

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能

宿程远^{1,2}, 郑鹏¹, 阮祁华¹, 覃菁菁¹, 卢宇翔¹, 李俊兵¹

(1. 广西师范大学环境与资源学院, 桂林 541004; 2. 岩溶生态与环境变化研究广西高校重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 以中药渣与城市污泥为原料进行共堆肥实验, 考察了不同物料质量配比与中药渣不同时间投加条件下, 堆体在堆肥过程中温度、有机质、挥发氨、蛋白酶活性等理化指标的变化情况, 确定了最佳的物料质量配比与中药渣投加时间; 同时探讨了中药渣投加对堆肥过程中溶解性有机质 (DOM) 及微生物群落结构的影响。结果表明, 中药渣作为外加碳源投加后 (60 g 中药渣 + 300 g 污泥), 提高了堆体的温度, 减少了氨的挥发, 且提高了堆体中蛋白酶的活性, 氨的挥发量减少了 35.9%, 蛋白酶的活性提高了 80.5%。同时中药渣可作为调理剂, 在堆肥前期投加, 促进了有机质的降解, 从而加快了堆肥的进程。而通过对 DOM 的紫外-可见和荧光光谱特征分析表明, 投加中药渣有利于提高堆肥的腐殖化程度; 同时通过磷脂脂肪酸 (PLFA) 分析可以发现, 投加中药渣后使得堆体中革兰氏阴性菌与真菌的数量有所提高。

关键词: 中药渣; 城市污泥; 共堆肥; 氮损失; 溶解性有机质

中图分类号: X703.1; X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-4062-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.10.050

Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues

SU Cheng-yuan^{1,2}, ZHENG Peng¹, RUAN Qi-hua¹, QIN Jing-jing¹, LU Yu-xing¹, LI Jun-bing¹

(1. School of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China; 2. Key Laboratory of Karst Ecology and Environment Change of Guangxi Department of Education, Guilin 541004, China)

Abstract: With Chinese medicinal herbal residues and municipal sludge as raw materials for co-composting experiment, the effect of the material ratio and addition time of Chinese medicinal herbal residues on the composting efficiency were investigated, including the change of the temperature, organic matter, ammonia nitrogen, and activity of protease. The best composting conditions were determined based on the results. The experimental results showed that the temperature of the pile was raised in the presence of 60 g Chinese medicinal herbal residues as carbon source and 300 g municipal sludge, the ammonia volatilization was reduced and the activity of protease was improved. The ammonia volatilization was reduced by 35.9% and the activity of protease was increased by 80.5% in 15 d, respectively. Especially, in the early stage, addition of Chinese medicinal herbal residues as conditioner could increase the organic matter degradation. Thus, the composting process was accelerated. Changes in the UV-visible and fluorescence characteristics of dissolved organic matter (DOM) during the co-composting process were discussed. The treatment with Chinese medicinal herbal residues improved the maturity of the compost. Moreover, phospholipid fatty acid (PLFA) method was used to estimate the microbial community structure changes. It showed that the number of microbial community such as fungi and Gram negative bacteria increased with addition of Chinese medicinal herbal residues.

Key words: Chinese medicinal herbal residues; urban sludge; co-composting; nitrogen loss; dissolved organic matter

随着我国城市化建设的发展, 城市污水处理率逐年上升, “十二五”规划明确指出: 到 2015 年城市污水处理率至少达到 85%。但在我国污水处理设施的建设过程中长期存在着“重水轻泥”的情况, 目前进行处置和资源化利用的污泥不足 50%, 而城市污泥若不采取妥善处置, 必然会对环境带来的威胁^[1]。当前国内外主要的污泥处理技术包括填埋、厌氧消化、焚烧与好氧堆肥等^[2], 其中好氧堆肥即在特定的环境条件下微生物菌群分解转化有机物, 将污泥腐熟成稳定的腐殖质, 用于改善肥田或土壤, 最终达到无害化、减量化与资源化的目的, 因此好氧堆肥成为污泥处理领域的主流技术之一^[3,4]。污泥堆肥过程中氮素损失严重是在实际应用中长期未

能妥善解决的重要问题, 研究表明在整个堆肥过程中, 氮的损失最大可以达到 60% 以上。对于氮素损失, 一方面会降低肥效, 另一方面会产生臭气, 影响周边的环境空气质量, 因此对于氮素损失的控制成为制约污泥堆肥的一个瓶颈^[5~8]。国内外学者在堆肥过程中添加金属盐类, 或者添加吸附剂, 如沸石、浮石等, 来控制氮素的损失, 但受其经济条件的制约, 难以广泛采用。更多的是采用添加富含碳的

收稿日期: 2016-04-25; 修订日期: 2016-05-27

基金项目: 广西高校科学技术研究项目 (KY2015ZD018); 岩溶生态与环境变化研究广西高校重点实验室资助项目 (YRHJ15Z006)

作者简介: 宿程远 (1981~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为废水及污泥处理理论与技术, E-mail: suchengyuan2008@126.com

