

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

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

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪博, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋基烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婊娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九雄, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旻, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527)	《环境科学》征稿简则 (2723)
信息 (2826, 2852, 2910)	

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化

李玉^{1,2}, 方文^{2,3}, 祁光霞^{2,4}, 魏勇红², 刘建国^{2*}, 李润东¹

(1. 沈阳航空航天大学能源与环境学院, 辽宁省清洁能源重点实验室, 沈阳 110136; 2. 固体废物处理与环境安全教育国家重点实验室(清华大学), 北京 100084; 3. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023; 4. 北京工商大学环境科学与工程系, 北京 100048)

摘要: 市政污泥富含有机质和 N、P 等营养元素, 经堆肥稳定化处理后可成为矿山废弃地复垦的良好基质, 但市政污泥中含有的重金属成为限制其土地利用的主要瓶颈。以磷尾矿为辅料进行污泥堆肥处理, 既可利用其中磷酸盐固定市政污泥中的重金属, 又可实现磷尾矿和市政污泥的协同资源化利用。以磷尾矿渣为辅料, 采用高温好氧堆肥工艺, 研究污泥堆肥前后重金属 As、Cr、Cu、Ni、Pb、Cd 和 Zn 的赋存形态以及不同 pH 条件下的重金属浸出特性, 探讨污泥富磷堆肥处理对堆肥中重金属迁移转化的影响。结果表明, 污泥添加磷尾矿渣经过堆肥处理, 促进了重金属由不稳定形态向稳定形态转化, 降低了重金属在土壤自然 pH 范围(6~8)内及强碱性条件下的潜在释放风险, 有利于污泥的土地利用。

关键词: 污泥堆肥; 磷尾矿; 重金属赋存形态; pH 值; 浸出特性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2786-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201711069

Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere

LI Yu^{1,2}, FANG Wen^{2,3}, QI Guang-xia^{2,4}, WEI Yong-hong², LIU Jian-guo^{2*}, LI Run-dong¹

(1. Key Laboratory of Clean Energy, College of Energy and Environment, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. Key Laboratory for Solid Waste Management and Environment Safety (Tsinghua University), Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Sewage sludge is rich in organic matter, N, and P and could be used as a soil amendment to improve the status of soil organic matter, soil structural characteristics, and soil water retention capacity after aerobic composting. However, heavy metals in sewage sludge have become the main bottleneck limiting its land application. In addition, with the large-scale exploitation of phosphate rock resources in our region of interest, a large amount of phosphate tailings needs to be disposed and a large area of abandoned mining lands needs to be reclaimed. Phosphate tailings could be auxiliary materials for sewage sludge composting to immobilize heavy metals, and the compost could be applied for revegetation of the abandoned mining lands. The contents of As, Cr, Cu, Ni, Pb, Cd, and Zn were measured, and a successive extraction procedure was used to investigate the change in speciation of heavy metals in the sludge before and after the phosphate-rich composting. pH-dependent leaching tests were carried out to further evaluate the immobilization effects of composting on heavy metals and the release potential under different pH conditions. The results showed that the contents of heavy metals in the compost satisfied the corresponding threshold for land reclamation. Adding phosphate tailings greatly improved the stability of heavy metals during the composting process. The portion of stable residues of Pb, Cd, As, and Zn in the phosphate-rich compost was 84.00%, 58.00%, 68.50%, and 30.93%, respectively, compared with 68.10%, 30.50%, 40.32%, and 16.48% for the control, compost without adding the phosphate tailings. Meanwhile, the maximum leaching potential of As, Ni, Pb, Zn, and Cu in the phosphate-rich compost decreased from 3.692 mg·kg⁻¹, 0.903 mg·kg⁻¹, 0.217 mg·kg⁻¹, 7.225 mg·kg⁻¹, and 8.725 mg·kg⁻¹ to 0.684 mg·kg⁻¹, 0.586 mg·kg⁻¹, 0.071 mg·kg⁻¹, 2.603 mg·kg⁻¹, and 6.935 mg·kg⁻¹ in the control, respectively, for pH 6-8. It could be concluded that the addition of phosphate tailings in the sludge composting lowered the risk of heavy metals in sewage sludge compost to make it favorable for beneficial use in abandoned mining land reclamation.

Key words: sewage sludge compost; phosphate tailings; heavy metal speciation; pH value; leaching characteristics

随着我国城镇化进程的加快, 城镇污水处理厂的污泥产生量不断增加, 每年城镇污水处理厂污泥产生量将达到4 000多万 t, 预测到2020年, 我国城镇污泥的产生量将达到6 000~9 000万 t^[1]。污泥中富含 N、P 等植物生长的必需元素, 经过高温好氧堆肥化等稳定化过程后, 可形成大量腐殖质, 能够

改变重金属存在形态, 改善土壤有机质状态、结构

收稿日期: 2017-11-07; 修订日期: 2017-12-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07302-001)

作者简介: 李玉(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为固废处理与循环经济, E-mail: ylishine@163.com

* 通信作者, E-mail: jgliu@tsinghua.edu.cn

特性和土壤水分滞留能力，是良好的土壤改良剂和有机肥料^[2~4]。然而，污泥中含有重金属等有毒有害物质，施用后可能会在土壤中累积，造成土壤和地下水污染。与此同时，随着我国对磷矿资源的大规模开采，产生了大量磷尾矿需要进行处理，也形成了大面积的矿山废弃地亟待进行复垦。目前，每选出 1 t 含 P_2O_5 30.00% 的商品磷矿，就有 4 t 以上的尾矿堆存^[5]，然而我国磷尾矿的综合利用率只有 7.00%^[6]，大量磷尾矿长期堆存，引发了一系列环境污染和生态破坏问题。

