

喀斯特石漠化山区苔藓植物水分吸收特征

龙朝波, 张朝晖

(贵州师范大学 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: [目的] 探究贵阳市花溪区石漠化地区 5 种优势种黑扭口藓 (*Barbula nigrescens*)、美灰藓 (*Eurohypnum leptothallum*)、卷叶湿地藓 (*Hyophila involuta*)、小牛舌藓全缘亚种 (*Anomodon minor* subsp. *integerrimus*)、北方紫萼藓 (*Grimmia decipiens*) 的水分吸收特征, 为喀斯特石漠化地区利用苔藓植物开展水土保持工作提供理论支撑。[方法] 采集样品 120 份, 运用经典形态分类法进行鉴定; 测定其生物量、饱和吸水率、吸水量、最大吸水速率 (V_{\max})、吸水速率常数 (K_m) 和叶片展开时间。[结果] (1) 5 种苔藓植物间的生物量、吸水量和饱和吸水率差异较大, 最大吸水速率差异小; 生物量为 10.36~114.51 g/m²; 饱和吸水率为 675.43%~1 125.41%; 吸水量为 98.21~766.13 g/m²; V_{\max} 为 35.59~51.28 g/(g·min); K_m 为 69.97~101.99 g; 叶片展开时间为 35.9~86.1 s。(2) 生物量和吸水量呈正极显著相关; 吸水量和盖度、 V_{\max} 和 K_m 呈正相关; K_m 和叶片展开时间呈负相关。[结论] 在喀斯特石漠化地区干旱缺水的环境条件下, 苔藓以独特的水分吸收和利用方式适应这种恶劣的环境。石生苔藓为适应该地区的先锋植物。

关键词: 苔藓; 喀斯特石漠化; 吸水特征; 先锋植物

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0350-05

中图分类号: Q949.35

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.002

Water Absorption Characteristics of Bryophytes in Karst Rocky Desertification Area

LONG Chaobo, ZHANG Zhaohui

(Guizhou Provincial Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] The water absorption characteristics of five dominant bryophyte species at rocky desertification area of Huaxi district in Guiyang City, included *Barbula nigrescens*, *Eurohypnum leptothallum*, *Hyophila involuta*, *Anomodon minor* subsp. *integerrimus* and *Grimmia decipiens* were studied, in order to provide theoretical support for soil and water conservation work using bryophytes in karst rocky desertification area. [Methods] Totally 120 samples were collected and the taxonomic identification were completed with morphological classification method. After that, biomass, saturated water adsorption rate, water adsorption quantity, the maximum water absorption rate (V_{\max}), the constant of water absorption (K_m) and leaf expanding time of those samples were measured and compared among the five moss species. [Results] (1) There was large difference of biomass, water adsorption quantity and saturated water adsorption rate among the five species, and the maximum water absorption was less different. The ranges of biomass, saturated water adsorption rate, water adsorption quantity, V_{\max} , K_m and leaf expanding time were 10.36~114.51 g/m², 675.43%~1 125.41%, 98.21~766.13 g/m², 35.59~51.28 g/(g·min), 69.97~101.99 g, 35.9~86.1 s, respectively; (2) It was showed that the correlation between biomass and saturated water adsorption quantity was positive. Water adsorption quantity had positive correlations with cover degree, the K_m and V_{\max} . The negative correlation was found between K_m and leaf expansion time. [Conclusion] Bryophytes are adaptable to harsh environment, which had serious water shortage like karst rocky desertification area, with an unique way of water absorption and utilization. Stone-bryophytes can act as the pioneer plants which is highly adaptable to the karst rocky desertification area.

