

云南乃古石林 5 种藓类植物的水土保持作用

代玉¹, 张朝晖^{2*}

(1. 贵州师范大学生命科学学院, 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, 贵阳 550001)

摘 要: 对云南乃古石林出现频度最高的 5 种藓类植物做了水土保持作用研究。5 种藓类植物鳞叶藓 (*Taxiphyllum taxirameum* (Mitt.) Fleisch.)、灰白青藓 (*Brachythecium albicans* (Hedw.) B. S. G.)、小牛舌藓全缘亚种 (*Anomodon minor* subsp. *integerrimus* (Mitt.) Iwats.)、中华细枝藓 (*Lindbergia sinensis* (C. Muell.) Broth.) 和拟扁枝藓 (*Homaliadelphus targionianus* (Mitt.) Dix. et P. Varde) 的生物量等测定结果显示: 平均生物量为 24.31 ~ 103.78 g/m², 平均饱和吸水率为 818.24% ~ 1462.02%, 最高的达到 1659.27%, 最低的也达到了 590.95%; 平均饱和吸水量为 216.92 ~ 791.80 g/m², 最高的达到 1790.28 g/m²; 平均成土率为 47.32% ~ 111.58%, 最高的达到 194.82%, 最低的也达到 19.33%; 平均成土量为 9.01 ~ 46.73 g/m², 最高的达到 110.17 g/m²。小牛舌藓全缘亚种的平均饱和吸水量和平均生物量远远高于其他 4 种藓类, 分别为: 791.80 g/m² 和 103.78 g/m²。相关性分析表明, 小牛舌藓全缘亚种的保水成土相关性最显著。它的干重与饱和吸水重、生物量与干重、生物量与饱和吸水量、生物量与成土量、饱和吸水量与成土量都是呈正极显著相关。研究结果表明, 在乃古石林剑状喀斯特这种缺少土壤、干旱且保水能力弱的景区环境, 藓类植物以其特有的生态功能在石林景观多样性、水土保持等方面具有十分重要的作用。

关键词: 藓类植物; 水土保持; 相关性; 乃古石林; 云南

中图分类号: Q948.118

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2013)03-0209-10

Soil and Water Conservation of Five Mosses in the Naigu Stone Forest of Yunnan Province

DAI Yu¹, ZHANG Zhao-Hui^{2*}

(1. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: Soil and water conservation of five mosses were investigated in Naigu Stone Forest of Yunnan province. The five highest frequency mosses were *Taxiphyllum taxirameum* (Mitt.) Fleisch., *Brachythecium albicans* (Hedw.) B. S. G., *Anomodon minor* subsp. *integerrimus* (Mitt.) Iwats., *Lindbergia sinensis* (C. Muell.) Broth. and *Homaliadelphus targionianus* (Mitt.) Dix. et P. Varde. Determination of biomass, pedogenesis quantity, saturated water adsorption rate and quantity of the five mosses showed that the average biomass ranged from 24.31 g/m² to 103.78 g/m², average saturated water adsorption rate ranged from 818.24% to 1462.02% (highest of 1659.27%), average saturated water adsorption quantity ranged from 216.92 g/m² to 791.80 g/m² (highest of 1790.28 g/m²) average pedogenesis ranged from 47.32% to 111.58% (highest of 194.82%), and average pedogenesis quantity ranged from 9.01 g/m² to 46.73 g/m² (highest of 110.17 g/m²). Experiments showed that the average saturated water adsorption quantity and average biomass of *Anomodon minor* subsp. *integerrimus* were greatest, 791.80 g/m² and 103.78 g/m², respectively. *Anomodon minor* subsp.

收稿日期: 2012-11-05, 修回日期: 2013-02-08。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31160042)。

作者简介: 代玉(1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为系统与进化植物学(E-mail: daiyu1019@126.com)。

* 通讯作者: 张朝晖(1963-), 男, 教授, 博士, 研究方向为植物学和生态学(Author for correspondence. E-mail: academiclife@126.com)。

integerrimus exhibited the most significant correlation with soil water retention. Dry weight and fresh weight, biomass and dry weight, biomass and saturated water adsorption quantity, biomass and pedogenesis quantity, saturated water adsorption and pedogenesis quantity showed positive correlations. Therefore, the results indicated that the mosses had high ability to absorb and reserve water. The mosses showed a remarkable effect on pedogenesis, which is significant for landscape diversity and soil and water conservation in stone karst regions.

