

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫兰 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积

郑瑞伦¹, 石东¹, 刘文菊², 孙国新³, 侯新村¹, 胡艳霞¹, 朱毅¹, 武菊英^{1*}

(1. 北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097; 2. 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071001; 3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 大生物量能源草对镉污染土壤的修复潜力如何还未知. 本研究采用两种能源草杂交狼尾草 (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*) 和紫色象草 (*P. purpureum* ‘Purple’) 以及马蔺 (*Iris lactea* var. *chinensis*) 和镉的超累积植物遏蓝菜 (*Noccaea caerulescens*) 为对照, 在镉污染农田上开展田间试验. 结果表明, 杂交狼尾草的地上部生物量最大, 分别是遏蓝菜和马蔺的 126 和 36 倍, 与紫色象草地上部生物量无显著差异. 遏蓝菜地上部和根部中镉和锌的含量显著高于其他植物. 马蔺地上部和根部的锌含量最小, 而镉含量显著大于紫色象草和杂交狼尾草 ($P < 0.05$). 虽然地上部和根部的镉含量显著小于马蔺和超累积植物遏蓝菜, 紫色象草地上部中镉和锌的累积量最大, 镉累积量分别是马蔺和遏蓝菜的 7.0 和 4.1 倍, 锌累积量分别是马蔺和遏蓝菜的 41 和 11 倍 ($P < 0.05$). 杂交狼尾草地上部镉和锌的累积量略低于紫色象草. 遏蓝菜的地上部中镉和锌的富集系数均大于 1, 其体内镉和锌的转移系数均大于 1, 可用于提取修复镉锌复合污染土壤; 马蔺根部镉富集系数大于 1, 其体内镉的转移系数小于 1, 可用于稳定修复镉污染土壤; 紫色象草根部镉富集系数大于 1, 其体内镉的转移系数小于 1, 可用于稳定修复镉污染土壤. 田间条件下, 由于大的生物量, 紫色象草和杂交狼尾草表现出较强的土壤镉和锌的提取去除潜力, 且可产生经济效益, 应用前景较好.

关键词: 杂交狼尾草; 象草; 遏蓝菜; 马蔺; 镉; 锌

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1158-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202008291

Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment

ZHENG Rui-lun¹, SHI Dong¹, LIU Wen-ju², SUN Guo-xin³, HOU Xin-cun¹, HU Yan-xia¹, ZHU Yi¹, WU Ju-ying^{1*}

(1. Beijing Research & Development Center for Grasses and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. College of Resources and Environment Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The remediation potential of large biomass energy grasses in cadmium-contaminated soil remains ambiguous. A field experiment was carried out in a cadmium-contaminated farmland using two energy grasses and two control plants. The two energy grasses were hybrid pennisetum (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*, PAP) and purple elephant grass (*P. purpureum* ‘Purple’, PPP), and the two control plants were *Iris lactea* var. *chinensis* (ILC) and a cadmium hyperaccumulator, *Noccaea caerulescens* (NC). The results showed that the aboveground biomass of PAP was the largest among the four plants, and 126 and 36 times that of NC and ILC, respectively, but no significant difference with that of PPP. The concentrations of cadmium and zinc in the shoots and roots of NC were significantly higher than in the other plants. Zinc concentrations in the shoots and roots of ILC were lower than in the other plants, while cadmium concentrations were significantly higher than in PAP and PPP ($P < 0.05$). The amounts of cadmium and zinc accumulated in the shoots of PPP were the highest among the four plants, while cadmium concentrations in the shoots and roots of PPP were significantly lower than in ILC and NC ($P < 0.05$). Cadmium amounts accumulated in PPP shoots were 7.0 and 4.1 times that of ILC and NC, respectively. Zinc amounts accumulated in PPP shoots were 41 and 11 times that of ILC and NC, respectively ($P < 0.05$). Cadmium accumulation in the shoots of PAP was 19.4% lower than in PPP, and zinc accumulation had no significant difference with that of PPP. NC, having a bioconcentration factor of shoot (BCFS) and a translocation factor (TF) for cadmium and zinc both larger than 1, is usable for phytoextraction of soils contaminated by cadmium and zinc. ILC, having a bioconcentration factor of root (BCFR) larger than 1 and a TF lower than 1 for cadmium, is usable for the phytostabilization of soils contaminated by cadmium. PPP, having a BCFR larger than 1 and a TF lower than 1 for zinc, can be used in the phytostabilization of soils contaminated by zinc. Under field conditions, PPP and PAP showed great potential for the extraction and removal of cadmium and zinc from soil due to their large biomass and ability to produce economic benefits, have good application prospects.

Key words: hybrid pennisetum; elephant grass; *Noccaea caerulescens*; *Iris lactea*; cadmium; zinc

收稿日期: 2020-08-29; 修订日期: 2020-09-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800303); 北京市农林科学院科技创新建设专项(KJCX20200210, 20170411); 国家自然科学基金项目(41501336)

作者简介: 郑瑞伦(1982~), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为重金属污染土壤修复, E-mail: zhengruilun@grass-env.com

* 通信作者, E-mail: wujuying@grass-env.com

镉毒性较大,属人体非必须金属元素,镉的摄入与肾中毒、骨质疏松症、神经中毒、内分泌紊乱和生殖障碍等许多疾病有关^[1]. 由于肥料使用、大气沉降、污水灌溉和污泥施用等人类活动已经使得农田土壤镉污染成为了全球性问题^[2,3]. 据环境保护部和国土资源部联合发布报告表明,我国农田镉的点位超标率在所有有害金属和类金属中名列第一^[4]. 而且,与其他有害金属和类金属相比,镉在土壤中的移动性较强,可通过很多必须营养元素(如铁和锌)的膜载体或通道被植物吸收,更容易从土壤向植物体内迁移并累积在植物可食部位^[5,6]. 土壤镉污染已经对食品安全和人体健康造成严重威胁^[6~8].

