

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202003063

顿梦杰, 张云霞, 宋波, 等. 贵州牛角塘铅锌矿区优势植物的重金属富集特征 [J]. 广西植物, 2022, 42(3): 479–490.
DUN MJ, ZHANG YX, SONG B, et al. Heavy metal enrichment of dominant plants in Niujiatong mining area of Guizhou Province [J]. *Guihaia*, 2022, 42(3): 479–490.



贵州牛角塘铅锌矿区优势植物的重金属富集特征

顿梦杰¹, 张云霞¹, 宋波^{1,2*}, 盛昕¹, 周浪¹, 宾娟¹

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学
岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 为筛选适合贵州喀斯特地区重金属污染土壤修复治理以及矿区生态复垦的植物材料, 该研究在贵州牛角塘铅锌矿区采集 30 种优势植物及其根系土壤, 测定其地上部、地下部和根系土壤的 Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 含量, 计算植物对重金属的富集和转运系数, 并通过聚类分析综合评估植物的应用潜力。结果表明: (1) 千里光、鬼针草地上部 Cd 含量高达 40.33、43.26 mg · kg⁻¹, 富集系数(地上部分)分别为 0.20 和 0.37, 转运系数分别为 1.35 和 1.16, 有较强富集 Cd 的能力, 对 Cd 污染土壤有一定的修复潜力。(2) 头花蓼地上部 Cd、Zn 含量分别为 77.49、3 557.96 mg · kg⁻¹, 均为本次调查 30 种植物中的最大值, 是一种修复 Cd、Zn 复合污染土壤的潜在植物材料。(3) 醉鱼草地上部 Ni 含量为 0.62 mg · kg⁻¹, 富集系数(地上部分)和转运系数高达 6.16 和 1.37, 醉鱼草是否是 Ni 的一种富集植物, 还需进一步研究加以验证。(4) 紫茉莉、节节草根部分 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量远大于地上部, 属于根部囤积型植物; 河北木蓝地上部、地下部 Cd、Cu 和 Zn 等重金属含量都较低, 属于规避型植物。因此, 千里光、鬼针草和头花蓼可用于修复土壤重金属污染, 紫茉莉、节节草、河北木蓝可用于矿区复垦。

关键词: 牛角塘铅锌矿区, 富集植物, 矿区复垦, 根部囤积型植物, 规避型植物

中图分类号: Q948.116 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2022)03-0479-12

Heavy metal enrichment of dominant plants in Niujiatong mining area of Guizhou Province

DUN Mengjie¹, ZHANG Yunxia¹, SONG Bo^{1,2*}, SHENG Xin¹, ZHOU Lang¹, BIN Juan¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Guilin University of Technology, Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Areas, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: To select suitable materials for remediation of heavy metal pollution in karst areas of Guizhou Province and ecological reclamation of mining area. A total of 30 dominant plants and their root soils were collected in Niujiatong lead-zinc mining area of Guizhou Province for testing of the contents of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in aboveground, underground and root soils. The enrichment and transport coefficients of heavy metals by plants were calculated, and the application potential of plants was comprehensively evaluated by cluster analysis. The results were as follows: (1) Cd contents in the aerial part of *Senecio scandens* and *Bidens Pilosa* were respectively 40.33 mg · kg⁻¹ and 43.26 mg · kg⁻¹, the

收稿日期: 2020-08-24

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17204047); 广西自然科学基金(2013GXNSFEA053002) [Supported by Major Science and Technology Project in Guangxi (GuiKe AA17204047); Guangxi Natural Science Foundation (2013GXNSFEA053002)]。

第一作者: 顿梦杰(1992-), 硕士, 主要研究方向为区域环境调查与风险评估, (E-mail) 623382673@qq.com。

*通信作者: 宋波, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为重金属污染土壤修复治理, (E-mail) songbo@glut.edu.cn。

enrichment coefficients (aboveground part) were respectively 0.20 and 0.37, and the transport coefficients were respectively 1.35 and 1.16, and they had strong ability to enrich Cd and had certain remediation potential for Cd contaminated soil. (2) The contents of Cd and Zn in aboveground of *Polygonum capitatum* were $77.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $3557.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively, which were the maximum values among the 30 plants investigated in this survey. It is a potential plant material for remediation of Cd and Zn contaminated soil. (3) The content of Ni in aboveground of *Buddleja lindleyana* was $0.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the enrichment coefficient (aerial part) and transport coefficient were 6.16 and 1.37 respectively. However, a further study need to be done to test whether the plant for Ni enrichment. (4) The contents of Cd, Cu, Pb and Zn in the roots of *Mirabilis jalapa* and *Equisetum ramosissimum* were much higher than those in aboveground, which were root-hoarding plants. The contents of Cd, Cu, Zn and other heavy metals in aboveground and underground parts of *Indigofera bungeana* were relatively low, which belonged to evading plant. Therefore, *Senecio scandens*, *Bidens pilosa*, and *Polygonum capitatum* can be used to remediate heavy metal pollution in soil, and *Mirabilis jalapa*, *Equisetum ramosissimum*, and *Indigofera bungeana* can be used for reclamation of mining area.

Key words: Niujiaotang lead-zinc mining area, enrichment, heavy metal, root-hoarding plant, evading plant

近年来,随着铅、锌等矿产资源开采、金属冶炼等生产活动的快速发展,在金属冶炼和大力开采矿山的进程中,由于管理不当及自然灾害等原因,使矿山开采和金属冶炼所产生的废水、废渣排入矿区和周围农田土壤,因此导致土壤重金属污染(李俊凯等,2018)。土壤的污染导致农产品重金属超标,同时农产品随食物链进入人体,对长期生活在矿区周围居民的身体健康产生了严重的危害(王学礼等,2010;董彬,2012;Sharifinia et al., 2016)。贵州矿产资源丰富,随着科技发展和社会进步,在对矿山快速开采的过程中,对周围环境也造成了难以估量的损害,特别是Cd污染,因其具有高毒性、易致癌、快迁移而引起人们的高度重视(张芳等,2018)。因此,不仅需要加大矿区的治理力度,尽快恢复矿区植被,控制矿区重金属对周围环境的影响,而且矿区周围被重金属污染农田的修复治理也迫在眉睫。

植物修复一般是指绿色植物利用自身的新陈代谢来转移、转换和固定土壤环境中的重金属元素,进而使土壤中重金属的含量减少或生物毒性降低,从而使被污染的土壤环境得到净化的过程。植物修复具有适合大面积推广、治理成本低且操作相对简单的特点逐渐成为国内外学者的研究热点(Sun et al., 2016; Sarwar et al., 2017)。近年来许多学者对长于矿区的植物进行了调查。张会敏等(2015)通过对相思谷矿区8种优势植物对Cd、Pb、Cu和Zn的富集能力的研究认为,芒(*Miscanthus sinensis*)可用于尾矿的植被修复。付广义等(2019)对东江湖铅锌矿渣堆场的9种优势

植物进行调查发现,马尾松(*Pinus massoniana*)对Pb有很强的富集能力。Wan等(2017)对湖南4个矿山上的植物进行调查发现,柔毛堇菜(*Viola principis*)对As、Pb和Cd都具有很强的富集能力。李思亮等(2016)通过研究浙江省4个铅锌矿中自然生长的优势植物对重金属的富集特性发现,紫花香薷(*Elsholtzia argyi*)具有Cd超富集植物的特征。另外,毛海立等(2011)研究发现,贵州铅锌矿区的桑科植物对Pb、Cd具有显著的富集效应。因此,对生长在矿区周围的植物进行调查和筛选,初步筛选出对重金属具有富集和耐性且生物量大的优势植物,对矿区土壤的修复和植被恢复具有重大意义。