物质,如添加秸秆、稻草等,以调理剂形式存在的外加碳源在氮素损失控制中发挥了作用^[8~10]。

中医药作为我国传统文化的珍宝,因其药性温和、副作用小等优点,近些年来其发展更为迅速;随着各大中药制药企业的迅速发展,中药渣排放量也与日俱增;中药渣属于典型的“放错了地方的资源”,排放的药渣含水率适宜、性质均一、无杂质,且含有纤维素、多糖等大量有机成分。中药渣大部分被视为垃圾而排放掉,不仅仅会造成了资源的极大浪费,更严重的是给周围环境带来污染。因此,中药渣合理的处理处置成为中药企业所要面临的严峻问题^[11,12]。

鉴于此,本实验以中药渣作为调理剂与外加碳源,研究了中药渣与污泥共堆肥的效能,重点探讨了不同质量配比以及中药渣不同的投加时间对堆肥过程的影响,分析了堆肥过程中堆体温度、有机质、挥发氨、蛋白酶活性等理化指标的情况;同时利用紫外-可见光谱(UV-vis)、三维荧光光谱(EEM)、磷脂脂肪酸(PLFA),探讨了中药渣投加对堆肥过程中 DOM 及微生物群落结构的影响,以期为解决中药渣与污泥处理问题提供新思路。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所需原料为城市污水厂剩余污泥与中药渣。污泥取自桂林市某污水处理厂脱水后的剩余污泥。中药渣取自桂林市某医院,并进行一定的风干,堆肥时将其粉碎。污泥与中药渣的基本性质参数如表 1 所示。从中可知,污泥的有机物含量较低,而中药渣含有较高的碳源,同时中药渣的含水率较低。

表 1 堆肥物料部分性质参数

Table 1 Physicochemical parameters of the raw materials				
参数	总固体/%	pH	有机质/%	总氮/%
污泥	18.8	6.21	55.40	5.68
中药渣	67.7	6.44	79.51	2.53

1.2 实验装置与实验过程

本实验分为两个周期进行,每个周期大约进行 1 个月。按照文献[5]的方法,第一周期以中药渣与污泥的不同质量配比进行设计实验,研究其堆肥的理化性质以及有关酶活性的变化,共分为 3 个堆肥发酵罐,编号为 1、2、3 号瓶,配比分别是 60 g(中药渣)+300 g(污泥)、120 g(中药渣)+240 g(污泥)、180 g(中药渣)+180 g(污泥)。通过第一周期的实验得出一个效果较好的质量配比,第二周期在

中药渣与污泥质量配比相同的前提下,进行不同的中药渣投加时间的分析,分别编号为 4、5 号瓶,4 号瓶在实验开始阶段即投加中药渣,5 号瓶在堆肥的第 10 d 投加中药渣。在一、二周期均进行对照组实验,堆体全部为 360 g 污泥。

实验用发酵罐尺寸:外径为 15 cm、高 20 cm,7 个;实验用 150 mL 的装有 20 g·L⁻¹硼酸溶液的锥形瓶吸收堆体所挥发的氨气,7 个;自动恒温水浴锅 1 台;鼓气泵 1 台。实验过程:将堆肥发酵罐置于恒温水浴锅中,水浴锅温度设置为 30℃^[13]。每隔 2 d 测定堆肥发酵罐里堆体的温度以及挥发的氨气;每隔 5 d 测定堆体的有机质以及蛋白酶。

1.3 分析方法

氨氮采用纳氏试剂分光光度法进行分析。蛋白酶采用茚三酮分光光度法进行分析^[10]。有机质的测定为取 1~2 g 堆体置于已称重的坩埚中,60℃下烘干 12 h,称重,先计算其含水率;再将已烘干的堆体置于马弗炉,在 550℃烘 2 h,称重,从而计算其有机质含量。采用去离子水提取堆体的 DOM,将堆肥样品自然风干后,称取 1 g 干物质,加入 20 mL 去离子水,在 200 r·min⁻¹振荡 24 h,然后 3 000 r·min⁻¹下离心 20 min,上清液过 0.45 μm 滤膜后,滤液即为堆肥 DOM 样品^[14];采用荧光光谱仪(HITACHI, F7000)对其进行三维荧光扫描,继而计算荧光指数(FI)与自生源指数(BIX),具体计算方法为:FI 为 $E_x=370\text{ nm}$ 时, E_m 波长分别为 450 和 500 nm 时的荧光强度比值;BIX 为 $E_x=310\text{ nm}$ 时, E_m 波长分别为 380 和 430 nm 时的荧光强度比值^[14];并且利用双通道紫外可见分光光度计(岛津,UV-2550)对 DOM 进行扫描。PLFA 分析参考 SHERLOCK 系统所提供的操作手册,堆体样品预处理需要经过皂化、甲基化以及萃取过程,而后通过 SHERLOCK 微生物鉴定系统与安捷伦 6890 高效气相色谱仪对其特征脂肪酸进行分析鉴定。

