

# 废弃卡林型金矿区结皮苔藓植物蓄水作用和成土功能研究

王登富<sup>1</sup>, 王智慧<sup>1</sup>, 张朝晖<sup>1,2</sup>

(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:** 通过野外调查和实验室分析,对贵州省兴义市新路废弃卡林型金矿区苔藓植物进行了研究。结果显示,该矿区共计有苔藓植物 4 科 6 属 7 种,未发现苔类和角苔,种类组成较单调,其中丛藓科(Pottiaceae)和真藓科(Bryaceae)为优势科;生活型有 2 种类型:矮丛集型(85.71%)和交织型(14.29%),矮丛集型占有绝对优势;并对该矿区结皮优势苔藓植物硬叶扭口藓、卵蒴真藓、毛口藓和小青藓的生物量、成土量、饱和吸水率和饱和吸水量进行了测定分析。结果显示,该矿区生物量为 3.00~52.40 g/m<sup>2</sup>;成土量为 217.50~3 695.80 g/m<sup>2</sup>;饱和吸水量为 35.10~684.30 g/m<sup>2</sup>;饱和吸水率为 1 170.00%~3 637.00%。研究表明,在喀斯特石漠化严重的废弃金矿区,对于在缺少土壤、水土流失严重和植被破坏大的环境区域,苔藓植物以其特有的生态功能在石漠化治理、蓄水作用和成土功能、植被恢复及生态治理等方面起到十分重要的作用。

**关键词:** 废弃卡林型金矿; 生物结皮; 苔藓植物; 蓄水作用; 成土功能

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)04-0056-06

中图分类号: Q949.35

## Water Conservation and Pedogenic Function of Bryophytes in Abandoned Carlin Gold Mine

WANG Deng-fu, WANG Zhi-hui, ZHANG Zhao-hui

(1. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

2. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and

Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China)

**Abstract:** The bryophytes found in an abandoned Carlin gold mine of Xingyi City, Guizhou Province were investigated in this study. According to field survey and identification of the bryophyte specimens, seven taxa in six genera of four families were found. Pottiaceae and Bryaceae were the dominant families and no Hepaticae and Anthocerotae was identified. The life-forms of the bryophyte were mainly short turfs(85.71%) and the others were wefts(14.29%). The dominant bryophytes are *Barbula rigidula* (Hedw.) Mild., *Bryum blindii* B. S. G., *Trichostomu brachydontium* Bruch. and *Brachythecium perminusculum* C. Muell. Of these species, the biomass range from 3.00 to 52.40 g/m<sup>2</sup>, with formed soil varying from 217.50 to 3 695.80 g/m<sup>2</sup>, water holding capacity from 35.10 to 684.30 g/m<sup>2</sup>, and saturated water absorption ratio from 1 170.00% to 3 637.00%. These results indicate that the bryophyte crust found in the mine had great ability to absorb and reserve water and played an important role in soil formation, rock desertification control and ecological environment renovation in karst areas.

**Keywords:** abandoned Carlin gold mine; biotic crust; bryophytes; water conservation; pedogenic function

卡林型金矿亦称微细浸染型金矿,是目前世界上储量最大的金矿类型之一,金“不可见”或其颗粒极细(纳米级)是该类金矿最重要的特点之一<sup>[1-2]</sup>。兴义市位于贵州地区西南部,属黔西南州州府,其境内含有丰富金矿资源,主要以卡林型金矿为主,该金矿块体

位于扬子陆块西南缘,出露地层以二叠系、三叠系为主,泥盆系、石炭系、第四系次之<sup>[3-4]</sup>,且成为了黔西南卡林型金矿重要的分布区。矿的开采,无疑会带来巨大的财富,但同时会造成大量的重金属污染,给环境和周围居民带来了不可估量的危害。由于前期大量

