

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国城市 PM _{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响	孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)
基于区域传输矩阵和 PM _{2.5} 达标约束的大气容量计算方法	李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征	温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征	彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)
杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析	徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)
城市生活垃圾露天焚烧 PM _{2.5} 及其组分排放特征	王艳, 郝伟伟, 程珂, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子	杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)
大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析	纪德钰 (3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析	张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数	王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别	翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征	胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露	陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化	李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)
太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价	朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性	姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)
珠江三角洲高碑地下水赋存环境特征及成因分析	张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响	宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析	程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子	王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析	张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响	刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N ₂ O 排放影响	余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布	尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)
水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响	高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)
Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A	李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制	于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制	赵华轩, 郎印海 (3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证	陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解	关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮	叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能	陈思, 白波, 王洪林, 索有瑞 (3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能	许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕峰, 夏四清 (3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用	马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能	王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因	康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 刘珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性	吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析	刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)
生物炭对华北农田土壤 N ₂ O 通量及相关功能基因丰度的影响	刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)
设施菜田土壤 N ₂ O 产生对 O ₂ 的响应	陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)
利用 μ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性	孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)
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	李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果	杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)
基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移	李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程	赵鹏宇, 李鑫, 柴宝峰 (3876)
转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响	王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)
脱硫石膏对稻田 CH ₄ 释放及其功能微生物种群的影响	胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征	杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响	宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)
黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价	康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响	涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响	祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君 (3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO ₂ 排放	林婷, 吴焯, 何晓婧, 张少君, 郝吉明 (3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展	叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)
《环境科学》征订启事 (3543)	
《环境科学》征稿简则 (3570)	
信息 (3600, 3728, 3844)	

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

李俊凯^{1,2}, 张丹^{1,2}, 周培^{1,2}, 刘群录^{1,2,3*}

(1. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240; 2. 农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240; 3. 国家林业局上海城市森林生态系统国家定位观测研究站, 上海 200240)

摘要: 为了筛选可用于修复土壤重金属污染的植物材料, 测定了南京市某铅锌矿采矿场土壤及样地内 14 种优势植物中 Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn 的含量, 并分析了采矿场土壤重金属的污染状况和 14 种植物对这 6 种重金属元素的富集和转运能力。结果表明, 矿区土壤中 Cd、Mn、Zn、Pb 的污染最为严重, 单因子污染指数分别达到了 45.71、11.68、10.40 和 4.46; 样地的内梅罗综合污染指数为 33.45, 也达到重度污染级别。尽管各种重金属的含量不同, 14 种优势植物均表现出了较强的重金属耐受能力, 其中井栏边草(*Pteris multifida*)和络石(*Trachelospermum jasminoides*)对 6 种重金属均表现出很高的富集能力。所有植物体内 Zn 含量均超出了正常范围, 但仅马唐(*Digitaria sanguinalis*)对 Zn 的生物富集系数大于 1, 其他植物的重金属生物富集系数均小于 1。14 种植物对重金属的生物转移系数较高, 其中菊芋(*Helianthus tuberosus*)和野菊(*Dendranthema indicum*)对 6 种重金属的生物转移系数均大于 1。根据植物对重金属的吸收机制, 可将 14 种植物分为 3 类: 富集型植物, 如菊芋(*H. tuberosus*)、野菊(*D. indicum*)、垂序商陆(*Phytolacca americana*)、爵床(*Justicia procumbens*)、马唐(*D. sanguinalis*)、山萵苣(*Sonchus brachyotus*)、龙葵(*Solanum nigrum*)和狗尾草(*Setaria viridis*); 根部囤积型植物, 如井栏边草(*P. multifida*)和络石(*T. jasminoides*); 规避型植物, 如一枝黄花(*Solidago decurrens*)、蛇莓(*Duchesnea indica*)、青绿苔草(*Carex breviculmis*)和贯众(*Cyrtomium fortunei*)。

关键词: 铅锌矿采矿场; 重金属; 污染评价; 优势植物; 积累能力

中图分类号: X171.5; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3845-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712086

Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing

LI Jun-kai^{1,2}, ZHANG Dan^{1,2}, ZHOU Pei^{1,2}, LIU Qun-lu^{1,2,3*}

(1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Key Laboratory of Urban Agriculture (South), Ministry of Agriculture, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Urban Forest Research Station, State Forestry Administration, Shanghai 200240, China)

Abstract: To identify plants with potential application in phytoremediation, the concentration of cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), manganese (Mn), lead (Pb), and zinc (Zn) in soil and 14 dominant plants sampled from a lead-zinc mining area in Nanjing City was measured. Furthermore, the heavy metal contamination of soil, and bioaccumulation and translocation of the 6 heavy metals by the 14 plants were evaluated. The results showed that the principal contaminants were Cd, Mn, Zn, and Pb, and their single factor pollution index was 45.71, 11.68, 10.40, and 4.46, respectively. Furthermore, the Nemerow index of this area was 33.45, which indicated that the mining area was severely polluted. All the 14 dominant plant species were metal-tolerant, although the concentration of metal varied between different species. Among them, *Pteris multifida* and *Trachelospermum jasminoides* significantly accumulated the heavy metals. The concentration of Zn in all the dominant plants was beyond the normal range; however, the bio-concentration factor (BCF) of only *Digitaria sanguinalis* for Zn was >1, while the BCF of the remaining species for the 6 heavy metals was <1. Furthermore, the heavy metal bio-transfer factor (BTF) of the 14 species was generally high. The BTF of *Helianthus tuberosus* and *Dendranthema indicum* for the 6 heavy metals was >1. According to the mechanism of heavy metal accumulation, the 14 plant species were classified into 3 types: accumulators (*H. tuberosus*, *D. indicum*, *Phytolacca americana*, *Justicia procumbens*, *D. sanguinalis*, *Sonchus brachyotus*, *Solanum nigrum*, and *Setaria viridis*), root compartment (*P. multifida* and *T. jasminoides*), and excluders (*Solidago decurrens*, *Duchesnea indica*, *Carex breviculmis*, and *Cyrtomium fortunei*).

