

 方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响

周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨洽, 张成*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要:以城市脱水污泥为研究对象, 设置2种处理(A组: 添加水稻生物炭; B组: 未添加生物炭)进行污泥堆肥, 并将污泥堆肥产品进行土地利用, 研究污泥堆肥及其利用过程重金属(Cd、Pb、Cu、Zn、Ni)的变化特征及其钝化效果, 同时考察添加生物炭的影响作用. 结果表明: 在污泥堆肥及其短期利用过程中, 除Ni外, 重金属总量没有显著变化, 水稻生物炭对5种重金属总量的影响也不显著. 污泥堆肥过程对5种重金属具有一定钝化作用, 添加生物炭能显著降低重金属有效态含量, 并具有显著的钝化效果($P < 0.05$), 钝化率达到16.39%~43.10%, 其中Zn、Ni的钝化效果更为显著; 而未添加生物炭的污泥堆肥过程对重金属有效态的钝化效果不显著($P > 0.05$). 施用污泥堆肥会增加土壤重金属含量, 短期内, 生物炭对污泥堆肥土壤利用后的重金属有效态具有一定影响, 但效果不显著.

关键词:污泥堆肥; 土地利用; 重金属有效态; 生物炭; 钝化

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0987-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201804184

Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost

ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, YANG Yu-han, ZHANG Cheng*

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The effects of biochar addition to compost on change characteristics and passivation effect of heavy metals (Cd, Pb, Cu, Zn, Ni) were investigated during the process of sludge composting with two different composts (group A: with biochar; group B: without biochar) and land application of compost. The results indicated that the total amount of heavy metals (except Ni) did not change significantly during the process of sludge composting and land application of compost. Additionally, biochar addition had little effect on the total amount of heavy metals. During the sludge composting process, five heavy metals (Cd, Pb, Cu, Zn, Ni) were passivated. Sludge composting with the addition of biochar can decrease the available contents of heavy metals, and the passivation effect of heavy metals was significant ($P < 0.05$). The passivation rate of the five examined heavy metals (Cd, Pb, Cu, Zn, Ni) ranged from 16.39%~43.10%, and the passivation effect for Zn and Ni was more significant. However, the passivation effect was not significant in the sludge composting process without the addition of biochar ($P > 0.05$). The concentrations of heavy metals in soil increased with the application of sewage sludge compost products. In the short term, biochar had a certain passivation effect on the available heavy metals in soils with sludge compost application, but the effect was not significant.

Key words: sludge compost; land use; available heavy metals; biochar; passivation

随着我国工业化与城市化速度加快, 我国污水处理量日益增加, 相应地污泥产量也逐年上升, 2016年污泥产量已突破4 500万 t. 国家新环境保护法及《水污染防治行动计划》强调了我国污泥处理处置的迫切性, 堆肥及其土地利用被认为是一种具有成本效益的有机废物处理和再利用的方式^[1], 但其含有重金属可能造成环境的二次污染, 因而限制了污泥堆肥土地利用的推广和应用. 研究表明, 在堆肥过程中添加一些外源物质可降低污泥中重金属有效态含量. 如杨坤等^[2]通过在堆肥处理中施用不同钝化剂, 发现重金属钝化效果不同, 如膨润土和磷矿粉对交换态铅的钝化效果较好, 硅藻土对交换态镉的钝化效果较好. 在污泥堆肥过程添加粉煤灰和生石灰, 能降低重金属的生物有效性, 增加Zn、Ni的残渣态含量^[3]. 近年来, 生物炭作为一种新型高效安全的功能型材料, 被广泛应用于土壤修复、环境安全等领域^[4, 5]. 生物炭

直接施入土壤后, 短期能显著降低土壤重金属有效态含量^[6]. 不同用量生物炭均能降低土壤Pb和Cd的含量^[7], 秸秆生物炭能显著降低土壤中Cu的酸溶态^[8]. 生物炭在堆肥过程中也具有一定的重金属钝化效果, 侯月卿等^[9]在猪粪堆肥过程中加入不同生物质炭, 发现花生壳炭、玉米秸秆炭和木屑炭分别对Cu、Pb、Cd具有较好的钝化效果. Zhou等^[10]发现木屑炭和麦草炭也能钝化猪粪堆肥过程中的Pb、Cu等重金属. Chen等^[11]在猪粪堆肥中加入竹炭后, 发现对于Cu和Zn的钝化效果较为显著. 这些研究表明生物炭对重金属的形态变化具有一定的影响作用, 但关于生物炭在

