

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 李振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果

段然^{1,2}, 胡红青¹, 付庆灵^{1*}, 寇长林²

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002)

摘要: 采用室内培养实验, 利用生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤进行修复, 比较两者不同配比对土壤重金属镉镍的修复效果及对土壤无机氮和微生物量氮 (MBN) 转化的影响。结果表明, 随着草酸活化磷矿粉和生物炭施用量的增加, 土壤 pH 逐渐增加, 镉和镍均由弱酸提取态逐渐向可还原态、可氧化态和残渣态转化, 生物有效性降低。其中, C50P3 (50 g·kg⁻¹ 生物炭与 3 g·kg⁻¹ 草酸活化磷矿粉) 配施的修复效果最好, 弱酸提取态 Ni 占全量的质量分数降低了 37.0%, 残渣态 Ni 增加了 14.8%, 弱酸提取态 Cd 含量占全量的质量分数降低了 40.2%, 残渣态增加了 35.2%。施用修复剂 40 d 后, 相较于 C0P0 (空白对照) 处理, C50P0 (单施 50 g·kg⁻¹ 生物炭) 处理与 C0P3 (单施 3 g·kg⁻¹ 草酸活化磷矿粉) 处理微生物量氮含量均分别增加了 1.5 倍和 1 倍; 铵态氮含量分别减少了 12.5% 和 6.4%, 硝态氮含量分别降低了 11.6% 和 10.2%。综合比较可知, 生物炭和草酸活化磷矿粉配施对土壤重金属镉镍复合污染的修复效果要优于单施, 且 50 g·kg⁻¹ 生物炭与 3 g·kg⁻¹ 草酸活化磷矿粉 (C50P3) 配施的修复效果最好, 修复剂的加入促进了土壤无机氮向有机氮的转化。

关键词: 土壤; 镉镍复合污染; 生物炭; 草酸活化磷矿粉; 化学修复

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4836-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704028

Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock

DUAN Ran^{1,2}, HU Hong-qing¹, FU Qing-ling^{1*}, KOU Chang-lin²

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China; 2. Institute of Plant Nutrition and Agricultural Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Taking soil contaminated with a combination of Cd and Ni as the research objective, biochar, and oxalic acid activated phosphate rock (APR) were applied both together and separately for the remediation of this contaminated soil. The effects of different ratios of amendments on the remediation of Cd and Ni heavy metals in the soil and on inorganic nitrogen and microbial biomass nitrogen (MBN) in the soil were compared. The results show that an increasing amount of biochar and APR, increases the soil pH gradually and acid-extractable Cd and Ni are gradually transformed into reducible, oxidable and residual Cd and Ni, resulting in a reduction in Cd and Ni bioavailability. After 40 days incubation, the acid extractable Ni decreased by 37.04% with a 14.8% increase in residual Ni, and acid extractable Cd decreased 40.28% with a 35.20% increase in residual Cd with the amendment of C50P3 (Applying 50 g·kg⁻¹ biochar and 3 g·kg⁻¹ APR) when compared to C0P0 treatment (Applying nothing). Furthermore, the MBN content for C50P0 (Applying 50 g·kg⁻¹ biochar only) and C0P3 (Applying 3 g·kg⁻¹ APR only) increased by 1.5 and 1 times, respectively, while the content of ammonium nitrogen decreased by 12.5% and 6.4%, respectively and the content of nitrate nitrogen decreased by 11.6% and 10.2%, respectively. This comparison shows that the combined effect of the application of biochar and APR is superior to each respective separate treatment. A mixture of 50 g·kg⁻¹ of biochar and 3 g·kg⁻¹ of APR (C50P3) demonstrates the best effect on the remediation of the Cd and Ni in soil. Furthermore, the application of amendments promoted the transformation of inorganic nitrogen into organic nitrogen.

Key words: soil; Cd/Ni compound contamination; biochar; APR; chemical remediation

当前, 我国土壤环境总体状况堪忧, 其中重金属污染较为突出, 2014 年全国土壤污染状况调查结果显示, 土地污染超标比例达 16.1%, 镉和镍的污染点位超标率较高, 分别为 7.0% 和 4.8%^[1]。我国 26 个城市土壤样品的重金属含量分析表明, 各金属平均含量均超过了土壤环境背景值, 并且以镉污染最为严重, 是背景值的 91.4 倍^[2]。镍的污染也不容忽视, 有研究发现电镀厂附近土壤中的镍含量最高达

2 900 mg·kg⁻¹, 平均值为 136.4 mg·kg⁻¹, 最大超标 19.3 倍^[3]。土壤重金属污染通常表现为复合污染, 即存在 2 种及 2 种以上影响土壤环境质量水平的污

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-05-15

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2015BAD05B02); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0800805)

作者简介: 段然 (1991 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为土壤化学, E-mail: yucca1130@163.com

* 通信作者, E-mail: fuqingling@mail.hzau.edu.cn

染物,相较于单一的重金属污染,复合污染土壤中的多种重金属之间会发生相互作用,如加和效应、拮抗效应和协同效应,对作物及土壤微生物产生更为复杂的影响,使修复更具挑战性^[4]. 另外,土壤中重金属可以通过影响硝化微生物活性抑制潜在硝化速率,从而显著影响硝化作用^[5,6],因此硝化作用作为对重金属最敏感的微生物过程之一,常被用来研究土壤重金属污染的危害与风险评价^[7].

