

百方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12  
第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

京津冀秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染概况和预报结果评估 ..... 朱媛媛,高愈霄,刘冰,王晓彦,朱莉莉,许荣,汪巍,丁俊男,李健军,段小丽(5191)

2016~2017年采暖期华北平原东部 PM<sub>2.5</sub> 组分特征及来源解析 ..... 张逸琴,王杰,高健,徐仲均,车飞,马彤,杨艳,刘素,闫璐璐(5202)

霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 ..... 王振彬,刘安康,卢文,杨晓旻,王红磊,陈魁,夏丽(5213)

上海郊区家庭妇女 PM<sub>2.5</sub> 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 ..... 罗燃燃,戴海夏,张蕴晖,乔利平,马英歌,周敏,夏斌,朱清扬,赵迎亚,黄成(5224)

固定污染源可凝结颗粒物测量方法 ..... 蒋靖坤,邓建国,王刚,张莹,李妍菁,段雷,郝吉明(5234)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 ..... 张嘉妮,曾春玲,刘锐源,姚懿娟,柯云婷,范丽雅,叶代启(5240)

抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 ..... 竹涛,吕怡蓉,边文璟,牛文凤,袁前程,段二红,于洋,林军(5250)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 ..... 李琦路,吴锦涛,张颖,孙玉静,乔泓钦,张子伟,裴梦园,张孟琼,任明浩(5258)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 ..... 方淑红,朱和祥,叶芝祥,印红玲,孙静(5265)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 ..... 张百娟,李宗省,王昱,李永格,吕越敏,袁瑞丰,桂娟(5272)

长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 ..... 封梦娟,张芹,宋宁慧,卜元卿,杨正标,刘艳华,郭瑞昕,陈建秋,张圣虎(5286)

夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 ..... 程丽杰,黄廷林,程亚,张莎莎,阮昭意,卢磊(5294)

浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 ..... 刘俊萍,于建全,李青松,马晓雁,杨玉龙,贾佳(5302)

三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 ..... 陈昭宇,李思悦(5309)

川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 ..... 刘堰杨,孙辉,刘琛,王小沁(5318)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 ..... 曹瑞霞,刘京,邓开开,先宇,王伟,方芳,欧阳文娟,郭劲松(5330)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 ..... 黄亚玲,唐莉,黄金良,肖才荣(5340)

不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 ..... 方娜,刘玲玲,游清徽,田娜,吴燕平,阳文静(5348)

太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 ..... 耿雪,文帅龙,孙培荣,徐楚天,李大鹏,黄勇(5358)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 ..... 方家琪,祁闯,张新厚,韩睿明,黄和笑,王卓森,王国祥(5367)

降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 ..... 李晓虹,雷秋良,周脚根,张亦涛,李影,胡万里,武淑霞,翟丽梅,王洪媛,刘宏斌(5375)

外源 Ca<sup>2+</sup> 和 K<sup>+</sup> 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 ..... 吴丹,孙萍,陈广琳,陈友媛,彭昌盛(5384)

泽泻(*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 ..... 王团团,李贝贝,王赛,华佩,陈军,应光国(5394)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 ..... 刘冰,郑煜铭,李清飞,赵承美,魏巍,张凯(5401)

锆、镧和镧锆改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 ..... 刘婷,赵钰颖,林建伟,詹艳慧,秦琴(5411)

生物炭结构性对氨氮的吸附特性影响 ..... 陈梅,王芳,张德俐,易维明(5421)

溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 ..... 王嗣禹,刘灵婕,王芬,季民(5430)

间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 ..... 李冬,刘志成,徐贵达,李帅,张杰(5438)

共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 ..... 王茹,刘梦瑜,刘冰茵,赵治国,袁林江(5446)

阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬,魏子清,劳会妹,李帅,张杰(5456)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 ..... 俞心怡,向金豪,刘英,龚天翼,张彬辉,吕文洲(5465)

基于 GEE 的 1998~2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 ..... 娄佩卿,付波霖,林星辰,闭璐,马瑞雪,唐廷元(5473)

基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 ..... 解雪峰,濮励杰,朱明,吴涛,许艳(5484)

淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响 ..... 李敬,黄佳芳,罗敏,刘育秀,谭季,朱爱菊,王声钰,仝川(5493)

养殖塘 CH<sub>4</sub> 排放特征及其影响因素 ..... 王娇,肖薇,张秀芳,张弥,张文庆,刘强,陈争,董保华,李旭辉(5503)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 ..... 严俊霞,张媛,焦晓燕(5515)

高硒高镉区土地安全区划方法 ..... 王锐,侯宛苓,李雨潼,余涛,陈娟(5524)

不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 ..... 陈树兰,许晨阳,耿增超,王强,祝乐,龚园,拓卫卫(5531)

水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 ..... 吴秋梅,刘刚,王慧峰,胡文友,黄标(5540)

狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 ..... 黄健,朱旭炎,陆金,孙雨,赵兴青(5550)

林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 ..... 王蕊,吴宪,李刚,修伟明,王丽丽,张贵龙(5561)

**粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑**

粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 ..... 常春英,董敏刚,邓一荣,肖荣波,刘丽丽(5570)

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 ..... 张宁,张盛,杨海超,张建通(5581)

城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响:以粤港澳大湾区为例 ..... 马仕君,周传斌,杨光,赵志岚,刘懿颀(5593)

粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 ..... 侯文隽,龚星,詹泽波,刘锋,黄子航,杨立宏,林晓琛(5604)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 ..... 邓一荣,陆海建,董敏刚,程洲,庄长伟,肖荣波,钟音,彭平安(5615)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 ..... 刘千钧,李想,周阳媚,唐杰鹏,林亲铁,姚琨(5623)

广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 ..... 陈洁宜,刘广波,崔金立,肖唐付(5629)

Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 ..... 林挺,罗飞,朱艳,杨坤,郝秀平(5640)

《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 ..... (5649)

《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

# 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价

陈洁宜, 刘广波, 崔金立\*, 肖唐付

(广州大学环境科学与工程学院, 珠江三角洲水质安全与保护教育部重点实验室, 广州 510006)

**摘要:** 为研究矿区重金属在土壤-植物体系中的分布特征、迁移过程以及生态风险, 分析了广东大宝山废弃采矿场地及附近农田的土壤和植物中重金属含量, 揭示了重金属从土壤到植物的迁移累积特征, 并评价了其生态风险。结果表明, 研究区域大部分土壤 pH 小于 5, Cu、Pb 及 Al 等重金属易从土壤中释放并被植物吸收累积。沙溪镇农田 Cd 污染严重, 凡洞废弃采矿场地受 Cd、Pb、Cu 和 As 污染严重, 存在严重的生态风险。新江镇农田也存在严重的生态风险, Cu、As 和 Cd 是主要的潜在生态风险因子。采集的 8 种植物大多数重金属含量均高于一般植物, 尤其是 Al 和 Fe 的含量。植物地上部分 10% 的 BCF 和 18% 的 TF 值高于 1, 表明植物吸收的重金属基本累积在根部。废弃矿区乌毛蕨和芒草地上部分重金属含量不高, 是重金属耐受规避型植物, 具备潜在的土壤重金属污染固定修复能力。农田杂草裸柱菊对 Cd 表现出较强的富集能力; 水稻主要在根部富集 As 及 Cd, 属于根部囤积型植物。

**关键词:** 重金属; 土壤; 植物; 风险评价; 大宝山

中图分类号: X171.5; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5629-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906229

## Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China

CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li\*, XIAO Tang-fu

(Key Laboratory for Water Quality and Conservation of the Pearl River Delta, Ministry of Education, School of Environmental Science and Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** This study analyzed heavy metal concentrations in mining/agricultural soil and plant samples from the Dabaoshan mining-impacted region, Guangdong Province, and evaluated the corresponding health risks. The results showed that most of the soil samples exhibited a pH < 5, which, in some cases, facilitated the release of Cu, Pb, and Al from soil and hence affected the availability for plant uptake. Farmland in Shaxi town was found to be seriously polluted by Cd, whereas the mining area was seriously polluted by Cd, Pb, Cu, and As, which present potential ecological risks. Farmland in Xinjiang town was seriously polluted by Cu, As, and Cd, and also present ecological risks for this area. The concentrations of heavy metals (especially Al and Fe) in the eight plant species assessed were mostly higher than that in plants grown in non-contaminated soil. Only 10% of the bioconcentration factors and 18% of the translocation factors were higher than 1 in the aerial parts of plants, indicating that most heavy metals were concentrated in plant roots. Heavy metal concentrations in shoots of *Miscanthus* and *Blechnum orientale* were not high, and their accumulation from soil to plant was poor. These plants are excluder species and can be used for *in situ* phyto-stabilization and management. Weeds like *Soliva anthemifolia* species in contaminated agricultural field showed a strong enrichment ability for Cd. Rice mainly accumulated As and Cd in the roots and belongs to root compartment plants.

