

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

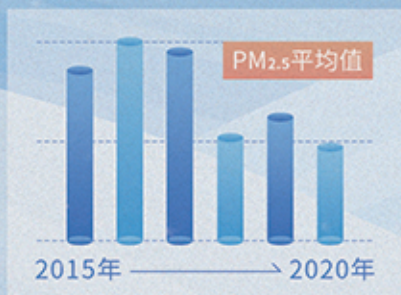
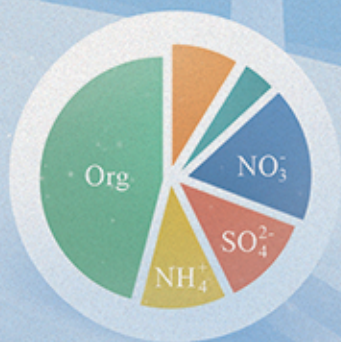
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力

张颖¹, 赵欣^{2*}, 张圣虎², 漆丹², 王博², 陈引¹, 陆建刚^{1*}

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室, 大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 选用菲黄竹、箬竹和鹅毛竹这3种地被竹在Cu、Zn、Cd和Pb复合污染农田上进行为期2 a的田间试验, 分析其在污染条件下的生长富集特征, 并结合土壤中重金属含量变化情况, 对比3种地被竹对重金属复合污染的修复潜力。结果表明, 菲黄竹在重金属复合污染农田上适应性最好, 生长株数为种植时的63.8倍。3种地被竹体内重金属含量均集中在根部, 且对Cd的富集效果最好, 对Pb的富集能力最差。3个竹种的根部和鞭部的Cd富集系数均远大于1, 其中菲黄竹和箬竹根部富集系数分别为17.68和14.63。重金属累积量则主要集中在根部和鞭部, 其中菲黄竹对Cu、Zn和Cd的累积量分别为157.14、363.3和7.18 g·hm⁻², 高于鹅毛竹和箬竹。种植2 a后, 地被竹周围表层土壤中重金属含量较种植前均有下降, 其中Cd含量下降最多, 为39.6%~40.4%。此外, 菲黄竹和鹅毛竹根际土壤中Cu、Zn和Cd含量均显著小于表层土壤($P < 0.05$)。试验证明, 3种地被竹对Cd均有较强富集能力, 可作为Cd修复植物继续深入研究; 菲黄竹在生长状况、重金属富集量和累积量等方面均优于箬竹和鹅毛竹, 对土壤重金属复合污染修复潜力最高。

关键词: 植物修复; 地被竹; 镉; 田间试验; 土壤重金属

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4262-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202110170

Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals

ZHANG Ying¹, ZHAO Xin^{2*}, ZHANG Sheng-hu², QI Dan², WANG Bo², CHEN Yin¹, LU Jian-gang^{1*}

(1. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

Abstract: A two-year field experiment was carried out in a Cu-Zn-Cd-Pb-contaminated field with *Sasa auricoma*, *Indocalamus tessellatus*, and *Shibataea chinensis* Nakai to investigate their growth and accumulation characteristics. Based on changes in heavy metal content in the soil, we compared their phytoremediation potentials for the combined pollution of heavy metals. After two years of planting, *S. auricoma* showed the best tolerance to soil contaminated by heavy metals, with the number of plants being 63.8 times that at the time of planting. For each bamboo type, heavy metals were most concentrated in the root, with the best enrichment ability of Cd and worst ability of Pb. The bioconcentration factor of Cd in the roots was far greater than 1 for all three species, with 17.68 for *S. auricoma* and 14.63 for *I. tessellatus*. The accumulation of heavy metals was mainly concentrated in the roots and rhizomes, and the accumulations of Cu, Zn, and Cd in *S. auricoma* were 157.14, 363.3, and 7.18 g·hm⁻², respectively, which were higher than those of *I. tessellatus* and *S. chinensis* Nakai. Compared with that before planting, the content of heavy metals in the non-rhizosphere soil decreased after two years of planting, among which Cd content decreased the most, from 39.6%~40.4%. In addition, the contents of Cu, Zn, and Cd in rhizosphere soil of *S. auricoma* and *S. chinensis* Nakai were significantly lower than those in non-rhizosphere soil ($P < 0.05$). The results showed that the three species had strong accumulation ability of Cd and could be further studied as Cd-repaired plants. The growth condition and content and accumulation of heavy metals in *S. auricoma* were excellent among the dwarf bamboos, which showed the highest phytoremediation potential.

Key words: phytoremediation; dwarf bamboo; Cd; field experiments; heavy metal in soil

随着我国工农业现代化的快速发展, 矿山开采和污水排放等产生的重金属可通过地表径流、大气飘尘等污染途径进入土壤, 导致土壤重金属污染日益严重^[1~3], 对人体健康也存在一定风险^[4]。文献^[5]显示, 全国土壤总超标率为16.1%, 重金属镉(Cd)、铜(Cu)、铅(Pb)和锌(Zn)的点位超标率分别为7.0%、2.1%、1.5%和0.9%。其中农田土壤重金属的污染问题十分严重, 每年因此导致粮食减产超过1 000万 t, 被重金属污染的粮食超过1 200万 t, 直接经济损失超过200亿元人民币^[6]。

植物修复作为一种经济、高效和绿色的治理方法, 具有非常广阔的发展前景^[7]。现应用较多的超

累积植物多为生物量较低的野生草本植物, 由于其培育工作复杂、对生长条件要求严格和生物量小等问题, 在实际推广应用中受到一定限制^[8,9]。竹类植物生长范围广, 环境适应能力强, 且对重金属有一定耐受性^[9~11], 近几年在修复土壤重金属方面受到了一定关注, 如毛竹(*Phyllostachys pubescens*)、雷竹(*Phyllostachys praecox*)、金镶玉竹(*Phyllostachys*

收稿日期: 2021-10-22; 修订日期: 2021-12-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF0213402); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21_0379)

作者简介: 张颖(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染土壤修复, E-mail: yancy0123@163.com

* 通信作者, E-mail: jszhaixin@qq.com; jglu@nuist.edu.cn

aureosulcata)、菲白竹 (*Sasa fortunei*) 和鹅毛竹 (*Shibataea chinensis* Nakai) 等^[12~21] 均对重金属表现出较强的耐抗性和富集能力。

作为常用的景观生物,地被竹繁殖扩展能力强,种植后可快速覆盖地表,具有很高的观赏价值和经济价值^[21,22]。此外,地被竹对重金属也具有一定的富集能力。张志坚等^[14]在水培试验中发现菲白竹在 Pb 胁迫下根部和叶部的富集系数均大于 1; Cai 等^[19]的研究发现铺地竹 (*Sasa argenteostriata*) 具有较强的 Pb 富集能力,富集系数和转运系数均大于 1。然而目前关于地被竹修复土壤重金属污染的研究多集中在单一 Pb 污染上,鲜见地被竹针对土壤重金属复合污染的修复研究。