Key words: Mosses; Soil and water conservation; Correlation; Naigu Stone Forest; Yunnan

乃古石林是位于亚热带高原地区的喀斯特地貌风景区之一,是世界大陆地区最典型、最完整的剑状喀斯特地貌。素有“天下第一奇观”、“石林博物馆”的美誉^[1]。它以高大的石灰岩剑状石柱和石峰为特征成为“石林”喀斯特景观的范例,同时,它也被挑选作为中国南方喀斯特所发现的各种石林地貌的经典样板^[2]。石林景区的开发给公园所在社区和居民带来新的经济来源和就业岗位,在区域社会经济的可持续发展中发挥着中坚作用^[3]。然而,由于过去长期不合理的人为干扰与破坏,加之旅游开发导致人为活动频繁,石林资源过度消耗、水土流失、生态失衡,使石林生态系统退化,从而破坏了石林的自然景观多样性,直接影响了石林地区的可持续发展。因此,研究云南乃古石林水土保持作用具有重要现实价值。

苔藓植物属于高等植物中的低等类群,它是一类绿色自养型植物^[4]。苔藓植物一般形体矮小,有特殊的生理适应机制。特别是一些特殊的苔藓种类能在高温、干旱等其它陆生植物很难生存的环境中生长繁衍^[5],它们在水土保持方面发挥着重要作用。近年来,随着苔藓植物水土保持功能研究的不断深入,苔藓植物的水土保持作用备受关注。国外许多学者在不同区域对苔藓特性作了研究,在苔藓植物分布与环境关系、苔藓植物涵养水源作用等方面取得了一定成果^[6-9]。国内学者们在苔藓水土保持方面也取得了一定的进展。曾信波对苔藓层的蓄水保土功能进行了研究^[10];李冰和张朝晖对喀斯特石漠结皮层藓类物种多样性及其在石漠化治理中的作用进行了研究^[11];吴玉环等在对苔藓植物的生态功能及其在植被恢复与重建中的作用的研究中指出:苔藓植物在水土保持和涵养水份等方面有重要的生态学功能^[12];王登富、王智慧和张朝晖等对废弃卡林型金矿区结皮层苔藓植物蓄水作用和

成土功能进行了研究^[13]。然而,对云南乃古石林藓类植物水土保持作用的研究还未见报道。该区域因特殊的地质构造,形成了较典型的剑状喀斯特地貌,随着人为活动的日益频繁,水土流失严重,生态环境遭到不同程度的破坏,严重影响着石林地区的可持续发展。因此,对该问题的研究具有重要的现实意义。我们对云南乃古石林5种藓类植物的水土保持作用进行了研究,期望筛选出在水土保持方面起先锋作用的一种或几种藓类植物,为该区域更好地塑造景观多样性和生态治理提供科学的基础数据和参考资料。

1 研究区域概况

乃古石林位于云南省昆明市石林彝族自治县境内,面积约30 km²。它在中国西南岩溶高原的石林景区北部,地处24°40'~24°55'N、103°11'~103°30'E,海拔1700~1900 m^[14]。本区域属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℃;年平均降水量967.9 mm,年平均相对湿度75%^[15]。乃古石林主要是由白云质灰岩构成,是世界上罕见的发育较为完整的剑状喀斯特。石林岩石的表面长满了苔藓植物,苔藓植物虽然微小,但其对石林的贡献不容忽视。首先,它们不仅能加深岩石的颜色;其次苔藓的生长能分泌有机酸,产生生物溶蚀作用,使岩石表面形成溶窝、溶斑,塑造岩石表面的微小形态;最后苔藓植物的生存与繁衍,还可以为其他高等植物的登陆创造有利的条件,以此来增加石林喀斯特的景观多样性,发挥其水土保持作用。

2 研究方法

2.1 野外调查

所有试验材料均选自2012年1月9日和7月

23 日对云南乃古石林苔藓植物野外调查时采集的标本。采集区内设置 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 5 个 10 cm × 10 cm 的小样方，共采集苔藓标本 200 号。对标本进行拍照、采集，记录海拔、经纬度、生境等数据。

2.2 标本鉴定

将采集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。在实验室内，应用 HWG-1 解剖镜、XSZ-107 显微镜等仪器，借助《中国苔藓志》^[16-20]、《云南植物志》^[21] 和《澳门苔藓植物志》^[22] 等对苔藓植物进行形态鉴定和分类。

2.3 处理方法

根据标本鉴定结果，有少量藓类植物出现的频度较高，选取该景区岩石上出现频度最高、生物量较大、分布面积较广且盖度较大的 5 种藓类植物进行生物量测定等相关试验。这 5 种藓类植物分别是鳞叶藓 (*Taxiphyllum taxirameum* (Mitt.)

Fleisch.)、灰白青藓 (*Brachythecium albicans* (Hedw.) B. S. G.)、小牛舌藓全缘亚种 (*Anomodon minor* subsp. *integerrimus* (Mitt.) Iwats.)、中华细枝藓 (*Lindbergia sinensis* (C. Muell.) Broth.) 和拟扁枝藓 (*Homaliadelphus targionianus* (Mitt.) Dix. et P. Varde)。由于所采集的标本中存在混合苔藓群落且含有少许杂物，实验前必须进行物种分离并重新测量藓类纯群落的盖度，相关数据见表 1。随后将这 5 种藓类植物纯群落和泥土分离，过 60 目分样筛，称量其结皮层总重，清洗直至藓类植物冲洗干净为止；将清洗干净的藓类植物室温晾干 24 h 后称量其鲜重，然后将称完鲜重的藓类植物放于 60℃烘箱烘 48 h 后称量干重，最后将称完干重的藓类植物充分吸水后放置于细网上至不滴水时称量其饱和吸水重。