收稿日期: 2018-04-23; 修订日期: 2018-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208426); 西南大学本科生创新基金项目(20172402001)

作者简介: 周楫(1998~), 女, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 747594755@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhcheng@126.com

城市污泥堆肥过程中对重金属的影响作用,以及将污泥堆肥施入土壤后,生物炭是否会持续产生钝化作用还缺乏研究. 本试验将城市污泥与秸秆进行混合堆肥,并添加水稻生物炭作为调理剂,堆肥后再进行土地利用,研究污泥堆肥及其短期利用过程重金属的变化特征,同时分析添加水稻生物炭对重金属的影响及钝化作用,以期为进一步开展城市污泥土地利用的重金属污染控制和环境风险研究提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 污泥堆肥试验设计

污泥堆肥试验于 2015 年 4 月进行,以城市脱水污泥和玉米秸秆作为原料,以水稻生物炭作为调理剂,按照质量比分别将污泥: 秸秆: 生物炭 = 20: 5: 1 (A 组处理)、污泥: 秸秆 = 4: 1 (B 组处理) 充分混合,调节含水率在 60% ~ 70% 后放入自制堆肥箱 (图 1),堆肥原料总质量为 50 kg,体积约为 0.279 m³. 简易堆肥箱为 PVC 材料外壳以及泡沫箱制成内层制作而成,有效尺寸为 0.90 m × 0.45 m × 0.71 m (长 × 宽 × 高),有效体积约为 0.288 m³. 堆肥期间采用强制通风 + 人工翻堆的方式进行处理^[12],

前 2 周每周翻堆 2 次,随后每周翻堆 1 次;以 50 L·min⁻¹ 的小型鼓风机供气,采用通气管按照设计量进行分流,设置循环通风/关闭为 20 min/20 min,通风量约为 0.1 m³·(min·m³)⁻¹.

堆肥所用污泥来自重庆市北碚区某污水处理厂脱水污泥,玉米秸秆来源于重庆市西南大学试验农场 (剪碎至 2 ~ 3 cm). 水稻生物炭购于商丘市三利新能源有限公司,为水稻秸秆在 500℃ 条件下热解炭化 3 h,破碎后过 0.35 mm 筛所得. 堆肥物料基本理化性质见表 1.

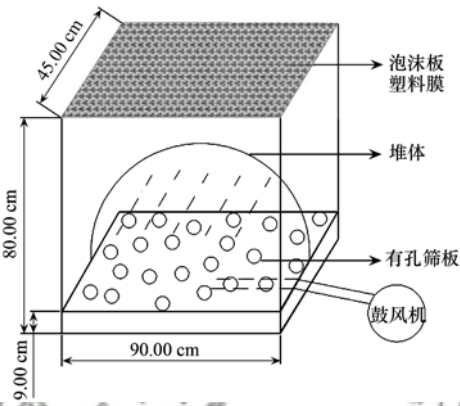


图 1 堆肥装置示意
Fig. 1 Sketch map of composting process

表 1 堆肥物料基本理化性质
Table 1 Basic characteristics of composting materials

名称	pH	含水率/%	TC/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	TOC/g·kg ⁻¹
原污泥	7.23	81.02	598.49	27.79	301.67
玉米秸秆	—	15.03	492.07	8.92	419.63
水稻生物炭	10.24	2.22	578.35	7.68	249.60
A 组处理	8.01	66.08	536.55	25.30	353.61
B 组处理	7.82	67.71	512.23	24.12	312.76

1.2 堆肥土地利用试验设计

经检测,上述污泥堆肥所得的堆肥产品重金属含量 (表 2) 均能达到《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284-84),因此进一步进行土地利用试验. 试验于 2015 年 7 月 10 日 ~ 8 月 14 日于西南大学试验大棚中进行,试验周期为 36 d^[13],共设置 7 个处理: CK (不施肥)、A1、A2、A3 (施肥量分别为 0.40、0.80、1.19 kg·m⁻²)、B1、B2、B3 (施肥量分别为 0.41、0.83、1.24 kg·m⁻²). 供试植物为耐热且早熟的不结球白菜 (*Brassica campestris* L. ssp.