**Key words:** heavy metal; soil; plant; risk assessment; Dabaoshan Mountain

硫化物矿产资源开发过程往往产生大量尾矿, 易产生富含重金属的酸性矿山废水 (acid-mine drainage, AMD)<sup>[1~4]</sup>, 造成矿区流域水体及土壤重金属污染, 威胁区域生态系统安全<sup>[5]</sup>。全球受 AMD 污染的典型矿区包括葡萄牙阿尔乔斯特尔 (Aljustrel) Zn-Cu 矿区<sup>[6]</sup> 和帕纳什凯拉 (Panasqueira) Sn-W 矿<sup>[7]</sup>, 波兰 Podwiśniówka 石英-黄铁矿区<sup>[8]</sup>, 美国亚利桑那州巴塔哥尼亚山矿区 (Patagonia Mountains)<sup>[9]</sup> 及我国广东大宝山铜铁矿区<sup>[10]</sup>。在大宝山矿区, AMD 污染涉及到约 83 个村庄, 影响到 585 × 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> 的稻田和 21 × 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> 的池塘<sup>[11]</sup>; 矿区附近的农田受污水灌溉的影响, 土壤中 Cu (502

mg·kg<sup>-1</sup>)、Zn (498 mg·kg<sup>-1</sup>)、Pb (278 mg·kg<sup>-1</sup>) 和 Cd (3.92 mg·kg<sup>-1</sup>) 的平均含量远超中国土壤二级标准<sup>[12]</sup>。重金属进入土壤环境后, 可经根系被植物吸收。有研究发现, 污染农田上种植的蔬菜和 大米中 Pb、Zn 和 Cd 平均含量分别超过国家卫生标准限值 4.0、1.1 和 5.6 倍以及 7.0、3.4 和 2.9 倍, 对珠三角地区生态健康造成严重威胁<sup>[13]</sup>。前人对大宝山矿区水体、土壤、沉积物和植物中重金属污染及环境影响

收稿日期: 2019-06-30; 修订日期: 2019-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41603093)

作者简介: 陈洁宜 (1994 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属环境地球化学, E-mail: 470416795@qq.com

\* 通信作者, E-mail: jlcui@gzhu.edu.cn

效应开展了大量有意义的研究工作<sup>[14~17]</sup>,并寻找植物物种进行矿区重金属污染生态修复<sup>[18~20]</sup>.然而,大宝山矿区乡土植物中重金属迁移累积特征及其生态风险的认识尚有不足.因此,本文以大宝山矿区周围的沙溪镇农田、凡洞废弃采矿场地以及新江镇农田土壤中的优势植物为研究对象,分析重金属在土壤中的污染分布情况,讨论重金属在土壤-植物中的迁移行为,综合评价重金属污染风险并探讨当地生态恢复的可能性,以期为该地区土壤重金属生态修复提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

大宝山矿区(24°31'28"N, 113°43'42"E)位于广东省韶关市北部(图1),该地区属亚热带季风气候,年均气温 20.3℃,降雨量 1 782 mm. 矿区为大型多金属硫化物矿床,主要矿物包括黄铁矿、磁黄铁矿与黄铜矿,含有少量闪锌矿和方铅矿,储量约为 1 亿 t 铁、0.88 万 t 铜和 1.5 万 t 铅锌<sup>[21, 22]</sup>. 自 20 世纪 70 年代起,该矿区开始大规模开采,采矿废石堆放、选矿及洗矿过程产生大量酸性矿山废水,并沿河谷向下游至凉桥处汇合流入横石河<sup>[23, 24]</sup>. 横石河的农民此前用矿山污水灌溉,导致周围稻田重金属严重污染<sup>[25, 26]</sup>.

### 1.2 样品的采集

研究区分为灌溉区沙溪镇农田(A),废弃凡洞场地(B)和灌溉区新江镇农田(C),见图1. 研究区内多为草本植物,生长状态良好. 农田土壤类型为红壤,基本理化性质如表1,其中凡洞场地上有植物生长与无植物生长土壤的基本理化性质差异较大.

采集具有代表性、生长良好且数量较多的优势植物: 芒草 (*Miscanthus*)、乌毛蕨 (*Blechnum orientale*)、灌木、象草 (*Pennisetum purpureum* Schum.)、裸柱菊 [*Soliva anthemifolia* (Juss.) R. Br.]、花生 (*Arachis hypogaea* Linn)、甘蔗 (*Saccharum officinarum*) 和水稻 (*Oryza sativa* L.) 的地上部和根部,每个样品采集 3 个重复样,同时采集植物根际土和非根际土.

### 1.3 样品处理

土壤样品剔除砾石和植物残骸等杂物,室内

自然风干研磨,过 200 目尼龙筛后混匀备用. 土壤样品重金属采用 HNO<sub>3</sub> 和 HClO<sub>4</sub> (4:1) 消解,同时设置空白对照<sup>[27]</sup>. 植物样品用自来水-去离子水冲洗,105℃杀青 5 min,70℃烘至恒重,用不锈钢粉碎机粉碎后,采用混合酸法 (HNO<sub>3</sub>: HClO<sub>4</sub> = 4:1) 对植物样品消解至透明澄清溶液. 利用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Agilent-700) 测定土壤和植物样品中 Cu、Zn、Pb、Fe、As 和 Cd 等重金属元素总量. 实验采用空白对照法、平行样法及标准样品确保整个实验过程及测定的精确度. 消解过程采用标准物质 NIST2711a (土壤) 及 NIST1573a (植物) 进行质量控制,结果显示重金属回收率在 74.7% ~ 121.6% 之

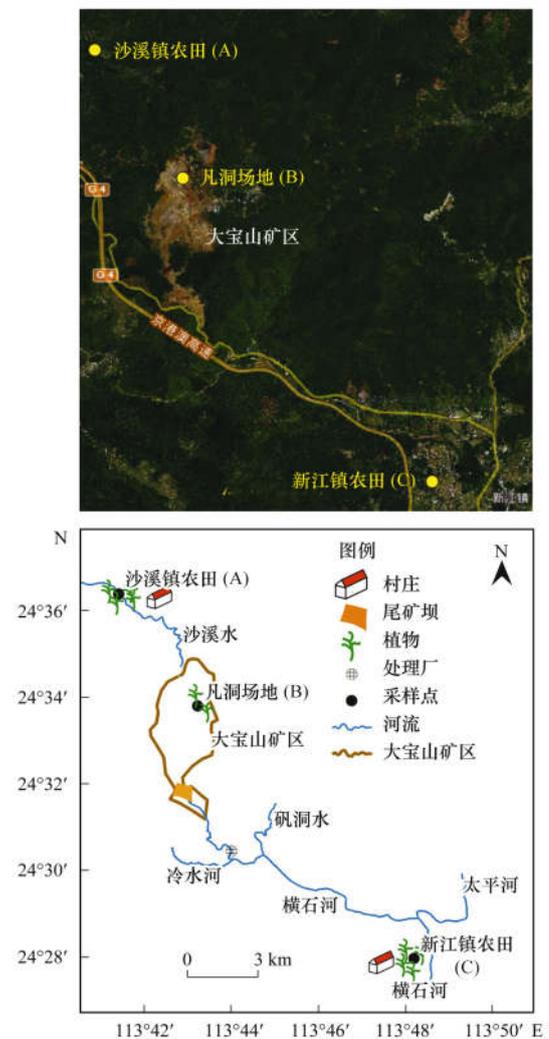


图1 大宝山研究区域和取样点位置示意

Fig. 1 Sketch map of the Dabaoshan mine area and the sampling site locations

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soils in the study area

研究区	pH	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	水溶态 TOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水溶态 P/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
A	4.96 ± 0.16	50.71 ± 23.24	14.95 ± 5.06	0.28 ± 0.21	3.20 ± 1.83	0.14 ± 0.06
B	3.75 ± 0.89	903.86 ± 1 367.91	2.11 ± 2.44	0.19 ± 0.09	5.92 ± 7.03	0.08 ± 0.09
C	5.79 ± 0.63	94.83 ± 29.98	0.44 ± 0.06	0.44 ± 0.06	2.50 ± 0.61	0.40 ± 0.20

间,土壤样品 Al 回收率(38.2%)较低,这是由于土壤中硅铝酸盐不易完全消解所致. 土壤有效态重金属含量用  $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  溶液提取测定. 采用 pH 计(METTLER)以水土比为 2.5:1 进行 pH 测定,用电导率计(DDS-307,雷磁)测定电导率(EC),利用 TOC 分析仪(Shimadzu)分析水溶态有机碳(TOC)含量. 采用钼蓝分光光度法在 880 nm 下用紫外分光光度计(SPECTRA UV-11, MRC, Germany)测定  $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  溶液提取液有效 P. 土样与  $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  KCl 溶液混合(水土比 = 12:1,  $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) 1 h,加入 Nessler 试剂后利用分光光度计(DR 3900, Hach Co)测定土壤中生物可利用的  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$ .