有研究发现，磷矿粉等富含的磷酸盐可有效降低重金属的可生物利用比例，实现重金属的原位钝化^[7]。例如，殷飞等^[8]通过向重金属复合污染土壤施加 20% 的磷矿粉，可将 Pb、Cd、Cu、Zn 和 As 的生物有效态含量分别降低 51.30%、40.20%、31.70%、24.90% 和 29.20%；Sun 等^[9]发现使用磷肥改良 Cd 污染土壤后，水稻的根、茎、叶、糙米和稻谷壳中 Cd 的含量分别降低 45.80%、31.10%、58.20%、29.50% 和 7.46%。另外，以磷矿粉为代表的磷酸盐可通过化学沉淀和吸附等方式显著降低污染土壤中 Pb、Cd、Zn、Cu 和 As 等的浸出浓度^[10,11]。例如，Sima 等^[12]采用重过磷酸钙分别处理 $Pb(NO_3)_2$ 、 $PbSO_4$ 和 $PbCO_3$ 污染土壤，可将土壤中铅的 TCLP 浸出浓度降低 1~2 个数量级；Su

等^[13]使用磷矿粉处理铅污染土壤，在 P/Pb 摩尔比 0.6 的条件下，可将红壤和黄棕壤中铅的 TCLP 浸出浓度分别降低 29.70% 和 36.80%。

综上所述，污泥及污泥堆肥重金属通过添加磷矿粉等磷酸盐降低其迁移性和可生物利用性。然而，磷矿开采产生的固体废弃物——磷尾矿中也富含能够固定重金属的磷酸盐，因此本研究拟以磷尾矿渣为辅料进行市政污泥堆肥化处理，对污泥富磷堆肥产品中重金属 Zn、Cu、Ni、Cd、Pb、Cr 和 As 的赋存形态以及不同 pH 条件下的重金属浸出特性进行研究，探讨污泥富磷堆肥处理对堆肥中重金属迁移转化的影响，以期为市政污泥和磷尾矿的协同资源化并应用于矿山废弃地复垦提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 堆肥物料

本试验所用市政污泥取自云南昆明某生活污水处理厂脱水车间，含水率约 80.00%；磷尾矿渣取自云南昆明某磷矿尾矿库，是经浮选工艺选矿后剩余的固体废弃物，含水率约 11.80%，破碎至 0.5~1.0 cm；绿化废物取自污水处理厂附近绿化带树木修剪后的树枝，晾晒后含水率约 26.70%，破碎至 0.5~1.5 cm。堆肥所用物料的基本理化性质见表 1~3。

表 1 堆肥物料营养物质含量/ $g \cdot kg^{-1}$

Table 1 Nutrient content of compost materials/ $g \cdot kg^{-1}$

项目	营养物质含量			
	腐殖酸类物质	全氮(以 N 计)	全磷(以 P_2O_5 计)	全钾(以 K_2O 计)
市政污泥	404	47.30	7.99	15.50
绿化废物	294	15.50	2.73	4.94
磷尾矿渣	—	0.14	350.42	0.47

表 2 磷尾矿渣矿物组成/%

Table 2 Mineral composition of phosphate tailings/%

项目	P_2O_5	MgO	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3
磷尾矿渣	21.91	6.00	13.50	—	0.88	1.46

表 3 堆肥物料重金属含量以及相关标准限值/ $mg \cdot kg^{-1}$

Table 3 Content of heavy metals in compost materials and relative standard limits/ $mg \cdot kg^{-1}$

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
市政污泥	26.71	15.89	117.22	580.15	10.46	1.49	34.68
磷尾矿渣	46.15	7.60	5.15	46.54	15.31	0.57	14.59
土壤环境质量Ⅲ级标准 ^[14]	300	200	400	500	40	1.0	500
土地改良用泥质(碱性) ^[15]	1 000	200	1 500	4 000	75	20	1 000

1.2 试验方法

1.2.1 污泥富磷堆肥方案

污泥富磷堆肥试验将传统翻堆式条垛堆肥工艺

的一次发酵段和二次腐熟段分离，污泥(标记为 F0)添加磷尾矿渣经过一次发酵段的产物直接放置于废弃磷矿山生态修复现场进行二次发酵自然腐

熟,从而提高效率,节约场地和成本. 试验共设置 2 个处理,物料组成及质量比分别为:处理 F1(空白对照),绿化废物:污泥=2:5,产物标记为 F1;处理 F2,绿化废物:磷尾矿渣:污泥=2:1:5,产物标记为 F2. 物料堆成宽 2.0~2.5 m、高 0.8~1.0 m、长约 5.0 m 的条垛,总质量约 5~6 t,1~3 d 翻堆一次,总时长 26 d(一次发酵在 20 d 左右基本完成,本试验又多进行 6 d 的采样测试). 处理 F1、F2 混合物料初始 C/N 比为 25~35,堆肥过程中,处理 F1、F2 堆体温度、含氧量以及含水率随堆肥时间变

