

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

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

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM _{2.5} 影响	段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)
京津冀内陆平原区 PM _{2.5} 浓度时空变化定量模拟	郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)
成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响	刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)
华山地区 PM _{2.5} 中无机离子垂直分布特征	曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)
烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 成分图谱	谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)
长三角地区中小燃煤锅炉 PM _{2.5} 成分谱特征	徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)
民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子	严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑睿, 杨国威, 吴方琪 (1502)
冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素	张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)
青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度	李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)
辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配	张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)
典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露	李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)
苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平	王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)
上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响	杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)
城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例	曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)
艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨	曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)
三峡澎溪河水华期间水体 CH ₄ 浓度及其通量变化特征初探	秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)
漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源	苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)
柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价	张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)
黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析	刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)
白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)
典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟	高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)
河道水旁路处理中试工艺中 PPCPs 的去除效果及机制	李力, 朱耕, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑思 (1637)
蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价	樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)
真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质	孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)
热活化过硫酸盐降解三氯生	蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)
水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律	徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)
海水优化 ANAMMOX 包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能	单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)
外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能	于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)
硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究	盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)
分段进水对改良 A ² /O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响	南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)
不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化	梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)
智能化曝气控制 A/O 工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制	徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)
温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响	李玥, 胡奇, 高文大 (1731)
污泥臭原位置量工艺中抗生素的去除	汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)
零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响	杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)
环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响	陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)
后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性	张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)
复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析	陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)
氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化	贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)
1 株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径	李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)
铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子	李鑫, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)
垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响	黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)
黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响	陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)
河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究	丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)
藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化	展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)
深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征	沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)
香港周边海域野生鱼体内 DDTs 和 PCBs 的含量分布和食用风险评估	苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)
偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征: 以神农架大九湖为例	胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)
西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征	孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)
广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估	宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)
长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响	张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)
三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响	辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)
稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系	王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)
钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响	赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)
外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响	贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)
模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响	王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)
紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素	田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)
季节非对称升温对喀斯特土壤 CO ₂ 释放的影响	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)
《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)	

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响

赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强*

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 通过好氧堆肥和盆栽试验, 探究不同比例(0%、2.5%、5%、7.5% 和 10%) 钙基膨润土(CB)辅助猪粪堆肥过程及盆栽土壤中 Cu、Zn 形态的变化, 并分析 CB 对白菜生物量及吸收 Cu、Zn 的影响。结果表明, 在所有处理的堆肥过程中, 可交换态 Cu、Zn 的分布比例逐渐下降, 而可氧化态和残渣态逐渐升高, 与 0% CB 相比, 2.5% ~ 10% CB 可使堆肥结束时生物可利用态(可交换态和可还原态)Cu、Zn 的分布比例分别降低 19.84% ~ 48.90% 和 4.94% ~ 16.39%, 并以 10% CB 的效果最为显著。进而开展的盆栽试验显示, 施用堆肥后, 土壤有机质和 EC 显著升高, 而 pH 有所下降; CB 辅助堆肥能够促使土壤 EC 的降低及 pH 的升高, 稳定土壤有机质。与纯土处理相比, 施用堆肥可显著提升白菜的生物量, 且 10% CB 处理中的生物量最大($6.51 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1} \pm 0.34 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$)。施用 CB 辅助堆肥后, 种后土壤中生物可利用态 Cu 含量增加; 但各处理中可交换态 Zn 含量分别降低 38.91%、43.69%、46.02%、45.12% 和 54.65%。白菜在施用堆肥后 Cu、Zn 的吸收量显著降低, 并且随着 CB 辅助比例的增加 Zn 的吸收量随之减少, 而 Cu 的吸收量呈增加趋势。本研究表明, 钙基膨润土能够降低堆肥过程中 Cu、Zn 活性, 在堆肥施入土壤后仍对 Zn 有持续的固定作用, 同时 CB 辅助堆肥可以提高白菜的生物量, 减少重金属 Zn 在白菜中的累积, 并以 10% CB 的效果最为显著。

关键词: 钙基膨润土; 堆肥; 土壤; 铜; 锌; 形态

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1926-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201706071

Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage

ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, LI Rong-hua, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, ZHANG Zeng-qiang*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Aerobic composting was conducted to evaluate the effects of the different ratios (0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10%) of Ca-bentonite (CB) on the speciation of Cu and Zn during pig manure composting, while pot experiment was performed to investigate the role of CB-added compost on the bio-availability of Cu and Zn to Chinese cabbage and its biomass. The results showed that the exchangeable fractions of Cu and Zn decreased, while their oxidized and residual fractions gradually increased during composting; CB addition reduced the distribution ratios of bio-available Cu and Zn in mature compost by approximately 19.84% - 48.90% and 4.94% - 16.39%, compared to those in the 0% CB-added treatment, and the best result was found in the 10% CB-added treatment. Meanwhile, the pot experiment confirmed that the addition of compost considerably increased soil organic matter (OM) and electrical conductivity (EC) but decreased soil pH value. On the contrary, the application of CB effectively decreased EC and increased soil pH but inhibited OM mineralization in soil as compared to non-amended treatment. While addition of compost significantly increased plant dry biomass as compared to that with soil alone, maximum biomass was obtained [$(6.51 \pm 0.34) \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$] in 10% CB-added compost. After the application of CB-added compost, the contents of the bio-available fractions of Cu in the harvested soil increased, while the contents of the exchangeable fractions of Zn decreased by 38.91%, 43.69%, 46.02%, 45.12%, and 54.65%, respectively. The absorption of Cu and Zn by Chinese cabbage was considerably reduced after the application of compost, while the uptake of Zn in the plant declined as the CB rates increased, and the absorption of Cu increased. The study indicated that 10% CB addition could significantly reduce the bioavailability of Cu and Zn in compost, and also showed a continuous effect on restricting the bioavailability of Zn after land utilization. Meanwhile CB amendment enhanced Chinese cabbage biomass and reduced the uptake of Zn.

