

低温胁迫对鱼腥草基因表达的影响*

杨振涛¹, 陈宏宇^{1▲}, 于莹², 邓坤¹, 杨莉莉¹, 郑维军¹, 文爰惠¹

(¹ 贵州中医药大学 药学院, 贵州 贵阳 550025; ² 贵州中医药大学 基础医学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: **目的:** 为研究鱼腥草在低温胁迫下的相关基因表达差异。**方法:** 利用 Illumina 高通量 RNA 测序系统对低温胁迫下的鱼腥草叶片样本进行转录组测序。对 4 h 和 15 h 低温胁迫转录组以及 CBF 调控因子进行比较探索其是否存在差异。**结果:** 从 3 个组织共获得 151823 个单基因 (unigene), 其中 75643 个单基因在 Nr、COG 等 7 个数据库中获得注释。与对照相比, 4 h 低温胁迫识别了上调表达基因 1715 个, 下调表达基因 1197 个; 而 15 h 低温胁迫识别了上调表达基因 4207 个, 下调表达基因 2600 个。**结论:** 基因功能分析表明, 鱼腥草在低温胁迫下可能与细胞缺氧应答、缺水应答和低温应答等过程有关。本实验为鱼腥草低温应答分子机制的相关研究提供参考。

关键词: 鱼腥草, 转录组, 低温胁迫, 基因

中图分类号: S567 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0001-06

Effect of low temperature stress on gene expression of *Houttuynia cordata* Thunb. *

YANG Zhentao¹, CHEN Hongyu^{1▲}, YU Ying², DENG Kun¹, YANG Lili¹, ZHENG Weijun¹, WEN Yuanhui¹

(¹ College of Pharmacy, Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China; ² College of Basic Medicine, Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China)

Abstract: To understand the difference in gene expression of *Houttuynia cordata* Thunb. under low temperature stress, the transcriptomes of *H. cordata* leaf tissues under low temperature stress were studied by using Illumina high-throughput RNA sequencing. The transcriptomes and CBF regulons under 4 h/15 h low temperature stress was compared. A total of 151823 unigenes were obtained, among which 75643 unigenes were annotated by seven databases. There were 1715 up-regulated and 1197 down-regulated unigenes under 4 h low temperature stress, and 4207 up-regulated and 2600 down-regulated unigenes under 15 h low temperature stress. The results of gene function analysis showed that low temperature stress was correlated with cellular response to hypoxia, cellular response to water deprivation, and cellular response to cold. This study has provided reference for research on the cellular mechanism of low temperature response of *H. cordata* Thunb.

Keywords: *Houttuynia cordata* Thunb., transcriptome, low temperature stress, gene

鱼腥草 *Houttuynia cordata* Thunb. 为三白草科植物蕺菜的新鲜全草或干燥地上部分, 广泛分布于我国南方各省区, 为传统的药食两用植物。鱼腥草味辛, 微寒, 归肺经, 具有清热解毒、消痈排脓、利尿通淋的功能, 主要用于治疗肺痈吐脓、痰热喘咳等。现

代研究证明鱼腥草具有较好的抗炎活性, 临床上用于治疗呼吸道感染, 如结膜炎、角膜炎、急慢性鼻炎、鼻窦炎等炎症性疾病^[1-2]。

低温是常见的非生物胁迫, 通过引起细胞膜结构损伤, 电解质外渗, 氧化代谢平衡失调, 活性氧积

累,脂类过氧化,造成植物细胞膜系统损伤^[3]。低温环境被细胞感知,信号分子响应后,通过基因转录调控一系列复杂的传导过程,促使很多抗逆功能基因起作用。功能基因在细胞内可以积累渗透调节物质、提高抗氧化能力和产生保护酶等,产生低温耐受能力^[4]。

目前发现了很多关键低温调控基因。DREB/CBF(C-repeat binding factor)基因是 AP2/乙烯应答因子 DNA 结合蛋白,是最重要的低温应答基因之一^[5]。利用基因工程技术过表达 CBF 基因,能提高拟南芥的低温耐受能力^[6]。此外,如 MAPK、钙调蛋白、CDPK 和 ICE 转录因子都是低温应答的主要关键基因^[7]。

高通量测序技术用于大规模分析基因表达并识别基因调控通路^[8]。Fowler 等人利用基因芯片方法研究低温应答机制,识别了植物 306 个低温应答关键基因^[9]。类似的还有马铃薯^[10]、番茄^[11]等。利用测序技术,在高山离子芥测序数据中组装 54870 个基因,并识别了数千个低温调控基因^[12]。随后,有关植物低温应答的转录组研究明显增多,如小麦、水稻、香蕉、菠萝、铁皮石斛等,促进了低温应答机制的研究进展^[13]。

本实验对鱼腥草进行低温胁迫转录组测序并比较分析,识别鱼腥草叶片低温应答相关重要基因,分析调控通路,为进一步研究鱼腥草低温响应分子机制提供基础和参考。

1 材料与方法

1.1 材料与实验试剂

鱼腥草(*Houttuynia cordata* Thunb.)由本实验室提供,在人工气候箱生长(25℃,14 h 光照/天)。RNA 提取试剂盒(华越洋)、RQ1 DNA 酶(普洛麦格公司)、建库试剂盒(VAHTS® Universal V8 RNA-seq Library Prep Kit for Illumina)。

1.2 方法

1.2.1 材料处理

取生长一致的鱼腥草 15 颗,分为 3 组。1 组作为对照,另外 2 组移入 4℃人工气候箱,进行低温胁迫处理,分别于 4 h 和 15 h 后取叶片。称取相同重

量,同组混样后液氮冷冻。

1.2.2 RNA 提取与测序

提取样本总 RNA,对 DNA 进行消化。纯化 mRNAs 在 95℃裂解后,修复末端,连接 5'接头,利用随机六聚体和带 3'接头的 RT 引物进行反转录。纯化 cDNA 被扩增产生 150~200 bp 的 PCR 产物,再进行定量和纯化。利用 Illumina HiX 基因组分析系统进行 32nt 单端转录组测序。得到原始测序数据后,以 FASTQ 格式文件保存。

利用软件 Cutadapt(v1.9.1)^[14]去除接头序列、去除 5'或 3'末端质量值低于 20 或含 N 碱基,去除 trim 后 reads 长度低于 75 bp 的序列。合并所有样本数据后,利用软件 Trinity(v2.2.0)^[15]进行从头组装,序列聚类后进行序列拼接和冗余去除,得到非冗余长 Unigene 序列,统计序列数量与长度分布。利用软件 TransDecoder(v3.0.0)(<https://github.com/TransDecoder/TransDecoder/wiki>)鉴定 ORF 序列,以最长的 500 个 ORF 序列为训练集,利用 Markov 模型预测。利用 BLAST 软件对 Unigene 进行 Nr 数据库(Non-Redundant Protein Database, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)、SwissProt 数据库(<http://www.gpmaw.com/html/swiss-prot.html>)、GO 数据库(Gene Ontology, <https://geneontology.github.io/>)、KEGG 数据库(Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, <https://www.kegg.jp/>)和 COG 数据库(Cluster of Orthologous Groups of proteins, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)注释。

1.2.3 基因表达与调控通路分析

利用 FPKM(Fragment Per Kilo Bases per Million Reads)值表示对应 Unigene 的表达量。使用 Bioconductor 软件包的 edgeR(v3.4.6)^[16]进行差异表达分析,差异基因表达变化 2 倍以上且 $qvalue \leq 0.05$ 定义为差异显著基因。GO 富集采用 GSeq 法^[17]。显著富集筛选标准为 $over_represented_pvalue \leq 0.05$ 。KEGG 采用计算公式:

$$p = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\binom{M}{i} \binom{N-M}{n-i}}{\binom{N}{n}}$$

其中, N 为所有基因中具有 Pathway 注释的基因数目; n 为 N 中差异表达基因的数目; M 为所有基因中注释为某特定 Pathway 的基因数目; m 为注释为某

特定 *Pathway* 的差异表达基因数目^[18]。显著富集筛选标准为 $Qvalue < 0.05$ 。

2 结果

2.1 测序与注释

对鱼腥草叶片 3 个样本测序,去除低质量数据后,分别获得 28235054、30230672 和 32258474 个 Reads(读长)数据,所有样本 Q20 检测值均大于 98.19%,Q30 检测值均大于 94.62%。从头组装后,在 3 个组织共获得 151823 条长的、非冗余单基因(unigene),长度分布在 201~20338 bp 之间,平均长度 614.28 bp,GC 含量为 42.98%。利用 Nr、COG、SwissProt 和 KEGG 数据库分别注释了 74251、36486、51037 和 9034 条单基因,共 75643 条单基因。

2.2 差异表达基因分析

不同低温胁迫时间对鱼腥草诱导基因表达的数量不同。经过计算,与对照相比,4 h 低温胁迫识别了上调表达基因 1715 个,下调表达基因 1197 个;而 15 h 低温胁迫识别了上调表达基因 4207 个,下调表达基因 2600 个。结果说明,鱼腥草在受到低温胁迫后发生较大程度的基因表达变化,2 个胁迫时间的上调表达基因数量均多于下调表达基因,15 h 胁迫差异表达基因数量总体多于 4 h 胁迫差异表达基因。

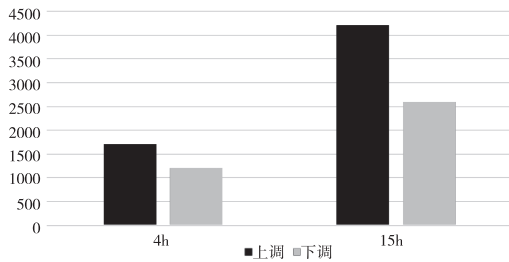


图 1 鱼腥草低温诱导基因和低温抑制基因

2.3 基因调控通路分析

利用 GO 聚类分析对显著差异表达基因进行功能分类,研究具有相同代谢过程或细胞途径的基因类群。结果表明,鱼腥草 4 h 低温应答基因有 30 个显著富集功能聚类,分为 3 大类:生物过程(biological process)、细胞组分(cellular component)和分子功能(molecular function),分别有 17、2 和 11 个功能

聚类;相应的,15 h 低温应答基因有 32 个显著富集功能聚类,分别有 12、11 和 7 个功能聚类。表 1 和表 2 分别列出了排名前 5 的类别。

表 1 鱼腥草 4 h 低温胁迫应答基因的 GO 聚类分析

类别	分 类	差异表达基因 (DEG)数量			pvalue
		总数	上调	下调	
生物 过程	细胞缺氧应答	64	53	11	0.00
	缺水应答	63	28	35	0.00
	低温应答	62	43	19	0.00
	高温应答	55	15	40	0.00
	蛋白折叠	44	1	43	0.00
细胞 组分	细胞壁	88	66	22	0.00
	质外体	86	72	14	0.00
分子 功能	序列特异性 DNA 结合转录因子活性	187	146	41	0.00
	转录调控区序列特异性 DNA 结合	93	75	18	0.00
	血红素结合	59	29	30	0.00
	水解酶活性,水解 O-糖基化合物	26	24	2	0.00
	木葡聚糖;木葡糖基转移酶活性	25	24	1	0.00

表 2 鱼腥草 15 h 低温胁迫应答基因的 GO 聚类分析

类别	分 类	差异表达基因 (DEG)数量			pvalue
		总数	上调	下调	
生物 过程	低温应答	120	72	48	0.00
	光刺激应答	120	27	93	0.00
	蛋白质发色团连接	116	12	104	0.00
	细胞缺氧应答	72	56	16	0.00
	昼夜节律	71	45	26	0.00
细胞 组分	核	1052	662	390	0.00
	膜的组成部分	995	525	470	0.00
	叶绿体	508	388	120	0.00
	叶绿体类囊体膜	204	86	118	0.00
	叶绿体基质	200	166	34	0.00
分子 功能	金属离子结合	632	358	274	0.00
	序列特异性 DNA 结合转录因子活性	310	205	105	0.00
	转录调控区序列特异性 DNA 结合	160	102	58	0.00
	血红素结合	126	63	63	0.00
	铁离子结合	117	58	59	0.00

结果表明,鱼腥草在低温胁迫下有大量基因表达,过程涉及到细胞缺氧应答、缺水应答、低温应答、细胞壁、质外体和序列特异性 DNA 结合转录因子活性等多个过程,说明这些生物学过程对于鱼腥草低

温胁迫应答非常重要。同时,15 h 低温胁迫应答基因类别中,细胞组分的基因数量和类别数量多于 4 h 低温胁迫。如,15 h 低温胁迫应答基因中,核功能有 1052 个差异表达基因;膜的组成部分功能有 995 个差异表达基因;叶绿体功能有 508 个差异表达基因,其数量远大于 4 h 低温胁迫,说明这些类别的基因在鱼腥草低温胁迫应答中可能起到重要作用。

利用 KEGG 数据库对差异表达基因进行生物学功能分析,推测参与生化代谢或信号转导途径基因的相互协调特征。结果表明,鱼腥草 4h 低温应答基因归属通路分为 5 大类:环境信息过程、遗传信息过程、人类疾病、代谢和生物系统分别有 1、3、1、23 和 2 个通路(表 3);相应的,15 h 低温应答基因归属通路分为 4 大类:细胞过程、环境信息过程、代谢和生物系统分别有 1、1、26 和 1 个通路。KEGG 富集分析结果表明,代谢过程是最主要的富集途径。

2.4 低温应答基因表达分析

在数据中查找低温胁迫有关的应答基因,识别了在胁迫信号感知受体中,钙离子信号受体的 17 个钙调磷酸酶 B 类蛋白基因(calcineurin B-like protein, CBL)、228 个丝裂原激活的蛋白激酶基因(mitogen-activated protein kinase, MAPK)。CBF 途径是植物最重要的低温应答通路,本实验识别了 22 个可能的 DREB/CBF (dehydration-responsive element-binding protein/C-repeat binding factor) 基因(表 4)。如 DN48647_c0_g1_i4 (DREB/CBF 1B)、DN41429_c0_g3_i2 (DREB/CBF 1D-类似)、DN37223_c0_g1_i1 (DREB/CBF 2A-类似)和 DN39233_c0_g1_i1 (DREB/CBF 2A-类似),在鱼腥草受低温胁迫后上调表达。相应的, DN53572_c0_g2_i1 (DREB/CBF 2A)、DN53572_c0_g3_i1 (DREB/CBF 2A-类似)、DN77300_c0_g1_i1 (DREB/CBF 2E-类似)、DN45660_c0_g2_i1 (DREB/CBF 3)和 DN27272_c0_g1_i1 (DREB/CBF 3-类似),在鱼腥草受低温胁迫后上调表达。DN45660_c0_g1_i1 (DREB/CBF 3-类似)在低温胁迫 15 h 后下调表达。DN4791_c0_g1_i1 (DREB/CBF 3-类似)和 DN31590_c1_g1_i1 (预测的 DREB/CBF 1E 类似)在低温胁迫 4 h 后上调表达,但在低温胁迫 15 h 后下调表达。相反的, DN48002_c0_g1_i4 (DREB/CBF 3-类似)和 DN48002_c0_g1_i5 (DREB/CBF3-类似)在低温胁迫

表 3 鱼腥草低温胁迫应答基因的 KEGG 分析

分类	通路	差异表达基因(DEG)数量	
		4h 低温胁迫	15h 低温胁迫
细胞过程	群体感应	--	30(0.00)
	环境信息过程	--	19(0.07)
	细菌分泌系统	3(0.11)	--
遗传信息过程	内质网中蛋白质加工	39(0.00)	--
	同源重组	4(0.18)	--
	碱基切除修复	4(0.18)	--
人类疾病	阳离子抗菌肽(CAMP)耐药性	2(0.02)	--
	丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢	--	19(0.01)
	精氨酸和脯氨酸代谢	--	12(0.09)
	抗坏血酸和阿糖酸盐代谢	7(0.07)	--
	辅因子生物合成	--	62(0.04)
	次生代谢产物生物合成	84(0.10)	267(0.00)
	不饱和脂肪酸生物合成	3(0.11)	--
	类胡萝卜素生物合成	4(0.02)	10(0.00)
	类胡萝卜素生物合成	4(0.19)	10(0.07)
	二萜类生物合成	3(0.01)	--
	脂肪酸伸长率	--	20(0.00)
	类黄酮生物合成	3(0.14)	--
	半乳糖代谢	6(0.15)	--
	甘油酯代谢	--	15(0.07)
	糖胺聚糖降解	4(0.07)	--
	糖鞘脂生物合成-神经节系列	2(0.24)	--
	糖鞘脂生物合成-球状和异球状系列	1(0.19)	--
	异喹啉生物碱生物合成	6(0.00)	11(0.00)
代谢	赖氨酸降解	--	12(0.03)
	代谢途径	--	512(0.04)
	氮代谢	--	15(0.00)
	O-抗原核苷酸糖生物合成	5(0.03)	--
	其他聚糖降解	4(0.19)	--
	戊糖和葡萄糖醛酸相互转化	5(0.19)	16(0.01)
	苯丙氨酸代谢	4(0.02)	--
	苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸生物合成	--	12(0.06)
	苯丙烷生物合成	14(0.00)	23(0.00)
	光合作用-天线蛋白	--	81(0.34)
	卟啉代谢	6(0.25)	--
	淀粉和蔗糖代谢	20(0.00)	36(0.02)
	硫代谢	--	16(0.00)
	硫胺素代谢	8(0.01)	22(0.00)
	萜、吡啶和吡啶生物碱的生物合成	3(0.10)	--
	酪氨酸代谢	6(0.04)	12(0.02)
	玉米素生物合成	1(0.17)	--
生物系统	植物病原体相互作用	20(0.13)	64(0.00)
	植物昼夜节律	14(0.00)	27(0.00)

迫 4 h 后下调表达,但在低温胁迫 15 h 后上调表达。说明 CBF 基因在鱼腥草低温应答中起重要作用,而且不同家族的表达模式明显不同。

表 4 鱼腥草 DREB/CBF 低温胁迫表达量

基因编号	基因注释	基因长度	FPKM		
			对照	4h 低温	15h 低温
DN2802_c0_g1_i1	DREB/CBF 1B	251	0	1.14	1.24
DN48647_c0_g1_i4	DREB/CBF 1B	854	3.44	9.66	8.14
DN41429_c0_g3_i2	DREB/CBF 1D-类似	778	1.94	6.07	3.12
DN9504_c0_g1_i1	DREB/CBF 1F-类似	515	0.58	0.28	1.13
DN53572_c0_g2_i1	DREB/CBF 2A	219	1.72	0	0
DN53572_c0_g3_i1	DREB/CBF2A-类似	726	4.07	0.79	0
DN37223_c0_g1_i1	DREB/CBF 2A-类似	521	0.28	2.74	1.11
DN39233_c0_g1_i1	DREB/CBF 2A-类似	716	0.18	3.65	1.92
DN77300_c0_g1_i1	DREB/CBF 2E-类似	627	2.16	0	0
DN45660_c0_g2_i1	DREB/CBF 3	571	7.91	0.24	0.24
DN27272_c0_g1_i1	DREB/CBF 3-类似	294	8.07	0	0
DN45660_c0_g1_i1	DREB/CBF 3-类似	837	4.41	3.26	1.56
DN4791_c0_g1_i1	DREB/CBF 3-类似	334	1.85	3.57	2.5
DN48002_c0_g1_i1	DREB/CBF 3-类似	342	2.35	2.27	1.78
DN48002_c0_g1_i4	DREB/CBF 3-类似	946	7.44	0.69	3.32
DN48002_c0_g1_i5	DREB/CBF 3-类似	921	3.26	0.29	1.2
DN31590_c1_g1_i1	预测的 DREB/CBF 1E 类似	856	0	3.17	0.69

3 讨论

基于高通量测序的转录组技术在生物学研究中的应用越来越广泛,不仅可以获得大量的序列信息,还可以获得基因表达和调控信息。鱼腥草是极具特色的药食两用植物,在医药、食品和农业领域有重要价值。鱼腥草无基因序列参照,本研究为了研究鱼腥草低温应答分子机制,同时也为了获得基因信息,对鱼腥草低温胁迫下的叶片进行测序,进而分析基因表达差异和基因调控通路信息,为将来鱼腥草及其相关近源植物基因研究提供支撑。转录组结果不仅提供了大量鱼腥草的生理生化信息,也帮助开拓鱼腥草抗逆研究的新思路和新方法。本实验通过转录组数据提供了鱼腥草低温应答的基因表达谱,从中可以发现很多重要功能的基因,为鱼腥草相关基础研究提供依据。

参考文献【REFERENCES】

[1] 武营雪,丁倩云,刘静,等. 鱼腥草化学成分,药理及质量控制研究进展[J]. 药物分析杂志,2022,42(1):108-120.

[2] 吴卫. 鱼腥草的研究进展[J]. 中草药,2001,32(4):367-368.

[3] DING Y L,SHI Y T,YANG S H. Advances and challenges in uncovering cold tolerance regulatory mechanisms in plants[J]. The new phytologist,2019,222(4):1690-1704.

[4] ZHANG X,FOWLER S G,CHENG H,et al. Freezing sensitive tomato has a functional CBF cold response pathway, but a CBF regulon that differs from that of freezing-tolerant Arabidopsis[J]. Plant j,2004,39:905-919.

[5] VAN-BUSKIRK H A,THOMASHOW M F. Arabidopsis transcription factors regulating cold acclimation[J]. Physiol plant,2006,126:72-80.

[6] KASUGA M,MIURA S,SHINOZAKI K,et al. A combination of the Arabidopsis DREB1A gene and stress-inducible rd29A promoter improved drought- and low-temperature stress tolerance in tobacco by gene transfer[J]. Plant cell physiol, 2004,45:346-50.

[7] 吴丹,毛东海,赵小英. 植物低温响应的分子机制研究进展[J]. 生命科学研究,2022,26(1):67-75.

[8] 王尧龙,黄璐琦,袁媛,等. 药用植物转录组研究进展[J]. 中国中药杂志,2015,40(11):2055-2061.

[9] THOMASHOW F M F. Arabidopsis transcriptome profiling indicates that multiple regulatory pathways are activated during cold acclimation in addition to the CBF cold response pathway[J]. Plant cell,2002,14(8):1675-1690.

[10] CARVALLO M A,PINO M,JEKNIĆ Z,et al. A comparison of the low temperature transcriptomes and CBF regulons of three plant species that differ in freezing tolerance; *Solanum commersonii*, *Solanum tuberosum*, and *Arabidopsis thaliana*[J]. J exp bot,2011,62(11):3807-3819.

[11] LIU H,OUYANG B,ZHANG J,et al. Differential modulation of photosynthesis, signaling, and transcriptional regulation between tolerant and sensitive tomato genotypes under cold stress[J]. Plos one,2012,7(11):e50785.

[12] ZHAO Z,TAN L,DANG C,et al. Deep-sequencing transcriptome analysis of chilling tolerance mechanisms of a subnival alpine plant, *Chorispora bungeana*[J]. Bmc plant biology,2012,12(1):222-222.

[13] 张健,唐露,冉启凡,等. 植物响应低温胁迫转录组测序研究进展[J]. 分子植物育种,2020,18(6):1849-1866.

[14] MARTIN M. Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads[J]. EMBnet journal,2011,17(1):10-12.

[15] HAAS B,PAPANICOLAOU A,YASSOUR M,et al. De novo transcript sequence reconstruction from RNA-seq using the Trinity platform for reference generation and analysis[J]. Nat protoc,2013,8:1494-1512.

草海及周边水库鱼类的种类组成及群落多样性*

李 峰¹, 龙汉武¹, 向远平¹, 李亚龙¹, 朱 立^{2▲}

(¹ 贵州省生物研究所, 贵州 贵阳 550009; ² 贵州省植物园, 贵州 贵阳 550004)

摘 要: 2017 年 6 月至 2018 年 12 月, 项目组分 2 次对草海及周边水库的鱼类资源进行了调查, 共采集到鱼类标本 5000 余份。草海及周边水库现有鱼类 12 种, 隶属于 3 目 6 科 12 属。渔获物种类主要为鲤鱼、鲫鱼、黄黝鱼、彩石鲃、麦穗鱼、泥鳅、黄鳝、普栉鰕虎鱼、棒花鱼、片唇鲃、鱼餐条、草海云南鳅。通过对草海及周边水库渔获物组成的分析测量发现, 优势种群为麦穗鱼。鱼类多样性分析表明, 东中部凹地冒水水库、乐溪水库、草海、杨湾桥水库和干海子水库多样性指数较高, 西南部冲子河水库次之, 西北高海拔地区的雪山水库和邓家营水库最低。本地特有种一个, 为草海云南鳅, 且只有杨湾桥水库有, 其他水库包括草海均未采到标本。

关键词: 草海, 鱼类, 渔获物, 种群

中图分类号: Q95 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0006-08

Species composition and community diversity of fishes in Caohai Lake and surrounding reservoirs*

LI Feng¹, LONG Hanwu¹, XIANG Yuanping¹, LI Yalong¹, ZHU Li^{2▲}

(¹ Guizhou Institute of Biology, Guiyang 550009, China; ² Guizhou Botanical Garden, Guiyang 550004, China)

Abstract: From June 2017 to December 2018, we conducted two surveys of fish stocks in Caohai Lake and surrounding reservoirs, and collected more than 5000 fish specimens. There were 12 species of fishes in Caohai Lake and surrounding reservoirs, belonging to 12 genera, 6 families and 3 orders. The main species of fish caught were *Cyprinus carpio*, *Carassius auratus*, *Hypseleotris swinhonis*, *Pseudoperilampus lighti*, *Pseudorasbora parva*, *Misgurnus anguillicaudatus*, *Monopterus albus*, *Ctenogobius giurinus*, *Abbottina rivularis*, *Platysmacheilus exiguous*, *Hemiculter leucisculus*, and *Yunnanilus caohaiensis*. Based on the analysis and measurement of the composition of the catch, it was found that the dominant species was *Pseudorasbora parva*. Fish diversity analysis showed that Aodi Maoshui

[16] ROBINSON M D, MCCARTHY D J, SMYTH G K. edgeR; a Bioconductor package for differential expression analysis of digital gene expression data[J]. *Bioinformatics*, 2010, 26(1): 139-140.

[17] YOUNG M D, WAKEFIELD M J, SMYTH G K, et al. go-seq; Gene ontology testing for RNA-seq datasets[J]. *R Bioconductor*, 2012, 8: 1-25.

[18] KANEHISA M, GOTO S. KEGG; Kyoto encyclopedia of genes and genomes[J]. *Nucleic acids res*, 2000, 28(1): 27-30.

收稿日期: 2023-04-25; 修回日期: 2023-05-24

基金项目: 大学生创新创业训练项目【贵中医大创合字〔2022〕100号】(2015-41300014-100); 贵州中医药大学博士启动基金(贵中医博士启动〔2020〕19号, 3043-043200019)。

作者简介: 杨振涛(2002-), 男, 本科在读, 主要从事中药资源与开发研究。

▲通讯作者: 陈宏宇(1981-), 男, 博士, 讲师, 主要从事药用植物学和生物技术研究。

Reservoir, Lexi Reservoir, Caohai Lake, Yangwanqiao Reservoir and Ganhaizi Reservoir had relatively high fish diversity, followed by Chongzihe Reservoir, and Xueshan Reservoir and Dengjiaying Reservoir had the lowest fish diversity. The one endemic species was *Yunnanilus caohaiensis*, which was only found in Yangwanqiao Reservoir.

Keywords: Caohai Lake, fish, catch, species

威宁彝族回族苗族自治县地处贵州省西部边缘,位于东经 $103^{\circ}36' \sim 104^{\circ}05'$, 北纬 $26^{\circ}30' \sim 27^{\circ}25'$, 平均海拔 2200 m, 是贵州省面积最大、海拔最高的县, 属滇东高原东延部分的高寒山区。县境中部开阔平缓, 四周低矮, 峰壑纵横, 河流交错。境内河流总长度达 1031.1 km, 其中干流长 368.5 km, 分属长江水系的牛栏江、洛泽河、二塘河和珠江水系的可渡河; 还有草海、干海子、杨湾桥、冒水、乐溪、邓家营、雪山、冲子河等湖泊和水库, 是长江水系乌江、珠江水系北盘江的发源地。历史上对威宁地区鱼类资源的研究始于 1980 年, 许多学者对草海鱼类资源本底调查、新种记录和鱼类区系的演化有大量报道, 对草海鱼类群落结构的研究也有所涉及, 但对鱼类群落结构演替及变化趋势等问题的研究还缺乏长期动态的研究数据, 尤其未开展过草海邻近水域的系统研究。本文根据 2017 年—2018 年对草海及周边水库的调查数据, 分析了草海和周边水库的鱼类种类组成、群落结构与多样性变化趋势, 为高寒山区的鱼类研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究地点: 根据调查对象群体的不同生活阶段确定调查时间和调查范围。在威宁境内根据水库分布设置 8 个采样点, 见图 1。

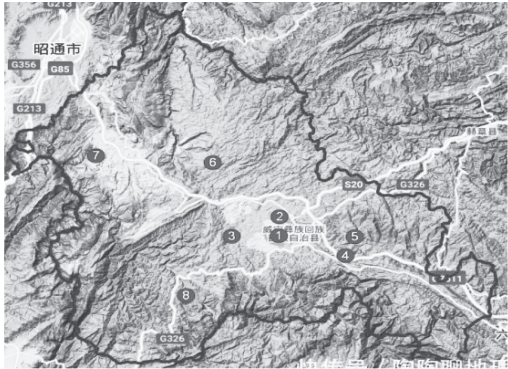


图 1 草海及周边水域样点分布图

各采样点坐标如下:

1 草海		
S1:	N26°51'49.1"	E104°13'11.2"
S2:	N26°51'35.8"	E104°13'5.4"
S3:	N26°50'56.0"	E104°12'59.5"
S4:	N26°50'18.7"	E104°13'11.0"
S5:	N26°50'9.4"	E104°13'36.9"
S6:	N26°50'3.7"	E104°14'17.1"
S7:	N26°50'23.9"	E104°15'31.6"
S8:	N26°51'1.2"	E104°15'35.3"
S9:	N26°51'48.3"	E104°14'46.3"
S10:	N26°51'50.8"	E104°13'54.2"
2 干海子水库		
S1:	N26°53'35.1"	E104°14'24.4"
S2:	N26°52'50.0"	E104°15'1.0"
S3:	N26°53'22.0"	E104°14'34.0"
S4:	N26°53'35.4"	E104°44'25.1"
3 杨湾桥水库		
S1:	N26°51'58.9"	E104°9'1.9"
S2:	N26°52'1.0"	E104°9'12.0"
S3:	N26°51'53.0"	E104°9'17.9"
S4:	N26°51'55.0"	E104°8'51.8"
4 冒水水库		
S1:	N26°18'24.0"	E104°38'33.0"
5 乐溪水库		
S1:	N26°47'26.9"	E104°25'1.3"
S2:	N26°47'29.5"	E104°24'56.2"
6 雪山水库		
S1:	N27°3'55.6"	E104°6'19.9"
S2:	N27°3'52.7"	E104°6'16.9"
S3:	N27°3'57.0"	E104°6'24.9"
7 邓家营水库		
S1:	N27°7'16.6"	E103°50'25.3"
S2:	N27°7'20.1"	E103°50'23.1"
S3:	N27°7'23.5"	E104°50'23.5"
8 冲子河水库		
S1:	N26°43'56.0"	E104°0'9.0"

1.2 调查方法

捕捞法:根据不同水库特点和典型环境对草海及周边水库设置采样点,利用地笼进行捕捞,调查记录鱼类的种类、数量并测量。

访谈(问)法:访问当地渔民、草海管理局和草海生态站的科技人员,掌握物种的相关信息。

通过对当地周边渔码头和菜市场的调查,了解鱼类种类、名称、来源等相关信息。

渔获物分析以地笼放置 2 天后收取的捕捞量计算。

2 数据处理与分析

2.1 鱼类群落优势种

由 Pinkas 相对重要性指数来分析:

$$IRI = (N + W)F \times 1000$$

式中, N 为数量百分比, W 为重量百分比, F 为出现频率。选 $IRI \geq 500$ 为优势种; $100 \leq IRI < 500$ 为主要种; $10 \leq IRI < 100$ 为一般种; $IRI < 10$ 则为少见种。

2.2 群落多样性指数

用 Shannon - wiener 多样性指数 (H') (Shannon, 1948)、Pielou's 均匀度指数 (J) (Pielou 1975)、Margalef 丰富度指数 (D) (Margalef, 1957) 对群落多样性进行分析。

Shannon-wiener 多样性指数:基于物种数量反映群落多样性,用于反映种群结构的复杂程度,群落中的数目增加和已存在种的个体数量分布越来越均匀时,多样性也就越高。

$$H' = - \sum P_i \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数:群落中多样性指数与该群落理论上最大多样性指数之比,反映群落中物种间个体均匀分布的程度。

$$J = H' / \ln S$$

Margalef 丰富度指数:指一个群落或环境中物种数目的多寡,亦表示生物群聚(或样品)中种类丰富程度的指数。

$$D = (S - 1) / \ln N$$

式中, P_i 为样品中属于第 i 种的个体的比例, N 为观察到的个体总数, S 为群落中的总数目。

3 结果与分析

3.1 草海及周边水库的鱼类资源组成

2017 年 12 月至 2018 年 6 月,分 2 次对草海及周边水库的鱼类资源进行了调查,共采集到鱼类标本 5000 余份。草海及周边水库现有鱼类 12 种(图 2),隶属于 3 目 6 科 12 属 12 种。其中,鲤形目 Cypriniformes 最多,有 9 种,约占所采到鱼类总种数的 75.00%;鲈形目 Perciformes 有 2 种,占所采到鱼类总种数的 16.67%;合鳃鱼目 Siluriformes 1 种,占总种数的 8.33%。草海及周边水域的鱼类名录见表 1。

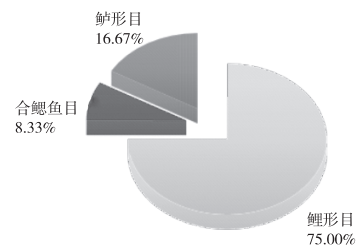


图 2 草海及周边水库的鱼类资源组成

表 1 草海及周边水库鱼类名录

种 类	学名
鲤形目	CYPRIMIFORMES
鲤科	Cyprinidae
鲤鱼	Cyprinus carpio
鲫鱼	Carassius auratus
棒花鱼	Abbottina rivularis
片唇鲃	Platysmacheilus exiguous
鱼餐条	Hemiculter leucisculus
麦穗鱼	Pseudorasbora parva
彩石鲃	Pseudoperilampus lighti
花鳅科	Cobitidae
泥鳅	Misgurnus anguillicaudatus
条鳅科	Nemacheilidae
草海云南鳅	Yunnanilus caohaiensis
合鳃鱼目	SYNBRANCHIFORMES
合鳃鱼科	Synbranchidae
黄鳝	Monopterus albus
鲈形目	PERCIFORMES
沙塘鳢科	Odontobutidae
黄鱼幼鱼	Hypseleotris swinhonis
鰕虎鱼科	Gobiidae
普栉鰕虎鱼	Ctenogobius giurinus

3.2 草海及周边水库鱼类群落的优势种

IRI 值分析结果显示(表 2、表 3),2018 年 6 月草海及周边水库鱼类的优势种是麦穗鱼,数量占渔获物总数量的 41.41%,生物量占总生物量的 44.11%;主要种有 2 种,分别是彩石鲂和黄鱼幼鱼,数量占渔获物总数量的 36.90%,生物量占总生物量的 12.63%;一般种有 4 种,分别是鲫鱼、普栉鰕虎鱼、泥鳅和鲤鱼,数量占渔获物总数量的 16.74%,生物量占总生物量的 36.49%;少见种有 5 种,分别是黄鳊、草海云南鳅、鱼餐条、片唇鲃和棒花鱼,数量占渔获物总数量的 4.95%,生物量占总生物量的 6.77%。其中,草海的优势种是鲫鱼和黄鱼幼鱼,干海子水库的优势种是鲤鱼和黄鱼幼鱼,杨湾桥水库的优势种是普栉鰕虎鱼和彩石鲂,冒水水库的优势种是鲫鱼,乐溪水库的优势种是麦穗鱼,雪山水库的优势种是麦穗鱼,邓家营水库的优势种是麦穗鱼,冲子河水库的优势种是麦穗鱼。草海及周边水库鱼类优势种组成和变化见图 3。

表 2 草海及周边水库渔获物优势种分析

样点	种类	数量 (尾)	数量 百分比 /%	生物量 /g	生物量 百分比 /%	出现 频次	IRI 值	分类
草海及 周边 水域	鲫鱼	167	3.72	1679.80	16.71	11/28	80.26	一般种
	麦穗鱼	1857	41.41	4435.30	44.11	26/28	794.11	优势种
	彩石鲂	730	16.28	770.30	7.66	15/28	128.25	主要种
	黄鳊	1	0.02	29.40	0.29	1/28	0.11	少见种
	普栉鰕虎鱼	240	5.35	367.40	3.65	12/28	38.57	一般种
	黄鱼幼鱼	925	20.62	499.40	4.97	18/28	164.51	主要种
	泥鳅	75	1.67	1181.40	11.75	7/28	33.55	一般种
	鲤鱼	269	6.00	440.45	4.38	6/28	22.24	一般种
	草海云南鳅	75	1.67	132.30	1.32	4/28	4.27	少见种
	鱼餐条	1	0.02	20.80	0.21	1/28	0.08	少见种
	片唇鲃	3	0.07	9.20	0.09	1/28	0.06	少见种
	棒花鱼	142	3.17	488.20	4.86	3/28	8.60	少见种

表 3 草海及周边水库鱼类群落的优势种

样点	种类	数量 (尾)	数量 百分比 /%	生物量 /g	生物量 百分比 /%	出现 频次	IRI 值	分类
草海	鲫鱼	157	12.4	1572.70	61.55	9/10	665.55	优势种
	麦穗鱼	79	6.24	224.90	8.80	9/10	135.36	主要种
	彩石鲂	241	19.04	163.10	6.38	9/10	228.78	主要种
	黄鳊	1	0.08	29.40	1.15	1/10	1.23	少见种
	普栉鰕虎鱼	80	6.32	151.10	5.92	8/10	110.16	主要种
	黄鱼幼鱼	707	55.84	405.10	15.85	10/10	716.9	优势种
	泥鳅	1	0.08	9.00	0.35	1/10	0.43	少见种

续表 3

样点	种类	数量 (尾)	数量 百分比 /%	生物量 /g	生物量 百分比 /%	出现 频次	IRI 值	分类
干海子 水库	鲤鱼	265	54.98	436.10	81.33	4/4	1363.10	优势种
	黄鱼幼鱼	192	39.83	63.20	11.79	4/4	516.20	优势种
	麦穗鱼	23	4.78	11.30	2.11	4/4	68.90	一般种
	泥鳅	2	0.41	25.60	4.77	1/4	12.95	一般种
杨湾桥 水库	鲤鱼	4	0.79	4.35	0.64	2/4	7.15	少见种
	麦穗鱼	87	17.16	137.00	20.07	4/4	372.30	主要种
	普栉鰕虎鱼	160	31.56	216.30	31.69	4/4	632.50	优势种
	彩石鲂	181	35.70	192.6	28.22	4/4	639.20	优势种
冒水 水库	草海云南鳅	75	14.79	132.3	19.38	4/4	341.70	主要种
	鱼餐条	1	11.11	20.80	22.78	1/1	338.90	主要种
	泥鳅	2	22.22	23.20	25.41	1/1	476.30	主要种
	鲫鱼	3	33.33	38.10	41.73	1/1	750.60	优势种
乐溪 水库	片唇鲃	3	33.34	9.20	10.08	1/1	434.20	主要种
	鲫鱼	7	0.68	69.00	1.99	1/2	13.35	一般种
	麦穗鱼	499	48.40	1391.20	40.11	2/2	885.10	优势种
	黄鱼幼鱼	12	1.16	12.60	0.36	2/2	15.20	一般种
雪山 水库	彩石鲂	308	29.87	414.60	11.95	2/2	418.20	主要种
	棒花鱼	140	13.58	485.10	13.98	2/2	275.60	主要种
	泥鳅	65	6.31	1096.40	31.61	2/2	379.20	主要种
	黄鱼幼鱼	14	1.73	18.50	1.56	2/3	21.93	一般种
邓家 营水 库	麦穗鱼	795	98.27	1170.00	98.44	3/3	1967.10	优势种
	泥鳅	1	0.28	5.3	0.36	1/3	2.13	少见种
	麦穗鱼	351	99.72	1456.6	99.64	3/3	1993.60	优势种
	棒花鱼	2	6.90	3.1	4.47	1/1	113.70	主要种
冲子 河水 库	麦穗鱼	23	79.31	44.3	63.93	1/1	1432.40	优势种
	泥鳅	4	13.79	21.9	31.60	1/1	453.90	主要种

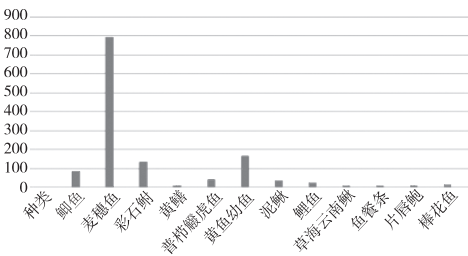


图 3 草海及周边水库鱼类 IRI 值

3.3 鱼类物种多样性分析

通过 3 种多样性指数来分析草海及周边水域鱼类的群落多样性(表 4)。Shannon-wiener 指数(H')

结果显示:草海及周边各水库的多样性指数为 0.023 ~ 1.311, 平均 0.755; 其中, 多样性最高的为冒水水库, 最低的为邓家营水库。Pielou 均匀度指数(J)结果显示:草海及周边各水库的均匀度指数为 0.033 ~ 0.945, 平均 0.550; 其中, 冒水水库均匀度最高, 邓家营水库均匀度最低。Margalef 丰富度指数(D)结果显示:草海及周边各水库的丰富度指数为 0.077 ~ 1.365, 平均 0.641; 其中, 冒水水库丰富度最高, 邓家营水库的丰富度最低。草海及周边各水库鱼类的群落多样性特征值见表 5-表 12。

表 4 草海及周边水域鱼类群落多样性特征值

采样点	Shannon-wiener 指数(H')	均匀度指数 (J)	丰富度指数 (D)
草海	1.083	0.712	0.827
干海子水库	0.734	0.619	0.538
杨湾桥水库	1.108	0.740	0.739
冒水水库	1.311	0.945	1.365
乐溪水库	1.019	0.598	0.856
雪山水库	0.118	0.170	0.130
邓家营水库	0.023	0.033	0.077
冲子河水库	0.642	0.584	0.594

表 5 草海鱼类群落多样性特征值

采样点	Shannon-wiener 指数(H')	均匀度指数 (J)	丰富度指数 (D)
阳关山 1	1.278	0.713	1.070
阳关山 2	1.292	0.803	0.680
裸落山 3	0.906	0.563	0.787
周家院子 4	0.676	0.488	0.616
王家院子 5	0.905	0.562	0.737
顾家院子 6	1.200	0.670	1.193
白家嘴 7	1.418	0.881	1.214
西海码头 8	1.109	0.799	0.793
江家湾 9	1.169	0.844	0.719
管家院子 10	0.876	0.797	0.465
平均值	1.083	0.712	0.827

表 6 干海子水库鱼类群落多样性特征值

采样点	Shannon-wiener 指数(H')	均匀度指数 (J)	丰富度指数 (D)
干海子 1	1.041	0.751	0.771
干海子 2	0.803	0.731	0.629
甘海子 3	0.425	0.387	0.375
干海子 4	0.667	0.607	0.376
平均值	0.734	0.619	0.538

表 7 杨湾桥水库鱼类群落多样性特征值

采样点	Shannon-wiener 指数(H')	均匀度指数 (J)	丰富度指数 (D)
杨湾桥 1	1.142	0.709	0.736
杨湾桥 2	1.241	0.771	0.840
杨湾桥 3	0.883	0.637	0.656
杨湾桥 4	1.166	0.841	0.724
平均值	1.108	0.740	0.739

表 8 冒水水库鱼类群落多样性特征值

采样点	Shannon-wiener 指数(H')	均匀度指数 (J)	丰富度指数 (D)
冒水 1	1.311	0.945	1.365
平均值	1.311	0.945	1.365

表 9 乐溪水库鱼类群落多样性特征值

采样点	Shannon-wiener 指数(H')	均匀度指数 (J)	丰富度指数 (D)
乐溪 1	1.118	0.624	0.746
乐溪 2	0.919	0.571	0.965
平均值	1.019	0.598	0.856

表 10 雪山水库鱼类群落多样性特征值

采样点	Shannon-wiener 指数(H')	均匀度指数 (J)	丰富度指数 (D)
雪山水库 1	0.235	0.339	0.212
雪山水库 2	0	0	0
雪山水库 3	0.118	0.171	0.178
平均值	0.118	0.170	0.130

表 11 邓家营水库鱼类群落多样性特征值

采样点	Shannon-wiener 指数(H')	均匀度指数 (J)	丰富度指数 (D)
邓家营水库 1	0	0	0
邓家营水库 2	0.069	0.100	0.230
邓家营水库 3	0	0	0
平均值	0.023	0.033	0.077

表 12 冲子河水库鱼类群落多样性特征值

采样点	Shannon-wiener 指数(H')	均匀度指数 (J)	丰富度指数 (D)
冲子河水库 1	0.642	0.584	0.594
平均值	0.642	0.584	0.594

3.4 渔获物分析

草海及周边水库地笼捕获的渔获物种类主要为鲫鱼、麦穗鱼、彩石鲃、黄鳊、普栉鰕虎鱼、黄鱼幼鱼、泥鳅、鲤鱼、草海云南鳅、鱼餐条、片唇鮡和棒花鱼。

3.4.1 草海及周边水库主要渔获物统计

按照采样时间、地点位置、种类、尾数、尾数百分比、重量、重量百分比和尾均重统计,数据见表 13。

表 13 草海及周边水域主要网具渔获物统计(地笼)

地名	采样点	位置坐标	种类	尾数		重量 /g	重量 百分比 /%	尾均重 /g
				尾数	百分比 /%			
草海	S1	N 26°51'49.1" E104°13'11.2"	鲫 鱼	15	14.3	305.6	77.0	20.4
			泥 鳅	1	0.9	9.0	2.3	9.0
			麦穗鱼	7	6.7	19.9	5.0	2.8
			彩石鲃	43	41.0	33.9	8.5	0.8
			普栉鰕虎鱼	1	0.9	0.7	0.2	0.7
			黄鱼幼鱼	38	36.2	27.9	7.0	0.7
	S2	N 26°51'35.8" E104°13'5.4"	鲫 鱼	104	28.9	791.1	76.7	7.6
			麦穗鱼	17	4.7	75.0	7.3	4.4
			彩石鲃	60	16.7	35.2	3.4	0.6
			普栉鰕虎鱼	15	4.2	25.3	2.5	1.7
			黄鱼幼鱼	164	45.5	103.9	10.1	0.6
	S3	N 26°50'56.0" E104°12'59.5"	鲫 鱼	3	1.9	16.9	14.9	5.6
			麦穗鱼	5	3.1	5.6	4.9	1.1
			彩石鲃	35	21.8	21.0	18.5	0.6
			普栉鰕虎鱼	7	4.3	11.1	9.8	1.6
			黄鱼幼鱼	111	68.9	59.0	51.9	5.3
	S4	N 26°50'18.7" E104°13'11.0"	鲫 鱼	1	0.8	4.0	5.7	4.0
			麦穗鱼	5	3.8	6.8	9.6	1.4
			彩石鲃	24	18.5	16.0	22.7	0.7
			黄鱼幼鱼	100	76.9	43.8	62.0	0.4
			鲫 鱼	8	3.5	139.8	52.8	17.5
	S5	N 26°50'9.4" E104°13'36.9"	麦穗鱼	16	7.0	12.9	4.9	0.8
			彩石鲃	45	19.9	28.6	10.8	0.6
			普栉鰕虎鱼	1	0.4	1.4	0.5	1.4
			黄鱼幼鱼	157	69.2	82.2	31.0	0.5
			鲫 鱼	1	1.5	3.7	3.6	3.7
	S6	N 26°50'3.7" E104°14'17.1"	麦穗鱼	4	6.1	18.4	18.0	4.6
			彩石鲃	18	27.3	13.5	13.2	0.8
			普栉鰕虎鱼	6	9.1	14.0	13.7	2.3
			黄鱼幼鱼	36	54.5	23.4	22.8	0.7
			黄 鳊	1	1.5	29.4	28.7	29.4
	S7	N 26°50'23.9" E104°15'31.6"	鲫 鱼	10	37.0	219.2	80.1	21.9
			麦穗鱼	7	25.9	37.9	13.8	5.4
			彩石鲃	1	3.8	2.2	0.8	2.2
			普栉鰕虎鱼	6	22.2	12.4	4.5	2.1
			黄鱼幼鱼	3	11.1	2.2	0.8	0.7