因此,本研究利用 3 种地被竹对安徽铜陵义安区的 Cu、Zn、Cd 和 Pb 复合污染土壤进行修复。通过分析根、鞭、茎和叶中重金属含量和累积量,对比其生长和重金属累积特征,并结合根际和表层土壤中重金属含量变化情况,评估其对重金属复合污

染土壤的修复潜力,以期为利用地被竹修复重金属污染土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验区位于安徽省铜陵市义安区钟鸣镇 (E118°04'、N30°58'),属亚热带季风气候。20 世纪 90 年代至 2013 年,该地进行硫铁矿的开采及各类有色金属矿的堆矿洗矿,开矿和洗矿污水流入狮峰河,农田区域长期受污染河水灌溉,重金属污染严重。本试验共有 3 块样地,在试验进行前对其基本理化性质与重金属含量进行测定(表 1)。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018),该地农田土壤为 Cu、Zn、Cd 和 Pb 这 4 种重金属复合污染。Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量均超过风险筛选值,超标倍数为 1.37 ~ 11.67 倍,其中 Cd 含量和 3 号地中 Pb 含量已超风险管制值。

表 1 试验样地土壤基本性质
Table 1 Basic properties of the tested soil

编号	品种	pH	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	ω (有效磷) /mg·kg ⁻¹	ω (速效钾) /mg·kg ⁻¹	ω (全氮) /g·kg ⁻¹	ω (Cu) /mg·kg ⁻¹	ω (Zn) /mg·kg ⁻¹	ω (Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (Pb) /mg·kg ⁻¹
1	菲黄竹	4.57	20.8	12.7	72.8	1.72	263.47 ± 12.29b	400.40 ± 18.23b	2.13 ± 0.08a	370.87 ± 15.67b
2	箬竹	4.33	18.3	12.6	71.1	1.54	289.87 ± 14.29b	426.64 ± 13.16b	2.45 ± 0.13a	395.90 ± 11.58b
3	鹅毛竹	4.10	13.3	7.6	66.3	1.40	343.97 ± 16.19a	507.84 ± 17.00a	1.83 ± 0.08b	813.53 ± 21.47a
风险筛选值							80	200	0.3	70
风险管制值							—	—	1.5	400

1.2 试验设计

3 块试验田分别种植菲黄竹 (*Sasa auricoma*)、箬竹 (*Indocalamus tessellatus*) 和鹅毛竹 (*Shibataea chinensis* Nakai) 这 3 种地被竹。种植前清理地块上原有杂草,并翻土至 30 cm 深。每块样地大小为 10 m × 6 m。选株形相同、长势相似和健康无缺刻的 2 a 生地被竹,各竹种均分 8 行种植,其中菲黄竹和鹅毛竹每行种植 5 株,共 40 株;箬竹每行种植 6 株,共 48 株。栽植穴的深度 0.3 ~ 0.4 m,长宽 0.4 ~ 0.5 m。同时为避免竹种生长几年后窜鞭无法处理,在竹种之间挖隔离沟,隔离沟深度为 0.5 m,宽度 0.2 ~ 0.3 m,每年定时清理隔离沟。在自然生长 1 a 和 2 a 后进行采样,即分别于 2020 年和 2021 年 5 月采集竹子样品及土壤样品。

1.3 样品采集与测定

采样时参照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395-2012)执行。每块试验田均按三点采样法进行采样,即在每块试验田上沿对角线选取 3 个采样点,注意在确定采样点时要避免在田埂和地

边的位置。

土壤样品采集表层土壤与根际土壤样品。表层土壤样品采集竹子生长范围附近 0 ~ 20 cm 的耕作层土壤;根际土壤的采集参考抖落法,将根带土挖出,抖动根部时散落的土壤即为根际土壤^[8,13]。为方便收集根际土壤,在采样后先对菲黄竹和鹅毛竹进行简单的根鞭分离。土壤样品自然风干后,研磨过 100 目尼龙筛待测。

竹子样品与土壤样品同步采集,即在采样点上选择完整一丛竹子进行采样,包括根、鞭、茎和叶这 4 个部分。竹子样品采集后先用自来水充分冲洗,再用去离子水淋洗 2 ~ 3 次,吸干表面水分。所有的竹子样品均置于烘箱中 105℃ 杀青 30 min 后,再于 70℃ 下烘干至恒重,用配有氧化锆研磨罐的球磨机研磨植物样品,过 60 目尼龙筛待测。

2021 年 5 月取样后,每块试验田中均随机选取 3 块大小为 4 m² 的小区挖取全面生长的竹子^[23],清洗烘干后称取各部位干重。同时统计各小区竹种生长株数,以此估算各竹种的全部生物量及生长株数。

土壤样品 Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量采用便携式 X 射线荧光光谱法 (PXRF) 测定,分析过程中通过测定平行双样及国家标准土壤样品 (GSS-1a 和 GSS-2a) 进行质量控制. 竹子样品采用 HNO₃ 进行消解 (GB 5009. 268-2016),使用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定 Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量,通过平行双样及加标回收试验进行质量控制,其中各元素回收率分别为 94. 97% ~ 104. 33%、92. 42% ~ 106. 94%、90. 61% ~ 104. 20% 和 96. 34% ~ 105. 14%,符合质量控制要求.

1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 进行数据处理,使用 SPSS 的单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对每个测定项目统计结果进行显著性方差分析,差异显著水平设定为 $P < 0. 05$.

评价植物对重金属修复潜力的指标主要有生物富集系数 (bioconcentration factor, BCF) 和转运系数 (translocation factor, TF). 其中富集系数 (BCF) 反映了植物从土壤中吸收重金属的能力,转运系数 (TF) 则反映了植物将重金属从根部转运到其它部位的能力,其计算方法如下:

$$BCF = \frac{\text{植物中某部分中某重金属的含量}}{\text{土壤中该重金属含量}}$$

$$TF = \frac{\text{其它部分中某重金属的含量}}{\text{根部中该重金属含量}}$$

由于植物不同部位对重金属的累积量是其重金属含量与生物量的乘积,因此本文还选取了转运量系数 (translocation quantity factor, TQF) 来反映植物不同部位累积重金属能力的差异^[24, 25],其计算公式为:

$$TQF = \frac{\text{其它部分中某重金属的累积量}}{\text{根部中该重金属累积量}}$$

2 结果与分析

2.1 地被竹的生长情况

表 2 给出了种植 2 a 后各竹种的存活率、单位面积生长株数及生物量情况. 种植 2 a 后,菲黄竹和鹅毛竹全部存活,且每平方米生长株数分别为种植时的 63. 8 倍和 24. 6 倍. 而箬竹对该重金属污染的耐受能力较差,存活率仅为 66. 7%. 菲黄竹和鹅毛竹的地下部分生物量大于地上部分,其中鞭部生物量分别占其总生物量的 49% 和 60%. 箬竹生物量主要集中在鞭部和茎部,分别为总生物量的 35% 和 39%. 调查发现,箬竹部分植株存在明显叶片损伤,竹叶边缘干枯,另有部分植株则存在茎叶发黄症状;鹅毛竹中少量个体也存在叶尖枯萎的现象;菲黄竹枝叶茂密,未见伤害症状.