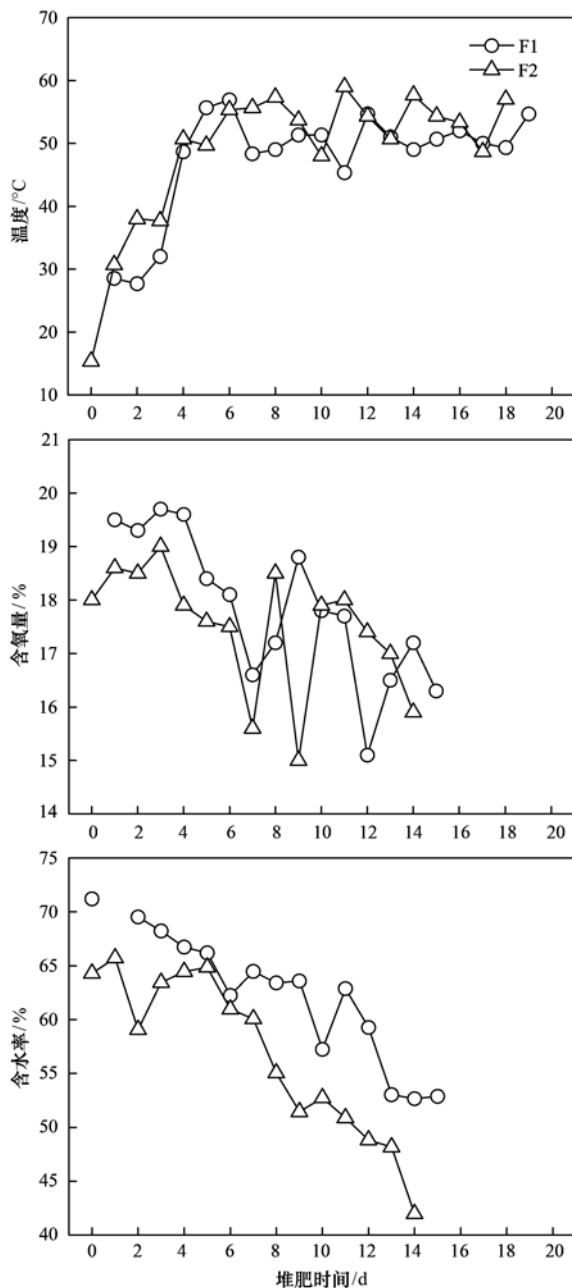


图1 不同污泥堆肥温度、含氧量以及含水率变化

Fig. 1 Changes in the temperature, oxygen content, and moisture content of different sewage sludge composts

化见图1,堆体温度保持50℃以上均不小于5 d;堆体均为好氧状态,含氧量在15.00%~20.00%之间;堆体含水率由初始的60.00%~72.00%下降至55.00%以下.

1.2.2 污泥富磷堆肥过程产品采集

在污泥富磷堆肥试验的第0 d和第26 d,采用多点随机取样将采集的样品混合均匀,称取2~4 kg装入干净的密封袋带回实验室.样品在室温下自然风干、粉碎并过100目尼龙筛,过筛样品装入干净的密封袋并置于干燥器备用.

1.3 分析方法

1.3.1 重金属含量及赋存形态分析方法

重金属As、Cr、Cu、Ni、Pb、Cd和Zn含量分析采用HNO₃-HCl微波消解和电感耦合等离子体质谱仪进行测定.重金属赋存形态分析采用Tessier五步连续提取法^[16],该方法将重金属分为5种形态:可交换态(EX)、碳酸盐结合态(BC)、铁锰氧化物结合态(BFM)、有机结合态(BOM)和残渣态(RS).其中,前两者为不稳定形态,后三者为稳定形态^[17].样品设置2个平行样,取平均值作为结果.

1.3.2 基于pH变化的重金属浸出特性分析方法

基于pH变化的浸出试验根据US EPA Method 1313^[18]进行.具体方法步骤如下:准确称取5.000 0 g样品置于50 mL离心管中,按照固液质量比1:10加入去离子水,并用1 mol·L⁻¹ KOH溶液或2 mol·L⁻¹ HNO₃溶液调节溶液pH,使悬浊液最终pH分布在2~13,在室温下以(28±2) r·min⁻¹翻转振荡48 h,翻转振荡完成后静置15 min测其pH和电导率,然后以10 000 r·min⁻¹高速离心10 min,用0.45 μm滤膜过滤,得到的滤液于4℃下保存待测.重金属含量采用HNO₃-HCl微波消解和电感耦合等离子体质谱仪进行测定,溶解性有机碳(DOC)使用总有机碳分析仪测定.

2 结果与讨论

2.1 不同污泥堆肥处理前后重金属含量分析

如图2所示,与物料堆肥前相比,F1、F2的重金属含量总体呈上升趋势,涨幅为3.20%~63.80%,原因是污泥在堆肥过程中,随着不稳定有机质的降解,堆体质量变小引起重金属在堆料中浓缩富集,最终导致重金属含量升高^[19].其中,F2中重金属As、Ni和Pb含量略有下降,分别由8.21%、18.48%和37.29%下降至7.70%、16.22%和37.16%,分析其原因是由于堆肥过程中

堆体会产生渗滤液并流出, 同时带出部分重金属, 从而使堆肥后堆体中重金属含量降低^[20], 但总体变化幅度不大。

由图 2 结合表 3 可知, 与市政污泥相比, 堆肥前大量绿化废物加入稀释了污泥重金属含量, 重金属总量不变, 但表现为 F1 重金属含量有所降低。与 F1 相比, 添加磷尾矿渣的 F2 中重金属 Cr、Cu、As、Cd 和 Zn 含量有所下降, 原因是磷尾矿渣自身重金属含量相对较低, 可对市政污泥重金属含量起到稀释作用。F2 中重金属 Ni、Pb 由于磷尾矿渣自身引入有小幅增加, 分别由 11.11%、29.72% 增加至 16.22%、37.16%, 但仍远低于国家土地改良用泥质(碱性)标准。因此, 从重金属含量来看, 污泥富磷堆肥符合土地利用相关要求。