2 结果与讨论

2.1 温度的变化情况

温度与堆体中微生物的代谢活动密不可分,可间接地表现微生物对有机质的利用程度,亦从一定意义上可表征堆肥效应是否达到无害化,因此本实验对两个堆肥周期堆体温度的变化进行了分析,如图 1 所示。

由图 1 第一周期的堆体温度变化可知,堆肥各

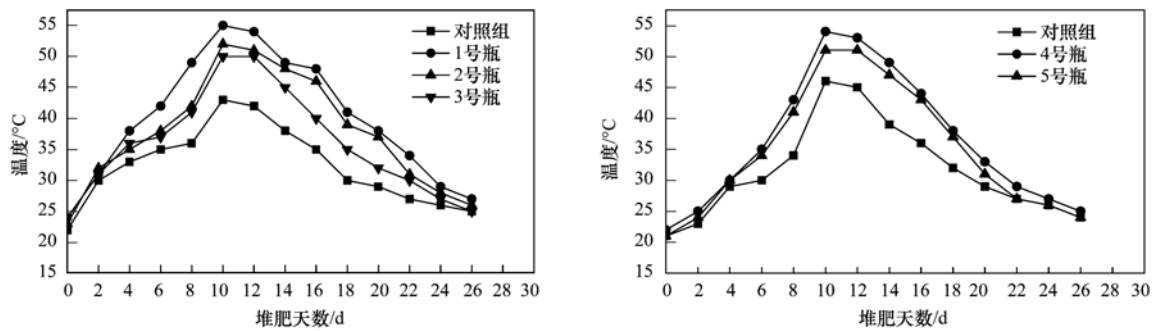


图 1 堆肥过程中温度的变化情况

Fig. 1 Evolution of temperature during composting

组在前 10 d 温度呈上升的趋势,实验组 1、2、3 号瓶温度在第 10 d 达到堆肥过程最高温度,分别为 55、52、50℃,对照组则只有 43℃,实验各组的升温速度明显比对照组快,同时 1 号高于 2 号与 3 号,表明中药渣的投加有利于堆肥的进行,但存在一个最佳的配比,由于中药渣含有的纤维素较多,如投加得过多会造成有机质降解速率慢,从而造成堆体温度上升较慢。堆肥高温期持续大概 2~4 d 左右,以后堆体温度慢慢下降。堆肥高温期时间短的原因可能一方面因为实验在冬天进行,环境温度比较低,虽然有水浴但堆体并没有全部浸没在水浴锅中,实验本体受到一定制约;第二方面是堆体发酵罐体积较小,可提供的外源物质较少,此时罐体内有机物的消耗逐渐减少,微生物的分解活动就会慢下来,产热量就会降低,导致了高温期比较短^[15]。根据第一周期的实验,确定第二周期中 60 g 中药渣 + 300 g 污泥进行共堆肥,而由图 1 可知,第二周期堆体温度大致趋势和第一周期一致,在第 10 d 达到最高温度,其中 4、5 号瓶分别是 54℃、51℃,而对照组为 46℃,中药渣在堆肥的初期投加更为有效。整体而言,投加中药渣后,有利于堆体温度的提高,这对于堆肥过程中有机质的转化是有利的。

2.2 有机质的变化情况

本实验投加的中药渣属于外源有机物,即为微生物的能量物质,堆肥效应其实就是有机质不断被分解的过程^[16],本实验对共堆肥过程中堆体有机质的变化情况进行了分析,如图 2 所示。

由图 2 可知第一周期实验组 1、2、3 号瓶在整个堆肥过程中,有机质分别降低了 31.1%、26.1%、26.9%,特别是 1 号瓶结束时有机质含量为 40.2%,而对照组有机质由初始的 60.1%降至堆肥结束的 42.9%,降低了 17.2%。同时实验组 4 号瓶由初始的 71.7%降至结束的 40.6%,5 号瓶由初始的 72.6%降至结束的 44.6%,而对照组堆肥结束后的有机质含量为 42.1%。从两个周期的实验数据可看出堆肥前期有机质的分解速率比较高,堆肥后期的分解速率较低。前期分解速率较高主要因为有机质充足,随着堆肥的进行,堆体温度逐渐升高适合微生物的增长,此时微生物分泌一些胞外酶,把大分子有机物质分解成小分子物质,小分子物质又被溶解为水溶性碳进一步被微生物吸收利用;后期则是由于堆体温度降低,微生物活性下降,有机质分解减弱而致^[17]。整体而言,60 g 中药渣 + 300 g 污泥的堆体,特别是在堆肥前期投加中药渣的堆体,堆肥进程