虽然目前发现的超富集植物已有400余种,但大多数存在生物量小和较差的区域适应性等缺点。因此,本研究通过对地处喀斯特地区的贵州牛角塘铅锌矿区进行优势植物调查,研究优势植物对重金属的富集特性,筛选出能大量富集重金属的优势植物和不易富集重金属的耐性植物,以为牛角塘矿区和其他同类矿区的土壤修复提供植物材料。

1 材料与amp;方法

1.1 材料和研究区概况

贵州牛角塘铅锌矿区,坐落在贵州东部铅锌成矿带的南端。矿山开采产生的尾矿,大多以灰白色、灰色和灰褐色铅锌细粒堆放在人们修建的大型尾矿库内(张建等,2018)。本次调查的菜园

河分矿区、大坪分矿区、马坡分矿区、狮子洞分矿区和新桥分矿区均已停止开采多年,该矿区为以铅和锌为主的多金属矿床。

在该区域内,植物资源极其丰富且长势良好,同时草本植物和体型小的灌木在矿区分布区域广、数量多,为本地的优势物种,分别在这 5 个分矿区内选择优势植物作为研究材料。

1.2 样品采集和处理

2017 年 6 月,利用手持式重金属快速检测仪(Innov-X Delta CGSM)进行初筛,选择土壤重金属含量高的区域为采样区。选择矿区中自然生长的、生物量较大的植物种类,多为草本植物,其中生物量较大的物种在体型上明显大于周围其他植物。对于矿区分布较多的植物采集的样本较多,局部分布的植物采集混合植物样,采集 3~5 株,混合成一个样品,植物样品尽量保持完整。土壤样品采集与植物同时进行,植物根系附着了大量的土壤,用力抖动将土壤抖下后混合均匀,四分法后,取大约 1 kg 土壤装入布袋,带回实验室进行下一步处理。

所有植物样品均用聚乙烯塑料袋密封好带回实验室,先用自来水将附着在植物表面的泥土冲洗干净,再用超纯水将植物润洗 3~5 遍,在通风处自然晾干后称鲜重;将植物置于烘箱内,105 ℃ 杀青 30 min,并于 80 ℃ 烘干到恒重后称其干重;计算各优势植物的含水率。将烘干的植物放入不锈钢粉碎机内粉碎充分后装入聚乙烯袋,记上编号待测。将土壤样品内的各种杂物剔除后自然风干,用研钵充分研磨后,过 0.841 mm 和 0.149 mm 尼龙筛,分别装入牛皮信封袋,记上对应编号保存待测。

1.3 测定方法

采用美国国家环保署(US EPA)推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 体系来消解土壤样品,采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 方法(EPA 3050B)来消解植物样品,有效态采用 DTPA 浸提法。使用石墨炉原子吸收分光光度计(AA-700)测定样品 Cd 含量,用 ICP-OES 测定各样品 Cu、Pb、Zn、Ni 含量。同时,在处理的样品中随机加入 10%~15% 的重复数,来验证实验方法的准确性和操作人员对实验过程的干扰。在样品中分别加入国家标准土壤样品(GSS-4、GSF-4)、国家标准植物样品(GSV-1)进行质量控制,以确保实验数据的可靠性。Cd 回收率为 82.3%~105.3%,Pb

的回收率为 92.1%~99.5%,Cu 的回收率为 95.0%~105.3%,Zn 的回收率为 89.6%~91.3%,Ni 的回收率为 97.3%~104.6%,符合分析质量控制要求,分析过程中所用试剂均为优级纯,所用的水均为超纯水(亚沸水)。

1.4 数据处理

富集系数(bio-enrichment coefficient, BCF)(地上部分)反映植物从土壤中吸收重金属能力(魏树和等,2003),计算方法如(1)所示:

$$BCF = C_p / C_s \quad (1)$$

式中: C_p 为植物地上部各重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_s 为土壤各重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

转运系数(transport coefficient, TF)用来评价重金属从植物根部向地上部的转移能力(邹春萍等,2015),计算方法如(2)所示:

$$TF = C_p / C_r \quad (2)$$

式中: C_p 为植物地上部各重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_r 为地下部各重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

试验数据使用软件 Excel 2016 整理,图形使用软件 SigmaPlot 15.0 绘制,使用软件 SPSS 18.0 进行方差分析,应用 ANOVA 进行差异性检验, $P < 0.05$ 表示存在显著性差异。使用软件 SPSS 18.0 进行聚类分析,根据不同样品的特征,对其进行分类,将性质相近的植物归为一类。

2 结果与分析

2.1 优势植物组成

本次调查采集优势植物共 30 种,分属 16 科,28 属。其中,菊科 12 种(占 40%),豆科 2 种(占 6.7%),蓼科 2 种(占 6.7%),荨麻科 2 种(占 6.7%),车前科、唇形科、马钱科、木贼科、茄科、商陆科、松科、苋科、旋花科、罂粟科、鸢尾科和紫茉莉科各 1 种(分别占 3.3%)。牛角塘铅锌矿区优势植物种类组成见表 1。

由表 1 可知,草本植物 25 种,占比 83%,说明在牛角塘铅锌矿区的复杂生存条件下,草本植物具有较强的抗性,同时也说明草本植物对重金属有很强的耐性。另外,在本次采样中,部分样本在多个矿区均有采集,其中旋花分别采于狮子洞分矿区和新桥分矿区,鬼针草分别采于大坪分矿区、菜园河分矿区和狮子洞分矿区,河北木蓝分别采于菜园河分矿区和狮子洞分矿区,藿香蓟分别采

于菜园河分矿区和狮子洞分矿区,千里光分别采于大坪分矿区和狮子洞分矿区,小蓬草分别采于狮子洞分矿区和马坡分矿区,野艾蒿分别采于菜园河分矿区和狮子洞分矿区,醉鱼草分别采于狮子洞分矿区、马坡分矿区和新桥分矿区。

2.2 土壤重金属含量状况

测定分析牛角塘铅锌矿 5 个分矿区土壤的重金属含量(表 2)。由表 2 可知,5 个分矿区土壤中 Cd、Pb、Zn 的含量均出现较大程度的超标现象,说明牛角塘铅锌矿 5 个分矿区土壤受到 Cd、Pb、Zn 等 3 种元素的污染十分严重。另外,5 个分矿区土壤 Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 含量的变化范围很大,变异系数大多数都在 30% 以上,说明 5 个分矿区重金属污染都存在较大的空间变异性,矿区土壤是一种复杂的多重金属复合污染土壤。矿区土壤重金属有效态含量如表 3 所示,相关性分析结果发现,有效态 Cu 与全量 Cu、有效态 Ni 与全量 Ni、有效态 Pb 与全量 Pb 和有效态 Zn 与全量 Zn 都在 0.01 水平上有显著的相关性。