chinensis Makino), 供试地点位于西南大学试验大棚. 每块试验田为 1 m²,试验田之间用 PVC 板隔开深入土壤表层 30 cm,隔绝地表径流,处理之间间隔约 1 m,避免不同处理组之间相互干扰. 将磨细的堆肥产品均匀撒在各土壤样方表面后混合均匀,并浇水,后期不追肥. 种植密度为 40 穴·m⁻²,每穴 3 株,每天上午 08:00 前浇水灌溉,作物成熟后收割^[13]. 按照传统管理模式: 施肥、间苗、翻耕、灌溉等管理菜地. 供试土壤和污泥堆肥基本理化性质见表 2.

表 2 供试土壤和污泥堆肥基本理化性质
Table 2 Basic characteristics of tested soil and sludge compost

类别	pH	TC/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹
原污泥	7.23	598.49	27.79	1.87	83.60	96.46	989.76	46.32
供试土壤	7.93	64.40	1.39	0.64	19.38	38.58	58.50	24.90
A 组堆肥	7.58	414.98	24.34	1.29	46.73	74.92	469.67	45.41
B 组堆肥	7.33	338.73	24.92	1.31	44.19	76.81	483.67	43.01

1.3 样品采集与分析

1.3.1 堆肥固体样品

分别于堆肥初期和堆肥结束后采集堆肥固体样品。采用剖面采样法, 采集不同深度的固体样品, 混合均匀后取 300 g 左右带回实验室, 测定堆体基本性质及重金属含量。堆体温度分别在堆体四周 4 个点、中心部位选择 3 个固定点, 深入堆料 30 cm 内测定, 取平均值。

1.3.2 土壤样品

在土地利用初期和利用结束时分别采集土壤样品。土壤样品的采集选取作物种植附近的表层土壤 (0 ~ 10 cm)。土壤每次采集样品约 250 g 左右, 各处理组每次采集 3 个样品; 采集的样品放入样品袋中, 放入冻干机中冻干, 研磨并过 100 目尼龙筛测定。堆肥固体样品基本性质、土壤基本性质及重金属含量测定方法参见文献[14, 15]。其中, 重金属有效态含量采用二乙基三胺五乙酸 (DTPA) 浸提原子吸收分光光度计测定。

1.4 重金属的钝化效果

污泥堆肥及其土地利用过程中, 重金属的钝化效果主要通过对重金属有效态的钝化来体现。重金属有效态的钝化效果计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{C} \times 100\% \quad (1)$$

$$N_i = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, P_i 为各重金属有效态含量占其总量的质量分数(%); C_i 为重金属的有效态含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C 为重金属总量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); N_i 为重金属有效态钝化率(%); P_1 为钝化前重金属有效态含量占总量的质量分数(%); P_2 为钝化后重金属有效态含量占总量的质量分数(%)。

本研究采用空白试验、平行试验和标准样品进行质量控制, 所测浓度值与标准值相差均在 6% 以内, Cd、Pb、Cu、Zn、Ni 的加标回收率为 88.6% ~ 104.8%。采用 SPSS 20.0 和 Origin 9.0 进行统计分析和作图。

2 结果与讨论

2.1 污泥堆肥基本性质变化特征

两种处理堆体温度及环境温度变化如图 2。两种处理的堆体温度在堆肥开始时急速上升, 快速进入高温期 (50 ~ 70℃), 高温持续时间均超过 1 周, 且添加生物炭的堆体高温持续时间更长。10 d 后堆体温度逐渐下降, 并在 1 个月后逐渐达到环境温度, 堆肥时间持续 50 d。这可能是生物炭的多孔结

构为氧气在堆体内的运输和分布提供有利条件, 更利于微生物的活动释放热量, 提高堆体温度, 加快堆肥的腐熟进程^[16]。两种处理 pH 值均表现为先升高后下降的趋势, 这主要是由于前期堆体中含氮有机物不断降解, 产生的氨逐渐积累导致 pH 值增大^[17]。随着堆体温度下降, 有机物分解产生有机酸, pH 值开始下降。