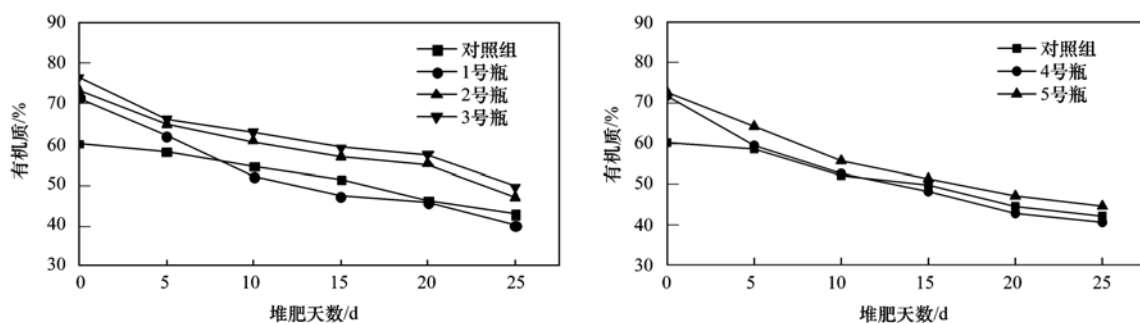


图 2 堆肥过程中有机质的变化情况

Fig. 2 Evolution of organic matter during composting

较快,有机质降解的更为充分,可以推测在此条件下,堆体中的微生物活性更好,其降解有机质的能力更强.

2.3 累积挥发氨的变化情况

在堆肥过程中,会有部分有机氮被转化为铵态氮

以氨气的形式存在,随着罐体温度升高易大量散失到大气中,造成氮元素的损失,直接影响了堆肥的效益,因此控制氮元素的损失是实现城市污泥资源化的一个非常重要的关键技术^[18],因此本实验对共堆肥过程中堆体氨氮的挥发量进行了分析,如图3所示.

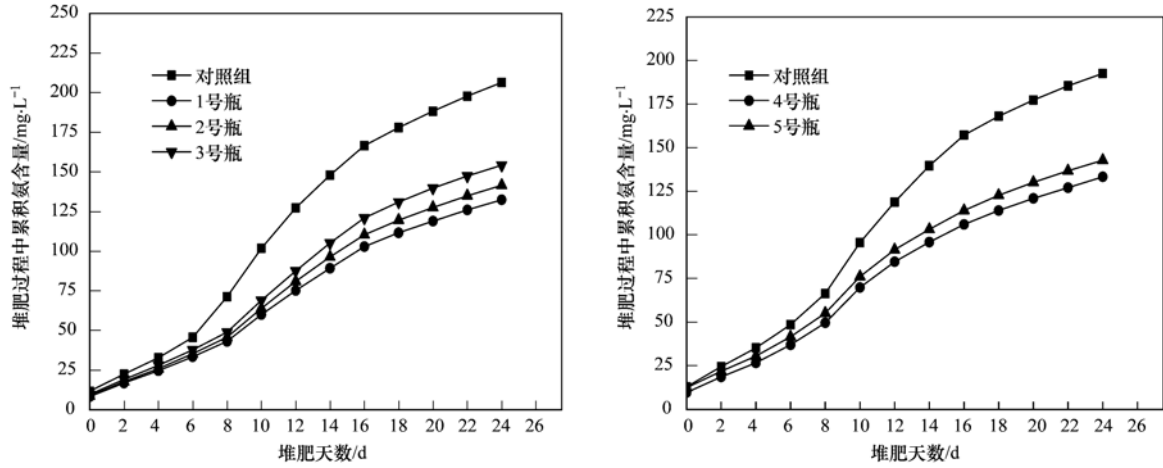


图3 堆肥过程中挥发氨累积量变化情况

Fig. 3 Cumulative NH₃ emission during composting

由图3可知,前6 d两周期的挥发氨累积量没有明显的变化,但均呈现上升的趋势,堆肥进行第8 d到第18 d是氨氮损失量最大的区段,之后由于温度降低,有机物的消耗以及微生物的活动减弱,氨氮损失量变小,慢慢趋向稳定. 未投加中药渣时,对照组堆体的氨氮挥发累积量达到了206.5 mg·L⁻¹,而1号瓶(60 g 中药渣 + 300 g 污泥)堆体的氨氮挥发累积量仅为132.2 mg·L⁻¹,与对照组相比减少了35.9%,原因在于微生物的固氮是需要碳源的,但城市污泥中的C/N往往不足,因此微生物的固氮能力差,导致了氮的损失严重;而中药渣富含碳源,可以调整堆体的C/

N,从而使微生物能更好的发挥其固氮作用^[19].

2.4 蛋白酶的变化情况

蛋白酶主要参与有机氮的分解和氨基酸、蛋白质以及其他含氮化合物的转化^[20],蛋白酶的主要功能是将有机氮分解催化为可用于微生物自身利用的氮元素,贮存在自身体内,有效地避免堆肥过程中氮素的损失,所以蛋白酶活性的高低影响着堆肥效能的好坏,因此本实验对共堆肥过程中堆体的蛋白酶活性进行了分析,如图4所示. 从中可知,第一周期的蛋白酶含量是先稍微地下降后上升,随着堆肥时间的推移,酶含量又慢慢降低,酶含量最高值出现在