2.3 植物重金属含量特征

牛角塘铅锌矿 5 个分矿区 30 种优势植物体内重金属含量见表 4。从表 4 可以看出,不同植物体内重金属含量差别较大,结合表 2 中不同分矿区土壤中的重金属含量,从整体上看植物体内重金属的含量与其生长环境处的土壤重金属含量成正比,这与熊云武等(2016)的研究相一致。植物地上部各重金属含量范围分别是 Cd 0.15 ~ 77.49 mg · kg⁻¹、Cu 1.26 ~ 21.33 mg · kg⁻¹、Ni 0.16 ~ 6.39 mg · kg⁻¹、Pb 2.25 ~ 139.1 mg · kg⁻¹、Zn 13.48 ~ 3 558 mg · kg⁻¹。地下部各重金属含量范围分别是 Cd 0.57 ~ 45.45 mg · kg⁻¹、Cu 3.73 ~ 173.6 mg · kg⁻¹、Ni 0.29 ~ 12.45 mg · kg⁻¹、Pb 0.01 ~ 611.1 mg · kg⁻¹、Zn 52.39 ~ 1 983 mg · kg⁻¹。相比各重金属在植物体内的正常含量,5 种重金属都不同程度地超出了正常范围值,一般植物体内重金属的正常含量(龙新宪等,2000; Gerber & Léonard, 2002)为 Pb 0.10 ~ 41.70 mg · kg⁻¹、Zn 1.00 ~ 160.00 mg · kg⁻¹、Cd 0.20 ~ 3.00 mg · kg⁻¹、Ni 1.00 ~ 5.00 mg · kg⁻¹和 Cu 0.40 ~ 45.80 mg · kg⁻¹。

为了能更好地筛选出对重金属有富集能力的优势植物,选取各植物地上部含量的最大值与超富集植物临界值进行对比(图 1),其中超富集植物各重金属的临界值分别为 Cd 100 mg · kg⁻¹、Pb

1 000 mg · kg⁻¹、Cu 1 000 mg · kg⁻¹、Ni 1 000 mg · kg⁻¹、Zn 10 000 mg · kg⁻¹。从表 4 和图 1 可以看出,马坡分矿区的头花蓼、鬼针草和大坪分矿区的千里光地上部 Cd 含量分别为 77.49、43.26、40.33 mg · kg⁻¹,远超普通植物体内 Cd 含量,与 Cd 超富集植物临界值的比值分别为 0.77、0.43、0.40,这说明头花蓼、鬼针草、千里光对 Cd 都有较强的富集能力,同时头花蓼地上部 Zn 含量为 3 558 mg · kg⁻¹,与 Zn 超富集植物临界值的比值分别为 0.36,说明头花蓼对 Cd 和 Zn 都有较强的富集能力。其余植物体内这 5 种重金属含量与超富集植物临界值的比值都相对较小,尤其是采于菜园河分矿区的河北木蓝,地上部和根部 Cd、Cu、Zn 含量都很低,说明它们对所处环境都有很强的适应性,具有良好的重金属耐性。

2.4 矿区植物对重金属的富集与转运特征

富集系数(地上部分)用来评价植物从土壤中吸收重金属的能力(李俊凯等,2018)。由图 2 可知,土壤中 Ni 和 Cu 含量较低,虽然鬼针草、醉鱼草、地盘松对 Ni 的富集系数(地上部分)大于 1,鬼针草和千里光对 Cu 的富集系数(地上部分)也大于 1,但这几种植物是否对 Ni、Cu 有较强的富集能力,还需进一步的实验加以验证。所有植物对 Cd、Pb、Zn 的富集系数(地上部分)均小于 1,可能与本次调查区域土壤中 Cd、Pb、Zn 含量过高有关。其中,野艾蒿对 Cd、Zn 的富集系数(地上部分)分别达到 0.77、0.56,表明野艾蒿对 Cd、Zn 具有良好的富集能力;节节草对 Cd、Pb、Zn 的富集系数(地上部分)均为此次调查的 30 种优势植物的最小值,其值分别为 0.0003、0.0040、0.0005。

转运系数表征植物对重金属在体内的转运能力(杨成等,2010)。从图 2 和图 3 可以看出,Cu、Zn、Cd 在 30 种优势植物中的富集能力和转运能力存在一定的一致性,而 Pb 和 Ni 在 30 种优势植物中的富集能力与转运能力相差较大。其中,鬼针草、藿香蓟、千里光、野艾蒿、醉鱼草、苦苣、龙葵、豚草和博落回对多种重金属的转运系数均超过 1,鬼针草、野艾蒿对 5 种重金属的转运系数均大于 1。另外,节节草对 Cd、Ni、Zn 的转运系数均是本次调查 30 种植物中的最低值,分别为 0.007、0.069、0.008,紫茉莉对 Pb 和 Cu 的转运系数是本次调查 30 种植物中的最低值,其值分别为 0.010、0.029。

表 1 优势植物种类组成

Table 1 Dominant plant species composition

植物名称 Plant name	科 Family	属 Genus	生活型 Biotype
醉鱼草 <i>Buddleja lindleyana</i>	马钱科 Loganiaceae	醉鱼草属 <i>Buddleja</i>	灌木 Shrub
河北木蓝 <i>Indigofera bungeana</i>	豆科 Leguminosae	木蓝属 <i>Indigofera</i>	灌木 Shrub
野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i>	菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	草本 Herbal
小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i>	菊科 Asteraceae	白酒草属 <i>Conyza</i>	草本 Herbal
千里光 <i>Senecio scandens</i>	菊科 Asteraceae	千里光属 <i>Senecio</i>	草本 Herbal
藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i>	菊科 Asteraceae	藿香蓟属 <i>Ageratum</i>	草本 Herbal
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	菊科 Asteraceae	鬼针草属 <i>Bidens</i>	草本 Herbal
旋花 <i>Calystegia sepium</i>	旋花科 Convolvulaceae	打碗花属 <i>Calystegia</i>	草本 Herbal
平车前 <i>Plantago depressa</i>	车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	草本 Herbal
草木犀 <i>Melilotus officinalis</i>	豆科 Fabaceae	草木樨属 <i>Melilotus</i>	草本 Herbal
博落回 <i>Macleaya cordata</i>	罂粟科 Papaveraceae	博落回属 <i>Macleaya</i>	草本 Herbal
白头婆 <i>Eupatorium japonicum</i>	菊科 Asteraceae	泽兰属 <i>Eupatorium</i>	草本 Herbal
紫茉莉 <i>Mirabilis jalapa</i>	紫茉莉科 Nyctaginaceae	紫茉莉属 <i>Mirabilis</i>	草本 Herbal
豨薟 <i>Sigesbeckia orientalis</i>	菊科 Asteraceae	豨薟属 <i>Sigesbeckia</i>	草本 Herbal
豚草 <i>Ambrosia trifida</i>	菊科 Asteraceae	豚草属 <i>Ambrosia</i>	草本 Herbal
酸模叶蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i>	蓼科 Polygonaceae	篇蓄属 <i>Polygonum</i>	草本 Herbal
商陆 <i>Phytolacca acinosa</i>	商陆科 Phytolaccaceae	商陆属 <i>Phytolacca</i>	草本 Herbal
三脉紫菀 <i>Aster trinervius</i>	菊科 Asteraceae	紫菀属 <i>Aster</i>	草本 Herbal
绿穗苋 <i>Amaranthus hybridus</i>	苋科 Amaranthaceae	苋属 <i>Amaranthus</i>	草本 Herbal
龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	茄科 Solanaceae	茄属 <i>Solanum</i>	草本 Herbal
兰花扁竹 <i>Iris confusa</i>	鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	草本 Herbal
苦苣 <i>Sonchus oleraceus</i>	菊科 Asteraceae	苦苣菜属 <i>Sonchus</i>	草本 Herbal
节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>	木贼科 Equisetaceae	木贼属 <i>Equisetum</i>	草本 Herbal
黄瓜菜 <i>Crepidiastrum denticulatum</i>	菊科 Asteraceae	假还阳参属 <i>Crepidiastrum</i>	草本 Herbal
野苘蒿 <i>Crassocephalum crepidioides</i>	菊科 Asteraceae	野苘蒿属 <i>Crassocephalum</i>	草本 Herbal
苎麻 <i>Boehmeria nivea</i>	荨麻科 Urticaceae	苎麻属 <i>Boehmeria</i>	灌木 Shrub
水麻 <i>Debregeasia orientalis</i>	荨麻科 Urticaceae	水麻属 <i>Debregeasia</i>	灌木 Shrub
地盘松 <i>Pinus yunnanensis</i>	松科 Pinaceae	松属 <i>Pinus</i>	乔木 Arbor
山薄荷 <i>Mentha canadensis</i>	唇形科 Lamiaceae	薄荷属 <i>Mentha</i>	草本 Herbal
头花蓼 <i>Polygonum capitatum</i>	蓼科 Polygonaceae	篇蓄属 <i>Polygonum</i>	草本 Herbal

