文章编号:1001－4810(2010)01－0041－07

贵州东南部喀斯特汞金矿带苔藓植物及其重金属富集特征

刘荣相[1],张朝晖[1,2]
(1.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;
2.贵州师范大学生命科学学院,贵州 贵阳 550001)

摘 要:贵州东南部的三(三都)—丹(丹寨)汞金矿带是以喀斯特地质为背景,以卡林型汞金矿为主的多金属矿带。长期汞矿的开采和冶炼,导致当地生态环境受到了严重的破坏。通过对矿带上各种典型生境苔藓植物标本的采集、整理及鉴定,共发现了苔藓植物13科26属58种,其中丛藓科和真藓科为优势科。对汞金矿带上占优势的南亚石灰藓*Hydrogonium consanguineum*、狭网真藓*Bryum algovicum*、小石藓 *Weisia controversa*、刺叶真藓 *Bryum lonchocaulon*、皱叶毛口藓*Trichostomum crispulum*、狭叶小羽藓*Haplocladium angustifolium*、亮叶绢藓*Entodon aeruginosus*和黑扭口藓*Barbula nigrescens* 等8种苔藓及基质的Cd、Pb、Cu、Zn、Ca、Mg、As、Hg等8种金属元素进行了分析测定。结果表明,8种苔藓体内元素含量最高是Ca,其次是Mg,最低的是Cd。Hg－Zn($P<0.01$)存在极显著正相关;Hg－Pb($P<0.05$)存在显著正相关性;而As－Cd($P<0.05$)则存在显著负相关。应用富集系数分析,表明了矿带上8种苔藓对Cu均有一定的富集作用,小石藓对Hg、Cd、Cu、Zn等4种重金属的富集系数均大于1,狭网真藓对Hg、As、Cu、Pb等4种重金属的富集系数大于1,表明这两个物种对汞金矿带上重金属污染具有良好的耐受性,是矿带上生态恢复、矿区综合治理的适宜物种。

关键词:苔藓植物;喀斯特;富集系数;重金属污染;汞金矿带
中图分类号:Q948.116 **文献标识码**:A

环境是人类生存与发展的物质基础和支撑系统,人类在谋求生存与发展同时,不断的利用和改造环境。矿山的开采挖掘,给人类带来了巨大物质财富,但同时也给环境造成了严重的污染和破坏。贵州东南部三都—丹寨境内分布有以喀斯特地质为背景,卡林型汞金矿为主的多金属矿带——三—丹汞金矿带。汞矿、金矿的开采、冶炼已有一定的历史[1]。汞是有毒物质,具有跨国污染的特点;同时,汞污染具有持久性,易迁移性和高度生物富集性,在环境中任何形式的汞均可在一定条件下转化为剧毒的甲基汞[2~7]。特殊的喀斯特地质背景,采矿、选矿、冶炼,掠夺性的粗放型生产,随意排放的废渣、废气、废液等人类强烈的间接作用,导致矿区岩石大面积裸露,还形成了喀斯特石漠化的新类型——矿山石漠化[8]。现有关矿区的生态环境问题、生态综合治理等已受到国内外广泛的关注[2~7]。

苔藓植物因其特殊的生理机制,能生活在多种维管植物不能生存的高盐、高温、干旱、弱光等恶劣的环境中。有关矿区苔藓植物的研究,1948年Persson就报道了真藓科(Bryaceae)缺齿藓属(*Mielichhoferia*)的*Mielichhoferia mielichhoferia* (Hook.) Wijk et Marg. 用于勘探铜矿[9],并获得了成功。此后,Hartman等也报道了*Mielichhoferia mielichhoferia* 能生活在铜矿上这一特性[10]。Samecka-Cymerman & Kempers[11]

基金项目:国家自然科学基金[国基No. 30860025]、国家人力资源和社会保障部留学人员科技活动优秀项目[人社厅(2008)86号]、贵州省中长期科技规划重大专项和重点领域基础培育项目[黔教科(2008)012号]
第一作者简介:刘荣相(1983—),男,在读硕士研究生,研究方向为植物生态学。E-mail:ecolrx@163.com。
通讯作者:张朝晖(1963—),男,教授,主要从事生态学和植物学研究。E-mail:academiclife@126.com。
收稿日期:2009－08－11

