

代 玉,张天汉,王智慧,等. 黔滇石漠区苔藓植物物种多样性及其水土保持作用[J]. 江苏农业科学,2015,43(4):332-337.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.04.119

黔滇石漠区苔藓植物物种多样性及其水土保持作用

代 玉¹, 张天汉¹, 王智慧¹, 张朝晖²

(1. 贵州师范大学生命科学学院, 贵州贵阳 550001; 2. 贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州贵阳 550001)

摘要:研究了贵州省泥凼石林、万峰林和云南省乃古石林苔藓植物的物种多样性,并对研究区苔藓植物在水土保持中的作用做了多因素方差分析。结果显示:在 3 个石漠区中,苔藓植物的物种丰富度: $S_{\text{泥凼石林}}(0.203\ 5) > S_{\text{乃古石林}}(0.048\ 1) > S_{\text{万峰林}}(-0.252\ 0)$;苔藓植物的生活型:万峰林(7 种) > 泥凼石林(6 种) > 乃古石林(5 种),其中 3 个石漠区的共有生活型是:矮丛集型、高丛集型、交织型和平铺型;对 3 个石漠区 2 种优势苔藓植物的多因素方差分析显示:影响苔藓植物水土保持的因素是:“饱和吸水量、成土量” > “苔藓种类” > “石漠区” > “苔藓种类”与“饱和吸水量、成土量”的交互作用 > “石漠区”与“苔藓种类”的交互作用;灰白青藓的水土保持作用均明显高于小舌舌藓,且 2 种苔藓的水土保持作用在各石漠区也是依次降低的:万峰林 > 泥凼石林 > 乃古石林;万峰林苔藓植物 5 项指标平均值均明显高于其他 2 个石漠区。说明苔藓植物对黔滇石漠区治理和水土保持具有十分重要的现实意义。

关键词:苔藓;物种丰富度;相似性系数;方差分析;石漠区;黔滇

中图分类号: Q948;S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)04-0332-06

黔滇两省地处中国的西南部,介于 $97^{\circ}31' \sim 109^{\circ}36'E$, $21^{\circ}09' \sim 29^{\circ}15'N$,是我国喀斯特分布面积最大的地区,也是世界喀斯特景观的重要地带^[1]。贵州地处该区的腹心地带,境内碳酸盐岩出露面积达 13 万 km^2 ,占全省土地总面积的 73%^[2]。云南是我国喀斯特的主要分布省区之一,喀斯特面积约 110 875.7 km^2 ,约占全省面积的 28.1%。在滇东地区,碳酸盐岩的出露面积就占了 58%^[3]。

泥凼石林和万峰林属于贵州省兴义国家地质公园的重要组成部分。泥凼石林的剑状喀斯特地貌和万峰林的锥状喀斯特地貌构建了兴义市典型的岩溶地貌。兴义国家地质公园正在申报世界自然遗产地。乃古石林是世界自然遗产地——云南石林的重要组成部分之一。近年来,随着旅游产业的迅猛发展,一方面给这 3 个石漠景区赢得了声誉,创造了经济价值,

另一方面也给该区域带来了相当大的生态压力:景区资源过度消耗、生态失衡,导致景区生态系统退化,进而破坏了景区自然景观的多样性,直接影响了地区的可持续发展。现有苔藓植物的生存状况、在景观建成中的作用及其保护也必将引起人们的关注。然而,对黔滇石漠区苔藓植物的专一研究却仅见零星报道^[4-8]。作为世界遗产地和即将申报世界遗产地的公园而言,该现状显得极不和谐。因此,研究黔滇石漠区苔藓植物的物种多样性和水土保持作用具有重要的现实价值。

1 研究区域概况

1.1 贵州省泥凼石林

泥凼石林是兴义国家地质公园的重要组成部分之一,是兴义市典型岩溶地貌的组成部分,在我国的石林中享有盛名。泥凼石林位于兴义市西南部的万峰湖畔,距兴义市区 42 km^2 ^[9]。东西长 4 km 、南北宽 2 km 、面积达 200 hm^2 的泥凼石林,密集林立于一海拔在 1150 ~ 1400 m 的峰丛洼地之中,高低不等,高的达 20 m 甚至 30 m ,低的仅为 5 m ^[10]。兴义地区地形西北高东南低,泥凼石林正处于云贵高原向广西盆地的斜坡地带,优厚的地势条件加剧了水的岩溶作用。在

收稿日期:2014-05-08

基金项目:国家自然科学基金(编号:31160042)。

作者简介:代 玉(1984—),女,湖北天门人,硕士研究生,主要从事系统与进化植物学研究。E-mail:daiyu1019@126.com。

通信作者:张朝晖,博士,教授,主要从事植物学和生态学研究。E-mail:academiclife@126.com。

[10]钱晓晴,张学农,程传敏,等. 洪泽湖地区土壤钾素供应状况的研究[J]. 土壤肥料,1996(6):23-26.