2.4 数据处理

数据采用 Spss 19.0 处理：选取该地区出现频

表 1 乃古石林 5 种藓类植物野外调查
Table 1 Statistics of five mosses by field investigation in Naigu Stone Forest

种名 Species	样品号 Number	生境 Habitat	盖度 (%) Cover degree
鳞叶藓 <i>Taxiphyllum taxirameum</i> (Mitt.) Fleisch.	A ₁	林下石灰岩岩面	82
	A ₂	小石槽壁	30
	A ₃	石灰岩面薄土	100
	A ₄	白云质灰岩面薄土	100
灰白青藓 <i>Brachythecium albicans</i> (Hedw.) B. S. G.	B ₁	石灰岩岩壁	65
	B ₂	石灰岩岩面	40
	B ₃	石灰岩岩面	45
	B ₄	白云质灰岩石槽壁	38
小牛舌藓全缘亚种 <i>Anomodon minor</i> subsp. <i>integerrimus</i> (Mitt.) Iwats.	C ₁	坡阴面石灰岩岩面	100
	C ₂	石灰岩岩面	24
	C ₃	坡阴面白云质灰岩岩面	80
	C ₄	白云质灰岩岩面	42
中华细枝藓 <i>Lindbergia sinensis</i> (C. Muell.) Broth.	D ₁	石灰岩岩面	63
	D ₂	石灰岩石槽壁	10
	D ₃	石灰岩岩面	50
	D ₄	石灰岩岩面	30
拟扁枝藓 <i>Homaliadelphus targionianus</i> (Mitt.) Dix. et P. Varde	E ₁	石灰岩岩面	50
	E ₂	白云质灰岩岩面	15
	E ₃	白云质灰岩石缝	20
	E ₄	石灰岩岩面	44

注：A：鳞叶藓；B：灰白青藓；C：小牛舌藓全缘亚种；D：中华细枝藓；E：拟扁枝藓。1~4 代表各物种的 4 个采样点。下同。
Notes: A: *Taxiphyllum taxirameum* (Mitt.) Fleisch. ; B: *Brachythecium albicans* (Hedw.) B. S. G. ; C: *Anomodon minor* subsp. *integerrimus* (Mitt.) Iwats. ; D: *Lindbergia sinensis* (C. Muell.) Broth. ; E: *Homaliadelphus targionianus* (Mitt.) Dix. et P. Varde. 1 - 4 stand for four sampling points of each species. The same below.

度最高且盖度较大的 5 种藓类植物进行生物量、成土量、饱和吸水量和饱和吸水率等的测定分析,参照徐杰等的计算公式^[23]进行统计,具体如下:

- (1) 藓类植物生物量(g/m²) = 干重(g/m²) × 盖度(%);
- (2) 藓类植物成土率(%) =
$$\frac{\text{结皮层总重(g/m}^2\text{)} - \text{干重(g/m}^2\text{)}}{\text{干重(g/m}^2\text{)}} \times 100\%;$$
- (3) 藓类植物成土量(g/m²) = 生物量(g/m²) × 成土率(%);
- (4) 饱和吸水率(%) =
$$\frac{\text{饱和吸水重(g/m}^2\text{)} - \text{干重(g/m}^2\text{)}}{\text{干重(g/m}^2\text{)}} \times 100\%;$$
- (5) 饱和吸水量(g/m²) = 生物量(g/m²) × 饱和吸水率(%)。

3 结果

3.1 藓类植物的保水作用

选取该景区岩石上出现频度最高且盖度较大的 5 种藓类植物来作生物量相关测试试验。选取的种类是鳞叶藓、灰白青藓、小牛舌藓全缘亚种、中华细枝藓和拟扁枝藓纯群落, 5 种藓类的饱和吸水率和饱和吸水量试验数据见表 2。测定结果显示, 5 种藓类植物的平均生物量在 24. 31 ~ 103. 78 g/m², 平均饱和吸水率在 818. 24% ~ 1462. 02%, 最高的达到 1659. 27%, 最低的也达到了 590. 95%; 平均饱和吸水量在 216. 92 ~ 791. 80 g/m², 最高的达到 1790. 28 g/m², 最低的是 12. 47 g/m²。从表 2 中还可知: 小牛舌藓全缘亚种的平均饱和吸水量和平均生物量远远高于其他 4 种藓类, 分别为:

表 2 乃古石林 5 种藓类植物的测试数据
Table 2 Experimentation data of five mosses in Naigu Stone Forest