为去除土壤中的镉,减小镉在作物体内的累积,目前已经发展了很多方法和措施^[6,9]. 这些方法各有利弊,植物修复与其他方法相比不会造成二次污染、成本低,且不会破坏土壤理化性质,是公认的绿色修复技术^[10]. 特别是对于植物提取修复,目前已经发展了多种镉超累积植物,可在地上部累积较高含量的镉,通过收割地上部将镉从土壤中移除,但超累积植物一般对生长环境要求苛刻、生长速度慢或者生物量小,维护成本高,而且在修复的同时还会导致占用的农田无法进行正常生产,大大降低土地利用率^[11].

近年来有报道表明,一些大生物量的能源植物可以在地上部累积大量的镉,具有较好地提取修复镉污染土壤的潜力. 这些植物的根系很发达,可以将镉吸收或吸附固持在发达的根系上减小镉的移动性^[12,13],且这些植物普遍具有较强的适应性和抗性^[14,15]. 土壤镉含量为 8 mg·kg⁻¹时,单株杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*)地上部镉累积量可达到 0.62 mg^[12],而土壤镉含量为 20.3 mg·kg⁻¹时,超累积植物单株镉累积量只有 0.24 mg^[16]. 笔者在同一种植条件下的盆栽试验结果也表明,虽然杂交狼尾草和紫色象草(*Pennisetum purpureum* ‘Purple’)的体内镉含量低于超累积植物遏蓝菜(*Noccaea caerulescens*)和马蔺(*Iris lactea* var. *chinensis*),但其地上部镉累积量显著大于其他 30 种芒属(*Miscanthus*)、芦竹属(*Arundo*)、黍属(*Panicum*)植物和马蔺,并与遏蓝菜持平^[17]. 但是对于生长速度快、生物量大的杂交狼尾草和紫色象草,

盆栽试验会由于盆的约束而限制其生长,从而低估其提取修复能力. 在田间条件下比较能源草与超累积植物的地上部镉累积量,评价能源草对镉污染土壤修复潜力的研究鲜见报道.

此外,能源草的茎秆可用于生产生物燃料、纸浆、建筑材料以及吸附材料等,从而产生经济效益^[18~21]. 如果这些能源草本植物田间条件下对镉污染土壤的修复能力可以与超累积植物相近或高于超累积植物,再加上其适应性强、管护成本低等特点,在污染土壤上种植这些能源草本植物可以提取去除土壤中的镉或减少镉随水径流污染周边环境的风险,并可增加植被、提升景观和开展原材料生产,从而在减小镉进入食物链的同时提高土地利用率,产生经济效益,实现边修复边生产.

本文选用镉吸收累积能力较强的杂交狼尾草和紫色象草为研究对象^[17],并用超累积植物遏蓝菜^[11,22]和具有高富集镉特征的马蔺^[23,24]为对照植物,开展田间试验,通过阐明田间条件下杂交狼尾草和紫色象草对镉的吸收累积能力,评价其对镉污染土壤的修复潜力,以期为进一步结合修复与利用镉污染土壤提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况与供试植物

本试验于 2018 年 5 月上旬至 11 月上旬在河北省保定市某农田(北纬 38°48′,东经 115°44′)进行. 该地区属暖温带大陆性季风气候区,四季分明,年均日照 2 511 h,年均气温 13.4℃,平均风速 1.8 m·s⁻¹,年均降雨量 499 mm. 试验点北部 700 m 左右是已经废弃的铜矿开采冶炼厂,由于长期污水灌溉导致试验点农田土壤镉含量超标. 土壤质地为壤土,其理化性质见表 1. 其中土壤镉含量是我国农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618-2018)的 3.1 倍,超过河北省土壤背景值 19 倍,为中度污染土壤^[4,25]. 虽然土壤锌和铅含量未超过风险筛选值(GB 15618-2018),但由于锌是镉的伴生元素,与镉具有相同的核外电子构型,化学性质相似,Cd²⁺可以通过占用特异度低的 Zn²⁺离子通道进入植物细胞^[26~29],因此本研究也分析了植物对锌的吸收累积情况.

表 1 土壤和草炭理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of the soil and the peat

项目	pH	TOC/%	TN/%	CEC /cmol·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	重金属元素/mg·kg ⁻¹		
								Cd	Zn	Pb
土壤	7.6	1.7	0.2	16.2	94	23.9	228	1.9	132	115
草炭	5.1	35.7	2.4	—	597	72.9	475	0.2	30	18

本试验用植物是镉吸收累积能力较强的两种草本能源植物紫色象草和杂交狼尾草,以及马蔺和超累积植物遏蓝菜(表2)。

1.2 植物培养与试验设计

紫色象草和杂交狼尾草采用扦插培养:将具有

完整芽的植物根茎(7 cm 长)在装有草炭的营养钵中进行扦插培养. 马蔺采用分株的方法培养:将大小一致的马蔺的分株进行修剪,得到地上部分高为 7 cm、根长为 4 cm 的分株,然后将分株栽植到装有草炭的营养钵中培养. 草炭基本理化性质见表 1。

