

桂西北有色金属矿区苔藓植物的主要类群及影响因素分析

何世杰, 覃 春, 闭华堂, 莫奇香, 韦兰新, 覃勇荣*

河池学院化学与生物工程学院, 广西 河池

收稿日期: 2025年6月20日; 录用日期: 2025年7月18日; 发布日期: 2025年8月15日

摘 要

本研究旨在探究桂西北有色金属矿区苔藓植物的主要类群及其分布的主要影响因素, 说明苔藓植物在重金属污染环境修复中的应用潜力。通过实地调研, 采集了矿区苔藓植物的常见种类, 测定了苔藓植物部分优势种群及其生长基质的理化特性及Cd、Cu、Pb、Zn、Mn五种重金属元素的含量, 并对苔藓植物与生长基质重金属含量的相关性进行了比较分析。结果表明: (1) 桂西北有色金属矿区已鉴定的苔藓植物共有29科52属89种, 优势科为真藓科、丛藓科、羽藓科、金发藓科、木灵藓科和珠藓科, 优势属为真藓属、对齿藓属、扭口藓属、泽藓属和小金发藓属, 优势种为毛尖卷柏藓、黄叶凤尾藓、云南真藓和短叶对齿藓; (2) 影响桂西北有色金属矿区苔藓植物种群分布的主要因素为生长基质的理化特性和重金属污染状况; (3) 部分苔藓植物对Cd、Cu、Pb和Mn具有较强的富集能力, 可作为土壤重金属污染的植物修复材料或指示生物。由此可见, 苔藓植物对重金属胁迫具有较强的耐受性和一定的富集能力, 部分苔藓植物在桂西北有色金属矿区土壤重金属污染生态修复中具有较大的应用潜力。

关键词

桂西北, 有色金属矿区, 重金属污染, 苔藓植物, 主要类群

Analysis of Main Groups and Influencing Factors of Bryophyta in Non-Ferrous Metal Mining Area of Northwest Guangxi

Shijie He, Chun Qin, Huatang Bi, Qixiang Mo, Lanxin Wei, Yongrong Qin*

School of Chemistry and Biological Engineering, Hechi University, Hechi Guangxi

Received: Jun. 20th, 2025; accepted: Jul. 18th, 2025; published: Aug. 15th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 何世杰, 覃春, 闭华堂, 莫奇香, 韦兰新, 覃勇荣. 桂西北有色金属矿区苔藓植物的主要类群及影响因素分析[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(8): 1099-1114. DOI: 10.12677/aep.2025.158123

Abstract

The purpose of this study is to explore the main groups of bryophytes in the non-ferrous metal mining areas of northwest Guangxi and the main influencing factors on their distribution, and to demonstrate the potential application of bryophytes in the remediation of heavy metal-polluted environments. Through field research, common species of bryophytes in the mining area were collected, and the physicochemical properties of some dominant populations of bryophytes and their growth substrates, as well as the content of five heavy metal elements Cd, Cu, Pb, Zn, and Mn, were determined. The correlation between bryophytes and heavy metal content in growth substrates was compared and analyzed. The results showed that: (1) There are a total of 89 species of bryophytes belonging to 52 genera in 29 families identified in the non-ferrous metal mining area of northwest Guangxi. The dominant families are Bryaceae, Pottiaceae, Thuidiaceae, Polytrichaceae, Orthotrichaceae, and Bartramiaceae; the dominant genera are *Bryum*, *Didymodon*, *Barbula*, *Philonotis*, and *Pogonatum*; the dominant species are *Racopilum aristatum*, *Fissidens zippelianus*, *Bryum yunnanense*, and *Didymodon tectorum*; (2) The main factors affecting the distribution of bryophyte populations in the non-ferrous metal mining areas of northwest Guangxi are the physicochemical properties of the growth substrate and heavy metal pollution status; (3) Some bryophytes have strong enrichment ability for Cd, Cu, Pb, and Mn, which can be used as phytoremediation materials or indicator organisms for soil heavy metal pollution. From this, it can be seen that bryophytes have strong tolerance and certain enrichment ability to heavy metal stress. Some bryophytes have great potential for application in the ecological restoration of soil heavy metal pollution in the non-ferrous metal mining areas of northwest Guangxi.

Keywords

Northwest Guangxi, Non-Ferrous Metal Mining Areas, Heavy Metal Pollution, Bryophytes, Dominant Taxonomic Groups

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国工业化进程的推进,对有色金属矿产的需求不断增加,但由于矿物资源的过度开采、管理不善等诸多原因,矿区周边环境污染比较严重[1]。根据《中国耕地地球化学调查报告(2015年)》,重金属中度-重度污染或超标的耕地覆盖面积3488万亩,轻微-轻度污染或超标的耕地覆盖面积7899万亩,每年因土壤重金属污染使粮食至少减产一千万吨,年经济至少损失200亿元人民币[2]。桂西北曾被称为有色金属之乡,但其生态环境保护面临诸多难题。因为重金属具有较强的生物毒性,难以降解,可以通过生物吸收、富集和逐级放大,并通过食物链的传递,所以对人体健康构成潜在的威胁[3],因此,重金属污染治理的意义重大。

重金属污染土壤(Heavy metal-contaminated soil)的修复有物理法、化学法和生物法[4],其中,生物法中的植物修复具有成本低廉、操作简单、效果显著、环境友好等特点,可以避免二次污染[5]。在过去许多关于重金属污染土壤植物修复的研究中,人们主要聚焦于超富集植物的筛选、作用机制及其开发利用,在相关研究中,人们对蕨类植物和种子植物的研究比较深入,对苔藓植物的研究比较少,随着人们对苔藓植物的研究不断深入,发现苔藓植物在生态环境修复方面具有较大的潜力[6]。

苔藓植物(Bryophyta)是高等植物中较为原始的类群,其形态结构简单,没有分化出真正的根和维管束组织,叶片仅由单层细胞或几层细胞构成。由于苔藓植物具有特殊的形态结构,使其对重金属具有较强的吸附和富集能力[7]-[9],可以有效反映周围环境的污染程度[10],所以,在环境监测等相关领域,人们常利用苔藓植物来检测大气和水体环境中的重金属含量及其分布特征[11]-[14]。

在苔藓植物的相关研究中,研究者发现有色金属矿区分布的苔藓植物具有较为完整的群落结构,可以在重金属污染的生境中完成生活史,说明这些苔藓植物具备了较为完整重金属胁迫应答机制[15]-[17]。关于重金属胁迫对苔藓植物的毒害机理及苔藓植物的响应机制,研究者进行了一系列实验研究,结果表明,重金属胁迫可以使苔藓植物细胞膜系统的通透性增加,脂膜过氧化加剧,超微结构破坏,光合作用和呼吸作用受阻,从而使其生长发育受到抑制,直至死亡[18]-[20]。因为苔藓植物对大气污染物比较敏感,可以对环境污染物进行吸附和富集,部分苔藓植物对重金属具有较强的耐受性,所以苔藓植物常被用作环境监测的指示植物或土壤重金属污染修复的先锋植物[21][22]。

虽然,人们对苔藓植物进行了一些相关的研究,但关于桂西北有色金属矿区苔藓植物的深入调查研究鲜有文献报道,本研究的开展,不仅可以丰富苔藓植物研究的内容,还可以为有色金属矿区土壤重金属污染的生态修复提供一定的理论支持。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