利用水生苔藓植物对Au元素富集找到了金矿。近期国内研究见彭涛和张朝晖报道了铜矿区苔藓植物多样性与环境的相关性[12];黄文琥和张朝晖对卡林型金矿区的苔藓植物与苔藓植物的探矿潜力进行了研究[13];李冰和张朝晖卡林型金矿区苔藓及其对重金属污染的修复的潜力做了进一步的探讨[14]。此外,张朝晖和Pentecost对另外一种特殊的矿——钙华上苔藓植物区系、生态等方面作了较为系统的研究[15~17]。但有关喀斯特地质背景下,卡林型汞金矿区的苔藓植物及其重金属富集特征研究却鲜见报道。本文以贵州省东南部喀斯特地区三一丹(三都一丹寨)汞金矿带为代表,调查汞矿、金矿开采冶炼典型矿带上苔藓植物多样性特点,探讨不同苔藓植物重金属富集特征,以期为喀斯特地区重金属污染生态恢复、生态监测和汞矿区的生态综合治理提供技术性支撑数据。

1 研究区域概况

三一丹汞金矿带位于贵州东南部,南北长约50 km,东西宽约7 km,地跨三都县和丹寨县。其矿床较多,大型矿床为北部的丹寨汞矿床和南部的三都交梨汞矿床,是一个喀斯特地质为背景,卡林型汞金为主的多金属矿带[18]。汞矿的平均品位超过1%,是国内汞矿矿床平均品位最高的矿床之一[1,19]。研究范围地理坐标为东经107°50′~107°51′,北纬26°01′~26°09′,平均海拔680 m,最高气温40℃,最低气温-5.5℃,年均降雨量1 400 mm;自1980年后,因汞矿资源的枯竭,汞的产量逐年减少[1]。

本研究选取了三一丹汞金矿带上5个主要的汞矿开采、冶炼的矿点进行研究,它们是丹寨四相厂矿田、丹寨高排矿点、三都交梨矿田、三都王家寨汞矿点和三都拉峨汞矿点。

2 研究方法

2.1 野外苔藓植物标本的采集

三一丹汞金矿带上主要矿点多集开采和冶炼于一体,废石和废渣就近倾倒,人为活动显著地改变了原有生态系统;长期的汞矿开采活动,导致了矿区范围内生境发生了很大差异。按照矿区生境的不同,分别在典型的废渣、废石、废水,废洞和矿山边缘等5种典型的矿区生境中设置一定数量的样方。采样时按照野外的实际情况,在每种生境中(废洞除外)中布置10 m×2 m的样地,在样地内按S形布点法设置3个1 m×1 m的样方,每个样方内再按5点取样法设置5个10 cm×10 cm的小样方,采集小样方内的全部苔藓。每个样地共采集苔藓植物标本15份,采集时用一面积为10 cm×10 cm的小铁筛置于小样方上方,铁筛用细线进一步分成100个1 cm×1 cm的小格,以此来辅助计测苔藓植物在小样方中的盖度。并记录每个小样方的小生境。而在废洞中,按照从洞外至洞穴有光带的范围内,每隔1 m取一个样方,采集了2个典型的废汞矿洞,采集到苔藓标本25份。野外按生境的具体情况共设置了20个样地(包括2个汞矿洞的2个样地),60个样方,共采集到苔藓植物标本295份。各种生境概况及采样情况详见表1。

2.2 室内标本的整理

苔藓标本室内整理、鉴定、生活型划分等的鉴别方法参见文献[11~17]进行。

2.3 实验样品的制备

用镊子把8种藓类植物的植株与基质分开,分别置于自来水中冲洗,洗净后用去离子水漂洗2~3次,直至没有其他杂物。将冲洗好的苔藓植株包于滤纸中放入于101A型干燥箱内,60℃(防止Hg挥发)恒温干燥48 h,取出苔藓植株研磨过80目筛制成苔藓样品,放入样品袋备用。苔藓植物的基质也研磨过80目筛,放入样品袋备用。利用AL204型电子天平称取苔藓样品粉末0.3 g左右、基质粉末0.2 g左右,每次测定均设一平行样、一空白样做对照。

用于测定苔藓及基质Cd、Pb、Cu、Zn、Ca、Mg的方法[12~14]是:将样品分别置于50 mL编好号的三角瓶中,先后加15 mL HNO_3-$HClO_4$混酸,于KR可调电热板上硝化至样品为白色近干,且白烟逸尽为止。取下冷却,用0.5%的HNO_3少许微热熔解(余残渣时要过滤),然后转移到50 mL的容量瓶中,并用0.5%的HNO_3定容至刻度待用。