续表 13

地名	采样点	位置坐标	种类	尾数		重量 /g	重量 百分比 /%	尾均重 /g
				尾数	百分比 /%			
草海	S8	N 26°51'1.2" E104°15'35.3"	鲫 鱼	5	11.4	100.2	56.7	20.0
			麦穗鱼	2	4.5	9.7	5.5	4.9
			普栉鰕虎鱼	21	47.7	54.2	30.7	2.6
			黄鱼幼鱼	16	36.4	12.6	7.1	0.8
	S9	N 26°51'48.3" E104°14'46.3"	鲫 鱼	8	12.7	35.9	34.7	4.5
			麦穗鱼	15	23.8	38.7	37.4	2.6
			彩石鲃	5	7.9	6.2	6.0	1.2
			黄鱼幼鱼	35	55.6	22.6	21.9	0.6
	S10	N 26°51'50.8" E104°13'54.2"	彩石鲃	7	9.5	5.7	8.7	0.8
			普栉鰕虎鱼	21	28.3	32	49.1	1.5
			黄鱼幼鱼	46	62.2	27.5	42.2	0.6
	S1	N 26°53'35.1" E104°14'24.4"	鲤 鱼	28	57.1	68.1	63.3	2.4
			黄鱼幼鱼	14	28.6	10.3	9.6	0.7
			麦穗鱼	5	10.2	3.5	3.3	0.7
			泥鳅	2	4.1	25.6	23.8	12.8
	S2	N 26°52'50.0" E104°15'1.0"	鲤 鱼	4	16.7	10.3	40.7	2.6
			黄鱼幼鱼	17	70.8	13.3	52.6	0.8
			麦穗鱼	3	12.5	1.7	6.7	0.6
	S3	N 26°53'22.0" E104°14'34.0"	鲤鱼	184	88.9	297.0	98.1	1.6
			黄鱼幼鱼	13	6.3	1.7	0.6	0.1
			麦穗鱼	10	4.8	4.2	1.3	0.4
	S4	N 26°53'35.4" E104°44'25.1"	鲤鱼	50	24.6	60.7	60.4	1.2
			黄鱼幼鱼	148	72.9	37.9	37.7	0.3
			麦穗鱼	5	2.5	1.9	1.9	0.4
	S1	N 26°51'58.9" E104°9'1.9"	鲤鱼	2	0.9	1.7	0.7	0.9
			麦穗鱼	59	25.7	85.4	33.5	1.4
			普栉鰕虎鱼	7	3.0	3.6	1.4	0.5
			彩石鲃	121	52.6	121.8	47.7	1.0
			草海云南鳅	41	17.8	42.8	16.7	1.0
	S2	N 26°52'1.0" E104°9'12.0"	鲤鱼	2	1.7	2.7	2.0	1.4
			麦穗鱼	22	18.8	35.5	26.0	1.6
			普栉鰕虎鱼	56	47.9	55.5	40.8	1.0
			彩石鲃	31	26.5	34.4	25.2	1.1
			草海云南鳅	6	5.1	8.2	6.0	1.4
	S3	N 26°51'53.0" E104°9'17.9"	麦穗鱼	4	4.1	7.9	5.9	2.0
			普栉鰕虎鱼	69	71.1	87.2	65.4	1.3
			彩石鲃	15	15.5	17.3	13.0	1.2
			草海云南鳅	9	9.3	21.0	15.7	2.3
			麦穗鱼	2	3.2	8.2	5.2	4.1
	S4	N 26°51'55.0" E104°8'51.8"	普栉鰕虎鱼	28	44.4	70.0	44.4	2.5
			彩石鲃	14	22.2	19.1	12.1	1.4
			草海云南鳅	19	30.2	60.3	38.3	3.2
			鱼餐条	1	11.1	20.8	22.8	20.8
冒水水库	S1	N 26°18'24.0" E104°38'33.0"	泥 鳅	2	22.2	23.2	25.4	11.6
			鲫 鱼	3	33.3	38.1	41.7	12.7
			片唇鮡	3	33.4	9.2	10.1	3.1

续表 13

地名	采样点	位置坐标	种类	尾数		重量 /g	重量 百分比 /%	尾均重 /g
				尾数	百分比 /%			
乐溪水库	S1	N 26°47' 26.9" E104°25' 1.3"	鲫 鱼	7	0.7	69	2.6	9.9
			麦穗鱼	486	50.3	1344.7	50.2	2.8
			黄鱼幼鱼	11	1.1	11.5	0.4	1.0
			彩石鲋	307	31.7	412.9	15.4	1.3
			棒花鱼	135	13.9	458.1	17.2	3.4
			泥 鳅	22	2.3	380.7	14.2	17.3
	S2	N 26°47' 29.5" E104°24' 56.2	麦穗鱼	13	20.6	46.5	5.9	3.6
			黄鱼幼鱼	1	1.6	1.1	0.1	1.1
			彩石鲋	1	1.6	1.7	0.2	1.7
			棒花鱼	5	7.9	27.0	3.3	5.4
泥 鳅			43	68.3	715.7	90.4	16.6	
雪山水库	S1	N 27°3' 55.6" E104°6' 19.9"	黄鱼幼鱼	7	6.3	10.0	5.9	1.4
			麦穗鱼	104	93.7	158.6	94.1	1.5
	S2	N 27°3' 52.7" E104°6' 16.9"	麦穗鱼	453	100.0	635.9	100.0	1.4
	S3	N 27°3' 57.0" E104°6' 24.9"	黄鱼幼鱼	7	2.5	8.5	2.2	1.2
			麦穗鱼	268	97.5	375.5	97.8	1.4
邓家营水库	S1	N 27°7' 16.6" E103°50' 25.3"	麦穗鱼	86	100.0	389.0	100.0	4.5
	S2	N 27°7' 20.1" E103°50' 23.1"	麦穗鱼	76	98.7	345.4	98.5	4.5
			泥 鳅	1	1.3	5.3	1.5	5.3
	S3	N 27°7' 23.5" E104°50' 23.5"	麦穗鱼	189	100.0	722.2	100.0	3.8
冲子河水库	S1	N 26°43' 56.0" E104°0' 9.0"	棒 花 鱼	2	6.9	3.1	4.5	1.6
			麦 穗 鱼	23	79.3	44.3	63.9	1.9
			泥 鳅	4	13.8	21.9	31.6	5.5

3.4.2 草海及周边水域主要渔获物的全长、体长、体高

2018 年草海及周边水域主要网具捕获的渔获物中,全长、体长、体高见表 14。

表 14 草海及周边水域主要渔获物的全长、体长、体高(2018 年)

种类	体长范围 /mm	平均体长 /mm	全长范围 /mm	平均全长 /mm	体高范围 /mm	平均体高 /mm	体重范围 /g	平均体重 /g
鲫鱼	2.6~16.0 (60)	7.2	3.4~19.3 (60)	9.1	0.8~6.5 (60)	2.6	0.3~63.4 (60)	10.1
麦穗鱼	2.3~8.6 (60)	5.1	2.6~10.5 (60)	5.9	0.4~2.1 (60)	1.1	0.3~15.1 (60)	2.4
彩石鲂	2.2~4.5 (60)	3.3	3.2~5.5 (60)	4.2	0.8~1.9 (60)	1.3	0.3~3.0 (60)	1.1
黄鳝	31(1)	31	31(1)	31	1.0(1)	1.1	29.4	29.4
普栉鰕虎鱼	2.5~5.2 (60)	4.2	3.0~6.3 (60)	4.9	0.4~1.1 (60)	0.7	0.2~3.9 (60)	1.5

续表 14

种类	体长范围 /mm	平均体长 /mm	全长范围 /mm	平均全长 /mm	体高范围 /mm	平均体高 /mm	体重范围 /g	平均体重 /g
黄鱼幼鱼	1.4~4.5 (60)	2.9	1.9~5.3 (60)	3.2	0.3~0.9 (60)	0.5	0.1~1.8 (60)	0.6
泥鳅	6.0~16.2 (60)	12.4	7.2~18.3 (60)	14.5	0.6~2.3 (60)	1.6	2.4~34.0 (60)	15.8
鲤鱼	1.9~6.2 (60)	3.9	2.3~7.8 (60)	4.8	0.4~2.1 (60)	1.1	0.2~9.5 (60)	1.6
草海云南鳅	2.5~5.9 (60)	4.2	3.0~7.0 (60)	4.9	0.5~1.6 (60)	0.9	0.4~6.3 (60)	1.8
鱼餐条	11.4 (1)	11.4	13.8 (1)	13.8	2.6 (1)	2.6	20.8 (1)	20.8
片唇鲃	5.4~6.3 (3)	5.8	6.5~7.6 (3)	7.1	0.9~1.0 (3)	0.9	3.1(3)	3.1
棒花鱼	2.7~9.1 (60)	5.1	3.2~11.0 (60)	7	0.4~2.0 (60)	1.2	0.4~14.1 (60)	3.4

注:括号内为样本数。

4 讨论

4.1 区系组成

热带平原鱼类区系复合体,为原产于南岭以南的热带、亚热带平原区各水系的鱼类。包括合鳃鱼目中的黄鳝、沙塘鳢科中的黄鱼幼鱼、鰕虎鱼科中的普栉鰕虎鱼 3 种,占采样鱼类总数的 26.0%。上第三纪鱼类区系复合体,为第三纪早期北半球温热带地区形成的种类。包括鲤科中的鲤亚科、鮡亚科中的麦穗鱼属、花鳉科的泥鳅,共 4 种,占采样鱼类总数的 52.8%。江河平原鱼类区系复合体,为第三纪由南热带迁入我国长江、黄河平原区。并逐渐演化为许多我国特有的地区性鱼类。包括鲤科的鮡亚科(麦穗鱼属除外)中的棒花鱼、片唇鲃,鲴亚科中的彩石鲂,鲴亚科中的鱼餐条,共 4 种,占采样鱼类总数的 19.5%。中亚山地鱼类区系复合体,以耐寒、耐碱、性成熟晚、生长慢、食性杂为特点,包括条鳅亚科中的草海云南鳅,占采样鱼类总数的 1.7%。综上所述,草海及周边水域淡水鱼类区系基本上是由江河平原区系复合体、热带平原复合体和上第三纪鱼类区系复合体所组成(三者占 98.3%),高原高寒性的条鳅亚科鱼类仅占很小的比重。无热带平原的鲴亚科和山区急流性的平鳍鳅科和鮡科等种类。

4.2 鱼类多样性变化

表现为东中部凹地冒水水库、乐溪水库、草海、杨湾桥水库和干海子水库较高,西南部冲子河水库

次之,西北高海拔地区的雪山水库和邓家营水库最低(表4)。

4.3 土著特有种稀少

由草海及周边水域鱼类名录(表1)显示,草海及周边7个水库现有鱼类中,只有草海云南鳅(*Y. caohaiensis*)为本地特有种,且只有杨湾桥水库有,其他水库包括草海都未采到标本。

4.4 种类贫乏

草海及周边7个水库渔获物共有12种鱼类,其中草海最多,但也仅有7种;乐溪水库次之,为6种;杨湾桥水库5种;冒水水库和干海子水库各4种;冲子河水库3种;雪山水库和邓家营水库各2种。同全国各主要淡水湖泊鱼类的物种数(表15)比较,显见贫乏。

表 15 全国各主要淡水湖泊鱼类的物种数

项 目	洪泽湖湖	洞庭湖	太湖	洱海	滇池
物种数	51	69	37	24	52

5 存在的问题

本次调查对草海和周边7个水库的鱼类种类、数量和多样性进行了研究,对变化涉及较少,因为周边7个水库均没有历史资料,缺乏对比分析。样点设置上,除草海外的7个水库大多是请当地农民放网,有的未能反映库区全貌,还有的水库所放网具被当地农民偷走,仅有一个点的数据。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 陈宜瑜. 中国动物志:硬骨鱼纲:鲤形目:中卷[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [2] 乐佩琦. 中国动物志:硬骨鱼纲:鲤形目:下卷[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [3] 伍律. 贵州鱼类志[M]. 贵阳:贵州人民出版社,1989.
- [4] 张觉民,何忠辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京:农业出版社,1991.
- [5] 褚新洛,陈银瑞. 云南鱼类志[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [6] 何纪昌,刘振华. 从滇池鱼类区系变化论滇池鱼类数量变动及其原因[J]. 云南大学学报(自然科学版),1985(S1):29-36.
- [7] 茹辉军,刘学勤,黄向荣,等. 大型通江湖泊洞庭湖的鱼类物种多样性及其时空变化[J]. 湖泊科学,2008(1):93-99.
- [8] 文军. 草海的鱼类及鲫鱼的几项生物学资料[M]. 贵阳:贵州人民出版社,1986:207-213.
- [9] 李峰,秦洪超,吴本寿. 草海国家级自然保护区鱼类资源现状的研究[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2007:58-63.
- [10] 秦洪超,朱立,龙汉武,等. 草海鱼类的种类组成及群落多样性[J]. 贵州科学,2021,39(4):7-12.

收稿日期:2023-07-16;修回日期:2023-07-16

基金项目:贵州省生物研究所项目“草海鱼类的动态监测”。

作者简介:李 峰(1969-),男,汉族,四川人,本科,高级工程师,长期从事生态环境保护等方面的研究工作。

▲通讯作者:朱 立(1975-),女,汉族,贵州人,硕士,高级工程师,长期从事生物资源保护、利用等方面的研究工作。

理气健脾煮丸制备工艺研究^{*}

胡娟,陈晓兰[▲],杜林飞,谢树才

(贵州中医药大学 药学院,贵州 贵阳 550025)

摘要: **目的:**研究理气健脾煮丸的处方及制备工艺。**方法:**以溶散时间和成型性为指标,考察煮丸中淀粉量、拐枣液、崩解剂及干燥条件对煮丸崩解时限的影响,结合橙皮苷溶出量,选择最适服用方法。**结果:**理气健脾煮丸制备工艺:陈皮、魔芋粉、淀粉均过 8 号筛以等比例混合,加入 58% 的拐枣液(相对密度为 1.305)于 80 ℃和药制备湿颗粒,加入 19% 的 NaHCO₃ 迅速混匀制软材,最后制丸并于 50 ℃干燥 1 h;将煮丸加入沸水中溶散,在水温降至 55 ℃后最适合服用。**结论:**理气健脾煮丸的制备工艺稳定可行,符合传统中医药理论的要求。

关键词: 理气健脾,煮丸,制备工艺,溶出,橙皮苷

中图分类号:R283.6 文献标识码:A 文章编号:1003-6563(2024)05-0014-05

Preparation process of the boiled pill for regulating qi and invigorating the spleen^{*}

HU Juan, CHEN Xiaolan[▲], DU Linfei, XIE Shucui

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

Abstract: We studied the prescription and preparation process of the boiled pill for regulating qi and invigorating the spleen. Taking the dissolution time and formability as indexes, the effect of the amount of starch, the *Hovenia acerba* liquid, the disintegrant and the drying time on the disintegration time of the boiled pill were investigated, and the optimal administration method was selected according to the dissolution of hesperidin. The preparation process of the boiled pills; tangerine peel, konjac flour and starch were mixed in equal proportions after passing through No. 8 sieve, and 58% *Hovenia acerba* liquid with a relative density of 1.305 was added to prepare wet granules at 80 ℃, 19 % NaHCO₃ was added and mixed rapidly to make soft material, and finally the pills were prepared and dried at 50 ℃ for 1 h. Adding the boiled pills to boiling water to dissolve and disintegrate, and it is best to take after the water temperature drops to 55 ℃. The preparation process of the boiled pills for regulating qi and invigorating the spleen is stable and feasible, in line with the requirements of traditional Chinese medicine theory.

Keywords: regulating qi and invigorating the spleen, boiling pill, preparation process, dissolution, hesperidin

煮丸是汤剂的一种,早在汉代已具雏形^[1]。传统丸剂不能如汤剂快速发挥疗效,而汤剂又存在体积较大、味苦、携带不方便、易发霉、不能久贮等缺点。在《伤寒论》里对发挥疗效较慢的传统丸剂做了一定的改进,结合汤剂和丸剂的特点在病情较缓时以丸剂吞服,在病情较急时取其丸煮之内服,谓之抵当丸,即为煮丸。将煮丸煮成汤剂后服用,以便快

速地发挥疗效,提高生物利用度,通过群药共煮,既符合汤剂的要求,又可实现工业化生产。

在民间,由陈皮、魔芋粉和拐枣组成的理气健脾药方具有理气健脾、醒酒保肝、消脂减肥的功效。其中,陈皮作为君药,理气健脾、燥湿化痰,临床上常用于脾胃气滞证,寒痰湿痰等咳证^[2-3];魔芋富含葡甘聚糖,具有低热量、低脂肪、高纤维素的营养特点,能

增强机体免疫功能^[4-6];拐枣保肝护胃、解酒醒酒,具有抗糖尿病、减肥降脂、免疫调节和抗肿瘤等作用^[7-8]。基于此,本实验主要对理气健脾煮丸的处方及制备工艺进行研究,并考察体外溶出条件、溶散情况以及最佳服用方法等,为研究一种具有急时煮化或者冲服起到快速吸收、缓时以丸吞服持续释药的方法,从而更好地发挥理气健脾、护胃保肝、醒酒等作用,为理气健脾煮丸的开发利用奠定一定的基础。

1 材料

1.1 主要药品与试剂

陈皮粉(橙皮苷含量为 4.16%,符合药典要求),魔芋粉(批号:20210308,长沙博健生物科技有限公司),碳酸氢钠(批号:20191114,天津市永大化学试剂有限公司),羧甲基淀粉钠(批号:Y045S10S96782,上海源叶生物有限公司),交联聚维酮(批号:C1576539,上海麦克林生化科技有限公司),低取代羟丙基纤维素(批号:Z22M10W83655,上海源叶生物科技有限公司),微晶纤维素(批号:Z26F10W81483,上海源叶生物科技有限公司),可溶性淀粉(批号:20170908,天津市恒兴化学试剂制造有限公司),橙皮苷对照品(批号:C100023.201217,贵州迪大科技有限责任公司),磷酸(批号:K819049,上海阿拉丁试剂有限公司),乙腈为色谱纯,水为哇哈哈纯净水。

1.2 主要仪器

JA2003 电子天平(上海梅特勒仪器有限公司),HH-4 数显恒温水浴锅(常州奥华仪器有限公司),SK8210HP 超声波清洗器(上海科导超声仪器有限公司),GZX.9240MBE 电热鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司),SHZ III 型循环水真空泵(上海亚荣生化仪器厂),1260 型高效液相色谱仪(安捷伦)。

2 方法与结果

2.1 煮丸制备工艺研究

2.1.1 煮丸的制备及溶散时限测定

将陈皮、魔芋粉和淀粉混匀后,加入拐枣液(相

对密度为 1.305)进行制湿颗粒,在制好的湿颗粒中加入一定比例的崩解剂混合均匀后制软材,制成丸剂后在 50℃干燥一定时间后,即得一定质量的煮丸^[9]。取 10 粒煮丸于烧杯中,加入 100 mL 沸水,测定溶散时限。

2.1.2 成型性评价标准

对制成的软材进行成型性评价,评价标准见表 1。

表 1 成型性评价标准

得分情况	评价标准
1~5(不成型)	制成的软材太黏手或太松散无法制成丸
6	制丸时软材在手中大量粘结
7	制丸时软材在手中少量粘结
8	制丸时软材在手中几乎不粘结
9	制丸时软材在手中不粘结

2.1.3 淀粉用量比例考察

取过 8 号筛的陈皮与魔芋粉 1:1 混合,加入一定比例淀粉混匀,取 4 mL 拐枣液(相对密度为 1.305)制成湿颗粒后加入 NaHCO₃ 进行制软材,制丸剂,在 50℃干燥 2 h,测定溶散时限。结合成型性与溶散时限,陈皮魔芋粉与淀粉按 2:1 为最好方案,结果见表 2。

表 2 淀粉用量比例考察

陈皮魔芋粉/g	淀粉/g	NaHCO ₃ /g	成型性	溶散时限/min
6.002	2.003	1.065	7	6.50
6.003	3.007	1.065	8	6.20
6.002	4.001	1.069	8	6.30
6.003	5.002	1.067	7	6.30

2.1.4 拐枣液用量考察

取过 8 号筛的陈皮与魔芋粉 1:1 混匀,陈皮魔芋粉末与淀粉 2:1 比例混合,加入不同体积的拐枣液(相对密度为 1.305),制成湿颗粒后加入 NaHCO₃ 进行制软材,取软材制丸,在 50℃干燥 2 h,测定溶散时限。综合考虑成型性与溶散时限,选用 4 mL 拐枣液最好,结果见表 3。

表 3 拐枣液用量与成型性考察

拐枣液/mL	陈皮魔芋粉/g	淀粉/g	碳酸氢钠/g	成型性	溶散时限/min
2(29.0%)	6.003	3.001	1.138	6	5.30
3(43.5%)	6.01	3.000	1.137	6	5.40
4(58.0%)	6.003	2.999	1.137	8	6.00
5(72.5%)	6.002	3.011	1.137	7	6.30
6(87.0%)	6.002	3.002	1.137	不成型	/

2.1.5 不同崩解剂考察

取过 8 号筛的陈皮与魔芋粉 1 : 1 混匀,陈皮魔芋粉末与淀粉 2 : 1 比例混合,加入 4 mL 拐枣液制成湿颗粒后,加入不同崩解剂进行制软材,制丸剂,在 50 ℃干燥 2 h,测定溶散时限。结果显示,NaHCO₃ 的崩解效果最好,如表 4 所示。

表 4 不同崩解剂与溶散时限考察

陈皮魔芋粉/g	淀粉/g	崩解剂种类/g	成型性	溶散时限/min
5.997	3.003	MCC/1.066	8	8.10
6.003	2.999	CMS-Na/1.062	8	8.45
6.009	3.001	PVP-P/1.063	6	8.50
6.007	3.014	L-HPC/1.071	8	8.05
6.002	3.01	NaHCO ₃ /1.069	7	6.25

2.1.6 崩解剂的用量考察

取过 8 号筛的陈皮与魔芋粉 1 : 1 混匀,陈皮魔芋粉末与淀粉 2 : 1 比例混合,加入 4 mL 拐枣液制成湿颗粒后加入不同体积的 NaHCO₃ 制软材,制丸剂,在 50 ℃干燥 2 h,测定溶散时限。综合成型性、溶散时限与经济性多方面考虑,选用 19% 的 NaHCO₃ 最理想,结果见表 5。

表 5 崩解剂用量考察

陈皮魔芋粉/g	淀粉/g	NaHCO ₃ /g	成型性	溶散时限/min
6.000	3.002	1.847 (13%)	7	5.40
6.010	3.006	2.280 (16%)	8	5.20
6.006	3.002	2.700 (19%)	8	4.20
6.002	3.000	3.122 (22%)	8	4.05
6.009	2.999	3.556 (25%)	8	4.10

2.1.7 干燥时长与水分测定

取过 8 号筛的陈皮与魔芋粉 1 : 1 混匀,陈皮魔芋粉末与淀粉 2 : 1 比例混合,加入拐枣液制成湿颗粒后加入崩解剂制软材,制丸剂,在 50 ℃分别干燥 0.5 h、1 h、1.5 h、2 h、2.5 h,测定溶散时限,并按药典烘干法测定水分含量。结果显示,干燥不足 1 h 时,其水分含量大于 9%,结合溶散时限,选择干燥 1 h 最理想,水分含量<9%,结果见表 6。

表 6 干燥时长与水分含量测定

陈皮魔芋粉	淀粉	NaHCO ₃	干燥时长	溶散时限	水分含量
/g	/g	/g	/h	/min	
12.010	6.001	5.401	0.5	1.40	>9%
			1	3.10	<9%
			1.5	3.22	<9%
			2	3.40	<9%
			2.5	3.40	<9%

2.2 理气健脾煮丸中橙皮苷含量测定方法的建立^[10]

2.2.1 橙皮苷对照品溶液的制备

精密称取 0.00400 g 橙皮苷对照品于 10 mL 容量瓶中,加入甲醇超声溶解,配制成 0.400 mg/mL 的对照品溶液,过 0.45 μm 微孔滤膜,备用。

2.2.2 供试品溶液的制备

取理气健脾煮丸粉末约 1 g,精密称定,置具塞锥形瓶中,精密加入 25 mL 甲醇,密塞,称定重量,超声处理(功率 300 W,频率 40 kHz)45 min,放冷,再称定重量,用甲醇补足减失的重量,摇匀,0.45 μm 微孔滤膜,备用。

2.2.3 色谱条件

色谱柱;Cromasil C₁₈ 柱(250 mm×4.6 mm,5 μm);流动相:乙腈-水(22 : 78);检测波长:283 nm;流速:1.0 mL/min;柱温为 30 ℃;进样量为 5 μL。

2.2.4 专属性考察

分别取橙皮苷对照品和供试品溶液,按“2.2.3”项下色谱条件测定,结果见图 1。橙皮苷的保留时间 $t_R = 11.5$ min,样品的色谱图在 11.5 min 时显示橙皮苷吸收峰,且分离度好,无杂质峰的干扰。表明橙皮苷分离度好,且在出峰处无干扰。

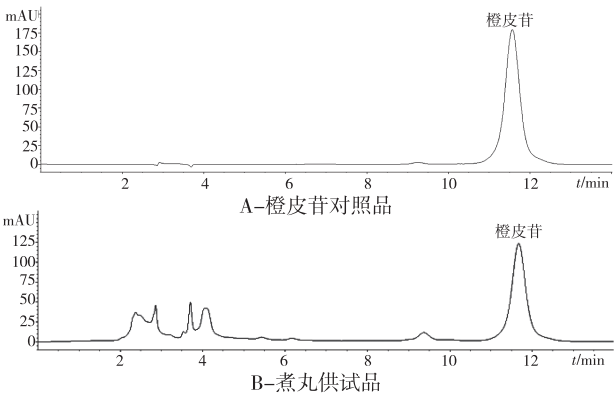


图 1 高效液相色谱图

2.2.5 线性关系考察

取 0.400 mg/mL 的橙皮苷对照品溶液,用甲醇稀释至 0.016 mg/mL、0.0128 mg/mL、0.0096 mg/mL、0.0064 mg/mL、0.0032 mg/mL。按“2.2.3”项下方法测定,以峰面积对橙皮苷对照品浓度进行

线性回归,得到橙皮苷回归方程 $Y = 12275X - 47.639$, $R^2 = 0.9991$,结果表明,橙皮苷在 $0.0032 \sim 0.016 \text{ mg/mL}$ 范围内与峰面积呈良好线性关系。

2.2.6 精密度考察

按“2.2.1”项下制备橙皮苷对照品,按“2.2.3”色谱条件下连续进样6次,记录橙皮苷峰面积值,其 RSD 值为 0.12% ,说明仪器精密度良好。

2.2.7 重复性试验

称取理气健脾煮丸粉末6份,按“2.2.2”项下制备,按“2.2.3”项下色谱条件下进样,计算橙皮苷峰面积值,其 RSD 为 0.15% ,说明该方法重复性好。

2.2.8 稳定性试验

取“2.2.2”项下供试品溶液,室温下分别于 0 h 、 2 h 、 4 h 、 6 h 、 8 h 、 10 h 、 12 h 按“2.2.3”项下色谱条件下进样,记录橙皮苷峰面积值并计算, RSD 值为 1.14% ,表明供试品溶液稳定性良好。

2.2.9 加样回收试验

取已知橙皮苷含量的理气健脾煮丸粉末6份,精密称定,分别加入橙皮苷对照品,在“2.2.3”色谱条件下进样,记录橙皮苷的含量,计算得到的回收率为 98.66% ,其 RSD 为 0.58% ,表明该方法准确可靠。结果见表7。

表7 加样回收率试验结果

称样量 /g	橙皮苷含量 /mg	加入量 /mg	测得量 /mg	回收率 /%	平均值 /%	RSD /%
0.5650	3.4217		6.59	97.49		
0.5649	3.4088		6.62	98.81		
0.5652	3.4075	3.25	6.61	98.54	98.66	0.58
0.5647	3.4093		6.62	98.79		
0.5643	3.4115		6.63	99.03		
0.5651	3.4131		6.64	99.29		

2.3 理气健脾煮丸中橙皮苷溶出试验

2.3.1 煮化与冲服对橙皮苷溶出的影响

取煮丸精密称定,加 50 mL 纯净水,分别采用煮沸、沸水冲服和 90°C 水冲服,冷却至室温后测定溶液中的橙皮苷浓度,比较煮沸、沸水冲服和 90°C 水对橙皮苷溶出的影响。结果显示,煮沸能够快速溶散,沸水冲较 90°C 水溶散快,但煮沸和沸水冲服后的橙皮苷的溶出率均较高,结果如图2所示。

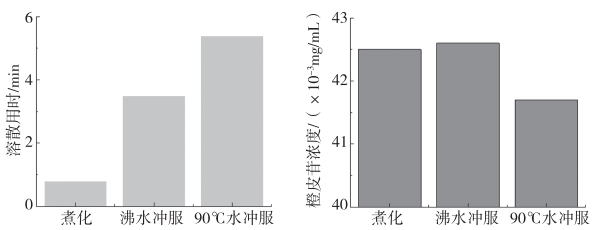


图2 煮化与冲服对橙皮苷溶出的影响

2.3.2 温度对橙皮苷溶出的影响

取理气健脾煮丸,精密称定,加入 50 mL 沸腾的纯净水,分别在温度降至 70°C 、 65°C 、 60°C 、 55°C 、 50°C 、 45°C 、 40°C 、 35°C 时测定溶液中的橙皮苷浓度。结果表明,当温度降至 55°C 以下时水中橙皮苷浓度开始下降,结果如图3所示。

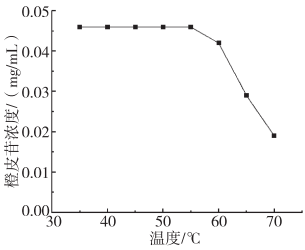


图3 不同温度对橙皮苷溶出的影响

2.3.3 橙皮苷溶出曲线

取理气健脾煮丸,精密称定,加入 50 mL 沸腾的纯净水,分别在放入后的 1 min 、 3 min 、 5 min 、 7 min 、 9 min 、 11 min 、 13 min 、 15 min 时,测定橙皮苷溶出百分率,结果如图4所示。

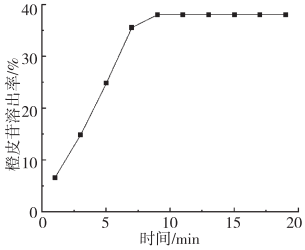


图4 橙皮苷时间溶出曲线图

综上,可得出理气健脾煮丸的制备工艺为:陈皮、魔芋、淀粉均过8号筛以等比例混合,加入 4 mL 相对密度为 1.305 的拐枣液于 80°C 和药制备湿颗粒,加入 19% 的 NaHCO_3 迅速混匀制软材,最后制丸并于 50°C 干燥 1 h ,即得理气健脾煮丸。在日常服用时只需采用沸水或 90°C 以上热水冲化后放置 9 min ,此时水温降至 55°C 左右,橙皮苷溶出达到峰

值,最适合服用。

3 讨论

根据陈皮、魔芋和拐枣三味药物的研究,三味药物的最新研究偏向于食品保健。陈皮中主要含有黄酮苷等成分^[11-12],是其主要活性成分^[13-14]。在中医临床上,陈皮作为常用理气药常以汤剂入药,但橙皮苷存在水溶性差,其经口服后需经肠道微生物发酵转化为单糖苷或苷元等成分发挥药效^[15],生物利用度低的问题^[16]。综合三味药物的疗效,结合汤剂的特点,克服传统丸剂的缺点,在此基础上研发新型丸剂,力求新型煮丸在一定温度的水中能达到如散剂快速崩解的效果。

本文对理气健脾煮丸的处方和制备工艺进行了较系统的研究,以考察煮丸的可行性,结果显示,处方配比合理,制备工艺稳定可行,制剂质量可控。在此次试验中,采用 HPLC 法对理气健脾煮丸中君药陈皮中指标性成分橙皮苷的含量测定进行方法学考察,结果显示,线性关系、精密度、稳定性、回收率良好,表明高效液相色谱法对此次考察呈现出较好的结果,该方法简便、准确,能够有效控制理气健脾煮丸的内在质量,保证制剂质量的稳定性、有效性和安全性。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 李爱英. 煮丸的临床应用[J]. 中医药研究, 1991(6): 59-60.
- [2] 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, 2020:199-200.
- [3] 徐健, 曾万祥, 王晓东, 等. 陈皮的化学成分与药理学作用研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(10): 72-76.
- [4] 周启武, 桂云霞, 李明灿, 等. 五种魔芋中主要营养成分及重金属元素分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 234-239.
- [5] 杨晓仪, 刘浩, 庞杰. 魔芋葡甘聚糖复合涂膜在食品中

的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(9): 7-9.

- [6] 信珊珊. 魔芋葡甘聚糖的生理功效综述[J]. 粮食与食品工业, 2019, 26(5): 50-52.
- [7] 杨子悦, 林洁, 霍蕾, 等. 拐枣活性成分及其提取技术研究进展[J]. 中南农业科技, 2023, 44(8): 239-243.
- [8] 王佳豪, 谢超, 张敏, 等. 拐枣功能作用及开发利用的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(19): 121-123.
- [9] 黄芳, 曹岗, 葛卫红, 等. 连钱草配方煮丸及其制备工艺研究[J]. 中华中医药学刊, 2015, 33(5): 1079-1082.
- [10] 李建, 黄宇思, 赖慧, 等. HPLC 法测定参苓安神胶囊中橙皮苷含量[J]. 光明中医, 2022, 37(13): 2337-2339.
- [11] 宋玉鹏, 陈海芳, 谭舒舒, 等. 不同陈皮来源药材中橙皮苷、川陈皮素、橘皮素和辛弗林的含量比较[J]. 时珍国医国药, 2017, 28(9): 2061-2064.
- [12] 杨秀娟, 巢颖欣, 蔡轶, 等. 新会陈皮化学成分的综合分析测定研究[J]. 中国医院药学杂志, 2019, 39(4): 348-352.
- [13] 李思琦, 李华. 陈皮主要化学成分及质量控制研究进展[J]. 今日药学, 2020, 30(12): 861-864.
- [14] 魏莹, 李文东, 杨武亮. HPLC 法测定不同贮存年限广陈皮药材中主要活性成分的含量[J]. 中国药房, 2016, 27(15): 2131-2134.
- [15] LIN Y G, VERMEER M A, BOS W, et al. Molecular structures of citrus flavonoids determine their effects on lipid metabolism in HepG2 cells by primarily suppressing apoB secretion. [J] Journal of agricultural and food chemistry, 2011, 59(9): 4496-4503.
- [16] 杨元丰, 黎艳刚, 罗小泉, 等. 橙皮苷与陈皮酶转化工艺研究及其对正常小鼠小肠推进作用的比较[J]. 中国新药杂志, 2022, 31(18): 1831-1837.

收稿日期: 2023-10-17; 修回日期: 2024-02-22

基金项目: 国家苗药工程技术研究中心能力提升(黔科合中引地[2023]006); 贵州省高层次创新型人才(黔科合平台人才-GCC[2023]037)。

作者简介: 胡娟, 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 中药、民族药药物新制剂及新剂型。

▲通讯作者: 陈晓兰, 女, 教授, 博士, 研究方向: 中药、民族药药物新制剂及新剂型。

中药治疗便秘古今用药对比研究*

陈汝玲¹, 黄兴文², 辛振杰^{1▲}, 陈宗武¹, 禰昭银¹

(¹ 罗定市中医院, 广东 罗定 527200; ² 广东云浮中医药职业学院, 广东 新兴 527400)

摘要: **目的:**通过比较治疗便秘的古代复方和现代中成药用药的差异,探究古今治疗便秘的有效优选药物,并为该类中成药的研发提供科学参考。**方法:**通过建立治疗便秘的中药方剂数据库,采用 SPSS 22.0 统计软件对古今通便用药进行比较,对常用药物进行整理和分析。**结果:**古代复方以大黄、甘草、当归、火麻仁较为常用;现代中成药以大黄、甘草、黄芩、黄连较为常用。古今用药存在显著性差异($P<0.05$)。**结论:**通过对古今治疗便秘的用药规律对比研究,可发现治疗便秘的优选药物和药对,并为今后中医临床治疗便秘和中成药研制提供科学参考。

关键词: 古代复方, 中成药, 便秘, 用药规律

中图分类号: R256.35 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0019-05

Comparative study on ancient and modern medicines for treating constipation*

CHEN Ruling¹, HUANG Xingwen², XIN Zhenjie^{1▲}, CHEN Zongwu¹, XUAN Zhaoyin¹

(¹ Luoding Hospital of Traditional Chinese Medicine, Luoding 527200, China; ² Guangdong Yunfu Vocational College of Chinese Medicine, Xinxing 527400, China)

Abstract: In this study we compared the differences between ancient and modern Chinese medicines for treating constipation, and explored the effective drugs for treating constipation in ancient and modern times, so as to provide scientific reference for the development of such Chinese patent medicines. After establishing a database of traditional Chinese medicine prescriptions for treating constipation, SPSS 22.0 statistical software was used to compare the ancient and modern laxative medications, and the common drugs were sorted and analyzed. In ancient times, rhubarb, licorice, angelica and hemp were more commonly used; in modern times, rhubarb, licorice, astragalus and berberine were more commonly used. There was a significant difference between ancient and modern medications ($P<0.05$). Through the comparative study of ancient and modern medication rules of constipation, this study has found the preferred drugs and drug pairs for the treatment of constipation, and has provided scientific reference for future clinical treatment of constipation and the development of Chinese patent medicines.

Keywords: ancient compound medicine, Chinese patent medicine, constipation, medication rule

便秘是指由于大肠传导功能失常导致的以大便排出困难、排便时间或排便间隔时间延长为临床特征的一种大肠病证。便秘既是一种独立的病证,也是一个在多种急慢性疾病过程中经常出现的症状,《内经》认为便秘与脾胃受寒,肠中有热和肾病有关^[1-2]。现代研究表明,便秘可能与年龄、不良生活习惯、精神心理因素、肠道疾病、滥用泻药有关^[3-5]。

中成药(Traditional Chinese Medicine Patent Prescription)不仅仅是以中药为原料,经制剂加工制成各种不同剂型的中药制品,包括丸、散、膏、丹各种剂型^[6],而且是我国历代医药学家经过千百年医疗实践创造、总结的有效方剂的精华。中成药具有安全、方便、耐受性低等特点,现已经广泛运用在中药市场^[7-9]。顾珈裔^[10]用三仁润肠治疗干燥脱水和肠

干燥引起的功能性便秘,与对照组(乳果糖)相比,其效果明显优于对照组,且未发现明显副作用,安全性较好。焦晨莉^[11]等以当归芦荟胶囊口服治疗老年便秘 56 例,治疗 1 周后,总有效率为 89.30%,且患者治疗后的血、尿、粪常规,肝、肾功能及心电图均未发现明显变化。由于古代治疗便秘的复方较多,而中成药的研制应该发挥继承与创新的精神。所以从中找到治疗便秘的有效药物应用于中成药的研发显得尤为重要,目前国内许多学者通过大数据分析对古代复方的用药情况进行了分析,为通便类中成药的研究开发起到了很大的补益作用^[12-14]。本文拟通过比较治疗便秘的古代复方和现代中成药用药的差异,探究古今治疗便秘的方剂中常用药规律,为中医临床治疗便秘以及中成药研制提供科学参考依据。以中国方剂数据库为总样本,对相关的中药复方进行检索,采用 SPSS 22.0 软件对复方中药物的频次和用量进行统计分析。通过对古今治疗便秘的用药及用量的对比分析,优选出治疗便秘的药物,可为中医临床治疗便秘和中成药的研制提供参考。

1 资料与方法

1.1 数据库的建立

采用计算机检索、人工查验的方法,古方收集以《方剂大辞典》电子版为检索工具,今方以《新编中成药大全》电子版为检索工具。将同名异药者,采用药用名分类,对同药异名者,进行合并处理。纳入标准:本研究中通过中医大辞典数据库以“大便秘结”“通便”“大便不通”“大便闭结”“便闭”“便秘”等为关键词,且检索功效或主治范围中含治疗便秘相关病症的方药。排除标准:方中加减配伍治疗便秘等的予以排除。

1.2 统计学方法

应用 SPSS 22.0 统计学软件对治疗便秘的古代复方和现代中成药的数据分别进行统计分析:(1)对单味药使用的频数、频率进行分析;(2)对出现频率较高的单味药物,采用卡方检验分析常用药物之间的差异情况;(3)将常用的药物采用系统聚类法中的 Q 型聚类,选择欧式距离和组间连接法进行聚类分析,结果用邻接树状图显示。

2 结果

2.1 古代治疗便秘复方的数据收集

将收集的古代方剂用药情况依次录入 EXCEL,获得古代方剂 469 首,用药 253 种。通过对药物使用的频次进行排序,得到前 30 位的药物。结果见表 1。

表 1 古代治疗便秘复方部分用药使用情况

药物	频次	频率/%	药物	频次	频率/%	药物	频次	频率/%
大黄	226	48.19	槟榔	60	12.79	桃仁	40	8.53
甘草	162	34.54	黄连	54	11.51	生地黄	40	8.53
当归	110	23.45	栀子	51	10.87	牵牛子	38	8.10
火麻仁	105	22.39	川芎	50	10.66	黄柏	36	7.68
黄芩	86	18.34	防风	50	10.66	白芍	36	7.68
枳实	82	17.48	人参	48	10.23	白术	36	7.68
厚朴	72	15.35	连翘	48	10.23	羌活	32	6.82
木香	67	14.29	桔梗	45	9.59	木通	32	6.82
枳壳	65	13.86	麦冬	44	9.38	赤芍	31	6.61
陈皮	64	13.65	杏仁	42	8.96	柴胡	31	6.61

2.2 中成药治疗便秘复方的数据收集

通过中成药数据库检索功能主治为“便秘”进行检索,检索共获得中成药方剂 234 种,用药 213 种。现代中成药治疗便秘复方用药使用情况见表 2。

表 2 现代中成药治疗便秘复方部分用药使用情况

药物	频次	频率/%	药物	频次	频率/%	药物	频次	频率/%
大黄	101	43.16	天花粉	22	9.40	枳壳	14	2.99
甘草	48	20.51	香附	20	8.55	知母	14	2.99
黄芩	46	19.66	玄参	19	8.12	茯苓	14	2.99
黄连	33	14.10	山楂	19	8.12	防风	14	2.99
陈皮	31	13.25	桔梗	19	8.12	苡蓉	14	2.99
木香	29	12.39	厚朴	19	8.12	半夏	13	2.77
槟榔	29	12.39	枳实	18	7.69	麦芽	12	2.56
牵牛子	27	11.54	赤芍	17	7.26	火麻仁	12	2.56
当归	27	11.54	白术	17	7.26	黄柏	12	2.56
连翘	23	9.83	栀子	15	6.41	杏仁	11	2.35

2.3 常用药物间的差异显著性分析

2.3.1 古代复方常用药物间的差异显著性分析

对使用频率前 10 的药物,采用卡方检验进行两两差异显著性分析。结合表 1,我们发现大黄的使用率最高,与其他药物相比差异显著,有统计学意义。

($P<0.05$),其次,甘草的使用率也比较高,列第二位。利用同样的比较方法,对其余的药物两两比较。两药配伍率差异显著($P<0.05$),即表明两药的配伍率不同。若($P>0.05$)则认为两种药物的配伍率相同。如当归和火麻仁之间相比差异不显著($P>0.05$),不能认为两者的使用频次不同。所以当归和火麻仁的使用频率位于第三位。因此,我们可以认为大黄、甘草、火麻仁、当归是古代复方治疗便秘的首选用药。结果见表3。

表3 古代复方常用药物使用频次两两差异比较情况

S/p	大黄	甘草	当归	火麻仁	黄芩	枳实	厚朴	木香	枳壳
甘草	0.000								
当归	0.000	0.000							
火麻仁	0.000	0.000	0.752						
黄芩	0.000	0.000	0.065	0.144					
枳实	0.000	0.000	0.029	0.072	0.791				
厚朴	0.000	0.000	0.002	0.008	0.256	0.427			
木香	0.000	0.000	0.000	0.002	0.112	0.212	0.708		
枳壳	0.000	0.000	0.000	0.001	0.075	0.150	0.578	0.920	
陈皮	0.000	0.000	0.000	0.001	0.061	0.126	0.517	0.841	1.000

注: $P<0.05$ 为有统计学差异, $P<0.01$ 为统计学差异显著。

2.3.2 现代中成药复方常用药物间的差异显著性分析

我们对中成药中使用频率前10的药物进行两两间的差异显著性分析。与古代复方结果不同的是甘草的使用频次与黄连和黄芩之间无差异($P>0.05$),甘草、黄芩与其他6味中药之间有差异($P<0.05$),表明它们的配伍率不同。黄连与其他6味中药之间相比差异不显著($P>0.05$),不能认为黄连与其他6味中药的配伍率不同。因此,我们可以认为大黄、甘草、黄芩为中成药的首选常用药。从结果可以看出,现代中成药治疗便秘主要是以清热为主,所以清热药的使用频率较高。结果见表4。

表4 中成药常用药物使用频次两两差异比较情况

S/p	大黄	甘草	黄芩	黄连	陈皮	木香	槟榔	牵牛子	当归
甘草	0.000								
黄芩	0.000	0.920							
黄连	0.000	0.087	0.139						
陈皮	0.000	0.048	0.081	0.888					
木香	0.000	0.025	0.044	0.680	0.888				
槟榔	0.000	0.025	0.044	0.680	0.888	0.888			
牵牛子	0.000	0.012	0.022	0.488	0.671	0.888	0.888		
当归	0.000	0.012	0.022	0.488	0.671	0.888	0.888	0.888	
连翘	0.000	0.004	0.004	0.200	0.310	0.462	0.462	0.655	0.655

注: $P<0.05$ 为有统计学差异, $P<0.01$ 为统计学差异显著。

2.4 古代复方治疗便秘常用药物间的聚类分析

通过古代治疗便秘的常用药物的聚类分析,以欧式距离5,可以将其分为5类。第一类:大黄单独为一类,大黄作为治疗便秘的常用药,有攻积导滞,泻火凉血,行瘀通经的作用。常用于大便燥结,积滞泻痢,以及热结便秘、壮热苔黄等症。第二类:甘草单独为一类,甘草人称国老,有调和诸药,解毒的功。第三类:当归和火麻仁聚为一类,两者都有润肠通便之用,故聚在一起。第四类:枳实和厚朴聚为一类,治疗便秘时常常以药对形式出现,具有行气作用。第五类:其余四药聚为一类,具有理气作用。结果见图1。

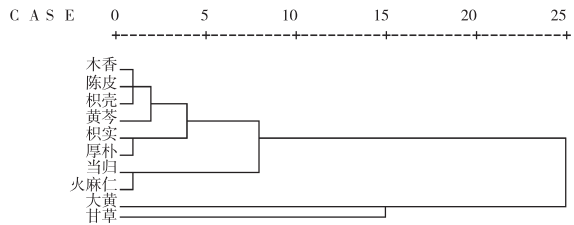


图1 古代复方治疗便秘常用药物间的聚类分析树状图

2.5 现代中成药治疗便秘常用药物间的聚类分析

通过现代中成药治疗便秘的常用药物的聚类分析,以欧式距离5,可以将其分为3类。第一类:大黄单独为一类,大黄作为治疗便秘的常用药,常用于大便燥结,积滞泻痢,以及热结便秘、壮热苔黄等症。第二类:甘草和黄芩聚为一类。第三类:其余药聚为一类,具有理气和润肠作用。结果见图2。

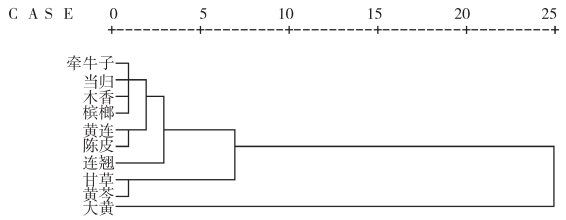


图2 现代中成药治疗便秘常用药物间的聚类分析树状图

2.6 古代复方和现代中成药常用药物比较分析

我们对古代复方和现代中成药重复常用药物,采用卡方检验进行分析,发现大黄、黄芩、木香、陈皮

的使用频次无差异($P>0.05$)。而甘草、当归的使用频次差异显著($P<0.05$),古代复方运用当归和甘草的频次更高。结果见表 5。

表 5 古代复方和现代中成药常用药物比较

组别	大黄	甘草	当归	黄芩	木香	陈皮
古代复方	48.19	34.54	23.45	18.34	14.29	13.65
中成药	43.16	20.51	11.54	19.66	12.39	13.25
χ^2	1.39	14.00	13.38	0.10	0.33	0.00
P	0.238	0.000	0.000	0.752	0.566	1.000

3 讨论

1)古代治疗便秘复方用药使用情况,我们发现使用较多的药物以泻下药为主,如攻下药大黄、润下药火麻仁等,其次理气药的使用次数也比较多,如陈皮、木香、枳实等,主要借助理气药的推动作用,针对兼证或兼病起治疗作用的药物。符合方剂学臣药的配伍理论。药用部位大多为种子类药材,因为种子类药材的含油性较高,有润肠作用。其中甘草的使用频次也很高,主要是发挥其解毒、调和诸药的功效。而现代治疗便秘的中成药中常用药除泻下药外,主要以清热药为主,可能是现代人肠胃积热素体阳盛更多的体现^[15]。

2)古代复方运用当归和甘草的频次更高。结果表明,可能当归作为养血药,对便秘治疗的作用被忽视。而古方复方研究中可以看出,当归有润肠通便的功效,常与肉苁蓉、生首乌等配伍治疗血虚肠燥便秘有很好的作用。在今后中成药的研制中可以加以重点考虑。

3)古代复方中选用火麻仁的频次较高,但是在现在的中成药的处方中不为常见。火麻仁体润多汁,为甘性平,功能润燥滑肠,兼有滋养补虚作用,临床上常用于体质较为虚弱、津血枯少的肠燥便秘,主要用于肠燥便秘、老人及产后便秘^[16]。在今后通便类中成药的研发中可以加大研究力度。

4)研究中发现古代治疗便秘的常用药物和现代中成药处方中的常用药物有所不同,可能是因为人类的生活水平不断提高,饮食习惯和生活作息发生的较大的变化,应对现代疾病的特点,故药物的选择就有所不同。因此,可以从古代复方中选取一些高频的有效药物进行配伍、毒性、药效等研究,开发

新处方、新剂型,进而开发和挖掘适合当今便秘类型的中成药,为治疗便秘提供疗效更高、副作用更小的药物。

4 小结

方剂数据挖掘对提升临床疗效的作用逐渐被广泛肯定,关联规则在方剂数据挖掘的研究中,其优势体现在提取核心药物及揭示配伍关系。今后的研究应严格试验设计,确切地进行疗效评价,为进一步中药治疗便秘具有优越性提供可靠的证据,以满足循证需求。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 高尚社. 国医大师朱良春教授治疗便秘验案赏析[J]. 中国中医药现代远程教育,2011(16):4-6.
- [2] 山东中医学院. 黄帝内经素问校释:上册[M]. 北京:人民卫生出版社,1982.
- [3] 沈长青,景艳凤. 消化系中成药与西药的配伍禁忌[J]. 中国实用医药,2011,6(15):141-142.
- [4] 黄云,王学红. 便秘发病机制概述[J]. 中国现代医药杂志,2017,19(10):105-108.
- [5] 杜秋,谈瑄忠,丁曙晴,等. 脾肾阳虚型便秘临床用药及分析[J]. 辽宁中医药大学学报,2014(2):132-134.
- [6] 马玉芳. 李杲治疗便秘方药统计及经验分析[J]. 中医文献杂志,2008,26(2):46-47.
- [7] 徐思敏,戴泽琦,李苗苗,等. 口服中成药治疗便秘临床研究证据的概况性综述[J]. 中国实验方剂学杂志,2022,28(20):144-153.
- [8] 张军军,宋瑞. 中成药在肿瘤中的合理应用[J]. 中国药物滥用防治杂志,2021,27(5):775-777.
- [9] 杨艳. 中成药处方点评及分析[J]. 黑龙江中医药,2023,52(1):39-41.
- [10] 顾珈裔. 三仁润肠方治疗慢传输型功能性便秘的临床研究[D]. 北京:北京中医药大学,2013.
- [11] 焦晨莉,张敏,高玉芳,等. 当归芦荟胶囊治疗老年功能性便秘临床研究[J]. 现代中医药,2018,38(5):72-75.
- [12] 樊院院,湛松霖,陈聪,等. 基于 WeKa 关联规则联合聚类及因子分析的便秘处方规律探究[J]. 山东中医杂志,2016(10):865-869.
- [13] 谢建军. 基于中医传承辅助系统挖掘余绍源治疗便秘组方规律[D]. 广州:广州中医药大学,2014.
- [14] 杜丽东,田金徽,吴国泰,等. 基于文献的中药治疗便秘的社会网络分析[J]. 中国中药杂志,2017,42(2):370-377.