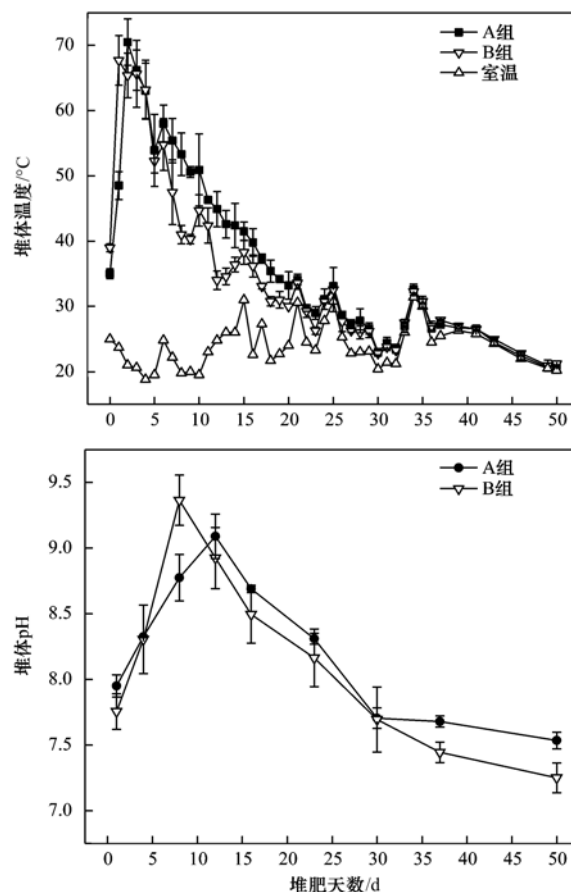


图2 堆肥过程温度和 pH 变化情况

Fig. 2 Changes in temperature and pH during composting

2.2 生物炭对污泥堆肥过程重金属总量的影响

污泥堆肥前后, 两种处理重金属总量变化如表 3 所示。污泥堆肥产品重金属 (Cd、Pb、Cu、Zn、Ni) 含量均低于《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284-84) 最低限值。在堆肥前后, 两种处理堆体中 Ni 含量分别降低了 19% 和 16%。其他 4 种重金属 (Cd、Pb、Cu、Zn) 含量略有变化, 但总体变化不显著 ($P > 0.05$)。在污泥堆肥过程中, 重金属的形态会发生变化^[18], 但其总量难以被降解, 重金属依然存在于堆肥产品中。如冯春等^[19]研究发现, 污泥堆肥后, 堆体中交换态 Cu、Pb、Zn、Cd 和 As 的含量显著降低, 其它形态含量升高, 但重金属总量并未显著降低或升高。

2.3 生物炭对污泥堆肥过程重金属有效态的影响和钝化

A、B 两种处理堆肥前后重金属有效态含量有

表 3 堆肥前后重金属含量变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 3 Heavy metal changes before and after the composting process/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理组	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
A 组堆肥前	1.290 ± 0.007	46.73 ± 4.53	74.92 ± 4.00	469.67 ± 7.73	45.41 ± 2.40
A 组堆肥后	1.270 ± 0.021	48.07 ± 1.85	73.58 ± 6.41	474.42 ± 11.31	36.79 ± 1.56
B 组堆肥前	1.314 ± 0.039	44.19 ± 3.62	76.81 ± 2.96	483.64 ± 8.79	43.01 ± 2.07
B 组堆肥后	1.322 ± 0.021	44.11 ± 5.11	78.66 ± 2.96	479.59 ± 12.93	35.95 ± 1.13

一定变化(见表4),其中A组处理重金属有效态含量下降显著,而B组处理变化不显著.根据堆肥前后不同重金属有效态含量占总量的质量分数来计算2种堆肥处理过程重金属的钝化效果(见表4),添加生物炭(A组处理)对污泥堆肥过程5种重金属有效态均有较好的钝化效果,Cd、Pb、Cu、Zn、Ni的钝化率分别为:23.54%、16.39%、27.16%、43.10%、37.82%,其中,Zn、Ni钝化效果尤为显著.与A组处理相比,未添加生物炭的污泥堆肥(B组处理)对重金属钝化效果不显著,其中Cd、Pb、Zn钝化率仅为1.65%~8.12%,Cu、Ni有效态所

占质量分数反而增加了3.76%、1.17%.