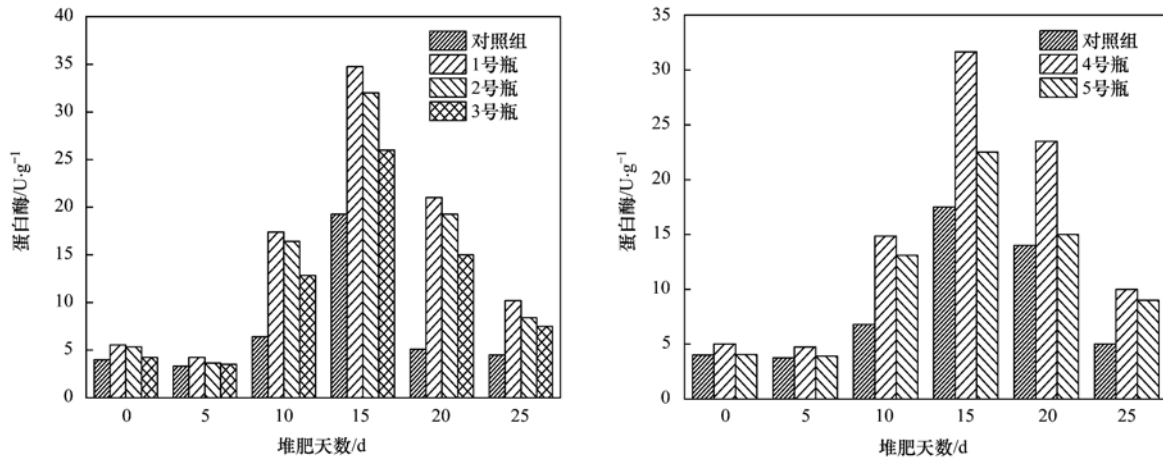


图4 堆肥过程中蛋白酶活性的情况

Fig. 4 Activities of protease depending on addition of Chinese medicinal herbal residues

堆肥期间第 15 d, 此时对照组是 $19.25 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$, 1~3 号瓶分别为 34.75 、 32.0 、 $26.0 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$. 堆肥期间, 对照组的酶含量都少于实验各组的酶含量, 而 1 号瓶堆体的酶含量是所有实验组在堆肥各个期间中最高的. 第二周期各组蛋白酶的含量和第一周期的趋势大致一样, 其中 4 号瓶的含量最高, 最高含量值达到 $31.65 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$, 因此在污泥堆肥的前期投加中药渣, 并且中药渣与污泥的质量比是 1:5 时, 蛋白酶的活性最高, 更有利于固氮.

2.5 不同堆体 DOM 的光谱特征变化情况

堆肥过程中 DOM 的变化被认为是能灵敏反映堆肥腐熟状况的重要指标, 与堆肥的固相组分相比更具代表性, 因此本实验采用紫外-可见光谱共堆肥过程中 DOM 的光谱特征进行了分析, 而由前面的实验结果可知, 1 号瓶的整体堆肥效果最佳, 因此将 1 号瓶中的堆体与对照组进行了分析, 结果如图 5 所示.

SUVA₂₅₄ 是研究天然有机质的重要特征参数, 其大小可间接表征有机质的芳香性程度, SUVA₂₅₄ 越高, 有机质芳香度越高. 由图 5 可知, 对照组和添加中药渣的实验组随堆肥时间进行, 其 SUVA₂₅₄ 值不断增加, 在第 5 d、15 d 以及第 25 d, 对照度的 SUVA₂₅₄ 分别为 0.172、0.362 和 0.543, 而添加中药渣的 SUVA₂₅₄ 分别为 0.217、0.575 和 0.768, 表明随着堆肥的进行, 污泥堆肥的腐熟度不断增加, 芳香性结构不断增多; 同时投加中药渣的堆体高于对照组的 SUVA₂₅₄ 值, 说明了添加中药渣的外源有机质炭有利于提高城市污泥堆肥的腐熟度. 而 DOM 在 280 nm 摩尔吸光系数 (SUVA_{280 nm}) 与相对分子质量存在显著正相关^[14]. 实验组和对照组的 SUVA₂₈₀ 和 SUVA₂₅₄ 的变化趋势一致, 反映了不同处理堆肥过程中 DOM 芳香性增强可能与大分子物质的增加有关^[14]. 并且随着堆肥过程的进行, 紫外可见光谱出现了蓝移, 这同样表明, DOM 中的共轭结构与芳香结构增多, 腐殖质程度得到提高.

为了更全面地分析 DOM, 本实验采用荧光分析仪对对照组与 1 号瓶堆体第 10 d 的 DOM 三维荧光光谱特征进行了分析, 如图 6 所示. 在不同堆体中均出现了可见光区类腐殖酸峰 A ($E_x/E_m = 310 \sim 360 \text{ nm}/400 \sim 450 \text{ nm}$), 紫外光区类腐殖酸峰 B ($E_x/E_m = 250 \sim 280 \text{ nm}/420 \sim 450 \text{ nm}$), 类蛋白荧光峰 C ($E_x/E_m = 250 \sim 280 \text{ nm}/320 \sim 380 \text{ nm}$) 及简单芳香蛋白荧光峰 D ($E_x/E_m = 220 \sim 250 \text{ nm}/300 \sim 380 \text{ nm}$)^[14,21], 添加中药渣的堆体, 其类腐殖酸峰更强, 表明堆肥腐殖化程度更好, 添加外源有机质有利于

