

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.05.006

向美晔, 李丽娜, 王安琪, 等. 喀斯特地区适生苔藓植物景观价值评价探究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(5): 63-72.

喀斯特地区适生苔藓植物景观价值评价探究

向美晔, 李丽娜, 王安琪, 黄杰,
汪鹏, 陶建平, 李宗峰

西南大学 生命科学学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 西南喀斯特地区生态环境脆弱, 石漠化程度较高, 苔藓植物具有较高的生态功能和景观价值, 是喀斯特地区生态恢复、植被重建和景观建设的重要材料。基于中梁山喀斯特地区 4 种典型景观类型中 240 个样方的野外调查数据, 应用层次分析法(AHP)对适生苔藓物种进行景观价值评价。结果表明: 研究区域内共分布苔藓植物 22 科 48 属 96 种, 其中苔类植物 2 科 2 属 2 种, 藓类植物 20 科 46 属 94 种, 有 14 个适生物种。基于层次分析法得到, 适生物种中 I 级苔藓植物有 4 种、II 级 5 种、III 级 5 种。美灰藓、密枝青藓、宽叶青藓和薄壁卷柏藓等苔藓植物的景观价值较高。

关键词: 苔藓植物; 景观价值; 喀斯特地区

中图分类号: S682.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)05-0063-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Evaluation of the Landscape Value of Suitable Bryophytes Species in Karst Areas

XIANG Meiyue, LI Lina, WANG Anqi, HUANG Jie,
WANG Peng, TAO Jianping, LI Zongfeng

School of Life Sciences, Southwest University/Key Laboratory of Eco-Environments in the
Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China

Abstract: The ecological environment in the karst areas of southwest China is fragile, with high rocky desertification degree. Bryophytes have important ecological functions and high landscape value, making them important materials for ecological restoration, vegetation reconstruction, and landscape construction

收稿日期: 2025-04-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502304)。

作者简介: 向美晔, 硕士研究生, 主要从事生态学研究。

通信作者: 李宗峰, 博士, 高级实验师。

in karst areas. Based on field survey data from 240 quadrats across 4 typical landscape types in the Zhongliang Mountain karst area, this study applied the analytic hierarchy process (AHP) to evaluate the landscape value of suitable bryophyte species. The results showed that a total of 96 bryophyte species belonging to 48 genera and 22 families were distributed in the study area, among which 2 species were liverworts (2 families, 2 genera) and 94 species were mosses (20 families, 46 genera), with 14 suitable species identified. According to the evaluation via AHP, the dominant species were classified into three grades: 4 species as Grade I, 5 species as Grade II, and 5 species as Grade III. *Hypnum leptothallum*, *Brachythecium amnicolum* Müll. Hal., *Brachythecium curtum* (Lindb.) Limpr., and *Racomitrium cuspidigerum* Aongstr. exhibited relatively high landscape value.

Key words: bryophytes; landscape value; karst areas

苔藓植物具有保持水分、改良土壤、维持生态系统稳定等生态功能^[1],对生物地球化学循环和植被恢复等影响较大^[2-3]。苔藓植物还具有较高的景观价值,适宜在园林绿化中广泛应用。日本园林应用苔藓作为造景材料的历史悠久、形式多样,并形成了独特的“青苔文化”^[4-5]。Radu 等^[6]基于控制实验发现,垫丛紫萼藓(*Grimmia pulvinata*)和角齿藓(*Ceratodon purpureus*)适用于城市景观设计。中国在苔藓植物景观方面的探索始于 20 世纪 90 年代,在近几年得到较好发展,如丁水龙等^[7]自 2014 年起在西湖景区大力推广苔藓植物的种植与应用,王琦等^[8]基于层次分析法发现,上海市区的苔藓景观质量整体水平较高。苔藓植物因其重要的生态功能和较高的景观价值在园林造景方面引起了学者们的高度关注。

我国西南喀斯特地区是全球 3 大喀斯特分布区中面积最大、最集中的连片分布区^[9],其土层浅薄、岩石大面积裸露,地表植被遭受破坏、水土资源严重流失,因此具有成土速率低、石漠化程度高、水土资源异质性强、生态恢复能力差^[10-11]等特点,严重制约了区域内经济和社会的发展,是生态建设的重点攻克对象^[12-13]。研究发现,苔藓植物的覆盖可以有效减少土壤中养分的流失,有助于减缓石漠化进程,加速环境恢复工程的进行^[14]。已发表文献中对于喀斯特地区苔藓景观价值方面的研究较少,存在较大的探索空间。

