

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.1

第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM _{2.5} 污染演变的时空过程	时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)
2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析	郑庆峰, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)
夏季大气PM _{2.5} 中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例	刘威杰, 石明明, 程敏, 黎莹, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)
呼包鄂地区冬季、夏季PM _{2.5} 污染特征	李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)
2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	周静博, 段青春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)
基于模型模拟的成都市PM _{2.5} 污染来源解析	许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)
北京市PM _{2.5} 中砷污染特征	石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段青春, 谭吉华, 陈荣志 (57)
夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析	易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)
安阳市大气PM _{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析	孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)
新乡市夏冬季节PM _{2.5} 稳定碳同位素特征分析	闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)
基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估	梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)
超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征	王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)
京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨	余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)
安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析	杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)
长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响	王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)
华东典型城市非道路移动机械排气烟度	鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昀, 黄成 (133)
国内外储油库VOCs排放现状与标准分析	胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)
四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响	庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)
乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比	徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张显, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)
长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素	汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)
巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征	沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)
城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例	田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)
典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估	陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)
长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估	李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)
白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析	汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)
松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评价	王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟丰, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)
鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系	李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)
臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响	刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮水重金属暴露与健康风险精细化评估	陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)
镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制	吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)
一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制	廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)
酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能	谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)
脱氮菌剂在低溶解性黑臭水体中氮代谢特征	赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)
宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及耐药基因	陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)
淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析	赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)
基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控	陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)
基于间歇饥饿的SNAD工艺运行	李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)
反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液	陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)
硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现	刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)
高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)
中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评价	向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖偲, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)
某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征	孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)
北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征	张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征	杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)
亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征	宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)
宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化	陈志浩, 覃云斌, 丁帮琛, 胡优优, 陈湜, 李正魁 (412)
秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响	王晶, 马丽娟, 刘泽华, 陆伟, 侯振安 (420)
基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析	黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)
塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征	陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)
广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征	马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)
不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响	张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)
不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响	栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪艺凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)
黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应	周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)
炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响	蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)
《环境科学》征订启事(89)	
《环境科学》征稿简则(97)	
信息(303, 329, 344)	

不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响

栾润宇^{1,2}, 高珊^{1,2}, 徐应明², 纪艺凝^{1,2}, 闫翠侠^{2,3}, 孙约兵^{2*}

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 农业农村部产地环境污染防控重点实验室, 天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191; 3. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为探究不同钝化剂对畜禽粪便处理效果, 以鸡粪和稻草秸秆为原料, 采用高温酵素快速堆肥方法, 研究添加海泡石 (SE)、钙镁磷肥 (NP)、生物炭 (BI) 单一及复配钝化剂海泡石 + 钙镁磷肥 (S + N)、海泡石 + 生物炭 (S + B)、钙镁磷肥 + 生物炭 (N + B)、海泡石 + 钙镁磷肥 + 生物炭 (SNB) 对鸡粪有机肥的理化性质、重金属形态分布及有机质变化的影响。结果表明, 添加不同钝化剂堆肥后显著增加鸡粪有机肥 pH ($P < 0.05$), 种子发芽率有所增加 (80% 以上), 发芽抑制率相应降低, 而电导率 (EC)、有机碳全氮含量和碳氮比 (C/N) 均较堆肥前有所降低, 各项指标均达到有机肥腐熟标准。但堆肥后各组间差异为: 在 pH 方面复配处理 pH 增加较高, 在电导率方面单一海泡石和钙镁磷肥处理下 EC 值降幅较大, 而有机碳全氮含量和碳氮比各组差异不明显。虽然由于“浓缩效应”导致鸡粪有机肥重金属总量有所增加, 但鸡粪有机肥中重金属可溶态比例下降, 残渣态比例均有所增加, 添加钝化材料后发现复配钝化剂对重金属钝化效果好于单一钝化剂, 其中 SNB 处理对 Ni、Zn、As 和 Pb 钝化效果最好。堆肥处理后, 腐殖酸 (HS) 和胡敏酸 (HA) 浓度均显著上升 ($P < 0.05$), 最高分别增加 19.8% 和 78.9%, 富里酸 (FA) 则较初始条件下降低 4.47%~20.11%。红外光谱分析发现堆肥后多糖小分子类物质均不同程度增加。综上所述, 投加钝化剂对鸡粪有机肥重金属钝化有一定的促进作用, 从而使堆肥达到无害化效果。

关键词: 堆肥; 钝化剂; 重金属; 鸡粪; 腐殖质

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0469-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906121

Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes

LUAN Run-yu^{1,2}, GAO Shan^{1,2}, XU Ying-ming², JI Yi-ning^{1,2}, YAN Cui-xia^{2,3}, SUN Yue-bing^{2*}

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety, Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 3. College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: We explore the effects of different passivating agents on livestock manure treatment by using chicken manure and straw as raw materials and thermophilic rapid fermentation. We investigate the effects of sepiolite (SE), calcium magnesium phosphate fertilizer (NP), biochar (BI), compounds of sepiolite plus calcium magnesium phosphate fertilizer (S + N), sepiolite plus biochar (S + B), calcium magnesium phosphate fertilizer plus biochar (N + B), and sepiolite plus calcium magnesium phosphate fertilizer and biochar (SNB) on the physical and chemical characteristics, heavy metal fraction and distribution, and organic matter content in chicken manure compost. The results showed that the addition of different passivating agents significantly increased the pH in chicken manure organic fertilizer ($P < 0.05$). The seed germination rate was increased after applying of passivation agents, being > 80%, and the germination inhibition rate decreased accordingly, whereas the values of electric conductivity (EC) and organic carbon were inhibited. The total nitrogen content and carbon/nitrogen ratio (C/N) were lower than of those before composting, and all of the indicators reached the standard of organic fertilizer maturity. However, differences among the groups after composting were that the pH increase in the compounding treatment was comparatively higher, and that the EC decreased significantly under the treatment of the single sepiolite and calcium magnesium phosphate, whereas the total nitrogen content and C/N ratio of organic carbon were not significantly different in each group. Although the total amount of heavy metals in our organic chicken manure fertilizer increased due to a concentration effect, the proportion of exchangeable heavy metals in the fertilizer decreased, and while the ratio of the residual heavy metals increased. The passivation effect on heavy metals under combined treatments of different materials was better than that of a single agent, and the SNB treatment had the best effect on the passivation of Ni, Zn, As, and Pb. After composting treatment, the concentrations of humic substances (HS) and humic acid (HA) increased significantly ($P < 0.05$), and the highest concentrations increased by 19.8% and 78.9%, respectively. The amount of fulvic acid (FA) decreased by 4.47%~20.11% compared with the initial conditions. Infrared

收稿日期: 2019-06-17; 修订日期: 2019-08-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0801402, 2018YFD0800300); 天津市自然科学基金重点项目 (17JCZDJC34200)

作者简介: 栾润宇 (1994 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为畜禽粪便有机肥重金属污染治理, E-mail: 425095692@qq.com

* 通信作者, E-mail: sunyuebing@aepi.org.cn

spectroscopy analysis showed that the small molecular substances of polysaccharides increased after composting. In summary, the addition of a passivation agent can promote the heavy metal passivation in chicken manure organic fertilizers to potentially render the compost as harmless.