本研究的区域主要选择在地处桂西北的河池市有色金属矿产比较集中且开采时间较长的县区,地理坐标为 106°34'~109°09' E, 23°41'~25°37' N, 境内喀斯特地貌分布广泛, 占其地域面积的 2/3 以上, 为典型的亚热带季风气候区, 境内最高峰海拔 1693 m, 年均日照为 1447~1600 h, 年均气温为 16.9℃~21.5℃, 年均降雨量为 1200~1600 mm, 且集中于夏季[23]。

2.2. 样品采集及处理

2023 年 7 月至 2025 年 3 月,在河池市宜州区龙头乡龙头锰矿,南丹县五一矿、长坡矿、拉么村茶山矿等矿区进行实地调研,并采集生长状况良好、生物量较大的苔藓植物及其生长基质样品。采样时,利用 GPS 进行定位,记录采样点的地理坐标及苔藓植物生境的相关信息。将采集的苔藓植物生长基质去除砾石等杂物,室内自然风干,捣碎,分别过 20 目、60 目、100 目标准筛,然后放在阴凉干燥处保存备用[24]。

将采集的苔藓植物样品用清水洗涤干净,再用去离子水洗涤 3 次,超声 20 min,沥干其表面水分后,将苔藓植物分为两部分,其中一部分用于苔藓植物的形态结构观察及物种鉴定,另一部分用于重金属含量测定。用于重金属含量测定的苔藓植物样品,放入干净的牛皮纸袋内,置于 60℃ 的电热恒温鼓风干燥箱中烘至恒重,研成粉末,过 60 目标准筛,做好相应编号后,放入样品袋在阴凉干燥处保存备用[24]。

2.3. 苔藓植物的鉴定

将新鲜苔藓标本置于体视显微镜的载物台上,观察其形态结构并拍照记录,随后取苔藓的一片叶子制成临时装片,在光学显微镜下,依次用 4×、10×、40×、100× 倍的物镜拍照,观察并记录其叶片基部、中部、顶部、边缘及中肋形态等相关信息,并借助《云南植物志》《中国高等植物彩色图鉴第一卷苔藓植物》《贵州苔藓植物志》《中国苔藓志》等专业图书资料对苔藓植物进行鉴定。

2.4. 相似性系数的计算

相似性系数的运用,旨在评估不同地域(即样本点)之间苔藓植物种群构成的相似性水平,相似性系数

越高,表明两个地区(样点)之间苔藓植物物种组成越接近,其计算公式为: $S = [2c/(a + b)] \times 100\%$, 式中 S 为相似性系数, a 为样点 A 的种数, b 为样点 B 的种数, c 为样点 A 和 B 共有的种数[25]。

2.5. 生长基质理化性质的测定

苔藓植物生长基质的 pH 值测定采用电位法(水土比为 2.5:1), 风干系数的测定采用重量法, 有机质含量测定采用重铬酸钾氧化 - 分光光度法, 全氮含量的测定采用凯氏定氮法, 有效氮含量测定采用碱解扩散法, 全磷含量的测定采用氢氧化钠熔融 - 钼锑抗比色法, 速效磷含量测定采用碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗分光光度法[26]。

2.6. 重金属含量的测定及污染评价

参考李燕群等人[27]的方法, 对苔藓植物及其生长基质的重金属含量进行测定。分别使用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和地累计指数法, 对苔藓植物生长基质的重金属污染程度进行评价[28]-[30]。重金属富集系数计算公式为: $C = \text{植物内某种重金属含量} / \text{该植物生长基质中某元素的背景值}$ [31]。

2.7. 数据处理

每个样品的检测均做 3 个重复, 最终结果通过计算均值获得, 并以“平均值 $\pm$ 标准差(SD)”的形式予以呈现。用 Excel 2020 和 SPSS 22.0 对实验数据进行处理分析, 用 LSD 法对实验数据的差异显著性进行分析, 用 Origin 9.0 绘制数据图。

3. 结果与分析

3.1. 桂西北有色金属矿区苔藓植物的主要类群

通过对采集的 122 份苔藓植物样品进行初步鉴定, 共鉴定出苔藓植物 29 科 52 属 89 种(具体见表 1), 其中, 苔类有 3 科 3 属 3 种, 藓类有 26 科 49 属 86 种。

真藓科和丛藓科的苔藓植物种类数量最多, 分别占已鉴定苔藓植物总数的 21.3%和 12.3%; 其次为羽藓科、金发藓科、木灵藓科和珠藓科, 分别占已鉴定苔藓植物总数的 7.8%、6.7%、5.6%和 5.6%; 其余苔藓植物的种类数量较少, 仅占苔藓植物总数的 1.1%~2.2%。在本研究中, 真藓属为真藓科的常见属, 其物种数占真藓科物种数的 68.4%; 对齿藓属和扭口藓属为丛藓科的常见属, 两者均占丛藓科物种总数的 27.3%; 小金发藓属为金发藓科的常见属, 其物种数占金发藓科物种总数的 60%; 泽藓属为珠藓科的常见属, 其物种数占珠藓科物种总数的 100%; 在所采集的苔藓植物样品中, 较为常见的苔藓植物为平蒴藓 (*Plagiobryum zieri*)和云南真藓(*Bryum yuennanense*); 相比较而言, 苔类植物种类较少, 其原因有待进一步研究。

Table 1. Identification results of bryophytes in the nonferrous metal mining area of northwest Guangxi

表 1. 桂西北有色金属矿区苔藓植物的鉴定结果

科	属	种
白齿藓科 Leucodontaceae	白齿藓属 <i>Leucodon</i> Schwaegr.	白齿藓 <i>Leucodon sciuroides</i> (Hedw.) Schwägr.
	疣齿藓属 <i>Scabridens</i> Bartr.	疣齿藓 <i>Scabridens sinensis</i> E. B. Bartram
薄罗藓科 Leskeaceae	拟草藓属 <i>Pseudoleskeopsis</i> Broth.	拟草藓 <i>Pseudoleskeopsis zippelii</i> (Dozy & Molk.) Broth.
	薄罗藓属 <i>Leskea</i> Hedw.	粗肋薄罗藓 <i>Leskea scabrinervis</i> Broth. & Paris