#### 1.4 数据处理与分析

##### 1.4.1 地累积指数法

地累积指数法由德国学者 Müller<sup>[28]</sup> 提出,考虑人为污染因素和环境地球化学背景值,判别人类活动对环境的影响<sup>[29]</sup>. 其计算公式为:

$$I_{\text{Geo}} = \log_2 [C_i / (1.5 \times B_i)]$$

式中,  $C_i$  为污染物  $i$  的实测含量;  $B_i$  为计算所需的参比值,参考广东省土壤元素背景值<sup>[30]</sup>, Cu  $17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Zn  $47.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Pb  $36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、As  $8.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Mn  $279 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  以及 Cd  $0.056 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 常数 1.5 是自然环境波动和非常小的人为影响校正. 分级标准见表 2.

表 2 地累积指数分级

地累积指数	分级	污染程度
$\leq 0$	0	无
0 ~ 1	1	无 ~ 中度
1 ~ 2	2	中度
2 ~ 3	3	中度 ~ 强度
3 ~ 4	4	强度
4 ~ 5	5	强 ~ 极强
$> 5$	6	极强

##### 1.4.2 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数由瑞典学者 Hakanson<sup>[31]</sup> 提出,根据元素的释放能力和元素丰度,引入重金属毒性系数对重金属污染进行评估,其计算公式为:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

$$\text{RI} = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中,  $C_f^i$  为重金属  $i$  的富集系数;  $C_s^i$  为重金属  $i$  的实测含量;  $C_n^i$  为计算所需的参比值,参比值与地累积指数参比值相同,以广东省土壤元素背景值为参考;  $E_r^i$  为土壤中第  $i$  种重金属的潜在生态系数;  $T_r^i$  为重金属  $i$  的毒性系数,毒性系数参考前人的研究<sup>[32]</sup>,

Cu、Zn、Pb、As、Mn 和 Cd 毒性系数分别为 5、1、5、10、1 和 30; RI 为土壤多种重金属的综合潜在生态危害指数,评价分级见表 3.

表 3 潜在生态危害等级

生态风险因子 ( $E_r$ )	生态风险程度	综合生态风险指数 (RI)	综合生态风险程度
$< 40$	轻微	$> 150$	低
40 ~ 80	中等	150 ~ 300	中等
80 ~ 160	强	300 ~ 600	重
160 ~ 320	很强	$> 600$	严重

##### 1.4.3 生物富集系数

植物富集系数(bioconcentration factor, BCF)是某种元素在植物地上部分中的含量与该植物所生长的土壤中该元素含量的比值,反映植物对某种元素的富集能力<sup>[33]</sup>. 其计算公式为:

$$\text{BCF} = C_{\text{植物}} / C_{\text{土壤}}$$

式中,  $C_{\text{植物}}$  为植物地上部或根部的重金属含量;  $C_{\text{土壤}}$  为土壤重金属含量. BCF  $> 1$  说明植物体内的重金属含量大于土壤,对某种重金属有一定的富集能力,可用于土壤重金属污染修复治理.

##### 1.4.4 迁移系数

迁移系数(translocation factor, TF)是植物地上部分某元素的含量与根部该元素含量的比值,反映植物对该元素的迁移能力<sup>[34]</sup>. 其中计算公式为:

$$\text{TF} = C_{\text{地上部}} / C_{\text{根部}}$$

式中,  $C_{\text{地上部}}$  为植物地上部的重金属含量;  $C_{\text{根部}}$  为植物根部的重金属含量. TF  $> 1$  表明植物易将地下部吸收的元素输送到地上部,地上部大量吸收某些重金属,通过植物提取的方式,在一定程度上可治理污染的土壤. 当 TF  $< 1$  时,植物具备耐受性,地下部分吸收了大部分重金属,防止重金属元素向地上部迁移,可降低重金属引起的毒性<sup>[35]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属分布特征

#### 2.1.1 土壤重金属总量特征

研究区土样重金属含量如表 4 所示. 与广东省土壤重金属背景值<sup>[30]</sup> 相比,大部分土样中 Cu、Zn、Pb、As、Fe、Al 和 Cd 元素的含量超过广东省土壤重金属背景值,只有农田土样中的 Mn 低于背景值. 根据我国环境土壤环境质量标准(GB 15618-2018, pH  $< 6.5$ ),沙溪镇农田大部分重金属含量都在安全值之内,表明沙溪镇受矿山活动影响较少. 凡洞场地 Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 的平均含量分别超出农用地土壤污染风险筛选值的 31.8、6.4、34.2、6.2 和 134.5 倍,凡洞采矿场地受矿山活动的直接

影响和间接影响,表层土壤重金属浓度较高,明显高于农田土样,不同样点之间重金属含量差异较大.新江镇农田 Cu、Pb、As 和 Cd 的平均含量分别超标 3.1、1.32、0.8 和 10.6 倍,受矿山活动影响,

重金属含量比沙溪镇农田高.有研究发现距离大宝山矿井 25 km 的下游溪流仍受 AMD 影响,潜在风险重金属主要是 Fe、Zn 和 Al,其次是 Mn、Cu、Pb、As 和 Cd<sup>[36]</sup>.

表 4 土壤重金属总含量<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 4 Total concentration of heavy metals in soils/mg·kg<sup>-1</sup>

样品点-项目	部位	Cu	Zn	Pb	Fe	Mn	Al	As	Cd
A-象草	根际土	29.2 ± 0.4	106 ± 3	99.3 ± 9.6	19.4 ± 0.5	21.3 ± 3.3	29.1 ± 0.2	13.7 ± 0.3	0.22 ± 0.06
	非根际土	29.1 ± 0.2	97.1 ± 1.1	93.2 ± 0.7	19.1 ± 0.4	4.22 ± 5.96	29.4 ± 0.0	13.2 ± 0.1	0.04 ± 0
B-芒草	根际土	1 340 ± 20	373 ± 15	688 ± 13	165 ± 2	1 200 ± 89	108 ± 1	350 ± 3	14.6 ± 0.2
	非根际土	1 120 ± 18	1 750 ± 6	1 433 ± 40	190 ± 2	1 300 ± 107	106 ± 0	167 ± 4	20.8 ± 0.4
B-乌毛蕨	根际土	698 ± 0	928 ± 37	953 ± 2	154 ± 6	962 ± 18	108 ± 2	112 ± 6	24.0 ± 0.1
	非根际土	1 320 ± 20	6 157 ± 7	4 860 ± 52	536 ± 2	3 590 ± 3	234 ± 1	167 ± 1	78.0 ± 0.4
C-甘蔗	根际土	111 ± 3	150 ± 2	104 ± 3	38.7 ± 1.4	34.7 ± 1.9	25.0 ± 0.1	39.4 ± 0.9	1.59 ± 0.13
	非根际土	111 ± 1	149 ± 0	101 ± 2	38.0 ± 1.3	38.9 ± 0.7	24.1 ± 0.3	40.0 ± 0.5	1.52 ± 0.02
C-水稻 I	根际土	148 ± 2	170 ± 2	96.0 ± 0.4	32.0 ± 0.2	6.23 ± 0.58	26.4 ± 0.5	30.4 ± 0.4	1.22 ± 0.02
	非根际土	146 ± 4	170 ± 8	94.8 ± 1.3	31.6 ± 0.2	4.02 ± 1.21	24.4 ± 1.2	28.7 ± 1.3	1.21 ± 0.18
C-水稻 II	根际土	339 ± 5	278 ± 4	371 ± 6	73.5 ± 1.7	71.3 ± 5.1	25.1 ± 0.7	141 ± 1	7.22 ± 0.06
	非根际土	366 ± 14	311 ± 17	429 ± 26	90.8 ± 14.5	115 ± 32	27.3 ± 0.8	157 ± 5	8.16 ± 0.71
B-灌木	附近土壤	925 ± 9	427 ± 4	6 820 ± 99	235 ± 5	14 900 ± 163	107 ± 0	114 ± 4	54.5 ± 0.3
B 矿区土壤	D1	3 150 ± 48	377 ± 28	1 290 ± 30	316 ± 2	5 690 ± 172	109 ± 0	469 ± 24	44.6 ± 11.4
	D2	2 930 ± 149	343 ± 22	1 180 ± 42	341 ± 0	3 590 ± 3	108 ± 0	621 ± 1	46.1 ± 9.7
广东省土壤重金属背景值		17.0	47.3	36.0	2.42	279	7.21	8.90	0.056
农用地土壤风险筛选值		50	200	70 (pH ≤ 5.5) 90 (5.5 < pH ≤ 6.5)	—	—	—	40	0.3