Key words: composting; passivating agent; heavy metals; chicken manure; humus

据统计, 2010 年我国畜禽粪便年排放量达到 22.263 亿 t^[1], 2020 年的畜禽粪尿产生量将达到 28.11 亿 t 猪粪当量^[2]. 然而, 为促进畜禽生长, 饲料中往往添加一定剂量的重金属, 导致畜禽粪便和堆肥产物中的 Zn 和 Cu 等重金属含量严重超标^[3]. 如王飞等^[4]对华北地区饲料和畜禽粪便调查发现, 部分饲料中重金属含量超标, 按照农业部及卫生标准, 猪饲料中 Cu 和 Zn 超标率为 66.67% 和 80.00%, 肉鸡饲料中 Zn 超标 62.50%, 肉牛中 Cr 和 Pb 超标 83.33% 和 66.67%, 奶牛饲料中 Cr 超标 60.00%, 蛋鸡饲料中 Pb 超标 53.85%, 且畜禽粪便中重金属含量与饲料中重金属含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 候月卿等^[5]对比了我国不同地区畜禽粪便的重金属含量, 发现粪便中重金属主要为 Cu、Zn 超标, 且猪粪和鸡粪中重金属含量明显高于其他畜禽. Zhang 等^[6]调查东北三省部分养殖场鸡粪发现: Cu、Zn、As、Pb 和 Cd 最高含量分别达到 487.4、1 063.3、10.4、22.1 和 38.0 mg·kg⁻¹, 超标污染畜禽粪便长期施用至土壤中引起环境风险, 宋伟等^[7]对我国 138 个地区的耕地土壤重金属污染进行了调查, 发现我国耕地的土壤重金属污染率为 16.7% 左右, 其中 Cd 污染最严重, 达到 25.20%. 重金属含量超标, 进而抑制作物生长, 使其品质下降^[8], 进入食物链危害人体健康.

堆肥是实现畜禽粪便重金属无害化的重要手段^[9], 其主要原理是畜禽粪便和辅料中纤维素、半纤维素、木质素等有机物降解及腐殖质与重金属发生络合反应, 有助于有重金属向稳定化形态转化, 进而降低重金属生物有效性和活性. 然而堆肥化过程仍存在重金属钝化效率低下、稳定性较差等问题. 通过添加重金属钝化材料, 与粪便中重金属离子发生吸附、沉淀、络合和离子交换等反应, 可极大提高重金属钝化效率, 降低其生态环境风险. 候月卿等在猪粪堆肥过程中添加生物炭和腐殖质, 发现花生壳炭、腐殖质和木屑炭对 Cu、Zn 和 Cd 钝化效果最佳, 分别达到 65.8%、64.9% 和 94.7%^[10]. FeCl₃ 改性生物炭对猪粪 Cu、Zn 和 Pb 钝化率分别达到 78.7%、43.5% 和 66.5%^[11]. 何增明等^[12]的研究发现, 5.0% 海泡石 + 2.5% 膨润土复配处理对猪粪中 As 和 Zn 表现出较好的钝化效果, 残渣态 As、Zn 增幅分别达到 79.8% 和 158.6%^[12]. 然而, 针对不同钝化剂对鸡粪堆肥中重金属有效性影响的研究较

少. 本文通过高温酵素快速堆肥, 研究投加单一和复配钝化材料对鸡粪有机肥理化特性、重金属含量与形态分布以及有机质含量的影响, 以期为畜禽粪便堆肥过程中重金属的钝化技术研发提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

本实验于 2018 年 12 月在天津武清某养殖基地进行, 鸡粪由该养殖场提供. 稻草秸秆选自联丰农产品深加工稻草秸秆, 粉碎至秸秆粉备用. 酵素购自鑫宏润(天津)农业生物技术有限公司.

1.2 实验设计

将稻草秸秆与鸡粪以碳氮比为 25:1 进行混合, 含水率控制在 60% 左右在快速升温发酵一体发酵箱 (50 cm × 30 cm × 30 cm) 中充分预热 30 min 后, 添加单一海泡石、钙镁磷肥、生物炭及其复配材料, 部分研究显示^[12], 相比于其他浓度, 添加 2.5% ~ 4% 的不同种钝化剂对堆肥钝化效果普遍较好. 因此, 本实验添加 3% 含量的钝化剂, 通过调整其配比探究不同钝化剂对堆肥效果的影响. 分别为 CK 组 (无添加)、SE 组 (3% 海泡石)、NP 组 (3% 钙镁磷肥)、BI 组 (3% 生物炭)、S + N 组 (1.5% 海泡石 + 1.5% 钙镁磷肥)、S + B 组 (1.5% 海泡石 + 1.5% 生物炭)、N + B 组 (1.5% 钙镁磷肥 + 1.5% 生物炭) 和 SNB 组 (1% 海泡石 + 1% 钙镁磷肥 + 1% 生物炭). 然后加入 3% 酵素发酵, 每组处理物料总重量均为 7.5 kg, 以 60 r·min⁻¹ 翻转混匀, 在 85℃ 下发酵处理 3 h. 结束后, 取一部分鲜样进行保存, 用于检测 pH、EC、种子发芽率和根长抑制率. 另一部分样品风干处理, 用于检测总 C、总 N、重金属总量与各形态分布以及腐殖质类物质含量, 每个处理 3 次重复.

1.3 分析方法

(1) 有机肥理化特征分析 pH 测定通过蒸馏水浸提, 固液质量比为 1:10, 采用赛多利斯 PB-10 型 pH 计测定, EC 值用梅特勒-托利多仪器 FiveEasy Plus 型电导率仪测定; 有机碳采用重铬酸钾容量法-稀释热法测定; 全氮采用凯式定氮仪 (型号: KDY-9820) 进行检测.

(2) 种子发芽率 选用小白菜种子, 取固液质量比为 1:20 的溶液 5 mL 于底有滤纸的培养皿中, 取 10 粒小白菜种子在 (20 ± 1)℃ 恒温培养箱中培养 96 h 测定发芽率, 并设置 5 mL 纯净水作为对照,

GI 由以下公式计算^[10]:

$$GI(\%) = \frac{\text{浸提液种子发芽率} \times \text{平均根长}}{\text{对照组种子发芽率} \times \text{平均根长}}$$

(3) 重金属全量及各形态的测定 全量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (体积比 4:1) 消解,取 0.2 g 样品放于消煮管中,加入 10 mL 的混合溶液静置过夜,次日用控温消煮炉进行加热消解. 重金属形态分析采取欧洲共同体参考物机构(European Communities Bureau of Reference, BCR 法)改进的三步提取法测定^[13],分为可交换态、还原态、氧化态和残渣态这 4 个形态. 重金属各形态分配律及有效态钝化率分别由下式计算^[14]:

$$\text{分配率} = \frac{\text{不同形态重金属质量分数}}{\text{该重金属总质量分数}}$$

$$\text{钝化率(有效态)} = \frac{\text{堆前分配率} - \text{堆后分配率}}{\text{堆前分配率}}$$

(4) 可提取腐殖物质、胡敏酸、富里酸的提取测定 参照 Kumada 方法,改进了提取温度和分组方法^[15],用重铬酸钾容量法测定可提取腐殖质,富里酸组分碳量,胡敏酸含量 = 可提取腐殖物质 - 富里酸.

(5) 堆肥有机碳红外光谱 采用傅里叶红外光谱仪进行定性分析,红外光谱图分析委托安泰科技股份有限公司分析测试中心,在 Nicolet iS10 傅立叶变换红外光谱仪上进行,测试波数 400 ~ 4 000 cm^{-1} ,以高纯 KBr 压片为标准试剂扣除背景.

1.4 数据分析

数据采用 Origin 8.0 作图软件进行分析,采用 DPS 软件进行相关性分析,半定量分析红外光谱官能团采用 OMNIC 进行计算.