各采样点的藓类物种 Species	鲜重 Fresh weight (g/m ²)	干重 Dry weight (g/m ²)	饱和吸水重 Saturated water adsorption weight (g/m ²)	饱和吸水率 Saturated water adsorption rate (%)	生物量 Biomass (g/m ²)	饱和吸水量 Saturated water absorption (g/m ²)	成土率 Pedogenesis rate (%)	成土量 Pedogenesis quantity (g/m ²)
A ₁	329. 32	71. 96	938. 90	1204. 75	59. 01	710. 89	83. 46	49. 25
A ₂	104. 78	47. 91	591. 77	1135. 17	14. 37	163. 16	194. 82	28. 00
A ₃	520. 39	53. 94	741. 91	1275. 44	53. 94	687. 97	88. 21	47. 58
A ₄	324. 31	60. 49	820. 19	1255. 91	60. 49	759. 70	79. 83	48. 29
平均值 Average	319. 70	58. 58	773. 19	1217. 82	46. 95	580. 43	111. 58	43. 28
B ₁	421. 86	63. 14	1110. 80	1659. 27	41. 04	680. 98	109. 72	45. 03
B ₂	608. 91	92. 85	1453. 56	1465. 49	37. 14	544. 28	71. 39	26. 52
B ₃	815. 93	138. 37	1754. 11	1167. 70	62. 27	727. 08	44. 67	27. 81
B ₄	333. 20	58. 26	964. 56	1555. 61	22. 14	344. 39	35. 74	7. 91
平均值 Average	544. 98	88. 16	1320. 76	1462. 02	40. 65	574. 18	65. 38	26. 82
C ₁	1119. 80	235. 51	2025. 79	760. 17	235. 51	1790. 28	46. 78	110. 17
C ₂	276. 33	60. 32	646. 85	972. 36	14. 48	140. 77	47. 10	6. 82
C ₃	442. 72	181. 37	1526. 54	741. 67	145. 10	1076. 14	40. 63	58. 95
C ₄	50. 00	49. 69	428. 61	798. 74	20. 03	159. 99	54. 77	10. 97
平均值 Average	472. 21	131. 72	1156. 95	818. 24	103. 78	791. 80	47. 32	46. 73
D ₁	498. 38	117. 37	1355. 64	1055. 01	73. 94	780. 11	98. 67	72. 96
D ₂	10. 82	8. 82	133. 55	1414. 17	0. 88	12. 47	86. 62	0. 76
D ₃	929. 26	157. 04	2074. 21	1220. 82	78. 52	958. 59	62. 23	48. 87
D ₄	40. 33	37. 91	274. 45	623. 95	11. 37	70. 96	49. 56	5. 64
平均值 Average	369. 70	80. 29	959. 46	1078. 49	41. 18	455. 53	74. 27	32. 06
E ₁	200. 66	122. 14	1202. 16	884. 25	61. 07	540. 01	37. 37	22. 82
E ₂	23. 47	21. 89	151. 25	590. 95	3. 28	19. 40	49. 70	1. 63
E ₃	43. 19	39. 08	431. 81	1004. 94	7. 82	78. 55	86. 00	6. 72
E ₄	63. 74	57. 00	579. 09	915. 95	25. 08	229. 72	19. 33	4. 85
平均值 Average	82. 77	60. 03	591. 08	849. 02	24. 31	216. 92	48. 10	9. 01

791.80 g/m²和103.78 g/m²。

3.2 藓类植物的成土作用

对该景区岩石上出现频度最高且盖度较大的5种藓类植物的成土率和成土量作了测试实验。测定结果显示(表2),5种藓类植物的平均成土率在47.32%~111.58%,最高的达到194.82%,最低的也达到了19.33%;平均成土量在9.01~46.73 g/m²,最高的达到110.17 g/m²,最低的是0.76 g/m²。即便是平均成土量最少的拟扁枝藓也达到了9.01 g/m²。

3.3 藓类植物的相关性分析

3.3.1 鳞叶藓所测数据的相关性分析

鳞叶藓所测数据的相关性分析见表3。从表3可以看出:鳞叶藓的生物量与饱和吸水量、生物量与成土量、饱和吸水量与成土量在0.01水平上呈

极显著正相关。成土率与生物量、成土率饱和吸水量、成土率与成土量在0.01水平上呈极显著负相关。即鳞叶藓生物量越大,其饱和吸水量和成土量也就越大;鳞叶藓饱和吸水量越大,其成土量也就越大。鳞叶藓成土率越大,其生物量、饱和吸水量和成土量也就越小。

3.3.2 灰白青藓所测数据的相关性分析

灰白青藓所测数据的相关性分析见表4。从表4可以看出:灰白青藓的鲜重与饱和吸水重在0.01水平上呈极显著正相关。即灰白青藓的鲜重越大,其饱和吸水重也就越大。

3.3.3 小牛舌藓全缘亚种所测数据的相关性分析

小牛舌藓全缘亚种所测数据的相关性分析见表5。从表5可以看出:小牛舌藓全缘亚种的干重与饱和吸水重、生物量与干重、生物量与饱和吸水量、

表3 乃古石林鳞叶藓所测数据的相关性分析
Table 3 Correlation analysis of *Taxiphyllum taxirameum* (Mitt.) Fleisch. in Naigu Stone Forest