1) “—”表示没有数值

### 2.1.2 土壤重金属可溶性特征

土壤中可溶态重金属容易被植物根系吸收,也极易随地表水淋滤作用而迁移扩散.重金属各元素的浸提率如图 2 所示,其中 Cu、Zn、Pb、As、Fe 和 Al 元素的浸提率都低于 1%, Mn 的浸提率是最高的,平均浸提率高达 3.2%,这可能与 Mn 本身易淋溶的性质有关<sup>[37]</sup>, Zn 次之,浸提率为 0.20%. 当 pH = 5 时,土壤中 Mn 和 Zn 较易迁移<sup>[38]</sup>. 此外, Zn 和 Mn 的碳酸盐结合态与土壤溶液中 Zn 和 Mn 离子之间存在沉淀-溶解平衡,可交换态 Zn 和 Mn 随 pH 的下降而增加<sup>[39]</sup>,与本研究采集的酸性土样提取结果一致. 其次是 Cu、Pb、As、Al 和 Cd,而 Fe 的浸提率极低. 表明当地土壤中 Mn 与 Zn 的活动性最强,容易迁移扩散.

重金属的释放过程与土壤理化性质有关(表 5), Cu、Pb 和 Al 的浸提率与 pH 值呈显著负相关; Fe、Mn 和 Zn 的浸提率也与 pH 呈负相关,但不显著; As 的浸提率总体上随着 pH 的增加而显著上升; Cd 的浸提率与 pH 呈正相关,但不显著. Zn 的变化与前人的研究<sup>[11]</sup>不一致,可能与样品中 Mn 的含量高有关系. 在大宝山矿区,除了褐铁矿等露天采矿区,还有电解铜(Cu-MnO<sub>2</sub>)冶炼厂对下游农田土壤

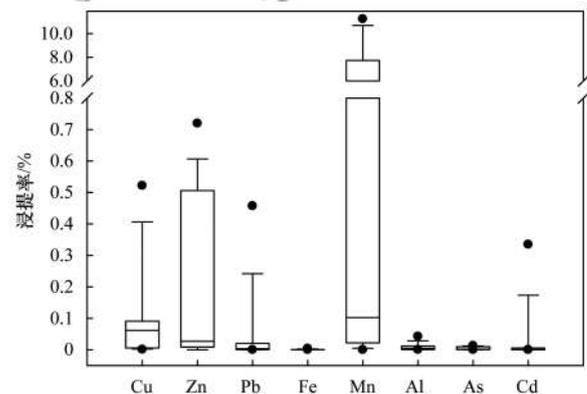


图 2 土壤重金属有效态浸提率

Fig. 2 Percentage of available heavy metals in soil samples

造成 Mn 污染<sup>[37]</sup>. 当土壤 pH < 5 时, Al 以离子态为主,活性增强;随着 pH 的降低,高活性 Al 的含量迅速上升,抑制植物生长发育<sup>[40]</sup>. 弱酸至中性条件下, As 容易从土壤中释放. 采集的土壤样品均为酸性,大部分土样 pH < 5,利于土壤重金属 Cu、Pb 和 Al 释放出来被植物吸收,对当地植物生长产生一定的重金属胁迫.

此外,在植物生长过程中,根系会分泌甲酸、乙酸、丙酸、苹果酸与酒石酸等小分子量有机酸,易活化土壤重金属赋存形态<sup>[41]</sup>. 图 3 表明,芒草根际土

表 5 重金属与土壤理化性质的相关性<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation between heavy metal concentration and soil physical and chemical properties

重金属	pH	电导率	水溶态 TOC	水溶态 P	水溶态 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	水溶态 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Cu	-0.740 **	0.749 **	-0.328	-0.147	0.500	-0.286
Zn	-0.290	0.082	0.062	0.059	0.243	-0.100
Pb	-0.780 **	0.345	-0.226	-0.079	0.014	-0.464
Fe	-0.307	0.620 **	-0.024	0.176	0.582 *	0.161
Mn	-0.215	0.051	-0.217	0.360	0.111	-0.236
Al	-0.737 **	0.578 **	0.007	-0.013	0.332	-0.461
As	0.502 **	0.033	0.359	0.444 *	0.332	0.786 **
Cd	0.112	-0.266	0.433 *	0.135	0.364	0.050

1) \*\* 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的, \* 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的

中 Zn、Fe、Cu、As 和 Cd 的有效态含量明显增加;乌毛蕨根际土中 Al 和 Mn 的有效态含量明显增加;象草根际土中 Fe 和 Cu 的有效态明显增加。农作物甘蔗和水稻根际土中重金属有效态含量与非根际土相差不大。因此,芒草根际对 Cu、As 和 Cd 等重金属的活化较为显著,可考虑作为当地植被恢复的先锋植物。

## 2.2 地累积指数评价

采样区域地累积指数见图 4,沙溪镇农田 Cu、Zn 和 Mn 的  $I_{Geo}$  < 1, As 的  $I_{Geo}$  大部分 < 1,个别样点的  $I_{Geo}$  在 1~2 之间。Cd 的  $I_{Geo}$  差异较大,土样中部分植物  $I_{Geo}$  < 0,另一部分根际土的  $I_{Geo}$  在 3~4,而非根际土的  $I_{Geo}$  > 5,污染极强,因此可能存在 Cd 点源污染,应该引起警惕。沙溪镇农田重金属整体污染累积程度由高到低依次为: Cd > As > Pb > Zn > Cu > Mn,大部分重金属的  $I_{Geo}$  < 2,人为源的影响较轻,与之前的报道一致<sup>[42]</sup>。

凡洞采矿场地 Cu 的  $I_{Geo}$  大部分在 > 5; Zn 的  $I_{Geo}$  大部分在 2~3 之间,根际土的 Zn 的  $I_{Geo}$  较高,接近 5 或大于 5; Pb 的  $I_{Geo}$  大部分指数在 4~5 之间,部分样点  $I_{Geo}$  > 5; Mn 的  $I_{Geo}$  大部分在 3~4 之间或小于 2,灌木附近样点土壤的  $I_{Geo}$  > 5; As 的  $I_{Geo}$  大部分在 3~4 之间。矿区土壤样品的  $I_{Geo}$  > 5, Cd 的  $I_{Geo}$  > 5。凡洞采矿场地重金属整体污染累积程度由高到低依次为: Cd > Cu > Pb > As > Zn > Mn,大部分重金属  $I_{Geo}$  > 4,污染程度强,表明当地土壤 Cd、Cu、As、Pb、Zn、Mn 等污染严重。

新江镇农田 Cu 的  $I_{Geo}$  在 2~3 之间或 > 3; Zn 的  $I_{Geo}$  大部分在 1~2 之间; Pb 的  $I_{Geo}$  基本处于 0~1 之间; 水稻 II 的  $I_{Geo}$  在 2~3 之间; Mn 的  $I_{Geo}$  < 0; As 的  $I_{Geo}$  基本在 1~2 之间,水稻 II 的  $I_{Geo}$  在 3~4 之间; Cd 的  $I_{Geo}$  不同植物土样点之间差异较大,甘蔗土的  $I_{Geo}$  在 4~5 之间,水稻 I 的  $I_{Geo}$  在 3~4 之间,水稻 II 的  $I_{Geo}$  > 5。新江镇农田重金属整体污染累积程度由高到低依次为: Cd > Cu > As > Pb > Zn > Mn,大部分重