[11]佟德利,徐仁扣,顾天夏. 施用尿素和硫酸铵对红壤硝化和酸化作用的影响[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(4):404-409.

[12]张 飞,孔 伟. 洪泽湖周边地区农业面源污染负荷变化分析[J]. 农业环境与发展,2012,29(2):65-68.

[13]Szillery J E, Fernandez I J, Norton S A, et al. Using ion-exchange resins to study soil response to experimental watershed acidification[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 116(1/2/3):383-398.

[14]Sullivan T J, Lawrence G B, Bailey S W, et al. Effects of acidic deposition and soil acidification on sugar maple trees in the adiron-

dack mountains, New York[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(22):12687-12694.

[15]段 雷,周 益,杨永森,等. 酸化及化学修复剂对森林土壤有机物淋溶的影响[J]. 环境科学,2008,29(2):440-445.

[16]庄秀琴. 洪泽湖湿地生态农业发展模式研究[J]. 中国农机化, 2004, 4(3):17-19.

[17]娄 庭,龙怀玉,杨丽娟,等. 在过量施氮农田中减氮和有机无机配施对土壤质量及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(2):11-15,34.

[18]Jobbágy E. Jackson R. Patterns and mechanisms of soil acidification in the conversion of grasslands to forests[J]. Biogeochemistry, 2003, 64:205-229.

经历新构造抬升活动作用,以及马岭河、南盘江和黄泥河 3 大河系的强烈切割下,该区夹于北东向断层夹块的中三叠统垄头组灰岩得以岩溶多样化发育。该断裂夹块对于石林的发育空间结构起到很重要的作用。如果夹块过小就会导致切割空间过大生成垛状而非剑状。可见,泥函石林处的断夹块大小适宜,因此得以形成此剑状的石柱形态^[11-12]。

1.2 贵州省万峰林

万峰林分为东峰林和西峰林,位于贵州省兴义市城南,兴义、安龙、贞丰 3 县交界处,它东到坡岗,南端和广西交界,西到滇、桂、黔三省(区)交界处的三江口,北接乌蒙山主峰,总面积达 2 000 km²,占了兴义市约 2/3 的面积。万峰林喀斯特地形地貌典型突出,形成了独特的锥状喀斯特地质景观,是兴义国家地质公园的重要组成部分之一^[13]。地处 30°38′~35°23′N、104°32′~105°11′E,海拔变化在 700~1 600 m 之间,相对高差达 900 m。万峰林区域易受印度洋暖气流影响,与黔同纬度地区比较,万峰林区域的气候条件具有“冬无严寒,夏无酷暑,四季如春,一雨成冬”的特点,气温高而降雨集中,年平均温度 16~18℃,年降雨量 1 100~1 200 mm,降雨主要集中在夏季(85%),空气相对湿度 75%以上。无霜期 295~300 d。光照充足,年平均日照 1 612.4 h。区内地貌有喀斯特峰林峰丛、喀斯特峡谷及喀斯特洼地^[14]。

1.3 云南省乃古石林

“乃古”,彝语“黑色”之意。乃古石林即黑松岩,它是南方喀斯特世界遗产模范展示地^[15]。乃古石林是位于亚热带高原地区的喀斯特地貌风景名胜之一,素有“石林博物馆”的美誉。2007 年成功申报为世界自然遗产地。它以高大的石灰岩剑状石柱和石峰为特征的“石林”成为喀斯特景观的范例^[16]。乃古石林是云南石林的重要组成部分之一,它位于云南省昆明市石林彝族自治县境内,总面积约 30 km²。地处 103°11′~103°30′E、24°40′~24°55′N,海拔 1 700~1 900 m。本研究区域是半湿润性亚热带山地气候,年均温 15.6℃,最高月均气温 25.3℃,最低月均气温 8.2℃;年平均降雨量 967.9 mm,年平均相对湿度 75%^[17]。

2 研究方法

2.1 野外工作

所有试验材料均选自于 2012 年 1 月和 2012 年 7 月野外调查云南乃古石林苔藓植物时采集的标本,2013 年 1 月野外调查贵州泥函石林和万峰林苔藓植物时采集的标本。各采集区内分别设置 8 个 10 m×10 m 的大样地,每个大样地共设置 5 个 1 m×1 m 的小样方,每个小样方按照 5 点取样法设了 5 个 10 cm×10 cm 小样方,各采集苔藓标本 200 个,3 个采集区共采集苔藓标本 600 个。同时进行标本的拍照、采集和海拔、经纬度、生境等数据记录。

2.2 室内工作

2.2.1 标本鉴定、区系成分和生活型的划分 将采集回来的标本装入处理好的标本袋中,并记录它们的编号及生境特征。在试验室内,应用了 HWG-1 解剖镜、XSZ-107 显微镜等仪器,借助于《中国苔藓志》^[18-22]、《云南植物志》^[23] 等对苔藓植物进行形态鉴定和分类。在结果的整理与分析中,生活型