重庆市中梁山属西南喀斯特地区,是重庆主城区的天然生态屏障,具有自然保护、生态农林、居住生活和休闲娱乐等重要功能,属于半自然或人工景观,受城市建设影响,出现植被退化、土壤侵蚀、岩石裸露等生态问题,经治理后状况有所好转^[15],但石漠化程度仍然较高。基于此,本研究在重庆市中梁山典型喀斯特地区应用层次分析法(AHP)建立苔藓景观价值综合层次结构模型,评价适生苔藓植物的景观价值,旨在筛选出具有较高景观价值的苔藓物种,为喀斯特地区苔藓植物的景观建设提供数据支撑和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于重庆市中梁山,属于中亚热带季风气候,年平均气温为 16.7 °C,年平均降水量在 1 200 mm 左右,水热条件较好,但季节性分配不均,雨季为 4—10 月,占全年降水量的 76%,7—8 月受副热带高压带的控制,炎热干燥,降水较少,具有典型的喀斯特地貌^[16]。

1.2 样地设置与调查采样

选择研究区域内公园、居民点、林地和农田等典型景观样地(表 1),每种景观类型布设 12 个大小为 3 m×3 m 的代表性样地,共计 48 个。在每个样地内采用 5 点取样法设置 5 个大小为 20 cm×20 cm 的样方,共计 240 个样方,分春、夏、秋、冬 4 季进行调查。详细记录样方内苔藓植物的物种编号、生长基质、盖度等,并拍摄样方的群落生态照片和植物重要特征照片,盖度利用 20 cm×20 cm 的微样方框(孔径 1 cm×1 cm 网格)根据网格法进行估算,同时进行采样、装样品袋,记录样方编号、物种编号等信息,带回实验室,阴干。

表 1 典型景观基本情况

景观类型	样地位置	优势物种
公园	29°41'36"N, 106°24'24"E	黄葛树、柏木、铁仔、黄荆、苘草、野胡萝卜
居民点	29°46'13"N, 106°26'14"E	刚竹、慈竹、黄葛树、柑橘
林地	29°46'13"N, 106°25'46"E	马尾松、女贞、红毛悬钩子、盐麸木、贯众、蕨
农田	29°46'18"N, 106°25'45"E	番薯、白菜、萝卜

1.3 样本鉴定

将样品加水浸泡至完全伸展状态, 在体视镜(SZ810 型)下观察苔藓植物体形态、分枝情况、叶片着生、有无假根等形态特征。后续剖离茎叶和枝叶, 保持其表面的原始状态, 制成玻片, 用显微镜(BK6000 型)观察叶片形态、叶尖细胞、叶上部细胞、叶边细胞、叶中部细胞、中肋细胞、叶基部细胞等显微特征, 并采集显微高清图片。

根据观察到的植物体形态结构和叶片显微结构, 参考《中国苔藓志》, 完成物种的鉴定工作^[17]。

1.4 适生苔藓植物筛选

以物种重要值和生境组合分布频率作为判定指标, 筛选研究区域内的适生苔藓植物。具体流程如下:

1) 将研究区域按照 4 个季节和 4 种典型景观类型进行交叉划分, 共得到 16 种生境组合。

2) 计算不同生境组合中每种苔藓植物的重要值, 将重要值 $V \geq 3\%$ 的物种确定为优势物种。重要值 V 的计算公式^[18]:

$$V = \frac{R_{\text{频度}} + R_{\text{盖度}}}{2} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{频度}}$ 为相对频度; $R_{\text{盖度}}$ 为相对盖度。

3) 统计各优势物种在 16 种生境组合中的出现情况, 计算其生境组合分布频率, 将分布频率 $F \geq 25\%$ 的优势物种确定为适生物种。生境组合分布频率 F 的计算公式:

$$F = \frac{n}{16} \times 100\% \quad (2)$$

式中: n 为某一优势物种出现的生境组合数量。

1.5 景观价值评价

遵循科学性、生态性、独立性、代表性、可比性和可操作性等原则, 选择对苔藓植物的形态结构、时空分布和景观效果具有重要影响的因子为指标, 运用层次分析法(AHP)建立综合评价层次结构模型, 评价苔藓植物, 根据评价分值对适生苔藓植物进行排序和分级。

苔藓植物景观价值评价包括 10 项评价因子^[8], 分别是面积占比、连续性、色泽艳度、生物量、持水能力、固土能力、生境、普遍性、纯度和分布频度, 各项因子数值的分级标准如表 2。