收稿日期:2011-09-24

修回日期:2011-10-20

资助项目:国家人力资源和社会保障部留学人员科技活动优秀项目“金矿生态系统的苔藓污染监测和生态恢复技术”[人社厅(2008)86号];贵州省科技厅社发科技攻关项目[黔科合SY(2010)3020号];贵州省教育厅自然科学基金项目[黔教科SY(2010)020号];贵州省科技厅自然科学基金[黔科合J字(2009)2033号]

作者简介:王登富(1986—),男(汉族),贵州省盘县人,硕士研究生,研究方向为系统与进化植物学。E-mail:wangdengfu1234@126.com。

通信作者:张朝晖(1963—),男(汉族),贵州省贵阳市人,博士,教授,研究方向为植物学和生态学。E-mail:academiclife@126.com。

金矿的开采和冶炼,矿石和废渣堆积成山,现已形成废弃的卡林型金矿山,因植被遭受破坏,周围环境破坏严重,导致了水土流失、山体滑坡、喀斯特石漠化加剧等环境问题,目前已受到政府和相关部门的广泛关注。

苔藓植物具有特殊的构造和生理功能,使得它们能很好的生长在严酷的环境中,如能生活在高钙化沉积的瀑布和溶洞洞口中<sup>[5-8]</sup>,喀斯特石漠峰丛和结皮层中<sup>[9-10]</sup>,极度干燥的矿区中<sup>[11-13]</sup>等。苔藓植物不仅具有特殊的生态功能,而且易形成生物结皮,作为土壤结皮的物种之一,在生态重建和恢复发挥着不可替代的作用。近年来,国外有关苔藓植物结皮的研究较多<sup>[14-15]</sup>,国内目前在这方面也有大量的报道,较深入的研究沙漠地带和喀斯特区域的结皮苔藓植物<sup>[9,16]</sup>,对于生态环境恶化的卡林型金矿区苔藓植物的研究较多,主要集中在找矿方面<sup>[17-18]</sup>等,而有关卡林型金矿区苔藓植物蓄水和成土功能方面的研究还鲜见报道,本研究通过对贵州省兴义市新路废弃卡林型金矿区苔藓植物进行调查,选取优势结皮苔藓植物进行生物量等的测定分析,旨在探明苔藓植物在蓄水成土和石漠化治理中的作用,为今后矿山恢复、保水固土及生态修复方面提供科学的基础数据和参考资料。

## 1 研究区概况

新路废弃卡林型金矿位于贵州省兴义市境内,地

处滇、桂、黔三省结合部,境内地势西北高、东南低,低纬度、高海拔,山峦起伏、河流纵横,喀斯特地貌发育良好。该地区地理位置处于 $104^{\circ}44'06.1''$ — $104^{\circ}44'35.7''$ E,  $24^{\circ}57'54.7''$ — $24^{\circ}58'09.5''$ N,海拔 $1\ 635\sim 1\ 786\text{ m}$ ,具有亚热带季风气候特征,属中亚热带湿润气候,年平均气温 $16.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,1月份平均温度 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,7月份平均温度 $26.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量为 $1\ 531.6\text{ mm}$ ,冬无严寒,夏无酷暑,终年温暖湿润<sup>[19]</sup>,岩性为碳酸盐岩,因长期大量开矿,使得矿山植被破坏大,仅有苔藓植物和草本,少量的灌木存在,植被覆盖率不到 $10\%$ ,喀斯特石漠化严重。

## 2 研究方法

### 2.1 野外工作

于2011年5月对贵州新路废弃卡林型金矿山苔藓植物进行调查,采集样点布及矿区废渣区、废石区、洗金池区、洗金池排水口区、废水区、相对污染区和相对清洁区等7种不同的生境(样地),为了使取样更能客观地反映金矿区苔藓植物的分布状况,在样带上采用蛇形布点采样,每个样地设置3个样点,共21个样点,每个样点设置 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 小样方 $1\sim 3$ 个,同时采集小样方内全部苔藓植物。采集苔藓植物标本65份,各采样点环境特征详见表1。并在野外观察并记载苔藓植物的生长状况,详细记录经纬度、海拔、频度、盖度及微环境特征等。