目前,镉镍复合污染土壤的修复方法主要有电动修复、化学淋洗和化学钝化等^[8,9],其中化学钝化修复因投入低、效率高、修复快速、操作简单等优越性,对于大面积污染土壤的修复具有较好的应用前景. 有研究发现,生物炭(biochar)因其比表面积大、有机质含量高性质而被广泛用于土壤改良,可以降低重金属在土壤中的有效性和移动性,减少植物对重金属的吸收,保障粮食安全^[8]. 磷矿粉不仅是一种缓效磷肥,因其能使土壤的 pH 值增大,促进重金属转化为沉淀,降低重金属的有效性,也可作为一种土壤重金属污染的修复材料^[9],而经过草酸活化的磷矿粉,可以释放出更多的磷酸根离子,对土壤中重金属有更好的钝化效果^[10].

对于复合污染土壤,单独使用一种钝化剂一般较难达到修复的要求,多种钝化剂联合使用是一个较好的解决方法,近年来的一些研究也证明了这一点^[11,12]. 研究表明,将 FeCl_3 、 AlCl_3 、 CaCl_2 、高岭石、碳酸钙和磷酸二氢钙等和生物炭复合后均增强了生物炭的抗氧化性和稳定性,增加了其在土壤中的保留时间^[13,14]. 本实验选择草酸活化磷矿粉和生物炭为修复材料,将两者以不同比例配合施用于镉镍复合污染土壤中,通过比较污染土壤中镉和镍形态的转化及土壤中无机态氮和微生物量氮含量的变化,选出修复效果最佳的配施浓度,以期为其推广应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自湖北省咸宁市咸安区贺胜桥(北纬 $\text{N}29^{\circ}39'$,东经 $\text{E}114^{\circ}06'$)的林地,所采集土样为 0~20 cm 的表层土. 土壤 pH 值为 4.58,有机质含量为 $10.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮、全磷和速效磷含量分别为 0.91、0.33 和 $2.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 将新鲜土样剔除杂物及残留根系后,风干后磨细,过 20 目筛后备用.

采用室内培养实验,取 18 个 500 mL 聚丙烯烧杯,称重,每个烧杯中加入上述风干过筛土 320 g,

以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液的形式向土样中添加外源氮 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,控制含水量为田间持水量的 45%. 培养 7 d 后,分别以 $3\text{CdSO}_4\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 溶液和 $\text{NiSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液的形式向培养土样中加入镉和镍,使土壤中总镉、镍含量分别达到 $33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,控制含水量为田间持水量的 50%,老化 32 d,获得污染土壤.

1.2 供试修复剂

草酸活化磷矿粉的制备:称取一定量磷矿粉(购于湖北省钟祥市盐矿床),液固比 10:1,施用量为 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的草酸于 $28^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 恒温箱中活化 6 d 后,置于烘箱中 $50^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 烘干磨细,过 100 目筛,备用^[15]. 供试草酸活化磷矿粉基本理化性质见表 1.

表 1 供试草酸活化磷矿粉的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of activated phosphate rock		
测定指标	数值	测定方法
pH 值(水土比 20:1)	3.52	电位法
速效磷(P_2O_5)/%	12.60	HCl- H_2SO_4 法
全磷(P_2O_5)/%	19.20	HClO_4 - H_2SO_4 消煮-钼锑抗比色法
全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.44	半微量开氏法
比表面积/ $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	2.38	N 吸附静态容量法(BET)

生物炭购于浙江省生物炭工程技术研究中心,原材料为水稻稻壳,500℃下缺氧热解制备,使用前过 100 目筛,干燥保存,备用. 供试生物炭基本理化性质见表 2.

表 2 供试生物炭的基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of biochar		
测定指标	数值	测定方法
pH 值(水土比 20:1) ¹⁾	7.25	电位法
全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	23.26	半微量开氏法
全碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	330.00	重铬酸钾容量法-外加热法
比表面积/ $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	101.17	N 吸附静态容量法(BET)
NH_4^+ -N/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.74	KCl 浸提法
NO_3^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.77	KCl 浸提法
灰分/%	51.67	直接灰化法

1) 参考 GB/T 12496.20-90 木质活性炭实验方法 pH 值的测定

1.3 实验设计

实验选用两种修复材料(生物炭 C 和草酸活化磷矿粉 P),分别设置 3 个浓度水平,共 9 种修复方案,处理设计见表 3,室温培养,控制含水量为田间持水量的 50%,加入修复剂后模拟一个淹水落干的过程. 培养 40 d 后,采集土壤样品,一部分风干过筛备用,其余保存于 -20°C 用于相关生物指标的测定.

表 3 不同配比修复剂实验处理/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Experimental treatments of the different amendments/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理组号	COP0	COP1	COP3	C20P0	C20P1	C20P3	C50P0	C50P1	C50P3
生物炭	0	0	0	20	20	20	50	50	50
草酸活化磷矿粉	0	1	3	0	1	3	0	1	3

1.4 样品分析与统计

土壤pH采用玻璃电极法(FE20 Plus,梅特勒-托利多),水土质量比为 2.5:1.形态分级实验则参照欧共体标准测量与检测局 BCR 法^[16]进行.土壤中各形态 Ni 含量用火焰原子吸收光谱仪(AA240FS,美国瓦里安)测定,Cd 含量用石墨炉原子吸收光谱仪(GTA120,美国瓦里安)测定.土壤基本理化性质按照土壤农化常规分析方法^[17]测定.用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液浸提新鲜土壤,采用连续流动分析仪(AA3,德国水尔),测定土壤浸提液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度.采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 方法^[18]提取,用过硫酸钾氧化-流动注射仪法^[19]测定土壤微生物量氮.实验结果为 3 组重复的平均值($\text{RSD}<5\%$).采用 Microsoft Excel 和 SPSS 19.0 软件对实验数据进行统计和分析,采用 Origin 9.0 软件进行作图处理.