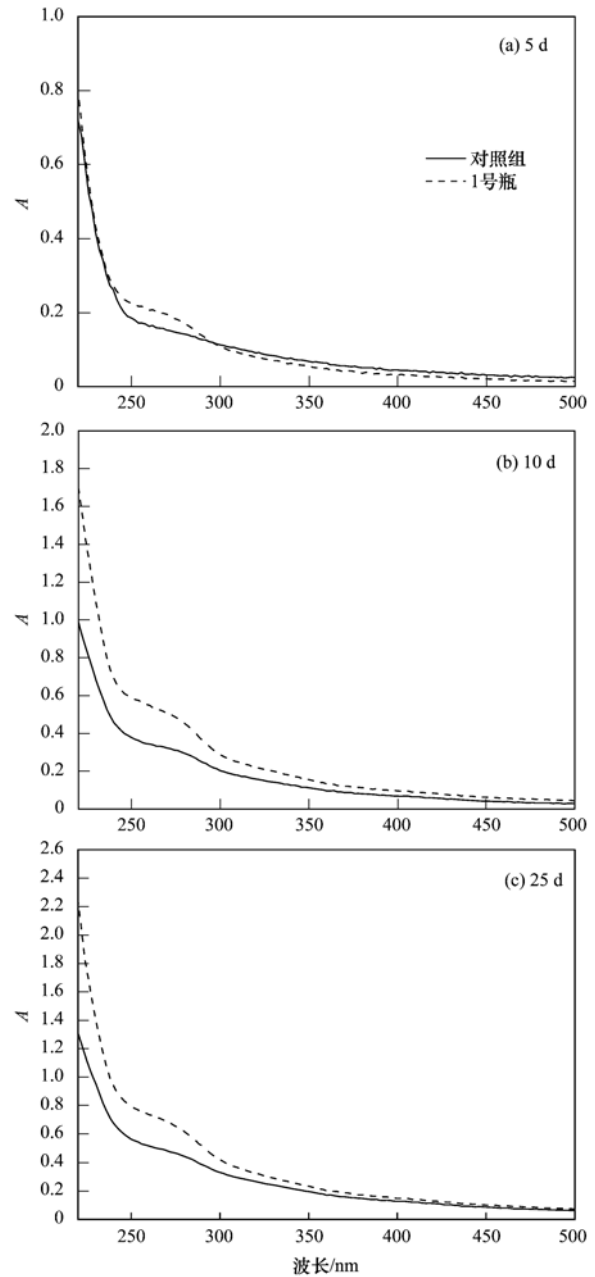


图 5 堆肥过程中 DOM 紫外可见光谱的变化情况

Fig. 5 UV-VIS spectra of DOM extracted from different composting treatment progresses

提高堆肥的腐殖化程度. 有研究认为 BIX 在 0.6~0.7 之间时, DOM 主要为陆源输入, 外源输入特征明显, 而本研究中 BIX 分别为 0.73 和 0.80, 证明了堆肥过程中 DOM 主要来源为自生源. FI 是评价 DOM 来源的依据: FI < 1.4 来源于陆地输入, FI > 1.4 时来自于微生物分解, 对照组和处理组 FI 为 1.57 和 1.53, 表明微生物对有机物的降解也是堆肥形成的主要原因.

2.6 不同堆体微生物群落的情况

通过 PLFA 技术可获得生态环境中微生物群落

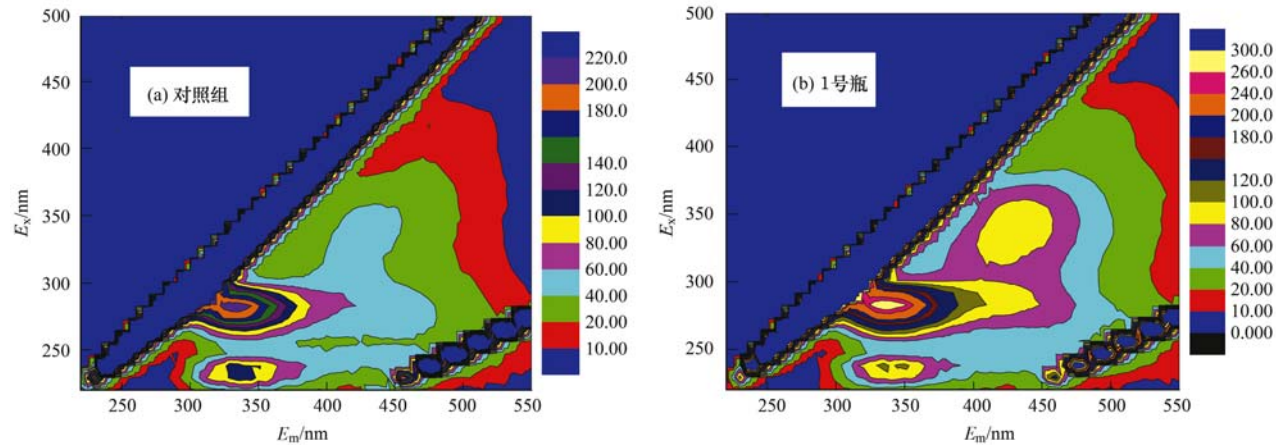
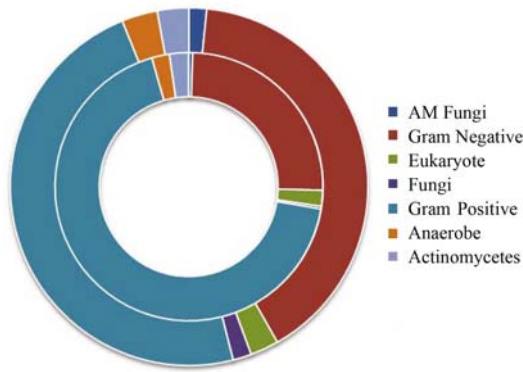