基于网络药理学与分子对接探索头花蓼抗肺炎的作用机制*

姜 特¹, 张 祥¹, 李来来¹, 柴艺汇¹, 蒲 翔¹, 何兰兰¹, 卢礼平², 张丽艳^{1▲}

(¹ 贵州中医药大学, 贵州 贵阳 550025; ² 贵州威门药业股份有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘 要: **目的:**运用网络药理学与分子对接探索头花蓼抗肺炎的作用机制。**方法:**通过查阅文献收集头花蓼的化学成分,在 chemdraw 软件绘制分子结构图,通过 PharmMapper 数据库选择 (NF) ≥ 0.9 的靶点蛋白获取潜在化合物的靶点;运用 GeneCards、OMIM、DRUGBANK 数据库以获得肺炎核心靶点;使用 Metascape 平台将头花蓼活性成分靶点和肺炎核心靶点交集进行 GO 和 KEGG 富集分析;使用 Cytoscape3.8.2 软件构建成分-靶点-通路图, AutoDock Tools 1.5.7、Pymol 软件进行分子对接。**结果:**头花蓼中筛选获得 38 个活性成分、116 个成分靶点、6 个核心靶点;KEGG 富集分析结果主要集中在 IL-17 信号通路、MAPK 信号通路、TNF 信号通路等;分子对接结果显示 ALB、EGFR、CASP3、MAPK1、MAPK14、SCR 与头花蓼主要化学成分的结合活性较好。**结论:**头花蓼中的核心化合物槲皮素、木犀草素、儿茶素等,可能通过 ALB、EGFR、CASP3、MAPK1、MAPK14、SCR 等靶点作用于 IL-17、MAPK、TNF 信号通路,从而达到治疗肺炎的作用。

关键词: 头花蓼, 网络药理, 肺炎, 分子对接, 作用机制

中图分类号: R917 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0023-06

Action mechanism of anti-pneumonia effect of *Polygonum capitatum* based on network pharmacology and molecular docking *

JIANG Te¹, ZHANG Xiang¹, LI Lailai¹, CHAI Yihui¹, PU Xiang¹, HE Lanlan¹, LU Liping², ZHANG Liyan^{1▲}

(¹ Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China; ² Guizhou Weimen Pharmaceutical Co. Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: In this study we used network pharmacology and molecular docking to explore the anti-pneumonia mechanism of *Polygonum capitatum*. The chemical constituents of *Polygonum capitatum* were collected by referring to literatures, and the molecular structure was drawn in chemdraw software. The target proteins with (NF) ≥ 0.9 were selected in PharmMapper database to obtain potential compound targets. GeneCards, OMIM and DRUGBANK databases were used to obtain the core targets of pneumonia. GO and KEGG enrichment analysis was performed at

[15] 王永炎, 严世芸. 实用中医内科学: 中医内科学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2009.

[16] 张丹丹. 火麻仁及其复方降血脂和抗氧化的药理学研究[D]. 武汉: 湖北中医药大学, 2015.

基金项目: 云浮市中药名工作室建设项目(云中医函[2022]23号)。

作者简介: 陈汝玲(1990-), 女, 广东罗定人, 中药师, 硕士研究生, 研究方向: 中药药物制剂。

▲通讯作者: 辛振杰(1971-), 男, 广东罗定人, 主任中药师, 研究方向: 中药制剂。

the intersection of the active component targets of *Polygonum capitatum* and the core targets of pneumonia by using Metascape platform. Cytoscape3. 8. 2 was used to construct the component-target-pathway map, and AutoDock Tools 1. 5. 7 and Pymol were used for molecular docking. A total of 38 active components, 116 component targets and 6 core targets were obtained. The results of KEGG enrichment analysis mainly focused on IL-17 signaling pathway, MAPK signaling pathway, TNF signaling pathway, etc. Molecular docking results showed that ALB, EGFR, CASP3, MAPK1, MAPK14 and SCR had good binding activity with the main chemical components of *Polygonum capitatum*. In conclusion, the core compounds of quercetin, luteolin and catechin in *Polygonum capitatum* may act on IL-17, MAPK and TNF signaling pathways through ALB, EGFR, CASP3, MAPK1, MAPK14, SCR and other targets, thus achieving the therapeutic effect of pneumonia.

Keywords: *Polygonum capitatum*, network pharmacology, pneumonia, molecular docking, action mechanism

肺炎是指终末气道、肺泡和肺间质的炎症^[1]。在中医上认为肺炎属于肺热性疾病,多是由温热之邪袭肺所致,故疏风清热是其基本治疗大法。

头花蓼(*Polygonum capitatum* Buch. -Ham. exD. Don)为蓼科多年生草本,有清热利湿、利尿通淋等功效^[2]。据研究表明,头花蓼具有抗菌、抗炎、解热镇痛等药理作用^[3]。槲皮素是头花蓼的主要有效成分之一^[4],具有抗炎活性的为黄酮类成分^[5]。程健等^[6]发现槲皮素能够明显改善小鼠肺组织的炎症作用。头花蓼可能对肺炎具有潜在的治疗作用。

网络药理学已被广泛应用于中药研究领域,为中药的作用机制及新药的研发指明了方向^[7]。为深入探索头花蓼治疗肺炎的作用机制,本文通过网络药理学及分子对接技术,从头花蓼有效成分、药物及疾病的作用靶点及信号通路,预测头花蓼有效成分对肺炎干预的作用机制,为今后头花蓼的抗肺炎实验研究提供理论依据。

1 材料方法

1.1 头花蓼活性成分筛选

通过查阅相关文献收集头花蓼化学成分,通过 chemdraw 软件绘制分子结构式,在通过 Pubchem (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>) 数据库获得分子结构图并保存为 3Dsdf 格式。将头花蓼化学成分结构式输入 SwissADME^[8] (<http://www.swissadme.ch/>)。选取潜在核心化合物:①肠胃吸收(GI absorption)为“High”;②Lipinski、Ghose、Veber、Egan、Muegge 结果中有 2 个及 2 个以上为“Yes”。再通过 PharmMapper^[9] (<http://lilab.ecust.edu.cn/pharmmapper/index.php>) 数据库获取潜在化合物的

核心靶点,结合文献,选择 $NF \geq 0.9$ 的靶点蛋白,获得最终化合物作用的核心靶点。

1.2 肺炎靶点筛选

在 GeneCards (<https://www.genecards.org/>)、TTD (<https://db.idrblab.net/ttd/>)、DRUGBANK (<https://go.drugbank.com/>) 数据库中输入以“pneumonia”“pneumonia disease”“pulmonitis”肺炎名词,获得肺炎核心靶点。将上述数据库所获取的靶点合并去重。利用韦恩图在线绘制工具绘制头花蓼-肺炎靶点的韦恩图,获得头花蓼治疗肺炎的潜在作用靶点。

1.3 “头花蓼成分-肺炎靶点”PPI 网络构建

将交集基因的靶点上传至 STRING11. 5 (<https://cn.string-db.org/>) 数据库,获得 PPI 网络关系,通过 CytoScape3. 8. 2 软件以 BC 值为限定条件对“头花蓼成分-肺炎靶点”的 PPI 进行筛选,最终得到核心靶点,制作头花蓼成分-肺炎靶点 PPI 网络图。

1.4 GO 及 KEGG 通路富集分析

通过 Metascape (<https://metascape.org/>) 数据库对核心靶点进行 GO 和 KEGG 富集分析,将富集分析结果按 P 值排序,且 $P \leq 0.01$,并将富集分析的结果选取符合要求的前 20 位,通过微生信进行作图处理。

1.5 头花蓼成分-靶点-通路网络图的构建

将 1.3 和 1.4 中得到的头花蓼成分、靶点、通路通过 Cytoscape3. 8. 2 构建头花蓼成分-靶点-通路网络图。

1.6 分子对接评估

选择分析头花蓼-肺炎靶点网络图中度值排名为前 6 的靶点,从 RCSB(<http://www.rcsb.org/pdb>) 数据库中下载靶点蛋白的 3D 结构。使用 Open Babel 2. 4. 1 软件将其转换为 mol2 格式,使用 AutoDock Tools 1. 5. 7 软件除去水和小分子配体,并进行分子对接操作,得结合能。最后用 Pymol 软件将分子对接结果进行可视化分析。

2 结果

2.1 头花蓼药物成分

通过 SwissADME 筛选出头花蓼 38 种活性成分(表 1)。通过 PharmMapper 预测并选择 NF $\geq$ 0. 9 的靶点,获得 116 个靶点。

表 1 头花蓼活性成分

编号	化合物	GI absorption	Lipinski	Chose	Veber	Egan	Muegge
THL1	(+)-isolariciresinol	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL2	1,5,7-三羟基-3-甲基蒽醌	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL3	(S)-Matsutake alcohol	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL4	n-butyl- α -D-fructofuranoside	High	Yes	NO	Yes	Yes	Yes
THL5	2-HEPTENAL	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL6	(E)-2-HEXENAL	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL7	4-O-Methylgallic acid	High	Yes	Yes	Yes	Yes	NO
THL8	3-O-Methylquercetin	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL9	5,7-二羟基色原酮(5,7-Di-hydroxychromone)	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL10	5-羟甲基糠醛(5-methylolfurfural)	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL11	N-反式咖啡酰酪胺(N-trans-caffeoyltyramine)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL12	大黄素(emodin)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL13	丁香酸(Cedar acid)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	NO
THL14	短叶苏木酚(brevifolin)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	NO
THL15	短叶苏木酚酸乙酯(ethyl brevifolincarboxylate)	High	Yes	Yes	Yes	NO	Yes
THL16	对羟基苯甲酸(PHB)	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL17	儿茶素((-)-catechin)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL18	红景天苷(salidroside)	High	Yes	NO	Yes	Yes	Yes
THL19	槲皮素(quercetin)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

续表 1

编号	化合物	GI absorption	Lipinski	Chose	Veber	Egan	Muegge
THL20	琥珀酸(succinic acid)	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL21	酒渣碱(Flazin)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL22	蓝桉醇(globulol)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	NO
THL23	龙胆酸(GENOP)	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL24	陆地棉苷(hirsutin)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL25	没食子酸(3,4,5-trihydroxy-benzoic acid)	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL26	没食子酸甲酯(Methylgallate)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	NO
THL27	没食子酸乙酯(Progallin A)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	NO
THL28	木犀草素(Luteolin)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL29	壬醛(Nonanal)	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL30	鞣花酸(ellagic acid)	High	Yes	Yes	NO	NO	Yes
THL31	山柰酚(kaempferol)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL32	十六烷酸(palmitic acid)	High	Yes	Yes	NO	Yes	NO
THL33	香草酸(vanillic acid)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	NO
THL34	熊果酸(Ursolic acid)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL35	异落叶松脂素((+)-isolariciresinol)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
THL36	原儿茶酸(protocatechuic acid)	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO
THL37	原儿茶酸乙酯(Ethyl protocatechuat)	High	Yes	Yes	Yes	Yes	NO
THL38	长叶冰片((-)-Borneol)	High	Yes	NO	Yes	Yes	NO

2.2 肺炎的靶点

基于 GeneCards 数据库、TTD 数据库、OMIM 数据库、DRUGBANK 数据库,共收集到肺炎相关靶点 2379 个。

2.3 头花蓼成分-肺炎靶点

图 1 为头花蓼-肺炎共同靶点的韦恩图,从中得到头花蓼-肺炎靶点 41 个,其中头花蓼靶点 116 个,肺炎相关靶点 2379 个。

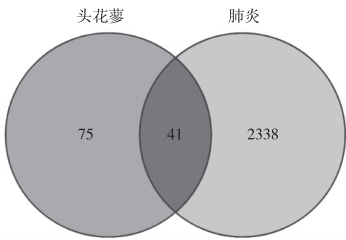
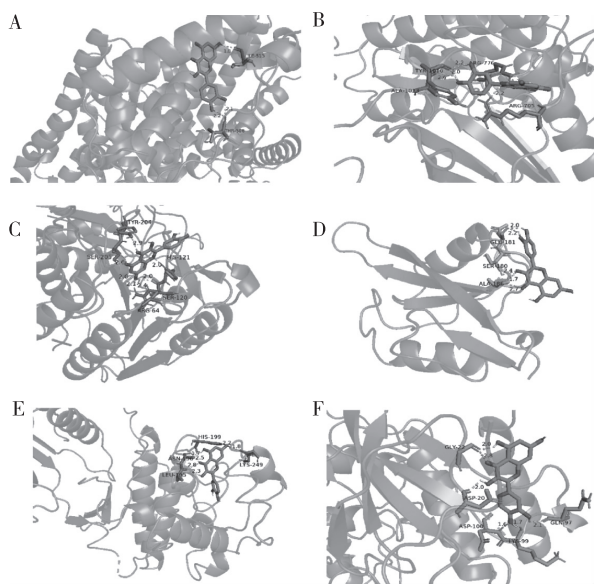


图 1 头花蓼-肺炎靶点韦恩图

力越强。结果显示,结合能均小于 $-1.2 \text{ kal} \cdot \text{mol}^{-1}$,均可自发进行结合。部分对接结果见图 6。

表 2 槲皮素与靶点蛋白对接结果

活性成分	靶点	蛋白库编号	结合能/ $(\text{kal} \cdot \text{mol}^{-1})$
槲皮素	ALB	1HK1	-6.09
	EGFR	6LUD	-5.16
	CASP3	1NMS	-6.58
	SCR	4F5A	-5.92
	MAPK14	6SFO	-6.42
	MAPK1	6Q7K	-5.14



注:A:ALB-槲皮素;B:EGFR-槲皮素;C:CASP3-槲皮素;D:SCR-槲皮素;E:MAPK14-槲皮素;F:MAPK1-槲皮素。

图 6 分子对接图

3 讨论

中医上认为肺炎属于“风温”“肺热病”等范畴,多是由温热病邪袭肺所致,当以清热药为主^[10]。头花蓼具有抗菌、抗炎、解热镇痛等药理活性。新冠肺炎(COVID-19)亦属于肺炎的一种。据研究表明,槲皮素、木犀草素、儿茶素对 COVID-19 的治疗主要是通过 ALB、EGFR、CASP3、MAPK1、MAPK14、MAPK8 等靶点及 IL-17、NF- κ B、MAPK 等信号通路发挥抗炎、抗病毒作用^[11-13]。本文通过网络药理学与分子对接技术分析头花蓼干预肺炎的作用机制。

通过药物-肺炎的 PPI 网络分析可知头花蓼主

要通过 ALB、EGFR、CASP3、MAPK1、MAPK14、SCR、MAPK8 等靶点发挥抗炎作用。据研究表明,ALB 可作为早期评估重症肺炎患者临床预后的客观指标,其与感染刺激引起的炎症也有一定关系^[14]。EGFR 的活化可参与气道上皮细胞的修复与再生,从而促进促炎细胞因子的分泌^[15]。CASP3 可诱导细胞凋亡,引起相关免疫反应^[16]。MAPK1、MAPK8、MAPK14 能在病毒感染的环境中被激活^[17]。MAPK1 和 MAPK8 是细胞外调节蛋白激酶 1 (ERK1)、ERK2 和 JNK^[18],参与 MAPK 的 2 条信号通路,与细胞炎症反应有密切联系^[19]。

头花蓼发挥抗炎作用主要是黄酮类成分。据研究表明,头花蓼水提物和醇提物得到的槲皮苷均可下调 TNF- α 的表达,进而抑制 RAW264.7 细胞炎症反应,发挥抗炎作用^[20]。通过筛选得出头花蓼主要活性成分为槲皮素、木犀草素、儿茶酚等。王哲义^[21]发现槲皮素、木犀草素、儿茶酚等化学成分可能通过 IL-17、TNF 等信号通路,作用于 TNF、MAPK8、CASP3、MAPK1 等靶点,从而发挥抗炎、抗病毒作用。

在 KEGG 富集分析中头花蓼干预肺炎通路主要与 IL-17、MAPK、TNF 通路有关。在目前研究中,发现 IL-17 与体内炎症细胞的表达密切相关,IL-17 具有很强的生物学作用,在促进炎症的发生中发挥重要作用^[22]。IL-17 作为高度促炎因子,主要是由 Th17 细胞分泌,对多种病原体感染的肺炎有明显效果^[23-25]。IL-17 通过相应的受体传递信号,激活下 NF- κ B 核转录因子、MAPK 等信号通路,从而导致炎症的发生^[26]。

4 总结

本研究通过网络药理学和分子对接技术,对头花蓼治疗肺炎的有效成分、作用靶点、通路及作用机制做了初步探讨。结果显示,头花蓼中的槲皮素、木犀草素、儿茶素等化学成分可能通过 IL-17、MAPK、TNF 等信号通路作用于 ALB、EGFR、MAPK14、MAPK1、CASP3、SCR 等靶点,发挥治疗肺炎的作用。

参考文献【REFERENCES】

[1] 古丽达娜·安那斯汗,刘静.探讨中医对肺炎的辨证治疗的功效[J].临床医药文献电子杂志,2016,3(24):4757

-4759.

- [2] 贵州省药品监督管理局. 贵州省中药材、民族药材质量标准[S]. 北京:中国医药科技出版社,2003:147.
- [3] 刘慧,张庆捷,袁丽,等. 苗药头花蓼研究进展[J]. 中国药业,2021,30(6):1-5.
- [4] 于明,李占林,李宁,等. 头花蓼的化学成分[J]. 沈阳药科大学学报,2008(8):633-635.
- [5] 王祥培. 头花蓼的鉴别与质量评价研究[D]. 成都:成都中医药大学,2006.
- [6] 程健,姜玉华. 槲皮素通过抑制丝裂原活化蛋白激酶信号通路表达减轻小鼠放射性肺炎[J]. 山东大学学报(医学版),2019,57(5):87-92.
- [7] ANDREW L H. Network pharmacology:the next paradigm in drug discovery[J]. Nature chemical biology,2008,4(11):682-690.
- [8] ANTOINE D O M, VINCENT Z. SwissADME: a free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules[J]. Sci rep,2017,7:42717.
- [9] WANG X S, WANG S L. PharmMapper 2017 update: a web server for potential drug target identification with a comprehensive target pharmacophore database[J]. Nucleic acids res,2017,45(W1):W356-W360.
- [10] 王豪. 肺炎的中医辨证论治[J]. 家庭医学,2022(1):52-53.
- [11] 吕鑫,顾志荣,张志红,等. 基于网络药理学和分子对接技术探讨解毒活血汤治疗新型冠状病毒肺炎的潜在作用机制[J]. 甘肃中医药大学学报,2022,39(4):34-44.
- [12] 王晨钰,韩涵,郭磊,等. 傣药方在治疗新型冠状病毒肺炎中作用的网络药理学和分子对接分析[J]. 中国测试,2021,47(9):70-81.
- [13] 赵小鸽,韩智平. 基于网络药理学探讨双黄连颗粒治疗新型冠状病毒肺炎的可行性[J]. 广东化工,2022,49(3):53-58.
- [14] 胡珊珊,李洁,史元元,等. 基于网络药理学和分子对接法探索复方一枝蒿颗粒治疗新型冠状病毒肺炎的潜在分子机制[J]. 现代药物与临床,2022,37(8):1710-1717.
- [15] CARLOS M M. Epidermal growth factor receptor expression licenses type-2 helper T cells to function in a T cell receptor-independent fashion[J]. Immunity,2017,47(4):710-722.
- [16] WANG Y, GAO W, SHI X, et al. Chemotherapy drugs induce pyroptosis through caspase-3 cleavage of a gasdermin[J]. Nature,2017,547(7661):99-103.
- [17] MILENA P. Hepatitis viruses and the MAPK pathway:is this a survival strategy[J]. Virus research,2003,92(2):131-140.
- [18] BARROSO-CHINEA P. DRD3 (dopamine receptor D3) but not DRD2 activates autophagy through MTORC1 inhibition preserving protein synthesis[J]. Autophagy,2020,16(7):1279-1295.
- [19] 赵叶,杨金华,韩君萍,等. MEK/ERK 通路参与支气管哮喘发病机制的研究进展[J]. 中华中医药学刊,2017,35(2):329-331.
- [20] 薛鑫宇,刘昌孝,周英,等. 基于 UPLC-MS 联用技术的头花蓼抗炎谱效关系初探[J]. 中草药,2018,49(21):5134-5141.
- [21] 王哲义,孙怿泽,曲稔栋,等. 基于网络药理学的麻杏石甘汤治疗新型冠状病毒肺炎(COVID-19)作用机制探讨[J]. 中草药,2020,51(8):1996-2003.
- [22] 宋磊,赵小冬,杨小红,等. 肺炎支原体感染儿童血外周血辅助性 T 细胞 17 型和白细胞介素-17 变化及其临床意义[J]. 中华妇幼临床医学杂志(电子版),2012,8(2):163-166.
- [23] BENJAMIN J M. Interleukin-17 drives pulmonary eosinophilia following repeated exposure to Aspergillus fumigatus conidia[J]. Infection and immunity,2012,80(4):1424-1436.
- [24] HEATHER R C. Th17 cells and IL-17 receptor signaling are essential for mucosal host defense against oral candidiasis[J]. The journal of experimental medicine,2009,206(2):299-311.
- [25] WU W, HUANG J, DUAN B, et al. Th17-stimulating protein vaccines confer protection against Pseudomonas aeruginosa pneumonia[J]. American journal of respiratory and critical care medicine,2012,186(5):420-427.
- [26] LI X, BECHARA R, ZHAO J, et al. IL-17 receptor -based signaling and implications for disease[J]. Nature immunology,2019,20(12):1594-1602.

收稿日期:2024-07-05;修回日期:2024-07-16

基金项目:贵阳市科技计划项目(筑科合同[2020]-10-12号);贵阳市科技计划项目(筑科合同[2021]43-11号)。

作者简介:姜 特(1998-),女(汉族),山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向:中药及民族药质量控制与新药研究。

▲通讯作者:张丽艳(1964-),女(汉族),河南新密人,贵州中医药大学教授,主要研究方向:中药及民族药质量控制与新药研究。

探究不同浓度商陆提取液对常见三种霉菌的抑制效果^{*}

邱傳懿,邱梦琦,王 敏,陈丰年,张 芸,邱成书[▲]

(成都师范学院 化学与生命科学学院,四川 成都 611130)

摘 要: 以安徽菌启健公司的商陆为试验原材料,采用水提法提取商陆浸提液。用商陆水提液开展对常见霉菌抑制作用的实验。实验表明:在 10~100 g/L 浓度范围内,哈茨木霉的菌落直径由 17.27 mm 降至 11.14 mm;层出镰孢菌的菌落直径由 17.07 mm 降至 11.07 mm;茄腐镰刀菌的菌落直径由 16.17 mm 降至 10.23 mm,其最佳抑制浓度为 100 g/L。实验结果发现商陆水提液对哈茨木霉、层出镰孢菌、茄腐镰刀菌三种菌有较好的抑菌效果,其抑菌率分别为 53.43% (哈茨木霉)、53.25% (层出镰孢菌)、59.37% (茄腐镰刀菌)。实验结果表明:一定浓度的商陆水煮提取液能有效抑制哈茨木霉、层出镰孢菌、茄腐镰刀菌的生长,在防霉实践中具有潜在应用前景。

关键词: 商陆,提取液,抑菌作用,霉菌

中图分类号:Q939.96 文献标识码:A 文章编号:1003-6563(2024)05-0029-05

Inhibitory effect of different concentrations of *Phytolacca acinosa* Roxb extract on three common molds^{*}

QIU Fuyi, QIU Mengqi, WANG Min, CHEN Fengnian, ZHANG Yun, QIU Chengshu[▲]

(College of Chemistry and Life Science, Chengdu Normal University, Chengdu, 611130, China)

Abstract: *Phytolacca acinosa* Roxb was bought from Anhui Junqi Health Technology Company, and *P. acinosa* extract was obtained by water extraction. The anti-mold experiments were carried out, and the results showed that under the extract concentration of 10 g/L to 100 g/L, the colony diameter of *Trichoderma harzianum* decreased from 17.27 mm to 11.14 mm, that of *Fusarium proliferatum* decreased from 17.07 mm to 11.07 mm, and that of *Fusarium solani* decreased from 16.17 mm to 10.23 mm. The best inhibitory effect was achieved under the concentration of 100 g/L. The inhibition rates were 53.43% (*T. harzianum*), 53.25% (*F. proliferatum*), and 59.37% (*F. solani*), respectively. In conclusion, *P. acinosa* water extract at a certain concentration could effectively inhibit the growth of *T. harzianum*, *F. proliferatum* and *F. solani*, showing potential application prospect in anti-mold practice.

Keywords: *Phytolacca acinosa* Roxb, extract, anti-mold effect, mold

0 引言

食用菌生产过程中,多种霉菌寄生于食用菌菌丝上并产生毒害物质,抑制或者分解掉食用菌菌丝体,或者直接利用栽培料抑制食用菌菌丝生长,导致

食用菌生长受到抑制甚至死亡,造成食用菌减产。徐耀波^[1]在平菇及香菇代料作物分离出的霉菌类型,常见侵染食用菌的霉菌主要有木霉属、镰孢霉属、镰刀霉属等,尤其以木霉侵染最高。而目前食用菌生产常用化学试剂抑制这些杂菌生长,结果影响食用菌产品的安全性和品质。开发或者探索抑制这

些常见霉菌生长,对食用菌的绿色无污染、生态友好型的天然抑菌物质显得尤为重要,关乎食用菌生产的未来。不少植物富含天然抑菌成分,是开发绿色天然抑制食用菌杂菌生长的资源之一。商陆就是这样的植物。

商陆(*Phytolacca acinosa* Roxb)又名章柳、山萝卜,属商陆科多年生草本植物,味苦、性寒且有微量毒性,具有逐水消肿、通利二便、解毒散结等一系列功效^[2]。现代药理研究证实商陆具有利尿、抗病毒、抗菌等效果。由于商陆含有三萜皂苷类化合物等^[3]毒性成分,极大地限制其开发利用^[4]。商陆水浸剂和醇提取液在体外对于肺炎菌等革兰氏阴性、阳性菌均有一定抑制效果^[5]。垂序商陆提取液中的抗菌蛋白 R1 和 R2 对绿色木霉等一系列真菌的生长具有一定抑制作用^[6]。

为了探究商陆对食用菌生长杂菌的抑制效果,本研究以商陆用水提法提取商陆有效成分,并以此开展抑制常见食用菌生产杂菌哈茨木霉菌、层出镰孢菌、茄腐镰刀菌实验。以期获得能较好抑制食用菌杂菌的商陆提取液浓度;获得经济实惠的天然、高抗菌效果、高环境亲和型的抑菌制剂。为今后部分替换高成本、易污染的化学制剂做有益的尝试,实现食用菌产业低成本、高回报的经济效益。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 菌种来源

哈茨木霉菌种,山东绿陇生物科技有限公司;层出镰孢菌,校内自行分离;茄腐镰刀菌,校内自行分离;商陆,安徽菌启健康科技有限公司

1.1.2 实验试剂

蔗糖(AR),成都市科龙化工试剂厂;琼脂(AR),北京康倍斯科技有限公司。

1.1.3 实验仪器

净化工作台(VS-840-1),上海博讯实业有限公司;万分之一分析天平(FA2004),常州市幸运电子有限公司;立式自动压力蒸汽灭菌器(GI54DS),致微(厦门)仪器有限公司;多功能电磁炉(C21-SK2105),广东美的生活电器有限公司;双筒显微镜(XTL-165VB),江西凤凰光学股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 烘干水煮提取法

将商陆炮制品烘干后,参照王刚正等^[7]的提取方式进行提取。即通过水煮 3 次,取上层液体浓缩后定容,制得 100 g/L 商陆水提液。

1.2.2 菌饼抑菌法

菌饼抑菌法是在打孔法的基础上进行修改,具体操作见蒙思妤^[8]等使用的具体方法,将菌饼反盖入药平板改为菌饼移植入打孔后药平板。主要包括:(1)含药 PSA 平板的制备及打孔;(2)霉菌富集及含菌平板制备及打孔;(3)菌饼移植。

1.2.3 处理后镜检

接种后 20 h 分别取对照组(未添加商陆提取液)与实验组(100 g/L 浓度商陆提取液)中霉菌,参照陈建妙等^[9]的方法修改后进行镜检。

2 结果与分析

2.1 霉菌抑菌效果分析

2.1.1 对哈茨木霉菌的抑制结果分析

商陆水提液对哈茨木霉的抑菌实验值见表 1。

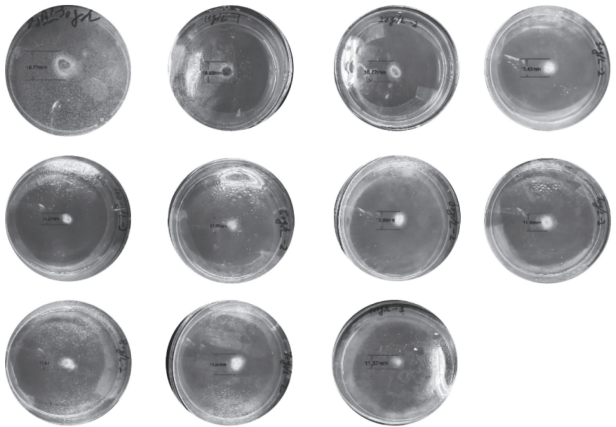
表 1 不同浓度商陆提取液作用下哈茨木霉菌菌丝平均值

浓度/(g/L)	平均值
0	17.27±1.884a
10	16.47±1.743a
20	15.92±0.423ab
30	15.38±0.029abc
40	13.58±1.168bcd
50	12.93±0.24cd
60	12.51±0.289d
70	12.2±0.458d
80	11.68±0.351d
90	11.36±0.32d
100	11.14±0.256d

注:表中数值为平均值±标准误差;标准误差后的字母表示数据差异显著性($P<0.05$)。

从表中可以看出,水提液对哈茨木霉具有较好的抑菌效果,且呈现规律性变化,其抑菌效果随浓度上升而呈上升趋势。在浓度为 100 g/L 时,哈茨木霉菌抑菌率最高,为 53.43%。初步认定为商陆提

取液在 40 ~ 100 g/L(抑菌率 32. 17% ~ 53. 43%) 时具有显著作用 ($P<0. 05$)。在其余浓度均对哈茨木霉无明显抑菌效果 ($P>0. 05$)。其菌饼抑菌法实例图见图 1。



注:第一排从左至右分别是对照组、10 g/L、20 g/L、30 g/L;第二排从左至右分别是 40 g/L、50 g/L、60 g/L、70 g/L;第三排从左至右分别是 80 g/L、90 g/L、100 g/L。

图 1 哈茨木霉抑菌平板(部分)

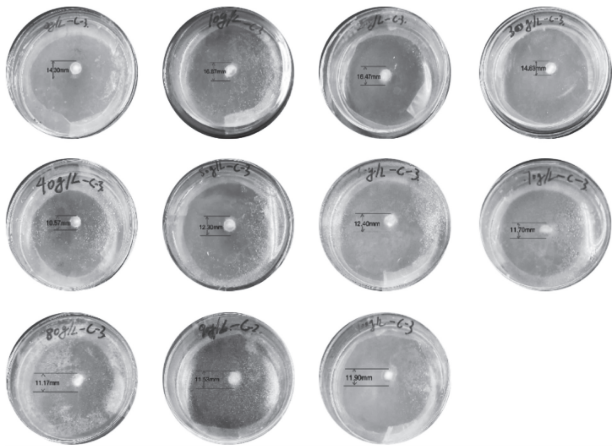
2. 1. 2 对层出镰孢菌的抑制结果分析

商陆水提液对层出镰孢菌的抑菌实验值见表 2。水提液对层出镰孢菌具有较好的抑菌效果,且呈现规律性变化,其抑菌效果随浓度上升而呈上升趋势。在浓度为 100 g/L 时,层出镰孢菌抑菌率最高,为 53. 25%。初步认定为商陆提取液在 30 ~ 100 g/L(抑菌率 28. 50% ~ 53. 25%) 时具有显著作用 ($P<0. 05$)。在其余浓度均对层出镰孢菌无明显抑菌效果 ($P>0. 05$)。其菌饼抑菌法实例图见图 2。

表 2 不同浓度商陆提取液作用下层出镰孢菌菌丝平均值

浓度/ (g/L)	平均值
0	17. 07±1. 578a
10	15. 36±0. 758ab
20	15. 11±1. 011abc
30	13. 86±0. 406bcd
40	13. 42±1. 738bcd
50	12. 84±0. 433bcd
60	12. 54±0. 515bcd
70	12. 41±0. 380cd
80	11. 97±0. 436d
90	11. 63±0. 340d
100	11. 07±0. 441d

注:表中数值为平均值±标准误差;标准误差后的字母表示数据差异显著性 ($P<0. 05$)。



注:第一排从左至右分别是对照组、10 g/L、20 g/L、30 g/L;第二排从左至右分别是 40 g/L、50 g/L、60 g/L、70 g/L;第三排从左至右分别是 80 g/L、90 g/L、100 g/L。

图 2 层出镰孢菌抑菌平板(部分)

2. 1. 3 对茄腐镰刀菌的抑制结果分析

商陆水提液对茄腐镰刀菌的抑菌实验值见表 3。水提液对茄腐镰刀菌具有较好的抑菌效果,且呈现规律性变化,其抑菌效果随浓度上升而呈上升趋势。在浓度为 100 g/L 时,茄腐镰刀菌抑菌率最高,为 59. 37%。初步认定为商陆提取液在 10 ~ 100 g/L(抑菌率 14. 46% ~ 59. 37%) 时均具有显著作用 ($P<0. 05$)。其菌饼抑菌法实例图见图 3。

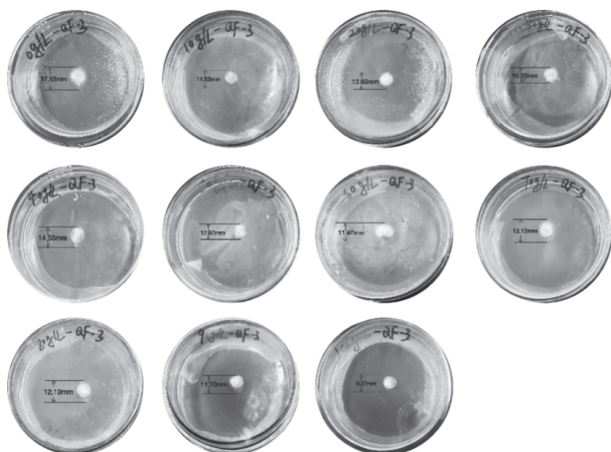
表 3 不同浓度商陆提取液作用下茄腐镰刀菌菌丝平均值

浓度/ (g/L)	平均值
0	16. 71±0. 427a
10	15. 13±0. 306b
20	14. 47±0. 532bc
30	13. 97±0. 643bcd
40	13. 70±0. 611bcd
50	13. 16±0. 472cde
60	13. 02±0. 583cde
70	12. 73±0. 265de
80	12. 42±0. 517de
90	12. 00±0. 611e
100	10. 23±0. 500f

注:表中数值为平均值±标准误差;标准误差后的字母表示数据差异显著性 ($P<0. 05$)。

2. 2 镜检结果与分析

用商陆水提液抑制后的 3 种霉菌置于显微镜下镜检后,镜检结果见图 4。从图中可以看出以下结果。



注:第一排从左至右分别是对照组、10 g/L、20 g/L、30 g/L;第二排从左至右分别是 40 g/L、50 g/L、60 g/L、70 g/L;第三排从左至右分别是 80 g/L、90 g/L、100 g/L。

图 3 茄腐镰刀菌抑菌平板(部分)

(1) 哈茨木霉菌处理组相较于对照组,其孢子分散更明显、排列更加混乱,不能形成浓密且正常菌丝,孢子丝发生变形,表明商陆水提液可以有效抑制哈茨木霉的生长,具有较好的抑菌效果。

(2) 层出镰孢菌处理组相较于对照组,其单个菌变宽变短、个体发生显著变化,不再交错纵横。表明商陆水提液可以抑制层出镰孢菌的生长,具有较好的抑菌效果。

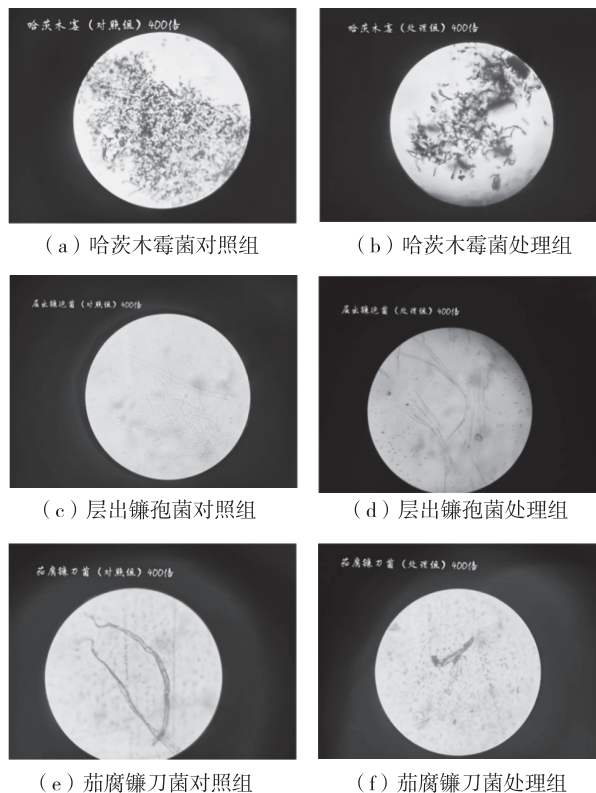
(3) 茄腐镰刀菌处理组相较于对照组,其单个个体变短变粗,弯曲程度减弱且由镰刀状转变为弯曲丝状,单个个体发生显著变化。表明商陆水提液可以抑制茄腐镰刀菌的生长,具有较好的抑菌效果。

3 小结

3.1 不同霉菌抑菌效果讨论

本研究利用水提法提取商陆提取液,开展其对霉菌的抑制实验。商陆水提液对哈茨木霉、层出镰孢菌及茄腐镰刀菌都具有一定程度的抑菌效果,对不同霉菌抑制效果有较大差异。

(1) 哈茨木霉菌抑菌效果分析。商陆水提液对哈茨木霉的最高抑制率为 53.43%,相较于王刚正^[7]所做实验的商陆全草水煎液对绿色木霉菌抑制率 92.9%的结果,存在差距的原因可能为:a)不同品种商陆存在个体差异;b)绿色木霉和哈茨木霉存在抗性差异,哈茨木霉耐受性可能更高。



注:以上图片均为显微镜下放大400倍图片。

图 4 镜检结果

(2) 层出镰孢菌抑菌效果分析。商陆水提液对层出镰孢菌的最高抑制率为 53.25%,与袁冬梅^[10]所做实验的大蒜鳞茎浸提液对层出镰孢菌抑制率最高到 56.08%的结果相差不大。可尝试用商陆水煮液替代大蒜鳞茎浸提液进行层出镰孢菌的抑制。

(3) 茄腐镰刀菌抑菌效果分析。商陆水提液对茄腐镰刀菌的最高抑制率为 59.37%,这个效果间于袁冬梅^[10]所做的大蒜鳞茎浸提液对该菌抑制率不足 50%,余凤玉^[11]所做的茶枯发酵液对茄腐镰刀菌抑制率最高到 82.39%的结果。可能是茶枯经过发酵后,抑菌物质含量有所增加所致。

3.2 结论

试验显示,合适浓度的商陆提取液可以抑制哈茨木霉菌、层出镰孢菌、茄腐镰刀菌 3 种霉菌的生长,并应用于食品、食用菌生产中,减少化学试剂的使用量,降低化学试剂对生产造成的影响。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 徐耀波,文成敬. 平菇和香菇代料栽培中污染真菌的研究[J]. 中国食用菌,2004(2):45-47.

基于网络药理学-分子对接技术探讨高粱泡叶抗炎作用的分子机制*

韦美燕¹, 韩伟¹, 李哲¹, 田孟斌¹, 吴静澜^{1,2,3▲}, 陈汝玲⁴

(¹ 贵州中医药大学 药学院, 贵州 贵阳 550025; ² 国家苗药工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550025; ³ 贵州中药炮制与制剂工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550025; ⁴ 罗定市中医院, 广东 罗定 527200)

摘要: 目的: 本研究旨在采用网络药理学与分子对接技术, 揭示高粱泡叶在抗炎治疗中的潜在作用机制。方法: 通过网络药理学数据库筛选识别出高粱泡叶关联的抗炎靶点, 并进行蛋白互作网络(PPI)、基因本体论(GO)富集分析及京都基因与基因组百科全书(KEGG)通路分析; 同时, 利用 Autodock 软件对关键靶点进行分子对接模拟。结果: 从高粱泡叶中鉴定了 30 种活性成分, 涉及 493 个潜在靶点和 2004 个疾病相关靶点, 其中直接参与抗炎治疗的核心靶点共计 131 个, 如 IL-6、TNF- α 、IL-1 β 、ALB、AKT1、EGFR、SRC、TP53、ATAT3、PTGS2 等。GO 功能富集与 KEGG 通路分析表明, 高粱泡叶抗炎效应可能与 PI3K-AKT 信号通路、MAPK 信号传导途径以及 cAMP 信号通路在内的 170 条生物通路密切相关。分子对接实验证实这些主要活性成分与相应靶蛋白间具有良好的结合亲和力。结论: 高粱泡叶可能通过多种成分、多靶点、多信号通路发挥抗炎作用与机制, 为深入研究高粱泡叶及其活性成分抗炎的作用机制提供实验依据和理论参考。

关键词: 高粱泡叶, 网络药理学, 分子对接, 抗炎, 分子机制

中图分类号: R285 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0033-09

Molecular mechanism of the anti-inflammatory effect of *Rubus lamberianus* Ser leaves based on network pharmacology and molecular docking*

WEI Meiyang¹, HAN Wei¹, LI Zhe¹, TIAN Mengbin¹, WU Jinglan^{1,2,3▲}, CHEN Ruling⁴

[2] 孟祥龙, 张朔生, 孙珊珊. 不同蒸制方法及蒸制时间对商陆中商陆皂苷甲含量动态变化影响的研究[J]. 药物分析杂志, 2012, 32(11): 1968-1971.

[3] 郭秀欢, 雷艳, 黄宏威, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MS/MS 和网络毒理学的商陆致肝损伤潜在毒性成分及作用机制探讨[J]. 药物评价研究, 2023, 46(1): 37-49.

[4] 王鹏程, 王秋红, 赵珊, 等. 商陆化学成分及药理作用和临床应用研究进展[J]. 中草药, 2014, 45(18): 2722.

[5] 王莺杰, 李思学. 商陆的药理作用研究及展望[J]. 生物化工, 2019, 5(5): 137-139.

[6] 杨帮. 中药植物美洲商陆抗菌活性及作用机理研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.

[7] 王刚正, 曹现涛, 边银丙. 36 种植物提取物液对食用菌两种竞争性木霉菌的抑制作用[J]. 中国食用菌, 2015, 34(2): 74-76.

[8] 蒙思好. 草珊瑚内生真菌的抑菌活性及活性物质研究

[D]. 桂林: 广西师范大学, 2022.

[9] 陈建妙, 曹英建, 瞿金旺, 等. 哈茨木霉对黑麦草气体交换和生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2023(4): 53-59.

[10] 袁冬梅, 于静, 迟玉成, 等. 大蒜鳞茎浸提液对花生根腐病菌的抑制作用[J]. 山东农业科学, 2022, 54(2): 134-138.

[11] 余凤玉, 邢益政, 刘小玉, 等. 茶枯发酵液对花生果腐病菌的拮抗作用[J]. 中国热带农业, 2022(3): 44-49.