的统计采用 Magdefrau 的分类系统^[24],借助于 Excel、SPSS 等统计分析软件进行数据的处理分析。

2.2.2 苔藓水土保持试验的处理方法 根据标本鉴定结果,在这 3 个石漠区域中出现的 2 种苔藓植物是灰白青藓 [*Brachythecium albicans* (Hedw.) B. S. G.] 和小牛舌藓 [*Anomodon minor* (Hedw.) Lindb.], 它们在 3 个石漠区域出现的频数较高(≥15)且盖度较大,属于各石漠区中的优势苔藓植物。本研究分别对在 3 个石漠区域出现的这 2 种苔藓植物进行生物量测定等相关试验。由于所采集的标本中存在混合苔藓群落且含有少许杂物,试验前必须进行物种分离并重新测量苔藓纯群落的盖度(表 1)。随后将这 2 种苔藓植物纯群落和泥土分离,过 60 目分样筛称量其结皮层总质量,再将苔藓植物冲洗干净;将清洗干净的苔藓植物室温晾干 24 h 后称量其鲜质量,然后将称完鲜质量的苔藓植物放于 60℃烘箱烘 48 h 后称量干质量,最后将称完干质量的苔藓植物充分吸水后放置于细网上至不滴水时称量饱和吸水质量。

2.2.3 数据处理 物种丰富度指数(S_j)和相似性系数(C_s)计算公式如下:

$$S_j = \sum_{j=1}^n \frac{X_{ij} - \bar{X}_{ij}}{\bar{X}_{ij}} \quad (1)$$

式中: S_j 为丰富度指数; X_{ij} 为 k 个地区中第 i 个地区 n 个分类单元中的第 j 个分类单元数据; \bar{X}_{ij} 为 k 个地区中 n 个分类单元中第 j 个分类单位的数据平均值。

$$C_s = 2C/(a+b) \quad (2)$$

式中: C_s 为 2 个群落共有种, a 和 b 分别为 2 个群落的物种数。

水土保持试验中,对 2 种苔藓植物:灰白青藓和小牛舌藓进行生物量、成土量、饱和吸水量和饱和吸水率等的测定分析,计算参照徐杰等的计算公式^[25],数据采用 SPSS 16.0 处理。

苔藓植物生物量(g/m²) = 干质量(g/m²) × 盖度(%);

成土率 = $\frac{\text{结皮层总质量(g/m}^2\text{)} - \text{干质量(g/m}^2\text{)}}{\text{干质量(g/m}^2\text{)}} \times 100\%$;

苔藓植物成土量(g/m²) = 生物量(g/m²) × 成土率(%);

饱和吸水率 = $\frac{\text{饱和吸水质量(g/m}^2\text{)} - \text{干质量(g/m}^2\text{)}}{\text{干质量(g/m}^2\text{)}} \times 100\%$;

饱和吸水量(g/m²) = 生物量(g/m²) × 饱和吸水率(%).

3 结果

3.1 苔藓植物物种丰富度指数(S_j)

根据公式(1)计算泥函石林、乃古石林和万峰林苔藓植物物种丰富度(表 2),泥函石林物种丰富度指数 $S_1 = 0.2035$,乃古石林物种丰富度指数 $S_2 = 0.0481$,万峰林物种丰富度指数 $S_3 = -0.2520$ 。它们的物种丰富度是依次降低的,即 $S_1 > S_2 > S_3$ 。

3.2 苔藓植物科、属、种和生活型的相似性系数(C_s)

生活型是苔藓植物生长型、群集方式及其对外界环境的长期综合反映。通过苔藓植物生活型的分析,可以揭示当地

表 1 不同石漠区 2 种苔藓植物野外调查表

石漠区	苔藓种类	样品号	生境	盖度(%)	海拔(m)	经纬度
泥凼石林	灰白青藓	1	岩壁	100	1 228	24°48'18.64"N,104°49'07.57"E
		2	岩壁	60	1 256	24°48'19.26"N,104°49'05.74"E
		3	岩壁	100	1 293	24°48'16.08"N,104°48'58.26"E
	小牛舌藓	4	岩壁	100	1 291	24°48'15.51"N,104°48'57.36"E
		5	岩壁薄土	100	1 226	24°48'19.06"N,104°49'07.77"E
		6	岩壁	100	1 273	24°48'12.55"N,104°49'05.17"E
万峰林	灰白青藓	7	岩壁	100	1 162	25°00'05.96"N,104°54'50.76"E
		8	岩面	80	1 162	25°00'05.96"N,104°54'50.76"E
		9	岩壁薄土	100	1 149	25°00'10.35"N,104°54'55.72"E
	小牛舌藓	10	岩壁	65	1 142	24°59'25.02"N,104°55'00.55"E
		11	石缝	75	1 141	24°59'25.18"N,104°55'00.14"E
		12	岩面薄土	100	1 147	24°59'59.94"N,104°54'53.90"E
乃古石林	灰白青藓	13	岩壁	65	1 847	24°54'05.84"N,103°21'08.39"E
		14	岩面	40	1 850	24°54'07.49"N,103°21'04.71"E
		15	石槽壁	38	1 874	24°54'12.41"N,103°20'56.02"E
	小牛舌藓	16	岩面	24	1 851	24°54'21.14"N,103°20'49.77"E
		17	岩面	80	1 878	24°54'12.73"N,103°20'56.75"E
		18	岩面	42	1 882	24°54'03.98"N,103°20'54.28"E