表 2 供试植物信息
Table 2 Information about the plants used in the present study

中文名称	学名	缩写	来源
紫色象草	<i>Pennisetum purpureum</i> ‘Purple’	PPP	中国广东省韶关市
杂交狼尾草	<i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	PAP	哥伦比亚
马蔺	<i>Iris lactea</i> var. <i>chinensis</i>	ILC	中国新疆伊犁昭苏县
遏蓝菜	<i>Noccaea caerulea</i>	NC	法国南部 Ganges

遏蓝菜采用种子繁殖培养:将遏蓝菜种子用 15% 双氧水浸泡 30 min,再用去离子水充分冲洗 3 遍后移入铺有滤纸的培养皿中,保持滤纸湿润,在 25℃ 下避光培养,两周后将露白的种子移入蛭石中继续培养,浇灌去离子水保持蛭石湿润. 待遏蓝菜幼苗子叶完全张开后浇灌营养液,在蛭石中培养 5 个月移入装有草炭的营养钵中继续培养。

将以上 4 种植物移栽到装有草炭的营养钵(11 cm 口径、12 cm 高)中后,均统一浇灌去离子水培养 3 周,然后选取大小一致的植物苗,将其随同钵中草炭一起移入试验区. 植物具体培养方法参考文献[17]。

杂交狼尾草和紫色象草按照行株距 1 m × 1 m 种植,每个小区 16 棵,小区面积为 9 m² (3 m × 3 m); 马蔺和遏蓝菜按照行株距 30 cm × 30 cm 种植,每个小区 40 棵,小区面积为 3 m² (3 m × 1 m). 每种植物重复 3 个小区,随机区组排列. 将植物移入田间后立即进行灌溉,浇足浇透头水,一周后浇足二水,之后对植物进行正常的人工除草和灌溉管护工作。

1.3 采样与测定

植物移入田间种植 6 个月后收获,杂交狼尾草和紫色象草每个小区随机取 3 株,马蔺和遏蓝菜随机取 10 株(为防止边际效应影响,不取边行植株样本),迅速称量地上部样品总鲜重后带回实验室,随机取一部分称量鲜重后用去离子水洗净,105℃ 杀青 0.5 h 后 80℃ 烘干至恒重,称量,计算含水率. 地上部生物量以总干重计. 植物根用根钻(XDB0404 汽油动力根钻,北京新地标土壤设备有限公司)收集后,带回实验室,用去离子水洗净,105℃ 杀青 0.5 h 后 80℃ 烘干至恒重. 根钻所取圆柱形土柱直径为 7 cm,深度为 20 cm. 每株植物取 3 根钻为一个混合样,分别从植物正上方和植物主干两侧打入根钻取样. 植物样品经烘干、粉碎后备用。

土壤基本理化性质测定参照文献[30]. 土壤的

pH 值用 pH 计(pHs-3C 雷磁,上海精密科学仪器有限公司)测定,土水比 1:2.5. 土壤有机碳(TOC)和总氮(TN)分别用重铬酸钾氧化法和开氏消煮法测定. 土壤阳离子代换量(CEC)用乙酸铵法测定. 土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量分别用碱解扩散法、碳酸氢钠法和乙酸铵提取法测定. 土壤样品采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 方法消解(GB/T 1739-1997),植物样品用浓硝酸微波消解,消解液中镉和锌的质量浓度用电感耦合等离子体质谱仪进行测定(ICP-MS, 7500a, 安捷伦科技有限公司)^[31]. 植物样品中镉和锌的含量均以样品干重为基础计. 在消解和测定全程使用试剂空白和标准物质(GBW 07603, 灌木枝叶)进行质量控制,镉和锌的加标回收率为 86% ~ 105%。

1.4 数据分析

所有数据进行单因素方差分析,样品均值的比较采用 LSD 检验($P < 0.05$). 所有统计分析均在 SPSS 16.0 软件(SPSS Inc., USA)下进行。

转移系数(translocation factor, TF) = 植物地上部元素含量/根部元素含量

提取率(extraction ratio, ER) = 植物地上部元素总累积量/耕层(20 cm)土壤元素总量 × 100%

地上部富集系数(bioconcentration factor of shoot, BCFS) = 植物地上部元素含量/土壤元素含量

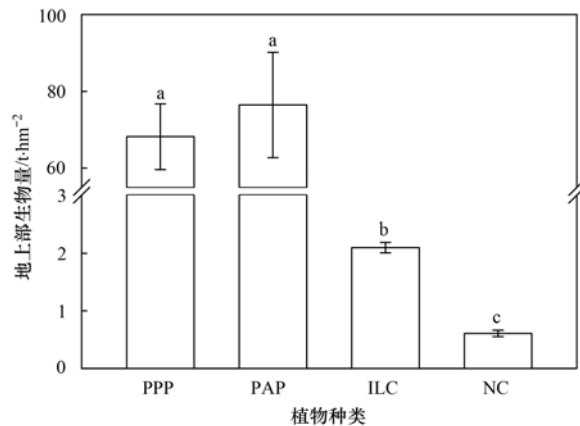
根部富集系数(bioconcentration factor of root, BCFR) = 植物根部元素含量/土壤元素含量

2 结果与分析

2.1 植物生物量

4 种供试植物中,因遏蓝菜对环境要求苛刻,其成活率只有 35.4%,其他 3 种植物的成活率为 100%. 因遏蓝菜和马蔺植株矮小,需要经常除草,而紫色象草和杂交狼尾草除了在种植前进行过一次除草外,未进行过其他管护措施. 结果统计中遏蓝菜生

物量、镉累积量和提取率均是按照成活率为 100% 计算得出的结果. 4 种植物地上部的生物量差异显著 ($P < 0.05$, 图 1). 其中, 杂交狼尾草和紫色象草的地上部生物量最大, 遏蓝菜地上部生物量最小. 杂交狼尾草的生物量分别比遏蓝菜和马蔺大 125 和 35 倍, 马蔺的生物量比遏蓝菜大 2.4 倍.