表 2 评价因子等级及评分标准

评价因子	苔藓植物景观评价指标等级	分值
面积占比(C_1)	$C_1 < 3\%$	1
	$3\% \leq C_1 < 10\%$	2
	$C_1 \geq 10\%$	3
连续性(C_2)	存在 1 个季度	1
	存在 2~3 个季度	2
	存在 4 个季度	3

续表 2

评价因子	苔藓植物景观评价指标等级	分值
色泽艳度(C_3)	色彩灰暗, 无光泽	1
	色彩一般, 有微弱光泽	2
	色彩艳丽, 有光泽	3
生物量(C_4)/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	生物量小, $C_4 < 1 \times 10^3$	1
	生物量一般, $1 \times 10^3 \leq C_4 < 3 \times 10^3$	2
	生物量大, $C_4 \geq 3 \times 10^3$	3
持水能力(持水率 C_5)/%	持水能力弱, $C_5 < 500$	1
	持水能力一般, $500 \leq C_5 < 800$	2
	持水能力强, $C_5 \geq 800$	3
固土能力(固土率 C_6)/%	固土能力弱, $C_6 < 100$	1
	固土能力一般, $100 \leq C_6 < 300$	2
	固土能力强, $C_6 \geq 300$	3
生境(C_7)	以树生为主	1
	以土生为主	2
	以石生为主	3
普遍性(C_8)	分布少, 不常见	1
	分布较广	2
	分布广泛	3
纯度(C_9)	纯度低, 较多其他植物	1
	纯度一般, 其他植物少	2
	纯度高, 无其他植物	3
分布频度(C_{10})	仅在 1 种景观类型中有分布	1
	在 2 种景观类型中有分布	2
	在 3~4 种景观类型中有分布	3

注: 1) 生物量(C_4)测定:

$$C_4 = W_{\text{干}} \times G \quad (3)$$

式中: $W_{\text{干}}$ 为苔藓植物干质量(kg/hm^2); G 为盖度。

2) 持水率(C_5)测定^[19]: 淘洗干净样品后, 将样品放入清水中浸泡 24 h 至饱和状态; 后将样品放入纱网中, 滴干重力水, 称质量, 得苔藓植物湿质量; 称量后将样品置于 65 °C 烘箱中干燥至恒质量, 称量, 得苔藓植物干质量。

$$C_5 = \frac{N_{\text{持水}}}{W_{\text{干}}} \times 100\% \quad (4)$$

$$N_{\text{持水}} = W_{\text{湿}} - W_{\text{干}} \quad (5)$$

式中: $N_{\text{持水}}$ 为苔藓植物持水量(kg/hm^2); $W_{\text{湿}}$ 为苔藓植物湿质量(kg/hm^2)。

3) 固土率(C_6)测定: 淘洗样品过程中丢弃的土壤质量为苔藓植物固土量, 可用结皮层干质量减苔藓植物干质量获得。

$$C_6 = W_{\text{固土}} / W_{\text{干}} \times 100\% \quad (6)$$

$$W_{\text{固土}} = M_{\text{结皮}} - W_{\text{干}} \quad (7)$$

式中: $W_{\text{固土}}$ 为苔藓植物固土量(kg/hm^2); $M_{\text{结皮}}$ 是结皮层干质量^[20]。

以表 2 中的 10 个评价因子建立综合评价层次结构模型(图 1), 在借鉴文献的基础上, 结合野外调查, 综合专家意见, 得出各评价因子的权重。

采用 1~9 量化标度法对各评价因子进行判断和比较, 构建 **A-B**、**B1-C**、**B2-C** 判断矩阵。对判断矩阵的特征向量 **W** 归一化处理得到相对重要度, 从而确定各项指标权重。

1) 将判断矩阵 **A** 的每一列向量归一化:

$$\tilde{W}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (8)$$

2) 将 \tilde{W}_{ij} 按行求和:

$$\tilde{W}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{W}_{ij} \quad (9)$$

3) 对向量 \tilde{W} 归一化:

$$W_i = \frac{\tilde{W}_i}{\sum_{i=1}^n \tilde{W}_i} \quad (10)$$

4) 计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

5) 计算 λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{[AW]_i}{nW_i} \quad (12)$$