2 结果与讨论

2.1 不同钝化剂对鸡粪堆肥腐熟程度的影响

在堆肥过程中常用物理和化学等方法较为快速直观地检测堆肥腐熟程度及堆肥品质^[16],其中 pH 值是评价堆肥腐熟度的一个重要指标. 如图 1(a) 所示,与传统堆肥类似,各组处理下堆肥 pH 较堆肥前均显著增加 ($P < 0.05$),增加了 0.11 ~ 0.57 个单位. 有研究普遍发现^[17,18],堆肥腐熟后 pH 增加,呈中性或弱碱性,这是由于在微生物驱动下,蛋白质在脱氨基作用产生了大量的 NH_3 释放到堆体中,从而使 pH 值缓慢上升^[19]. 姜新有等^[20]的研究发现,添加外源物质后随着堆肥初始 pH 值增加,堆体温度也随之上升,有机物降解率加快. 因此,pH 一定程度上反映了堆肥腐熟程度. 与未添加钝化材料(CK)组处理相比,其他处理中堆肥 pH 值明

显提高 ($P < 0.05$, SE 组除外),且在 SNB 处理下 pH 最高,这可能是由于添加钝化剂提高了 pH 以及不同 pH 条件下堆肥使其效果有所不同导致的,但添加单一和复合钝化材料后鸡粪堆肥 pH 介于 6.6 ~ 7.1,均达到堆肥腐熟标准. 电导率反映出了溶液的离子性,在堆肥过程中,有机肥 EC 值呈降低趋势,由离子态向稳定态转化^[10]. 与堆肥前鸡粪相比,堆肥后有机肥 EC 值显著降低 ($P < 0.05$) [图 1(b)],这是由于在堆肥过程中 NH_3 、 CO_2 等挥发^[21]造成的. 与不添加钝化剂相比,SE、NP、BI、S + N 和 S + B 处理下 EC 值均有所抑制,其中单一海泡石和钙镁磷肥处理下 EC 值显著降低 ($P < 0.05$),而 N + B 和 SNB 处理下 EC 值略微增加. 候月卿等^[10]在猪粪中添加生物炭和腐植酸类,EC 值从堆肥前的 4 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 下降至堆肥后的 1.72 ~ 3.24 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,满足堆肥腐熟标准.

堆肥过程中有机碳的变化反映了有机物分解的情况,氮素的变化则与氨的挥发以及硝态氮的反硝化作用有关^[22]. 在高温堆肥后,有机碳含量均显著下降 ($P < 0.05$),与初始鸡粪相比,有机碳含量降低了 6.3% ~ 17.2% [图 1(c)]. 与添加单一钝化材料相比,复配处理有机碳含量均有不同程度地降低,且在 SNB 处理下达到最低,显著低于单一和两种材料复配处理 ($P < 0.05$). 与之相反,堆肥各组全氮含量较堆肥前有所提高,增加了 2.2% ~ 15.6%,且 BI 组达到最高,为 19.93 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与 CK 相比,投加单一和复配钝化剂后全氮含量整体有所提高,取到一定保氮作用. 郑瑞生等研究发现,在猪粪堆肥中投加沸石后显著减少 NH_3 挥发,氮损失率最低可减少 47.3%^[23]. 鲍艳宇等^[24]的研究发现堆肥后 TN 相对含量并不一定呈现降低的变化趋势. C/N 比值用来评价有机肥的腐熟程度,一般认为堆肥结束时 C/N 比值达到 15 ~ 20 时即可视为腐熟^[25]. 不同处理下堆肥 C/N 比值为 14.1 ~ 15.3,满足腐熟度标准 [图 1(d)].

种子发芽指数 (GI) 用来反映堆肥对植物毒性的大小^[26]. 一般条件下堆肥腐熟度越高,种子发芽指数越高,发芽抑制率反而越低. Zucconi 等^[27]认为当 GI 达到 80% 以上,堆肥对植物没有毒害. 由图 2 可以看出,初始条件下 GI 仅为 33.0%,未添加钝化剂发酵后达到 83.4%. 投加单一和复配材料后 GI 整体上均有所促进,介于 86.1% ~ 108.4% 之间 (SE 组除外),且复配处理整体上高于单一处理,说明添加钝化剂后降低了重金属的活性,其对植物的毒性有所减弱. 与纯净水条件下培养相比,未发酵鸡粪小白菜芽长抑制率达到 67.0%,发酵处理抑制率有所

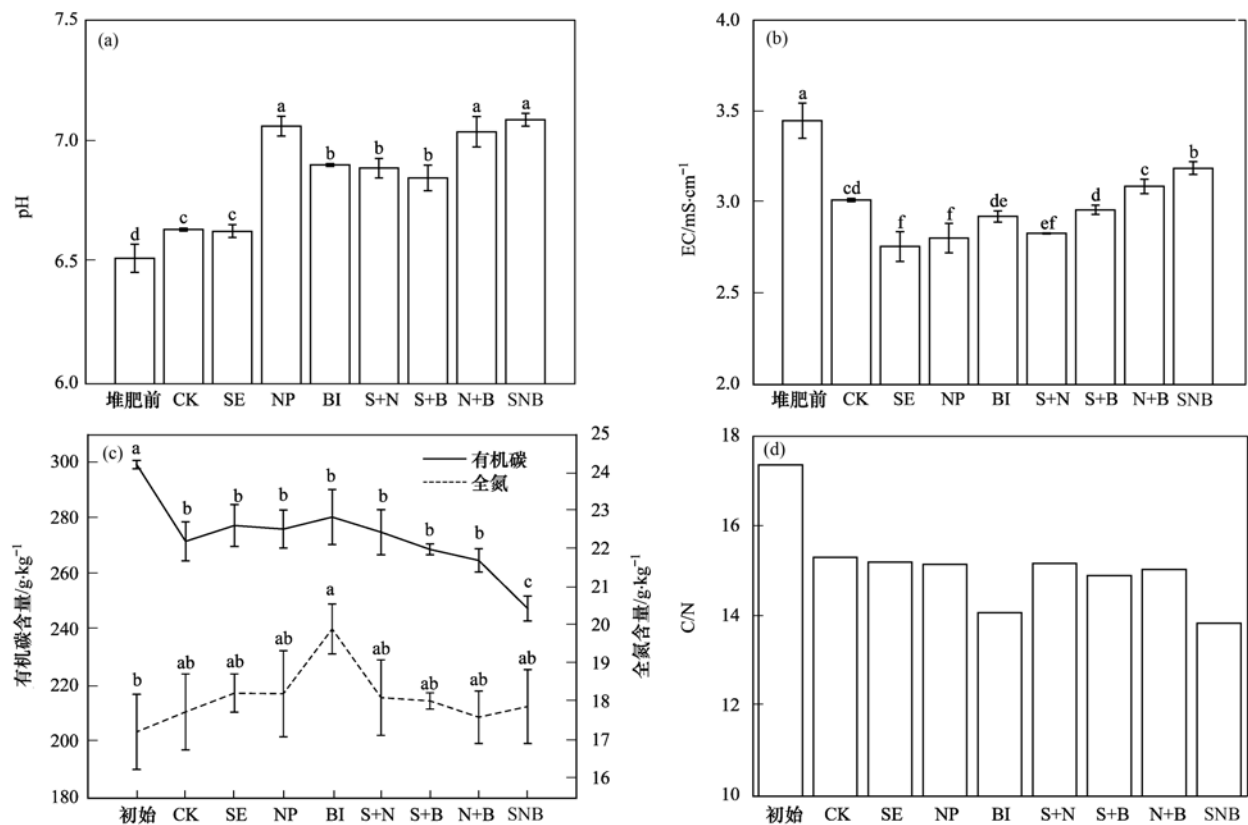


图 1 不同处理鸡粪堆肥理化性质

Fig. 1 Physical and chemical properties of chicken manure composting under different treatments