续表

丛藓科 Pottiaceae	对齿藓属 <i>Didymodon</i> Hedw.	北地对齿藓 <i>Didymodon fallax</i> (Hedw.) R. H. Zander 短叶对齿藓 <i>Didymodon tectorus</i> (Müll. Hal.) Saito 硬叶对齿藓 <i>Didymodon rigidulus</i> Hedw.
	净口藓属 <i>Gymnostomum</i> Nees & Hornsch.	净口藓 <i>Gymnostomum calcareum</i> Nees & Hornsch.
	扭口藓属 <i>Barbula</i> Hedw.	小扭口藓 <i>Barbula indica</i> (Hook.) Spreng. 扭口藓 <i>Barbula unguiculata</i> Hedw. 长尖扭口藓 <i>Barbula ditrichoides</i> Broth.
	舌叶藓属 <i>Scopelophila</i> (Mitt.) Lindb.	剑叶藓 <i>Scopelophila cataractae</i> Broth. 舌叶藓 <i>Scopelophila ligulata</i> (Spruce) Spruce
	湿地藓属 <i>Hyophila</i> Brid.	卷叶湿地藓 <i>Hyophila involuta</i> (Hook.) A. Jaeger 湿地藓 <i>Hyophila javanica</i> (Nees & Blume) Brid.
	小墙藓属 <i>Weisiopsis</i> Broth.	东亚小墙藓 <i>Weisiopsis anomala</i> (Broth. et Par.) Broth.
地萼苔科 Geocalycaceae	异萼苔属 <i>Heteroscyphus</i> Schiffn.	四齿异萼苔 <i>Heteroscyphus</i> (Nees) Schiffin.
地钱科 Marchantiaceae	地钱属 <i>Marchantia</i> L.	地钱 <i>Marchantia polymorpha</i> L.
凤尾藓科 Fissidentaceae	凤尾藓属 <i>Fissidens</i> Hedw.	厄氏凤尾藓 <i>Fissidens esquirolii</i> Thér. 黄叶凤尾藓 <i>Fissidens zippelianus</i> Dozy & Molk. Zoll.
高领藓科 Glyphomitriaceae	高领藓属 <i>Glyphomitrium</i> Brid.	滇西高领藓 <i>Glyphomitrium grandirete</i> Broth. 尖叶高领藓 <i>Glyphomitrium acuminatum</i> Broth.
壶藓科 Splachnaceae	小壶藓属 <i>Tayloria</i> Hook.	南亚小壶藓 <i>Tayloria indica</i> Mitt.
葫芦藓科 Funariaceae	葫芦藓属 <i>Funaria</i> Hedw.	葫芦藓 <i>Funaria hygrometrica</i> Hedw.
金发藓科 Polytrichaceae	拟金发藓属 <i>Polytrichastrum</i> G. Sm.	黄尖拟金发藓 <i>Polytrichastrum xanthopilum</i> (Wilson ex Mitt.) G. L. Sm.
		半栉小金发藓 <i>Pogonatum subfuscum</i> Broth.
	小金发藓属 <i>Pogonatum</i> P. Beauv.	东亚小金发藓 <i>Pogonatum inflexum</i> (Lindb.) Sande Lac. 全缘小金发藓 <i>Pogonatum perichaetiale</i> (Mont.) A. Jaeger
	仙鹤藓属 <i>Atrichum</i> P. Beauv.	东亚仙鹤藓 <i>Atrichum yakushimense</i> (Horik.) Mizut.
	栅孔藓属 <i>Palisadula</i> Toyama	栅孔藓 <i>Palisadula chrysophylla</i> Toyama
锦藓科 Sematophyllaceae	鞭枝藓属 <i>Isocladiella</i> Dixon 拟疣胞藓属 <i>Clastobryopsis</i>	鞭枝藓 <i>Isocladiella surcularis</i> (Dixon) B. C. Tan & Mohamed 拟疣胞藓 <i>Clastobryopsis planula</i> M. Fleisch.
卷柏藓科 Racopilaceae	卷柏藓属 <i>Racopilum</i> P. Beauv.	薄壁卷柏藓 <i>Racopilum cuspidigerum</i> Ångstr. 毛尖卷柏藓 <i>Racopilum aristatum</i> Mitt.

续表

绢藓科 Entodontaceae	绢藓属 <i>Entodon</i> Mull. Hal.	绿叶绢藓 <i>Entodon viridulu</i> Card., Bull.Soc.Bot.Geneve ser.
柳叶藓科 Amblystegiaceae	牛角藓属 <i>Cratoneuron</i> (Sull.) Spruc.	牛角藓 <i>Cratoneuron filicinum</i> (Hedw.) Spruce
	细柳藓属 <i>Platydictya</i> Berk.	细柳藓 <i>Platydictya jungermannioides</i> (Brid.) Crum
	细湿藓属 <i>Campyllum</i> (Sull.) Loesk.	粗毛细湿藓 <i>Campyllum hispidulum</i> (Brid.) Mitt., Jour. Linn. Soc. Bot.
棉藓科 Plagiotheciaceae	棉藓属 <i>Plagiothecium</i> B. S. G.	长喙棉藓 <i>Plagiothecium succulentum</i> (Wilson) Lindb.
木灵藓科 Orthotrichaceae	木灵藓属 <i>Orthotrichum</i> Hedw.	木灵藓 <i>Orthotrichum anomalum</i> Hedw.
	藓属 <i>Macromitrium</i> Brid.	钝叶藓 <i>Macromitrium japonicum</i> Dozy & Molk.
		阔叶藓 <i>Macromitrium holomitrioides</i> Nog.
		中华藓 <i>Macromitrium cavaleriei</i> Cardot & Thér.
	直叶藓属 <i>Macrocoma</i> (Müll. Hal.) Grout	细枝直叶藓 <i>Macrocoma sullivantii</i> (Müll. Hal.) Grout
		直叶藓细枝亚种 <i>Macrocoma tenue</i> subsp. <i>sullivantii</i> (Müll. Hal.) Vitt
牛舌藓科 Anomodontaceae	牛舌藓属 <i>Anomodon</i> Hook. & Taylor	小牛舌藓原亚种 <i>Anomodon minor</i> subsp. <i>minor</i> (Hedw.) Lindb. 小牛舌藓 <i>Anomodon minor</i> Lindb.
曲尾藓科 Dicranaceae	曲尾藓属 <i>Dicranum</i> Hedw.	日本曲尾藓 <i>Dicranum japonicum</i> Mitt.
蛇苔科 Conocephalaceae	小蛇苔属 <i>Sandea</i> Lindb.	小蛇苔 <i>Sandea japonica</i> Steph. ex Yoshin.
提灯藓科 Mniaceae	提灯藓属 <i>Mnium</i> Hedw.	长叶提灯藓 <i>Mnium lycopodioides</i> Schwägr.
	匍灯藓属 <i>Plagiomnium</i> T. J. Kop.	全缘匍灯藓 <i>Plagiomnium integrum</i> T. J. Kop.
	毛灯藓属 <i>Rhizomnium</i> (Mitt. ex Broth.) T. J. Kop.	大叶毛灯藓 <i>Rhizomnium magnifolium</i> T. J. Kop.
叶苔科 Jungermanniaceae	被蒴苔属 <i>Nardia</i> Gray	被蒴苔 <i>Nardia compressa</i> (Hook.) Gray
隐蒴藓科 Cryphaeaceae	隐蒴藓属 <i>Cryphaea</i> Mohr.	中华隐蒴藓 <i>Cryphaea sinensis</i> E. B. Bartram
油藓科 Hookeriaceae	白藓属 <i>Leucomium</i> Mitt.	白藓 <i>Leucomium strumosum</i> (Hornsch.) Mitt.
疣冠苔科 Aytoniaceae	石地钱属 <i>Reboulia</i> Raddi.	石地钱 <i>Reboulia hemisphaerica</i> (L.) Raddi
羽藓科 Thuidiaceae	麻羽藓属 <i>Claopodium</i> (Lesq. & James) Renauld & Cardot	细麻羽藓 <i>Claopodium gracillimum</i> (Cardot & Thér.) Nog.
		齿叶麻羽藓 <i>Claopodium prionophyllum</i> (Müll. Hal.) Broth.
	小羽藓属 <i>Haplocladium</i> R. Watan. et Iwats.	<i>Thuidiaceae</i> sp. 细叶小羽藓 <i>Haplocladium microphyllum</i> (Hedw.) Broth.