金属  $I_{Geo}$  在 2~4 之间,属于中强度污染,人为污染源影响较大。

## 2.3 潜在生态危害指数评价

研究区潜在生态危害指数如图 5 所示,沙溪镇农田 Cu、Zn、Pb、Mn 和 As 的潜在生态风险因子  $E_r$  < 40。但 Cd 的  $E_r$  > 320,生态风险很强,综合潜在生态风险指数 RI 在 300~600 之间,处于高生态风险水平。

凡洞采矿场地 Cu、Pb、As 和 Cd 的潜在生态风险因子都 > 320,危害性极强,存在很强的潜在生态风险。而 Zn 和 Mn 的  $E_r$  < 40,虽然 Zn 和 Mn 的  $I_{Geo}$  较高,但由于生物毒性低,因此 Zn 和 Mn 造成的生态危害并不大。综合潜在生态危害指数 RI > 600,处于极高生态风险水平。

新江镇农田 Zn、Pb 和 Mn 的潜在生态风险因子  $E_r$  < 40, Cu 的  $E_r$  在 40~80 之间, As 的  $E_r$  在 80~160 之间,生态风险强, Cd 的  $E_r$  > 320,生态风险极强,综合潜在生态危害指数 RI > 600,处于极高生态风险水平。可见,研究区域大宝山周围应重点关注 Cu、Pb、As 和 Cd 造成的生态危害。

## 2.4 植物重金属分布特征

大宝山矿区优势植物主要有芒草、乌毛蕨、铺地黍和类芦等草本植物以及马尾松、杉木和麻风树等乔木<sup>[43-47]</sup>,因此本次调查的生物量大的植物种类共 8 种,隶属 5 个科,且主要以一年生或多年生的草本植物为主。表 6 显示 8 种植物各部分的 Cu、Zn、Pb、Fe、Mn、As、Al 和 Cd 分布情况。总体上根部重金属的含量大于地上部分。除了灌木、象草和水稻 II 对 Cu 的吸收量地上部分 > 根部,裸柱菊对 Zn 和 Mn 的吸收量地上部分 > 根部,灌木对 Pb 的吸收量茎 > 根部。

植物样品体内含量超出一般植物的元素主要是 Al、Fe 和 Cu,其次是 Pb、As、Zn 和 Cd,而 Mn 在一般植物含量范围之内。除了象草地上部分,全部植物样品的地上部分和根部中 Al 含量都超出一般正常

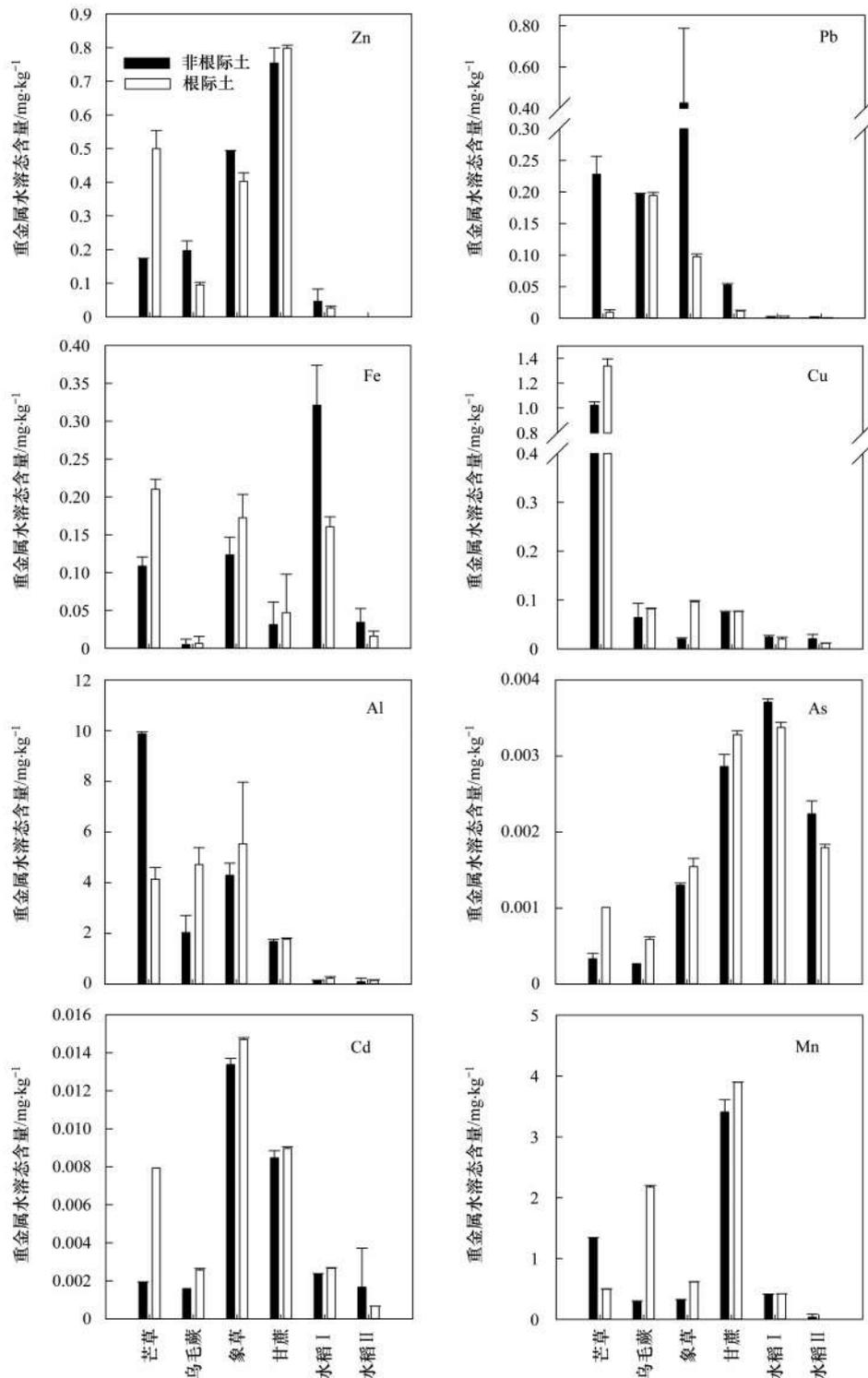


图3 不同植物根际土与非根际土有效态含量

Fig. 3 Available heavy metal concentrations of bulk and rhizosphere samples of various species

值, Al 是限制植物生长的主要因素, 也是森林大面积退化的重要原因<sup>[48]</sup>, 研究区域土壤中 Al 元素含量超出广东省背景值, 这些植物都对 Al 表现出较强的耐性. 大部分植物样品地上或根部的 Fe 含量也高于正常值. 芒草和乌毛蕨体内 Cu、Zn、Pb、Fe、Al 和 As 含量不高, 且主要集中在根部, 表明这些植物将重金属囤积在根部, 提高了重金属耐受性. 裸柱菊体内重金属含量较高, 地上部分和根部中

Zn、Mn、As 和 Cd 的含量都高于一般植物. 甘蔗是当地主要的一种经济作物, 但关于甘蔗的重金属污染情况和迁移行为很少被关注<sup>[49]</sup>, 甘蔗体内 Cu、Zn、Pb、Fe 和 As 含量较高, 但主要集中在根部, Al 元素含量主要集中在地上部. 水稻根部 Cd 含量非常高, 远超出一般植物含量  $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 地上部分 Cu 含量也较高, 超出一般植物, 因此将来需要对米粒进行相应检测.