柱上方不同的小写字母表示不同植物地上部之间差异显著 ($P < 0.05$); PPP、PAP、ILC 和 NC 分别表示紫色象草、杂交狼尾草、马蔺和遏蓝菜, 下同

图 1 植物地上部的生物量

Fig. 1 Aboveground biomass of the plants used in the present field study

2.2 植物体内镉和锌的含量

4 种植物地上部和根部的镉含量在不同植物间差异显著 [$P < 0.05$, 图 2(a)]. 超累积植物遏蓝菜地上部和根部的镉含量均为最高, 分别比马蔺、杂交狼尾草、紫色象草高 4.9、36.6、26.0 倍和 3.6、7.6、9.5 倍. 马蔺和遏蓝菜各自的根部与地上部的镉含量无显著差异, 杂交狼尾草和紫色象草根镉含量比地上部镉含量分别高 2.6 和 1.1 倍. 4 种植物中, 遏蓝菜的地上部和根部的锌含量最大, 分别显著比其他植物高 8.9 ~ 11.7 和 0.8 ~ 2.0 倍 [$P <$

0.05, 图 2(b)]. 紫色象草、杂交狼尾草和马蔺中, 紫色象草的根部锌含量最大, 马蔺最小, 地上部锌含量无显著差异. 紫色象草、杂交狼尾草和马蔺的根部锌含量分别显著比地上部高 3.0、2.8 和 2.0 倍 ($P < 0.05$). 虽然马蔺地上部和根部的镉含量均显著高于杂交狼尾草和紫色象草 ($P < 0.05$), 但是其锌含量却较低 (图 2).

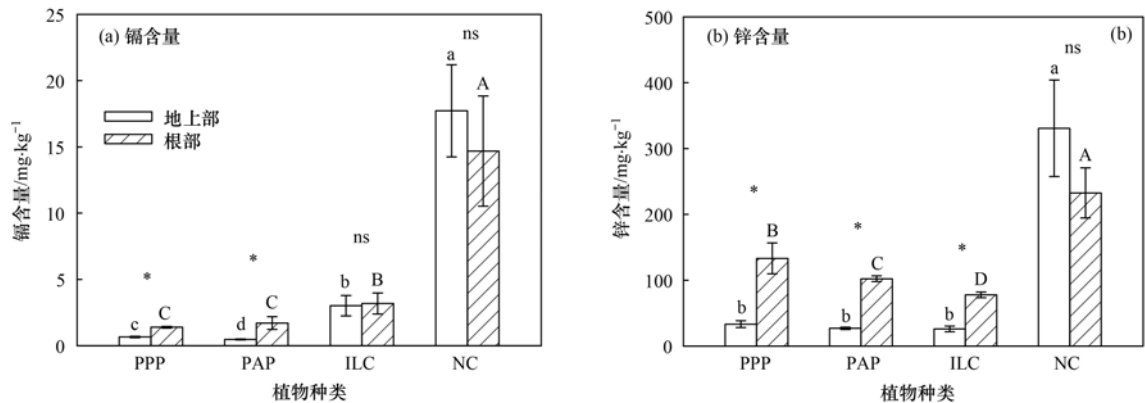
2.3 植物体内镉和锌的累积量与富集系数

紫色象草地上部镉和锌的累积量最大, 其中镉累积量分别比马蔺、杂交狼尾草和遏蓝菜高 6.0、0.2 和 3.1 倍 [图 3(a)], 锌累积量与杂交狼尾草无显著差异, 分别比马蔺和遏蓝菜高 40.2 和 10.3 倍 [$P < 0.05$, 图 3(b)].

4 种植物地上部和根部的镉富集系数在不同植物间差异显著 [$P < 0.05$, 图 4(a)]. 超累积植物遏蓝菜地上部和根部的镉富集系数均在 7.8 以上, 远大于 1; 马蔺地上部和根部的镉富集系数均大于 1.6; 杂交狼尾草和紫色象草的地上部和根部的镉富集系数均小于 1. 对于锌富集系数, 只有遏蓝菜的地上部锌富集系数大于 1, 其他植物均未达到 0.3; 除遏蓝菜外, 其他植物根部的锌富集系数均大于地上部锌富集系数, 遏蓝菜和紫色象草的根部锌富集系数均大于 1 [图 4(b)]. 在 4 种植物中, 马蔺地上部和根部的锌富集系数最小.