表 2 3 种地被竹的生长情况 (2 a)
Table 2 Growth of three dwarf bamboos (2 years)

品种	存活率 /%	生长密度 /株·m ⁻²	生物量 (以干重计)/g·m ⁻²				
			总生物量	根	鞭	茎	叶
菲黄竹	100	42. 5 ± 16. 42	241. 82 ± 50. 48	22. 67 ± 5. 03	119. 28 ± 21. 65	65. 73 ± 19. 23	34. 13 ± 5. 86
箬竹	66. 7	4. 6 ± 1. 59	44. 69 ± 13. 39	4. 39 ± 0. 71	18. 06 ± 3. 12	20. 36 ± 7. 14	9. 90 ± 3. 47
鹅毛竹	100	17. 6 ± 5. 44	191. 84 ± 22. 13	21. 46 ± 3. 19	115. 82 ± 25. 25	30. 28 ± 4. 53	24. 28 ± 3. 68

2.2 重金属在地被竹体内的富集转运情况

表 3 中展示了 3 个竹种在不同生长年限下各部位的重金属含量. 除非黄竹和箬竹茎部和叶部中存在部分重金属略下降的情况外,各竹种生长 2 a 时体内重金属含量较生长 1 a 均有一定增加,但大部分未达到显著水平 ($P < 0. 05$). 其中菲黄竹生长 2 a 时根部 ω (Cd) 为 18. 03 mg·kg⁻¹,较上年增加了 39. 4%; 箬竹生长 1 a 时茎部 ω (Zn) 为 194. 20 mg·kg⁻¹,第 2 年增加至 232. 88 mg·kg⁻¹,较上年有显著增加;此外鹅毛竹鞭部中 Cu 和 Zn 含量也在第 2 年有显著增加 ($P < 0. 05$). 菲黄竹生长 2 a 时根部中 ω (Cu) 可达 435. 81 mg·kg⁻¹,远高于箬竹和鹅毛竹; ω (Zn) 在菲黄竹根部及箬竹根部和茎部中最高,为 227. 13 ~ 238. 28 mg·kg⁻¹; 菲黄竹和箬竹根部中 ω (Cd) 分别为 18. 03 mg·kg⁻¹ 和 18. 44 mg·kg⁻¹,显著高于鹅毛竹 ($P < 0. 05$). 3 种地被竹中 Pb 含量均较小,鹅毛竹鞭部和叶部 Pb

含量较高,可能与其所在试验田 Pb 含量高有关. 对比发现,Cu、Cd 和 Pb 在 3 个竹种根部的含量均显著高于其他部位 ($P < 0. 05$),Zn 在菲黄竹和鹅毛竹中根部含量最高,在箬竹中则主要集中在根和茎这 2 个部分.

为进一步分析各竹种对重金属的吸收和转运能力,分别计算了其 BCF 和 TF 值 (表 4 和表 5). 竹种生长 1 a 时,各竹种根鞭部对 Cd 的 BCF 值均大于 1,其中箬竹根部 BCF 值最大,为 10. 25,菲黄竹和鹅毛竹根部 BCF 值分别为 8. 56 和 2. 94; 除非黄竹根部对 Cu 的 BCF 值为 1. 99 外,3 种地被竹对这 4 种重金属的 BCF 值均小于 1. 随着竹种生长年限增大,竹种各部位内重金属含量增加,而土壤重金属含量由于部分重金属被竹种吸收而下降,故 BCF 值增加. 第 2 年菲黄竹根部对 Cd 的 BCF 值达上年的 2. 07 倍,为 17. 68. 菲黄竹鞭部对 Cd 及根部对 Cu 的 BCF 值分别增加至 2. 26 和 2. 39,茎和叶两部分对

Cd 的 BCF 值也较上年成倍增加; 鹅毛竹除对 Cd 的 BCF 值增加较明显外, 其余 3 种重金属的 BCF 值均小于 0.1, 而箬竹叶部对 Cd 的 BCF 值反而由 0.14 降低至 0.04. 由表 4 可知, 3 种地被竹对 Cd 的 BCF 值最大, 富集能力最强, 其根部和鞭部对 Cd 的 BCF 值均大

表 3 地被竹不同部位的重金属含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Heavy metal contents in dwarf bamboos/mg·kg ⁻¹						
重金属元素	品种	生长年限/a	根	鞭	茎	叶
Cu	菲黄竹	1	412.27 ± 16.15aA	36.67 ± 2.62aB	6.47 ± 0.63cdC	6.17 ± 0.77cC
		2	435.81 ± 18.16aA	40.98 ± 1.34aB	9.61 ± 1.68bcC	9.25 ± 0.91abC
	箬竹	1	153.19 ± 9.45bA	13.38 ± 1.17cB	11.47 ± 1.26abB	9.37 ± 0.91abB
		2	182.93 ± 8.47bA	18.90 ± 2.11cB	12.93 ± 1.15aB	10.01 ± 1.05aC
	鹅毛竹	1	171.36 ± 10.51bA	28.29 ± 2.23bB	6.61 ± 1.28cdC	6.99 ± 1.37bcC
		2	181.31 ± 8.99bA	34.94 ± 3.83aB	6.30 ± 0.53dC	9.00 ± 1.09abcC
Zn	菲黄竹	1	201.11 ± 13.20bA	151.01 ± 10.90cdB	110.78 ± 7.08cdC	49.79 ± 3.99bcD
		2	227.13 ± 11.74abA	182.22 ± 10.28cB	118.60 ± 8.89cC	48.34 ± 2.61cD
	箬竹	1	219.51 ± 18.51abA	151.99 ± 11.73dB	194.20 ± 17.38bA	46.86 ± 4.37cC
		2	238.28 ± 14.96aA	172.40 ± 7.09cdB	232.88 ± 9.60aA	48.35 ± 4.29cC
	鹅毛竹	1	150.11 ± 10.45cA	91.96 ± 7.07bB	75.21 ± 5.19eBC	60.41 ± 4.92abC
		2	162.75 ± 9.01cA	96.49 ± 6.96aB	89.86 ± 4.39deBC	68.74 ± 4.01aC
Cd	菲黄竹	1	12.93 ± 0.78bA	2.22 ± 0.26aB	0.30 ± 0.06cC	0.06 ± 0.03cC
		2	18.03 ± 0.95aA	2.31 ± 0.28aB	0.43 ± 0.11bcC	0.19 ± 0.04bcC
	箬竹	1	17.73 ± 1.35aA	2.01 ± 0.25abB	0.41 ± 0.08bcC	0.24 ± 0.06abC
		2	18.44 ± 1.23aA	2.05 ± 0.28abB	0.37 ± 0.07bcC	0.23 ± 0.07abC
	鹅毛竹	1	3.29 ± 0.12cA	1.35 ± 0.11cB	0.57 ± 0.08abC	0.31 ± 0.04abD
		2	3.90 ± 0.27cA	1.51 ± 0.06bcB	0.66 ± 0.05aC	0.36 ± 0.03aD
Pb	菲黄竹	1	38.18 ± 2.40cA	18.12 ± 1.24bB	4.70 ± 0.51bC	3.86 ± 0.62dC
		2	42.71 ± 1.41cA	20.99 ± 1.34aB	5.36 ± 0.73bC	4.10 ± 0.50dC
	箬竹	1	71.18 ± 3.32abA	14.22 ± 2.25abB	11.01 ± 1.11aB	12.95 ± 2.92cB
		2	76.07 ± 5.95aA	15.31 ± 2.60aB	11.42 ± 1.61aB	12.30 ± 1.44cB
	鹅毛竹	1	64.92 ± 3.09bA	39.44 ± 3.40cB	11.42 ± 2.77aC	21.39 ± 1.34bD
		2	71.70 ± 5.44abA	46.50 ± 2.85cB	15.85 ± 2.57aC	26.69 ± 2.26aD

