贵州种子植物一新记录种*
——网纹马铃苣苔(苦苣苔科)

李 飒,何选泽,汤升虎,熊鹏飞,徐 建
(贵州省植物园,贵州 贵阳 550000)

摘 要: 报道了1种贵州新记录的种子植物,即网纹马铃苣苔(分布在赤水县),并提供了它的形态描述、生境及照片。凭证标本保存在贵州省植物园标本馆。

关键词: 新记录,马铃苣苔属,贵州植物区系
中图分类号:Q949 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0001-03

Oreocharis reticuliflora (Gesneriaceae), a new record of spermatophyte from Guizhou, China*

LI Sa, HE Xuanze, TANG Shenghu, XIONG Pengfei, XU Jian

(*Guizhou Botanical Garden, Guiyang 550000, China*)

Abstract: *Oreocharis reticuliflora* (occurred in Chishui County) is reported as a newly recorded species of seed plants from Guizhou, China. Its morphological descriptions, habitats and photos are provided. The voucher specimens are deposited in the herbarium of Guizhou Botanical Garden.

Keywords: new record, *Oreocharis*, flora of Guizhou

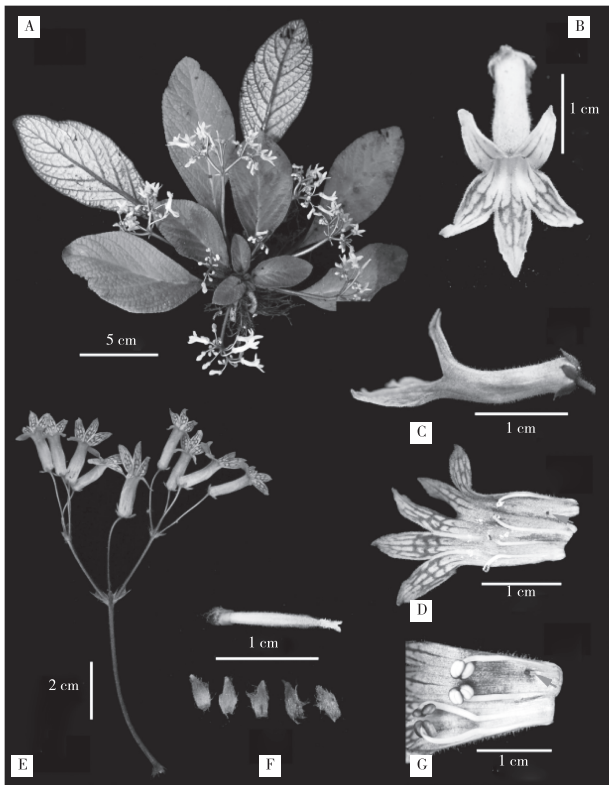
1 简介

马铃苣苔属 *Oreocharis* Benth. 被建立于1876年。1990年的中国植物志(第69卷)收录马铃苣苔属植物26种,5变种[1]。2011年,该属被进行了一次重大修订,它囊括了直瓣苣苔属 *Ancylostemon* Craib、四数苣苔属 *Bournea* Oliv.、瑶山苣苔属 *Dayaoshania* W. T. Wang、全唇苣苔属 *Deinocheilos* W. T. Wang、金盏苣苔属 *Isometrum* Craib、后蕊苣苔属 *Opithandra* Burtt、弥勒苣苔属 *Paraisometrum* W. T. Wang、辐花苣苔属 *Thamnocharis* W. T. Wang、短檐苣苔属 *Tremacron* Craib 的全部物种以及粗筒苣苔属 *Briggsia* Craib 的部分物种[2]。2020年,该属被再次修订,四数苣苔属从马铃苣苔属中被分离出来[3]。截至2024年10月1日,马铃苣苔属有154种,大多数物种分布在中国,少数物种分布在越南、日本等(https://powo.science.kew.org/)。

贵州位于中国西南,具有丰富的苦苣苔科植物资源。近年来,在贵州发现了若干苦苣苔科新物种,如都匀石蝴蝶 *Petrocosmea duyunensis* Sheng H. Tang[4]、荔波石山苣苔 *Petrocodon liboensis* Sheng H. Tang & Jia W. Yang[5]、华海报春苣苔 *Primulina huahaii* Sheng H. Tang & X. Z. He[6]等;另外,发现了若干苦苣苔科贵州新记录,如黄花吊石苣苔 *Lysionotus sulphureus* Hand.-Mazz.[7]、中华石蝴蝶 *Petrocosmea sinensis* Oliv.[8]、云南蛛毛苣苔 *Paraboea neurophylla* (Collett & Hemsl.) Burtt[9]等。

2024年7月,何选泽等从贵州省赤水市带回一种苦苣苔科马铃苣苔属植物。随后我们再次赴赤水

调查该植物。通过实地调查并查阅相关资料,将其暂时鉴定为“网纹马铃苣苔 *Oreocharis reticuliflora* Li H. Yang & X. Z. Shi”(图 1)[10]。接着,到网纹马铃苣苔的模式产地——四川省叙永县进行了调查。仔细比较赤水居群和叙永居群,发现它们在形态上没有差别。最终,将赤水居群鉴定为“网纹马铃苣苔”,然后查阅相关资料[11],并确定其为贵州新记录。



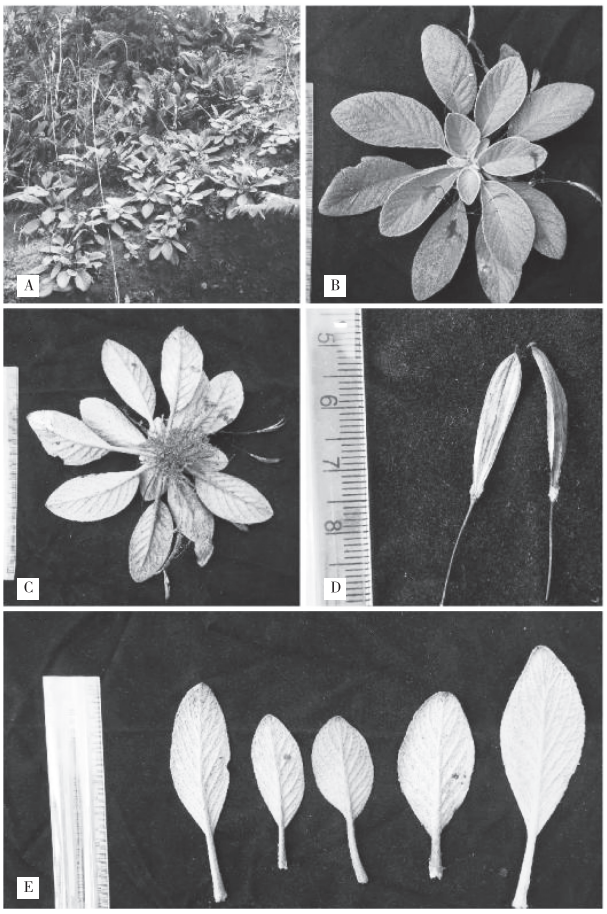
注:A-开花植株;B-花冠前面观;C-花冠侧面观;D-花冠打开;E-花序;F-雌蕊和花萼;G-雄蕊和退化雄蕊。

图 1 网纹马铃苣苔(模式产地居群)(Yang & Shi 2021)

2 结果

贵州新记录植物:网纹马铃苣苔 *Oreocharis reticuliflora* Li H. Yang & X. Z. Shi, in Nordic Journal of Botany 39(11)-e03322:2(2021)(图 2)。

形态描述:多年生草本,具不明显的根状茎。叶 8~20 枚,全部基生;叶柄长 1~3 cm,密被褐色绢状绵毛,基部更密;叶片椭圆形至卵圆形,长 8~15 cm,宽 4~6 cm,厚纸质,上面被贴伏短柔毛,下面沿脉密被淡褐色绢状绵毛,基部楔形,边缘具浅圆锯齿或近全缘,顶端急尖至钝圆;侧脉每边 6~8 条,在上面不明显,在下面明显,小脉网状。聚伞花序4~8



注:A-生境;B-植株正面;C-植株背面;D-果实;E-不同叶形以及叶背面。

图 2 网纹马铃苣苔(赤水联华村居群)

条,腋生,每花序具 4~14(22)花;花序梗长 4~8 cm,密被锈色柔毛,基部密被褐色绢状绵毛;苞片 2,披针形,长 5~10 mm,宽约 2 mm,边缘全缘,外面被褐色绢状绵毛,内面无毛;花梗长 1~2 cm,密被锈色柔毛。花萼 5 裂至近基部,裂片相等,披针形,长 4~6 mm,宽约 1.5 mm,边缘全缘,外面被褐色绢状绵毛,内面无毛。花冠蓝紫色,长 2~2.5 cm,外面被短腺毛,内面无毛;花冠筒圆柱状,轻微弯曲,长 1.2~1.5 cm;檐部二唇形,上唇和下唇的裂片均有网状蓝色条纹,上唇 2 裂至近基部,裂片长圆形,顶端急尖至钝圆,长 6~8 mm,宽 2~2.5 mm,下唇 3 裂至近基部,裂片长圆形,顶端急尖至钝圆,长 8~10 mm,宽 2~2.5 mm。雄蕊 4 枚,分生,着生在花冠筒近中部,上雄蕊长约 4 mm,下雄蕊长 4~6 mm;花丝线形,无毛;花药背着,卵状长圆形,纵裂,无毛;退化雄蕊 1 枚,着生在花冠基部上方,无毛。花盘环状,高约 1 mm,无毛。雌蕊长 10~12 mm;子房圆柱

状,长 7 ~9 mm,被短腺毛;花柱长 2 ~3 mm,被短腺毛;柱头 2 裂,裂片长圆形,长约 1.5 mm,宽约 1 mm。蒴果长约 2 cm,纵裂为 2 瓣(起初只有一边开裂)。注:形态描述翻译自发表该物种的原始文献。

主要识别特征:该种为苦苣苔科马铃苣苔属多年生草本。该种在形态上与长瓣马铃苣苔 *Oreocharis auricula*(S. Moore)C. B. Clarke 相近,主要区别是:叶片小脉明显,并结为网状(VS. 次脉不明显)、花冠筒在喉部不收缩(VS. 在喉部收缩)、檐部的上唇和下唇的裂片均有网状蓝色条纹(VS. 无条纹)、柱头 2 裂(柱头不裂、盘状)。

原有分布记录:四川省叙永县龙凤镇四坪村,海拔高度 690 m,生于岩石表面。

贵州分布新记录:贵州省赤水市宝源乡联华村,海拔高度 600 m,生于岩石表面。

凭证标本:2024 年 10 月 8 日,汤升虎 202410001,栽培在贵州省植物园(汤升虎于 2024 年 7 月 18 日引种自贵州省赤水市宝源乡联华村,海拔高度 600 m),标本保存在贵州省植物园标本馆。

生境:生长于林缘,潮湿的红色砂砾岩表面。伴生植物主要是毛竹 *Phyllostachys edulis* (Carrière)J. Houz.、赤水秋海棠 *Begonia chishuiensis* T. C. Ku 等。

3 讨论

在贵州省赤水市宝源乡联华村,我们不仅发现了网纹马玲苣苔,还发现了斜柱苣苔 *Loxostigma griffithii*(Wight)C. B. Clarke、赤水石山苣苔 *Petrocodon chishuiensis* Z. B. Xin, F. Wen & S. B. Zhou、光叶苣苔 *Glabrella mihieri*(Franch.)Mich. Möller & W. H. Chen、筒花苣苔 *Briggsiopsis delavayi*(Franch.)K. Y. Pan、椭圆线柱苣苔 *Rhynchotechum ellipticum*(Wall. ex D. Dietr.)A. DC.、白花异叶苣苔 *Whytockia tsiangiana* (Hand. -Mazz.)A. Weber、白花大苞苣苔 *Anna ophiorrhizoides*(Hemsl.)Burtt & Davidson。这些发现,可以说明宝源乡及其相邻区域的苦苣苔资源较丰富,同时也预示着该区域是四川和贵州的苦苣苔相互交流的一个通道。另外,该区域也进化出了一些特有种类,如网纹马铃苣苔、赤水石山苣苔等。

网纹马铃苣苔是马铃苣苔属向低海拔、气候炎热的丹霞地貌散布而形成的一个特殊物种。它的叶背密被淡褐色绢状绵毛,该特征与锈色蛛毛苣苔 *Paraboea rufescens*(Franch.)Burtt. 相似,这可能是适应干旱、炎热环境,趋同进化的结果。

参考文献【REFERENCES】

[1] 王文采. 中国植物志:第 69 卷[M]. 北京:科学出版社,1990:141-171.

[2] MÖLLER M, MIDDLETON D, NISHII K, et al. A new delineation for *Oreocharis* incorporating an additional ten genera of Chinese Gesneriaceae[J]. Phytotaxa, 2011, 23:1-36.

[3] CHEN W H, ZHANG Y M, GUO S W, et al. Reassessment of *Bournea* oliver(Gesneriaceae)based on molecular and palynological evidence[J]. Phytokeys, 2020, 157:27-41.

[4] TANG S H, YANG J W, LI C R, et al. *Petrocosmea duyunensis*(Gesneriaceae), a new species from Guizhou, China[J]. Phytokeys, 2021, 181:1-8.

[5] TANG S H, OU M Z, REN Q F, et al. *Petrocodon liboensis*(Gesneriaceae), a new species from Guizhou, China[J]. Phytokeys, 2024, 243:1-8.

[6] TANG S H, LI S, HE X Z. *Primulina huahaii*(Gesneriaceae), a new species from Guizhou, China[J]. Annales botanici fennici, 2024, 61:255-262.

[7] 崔兴波,陈捷,丁颖蕾,等. 贵州草本植物分布新记录[J]. 中国野生植物资源,2023,42(S):91-94.

[8] 周雨露,李佺渊,黄红,等. 贵州省苦苣苔科(Gesneriaceae)植物 8 个新记录种[J]. 生命科学研究,2023,27(4):338-343.

[9] 汤升虎,李飒,李晓芳,等. 贵州种子植物新记录种——云南蛛毛苣苔(苦苣苔科)[J]. 贵州科学,2020,38(6):22-24.

[10] YANG L H, SHI X Z. *Oreocharis reticuliflora*(Gesneriaceae), a new species from southeastern Sichuan, China[J]. Nordic journal of botany, 2021, 39(11):e03322.

[11] 汤升虎,李飒,杨加文,等. 贵州苦苣苔科植物名录[J]. 贵州科学,2020,38(1):1-7.

收稿日期:2024-10-08;**修回日期**:2024-10-08

基金项目:国家自然科学基金地区基金项目(32160095);贵州省植物园基金项目(黔植科合 Z〔2023〕01)和(黔植园〔2022〕02)。

作者简介:李 飒(1988-),女,助理研究员,主要从事植物分类、引种保育以及科普工作。

黎平太平山自然保护区土壤研究*

代丽华,田　奥,黎有为,高占冬▲
(贵州省山地资源研究所,贵州　贵阳　550001)

摘　要: 通过对黎平弄相山、太平山、老山界、岩村大落雨五龙山自然保护区自然环境条件的调查,采集具有代表性的土样进行理化性质的分析测定和土壤分类研究。结果表明:(1)土壤呈酸性至强酸性,土壤中有机质、全氮含量较高,速效氮、磷、钾含量也比较高,均表现出垂直分布规律;(2)该区的土壤剖面厚度相差较大,出现潜育层;(3)各土壤颗粒组成中粉砂粒含量较高,大多数土壤质地为重壤土-轻黏土,土壤发生分类的垂直带谱比较明显:红壤(<700 m)、黄壤(700 ~ 1100 m)、山地灌丛草甸土(>1450 m)。

关键词: 自然保护区,土壤理化性质,土壤类型,分布规律
中图分类号:S152　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1003-6563(2025)05-0004-07

Study on soil in Taiping Mountain Natural Reserve in Liping, Guizhou*

DAI Lihua, TIAN Ao, LI Youwei, GAO Zhandong▲

(*Guizhou Institute of Mountain Resources, Guiyang 550001, China*)

Abstract: Through investigation on the natural environment conditions in Taiping Mountain Natural Reserve of Liping, representative soil samples were collected, and their physicochemical characteristics were analyzed and categorized. The results are as follows: (1) The acidity of the soil is high; the contents of organic matter, total nitrogen, available nitrogen, phosphorus and potassium are high, showing vertical distribution. (2) The thickness of soil profile in this area is quite different, and there is a latent layer. (3) The content of silt particles in each soil particle composition is high. Most of the soil texture is heavy loam to light clay, and the vertical band spectrum of soil genetic classification is obvious: red soil (<700m), yellow soil (700-1100 m), mountain shrub meadow soil (>1450 m).

Keywords: natural reserve, physicochemical characteristics of soil, soil types, distribution law

1　自然保护区概况

黎平太平山自然保护区是指由黎平县境内的太平山、弄相山、老山界、五龙山、五里江水库、三省坡等 6 片原生植被保存良好的山区所组成的自然保护区。保护区原面积为 39215 hm^2,现调整后面积为 31551 hm^2[1]。本次调查区域为太平山、弄相山、老山界、五龙山 4 片核心区域。

太平山位于北部的国有德顺楠竹林场,原面积 11148 hm^2,修编后面积 6185 hm^2,主要为中低山地貌类型,主要植物为毛竹林。

弄相山位于黎平县南部地坪乡境内,原面积 1224 hm^2,修编后面积 941 hm^2,主要为中低山地貌类型,海拔在 700 ~ 1265 m 之间。本区成土母岩主要为前震旦系板溪群长安组粉砂质板岩,其风化残积物多形成地带性黄壤、黄红壤。

老山界位于本县西北部德化乡乌孟村境内,与剑河县接壤,原面积 1411 hm^2,修编后面积 1455 hm^2,主要为中山地貌类型,最高海拔 1589 m。海拔 1450 m 以下地区主要为原生森林植被,1500 ~ 1589 m 的山顶平台主要为冷箭竹灌丛和禾草类草本植

物[2]。

岩村大落雨小片区位于五龙山片区,该区和五里江保护小区原面积分别为2128 hm^2、1187 hm^2,修编后面积为9358 hm^2[1],合并后规划晋升为国家级保护区,具备一定的保护价值。

2 材料与方法

2.1 土壤样品的采集

根据县林业局提供的自然保护区建设调整计划表和本次科考小组划定的考察路线,在地图上预设考察路线和土壤样品采集点。运用GPS进行定位,查找上一次土壤采集的点,在进行土壤样品采集时,按土壤发生层次采集土壤剖面分析样品和剖面盒参比样品,共挖掘了14个剖面,采集土壤样品45个,筛选代表性较强的土壤剖面9个、分析样品33个进行了理化分析。该区域范围内的母岩均以板岩为主,有紫红色长质石英砂岩、紫红色含砂页粉砂岩,因此形成土壤的母质比较单一,土壤类型也不多。土壤剖面基本性状特征记载于表1。

2.2 测定方法[3-4]

土壤机械组成采用比重计法。土壤pH值采用酸度计法;有机质采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法;土壤全氮采用硒粉-硫酸铜-硫酸消化法(开氏法);土壤碱解氮采用碱解扩散法;土壤有效磷采用0.03 mol/L NH_4F-0.025 mol/L HCl法;土壤速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法。测定结果见表2。

表1 黎平自然保护区供试土壤剖面状况

剖面编号	地 点	地理位置	海拔/m	基岩	优势植被	土壤类型	层次代号	厚度/cm	土壤颜色
LP-1	太平山山顶	N26°13.0474′ E109°18.4943′	981	板岩	常绿阔叶林	黄壤	A_{00}	0-5	
							A	5~20	棕色
							AB	20~40	暗黄色
							B	40~60	黄棕色
							C	60以下	黄色
LP-3	太平山山脚	N26°13.3220′ E109°19.7717′	602	板岩	乔木、灌木混交林	红壤	A	0~15	棕色
							B	15~35	黄棕色
							C	35~90	黄色
LP-4	老山界顶	N 26°29.2776′ E108°38.9046′	1600	板岩	禾本科杂草	山地草甸土	A	5~15	暗棕色
							C	15以下	棕色
LP-5	老山界梁子上	N26°29.2776′ E108°38.9046′	1480	板岩	箭竹林	山地草甸土	A_{00}	0~10	黑棕色
							A	10~20	暗棕色
							B	20~30	棕色
							C	30~40	黄棕色
LP-6	岩村大落雨小片区半冲头	N26°17.3926′ E109°15.1834′	855	板岩	常绿阔叶林、混交林	黄壤	A	0~5	暗棕色
							B	5~25	棕红色
							BC	25~45	黄棕色
							C	45~75	黄色
LP-7	岩村大落雨山腰	N26°17.5454′ E109°14.9820′	749	板岩	常绿阔叶林	黄壤	A	0~10	暗棕色
							B	10~20	黄棕色
							C	20~30	黄色
							G	30~55	砖红色
LP-8	岩村大落雨小片区山脚河谷旁	N26°17.5922′ E109°14.9491′	695	板岩	常绿阔叶林	黄红壤	A	0~20	暗棕色
							AB	20~40	棕色
							B	40~60	黄色
							C	60~90	砖红色

续表 1

剖面编号	地　点	地理位置	海拔/m	基岩	优势植被	土壤类型	层次代号	厚度/cm	土壤颜色
LP-04	弄相山山顶	N25°46.7487′ N109°109.3008′	1087	板岩	箭竹林	黄壤	A_{00}	0～5	
							A	5～25	暗棕色
							B	25～45	淡黄棕
							C	45～80	黄色
LP-03	弄相山山中部	N25°46.5820′ N109°18.0910′	754	板岩	箭竹林、常绿阔叶林	黄壤	A_{00}	0～3	
							A	3～15	暗棕色
							B	15～25	黄棕色
							BC	25～45	黄色
							C	45～100	黄色

表 2　自然保护区土壤颗粒组成及质地状况

剖面编号	地点	土壤类型	层次代号	厚度/cm	≥1mm 砾石石块含量/%	土壤颗粒组成(mm,%)						质地(卡氏制)
						1～0.25	0.25～0.05	0.05～0.01	0.01～0.005	0.005～0.001	<0.001	
LP-1	太平山山顶	黄壤	A_{00}	0～5	2.9							
			A	5～20	4.5	5.4	3.1	12.50	21.50	21.33	28.43	中石质轻黏土
			AB	20～40	5.8	7.3	5.6	13.60	15.3	16.02	37.02	轻石质轻黏土
			B	40～60	6.3	8.9	3.9	15.30	16.80	19.65	30.66	中石质中壤土
			C	60 以下	8.9	11.50	6.8	16.33	11.03	05.02	29.77	重石质轻黏土
LP-3	太平山山脚	黄壤	A	0～15	4.5	4.2	3.6	19.81	12.09	22.00	29.58	轻石质轻黏土
			B	15～35	6.2	6.3	4.28	18.84	7.36	17.15	20.89	中石质重壤土
			C	35～90	9.5	12.8	5.9	16.90	10.53	15.03	18.36	重石质轻黏土
LP-4	老山界顶	山地草甸土	A	5～15	5.5	6.40	4.40	20.10	15.21	26.20	27.30	中石质轻黏土
			C	15 以下	7.6	8.4	3.4	18.41	13.77	29.32	27.43	重石质轻黏土
LP-5	老山界梁子上	山地草甸土	A_{00}	0～10								
			A	10～20	10.3	10.23	3.9	17.21	16.22	16.28	23.45	重石质轻黏土
			B	20～30	11.2	12.21	5.4	19.12	19.65	19.88	27.55	中石质重壤土
			C	30～40	13.6	13.82	6.31	15.97	16.22	11.19	21.33	重石质轻黏土
LP-6	岩村大落雨小片区半山腰	黄壤	A	0～5	3.9	6.88	7.13	16.23	18.01	19.13	31.62	轻石质轻黏土
			B	5～25	6.8	8.02	6.4	18.84	14.31	22.34	32.30	轻石质轻黏土
			BC	25～45	8.3	9.87	8.33	19.11	13.16	18.62	25.15	重石质轻黏土
			C	45～75	14.6	11.30	12.00	25.03	14.46	13.52	23.98	中石质重壤土
LP-7	岩村大落雨	黄壤	A	0～10	5.7	9.21	5.22	21.80	14.30	19.80	27.08	中石质中壤土
			B	10～20	7.5	8.50	6.33	15.13	12.88	19.30	25.22	重石质轻黏土
			C	20～30	8.1	11.01	8.30	14.19	9.14	25.53	18.13	中石质轻黏土
			G	30～55	15.3	12.01	13.3	13.05	11.02	13.09	17.52	重石质轻黏土
LP-8	岩村大落雨小片区山脚河谷	黄红壤	A	0～20	9.8	14.00	2.00	19.57	14.93	18.72	25.18	轻石质轻黏土
			AB	20～40	11.1	13.98	5.3	17.31	11.11	16.24	21.28	重石质轻黏土
			B	40～60	10.9	15.52	6.12	24.23	10.25	12.68	16.58	中石质重壤土
			C	60～90	20.8	16.8	17.5	30.02	16.33	13.90	17.32	重石质轻黏土
LP-04	弄相山山顶	黄壤	A_{00}	0～5								
			A	5～25	4.5	7.7	3.59	21.42	16.64	16.86	25.39	中石质重壤土
			B	25～45	4.8	8.9	10.44	18.41	16.20	19.57	27.70	重石质中壤土
			C	45～80	10.2	9.3	10.47	16.08	9.30	20.05	28.01	重石质轻黏土

续表 2

剖面编号	地点	土壤类型	层次代号	厚度/cm	≥1mm 砾石石块含量/%	土壤颗粒组成(mm,%)						质地(卡氏制)
						1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001	
LP-03	弄相山山中部	黄壤	A_{00}	0~3								
			A	3~15	4.7	8.3	6.10	17.43	11.33	19.23	33.65	中石质重壤土
			B	15~25	6.6	7.9	6.54	16.36	7.45	20.98	35.10	重石质重壤土
			BC	25~45	12.8	12.6	9.3	11.5	10.01	22.33	28.02	重石质重壤土
			C	45~100	15.1	13.5	10.2	8.5	6.30	27.49	26.09	重石质轻黏土

3 结果与分析

3.1 土壤剖面形态与物理性状

3.1.1 土壤剖面形态

由表 1 和野外记录可知,土壤剖面发育良好,一般均具有 10~20 cm 厚的腐殖质层,颜色以深暗色调为主,如暗灰、暗棕等,植物根系分布较多。其下多发育了比较厚的淀积层或淀积层向母质层的过渡层,颜色以黄色、红色为主,如黄色、淡黄色、淡黄棕色、淡红色等,植物根系分布较表层少,并以较粗的根系为主,比较紧实。再往下为不同厚度的母质层(C),颜色多为黄色、黄红色、棕色等,植物根系很少,但在土体厚度较薄、没有淀积层的土壤中,仍然可见较多的根系分布,多见半风化或未风化的母岩块石。采集过程中发现有潜育层(G),说明该区土壤中的铁、锰遭强烈淋溶作用,排水条件较好。

从调查中,观察的土壤剖面形态来看,4 个片区的土壤剖面发育差异不大,因为是森林和草被下发育的土壤。

3.1.2 土壤物理性状

对具有代表性的 9 个土壤剖面进行了土壤颗粒组成分析,结果详见表 2。从表中数据可以看出,自然保护区的土壤物理性状具有如下特点:

(1)各类土壤中<0.001 mm 的粘粒含量变化较大,变化在 16.58% ~37.02% 之间,黄红壤为 16.58% ~32.30%,黄壤为 18.36% ~37.02%,山地灌丛草甸土 21.33% ~27.55%。其中粘粒含量低于 20% 的土壤仅占供试土样的 12.9%,以黄壤的粘粒含量差异最大,草甸土的差异最小,说明不同土壤类型的矿质胶体含量具有较大差异。

(2)细土部分的砂粒含量为 7.36% ~42.93%,其变化幅度大于粘粒和粉砂粒,砂粒含量低于 20% 的土壤占供试土样的 60.21%,大多数土壤的砂粒含量低于粘粒含量,说明自然保护区的土壤风化程度较高。

(3)土壤中>1 mm 的石砾含量较高,其含量变化在 2.9% ~20.8% 之间,大多数的含量为 9% 左右。石砾含量对土壤的大孔隙及水分运动特征具有重要影响,石砾含量高说明土壤的压实程度和稳定性好。但却不利于植物根系的延伸和蓄水的下渗,从而使地表径流增大,表层细土的流失量增加,增加发生地质灾害的可能[5]。

自然保护区的土壤机械组成具有一定的差异,但由于土壤的母质(母岩)基本相同,因此各土壤类型的粉砂粒含量高。土壤质地变化不大,除个别土壤外,大多数土壤质地为轻粘土~重壤土。同时可见,土壤剖面中部的粘粒含量具有高于上层和底层的现象[5],这说明自然保护区的土壤剖面上有粘化作用发生。

3.2 土壤的一般化学性质

3.2.1 土壤酸碱度

从表 3 可以看出,自然保护区的土壤均为酸性至强酸性,pH 值变化在 3.53~5.40 之间。太平山、老山界、岩村和弄相山的土壤 pH 值变化范围分别在 4.34~5.11 之间、3.53~4.77 之间、3.8~5.4 和 4.01~5.00 之间,太平山的土壤 pH 值变化最小,岩村的变化最大,老山界和弄相山的 pH 介于二者之间。pH 值在剖面上的分布状况除个别剖面的 pH 值表现为上部土层的 pH 值略高于下部土层之外(LP-8),其余的剖面均表现为上部土层的 pH 值略低于下部土层。导致这种结果的原因:一是植物凋落物、动物残体等有机物质分解产生的有机酸使上部土层的 pH 值下降,同时,盐基离子随着水分下移至心土层使其 pH 值略有升高。二是该地区的土壤经过强烈的脱硅富铝化作用,使土壤中的盐基离子淋移也促使上部土层的 pH 值高于下部土层。

表 3 土壤酸碱度、有机质和全氮含量

剖面编号	地点	海拔/m	优势植被	土壤类型	层次代号	厚度/cm	pH	有机质/(g/kg)	全氮/(g/kg)
LP-1	太平山山顶	981	常绿阔叶林	黄壤	A_{00}				
					A	5~20	4.48	68.52	2.41
					AB	20~40	4.88	44.90	2.15
					B	40~60	5.07	14.35	0.98
					C	60 以下	5.11	14.82	1.03
LP-3	太平山山脚	602	乔木、灌木混交林	黄壤	A	0~15	4.54	56.36	2.43
					B	15~35	4.59	19.72	1.21
					C	35~90	4.98	8.17	0.87
LP-4	老山界顶	1600	禾本科杂草	山地草甸土	A	5~15	4.66	95.77	4.98
					C	15 以下	4.77	84.93	4.86
LP-5	老山界梁子上	1480	箭竹林	山地草甸土	A_{00}				
					A	10~20	3.89	153.91	6.25
					B	20~30	4.33	87.48	3.79
					C	30~40	4.48	62.54	3.00
LP-6	岩村大落雨小片区半冲头	855	常绿阔叶林、混交林	黄壤	A	0~5	4.18	110.41	3.01
					B	5~25	4.73	34.08	1.76
					BC	25~45	4.76	14.89	1.25
					C	45~75	4.87	9.38	1.19
LP-7	岩村大落雨山腰	749	常绿阔叶林	黄壤	A	0~10	3.8	137.01	2.13
					B	10~20	4.35	29.91	1.62
					C	20~30	4.4	29.42	1.53
					G	30~55	4.64	9.26	0.75
LP-8	岩村大落雨小片区山脚河谷旁	695	人工杉木林	黄红壤	A	0~20	5.40	148.67	5.41
					AB	20~40	4.78	53.98	2.23
					B	40~60	4.83	13.86	1.06
					C	60~90	4.91	8.58	0.71
LP-04	弄相山山顶	1087	箭竹林	黄壤	A	5~25	4.40	56.39	1.90
					B	25~45	4.80	12.26	0.92
					C	45~80	5.00	7.64	0.88
LP-03	弄相山山中部	754	常绿阔叶林	黄壤	A	3~15	4.01	79.54	5.11
					B	15~25	4.16	60.74	4.00
					BC	25~45	4.29	52.60	3.20
					C	45~100	4.56	29.18	2.21

3.2.2 自然保护区土壤有机质含量状况

从表 3 可以看出,有机质含量最高的是老山界梁子上的山地草甸土高达 153.91 g/kg,其次是岩村大落雨小片区山脚河谷旁的黄壤表层土高达 148.67g/kg,并且岩村大落雨小片区的 3 个剖面有机质的平均含量高达 132.03 g/kg,说明该区有机质积累丰富,植被覆盖率高。

总体来说,自然保护区的 4 个片区的土壤剖面的土壤有机质含量表层土要高于底层土,有机质含量均随剖面深度的增加而下降,自然保护区境内海拔 1000 m 以上的 3 个剖面所有土层有机质含量平均为 76.80 g/kg,是境内海拔 750 m 以下的 3 个剖面所有土层有机质含量平均值 46.81 g/kg 的 1.64 倍。土壤有机质的积累主要取决于腐殖化和矿质化过程,一般来说,海拔较高的山体上部,年均温度较低,降水量较大,土壤中微生物新陈代谢快,有机质的矿质化较弱,而腐殖化较强[6],因此,海拔较高山体的土壤有机质总含量比海拔较低山体的高一些。

3.2.3 自然保护区土壤氮素养分分布特征

土壤全氮及碱解氮含量在不同海拔和不同剖面层次上的分布状况与土壤有机质的分布特点是一致的。影响氮素的积累和释放的因素与有机质相同。无论是土壤全氮还是碱解氮,土壤剖面层次的加深其含量都呈下降趋势,其下降幅度在剖面上要大得多。同时可以看出,自然保护区的全氮变化在0.71~6.25 g/kg之间,老山界梁子上山地草甸表层土全氮含量最高达到6.25 g/kg,这和该区有机质在9个剖面中最高是一致的。

表4 自然保护区土壤速效养分

剖面编号	地点	海拔/m	优势植被	土壤类型	层次代号	厚度/cm	速效氮/(mg/kg)	有效磷/(mg/kg)	速效钾/(mg/kg)
LP-1	太平山山顶	981	常绿阔叶林	黄壤	A	5~20	170	0.88	58
					AB	20~40	152	0.44	38
					B	40~60	63	0.22	30
					C	60以下	40	0.22	30
LP-3	太平山山脚	602	乔木、灌木混交林	黄壤	A	0~15	177	1.43	49
					B	15~35	63	0.22	28
					C	35~90	59	0.10	18
LP-4	老山界顶	1600	禾本科杂草	山地草甸土	A	5~15	336	2.20	181
					C	15以下	322	1.54	131
LP-5	老山界梁子上	1480	箭竹林	山地草甸土	A	10~20	3.19	132	354
					B	20~30	1.21	65	250
					C	30~40	0.44	55	211
LP-6	岩村大落雨小片区半冲头	855	常绿阔叶林、混交林	黄壤	A	0~5	338	5.16	102
					B	5~25	147	0.60	58
					BC	25~45	90	0.55	34.5
					C	45~75	52	0.22	38
LP-7	岩村大落雨山腰	749	常绿阔叶林	黄壤	A	0~10	283	4.95	80
					B	10~20	103	0.99	35
					C	20~30	93	0.99	32
					G	30~55	47	0.10	12
LP-8	岩村大落雨小片区山脚河谷旁	695	人工杉木林	黄壤	A	0~20	278	6.37	272
					AB	20~40	164	1.00	50
					B	40~60	54	0.22	29
					C	60~90	40	0.10	29
LP-04	弄相山山顶	1087	箭竹林	黄壤	A	5~25	119	0.88	40
					B	25~45	50	0.11	15
					C	45~80	31	0.10	17
LP-03	弄相山山中部	754	常绿阔叶林	黄壤	A	3~15	345	6.26	142
					B	15~25	290	3.19	100
					BC	25~45	269	1.65	62
					C	45~100	130	0.33	40

3.2.4 自然保护区土壤有效磷和速效钾含量状况

根据速效钾含量的分级标准,从自然保护区表层土壤速效钾的含量看来,有1个剖面表层土壤速效钾含量处于中等水平(参考标准为60~100 mg/kg),有3个剖面表层土壤速效钾含量高于极高水平(参考标准>160 mg/kg),有3个剖面的表层土

壤速效钾含量属于高含量水平(参考标准为 100 ~ 160 mg/kg),说明自然保护区的土壤速效钾含量较高,其中属于高至极高含量水平的土壤剖面表层样品占 66.67%,这与该区域的成土母质以板岩风化物为主,其含钾量较高有关[6]。

由表 4 可以看出,自然保护区土壤的有效磷、速效钾含量具有随海拔增高而上升的趋势。这可能与海拔较高地段有机质含量较高、土壤风化淋溶作用较弱有关[7]。有效磷和速效钾在土壤剖面上的分布情况均有垂直分布的特点,其含量是随着剖面深度的加深而降低的。

4 讨论

对黎平弄相山、太平山、老山界、岩村大落雨五龙山自然保护区土壤剖面形态、土壤理化性质等进行研究。结果表明:(1)土壤呈酸性至强酸性,土壤中有机质、全氮、速效氮、磷、钾含量较高,均表现出垂直分布规律;(2)该区的土壤剖面厚度相差较大,出现潜育层;(3)各土壤颗粒组成中粉砂粒含量较高,大多数土壤质地为重壤土-轻黏土,土壤发生分类的垂直带谱比较明显:红壤(<700 m)、黄壤(700 ~1100 m)、山地灌丛草甸土(>1450 m)。通过对保护区森林土壤的研究,为开发利用保护区内土壤资源、提高土壤生产力及遏制土壤退化等提供理论依据,为保护区的科学管理和合理规划提供数据支持,以期不断推进创新与优化,

黎平太平山州级自然保护区旅游资源丰富,地文景观、生物景观、天象景观、人文景观皆备,保护区内有原汁原味极具历史文化和科学研究价值的侗族民俗风情;地带性森林植被的生态系统保存完整,色彩纷呈的自然山水风光,分布有木兰科的鹅掌楸林、乐昌含笑林、桂南木莲林、亮叶含笑林以及众多野生珍稀植物和珍贵动物[8-12],是研究我国西南森林类型,特别是常绿阔叶林的结构、动态变化、生态系统平衡等学科的重要基地。对开发生态观光旅游,开展科普宣教具有积极而现实的作用。

该文结合黎平太平山自然保护区的工作实际,梳理了保护区内的土壤生态资源,以科学发展观为指导,积极借鉴当前保护事业成熟理论和经验,通过对保护区重要物种资源的调查和研究,分析生物多样性的作用和功能,同时依托保护区丰富的自然景观和人文景观,打造科普教育基地、原生态旅游胜地,建立国家级自然保护区,实现保护区的可持续发展[13],以期为黎平自然保护区初步建立起一套比较完善的保护管理制度和生态旅游实施计划。

参考文献【REFERENCES】

[1] 黎平县林业志办公室. 黎平县林业志[M]. 贵阳:贵州人民出版社,1989.

[2] 吴运辉,杨承荣,姜芝琼. 黎平县自然保护区建设存在的问题与对策[J]. 林业经济,2017(9):88-93.

[3] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[4] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 北京:中国农业出版社,2009.

[5] 朱祖祥. 土壤学:下册[M]. 北京:农业出版社,1983.

[6] 王晓荣,胡文杰,庞宏东,等. 湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J]. 中南林业科技大学学报,2020(11):156-166.

[7] 高大威. 哀牢山国家级自然保护区东西坡土壤理化性质及土壤质量沿海拔梯度变化特征分析[D]. 昆明:云南师范大学,2020.

[8] 戴京宏. 基于单目标规划的林下经济发展规划研究——以贵州省黎平县为例[D]. 长沙:中南林业科技大学,2024.

[9] 孙运刚. 贵州黎平太平山州级自然保护区[J]. 凯里学院学报,2014,32(6):187.

[10] 尹长禧,邱守明,冯艳滨. 云南省国家级自然保护区功能评价与结构分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2025,49(1):235-244.

[11] 苏建永,陈桂首,曹义聪. 云南怒江州高黎贡山国家级自然保护区生态旅游发展探索[J]. 农村科学实验,2024(15):58-60.

[12] 马芬. 自然保护区景观植物多样性配置与旅游体验平衡研究[J]. 分子植物育种,2024,22(16):5469-5474.

[13] 郝新朝. 贵州省国家级自然保护区生态系统服务价值评估——以草海、梵净山和茂兰为例[D]. 贵阳:贵州师范大学,2019.

收稿日期:2024-10-17;**修回日期**:2025-03-05

基金项目:贵州省科技计划项目“微生物技术在磷石膏改良土壤的关键技术研究”(黔科合支撑〔2023〕一般 201);贵州省科技计划项目“百里杜鹃林区灌丛生态系统的碳库特征时空变化研究”(黔科合基础-ZK〔2022〕一般 275)。

作者简介:**代丽华**(1987-),助理研究员,研究方向:土壤资源利用与保护 。

▲**通讯作者**:**高占冬**(1986-),男,博士,高级工程师,研究方向:喀斯特地质与环境。

梵净山 5 种藤本植物根际土壤养分及酶化学计量特征*

罗文敏,吴先亮,陈　胜,余　伟,赵理源,牟桂婷,刘盈盈▲
(贵州省生物研究所,贵州　贵阳　550009)

摘　要: 研究植物根际土壤养分、酶活性及其生态化学计量特征的变化规律,对了解不同植物根际土壤养分循环和转化能力,揭示植物响应和适应环境的机制具有重要意义。以梵净山不同生境上的 5 种藤本为研究对象,对其根际土壤养分、酶活性及其生态化学计量特征进行了分析,研究结果表明:地锦和地果根际土壤 C、N、P 含量均较低,其中 P 含量最低,仅为全国土壤 P 水平的 22.67% 和 30.67%,是一种极度缺 P 的表现;地锦和地果根际土壤 N∶P 比分别为 8.04 和 8.20,其生长受 N 限制;地果根际土壤 N 获取酶活性最大,平均值为 9.61 U/g;5 种藤本植物根际土壤向量角度 *VA*>45°,其根际土壤微生物都受 P 限制;pH 值与 *VA* 呈极显著负相关;*TN* 与 βG、*PHO*、$E_{C/N}$ 和 $E_{C/P}$ 呈显著正相关,对土壤酶活性及化学计量的解释量最大,为 34.00%。本研究可以为梵净山藤本植物的进一步开发利用提供一定的基础数据。

关键词: 藤本,根际土壤,土壤养分,酶活性,化学计量
中图分类号:S714　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1003-6563(2025)05-0011-07

Rhizosphere soil nutrients and enzyme stoichiometry characteristics of five vines in Fanjing Mountain*

LUO Wenmin, WU Xianliang, CHEN Sheng, YU Wei, ZHAO Liyuan, MU Guiting, LIU Yingying▲

(*Guizhou Institute of Biology, Guiyang 550009, China*)

Abstract: It is of great significance to study the changes of nutrients, enzyme activity and ecological stoichiometric characteristics of plant rhizosphere soil for understanding its nutrient cycling and transformation ability and revealing the mechanism of plant response and adaptation to the environment. Five kinds of vines in different habitats in Fanjing Mountain were taken as the research objects, and their rhizosphere soil nutrients, enzyme activities and ecological stoichiometric characteristics were analyzed. The results showed that the contents of C, N and P in the rhizosphere soil of *Parthenocissus tricuspidate* and *Ficus tikoua* were low, and the content of P was the lowest, which was only 22.67 % and 30.67 % of the national soil P level, indicating extreme P deficiency. The N-P ratios in the rhizosphere soil of *Parthenocissus tricuspidate* and *Ficus tikoua* were 8.04 and 8.20, respectively, and their growth was limited by N. The N-acquisition enzyme activity in the rhizosphere soil of *Ficus tikoua* was the highest, with an average of 9.61 U/g. The vector angles (*VA*) of the five vines were all greater than 45°, and the rhizosphere soil microorganisms were limited by P. There was a significant negative correlation between pH and *VA*. *TN* was significantly positively correlated with βG, *PHO*, $E_{C/N}$ and $E_{C/P}$, and explained the largest amount of soil enzyme activity and stoichiometry (34.00%). This study has provided basic data for further development and utilization of vines in Fanjing Mountain.

Keywords: vine, rhizosphere soil, soil nutrients, enzyme activity, stoichiometry

0 引言

植物根系与实生土壤之间关系密切,土壤为植物提供生长所需要的营养物质,同时植物根系的穿插与分泌也在一定程度上起到对土壤的塑造作用,导致土壤 pH 值、营养等发生改变[1]。植物根际是植物和土壤进行物质、能量交换的场所,也是最强的生化活性区域[2-4]。因此,根际土壤能更确切地反映植物生长受土壤养分制约的程度和植物根际土壤养分循环和转化能力,更好地反映植物的生物学特性和根系-土壤相互作用的机制。根际土壤特征决定了植物是否处于适生环境。

生态化学计量学是研究生态系统能量平衡和多重化学元素平衡的科学,其主要强调碳氮磷三种重要组成元素的关系,它们是表征土壤肥力和生产力的重要指标[5],土壤养分元素之间的比值反映了一系列的生态策略,代表了 C、N、P 循环耦合的关键约束[6],在生态系统的元素平衡、物质循环和植物生境适应中起着积极的作用[7-8]。近年来有越来越多的用根际土壤化学计量比评估植物和地下养分平衡联系的研究,如 Zhu 等[9]认为 N 添加可能会逐渐加剧根际 P 限制;Dai 等[10]认为根际土壤 C∶N∶P 化学计量学有助于识别植物物种和土壤养分之间的联系,林下乔木和林下灌木营养状况的差异与灌木种类有关,其中土壤 pH 值是主要驱动因素。土壤酶是土壤养分转化和物质循环的重要“催化剂”[8],是植物与土壤之间的重要纽带。土壤酶活性可以敏感地反映不同植物生态系统养分碳、氮、磷等供需关系和生化过程强度[11]。碳获取酶以 β-1,4-葡萄糖苷酶为代表;氮获取酶以 β-1,4-N-乙酰葡萄糖胺酶(NAG)和 L-亮氨酸氨基肽酶(LAP)之和为代表;磷获取酶以磷酸酶为代表。酶生态化学计量比是碳(C)、氮(N)、磷(P)相关的酶活性比值,可以反映微生物元素组成和养分同化效率之间的耦合关系[12]。根际生态酶化学计量比主要受植物和土壤物理性质的影响[13]。探究根际土壤的 C、N、P 和酶活性化学计量学,有助于了解植物生长的生态系统的养分丰度和整体生产力,为植物适应环境提供生态策略。

藤本植物不但具有重要的经济价值(如药用、保健、食用等),而且具有重要的生态价值,在城市垂直绿化[14-15]、边坡防护[16]、石漠化治理[17]、森林再生[18]、保持物种多样性[19]等生态建设过程中发挥着重要的作用。目前,关于藤本植物的研究多集中在藤本对森林群落结构的影响[20]、藤本资源与评价[19]等宏观生态方面,关于藤本植物微观生态的研究多集中在根形态结构[21]、叶功能[22-23]和干旱等逆境生理[24]方向。对藤本微观生态,尤其是植物-根系-根际土壤-微生物相互作用认识不清,制约了我们对藤本环境适应性的认识,不利于藤本的开发利用。梵净山浓缩了跨越地带的环境梯度,藤本种类丰富,是研究藤本环境适应性的天然实验室[25]。基于此,本项目在前期工作的基础上,以梵净山不同生境上的 5 种藤本为研究对象,分析根际土壤养分、酶活性的生态化学计量特征及变化规律,初步探讨 5 种藤本植物养分限制情况,探明不同藤本植物根际土壤养分循环和转化能力,为梵净山藤本植物的进一步开发利用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

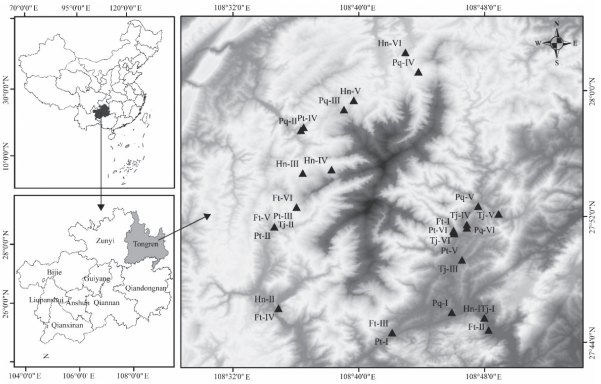
1.1 研究区概况

梵净山是云贵高原向湘西丘陵过渡斜坡上的第一高峰,它不仅是乌江与沅江的分水岭,而且还是武陵山脉的最高主峰。贵州梵净山地区位于贵州省东北部的江口、印江、松桃三县交界处,邻近四川、湖南二省东、西界。地理坐标为北纬 27°31′~28°41′,东经 108°21′~109°17′,最高峰凤凰山海拔 2570.15 m,次高峰为金顶海拔 2493.14 m,相对高差达 2000 m。该区属于东亚季风气候区,年均温 6~17 ℃,1 月均温 3.1~5.1 ℃,7 月均温 15~27 ℃,≥10 ℃积温 1500~5500 ℃;年均降水量 1100~2600 mm;相对湿度年均 80% 以上,具有我国典型的中亚热带季风山地湿润气候特征。

1.2 样点设计与样品采集

2023 年 9 月,在梵净山地区的路旁荒坡、路旁石壁等生境中采集 5 种藤本植物的根际土壤。每种藤本植物选择 6 个不同样点,共 30 个样点。采样点在梵净山地区的位置见图 1,样地环境见表 1。每个样点随机选取 3 株苗进行破坏性采样,3 个根际土壤合并为 1 个。取苗前除去覆盖层,仔细挖出每株植物,获取其整个根系和附着土壤。参考 Riley 等人[26]的抖落法来收集根际土壤。将采集的土样分成两份。一份样品在干冰上过 10 目筛,用于检测土

壤酶活;一份样品置于阴凉通风处风干,剔除植物残体等非土壤物质,将风干后土样研磨,过 2 mm 孔筛,用于检测土壤 pH 值和土壤养分。



注:Tj,络石;Pt,地锦;Ft,地果;Hn,常春藤;Pq,五叶地锦。

图 1 采样点分布图

表 1 采样点基本情况

物种	样地号	海拔/m	生境	伴生物种
络石 *Trachelospermum jasminoides* (Lindl.) Lem.	Tj-Ⅰ	554.75	路旁石壁	楝树、飞蓬、雾水葛、野茼蒿
	Tj-Ⅱ	398.74	路旁石壁	井栏边草、铁角蕨、香花崖豆藤、火棘
	Tj-Ⅲ	717.27	路旁荒坡	三脉紫菀、蝴蝶花、边缘鳞盖蕨、龙牙草
	Tj-Ⅳ	497.08	路旁石壁	黄独、水麻、芒
	Tj-Ⅴ	508.31	路旁荒坡	蝴蝶花、杜茎山、尖连蕊茶、荨麻
	Tj-Ⅵ	568.68	路旁荒坡	蝴蝶花、龙牙草、尖连蕊茶、荨麻
地锦 *Parthenocissus Tricuspidate* (Siebold & Zucc.) Planch.	Pt-Ⅰ	554.75	路旁荒坡	苦苣菜、里白、芒、天门精、鬼针草
	Pt-Ⅱ	516.93	路旁疏林	杠香藤、冬青、鬼针草、野茼蒿
	Pt-Ⅲ	717.27	路旁荒坡	光皮桦、打破碗花花、芒、川莓
	Pt-Ⅳ	1211.7	路旁疏林	芒、光皮桦、乌蕨、淡竹叶、马尾松
	Pt-Ⅴ	908.93	路旁荒坡	瑞木、杜茎山、栲、宜昌悬钩子、蝴蝶花
	Pt-Ⅵ	497.08	路旁石壁	芒、水麻
地果 *Ficus tikoua* Bureau	Ft-Ⅰ	531.48	山谷路旁	三脉紫菀、风轮菜、爵床、艾蒿、毛蕨
	Ft-Ⅱ	396.45	路旁耕地边	地锦草、牛筋草、飞蓬、芒、雾水葛
	Ft-Ⅲ	516.93	路旁荒坡	苦苣菜、里白、芒、天门精、鬼针草
	Ft-Ⅳ	560.21	路旁荒坡	白车轴草、飞蓬、苦苣菜、野茼蒿
	Ft-Ⅴ	717.27	路旁荒坡	苦苣菜、野茼蒿、川莓、芒
	Ft-Ⅵ	1211.7	山谷路旁	过路黄、豹皮樟、楠竹

续表 1

物种	样地号	海拔/m	生境	伴生物种
常春藤 *Hedera nepalensis* var. sinensis (Tobler) Rehder	Hn-Ⅰ	398.74	路旁荒坡	三脉紫菀、大芽南蛇藤、棕榈、野茼蒿
	Hn-Ⅱ	560.21	路旁疏林	十字薹草、光皮桦、芒、龙牙草、糯米团
	Hn-Ⅲ	1152.7	路旁荒坡	三脉紫菀、小蜡、小花鹰爪枫、锈毛崖豆藤
	Hn-Ⅳ	1292.09	路旁荒坡	芒、苦苣菜
	Hn-Ⅴ	1077.98	路旁荒坡	穗序鹅掌柴、芒、花叶菝葜、常山、六月雪
	Hn-Ⅵ	864.23	路旁荒坡	芒、苦苣菜
五叶地锦 *Parthenocissus quinquefolia*	Pq-Ⅰ	405.82	路旁石壁	艾蒿、合欢属、火炭母、水蓼、醉鱼草
	Pq-Ⅱ	881.24	路旁石壁	芒、千里光、肾蕨
	Pq-Ⅲ	1295.92	路旁石壁	芒、三脉紫菀、白车轴草、七星莲
	Pq-Ⅳ	951.33	路旁荒坡	野茼蒿、芒、杉木、爵床、艾蒿
	Pq-Ⅴ	541.81	路旁荒坡	木蓝、过路黄、芒、水麻、节毛飞廉
	Pq-Ⅵ	509.49	路旁荒坡	三脉紫菀、六月雪、蝴蝶花、芒青榨槭

1.3 样品测定

土壤 pH 值用电位法测定(赛多利斯 PB-10);全碳、全氮用元素分析仪法测定(Thermo Fisher Scientific);全磷用钼锑抗比色法测定(上海美谱达 UV-1800PC);采用分光光度法测定 β-1,4-葡萄糖苷酶(β-1,4-glucosidase,BG)、β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β-1,4-N-acetylglucosidase,NAG)、磷酸酶(phosphatase,PHO)活性,底物分别为对-硝基苯-β-D 吡喃葡萄糖苷、对硝基苯 β-N-乙酰氨基葡萄糖苷、磷酸苯二钠。

1.4 数据分析

使用 SPSS25.0(SPSS Inc.,IBM Corporation,Chicago,IL,USA)对数据进行统计分析。使用 Origin2019(OriginLab,Northampton,MA,USA)作相关性热图。利用 CANOCO 4.5 软件对土壤和土壤微生物生态化学计量特征与环境因子之间的关系进行冗余分析。