2 结果与分析

2.1 施用不同配比修复剂后 pH 值的变化

从图 1 可以看出,各处理 pH 值相较于 COP0 (未添加修复剂的空白处理)均显著增加.且当生物炭加入量一定时,随着草酸活化磷矿粉添加浓度的增加,pH 逐渐增加;当草酸活化磷矿粉加入量一定时,随着生物炭添加浓度的增加,pH 也是逐渐增加.COP0 的 pH 值为 4.47,C50P3 处理的 pH 值最高,达

到 4.96.说明向镉镍复合污染土壤中加入生物炭和草酸活化磷矿粉,均可以使土壤的 pH 升高,且随着修复剂加入量增加而增大.

2.2 施用不同配比修复剂对镍形态的影响

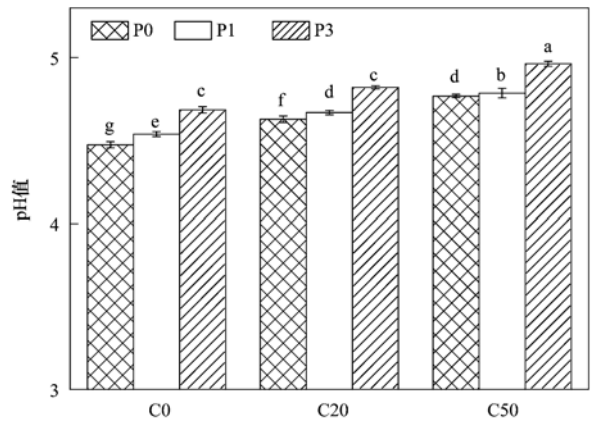
由图 2(a)可知,同空白对照 COP0 相比,施用修复剂处理中弱酸提取态 Ni 含量均显著降低,各处理间无显著差异;可还原态 Ni 含量[图 2(b)]整体上随生物炭和草酸活化磷矿粉的加入量而呈增加趋势,其中 C50P1 处理的可还原态 Ni 含量最高;可氧化态 Ni 含量[图 2(c)]随着生物炭和草酸活化磷矿粉的施用量的增加而增加.残渣态 Ni 含量[图 2(d)]虽然整体上也随修复剂施用量增加而呈增加趋势,但是除了 C50P0 处理外,其他各处理的残渣态 Ni 的含量的差异并不显著.

2.3 施用不同配比修复剂对镍形态分布的影响

图 3 所示为不同处理土壤中 Ni 的形态分布.同 COP0 相比,施用修复剂后,各处理弱酸提取态 Ni 所占的百分比(质量分数)均有所下降;单施生物炭处理中,弱酸提取态所占的百分比随加入生物炭的量有较明显的下降;生物炭施用量一定时,随草酸活化磷矿粉的加入弱酸提取态 Ni 所占百分比明显下降.残渣态 Ni 所占的比重在生物炭加入量为 $50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下,出现了较明显的增加.所以,施用修复剂促进了弱酸提取态 Ni 向可氧化态 Ni 和可还原态 Ni 转化,且随着使用量的增加,转化效果越明显,生物炭和草酸活化磷矿粉配施的效果更显著.其中, $50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭和 $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的草酸活化磷矿粉处理(C50P3)的转化效果最显著,土壤的弱酸提取态 Ni 占全量的百分比由 65.7%降低至 28.7%,残渣态由 13.8%增加至 28.6%.

2.4 施用不同配比修复剂对镉形态的影响

由图 4(a)可见,随着生物炭和草酸活化磷矿粉施用量的增加,弱酸提取态 Cd 含量呈减少的趋势.其中,与添加修复剂的空白处理 COP0 相比,C50P0 组的弱酸提取态 Cd 含量降低了 43.1%,COP3 处理降低了 36.6%. $50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 生物炭和 $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 草酸活化磷矿粉处理(C50P3)弱酸提取态 Cd 含量最低;在草酸活化磷矿粉施用量相同时,可还原态 Cd 含