Key words: lead-zinc mining area; heavy metals; pollution assessment; dominant plants; accumulation ability

矿产资源的开发极大推动了国民经济的发展, 同时也带来了严重的环境污染问题, 矿产开采过程中, 废水排放、废石和尾矿的堆放及淋滤使矿区及周边土壤积累大量的重金属^[1,2]。重金属在环境中

收稿日期: 2017-12-12; 修订日期: 2018-01-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800807)

作者简介: 李俊凯(1993~), 男, 硕士, 主要研究方向为城市生态, E-mail: lijunkai@sjtu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: liuql@sjtu.edu.cn

具有稳定性和不降解性的特征,难以从环境中清除^[3]. 不仅造成生态环境破坏,农作物品质下降,还影响人体健康^[4, 5]. 因而土壤重金属污染成为迫切需要解决的环境问题和国内外学者的研究热点.

近年来,环境友好、修复成本低且适于大面积推广的植物修复技术成为国内外学者的研究焦点^[6, 7]. 在重金属污染的生境中易于发现对重金属有较高耐性和富集能力的植物,许多学者对生长于矿区的植物展开了调查研究. 张会敏等^[8]研究了铜陵市相思谷尾矿自然定居的 8 种植物对 Cu、Pb、Zn 和 Cd 的富集能力,认为芒 (*Miscanthus sinensis*) 可以用于铜尾矿的植被恢复. 朱光旭等^[9]分析了锌冶炼废渣堆场土壤和 18 种优势植物的重金属含量,发现鬼针草 (*Bidens pilosa*) 和土荆芥 (*Chenopodium ambrosioides*) 对 Cd、Pb、Zn 有较强的富集和转运能力. 李思亮等^[10]通过对浙江省 4 个铅锌矿中自然生长的 16 种优势植物的重金属富集特征进行研究,发现伴矿景天 (*Sedum plumbizincicola*) 和紫花香薷 (*Elsholtzia argyi*) 具有 Cd 超富集植物的特征. Wan 等^[11]对湖南省内四处矿山上植被重金属含量调查研究,发现柔毛堇菜 (*Viola principis*) 对 Cd、Pb、As 具有超富集能力. Liu 等^[12]在阿勒泰两处矿山尾矿中发现花花柴 (*Karelinia caspica*) 对 Cd、扁蓄蓼 (*Polygonum aviculare*) 对 Cu 具有很高的富集能力. 因此,在重金属污染土壤环境中调查和筛选优势植

物对于重金属污染土壤的修复有重要意义.

关于南京市栖霞山铅锌矿已有很多报道,研究内容大多集中在矿床和土壤重金属污染领域^[13, 14],而对于当地自然生长的植物调查研究很少,尤其对周边地区土壤污染严重的采矿场内重金属耐性和富集型植物的研究鲜有报道. 为筛选出适应当地气候和土壤条件的重金属耐性和富集植物,本文以栖霞山铅锌矿附近某大型采矿场内土壤和主要优势植物作为研究对象,分析评价了该地区土壤重金属污染状况,并对优势植物重金属富集能力进行了探讨. 初步筛选出多种对重金属 Cd-Mn-Pb-Zn 复合型污染土壤有较高耐性和修复能力的植物,以期为该地区土壤重金属污染的植物修复技术提供新的材料和依据.

1 材料与方

1.1 研究区域概况

本铅锌矿采矿场 (E118°57'2", N32°9'23") 位于江苏省南京市北部,属于北亚热带湿润气候区,四季分明,降水丰沛. 该采矿场主要开采栖霞山铅锌矿,长期的开采在场内造成大量矿渣的堆积,为植物生长提供了一定的土壤基质,调查区域内植被多为草本和低矮灌木,生长状态良好,植被群落比较丰富. 样地土壤类型为黄棕壤土,土壤中混杂着大量的铅锌矿矿渣,土壤基本理化性质如表 1 所示.

表 1 样地土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil in the plot

项目	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	总 N /g·kg ⁻¹	总 P /g·kg ⁻¹	总 K /g·kg ⁻¹	碱解 N /mg·kg ⁻¹	有效 P /mg·kg ⁻¹	速效 K /mg·kg ⁻¹
样地土壤	7.47 ± 0.23	62.43 ± 8.84	0.49 ± 0.14	0.84 ± 0.37	9.68 ± 1.56	35.42 ± 8.65	4.45 ± 1.12	124.20 ± 31.92

1.2 样品采集

于 2016 年 9 月,对该采矿场内的植被群落和土壤状况进行调查和采样,记录区域内所有植物种类. 采集具有代表性、生长良好且数量较多的优势植物的地上部和根部,每个样本采集 3 个重复. 每采集一个植物样品,同时在植物的根际采集 0 ~ 20 cm 深度的土壤样品.

1.3 样品处理

将采回的土壤样品剔除其中的动植物残骸、石块等杂物,置于室内自然风干. 风干后用木棒碾碎,过 0.15mm 尼龙筛后混匀备用. 称取土样 0.2 g,采用微波消解仪 (MDS-10, 新仪/sineo, 上海),在 HNO₃-H₂O₂-HF 消解体系 (HNO₃: H₂O₂: HF = 6: 2: 1, 体积比) 下消解至液体透明澄清,同时设置空

白对照.

植物地上部和根部分别用自来水冲洗除去表面灰尘,然后用去离子水冲洗 3 次,放入纸质信封中,于烘箱内 105℃ 杀青 30 min 后,置于 75℃ 烘箱中至恒重. 用不锈钢粉碎机粉碎后,称样 0.5 g,采用 HNO₃-H₂O₂ 消解体系 (HNO₃: H₂O₂ = 3: 1, 体积比) 进行微波消解至透明澄清液体. 实验采用空白对照法、双平行样法及加标回收法,确保整个实验过程及测定过程的精确度. 样品中 Cd、Cr、Cu、Mn、Pb、Zn 6 种重金属元素含量用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Optima 8000, Perkin Elmer, USA) 测定.