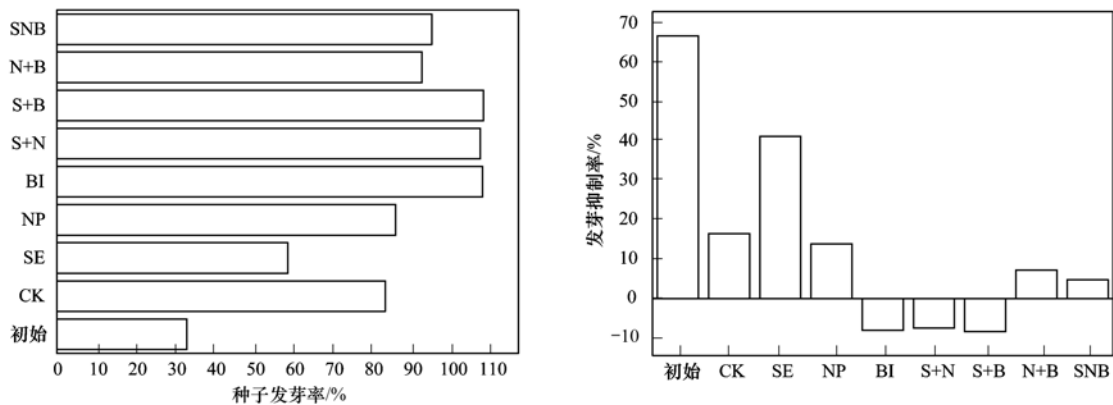


图 2 不同处理鸡粪堆肥理化性质

Fig. 2 Physical and chemical properties of chicken manure composting under different treatments

降低,其中 BI、S + N 和 S + B 处理下可促进小白菜生长. 郜斌斌等^[28]的研究发现,投加蛭石、沸石和麦饭石后,GI 增加 7.8%~17.3%.

2.2 不同处理下堆肥重金属含量与形态分布特征

由表 1 可以看出,与初始鸡粪相比,堆肥后 (CK、单一和复配钝化材料) 重金属 Mn、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 含量均有所增加,分别增加了 9.8%~19.6%、11.7%~17.5%、11.7%~23.3%、3.9%~39.1%、11.8%~19.2%、8.8%~19.1%、2.3%~16.0% 和 8.5%~16.6%. 这是由于有机肥在堆制过程中,随之有机物降解、水分散失、挥发

性物质损失等,使得堆体变小,干物质降低,重金属含量都普遍增加,呈现出一定程度的“相对浓缩效应”^[29]. 王玉军等^[30]利用玉米秸秆和鸡粪作原料,添加菌剂发酵后 Pb、Cd、As 和 Cu 分别增加了 44.4%、37.3%、38.9% 和 40.0%,荣湘民等^[31]对猪粪堆肥结果显示,各处理堆肥后重金属 As、Cu 和 Zn 的含量都普遍升高,分别为堆肥前 101.67%~211.75%. 因为堆肥整体浓缩倍数相同,因此所有重金属全量含量提升普遍在 10%~20% 之间,但与对照相比,添加单一和复配材料处理下重金属含量变化不大.

表 1 不同钝化处理下有机肥重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Heavy metal content in chicken manure under different treatments/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Mn	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
初始	280.92 ± 1.86	41.23 ± 2.15	6.26 ± 0.35	29.93 ± 3.80	340.96 ± 4.66	0.68 ± 0.07	4.82 ± 0.27	2.47 ± 0.44
CK	333.69 ± 18.38	48.25 ± 0.58	7.10 ± 0.14	33.95 ± 2.92	400.53 ± 11.45	0.81 ± 0.06	5.18 ± 0.10	2.69 ± 0.31
SE	321.45 ± 18.48	46.06 ± 3.11	6.99 ± 0.88	32.74 ± 5.71	398.09 ± 18.12	0.74 ± 0.04	5.24 ± 0.19	2.68 ± 0.01
NP	308.53 ± 15.32	48.06 ± 0.20	7.53 ± 0.05	33.96 ± 2.81	402.76 ± 2.90	0.78 ± 0.04	5.59 ± 0.19	2.85 ± 0.30
BI	316.13 ± 7.75	46.72 ± 2.32	7.35 ± 0.14	31.11 ± 2.15	381.86 ± 29.23	0.81 ± 0.04	5.21 ± 0.14	2.76 ± 0.16
S + N	335.86 ± 5.99	48.04 ± 1.44	7.24 ± 0.70	41.64 ± 5.60	383.48 ± 9.93	0.75 ± 0.10	5.49 ± 0.08	2.73 ± 0.37
S + B	318.60 ± 6.65	48.44 ± 4.10	7.06 ± 0.37	32.85 ± 3.66	398.59 ± 36.71	0.80 ± 0.11	5.26 ± 0.38	2.83 ± 0.45
N + B	315.83 ± 17.14	46.13 ± 2.63	7.72 ± 0.40	33.90 ± 1.09	406.51 ± 29.43	0.78 ± 0.06	4.93 ± 0.36	2.88 ± 0.36
SNB	334.11 ± 3.15	46.52 ± 3.57	7.50 ± 1.60	34.18 ± 3.46	381.30 ± 39.95	0.77 ± 0.14	5.22 ± 0.20	2.87 ± 0.32

仅仅根据重金属绝对量来判断堆肥的环境效应是不全面的,重金属的生物有效性与其化学形态密切相关,重金属的化学形态比其绝对量更值得关注,分配率是评价重金属环境风险的一项重要指标^[32].图3可以看出,不同处理下鸡粪有机肥中Cr残渣态比例最高(74.34%~80.48%),依次为还原态(16.50%~21.88%)、氧化态(1.53%~3.20%)和可交换态(0.85%~1.32%).与堆肥前Cr可交换态比例(1.31%)相比,添加钝化剂后鸡粪有机肥Cr可交换态比例均有所降低,其中为S+N组处理最低,仅为0.82%,而堆肥结束后残渣态也均有不同幅度增加,且不同钝化剂复配高于单一钝化剂处理.在初始条件下,鸡粪有机肥Cu形态比例大小表现为还原态>残渣态>氧化态>可交换态,添加钝化剂后堆肥Cu残渣态占比均大幅提高,其中N+B处理下Cu残渣态占比高达52.63%,可交换态、还原态比例相应不同程度下降.不同材料对Cu的钝化效果表现为复配处理>单一处理>不添加钝化剂.Zn的四部形态分配律分别为氧化态(49.68%~58.37%)>还原态(28.47%~43.70%)>可交换态(16.91%~29.27%)>残渣态(18.21%~27.00%),可以发现堆肥结束后可交换态占比均不同幅度地降低,添加复配钝化剂可交换态钝化效果好于单一钝化剂组,最低组SNB可交换态占比由29.27%降低至16.91%,其他形态占比不同幅度增加,从残渣态看,N+B增幅最高,占比由18.21%增加至27.00%.在堆肥结束后,As各形态占比依次为可交换态(29.20%~27.24%)>还原态(23.48%~30.77%)>残渣态(21.66%~30.93%)>氧化态(9.67%~16.88%),由图3可以发现堆肥后可交换态占比不同程度地下降,且全部低于CK组,其中最高组SNB在堆肥后可交换态占比从堆肥前的37.24%降低到16.91%.Cd各形态占比为残渣态(81.24%~83.71%)>还原态(6.58%~8.37%)>可交换态(5.35%~6.45%)>氧化态(3.49%~