图 6 不同堆体 DOM 三维荧光光谱的情况

Fig. 6 EEM spectra of DOM extracted from different composting piles

在数量与结构方面的信息,具有较高的准确性、稳定性与敏感性,因此被应用于堆肥样品、土壤以及污泥等的微生物群落研究^[22]. PLFA 技术在对技术与仪器条件要求相对较低的情况下,可以确定土壤、污泥中微生物的生物量分布;更重要的是,从 PLFA 的组分中还可以得到较完整的“存活”微生物群落在数量与结构方面的信息^[22,23],因此,本研究利用 PLFA 对第 25 d 对照组与 1 号瓶进行了分析,结果如图 7 所示.



内环为对照组;外环为 1 号瓶

图 7 不同堆体中微生物群落的情况

Fig. 7 Change of microbial community from different composting piles

由图 7 可知,在对照组与 1 号瓶中,均是细菌占主要地位,Gram Positive (革兰氏阳性菌)所占比例分别为 67.9% 和 47.9%,而 Gram Negative (革兰氏阴性菌)所占比例分别为 24.9% 和 40.2%. 投加中药渣后,AM Fungi (AM 真菌)的比例由原来的 0.49% 增加到 1.58%,Fungi (真菌)的比例由原来的 0.31% 增加到 1.68%,由于真菌对堆体中的纤维素、半纤维素有着很好的降解作用,其菌丝具有有机

械穿插的作用,从而可促进难降解的有机物的降解;同时 Actinomycetes (放线菌)的比例由原来的 2.30% 增加到 2.86%,放线性菌对木质素的降解有着非常好的作用^[24,25],可见,加入中药渣对污泥堆肥结束时,堆体中的微生物种群变化有较大影响,从而也影响了蛋白酶活性及氨挥发情况.

3 结论

(1) 以中药渣作为外加碳源与城市污泥进行共堆肥时,质量配比为 60 g 中药渣与 300 g 污泥,在堆肥过程初始投加,会使污泥堆肥的进程加快,同时堆体的氨氮挥发累积量减少 35.9%,提高了堆肥的肥效.

(2) 投加中药渣后,堆体 DOM 中的共轭结构与芳香结构增多,且 EEM 光谱中类腐殖酸峰更强,有利于提高城市污泥堆肥的腐熟度.

(3) 添加中药渣对污泥堆肥中微生物种群变化有一定的影响,特别是 Fungi 与 Actinomycetes 的比例与单独的污泥堆肥相比有所增加.

参考文献:

[1] 白莉萍, 齐洪涛, 伏亚萍, 等. 北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4648-4654.
Bai L P, Qi H T, Fu Y P, *et al.* Nutrient contents and heavy metal pollutions in composted sewage sludge from different municipal wastewater treatment plants in Beijing region [J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4648-4654.
[2] 钟佳, 魏源送, 赵振凤, 等. 污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征[J]. 环境科学, 2013, 34(11): 4186-4194.
Zhong J, Wei Y S, Zhao Z F, *et al.* Emissions of greenhouse gas and ammonia from the full process of sewage sludge composting and land application of compost [J]. Environmental Science, 2013, 34(11): 4186-4194.