收稿日期: 2023-06-12; 修回日期: 2023-06-15

基金项目: 大学生创新创业项目(S202114389131)。

作者简介: 邱傅懿, 成都师范学院生物科学 2019 级学生。

▲通讯作者: 邱成书, 男, 副教授, 博士, 主要从事资源微生物和环境微生物研究。

(¹School of Pharmacy, Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China; ²National Engineering Research Center of Miao Medicine, Guiyang 550025, China; ³Guizhou Engineering Research Center of Processing and Preparation of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China; ⁴Luoding Hospital of Traditional Chinese Medicine, Luoding 527200, China)

Abstract: The aim of this study is to reveal the potential action mechanism of the anti-inflammatory effect of *Rubus lamberianus* Ser leaves by using network pharmacology and molecular docking technology. The anti-inflammatory targets associated with *Rubus lamberianus* Ser leaves were screened and identified through the network pharmacology database, and protein-protein interaction network (PPI), gene ontology (GO) enrichment analysis and Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (KEGG) pathway analysis were performed. Meanwhile, molecular docking simulation of the key targets was carried out using Autodock software. Thirty active ingredients were identified in *Rubus lamberianus* Ser leaves, involving 493 potential targets and 2004 disease-related targets, of which a total of 131 core targets were directly involved in anti-inflammatory therapy, including IL-6, TNF- α , IL-1 β , ALB, AKT1, EGFR, SRC, TP53, ATAT3, PTGS2, etc. GO functional enrichment and KEGG pathway analysis indicated that the anti-inflammatory effect of *Rubus lamberianus* Ser leaves might be closely related to 170 biological pathways, including PI3K-AKT signaling pathway, MAPK signaling pathway, and cAMP signaling pathway. Molecular docking experiments confirmed that these main active ingredients have good binding affinity with the corresponding target proteins. In conclusion, *Rubus lamberianus* Ser leaves may exert anti-inflammatory effect through multiple components, targets, and signaling pathways. This study has provided experimental basis and theoretical reference for the in-depth study on the anti-inflammatory mechanism of *Rubus lamberianus* Ser leaves and its active components.

Keywords: *Rubus lamberianus* Ser leaves, network pharmacology, molecular docking, anti-inflammatory, molecular mechanism

炎症,作为一种机体对病原体入侵或组织损伤作出的天然防御反应机制,体现为一个多元而复杂的病理生理进程^[1]。其核心临床表现涵盖了疼痛感、局部红肿、体温升高、组织肿胀以及可能发生的浮肿症状^[2]。机体的免疫响应犹如一把双面刃:一方面,它扮演着保护角色,有效对抗感染及各种刺激源,助力身体恢复健康;然而另一方面,如果这种免疫反应失去平衡调控,则有可能转化为对机体自身功能和结构的破坏力量^[3]。在现代医疗实践中,非甾体抗炎药物常被用来控制和缓解炎症症状,但长期依赖这些药物治疗会产生胃肠道黏膜损害(如溃疡)、肾功能损害乃至出血等不良后果^[4-5]。与此同时,科研证据表明中药资源中富含多样化的活性成分,并且具有针对多种炎症途径的干预靶点,在抗炎方面展现出显著的治疗价值^[6-7]。因此,从中药宝库中发掘出疗效确切、副作用较小的新型抗炎制剂是一项至关重要的研究任务。

高粱泡叶是蔷薇科植物高粱泡(*Rubus Lamber-tianus* Ser)的干燥叶,具备独特的芳香气息,药理作

用显著,可以帮助改善炎症,如感冒、肺炎、皮炎、黄水疮等^[8]。通过 UPLC-Q-Orbtrap-MS 技术,在前期的实验研究中,发现高粱泡叶含有黄酮、三萜、鞣质和酚酸等化学成分^[9-10]。其中,槲皮素、山柰酚等黄酮类和酚酸类成分均具有抗炎活性^[11-13]。然而,对于高粱泡叶的化学成分,特别是抗炎活性物质的研究仍然有限,其药效机制有待进一步探索。

网络药理学作为系统生物学理论的重要延伸,从多元、整体的角度深入剖析药物与疾病相互作用的复杂机制。鉴于此,本研究选择将网络药理学方法应用于高粱泡叶这一中药资源的“中药-成分-靶点”三维关联网络构建中,旨在揭示并挖掘出具有显著抗炎活性的关键有效成分,从而为合理开发和高效利用高粱泡叶这一宝贵的药用资源提供坚实的科学依据^[14-16]。

1 资料与方法

1.1 高粱泡叶活性成分的获取

在前期研究中,课题组对高粱泡叶进行了乙醇提取,并利用 UPLC-Q-Orbitrap-MS 技术对其成分进行了系统分析鉴定,从而成功获取了高粱泡叶中的 61 种化学成分^[10],将所获取化合物结构输入 SwissADME 平台(<http://www.swissadme.ch/>)。设置潜在核心化合物的标准为:①肠胃吸收为“High”,表明成分具备良好口服生物利用度,可被吸收;②设置 5 类药性预测(Lipinski、Ghose、Veber、Egan、Muegge)结果有 2 个及 2 个以上为“Yes”^[17]。其后通过文献核查根据筛选标准所排除的化合物,若化合物药理作用明显且与研究主题相关,仍予以纳入,最终获得研究主题相关的潜在化合物。

1.2 高粱泡叶靶点的预测

将高粱泡叶的有效成分输入 PubChem 获取其 SMILES 号和结构式,借助 Swiss Target Prediction 数据库预测人类靶点,并通过 Uniprot 转换为标准基因名。利用 Cytoscape 构建出“有效成分-靶点”网络图,直观展示各成分与潜在靶点间的相互作用关系。

1.3 高粱泡叶抗炎靶点的收集

针对“炎症”这一关键词,在 GeneCards、DisGeNET、TTD 及 OMIM 四大数据库中进行系统搜索,以确定与抗炎作用相关的靶点。经过 Uniprot 数据库标准化处理后的活性成分靶点数据,与从疾病研究中获取的靶点信息合并后,被导入 Venny 2.1 在线工具(网址:<https://bioinfogp.cnb.csic.es/venny/>)。通过该工具绘制韦恩图,共同出现的靶点在图中得以显现,并被识别为药物潜在治疗炎症疾病的靶点。

1.4 药物治疗疾病的靶蛋白互作关系的构建

将识别出的与药物治疗疾病相关的潜在靶点输入到 STRING 蛋白质相互作用数据库(网址:<https://string-db.org/>),并在数据库中限定物种为“Homo sapiens”(人类),同时设定筛选条件为 Combined score(综合得分)不低于 0.9 的靶蛋白。基于这些参数,系统将会构建并展示一个反映这些靶蛋白之间相互作用关系的蛋白-蛋白相互作用网络图(PPI network)。

1.5 关键靶点网络的构建

采用 Cytoscape 3.7.1 软件平台,导入详实的互

作蛋白数据集,并通过系统化筛选流程,甄选出 Degree 值显著高于全体蛋白度中位数两倍且同时兼备较高的 Betweenness Centrality(BC)与 Closeness Centrality(CC)属性的靶蛋白作为药物抗炎研究的关键候选分子。基于此严格标准确定的核心靶点集合,绘制其对应的交互网络图谱,在该图谱中,节点精确表示各个蛋白质实体,而连线则直观展现它们之间的相互作用联系。为进一步揭示潜在的生物学意义和功能结构,运用内置的 NetworkAnalyzer 分析工具,对这些关键靶点构建的网络进行了深入的拓扑结构解析,特别强调依据节点度数值的大小进行排序及量化分析。

1.6 “成分-靶点-通路”网络的构建

首先将经过严格鉴定的抗炎关键靶点数据导入权威生物信息分析平台 DAVID 数据库(<http://david.ncifcrf.gov/>),并在此基础上进行细致筛选,仅保留显著富集于人源通路(Homo sapiens)下的 KEGG 通路结果,且要求其 P 值须低于 0.01,并通过 FDR 校正后的阈值亦不得超过 0.01,以确保统计学上的高度显著性。接下来,将这些具有重要生物学意义的关键靶点与相关的活性成分及其经上述严格筛选后得到的 KEGG 富集通路进行整合。最后运用 Cytoscape 3.7.1 软件,构建“成分-靶点-通路”交互网络图谱。该网络图不仅直观展示了活性成分如何作用于特定靶点进而影响相关信号通路,同时也为深入探索药物抗炎效应背后的分子机制提供了有力支持和可视化工具。

1.7 GO 生物过程富集分析

将所识别出的关键靶点信息导入至权威生物信息学资源——DAVID 数据库(官方网址:<http://david.ncifcrf.gov/>),并针对性地设置了物种参数为“Homo sapiens”,旨在对人类相关通路进行深入探究。基于此设定,严格筛选出仅符合统计显著性标准的靶点数据,即其 P 值需低于 0.01,并且经过多重假设检验校正后的 FDR 阈值不得超过 0.01。对于通过上述严苛筛选的标准靶点,利用 DAVID 数据库的强大功能,从生物过程(Biological Process, BP)、分子功能(Molecular Function, MF)以及细胞组分(Cellular Component, CC)三个核心的基因本体论(GO)分类视角,进行了全面而细致的功能富集分析,旨在揭示这些关键靶点在复杂生物学系统中的

潜在作用机制及功能定位。

1.8 分子对接分析

根据构建的活性成分-靶点相互作用网络图,选取 Degree 排名前五的有效化合物作为进一步研究对象,并运用 obogui 工具对其结构进行了优化处理,以 MOL2 格式进行导出。与此同时,对筛选出的关键蛋白质靶点,通过 PDB 数据库查找并下载了最适合对接的三维蛋白结构文件,以 PDB 格式存储。在进行分子对接之前,团队利用 PyMOL 软件对所有目标受体蛋白进行了必要的预处理步骤。接着,借助 AutoDock 软件平台,对这些蛋白结构进行脱水、氢原子添加等操作,并将其设定为对接过程中的受体,随后将处理后的受体以 PDBQT 格式输出保存。同时,对选定的有效成分进行氢原子添加,并设置其为对接过程中的配体;在此过程中,还进行了扭转键检测和选择,并同样以 PDBQT 格式导出。为了实施精确的分子对接计算,预先设置了合适的对接 Box,并使用 AutoDock Vina 软件进行对接打分运算,依次将选中的 5 个活性成分逐一与各受体蛋白进行对接分析。最后,对接结果采用 PyMOL 软件进行了可视化呈现,从而直观地揭示了高粱泡叶有效成分与关键蛋白靶点之间的潜在结合模式及亲和力。

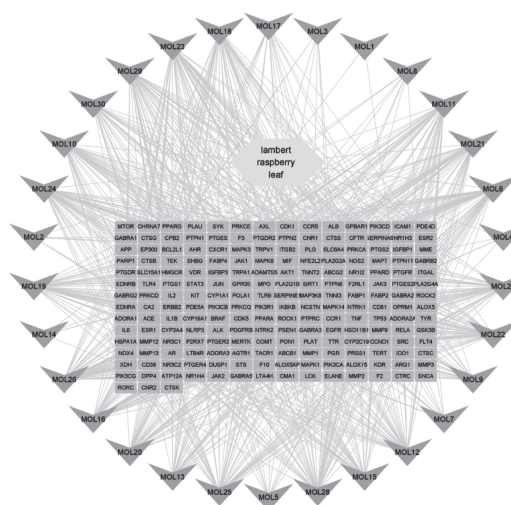
2 结果

2.1 活性成分获取与靶点筛选

根据“胃肠吸收及 5 类药性预测”两个条件,对前期从高粱泡叶乙醇提取物中鉴定的 61 种化学成分进行筛选,得到 30 个符合条件的活性成分,结果见表 1。对筛选出的 30 种有效成分通过 Swiss Target Prediction 数据库进行靶点预测,选取出评分高的靶点,并利用 Uniprot 数据库将基因名标准化,得到高粱泡叶靶点共 493 个。将“有效成分-靶点”数据导入 Cytoscape 3.7.1 软件构建网络图(图 1),并按 Degree 值排序,发现其中 64 个靶点的 Degree 值 ≥ 10 ,包括 IL-6、TNF- α 、IL-1 β 、ALB、AKT1、EGFR、SRC、TP53、ATAT3、PTGS2 等关键靶点。这一结果揭示了中药多成分作用于多个生物靶点的现象,体现了中药多途径协同效应的特点。

表 1 高粱泡叶的有效成分

编号	英文名称	中文名称	相对分子质量	分子式	胃肠吸收	5 类药性预测
MOL1	adenine	腺嘌呤	135.13	C ₅ H ₅ N ₅	高	3
MOL2	leucine	L-亮氨酸	131.17	C ₆ H ₁₃ NO ₂	高	3
MOL3	L-phenylalanine	L-苯丙氨酸	165.19	C ₉ H ₁₁ NO ₂	高	4
MOL4	Protocatechuic aldehyde	原儿茶醛	138.12	C ₇ H ₆ O ₃	高	4
MOL5	cantharidin	斑蝥素	196.2	C ₁₀ H ₁₂ O ₄	高	4
MOL6	caffeic acid	咖啡酸	180.16	C ₉ H ₈ O ₄	高	4
MOL7	Ethyl gallate	没食子酸乙酯	198.17	C ₉ H ₁₀ O ₅	高	4
MOL8	Linderalactone	乌药内酯	224.28	C ₁₅ H ₁₆ O ₃	高	5
MOL9	ellagic acid	鞣花酸	302.19	C ₁₄ H ₆ O ₈	高	3
MOL10	Kaempferol	山奈酚	286.24	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	高	5
MOL11	Morin	桑黄素	302.23	C ₁₅ H ₁₀ O ₇	高	5
MOL12	quercetin	槲皮素	302.23	C ₁₅ H ₁₀ O ₇	高	5
MOL13	cyperone	香附酮	218.33	C ₁₅ H ₂₂ O	高	4
MOL14	salicylic acid	水杨酸	138.12	C ₇ H ₆ O ₃	高	3
MOL15	azelaic acid	壬二酸	188.22	C ₉ H ₁₆ O ₄	高	4
MOL16	abietic acid	松香酸	302.5	C ₂₀ H ₃₀ O ₂	高	5
MOL17	p-Hydroxycinnamic acid	对羟基肉桂酸	164.16	C ₉ H ₈ O ₃	高	4
MOL18	genistein	染料木素	270.24	C ₁₅ H ₁₀ O ₅	高	5
MOL19	hydroxygenkwanin	羟基芫花素	300.26	C ₁₆ H ₁₂ O ₆	高	5
MOL20	Artemisinic acid	青蒿酸	234.33	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	高	5
MOL21	Acacetin	金合欢素	284.26	C ₁₆ H ₁₂ O ₅	高	5
MOL22	Nevadensin	石吊兰素	344.3	C ₁₈ H ₁₆ O ₇	高	5
MOL23	Genkwanin	芫花素	284.26	C ₁₆ H ₁₂ O ₅	高	5
MOL24	pectolarigenin	柳穿鱼黄素	314.29	C ₁₇ H ₁₄ O ₆	高	5
MOL25	jaceosidin	棕矢车菊素	330.29	C ₁₇ H ₁₄ O ₇	高	5
MOL26	periplogenin	杠柳苷元	390.5	C ₂₃ H ₃₄ O ₅	高	5
MOL27	Quercetin	槲皮素	302.23	C ₁₅ H ₁₀ O ₇	高	5
MOL28	glycyrrhethinic acid	甘草次酸	470.7	C ₃₀ H ₄₆ O ₄	高	2
MOL29	echinocystic acid	刺囊酸	472.7	C ₃₀ H ₄₈ O ₄	高	2
MOL30	wilforlide A	雷公藤内酯甲	454.7	C ₃₀ H ₄₆ O ₃	高	2



注:棱形代表药物,翼形代表活性成分,方形代表靶点。

图 1 “药物-活性成分-靶点”网络

2.2 抗炎靶点和有效成分靶点的收集

在炎症相关靶点的系统性收集过程中,课题组利用 GeneCards、DisGeNET、TTD 及 OMIM 等权威数据库资源,共汇集了 2004 个与炎症密切相关的生物学靶点数据。为了揭示这些炎症靶点与前期通过液质联用分析筛选出的高粱泡叶乙醇提取物活性成分之间的关联性,运用韦恩图进行了交叉对比分析。这一分析表明,在所获得的大规模炎症靶点库中,有 199 个靶点与之前通过 Pubchem 和 SwissTarget Prediction 平台预测得出的 493 个活性成分潜在作用靶点相重叠。这一关键发现意味着这 199 个共有靶点可能是高粱泡叶发挥抗炎活性的核心作用位点,具体靶点列表及相互关系已直观地呈现在图 2 所示的韦恩图中,进一步印证了中药多成分协同作用于多种炎症相关生物靶标的复杂网络特性。

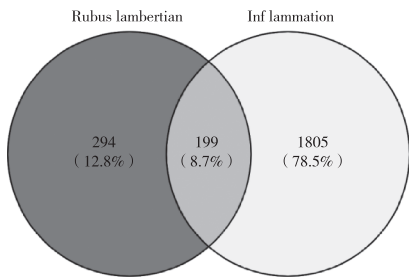


图 2 活性成分靶点与疾病靶点的韦恩图

2.3 PPI 图和关键靶点网络的构建

为研究高粱泡叶抗炎机制,从 STRING 数据库提取 199 个靶点并进行 PPI 分析(图 3(a))。通过 Cytoscape 构建的可视化网络(图 3(b))包含 199 个节点、3626 条边,平均节点度为 36.4。PPI 网络中显示的节点越大及颜色越深则其度值就越大,表明该靶点关联性好且为关键靶点,如 IL-6、TNF- α 、IL-1 β 、ALB、AKT1、EGFR、SRC、TP53、STAT3 和 PTGS2 等。

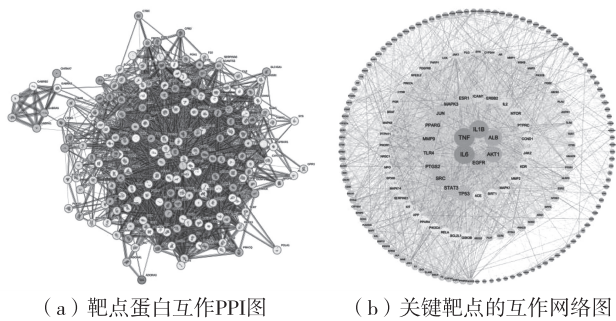


图 3 PPI 图和关键靶点网络图

2.4 KEGG 与 GO 富集分析

将 199 个关键靶点导入 DAVID 数据库进行 KEGG 信号通路富集分析,发现其中与高粱泡叶抗炎作用密切相关的信号通路共有 170 条,主要包括 PI3K-AKT、MAPK 及 cAMP 等重要通路,具体见表 2 中 *P* 值和 *FDR* 最小的前 20 项以及图 4、图 5、图 6。同时,GO 富集分析揭示了多个生物过程参与其中:在 858 条生物过程中,炎症反应、MAPK 级联激活的正调控、细胞凋亡抑制以及 ERK1/2 级联激活的正调控尤为突出;在 111 条细胞组成相关项目中,质膜胞质侧外部成分、胞质溶胶、神经元投射结构、局灶性粘连区域、细胞质核周区以及神经元胞体结构等功能区域扮演着关键角色;而在 193 条分子功能类别中,蛋白结合、ATP 结合、蛋白激酶活性(包括丝氨酸/苏氨酸蛋白激酶)等功能尤为重要,具体见图 4 所展示的 GO 排名前 20 项的结果。这些数据共同表明药物治疗疾病是一个涉及多种生物过程、多条信号传导通路协同运作的过程。

表 2 KEGG 信号通路(*P* 值和 *FDR* 最小的前 20 个)

ID	KEGG 信号通路	Count	<i>P</i>	Benjamini	<i>FDR</i>
hsa05200	Pathways in cancer	52	1.93E-20	3.95E-18	1.61E-18
hsa05417	Lipid and atherosclerosis	33	2.00E-18	1.72E-16	7.01E-17
hsa04151	PI3K - Akt signaling pathway	32	3.04E-11	2.45E-10	9.98E-11
hsa04080	Neuroactive ligand-receptor interaction	31	2.56E-10	1.74E-09	7.07E-10
hsa05163	Human cytomegalovirus infection	29	4.01E-14	7.96E-13	3.24E-13
hsa05167	Kaposi sarcoma-associated herpesvirus infection	28	7.16E-15	2.31E-13	9.39E-14
hsa05205	Proteoglycans in cancer	28	2.89E-14	6.78E-13	2.76E-13
hsa05171	Coronavirus disease - COVID-19	27	4.16E-12	4.47E-11	1.82E-11
hsa05131	Shigellosis	27	1.76E-11	1.51E-10	6.15E-11
hsa04010	MAPK signaling pathway	27	1.41E-09	7.44E-09	3.03E-09
hsa05010	Alzheimer disease	27	2.14E-07	7.18E-07	2.92E-07
hsa04933	AGE-RAGE signaling pathway in diabetic complications	26	3.06E-20	3.95E-18	1.61E-18
hsa05207	Chemical carcinogenesis - receptor activation	26	3.57E-12	4.00E-11	1.63E-11

续表 2

ID	KEGG 信号通路	Count	P	Benjamini	FDR
hsa05161	Hepatitis B	25	6.20E-14	1.14E-12	4.65E-13
hsa05166	Human T-cell leukemia virus 1 infection	25	6.43E-11	4.88E-10	1.99E-10
hsa04014	Ras signaling pathway	24	1.32E-09	7.26E-09	2.95E-09
hsa05235	PD-1 expression and PD-1 checkpoint pathway in cancer	23	8.26E-18	4.83E-16	1.96E-16
hsa05215	Prostate cancer	23	6.05E-17	2.60E-15	1.06E-15
hsa05135	Yersinia infection	23	1.35E-13	2.33E-12	9.46E-13
hsa05206	MicroRNAs in cancer	23	9.11E-07	2.67E-06	1.09E-06

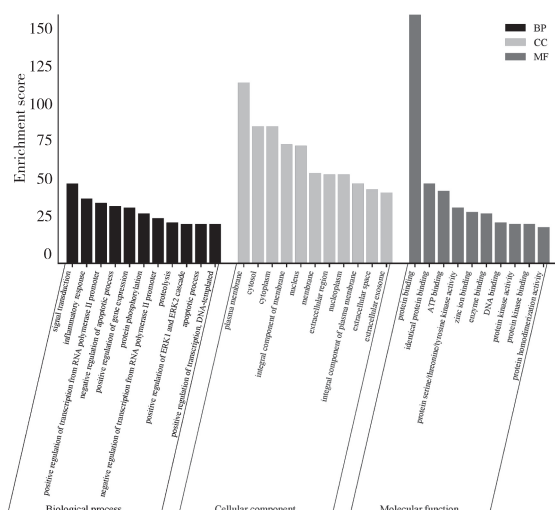


图 4 GO 富集分析(GO 排名前 10)

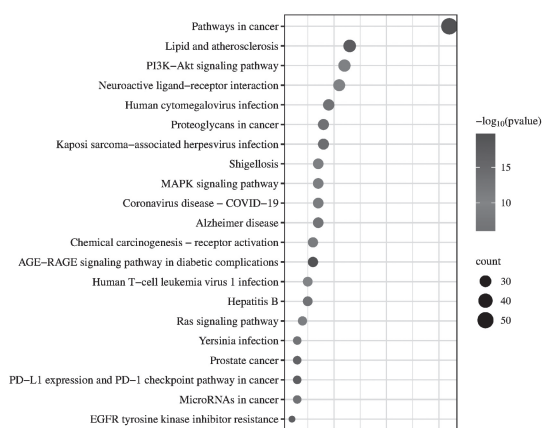


图 5 KEGG 通路分析

2.5 “成分-靶点-通路”网络图的构建

在 DAVID 数据库中执行严格的统计学筛选后,确定了 170 条显著富集的 KEGG 信号通路,这些通路的 P 值均低于 0.01,且校正后的 FDR 阈值不高

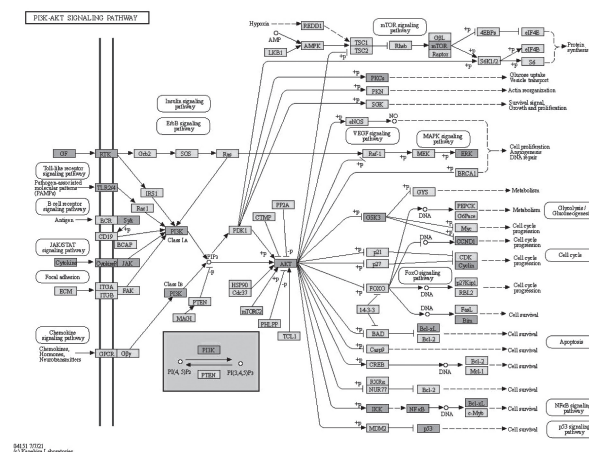
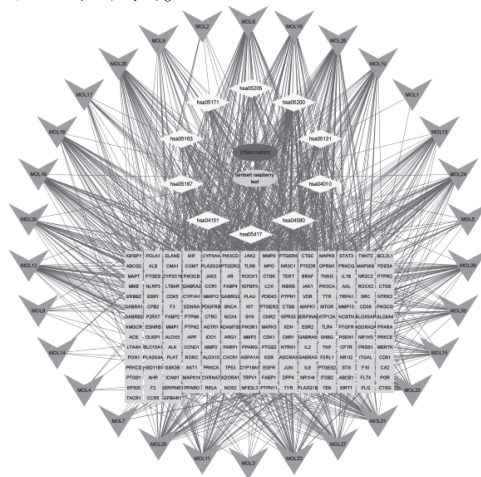


图 6 高粱泡叶发挥抗炎作用相关通路中的作用靶点

于 0.01。为了探究这些生物通路与已识别出的活性成分关键作用靶点之间的内在联系,将这些筛选出的通路数据和之前关联到的活性成分的关键靶点信息整合起来。利用 Cytoscape 3.7.1 这一先进的网络构建工具,构建“活性成分-核心靶蛋白-调控信号通路”交互网络模型,并将其可视化展示于图 7 中,以直观地揭示有效成分如何通过其关键靶点参与并调节众多重要的生物学过程。根据 Degree 值对靶点进行排序,共有 69 个靶点的 Degree 值 ≥ 40 ,如 IL-6、TNF- α 、IL-1 β 、ALB、AKT1、EGFR、SRC、TP53、STAT3 和 PTGS2 等。在网络图中,靶点的 Degree 值越大,意味着其在“成分-靶点-通路”关系中的重要性越高,表明其与活性成分及信号通路之间的互动更为密切,因此更可能是高粱泡叶抗炎效果的核心调控靶点。



注:上椭圆代表抗炎,下椭圆代表药物,翼形代表化合物,方形代表靶点,棱形代表通路。

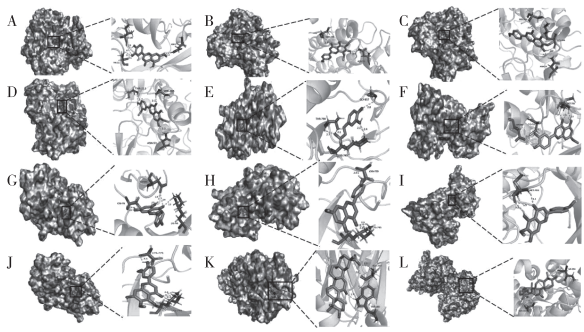
图 7 “成分-靶点-通路”图

2.6 分子对接

为了深入探究高粱泡叶中活性成分与关键靶标的相互作用机制,本研究采用有效成分靶标网络和蛋白质-蛋白质相互作用(PPI)网络分析手段,将其度值前 10 的大分子靶点(IL-6、TNF- α 、IL-1 β 、ALB、AKT1、EGFR、SRC、TP53、STAT3 和 PTGS2)与度值前 10 的小分子(periplogenin(杠柳苷元)、glycyrrhetic acid(甘草次酸)、caffeic acid(咖啡酸)、pectolinarigenin(柳穿鱼黄素)、Genkwanin(芫花素)、Nevadensin(石吊兰素)、Hydroxygenkwanin(羟基芫花素)、echinocystic acid(刺囊酸)、Acacetin(金合欢素)、jaceosidin(棕矢车菊素))进行整理,并进行分子对接处理,结果大分子(IL1B、ALB、SRC、TP53、STAT3 和 PTGS2)与排名前 10 的小分子在进行分子对接时,没有氢键展示;小分子(periplogenin(杠柳苷元)和 echinocystic acid(刺囊酸))与排名前 10 的大分子,在进行分子对接时,没有氢键展示。最终筛选出 8 种具有代表性的有效成分,并针对其中结合程度最为显著的前 4 个核心靶点进行了分子对接验证,见表 3。当计算得出的结合能数值小于零时,这表明靶基因与所对应的有效成分之间存在自发结合的可能性。通常,若结合能值在-5.0 kcal/mol 以下,则认为该结合效果较为理想;而当结合能达到或低于-7.0 kcal/mol 阈值时,则意味着其结合活性尤为强烈。根据表 3 和图 8 所示的分子对接实验结果,表明 8 种活性化合物对 AKT1、TNF- α 、IL-6、EGFR 均成功对接,具有较低的结合能,表明化合物与靶点结合稳定。

表 3 高粱泡叶中有效成分与关键靶点对接结合能

编号	有效成分	靶点	结合能 /(kcal/mol)
MOL19	Hydroxygenkwanin(羟基芫花素)	AKT1	-6.36
MOL22	Nevadensin(石吊兰素)	AKT1	-5.99
MOL24	pectolinarigenin(柳穿鱼黄素)	AKT1	-2.26
MOL25	jaceosidin(棕矢车菊素)	AKT1	-5.53
MOL6	caffeic acid(咖啡酸)	EGFR	-4.82
MOL19	Hydroxygenkwanin(羟基芫花素)	EGFR	-5.99
MOL21	Acacetin(金合欢素)	EGFR	-5.95
MOL23	Genkwanin(芫花素)	EGFR	-7.03
MOL24	pectolinarigenin(柳穿鱼黄素)	EGFR	-5.67
MOL25	jaceosidin(棕矢车菊素)	EGFR	-5.47
MOL28	glycyrrhetic acid(甘草次酸)	IL-6	-7.38
MOL28	glycyrrhetic acid(甘草次酸)	TNF- α	-6.63



注:A:19-AKT1, B:22-AKT1, C:24-AKT1, D:25-AKT1, E:6-EGFR, F:19-EGFR, G:21-EGFR, H:23-EGFR, I:24-EGFR, J:25-EGFR, K:28-IL-6, L:28-TNF- α 。

图 8 活性成分与核心靶点分子对接结果

3 讨论

运用网络药理学方法进行分析后,揭示出高粱泡叶在抗炎过程中的作用机制与其对细胞凋亡的抑制密切相关,这与 PI3K-AKT 信号通路的调控密不可分。有研究文献指出,在炎症刺激条件下,外部炎症因子能够触发 PI3K 活性上升,进而激活下游关键激酶 AKT^[18-19],这一系列事件发生在连接于细胞内 C 端受体的信号传导过程中。进一步研究表明,被激活的 PI3K/AKT 信号通路在生物学功能上发挥着促进细胞存活的作用,它通过降低氧化应激水平、抑制炎症相关细胞因子的生成,从而有效地减轻细胞凋亡的程度^[20-22]。因此,高粱泡叶可能通过调节这一信号通路,实现其在抗炎和抑制细胞凋亡方面的积极作用。

本研究发现 glycyrrhetic acid(甘草次酸)与炎症标志物 IL-6 及 TNF- α 之间的结合亲和力表现最佳,有研究表明甘草次酸在实验性大鼠关节炎模型中展示显著抗炎效果,有效抑制角叉菜胶诱发的炎症,且在马血清或鸡蛋白激发豚鼠过敏反应中表现出抑制作用,提示其在多种炎症及过敏性疾病治疗中的潜力^[23-24]。其抗炎与抗过敏机制可能与调节毛细血管通透性、抑制组胺效应及降低细胞刺激敏感性有关^[25]。在环磷酸腺苷诱导的炎症模型中,甘草次酸降低血清乳酸脱氢酶、IL-6 和 TNF- α 水平,同时减少小鼠膀胱组织中 caspase-3 和 PARP 阳性细胞数量,暗示其减轻组织损伤及抑制细胞凋亡能力。更重要的是,甘草次酸剂量依赖性抑制环磷酸腺苷诱导的 NF- κ B 和 TNF- α 上调^[26-29],为深入理解其抗

炎机制提供有力证据,并预示其在临床炎症性疾病治疗中的良好应用前景。

同时,Genkwanin(芫花素)与表皮生长因子受体(EGFR)的结合活性也呈现出高度优势,表明结合稳定程度最高。EGFR 及其家族酪氨酸激酶受体在癌症研究中至关重要,对肿瘤生长、分化、迁移具有决定性影响。EGFR 最早被证实与肿瘤细胞过度表达密切相关,且在多种上皮源恶性肿瘤中,约 30% 的患者出现 EGFR 异常过表达^[30-31]。临床已广泛应用 EGFR 靶向药物,如吉非替尼,通过精确干预 ErbB 信号通路抑制肿瘤增殖与存活^[32]。此外,EGFR 异常激活还与糖尿病引起的早期肠系膜血管功能障碍等疾病相关^[33-34]。据此推测,高粱泡叶可能通过调节 EGFR 及相关蛋白,干预 ErbB 信号传导,调控炎症相关细胞生长与分化,实现抗炎效果。此外,芫花素作为 O-甲基化黄酮,还具有显著抗炎活性,可浓度依赖性抑制 LPS 诱导的 NO 生成及降低 RAW264.7 巨噬细胞中 TNF- α 、IL-1 β 和 IL-6 水平。其主要抑制 AP-1 信号通路(尤其是 p38 和 JNK 磷酸化),对 NF- κ B 影响较小,且通过抑制 IKK、I κ B 和 NF- κ B 磷酸化,下调 iNOS、COX-2 和 IL-6 mRNA 表达来抗炎^[35-36]。这些数据有力地证实了这些化合物在潜在抗炎治疗中的重要作用。

综上所述,高粱泡叶抗炎机制包括两方面:①通过调整 PI3K、AKT、mTOR 等关键蛋白活性,激活 PI3K-AKT 通路,抑制细胞凋亡;②通过间接作用于 EGFR 相关信号通路,精细调控 ErbB 信号,限制炎症细胞增殖。网络药理学与分子对接技术的应用,系统展现了高粱泡叶通过作用于多元生物靶标及信号通路实现抗炎功效,为深化药效物质挖掘及药理机制研究提供了科学依据与理论支持。

参考文献【REFERENCES】

- [1] YEUNG Y T, AZIZ F, GUERRERO-CASTILLA A, et al. Signaling pathways in inflammation and anti-inflammatory therapies[J]. Current pharmaceutical design, 2018, 24(14): 1449-1484.
- [2] SALEEM U, AHMAD B, AHMAD M, et al. Anti-nociceptive, anti-inflammatory and anti-pyretic activities of latex and leaves methanol extract of Euphorbia helioscopia[J]. Asian Pacific journal of tropical disease, 2015, 5(4): 322-328.
- [3] VARELA M L, MOGILDEA M, MORENO I, et al. Acute inflammation and metabolism[J]. Inflammation, 2018, 41(4):

1115-1127.

- [4] CONFORTI F, SOSA S, MARRELLI M, et al. The protective ability of Mediterranean dietary plants against the oxidative damage; the role of radical oxygen species in inflammation and the polyphenol, flavonoid and sterol contents[J].

2011,41(6):1073-1093.

[19] 帕哈拉丁·白克热,阿不拉江·阿不都克力木,王海林,等.超声引导下射频消融术治疗原发性肝癌的疗效及对患者免疫功能与预后的影响[J].疑难病杂志,2019,12(6):514-519.

[20] 陈姗姗,白洁.超声引导下微波消融术联合 TACE 治疗特殊部位中晚期原发性肝癌的疗效及安全性探讨[J].山西医药杂志,2020,49(8):81-83.

[21] 于锋,万文博.超声引导下微波消融术联合 TACE 治疗特殊部位中晚期原发性肝癌的疗效及安全性分析[J].临床超声医学杂志,2019,21(6):479-480.

[22] 程晓雪,周臻涛,罗可.超声引导微波消融术个体化方案在危险部位肝癌治疗中的应用[J].中国医师杂志,2019,21(8):1139-1142.

[23] MIZUTANI K, KAMBARA T, MASUDA H, et al. Glycyrrhetic acid monoglucuronide (MGGR): biological activities[J]. Int Congr Ser, 1998, 1157: 225-235.

[24] 包金凤.甘草次酸药理作用研究进展[J].兰州医学院学报,1994(1):50-52.

[25] 赵欢.甘草次酸及其衍生物的抗炎活性研究及应用[D].天津:天津科技大学,2020.

[26] FINNEY R S, SOMERS G F, WILKINSON I H. The pharmacological properties of glycyrrhetic acid; a new anti-inflammatory drug[J]. J Pharm Pharmacol, 1958, 10(11): 687-695.

[27] KRAUS S D. Glycyrrhetic acid; a triterpene with antioestrogenic and anti-inflammatory activity[J]. J Pharm Pharmacol, 1960, 12: 300-306.

[28] KAO T C, SHYU M H, YEN G C. Glycyrrhizic acid and 18 β -glycyrrhetic acid inhibit inflammation via P3K/Akt/GSK3 β signaling and glucocorticoid receptor activation[J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(15): 8623-8629.

[29] FAN B, JIANG B, YAN S, et al. Anti-inflammatory 18 β -glycyrrhetinic acid derivatives produced by biocatalysis[J]. Planta Med, 2019, 85(1): 56-61.

[30] WEN L, XIN B, WU P, et al. An efficient combination immunotherapy for primary liver cancer by harmonized activation of innate and adaptive immunity in mice[J]. Hepatology, 2019, 69(6): 2518-2532.

[31] WANG J, ZHAO J P, WANG J J, et al. The impact of bile leakage on long-term prognosis in primary liver cancers after hepatectomy; a propensity-score-matched study[J]. Asian Journal of Surgery, 2020, 43(5): 603-612.

[34] DRAKE T M, BIRD T G. Simplifying screening for primary liver cancer-do the LCR1 and LCR2 tests hold the key? [J]. Alimentary pharmacology therapeutics, 2019, 49(5): 612-613.

[33] 杜轲锋.超声引导下经皮微波消融术治疗原发性小肝癌的疗效分析[J].实用中西医结合临床,2018,18(3):35-37.

[34] 吴婷,祝源,肖大平,等.血清 CEA、CA125、AFP 水平变化与慢性乙型肝炎患者病情的相关性分析[J].检验医学与临床,2020,17(23):108-110.

[35] GAO Y, LIU F, FANG L, et al. Genkwanin inhibits proinflammatory mediators mainly through the regulation of miR-101/MKP-1/MAPK pathway in LPS-activated macrophages[J]. PLoS one, 2014, 9(5): e96741.

[36] SUN Y, BAO Y, YU H, et al. Anti-rheumatoid arthritis effects of flavonoids from *Daphne genkwa* [J]. International immunopharmacology, 2020, 83: 106384.

收稿日期:2024-03-18;修回日期:2024-04-25

基金项目:贵州省中医药管理局中医药、民族医药科学技术研究课题(QZYY-2022-011);贵州中医药大学药用高分子材料研究中心(贵中医ZX合字[2024]071号)。

作者简介:韦美燕(1997-),女,在读硕士研究生,主要研究方向:中药及民族药物新制剂、新剂型与新技术研究。

▲通讯作者:吴静澜(1973-),女,硕士,教授,硕士研究生导师,主要研究方向:中药及民族药物新制剂、新剂型与新技术研究。

仙人掌胃康胶囊含量测定方法的优化研究*

陈 维,龙丽娜,吴 芸,孙 刚,李开斌[▲]

(安顺市食品药品检验所,贵州 安顺 561000)

摘 要: **目的:**优化仙人掌胃康胶囊的含量测定方法,以提升仙人掌胃康胶囊含量测定的方便性和科学性。**方法:**采用加热回流提取样品,高效液相色谱法测定样品中橙皮苷含量;色谱条件:色谱柱为 Agilent TC-C18 柱(250 mm×4.6 mm,5 μm),流动相采用乙腈-0.1%磷酸溶液(20:80),柱温为室温,PDA 检测器,检测波长 283 nm,流速 1.0 mL·min⁻¹。**结果:**HPLC 方法学考察表明,橙皮苷在 2.0742~414.8496 μg/mL 范围内线性关系良好($R^2=0.9997$),精密度 $RSD\leq 0.56\%$,重复性 $RSD\leq 1.12\%$ ($n=6$),稳定性 $RSD\leq 2.03\%$,供试品在以 25 mL 甲醇为提取溶剂,加热时间 30 min 时平均回收率为 94.60%, $RSD=2.31\%$ ($n=6$)。**结论:**优化 HPLC 法测定仙人掌胃康胶囊中橙皮苷的含量,样品提取方法简便,结果准确,重复性好,可用于仙人掌胃康胶囊中橙皮苷含量的测定,为更好地控制仙人掌胃康胶囊质量稳定和可靠提供科学依据。

关键词: 仙人掌胃康胶囊,橙皮苷,高效液相色谱法

中图分类号:R284.1 文献标识码:A 文章编号:1003-6563(2024)05-0042-04

Optimization of content determination method for Cactus Weikang Capsules*

CHEN Wei, LONG Lina, WU Yun, SUN Gang, LI Kaibin[▲]

(Anshun Food and Drug Inspection Institute, Anshun 561000, China)

Abstract: We optimized the content determination method for Cactus Weikang Capsules, so as to improve the convenience and scientificity of the method. The sample was extracted by heating reflux, and the content of hesperidin in the sample was determined by HPLC. Chromatographic conditions; the chromatographic column was Agilent TC-C18 column (250 mm × 4.6 mm, 5 μm), the mobile phase was acetonitrile-0.1% phosphoric acid solution (20:80), the column temperature was room temperature, the PDA detector was adopted, the detection wavelength was 283 nm, and the flow rate was 1.0 mL/min. The results showed that hesperidin had good linear relationship in the range of 2.0742 μg/mL to 414.8496 μg/mL ($R^2=0.9997$); the precision $RSD\leq 0.56\%$, the repeatability $RSD\leq 1.12\%$ ($n=6$), and the stability $RSD\leq 2.03\%$; the average recovery rate of the sample was 94.60%, $RSD=2.31\%$ ($n=6$) when heated for 30 minutes with 25 mL methanol as the extraction solvent. The optimized HPLC method is simple, accurate and reproducible, and can be used for the determination of hesperidin in Cactus Weikang Capsules. This study has provided scientific basis for the quality control of Cactus Weikang Capsules.

Keywords: Cactus Weikang Capsules, hesperidin, HPLC

仙人掌胃康胶囊的现行标准为国家药品标准 WS-10504(ZD-0504)-2002-2012Z,为仙人掌、木香、蜘蛛香、陈皮、刺梨、桔萝卜等六味药材经提取制成的复方制剂。具有清热养胃,行气止痛,用于胃热气滞所致的脘腹热痛,胸胁胀满,食欲不振,暖气吞

酸,以及慢性浅表性胃炎的治疗^[1]。

仙人掌胃康胶囊现行标准的含量测定是采用高效液相色谱法(HPLC)测定制剂中橙皮苷的含量,供试品溶液的制备采用加甲醇索氏提取 6 h 来处理,这个方法处理过程繁琐、费时并造成溶剂浪费。

因此,本实验供试品溶液的制备采用加热回流的方式提取仙人掌胃康胶囊中的橙皮苷,并用 HPLC 测定其含量,以完善、提升仙人掌胃康胶囊的质量控制标准。

1 仪器与材料

1.1 仪器

Agilent 1260 HPLC 色谱仪(美国 Agilent 公司),Waters e2695HPLC 色谱仪(美国 Waters 公司),日本岛津 AY-120 电子天平(万分之一),瑞士梅特勒-托利多 XSE105DU 电子天平(十万分之一),恒温水浴锅(天津市泰斯特仪器有限公司)。

1.2 材料

橙皮苷对照品(批号:110721-202220,含量 $\geq$ 97.2%,中国食品药品检定研究院),乙腈(批号:0211128,北京迈瑞达)、磷酸(批号:20220110,天津科密欧)、甲醇(批号:22075297,安徽天地)均为优级纯,水为娃哈哈纯净水。仙人掌胃康胶囊(贵州顺健制药有限公司)。

2 方法与结果^[2-4]

2.1 溶液的制备

2.1.1 对照品溶液

用 XSE105DU 电子天平精密称取橙皮苷 21.34 mg 置于 50 mL 量瓶中,加甲醇适量,超声溶解后并用甲醇定容至刻度,摇匀,制成对照品储备液。

2.1.2 供试品溶液

取仙人掌胃康胶囊内容物适量,混匀,精密称取 0.2 g,置锥形瓶中,精密加入甲醇 25 mL,称定重量,水浴加热回流 30 min,放冷后用甲醇补足减失的重量,摇匀,过滤,即得。

2.2 色谱条件

色谱柱:Agilent TC-C18(250 mm $\times$ 4.6 mm,5 μ m);流动相:乙腈-0.1%磷酸溶液(20:80);检测波长:210 nm;流速:1.0 mL/min 柱温:25 $^{\circ}$ C;进样量 10 μ L。色谱图如图 1、图 2 所示。

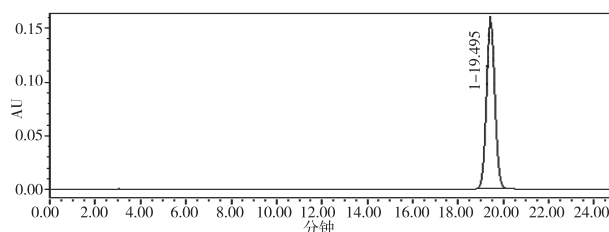


图 1 对照品色谱图

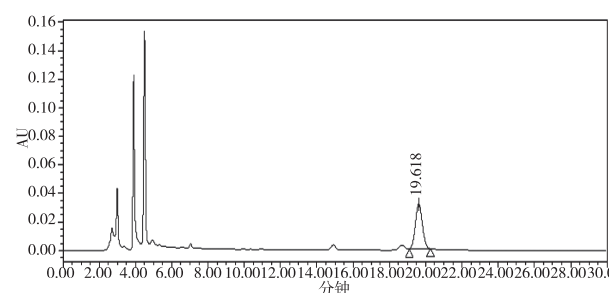


图 2 供试品色谱图

2.3 方法学考察

2.3.1 线性关系考察

精密吸取“2.1.1”项下对照品储备液适量,加甲醇配置成每 1 mL 分别含橙皮苷 2.07 μ g、5.19 μ g、10.37 μ g、31.11 μ g、5.19 μ g、82.97 μ g、103.71 μ g、207.42 μ g、414.85 μ g 的溶液,按照“2.2”项下的色谱条件分析,以橙皮苷峰面积为纵坐标,浓度为横坐标绘制标准曲线,回归方程为 $Y = 18918X + 19290$,相关系数 r^2 为 0.9997,结果表明,橙皮苷在 2.07 ~ 414.85 μ g/mL 浓度范围内呈良好的线性关系。

2.3.2 精密度试验

分别精密吸取浓度为 5.19 μ g/mL、82.97 μ g/mL、207.42 μ g/mL 的对照品溶液 10 μ L,连续进样 6 次,测得橙皮苷峰面积 RSD 分别为 0.37%、0.15%、1.16% ($n=6$),表明仪器精密度良好。

2.3.3 重复性试验

取同一批次仙人掌胃康胶囊的内容物,精密称取 6 份,每份 0.2 g,按“2.1.2”项下方法制备,照“2.2”项下色谱条件分析并计算橙皮苷含量,样品中橙皮苷的平均含量是 12.04 mg/g,RSD 为 1.2%,表明方法重复性良好。

2.3.4 稳定性考察

取浓度为 5.19 μ g/mL、207.42 μ g/mL 的对照

品溶液,分别在 0 h、12 h、48 h 进样 10 μL ,进行测定。结果在 48 h 内橙皮苷的平均峰面积分别为 99418 和 4052362, *RSD* 分别为 2.93% 和 1.13%,表明在 48 h 内橙皮苷溶液的稳定性良好。

2.3.5 加样回收率试验

称取已知橙皮苷含量的本品内容物 9 份,每份 0.1 g,置锥形瓶中,分别精密加入 2 mL、3 mL、4 mL 对照品标准储备液,在分别加入甲醇 23 mL、22 mL、21 mL,称定重量,加热回流 30 min,放冷,用甲醇补足减失的重量,摇匀,过滤,制得供试品溶液,按照“2.2”项下的色谱条件进行分析并计算回收率。详见表 1。

表 1 加样回收试验结果表

序号	取样量 /g	原有量 / μg	加入量 / μg	测定量 / μg	回收率 /%	平均值 /%	<i>RSD</i> /%
1	0.1000	1204.03	829.70	1961.57	91.30		
2	0.1001	1205.23	829.70	1962.79	91.30	91.1	0.5
3	0.1029	1238.95	829.70	1990.37	90.57		
1	0.1014	1220.89	1244.55	2412.45	95.74		
2	0.1004	1208.85	1244.55	2386.58	94.63	94.5	1.3
3	0.1002	1206.44	1244.55	2366.65	93.22		
1	0.1017	1224.50	1659.40	2770.41	93.16		
2	0.1003	1207.64	1659.40	2794.81	95.65	95.4	2.2
3	0.1012	1218.48	1659.40	2832.92	97.29		

2.3.6 样品测定

取 4 批仙人掌胃康胶囊内容物适量,按照“2.1.2”项下方法制备供试品溶液,以“2.2”项下色谱条件测定供试品溶液中橙皮苷的含量,参照《中国药典》外标法计算样品中橙皮苷的含量,结果见表 2。

表 2 样品测定表

品 名	批 号	含量/(mg/g)
仙人掌胃康胶囊	20210801	5.9
仙人掌胃康胶囊	20210810	7.4
仙人掌胃康胶囊	20210303	9.3
仙人掌胃康胶囊	20220106	12.2

3 讨论

3.1 流动相的优化

仙人掌胃康胶囊的现行标准为国家药品标准流

动相为乙腈-水(20 : 80),用 Agilent TC-C18(250 mm $\times$ 4.6 mm,5 μg) 色谱柱分析批号为 20220106 的样品时,理论板数符合标准要求,但存在峰拖尾因子大于 1.10,橙皮苷峰与相邻峰之间的分离度小于 1.5。参考《中国药典》,唐冰雯、徐宁宁等^[4-7]的研究,流动相考察了乙腈-0.1% 磷酸溶液(20 : 80)、乙腈-0.5% 醋酸溶液(20 : 80)、甲醇-醋酸-水(35 : 4 : 61)、甲醇-水(25 : 75)等 4 种。结果表明:乙腈-0.1% 磷酸溶液(20 : 80)作为流动相测定时,理论板数符合原标准要求,峰拖尾因子在 0.95~1.05 之间,橙皮苷峰与相邻峰之间的分离度大于 1.5。

3.2 供试品溶液制备条件的优化

原标准采用加入甲醇 70 mL,索氏提取 6 h 制备供试品溶液,该方法使用溶剂多,用时长,操作繁琐。本实验分别考察了超声和加热回流两种提取方法,结果显示,在加甲醇超声提取过程中,目标物质橙皮苷提取不完全,回收率达不到要求。用水浴加热回流提取仙人掌胃康胶囊中的橙皮苷,结果准确、重复性好、操作简便。比较了不同提取的溶剂体积(15 mL、25 mL、50 mL)和不同加热回流时间(20 min、30 min、45 min),结果表明,在取样量为 0.2 g 时,加入甲醇 25 mL 加热回流 30 min 样品中橙皮苷含量最高。

4 结论

本研究优化了仙人掌胃康胶囊含量测定方法,采用加热回流提取-高效液相色谱法测定橙皮苷的含量,该方法操作简便,重复性好,结果准确,为进一步提升完善原质量标准,更好地控制仙人掌胃康胶囊的质量提供了科学依据。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 国家食品药品监督管理局. 仙人掌胃康胶囊: WS-10504(ZD-0504)-2002-2012Z[S]. 2012.
- [2] 李岩,李成明,张明童,等. 宣肺止嗽合剂中 4 种生物碱的含量测定方法研究[J]. 中国民族民间医药, 2023, 32(1): 43-47.
- [3] 卢向红,刘利辉,汪霞,等. HPLC 法测定苦柏洗剂中盐酸巴马汀、蛇床子素和盐酸小檗碱含量[J]. 中国民族民间医药, 2023, 32(1): 28-31.