5.06%),在堆肥结束后,有效态占比全部下降,但变化较小,除BI组外,堆肥后各组可交换态占比均低于CK组(5.71%),可交换态分配律最低组S+N(5.26%),氧化态均提高,且复合处理组氧化态占比高于单一处理组,最高组SNB氧化态占比由堆肥前的6.58%增加到8.37%.Pb不同形态分配率整体上表现为还原态(36.76%~46.33%)>残渣态(34.59%~45.06%)>氧化态(14.53%~18.57%)>可交换态(0.36%~0.72%),如图3可发现在堆肥结束后,主要体现为各组残渣态占比一定幅度提高,各钝化剂处理组普遍高于CK组,但不同钝化剂处理组间差异不明显,最高组BI占比增至45.06%.可交换态变化较小.Ni的四部形态分配律分别为可交换态(22.04%~36.25%)>残渣态(22.07%~37.31%)>还原态(21.13%~29.36%)>氧化态(14.97%~20.94%),在堆肥后可交换态占比均下降,除NB组外,各组堆肥后可交换态分配律均低于CK组(29.47%),最低组SNB由堆肥前36.24%降至22.04%,此外,还原态残渣态均有一定幅度的提升,其中添加钝化剂处理的还原态残渣态占比均高于CK,其中含有SE和NP组残渣态占比最高最高组S+N残渣态占比增加至37.31%.Mn的四部形态分配律分别为可交换态(49.28%~61.97%)>残渣态(17.65%~24.51%)>氧化态(17.00%~24.89%)>还原态(2.71%~4.69%)在堆肥后可交换态占比均下降,除BI、N+B和SNB组外,各组堆肥后可交换态分配律均低于CK组(54.84%),且各组间并无明显差异.

重金属各形态反映了其有效性,其中可交换态生物有效性最强,只要增大介质中的离子强度,重金属就会释放出来^[30],同时较容易被植物吸收,因此有效态含量的减少对堆肥重金属钝化效果的影响较为重要,而钝化率则更直观地反映不同钝化材料对重金属有效态钝化强弱.投加不同钝化材料堆肥后,不同重金属钝化率整体上均有所增加(表2).与对

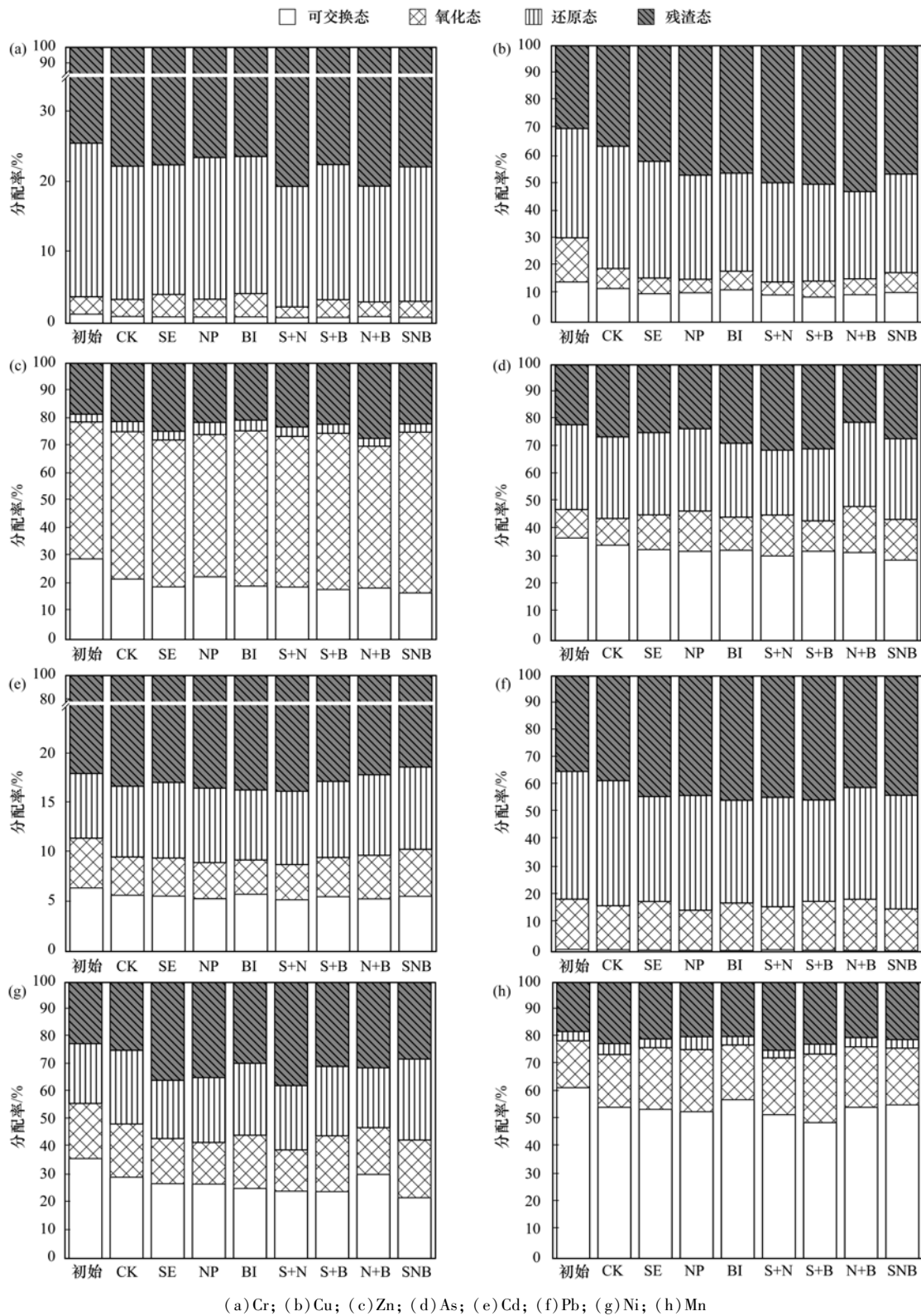


图 3 不同处理下重金属形态分配率

Fig. 3 Ratio of heavy metal fraction under different treatments

照相比, Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 钝化率最大分别增加了 12.29%、8.97%、20.49%、21.11%、17.17%、14.63%、6.99% 和 42.74%。其中, S+N 处理对 Cr 和 Cd 钝化效果最好, S+B 处理对 Mn 和 Cu 钝化效果最好, SNB 处理对 Ni、Zn、As

和 Pb 钝化效果最好。有研究表明 pH 变化和吸附作用对重金属形态变化有较大的影响^[33], 一方面堆肥后 pH 值均呈增加趋势, 另一方面添加钝化材料通过离子交换、表面吸附、共沉淀等与重金属发生作用, 从而降低了有机肥中重金属活性。海泡石和生物

炭具有较大的空腔表面,对重金属离子具有较强的吸附能力^[34],何增明等^[12]在好氧高温堆肥中添加5%的海泡石对As和Zn起到较好地钝化效果,候月卿等^[10]在堆肥中添加木屑炭,对Cd的钝化效果较

达到94.67%。含P物质如钙镁磷肥可降低土壤Cu和Zn的生物有效性^[35]。李国学等^[36]在研究污泥堆肥处理中重金属钝化剂时指出,磷矿粉和粉煤灰效果较好。