Key words: Ca-bentonite; composting; soil; copper; zinc; forms

随着我国集约化养殖业的快速发展, 每年都会产生大量的猪粪。猪粪的养分含量较高, 是一种良好的潜在肥源^[1]。然而, 在养殖过程中饲料添加剂的过度使用, 导致猪粪中重金属含量普遍较高, 尤其以 Cu、Zn 含量最为显著^[2]。猪粪的直接农田施

用不仅会危害作物的生长, 也有造成环境污染的风

收稿日期: 2017-06-08; 修订日期: 2017-09-22

基金项目: 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目 (2016CXY-12)

作者简介: 赵军超(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物资源化处理, E-mail: zjc2011yly@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangzq58@126.com

险^[3]。因此猪粪农用之前一般需经过堆肥处理，促使其转化为稳定、安全、无害的有机肥料^[4]。然而传统的堆肥工艺存在重金属钝化效率不高及产品品质低下等问题，限制了堆肥产业的发展和有机固体废物的快速消纳^[5,6]。为了改进这些缺点，现代堆肥工艺立足于高效高品质有机肥的生产，注重堆肥过程和施用风险的控制。其中，在堆肥过程中引入廉价易得的矿物添加剂就是现代堆肥工艺中的一种有效工程措施^[7-9]。例如，Wang 等^[6]指出麦饭石辅助猪粪堆肥对 Cu、Zn 的钝化作用显著，添加比例为 10% 时能使堆肥过程中 NH₃ 和 N₂O 的排放量分别减少 48.76% 和 85.26%。Li 等^[1]发现添加钠基膨润土能有效降低猪粪堆肥中重金属 (Cu、Zn) 活性，促进有机质的矿化分解，且添加比例不宜超过 2.5%。Chen 等^[10]的研究表明添加生物炭可以提高堆肥过程中重金属 (Cu、Zn、Cd、Cr) 的钝化效率，缩短堆体升温时间。

综上所述，加入一定比例的矿物添加剂可以有效钝化重金属，改善堆肥进程^[11]。然而，堆肥作为有机肥料，土壤是其最终的归宿。猪粪堆肥中 Cu、Zn 总量仍然较高，长期施用容易导致农田 Cu、Zn 污染，加重作物中重金属元素的累积^[12,13]。同时重金属的生物有效性与其化学形态密切相关^[14-16]，在土壤中重金属形态易受到 pH、氧化还原电位、有机质和阳离子交换量等因素的变化而重新分布^[17]。添加矿物质能够有效钝化堆肥中的重金属，而在土壤施用矿物添加剂辅助堆肥后，其对土壤中 Cu、Zn 生物有效性及作物吸收 Cu、Zn 的影响，目前尚不

明确。由此可知，深入探究矿物添加剂对堆肥过程及土地利用中重金属形态变化的影响，对促进畜禽粪便堆肥的安全农用具有重要意义。

钙基膨润土在我国矿产丰富，价廉易得，有着良好的吸附和离子交换能力^[2]。前期研究^[2,18]表明添加钙基膨润土能有效降低堆肥初期氮素损失，促进有机质的降解及腐熟度的提升。在此基础上，本研究以钙基膨润土为堆肥辅助剂，结合盆栽试验来探究钙基膨润土对堆肥过程以及土壤施用堆肥后 Cu、Zn 形态分布的影响，同时评价其在改善作物吸收重金属方面的应用潜力，以期能探明钙基膨润土固定堆肥重金属的实际功效，同时为矿物添加剂辅助堆肥工艺的应用推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 堆肥试验

本研究供试材料为杨凌规模化养殖场的新鲜猪粪，调理剂木屑出自杨凌周边家具厂，钙基膨润土购置于山东潍坊华潍有限公司。堆肥原料基本理化性质见表 1，堆制方法详见文献^[2]。试验中，将猪粪和木屑按干基 2:1 比例混合，然后添加干基质量 0%、2.5%、5%、7.5% 和 10% 的钙基膨润土，共设置 5 个处理，分别记为 0% CB、2.5% CB、5% CB、7.5% CB 和 10% CB，调节含水率 60% 左右，混匀后转移入自制半自动搅拌式好氧堆肥反应器^[1]进行为期 60 d 好氧堆肥，于 1、3、7、14、21、30、45 和 60 d 采集样品。堆肥结束后，自然风干腐熟堆肥，开展盆栽试验。

表 1 堆肥原料基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of composting materials

参数	猪粪	木屑	钙基膨润土	混合
含水率/%	75.63 ± 0.23	15.01 ± 0.10	0.06 ± 0.01	64.10 ± 0.01
pH	8.29 ± 0.03	6.85 ± 0.02	8.40 ± 0.02	8.36 ± 0.01
电导率/mS·cm ⁻¹	2.65 ± 0.03	0.40 ± 0.01	0.09 ± 0.01	1.54 ± 0.02
有机质/%	72.27 ± 0.13	96.22 ± 1.20	—	75.93 ± 0.05
总磷/g·kg ⁻¹	27.34 ± 0.75	<0.01	0.01 ± 0.01	22.67 ± 0.21
总凯氏氮/g·kg ⁻¹	24.01 ± 0.11	2.21 ± 0.03	—	19.41 ± 0.23
Cu/mg·kg ⁻¹	773.60 ± 4.8	7.12 ± 0.67	34.63 ± 0.89	620.10 ± 0.6
Zn/mg·kg ⁻¹	795.10 ± 5.4	38.51 ± 0.25	114.00 ± 2.2	650.00 ± 2.4
C/N	17.46 ± 0.10	252.50 ± 1.2	—	22.69 ± 0.27

1.2 盆栽试验

盆栽土取自西北农林科技大学试验站农田表层土，土壤类型为黄褐土；pH 8.04、电导率 0.40 mS·cm⁻¹、有机质 1.04%、Cu 20.61 mg·kg⁻¹、Zn 64.52 mg·kg⁻¹。土壤和堆肥粉碎过 2 mm 筛。盆栽

装置为上口直径 28 cm、下口直径 16 cm、高 18 cm 的塑料盆，填装总质量为 3 kg，肥土比为 2.5% (湿基质量)，每个处理 3 个重复，加去离子水至田间持水量的 70%，放置两周使各组分稳定化。供试植物为常见蔬菜白菜，每盆均匀播种 20 粒，放置于

西北农林科技大学温室大棚,待植株萌发4个叶片后进行间苗,均匀保留5株幼苗,40 d后收获白菜地上部分.