2.4 镉和锌在植物体内的转移系数与提取率

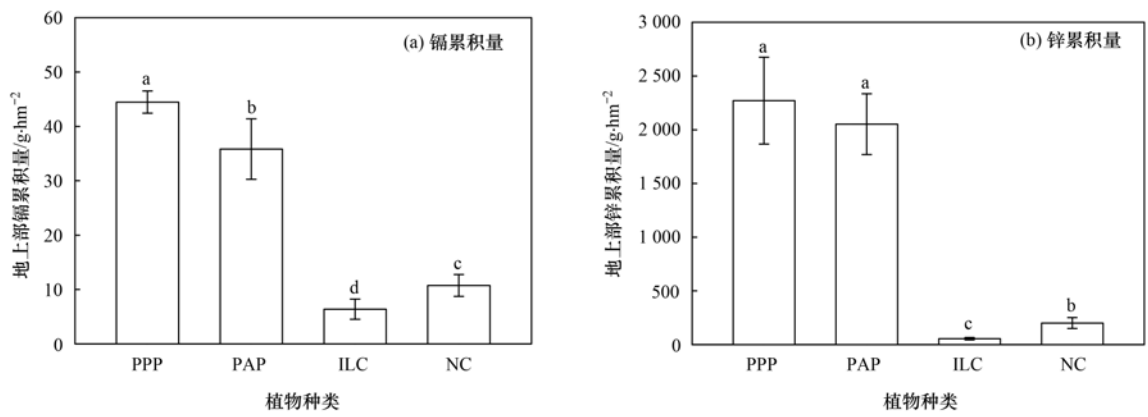
4 种植物对镉的转移系数差异显著, 遏蓝菜体内镉的转移系数最大, 其次是马蔺, 杂交狼尾草最小 (表 3). 遏蓝菜的镉转移系数分别比马蔺、紫色象草和杂交狼尾草高 0.3、1.6 和 3.2 倍 ($P < 0.05$). 遏蓝菜体内锌转移系数显著高于其他 3 种植物, 是其他 3 种植物的 4.2 ~ 5.4 倍, 其他 3 种植物的锌转移系数无显著差异 ($P < 0.05$). 只有遏蓝菜体内镉和



柱上方不同的小写和大写字母分别表示不同植物地上部和根部之间差异显著 ($P < 0.05$), * 和 ns 分别表示地上部与根部之间差异显著 ($P < 0.05$) 和不显著 ($P > 0.05$)

图 2 植物地上部和根部的镉和锌的含量

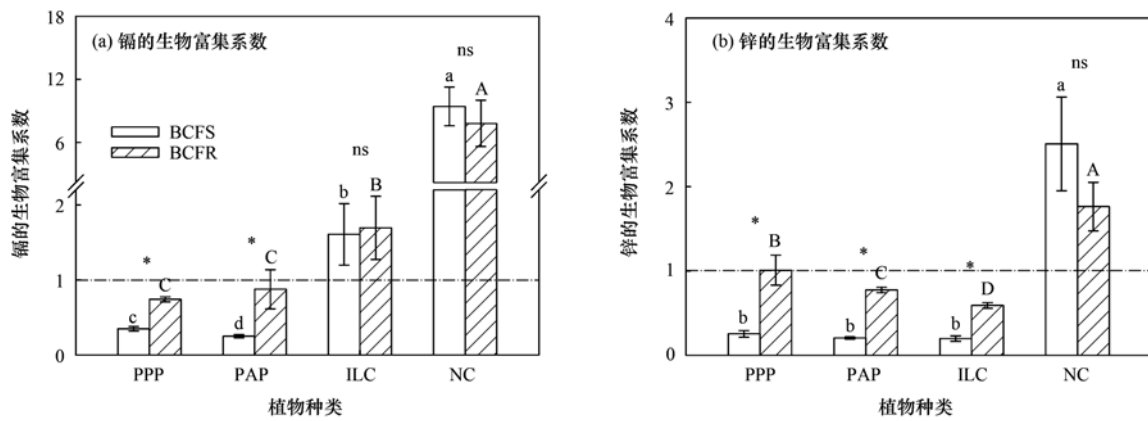
Fig. 2 Concentrations of Cd and Zn in the shoots and roots of the plants



柱上方不同的小写字母表示不同植物地上部之间差异显著 ($P < 0.05$)

图3 植物地上部中镉和锌的累积量

Fig. 3 Amounts of Cd and Zn accumulated in the shoots of the plants



柱上方不同的小写和大写字母分别表示不同植物地上部和根部之间差异显著 ($P < 0.05$),

* 和 ns 分别表示地上部与根部之间差异显著 ($P < 0.05$) 和不显著 ($P > 0.05$)

图4 镉和锌在植物地上部和根部的生物富集系数 (BCFS 和 BCFR)

Fig. 4 Bioconcentration factors of Cd and Zn in the shoots and roots (BCFS and BCFR) of the plants

锌的转移系数大于1. 马蔺体内镉的转移系数比紫色象草和杂交狼尾草高1.0和2.3倍 ($P < 0.05$), 锌的转移系数与这两种能源草无显著差异. 4种植物中, 紫色象草对镉和锌的提取率最大, 其镉的提取率比马蔺和超累积植物遏蓝菜分别高6.0和3.1倍, 锌的提取率比马蔺和超累积植物遏蓝菜分别高40.2和10.3倍. 杂交狼尾草的镉提取率比紫色象草低19.8% ($P < 0.05$), 锌提取率略低于紫色象草, 但不显著 (表3).

表3 不同植物对镉和锌的提取率及镉和锌在植物体内的转移系数¹⁾

项目	Extraction ratios (ERs) and translocation factors (TFs) of Cd and Zn for different plants			
	TF		ER/%	
	Cd	Zn	Cd	Zn
PPP	0.47 ± 0.05c	0.34 ± 0.12b	0.91 ± 0.04a	0.66 ± 0.12a
PAP	0.29 ± 0.10d	0.26 ± 0.03b	0.73 ± 0.11b	0.60 ± 0.08a
ILC	0.95 ± 0.01b	0.33 ± 0.04b	0.13 ± 0.04d	0.02 ± 0.00c
NC	1.23 ± 0.13a	1.44 ± 0.33a	0.22 ± 0.04c	0.06 ± 0.01b

1) 同一列中不同字母表示不同植物之间差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 田间条件下植物的生物量

本研究中能源草杂交狼尾草和紫色象草均具有很大的地上部生物量, 分别可以达到 $76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于其他的研究报道^[32,33]. 除降雨、温度等环境因素的影响外, 土壤镉含量也可能是造成本研究中这两种能源草的生物量高于其他报道研究结果的原因. 虽然过高的镉含量可以抑制植物的生长, 但低含量镉对植物生长有促进作用^[12,34,35].