表 2 不同石漠区苔藓植物的丰富度指数

石漠区	科数(个)	属数(个)	种数(个)	丰富度指数	排序
泥凼石林	19	39	90	0.203 5	1
乃古石林	18	38	84	0.048 1	2
万峰林	17	33	75	-0.252 0	3

环境的一般特征^[26]。依据 Magdefrau 的分类系统,泥凼石林、万峰林和乃古石林苔藓植物的生活型分别是 6 种、7 种和 5 种(表 3)。统计数据显示:泥凼石林石漠区苔藓植物的生活型可分为 6 种类型,即矮丛集型 39 种,占总数的 43.33%,如北地扭口藓(*Barbula fallax* Hedw.);高丛集型 5 种,占总数的 5.56%,如暖地大叶藓[*Rhodobryum giganteum* (Schwaeger.) Par.];交织型 37 种,占总数的 41.11%,如东亚蔓藓(*Meteorium atroviregatum* Card. et Thèr.);平铺型 7 种,占总数的 7.78%,如拟扁枝藓[*Homaliadelphus targionianus* (Mitt.) Dix. et P. Varde];垫状 1 种,占总数的 1.11%,如砂生短月藓(*Brachymenium muricola* Broth.);悬垂型 1 种,占总数的 1.11%,如新悬藓毛尖变种[*Neobarbella comes* (Griff.) Nog. var. *pilifera* (Broth. et Yas.) Tan S. He et Isov.]。万峰林

石漠区苔藓植物的生活型可分为 7 种类型,即矮丛集型 32 种,占总数的 42.67%,如东亚小石藓[*Weissia exserta* (Broth.) Chen];高丛集型 3 种,占总数的 4.00%,如弯叶真藓原变种(*Bryum recurvulum* Mitt. var. *recurvulum*);交织型 32 种,占总数的 42.67%,如薄壁卷柏藓[*Racopilum cuspidigerum* (Schwaeger.) Aongstr.];平铺型 5 种,占总数的 3.57%,如毛地钱[*Dumortiera hirsuta* (Sw.) Reinw.]。垫状 1 种,占总数的 1.33%,如砂生短月藓;1 年生型 1 种,占总数的 1.33%,如葫芦藓(*Funaria hygrometrica* Hedw.);悬垂型 1 种,占总数的 1.33%,如新悬藓毛尖变种。乃古石林石漠区苔藓植物的生活型可分为 5 种类型,即矮丛集型 33 种,占总数的 39.29%,如卷叶毛口藓(*Trichostomum involutum* Broth.);交织型 39 种,占总数的 46.43%,如川滇蔓藓[*M. buchananii* (Brid.) Broth.];高丛集型 7 种,占总数的 8.33%,如拟丛净口藓[*Gymnostomum anoectangioides* (C. Muell) X. J. Li];平铺型 3 种,占总数的 3.57%,如紫背苔[*Plagiochasma rupestre* (Forst.) Steph.];树型 2 种,占总数的 2.38%,如南亚拟蕨藓[*Pterobryopsis orientalis* (C. Muell.) Fleisch.]。

表 3 不同石漠区苔藓植物的生活型

石漠区	生活型(%)								
	矮丛集型	高丛集型	交织型	平铺型	垫状	树形	1 年生型	悬垂型	合计
泥凼石林	43.33	5.56	41.11	7.78	1.11	—	—	1.11	100
万峰林	42.67	4.00	42.67	6.67	1.33	—	1.33	1.33	100
乃古石林	39.29	8.33	46.43	3.57	—	2.38	—	—	100

注:“—”表示没有此类生活型。

根据公式(2)分别计算泥凼石林、乃古石林和万峰林两区域的苔藓植物相似性系数(表 4)。结合表 3 和表 4 可知:泥凼石林和万峰林的苔藓植物相比较,科的相似性系数 $S_{11} = 72.22\%$,属的相似性系数 $S_{12} = 61.11\%$,种的相似性系数 $S_{13} = 59.39\%$,生活型的相似性系数 $S_{14} = 92.31\%$;泥凼石林和乃古石林的苔藓植物相比较,科的相似性系数 $S_{21} = 48.65\%$,属的相似性系数 $S_{22} = 44.16\%$,种的相似性系数

$S_{23} = 45.98\%$,生活型的相似性系数 $S_{24} = 72.73\%$;万峰林和乃古石林的苔藓植物相比较,科的相似性系数 $S_{31} = 40.00\%$,属的相似性系数 $S_{32} = 42.25\%$,种的相似性系数 $S_{33} = 42.77\%$,生活型的相似性系数 $S_{34} = 50.00\%$ 。