本研究中,土壤全碳、全氮和全磷之间的比值分别以 C∶N、C∶P、N∶P 表示。土壤酶化学计量碳氮比 $E_{C/N}=\frac{\ln\beta G}{\ln NAG}$;土壤酶化学计量碳磷比 $E_{C/P}=$

$\frac{\ln\beta G}{\ln PHO}$；土壤酶化学计量氮磷比 $E_{N/P}=\frac{\ln NAG}{\ln PHO}$；向量角度（vector angle）大于 45°，越大表示微生物受磷的限制越强，向量长度（vector length）越长表示微生物受碳的限制越严重[27]。其计算公式如下[28]：

$$向量角度=\tan\left[\left(\frac{\ln\beta G}{\ln PHO}\right),\left(\frac{\ln\beta G}{\ln NAG}\right)\right]\times 180/3.1416 \quad (1)$$

$$向量长度=\sqrt{\left(\frac{\ln\beta G}{\ln NAG}\right)^2+\left(\frac{\ln\beta G}{\ln PHO}\right)^2} \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 根际土壤 CNP 化学计量比特征

5 种藤本植物根际土壤理化性质差异明显，且不同理化性状有不同的权衡。络石根际土壤 pH 值变异系数最小（0.02），pH 范围为 7.29 ~ 7.62，其他 4 种藤本植物根际土壤 pH 变化范围较大，pH 范围为 5.37 ~ 7.86。地锦和常春藤 *TC* 变异系数最大（1.00），变化范围为 5.82 ~ 49.39 g/kg 和 3.64 ~ 112.43 g/kg。地锦 *TN* 变异系数最大（0.84），变化范围为 0.52 ~ 3.72 g/kg。五叶地锦 C∶N 比变异系数最大（1.50），变化范围为 7.49 ~ 114.61。络石 N∶P 比异系数最大（1.02），变化范围为 2.39 ~ 28.10（表 2）。

表 2 5 种藤本植物根际土壤 CNP 含量及化学计量比特征

物种	特征值	pH	*TC* /(g/kg)	*TN* /(g/kg)	*TP* /(g/kg)	C∶N	C∶P	N∶P
络石 *Trachelospermum jasminoides*（Lindl.）Lem.	最小值	7.29	10.87	0.83	0.15	12.47	34.15	2.39
	最大值	7.62	91.49	4.27	0.90	32.22	619.64	28.10
	平均值	7.50	50.49	2.32	0.37	19.57	270.44	11.41
	标准偏差	0.13	38.42	1.31	0.31	8.00	307.38	11.65
	变异系数	0.02	0.76	0.57	0.84	0.41	1.14	1.02
地锦 *Parthenocissus Tricuspidate*（Siebold & Zucc.）Planch.	最小值	5.37	5.82	0.52	0.12	7.93	46.63	4.42
	最大值	7.44	49.39	3.72	0.29	13.74	168.09	12.68
	平均值	6.55	18.15	1.52	0.17	11.06	94.17	8.04
	标准偏差	0.85	18.10	1.28	0.08	2.54	58.45	3.48
	变异系数	0.13	1.00	0.84	0.45	0.23	0.62	0.43
地果 *Ficus tikoua* Bureau	最小值	5.48	5.37	0.95	0.12	4.32	23.26	4.12
	最大值	7.61	53.68	3.02	0.40	17.79	163.84	10.93
	平均值	6.70	19.41	1.76	0.23	9.71	79.39	8.20
	标准偏差	0.74	18.35	0.77	0.11	4.99	48.77	2.84
	变异系数	0.11	0.95	0.44	0.48	0.51	0.61	0.35

续表 2

物种	特征值	pH	*TC* /(g/kg)	*TN* /(g/kg)	*TP* /(g/kg)	C∶N	C∶P	N∶P
常春藤 *Hedera nepalensis* var. sinensis（Tobler）Rehder	最小值	5.75	3.64	1.16	0.12	3.12	24.46	7.38
	最大值	7.36	112.43	9.09	0.72	12.37	498.26	43.38
	平均值	6.72	40.51	3.87	0.32	8.62	147.21	14.84
	标准偏差	0.75	40.62	2.96	0.24	3.39	177.25	14.10
	变异系数	0.11	1.00	0.77	0.74	0.39	1.20	0.95
五叶地锦 *Parthenocissus quinquefolia*	最小值	5.86	12.78	1.00	0.10	7.49	51.33	6.09
	最大值	7.86	128.98	6.14	0.42	114.61	1191.99	16.62
	平均值	6.78	53.82	2.70	0.28	28.32	301.99	9.69
	标准偏差	0.82	53.14	1.82	0.11	42.57	450.84	4.09
	变异系数	0.12	0.99	0.67	0.40	1.50	1.49	0.42

注：TC，全碳；TN 总氮；TP，总磷（下同）。

2.2 根际土壤酶活性及酶化学计量比

5 种藤本植物根际土壤酶活性及化学计量比差异明显。络石 βG 变异系数最大（0.97），变化范围为 4.20 ~ 57.92 U/g。地锦 *NAG* 变异系数最大（0.69），变化范围为 15.74 ~ 56.32 U/g。五叶地锦 $E_{C/N}$ 变异系数最大（0.39），变化范围为 0.54 ~ 2.04。络石 $E_{C/P}$ 变异系数最大（0.37），变化范围为 0.45 ~ 1.27。五叶地锦 *VL* 变异系数最大（0.38），变化范围为 0.68 ~ 2.31。

表 3 5 种藤本植物根际土壤酶及酶化学计量比特征

物种	特征值	*βG* /(U/g)	*NAG* /(U/g)	*PHO* /(U/g)	$E_{C/N}$	$E_{C/P}$	$E_{N/P}$	*VA*	*VL*
络石 *Trachelospermum jasminoides*（Lindl.）Lem.	最小值	4.20	3.87	8.62	0.70	0.45	0.60	55.49	0.84
	最大值	57.92	11.26	48.00	1.85	1.27	0.69	59.20	2.24
	平均值	23.13	7.67	25.44	1.34	0.86	0.64	57.54	1.59
	标准偏差	22.46	2.95	14.71	0.46	0.31	0.03	1.35	0.56
	变异系数	0.97	0.38	0.58	0.35	0.37	0.05	0.02	0.35
地锦 *Parthenocissus Tricuspidate*（Siebold & Zucc.）Planch.	最小值	6.88	4.14	15.74	1.06	0.66	0.44	54.76	1.30
	最大值	26.02	17.25	56.32	1.58	1.02	0.71	66.43	1.86
	平均值	15.60	7.92	31.37	1.41	0.80	0.57	60.50	1.63
	标准偏差	7.65	5.44	16.50	0.21	0.14	0.11	4.76	0.22
	变异系数	0.49	0.69	0.53	0.15	0.18	0.19	0.08	0.14
地果 *Ficus tikoua* Bureau	最小值	10.75	6.13	16.44	1.08	0.65	0.49	52.89	1.27
	最大值	24.72	12.45	50.03	1.39	1.02	0.76	63.73	1.71
	平均值	16.32	9.61	29.55	1.24	0.85	0.68	55.85	1.51
	标准偏差	4.78	2.44	12.87	0.13	0.16	0.11	4.33	0.17
	变异系数	0.29	0.25	0.44	0.10	0.19	0.15	0.08	0.11
常春藤 *Hedera nepalensis* var. sinensis（Tobler）Rehder	最小值	4.92	3.07	14.85	1.28	0.48	0.34	53.84	1.50
	最大值	57.69	13.94	52.88	1.96	1.12	0.73	71.39	2.20
	平均值	29.88	9.07	36.30	1.48	0.87	0.59	59.62	1.72
	标准偏差	21.73	4.18	13.33	0.26	0.22	0.15	6.52	0.28
	变异系数	0.73	0.46	0.37	0.17	0.25	0.25	0.11	0.16

续表 3

物种	特征值	βG /(U/g)	NAG /(U/g)	PHO /(U/g)	$E_{C/N}$	$E_{C/P}$	$E_{N/P}$	VA	VL
五叶地锦 *Parthenocissus quinquefolia*	最小值	1.59	2.34	3.14	0.54	0.40	0.49	53.34	0.68
	最大值	57.82	15.03	61.22	2.04	1.09	0.74	63.97	2.31
	平均值	23.47	8.32	33.84	1.27	0.77	0.62	58.19	1.49
	标准偏差	20.48	4.62	21.35	0.50	0.28	0.10	4.04	0.56
	变异系数	0.87	0.55	0.63	0.39	0.36	0.16	0.07	0.38

注:βG,β-1,4-葡萄糖苷酶;NAG,β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶;PHO,磷酸酶;$E_{C/N}$,土壤酶化学计量碳氮比;$E_{C/P}$,土壤酶化学计量碳磷比;$E_{N/P}$,土壤酶化学计量氮磷比;VA,向量角度;VL,向量长度。下同。

2.3 相关性

TN 与 TC、N∶P、βG、PHO、$E_{C/N}$ 和 VL 呈极显著正相关($P<0.01$),与 TP 和 $E_{N/P}$ 呈显著正相关($P<0.05$)。TC 与 βG、C∶N、C∶P、N∶P 呈极显著正相关($P<0.01$)。TP 与 $E_{C/P}$ 和 VL 呈显著正相关($P<0.05$)。βG 与 NAG、PHO、N∶P 呈显著正相关($P<0.05$),与 $E_{C/N}$、$E_{C/P}$、VL 呈极显著正相关($P<0.01$)。NAG 与 PHO、$E_{N/P}$ 呈极显著正相关($P<0.01$),与 VA 呈极显著负相关($P<0.01$)。$E_{C/N}$ 与 $E_{C/P}$、VL 呈极显著正相关($P<0.01$)。$E_{C/N}$ 与 $E_{N/P}$ 呈显著正相关($P<0.05$),与 VL 呈极显著正相关($P<0.01$),与 VA 呈显著负相关($P<0.05$)。$E_{N/P}$ 与 VA 呈极显著负相关($P<0.01$)。

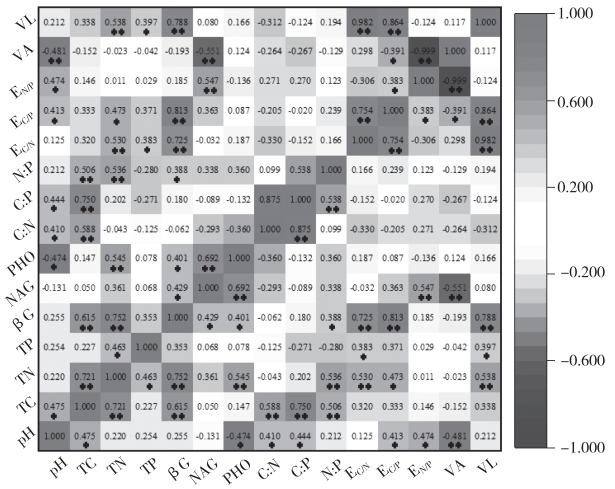


图 2 相关性热图

2.4 冗余分析

通过逐步迭代的方式筛选出 5 种藤本植物根际土壤理化性质对土壤酶活性及化学计量具有显著解释性的变量,分别为海拔、TN、C∶N 和 N∶P(表 4)。将土壤酶活性和其化学计量比与具有显著解释性的环境变量进行冗余双序分析。第一轴和第二轴的解释量分别为 53.3% 和 3.3%(图 3)。RDA1 主要与土壤海拔、总氮、C∶N 比和 N∶P 比相关。RDA2 与总氮和 C∶N 比相关(图 3,表 4)。所有环境变量对土壤-酶活性特征变异的解释量为 69%,具有显著解释性环境变量的解释量为 60%,其中 TN 对土壤酶活性及化学计量的解释量最大,为 34.00%(用 9999 个排列进行蒙特卡罗置换检验,$P=0.0005$)。

表 4 5 种藤本植物根际土壤理化性质与土壤酶活性及其化学计量的冗余方差分析

前向选择的变量	RDA 1	RDA 2	F 值	P 值	Extra fit
总氮	−0.6552	0.2871	13.59	0.0005**	0.34
C:N	0.4714	0.2855	5.92	0.0007**	0.17
海拔	−0.4026	−0.1911	3.93	0.0333*	0.06
N:P	−0.3992	0.0920	3.74	0.0477*	0.03
全部变量解释的方差					0.69
显著变量解释的方差					0.60

注:**$P<0.01$,*$P<0.05$。

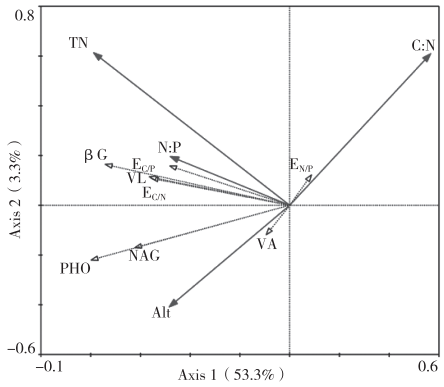


图 3 冗余双序图

3 讨论

土壤是植物生长的载体,其养分含量决定着植物的生长。地锦和地果根际土壤 C、N、P 平均值分别为 18.15 g/kg、1.52 g/kg、0.17 g/kg 和 19.41 g/kg、1.76 g/kg、0.23 g/kg,其含量均明显低于全国土壤 C、N、P 平均值 24.56 g/kg、1.88 g/kg、0.75 g/kg[29],说明地锦和地果根际土壤 C、N、P 含量均较低,其中 P 含量最低,仅为全国土壤 P 水平的 22.67% 和 30.67%,是一种极度缺 P 的表现。土壤中 N∶P 的比值可反映有机质的可分解性及土壤养

分限制状况,有研究表明,土壤 N∶P<10 时,N 元素是植物生长的限制元素[30]。本研究中,地锦和地果根际土壤 N∶P 比分别为 8.04 和 8.20,说明地锦和地果生长受 N 限制。土壤 C∶P 比是土壤 P 矿化能力的标志,当 C∶P 比低于 200 时,微生物 P 发生净矿化,土壤中有效 P 元素累积[31]。本研究中,地锦、地果和常春藤根际土壤 C∶P 比分别为 94.17、79.39 和 147.21,远低于 200,说明 3 种藤本根际土壤 P 有效性较高,

了解不同植物土壤微生物的代谢特征需要了解酶活性和酶化学计量学。土壤养分充足时,土壤微生物会减少土壤胞外酶的分泌,养分不足时,微生物通过分泌酶来获取养分[32]。本研究中,地果根际土壤 N 获取酶活性最高,可以缓解地果生长时的 N 限制情况,推测土壤胞外酶活性不仅跟土壤养分有关,还可能跟植物根系有关。根际土壤酶主要由土壤微生物和根系分泌,地果具有发达的根系[33],是生理代谢的活跃组织,这与 Wang 等[12]的研究结果相似,Wang 等研究认为玉米与其他作物相比,C、N、P 根际土壤获取的酶活性最高,推测可能是因为其具有丰富的须根。地锦生长同样受 N 限制,但 N 获取酶活性却较低,推测可能是与地锦的强耐受性有关,地锦适应性强,营养需求低[34]。本研究中酶化学计量 C∶N∶P 比大致分为 4∶3∶2、5∶3∶2 和 2∶1∶1,均与全球土壤酶化学计量比 1∶1∶1 有所区别,5 种藤本植物根际土壤向量角度 VA>45°,表明 5 种藤本植物根际土壤都受 P 限制。

植物根际土壤 pH 值变化决定着根际环境中各矿质营养的生物与化学有效性[35]。Dai 等[10]研究认为,较低的 pH 值有较高的 N 和 P 营养限制,尤其是 P 营养限制。本研究中 pH 与 VA 呈极显著负相关,说明 pH 越小,根际土壤 P 营养限制越高,与 Dai 等研究结果相似。Suo 等[36]认为,土壤 C∶N 和 N∶P的最重要预测因子是土壤 pH。本研究中根际土壤 pH 与土壤 N、P 含量相关性均不显著,但与土壤 C 含量、C∶N 和 C∶P 呈显著正相关性,与前人的研究结果不完全一致。本研究中,根际土壤C∶N 与 C∶P 相关关系极显著,表明根际土壤氮、磷限制协同性更强,二者中任一养分限制更易引起另一限制的发生。本研究中,*TN* 与 βG、*PHO* 和 $E_{C/N}$呈极显著正相关,与 $E_{C/P}$呈显著正相关,冗余分析也显示 *TN* 对土壤酶活性及化学计量的解释量最大,表明 *TN* 在调节 5 种藤本植物根际土壤酶活性及其化学计量特征变化上发挥着关键作用。

4 结论

5 种藤本植物根际土壤都受 P 限制,其中地锦和地果的 P 含量最低,仅为全国土壤 P 水平的 22.67% 和 30.67%,是一种极度缺 P 的表现;地锦和地果根际土壤 N∶P 比分别为 8.04 和 8.20,其生长受 N 限制;地果根际土壤通过提高 N 获取酶活性来缓解地果生长时的 N 限制情况;根际土壤 pH 值越小,P 营养限制越高;*TN* 与 βG、*PHO*、$E_{C/N}$和 $E_{C/P}$呈显著正相关,对土壤酶活性及化学计量的解释量最大,在调节 5 种藤本植物根际土壤酶活性及其化学计量特征变化上发挥着关键作用。

参考文献【REFERENCES】

[1] CHAUDHARY D R, GAUTAM R K, YOUSUF B, et al. Nutrients, microbial community structure and functional gene abundance of rhizosphere and bulk soils of halophytes[J]. Applied soil ecology, 2015, 91: 16-26.

[2] YUAN Y, DAI X Q, FU X L, et al. Differences in the rhizosphere effects among trees, shrubs and herbs in three subtropical plantations and their seasonal variations[J]. European journal of soil biology, 2020, 100: 103218.

[3] GAGNON V, RODRIGUE-MORIN M, TREMBLAY J, et al. Life in mine tailings: microbial population structure across the bulk soil, rhizosphere, and roots of boreal species colonizing mine tailings in northwestern Québec[J]. Annals of microbiology, 2020, 70: 1-18.

[4] 李丽娟,李昌晓,陈春桦,等. 三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2898-2907.

[5] 魏亚娟,汪季,党晓宏,等. 干旱荒漠区人工梭梭林土壤碳氮磷密度与生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 259-266.

[6] BERTRAND I, VIAUD V, DAUFRESNE T, et al. Stoichiometry constraints challenge the potential of agroecological practices for the soil C storage: a review[J]. Agronomy for sustainable development, 2019, 39: 1-16.

[7] 陈志霞,喻阳华,吴银菇. 黔中石漠化区大理石矿山不同植被恢复对土壤养分及化学计量的影响[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(1): 95-102.

[8] WANG Z, LV S, SONG H, et al. Plant type dominates fine-root C∶N∶P stoichiometry across China: a meta-analysis[J]. Journal of biogeography, 2020, 47(5): 1019-1029.

[9] ZHU X M,LIU M,KOU Y P,et al. Differential effects of N addition on the stoichiometry of microbes and extracellular enzymes in the rhizosphere and bulk soils of an alpine shrubland [J]. Plant and soil,2020,449(1/2):285-301.
[10] DAI X Q,FU X L,KOU L,et al. C∶N∶P stoichiometry of rhizosphere soils differed significantly among overstory trees and understory shrubs in plantations in subtropical China[J]. Canadian journal of forest research,2018,48(11):1398-1405.
[11] ZENG Q,CHEN Z,TAN W. Plant litter quality regulates soil eco-enzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in a citrus orchard[J]. Plant and soil,2021,466(1/2):179-191.
[12] WANG X,GONG X,LI X,et al. Microbial nutrient limitation in rhizosphere soils of different food crop families: evidence from ecoenzymatic stoichiometry[J]. Land degradation & development,2023,34(4):1019-1034.
[13] 杨敏,阳珍,胥晓,等. 不同植被恢复类型对四川泸石高速公路边坡土壤胞外酶及化学计量特征的影响[J]. 土壤通报,2024,55(1):161-172.
[14] 刘然. 藤本植物在城市立体绿化中的应用和选择[J]. 花卉,2019(16):145-146.
[15] 唐娜,王玉婷,周东民,等. 几种藤本植物在屋顶的适应性评价与分析[J]. 湖南农业科学,2019(7):68-71.
[16] 宋凤鸣,刘建华,钱瑭璜,等. 8 种乡土植物在边坡植被恢复工程中的应用[J]. 中国水土保持科学,2016(4):134-141.
[17] 刘伟,王昊琼,但新球,等. 藤本植物在石漠化治理中的应用[J]. 安徽农业科学,2019,47(13):78-81.
[18] 郭华武. 藤本植物在北方破损山体生态修复中的应用研究[J]. 花卉,2020(2):233-234.
[19] 王业社,陈立军,黎颖惠,等. 中国南方喀斯特地区藤本植物物种组成及其相关性状属性特征分析[J]. 草业科学,2020,37(1):126-138.
[20] 宋述灵,易伶俐,张李龙,等. 森林木质藤本数量过度增长的机制与生态效应[J]. 广西植物,2023,43(5):980-990.
[21] 许海武,任隐,柳向娟,等. 热带森林 10 种藤本植物根尖直径与解剖性状间的关联分析[J]. 分子植物育种,2022,20(3):987-995.
[22] 李卓冉,袁喆,翁殊斐,等. 9 种木质藤本的叶性状及其对光照的响应[J]. 江西农业大学学报,2024,46(1):152-160.
[23] 王梦洁,容丽,李婷婷,等. 黔中喀斯特 9 种木质藤本叶功能性状研究[J]. 热带亚热带植物学报,2021,29(5):455-464.
[24] 王桢珍,范体凤,翁殊斐. 吸附类 2 种藤本植物对攀附面和干旱胁迫的生长响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2024,44(5):9-17.
[25] 夏常英,吴学学,傅连中,等. 梵净山地区藤本植物的多样性及区系特征[J]. 广西植物,2020,40(2):264-271.
[26] RILEY D,BARBER S A. Bicarbonate accumulation and pH changes at the soybean(*Glycine max*(L.)Merr.)root - soil interface[J]. Soil science society of america journal,1969,33(6):905-908.
[27] 陈浩宁,周怀平,文永莉,等. 长期不同施肥下褐土养分及酶活性的生态化学计量特征[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(6):972-983.
[28] HILL B H,ELONEN C M,JICHA T M,et al. Ecoenzymatic stoichiometry and microbial processing of organic matter in northern bogs and fens reveals a common P-limitation between peatland types[J]. Biogeochemistry,2014,120(1/3):203-224.
[29] TIAN H,CHEN G,ZHANG C,et al. Pattern and variation of C∶N∶P ratios in China´s soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry,2010,98(1/3):139-151.
[30] BUI E N,HENDERSON B L. C∶N∶P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. Plant and soil,2013,373(1):553-568.
[31] 陈飞,刘方,白晓永,等. 喀斯特山地不同微地貌下土壤碳氮磷空间异质性及生态化学计量特征[J]. 生态学报,2022(24):1-13.
[32] ALLISON S D,VITOUSEK P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J]. Soil biology and biochemistry,2005,37(5):937-944.
[33] 王晓荣,辜忠春,刘星,等. 基质和生长激素对地果硬枝扦插生根的影响[J]. 中国农学通报,2023,39(31):90-95.
[34] 王忠强,吴良欢,刘婷婷,等. 供氮水平对爬山虎(*Parthenocissus tricuspidata* Planch)生物量及养分分配的影响[J]. 生态学报,2007(8):3435-3441.
[35] BLOSSFELD S,GANSERT D,THIELE B,et al. The dynamics of oxygen concentration,pH value,and organic acids in the rhizosphere of Juncus spp[J]. Soil biology and biochemistry,2011,43(6):1186-1197.
[36] SUO Y Y,YUAN Z Q,LIN F,et al. Local-scale determinants of elemental stoichiometry of soil in an old-growth temperate forest[J]. Plant and soil,2016,408(1):401-414.

收稿日期:2024-10-31;**修回日期**:2024-11-01
基金项目:贵州科学院博士基金启动项目(黔科院 R 字〔2021〕3 号);贵州省科技计划项目(黔科合平台 YWZ〔2024〕005);贵州省生物研究所人才团队项目(黔生所 2024001);贵州省基础研究(自然科学)项目(黔科合基础-ZK〔2022〕一般 282)。
作者简介:**罗文敏**(1983-),硕士,副研究员,研究方向:喀斯特生态恢复。
▲**通讯作者**:**刘盈盈**(1979-),博士,研究员,研究方向:植物学、生态学。

贵州省福泉市蛤蚌河景区石松类和蕨类植物多样性分析*

何选泽[1],杨加文[1▲],叶红环[2],徐 建[1],蒙文萍[1]
([1] 贵州省植物园,贵州 贵阳 550004;[2] 贵州省林业科学研究院,贵州 贵阳 550005)

摘 要: 调查了贵州省福泉市蛤蚌河景区的石松类与蕨类植物,结果显示,在上述区域有石松类与蕨类植物 16 科 40 属 68 种,其中石松类 1 科 1 属 6 种;优势科为鳞毛蕨科、凤尾蕨科、水龙骨科、金星蕨科、卷柏科。该区石松类与蕨类植物的区系分布在属、种上有所差异,属的区系是以热带性质为主,种的区系则以温带性质为主。该区石松类与蕨类植物的生态类型主要为土生,其次是石生、附生的种类,水生或湿生较少。部分种类在观赏、食用、药用方面具有一定程度的优先利用价值。

关键词: 蛤蚌河,石松类,蕨类,植物区系
中图分类号:Q 949 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0018-05

Diversity analysis of lycophytes and ferns in Gebang River Scenic Area, Fuquan City, Guizhou Province*

HE Xuanze[1], YANG Jiawen[1▲], YE Honghuan[2], XU Jian[1], MENG Wenping[1]

([1] *Guizhou Botanical Garden, Guiyang 550004, China*; [2] *Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China*)

Abstract: A survey was conducted on the lycophytes and ferns in the Gebang River Scenic Area of Fuquan City, Guizhou Province. The results show that there are 68 species of lycophytes and ferns in the area, belonging to 40 genera and 16 families, including 6 species of lycophytes belonging to 1 genus and 1 family. The advantageous families are Dryopteridaceae, Pteridiaceae, Polypodiaceae, Thelypteridaceae, and Selaginellaceae. The distribution of lycophytes and ferns in the area varies in terms of genera and species. The flora of genera is mainly tropical, while the flora of species is mainly temperate. The ecological types of lycophytes and ferns in the area are mainly terrestrial, followed by lithophytic and epiphytic species, with fewer aquatic or wetland species. Some species have a certain degree of priority utilization value in terms of ornamental, edible, and medicinal purposes.

Keywords: Gebang River, lycophytes, ferns, flora

过去人们认为蕨类植物(Pteridophyta)、苔藓植物、种子植物等均是自然类群,是构成现代植物界的六大门类之一[1]。随着分子生物学的发展,人们发现它包括了石松类(Lycophytes)和蕨类植物(Ferns),石松类包括了石松科、水韭科和卷柏科,蕨类植物则包括了松叶蕨类、木贼类和真蕨类[1-3]。根据 PPG I 分类系统,现存的石松类和蕨类植物有 14 目 51 科 337 属约 12000 种[2],据统计,我国的石松类和蕨类植物有 41 科 189 属 2400 余种,而贵州目前记载的石松类与蕨类植物有 36 科 114 属 846 种[2,4-5]。蛤蚌河风景区坐落在福泉市仙桥乡,景区是由蛤蚌河河谷及多条支流峡谷组成,是良好的旅游资源,目前未见到有关该区石松类与植物多样性的相关报道。为查清蛤蚌河景区的石松类与蕨类植物及其区系组成和生态类型,为后续相关研究以及该区域石松类和蕨类植物的开发利用奠定一定基

础,进行本调查。

1 调查地概况与方法

调查地点蛤蚌河景区位于贵州省福泉市仙桥乡。东经 107°14′~107°25′,北纬 26°40′~26°49′。土壤类型以石灰土最多,黄壤次之。属亚热带季风气候华中湿润区,热量丰富、雨量充沛,无霜期长,年均温 14 ℃左右,年积温 4574~5609 ℃,无霜期 245~278 d。年均降水量 1033~1220 mm。

通过多次野外调查采集,并经鉴定,按 PPG I[6] 并参照胡佳玉等[7] 对水龙骨科的处理系统进行科属划分,整理出蛤蚌河石松类和蕨类植物名录。植物区系参考吴征镒[8] 与陆树刚[9] 的分布类型划分,对福泉蛤蚌河的石松类和蕨类植物进行分布区划分。通过现场调查的记录和植物志[10] 比对,记录其生态类型,并统计分析。

2 结果与分析

2.1 物种组成

经过调查,蛤蚌河区域有石松类和蕨类植物 16 科 40 属 68 种(含变种),分别占贵州省石松类与蕨类植物科的 44.4%、属的 27.8%、种的 8.0%,表明该区的蕨类植物组成较为丰富。主要为凤尾蕨科 Pteridaceae、鳞毛蕨科 Dryopteridaceae、水龙骨科 Polypodiaceae、金星蕨科 Thelypteridaceae、卷柏科 Selaginellaceae、铁角蕨科 Aspleniaceae 和碗蕨科 Dennstaedtiaceae 的物种。如表 1 所示,鳞毛蕨科最多,有 4 属 12 种,其次为凤尾蕨科和水龙骨科,有 6 属 10 种,金星蕨科 5 属 6 种,卷柏科 1 属 6 种,铁角蕨科 Aspleniaceae 2 属 5 种,碗蕨科 Dennstaedtiaceae 2 属 4 种。蹄盖蕨科 Athyriaceae 3 属 3 种,乌毛蕨科 Blechnaceae 2 属 3 种,其余如海金沙科 Lygodiaceae、瓶尔小草科 Ophioglossaceae、鳞始蕨科、紫萁科 Osmundaceae 等科有 1 或 2 种。

优势属为耳蕨属 *Polystichum* 和卷柏属 *Selaginella*,均有 6 种;铁角蕨属 *Asplenium* 和凤尾蕨属 *Pteris* 均有 4 种。贯众属 *Cyrtomium*、瓦韦属 *Lepisorus* 等 2 属在该区调查到 3 种,盾蕨属 *Neolepisorus*、铁线蕨属 *Adiantum*、蕨属 *Pteridium*、薄唇蕨属 *Leptochilus*、复叶耳蕨属 *Arachniodes*、狗脊属 *Woodwardia*、金星蕨属 *Parathelypteris*、鳞盖蕨属 *Microlepia* 等 8 属在该区调查到 2 种。其余属在该区域只调查到 1 种,如方杆蕨属 *Glaphyropteridopsis*、阴地蕨属 *Sceptridium*、荚囊蕨属 *Struthiopteris*、石韦属 *Pyrrosia*、双盖蕨属 *Diplazium*、肿足蕨属 *Hypodematium* 等。

凤尾蕨科除凤尾蕨属外,还包含了秦仁昌系统中国蕨科的碎米蕨属 *Cheilanthes*、金粉蕨属 *Onychium*、粉背蕨属 *Aleuritopteris*,铁线蕨科的铁线蕨属 *Adiantum*,还有裸子蕨科的凤丫蕨属 *Coniogramme*。阴地蕨属原为阴地蕨科,PPG I 将之划入瓶尔小草科,蕨属亦划入碗蕨科 Dennstaedtiaceae。柳叶蕨 *Polystichum fraxinellum* 由柳叶蕨属转入耳蕨属。这些分类处理导致了科属组成上的变动。

表 1 蛤蚌河石松类与蕨类植物科属组成

科 名	属数目	种数目
凤尾蕨科 Pteridaceae	6	10
海金沙科 Lygodiaceae	1	1
金星蕨科 Thelypteridaceae	5	6
卷柏科 Selaginellaceae	1	6
里白科 Gleicheniaceae	2	2
鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	4	12
鳞始蕨科 Lindsaeaceae	1	1
木贼科 Equisetaceae	1	1
瓶尔小草 Ophioglossaceae	1	1
水龙骨科 Polypodiaceae	6	10
蹄盖蕨科 Athyriaceae	3	3
铁角蕨科 Aspleniaceae	2	5
碗蕨科 Dennstaedtiaceae	2	4
乌毛蕨科 Blechnaceae	2	3
肿足蕨科 Hypodematiaceae	1	1
紫萁科 Osmundaceae	2	2
总计	40	68

2.2 石松类与蕨类植物区系

从属的层面来看,蛤蚌河分布的 40 属石松类和蕨类植物,可划为 8 个分布区类型 1 亚型共 9 类,见表 2,主要为世界分布(表 2,1)和热带性质分布类型(表 2,3~7-4),温带性质分布类型(表 2,8~15)相对较少。其中世界分布 11 属,占蛤蚌河总属数的 27.5%,如铁线蕨属、蹄盖蕨属 *Athyrium*、卷柏属、狗脊属和荚囊蕨属等。热带性质分布类型主要是泛热带分布 13 属,如凤尾蕨科的凤丫蕨属、凤尾蕨属、碎米蕨属、金粉蕨属、肋毛蕨属 *Ctenitis*、复叶耳蕨属、

乌蕨属 *Stenoloma* 等,占蛤蚌河石松类和蕨类植物总属数的 32.5%。此外,热带性质分布的类型还有热带亚洲至热带非洲分布 5 属,占总属数的 12.5%,有贯众属、盾蕨属、肿足蕨属等。其余的热带性质分布则属数较少,见表 2(3~7)。温带性质分布的类型占少数,其中北温带分布 3 属,分布是阴地蕨属、桂皮紫萁属 *Osmundastrum*、紫萁属 *Osmunda*;东亚分布 2 属,有伏石蕨属 *Lemmaphyllum* 和鳞果星蕨属 *Lepidomicrosorum*。

表 2 蛤蚌河石松类与蕨类植物区系

分布区类型	属数	比例/%	种数	比例/%
1. 世界分布	11	27.5	3	4.4
2. 泛热带分布	13	32.5		
3. 热带亚洲和热带美洲分布	1	2.5		
4. 旧世界热带分布	2	5		
5. 热带亚洲至热带大洋洲分布			2	2.9
6. 热带亚洲至热带非洲分布	5	12.5	1	1.5
6-1 华南、西南到印度和热带非洲间断分布			1	1.5
6-2 热带亚洲和东非或马达加斯加间断分布	1	2.5		
7. 热带亚洲分布	2	5	9	13.2
7-1 爪哇(或苏门答腊)喜马拉雅间断或星散分布到华南、西南			1	1.5
7-4 越南(或中南半岛)至华南(或西南)分布			8	11.8
8. 北温带分布	3	7.5	1	1.5
9. 东亚和北美间断分布				
10. 旧世界温带分布				
11. 温带亚洲分布			1	1.5
14 东亚广布	2	5	12	17.6
14-1 中国-喜马拉雅			5	7.4
14-2 中国-日本			9	13.2
15. 中国特有			15	22.1
合 计	40	100	68	100

植物物种是植物区系地理的基本研究对象,是特定环境下植物产生特定的遗传反应的植物群。从物种层面看,蛤蚌河石松类与蕨类植物区系可分为 8 个分布区类型 5 个亚型共 13 类,如表 2,世界分布的有 3 种,如海金沙 *Lygodium circinnatum*、铁线蕨 *Adiantum capillus-veneris* 等。温带性质分布的种有 43 种,占蛤蚌河石松类和蕨类植物的 63.2%。其中东亚分布 12 种,占 17.6%,如岩凤尾蕨 *Pteris deltodon*、斜方复叶耳蕨 *Arachniodes amabilis*、阴地蕨 *Sceptridium daucifolium*、长叶铁角蕨 *Asplenium prolongatum*、边缘鳞盖蕨 *Microlepia marginata*、单芽狗脊 *Woodwardia unigemmata*、紫萁 *Osmunda japonica*;中国-喜马拉雅分布 5 种,占 7.4%,有野雉尾金粉蕨 *Onychium japonicum*、披针新月蕨 *Pronephrium penangianum*、表面星蕨 *Lepisorus superficialis*、盾蕨 *Lepisorus ovatus* 等;中国-日本分布 9 种,占 13.2%,如渐尖毛蕨 *Cyclosorus acuminatus*、江南卷柏 *Selaginella moellendorffii*、深绿卷柏 *S. doederleinii*、贯众 *Cyrtomium fortunei*、江南星蕨 *Lepisorus fortunei*;中国特有分布的 15 种,占 22.1%,如白垩铁线蕨 *Adiantum gravesii*、翠云草 *Selaginella uncinata*、长尾复叶耳蕨 *Arachniodes simplicior*、华中介蕨 *Deparia okuboana*、江南短肠蕨 *Diplazium mettenianum*、假粗毛鳞盖蕨 *Microlepia pseudostrigosa*、荚囊蕨 *Cleistoblechnum eburneum* 等。热带性质分布的 22 种,占该区种数的 32.4%。其中热带亚洲分布 9 种,占 13.2%,如溪边凤尾蕨 *Pteris terminalis*、长根金星蕨 *Parathelypteris beddomei*、亮鳞肋毛蕨 *Ctenitis subglandulosa*、狭翅铁角蕨 *Asplenium wrightii*。越南(或中南半岛)至华南(或西南)分布 8 种,占 11.8%,如刺齿贯众刺齿贯众 *Cyrtomium caryotideum* f. *caryotideum*、曲边线蕨 *Colysis elliptica var. flexiloba*、庐山石韦 *Pyrrosia sheareri*、羽裂星蕨 *Microsorum insigne* 等。其余热带亚洲至热带大洋洲分布、热带亚洲至热带非洲分布以及华南、西南到印度和热带非洲间断分布等类型较少。有切边膜叶铁角蕨 *Hymenasplenium excisum*、凤尾蕨 *Pteris cretica*、蜈蚣凤尾蕨 *Pteris vittata* 等。

2.3 生态类型

蛤蚌河石松类与蕨类植物的生态类型如表 3 所示,土生型蕨类在该区最多,有 41 种,占该区总种数的 60.3%,如紫萁、蕨 *Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*、毛轴蕨 *Pteridium revolutum* 等具有较高使用价值,阴地蕨、乌蕨 *Odontosoria chinensis*、海金沙 *Lygodium japonicum* 等具有药用价值,峨眉耳蕨 *Polystichum caruifolium*、桂皮紫萁等具备较好的观赏价值。其次是石生类型的石松类与蕨类植物,有 19 种,占该区石松类与蕨类植物的 27.9%。如岩凤尾蕨、流苏耳蕨 *Polystichum fimbriatum*、荚囊蕨、肿足蕨等,具备观赏价值。附生蕨类植物有 8 种,主要为水龙骨科的庐山石韦 *Pyrrosia sheareri*、江南星蕨、羽裂星蕨 *Microsorum insigne*、抱石莲 *Lemmaphyllum*

drymoglossoides、表面星蕨 *Lepisorus superficialis* 等,具备药用和观赏价值;此外长叶铁角蕨和狭翅铁角蕨在该区亦附着生长于树干或石表、石缝,这两种铁角蕨亦具备较高观赏价值。

表 3 蛤蚌河石松类与蕨类植物的生态类型

生态类型	种 数	占蛤蚌河总种数比例/%
附生	8	11.8
石生	18	26.5
水生或湿生	1	1.5
土生	41	60.3

3 讨论

蛤蚌河景区石松类与蕨类植物较为丰富,有 16 科 40 属 68 种。这与在该区较为临近的麻江老蛇冲自然保护区[11]的 64 种数量相差较小,但与斗篷山自然保护区[12]的 173 种悬殊较大,一部分原因是蛤蚌河景区较之上述保护区面积更小,另一部分因素可能是斗篷山自然保护区在苗岭南坡,水热条件相对较好。蛤蚌河景区石松类与蕨类主要为凤尾蕨科、鳞毛蕨科、水龙骨科、金星蕨科、卷柏科等,上述 5 科在该区具有 22 属 44 种,分别占该区属、种数的 55.0%、64.7%,是较为明显的优势科。这与贵州一些地区[13-14]调查结果的常见的优势科是基本一致的。

石生、附生的种类较多,占该区蕨类植物总属的近四成,这是由于该区域石灰岩地貌较为发达,河谷地带植被保存比较完好所致。水龙骨科在该区种类较多说明了这一点。凤丫蕨属、碎米蕨属、金粉蕨属与凤尾蕨属都是泛热带分布的属,说明其分布区是较为一致的,这在一定程度上说明将前三者与凤尾蕨属在地域上更相近,亲缘关系更相近,侧面说明了将其并入凤尾蕨属的合理性。

属的区系成分有 9 类,热带性质为主。种的区系成分有 13 类,温带性质更为突出。从其属分布区类型来看,热带性质的属占蛤蚌河蕨类与石松类植物区系的主要部分,有 24 属,占 60.0%,而温带性质的属只占 12.5%。而从种的层面上,则是温带性质占据主导,温带性质的种类几近热带性质种类的两倍;这可能是该区地理上靠近热带,是热带向温带的过渡区,属于亚热带气候区所致,海拔落差较大,河谷地带常常生长喜热喜湿的种类,如羽裂星蕨、峨眉耳蕨等;山顶、山梁或石壁等区域则生长一些喜中高海拔或耐寒耐贫瘠土壤的种类。中国-日本分布有 9 种,中国-喜马拉雅分布有 5 种,中国-日本分布近乎中国-喜马拉雅分布的两倍,说明该区的中国-日本分布倾向性更明显。东亚广布有 12 种,中国特有分布有 15 种,说明该区处于东亚分布的植物区系之中。热带亚洲分布的种类占据该区石松类与蕨类植物的 13.2%,表明了该区是由热带向温带的一个过渡区,这与对梵净山保护区[15]、茂兰保护区[7]的区系研究结果大致相似。

本区分布的石松类与蕨类植物中峨眉耳蕨、羽裂星蕨、狭翅铁角蕨、荚囊蕨等具有较高观赏价值,紫萁、蕨、毛轴蕨等具有较高食用价值,阴地蕨具有较高药用价值,在开发利用时可以优先考虑。

参考文献【REFERENCES】

[1] 沙莎,张光富,邵丽鸳. 江苏石松类和蕨类植物多样性及生物地理学特征分析[J]. 生态与农村环境学报,2022,38(2):194-200.

[2] 陈永怡,谢梅,何选泽,等. 仁怀市石松类和蕨类植物多样性[J]. 山地农业生物学报,2024,43(1):8-17.

[3] 张宪春,卫然,刘红梅,等. 中国现代石松类和蕨类的系统发育与分类系统[J]. 植物学报,2013,48(2):119-120.

[4] 王培善,潘炉台. 贵州石松类和蕨类植物志[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2018.

[5] WANG B,SUN W Q,WANG H Z,et al. *Polystichum suiyangense*(sect. *Sphaenopolystichum*,Dryopteridaceae),a new fern from Guizhou,China[J]. Phytotaxa,2022,567(1):93-99.

[6] 张宪春. 中国石松类和蕨类植物[M]. 北京:北京大学出版社,2012.

[7] 胡佳玉,谭成江,姚正明,等. 茂兰国家级自然保护区石松类和蕨类植物区系特征[J]. 亚热带植物科学,2021,50(3):216-221.

[8] 吴征镒,孙航,周浙昆,等. 中国种子植物区系地理[M]. 北京:科学出版社,2013:1-492.

[9] 陆树刚. 植物科学进展:第六卷[M]. 北京:高等教育出版社,2004:29-42.

[10] 王培善,王筱英. 贵州蕨类植物志[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2001.

[11] 张华海. 老蛇冲自然保护区科学考察集[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2003.

[12] 叶红环. 斗篷山自然保护区石松类和蕨类植物初步研究[D]. 贵阳:贵州大学,2019.

[13] 孙巧玲. 月亮山自然保护区石松类和蕨类植物物种多样性研究[D]. 贵阳:贵州大学,2017.

裂萼苔[*Chiloscyphus polyanthos*(L.)Corda]叶绿体基因组分析*

孔令雄[1],胡　蓉[2],黄定旭[1],梁　盛[1],何琴琴[1],刘邦友[1],张廷跃[1],宋云起[2],向友良[2▲],彭　涛[2]

([1]贵州赤水桫椤国家级自然保护区管理局,贵州　赤水　564700;[2]贵州师范大学　生命科学学院,贵州　贵阳　550025)

摘　要: 裂萼苔[*Chiloscyphus polyanthos*(L.)Corda]隶属于齿萼苔科叶苔目,是苔藓植物中既能水生又能陆生的物种,也是研究植物登陆与演化的重要类群之一。本文对裂萼苔叶绿体基因组的结构和系统发育进行了分析,并将其与 GenBank 中现有的四个叶苔目物种(*Bazzania praerupta* (Reinw., Blume et Nees) Trevis.、*Heteroscyphus argutus* (Reinw., Blume et Nees) Schiffn.、*Herbertus javanicus* (Steph.) H. A. Mill. 和 *Plagiochila chinensis* Steph.)进行基因组比较。研究结果表明:(1)裂萼苔叶绿体基因组全长 116988 bp,GC 含量为 33.9%,呈典型的四分体结构,共注释 130 个基因,其中包括 85 个编码基因、37 个 tRNA 基因和 8 个 rRNA 基因;(2)共检测到 35 个简单序列重复(SSRs),其中以单核苷酸(A/T)为主,且发现 36 个散在重复序列,回文重复最为丰富;(3)IR 边界分析显示,裂萼苔与其他四个叶苔目物种在 JLB、JSB 和 JSA 边界具有显著差异;(4)筛选出四个高度变异的基因或区域,分别为 trnQ(UUG)-trnK(UUU)、cysT-trnL(UAG)、ycf1-1-trnN(GUU)和 ycf2,它们可以作为叶苔目的分子标记,未来可用于该类群的系统发育研究;(5)基于 rbcL 标记的系统发育分析表明,裂萼苔与该属中 *Chiloscyphus pallescens* 的亲缘关系较近。本研究为裂萼苔的叶绿体基因组结构、系统发育以及进化动态提供了宝贵的数据支持。同时为裂萼苔的分类学研究、物种进化探讨以及植物登陆的进一步研究提供了重要的理论依据。

关键词: 裂萼苔,特征分析,核苷酸多态性,系统发育分析

中图分类号:Q949　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1003-6563(2025)05-0022-09

Analysis of chloroplast genome structure of *Chiloscyphus polyanthos*(L.)Corda*

KONG Lingxiong[1], HU Rong[2], HUANG Dingxu[1], LIANG Sheng[1], HE Qinqin[1], LIU Bangyou[1], ZHANG Tingyue[1], SONG Yunqi[2], XIANG Youliang[2▲], PENG Tao[2]

([1]*Guizhou Chishui Alsophila National Nature Reserve, Chishui 564700, China*;[2]*School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China*)

Abstract: *Chiloscyphus polyanthos*(L.)Corda, classified within the family Lophocoleaceae of the order Jungermanniopsida, represents a bryophyte species capable of thriving in both aquatic and terrestrial environments. This

[14] 吴菲菲. 麻阳河国家级自然保护区蕨类植物研究[D]. 贵阳:贵州大学,2015.

[15] 王晖,魏奇,吴菲菲,等. 梵净山自然保护区蕨类植物的区系特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2014,32(4):22-28.

收稿日期:2024-11-25;**修回日期:**2024-11-25

基金项目:贵州省植物园园基金:贵州省水龙骨科植物引种保育研究(2022〔02〕号)。

作者简介:何选泽(1993-),男,硕士,助理研究员,研究方向:植物分类学。

▲**通讯作者:杨加文**(1983-),男,硕士,高级工程师,研究方向:植物分类学,植物资源学,珍稀植物的引种保育。

versatility renders it a crucial subject for studies on plant land colonization and evolutionary processes. In the present study, we conduct a comprehensive analysis of the chloroplast genome structure and phylogenetic relationships of *Chiloscyphus polyanthos*, comparing it with four other species from Jungermanniopsida available in GenBank, namely *Bazzania praerupta* (Reinw., Blume et Nees) Trevis., *Heteroscyphus argutus* (Reinw., Blume et Nees) Schiffn., *Herbertus javanicus* (Steph.) H. A. Mill. and *Plagiochila chinensis* Steph. The key findings of the study are summarized as follows: (1) The chloroplast genome of *Chiloscyphus polyanthos* has a length of 116,988 base pairs, with a GC content of 33.9%, and exhibits a typical quadripartite structure. The genome annotation has identified 130 genes, including 85 protein-coding genes, 37 tRNA genes, and 8 rRNA genes. (2) The analysis of simple sequence repeats (SSRs) has revealed 35 repeats, with single-nucleotide motifs (primarily A/T) predominating. Additionally, 36 dispersed repetitive sequences are identified, with palindromic repeats being the most abundant. (3) Examination of the inverted repeat (IR) boundary regions demonstrates significant differences between *Chiloscyphus polyanthos* and the other four Jungermanniopsida species, particularly at the JLB, JSB, and JSA boundaries. (4) Four highly variable genes or regions have been identified: trnQ(UUG)-trnK(UUU), cysT-trnL(UAG), ycf1-1-trnN(GUU) and ycf2. These regions can serve as molecular markers for Jungermanniopsida and hold potential for future phylogenetic studies. (5) Phylogenetic analysis based on the rbcL marker indicates that *Chiloscyphus polyanthos* shares a close evolutionary relationship with *Chiloscyphus pallescens*. The findings of this study contribute valuable data to the understanding of the chloroplast genome structure, phylogeny, and evolutionary dynamics of *Chiloscyphus polyanthos*. Furthermore, these results offer important theoretical support for advancing taxonomic research, elucidating species evolution, and investigating plant land colonization in bryophytes.