这主要是A组处理堆肥中添加了水稻生物炭,其具有较大的比表面积、较强的阳离子交换能力等性质,与污泥混合后能够增强透气性,为堆肥中微生物提供适宜生存繁殖的环境^[20],也可通过吸附作用降低重金属的溶解,有效地降低重金属在环境中的迁移^[21].同时生物炭呈碱性,含有碱性物质,其有机质含量高,大量添加使用后有利于提高pH值^[22,23],使重金属的残渣态含量显著升高,生物可利用态下降,因而A组堆肥重金属钝化效果较好.

表 4 堆肥前后重金属有效态含量及钝化率

Table 4 Available contents and passivating effect of heavy metals in sludge composting

重金属	取样时期	A 组			B 组		
		含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分配率/%	钝化率/%	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分配率/%	钝化率/%
Cd	堆肥前	0.182 ± 0.007	14.11	—	0.167 ± 0.004	12.71	—
	堆肥后	0.137 ± 0.012	10.79	23.54	0.158 ± 0.008	11.95	5.96
Pb	堆肥前	5.29 ± 0.54	11.32	—	4.93 ± 0.36	11.16	—
	堆肥后	4.55 ± 0.48	9.47	16.39	4.84 ± 0.21	10.97	1.65
Cu	堆肥前	26.46 ± 1.10	35.32	—	20.45 ± 0.50	26.62	—
	堆肥后	18.93 ± 0.82	25.73	27.16	21.73 ± 1.66	27.63	-3.76
Zn	堆肥前	87.78 ± 4.27	18.69	—	63.32 ± 2.36	13.09	—
	堆肥后	50.45 ± 1.89	10.63	43.10	57.62 ± 3.37	12.01	8.23
Ni	堆肥前	5.60 ± 0.14	12.33	—	4.21 ± 0.31	9.79	—
	堆肥后	2.82 ± 0.08	7.67	37.84	3.56 ± 0.16	9.90	-1.17

2.4 生物炭对施用堆肥后土壤重金属总量的影响

施用污泥堆肥后,土壤重金属总量变化见表5.各处理重金属含量均高于CK组处理,可见施加污泥堆肥后,污泥中的重金属元素也随之进入土壤,导致土壤重金属含量增加.随着施肥量的增加,土壤重金属总量有一定变化,但重金属含量与污泥堆肥施用量没有显著的相关关系($P>0.05$),这可能是由于施肥时仅将堆肥产品均匀撒在土壤表面(0~5 cm),而下层土壤(>5 cm)中没有混入堆肥,导致土壤取样混合分析时重金属变化不显著.施加污泥堆肥后,土壤中5种重金属除Cd外,其余均未超过国家土壤环境质量(GB 15618-1995)二级标准.试验组中Cd含量超过了土壤环境质量二级标准(pH<7.5时,二级标准为 $0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;pH>7.5时,二级标准为 $0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),这主要是由于供试土壤Cd含量较高($0.64\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且原污泥

中Cd含量也较高($1.87\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),导致堆肥产品Cd含量依然较高,施入土壤后可能会对土壤造成二次Cd污染.

本试验结束后,大部分处理土壤重金属含量均呈降低趋势(降低量<14%),一方面可能是由于试验田未隔绝水分下渗,在定期浇水过程中,土壤中的重金属随着水分下渗向地下迁移;另一方面可能是由于植物从土壤中富集了部分重金属,但是由于作物生长周期较短,因而短期内富集土壤中的重金属较少.

