

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

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

2010~2015年我国水泥工业NO_x排放清单及排放特征 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)

兰州市煨炕污染物排放清单及其对PM_{2.5}浓度贡献 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)

北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)

郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)

菏泽市冬季PM_{2.5}中二元羧酸类SOA的昼夜变化特征 孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)

我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征 温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)

嘉兴市2015年人为源VOCs排放清单 郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)

上海某石化园区周边区域VOCs污染特征及健康风险 盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)

SBR工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征 杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)

太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应 石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)

巢湖2016年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析 胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)

蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响 彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)

三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响 陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)

纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响 白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)

澜沧江流域水体悬浮颗粒物δ¹⁵N空间差异及成因分析 唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)

潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律 耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)

蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素 张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)

典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算 熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)

农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)

城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征 刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)

不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响 葛德, 张守红 (5015)

四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用 王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)

厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用 卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)

光助二茂铁/H₂O₂非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶 张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)

基于同位素技术的短程硝化过程N₂O产生途径 杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)

基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响 安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)

厌氧/好氧SPNDPR系统实现低C/N城市污水同步脱氮除磷的优化运行 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)

污水处理厂SNAD工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)

盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学 唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)

中试ANAMMOX-ASBR处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性 张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)

碳氮比对颗粒污泥CANON反应器脱氮性能和N₂O释放的冲击影响 付昆明, 姜姍, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)

污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析 房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)

重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析 伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)

韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布 刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)

有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源 杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)

纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的α-HCH 姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)

株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征 申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)

生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响 王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)

生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响 俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)

颗粒有机质对水稻稻吸收及转运的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

施肥对向日葵吸收积累Cd的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

不同水稻品种对重金属的积累特性 林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄久如 (5198)

芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)

三峡库区典型河流水-气界面CO₂通量日变化观测及其影响因素分析 罗佳宸, 李思悦 (5217)

富营养化湖区CH₄排放特征及其影响因素 商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)

短期放牧对半干旱草地生态系统CO₂和N₂O排放的影响 申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)

覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)

臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物(BVOCs)影响的研究进展 冯兆忠, 袁相洋 (5257)

地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展 杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)

污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素 张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)

《环境科学》征订启事(4848) 《环境科学》征稿简则(4990) 信息(5188, 5216, 5236)

芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤

曾鹏, 郭朝晖*, 肖细元, 彭驰, 黄博

(中南大学冶金与环境学院环境工程研究所, 长沙 410083)

摘要: 通过温室盆栽实验, 研究草本植物芦竹与木本植物构树、桑树间种修复重金属污染土壤的潜力. 结果表明, 重金属污染土壤上芦竹与构树、桑树间种有利于植物的生长, 提高植物对污染土壤中重金属的富集能力, 并有效改善土壤酶活性. 重金属污染土壤上单种芦竹、构树和桑树的叶片光合色素含量随着修复时间的延长呈下降趋势, 而芦竹与构树、桑树间种修复 270 d 后, 构树叶片叶绿素 a 和类胡萝卜素含量, 桑树叶片叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均与修复初期(90 d)相比无显著差异; 桑树叶片叶绿素 a、叶绿素 b 以及类胡萝卜素含量较单种桑树分别显著 ($P < 0.05$) 提高 99.1%、177.1% 和 119.9%, 且整株生物量显著 ($P < 0.05$) 提高 26.1%. 芦竹-构树间种下植物地上部分 Pb 和 Zn 总量较单种芦竹分别显著 ($P < 0.05$) 提高 171% 和 124%; 芦竹-桑树间种下植物地上部分 As 和 Pb 总量较单种桑树和芦竹修复分别显著 ($P < 0.05$) 提高 150% 和 76.5%. 芦竹与构树、桑树间种修复 270 d 后, 污染土壤中 As、Cd、Pb 和 Zn 的赋存形态无明显变化, 而且土壤脲酶、酸性磷酸酶和总磷酸酶活性明显优于部分单一植物修复. 上述结果表明, 芦竹与构树、桑树间种可有效用于重金属污染土壤修复, 还可改善污染土壤的环境质量.

关键词: 重金属污染土壤; 芦竹; 构树; 桑树; 间种

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-5207-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201804136

Intercropping *Arundo donax* with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil

ZENG Peng, GUO Zhao-hui*, XIAO Xi-yuan, PENG Chi, HUANG Bo

(Institute of Environmental Engineering, School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A greenhouse experiment was conducted to study the potential of intercropping *Arundo donax* with *Broussonetia papyrifera* or *Morus alba* to remediate heavy metal-contaminated soil. The results showed that intercropping the herbaceous plant *A. donax* with woody plants *B. papyrifera* or *M. alba* was beneficial for plant growth on heavy metal-contaminated soil. This can effectively enhance the comprehensive enrichment capacity of heavy metals and improve soil enzyme activities. The photosynthetic pigment contents in the leaves of *A. donax*, *B. papyrifera*, and *M. alba* decreased along with remediation time under monoculture treatment for each plant. However, compared with 90 d cultivation, the chlorophyll-a and carotenoid contents in *B. papyrifera* leaves and chlorophyll-b and carotenoid contents in *M. alba* leaves under intercropping treatment after 270 d cultivation were only slightly changed. Furthermore, chlorophyll-a, chlorophyll-b, and carotenoid contents in *M. alba* leaves under intercropping treatment were significantly ($P < 0.05$) increased by 99.1%, 177.1%, and 119.9%, respectively, compared with monoculture-treated *M. alba*, and the total biomass of *M. alba* increased significantly ($P < 0.05$) by 26.1%. Compared with monoculture-treated *A. donax*, the total accumulation amounts of Pb and Zn in the shoots of combined plants was significantly ($P < 0.05$) enhanced by 171% and 124% under intercropping treatment of *A. donax* with *B. papyrifera*. Compared with monoculture-treated *M. alba* and *A. donax*, the total accumulation amounts of As and Pb in the shoots of intercropped plants were significantly ($P < 0.05$) enhanced by 150% and 76.5%, respectively, under intercropping treatment of *A. donax* with *M. alba*. Moreover, the fractions of As, Cd, Pb, and Zn in contaminated soil slightly changed under intercropping treatment of *A. donax* with *B. papyrifera* or *M. alba*, and soil urease, acid phosphatase, and total phosphatase activity was superior to part of the monoculture treatments after 270 d cultivation. The results further suggested that intercropping *A. donax* with *B. papyrifera* or *M. alba* could be effectively used for heavy metal-contaminated soil remediation, while simultaneously improving the biological quality in contaminated soil.