3.4 在水土保持中苔藓植物的多因素方差分析

3.4.1 不同石漠区 2 种苔藓植物水土保持作用的测试 在这 3 个石漠区中有 2 种苔藓植物:灰白青藓和小牛舌藓,它们

表 4 不同石漠区苔藓植物相似性比较

类别	泥凼石林	万峰林	乃古石林	A	B	C	D(%)	E(%)	F(%)
苔藓植物科	19	17	18	13	9	7	72.22	48.65	40.00
苔藓植物属	39	33	38	22	17	15	61.11	44.16	42.25
苔藓植物种	90	75	84	49	40	34	59.39	45.98	42.77
生活型	6	7	5	6	4	3	92.31	72.73	50.00

注:A:泥凼石林和万峰林共有数量;B:泥凼石林和乃古石林共有数量;C:万峰林和乃古石林共有数量;D:泥凼石林和万峰林的相似性系数 S_1 (%);E:泥凼石林和乃古石林的相似性系数 S_2 (%);F:万峰林和乃古石林的相似性系数 S_3 (%)。

出现的频数较高 ≥ 15)且盖度较大,属于各石漠区中的优势苔藓植物。2 种苔藓植物生物量、成土量、饱和吸水量和饱和吸水率等测定结果(表 5)显示:3 个石漠区中 2 种苔藓植物的平均生物量在 33.44 ~ 192.01 g/m²;平均饱和吸水量在 458.97 ~ 2 309.64 g/m²;平均饱和吸水率在 503.22% ~ 1 560.12%;平均成土率在 16.72% ~ 135.89%;平均成土量在 25.58 ~ 158.59 g/m²。在万峰林石漠区中,灰白青藓的平均生物量和平均饱和吸水量都是最大的,分别为 192.01 g/m²

和 2 309.64 g/m²;小牛舌藓的平均成土率和平均成土量也是最大的,分别为 135.89% 和 158.59 g/m²。在乃古石林石漠区中,灰白青藓的平均生物量最小,为 33.44 g/m²,小牛舌藓的平均饱和吸水量和平均成土量也是最小的,分别为 458.97 g/m² 和 25.58 g/m²;在万峰林石漠区中,灰白青藓的平均成土率最小,为 16.72%;在泥凼石林石漠区中,小牛舌藓的平均饱和吸水率最小,为 503.22%。

表 5 不同石漠区 2 种苔藓植物的测试数据

石漠区	苔藓种类	样品号	鲜质量(g/m ²)	干质量(g/m ²)	饱和吸水质量(g/m ²)	饱和吸水率(%)	生物量(g/m ²)	饱和吸水量(g/m ²)	成土率(%)	成土量(g/m ²)
泥凼石林	灰白青藓	1	802.24	130.82	1641.81	1155.01	130.82	1510.99	93.41	122.20
	灰白青藓	2	310.95	46.96	468.88	898.47	28.18	253.15	91.59	25.81
	灰白青藓	3	1 110.03	222.88	3 428.04	1 438.07	222.88	3205.16	52.52	117.05
		平均值	741.07	133.55	1 846.24	1 163.85	127.29	1656.43	79.17	88.35
	小牛舌藓	4	629.29	98.45	567.04	475.97	68.92	328.01	43.75	30.15
	小牛舌藓	5	699.92	124.09	782.52	530.61	124.09	658.43	111.85	138.80
	小牛舌藓	6	832.58	142.45	859.08	503.07	142.45	716.63	66.38	94.56
万峰林		平均值	720.60	121.66	736.21	503.22	111.82	567.69	73.99	87.84
	灰白青藓	7	983.05	175.48	2 370.41	1 250.81	175.48	2 370.41	15.34	26.91
	灰白青藓	8	988.25	197.58	2 286.24	1 360.80	197.58	2 286.24	8.02	15.84
	灰白青藓	9	998.95	202.98	2 272.28	1 019.46	202.98	2 272.28	26.79	54.93
		平均值	990.08	192.01	2 309.64	1 210.36	192.01	2 309.64	16.72	32.56
	小牛舌藓	10	766.36	107.71	985.28	814.75	80.78	738.94	123.29	99.60
	小牛舌藓	11	936.63	124.48	897.69	621.15	80.91	583.48	136.13	110.15
乃古石林	小牛舌藓	12	1 419.54	179.45	1 334.67	643.76	179.45	1 334.67	148.25	266.03
		平均值	1 040.84	137.21	1 072.55	693.22	113.71	885.70	135.89	158.59
	灰白青藓	13	421.86	63.14	1 110.80	1 659.27	41.04	680.98	109.72	45.03
	灰白青藓	14	608.91	92.85	1 453.56	1 465.49	37.14	544.28	71.39	26.52
	灰白青藓	15	333.20	58.26	964.56	1 555.61	22.14	344.39	35.74	7.91
		平均值	454.66	71.42	1176.31	1 560.12	33.44	523.22	72.28	26.49
	小牛舌藓	16	276.33	60.32	646.85	972.36	14.48	140.77	47.10	6.82
	小牛舌藓	17	442.72	181.37	1 526.54	741.67	145.10	1 076.14	40.63	58.95
	小牛舌藓	18	50.00	49.69	428.61	798.74	20.03	159.99	54.77	10.97
		平均值	256.35	97.13	867.33	837.59	59.87	458.97	47.50	25.58