测定指标 Determination of indicators	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	饱和吸水重 Saturated water adsorption weight	饱和吸水率 Saturated water adsorption rate	生物量 Biomass	饱和吸水量 Saturated water absorption	成土率 Pedogenesis rate	成土量 Pedogenesis quantity
鲜重 Fresh weight	1 4							
干重 Dry weight	0.286 0.714 4	1 4						
饱和吸水重 Saturated water adsorption weight	0.465 0.535 4	0.976* 0.024 4	1 4					
饱和吸水率 Saturated water adsorption rate	0.920 0.080 4	0.265 0.735 4	0.469 0.531 4	1 4				
生物量 Biomass	0.769 0.231 4	0.743 0.257 4	0.871 0.129 4	0.839 0.161 4	1 4			
饱和吸水量 Saturated water absorption	0.795 0.205 4	0.699 0.301 4	0.838 0.162 4	0.871 0.129 4	0.998** 0.002 4	1 4		
成土率 Pedogenesis rate	-0.812 0.188 4	-0.708 0.292 4	-0.845 0.155 4	-0.868 0.132 4	-0.998** 0.002 4	-0.999** 0.001 4	1 4	
成土量 Pedogenesis quantity	0.812 0.188 4	0.737 0.263 4	0.866 0.134 4	0.846 0.154 4	0.995** 0.005 4	0.994** 0.006 4	-0.998** 0.002 4	1 4

注：*表示在0.05水平上呈显著相关；**表示在0.01水平上呈极显著相关。下同。
Notes: * Correlation significant at the 0.05 level (2-tailed); ** Correlation significant at the 0.01 level (2-tailed). The same below.

表 4 乃古石林灰白青藓所测数据的相关性分析
Table 4 Correlation analysis of *Brachythecium albicans* (Hedw.) B. S. G. in Naigu Stone Forest

测定指标 Determination of indicators	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	饱和吸水重 Saturated water adsorption weight	饱和吸水率 Saturated water adsorption rate	生物量 Biomass	饱和吸水量 Saturated water absorption	成土率 Pedogenesis rate	成土量 Pedogenesis quantity
鲜重 Fresh weight	1 4							
干重 Dry weight	0.986 * 0.014 4	1 4						
饱和吸水重 Saturated water adsorption weight	0.999 ** 0.001 4	0.979 * 0.021 4	1 4					
饱和吸水率 Saturated water adsorption rate	-0.910 0.090 4	-0.963 * 0.037 4	-0.898 0.102 4	1 4				
生物量 Biomass	0.894 0.106 4	0.882 0.118 4	0.876 0.124 4	-0.764 0.236 4	1 4			
饱和吸水量 Saturated water absorption	0.680 0.320 4	0.619 0.381 4	0.667 0.333 4	-0.418 0.582 4	0.903 0.097 4	1 4		
成土率 Pedogenesis rate	-0.207 0.793 4	-0.337 0.663 4	-0.196 0.804 4	0.573 0.427 4	0.059 0.941 4	0.479 0.521 4	1 4	
成土量 Pedogenesis quantity	0.206 0.794 4	0.094 0.906 4	0.205 0.795 4	0.159 0.841 4	0.504 0.496 4	0.825 0.175 4	0.890 0.110 4	1 4

生物量与成土量、饱和吸水量与成土量在 0.01 水平上呈极显著正相关。即小牛舌藓全缘亚种的干重越大，其饱和吸水重也就越大；小牛舌藓全缘亚种的生物量越大，其干重、饱和吸水量和成土量也就越大；小牛舌藓全缘亚种的饱和吸水量越大，其成土量也就越大。

3.3.4 中华细枝藓所测数据的相关性分析

中华细枝藓所测数据的相关性分析见表 6。从表 6 可以看出：中华细枝藓的饱和吸水重与鲜重、饱和吸水重与干重、生物量与饱和吸水量在 0.01 水平上呈极显著正相关。即中华细枝藓的饱和吸水重越大，其鲜重和干重也就越大；中华细枝藓的生物量越大，其饱和吸水量也就越大。

3.3.5 拟扁枝藓所测数据的相关性分析

拟扁枝藓所测数据的相关性分析见表 7。从表 7 可以看出：拟扁枝藓的干重与鲜重、干重与饱和吸水重、干重与生物量、干重与饱和吸水量、生物

量与饱和吸水量在 0.01 水平上呈极显著正相关。即拟扁枝藓的干重越大，其鲜重、饱和吸水重、生物量和饱和吸水量也就越大；拟扁枝藓生物量越大，其饱和吸水量也就越大。

4 讨论

4.1 藓类植物与环境因子的关系

本次试验材料选自 2012 年 1 月 9 日和 7 月 23 日对云南乃古石林苔藓植物野外调查时采集的标本。从云南石林地区的气候特点来看，1 月属于旱季，7 月属于雨季，一般而言，在旱季和雨季藓类植物的生长与分布状况应有较大的差异。从本试验采样结果发现：无论是旱季还是雨季，这 5 种藓类均属于出现频度最高的藓类植物，这可能与 5 种藓类植物的小生境有关。它们都来自于岩面、岩壁、石槽壁、岩面薄土和石缝 5 种小生境，而这 5 种小生境都是较为干旱缺土的，随着时间的推移，藓类

表 5 乃古石林小牛舌藓全缘亚种所测数据的相关性分析
Table 5 Correlation analysis of *Anomodon minor* subsp. *integerrimus* (Mitt.) Iwats. in Naigu Stone Forest