Key words: heavy metals contaminated soil; *Arundo donax*; *Broussonetia papyrifera*; *Morus alba*; intercropping

金属矿物开采、冶炼等生产活动造成大量土壤被重金属污染, 并恶化生态环境质量, 并通过生物富集和放大效应对人类产生潜在的健康风险^[1~3], 开展重金属污染土壤修复迫在眉睫. 与传统的物理和化学修复相比, 植物修复技术具有成本低、环境友好、原位修复且应用广泛等优点, 成为目前发展前景较好的一种修复技术^[4, 5]. 目前, 大量的超富

集植物被广泛研究, 如蜈蚣草^[6]、东南景天^[7]等, 然而超富集植物具有生物量小、提取重金属总量有限且仅对特殊重金属具有超富集能力^[8], 从而限制

收稿日期: 2018-04-17; 修订日期: 2018-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271330)

作者简介: 曾鹏(1992~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤污染控制与修复, E-mail: zengpeng@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: zhguo@csu.edu.cn

其大规模应用. 因此, 一些大生物量植物, 如海桐^[9]、珊瑚树^[10]、香樟^[11]、旱柳^[12]等重金属富集植物逐渐受到广泛的关注. 然而, 目前研究主要集中于单一植物修复重金属污染土壤, 而利用植物间种增强修复系统物种多样性并提高对多种重金属的修复潜力暂时研究报道不多.

植物间种能充分利用光能、空间结构和土壤肥力. 有研究表明, 龙葵-茄子间种可提高茄子的生物量和其叶片光合色素和超氧化物酶活性的含量, 同时显著降低茄子地上部分 Cd 含量^[13], 龙葵-大葱间种不会影响大葱的生长和 Cd 的积累^[14], 东南景天-玉米间种可通过东南景天的竞争性吸收 Zn 和 Cd 来降低玉米茎叶中的重金属含量^[15, 16]. 因此, 多种植物间种修复重金属污染土壤有可能是一条行之有效的途径. 但是上述关于间种研究仅用于解决农田重金属污染问题, 通过超富集植物与农作物间种来实现农产品的安全生产, 但鲜有间种生物量大的耐性植物来修复多金属工矿区污染土壤.

芦竹是多年生草本植物, 抗逆能力强, 生物量大, 适应性强, 是一种优质造纸原材料和生物质能源材料, 对污染土壤中 As、Cd、Pb 和 Zn 的累积分别达 0.03、0.04、0.21 和 0.17 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[17]. 桑树和构

树是属于桑科的木本植物, 对多种重金属具有较强的累积能力, 其中矿冶区构树的重金属综合富集系数可达 2.93^[18], 桑树具有较强的植物提取 Cd 的潜力^[19]. 因此, 本文选取草本植物芦竹、木本植物桑树和构树为研究材料, 通过温室盆栽实验, 研究草木间种模式下植物之间竞争协调机制, 间种组合植物对重金属的综合富集能力、污染土壤中重金属赋存形态转化和土壤酶活性的影响, 以期为工矿区重金属污染土壤生态修复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤和植物

温室盆栽土壤采自湖南省某典型冶炼区 0~20 cm 的表层土壤, 收集的土壤自然风干后过 5 mm 筛后混合均匀用于盆栽实验. 实验土壤的基本理化性质: 土壤 pH 值 6.17, 有机质 21.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 49.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 5.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 151 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全 As、Cd、Pb、Zn、Cu 含量分别为 79.6、41.2、519、2 041 和 194 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

芦竹取自湖南省本课题组育苗基地, 桑树苗购于湖南省某苗木基地, 构树苗采自湖南省某野外构树丛林, 其初始重金属含量见表 1.

表 1 供试苗木的初始重金属含量

Table 1 Initial heavy metals contents in tested seedlings

植物	拉丁文名	类型	植物体内重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
			As	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni
芦竹	<i>Arundo donax</i>	多年生草本	4.34	1.15	5.14	47.1	3.37	0.69
构树	<i>Broussonetia papyrifera</i>	落叶乔木	0.17	0.24	1.29	15.0	12.1	1.36
桑树	<i>Morus alba</i>	落叶乔木或灌木	0.26	0.14	2.04	13.9	6.39	1.24

1.2 实验设计

10 kg 过 5 mm 筛的土壤装入塑料盆(长、宽和高分别为 33、22 和 19 cm)中, 每盆土壤施入 2.7 g $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、0.5 g $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、1.6 g KNO_3 作基肥, 浇灌去离子水保持 70% 的田间持水量加入土壤中, 平衡 30 d 后, 统一移栽大小一致的幼苗. 实验种植模式为: 芦竹单种(L, 8 株)、桑树单种(S, 8 株)、构树单种(G, 8 株)、芦竹-构树间种(LG, 4 株芦竹和 4 株构树)、芦竹-桑树间种(LS, 4 株芦竹和 4 株桑树). 每个种植模式 3 次重复. 本实验期间, 浇灌去离子水以保持供试土壤田间持水量为 60%. 光照周期为 10 $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$, 温室内昼夜温度为 30 $^{\circ}\text{C}$ /20 $^{\circ}\text{C}$. 在培养 90、150、210 和 270 d 后取相同部位的叶片用于光合色素含量测定, 培养 270 d 后收获所有植物和土壤. 植物按照根、茎、叶分开, 分别用自来

水冲洗后, 再用去离子水冲洗干净, 于 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min, 然后 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重, 称量干重、粉碎后备用. 土壤采取五点取样法收集后, 自然风干, 充分混匀, 过 20 目和 100 目筛备用.

1.3 测试与分析

土壤基本理化性质(pH 值、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾)根据鲁如坤^[20]的方法进行分析和测定, 土壤和植物样品消解分别采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 和 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解. 土壤中 As 的赋存形态根据 Wenzel 等^[21]的方法: 第一步为非专性吸附态 As, 称取过 100 目 1.000 g 土壤置于 100 mL 离心管中, 加入 25 mL 0.05 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 下振荡 4 h 后, 4 800 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 10 min, 过滤, 滤液经过冷藏保存待测; 第二步为专性吸附态 As, 往第 1 步的土壤中加入 25 mL 0.05 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$,

20℃振荡 16 h 后, 4 800 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min, 过滤, 滤液经过冷藏保存待测; 第三步为弱结晶水合铁铝氧化物结合态 As, 往第 2 步的土壤中加入 25 mL pH 为 3.25 的 0.2 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ 缓冲溶液, 20℃ 黑暗振荡 4 h 后, 4 800 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min, 过滤, 滤液经过冷藏保存待测, 加入 12.5 mL 0.2 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ 清洗, 避光振荡 10 min, 弃液; 第四步为结晶水合铁铝氧化物结合态 As, 往第 3 步的土壤中加入 25 mL pH 为 3.25 0.2 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ 缓冲溶液和 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 抗坏血酸混合液, 90℃ 水浴 30 min 后 4 800 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min, 过滤, 滤液经过冷藏保存待测, 然后加入 12.5 mL 0.2 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ 清洗, 避光振荡 10 min, 弃液; 第五步为残渣态 As, 将第四步提取完之后的土样风干, 研磨过 100 目筛, 采用 (1 + 1) 王水消解. 土壤中 Cd、Pb 和 Zn 的赋存形态采用改进 BCR 连续提取法^[22]. 消解液和浸提液中 Cd、Pb 和 Zn 含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, iCAP 7400, Thermo) 测定, As 含量采用双道原子荧光光度计 (AFS-2202E, 北京海光仪器公司) 测定. 植物叶片光合色素含量^[23] 采用分光光度计 (UV 1801, 北京北分瑞利分析仪器公司) 测定. 土壤脱氢酶、脲酶、蔗糖酶和磷酸酶 (酸性磷酸酶和总磷酸酶活性) 分别采用红四氮唑 (TTC) 比色法、靛酚蓝比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法和磷酸苯二钠比色法测定^[8, 24].