1.3 测定方法

堆肥和白菜采用HNO₃-HClO₄消解,土样采用HNO₃-HCl-HClO₄消解,日立Z-3000型原子吸收分光光度计测定Cu、Zn总量;重金属形态采用改进BCR连续提取法测定^[19],操作要点见表2;白菜收获后经过杀青、烘干至恒重后记录干重;pH和电导率EC采用电极法测定(水土质量比5:1)^[18];有机质

及原材料总凯氏氮和总磷测定方法见文献[20].

重金属形态分级为可交换态(X-EXC)、可还原态(X-RED)、可氧化态(X-OXI)、残渣态(X-RES),X代表Cu、Zn.因为堆肥过程中重金属含量变化较大,为了更好地进行比较,堆肥样品采用各形态占总量的质量分数进行表示.试验中土壤和堆肥重金属总量测定采用标准物质GBW08502,植物样品用GBW10014分别进行分析质量控制.堆肥和土壤重金属形态分析试验回收率为91.86%~105.28%.

表2 改进BCR连续提取法操作要点

Table 2 Scheme of modified BCR sequential extraction

重金属形态	提取剂	操作方法
X-EXC	0.11 mol·L ⁻¹ HAc	固液比1:40, 22℃±5℃振荡16 h, 离心分离
X-RED	0.5 mol·L ⁻¹ NH ₂ OH-HCl, pH 1.5	固液比1:40, 22℃±5℃振荡16 h, 离心分离
X-OXI	8.8 mol·L ⁻¹ H ₂ O ₂ , pH 2.5, 2次, 1 mol·L ⁻¹ NH ₄ Ac, pH 2	固液比1:10, 22℃±5℃轻微振荡1 h, 85℃水浴1 h(重复一次), 固液比1:50, 22℃±5℃振荡16 h, 离心分离
X-RES	HCl-HNO ₃	消解

1.4 数据处理

采用Origin 8.5软件进行图表绘图,SPSS 19.0进行数据显著性检验以及相关分析.

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程中Cu、Zn总量的变化

堆肥过程中各处理Cu、Zn总量变化如图1所示,随着CB辅助比例的增加,各处理初始物料中重金属含量逐渐降低,这是由于CB中Cu、Zn含量低于猪粪,对堆体有一定的稀释作用^[6,14].随着堆肥的进行,0%~10% CB的处理中Cu、Zn含量逐渐上升,这是因为有机质的降解及水分散失会导致堆体浓缩^[1].堆肥结束时各处理Cu、Zn总量的增幅分别为14.92%~35.41%、12.71%~25.73%,

与毛晖等^[21]报道的Cu(28.8%~32.9%)和Zn(12.3%~17.3%)结果相似,但与郭靖等^[22]报道的鸡粪堆肥中Cu、Zn增幅分别为1.68%~4.71%和4.03%~11.46%的结果存在一定差异.这是由于堆肥中重金属总量变化受堆肥原料和外部条件(如堆肥方式、天数等)的影响较大^[14,21],不同堆肥原料的有机质降解速率及CO₂释放速率不同,因而导致了不同研究结果之间Cu、Zn的相对浓缩效应有所差异^[14].

2.2 堆肥过程中Cu、Zn形态变化

与重金属总量相比,重金属的化学形态能更精确的反映其在环境中的生物有效性^[23],并且可交换态和可还原态的生物活性较高,常将其统称为生物可利用态(X-BF;X为Cu、Zn)^[14,15].堆肥过程

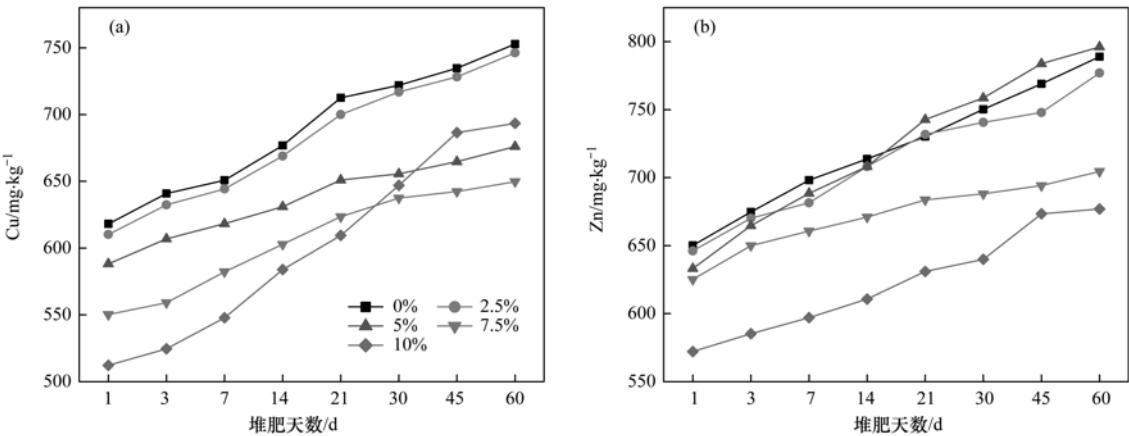


图1 堆肥过程中Cu、Zn总量变化

Fig. 1 Changes in the total contents of Cu and Zn during composting of pig manure

中不同处理 Cu 形态变化如图 2 所示. 随着堆肥的进行, 各处理中 Cu-EXC 和 Cu-RED 质量分数逐渐降低, 而 Cu-OXI 逐渐升高, Cu-RES 略有增加. 堆肥结束后, Cu 形态分布以可氧化态为主, 占其总量的 61.85% ~ 73.56%, 与 Meng 等^[16]的研究结果相印证. 这是由于随着堆肥的进行, 大量增加的腐殖

质会通过羧基及酚基等有机官能团对 Cu(II) 产生较强的络合能力, 促使 Cu-EXC 和 Cu-RED 向 Cu-OXI 转化^[24]. 堆肥结束后与对照相比, 2.5% ~ 10% CB 可使 Cu-BF 的分布比例降低 19.84% ~ 48.90%, 促进 Cu 的化学形态向生物有效性低的方向转化, 并且 10% CB 处理效果最显著.