脊蛇祛湿胶囊调节 mPGES-1 干预类风湿关节炎的作用机制研究*

罗进芳^{1,2}, 支太发¹, 何吉¹, 姚血明³, 黄聪^{1▲}

(¹ 贵州中医药大学, 贵州 贵阳 550025; ² 贵州省高等学校中药(民族药)药性与效应研究重点实验室, 贵州 贵阳 550025; ³ 贵州中医药大学第二附属医院风湿免疫科, 贵州 贵阳 550025)

摘要: **目的:**探究脊蛇祛湿胶囊(JiShe QuShi Capsules, JSQSC)对胶原诱导性关节炎(Collagen-induced Arthritis, CIA)大鼠模型微粒体前列腺素 E₂ 合酶-1(mPGES-1)靶点的影响。**方法:**雌性 SD 大鼠 24 只,随机分为正常组、模型组、JSQSC 组和甲氨蝶呤(Methotrexate, MTX)组,每组 6 只。适应性喂养一周后构建 CIA 大鼠模型,二次免疫后第 3 天开始给药。JSQSC 组每天灌胃脊蛇祛湿胶囊药液,MTX 组每天灌胃 1 mg/kg 甲氨蝶呤药液,正常组和模型组每天灌胃等体积的生理盐水,每 7 天检测大鼠体重、足肿胀等指标,于实验第 28 天取材。**结果:**相比于模型组,JSQSC 组与 MTX 组的大鼠体重增加,足肿胀减轻,滑膜组织 mPGES-1 表达水平降低($P<0.05$)。**结论:**脊蛇祛湿胶囊药液可通过抑制 mPGES-1 的表达从而减轻 CIA 大鼠炎症症状的产生。

关键词: mPGES-1, 脊蛇祛湿胶囊, 类风湿性关节炎, CIA 大鼠模型, 甲氨蝶呤

中图分类号:R593 文献标识码:A 文章编号:1003-6563(2024)05-0045-06

Mechanism of JiShe QuShi Capsules regulating mPGES-1 to intervene rheumatoid arthritis*

LUO Jinfang^{1,2}, ZHI Taifa¹, HE Ji¹, YAO Xueming³, HUANG Cong^{1▲}

(¹ Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China; ² Key Laboratory on the Property & Effect Medicine, Guiyang 550025, China; ³ Department of Rheumatism and Immunology, the Second Affiliated Hospital of Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China)

[4] 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,2020:63.

[5] 唐冰雯,郭俐麟. 基于 HPLC 法的止咳宝片中橙皮苷的含量测定[J]. 山东化工,2020(10):102-104.

[6] 贵州顺健制药有限公司. 仙人掌胃康胶囊的质量控制方法:CN200710200169.1[P]. 2007-08-08.

[7] 徐宁宁. HPLC 法测定胃舒口服液中橙皮苷的含量[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2015(3):23-26.

收稿日期:2023-05-24;修回日期:2023-05-24

基金项目:安顺市科技创新平台建设计划项目(安市科平[2017]03)。

作者简介:陈维(1988-),男,工程师,本科,从事食品药品检验与质量标准研究。

▲通讯作者:李开斌(1979-),男,副主任药师,本科,从事药品检验与质量标准研究。

Abstract: We investigated the effects of Jishe Qushi Capsules (JSQSC) on microsomal prostaglandin E_2 synthase-1 (mPGES-1) targets in a rat model of collagen-induced arthritis (CIA). Twenty-four female SD rats were randomly divided into normal, model, JSQSC and methotrexate (MTX) groups, with six rats in each group. The CIA rat model was constructed after one week of acclimatization feeding, and the administration was started on the third day after secondary immunization. JSQSC solution was gavaged daily in the JSQSC group, 1 mg/kg of methotrexate solution was gavaged daily in the MTX group, and an equal volume of saline was gavaged daily in the normal and model groups. The body weight, foot swelling and other indexes of the rats were measured every 7 days, and the samples were taken on the 28th day of the experiment. Compared with the model group, the rats in the JSQSC and MTX groups had increased body mass, reduced foot swelling and decreased mPGES-1 expression level in synovial tissue ($P < 0.05$). In conclusion, Jishe Qushi Capsules could reduce the inflammatory symptoms in CIA rats by inhibiting the expression of mPGES-1.

Keywords: mPGES-1, Jishe Qushi Capsules, rheumatoid arthritis, CIA rat model, methotrexate

0 引言

类风湿关节炎 (Rheumatoid Arthritis, RA) 是一种主要针对滑膜关节的慢性自身免疫性疾病, 导致滑膜炎、滑膜肥大以及软骨和骨破坏^[1]。其特征是关节僵硬、肿胀和疼痛。RA 的症状可能是隐匿的, 通常从近端指间关节和掌指关节开始, 然后发展为对称性关节受累^[2], 如果不及时治疗, 其会导致关节畸形和正常关节功能的丧失。RA 的发病机制是多因素的, 目前的研究表明, 抑制微粒体前列腺素 E_2 合酶-1 (mPGES-1) 的表达可能是治疗关节炎的有效方法。前列腺素 E_2 (PGE_2) 是体内的主要前列腺素, 在关节炎的生理病理学中起着重要作用, 除了致炎作用外, PGE_2 还能通过促进基质金属蛋白酶的产生、破骨细胞的骨吸收和血管生成而致使关节损伤^[3], 有研究检测出 PGE_2 在 RA 患者的血清和滑液中过量产生^[4], mPGES-1 恰好是 PGE_2 的 3 种亚型之一^[5]。据此通过抑制该酶的表达起到治疗 RA 的目的。

构成脊蛇祛湿胶囊 (Jishe Qushi Capsules, JSQSC) 复方制剂的药包括: 君药金毛狗脊, 具有强筋健骨、祛风止痛等效用; 臣药黑骨藤、青风藤、乌梢蛇等, 具有活血通络、消肿止痛、补肾益气等效用; 佐药三七、姜黄等, 具有活血化瘀、消炎止痛等效用; 使药白芍, 具有滋阴补血、散寒止痛等效用, 全方具有补中益气、活血通经、祛风散寒、活血通络的功效^[6]。常用于治疗 RA, 在研究中已证实其对 RA 具备良好的治疗作用, 能够减轻胶原诱导性关节炎

(Collagen-induced arthritis, CIA) 大鼠的足趾肿胀^[3]。

前期研究发现, 脊蛇祛湿胶囊中的臣药青风藤的有效单体成分青藤碱 (Sinomenine, SIN) 在体内外炎症实验模型中均能明显抑制 mPGES-1 蛋白的表达, 发挥抗炎和抗 RA 作用^[7]。但目前未见基于调节 mPGES-1 的角度来探究 JSQSC 作用机制的相关研究报道, 故此本研究从调控 mPGES-1 蛋白表达的角度, 探究 JSQSC 的抗炎、抗 RA 作用及其调控机制, 为 JSQSC 临床上治疗 RA 提供更多科学研究依据。

1 实验材料

1.1 动物

选取健康 SD 雌性大鼠 (SCXK (京) 2019-0008) 24 只, 体质量 140 ~ 160 g, 在 SPF 级、(20 ± 2) °C、43% ~ 50% 相对湿度下喂养, 饮用水与饲料消毒后供实验大鼠自由进食, 适应性喂养一周后进行造模实验。本研究经过贵州中医药大学动物伦理委员会批准进行。

1.2 药物与试剂

脊蛇祛湿胶囊 (规格: 0.45g/粒, 36 粒/瓶, 贵州中医药大学第二附属医院, 批号: Z20160028); 完全弗氏佐剂 (货号: 210154), 牛 II 型胶原 (货号: 20022), 购于 Chondrex 公司; 辣根过氧化物酶 (HRP) 标记的兔二抗 (武汉博士德生物工程有限公司, 货号: BA1054); β -actin 抗体 (Santa Cruz Bio-

technology, 货号: sc-47778); 甲氨蝶呤(货号: 517B021); SDS-PAGE 凝胶制备试剂盒(货号: P1200-1/P1200-2); 电转液(批号: D1060), Tris-电泳缓冲液(批号: T1070), 彩虹 180 广谱蛋白 marker(货号: PR1910), 购于北京索莱宝科技有限公司; 蛋白上样缓冲液(北京康润诚业生物科技有限公司, 批号: E153-10); 抗体稀释液(批号: BL506A), TBST 缓冲液(货号: BL315B), 购于广州硕普生物科技有限公司; 高效 Western 封闭液(上海积福生命科技有限公司, 货号: GF1815)。

1.3 主要仪器

电子天平(上海然浩电子有限公司, 型号: JCS-51001C); 高压灭菌锅(美国 ZEALWAY, 型号: G154T); 游标卡尺(武汉芯泰科技有限公司, 型号: JS119F150); 高速冷冻离心机(赛默飞世尔科技公司, 型号: Sorvall Legend Micro 21R); 超灵敏多功能化学发光成像系统曝光机(美国 Bio-Rad, 型号: ChemiDocTM); 电泳仪与电转仪(北京鸿涛基业科技发展有限公司, 型号: HT-Zy02)。

2 实验方法

2.1 造模方法

24 只雌性 SD 大鼠经适应性喂养一周后标记耳标, 随机分为 4 组: 正常组、模型组、JSQSC 组、甲氨蝶呤(Methotrexate, MTX) 组, 每组 6 只。正常组尾根部皮下注射 1 mL/kg 生理盐水。除正常组外, 所有大鼠尾根部皮下注射 0.1 mL 牛 II 型胶原和完全弗氏佐剂充分混匀的乳化剂, 采用二次免疫法, 构建胶原诱导性关节炎(Collagen-induced Arthritis, CIA) 大鼠模型。将 2.5 mL 完全弗氏佐剂加入置于冰浴中的研磨碗中, 边研磨边缓慢加入等体积的牛 II 型胶原蛋白, 滴入水中成圆形液滴不分散即可^[6]。一次免疫后的第 7 天进行第 2 次免疫, 造模成功后, 进行药物治疗。

2.2 给药剂量

按照徐书云教授主编的《药理实验方法》, 附 60 kg 成人和动物剂量换算系数表, 按公式计算每只大鼠给药剂量: 大鼠剂量 = $6.3 \times$ 成人用药剂量 (mg/kg)^[8]。第 2 次免疫注射后第 3 天开始灌胃给

药, 每天按照大鼠体重给药一次 (567 mg/kg), 连续给药 21 天, MTX 组每天给予甲氨蝶呤药液 1 mg/kg, 正常组和模型组每天给予等体积生理盐水。

2.3 模型处理

适应性喂养一周后, 每 7 天测量一次所有大鼠的体重, 并用游标卡尺测量足肿胀。连续用药 21 天后, 从腹主动脉采集 5 mL 血液。离心后保存上清液, 储存在 -80 °C 以备后续使用。将每组大鼠的肝脏、胸腺、脾脏、肾脏、心脏和肺进行称重。对于有明显炎症和药物干预的大鼠, 取出滑膜并将整个右后肢取出剃毛, 置于多聚甲醛或低温环境中保存。

2.4 检测方法

免疫蛋白印迹法(Western-Blot)检测各组大鼠滑膜组织中 mPGES-1 蛋白表达水平。具体步骤简要概述如下。

(1) 蛋白样品的提取

取各组大鼠膝关节滑膜组织, 置于黄铜研钵中, 加入适量液氮将组织捣成粉末。使用预冷勺将粉末转移至预冷的 2 mL EP 管中, 加入 500 μ L RIPA 细胞裂解缓冲液。将管置于冰上 1 h, 然后以 14000 $\times$ g 和 4 °C 条件高速离心 15 min。离心后, 取 400 μ L 上清液与 100 μ L 蛋白上样缓冲液混合, 涡旋 2~3 s。然后将混合物离心 1~2 s 固定在泡沫浮板上, 并将浮板置于 100 °C 水浴锅中维持 15 min。结束后, 放置在 -20 °C 的冰箱保存。

(2) 制备 SDS-PAGE 凝胶

表 1 SDS-PAGE 凝胶配方

产品内容	分离胶 15%	分离胶 10%	浓缩胶 5%
30% Acr/Bis(29:1)	5 mL	3.3 mL	0.83 mL
1M Tris-HCl(pH6.8)	0	0	0.652 mL
1.5M Tris-HCl(pH8.8)	2.5 mL	2.5 mL	0
10% SDS	100 μ L	100 μ L	50 μ L
10% PAGE 凝胶固剂	100 μ L	100 μ L	75 μ L
PAGE 促凝剂	10 μ L	10 μ L	7.5 μ L
去离子水	2.3 mL	4.0 mL	3.42 mL
最佳分离范围	10~40 kD	20~80 kD	-

清洁干净玻璃板: 一只手固定, 用刷子轻轻擦拭除去余留胶渍, 纯净水清洗干净, 晾干。

15% 分离胶: 对齐玻璃板, 将其装进夹子中卡紧, 按表 1 比例制备 15% 分离胶。注胶时, 用移液枪吸取试剂沿玻璃板两侧平稳打入, 至夹子绿色横杠处停止注胶, 然后再沿着玻璃板水平移动加一层去离子水封胶压平。

5% 浓缩胶: 当去离子水和下层胶之间有一条折射线时, 说明下层分离胶已凝。倒弃封胶水用过滤纸吸净残留。按表 1 比例制备 5% 的浓缩胶, 混合均匀后迅速注胶至与短玻璃盖板平齐, 立即将蛋白上样齿梳插到浓缩胶中。

(3) 上样

待浓缩胶固化后, 将玻璃板安装在电泳槽内, 加入现配电泳液, 倒至恰好没过内测短玻璃板位置为宜。先上 Marker 4 μL , 而后按照正常组、模型组、JSQSC 组、MTX 组顺序上样 20 μL 。移液枪竖直吸样, 从孔的中间慢慢地添加蛋白样品。

(4) 电泳

蛋白检测样品在上层胶的电压为 80 V, 当溴酚蓝指示剂刚到浓缩胶与分离胶交接处所在位置时, 将电压变为 120 V, 直到溴酚蓝到达下层分离胶的底端, 结束电泳。

(5) 转膜

电转液 4 $^{\circ}\text{C}$ 预冷, 裁剪大小适合的 PVDF 膜, 4 $^{\circ}\text{C}$ 环境下甲醇活化 3 ~ 5 min 后, 用装置固定后加入预冷的电转液。将转膜槽放进冰水浴中降温, 以 300 mA 条件恒流 90 min。转膜完毕后, 取出 PVDF 膜并将其放置于调配好的 TBST 溶液内。

(6) 封闭, 一、二抗孵育

将膜放入盛装 50 mL 快速封闭液的试剂盒中, 室温下摇床 25 min。用调配好的 TBST 在摇床上冲洗 PVDF 膜 3 次, 每次 5 min。而后放于对应抗体孵育盒中, 放入对应一抗在 4 $^{\circ}\text{C}$ 环境下摇床一宿, 一抗的稀释浓度比例为: mPGES-1 (1 : 1000); β -actin (1 : 500)。接着用 TBST 于室温摇床上冲洗 PVDF 膜 6 次, 每次 5 min。完毕后把 PVDF 膜置于孵育盒内加入相应的二抗, 在室温环境下避光摇床孵化 1 h。孵育完后, 继续用 TBST 冲洗, 每次 10 min, 二抗的稀释浓度比例为: 山羊抗兔 IgG 抗体 (1 : 10000)。

(7) 分子成像

按 1 : 1 的比例吸取 A 液和 B 液配制成发光

液, 滴加适量发光液于 PVDF 膜上, 操作生物分子成像仪进行分子成像。

(8) Western blot 结果判定

成像系统拍取照片, 为了确定 mPGES-1 的相对表达水平, 使用 Image J 软件量化了 β -actin 内参条带的灰度值, 把 mPGES-1 条带的灰度值与 β -actin 条带的灰度值的比值以归一化其灰度值。

3 统计学处理

运用 EXCEL 及 SPSS 27.0 软件处理原始数据, 正态分布的度量数据表示为平均值 $\pm$ 标准偏差 ($\bar{x} \pm s$), 数据方差齐性时采用单因素分析, 方差不齐性时采用 T 检验, 单因素分析使用最小显著差异 LSD 方法进行详细分析。采用 $P < 0.05$ 的显著性水平具有统计学意义。

4 结果

4.1 脊蛇祛湿胶囊对 CIA 大鼠一般状况及体质量的影响

正常组大鼠活泼健康、日常饮食正常、毛皮亮泽柔软; 模型组大鼠体形消瘦、动作迟缓、足部肿胀严重、足趾皮肤红肿, 以右后趾关节最为严重; JSQSC 组和 MTX 组大鼠关节肿胀减低、活动速度缓慢未见行走困难、精神状态尚好、日常饮食提高、毛皮有光泽稍稀疏。造模前各组大鼠体重无明显差异, 第 2 次免疫后各组大鼠体重逐渐升高但均低于正常组。根据实际测量模型组与正常组体质量有显著性差异 ($P < 0.05$); 与模型组相比, JSQSC 组和 MTX 组大鼠体质量有显著性差异 ($P < 0.05$); 两组给药组与正常组相比无显著性差异。结果见表 2。

表 2 各组大鼠体重比较 ($n = 6$)

组别	体重/ $\bar{x} \pm s$			
	第一周	第二周	第三周	第四周
正常组	257.77 $\pm$ 26.27	261.62 $\pm$ 37.23 ^{**}	320.63 $\pm$ 26.76 ^{**}	341.00 $\pm$ 26.39 ^{**}
模型组	231.62 $\pm$ 15.37	208.75 $\pm$ 10.70 ^{##}	263.18 $\pm$ 24.66 ^{##}	277.90 $\pm$ 31.62 ^{##}
JSQSC 组	231.63 $\pm$ 7.86	266.48 $\pm$ 18.50 ^{**}	292.87 $\pm$ 15.90 [*]	323.10 $\pm$ 16.57 [*]
MTX 组	234.30 $\pm$ 9.74	267.57 $\pm$ 16.92 ^{**}	297.03 $\pm$ 12.27 [*]	311.58 $\pm$ 31.81 [*]

注: 与模型组相比, ^{*} $P < 0.01$, ^{*} $P < 0.05$; 与正常组相比, ^{##} $P < 0.01$ 。

4.2 脊蛇祛湿胶囊对 CIA 大鼠足肿胀的影响

2 次免疫后,对两组给药组进行药物干预,其余组灌胃生理盐水。相比于正常组,其余各组大鼠右后足趾出现肿胀发红,两组给药组大鼠右后足趾厚度稍微增加,模型组大鼠右后足趾肿胀厚度增加大于其余组。模型组大鼠右后足趾肿胀厚度与正常组大鼠相比具有显著性差异 ($P<0.05$):JSQSC 组和 MTX 组右后足趾肿胀厚度与正常组相比无显著性差异,与模型组相比大鼠的右后足趾肿胀下降,肿胀厚度减少,差异有统计学意义 ($P<0.05$)。这表明脊蛇祛湿胶囊能减轻关节炎肿胀。结果见表 3。

表 3 各组大鼠足肿胀比较 ($n=6$)

组 别	足肿胀厚度/mm($\bar{x}\pm s$)			
	第一周	第二周	第三周	第四周
正常组	5.29±0.14	5.31±0.21 [*]	5.44±0.22 [*]	5.66±0.23 [*]
模型组	5.48±0.21	6.62±0.90 [#]	7.57±1.37 [#]	9.59±1.13 [#]
JSQSC 组	5.45±0.21	6.27±0.16 [#]	5.74±0.66 [*]	5.71±0.70 [*]
MTX 组	5.44±0.22	6.36±0.19 [#]	5.68±0.24 [*]	5.61±0.30 [*]

注:与模型组相比,^{*} $P<0.05$;与正常组相比,[#] $P<0.05$ 。

4.3 脊蛇祛湿胶囊对(CIA)大鼠脾指数的影响

实验结果的数据表明,经过造模成功后,模型组脾指数明显低于正常组 ($P<0.05$);JSQSC 组和 MTX 组与模型组相比,差异具有统计学差异 ($P<0.05$),这表明脊蛇祛湿胶囊对大鼠脾脏指数的提高起到促进的作用,脊蛇祛湿胶囊能一定程度增加关节炎脾指数程度,具有一定的减轻炎症作用。结果见表 4。

表 4 各组脾脏指数 ($n=6$)

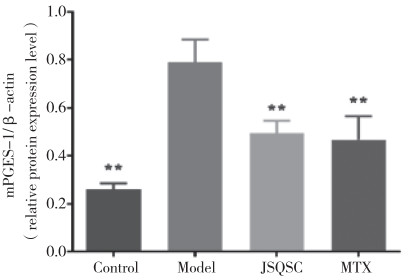
组 别	脾脏指数/% ($\bar{x}\pm s$)
正常组	3.842±1.132 [*]
模型组	2.292±0.289 [#]
脊蛇祛湿胶囊组	4.268±0.530 [*]
甲氨蝶呤组	3.958±0.669 [*]

注:与模型组相比,^{*} $P<0.05$;与正常组相比,[#] $P<0.05$ 。

4.4 各组大鼠关节滑膜组织 mPGES-1 蛋白表达水平比较

在炎症和癌症病理生理学中,mPGES-1 是催化

PGE₂ 生物合成的终端酶,目前认为抑制 mPGES-1 是控制 RA 的重要方法。相比于正常组,模型组大鼠关节滑膜组织 mPGES-1 蛋白水平显著上升,但 JSQSC 组和 MTX 组大鼠关节滑膜组织 mPGES-1 蛋白水平下降,差异有统计学意义 ($P<0.05$)。结果如图 1 所示。



注:与模型组相比,^{*} $P<0.05$ 。

图 1 JSQSC 对大鼠滑膜组织 mPGES-1 蛋白表达的影响

5 讨论

本研究内容表明,经脊蛇祛湿胶囊治疗后,可有效改善大鼠的症状,服用抗炎药后减轻足肿胀。同时,脊蛇祛湿胶囊能有效缓解大鼠滑膜组织的异常增生,减轻滑膜炎,说明脊蛇祛湿胶囊发挥了对关节炎的治疗作用并起到一定的关节保护作用。

甲氨蝶呤是一种叶酸还原酶抑制剂,常用于类风湿性关节炎的药物治疗。不仅能有效抑制滑膜组织细胞的过度增殖,还能降低骨质破坏和炎症反应的综合作用,能有效缓解和修复肌肉骨质疏松、骨关节炎等骨关节疾病^[9]。研究显示脾脏、胸腺等是动物体内主要的免疫器官,脏器指数能有效反映动物机体免疫功能,已被广泛用于评价实验动物的免疫状态^[10]。甲氨蝶呤对脾脏这一重要免疫器官存在一定的免疫抑制作用,但脊蛇祛湿胶囊对脾脏没有明显的免疫抑制影响。

RA 的病理发生和发展与体内抗炎药的存在有着密切的联系^[11],当关节滑膜周围的巨噬细胞被激活时,会逐步形成大量的炎症介质,炎症介质与促炎因子、生长因子、趋化因子等协同作用对关节造成严重损伤^[12]。TNF- α 是医学影像中使用频率较高的血管内皮细胞因子,检测 TNF- α 的水平,能够相对准确地评估类风湿关节炎的发展情况。TNF- α 炎症因子在类风湿关节炎患者中大量出现,共同参与了炎症反应,其在形成 RA 的炎症过程中起着重要

作用^[13]。

RA 病情的发生、发展与 mPGES-1 蛋白的表达有关,脊蛇祛湿胶囊通过抑制该蛋白的表达,改善 RA 炎症反应。本研究通过设置甲氨蝶呤阳性药组对照得出脊蛇祛湿胶囊不仅能有效治疗类风湿性关节炎并起到一定的关节保护作用,而且对脾脏等免疫器官未出现明显的免疫抑制作用。本实验仅初步探讨了脊蛇祛湿胶囊可以调节 mPGES-1,干预类风湿性关节炎,并未考察不同剂量脊蛇祛湿胶囊的作用效果,未来的研究可以确定不同剂量药物的作用效果,以明确量效关系,并扩展我们对脊蛇祛湿胶囊治疗类风湿性关节炎潜力的了解。

参考文献【REFERENCES】

- [1] EA L, SU M. Early diagnosis and treatment of rheumatoid arthritis[J]. Primary care, 2018, 45(2): 237-255.
- [2] 冯红, 袁理, 丁淑贞, 等. 类风湿关节炎患者用药依从性促进策略研究进展[J]. 护理学报, 2019, 26(4): 23-26.
- [3] 李湖帆, 钟琴, 马武开, 等. 基于 RAF-MEK1/MEK2 信号途径探讨脊蛇祛湿胶囊改善胶原诱导关节炎模型大鼠肠道炎症的作用机制[J]. 风湿病与关节炎, 2022, 11(7): 16-17.
- [4] IKEDA-MATSUO Y. The role of mPGES-1 in inflammatory brain diseases[J]. Biological & pharmaceutical bulletin, 2017, 40(5): 557-563.
- [5] FAHMI H. mPGES-1 as a novel target for arthritis[J]. Current opinion in rheumatology, 2004, 16(5): 623-627.
- [6] 蔡鑫, 唐芳, 马武开, 等. 苗药金乌健骨方治疗类风湿关节炎的研究进展[J]. 中国老年学杂志, 2021, 41(9): 2001-2004.
- [7] ZHOU H, LIU J X, LUO J F, et al. Suppressing mPGES-1 expression by sinomenine ameliorates inflammation and arthritis[J]. Biochemical pharmacology, 2017, 142: 133-144.
- [8] 兰维娅, 唐芳, 马武开, 等. 脊蛇祛湿胶囊对 CIA 大鼠关节滑膜 Wnt/DKK1 的表达及调控机制[J]. 中华中医药杂志, 2020, 35(11): 5800-5803.
- [9] 宋爱凤, 王亚芳, 康林, 等. 甲氨蝶呤对类风湿关节炎模型大鼠的疗效及对 ACCP 和 RF 的影响[J]. 解剖学研究, 2021, 43(2): 123-127.
- [10] LI G, LIU D, ZHANG Y, et al. Celastrol inhibits lipopolysaccharide-stimulated rheumatoid fibroblast-like synovocyte invasion through suppression of TLR4/NF- κ B-mediated matrix metalloproteinase-9 expression[J]. PLoS one, 2013, 8(7): e68905.
- [11] 施佳君, 陈方明, 马全鑫, 等. 胶原诱导 Wistar 和 Lewis 大鼠类风湿关节炎模型病理特点的比较[J]. 中国比较医学杂志, 2018, 28(4): 19-26.
- [12] 陈彩娥, 崔向军, 郑可, 等. 胶原诱导型大鼠类风湿关节炎模型的制备[J]. 泰山医学院学报, 2012, 33(12): 821-823.
- [13] 胡晨霞, 何嘉琪, 刘戈, 等. 姜黄对胶原诱导性关节炎大鼠抗炎作用的研究[J]. 中药新药与临床药理, 2010, 21(4): 363-365.

收稿日期: 2023-05-24; 修回日期: 2023-07-04

基金项目: 贵州省基础研究(自然科学)项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 477); 贵州中医药大学国家与省级科技创新人才团队培育项目(贵中医 TD 合字[2022]004 号); 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2021]一般 537); 国家自然科学基金资助项目(82160779, 82160805)。

作者简介: 罗进芳(1989-), 女, 贵州省黔西市人, 博士, 硕士生导师, 讲师, 研究方向: 中药抗炎免疫药理研究。

▲通讯作者: 黄 聪(1982-), 男, 贵州省贵阳市人, 博士, 硕士生导师, 副教授, 研究方向: 中药抗炎免疫药理研究。

基于 NPP 指标法的贵阳市水土保持功能重要性评价

胡先培, 杨 云, 郭程程

(息烽县自然资源局土地矿产资源储备中心, 贵州 贵阳 551100)

摘 要: **目的:**对贵阳市水土保持功能进行重要性评价,为水土保持功能的区划和治理措施提供重要参考价值。**方法:**根据其自然环境及社会经济实际情况,选取多年植被净初级生产力(NPP)平均值、地形坡度、土地的土壤可蚀性因子3项因子,基于NPP指标法进行综合评价。**结果:**贵阳市水土保持功能重要性程度以一般重要、重要等级为主,分别占全市总面积的64.5%和32.43%;其下辖各行政区域也以一般重要、重要等级为主;极其重要等级分布区域面积及占比极小,呈现小区域集中分布,主要分布在贵阳市城市集中建成区及贵阳面积较大的湖泊所在区域。**结论:**评价结果揭示了贵阳市水土保持功能重要性等级及其空间分布特征,同时也分析出下辖各行政区域在水土保持功能重要性等级分布差异较明显的特征,各地区可根据差异性提供不同的水土保持策略。

关键词: 水土保持, 植被净初级生产力, 喀斯特, 土壤类型

中图分类号:X825;Q146 文献标识码:A 文章编号:1003-6563(2024)05-0051-05

Evaluation of the importance of soil and water conservation function of Guiyang City based on NPP index method

HU Xianpei, YANG Yun, GUO Chengcheng

(Land and Mineral Resources Reserve Center, Xifeng Natural Resources Bureau, Guiyang 551100, China)

Abstract: In this study, we evaluated the importance of soil and water conservation function of Guiyang City, so as to provide reference for the zoning and control measures of soil and water conservation functions. Based on the natural environment and socio-economic situation of Guiyang, the average annual net primary productivity (NPP) of vegetation, the terrain slope, and the soil erodibility of the land were selected for comprehensive evaluation by the NPP index method. The importance level of soil and water conservation function of Guiyang City is mainly at general importance and importance level, accounting for 64.5 % and 32.43 % of the total area of the city, respectively. The administrative regions are also at general importance and importance level. The area and proportion of areas at extremely important level are extremely small, showing a concentrated distribution in small areas, mainly in the urban built-up areas of Guiyang City and the areas where the larger lakes are located. The evaluation results reveal the importance level and spatial distribution characteristics of soil and water conservation function of Guiyang City, as well as the significant differences in the distribution of soil and water conservation function importance levels among the administrative regions. Each region can provide different soil and water conservation strategies based on the differences.

Keywords: soil and water conservation, net primary productivity of vegetation, karst, soil type

0 引言

水土保持在防治水土流失、合理利用水土资源、提高土地生产力以及充分发挥区域水土资源的经济和社会效益方面有着重要意义。它是生态文明建设的重要组成部分,也是打造区域良好生态环境的综合性科学技术手段。而水土保持功能重要性评价结果为界定区域水土保持功能上、制定水土流失防治对策上可提供科学依据,其结果可揭示区域水土保持功能重要性空间的分布规律以及明确水土保持功能核心区域^[1]。随着近些年的社会经济发展,人地矛盾日益突出,而贵州区域喀斯特地貌广布,不合理的土地利用又极易造成石漠化^[2-3],再加上极端天气增多,旱涝灾害风险增大,给贵州广大区域的水土保持带来不小的挑战。因此水土保持功能的评估愈发重要,越来越多的学者针对水土保持功能的评价进行了大量研究工作,余新晓等人从水土保持工程、农业和林草措施 3 个方向建立了评价方法^[4];张霞采用层次分析法、灰色聚类分析法和 Topsis 法相结合,对秦岭生态功能区水土保持治理效益进行了综合分析评价^[5];李该霞结合江苏省自然环境、社会经济、土地利用和水土流失特征,选取土壤保持、农田防护、水质维护和人居环境维护 4 项水土保持功能进行综合评价^[6];植被覆盖对水土保持有着重要影响,一些研究也证实了水土保持与净初级生产力(NPP)之间的协同关系^[7-8]。因此本文采用成熟可靠的 NPP 指标法对喀斯特山区城市进行水土保持功能重要性评估^[9]。同时,为得到切合实际的评价结果,对于 NPP 指标法里的净初级生产力均值指标,这里采用的是贵阳市近 20 年逐年的平均结果。

贵阳市作为贵州的省会,是西南地区重要的交通和通信枢纽,也是国家大数据产业发展集聚区和大数据综合试验区核心区;作为首个国家森林城市,以及国家循环经济试点城市,贵阳一直将生态文明建设作为主要发展方向并走出城市经济发展与生态改善“双赢”的可持续发展道路;同时因贵阳是山地城市且喀斯特地貌广布发育,导致其也是重要的生态敏感区和脆弱区^[10]。目前针对贵阳市的水土保持功能评价主要以植被、土地利用类型等单一视角评价为主^[11-12],暂未对贵阳全域的水土保持功能进行评价,因此,本研究以贵阳市全域为研究对象,利

用 GIS 空间分析技术,采用 NPP 指标法,定量分析其水土保持功能重要区域的空间分布特征,可为辖区内水土保持功能区划和生态文明建设提供重要参考意义。

1 区域概况

贵阳市位于贵州省中部,地处东经 106°07′ ~ 107°17′,北纬 26°11′ ~ 26°55′之间。地貌以山地和丘陵为主,辖区喀斯特、丹霞地貌发育广布,各区县市喀斯特出露面积占该地区土地总面积的比例均高于全省的 61.92%,高于中国其他省会城市。另外山地、丘陵面积占贵阳总面积的 84.61%,是一个没有平原支撑的省会城市,属亚热带(副热带)高原季风湿润气候区,雨量充沛、雨热同季。贵阳的地貌及气候特点极易造成雨季水土流失,是造成喀斯特地区石漠化的自然因素之一。贵阳地处长江与珠江两大水系的分水岭地带,是贵州省的政治、经济、文化、科教、交通中心,西南地区重要的交通和通信枢纽、工业基地及商贸旅游服务中心,也是国家大数据产业发展集聚区和大数据综合试验区核心区。

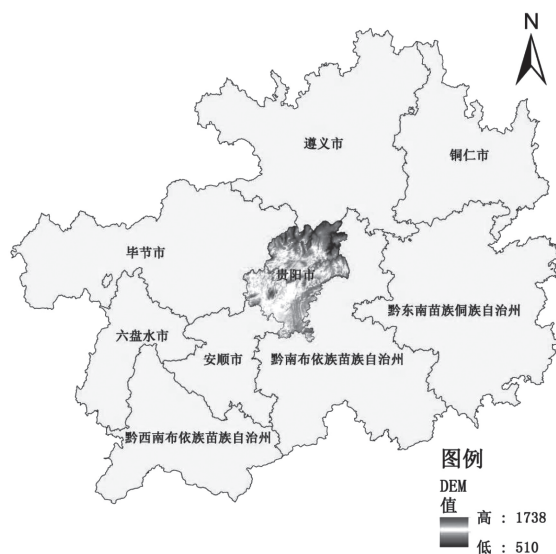


图 1 贵阳市区位示意图

2 研究方法及数据准备

基于 GIS 空间分析,采用生态系统水土保持服务能力指数作为评估指标^[9],计算公式表达如下:

$$S_{pro} = NPP_{mean} \times (1 - K) \times (1 - F_{slo}) \quad (1)$$

式中: S_{pro} 为水土保持服务能力指数, NPP_{mean} 为多年植被净初级生产力的平均值, F_{slo} 为地形坡度因子, K 为土壤可蚀性因子。

2.1 多年净初级生产力平均值(NPP_{mean})

净初级生产力(NPP) 是指植物在单位时间、面积上由光合作用产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分,是生产者能用于生长、发育和繁殖的能量值,反映了植物固定和转化光合产物的效率,也是生态系统中其他生物成员生存和繁衍的物质基础;这里采用 2000 年—2020 年近 20 年的平均年净初级生产力(NPP_{mean})。

$$NPP_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

式中: NPP_{mean} 为多年平均净初级生产力, n 为年限时间, X_i 为该年的净初级生产力。

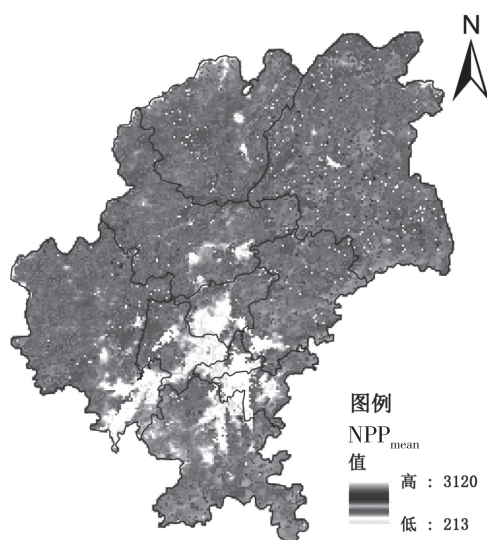


图2 多年平均净初级生产力(NPP)值

2.2 土壤可蚀性因子 K 值

土壤可蚀性因子 K 值是土壤抵抗侵蚀力的综合表现,不同的土壤类型 K 值大小不同, K 值的大小,决定土壤受侵蚀可能性的大小。所以,本文采用 Sharply 和 Williams 等^[13] 提出的 EPIC 模型公式计算 K 值,公式表达如下:

$$K = 0.1317 \cdot \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{SIL}{CAL + SIL} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times$$

$$\left[1 - \frac{0.7SN}{SN + \exp(22.9SN - 5.51)} \right] \quad (3)$$

式中, SAN 为砂粒含量的百分比值, SIL 为粉砂含量的百分比值, CLA 为粘粒含量的百分比值, C 为有机质含量的百分比值, $SN = 1 - SAN/100$ 。

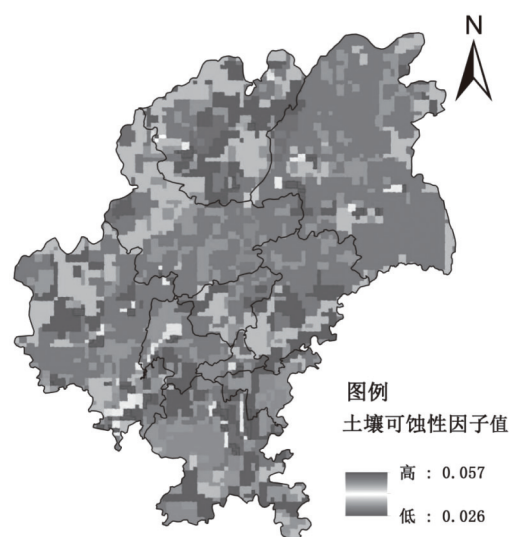


图3 土壤可蚀因子

2.3 地形坡度因子(F_{slo})

采用 90 m 分辨率的数字高程模型(DEM)数据提取坡度因子,这里可在 GIS 软件的空间分析里的坡度分析工具计算得出,公式如下。

$$F_{slo} = \frac{H}{L} \times 100\% \quad (4)$$

式中, H 为高度差, L 为水平距离, F_{slo} 为坡度因子。

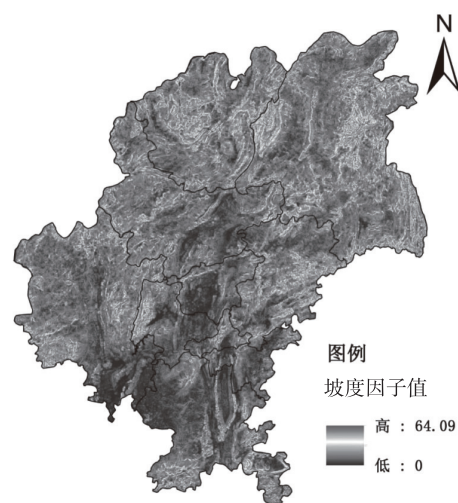


图4 坡度因子

2.4 数据来源

根据上述评估方法,收集贵阳市净初级生产力(NPP)空间分布数据、土地土壤资源数据、高程数据等重要性评估所需数据,如表 1 所示。

表 1 水土保持功能重要性评估的数据来源

名称	类型	用途	数据来源
NPP 数据集	栅格	代表生境条件植被状况	中国科学院资源环境科学与数据中心
土地资源数据	矢量/Excel	计算土壤可蚀性因子	土壤数据库农业部门/中国土壤数据库
高程数据集	栅格	计算地形因子	地理空间数据云

3 结果与分析

因各因子的单位及数值大小不统一,但为了更好地科学评估,这里对各因子进行了归一化处理。按照《指南》要求,分别划分为极重要、重要和一般重要 3 个等级,取计算结果的最高等级作为水土保持功能重要性等级,对其进行分等定级。

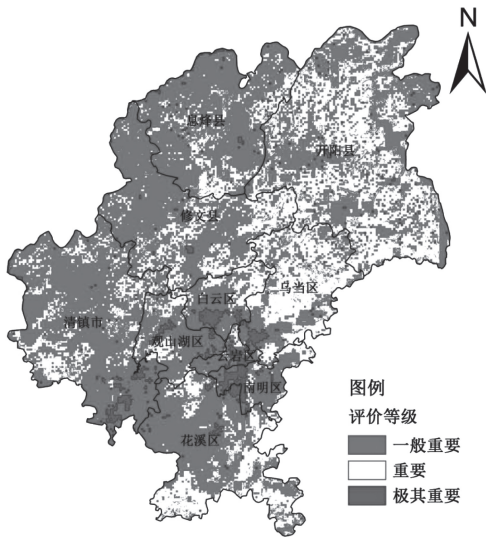


图 5 水土保持功能重要性评价结果

3.1 研究区水土保持功能重要性等级总体分布情况

总体来看,水土保持功能重要性的三个等级在全区域均有分布,其中一般重要等级的区域面积为

5151.58 平方千米,占总区域的 64.5%;重要等级的区域面积为 2608.23 平方千米,占总区域的 32.43%,极其重要等级的区域面积为 283.20 平方千米,占总区域的 3.52%。从各等级分布区域来看,一般重要等级主要分布在贵阳市的西部及西北部区域,重要等级主要分布在贵阳市的东部及东北部区域,极其重要等级主要分布在贵阳市的中部及中部偏南区域。从各等级总体分布特征来看,三个等级在全区域均有分布,一般重要等级和重要等级成连片区域分布,占总区域的面积及比例优势明显,而极其重要等级分布区域面积及占比极小,呈现小区域集中分布,主要分布在贵阳市城市建成区的集中区域及红枫湖、百花湖、阿哈湖等重要湖泊区域。

表 2 各区域水土保持功能重要性等级的面积占比情况

等级	行政区域(面积占比:%)									
	南明区	云岩区	观山湖	白云区	乌当区	花溪区	修文县	息烽县	开阳县	清镇市
一般重要	61.34	67.49	72.20	59.64	37.85	62.71	72.61	79.94	50.61	78.30
重要	20.36	11.21	21.06	29.33	58.45	34.42	26.15	18.11	47.41	18.22
极其重要	18.30	21.30	6.73	11.03	3.70	2.87	1.24	1.95	1.98	3.48

3.2 研究区各行政区域水土保持功能重要性等级分布情况

从各行政区域看,在一般重要等级上,除乌当区外,另外 9 个区域一般重要等级在区域占比均比较高,其中息烽县和清镇市在一般重要等级上占比最高,分别为 79.94% 和 78.30%;在重要等级上,除开阳县达 47.41% 外,另外 9 个区域重要等级在所在区域占比均较低,其中息烽县和云岩区在重要等级上占比最低,分别为 18.11% 和 11.21%;在极其重要等级上,除云岩区与南明区达 21.30% 和 18.30% 外,另外 8 个区域极其重要等级在所在区域占比均较低,其中息烽县和修文县在极其重要等级上占比最低,分别为 1.95% 和 1.24%。

从各行政区域各等级面积看,开阳县因行政区域较大,各等级所占面积均较大,其中一般重要等级面积为 1024.72 km²,重要等级面积为 959.89 km²,极其重要等级面积为 40.15 km²;而云岩区行政区域最小,各等级所占面积均较小,其中一般重要等级面积为 60.01 km²,重要等级面积为 9.97 km²,极其重要等级面积为 18.94 km²;这里也看出虽然云岩区行政区域面积较小,但极其重要等级在该区域的面积占比却较大。

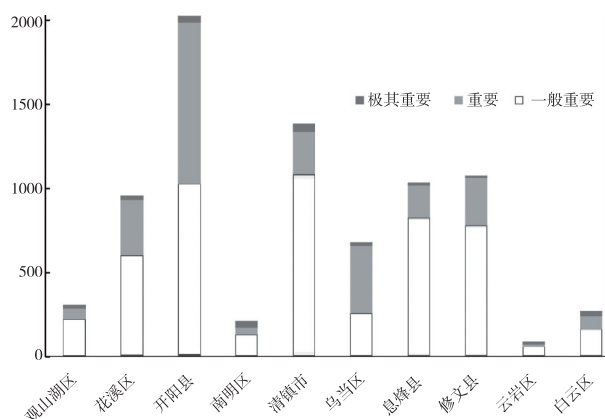


图6 研究区域水土保持功能各重要性评估等级占比情况

4 结论

贵阳市水土保持功能重要性以一般重要等级和重要等级为主,其中一般重要等级的区域面积为 5151.58 km², 占总区域的 64.5%; 重要等级的区域面积为 2608.23 km², 占总区域的 32.43%; 极其重要等级分布区域面积及占比极小, 呈现小区域集中分布, 主要分布在贵阳市城市建成区的集中区域及红枫湖、百花湖、阿哈湖等重要湖泊区域; 贵阳下辖各行政区域也以一般重要、重要等级为主; 但各区域的水土保持功能重要性等级分布差异存在较明显的特征, 贵阳中心城区的水土保持功能重要性等级分布与其他区域明显不同, 尤其是极其重要等级面积明显增多, 这是以后水土保持重点关注区域, 而其他各地区可根据差异性提供不同的水土保持策略。

参考文献【REFERENCES】

[1] 冯磊, 王治国, 孙保平, 等. 黄土高原水土保持功能的重要性评价与分区[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(4): 16-21.

[2] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J]. 地球科学进展, 2007(6): 573-582.

[3] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.

[4] 余新晓, 吴岚, 饶良懿, 等. 水土保持生态服务功能评价方法[J]. 中国水土保持科学, 2007(2): 110-113.

[5] 张霞, 刘晓清, 王亚萍, 等. 秦岭生态功能区水土保持治理效益评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 86-90.

[6] 李该霞, 宋蒙亚, 谢丽芳, 等. 江苏省水土保持功能的重要性评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 236-241.