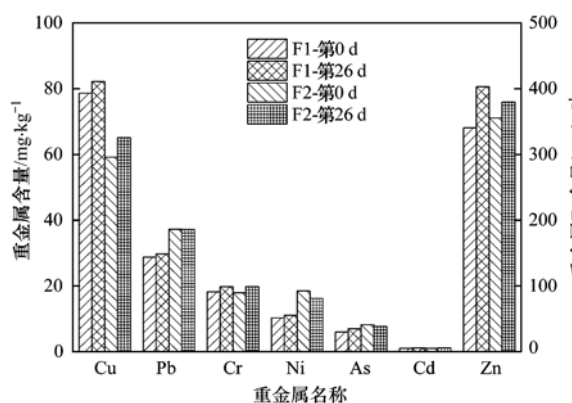


图 2 不同污泥堆肥处理前后重金属含量变化

Fig. 2 Changes in the content of heavy metals before and after different sewage sludge composting treatments

2.2 不同污泥堆肥处理前后重金属赋存形态分析

F1、F2 堆肥处理前后各重金属赋存形态变化如图 3 所示。对于 F1, 堆肥后 7 种重金属的 EX 和 BC 比例均呈下降趋势, As、Ni、Cr、Cu 的 RS 比例有所增加, 分别由 38.34%、60.32%、61.04%、34.11% 升高至 40.32%、71.59%、85.26%、51.50%。Yuan 等的研究显示^[21], EX 与 BC 为迁移性较强的形态, 容易浸出释放到水环境。因此, 污泥堆肥过程可促成污泥重金属由不稳定形态向稳定态转化, 这与 Amir 等^[22]和 Zheng 等^[23]的研究结果一致。对于 Pb、Cd、Zn, 虽然 RS 比例有所下降, 分别下降了 29.71%、20.39%、4.54%, 但 BOM 和 BFM 总比例明显升高, 分别升高了 29.58%、33.41%、12.21%, 说明污泥堆肥后重金属 Pb、Cd、Zn 整体稳定性仍升高。Pb、Cd、Zn 的 BOM 比例升高可能是由于污泥不稳定有机质转化为稳定腐殖质, 腐殖质含有羟基、羧基、醌基等活性官能团,

能与环境中的重金属发生吸附、螯合和络合等作用^[24], 导致大量 Pb、Cd、Zn 被络合而使有机结合态增加。Clemente 等^[25]和 O'Dell 等^[26]的研究也证实腐殖质会促成有机结合态重金属的增加。而 Pb、Cd、Zn 的 BFM 比例增加可能与铁锰氧化物胶体为两性胶体有关, 污泥堆肥后堆体 pH 上升到氧化物的零电位点以上, 胶体表面带负电荷, 对重金属的吸附能力增加^[27, 28]。

与 F1 相比, 添加磷尾矿渣的 F2 中 7 种重金属 EX 和 BC 总比例显著减少, 尤其是 As 和 Cd, 分别由 F1 的 11.46%、10.74% 下降至 F2 的 5.99%、4.45%。Cr、Ni、Cu 的 BOM 和 BFM 总比例分别由 F1 的 13.50%、26.92%、42.76% 上升至 F2 的 14.30%、39.17%、62.93%; 对于 Pb、Cd、As、Zn, 以磷尾矿渣为辅助料的污泥堆肥过程显著促进其稳定残渣态的形成, RS 分别由 F1 的 68.10%、30.50%、40.32%、16.48% 增加至 F2 的 84.00%、58.00%、68.50%、30.93%, 稳定性显著增加。

由此可见, 从重金属形态的稳定性层面来说, 污泥添加磷尾矿渣作为辅料进行堆肥处理, 促成重金属由不稳定形态向稳定形态转化, 有利于实现污泥土地利用的重金属溶出迁移控制。

2.3 市政污泥及不同污泥堆肥基于 pH 变化的重金属浸出特性

F0(市政污泥)、F1 和 F2 中 7 种重金属基于 pH 变化的浸出行为如图 4 所示, 其浸出规律相似: 重金属浸出比例在中性 pH(6~8)条件下最低, 但在强碱性和强酸性 pH 条件下浸出浓度显著升高, 表现出较强的 pH 依赖性。在强酸性条件下, 由于污泥中的黏土矿物和金属矿物溶解导致重金属失去吸附位点以离子形态大量溶出; 在强碱性条件下有机质大量溶出, DOC 含量明显增加, 如图 5 所示。DOC 对重金属有强烈的络合作用^[29], 形成可溶的有机物-重金属络合物, 从而增加重金属的溶出风险。

与 F0 相比, 除 Zn 外, 经过堆肥处理的 F1 中重金属在强碱性 pH 条件下的浸出比例明显降低, 一方面, 污泥堆肥过程促成有机质转化形成较稳定的腐殖质, 酸碱缓冲性能增加, 减少极端 pH 对污泥基体的溶解破坏, 因而重金属的溶解量大幅降低。另一方面, 在极端 pH 条件下 F1 中 DOC 含量明显低于 F0 中 DOC 含量, 因此 F1 中可溶的有机物-重金属络合物相对较少, 从而降低了重金属的浸出比例。在强酸性条件下, 尽管 F0 中重金属含