1) 不同小写字母表示不同生长年限的竹种之间重金属含量的差异($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同部位之间重金属含量的显著差异($P < 0.05$)

表 4 3 种地被竹不同部位对重金属的富集系数(BCF)¹⁾

Table 4 Bioconcentration factor of three dwarf bamboos																	
品种	生长年限 /a	Cu				Zn				Cd				Pb			
		根	鞭	茎	叶	根	鞭	茎	叶	根	鞭	茎	叶	根	鞭	茎	叶
菲黄竹	1	1.99	0.18	0.03	0.03	0.62	0.46	0.34	0.15	8.56	1.47	0.20	0.04	0.11	0.05	0.01	0.01
	2	2.39	0.22	0.05	0.05	0.79	0.63	0.41	0.17	17.68	2.26	0.42	0.15	0.13	0.07	0.02	0.01
箬竹	1	0.65	0.06	0.05	0.04	0.64	0.44	0.57	0.14	10.25	1.18	0.24	0.14	0.20	0.04	0.03	0.04
	2	0.91	0.09	0.06	0.05	0.75	0.54	0.73	0.15	14.63	1.63	0.29	0.04	0.22	0.04	0.03	0.04
鹅毛竹	1	0.59	0.10	0.02	0.02	0.35	0.21	0.17	0.14	2.94	1.20	0.50	0.28	0.08	0.05	0.01	0.03
	2	0.69	0.13	0.02	0.03	0.43	0.25	0.24	0.18	4.88	1.88	0.82	0.45	0.09	0.06	0.02	0.04

1) 黑体字表示 BCF ≥ 1 的值

表 5 3 种地被竹对重金属的转运系数(TF)

Table 5 Translocation factor of three dwarf bamboos													
品种	生长年限 /a	Cu			Zn			Cd			Pb		
		鞭	茎	叶	鞭	茎	叶	鞭	茎	叶	鞭	茎	叶
菲黄竹	1	0.09	0.02	0.01	0.75	0.55	0.25	0.17	0.02	0.01	0.47	0.12	0.10
	2	0.09	0.02	0.02	0.80	0.52	0.21	0.13	0.02	0.01	0.49	0.13	0.10
箬竹	1	0.09	0.07	0.06	0.70	0.89	0.21	0.12	0.02	0.01	0.20	0.15	0.18
	2	0.10	0.07	0.05	0.72	0.98	0.20	0.11	0.02	0.01	0.20	0.15	0.16
鹅毛竹	1	0.17	0.04	0.04	0.61	0.50	0.40	0.41	0.17	0.09	0.61	0.18	0.33
	2	0.19	0.03	0.05	0.59	0.55	0.42	0.39	0.17	0.09	0.65	0.22	0.37

于1,其中菲黄竹和箬竹的根部 BCF 值分别达 17.68 和 14.63. 除非黄竹根部对 Cu 的 BCF 值大于 1 外,3 种地被竹对 Cu、Zn 和 Pb 的 BCF 值均小于 1,其中三者对 Pb 的富集能力最弱,BCF 值均小于 0.22. 整体上菲黄竹表现出最强的重金属富集能力,箬竹次之,而鹅毛竹的重金属富集能力相对最弱.

表 5 中 3 个竹种各部位对重金属的 TF 值均小于 1. 由此可知,Cu、Cd、Zn 和 Pb 含量主要集中在地被竹根部,向其它部位转运较少. 对比发现,Zn 在竹种不同部位含量差异较小,与其它重金属相比,由根部向其他部分转运相对较多. 整体来看,4 种重金属在竹种体内含量基本表现为根部>鞭部>茎部>叶部的规律,然而 Zn 在箬竹体内含量大小顺序为:根部>茎部>鞭部>叶部,箬竹和鹅毛竹叶部

中的 Pb 含量略大于其茎部.

2.3 重金属在地被竹体内的累积分布情况

根据试验结果估算出各竹种生长 2 a 时在每 hm^2 上的干重,进而估算出其对不同重金属累积量(图 1). 由图 1 可知,重金属在 3 种地被竹中主要累积在地下部分. 菲黄竹根部和鞭部中 Cu 累积量分别为 $98.78 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $48.88 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,共占总累积量的 94%; Cd 累积量分别为 $4.09 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $2.67 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,共占总累积量的 95%. 鹅毛竹鞭部累积量最大,其根部和鞭部 Cd 累积量分别为 $0.84 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1.75 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,共占总累积量的 95%,其中鞭部累积量占 61%. 此外,3 种地被竹中地下部分 Zn 累积量分别占 74%、45% 和 77%,Pb 分别占 88%、64% 和 86%.