[7] 孙应龙, 李娜, 黄斌斌, 等. 2000-2019 年黄土高原地区土壤保持时空变化及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 290-297.

[8] 汪晓珍, 吴建召, 吴普侠, 等. 2000-2015 年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和 NPP 服务的时空分布与权衡/协同关系[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 114-121.

[9] 环境保护部. 关于印发《生态保护红线划定指南》的通知[EB/OL]. [2023-11-04]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm.

[10] 高红艳, 刁承泰. 试论喀斯特地貌对城市发展建设的影响——以喀斯特山区城市贵阳为例[J]. 中国岩溶, 2010, 29(1): 81-86.

[11] 丁颖蕾. 贵阳市近自然经营马尾松林水土保持生态效益评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.

[12] 舒天竹. 贵阳市城市绿地水土保持生态效益评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.

[13] SHARPLY A N, WILLIAMS J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator. 1. Model documentation[J]. USDA technical bulletin, 1990; 3-9.

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2023-12-18

作者简介: 胡先培(1993-), 男, 硕士, 贵州省盘州市人, 研究方向: 土地资源管理、生态恢复等。

贵州正安地区五峰组—龙马溪组页岩气组分及含气性特征^{*}

吴松¹, 冯冰², 于继良³, 蓝宝锋⁴, 王胜², 李刚权²[▲]

(¹ 贵州乌江能源投资有限公司, 贵州 贵阳 550081; ² 贵州页岩气勘探开发有限责任公司, 贵州 遵义 563000; ³ 贵州能源集团有限公司, 贵州 贵阳 550081; ⁴ 贵州能源产业研究院有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 选取贵州正安地区安场向斜 7 口五峰组—龙马溪组页岩气取心井为研究对象, 根据现场解析及页岩气样品组分分析, 以期了解正安地区五峰组—龙马溪组页岩气组分特征及含气性特征。结果表明: 五峰组—龙马溪组页岩气组分中以甲烷为主, 含量 98.25 % ~ 98.36 %, 平均 98.33 %, 氦气含量为 0.06 % ~ 0.07 %, 达到了含氦气田标准; 总含气量 1.64 ~ 5.88 m³/t, 平均 3.02 m³/t, 含气性总体表现出从向斜中部向南北两端逐渐减少, 从向斜核部向两翼逐渐降低的趋势。随着深度的增加总含气量不断增加, 并在龙马溪组底部达到最大; 解吸气量约占总含气量的 31.3 % ~ 66.7 %, 损失气量占比为 32.5 % ~ 66.0 %。游吸比为 1.39 ~ 5.49, 平均 2.20, 整体较高, 位于向斜核部的 Ay1、Ay4 井的游吸比最高, 具有较好的保存条件及可开采能力; 含气饱和度整体较高, 为 58.85 % ~ 86.18 %, 平均 75.60 %, 具有良好的资源前景。

关键词: 正安地区, 黔北地区, 五峰组—龙马溪组, 页岩气, 安场向斜, 氦气, 含气性

中图分类号: TE133 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6563(2024)05-0056-05

Shale gas composition and gas bearing characteristics of Wufeng–Longmaxi Formation in Zheng'an area, Guizhou Province^{*}

WU Song¹, FENG Bing², YU Jiliang³, LAN Baofeng⁴, WANG Sheng², LI Gangquan²[▲]

(¹ Guizhou Wujiang Energy Investment Co. Ltd., Guiyang 550081, China; ² Guizhou Shale Gas Exploration and Development Co. Ltd., Guiyang 563400, China; ³ Guizhou Energy Group Co. Ltd., Guiyang 550081, China; ⁴ Guizhou Energy Industry Research Institute Co. Ltd., Guiyang, 550025, China)

Abstract: Seven shale gas core wells in Wufeng–Longmaxi Formation in Anchang syncline in Zheng'an area of Guizhou Province are selected as the research objects. Through field analysis and composition analysis of shale gas samples, the composition characteristics and gas-bearing characteristics of shale gas in Zheng'an area are expected to be understood. The results show that methane is the main component of shale gas in Wufeng–Longmaxi Formation, with an average content of 98.33 %. The helium content is between 0.06 % and 0.07 %, reaching the standard of helium fields. The total gas content is 1.64 m³/t to 5.88 m³/t, with an average of 3.02 m³/t. The gas content decreases gradually from the central part of the syncline to the north and south ends, and decreases gradually from the core of the syncline to the two wings. The total gas content increases with depth and reaches its maximum at the bottom of Longmaxi Formation. The desorption gas accounts for 31.3 % to 66.7 % of the total gas content, and the loss gas accounts for 32.5 % to 66.0 %. Wells Ay1 and Ay4 located in the syncline core have the highest swing-to-suction ratio, which is 1.39 to 5.49, with an average of 2.20. They have better preservation conditions and recoverable ability. The overall gas saturation is high, which is 58.85 % to 86.18 %, with an average of 75.60 %. The resource prospect is good.

Keywords: Zheng'an area, Wufeng–Longmaxi Formation, shale gas, Anchang syncline, helium, gas bearing property

0 引言

中国页岩气的资源储量大、分布范围广,具有巨大的发展前景,已为我国油气增储上产做出巨大贡献。中国已成为仅次于美国的全球第二大页岩气生产国,近年来页岩气探明地质储量和产量增长显著。贵州省发育多套富有机质页岩地层,厚度大、分布广,具有较好的页岩气成藏物质基础^[1]。2011 年全国页岩气资源潜力评价结果显示,贵州页岩气地质资源量达到 $10.48 \times 10^{12} \text{ m}^3$,2012 年原贵州省国土资源厅按照“黔北突破,带动两翼,兼顾黔南”的战略思路,依托国内页岩气调查评价权威机构和单位,聘请知名专家,整合省内现有地勘单位和各种要素,配备业务骨干,开展了贵州省页岩气资源评价和有利区优选^[2]。发现并落实了五峰组-龙马溪组等多套富有机质页岩层系,并优选了有利区。2017 年正安页岩气勘查区块的拍卖落地,按照“三年落实储量、实现规模开发”的目标,正式开启了贵州页岩气勘探开发的新征程。近年来在贵州省内的页岩气勘探开发及研究层系主要针对上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组^[3-4]、下寒武统牛蹄塘组^[5-6]、下石炭统打屋坝组^[7-8]等。目前仅在黔北地区的正安地区实现了规模商业开发,2021 年在区内完成页岩气探明储量申报并获自然资源部评审备案,证实正安页岩气区块是继中石化南川区块之后国内第二个得到确认的常压页岩气资源区块,贵州页岩气勘探开发有限责任公司也成为了第一家通过页岩气探明储量评审备案的省属能源企业,页岩气产销量从 2020 年的 $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 增长到 2022 年的超 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 亿方,是贵州乃至我国页岩气勘探开发利用的一个重大历史性里程碑。促进了贵州省页岩气资源的实质性开发利用,改变了贵州省“缺油少气”的局面,有效改善贵州省能源结构,促进地方经济和社会发展。

1 区域地质概况

贵州正安地区位于贵州省遵义市北部,北接重庆南川区,东北毗邻道真县、务川县,东南与凤冈县和湄潭县交界,南靠绥阳县,西北与桐梓县接壤,素有“黔北门户”之称,这里吉他及能源产业发展蹄疾步稳,被享有中国“吉他之都、音乐之城”的美誉。研究区构造位置主体处于武陵拗陷内,中上扬子地

块东南部边缘与雪峰山基底拆离造山带之间,即川东隔槽式褶皱带西侧贵州北部褶皱强改造区,总体构造复杂,褶皱和断裂均较发育。受加里东期、海西期、燕山-喜山期等多期构造运动叠加、限制和改造,在区内形成构造形态基本一致以北东向的安场向斜、斑竹向斜(图 1),五峰组-龙马溪组页岩地层残留于向斜中,具有“残留改造,向斜浅埋”的特征,长轴长、短轴短,为典型的窄陡型向斜^[9]。地层自向斜核部向两端抬升,总体向斜的核部和东西两翼断层均发育,东翼较西翼断裂更为复杂,从向斜两翼向核部五峰组底界深度逐渐增大。五峰组沉积水体相对较深,沉积速率较低,呈贫氧-缺氧状态^[10],富有机质页岩厚度 $3.5 \sim 6.0 \text{ m}$ 。龙马溪组处于相对安静的低能强还原的深水陆棚环境,龙马溪组下部为一套黑色碳质泥页岩,黄铁矿、有机质富集,顶部属于浅水陆棚亚相沉积,优质页岩厚 $17 \sim 24 \text{ m}$ 。目前已在区内多口井测试产量达 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,正在结合开发方案推进开发区的产能、产量建设,实现了盆外向斜型常压页岩气的规模建产。

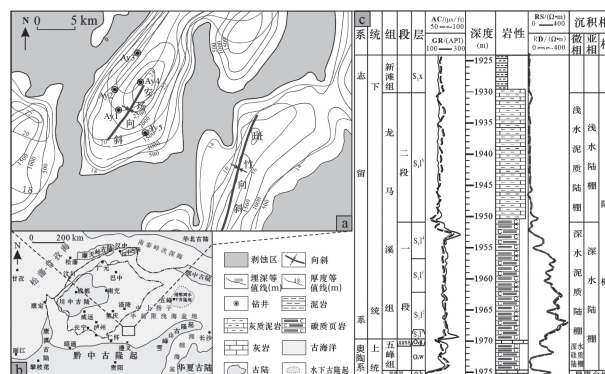


图 1 黔北正安地区位置及五峰组-龙马溪组地层综合柱状图

2 页岩气组分特征

正安地区地史上经历多期构造改造作用,保存条件复杂,页岩气组分特征在一定程度上能够判别页岩气富集保存情况,甲烷比例高的天然气,气藏未遭受大气水下渗的影响,氮气和二氧化碳含量对于页岩气藏的富集条件同样具有一定指示意义^[11]。根据安场向斜五峰组-龙马溪组页岩气组分分析结果统计,表明气体成分中甲烷占据主导地位,不同钻井中甲烷含量变化不大(图 2),为 $98.25\% \sim 98.36\%$,平均值为 98.33% 。气样中含少量的乙烷(平均含量 0.67%)和丙烷(平均含量 0.02%),几乎

不含丁烷,未检测到 iC_5 和 nC_5 。非烃气主要为 CO_2 和 N_2 , CO_2 含量为 0.14 % ~ 0.30 %, 平均 0.22 %。 N_2 含量为 0.67 % ~ 0.70 %, 平均 0.69 %, 所有样品均未检测到 H_2S 和 H_2 。值得指出的是,所检测的样品中都含有一定量的 He, 含量为 0.06 % ~ 0.07 %, 平均 0.64 %, 达到了含氦气田标准。在正安地区五峰组-龙马溪组探明烃类气体中,氦气探明地质储量规模为一小型氦气田。

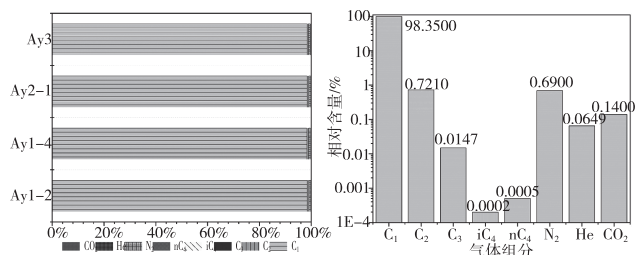


图2 正安地区五峰组-龙马溪组页岩气组分统计图

3 含气性特征

3.1 含气量特征

含气量是评价一个地区是否具有资源潜力的重要参数,页岩气为源储一体,具有游离态、吸附态和溶解态气多种赋存方式,含气量的大小对页岩气藏储量评估具有重要意义^[12],页岩储层的含气量是页岩气富集的体现,同样也是决定页岩气有无经济价值的重要参数^[11]。含气量是指每吨岩石样品中所含天然气总量在标准状态下的体积,页岩含气量测定是页岩储层评价的重要基础,测定方法包括现场解析法、等温吸附、测井解释等^[13],其中直接测试页岩含气量的是现场解析法,它能够在模拟地层实际条件下反映样品的含气性,是样品含量测量的基本方法,也是最常用的方法。解析气量是指在大气压力条件下将页岩样放入样品解吸罐中密封之后从页岩样中自然解吸出来的气体量,残余气量指经过自然解吸仍残留在样品中的那部分气体量。损失气量指在钻遇页岩层后到岩样被装入样品解吸罐密封之前从页岩样中释放的气体量,总含气量主要由解吸气、残留气和损失气3部分组成^[14]。通过正安地区7口直井五峰组-龙马溪组63块样品现场解析数据统计表明,研究区五峰组-龙马溪组解析气量分布在 0.70 ~ 3.10 m^3/t 之间(图3左),平均 1.62

m^3/t , 主要分布在 1.10 ~ 1.70 m^3/t 之间,中值 1.37 m^3/t ,其中小于 1.5 m^3/t 的样品占比为 46.03%,解析气含量在 1.50 ~ 2.00 m^3/t 的占比为 31.75%,大于 2.0 m^3/t 的占比为 22.2 %。总含气量分布在 1.64 ~ 5.88 m^3/t 之间(图3右),平均 3.02 m^3/t ,主要分布在 2.50 ~ 3.50 m^3/t 之间,中值 2.71 m^3/t 。

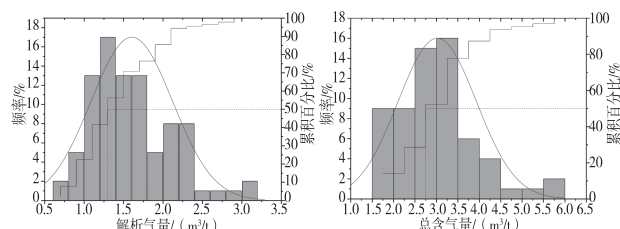


图3 五峰组-龙马溪组解析气量及总含气量分布统计图

平面上,安场向斜核部 Ay1 井、Ay1-6 井、Ay4 井目的层总含气量最高,在两翼的 Ay2 井、Ay5 井和 Ay3 井处含气量次之,在翼部南向较浅的 Ad1 井总含气量最低(图4左)。含气性总体表现出从安场向斜中部向南北两端逐渐减少,从向斜核部向两翼逐渐降低的趋势。随着深度的增加,7口井的总含气量都呈不断增加的趋势,并且在龙马溪组的底部达到最大,到五峰组后含气量又开始变低(图4右),表明龙马溪组底部的优质页岩是研究区五峰组-龙马溪组产气贡献的主力层系。

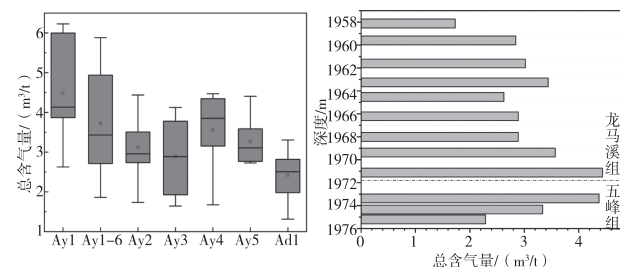


图4 研究区平面各井及垂向上总含气量统计图

从岩心浸水试验也可见,龙马溪组岩心线状气泡快速冒出,间断见喷泉状、串珠状气泡逸出,并伴有“嘶嘶”声响。其中 Ay1 井反应最为强烈,出气处数密集分布于整个岩心表面,含气均匀、饱满(图5左),显示最好。Ay2 井次之,Ay4、Ay5 井由于岩心比较破碎,气泡显示较少,但仍有多处气泡冒出(图5右)。

3.2 含气结构特征

含气性结构指现场测试页岩含气量时的不同类型解吸气、残余气和损失气的含气量的组成情况,从

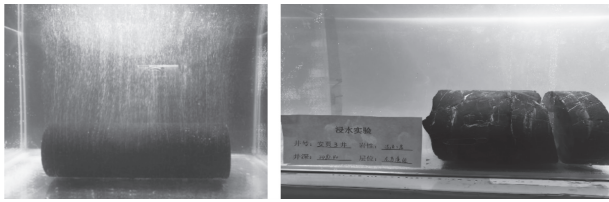


图5 现场解析岩心浸水试验照片

各井含气组成情况来看,解吸气量约占总含气量的 31.3% ~ 66.7%, 损失气量占比为 32.5% ~ 66.0%, 而残余气量气 0.4% ~ 5.7%。其中各井的含气结构有所差异同,从埋深来看,解吸气量随着深度增加呈现先降低后增加的趋势(图 6)。

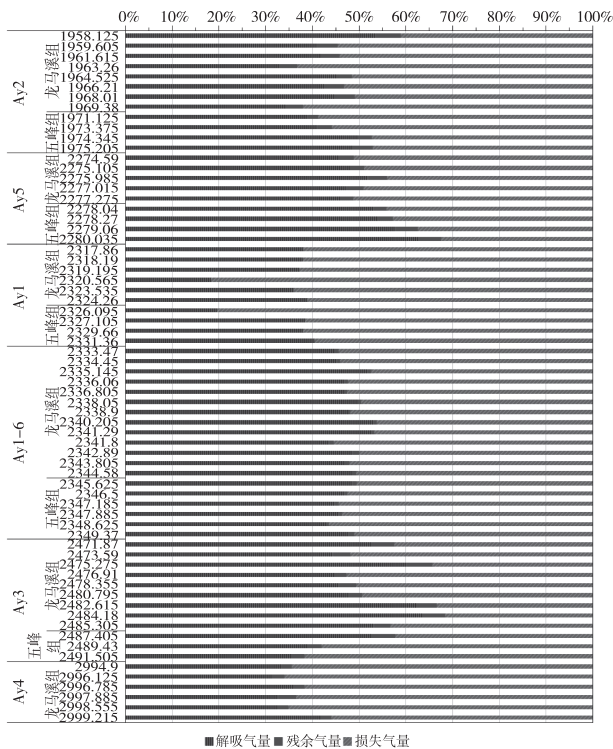


图6 正安地区五峰组-龙马溪组页岩气含气结构

游吸比是能够指导页岩气藏是否值得开发的关键指标,含气量和游吸比结合所构成的评价体系可以提供对页岩气可采性判断准确的依据^[15]。一般情况下都认为页岩含气量越高,整体评价越好,但是在实际生产中,页岩气的采收率并不是完全随着含气量的增加而增大。相反在含气量中等的页岩层系中游离气的占比越高可采资源量会较高。因此不能单一的利用含气量来作为评价指标,根据现场解吸的方法过程,可以直观地分析出地层中的游离气先逸出形成损失气,成为解吸气的首要贡献者;随着时间的延长和温度的升高,吸附气逐渐成为损失气的

主要贡献者,部分吸附气通过解吸成为吸附气的部分,同时它也是残余气体的主要成分。因此,利用现场解析的方法容易获得表征页岩游离气与吸附气的比值,即游吸比。页岩气中游离气的占比不仅能反映页岩中天然气的赋存状态,而且更重要的是指示了页岩气的可采性,表征页岩气赋存状态的游吸比值越高,页岩气越易采出^[13,15]。因此要满足含气量与游吸比同时较高的页岩层位,才是页岩的最优层系。通过计算研究区五峰组-龙马溪组页岩气游吸比,表明研究区游吸比为 1.39 ~ 5.49,整体较高,其中 Ay1、Ay4 井的游吸比最高,分别为 3.16、2.63, Ay3、Ay5 井的最低,分别为 1.84、1.74。此外,在页岩气生成初期或页岩气保存较差的情况下,游离气逸散多,吸附气含量占比高,页岩气可采能力差,所以游吸比可侧面反映页岩气的保存能力, Ay1、Ay4 井较高的游吸比反映了比 Ay3、Ay5 井较好的保存条件。

3.3 含气饱和度特征

含气饱和度是页岩气储层评价中十分重要的参数,也是页岩气勘探选区中的一项重要指标,常利用阿尔奇公式及其派生公式计算含气饱和度^[16]。随着对低渗-致密气资源投入开发,对储层中含气饱和度和定量分布预测的精度要求越来越高^[17]。核磁测井法在目前国内测井仪器和实验设备的精度达不到评价页岩气纳米孔隙的要求,非电法测井拟合关系法能有效避开电阻率的影响因素。通过对 Ay1-Ay6 井五峰组-龙马溪组富有机质页岩气段 21 块含气饱和度测定表明,五峰组-龙马溪组页岩气含气饱和度整体较高,主要介于 58.85 % ~ 86.18 % 之间(图 7),平均含气饱和度 75.60 %,中值为 76.37 %。主要分布于 70.0 % ~ 80.0 %,占样品总数的 42.86 %。

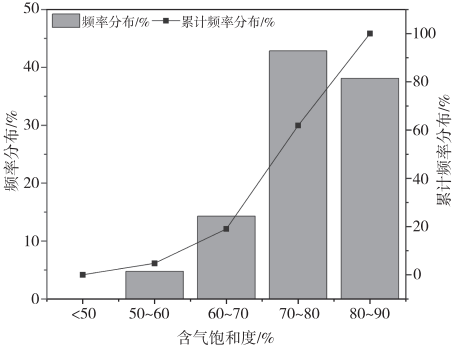


图7 正安地区五峰组-龙马溪组页岩气含气饱和度统计图

4 结论

贵州正安地区五峰组-龙马溪组页岩气组分中以甲烷为主,含少量乙烷和丙烷,几乎不含丁烷,非烃气主要为二氧化碳和氮气。甲烷含量为 98.25%~98.36%,平均值为 98.33%。研究区五峰组-龙马溪组页岩气烃类组分中含有一定的氮气,含量为 0.06%~0.07%,平均 0.64%,达到了含氮气田标准。在正安地区五峰组-龙马溪组探明烃类气体中,氮气探明地质储量为—小型氮气田。

研究区五峰组-龙马溪组页岩气解析气量分布在 0.70~3.10 m³/t 之间,平均 1.62 m³/t。总含气量分布在 1.64~5.88 m³/t 之间,平均 3.02 m³/t。含气性总体表现为从安场向斜中部向南北两端逐渐减少,从向斜核部向两翼逐渐降低的趋势。随着深度的增加总含气量呈不断增加的趋势,并且在龙马溪组的底部达到最大,到五峰组后含气量又开始变低,龙马溪组底部的优质页岩是龙马溪组产气的主力层系。

研究区五峰组-龙马溪组页岩气解吸气量约占总含气量的 31.3%~66.7%,损失气量占比为 32.5%~66.0%,残余气量占 0.4%~5.7%。研究区五峰组-龙马溪组页岩气游吸比整体较高,为 1.39~5.49,平均 2.20。位于向斜中部的 Ay1、Ay4 井的游吸比最高,具有较好的保存条件及可开采能力。研究区五峰组-龙马溪组页岩气的含气饱和度整体较高,主要介于 58.85%~86.18% 之间,平均 75.60%,具有较好的页岩气资源前景。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 秦琴,龙成雄,唐显贵.黔西南地区石炭系旧司组页岩沉积环境分析[J].中国煤炭地质,2016,28(4):35-40.
- [2] 张本杰,姚玲,罗沙,等.贵州省页岩气勘探开发现状与展望[J].天然气技术与经济,2016,10(3):57-59.
- [3] LAN B F, ZHAO F P, LI S P, et al. Investigation of the enrichment and accumulation of normal pressure shale gas in Anchang syncline outside of Sichuan Basin[J]. Frontiers in earth science, 2022, 10(9):1-11.
- [4] 何洪茜,肖加飞,杨海英,等.贵州北部五峰组烃源岩沉积环境及页岩气资源潜力[J].贵州科学,2022,40(2):59-64.

- [5] 张培先.黔中隆起及邻区下寒武统页岩气成藏特殊性分析[J].石油实验地质,2017,39(2):162-168.
- [6] 王兴富,顾秉谦.贵州地区下寒武统黑色岩系区“多元素”富集矿层分析及土壤重金属污染研究进展[J].贵州科学,2016,34(5):63-68.
- [7] 何犇,卢树藩,代雅然,等.贵州紫云地区早石炭世黑色岩系地球化学特征及油气地质意义[J].贵州地质,2022,39(4):332-341.
- [8] 郑逢赞,苑坤,单俊峰,等.复杂构造区页岩含气性与保存条件评价——以黔西南坝紫罗断裂带打屋坝组为例[J].中国海上油气,2022,34(4):109-121.
- [9] 吴松,于继良,徐尚,等.黔北地区窄陡型向斜页岩气水平井地质导向技术对策[J].地质科技通报,2022,41(4):309-316.
- [10] 何洪茜,肖加飞,杨海英,等.贵州北部五峰组烃源岩沉积环境及页岩气资源潜力[J].贵州科学,2022,40(2):59-64.
- [11] 杨振恒,魏志红,何文斌,等.川东南地区五峰组—龙马溪组页岩现场解吸气特征及其意义[J].天然气地球科学,2017,28(1):156-163.
- [12] 龚月,高和群,李小越,等.四川盆地及周缘页岩气赋存方式展布特征研究[J].非常规油气,2023,10(2):49-56.
- [13] 唐颖,张金川,刘珠江,等.解吸法测量页岩含气量及其方法的改进[J].天然气工业,2011,31(10):108-112.
- [14] 李娟,陈雷,计玉冰,等.浅层海相页岩含气性特征及其主控因素——以昭通太阳区块下志留统龙马溪组为例[J].石油实验地质,2023,45(2):296-306.
- [15] 张金川,刘树根,魏晓亮,等.页岩含气量评价方法[J].石油与天然气地质,2021,42(1):28-40.
- [16] 谢慧卓,李会银,袁卫国,等.龙马溪低电阻率页岩含气饱和度计算研究[J].测井技术,2019,43(2):161-166.
- [17] 许胜利,张雨,李辉,等.多参数下低渗-致密砂岩储层含气饱和度定量预测[J].天然气勘探与开发,2022,45(2):92-98.

收稿日期:2023-05-27;修回日期:2023-05-31

基金项目:贵州省科技厅 2024 年基础 Research 计划(自然科学)青年引导项目(黔科合基础[2024]青年 379);贵州省找矿突破战略行动重大协同创新项目(黔科合战略找矿[2022]ZD005);贵州省科技厅科技支撑项目(黔科合支撑[2021]一般 405)。

作者简介:吴松(1995-),男,贵州遵义人,中级工程师,硕士,从事页岩气勘探开发地质研究及相关管理工作。

▲通讯作者:李刚权(1985-),男,贵州遵义人,高级工程师,学士,从事页岩气勘探开发综合研究及相关管理工作。

贵州省贵定县石漠化现状及动态变化研究

云炜琦, 李飞进, 毛祥让, 陈显金, 胡 伟[△]

(贵州省山地资源研究所有限公司, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 石漠化是重要环境问题之一, 对生产生活有着重大影响。为掌握贵定县岩溶地区石漠化最新状况及变化情况, 本文采用 3S 技术对贵定县石漠化情况开展调查, 结果表明: 贵定县石漠化面积为 80853.0492 hm², 其中: 潜在石漠化面积为 72956.3338 hm², 轻度石漠化面积 3824.8074 hm², 中度石漠化面积 3686.2608 hm², 重度石漠化面积 355.9048 hm², 极重度石漠化面积 29.7424 hm²。

关键词: 贵定县, 石漠化现状, 石漠化演替类型

中图分类号: S7 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0061-03

Current situation and dynamic change of rocky desertification in Guiding, Guizhou

YUN Weiqi, LI Feijin, MAO Xiangrang, CHEN Xianjin, HU Wei[△]

(Guizhou Institute of Mountain Resources Co. Ltd., Guiyang 550001, China)

Abstract: Rocky desertification is one of the important environmental problems. In order to master the current situation and change of rocky desertification in Guiding County, this paper uses 3S technology to investigate the rocky desertification situation in Guiding County. The results show that the rocky desertification area of Guiding County is 80853.0492 hm², of which the potential rocky desertification area is 72956.3338 hm², the mild rocky desertification area is 3824.8074 hm², the moderate rocky desertification area is 3686.2608 hm², the severe rocky desertification area is 355.9048 hm², and the extremely severe rocky desertification area is 29.7424 hm².

Keywords: Guiding County, current situation of rocky desertification, succession type of rocky desertification

1 研究区概况

中国岩溶面积为 344.4 万平方公里, 岩溶地貌类型多样, 全国裸露型岩溶地貌面积为 90.7 万平方公里, 集中分布在以贵州为中心的中国西南黔滇桂湘鄂川渝地区^[1]。贵定县属于中亚热带季风湿润气候, 地处苗岭北坡, 扬子陆台褶皱带的黔南凹陷地带。年平均气温 15.5℃, 平均降水量 1084.8 mm, 境内地表出露岩石主要以碳酸盐岩为主。贵定县喀斯特发育极其成熟, 是典型的石漠化区域。

2 调查时间与方法

本次调查时间为 2022 年 6 月, 调查数据以国土三调图斑界线和地类为基准, 在此基础上与 2016 年石漠化调查矢量数据进行融合与赋值, 形成调查区划底图。并以底图为本底, 对照本期遥感影像, 对图斑发生变化的区域进行区划与初步解译, 通过现地核实, 进行图斑界线修正与因子调查。

本文采用熊康宁等的石漠标准将石漠化程度等级分为非石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石

漠化、重度石漠化和极重度石漠化等 6 级^[2],采用姚永慧等的分类标准将石漠化演化类型分为明显改善型、轻微改善型、稳定型、退化加剧型、退化严重加剧型等 5 个类别^[3]。利用 arcgis 空间叠加分析,研究石漠化程度的变化情况,分析石漠化变化原因。

3 结果与分析

3.1 石漠化现状

贵定县石漠化土地面积 80853. 0492 hm²,其中:潜在石漠化土地面积 72956. 3338 hm²,占石漠化土地面积的 90. 23%;轻度石漠化面积 3824. 8074 hm²,占石漠化土地面积的 4. 73%;中度石漠化面积 3686. 2608 hm²,占石漠化土地面积的 4. 56%;重度石漠化面积 355. 9048 hm²,占石漠化土地面积的 0. 44%;极重度石漠化面积 29. 7424 hm²,占石漠化土地面积的 0. 04%。

表 1 岩溶土地石漠化程度分土地利用类型(一级)统计表
单位:hm²

土地利用 类型	石漠化程度					
	合计	潜在	轻度	中度	重度	极重度
合计	80853. 0492	72956. 3338	3824. 8074	3686. 2608	355. 9048	29. 7424
耕地	5314. 6965	139. 9408	1673. 6757	3220. 9737	272. 7039	7. 4024
园地	2149. 3767	1756. 0212	259. 7629	128. 8423	4. 7503	
林地	72579. 6221	70725. 266	1605. 6769	223. 2383	25. 4409	
草地	742. 1632	335. 1058	285. 5935	113. 2065	8. 2574	
其他土地	67. 1907		0. 0984		44. 7523	22. 34

表 2 岩溶土地石漠化程度分植被类型统计表
单位:hm²

植被类型	石漠化土地					
	合计	潜在	轻度	中度	重度	极重度
合计	80853. 0492	72956. 3338	3824. 8074	3686. 2608	355. 9048	29. 7424
乔木型	42776. 794	42251. 1196	399. 6644	124. 4918	1. 5182	
灌木型	31949. 598	30230. 1676	1465. 7754	227. 5888	26. 0662	
草丛型	742. 2616	335. 1058	285. 6919	113. 2065	8. 2574	
作物型	5314. 6965	139. 9408	1673. 6757	3220. 9737	272. 7039	7. 4024
无植被型	69. 6991				47. 3591	22. 34

3.2 石漠化演变类型

通过对比两期调查数据,贵定县石漠化土地稳

定型面积为 128732. 5990 hm²,轻微改善型面积为 84. 4161 hm²,明显改善型面积为 10360. 2725 hm²,退化加剧型面积为 77. 1271 hm²,退化严重加剧型面积为 160. 3153 hm²。

表 3 岩溶土地潜在石漠化分植被盖度级统计表
单位:hm²

植被盖 度级	石漠化土地					
	合计	潜在	轻度	中度	重度	极重度
合计	80853. 0492	72956. 3338	3824. 8074	3686. 2608	355. 9048	29. 7424
0	5384. 3956	139. 9408	1673. 6757	3220. 9737	320. 063	29. 7424
30% ~ 39%	282. 5037		126. 7577	147. 5081	8. 2379	
40% ~ 49%	1991. 4468		1663. 83	301. 9843	25. 6325	
50% ~ 59%	3054. 1719	3025. 4698	22. 4972	6. 2049		
60% ~ 69%	5719. 6491	5581. 5645	127. 0461	9. 0671	1. 9714	
70% ~ 79%	16345. 8706	16265. 1725	80. 6074	0. 0907		
80% ~ 89%	40035. 1146	39913. 0956	121. 587	0. 432		
90% 以上	8039. 8969	8031. 0906	8. 8063			

表 4 岩溶土地石漠化演变类型统计表
单位:hm²

统计单位	石漠化演变类型				
	合计	明显 改善型	轻微 改善型	稳定型	退化 加剧型
贵定县	139414. 7300	10360. 2725	84. 4161	128732. 5990	77. 1271

3.3 石漠化变化原因

石漠化是特殊的岩溶作用过程叠加人类活动而造成的,是自然因素与人为因素共同作用的结果^[4]。自然因素是石漠化形成的基础条件,人为因素是石漠化土地形成的主要原因。通过对比两期石漠化数据,分析总结出贵定县石漠化的变化原因主要有以下几个方面:

一是近年来实施的退耕还林、封山育林、人工造林等石漠化治理工程效果明显,使得林地中的石漠化土地均为正向演替。二是群众生态意识淡薄,毁林开垦活动频繁,导致耕地中的石漠化逆向演替。三是防火意思薄弱,造成大面积的森林烧毁逆向演替为草地、其他土地。烧后大雨冲刷,水土流失,造成石漠化加剧。四是技术原因,由于前期统计时未区划园地地类,因此园地中的石漠化均为逆向演替。五是前期误判,由于 2016 年遥感技术不发达,影像

图精度低。造成上期石漠化数据粗糙,判读错误,将石漠化判为非石漠化,一定程度上造成本期石漠化数据上的逆向演替的变化结果。

表 5 岩溶土地石漠化程度分土地利用类型(一级)
动态变化统计表

土地利 用类型	时间	石漠化土地					
		合计	潜在	轻度	中度	重度	极重度
合计	2021 年	80853.0492	72956.3338	3824.8074	3686.2608	355.9048	29.7424
	2016 年	84332.35	67125.92	10667.23	6010.46	479.71	49.03
	变化量	-3479.3008	5830.4138	-6842.4226	-2324.1992	-123.8052	-19.2876
耕地	2021 年	5314.6965	139.9408	1673.6757	3220.9737	272.7039	7.4024
	2016 年	4475.58	13.1	1425.36	2697.43	308.27	31.42
	变化量	839.1165	126.8408	248.3157	523.5437	-35.5661	-24.0176
园地	2021 年	2149.3767	1756.0212	259.7629	128.8423	4.7503	
	2016 年	0	0	0	0	0	
	变化量	2149.3767	1756.0212	259.7629	128.8423	4.7503	
林地	2021 年	72579.6221	70725.266	1605.6769	223.2383	25.4409	
	2016 年	79565.98	66957.06	9216.07	3286.83	88.41	17.61
	变化量	-6986.3579	3768.206	-7610.3931	-3063.5917	-62.9691	-17.61
草地	2021 年	742.1632	335.1058	285.5935	113.2065	8.2574	
	2016 年	262.74	155.76	2.34	23.85	80.79	
	变化量	479.4232	179.3458	283.2535	89.3565	-72.5326	
其他 土地	2021 年	67.1907		0.0984		44.7523	22.34
	2016 年	28.05		23.46	2.35	2.24	
	变化量	39.1407		-23.3616	-2.35	42.5123	22.34

4 结论与建议

(1)从表 4 可以看出,石漠化演变类型为改善

型面积 10444.6886 hm²,稳定型面积 128732.5990 hm²,说明 5 年期间贵定县实施的石漠化治理工程效果显著,需要再接再厉。

(2)从表 1 可以看出,贵定县石漠化土地面积仍有 80853.0492 hm²,说明石漠化治理任务依旧艰巨,延续贵定县石漠化的治理是必不可少的。

(3)从表 5 可以看出,石漠化正向演替仅出现在林地当中,其他土地利用类型均为逆向演替。除了技术原因外,与石漠化治理工程大多是由林业主管部门实施密不可分,建议后续加强国土部门坡耕地治理、水利部门水利工程治理的资金投入力度,从多学科多方位来完善石漠化治理措施。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 靖娟利,王永锋.西南岩溶区 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系[J].水土保持研究,2016,23(5):169-174.
- [2] 熊康宁,黎平,周忠发,等.喀斯特石漠化的遥感:GIS 典型研究:以贵州省为例[R].贵州省水土保持监测站,2001.
- [3] 张钦云,孙丽娟.云南省生态工程建设对石漠化演变的影响与评价[J].林业调查规划,2013,38(2):125-129.
- [4] 蒋忠诚,罗为群,童立强,等.21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J].中国岩溶,2016,35(5):461-468.

收稿日期:2023-05-26;修回日期:2023-05-31

作者简介:云炜琦(1995-),男,本科,工程师,从事林业调查与规划相关工作。

▲通讯作者:胡 伟(1983-),男,高级工程师,研究方向:土地资源管理与林业调查规划设计。

2022 年芦山 6.1 级地震序列 b 值变化特征^{*}

李世杰, 罗丹芬, 陶 卓, 陈 涛

(贵州省地震局, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 2022 年 6 月 1 日, 四川省雅安市芦山县发生 6.1 级地震, 为研究此次地震的 b 值变化特征及该区域未来发生中强震的风险, 本文利用震中所处的龙门山断裂带两侧 40 km 作为研究区, 通过 ZAMP 程序中的拟合度检测法分析研究区 2009 年来地震序列的完整性^[1], 用最大似然法计算研究区 b 值时间和空间的变化。时间扫描中该区域的平均背景 b 值为 0.71 左右, 当 b 值小于这个值时, 发生 5 级以上地震的可能性就增大。空间扫描结果表明芦山 6.1 级地震所处位置处于低 b 值区。综合分析, 该区域未来有发生中强震的可能。

关键词: 芦山 6.1 级地震, b 值, 时间扫描, 空间扫描

中图分类号: P315.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0064-05

Variation characteristics of b value of Lushan M6.1 earthquake sequence in 2022^{*}

LI Shijie, LUO Danqin, TAO Zhuo, CHEN Tao

(Earthquake Administration of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: On June 1, 2022, a 6.1 magnitude earthquake occurred in Lushan County, Ya'an City, Sichuan Province. In order to study the characteristics of the b value changes of this earthquake and the risk of future moderate to strong earthquakes in the region, this article takes 40 kilometers on both sides of the Longmenshan fault zone where the epicenter is located as the research area. The integrity of the earthquake sequence since 2009 in the research area is analyzed by using the fitting detection method in the ZAMP program, and the temporal and spatial changes of b value in the research area are calculated by using the maximum likelihood method. The average background b value in this area during the time scan is around 0.71. When the b value is less than this value, the likelihood of an earthquake with a magnitude of 5 or above increases. The spatial scanning results indicate that the location of the Lushan 6.1 magnitude earthquake is in a low b value zone. Based on comprehensive analysis, there is a possibility of moderate to strong earthquakes occurring in the region in the future.

Keywords: Lushan M6.1 earthquake, b value, time scan, space scan

0 引言

有众多学者发现 b 值不是恒定不变的量, 在大地震之前 b 值会有明显的异常变化。1978 年李全林等提出 b 值的动态时空扫描变化可以用于研究破坏性地震孕育过程^[2]; 1981 年黄德瑜等认为大地震前区域地震活动性会呈现某些异常特征; 可用于强

震中期预报^[3]; 1982 年马鸿庆发现利用震前 b 值异常变化有望预报地震^[4]; 1998 年焦远碧探讨了将 7 级地震序列 b 值变化用于预测地震^[5]; 2012 年王辉等研究了川滇地区强震活动前 b 值的时空分布特征, 指出结合其他的地震、地质资料, 较短时间内的地震活动性资料可以为特定地区的地震潜在危险性的判定提供一定的依据^[6]; 2016 年张广伟通过计算 b 值得出盈江 5.8 级主震发生在高低 b 值过渡带的

结论^[7];2017 年刘雁冰等发现汶川地震破裂区在震前 b 值出现先降后升的异常变化^[8];2019 年高斯阳等通过研究门源 6.4 级地震发现地震发生在低 b 值区^[9];2021 年杜航等从大尺度和小尺度区域研究了河北唐山 5.1 级地震 b 值的时空变化,得出小区域研究更能反映 b 值异常^[10]。以上研究结果表明,在大地震之前 b 值出现异常变化,对 b 值时空扫描的结果分析对强震预报有一定指示意义。

2022 年 6 月 1 日 17 时 00 分,四川省雅安市芦山县(北纬 30.37 度,东经 102.94 度)发生 6.1 级地震,震源深度约 17 公里。此次地震发生在巴颜喀拉块体东边界的龙门山断裂带上,震源机制解初步结果显示为逆冲型破裂。基于前人的相关研究,本文利用龙门山断裂带两侧 40 km 作为研究区,利用拟合度检测法分析研究区 2009 年来地震序列完整性的基础上,用最大似然法计算研究区 b 值时间和空间的变化,对芦山 6.1 级地震序列 b 值变化特征进行分析,研究结果可为区域地震预测和发震概率提供参考。

1 地震目录数据

根据马瑾等的研究成果,表明强震前主破裂区(或孕震区)的 b 值存在明显变化^[11]。因此,为了更好地研究芦山 6.1 级地震序列 b 值变化特征,同时考虑断裂带上发生过的破坏性地震的影响,本文研究选取龙门山断裂带两侧约 40 km 作为研究区,范围为(29.39°~33.51°N,101.77°~106.40°E)。数据来源于中国地震台网中心国家地震科学数据中心(<http://data.earthquake.cn>),地震目录选取时间为 1970 年 1 月 1 日至 2022 年 6 月 30 日,其中 1970 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日地震目录为速报目录,2009 年 1 月 1 日至 2022 年 6 月 30 日地震目录为中国地震台网正式目录。为保证分析结果的准确性,利用 zmap 程序进行去除余震处理。去除余震前,1970 年至 2008 年数据共有 1704 条,2009 年至 2022 年数据共有 126100 条,去除余震后,1970 年至 2008 年数据共有 255 条,2009 年至 2022 年数据共有 88391 条。

图 1 为芦山 MS6.1 地震前后研究区地震分布图,五角星为芦山 MS6.1 地震震中,虚线框为研究区,圆代表 1997 年至 2008 年地震,菱形代表 2009 年至 2022 年地震,该研究区 1970 年至 2008 年记录

到 $M \geq 2.0$ 级地震 78 次,其中 $M2.0 \sim 2.9$ 级地震 3 次, $M3.0 \sim 3.9$ 级地震 37 次, $M4.0 \sim 4.6$ 级地震 30 次, $M4.7 \sim 4.9$ 级地震 6 次, $M6.0 \sim 6.9$ 级地震 1 次, $M8.0$ 级地震 1 次;该研究区 2009 年至 2022 年记录到 $M0.1 \sim 0.9$ 级地震 39313 次, $M1.0 \sim 1.9$ 级地震 12858 次, $M2.0 \sim 2.9$ 级地震 2254 次, $M3.0 \sim 3.9$ 级地震 339 次, $M4.0 \sim 4.6$ 级地震 52 次, $M4.7 \sim 4.9$ 级地震 11 次, $M5.0 \sim 5.9$ 级地震 7 次, $M6.3$ 级地震 1 次, $M7.0$ 级地震 1 次。这些地震中,震级最大的为 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震(距离本次地震约 78 km),空间距离最近的为 2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 级地震(距离本次地震约 9 km)。

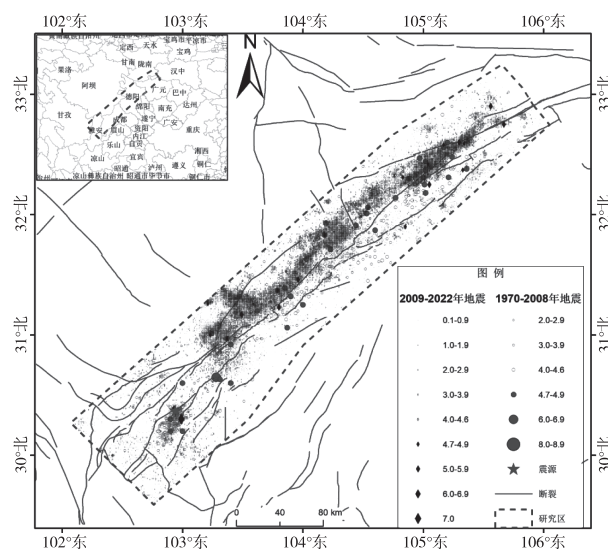


图 1 芦山 MS6.1 地震前邻区地震分布图

自 2022 年 6 月 1 日芦山 6.1 级地震发生至 6 月 30 日,共记录到 $M \geq 0$ 级余震 741 次,其中 0.0~0.9 级 553 次,1.0~1.9 级 168 次,2.0~2.9 级 18 次,3.0~3.9 级 1 次,4.0~4.9 级 1 次。其中最大余震为 6 月 1 日 17 时 03 分 09 秒 4.5 级地震。由图 2 的 $M-T$ 图可以看出余震主要集中在 1.0 级左右,频度图从 6 月 4 日开始急剧下降, $\Delta T-T$ 图显示随着时间的推移,地震发生的间隔变长。

2 计算方法

2.1 最小完整性震级分析

拟合度检测法^[12-17]是通过对比地震目录的震级-

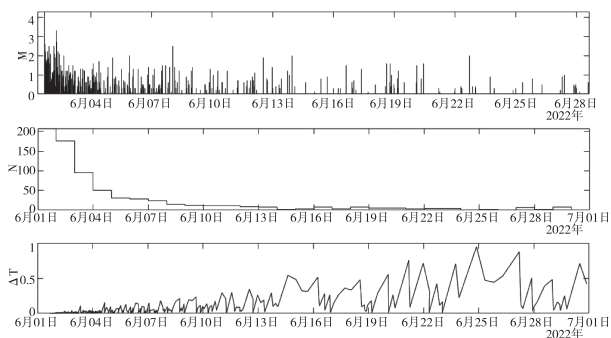


图 2 芦山 MS6.1 地震余震 M-T、频度及地震间隔时间变化图

累积频度分布和拟合的震级-累积频度分布进行比较从而计算得到 M_c 值。其中参数 R 为一个比值, 是每个震级档里实际地震数量与拟合曲线估计的地震数量的差值与实际观测地震数量的比值。计算公式如下:

$$R(a_i, b_i, M_i) = 1 - \frac{\sum_{M_k=M_i}^{M_k=M_{\max}} |B_k - S_k|}{\sum_{M_k=M_i}^{M_k=M_{\max}} B_k}$$

其中, M_i — 截止震级; B_k — 实际地震的累积数量; S_k — 拟合曲线估计地震的累积数量。

2.2 b 值计算

目前计算 b 值常用方法有最小二乘法和最大似然法^[18-20], 其中使用最大似然法计算 b 值对样本数据量要求比前者低, 个别较大地震对计算结果的影响较小, 且结果更为稳定, 故本文采用最大似然法。计算公式为 (Aki, 1965):

$$b = \frac{\lg e}{\bar{M} - M_{\min}}$$

其中: $\bar{M}$ 为平均震级, $M_{\min}$ 为最小震级。

b 值计算误差可用以下公式评估:

$$\sigma_b = \frac{b}{\sqrt{N}}$$

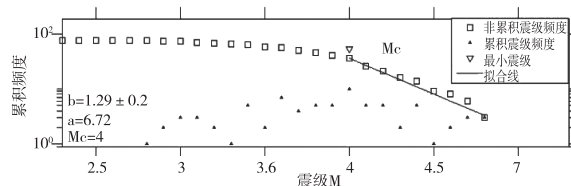
其中: N 为样本总数。

3 计算结果

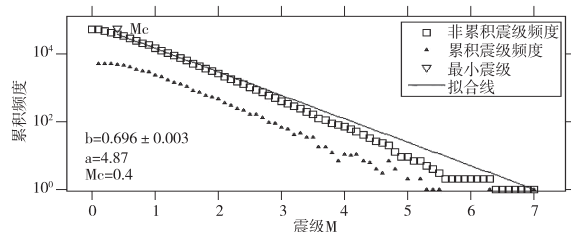
3.1 最小震级完整性分析

本文通过拟合度检测法计算得出 1970 年至

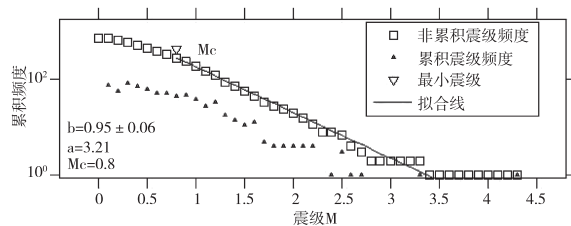
2008 年研究区最小完整性震级为 4.0, 2009 年至 2022 年 6 月 30 日研究区最小完整性震级为 0.4, 芦山地震余震进行最小完整性震级为 0.8, 其中拟合度 $R=95\%$ 。自汶川 8.0 级地震发生后, 地震灾害引起了高度重视, 监测能力大大提升, 故 2008 年前后最小完整性差别明显, 符合四川监测能力提升的实际情况。结果如图 3 所示。为保证研究的准确性, 后续选用 2009 年至 2022 年地震数据进行研究区 b 值相关分析。