Keywords: *Chiloscyphus polyanthos* (L.) Corda, characteristic analysis, nucleotide diversity (Pi), phylogenetic analysis

1 绪论

1.1 苔藓植物简介

苔藓植物被认为是最初从水生过渡到陆生的高等植物类群[1],在地球的发展历程中至少经历了4.5亿年[2]。苔藓植物作为高等植物中最原始的类群,在高等植物中的物种数量仅次于被子植物,是第二大类群[3]。据不完全统计,全世界苔藓植物约有21000种[4]。苔藓植物的植物体体形小,结构简单;具明显的世代交替的生活史;配子体发达,孢子体寄生在配子体上;后代生活力强,能够适应恶劣的生存环境[5];其主要生境为岩石表面、树干、土壤。苔藓植物在促进土壤的形成、增强土壤肥力、防止水土流失、环境监测等方面发挥了重要作用:1)能通过捕获风吹来的有机和无机物质,通过直接贡献未分解的有机物以及分泌化学物质酸解岩石来促进土壤的形成[6]。2)苔藓植物没有真正的根,只有假根,假根上有大量的细菌与之共生,形成菌根,部分细菌共生可在假根外形成菌丝,伸入土壤,将土壤微粒团聚在假根周围,并且苔藓植物的假根与其菌根能够分泌大量有机酸和矿物质,进而提高土壤肥力[7]。3)苔藓植物没有维管组织的分化,且茎叶细小,故而水分在苔藓体内运输的速度较慢,表面水分蒸发量少,密集的苔藓层更是天然的保水屏障,加之假根能够固定土壤,因此,苔藓植物能够有效防止水土流失[7],从而在群落演替中起到先锋植物的作用。4)苔藓植物是生态系统的重要组成部分,在陆地生态系统碳循环、氮循环以及磷循环中具有重要作用[1]。5)此外,苔藓植物与其他生物类群密切相关,能够起到保护和促进生物多样性的作用[8-9];并且由于苔藓植物对环境变化敏感,可对环境污染起指示作用,应用于污染的生物监测研究[10-12]。

1.2 裂萼苔概述

1.2.1 系统发育位置

裂萼苔[*Chiloscyphus polyanthos* (L.) Corda]隶属于叶苔目(Jungermanniales)齿萼苔科(Lophocoleaceae)裂萼苔属(*Chiloscyphus*),该属共有21个物种[13]。

1.2.2 形态特征

植物体中等大小,丛生,绿色、黄绿色或淡绿色;假根少,茎匍匐或先端上升,具叶;叶片圆方形或长方形,斜生茎上,内凹背凸,近勺状,先端微凹或凹,长大于宽,中部细胞近方形或短矩形,基部细胞稍长,细胞壁薄,角质层平滑,无三角体,每个细胞 2 ~ 3 个油体;腹叶小,与茎同宽或略小于茎,2 裂至叶长 1/2 ~ 1/3,裂片呈长刺状,两侧常各有一长齿;雌雄同株,雄苞常生于雌苞近处茎上,雄苞叶 8 ~ 15 对,基部膨大成囊状,每个雌苞叶具 1 ~ 2 个精子器;雌苞生于叶腋侧短枝上;蒴萼高脚杯状,口呈三裂瓣,边缘光滑无齿。孢子球形,12 ~ 18 μm;弹丝 2 条,螺纹状加厚。

1.2.3 研究历史和现状

该种最早由林奈于 1753 年发表,命名为 *Jungermannia polyanthus* L.。在 1829 年,Corda 将它归并到裂萼苔属(*Chiloscyphus*)[14]。国内外学者对裂萼苔的研究主要集中在分类研究以及化学成分研究上。至目前,已经有许多人对裂萼苔属进行分类学修订[15-16],但是没有人对其叶绿体基因组的结构进行过研究。在化学成分研究上,国内外学者已经从中分离出桉烷型[17-19]、cyperane 型[19]、裂萼苔烷型[20-21]、对凹顶藻烷型[20]、愈创木烷型等倍半萜类化合物[22],二萜和三萜类化合物[22]以及多种木脂素类化合物[23]。

近年来,随着生物信息学的成熟和测序成本的降低,拥有独立遗传、物种全部遗传信息、结构简单、准确性高等特点的叶绿体基因组的发展变得更加迅速,更多的学者偏向利用叶绿体基因组去解决物种的鉴定、不同物种间的亲缘关系以及属间的系统发育和进化等问题[24],本研究将基于叶绿体基因组信息探讨裂萼苔的叶绿体基因组结构、比较其和同目(叶苔目)下另外 4 个属物种的叶绿体基因组结构差异,并基于叶绿体基因组中的 *rbc*L 位点探讨其系统发育位置。

1.3 研究意义和内容

苔藓植物是生态系统中重要的组成部分,被认为是从水生过渡到陆生的最早的高等植物类群。裂萼苔适应性广泛,在世界大部分地区都有分布,是苔藓中既能水生又能陆生的物种,可作为研究植物登陆和适应复杂环境的重要类群。本研究旨在探讨裂萼苔叶绿体基因组结构以及与其同目的 4 个物种比较区别。为今后裂萼苔的分类研究、物种进化以及进一步研究植物登陆提供了理论基础。

2 材料与方法

2.1 研究材料

本研究所用植物材料裂萼苔[*Chiloscyphus polyanthos*(L.)Corda]样本于 2023 年 8 月在新疆阿勒泰地区清河县(47°30′8.05″N,89°27′55.25″E,海拔 2120 m)采集,标本现存于贵州师范大学植物标本馆(标本编号:20230818-7;采集人:向友良)。

2.2 实验方法

2.2.1 植物总 DNA 提取、叶绿体基因组测序

将采集的材料用纯净水洗净,借助解剖镜挑出杂质,洗净的材料放置在变色硅胶中密封保存一段时间,待水分吸干后将植物材料送至华大公司提取 DNA、测序。

2.2.2 叶绿体基因组组装、注释与图谱绘制

得到测序数据后,用 GetOrganelle 软件完成组装。组装后使用在线软件 GeSeq 进行叶绿体基因组注释,得到注释结果 1,从 NCBI(https://www.ncbi.nlm.nih.gov/)数据库下载 *Pellia endiviifolia* 的叶绿体基因组序列,Genebank 登录号为 JX827163,利用在线软件 CPGAVAS2 以 *Pellia endiviifolia* 叶绿体基因组为参考进行叶绿体基因组注释,得到注释结果 2,将两个注释结果以及 *Pellia endiviifolia* 叶绿体基因组在 Geneious 软件上进行检查和手动校正,得到最终注释结果。组装注释后的结果利用在线软件 OGDRAW 绘制叶绿体基因组图谱。

2.2.3 重复序列分析

2.2.3.1 简单重复序列分析

利用在线软件 MISA 对简单重复序列进行检测和统计分析,各重复单元对应的检测参数设置最少重复次数分别为 1-10、2-5、3-4、4-3、5-3、6-3,两个 SSR 之间的最小间隔距离设置为 100 bp。

2.2.3.2 散在重复序列分析

使用在线软件 REPuter 对裂萼苔叶绿体基因组

中散在重复序列进行分析,检测类型为回文重复(palindromic,P)、正向重复(forward,F)、反向重复(reverse,R)和互补重复(complementary,C)。参数设置:最小重复长度为30,最大计算重复次数为50,Hamming距离为3。

2.2.4 叶苔目5个叶绿体基因组序列基本信息比较分析

从NCBI数据库下载已公布的4个叶苔目物种的叶绿体基因组序列,具体物种信息见表1。将裂萼苔(*Chiloscyphus polyanthos*(L.)Corda)叶绿体基因组序列与4个叶苔目物种(*Heteroscyphus argutus*, *Plagiochila chinensis*, *Herbertus javanicus*, *Bazzania praerupta*)的叶绿体基因组序列进行比对,利用Geneious软件确定并比较各序列大单拷贝区(LSC)、小单拷贝区(SSC)以及反向重复区(IR)的长度和GC含量与基因类型。

表1 物种信息

物种名	GeneBank登录号
Heteroscyphus argutus	NC_043788
Plagiochila chinensis	MH064511
Herbertus javanicus	MW429507
Bazzania praerupta	MH064512

2.2.5 IR区边界分析

采用IRscope(https://irscope.shinyapps.io/irapp/)在线软件对裂萼苔以及4个叶苔目物种进行IR区边界收缩和扩张分析。

2.2.6 核苷酸多态性分析

在Geneious软件中利用MAFFT插件对裂萼苔与叶苔目4个物种进行序列比对,利用DNAsp软件完成核苷酸多态性分析,设置窗口长度(Window length)为600 bp,步长(Step size)为200 bp。

2.2.7 系统发育分析

从NCBI下载得到40个rbcL基因序列样本,其中裂萼苔属31个,其余为外类群,具体信息见表2。基于叶绿体基因组rbcL位点,将组装得到的裂萼苔序列与下载的31个裂萼苔属(*Chiloscyphus*)样本,以异萼苔属(*Heteroscyphus*)5个物种为外类群,使用IQ-TREE2软件构建系统发育树,其中modelfinder选择最佳模型为TIM3+F+I+G4。

表2 样本信息

物种名	采集地	GeneBank登录号
Chiloscyphus novae-zeelandiaevar. grandistipulus	——	FJ173314
Chiloscyphus novae-zeelandiae	New Zealand	KT992598
Chiloscyphus sabuletorum	*Chile*	DQ312488
Chiloscyphus sp.	Colombia	KF852401
Lophocolea difformis	Sao Tome and Principe: Sao Tome Island	KT992583
Chiloscyphus lentus	——	FJ173312
Chiloscyphus austrigenus	——	FJ173310
Chiloscyphus sp.	——	FJ173317
Chiloscyphus fragmentissimus	Venezuela	DQ312480
Chiloscyphus itoanus	China: Hunan Prov., Jiangyong Co.	AY149846
Chiloscyphus profundus	Finland: Nuukisio National Park	AY149852
Chiloscyphus semiteres	Australia	DQ312489
Chiloscyphus semiteres	——	FJ173315
Chiloscyphus semiteres	New Zealand	JF316334
Chiloscyphus fragrans	Portugal: Azores	DQ312484
Chiloscyphus muricatus	Australia	DQ312486
Chiloscyphus cucullistipulus	Chile	KT992578
Chiloscyphus vermicularis	Dominican Republic	KT992588
Chiloscyphus fasciculatus	South Africa	KT992579
Chiloscyphus humilis	Chile	KT992587
Chiloscyphus polyanthos	USA: Utah	DQ268969
Chiloscyphus polyanthos	Finland: Nuuksio National Park	AY149851
Chiloscyphus polyanthos	Germany	AM392318
Chiloscyphus pallescens	Germany	AY699992
Chiloscyphus pallescens	Germany: Bavaria, Mangfalltal	MK478419
Chiloscyphus pallescens	Poland:Silesian upland	AY149849
Chiloscyphus connatus	Costa Rica	DQ312483
Chiloscyphus helmsianus	——	FJ173311
Chiloscyphus leucophyllus	——	FJ173313
Chiloscyphus spinifer	——	FJ173316
Chiloscyphus martianus	Ecuador	DQ312485
Heteroscyphus aselliformis	Malaysia: Borneo, Sabah	AY149841
Heteroscyphus splendens	Papua New Guinea: E de Mom Prov.	AY149854
Heteroscyphus inflatus	Nepal: Sankhuwasabha District	AY149853
Heteroscyphus coalitus	Nepal: Sankhuwasabha District	AY149844

续表 2

物种名	采集地	GeneBank 登录号
Heteroscyphus zollingeri	China: Hunan Prov., Yan-Ling Co.	AY149856
Bazzania praerupta	China	MH064512
Herbertus javanicus	China	MW429507
Plagiochila asplenioides	Finland: Nuuksio National Park	AY149839
Heteroscyphus planus	Japan: Honshu, Gifu-ken	AY149850

3 结果与分析

3.1 裂萼苔(*Chiloscyphus polyanthos*(L.)Corda)叶绿体基因组基本特征

裂萼苔叶绿体基因组全长 116988 bp,GC 含量为 33.9%,包含一个长度为 80713 bp,GC 含量为 31.9% 的大单拷贝区 LSC,一个长度为 18255 bp,GC 含量为 30.1% 的小单拷贝区 SSC,以及两个长度为 9,010 bp,GC 含量为 46.3% 的反向重复区 IR,是典型的四分体结构(图 1)。

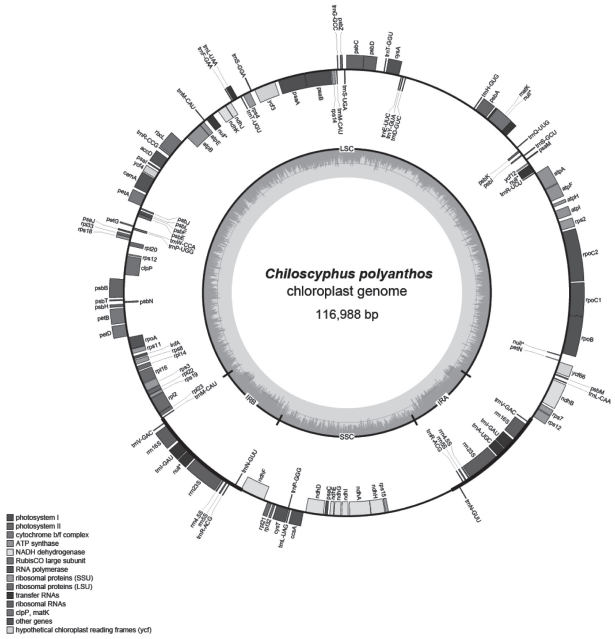


图 1 裂萼苔叶绿体基因组图谱

通过对裂萼苔叶绿体基因组的注释,共得到 130 个基因(表 3),包括 85 个编码基因、37 个 tRNA 基因以及 8 个 rRNA 基因。获得的 130 个基因中,有 21 个基因(13 个编码基因和 8 个 tRNA 基因)含有内含子,其中有 2 个编码基因(ycf3、clpP)包含两个内含子,19 个基因包含一个内含子。此外,在所有基因中,有 5 个 tRNA 基因和 4 个 rRNA 基因存在两个拷贝,1 个 tRNA 基因存在 3 个拷贝。

表 3 裂萼苔叶绿体基因组基因功能分类统计表

基因分类	基因功能	基因名称
光合合成	光合系统 I 基因	psaA, psaB, psaC, psaI, psaJ, psaM
	光合系统 II 基因	psbA, psbB, psbC, psbD, psbE, psbF, psbH, psbI, psbJ, psbK, psbL, psbM, psbN, psbT, psbZ
	NADH 脱氢酶基因	ndhA*, ndhB*, ndhC, ndhD, ndhE, ndhF, ndhG, ndhH, ndhI, ndhJ, ndhK
	细胞色素 b/f 复合物	petA, petB*, petD*, petG, petL, petN
	ATP 合成酶基因	atpA, atpB, atpE, atpF*, atpH, atpI
	rubisco 大亚基基因	rbcL
自我复制	核糖体大亚基	rpl2*, rpl14, rpl16*, rpl20, rpl21, rpl22, rpl23, rpl32, rpl33, rpl36
	核糖体小亚基	rps11, rps12*, rps14, rps15, rps18, rps19, rps2, rps3, rps4, rps7, rps8
	RNA 聚合酶亚基基因	rpoA, rpoB, rpoC1*, rpoC2
	核糖体 RNA 基因	rrn16(2), rrn23(2), rrn4.5(2), rrn5(2)
	转运 RNA 基因	trnA-UGC*(2), trnI-GAU*(2), trnR-ACG(2), trnN-GUU(2), trnV-GAC(2), trnM-CAU(3), trnC-GCA, trnD-GUC, trnE-UUC, trnF-GAA, trnG-GCC, trnG-UCC*, trnH-GUG, trnK-UUU*, trnL-CAA, trnL-UAA*, trnL-UAG, trnP-GGG, trnP-UGG, trnQ-UUG, trnR-CCG, trnR-UCC, trnS-GCU, trnS-GGA, trnS-UGA, trnT-GGU, trnT-UGU, trnV-UAC*, trnW-CCA, trnY-GUA
其他功能	成熟酶	matK
	蛋白酶	clpP**
	囊膜蛋白基因	cemA
	乙酰辅酶 A 羧化酶亚基基因	accD
	c 型细胞色素合成基因	ccsA
	转录起始因子基因	infA
未知功能	假定叶绿体阅读框基因	ycf1-1, ycf1-2, ycf2, ycf3**, ycf4, ycf12, ycf66*
		cysA, cysT*

注:上标(2)表示有两个拷贝;(3)表示有三个拷贝;*表示有一个内含子;**表示有两个内含子。

3.2 重复序列分析

在裂萼苔叶绿体基因组中共检测到 35 个 SSRs(图 2),其中单核苷酸(A/T 和 C/G)的重复最多,共有 15 个,占比 42.86%,其次是二核苷酸(AT/AT)的重复,有 11 个,四核苷酸重复(AAAC/GTTT、AAAG/CTTT、AAAT/ATTT、ACCT/AGGT)5 个,三核苷酸重复(AAT/ATT)4 个,未发现五核苷酸重复和六核苷酸重复。在各类 SSR 类型中,优势基序分别为 A/T、AT/AT、AAT/ATT、AAAT/ATTT,可见,各类型主要由 A/T 碱基组成,对 A/T 碱基明显具有偏好性。

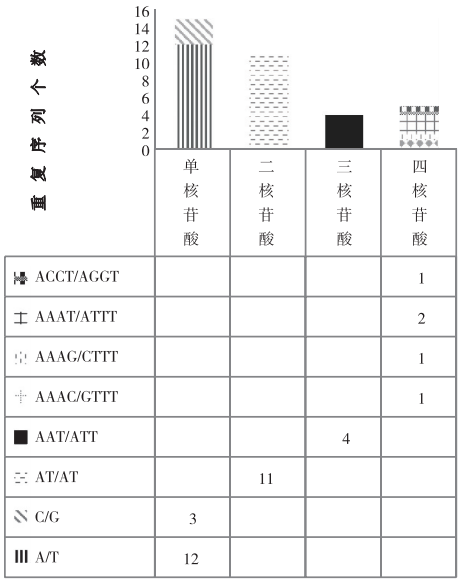


图 2 裂萼苔叶绿体基因组 SSRs 类型及数量

利用 REPuter 在线软件在裂萼苔叶绿体基因组中共检测到 36 个散在重复序列(图 3),其中包括 30 个回文重复(palindromic repeat)、5 个正向重复(forward repeat)和 1 个反向重复(reverse repeat)。未检测到互补重复(complementary repeat)。重复序列的长度集中在 31 bp、32 bp、40 bp,占比都为 16.67%。同一重复长度且只有一个散在重复序列的,该重复序列类型都为 P 型。

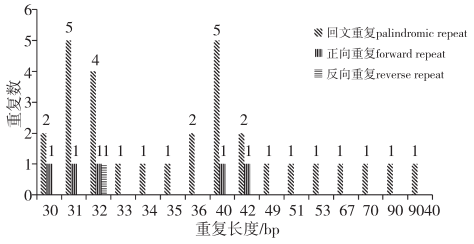


图 3 裂萼苔叶绿体基因组散在重复序列类型及数量

3.3 叶苔目 5 个物种的叶绿体基因组比较分析

裂萼苔与 4 个叶苔目物种叶绿体基因组基本特征见图 4,这 5 个叶苔目物种的叶绿体基因组均为典型的四分体结构,长度为 116988 ~ 120158 bp。其中,裂萼苔是 5 个种中总长度最短的,为 116988 bp。GC 含量均为 IR>LSC>SSC。裂萼苔与 *Plagiochila chinensis* 和 *Heteroscyphus argutus* 两个种的大单拷贝区(LSC)与小单拷贝区(SSC)的 GC 含量的相似,且该 3 个种的 SSC 区长度明显短于另外两个种。

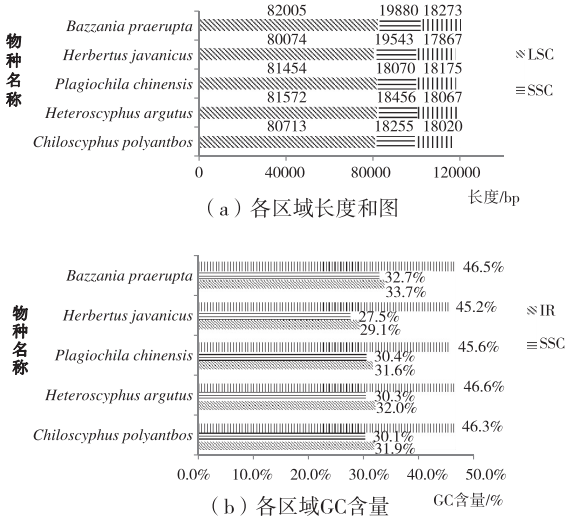


图 4 叶苔目五个物种的叶绿体基因组

以裂萼苔(*Chiloscyphus polyanthos* (L.) Corda)叶绿体基因组为参照,分别与 4 个叶苔目物种叶绿体基因组比较(表 4)。结果表明,裂萼苔与 4 个物种叶绿体基因组相比都缺少了 chlB、chlN、chlL 基因,多了一个 trnP-GGG 基因。比 *Heteroscyphus argutus*、*Plagiochila chinensis* 和 *Bazzania praerupta* 物种多了 cysT 和 ycf1-2 基因。

表 4 4 个叶苔目物种与裂萼苔基因差异信息统计

物种名称	新 增	缺 失
Heteroscyphus argutus	chlB,chlN,chlL	cysT,trnP-GGG,ycf1-2
Plagiochila chinensis	chlB,chlN,chlL	cysA,cysT,trnP-GGG,ycf1-2
Herbertus javanicus	chlB,chlN,chlL	trnP-GGG
Bazzania praerupta	chlB,chlN,chlL	cysA,cysT,trnP-GGG,ycf1-2

3.4 IR 区边界分析

对 5 个物种叶绿体基因组 IR 区边界进行比较

分析(图 5),5 个物种叶绿体基因组的 IR 区长度范围为 17867 ~ 18273 bp。除裂萼苔(*Chiloscyphus polyanthos*(L.)Corda)外,其余物种的 JLB 边界(LSC 区与 IRb 区边界)均位于 trnI 和 trnV 基因之间,但与这两个基因的距离存在差异,裂萼苔的 JLB 边界位于 trnM 基因中。JSB 边界(IRb 区与 SSC 区边界)全部位于 ndhF 基因中,裂萼苔距离 ndhF 基因左端 110 bp,而其他 4 个物种均距离 ndhF 基因左端 68 ~ 72 bp。JSA 边界(SSC 区与 IRa 区边界)位于 chIL 基因中,而裂萼苔在该边界未见 chIL 基因,且 *Heteroscyphus argutus* 和 *Plagiochila chinensis* 的 chIL 基因长度明显较短。JLA 边界(IRa 区与 LSC 区边界)除 *Heteroscyphus argutus* 外,均位于 trnV 基因右边,距离存在差异,*Heteroscyphus argutus* 在该处未见 trnV 基因。

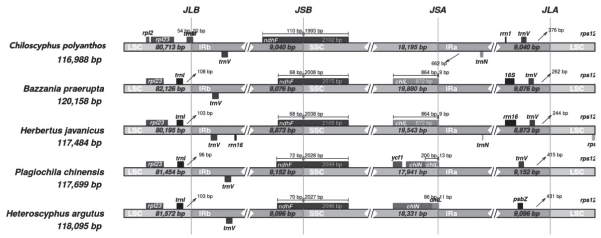


图 5 叶苔目 5 个物种的叶绿体基因组的 IR 区边界分析

3.5 核苷酸多态性分析

核苷酸多态性分析显示(图 6),核苷酸多态性值(*Pi*)的范围为 0.00517 ~ 0.322,平均值为 0.11692,将图中 *Pi* 值>0.25 的峰值认定为核苷酸多态性高可变区域,共检测到 4 个高可变区,分别为位于 LSC 区的 trnQ(UUG)-trnK(UUU)区和 ycf2 基因以及位于 SSC 区的 cysT-trnL(UAG)和 ycf1-1-trnN(GUU)区域。

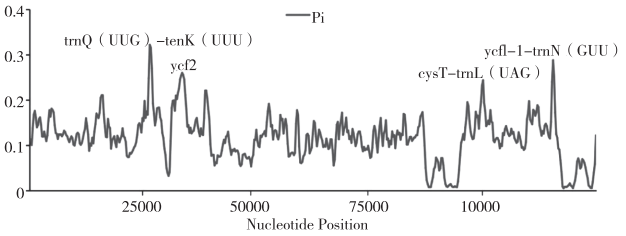


图 6 叶苔目 5 个物种叶绿体基因组的核苷酸多态性分析

3.6 系统发育分析

选取裂萼苔属(*Chiloscyphus*)32 份样本(包括本研究获得的裂萼苔叶绿体基因组序列),以叶苔目下亲缘关系较近的 *Bazzania praerupta*、*Herbertus javanicus*、*Plagiochila asplenioides*、*Heteroscyphus planus*、*Heteroscyphus aselliformis*、*Heteroscyphus splendens*、*Heteroscyphus inflatus*、*Heteroscyphus coalitus*、*Heteroscyphus zollingeri* 作为外类群,选取叶绿体基因片段 rbcL,利用最大似然法构建系统发育树(图 7)。结果表明:rbcL 基因片段包含 1226 个碱基位点,其中保守信息位点 911 个,简约信息位点 188 个,变异信息位点 127 个。裂萼苔与 *Chiloscyphus polyanthos*(USA:Utah)聚为一支,与 *Chiloscyphus pallescens* 为姐妹群关系(MLBS=78)。

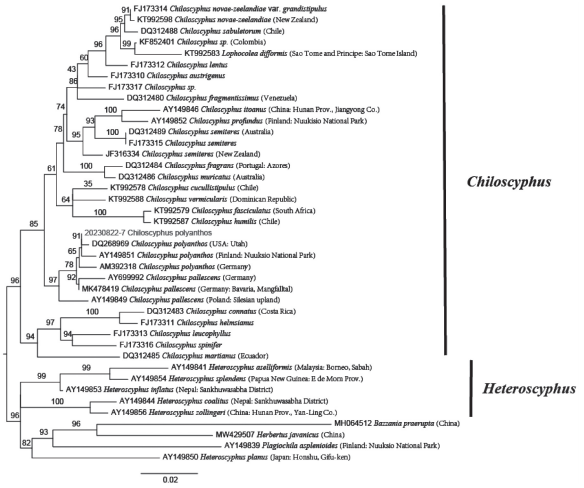


图 7 基于 rbcL 构建的裂萼苔属 ML 系统发育树

4 讨论与结论

大多数植物的叶绿体基因组是由一个大单拷贝区、一个小单拷贝区和两个反向重复区组成,为四分体结构,高等植物的叶绿体基因组长度大小范围一般为 110 ~ 160 kb[24]。本研究首次对裂萼苔叶绿体基因组进行测序、组装、注释以及基本特征分析,结果显示:裂萼苔叶绿体基因组全长为 116988 bp,总 GC 含量为 33.9%,是典型的四分体结构,与大多数高等植物的结构和长度一致。在裂萼苔叶绿体基因组中共注释到 130 个基因,其中包括 85 个编码基因、37 个 tRNA 基因以及 8 个 rRNA 基因。

重复序列是指在整个基因组中以多个拷贝出现的单个相同或者对称的核酸序列[26]。本研究中主要分析了裂萼苔叶绿体基因组中的简单重复序列和散在重复序列。简单重复序列(SSRs)在基因组序

列中分布广泛,具有非重组、单倍体和单亲遗传以及高突变的特性,因此,常作为遗传标记,用于遗传变异研究[27]。散在重复序列是基因组大小变异的来源[28]。在裂萼苔叶绿体基因组中,共检测到 35 个 SSRs,其中单核苷酸重复 15 个,二核苷酸重复 11 个,三核苷酸重复 4 个,四核苷酸重复 5 个,未发现五核苷酸重复和六核苷酸重复。在各类 SSR 类型中,优势基序分别为 A/T、AT/AT、AAT/ATT、AAAT/ATTT,推测裂萼苔叶绿体基因组 SSR 对 A/T 碱基使用具有偏好。散在重复序列共检测到 3 种 36 个,未检测到互补重复。

将裂萼苔与 4 个叶苔目物种叶绿体基因组基本信息进行统计与比较,结果显示,裂萼苔叶绿体基因组总长度是 5 个物种中最短的,基因组 GC 含量基本一致,这可能与裂萼苔较其他种的基因组成差异有关,裂萼苔与其余 4 种物种基因组成比较发现,裂萼苔比该 4 个基因组都少了 chlB、chlN、chlL 基因,多了一个 trnP-GGG 基因,chlB、chlN、chlL 三个基因在基因功能分类上属于光合合成中行使叶绿素合成功能的基因。在缺失这三个基因上,裂萼苔与鸡矢藤[29]、中甸刺玫[30]、西南牡蒿[31]等被子植物相似,却又比它们多了 cysA、cysT 与 trnP-GGG 基因。IR 边界可作为比较物种叶绿体基因组差异的重要指标,IR 区可能会发生扩张和收缩,从而引起 IR/SC 连接位置的变化,进而导致叶绿体基因组总长度的变化[32]。这些差异可能会导致假基因的产生、基因重复或基因缺失[25]。5 个物种 IR 边界分析结果显示出裂萼苔与其余物种分别在 JLB 边界、JSB 边界和 JSA 边界有明显的差异。JSA 边界在 chlL 基因内,chlN 基因在 chlL 基因旁边,裂萼苔与 *Heteroscyphus argutus*、*Plagiochila chinensis* 物种的 SSC 区长度明显短于其余两个物种的 SSC 区长度,可能是因为 SSC 区的变化,导致裂萼苔缺失 chlN 和 chlL 基因以及 *Heteroscyphus argutus* 和 *Plagiochila chinensis* 的 chlL 基因长度较短。对这 5 个物种进行核苷酸多态性分析,检测到 4 个高可变异的基因或区域,分别为 trnQ(UUG)-trnK(UUU)、cysT-trnL(UAG)、ycf1-1-trnN(GUU)和 ycf2,全部位于 SC 区域,可见裂萼苔叶绿体基因组 IR 区相比 SC 区更保守。基于 rbcL 位点,构建系统发育树,结果表明,裂萼苔与 *Chiloscyphus polyanthos*(USA:Utah)聚为一支,与 *Chiloscyphus pallescens* 为姐妹群关系(MLBS=78)。

综上所述,本研究首次对裂萼苔叶绿体全基因组进行测序、组装和注释,并分析了裂萼苔 GC 含量、重复序列等基本特征,在此基础上,将裂萼苔与其同目的 4 个物种进行比较分析,基于 rbcL 基因,探讨裂萼苔在裂萼苔属的进化位置。为今后裂萼苔的分类研究、物种进化以及进一步研究植物登陆提供了理论支持。

5 展望与不足

本研究得到了裂萼苔叶绿体全基因组序列,对其重复序列、IR 边界、核苷酸多态性等进行了分析,检测出 35 个 SSR 位点,36 个散在重复序列以及 4 个高变异区域,并基于 rbcL 位点,对裂萼苔系统发育位置进行探讨。在对裂萼苔系统发育位置研究时,由于 NCBI 数据库中缺少检测出的高变异基因数据,所以选择了 rbcL 基因,今后可完善高变异基因数据再对裂萼苔系统发育位置进行研究。在此基础上,比较裂萼苔与其他苔藓之间的差异,探讨裂萼苔区别于其他苔藓既能水生又能陆生的原因。

参考文献【REFERENCES】

[1] 田维莉,孙守琴. 苔藓植物生态功能研究新进展[J]. 生态学杂志,2011,30(6):1265-1269.

[2] DELWICHE C F,COOPER E D. The evolutionary origin of a terrestrial flora[J]. Current biology,2015,25(19):R899-R910.

[3] 师雪芹,王健. 安徽省苔藓植物名录[J]. 生物多样性,2021,29(6):798-804.

[4] 杜兴兰. 河北塞罕坝自然保护区苔藓植物初步调查与区系分析[J]. 安徽农学通报,2018,24(12):81-82.

[5] 钟世梅. 苔藓植物在贵州不同环境下的适应表达[D]. 贵阳:贵州大学,2016.

[6] 左倩孺. 燕山北部山地苔藓植物多样性[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2022.

[7] 朱华清,江子彦,鲍麒麟,等. 苔藓植物的环境生态功能分析研究综述[J]. 广州化工,2010,38(5):13-16.

[8] 查广才,梁来荣,周昌清. 苔藓土壤节肢动物群落及其多样性[J]. 生态学报,2003(6):1057-1062.

[9] 李胜东. 苔藓植物在桂北石灰岩矿山边坡生态修复中的应用[D]. 桂林:桂林理工大学,2023.

[10] 冉江游,叶丽,黄帅,等. 苔藓指示大气重金属铅沉降的机制和采样策略优化[J]. 四川农业大学学报,2023,41(3):471-480.

[11] 周卉. 环境监测中的生物监测技术应用对策研究[J]. 皮革制作与环保科技,2023,4(22):33-35.

[12] 侯梦丹. 基于转录组狭叶泥炭藓响应铬胁迫关键基因挖掘及其功能验证[D]. 贵阳:贵州师范大学,2023.

[13] 中国生物物种名录 2023 版[DB/OL]. [2024-11-05]. http://www.sp2000.org.cn.

[14] JÄRVINEN I. Taxonomy and distribution of the European taxa of the genus *Chiloscyphus* (Hepaticae, Geocalycaceae)[C]//Annales Botanici Fennici. Finnish Botanical Publishing Board,1983:87-99.

[15] 周国艳. 中国裂萼苔属—异萼苔属—齿萼苔属类群植物的分类修订[D]. 杭州:杭州师范大学,2011.

[16] 高谦. 中国苔藓志:第十卷[M]. 北京:科学出版社,2008.

[17] MA B,LU Z Q,GUO H F,et al. Rearranged calamenene and eudesmane sesquiterpenoids from two Chinese liverworts[J]. Helvetica chimica acta,2007,90(1):52-57.

[18] XIE C F,SUN B,GUO D X,et al. Terpenoids from the Chinese liverwort *Chiloscyphus polyanthus*[J]. Helvetica chimica acta,2011,94(3):534-538.

[19] JIAOZHEN Z,YONGJIE W,RONGXIU Z,et al. Cyperane and eudesmane-type sesquiterpenoids from Chinese liverwort and their anti-diabetic nephropathy potential[J]. RSC advances,2018,8(68):39091-39097.

[20] HARRISON L J,ASAKAWA Y. Oppositane and chiloscyphane sesquiterpenoids from the liverwort *Chiloscyphus pallescens*[J]. Phytochemistry,1991,30(11):3806-3807.

[21] WU C,GUNATILAKA A L,MCCABE F L,et al. Bioactive and other sesquiterpenes from *Chiloscyphus rivularis*[J]. Journal of natural products,1997,60(12):1281-1286.

[22] 张教真,娄红祥. 裂萼苔水生变种化学成分[J]. 山东大学学报(医学版),2019,57(3):38-41.

[23] CULLMANN F,SCHMIDT A,SCHULD F,et al. Lignans from the liverworts *Lepidozia incurvata*, *Chiloscyphus polyanthos* and *Jungermannia exsertifolia ssp. cordifolia*[J]. Phytochemistry,1999,52(8):1647-1650.

[24] 林楚航,韩俊艳,闫小玲. 叶绿体基因组的应用及前景展望[J/OL]. 分子植物育种[2024-11-05]. https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230703.1048.002.html.

[25] 邓永彪,张进,蓝伦礼,等. 珍稀濒危植物越南小花金花茶的叶绿体基因组特征分析[J]. 广西植物,2024,44(1):30-42.

[26] 张瑞,张天留,宋美华,等. 重复序列在牛亚科中的研究进展[J]. 中国畜牧杂志,2021,57(4):33-38.

[27] GUI L,JIANG S,XIE D,et al. Analysis of complete chloroplast genomes of Curcuma and the contribution to phylogeny and adaptive evolution[J]. Gene,2020,732:144355.

[28] 林汇源,何楚扬,张启赢,等. 植物基因组重复 DNA 序列与基因组大小[J/OL]. 分子植物育种[2024-11-05]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230425.1450.019.html.

[29] 吴民华,吴子健,叶晓霞,等. 鸡矢藤叶绿体基因组分析[J]. 河南农业科学,2024,53(1):70-77.

[30] 王其刚,曹世睿,王慧纯,等. 中甸刺玫的叶绿体基因组特征及种内变异[J]. 广西植物,2025,45(1):15-30.

[31] 李志芳,陈丽玲,罗淑洁,等. 西南牡蒿叶绿体基因组特征及系统发育分析[J]. 广西植物,2024,44(9):1732-1745.

[32] 杨俏俏,姜梅,王立强,等. 药食两用菖头叶绿体基因组解析、比较基因组学及系统发育研究[J]. 药学学报,2019,54(1):173-181.

收稿日期:2024-12-05;**修回日期**:2025-01-03

基金项目:赤水桫椤国家级自然保护区药用植物调查项目。

作者简介:**孔令雄**(1970-),男,专科,工程师,主要从事生物多样性保护工作。

▲**通讯作者**:**向友良**(1991-),讲师,理学博士,主要从事苔藓植物学研究工作。

芩连解毒合剂提取工艺及质量控制研究*

陈 娅[1],罗玉玲[2],杨元凤[2],陈永敏[2],高永跃[2▲]
([1] 贵州中医药大学 药学院,贵州 贵阳 550025;[2] 贵州中医药大学 第二附属医院药学部,贵州 贵阳 550003)

摘 要: **目的:**优选芩连解毒合剂提取工艺,并为该制剂的质量标准提供实验依据。**方法:**以黄芩苷含量和出膏率作为评价指标,提取次数、加水倍数和提取时间作为正交试验的考察因素,优选芩连解毒合剂的最佳提取工艺;采用薄层鉴别(TLC)法对黄芩、北柴胡及茯苓进行鉴别,HPLC 法测定黄芩苷含量,建立芩连解毒合剂的质控方法。**结果:**芩连解毒合剂的最佳提取工艺为用水煎煮两次,每次 30 min,每次加水量为药材量的 10 倍。薄层色谱斑点显色清晰,无干扰斑点,专属性强。3 批合剂中黄芩苷平均含量为 2.21 mg/mL。**结论:**该研究建立的提取工艺和定性定量方法可靠,可为芩连解毒合剂质量标准的制定提供实验依据。

关键词: 正交试验,质量控制,薄层色谱法,黄芩苷
中图分类号:R283.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0031-06

Extraction technology and quality control of Qinlian Detoxication Decoction*

CHEN Ya[1], LOU Yuling[2], YANG Yuanfeng[2], CHEN Yongmin[2], GAO Yongyue[2▲]

([1] *School of Pharmacy, Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China*; [2] *Department of Pharmacy, The Second Affiliated Hospital of Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550003, China*)

Abstract: In this study, the extraction process of Qinlian Detoxication Decoction was optimized to provide experimental evidence for its quality standard. With the content of baicalin and the extraction yield as the evaluation indexes, and the extraction times, water amount and extraction time as the factors, the extraction process was optimized by orthogonal test. Thin-layer chromatography (TLC) was used to identify *Scutellaria baicalensis*, *Bupleurum chinense*, and *Poria cocos*, and high-performance liquid chromatography (HPLC) was used to determine the content of baicalin to establish a quality control method for Qinlian Detoxication Decoction. The optimal extraction process: boiling the ingredients with water twice, 30 minutes each time, with the water amount being 10 times of the medicinal materials. The TLC spots were clearly colored without interference, and the specificity was high. The average content of baicalin in the three batches of decoction was 2.21 mg/mL. The extraction process established in this study is stable and reliable, and the qualitative and quantitative methods are convenient and reliable, which can provide experimental evidence for the formulation of the quality standard of Qinlian Detoxication Decoction.

Keywords: orthogonal test, quality control, thin layer chromatography, baicalin

风热感冒由风热邪气引起,主要因外感风热之邪,内侵肺卫所致[1]。治疗风热感冒,旨在清热解毒、宣肺止咳[2]。通过对疫情期间本院治疗新冠肺炎的临床处方药物进行 k-means 聚类算法分析得到本方。该方由黄芩、金银花、连翘、北柴胡和茯苓 5 味药材组成。与治疗风热感冒的经典名方“银翘散”组方思想相似[3]。该方在中医临床治疗中常用于表热夹湿的治疗。其主要活性成分有木犀草素、β

-谷甾醇、茯苓酸、柴胡皂苷、连翘苷等,研究表明,上述活性成分可以靶向 PTGS2、IL6、CASP3[4],并参与抗病毒和抗炎反应相关的 T 细胞活化、病毒受体和炎症反应通路来治疗疾病[5]。该方中黄芩能清热燥湿、凉血解毒[6-7],其有效成分黄芩苷具有抗氧化、抗炎、免疫调节和抗凋亡作用[8]。北柴胡则能疏肝解郁、退热散寒,其主要活性成分柴胡皂苷能抗炎、镇痛[9]。黄芩和北柴胡配伍使用,在治疗风热感冒时,黄芩可以清热解毒,北柴胡可以疏肝解表,两者合用可用于治疗感冒发热、头痛、咽喉疼痛等[10]。金银花具清热解毒、凉血消炎的功效。金银花中的有效成分木犀草素具有较强的抗菌、抗病毒作用[11]。连翘能清热解毒、疏肝解郁,其中连翘苷具有抗炎、抗病毒、调节免疫系统等作用[12]。在中医方剂中,金银花和连翘配伍使用在治疗风热感冒时,金银花可以清热解毒,连翘可以散瘀消肿,两者合用可以更好地治疗感冒发热、头痛、咽喉疼痛等症状[13]。茯苓能利水渗湿[14]。诸药合用,具有祛湿解毒、发散风热的功效,可用于治疗风温夹湿正气不足的普通感冒和时行感冒[15]。本研究主要针对君药黄芩的主要成分黄芩苷,使用薄层色谱法和高效液相色谱法,建立芩连解毒合剂的鉴别与含量测定的质量控制方法。为最大限度地保留原有制剂的优势和特色,计划将此处方制成合剂。通过优化提取和浓缩工艺,提升黄芩苷的含量,并增强患者的用药依从性。此外,这些研究结果将为该制剂的质量标准的制定提供科学依据,并为医疗机构传统中药制剂的开发提供参考。

1 仪器与试药

1.1 仪器

本实验主要使用的仪器与材料见表 1。

表 1 实验仪器与材料

名 称	型 号	生产厂家
高效液相色谱仪	Agilent 1260	美国安捷伦公司
电子天平	TP-320C	惠州市英衡电子科技有限公司
十万分之一天平	AUW220	日本岛津公司
电热恒温水浴锅	BSG-24	上海一恒科学仪器有限公司
数控超声波清洗器	KQ-500DA	昆山市超声仪器有限公司
电热鼓风干燥箱	101-2AB	天津泰斯特仪器有限公司

续表 1

名 称	型 号	生产厂家
暗箱式紫外分析仪	ZF-20D	巩义市予华仪器有限责任公司
点样毛细管	—	上海长城科学仪器商店经销
硅胶 G 薄层板	—	青岛海洋化工有限公司

1.2 药材及试剂

药材信息见表 2,实验所用试剂信息见表 3。

表 2 实验药材

药 材	批 号	厂 家
黄芩	231210	贵州同济堂中药饮片有限公司
北柴胡	240129	贵州同济堂中药饮片有限公司
茯苓	230526	贵州同济堂中药饮片有限公司
金银花	240205	贵州同济堂中药饮片有限公司
连翘	230512	贵州同济堂中药饮片有限公司
黄芩苷对照品	21121404	中国食品药品检定研究院
北柴胡对照药材	120992-201509	中国食品药品检定研究院
黄芩对照药材	120955-201810	中国食品药品检定研究院
茯苓对照药材	121117-201508	中国食品药品检定研究院

表 3 试验试剂

实验试剂名称	规 格	生产厂家
乙腈	色谱纯	安徽天地科技有限公司
甲醇	色谱纯	安徽天地科技有限公司
2-丙酮	色谱纯	安徽天地科技有限公司
氨水	分析纯	重庆万盛川东化工有限公司
硫酸	分析纯	重庆川东化工(集团)有限公司
石油醚	分析纯	天津市致远化学试剂有限公司
丙酮	分析纯	太仓沪试试剂有限公司
无水乙醇	分析纯	天津市富宇精细化工有限公司
乙酸乙酯	分析纯	天津市富宇精细化工有限公司
二氯甲烷	分析纯	上海试赫维化工有限公司
甲醇	分析纯	成都海峡两岸科技产业公司

2 方法与结果

2.1 制法

按处方剂量称取黄芩、金银花、连翘等五味中药,加入 10 倍量水,煎煮 2 次,每次 30 min,滤过,合并滤液,浓缩,定容至 500 mL。

2.2 芩连解毒合剂提取工艺优化

2.2.1 色谱条件

色谱柱为 Ultimate plus C18(5 μm,4.6 mm×250 mm),流动相为乙腈-0.2% 磷酸(30∶70),柱温 30 ℃,进样量 10 μL ,流速 1.0 mL/min,检测波长 280 nm[16],理论塔板数不低于 2500。

2.2.2 制备对照品溶液

取适量黄芩苷对照品,精密称定其质量,用甲醇配制成浓度为 414 mg/L 的对照品溶液。

2.2.3 制备供试品溶液

精密吸取“2.1”项下提取液 1 mL,加入 70% 乙醇[17]定容至 50 mL,即得供试品溶液。

2.2.4 制备阴性样品溶液

称取缺黄芩处方,同“2.2.3”项下方法操作,制成阴性样品溶液。

2.2.5 专属性试验

使用上述对照品、供试品和阴性样品溶液。照“2.2.1”项下条件测定。结果显示,供试品溶液和对照品溶液的色谱图在相同的保留时间点都出现了色谱峰,且阴性样品没有干扰。

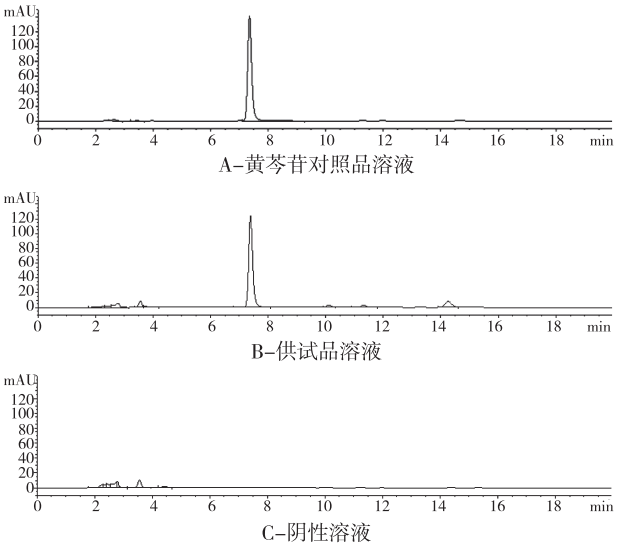


图 1 专属性试验 HPLC 色谱图

2.2.6 线性关系考察

取黄芩苷对照品,加甲醇分别制成浓度为 10.352 mg/L、20.704 mg/L、41.408 mg/L、51.756 mg/L、82.816 mg/L、103.520 mg/L、207.039 mg/L、414.079 mg/L 的对照品溶液。根据“2.2.1”项下色谱条件测定。以横坐标(X)表示黄芩苷浓度(mg/L),纵坐标(Y)表示对应峰面积,绘制标准曲线。回归方程为 $Y=26.933X-49.453$,相关系数 $r=0.9999$。研究显示,在 10.352 ~414.079 mg/L 浓度区间,黄芩苷呈现出良好的线性关系。

2.2.7 精密度试验

选择黄芩苷(其质量浓度为 51.169 mg/L)对照品溶液,连续 6 次进样。记录峰面积后,计算出黄芩苷的 *RSD* 为 0.82% ($n=6$),结果证明仪器的精密度较好。

2.2.8 重复性试验

按“2.2.3”项下方法制备 6 份供试品溶液,按“2.2.1”项下条件检测。结果表明,黄芩苷的平均含量为 1118 mg/L,其相对标准偏差(*RSD*)为 1.36% ($n=6$)。故该方法的重复性较好。

2.2.9 稳定性考察

选择重复性项下供试品溶液,在室温条件下,按“2.2.1”项下条件,分别在 0 h、2 h、4 h、6 h、8 h、10 h、12 h、24 h 时间点测定黄芩苷含量,记录峰面积。峰面积的 *RSD* 为 0.45% ($n=8$),表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.2.10 加样回收试验

取已测定黄芩苷含量的样品 0.5 mL,置于 50 mL 容量瓶中,加入适量黄芩苷对照品溶液,精密加入 70% 乙醇定容到刻度,即得供试品溶液。测得黄芩苷的平均加样回收率为 101.2% ,*RSD* 为 1.43% ,符合规定。

2.2.11 正交试验设计与结果

(1)正交试验设计:通过单因素试验结果,选择加水量(A)、煎煮时间(B)和煎煮次数(C)作为考察因素[18]。黄芩苷含量(a)和出膏率(b)作为评价指标,通过加权评分法计算得出综合评分(综合评分=$a/a_{max}\times6+b/b_{max}\times4$)。按处方剂量称取药材,参照表 5 中各因素水平制备供试品溶液。采用 $L_9(3^4)$ 正交试验法来优选芩连解毒合剂的提取工艺。参见表 4 中的因素水平,以及表 5 中的试验结果。

(2)优化提取工艺的结果和分析显示:通过正交试验的直观分析可知(表 5),影响提取效果的因素依次排序为 C>A>B,综合得分最高的工艺组合是 $A_3B_1C_3$。根据表 6 的方差分析,只有因素 C 对提取

工艺产生了显著的统计学意义。考虑到因素 A 和 B 的极差较小,以及生产成本和周期,我们选择最佳提取工艺为 $A_3B_1C_2$,具体操作为加 10 倍量的水煎煮 2 次,每次 30 min。

表 4 芩连解毒合剂提取因素水平

水平	因素		
	加水倍数(A)/倍	提取时间(B)/min	提取次数(C)/次
1	6	30	1
2	8	45	2
3	10	60	3

表 5 芩连解毒合剂正交试验直观分析结果

试验号	A	B	C	D	*a*/mg	*b*/%	综合评分
1	1	1	1	1	657.72	12.55	5.19
2	1	2	2	2	933.64	17.97	7.38
3	1	3	3	3	1014.73	19.88	8.07
4	2	1	3	3	1065.24	19.45	8.30
5	2	2	2	1	1258.90	23.06	9.80
6	2	3	1	2	698.43	13.46	5.52
7	3	1	3	2	1280.50	23.53	10.00
8	3	2	1	3	759.41	15.20	6.08
9	3	3	2	1	1128.64	21.66	8.91
k1	6.880	7.830	5.597	7.967			
k2	7.873	7.753	8.197	7.633			
k3	8.330	7.500	9.290	7.483			
R	1.450	0.330	3.693	0.484			

表 6 芩连解毒合剂正交试验方差分析结果

因数	偏差平方和	自由度	$F_{比}$	$F_{临界值}$	*P* 值
A	3.298	2	8.986	19.000	
B	0.179	2	0.488	19.000	
C	21.596	2	58.845	19.000	<0.05
误差	0.37	2			

(3)验证试验:称取 3 份芩连解毒合剂各药材饮片,按照上述确定的最佳提取工艺进行提取。对提取后的样品进行黄芩苷含量和出膏率的测定,具体数据见表 7。3 组验证试验的结果表明,出膏率和黄芩苷含量的相对标准偏差(*RSD*)分别为 0.65% 和 2.54%,说明在当前的制备工艺条件下,黄芩苷的含量相对稳定,提取工艺合理、可行。

表 7 芩连解毒合剂提取工艺验证试验结果

试验号	*a*/%	*b*/mg
1	20.77	1092.715
2	20.50	1113.341
3	20.61	1148.751
平均值	20.63	1118.269
RSD/%	0.65	2.54

2.3 质量控制

2.3.1 芩连解毒合剂的制备

称取黄芩、金银花、连翘、北柴胡和茯苓五味中药,加入 10 倍的水量进行 2 次煎煮,每次煎煮 30 min,滤过,合并滤液浓缩,制成 100 mL 即可。

2.3.2 性状

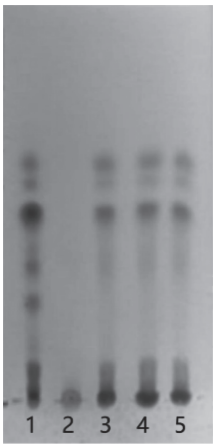
对 3 批所制得的芩连解毒合剂的颜色和气味进行观察,其性状均为棕黄色液体,味苦,微酸,气微。

2.3.3 成品含量测定

取芩连解毒合剂 3 批,按“2.2.3”项下方法制备供试品溶液,进样测定。结果显示,3 批合剂中黄芩苷平均含量为 2.21 mg/mL,*RSD* 为 3.12%。

2.3.4 黄芩 TLC 定性鉴别

取 3 批样品,各 10 mL,加入 30 mL 的乙酸乙酯-甲醇(3∶1)溶液,回流 30 min,滤后蒸干,加入 1 mL 甲醇,得到供试品溶液[19]。采用相同的方法制备阴性样品和对照药材溶液。将 6 μL 上述溶液点在硅胶 G 板上,用甲苯-乙酸乙酯-甲酸-甲醇(10∶3∶2∶1)展开,喷 5% 三氯化铁乙醇溶液[20]显色于日光观察。对照药材和供试品在色谱图相同位置有斑点,阴性样品未见干扰。

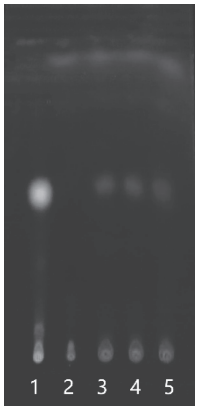


1-茯苓对照药材;
2-阴性样品;
3~5-芩连解毒合剂供试品。

图 2 黄芩薄层色谱图

2.3.5 茯苓 TLC 定性鉴别

取 3 批样品,各 10 mL,加 30 mL 甲醇,超声 30 min。滤过蒸干加 5 mL 二氯甲烷,过滤浓缩至 1 mL,得到供试品溶液。采用相同的方法制备阴性样品和对照药材溶液。将 6 μL 上述溶液点在硅胶 G 板上。使用石油醚(60 ~ 90 ℃)-乙醚(9 ∶ 6)的混合溶剂展开,并在紫外分析仪(波长 365 nm)下观察[21]结果。对照药材和供试品在色谱图上相同位置显示出斑点,而阴性样品未见干扰。



1-黄芩对照药材;
2-阴性样品;
3~5-芩连解毒合剂供试品。

图 3 茯苓薄层色谱图

2.3.6 北柴胡 TLC 定性鉴别

取 3 份样品,每份 10 mL,离心后取上清液,并用 20 mL 水饱和的正丁醇进行 2 次提取。将提取后液体用 20 mL 氨水洗涤 2 次。蒸干上层溶液后,加入 1 mL 甲醇,得到供试品溶液[22]。采用相同的方法制备阴性样品溶液。取 1 g 北柴胡对照药材,加 50 mL 水,加热 30 min 后按照相同的方法制备对照药材溶液。吸取 5 μL 上述溶液,点于硅胶 G 板上,用乙酸乙酯-乙醇-水(8 ∶ 2 ∶ 1)展开,喷 2% 对二甲氨基苯甲醛、40% 硫酸显色[19]。并在紫外分析仪(波长 365 nm)下观察结果[23-24]。对照药材和供试品在色谱图上的相同位置显示出斑点,而阴性样品未见干扰。

3 讨论

中医将表证大致分为风寒表证和风热表证,风热表证的临床症状主要包括发热、头痛、咽喉肿痛、鼻塞等[25]。芩连解毒合剂处方由黄芩、金银花、连翘、北柴胡和茯苓 5 味药组成,可用于治疗风热表证,缓解风热表证的各种临床症状。长期以来该方

1-北柴胡对照药材;
2-阴性样品;
3~5-芩连解毒合剂供试品。

图 4 北柴胡薄层色谱图

在临床上以传统内服汤剂的形式使用。但汤剂存在携带不便、质量难控、量大难喝、剂量不准确等问题[26],且该方中君臣药味的主要药效物质黄芩苷、连翘苷、绿原酸等水溶性较好,且考虑到该方对应的证型,对比其他剂型,选择水作为该方的提取溶剂,制成合剂,具有传统内服汤剂的优点,且服用量较小,质量相对稳定,便于携带服用和贮藏[27]。而该方出膏率较小,制成合剂还能提高原料药生物利用度。

在筛选指标成分时发现茯苓酸含量较低,绿原酸受热易分解[28],连翘苷阴性存在干扰。而君药黄芩中的黄芩苷含量较高且性质稳定,也是黄芩发挥清热燥湿、泻火解毒的重要成分,因此选择黄芩苷作为指标成分。鉴于本方作为复方中药制剂,其药效主要源自多种成分的协同作用,同时选择出膏率作为评价指标,以反映其他配伍药材的影响。

在 HPLC 色谱条件摸索中,对黄芩苷对照品溶液进行 200 ~ 400 nm 波长扫描,结果在 280 nm 波长处有最大吸收,故选择该波长作为检测波长。在流动相的考察中,尝试了甲醇-0.4% 磷酸溶液、乙腈-0.1% 磷酸溶液和乙腈-0.2% 磷酸溶液在内的多种流动相体系,结果用乙腈-0.2% 磷酸作为流动相时,黄芩苷色谱峰峰形较好,出峰时间短,分离效果佳,且未检测到阴性对照的干扰。

综上所述,本项研究选择芩连解毒方作为主要研究对象,并将其制成合剂,这不仅与传统药物的特性相契合,同时也符合现代中药开发明确有效成分的理念,并与中药的现代化进程相一致[29]。研究建立的芩连解毒合剂制备工艺稳定可靠,定性定量方法便捷、准确、重现性好,适用于芩连解毒合剂的生产和质量控制,可为该制剂质量标准的制定提供实

验依据。

参考文献【REFERENCES】

[1] 孙佳红,王烈,孙丽平. 王烈运用清感方治疗小儿风热感冒[J]. 长春中医药大学学报,2019,35(1):46-48.

[2] 江友贤,黄启建. 银翘散联合麻杏石甘汤加减治疗风热感冒临床观察[J]. 北方药学,2023,20(5):167-169.

[3] 夏亚楠. 聊聊治疗风热感冒的第一方——银翘散[J]. 药物与人,2024(8):91-93.

[4] 凌晓颖,陶嘉磊,孙逊,等. 基于网络药理学的连花清瘟方抗冠状病毒的物质基础及机制探讨[J]. 中草药,2020,51(7):1723-1730.

[5] SHEN X,YIN F. The mechanisms and clinical application of traditional Chinese medicine Lianhua-Qingwen capsule[J]. Biomedicine & pharmacotherapy,2021,142:111998.

[6] 赵立昌. 经方药对浅析[J]. 河南中医,2019,39(8):1158-1161.

[7] 魏佳明,朱俊平,刘瑞连,等. 古代经典名方的药对研究[J]. 中医药临床杂志,2019,31(6):999-1003.

[8] WANG D,LI Y. Pharmacological effects of baicalin in lung diseases[J]. Frontiers in pharmacology, 2023, 14:1188202.

[9] 海强,周千瑶,李冰琪,等. 柴胡化学成分及药理作用研究进展[J]. 吉林中医药,2024,44(1):96-100.

[10] 李岳,杨甜甜,周新苗,等. 柴胡-黄芩药对功效及临床应用[J]. 中成药,2022,44(11):3721-3723.

[11] 汪晓露,付畅,赵勇,等. 中药金银花治疗新型冠状病毒肺炎机制探究[J]. 中药材,2020,43(9):2340-2343.

[12] 景奉堂,李峰,张天屹,等. 连翘的化学成分与生物活性的最新研究进展[J]. 中药材,2023,46(1):242-251.

[13] 杨兰,钟晓红,张志旭,等. 清热解毒经典药对金银花-连翘干预新型冠状病毒肺炎分子机制及相须配伍实质[J]. 辽宁中医药大学学报,2022,24(6):109-117.

[14] 石璐瑶,王一帆,张琳琪. 浅谈茯苓在《金匮要略》中的运用规律[J]. 辽宁中医杂志,2024,51(11):10-14.

[15] 罗群,蒲清荣,赵剑,等. 扶正辟邪合剂制备工艺及质量标准研究[J]. 中国当代医药,2023,30(10):7-11.

[16] 徐维二,范秀春,罗廷顺,等. HPLC 同时测定清肺抑火片中 14 种成分的含量[J]. 中国现代应用药学,2024,41(8):1084-1090.

[17] 褚莉,齐元春,孙利,等. 基于高效液相色谱法的儿童清肺丸中汉黄芩苷含量测定[J]. 临床合理用药,2024,17(8):168-171.

[18] 方德宇,张林,吴品昌,等. 枸石山合剂的制备工艺及薄层色谱鉴别研究[J]. 中华中医药学刊,2023,41(8):80-83.