表1 废弃卡林型金矿区苔藓植物研究地点

样地类型	经纬度	海拔/m	生境特征
废渣区	$24^{\circ}57'54.7''\text{N}, 104^{\circ}44'06.1''\text{E}$	$1\ 786\pm 10$	金矿区裸露废渣,少量草本、小灌木
废石区	$24^{\circ}57'55.6''\text{N}, 104^{\circ}44'07.3''\text{E}$	$1\ 770\pm 8$	金矿区裸露废石,少量草本、小灌木
洗金池区	$24^{\circ}57'59.8''\text{N}, 104^{\circ}44'07.5''\text{E}$	$1\ 753\pm 10$	金矿区洗金池底部、边缘泥土上
洗金池排水口区	$24^{\circ}57'59.9''\text{N}, 104^{\circ}44'08.4''\text{E}$	$1\ 743\pm 10$	金矿区洗金池排水口处,岩面薄土上
废水区	$24^{\circ}58'01.1''\text{N}, 104^{\circ}44'15.9''\text{E}$	$1\ 718\pm 10$	金矿区残留的废水坑底部,潮湿泥土上
相对污染区	$24^{\circ}58'01.4''\text{N}, 104^{\circ}44'17.4''\text{E}$	$1\ 696\pm 9$	金矿区相对污染地泥土上,距废渣区 $150\text{ m}$
相对清洁区	$24^{\circ}58'09.5''\text{N}, 104^{\circ}44'35.7''\text{E}$	$1\ 635\pm 7$	金矿区相对清洁地,小麦地中泥土上

### 2.2 室内工作

标本鉴定:将采集回来的苔藓植物标本整理并装入标本袋,记录编号及生境特征。应用HWG-1型双筒解剖镜及XSZ-107TS型光学显微镜对标本进行形态学观察,并借助于《中国藓类植物属志(上、下册)》<sup>[20]</sup>、《中国苔藓志》<sup>[21-23]</sup>以及多本地方苔藓植物志<sup>[24-26]</sup>,同时参考国际最新的苔藓植物资料<sup>[27-29]</sup>及专业学术刊物《Journal of Bryology》,《The Bryologist》和《Journal of the Hattori Botanical Laboratory》等现代苔藓植物分类资料,采用经典形态分类方法进行鉴定工作。

生物量等项目的测定: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;将清洗干净的藓类植物室温晾干24h后称量其鲜重,然后将称完鲜重的藓类植物放于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘48h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。

### 2.3 数据处理

选取该矿区优势结皮苔藓植物进行生物量、成土量、饱和吸水量和饱和吸水率等项目的测定分析,计算参照徐杰、白学良等<sup>[16]</sup>的计算公式:

$$\text{藓类植物生物量 (g/m}^2\text{)} = \text{干重 (g/dm}^2\text{)} \times \text{盖度 (\%)} \times 10^2$$

$$\text{藓类植物成土率 (\%)} = [\text{结皮层总重 (g/dm}^2\text{)} - \text{干重 (g/dm}^2\text{)}] / \text{干重 (g/dm}^2\text{)} \times 100\%$$

$$\text{藓类植物成土量 (g/m}^2\text{)} = \text{生物量 (g/m}^2\text{)} \times \text{成土率 (\%)} \times 10^2$$

$$\text{饱和吸水率 (\%)} = (\text{饱和吸水重 (g/dm}^2\text{)} - \text{干重 (g/dm}^2\text{)}) / \text{干重 (g/dm}^2\text{)} \times 100\%$$

$$\text{饱和吸水量 (g/m}^2\text{)} = \text{生物量 (g/m}^2\text{)} \times \text{饱和吸水率 (\%)} \times 10^2$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 苔藓植物种类组成特征