(a) 1970年至2008年



(b) 2009年至2022年6月30日



(c) 余震序列

图 3 地震完整性分析

对研究区 2009 年至 2022 年最小完整性震级随时间的变化情况进行分析, 结果如图 4 所示。由图可知, 研究区整体监测水平在不断提升, 根据计算结果, 研究区的后续研究分析将选取 0.5 级以上地震目录进行 b 值计算。

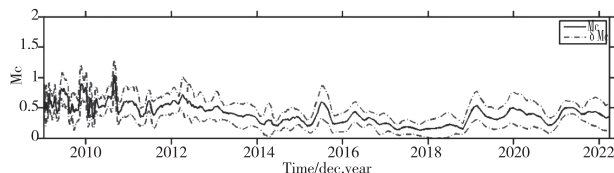


图 4 研究区 M_c 随时间的变化情况

3.2 b 值的时间变化

根据地震目录完整性分析结果, 计算 b 值时选

用地震样本时间窗宽度为 500,步长为 50,同时选取了研究区内 8 个 $M \geq 5.0$ 级地震进行对应关系分析,如图 5 所示,可以看出 6 个 $M \geq 5.0$ 级地震发震时刻与 b 值下降时段基本吻合,吻合率达到 75%。记录到 5 级以上地震大多发生在 b 值下降期, b 值的下降幅度和趋势各有不同,这表明 b 值的变化对该区域有一定的指示意义。计算表明,该区域的平均背景 b 值约为 0.69。当 b 值小于该值时,发生 $M \geq 5.0$ 级地震的可能性增加。芦山地震也发生在 b 值下降的时期。

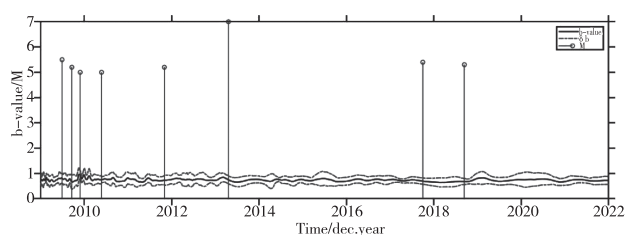


图 5 2009 年以来 b 值变化与 5 级以上地震的对应关系

芦山地震余震 b 值随时间变化情况如图 6 所示, b 值在短时间内迅速下降,而后升高,最后趋于较稳定,表明此次芦山地震应力完全释放。

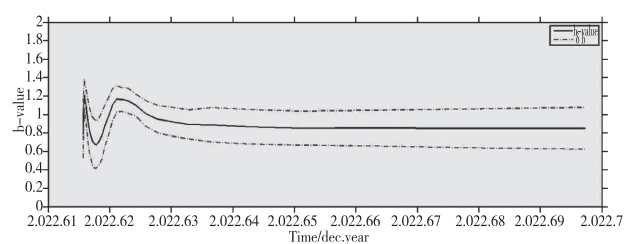


图 6 余震 b 值随时间变化情况

3.3 b 值的时空变化

b 值时间扫描结果表明,中强震发震与 b 值异常变化存在一定的关系。但由于研究区面积较大,中强震的发震区域仅从时间扫描特征无法进行准确描述^[21]。要通过 b 值分析实现对研究区中强震发生时间、空间的预测,需进行空间扫描分析研究区内 b 值异常地区^[23-24]。根据研究区地震时空分布特征,本文计算 b 值时以 0.1 为经纬度步长,计算出每个网格点的 b 值并绘制其研究区域的空间分布,如果网格点内地震数量小于 50 则进行空白处理。分别以滑动步长为 1 年、2 年计算 b 值,得到 2009 年至今的 b 值空间扫描图(图 7)。

由图 7 可知,2009 年和 2010 年因为有发生多

次破坏性地震, b 值处于 0.4 左右,整体较低,且低 b 值区主要位于汶川、北川,2011 年开始破坏性地震数量减少,故 2011 年至 2012 年 b 值处于 0.75 左右,2013 年 b 值降低至 0.6 左右后发生芦山 7.0 级地震,2014 年低 b 值区开始往芦山地区迁移,芦山附近发生地震数量显著增加,2020 年至 2022 年研究区 b 值处于 0.7 左右。图 7 反映了研究区低 b 值区域有以汶川北川为中心向周边扩张的趋势,且表现出往芦山地区迁移。

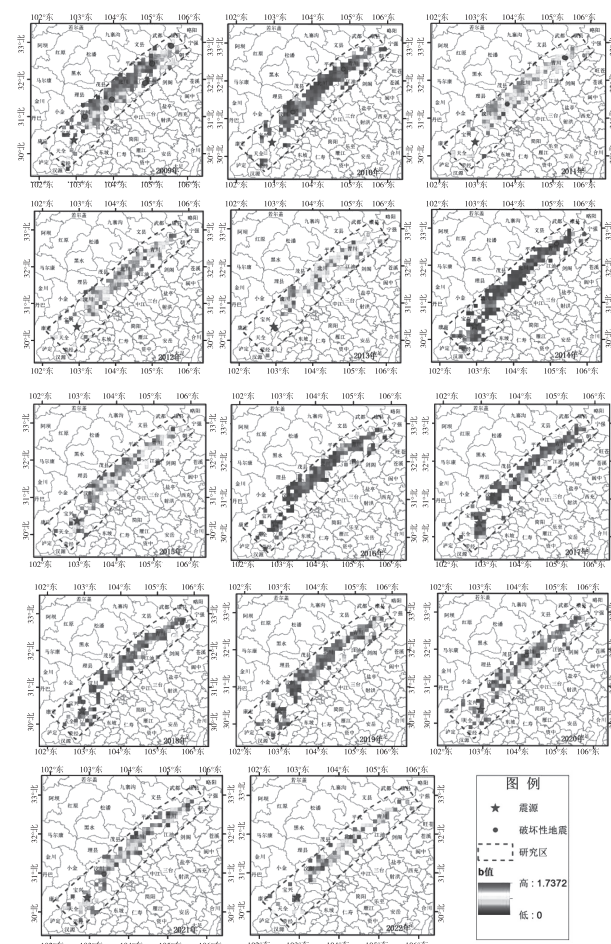


图 7 2009 年至今 b 值空间分布(滑动步长为 1 年)

图 7 显示,此次芦山地震所处位置 b 值为 0.5 左右,但研究区整体处于高 b 值状态,表明研究区经过此次芦山地震仅释放部分能量,闭锁状态打开,后续还会有中强震的可能。

4 结论

本文根据中国地震台网中心国家地震科学数据中心的目录,在分析了最小完整性震级的基础

上,以龙门山断裂带为研究区,分析 2022 年芦山 6.1 级地震前后 b 值时空扫描情况,得到以下结论:

(1)自 1970 年以来,研究区地震监测能力逐步提高,最小完整性震级有明显提升。

(2)通过分析该区域 2009 年至 2022 年 $M \geq 5.0$ 级地震 b 值的时间、时空变化,得出发生中强震前 b 值普遍存在异常低值。

(3)空间扫描计算结果表明,研究区整体处于高 b 值区,此次芦山 6.1 级地震仅释放部分能量,该区域未来有发生中强震的可能。

(4)本文在分析的过程中,使用 1970 年至今 2 级以上地震目录,缺少对 1970 年至 2022 年 5 月 31 日 2 级以下地震目录的研究分析,对分析的深度和广度存在一定限制,在后续的研究中将探索如何运用有限的数据库结合地震地质资料进行更科学合理的分析。

最后,感谢中国地震台网中心国家地震科学数据中心 (<http://data.earthquake.cn>) 提供的数据支撑。

参考文献【REFERENCES】

- [1] WIEMER S. A software package to analyze seismicity; ZMAP[J]. Seismological research letters, 2001, 72(3): 373-382.
- [2] 李全林,陈锦标,于禄,等. b 值时空扫描——监视破坏性地震孕育过程的一种手段[J]. 地球物理学报, 1978(2): 101-125.
- [3] 黄德瑜,冯浩. 强震前大范围地震活动性参数的时空扫描[J]. 地震学报, 1981(3): 283-291.
- [4] 马鸿庆. 大、中地震前 b 值的区域分布[J]. 地球物理学报, 1982(2): 163-171.
- [5] 焦远碧. 地震序列类型、地震序列 b 值与地震大形势关系初探[J]. 地震, 1998(1): 33-40.
- [6] 王辉,曹建玲,荆燕,等. 川滇地区强震活动前 b 值的时空分布特征[J]. 地震地质, 2012, 34(3): 531-543.
- [7] 张广伟. 云南地区地震的重新定位及 b 值研究[J]. 中

怀化市一次大暴雨过程分析

鞠亮亮, 彭艳青, 罗文英

(怀化市气象局, 湖南 怀化 418000)

摘要: 利用 NCEP 再分析资料(分辨率: $1^\circ \times 1^\circ$)、常规观测资料及区域自动站降水资料, 对 2015 年 7 月 22 日至 23 日出现在怀化的一次大暴雨天气过程进行分析。结果表明: 这次过程是由高空低槽带动中低层低涡切变东移所引发的, 强降雨区 850 hPa 水汽通量大、水汽辐合剧烈, 且比湿在 15 g/kg 以上; 低层正涡度、高层负涡度及低层辐合、高层辐散的形势利于强降雨的发生, 强降雨出现在 850 hPa 能量锋区前缘假相当位温大值区与 700 hPa 强垂直上升速度重叠的区域; 另外, 地形动力作用对这次大暴雨过程有一定的影响。

关键词: 大暴雨, 低涡, 水汽, 垂直速度

中图分类号: P458 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0069-04

Analysis of a heavy rainstorm process in Huaihua

JU Liangliang, PENG Yanqing, LUO Wenying

(Huaihua Meteorological Bureau, Huaihua 418000, China)

Abstract: The heavy rainstorm process occurred in Huaihua from July 22 to July 23, 2015 was analyzed by using NCEP re-analysis data, conventional observation data and regional automatic station precipitation data. The results showed that this process was caused by the eastward movement of the middle- and lower-level vortex shear driven by the upper-level trough. The water vapor flux at 850 hPa was large, the water vapor convergence was intense, and the specific humidity was above 15 g/kg in the heavy rainfall area. The situation of positive vorticity at the lower level with negative vorticity at the upper level, and convergence at the lower level with divergence at the upper level was favorable to the occurrence of heavy rainfall. The heavy rainfall occurred in the overlap area of pseudo-equivalent potential temperature large value at the edge of 850 hPa energy front and the strong vertical rising velocity of 700 hPa. In addition, the topographic dynamic effect had a certain impact on the heavy rainstorm process.

Keywords: heavy rainstorm, vortex, water vapor, vertical velocity

0 引言

大暴雨通常是一种灾害性天气, 大暴雨过程往往持续时间长、强度大, 可能会使河流水位上涨, 也可造成山洪、滑坡、泥石流等地质灾害, 给人民生活带来不利影响, 甚至威胁到人的生命。近年来许多气象工作者对暴雨及大暴雨发生的成因及机制等进行了大量的研究^[1-9]并得出了许多有意义的结

论, 但大暴雨预报仍然是怀化市预报业务的难点之一, 因此有必要对怀化地区出现的大暴雨进行研究。2015 年 7 月 22 日至 23 日, 怀化市出现了一次大暴雨天气过程, 此次过程降雨强度强、影响范围广、累积雨量大, 本文利用各种资料对这次强降雨天气过程进行了分析, 寻求有预报意义的物理量场, 以期今后类似的强降雨天气预报提供有用的参考。

1 降雨实况与灾情

受高空槽及中低层低涡切变影响,2015 年 7 月 22 日至 23 日,怀化市出现了大范围强降雨天气,22 日 20 时起怀化市北部开始出现降水,雨区自北向南逐步发展,到 23 日 08 时,全市除南部的通道县外均出现暴雨,之后雨带一直稳定在怀化市中部偏南地区,直到 24 日 08 时,降水减弱并趋于结束。据区域自动站累计雨量显示,整个过程从 22 日 20 时至 24 日 08 时,全市共有 307 站雨量超过 50 mm,其中有 120 站超过 100 mm,6 站超过 250 mm,最大雨量出现在洪江的桂花园村站,达 323.4 mm。强降雨主要集中在 22 日晚上,最大 1 小时降雨量达 90.5 mm (出现在洪江龙船塘站 23 日 03 时至 04 时)。

由于降水强度大、范围广,导致全市受灾严重,据统计,全市 18.32 万人受灾,紧急转移 2168 人,农作物受灾面积达 11.15 万亩,直接经济损失 6046.03 万元,但由于预报服务及时,未出现人员伤亡情况。

2 成因分析

2.1 天气系统配置

根据降雨实况可知,怀化强降雨时段主要出现在 7 月 22 日晚上,从 22 日 20 时天气系统配置来看(图略),500 hPa 副高北界位于华南沿海一带,利于水汽向江南、华南一带输送,在湖北西部至重庆东南部及贵州中东部一带有高空槽东移,怀化市正处于该槽的槽前;700 hPa 及 850 hPa 西南涡东移到重庆与贵州交界处,低涡一侧的切变线延伸至湖南西北部及湖北东南部一带,怀化北部正处于该切变线附近,动力抬升条件好;地面一直受热低压控制,使得 7 月 22 日怀化站最高气温达 32℃,积聚了大量不稳定能量,对流有效位能高达 3683.6 J/kg,强对流潜势大,且 K 指数达 42℃,热力条件好,利于怀化地区强降雨的出现。到 23 日 08 时,副高略有南压,高空槽稳定少动,850 hPa 在广西北部到湘东北一带南风增强,形成明显急流,怀化处于急流轴左侧,有利于水汽的输送及辐合,持续的水汽输送有利于强降雨的维持,中低层低涡东移至湘北地区,带动中

低层切变线东移南压至怀化中部略偏南地区并一直维持,从而使得怀化中部略偏南持续出现强降雨。24 日 08 时,中低层低涡东移至安徽,切变线移出怀化,怀化降水减弱结束。

2.2 水汽条件

由于造成本次大暴雨过程的水汽主要出现在低层,故对 850 hPa 的水汽通量、水汽通量散度和比湿进行分析,在降水发生前的 22 日 08 时(图 1(a)),怀化地区受一致的西南气流控制,来自孟加拉湾的水汽通道为江南地区提供了充足的水汽,怀化地区比湿均在 14 g/kg 以上,此时水汽辐合中心在重庆及贵州北部一带,怀化地区并未出现降水,到 22 日 20 时(图 1(b)),水汽输送中心呈东北—西南向的带状分布,怀化西部及北部地区水汽辐合加强,同时怀化地区比湿加大到 15 g/kg 以上,此时怀化的北部地区开始出现较强降水。到 23 日 02 时(图 1(c)),怀化地区水汽输送进一步增强,强水汽辐合中心移至湘西北,同时在怀化中东部的洪江一带有一个 15 g/kg 以上的比湿中心与强的水汽辐合中心相重叠,造成了洪江地区大暴雨的出现。到 23 日 08 时(图 1(d)),水汽输送中心东移南压,怀化北部地区水汽输送减弱,中南部地区水汽输送维持,但其水汽辐合有所减弱,此时怀化北部地区降水明显减弱,中南部地区降水维持但逐步减弱,直到 24 日,怀化地区已转为水汽通量辐散区及比湿小值区,怀化的降水也减弱结束。

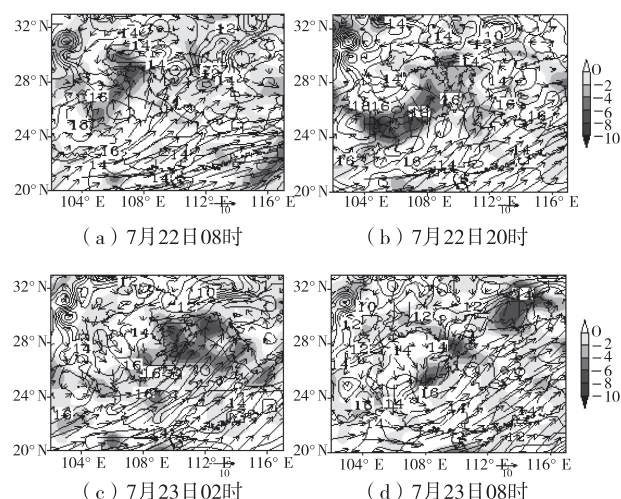


图 1 850hPa 水汽通量(矢量,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、水汽通量散度(色斑,单位: $10^{-5} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和比湿(等值线,单位: g/kg)

2.3 动力条件

由于暴雨主要集中在 $109^{\circ} \sim 111^{\circ}\text{E}$ 及 $27^{\circ} \sim 29^{\circ}\text{N}$ 范围内,现对暴雨区的平均涡度场(图 2(a))进行分析发现,22 日 20 时之前低层正涡度不明显,22 日 20 时,正涡度区域迅速自低层向高层伸展到 300 hPa 以上,且低层正涡度与高层负涡度均逐步增强,到 23 日 02 时,正涡度中心值达到 $4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 以上,此时正是强降雨发生主要时段,23 日 20 时起,低层正涡度与高层负涡度值均减小,雨势也随之减小。分析平均散度场(图 2(b))也可以发现,22 日 20 时之前各个层次散度值均不大,22 日 20 时起低层散度值迅速增大,到 23 日 02 时在低层形成一个 $-4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 的负散度(辐合)中心,其高层一直维持较大的正散度值,为低层辐合、高层辐散形势,23 日 20 时后,低层辐合消失,降雨减弱结束。可见低层正涡度、高层负涡度及低层辐合与高层辐散配合的区域利于强降雨的发生发展。

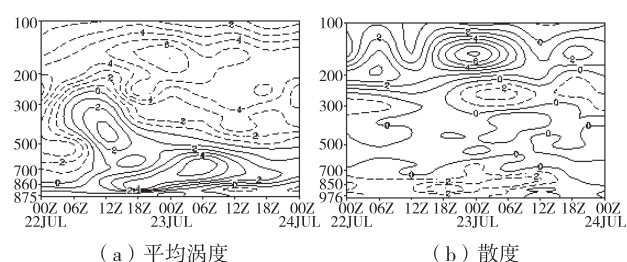


图 2 暴雨区 ($109^{\circ} \sim 111^{\circ}\text{E}$, $27^{\circ} \sim 29^{\circ}\text{N}$) 的平均涡度和散度的时间-高度剖面图
(单位: 10^{-5} m/s)

2.4 热力及不稳定条件

分析 700 hPa 垂直速度及 850 hPa 假相当位温发现,22 日 08 时(图 3(a))虽然怀化地区假相当位温较大,均在 350°C 以上,但垂直上升速度较低;20 时(图 3(b))起,能量锋区(假相当位温密集带)移到湘西北一带,怀化市北中部正处于能量锋区前缘的假相当位温大值区,且 700 hPa 垂直上升速度逐渐增强,利于该地区强降水天气的发生;23 日 02 时(图 3(c)),怀化地区垂直速度进一步增大,假相当位温维持在 354°C 以上;23 日 08 时(图 3(d))之后,能量锋区逐步南移,雨区也随之向南发展。由此可见,强降水发生在 850 hPa 能量锋区前缘假相当位温大值区与 700 hPa 强垂直速度重叠的区域。

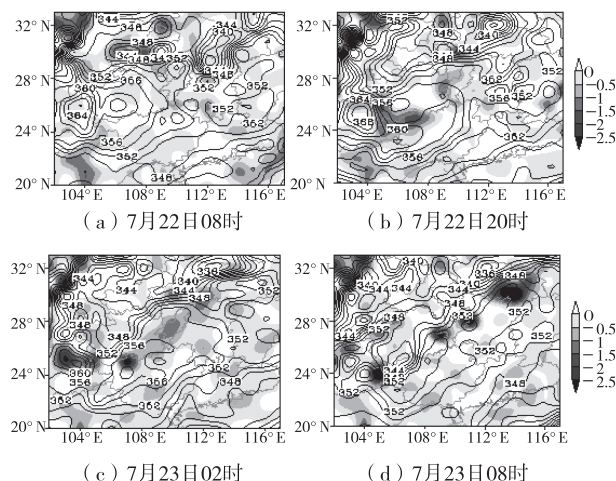


图 3 700 hPa 垂直速度(色斑,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 850 hPa 假相当位温(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)

2.5 地形作用

地形与降水的关系很密切,在同样的天气形势下,迎风坡由于动力强迫抬升作用、局地辐合辐散及降水微物理作用,降水要比其他地区偏大。这次怀化的强降雨带也与地形有着密切的关系,怀化位于湖南西部,以山地为主,呈东北西南向的狭长带状分布,地形较为复杂,西北部为武陵山脉所绵延,东南部有雪峰山脉盘踞,中间丘岗起伏,形成若干盆地,盛夏西南气流吹向怀化地区时,一方面为怀化地区带来充沛的水汽,另一方面西南气流受地形阻挡,气流抬升,造成大量水汽凝结,使地处武陵山脉南部的怀化北部及雪峰山脉西部的怀化中东部地区对流活动发展旺盛,容易造成大的降水。从 22 日 08 时至 23 日 08 时降水量与地形叠加图(图 4)可以看出,位于迎风坡的怀化市北部及中东部的降雨明显偏大,可见地形动力作用在这次大暴雨过程中起了明显的增幅作用。

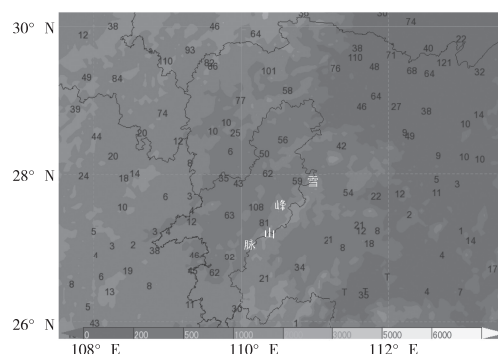


图 4 2015 年 7 月 22 日 08 时至 23 日 08 时降水量(数值,单位: mm)与地形叠加图

基于 ArcGIS Engine 的拓扑检查功能集成实现与应用

吴永星, 史 婷

(贵州省第三测绘院, 贵州 贵阳 550004)

摘 要: 随着地理信息系统(GIS)的广泛应用,数据的拓扑一致性变得尤其重要,拓扑检查是确保 GIS 数据质量的关键步骤。本文基于 Visual Studio2015+ArcGIS Engine10.4 平台,使用 C#语言开发出拓扑检查软件。研究和实践证明,该软件实现了拓扑检查流程简单化,提高了作业效率。

关键词: 拓扑检查, ArcGIS Engine, 二次开发, C#

中图分类号: P231 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0072-06

Integrated implementation and application of topology check function based on ArcGIS Engine

WU Yongxing, SHI Ting

(The Third Institute of Surveying and Mapping of Guizhou Province, Guiyang 550004, China)

3 结论

这次大暴雨过程是由高空低槽带动中低层低涡切变东移所引发的;强降雨区 850 hPa 水汽通量大、水汽辐合剧烈且比湿在 15 g/kg 以上;低层正涡度、高层负涡度及低层辐合、高层辐散的形势利于强降雨的发生;强降雨发生在 850 hPa 能量锋区前缘假相当位温大值区及 700 hPa 强垂直上升速度重叠的区域;地形动力作用对这次过程有明显的增幅作用。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 陈红专,王强,欧小锋,等. 怀化 2010 年 6 月 19 日大暴雨天气过程分析[J]. 贵州气象,2010(B09):31-35.
- [2] 陈红专,汤剑平. 一次突发性特大暴雨的中尺度分析和诊断[J]. 气象科学,2009(6):797-803.
- [3] 杨克明,张守锋,张建忠,等. “0185”上海特大暴雨成因分析[J]. 气象,2004(3):25-30.

- [4] 黄忠,吴乃庚,冯业荣,等. 2007 年 6 月粤东持续性暴雨的成因分析[J]. 气象,2008(4):53-60.
- [5] 曹晓岗. “0185”特大暴雨的诊断分析[J]. 气象,2002(1):21-25.
- [6] 林良勋,吴乃庚,黄忠,等. 广东 2008 年罕见“龙舟水”特点及成因诊断分析[J]. 气象,2009(4):43-50.
- [7] 叶树春,周武,蔡晶. 一次区域暴雨天气过程分析[J]. 广东气象,2011(6):8-12.
- [8] 陈炳洪,林良勋,张维,等. 5·23 广东特大暴雨过程特点及数值诊断分析[J]. 热带气象学报,2011(5):738-744.
- [9] 彭艳青,王强,鞠亮亮,等. 怀化地区一次大暴雨过程两个降雨阶段对比分析[J]. 中低纬山地气象,2019(4):23-31.

收稿日期:2023-07-20;修回日期:2023-07-25

作者简介:鞠亮亮,男,工程师,主要从事气象服务及气象装备保障工作。

Abstract: With the widespread application of Geographic Information Systems (GIS), the topological consistency of data has become particularly important, and topology check is a key step in ensuring the quality of GIS data. This article is based on the Visual Studio2015+ArcGIS Engine 10.4 platform, and develops a topology check software using C# language. Research and practice have proven that this software simplifies the topology check process and improves operation efficiency.

Keywords: topology check, ArcGIS Engine, secondary development, C#

0 引言

矢量数据是空间数据的重要组成部分,保证数据的拓扑正确性是矢量数据建库工作的重中之重^[1]。在实际项目生产过程中,经常需要多次、反复地执行重复的处理功能和环节,处理过程费时费力且操作时容易出现错误,不易满足效率和质量的要求^[1]。

测绘相关项目生产过程中,受到不同作业人员的作业方法、制图水平和制图经验等因素的影响,导致图形数据可能存在各式各样的拓扑错误,这些错误会给地理数据入库带来很大的麻烦。所以,为保证数据入库的质量,必须通过拓扑检查来消除拓扑错误^[2]。而基于 ArcMap 在实现拓扑检查过程中需要涉及多个步骤(①新建要素集;②要素类导入要素集;③新建拓扑;④要素类添加至拓扑;⑤添加拓扑规则;⑥验证;⑦导出拓扑错误),使用过程相当不便,且有的拓扑检查功能 ArcMap 中并没有实现(如面折刺角、面节点密度等)。本文为了解决这一问题,将以上 7 个拓扑检查步骤,使用 ArcGIS Engine 集成封装,用户只需要选择待检查图层,点击确定即可实现矢量数据的拓扑检查。软件的组成结构如图 1 所示。

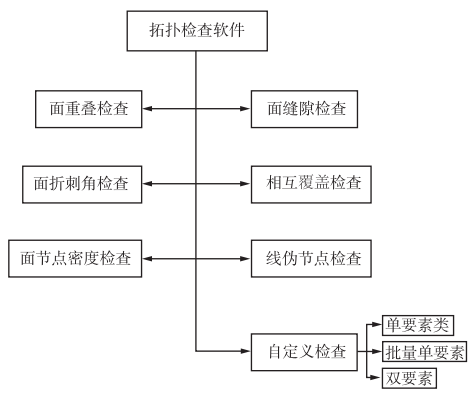


图 1 软件组成结构

1 关键技术

1.1 ArcGIS Engine 技术

ArcGIS Engine 是美国 ESRI 公司推出的一套功能完备的嵌入式 GIS 组件库和工具库^[3],开发出的 GIS 系统可以脱离 ArcGIS 桌面端而独立运行。用户可以基于 ArcGIS Engine 结合自己的业务工作二次开发出满足业务需求的 GIS 系统。ArcGIS Engine 支持多种开发语言,其包括控件、工具条和对象库 3 个关键部分,控件是通过嵌入方式成为 GIS 程序的用户界面组成部分;工具条是进行地理信息交互的 GIS 工具集合;对象库是 ArcObject 的几何图形、GIS 数据源和 Geodatabase 的集合^[3]。

1.2 ArcGIS Engine 基于规则的拓扑模块

拓扑是地理要素间的空间关系,是确保数据质量的基础。拓扑能提高空间分析能力,其在确保 GIS 数据库质量方面扮演了重要角色。拓扑的实现依赖于一组完整性规则,它定义了空间相关的地理要素和要素类的行为。当拓扑规则应用于 Geodatabase 中的要素或要素类时,它就使得 GIS 用户能够建立连通(connectivity)和邻接(adjacency)这样的空间关系。拓扑同样能够管理不同要素类间几何重叠的完整性(比如,海岸线和国界是否重叠)^[4]。ArcGIS 也包括了一组空间操作工具,以此来编辑共享几何形体(geometry),并且基于用户应用的规则来发现空间关系中的错误^[4]。

拓扑主要研究空间内在连续变化下维持不变的性质,拓扑关系是地理空间实体之间的关系,描述的是不同要素的空间联系,参与拓扑的要素类主要是点、线和面^[2]。拓扑检查的目的是定义要素之间的空间位置关系,以确保数据的质量^[5]。ArcGIS Engine 同样提供了拓扑检查接口,用户可以根据实际项目生产需要,自行开发实现相应的功能。

2 软件的实现及应用

2.1 软件的实现流程

(1) 在软件的根目录下有一个默认 GDB 数据库 temp.gdb, 通过 IDataset 接口实现 GetDataset() 方法去读取 temp.gdb 下默认的数据集“MyDataSet”; (2) 使用 ITopology 接口实现 CreateTopology() 方法新建拓扑“MyTopu”; (3) 使用 IFeatureClass 接口实现 FtClassToDataset() 方法将待检查的要素类添加至要素集“MyDataSet”, 这里将方法 FtClassToDataset() 实现了重载, 可以将多个要素类添加至要素集; (4) 实现一个方法 AddFtClassToTopology(), 将已添加至要素集中的要素类添加至拓扑; (5) 通过方法 PUB_AddRuleToTopology(), 实现在拓扑中对要素类添加拓扑规则, 值得说明的是, 这里需要添加的拓扑规则是开放给用户的, 内部的代码使用枚举类 Topo-ErroType 实现, 用户可以根据需要, 自行选择待添加的拓扑规则。同样, 方法 PUB_AddRuleToTopology() 也实现了重载, 可以添加多个拓扑规则, 为后面实现用户自定义检查做准备; (6) 通过方法 PRV_ValidateTopologyWithGP(), 实现验证拓扑规则; (7) 通过方法 FuncExportTopologyErrors(), 实现导出验证后的拓扑规则错误。实现流程如图 2 所示。

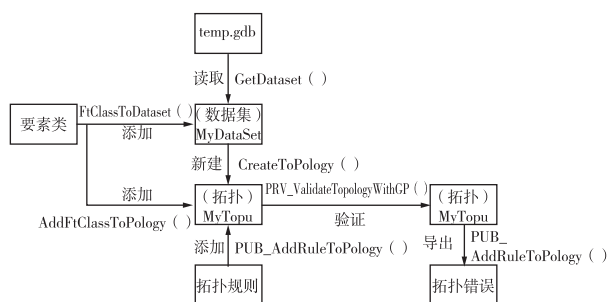


图 2 拓扑检查功能实现流程

以面重叠检查为例, 实现面重叠检查的部分代码如下:

//拓扑检查步骤的集成

```

public static void ValidateOverLap( IFeatureClass
pInputFtClass, string OutGDBPath, DevComponents.
DotNetBar.Controls.TextBoxX textBoxX_Msg)
{
    textBoxX_Msg.AppendText("执行 重叠检查...")

```

```

+ Environment.NewLine);
    textBoxX_Msg.AppendText(" step1 获取要素
集" ... + Environment.NewLine);
    IDataset pDataset = GetDataset( DataClass. strG-
DBPath, "MyDataSet");
    textBoxX_Msg.AppendText(" step2 创建拓扑
..." + Environment.NewLine);
    ITopology pTopology = CreateTopology( pData-
set);
    textBoxX_Msg.AppendText(" step3 要素类至要
素集..." + Environment.NewLine);
    IFeatureClass pFtClass = FtClassToDataset
(pDataset, pInputFtClass);
    textBoxX_Msg.AppendText(" step4 添加要素类
至拓扑..." + Environment.NewLine);
    AddFtClassToTopology( pTopology, pFtClass);
    textBoxX_Msg.AppendText(" step5 添加拓扑规
则..." + Environment.NewLine);
    PUB_AddRuleToTopology( pTopology, TopoErro-
Type. 面要素间无重叠, pFtClass);
    textBoxX_Msg.AppendText(" step6 验证拓扑规
则..." + Environment.NewLine);
    PRV_ValidateTopologyWithGP( pTopology);
    textBoxX_Msg.AppendText(" step7 导出规则
..." + Environment.NewLine);
    FuncExportTopologyErrors( pDataset, pTopology,
OutGDBPath);
    textBoxX_Msg.AppendText(" 处理完成 ..." +
Environment.NewLine);
}
//添加拓扑规则
public static void PUB_AddRuleToTopology( ITo-
pology pTopology, TopoErroType IN_RuleType, IFea-
tureClass IN_FeatureClass)
{
    ITopologyRule Temp_TopologyRule =
new TopologyRuleClass();
    //设定参数
    Temp_TopologyRule.TopologyRuleType = PRV_
ConvertTopologyRuleType( IN_RuleType);
    Temp_TopologyRule.Name = IN_RuleType. ToS-
tring();
    Temp_TopologyRule.OriginClassID = IN_Fea-
tureClass.FeatureClassID;

```

```
Temp_TopologyRule. AllOriginSubtypes = true;
PRV_AddRuleTool ( pTopology, Temp_Topology-
Rule);
}
//拓扑验证
private static void PRV_ValidateTopologyWithGP
(ITopology pTopology)
{
    Geoprocessor pGeoprocessor = new Geoprocessor
();
    pGeoprocessor. OverwriteOutput = true;
    ValidateTopology Temp_Validate = new Validate-
Topology ( pTopology );
    object obj = pGeoprocessor. Execute ( Temp_Vali-
date, null );
    object btempTopology = new object ();
    string strMessageTopology = pGeoprocessor. Get-
Messages ( ref btempTopology );
    Console. WriteLine ( strMessageTopology );
}
```

此外,还对添加拓扑规则方法 PUB_AddRuleTo-
Topology()实现了多个重载,让用户可以自定义拓
扑检查,部分代码如下所示。

//添加拓扑规则方法重载 1,自定义单要素规
则

```
public static void PUB_AddRuleToTopology ( ITo-
pology pTopology, List < TopoErrorType > listTopoErro-
Type, IFeatureClass IN_FeatureClass)
{
    for ( int i=0;i<listTopoErrorType. Count;i++)
    {
        TopoErrorType IN_RuleType = listTopoErrorType
[i];
        ITopologyRule Temp_TopologyRule = new Topol-
ogyRuleClass ();
        //设定参数
        Temp_TopologyRule. TopologyRuleType = PRV_
ConvertTopologyRuleType ( IN_RuleType );
        Temp_TopologyRule. Name = IN_RuleType. ToS-
tring ();
        Temp_TopologyRule. OriginClassID = IN_Fea-
tureClass. FeatureClassID;
        Temp_TopologyRule. AllOriginSubtypes = true;
```

```
PRV_AddRuleTool ( pTopology, Temp_Topology-
Rule);
}
}
//添加拓扑规则方法重载 2,自定义多个单要素规则
public static void PUB_AddRuleToTopology ( ITo-
pology pTopology, List < TopoErrorType > listTopoErro-
Type, List<IFeatureClass> IN_FeatureClass)
{
    ...
}
//添加拓扑规则方法重载 3,自定义双要素规则
public static void PUB_AddRuleToTopology ( ITo-
pology pTopology, TopoErrorType IN_RuleType, IFea-
tureClass IN_FeatureClassA, IFeatureClass IN_Feature-
ClassB)
{
    ...
}
```

在软件实现流程中的步骤 5 所涉及的拓扑规则
类型,展现给用户显示的是枚举类 TopoErrorType 中
的错误中文描述,目的是为了更方便用户的选择使用,
通过枚举类型的转换,将用户所选择的错误中文描
述转换成 ArcGIS Engine 中 esriTopologyRuleType 对
应的拓扑错误枚举值,其对应关系如表 1 所示。

表 1 拓扑规则转换对应表

序号	TopoErrorType	esriTopologyRuleType
1	任何规则	esriTopologyRuleType. esriTRTAny
2	面要素之间无空隙	esriTopologyRuleType. esriTRTAreaNoGaps
3	面要素间无重叠	esriTopologyRuleType. esriTRTAreaNoOverlap
4	第二个图层面要素必须被第一个图层任一 面要素覆盖	esriTopologyRuleType. esriTRTArea- CoveredByAreaClass
5	两图层面要素必须互 相覆盖	esriTopologyRuleType. esriTRTArea AreaCoverEachOther
6	第一个图层面要素必 须被第一个图层任一 面要素包含	esriTopologyRuleType. esriTRTArea- CoveredByArea
7	图层面要素不能相 互覆盖	esriTopologyRuleType. esriTRTArea- aNoOverlapArea

续表 1

序号	TopoErroType	esriTopologyRuleType
8	线要素必须跟面图层边界的一部分或全部重叠	esriTopologyRuleType. esriTRTLineCoveredByAreaBoundary
9	线要素必须在面内	esriTopologyRuleType. esriTRTLineInsideArea
10	点要素必须落在面要素边界上	esriTopologyRuleType. esriTRTPointCoveredByAreaBoundary
11	点要素必须落在面要素内	esriTopologyRuleType. esriTRTPointProperlyInsideArea
12	面要素必须只包含一个点要素	esriTopologyRuleType. esriTRTAreaContainOnePoint
13	线要素间不能有相互重叠部分	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoOverlap
14	线要素之间不能相交	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoIntersection
15	线要素不允许有悬挂点	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoDangles
16	线要素不允许有假节点	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoPseudos
17	第一个图层线要素应被第二个线图层线要素覆盖	esriTopologyRuleType. esriTRTLineCoveredByLineClass
18	第一个图层线要素不被第二个线图层线要素覆盖	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoOverlapLine
19	点要素应被线要素覆盖	esriTopologyRuleType. esriTRTPointCoveredByLine
20	点要素应在线要素的端点上	esriTopologyRuleType. esriTRTPointCoveredByLineEndpoint
21	点要素之间不相交	esriTopologyRuleType. esriTRTPointDisjoint
22	点要素重合点要素	esriTopologyRuleType. esriTRTPointCoincidePoint
23	面要素边界必须被线要素覆盖	esriTopologyRuleType. esriTRTAreaBoundaryCoveredByLine
24	面要素的边界必须被另一面要素边界覆盖	esriTopologyRuleType. esriTRTAreaBoundaryCoveredByAreaBoundary
25	线要素不能自重叠	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoSelfOverlap
26	线要素不能自相交	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoSelfIntersect
27	线要素间不能重叠和相交	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoIntersectOrInteriorTouch
28	线要素端点必须被点要素覆盖	esriTopologyRuleType. esriTRTLineEndpointCoveredByPoint

续表 1

序号	TopoErroType	esriTopologyRuleType
29	面要素内必须包含至少一个点要素	esriTopologyRuleType. esriTRTAreaContainPoint
30	线要素不能是多段	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoMultipart
31	线要素必须不相交	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoIntersectLine
32	线必须不相交或内部接触	esriTopologyRuleType. esriTRTLineNoIntersectOrInteriorTouchLine

2.2 软件的功能实现

软件实现了如图 3 所示的几个常用的拓扑检查功能,包括面重叠检查、面缝隙检查、面折刺角检查、相互覆盖检查、面点密度检查、线伪节点检查和自定义检查。表 1 所示有 30 多个拓扑错误类型,由于错误类型较多,软件并没有逐一实现其对应的功能显示在工具栏上,但是由于对添加拓扑规则方法 `PUB_AddRuleToTopology()` 实现了多个重载,且拓扑检查的各个步骤在后台都是事先封装好了的,因此该软件实现了自定义检查功能,用户通过自定义检查实现表 1 所描述的拓扑错误检查功能。

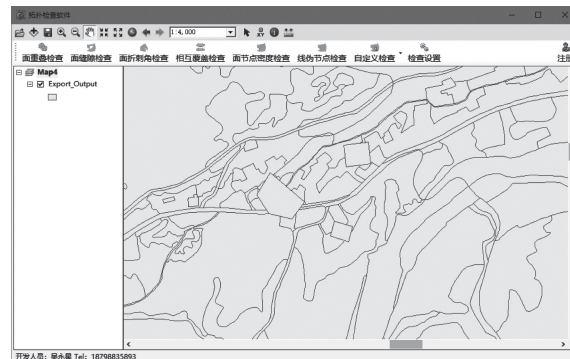


图 3 软件主界面

2.3 应用实例

以面重叠检查为例,点击“面重叠检查”,在弹出的面重叠检查对话框中依次选择待检查图层,选择检查结果存放路径,点击确定即可。如图 4 所示,图层“topu 检查结果_poly”“topu 检查结果_line”“topu 检查结果_point”即为检查结果。

此外还可以自定义检查,如同一面要素图层可以同时检查面重叠、面缝隙;多个线要素图层同时检查不能自相交、悬挂点、假节点;两个要素类之间的拓扑关系检查等,如图 5、图 6、图 7 所示。

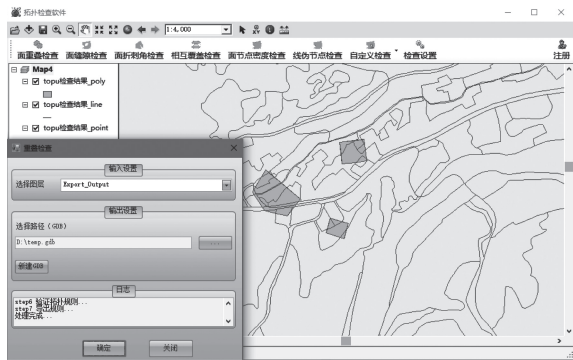


图4 面重叠检查

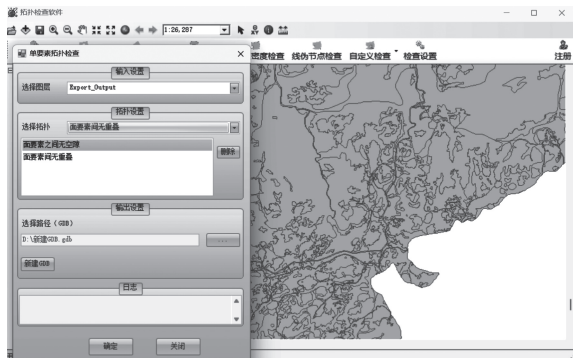


图5 自定义检查(单要素拓扑检查)

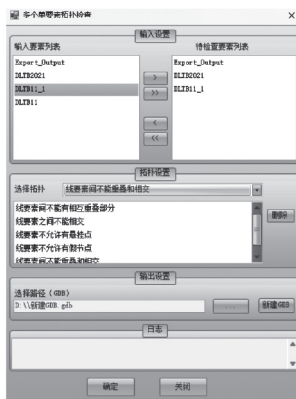


图6 自定义检查
(多个要素拓扑检查)

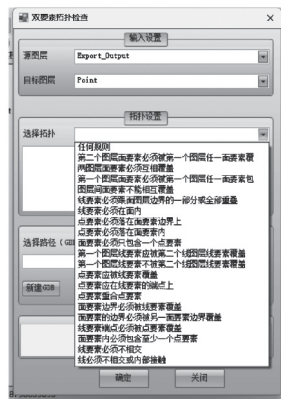


图7 自定义检查
(双要素拓扑检查)

3 结束语

软件基于 Visual Studio2015+ArcGIS Engine10.4 开发,通过实践证明,针对测绘相关项目(如三调)

所涉及的拓扑检查问题,本软件可以实现拓扑检查流程简化,省去了在 ArcMap 中繁琐的拓扑检查步骤,提高了工作效率。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 苗连朋,张莉. 基于 ArcGIS 模型构建器的矢量数据自动化拓扑检查方法[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44 (S1):43-44.
- [2] 张睿. ArcGIS 拓扑检查在农村土地承包经营权确权登记中的应用[C]//2017 年度江苏省测绘地理信息学会 GPS、大地专业委员会学术年会暨 JSCORS 技术交流大会. 2017.
- [3] 丛喜东,魏军,冯亚男,等. 基于 ArcGIS Engine 征占用林地制图排号系统的设计与实现[J]. 林业科技, 2023, 48 (1):58-62.
- [4] 韩军,徐辉. ArcGIS 中拓扑的介绍及应用[J]. 城市建设理论研究, 2012(7):1-6.
- [5] 韩涛,田峰. ArcGIS 拓扑检查在房屋确权登记中的应用[J]. 世界有色金属, 2016(12):56-57.
- [6] 张照杰. 基于 ArcGIS Engine 的多源数据拓扑检查研究[J]. 北京测绘, 2014(4):45-50.
- [7] 雷文中,王小巍,王睿燕. 基于 ArcGIS Engine 的 GIS 开发技术探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2012(28):1-6.
- [8] 牟乃夏,王海银,李丹,等. ArcGIS Engine 地理信息系统开发教程[M]. 北京:测绘出版社, 2015.
- [9] 邱洪钢,张青莲,熊友谊. ArcGIS Engine 地理信息系统开发从入门到精通[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社, 2013.
- [10] 柳锦宝. ArcGIS Engine 开发技术基础教程[M]. 北京:科学出版社, 2018.
- [11] 詹金贵,戈振扬. 基于 ArcGIS Engine 的农地确权管理系统设计[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(5):241-246.
- [12] 丁黎,王翠平,马静. 基于 ArcGIS Engine 的 GIS 开发技术初探[J]. 山西建筑, 2007(17):365-366.
- [13] 李智福,赵生良,张小宏. ARCGIS 基于规则的拓扑在地籍数据中的应用[J]. 价值工程, 2013, 32(14):230-231.

收稿日期:2024-03-07;修回日期:2024-03-07

作者简介:吴永星(1988-),男,本科,工程师,从事测绘地理信息相关工作。

聚合条件对 PEDOT 微观结构及叠层铝电性能的影响

陈绪鑫, 陈琛, 袁家印, 王艳

(中国振华(集团)新云电子元器件有限责任公司, 贵州 贵阳 550018)

摘要: 为了获得致密的 PEDOT 层, 研究了不同聚合条件对 PEDOT 生长规律、微观结构、厚度及叠层铝电容器电性能的影响。结果表明, 相对于 25% 氧化剂浓度, 35% 氧化剂浓度下 PEDOT 生长更快, 微观呈长链网状结构, 厚度更厚, 电参数更优; 氧化剂在 40 °C 条件下干燥易形成树枝状晶体, 有利于 PEDOT 更好地覆盖于铝箔表面, 厚度更均匀, 电参数更好; 增加水洗次数能让 PEDOT 在铝箔腐蚀孔内填充更好, 微观结构更致密, 厚度一致性更好, 容量引出更高, 并降低成品的损耗及 ESR。综合考虑以上条件对 PEDOT 的影响, 将一次完整的聚合分为内层填充、表面生长及厚度增加三个阶段, 形成了 PEDOT 最佳生长模型, 解决了批量生产时 PEDOT 层较薄、生长不致密等问题, 提高叠层铝电容器的电性能及可靠性。

关键词: 叠层铝电容器, 氧化剂浓度, 枝晶, 水洗次数, PEDOT, 生长模型

中图分类号: TQ316.37 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0078-09

Effects of polymerization conditions on microstructure of PEDOT and electrical properties of laminated aluminum capacitors

CHEN Xuxin, CHEN Chen, YUAN Jiayin, WANG Yan

(China Zhenhua (Group) Xinyun Electronic Components Co. Ltd., Guiyang 550018, China)

Abstract: In order to obtain dense PEDOT layers, the effects of different polymerization conditions on the growth, microstructure and thickness of PEDOT, and the electrical properties of laminated aluminum capacitors were studied. The results showed that compared with 25% oxidant concentration, the growth of PEDOT at 35 % oxidant concentration was faster, the microstructure was long chain network, the thickness was thicker, and the electrical parameters were better. When the oxidant was dried at 40 °C, it was easy to form dendritic crystals, which was favorable for PEDOT to cover the aluminum foil surface, with more uniform thickness and better electrical parameters. Increasing the water rinse times could make PEDOT better fill the aluminum foil corrosion holes, having denser microstructure, better thickness consistency, higher capacity extraction, and lower loss and ESR of finished products. Considering the influence of the above conditions on PEDOT, a complete polymerization was divided into three stages; inner layer filling, surface growth and thickness increase. On this basis, the optimal growth model of PEDOT was formed, solving the problems of thin and low-density PEDOT layer in batch production, and improving the electrical performance and reliability of laminated aluminum capacitors.