[19] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[S]. 北京:中国医药科技出版社,2022.

[20] 蒋宇,刘华荣. 黄连上清片中黄芩的薄层鉴别与黄芩苷的含量测定[J]. 海峡药学,2018,30(7):61-62.

[21] 刘柳毅,刘丽君,纪秋凤,等. 复方苓桂颗粒薄层色谱鉴别研究[J]. 中国民族民间医药,2022,31(5):52-57.

[22] 王世承. 仲景风热表证理论探讨与应用[C]//中国中医药信息研究会. 第三届中国中医药民族医药信息大会论文集. 2016:4.

[23] 欧水平,郑小翠,王森,等. 清胰煎剂与颗粒中 4 种成分在大鼠体内的药动学比较[J]. 医药导报,2021,40(1):30-34.

[24] 刘军鹏,赵燕. 中药剂型与临床给药途径[J]. 心理月刊,2019,14(13):227.

[25] 周鹤,章顺. 感冒止咳颗粒中柴胡的质量分析研究[J]. 药品评价,2023,20(7):834-837.

[26] 袁强华,宋英,朱璐璐,等. 感甦合剂的质量控制[J]. 中国医院药学杂志,2013,33(2):111-115.

[27] 刘和平,谢培山,田润涛. 柴胡属药材皂苷高效薄层色谱指纹图谱的研究[J]. 中药新药与临床药理,2008(1):38-42.

[28] 刘兴勇,陈兴连,杜丽娟,等. 多因素交互作用导致烘焙咖啡中绿原酸快速降解[J]. 食品科学,2021,42(9):7-14.

[29] 程涛,马诗瑜,宋平,等. 徐黄合剂的制备工艺优化及含量测定[J]. 化工管理,2024(1):131-134.

收稿日期:2024-09-09;**修回日期**:2024-11-25

基金项目:贵阳市科学技术局公共卫生和疫情防控项目(〔2022〕-4-4-5 号);贵州省级中医药、民族医药重点学科——临床中药学(QZYYZDXK(JS)-2023-04)。

作者简介:**陈　娅**(2002-),女,苗族,硕士在读,研究方向:医疗机构制剂研究与开发。

▲**通讯作者**:**高永跃**(1986-),男,汉族,硕士,副主任药师,研究方向:中药及民族药质量控制。

基于 Box-Behnken 响应面法优选强直康颗粒提取工艺*

李季林[1],杨元凤[2▲],肖惠玲[1],罗玉玲[2],周训蓉[2]
([1] 贵州中医药大学 药学院,贵州 贵阳 550025;[2] 贵州中医药大学 第二附属医院药学部,贵州 贵阳 550003)

摘 要: **目的:**优选强直康颗粒的最佳提取工艺。**方法:**以朝藿定 C、淫羊藿苷和补骨脂素、异补骨脂素含量及总固体收率的综合加权评分结果为指标,通过 Box-Behnken 响应面法拟定试验,优选强直康颗粒提取工艺的最佳加水倍数、煎煮时间和煎煮次数。**结果:**强直康颗粒的最佳提取工艺为:首次加 14 倍水,第 2 ~ 4 次加 12 倍水,每次煎煮 50 min,煎煮 4 次,滤过,合并滤液,浓缩。**结论:**优选出的强直康颗粒提取工艺稳定、可行,为其大生产提供重要支撑。

关键词: 强直康颗粒,强直性脊柱炎,Box-Behnken 响应面法,提取工艺
中图分类号:R283.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0037-08

Optimization of extraction process of Qiangzhikang Granules based on Box-Behnken response surface method*

LI Jilin[1], YANG Yuanfeng[2▲], XIAO Huiling[1], LUO Yuling[2], ZHOU Xunrong[2]

([1] *School of Pharmacy, Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China*; [2] *Department of Pharmacy, The Second Affiliated Hospital of Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550003, China*)

Abstract: In this study we optimized the extraction process of Qiangzhikang Granules. Using the weighted sum of the comprehensive scores of cimicifuga racemosa root extract, icariin, psoralen and fructus psoraleae as the evaluation index, a Box-Behnken response surface method was designed to optimize the extraction process parameters of Qiangzhikang Granules, including the water-material ratio, extraction time and extraction times. The optimal extraction process was as follows: adding 14 times of water for the first time, adding 12 times of water for the 2nd to 4th time, decocting for 50 min each time, decocting for 4 times, filtering, mixing the filtrate and concentrating. The optimized extraction process of Qiangzhikang Granules is stable and feasible, which provides important support for its large-scale production.

Keywords: Qiangzhikang Granules, ankylosing spondylitis, Box-Behnken response surface method, extraction process

强直性脊柱炎(Ankylosing spondylitis, AS)是一种以慢性腰背痛为主要临床表现的炎症性自身免疫性疾病,主要影响中轴关节,可累及外周关节和多种器官,晚期可出现腰椎活动受限、胸廓活动度减低,严重者出现脊柱强直或畸形[1]。我国强直性脊柱炎患病率初步调查为 0.3% 左右,主要累及 30 岁以下的青年男性,男女比例约 2∶1,发病高峰年龄在 18 ~ 35 岁,50 岁以上及 8 岁以下发病者少见。病程可长可短,可反复发作,若治疗不当,易发生转变,致残率高,严重影响患者生存质量[2-3]。该病的病因

及发病机制尚不明确,目前无特效药可根治,早诊断、早治疗可控制疾病恶化进展及防止畸形的产生。寻找安全有效的 AS 治疗方法,缓解疾病活动,降低致残率成为国内外治疗研究的热点话题。

现代医学对强直性脊柱炎的治疗常用非甾体消炎药、抗风湿药、生物制剂,但长时间服用可能会产生感染、结核、肿瘤风险及肝肾功能损害等不良反应,存在诸多局限[4]。强直康方为贵州中医药大学第二附属医院马武开主任医师在国家级名老中医龙运光教授治疗肾虚督寒所致的脊痹的中医思想的基础上所得的经验方,由淫羊藿、盐补骨脂、盐巴戟天等七味中药组成,全方共奏补肾强督、祛寒除湿之功。临床观察结果表明,强直康方对脊痹证属肾虚督寒型患者具有良好的疗效,在改善疼痛方面有较明显的效果,有助于提高病人生活质量和减轻病人心理负担,前景广阔,是值得推广的治疗脊痹的中药复方制剂。

强直康方在临床上以传统汤剂的形式服用,由于缺乏标准的煎煮工艺,如煎煮时间、煎煮次数及煎液量难以控制,导致该方质量不稳定[5-6]。为保证强直康颗粒的质量及稳定性,本研究运用 Box-Behnken 响应面法,以朝藿定 C、淫羊藿苷和补骨脂素、异补骨脂素含量及总固体收率的综合加权评分结果为指标进行分析,通过多元二次回归方程拟合各因子与响应值之间的函数相互作用,从而得到预测的最优试验条件。该研究方法应用性强,预测性好,通过响应面法拟定试验方案,从响应面中得到各影响因子对指标的影响趋势,筛选出最优的提取工艺条件,为生产提供理论依据,进而推进该方在医院制剂和临床应用的发展,积极发挥中医药在重大疑难病中的作用。

1 仪器与试药

1.1 仪器

HPLC 高效液相色谱仪(型号 Agilent 1260 Infinity Ⅱ,美国安捷伦科技有限公司)、电子天平(型号 YHM-20002,惠州市英衡电子科技有限公司)、分析天平(型号 FA2204N,上海菁海仪器有限公司)、离心机(型号 H2-16K,湖南可成仪器设备有限公司)、电热恒温水浴锅(型号 BSG-26,宁波市州群安实验仪器有限公司)、超声波清洗器(型号 SK5210HP,上海科导超声仪器有限公司)。

1.2 试药

中药饮片淫羊藿、盐补骨脂、盐巴戟天、当归、生地黄购于贵州省同济堂中药饮片有限公司,盐杜仲购于天津盛实药业有限公司,麸炒白术购于贵阳济仁堂中药饮片厂,批号分别为:230913、231010、231007、231031、231121、XG210015002、20231201,均符合《中国药典》2020 年版一部标准。朝藿定 C 对照品(批号:111780-201905,含量以 94.3% 计);淫羊藿苷对照品(批号:110737-202017,含量以 98.1% 计);补骨脂素对照品(批号:110739-202319,含量以 99.7% 计);异补骨脂素对照品(批号:110738-202317,含量以 99.8% 计)均购自中国食品药品检定研究院;乙腈(色谱纯,美国 TEDIA);水(纯净水,贵阳娃哈哈食品有限公司);强直康水提液为贵州中医药大学第二附属医院实验室自制。

2 方法与结果分析

2.1 考察指标筛选

根据中药复方制剂中药物“君臣佐使”的定位,对强直康颗粒中君药淫羊藿的指标成分朝藿定 C 和淫羊藿苷、臣药补骨脂的指标成分补骨脂素和异补骨脂素进行考查。经检测,朝藿定 C、淫羊藿苷及补骨脂素、异补骨脂素可作为含量测定指标用于评价提取工艺。由于总固体物收率是评价提取工艺的常用指标之一,故与朝藿定 C、淫羊藿苷、补骨脂素、异补骨脂素指标成分一起纳入提取工艺指标。

2.2 朝藿定 C、淫羊藿苷含量测定方法

2.2.1 混合对照品溶液的制备

分别精密称取朝藿定 C、淫羊藿苷对照品适量,置于同一 10 mL 容量瓶中,加甲醇配制成浓度分别为 108.634 μg/mL、109.480 μg/mL 的混合对照品溶液。

2.2.2 供试品溶液制备

精密量取制备后的水提液 5 mL,置 10 mL 容量瓶中,加甲醇至刻度,摇匀,滤过,取续滤液经 0.22 μm 微孔滤膜过滤,即得。

2.2.3 阴性样品溶液的制备

精密量取缺淫羊藿的强直康水提液 5 mL,照“2.2.2”项下方法进行制备,即得。

2.2.4 色谱条件

色谱柱 Welch Ultimate XB-C18(4.6 mm×250 mm,5 μm);流动相:乙腈-水(26∶74);柱温 30 ℃;检测波长 270 nm;进样量 10 μL。

2.3 补骨脂素、异补骨脂素含量测定方法

2.3.1 混合对照品溶液的制备

分别精密称取补骨脂素、异补骨脂素对照品适量,置于同一 25 mL 容量瓶中,加甲醇配制成浓度分别为 20.478 μg/mL、20.978 μg/mL 的混合对照品溶液。

2.3.2 供试品溶液制备

精密量取制备后的水提液 2 mL,置 10 mL 容量瓶中,加 50% 乙醇至刻度,摇匀,滤过,取续滤液经 0.22 μm 微孔滤膜过滤,即得。

2.3.3 阴性样品溶液的制备

精密量取缺补骨脂的强直康水提液 2 mL,照“2.3.2”项下方法进行制备,即得。

2.3.4 色谱条件

色谱柱依利特 Hypersil BDS C18(4.6 mm×250 mm,5 μm);流动相:乙腈-水(28∶72);柱温 30 ℃;检测波长 246 nm;进样量 10 μL。

2.4 方法学考察

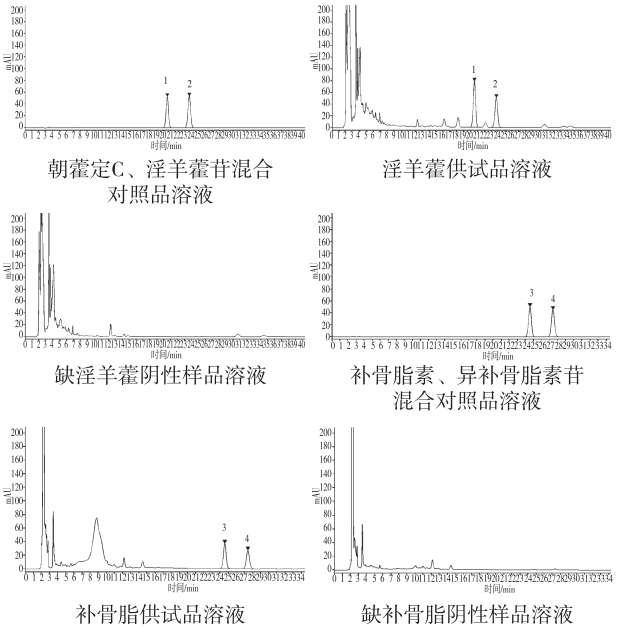
2.4.1 专属性

精密量取上述混合对照品溶液、供试品溶液和阴性样品溶液,分别根据“2.2.4”项下、“2.3.4”项下色谱条件测定。

结果表明:与混合对照品溶液对应的色谱图中同一保留时间内的色谱峰均存在于供试品溶液的色谱图中,阴性样品溶液不受干扰,如图 1 所示。

2.4.2 线性关系考察

分别精密吸取表 1 中混合对照品溶液 10 μL 注入液相色谱仪,按“2.2.4”项下、“2.3.4”项下色谱条件测定。结果:朝藿定 C 线性回归方程:$y = 10.924x + 4.2932$,$R^2 = 0.9999$,表明朝藿定 C 在 0.181 ~ 3.621 μg范围内线性关系良好;淫羊藿苷



注:1-朝藿定C;2-淫羊藿苷;3-补骨脂素;4-异补骨脂素。

图 1 水提液专属性 HPLC 色谱图

线性回归方程:$y = 13.267x + 2.5441$,$R^2 = 0.9999$,表明淫羊藿苷在 0.182 ~ 3.649 μg 范围内线性关系良好;补骨脂素线性回归方程:$y = 59.597x + 24.595$,$R^2 = 1$,表明补骨脂素在 0.027 ~ 1.333 μg 范围内线性关系良好;异补骨脂素线性回归方程:$y = 59.3x + 30.342$,$R^2 = 1$,表明异补骨脂素在 0.027 ~ 1.134 μg 范围内线性关系良好。

表 1 线性系列混合对照品溶液

编 号	朝藿定 C、淫羊藿苷浓度/(μg/mL)		补骨脂素、异补骨脂素浓度/(μg/mL)	
线性 1	18.106	18.247	2.667	2.690
线性 2	36.211	36.493	5.334	5.379
线性 3	72.422	72.986	13.335	13.448
线性 4	108.634	109.48	26.670	26.896
线性 5	181.056	182.466	80.009	80.688
线性 6	362.112	364.932	133.349	134.481

2.4.3 精密度试验

精密吸取朝藿定 C、淫羊藿苷浓度分别为 108.634 μg/mL、109.480 μg/mL 的混合对照品溶液,补骨脂素、异补骨脂素浓度分别为 20.478 μg/mL、20.978 μg/mL 的混合对照品溶液,连续进样 6 次。结果表明,朝藿定 C、淫羊藿苷峰面积的 *RSD* 值分别为 0.24%、0.28%,补骨脂素、异补骨脂

素峰面积的 *RSD* 值分别为 0.08%、0.06%，表明仪器的精密度良好。

2.4.4 重复性试验

精密吸取同一浓度的强直康水提液共 12 份，各 6 份，分别按“2.2.2”项下、“2.3.2”项下制备方法进行制备，按“2.2.4”项下、“2.3.4”项下色谱条件进样测定。

结果表明，强直康提取液中朝藿定 C、淫羊藿苷的含量分别为 0.36 mg/mL、0.21 mg/mL，*RSD* 值分别为 1.09%、1.16%；补骨脂素、异补骨脂素的含量分别为 0.08 mg/mL、0.07 mg/mL，*RSD* 值分别为 2.50%、2.24%，表明此制备方法的重复性良好。

2.4.5 稳定性考察

分别取“2.2.2”项下、“2.3.2”项下供试品溶液，于室温条件下不同时间（0 h、3 h、6 h、9 h、12 h、15 h、18 h、21 h、24 h），按“2.2.4”项下、“2.3.4”项下色谱条件进样测定。

结果表明，朝藿定 C、淫羊藿苷峰面积的 *RSD* 值分别为 0.49%、0.91%，补骨脂素、异补骨脂素峰面积的 *RSD* 值分别为 0.22%、0.81%，表明强直康方提取液供试品在室温条件下 24 h 内稳定。

2.4.6 加样回收试验

精密吸取已知朝藿定 C、淫羊藿苷、补骨脂素、异补骨脂素含量的强直康方提取液，分别精密加入朝藿定 C、淫羊藿苷混合对照品溶液，补骨脂素、异补骨脂素混合对照品溶液，配制成各 6 份样品溶液，按“2.2.4”项下、“2.3.4”项下色谱条件进样测定，结果见表 2。由表 2 可知，朝藿定 C、淫羊藿苷加样回收率分别为 95.78%、95.62%，补骨脂素、异补骨脂素加样回收率分别为 98.03%、100.94%，表明该方法的准确度良好，符合规定。

2.5 总固体物收率

精密量取制备后的水提液 10 mL，放入已干燥至恒重的蒸发皿内，水浴挥干后，置 105 ℃烘箱干燥 3 h，转移至干燥器中冷却 30 min，迅速称量，计算总固体物收率。总固体物收率计算公式如下：

$$总固体物收率(\%) = \frac{(W \times V)}{10 \times W_t} \times 100\%$$

式中，W 为 10 mL 滤液中固体物的重量，V 为定容体积，W_t 为样品投料重量。

表 2 加样回收率

指标成分	取样量/mL	样品含量/mg	加入量/mg	测得量/mg	回收率/%	平均回收率/%	*RSD*/%
朝藿定 C	2.5	0.898	0.889	1.744	95.22	95.78	0.73
				1.748	95.61		
				1.748	95.58		
				1.755	96.46		
				1.758	96.79		
				1.743	95.02		
淫羊藿苷	2.5	0.520	0.652	1.138	94.80	95.62	0.73
				1.142	95.37		
				1.141	95.25		
				1.145	95.93		
				1.151	96.84		
				1.143	95.51		
补骨脂素	1	0.080	0.080	0.158	97.11	98.03	1.00
				0.158	97.00		
				0.158	97.77		
				0.159	98.78		
				0.160	99.52		
				0.158	98.00		
异补骨脂素	1	0.065	0.081	0.146	100.48	100.94	1.25
				0.146	99.53		
				0.147	100.86		
				0.148	102.11		
				0.148	102.75		
				0.146	99.90		

2.6 综合评分计算

对水提液中朝藿定 C、淫羊藿苷和补骨脂素、异补骨脂素含量及总固体物收率的测定结果进行综合加权评分。为便于考察各工艺对以上五个指标的综合提取效应，将某一指标成分以各提取工艺中提取出含量最高（m_{max}）的计 1 分，其他各实验号该指标含量（$m_{测}$）相对应的计分值（f）计算和工艺的综合加权评分方法如下：

$$f = m_{测} / m_{max}$$

$$综合评分 = f_{(朝藿定C+淫羊藿苷)} \times 0.5 + f_{(补骨脂素+异补骨脂素)} \times 0.4 + f_{总固体物收率} \times 0.1$$

对君药淫羊藿中朝藿定 C、淫羊藿苷含量加和值权重系数设定为 0.5，臣药补骨脂中补骨脂素、异

补骨脂素含量加和值权重系数均设定为 0.4,总固体物收率权重系数均设定为 0.1,进行加权评分。

2.7 提取工艺单因素考察

2.7.1 药材吸水率

按 2 倍临床处方比例称取药材饮片约 140 g,置于容器中,加入 12 倍水浸泡,于不同时间测定药材的湿重,待饮片重量不再增加,倒出未被吸收的溶剂,按吸水率(%)=[药材湿重(g)-药材重(g)]/药材重(g)×100%计算吸水率,平行 3 次。结果:饮片平均吸水率为 190.1%,*RSD* 为 0.02%,为方便操作,以吸水率为 2 倍计算,即首次水提时多加饮片重量的 2 倍量水。

2.7.2 浸泡时间考察

考察不同浸泡时间对强直康水提液中总固体物收率和朝藿定 C、淫羊藿苷、补骨脂素、异补骨脂素含量综合评分的影响。取 1 个处方量药材约 70 g,共 10 份,在满足药材吸水率的情况下,分别加 8 倍水,浸泡 0 h、0.5 h、1 h、2 h 和 3 h,煎煮 2 次,每次 30 min,过滤,合并药液,浓缩,定容至 250 mL,即得。分别按“2.2.2”“2.3.2”项下各供试品溶液的制备方法处理,分别按“2.2.4”“2.3.4”项下各色谱条件检测,得到峰面积,计算朝藿定 C、淫羊藿苷及补骨脂素、异补骨脂素含量,并计算综合评分。结果见图 2(a),不浸泡时综合评分最高,为 0.9324。因此采取不浸泡直接煎煮的方式。

2.7.3 加水量考察

按 1 个处方量称取药材饮片,在满足药材吸水率的情况下,分别加入 6 倍、8 倍、10 倍、12 倍量水,煎煮 2 次,每次 30 min,过滤,滤液浓缩,定容至 250 mL,分别按“2.2.2”“2.3.2”项下制备方法制备供试品溶液,进样测定,考察加水量对强直康水提液中朝藿定 C、淫羊藿苷和补骨脂素、异补骨脂素含量及总固体物收率综合评分的影响。结果见图 2(b),当加水量为 10 倍时,综合评分最高,为 0.9906。经全面考虑,最终选择加水倍数为 8 倍、10 倍、12 倍。

2.7.4 煎煮时间考察

称取 1 个处方量的药材饮片,加 10 倍水,煎煮 2 次,分别煎煮 30 min、45 min、60 min、75 min、90 min,过滤,滤液浓缩,定容至 250 mL。按“2.2.2”“2.3.2”项下方法制成供试品溶液,注入液相色谱仪测定。结果见图 2(c),煎煮 45 min 后综合评分结果无显著差异,因此最终选择提取时间为 30 min、45 min、60 min。

2.7.5 煎煮次数考察

称取 1 个处方量的药材饮片,加入 10 倍水,分别煎煮 1 次、2 次、3 次、4 次,每次 45 min,过滤,滤液浓缩,定容至 250 mL。按“2.2.2”“2.3.2”项下方法制成供试品溶液,注入液相色谱仪检测。结果见图 2(d),煎煮 3 次时,综合评分最高,为 0.9947,因此最终选择提取次数为 2 次、3 次、4 次。

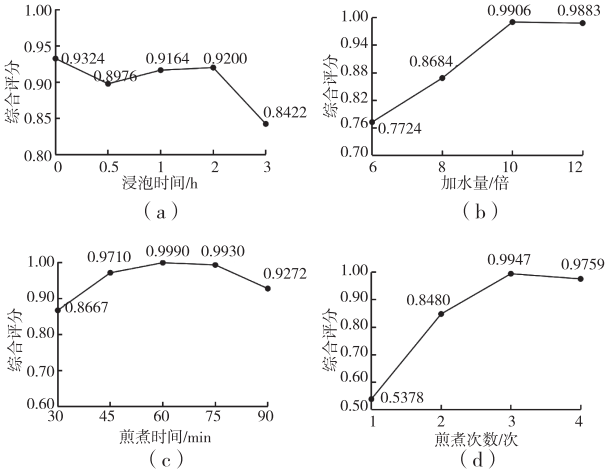


图 2 单因素试验结果

2.8 Box-Behnken 响应面法试验

2.8.1 响应面试验设计

结合单因素试验考察结果,采用 Box-Behnken 响应面法拟定试验,选取加水量(A)、煎煮时间(B)、煎煮次数(C)为考察因素,考察不同试验设计对总固体物收率及朝藿定 C、淫羊藿苷、补骨脂素、异补骨脂素含量综合评分的影响,以其综合加权评分结果作为评价指标,优选最佳提取工艺条件。按 1 个处方比例称取约 70 g,共 34 份。因素水平见表 3。采用 Design-Expert. V8.0.6.1 软件对试验结果进行分析,试验设计和结果见表 4,方差分析见表 5。

2.8.2 响应面结果与分析

表 4 中,编号 1 ~ 12 为析因试验,13 ~ 17 为中心试验,运用 Design-Expert. V8.0.6.1 软件对表 2 中的试验结果进行回归分析,得二次多项回归方程为 $Y=0.90+0.061A+0.012B+0.11C+6.550\times10^{-3}AB-0.036AC-9.300\times10^{-3}BC-0.018A^2-0.034B^2-$

$0.038C^2$。由回归方程可知,影响因素的顺序为 C>A>B,对其进行方差分析,结果见表 5。

表 3 响应面试验因素水平表

水平	因素		
	A 加水量/倍	B 煎煮时间/min	C 煎煮次数/次
1	8	30	2
2	10	45	3
3	12	60	4

表 4 响应面试验设计与结果

试验号	A	B	C	总固体物收率/%	(朝藿定 C+淫羊藿苷)含量/(mg/mL)	(补骨脂素+异补骨脂素)含量/(mg/mL)	综合评分
1	8	45	4	47.63	0.657	0.179	0.9353
2	8	60	3	46.13	0.590	0.141	0.8060
3	10	30	4	49.72	0.618	0.198	0.9410
4	12	45	2	45.04	0.594	0.150	0.8275
5	12	60	3	47.51	0.660	0.180	0.9412
6	10	60	2	43.93	0.515	0.137	0.7377
7	8	30	3	43.02	0.514	0.156	0.7721
8	10	60	4	50.36	0.621	0.183	0.9233
9	10	30	2	43.99	0.487	0.138	0.7182
10	12	45	4	50.91	0.646	0.206	0.9857
11	12	30	3	45.93	0.617	0.170	0.8811
12	8	45	2	40.32	0.491	0.096	0.6350
13	10	45	3	45.79	0.607	0.177	0.8897
14	10	45	3	45.69	0.610	0.180	0.8985
15	10	45	3	45.71	0.635	0.177	0.9106
16	10	45	3	45.74	0.645	0.177	0.9181
17	10	45	3	45.66	0.603	0.179	0.8909

由表 5 可知,该模型的 $P<0.0001$,表明拟合模型具有极显著性差异。失拟项 $P=0.1605>0.05$ 差异不显著,表明该模型的回归方程具有较好的拟合度和可信度,本试验方法是可靠的,该方程对模拟真实的 3 因素 3 水平的分析是可行的。其模型的相关系数 $R^2=0.9863$,模型的变异系数 CV 为 1.96%,表明该模型可解释 3 个因素 98.63% 的变异性,试验误差小,用此模型方程能很好地反映真实的试验值,可用于提取工艺中综合评分的预测。该模型的一次项 A、C 显著($P<0.05$),AC 交互作用显著($P<0.05$),二次项 B^2、C^2对综合评分的影响达到显著水平($P<0.05$),其他因素对综合评分无显著性影响。

为进一步研究相关变量的交互作用和确定最佳工艺提供可视化分析,利用 Design - Expert. V8.0.6.1 软件对回归模型进行响应面分析,得到响应立体分析图谱,见图 3-图 5。

表 5 响应面模型方差分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	0.14	9	0.016	56.02	< 0.0001	极显著
A	0.030	1	0.030	104.04	<0.0001	极显著
B	1.147×10^{-3}	1	1.147×10^{-3}	4.02	0.0849	
C	0.094	1	0.094	329.53	<0.0001	极显著
AB	1.716×10^{-4}	1	1.716×10^{-4}	0.60	0.4632	
AC	5.048×10^{-3}	1	5.048×10^{-3}	17.71	0.0040	极显著
BC	3.460×10^{-4}	1	3.460×10^{-4}	1.21	0.3071	
A^2	1.337×10^{-3}	1	1.337×10^{-3}	4.69	0.0671	
B^2	4.766×10^{-3}	1	4.766×10^{-3}	16.72	0.0046	极显著
C^2	6.038×10^{-3}	1	6.038×10^{-3}	21.18	0.0025	极显著
残差	1.996×10^{-3}	7	2.851×10^{-4}	-	-	
失拟项	1.377×10^{-3}	3	4.589×10^{-4}	2.97	0.1605	不显著
误差	6.190×10^{-4}	4	1.547×10^{-4}	-	-	
总和	0.15	16	-	-	-	

注:$P<0.05$ 为显著,$P<0.01$ 为极显著。

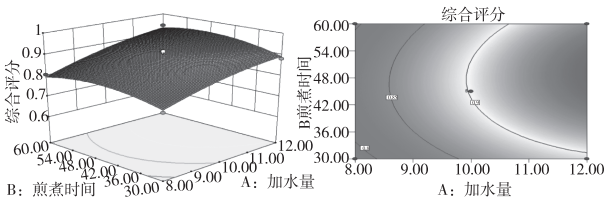


图 3 加水量和煎煮时间响应面图和等高线图

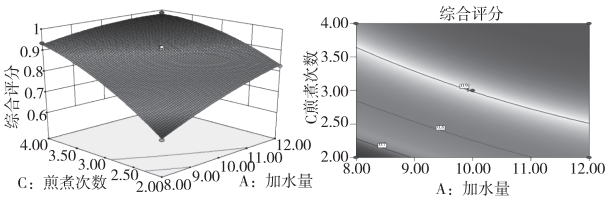


图 4 加水量和煎煮次数的响应面图和等高线图

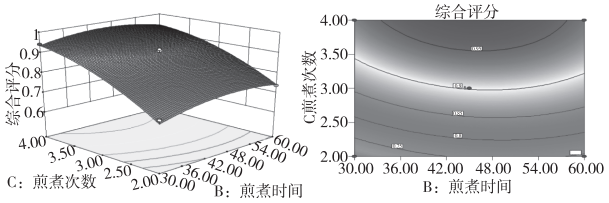


图 5 煎煮时间和煎煮次数响应面图和等高线图

利用 Box-Behnken 得出的回归模型作出两两因素对综合评分的交互作用响应面曲线图及等高线图,曲面的倾斜程度反映两因素交互作用的显著程度,等高线的密度反映该因素对综合评分的影响强弱,即响应曲面倾斜度越高,等高线越密集,说明两因素间的交互作用越明显。

由图 3-图 5 可知,因素 A 和 C 具有较大的曲面倾斜度和陡峭的坡度,以及等高线的紧凑性,表明因素 A 和 C 对响应值有着非常显著的影响;在因素 B 保持不变的情况下,随着因素 A 的逐渐增加,曲面的变化相对平稳,等高线显得较为松散,表明两个因素之间的相互作用对响应值无显著性影响;当因素 C 处于较高水平时,响应值会随着因素 A 的增加而逐步下降,曲面的变化变得陡峭,同时还会出现曲面的最高点,表明两个因素的交互作用对响应值的影响是显著的;在因素 C 保持不变的情况下,随着因素 B 的逐渐增长,曲面的变化相对稳定,表明两个因素之间的相互作用对响应值并无显著性影响,这与方差分析的结果是一致的。经 Design-Expert. V8.0.6.1 软件优化分析得到最佳提取工艺条件:加水倍数为 11.47 倍,煎煮时间为 46.64 min,提取次数为 4 次。结合实际与大生产选择:加水量为 12 倍水,煎煮时间 50 min,煎煮次数 4 次。

2.9 水提工艺验证

平行称取 1 倍处方量的药材 3 份,按最优提取工艺条件平行制备 3 份进行验证。结果见表 6,3 批验证样品的综合评分的 *RSD* 为 0.54% <3.0%,说明该提取工艺质量稳定,可靠,重复性好,适用于大生产。

表 6 提取工艺验证综合评分

试验号	总固体物收率/%	(朝藿定 C+淫羊藿苷)含量/(mg/mL)	(补骨脂素+异补骨脂素)含量/(mg/mL)	综合评分	平均值	*RSD*/%
1	50.97	0.609	0.159	0.9869		
2	51.12	0.616	0.158	0.9903	0.9915	0.54
3	51.07	0.625	0.158	0.9974		

3 讨论

强直性脊柱炎是一种慢性炎症性关节病,目前现代医学中尚无特效药物可以完全治愈该病,且常规药物治疗容易出现不良反应。在此环境下,中医及中西医结合治疗强直性脊柱炎展现出了独特的优势。中医注重整体调理,强调平衡阴阳、调和气血,可以在一定程度上改善患者的临床症状及患者的身体状况和免疫功能,从而减缓病情的发展,并减少药物的不良反应。强直康方为贵州中医药大学第二附属医院风湿免疫科长期用于治疗强直性脊柱炎的临床经验方,方中淫羊藿补肾阳、强筋骨、祛风湿,为君药;盐补骨脂、杜仲、巴戟天三药合用补肝肾、强腰膝、祛风湿,共为臣药;当归活血通经止痛,生地黄补血凉血,麸炒白术理气健脾、燥湿利水,共为佐药;杜仲也可引药至腰脊,亦为使药。全方共奏补肾强督、祛寒除湿之功。其药理研究表明,淫羊藿、盐补骨脂具有提高免疫功能、抗骨质疏松、抗氧化、镇痛、消炎、抗病毒等多种药理功效[7-8];盐巴戟天具有较好的镇痛、抗炎作用[9];当归有抗炎、促进造血功能、抗肿瘤、保肝护肾、增强免疫等功能[10];杜仲、生地黄、麸炒白术具有抗炎、抗氧化、抗菌、抗病毒、抗肿瘤、降血糖、镇痛等药理作用[11-13]。不管是单方药还是配方药,对抗炎和镇痛都发挥着重要的治疗作用,可有效地改善强直性脊柱炎患者的临床症状。

以药材中成分的提取效率为标准优化提取工艺,使用高效液相色谱法来准确测量药材中的成分含量,此方法更为精确和可信。根据中药复方制剂中药物“君臣佐使”的定位,对强直康颗粒中君药淫羊藿、臣药补骨脂的指标成分进行考查,对其所含的朝藿定 C、淫羊藿苷和补骨脂素、异补骨脂素进行提取及含量测定,使其物质基础明确,质量稳定、可控,使用检测方便。本文通过单因素试验考察结果,对强直康颗粒的提取工艺进行系统研究,确定了影响强直康方中各药物提取效率的主要因素。采用 Box-Behnken 响应面法试验,分别考虑加水量、煎煮次数、煎煮时间三个因素之间的相互影响,以朝藿定 C、淫羊藿苷、补骨脂素、异补骨脂素含量和总固体物收率的综合评分结果为指标进行分析,通过 Box-Behnken 响应面法试验操作所得出的数据分析,并结合产品使用的方便和高效特性,最终确定最优提取工艺条件为:加 12 倍量水,煎煮 4 次,每次煎煮时间为 50 min。并以最优提取工艺条件进行 3 批样品验证,验证试验结果相对误差均小于 1%。结果表明,响应面法通过设计试验,精确研究各因素之间的关系,快速有效地确定多因素系统的最佳条件,其优化后的提取工艺科学合理、稳定可行,为淫羊藿中黄

酮类成分、补骨脂中呋喃香豆素类成分的后续开发和利用,以及对强直康方的工业化生产等提供了一定的参考。

参考文献【REFERENCES】

[1] 范晓云,李志军. 强直性脊柱炎的诊断与治疗[J]. 中华全科医学,2020,18(8):1256-1257.

[2] WARD MM, DEODHAR A, AKL E A, et al. American College of Rheumatology/Spondylitis Association of America/Spondyloarthritis Research and Treatment Network 2015 recommendations for the treatment of ankylosing spondylitis and nonradiographic axial spondyloarthritis[J]. Arthritis & rheumatology, 2016,68(2):282-298.

[3] 杜琳,高延征. 强直性脊柱炎诊断及治疗新进展[J]. 中华实用诊断与治疗杂志,2019,33(7):629-631.

[4] 何东仪,程鹏,汪荣盛,等. 强直性脊柱炎中西医结合诊疗指南[J]. 上海医药,2023,44(13):23-30.

[5] 朱荣荣,李玲,王靖,等. 心脉通复方提取工艺优化及颗粒成型性考察[J]. 世界科学技术-中医药现代化,2018,20(2):288-293.

[6] 刘斯琪,高明阳,胡昌江,等. 茵陈蒿汤配方颗粒成型工艺的优化[J]. 中成药,2017,39(12):2628-2630.

[7] 李莉,王嘉瑞,王晶,等. 淫羊藿的主要化学成分、药理作用研究进展及质量标志物的预测分析[J]. 中华中医药学刊,2023,41(11):143-151.

[8] 范冰冰,仲人中,马壮,等. 补骨脂的药理学研究进展[J]. 中华中医药学刊,2024,42(4):84-87.

[9] 吴岩斌,吴建国,郑丽鋆,等. 基于炎症细胞模型的巴戟天抗炎活性部位[J]. 福建中医药大学学报,2011,21(1):48-50.

[10] 王凤龙,刘员,张来宾,等. 当归抗炎镇痛作用研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志,2021,27(15):197-209.

[11] 李宁博,骆晓飞,尹夏,等. 杜仲多糖通过抑制 NF-κB 通路减轻 IL-1β 诱导的软骨细胞损伤[J]. 中国骨伤,2022,35(7):661-668.

[12] LIANG X, ZHAO Y, XU T, et al. Catalpol alleviates depression by inhibiting NLRP3 inflammasome via TLR4/MAPK/NF-Kb pathway[J]. Iranian journal of public health, 2023, 52(4):722.

[13] 张维霞,苏萍,赵爱军. 白术的炮制方法及其药理作用研究进展[J]. 中医药导报,2022,28(5):110-115.

收稿日期:2024-09-20;**修回日期**:2024-10-14

基金项目:2023 年度贵州省级中医药、民族医药重点学科建设项目(QZYYZDXK(JS)-2023-04)。

作者简介:**李季林**(2001-),女,蒙古族,在读研究生,研究方向:医院制剂研发。

▲**通讯作者**:**杨元凤**(1985-),女,汉族,博士,副主任药师,硕士研究生导师,研究方向:医院制剂研发及中药药效物质基础研究。

黔东南州黄精多糖含量的影响因子研究*

胡秀虹[1],张廷辉[2],曾珠亮[1,2],梁园园[1]
([1]凯里学院 大健康学院,贵州 凯里 556011;[2]黔东南州食品药品检验检测中心,贵州 凯里 556011)

摘 要: 目的:旨在比较不同产地、不同品种、不同年份、不同大小规格及不同炮制方法下的黄精多糖含量变化。**方法:**以黔东南州9个县的多花黄精、滇黄精、鸡头黄精的干燥根茎为原料,利用蒽酮-硫酸法测定黄精多糖含量。**结果:**黔东南州9个县的多花黄精的多糖含量由高到低依次是台江县(14.64%)>雷山县(13.41%)>剑河县(12.83%)>施秉县(11.26%)>丹寨县(9.13%)>黄平县(8.95%)>岑巩县(7.67%)>镇远县(5.84%),黔东南州4个县的鸡头黄精的多糖含量由高到低依次是施秉县(14.12%)>黄平县(12.17%)>岑巩县(11.32%)>丹寨县(10.60%),黔东南州4个县的滇黄精的多糖含量由高到低依次是岑巩县(12.21%)>黄平县(8.31%)>麻江县(7.17%)>镇远县(6.37%)。此外,研究发现同一县份不同品种黄精的多糖含量有一定差异,黄精种植年份与黄精多糖的含量总体呈正相关性,大小规格对多糖含量的影响不大,炮制方法会影响多糖含量,其中炒制法使多糖含量显著下降,清蒸法使多糖含量略有提高,九蒸九晒过程中多糖含量先增长后减小。**结论:**本研究有望为黔东南州产黄精的质量评价及标准的制定提供依据。

关键词: 黔东南州,黄精,多糖,含量测定,影响因子
中图分类号:S-3 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0045-07

Influencing factors of polysaccharides content in *Polygonatum* from Qiandongnan*

HU Xiuhong[1], ZHANG Tinghui[2], ZENG Zhuliang[1,2], LIANG Yuanyuan[1]

([1]*School of Life and Health Science, Kaili University, Kaili 556011, China*; [2]*Qiandongnan Food and Drug Inspection and Testing Center, Kaili 556011, China*)

Abstract: In this study we compared the changes in polysaccharides content of *Polygonatum* with different origins, varieties, years, sizes, and processing methods. Using the dried rhizomes of *Polygonatum cyrtonema*, *Polygonatum kingianum* and *Polygonatum sibiricum* from 9 counties in Qiandongnan as the raw materials, their polysaccharides content was determined by anthrone-sulfuric acid method. The polysaccharides content of *Polygonatum cyrtonema*: Taijiang County (14.64%) > Leishan County (13.41%) > Jianhe County (12.83%) > Shibing County (11.26%) >Danzhai County(9.13%) >Huangping County(8.95%) >Cengong County(7.67%) >Zhenyuan County(5.84%). The polysaccharides content of *Polygonatum sibiricum*: Shibing County(14.12%) >Huangping County (12.17%) >Cengong County(11.32%) >Danzhai County(10.60%). The polysaccharides content of *Polygonatum kingianum*: Cengong County(12.21%) >Huangping County(8.31%) >Majiang County(7.17%) >Zhenyuan County(6.37%). In addition, there were certain differences in polysaccharides content of different varieties of *Polygonatum* from the same county; the planting year of *Polygonatum* was generally positively correlated with the polysaccharides content; size had little effect on the polysaccharides content. Processing methods affected the polysaccharides content: the frying method significantly reduced the polysaccharides content; the steaming method slightly increased the polysaccharides content; during the nine-steam-nine-bask processing, the polysaccharides content first in-

creased and then decreased. This study serves to provide a basis for the quality evaluation and standard formulation of *Polygonatum* from Qiandongnan.

Keywords: Qiandongnan, *Polygonatum*, polysaccharides, content determination, influencing factors

黄精为百合科(Liliaceae)黄精属(*Pilygonatum*)多年生草本植物滇黄精(*Polygonatum kingianum* Coll. et Hemsl.)、鸡头黄精(*Polygonatum sibiricum* Red.)或多花黄精(*Polygonatum cyrtonema* Hua.)的干燥根茎[1-2]。黄精作为我国重要的药食同源性中药材,始载于《名医别录》,其药用历史已有 2000 多年,在古代被视为“长生不老和延年益寿”药用植物,言其“久服轻身延年不饥”[3-4]。多糖是一种由 10 个及以上单糖通过脱水缩合形成的大分子聚合物,主要包括半乳糖醛酸、阿拉伯糖、鼠李糖、葡萄糖、葡萄糖醛酸、甘露糖、半乳糖以及木糖[4-6]等,是黄精的主要活性成分,具有抗氧化[6]、改善记忆力[7]、增强免疫力[8]、抗抑郁[9]、抑菌[10]、抗疲劳[11]以及降血糖[12]等诸多活性。《中国药典》[13]规定多糖为黄精的质量标志物。

黄精是贵州省黔东南州的重点药材之一。近年来关于黄精多糖及其含量测定的研究较多。贺维涛[14]等探讨不同产地的黄精药材品质差异,发现生长环境不同导致其黄精所含多糖及抗氧化能力存在差异。吴江[15]等研究发现,随着多花黄精生长年限的增加,多花黄精多糖的含量随生长年限的增加而呈先升高后降低趋势。蔡春燕[16]等研究九蒸九晒不同炮制阶段多花黄精内在质量和体外抗氧化活性,发现不同炮制阶段的多花黄精浸出物的含量与多糖含量均存在差异。孙婷婷[17]等探讨陕西产黄精不同炮制品中多糖含量变化规律,发现不同炮制品中多糖含量存在显著差异,以黄精生饮片中多糖含量最高,酒蒸品次之,清蒸品最低。陈文华[18]发现黄精生品中的多糖含量远高于炮制后的多糖含量,四蒸四晒至五蒸五晒炮制品多糖含量较高。李旭鸿[19]等探究不同品种间黄精(多花黄精、鸡头黄精和滇黄精)多糖的含量与抗氧化活性的差异,发现 3 种黄精(鸡头黄精、滇黄精、多花黄精)多糖含量及抗氧化活性存在明显差异,以鸡头黄精质量最佳。尽管黄精多糖相关性研究较多,但系统性研究黄精多糖含量的影响因素的较少。综上,本文以贵州省黔东南州境内黄精作为研究对象,以黄精多糖含量为评估指标,采用蒽酮-硫酸法测定多糖含量,比较不同产地、不同品种、不同年份、不同规格以及不同炮制方式等条件下的黄精多糖含量变化,以期为黔东南州黄精的质量评价及标准的制定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验药材

实验用黄精药材均采集于贵州黔东南州,采集信息详见表 1。

表 1 黔产黄精药材采集信息表

序号	编号	采集地	品种	年份/年	采集时间
1	QHJ01	施秉县牛大场镇	鸡头黄精	3	2023 年 10 月
2	QHJ02		鸡头黄精	4	2023 年 10 月
3	QHJ03		鸡头黄精	5	2023 年 10 月
4	QHJ04	镇远县羊场镇	多花黄精	4	2023 年 10 月
5	QHJ05		滇黄精	4	2023 年 11 月
6	QHJ06		多花黄精	4	2023 年 11 月
7	QHJ07	黄平县新州镇	多花黄精	3	2023 年 11 月
8	QHJ08		多花黄精	4	2023 年 11 月
9	QHJ09		多花黄精	5	2023 年 11 月
10	QHJ10	黄平县旧州镇	鸡头黄精	4	2023 年 10 月
11	QHJ11		滇黄精	4	2023 年 10 月
12	QHJ12	麻江县宣威镇	滇黄精	3	2023 年 11 月
13	QHJ13		滇黄精	4	2023 年 11 月
14	QHJ14		滇黄精	5	2023 年 11 月
15	QHJ15	岑巩县凯丰镇	鸡头黄精	4	2023 年 10 月
16	QHJ16		多花黄精	4	2023 年 10 月
17	QHJ17		滇黄精	4	2023 年 10 月
18	QHJ18	雷山县大塘镇	多花黄精	4	2023 年 11 月
19	QHJ19	剑河县柳川镇	多花黄精	4	2023 年 11 月
20	QHJ20	台江县革一镇	多花黄精	4	2023 年 11 月
22	QHJ21	丹寨县兴仁镇	鸡头黄精	4	2023 年 11 月
23	QHJ22		多花黄精	4	2023 年 11 月

1.1.2 主要仪器设备

111B 型高速中药粉碎机,浙江温州瑞安市永历制药机械有限公司;SYG-A2-6 型电热恒温水浴锅、

202-1AB 型电热恒温干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;AB-104N 型电子分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;HH-6(单列 6 孔)型数显恒温水浴锅,江苏科析仪器有限公司;DLSB-10L 型低温冷却液循环泵,中世沃克(天津)科技股份有限公司;UV-6100S 型紫外可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 标准曲线的绘制

参照 2020 版《中国药典》[13]中配置葡萄糖标准溶液(0.34 mg/mL)的方法。取 7 支干燥的具塞试管,按表 2 数据和步骤加入试剂、完成反应并进行比色测定(λ_{max} = 582 nm)。以每管标准葡萄糖含量(mg)作横坐标,以吸光度值作纵坐标,绘制标准曲线(y=30.199x+0.0007,R^2=0.9993),见图 1。

表 2 葡萄糖标准曲线的绘制

试剂	管号						
	0	1	2	3	4	5	6
葡萄糖标准液/mL	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
蒸馏水/mL	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
葡萄糖含量/mg	0	0.0068	0.0136	0.0204	0.0272	0.0340	0.0408
置冰水浴中 10 min							
蒽酮试剂/mL	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
沸水浴中准确煮沸 10 min,取出,用流水冷却,室温放置 10 min,于 582 nm 处比色。							

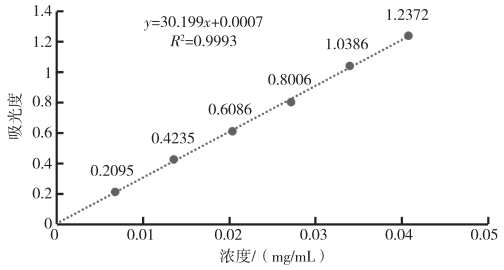


图 1 无水葡萄糖标准曲线

1.2.2 黄精多糖供试品溶液的制备

参照 2020 版《中国药典》[13],取经过 45 ℃干燥至恒重的本品细粉约 0.25 g,精密称定,置 250 mL 具塞锥形瓶中,加 80% 乙醇 150 mL,置水浴中加热回流 1 h,趁热滤过,残渣用 80% 热乙醇洗涤 3 次,每次 10 mL,将残渣及滤纸置烧瓶中,加水 150 mL,置沸水浴中加热回流 1 h,趁热滤过,残渣及烧瓶用热水洗涤 4 次,每次 10 mL,合并滤液与洗液,放冷,转移至 250 mL 量瓶中,加水至刻度,摇匀,即得黄精多糖供试品溶液[1]。

1.2.3 不同县份的黄精多糖含量测定

取施秉县、镇远县、黄平县、麻江县、岑巩县、雷山县、剑河县、台江县、丹寨县 9 个县的不同品种 4 年生鸡头黄精、多花黄精及滇黄精粉末,参照 1.2.2 项下操作进行黄精多糖供试品溶液的制备。采用蒽酮-硫酸法测定黄精多糖含量,即参照 1.2.1 项下步骤:精密量取 1 mL 待测样品溶液,置 5 mL 具塞干燥试管中,加入 0.2% 蒽酮-硫酸溶液、完成反应,然后采用紫外-可见分光光度法,在 582 nm 波长处测量黄精多糖供试品溶液的吸光度,将吸光度值代入标准曲线并计算供试品溶液中含无水葡萄糖的重量(mg),再换算出供试品黄精中的多糖含量(质量分数)。计算公式[13,20]如下。

$$含量/\% = \frac{N \times C \times 10^{-3}}{M} \times 100\%$$

式中:C 为样品浓度,mg/mL;N 为稀释体积,mL;M 为原料质量,g。

1.2.4 不同年份的黄精多糖含量测定

取施秉县 3 年生、4 年生、5 年生的鸡头黄精粉末,黄平县 3 年生、4 年生、5 年生的多花黄精粉末,麻江县 3 年生、4 年生、5 年生的滇黄精粉末,参照 1.2.3 项下的步骤进行黄精多糖含量的测定。

1.2.5 不同规格的黄精多糖含量测定

以镇远县 4 年生滇黄精(QHJ05)、黄平县 4 年生多花黄精(QHJ08)及岑巩县 4 年生鸡头黄精(QHJ15)药材为代表,按照小、中、大三个规格进行分类,洗净。分别挑选大份黄精根茎(5 个)、中份黄精根茎(5 个)和小份黄精根茎(5 个),对它们的长度、宽度、圆盘茎痕及其重量进行记录,计算平均值[21],结果见表 3、表 4、表 5。分别取上述不同规格的黄精粉末,参照 1.2.3 项下的步骤进行黄精多糖含量的测定。

表 3 镇远县的滇黄精大小规格

规格	平均值				
	长/cm	宽/cm	最大圆盘状茎痕/cm	最小圆盘状茎痕/cm	鲜重/g
大规格	38.70	14.80	24.80	9.20	236.20
中规格	34.00	13.00	19.00	8.30	204.50
小规格	20.30	10.00	13.50	8.60	79.70

表 4 黄平县的多花黄精大小规格

规格	平均值				
	长 /cm	宽 /cm	最大圆盘状茎痕 /cm	最小圆盘状茎痕 /cm	鲜重 /g
大规格	41.00	18.00	28.00	9.00	234.10
中规格	29.00	8.00	17.00	5.00	198.80
小规格	18.00	6.00	14.00	8.00	90.60

表 5 岑巩县凯丰镇的鸡头黄精大小规格

规格	平均值				
	长 /cm	宽 /cm	最大圆盘状茎痕 /cm	最小圆盘状茎痕 /cm	鲜重 /g
大规格	39.60	16.80	27.80	10.40	235.80
中规格	26.00	15.00	23.60	9.80	195.30
小规格	19.00	12.00	21.00	8.00	92.50

1.2.6 不同黄精炮制品的多糖含量测定

取镇远县 4 年生滇黄精,采用不同的炮制方法进行炮制,具体如下:(1)清蒸黄精[22]:选取新鲜黄精药材,除去须根和泥沙杂质,将药材洗净并沥干水分,切成片状,置于不锈钢容器内蒸 18 h,直到药材颜色变得黑润后取出,放置至室温,60 ℃干燥至水分小于 15.0%,即可得到;(2)九蒸九晒黄精:取适量黄精鲜品,去掉泥土和黄精根须,清洗干净,放在阴凉处晾干,切成小块,用 20% 黄酒搅拌均匀,静置一段时间捞起置于蒸锅中隔水蒸 3 ~5 h,取出于 45 ~60 ℃烘至半干,即得一蒸一制黄精炮制品,依次步骤反复 2 ~9 次,可制得炮制次数不同的黄精炮制品[23];(3)炒制黄精:采集新鲜黄精,用剪刀剪掉须根,除去泥土杂质,将霉变的黄精丢掉,洗净,将黄精放入锅中翻炒,炒至黄精表面出现焦黄色或褐黄色即可。分别取九蒸九晒、清蒸及炒制法炮制的黄精炮制品粉末参照 1.2.3 项下的步骤进行黄精多糖含量的测定。

2 结果与分析

2.1 不同县份的黄精多糖含量

黔东南州 9 个县的不同品种 4 年生黄精多糖含量的测定结果见表 6。由表 6 可知,黔东南州 9 个县的多花黄精的多糖含量(质量分数)由高到低依次是台江县(14.64%)>雷山县(13.41%)>剑河县(12.83%)>施秉县(11.26%)>丹寨县(9.13%)>黄平县(8.95%)>岑巩县(7.67%)>镇远县(5.84%),除剑河县与施秉县的多花黄精多糖含量无显著性差异,其余各县的多花黄精多糖含量均存在显著性差异($P<0.05$)。黔东南州 4 个县的鸡头黄精的多糖含量(质量分数)由高到低依次是施秉县(14.12%)>黄平县(12.17%)>岑巩县(11.32%)>丹寨县(10.60%),且各县的鸡头黄精多糖含量之间差异显著。黔东南州 4 个县的滇黄精的多糖含量由高到低依次是岑巩县(12.21%)>黄平县(8.31%)>麻江县(7.17%)>镇远县(6.36%)。按干燥品计算[13],黄精多糖含量以无水葡萄糖计,不少于 7.0%,由表 6 可以看出,除黔东南州镇远县的多花黄精及滇黄精的多糖含量低于 7.0%,其他 8 个县的黄精多糖含量均高于 7%,符合标准。分析原因,镇远县黄精种植基地因多种原因造成病虫害时有发生,这可能是造成黄精多糖含量偏低的主要原因之一。此外,对比同一产地同一年份的不同品种黄精,黄精多糖含量也存在显著差异($P<0.05$),总体而言,鸡头黄精多糖含量相对较高。

表 6 黔东南州不同县份的黄精多糖含量($n=3$)