6) 计算一致性比例 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (13)$$

式中: **W** 为向量; **n** 为矩阵阶数; A 为第 i 个元素值; RI 为平均随机一致性指标。通过景观综合评价指数法得出综合评价分值。根据公式

$$A_m = \sum_{i=1}^{10} C_i \times \alpha \times \beta \quad (14)$$

计算出某种苔藓植物 m 的综合评分(A_m), 其中, C_i 为通过野外调查得到的第 i 个评价因子的得分值; α 为物种指标 B 的权重值; β 为该评价因子的权重值。

利用公式

$$A_{m\max} = \sum_{i=1}^{10} (\max C_i) \times \alpha \times \beta \quad (15)$$

$$D_m = \frac{A_m}{A_{m\max}} \times 100\% \quad (16)$$

确定物种 m 景观价值的等级, 其中, D_m 为物种 m 的景观分级指数。 D 作为分级的依据, 按差值百分

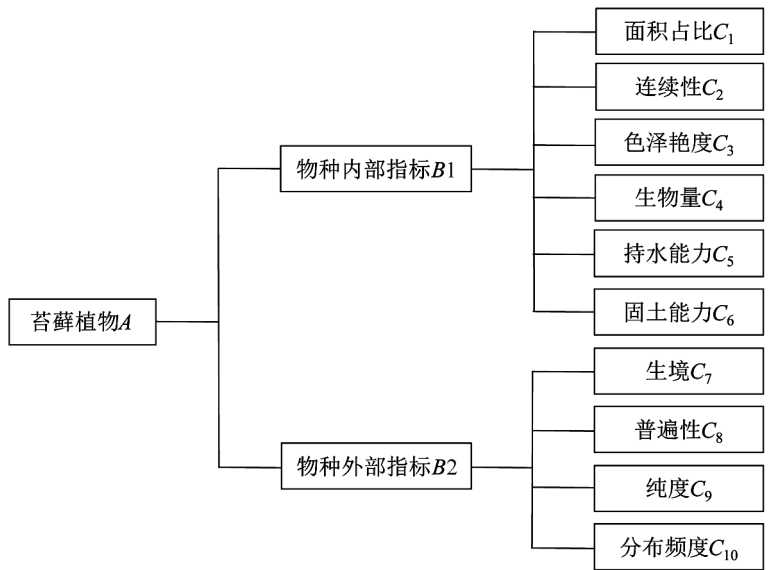


图 1 综合评价层次结构模型

比分级法划分等级： $D \geq 80\%$ 为 I 级， $70\% \leq D < 80\%$ 为 II 级， $60\% \leq D < 70\%$ 为 III 级， $D < 60\%$ 为 IV 级。

2 结果与分析

2.1 适生苔藓植物

经调查统计，研究区域内共分布苔藓植物 22 科 48 属 96 种，其中苔类植物 2 科 2 属 2 种，藓类植物 20 科 46 属 94 种。

基于野外调查数据的整合分析，发现研究区域内共有 14 种适生苔藓植物(表 3)，为美灰藓(*Hypnum leptothallum*)、狭叶扭口藓(*Barbula subcontorta*)、薄壁卷柏藓(*Racopilum cuspidigerum*)、密枝青藓(*Brachythecium curtum*)、侧枝匐灯藓(*Plagiomnium maximoviczii*)、比拉真藓(*Bryum billarderi*)、卷叶凤尾藓(*Fissi-dens dubius*)、灰羽藓(*Thuidium pristoca-lyx*)、细尖鳞叶藓(*Taxiphyllum aomoriense*)、斜蒴藓(*Camptothecium lutescens*)、丛生真藓(*Bryum caespiticium*)、脆枝青藓(*Brachythecium thraustum*)、宽叶青藓(*Brachythecium curtum*)和牛舌藓(*Anomodon viticulosus*)。牛舌藓的生境组合分布频率虽低于 25% 的筛选阈值，但在农田景观中于春、夏、冬 3 个季节均有分布，基于其在特定景观类型中的较高分布频率，本研究将其列为适生物种。由此表明，这 14 种苔藓植物在研究区域内占据一定的优势地位，可在该喀斯特地区更好地生长、发育和繁殖。

表 3 适生苔藓植物

%

物种	重要值	生境组合分布频率	物种	重要值	生境组合分布频率
美灰藓	18.37	100	灰羽藓	5.42	38
狭叶扭口藓	9.63	56	细尖鳞叶藓	5.27	25
薄壁卷柏藓	8.99	69	斜蒴藓	4.76	25
密枝青藓	8.95	50	丛生真藓	4.72	25
侧枝匐灯藓	8.90	25	脆枝青藓	4.64	31
比拉真藓	7.22	44	宽叶青藓	4.25	25
卷叶凤尾藓	7.18	31	牛舌藓	4.01	19