续表

		东亚小羽藓 <i>Haplocladium strictulum</i> (Cardot) Reimers
		卵叶小羽藓 <i>Haplocladium discolor</i> (Par. et Broth.) Broth.
		<i>Thuidiaceae</i> sp.
真藓科 Bryaceae	红叶藓属 <i>Bryoerythrophyllum</i> P. C. Chen	红叶藓 <i>Bryoerythrophyllum recurvirostrum</i> (Hedw.) P. C. Chen
	平蒴藓属 <i>Plagiobryum</i> Lindb.	平蒴藓 <i>Plagiobryum zieri</i> (Dicks. ex Hedw.) Lindb.
	缺齿藓属 <i>Mielichhoferia</i> Nees & Hornsch.	缺齿藓 <i>Mielichhoferia mielichhoferi</i> (Hook.) Wijk & Marg.
		中华缺齿藓 <i>Mielichhoferia sinensis</i> Dixon.
	丝瓜藓属 <i>Pohlia</i> Hedw.	黄丝瓜藓 <i>Pohlia nutans</i> Lindb.
	银藓属 <i>Anomobryum</i> Schimp.	银藓 <i>Anomobryum filiforme</i> (Dicks.) Husn.
		刺叶真藓 <i>Bryum lonchocaulon</i> Müll. Hal.
		丛生真藓 <i>Bryum caespiticium</i> Hedw.
		黄色真藓 <i>Bryum pallescens</i> Schleich. ex Schwägr.
		宽叶真藓 <i>Bryum funkii</i> Schwägr.
	真藓属 <i>Bryum</i> Hedw.	瘤根真藓 <i>Bryum bornholmense</i> Wink. & R. Ruthe
		拟三列真藓 <i>Bryum pseudotriquetrum</i> (Hedw.) G. Gaertn., B. Mey. & Scherb.
		柔叶真藓 <i>Bryum cellulare</i> Hook.
		弯叶真藓 <i>Bryum recurvulum</i> Mitt.
		细叶真藓 <i>Bryum capillare</i> Hedw.
		狭网真藓 <i>Bryum algovicum</i> Sendtn. ex Müll. Hal.
		圆叶真藓 <i>Bryum cyclophyllum</i> (Schwägr.) Bruch & Schimp.
		云南真藓 <i>Bryum yuennanense</i> Broth.
		真藓 <i>Bryum argenteum</i> Hedw.
		泽藓 <i>Philonotis fontana</i> Brid.
珠藓科 Bartramiaceae	泽藓属 <i>Philonotis</i>	密叶泽藓 <i>Philonotis hastata</i> Wijk & Marg.
		小泽藓 <i>Philonotis calomicra</i> Broth.
		<i>Philonotis</i> sp.
珠藓科 Bartramiaceae	泽藓属 <i>Philonotis</i> Brid.	珠状泽藓 <i>Philonotis bartramioides</i> (Griff.) D. G. Griffin & W. R. Buck
紫萼藓科 Grimmiaceae	紫萼藓属 <i>Grimmia</i> Ehrh. ex Hedw.	高山紫萼藓 <i>Grimmia montana</i> Bruch & Schimp.
星孔苔科 Cleveaceae		<i>Cleveaceae</i> Cavers sp.

注: *sp.* 为尚未鉴定的物种。

3.2. 苔藓植物生长基质的基本理化特性

由表 2 知,不同采集点苔藓植物生长基质的风干系数为 94.30%~99.30%, pH 值为 3.45~8.58,全氮含量为 0.57~4.06 g/kg,碱解氮含量为 22.75~277.55 mg/kg,全磷含量为 0.04~8.40 g/kg,速效磷含量为 0.94~196.03 mg/kg,有机质含量为 1.22~63.75 g/kg,大部分采集点苔藓植物生长基质的理化性质差异较为显著。

Table 2. Basic physical and chemical characteristics of moss plant growth matrix
表 2. 苔藓植物生长基质的基本理化特性

样品编号	风干系数%	pH	全氮 g/kg	碱解氮 mg/kg	全磷 g/kg	速效磷 mg/kg	有机质 g/kg
GJ2	98.77 ± 0.01 ^b	6.63 ± 0.01 ⁱ	2.45 ± 0.05 ^g	85.40 ± 1.00 ⁱ	1.74 ± 0.25 ^h	5.67 ± 0.40 ⁱ	42.29 ± 0.23 ^f
GJ4	98.60 ± 0.01 ^c	5.77 ± 0.00 ⁿ	0.57 ± 0.00 ^o	28.70 ± 0.00 ^p	0.95 ± 0.06 ⁱ	3.25 ± 0.42 ^j	22.37 ± 0.53 ^k
LT3	98.60 ± 0.01 ^c	7.60 ± 0.00 ^e	1.01 ± 0.07 ^m	29.05 ± 2.47 ^p	2.27 ± 0.06 ^g	9.28 ± 0.00 ^h	29.04 ± 0.08 ⁱ
LT10	96.89 ± 0.06 ^g	7.33 ± 0.00 ^g	1.55 ± 0.01 ^k	56.35 ± 0.50 ^m	2.88 ± 0.23 ^f	4.26 ± 0.23 ^{ij}	26.08 ± 0.13 ^j
LT12	98.26 ± 0.04 ^d	7.36 ± 0.00 ^{fg}	1.82 ± 0.05 ^j	47.60 ± 0.00 ⁿ	0.32 ± 0.00 ^{jk}	11.64 ± 0.9 ^h	33.13 ± 0.42 ^h
LT13	98.52 ± 0.00 ^{ec}	8.40 ± 0.06 ^c	0.865 ± 0.01 ⁿ	34.30 ± 0.99 ^o	0.28 ± 0.01 ^{jk}	0.94 ± 0.01 ^j	1.22 ± 0.09 ^m
LT14	96.995 ± 0.01 ^f	8.58 ± 0.01 ^a	2.26 ± 0.01 ^h	107.09 ± 0.00 ^g	0.04 ± 0.01 ^k	1.85 ± 0.01 ^j	38.75 ± 0.91 ^g
LT19	95.72 ± 0.00 ^l	8.33 ± 0.03 ^d	4.06 ± 0.01 ^a	203.00 ± 0.01 ^c	0.39 ± 0.01 ^{jk}	1.69 ± 0.01 ^j	29.49 ± 0.40 ⁱ
LT20	96.90 ± 0.01 ^g	8.485 ± 0.06 ^b	2.48 ± 0.01 ^g	81.55 ± 0.50 ^j	0.52 ± 0.01 ^j	1.25 ± 0.02 ^j	15.76 ± 0.23 ^l
LT21	95.16 ± 0.04 ⁿ	8.40 ± 0.05 ^c	2.27 ± 0.01 ^h	157.49 ± 0.01 ^e	0.18 ± 0.00 ^{jk}	1.67 ± 0.01 ^j	15.50 ± 0.22 ^l
GF2	94.39 ± 0.04 ^o	5.89 ± 0.00 ^m	3.81 ± 0.00 ^d	277.55 ± 3.46 ^a	5.00 ± 0.28 ^c	29.40 ± 1.46 ^f	63.75 ± 0.98 ^a
LQ	96.17 ± 0.01 ^l	6.60 ± 0.01 ⁱ	3.61 ± 0.01 ^c	78.05 ± 1.48 ^k	3.32 ± 0.21 ^e	16.06 ± 0.43 ^g	50.68 ± 0.93 ^e
WY	95.44 ± 0.01 ^m	4.745 ± 0.01 ^o	2.17 ± 0.03 ⁱ	265.65 ± 1.49 ^b	4.07 ± 0.21 ^d	33.42 ± 0.78 ^e	52.94 ± 0.21 ^d
LZ1	96.73 ± 0.05 ^h	6.28 ± 0.04 ^l	3.53 ± 0.01 ^d	136.49 ± 2.97 ^f	2.05 ± 0.02 ^h	66.76 ± 0.10 ^c	55.87 ± 0.56 ^c
LZ2	99.32 ± 0.01 ^a	6.34 ± 0.04 ^k	1.14 ± 0.02 ^l	31.50 ± 2.99 ^{op}	2.67 ± 0.03 ^f	38.21 ± 1.22 ^d	28.98 ± 1.75 ⁱ
LZ3	98.49 ± 0.06 ^d	6.49 ± 0.00 ^j	1.76 ± 0.00 ^j	22.75 ± 0.50 ^q	6.43 ± 0.16 ^b	102.06 ± 2.39 ^b	51.49 ± 0.18 ^e
LZ4	96.49 ± 0.09 ^j	3.45 ± 0.00 ^p	2.99 ± 0.03 ^e	65.44 ± 0.50 ^l	8.40 ± 0.17 ^a	101.25 ± 5.28 ^b	54.58 ± 0.22 ^c
ZL	97.06 ± 0.02 ^f	7.40 ± 0.00 ^f	0.97 ± 0.00 ^m	91.70 ± 1.00 ^h	4.13 ± 0.15 ^d	196.03 ± 2.14 ^a	58.90 ± 0.71 ^b
CP	96.57 ± 0.01 ⁱ	6.80 ± 0.00 ^h	2.79 ± 0.04 ^f	175.69 ± 1.00 ^d	4.69 ± 0.41 ^c	15.24 ± 0.32 ^g	60.18 ± 0.74 ^b