用于测定苔藓植物体As和Hg的方法[12~14]是:称取苔藓植物0.3 g左右与聚四乙烯的消解罐中,加入3 mL HNO_3浸泡,盖上盖子,置于低温电热板上,待样品基本透明,再加入1 mL的H_2O_2,合上盖子,放置于高压密闭容器内130℃,3~4个小时后取出冷却,将聚四乙烯罐内的全部黄色物种用10 mL的5% HCl转移到50 mL的容量瓶中,并加入5 mL10%的硫脲,用高纯水定容至刻度。测定苔藓基质As和Hg的方法是:称取样品0.2 g左右,置于50 mL比色管中,加入新配置的王水沸水浴2小时,白烟散尽,取出冷却,加入5 mL10%的硫脲,用高纯水定容至刻度。

2.4 分析方法

苔藓植物及其基质的Cd、Pb、Cu、Zn、Ca、Mg用A Analyst800原子吸收光谱仪和ICP-OES等离子发射光谱仪进行测定;As和Hg用AF-640原子荧光光谱仪测定。苔藓植物的重金属富集特征用富集系数(Accumulation coefficient)进行分析。富集系数是衡

量植物对重金属积累能力的重要指标，它是指植物体内某种重金属含量与土壤中该元素含量的比值[20]。它反映的是植物对某种重金属元素的积累能力。富集系数越大，其积累重金属的能力越强。同时，富集系数大于1，也是超富集植物的一个特征，超富集植物是用于矿区生态修复的必备条件之一。富集系数的计算公式如下：

重金属富集系数＝植物体内重金属含量/基质（土壤）中重金属含量

相关性分析用SPSS16.0软件进行。

表1　贵州东南部汞金矿带苔藓植物生境概况

Tab.1　Habitat of bryophytes in mercury-gold ore belt in southeast Guizhou

样点	废石区	废渣区	废洞区	废水区	矿山边缘
丹寨四相厂矿田	废石堆上，样地内有少量草本生长，采集苔藓30份。	废渣堆上，偶见稀疏的三叶鬼针草，苔藓为优势种，采集苔藓15份。	——	废水周期淹没，沙生或土生，水pH：6.0～6.5，草本植物占优势，采集苔藓30份。	——
丹寨高排矿点	——	废渣倾倒的斜坡上，已有草本丛和小灌木生长，采集苔藓60份。	——	——	矿山边缘土石生，草本植物占优势，共采集苔藓15份
三都交梨矿田	裸露废石和草本覆盖的废石上，共采集苔藓30份。	裸露废渣和草本覆盖的废渣上，共采集苔藓30份。	采集弱光带到矿洞口带的苔藓植物共10份	——	——
王家寨矿点	废石堆沙土生，草本占优势，采集苔藓15份。	裸露的废渣和草本覆盖的废渣上，采集苔藓30份。	——	——	——
拉峨矿点	废石上无任何植物生长，在废石堆周边，采集苔藓15份。	——	矿洞内及矿洞洞口带采集苔藓15份。	——	——
共计	90份	135份	25份	30份	15份

3　研究结果

3.1　贵州东南部汞金矿带苔藓植物组成概况

通过对贵州东南部三一丹汞金矿带上各种生境中295份苔藓植物标本的整理及鉴定，共发现苔藓植物13科26属58种。其中苔类3科3属3种，仅占科数的23.1%，属数的11.5%，种数的5.1%；藓类植物10科23属55种，占科数的76.9%，属数的88.5%，种数的94.9%。根据汞金矿带苔藓组成情况，把含5属以上的科定为优势科（表2）。由表2看出，矿带上优势的科是：丛藓科Pottiaceae和真藓科Bryaceae。丛藓科有25种，占总种数的43.1%，常见的种类有：南亚石灰藓 *Hydrogonium consanguineum*（Thwait. et Mitt.）Hilp.、芽胞湿地藓 *Hyophila propagulifera* Broth.、小石藓 *Weisia controversa* Hedw.、皱叶毛口藓 *Trichostomum crispulum* Bruch in F. A. Muell.、尖叶扭口藓 *Barbula constricta*（Mitt.）Saito.、黑扭口藓 *Barbula nigrescens*（Mitt.）Saito.等；真藓科有17