1.4 数据处理与分析

所有实验数据采用 Microsoft Excel 2016 进行分析处理. 单因素 (One-way) 和双因素 (Two-way) 方

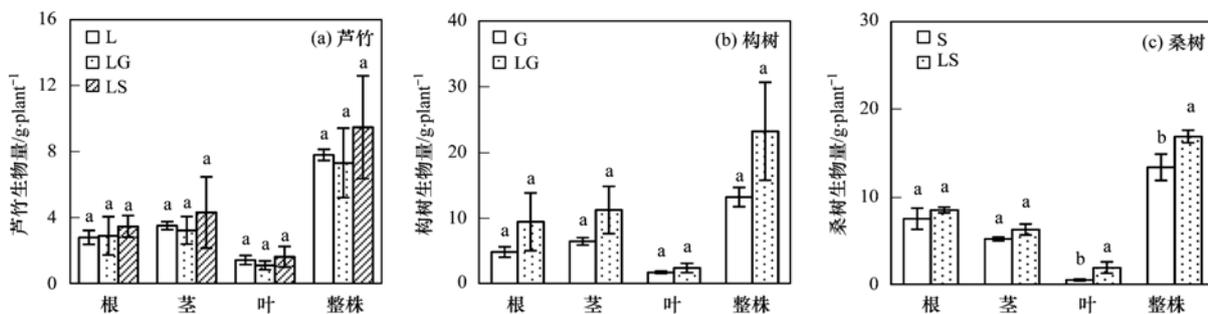
差分析 (ANOVA), 以及双侧 t 检验采用 SPSS 16.0 统计软件进行显著差异分析, $P < 0.05$ 为显著性水平.

2 结果与讨论

2.1 间种对修复植物生长的影响

2.1.1 生物量

植物的生物量在一定程度上可反映植物在重金属污染土壤中的生长状况. 在 LG 和 LS 间种修复重金属污染土壤 270 d 后, 芦竹、构树和桑树均能正常生长 (图 1), 且对芦竹的生物量无明显影响, 而对木本植物桑树和构树的生长具有一定的促进作用. 在间种处理下, 构树整株生物量较单作处理相比增加 75.7%, 但未达到显著差异, 而桑树整株生物量显著 ($P < 0.05$) 提高 26.1%, 其中根、茎和叶片生物量分别提高 13.3%、20.5% 和 236.7%. 当两种植物种植在有限空间时, 由于生态位重叠, 存在竞争与促进关系, 当竞争作用小于促进作用, 则为正效应; 当竞争作用大于促进作用, 则为负效应^[25]. Wang 等^[26] 发现植物间种过程中植物之间对土壤中营养元素竞争, 从而导致东南景天与蓖麻间种过程中东南景天地上部分生物量的下降. 而本研究中在芦竹分别与构树或桑树间种可促进构树和桑树的生长, 与 Jang 等^[27] 的研究表明天蓝遏蓝菜与黑麦草间种下天蓝遏蓝菜的生物量与单种相比显著增加 2 倍的结果类似. 本研究表明, 芦竹分别与构树或桑树间种不会影响芦竹的正常生长, 且有利于构树和桑树的生长, 为重金属污染生态修复奠定良好的前提条件.



不同字母表示间种与单种处理下植物各部位生物量具有显著差异; L、S 和 G 分别表示芦竹、桑树和构树单种, LG 和 LS 分别表示芦竹-构树和芦竹-桑树间种, 下同

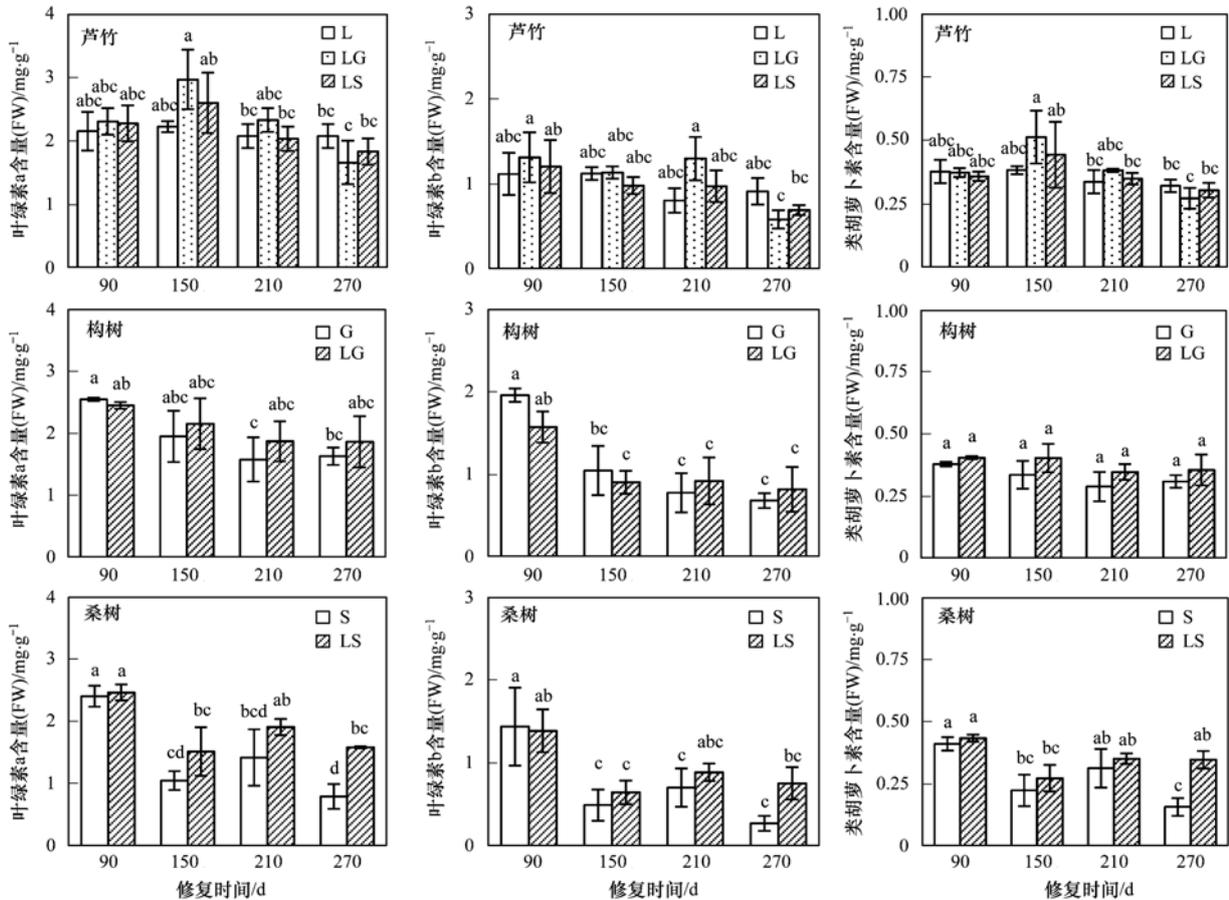
图 1 间种下芦竹、构树和桑树的生物量

Fig. 1 Dried biomass of *A. donax*, *B. papyrifera*, and *M. alba* under intercropping treatments