测定指标 Determination of indicators	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	饱和吸水重 Saturated water adsorption weight	饱和吸水率 Saturated water adsorption rate	生物量 Biomass	饱和吸水量 Saturated water absorption	成土率 Pedogenesis rate	成土量 Pedogenesis quantity
鲜重 Fresh weight	1 4							
干重 Dry weight	0. 905 0. 095 4	1 4						
饱和吸水重 Saturated water adsorption weight	0. 927 0. 073 4	0. 997 ** 0. 003 4	1 4					
饱和吸水率 Saturated water adsorption rate	-0. 393 0. 607 4	-0. 665 0. 335 4	-0. 604 0. 396 4	1 4				
生物量 Biomass	0. 930 0. 070 4	0. 992 ** 0. 008 4	0. 987 * 0. 013 4	-0. 681 0. 319 4	1 4			
饱和吸水量 Saturated water absorption	0. 938 0. 062 4	0. 990 * 0. 010 4	0. 987 * 0. 013 4	-0. 666 0. 334 4	1. 000 ** 0. 000 4	1 4		
成土率 Pedogenesis rate	-0. 407 0. 593 4	-0. 619 0. 381 4	-0. 635 0. 365 4	0. 199 0. 801 4	-0. 514 0. 486 4	-0. 507 0. 493 4	1 4	
成土量 Pedogenesis quantity	0. 950 * 0. 050 4	0. 976 * 0. 024 4	0. 974 * 0. 026 4	-0. 657 0. 343 4	0. 996 ** 0. 004 4	0. 997 ** 0. 003 4	-0. 444 0. 556 4	1 4

植物的生长与繁衍已经适应了这样的小生境。从表 1 可以看出：生长在岩面薄土和部分生长在岩面的藓类植物盖度较大。岩面薄土主要是由已死亡的藓类残体堆积和被风带来的细小粒土组成^[12]，其中含有相对较丰富的基质。还有一些盖度较大的藓类生长在林下岩面和坡阴面岩面的小生境。有研究者指出：苔藓植物在适应环境的同时也在不断改变环境，在许多极端环境下苔藓植物常作为先锋种而存在，可以改善其生境基质等，也更有利于苔藓植物的生长与繁衍^[24]。因此在石林地区这些条件较优越的小生境生长的藓类植物盖度较大。

4.2 藓类植物的保水作用

程金花等研究表明，不同植被林下苔藓、枯落物的持水量区别很大，苔藓持水量最高可达 587%，软阔叶为 386%，硬阔叶为 250%，针叶为 172%^[25]。从本试验结果可知，5 种藓类植物鳞叶藓、灰白青藓、小牛舌藓全缘亚种、中华细枝藓

和拟扁枝藓的平均饱和吸水量分别为：990. 83%、651. 29%、601. 12%、567. 36% 和 361. 35%。对乃古石林这一干旱环境来说，藓类植物的生长是极其重要的。正是由于藓类植物具备这种吸水、保水的特性，在一次降水中经充分吸水后，藓类植物能在长期不降水且没有地下水可利用的条件下生存。在长时间干旱缺水时，藓类植物能启动自我保护程序进入休眠状态，仅靠吸收空气中的水分维持自身的低耗能生存^[11]。一旦雨水来袭，它们就能迅速复苏，进入正常的生活史。从本试验结果还可知，小牛舌藓全缘亚种的平均饱和吸水量和平均生物量远远高于其他 4 种藓类，分别为：791. 80 g/m² 和 103. 78 g/m²，成为石林岩石表面最主要的生产者，这也反映了该物种的特性，在发挥植物水土保持作用的时候，在相同的条件下，如果对物种进行适当的选择，可以达到更好的效果。而另外 4 种藓类植物在吸水、蓄水方面也发挥了积极作用。表明

表 6 乃古石林中华细枝藓所测数据的相关性分析
Table 6 Correlation analysis of *Lindbergia sinensis* (C. Muell.) Broth. in Naigu Stone Forest

测定指标 Determination of indicators	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	饱和吸水重 Saturated water adsorption weight	饱和吸水率 Saturated water adsorption rate	生物量 Biomass	饱和吸水量 Saturated water absorption	成土率 Pedogenesis rate	成土量 Pedogenesis quantity
鲜重 Fresh weight	1							
	4							
干重 Dry weight	0.974 *	1						
	0.026							
	4	4						
饱和吸水重 Saturated water adsorption weight	0.995 **	0.990 **	1					
	0.005	0.010						
	4	4	4					
饱和吸水率 Saturated water adsorption rate	0.241	0.077	0.197	1				
	0.759	0.923	0.803					
	4	4	4	4				
生物量 Biomass	0.930	0.979 *	0.961 *	0.111	1			
	0.070	0.021	0.039	0.889				
	4	4	4	4	4			
饱和吸水量 Saturated water absorption	0.965 *	0.988 *	0.985 *	0.184	0.993 **	1		
	0.035	0.012	0.015	0.816	0.007			
	4	4	4	4	4	4		
成土率 Pedogenesis rate	0.004	0.031	0.048	0.579	0.215	0.181	1	
	0.996	0.969	0.952	0.421	0.785	0.819		
	4	4	4	4	4	4	4	
成土量 Pedogenesis quantity	0.762	0.859	0.819	0.083	0.944	0.906	0.454	1
	0.238	0.141	0.181	0.917	0.056	0.094	0.546	
	4	4	4	4	4	4	4	4