Keywords: bryophytes; karst rocky desertification; water absorption characteristics; pioneer plants

收稿日期: 2014-03-05

修回日期: 2014-03-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“南方喀斯特山区石漠苔藓植物区系特征及水土保持意义”(31160042); 贵州省国际科技合作项目(黔科合外 G 字 2013-7016 号)

第一作者: 龙朝波(1986—), 男(汉族), 贵州省余庆县人, 硕士研究生, 研究方向为环境科学。E-mail: lcb470596@126.com。

通信作者: 张朝晖(1963—), 男(汉族), 贵州省贵阳市人, 博士, 教授, 主要从事环境科学和生态学方面的研究。E-mail: academiclife@126.com。

喀斯特石漠化是土地荒漠化的主要类型之一,它是一种地质生态灾害,所造成的经济、环境乃至社会影响越来越大,受到国家有关部门的广泛关注^[1]。喀斯特背景下的生态系统普遍具有生境基岩裸露,土体浅薄,水分下渗严重,生境保水性差,基质以及土壤和水等环境富钙的生态特征^[2]。在干旱条件下,水又常常是喀斯特石漠化地区植物生长的决定性因素,原因是石漠化地区岩石裸露,水分不易存储,每当降雨时大量的水分直接从岩石表面流走,贮藏量很少^[3-4],因此这种严酷的环境对植物种类成分具有强烈的选择性:喜钙、耐旱及石生的植物种群^[5]。苔藓植物是一种结构简单的高等植物,是水生向陆生的一种过渡形式,是高等植物中最原始的类群,它生命力强,能忍受恶劣的环境条件,被誉为“先锋植物”和“拓荒者”^[6]。生长在喀斯特石漠化区域的苔藓植物具有石生、耐旱性、吸水性强和生物量相对较大等特点^[5]。石生苔藓往往生长在山坡或林地以外多阳光且比较干燥的石质基础上,完全依赖雨水或空气中水分而生存的一个重要苔藓生态类型^[7],并且能在短暂的降雨过程中迅速吸收大量水分供机体所需^[8]。苔藓植株之间的空隙可形成规模宏大的毛细管传导系统,水分和营养物可从植物体表面直接吸入藓丛,再进入细胞之中。许多石生苔藓能通过叶片的卷曲或改变叶片的方向而减少水分蒸发,部分苔藓叶片的毛状叶尖可以反射入射的光照而减少水分蒸发^[9]。研究^[10]发现,耐旱的苔藓植物能忍耐的水势比相应的维管束植物要低,而且通常与干旱环境的基质水势保持一致,因而一旦环境变湿润,植物与环境之间所建立的明显的水势梯度可以加速水分的运动,使植物迅速地吸收水分。凭借这种特殊的吸水机制和强大的保水效率,生长在喀斯特石漠化地区裸露石头上的苔藓可以很容易地应对喀斯特石漠化地区的临时干旱^[11]。然而目前关于喀斯特石漠化苔藓水分吸收特征报道甚少^[8,10,12],本研究选取喀斯特石漠化地区 5 种苔藓优势种作为研究对象,通过试验得出其在喀斯特石漠化这种干旱极端条件下的吸水特征,为利用苔藓对喀斯特石漠化治理提供基础数据和理论支撑。

1 研究区概况

研究区地处东经 106°39′34″—106°39′41″,北纬 26°20′27″—26°20′30″,位于黔中腹地的花溪区龙井村,距贵阳市中心 17 km,地貌以山地为主。该区具有高原季风湿润气候的特点,冬无严寒,夏无酷暑,年平均气温为 14.9℃,无霜期 270 d,年平均降雨量

1 100 ~ 1 200 mm^[13],森林覆盖率 5%~15%,植被覆被率 10%~90%,裸岩率 30%~90%,土地开垦率 10%~70%,石漠化特征表现明显,平均石漠化率 36.79%^[8]。该地区石芽广布,植被退化明显,以草丛和藤刺丛为主,乔木稀少。主要伴生植物包括:有柄石韦(*Polypodium petiolosa*)、滇西金毛裸蕨(*Gymnompteris delavayi*)、大叶卷柏(*Selaginella bodinieri*)、井栏边草(*Pteris multifida*)、婆婆纳(*Veronica polita*)、小飞蓬(*Conyza canadensis*)、佛甲草(*Sedum lineare*)、抱茎苦苣菜(*Ixeridium sonchifolium*)、野菊(*Chrysanthemum indicum*)、白花蒿(*Achillea laetiflora*)、繁缕(*Stellaria media*)、绛三叶(*Trifolium incamatum*)、何首乌(*Fallopia multiflora*)、铁线莲(*Clematis florida*)、婴奥(*Vitis pryonifolia*)、五叶地绵(*Parthenocissus quinquetolia*)、细柄薯蓣(*Rhizoma tenuipes*)、白茅(*Imperata cylindrical*)、金银花(*Lonicera japonica*)、刺梨(*Rosa roxburghii*)、尖叶菝葜(*Smilax arisanensis*)、小构树(*Broussonetia kazinoki*)、野花椒(*Zanthoxylum simulans*)、小叶平枝栒子(*Cotoneaster horizontalis*)、插田泡(*Rubus coreanus*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、李(*Prunus salicina*)。