2.2 景观价值评价

应用公式计算出各指标的权重值，并对 3 个判断矩阵 **A-B**、**B1-C** 和 **B2-C** 进行一致性检验，结果见表 4—表 6。

表 4 判断矩阵 **A-B** 及一致性检验

评价要素	B1	B2	权重	一致性检验
B1	1	2	2/3	$CI=0, RI=0$
B2	1/2	1	1/3	$CR=0 < 0.10$

表 5 判断矩阵 **B1-C** 及一致性检验

评价因子	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	权重	一致性检验
C ₁	1	1/2	1/3	3	3	3	0.166	$CI=0.013$
C ₂	2	1	1/2	4	4	4	0.254	$RI=1.24$
C ₃	3	2	1	5	5	5	0.385	$CR=0.010 < 0.10$
C ₄	1/3	1/4	1/5	1	1	1	0.065	
C ₅	1/3	1/4	1/5	1	1	1	0.065	
C ₆	1/3	1/4	1/5	1	1	1	0.065	

表 6 判断矩阵 B2-C 及一致性检验

评价因子	C_7	C_8	C_9	C_{10}	权重(W)	一致性检验
C_7	1.00	0.50	0.33	0.50	0.120	$CI=0.024$
C_8	2.00	1.00	0.50	2.00	0.260	$RI=0.89$
C_9	3.00	2.00	1.00	3.00	0.450	$CR=0.027<0.10$
C_{10}	2.00	0.50	0.33	1.00	0.171	

A-B、**B1-C**、**B2-C** 矩阵的 CR 均小于 0.10, 说明矩阵的一致性可以接受, 结果合理有效。综合分析, 得出各评价因子的权重值(表 7)。在苔藓植物的准则层, 物种内部指标的权重值为 0.667, 大于外部指标的权重值 0.333, 表明内部指标对苔藓景观具有较大的影响。在苔藓植物内部指标中, 色泽艳度占比较大, 权重值为 0.385; 其次是连续性, 为 0.254; 面积占比为 0.166; 生物量、持水能力和固土能力占比较小, 影响较弱, 均为 0.065。在苔藓植物外部指标中, 纯度权重值较大, 为 0.450; 其次是普遍性, 为 0.260; 分布频度为 0.171; 生境占比较小, 为 0.120。