编号	产地	品种	含量/%			
			1	2	3	$X\pm SD$
QHJ02	施秉县	鸡头黄精	13.83	14.09	14.34	$14.12^{a}\pm0.21$
QHJ04		多花黄精	10.76	11.85	11.16	$11.26^{a}\pm0.45$
QHJ05	镇远县	滇黄精	6.71	6.23	6.14	$6.36^{a}\pm0.25$
QHJ06		多花黄精	5.90	5.03	6.58	$5.84^{b}\pm0.63$
QHJ08	黄平县	鸡头黄精	12.17	11.87	12.46	$12.17^{b}\pm0.24$
QHJ10		多花黄精	8.63	9.58	8.65	$8.95^{c}\pm0.44$
QHJ11		滇黄精	8.76	8.31	7.87	$8.31^{b}\pm0.36$
QHJ13	麻江县	滇黄精	6.78	7.27	7.46	$7.17^{c}\pm0.29$
QHJ15	岑巩县	鸡头黄精	11.43	11.15	11.39	$11.32^{c}\pm0.12$
QHJ16		多花黄精	7.61	7.31	8.09	$7.67^{d}\pm0.32$
QHJ17		滇黄精	12.20	12.36	12.08	$12.21^{d}\pm0.11$
QHJ18	雷山县	多花黄精	13.53	13.44	13.25	$13.41^{e}\pm0.12$
QHJ19	剑河县	多花黄精	13.04	13.33	12.11	$12.83^{a}\pm0.52$
QHJ20	台江县	多花黄精	14.13	15.08	14.71	$14.64^{f}\pm0.39$
QHJ21	丹寨县	鸡头黄精	10.12	11.16	10.53	$10.60^{d}\pm0.43$
QHJ22		多花黄精	8.43	10.86	8.09	$9.13^{g}\pm1.23$

注:X 为平均值,SD 为标准偏差,不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

2.2 不同年份的黄精多糖含量

分别采集施秉县 3 年生、4 年生、5 年生的鸡头黄精,黄平县 3 年生、4 年生、5 年生的多花黄精,麻江县 3 年生、4 年生、5 年生的滇黄精进行多糖含量的测定,结果见表 7。由表 7 可知,施秉县鸡头黄精的多糖含量范围为 8.16% ~14.12%,黄平县多花黄精的多糖含量范围为 6.39% ~15.50%,麻江县滇黄精的多糖含量范围为 6.92% ~8.02%。研究还发现,黄平县多花黄精的多糖含量随着年份的增长而增大,3 年生(6.39%)<4 年生(8.95%)<5 年生(15.50%),且差异显著;麻江县滇黄精的多糖含量也随年份的增长而增加,3 年生(6.92%)<4 年生(7.17%)<5 年生(8.02%),但差异不显著;施秉县的鸡头黄精 3 年生到 4 年生多糖含量是上升的,到了 5 年生含量反而降低,可能是因为 4 年后土壤肥质变化导致。由此可知,黄精种植年份与黄精多糖的含量总体呈正相关,这与相关研究报道一致[15]。根据 2020 版《中国药典》,按干燥品计算[13],黄精多糖含量以无水葡萄糖计,不少于 7.0%,发现黄精种植至少达 3 年以上,其品质才能达标,方可进行采收出售,期间做好病虫害防治及定期施肥也是提高产量的关键。

表 7 不同年份的黄精多糖含量(n=3)

编号	产地	品种	年份	含量/%			
				1	2	3	$X\pm SD$
QHJ01	施秉县	鸡头黄精	3 年生	10.71	11.34	10.15	$10.73^{a}\pm0.49$
QHJ02			4 年生	13.83	14.19	14.34	$14.12^{a}\pm0.21$
QHJ03			5 年生	8.29	7.80	8.39	$8.16^{c}\pm0.26$
QHJ07	黄平县	多花黄精	3 年生	6.70	6.15	6.31	$6.39^{a}\pm0.23$
QHJ08			4 年生	8.63	9.58	8.65	$8.95^{c}\pm0.44$
QHJ09			5 年生	15.54	15.14	15.83	$15.50^{b}\pm0.28$
QHJ12	麻江县	滇黄精	3 年生	6.60	7.47	6.69	$6.92^{a}\pm0.39$
QHJ13			4 年生	6.78	7.27	7.46	$7.17^{a}\pm0.29$
QHJ14			5 年生	8.15	8.35	7.57	$8.02^{a}\pm0.33$

2.3 不同规格的黄精多糖含量

采集某个县同一年份同一批黄精,按大、中、小规格进行分类,考察大小规格对黄精多糖含量的影响,结果见表 8。由表 8 可知,镇远县滇黄精的多糖含量范围为 5.96% ~6.37%,黄平县多花黄精的多糖含量范围为 13.16% ~15.56%,岑巩县鸡头黄精的多糖含量范围为 11.29% ~11.53%;根据数据显示,大小规格对黄精多糖含量的影响并没有规律可循,大小规格对多糖含量的影响不大。

表 8 不同规格的黄精多糖含量(n=3)

编号	产地	品种	规格	含量/%			
				1	2	3	$X\pm SD$
QHJ05	镇远县	滇黄精	大规格	5.83	6.34	6.70	$5.96^{a}\pm0.36$
			中规格	6.17	6.28	6.65	$6.37^{a}\pm0.21$
			小规格	6.06	6.13	6.04	$6.08^{a}\pm0.04$
QHJ09	黄平县	多花黄精	大规格	14.84	15.07	14.46	$14.79^{a}\pm0.25$
			中规格	15.23	15.79	15.65	$15.56^{a}\pm0.24$
			小规格	13.84	13.27	12.36	$13.16^{a}\pm0.61$
QHJ15	岑巩县	鸡头黄精	大规格	11.51	11.76	11.32	$11.53^{a}\pm0.18$
			中规格	11.84	11.45	11.03	$11.44^{a}\pm0.33$
			小规格	11.23	11.15	11.08	$11.29^{a}\pm0.24$

2.4 不同黄精炮制品的多糖含量

本研究采用酒蒸(九蒸九晒)、清蒸及炒制法进行黄精的炮制,考察炮制方式对黄精多糖含量的影响,结果见表 9。由表 9 可知,黔东南州镇远县滇黄精九蒸九晒品的多糖含量范围为 2.46% ~7.92%,随着蒸制次数的增加,多糖含量先增加后迅速降低;与生品相比,炒制后的滇黄精多糖含量降低至 4.79%,清蒸后滇黄精多糖含量略有提高(7.08%),一蒸一晒后的多糖含量(6.10%)与生品的(6.14%)相当,三蒸三晒(7.92%)、五蒸五晒(7.37%)后的多糖含量均高于生品,七蒸七晒(2.65%)和九蒸九晒(2.46%)的多糖含量均低于生品的。由此可见,不同炮制方式(九蒸九制、清蒸及炒制)在一定程度上均影响黄精多糖的含量,特别是九蒸九晒过程中会造成黄精多糖先增长后减小,这与孙婷婷[17]、郑晓倩[23]等的研究报道有一定的差异,但与陈文华等的研究报道基本一致[18]。

表 9 不同炮制方式制得的黄精制品的多糖含量(n=3)

产地	品种	炮制方式		含量/%			
				1	2	3	$X\pm SD$
镇远县	滇黄精		生品	6.71	6.23	6.14	$6.36^{a}\pm0.25$
		酒蒸	一蒸一晒	5.96	5.86	6.47	$6.10^{a}\pm0.27$
			三蒸三晒	7.87	7.65	8.23	$7.92^{a}\pm0.24$
			五蒸五晒	7.31	7.90	6.91	$7.37^{a}\pm0.41$
			七蒸七晒	2.81	2.61	2.52	$2.65^{b}\pm0.12$
			九蒸九晒	2.94	2.36	2.07	$2.46^{b}\pm0.36$
			清蒸	6.72	7.31	7.21	$7.08^{a}\pm0.26$
			炒制	4.78	4.96	4.63	$4.79^{c}\pm0.13$

3 结论与讨论

多糖是黄精的主要成分,具有抗疲劳、抗氧化、延缓衰老的功效,不同产地、不同品种、不同年份的黄精的多糖含量均有一定差异,且炮制方式也会影响黄精多糖含量。目前黄精多糖含量的测定方法主要为蒽酮-硫酸法[16-18,21]。

通过蒽酮-硫酸法测定黔东南州不同产地的黄精多糖,发现黔东州 9 个县的多花黄精的多糖含量(质量分数)由高到低依次是台江县(14.64%)>雷山县(13.41%)>剑河县(12.83%)>施秉县(11.26%)>丹寨县(9.13%)>黄平县(8.95%)>岑巩县(7.67%)>镇远县(5.84%),黔东南州 4 个县的鸡头黄精的多糖含量(质量分数)由高到低依次是施秉县(14.12%)>黄平县(12.17%)>岑巩县(11.32%)>丹寨县(10.60%),黔东南州 4 个县的滇黄精的多糖含量由高到低依次是岑巩县(12.21%)>黄平县(8.31%)>麻江县(7.17%)>镇远县(6.37%)。除黔东南州镇远县的 2 个品种黄精的多糖含量略低于 7.0%,其他 8 个县的 3 个品种黄精的多糖含量均高于 7.0%,符合标准。黔东南州同一品种不同县份的黄精多糖含量差异较大,这可能和黄精生长环境、气候及土壤条件等因素有关。具体原因有待结合不同县份黄精种植地的气候因子、土壤因子等进一步深入分析。

同一产地同一年份的不同品种黄精,黄精多糖含量存在显著差异($P<0.05$),其中鸡头黄精多糖含量相对较高,黄精种植年份与黄精多糖的含量总体呈正相关,随着种植年份的增长,多糖含量随之增长;大小规格对黄精多糖含量的影响较小,这为合理采收与评价黄精药材质量提供了精准数据支撑。不同炮制方式(九蒸九晒、清蒸及炒制)在一定程度上均影响黄精多糖的含量,与生品相比,炒制后的黄精多糖含量显著下降,清蒸后的黄精多糖含量略有提高,九蒸九晒炮制过程中会造成黄精多糖先增长后减小。结合相关文献报道[16-18,22-23],不难发现,黄精不同炮制品中的多糖含量的变化规律有所不同,故不能单一将多糖含量作为评价黄精炮制工艺优良的唯一标准,后续还需结合黄精不同炮制品的内在质量及体外抗氧化、抑菌、抗肿瘤等作用进行综合评价。

参考文献【REFERENCES】

[1] 陈建祥,吴柳绚. 黔东南黄精产业发展现状与对策研究[J]. 耕作与栽培,2021,41(6):119-121.

[2] 崔阔澍,肖特,李慧萍,等. 我国黄精种质资源研究进展[J]. 江苏农业科学,2021,49(1):35-39.

[3] 郑玲艳,马小龙,孙艺琦. 药食同源黄精的资源分布与开发应用现状[J]. 浙江农业科学,2022,63(8):1679-1684.

[4] 李彦力,苏艺,袁晚晴,等. 黄精主要活性成分、功能及其作用机制研究进展[J]. 现代食品科技,2023,39(12):354-363.

[5] 张凯. 黄精属植物化学成分的比较研究[D]. 北京:北京协和医学院,2023.

[6] 李玲. 连续制备的多花黄精多糖的理化性质及活性研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.

[7] 李孝娟,周思诗,杨梦青,等. 3 种百合科植物多糖对学习记忆力的改善及其机制的研究进展[J]. 四川畜牧兽医,2022,49(5):24-26.

[8] 叶红翠,张小平,余红,等. 多花黄精粗多糖抗肿瘤活性研究[J]. 中国实验方剂学杂志,2008(6):34-36.

[9] 郭凯丽,刘继平,赵重博,等. 酶辅助超声法提取陕产黄精总黄酮及其抗氧化、抗 A549 细胞增殖活性研究[J]. 天然产物研究与开发,2022,34(4):630-638.

[10] 曹冠华,李泽东,赵荣华,等. 生黄精多糖与制黄精多糖抑菌效果比较研究[J]. 食品科技,2017,42(9):202-206.

[11] 陈靓雯,柯晓燕. 古法炮制多花黄精提取物抗疲劳作用研究及其机制探讨[J]. 科学技术创新,2019(4):3-4.

[12] XIE S Z,YANG G,JIANG X M,et al. *Polygonatum cyrtonema* Hua polysaccharide promotes GLP-1 secretion from enteroendocrine L-cells through sweet taste receptor-mediated cAMP signaling[J]. Journal of agricultural and food chemistry,2020,68(25):6864-6872.

[13] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:319-320.

[14] 贺维涛,年婧,赵重博. 不同产地黄精多糖含量、多糖红外光谱及抗氧化活性研究[J]. 现代中医药,42(6):51-55.

[15] 吴江,朱荣平,樊成,等. 不同年份多花黄精多糖和重金属含量与土壤关联性评价[J]. 湖北农业科学,2024,63(6):181-186.

[16] 蔡春燕,陈鑫,刘绍姜,等. 不同炮制阶段多花黄精内在质量及体外抗氧化作用比较研究[J]. 时珍国医国药,2022,33(11):2655-2669.

[17] 孙婷婷,张红,刘建峰,等. 陕西产黄精不同炮制品中多糖含量分析[J]. 中国药师,2016,19(2):232-234.

[18] 陈文华,谭会颖,邴帅,等. 传统炮制工艺对热河黄精多糖含量的影响[J]. 时珍国医国药,2018,29(12):2940-2942.

贵州石蒜属植物中加兰他敏含量的研究*

剑可欣[1,2],张友元[3▲]
([1] 川渝共建乡土植物种质创新与利用重庆市重点实验室,重庆 404100;[2] 贵阳市城市绿化服务中心,贵州 贵阳 550003;[3]贵阳职业技术学院,贵州 贵阳 550081)

摘 要: 以贵州产石蒜属4种植物为研究对象,为探索加兰他敏含量在种间的差异及各自的最佳采收部位、时期等,试验采用高效液相色谱法,测定其加兰他敏含量。结果表明:鳞茎、根系中加兰他敏含量总和高低依次为稻草石蒜、忽地笑和石蒜,而中国石蒜呈现不稳定的现象;鳞茎中,石蒜、稻草石蒜、忽地笑加兰他敏的最大积累时期为7月(0.188 g/100 g、0.237 g/100 g、0.262 g/100 g),中国石蒜为6月(0.402 g/100 g);根系中,稻草石蒜、忽地笑加兰他敏的最大积累时期为7月(0.488 g/100 g、0.403 g/100 g),石蒜为6月(0.184 g/100 g),中国石蒜为4月(1.058 g/100 g)。研究可为这4种植物的采收和提取加兰他敏提供切实可行的方案。

关键词: 加兰他敏,石蒜属,贵州
中图分类号:S682.2+9 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0051-04

Study on galanthamine contents of *Lycoris* from Guizhou*

JIAN Kexin[1,2], ZHANG Youyuan[3▲]

([1] *Chongqing Key Laboratory of Germplasm Innovation and Utilization of Native plants, Chongqing 404100*; [2] *Guiyang Urban Green Management Office, Guiyang 550003, China*; [3] *Guiyang Vocational and Technical College, Guiyang 550081, China*)

Abstract: In this study, 4 species of *Lycoris* from Guizhou were taken as the research objects to explore the difference of galantamine content among species and the best harvesting parts and periods. High performance liquid chromatography (HPLC) was used to detect the galantamine content of *Lycoris*. The results showed that *Lycoris straminea* had the highest total content of glantamine in bulb and root, followed by *L. aurea* and *L. radiata*, while the galantamine content of *L. chinensis* was not stable. In the bulb, the maximum galantamine accumulation period for *L. radiata*, *L. straminea* and *L. aurea* was in July (0.188 g/100 g, 0.237 g/100 g, 0.262 g/100 g), and for *L. chinensis*

[19] 李旭鸿,冯源源,黄月,等.3种黄精多糖含量及抗氧化活性的差异分析[J].食品工业,2023,44(4):172-175.
[20] 王敏.超高压提取黄精多糖的工艺及应用[D].泰安:山东农业大学,2022.
[21] 曾婷,周芳,汤嫣然,等.紫外-可见分光光度法测定多花黄精多糖含量[J].湖南中医志,2018,34(9):167-169.
[22] 刘玲,鲍家科,刘建军,等.蒸黄精的不同炮制方法比较[J].中国实验方剂学杂志,2014,20(24):14-17.
[23] 郑晓倩,金传山,张亚中,等.黄精九蒸九晒炮制过程中糖类成分动态变化[J].中成药,2020,42(7):1837-1841.

收稿日期:2024-09-26;**修回日期:**2024-12-11
基金项目:2022年度黔东南州基础研究计划项目(黔东南科合基础〔2022〕05号);贵州省"千"层次创新型人才(黔千层人才〔2023〕203006);凯里学院2023年校级专项课题(2023XJZX0304);凯里学院"十四五"学科专业平台团队一体化建设规划-科研项目(YTH-XM2024019);2022年省级"金课"(一流课程)建设项目(SJJK202221)。
作者简介:胡秀虹(1986-),女,江西景德镇人,硕士,教授,研究方向为微生物技术与药用植物药效研究。

was in June(0.402g/100g). In the root, the maximum galantamine accumulation period for *L. straminea* and *L. aurea* was in July(0.488g/100g, 0.403g/100g), for *L. radiata* was in June(0.184g/100g), and for *L. chinensis* was in April(1.058g/100g). The study can provide a feasible scheme for the harvesting and extraction of galantamine from the 4 species of *Lycoris*.

Keywords: galanthamine, *Lycoris*, Guizhou

石蒜属(*Lycoris*)植物为多年生球根类草本植物,隶属石蒜科。全世界分布约有 20 余种,主要分布于中国,少数产于日本和朝鲜。我国约有石蒜属植物 17 种(含 1 个变种)、日本 6 种、朝鲜 2 种、老挝 1 种、缅甸 1 种。该属半数以上种类产于我国,其中 12 种为中国特有,主要分布于我国中部及西南各省,以皖、浙、苏三省资源最为丰富,蕴藏量较大,除野生资源外,杭州植物园近年来还搜集保存了 6 个人工杂交种[1-4]。

加兰他敏是 1952 年从植物 *Galanthus woronowi* 中首次分离获得的一种四环生物碱,属于具有可逆作用的胆碱酯酶抑制剂。我国于 60 年代在石蒜属植物中分离得到,并于 1977 年收载于中国药典中。

加兰他敏被用于治疗脊髓灰质炎及各种神经系统疾病,但主要用于治疗青光眼和作为使用箭毒后的解毒药。近年来加兰他敏在治疗早老性痴呆和血管性痴呆,治疗酒精依赖、尼古丁依赖性等方面引起了广大研究者的兴趣[5]。加兰他敏在抗早、中期阿尔茨海默病有特殊的疗效,其药效作用已获得世界神经病学会的认可[6]。

石蒜属植物作为一种民间药材使用,已有悠久的历史,且具有可观的实用价值,特别是它的药用价值,每提取一克加兰他敏都要消耗大量的野生资源,随着需求量的上升和自然环境的日趋恶化,加之人们的滥采乱挖,使得资源严重匮乏。人工栽培扩繁,是较好地解决石蒜属植物资源匮乏的方法,具有野生采集无法比拟的优势。如何在石蒜属植物中筛选加兰他敏高含量的药材原料,确定其最佳采收部位及时期,是实现资源有效利用的关键。

据调查,贵州分布有野生石蒜属植物 4 种,分别是石蒜 *Lycoris radiata*、稻草石蒜 *L. straminea*、中国石蒜 *L. chinensis* 和忽地笑 *L. aurea*[7],资源优势明显。若得以充分利用,适时适当地在乡村或工业园区发展石蒜植物产业,可推动乡村的振兴与发展。

从石蒜属植物中提取加兰他敏,前人已有报道,但是大多数仅集中在 1 ~2 个种类,且部分研究结论之间存在相互矛盾之处[8-9],对加工生产加兰他敏带来困扰。本研究以贵州产石蒜属 4 种植物为研究对象,探索加兰他敏含量在种间的差异及各自的最佳采收部位、时期等时空分布特征,综合生态环境因子,以确定加兰他敏高含量的药材原料的最佳方案。

1 材料与方法

本研究所选 4 种贵州石蒜属植物引种栽植于贵阳市园林绿化科学研究院苗圃地,海拔 1073.8 m,北纬 26°36′8″,东经 106°41′7″。2024 年 4 月至 7 月,每隔 30 天左右,分别采集 4 个种的鳞茎和根系,鲜重各约 60 g,采用高效液相色谱法测定其加兰他敏含量[10-13]。检测仪器为 Agilent 1260 II。具体测定方法如下。

1.1 标曲

准确称取加兰他敏标准品 0.0130 g,置于 10 mL 容量瓶,用甲醇溶解,加入 100 μL 氨水,甲醇稀释定容至刻度,加兰他敏标准溶液浓度为 1.3 mg/mL。将上述溶液稀释 10 倍,则加兰他敏标准溶液浓度为 130 μg/mL,再稀释到 26 μg/mL、13 μg/mL、6.5 μg/mL、3.25 μg/mL,后经 0.22 μm 尼龙滤膜过滤,注入液相色谱样品瓶,标准曲线由工作站自动生成。

1.2 提取样品中加兰他敏

称取 0.1 g(精确到 0.001 g)样品到 50 mL 离心管中,加入 1 mL 10% 氢氧化钠溶液碱化 15 min,加入 15 mL 甲醇超声 30 min。后经 0.22 μm 尼龙滤膜过滤,注入液相色谱仪分析。由此试液可以测定加兰他敏总量。

1.3 测试条件

色谱柱:安捷伦 Polaris 5 C18-A 250×4.6 mm, 5-Micron;流动相:甲醇:pH2.4 磷酸水溶液 = 10∶90,等度洗脱;柱温:30 ℃;波长:230 nm;流速:1.0 mL/min;进样量:10 μL。

2 结果与分析

4 种石蒜属植物不同部位、不同生长时期加兰他敏含量不同,结果见表 1 和表 2。

表 1 4 种石蒜在不同生长时期鳞茎中加兰他敏含量比较

序号	种 名	加兰他敏含量/(g/100g)			
		4 月	5 月	6 月	7 月
1	石蒜 *L. radiata*	0.155	0.154	0.131	0.188
2	稻草石蒜 *L. straminea*	0.129	0.194	0.2	0.237
3	忽地笑 *L. aurea*	0.142	0.172	0.244	0.262
4	中国石蒜 *L. chinensis*	0.292	0.074	0.402	0.123

表 2 4 种石蒜在不同生长时期根系中加兰他敏含量比较

序号	种 名	加兰他敏含量/(g/100g)			
		4 月	5 月	6 月	7 月
1	石蒜 *L. radiata*	0.15	0.151	0.184	0.177
2	稻草石蒜 *L. straminea*	0.254	0.371	0.325	0.488
3	忽地笑 *L. aurea*	0.177	0.379	0.34	0.403
4	中国石蒜 *L. chinensis*	1.058	0.24	0.674	0.206

2.1 种间不同部位加兰他敏含量差异的分析

从表 1、表 2 可以看出,中国石蒜加兰他敏的含量相对较高,尤其在 4 月和 6 月表现突出,这可能与中国石蒜具有较大的生物量有关。孙长生等对 11 种石蒜属植物进行试验发现:8 月采收的鳞茎中,中国石蒜的加兰他敏含量最高,宜作为药用良种进行系统研究和发展规模种植[14],但本试验显示出各时期含量差异较大,没有明显规律。

结合表 1、表 2 和图 1,鳞茎、根系中加兰他敏总含量高低依次为稻草石蒜、忽地笑和石蒜,而中国石蒜呈现不稳定的现象;石蒜根系与鳞茎中加兰他敏含量接近,而在稻草石蒜、忽地笑、中国石蒜根系中,加兰他敏含量均高于鳞茎。孙长生等的试验表明:除了安徽石蒜与乳白石蒜,乳白石蒜与换锦花之间,其他不同品种石蒜间的加兰他敏含量差异显著,其中中国石蒜的含量最高[14]。但就本研究来看,除石蒜外,其余 3 种的加兰他敏含量接近。

2.2 种间不同时期加兰他敏含量的分析

不同种石蒜属植物鳞茎、根中加兰他敏含量随生长时期的不同存在一定差异,其中石蒜、稻草石蒜、忽地笑鳞茎中加兰他敏的最大积累时期为7月

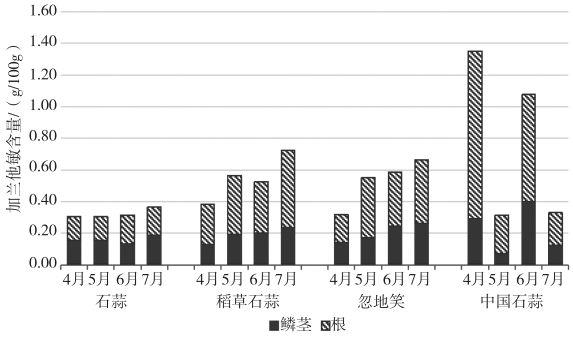


图 1 不同种不同时期加兰他敏含量的比较

(0.188 g/100 g、0.237 g/100 g、0.262 g/100 g),中国石蒜为 6 月(0.402 g/100 g);稻草石蒜、忽地笑根系中加兰他敏的最大积累时期为 7 月(0.488 g/100 g、0.403 g/100 g),石蒜为 6 月(0.184 g/100 g),中国石蒜为 4 月(1.058 g/100 g)。

从表 1、表 2 可以看出,除中国石蒜外,石蒜、稻草石蒜和忽地笑在 4 月至 7 月时,鳞茎、根系中加兰他敏含量整体呈上升趋势,该结果与全妙华等探索忽地笑鳞茎中总生物碱含量随不同月份变化的规律类似[15]。刘坤等对中国石蒜总生物碱含量的动态变化进行研究发现,不同生长期中国石蒜鳞茎总生物碱含量差异不显著,以开花期最高,出叶期最低[16]。但本次试验中中国石蒜并没有表现出类似规律,且波动幅度较大。这可能与个体差异因素干扰有关:石蒜属秋出叶种(石蒜、稻草石蒜、忽地笑)与春出叶种(中国石蒜)之间物候期不同,从而导致年生长周期中生理生化进程、次生代谢合成积累进程的不一致[17]。全妙华等人的研究发现:忽地笑鳞茎中总生物碱含量在 11 月含量最高,12 月次之,1 月的最低,休眠期(5 月至 8 月)较低[15]。

3 结论与讨论

由于试验受时间、取材等多种因素的制约,其内容的深度和范围有限,加之影响植物次生代谢产物合成和积累的因素很多,如物候期、个体密度、病虫害、水分、温度、光照、养分等,且环境因子对植物体内次生代谢的影响和作用非常复杂。要综合评价最佳采收部位和时期,不仅要考虑主体植物生长过程中的各个阶段,还要考虑环境条件的相互作用,才能得出更准确的结论。本试验主要针对 4 月至 7 月的石蒜、稻草石蒜、忽地笑、中国石蒜的鳞茎、根系进行

了加兰他敏含量的测定。后续还需要进一步扩大研究周期以及不同部位中加兰他敏含量的研究,而且要考虑加兰他敏随生长周期的动态积累情况。如李青竹等[18]研究换锦花中加兰他敏的动态积累规律发现:不同生长时期,加兰他敏在换锦花各个器官的分配变化较大,在盛花期,换锦花加兰他敏含量较高的部位为鳞茎,各器官中积累量排列顺序为:鳞茎>花>根>花葶;在盛叶期,加兰他敏含量较高的部位为叶片,各器官中积累量排列顺序为:叶>根>鳞茎;鳞茎中,加兰他敏含量总体表现为在休眠期积累,7 月最高。

就本研究而言,可初步认为石蒜、稻草石蒜、忽地笑在使用鳞茎提取加兰他敏时,宜选择在 7 月,而中国石蒜则在 6 月;稻草石蒜、忽地笑的根系在 7 月为加兰他敏最大积累期,石蒜为 6 月,而中国石蒜为 4 月。但就综合分析来说,4 月是提取中国石蒜加兰他敏的最佳时期,而 7 月可考虑利用稻草石蒜和忽地笑。

目前,有关于石蒜属植物加兰他敏含量的系统研究(部位、生长期等)还有待深入和扩展,本研究在这方面欲起到抛砖引玉的作用。

参考文献【REFERENCES】

[1] 王仁师. 关于石蒜属(*Lycoris*)的生态地理[J]. 西南林学院学报,1990,10(1):41-48.

[2] 杨志玲,谭梓峰. 石蒜资源的开发利用和繁育研究建议[J]. 经济林研究,2003,21(4):97-99.

[3] 张鹏翀,鲍淳松,高淑滢,等. 华东地区不同居群石蒜属种质资源变异类型的优良单株选育[R]. 杭州:杭州植物园:2020.

[4] 张兆金. 石蒜属植物在园林绿化中的应用研究[J]. 农村经济与科技,2021(21):56-57.

[5] MURRAY A, RASKIND M. Update oil alzheimer drugs (gahnthamine)[J]. The neurologiat,2003,9(5):235-240.

[6] 马振英,赵文丽. 氢溴酸加兰他敏获得美国批准[J]. 国外医学(药学分册),2001(6):378.

[7] 罗扬,邓伦秀,杨成华. 贵州维管束植物编目[M]. 北京:中国林业出版社,2015.

[8] 李子璇,江海,曹小勇,等. 石蒜植株中加兰他敏的分布与含量测定[J]. 江苏农业科学,2009(3):290-292.

[9] 刘湘丹,王姣,李凤娟,等. 不同产地人工栽培黄花石蒜不同器官中加兰他敏含量测定[J]. 湖南中医药大学学报,2015,35(5):31-33.

[10] 聂媛媛,周海翔,彭菲,等. HPLC 法测定黄花石蒜不同部位的加兰他敏含量[J]. 湖南中医药大学学报,2009,29(5):51-53.

[11] 李明凯,张玉琼,董召荣,等. 高效液相色谱法测定石蒜中加兰他敏、力可拉敏及石蒜碱 3 种生物碱[J]. 分析测试学报,2012,31(8):957-961.

[12] 熊海蓉,李霞,文祝友,等. 野生石蒜中石蒜碱和加兰他敏的分离研究[J]. 化学与生物工程,2012,29(9):51-53.

[13] 王玉霜,全妙华,赵博文,等. 高效液相色谱法测定雪峰山不同海拔忽地笑石蒜碱和加兰他敏含量[J]. 中国民族医药杂志,2013,19(9):56-59.

[14] 孙长生,朱虹,彭志金. 石蒜属植物加兰他敏含量研究[J]. 现代中药研究与实践,2011,25(6):30-31.

[15] 全妙华,夏伟健. 忽地笑鳞茎中总生物碱含量的月动态变化[J]. 光谱实验室,2012,29(3):1800-1803.

[16] 刘坤,周守标,张栋. 中国石蒜总生物碱提取工艺优化及其含量动态变化[J]. 中国卫生检验杂志,2010,20(4):703-706.

[17] 董娟娥,梁宗锁. 植物次生代谢物积累量影响因素分析[J]. 西北植物学报,2004(10):1979-1983.

[18] 李青竹,蔡友铭,张永春,等. UPLC-MS/MS 法快速分析换锦花中加兰他敏的动态积累变化[J]. 分子植物育种,2019,17(3):1011-1018.

收稿日期:2024-10-08;**修回日期**:2024-10-11

基金项目:贵阳职业技术学院院级课题(GYZJY2024YB-022);川渝共建乡土植物种质创新与利用重庆市重点实验室开放课题基金(XTZW2022-KF02)。

作者简介:**剑可欣**,女,硕士,工程师,主要从事园林植物与观赏园艺方面的研究工作。

▲**通讯作者**:**张友元**,男,博士,讲师,主要从事植物分类方面的研究工作。

基于中医传承辅助平台和 SPSS 卡方分析探究中药方剂治疗眩晕高血压用药规律

杨晓梅[1],林森林[2▲],陈登丰[1],杨敬鸿[1]
([1] 福建省南平市人民医院 药剂科,福建 南平 353000;[2] 福建省厦门市中医院 药学部临床药学室,福建 厦门 361000)

摘 要: 目的:利用中医传承辅助平台 v2.5 和 SPSS16.0 卡方分析探究治疗眩晕高血压中药方剂用药规律,为研发制剂提供科学依据。**方法:**回顾性收集南平市人民医院 2024 年 1 月至 3 月治疗眩晕高血压中药方剂,借助中医传承辅助平台 v2.5 和 SPSS16.0 卡方分析,对方剂中的药物频次、四气五味、归经、关联性等内容进行探究。**结果:**共收集到 173 个方剂,涉及 171 味中药,分析出甘草、白术、白芍使用频率较高,药性以平、温、寒性药为主,与其他药性比差异显著;五味以甘、苦、辛、酸味为主,与咸、涩味比差异显著;主要归肝、脾、心、肾、肺、胃经,与其他归经相比差异显著;白术-茯苓,牛膝-天麻,钩藤-天麻为常用药物组,钩藤→天麻,牛膝,钩藤→天麻,白芍,钩藤→天麻关联度较高。**结论:**通过中医传承辅助平台 v2.5 和 SPSS16.0 卡方分析,可挖掘中药方剂治疗眩晕高血压用药规律,为研发制剂提供科学依据。

关键词: 眩晕高血压,中药方剂,中医传承辅助平台,卡方分析,用药规律
中图分类号:R256.35 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0055-06

Medication rules in treating vertigo hypertension based on TCM inheritance assistance platform and SPSS chi-square analysis

YANG Xiaomei[1], LIN Senlin[2▲], CHEN Dengfeng[1], YANG Jinghong[1]

([1] *Nanping People´s Hospital, Nanping 353000, China*; [2] *Xiamen Hospital of Traditional Chinese Medicine, Xiamen 361000, China*)

Abstract: In this study we analyzed the medication rules in the treatment of vertigo hypertension by using TCM inheritance assistance platform v2.5 and SPSS16.0 chi-square analysis. The traditional Chinese medicine prescriptions for treating vertigo hypertension in Nanping People´s Hospital from January to March 2024 were collected, and the frequency, characteristics and correlation of the drugs in the prescriptions were explored with the help of TCM inheritance assistance platform v2.5 and SPSS16.0 chi-square analysis. A total of 173 prescriptions were collected, involving 171 traditional Chinese medicines. Liquorice root, largehead atractylodes rhizome and debark peony root were used more frequently. The drug properties were mainly flat, warm and cold, and the difference was significant compared with other drug properties. The tastes were mainly sweet, bitter, spicy and sour, which were significantly different from salty and astringent. The main channels were liver, spleen, heart, kidney, lung and stomach, which were significantly different from other channels. The commonly used drug groups were largehead atractylodes rhizome-Indian bread, twotoothed achyranthes root-tall gastrodia tuber, and gambir plant nod-tall gastrodia tuber. This study serves to provide scientific basis for the development of preparations.

Keywords: vertigo hypertension, traditional Chinese medicine prescription, TCM inheritance assistance platform, chi-square analysis, medication rules

眩晕是以头晕、目眩为主症的一类脑系病症,常有视物旋转、眼前发黑、恶心呕吐甚则仆倒等临床症状,西医高血压、脑缺血、耳石症、梅尼埃病等属眩晕范畴。《黄帝内经》称眩晕为“眩冒”“眩”,《素问·至真要大论》曰:“诸风掉眩,皆属于肝”,《景岳全书》载:“无虚不作眩”。《丹溪心法·头眩》载:“无痰则不作眩,痰因火动”[1]。中医认为眩晕病机与肝阳上亢、肾虚髓空、痰浊蒙窍等密切相关。

高血压是临床常见的慢性病和多发病,有病程长、进展缓慢、并发症多的特点,与家族遗传、个人情绪、饮食习惯等因素有关,有研究报道[2],我国高血压患病人数逐渐增多。血管紧张素转换酶抑制剂、血管紧张素Ⅱ受体拮抗剂、钙通道阻滞剂及 β 受体阻断剂为西医治疗高血压的主要药物,常需两种、三种降压药联合使用以保持血压稳定[3],西药治疗疾病的同时往往有副作用,中医通过辨证施治予患者个体化给药方案,治疗疾病有其独特的优势。有文献报道[4-6],中药汤剂在治疗眩晕高血压方面也取得了明显的疗效。因此,本文通过回顾性方式,收集福建省南平市人民医院 2024 年 1 月至 3 月治疗眩晕高血压中药方剂,借助中医传承辅助平台 v2.5 和 SPSS 16.0 卡方分析探究其用药规律[7-10],为我院研发制剂提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料收集

回顾性收集福建省南平市人民医院 2024 年 1 月至 3 月治疗眩晕高血压的中药方剂,包括方剂药味和剂量。中医诊断眩晕同时西医诊断高血压才可纳入,如中医诊断眩晕而西医诊断无高血压,不纳入;西医诊断高血压而中医诊断无眩晕,不纳入。

1.2 数据预处理

中药名以 2020 年版《中国药典》[11]和《临床中药学》[12]为准,对符合要求的中药处方药味名称进行标准化处理。①对不同炮制品中药名称进行标准化,姜半夏包括姜半夏、法半夏,黄芪包括黄芪、炙黄芪,稻芽包括生稻芽、炒稻芽,酸枣仁包括生酸枣仁、炒酸枣仁;②中药别名称标准化,山茱萸包括山茱萸、山萸肉;③不同产地中药名称标准化,紫草指的是新疆紫草。

1.3 数据录入

1.3.1 中医传承辅助平台(v2.5)

将符合要求的方剂预处理,按一定顺序整理在 word 文档上。将整理好的方剂按照一定顺序录入中医传承辅助平台(平台系统→方剂管理),包括中药方剂名称(用序号代替)、方剂组成药味、中药剂量,为了确保数据正确,两人合作,一人录入,另一人核查。

1.3.2 SPSS 卡方差异显著性分析

将纳入中药处方的用药频次、四气五味、归经在中医传承辅助平台(v2.5)上进行分析处理后,再用 SPSS16.0 软件对其进行卡方差异性分析(以中医传承辅助统计的用药频次、四气五味、归经结果为数据)。

2 结果分析

2.1 用药频次统计及差异显著性分析

2.1.1 中医传承辅助平台(v2.5)方剂用药频次统计

将符合要求的 173 首中药方剂录入中医传承辅助方剂管理平台后,点击统计报表平台→基本信息统计→药物频次→导出,得到 171 味药物,累计频次 2037,位列前 10 的药名(茯苓、牛膝出现频次相同,合并为一个,同理陈皮、半夏并为一个)及频率具体见表 1。

表 1 组方中频次位列前 10 的中药及频率

药物	频次	频率/%	药物	频次	频率/%
甘草	107	5.25	钩藤	60	2.95
白术	92	4.52	山茱萸	48	2.36
白芍	86	4.22	黄芪	47	2.31
茯苓	84	4.12	陈皮	46	2.26
牛膝	84	4.12	半夏	46	2.26
天麻	82	4.03	丹参	45	2.21

2.1.2 处方中频次位列前 10 的中药差异显著性分析

处方中出现频次前 10 的中药(茯苓、牛膝出现频次相同,合并为一个,同理陈皮、半夏并为一个),用卡方检验进行两两差异显著性分析。处方中甘草使用频次最多,位列第一,甘草与白术、白芍、茯苓、

牛膝、天麻相比差异无统计学意义($P>0.05$),与其余药相比差异显著($P<0.01$);白术与白芍、茯苓、牛膝、天麻相比差异无统计学意义,与其余药相比差异显著;白芍与茯苓、牛膝、天麻相比差异无统计学意义,与钩藤相比差异有统计学意义($P<0.05$),与其余药物相比差异显著。其余两两药物相比差异结果具体见表2。

表2 组方中频次位列前10的中药两两差异比较结果

S/p	甘草	白术	白芍	茯苓	牛膝	天麻	钩藤	山茱萸	黄芪	陈皮	半夏
白术	0.288										
白芍	0.131	0.653									
茯苓	0.096	0.546	0.878								
牛膝	0.096	0.546	0.878	1.000							
天麻	0.069	0.448	0.758	0.877	0.877						
钩藤	0.000	0.009	0.031	0.046	0.046	0.065					
山茱萸	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.003	0.248				
黄芪	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.209	0.918			
陈皮	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.174	0.873	0.917		
半夏	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.174	0.873	0.917	1.000	
丹参	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.143	0.756	0.835	0.917	0.917

注:$P<0.05$ 有统计学意义;$P<0.01$ 统计学差异显著。

2.2 药物四气统计及差异显著性分析

2.2.1 中医传承辅助平台(v2.5)方剂药物四气统计

将符合要求的173首中药方剂录入中医传承辅助方剂管理平台后,点击统计报表平台→基本信息统计→四气→导出,得到四气总频次,累计1938次,方剂中药物四气频次及频率具体见表3。

表3 组方中中药四气频次及频率

四 气	频次/次	频率/%
平	677	34.93
温	605	31.22
寒	544	28.07
凉	110	5.68
热	2	0.10

2.2.2 药物四气差异显著性分析

用卡方检验对方剂中的药物四气进行两两差异显著性分析。平性共677次,出现次数最多,与温性相比差异有统计学意义($P<0.05$),与寒、凉、热性相比差异显著($P<0.01$);温与寒相比差异无统计学意义($P>0.05$),与凉、热相比差异显著($P<0.01$)。其余四气两两差异比较结果具体见表4。

表4 组方中中药四气两两比较结果

S/p	平	温	寒	凉
温	0.044			
寒	0.000	0.072		
凉	0.000	0.000	0.000	
热	0.000	0.000	0.000	0.000

注:$P<0.05$ 有统计学意义;$P<0.01$ 统计学差异显著。

2.3 药物五味统计及差异显著性分析

2.3.1 中医传承辅助平台(v2.5)方剂药物五味统计

将符合要求的173首中药方剂录入中医传承辅助方剂管理平台后,点击统计报表平台→基本信息统计→五味→导出,累计药味频次3048次,组方中药物五味及频率具体见表5。

表5 组方中中药五味频次及频率

五 味	频次/次	频率/%
甘	1156	37.93
苦	865	28.38
辛	570	18.70
酸	261	8.56
咸	106	3.48
涩	90	2.95

2.3.2 药物五味差异显著性分析

用卡方检验对方剂中的药物五味频率进行两两差异显著性分析。甘味共1156次,频次最高。五味中除了咸与涩相比差异无统计学意义外($P>0.05$),其余四味两两差异均显著($P<0.01$),具体见表6。

表6 组方中中药五味两两比较结果

S/p	甘	苦	辛	酸	咸
苦	0.000				
辛	0.000	0.000			
酸	0.000	0.000	0.000		
咸	0.000	0.000	0.000	0.000	
涩	0.000	0.000	0.000	0.000	0.253

注:$P<0.05$ 有统计学意义;$P<0.01$ 统计学差异显著。

2.4 药物归经统计及差异显著性分析

2.4.1 中医传承辅助平台(v2.5)方剂药物归经统计

将符合要求的173首中药方剂录入中医传承辅助方剂管理平台后,点击统计报表平台→基本信息统计→归经→导出,药物归经频次共4947次,方剂

中药物归经频次及频率具体见表 7。

表 7 方剂中药物归经频次及频率

归经	频次/次	频率/%	归经	频次/次	频率/%
肝	1082	21.87	胃	553	11.18
脾	857	17.32	胆	239	4.83
心	637	12.88	大肠	138	2.79
肾	585	11.83	心包	110	2.22
肺	584	11.81	膀胱	84	1.70

2.4.2 药物五味差异显著性分析

将方剂中药物归经频率用卡方检验进行两两差异显著性分析。肝经药物 1082 次,次数最多,与其他归经相比差异均显著($P<0.01$);其次为脾经,达 857 次,与其他归经相比差异均显著($P<0.01$);心经与肾、肺经相比差异无统计学意义($P>0.05$),与胃经相比差异有统计学意义($P<0.05$),与其他归经相比差异均显著。其余归经两两相比差异结果具体见表 8。

表 8 方剂中药物归经两两比较结果

S/p	肝	脾	心	肾	肺	胃	胆	大肠	心包
脾	0.000								
心	0.000	0.000							
肾	0.000	0.000	0.137						
肺	0.000	0.000	0.129	0.997					
胃	0.000	0.000	0.015	0.343	0.358				
胆	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
大肠	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
心包	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.075	
膀胱	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.062

注:$P<0.05$ 有统计学意义;$P<0.01$ 统计学差异显著。

2.5 药物组合规律及关联分析

方剂录入完毕,登入中医传承辅助数据平台(数据分析→组方规律),支持度个数为 40,置信度为 0.95,共显示 24 条数据,由 9 味药组成,白术-茯苓,牛膝-天麻,钩藤-天麻组合出现频次排列前 3,药物组合位列前 15 的见表 9,关联分析见表 10,药物组合网络图见图 1。

表 9 方剂中常见的药物组合及频次

药物组合	频次	药物组合	频次
白术, 茯苓	68	白芍, 天麻	51
牛膝, 天麻	63	白术, 白芍	50

续表 9

药物组合	频次	药物组合	频次
钩藤, 天麻	59	白芍, 钩藤	47
白术, 甘草	57	茯苓, 天麻	46
牛膝, 钩藤	55	白芍, 钩藤, 天麻	46
牛膝, 钩藤, 天麻	54	牛膝, 白芍, 天麻	45
白芍, 茯苓	53	牛膝, 茯苓	44
牛膝, 白芍	53		

表 10 置信度>0.95 的关联规则

关联规则	置信度
钩藤→天麻	0.9833
牛膝, 钩藤→天麻	0.9818
白芍, 钩藤→天麻	0.9787
牛膝, 白芍, 钩藤→天麻	0.9772
牛膝, 白芍, 天麻→钩藤	0.9555

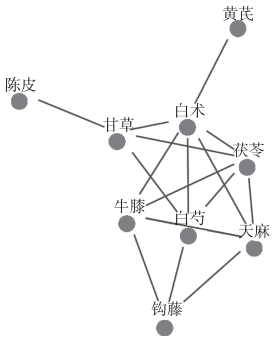


图 1 药物组合网络图

3 讨论

1)药物出现频次分析

甘草、白术、白芍、茯苓、牛膝、天麻、钩藤、山茱萸、黄芪、陈皮、半夏、丹参(茯苓、牛膝出现频次一致,合并一个,陈皮、半夏出现频次相同,并为一个)为出现频次位列前 10 的中药,其中包含了半夏白术天麻汤(半夏、白术、天麻、茯苓、陈皮、甘草)和二陈汤(陈皮、半夏、茯苓、甘草)的药物,说明临床通过化痰熄风、健脾祛湿以达到降低血压的目的,湿为阴性,阻遏气机,气血运行不畅,风邪主动向上,痰湿与风邪存于体内,使人血瘀痛疼,头晕目眩,以白芍、钩藤平抑肝阳、止痛,丹参活血化瘀。高血压老年人发病率较高,以黄芪补气,牛膝、山茱萸补肝肾,强筋骨,增强正气。SPSS16.0 卡方分析可知,甘草、白术、白芍、茯苓、牛膝、天麻两两比较差异无统计学意

义,说明临床治疗眩晕高血压健脾祛湿、平抑肝阳、补肝肾类药物为基础,佐以别的药物配伍治疗。

半夏白术天麻汤在二陈汤基础上加白术天麻而成,赵松楠[13]等对半夏白术天麻汤配合耳穴压豆治疗痰浊中阻型眩晕的临床观察,与对照组相比,观察组总有效率高,心悸、烦躁、头重评分低,说明半夏白术天麻汤治疗痰浊中阻型眩晕有效;白芍,能养血调经,敛阴止汗,柔肝止痛,平抑肝阳,专补肝阴,戴淑萍[14]等研究发现,白芍总苷能抑制 RAAS 系统和增加胰岛素敏感性来降低血压。

2)药物四气分析

方剂中药物四气以平性为主,其次为温和寒,三者加起来比例大于 90%,且卡方分析可知,平、温、寒性与凉、热性差异显著,说明治疗眩晕高血压以平、温、寒性药物为主,温性药物可(平与温差异不显著)温化痰湿也可温补脾阳,振奋阳气,平性制约药物寒热偏过,寒性药可平抑肝阳,滋阴润燥。温、寒并用,体现了“病痰饮者,当以温和之”的治疗法则[15]。

3)药物五味分析

方剂中药物甘味最多,苦、辛、酸味依次排后,且甘、苦、辛、酸味与咸、涩味差异显著,说明临床治疗眩晕高血压以和、缓、补,燥、泄,行、散,收敛等治法效果良好,同时也是中医辨证论治,相辅相成特点的体现。

4)药物归经分析

方剂中药物归肝经最多,脾、心、肾、肺、胃经依次排后,脾为生痰之源,肝、脾经与其他归经差异显著,临床治疗眩晕高血压的药物与其肝阳上亢、痰浊蒙窍发病机制相符。心、肾、肺、胃与其他归经差异显著,说明临床治疗眩晕高血压使用归肝、脾经药物的同时也关注心、肾、肺(胃)经的作用,根据五行学说,肝与心、肾,脾与肺为母子关系,肝、脾经受邪,可通过调理与之有关的脏腑达到治愈目的。

5)药物组合规律及关联分析

中医传承辅助平台(v2.5),数据分析→组方规律界面中支持度个数设置为 40,置信度设为 0.95 时,共显示 24 条数据,由 9 味药组成,位列前 15 的药物组合无统计学意义(通过卡方分析得到,但篇幅过长未在文中体现)。药物组合中白术-茯苓,牛膝-天麻,钩藤-天麻使用频率较高,关联分析中钩藤→天麻,牛膝,钩藤→天麻,白芍,钩藤→天麻关联度较高,与时方天麻钩藤饮关联密切。

白术健脾益气,茯苓利水渗湿,健脾宁心,为治疗眩晕方剂真武汤重要组成药物,也为治疗痰眩之要药[16],研究表明[13],白术含有氨基酸、果糖等有效成分,能强化脾胃功能,调节新陈代谢,脾虚生湿,白术、茯苓可通过健脾祛湿,利水而降压。天麻钩藤饮载于《中医内科杂病证治新义》,对于肝阳上亢型眩晕高血压效果良好[17],卿俊[18]等药理实验结果表明,天麻钩藤饮能使胸主动脉管壁上 NOX2 表达下调,减少 ROS 的产生,进而降低血管壁上内质网应激关键蛋白 CHOP 与 GRP78 的表达,达到抑制血管重塑的目的,因此起到降低血压的作用。

参考文献【REFERENCES】

[1] 黄家昌,张孟哲,陈卿倩,等. 中医药治疗高血压病的研究进展[J]. 中国民间疗法,2024,32(20):109-115.

[2] 胡盛寿,高润霖,刘力生,等.《中国心血管病报告 2018》概要[J]. 中国循环杂志,2019,34(3):209-220.

[3] 国家卫生计生委合理用药专家委员会. 高血压合理用药指南:第 2 版[J]. 中国医学前言杂志,2017,9(7):28-108.

[4] 姚剑峰,黄亦琦. 化痰祛湿定眩汤对原发性高血压的治疗效果[J]. 中国医药指南,2024,22(35):133-136.

[5] 尹丽丽,李鹏松. 加味半夏白术天麻汤治疗高血压合并高脂血症疗效的临床观察[J]. 贵州医药,2024,48(12):1952-1953.

[6] 崔梦瑶,靳利利,王远平,等. 平调颗粒对高血压合并睡眠障碍患者血压变异性影响的回顾性研究[J]. 广州中医药大学学报,2024,41(12):3141-3147.

[7] 何路坪,徐露,代红,等. 基于数据挖掘探讨张燕平治疗变应性鼻炎的用药规律[J]. 贵州中医药大学学报,2023,45(6):54-59.

[8] 刘晓萌,刘高卿,曹园圆,等. 基于中医传承辅助平台探讨中药治疗高血压的用药规律[J]. 中西医结合心脑血管病杂志,2024,22(19):3462-3470.

[9] 付天骄,李思琦,李晓莹,等. 基于中医传承辅助平台健脾祛痰法治疗高血压用药规律分析[J]. 中国医药科学,2024,14(2):12-14.

[10] 陈汝玲,黄兴文,辛振杰,等. 中药治疗便秘古今用药对比研究[J]. 贵州科学,2024,42(5):19-23.

[11] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[S]. 北京:中国医药科技出版社,2020:1-1088.

[12] 张延模,杨卫平,邓家刚,等. 临床中药学[M]. 上海:上海科学技术出版社,2012:3-354.

[13] 赵松楠,李英杰,宋雷. 半夏白术天麻汤配合耳穴压豆治疗痰浊中阻型眩晕临床观察[J]. 实用中医药杂志,2024,40(11):2156-2159.

傅南琳自拟宁咳方治疗慢性咳嗽的临床观察*

肖东靖[1],傅南琳[2▲]
([1] 罗定市中医院,广东 罗定 527200;[2] 广东药科大学附属第二医院(云浮市中医院),广东 云浮 527300)

摘 要: **目的:**观察宁咳方治疗慢性咳嗽的临床疗效。**方法:**选取 2022 年 1 月至 2023 年 12 月于我院使用宁咳方治疗慢性咳嗽患者 100 例为研究对象,通过比较患者治疗前后的临床症状、炎症指标以及不良反应的发生情况。**结果:**治疗 1~5 周后,宁咳方可显著改善患者的临床症状,促进炎症指标的恢复,总有效率 95%,且未发生不良反应。**结论:**宁咳方治疗慢性咳嗽,疗效显著,安全性好,值得推广。

关键词: 傅南琳,宁咳方,慢性咳嗽
中图分类号:R256.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0060-05

Clinical observation of FU Nanlin self-prepared Ningke Prescription in the treatment of chronic cough*

XIAO Dongjing[1], FU Nanlin[2▲]

([1] *Luoding Hospital of Traditional Chinese Medicine, Luoding 527200, China*; [2] *Yunfu Hospital of Traditional Chinese Medicine, Yunfu 527300, China*)

Abstract: In this study we observed the clinical effect of the Ningke Prescription in the treatment of chronic cough. 100 patients with chronic cough treated by the Ningke Prescription in our hospital from January 2022 to December 2023 were selected as the study objects. Their clinical symptoms, inflammatory indicators, and adverse reactions before and after the treatment were compared. After 1 to 5 weeks of treatment, the Ningke Prescription has significantly improved the clinical symptoms of the patients, and has promoted the recovery of inflammatory indicators. The total effective rate was 95%, and no adverse reactions occurred. The Ningke Prescription has remarkable effect and safety in the treatment of chronic cough, and is worth promoting.

Keywords: FU Nanlin, Ningke Prescription, chronic cough

[14] 戴淑萍,颜勤明. 白芍总苷在心血管疾病模型动物中的药理研究进展[J]. 中国药房,2015,26(10):1418-1420.
[15] 张思凡. 基于数据挖掘探讨高血压病(眩晕)内服用药规律的分析[D]. 哈尔滨:黑龙江中医药大学,2023.
[16] 张群峰. 半夏白术天麻汤加减治疗后循环缺血眩晕痰浊中阻型临床观察[J]. 实用中医药杂志,2024,40(12):2394-2396.
[17] 陈芳. 天麻钩藤饮联合硝苯地平控释片治疗高血压疗效观察[J]. 内蒙古中医药,2024,43(3):26-28.
[18] 卿俊,刘平安,鄢然,等. 天麻钩藤饮对自发性高血压大鼠血管重塑的抑制作用及对 NOX2/ROS 通路、内质网应激的影响[J]. 湖南中医药大学学报,2024,44(12):2150-2156.