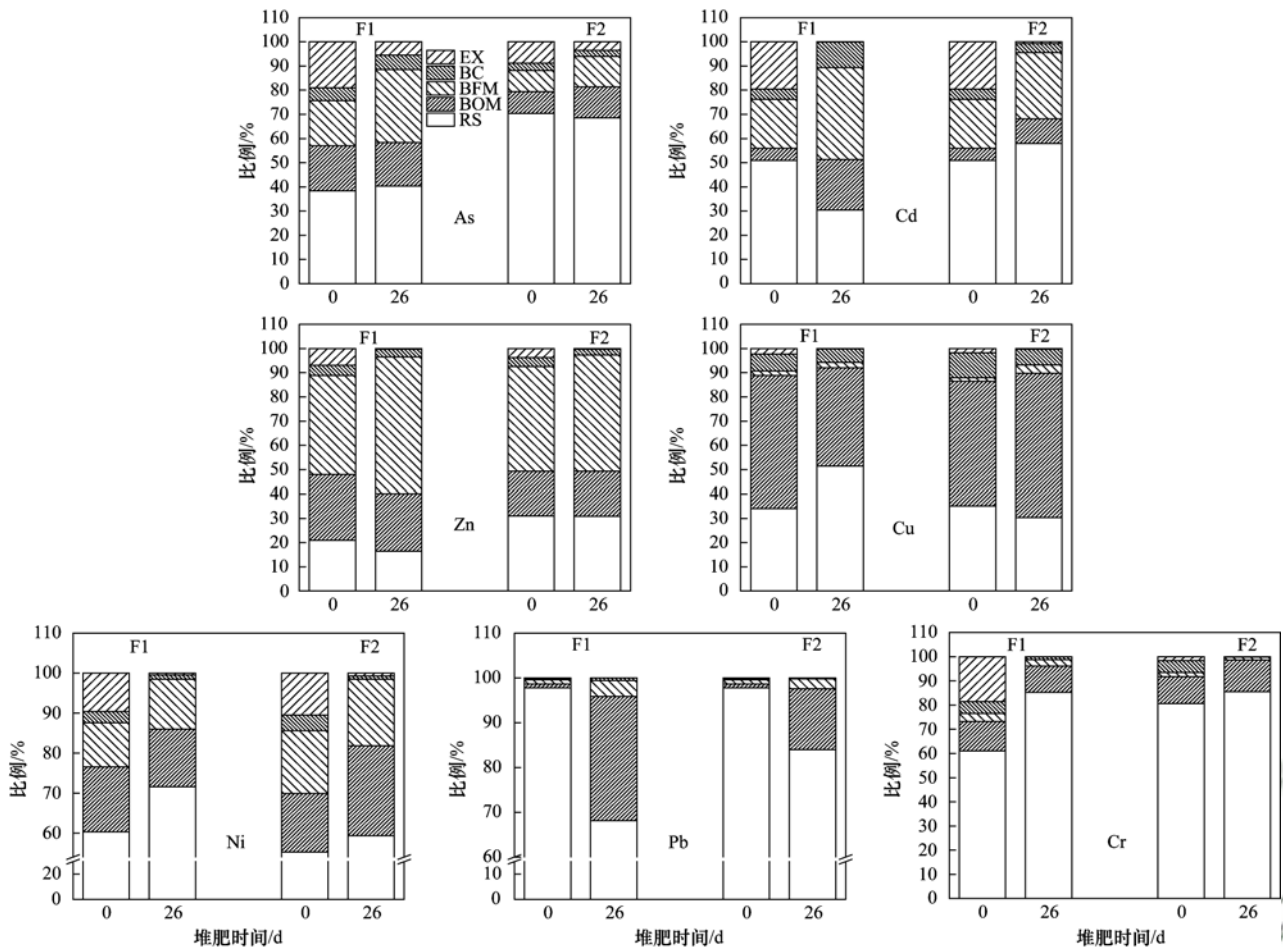


图3 不同污泥堆肥处理前后各重金属赋存形态变化

Fig. 3 Changes in the speciation of heavy metals before and after different sludge compost treatments

量较高, F0 中重金属的浸出比例却相对较低, 可能是由于市政污泥中含有大量在强酸性条件下不溶的有机质并为重金属提供吸附位点^[4]。

与 F1 相比, 添加磷尾矿渣的 F2 中重金属在极端 pH 条件下的溶出比例进一步降低, 尤其是强碱性条件。对于强酸性条件, 磷尾矿渣中磷酸盐的溶解会降低磷尾矿渣对重金属的钝化/稳定化效果, 因而溶出抑制效果会有削弱。特别地, 对于强碱性条件下 F1 会大量溶出的 Zn、As 和 Cd, 添加磷尾矿渣可极大抑制其迁移溶出: pH 为 13, Zn、As 和 Cd 浸出比例分别由 F1 堆肥产品的 41.50%、75.10% 和 61.80% 大幅降低至 3.66%、17.60% 和 5.46%。造成这种现象的原因可能是由于重金属离子通过与磷尾矿渣颗粒表面的 Ca^{2+} 发生阳离子交换而被吸附在表面^[30, 31], 从而降低了重金属的浸出量。

由于我国常见土壤 pH 值在 6~8 之间, 因此在土壤自然 pH 范围(6~8)内污泥富磷堆肥中重金属的潜在释放风险值得关注。由表 4 可知, 与 F1、F2 中重金属含量相比, F1、F2 中重金属在土壤自然 pH