2.1.2 叶片光合色素含量

间种处理对芦竹和构树叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均无明显影响 (图 2 和表

2), 而对桑树叶片光合色素有显著影响 ($P < 0.01$). 在 90 ~ 210 d 的修复期间, LS 组合处理下桑树叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 以及类胡萝卜素含



不同字母表示间种和单种处理在不同修复时间下植物叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量具有显著差异

图 2 间种下芦竹、构树和桑树叶片光合色素含量随时间的变化

Fig. 2 Change of photosynthetic pigments for *A. donax*, *B. papyrifera*, and *M. alba* leaves along with remediation time under intercropping treatments

量与单一桑树修复相比无显著差异，而修复 270 d 后，桑树叶片叶绿素 a、叶绿素 b 以及类胡萝卜素含量较其单种分别显著 ($P < 0.05$) 提高 99.1%、177.1% 和 119.9%，且间种下桑树的生物量明显增加(图 1)，与 Tang 等^[13]的研究表明龙葵与茄子间种下可显著提高茄子的光合色素含量的结果类似。可能是植物间种过程可有效改善土壤酶活性并降低污染土壤重金属对微生物的不利影响^[28, 29]，在一定程度上提高了间种下桑树对污染土壤中重金属的耐受性能。通过双因素方差分析表明(表 2)，芦竹、构树和桑树叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量随着修复时间的延长有显著 ($P < 0.05$) 变化，其中芦竹叶片光合色素含量随修复时间的延长呈下降趋势，修复 270 d 后单一构树叶片的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量与修复初期(90 d)相比分别显著 ($P < 0.05$) 下降 35.9% 和 65.1%，单一桑树叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量分别显著 ($P < 0.05$) 下降 66.9%、81.1% 和 61.6%。有研究表明，

污染土壤中重金属可显著抑制植物叶片的光合作用^[10, 11]，从而造成单一构树和桑树修复下其叶片光合色素含量下降。但在 LG 和 LS 间种修复 270 d 后，构树叶片叶绿素 a 和类胡萝卜素含量，桑树叶片叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均与修复初期(90 d)相比无显著差异。研究表明，芦竹分别与构树或桑树间种，可有效降低污染土壤中重金属对构树或桑

表 2 双因素方差分析间种处理和修复时间对芦竹、构树和桑树叶片光合色素的影响¹⁾

Table 2 Effects of intercropping treatment and remediation time on pigments contents in *A. donax*, *B. papyrifera*, and *M. alba* leaves based on two-way ANOVA

项目	类别	叶绿素 a	叶绿素 b	类胡萝卜素
芦竹	间种处理	n	n	n
	修复时间	**	**	**
构树	间种处理	n	n	*
	修复时间	**	**	*
桑树	间种处理	**	n	**
	修复时间	**	**	**

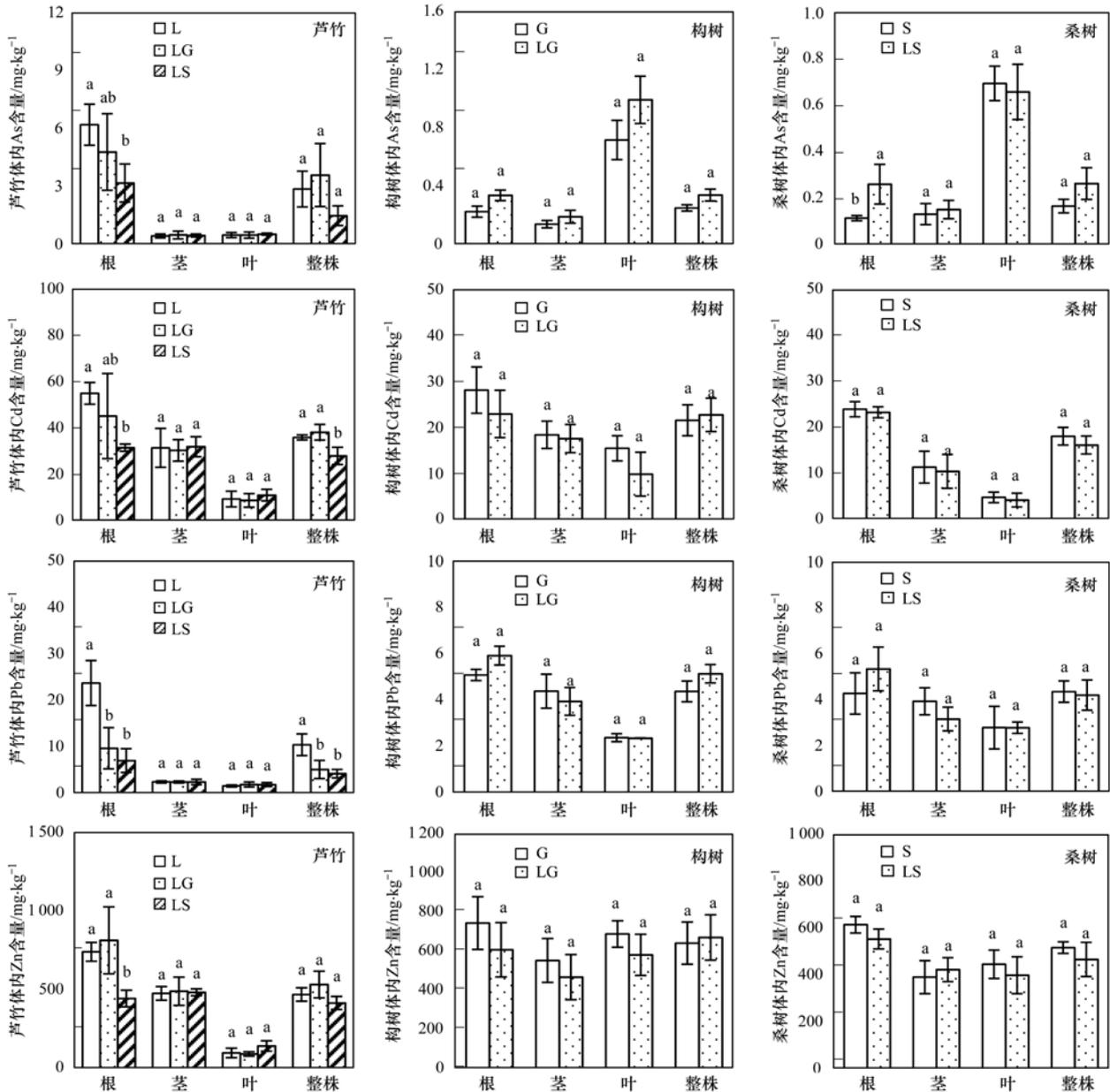
1) n 表示影响不明显；* 表示 $P < 0.05$ ；** 表示 $P < 0.01$