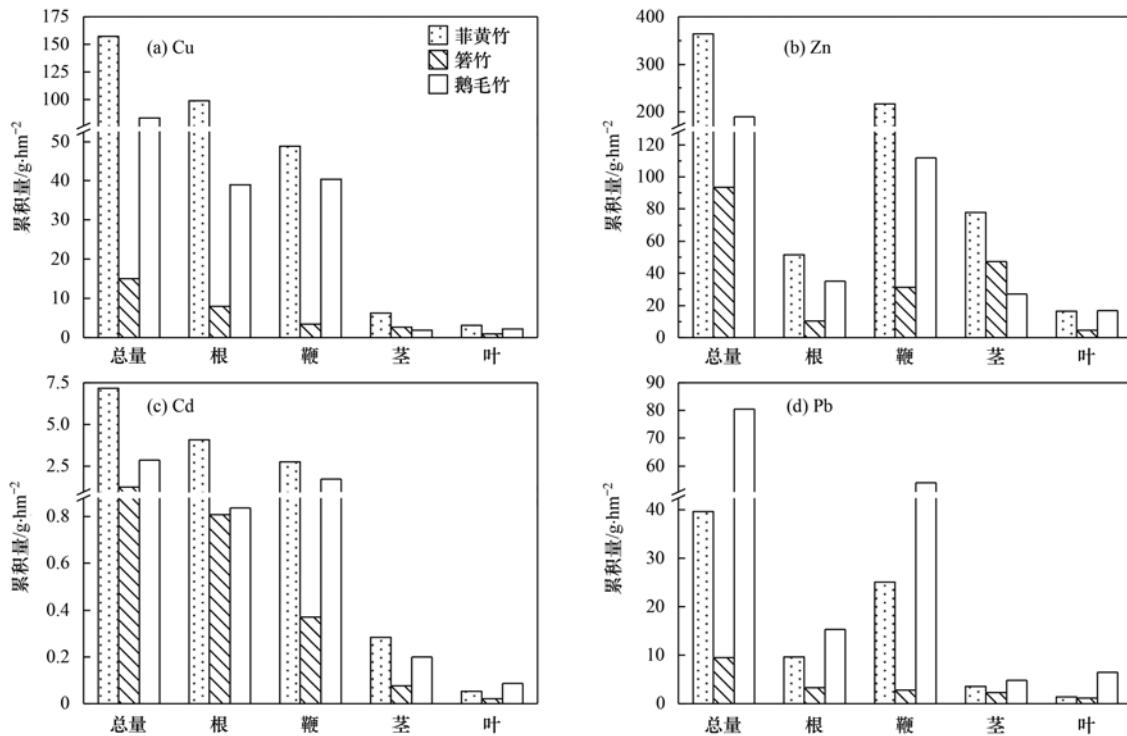


图 1 3 种地被竹的重金属累积量(2 a)

Fig. 1 Accumulation amounts of three dwarf bamboos(2 years)

菲黄竹对 Cu、Zn 和 Cd 累积量为三者中最高,分别为 157.14 、 363.3 和 $7.18 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$; 而鹅毛竹对 Pb 有着最高的累积量,为 $80.48 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别是箬竹和菲黄竹的 8.43 倍和 2.03 倍. 整体来看,菲黄竹在重金属复合污染中表现出最佳的重金属累积能力,鹅毛竹次之,箬竹对重金属的累积能力最差.

各竹种不同部位的转运量系数(TQF)如表 6 所示. TQF 值可直观体现重金属在植物各部位累积能力差异,当 TQF 值大于 1 时,说明该部位对重金属累积能力大于根部. 由表 6 可知,鹅毛竹鞭部对 4 种重金属的 TQF 值分别为 1.04、3.20、2.08 和 3.51,均大于 1,其鞭部重金属累积能力最强;菲黄竹鞭部

对 Zn 和 Pb 的 TQF 值分别为 4.22 和 2.59,累积能力优于根部;箬竹的鞭部和茎部对 Zn 的 TQF 值分别为 2.98 和 4.54,其各部位对 Zn 的累积能力表现为:茎部>鞭部>根部>叶部.

可以看出,TQF 值的大小规律与 TF 值有所不同. 对于菲黄竹和箬竹,Zn 在根、鞭和茎部含量差异较小,而鞭部和茎部生物量却是根部的数倍,故其累积量受生物量影响较大,鞭部和茎部的 TQF 值均大于 1;而叶部与根部的含量差异较大而生物量差异较小,其累积量主要受含量大小影响,TQF 值小于 1. 再如 4 种重金属在鹅毛竹根部含量最大,但其鞭部生物量可达根部的 5.40 倍,最终鞭部 TQF 值大

于 1. 因此,当生物量和富集系数存在很大差异时,使用 TQF 值更能准确反映重金属在植物体内的分布情况. 但 TQF 值仅能反映出同一植物不同部位间重金属累积量的大小关系,对比不同植物之间重金属累积量的大小关系还需要考虑其单位面积上的生物量.

表 6 3 种地被竹对重金属的转运量系数 (TQF)¹⁾
Table 6 Translocation quantity factor of three dwarf bamboos

品种	Cu			Zn			Cd			Pb		
	鞭	茎	叶	鞭	茎	叶	鞭	茎	叶	鞭	茎	叶
菲黄竹	0.49	0.06	0.03	4.22	1.51	0.32	0.67	0.07	0.01	2.59	0.36	0.14
箬竹	0.43	0.33	0.11	2.98	4.54	0.42	0.46	0.09	0.03	0.83	0.70	0.34
鹅毛竹	1.04	0.05	0.06	3.20	0.78	0.48	2.08	0.24	0.10	3.51	0.31	0.42

1) 黑体字表示 TQF≥1 的值

2.4 地被竹根际与表层土壤中重金属的含量变化

表 7 中给出了不同生长年限下各竹种根际与表层土壤中的重金属含量. 与种植前各试验田中重金属含量相比 (表 1), 竹种周围表层土壤重金属含量都存在不同程度的下降. 3 块试验田中 Cd 含量显著低于种植前含量, 分别由原来的 2.13、2.45 和 1.83 mg·kg⁻¹ 下降至 1.28、1.48 和 1.09 mg·kg⁻¹, 下降了 39.6%~40.4% ($P<0.05$). Cu 和 Zn 含量下降了 10.3%~19.8%, 其中 1 号试验田中菲黄竹表层土壤中 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 分别从 263.47 mg·kg⁻¹ 和 400.4 mg·kg⁻¹ 下降至 210.63 mg·kg⁻¹ 和 326.6 mg·kg⁻¹. 箬竹表层土壤中 $\omega(\text{Zn})$ 由 426.64 mg·kg⁻¹ 下降至 342.33 mg·kg⁻¹, 但 $\omega(\text{Cu})$ 却仅从 289.87 mg·kg⁻¹ 下降至 259.90 mg·kg⁻¹, 下降了 10.3%. 表层土壤中 Pb 变化最小, 仅下降 4.5%~7.6%. 考虑到污染土壤中重金属含量有很大的空间变异性^[26], 且竹种根系影响范围有限, 表 7 中结果仅能代表竹种生长范围附近的修复情况, 这也能进一步解释不同竹

种体内重金属累积量与耕作层土壤中重金属下降量不同的现象. 除了植物对土壤中重金属的富集累积作用之外, 土壤中重金属总量降低也可能与自然条件下重金属的迁移有关, 如污染土壤中重金属离子在重力或地表径流的作用下可能向四周扩散或向下迁移^[27].

对比竹种生长 1 a 和 2 a 的数据可发现, 3 块试验田中 Cd 含量在每年均有显著下降, 此外 1 号试验田中的 Cu 和 Zn 以及 3 号试验田中的 Zn 也存在明显差异 ($P<0.05$). 这说明 3 个竹种对土壤 Cd 污染有明显修复效果, 且菲黄竹对 Cu 和 Zn 及鹅毛竹对 Zn 也有一定修复能力.

有研究表明, 植物可通过根系向根际环境释放多种化学物质, 改变土壤理化性质和微生物种类组成, 进而增强对重金属的富集能力^[28~30]. 由表 7 可知, 根际土壤中 4 种重金属含量均低于表层土壤, 其中菲黄竹和鹅毛竹根际土壤中的 Cu、Zn 和 Cd 与表层土壤之间均存在显著差异 ($P<0.05$). 该结果说明根系作用对重金属吸收存在一定影响.