表2　贵州东南部汞金矿带苔藓植物科的组成

Tab.2　Families of bryophyte in mercury-gold ore belt in southeast Guizhou

科	属数	占总属数的百分比/%	种数	占总种数的百分比/%
丛藓科 Pottiaceae	10	38.5	25	43.1
真藓科 Bryaceae	5	19.2	17	29.3
葫芦藓科 Funariaceae	1	3.8	3	5.2
青藓科 Brachytheciaceae	1	3.8	2	3.4
灰藓科 Hypnzceae	1	3.8	2	3.4
绢藓科 Entodontaceae	1	3.8	1	1.7
羽藓科 Thuidiaceae	1	3.8	1	1.7
凤尾藓科 Fissidentaceae	1	3.8	1	1.7
牛毛藓科 Ditrichaceae	1	3.8	1	1.7
曲尾藓科 Dicranaceae	1	3.8	1	1.7
光苔科 Cythodiaceae	1	3.8	1	1.7
溪苔科 Dilaenaceae	1	3.8	1	1.7
瘤冠苔科 Aytoniaceae	1	3.8	1	1.7

种，占总种数的29.3%，常见的种类有：狭网真藓 *Bryum algovicum* Sendt.、刺叶真藓 *Bryum lonchocaulon* C. Muell.、真藓 *Bryum argenteum* Hedw.、卵蒴真藓 *Bryum blindii* B. S. G.、南亚丝瓜藓 *Pohlia gedeana* (Bsch. et Lac.)Gang. 等。同时，把含3种以上的属定为优势属，汞金矿带上占优势的属是：真藓属 *Bryum*、扭口藓属 *Barbula*、石灰藓属 *Hydrogonium*、湿地藓属 *Hyophila*、毛口藓属 *Trichostomum* 和葫芦藓属 *Funaria*。而其他科的苔藓多为单属，单种，故苔藓植物的优势科、优势属的表现较明显。这可能与喀斯特背景下，矿区严重的重金属污染、汞矿废渣、废石等环境储水能力较差及矿区植被覆盖度极低等严酷的综合环境因素相关。

3.2 贵州东南部汞金矿带苔藓植物及基质金属元素含量

对汞金矿带上占优势的苔藓植物：南亚石灰藓(L1)、狭网真藓(L2)、小石藓 (L3)、刺叶真藓(L4)、皱叶毛口藓(L5)、狭叶小羽藓(L6) *Haplocladium angustifolium* (Hampe et C. Muell.) Broth.、亮叶绢藓(L7) *Entodon aeruginosus* C. Muell. 和黑扭口藓(L8)等8种苔藓及基质的Cd、Pb、Cu、Zn、Ca、Mg、As、Hg等8种金属元素含量进行了测定，其结果见表3。

表3 苔藓植物及其基质金属元素含量(单位：mg/kg)

Tab. 3 Concentration of metals in bryophytes and their substrates (Unit: mg/kg)

苔藓/基质	Cd	Cu	Pb	Zn	Hg	As	Ca	Mg
L1/LS1	0.23/0.58	28.32/11.79	47.46/—	157.00/287.10	71.15/145.20	366.41/355.51	28420/69220	5467/14590
L2/LS2	0.29/0.46	15.13/12.43	249.60/216	210.40/393.00	81.42/63.87	373.81/310.92	37420/61960	5557/13600
L3/LS3	2.46/0.87	7.33/3.25	166.70/—	237.40/107.00	92.22/66.07	71.43/204.35	31210/81050	9124/7344
L4/LS4	0.87/1.11	35.80/6.47	21.20/—	109.60/254.20	18.67/103.20	67.49/302.08	26080/68690	6698/13015
L5/LS5	1.57/1.83	12.88/2.79	100.00/—	98.05/196.20	41.02/71.22	56.69/234.54	23490/86620	7747/12900
L6/LS6	1.01/1.87	12.09/10.14	122.70/—	112.50/289.30	65.32/149.38	35.02/149.74	13540/48690	3091/17040
L7/LS7	1.90/1.70	8.34/4.47	125.20/—	109.80/259.30	50.27/147.24	38.50/207.16	20470/50510	4805/11710
L8/LS8	0.23/0.83	13.74/1.81	41.77/—	61.21/273.50	22.53/61.18	343.37/325.79	27190/88580	3097/10000

注：L1为南亚石灰藓，L2为狭网真藓，L3为小石藓，L4为刺叶真藓，L5为皱叶毛口藓，L6为狭叶小羽藓，L7为亮叶绢藓，L8为黑扭口藓。"—"为数据缺失，下同。L1: *Hydrogonium consanguineum* (Thwait. et Mitt.) Hilp.，L2: *Bryum algovicum* Sendt.，L3: *Weisia controversa* Hedw. var. controversa，L4: *Bryum lonchocaulon* C. Muell.，L5: *Trichostomum crispulum* Bruch in F. A. Muell.，L6: *Haplocladium angustifolium* (Hampe et C. Muell.) Broth.，L7: *Entodon aeruginosus* C. Muell. and L8: *Barbula nigrescens* Mitt.. "—" was miss, The same as following.