3.4.2 苔藓植物水土保持作用的多因素方差分析 3 个石漠区 2 种苔藓水土保持作用的统计分析见表 6。由表 6 可知,整个模型的 F 统计量为 19.677 343,除“石漠区”与“苔藓种类”的交互作用不存在明显差异外,其他各项如“石漠区”、“苔藓种类”、“饱和吸水量、成土量”、“苔藓种类”与“饱和吸水量、成土量”的交互作用、“石漠区”与“饱和吸水量、成土量”的交互作用等的方差分析模型差异极显著。即“石漠区”的 $F = 16.407\ 872$ 、“苔藓种类”的 $F = 46.560\ 186$ 、“饱和吸水量、成土量”的 $F = 71.766\ 013$ 、“苔藓种类”与“饱和吸水量、

成土量”交互作用的 $F = 11.193\ 034$ 、“石漠区”与“饱和吸水量、成土量”交互作用的 $F = 3.834\ 638$ 时,差异极显著。这说明不同的“石漠区”、“苔藓种类”、“饱和吸水量、成土量”、“苔藓种类”与“饱和吸水量、成土量”的交互作用以及“石漠区”与“饱和吸水量、成土量”的交互作用对苔藓植物的水土保持作用均有极显著影响。

统计并分析 2 种苔藓植物分别在不同石漠区的水土保持作用的数据,结果见图 1。结合表 5 和图 1 可知:在各石漠区中,灰白青藓(I)水土保持作用数据的平均值均高于小牛

舌藓(Ⅱ)。在万峰林石漠区,Ⅰ(906.63) > Ⅱ(529.71);在泥凼石林石漠区,Ⅰ(729.50) > Ⅱ(365.38);在乃古石林石漠区,Ⅰ(489.74) > Ⅱ(331.29);而且 2 种苔藓植物水土保持作用数据的平均值在各石漠区也是依次降低的:万峰林 > 泥凼石林 > 乃古石林。

统计并分析在不同石漠区苔藓各项指标的平均值,结果见图 2。结合表 5 和图 2 可知:在各石漠区中,苔藓 8 项指标的平均值有明显的区别。总体而言,在各石漠区中,前 5 个指

标的数值变化幅度较大,即苔藓的饱和吸水重、饱和吸水量、干重、生物量和成土量等 5 项指标的数值均呈现:万峰林 > 泥凼石林 > 乃古石林;苔藓的饱和吸水率:乃古石林(1 198.86%) > 万峰林(951.79%) > 泥凼石林(833.53%),乃古石林石漠区苔藓的饱和吸水率占绝对优势;苔藓的成土率:泥凼石林(76.58%) > 万峰林(76.30%) > 乃古石林(59.89%),在泥凼石林石漠区和万峰林石漠区,苔藓的成土率差异不明显,但明显高于乃古石林石漠区。

表 6 不同石漠区 2 种苔藓水土保持作用的多因素方差分析

变异来源	SS	df	MS	F 值	P 值
校正模型	6.018a	33	182 3631.713	19.677 343 **	0.000 000
截距	5.993	1	5.993	646.697 865	0.000 000
石漠区	3 041 070.222	2	1520535.111	16.407 872 **	0.000 000
苔藓种类	4 315 045.421	1	4315045.421	46.560186 **	0.000 000
饱和吸水量、成土量	4.656	7	6651038.770	71.766 013 **	0.000 000
石漠区 × 苔藓种类	481 003.810	2	240501.905	2.595 063	0.077 401
苔藓种类 × 饱和吸水量、成土量	7 261 336.001	7	1 037 333.714	11.193 034 **	0.000 000
石漠区 × 饱和吸水量、成土量	4 975 343.132	14	355 381.652	3.834 638 **	0.000 011
误差	1.687	182	92 676.722		
总和	1.330	216			
校正总和	7.705	215			