范围(6~8)内最大浸出量以及自然 pH 条件下浸出量要低 1~2 个数量级。F1、F2 在土壤适用 pH 范围(6~8)内有机质不易溶出, 从而减少可溶性有机物-重金属络合物的形成, 降低重金属的溶出迁移。

有研究表明^[32], 在土壤自然 pH 范围内重金属最大释放浓度可用作评估最大局部平衡浓度, 重金属在土壤自然 pH 范围内最大浸出量的增加意味着重金属释放的潜在风险。与 F0 相比, F1 中重金属 As、Cr、Ni、Pb 和 Zn 在土壤自然 pH 范围(6~8)内的最大浸出量均大幅下降, 下降百分比 52.30%~89.40%。主要是由于污泥经堆肥处理后 DOC 含量在土壤自然 pH 范围(6~8)内介于 $401.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $660.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 比市政污泥低 1 个数量级, 减少可溶性有机物与重金属阳离子之间的络合, 从而降低重金属的潜在释放风险。重金属 Cd 在土壤自然 pH 范围(6~8)内的最大浸出量基本未变, 说明污泥堆肥处理不会增加 Cd 的潜在释放风险。重金属 Cu 在土壤自然 pH 范围(6~8)内的最大浸出量由 $3.465 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 $8.725 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可能是污

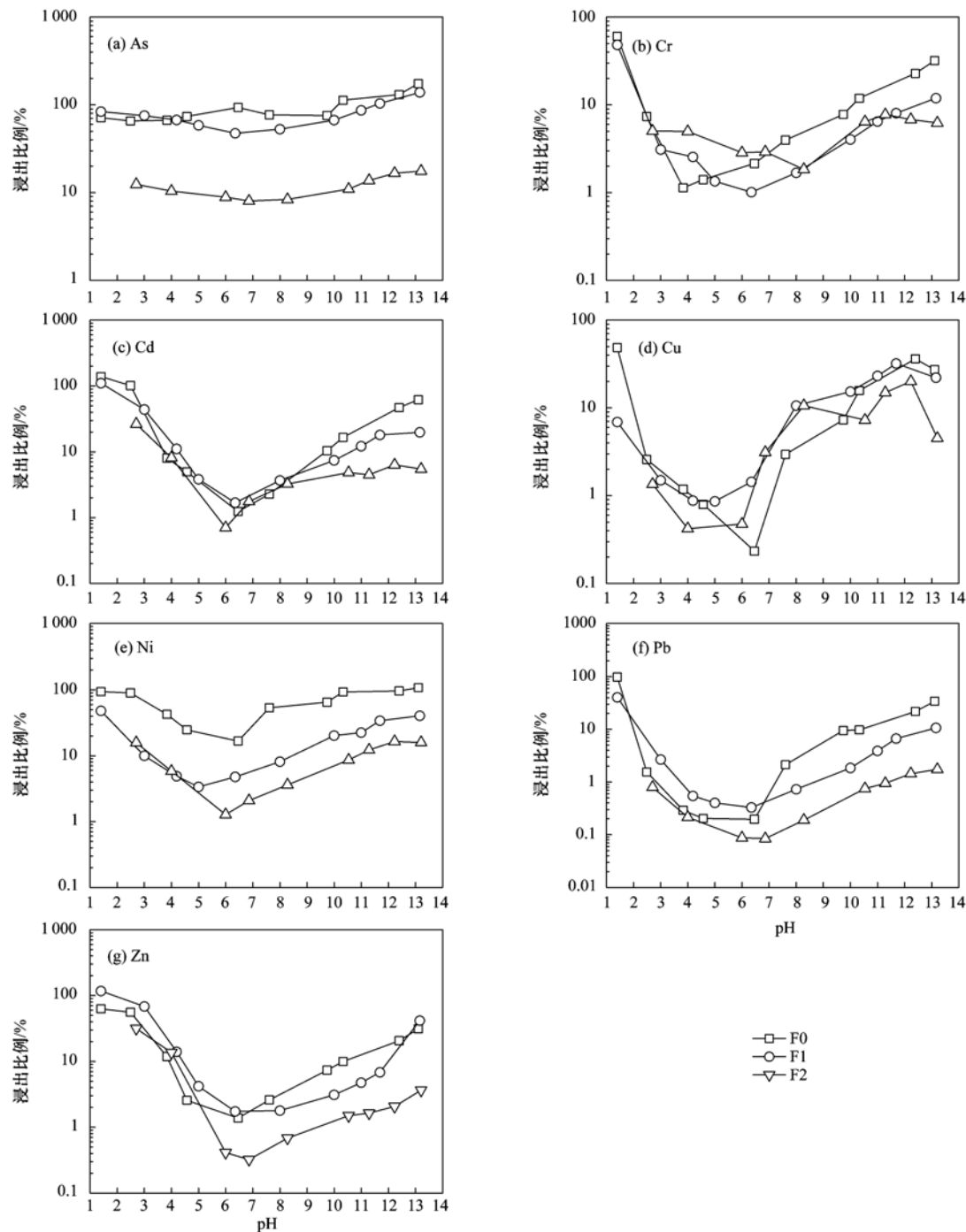


图4 市政污泥及不同污泥堆肥中重金属在不同 pH 条件下浸出比例变化

Fig. 4 Changes in the leaching ratio of heavy metals in sewage sludge and in different sewage sludge composts under different pH conditions