另外, 本研究中杂交狼尾草和紫色象草的地上部生物量远大于马蔺和遏蓝菜, 最高相差125倍, 杂交狼尾草和紫色象草的单株地上部生物量分别可达到4.8 kg和4.3 kg (图1). 而在盆栽条件下, 杂交狼尾草和紫色象草的单株地上部生物量分别比遏蓝菜高8.5和7.8倍, 单株生物量分别只有18.6 g和17.3 g^[17]. Zhang等^[12]的研究结果也表明, 土壤镉含量为 $0.17 \sim 8.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的盆栽条件下, 种植100

d 后杂交狼尾草的地上部生物量为 10.0 ~ 14.5 g. 可见, 田间条件下的紫色象草和杂交狼尾草的生物量远高于盆栽条件^[12,17]. 田间条件避免了盆栽土壤体积对杂交狼尾草和紫色象草生长的限制, 使得这两种能源草充分发挥出其生物量大的优势, 在地上部累积了比超累积植物更多的镉和锌(图 3).

3.2 植物体内的镉、锌含量和累积量

本研究用超累积植物遏蓝菜是 Ganges 生态型, 来自法国南部, 与其他生态型相比具有更好的修复镉污染土壤的潜力, 可用于中度和轻度镉污染土壤的植物提取修复^[22]. 马蔺广泛分布于我国各地区, 具有耐干旱、耐盐碱和抗病虫害的特性, 适应性强, 并对镉具有很强的耐性和吸收累积能力. 当营养液中镉质量浓度达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其地上部镉含量便可大于超累积植物标准值 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且无明显毒害症状, 具有超累积植物的特征^[23,24]. 虽然遏蓝菜和马蔺的地上部镉含量均显著大于杂交狼尾草和紫色象草, 但在田间条件下的地上部镉累积量却远小于杂交狼尾草和紫色象草, 最高可相差 6.0 倍 [图 2(a) 和图 3(a)], 相差倍数远高于盆栽条件下的试验结果^[12,17]. 田间条件下, 杂交狼尾草和紫色象草表现出更强的吸收累积镉的能力.

对镉吸收能力较强的植物通常也有较强的锌吸收能力, 但有趣的是, 4 种植物地上部和根部的镉含量排序与锌含量排序并不一致, 马蔺地上部和根部的镉含量均显著高于杂交狼尾草和紫色象草, 但是锌含量却较低, 根部锌含量显著低于这两种能源草(图 2). 而且, 虽然马蔺体内镉从根向地上部的转移系数是紫色象草和杂交狼尾草的 2.0 和 3.3 倍 ($P < 0.05$), 其锌转移系数却与这两种能源草无显著差异. Hou 等^[17] 的盆栽试验的结果也表明, 马蔺体内镉含量显著高于其他观赏或能源草本植物, 而锌含量却很低. 此外, 也有研究表明, 在 $0 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉质量浓度处理中, 随着镉质量浓度的增加马蔺地上部和根部的锌含量无显著变化^[24]. 因此, 马蔺对镉的吸收转运机制可能有其自身的特点, 值得深入研究.

3.3 田间条件下植物对镉和锌的富集系数与转移系数

地上部重金属的富集系数和转移系数均大于 1 的植物通常被认为可用于提取修复污染土壤^[9,36]. 根部富集系数大于 1 且转移系数小于 1 的植物通常被认为可用于稳定修复污染土壤^[37,38]. 据此, 在本研究中, 只有遏蓝菜体内镉和锌的转移系数和地上部富集系数均大于 1, 可用于提取修复镉锌复合污染土壤. 马蔺体内镉的根部富集系数大于 1 且转移

系数小于 1, 可用于稳定修复镉污染土壤. 对于锌, 只有紫色象草根部分富集系数大于 1, 转移系数小于 1, 可用于稳定修复锌污染土壤(图 4 和表 3). 而在盆栽条件下, 杂交狼尾草和紫色象草的地上部镉富集系数大于 1^[12,17], 这可能由于盆栽条件下植物根系密度较大, 增加了土壤中镉的空间有效性, 从而促进了植物对镉的吸收. 但是, 无论如何, 虽然田间条件下杂交狼尾草和紫色象草体内镉的地上部富集系数和转移系数均小于 1, 锌的转移系数均小于 1, 但两者很大的生物量弥补了其镉锌含量较低的短板, 地上部中镉和锌的累积量远大于马蔺和超累积植物遏蓝菜, 对土壤中镉和锌的提取率更高. 可见, 除了富集系数和转移系数外, 植物生物量也应该作为判断植物修复潜力的指标之一, 如何将评判植物修复能力的指标进行量化和标准化还需要深入和广泛地研究.