经过初步鉴定发现,新路废弃卡林型金矿区苔藓植物种类组成有 4 科 6 属 7 种(表 2)。从表 2 中可见,该矿区全部为藓类植物,其中丛藓科(Pottiaceae)和真藓科(Bryaceae)为优势科,真藓属(*Bryum*)为优势属,种类组成较单调,苔藓植物丰富度低,这是由于长期开矿活动,人为因素干扰破坏大,喀斯特石漠化加剧,使得环境越来越恶化,加上该矿区干燥且重金属污染严重,只有那些具有特殊构造和生理适应机制的苔藓植物才能在该矿区得以生存、繁衍和发展。该矿区常见的苔藓植物种类有:硬叶扭口藓(*Barbula rigidula* (Hedw.) Mild.), 毛口藓(*Trichostomu brachydontium* Bruch.), 卵蒴真藓(*Bryum blindii* B. S. G.), 银叶真藓(*Bryum argenteum* Hedw.)。该矿区未发现苔类和角苔植物,主要是因为苔类和角苔植物对环境质量要求高,对水分、湿度和荫蔽度等条件要求高,其抗旱和抗干燥能力弱,因此,在极度干燥严酷的环境条件下,苔类和角苔植物不能生存,说明在环境遭到严重破坏的金矿区,藓类植物较苔类和角苔植物表现出更强的适应性和耐受性。

表 2 废弃卡林型金矿区苔藓植物名录

科名	属名	种名
丛藓科(Pottiaceae)	扭口藓属( <i>Barbula</i> Hedw.)	硬叶扭口藓
	毛口藓属( <i>Trichostomu</i> Bruch.)	毛口藓
真藓科(Bryaceae)	真藓属( <i>Bryum</i> Dill.)	银叶真藓
	丝瓜藓属( <i>Pohlia</i> Hedw.)	卵蒴真藓
		异芽丝瓜藓
葫芦藓科(Funariaceae)	葫芦藓属( <i>Funaria</i> Hedw.)	纤细葫芦藓
真藓科(Brachytheciaceae)	青藓属( <i>Brachythecium</i> B. S. G.)	小青藓

#### 3.2 苔藓植物生活型特征

生活型(Life-form)是有机体对外界环境适应的外部表现形式,同一生活型的生物,不但体态相似,而

且适应环境的特点也是相似的<sup>[30]</sup>。苔藓植物生活型的划分参照 Magdefrau K. 的分类系统。新路废弃卡林型金矿区苔藓植物生活型有 2 种类型:矮丛集型(Short-turfs)和交织型(Wefts)。其中矮丛集型苔藓植物有 6 种,占 85.71%,在该矿区明显占优势,常见种:硬叶扭口藓、毛口藓、异芽丝瓜藓(*Pohlia leucostoma* (Bosch et Lac.) Fleisch.) 和纤细葫芦藓(*Funaria gracilis* (Hook. f. et Wils.) Broth.) 等,交织型苔藓植物仅有 1 种,为小青藓(*Brachythecium perminusculum* C. Muell),占 14.29%。由此可看出,该矿区苔藓植物生活型组成单调,仅有两种类型,与矿区干旱的环境条件相适应,因这两类生活型组成的苔藓植物群落较矮小,加上自身特殊的生理构造,能很好地在废石、废渣、废水及洗金池等重金属污染严重的环境中生存,较其他微管植物表现出更强的耐受性,形成了特殊的栖息地,为其他物种在该矿区的生存提供了条件,可作为废弃卡林型金矿区在石漠化治理、生态恢复和蓄水保土等方面研究的良好素材。