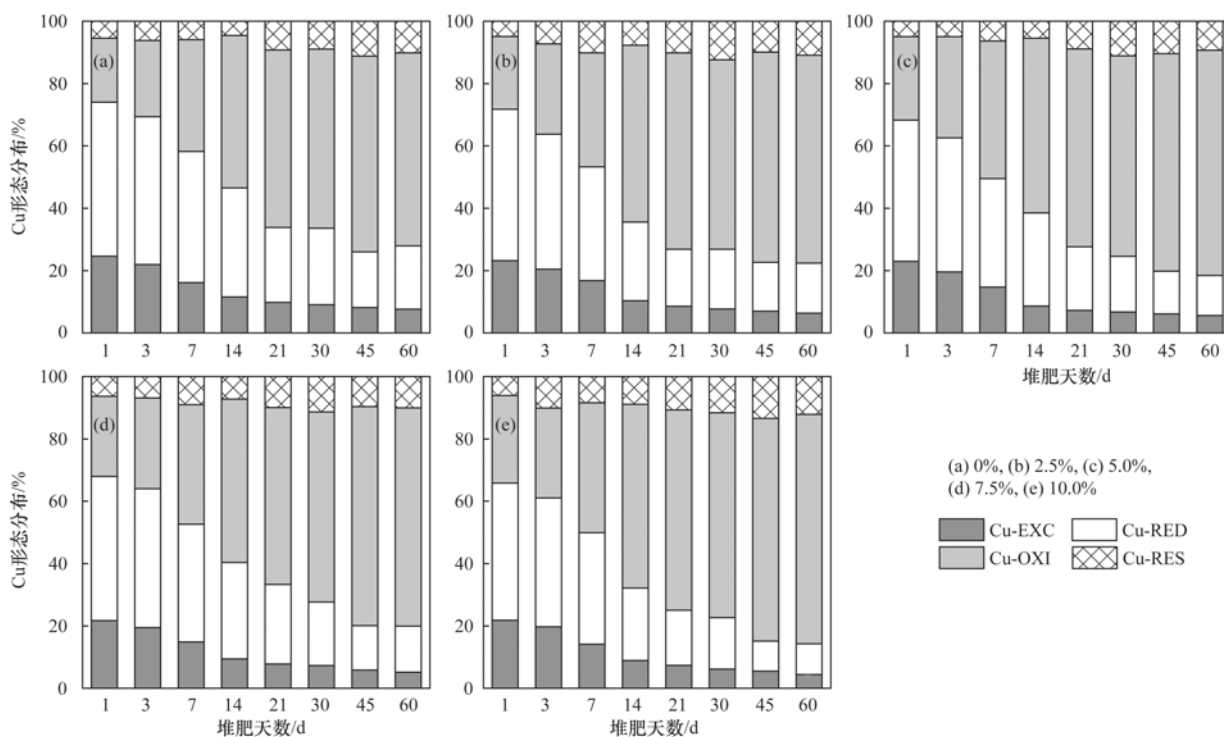


图2 添加钙基膨润土堆肥过程中 Cu 形态变化

Fig. 2 Changes in the Cu fractions during composting of pig manure amended with Ca-bentonite

堆肥过程中 Zn 的各形态分布与 Cu 有所不同 (图 3). 随着堆肥的进行, 各处理中 Zn-EXC 逐渐降低, Zn-RED 逐渐升高, Zn-OXI 和 Zn-RES 略有增加, 这与侯月卿等^[25]的研究结果具有一定的相似性. 堆肥结束后, Zn 以可还原态为主, (占 60.85% ~ 69.24%), 而此时 Cu 主要以可氧化态存在. 造成这一差异的原因可能是由于 Zn 与腐殖物质的结合能力弱于 Cu, 而与铁锰氧化物的结合能力较强, 在堆肥过程中有利于 Zn-RED 的转化^[26]. 堆肥结束后与 0% CB 相比, 2.5% CB、5% CB、7.5% CB 和 10% CB 处理中 Zn-BF 分布比例分别下降了 8.25%、4.94%、12.28% 和 16.39%. 结果与 Cu 类似, CB 辅助有利于降低堆肥处理中 Zn 的生物有效性, 并以 10% CB 处理的效果最明显. 其原因可能是多方面的: 第一, CB 的添加提高了堆体孔隙度, 微生物大量繁殖的同时使得腐殖物质含量增加, Cu 的形态向较为稳定的可氧化态转化^[14,26], 生物有效性降低; 第二, CB 本身为多孔矿物质, 具

有较强的物理吸附和离子交换能力, 且其表面能形成呈电负性的水合氧化物薄膜, 有助于络合吸附重金属, 从而降低重金属的生物有效性^[27]; 第三, CB 呈碱性 (pH 8.4), 对重金属有一定的钝化作用^[28].

2.3 钙基膨润土堆肥对土壤 pH、EC 及有机质变化的影响

与纯土处理相比, 施加堆肥后土壤初始 pH 有所下降, 而 CB 辅助堆肥的处理中土壤 pH 随辅助比例的增加而升高 [图 4(a)], 这主要是由于堆肥施用到土壤后有一定的缓冲作用^[29]. 经过 40 d 的种植过程, 纯土及 0% ~ 10% CB 处理中土壤 pH 分别增加了 0.42、0.57、0.61、0.51、0.65 和 0.64, 究其原因可能是有机碳的矿化分解以及随之产生的 OH⁻ 与土壤中 K⁺、Ca⁺、Mg²⁺ 等进行了离子交换^[30].