注: ① 样品编号中 GJ、LT、GF、LQ、WY、LZ、ZL、CP 分别表示采样点更架、龙头锰矿、高峰地磅、龙泉选矿厂、五一矿、六寨雅陇、者乐、长坡矿, 下同; ② 同一列数据不同字母表示差异显著。

3.3. 苔藓植物优势种群生长基质的重金属含量

不同采集点苔藓植物生长基质重金属含量的测定结果见表 3。由此得知,Cd 含量为 1.28~45.42 mg/kg,Cu 含量为 3.66~29.76 mg/kg,Pb 含量为 0.55~8395.16 mg/kg,Zn 含量为 59.82~22674.66 mg/kg,Mn 含量为 94.67~80016.95 mg/kg; 从被测重金属元素含量的平均值来看,苔藓植物生长基质重金属含量的高低排序为 Mn>Zn>Pb>Cu、Cd。与河池市土壤背景值[32]相比,各采集点苔藓植物生长基质中的 Cd 含量均远超当地土壤背景值(0.12 mg/kg),大部分采集点苔藓植物生长基质中的 Pb、Zn、Mn 含量也远超当地土壤重金属含量的背景值。

Table 3. Heavy metal content of bryophytes growth matrix in non-ferrous metal mining area northwest Guangxi
表 3. 桂西北有色金属矿区苔藓植物生长基质的重金属含量(mg/kg)

样点编号	Cd	Cu	Pb	Zn	Mn
GJ2	2.81 ± 0.10 ^j	17.71 ± 0.03 ^c	112.89 ± 148.34 ^g	285.82 ± 26.07 ^{ghi}	4855.24 ± 164.69 ^g
GJ4	2.41 ± 0.10 ^j	3.70 ± 0.26 ^l	382.21 ± 7.28 ^d	563.64 ± 13.93 ^{17gh}	329.87 ± 18.77 ^h
LT3	3.17 ± 0.05 ^{ij}	4.46 ± 0.0 ^{lk}	168.97 ± 0.57 ^g	184.23 ± 5.30 ^{hi}	3627.05 ± 17.33 ^g
LT10	6.24 ± 0.02 ^f	7.35 ± 0.05 ^{gh}	526.23 ± 0.18 ^c	651.73 ± 10.27 ^g	25575.43 ± 1783.50 ^e
LT12	22.82 ± 0.94 ^c	4.41 ± 0.06 ^k	161.93 ± 3.67 ^g	11455.58 ± 749.42 ^b	1660.57 ± 44.78 ^h
LT13	1.29 ± 0.04 ^k	3.66 ± 0.03 ^l	0.82 ± 0 ^h	121.78 ± 1.74 ^{hi}	14637.78 ± 67.89 ^f
LT14	2.89 ± 0.11 ^j	7.16 ± 0.01 ^{gh}	1.34 ± 0.01 ^h	116.90 ± 1.12 ^{hi}	51612.85 ± 915.72 ^c
LT19	4.06 ± 0.02 ^{gh}	7.25 ± 0.02 ^{gh}	0.82 ± 0.02 ^h	107.13 ± 4.51 ^{hi}	80016.95 ± 3182.00 ^a
LT20	2.90 ± 0.01 ^j	7.08 ± 0.02 ^h	0.55 ± 0.02 ^h	59.82 ± 12.75 ⁱ	42295.02 ± 224.27 ^d
LT21	2.71 ± 0.04 ^j	7.87 ± 0.03 ^g	0.65 ± 0.01 ^h	84.41 ± 0.51 ⁱ	77130.04 ± 307.68 ^b
GF2	16.30 ± 0.17 ^d	18.67 ± 0.33 ^b	8395.16 ± 44.83 ^a	291.51 ± 0.88 ^{ghi}	160.69 ± 16.77 ^h
LQ	45.41 ± 0.19 ^a	5.42 ± 0.41 ⁱ	176.16 ± 2.57 ^{fg}	22674.66 ± 274.01 ^a	1182.00 ± 35.59 ^h
WY	3.71 ± 0.00 ⁱ	5.21 ± 0.06 ^{ij}	98.34 ± 2.62 ^g	269.29 ± 30.41 ^{ghi}	94.67 ± 1.26 ^h
LZ1	8.22 ± 0.04 ^e	29.76 ± 0.31 ^a	257.40 ± 2.73 ^{ef}	5297.78 ± 107.28 ^d	541.59 ± 45.75 ^h
LZ2	7.77 ± 0.07 ^e	10.82 ± 0.06 ^e	253.21 ± 2 ^{ef}	2402.15 ± 67.49 ^f	466.80 ± 13.46 ^h
LZ3	7.93 ± 0.83 ^e	12.51 ± 0.02 ^d	253.13 ± 30.14 ^{ef}	3274.53 ± 75.58 ^e	730.07 ± 25.99 ^h
LZ4	23.98 ± 0.05 ^b	11.16 ± 1.19 ^e	1541.73 ± 5.87 ^b	10500.96 ± 235.49 ^c	384.03 ± 0.13 ^h
ZL	4.56 ± 0.66 ^g	4.71 ± 0.00 ^{ik}	491.12 ± 2.27 ^c	283.41 ± 12.55 ^{ghi}	307.26 ± 8.55 ^h
CP	8.17 ± 0.13 ^e	8.69 ± 0.06 ^f	286.42 ± 6.85 ^e	5216.06 ± 7.38 ^d	682.75 ± 2.90 ^h
平均值	9.33 ± 10.97	9.35 ± 6.57	689.95 ± 1898.24	3360.07 ± 5840.67	16120.56 ± 26643.82

注：表中同一列数据不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

3.4. 苔藓植物生长基质的重金属污染情况

3.4.1. 单因子污染指数和内梅罗综合污染指数

重金属及其危害程度可以通过污染指数表示[33]，不同采集点部分苔藓植物优势种群生长基质被测重金属元素的单因子污染指数和内梅罗综合污染指数的计算结果见表 4。

Table 4. Single-factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index of heavy metals in moss plant growth substrates