图中的误差线为标准差($n=3$),不同字母代表处理间有显著差异($P<0.05$),下同

图 1 不同处理中土壤的 pH 值

Fig. 1 The pH values of soil in different treatments

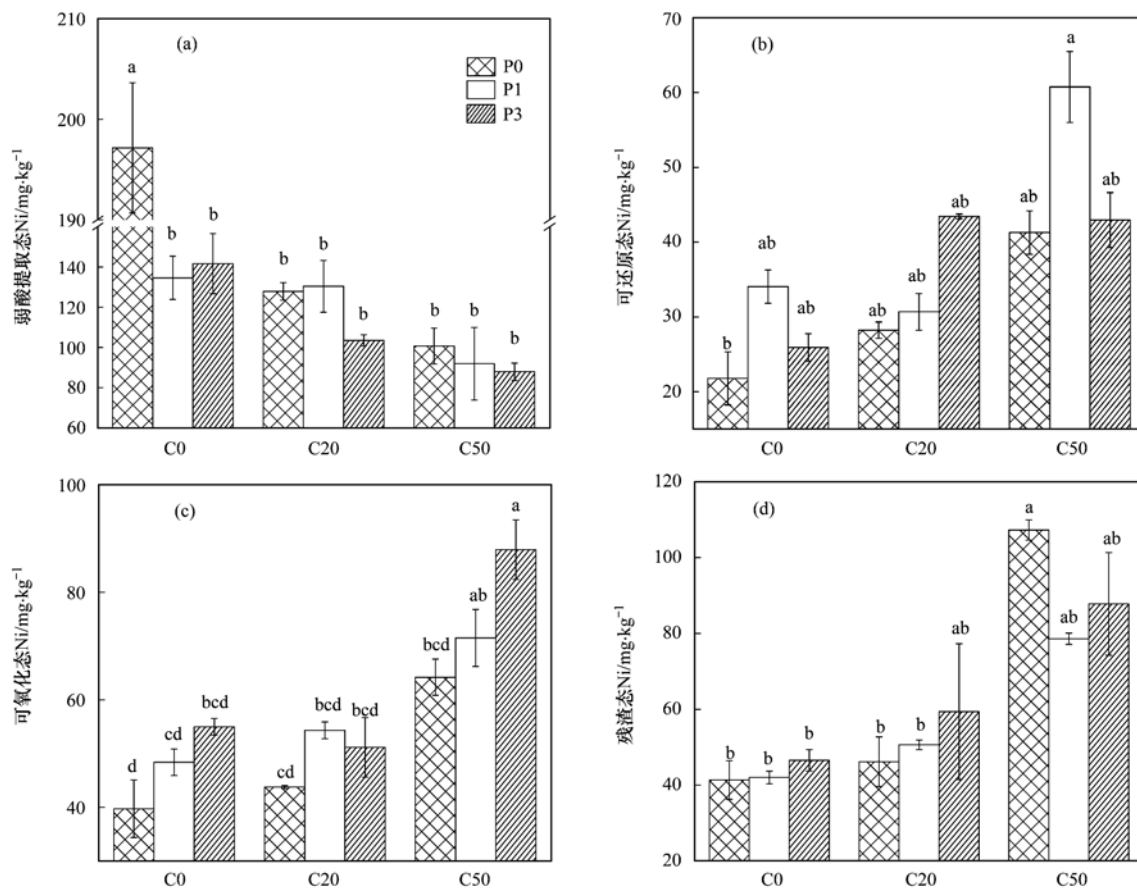


图2 施用不同配比修复剂土壤镍形态的变化

Fig. 2 Content of different Ni fractions in soil of different treatments after incubation

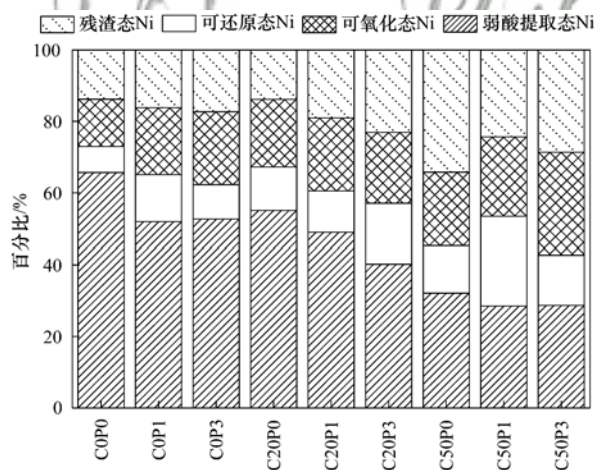


图3 施用不同配比修复剂土壤中镍形态分布的变化

Fig. 3 Ni fractionation in contaminated soils of different treatments after incubation

量[图4(b)]随加入生物炭浓度的增加基本呈增加趋势;可氧化态Cd[图4(c)]随着生物炭施用量的增加呈现先减少后增加的趋势;由图4(d)可知,除了C0P1处理外,其余各处理残渣态Cd均显著增加,且随着修复剂施用量的增加而增大;其中,C20P3时残渣态含量最大,相较于对照组C0P0增

加了4.15倍。

2.5 施用不同配比修复剂对镉形态分布的影响

图5为不同处理土壤中各形态镉的分布。由C0P0~C50P0各个处理弱酸提取态Cd含量分别为86.3%、87.1%、61.9%、68.0%、58.3%、51.5%、57.8%、52.2%、46.1%,结合图4可以发现,随生物炭和草酸活化磷矿粉加入量的增加,弱酸提取态Cd所占的百分比显著降低。同时,可还原态Cd和残渣态Cd所占百分比随生物炭和草酸活化磷矿粉的添加也呈现一个上升趋势。所以,生物炭和草酸活化磷矿粉能促进弱酸提取态Cd向可还原态Cd和残渣态Cd的转化,且两者配施的效果要优于单施。其中,C20P3与C50P3处理的转化效果较为显著,两者效果相近,其残渣态Cd所占百分比均占到全Cd含量的40%左右。

2.6 生物炭和草酸活化磷矿粉之间的交互作用

生物炭和草酸活化磷矿粉单一施用均对土壤镉镍复合污染有较显著的修复效果(表4),且修复效果也随着施用量的增加而增强。单一施用,生物炭对土壤镉和镍污染的修复效果均要优于草酸活化