注: $R=0.781(R_{校正}=0.741)$; ** 表示在 0.01 水平上差异显著。

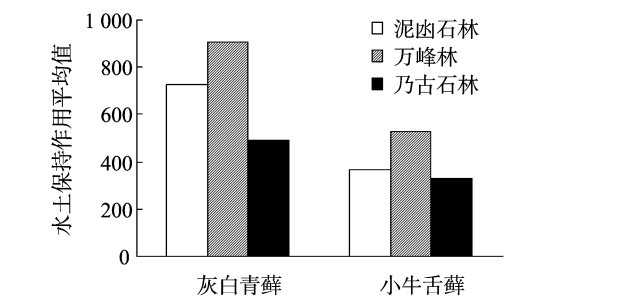


图 1 2 种苔藓分别在不同石漠区的水土保持作用数据的平均值

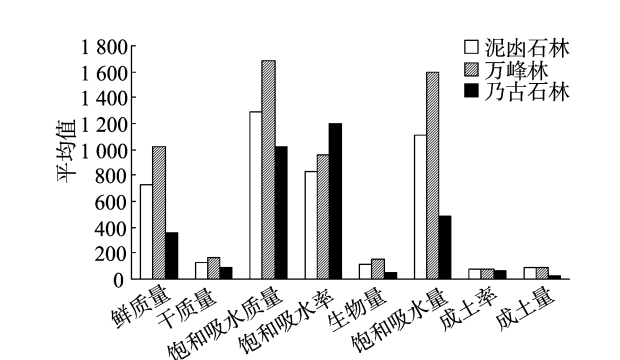


图 2 不同石漠区苔藓各项指标的平均值

4 结论与讨论

4.1 苔藓植物的生活型和物种丰富度

苔藓植物体型矮小,茎内组织分化水平不高,仅有皮部和中轴的分化,没有真正的维管束构造^[26],因此其生长分布对环境变化及其敏感。苔藓植物生活型的类型的多少,可以反映其生长环境的基本情况。结合表 3 分析:苔藓植物生活型

类型个数依次为:万峰林石漠区(7 种) > 泥凼石林石漠区(6 种) > 乃古石林石漠区(5 种),其中 3 个石漠区苔藓共有的生活型是:矮丛集型、高丛集型、交织型和平铺型。2004 年初乃古石林成为世界地质公园后,当年游客人数猛增至 209 万人次^[27]。超负荷的人流量势必会给石漠区的生态环境带来前所未有的压力,因此该石漠区苔藓植物的生活型相对少一些;泥凼石林位于距兴义市 42 km 以外的泥凼镇,较为偏僻,目前正处于旅游开发初期,除少量农民作业外,人为干扰较少,因此该石漠区苔藓植物的生活型相对多一些;万峰林位于兴义市城南,是一个较为成熟的景区。万峰林石漠区山体大多锥形,山势陡峭,山上多覆盖灌木丛,人们在离万峰林较远的几座山的山腰开辟了一条旅游线路,在这条旅游线路上,游客们来观赏万峰林的锥状喀斯特地貌。换言之,只有极少数游客会置身于万峰林中观光,这样对万峰林内部生态环境的影响并不大,因此苔藓植物的生活型最为丰富。

泥凼石林物种丰富度指数 $S_1=0.203 5$;乃古石林物种丰富度指数 $S_2=0.048 1$;万峰林物种丰富度指数 $S_3=-0.252 0$ 。它们的物种丰富度是依次降低的, $S_1>S_2>S_3$ 。而 S 越大,说明该区域的物种丰富度越高。由此可见:相对而言,泥凼石林苔藓植物的物种丰富度最高。

4.2 苔藓植物的科、属、种和生活型的相似性

泥凼石林和万峰林中,苔藓植物的科、属、种和生活型的相似性(依次是 72.22%、61.11%、59.39%、92.31%)都是较高的。因为泥凼石林和万峰林相对距离较乃古石林近,同处贵州省兴义市境内,受到相同的地质条件和气候环境的影响,所以这 2 个石漠区苔藓植物的科、属、种和生活型相似性较高。

4.3 在水土保持中苔藓植物的多因素方差分析

不同石漠区 2 种苔藓水土保持作用的多因素方差分析结

果表明:不同的“石漠区”、“苔藓种类”、“饱和吸水量、成土量”、“苔藓种类”与“饱和吸水量、成土量”的交互作用以及“石漠区”与“饱和吸水量、成土量”的交互作用对苔藓植物的水土保持作用均有极显著影响。这说明:对苔藓植物的水土保持起作用的因素是:“饱和吸水量、成土量”>“苔藓种类”>“石漠区”>“苔藓种类”与“饱和吸水量、成土量”的交互作用>“石漠区”与“苔藓种类”的交互作用。试验结果符合苔藓植物水土保持的实际情况,首先在野外采样时测得了苔藓植物盖度;其次通过试验测得了苔藓植物的结皮层总质量、鲜质量、干质量、饱和吸水质量等数值;最后通过公式计算出苔藓植物的其他几项指标。苔藓植物不同,它们的各项生理生化指标也是不同的,这就必然造成它们的饱和吸水量、生物量、成土量的不同。因为不同的石漠区环境、气候和人流量等因素各不相同,所以不同石漠区苔藓植物水土保持的作用有较大差异。从数据分析还可以看出:“苔藓种类”与“饱和吸水量、成土量”的交互作用、“石漠区”与“苔藓种类”的交互作用呈极显著状态,而“石漠区”与“苔藓种类”的交互作用不显著。这说明在苔藓植物的水土保持方面,可以多挑选出“饱和吸水量、成土量”高的种类和优化测定“饱和吸水量、成土量”的方法;在不同的石漠区,苔藓植物均具有良好的水土保持作用。