EC 代表土壤水溶性盐分含量, 对作物生长具有重要的作用. 施加堆肥显著提高了 ($P < 0.05$) 土壤 EC 值 [图 4(b)], 随着种植过程的进行, 纯土及

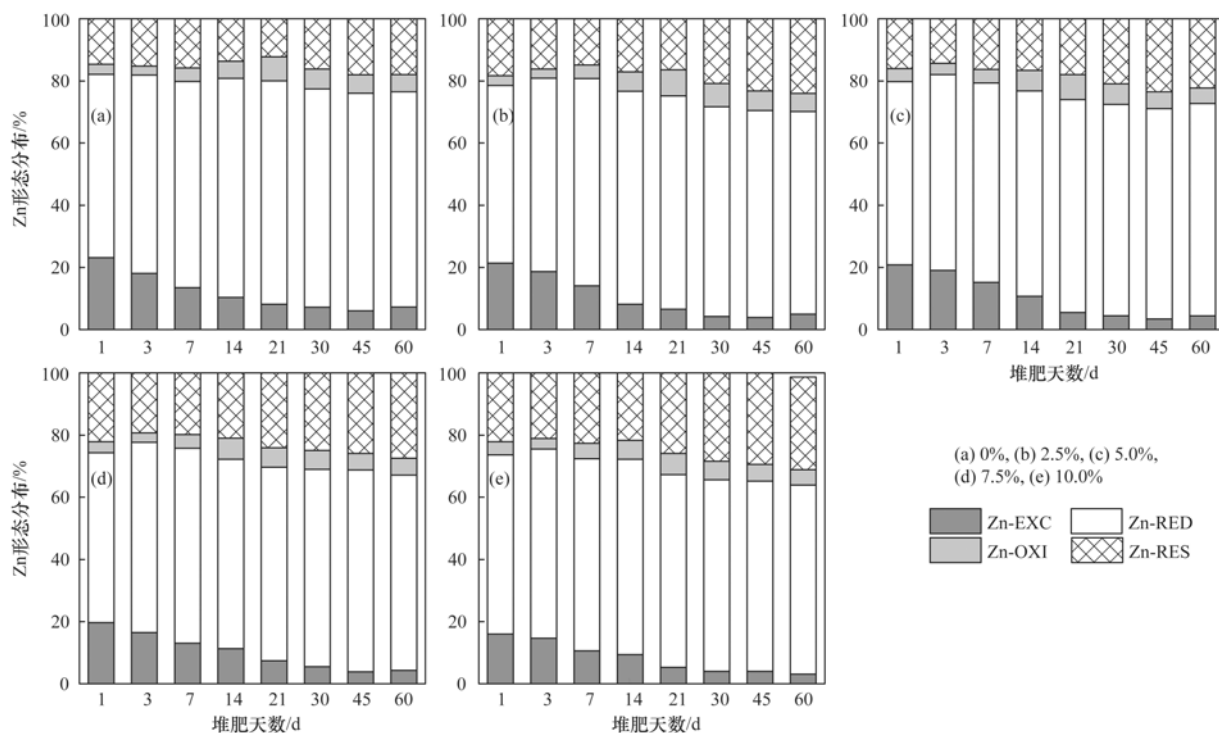


图3 添加钙基膨润土堆肥过程中 Zn 形态变化

Fig. 3 Changes in the Zn fractions during composting of pig manure amended with Ca-bentonite

0% ~ 10% CB 处理中 EC 的降幅为 26.46% ~ 37.28%，这与蔡函臻等^[20]的研究结果相印证，可能由于水溶性盐分被植物吸收以及 CB 的吸附或共沉淀作用导致^[18]。

种植前后土壤有机质变化见图 4(c)。施加堆肥后显著提高了土壤有机质含量，其中 CB 辅助处理中有机质含量低于 0% CB。盆栽试验结束后，0% ~ 10% CB 处理中有机质含量分别下降了 3.51%、3.22%、2.68%、2.71% 和 2.54%，由此说明钙基膨润土能够稳定土壤中的有机质。Zhang 等^[31]通过盆栽试验研究表明，土壤中微生物对调控有机碳的矿化分解作用显著，而 CB 为微生物提供了大量的附着位点，有利于土壤中微生物的生长

繁殖，因此 CB 可能通过影响土壤微生物活性间接地稳定土壤有机质。

2.4 盆栽种植前后土壤 Cu、Zn 形态变化

与纯土相比，施入堆肥后土壤中不同形态 Cu 含量显著($P < 0.05$)上升[图 5(a)]，各处理 Cu 的形态分布为 Cu-RES > Cu-RED > Cu-OXI > Cu-EXC。经过 40 d 的盆栽试验，土壤中 Cu-EXC 和 Cu-RED 含量增加，Cu-OXI 和 Cu-RES 含量降低，Cu 的生物有效性提高，这与商和平等^[32]的研究结果大致相同。盆栽土壤偏碱性[图 4(a)]，堆肥中的腐殖物质在土壤环境中进一步分解，促使与有机质结合的 Cu 向 Cu-EXC 和 Cu-RED 方向转化^[28]。相比 0% CB，2.5% ~ 10% CB 处理中土壤 Cu-BF 含量分别