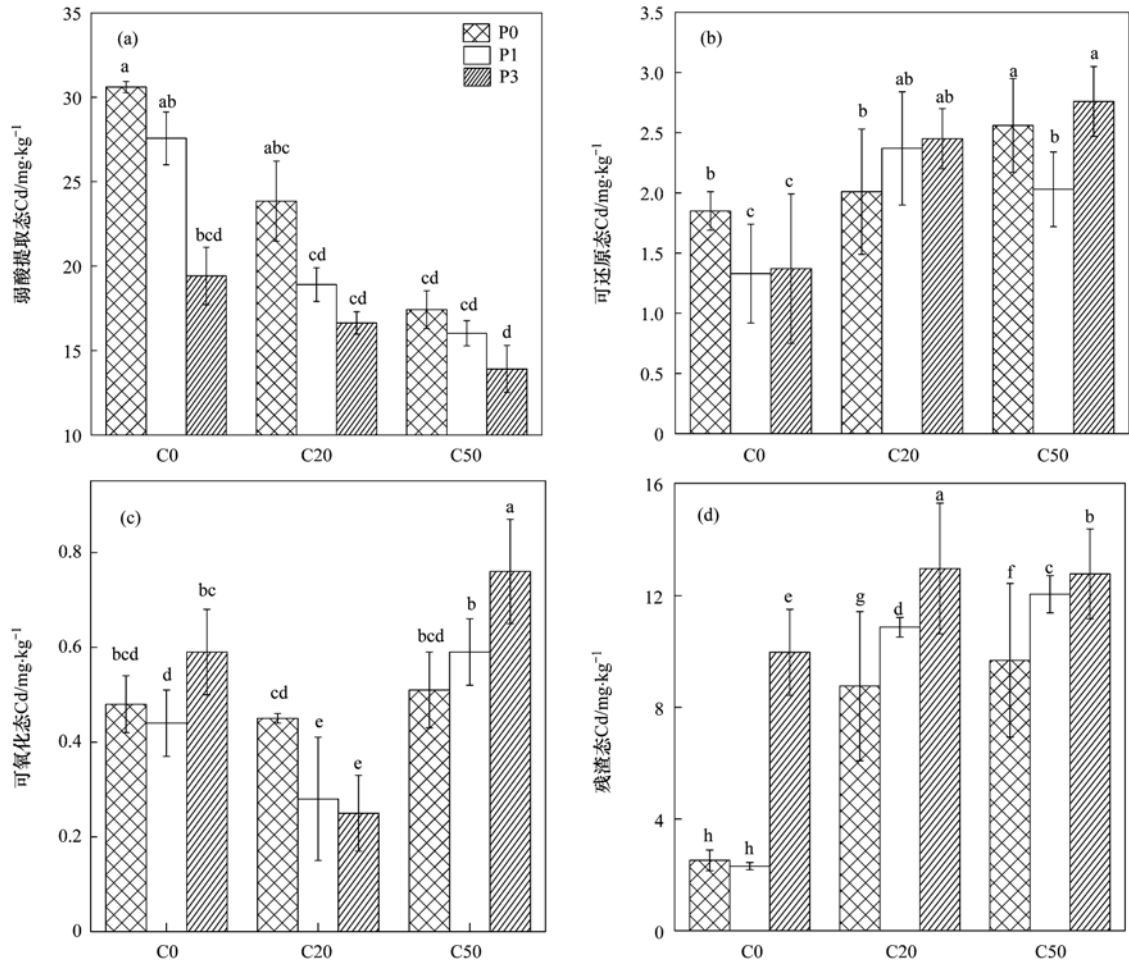


图 4 施用不同配比修复剂土壤中镉形态的变化

Fig. 4 Content of different Cd fractions in soil with different treatments after incubation

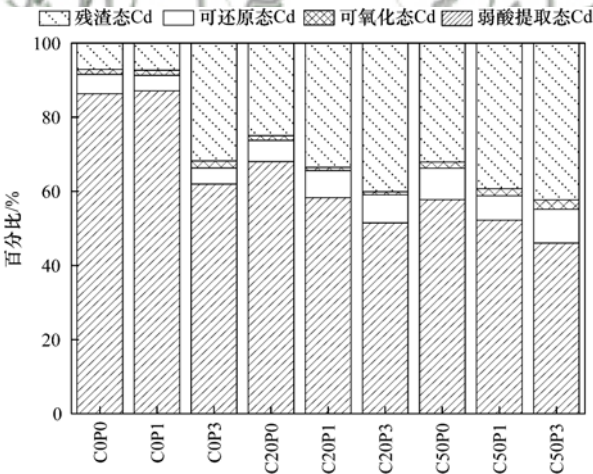


图 5 施用不同配比修复剂土壤中镉形态的分布的变化

Fig. 5 Cd fractionation in contaminated soils with different treatments after incubation

磷矿粉,对 4 种形态的镍含量的变化都具有统计意义;在生物炭和草酸活化磷矿粉配施的情况下,二者存在交互作用,在对可氧化态和残渣态 Cd 的变化上,两种材料的交互作用极显著。

2.7 施用不同配比修复剂对土壤中硝态氮和铵态氮含量的影响

土壤的硝化作用是铵态氮转化为硝态氮的过程。如图 6 所示,加入生物炭浓度一定时,随着草酸活化磷矿粉的施用量增加,土壤中铵态氮含量呈下降趋势;施用草酸活化磷矿粉浓度一定时,随着土壤中加入生物炭的浓度的升高,土壤中铵态氮含量逐渐减小。C50P0 处理中铵态氮含量相较于空白处理下降了 12.5%,C0P3 处理的铵态氮含量降低了 6.4%。生物炭和草酸活化磷矿粉配施的铵态氮含量下降幅度均大于单施处理组别。当施用生物炭浓度一定时,随着加入土壤中草酸活化磷矿粉浓度的升高,硝态氮含量均有所减少;施用草酸活化磷矿粉浓度一定时,随着加入土壤生物炭的浓度的升高,硝态氮含量基本呈下降趋势。在单施生物炭时,硝态氮随加入生物炭施用量的增加变化最显著。相较于空白对照 C0P0,C50P0 处理中的硝态氮含量降低了 11.6%,C0P3 处理的硝态氮含量降低了 10.2%。