表 7 不同生长年限下根际土与表层土中的重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 7 Heavy metal contents in rhizosphere and non-rhizosphere soil under different growth years/mg·kg⁻¹

试验田	生长年限/a	Cu		Zn		Cd		Pb	
		根际土	表层土	根际土	表层土	根际土	表层土	根际土	表层土
1 号 (菲黄竹)	1	207.39±9.48aB	241.54±11.53aA	325.83±16.40aB	362.48±12.33aA	1.51±0.16aA	1.74±0.11aA	340.60±11.68aA	357.60±15.02aA
	2	182.50±7.78bB	210.63±8.04bA	287.57±12.87bB	326.60±8.34bA	1.02±0.07bB	1.28±0.09bA	321.63±10.46aA	344.77±12.04aA
2 号 (箬竹)	1	237.33±10.43aA	277.54±8.92aA	343.20±7.47aB	367.38±11.99aA	1.70±0.17aA	1.99±0.08aA	366.63±10.54aA	382.40±8.71aA
	2	200.13±7.13bB	259.90±9.63aA	319.31±9.40aA	342.33±11.54aA	1.26±0.14bA	1.42±0.06bA	346.83±15.82aA	365.67±7.94aA
3 号 (鹅毛竹)	1	288.03±5.53aB	323.54±10.84aB	430.00±12.24aB	467.10±13.15aA	1.12±0.20aB	1.48±0.09aA	774.70±18.33aA	799.01±13.79aA
	2	263.50±9.43bB	297.47±11.61aA	382.27±13.00bB	432.50±10.86bA	0.80±0.06aB	1.09±0.02bA	752.50±14.52aA	776.77±11.00aA

1) 不同小写字母表示同一土壤样品在不同生长年限之间的显著差异 ($P<0.05$), 不同大写字母表示同一生长年限下不同土壤类型之间的显著差异 ($P<0.05$).

3 讨论

本研究中 3 个竹种均具有较大的鞭部生物量, 这可能与其对重金属的解毒机制有关. Cai 等^[19]的研究发现, 地被竹在 Pb 胁迫下优先生长竹鞭, 生物量分配趋向于鞭部; Liao 等^[20]的研究发现地被竹

可以利用根鞭部对 Pb 的滞留作用缓解 Pb 胁迫带来的毒害作用. 在本试验条件下, 菲黄竹和鹅毛竹鞭部生物量远大于其他部分, 对重金属复合污染表现出了较高的耐受和富集能力. 而箬竹鞭部生物量相对较小, 可能是土壤重金属污染超过了其耐受范围. 但箬竹对重金属的富集系数和转运量较大, 理论上

仍存在一定重金属修复潜力,后续可针对浓度略小的污染进一步研究其生长和累积特征。

卞方圆^[13]在田间试验中发现,在 $\omega(\text{Cd})$ 为11~14.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的污染下,毛竹和雷竹对Cd的富集系数均不超过0.5。而在本研究中各竹种根部和鞭部对Cd的富集系数均大于1,说明地被竹对Cd的富集能力明显优于毛竹和雷竹。陈迪等^[31]的研究通过盆栽试验认为粗毛牛膝菊(*Galinsoga quadriradiata*)是一种Cd高富集植物,其在5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Cd胁迫下,地上和地下的BCF值分别为2.1和1.86。张云霞等^[23]的研究发现Cd超积累植物藿香蓟(*Ageratum conyzoides* L.)在土壤 $\omega(\text{Cd})$ 为3.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,地上和地下部分的Cd含量分别为8.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和3.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本研究中菲黄竹在 $\omega(\text{Cd})$ 为2.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的试验田种植2 a后根部 $\omega(\text{Cd})$ 可达18.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根部和鞭部的BCF值分别为17.68和2.26,与上述植物相比,其地下部分的富集量和BCF值均处于较高水平,说明地被竹对Cd具有很强的富集能力,可作为优势植物继续深入研究。

然而本研究中地被竹对Pb的BCF值远小于Jiang等^[18]针对单一Pb污染的研究结果,可能与本研究中为重金属复合污染有关。王天顺等^[32]的研究发现,斑茅(*Saccharum arundinaceum* Retz.)在Cu、Zn、Cd和Pb复合污染中,对Cd和Zn的富集系数明显大于Cu和Pb;彭维新等^[33]的研究则发现Cd含量增加会显著抑制小叶榕(*Ficus microcarpa*)对Pb的吸收积累。因此,在本研究中3种地被竹对不同重金属表现的富集累积特征,可能是竹种对重金属进行了选择性吸收^[34,35],也可能与多种重金属之间的交互作用有关^[36,37]。

一般认为,植物修复主要靠收获植物地上部分以去除植物中累积的重金属。然而本研究中,Cu、Cd和Pb这3种重金属主要累积在地被竹根鞭部,Zn在根、鞭和茎这3部分中均有较大累积量(表6),地被竹地下部分也可去除大量重金属。对比地被竹对不同重金属的BCF值可知,地下部分对Cd的富集效果最好,对Cu和Zn的富集效果次之,对Pb的富集能力最差,而地上部分对Zn和Cd的富集能力则明显优于Cu和Pb(表4)。综上,本试验条件下3种地被竹对4种重金属的修复能力强弱表现为: Cd > Zn > Cu > Pb,说明地被竹对土壤Cd污染修复效果最佳,对土壤中的Zn也具有一定修复潜力。

相对于其它植物,地被竹具有生物量大、一次种植永续利用等优点^[38],将其地上部分全部修剪后

来年仍可生长完全。因此,考虑到经济效益,在实际修复时可以5~10 a为一个修复周期,成林后每年定期收割地上部分,在修复周期结束时整体移除地上和地下部分,并进行下一轮种植。然而,通过植物修复去除土壤中重金属是一个漫长的过程^[39,40],在选择修复植物时,除富集能力外还要考虑其在长期修复过程中的利用价值。地被竹生长繁殖能力强,日常维护管理成本低,若长期种植,不仅可以修复污染区重金属、快速恢复污染区的植被,还起到园林绿化和固土护坡等作用^[41]。由于地被竹具有观赏功能,修复后的竹子可考虑作为盆景销售,具有一定的经济价值。因此,地被竹在快速恢复植被和提高污染区土地利用价值方面可发挥重要作用。

本研究重金属累积量偏小,可能与地被竹的种植密度偏低和种植年限较短等原因有关。王志强等^[42]的研究以1株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 的密度种植鹅毛竹,3 a后成林时生长密度可达200株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 。此外,有研究表明适当提高种植密度可显著提高修复植物对重金属的修复效率^[43~45]。若在实际应用中选择合适的种植密度,可以有效提高地被竹对重金属的去除量。