1.4 数据处理与分析

土壤重金属污染评价采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法^[15, 16]. 植物的重金属积累

能力则采用生物富集系数 (bio-concentration factor, BCF) 和生物转移系数 (bio-transfer factor, BTF)^[17] 进行评价. 采用 Excel 2013、SPSS 19.0 进行数据处理和分析.

1.4.1 单因子指数法

单因子污染指数是将实测值与标准值进行对比评判环境质量的一种方法. 其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中, P_i 为土壤中重金属 i 的单因子污染指数; C_i 为土壤中重金属 i 的含量, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_i 为根据需求选取的标准值, 其中 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 的标准值 S_i 采用《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 中的三级标准. 目前土壤环境质量标准中未对 Mn 做出规定, 参考黄小娟等^[18]、杨胜香等^[19] 的

研究, 本文采用 $1\,200\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为 Mn 的评价标准值.

1.4.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法是评价土壤重金属污染时运用最为广泛的综合指数法, 可以全面反映各重金属对土壤的作用, 避免由于平均而带来的对重金属属权值削弱现象的发生^[20]. 其计算公式为:

$$P_{\text{com}} = \sqrt{\frac{P_{\text{max}}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}} \tag{2}$$

式中, P_{com} 为内梅罗综合污染指数, P_{max} 为单因子污染指数的最大值, P_{ave} 为单因子污染指数的算术平均值.

依据单因子污染指数和内梅罗综合污染指数将土壤重金属污染划分为 5 个等级, 如表 2 所示.

表 2 土壤重金属污染分级标准

Table 2 Criteria for the classification of soil heavy metal pollution				
等级划分	单因子污染指数	综合污染指数	污染等级	污染水平
I	$P_i \leq 0.7$	$P_{\text{com}} \leq 0.7$	安全级	清洁
II	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_{\text{com}} \leq 1.0$	警戒级	尚清洁
III	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_{\text{com}} \leq 2.0$	轻度污染级	开始受到污染
IV	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_{\text{com}} \leq 3.0$	中度污染级	受中度污染
V	$P_i > 3.0$	$P_{\text{com}} > 3.0$	重度污染级	污染已相当严重

1.4.3 生物富集系数

生物富集系数 (BCF) 是植物体内的重金属含量与土壤中相应重金属含量的比值, 反映植物从土壤中吸收重金属的能力. 其计算公式为:

$$\text{BCF} = C_{\text{植物}} / C_{\text{土壤}} \tag{3}$$

式中, $C_{\text{植物}}$ 表示植物地上部或根部的重金属含量, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $C_{\text{土壤}}$ 表示土壤中重金属含量, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.4.4 生物转移系数

生物转移系数 (BTF) 是植物地上部分重金属含量和植物的地下部分的重金属含量的比值, 反映植物吸收重金属后从根部转移到地上部的能力. 其计算公式为:

$$\text{BTF} = C_{\text{地上部}} / C_{\text{根部}} \tag{4}$$

式中, $C_{\text{地上部}}$ 表示植物地上部的重金属含量, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $C_{\text{根部}}$ 表示植物根部的重金属含量, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属污染状况

样地土壤重金属含量如表 3 所示, 可以看出土

壤中各重金属的含量分别为: Cd $7.32 \sim 98.43\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cr $64.96 \sim 167.50\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu $148.10 \sim 377.50\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Mn $4\,346.00 \sim 28\,360.00\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb $825.41 \sim 3\,496.00\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn $1\,277.07 \sim 9\,490.73\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 各重金属含量均值分别达到了 45.71、92.92、216.46、14 015.31、2 232.16 和 5 201.86 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 重金属含量由高到低依次为: Mn > Zn > Pb > Cu > Cr > Cd.

6 种金属元素的单因子污染指数从高到低依次为 Cd > Mn > Zn > Pb > Cu > Cr. 其中 Cd、Mn、Zn 和 Pb 的单因子污染指数分别为 45.71、11.68、10.40 和 4.46, 均大于 3, 达到了重度污染级别; Cr 和 Cu 表现为未污染. 从内梅罗综合污染指数来看, 研究样地的内梅罗综合污染指数达到 33.45, 远高于重度污染级别, 表明该区域土壤重金属污染十分严重.

2.2 优势植物重金属富集能力

2.2.1 植物体内重金属含量

本次调查样地内共有植物 34 种, 分属 30 属, 23 科, 其中优势植物有 14 种, 各植物体内重金属含量如表 4 所示, 可以看出植物对重金属的吸收能力各不相同. 植物根部各重金属含量范围分别为:

Cd 1.14 ~ 19.84 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cr 1.28 ~ 25.07 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cu 9.30 ~ 75.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mn 25.98 ~ 893.30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 2.42 ~ 488.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn 166.10 ~ 5 514.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 植物地上部各重金属含量范围分别为: Cd 0.34 ~ 7.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cr 0.83 ~ 10.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cu 6.30 ~ 26.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mn

39.84 ~ 259.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 0.00 ~ 31.83 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn 185.95 ~ 1 644.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 总体来看, 6 种重金属在植物根部的含量高于地上部, 植物体内 6 种重金属的含量由高到低依次为: $\text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Cd}$, 张丽等^[21]和赵玉红等^[22]的研究也得出了类似的结论.