3.2.1 苔藓植物体金属元素含量

各种元素在苔藓中含量差异较大，如南亚石灰藓，狭网真藓和黑扭口藓中As的元素分别为366.41 mg/kg，373.81 mg/kg和343.37 mg/kg，是测定中其他苔藓元素含量的5～10倍；Pb的含量在狭网真藓最高，为其他藓类2～10倍。但就单种金属而言，由于汞金矿区地质背景为喀斯特地区，普遍存在苔藓体内元素含量最高是Ca和Mg，并且Ca的含量均大于Mg的含量；而Cd在所有藓类中含量均为最低。Cu、Pb、Zn、Hg和As的含量在每种藓类中的含量差异较大。

3.2.2 苔藓基质金属元素含量

由表3看出，苔藓基质中元素含量最高的是钙和镁，平均含量达6 9415 mg/kg和12 524.88 mg/kg。同时，苔藓基质中重金属元素含量代表了汞金矿区表层土壤重金属的污染情况。苔藓基质Cd、Cu、Zn、As和Hg5种重金属平均含量分别为：1.16 mg/kg、6.65 mg/kg、257.45 mg/kg、261.26 mg/kg和100.92 mg/kg。与中国土壤环境质量标准(GB15618—1995)相比较，Hg的含量为国家三级土质量标准≤1.5 mg/kg的67.28倍，As的含量为国家三级土质量标准≤40 mg/kg的6.53倍，Cd的含量为国家三级土质量标准≤1.0 mg/kg的1.16倍。只有Cu和Zn的含量仍在国家二级土质量标准内，表明了汞金矿区土壤已受到了较严重的重金属污染。

3.2.3 苔藓植物体内金属元素相关分析

植物体中不同元素之间由于拮抗或协同作用而有相互促进或降低吸收量的可能，通过相关分析可大体反映出元素之间是否存在这种关系。若两元素之间呈显著或极显著正相关，则表明存在协同作用；若呈显著或极显著负相关，则表明有拮抗作用[21]。即分析汞金矿带上苔藓植物体内的元素相关性，就可以了解其元素的吸收累积特性与苔藓自身生长需求状况。8种苔藓植物体内的金属元素的Pearson相关性分析结果见表4。

表4 8种苔藓植物体内8种元素相关性

Tab. 4 Correlation of 8 elements in 8 different bryophytes

元素	Cd	Cu	Zn	Hg	As	Ca	Mg	Pb
Cd	1.000	−0.534	0.267	0.257	−0.792*	−0.234	0.602	0.236
Cu		1.000	−0.150	−0.401	0.229	0.145	0.026	−0.590
Zn			1.000	0.876**	0.148	0.624	0.570	0.694
Hg				1.000	0.127	0.317	0.294	0.738*
As					1.000	0.649	−0.307	0.063
Ca						1.000	0.425	0.381
Mg							1.000	0.189
Pb								1.000

* 在0.05水平上达相关;**在0.01水平上达到极显著相关。*Correlation is significant at the 0.05 level, **Correlation is significant at the 0.01 level.

由表4可以看出,汞金矿带上苔藓植物体内,Hg—Zn存在极显著的正相关,相关系数为0.876($P<0.01$);Hg—Pb存在显著正相关,相关系数为0.738($P<0.05$),表明,苔藓植物体内的汞和锌可能存在协同作用、汞和铅也可能存在协同作用;而As—Cd则存在显著负相关,相关系数为−0.792($P<0.05$),则可能是苔藓体内的砷和镉存在拮抗作用。同时,这种关系也可能是汞金带背景下,苔藓植物对不同金属元素吸收的选择性吸收与累积有关。利用苔藓植物这一特性,可在矿区生态治理种选择合适的物种进行搭配。

3.3 苔藓植物重金属富集特征

各种苔藓植物的重金属富集系数见表5。不同苔藓对6种元素富集概况如下:

表5 苔藓植物重金属的富集系数

Tab. 5 Accumulation coefficient of heavy metals in bryophytes

苔藓种类	Cd	Cu	Pb	Zn	Hg	As
L1	0.40	2.40	—	0.55	0.49	1.03
L2	0.63	1.22	1.16	0.54	1.27	1.20
L3	2.83	2.26	—	2.22	1.40	0.35
L4	0.78	5.53	—	0.43	0.18	0.22
L5	0.86	4.62	—	0.50	0.58	0.24
L6	0.54	1.20	—	0.39	0.44	0.23
L7	1.12	1.87	—	0.42	0.34	0.19
L8	0.28	7.60	—	0.22	0.37	1.05