表2 不同处理下重金属钝化率/%

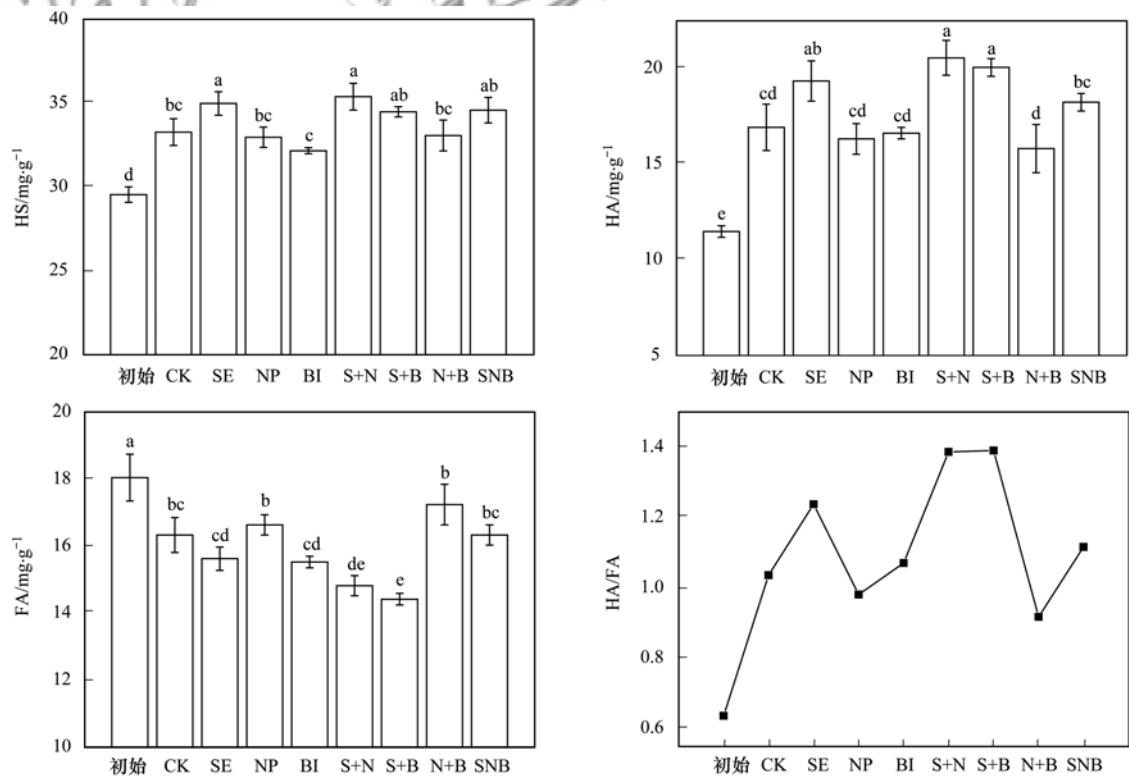
Table 2 Stabilization ratio of heavy metals under different treatments/%								
项目	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
CK	25.43	11.51	18.69	16.35	25.05	6.96	11.50	15.67
SE	29.40	12.71	25.11	29.07	34.72	11.35	12.80	27.64
NP	32.18	14.08	25.55	26.65	22.21	13.00	16.77	40.83
BI	29.63	7.08	30.01	19.49	33.78	11.94	9.91	43.71
S+N	37.72	15.86	32.70	32.35	34.91	17.45	18.49	16.72
S+B	35.68	20.48	33.07	37.46	37.94	12.93	13.75	33.44
N+B	26.82	11.49	15.84	31.51	36.00	14.15	17.17	44.49
SNB	35.06	10.09	39.18	26.19	42.22	21.59	13.17	58.41

2.3 不同钝化材料对堆肥腐殖物质的影响

图4为腐殖质(HS)、胡敏酸(HA)、富里酸(FA)及HA/FA变化趋势,可以发现堆肥后HS含量增加,堆肥后分别增加了8.8%~19.8%,堆肥结束后,各组均与堆肥前差异显著($P<0.05$),但堆肥后各组间差异不显著,仅有SE组、S+N组堆肥结束后腐殖质增加量与CK差异性显著($P<0.05$),与CK差异显著。HA含量不同程度地升高,堆肥后分别增加37.7%~78.9%,均与堆肥前差异显著($P<0.05$),但不同处理间仅有SE组、S+N组、S+B组与CK差异显著($P<0.05$)。堆肥后FA有所降

低,相较于堆肥前降低4.47%~20.11%,均与堆肥前差异显著($P<0.05$),但不同处理间仅有S+N、S+B与CK差异显著($P<0.05$)。HA/FA升高,从堆肥前0.63分别增加至0.92~1.39。

在堆肥过程中可提取腐殖物质是有机物料在微生物、酶的作用下形成的一类特殊的高分子化合物^[37],卜贵军等^[38]采用三维荧光光谱研究发现,在鸡粪堆肥后期类腐殖质荧光区Ⅲ和Ⅴ明显上升,预示腐殖质含量增加。本实验可发现堆肥后各组腐殖质含量均增加,与堆肥前差异性显著($P<0.05$),这是因为堆肥过程中,有机物料不断分解,可提取腐殖



不同小写字母表示相互间存在显著性差异($P<0.05$),各处理间无共同小写字母即为差异达到5%显著水平

图4 不同处理下腐殖酸、FA、HA以及HF/HA变化情况

Fig. 4 Change of humic acid, FA, HA, and HF/HA under different treatments

物质含量增加所致,但组间差异不显著,说明钝化剂对腐殖质变化没有明显影响。

而胡敏酸(HA)和富里酸(FA)是腐殖质的重要组成部分,在堆肥发酵过程中,木质素氧化形成胡敏酸,进一步氧化生成富里酸,HA/FA 通常用来评估堆肥腐熟度的重要指标,数值越大,表示腐熟堆肥腐殖化程度越高^[39]。本实验堆肥结束后,大分子 HA 增加,均与堆肥前差异性显著($P < 0.05$),意味着腐殖质从水溶态向固态的转化,但组间差异性不显著。小分子 FA 减少,这表明了堆肥存在促进富里酸分解的过程,马开星等研究发现,鸡粪堆肥富里酸含量降低,最大可减少 47.1%^[40],于其研究较为一致。而 HA/FA 通常用来评估堆肥腐熟度的重要指标,数值越大,表示腐熟堆肥腐殖化程度越高^[41]。本实验中由于 HA/FA 比值的增大,对降低堆肥原料中重金属的迁移性和有效性有重要意义,可发现复配组(S+N、S+B和 SNB)HA/FA 较高,这可能与堆肥前添加钝化剂影响其 pH 环境导致堆肥效果不同有关。

不同来源的腐殖质有类似的结构组成和官能团,根据前人的研究结果,具体红外光谱各吸收波段归属如下^[42~44]: $3\ 200 \sim 3\ 500\text{ cm}^{-1}$,羟基的氢键伸缩振动,一部分是有机物中碳水化合物的羟基吸收,另一部分是样品中所含水分的羟基吸收和氨基酸中的 N—H 伸缩振动吸收; $2\ 915 \sim 2\ 935\text{ cm}^{-1}$,脂肪族 C—H 伸缩振动,—CH₂—不对称; $1\ 620 \sim 1\ 650\text{ cm}^{-1}$,取代的芳环的环振动,酰胺中 C=O、N—H 键及吸湿水的振动; $1\ 421 \sim 1\ 431\text{ cm}^{-1}$,羧酸分子中的—OH 面内弯曲振动、羧酸盐的 C=O 伸缩振动和脂肪族=CH₂ 的摇摆振动; $1\ 030 \sim 1\ 080\text{ cm}^{-1}$,多糖或多糖类似物的 C—O 键以及硅酸盐杂质的 Si—