#### 3.3 苔藓植物成土量分析

土壤很大一部分是由岩石在经过一系列的作用后演变而来的,生物在岩石转变成土壤的过程中起到至关重要的作用。在原始土壤成土过程的第 3 时期就是苔藓植物的着生和发展相伴随的<sup>[31]</sup>。苔藓植物殖居后,提高了岩石的持水量,随着苔藓植物的繁殖,大量的苔藓植物聚集成丛状,其假根常粘结大量的棕黑色的细粒土<sup>[32]</sup>。另外,苔藓植物的毛细管作用能够减少溶于土壤水分中的有机质、氮、磷、钾等矿质元素的大量流失,并可进一步增加营养物质的保留,对蓄水作用起到一定的效果,同时,地表苔藓层通过减少排放和离子的化学结合,还有助于保持土壤肥力<sup>[33]</sup>。这样,一方面扩大了有机物和细土的来源,加强岩石拦截细土的能力,聚集了大量的细土且增厚了土层,为土壤的形成奠定了坚实的基础,另一方面减少了矿物质的流失,增加了土壤肥力,减少了水土流失。苔藓植物的这些特殊性质,在废弃金矿区生态治理过程中,在有机物的积累、土壤性质改善和更新及保水固土等方面发挥着十分重要的作用。

此外,从表 3 中可见,硬叶扭口藓、卵蒴真藓、毛口藓和小青藓的成土量分别为 569.10, 217.50, 3 695.80 和 359.05 g/m<sup>2</sup>,成土率分别为 3 794.00%, 7 250.00%, 7 053.00% 和 4 127.00%。另外,从表 4 可以看出,苔藓植物的生物量与成土量,成土量与干重之间成显著正相关的关系,干重与生物量之间成极显著正相关关系,即干重大,生物量大,成土量越大,反之越小。

表 3 废弃卡林型金矿区苔藓植物成土量

苔藓名称	鲜重/ g	干重/ g	生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )	成土 率/%	成土量/ (g·m <sup>-2</sup> )
硬叶扭口藓	0.95	0.50	15.00	3 794.00	569.10
卵蒴真藓	0.20	0.10	3.00	7 250.00	217.50
毛口藓	1.41	1.31	52.40	7 053.00	3 695.80
小青藓	0.59	0.30	8.70	4 127.00	359.05

表明苔藓植物对岩石的成土过程具有促进作用,即使成土量最小的卵蒴真藓也达到了217.50 g/m<sup>2</sup>,这在金矿区喀斯特石漠化严重区域是极其重要的。因此,可人工选择生物量大且易适应极端环境的毛口藓

进行组培实验,繁殖大量的植物体,对于在矿区加强蓄水成土和石漠化治理进程等方面起到关键性作用。

### 3.4 苔藓植物生物量、饱和吸水量分析

苔藓植物在整个生态系统中作为重要的初级生产者之一,不仅生产量大而且分解缓慢,积累了较大的生物量,在一些极端的环境中起到重要的作用,特别在严酷环境条件下的重金属污染矿区,苔藓植物作为优势种群是最大的生产者,且常常大片形成垫丛状,植物体具有大量的毛细空隙,可以通过细胞壁直接从植物体外吸收水分,保水能力强,具有吸水快、蓄水量大的特点<sup>[33-34]</sup>。

表 4 废弃卡林型金矿区结皮苔藓植物各参数值相关性分析

项目	A	B	C	D	E	F	G	H
A	1							
	4							
B	0.948	1						
	0.052	4						
C	0.954*	0.880	1					
	0.046	0.120	4					
D	0.916	0.992**	0.870	1				
	0.084	0.008	0.130	4				
E	0.853	0.974*	0.789	0.989*	1			
	0.147	0.026	0.211	0.011	4			
F	-0.024	0.279	-0.189	0.318	0.455	1		
	0.976	0.721	0.811	0.682	0.545	4		
G	0.893	0.864	0.977*	0.881*	0.814	-0.112	1	
	0.107	0.136	0.023	0.119	0.186	0.888	4	
H	-0.124	-0.319	0.152	-0.289	-0.394	-0.840	0.196	1
	0.876	0.681	0.848	0.711	0.606	0.160	0.804	4
	4	4	4	4	4	4	4	4