4 结论

(1)菲黄竹和鹅毛竹在重金属复合污染农田上生长繁殖情况较好,生长株数分别为种植时的63.8倍和24.6倍,而箬竹受重金属毒害影响较大,成活率低且伤害症状明显。

(2)本试验条件下,重金属主要累积在地被竹的根部和鞭部,且3种地被竹对重金属修复能力强弱表现为: Cd > Zn > Cu > Pb。

(3)菲黄竹在生长状况、重金属富集量和累积量等方面均优于箬竹和鹅毛竹,具有更佳的重金属修复潜力。

(4)3种地被竹根、鞭部对Cd的富集系数均大于1,其中菲黄竹和箬竹根部富集系数分别为17.68和14.63,可作为Cd修复植物继续深入研究。

致谢:感谢南京林业大学刘国华教授在方案制定和竹种培育中给予的帮助与指导。

参考文献:

- [1] 孙鑫, 姜燕宏, 王会, 等. 重金属污染土壤的植物强化修复研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 1008-1013.
Sun X, Lou Y H, Wang H, et al. Review on enhancing phytoremediation of soil contamination by heavy metals [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(4): 1008-1013.
- [2] Liang J, Fang H L, Zhang T L, et al. Heavy metal in leaves of twelve plant species from seven different areas in Shanghai, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 27: 390-398.
- [3] Sheng J J, Wang X P, Gong P, et al. Heavy metals of the

- Tibetan top soils: level, source, spatial distribution, temporal variation and risk assessment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(8): 3362-3370.
- [4] Islam M S, Hossain M B, Matin A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River estuary, Bangladesh [J]. *Chemosphere*, 2018, **202**: 25-32.
- [5] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, (5): 10-11.
- [6] 赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略[J]. 中国科学院院刊, 2015, **30**(4): 452-458.
- Zhao Q G, Luo Y M. The macro strategy of soil protection in China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2015, **30**(4): 452-458.
- [7] Ahemad M. Phosphate-solubilizing bacteria-assisted phytoremediation of metalliferous soils: A review[J]. *3 Biotech*, 2015, **5**(2): 111-121.
- [8] 张云霞, 周浪, 肖乃川, 等. 鬼针草(*Bidens pilosa* L.) 对镉污染农田的修复潜力[J]. 生态学报, 2020, **40**(16): 5805-5813.
- Zhang Y X, Zhou L, Xiao N C, *et al.* Remediation potential of *B. pilosa* L. in Cadmium-contaminated farmland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(16): 5805-5813.
- [9] 张颖, 赵欣, 张圣虎, 等. 竹类植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(1): 30-38.
- Zhang Y, Zhao X, Zhang S H, *et al.* Research progress of bamboo species in phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(1): 30-38.
- [10] 刘玉芳, 陈双林, 李迎春, 等. 竹子生理可塑性的环境胁迫效应研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(3): 473-480.
- Liu Y F, Chen S L, Li Y C, *et al.* Environmental stress on physiological plasticity of bamboo: a review [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2014, **31**(3): 473-480.
- [11] 陈俊任, 柳丹, 吴家森, 等. 我国典型植物修复材料研究及毛竹修复应用可行性分析[J]. 竹子研究汇刊, 2015, **34**(2): 61-66.
- Chen J R, Liu D, Wu J S, *et al.* The research of typical materials for phytoremediation and the application feasibility of *Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens* [J]. *Journal of Bamboo Research*, 2015, **34**(2): 61-66.
- [12] Bian F Y, Zhong Z K, Zhang X P, *et al.* Bamboo: an untapped plant resource for the phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2020, **246**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125750.
- [13] 卞方圆. 重金属污染土壤的竹林修复研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- Bian F Y. Study on phytoremediation of heavy metal contaminated soils by bamboo stand [D]. Beijing: China Academy of Forestry, 2018.
- [14] 张志坚, 高健, 蔡春菊, 等. 铅胁迫下菲白竹的矿质营养吸收和分配[J]. 林业科学, 2011, **47**(1): 153-157.
- Zhang Z J, Gao J, Cai C J, *et al.* Absorption and distribution of mineral nutrients in *Pleioblastus fortunei* under Lead stress[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, **47**(1): 153-157.
- [15] 姜黎. 几种竹对过量 Cu 胁迫的生理适应性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- Jiang L. Research on the physiological adaptability of bamboo stressed by excess copper [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [16] 廖家蓉, 蔡心怡, 陈雅慧, 等. 土壤铅胁迫对地被竹出笋成竹的影响研究[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(6): 1085-1095.
- Liao J R, Cai X Y, Chen Y H, *et al.* Effect of soil Pb stress on shoot-emergence of dwarf bamboos [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(6): 1085-1095.
- [17] 李娟, 高健. 黄条金刚竹、阔叶箬竹和菲白竹在干旱、冻害和重金属 Pb 胁迫下光合生理响应研究[J]. 竹子研究汇刊, 2016, **35**(1): 22-29.
- Li J, Gao J. Photosynthetic and physiological responses to drought, cold and Pb stresses in *Pleioblastus kongosensis*, *Indocalamus latifolius* and *Sasa fortunei* [J]. *Journal of Bamboo Research*, 2016, **35**(1): 22-29.
- [18] Jiang M Y, Cai X Y, Liao J R, *et al.* Different strategies for lead detoxification in dwarf bamboo tissues [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **193**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110329.
- [19] Cai X Y, Jiang M Y, Liao J R, *et al.* Biomass allocation strategies and Pb-enrichment characteristics of six dwarf bamboos under soil Pb stress [J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2021, **207**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111500.
- [20] Liao J R, Cai X Y, Yang Y X, *et al.* Dynamic study of the lead (Pb) tolerance and accumulation characteristics of new dwarf bamboo in Pb-contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2021, **282**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131089.
- [21] 李阳帆. EDTA 对地被竹的 Pb 吸收和积累的影响研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2017.
- Li Y F. Effects of EDTA on Pb absorption and accumulation of dwarf bamboos [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2017.
- [22] 雷刚, 漆良华, 胡璇, 等. 中国地被竹应用与引种栽培研究 [J]. 世界林业研究, 2020, **33**(3): 60-66.
- Lei G, Qi L H, Hu X, *et al.* Application and cultivation of dwarf bamboos resources in China [J]. *World Forestry Research*, 2020, **33**(3): 60-66.
- [23] 张云霞, 宋波, 宾娟, 等. 超富集植物藿香蓟 (*Ageratum conyzoides* L.) 对镉污染农田的修复潜力 [J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2453-2459.
- Zhang Y X, Song B, Bin J, *et al.* Remediation potential of *Ageratum conyzoides* L. on Cadmium contaminated farmland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2453-2459.
- [24] 欧阳林男, 吴晓芙, 李芸, 等. 锰矿修复区泡桐与栎树生长与重金属积累特性[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(3): 908-916.
- Ouyang L N, Wu X F, Li Y, *et al.* Growth and heavy metal accumulation of *Paulownia fortunei* and *Koelreuteria bipinnata* in an ecological restoration site of the manganese-ore tailing [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 908-916.
- [25] 辜娇峰, 周航, 贾润语, 等. 三元土壤调理剂对田间水稻镉砷累积转运的影响 [J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1910-1917.
- Gu J F, Zhou H, Jia R Y, *et al.* Effects of a tribasic amendment on Cadmium and Arsenic accumulation and translocation in rice in a field experiment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1910-1917.
- [26] 刘颖茹, 陈同斌, 黄泽春, 等. 野外条件下土壤砷浓度对蜈蚣草砷富集特征的影响 [J]. 环境科学, 2005, **26**(5): 181-186.
- Liu Y R, Chen T B, Huang Z C, *et al.* As-hyperaccumulation of *Pteris vittata* L. as influenced by As concentrations in soils of contaminated fields [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(5): 181-186.