对Cd的富集,小石藓和亮叶绢藓对Cd的富集系数大于1,表现出对Cd有富集能力。

对Cu的富集,所选取的8种藓类均表现出对Cu有一定的富集特征,其富集系数大小顺序是:黑扭口藓>刺叶真藓>皱叶毛口藓>南亚石灰藓>小石藓>亮叶绢藓>狭网真藓>狭叶小羽藓。以黑扭口藓富集系数7.6为最大值,也表明黑扭口藓对Cu的积累能力最强。

Pb的数据由于不完整,有限的数据表明狭网真藓对Pb表现出富集能力,富集系数为1.16。

对Zn的富集,仅小石藓表现出对Zn有富集能力,富集系数为2.22。

对Hg的富集,狭网真藓和小石藓表现出对Hg有富集能力,富集系数分别为1.27和1.40。

对As的富集,南亚石灰藓,狭网真藓和黑扭口藓表现出对As有富集能力,富集系数分别为1.03,1.20和1.05。

综上所述,刺叶真藓、皱叶毛口藓、狭叶小羽藓仅对一种元素表现出富集现象,表明是矿带上对重金属有抗性的物种。而小石藓、狭网真藓分别对Hg、Cd、Cu、Zn等4种重金属和Hg、As、Cu、Pb等4种重金属表现出富集,表明该两个物种为汞金矿带上具有良好耐受性物种。

4 结论与讨论

(1)贵州东南部汞金矿带上各种典型生境中苔藓植物物种多样性共13科26属58种。其中苔类3科3属3种,藓类植物10科23属55种。其中丛藓科和真藓科为优势科;真藓属、扭口藓属、石灰藓属、湿地藓属、小石藓属、毛口藓属、葫芦藓属为优势属。对比张朝晖等国内外学者系统研究的西欧喀斯特瀑布钙华[22,23]、洞穴的苔藓植物[24,25];中国喀斯特地区[26,27]、喀斯特洞穴地区的苔藓植物[28~30],同样为喀斯特地质背景的贵州东南部三一丹汞金矿带苔藓植物的优势属与上述研究区域苔藓植物的优势属的组成基本一致,如在汞金矿带上石灰藓属、扭口藓属、小

石藓属、净口藓属、毛口藓属、纽藓属、凤尾藓属、真藓属、光苔属、青藓属等10属均为西欧喀斯特地区或中国喀斯特地区常见属。这说明可能喀斯特地区苔藓植物分布与喀斯特地质背景有很大的相关性，且苔藓植物生长受地质背景影响。

此外，贵州东南部汞金矿带为喀斯特矿山石漠化和重金属污染的严重地区，其中的苔藓植物生活型方式，矮丛集的达49种，占总数的84.5%，是该矿带上最主要的生活型类型。矮丛集方式苔藓生活型虽是对干燥、贫瘠等生境的响应[31]；但对矿山的开采、冶炼，大量废石、废渣的任意倾倒，植被稀少、强光、重金属污染严重区域，矮丛集生活型生长方式的苔藓植物同样在这类生境中占优势，且具有较好适应性。

(2)对喀斯特汞金矿带上8种占据各种生境的优势苔藓植物及基质金属元素分析结果表明，不同苔藓对不同金属的吸收差异性较大；但在总体上呈现含量最高是Ca，其次是Mg，最低的是Cd的现象。苔藓基质分析显示了Hg、As、Cd等重金属含量均超出了国家三级土的质量标准。以汞含量超出的67.28倍为最大，表明了汞金矿带上土壤表层已受到了汞和复合重金属较为严重的污染。

(3)苔藓植物元素相关性分析表明，喀斯特汞金矿带上苔藓植物体内的Hg－Zn存在极显著正相关($P<0.01$)；Hg－Pb存在显著正相关($P<0.05$)；而As－Cd则存在显著负相关($P<0.05$)。表明了：矿带上苔藓植物体内的Hg－Zn，Hg－Pb存在协同；而As－Cd存在拮抗作用，也可能是喀斯特背景下汞污染和其他重金属复合污染导致苔藓选择性吸收重金属所引起。