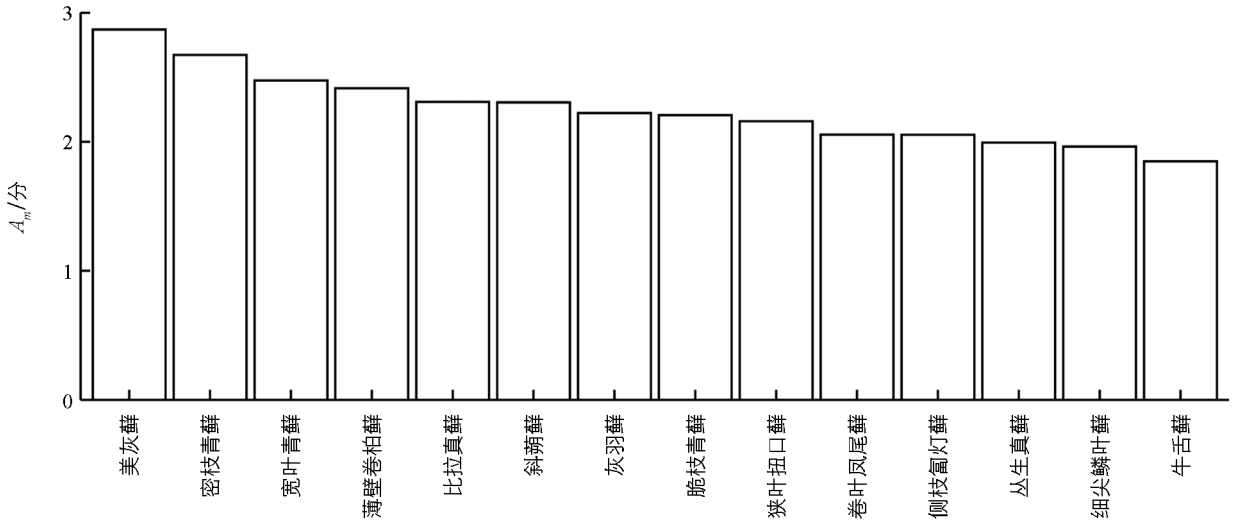
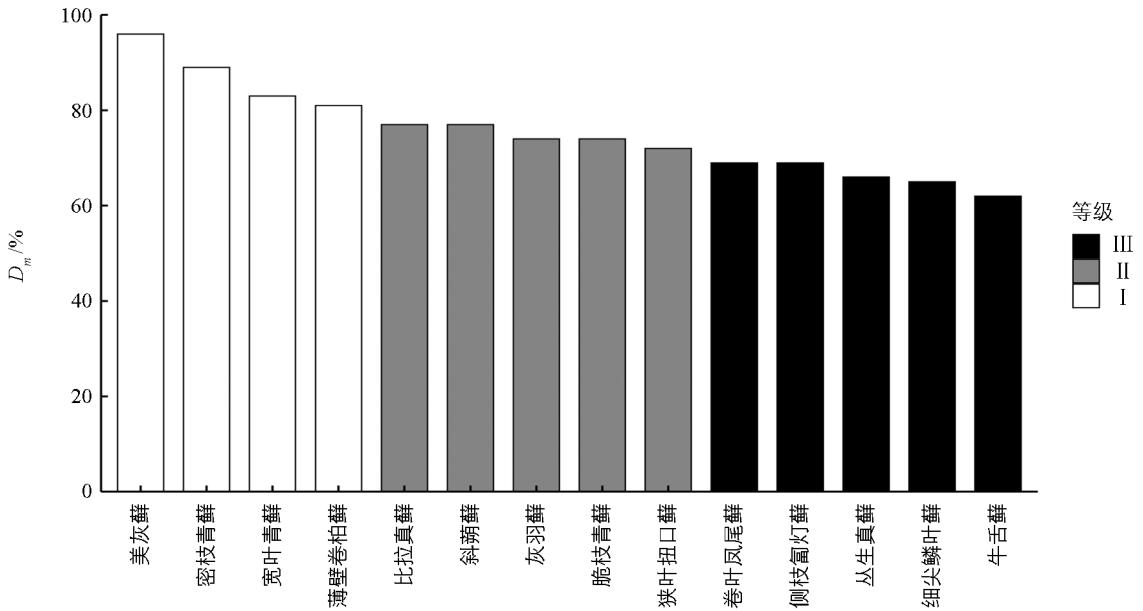
表 7 苔藓植物景观评价因子的权重分配

目的层	准则层	权重	评价因子	权重	归一化权重
苔藓植物 A	物种内部指标 B1	0.667	面积占比 C_1	0.166	0.111
			连续性 C_2	0.254	0.170
			色泽艳度 C_3	0.385	0.257
			生物量 C_4	0.065	0.043
			持水能力 C_5	0.065	0.043
			固土能力 C_6	0.065	0.043
	物种外部指标 B2	0.333	生境 C_7	0.120	0.040
			普遍性 C_8	0.260	0.087
			纯度 C_9	0.450	0.150
			分布频度 C_{10}	0.171	0.057

整合 10 个评价因子发现, 色泽艳度较重要, 是苔藓植物景观建设的关键影响因子, 归一化权重值为 0.257; 其次是连续性, 为 0.170; 生境占比最小, 对苔藓景观建设的影响较小, 仅为 0.040。

依据公式(14)和各评价因子的权重值, 计算出研究区域适生苔藓植物的综合评价得分(图 2), 发现 14 种苔藓植物的分值大多在 2 分以上, 其中美灰藓得分最高, 为 2.870 分, 其次为密枝青藓, 得分为 2.673 分; 而丛生真藓、细尖鳞叶藓和牛舌藓分值均在 2 分以下, 牛舌藓得分最低, 仅有 1.849 分, 说明这 3 种苔藓植物的景观价值较低。

根据公式(16)计算得出苔藓植物的评价等级(图 3), 结果发现: 景观价值为 I 级的苔藓植物有 4 种, 分别为美灰藓、密枝青藓、宽叶青藓和薄壁卷柏藓, 占研究区域物种总数的 4.17%; II 级苔藓植物有 5 种, 分别为比拉真藓、斜蒴藓、灰羽藓、脆枝青藓和狭叶扭口藓, 占研究区域物种总数的 5.21%; III 级苔藓植物有 5 种, 分别为卷叶凤尾藓、侧枝匐灯藓、丛生真藓、细尖鳞叶藓和牛舌藓, 占研究区域物种总数的 5.21%。综合表明, 美灰藓、密枝青藓、宽叶青藓和薄壁卷柏藓在该区域苔藓景观建设工作中的应用潜力较高。