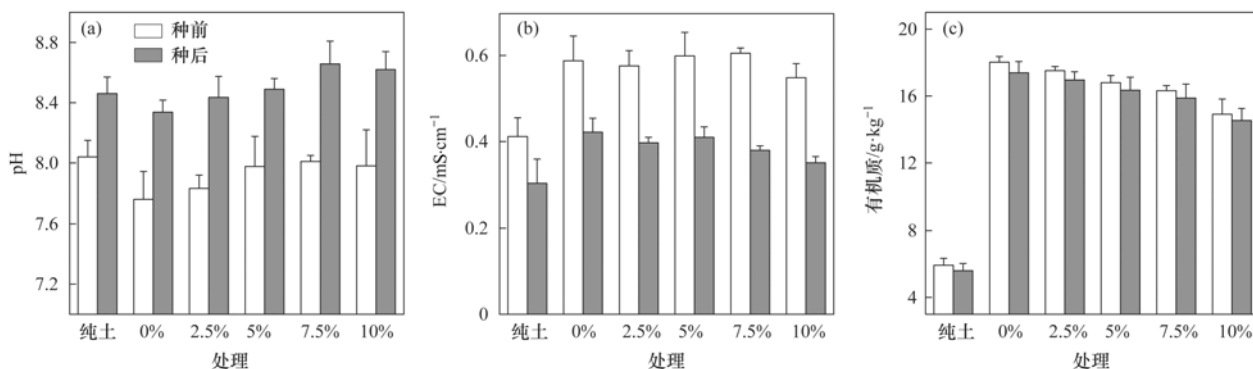


图4 盆栽试验前后土壤 pH、EC、有机质变化

Fig. 4 Changes in the pH, EC, and organic matter content in soil before and after pot experiment

增加了 35.72%、23.02%、60.56% 和 64.36%，表明 CB 随堆肥施入土壤后对 Cu 的生物有效性有一定促进作用，且 2.5%~10% CB 处理中白菜的 Cu 吸收量高于对照，与此结果相印证。

盆栽种植前后土壤中 Zn 形态变化如图 5(b) 所示。各处理土壤 Zn 的形态分布为 Zn-RES > Zn-RED > Zn-EXC > Zn-OXI，盆栽结束后，0%~10% CB 处理中仅 Zn-RED 含量上升。这是由于 Fe、Mn 氧化物对 Zn 具有较强的吸附作用，同时土壤 pH 对重金属在土壤中的迁移性和生物有效性具有重要影

响^[33]，pH 的上升[图 4(a)]更能促进这一吸附效果^[14]。改进 BCR 法提取的 4 种化学形态中以可交换态的生物有效性最高，各处理种后土壤中 Zn-EXC 含量分别降低了 38.91%、43.69%、46.02%、45.12% 和 54.65%，表明 CB 辅助堆肥施入土壤后对 Zn 活性仍有抑制作用，并且 2.5%~10% CB 处理中白菜 Zn 含量显著($P<0.05$)低于 0% CB 处理[图 6(b)]，与此结果相印证。究其原因可能是 CB 比表面积巨大，对重金属有较强的吸附和离子交换作用，降低了土壤中 Zn 的生物有效性^[2]。

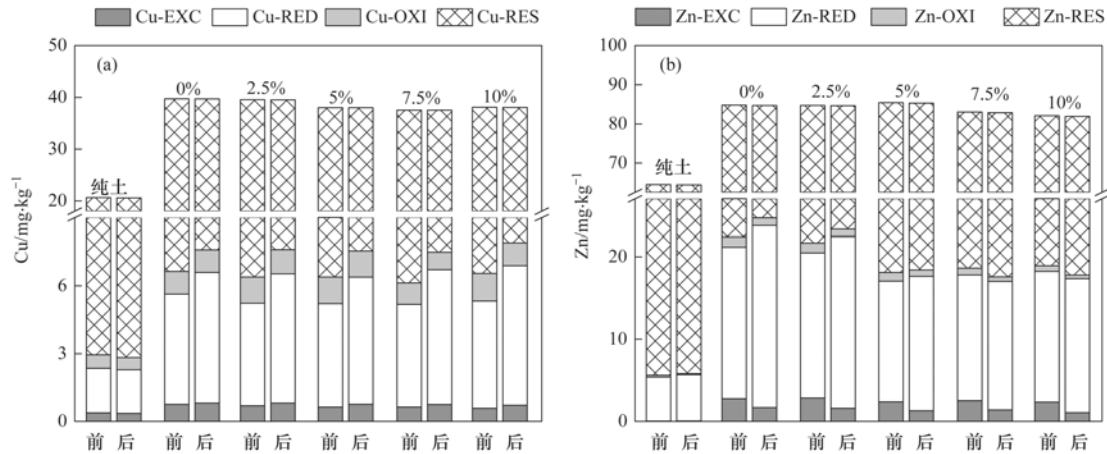


图 5 盆栽试验前后土壤 Cu、Zn 形态变化

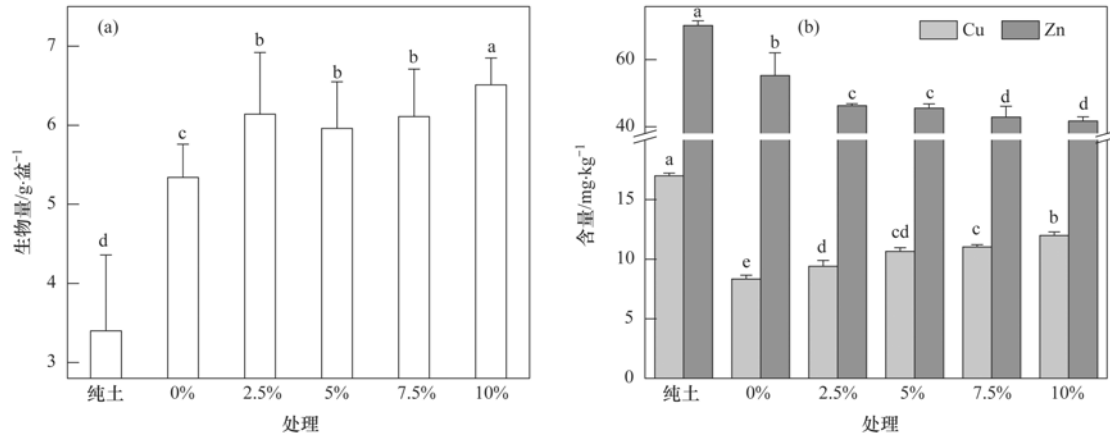
Fig. 5 Changes in the Cu and Zn fractions in soil before and after pot experiment