2.5 聚类分析

本次调查中,没有一种植物体内重金属的含量达到超富集植物的临界值,但对 Cd 而言,已经有超过普通植物含量数十倍的植物,其已具备重金属富集植物的某些特征,有可能从中筛选出一些潜在的富集植物。为能更好地筛选出对重金属具有富集潜力的优势植物,选取每种植物地上部 Cd 含量的最大值和对应的富集转运系数作为参数,对 30 种优势植物进行聚类分析(图 4)。根据图 4,可将其划分为 4 个等级, I 级中的植物对 Cd

的转运系数均大于 2, II 级中的植物对 Cd 的转运系数介于 1~2 之间, III 级植物对 Cd 的转运系数介于 0.5~1 之间, IV 级中植物对 Cd 的转运系数均小于 0.5,地上部 Cd 含量与 Cd 超富集植物临界值的比值均小于 0.04。其中, I 级植物有龙葵和商陆, II 级植物有千里光、藿香蓟、鬼针草、野艾蒿, III 级植物有黄瓜菜、河北木蓝等 10 种, IV 级植物有节节草、紫茉莉等 12 种。其中, I 级中的龙葵和商陆地上部 Cd 含量较小,分别为 $3.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $7.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, II 级植物中的千里光、鬼针草、藿香

表 2 矿区土壤重金属含量统计 (单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 2 Statistics of heavy metal contents in mining area soil (Unit: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

矿区 Mining area	统计值 Statistic	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
菜园河分矿区 Caiyuanhe mining area	最大值 Maximum value	114.00	280.65	84.34	3681.71	9 752.12
	最小值 Minimum value	9.29	14.58	0.10	107.22	1 508.76
	平均值 Mean	46.03	54.15	24.52	610.49	4 453.05
	变异系数 Coefficient of variation (%)	68.80	129.01	96.65	168.60	67.58
	样本数 Number of samples	10	10	10	10	10
大坪分矿区 Daping mining area	最大值 Maximum value	197.75	14.78	15.56	105.14	1 566.88
	最小值 Minimum value	134.88	7.04	7.47	54.96	541.56
	平均值 Mean	173.07	10.28	11.36	75.94	893.77
	变异系数 Coefficient of variation (%)	13.63	30.88	26.23	44.56	44.56
	样本数 Number of samples	4	4	4	4	4
马坡分矿区 Mapo mining area	最大值 Maximum value	718.88	92.00	37.10	587.15	44 532.73
	最小值 Minimum value	36.15	18.55	13.46	241.06	2 517.35
	平均值 Mean	275.95	43.37	20.72	422.3	18 019.56
	变异系数 Coefficient of variation (%)	68.61	52.30	34.87	25.00	70.36
	样本数 Number of samples	9	9	9	9	9
狮子洞分矿区 Lion Cave mining area	最大值 Maximum value	434.40	310.85	36.26	761.41	46 909.00
	最小值 Minimum value	21.34	13.21	0.10	95.30	1 339.70
	平均值 Mean	225.25	62.23	16.87	283.59	15 576.55
	变异系数 Coefficient of variation (%)	66.22	116.46	60.90	58.97	78.52
	样本数 Number of samples	17	17	17	17	17
新桥分矿区 Xinqiao mining area	最大值 Maximum value	884.95	26.05	30.93	1211.84	45 229.89
	最小值 Minimum value	43.11	21.23	20.21	80.81	2 659.30
	平均值 Mean	464.03	23.64	25.57	646.30	23 994.00
	变异系数 Coefficient of variation (%)	90.71	10.19	20.96	87.50	88.90
	样本数 Number of samples	2	2	2	2	2
	贵州省平均值 Guizhou average	0.24	32.00	39.10	35.20	99.50

表 3 矿区土壤重金属有效态含量统计 (单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 3 Effective state statistics of heavy metals in mining area soil (Unit: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

矿区 Mining area	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
菜园河分矿区 Caiyuanhe mining area	6.02±2.99	10.07±13.16 **	7.06±9.14 **	167.77±205.42 **	728.88±680.08 **
大坪分矿区 Daping mining area	26.12±7.92	2.97±0.97 **	2.54±1.29 **	23.10±5.27 **	84.28±51.69 **
马坡分矿区 Mapo mining area	21.19±14.76	10.03±9.48 **	3.32±2.96 **	58.32±32.19 **	2 647.74±2 463.05 **
狮子洞分矿区 Lion Cave mining area	16.71±16.39	15.57±15.26 **	3.57±2.87 **	38.39±20.99 **	1 804.15±1 637.33 **
新桥分矿区 Xinqiao mining area	7.17±1.50	6.66±2.63 **	8.91±2.64 **	6.68±6.18 **	3 476.95±2 996.92 **

注: ** 表示有效态与全量在 0.01 水平上有显著的相关性。

Note: ** indicates a significant correlation between the effective state and the total quantity at 0.01 level.

藎、野艾蒿地上部 Cd 含量分别为 40.33、43.26、21.60、22.89 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 转运系数和富集系数(地上