在本研究中, 紫色象草地上部对镉的累积量最大, 对镉污染土壤的提取修复能力最强. 如果按照本研究的种植密度且每年只收获一茬(6 个月)紫色象草, 耕层土壤镉含量降到我国农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618-2018) $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下需要 75 a 的时间, 而用遏蓝菜和马蔺分别需要 310 a 和 521 a. 如果仅仅对污染土壤进行修复而不能产生经济效益, 则大大减小了土地利用效率, 75 a 的时间在实际应用中仍然难以接受, 但是, 作为能源草的紫色象草和杂交狼尾草除了管理成本低, 可以增加植被保持水土外, 还可以用来生产生物质能源、优质饲料或者造纸原料, 在修复镉污染土壤的同时带来可观的经济效益, 从而治产结合, 实现镉污染农田的安全利用^[18~21,33,39]. 有研究表明, 象草中镉和锌主要以果胶和蛋白结合态存在, 用盐酸和乙醇溶液提取后可以在保留蛋白的同时将镉去除, 提取后的象草茎叶中的镉、锌含量低于我国《饲料卫生标准》(GB 13078-2001)限量值^[40]. 而将紫色象草和杂交狼尾草作为生产生物燃料和纸浆的原材料则不会使镉进入食物链. 植物生长及对镉的吸收受土壤性质和环境条件等的影响较大, 在其他地区或者在轻度或重度污染区, 紫色象草和杂交狼尾草是否也可以表现出同样的镉吸收累积能力还需要开展广泛研究. 此外, 刈割、施用螯合剂和种植密度等均可以影响植物对土壤中镉的吸收累积能力. 有研究表明, 刈割可以显著增加象草对土壤镉的吸收去除能力, 刈割处理后象草对镉和锌的吸收去除量分别可增加 1.1 和 0.7 倍^[40]. 铵态氮肥和螯合剂的施用也可以显著增加象草地上部的镉累积量^[41,42]. 如果用紫色象草结合刈割和施用螯合剂等农艺和化学综合措施, 将会

很大程度上增加紫色象草地上部的镉累积量,缩短修复到目标土壤镉含量所需要的时间.因此,用大生物量的象草和杂交狼尾草进行镉污染土壤修复具有很好的应用前景.

在实际应用中,大规模的种植杂交狼尾草和象草需要考虑其对农田和自然环境产生生态入侵的风险性.由于杂交狼尾草为直立丛生型草,其地下根茎基本上不向周围扩散,且不结实,对周边环境不具入侵性,属于低风险入侵植物,对农业生产和生态环境的影响较小^[43,44];而象草被认为存在一定的潜在入侵风险,但入侵风险可控,因此在田间种植象草时应对其加强管理和监测,对其可能存在的入侵风险给予关注^[45].由于象草和杂交狼尾草在我国北方地区均无法安全露地越冬,因此这两种草在北方地区不具入侵性,且更适用于修复设施污染土壤^[44,46].

4 结论

(1) 杂交狼尾草和紫色象草田间条件下的生物量远大于马蔺和超累积植物遏蓝菜,且具有很强的适应性,管护成本低.

(2) 4种植物中,遏蓝菜地上部镉和锌的富集系数均大于1,其体内镉和锌的转移系数均大于1,可用于提取修复镉锌复合污染土壤;马蔺根部的镉富集系数大于1且体内镉转移系数小于1,可用于稳定修复镉污染土壤;紫色象草根部的镉富集系数大于1,其体内镉的转移系数小于1,可用于稳定修复镉污染土壤.

(3) 尽管体内镉和锌的含量显著小于马蔺和超累积植物遏蓝菜,杂交狼尾草和紫色象草的地上部镉和锌的累积量远大于这两种植物.紫色象草地上部镉和锌的累积量最大,分别是马蔺累积量的7.0和41.2倍,是遏蓝菜累积量的4.1和11.3倍;杂交狼尾草的镉和锌的累积量略小于紫色象草.

(4) 田间条件下,紫色象草对土壤中镉和锌的提取率最大,其次是杂交狼尾草,表现出较强的土壤镉和锌的提取去除潜力,且可通过加工生产生物燃料和纸浆等产品带来经济效益,具有较好地应用前景.

致谢:感谢赵方杰教授和江荣风教授提供遏蓝菜种子,感谢孟林研究员提供马蔺植株.

参考文献:

- [1] European Food Safety Authority. Scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain[J]. EFSA Journal, 2009, **980**: 1-139.
- [2] Kabata-Pendias A. Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils[A]. In: Förstner U, Salomons W, Mader P, (Eds.). Heavy Metals. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995. 3-18.
- [3] He Z, Shentu J, Yang X, et al. Heavy metal contamination of soils: sources, indicators, and assessment[J]. Journal of Environmental Indicators, 2015, **9**: 17-18.
- [4] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>, 2020-07-01.
- [5] Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis[J]. Planta, 2001, **212**(4): 475-486.
- [6] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(2): 750-759.
- [7] 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 等. 冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1482-1490.
- [8] Rizwan M, Ali S, Rehman M Z u, et al. A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(7): 6279-6289.
- [9] Liu L W, Li W, Song W P, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability[J]. Science of the Total Environment, 2018, **633**: 206-219.
- [10] 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.
- [11] Reeves R D, Baker A J M, Jaffré T, et al. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloids trace elements[J]. New Phytologist, 2018, **218**(2): 407-411.
- [12] Zhang X F, Xia H P, Li Z A, et al. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(6): 2063-2066.
- [13] Phusantisampan T, Meeinkuirt W, Saengwilai P, et al. Phytostabilization potential of two ecotypes of *Vetiveria zizanioides* in cadmium-contaminated soils: greenhouse and field experiments[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(19): 20027-20038.
- [14] 王正, 孙兆军, Mohamed S, 等. 胺鲜酯与螯合剂 GLDA 联合强化柳枝稷吸收累积镉效果[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5589-5599, doi: 10.13227/j.hjxx.202004071.
- [15] Tian R N, Yu S, Wang S G, et al. Heavy metal tolerance and accumulation of *Triarrhena sacchariflora*, a large amphibious ornamental grass[J]. Water Science & Technology, 2013, **68**(8): 1795-1800.
- [16] Perronnet K, Schwartz C, Morel J L. Distribution of cadmium and zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown on multicontaminated soil[J]. Plant and Soil, 2003, **249**(1): 19-25.
- [17] Hou X, Teng W, Hu Y, et al. Potential phytoremediation of soil cadmium and zinc by diverse ornamental and energy grasses[J]. BioResources, 2020, **15**(1): 616-640.
- [18] Gong X M, Huang D L, Liu Y G, et al. Pyrolysis and reutilization of plant residues after phytoremediation of heavy