- 181-186.
- [27] 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 等. 构树修复对重金属污染土壤环境质量的影响[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(7): 2639-2645.
- Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Effect of phytoremediation with *Broussonetia papyrifera* on the biological quality in soil contaminated with heavy metals [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(7): 2639-2645.
- [28] 陈勤, 沈羽, 方炎明, 等. 紫湖流域重金属污染风险与植物富集特征[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(14): 198-205.
- Chen Q, Shen Y, Fang Y M, *et al.* Heavy metals pollution risk and characteristics of plant accumulation along Zihu River [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(14): 198-205.
- [29] 曾鹏, 郭朝晖, 韩白玉, 等. 桑树 (*Morus alba* L.) 原位修复某尾矿区重金属污染土壤[J]. 环境化学, 2020, **39**(5): 1395-1403.
- Zeng P, Guo Z H, Han Z Y, *et al.* In-situ phytoremediation of heavy metal-contaminated soil by *Morus alba* L. near a mine tailing [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(5): 1395-1403.
- [30] 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 等. 黑麦草和牵牛花对镉耐受能力和积累效果的指标表征研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 4044-4053.
- Dong B B, Chen Y Y, Hui H X, *et al.* Characterization of Cr tolerance and accumulation in *Lolium perenne* L. and *Pharbitis purpurea* (L.) Voigt [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 4044-4053.
- [31] 陈迪, 李伯群, 杨永平, 等. 4 种草本植物对镉的富集特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 960-966.
- Chen D, Li B Q, Yang Y P, *et al.* Cadmium accumulation characteristics of four herbs [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 960-966.
- [32] 王天顺, 陈伟, 蒋文艳, 等. Cd、Zn、Pb、Cu 复合污染对斑茅生长及吸收富集的影响[J]. 河南农业科学, 2020, **49**(5): 97-103.
- Wang T S, Chen W, Jiang W Y, *et al.* Effects of combined pollution of Cd, Zn, Pb and Cu on growth and absorption enrichment responses of *Saccharum arundinaceum* Retz. [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, **49**(5): 97-103.
- [33] 彭维新, 庄玉婷, 梁智淇, 等. 小叶榕对土壤铅镉污染的抗性和修复潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(8): 1707-1717.
- Peng W X, Zhuang Y T, Liang Z Q, *et al.* Resistance and remediation potential of *Ficus microcarpa* to Pb and Cd pollution in soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(8): 1707-1717.
- [34] 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 等. 芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5207-5216.
- Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Intercropping *Arundo donax* with woody plants to remediate heavy metal-contaminated soil [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5207-5216.
- [35] 王君, 严小莉, 李凌. 不同种源麻栎幼苗对 Cd^{2+} - Pb^{2+} 复合污染的吸收累积特性[J]. 林业科学, 2014, **50**(7): 23-30.
- Wang J, Yan X L, Li L. Absorption and accumulation characteristics of *Quercus acutissima* seedlings in different provenances under the combined pollution of Cd^{2+} and Pb^{2+} [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, **50**(7): 23-30.
- [36] 乔永, 周金星, 王小平. Pb、Cd 复合胁迫对桑树种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, **42**(4): 32-40.
- Qiao Y, Zhou J X, Wang X P. Effects of lead and cadmium combined stress on seed germination and seedling growth of mulberry [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, **42**(4): 32-40.
- [37] 石慧芳, 席溢, 张茂, 等. 铅、锌、镉单一及复合胁迫对多年生黑麦草生长及生理特性的影响[J]. 南方农业学报, 2021, **52**(4): 1030-1039.
- Shi H F, Xi Y, Zhang M, *et al.* Effects of single and combined stresses of lead, zinc and cadmium on growth and physiological characteristics of *perennial ryegrass* [J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, **52**(4): 1030-1039.
- [38] 刘国华, 王福升. 修剪对 6 种地被竹高生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, **32**(2): 145-147.
- Liu G H, Wang F S. Height growth regularity of six dwarf bamboo's culm [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2008, **32**(2): 145-147.
- [39] 肖明, 杨文君, 崔明明, 等. 藜麦、皱叶酸模对土壤砷、镉修复作用田间试验[J]. 干旱区资源与环境, 2018, **32**(7): 122-127.
- Xiao M, Yang W J, Cui M M, *et al.* A field experiment on remediation of soil arsenic and cadmium by *Chenopodium quinoa* and *Rumex crispus* [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, **32**(7): 122-127.
- [40] 朱俊艳, 于玲玲, 黄青青, 等. 油菜-海州香薷轮作修复铜镉复合污染土壤: 大田试验[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(6): 1166-1171.
- Zhu J Y, Yu L L, Huang Q Q, *et al.* Application of rotation system of *Brassica juncea* and *Elsholtzia splendens* to remediate Copper and Cadmium-contaminated soil: a field trial [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(6): 1166-1171.
- [41] 刘国华, 王福升, 丁雨龙. 4 种地被竹根系分布特征及其力学性质[J]. 林业科技开发, 2011, **25**(6): 20-23.
- Liu G H, Wang F S, Ding Y L. A research on root system distribution characteristic and mechanical properties of 4 dwarf bamboos [J]. China Forestry Science and Technology, 2011, **25**(6): 20-23.
- [42] 王志强, 杨海芸, 王姝, 等. 三种地被竹出笋成竹生长规律比较研究[J]. 浙江林业科技, 2012, **32**(2): 23-28.
- Wang Z Q, Yang H Y, Wang S, *et al.* Comparison on shooting and growth characteristics of three dwarf bamboos [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2012, **32**(2): 23-28.
- [43] 肖清铁, 郑新宇, 韩永明, 等. 不同栽培措施对紫苏镉富集能力的影响[J]. 福建农业学报, 2018, **33**(7): 724-731.
- Xiao Q T, Zheng X Y, Han Y M, *et al.* Cd-uptake of *Perilla frutescens* (L.) Britt as affected by cultivation conditions [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2018, **33**(7): 724-731.
- [44] 刘玲, 吴龙华, 李娜, 等. 种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3422-3426.
- Liu L, Wu L H, Li N, *et al.* Effect of planting densities on yields and Zinc and Cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola* [J]. Environmental Science, 2009, **30**(11): 3422-3426.
- [45] Liphadzi M S, Kirkham M B, Mankin K R, *et al.* EDTA-assisted heavy-metal uptake by poplar and sunflower grown at a long-term sewage-sludge farm [J]. Plant and Soil, 2003, **257**(1): 171-182.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)