部分)分别为 1.35 和 0.20、1.16 和 0.37、1.65 和 0.28、1.61 和 0.77。

表 4 不同矿区植物体内重金属含量

Table 4 Heavy metal contents of plants in different mining areas

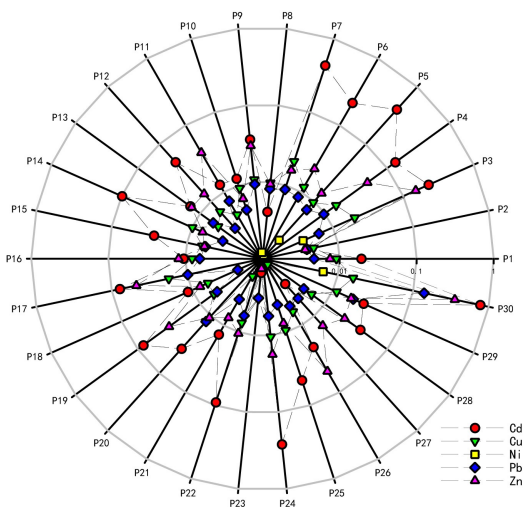
矿区 Mining area	植物 Plant	部位 Position	重金属含量 Heavy metal content ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)				
			Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
菜园河分矿区 Caiyuanhe mining area	河北木蓝	地上部 Aboveground	0.39	4.77	0.28	3.69	36.90
	<i>Indigofera bungeana</i>	地下部 Underground	0.72	5.41	1.36	13.56	72.85
	野艾蒿	地上部 Aboveground	22.89	20.43	3.77	6.33	1 503.58
	<i>Artemisia lavandulaefolia</i>	地下部 Underground	14.21	9.10	0.77	1.41	326.53
	藿香蓟	地上部 Aboveground	21.60	11.86	1.08	8.43	223.33
	<i>Ageratum conyzoides</i>	地下部 Underground	13.07	9.41	1.35	10.74	361.35
	鬼针草	地上部 Aboveground	13.46	15.27	0.68	8.86	161.67
	<i>Bidens pilosa</i>	地下部 Underground	11.25	25.32	2.76	37.45	870.01
	草木犀	地上部 Aboveground	1.24	9.17	0.63	4.67	66.20
	<i>Melilotus officinalis</i>	地下部 Underground	1.53	8.40	0.63	4.19	108.31
	博落回	地上部 Aboveground	1.29	4.57	0.69	7.34	388.90
	<i>Macleaya cordata</i>	地下部 Underground	1.90	3.91	0.64	4.32	669.05
	紫茉莉	地上部 Aboveground	1.44	5.13	0.49	6.19	137.36
	<i>Mirabilis jalapa</i>	地下部 Underground	41.45	173.36	2.78	611.10	1 982.72
	酸模叶蓼	地上部 Aboveground	1.06	8.20	0.45	6.54	123.06
	<i>Polygonum lapathifolium</i>	地下部 Underground	13.33	21.55	4.50	157.04	613.94
	绿穗苋	地上部 Aboveground	8.15	6.03	0.66	5.35	315.42
	<i>Amaranthus hybridus</i>	地下部 Underground	10.00	6.96	4.23	12.08	333.42
	大坪分矿区 Daping mining area	龙葵	地上部 Aboveground	3.72	12.42	0.90	12.46
<i>Solanum nigrum</i>		地下部 Underground	1.59	7.45	1.89	28.27	122.62
千里光		地上部 Aboveground	40.33	9.31	2.11	7.22	139.62
<i>Senecio scandens</i>		地下部 Underground	29.91	12.00	1.44	4.77	270.11
鬼针草		地上部 Aboveground	25.84	12.65	1.12	6.40	104.67
<i>Bidens pilosa</i>		地下部 Underground	27.92	5.33	0.79	3.68	56.95
豚草		地上部 Aboveground	2.75	6.32	0.95	5.70	59.10
<i>Ambrosia trifida</i>		地下部 Underground	8.27	7.81	0.91	3.99	57.25
苦苣		地上部 Aboveground	9.09	7.47	0.60	5.97	104.24
<i>Sonchus oleraceus</i>		地下部 Underground	11.37	4.24	0.99	2.73	72.75
马坡分矿区 Mapo mining area	醉鱼草	地上部 Aboveground	0.80	9.10	0.40	4.54	31.63
	<i>Buddleja lindleyana</i>	地下部 Underground	1.29	8.32	0.29	2.75	161.00
	小蓬草	地上部 Aboveground	8.67	7.66	0.61	9.63	423.84
	<i>Erigeron canadensis</i>	地下部 Underground	7.54	5.36	1.69	14.51	405.34
	鬼针草	地上部 Aboveground	43.26	21.33	0.50	7.39	461.22
	<i>Bidens pilosa</i>	地下部 Underground	37.16	26.60	2.79	36.61	1 481.94
	商陆	地上部 Aboveground	7.81	17.53	0.52	9.81	471.36
	<i>Phytolacca acinosa</i>	地下部 Underground	2.75	10.49	1.22	8.78	213.90
	兰花扁竹	地上部 Aboveground	1.37	1.83	0.16	4.05	76.44
	<i>Iris confusa</i>	地下部 Underground	15.34	4.08	1.93	19.03	1 418.58
	黄爪菜	地上部 Aboveground	26.40	10.41	0.57	5.60	176.68
	<i>Crepidiastrum denticulatum</i>	地下部 Underground	34.70	6.99	1.56	20.79	1013.59
水麻	地上部 Aboveground	0.28	1.26	0.50	4.91	147.37	

续表 4

矿区 Mining area	植物 Plant	部位 Position	重金属含量 Heavy metal content (mg · kg ⁻¹)				
			Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
狮子洞分矿区 Lion Cave mining area	<i>Debregeasia orientalis</i>	地下部 Underground	15.26	3.73	1.93	19.05	1 402.33
	山薄荷	地上部 Aboveground	2.72	11.32	0.85	19.46	182.02
	<i>Mentha canadensis</i>	地下部 Underground	—	—	—	—	—
	头花蓼	地上部 Aboveground	77.49	15.92	6.39	139.06	3 557.96
	<i>Polygonum capitatum</i>	地下部 Underground	—	—	—	—	—
	醉鱼草	地上部 Aboveground	1.92	4.76	0.62	4.66	75.50
	<i>Buddleja lindleyana</i>	地下部 Underground	16.48	5.05	4.94	17.88	1 047.29
	河北木蓝	地上部 Aboveground	0.22	3.08	0.18	3.88	19.50
	<i>Indigofera bungeana</i>	地下部 Underground	0.57	5.73	0.47	0.31	52.39
	野艾蒿	地上部 Aboveground	0.45	11.06	0.91	4.07	84.74
	<i>Artemisia lavandulifolia</i>	地下部 Underground	13.49	10.23	1.31	8.76	1 045.05
	小蓬草	地上部 Aboveground	13.51	15.15	0.61	4.01	482.73
	<i>Erigeron canadensis</i>	地下部 Underground	13.63	6.64	1.42	19.10	658.24
	千里光	地上部 Aboveground	3.01	9.65	0.73	4.85	105.60
	<i>Senecio scandens</i>	地下部 Underground	12.67	9.46	12.45	12.21	862.21
	藿香蓟	地上部 Aboveground	16.02	6.62	0.66	4.40	162.41
	<i>Ageratum conyzoides</i>	地下部 Underground	29.16	21.59	5.25	47.19	1 063.08
	鬼针草	地上部 Aboveground	7.16	7.39	0.61	4.01	99.72
	<i>Bidens pilosa</i>	地下部 Underground	7.47	9.97	2.68	19.65	442.63
	旋花	地上部 Aboveground	0.41	8.95	0.89	4.36	94.87
	<i>Calystegia sepium</i>	地下部 Underground	3.35	10.43	1.22	1.15	416.08
	平车前	地上部 Aboveground	3.59	10.78	1.21	9.39	298.07
	<i>Plantago depressa</i>	地下部 Underground	8.75	20.50	2.01	9.19	772.98
	白头婆	地上部 Aboveground	4.86	6.66	0.53	3.41	135.95
	<i>Eupatorium japonicum</i>	地下部 Underground	4.86	7.48	1.05	4.34	263.41
	豨莶	地上部 Aboveground	9.89	9.93	0.50	3.67	70.97
	<i>Sigesbeckia orientalis</i>	地下部 Underground	12.05	9.95	5.13	20.66	212.15
	三脉紫菀	地上部 Aboveground	1.15	5.96	0.42	2.25	76.99
	<i>Aster trinervius</i>	地下部 Underground	3.46	9.84	5.39	18.24	314.30
	节节草	地上部 Aboveground	0.15	3.33	0.19	3.26	13.48
	<i>Equisetum ramosissimum</i>	地下部 Underground	20.44	42.34	2.67	42.76	1 611.86
	野苘蒿	地上部 Aboveground	4.55	9.41	0.57	4.24	76.01
<i>Crassocephalum crepidioides</i>	地下部 Underground	13.24	12.46	4.30	12.05	194.22	
苎麻	地上部 Aboveground	2.11	6.19	0.44	5.12	486.27	
<i>Boehmeria nivea</i>	地下部 Underground	13.68	10.01	0.58	10.58	1 256.46	
地盘松	地上部 Aboveground	3.71	6.12	0.71	4.59	207.82	
<i>Pinus yunnanensis</i>	地下部 Underground	12.86	9.30	1.49	11.38	654.87	
新桥分矿区 Xinqiao mining area	醉鱼草	地上部 Aboveground	0.32	7.87	0.55	4.02	48.36
	<i>Buddleja lindleyana</i>	地下部 Underground	1.49	6.01	0.51	2.65	152.35
	旋花	地上部 Aboveground	0.23	9.80	0.54	8.18	48.85
	<i>Calystegia sepium</i>	地下部 Underground	1.30	21.54	1.08	0.01	99.44