- metals contaminated sediments: for heavy metals stabilization and dye adsorption[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **253**: 64-71.
- [19] Ko C H, Yu F C, Chang F C, *et al.* Bioethanol production from recovered napier grass with heavy metals [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **203**: 1005-1010.
- [20] Ververis C, Georgiou K, Christodoulakis N, *et al.* Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production[J]. *Industrial Crops and Products*, 2004, **19**(3): 245-254.
- [21] Pirozzi D, Yousuf A, Fagnano M, *et al.* Lipids production by yeast grown on giant reed biomass[J]. *Journal of Biotechnology*, 2010, **150** Suppl 1: 167-168.
- [22] Zhao F J, Lombi E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Plant and Soil*, 2003, **249**(1): 37-43.
- [23] Han Y L, Yuan H Y, Huang S Z, *et al.* Cadmium tolerance and accumulation by two species of *Iris*[J]. *Ecotoxicology*, 2007, **16**(8): 557-563.
- [24] Guo Q, Meng L, Zhang Y N, *et al.* Antioxidative systems, metal ion homeostasis and cadmium distribution in *Iris lactea* exposed to cadmium stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **139**: 50-55.
- [25] Zheng R L, Sun G X, Li C, *et al.* Mitigating cadmium accumulation in greenhouse lettuce production using biochar[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(7): 6532-6542.
- [26] Ueno D, Zhao F J, Ma J F. Interactions between Cd and Zn in relation to their hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, **50**(4): 591-597.
- [27] Wang M, Zou J H, Duan X C, *et al.* Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(1): 82-88.
- [28] Verbruggen N, Hermans C, Schat H. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, **12**(3): 364-372.
- [29] Khaliq M A, James B, Chen Y H, *et al.* Uptake, translocation, and accumulation of Cd and its interaction with mineral nutrients (Fe, Zn, Ni, Ca, Mg) in upland rice [J]. *Chemosphere*, 2019, **215**: 916-924.
- [30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [31] Zheng R L, Cai C, Liang J H, *et al.* The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(7): 856-862.
- [32] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力[J]. *中国草地学报*, 2012, **34**(1): 59-64, 76.
- [33] 侯新村, 范希峰, 朱毅, 等. 杂交狼尾草作为能源植物的产量和品质特性[J]. *中国草地学报*, 2012, **34**(1): 48-52.
- [34] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(5): 1863-1868.
- [35] He J Y, Wang Y Y, Ren Y F, *et al.* Effect of cadmium on root morphology and physiological characteristics of rice seedlings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(5): 1863-1868.
- [36] Pinto A P, Mota A M, de Varennes A, *et al.* Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **326**(1-3): 239-247.
- [37] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, **14**(3): 277-282.
- [38] 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.
- [39] Cheraghi M, Lorestani B, Khorasani N, *et al.* Findings on the phytoextraction and phytostabilization of soils contaminated with heavy metals [J]. *Biological Trace Element Research*, 2011, **144**(1-3): 1133-1141.
- [40] 温晓娜, 简有志, 解新明. 象草资源的综合开发利用[J]. *草业科学*, 2009, **26**(9): 108-112.
- [41] Wen X N, Jian Y Z, Xie X M. The comprehensive exploitation and utilization of *Pennisetum purpureum* [J]. *Pratacultural Science*, 2009, **26**(9): 108-112.
- [42] Yang W J, Gu J F, Zhou H, *et al.* Effect of three Napier grass varieties on phytoextraction of Cd- and Zn-contaminated cultivated soil under mowing and their safe utilization [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(14): 16134-16144.
- [43] Chen Y H, Liu M J, Deng Y W, *et al.* Comparison of ammonium fertilizers, EDTA, and NTA on enhancing the uptake of cadmium by an energy plant, Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schumacher) [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**(12): 2786-2796.
- [44] 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 等. 整合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3862-3869.
- [45] Qin J J, Tang S S, Jiang K, *et al.* Effects of chelate GLDA on the remediation of cadmium contaminated farmland by *Pennisetum purpureum* Schumacher [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3862-3869.
- [46] 段青松, 何丙辉, 张娅玲, 等. 产业沼气作物的主要特征及种类特性[J]. *云南农业大学学报*, 2014, **29**(3): 430-435.
- [47] Duan Q S, He B H, Zhang Y L, *et al.* Main characteristics of industrial biogas crops and their species typical properties [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2014, **29**(3): 430-435.
- [48] 陈超, 袁小环, 滕文军, 等. 狼尾草属植物生物学特性、生态适应性、观赏性和入侵风险关系的探讨 [J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(2): 374-381.
- [49] Chen C, Yuan X H, Teng W J, *et al.* Biological characteristics, ecological adaptability, ornamental, and invasion risk of *Pennisetum* species [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(2): 374-381.
- [50] 王铁梅, 平晓燕, 林长存. 外来牧草入侵风险评估体系研究 [J]. *草地学报*, 2020, **28**(3): 727-733.
- [51] Wang T M, Ping X Y, Lin C C. Risk assessment of invasive forages [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, **28**(3): 727-733.
- [52] 寻路路, 原雅玲, 丁芳兵, 等. 彩叶观赏草的引种及评价 [J]. *陕西农业科学*, 2017, **63**(1): 68-74.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polys to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)