- [3] Wang K, Li W G, Gong X J, *et al.* Spectral study of dissolved organic matter in biosolid during the composting process using inorganic bulking agent: UV-vis, GPC, FTIR and EEM [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, **85**: 617-623.
- [4] Lashermes G, Barriuso E, Le Villio-Poitrenaud M, *et al.* Composting in small laboratory pilots: performance and reproducibility [J]. *Waste Management*, 2012, **32**(2): 271-277.
- [5] Zhou H B, Ma C, Gao D, *et al.* Application of a recyclable plastic bulking agent for sewage sludge composting [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **152**: 329-336.
- [6] Li Z T, Lu H W, Ren L X, *et al.* Experimental and modeling approaches for food waste composting: a review [J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(7): 1247-1257.
- [7] Meng L Q, Li W G, Zhang S M, *et al.* Effects of sucrose amendment on ammonia assimilation during sewage sludge composting [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **210**: 160-166.
- [8] 胡伟桐, 余雅琳, 李喆, 等. 不同调理剂对生物沥浸污泥堆肥氮素损失的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(12): 2379-2385.
- Hu W T, Yu Y L, Li Z, *et al.* Effects of different organic bulking agents on nitrogen loss during composting of dewatered bioleached sludge on a commercial scale [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(12): 2379-2385.
- [9] 耿立威, 高尚, 田沛东, 等. 城市污水处理污泥堆肥过程中氮元素形态变化研究 [J]. *吉林师范大学学报(自然科学版)*, 2013, **34**(2): 114-117.
- Geng L W, Gao S, Tian P D, *et al.* Transformation of nitrogen forms during composting of sewage sludge [J]. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, **34**(2): 114-117.
- [10] 张莹, 许修宏, 李洪涛. 污泥堆肥过程中生物酶活性与理化因子关系分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(11): 2290-2295.
- Zhang Y, Yu X H, Li H T. Relationship between bioenzyme activities and physico-chemical properties during sewage sludge composting process [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(11): 2290-2295.
- [11] 张英. 中药药渣资源利用研究现状 [J]. *药物生物技术*, 2013, **20**(3): 280-282.
- Zhang Y. Resource utilization status of herb residues for TCM [J]. *Pharmaceutical Biotechnology*, 2013, **20**(3): 2290-2295.
- [12] 刘文伟, 刘玉璇, 赵宇, 等. 中药渣综合利用研究进展 [J]. *药学研究*, 2013, **32**(1): 49-50.
- Liu W W, Liu Y X, Zhao Y, *et al.* Review on the recycle of traditional Chinese medicine slag [J]. *Journal of Pharmaceutical Research*, 2013, **32**(1): 49-50.
- [13] Jiang J S, Huang Y M, Liu X L, *et al.* The effects of apple pomace, bentonite and calcium superphosphate on swine manure aerobic composting [J]. *Waste Management*, 2014, **34**(9): 1595-1602.
- [14] 闫金龙, 江韬, 赵秀兰, 等. 含生物质炭城市污泥堆肥中溶解性有机质的光谱特征 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 459-465.
- Yan J L, Jiang T, Zhao X L, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in co-composting process of municipal sludge with biochar [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 459-465.
- [15] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册 [M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [16] 王守红, 葛晓, 卞新智, 等. 菌菇渣和秸秆对生活污泥好氧堆肥的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2013, **29**(2): 324-328.
- Wang S H, Ge Y, Bian X Z, *et al.* Effects of mushroom residue and straw on aerobic composting of sewage sludge [J]. *Jiangsu Journal of Agro-Science*, 2013, **29**(2): 324-328.
- [17] 伍兵, 邓悟森, 谭周进, 等. 鸡粪堆肥的酶活特性研究 [J]. *中国微生物生态学杂志*, 2011, **23**(11): 972-975.
- Wu B, Deng W S, Tan Z J, *et al.* Studies on enzyme characteristics during composting of chicken manure [J]. *Chinese Journal of Microecology*, 2011, **23**(11): 972-975.
- [18] Lazcano C, Gómez-Brandón M, Domínguez J. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(7): 1013-1019.
- [19] 李云蓓, 李伟光. 不同类型的外加碳源对污泥堆肥过程氮素损失的影响 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, **36**(2): 104-109.
- Li Y B, Li W G. Influence of carbon-rich amendments on nitrogen losses during sewage sludge composting [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2014, **36**(2): 104-109.
- [20] 胡红伟, 李吕木, 钱坤, 等. 发酵菌剂接种量对堆肥理化性质和有关酶活的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(6): 1261-1270.
- Hu H W, Li L M, Qian K, *et al.* Effect of doses of fermentation inoculum on physico-chemical properties and related enzymic activities during the composting process [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(6): 1261-1270.
- [21] 李丹, 何小松, 席北斗, 等. 生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2918-2924.
- Li D, He X S, Xi B D, *et al.* Composition and transformation of leachates during municipal solid waste composting [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2918-2924.
- [22] 曾清苹, 何丙辉, 毛巧芝, 等. 缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物 PLFA 沿海拔梯度的变化 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4667-4675.
- Zeng Q P, He B H, Mao Q Z, *et al.* Effects of different altitudes on soil microbial PLFA and enzyme activity in two kinds of forests [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4667-4675.
- [23] Zhao C H, Xing M Y, Yang J, *et al.* Microbial community structure and metabolic property of biofilms in vermifiltration for liquid-state sludge stabilization using PLFA profiles [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **151**: 340-346.
- [24] 李昂, 孙丽娜, 李鹏. 市政污泥堆肥过程中微生物群落的动态变化 [J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(12): 5445-5450.
- Li A, Sun L N, Li P. Changes of microbial community during the composting of municipal sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(12): 5445-5450.
- [25] Tian W, Wang L, Li Y, *et al.* Responses of microbial activity, abundance, and community in wheat soil after three years of heavy fertilization with manure-based compost and inorganic nitrogen [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **213**: 219-227.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行