注: — 代表无数据。

Note: — represents no data.



P1. 醉鱼草; P2. 河北木蓝; P3. 野艾蒿; P4. 小蓬草; P5. 千里光; P6. 藜香蓟; P7. 鬼针草; P8. 旋花; P9. 平车前; P10. 草木犀; P11. 博落回; P12. 白头婆; P13. 紫茉莉; P14. 豨莶; P15. 豚草; P16. 酸模叶蓼; P17. 商陆; P18. 三脉紫菀; P19. 绿穗苋; P20. 龙葵; P21. 蓝花扁竹; P22. 苦苣; P23. 节节草; P24. 黄瓜菜; P25. 野苘蒿; P26. 苕麻; P27. 水麻; P28. 地盘松; P29. 山薄荷; P30. 头花蓼。下同。

P1. *Buddleja lindleyana*; P2. *Indigofera bungeana*; P3. *Artemisia lavandulaefolia*; P4. *Erigeron canadensis*; P5. *Senecio scandens*; P6. *Ageratum conyzoides*; P7. *Bidens Pilosa*; P8. *Calystegia sepium*; P9. *Plantago depressa*; P10. *Melilotus officinalis*; P11. *Macleaya cordata*; P12. *Eupatorium japonicum*; P13. *Mirabilis jalapa*; P14. *Sigesbeckia orientalis*; P15. *Ambrosia trifida*; P16. *Polygonum lapathifolium*; P17. *Phytolacca acinosa*; P18. *Aster trinervius*; P19. *Amaranthus hybridus*; P20. *Solanum nigrum*; P21. *Iris confuse*; P22. *Sonchus oleraceus*; P23. *Equisetum ramosissimum*; P24. *Crepidiastrum denticulatum*; P25. *Crassocephalum crepidioides*; P26. *Boehmeria nivea*; P27. *Debregeasia orientalis*; P28. *Pinus yunnanensis*; P29. *Mentha canadensis*; P30. *Polygonum capitatum*. The same below.

图 1 地上部各重金属含量最大值/临界值

Fig. 1 Maximum value/critical value of heavy metal content in the part of aboveground

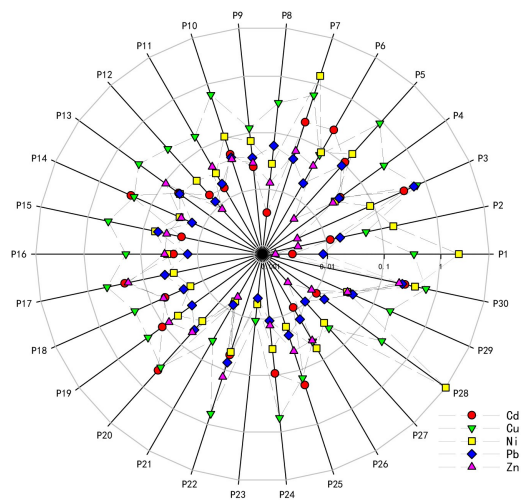


图 2 优势植物对重金属的富集系数(地上部分)

Fig. 2 Enrichment coefficients of dominant plants for heavy metals(aboveground)

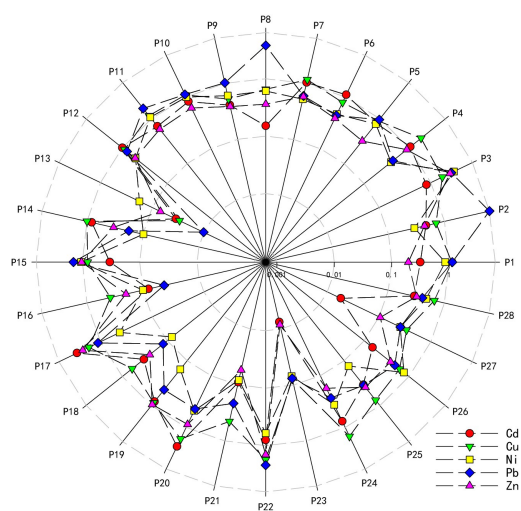


图 3 优势植物对重金属的转运系数

Fig. 3 Transport coefficients of dominant plants to heavy metals

3 讨论与结论

富集植物一般是指植物的地上部分对重金属的吸收量比普通植物高十倍以上,且不影响正常的生命活动的植物。一些植物常年生活在重金属高背景区域,经过不断地驯化后,对重金属具有很强的耐性,能在重金属含量比较高的土壤中正常生长,这些植物被称为耐性植物。

植物为了适应矿区复杂的生存环境,逐渐对重金属具备一定的抗性,但每种植物对不同重金属的适应能力和抵抗能力各不相同。根据植物对土壤重金属的不同耐性将植物划分为富集型植物、根部囤积型植物和规避型植物三种(雷梅等, 2005; Vaculik et al., 2012)。

富集型植物能够大量吸收重金属并将其运移到地上部。对于土壤重金属的治理与修复,关键

表5 不同级别植物间差异性分析
Table 5 Analysis of differences between different levels of plants

植物类别 Plant category	地上部 Cd 含量 Cd content of aboveground	富集系数 (地上部分) Enrichment coefficient (Aboveground)	转运系数 Transport coefficient
I 级植物 Grade I plants	0.06± 0.03b	0.31± 0.13a	2.59± 0.36a
II 级植物 Grade II plants	0.32± 0.11a	0.41± 0.25a	1.45± 0.22b
III 级植物 Grade III plants	0.07± 0.08b	0.06± 0.07b	0.74± 0.27c
IV 级植物 Grade IV plants	0.02± 0.02b	0.04± 0.05b	0.24± 0.23d

注: 不同字母表示不同组之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences between different groups ($P < 0.05$).