收稿日期:2025-01-05;**修回日期:**2025-03-04
作者简介:杨晓梅(1993-),女,贵州天柱人,中药临床药师,硕士研究生,研究方向:中药药物制剂。
▲通讯作者:林森林(1985-),男,福建泉州人,副主任中药师,学士学位,研究方向:中药学。

慢性咳嗽是指持续时间>8 周,以咳嗽为主要的症状,常伴随咳痰、鼻塞、咽干、声音嘶哑以及呼吸困难等,且患者胸部体格检查和 X 线片无明显异常[1]。在我国专科门诊中,慢性咳嗽患者约占 1/3 以上,该疾病在全球范围内的患病率为 9.6%[2],由于社会及家庭等多种因素,有逐年上升的趋势,且该病病程长,具有复杂性、隐匿性、反复发作等特点,严重影响了患者身心健康和生活质量[3-4]。目前认为慢性咳嗽的病因较多,主要包括咳嗽变异性哮喘(cough variant asthma,CVA)、鼻后滴综合征(Postnasal drop syndrome,PNDS)、胃食管反流性咳嗽(Gastroesophageal reflux cough,GERC)、嗜酸粒细胞性支气管炎(Aosophilic bronchitis,EB)、变应性咳嗽(Allergic cough,AC)和上气道咳嗽综合征(Upper airway cough syndrome,UACS)[5]。西医临床上主要以止咳化痰、抗组胺、减少腺体分泌等治疗为主,常使用抗生素、中枢性止咳药、抗组胺药、糖皮质激素、支气管舒张剂、抑酸药等药物,虽有很好的治疗效果,但病情容易复发、难以治愈,且长期治疗成本高,同时伴随一定的不良反应[6]。

在中医学里,虽无慢性咳嗽病名,但多将其归入“久咳”“顽咳”“久嗽”等范畴。中医认为,慢性咳嗽可能是由不同的病理机制引起,如肺阴亏虚、肺气亏虚、痰湿蕴肺、痰热郁肺、肝火犯肺等,因此治法因人而异[7-8]。中医药治疗慢性咳嗽历史悠久,不仅具有很好的治疗效果,还可随症加减,达到个性化治疗,同时在控制临床症状、减少不良反应等方面具有独特的优势[9]。鉴于此,为了进一步探讨中医对慢性咳嗽有效的治疗方法,本研究基于广东省名老中医傅南琳既往治疗慢性咳嗽的临床经验,选取 2022 年 1 月至 2023 年 12 月于我院使用傅南琳自拟宁咳方治疗慢性咳嗽患者 100 例为研究对象,通过比较患者治疗前后的临床症状、炎症指标以及不良反应的发生情况,进而观察傅南琳自拟宁咳方治疗慢性咳嗽的临床疗效,现报告如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料

收集 2022 年 1 月至 2023 年 12 月于傅南琳全国名老中医工作室诊疗符合慢性咳嗽纳入标准的患者 100 例作为研究对象。所有患者停用一切西医西药治疗,均采用宁咳方中药汤剂治疗。诊断标准:西医参照《咳嗽的诊断与治疗指南(2021)》[10]和《中国难治性慢性咳嗽的诊断与治疗专家共识(2021)》[11],临床表现:①咳嗽持续时间>8 周;②咳嗽为主要症状,常伴随咳痰、鼻塞、咽干、声音嘶哑以及呼吸困难等症状;③胸部 X 线或 CT 检查无明显异常。中医参照《咳嗽中医诊疗专家共识意见(2021)》[12],临床表现:咳嗽日久,伴较多白痰或清稀痰液,有时难以咳出,鼻塞、咽干,咽后壁不适。舌苔偏白且滑腻,脉浮而缓。其中咳嗽为主症,咳痰、咽干、咽痒、咽后壁不适为次症。纳入标准:①符合慢性咳嗽的西医诊断标准;②符合慢性咳嗽的中医诊断标准;③年龄≥18 岁;④临床资料齐全;⑤自愿签署知情同意书,且依从性良好者。排除标准:①排除非器质性神经、心理因素引起的神经官能症咳嗽者;②意识障碍或精神疾病者;③对本次研究所用药物有过敏者;④临床信息不全者;⑤妊娠或哺乳以及年龄小于 18 岁。剔除标准:①中途停止治疗或退出研究者;②发生严重不良反应不能继续研究者;③治疗期间同时使用西药治疗者。其中男 52 例,女 48 例;年龄 25 岁至 86 岁,平均年龄(43.89±5.86)岁;病情最短 8 周,最长 20 年,平均病程(2.13±3)年。本项目已经过罗定市中医院伦理委员会审核批准,且患者或家属均已签订知情同意书。

1.2 治疗方法

通过收集 2022 年 1 月至 2023 年 12 月于傅南琳全国名老中医工作室诊疗符合慢性咳嗽纳入标准的患者 100 例,采用宁咳方中药汤剂治疗,并进一步分析总结傅南琳老师的临床经验及组方用药规律,组方:法半夏 15 g,厚朴 15 g,茯苓 15 g,紫菀 15 g,苦杏仁 15 g,僵蚕 10 g,黄芩 15 g,苏子 15 g,枇杷叶 15 g,甘草 10 g。加减:兼痰多者加冬瓜子 10 g;兼寒者加干姜 3~5 g、细辛 3 g;兼热者加鱼腥草 15 g、栀子 10 g、连翘 10 g、金银花 15 g;兼湿者加藿香 10 g、佩兰 10 g;兼燥者加沙参 15 g、麦冬 15 g、玉竹 15 g、贝母 15 g;兼风寒者加辛夷花 10 g、苍耳子 10 g、蜜麻黄 10 g;兼脾虚气滞者加白术 15 g、佛手 10 g、鸡内金 20 g;瘀血者加地龙 10 g。每日煎一剂,早晚分服。疗程为 1~5 周。

1.3 观察指标

①症状积分:包括咳嗽、咳痰、咽干、咽痒、咽后

壁不适,无症状计 0 分,不影响日常生活的轻微症状计 1 分;部分影响日常生活的中等症状计 2 分;无效或仍有严重症状计 3 分。②病情程度评分:轻度为症状积分 1 ~3 分,中度为症状积分 4 ~6 分,重度为症状积分≥7 分。③炎症指标:于治疗前后 3 d,分别抽取空腹肘静脉血 5 mL,静置 30 min,3000 r/min 离心 15 min,取上层血清置于-70 ℃的冷冻箱中保存待检。超敏 C-反应蛋白(hs- CRP),采用免疫比浊法检测,仪器为 RocheP800 全自动生化分析仪,试剂盒购自罗氏(Roche)公司。白细胞介素-4(IL-4)和白细胞介素-10(IL-10),采用 ELISA 法检测,仪器为 SuPerMax 3100 型多功能酶标仪,试剂盒购自深圳晶美生物工程有限公司。所有操作步骤均按照试剂盒说明书进行。④安全性评价:观察患者治疗期间有无皮疹、瘙痒、恶心、呕吐、腹泻等不良反应。

1.4 疗效评定

显效:0 分;有效:1 ~3 分;无效 3 分。根据上述症状积分,临床症状消失且症状积分减少 90% 以上为治愈,临床症状显著改善且症状积分减少 70% 以上为显效,临床症状有所改善且症状积分减少 30% 以上为有效,临床症状无改善甚至加重或症状积分减少不足 30% 为无效。总有效率(%)=(治愈+显效+有效)例数/总例数×100%。

1.5 统计处理

采用 SPSS27.0 软件进行数据分析,计量资料用 $\bar{x}\pm s$ 表示,若符合正态分布做 t 检验,反之做非参数秩和检验;计数资料用 n(%)表示,做 χ^2 检验;等级资料用 n(%)表示,做非参数检验。$P<0.05$ 差异显著,有统计学意义。

2 结果

2.1 症状积分比较

治疗后,咳嗽、咳痰、咽干、咽后壁症状积分明显低于治疗前,且均有显著性差异($P<0.05$),见表 1。

2.2 临床疗效

治疗后,治愈 5 例(5%),显效 45 例(45%),有效 45 例(45%),无效 5 例(5%),总有效 95 例(95%)。

表 1 治疗前后症状积分比较($\bar{x}\pm s$,分)

时间	例数	咳嗽	咳痰	咽干	咽后壁不适	总积分
治疗前	100	2.53±0.50	2.34±0.47	2.43±0.50	2.26±0.44	9.57±1.24
治疗后	100	0.93±0.42	0.72±0.55	0.65±0.57	0.64±0.59	2.93±1.46
Z 值		-8.896	-8.784	-8.795	-8.733	-8.711
P 值		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

2.3 炎症指标

治疗后患者白细胞介素-4(IL-4)、超敏 C-反应蛋白(hs-CRP)水平均低于治疗前,白细胞介素-10(IL-10)高于治疗前,差异显著,均有统计学意义($P<0.05$),见表 2。

表 2 治疗前后炎症指标比较($\bar{x}\pm s$,例)

时间	例数	IL-4(pg/mL)	hs-CRP(mg/L)	IL-10(pg/mL)
治疗前	100	13.40±1.42	9.65±1.04	13.64 ± 1.16
治疗后	100	5.86±1.79	2.45±1.69	24.88 ± 2.73
Z 值		-8.647	-8.682	-8.668
P 值		<0.001	<0.001	<0.001

2.4 不良反应

患者在治疗期间均未发生皮疹、瘙痒、恶心、呕吐、腹泻等不良反应。

2.5 性别、年龄、病程及病情程度与疗效的关系

经统计分析,疗效与患者的性别、年龄、病程及病情程度无关($P>0.05$),且均有很好的治疗效果,见表 3。

表 3 性别、年龄、病程时间与疗效的关系(n/%)

观察项目	分 类	例数	治愈	显效	有效	无效	总有效
性别	男	52	3	24	22	3	49(94%)
	女	48	2	21	23	2	46(96%)
年龄	25 岁 ~45 岁	24	2	14	7	1	23(96%)
	45 岁 ~65 岁	40	2	16	20	2	38(95%)
	65 岁 ~86 岁	36	1	15	18	2	34(94%)
病程	8 周 ~1 年	23	2	10	10	1	21(96%)
	1 年 ~5 年	30	1	15	13	1	29(97%)
	5 年 ~10 年	28	1	11	14	2	26(93%)
	10 年 ~20 年	19	1	9	8	1	18(95%)
病情程度	轻度	46	2	21	21	2	44(96%)
	中度	40	2	17	19	2	38(95%)
	重度	14	1	7	5	1	13(93%)

注:性别($\chi^2=0.135$,$P=0.538$);年龄($\chi^2=0.058$,$P=0.529$);病程($\chi^2=0.469$,$P=0.438$);病情程度($\chi^2=0.177$,$P=0.459$)。

3 讨论

3.1 病因病机分析

在中医学里,虽无慢性咳嗽病名,但多将其归入“久咳”“顽咳”等范畴,并以病程长、迁延难愈为主要特点,正如《诸病源候论》载:“久咳嗽,是连滞岁月,经久不瘥者也”。《黄帝内经》《伤寒论》及《景岳全书》中多有论述咳嗽病因病机的条文,并指出咳嗽的病位主要在肺,这是因为肺主气,其位最高,为五脏之华盖,肺又开窍于鼻,外合皮毛,故肺最易受外感、内伤之邪,而肺又为娇脏,不耐邪侵,邪侵则肺气不清,失于肃降,迫气上逆而作咳[13]。老师认为分析慢性咳嗽的中医病因病机不外乎外感邪气,内有“伏痰”,致肺失宣降,造成邪气未能完全发散,余邪留恋,内伏于肺,两者互相影响成为慢性咳嗽。如西医的病毒感染、细菌感染的炎症反应分泌物伏痰壅阻肺,或外感邪气引邪深入或不经辩证而乱用寒凉之品,如西医常予口服或静滴抗生素治疗,相当于中医的“苦寒药”,寒邪凝滞,肺气不宣,水液运化失常,聚而成伏痰。结合风邪为百病之长,且外感邪气多以风邪为主的理论,老师将慢性咳嗽的病因病机归为内有“伏痰”,外受“风邪”。这与白涛[14]、樊佳佳[15]及张颖[16]等认为慢性咳嗽与风邪密切相关,多从“风咳”进行论治相一致。且在长期诊疗过程中,老师发现慢性咳嗽久咳不愈患者,发病初期多有外感病史为“风邪”,各种原因的失治误治而使邪气伏肺,或炎症反应分泌物,形成“伏痰”,邪终不能去除,如闭门留寇,稍有不慎则风邪诱发伏痰共起,咳嗽反复迁延未愈。故老师治疗慢性咳嗽,强调祛除外风的同时需祛痰,因此治疗法则为:祛风化痰,润肺止咳。

3.2 组方用药分析

本自拟方中半夏、陈皮归肺、脾、胃经,半夏辛温而燥,燥湿化痰,降逆和胃,散结消痞。陈皮,辛、苦燥湿,理气行滞,燥湿化痰,乃“治痰先治气,气顺则痰消”之意,二者共为君药。且以陈皮、法半夏健脾化运,斡旋中焦气机,平复“内风”[17]。厚朴归肺、脾、胃、大肠经,辛、苦、温,既燥湿而化痰,又下气而平喘。苏子、杏仁归肺、大肠经,苏子辛、温而不燥,质润而降,善降上逆之肺气,消壅滞之痰涎。杏仁辛、苦、微温而润,肃降肺气,润燥止咳,苏子、杏仁与陈皮、厚朴合用,增其行气宽胸,宣通郁结之气,为臣药[18]。紫菀辛、苦、甘、微温,归肺经,长于润肺下气,化痰止咳。枇杷叶苦、微寒,归肺、胃经,常用于降肺气而止咳平喘,兼能化痰,其性微寒又可清肺热,与归肺、胃、胆、大肠、膀胱经,苦、寒的黄芩尤擅清肺火,共奏清热化痰解毒之效[19-20]。蝉蜕甘、寒,归肺、肝经,祛风止咽痒之咳,若痰多加咸、辛、平归肝、肺经之僵蚕以增化痰之功[21-22]。茯苓甘、淡、平,入脾、肾、心经,渗湿健脾以杜生痰之源,与半夏配伍,体现了朱丹溪“燥湿渗湿则不生痰”之理,均为佐药。乌梅酸、涩、平,归脾、肺、大肠经,取其收敛久咳之肺气[23],与半夏相伍,散中有收,使燥湿祛痰而不伤正,甘草甘、微寒,归心、肺、脾、胃经,既能祛痰止咳,又有平喘之功,调和诸药,为使药。纵观全方,具有温而不燥,燥湿而不伤正,宣肺降气,祛风化痰,润肺止咳之特点。

3.3 治疗效果分析

结果显示,治疗后咳嗽、清嗓、咽干、咽痒、咽后壁临床症状积分明显低于治疗前($P<0.05$),表明宁咳方可显著改善慢性咳嗽患者的临床症状;研究表明,白细胞介素-4(IL-4)、白细胞介素-10(IL-10)和超敏C-反应蛋白(hs-CRP)在炎症调节中各自发挥着重要的作用,其中,超敏C-反应蛋白(hs-CRP)水平的高低通常反映了炎症反应的程度,水平越高,炎症越重,反之越轻[24]。白细胞介素-4(IL-4)可促进B细胞分泌炎性细胞因子,产生一系列炎症介质,最终诱发炎症[25]。白细胞介素-10(IL-10)能够抑制多种促炎细胞因子的产生,如IL-1、TNF-α、IL-6等,从而减轻炎症反应[26]。因此,三者对理解炎症反应及其治疗具有重要意义。本研究中,治疗后患者白细胞介素-4(IL-4)和超敏C-反应蛋白(hs-CRP)水平均低于治疗前($P<0.05$),白细胞介素-10(IL-10)高于治疗前($P<0.05$),提示宁咳方可促进慢性咳嗽患者炎症指标的恢复;治疗后,总有效95例(95%),且在治疗期间未发生不良反应等安全情况,表明宁咳方治疗慢性咳嗽的疗效显著,安全性好;治疗后,疗效与患者的性别、年龄、病程及病情程度无显著性差异($P>0.05$),表明宁咳方治疗慢性咳嗽的疗效不受患者的年龄、性别、病程以及病情程度的影响。

综上所述,宁咳方治疗慢性咳嗽,疗效显著,安

全性好,可有效改善临床症状,促进炎症指标恢复,且不受年龄、性别、病程以及病情程度的影响,因此,值得推广应用。

参考文献【REFERENCES】

[1] SUNDAR K M,STARK A C,DICPINIGAITIS P. Chronic cough and obstructive sleep apnea[J]. Sleep med clin,2024,19(2):239-251.

[2] HERING T. Chronischer husten-stiefkind der diagnostik[J]. MMW fortschr med,2023,165(19):61-63.

[3] 赵婷婷. 慢性咳嗽对患者及其家人生活质量的影响研究[J]. 世界临床医学,2017,11(11):41-42.

[4] MORICE A,DICPINIGAITIS P,MCGARVEY L,et al. Chronic cough:new insights and future prospects[J]. Eur respir rev,2021,30(162):210127.

[5] 金雪文,丁金盾,金洋一,等. FeNO 联合血清总 IgE 对慢性咳嗽患者使用吸入性糖皮质激素疗效的预测价值[J]. 现代实用医学,2023,35(6):759-761.

[6] BRISTER D,WAHAB M,RASHAD M,et al. Emerging drugs in the treatment of chronic cough[J]. Expert opin emerg drugs,2023,28(2):67-77.

[7] 陈奇祺,陈达满,刘滨,等. 慢性咳嗽辨证论治的理论发展及新进展[J]. 基层中医药,2023,2(8):91-95.

[8] 刘潇蔚. 清宣润降止咳丸治疗慢性咳嗽(阴虚肺燥证)的临床研究[D]. 济南:山东中医药大学,2023.

[9] 鲁培培,刘世菊,王京奇. 中医药治疗慢性咳嗽的应用现状述评[J]. 中外医疗,2023,42(33):194-198.

[10] 中华医学会呼吸病学分会哮喘学组. 咳嗽的诊断与治疗指南(2021)[J]. 中华结核和呼吸杂志,2022,45(1):13-46.

[11] 中华医学会呼吸病学分会哮喘学组. 中国难治性慢性咳嗽的诊断与治疗专家共识[J]. 中华结核和呼吸杂志,2021,44(8):689-698.

[12] 孙增涛,师艺航,李小娟. 咳嗽中医诊疗专家共识意见(2021)[J]. 中医杂志,2021,16:1465-1472.

[13] 王猛,张思超. 张思超治疗慢性咳嗽经验[J]. 中医学报,2024,39(4):787-792.

[14] 白涛. 化痰祛风方治疗小儿痰湿证慢性咳嗽临床观察[J]. 光明中医,2023,38(11):2117-2120.

[15] 樊佳佳,张纾难. 从虚、风、郁论治难治性慢性咳嗽经验举隅[J]. 中日友好医院学报,2023,37(3):176-177.

[16] 张颖,韩峰. 从风论治儿童慢性咳嗽[J]. 光明中医,2023,38(14):2718-2721.

[17] 罗建峰,陈梅兰. 调肺运脾小儿推拿法联合二陈汤加减治疗痰湿蕴肺型小儿慢性咳嗽临床研究[J]. 新中医,2022,54(14):176-179.

[18] 毛健婧,刘永平. 苏子降气汤临床应用及药理研究概况[J]. 湖南中医杂志,2024,40(6):215-219.

[19] 龚攀. 复方芩兰口服液治疗慢性支气管炎急性发作有效性及安全性分析[J]. 北方药学,2023,20(2):73-75.

[20] 顾临月,李亚男,商丽,等. 止咳散加减治疗变异型哮喘的临床分析[J]. 内蒙古中医药,2024,43(8):33-35.

[21] 李洁,邵蒙苏,王盈蕴,等. 蝉蜕的临床应用及其用量探究[J]. 长春中医药大学学报,2021,37(3):508-511.

[22] 姚海霞,赵桂峰.《中医方剂大辞典》含僵蚕方剂的组方规律分析[J]. 光明中医,2024,39(13):2569-2573.

[23] 朱月,袁静,孙文波,等. 乌梅药理作用及临床应用研究进展[J]. 辽宁中医药大学学报,2022,24(7):155-159.

[24] 张伟锋,蔡宇飞. 血清 PCT、IL-6、hs-CRP 联合检测在新生儿肺炎早期诊断中的价值分析[J]. 实用中西医结合临床,2023,23(9):87-89.

[25] 仇陈,张顾媛. 止嗽散加减治疗慢性咳嗽的疗效及对血清指标的影响[J]. 内蒙古中医药,2024,43(7):73-75.

[26] 李茂清,贾鸿飞,高学坡. 烧伤患者血清 ICAM-1、IL-10、TNF-α 水平变化及与创面愈合程度的关系分析[J]. 中国美容整形外科杂志,2024,35(3):145-149.

收稿日期:2024-08-30;**修回日期**:2024-09-27

基金项目:广东省中医师承薪火工程(粤中医函〔2021〕123 号)。

作者简介:**肖东靖**(1988-),女,广东罗定人,副主任中医师,研究方向:中医内科学。

▲**通讯作者**:**傅南琳**(1964-),女,安徽合肥人,硕士,主任医师。

贵州景天科(Crassulaceae)药用植物资源分布与应用情况研究*

吴松松,严福林▲,何顺志,孙庆文,魏升华
(贵州中医药大学,贵州 贵阳 550025)

摘 要: 通过文献总结与实地调查,以掌握贵州景天科药用植物种类、资源分布与应用情况,为其可持续开发利用与资源保护提供参考。调查发现,贵州有景天科药用植物6属共26种,其中23种作为药用植物使用,15种在贵州10个民族中入药使用。主要有清热解毒、散瘀止血、清热利湿等功效,主要用于治疗疔疮痈肿、跌打损伤、热淋,湿疹等疾病。使用方法有:煎煮、捣碎外敷、泡酒、炖肉等。此外,贵州景天科植物有10种作为食用,14种应用于园艺绿化,1种应用于土壤的改良。

关键词: 景天科,资源分布,民族药用,应用情况
中图分类号:R281.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0065-06

Distribution and application of medicinal plant resources of Crassulaceae in Guizhou, China*

WU Songsong, YAN Fulin▲, HE Shunzhi, SUN Qingwen, WEI Shenghua

(*Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China*)

Abstract: Through literature summary and field investigation, this study aims to master the species, resource distribution and application situation of the medicinal plants of Crassulaceae in Guizhou, and provide reference for their sustainable utilization and resource protection. According to the investigation, there are 26 species of 6 genera of Crassulaceae plants in Guizhou. Among them, 23 species are used as medicinal plants, and 15 species are used in the 10 ethnic groups in Guizhou. They mainly have the functions of clearing heat, detoxifying, dispersing blood stasis, hemostasis, and removing dampness, etc. They are mainly used to treat the diseases such as boil carbuncle, injuries from falls, heat stranguria and eczema, etc. Methods of use: decoction, mashing and external application, soaking in wine, stewing meat, etc. In addition, 10 species of Crassulaceae plants are used as food, 14 species are used in horticulture and virescence, and 1 species is used in soil improvement.

Keywords: Crassulaceae, resource distribution, ethnomedicinal application, application situation

景天科(Crassulaceae)全球分布34属1500种以上,《中国植物志》记载我国分布10属242种,将其分为东爪草亚科(Crassuloideae)、伽蓝菜亚科(Kalanchoideae)、景天亚科(Sedoideae)三个亚科[1]。《贵州植物志》记载贵州分布5属23种[2]。景天科大多数植物类群具有良好的抗旱与重金属吸附特性与优美的植物形态,在园艺观赏、土壤与植被修复等方面具有重要的生态与园艺价值。此外,景天科植物还具有重要的药用与食用价值,受到了广泛关注,是当前研究的热点植物之一。

景天科植物的药用最早记载于《神农本草经》,迄今已有2000多年历史,描述为:“景天,味苦平。主大热,火创,身热,烦邪恶气,华主女人漏下赤白,轻身明目……”[4]。随后,诸多本草均有收载。经

民间调研与本草考证发现,垂盆草 *S. sarmentosum*、佛甲草 *S. lineare*、费菜 *S. aizoon*、凹叶景天 *S. emarginatum*、轮叶景天 *S. verticillatum*、长药景天 *H. spectabile*、珠芽景天 *S. bulbiferum* 等为常用的中药或民族药,这些药用植物大多具有利胆、清热解毒、散瘀消肿、宁心安神等功效,主要用于黄疸、跌打损伤、失眠多梦、烧烫伤、疔疮等疾病[4-5]。现代研究表明,景天科植物含有丰富的生物碱类、有机酸类、黄酮类、甾醇类、强心苷等活性成分,具有抗氧化、抗疲劳、抗血栓、降血糖、改善记忆障碍等药理活性[7-16]。

随着对其研究的不断深入,景天科植物在药用、蔬菜食用、保健产品开发等方面得到较好的利用,例如著名的抗缺氧的红景天系列产品、垂盆草片、垂盆草冲剂、养心草制剂、景天三七糖浆等系列产品。本文以资料查阅与实地调查结合的方式,对贵州的景天科植物资源分布、种类与应用情况进行深入的调查研究,为该类群药用植物资源的保护、引种栽培与开发利用提供参考。

1 贵州景天科植物种类与分布情况

据调查发现,贵州分布景天科植物 6 属,26 种,景天属 21 种,八宝属 1 种,落地生根属 1 种,红景天属 1 种,瓦松属 1 种,石莲属 1 种。景天科植物在贵州全省各地均有分布,贵阳地区分布 4 属,15 种;遵义地区分布 4 属,13 种;毕节地区分布 3 属,11 种;黔东南地区分布 2 属,11 种;黔西南地区分布 3 属,9 种;黔南地区分布 4 属,7 种;安顺地区分布 1 属,6 种;六盘水地区分布 1 属,4 种;铜仁地区分布 3 属,13 种。2023 年贵州又发现了新纪录种:薄叶景天(*S. leptophyllum*)的分布[17]。其中,安龙景天(*S. tsiangii*)、梵净山景天(*S. fanjingshanensis*)为贵州特有资源[6,18],详见表 1。

表 1 贵州景天科植物种类与分布状况

属名	种名	别名	分布	海拔/m	主要生境
Bryophyllum	落地生根 *B. pinnatum*	天灯笼、倒吊莲、灯笼花	望谟、罗甸、册亨、荔波	400 ~ 1000	草地、荒坡
Hylotelephium	八宝 *H. erythrostictum*	活血三七、对叶景天、白花蝎子草	松桃、雷山、锦屏、瓮安、长顺、贵阳、罗甸等	700 ~ 1300	山坡、草地、河谷湿地
Rhodiola	云南红景天 *R. yunnanensis*	三台观音、铁脚莲	梵净山、赫章、威宁	1800 ~ 2600	山坡、草地
	费菜 *S. aizoon*	景天三七,土三七、四季还阳、石菜兰、九莲花	雷公山、威宁、赫章、金沙、息烽、清镇、贵阳、遵义、黔西等	800 ~ 2600	山坡、岩石缝
	薄叶景天 *S. leptophyllum*	–	安顺市西秀区	1302	山坡、石壁
	东南景天 *S. alfredii*	石板菜、变叶景天	江口、印江、凯里等	1650 ~ 1900	山地沟谷、岩石缝、湿地
	大苞景天 *S. amplibracteatum*	一朵云、山胡豆、鸡爪七、活血草	雷公山、都匀、梵净山	1950	山沟、密林、水旁湿地
	珠芽景天 *S. bulbiferum*	马尿花、零余子景天	毕节、道真、清镇、黔西等	800 ~ 1500	林下、河沟、路旁湿地
	大叶火焰草 *S. drymarioides*	光板猫叶草、荷莲豆景天	锦屏、岑巩、道真、贵阳、黔西等	450 ~ 1200	石灰岩山地
	凹叶景天 *S. emarginatum*	石马苋、石板菜、石板还阳、九月寒、打不死	江口、松桃、雷山、岑巩、瓮安、道真、习水、绥阳、清镇、贵阳等	450 ~ 1200	山坡沟谷、路旁潮湿地
Sedum	细叶景天 *S. elatinoides*	崖松、疣果景天、小鹅儿肠、半边莲	岑巩、习水、道真、贵阳等	500 ~ 1300	草地、荒坡、岩石
	日本景天 *S. japonicum*	佛甲草、石板菜、黄花方	赫章、威宁、水城、遵义等	1000 ~ 1500	山地、沟谷、岩石缝
	佛甲草 *S. lineare*	佛指甲、万年草、铁指甲、狗牙菜	松桃、雷山、黎平、毕节、金沙、道真、赤水、册亨、黔西、贵阳、都匀等	750 ~ 1200	阴湿山坡、岩石缝
	山飘风 *S. major*	豆瓣七、豆瓣还阳	梵净山、册亨	800 ~ 1400	坡地、阴湿林下
	多茎景天 *S. multicaule*	岩如意、石花、石根	盘州	2610	山顶阴湿处、岩石缝
	齿叶景天 *S. odontophyllum*	天黄七	习水、赤水、土城、息烽	800 ~ 1300	山坡、岩石缝
	垂盆草 *S. sarmentosum*	豆瓣菜、狗牙瓣、爬景天、石头菜	锦屏、毕节、都匀、瓮安、绥阳、习水、道真、清镇、贵阳、黔西、册亨、平坝、松桃	800 ~ 1500	石灰岩石缝、山地

续表 1

属名	种　名	别　名	分　布	海拔/m	主要生境
Sedum	火焰草 *S. stellariifolium*	卧儿菜、石豆瓣、狗牙风、繁缕景天	江口、石阡、金沙、岑巩、道真、清镇、平坝、贵阳、黔西等	450～1200	山坡、山谷石缝、居民房顶
	叶花景天 *S. phyllanthum*	–	梵净山、平坝、清镇、修文等	1000～2000	山谷石缝
	安龙景天 *S. tsiangii*	–	安龙、水城、威宁、赫章等	500～2230	灌木林、草坡岩石缝
	短蕊景天 *S. yvesii*	伙连草	贵阳、水城、清镇、平坝、修文等	1000～1250	山脚沟边、石上、林下
	梵净山景天 *S. fanjingshanensis*	–	梵净山	2200～2400	石灰岩石上、潮湿林下
	圆叶景天 *S. makinoi*	–	榕江、凯里	500～1200	低山山谷林下阴湿处
	小山飘风 *S. filipes*	豆瓣还阳	江口(梵净山)	820	潮湿岩石上、林下
Orostachys	瓦松 *O. fimbriatus*	瓦花、天王铁塔草、瓦塔	黔西、贵阳、赤水	1000～1500	山坡、瓦房、草房顶
Sinocrassula	石莲 *S. indica*	莲花还阳、碎骨还阳、蛇舌莲	遵义、贵阳、惠水、黔西、兴仁、册亨	1000～1800	石灰岩石缝、山地

2　贵州景天科植物药用情况分析

2.1　药用部位、功效与主治分析

贵州有景天科药用植物 23 种,其中全草入药 20 种,占 86.96%;根与花类各 2 种,各占 8.69%;茎、叶、果各 1 种,各占 4.35%。其药用功效分为 6 类,主要有清热解毒、散瘀止血、清热利湿等。其中,散瘀止血药使用最为广泛,有 16 种,占 69.57%;清热解毒药 14 种,占 60.87%;清热利湿药 12 种,占 52.17%;止痢,截疟药 5 种,占 21.74%;心宁安神药 2 种,占 8.69%;补肺益肾药 3 种,占 13.04%,用于治疗疔疮痈肿、跌打损伤、热淋,湿疹等疾病[1-2,19-20]。详见表 2。

表 2　贵州景天科植物功效与主治情况

功效	主治疾病	种数	种　名	百分比/%
清热解毒	疔疮痈肿痈,乳痈,丹毒,溃疡等	14	落地生根 *B. pinnatum*、八宝 *H. erythrostictum*、大苞景天 *S. amplibracteatum*、珠芽景天 *S. bulbiferum*、大叶火焰草 *S. drymarioides*、细叶景天 *S. elatinoides*、凹叶景天 *S. emarginatum*、佛甲草 *S. lineare*、山飘风 *S. major*、多茎景天 *S. multicaule*、齿叶景天 *S. odontophyllum*、垂盆草 *S. sarmentosum*、火焰草 *S. stellariifolium*、瓦松 *O. fimbriatus*	60.87
散瘀止血	跌打损伤,外伤出血等	16	落地生根 *B. pinnatum*、八宝 *H. erythrostictum*、云南红景天 *R. yunnanensis*、费菜 *S. aizoon*、东南景天 *S. alfredii*、大苞景天 *S. amplibracteatum*、珠芽景天 *S. bulbiferum*、大叶火焰草 *S. drymarioides*、细叶景天 *S. elatinoides*、凹叶景天 *S. emarginatum*、日本景天 *S. japonicum*、齿叶景天 *S. odontophyllum*、垂盆草 *S. sarmentosum*、石莲 *S. indica*、叶花景天 *S. phyllanthum*、安龙景天 *S. tsiangii*	69.57
清热利湿	热淋,湿疹,黄疸等	12	八宝 *H. erythrostictum*、凹叶景天 *S. emarginatum*、细叶景天 *S. elatinoides*、日本景天 *S. japonicum*、佛甲草 *S. lineare*、山飘风 *S. major*、多茎景天 *S. multicaule*、垂盆草 *S. sarmentosum*、火焰草 *S. stellariifolium*、瓦松 *O. fimbriatus*、叶花景天 *S. phyllanthum* 石莲 *S. indica*	52.17
止痢,截疟	疟疾	5	东南景天 *S. alfredii*、珠芽景天 *S. bulbiferum*、细叶景天 *S. elatinoides*、佛甲草 *S. lineare*、叶花景天 *S. phyllanthum*	21.74
心宁安神	失眠,心悸等	2	费菜 *S. aizoon*、山飘风 *S. major*	8.69
补肺益肾	肺热咳嗽,肾虚腰痛等	3	云南红景天 *R. yunnanensis*、大叶火焰草 *S. drymarioides*、齿叶景天 *S. odontophyllum*	13.04

2.2　少数民族用药情况分析

贵州景天科植物有 15 种在 10 个民族中作为药用。其中,土家族用药 9 种,苗族用药 5 种,白族用药 4 种,壮族用药 3 种,彝族用药 3 种,布依族用药 2 种,仡佬族用药 2 种,侗族用药 1 种,水族用药 1 种,穿青人用药 1 种,详见表 3。

表 3　贵州景天科植物民族用药情况

民族	种数	种　名	功　用
苗族	5	费菜 *S. aizoon*	散瘀消肿、消炎止血,主治大肠出血、咯血、吐血
		垂盆草 *S. sarmentosum*	清热解毒,散瘀消肿、消炎止血,主治外伤止血、烧烫伤、刀伤、毒蛇咬伤、疮毒
		火焰草 *S. stellariifolium*	散瘀消肿、消炎止血,主治外伤止血、烫伤、牙龈炎、吐血、鼻衄
		八宝 *H. erythrostictum*	主治荨麻疹、毒蛇咬伤、带状疱疹、脚癣等皮肤病
		凹叶景天 *S. emarginatum*	肝炎、痢疾、便血、跌打损伤

续表 3

民族	种数	种 名	功 用
侗族	1	凹叶景天 *S. emarginatum*	清热解毒、消肿散瘀,主治烧烫伤、跌打损伤、黄疸
布依族	2	八宝 *H. erythrostictum*	治疗鸡眼、脚癣
		安龙景天 *S. tsiangii*	治疗刀伤、痔疮、疮疡、烧烫伤等
水族	1	垂盆草 *S. sarmentosum*	治疗毒蛇咬伤、湿热黄疸、烧烫伤、肝炎等
壮族	3	落地生根 *B. pinnatum*	治疗烧烫伤、疔疮、溃疡
		大叶火焰草 *S. drymarioides*	治疗咯血、吐血、肺热咳嗽、外伤出血
		垂盆草 *S. sarmentosum*	消肿止血、接骨、咳嗽
白族	4	落地生根 *B. pinnatum*	治疗吐血、刀伤出血、胃痛、关节痛、咽喉肿痛、烫伤
		云南红景天 *R. yunnanensis*	治疗跌打损伤、风湿、关节炎
		多茎景天 *S. multicaule*	治疗咽喉肿痛、肺热咳嗽、头痛、急(慢)性肝炎、中耳炎
		费菜 *S. aizoon*	治疗炎性肿块、扭伤、骨折
土家族	9	山飘风 *S. major*	治疗月经不调、劳伤腹痛、跌打损伤、腹泻
		石莲 *S. indica*	治疗跌打损伤,外伤出血,便血;外治牛皮癣
		凹叶景天 *S. emarginatum*	治疗肝炎、痢疾、月经过多、外伤出血、疱疹、疔疮
		垂盆草 *S. sarmentosum*	治疗吐血、便血、肝炎、腹泻痢疾
		佛甲草 *S. lineare*	治疗肝炎、腹泻、牙痛、抗癌
		费菜 *S. aizoon*	治疗跌打损伤、便血、吐血
		大苞景天 *S. amplibracteatum*	治疗跌打损伤、骨折、烫伤、痈疔
		珠芽景天 *S. bulbiferum*	治疗痈疔、跌打损伤、烫伤、蛇虫咬伤
		大叶火焰草 *S. drymarioides*	治疗吐血、咯血、外伤出血、肺炎
仡佬族	2	费菜 *S. aizoon*	治疗咯血、吐血、齿衄、鼻衄、牙痛浮肿
		佛甲草 *S. lineare*	治疗咽喉肿痛、喉癣、喉炎、咳嗽
穿青人	1	珠芽景天 *S. bulbiferum*	治疗牙龈肿痛、疟疾、外伤出血
彝族	3	多茎景天 *S. multicaule*	治疗喉炎、扁桃体炎、口腔糜烂、小儿疳积
		云南红景天 *R. yunnanensis*	治疗跌打损伤、刀伤流血、骨折、风湿、痢疾
		垂盆草 *S. sarmentosum*	治疗痔疮、牙痛、风疹及疮疡肿痛

贵州景天科植物药用价值高,应用广泛,用药方法多样。常见的用法有煎煮法、鲜用、捣碎外敷或涂抹、泡酒、炖肉等[21]。其中,以煎煮法和捣碎外敷或涂抹法居多,各 19 种,煎煮法主要用于治疗咯血、吐血、咽喉肿痛、月经不调、痢疾、腹痛经、崩漏、黄疸等疾病;捣碎外敷或涂抹法主要用于外伤出血、水火烫伤、疔疮、风湿关节痛、湿疹、消炎等。泡酒 6 种,主要用于跌打损伤、外伤出血、风湿疼痛、消肿止痛、散瘀止血、劳伤等;炖肉 2 种,主要用于感冒咳嗽、大肠出血等,详见表 4。

表 4 贵州景天科植物用药方法

药用方法	种数	种 名	治疗疾病
煎煮法	19	落地生根 *B. pinnatum*	吐血,疔疮痈肿,乳痈,溃疡,胃痛,关节痛,咽喉肿痛,肺热咳嗽
		云南红景天 *R. yunnanensis*	炎症,接筋骨
		费菜 *S. aizoon*	咯血,吐血,齿衄,鼻衄,高血压
		东南景天 *S. alfredii*	消肿,吐血,衄血
		珠芽景天 *S. bulbiferum*	牙龈出血、肿痛,吐血
		大叶火焰草 *S. drymarioides*	吐血、咯血、肺热咳嗽
		火焰草 *S. stellariifolium*	疮疡,咽喉肿痛,咯血,牙龈炎
		凹叶景天 *S. emarginatum*	热疖,毒疮
		细叶景天 *S. elatinoides*	痢疾,腹泻
		日本景天 *S. japonicum*	抗癌
		佛甲草 *S. lineare*	咽喉肿痛,眼红肿痛,疔疮,热疖
		山飘风 *S. major*	月经不调,痨伤腰痛,鼻衄
		多茎景天 *S. multicaule*	咽喉肿痛,口腔溃疡,鼻衄,咯血,风湿,头痛
		齿叶景天 *S. odontophyllum*	痛经,崩漏,骨折,咯血,便血
		垂盆草 *S. sarmentosum*	黄疸,蛇虫咬伤,淋病,肺痈,肠痈
		叶花景天 *S. phyllanthum*	疮疡,痢疾,蛇虫咬伤
		安龙景天 *S. tsiangii*	痔疮,疮疡
		瓦松 *O. fimbriatus*	吐血,鼻衄,血痢,肝炎,疟疾,热淋,痔疮
		石莲 *S. indica*	跌打损伤,肝病,高血压,肝硬化
泡酒	6	珠芽景天 *S. bulbiferum*	外伤出血,毒蛇咬伤
		大苞景天 *S. amplibracteatum*	劳伤,肺热咳嗽
		佛甲草 *S. lineare*	外伤出血,毒蛇咬伤
		山飘风 *S. major*	跌打损伤,消肿止痛
		齿叶景天 *S. odontophyllum*	散瘀止血,跌打损伤,瘀肿疼痛
		安龙景天 *S. tsiangii*	跌打损伤,瘀肿疼痛
炖肉	2	落地生根 *B. pinnatum*	感冒,肺热咳嗽
		费菜 *S. aizoon*	大肠出血
捣碎外敷或涂抹	19	八宝 *H. erythrostictum*	疔疮
		落地生根 *B. pinnatum*	创伤出血,溃疡,急性中耳炎,消炎
		云南红景天 *R. yunnanensis*	风湿关节痛,骨折,疔疮,跌打损伤
		费菜 *S. aizoon*	外伤出血,烫伤,毒虫咬伤
		珠芽景天 *S. bulbiferum*	外伤出血,烫伤
		大苞景天 *S. amplibracteatum*	治鸡眼
		大叶火焰草 *S. drymarioides*	外伤出血
		火焰草 *S. stellariifolium*	外伤出血
		凹叶景天 *S. emarginatum*	跌打损伤,烧伤,烫伤
		佛甲草 *S. lineare*	外伤出血,烧伤,烫伤
		山飘风 *S. major*	外伤出血,烧伤、疖痈

续表 4

药用方法	种数	种 名	治疗疾病
捣碎外敷或涂抹	19	东南景天 *S. alfredii*	烧伤,烫伤
		多茎景天 *S. multicaule*	外伤出血,烧伤,烫伤,湿疹
		齿叶景天 *S. odontophyllum*	外伤出血,烧伤,烫伤,消炎
		垂盆草 *S. sarmentosum*	疮疖,烫伤,咽喉肿痛,带状疱疹
		叶花景天 *S. phyllanthum*	蛇虫咬伤,烫伤,咽喉肿痛、消炎
		安龙景天 *S. tsiangii*	烧伤,烫伤
		瓦松 *O. fimbriatus*	湿疹,疔疮,烫伤
		石莲 *S. indica*	跌打损伤,烫伤,刀伤,消炎

2.3 其他用途情况

贵州景天科植物除具有广泛的药用价值外,其在食用、花卉、绿化等方面得到了广泛的开发应用。其中,共有 10 种在民间作为野菜食用,有改善冠状动脉循环、降血压、降血糖等保健功效[16]。有 14 种用于绿化、盆栽等观赏花卉进行庭院栽培和公园绿化[24-28]。此外,云南红景天具有消除疲劳、抗缺氧、改善记忆等功效[13-14],可用于功能食品、药品的开发。东南景天具有良好的重金属富集作用[22-23],可用于降低土壤中的重金属含量,修复土壤。详见表 5。

表 5 贵州景天科植物的其他应用

用途	种数	种 名	应用部位	功 效
食用	10	费菜 *S. aizoon*	茎、叶	改善冠状动脉循环
		八宝 *H. erythrostictum*	茎、叶	利于咽喉痛,吐血,瘾疹等病症的恢复
		珠芽景天 *S. bulbiferum*	茎、叶	促进消化液分泌,增加肠张力与蠕动
		凹叶景天 *S. emarginatum*	茎、叶	利尿,热疖等
		山飘风 *S. major*	茎、叶	月经不调和流鼻血
		多茎景天 *S. multicaule*	全草	喉炎,扁桃体炎,口腔溃疡
		齿叶景天 *S. odontophyllum*	茎、叶	行血、散瘀
		垂盆草 *S. sarmentosum*	茎、叶	缓解咽喉肿痛、口腔溃疡
		瓦松 *O. fimbriatus*	茎、叶	利于通便、利湿
		石莲 *S. indica*	叶	降血压、降血糖、尿酸痛风
绿化/观赏/花卉	14	落地生根 *B. pinnatum*	全草、不定芽	叶片肥厚,整齐美观,似蝴蝶
		八宝 *H. erythrostictum*	全草	耐旱,可塑性好,适宜绿化、花坛点缀
		费菜 *S. aizoon*	全草	耐旱、美观
		大苞景天 *S. amplibracteatum*	全草	花黄色,整体观赏性好
		凹叶景天 *S. emarginatum*	全草	叶片翠绿,周期长
		佛甲草 *S. lineare*	全草	适应能力强,植株细腻
		多茎景天 *S. multicaule*	全草	耐旱,适宜楼顶绿化和道路边坡修复
		齿叶景天 *S. odontophyllum*	全草	观赏效果好、适宜盆栽
		垂盆草 *S. sarmentosum*	全草	适应能力强
		叶花景天 *S. phyllanthum*	全草	适宜盆栽、绿化,整体效果好
		安龙景天 *S. tsiangii*	全草	繁殖能力强,适宜培育新品种
		瓦松 *O. fimbriatus*	全草	圆锥花序穗状,小花白色或粉红色,具有较高的观赏效果
		石莲 *S. indica*	全草	叶莲花状,晶莹剔透,适宜阳台盆栽
		圆叶景天 *S. makinoi*	全草	周期长,适宜花坛植被等镶边
其他	2	云南红景天 *R. yunnanensis*	提取物	消除疲劳,抗缺氧,改善记忆等
		东南景天 *S. alfredii*	全草	吸收土壤重金属

3 讨论

贵州是全国喀斯特地貌的主要分布区域,地形复杂,海拔与气候跨度较大,丰富的小气候环境与独特的生态环境孕育了丰富的景天科植物资源。本次研究通过文献查阅与实地调查发现,景天科植物在贵州全省各地均有分布,有 6 属 26 种,《贵州植物志》[2]记载的豌豆七已归并为云南红景天,火连草归并为垂盆草,天黄七中文名应为齿叶景天。安龙景天(*S. tsiangii*)、梵净山景天(*S. fanjingshanensis*)为贵州特有资源。

景天科植物的药用最早记载于《神农本草经》[4],后诸多本草均有收载。《中国药典》2020 版收载了景天科植物垂盆草 *S. sarmentosum*、瓦松 *O. fimbriatus*、大花红景天 *R. crenulata* 作为药用[3],其余种类在其产地亦作药用或食用。贵州景天科植物药用价值高,共有 23 种入药使用,应用较为广泛,且用药方法多样,尤其是作为苗族、布依族、土家族等少数民族用药,以全草类居多,主要有清热解毒、散瘀止血、清热利湿等功效,用于治疗疔疮痈肿、跌打损伤、热淋、湿疹等疾病。常见的景天科植物用药方法有煎煮法、鲜用、捣碎外敷、泡酒、炖肉等,以煎煮法和捣碎外敷居多,各 19 种。有 15 种在 10 个民族中作为药用。土家族药用种类最多,共 9 种,其次是苗族 5 种,白族 4 种。此外,贵州景天科植物有费菜、凹叶景天、佛甲草等 10 种在民间作为野菜食用。

14 种用于绿化、盆栽等观赏花卉进行庭院栽培和公园绿化。1 种可用于富集土壤重金属而进行土壤改良。

贵州景天科植物资源丰富、分布广泛,具有广泛的药用价值、食用价值与园艺观赏价值,开发前景较为广阔。

参考文献【REFERENCES】

[1] 中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京:科学出版社,1984:31-152.

[2] 贵州植物志编辑委员会. 贵州植物志[M]. 贵阳:贵州科学出版社,1987:171-198.

[3] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[S]. 北京:中国医药科技出版社,2020.

[4] 吴普,孙星衍,孙冯翼,等. 神农本草经[M]. 北京:科学技术文献出版社,1996.

[5] 何顺志,徐文芬. 贵州中草药资源研究[M]. 贵阳:贵州科学出版社,2007.

[6] 姜守忠. 贵州景天属的研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),1983(1):65-72.

[7] 杨林,闫福林,刘胜飞,等. 晚红瓦松化学成分的研究[J]. 新乡医学院学报,2008(3):292-294.

[8] 杨迎迎,万新焕,刘英男,等. 垂盆草化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国中药杂志,2020,45(18):4341-4348.

[9] 马雪,吴莹莹,刘理燕,等. 珠芽景天的化学成分研究(Ⅱ)[J]. 中草药,2020,51(8):2112-2116.

[10] 余梅燕. 八宝景天叶的化学成分及生物活性研究[D]. 长春:吉林农业大学,2013.

[11] 刘亚虓,李昕卓,唐家美,等. 景天三七化学成分及药理作用研究进展[J]. 陕西中医药大学学报,2024,47(3):21-33.

[12] 熊燕,杜彩霞,段玉书,等. 黔产景天三七的化学成分及药理活性研究[J]. 中草药,2019,50(22):5404-5410.

[13] 刘志伟,吴谋成,刘秀梅. 菱叶红景天多糖的抗疲劳作用研究[J]. 营养学报,2004(4):327-328.

[14] 王珊珊. 红景天提取物及其复方抗疲劳活性的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.

[15] 林晓坚. 红景天苷抗血小板活性及抗血栓作用的研究[D]. 贵阳:贵州医科大学,2019.

[16] 王娜,王奇志. 费菜的临床应用及其研究进展[J]. 北方园艺,2011(23):171-174.

[17] 侯小琪,张雨曲,张久磊,等. 贵州省维管植物新记录 7 种[J]. 植物资源与环境学报,2023,32(4):98-100.

[18] 杨传东,王晓宇,苟光前. 梵净山景天——景天属一新种[J]. 植物研究,2012,32(4):389-391.

[19] 蒋佳雯,徐文芬,何顺志. 贵州樟科、景天科等 9 个科药用植物资源的种类与分布[J]. 贵州农业科学,2009,37(12):29-32.

[20] 陈京,王静波,徐攀,等. 浙江景天属药用植物资源概述[J]. 中华中医药杂志,2016,31(8):3201-3203.

[21] 万定荣. 垂盆草及其同属(景天属)药用种的民族医疗应用[J]. 时珍国医国药,2007(8):1853-1855.

[22] 田生科. 超积累东南景天(*Sedum alfredii* Hance)对重金属(Zn/Cd/Pb)的解毒机制[D]. 杭州:浙江大学,2010.

[23] 张涵. 东南景天修复高浓度复合重金属污染土壤过程及响应机制研究[D]. 北京:中国环境科学研究院,2023.

[24] 杨澜,王爱华,李薇,等. 贵阳石漠化山地越冬多肉植物品种筛选[J]. 北方园艺,2017(9):57-61.

[25] 陆筱欣. 景天科植物在园林中的应用研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2014.

[26] 卢洁. 景天科多肉植物园林景观中的应用[J]. 绿色科技,2017(22):201-202.

[27] 胡莹冰. 景天科多肉植物应用调查研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2013.

[28] 赵扬辉. 贵州省朱家山自然保护区野生观赏植物资源评价与应用[D]. 贵阳:贵州师范大学,2021.

收稿日期:2025-02-26;**修回日期**:2025-03-02

基金项目:国家中医药管理局项目(国中医药科技中药 2014-117 号);贵州省科技计划项目(黔科中引地〔2022〕4016);贵州省农业农村厅项目:贵州省中药材现代农业产业技术体系(GZYCCYJSTX-02)。

作者简介:**吴松松**(2002-),男,在读本科生,主要研究方向:中药民族药资源研究。

▲**通讯作者**:**严福林**(1986-),男,博士研究生,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向:中药民族药资源研究。

四氟醚唑对斑马鱼的急性毒性与生物富集性*

梁 可[1],何 钰[1],罗 欣[1],陈迎丽[2],谭正莹[1],张冰梅[1],包 娜[1],廖朝选[1▲]
([1] 贵州省分析测试研究院,贵州 贵阳 550014;[2] 贵州省检测技术研究应用中心,贵州 贵阳 550002)

摘 要: 为评价四氟醚唑对水生生态系统的影响。以斑马鱼为试验生物,采用静态试验法进行了四氟醚唑的鱼类急性毒性试验,使用半静态试验结合 HPLC-MS/MS 法研究了四氟醚唑在斑马鱼体内的生物富集效应。结果显示,四氟醚唑对斑马鱼 96 h 的急性毒性 LC_{50} = 7.07 mg a.i./L,95% 置信限为 6.46 ~ 7.80 mg a.i./L;在 0.070 mg a.i./L 和 0.70 mg a.i./L 浓度下,四氟醚唑在斑马鱼体内的富集系数 BCF_{8d} 分别为 26 L/kg、10 L/kg。四氟醚唑对斑马鱼具有中等毒性,生物富集水平为中等,相关数据可用于水生态系统的风险评估。

关键词: 四氟醚唑,斑马鱼,急性毒性,生物富集性
中图分类号:X171.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0071-06

Acutetoxicity and bioconcentration of tetraconazole in zebrafish(*Brachydonio rerio*)*

LIANG Ke[1], HE Yu[1], LUO Xin[1], CHEN Yingli[2], TAN Zhengying[1], ZHANG Bingmei[1], BAO Na[1], LIAO Chaoxuan[1▲]

([1] *Guizhou Academy of Testing and Analysis, Guiyang 550014, China*; [2] *Guizhou Testing Technology Research and Application Center, Guiyang 550002, China*)

Abstract: To evaluate the effect of tetraconazole on aquatic ecosystem, the zebrafish(*Barchydanio rerio*) was used as the test objtect, and the acute toxicity test of tetraconazole in fish was carried out by static test method. The bioconcentration effect of tetraconazole in zebrafish was studied by semi-static test combined with HPLC-MS/MS method. The results showed that the acute toxicity of tetraconazole in zebrafish at 96 h was LC_{50} = 7.07 mg a.i./L, and the 95% confidence limit was 6.46 to 7.80 mg a.i./L. Under the concentration of 0.070 and 0.70 mg a.i./L, the bioconcentration coefficients(BCF_{8d}) of tetraconazole in zebrafish were 26 and 10 L/kg, respectively. Tetraconazole has moderate toxicity to zebrafish, and its bioconcentration level is moderate. The relevant data can be used for the risk assessment of aquatic ecosystems.