注:A为鲜重,B为干重,C为饱和吸水重,D为生物量,E为成土量,F为成土率,G为饱和吸水量,H为饱和吸水率;横向往各组数据中,第1行为对应2项相关系数,第2行为对应2项正态分布双向系数,第3行为样本数;\*表示在0.05水平上显著相关,\*\*表示在0.01水平上极显著相关。

此外,苔藓植物并能在降雨期间,通过慢慢地向土壤中释放水分,来维持湿润的环境,调节水分的径流量和蒸发量,使土壤对雨水具有更好的渗透性<sup>[33]</sup>。苔藓植物这些特殊的功能,能缓冲微环境的剧烈变化,减少水土流失和石漠化加剧的现象,在维持生态平衡和生态系统的循环中起到非常重要的作用。

为了探索废弃金矿区结皮优势苔藓植物,即硬叶扭口藓、卵蒴真藓、毛口藓和小青藓在该矿区的生态

功能及在生态环境治理中的潜能,对其生物量和饱和吸水量进行测定(表5),结果显示,在废弃金矿区,4种优势结皮苔藓植物的生物量为3.00~52.40 g/m<sup>2</sup>,与汞矿区优势苔藓植物群落生物量作比较<sup>[35]</sup>,具有较大的差异性。虽卵蒴真藓生物量最小,仅3.00 g/m<sup>2</sup>,但在该矿区作为主要的植被类群,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,一旦形成地被层,不易被微生物分解或食草动物取食而使生

物量逐年增加。随着时间的推移,藓类植物体下部死亡,残体堆积,为其他物种的生存和登陆创造了条件,也达到了矿区植物恢复和喀斯特石漠化治理的目的,为矿区生态治理提供基础数据和参考资料。

从表 5 可见,硬叶扭口藓、卵蒴真藓、毛口藓和小青藓的饱和吸水量分别为 345.00, 35.10, 684.30 和 316.42 g/m<sup>2</sup>, 其饱和吸水率分别为 2 300.00%, 1 170.00%, 1 306.00% 和 3 637.00%, 这对于在金矿区缺水且干旱的环境条件下生长的植物来说是非常重要的,正是由于苔藓植物具备这样的特性,充分吸水后,能在长时间没有水源的状况下生存。此外,如果长期不降水,藓类植物会失水,其细胞渗透压降低进入休眠状态,此时苔藓植物可吸收空气中水分维持生命不至于死亡,遇到降水很快复苏生长<sup>[16]</sup>。藓类植物具有这些独特的性质,使其能在人为极度破坏严重的重金属污染矿区很好的生长,并为其他物种的生存创造了条件,这对废弃金矿区植物的恢复、蓄水作用及喀斯特石漠化治理等方面具有十分重要的意义。此外,从表 4 中的相关性分析结果(苔藓植物的饱和吸水量和生物量成显著正相关的关系,即生物量大,饱和吸水量大,反之越小。)可以看出,生物量大的苔藓植物不仅储存了较多的有机物,而且成为生态系统中重要的碳汇,吸水和保水能力强,生态功能越大,在废弃金矿区生态系统的修复过程中,特别在物质循环和蓄水成土功能等方面扮演着重要角色。

表 5 苔藓植物生物量、饱和吸水量

苔藓名称	干重/ g	饱和吸 水重/g	生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )	饱和吸 水率/%	饱和吸水量/ (g·m <sup>-2</sup> )
硬叶扭口藓	0.50	12.00	15.00	2 300.00	345.00
卵蒴真藓	0.10	1.27	3.00	1 170.00	35.10
毛口藓	1.31	18.42	52.40	1 306.00	684.30
小青藓	0.30	11.21	8.70	3 637.00	316.42