是找到合适的富集植物, 目前许多学者在这方面已做了大量研究。印度芥菜(杨卓等, 2011; 麦笑桃等, 2019)、宝山堇菜(刘威等, 2003; 邓培雁等, 2007)等具有很好的 Cd 富集能力, 但其生物量较小, 故在实际的工程应用中也无法推广。本研究中鬼针草和千里光作为一种田间杂草, 具有生命力强、易培育、生物量大等优点。采于马坡分矿区的鬼针草和采于大坪分矿区的千里光地上部 Cd 含量分别为 43.26、40.33 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远大于重金属在植物体内的正常含量, 转运系数分别为 1.35 和 1.16, 富集系数(地上部分)分别为 0.20 和 0.37, 表明千里光和鬼针草可以分别用于大坪分矿区和马坡分矿区土壤 Cd 污染的治理和修复。采于马坡分矿区的头花蓼地上部 Cd、Zn 含量均为 30 种植物的最大值, 表明头花蓼是一种 Cd、Zn 复合污染潜在修复植物, 可用于马坡分矿区土壤 Cd、Zn 污染的治理。采于狮子洞分矿区的醉鱼草对 Ni 的富集系数(地上部分)和转运系数分别为 6.16 和 1.37, 均大于 1, 其地上部 Ni 含量仅为 0.62 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 导致富集系数(地上部分)大于 1 的原因是醉鱼草根系土壤中 Ni 含量过低, 虽然醉鱼草对 Ni 有较大的富集转运系数, 但醉鱼草是否能用来治理狮子洞分矿区土壤 Ni 污染, 还需进一步的研究加以验证。

根部囤积型植物则是被动地吸收土壤中的重金属, 虽然能将重金属吸收至体内, 但大部分重金

属只囤积在根部, 而不向地上部转移, 从而减少对植物体的伤害。采于狮子洞分矿区的节节草和采于菜园河分矿区的紫茉莉, 均属于 IV 级植物, 其中节节草和紫茉莉根部 Cd、Cu、Pb 的含量介于 20.44~611.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 地上部 Cd、Cu、Pb 的含量介于 0.15~6.19 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 根部 Zn 含量均超过 1 600 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 地上部 Zn 含量均小于 140 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明节节草和紫茉莉能够适应不同程度的污染土壤, 并将重金属吸收到地下部根系中, 属于根部囤积型植物。

规避型植物则是能抵制对重金属的吸收, 将土壤重金属沉积在根系表面, 植物体内则很少吸收重金属。采于菜园河分矿区的河北木蓝, 属于 III 级植物, 根部 Cd、Cu、Zn 的含量分别为 0.72、5.41、72.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 地上部 Cd、Cu、Zn 的含量分别为 0.39、4.77、36.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明河北木蓝不易从土壤中吸收重金属, 属于规避型植物。

根部囤积型和规避型植物, 可用于矿区的复垦, 减少矿区对周围环境的伤害。因此, 节节草可用于狮子洞分矿区, 紫茉莉和河北木蓝可用于菜园河分矿区的矿区复垦工作, 从而实现矿区的可持续发展。

参考文献:

- DENG PY, LIU W, HAN BP, 2007. Photosynthesis of *Viola baoshanensis* under cadmium stress [J]. *Acta Ecol Sin*, 27(5): 1858–1862. [邓培雁, 刘威, 韩博平, 2007. 宝山堇菜(*Viola baoshanensis*) 镉胁迫下的光合作用 [J]. *生态学报*, 27(5): 1858–1862.]
- DONG B, 2012. Prospects of research on heavy metal pollution remediation in China soil [J]. *Ecol Sci*, 31(6): 683–687. [董彬, 2012. 中国土壤重金属污染修复研究展望 [J]. *生态科学*, 31(6): 683–687.]
- FU GY, QIU YQ, SONG BY, et al., 2019. Characteristics of heavy metal enrichment of dominant plants in Dongjiang Lake lead-zinc slag dump [J]. *J Cent S Univ Technol*, 39(4): 117–122. [付广义, 邱亚群, 宋博宇, 等, 2019. 东江湖铅锌矿渣堆场优势植物重金属富集特征 [J]. *中南林业科技大学学报*, 39(4): 117–122.]
- GERBER GB, LEONARD A, 2002. Ph Hantson. Carcinogenicity, mutagenicity and teratogenicity of manganese compounds [J]. *Crit Rev Oncol Hematol*, 42(1): 25–34.
- LEI M, YUE QL, CHEN TB, et al., 2005. Soil heavy metal content and plant absorption characteristics in Shizhuyuan

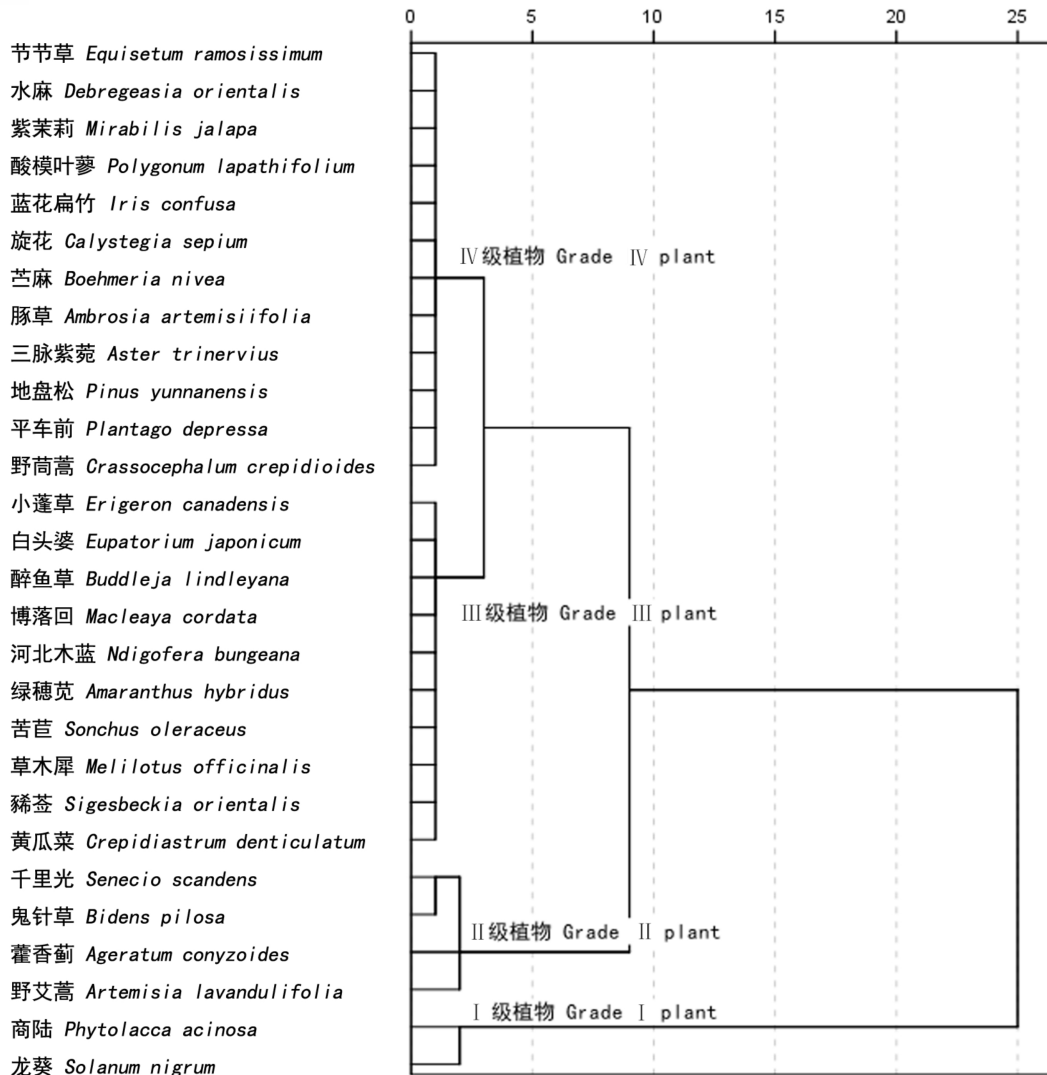


图 4 地上部 Cd 含量、富集系数(地上部分)、转运系数聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of aboveground Cd contents, enrichment coefficients (aboveground part), and transport coefficients

mining area, Hunan [J]. *J Ecol*, 25(5): 1146–1151. [雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 等, 2005. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征 [J]. *生态学报*, 25(5): 1146–1151.]