表 4 不同修复剂对各形态 Ni、Cd 影响的主体间效应检验¹⁾

Table 4 Inter subjectivity effect test of the different remediation for Ni and Cd

元素	形态	生物炭	草酸活化磷矿粉	生物炭 × 草酸活化磷矿粉
Ni	弱酸提取态	24.32 **	6.01 **	2.59
	可还原态	8.41 **	0.59	1.24
	可氧化态	29.03 **	7.82 **	1.19
	残渣态	15.25 **	0.31	1.34
Cd	弱酸提取态	11.20 **	5.82 *	0.71
	可还原态	2.69	0.25	0.39
	可氧化态	34.03 **	3.53	6.73 **
	残渣态	33 129.54 **	16 174.32 **	2 887.24 **

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

2.8 施用不同配比修复剂对土壤微生物量氮的影响

不同的生态环境条件会影响土壤微生物量氮的数量,土壤微生物对重金属复合污染所做出的反应属于群体性反应,因此微生物量氮可以直观地反映土壤中微生物的活性. 图 7 所示为加入生物炭和草酸活化磷矿粉复合修复剂培养 40 d 后的微生物量氮含量变化,从中可以看出,生物炭施用量为 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,随着草酸活化磷矿粉浓度的增加,微生物量氮显著增加;生物炭施用量为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,随着草酸活化磷矿粉浓度的增加,微生物量氮先减少后增加. 当草酸活化磷矿粉施用量一

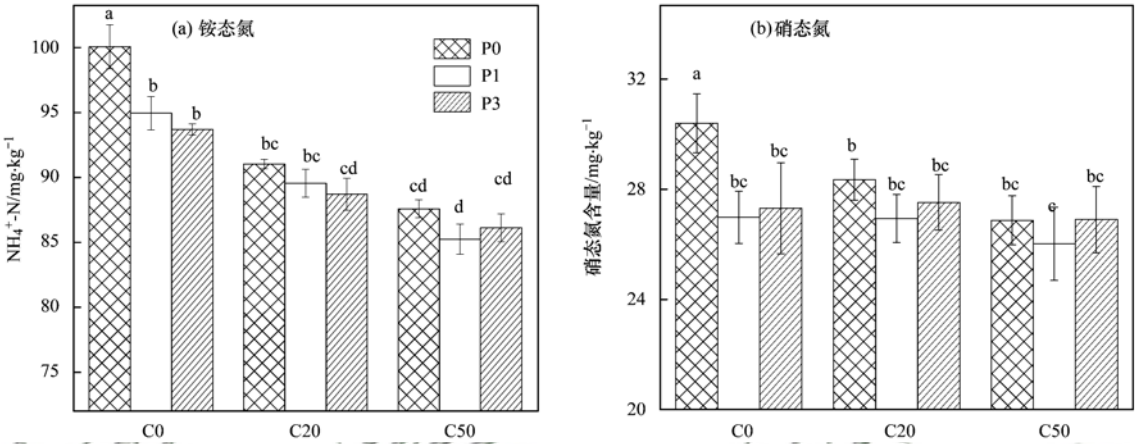


图 6 施用修复剂 40 d 土壤中铵态氮和硝态氮含量的变化

Fig. 6 Changes of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in soil after 40 d incubation

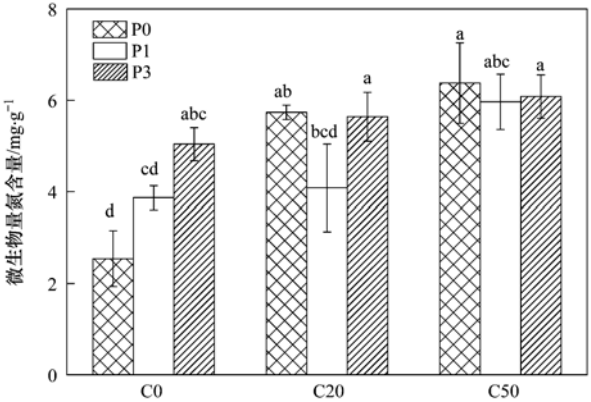


图 7 施用修复剂 40 d 土壤中的微生物量氮含量变化

Fig. 7 Changes of microbial biomass nitrogen content in soil after 40 d incubation

定时,随着生物炭施用量的增加,微生物量氮含量呈增加趋势. 其中, C20P3 处理和 C50P3 处理的微生物量氮含量最高.