树叶片光合作用的不利影响。

2.2 修复植物间种对重金属吸收和累积的影响

LG 和 LS 间种下芦竹、构树和桑树的根、茎、叶片和整株 As、Cd、Pb 和 Zn 含量见图 3。LG 和 LS 间种处理下，木本植物构树和桑树体内 As、Cd、Pb 和 Zn 含量分别与单一构树和桑树修复相比无明显差异，而草本植物体内重金属含量具有一定程度的影响。LG 间种下芦竹的根、茎、叶片和整株 As、Cd 和 Zn 含量均与单一芦竹修复相比无显著差异，而芦竹整株 Pb 含量显著 ($P < 0.05$) 下降 51.26%，主要表现为根部显著 ($P < 0.05$) 下降 59.26%。LS 间

种下芦竹整株 As、Cd、Pb 和 Zn 含量均明显低于单一芦竹修复，也主要表现为根部显著 ($P < 0.05$) 下降 48.86%、42.62%、70.52% 和 40.09%。其原因可能是植物在无根系障碍间种过程中，间种植物之间产生竞争作用^[15, 30]，从而导致芦竹体内重金属含量出现一定程度的降低。与蒋成爱等^[31]研究表明东南景天与黑麦草的间种没有显著影响东南景天对 Zn、Cd、Pb 的吸收，但显著降低黑麦草对 Cd 和 Zn 的吸收的研究结果类似。不同植物的“根际对话”可直接影响其对重金属的吸收^[32]。Yang 等^[33]的研究表明，蜈蚣草和蓖麻间种可有效促进蜈蚣草对污



不同字母表示间种和单种处理下植物体内各部位 As、Cd、Pb 和 Zn 含量具有显著差异

图 3 间种下芦竹、构树和桑树根、茎和叶片 As、Cd、Pb 和 Zn 含量

Fig. 3 Contents of As, Cd, Pb, and Zn in the roots, stems and leaves of *A. donax*, *M. alba*, and *B. papyrifera* under intercropping treatments

染土壤中 As 和 Pb 的吸收, 并显著降低蓖麻根部的 As 和 Pb 含量. Wan 等^[34]的研究也表明, 蜈蚣草和桑树间种可有效促进蜈蚣草对 As 的吸收并显著降低桑树地下部分 As 的含量. 在重金属污染条件下, 不同植物间种对重金属元素的吸收影响主要集中在根际环境中, 植物可通过信号反馈分泌有机酸与重金属形成可溶性络合物而抑制重金属的跨膜运输, 减少其对植物的伤害^[32]. 总之, 间种下植物体内重金属含量取决于重金属的类型和竞争植物之间的相互作用^[26]. 本研究表明, 芦竹分别与构树或桑树间种对木本植物构树和桑树各部位重金属含量无明显影响, 并一定程度抑制芦竹对重金属的吸收.

植物修复的效率主要取决于植物地上部分的重金属含量和生物量^[15, 35]. 本研究中单一芦竹、构树和桑树地上部分 As, 以及单一芦竹地上部分 Pb 的富集总量均远远小于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ (表 3), 与郭朝晖等^[17]的研究表明芦竹对污染土壤中 As 和 Pb 主要起到稳定作用的结果一致. 单一构树修复下, 构树地上部分 Cd、Pb 和 Zn 的富集总量较单一桑树修复下桑树地上部分的富集总量分别显著 ($P < 0.05$) 提高 139%、52.9% 和 106.1%. 研究表明, 芦竹可用于 As 和 Pb 污染土壤植物稳定修复, 桑树和构树可

用于 As 污染土壤植物稳定修复, 构树可用于 Cd、Pb 和 Zn 污染土壤的植物提取.

植物间种修复可以提高植物对污染土壤中重金属的提取效率. LG 间种下修复植物地上部分 As 和 Cd, 以及地下部分 As、Cd 和 Pb 累积总量与单一芦竹和构树修复相比无显著差异, 而其地上部分 Pb 和 Zn, 以及地下部分 Zn 累积总量较单一芦竹修复分别显著 ($P < 0.05$) 提高 171% 和 124%, 以及 80.72%. LS 间种下修复植物地上部分和地下部分 Cd、地下部分 Pb、以及地上部分 Zn 累积总量均与单一芦竹和桑树修复相比无显著差异, 而地上部分 As 累积总量较单一桑树修复显著 ($P < 0.05$) 提高 150%, 地上部分 Pb 累积总量较单一芦竹修复显著 ($P < 0.05$) 提高 76.5%. 因此, LG 和 LS 间种模式可从污染土壤中提取相同或者更高的重金属累积总量, 从而提高组合植物对重金属污染土壤的修复效率. 韩存亮等^[36]利用草本植物伴矿景天和木本植物杨桃套种对受污染土壤的修复效果明显, 将成为治理土壤重金属污染的新途径. 研究表明, 利用草本和木本植物间种修复重金属污染土壤, 可通过植物之间的互补性来提高其修复效率.

表 3 间种下组合植物对 As、Cd、Pb 和 Zn 累积总量¹⁾/ $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$

Table 3 Total accumulation amounts of As, Cd, Pb, and Zn for combined plants under intercropping treatments/ $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$