2.5 盆栽试验白菜的生物量及 Cu、Zn 吸收量

白菜生物量及 Cu、Zn 含量如图 6 所示。0%~10% CB 处理中白菜生物量分别比纯土处理增加了 57.06%、80.59%、75.29%、79.71% 和 91.47%，施用堆肥显著提高白菜生物量。同时 CB 辅助堆肥的提升效果要优于对照，有利于作物生长。

施用堆肥在白菜增产的同时降低了 Cu、Zn 吸

收量，降幅分别为 30.25%~50.97% 和 21.28%~40.81%，这是由于施入堆肥后带来的有机物质会吸附土壤中的重金属离子，对植物的吸收有抑制作用^[24]。CB 辅助堆肥降低了白菜对 Zn 的吸收量，与 0% CB 处理相比，10% CB 中 Zn 的吸收量降低了 25.94%，但在 2.5%~10% CB 处理中 Cu 的吸收量增加了 12.85%~43.94%。CB 辅助堆肥抑制



不同字母代表数据在 $P<0.05$ 下差异显著

图 6 白菜生物量及 Cu、Zn 吸收量

Fig. 6 Biomass and contents of Cu and Zn in Chinese cabbage

了白菜对 Zn 的吸收,而对 Cu 则作用相反,同时在土地利用过程中对土壤中 Zn 的活性仍保持抑制作用,但对 Cu 则有活化的可能.为了分析这一现象,进一步对数据进行 Pearson 相关性分析(表 3).虽然影响土壤 Cu、Zn 形态变化及白菜吸收的原因是多方面的,但就本试验而言,白菜对 Cu 的

吸收量与土壤中 Cu-RED 含量正相关,而 CB 辅助堆肥恰好可以提高 Cu-RED 的含量,由此导致白菜对 Cu 的吸收量增加.对于 Zn 而言,Zn-EXC、pH 及 OM 均与白菜吸收量负相关,也暗示了不同元素在土壤中与作物的吸收之间存在较大差异^[2].

表 3 不同参数变化量与白菜吸收间的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 3 Pearson's correlation coefficient between the changes in parameters and absorption by Chinese cabbage

	Cu-RED	Cu-OXI	Cu-RES	pH	EC	OM	Cu-P	Zn-RED	Zn-OXI	Zn-RES	pH	EC	OM	Zn-P
X-EXC	0.944 *	-0.54	-0.81	0.958 *	0.609	-0.806	0.862	-0.454	-0.711	0.075	-0.901 *	-0.549	0.412	-0.961 **
X-RED		-0.978 *	-0.962 **	0.804	0.961 **	-0.783	0.951 *		0.57	-0.907 *	0.966 **	0.761	-0.885 *	-0.883
X-OXI			-0.892 *	-0.848	-0.928 *	0.947 *	-0.805			-0.207	0.548	0.238	-0.216	-0.709
X-RES				-0.663	-0.921 *	0.819	0.856				-0.074	0.695	0.880 *	0.828
pH					0.680	-0.286	0.872					0.680	-0.286	-0.955 **
EC						-0.856	0.883 *						-0.856	-0.881
OM							-0.975 *							-0.908 *

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$; X 代表 Cu、Zn; Cu-P、Zn-P 分别为白菜对 Cu、Zn 吸收量

3 结论

(1) 钙基膨润土辅助堆肥降低了堆肥过程中 Cu、Zn 的生物有效性,相比对照,2.5% ~ 10% CB 能使堆肥产品 Cu、Zn 的生物可利用态分别降低 19.84% ~ 48.90% 和 4.94% ~ 16.39%,其中 10% CB 效果最为显著.

(2) 土壤施用堆肥后,钙基膨润土辅助堆肥能持续抑制土壤中 Zn 的生物有效性,促使 Cu 的活性略有提高.

(3) 钙基膨润土辅助堆肥可以提高白菜生物量,抑制白菜对 Zn 的吸收,而对 Cu 则表现出一定的促进作用.

(4) 相比而言,以 10% 的添加比例进行堆肥,在降低堆肥土地利用中重金属的环境风险以及改善作物对重金属元素累积方面具有较好的应用潜力.

参考文献:

- [1] Li R H, Wang J J, Zhang Z Q, *et al.* Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **121**: 362-368.
- [2] Wang Q, Li R H, Cai H Z, *et al.* Improving pig manure composting efficiency employing Ca-bentonite [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **87**: 157-161.
- [3] Zang B, Li S Y, Michel Jr F, *et al.* Effects of mix ratio, moisture content and aeration rate on sulfur odor emissions during pig manure composting[J]. *Waste Management*, 2016, **56**: 498-505.
- [4] Li R H, Wang Q, Zhang Z Q, *et al.* Nutrient transformation during aerobic composting of pig manure with biochar prepared at different temperatures[J]. *Environmental Technology*, 2015, **36** (7): 815-826.