表 3 样地土壤重金属含量及污染指数

Table 3 Concentration of heavy metals and pollution index of soils

项目	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	98.43	167.50	377.50	28 360.00	3 496.00	9 490.73
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	7.32	64.96	148.10	4 346.00	825.41	1 277.07
平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	45.71	92.92	216.46	14 015.31	2 232.16	5 201.86
评价标准值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.00	300.00	400.00	1200.00	500.00	500.00
平均超标倍数 ¹⁾	44.71	NE ²⁾	NE	10.68	3.46	9.40
单因子污染指数	45.71	0.31	0.54	11.68	4.46	10.40
内梅罗综合污染指数	33.45					

1) 平均超标倍数 = (平均值 - 评价标准值) / 评价标准值; 2) NE 表示未超标

14 种优势植物对重金属的富集能力有较大差异, 与植物体内重金属正常含量相比, 6 种重金属含量均不同程度地超出了正常范围. Zn 是植物体必需的元素, 但过量会引起毒害作用, 所有 14 种植物体内 Zn 含量均超出植物正常含量. Cd 是毒性最高的重金属元素之一, 本研究中山莴苣、马唐、垂序商陆、爵床、蛇莓、野菊、络石、青绿苔草、狗尾草和井栏边草 10 种植物体内 Cd 含量超出正常范围, 对 Cd 具有较高的耐性. Pb 的生物有效性低且在植物体内难以被转运, 山莴苣、一枝黄花、络石、青绿苔草、狗尾草和井栏边草体内 Pb 含量超出正常范围, 但大都积累在根部. 由于样地土壤中 Cu 和 Cr 污染程度较低, 因此大部分植物体内 Cu 和 Cr 的含量均在正常值范围内. 总体上看, 井栏边草和络石体内 6 种重金属的含量均很高, 表明两种植物对于复合污染土壤的修复有较高的潜在应用价值. 青绿苔草体内 Cd、Cu 及 Mn 含量, 蛇莓体内的 Cu、Mn 含量, 马唐体内 Zn、Cr 含量较高, 表明这几种植物对某些重金属有较高的富集能力. 但是与超富集植物体内重金属含量临界值相比, 样地中所有植物体内重金属含量均未达到超富集植物的临界值.

2.2.2 植物对重金属的富集及转移特征

生物富集系数表征重金属从土壤向植物体内迁移的难易程度, 是反映植物将重金属吸收到体内能

力大小的评价指标^[25]. 由表 5 可知, 14 种植物对 6 种重金属的生物富集系数总体表现为 $\text{Zn} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Mn}$, 且根部的生物富集系数大于地上部分. 马唐对 Zn 表现出很强的富集能力, 其地上部分对 Zn 的生物富集系数超过 1, 达到 1.040; 井栏边草对 Zn 也有较强的富集能力, 其根部生物富集系数为 0.845. 井栏边草、络石、山莴苣及马唐对 Cd 的生物富集系数较高, 但均未超过 1. 所有植物对 Cr、Cu、Mn、Pb 的生物富集系数也均小于 1.

生物转移系数表征植物对重金属在体内的转运能力. 由表 5 可以看出, 14 种植物对 6 种重金属的转移能力存在一定的差异, 总体表现为 $\text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb}$. 其中菊芋、野菊、垂序商陆、爵床、马唐、山莴苣、龙葵和狗尾草对多种重金属的生物转移系数超过 1, 具有较强的重金属转运能力. 菊科植物菊芋和野菊对 6 种重金属的生物转移系数均超过 1, 其中菊芋对 Cu 和 Pb 的生物转移系数在所有调查植物中最高, 分别为 2.573 和 2.697. 马唐对 Cr、Mn、Zn 的生物转移系数均超过 1, 其中对 Cr 的生物转移系数在所有调查植物中最高, 达到 2.832; 垂序商陆对 Cd、Cu、Mn、Zn 的生物转移系数均超过 1, 其中对 Cd、Mn、Zn 的生物转移系数在所有调查植物中最高, 分别达到 2.904、4.128 和 3.135; 爵床对 Cd、Cr、Mn、Zn 的生物转移系数均超过 1.

表 4 植物体内重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 4 Concentration of heavy metals in plants/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