2 研究方法

2.1 样品采集与鉴定

2013 年 3 月对该区进行考察,采集地点在该区典型石漠化区域,随机选取 6 个 25 m×25 m 的样地,每个样地设置 4 个小样地,每个小样地采用梅花布点采集法设置 5 个采样点,以 10 cm×10 cm 的样方框在小样地内采集苔藓。将采集的样品详细的记录经纬度、海拔、生活型、盖度及生长环境,并装入自封袋带回实验室。

在贵州师范大学山地环境重点实验室借助 SMARTe-320 一体化数码显微镜、HWG-1 解剖镜和 Nikon-D800 相机,参照《中国苔藓植物志》^[14-18]《云南植物志》^[19]《Journal of Bryology》^[20]和《The Bryologist》^[21]等对标本进行鉴定和分类。

2.2 测定项目和方法

2.2.1 藓类植物的生物量、饱和吸水率、吸水量 参照徐杰、白学良等的计算公式^[22]。将藓类植物和泥土分离清洗,过 60 目和 80 目分样筛,直至藓类植物冲洗干净为止,然后将其放于 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饱和吸水重^[23]。

藓类植物生物量(g/m^2) = 藓类植物干重(g/m^2) × 盖度(%)

藓类植物饱和吸水率(%) = $\frac{\text{藓类植物饱和吸水重}(\text{g}/\text{m}^2) - \text{藓类植物干重}(\text{g}/\text{m}^2)}{\text{藓类植物干重}(\text{g}/\text{m}^2)} \times 100\%$

藓类植物吸水量(g/m^2) = 藓类植物生物量(g/m^2) × 藓类植物饱和吸水率(%)

2.2.2 水分吸收动力学试验 选取该研究区中 5 种优势苔藓,其生境和生活型见表 1。分别称取 5 g,平整放在盛有 300 ml 蒸馏水的 23 cm × 15 cm 搪瓷盘中进行吸水试验^[8,10,12]。控制水的加入量分别为 10, 15, 20, 25, 50, 100, 150, 200 ml, 固定吸水时间为 30 s,取出称重,减去样品自身重量后得吸水量(试验均重复 3 次)。

表 1 5 种藓类的生境及生活型

藓类	生境	生活型	盖度/%
A	岩面、岩壁和岩面薄土	丛集型	11
B	岩壁、岩面和岩壁石缝	丛集型	11
C	岩面、岩壁和岩面薄土	交织型	40
D	岩壁、岩面和岩壁石槽	丛集型	39
E	岩面和岩壁	交织型	17

注:A,B,C,D,E 分别代表黑扭口藓、卷叶湿地藓、美灰藓、北方紫萼藓和小牛舌藓全缘亚种。下同。

2.2.3 叶片展开试验 分别选取 5 种烘干苔藓中合适长度的茎叶,在 SMARTe-320 一体化数码显微镜下观察叶片与水作用的展开情况,记录展开时间,并用 Nikon-D800 相机拍下叶片展开图。每种苔藓做 10 次,最后结果取平均值。

3 结果与分析

3.1 苔藓植物种类组成

经鉴定发现该喀斯特石漠化地区苔藓植物种类组成为 13 科 22 属 33 种,其中苔类 2 科 2 属 2 种,藓类 11 科 20 属 31 种。苔类为盔瓣耳叶苔(*Frullania muscicoa*)和圆叶异萼苔(*Heteroscyphus tener*),藓类中较常见的有黑扭口藓(*Barbula nigrescens*)、美灰藓(*Eurohypnum leptothallum*)、卷叶湿地藓(*Hyophila involuta*)、小牛舌藓全缘亚种(*Anomodon minor* subsp. *integerrimus*)、北方紫萼藓(*Grimmia decipiens*)、小口小石藓(*Weissia microstoma*)和真藓(*Bryum argenteum*)等。其中样地 1 有 5 科 7 属 8 种;样地 2 有 5 科 7 属 9 种;样地 3 有 4 科 6 属 7 种;样地 4 有 6 科 9 属 10 种;样地 5 有 5 科 6 属 8 种;样地 6 有 8 科 12 属 15 种。