O 键伸缩振动。

特征峰吸收强度的大小和吸收峰的相对强度可以反映官能团含量的相对多少^[45]。由图 5 和表 3 可发现堆肥前后主要吸收带一致,某些波峰的峰形和峰吸收强度与堆肥前有一定差异,体现出堆肥前后官能团的性质变化,在 $3\ 200 \sim 3\ 500\text{ cm}^{-1}$ 处吸收强度较高,堆肥处理后增加,与于子旋等^[33]的研究一致,这说明各组堆肥后多糖类的小分子物质均增加,其中堆肥后 SNB 组在 $3\ 428\text{ cm}^{-1}$ 相对于其余组较高,说明其堆肥进程较快。此外 SNB 组相对于其他组变化较大,说明其各物质反应均较剧烈。 $1\ 430\text{ cm}^{-1}$ 对 $1\ 030\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰的比值有所降低,这与 Fatima 等^[35]的研究一致,可能与堆肥的降温腐熟期活动加剧有关。相对于鸡粪传统堆肥 $1\ 650\text{ cm}^{-1}$ 吸收强度略微下降,这说明了芳香程度降低,这与孙向平^[46]的研究结果类似。因此从吸收峰来看与传统堆肥基本一致,说明高温酵素堆肥可行性较高,但各钝化剂组间差异并不明显。

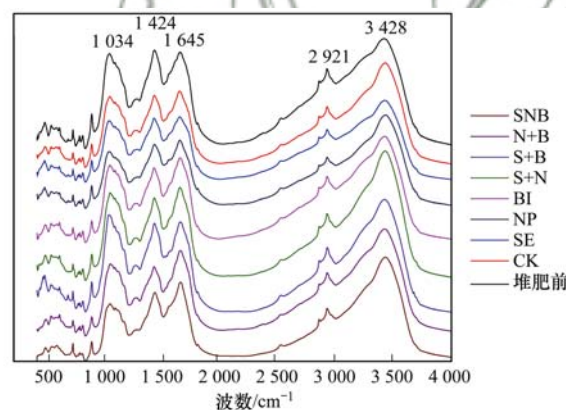


图 5 不同处理下红外光谱特征

Fig. 5 Infrared spectral characteristics under different treatments

表 3 不同处理下各官能团半定量分析/%

Table 3 Semi-quantitative analysis of functional groups under different treatments/%

项目	羟基 H 键	脂肪族 C—H	芳香环	羧酸分子中—OH	多糖或多糖类似物的 C—O 键
堆肥前	49.59	1.25	15.18	10.09	23.89
CK	61.45	1.10	12.73	7.02	17.71
SE	56.84	1.11	14.58	8.17	19.29
NP	62.75	0.97	12.34	7.58	16.36
BI	58.97	1.15	14.96	6.74	18.17
S+N	61.86	0.96	12.91	6.20	18.07
S+B	55.93	1.17	12.36	8.03	22.51
N+B	59.01	1.18	15.86	6.31	17.64
SNB	64.17	1.07	13.76	6.42	14.58

3 结论

(1)堆肥后在各理化性质方面,均与堆肥前差异性显著($P < 0.05$),不同处理下 pH、EC、C/N、种子发芽率均达到有机肥腐熟标准。

(2)添加钝化剂对重金属钝化效果明显,且复配处理组效果优于单一处理,其中 SNB 组处理对重金属钝化效果最佳。

(3)投加钝化材料后,堆肥中腐殖类物质较堆肥前显著增加($P < 0.05$),且复配钝化剂处理下

HA/FA 普遍高于单一处理,多糖小分子物质均增加,芳香结构化降低,显示钝化剂添加在一定程度上促进堆肥效果。

参考文献:

- [1] 仇焕广,廖绍攀,井月,等.我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J].环境科学,2013,34(7):2766-2774.
Qiu H G, Liao S P, Jing Y, *et al.* Regional differences and development tendency of livestock manure pollution in China[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2766-2774.
- [2] 林源,马骥,秦富.中国畜禽粪便资源结构分布及发展展望[J].中国农学通报,2012,28(32):1-5.
Lin Y, Ma J, Qin F. The structure distribution and prospect of China manure resource [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(32): 1-5.
- [3] 张辉,李文凤,赵盈盈,等.猪饲料中重金属对猪粪有机肥的影响[J].浙江农业科学,2018,59(11):2120-2122.
- [4] 王飞,邱凌,沈玉君,等.华北地区饲料和畜禽粪便中重金属质量分数调查分析[J].农业工程学报,2015,31(5):261-267.
Wang F, Qiu L, Shen Y J, *et al.* Investigation and analysis of heavy metal contents from livestock feed and manure in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 261-267.
- [5] 侯月卿,沈玉君,刘树庆.我国畜禽粪便重金属污染现状及其钝化措施研究进展[J].中国农业科技导报,2014,16(3):112-118.
Hou Y Q, Shen Y J, Liu S Q. Present status of heavy metal pollution from livestock waste and progress on passivation measures[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(3): 112-118.
- [6] Zhang F S, Li Y X, Yang M, *et al.* Content of heavy metals in animal feeds and manures from farms of different scales in Northeast China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9(8): 2658-2668.
- [7] 宋伟,陈百明,刘琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J].水土保持研究,2013,20(2):293-298.
Song W, Chen B M, Liu L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(2): 293-298.
- [8] 钱雯婕,袁青锋,王妙星,等.重金属污染对农作物的影响及应对措施[J].现代农业科技,2013,(15):247,249.
- [9] 李冉,赵立欣,孟海波,等.有机废弃物堆肥过程重金属钝化研究进展[J].中国农业科技导报,2018,20(1):121-129.
Li R, Zhao L X, Meng H B, *et al.* Research progress of heavy metal immobilization and its mechanism during composting[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(1): 121-129.
- [10] 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.
- [11] 李冉,孟海波,沈玉君,等.改性生物炭对猪粪堆肥过程重金属钝化效果研究[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2304-2311.
Li R, Meng H B, Shen Y J, *et al.* Immobilization of heavy metals by modified biochar during composting of pig manure[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(10): 2304-2311.
- [12] 何增明,刘强,谢桂先,等.好氧高温猪粪堆肥中重金属铜、锌的形态变化及钝化剂的影响[J].应用生态学报,2010,21(10):2659-2665.
He Z M, Liu Q, Xie G X, *et al.* Changes of heavy metals form during aerobic high temperature composting of pig manure and the effects of passivators [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2659-2665.
- [13] 刘甜田,何滨,王亚韩,等.改进BCR法在活性污泥样品重金属形态分析中的应用[J].分析试验室,2007,26(S1):17-20.
- [14] 杨坤,李军营,杨宇虹,等.不同钝化剂对猪粪堆肥中重金属形态转化的影响[J].中国土壤与肥料,2011,(6):43-48.
Yang K, Li J Y, Yang Y H, *et al.* Effect of passivator on form transformation of heavy metal in composting of pig manure [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011, (6): 43-48.
- [15] 窦森,于水强,张晋京.不同CO₂浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J].土壤学报,2007,44(3):458-466.
Dou S, Yu S Q, Zhang J J. Effects of carbon dioxide concentration on humus formation in corn stalk decomposition [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 458-466.
- [16] Bernal M P, Alburquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(22): 5444-5453.
- [17] 王磊元,秦翠兰,周岭.畜禽粪便堆肥过程中传热传质规律研究[J].中国农机化学报,2016,37(1):230-234.
Wang L Y, Qin C L, Zhou L. Study on heat and mass transfer during the cow manure composting [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 230-234.
- [18] 丛林.微生物菌剂对畜禽粪便堆肥过程中养分及腐熟度动态变化规律的研究[D].长春:吉林农业大学,2013.
Cong L. Study on the dynamic variation rule of nutrient and putrescibility in the process of livestock and poultry manure composting of microbial agents [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013.
- [19] Cegarra J, Alburquerque J A, González J, *et al.* Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive-mill by-product ("alperujo") managed by mechanical turning [J]. Waste Management, 2006, 26(12): 1377-1383.
- [20] 姜新有,王晓东,周江明,等.初始pH值对畜禽粪便和菌渣混合高温堆肥的影响[J].浙江农业学报,2016,28(9):1595-1602.
Jiang X Y, Wang X D, Zhou J M, *et al.* Effects of initial pH values on maturity and nitrogen loss during co-composting of pig manure and edible fungus residue [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(9): 1595-1602.
- [21] Zmora-Nahum S, Markovitch O, Tarchitzky J, *et al.* Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(11): 2109-2116.
- [22] 黄向东,韩志英,石德智,等.畜禽粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J].应用生态学报,2010,21(1):247-254.
Huang X D, Han Z Y, Shi D Z, *et al.* Nitrogen loss and its control during livestock manure composting [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 247-254.
- [23] 郑瑞生,封辉,李延.沸石在猪粪堆肥过程中保氮效果研究[J].环境科学学报,2010,30(5):1017-1022.
Zheng R S, Feng H, Li Y. Nitrogen conservation in swine manure compost with zeolite usage [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(5): 1017-1022.
- [24] 鲍艳宇,周启星,颜丽,等.畜禽粪便堆肥过程中各种氮化