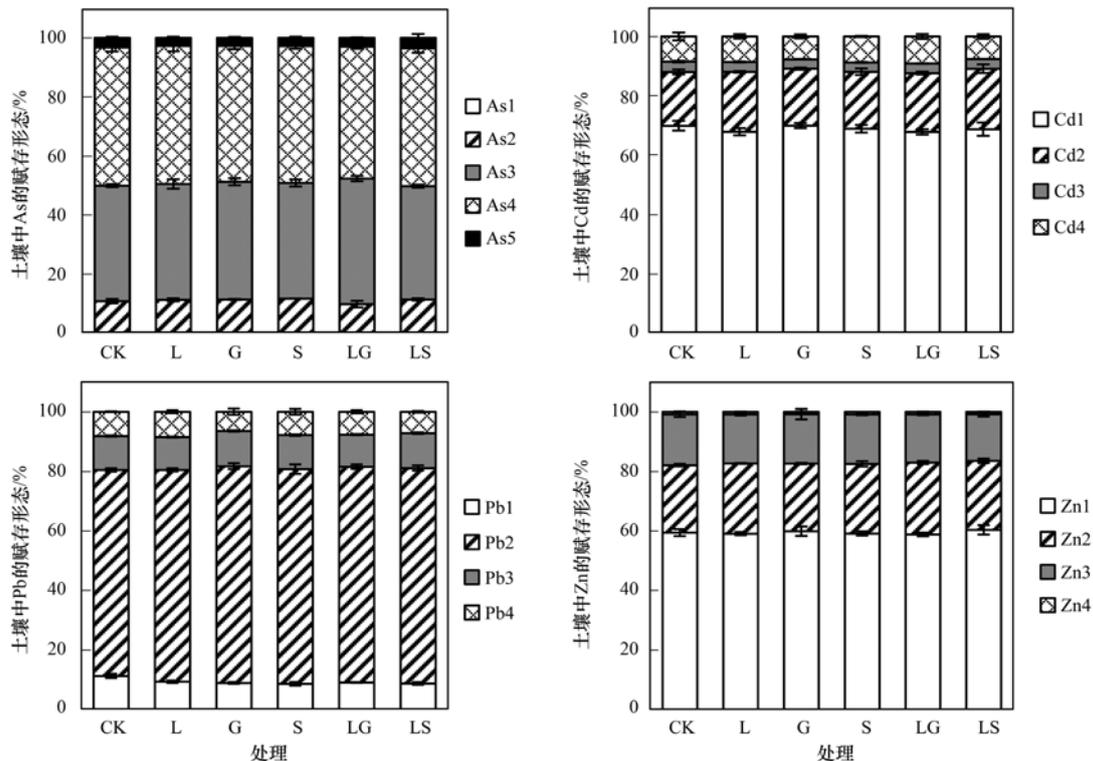
累积总量	部位	种植模式				
		L	G	S	LG	LS
As	地上部分	0.017 ± 0.004 6ab	0.017 ± 0.002 4ab	0.008 ± 0.002 7b	0.026 ± 0.003 2a	0.020 ± 0.005 3a
	地下部分	0.14 ± 0.034a	0.008 ± 0.003b	0.006 ± 0.000 4b	0.073 ± 0.043ab	0.051 ± 0.006b
Cd	地上部分	1.00 ± 0.28ab	1.17 ± 0.18a	0.49 ± 0.16b	1.29 ± 0.02a	0.89 ± 0.25ab
	地下部分	1.24 ± 0.26a	1.08 ± 0.13a	1.43 ± 0.25a	1.33 ± 0.19a	1.23 ± 0.13a
Pb	地上部分	0.085 ± 0.006d	0.26 ± 0.019a	0.17 ± 0.026bc	0.23 ± 0.039ab	0.15 ± 0.026c
	地下部分	0.53 ± 0.17a	0.19 ± 0.02b	0.26 ± 0.09b	0.34 ± 0.11ab	0.27 ± 0.04ab
Zn	地上部分	14.57 ± 1.30b	38.20 ± 5.39a	18.53 ± 3.65b	32.70 ± 2.22a	23.08 ± 3.26b
	地下部分	16.55 ± 1.51c	28.59 ± 2.31ab	36.8 ± 4.54a	29.91 ± 3.94ab	25.05 ± 2.96bc

1) 数据为平均值 ± 标准偏差 ($n = 3$), 不同字母表示间种和单种处理下地上或地下部分重金属累积总量具有显著差异 ($P < 0.05$)

2.3 修复植物间种对污染土壤中重金属赋存形态的影响

LG 和 LS 间种修复重金属污染土壤 270 d 后, 污染土壤中 As、Cd、Pb 和 Zn 的赋存形态与单一芦竹、构树和桑树修复和 CK 处理相比均无明显差异 (图 4). 与谭建波等^[37]研究表明续断菊与蚕豆间作后, 通过根系分泌有机酸与 Cd 进行螯合作用来提高土壤 Cd 的活化效率, 而续断菊是 Cd 的超积累植物, 对 Cd 具有强吸收作用, 从而导致土壤中 Cd 可交换态含量下降的研究结果相反. 这可能与供试土

壤中重金属浓度较高, 且芦竹、桑树和构树均不属于重金属超富集植物有关, 因此上述植物修复无法在短时间改变土壤中重金属的赋存形态. 与 Wan 等^[34]的研究表明桑树和蜈蚣草间种无法显著改变污染土壤中 As 的各种赋存形态的结果类似. 供试土壤中 As 的赋存形态主要以弱结晶水合铁铝氧化物结合态 (As3) 和结晶水合铁铝氧化物结合态 (As4) 存在, 分别占土壤总 As 的 38.3% ~ 42.5% 和 44.7% ~ 46.8%; 土壤中以酸可提取态 Cd 和 Zn 分别达到总 Cd 和 Zn 量的 67.8% ~ 69.9% 和



As1、As2、As3、As4 和 As5 分别表示土壤中非专性吸附态 As、专性吸附态 As、弱结晶水合铁铝氧化物结合态 As、结晶水合铁铝氧化物结合态 As 和残渣态 As；Cd1、Cd2、Cd3 和 Cd4 分别表示土壤中酸可提取态 Cd、可还原态 Cd、可氧化态 Cd 和残渣态 Cd；Pb1、Pb2、Pb3 和 Pb4 分别表示土壤中酸可提取态 Pb、可还原态 Pb、可氧化态 Pb 和残渣态 Pb；Zn1、Zn2、Zn3 和 Zn4 分别表示土壤中酸可提取态 Zn、可还原态 Zn、可氧化态 Zn 和残渣态 Zn

图4 间种修复下土壤中 As、Cd、Pb 和 Zn 赋存形态的变化

Fig. 4 Distribution of As, Cd, Pb, and Zn fractions in soil under intercropping treatments

58.8%~60.4%；土壤中可还原态 Pb 占总 Pb 量的 69.1%~72.7%。上述研究结果表明，土壤中 As、Cd、Pb 和 Zn 的活性较高，存在向周边扩散和食物链传递的风险。因此，必须辅助物理和化学措施来强化植物修复重金属污染土壤。

2.4 修复植物间种对污染土壤酶活性的影响

从表4可知，单一芦竹、桑树和构树，以及LG和LS间种修复下土壤脱氢酶和脲酶活性均与CK相比无显著差异(表4)。有研究表明污染土壤中重金属有效态含量与脲酶和脱氢酶呈负相关关系^[8]，且对污染土壤中重金属比较敏感^[24]，因此植物修