2.5 生物炭对施用堆肥后土壤重金属有效态的影响

有研究表明,土壤中重金属的迁移性和生物毒性主要取决于重金属的形态分布,而不仅仅是其总量^[24].土地利用前后,土壤中各重金属有效态含量如表6和表7所示,随着施肥量的增加,土壤重金

表 5 不同处理组土壤重金属总量变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 5 Heavy metal contents in soils with different treatments/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

重金属	取样时期	CK 组	A1 组	A2 组	A3 组	B1 组	B2 组	B3 组
Cd	利用初期	0.64 ± 0.10	0.83 ± 0.09	0.89 ± 0.74	0.87 ± 0.08	0.88 ± 0.12	0.93 ± 0.13	0.94 ± 0.07
	利用结束	0.66 ± 0.06	0.78 ± 0.06	0.86 ± 0.11	0.83 ± 0.11	0.76 ± 0.04	0.95 ± 0.10	0.92 ± 0.06
Pb	利用初期	19.38 ± 1.68	24.35 ± 0.92	26.61 ± 1.31	27.48 ± 2.13	22.39 ± 2.35	21.94 ± 4.60	24.36 ± 3.04
	利用结束	19.80 ± 2.67	23.49 ± 2.16	24.50 ± 0.80	23.90 ± 1.53	20.63 ± 1.54	20.86 ± 2.83	22.26 ± 0.70
Cu	利用初期	38.58 ± 3.69	42.30 ± 4.26	45.86 ± 3.00	44.53 ± 2.94	43.77 ± 2.88	47.36 ± 3.02	48.94 ± 2.98
	利用结束	38.20 ± 2.03	40.84 ± 1.43	42.47 ± 1.47	42.47 ± 3.01	40.36 ± 3.98	44.43 ± 2.36	47.83 ± 2.87
Zn	利用初期	58.50 ± 3.14	73.76 ± 2.38	80.69 ± 4.97	88.73 ± 6.55	80.76 ± 2.80	90.58 ± 5.33	95.56 ± 4.49
	利用结束	57.42 ± 3.06	74.14 ± 2.03	83.93 ± 4.24	80.71 ± 1.33	75.30 ± 5.40	85.11 ± 3.74	82.45 ± 6.24
Ni	利用初期	24.90 ± 1.48	26.76 ± 0.97	26.58 ± 2.04	27.81 ± 1.90	25.79 ± 1.65	26.38 ± 2.37	26.14 ± 0.76
	利用结束	25.49 ± 1.78	25.42 ± 1.41	26.01 ± 2.24	26.95 ± 1.22	26.94 ± 1.04	25.34 ± 2.07	25.81 ± 3.08

表 6 A 组处理土壤重金属有效态含量及分配率

Table 6 Available contents of heavy metals in soils from Group A

重金属	取样时期	A1 组		A2 组		A3 组	
		含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分配率/%	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分配率/%	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分配率/%
Cd	利用初期	0.082 ± 0.004	9.88	0.076 ± 0.011	8.54	0.088 ± 0.006	10.11
	利用结束	0.076 ± 0.010	9.74	0.070 ± 0.007	8.22	0.085 ± 0.004	10.24
Pb	利用初期	1.27 ± 0.17	5.22	1.43 ± 0.29	5.37	1.49 ± 0.16	5.42
	利用结束	1.17 ± 0.31	4.98	1.28 ± 0.31	5.22	1.30 ± 0.27	5.44
Cu	利用初期	11.63 ± 0.30	27.49	12.42 ± 0.21	27.08	11.98 ± 0.48	26.90
	利用结束	10.66 ± 0.92	26.10	10.81 ± 0.55	25.45	10.85 ± 0.53	25.55
Zn	利用初期	6.98 ± 0.17	9.46	6.58 ± 0.08	8.15	8.13 ± 0.31	9.16
	利用结束	6.68 ± 0.36	9.01	6.74 ± 0.09	8.03	7.13 ± 0.27	8.83
Ni	利用初期	1.33 ± 0.05	4.97	1.34 ± 0.04	5.04	1.36 ± 0.10	4.89
	利用结束	1.25 ± 0.14	4.92	1.27 ± 0.11	4.88	1.24 ± 0.08	4.60