## 4 结论

贵州省兴义市新路废弃卡林型金矿区苔藓植物种类组成有 4 科 6 属 7 种,且全部为藓类植物,其中丛藓科和真藓科为优势科,真藓属为优势属,种类组成较单调,苔藓植物丰富度低,这是由于长期开矿活动,人为因素干扰破坏大,喀斯特石漠化加剧,使得环境越来越恶化,加上该矿区干燥且重金属污染严重,只有那些具有特殊构造和生理适应机制的苔藓植物才能得以生存、繁衍和发展。

该矿区苔藓植物生活型有 2 种类型:矮丛集型(85.71%)和交织型(14.29%)。由此可看出苔藓植

物生活型组成单调,仅两种类型,与矿区干旱的环境条件相适应,因这两类生活型组成的苔藓植物群落较矮小,加上自身特殊的生理构造,能很好地生存在重金属严重污染的环境中,较其他微管植物表现出更强的耐受性,为其他物种在该矿区的生存提供了条件,可作为卡林型金矿区在石漠化治理、生态恢复和蓄水保土等方面研究的良好素材。

对该矿区优势结皮苔藓植物生物量、成土量和饱和吸水量等的测定及相关性分析,结果显示,苔藓植物的成土量、饱和吸水量与生物量之间成显著正相关的关系,即生物量大,成土量大,饱和吸水量大,反之越小。硬叶扭口藓、卵蒴真藓、毛口藓和小青藓的成土量分别为 569.10, 217.50, 3695.80 和 359.05 g/m<sup>2</sup>, 成土率分别为 3 794.00%, 7 250.00%, 7 053.00% 和 4 127.00%, 表明苔藓植物对岩石的成土过程具有促进作用,即使成土量最小的卵蒴真藓也达到了 217.50 g/m<sup>2</sup>, 这在金矿区喀斯特石漠化严重区域是极其重要的。因此,可人工选择生物量大且易适应极端环境的毛口藓进行组培实验,繁殖大量的植物体,对于在矿区加强蓄水成土和石漠化治理进程等方面起到关键性作用。此外,4 种优势结皮苔藓植物的生物量在 3.00~52.40 g/m<sup>2</sup> 的范围内,饱和吸水量分别为 345.00, 35.10, 684.30 和 316.42 g/m<sup>2</sup>, 饱和吸水率分别为 2 300.00%, 1 170.00%, 1 306.00% 和 3 637.00%。生物量大,饱和吸水量大,这对于矿区缺水植物的生长是极其重要的,水分作为矿区植物生长的主要限制因子,苔藓植物为其提供了生存条件,这对废弃金矿区植物恢复、蓄水作用及喀斯特石漠化治理等方面具有十分重要的意义。另外,生物量大的苔藓植物不仅储存了较多的有机物,而且成为生态系统中重要的碳汇,吸水和保水能力强,生态功能大,在废弃金矿区生态系统的修复过程中,特别在物质循环和蓄水成土功能等方面扮演着重要角色。

致谢:实验室分析工作和野外工作中得到吴启美、潘莎、谢斐、左思艺、付兰、殷声峰、徐兴华等同学的协助,在此一并表示最衷心的感谢!

### [参 考 文 献]

- [1] Hofstra A H, Cline J S. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits[J]. Reviews in Economic Geology, 2000, 13(2): 163-220.
- [2] Cline J S, Hofstra A H, Muntean J L. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geologic characteristics and viable models[J]. Economic Geology, 2005, 100(1): 451-484.