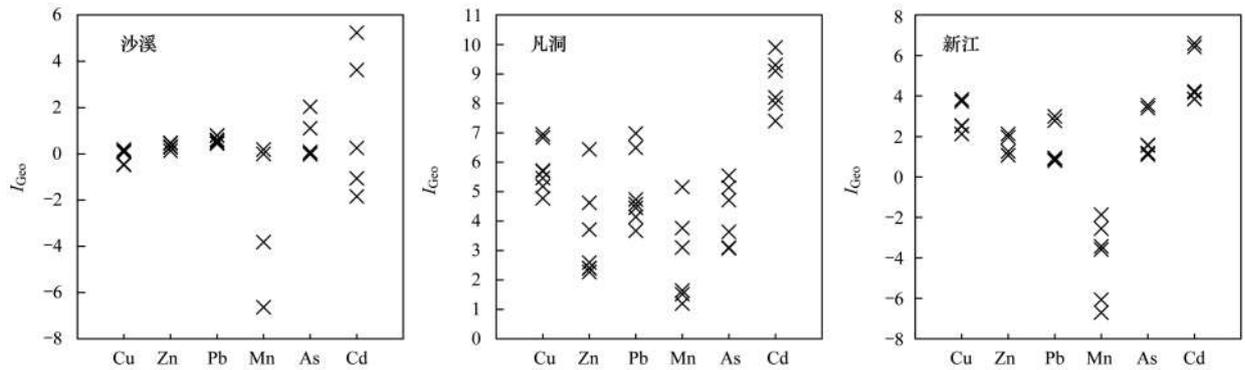


图 4 土壤地累积指数

Fig. 4 Geological accumulation index of soil

表 6 植物体内重金属含量<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 6 Concentration of heavy metals in plants/mg·kg<sup>-1</sup>

植物样品	部位	Cu	Zn	Pb	Fe	Mn	Al	As	Cd
芒草	地上	29.4	36.8	4.11	498	52.8	203	0.65	—
	根	264	51.2	14.6	2 850	18.0	870	4.17	—
乌毛蕨	叶、含部分茎	19.6	39.5	26.7	204	234	871	1.01	—
	根	535	87.9	239	8 052	98.1	7 996	10.8	—
灌木	叶	12.9	25.7	9.13	383	75.2	251	0.22	—
	茎	46.3	58.6	98.2	487	66.1	211	0.19	—
	全根	18.2	42.7	91.8	427	92.1	312	0.00	—
象草	地上	74.2	34.0	4.18	82.8	124	123	0.88	—
	根	13.1	25.2	26.5	5 219	40.4	1 396	29.4	0.55
裸柱菊	地上	19.7	169	24.3	2103	293	7 644	3.52	1.57
	根	101	164	61.2	4 608	207	1 3767	8.41	1.12
	花	8.31	51.1	7.87	896	70.9	3 189	0.95	2.00
花生	地上	24.6	34.7	3.10	112	13.2	498	0.07	—
	根	19.2	21.6	9.90	362	8.02	1 374	0.19	—
甘蔗	地上	41.1	31.1	2.31	419	91.5	608	0.62	—
	根	62.8	86.1	16.2	5 679	136	1 047	61.4	—
水稻 I	地上	36.7	44.2	2.32	450	106	488	4.61	—
	根	72.2	83.2	57.0	18 897	267	3 471	313	4.85
水稻 II	地上	150	38.9	4.58	663	159	668	2.41	—
	根	116	93.8	125	17 560	418	2 924	241	6.89
一般植物含量范围 <sup>[35, 45, 50-54]</sup>		0.4 ~ 45.8	1 ~ 160	0.1 ~ 41.7	350	1 ~ 700	10 ~ 200	0.05 ~ 13.25	0.2 ~ 3

1) “—”代表未检测到

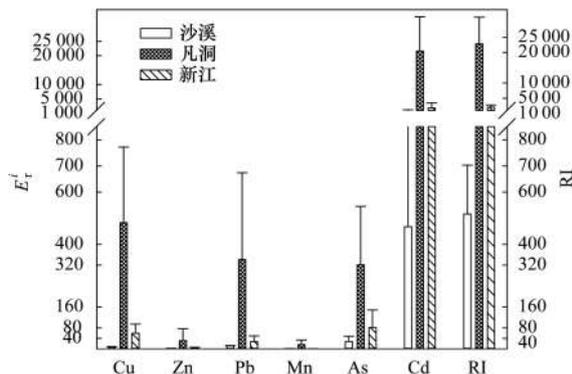


图 5 重金属潜在生态风险因子及综合潜在生态风险指数 (RI)

Fig. 5 Potential ecological risk factor and potential ecological risk index (RI) of heavy metals

## 2.5 土壤-植物体系中重金属迁移特征

采集的 7 种植物对 8 种重金属的富集系数总体表现为:  $Mn > Al > Fe > Cu > Zn > Pb > As > Cd$ , 且根部的生物富集系数远大于地上部分(表 7). 其中, 花生对 Fe 和 Al 表现出很强的富集能力, 地上部分的 BCF 分别为 7.16 和 19.02, 根部分别为 23.20 和 52.49. 裸柱菊对 Zn、Cu 和 Cd 表现出较强的富集能力, 地上部分对 Zn 和 Cd 的 BCF  $> 1$ , 根部对 Zn、Cu 和 Cd 的 BCF  $> 1$ , 尤其对 Cd 的富集系数较大. 象草、甘蔗、水稻地上部分和根部都对 Mn 表现出很强的富集能力, BCF 远大于 1. 甘蔗、水稻的根部对 As 的 BCF 也大于 1, 尤其是水稻 I, 水稻 I 土壤 As 含

表 7 植物对重金属的生物富集系数和生物转移系数<sup>1)</sup>

Table 7 Translocation factor (TF) and bioconcentration factor (BCF) of plants for heavy metals

植物样品	部位	Cu		Zn		Pb		Fe	
		TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF
芒草	地上	0.11	0.02	0.72	0.10	0.28	0.01	0.17	0.00
	根		0.20		0.14		0.02		0.02
乌毛蕨	叶、含部分茎	0.04	0.03	0.45	0.04	0.11	0.03	0.03	0.00
	根		0.77		0.09		0.25		0.05
灌木	叶	0.71	0.01	0.60	0.06	0.10	0.00	0.90	0.00
	茎	2.55	0.05	1.37	0.14	1.07	0.01	1.14	0.00
	全根		0.02		0.10		0.01		0.00
象草	地上	0.28	0.17	0.44	0.20	0.09	0.05	0.79	0.02
	根		0.62		0.47		0.58		0.03
裸柱菊	地上	0.19	0.57	1.03	1.35	0.40	0.23	0.46	0.11
	根		2.94		1.31		0.57		0.25
	花	0.08	0.24	0.31	0.41	0.13	0.07	0.19	0.05
花生	地上	1.29	0.96	1.61	0.30	0.31	0.03	0.31	7.16
	根		0.75		0.19		0.11		23.20
甘蔗	地上	0.65	0.37	0.36	0.21	0.14	0.02	0.07	0.01
	根		0.56		0.57		0.16		0.15
水稻 I	地上	0.51	0.25	0.53	0.26	0.04	0.02	0.02	0.01
	根		0.49		0.49		0.59		0.59
水稻 II	地上	1.29	0.44	0.41	0.14	0.04	0.01	0.04	0.01
	根		0.34		0.34		0.34		0.24
植物样品	部位	Mn		Al		As		Cd	
		TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF
芒草	地上	2.93	0.04	0.23	0.00	0.17	0.00	—	—
	根		0.02		0.01		0.01		—
乌毛蕨	叶、含部分茎	2.39	0.24	0.11	0.01	0.03	0.01	—	—
	根		0.10		0.07		0.10		—
灌木	叶	0.82	0.01	0.80	0.00	0.90	0.00	—	—
	茎	0.72	0.00		0.00	1.14	0.00	—	—
象草	地上	3.08	5.84		0.01	0.79	0.02	0	—
	根		1.89	0.09	0.08		0.64		—
裸柱菊	地上	1.41	9.89	0.56	0.26	0.42	0.12	1.40	1.51
	根		7.00		0.47		0.29		1.08
	花	0.34	2.40	0.23	0.11	0.11	0.03	1.79	1.93
花生	地上	1.64	0.33	0.36	19.02	0.31	0.01	—	—
	根		0.20		52.49		0.02		—
甘蔗	地上	0.67	2.64	0.58	0.02	0.07	0.02	—	—
	根		3.92		0.04		1.56		—
水稻 I	地上	0.40	17.04	0.14	0.02	0.02	0.15	—	—
	根		42.93		0.13		10.32		3.96
水稻 II	地上	0.38	2.23	0.23	0.03	0.04	0.02	—	—
	根		5.87		0.12		1.71		0.95

1) “—”代表由于植物体内未检测到而无法计算

量并不算太高(30.37 mg·kg<sup>-1</sup>),远低于水稻 II 土壤(140.68 mg·kg<sup>-1</sup>),同时 Cd 亦表现出类似情况。

7 种植物对重金属的迁移能力也存在一定差异,总体表现为:Mn > Zn > Cu > Fe > As > Al > Pb > Cd。其中灌木对各重金属都表现出很强的迁移能

力,TF > 1 或接近 1。花生对 Cu、Zn 和 Mn 表现出较强的迁移能力。芒草、乌毛蕨和象草对 Mn 表现出较强的迁移能力,裸柱菊对 Zn 表现出较强的迁移能力,以及水稻 II 对 Cu 表现出较强的迁移能力。

总之,裸柱菊在 Cd 污染严重的土壤上生长良

好,对重金属 Cd 表现出很强的生物富集和转移能力. 灌木在重金属复合污染严重的土壤上生长良好,且对重金属具有较强转移能力,在植物修复技术上具有较高的潜在价值. 芒草和乌毛蕨在重金属复合污染的土壤上生长良好,体内重金属含量不高,对重金属的转移能力较差,属于规避型植物<sup>[55]</sup>,对当地居民的养殖畜牧业有较高的利用价值.