泥经堆肥处理后,可溶性有机物中的羧基、酚羟基和烯醇基等基团增加,意味着可溶性有机物可为重金属提供更多可络合的吸附点位^[33]。

与 F1 相比,添加磷尾矿渣的 F2 中重金属 As、Ni、Pb、Zn 和 Cu 在土壤自然 pH 范围(6~8)内最大浸出量以及自然 pH 条件下浸出量明显降低,一方面因为污泥添加磷尾矿渣经堆肥处理后 DOC 含

量降低,另一方面与磷尾矿渣中磷酸盐对重金属的吸附以及沉淀作用有关。重金属 Cd 在土壤自然 pH 范围(6~8)内的最大浸出量基本未变,说明磷尾矿渣不会增加重金属 Cd 的潜在释放风险。对于 Cr,在土壤自然 pH 范围(6~8)内的最大浸出量有所增加,由 $0.333 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 $0.578 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是因为磷尾矿渣自身带入一定量 Cr,导致 F2 堆肥产品

表 4 市政污泥、不同污泥堆肥中重金属含量及不同 pH 条件下浸出量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 4 Content and leaching potential of heavy metals in sewage sludge and in different sewage sludge
composts under different pH conditions/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理 ¹⁾	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
F0	10.460	1.490	26.710	117.220	15.890	34.680	580.150
6 < pH < 8	9.775	0.034	1.060	3.465	8.483	0.739	15.140
自然 pH = 6.46	9.775	0.019	0.574	0.274	2.647	0.068	8.030
F1	6.990	1.180	19.790	82.160	11.110	29.720	403.010
6 < pH < 8	3.692	0.043	0.333	8.725	0.903	0.217	7.225
自然 pH = 6.35	3.310	0.020	0.200	1.183	0.530	0.098	7.015
F2	7.700	1.140	19.800	65.120	16.220	37.160	379.580
6 < pH < 8	0.684	0.037	0.578	6.935	0.586	0.071	2.603
自然 pH = 6.86	0.618	0.020	0.578	2.034	0.339	0.032	1.230

1) F0、F1、F2 指的是 F0、F1、F2 中重金属含量；6 < pH < 8 指的是在土壤自然 pH 范围(6~8)内重金属最大浸出量；自然 pH 为 6.46、6.35、6.86 分别指的是 F0、F1、F2 中重金属在自然 pH 条件下浸出量

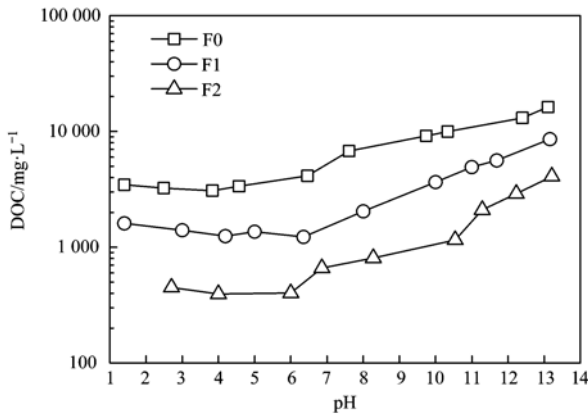


图 5 不同 pH 条件下市政污泥及不同
污泥堆肥中 DOC 含量变化

Fig. 5 Changes of the content of DOC in sewage sludge
and in different sewage sludge composts
under different pH conditions

重金属含量相对较高,从而引起浸出量的增加,但总体增幅不大.

综上所述,污泥添加磷尾矿渣经过堆肥处理,降低了重金属在土壤自然 pH 范围(6~8)内潜在释放风险,同时,添加磷尾矿渣可明显降低重金属在强碱性条件下的浸出能力.

3 结论

(1)添加磷尾矿渣的污泥富磷堆肥可在 20 d 左右完成一次发酵,堆肥产物中重金属含量远低于国家土地改良用泥质(碱性)标准,符合土地改良的重金属限值要求.

(2)从重金属的形态分析,污泥添加磷尾矿渣作为辅料进行堆肥处理促成重金属向稳定形态转化,有利于实现污泥土地利用的重金属溶出迁移控制.

(3)污泥添加磷尾矿渣经过堆肥处理,降低了重金属在土壤自然 pH 范围(6~8)内潜在释放风险,同时,添加磷尾矿渣可明显降低重金属在强碱性条件下的浸出能力.

参考文献:

[1] 严迎燕. 浅谈我国城镇污水处理厂污泥处理处置现状[J]. 广东化工, 2016, **43**(11): 204-205.
Yan Y Y. Analysis the status quo of domestic sludge treatment and disposal in China[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, **43**(11): 204-205.
[2] Fyttili D, Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods-a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, **12**(1): 116-140.
[3] Singh R P, Agrawal M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge[J]. Waste Management, 2008, **28**(2): 347-358.
[4] Fang W, Wei Y H, Liu J G. Comparative characterization of sewage sludge compost and soil: heavy metal leaching characteristics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, **310**: 1-10.
[5] 侯翠红, 李英翔, 许秀成, 等. 磷资源可持续利用新模式研究[J]. 化工矿物与加工, 2017, **46**(5): 1-3.
Hou C H, Li Y X, Xu X C, et al. Study on new patterns of sustainable utilization of phosphate resources [J]. Industrial Minerals & Processing, 2017, **46**(5): 1-3.
[6] 刘虹利, 张均, 王永卿, 等. 磷矿固体废弃物资源化利用问题及建议[J]. 矿产综合利用, 2017, (1): 6-11.
Liu H L, Zhang J, Wang Y Q, et al. Problems and proposals of solid waste utilization of phosphate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017, (1): 6-11.
[7] 马远. 重金属污染土壤原位钝化修复技术研究进展[J]. 城市地理, 2015, (18): 155-156.
[8] 殷飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(3): 438-448.
Yin F, Wang H J, Li Y Y, et al. Remediation of multiple heavy metal polluted soil using different immobilizing agents [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(3): 438-448.