- [3] 韩至钧,王砚耕,冯济舟,等. 黔西南金矿地质与勘查[M]. 贵阳:贵州科技出版社,1999.
- [4] 何邵麟,曾昭光,罗明学,等. 黔西南金矿勘查地球化学30年:回顾与展望[J]. 物探与化探,2008,32(5):461-464.
- [5] Pentecost A, Zhang Zhaohui. The travertine flora of Jizuzhaigou and Munigou, China, and its relationship with calcium carbonate deposition[J]. Cave Karst Science, 2000,27(2):71-78.
- [6] Pentecost A, Zhang Z H. A review of Chinese travertines[J]. Cave Karst Science, 2001,28(1):15-28.
- [7] Zhang Zhaohui. A preliminary taxonomical study on Tufa-Bryophytes in Guizhou, SW China[J]. Chenia, 1998,5(1):173-176.
- [8] Zhang Zhaohui, Peng Tao, Li Xiaona, et al. A study on the bryophytes of Karst cave threshold at Kunming Area in Yunnan Province, P. R. China[J]. Carsologica Sinica, 2004,23(3):229-233.
- [9] 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.
- [10] 刘荣相,王智慧,张朝晖. 贵州贞丰喀斯特石漠峰丛苔藓植物群落生态特征[J]. 植物研究,2009,29(6):734-741.
- [11] 李晓娜,张朝晖. 江西德兴铜矿苔藓植物研究[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2006,24(2):13-17.
- [12] 黄文琥,张朝晖. 贵州烂泥沟金矿5种苔藓植物的生物地球化学研究及生物探矿潜力分析[J]. 黄金,2006,12(27):12-15.
- [13] 刘荣相,王智慧,张朝晖. 苔藓植物对贵州丹寨汞矿区汞污染的生态监测[J]. 生态学报,2011,31(6):1558-1566.
- [14] Belnap J, Gillette D A. Disturbance of biological soil crusts: impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in southeastern Utah, USA[J]. Land Degrad and Develop, 1997,8(2):355-362.
- [15] Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crusts: a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia[J]. Aust. J. Soil Res., 1994,32(3):389-415.
- [16] 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.
- [17] Huang Wenhui, Zhang Zhaohui. Comparative study on bryophytes of Carlin gold mine and non-gold field area Nipu, Guizhou[J]. Guihaia, 2008,28(3):340-343.
- [18] 汪文云,张朝晖. 贵州水银洞卡林型金矿苔藓植物研究[J]. 黄金,2008,29(6):8-12.
- [19] 张惠远,蔡运龙,万军. 基于 TM 影像的喀斯特山地景观变化研究[J]. 山地学报,2000,18(1):18-25.
- [20] 陈邦杰. 中国藓类植物属志(上、下册)[M]. 北京:科学出版社,1963,1978.
- [21] 高谦. 中国苔藓志:第2卷[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [22] 黎兴江. 中国苔藓志:第3,4卷[M]. 北京:科学出版社,2000,2006.
- [23] 胡人亮,王幼芳. 中国苔藓志:第7卷[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [24] 中国科学院昆明植物研究所. 云南植物志:第17,18,19卷[M]. 北京:科学出版社,2000,2002,2005.
- [25] 白学良. 内蒙古苔藓植物[M]. 内蒙古:内蒙古大学出版社,1997.
- [26] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 横断山区苔藓志[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [27] Zhang Zhaohui, Chen Jiakuan. Marchantiophyta and Anthoceroophyta in Guizhou Province, P. R. China[J]. Journal of Bryology, 2006,28(3):170-176.
- [28] 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.
- [29] Magdefrau K. Life-forms of bryophytes[M]//Smith A J E. Bryophyte ecology, New York:Chapman and Hall, 1982.
- [30] 孙儒泳,李庆芬,牛翠娟,等. 基础生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [31] 朱显谟. 论原始土壤的成土过程[J]. 水土保持研究,1995,2(4):83-89.
- [32] 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.
- [33] 吴玉环,程国栋,高谦. 苔藓植物的生态功能及在植物恢复与重建中的作用[J]. 中国沙漠,2003,23(3):215-219.
- [34] Richardson D H S, David H S. The biology of mosses[M]. Oxford:Blackwell Scientific Pub., 1981.
- [35] 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.