表 7 B 组处理土壤重金属有效态含量及分配率

Table 7 Available contents of heavy metals in soils from Group B

重金属	取样时期	B1 组		B2 组		B3 组	
		含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分配率/%	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分配率/%	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分配率/%
Cd	利用初期	0.092 ± 0.013	10.45	0.087 ± 0.006	9.35	0.092 ± 0.015	9.79
	利用结束	0.080 ± 0.005	10.53	0.091 ± 0.012	9.58	0.087 ± 0.008	9.46
Pb	利用初期	1.36 ± 0.23	6.07	1.54 ± 0.10	7.02	1.53 ± 0.20	6.28
	利用结束	1.23 ± 0.11	5.96	1.47 ± 0.23	7.05	1.46 ± 0.08	6.56
Cu	利用初期	13.89 ± 1.11	31.73	15.25 ± 0.71	32.20	14.70 ± 1.04	30.04
	利用结束	12.86 ± 0.81	31.86	14.15 ± 0.34	31.85	13.89 ± 0.52	29.04
Zn	利用初期	8.24 ± 0.69	10.20	9.00 ± 0.50	9.94	10.03 ± 0.54	10.50
	利用结束	7.62 ± 0.61	10.12	8.45 ± 0.31	9.93	8.90 ± 0.20	10.79
Ni	利用初期	1.25 ± 0.06	4.85	1.24 ± 0.04	4.70	1.33 ± 0.10	5.09
	利用结束	1.28 ± 0.07	4.75	1.21 ± 0.09	4.78	1.30 ± 0.07	5.04

属有效态含量有一定变化,但统计发现,污泥堆肥施用量与土壤重金属有效态含量也没有显著的相关关系($P > 0.05$)。同时,各处理重金属有效态含量在试验前后没有显著变化。总体来看,在污泥堆肥利用初期与利用试验结束后,各处理土壤中 5 种重金属有效态含量占其总量的质量分数相差很小,也没有显著变化。生物炭对污泥堆肥土壤利用后的重金属有效态没有显著影响,表明污泥堆肥与土壤混

合后的重金属未被钝化。

有研究表明,在土壤中直接添加生物炭会钝化土壤中的重金属有效态。如刘晶晶等^[25]在土壤中直接施加 5% 的稻草炭,能有效降低土壤中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的有效态含量,几种重金属有效态降幅达 34.5% ~ 52.5%。王红等^[26]发现水葫芦炭对土壤中 Zn 和 Pb 的吸附率分别达到 21.83% 和 44.57%。生物炭施入土壤可通过物理吸附、离子

交换、沉淀络合等交互作用机制^[27,28], 显著降低土壤重金属的有效态, 减少它们在环境介质中的迁移性, 从而降低土壤重金属的生物毒性. Méndez 等^[29]的研究也发现生物炭能降低土壤中重金属含量, 主要是由于有机质对土壤重金属的矿化作用, 从而降低重金属的生物有效性.

而在本试验中, 污泥堆肥处理阶段生物炭对重金属的钝化效果较好, 而污泥堆肥后再进行短期土壤利用的过程重金属难以继续被钝化. 这可能是由于在污泥堆肥过程中, 添加的生物炭已经和污泥中的重金属发生物理吸附、离子交换等结合作用, 钝化了污泥中的重金属, 因而将污泥堆肥施入土壤后可利用的生物炭量减少; 同时, 由于土壤利用时间和试验周期较短, 导致在土壤利用过程中生物炭难以再继续钝化重金属. 因此, 需要进一步研究其长期效应.

3 结论

水稻生物炭对污泥堆肥及其利用过程中 5 种重金属(Cd、Pb、Cu、Zn、Ni)总量没有显著影响, 但添加生物炭能显著降低堆肥过程重金属有效态含量, 对污泥堆肥过程中的重金属具有较好的钝化效果, 且对 Zn、Ni 的钝化作用尤为显著. 生物炭对后续土壤利用后的重金属有效态具有一定影响, 但效果不显著. 总体来说, 生物炭对城市污泥堆肥处理过程中的重金属具有较好的钝化效果, 但在短期土壤利用过程难以继续钝化重金属.