植物	部位	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn
山莴苣	根部	3.65 ± 0.75	15.12 ± 3.12	21.50 ± 4.65	165.07 ± 44.07	54.53 ± 14.81	466.97 ± 81.00
	地上部	3.85 ± 0.27	1.69 ± 0.17	8.46 ± 4.09	68.62 ± 4.73	2.69 ± 0.18	514.63 ± 91.40
马唐	根部	5.83 ± 0.86	3.85 ± 0.22	21.66 ± 3.96	53.47 ± 5.32	30.10 ± 2.57	939.45 ± 270.89
	地上部	2.16 ± 0.07	10.90 ± 1.57	9.99 ± 0.34	133.77 ± 14.81	20.45 ± 3.42	$1\ 644.67 \pm 245.08$
一枝黄花	根部	1.58 ± 0.19	5.55 ± 1.87	23.83 ± 3.47	84.44 ± 25.66	46.18 ± 10.96	421.60 ± 95.65
	地上部	0.34 ± 0.04	1.93 ± 0.15	18.43 ± 0.41	74.15 ± 2.28	8.03 ± 0.25	185.95 ± 5.87
垂序商陆	根部	1.36 ± 0.04	1.57 ± 0.19	14.4 ± 0.97	42.09 ± 3.53	5.28 ± 0.47	277.80 ± 2.75
	地上部	3.95 ± 0.24	1.40 ± 0.10	23.95 ± 1.56	173.77 ± 14.08	0.00 ± 0.00	870.93 ± 28.92
爵床	根部	3.55 ± 0.46	1.74 ± 0.72	16.03 ± 4.39	101.08 ± 26.68	17.97 ± 6.99	567.74 ± 315.54
	地上部	5.20 ± 1.70	2.73 ± 0.21	13.65 ± 0.68	117.33 ± 27.55	0.00 ± 0.00	802.52 ± 127.71
蛇莓	根部	4.90 ± 0.40	6.31 ± 0.74	45.85 ± 3.66	310.00 ± 52.51	22.03 ± 9.18	908.70 ± 76.15
	地上部	2.19 ± 0.14	4.74 ± 0.83	22.73 ± 0.94	226.77 ± 34.37	5.41 ± 7.34	540.47 ± 69.61
野菊	根部	3.21 ± 0.53	2.39 ± 0.49	16.71 ± 0.15	127.25 ± 4.03	31.71 ± 1.79	433.05 ± 41.93
	地上部	4.10 ± 0.24	2.52 ± 0.31	26.70 ± 1.32	259.53 ± 14.45	31.83 ± 3.50	920.87 ± 20.82
菊芋	根部	1.14 ± 0.06	1.28 ± 0.25	9.30 ± 0.81	25.98 ± 3.56	2.42 ± 1.09	166.10 ± 5.44
	地上部	1.64 ± 0.01	1.66 ± 0.09	23.93 ± 0.63	85.23 ± 3.05	6.52 ± 0.62	199.07 ± 5.34
络石	根部	18.25 ± 1.58	4.57 ± 1.77	75.31 ± 1.05	456.95 ± 66.54	123.65 ± 55.80	2171.00 ± 93.34
	地上部	2.14 ± 1.14	2.45 ± 0.72	17.25 ± 5.31	215.18 ± 22.10	9.80 ± 10.81	801.07 ± 425.43
龙葵	根部	1.74 ± 0.25	1.70 ± 0.41	10.11 ± 1.42	78.11 ± 11.16	17.14 ± 2.30	314.73 ± 37.65
	地上部	2.84 ± 0.21	0.83 ± 0.16	6.30 ± 0.53	47.80 ± 6.02	4.36 ± 0.39	307.33 ± 10.71
青绿苔草	根部	7.94 ± 0.29	3.85 ± 0.44	48.04 ± 2.90	450.93 ± 37.53	105.93 ± 2.50	$1\ 383.67 \pm 36.67$
	地上部	5.88 ± 0.09	1.02 ± 0.10	6.40 ± 0.67	88.67 ± 1.19	3.90 ± 0.46	744.13 ± 28.44
狗尾草	根部	6.59 ± 0.36	3.86 ± 0.73	23.80 ± 2.06	160.87 ± 42.50	87.08 ± 18.98	$1\ 550.00 \pm 78.54$
	地上部	3.60 ± 0.04	6.93 ± 0.40	7.54 ± 0.25	96.82 ± 4.51	22.29 ± 1.01	$1\ 143.67 \pm 36.90$
贯众	根部	1.23 ± 0.14	1.83 ± 0.76	16.12 ± 1.73	94.18 ± 16.05	21.70 ± 4.96	901.47 ± 56.71
	地上部	0.70 ± 0.08	1.56 ± 0.26	10.09 ± 0.39	39.84 ± 3.01	4.42 ± 0.60	366.70 ± 14.83
井栏边草	根部	19.84 ± 2.83	25.07 ± 10.42	53.81 ± 8.09	893.30 ± 189.57	488.27 ± 80.23	$5\ 514.33 \pm 876.43$
	地上部	7.05 ± 0.17	7.19 ± 1.13	8.31 ± 0.70	114.86 ± 35.86	25.87 ± 6.72	867.00 ± 73.03
植物正常含量 ^[23]		0.20 ~ 3.00	0.20 ~ 8.40	0.40 ~ 45.80	20.00 ~ 400.00	0.10 ~ 41.70	1.00 ~ 160.00
超富集植物临界值 ^[24]		100.00	1 000.00	1 000.00	10 000.00	1 000.00	10 000.00

3 讨论

本研究中的 14 种优势植物对 6 种重金属表现出较强的富集和转运能力,大部分植物体内一种或多种重金属含量高于植物正常含量,但是均未达到超富集植物的临界标准. 14 种植物生长良好,对于当地重金属 Cd-Mn -Pb-Zn 复合型污染严重的生境表现出较强的耐性,均可作为该地区重金属污染的植物修复材料,除络石外,其余 13 种植物均为草本植物,表明草本植物对样地重金属污染铅锌矿渣土壤有较强的适应能力. 何东等^[23]和熊云武等^[26]的研究认为土壤中某种重金属含量越高,植物体内相应重金属含量越高,在本研究中,植物体内 Cd、Cr、Cu 和 Pb 含量与土壤中 Cd、Cr、Cu 和 Pb 含量

特征基本一致,均表现为 $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Cd}$,而植物体内的 Zn、Mn 含量与土壤中 Zn、Mn 含量特征不同,土壤中 Mn 含量高于 Zn 含量,而植物体内 Zn 含量却明显高于 Mn 含量,表明植物对重金属的富集不仅仅受到土壤重金属含量的影响. 植物对重金属的富集能力与诸多因素相关,如植物特性、土壤理化性质、土壤中重金属的浓度、形态和毒性大小等^[27],导致了不同研究结果出现较大的差异. 本研究中,龙葵地上部分对 Cd 富集量仅为 $2.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,吴汉福等^[28]在煤矸石山优势植物重金属富集能力调查中发现龙葵体内 Cd 含量为 $1.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与本研究结果相似,而林诗悦等^[29]的研究表明龙葵对 Cd 的富集量高达 $536.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与本研究差异较大. 比较 14 种植物对不同重金属

表 5 植物对重金属的生物富集系数和生物转移系数

Table 5 Bio-transfer factor (BTF) and bio-concentration factor (BCF) of plants for heavy metals