### 3 结论

(1) 研究区域土壤样品呈酸性,凡洞采矿场地及矿井下游新江镇地区受到重金属污染,潜在生态危害比较严重. 沙溪镇农田 Cd 污染严重,潜在生态风险较高.

(2) 对比分析 8 种优势植物不同部位的重金属含量,发现裸柱菊对 Zn、Cu 和 Cd 表现出较强的富集能力. 甘蔗 Cu、Zn、Pb、Fe 和 As 含量较高,主要集中在根部. 水稻对 As、Cd 有较强的富集能力,主要集中在根部,地上部分富集 As 的能力较低. 灌木对各重金属迁移能力最强,Cu、Zn、Pb、Zn 和 As 的转运系数 > 1.

(3) 芒草和乌毛蕨在重金属复合污染的土壤上生长良好,体内重金属含量较高,主要集中在根部,且基本处于一般植物含量范围,对重金属的转移能力较差,属于规避型植物,具备潜在的土壤重金属污染固定修复能力.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Bigham J M, Nordstrom D K. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters [ J ]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2000, **40**(1): 351-403.
- [ 2 ] Cai M F, Dang Z, Chen Y W, *et al.* The passivation of pyrrhotite by surface coating [ J ]. *Chemosphere*, 2005, **61**(5): 659-667.
- [ 3 ] Kuang J L, Huang L N, Chen L X, *et al.* Contemporary environmental variation determines microbial diversity patterns in acid mine drainage [ J ]. *The ISME Journal*, 2013, **7**(5): 1038-1050.
- [ 4 ] 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 等. 安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 [ J ]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4725-4732.
- [ 5 ] Dale J G, Stegemeier J P, Kim C S. Aggregation of nanoscale iron oxyhydroxides and corresponding effects on metal uptake, retention, and speciation: I. Ionic-strength and pH [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, **148**: 100-112.
- [ 6 ] Luís A T, Duraes N, de Almeida S F P, *et al.* Integrating geochemical (surface waters, stream sediments) and biological (diatoms) approaches to assess AMD environmental impact in a pyritic mining area: Aljustrel (Alentejo, Portugal) [ J ]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **42**(4): 215-226.
- [ 7 ] Candeias C, Ávila P F, da Silva E F, *et al.* Integrated approach to assess the environmental impact of mining activities: estimation of the spatial distribution of soil contamination (Panasqueira mining area, Central Portugal) [ J ]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(3): 135.
- [ 8 ] Migaszewski Z M, Galuszka A, Migaszewski A. The study of rare earth elements in farmer's well waters of the Podwiśniówka acid mine drainage area (south-central Poland) [ J ]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(3): 1609-1622.
- [ 9 ] Eddleman K. Bioaccumulation of heavy metals from soils to plants in watersheds contaminated by acid mine drainage in SE Arizona [ D ]. Arizona: The University of Arizona, 2012.
- [ 10 ] Liu Q Y, Chen B H, Haderlein S, *et al.* Characteristics and environmental response of secondary minerals in AMD from Dabaoshan Mine, South China [ J ]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **155**: 50-58.
- [ 11 ] 周建民, 党志, 司徒粤, 等. 大宝山矿区周围土壤重金属污染分布特征研究 [ J ]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(6): 1172-1176.
- [ 12 ] Zhou J M, Dang Z, Situ Y, *et al.* Distribution and characteristics of heavy metals contaminations in soils from Dabaoshan mine area [ J ]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, **23**(6): 1172-1176.
- [ 13 ] Zhuang P, Zou B, Li N Y, *et al.* Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: implication for human health [ J ]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, **31**(6): 707-715.
- [ 14 ] 邹晓锦, 仇荣亮, 黄穗虹, 等. 广东大宝山复合污染土壤的改良及植物复垦 [ J ]. *中国环境科学*, 2008, **28**(9): 775-780.
- [ 15 ] Zou X J, Qiu R L, Huang S H, *et al.* Immobilization and revegetation of heavy metal polluted soils in Dabao Mountain, Guangdong Province by amendments [ J ]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(9): 775-780.
- [ 16 ] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, *et al.* Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(5): 1551-1561.
- [ 17 ] Chen M Q, Lu G N, Guo C L, *et al.* Sulfate migration in a river affected by acid mine drainage from the Dabaoshan mining area, South China [ J ]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 734-743.
- [ 18 ] Shu X H, Zhang Q, Lu G N, *et al.* Pollution characteristics and assessment of sulfide tailings from the Dabaoshan Mine, China [ J ]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, **128**: 122-128.
- [ 19 ] 陈莹, 陈炳辉, 邹琦, 等. 粤北大宝山 AMD 水-表层沉积物的重金属分布特征及其影响因素 [ J ]. *环境科学学报*, 2018, **38**(1): 133-141.
- [ 20 ] Chen Y, Chen B H, Zou Q, *et al.* Distribution and influencing factors of heavy metals in water-sediments in Dabaoshan mine, northern Guangdong Province [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(1): 133-141.
- [ 21 ] 李清飞, 仇荣亮, 石宁, 等. 矿山强酸性多金属污染土壤修复及麻疯树植物复垦条件研究 [ J ]. *环境科学学报*, 2009, **29**(8): 1733-1739.
- [ 22 ] Li Q F, Qiu R L, Shi N, *et al.* Remediation of strongly acidic mine soils contaminated by multiple metals by plant reclamation with *Jatropha curcas* L. and addition of limestone [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(8): 1733-1739.
- [ 23 ] 杨煜曦, 卢欢亮, 战树顺, 等. 利用红麻复垦多金属污染酸化土壤 [ J ]. *应用生态学报*, 2013, **24**(3): 832-838.
- [ 24 ] Yang Y X, Lu H L, Zhan S S, *et al.* Using kenaf (*Hibiscus*