- 化合物的动态变化及腐熟度评价指标[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(2): 374-380.
- Bao Y Y, Zhou Q X, Yan L, *et al.* Dynamic changes of nitrogen forms in livestock manure during composting and relevant evaluation indices of compost maturity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(2): 374-380.
- [25] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 高温堆肥对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的作用[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(2): 337-343.
- Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M, *et al.* Degradation of antibiotics and passivation of heavy metals during thermophilic composting process[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, **39**(2): 337-343.
- [26] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter [J]. Environmental Pollution, 1996, **93**(3): 249-256.
- [27] Zucconi F, Forte M, Monaco A, *et al.* Biological evaluation of compost maturity[J]. Biocycle, 1981, **22**: 27-29.
- [28] 郜斌斌, 王选, 常瑞雪, 等. 黏土矿物和化学添加剂对牛粪堆肥过程氮素固持的影响[J]. 农业工程学报, 2018, **34**(20): 250-257.
- Gao B B, Wang X, Chang R X, *et al.* Effects of clay and chemical additives on nitrogen retention during cow manure composting [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(20): 250-257.
- [29] Zorpas A A, Inglezakis V J, Loizidou M. Heavy metals fractionation before, during and after composting of sewage sludge with natural zeolite[J]. Waste Management, 2008, **28**(11): 2054-2060.
- [30] 王玉军, 窦森, 李业东, 等. 鸡粪堆肥处理对重金属形态的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 913-917.
- Wang Y J, Dou S, Li Y D, *et al.* Speciation change of heavy metals during composting process of chicken manure [J]. Environmental Science, 2009, **30**(3): 913-917.
- [31] 荣湘民, 宋海星, 何增明, 等. 几种重金属钝化剂及其不同添加比例对猪粪堆肥重金属(As, Cu, Zn)形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(4): 136-140, 160.
- Rong X M, Song H X, He Z M, *et al.* Effect of some heavy mental passivation and its appending proportion on form transformation of heavy mental(As, Cu and Zn) in pig manure composting[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, **23**(4): 136-140, 160.
- [32] 黄月娥. 城市污泥5种重金属分布特征及其环境风险评价[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- Huang Y E. Distribution characteristics and environmental risk assessment of five heavymetals in sewage sludge[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [33] 于子旋, 杨静静, 王语嫣, 等. 畜禽粪便堆肥的理化腐熟指标及其红外光谱[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(6): 2015-2023.
- Yu Z X, Yang J J, Wang Y Y, *et al.* Physical and chemical maturity indexes and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of animal manures during composting[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(6): 2015-2023.
- [34] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, *et al.* Assessment of sepiolite for immobilization of cadmium-contaminated soils [J]. Geoderma, 2013, **193-194**: 149-155.
- [35] Fatima Z E O, Loubna E F, Laurent L, *et al.* Evaluation of lignocellulose compost stability and maturity using spectroscopic (FTIR) and thermal (TGA/TDA) analysis [J]. Ecological Engineering, 2015, **75**: 217-222.
- [36] 李国学, 孟凡乔, 姜华, 等. 添加钝化剂对污泥堆肥处理中重金属(Cu, Zn, Mn)形态影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, **5**(1): 105-111.
- Li G X, Meng F Q, Jiang H, *et al.* Studies on the effect of stabilizing materials to the status of heavy metals (Cu, Zn, Mn) during composting of sewage sludge [J]. Journal of China Agricultural University, 2000, **5**(1): 105-111.
- [37] 王玉军, 窦森, 张晋京, 等. 农业废弃物堆肥过程中腐殖质组成变化[J]. 东北林业大学学报, 2009, **37**(8): 79-81.
- Wang Y J, Dou S, Zhang J J, *et al.* Changes of humic components during agricultural waste composting[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, **37**(8): 79-81.
- [38] 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, (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, (11): 4352-4358.
- [39] Jindo K, Sonoki T, Matsumoto K, *et al.* Influence of biochar addition on the humic substances of composting manures [J]. Waste Management, 2016, **49**: 545-552.
- [40] 马开星, 邹长明, 赵建荣. 鸡粪堆肥腐熟过程中腐熟度参数的变化[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(3): 289-292.
- Ma K X, Zou C M, Zhao J R. Changes of maturity indexes during the chicken manure composting[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, **27**(3): 289-292.
- [41] Awasthi M K, Awasthi S K, Wang Q, *et al.* Role of Ca-bentonite to improve the humification, enzymatic activities, nutrient transformation and end product quality during sewage sludge composting[J]. Bioresource Technology, 2018, **262**: 80-89.
- [42] 王帅, 窦森, 刘艳丽, 等. 微生物对黑土添加麦秸后腐殖质结构特征影响的红外光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(9): 2409-2413.
- Wang S, Dou S, Liu Y L, *et al.* Characterization of soil humus by FTIR spectroscopic analyses after being inoculated with different microorganisms plus wheat straw[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, **32**(9): 2409-2413.
- [43] 宋彩红, 李鸣晓, 魏自民, 等. 初始物料组成对堆肥理化、生物和光谱学性质的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(8): 2268-2274.
- Song C H, Li M X, Wei Z M, *et al.* Influence of the composition of the initial mixtures on the physicochemi-cal and biological properties and spectral characteristics of composts [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, **35**(8): 2268-2274.
- [44] 张彩华. 光谱法在腐殖质研究中的应用进展[J]. 光谱实验室, 2011, **28**(2): 693-696.
- Zhang C H. Advance of application of spectroscopy in humic substance [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2011, **28**(2): 693-696.
- [45] Zhang R, Wang H X, Liu Q H, *et al.* Chemical and ultrastructural studies of lignocellulose biodegradation during *Agaricus bisporus* cultivation [J]. Biotechnology and Applied Biochemistry, 2014, **61**(2): 208-216.
- [46] 孙向平. 不同控制条件下堆肥过程中腐殖质的转化机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
- Sun X P. The humuns transformation mechanism research during composting under different controlled conditions [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, Jilili Abuduwali, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhao, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Tian-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshangang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)