植物	部位	Cd		Cr		Cu		Mn		Pb		Zn	
		BTF	BCF	BTF	BCF	BTF	BCF	BTF	BCF	BTF	BCF	BTF	BCF
山莴苣	根部		0.288		0.169		0.117		0.036		0.045		0.295
	地上部	1.055	0.303	0.112	0.019	0.393	0.046	0.416	0.015	0.049	0.002	1.102	0.325
马唐	根部		0.460		0.043		0.118		0.012		0.025		0.594
	地上部	0.371	0.170	2.832	0.122	0.461	0.055	2.502	0.029	0.679	0.017	1.751	1.040
一枝黄花	根部		0.124		0.062		0.130		0.018		0.038		0.267
	地上部	0.214	0.027	0.348	0.022	0.773	0.101	0.878	0.016	0.174	0.007	0.441	0.118
垂序商陆	根部		0.025		0.017		0.060		0.003		0.002		0.043
	地上部	2.904	0.072	0.889	0.015	1.663	0.099	4.128	0.010	0.000	0.000	3.135	0.133
爵床	根部		0.065		0.018		0.067		0.006		0.007		0.087
	地上部	1.462	0.095	1.569	0.029	0.851	0.057	1.161	0.007	0.000	0.000	1.414	0.123
蛇莓	根部		0.089		0.066		0.190		0.018		0.008		0.139
	地上部	0.448	0.040	0.751	0.050	0.496	0.094	0.732	0.013	0.245	0.002	0.595	0.083
野菊	根部		0.086		0.033		0.066		0.009		0.013		0.089
	地上部	1.279	0.110	1.054	0.035	1.598	0.105	2.040	0.017	1.004	0.012	2.126	0.189
菊芋	根部		0.021		0.013		0.039		0.002		0.001		0.025
	地上部	1.444	0.030	1.300	0.017	2.573	0.099	3.280	0.005	2.697	0.002	1.198	0.030
络石	根部		0.490		0.063		0.296		0.031		0.049		0.445
	地上部	0.118	0.058	0.536	0.034	0.229	0.068	0.471	0.014	0.079	0.004	0.369	0.164
龙葵	根部		0.032		0.018		0.042		0.005		0.006		0.048
	地上部	1.631	0.052	0.486	0.009	0.623	0.026	0.612	0.003	0.255	0.002	0.976	0.047
青绿苔草	根部		0.144		0.041		0.200		0.027		0.039		0.212
	地上部	0.741	0.107	0.265	0.011	0.133	0.027	0.197	0.005	0.037	0.001	0.538	0.114
狗尾草	根部		0.120		0.041		0.099		0.010		0.032		0.237
	地上部	0.546	0.065	1.798	0.073	0.317	0.031	0.602	0.006	0.256	0.008	0.738	0.175
贯众	根部		0.022		0.019		0.067		0.006		0.008		0.138
	地上部	0.568	0.013	0.852	0.016	0.626	0.042	0.423	0.002	0.204	0.002	0.407	0.056
井栏边草	根部		0.361		0.264		0.224		0.053		0.180		0.845
	地上部	0.355	0.128	0.287	0.076	0.155	0.035	0.129	0.007	0.053	0.010	0.157	0.133

的生物富集系数和生物转移系数，马唐对 Zn 的生物富集系数和生物转移系数均大于 1，具有潜在的 Zn 超富集植物特征，这与刘胜洪等^[30]的研究结果相同。垂序商陆对 Cd、Cu、Mn、Zn 的生物转移系数均超过 1，尤其对 Mn 的生物转移系数高达 4.128，已被鉴定为 Mn 的超富集植物^[31]。本次调查研究的 14 种植物，从某种程度上具有重金属超富集植物的一些特征，但还需要通过盆栽实验及生理生化研究进行验证。

重金属污染严重的土壤中生长的植物通常对重金属具有一定的耐性，但不同植物对重金属的吸收、转移和积累机制表现出一定的差异。参考 Punz 等^[32]和雷梅等^[33]对具有重金属耐性植物的种类划分，可将 14 种优势植物分为富集型、根部囤积型和规避型这 3 类进行探讨。

富集型植物能够从土壤中主动吸收并富集重金属，并将地下部分吸收的重金属转移至地上部分。本研究的 14 种植物中，有 8 种植物体内重金属含量较高，且具有很强的转移能力，具有富集型植物的特征。菊科植物常被作为一种典型的植物修复资源^[34, 35]，本研究中菊芋和野菊对 6 种重金属的生物转移系数均大于 1，陈福春等^[36]的研究同样发现野菊对 Cd、Cu、Pb 的生物转移系数大于 1。垂序商陆对 Cd、Cu、Mn、Zn 的生物转移系数均超过 1，爵床对 Cd、Cr、Mn、Zn 的生物转移系数均超过 1，马唐对 Cr、Mn、Zn 的生物转移系数均超过 1，山莴苣对 Cd、Zn 的生物转移系数均超过 1，龙葵对 Cd 的生物转移系数超过 1，狗尾草对 Cr 的生物转移系数超过 1。这些植物在重金属污染严重的土壤中生长良好且具有较强的重金属转移能力，在修复土壤重

金属上具有较高的潜在价值。

某些植物能够通过自身对重金属的排斥机制,阻止其由根部向地上部分运输,生物转移系数小于1^[37]。本研究中,井栏边草和络石体内6种重金属含量均很高,但对重金属的生物转移系数均小于1,重金属主要囤积在根部。这表明井栏边草和络石对土壤重金属的被动吸收方式,将大量重金属囤积在根部,以提高自身耐性,属于根部囤积型植物。

另外某些植物能够正常生长在重金属含量非常高的土壤中,但对重金属的吸收和转运较少,可能是植物体内某些机制能够减轻重金属的毒害或将体内过量的重金属排出体外^[38]。如一枝黄花、蛇莓、青绿苔草和贯众体内重金属含量较低,且对重金属的转运能力较差,但能够在重金属含量很高的土壤中正常生长,属于规避型植物。