Keywords: laminated aluminum capacitor, oxidant concentration, dendrite, water rinse times, PEDOT, growth model

电子整机技术的飞速发展, 对新型电子元件的发展也提出了更高的要求, 包括其响应速度、频率、厚薄、功耗等方面^[1], 与此同时, 传统铝电解电容器的缺点也愈发显现, 即易老化、频率特性较差, 甚至

出现漏液的可能性^[2]。随着电子设备、电源电路的高频化、轻薄化及表面贴装技术的发展, 对铝电解电容器有着逐步小型化、大容量、低 ESR 和高可靠性的需求, 有些使用场合尤其需要优异的高频特性, 为

了适应高频化需求^[3],以导电高分子作为电容器固体电解质而制成的片式叠层铝电解电容器^[4-5],在平板电脑、小型电源适配器、服务器、大型户外显示器、矿机等领域的终端产品上得到了广泛的应用。

导电聚合物技术发展至今,出现了聚苯胺、聚吡咯和聚噻吩应用于固态电容器,常规固态电容中,基本上使用的导电聚合物都是聚 3,4-乙烯二氧噻吩(PEDOT)。PEDOT 作为常用的导电聚合物,其空气稳定性较强,同时具备无毒、易制备、导电性高等优势,在诸多领域都有很好的应用^[6]。近年来,为了提高叠层铝电容器的电性能和可靠性,对聚合物叠层铝电容器(以下简称叠层铝电容器)工艺进行了大量研究^[7-12]。聚合作为叠层铝电容器的关键制作工序,其主要目的是在铝箔腐蚀孔及表面生成一定厚度的 PEDOT 作为电容器的阴极,目前 PEDOT 的聚合技术有电化学聚合、化学聚合和使用 PEDOT/PSS 分散液,化学聚合是工业中最常使用的聚合技术。使用化学聚合,必须更加控制好聚合速度以沉积出更加致密的聚合物层,由于叠层铝电容器是用多片电容叠层并联而成的,单片电容的尺寸十分小(目前只有 6.4 mm×3.5 mm 尺寸),明显小于卷绕式电容的铝箔尺寸,所以要在这么小的电容上沉积导电聚合物,难度高于卷绕式固态铝电容。同时,由于叠层铝电容还会在导电聚合物外涂覆碳层和银层^[13-14],必须考虑碳层和银层渗透进电介质中影响漏电流的问题,而且还要考虑由于封装技术的机械应力对聚合物层及介质层的损伤。所以,叠层铝电容的聚合物层必须对电容器实现更加致密的覆盖,才能保证叠层铝电容器的电参数及可靠性。

针对于此,本文研究了不同聚合条件对 PEDOT 生长情况、微观结构、厚度及最终成品电性能的影响,通过对比不同条件下 PEDOT 生长规律及对成品电性能的影响,建立叠层铝电容器化学法聚合 PEDOT 沉积的最佳模型,解决了大批量生产时 PEDOT 层较薄、生长不致密等问题,提高叠层铝电容器的电性能及可靠性,对指导叠层铝电容器的制备有着重要的意义。

1 实验

由于每个公司生产叠层铝电容器的工艺不尽相同,为了研究并指导叠层铝电容器的制备,笔者根据我公司叠层铝电容器工艺流程特点,采用化学聚合

法制作工艺制备叠层铝电容器,着重研究化学聚合中聚合条件对导电聚合物生长规律、微观结构、厚度和对叠层铝电容器电性能的影响。

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

3,4-乙烯二氧噻吩(EDOT)单体:纯度 $\geq 99.9\%$;阳极化成铝箔:规格为 120LT26B-3.6 Vf,化成电压 3.6 V,比容 520 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$;氧化剂:过硫酸铵(APS),纯度 $\geq 99\%$;掺杂剂:蒽醌-2-磺酸钠水合物,纯度 $\geq 99\%$;去离子水自制;电导率 $<1 \mu\text{S}/\text{cm}$;其他所用试剂均为分析纯,无需处理直接使用。

1.1.2 表征仪器

聚合后的芯子,用体视显微镜(桂林光电,XTL-300)观察 PEDOT 生长情况,用扫描电子显微镜(日本日立公司,S-3000N)观察 PEDOT 微观结构,用千分尺(精度 0.001 mm)测量聚合后芯子厚度。

制备成叠层铝电容器后使用 KEYSIGHT E4980AL 仪表测试电容量、损耗及等效串联电阻,使用漏电流测试仪(常州同惠电子有限公司,TH2686C)测量产品漏电流,在 100 Hz 频率条件下测试电容器容量和损耗,在 100 kHz 频率条件下测量电容器等效串联电阻(ESR)。对于漏电流测量,将电容器以恒定电流充电至额定电压,然后将电压保持恒定在 120 s 后读取漏电流值。

1.2 实验过程

1.2.1 电容器的制备

本次实验制备的叠层铝电容器额定电压 2 V,标称容量 330 μF 。制备流程如图 1,用切割设备将阳极铝箔分切为 3.5 mm 宽度,分切好的铝箔组排焊接于金属载体,便于批量生产,将组排后的铝箔进行补化成,修补因切割损伤的氧化膜。通过在一定位置涂覆绝缘胶,划分正极铝箔为负极区域和阳极区域,负极区域的有效面积为 3.5 mm×4.7 mm,基于化学聚合合法制备 PEDOT 覆盖于负极区域氧化膜上,通过在 PEDOT 上被覆石墨、银浆引出负极,通过叠层粘接设备将半成品电容器箔片芯子安装在引线框架上,层数为 4 层,然后用环氧树脂进行模压塑封,再将其进行老炼,修复因机械应力、热应力等造成损伤的氧化膜,并剔除早期失效的产品,测量分选出良品,最后进行试验测试。

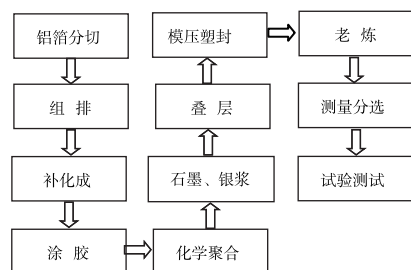


图1 聚合物叠层铝电解电容器制备流程

1.2.2 化学氧化聚合流程

聚合工艺流程如图2所示,化学法聚合是单体在氧化剂作用下聚合,使用过硫酸铵作为氧化剂,蒽醌磺酸盐作为抗衡离子掺杂聚合物中以稳定 PEDOT 主链中的正电荷,反应方程式如图3所示。具体工艺上,首先将电容器芯子含浸入氧化剂溶液中,然后干燥蒸发溶剂,再含浸入 EDOT 单体溶液中,之后在一定的温湿度下进行聚合反应。一般条件下这样的工艺沉积的导电聚合物比较少,无法完全覆盖多孔铝箔,所以需要循环含浸多次,循环含浸前,需要先洗去之前聚合后阳极上残留的单体和氧化剂盐,清洗后干燥,然后再到第一步浸渍氧化剂。要生成一定厚度的聚合物,需要进行 15~25 次循环,本次试验固定聚合循环次数为 20 次。

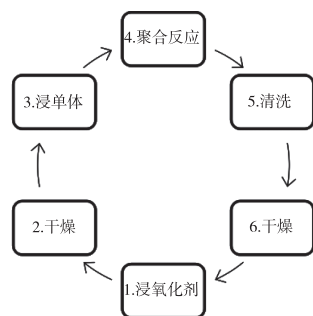


图2 化学氧化聚合工艺流程

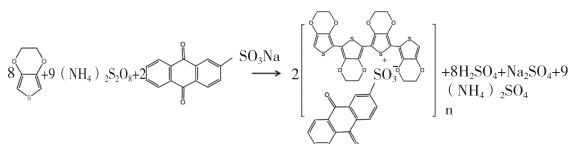


图3 化学氧化聚合反应方程式

1.2.3 对比条件

本文主要针对化学聚合的以下条件进行对比研究:

1) 氧化剂(APS)浓度的影响,质量百分比浓度 25% 对比 35% ;

2) 氧化剂(APS)干燥温度的影响,40 °C 对比 50 °C ;

3) 清洗次数的影响,每次循环水洗对比每两次循环水洗。

1.3 性能测试

具体测试项目如下:

1) 宏观生长规律对比:每一次聚合循环留样,观察不同聚合条件下聚合物的宏观生长情况;

2) PEDOT 微观结构:聚合后的芯子,用扫描电镜观察各条件聚合物生长的微观形貌;

3) 厚度对比:聚合后的芯子,测量不同条件下芯子的厚度;

4) 电性能对比:对比每个条件成品的容量、损耗角正切、等效串联电阻(ESR)及漏电流。

2 结果与讨论

2.1 宏观生长规律

2.1.1 不同氧化剂浓度的影响

实验选择了不同氧化剂浓度进行对比,各浓度条件每个聚合循环后留样,对比留样样品聚合物宏观生长规律,如图4所示。由图可看出,第 1/5/9/13/15/17/20 次循环后的样品在不同氧化剂浓度条件下,PEDOT 在铝箔表面的生长规律不一样。在 15 圈以前,35% 氧化剂浓度条件下聚合物生长速率比低浓度快,15 圈后不明显;25% 浓度下,聚合物从底端和中部开始生长,边角较薄,高浓度条件下,聚合物从上端和底部开始生长,中部偏薄。

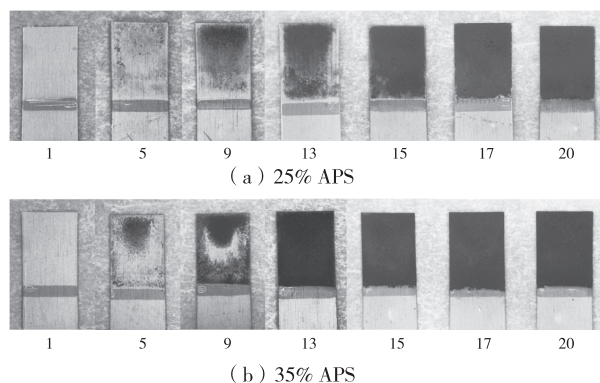


图4 不同 APS 浓度条件下聚合物生长情况

EDOT 在氧化剂为过硫酸铵时,过硫酸铵与 EDOT 物质的量比值越大,EDOT 聚合速率越快且转

化率越高^[15],所以氧化剂浓度提高有利于加快聚合物生长速度,但是浓度提高后,氧化剂在铝箔表面的附着状态会发生变化,35%浓度下氧化剂会集中在箔片上下两端,中部较薄,这种情况会导致聚合后芯子中部偏薄,厚度一致性差。

氧化剂溶液是将氧化剂(白色粉末状晶体)缓慢加入预先配制的掺杂剂水溶液中,并在一定转速下搅拌,形成浑浊状态的悬浮液,其特点是静置一定时间,氧化剂小颗粒会逐渐往下沉,当氧化剂浓度高时,悬浮液沉降速度相对较快。聚合初期,铝箔浸渍于氧化剂溶液中一定时间后脱液取出,使得氧化剂覆盖于铝箔表面,若氧化剂浓度高,液体里悬浮着由多分子集合成的固体小颗粒在溶液里分布不均;含浸保持阶段,部分氧化剂颗粒会附着于铝箔上端;脱液阶段,由于铝箔中部较光滑,氧化剂颗粒难以附着于铝箔中部,当铝箔快离开液面时,氧化剂水溶液存在表面张力,脱液瞬间铝箔下端会挂上一定量的氧化剂液滴,干燥后造成了铝箔上、下附着量相对较多,中部较少。低浓度时,氧化剂颗粒在悬浮液里分散较均匀,沉降速度慢,铝箔在含浸和脱液过程中除了由于脱液时铝箔下端液滴带的氧化剂较多,铝箔其他部位相对于高氧化剂浓度较均匀。聚合物的生长是随着氧化剂颗粒存在的部位进行,高氧化剂浓度在前期聚合过程中就会出现聚合物集中在铝箔上端和下端,低氧化剂浓度集中在下端及中部。

2.1.2 氧化剂干燥条件的影响

湿度一定时,实验选择了 50℃和 40℃对浸渍完氧化剂后的芯子进行干燥对比。结果发现,在 50℃干燥条件下,氧化剂干燥后为颗粒状态附着于铝箔表面,由于颗粒状的氧化剂附着力不佳,会造成氧化剂在铝箔表面分散不均匀,最终导致 PEDOT 在铝箔表面生长不均匀(图 5(a)),而在 40℃条件下干燥的芯子,铝箔表面形成了树枝状晶体(图 5(b)),这种像树枝一样蔓延生长出来的晶体,很好地覆盖在铝箔的表面,使得后续的聚合反应随着枝晶形状生长,聚合物在铝箔表面包覆良好,枝晶的形成是聚合物生长良好的关键。

溶液中析出晶体时,当结晶温度低或溶液浓度较大或分子量过大,晶体不再形成单晶,结晶的过度生长将导致较为复杂的结晶形式,由于生长速率受限于溶质原子向界面的扩散速率而发生的生长不稳定性,必须有从溶液中的过饱和值达到与表面上的

晶体平衡的浓度梯度,任何分支突起的发展伴随着尖端浓度梯度陡峭,这增加了对尖端的扩散速率,这个过程一次又一次的发生,直到产生枝晶^[16],枝晶生成是在特定方向上择优生长的结果,在湿度一定,低温条件下,氧化剂更易形成枝晶。

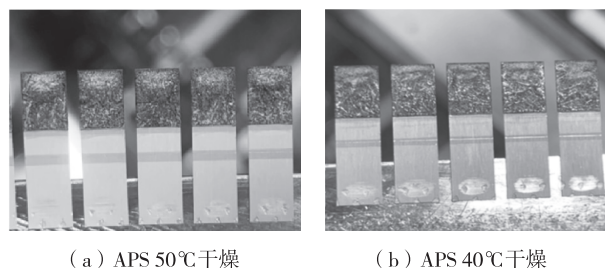


图 5 不同温度干燥条件下 APS 结晶情况

2.1.3 水洗次数的影响

实验选择了每次循环水洗及每两次循环水洗进行对比,对比 PEDOT 宏观生长规律,如图 6 所示。由图可看出,第 1/5/9/13/15/17/20 次循环后的样品,每两次循环水洗 PEDOT 生长更快。在实际的反应中,EDOT 和氧化剂实际上不能以化学计量比进行完全反应,水洗可以使未反应完全的氧化剂或者其他大颗粒杂质去除,可以使聚合物在铝箔腐蚀孔由内而外生长,每两次循环水洗生成的 PEDOT 会在铝箔表面过度生长,附着力不及每次循环水洗,可能会造成聚合物脱层。

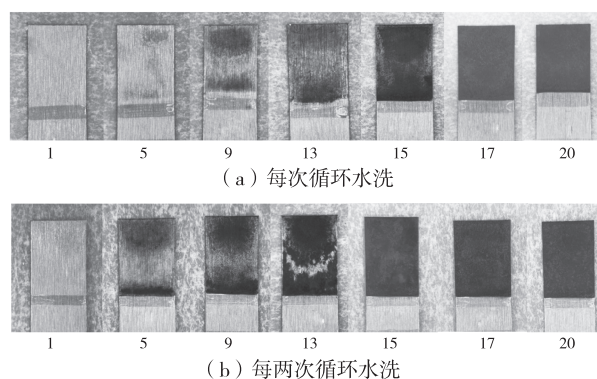


图 6 不同水洗次数聚合物生长情况

2.2 PEDOT 微观结构对比

图 7 为不同聚合条件下,化学聚合法生成的 PEDOT 微观 SEM 图。不同 APS 浓度条件下生成的 PEDOT 微观结构如图 7(a)、图 7(b)所示,25%浓度条件下,PEDOT 颗粒感比较明显,PEDOT 结构呈

小颗粒排列及大颗粒堆积状态,微观形貌杂乱无规律;而 35% 浓度下的 PEDOT 无颗粒形状,呈长链网状结构,但是此条件下形成的 PEDOT 聚合物不是非常致密,聚合物表面可以明显观察到孔洞。

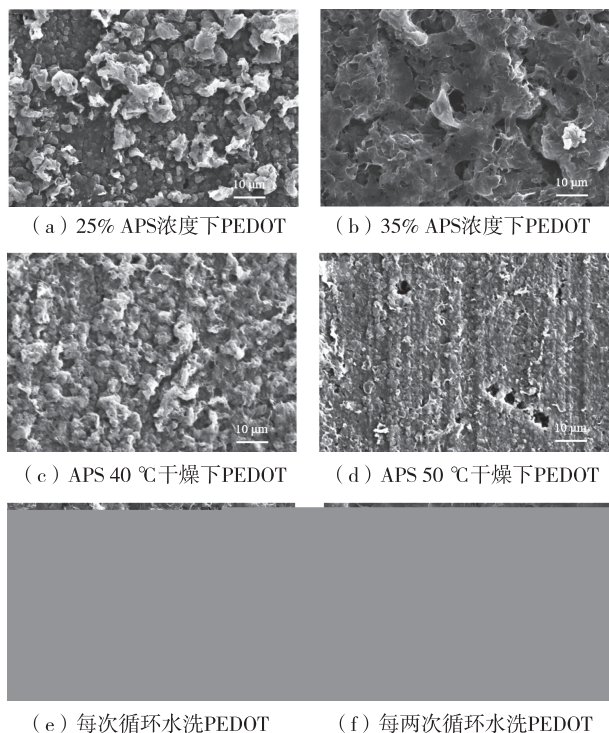


图 7 不同聚合条件聚合物 SEM 图

氧化剂不同干燥条件下生成的 PEDOT 微观结构如图 7(c)、图 7(d)所示,在 40 °C 条件下,氧化剂更易形成树枝状晶体,聚合反应时,PEDOT 在突出的棱角上要比其他邻近处的生长速度更快,从而也倾向于树枝状生长,所以最终生成的 PEDOT 也会呈枝晶状,枝晶状生长的 PEDOT 有利于铝箔表面的覆盖及边角的包覆,聚合物生长更加致密;相反地,在 50 °C 条件下干燥后的氧化剂,没有形成晶体而是呈粉末状,最终生成的 PEDOT 微观型貌也呈颗粒状,杂乱地分布于铝箔表面,从微观型貌图中可以观察到铝箔的纹路及未覆盖完成的腐蚀孔。

不同水洗条件下生成的 PEDOT 微观型貌结构如图 7(e)、图 7(f)所示,每次循环水洗条件下生成的 PEDOT 呈交联较好的网状结构,且比每两次循环条件下生成的 PEDOT 更致密,每两次循环水洗条件下生成的 PEDOT 呈膜状且较为疏松,主要原因是每次聚合后清洗能让反应的多余物及大颗粒杂质有效清除,在进行下一次聚合循环时,溶液能更好地进入腐蚀孔内部连续生长。

2.3 聚合后芯子厚度对比

不同条件下聚合后芯子厚度对比如图 8 所示。为了取样具有相对代表性,分别取第 3 架前、中、后各 1 条,测量聚合后芯子厚度,根据经验数据显示,芯子厚度如果小于 140 μm ,说明 PEDOT 层偏薄,最终会导致成品良率降低。

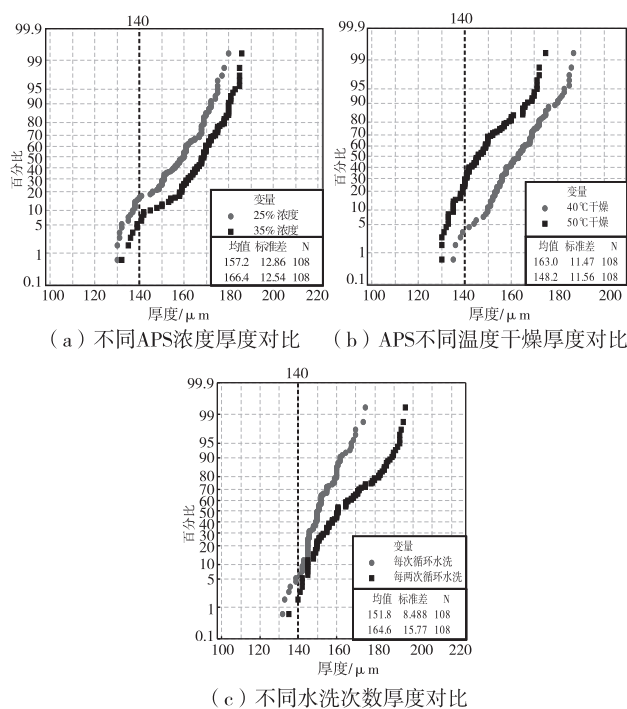


图 8 不同聚合条件芯子厚度对比

不同 APS 浓度芯子厚度的概率图如图 8(a), APS 25% 浓度下厚度均值为 157.2 μm ,标准差 12.86,厚度小于 140 μm 的约占 18%;35% 浓度下芯子厚度均值为 166.4 μm ,标准差 12.54,厚度小于 140 μm 的约占 5%,提高浓度可以提高整体芯子厚度,但是单一的提高氧化剂浓度并不能解决厚度偏薄比例大及一致性差的问题。

不同 APS 干燥温度芯子厚度的概率图如图 8(b), APS 40 °C 低温干燥下芯子厚度均值为 163.0 μm ,标准差 11.47,厚度小于 140 μm 的比例约占 4%,50 °C 高温干燥下为 148.2 μm ,标准差 11.56,厚度小于 140 μm 的比例约占 20%,说明 40 °C 干燥可以提高整体芯子厚度,原因是由于 40 °C 条件下,APS 能形成树枝状晶体,更利于 PEDOT 的生长。

不同水洗次数芯子厚度的概率图如图 8(c),每次循环水洗下芯子厚度均值为 151.8 μm ,标准差 8.49,厚度小于 140 μm 的比例约占 5%,每两次循

环下为 $164.6\ \mu\text{m}$, 标准差 15.77 , 厚度小于 $140\ \mu\text{m}$ 的比例约占 2% , 说明增加水洗次数可以提高芯子厚度的一致性, 减小水洗次数可以减少芯子厚度偏薄的比例, 但是芯子厚度一致性较差。主要原因是水洗次数减少会造成表面大颗粒的聚合物不能及时清洗掉, 最终导致厚度一致性差。

2.4 电性能对比

各条件分别取 20 只成品测量电参数, 图 9 为不同条件下成品容量对比。图 9(a) 中, APS 25% 和 35% 浓度容量均值分别为 $312.9\ \mu\text{F}$ 和 $330.8\ \mu\text{F}$, 35% 浓度下, APS 能更多地附着在铝箔表面, 使 PEDOT 在铝箔表面生长较好, 容量引出更高; 图 9(b) 中, APS $40\ ^\circ\text{C}$ 干燥和 $50\ ^\circ\text{C}$ 干燥容量均值分别为 $334.4\ \mu\text{F}$ 和 $317.2\ \mu\text{F}$, $40\ ^\circ\text{C}$ 干燥 APS 易形成树枝状结晶, 使得 PEDOT 更好地生长在铝箔表面, 容量引出更高; 图 9(c) 中, 每次循环水洗和每两次循环水洗容量均值分别为 $345.4\ \mu\text{F}$ 和 $323.4\ \mu\text{F}$, 增加清洗次数能去除反应的多余物杂质^[17], 去除未参与反应的大颗粒多余物, 使聚合物在铝箔腐蚀孔循序渐进地生长, 填充更好, 从而成品容量引出更好。

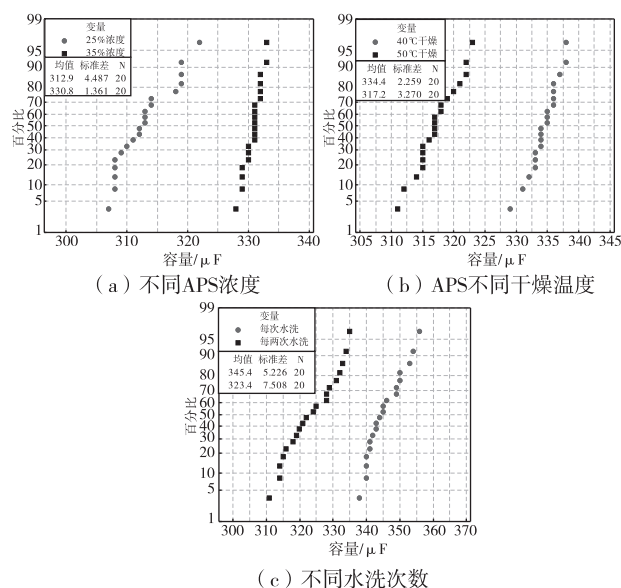


图 9 不同聚合条件成品容量对比

图 10 为不同条件下成品损耗对比。图 10(a) 中, APS 25% 和 35% 浓度损耗均值分别为 1.45% 和 1.305% , 35% 浓度下损耗值相对较小; 图 10(b) 中, APS $40\ ^\circ\text{C}$ 干燥和 $50\ ^\circ\text{C}$ 干燥损耗均值分别为 1.31% 和 1.54% , APS $40\ ^\circ\text{C}$ 干燥条件下损耗值相对较小; 图 10(c) 中, 每次循环水洗和每两次循环水洗损耗

均值分别为 1.225% 和 2.18% , 每次循环水洗条件下损耗值相对较小。

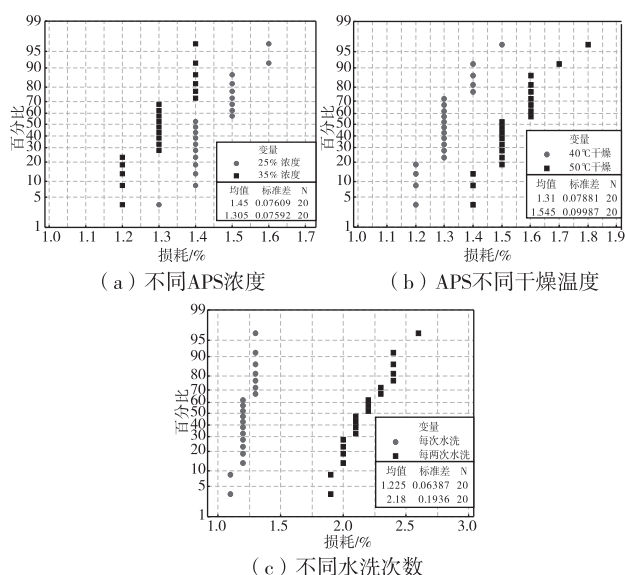


图 10 不同聚合条件成品损耗对比

图 11 为不同条件下成品 ESR 对比。图 11(a) 中, APS 25% 和 35% 浓度 ESR 均值分别为 $5.75\ \text{m}\Omega$ 和 $5.17\ \text{m}\Omega$, 35% 浓度下 ESR 值相对较小; 图 11(b) 中, APS $40\ ^\circ\text{C}$ 干燥和 $50\ ^\circ\text{C}$ 干燥条件下 ESR 均值分别为 $4.98\ \text{m}\Omega$ 和 $5.99\ \text{m}\Omega$, APS $40\ ^\circ\text{C}$ 干燥条件下 ESR 值相对较小; 图 11(c) 中, 每次循环水洗和每两次循环水洗 ESR 均值分别为 $4.74\ \text{m}\Omega$ 和 $6.495\ \text{m}\Omega$, 每次循环水洗条件下 ESR 值相对较小。

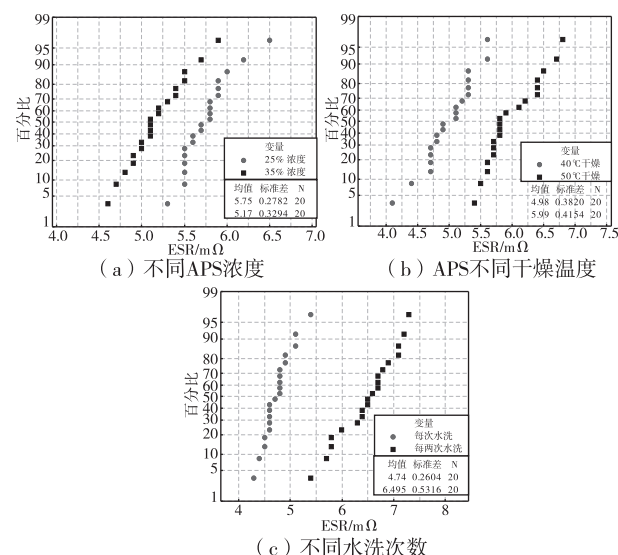


图 11 不同聚合条件成品 ESR 对比

APS 35% 浓度下的损耗和 ESR 值相对 25% 浓度下较小, 原因是 35% 浓度下, APS 能更多地附着

在铝箔表面,使 PEDOT 在铝箔表面覆盖较好;APS 40 ℃干燥条件下的损耗、ESR 值相对 50 ℃干燥条件下的较小,原因是 40 ℃下 APS 易形成树枝状结晶,PEDOT 更好地覆盖于铝箔表面;每

在该模型上生产出的芯子厚度如图 15 所示,聚合后芯子厚度均值 160.2 μm ,标准差 5.82,厚度大于 140 μm 的概率为 100%,一致性相对较优。该模型制造的成品电参数如表 1 所示,可以看出,成品容量引出、损耗、ESR、LC 值相对较优。

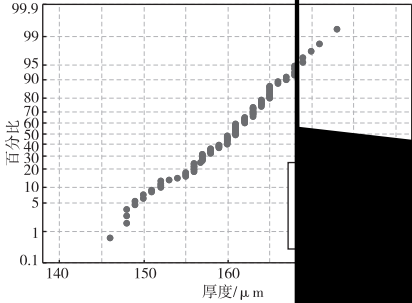


图 15 最佳生长模型下芯

表 1 最佳生长模型下成

序号	容量/ μF	损耗/%	ESR
----	-------------------	------	-----

不同面板形式下竖直加筋土挡墙工作性能研究*

邓 明^{1,3}, 刘 勇², 汪 磊³

(¹ 江西中昌工程咨询监理有限公司, 江西 南昌 330013; ² 内蒙古高速公路集团有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010051; ³ 江西理工大学 土木与测绘工程学院(南昌), 江西 南昌 330013)

摘 要: 为了研究不同面板形式下竖直加筋土挡墙的工作性能及其力学性能的分布规律, 利用有限元数值模拟软件 Plaxis 分别对砌块式与反包式面板竖直加筋土挡墙进行数值建模, 获取可靠的挡墙筋材拉力、面板水平位移及潜在破裂面位置等应力应变数据。研究表明: 砌块式挡墙墙脚及墙顶处的筋材拉力及面板水平位移为最小, 在挡墙中部达到最大, 沿墙高方向近似呈梯形分布。反包式面板挡墙筋材拉力沿墙高增加方向呈单调递减曲线分布, 面板水平位移则沿墙高增加方向呈单调递增曲线分布, 两者潜在破裂面形状相似。砌块式挡墙筋材拉力以及面板水平位移整体小于反包式面板挡墙筋材拉力, 砌块式挡墙潜在破裂面位置相对于反包式面板挡墙潜在破裂面位置更加靠近面板。因此, 相同工况下砌块式挡墙力学性能优于反包式面板挡墙的力学性能。

关键词: 竖直加筋土挡墙, 面板形式, 力学性能, 数值模拟

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0086-06

Working performance of vertical reinforced earth retaining wall under different panel forms*

DENG Ming^{1,3}, LIU Yong², WANG Lei³

(¹ Jiangxi Zhongchang Engineering Consulting and Supervision Co. Ltd., Nanchang 330013, China; ² Inner Mongolia Expressway Group Co. Ltd., Hohhot 010051, China; ³ School of Civil Engineering and Surveying & Mapping Engineering (Nanchang), Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to study the working performance and distribution of mechanical properties of vertical reinforced earth retaining wall under different panel forms, finite element numerical simulation software Plaxis was used to conduct numerical modeling of the block-type and reverse-cladding-type vertical reinforced earth retaining wall,

[13] MENG H, PEREPICHKA D F, WUDL F. Facile solid-state synthesis highly conducting poly (ethylenedioxythiophene) [J]. Angew chem int ed, 2003, 42(6): 658-661.

[14] RANE S B, SETH T, PHATAK G J, et al. Influence of surfactants treatment on silver powder and its thick films [J]. Mater lett, 2003, 57(20): 3096-3100.

[15] 刘书英, 李坚. 3,4-乙烯二氧噻吩聚合动力学[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(2): 107-110.

[16] 洪勇, 金蔚青, 潘秀红, 等. 镉酸铅晶体枝蔓晶生长的

实时观察研究[J]. 无机材料学报, 2006(2): 335-338.

[17] 吴耿云, 程贤甦, 林俊鸿. 聚合工艺对聚噻吩固体片式铝电解电容器的影响[J]. 功能材料, 2008, 39(3): 414-416.

收稿日期: 2024-02-19; 修回日期: 2024-02-19

作者简介: 陈绪鑫, 工程师, 本科, 主要从事电子元件的研发与生产。

respectively. Reliable stress-strain data such as reinforcement tension, horizontal displacement of the panel, and potential fracture surface location were obtained. The research results showed that the reinforcement tension and the horizontal displacement of the panel at the foot and top of the block-type retaining wall were the minimum, and reached the maximum at the middle of the retaining w

Plaxis 有限元数值模型如图 2 所示。

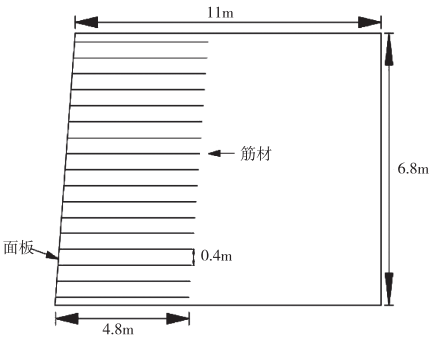


图 1 反包式面板加筋土挡墙原型实验模型示意图



图 2 原型实验中反包式面板

的变化规律。

反包式面板基础加筋土挡墙模型的几何参数如图 4 所示。 H 表示挡墙高度,在本次模拟中挡墙高度取 5.8 m; S_v 为筋材的竖直间距,取 0.4 m;筋材刚度取 2000 kN/m。地基土高为 6 m,长为 24 m,挡墙面板距地基土最左侧为 9 m。

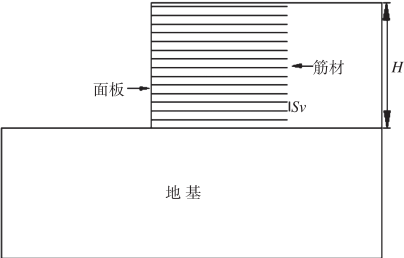


图 4 反包式面板挡墙基础模型几何参数示意图

(1)地基土

在反包式面板挡墙有限元数值模拟中地基为刚性地基,故采用摩尔-库伦本构模型模拟其应力应变关系。详细参数取值^[12]见表 2。

表 2 地基土参数取值表

参数名称	数 值	单 位
弹性模量	5×10^4	kN/m ²
泊松比	0.3	无量纲
重度	21	kN/m ³
内摩擦角	35	°

4 结论

本文利用 Plaxis 软件分别对砌块式及反包式面板竖直加筋土挡墙进行数值模拟,并验证建模方法的正确性。使用经过验证的建模方法对不同面板形式下竖直加筋土挡墙进行模拟,获取可靠的挡墙内部应力应变数据,分析得到以下结论:

(1)砌块式挡墙筋材拉力及面板水平位移沿墙高方向近似呈梯形分布,墙脚和墙顶处数值较小,挡墙中部达到最大。反包式面板挡墙筋材拉力沿墙高呈单调递减曲线分布,面板水平位移沿墙高呈单调递增曲线分布。

(2)砌块式挡墙面板水平位移分布规律与筋材分布规律相似,沿墙高方向近似呈单峰抛物线形式,挡墙中部面板水平位移达到最大值。反包式面板挡墙则随着墙高的不断增加,挡墙面板水平位移不断增加。

(3)砌块式挡墙与反包式面板挡墙潜在破裂面形式相似,挡墙上部潜在破裂面形式与“0.3H 法”相似,而挡墙下部潜在的破裂面形状接近于朗肯主动土压力理论。

(4)砌块式挡墙筋材拉力以及面板水平位移整体小于反包式面板挡墙筋材拉力,砌块式挡墙潜在破裂面位置相对于反包式面板挡墙潜在破裂面位置更加靠近面板。因此,砌块式挡墙力学性能优于反包式面板挡墙的力学性能。

参考文献【REFERENCES】

- [1] HEERTEN G. Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practice using geosynthetics[J]. Geotextiles and geomembranes,2012,30:43-49.
- [2] 中华人民共和国交通部.公路土工合

突发性滑坡灾害诱导形成机制及应急防治对策^{*}

吴正超¹, 夏江黔^{1,2▲}, 潘世佳¹, 廖德武¹, 郑冰¹

(¹ 贵州地矿基础工程有限公司, 贵州 贵阳 550081; ² 贵州省地质调查院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 2020年2月20日晚20点20分, 贵阳市乌当区在册的百宜镇拐九村秧寨大坡组发生滑坡地质灾害。通过资料收集、现场调查、室内试验、综合评判等多种方法对滑坡灾害诱导形成机制及应急防治对策展开研究。研究表明: 斜坡岩土由厚层状灰岩偶夹薄片状含泥质蠕状灰岩构成的岩石顺向坡, 层间存在泥化薄膜, 当前缘开挖后形成陡坎临空面, 在大气降雨沿地表裂隙和溶槽渗透坡体内长期作用下, 坡脚岩体崩滑后牵引后部岩土体沿岩层面形成滑移-拉裂式顺层滑坡; 应急防治对策采用“上清下压、侧面锁捆”的综合措施, 能够快速有效消除地质灾害隐患。研究结果可为同类型的滑坡研究及防治对策提供理论和技术借鉴。

关键词: 突发性滑坡, 地质灾害, 形成机制, 应急防治, 对策

中图分类号: P642.22; X43; X4 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2024)05-0092-05

Formation mechanism of sudden landslides and prevention and control measures^{*}

WU Zhengchao¹, XIA Jiangqian^{1,2▲}, PAN Shijia¹, LIAO Dewu¹, ZHENG Bing¹

(¹ Guizhou Geology and Mining Foundation Engineering Co. Ltd., Guiyang 550081, China; ² Guizhou Geological Survey Institute, Guiyang 550081, China)

Abstract: On the evening of February 20, 2020, at 20:20, a significant landslide occurred at Yangzhai Dapo Group in Guaijiu Village, Baiyi Town, Wudang District, Guiyang City. This study employed data collection, on-site investigation, internal trials, and comprehensive analysis to explore the formation mechanism of the landslide, and to develop emergency prevention strategies. Our findings reveal that the rock soil of the slope comprises a thick, layer-shaped, tattoo-like slice with embedded mud creep rocks, separated by a mud film between layers. The long-term impact of rainfall, surface crack infiltration, and meson penetration into the grooves leads to the entrapment of the rock body, following the formation of a rocky layer. The strategy of “clearing from above, pressing from below, and locking and bundling from the sides” has been proved to be a rapid and effective method to eliminate the risks of geological disasters. The outcomes of this research offer a theoretical and technical framework for addressing similar landslides and formulating prevention and control measures.

Keywords: sudden landslides, geological disasters, formation mechanism, emergency prevention and control, countermeasures

开展滑坡防治措施的总体分析及实例应

0 引言

近年来, 滑坡灾害频发, 不仅带来了巨大的经济损失, 还严重威胁区内居民的生命财产安全。因此,

条件下裂隙土坡的水土响应与变形破坏特征,揭示了裂隙土坡在不同降雨条件下的响应规律,有助于预防滑坡灾害的发生。在滑坡的成因分析中,熊资^[1]探讨了贵州水

2 研究方法

主要采用资料收集、地形测量、地面分析、水工环

稳。

另一方面为外在因素:一是在原始斜坡体中,植物的根系对岩体裂隙壁施加挤压力,导致裂隙扩大,进而引发岩石破坏,有利于雨水渗透;二是岩体内部的节理裂隙发育,大气降雨沿地表裂隙和溶槽渗透,形成静水压力,同时,雨水也会在岩体外倾结构面内形成扬压力,导致雨季时岩体稳定性显著下降;三是雨水渗入外倾面形成滑动面,根据前期资料及分析结果,该区崩塌面为人类工程活动使得坡面形成高 5~15 m 的临空面,风化后临空面岩体崩滑牵引后部岩土体沿外倾面(层面)形成滑移-拉裂式顺层滑移破坏。

3.2.2 滑坡失稳破坏机制过程

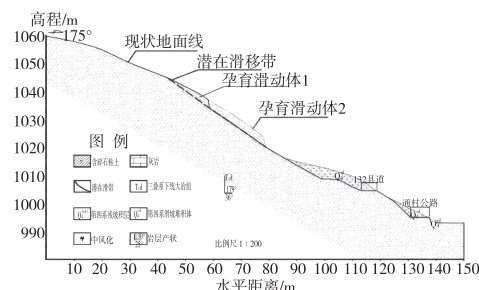
依据滑坡特征和变形破坏特征,滑坡体失稳机制演化过程大致可分为以下三个阶段:

(a)滑动体孕育阶段。原始斜坡体已在基覆界面附近贯通形成一层厚约 10 cm 的含泥质灰岩层,并发育成为潜在滑移带,同时受节理 I ($106^{\circ} \angle 81^{\circ}$)和节理 II ($3^{\circ} \angle 69^{\circ}$)两组优势结构面控制,进一步切割斜坡岩体,导致斜坡岩土体孕育产生滑动体 1 和滑动体 2,上述两组结构面与岩层面综合切割的结果,为滑坡的产生提供了较好的物质基础;考虑滑坡前缘坡脚与后壁高差近 30 m,坡度为 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$,这为滑坡向下滑动提供一定的动力基础,同时因人为活动在斜坡前缘开挖修建道路,造成部分台坎,这为滑坡后续的产生提供了较好的剪出口及临空面(图 5(a))。

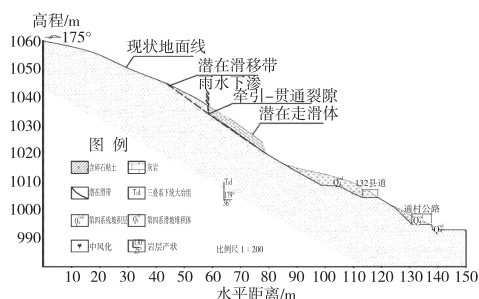
(b)滑移拉裂带贯通阶段。由于研究对象上覆岩土体多松散,孔隙度较大,为松散类岩组,这将导致当雨水初期入渗时,在坡体表面产生一定冲蚀作用,使坡体表面发生破坏,导致坡体内部逐渐溶蚀而产生空隙、裂缝等,破坏坡体的完整性,最终导致滑坡体形成破裂带(图 5(b))。

(c)滑坡体失稳阶段。多次降雨入参与外力加载综合作用下,滑动体 2 开始出现松动,同时由于滑动体 2 的滑移,将引起其后缘的张拉裂隙进一步扩展,并成为水体聚集区,导致部分雨水继续渗透进入滑动体 2 内部,使得其从非饱和状态向饱和状态不断过渡;由于含水状态的变化,增大了滑动体 2 的下滑力,加上聚集在后缘拉裂带内的水体推力及下渗产生的动力作用,将进一步加剧滑坡体的失稳;由于雨水的浸泡,滑移带附近的岩土体的力学性能加速

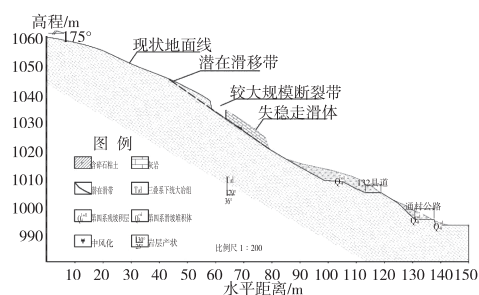
减弱,直至滑坡体上的下滑力大于抗滑力时,滑动体 2 将发生失稳破坏,同时由于滑动体 2 和滑动体 1 连接紧密,当滑动体 2 发生滑动时,牵引拉动滑动体 1 滑动(图 5(c))。最终导致整个滑坡体出现滑移-拉裂式顺层滑动现象。



(a) 滑动体孕育阶段



(b) 滑移拉裂带贯通阶段



(c) 滑坡体失稳阶段

图 5 滑坡体失稳机制过程

3.3 应急防治对策

滑坡地质灾害灾情发生后(Ⅱ区),滑坡体直接掩埋、影响 S102 省道道路长约 50 m、通村公路道路长约 45 m,影响及危害性较大;地质灾害体(Ⅰ区)有继续崩滑趋势,如地质灾害进一步发展,坡体整体失稳,将直接危及百宜镇拐九村秧寨大坡区域内 S102 省道长约 120 m,影响及危害性更大。

结合滑坡地质灾害的基本特征,在分析地质灾害体形成机制、稳定性评价的基础上,以及对威胁对象和社会的影响性,从安全性、施工可行性、经济合理性进行应急防治方案制定,选取了“上清下压、侧

面锁捆”防治措施即坡体上部沿层面顺层放坡清方,坡体下部设置护脚墙,侧向边坡锚杆挂网喷砼等综合防治措施对该滑坡地质灾害进行应急防治(图 6)。

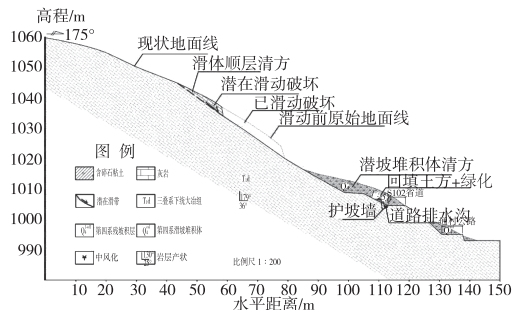


图 6 典型防治断面图

4 结论

(1)研究得出该斜坡岩土由厚层状灰岩偶夹薄片状含泥质蠕状灰岩构成的岩石顺向坡,层间存在泥化薄膜,前缘存在临空面的顺向坡。

(2)研究认为,斜坡存在临空面,岩土节理裂隙发育条件下,在大气降雨沿地表裂隙和溶槽渗透坡体内长期作用下,坡脚岩体崩滑后牵引后部岩土体沿岩层面形成滑移-拉裂式顺层滑坡。

(3)对突发性滑坡地质灾害,为快速有效消除地质灾害隐患,采取“上清下压、侧面锁捆”的综合防治措施是可行的。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 穆启超,王万迁,王琦,等. 贵州松桃长冲组滑坡形成机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2023,34(3):40-47.
- [2] 李玉林. 贵州镇宁许荒滑坡变形破坏机理研究[D]. 贵阳:贵州大学,2023.

[3] 陈金宏,王彤标,王刘文,等. 贵州山区堆积层滑坡形成机制及防治措施[J]. 资源环境与工程,2023(2):183-190.

[4] 赵超. 丘陵地区格网尺寸对滑坡易发性预测的影响研究——以浙江省永嘉县为例[J]. 自然资源信息化,2024(1):50-55.

[5] 王司法,江兴元,杨义,等. 降雨条件下裂隙土坡水土响应与变形破坏特征试验研究[J/OL]. 水利水电技术(中英文)[2024-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20240305.1347.002.html>.

[6] 熊赞. 贵州水城某公路滑坡区致灾机理及支护分析[J]. 中国水运(下半月),2023,23(10):123-125.

[7] 吴仕军,刘垚,夏敏. 贵州安顺新场河水库滑坡成因与变形趋势分析[J]. 贵州地质,2023,40(3):296-301.

[8] 熊赞,何松标. 贵州水城某高速公路滑坡稳定性及支护分析[J]. 中国水运,2023(8):145-147.

[9] 吴力鼎. 贵州某牵引式滑坡形成机理及治理措施建议[J]. 甘肃水利水电技术,2023,59(8):57-60.

[10] 廖德武,陈寿稀,郑冰,等. 贵州省盘州比中滑坡形成机制和稳定性分析[J]. 土工基础,2022,36(4):541-546.

[11] 陈寿稀,廖德武,兰中孝,等. 兴仁围豹滑坡形成条件及诱发机制探讨[J]. 贵州科学,2022,40(4):72-76.

[12] 廖德武,郑冰,杜艳松,等. 兴仁“6·10”彭家洞高速滑坡运动特征与形成机理[J]. 地质科技通报,2022,41(6):66-76.

收稿日期:2024-03-11;修回日期:2024-04-16

基金项目:基于多源异构数据的贵州三叠系含软弱夹层顺层岩质边坡能量演化特征及监测预警模型研究(黔科合支撑[2023]一般127)。

作者简介:吴正超(1991-),男,苗族,贵州黎平人,岩土工程师、水工环地质工程师,硕士,主要研究方向:岩土工程勘察设计、地质灾害防治工程勘察设计、地质环境保护。

▲通讯作者:夏江黔(1984-),男,汉族,江西进贤人,硕士,高级工程师,研究方向:岩土工程勘察设计、地质灾害防治工程勘察设计、地质环境保护。