Keywords: tetraconazole, *Barchydanio rerio*, acute toxicity, bioconcentration

三唑类杀菌剂广泛应用于作物生产的菌害防控[1-2],但它们与土壤一起很容易被冲入河流、湖泊等水体,可能对水生态系统构成暴露风险。例如江苏、浙江、上海沿海河口表层水体中三唑类杀菌剂的总浓度为0.020 ~ 104 ng/L[3],东海河口表层水体的总浓度为0.235 ~ 1.25 ng/L;在华北平原的白洋淀上游典型农田区水体中,多菌灵、三环唑、丙环唑、烯唑醇含量分别为 0.87 ~ 302 ng/L、0.49 ~ 9.59 ng/L、3.84 ~ 1209 ng/L、0.25 ~ 562 ng/L[4]。相关研究表明,水生态系统中三唑类杀菌剂残留可能造成水生生物毒性效应,并可在生物体内富集,产生累积风险。如叶菌唑对斑马鱼具有中等毒性,同时具有中等程度的生物富集性[5];丙环唑和苯醚甲环唑在禾花鲤体内也具有中等程度的富集性[6]。因此,

三唑类杀菌剂施用前,需评估其对水生生物的影响。

四氟醚唑(Tetraconazole)是一种高效、广谱的三唑类杀菌剂,是由意大利意赛格公司开发,对葡萄的白粉病具有很好的防效[7]。目前,有效登记的产品中,主要单独或与嘧菌酯、肟菌酯等杀菌剂混配用于草莓、黄瓜、观赏玫瑰的白粉病防治,也有少许产品扩展用于甜瓜炭疽病和水稻纹枯病防控[8]。和其他三唑类杀菌剂一样,四氟醚唑施用后,在葡萄园等应用场景区水体中普遍检出[9]。由于四氟醚唑在环境中具有持久性,在水中的半衰期 DT_{50} 为 94 ~ 125 d[10],在主要应用场景区水体中含量往往高于其他三唑类杀菌剂[9]。据报道,四氟醚唑暴露会破坏细胞的钙稳态和线粒体功能[11],可抑制乳酸和睾酮分泌,降低精子的活力和速度,增加精子形态异常的百分比[12],可影响斑马鱼体内的肠道微生物菌群丰度[13]。然而,对于水生态系统风险评估所需的鱼类急性毒性和生物富集数据尚少。本研究使用毒理试验常用的斑马鱼作为模式生物,利用半静态暴露试验法,结合 HPLC-MS/MS 分析四氟醚唑在斑马鱼体内的生物富集行为,相关数据有助于评估四氟醚唑对水生生物的潜在风险。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

液相色谱-三重四级杆质谱联用仪:Agilent 1290/6470A,配有 AJS ESI 离子源,美国 Agilent 公司;电子天平:AL204,0.0001 g,梅特勒-托利多(上海)有限公司;多管涡旋混合仪:Doprah,月旭科技(上海)股份有限公司;涡旋混合器:Vortex-Genie2,美国 Scientific Industries 公司;台式低速离心机:DD-5M,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;超声波清洗仪:SK250H,上海科导超声仪器有限公司;溶解氧测定仪:HQ30 d,美国哈希公司。

四氟醚唑:标准物质,100 μg/mL,坛墨质检科技股份有限公司;试样:12.5% 四氟醚唑水乳剂,意大利意赛格公司;乙腈:色谱纯,德国 Merck 公司;甲酸:色谱纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;碳酸钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;去离子水:经美国 Milli-Q 仪器自制。曝气试验水:经活性炭过滤并曝气充氧、脱氯 48 h 的自来水,溶解氧约 103% ASV,硬度 185 mg/L(以 $CaCO_3$ 计),pH 值约 7.85。

1.2 试验生物

斑马鱼:AB 型品系,实验室自培养,试验鱼全长 2.5 ~ 3.0 cm,表面光亮、健康无疾病,该批次鱼经重铬酸钾敏感性测试,24 h 的 LC_{50} 为 228 mg/L。试验前随机选择 100 尾进行了预养,每日 2 次喂食,于试验前 24 h 停止喂食,预养 7 d 内未发生死亡。

1.3 试验方法

1.3.1 鱼类急性毒性试验

依据《化学农药环境安全评价试验准则》第 12 部分:鱼类急性毒性试验(GB/T 31270.12—2014),使用 8 L 一体成型玻璃缸作为试验缸,将 12.5% 的四氟醚唑水乳剂分散于 4 L 曝气试验水中,制备为 2.96 mg a.i./L、4.4 mg a.i./L、6.67 mg a.i./L、10.00 mg a.i./L、15.00 mg a.i./L 的系列浓度试验液。然后取用 4 L 无试样的曝气自来水作为空白对照,将所有试验缸置于自动控光、控温的大型恒温水浴槽内,设置环境参数为温度 23 ℃,16 h 光照/8 h 黑暗,待温度恒定后随机添加 10 尾鱼进行试验。采用静态试验法进行试验,周期为 96 h。试验期间不进行喂食,每日记录试验鱼的毒理反应和死亡情况,同时监测试验液的温度、溶解氧和 pH 值,并在试验开始和结束时分别测定试验液的四氟醚唑浓度。

1.3.2 生物富集试验

参考《化学农药环境安全评价试验准则》第 7 部分:生物富集试验(GB/T 31270.7—2014),使用 100 L 玻璃方缸作为试验缸,将 12.5% 的四氟醚唑水乳剂分散于 50 L 曝气试验水中,制备为 0.070 mg a.i./L、0.70 mg a.i./L 的浓度处理组,然后取用 50 L 无试样的曝气自来水作为空白对照,每个处理组设 2 个重复。试验缸置于温度 23 ℃ ±2 ℃、16 h光照/8 h 黑暗的实验室内,待试验液温度恒定后随机添加 50 尾鱼进行试验。试验采用半静态试验法进行,换液频率为 48 h/次,试验周期为 8 d。试验期间每日进行 2 次喂食,每次喂食量为试验鱼体重的 1% 左右,喂食完毕后及时使用聚丙烯塑料管,利用虹吸原理清理缸底残留污垢。同时每日监测试验液的温度、溶解氧和 pH 值,分别于入缸前、1 h、3 h、6 h、12 h、24 h、48 h、96 h、144 h、196 h 定期采

集鱼样(4 尾/组)和水样,用于鱼体和水样中四氟醚唑的测定。

1.3.3 仪器分析方法

参照已发表的水-沉积物中的四氟醚唑分析方法[14],优化流动相及色谱条件,确定仪器分析方法。液相色谱分析条件:色谱柱为 Agilent InfinityLab Poroshell 120 EC-C18(1.9 μm,2.1 mm×50 mm)、柱温为 35 ℃、流动相采用梯度洗脱,程序(A 为 0.1% 甲酸水、B 为乙腈):0 min B 为 15%,1.0 min B 为 50%,1.1 ~ 3.0 min B 为 95%,3.2 ~ 6.0 min B 为 15%;进样体积为 2 μL;流速:0.3 mL/min;运行时间:6 min;。质谱条件为 ESI+模式,MRM 扫描,干燥器温度(300 ℃),Fragment(110 V),定性/定量离子对(372.1/159,372.1/70.2)。

1.3.4 样品前处理

水样直接取中部试验液,用去离子水稀释 10 倍后待测。鱼样先用去离子水清洗干净并吸干水分,然后剪断脊柱令其死亡。称重后置于玛瑙研钵中,加入 2 g $NaCO_3$ 研磨成浆,然后用 25 mL 乙腈转移至 50 mL 离心管内,涡旋振荡提取 1 h,然后离心 5 min(4000 r/min),取上清液稀释一定倍数后,经过 0.22 μm 滤膜过滤后待测。

1.3.5 数据处理

标准曲线的绘制:准确移取 100 μg/mL 四氟醚唑标准溶液 0.10 mL,用乙腈定容至 10 mL,制备为 1000 μg/L 的标准储备液。然后使用乙腈和空白鱼基质溶液逐渐稀释标准储备液,分别制备为质量浓度为 1.0 μg/L、2.0 μg/L、5.0 μg/L、10.0 μg/L、20.0 μg/L、50.0 μg/L、100.0 μg/L 的四氟醚唑系列标准工作溶液和鱼基质匹配标准工作溶液。然后在 1.3.3 节仪器条件下分析,将浓度(X)与峰面积(Y)进行线性拟合。乙腈配系列标准工作溶液的标准曲线方程为 $y = 1965.4x - 242.11$ ($R^2 = 0.9993$);鱼基质匹配标准工作溶液的标准曲线方程为 $y = 1726.2x + 683.92$ ($R^2 = 0.9998$),表明在乙腈或鱼基质溶液中,四氟醚唑在 1.0 ~ 100.0 μg/L 范围内均具有良好的线性关系。

准确度和精密度:取水样(25 mL 曝气试验水)和鱼样(1 g 鱼浆)的空白基质,分别添加 25 ng、250 ng 四氟醚唑制备为基质加标样品,每个添加水平均设 6 个重复,然后使用样品相同的前处理和分析方法进行添加回收率试验。如表 1 所示,水样中添加水平为 25 ng、250 ng 时,回收率分别为 101.77% (95.70% ~ 107.80%)、100.43% (95.60% ~ 104.40%),相对标准偏差分别为 4.73%、3.18%,最低检测浓度为 1.0 μg/L。鱼样中添加水平为 25 ng、250 ng 时,四氟醚唑的回收率分别为 99.20% (91.60% ~ 106.50%)、101.93% (98.30% ~ 105.10%),相对标准偏差分别为 7.19%、2.78%,最低检测含量为 0.05 mg/kg。表明方法的正确度和精密度均较好,可有效测定水样和鱼样中四氟醚唑的含量。

表 1 水样和鱼样中四氟醚唑的添加回收率和相对标准偏差

基质	添加水平/ng	测定量/ng			回收率/%			平均回收率/%	相对标准偏差/%
水样	25	26.95	24.62	26.80	107.80	98.50	107.20	101.77	4.73
		23.92	25.28	25.08	95.70	101.10	100.30		
	250	247.00	256.25	239.00	98.80	102.50	95.60	100.43	3.18
		261.00	247.75	255.50	104.40	99.10	102.20		
鱼样	25	23.48	26.32	22.90	93.90	105.30	91.60	99.20	7.19
		26.30	23.18	26.62	105.20	92.70	106.50		
	250	254.50	259.25	245.75	101.80	103.70	98.30	101.93	2.78
		259.75	262.75	247.00	103.90	105.10	98.80		

统计分析:LC_{50} 与 95% 置信限采用 SPSS19.0 进行 Probit 回归分析。富集系数(*BCF*),通过 $BCF = C_{fs}/C_{ws}$ 计算,式中:*BCF* 为生物富集系数;C_{fs} 为平衡时鱼体中四氟醚唑含量(mg a.i./kg),C_{ws} 为平衡时水中四氟醚唑浓度(mg a.i./L)。

毒性与富集等级判定:依据《化学农药环境安全评价试验准则》中相关标准进行判定。

2 结果与分析

2.1 急性毒性效应与死亡情况

试验期间溶液的温度为 22.2 ~ 24.0 ℃,溶解氧为 88.9% ~ 102.4% ASV,pH 值为 7.57 ~ 7.83,空白对照组中斑马鱼未发生死亡及异常行为,均符合鱼类急性毒性试验要求。试验初始水样浓度为理论配制浓度的 97.52% ~ 102.73%,试验结束时水样浓度为初始浓度的 90.41% ~ 98.79%,均介于 80% ~ 120% 之间,最终结果统计直接使用理论配制浓度。设置的 2.96 mg a.i./L、4.44 mg a.i./L、6.67

mg a. i. /L、10.00 mg a. i. /L 和 15.00 mg a. i. /L 的系列浓度处理组中,试验鱼发生体色改变、游动迟缓的中毒症状。从表 2 可知,试验鱼死亡情况与浓度呈正相关关系,鱼体死亡主要发生 0 ~ 48 h 阶段,48 h 后试验鱼逐渐适应并不再发生死亡。经 SPSS19.0 软件 Probit 回归分析,四氟醚唑对斑马鱼 96 h 的 LC_{50} = 7.07 mg a. i. /L,95% 置信限为 6.46 ~ 7.80 mg a. i. /L。

表 2 供试农药对斑马鱼的毒性数据分析

时间/h	死亡率/%					半致死浓度 LC_{50} /(mg a. i. /L)	95% 置信限 /(mg a. i. /L)
	2.96 mg a. i. /L	4.44 mg a. i. /L	6.67 mg a. i. /L	10.00 mg a. i. /L	15.00 mg a. i. /L		
12	0	0	0	0	20	>15	/
24	0	0	10	30	60	13.14	12.03 ~ 14.80
48	0	10	40	70	100	7.74	7.19 ~ 8.40
72	0	20	50	70	100	7.07	6.46 ~ 7.80
96	0	20	50	70	100	7.07	6.46 ~ 7.80

2.2 富集量与富集系数

试验期间溶液的温度为 21.8 ~ 24.4 ℃,溶解氧为 76.3% ~ 102.2% ASV,pH 值为 7.61 ~ 7.83,均符合鱼类急性毒性试验要求。试验初始水样浓度为理论配制浓度的 97.52% ~ 102.73%,试验结束时水样浓度为初始浓度的 90.41% ~ 98.79%,均介于 80% ~ 120% 之间,最终结果统计直接使用理论配制浓度。如图 1 所示,斑马鱼暴露于四氟醚唑溶液后,四氟醚唑快速的富集于斑马鱼体内,于 1 h 即检测出四氟醚唑,0.070 mg a. i. /L 与 0.70 mg a. i. /L 处理组鱼体内含量为 0.12 mg a. i. /kg、0.38 mg a. i. /kg。48 h 后鱼体内四氟醚唑积累量变化率低于 10%,基本达到富集平衡,0.070 mg a. i. /L 与 0.70 mg a. i. /L 处理组鱼体内富集量平均为 1.8 mg a. i. /kg、6.9 mg a. i. /kg,其富集系数 *BCF* 值分别为 26 和 10(图 2)。根据《化学农药环境安全评价试验准则》第 7 部分:生物富集试验(GB/T 31270.7—2014),四氟醚唑属于中等富集性农药。

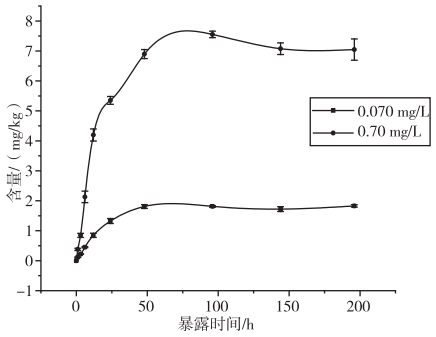


图 1 斑马鱼对四氟醚唑的富集量

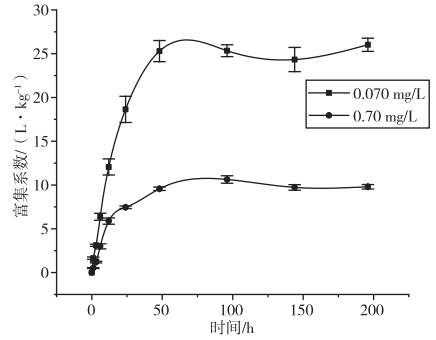


图 2 四氟醚唑在斑马鱼体内的富集系数

3 讨论

鱼类急性毒性是评估杀菌剂等化学品的环境危害的重要依据。斑马鱼具有易获取、繁殖快、稳定性好、对毒物敏感等优点,被广泛用于农药等化学品的环境风险评估[15-17]。急性毒性结果表明,四氟醚唑对斑马鱼 96 h 的 LC_{50} = 7.07 mg a. i. /L,具有中等程度的急性毒性。四氟醚唑是一种甾醇脱甲基化抑制剂,可通过阻碍真菌麦角甾醇的生物合成而影响真菌细胞壁的形成,从而达到杀菌作用[18]。而在动物体内,甾醇类物质参与了机体的糖、蛋白质、脂肪、水、电解质和矿物质等的代谢作用,四氟醚唑暴露可能通过影响甾醇的合成或转化,造成相关代谢紊乱,从而产生毒副作用。但农药对水生生物的影响不仅与毒性有关,也与用药量、用药次数和施用方式有关,对于四氟醚唑类中等程度农药,应严格按照产品规定,在相应使用量、次数和范围内使用,避免对水生态系统产生暴露风险。

生物富集主要反映农药等污染物在生物体内的富集能力,对于评估污染物对生物体的慢性危害或累积风险至关重要,是水生态系统风险评估的重要参数。在 0.070 mg a. i. /L 和 0.70 mg a. i. /L 浓度暴露下,鱼体很快的开始积累四氟醚唑,并在 48 h 内达到平衡。设置的两个试验组中四氟醚唑的暴露浓度比为 10 倍,但平衡时两组鱼体的积累量比值仅为 3.8 倍。这与磺胺甲恶唑、磺胺嘧啶等化学品在鱼体内的积累特性类似,对相关化学品的积累都具有有一定的容量限制或平衡机制,并不与暴露浓度

呈倍数增长关系[19]。

生物富集系数(bioaccumulation factor,BCF)是污染物在生物体内富集的表征方式,其数值大小反映了富集能力的强弱。通常,富集系数越大,污染物在生物体内的富集能力越强,其可能产生的环境污染和慢性风险就越大[20-21]。生物富集试验表明,0.070 mg a.i./L 和 0.70 mg a.i./L 浓度暴露下,四氟醚唑对斑马鱼 8 d 的 BCF 分别为 26 L/kg、10 L/kg,具有中等程度的富集作用。在我国现行的农药环境风险评估体系中,以生物富集系数 $BCF>1000$ L/kg,且 14 d 的清除率小于 95%($CT_{95}>14$ d)作为水生态系统风险不可接受的依据。四氟醚唑对斑马鱼 8 d 的 $BCF<1000$ L/kg,表明四氟醚唑使用后,因生物富集影响带来的水生态系统的风险在可接受范围。

研究获取的鱼类急性毒性和生物富集性数据可用于评估四氟醚唑施用后对水生态系统带来的风险,但鱼类和其他生物对污染物的毒性反应不尽相似。为了更全面地进行四氟醚唑的水生态系统风险评估,还需补充无脊椎动物、水生植物、底栖生物等不同营养级生物的毒性数据[22]。

参考文献【REFERENCES】

[1] LI C F,FAN S,ZHANG Y R,et al. Toxicity,bioactivity of triazole fungicide metconazole and its effect on mycotoxin production by *Fusarium verticillioides*:new perspective from an enantiomeric level[J]. Sci total environ,2022,828:154432.

[2] 雷雨豪,张翠芳,王壮,等. 环境激素农药三唑类杀菌剂在土壤中的残留与风险评价[J]. 农药,2019,58(9):660-663.

[3] ZHANG S W,WANG F,WANG R,et al. Spatial assessment of triazole organic compounds in surface water from the coastal estuaries to the East China sea[J]. Environ pollut,2023,320:121024.

[4] 孙小丽. 白洋淀上游典型水-土环境介质中农药的赋存特征及生态风险评估[D]. 保定:河北大学,2023.

[5] 李如美,戴争,王维,等. 叶菌唑对斑马鱼的急性毒性及生物富集效应[J]. 生态毒理学报,2019,14(5):326-330.

[6] 王壮. 丙环唑和苯醚甲环唑在禾花鲤体内的富集与激素干扰效应的研究[D]. 南宁:广西大学,2021.

[7] LIU S F,KOU H R,MU B F,et al. Dietary risk evaluation of tetraconazole and bifenazate residues in fresh strawberry from protected field in North China[J]. Regul toxicol pharmacol,2019,106:1-6.

[8] 中国农药信息网. 农药登记数据[EB/OL].[2024-03-27]. http://www.chinapesticide.org.cn/zwb/dataCenter.

[9] GUARDA P M,GUALBERTO L D S,MENDES D B,et al. Analysis of triazines,triazoles,and benzimidazoles used as pesticides in different environmental compartments of the Formoso River and their influence on biodiversity in Tocantins[J]. J environ sci health B,2020,55(9):783-793.

[10] ALAM S,SENGUPTA D,KOLE R K,et al. Dissipation kinetics of tetraconazole in three types of soil and water under laboratory condition[J]. Environ monit assess,2013,185(12):9819-9824.

[11] JEONG S A,SONG J,HAM J,et al. Tetraconazole interrupts mitochondrial function and intracellular calcium levels leading to apoptosis of bovine mammary epithelial cells[J]. Pestic biochem physiol,2023,191:105366.

[12] SERRA L,BOURDON G,ESTIENNE A,et al. Triazole pesticides exposure impaired steroidogenesis associated to an increase in AHR and CAR expression in testis and altered sperm parameters in chicken[J]. Toxicol rep,2023,10:409-427.

[13] DI S S,LI Y,SONG B B,et al. Potential effects of individual and combined exposure to tetraconazole and cadmium on zebrafish from the perspective of enantioselectivity and intestinal microbiota[J]. Sci total environ,2024,921:170899.

[14] 段亚玲,侯松嵋,王捷,等. 液相色谱-质谱联用法测定水-沉积物系统中四氟醚唑的残留量[J]. 农药学学报,2014,16(2):179-185.

[15] 廖朝选,李俊,魏杰,等. 己唑醇对 3 种水生生物的毒性效应与环境暴露风险[J]. 农药,2022,61(9):655-660.

[16] JIA M,TENG M M,TIAN S N,et al. Effects of penconazole enantiomers exposure on hormonal disruption in zebrafish *Danio rerio*(Hamilton,1822)[J]. Environ sci pollut res int,2021,28(32):43476-43482.

[17] 张伟浩,柳贤德,朴伶华. 利用转基因斑马鱼快速检测水体抗生素污染[J]. 江苏农业科学,2019,47(22):269-272.

[18] 徐汉红. 植物化学保护[M]. 北京:中国农业出版社,2011.

[19] NALLANI G C,PAULOS P M,CONSTANTINE L A,et al. Bioconcentration of ibuprofen in fathead minnow(*Pimephales promelas*)and channel catfish(*Ictalurus punctatus*)[J]. Chemosphere,2011,84(10):1371-1377.

[20] HILVARSSON A,OHLAUSON C,BLANCK H,et al. Bioaccumulation of the new antifoulant medetomidine in marine organisms[J]. Mar environ res,2009,68(1):19-24.

[21] WU W Z,KONG D Y,ZHANG W D,et al. Acute toxicity of fluazinam to aquatic organisms and its bioaccumulation in *Brachydanio rerio*[J]. Environmental science and pollution research,2020,27:35000-35007.

污泥/磷石膏陶粒生物挂膜性能研究*

李佳丽[1],徐乃姣[2],冯丽娟[3▲],彭　怀[4]

([1] 凯里学院　理学院,贵州　凯里　556011;[2] 息烽县水务管理局,贵州　息烽　551100;[3] 贵州师范大学　地理与环境科学学院,贵州　贵阳　550025;[4] 中国建筑材料工业地质勘查中心贵州总队,贵州　贵阳　550000)

摘　要: 以城市污泥及磷石膏为原料制备陶粒作为城市污水处理填料,并与市售陶粒作对比。在自行设计的曝气装置的基础上,对污水进行处理,整个系统运行 21 天。运行期间定期对污水中的 COD 进行检测,以挂膜前后陶粒的重量差,作为衡量微生物生长量的指标。自制的污泥陶粒对进水处和曝气池处污水 COD 的去除率分别为 87.55%、86.77%,微生物的生长量分别为 1.3339 g、0.6124 g;市售陶粒对进水处和曝气池处污水 COD 的去除率分别为 86.22%、82.91%,微生物的生长量分别为 0.1539 g、0.0998 g。结果表明,自制陶粒对 COD 的去除率优于市售陶粒;另外,自制污泥陶粒挂膜速度快且挂膜率高,比市售陶粒更利于微生物附着和增殖。运行期间自制污泥陶粒对 COD 的去除率比较平稳,说明自制陶粒的抗冲击负荷能力较强,去除污染物的效果更好。

关键词: 城市污泥,磷石膏,陶粒,挂膜

中图分类号:X705　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1003-6563(2025)05-0076-05

Study on biofilm formation performance of sludge/phosphogypsum ceramsites*

LI Jiali[1], XU Naijiao[2], FENG Lijuan[3▲], PENG Huai[4]

([1] *School of Science, Kaili University, Kaili 556011, China*; [2] *Xifeng Water Administration Bureau, Xifeng 551100, China*; [3] *School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China*; [4] *Guizhou Corps, China Geological Survey Center for Building Materials, Guiyang 550000, China*)

Abstract: In this study ceramsites were prepared using urban sludge and phosphogypsum as raw materials, respectively. The ceramsites were employed as fillers for urban wastewater treatment, and its performance was compared with commercially available ceramsites. Based on a self-designed aeration device, the wastewater was treated over a period of 21 days. During the operation of the system, regular monitoring of chemical oxygen demand (COD) in the wastewater was conducted. The weight difference of the ceramsites before and after biofilm formation was taken as the indicator for microbial growth. The results showed that the self-made sludge-based ceramsites achieved a COD removal rate of 87.55 % and 86.77 % at the influent and the aeration tank, respectively, with corresponding

[22] 魏成彩. 氟唑菌酰羟胺对 3 种水生生物毒性及水生态系统风险评估[D]. 泰安:山东农业大学,2024.

收稿日期:2024-09-29;**修回日期:**2024-09-29

基金项目:贵州省科学技术基金项目(黔科合基础-ZK[2022]一般229);贵州科学院青年基金项目(黔科院 J 字[2023]23 号)。

作者简介:梁　可(1972-),女,贵州贵阳人,研究实习员,研究方向:环境与生态毒理学。

▲**通讯作者:廖朝选**(1984-),男,贵州遵义人,高级工程师,研究方向:环境与生态毒理学。

microbial growth amount of 1.3339 g and 0.6124 g; the commercially available ceramsites exhibited a COD removal rate of 86.22 % and 82.91 %, with corresponding microbial growth amount of 0.1539 g and 0.0998 g, respectively. This demonstrated that the self-made ceramsites outperformed their commercial counterparts in terms of COD removal efficiency. Furthermore, the self-made sludge-based ceramsites exhibited rapid biofilm formation with a high attachment rate, making them more conducive to microbial adhesion and proliferation compared with commercial alternatives. Throughout the operational period, the COD removal rate of the self-made ceramsites remained stable, indicating robust resistance to shock loading conditions and superior pollutant removal efficacy.

Keywords: urban sludge, phosphogypsum, ceramsite, biofilm formation

城市污泥是污水处理厂在处理城市污水过程中产生的固体废物,它含水率高,并且含有各种病菌、虫卵、有机污染物、腐殖质纤维、泥沙及重金属[1-4],如不加以妥善处理,将会造成二次污染。随着我国城市化进程的加快,污水处理厂的规模日益增大,污水和污泥的排放量也随之增长[5]。有资料显示,全国污水处理厂 2022 年处理的污水总量约为 625.8 亿 m^3,干污泥的产生量约为 1300 万 t[6]。城市污泥的处理与处置已成为我国亟待解决的问题之一,受到社会各界的关注。目前常见的污泥无害化处理方法有卫生填埋、焚烧、堆肥、土地利用、投海和工业利用[7]等。以上这些方法都存在一定的弊端,例如填埋是我国最主要的污泥处置方式,但填埋过程中可能发生渗滤液污染及病原微生物传播[8-9]。污泥的高含水率使焚烧能耗巨大[10]。污泥中含有重金属和有毒有机物,当其浓度过高时,污泥堆肥产品的应用会受到限制[11]。磷石膏是磷化工生产过程产生的固体废弃物,含有磷、氟、磷酸、硅、镁、铁、铝、碱金属元素及有机杂质等。磷石膏主要成分为 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 和 Na_2SiF_6,另外也含有 P_2O_5,F,Al_2O_3,Fe_2O_3,MgO,SiO_2 及有机物等杂质。目前,磷石膏以用作土壤改良剂、建材及生产水泥缓凝剂为主[12],还可为农作物的生长提供所需要的磷、钙、硫、硅等养分[13-14]。但是从世界范围看,仍有大量磷石膏至今尚未得到有效利用。

以城市污泥为原料,辅以其他物料,造粒成型后烧结制备陶粒的方案最早是由 Nakouzi 等[15]提出的。Mun 等[16]用脱水污泥和粘土制成了陶粒轻骨料,其物理性能优于市售轻骨料;许国仁等[17]用污泥、粘土和粘结剂为原料,制备出内部孔隙发达、外表坚硬、强度较好的陶粒。以上研究都证实以污泥为原料制备陶粒的可行性。随着科学技术的不断发展,陶粒被广泛应用于环保、冶金、化工、农业等领域,其中,最引人注目的是在污水处理中的应用。阙科健[18]以污泥为原料制备出性能良好的生物滤池填料,污泥陶粒填料的终期挂膜量是普通陶粒填料的 2.5 倍,污泥陶粒填料的挂膜速度和挂膜率均优于普通陶粒填料。吴苏清[19]以脱水污泥和粘土为原料烧制污泥陶粒,作为水处理填料并用于工业废水的深度处理,处理后的水质符合国家污水排放标准的要求(COD ≤ 100 mg/L, NH_3-N ≤ 15 mg/L)。因此,污泥陶粒填料是一种较理想的废水生物处理填料。将陶粒用于污水处理中,不仅实现了污泥的变废为宝,而且也达到了以废治废的目的,污泥资源化的同时也使得污水处理的投资成本大大降低。目前暂无用磷石膏和污泥这两种废料混合烧制陶粒并用作水处理填料的研究,本文利用污泥及磷石膏为原料制备陶粒并作为城市污水处理填料,以期为污水处理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用城市污泥取自贵阳市某污水处理厂,黑褐色,有强烈的臭味;磷石膏购自开阳县某公司,浅灰色细粉末固体,两种原材料的基本性质见表 1。试验初期所用污水取自贵阳市某污水处理厂进水处及初级曝气池处的污水,试验过程中所用污水为自配的模拟污水。市售陶粒购自某公司,粒径 5 ~8 mm。

表 1 污泥及磷石膏的基本性质

材料	基本性质			
	pH	有机质/(g/kg)	总氮/(g/kg)	总磷/(g/kg)
污泥	6.84	436.16	22.37	25.09
磷石膏	4.65	14.87	17.4	62.7

1.2 试验方法

1.2.1 陶粒制备

污泥、磷石膏经除杂、粉碎后,研磨过 60 目筛,用标准样品袋密封干燥保存;根据污泥与磷石膏质量比 1∶1 加蒸馏水搅拌混合均匀,造粒成球(直径约 5 ~ 10 mm),将生料球放入烘箱中,设置温度 105 ℃,干燥 1 ~ 2 h;将干燥后的生料球放入马弗炉中,设置好烧结温度(1050 ℃)、烧结时间(15 min)等;烧制完成后,关掉马弗炉使其冷却至室温,取出陶粒恒重备用。

1.2.2 挂膜试验

挂膜试验按污水与陶粒的质量比为 3∶1 称取陶粒(原污水取自贵阳市某污水处理厂),放入自行设计的容器内进行曝气。每天停机 2 h,隔一天取出上清液 100 mL 后,往曝气容器中加入相同体积的配制模拟污水(模拟污水配方为:葡萄糖 0.170 g,可溶性淀粉 0.160 g,无水乙酸钠 0.233 g,氯化铵 0.0255 g,蛋白胨 0.158 g,牛肉膏 0.040 g,硫酸铵 0.0284 g,磷酸二氢钾 0.070 g,无水碳酸钠 0.060 g,自来水 1000 mL,模拟污水的 COD 为 700 mg/L,临用时稀释至 350 mg/L)。对取出上清液的 COD 进行测定,COD(重铬酸钾法)的测定参考《水和废水监测分析方法》[20]。实验进行 21 天,实验结束后对陶粒进行烘干称重,减去陶粒的初始重量得到微生物的重量,同时选用市售陶粒进行对比。市售陶粒及自制陶粒的基本参数见表 2,3 种污水的 COD 浓度参数见表 3。

表 2 多孔陶粒的理化性质

性能参数	陶粒类别	
	自制陶粒	市售陶粒
粒径/mm	5 ~ 10	5 ~ 8
表观密度/(g/cm^3)	1.35	3
孔隙率/%	56.24%	55%
盐酸可溶率/%	18.76%	2%
堆积密度/(g/mL)	0.59	—

表 3 3 种污水的 COD 浓度

污 水	COD 浓度/(mg/L)	
	第一次取水	第二次取水
进水处污水	148.06	95.38
曝气池处污水	93.02	84.74
模拟污水(稀释后)	350	350

2 结果与讨论

图 1 所示为曝气装置启动运行期间两种填料对进水处污水中 COD 的去除效果。由图 1 可知,自制污泥陶粒在挂膜实验初期(前 5 天),细菌在其表面的挂膜速度比较缓慢,随着时间的推移,微生物逐渐生长,挂膜速度也随之加快[21]。当运行到第 5 ~ 7 天时,自制陶粒对 COD 的去除率显著增强。运行至第 9 天时,市售陶粒对 COD 的去除率为 87.4%,自制的污泥陶粒对 COD 的去除率为 87.2%,两者几乎相当,其原因是试验中所使用的两种填料粒径差不多,都具有较强的吸附作用[22]。随着运行时间的推移,COD 的去除率出现不同程度的波动,两种陶粒的最高去除率有较大差异。自制污泥陶粒在试验运行 20 天后,对 COD 的去除率为 87.55%,且运行期间的去除率比较平稳,说明自制陶粒的抗冲击负荷能力较强,去除污染物的效果更好;市售陶粒虽然在运行 15 天后对 COD 的去除率达到了 94.65%,但随后又下降到了 72.86%,最后的去除率只有 86.22%。其原因一方面可能是有机物的浓度过高,使其超过了生物膜的分解能力[23],另一方面由于吸附达到饱和状态可能会出现解析现象,从而使出水 COD 浓度呈现增大趋势[24]。2 种填料对 COD 的去除率与郭鹏瑶等[25]的研究相当。

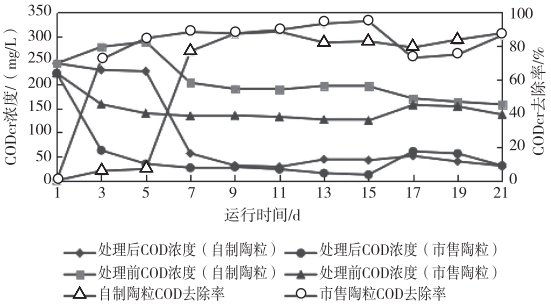


图 1 2 种陶粒对进水处污水中 COD 的去除情况

从图 2 中可以看出,在试验进行的前 5 天,自制陶粒处理前后 COD 浓度波动比较平稳,去除率较低,可能是由于市售陶粒填料粒径较自制污泥陶粒填料略小,截留能力强。运行初期,部分活性污泥被截留在填料间隙中,因此市售陶粒前期对 COD 的去除效果还包含截留的活性污泥表现出的去除效果[18]。运行前期,陶粒表面的微生物量还比较少,正处于生长期,其表面的生物膜还不成熟,使其 COD 的浓度下降得比较慢[26]。污泥陶粒填料生物

膜的形成时间略晚于市售陶粒填料,但其生物膜成熟的速度比市售陶粒填料要快。随着时间的推移,2种填料对 COD 的去除率总体上均呈上升趋势,但最高去除率出现的时间不同,自制污泥陶粒在运行第9天时就达到了最高去除率,为 90.22%,而市售陶粒的最高去除率是在第 11 天时,去除率为93.74%,因此,自制陶粒挂膜速度更快。虽然市售陶粒的最高去除率比自制污泥陶粒的略高,但自制污泥陶粒对 COD 的去除率的稳定性优于市售陶粒,几乎稳定在 82.1% ~88.73% 之间,最后的去除率达到 86.77%;市售陶粒在挂膜前 5 ~15 天的时间里去除率比较稳定,但之后又出现了较大的波动,最后的去除率为 82.91%。这可能是因为自制陶粒表面比较粗糙,空隙率比较大,更有利于微生物的附着及增殖,使其表面上微生物数量更丰富,挂膜率高,所以可以取得更好的去除效果[27-28]。

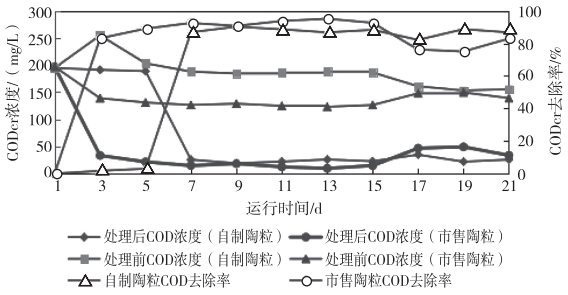


图 2 2 种陶粒对曝气池污水中 COD 的去除情况

以挂膜前后陶粒的重量差作为衡量微生物生长量的指标,表 4 所示即为自制污泥陶粒和市售陶粒的微生物生长量。由表 4 可知,自制污泥陶粒无论是在进水处还是在曝气池处污水中的生物量均高于市售陶粒。其中,自制污泥陶粒上的生物量分别为市售陶粒的 8.7 倍(进水处)与 6.1 倍(曝气池处),这可能是与市售陶粒相比,污泥陶粒的表面更粗糙,空隙丰富,更有利于微生物的附着及生长,从而污泥陶粒表面上微生物生长量更丰富。其次,进水处的微生物生长量比曝气池中的多,可能是因为进水处的污水中污染物的成分复杂多样,微生物的浓度与种类随之增多[29]。

表 4 2 种陶粒上微生物的生长量

污 水	陶 粒	
	自制陶粒/g	市售陶粒/g
进水处	1.3339	0.1539
曝气池处	0.6124	0.0998

3 结论

(1)自制陶粒对 COD 的去除率分别为 87.55%(进水处)、86.77%(曝气池处);市售陶粒对 COD 的去除率分别为 86.22%(进水处)、82.91%(曝气池处),且其挂膜速率及对 COD 去除率的稳定性均低于自制陶粒。运行期间自制陶粒的去除率比较平稳,说明自制陶粒的抗冲击负荷能力较强,去除污染物的效果更好。

(2)通过对挂膜前后进水处、曝气池处污水中陶粒重量变化的对比,得出自制污泥陶粒上的生物量分别为市售陶粒的 8.7 倍与 6.1 倍,且进水处的微生物生长量比曝气池中的多。

(3)将城市污泥与磷石膏混合制成水处理填料,达到了以废治废的目的,实现了废物的资源化利用,降低了污泥对环境的二次污染,也为污泥与磷石膏的利用开拓了新途径。

参考文献【REFERENCES】

[1] 樊臻. 污泥陶粒的制备及其机理研究[D]. 扬州:扬州大学,2015.

[2] 邹绍文,张树清,王玉军,等. 中国城市污泥的性质和处置方式及土地利用前景[J]. 中国农学通报,2005,21(1):198-282.

[3] 王大春,郑敏. 城市污泥处理及资源化利用现状与建议[J]. 节能,2015(6):4-8.

[4] 雷玉办,膨贵贵,蔡敏,等. 城市污泥球团填料的实验研究[J]. 广州化工,2018,46(2):85-87.

[5] 胡忻,陈茂林,吴云海,等. 城市污水处理厂污泥化学组分与重金属元素形态分布研究[J]. 农业环境科学学报,2005,24(2):387-391.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2021 年城乡建设统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2021.

[7] 刘浏. 污泥资源化——污泥填料的研制及其应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2005.

[8] 丁庆军,王承,黄修林. 污泥页岩陶粒的焙烧膨胀机理探讨[J]. 新型建筑材料,2014,41(11):1-4.

[9] 王乐乐,杨鼎宜,刘亚东,等. 轻质污泥陶粒研制及其膨胀机理的探讨[J]. 混凝土,2013(4):40-43.

[10] VEEKEN A H M,HAMELERSH V M. Removal of heavy metals from sewage sludge by extraction with organic acids[J]. Water science & technology,1999,40(1):129-136.

[11] 岳敏. 污泥的粉煤灰调理和污泥陶粒的制备及应用研究[D]. 济南:山东大学,2011.

[12] 李佳丽,冯丽娟,王济,等. 城市污泥-磷石膏陶粒的制备条件及性能分析[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(4):64-67.

[13] 廖若博,徐晓燕,纪罗军,等. 我国磷石膏资源化应用的现状及前景[J]. 硫酸工业,2012(3):1-7.

[14] 张茹,李艳军,刘杰,等. 磷石膏的综合利用及有害元素处理方法[J]. 矿产保护与利用,2015(2):50-54.

[15] NAKOUZI S. A novel approach to paint sludge recycling [J]. Journal of material research,1998,13(1):53-56.

[16] MUN K J. Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete[J]. Construction andbuilding materials,2007,21(7):1583-1588.

[17] 许国仁,邹金龙,孙丽欣. 污泥作为添加剂制备轻质陶粒的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(4):557-560.

[18] 阙科健. 利用城市污水厂污泥生产水处理填料研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.

[19] 吴苏清. 超轻污泥陶粒曝气生物滤池深度处理工业废水的研究及应用[D]. 济南:山东大学,2012.

[20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002:50-279.

[21] 陈洋. 给水厂污泥陶粒的制备及其在废水除磷中应用的研究[D]. 济南:山东大学,2017.

[22] 沈耀良,金吴云,刘灿灿. 不同填料曝气生物滤池启动运行特性比较[J]. 水处理技术,2008,34(6):33-36.

[23] 兰善红,陈锡强,梁谋会,等. 新型填料曝气生物滤池处理生活污水的研究[J]. 中国给水排水,2007,23(9):77-80.

[24] 徐波,周正兵,甘雁飞,等. 不同填料曝气生物滤池处理生活污水效能研究[J]. 水处理技术,2020,46(6):126-129.

[25] 郭鹏瑶,高文皓,姚新见,等. 污泥陶粒的制备及其对废水厌氧处理的影响[J]. 杭州化工,2016,46(4):38-40.

[26] 周颜,贾瑞,周兰,等. 疏浚底泥免烧陶粒的制备及其净水效果[J]. 环境工程学报,2017,11(5):2804-2811.

[27] 李倩炜,周笑绿,李环,等. 粉煤灰陶粒填料制备及用作曝气生物滤池填料的性能考察[J]. 化工进展,2015,34(9):3379-3382.

[28] 金凌. 曝气生物滤池特性及其处理生活污水的试验研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2010.

[29] 康心悦,刘建伟. 城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特性研究进展[J]. 环境工程技术学报,2022,12(4):1185-1193.

收稿日期:2024-09-23;**修回日期**:2024-09-23

基金项目:凯里学院 2024 年校级专项课题(2024ZX011);凯里学院 2023 年教学内容和课程体系改革项目(JG202316)。

作者简介:**李佳丽**(1994-),女,汉族,贵州贵阳人,硕士研究生,实验师,主要研究方向为固体废弃物资源化利用。

▲**通讯作者**:**冯丽娟**(1984-),女,博士,副教授,研究方向为固体废弃物资源化利用、环境污染控制技术及机理研究。

快速识别模态参数的改进数据驱动随机子空间法*

金宇文[1],伍　彩[2],马　俊[1],陈剑毅[1],朱道佩[1▲]
([1] 江西理工大学　软件工程学院,江西　南昌　330013;[2] 湖北工程学院　土木工程学院,湖北　孝感　432000)

摘　要: 数据驱动随机子空间法是一种常用的基于环境激励的结构模态参数识别方法。该方法通过 QR 分解计算"未来"输出数据对"过去"输出数据的投影矩阵,并利用奇异值分解(SVD)对投影矩阵进行进一步处理,以获取包含模态参数信息的状态矩阵。然而,QR 分解和 SVD 分解的计算量较大,导致计算时间较长。为提高计算效率,分别引入了经济型 QR 分解和经济型特征分解,替代了传统的 QR 分解和 SVD 分解。以三自由度质量-弹簧-阻尼模型为例进行数值分析,结果表明:采用本文方法与传统方法得到的计算结果一致,但计算时间大幅减少。本文方法有助于增强数据驱动随机子空间法在结构模态参数识别中的实时性。

关键词: 结构健康监测,模态识别,随机子空间法,模态参数,环境激励
中图分类号:TU311 O327 O329　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1003-6563(2025)05-0081-05

Improved data-driven stochastic subspace method for rapid identification of modal parameters*

JIN Yuwen[1], WU Cai[2], MA Jun[1], CHEN Jianyi[1], ZHU Daopei[1▲]

([1] *School of Software Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330013, China*; [2] *School of Civil Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China*)

Abstract: The data-driven stochastic subspace method is a commonly used ambient excitation-based structural modal parameter identification method. This method calculates the projection matrix of future output data onto past output data through QR decomposition, and further processes the projection matrix using singular value decomposition (SVD) to obtain the state matrix containing modal parameter information. However, the computational cost of QR and SVD decomposition is relatively high, resulting in long computation time. To improve computational efficiency, this paper introduces the economical QR decomposition and economical eigenvalue decomposition to replace the traditional QR and SVD decomposition. Numerical analysis is conducted using a three-degree-of-freedom mass-spring-damper model. The results indicate that the computed results obtained using the proposed method are consistent with those by the traditional method, but with significantly reduced computation time. The proposed method helps enhance the real-time performance of the data-driven stochastic subspace method in structural modal parameter identification.

Keywords: structure health monitoring, modal identification, stochastic subspace method, modal parameters, ambient excitations

结构模态参数往往隐含着结构的潜在损伤信息,因此及时准确地识别模态参数非常重要[1-2]。常见的模态识别方法有 Ibrahim 时域(ITD)法、特征系统实现法(ERA)、频域分解法(FDD)、随机子空间法(SSI)等[3-5]。其中,随机子空间法在近些年受到研究人员的广泛关注[6-7]。

由于投影矩阵获取方式的不同,随机子空间法又可以划分为数据驱动随机子空间法和协方差驱动随机子空间法[8]。一般认为两种随机子空间法的识别精度相当,但后者的计算速度相对较快[9]。也有研究表明前者比后者具有更高的识别精度,比如辛峻峰等指出"基于 QR 分解的数据驱动随机子空间法无论计算精度或对较弱势模态的识别能力均明显优于协方差驱动随机子空间法"[10]。但数据驱动随机子空间法的计算效率相对较低,在考虑较多的数据参与组集 Hankel 矩阵时,常常难以满足结构在线模态识别的实时性要求。

随机子空间法仅利用环境激励下结构的输出响应来构造系统识别算法,其计算流程大致包括:Hankel 矩阵的组集、投影矩阵的获取、能观矩阵的构造、状态矩阵的估计、模态参数的换算以及虚假模态的剔除等[11]。数据驱动随机子空间法有两个环节比较耗时,一是对 Hankel 矩阵的 QR 分解,二是对投影矩阵的 SVD 分解。QR 分解和 SVD 分解的时间复杂度通常为 $O(pq^2)$,其中 p、q 分别为矩阵的行数和列数。由于 Hankel 矩阵和投影矩阵的行列数一般较大,特别是 Hankel 矩阵的列数 q 通常很大且远大于行数 p,因此数据驱动随机子空间法在这两个环节耗费的计算时间较多,降低了该方法的工程实用性。

为了提高数据驱动随机子空间法的计算效率,分别引入经济型 QR 分解和经济型特征分解来代替传统的 QR 分解和 SVD 分解,从而快速获取投影矩阵和状态矩阵。在阐明数据驱动随机子空间法基本理论的基础上,本文对经济型 QR 分解和经济型 SVD 分解的基本原理进行了分析,并定性分析了它们和传统 QR 分解以及 SVD 分解之间的等效性。最后以某三自由度质量-弹簧-阻尼模型为例展开数值分析,验证了本文方法的有效性。

1 数据驱动随机子空间法

基于随机子空间理论表达的系统离散时间状态方程为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{k+1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_k+\boldsymbol{w}_k \\ \boldsymbol{y}_k=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_k+\boldsymbol{v}_k \end{cases} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{x}_k$、$\boldsymbol{y}_k$ 分别为 k 时刻系统的状态向量和响应向量,$\boldsymbol{y}_k$ 对应各通道输出数据;$\boldsymbol{w}_k$ 和 $\boldsymbol{v}_k$ 分别为 k 时刻系统的模型噪声和测量噪声,均为零均值白噪声;$\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{C}$ 分别为系统的状态矩阵和观测矩阵。

假设数据采集通道数为 l,采样点数量为 n,则利用输出数据 $\boldsymbol{y}(l\times n)$ 构造 Hankel 矩阵。

$$\boldsymbol{H}=\frac{1}{\sqrt{j}}\left[\begin{array}{cccc} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+j-2} \\ \hline y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{array}\right]=\left(\begin{array}{c}\boldsymbol{Y}_p \\ \hline \boldsymbol{Y}_f\end{array}\right) \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{H}$ 共有 $2i$ 个行块;$\boldsymbol{Y}_p$、$\boldsymbol{Y}_f$ 分别对应过去和将来的输出数据;$n=2i+j-1$。

把将来的行空间投影到过去的行空间,得到 $\boldsymbol{Y}_f$ 在 $\boldsymbol{Y}_p$ 行空间的正交投影:

$$\boldsymbol{O}_i=\boldsymbol{Y}_f/\boldsymbol{Y}_p=\boldsymbol{Y}_f\boldsymbol{Y}_p^T(\boldsymbol{Y}_p\boldsymbol{Y}_p^T)^{\dagger}\boldsymbol{Y}_p \tag{3}$$

式中:上标 $\dagger$ 表示对矩阵取广义逆。为了避免广义逆条件数过大带来的不利影响,通常采用 QR 分解来提高 $\boldsymbol{O}_i$ 的求解精度。将 $\boldsymbol{H}$ 表达为:

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{11} & 0 \\ \boldsymbol{R}_{21} & \boldsymbol{R}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_1^T \\ \boldsymbol{Q}_2^T\end{bmatrix}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{Q}^T \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{Q}$ 为对 $\boldsymbol{H}^T$ 进行 QR 分解得到的酉矩阵;$\boldsymbol{R}^T$ 为对 $\boldsymbol{H}^T$ 进行 QR 分解得到的上三角矩阵。因此,基于 QR 分解得到投影矩阵 $\boldsymbol{O}_i$ 的表达式为:

$$\boldsymbol{O}_i=\boldsymbol{R}_{21}\boldsymbol{Q}_1^T \tag{5}$$

进一步对 $\boldsymbol{O}_i$ 做奇异值分解

$$\boldsymbol{O}_i=\boldsymbol{U}\boldsymbol{S}\boldsymbol{V}=[\boldsymbol{U}_1 \quad \boldsymbol{U}_2]\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_1 & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{S}_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{V}_1^T \\ \boldsymbol{V}_2^T\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 分别为由左奇异列向量和右奇异列向量组成的酉矩阵;$\boldsymbol{S}$ 为由特征值组成的对角阵,特征值由大到小排列;$\boldsymbol{S}_1$、$\boldsymbol{S}_2$ 分别为包含物理模态参数和虚假模态参数的特征值对角阵。前若干阶特征值和相应酉矩阵组成的子空间往往包含真实物理模态参数的信息,因此需要选取合适的系统阶次 m 来确定 $\boldsymbol{U}_1$、$\boldsymbol{S}_1$ 和 $\boldsymbol{V}_1$,从而避免模态遗漏。

由空间系统识别理论可知,投影矩阵 $\boldsymbol{O}_i$ 可以表达为:

$$\boldsymbol{O}_i=\begin{bmatrix}\boldsymbol{C} \\ \boldsymbol{C}\boldsymbol{A} \\ \vdots \\ \boldsymbol{C}\boldsymbol{A}^{i-1}\end{bmatrix}[\hat{x}_i \quad \hat{x}_{i+1} \quad \cdots \quad \hat{x}_{i+j-1}]=\boldsymbol{\Gamma}_i\hat{\boldsymbol{X}}_i \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{\Gamma}_i$ 为广义能观矩阵;$\hat{\boldsymbol{X}}_i$ 为状态序列 $\boldsymbol{X}_i$ 的非平稳卡尔曼滤波估计。由 $\boldsymbol{O}_i$ 的 SVD 分解可以得到

$$\boldsymbol{\Gamma}_i=\boldsymbol{U}_1\boldsymbol{S}_1^{1/2},\hat{\boldsymbol{X}}_i=\boldsymbol{S}_1^{1/2}\boldsymbol{V}_1^T \tag{8}$$

根据式(7)可知,

$$\begin{cases}\boldsymbol{C}=\boldsymbol{\Gamma}_i(1:l,:)\\ \boldsymbol{A}=\boldsymbol{\Gamma}_i(1:(i-1)l,:)^{\dagger}\boldsymbol{\Gamma}_i(l+1:il,:)\end{cases} \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{\Gamma}_i(1:l,:)$ 为 $\boldsymbol{\Gamma}_i$ 的第一行块;$\boldsymbol{\Gamma}_i(1:(i-1)l,:)$ 为 $\boldsymbol{\Gamma}_i$ 的前$(i-1)$行块;$\boldsymbol{\Gamma}_i(l+1:il,:)$ 为 $\boldsymbol{\Gamma}_i$ 的后$(i-1)$行块。

对状态矩阵 $\boldsymbol{A}$ 进行特征值分解,得到:

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\psi}^T \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{\Lambda}$ 为由特征值 λ_k 组成的对角矩阵,k 小于等于选定的系统阶次 m;$\boldsymbol{\Psi}$ 为由特征向量组成的矩阵。

根据 $\boldsymbol{A}$ 的特征值可以导出结构第 k 阶模态的特征值 η_k、模态频率 f_k 和模态阻尼比 ξ_k。

$$\eta_k=F_s\ln(\lambda_k),f_k=\frac{|\eta_k|}{2\pi},\xi_k=-\frac{Re(\eta_k)}{|\eta_k|} \tag{11}$$

式中:F_s 为采样频率。测点的振型实际上为系统特征向量的已观部分,因此振型矩阵可表达为:

$$\boldsymbol{\Phi}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{\Psi} \tag{12}$$

式中:$\boldsymbol{\Phi}$ 中第 k 列即为结构的第 k 阶振型向量。值得注意的是,$\boldsymbol{\Phi}$ 为复振型。可以直接取 $\boldsymbol{\Phi}$ 的虚部来表达相应的实振型[12]。

2 计算效率提升策略

2.1 Hankel 矩阵的经济型 QR 分解

对矩阵 $\boldsymbol{H}^T$ 进行 QR 分解一般需要计算完整的 $\boldsymbol{Q}$ 矩阵和 $\boldsymbol{R}$ 矩阵,计算复杂度为 $O(j\times(l\times i)^2)$,计算耗时较多。注意到式(5)仅利用了 $\boldsymbol{R}_{21}$ 和 $\boldsymbol{Q}_1$,可见 QR 分解并不需要求解 $\boldsymbol{R}_{11}$、$\boldsymbol{R}_{22}$ 和 $\boldsymbol{Q}_2$。因此,对矩阵 $\boldsymbol{H}^T$ 进行 QR 分解时仅需求出矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 的前 $l\times i$ 列和矩阵 $\boldsymbol{R}^T$ 的前 $l\times i$ 行,分别对应 $\boldsymbol{Q}_1$ 和 $\boldsymbol{R}_{21}$,对应维度分别为 $j\times(l\times i)$ 和 $(l\times i)\times(l\times i)$。这种 QR 分解的改进可以称之为 Hanke 矩阵的经济型 QR 分解,且时间复杂度变为 $O((l\times i)^3)$。由于 $l\times i$ 通常远小于 j,因此经济型 QR 分解比传统 QR 分解的计算效率要高得多。

2.2 投影矩阵的经济型特征分解

对投影矩阵 $\boldsymbol{O}_i$ 的 SVD 分解一般需要计算完整的 $\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{V}$,它们的维度分别为 $(l\times i)\times(l\times i)$ 和 $j\times j$,计算效率较低。注意到式(8)仅利用了前 m 阶特征值和左奇异向量,而 m 远小于 $(l\times i)$ 和 j,因此只需解出前 m 阶特征值和左奇异向量便可以满足获取广义能观矩阵 $\boldsymbol{\Gamma}_i$ 的目的。