复无法在短时间有效恢复土壤脲酶和脱氢酶活性。然而，单一芦竹、桑树和构树，以及LG和LS间种修复下土壤蔗糖酶、酸性磷酸酶和总磷酸酶活性较CK处理分别明显提高1.66~3.15倍、2.29~5.71倍和1.10~1.77倍，表明植物修复可有效恢复重金属污染土壤蔗糖酶、酸性磷酸酶和总磷酸酶活性，与Zeng等^[8]的研究表明植物根系在重金属胁迫下可释放各种多糖、芳香族化合物和酯类等化合物，从而在金边黄杨修复下Cd污染土壤蔗糖酶活性显著改善的结果类似。本研究中，植物间种对土壤酶活性的改善效果明显优于单一植物修复。其中

表4 植物间种修复下土壤酶活性的变化¹⁾

Table 4 Changes in soil enzyme activity under intercropping treatments

处理	脲酶活性 / $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$	脱氢酶活性 / $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$	蔗糖酶活性 / $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$	酸性磷酸酶活性 / $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot 3\text{h})^{-1}$	总磷酸酶活性 / $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot 3\text{h})^{-1}$
CK	73.62 ± 7.65bc	3.21 ± 0.73a	0.91 ± 0.09b	49.8 ± 5.09d	51.3 ± 4.53c
L	71.72 ± 10.95bc	4.01 ± 0.73a	3.68 ± 1.13a	258.4 ± 22.21b	107.6 ± 16.79b
S	57.90 ± 8.03c	3.80 ± 1.01a	3.51 ± 0.81a	194.0 ± 5.19c	139.0 ± 16.7a
G	71.67 ± 18.01bc	3.16 ± 0.81a	3.78 ± 1.16a	163.9 ± 15.88c	109.3 ± 8.03b
LG	87.04 ± 12.09ab	3.84 ± 0.33a	2.42 ± 0.79ab	277.3 ± 28.94b	136.3 ± 10.39a
LS	97.64 ± 15.75a	4.75 ± 1.39a	2.42 ± 0.78ab	334.1 ± 53.19a	142.2 ± 14.72a

1) 数据为平均值 ± 标准偏差($n=3$)，同一列不同字母表示不同处理下土壤酶活性具有显著差异

LG 间种下, 土壤脲酶活性较单一桑树修复显著 ($P < 0.05$) 提高 50.3%, 酸性磷酸酶活性较单一桑树和构树修复分别显著 ($P < 0.05$) 提高 42.9% 和 69.2%, 总磷酸酶活性较单一芦竹和构树修复分别显著 ($P < 0.05$) 提高 26.7% 和 27.4%; LS 间种下, 土壤脲酶和酸性磷酸酶活性较单一芦竹、桑树和构树修复分别显著 ($P < 0.05$) 提高 36.1%、68.6% 和 36.2%, 29.3%、72.2% 和 103.8%, 土壤总磷酸酶活性较单一芦竹和构树修复分别显著 ($P < 0.05$) 提高 32.2% 和 30.1%。原因可能与植物多样性可有效富集土壤中重金属并可提高植物在土壤中的根际分泌物的种类有关^[38], 从而进一步提高污染土壤的酶活性和微生物多样性。与 Yang 等^[28] 得出的植物间种可降低 Pb 对土壤脲酶和微生物的影响结果一致。本研究表明, 芦竹与构树、桑树间种可有效改善污染土壤的酶活性。

3 结论

(1) 在重金属污染土壤上, 芦竹与构树、桑树间种不会影响植物的正常生长, 并可降低重金属对植物叶片光合作用的不利影响。芦竹与构树、桑树间种修复 270 d 后, 构树叶片叶绿素 a 和类胡萝卜素含量, 以及桑树叶片叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均与修复初期 (90 d) 相比无显著差异, 而且桑树叶片叶绿素 a、叶绿素 b 以及类胡萝卜素含量较单种桑树分别显著 ($P < 0.05$) 提高 99.1%、177.1% 和 119.9%, 同时桑树整株生物量显著 ($P < 0.05$) 提高 26.1%。

(2) 芦竹与构树、桑树间种可提高植物对重金属的富集能力。芦竹-构树间种下植物地上部分的 Pb 和 Zn 累积总量较单一芦竹分别显著 ($P < 0.05$) 提高 171% 和 124%; 芦竹-桑树间种下植物地上部分 As 累积总量较单一桑树显著 ($P < 0.05$) 提高 150%, Pb 累积总量较单一芦竹显著 ($P < 0.05$) 提高 76.5%。

(3) 芦竹与构树、桑树间种可改善污染土壤酶活性。芦竹-构树和芦竹-桑树间种修复下土壤蔗糖酶、酸性磷酸酶和总磷酸酶活性较对照处理分别明显提高 1.66 ~ 3.15 倍、2.29 ~ 5.71 倍和 1.10 ~ 1.77 倍, 且脲酶、酸性磷酸酶和总磷酸酶活性显著高于部分单一植物修复。然而, 污染土壤中 Cd 和 Zn 主要以酸可提取态、Pb 主要以可还原态形式存在, 因此必须辅助物理或化学措施来强化植物间种对重金属污染土壤的生态修复潜力。

参考文献:

- [1] Xue S G, Shi L Z, Wu C, *et al.* Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and their exposure effects on human HEPG2 and keratinocyte cell-lines [J]. *Environmental Research*, 2017, **156**: 23-30.
- [2] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. *地理学报*, 2008, **63**(1): 3-11.
Guo Z H, Xiao X Y, Chen T B, *et al.* Heavy metal pollution of soils and vegetables from midstream and downstream of Xiangjiang river[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, **63**(1): 3-11.
- [3] 封文利, 郭朝晖, 史磊, 等. 控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 399-405.
Feng W L, Guo Z H, Shi L, *et al.* Distribution and accumulation of cadmium in paddy soil and rice affected by pollutant sources control and improvement measures [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 399-405.
- [4] Wang L, Ji B, Hu Y H, *et al.* A review on in situ phytoremediation of mine tailings [J]. *Chemosphere*, 2017, **184**: 594-600.
- [5] 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.
- [6] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. *科学通报*, 2002, **47**(3): 207-210.
Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, *et al.* Effect of phosphorus on arsenic accumulation in As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its implication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(2): 1876-1879.
- [7] Yang X E, Long X X, Ye H B, *et al.* Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance) [J]. *Plant and Soil*, 2004, **259**(1-2): 181-189.
- [8] Zeng P, Guo Z, Cao X, *et al.* Phytostabilization potential of ornamental plants grown in soil contaminated with cadmium [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, **20**(4): 311-320.
- [9] 曹霞, 郭朝晖, 肖细元, 等. 海桐 (*Pittosporum tobira*) 对污染土壤中镉的耐受和吸收特征[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(4): 627-632.
Cao X, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Cadmium tolerance and uptake characteristics in *Pittosporum tobira* in contaminated soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(4): 627-632.
- [10] 曾鹏, 曹霞, 郭朝晖, 等. 珊瑚树 (*Viburnum odoratissimum*) 对污染土壤中镉的耐受和富集特征[J]. *生态学报*, 2017, **37**(19): 6472-6479.
Zeng P, Cao X, Guo Z H, *et al.* Tolerance and accumulation characteristics of *Viburnum odoratissimum* to cadmium in contaminated soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(19): 6472-6479.
- [11] 曾鹏, 曹霞, 郭朝晖, 等. Cd 污染土壤景观修复植物筛选研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(4): 691-698.