- cannabinus) to reclaim multi-metal contaminated acidic soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(3): 832-838.
- [20] 张鹏, 杨富淋, 蓝莫茗, 等. 广东大宝山多金属污染排土场耐性植物与改良剂稳定修复研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(2): 545-552.  
Zhang P, Yang F L, Lan M M, *et al.* Phytostabilization with tolerant plants and soil amendments of the tailings of the Dabaoshan polymetallic mine in Guangdong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(2): 545-552.
- [21] 葛朝华, 韩发. 大宝山铁-多金属矿床的海相火山热液沉积成因特征[J]. 矿床地质, 1986, **5**(1): 1-12.  
Ge C H, Han F. Submarine volcanic hydrothermal sedimentary origin of the Dabaoshan iron and polymetallic sulfide deposit[J]. Mineral Deposits, 1986, **5**(1): 1-12.
- [22] Ye L, Liu T G, Yang Y L, *et al.* Petrogenesis of bismuth minerals in the Dabaoshan Pb-Zn polymetallic massive sulfide deposit, northern Guangdong Province, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, **82**: 1-9.
- [23] 付善明, 周永章, 赵宇娟, 等. 广东大宝山铁多金属矿废水对河流沿岸土壤的重金属污染[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 805-812.  
Fu S M, Zhou Y Z, Zhao Y Y, *et al.* Study on heavy metals in soils contaminated by acid mine drainage from Dabaoshan Mine, Guangdong [J]. Environmental Science, 2007, **28**(4): 805-812.
- [24] Liao J B, Ru X, Xie B B, *et al.* Multi-phase distribution and comprehensive ecological risk assessment of heavy metal pollutants in a river affected by acid mine drainage [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **141**: 75-84.
- [25] Yang C F, Lu G N, Chen M Q, *et al.* Spatial and temporal distributions of sulfur species in paddy soils affected by acid mine drainage in Dabaoshan sulfide mining area, South China [J]. Geoderma, 2016, **281**: 21-29.
- [26] Cui J L, Zhao Y P, Lu Y J, *et al.* Distribution and speciation of copper in rice (*Oryza sativa* L.) from mining-impacted paddy soil: implications for copper uptake mechanisms [J]. Environment International, 2019, **126**: 717-726.
- [27] Cui J L, Luo C L, Tang C W Y, *et al.* Speciation and leaching of trace metal contaminants from e-waste contaminated soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **329**: 150-158.
- [28] Müller G. Schwermetalle in Sedimenten des staugeregelten Neckars [J]. Naturwissenschaften, 1980, **67**(6): 308-309.
- [29] 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 等. 山西省武乡县城大气 PM<sub>2.5</sub> 痕量重金属的生态和健康风险分析 [J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1004-1013.  
Guo Z X, Geng H, Zhang J H, *et al.* Ecological and health risks of trace heavy metals in atmospheric PM<sub>2.5</sub> collected in Wuxiang Town, Shanxi Province [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1004-1013.
- [30] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [31] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [32] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.  
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.
- [33] Yoon J, Cao X D, Zhou Q X, *et al.* Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site [J]. Science of the Total Environment, 2006, **368**(2-3): 456-464.
- [34] Leung H M, Ye Z H, Wong M H. Survival strategies of plants associated with arbuscular mycorrhizal fungi on toxic mine tailings [J]. Chemosphere, 2007, **66**(5): 905-915.
- [35] 何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 [J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3595-3600.  
He D, Qiu B, Peng J H, *et al.* Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in a Lead-Zinc tailings in Xiashuiwan of Hunan Province [J]. Environmental Science, 2013, **34**(9): 3595-3600.
- [36] Lin C, Wu Y, Lu W, *et al.* Water chemistry and ecotoxicity of an acid mine drainage-affected stream in subtropical China during a major flood event [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **142**(1-2): 199-207.
- [37] 张晗, 靳青文, 黄仁龙, 等. 大宝山矿区农田土壤重金属污染及其植物累积特征 [J]. 土壤, 2017, **49**(1): 141-149.  
Zhang H, Jin Q W, Huang R L, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in agricultural soils and bioaccumulation in plants of Dabaoshan Mine [J]. Soils, 2017, **49**(1): 141-149.
- [38] Sanders J R. The effect of pH on the total and free ionic concentrations of manganese, zinc and cobalt in soil solutions [J]. European Journal of Soil Science, 1983, **34**(2): 315-323.
- [39] 董德明, 杨彬, 刘森. 化学连续浸提法对土壤中 Zn 和 Mn 化学形态的研究 [J]. 吉林大学自然科学学报, 1998, (1): 62-66.  
Dong D M, Yang B, Liu M. Studies on the forms of Zn and Mn in soil by means of Sequential chemical extraction [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Jilinensis, 1998, (1): 62-66.
- [40] 吴亚, 陈思, 张卫红, 等. 多花黑麦草对铝胁迫的生长生理响应 [J]. 植物科学学报, 2018, **36**(5): 755-760.  
Wu Y, Chen S, Zhang W H, *et al.* Growth and physiological responses of *Lolium multiflorum* to aluminum stress [J]. Plant Science Journal, 2018, **36**(5): 755-760.
- [41] 何沅洁, 刘江, 江韬, 等. 模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 [J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 600-607.  
He Y J, Liu J, Jiang T, *et al.* Simulated desorption kinetics of lead by the dominant plant roots released low molecular weight organic acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 600-607.
- [42] 郑佳佳, 姜晓, 张晓军. 广东大宝山矿区周围土壤重金属污染状况评价 [J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(11): 137-139, 145.  
Zheng J J, Jiang X, Zhang X J. Pollution assessment of heavy metals in soil around Dabaoshan polymetallic ore deposit [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(11): 137-139, 145.
- [43] 秦建桥, 夏北成, 胡萌, 等. 广东大宝山矿区尾矿库植被演替分析 [J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(10): 2085-2091.  
Qin J Q, Xia B C, Hu M, *et al.* Analysis of the vegetation succession of tailing wasteland of Dabaoshan Mine, Guangdong Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(10): 2085-2091.
- [44] 丘英华, 吴林芳, 廖凌娟, 等. 广东大宝山矿区周边植被现状及矿区植被恢复重建 [J]. 广东林业科技, 2010, **26**(5):

- 22-27.
- Qiu Y H, Wu L F, Liao L J, *et al.* Analysis of vegetation actuality and restoration in Dabaoshan Mining Field, Guangdong Province [J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2010, **26**(5): 22-27.
- [45] 陈三雄, 陈家栋, 谢莉, 等. 广东大宝山矿区植物对重金属的富集特征[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(6): 216-220.
- Chen S X, Chen J D, Xie L, *et al.* Heavy metal accumulation characteristics of plants in Dabaoshan Mine in Guangdong Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(6): 216-220.
- [46] 黄红英, 徐剑, 白音, 等. 大宝山矿污染弃耕农田不同恢复植被下土壤动物群落结构及多样性[J]. *中国农学通报*, 2011, **27**(24): 80-85.
- Huang H Y, Xu J, Bai Y, *et al.* Soil animal community structure and diversity under different restoration vegetation in polluted abandoned farmland of Dabaoshan Mine [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, **27**(24): 80-85.
- [47] 王娟, 王正海, 耿欣, 等. 大宝山多金属矿区土壤-植被稀土元素生物地球化学特征[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2014, **39**(6): 733-740.
- Wang J, Wang Z H, Geng X, *et al.* REE biogeochemistry of soil-vegetation system in Dabaoshan Polymetallic Mine [J]. *Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2014, **39**(6): 733-740.
- [48] Chen J, Wang W H, Wu F H, *et al.* Hydrogen sulfide alleviates aluminum toxicity in barley seedlings [J]. *Plant and Soil*, 2013, **362**(1-2): 301-318.
- [49] Liao J B, Wen Z W, Ru X, *et al.* Distribution and migration of heavy metals in soil and crops affected by acid mine drainage: public health implications in Guangdong Province, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **124**: 460-469.
- [50] Baroni F, Boscagli A, Di Lella L A, *et al.* Arsenic in soil and vegetation of contaminated areas in southern Tuscany (Italy) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, **81**(1-3): 1-14.
- [51] 王英辉, 陈学军, 赵艳林, 等. 铅锌矿区土壤重金属污染与优势植物累积特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2007, **36**(4): 487-493.
- Wang Y H, Chen X J, Zhao Y L, *et al.* Heavy metal pollution in soils and plant accumulation in a restored Lead-Zinc mineland in Guangxi, South China [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, **36**(4): 487-493.
- [52] 秦俊梅, 白中科. 安太堡露天矿不同复垦基质和植物中重金属含量及污染评价[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(1): 176-181.
- Qin J M, Bai Z K. The content and pollution assessment of heavy metal in reclaimed mediums and plants at antaibao opencast mine [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(1): 176-181.
- [53] 黄小娟, 江长胜, 郝庆菊. 重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价及植物吸收特征[J]. *生态学报*, 2014, **34**(15): 4201-4211.
- Huang X J, Jiang C S, Hao Q J. Assessment of heavy metal pollutions in soils and bioaccumulation of heavy metals by plants in Rongxi Manganese mineland of Chongqing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(15): 4201-4211.
- [54] 游龙江, 罗绪强, 张桂玲, 等. 雷公山常见植物叶片铝元素含量特征[J]. *贵阳学院学报(自然科学版)*, 2017, **12**(4): 102-104.
- You L J, Luo X Q, Zhang G L, *et al.* Characteristics of aluminum contents in leaves of common plants in Leigong Mountain [J]. *Journal of Guiyang University Natural Sciences (Quarterly)*, 2017, **12**(4): 102-104.
- [55] 季俊凯, 张丹, 周培, 等. 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*, 2018, **39**(8): 3845-3853.
- Li J K, Zhang D, Zhou P, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in soil and its bioaccumulation by dominant plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3845-3853.

## CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM <sub>2.5</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter .....	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain .....	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze .....	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM <sub>2.5</sub> in Housewives in Rural Shanghai .....	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source .....	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment .....	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises .....	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang .....	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengde .....	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains .....	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River .....	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn .....	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province .....	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization .....	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau .....	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area .....	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed .....	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland .....	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake .....	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake .....	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed .....	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area .....	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i> .....	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments .....	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen .....	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems .....	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process .....	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode .....	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System .....	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances .....	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018 .....	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model .....	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China .....	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds .....	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field .....	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas .....	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil .....	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils .....	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area .....	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cblL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China .....	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China .....	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil .....	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China .....	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection .....	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40 .....	(5659)