参考文献:

- [1] 葛晓, 卞新智, 王艳, 等. 城市生活污泥堆肥过程中重金属钝化规律及影响因素的研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 502-507.
- [2] 杨坤, 李军营, 杨宇虹, 等. 不同钝化剂对猪粪堆肥中重金属形态转化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (6): 43-48.
- [3] 孟国欣, 查同刚, 巩潇, 等. 复合添加剂对污泥堆肥化重金属形态及生物有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(1): 182-190.
- [4] Cemansky R. Agriculture: state-of-the-art soil [J]. Nature, 2015, 517(7534): 258-260.
- [5] Waqas M, Nizami A S, Aburiazaiza A S, et al. Optimization of food waste compost with the use of biochar [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 261: 70-81.
- [6] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 251-256.
- [7] 李衍亮, 黄玉芬, 魏帆, 等. 施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2233-2239.
- [8] Jiang J, Xu R K. Application of crop straw derived biochars to Cu(II) contaminated ultisol: evaluating role of alkali and organic functional groups in Cu(II) immobilization [J]. Bioresource Technology, 2013, 133: 537-545.
- [9] 侯月卿, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭和腐植酸类对猪粪堆肥重金属的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 205-215.
- [10] Zhou H B, Meng H B, Zhao L X, et al. Effect of biochar and humic acid on the copper, lead, and cadmium passivation during composting [J]. Bioresource Technology, 2018, 258: 279-286.
- [11] Chen Y X, Huang X D, Han Z Y, et al. Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting [J]. Chemosphere, 2010, 78(9): 1177-1181.
- [12] 向秋洁, 杨雨滢, 张成, 等. 不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4390-4397.
- [13] 余亚伟, 杨雨滢, 张成, 等. 施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 405-411.
- [14] 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, 1999.
- [15] 王社平, 程晓波, 姚岚, 等. 城市污泥堆肥及农用前后重金属形态变化的研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(23): 116-121.
- [16] Spokas K A, Cantrell K B, Novak J M, et al. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration

- [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(4): 973-989.
- [17] 温沁雪, 曹永森, 陈志强. 猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4405-4411.
Wen Q X, Cao Y S, Chen Z Q. Removal of chlortetracycline and morphological changes in heavy metals in swine manure using the composting process[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4405-4411.
- [18] 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 等. 鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4352-4358.
Bu G J, Yu J, Di H H, *et al.* Influence of organic matter evolution during composting on the bioavailability of heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4352-4358.
- [19] 冯春, 杨光, 杜俊, 等. 污水污泥堆肥重金属总量及形态变化[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(1): 97-102.
Feng C, Yang G, Du J, *et al.* Study on the changes of total contents and the status of heavy metals for sewage sludge composting[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(1): 97-102.
- [20] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **139**(4): 469-475.
- [21] 张小凯, 何丽芝, 陆扣萍, 等. 生物质炭修复重金属及有机物污染土壤的研究进展[J]. *土壤*, 2013, **45**(6): 970-977.
Zhang X K, He L Z, Lu K P, *et al.* Use of biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants: a review[J]. *Soils*, 2013, **45**(6): 970-977.
- [22] 高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 等. 生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 361-367.
Gao R L, Tang M, Fu Q L, *et al.* Fractions transformation of heavy metals in compound contaminated soil treated with biochar, montmorillonite and mixed addition[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 361-367.
- [23] Agrafioti E, Kalderis D, Diamadopoulos E. Arsenic and chromium removal from water using biochars derived from rice husk, organic solid wastes and sewage sludge[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, **133**: 309-314.
- [24] Carbonell G, Torrijos M, de Imperial R M, *et al.* Effects of municipal solid waste compost and mineral fertilizer amendments on soil properties and heavy metals distribution in maize plants (*Zea mays* L.) [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(10): 1614-1623.
- [25] 刘晶晶, 杨兴, 陆扣萍, 等. 生物质炭对土壤重金属形态转化及其有效性的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3679-3687.
Liu J J, Yang X, Lu K P, *et al.* Effect of bamboo and rice straw biochars on the transformation and bioavailability of heavy metals in soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3679-3687.
- [26] 王红, 夏雯, 卢平, 等. 生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3944-3952.
Wang H, Xia W, Lu P, *et al.* Adsorption characteristics of biochar on heavy metals (Pb and Zn) in soil[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3944-3952.
- [27] Lu K P, Yang X, Shen J J, *et al.* Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn to *Sedum plumbizincicola* [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **191**: 124-132.
- [28] Canali S, Diacono M, Ciaccia C, *et al.* Alternative strategies for nitrogen fertilization of overwinter processing spinach (*Spinacia oleracea* L.) in southern Italy [J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, **54**: 47-53.
- [29] Méndez A, Gómez J, Paz-Ferreiro J, *et al.* Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil[J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(11): 1354-1359.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)