3 讨论

3.1 生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍污染土壤的修复效果

土壤 pH 是影响土壤中重金属有效性的重要因

素,一般 pH 越低,重金属的有效性越强,反之,重金属有效性越低. 实验中,添加生物炭和草酸活化磷矿粉后,土壤 pH 的均显著升高(图 1). 生物炭因为其含有 $-\text{COO}-$ ($-\text{COOH}$)、 $-\text{O}-$ ($-\text{OH}$) 等碱性功能团可提高土壤 pH 值^[20]. 磷矿粉施入土壤后释放的磷酸二氢根可以置换土壤胶体表面的羟基,导致土壤 pH 升高^[21],草酸活化磷矿粉经草酸活化后可以释放更多地磷酸二氢根、钙离子和镁离子. 土壤 pH 升高后生物炭表面的可变电荷增加,阳离子吸附能力增强,同时土壤中氢离子浓度的降低,减弱其与重金属离子的竞争,促进重金属氢氧化物和碳酸盐沉淀产生,使重金属与土壤中的有机质、铁锰氧化物等结合更稳固,降低重金属的移动性^[22]. 生物炭表面的羟基、羧基、羰基等活性官能团对多种重金属离子具有吸附固定作用^[23]. 草酸活化磷矿粉释放出的磷酸根阴离子等可以和镉、镍等重金属离子发生络合作用与沉淀作用,降低土壤中酸提取态重金属离子的含量^[24]. 生物炭和草酸活化磷矿粉之间可能存在一定的协同作用,生物炭不仅可以提高土壤 pH 和 CEC 来提高土壤磷素的有效

性,还能通过表层阳离子与磷之间的成键作用吸附磷酸根离子,降低土壤磷素流失,促进了重金属的沉淀作用,增强草酸活化磷矿粉的钝化效果^[25,26]。因此,生物炭和草酸活化磷矿粉可以通过吸附、络合、沉淀等反应使重金属由水溶性、交换性等有效态向可还原态、可氧化态和残渣态等生物难利用态转变,对土壤重金属镉镍复合污染土壤有显著的修复效果,且两者配施的效果要优于单施。

本实验所用的搅拌混匀方法在实际应用中应采用均匀播撒修复剂加深耕代替,灌溉方式尽量采用滴灌和喷灌,具体翻耕深度、灌水量及时间需结合实际情况进一步研究;实际应用过程中土壤环境更为复杂,有可能存在多种重金属复合污染、有机无机复合污染,这都可能会给修复效果带来偏差。

3.2 生物炭和草酸活化磷矿粉对重金属污染土壤中氮素转化的影响

生物炭和草酸活化磷矿粉的施用可以促进铵态氮和硝态氮减少和微生物量氮增加。一方面,生物炭和草酸活化磷矿粉可以提升土壤 pH,有利于生物炭对重金属的吸附和络合以及草酸活化磷矿粉对重金属的离子的沉淀作用,使重金属镉镍的移动性和有效性显著降低,减缓了对土壤微生物活性的抑制和毒害,促进微生物量氮含量的增加^[27];另一方面,生物炭较大的比表面,可有效吸附土壤中的铵态氮和硝态氮,提高氨氧化细菌的丰度^[30,31],一定程度上保护了酶的结合位点,提高了酶的活性,促进硝化作用。

施用生物炭和草酸活化磷矿粉后,土壤 pH 值增大,重金属镉镍的移动性和有效性显著降低,减缓了对土壤微生物活性的抑制和毒害。土壤中含磷物质的施用,降低了重金属的生物有效性,促进微生物量氮含量的增加^[27]。生物炭可增加对土壤养分的吸附交换,降低土壤养分淋失损失,增加对土壤氮素的固持效果^[28,29]。生物炭较大的比表面,可有效吸附土壤中的铵态氮和硝态氮,提高氨氧化细菌的丰度,一定程度上保护了酶的结合位点,提高了酶的活性,促进硝化作用^[30,31]。

4 结论

(1)添加生物炭和草酸活化磷矿粉能提高土壤 pH,促进弱酸提取态镉镍向可氧化态、可还原态和残渣态等更稳定的形态的转化,降低土壤中 Cd 和 Ni 的有效性。其中 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 生物炭和 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 草酸活化磷矿粉配施对土壤中 Cd 和 Ni 的钝化效果

最好。

(2)在重金属污染土壤的修复过程中,土壤铵态氮、硝态氮含量均明显减少,生物量氮显著增加,即修复剂的施用促进了土壤中有機态氮及无机态氮之间的转化。

(3)生物炭和草酸活化磷矿粉配施效果优于单施,生物炭的存在一定程度上增强草酸活化磷矿粉对土壤中镉和镍的钝化效果,两者在钝化土壤中重金属镉镍上表现为协同作用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 秦余丽,熊仕娟,徐卫红,等. 不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 4030-4043.
Qin Y L, Xiong S J, Xu W H, *et al.* Effect of nano zeolite on chemical fractions of Cd in soil and uptake by Chinese cabbage at different soil pH and cadmium levels [J]. Environmental Science, 2016, 37(10): 4030-4043.
- [3] 陈志良,周建民,蒋晓璐,等. 典型电镀污染场地重金属污染特征与环境风险评价[J]. 环境工程技术学报, 2014, 4(1): 80-84.
Chen Z L, Zhou J M, Jiang X L, *et al.* Pollution characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in typical electroplating contaminated site [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2014, 4(1): 80-84.
- [4] 赵祥伟,骆永明,滕应,等. 重金属复合污染农田土壤的微生物群落遗传多样性研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 186-191.
Zhao X W, Luo Y M, Teng Y, *et al.* Genetic diversity of microbial communities in farmland soils contaminated with mixed heavy metals [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(2): 186-191.
- [5] Liu Y R, Zheng Y M, Shen J P, *et al.* Effects of mercury on the activity and community composition of soil ammonia oxidizers [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2010, 17(6): 1237-1244.
- [6] Subrahmanyam G, Hu H W, Zheng Y M, *et al.* Response of ammonia oxidizing microbes to the stresses of arsenic and copper in two acidic alfisols [J]. Applied Soil Ecology, 2014, 77: 59-67.
- [7] Smolders E, Brans K, Coppens F, *et al.* Potential nitrification rate as a tool for screening toxicity in metal-contaminated soils [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2001, 20(11): 2469-2474.
- [8] Méndez A, Gómez A, 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.
- [9] 徐明岗,张青,王伯仁,等. 改良剂对重金属污染红壤的修复效果及评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 121-126.
Xu M G, Zhang Q, Wang B R, *et al.* Evaluation the remediation effects of amendments in heavy metal polluted red soil [J]. Plant