表 4. 苔藓植物生长基质的重金属单因子污染指数和内梅罗综合污染指数

样点编号	$P_i\text{-Cd}$	$P_i\text{-Cu}$	$P_i\text{-Pb}$	$P_i\text{-Zn}$	$P_i\text{-Mn}$	P_N
GJ2	23.48	0.76	3.98	3.44	15.28	25.29
GJ4	20.10	0.16	13.47	6.79	1.04	21.76
LT3	26.40	0.19	5.96	2.22	11.42	27.97
LT10	52.00	0.32	18.55	7.86	80.50	86.57
LT12	190.15	0.19	5.71	138.07	5.23	201.90
LT13	10.73	0.16	0.03	1.47	46.08	47.54
LT14	24.06	0.31	0.05	1.41	162.46	166.77
LT19	33.83	0.31	0.03	1.29	251.87	258.34
LT20	24.17	0.31	0.02	0.72	133.13	136.85
LT21	22.56	0.34	0.02	1.02	242.78	248.58

续表

GF2	135.86	0.80	295.92	3.51	0.50	308.53
LQ	378.46	0.23	6.21	273.29	3.72	400.94
WY	30.93	0.22	3.47	3.25	0.30	31.86
LZ1	68.51	1.28	9.07	63.85	1.70	74.35
LZ2	64.76	0.47	8.93	28.95	1.47	68.05
LZ3	66.14	0.54	8.92	39.47	2.30	70.18
LZ4	199.80	0.48	54.34	126.56	1.21	213.94
ZL	37.96	0.20	17.31	3.42	0.97	39.80
CP	68.06	0.37	10.10	62.87	2.15	73.86

注：① P_i -Cd 为重金属 Cd 的单因子污染指数，其他依次类推；② P_N 为内梅罗综合污染指数。

由表 4 可知，苔藓植物生长基质被测重金属元素的单因子污染指数分别为 10.73~378.46 (Cd)、0.02~295.92 (Pb)、0.72~273.29 (Zn)、0.30~251.87 (Mn)、0.16~1.28 (Cu)，各采集点苔藓植物生长基质的 Cd 含量均达到重度污染等级；除六寨雅陇 1 的苔藓植物生长基质 Cu 含量为轻度污染外，其余各采集点的苔藓植物生长基质均未受到 Cu 污染；除龙头锰矿 13、14、19、20、21 采集点苔藓植物生长基质未受 Pb 污染外，其余各采集点均受到重度 Pb 污染；除龙头锰矿 20 采集点苔藓植物生长基质未受 Zn 污染外，其余各采集点均受到轻度以上的 Zn 污染，其中大部分为重度 Zn 污染；除高峰地磅、五一矿和者乐采集点苔藓植物生长基质未受 Mn 污染外，其余采集点均受到轻度以上的 Mn 污染，大部分为重度 Mn 污染。

在桂西北有色金属矿区，对苔藓植物生长基质的重金属污染进行评估，可以采用内梅罗综合污染指数进行量化，结果为 21.76~400.94，说明各采集点苔藓植物的生长基质均受到了极严重的重金属污染。

3.4.2. 地累积指数

Table 5. Geoaccumulation index of heavy metals in moss plant growth matrix
表 5. 苔藓植物生长基质的重金属地累积指数

样点编号	I_{geo} -Cd	I_{geo} -Cu	I_{geo} -Pb	I_{geo} -Zn	I_{geo} -Mn
GJ2	3.97	-0.97	1.70	1.20	3.35
GJ4	3.74	-3.23	3.46	2.18	-0.53
LT3	4.14	-2.96	2.28	0.57	2.93
LT10	5.12	-2.24	3.92	2.39	5.75
LT12	6.99	-2.98	2.22	6.52	1.80
LT13	2.84	-3.25	-5.40	-0.03	4.94
LT14	4.00	-2.28	-4.70	-0.09	6.76
LT19	4.50	-2.26	-5.41	-0.22	7.39
LT20	4.01	-2.30	-5.98	-1.06	6.47
LT21	3.91	-2.15	-5.74	-0.56	7.34
GF2	6.50	-0.90	7.91	1.23	-1.57
LQ	7.98	-2.68	2.34	7.51	1.31
WY	4.37	-2.74	1.50	1.11	-2.33
LZ1	5.51	-0.23	2.89	5.41	0.18
LZ2	5.43	-1.68	2.86	4.27	-0.03
LZ3	5.46	-1.48	2.86	4.72	0.62

不同采集点部分苔藓植物优势种群 5 种被测重金属元素含量的分析结果见图 1。图中采集点与苔藓植物优势种群的对应关系为：更架 2 为弯叶真藓、更架 4 为全缘小金发藓、龙头锰矿 3 为粗毛细湿藓、龙头锰矿 10 为细柳藓、龙头锰矿 12 为薄壁卷柏藓、龙头锰矿 13 为长叶提灯藓、龙头锰矿 14 为密叶泽藓、龙头锰矿 19 为毛尖卷柏藓、龙头锰矿 20 为细叶小羽藓、龙头锰矿 21 为直叶藓细枝亚种、高峰地磅为狭网真藓、龙泉选矿为刺叶真藓、五一矿为东亚小墙藓、六寨雅陇 1 为中华隐蒴藓、六寨雅陇 2 为泽藓、六寨雅陇 3 为拟疣胞藓、六寨雅陇 4 为白藓、者乐为拟疣胞藓、长坡矿为短叶对齿藓。在各种苔藓植物被测重金属元素含量中，Pb 的含量为 0.21~1547.93 mg/kg，Cd 的含量为 0.00~25.02 mg/kg，Cu 的含量为 3.51~29.97 mg/kg，Zn 的含量为 43.43~5761.72 mg/kg，Mn 的含量为 37.44~38874.89 mg/kg。从平均值来看，苔藓植物被测重金属元素含量的高低排序为：Mn > Zn > Pb > Cu > Cd，与其生长基质重金属含量的高低排序一致。

3.5.1. 不同苔藓植物的重金属富集特征

不同苔藓植物对被测重金属元素的富集系数计算结果见表 6。

Table 6. Heavy metal accumulation coefficients of different moss species
表 6. 不同苔藓植物的重金属富集系数

序号	苔藓植物	Cd	Cu	Pb	Zn	Mn
01	弯叶真藓	0.41	0.19	6.48	1.30	0.01
02	全缘小金发藓	2.17	0.97	1.77	0.49	1.03
03	粗毛细湿藓	0.10	0.87	1.00	1.11	0.07
04	细柳藓	0.18	0.57	0.13	0.24	0.32
05	薄壁卷柏藓	1.10	1.99	0.53	0.02	0.41
06	长叶提灯藓	0.02	1.06	0.25	0.42	0.59
07	密叶泽藓	0.01	0.94	0.87	0.73	0.75
08	毛尖卷柏藓	0.00	0.29	1.60	0.68	0.05
09	细叶小羽藓	0.00	0.29	2.27	1.21	0.03
10	直叶藓细枝亚种	0.00	0.30	1.41	1.25	0.03
11	狭网真藓	0.10	1.25	0.18	0.15	1.01
12	刺叶真藓	0.27	2.29	1.63	0.09	0.31
13	东亚小墙藓	0.74	1.49	1.90	0.38	0.40
14	中华隐蒴藓	1.56	0.53	1.26	1.08	0.17
15	泽藓	0.48	0.27	1.05	0.41	0.36
16	拟疣胞藓	1.53	1.30	1.22	1.41	0.39
17	白藓	0.93	0.83	0.15	0.02	1.70
18	拟疣胞藓	0.36	0.74	0.05	0.62	0.38
19	短叶对齿藓	1.29	0.79	1.26	0.99	0.95