4 结论

(1)样地土壤重金属含量较高,单因子污染指数分析表明Cd、Mn、Pb、Zn污染严重;内梅罗综合污染指数为33.45,达到重度污染级别。

(2)通过对14种优势植物不同部位重金属含量测定,发现所有植物体内Zn含量均超出了植物体内正常范围,其中井栏边草和络石对6种重金属均有较高的积累能力。14种植物的生物富集系数均较低,除了马唐对Zn的生物富集系数大于1之外,其余植物的生物富集系数均小于1。但是14种植物对重金属的转运能力较强,其中菊芋和野菊对6种重金属的生物转移系数均超过1,具有修复复合型重金属污染的潜在价值。

(3)根据植物对重金属的吸收机制,将14种植物分为三类:菊芋、野菊、垂序商陆、爵床、马唐、山莴苣、龙葵和狗尾草属于富集型植物;井栏边草和络石属于根部囤积型植物;一枝黄花、蛇莓、青绿苔草和贯众属于规避型植物。

参考文献:

- [1] 徐佩,吴超,邱冠豪.我国铅锌矿山土壤重金属污染规律研究[J].土壤通报,2015,46(3):739-744.
Xu P, Wu C, Qiu G H. Study on the law of soil heavy metals pollution around lead-zinc mining areas in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(3): 739-744.
- [2] Esmaeili A, Moore F, Keshavarzi B, et al. A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran[J]. CATENA, 2014, 121: 88-98.
- [3] 陈璐,文方,程艳,等.铅锌尾矿库周边土壤重金属污染特征及环境风险[J].中国环境监测,2017,33(1):82-87.
Chen L, Wen F, Cheng Y, et al. Study on contamination characteristics and environmental risk of heavy metals in the soils around Pb-Zn tailings reservoir[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(1): 82-87.
- [4] 邓新辉,柴立元,杨志辉,等.铅锌冶炼废渣堆场土壤重金属污染特征研究[J].生态环境学报,2015,24(9):1534-1539.
Deng X H, Chai L Y, Yang Z H, et al. Study of the characteristics of heavy metal pollution at Pb/Zn smelting slag site[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(9): 1534-1539.
- [5] Wang Y Q, Yang L Y, Kong L H, et al. Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China[J]. CATENA, 2015, 125: 200-205.
- [6] Sun Z, Chen J J, Wang X W, et al. Heavy metal accumulation in native plants at a metallurgy waste site in rural areas of northern China[J]. Ecological Engineering, 2016, 86: 60-68.
- [7] Sarwar N, Imran M, Shaheen M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives [J]. Chemosphere, 2017, 171: 710-721.
- [8] 张会敏,袁艺,焦慧,等.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,2015,24(5):886-891.
Zhang H M, Yuan Y, Jiao H, et al. Study on heavy metal absorption and enrichment characteristics by 8 plants species settled naturally in Xiangsigu Copper Tailings[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(5): 886-891.
- [9] 朱光旭,肖化云,郭庆军,等.锌冶炼渣堆场优势植物的重金属累积特征研究[J].生态环境学报,2016,25(8):1395-1400.
Zhu G X, Xiao H Y, Guo Q J, et al. Accumulation of heavy metals by dominant plants in zinc smelting slag field[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(8): 1395-1400.
- [10] 李思亮,杨斌,陈燕,等.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,2016,38(5):48-54.
Li S L, Yang B, Chen Y, et al. Study of soil heavy metal pollution and screen of heavy metal hyper-accumulation plants in lead-zinc mine areas of Zhejiang Province [J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(5): 48-54.
- [11] Wan X M, Lei M, Yang J X. Two potential multi-metal hyperaccumulators found in four mining sites in Hunan Province, China[J]. CATENA, 2017, 148: 67-73.
- [12] Liu Z Y, Hamuti A, Abdulla H, et al. Accumulation of metallic elements by native species thriving in two mine tailings in Aletai, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 781.
- [13] 张明超,李景朝,左群超,等.江苏栖霞山铅锌银多金属矿床成矿时代探讨[J].中国矿业,2015,24(S2):128-134.
Zhang M C, Li J C, Zuo Q C, et al. Discussion on the mineralogenetic epoch of the Qixiashan lead-zinc-silver polymetallic deposit, Jiangsu Province [J]. China Mining Magazine, 2015, 24(S2): 128-134.
- [14] 储彬彬,罗立强.南京栖霞山铅锌矿地区土壤重金属污染评价[J].岩矿测试,2010,29(1):5-8,13.
Chu B B, Luo L Q. Evaluation of heavy metal pollution in soils from Nanjing Qixiashan lead-zinc mines[J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, 29(1): 5-8, 13.