(4)苔藓植物重金属富集特征研究表明，每种苔藓对某些元素的富集略存在差异，这与国内安丽[32]等研究结果相一致。但所有苔藓对铜的富集系数均大于1。刺叶真藓、皱叶毛口藓、狭叶小羽藓仅对一种元素表现出富集现象，是矿带上对重金属有较强抗性的物种。因此，在汞金矿开采带来的多种重金属复合污染的矿区中，可能这些苔藓种类由于自身存在某些基因，或生理结构变化使其产生了抵抗重金属毒害的防御机制。而小石藓对Hg、Cd、Cu、Zn等4种重金属的富集系数均大于1，狭网真藓对Hg、As、Cu、Pb等4种重金属的富集系数大于1，表明这两个物种为汞金矿带上具有良好耐受性物种。具有重金属耐受性植物，可以将重金属固定在植物根系或根际土壤中，从而降低土壤中重金属的迁移能力，使重金属的生物可利用性下降、重金属的生物毒性降低[33]。因此，在喀斯特背景下，汞金矿带上矿山石漠化综合治理中，可利用上述具有耐受性苔藓植物，率先来增加矿区植被覆盖，解决矿山由于缺少植被覆盖侵蚀作用加剧的难题，同时还可以遏制矿区土壤污染扩散，对矿区废渣、废石的等生境的生态恢复、矿区污染土壤的修复具有重要的现实意义。

致　谢：野外考察期间得到了中山大学李冰博士的大力支持，室内标本鉴定过程中得到了贵州师范大学苔藓植物研究室汪文云、杨再超、吴启美、谢斐、潘莎等同学的帮助，元素分析过程中得到了贵州师范大学分析测试中心秦奕鑫老师悉心指导和刘峰、姜胜军等同学的协助，谨此一并致谢！

参考文献

[1] 贵州省地方志编纂委员会. 贵州省志·有色金属工业志[M]. 贵阳：贵州人民出版社，2002：1－424.

[2] Feng X B, Qiu G L. Mercury pollution in Guizhou, Southwestern China－An overview[J]. Science of the Total Environment, 2008,400: 227－237.

[3] Limbong D, Kumampung J, Ayhuan D. Mercury Pollution Related to Artisanal Gold Mining in North Sulawesi Island, Indonesia[J]. Environmental Contamination and Toxicology, 2005,75: 989－996.

[4] Jan H M, Joyce S R, Carlos L, et al. Mercury contamination in freshwater, estuarine, and marine fishes in relation to small－scale gold mining in Suriname, South America [J]. Environmental Research Section A, 2001,86: 183－197.

[5] 仇广乐，冯新斌，王少锋，等. 贵州汞矿矿区不同位置土壤中总汞和甲基汞污染特征的研究[J]. 环境科学，2006,27(3)：550－555.

[6] 刘鹏. 贵州典型矿区环境中汞污染的研究[D]. 贵州大学，2006：1－131.

[7] 胡月红. 国内外汞污染分布状况研究综述[J]. 环境保护科学，2008,34(1)：38－41.

[8] 陈伟华，宋建波，苏孝良. 矿山石漠化——与喀斯特石漠化并存的一种石漠化类型[J]. 矿业研究与开发，2007,27(5)：39－41.

[9] Brooks R R, Yates T E, Ogden J. Copper in bryophytes from coppermine island, Hen and Chickens Group, New Zealand[J]. New Zealand Journal of Botany, 1972,11: 443－448.

[10] Hartman E L. The ecology of the "Copper Moss" *Mielichhoferia mielichhoferia* in Colorado [J]. Bryologist, 1969,72: 56－59.

[11] Samecka-Cymerman A, Kempers A J. Bioindication of gold by a quatic bryophytes[J]. Acta Hydro chemistry. Hydrobiologica, 1998,26: 90－94.

[12] 彭涛，张朝晖. 湖北省大冶市铜山口铜矿区藓类植物初步研究[J]. 贵州师范大学(自然学版)，2006,24(2)：1－6.

[13] 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.

[14] 李冰，张朝晖. 贵州烂泥沟金矿区苔藓植物及其生态修复潜力分析[J]. 热带亚热带植物学报，2008,16(6)：511－515.

[15] Pentecost A, Zhang Z H. The travertine flora of Juizhaigou and Munigou, China, and its relationship with calcium carbonate deposition[J]. Cave and Karst Science, 2000, 27(2): 71—78.

[16] Pentecost A, Zhang Z H. Response of bryophytes to exposure and water availability on some European travertines [J]. Journal of Bryology, 2006, 28: 21—26.

[17] Zhang Z H, 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.

[18] 黄根深,杜宜渝. 三一丹汞矿带中的微细粒浸染型金矿地质特征及矿床成因探讨[J]. 贵州地质, 1993, 10(1): 1—9.