由表 6 知，依据富集系数的评价标准[31]，全缘小金发藓对 Cd 的富集指数最大为 2.17，达到相对富集水平；刺叶真藓对 Cu 富集指数最大为 2.29，达到相对富集水平；弯叶真藓对 Pb 富集指数最大为 6.48，达到强烈富集水平；所采集的苔藓植物样品对 Zn 和 Mn 的富集水平均处于同一及以下水平。

3.5.2. 苔藓植物与生长基质重金属含量的相关性

在本研究的采集点中，苔藓植物与生长基质重金属含量的相关性分析结果见表 7。

Table 7. Correlation between moss plants and heavy metal content in growth matrix
表 7. 苔藓植物与生长基质重金属含量的相关性

	Cd 苔藓	Cu 苔藓	Pb 苔藓	Zn 苔藓	Mn 苔藓	Cd 基质	Cu 基质	Pb 基质	Zn 基质	Mn 基质
Cd 苔藓	1									
Cu 苔藓	0.402*	1								
Pb 苔藓	-0.004	0.627**	1							
Zn 苔藓	0.398*	0.449**	0.072	1						
Mn 苔藓	-0.269	-0.119	-0.277	-0.202	1					
Cd 基质	0.652**	0.478**	0.164	0.147	-0.206	1				
Cu 基质	0.152	0.573**	0.483**	0.53**	-0.159	0.013	1			
Pb 基质	-0.038	0.679**	0.826**	-0.133	-0.128	0.21	0.361*	1		
Zn 基质	0.735**	0.340*	-0.035	0.299	-0.197	0.948**	-0.018	-0.074	1	
Mn 基质	-0.453**	-0.426**	-0.43**	-0.325*	0.423**	-0.328*	-0.191	-0.214	-0.330*	1

注：表中*在 0.05 级别(双尾)，相关性显著；**在 0.01 级别(双尾)，相关性显著。

在苔藓植物体内重金属元素含量的相关性分析中，若两种重金属元素之间存在显著或极显著正相关，则说明这两种元素存在协同作用，反之存在拮抗作用[34]。

由表 7 可知，在苔藓植物体内重金属元素的相互影响关系为：Cu-Pb、Cu-Zn 在 $p < 0.01$ 水平上呈极显著正相关，Cd-Cu、Cd-Zn 在 $p < 0.05$ 水平上呈显著正相关，以上元素之间具有协同作用，表明苔藓植物对重金属的吸收具有多重效应[7]。此外，苔藓植物中 Cd、Cu、Pb、Zn 和 Mn 的含量与其生长基质中的 Cd、Cu、Pb、Zn 和 Mn 含量呈正相关，说明苔藓植物体内重金属主要来源于其生长基质[7]。

4. 讨论

4.1. 桂西北有色金属矿区苔藓植物的主要类群及其对生长基质的要求

通过对桂西北有色金属矿区苔藓植物的调查研究，共鉴定出苔藓植物 29 科 52 属 89 种，优势科主要为真藓科、丛藓科、金发藓科、羽藓科、木灵藓科和珠藓科，优势属为真藓属、对齿藓属、扭口藓属、泽藓属和小金发藓属。各采集点之间，苔藓植物的种类差异较大。相关研究表明，不同苔藓植物对重金属的耐受性不同，同一种苔藓植物对不同重金属的耐受性也具有一定的差异[35]，这可能是各采集点之间苔藓植物主要类群具有较大差异的原因之一。

通过对不同采集点苔藓植物生长基质基本理化特性的比较分析可知，不同采集点苔藓植物生长基质理化特性存在较大差异，部分采集点苔藓植物生长基质养分比较贫乏，而苔藓植物都可在其上正常生长，说明苔藓植物对生长基质的要求不高，可能与苔藓植物可以通过自身特殊的形态结构和生理特性对大气中水分和营养物质进行有效吸收有关[24]。此外，值得关注的是，大部分采集点苔藓植物生长基质的有机质和全氮含量达到较为丰富及以上水平[36]，可能是苔藓植物生活周期较短，繁殖速度快，在其凋亡后会同藻类和微生物形成生物结皮，从而提高其生长基质的有机质和总氮的含量[37]，但是，在这些有机质和全氮含量较为丰富的采集点中，大部分采集点苔藓植物生长基质的碱解氮含量较低，可能是重金属抑制了土壤微生物和土壤酶对含氮物质的分解所致[38]。

4.2. 影响桂西北有色金属矿区苔藓植物分布的主要因素

在本研究中,通过对部分采集点苔藓植物生长基质基本理化特性的测定,发现不同采集点之间的苔藓植物生长基质理化特性差异较大,各采集点苔藓植物的种类差异较大,说明生长基质基本理化特性是影响苔藓植物类群分布的原因之一[24]。通过对苔藓植物生长基质重金属含量的测定,发现大部分采集点苔藓植物生长基质 Cd、Pb、Zn 和 Mn 的地累积指数、单因子污染指数和内梅罗综合污染指数不同,说明生长基质重金属污染程度是影响苔藓植物分布的一个重要因素。孙守琴等人认为,影响苔藓植物生长和繁殖的因素很多,各环境因素并非孤立发挥作用,都是通过与其他因子的协同作用对苔藓植物的生长和繁殖产生影响[35],因此,在对苔藓植物主要类群分布影响因素进行分析的时候,应综合考虑苔藓植物生长基质重金属含量、基本理化特性、微生物组成、土壤酶活性、环境温度、空气湿度等因素。

4.3. 苔藓植物对重金属的富集能力及其对土壤重金属污染修复的潜力

生物富集系数可以在一定程度上反映植物对重金属吸收能力的强弱。在本研究中,全缘小金发藓和拟疣胞藓对 Cd 相对富集,刺叶真藓和薄壁卷柏藓对 Cu 相对富集,弯叶真藓对 Pb 强烈富集,细叶小羽藓、东亚小墙藓和毛尖卷柏藓对 Pb 相对富集,白藓对 Mn 相对富集。本研究也发现部分苔藓植物对一些被测重金属元素具有较强的富集能力,说明这些苔藓植物在修复重金属污染环境中可能具有较大的潜力。

在采集点六寨雅陇 3 和者乐,苔藓植物优势种群均为拟疣胞藓,两地采集的拟疣胞藓对 Cd 和 Pb 的富集系数相近,但对 Cu、Zn 和 Mn 的富集系数相差较大,其原因可能是生长基质中 Cu、Zn 和 Mn 的含量不同所致,此外,来源于大气沉降的 Cu、Zn 和 Mn 元素含量的差异,也可能是同种苔藓植物对这些重金属元素吸收和富集差异的原因[39]。

苔藓植物个体小,生活史较短,具有易于吸附环境污染物的结构特点,使其对环境污染物具有一定的吸附能力[7]。此外,苔藓植物可以和土壤微生物、藻类、地衣形成生物结皮,从而可以在一定程度上改善土壤环境的理化特性。使用苔藓植物对重金属污染土壤进行修复,可以避免二次污染[5]。在本研究中,部分苔藓植物对某些重金属表现出较强的富集能力,如果将这些苔藓植物作为重金属污染环境的植物修复材料,可以进一步发挥其在重金属污染环境修复中独特的作用。

值得注意的是,密叶泽藓、长叶提灯藓和细柳藓,其体内的 Mn 含量分别为 38874.69 mg/kg、8623.28 mg/kg 和 8163.73 mg/kg;中华隐蒴藓、短叶对齿藓和拟疣胞藓体内的 Zn 含量,分别为 5716.72 mg/kg、5166.23 mg/kg 和 4630.83 mg/kg,这些苔藓植物对重金属胁迫的适应机制值得深入研究。