这 5 种藓类植物在石林喀斯特地区有着重要的保水作用。

4.3 藓类植物的成土作用

从 5 种藓类的成土率和成土量试验数据分析可知，对于乃古石林这一缺水少土的环境来说，藓类植物的生长是极其重要的。因为该景区属于典型的剑锋喀斯特地貌，其它高等植物很难在岩石表面大量生长。曾信波认为，苔藓层的覆盖对表土层具有保护作用，从削减土壤流失量上体现出对土壤抗冲性的强化作用。在石林这样缺水少土的环境中，苔藓植物对土壤的抗冲性作用更为明显^[10]。而藓类植物体内含有较多的酚类化合物，具有耐腐蚀和抗捕食的作用，不易被微生物降解或食草动物取食，因此藓类植物的生物量逐年增加^[26]。这样，随着时间的推移，已死亡的藓类残体大量堆积，为其他苔藓植物生长或者其他物种的登陆创造了生存条件。此外，这 5 种藓类植物以交织型的方式生存，

枝叶交错形成大量的毛细孔隙，加上藓类植物假根的作用，可以网罗由风带来的土壤细小颗粒，聚积细土和增厚土层^[27]，本试验结果表明，5 种藓类植物的平均成土率为 47.32% ~111.58%，平均成土量为 9.01 ~46.73 g/m²，即便是平均成土量最少的拟扁枝藓也达到了 9.01 g/m²。与此同时，藓类植物在生长过程中分泌的有机酸对岩石表面有腐蚀作用，促进了内部岩体的风化作用，进一步加速了土壤的形成。苔藓植物的毛细管作用能够减少溶于土壤水分中的矿物质（如氮、磷、钾等）的流失，并可进一步增加营养物质的保留，对保土起到一定效果，还有助于保持土壤肥力^[28]。这样，一方面有效地保证了土壤颗粒的来源，另一方面减少了有机物质的流失，保证了藓类植物的更好生长，减小了土壤流失，加强了土壤肥力。凭借这些特有的生理结构和生理作用，藓类植物能更好地适应石林景区缺水少土的环境，能更好地生存与繁衍，这

表 7 乃古石林拟扁枝藓所测数据的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of *Homaliadelphus targionianus* (Mitt.) Dix. et P. Varde in Naigu Stone Forest

测定指标 Determination of indicators	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	饱和吸水重 Saturated water adsorption weight	饱和吸水率 Saturated water adsorption rate	生物量 Biomass	饱和吸水量 Saturated water absorption	成土率 Pedogenesis rate	成土量 Pedogenesis quantity
鲜重 Fresh weight	1 4							
干重 Dry weight	0. 992 ** 0. 008 4	1 4						
饱和吸水重 Saturated water adsorption weight	0. 978 * 0. 022 4	0. 995 ** 0. 005 4	1 4					
饱和吸水率 Saturated water adsorption rate	0. 278 0. 722 4	0. 363 0. 637 4	0. 457 0. 543 4	1 4				
生物量 Biomass	0. 984 * 0. 016 4	0. 994 ** 0. 006 4	0. 981 * 0. 019 4	0. 297 0. 703 4	1 4			
饱和吸水量 Saturated water absorption	0. 981 * 0. 019 4	0. 995 ** 0. 005 4	0. 986 * 0. 014 4	0. 332 0. 668 4	0. 999 ** 0. 001 4	1 4		
成土率 Pedogenesis rate	-0. 341 0. 659 4	-0. 387 0. 613 4	-0. 345 0. 655 4	0. 210 0. 790 4	-0. 485 0. 515 4	-0. 477 0. 523 4	1 4	
成土量 Pedogenesis quantity	0. 982 * 0. 018 4	0. 966 * 0. 034 4	0. 961 * 0. 039 4	0. 345 0. 655 4	0. 938 0. 062 4	0. 937 0. 063 4	-0. 159 0. 841 4	1 4

样既增加了石林的景观多样性，又加强了藓类植物的成土作用。

4. 4 藓类植物所测数据的相关性分析

从 5 种藓类植物的鲜重、干重、饱和吸水重、生物量的研究结果可以看出：小牛舌藓全缘亚种的保水成土相关性最为显著(表 3 ~表 7)；小牛舌藓全缘亚种的干重与饱和吸水重、生物量与干重、生物量与饱和吸水量、生物量与成土量、饱和吸水量与成土量都是在 0. 01 水平上呈极显著正相关(表 5))；其次，鳞叶藓也有一定的保水成土相关性。它的生物量与饱和吸水量、生物量与成土量、饱和吸水量与成土量在 0. 01 水平上呈极显著正相关，但是它的成土率与生物量、成土率与饱和吸水量、成土率与成土量在 0. 01 水平上是呈极显著负相关；再者，拟扁枝藓、中华细枝藓和灰白青藓的吸水、保水相关性也是极显著的，特别是这 3 种藓类的鲜重与饱和吸水重在 0. 01 水平上都是呈极显著