3.2 不同藓类生物量、饱和吸水率和吸水量比较

由图 1 可以看出,黑扭口藓、卷叶湿地藓、美灰藓、北方紫萼藓和小牛舌藓全缘亚种的生物量分别为 10.36, 11.92, 44.91, 114.51 和 17.22 g/m^2 ;饱和吸水

率分别是 943.99%, 903.42%, 1110.18%, 675.43% 和 1125.41%;吸水量分别是 98.21, 108.41, 496.85, 766.13 和 195.83 g/m^2 。生物量最大为北方紫萼藓,最小为黑扭口藓,分别是 114.51 和 10.36 g/m^2 ;最大为最小的 11.1 倍;饱和吸水率最大为小牛舌藓全缘亚种,最小为北方紫萼藓,分别是 1125.41% 和 675.43%,最大为最小的 1.67 倍,吸水量最大为北方紫萼藓,最小为黑扭口藓,分别是 766.13 和 98.21 g/m^2 ,最大为最小的 7.8 倍。生物量大的苔藓植物不仅储存了较多的有机质,而且成为生态系统中重要的碳汇,吸水 and 保水能力能力强,生态功能大^[22]。苔藓在石漠上生长,脱落的植株和叶片堆积在基部,往往形成厚厚的藓层,且具有强大的吸水功能,水分最长时间的滞留在石漠上,这为土壤的形成与微生物繁衍奠定了基础,使石漠化地区生态恢复及正向自然演替变得积极。

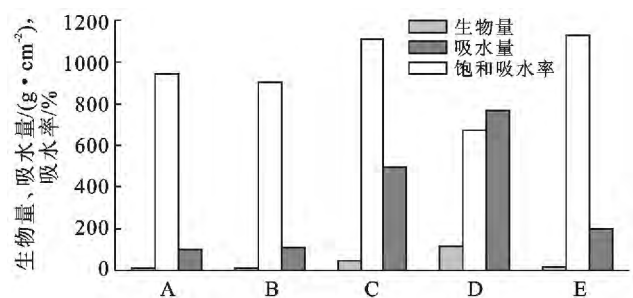


图 1 不同藓类的生物量、饱和吸水率和吸水量

3.3 不同藓类吸水动力学比较与分析

5 种苔藓植物水分吸收动力学曲线表现为 S 型饱和曲线(图 2)。当外界水分在 25 g 以下时,5 种苔藓植物水分吸收速度与水分加入量呈正比;而外界水分加到 25 g 以上后,5 种苔藓植物吸收速度逐渐达到最大值。该动力学曲线符合米氏方程^[8,10,12],可表达为:

$$V = \frac{V_{\max} \cdot S}{(S + K_m)}$$

式中:V——吸水速度;S——外界水量; V_{\max} ——最大吸水速度; K_m ——米氏常数。

利用 Lineweaver—Burk 双倒数作图法, X 轴截距为 $-\frac{1}{K_m}$, Y 轴截距为 $\frac{1}{V_{\max}}$,斜率为 $\frac{K_m}{V_{\max}}$,计算得到各种吸水过程的表现米氏常数 K_m 和表现最大吸水速

度 V_{max} 值,黑扭口藓吸水过程的表现 K_m 值和表现 V_{max} 值分别为 101.99 g 和 48.08 g/(g·min);卷叶湿地藓吸水过程的表现 K_m 值和表现 V_{max} 值分别为 87.77 g 和 47.62 g/(g·min);美灰藓吸水过程的表现 K_m 值和表现 K_m 值分别为 99.02 g 和 51.28 g/(g·min);北方紫萼藓吸水过程的表现 K_m 值和表现 V_{max} 值分别为 69.97 g 和 35.59 g/(g·min);小牛舌藓全缘亚种吸水过程的表现 K_m 值和表现 V_{max} 值分别为 96.94 g 和 46.95 g/(g·min)。 V_{max} 最大的为美灰藓,最小的为北方紫萼藓,分别为 51.28 和 35.59 g/(g·min),最大为最小的 1.44 倍; K_m 最大为黑扭口藓,最小的为北方紫萼藓,分别为 101.99 和 69.97 g,最大为最小的 1.46 倍。 K_m 越小,苔藓植物对水的亲和力越大^[12],反之越小; V_{max} 越大说明苔藓植物在固定时间与固定水量内对水的截留能力越大,反之则越小。