- Nutrition and Fertilizer Science, 2009, **15**(1): 121-126.
- [10] 许学慧, 姜冠杰, 胡红青, 等. 草酸活化磷矿粉对矿区污染土壤中 Cd 的钝化效果[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(10): 2005-2011.
- Xu X H, Jiang G J, Hu H Q, *et al.* The immobilization effect of oxalic acid activated phosphate rocks applied to the Cd contaminated farmland soil in mining area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(10): 2005-2011.
- [11] 王林, 徐应明, 梁学峰, 等. 新型杂化材料钝化修复镉铅复合污染土壤的效应与机制研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 581-588.
- Wang L, Xu Y M, Liang X F, *et al.* Effect and mechanism of immobilization of cadmium and lead compound contaminated soil using new hybrid material[J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 581-588.
- [12] Ruttens A, Mench M, Colpaert J V, *et al.* Phytostabilization of a metal contaminated sandy soil. I: influence of compost and/or inorganic metal immobilizing soil amendments on phytotoxicity and plant availability of metals[J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(2): 524-532.
- [13] Yang F, Zhao L, Gao B, *et al.* The interfacial behavior between biochar and soil minerals and its effect on biochar stability[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(5): 2264-2271.
- [14] Li F Y, Cao X D, Zhao L, *et al.* Effects of mineral additives on biochar formation: carbon retention, stability, and properties[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(19): 11211-11217.
- [15] 姜冠杰, 胡红青, 张峻清, 等. 草酸活化磷矿粉对砖红壤中外源铅的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(24): 205-213.
- Jiang G J, Hu H Q, Zhang J Q, *et al.* Immobilization effects of phosphate rock activated by oxalic acid on exogenous lead in latosol[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(24): 205-213.
- [16] Nemati K, Abu Bakar N K, Abas M R, *et al.* Speciation of heavy metals by modified BCR sequential extraction procedure in different depths of sediments from Sungai Buloh, Selangor, Malaysia[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **192**(1): 402-410.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2008.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd edition) [M]. Beijing: Agriculture Press, 2008.
- [18] Brookes P C, Kragt J F, Powlson D S, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: The effects of fumigation time and temperature [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, **17**(6): 831-835.
- [19] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [20] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 3488-3497.
- [21] 汤帆, 胡红青, 苏小娟, 等. 磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 3062-3067.
- Tang F, Hu H Q, Su X J, *et al.* Effects of phosphate rock and decomposed rice straw application on lead immobilization in a contaminated soil[J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 3062-3067.
- [22] Gomez-Eyles J L, Sizmur T, Collins C D, *et al.* Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(2): 616-622.
- [23] 王向前, 胡学玉, 陈窃君, 等. 生物炭及改性生物炭对水环境中重金属的吸附固定作用[J]. 环境工程, 2016, **34**(12): 32-37.
- Wang X Q, Hu X Y, Chen Y J, *et al.* Effect of biochar and modified biochar on the adsorption and immobilization of heavy metals in water environment [J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(12): 32-37.
- [24] 丁振亮, 赵玲, 续晓云, 等. 改性天然磷灰石促进 Pb/Zn 复合污染土壤的稳定化修复[J]. 环境化学, 2015, **34**(6): 1049-1056.
- Ding Z L, Zhao L, Xu X Y, *et al.* Enhanced immobilization of Pb/Zn in compound contaminated soil by modified natural phosphate rock[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(6): 1049-1056.
- [25] DeLuca T H, MacKenzie M D, Gundale M J. Biochar effects on soil nutrient transformations [A]. In: Lehmann J, Joseph S (Eds.). Biochar for Environmental Management and Technology [M]. London: Earthscan Ltd, 2009. 251-270.
- [26] Mukherjee A, Zimmerman A R, Harris W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars [J]. Geoderma, 2011, **163**(3-4): 247-255.
- [27] 王继红, 刘景双, 于君宝, 等. 氮磷肥对黑土玉米农田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2004, **18**(1): 35-38.
- Wang J H, Liu J S, Yu J B, *et al.* effect of fertilizing N and P on soil microbial biomass carbon and nitrogen of black soil corn agroecosystem [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, **18**(1): 35-38.
- [28] Steiner C, Das K C, Melear N, *et al.* Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar [J]. Journal of Environmental Quality, 2010, **39**(4): 1236-1242.
- [29] Case S D C, McNamara N P, Reay D S, *et al.* Biochar suppresses N₂O emissions while maintaining N availability in a sandy loam soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **81**: 178-185.
- [30] Ball P N, MacKenzie M D, Deluca T H, *et al.* Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacteria abundance in dry montane forest soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2010, **39**(4): 1243-1253.
- [31] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota-A review [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(9): 1812-1836.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)