在泥凼石林、万峰林和乃古石林 3 个石漠区,出现频数较高(≥ 15)且盖度较大的优势苔藓植物中:灰白青藓的水土保持作用均高于小牛舌藓,且这 2 种苔藓植物的水土保持作用在各石漠区也是依次降低的:万峰林>泥凼石林>乃古石林。这说明在黔滇石漠区的苔藓植物中,这 2 种苔藓分布较广且各项指标优良,而且灰白青藓的各项指标优于小牛舌藓。因此,在黔滇石漠区水土保持的自然治理和恢复中,灰白青藓发挥了重要的作用。

结果表明,忽略苔藓植物的种类,在泥凼石林、万峰林和乃古石林 3 个石漠区,万峰林石漠区苔藓植物绝大多数指标的数值均明显高于其他 2 个石漠区。这说明苔藓植物在万峰林石漠区发挥了较强的水土保持作用,其次是泥凼石林,再次是乃古石林。

参考文献:

- [1] Sweeting M M. Reflections on the development of karst geomorphology in Europe and a comparison with its development in China[J]. Z Geomorph, 1993, 37: 127–138.
- [2] 任海, 刘庆, 李凌浩. 恢复生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 10–45.
- [3] 王剑, 彭建. 贵州、云南旅游资源及其开发利用对比研究[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2001, 19(2): 87–91.
- [4] Zhang Z H, Peng T, Li X N, et al. A study on the bryophytes of karst cave threshold at Kunming Area in Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(3): 229–233.
- [5] Zhang Z H. Contribution to the bryoflora of Guizhou, SW China—New records and habitations on mosses from Huangguoshu Karst Area[J].

Journal of Bryology, 1996, 19: 115–149.

- [6] 李冰, 张朝晖. 喀斯特石漠结皮层藓类物种多样性及在石漠化治理中的作用研究[J]. 中国岩溶, 2009, 28(1): 55–60.
- [7] 付兰. 路南石林苔藓植物多样性及其生物喀斯特溶蚀形态研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学生命科学学院, 2013.
- [8] 代玉, 张朝晖. 云南乃古石林 5 种藓类植物的水土保持作用[J]. 植物科学学报, 2013, 31(3): 209–218.
- [9] 贺寿勇. 加强民族地区生态保护 努力构建人与自然的和谐——兴义市泥凼镇生态环境建设调研[Z]. 2010: 12.
- [10] 徐柯健, 李兴中. 贵州兴义岩溶地貌景观特色及成因探讨[C]//中国地质学会. 全国第 19 届旅游地学年会暨韶关市旅游发展战略研讨会论文集. 北京市: 中国地质学会, 2005: 279–286.
- [11] 廖凌伶. 泥凼石林成因分析[J]. 现代农业科技, 2012(9): 323–324.
- [12] 李兴中, 王立亭, 陈跃康. 贵州喀斯特石林发育演化特征[J]. 贵州地质, 2009, 26(1): 36–43.
- [13] 武国辉, 刘幼平. 贵州的岩溶峰林[J]. 理论与当代, 2007(1): 49–50.
- [14] 陈功轩, 刘畅, 罗泰昌. 贵州万峰林陆生贝类物种组成及区系分析[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2005, 23(4): 5–8.
- [15] 曲从俊. 石头演绎的艺术与风情——走进云南石林世界地质公园[J]. 资源导刊: 地质旅游版, 2011(4): 34–45.
- [16] 黎子骞, 甘沛奇. 云南石林世界地质公园 石头演绎的艺术与风情[J]. 西南航空, 2010(3): 26–30.
- [17] 张勇, 王晶晶, 李玉辉. 云南石林景区恢复植被的土壤水文结构功能研究[J]. 中国岩溶, 2009, 28(3): 293–299.
- [18] 高谦. 中国苔藓志: 第 9 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 51–135.
- [19] 黎兴江. 中国苔藓志: 第 4 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 42–146.
- [20] 吴鹏程, 贾渝. 中国苔藓志: 第 8 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 88–225.
- [21] 吴鹏程. 中国苔藓志: 第 6 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 119–240.
- [22] 胡人亮, 王幼芳. 中国苔藓志: 第 7 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 82–145.
- [23] 黎兴江. 云南植物志: 第 18 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 224–448.
- [24] Magdefrau K. Life – forms of bryophytes[M]//Smith A J E. Bryophyte ecology. New York: Chapman & Hall, 1982: 45–59.
- [25] 徐杰, 白学良, 杨持, 等. 固定沙丘结皮层藓类植物多样性及固沙作用研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 545–551.
- [26] 胡人亮. 苔藓植物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [27] 朱树荣, 李忠. 地质遗迹景观保护和利用的旅游地学实践与探索——以云南石林地质公园为例[C]//中国地质学会. 中国地质学会旅游地学与国家地质公园研究分会成立大会暨第 20 届旅游地学与地质公园学术年会论文集. 北京市: 中国地质学会, 2005: 66–70.