正相关。从吸水、保水的相关性研究结果中可见(表 4、表 6、表 7)，拟扁枝藓最为显著，其次是中华细枝藓，再次是灰白青藓。

结合表 2 ~表 7 综合分析可知：生长在岩石表面的 5 种藓类植物的吸水保水量和成土量有很大差异，这说明藓类植物对岩石的水土保持有促进作用，但由于藓类植物繁殖特性、生理特性差异，导致它们对岩石的作用效果也不同。生物量大的藓类植物能保存较大量的有机质，而且吸水和蓄水能力较强，进而生态功能较大。由此可见藓类植物的饱和吸水和成土作用在石林景区的水土保持方面起到至关重要的作用。

生长在岩石表面的 5 种藓类植物的生物量、饱和吸水量和成土量等有很大差异，小牛舌藓全缘亚种的生物量、饱和吸水量和成土量都是最大的，分别为 103. 78 g/m²、791. 80 g/m²和 46. 98 g/m²，它在乃古石林水土保持方面起着关键性作用。而鳞

叶藓、灰白青藓、中华细枝藓和拟扁枝藓虽然生物量、饱和吸水量和成土量相对较低,但是它们对于维系该区域水土保持作用的稳定发挥、增加物种组成、改善苔藓生长小生境等方面起着重要作用。

因此,可以选择生物量大且易成活的物种(如小牛舌藓全缘亚种),通过组培实验来繁殖大量的植物体,将其种植于石林景区内,这对石林地区的水土保持和景观多样性维持具有重要的生态学意义。

参考文献:

- [1] 谢凝高,郑心舟,谷光灿. 云南石林景观美学价值评价研究[J]. 地理研究, 2001, 20(5): 517–526.
- [2] 李忠. 石林世界地质公园地质遗迹深层次保护开发[J]. 云南地质, 2008, 27(2): 136–140.
- [3] 李玉辉,李忠德,张丹丹,等. 石林风景名胜区内对乡村经济的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(1): 18–23.
- [4] 胡人亮. 苔藓植物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [5] 李晓娜. 云南罗平喀斯特河谷苔藓植物研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2006.
- [6] Beasley R S, Alfredo B G. Soil protection by natural vegetation on clear cut forest land in Arkansas [J]. *J Soil Water Conserv*, 1985, 40(4): 379–382.
- [7] Eldridge D J, Leys J F. Exploring some relationships between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion[J]. *J Arid Environ*, 2003, 53: 457–466.
- [8] Smith A J E. Bryophyte Ecology [M]. London: Champan, 1982: 59–104.
- [9] Seth M D. Cover crop impact on watershed hydrology[J]. *J Soil Water Conserv*, 1998, 53(3): 207–213.
- [10] 曾信波. 苔藓层的蓄水保土功能研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 118–121.
- [11] 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.
- [12] 吴玉环,程国栋,高谦. 苔藓植物的生态功能及在植被恢复与重建中的作用[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 215–219.
- [13] 王登富,王智慧,张朝晖. 废弃卡林型金矿区结皮层苔藓植物蓄水作用和成土功能研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 56–61.
- [14] 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.
- [15] 徐海清,刘文耀,沈有信,等. 云南石林喀斯特地区半湿润常绿阔叶林附生植物的初步研究[J]. 广西植物, 2006, 26(1): 43–48.
- [16] 高谦. 中国苔藓志: 第1卷, 第2卷, 第9卷[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1–351; 1996: 1–277; 2003: 1–323.
- [17] 黎兴江. 中国苔藓志: 第4卷[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1–229.
- [18] 吴鹏程,贾渝. 中国苔藓志: 第5卷, 第8卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1–493; 2004: 1–482.
- [19] 吴鹏程. 中国苔藓志: 第6卷[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1–269.
- [20] 胡人亮,王幼芳. 中国苔藓志: 第7卷[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1–243.
- [21] 中国科学院昆明植物研究所. 云南植物志: 第17卷, 第18卷[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 31–609; 2002: 37–482.
- [22] 澳门特别行政区民政总署园林绿化部深圳市仙湖植物园. 澳门苔藓植物志[M]. 澳门: 澳门特别行政区民政总署园林绿化部, 2010: 157–351.
- [23] 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.
- [24] 叶吉,郝占庆,于德永,闫海兵,封德全,等. 苔藓植物生态功能的研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1937–1942.
- [25] 程金花,张洪江,史玉虎. 林下地被物保水保土作用研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(2): 96–100.
- [26] 潘莎,张朝晖. 废弃汞矿山苔藓植物群落生态研究[J]. 植物研究, 2011, 31(2): 241–248.
- [27] 李阳兵,王世杰,李瑞玲. 岩溶生态系统的土壤[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 434–438.
- [28] 张元明,曹同,潘伯荣. 干旱与半干旱地区苔藓植物生态学研究综述[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1129–1134.