注意到 $\boldsymbol{O}_i\boldsymbol{O}_i^T=\boldsymbol{USVV}^T\boldsymbol{SU}^T=\boldsymbol{US}^2\boldsymbol{U}^T$,且维度仅为 $(l\times i)\times(l\times i)$,因此 $\boldsymbol{O}_i\boldsymbol{O}_i^T$ 进行特征分解的时间复杂度为 $O((l\times i)^3)$。由于 $\boldsymbol{O}_i$ 进行 SVD 分解的时间复杂度为 $O((l\times i)\times j^2)$ 且 $l\times i$ 一般远小于 j,因此对 $\boldsymbol{O}_i\boldsymbol{O}_i^T$ 进行特征值分解所消耗的时间要远少于对 $\boldsymbol{O}_i$ 进行 SVD 分解的时间。而 $\boldsymbol{O}_i\boldsymbol{O}_i^T$ 的特征值恰好是 S^2,特征向量矩阵 $\boldsymbol{U}$ 与 $\boldsymbol{O}_i$ 的左奇异向量矩阵完全相同。实际上,系统阶次 m 也远小于 $l\times i$,对 $\boldsymbol{O}_i\boldsymbol{O}_i^T$ 进行特征值分解时仅需解出前 m 阶特征值和特征向量即可。此时,获取 $\boldsymbol{\Gamma}_i$ 的时间得到进一步缩短。这种仅对 $\boldsymbol{O}_i\boldsymbol{O}_i^T$ 进行前 m 阶特征分解的改进可称为投影矩阵的经济型特征分解。

根据以上分析,本文将 Hankel 矩阵的经济型 QR 分解和投影矩阵的经济型特征分解引入到数据驱动随机子空间法中,以大幅减少计算时间和快速识别模态参数。从定性的角度分析,本文方法仅计算模态识别所需的数据,避免了 QR 分解和 SVD 分解中大量的无效计算,计算结果同传统方法是完全等效的。

3 仿真分析

3.1 三自由度模型

为验证本文方法的有效性,以图 1 所示的某三自由度质量-弹簧-阻尼模型为例展开仿真分析。质量 $m_1=0.8$ kg,$m_2=1.2$ kg,$m_3=0.8$ kg;刚度 $k_1=k_2=k_3=250$ N/m;阻尼系数 $c_1=0.7$ N·s/m,$c_2=0.5$ N·s/m,$c_3=0.7$ N·s/m。该模型的运动方程如式(13)所示。根据特征值法计算的模态参数理论值为:自振频率 $f_1=1.1534$ Hz、$f_2=3.4156$ Hz、$f_3=4.6157$ Hz;振型阻尼比 $\xi_1=0.0090$、$\xi_2=0.0296$、$\xi_3=0.0341$。

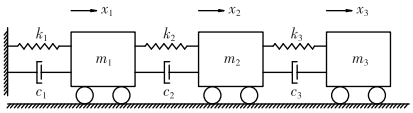


图 1 某三自由度质量 - 弹簧 - 阻尼模型

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ p_3(t) \end{Bmatrix} \tag{13}$$

式中:$p_1(t)$、$p_2(t)$ 和 $p_3(t)$ 分别为作用在三个质量块上的激励荷载。

仅在质量块 3 施加高斯白噪声激励。采用 Newmark_β 法计算系统的加速度响应,采样频率 1024 Hz,采样时间 300 s。按 16 Hz 对动力响应进行下采样(每个通道共计 4800 个采样点)并按 30 dB 的噪声水平模拟施加高斯白噪声污染,以供后续模态识别。质量块 3 经下采样的加速度响应时程如图 2 所示。

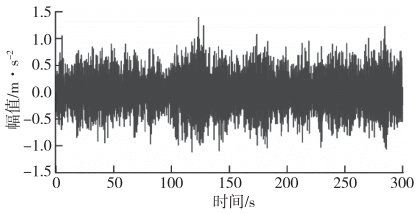


图 2 质量块 3 加速度响应时程

3.2 模态识别结果

为了保证模态参数识别精度,Hankel 矩阵行块数 i 的取值一般要大于 $0.5 \times F_s/F_f$[13],其中 F_s 为采样频率,F_f 为基频。本文取 $i = 3.0 \times F_s/F_f$。此外,过小的系统阶次会导致模态遗漏,而过大的系统阶次会生成较多的虚假模态。本文取系统阶次 $N = 2 \sim 60$,分别进行模态识别。经比较,发现基于传统 QR 分解和 SVD 分解的数据驱动随机子空间法计算结果和本文基于经济型 QR 分解和经济型特征分解的数据驱动随机子空间法的计算结果完全相同,这与前面的理论分析保持一致。

根据各个阶次的模态识别计算结果绘制稳定图,如图 3 所示。当处于相邻系统阶次的两个模态点之间的频率相对误差小于 0.01、阻尼比相对误差小于 0.05,以及振型 MAC 值大于 0.95 时,这两个模态点可以判断为稳定点。当仅满足频率和阻尼比的相对误差限值时,它们被判断为频率阻尼比稳定点;当仅满足频率相对误差限值时,它们为频率稳定点;否则为不稳定点。为了方便观察,图 3 中仅绘出前述三种稳定点,并在绘图区下方同时绘出平均归一化自功率谱曲线。

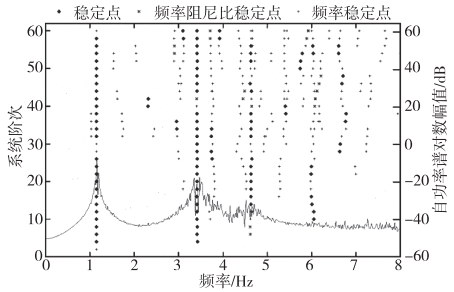


图 3 稳定图

图 3 中出现了 3 条较为明显的稳定轴,其中 4 ~5 Hz 之间的那条稳定轴的连续性和垂直度相对较差。这些稳定轴与平均归一化自功率谱曲线的波峰区域相对应,表明它们正是由符合三自由度模型模态特征的模态点形成。将这三个稳定轴对应的稳定点归类为三个不同的簇,再采用 k-means 法分别计算它们的簇中心,从而得到最终识别的模态参数值,如表 1、表 2 所示。由表中数据可知,模态频率的识别精度很高,识别误差介于 0.12% ~0.19% 之间;模态阻尼比的识别精度相对较差,识别误差介于 4.1% ~5.6% 之间。此外,识别振型与理论振型之间的相关性较高,均在 0.99 以上。这表明数据驱动随机子空间法具有较高的模态识别精度。

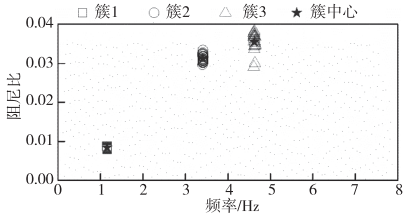


图 4 频率阻尼比分簇图

3.3 计算时间比较

利用配置有 2.30 GHz 主频的中央处理器和 32G 容量的 DDR4 内存的笔记本电脑来编制和运行

数据驱动随机子空间法模态识别计算程序。

表 1 模态频率和阻尼比识别结果

模态阶次	频率/Hz		阻尼比	
	理论值	识别值	理论值	识别值
1	1.1534	1.1520	0.0090	0.0085
2	3.4156	3.4092	0.0296	0.0312
3	4.6157	4.6226	0.0341	0.0355

表 2 模态振型识别结果

模态阶次	理论值	识别值	MAC 值
1	0.4543 0.8319 1.0000	0.4430 0.8366 1.0000	1.0000
2	-0.9008 -0.4736 1.0000	-0.8646 -0.5136 1.0000	0.9993
3	1.0000 -0.6918 0.4096	1.0000 -0.6966 0.4367	0.9998

经对比分析,上述模态识别计算过程中涉及的 Hankel 矩阵传统 QR 分解和投影矩阵传统 SVD 分解花费的时间分别为 2.16 s 和 2.12 s。相比之下,Hankel 矩阵经济型分解和投影矩阵经济型特征分解分别耗时 0.088 s 和 0.028 s。可见,本文方法的计算效率得到明显提升,其中经济型 QR 分解和经济型特征分解比传统方法分别减少 95.9% 和 98.3% 的计算时间。可见本文方法有利于减少数据驱动随机子空间法的时间消耗,从而增加该方法实现在线模态识别的实用性。

4 结论

本文对数据驱动随机子空间法中 Hankel 矩阵的 QR 分解和投影矩阵的 SVD 分解进行了改进,提升了其计算效率。算例表明,本文引入的经济型 QR 分解和经济型特征分解得到的计算结果与传统方法完全相同,但可以大幅减少计算消耗。本文方法有利于增强数据驱动随机子空间法的工程实用性。

参考文献【REFERENCES】

[1] 李翠,朱学坤,俞记生,等. 结构损伤识别的二次反馈岭估计法[J]. 机械强度,2024,46(4):932-938.
[2] 伍晓顺,夏巨伟,胡岳芳. 基于跨模型模态应变能指标的网架结构损伤定位[J]. 浙江大学学报(工学版),2020,54(2):248-256.
[3] 占晴,周宇,叶庆卫,等. 基于 ERA 算法的大桥斜拉索索力检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(8):743-747.
[4] 刘宇飞,辛克贵,樊健生,等. 环境激励下结构模态参数识别方法综述[J]. 工程力学,2014,31(4):46-53.
[5] 张云龙,张家源,钱雪松,等. 环境激励下桥梁模态参数识别的频谱方法综述[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(6):1580-1591.
[6] 罗杰,康杰,孙嘉宝,等. 基于随机子空间识别的模态参数不确定性量化方法[J]. 振动与冲击,2024,43(8):272-279.
[7] 胡卫华,张震,唐德徽,等. 基于 MVMD-SSI 和 Single-Pass 聚类的高层结构动力特性自动跟踪[J]. 振动工程学报,2024,37(9):1451-1459.
[8] 王燕,杭晓晨,姜东,等. 协方差驱动随机子空间的 Toeplitz 矩阵行数选择方法[J]. 振动与冲击,2015,34(7):71-75.
[9] 刘威,杨娜,白凡,等. 基于敏感性分析的协方差随机子空间方法参数优化[J]. 工程力学,2021,38(2):157-167.
[10] 辛峻峰,王树青,刘福顺. 数据驱动与协方差驱动随机子空间法差异化分析[J]. 振动与冲击,2013,32(9):1-4.
[11] ZHOU K,ZHI L H,WANG J F,et al. An improved stochastic subspace modal identification method considering uncertainty quantification[J]. Structures,2023,51:1083-1094.
[12] 伍晓顺,邓华,孙桐海. 基于优化阶跃激励的索穹顶密集模态测试方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(2):288-296.
[13] REYNDERS E,PINTELON R,ROECK G D. Uncertainty bounds on modal parameters obtained from stochastic subspace identification[J]. Mechanical systems and signal processing,2008,22(4):948-969.

收稿日期:2024-12-04;**修回日期**:2024-12-04
基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20232BAB214074);湖北省自然科学基金项目(2024AFB434)。
作者简介:**金宇文**,硕士生,研究方向:结构健康监测。
▲**通讯作者**:**朱道佩**,博士,讲师,研究方向:结构健康监测。

基于 BP 神经网络的加筋土挡墙内部稳定性研究*

毛水飞,马 俊,刘中南,王少聪,汪 磊▲
(江西理工大学 软件工程学院(南昌),江西 南昌 330013)

摘 要: 加筋挡土墙的内部稳定性取决于潜在破坏面形式与各层最大筋材拉力。基于 BP 神经网络预测数据与实测数据、规范法综合对比,通过大量模型数据训练 BP 神经网络,并建立 BP 神经网络预测模型,预测了筋材刚度对返包式竖直加筋挡土墙破裂面位置、筋材最大拉力及面板侧向位移影响规律。结果表明:预测值与实际值相吻合,趋势一致,表明模型能较好满足工程需要;随筋材刚度增大,挡墙面板水平位移逐渐减小,筋材最大拉力逐渐增大,挡墙潜在破坏角度也越大,即潜在破裂面与墙面位置更为贴近。

关键词: 加筋土挡墙,BP 神经网络,破裂面形式,预测模型
中图分类号:TU41 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0086-07

Study on the internal stability of reinforced soil retaining wall based on BP neural network*

MAO Shuifei, MA Jun, LIU Zhongnan, WANG Shaocong, WANG Lei▲

(*School of Software Engineering(Nanchang), Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330013, China*)

Abstract: The internal stability of the reinforced retaining wall depends on the form of the potential fracture surface and the maximum tensile force of each layer. Based on the comprehensive comparison of the BP neural network prediction data with the measured data and the standard method, the BP neural network is trained by a large number of model data, and the BP neural network prediction model is established to predict the influence of reinforcement stiffness on the fracture surface position, the maximum reinforcement tension and the panel lateral displacement. The results show that the predicted value is consistent with the actual value, and the trend is consistent, indicating that the model can meet the engineering needs. With the increase of the reinforcement stiffness, the horizontal displacement of the retaining wall panel gradually decreases, the maximum tensile force of the reinforcement gradually increases, and the potential failure angle of the retaining wall also increases, that is, the potential fracture surface is closer to the wall surface.

Keywords: reinforced soil retaining wall, BP neural network, fracture surface form, predictive model

加筋挡土墙是指在填土中埋入加筋材料,通过筋土之间的摩擦作用来改善土体特性,以达到维持结构稳定性的目的[1-2],其作为一种支挡结构而被广泛应用。而加筋挡土墙的内部稳定性取决于潜在破坏面形式与各层最大筋材拉力,筋材最大拉力决定了选用筋材的强度,潜在破坏面的形式影响到筋材的铺设长度,因此确定两者是加筋土挡墙设计的关键因素。

在潜在破坏面方面,国内外规范形式多样,且未有统一的标准。目前关于这方面的研究主要分为朗肯破裂面和 0.3H 折线形破坏面。两种破裂面形式由筋材刚度划分,对于刚度较低的柔性筋材时采用

朗肯破坏面进行计算,而刚度高的刚性筋材时则按照0.3H折线形破坏面进行计算。杨广庆等[3]认为在挡墙下部破裂面形状接近朗肯破裂面,上部与0.3H法接近。Mark Monrant[4]认为加筋复合土体的刚度影响破裂面形式,采用的刚度越大,破裂面越靠近挡墙面,挡墙下部适用于朗肯破裂面,上部为不符合传统的0.3H斜面。李国祥[5]在主动极限状态下的模型研究表明,挡墙在自重作用下破裂面为一对数螺旋线,且符合0.3H斜面。

在筋材最大拉力方面,国内外规范主要采用主动土压力理论计算,但筋材的真实受力状态在过程中无法体现,且没有考虑筋材刚度、面板刚度、面板倾角的贡献。为此,国内外学者提出了K刚度法[6]、极限平衡法[7]、应变相容法[8]、增量法[9]、全量法[10],其中K刚度法基于11个全尺寸土工挡墙数据库,对数据进行统计回归分析,提出了一种计算筋材在工作状态下的筋材最大内力计算方法,通过归一化处理指出工作应力下筋材拉力沿墙高呈梯形分布,具有很强的规律性。而机器学习能针对规律性较强的大样本数据集快速准确地预测结果,因此本文在BP神经网络基础上运用大量加筋土挡墙有限元模型结果及实测数据,建立预测模型。

1 样本数据集建立

1.1 模型建立与数据采集

1.1.1 建立几何模型

数值模型如图1所示,挡墙高度设置为H,根据规范筋材长度$L=0.7H$,筋材竖向间距为S_v。模型的左右边界条件均为滑动铰支座,底部边界为固定铰支座。利用Plaxis的增量步功能,对挡墙施工过程进行模拟。有限元模型参数参考文献[13],本文模型已由Mirmora-di和Ehrlich建立返包式加筋土挡墙模拟,且该模拟结果与实际尺寸模型的试验结果拟合度较高,关于数值建模方法的验证可查看文献[14],此处不再赘述。

1.1.2 参数分析内容及设置

数值模型中,采用Hardening-Soil的本构模型模拟墙后填土,目的是为了反映在施工加载过程中填土的压缩硬化与剪切硬化的过程,以及可以描述土样的破坏和变形行为[15];筋材采用Plaxis有限元

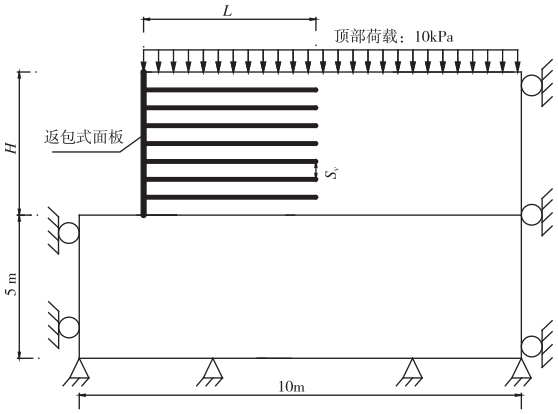


图1 模型几何示意图

软件中的线弹性土工格栅单元进行模拟;返包式面板则用刚度可忽略不计的板单元进行模拟;地基土为黏性土,采用的本构模型为Mohr-Coulomb本构,具体参数见表2。本文通过控制变量法以获取正交试验模型,设置的加筋土挡墙及填土参数如下:

(1)筋材刚度J:将筋材抗拉刚度从50 kN·m^{-1}增加到1000 kN·m^{-1},增量值为50 kN·m^{-1},共20种。

(2)筋材竖向间距S_v:分别取0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m,共4种间距。

(3)墙高H:分别取H = 4 m、5 m、6 m、7 m,共4种。

(4)填土土样:填土土样采用表1中所列土样,共3种。

表1 填土的土体硬化模型参数

参数名称	土样A	土样B	土样C
重度γ	17.1	15	19.6
朗肯主动土压力系数K_a	0.208	0.238	0.283
破坏比R_f	0.9	0.9	0.9
模量指数n	0.5	0.5	0.5
模量系数k	509	363	480
剪胀角ψ/(°)	11	8	4
平面应变摩擦角ϕ/(°)	41	38	34
E_{50}^{ref}/kPa	28000	20000	26400
E_{oed}^{ref}/kPa	28000	20000	26400
E_{ur}^{ref}/kPa	72500	60000	79200

注:土样A、B、C相关参数依次来源于文献[16-18]。

本次研究共计建立了360种工况的返包式竖直加筋土挡墙有限元模型,该模型工况如表3所示。

表 2 地基土模型参数

参数名称	数 值	单 位
泊松比 μ	0.3	无量纲
剪胀角 ψ	0	(°)
摩擦角 ϕ	35	(°)
粘聚力 c	200	kPa
重度 γ	20	kN/m^3
弹性模量 E	5×10^4	kN/m^2

表 3 模型正交表

试验号	列 号			
	1	2	…	9
1	1	1	…	1
2	2	1	…	8
3	1	3	…	4
4	1	1	…	6
…	…	…	…	…
359	3	3	…	11
360	3	4	…	11

注:360—模型工况数目,每一行对应一组试验数据;9—9 个因素(具体包括加筋长度、加筋间距、挡墙高度、筋材刚度、筋材所处位置深度、土体自重、土体摩擦角、剪胀角、粘聚力;11—主体部分出现 11 个数字,分别代表各因素的变量次数。

1.2 数据建立及预处理

从有限元软件建立的大量返包式加筋土挡墙模型获取各类数据,其中包括墙高、筋材刚度、筋材长度、填土材料、筋材竖向间距、最终的面板侧向位移、每层筋材最大拉力及破裂面位置等。同时查找文献,获取与本文条件相符的实测案例[19-21],将模型所得数据与实测案例数据汇总至表格中,组成样本集并将数据进行归一化处理。

2 BP 网络模型的建立、训练及预测

2.1 网络层数的确定

(1)输入层神经元

加筋挡土墙的应力应变是一个由多变量互相耦合的复杂过程,选取加筋长度、加筋间距、挡墙高度、筋材刚度、筋材所处位置深度、土体自重、土体摩擦角、剪胀角、粘聚力作为输入神经网络的 9 个自变量,即模型的输入节点数为 9。

(2)输出层神经元

加筋挡土墙的面板侧向位移是衡量外部稳定性的重要指标,而内部稳定性主要体现在筋材最大拉力的计算与潜在破坏面形式的选取,故将加筋土挡墙的面板侧向位移、筋材最大拉力与潜在破坏面作为神经网络的 3 个输出层指标。

(3)隐含层节点数的确定

BP 神经网络的隐含层节点数量决定了网络的学习能力和泛化能力,但是目前并没有定义隐含层节点的具体参考,以下三种经验公式通常被用来确定隐含层节点数。

$$m = \sqrt{(l+n)} + a \tag{1}$$

$$m = \sqrt{nl} \tag{2}$$

$$m = \log_2^n \tag{3}$$

式中,m 表示隐含层节点个数,n 表示输入层节点个数,a 为[1,10]之间的常数量。

综上,本文的输入层节点数为 9,输出层节点数为 2,因此 $n = 9$,$l = 3$,由三种公式可得隐含层节点数的范围为 3 至 13。将范围内不同节点数目的神经网络都进行训练,观察学习曲线,对应误差最小的隐含层节点数目则为最优解,训练结果汇总如图 2 所示。

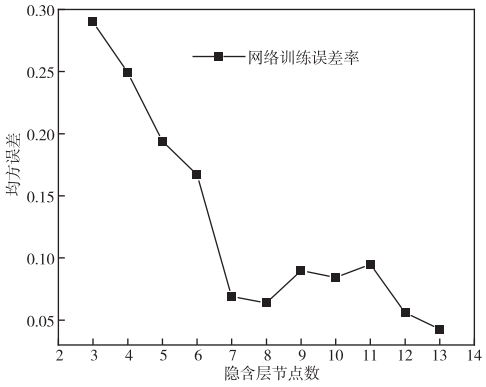


图 2 预测误差和隐含层节点数关系

2.2 网络学习参数的选取

(1)学习速率的选取

学习速率决定了模型参数在每次迭代时更新的幅度。速率过大时会破坏网络稳定性;速率过小时则会导致收敛速度缓慢[23]。为避免震荡和陷入局部最优解的情况,通过不断训练,得出符合本文所建立的神经网络模型的学习速率为 0.01。

(2)训练次数的选取

将上述数据集拆分为训练集、验证集和测试集

三部分,训练集主要用来训练模型,而验证集对应的就是监控训练过程,如观察到验证集误差收敛时,网络停止训练。本文在反复试验中发现,训练次数设置为 1000 次时,网络收敛效果较好。

(3)期望误差的选取

本文根据建立的数据集进行迭代训练,发现目标值设定为 0.00001 时,误差收敛且网络拟合程度较好。

(4)传递函数的选取

不同的传递函数都有其特点,本文选择训练速度最快的 trainlm 函数作为训练函数,传递函数选择 S 型对数函数 logsig,输出层传递函数为线性传递函数 purelin。

(5)BP 神经网络模型建立

对网络及数据集不断调试后发现当隐含层节点数为 13-13-12 时,网络训练后达到的误差最小且最稳定,此时训练次数达到 1000 次,模型训练截止。综上,构建基于 BP 神经网络的加筋土挡墙破裂面预测模型,如图 3 所示。

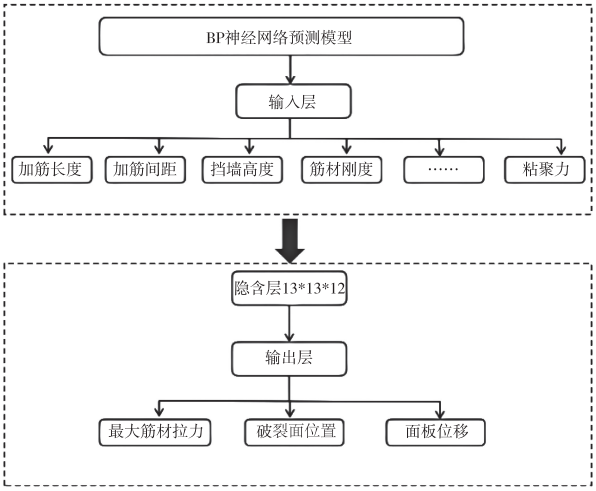


图 3 基本模型

2.3 预测模型训练结果

为保证预测模型的合理性,关于潜在破坏面筋材内力的要求根据土压力理论,神经网络预测拉力范围应满足公式(4),此外预测的潜在破裂面形状优化为弧线形。

$$K_a\sigma_z S_v \leqslant T \leqslant K_o\sigma_z S_v \tag{4}$$

式中,K_a、K_o 分别为主动土压力系数与静止土压力系数,T 为筋材拉力。

为验证所构建的 BP 神经网络预测模型具有较高的准确性,增加了 36 组数据的试验。试验结果显示,模型均方误差 *MSE* 达到最小值,为 0.0387,测试集平均绝对误差 *MAE* 为 0.0412。这表明 BP 神经网络通过训练已经掌握了样本之间的非线性关系。综上所述,可认为本文所构建的神经网络模型拟合效果较好,与实测数据具有可比性,给工程实践提供了一定的参考价值。从 36 组挡墙模型中随机抽取面板位移点进行模拟,预测值与模拟值如图 4 所示,绝对误差值如图 5 所示。

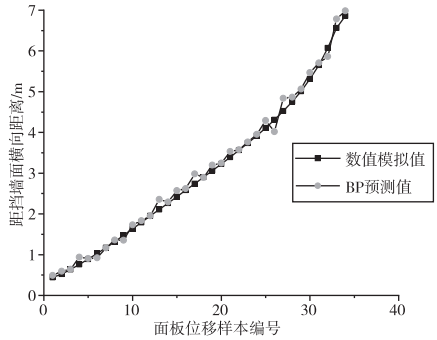


图 4 面板位移预测对比图

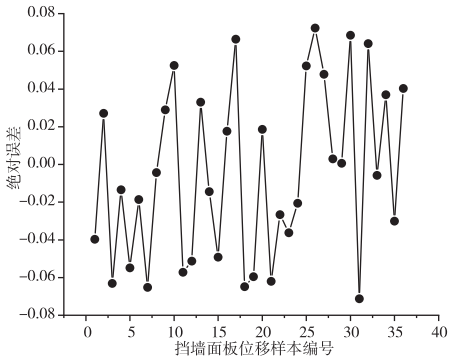


图 5 BP 神经网络模型验证误差

3 试验结果及分析

3.1 返包式挡墙内力计算方法对比分析

为了验证建立的神经网络预测模型的准确性,本文分别以筋材最大拉力、挡墙破裂面形式、面板位移对应的预测结果,结合三组实测案例[20,24-25]进行验证。

图 6 为采用 Allen[20]的实测值及其他方法对比结果,图中横坐标代表筋材最大拉力,纵坐标代表实测挡墙模型高度。从图中可以看出,返包式挡墙墙后筋材最大拉力沿深度方向基本上为非线性分布,

说明 BP 神经网络在预测各层筋材的最大拉力的效果较好,与 AASHTO 简化法相比,能够大量减少筋材的使用量,极大的节约成本。

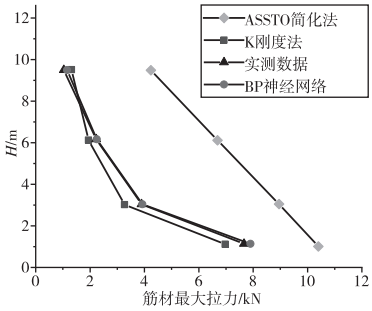


图 6 各层筋材最大拉力对比

将本文预测模型得出破裂面与规范中的破裂面、实测模型[19]进行对比,由图 7 可知,相较于 0.3 H 破裂面、朗肯法破裂面,由 BP 神经网络训练得出的破裂面与实测破裂面拟合程度更高,这表明本文方法能更好地反映出破裂面实况。

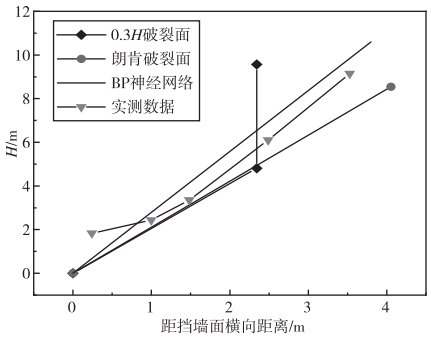


图 7 挡墙破裂面对比结果

为进一步论证本文方法的可行性,增加了一组 PWRI 原型试验实测数据[25]进行比较。结果如图 8 所示:其中纵坐标代表筋材所在高度与墙高 H 的比值处理后的坐标,且 BP 神经网络预测模型符合挡墙水平位移规律,具备可行性。

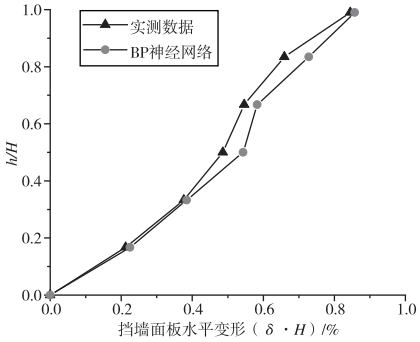


图 8 挡墙面板水平变形($\delta \cdot H$)

3.2 筋材刚度分析

选用挡墙高度为 6 m,筋材竖向间距为 0.4 m 的模型,墙后填土为 A 类土,筋材刚度分别选用 200 kN · m^{-1}、600 kN · m^{-1}、1000 kN · m^{-1},训练时只改变筋材刚度,得出的神经网络预测值如下图所示。

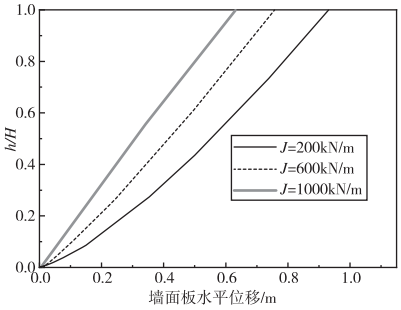


图 9 筋材刚度对挡墙面板水平位移的影响

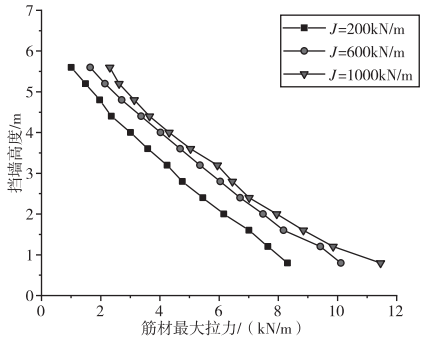


图 10 挡墙筋材最大拉力随筋材刚度变化情况对比图

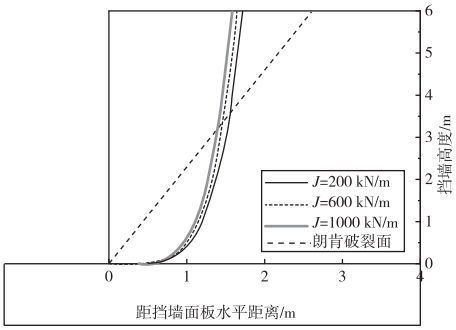


图 11 筋材刚度对破裂面的影响

图 9-图 11 分别为筋材刚度对挡墙面板水平位移、筋材最大拉力及破裂面的影响曲线,由图可知,筋材刚度越大,挡墙墙面水平位移反而越小。过大的水平位移会导致挡墙失稳破坏,选用刚度较大的筋材能够一定程度上避免此类状况的发生,使得挡墙具有较高的稳定性。筋材最大拉力随筋材刚度和挡墙深度的增加而逐渐增大。筋材刚度越大,挡墙

潜在破坏角度也越大,即潜在破裂面与墙面位置更为贴近。潜在破裂面的位置在筋材刚度数值达到一定量时几乎不发生改变。

4 结论

1)经过充分学习和训练后的 BP 神经网络模型预测值与实际数值拟合精度较高,误差较小(误差范围 3% ~10%),可应用于工程实践。

2)随筋材刚度增大,挡墙面板水平位移逐渐减小。增加筋材刚度有利于提高土挡墙的稳定性,减小挡墙的侧向位移。

3)筋材最大拉力随筋材刚度和挡墙深度的增加而逐渐增大,增加筋材刚度可以使加筋土挡墙整体力学性能提高。

4)筋材刚度越大,挡墙潜在破坏角度也越大,即潜在破裂面与墙面位置更为贴近。潜在破裂面的位置在筋材刚度数值达到一定量时几乎不发生改变。

参考文献【REFERENCES】

[1] SHUKLA S,SIVAKUGAN N,DAS B. Fundamental concepts of soil reinforcement:an overview[J]. International journal of geotechnical engineering,2009(3):329-342.

[2] 李思汉,蔡晓光,景立平,等. 加筋土挡墙变形特性研究进展[J]. 世界地震工程,2019,35(4):11.

[3] 杨广庆,蔡英. 多级台阶式加筋土挡土墙试验研究[J]. 岩石工程学报,2000(2):254-257.

[4] FARRAG K,ABU-FARSAKH M,MORVANT M. Stressand strain monitoring of reinforced soil test wall[J]. Transportation research record,2004(1868):89-99.

[5] 李国祥. 加筋土挡墙破裂面的试验研究与分析[J]. 铁道工程学报,2001(3):125-128.

[6] ALLEN T A T,BATHURST R B R,HOLTZ R H R,et al. A new working stress method for prediction of reinforcement loads in geosynthetic walls[J]. Canadian geotechnical journal,2003(5):976-994.

[7] LESHCHINSKY D,BOEDEKER R H. Geosynthetic reinforced soil structures[J]. Journal of geotechnical engineering,1989,115(10):1459-1478.

[8] EHRLICH M,MITCHELL J K. Working stress design method for reinforced soil walls[J]. J geotech engrg,1994(4):625-645.

[9] LIU H. Nonlinear elastic analysis of reinforcement loads for vertical reinforced soil composites without facing restriction[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering,2016,142(6):04016013.

[10] LIU H,WON M. Stress dilatancy and reinforcement load of vertical-reinforced soil composite:analytical method[J]. Journal of engineering mechanics,2014(3):630-639.

[11] YIN Z,JIN Y,LIU Z. Practice of artificial intelligence in geotechnical engineering[J]. Journal of Zhejiang University. A. Science,2020,21(6):407-411.

[12] 李友坤. BP 神经网络的研究分析及改进应用[D]. 淮南:安徽理工大学,2011.

[13] WANG L,WANG C,LIU H,et al. One-step analytical method for required reinforcement stiffness of vertical reinforced soil wall with given factor of safety on backfill soil[J]. Geotextiles and geomembranes,2021(1):343-350.

[14] MIRMORADI S H,EHRLICH M. Modeling of the compaction-induced stress on reinforced soil walls[J]. Geotextiles & geomembranes,2015,43(1):82-88.

[15] BRINKGREVE R B J. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application[M]//Soil constitutive models:evaluation,selection,and calibration. 2005:69-98.

[16] LAMAN M,YILDIZ A. Numerical studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand[J]. Geosynthetics international,2007(2):52-64.

[17] NIROUMAND H,KASSIM K A. Uplift of symmetrical anchor plates by using grid-fixed reinforced reinforcement in cohesionless soil[J]. China ocean engineering,2014,28:115-126.

[18] HSIUNG B C B,DAO S D. Evaluation of constitutive soil models for predicting movements caused by a deep excavation in sands[J]. Electronic journal of geotechnical engineering,2014,19(Z5):17325-17344.

[19] 杨广庆,吕鹏,庞巍,等. 返包式土工格栅加筋土高挡墙现场试验研究[J]. 岩土力学,2008(2):517-523.

[20] ALLEN T M,BATHURST R J. Application of the K_0-stiffness method to reinforce soil wall limit states design[M]. Washington State Department of Transportation,2001.

[21] 王继成. 格栅加筋土挡墙性状[D]. 杭州:浙江大学,2014.

[22] 王小川,史峰,郁磊,等. MATLAB 神经网络 43 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013:394.

[23] 桂现才. BP 神经网络在 MATLAB 上的实现与应用[J]. 湛江师范学院学报,2004,25(3):5.

[24] HATTAMLEH O A,MUHUNTHAN B. Numerical procedures for deformation calculations in the reinforced soil walls[J]. Geotextiles & geomembranes,2006,24(1):52-57.

[25] MIYATA Y,BATHURST R J. Evaluation of K-stiffness method for vertical geosynthetic reinforced granular soil walls in Japan[J]. Soils and foundations Tokyo,2007,47(2):319-335.

基于全自动分析仪的高锰酸盐指数检测方法优化
——以贵州省水质为例*

汪 慧[1,2],岳晓岚[1,2],李 靖[1,2]▲
([1] 贵州省地质矿产中心实验室,贵州 贵阳 550018;[2] 贵州省水质检验检测中心,贵州 贵阳 550018)

摘 要: 目前,高锰酸盐指数采用滴定法居多,其缺点是测定结果重复性较差,操作复杂,易引入人为误差,难以满足高效检测的需求。通过优化全自动高锰酸盐指数分析仪的运行条件,系统研究了最佳保存剂浓度、空白用水选择、高锰酸钾浓度范围及其存放时间的适用性,明确了关键实验参数。通过对不同水体样品的比较分析发现,与手工滴定法相比,全自动仪器法在检出限、准确度和精密度等方面表现更为优越,同时拓宽了高锰酸钾浓度的适用范围,显著提升了检测效率。最终,建立了一套完整的全自动高锰酸盐指数检测方法,为贵州省水质监测提供了技术支持。

关键词: 全自动高锰酸盐指数分析仪,高锰酸盐指数,手工滴定法,检测效率,方法对比
中图分类号:O657 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-6563(2025)05-0092-05

Optimization of permanganate index detection method based on automatic analyzer: a case study on water quality in Guizhou Province*

WANG Hui[1,2], YUE Xiaolan[1,2], LI Jing[1,2]▲

([1] *Guizhou General Laboratory of Geology and Mineral Resources, Guiyang 550018, China*; [2] *Guizhou Water Quality Inspection and Testing Center, Guiyang 550018, China*)

Abstract: At present, the permanganate index is mostly detected by titration, which is characterized by poor repeatability of measurement results, complex operation, and easy introduction of human error, and cannot meet the needs of efficient detection. This study optimized the operation conditions of an automatic permanganate index analyzer, systematically investigating the optimal protective agent concentration, the selection of blank water, and the applicable range of potassium permanganate concentration. The key experimental parameters were determined. Comparative analysis of various water samples demonstrated that, compared with the manual titration method, the automatic analyzer exhibited superior performance in detection limit, accuracy and precision, while broadening the applicable range of potassium permanganate concentration and significantly improving detection efficiency. Finally, a complete set of automatic permanganate index detection method was established in this study, which provided technical support for water quality monitoring in Guizhou Province.

Keywords: automatic permanganate index analyzer, permanganate index, manual titration method, detection efficiency, method comparison

收稿日期:2024-11-15;**修回日期:**2024-11-19
基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200865);高层次人才科研启动项目(jxncbs19002)。

作者简介:毛水飞(2000-),男,汉族,江西上饶人,硕士,从事岩土工程研究工作。
▲**通讯作者:**汪 磊(1987-),男,汉族,湖北随州人,博士,讲师,从事岩土工程研究工作。

高锰酸盐指数(COD_{Mn})是一种反映水体中有机及无机可氧化物质污染的常用综合性指标[1]。在特定条件下,高锰酸盐指数通过高锰酸钾氧化水样中的某些有机物(如酚类、氰化物、醇酯类、抗菌素等)以及无机还原性物质(如 Sn^{2+}、S^{2-}、I^-、NO^{2-}、Fe^{2+}等)[2],根据高锰酸钾的消耗量计算出相应的氧需求量[3]。水体中这些可氧化污染物的积累会导致水环境质量的恶性变化,进而产生全球性生态影响。地下水、地表水、水源水作为水资源的重要组成部分,在保障城乡居民生活、支持经济社会发展和维护生态平衡等方面具有重要的战略意义。

目前,高锰酸盐指数的检测方法较多。其中,分光光度法存在检测结果稳定性和准确度较差的问题;化学发光法线性范围窄[4-5];光催化降解法容易引发环境二次污染[6];而连续流动分析仪的故障排查较为困难[7]。因此,手工滴定法仍是当前 CODMn 检测的主要方法,并被广泛应用于国家标准中。国家标准中的滴定法通常采用酸性滴定法(氯离子含量不超过 300 mg/L),由于高锰酸盐指数是一个相对的条件性指标[8-9],其反应受酸度、加热温度、加热时间、高锰酸钾浓度以及滴定温度等实验条件的显著影响,同时还受到滴定颜色终点判断的主观性、一致性、空白值、K 值偏差以及样品采集和处理等因素的制约[10,13]。这些因素导致滴定法的测定结果的重复性较差,且方法耗费大量人力物力,操作复杂,易引入人为误差,尤其在面对地下水监测等大批量检测任务时,手工滴定法难以满足高效检测的需求。因此,建立一种高效、批量、稳定的高锰酸盐指数检测方法,以满足本地检测的需求具有现实意义。

本文采用全自动高锰酸盐指数分析仪替代手工滴定法[14],系统研究不同实验条件对检测结果的影响,试验并确定实验室滴定法的理想实验条件。在检测过程中,高锰酸盐指数的测定结果受众多因素的综合影响,而检测要求的时效性(24 h)进一步增加了对检测准确性的挑战。针对这些难点,本文基于现有实验数据和条件,利用全自动高锰酸盐指数分析仪,建立了一种快速、批量、准确的高锰酸盐指数检测方法。该方法能够有效解决由于酸度、高锰酸钾浓度、加热温度、加热时间以及滴定颜色终点判断等实验条件差异所导致的检测偏差问题,从而显著节约时间成本,提高检测效率和经济效益,为喀斯特地貌区域水质检测提供更加精准、高效的技术支撑。

1 实验部分

1.1 主要仪器

全自动高锰酸盐指数分析仪,电子天平。

1.2 主要试剂和溶液

高锰酸钾储备液(0.1 mol/L),科密欧基准试剂;草酸钠储备液(0.1 mol/L),科密欧基准试剂;硫酸溶液,川东化工优级纯。

1.3 标准物质和实验样品

高锰酸盐指数标准溶液 GSB 07-3162-2014、BY400026。高锰酸钾标准物质 BWZ8187-2016、GBW(E)084613 NCS146027。实验中采用贵州省境内地下水、地表水作为分析研究对象。

1.4 实验方法

(1)方法原理:高锰酸钾在酸性溶液中可氧化水样中的还原性物质,过量的高锰酸钾用草酸还原。根据反应中高锰酸钾的消耗量,计算得到高锰酸盐指数(以 O_2 计)。

(2)实验步骤:吸取 100 mL 充分混匀的水样,置于锥形瓶/石英杯中。加 5 mL 硫酸溶液(1+3),再加入 10 mL 高锰酸钾标准使用溶液。将样品放入沸水浴中加热约 30 min。如果加热过程中红色明显减退,则需稀释水样后重新实验。加热结束后,趁热加入 10 mL 草酸钠标准使用溶液,充分振摇至溶液红色完全退去。在白色背景下,用滴定管滴加高锰酸钾标准使用溶液,直到溶液呈现微红色且 30 s 内颜色不褪为滴定终点。

2 实验测试结果与讨论

2.1 仪器条件选择

通过实验测定,本地水样的沸点温度为 96.7 ℃(明显出现水沸腾的现象)。在 COD_{Mn} 检测过程中,加热温度和加热时间是两个相互关联的重要因素。为了缩短检测时间,需要将加热温度设定为最高点(沸腾点),然后优化仪器的加热时长(表 1)。实验

结果显示,当加热时间为 30 min 时,高、中、低浓度标样的回收率均稳定在 100% 左右;当加热时间低于 30 min 时,低浓度标样的回收率显著下降;而当加热时间超过 30 min 45 s 时,各浓度梯度标样的回收率均显著超过 100%。由此可见,加热时间对高锰酸盐指数的测定结果具有显著影响,即使 15 s 的变化也会有明显差异。综上,全自动高锰酸盐指数分析仪在本地的最佳加热温度和时间是 96.7℃ 和 30 min。

表 1 96.7℃条件下不同加热时间的回收率

条件(加热温度/时间)	0.605 mg/L 标样回收率/%	1.48 mg/L 标样回收率/%	2.68 mg/L 标样回收率/%	3.32 mg/L 标样回收率/%
96.7℃/29min30s	64.0	81.8	91.0	96.1
96.7℃/29min45s	73.6	87.2	95.5	98.5
96.7℃/30min	99.7	98.6	99.6	101
96.7℃/30min30s	102	105	104	106
96.7℃/30min45s	103	111	109	114

2.2 采样时硫酸保存剂浓度的选择

高锰酸盐指数是指在特定条件下,高锰酸钾氧化水样中的有机物和无机还原性物质后,根据高锰酸钾的消耗量计算相应的氧气需求量。由于在实际采用和检测过程中往往存在时间延迟,为防止水样中部分有机物和无机还原性物质发生氧化,采样时需及时加入硫酸作为保存剂。在 96.7 ℃、30 min 的优化仪器条件下,通过实验筛选出硫酸保存剂的最佳浓度(表 2)。

表 2 96.7℃、30min 仪器条件下硫酸保存剂浓度的选择

1∶1 硫酸∶水/(mL/L)	标样 1 (1.21mg/L)	回收率/%	标样 2 (2.11mg/L)	回收率/%	标样 3 (4.38mg/L)	回收率/%
0.0	0.965	79.8	1.80	85.3	4.12	94.1
0.4	1.02	84.3	1.96	92.9	4.17	95.2
0.6	1.03	85.1	1.96	92.9	4.28	97.7
0.8	1.23	102	2.15	102	4.34	99.1
1.2	1.22	101	2.13	101	4.38	100.0
1.6	1.26	104	2.17	103	4.35	99.3
2.4	1.38	114	2.31	109	4.51	103.0

以贵州省某地下水为例,选用高、中、低三种标样进行加标实验。结果表明,加入(1∶1)硫酸量小于 0.8 mL/L 时,低浓度标样在保存 5 天后的回收率明显下降。而当保存剂浓度控制在 0.8 ~ 1.6 mL/L 范围时,高、中、低浓度样品的加标回收率均保存在相对稳定的范围内。此外,随着水样 pH 值的升高,保存 5 天后低浓度标样的测定值呈显著下降趋势。综合考虑试剂用量和便携性,本研究中硫酸保存剂的浓度设定为 0.8 mL /L(1∶1 硫酸)。这一浓度既能满足实验的稳定性需求,又能方便野外采样人员的试剂携带,具有较高的实际应用价值。

2.3 高锰酸钾浓度的选择

高锰酸钾标准溶液浓度对空白值及标样值的测定结果的影响显著。虽然理论浓度为 0.0100 mol/L,但实际配置过程中可能存在一定偏差。传统手工滴定法要求高锰酸钾浓度应不得超过 0.01 mol/L,否则在加入 10.00 mL 草酸钠后,可能无法完全还原空白溶液中剩余的高锰酸钾,导致溶液粉色无法完全褪去。本文中,对全自动分析仪在不同高锰酸钾浓度下的适应性进行了筛选(图 1)。实验结果表明,当高锰酸钾浓度在 0.0097 ~ 0.0102 mol/L 之间时,高、中、低三种浓度的回收率均在合格范围内;当浓度低于 0.0097 mol/L 时,K 值小于 1,测量值显著低于标准值,回收率偏低;而当浓度高于 0.0102 mol/L 时,K 值大于 1,测量值偏高。这一结果突破了传统手工法对高锰酸钾浓度“不得超过 0.01 mol/L”的限制,拓宽了高锰酸钾浓度的适用范围,为实验过程中更灵活地选择高锰酸钾浓度提供了依据。同时,这也进一步验证了全自动分析仪在高锰酸盐指数测定中的优势。

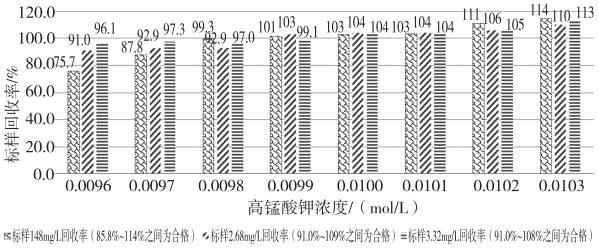


图 1 不同高锰酸钾浓度条件下各浓度标样的回收率

2.4 仪器与手工检测的检出限、精密度和准确度对比

在经过仪器条件及硫酸保存剂浓度的优化筛选后,最终确定最佳仪器检测条件。在该条件下,仪器

的检出限和精密度分别如表 3 和图 2 所示。实验结果显示,仪器的检出限为 0.034 mg/L,而手工滴定法的检出限为 0.044 mg/L,均满足国家标准滴定法要求的检出限不超过 0.05 mg/L 的标准。以贵州省境内三种典型水质为研究对象进行的精密度实验表明,仪器法的相对标准偏差(*RSD*)为 1.36% ~ 2.63%,回收率在 98.1% ~104% 之间;而手工滴定法的 *RSD* 为 3.06% ~6.28%,回收率在 95.9% ~ 104% 之间。实验结果进一步证实,尽管两种方法均符合国家标准要求,但全自动分析仪相较于手工滴定法具有更低的检出限、更高的精密度以及更优的准确度。

表 3 全自动高锰酸盐指数分析仪与手工滴定法的检出限

序 号	实验空白水浓度/(mg/L)	
	仪器	手工
1	0.277	0.276
2	0.281	0.276
3	0.260	0.256
4	0.283	0.256
5	0.254	0.240
6	0.271	0.256
7	0.269	0.276
平均值 x/(μg/L)	0.271	0.262
标准偏差 S/(μg/L)	0.011	0.014
检出限/(μg/L)	0.034	0.044
测定下限/(μg/L)	0.135	0.175

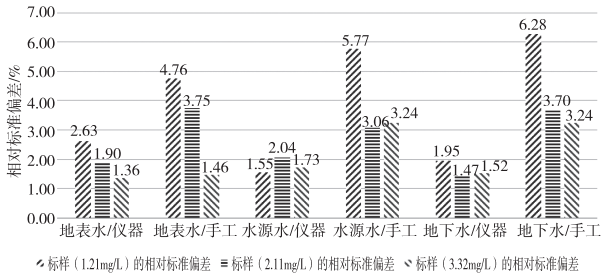


图 2 全自动高锰酸盐指数分析仪和手工滴定的精密度、准确度对比

2.5 空白实验用水的选择

空白实验在 COD_{Mn} 测定过程中扮演重要角色,因其结果直接影响到稀释时 COD_{Mn} 计算及质控样 COD_{Mn} 值的准确性。因此,空白实验的稳定性至关重要。本文对实验室超纯水在不同放置时间下的 COD_{Mn} 浓度变化及配置标样的加标回收率进行了检测(图 3,表 4)。

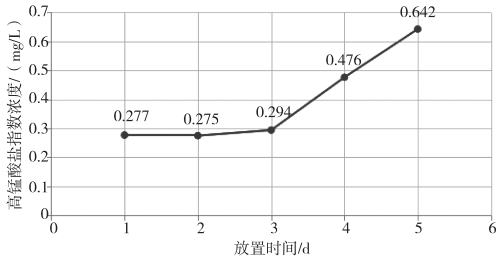


图 3 超纯水中 COD_{Mn} 浓度随放置时间的变化

表 4 各浓度实验空白水配置的标样回收率

空白水浓度/(mg.L^{-1})	1.21mg/L 标样回收率/%	2.11mg/L 标样回收率/%	3.32mg/L 标样回收率/%
0.277	102	101	100
0.275	100	100	99.7
0.294	106	98.6	102
0.476	111	106	104
0.642	121	116	110

实验结果表明,随着存放时间的延长,超纯水的 COD_{Mn} 浓度在 5 天内显著升高,超出了不确定度范围。此外,空白水浓度的升高直接导致测量值的不稳定性,对实验结果准确性的影响尤为显著。综上所述,在进行空白实验时,建议优先使用当天新制备的超纯水,以最大程度降低空白实验对 COD_{Mn} 测定准确度的干扰。

3 结论

利用全自动高锰酸盐指数分析仪,通过优化仪器条件,系统筛选了最佳硫酸保存剂浓度、高锰酸钾浓度范围、空白用水选择,建立了一套高效、稳定、准确且具有良好重现性的全自动高锰酸盐指数检测方法。以贵州省境内三种典型水质为研究对象进行的精密度和准确度测试表明,全自动仪器法和手工法的检出限分别是 0.034 mg/L 和 0.044 mg/L,仪器法的相对标准偏差(*RSD*)为 1.36% ~2.63%,回收率为 98.1% ~104%;手工滴定法的 *RSD* 为 3.06% ~6.28%,回收率为 95.9% ~104%。相比传统手工滴定方法,本研究显著降低了空白值和检出限,提高了分析精密度与准确度,解决了传统方法在人力限制下无法高效处理大批量样品的瓶颈问题,显著

提升了检测效率。该方法为水质高锰酸盐指数检测项目提供了可靠的技术支持,为区域水环境监测与管理奠定了基础。

参考文献【REFERENCES】

[1] 原晖. 高锰酸盐指数分析仪在水环境监测中的应用[J]. 水资源开发与管理,2019(9):11-20.

[2] 潘鹏. 基于嵌入式技术的高锰酸盐指数在线分析仪的研究与应用[D]. 北京:北方工业大学,2014.

[3] 陈连炳. 水环境高锰酸盐指数监测的研究[J]. 低碳世界,2021(11):13-14.

[4] TIAN J,HU Y,ZHANG J. Chemiluminescence detection of permanganate index(COD_{Mn}) by a luminol-$KMnO_4$ based reaction[J]. Journal of environmental sciences,2008,20(2):252-256.

[5] HUE D T K,HASHIMOTO S,NISHIKAWA H,et al. A3-step chemiluminescence method for chemical oxygen demand measurement[J]. Analytical sciences,2017,33(8):931-938.

[6] DAN D,SANDFORD R C,WORSFOLD P J. Determination of chemical oxygen demand in fresh waters using flow injection with on-line UV-photocatalytic oxidation and spectrophotometric detection[J]. Analyst,2005,130(2):227-232.

[7] 蔡晔,林休休,李月娥. 连续流动分析法测定水质中高锰酸盐指数的方法研究[J]. 环境科技,2014,27(4):60-64.

[8] 陈丽琼,茹婉红,胡勇,等. 影响高锰酸盐指数准确测定的因素探讨[J]. 安徽农业科学,2013,41(1):284-287.

[9] 赵剑辉,傅正. 关于高锰酸盐指数检测条件的探讨[J]. 治淮,2010(12):50-51.

[10] 陈燕. 酸性法测定地表水高锰酸盐指数影响因素探析[J]. 江西化工,2022,38(2):110-112.

[11] 宋大英. 影响高锰酸盐指数测定的因素探讨[J]. 江西化工,2020(4):110-111.

[12] 丁波涛,马训孟. 影响水中高锰酸盐指数测定的主要因素研究[J]. 能源与环境,2016(2):73-75.

[13] 韦顶堂. 谈高锰酸盐指数手工滴定分析测试工作体会[J]. 环境与发展,2019,31(3):129-131.

[14] 陈海根. 全自动高锰酸盐指数分析仪的设计与研究[J]. 仪器仪表与分析监测,2022(3):1-3.

收稿日期:2025-03-21;**修回日期**:2025-03-31

基金项目:全自动高锰酸盐指数(COD_{Mn})分析仪检测贵州省境内地下水中高锰酸盐指数方法的改进和优化研究(黔地矿科合〔2023〕16号);贵州优势特色矿产实验测试科技创新人才团队(黔地矿科合〔2024〕TD003 号)。

作者简介:**汪 慧**(1990-),女,工程师,主要从事水质检测工作。

▲**通讯作者**:**李 靖**,女,高级工程师,主要从事水质分析及质量控制管理工作。