5. 结论

(1) 本研究已鉴定的苔藓植物共有 29 科 52 属 89 种,优势科为真藓科、丛藓科、羽藓科、金发藓科、木灵藓科和珠藓科,优势属为真藓属、丛藓属、对齿藓属、扭口藓属、泽藓属和小金发藓属,优势种为毛尖卷柏藓、黄叶凤尾藓、云南真藓和短叶对齿藓。

(2) 影响桂西北有色金属矿区苔藓植物分布的主要影响因素为苔藓植物生长基质的理化特性和生长基质中的重金属污染状况。

(3) 全缘小金发藓对 Cd、刺叶真藓对 Cu、弯叶真藓对 Pb、白藓对 Mn 具有较强的耐性和富集能力,可作为相应重金属污染环境的植物修复材料。

基金项目

桂西北地方资源保护与利用工程中心(桂教科研[2012] 9 号),河池学院高层次人才科研启动费项目(XJ2018GKQ015, XJ2018GKQ016)。

参考文献

- [1] 林曼利, 胡振琪, 彭位华, 等. 安徽铜陵典型矿区周边土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5494-5505.
- [2] 朱秀敏. 丛藓科湿地藓属植物对环境的指示作用[J]. 北方园艺, 2010(22): 27-30.
- [3] 刘伟才, 姬瑞华, 罗晶. 大灰藓植物监测衡阳市大气重金属生态危害研究[J]. 湖南生态科学学报, 2019, 6(3): 15-21.
- [4] 贾红磊, 安昊东, 王晴, 等. 不同禾本科植物对矿区重金属污染土壤的修复效果研究[J]. 陕西科技大学学报, 2025, 43(1): 23-28.
- [5] 陈欣硕, 俞如旺. 植物对土壤重金属的富集机制及其应用[J]. 生物学教学, 2025, 50(2): 2-5.
- [6] Gezahegn, A., Bohnett, E. and Mammo, S. (2024) The Role of Mosses in 'Clean and Green' Phytoremediation Technology: A Review Paper. *BioMetals*, **38**, 89-101. <https://doi.org/10.1007/s10534-024-00649-3>
- [7] 任军, 刘方, 朱健, 等. 锰矿废渣区苔藓物种多样性及其重金属污染监测[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(6): 2398-2407.
- [8] 王亚南, 胡荣, 周晓丽, 等. 多藓种监测大气重金属污染方法改进[J]. 环境科学学报, 2019, 39(5): 1464-1473.
- [9] 汪文云, 张朝晖. 老万场金矿藓类重金属富集特性及其生态修复潜力研究[J]. 金属矿山, 2008(9): 134-139.
- [10] Han, Y., Kou, J., Jiang, B., Li, J., Liu, C., Lei, S., et al. (2025) Bryophytes Adapt to Open-Pit Coal Mine Environments by Changing Their Functional Traits in Response to Heavy Metal-Induced Soil Environmental Changes. *Journal of Hazardous Materials*, **482**, Article 136613. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136613>.
- [11] Chen, Q., Fang, Y.M., Yan, Y., et al. (2014) Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-Bag Method and Road-Dust Method for Taizhou Urban Area. *Environmental Science*, **35**, 1901-1908.
- [12] 凌钰亮, 吴丽琴, 付善明, 等. 利用藓袋法监测广州市大气重金属沉降研究[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(6): 113-120.
- [13] Dmuchowski, W., Gozdowski, D., Baczewska, A.H. and Brągoszewska, P. (2013) Evaluation of Various Bioindication Methods of Measuring Zinc Environmental Pollution. *International Journal of Environment and Pollution*, **51**, 238-254. <https://doi.org/10.1504/ijep.2013.054043>
- [14] 曹同, 王敏, 娄玉霞, 等. 监测环境污染的藓袋法技术及其应用[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2011, 40(2): 213-220.
- [15] 刘桂华, 吴永贵, 付天岭, 等. 贵州富硫高砷煤矿区苔藓及土壤典型金属的分布特征[J]. 西南农业学报, 2016, 29(9): 2201-2205.
- [16] 杨阳. 砂藓对 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 胁迫的生理生化响应及富集后炭化[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- [17] 朱永琪, 冯兰兰, 赵子帆, 等. 苔藓植物在重金属胁迫响应及污染监测方面的研究进展[J]. 生命科学, 2024, 36(12): 1552-1561.
- [18] 陈璇, 刘祥龙, 唐婷. 苔藓植物响应重金属胁迫的研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36(10): 191-199.
- [19] Viviana, M., Erika, B., Simone, L., et al. (2022) Biological Responses to Heavy Metal Stress in the Moss *Leptodictyum riparium* (Hedw.) Warnst. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **229**, Article 113078.
- [20] 顾艳红. Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 污染胁迫对多蒴灰藓(*Hypnum fertile* Sendtn.)的毒性效应研究[D]: [硕士学位论文]. 金华: 浙江师范大学, 2008.
- [21] 张转玲, 林绍霞, 谢双, 等. 利用苔藓植物监测分析贵州草海的重金属大气沉降特征[J]. 广西植物, 2020, 40(11): 1540-1550.
- [22] 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(6): 511-515.
- [23] 环江毛南族自治县地方志编纂委员会. 环江毛南族自治县志[M]. 南宁: 广西人民出版社, 2002.
- [24] 覃春, 覃晟, 蒋银妹, 等. 桂西北有色金属矿区苔藓植物的主要类群及重金属富集特征[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(5): 1158-1172.
- [25] 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.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [27] 李燕群. 原子吸收光谱法在重金属铅镉分析中的应用进展[J]. 冶金分析, 2008(6): 33-41.
- [28] 辛有涛, 李蕴峰, 陈卓, 等. 基于内梅罗指数法与地累积指数法的土壤重金属污染评价分析——以大兴安岭松

- 岭地区为例[J]. 地质与资源, 2024, 33(2): 196-201+221.
- [29] 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 等. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社, 2020.
- [30] 孙晶, 潘学军. 某铅锌污染场地污染调查与评估[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(S1): 76-78.
- [31] 朱秀敏, 王僧虎, 李丽. 几种苔藓植物对五种重金属富集能力的比较[J]. 北方园艺, 2012(23): 88-90.
- [32] 广西环境保护科学研究所. 土壤背景值研究方法及广西土壤背景值[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1992.
- [33] 刘春红, 张亮, 贾学桦, 等. 我国土壤重金属污染环境风险评价方法及防治措施探讨[J]. 环境影响评价, 2024, 46(6): 1-5+14.
- [34] 左思艺, 王智慧, 张朝晖. 张家湾子金矿苔藓植物物种多样性及其对重金属污染的监测[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 412-417.
- [35] 孙守琴, 王根绪, 罗辑, 等. 苔藓植物对环境变化的响应和适应性[J]. 西北植物学报, 2009, 29(11): 2360-2365.
- [36] 李玮, 乔玉强, 曹承富, 等. 安徽省不同生态区冬小麦产量及土壤肥力评价[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(2): 242-252.
- [37] 苏春丽, 许文文, 刘屹泽, 等. 生物土壤结皮在沙区草本植物恢复中的作用综述[J]. 甘肃林业科技, 2025, 50(1): 1-9+31.
- [38] 赵宇馨. 重金属污染对土壤微生物生态特征的影响综述[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(3): 89-91.
- [39] Aceto, M., Abollino, O., Conca, R., Malandrino, M., Mentasti, E. and Sarzanini, C. (2003) The Use of Mosses as Environmental Metal Pollution Indicators. *Chemosphere*, **50**, 333-342. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(02\)00533-7](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(02)00533-7)