[19] 李红阳,高振敏,杨竹森,等. 贵州丹寨卡林型金矿床地球化学特征[J]. 地质科学, 2002, 37(1): 1—7.

[20] Mattina M I, Lannucci B W, Mussante C, et al. Concurrent plant up take of heavy metals and persistent organic pollutanta from soil[J]. Environment pollution, 2003, 124: 375—378.

[21] 曾曙才,谢正生,陈北光. 几种林木植物体及枯落物的微量元素分析[J]. 华南农业大学学报·自然科学版, 2002, 23(2): 69—61.

[22] 张朝晖,陈家宽,艾伦. 培特客斯. 法国阿尔卑斯山(Mt. Alps', France)溪流型喀斯特瀑布水生苔藓植物群落生态研究[J]. 中国岩溶, 2007, 26(1): 24—30.

[23] 张朝晖, Pentecost A. 英国钙华苔藓植物区系特征及其主要钙华沉积类型[J]. 中国岩溶, 2002, 21(1)36—43.

[24] 张朝晖, Pentecost A. 法国阿尔卑斯—罗讷(Rhone—Alps)岩溶洞穴弱光带苔藓植物群落研究[J]. 中国岩溶, 2001, 20(3) 237—240.

[25] 张朝晖, Pentecost A. 英格兰洞穴苔藓植物区系特征及其岩溶沉积研究[J]. 西北植物学报 2002, 22 (2): 359—367.

[26] 张朝晖,陈家宽. 桂西南喀斯特瀑布水生苔藓植物生物多样性与生态沉积类型研究[J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 603—611.

[27] 张朝晖. 黄果树喀斯特区域苔藓植物名录[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1997, 15(1): 24—34.

[28] 张朝晖,王智慧,祝安. 黄果树喀斯特洞穴群苔藓植物岩溶的初步研究[J]. 中国岩溶, 1996, 15(3)224—231.

[29] 张朝晖,彭涛,李晓娜,等. 中国昆明地区岩溶洞穴洞口带苔藓植物研究[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3)229—233.

[30] 张朝晖,李晓娜,彭涛,等. 中国广西岩溶洞穴萤光苔类新记录: 光苔和艳绿光苔(苔纲,光苔科)[J]. 中国岩溶, 2004, 23(2)154—157.

[31] 吴鹏程. 苔藓植物生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 1—357.

[32] 安丽,曹同,俞膺浩. 不同苔藓植物对重金属富集能力的比较[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2006, 35(6): 64—70.

[33] Boularbah A, Schwartz C, Bitton G, et al. Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: Assessment of metal accumulation and toxicity in plants[J]. Chemosphere, 2006, 63(5): 811—817.

Bryophytes and its heavy metal accumulation in mercury-gold ore belt in the karst area of southeast Guizhou

LIU Rong-xiang[1], ZHANG Zhao-hui[1,2]

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

Abstract: The San-Dan (Sandu-Danzhai) Mercury-Gold Ore Belt in the karst area of southeast Guizhou belongs to the Carlin-type mercury-gold deposits. Long-term mercury ore and gold ore exploiting and smelting led to serious environmental pollution in San-Dan Mercury Belt. Based on extensive investigation of the bryophytes in the area, it is discovered that the bryoflora consists of 58 species and 26 genera in 13 families. The dominant families are Bryaceae and Pottiaceae. The concentration of Cd, Pb, Cu, Zn, Ca, Mg, As and Hg in bryophytes and their substrates are measured. *Hydrogonium consanguineum*, *Bryum algovicum*, *Weisia controversa*, *Bryum lonchocaulon*, *Trichostomum crispulum*, *Haplocladium angustifolium*, *Entodon aeruginosus and Entodon aeruginosus* are the dominant species in Mercury-Gold Belt. The results show that Ca concentration is the highest, Mg the second and the Cd the lowest in the plants of eight main species of bryophytes. Hg-Zn shows prefect correlation at 0.01 level, Hg-Pb shows coefficient at 0.05 level, but As-Cd shows negative correlation at 0.05 level. Based on the analysis on the accumulation coefficient, all the eight species have ability to accumulate Cu. *Weisia controversa* and *Bryum algovicum* could accumulate more than four types of heavy metals. It indicates that these two species have strong tolerance to contamination by Mercury-Gold ore belt and is good materials to be used for bioremediation and comprehensive treatment of abandoned mining site.

Key words: bryophytes; karst; accumulation coefficient; heavy mental pollution; mercury-gold ore belt