- [9] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, *et al.* Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium-contaminated soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **166**: 204-210.
- [10] 袁志辉, 刘敏超, 陈志良, 等. 磷基材料钝化土壤铅及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2015, **46**(6): 1514-1522.
Yuan Z H, Liu M C, Chen Z L, *et al.* A review of research progress on phosphorus immobilization of lead and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(6): 1514-1522.
- [11] 任伟伟, 夏威夷, 魏明俐, 等. 改性磷矿粉修复 Pb/Zn 污染土壤的研究进展[J]. *南京工程学院学报(自然科学版)*, 2015, **13**(4): 12-16.
Ren W W, Xia W Y, Wei M L, *et al.* Research progress of remediation of Pb/Zn contaminated soil with modified phosphate rocks[J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2015, **13**(4): 12-16.
- [12] Sima J K, Cao X D, Zhao L, *et al.* Toxicity characteristic leaching procedure over- or under-estimates leachability of lead in phosphate-amended contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2015, **138**: 744-750.
- [13] Su X J, Zhu J, Fu Q L, *et al.* Immobilization of lead in anthropogenic contaminated soils using phosphates with/without oxalic acid[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **28**: 64-73.
- [14] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
GB 15618-1995, Environmental quality standard for soils[S].
- [15] GB/T 24600-2009, 城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质[S].
GB/T 24600-2009, Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant-quality of sludge used in land improvement[S].
- [16] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [17] Lake D L, Kirk P W W, Lester J N. Fractionation, characterization, and speciation of heavy metals in sewage sludge and sludge-amended soils: a review [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1984, **13**(2): 175-183.
- [18] EPA Method 1313, Liquid-solid partitioning as a function of extract pH using a parallel batch extraction procedure[S].
- [19] 舒增年, 黄健. 蒙脱石对污泥好氧堆肥过程中重金属钝化效果[J]. *矿物学报*, 2017, **37**(1-2): 53-60.
Shu Z N, Huang J. Passivating effect of montmorillonite on heavy metals during sewage sludge composting[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, **37**(1-2): 53-60.
- [20] 陈镇新, 檀笑, 解启来, 等. 不同辅料配比对城市污泥堆肥效果及重金属形态转化的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, **45**(1): 227-234.
- [21] Yuan X Z, Huang H J, Zeng G G, *et al.* Total concentrations and chemical speciation of heavy metals in liquefaction residues of sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(5): 4104-4110.
- [22] Amir S, Hafidi M, Merlina G, *et al.* Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(6): 801-810.
- [23] Zheng G D, Gao D, Chen T B, *et al.* Stabilization of nickel and chromium in sewage sludge during aerobic composting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **142**(1-2): 216-221.
- [24] Milne C J, Kinniburgh D G, Van Riemsdijk W H, *et al.* Generic NICA-Donnan model parameters for metal-ion binding by humic substances[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(5): 958-971.
- [25] Clemente R, Bernal M P. Fractionation of heavy metals and distribution of organic carbon in two contaminated soils amended with humic acids [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(8): 1264-1273.
- [26] O'Dell R, Silk W, Green P, *et al.* Compost amendment of Cu-Zn minespoil reduces toxic bioavailable heavy metal concentrations and promotes establishment and biomass production of *Bromus carinatus* (Hook and Arn.) [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **148**(1): 115-124.
- [27] 丁疆华, 温琰茂, 舒强. 土壤环境中镉、锌形态转化的探讨[J]. *城市环境与城市生态*, 2001, **14**(2): 47-49.
Ding J H, Wen Y M, Shu Q. Fraction transformation of cadmium and zinc in soils [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2001, **14**(2): 47-49.
- [28] 杨秀敏, 任广萌, 李立新, 等. 土壤 pH 值对重金属形态的影响及其相关性研究[J]. *中国矿业*, 2017, **26**(6): 79-83.
Yang X M, Ren G M, Li L X, *et al.* Effect of pH value on heavy metals form of soil and their relationship [J]. *China Mining Magazine*, 2017, **26**(6): 79-83.
- [29] 卢信, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 不同可溶性有机碳对铜在土壤中迁移的影响[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(3): 418-424.
Lu X, Zhao B Z, Zhang J B, *et al.* Mobility of Cu in soils in relation to dissolved organic carbon (DOC) [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(3): 418-424.
- [30] Middelburg J J, Comans R N J. Sorption of cadmium on hydroxyapatite [J]. *Chemical Geology*, 1991, **90**(1-2): 45-53.
- [31] Seaman J C, Arey J S, Bertsch P M. Immobilization of nickel and other metals in contaminated sediments by hydroxyapatite addition[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(2): 460-469.
- [32] Kosson D S, Garrabrants A C, DeLapp R, *et al.* pH-dependent leaching of constituents of potential concern from concrete materials containing coal combustion fly ash [J]. *Chemosphere*, 2014, **103**: 140-147.
- [33] 熊雄, 李艳霞, 韩杰, 等. 堆肥腐殖质的形成和变化及其对重金属有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(6): 2137-2142.
Xiong X, Li Y X, Han J, *et al.* Formation and transformation of humus in composting and its impacts on bioavailability of toxic metals [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(6): 2137-2142.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)