- [15] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1938-1945.
Liu W, Yang J J, Wang J, *et al.* Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of East Junggar Basin in Xinjiang[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- [16] 丛鑫, 张偲溪, 胡峰, 等. 矿业城市煤矸石山周边土壤重金属分布特征与影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(3): 479-485.
Cong X, Zhang R X, Hu F, *et al.* Distribution characteristics and influence factors of heavy metals in soils around coal waste piles nearby mining city [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(3): 479-485.
- [17] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P B A, *et al.* Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. Bio/Technology, 1995, **13**(5): 468-474.
- [18] 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.
- [19] 杨胜香, 田启建, 梁士楚, 等. 湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 2038-2045.
Yang S X, Tian Q J, Liang S H, *et al.* Bioaccumulation of heavy metals by the dominant plants growing in Huayuan manganese and lead/zinc mineland, Xiangxi[J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 2038-2045.
- [20] 王斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价: 不同评价方法的比较[J]. 环境化学, 2015, **34**(2): 225-233.
Wang F, Huang Y Z, Wang X L, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of tungsten ores: comparison of different evaluation methods[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(2): 225-233.
- [21] 张丽, 彭重华, 王莹雪, 等. 14 种植物对土壤重金属的分布、富集及转运特性[J]. 草业科学, 2014, **31**(5): 833-838.
Zhang L, Peng Z H, Wang Y X, *et al.* Heavy metal distribution, bioaccumulation and translocation characteristics of fourteen plants[J]. Pratacultural Science, 2014, **31**(5): 833-838.
- [22] 赵玉红, 敬久旺, 王向涛, 等. 藏中矿区先锋植物重金属积累特征及耐性研究[J]. 草地学报, 2016, **24**(3): 598-603.
Zhao Y H, Jing J W, Wang X T, *et al.* Study on heavy metals bioaccumulation characteristics and tolerance of pioneer plants from central Tibet mining area[J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, **24**(3): 598-603.
- [23] 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.
- [24] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. Biorecovery, 1989, **1**: 81-126.
- [25] Mahdavian K, Ghaderian S M, Torkzadeh-Mahani M. Accumulation and phytoremediation of Pb, Zn, and Ag by plants growing on Koshk lead-zinc mining area, Iran[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, **17**(5): 1310-1320.
- [26] 熊云武, 唐彪, 林晓燕, 等. 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, 2016, **44**(8): 84-87, 95.
Xiong Y W, Tang B, Lin X Y, *et al.* Soil heavy metals content and dominant plants absorption characteristics in xiangxi manganese mining area [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, **44**(8): 84-87, 95.
- [27] 施翔, 陈益泰, 王树凤, 等. 废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 2021-2027.
Shi X, Chen Y T, Wang S F, *et al.* Pb, Zn accumulation and nutrient uptake of 15 plant species grown in abandoned mine tailings[J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 2021-2027.
- [28] 吴汉福, 田玲, 翁贵英, 等. 煤矸石山优势植物对重金属吸收及富集特征[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(2): 317-322.
Wu H F, Tian L, Weng G Y, *et al.* Study on heavy metal absorption and enrichment characteristics of dominant plants species settled naturally on coal gangue pile[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(2): 317-322.
- [29] 林诗悦, 冯义彪. 镉锌铅复合污染土壤的超富集植物修复能力研究[J]. 环境工程, 2017, **35**(3): 168-173.
Lin S Y, Feng Y B. Study on phytoremediation of hyperaccumulators for cadmium, zinc and lead in the multiple contaminated soils [J]. Environmental Engineering, 2017, **35**(3): 168-173.
- [30] 刘胜洪, 张雅君, 杨妙贤, 等. 稀土尾矿区土壤重金属污染与优势植物累积特征[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(6): 1042-1045.
Liu S H, Zhang Y J, Yang M X, *et al.* Heavy metal contamination of soil and concentration of dominant plants in rare earth mine tailing area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(6): 1042-1045.
- [31] 薛生国, 叶晟, 周菲, 等. 锰超富集植物垂序商陆 (*Phytolacca americana* L.) 的认定[J]. 生态学报, 2008, **28**(12): 6344-6347.
Xue S G, Ye S, Zhou F, *et al.* Identity of *Phytolacca americana* L. (Phytolaccaceae), pokeweed: a manganese hyperaccumulator plant[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(12): 6344-6347.
- [32] Punz W F, Sieghardt H. The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals [J]. Environmental and Experimental Botany, 1993, **33**(1): 85-98.
- [33] 雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 等. 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, 2005, **25**(5): 1146-1151.
Lei M, Yue Q L, Chen T B, *et al.* Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hu'nan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(5): 1146-1151.

- [34] 魏树和, 杨传杰, 周启星, 等. 三叶鬼针草等 7 种常见菊科杂草植物对重金属的超富集特征[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2912-2918.
- Wei S H, Yang C J, Zhou Q X, *et al.* Hyperaccumulative characteristics of 7 widely distributing weed species in composite family especially *Bidens pilosa* to heavy metals [J]. Environmental Science, 2008, **29**(10): 2912-2918.
- [35] 朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 等. 铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 3054-3060.
- Zhu G X, Xiao H Y, Guo Q J, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of heavy metals in three types of compositae plants from lead-zinc tailings area[J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 3054-3060.
- [36] 陈福春, 易心钰, 张路红. 资兴市铅锌尾矿库区植物资源调查及耐性植物筛选[J]. 湖南林业科技, 2016, **43**(2): 64-70.
- Chen F C, Yi X Y, Zhang L H. Survey on plants resource and selection of tolerant species at Pb-Zn tailings pond area of Zixing City[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2016, **43**(2): 64-70.
- [37] Vaculík M, Konlechner C, Langer I, *et al.* Root anatomy and element distribution vary between two *Salix caprea* isolates with different Cd accumulation capacities [J]. Environmental Pollution, 2012, **163**: 117-126.
- [38] Mahdavian K, Ghaderian S M, Schat H. Pb accumulation, Pb tolerance, antioxidants, thiols, and organic acids in metallicolous and non-metallicolous *Peganum harmala* L. under Pb exposure [J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, **126**: 21-31.

环境科学

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM _{2.5} Concentration Target Constraint	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, <i>et al.</i> (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, <i>et al.</i> (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, <i>et al.</i> (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, <i>et al.</i> (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, <i>et al.</i> (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian	Ji De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, <i>et al.</i> (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, <i>et al.</i> (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, <i>et al.</i> (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, <i>et al.</i> (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, <i>et al.</i> (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, <i>et al.</i> (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, <i>et al.</i> (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, <i>et al.</i> (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, <i>et al.</i> (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N ₂ O Emissions in Ditches Under Different Land Uses	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, <i>et al.</i> (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, <i>et al.</i> (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, <i>et al.</i> (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ Composite Photoanode	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II)	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, <i>et al.</i> (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, <i>et al.</i> (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, <i>et al.</i> (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, <i>et al.</i> (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, <i>et al.</i> (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, <i>et al.</i> (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, <i>et al.</i> (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, <i>et al.</i> (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, <i>et al.</i> (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i> (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, <i>et al.</i> (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, <i>et al.</i> (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, <i>et al.</i> (3885)
Effects of Gypsum on CH ₄ Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, <i>et al.</i> (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, <i>et al.</i> (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, <i>et al.</i> (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO ₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, <i>et al.</i> (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (3954)