LI JK, ZHANG D, ZHOU P, et al., 2018. Evaluation of soil heavy metal pollution and the enrichment characteristics of dominant plants in lead-zinc ore mine in Nanjing [J]. *EnvironSci*, 39(8): 3845–3853. [李俊凯, 张丹, 周培, 等, 2018. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 [J]. *环境科学*, 39(8): 3845–3853.]

LIU W, SHU WS, LAN CY, 2003. *Viola baoshanensis*, a new cadmium super-enrichment plant [J]. *Chin Sci Bull*, 54(19): 2046–2049. [刘威, 束文圣, 蓝崇钰, 2003. 宝山

堇菜(*Viola baoshanensis*)一种新的镉超富集植物 [J]. *科学通报*, 54(19): 2046–2049.]

LI SL, YANG B, CHEN Y, et al., 2016. Soil heavy metal pollution and screening of heavy metal super-enriched plants in lead-zinc mining areas of Zhejiang Province [J]. *Environ Pollut Contr*, 38(5): 48–54. [李思亮, 杨斌, 陈燕, 等, 2016. 浙江省铅锌矿区土壤重金属污染及重金属超富集植物筛选 [J]. *环境污染与防治*, 38(5): 48–54.]

LONG XX, YANG XE, 2000. Plant nickel nutrition [J]. *Chin J Soil Sci*, 31(1): 39–42. [龙新宪, 杨肖娥, 2000. 植物镍营养 [J]. *土壤通报*, 31(1): 39–42.]

MAI XT, LUO DG, YAO GC, et al., 2019. NTA-enhanced Indian mustard to repair Cd, Pb contaminated soil and heavy metal leakage characteristic [J]. *Guangdong Chem Ind*,

- 46(10): 31–35. [麦笑桃, 罗定贵, 姚广超, 等, 2019. NTA 强化印度芥菜修复 Cd、Pb 污染土及重金属渗漏特征 [J]. 广东化工, 46(10): 31–35.]
- MAO HL, LONG CM, CHEN GC, et al., 2011. Characteristics of absorption and enrichment of heavy metals by plants in lead-zinc mining areas [J]. *Environ Sci Technol*, 34(12): 114–118. [毛海立, 龙成梅, 陈贵春, 等, 2011. 铅锌矿区植物对重金属吸收和富集特征研究 [J]. 环境科学与技术, 34(12): 114–118.]
- SARWAR N, IMRAN M, SHAHEEN MR, et al., 2017. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives [J]. *Chemosphere*, 171: 710–721.
- SHARIFINIA M, MAHMOUDIFARD A, NAMIN JI, et al., 2016. Pollution evaluation in the Shahrood River: Do physico-chemical and macroinvertebrate-based indices indicate same responses to anthropogenic activities? [J]. *Chemosphere*, 159: 584–594.
- SUN Z, CHEN J, WANG XW, et al., 2016. Heavy metal accumulation in native plants at a metallurgy waste site in rural areas of northern China [J]. *Ecol Eng*, 86: 60–68.
- VACULIK M, KONLECHNER C, LANG I, et al., 2012. Root anatomy and element distribution vary between two *Salix caprea* isolates with different Cd accumulation capacities [J]. *Environ Poll*, 163: 117–126.
- WAN XM, LEI M, YANG JX, 2017. Two potential multi-metal hyper accumulators found in four mining sites in Hunan Province, China [J]. *Catena*, 148: 67–73.
- WEI SH, ZHOU QX, WANG X, et al., 2003. Screening of plants with heavy metal superaccumulation in weeds [J]. *Adv Nat Sci*, 13(12): 29–35. [魏树和, 周启星, 王新, 等, 2003. 杂草中具重金属超积累特征植物的筛选 [J]. 自然科学进展, 13(12): 29–35.]
- XIONG YW, TANG B, LIN XY, et al., 2016. The content of heavy metals in the soil and absorption characteristics of dominant plants in the manganese mining area of Xiangxi [J]. *Anhui Agric Sci*, 44(8): 84–87. [熊云武, 唐彪, 林晓燕, 等, 2016. 湘西锰矿区土壤重金属含量及优势植物吸收特征 [J]. 安徽农业科学, 44(8): 84–87.]
- YANG C, YUE J, CHEN JF, et al., 2010. Study on the distribution characteristics of heavy metals in sediments and plants of Taiyuan section of Fenhe River [J]. *J Shanxi Univ (Nat Sci Ed)*, 33(S1): 63–65. [杨成, 岳娟, 陈金凤, 等, 2010. 汾河太原段沉积物和植物中重金属分布特征的研究 [J]. 山西大学学报(自然科学版), 33(S1): 63–65.]
- YANG Z, CHEN J, LI BW, 2011. Comparative study on Cd · Pb · Zn enrichment capacity of different Indian mustard cultivars to hypo brown soil [J]. *Anhui Agric Sci*, 39(14): 8412–8414. [杨卓, 陈婧, 李博文, 2011. 不同品种印度芥菜对潮褐土 Cd · Pb · Zn 富集能力的比较研究 [J]. 安徽农业科学, 39(14): 8412–8414.]
- ZHANG F, WANG XH, LUO ZH, et al., 2018. Selection of phytoremediation plants for heavy metal cadmium contaminated soil in Guizhou [J]. *Agric Technol Serv*, 35(1): 85–87. [张芳, 王晓红, 罗泽虎, 等, 2018. 贵州重金属镉污染土壤的修复植物选择 [J]. 农技服务, 35(1): 85–87.]
- ZHANG HM, YUAN Y, JIAO H, et al., 2015. Absorption and enrichment characteristics of heavy metals by eight settled plants in Acacia Valley tailings [J]. *J Eco-Environ*, 24(5): 886–891. [张会敏, 袁艺, 焦慧, 等, 2015. 相思谷尾矿 8 种定居植物对重金属吸收及富集特性 [J]. 生态环境学报, 24(5): 886–891.]
- ZHANG J, WEI HR, YANG RD, et al., 2018. Study on distribution characteristics of heavy metals in tailings from Nuijiaotang lead-zinc mine area, Duyun City, Guizhou Province [J]. *Nonfer Metals Eng*, 8(1): 122–127. [张建, 魏怀瑞, 杨瑞东, 等, 2018. 贵州都匀牛角塘铅锌矿区选矿尾矿中重金属元素分布特征研究 [J]. 有色金属工程, 8(1): 122–127.]
- ZOU CP, CHEN JF, SUN YB, et al., 2015. Experimental study on cadmium enrichment and migration characteristics of *leucopsis alba* [J]. *S Agric*, 9(7): 23–26. [邹春萍, 陈金峰, 孙映波, 等, 2015. 白花鬼针草对镉的富集与迁移特性试验研究 [J]. 南方农业, 9(7): 23–26.]

(责任编辑 蒋巧媛)