- Zeng P, Cao X, Guo Z H, *et al.* Potential of ornamental plants for remediating soil polluted with cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(4): 691-698.
- [12] 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.
- [13] Tang Y, He J, Yu X N, *et al.* Intercropping with *Solanum nigrum* and *Solanum photeinocarpum* from two ecoclimatic regions promotes growth and reduces cadmium uptake of eggplant seedlings[J]. *Pedosphere*, 2017, **27**(3): 638-644.
- [14] Wang S Q, Wei S H, Ji D D, *et al.* Co-planting Cd contaminated field using hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. through interplant with low accumulation Welsh onion [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, **17**(9): 879-884.
- [15] 黑亮, 吴启堂, 龙新宪, 等. 东南景天和玉米套种对 Zn 污染污泥的处理效应[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 852-858.
- Hei L, Wu Q T, Long X X, *et al.* Effect of co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage sludge [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(4): 852-858.
- [16] 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 等. 植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4305-4312.
- Wei Z B, Guo X F, Wu Q T, *et al.* Continuous remediation of heavy metal contaminated soil by co-cropping system enhanced with chelator [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4305-4312.
- [17] 郭朝晖, 王凤永, 宋杰, 等. 污染土壤—芦竹—水体中 As, Cd, Pb 和 Zn 的渗漏与迁移特征[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, **42**(8): 2184-2192.
- Guo Z H, Wang F Y, Song J, *et al.* Leaching and transferring characteristics of arsenic, cadmium, lead and zinc in contaminated soil-giant reed-water system[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, **42**(8): 2184-2192.
- [18] Zhao X L, Liu J F, Xia X L, *et al.* The evaluation of heavy metal accumulation and application of a comprehensive bio-concentration index for woody species on contaminated sites in Hunan, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(7): 5076-5085.
- [19] Zhao S L, Shang X J, Duo L. Accumulation and spatial distribution of Cd, Cr, and Pb in mulberry from municipal solid waste compost following application of EDTA and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(2): 967-975.
- [20] 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.
- [21] Wenzel W W, Kirchbaumer N, Prohaska T, *et al.* Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2001, **436**(2): 309-323.
- [22] Guo Z H, Megharaj M, Beer M, *et al.* Heavy metal impact on bacterial biomass based on DNA analyses and uptake by wild plants in the abandoned copper mine soils [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(17): 3831-3836.
- [23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- Li H S. Techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [24] 郭朝晖, 廖柏寒, 黄昌勇. 模拟酸雨下 Cd、Cu、Zn 复合污染对土壤微生物量碳和酶活性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, **9**(4): 382-385.
- Guo Z H, Liao B H, Huang C Y. Microbial biomass carbon and enzyme activities in the tested soil treated with Cd, Cu and Zn by simulated acid rain [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2003, **9**(4): 382-385.
- [25] 梁开明, 章家恩, 杨滔, 等. 水稻与慈姑间作栽培对水稻病虫害和产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, **22**(7): 757-765.
- Liang K M, Zhang J E, Yang T, *et al.* Effect of rice/arrowhead (*Sagittaria sagittifolia*) intercropping on diseases, pests and yield of rice [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, **22**(7): 757-765.
- [26] Wang K, Huang H G, Zhu Z Q, *et al.* Phytoextraction of metals and rhizoremediation of PAHs in co-contaminated soil by co-planting of *Sedum alfredii* with ryegrass (*Lolium perenne*) or castor (*Ricinus communis*) [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2013, **15**(3): 283-298.
- [27] Jiang C A, Wu Q T, Sterckeman T, *et al.* Co-planting can phytoextract similar amounts of cadmium and zinc to monocropping from contaminated soils [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(4): 391-395.
- [28] Yang R Y, Tang J J, Chen X, *et al.* Effects of coexisting plant species on soil microbes and soil enzymes in metal lead contaminated soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, **37**(3): 240-246.
- [29] Lu M, Zhang Z Z. Phytoremediation of soil co-contaminated with heavy metals and deca-BDE by co-planting of *Sedum alfredii* with tall fescue associated with *Bacillus cereus* JP12 [J]. *Plant and Soil*, 2014, **382**(1-2): 89-102.
- [30] Desjardins D, Brereton N J B, Marchand L, *et al.* Complementarity of three distinctive phytoremediation crops for multiple-trace element contaminated soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **610-611**: 1428-1438.
- [31] 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 等. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(9): 985-990.
- Jiang C A, Wu Q T, Wu S H, *et al.* Effect of co-cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(9): 985-990.
- [32] 林立金, 罗丽, 杨代宇, 等. 混种富集植物对牛膝菊镉积累的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, **28**(6): 319-324.
- Lin L J, Luo L, Yang D Y, *et al.* Effects of intercropping with accumulator on cadmium accumulation of *Galinsoga parviflora* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(6): 319-324.
- [33] Yang J X, Yang J, Huang J. Role of co-planting and chitosan in phytoextraction of As and heavy metals by *Pteris vittata* and castor bean-A field case [J]. *Ecological Engineering*, 2017, **109**: 35-40.

- [34] Wan X M, Lei M, Chen T B, *et al.* Intercropped *Pteris vittata* L. and *Morus alba* L. presents a safe utilization mode for arsenic-contaminated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **579**: 1467-1475.
- [35] 黄细花, 卫泽斌, 郭晓方, 等. 套种和化学淋洗联合技术修复重金属污染土壤[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 3067-3074.
Huang X H, Wei Z B, Guo X F, *et al.* Metal removal from contaminated soil by co-planting phytoextraction and soil washing [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(12): 3067-3074.
- [36] 韩存亮, 黄泽宏, 肖荣波, 等. 粤北某矿区周边镉锌污染稻田土壤间作植物修复研究[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(1): 158-165.
Han C L, Huang Z H, Xiao R B, *et al.* Field phytoremediation of cadmium and zinc contaminated paddy soil around a mining area in northern Guangdong province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(1): 158-165.
- [37] 谭建波, 湛方栋, 刘宁宁, 等. 续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征与 Cd 形态分布状况研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(1): 53-60.
Tan J B, Zhan F D, Liu N N, *et al.* Soil chemical properties and Cd form distribution in *Vicia faba* and *Sonchus asper* intercropping system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(1): 53-60.
- [38] Gao Y, Miao C Y, Xia J, *et al.* Plant diversity reduces the effect of multiple heavy metal pollution on soil enzyme activities and microbial community structure [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, **6**(2): 213-223.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2017年10月31日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2016年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2015年度总被引频次10 024,影响因子1.878,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the δ ¹⁵ N of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α-HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshuitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)