在喀斯特石漠化区苔藓与水结合是很重要的生存策略。当雨水来临,则以最快的时间与水充分结合,并最大限度的保留水分以便在干旱来临时保证正常的生理活动,这与吴海辉^[12]等,张显强^[10]等研究的结论相似。

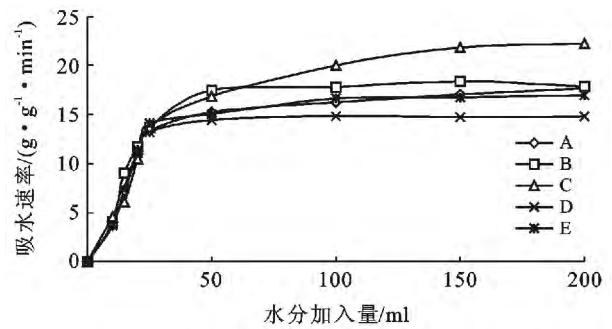


图 2 不同藓类水分动力学曲线

3.4 不同藓类与水亲和叶片展开时间比较

叶片展开时间为:黑扭口藓 63.1 s,美灰藓 71.2 s,卷叶湿地藓 79 s,小牛舌藓全缘亚种 35.9 s,北方紫萼藓 86.1 s。北方紫萼藓展开时间最大,小牛舌藓全缘亚种展开时间最小,分别为 86.1 和 35.9 s,最大为最小的 2.4 倍。

3.5 不同藓类测试数据相关性分析

经相关性分析(表 2)可得,生物量和吸水量在 0.01 水平上呈极显著正相关关系;吸水量和盖度, V_{max} 和 K_m 在 0.05 水平上呈显著正相关; K_m 和叶片吸水展开时间在 0.05 水平上呈负相关。

表 2 不同藓类各种指标相关性

项目	a	b	c	d	e	f	g
a	1						
	5						
b	-0.688	1					
	0.190	5					
		5					
c	0.965**	-0.492	1				
	0.008	0.400	5				
		5	5				
d	-0.831	0.861	-0.662	1			
	0.081	0.061	0.224	5			
		5	5	5			
e	0.830	0.862	-0.693	0.914*	1		
	0.082	0.060	0.195	0.030	5		
		5	5	5	5		
f	0.812	-0.194	0.936*	0.358	-0.431	1	
	0.095	0.754	0.019	0.554	0.469	5	
		5	5	5	5	5	
g	0.742	-0.792	0.658	0.688	-0.912*	0.483	1
	0.151	0.110	0.227	0.199	0.031	0.409	5
		5	5	5	5	5	5

注:a 为生物量,b 为饱和吸收率,c 为吸水量,d 为最大吸水速度,e 为米氏常数,f 为盖度,g 为展开时间;* 表示在 0.05 水平上相关,** 表示在 0.01 水平上极显著相关。