图 2 适生苔藓植物的综合评价分值 (A_m)图 3 适生苔藓植物的评价等级 (D_m)

3 讨论与结论

3.1 讨论

研究区域内共发现苔藓植物 22 科 48 属 96 种, 同其他喀斯特地区相比, 如芝云洞山区 11 科 25 属 53 种^[21] 和锅盖山 9 科 17 属 51 种^[22], 发现苔藓植物多样性的规律符合陈传武团队的调查。陈传武团队基于全球数据对小岛屿效应进行研究时发现生境多样性对小岛屿效应具有显著影响^[23], 说明具有较多生境类型的区域可以容纳更多种类苔藓植物的生长。人为干扰、喀斯特地貌等因素造就研究区域内生境异质性程度较高, 因而能够提供多种苔藓植物所需的可供进行生长、发育、繁殖等过程的生态环境, 具有较高的苔藓植物多样性。

研究区域内共有 14 种适生苔藓植物, 其分布广泛, 适应能力较强。美灰藓优势地位明显, 在不同景观类型、不同季节均有分布, 重要值基本在 10% 以上, 可在研究区域内大范围生长和繁殖。在西南喀斯特地区的不同区域优势种略有差异, 贵州优势物种主要为美灰藓、北地扭口藓和宽叶青藓^[24-25], 云南芝云洞山区主要为长叶扭藓、卷叶湿地藓、东亚小石藓、黑扭口藓、卵叶青藓和狭叶湿地藓^[21]。3 个研究区都是典型

的喀斯特地貌,但地理位置不同,水热条件存在差异,导致不同地区优势物种存在差异,因此在喀斯特地区进行苔藓景观建设时,要因地制宜选择适生苔藓植物作为造景材料。

评价因子的比较结果表明,色泽艳度、连续性和纯度等评价因子的权重值较高,对苔藓景观建设的影响较大,在筛选适宜苔藓物种时优先考虑这3个因子。与上海地区的模型^[8]对比发现,评价因子的选取基本相同,但基于研究区域和研究目的的不同,本研究增加了生物量、持水能力和固土能力等评价因子。在两个地区的模型中,色泽艳度和纯度均是较为重要的评价因子,表明其可能普遍适用于不同地区苔藓景观价值的评估工作中。不同地区的生态环境和景观需求不同,因此建立的综合评价层次结构模型略有差异,评价指标的权重也略有不同,需结合实际情况建立适宜的模型。

植物景观价值评估工作可采用多种研究方法,如本研究的层次分析法,以及王庆海等^[26]应用的模糊综合评判模型。两种方法相比而言,层次分析法的结构逻辑更为清晰、因素量化更为科学,评价结果更为全面系统,因此在对苔藓植物景观价值进行评估工作时选用层次分析法更为适合,更具有科学性和可信度,能较为准确、有效地展现结果,便于研究工作者开展后续研究。

曾辰午等^[27]的研究提出生物量较大的苔藓植物在退化生态系统的修复工作中具有重要意义,但并未提供可选择的苔藓植物。本研究筛选出的美灰藓、密枝青藓、宽叶青藓和薄壁卷柏藓等苔藓植物的景观价值较高,同时这4种苔藓在研究区域也具有较高的适生度,是开展后续研究工作的重点对象,值得进一步关注与探索。

3.2 结论

在喀斯特地区,苔藓研究主要集中于苔藓植物的多样性,而本研究聚焦于苔藓植物的景观价值,可为喀斯特地区苔藓植物景观价值的研究提供参考。基于综合评价层次结构模型筛选出的美灰藓、密枝青藓、宽叶青藓和薄壁卷柏藓等4种苔藓植物,在研究区域内具有较高的景观价值,可以作为造景材料开展进一步的应用研究。

本研究数据来源具有区域性,建立的综合评价层次结构模型是否具有普适性仍有待探索,在未来研究中需要扩大研究区域,对模型的普适性进行验证和完善。本研究并未对苔藓植物景观功能的应用进行探讨,后续需要加强实践应用方面的研究。

参考文献:

- [1] 王雅婷,郑景明,彭霞薇. 极端环境中苔藓植物的生态功能研究进展 [J]. 植物生理学报, 2022, 58(1): 101-108.
- [2] 刘润,申家琛,张朝晖. 4种苔藓植物在喀斯特石漠化地区的生态修复意义 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 141-148.
- [3] TURETSKY M R, BOND-LAMBERTY B, EUSKIRCHEN E, et al. The Resilience and Functional Role of Moss in Boreal and Arctic Ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2012, 196(1): 49-67.
- [4] OISHI Y. Why are the Aesthetics of Modest Mosses Highly Valued in Japanese Gardens [J]. *The Bryologist*, 2022, 125(1): 61-69.
- [5] OISHI Y. Urban Heat Island Effects on Moss Gardens in Kyoto, Japan [J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2019, 15(2): 177-184.
- [6] RADU D M, KOHLBRECHER M, CANTOR M, et al. Response of Some Moss Species to Different Controlled Environmental Conditions in Order to Use in Landscaping [J]. *Gesunde Pflanzen*, 2016, 68(2): 109-115.
- [7] 丁水龙,张璐,沈笑. 苔藓植物的园林造景应用 [J]. 中国园林, 2016, 32(12): 12-15.
- [8] 王琦,申琳,程军,等. 应用层次分析法评价城市苔藓的景观价值:以上海市为例 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2018, 47(5): 565-572.
- [9] 岳跃民,王克林,罗为群,等. 人地耦合视角下喀斯特石漠化地区生态系统服务提升 [J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8159-8164.

- [10] 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, 22(6): 573-582.
- [11] 罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 等. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析 [J]. 生态学报, 2021, 41(2): 680-693.
- [12] 郭婷婷, 丁洪伟, 张浩, 等. 中国西南喀斯特地区生态系统服务权衡/协同研究及展望 [J]. 自然资源学报, 2024, 39(6): 1384-1398.
- [13] 白晓永, 张思蕊, 冉晨, 等. 我国西南喀斯特生态修复的十大问题与对策 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1903-1914.
- [14] 程才, 李玉杰, 张远东, 等. 石漠化地区苔藓结皮对土壤养分及生态化学计量特征的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9234-9244.
- [15] 邹扬庆, 张锐, 罗红霞, 等. 重庆中梁山石漠化植被恢复区植被群落演替研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(12): 47-52.
- [16] 邱菊, 蒋勇军, 吕同汝, 等. 典型岩溶槽谷区土壤水和地下水氢氧稳定同位素对隧道建设的响应 [J]. 地球科学, 2022, 47(2): 717-728.
- [17] 申家琛, 张朝晖, 王智慧. 石漠化程度对苔藓植物多样性及其结皮土壤化学性质的影响 [J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6043-6054.
- [18] 刘艳, 郑越月, 敖艳艳. 不同生长基质的苔藓植物优势种生态位与种间联结 [J]. 生态学报, 2019, 39(1): 286-293.
- [19] 王芝慧, 黎静好, 白义, 等. 川西亚高山森林木质残体及其附生苔藓持水特性 [J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6552-6565.
- [20] 涂娜, 严友进, 戴全厚, 等. 喀斯特石漠化区典型生境下石生苔藓的固土持水作用 [J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6203-6214.
- [21] 李军峰, 王智慧, 张朝晖. 喀斯特石漠化山区苔藓多样性及水土保持研究 [J]. 环境科学研究, 2013, 26(7): 759-764.
- [22] 李军峰, 贾少华, 王智慧, 等. 喀斯特石漠化过程中苔藓植物多样性及分布与环境关系 [J]. 生态科学, 2015, 34(1): 68-73.
- [23] CHEN C W, YANG X R, TAN X W, et al. The Role of Habitat Diversity in Generating the Small-Island Effect [J]. *Ecography*, 2020, 43(8): 1241-1249.
- [24] 殷声锋, 王智慧, 张朝晖. 喀斯特重度石漠化地区苔藓植物优势种的种间关联性研究 [J]. 生态科学, 2016, 35(5): 90-95.
- [25] 黄显雅, 黄永才, 陈格, 等. 喀斯特高海拔山区百香果间作大豆生态经济效益评估 [J]. 中国南方果树, 2025, 54(1): 106-111.
- [26] 王庆海, 袁小环, 武菊英, 等. 观赏草景观效果评价指标体系及其模糊综合评判 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 381-386.
- [27] 曾辰午, 李宗峰, 张学朝, 等. 喀斯特石漠化地区苔藓植物功能性状与微生境的关系 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(3): 131-137.

责任编辑 周仁惠