- [5] Awasthi M K, Wang Q, Ren X N, *et al.* Role of biochar amendment in mitigation of nitrogen loss and greenhouse gas emission during sewage sludge composting [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **219**: 270-280.
- [6] Wang Q, Wang Z, Awasthi M K, *et al.* Evaluation of medical stone amendment for the reduction of nitrogen loss and bioavailability of heavy metals during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **220**: 297-304.
- [7] 吴娟,何胜洲,李国学,等.添加过磷酸钙的猪粪堆肥污染气体减排工艺优化[J]. *农业机械学报*, 2017, **48**(5): 304-312.
- [8] Zhang J Y, Chen M X, Sui Q W, *et al.* Impacts of addition of natural zeolite or a nitrification inhibitor on antibiotic resistance genes during sludge composting[J]. *Water Research*, 2016, **91**: 339-349.
- [9] Wang X, Selvam A, Wong J W C. Influence of lime on struvite formation and nitrogen conservation during food waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **217**: 227-232.
- [10] Chen Y N, Liu Y, Li Y P, *et al.* Influence of biochar on heavy metals and microbial community during composting of river sediment with agricultural wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **243**: 347-355.
- [11] Awasthi M K, Wang Q, Huang H, *et al.* Effect of biochar amendment on greenhouse gas emission and bio-availability of heavy metals during sewage sludge co-composting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **135**: 829-835.
- [12] 何梦媛,董同喜,茹淑华,等.畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1576-1586.
- He M Y, Dong T X, Ru S H, *et al.* Accumulation and migration characteristics in soil profiles and bioavailability of heavy metals from livestock manure [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**

- (4): 1576-1586.
- [13] Tian W, Zhang Z H, Hu X F, *et al.* Short-term changes in total heavy metal concentration and bacterial community composition after replicated and heavy application of pig manure-based compost in an organic vegetable production system[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, **51**(5): 593-603.
- [14] Lu D, Wang L X, Yan B X, *et al.* Speciation of Cu and Zn during composting of pig manure amended with rock phosphate[J]. *Waste Management*, 2014, **34**(8): 1529-1536.
- [15] Wu S H, Shen Z Q, Yang C P, *et al.* Effects of C/N ratio and bulking agent on speciation of Zn and Cu and enzymatic activity during pig manure composting[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, **119**: 429-436.
- [16] Meng J, Wang L, Zhong L B, *et al.* Contrasting effects of composting and pyrolysis on bioavailability and speciation of Cu and Zn in pig manure[J]. *Chemosphere*, 2017, **180**: 93-99.
- [17] Baldantoni D, Leone A, Iovieno P, *et al.* Total and available soil trace element concentrations in two Mediterranean agricultural systems treated with municipal waste compost or conventional mineral fertilizers[J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(9): 1006-1013.
- [18] 周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 等. 膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 3061-3069.
- Zhou L N, Cai H Z, Li R H, *et al.* Effects of bentonite amendment on detoxification, heavy metal passivation and estrone elimination of sewage sludge compost[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 3061-3069.
- [19] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, *et al.* Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 57-61.
- [20] 蔡函臻, 宁西翠, 王权, 等. 碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4848-4856.
- Cai H Z, Ning X C, Wang Q, *et al.* Effect of alkali solids amendment on sewage sludge aerobic composting and the potential of related products on infertile soil amelioration[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4848-4856.
- [21] 毛晖, 李荣华, 黄懿梅, 等. 添加剂对猪粪好氧堆肥过程锌和铜形态的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, **44**(10): 164-171, 202.
- Mao H, Li R H, Huang Y M, *et al.* Effect of additives on forms of Zn and Cu during aerobic composting of pig manure[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, **44**(10): 164-171, 202.
- [22] 郭靖, 王英辉, 陈建新, 等. 生化黄腐酸对堆肥中氰化物及重金属的影响[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(9): 1-7, 13.
- Guo J, Wang Y H, Chen J X, *et al.* Effects of biochemical fulvic acid on degradation of cyanide and speciation of heavy metal during composting[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(9): 1-7, 13.
- [23] 卜贵军, 于静, 邸慧慧, 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.
- [24] Huang M, Zhu Y, Li Z W, *et al.* Compost as a soil amendment to remediate heavy metal-contaminated agricultural soil: mechanisms, efficacy, problems, and strategies[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, **227**(10): 359.
- [25] 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.
- Hou Y Q, Zhao L X, Meng H B, *et al.* Passivating effect of biochar and humic acid materials on heavy metals during composting of pig manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(11): 205-215.
- [26] Tella M, Bravin M N, Thuriès L, *et al.* Increased zinc and copper availability in organic waste amended soil potentially involving distinct release mechanisms[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **212**: 299-306.
- [27] 施惠生, 刘艳红. 膨润土对重金属离子 Pb^{2+} , Zn^{2+} , $Cr(VI)$, Cd^{2+} 的吸附性能[J]. *建筑材料学报*, 2006, **9**(5): 507-510.
- Shi H S, Liu H Y. Adsorption characteristics of bentonite to Pb^{2+} , Zn^{2+} , $Cr(VI)$, Cd^{2+} [J]. *Journal of Building Materials*, 2006, **9**(5): 507-510.
- [28] 生骏, 陆文静, 王洪涛. 粉煤灰对污泥堆肥过程和土地施用后交换态重金属(Cu, Zn, Pb)的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1367-1371.
- Sheng J, Lu W J, Wang H T. Effects of fly ash on the exchangeable heavy metals (Cu, Zn, Pb) during sewage sludge composting and land utilization[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(6): 1367-1371.
- [29] Chan M T, Selvam A, Wong J W C. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **200**: 838-844.
- [30] Ouni Y, Lakhdar A, Scelza R, *et al.* Effects of two composts and two grasses on microbial biomass and biological activity in a salt-affected soil[J]. *Ecological Engineering*, 2013, **60**: 363-369.
- [31] Zhang X Y, Cao Y E, Tian Y Q, *et al.* Short-term compost application increases rhizosphere soil carbon mineralization and stimulates root growth in long-term continuously cropped cucumber[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, **175**: 269-277.
- [32] 商和平, 李洋, 张涛, 等. 畜禽粪便有机肥中 Cu、Zn 在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 314-324.
- Shang H P, Li Y, Zhang T, *et al.* Form tendency and bio-availability dynamics of Cu and Zn in different farm soils after application of organic fertilizer of livestock and poultry manures[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 314-324.
- [33] 孙娜, 商和平, 茹淑华, 等. 连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 815-824.
- Sun N, Shang H P, Ru S H, *et al.* Effects of continuous application of sewage sludge compost on heavy metals accumulation and mobility characteristics in soil profile and on heavy metals uptake of wheat[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 815-824.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajiu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)