4 结论

试验所选的 5 种藓是该石漠化地区的优势种,生

长基质都是岩石或岩面薄土。其中美灰藓和小牛舌藓全缘亚种的生活型是交织型,卷叶湿地藓、黑扭口藓、北方紫萼藓属于丛集型。试验结果表明不同种间

的生物量、吸水量和饱和吸水率差异较大,吸水速率差异小,表明该地区 5 种藓类植物对水的利用有各自独特的适应干旱方式。在喀斯特石漠化地区干燥、高钙和高温的极端环境下,苔藓叶片会紧紧包裹在茎周围,通过卷曲叶片、叶细胞上的疣状突起或叶尖白毛来反射太阳辐射,以减小自身水分的丧失。当环境变潮湿时,苔藓植物会立即舒展开来,迫使茎和叶分离,使叶片展开并达到与水结合的最佳位置。通过叶片间的空隙,叶茎之间的缝隙,假根之间的缝隙,以及叶片或茎表面疣状突起之间的空隙产生的毛细管系统吸收水分^[24]。试验结果还表明 K_m 越大,叶片与水结合展开的时间越短,反之则越大,许多亲水较强的苔藓有内凹的叶片,在吸水时这些凹状叶通常充满水分^[25]。总之,苔藓植物以矮小的植株和广泛的适应性为基础的,在长期的进化和环境选择下形成了不同的适应环境的形态结构^[26-27]。在石漠化地区苔藓有独特的生活方式,无论从自身的形态还是群落聚集的优势,都是与保水吸水这一石漠化地区关键环境因子密切相关;这种独特的生态功能使苔藓可作为喀斯特石漠化治理的先锋植物。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 屠玉麟,杨军. 贵州喀斯特灌丛群落类型研究[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,1995,13(5):27-43.
- [3] 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.
- [4] 李阳兵,侯建筠,谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. 地理科学,2002,22(3):365-370.
- [5] 李冰,张朝晖. 喀斯特石漠结皮层苔藓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.
- [6] 吴鹏程. 苔藓植物生物学[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [7] 陈邦杰,万宗玲,高谦,等. 中国藓类植物属志:上,下册[M]. 北京:科学出版社,1963.
- [8] 张显强,曾建军,谌金吾,等. 石漠化干旱环境中石生藓类水分吸收特征及其结构适应性[J]. 生态学报,2012,32(12):3902-3911.
- [9] Hamerlynck E P, Tuba Z, Csintalan Z. Diurnal variation in photochemical dynamics and surface reflectance of the desiccation-tolerant moss *Toryula ruralis* [J]. Plant Ecology, 2000,151(1):55-63.
- [10] 张显强,张来,何跃军,等. 喀斯特石漠结皮细尖鳞叶藓的吸水机制及耐旱适应性[J]. 生态学报,2010,30(12):3108-3116.
- [11] Santarius K A. Apoplasmic water fractions and osmotic water potentials at full turgidity of some Bryidae[J]. Planta,1994,193:32-37.
- [12] 吴海辉,乙引,谢爱林,等. 细枝赤齿藓(*Grythrodontium leptothallum*)水分吸收特征[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2003,21(2):46-48.
- [13] 魏崑,刘方,向仰州. 贵阳市花溪麦坪煤矿废弃地植被调查与分析[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2009,26(2):132-135.
- [14] 高谦. 中国苔藓植物志:第 2 卷[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [15] 黎兴江. 中国苔藓植物志:第 3,4 卷[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [16] 吴鹏程,贾渝. 中国苔藓植物志:第 5,8 卷[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [17] 吴鹏程. 中国苔藓植物志:第 6 卷[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [18] 胡人亮,王幼芳. 中国苔藓植物志:第 7 卷[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [19] 中国昆明植物研究所. 云南植物志:第 17 卷[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [20] Zhang Zhaohui, Chen Jiakuan. Marchantiophyta and Anthocerotophyta in Guizhou Province, P. R. China [J]. Journal of Bryology, 2006,28(3):170-176.
- [21] Zhang Zhaohui, Pentecost A. New and noteworthy list of bryophytes from active travertine sites of Guizhou and Sichuan, S. W. China [J]. Journal of Bryology, 2000,22(1):66-68.
- [22] 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.
- [23] 王登富,王智慧,张朝晖. 废弃卡林型金矿区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.
- [24] Proctor M C F. Physiological ecology of bryophytes [J]. Advances in Bryology, 1981,13(1):79-166.
- [25] Procter M C F. Structure and Eco-physiological Adaptations in Bryophytes[M]//Clarke G C S, Duckett J G, eds. Bryophyte Systematic. Systematic Association Special Volume 14. London: Academic Press, 1979: 479-509.
- [26] 胡人亮. 苔藓植物学[M]. 北京:高等教育出版社,1987: 433-439.
- [27] 杨武,郭水良,方芳. 不同生境下 30 种藓类植物茎的比较解剖学研究[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版,2007,30(4):440-446.