

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响

向秋洁¹, 杨雨涵¹, 张成^{1,3*}, 相欣奕², 木志坚^{1,3}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 3. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 采用城市污泥为堆肥基质, 设置4个堆肥处理, 分别为添加2.5%竹炭(S1, 占污泥的质量分数)、添加5%竹炭(S2)、添加10%竹炭(S3)和未添加竹炭(CK), 研究城市污泥堆肥过程中温室气体的动态变化特征及添加不同用量竹炭的影响。结果表明, CH₄排放主要在升温期和高温前期, 占排放总量的99.01%~99.81%。当竹炭添加量低于5%时, CH₄排放量随添加量的增加而减少; 竹炭添加量高于5%时, 其排放量又明显增加。CO₂排放集中在升温期和高温期, 占排放总量的75.65%~86.58%; 添加竹炭可减少3.37%~13.48%的CO₂排放, 但处理间不存在显著差异($P>0.05$)。N₂O排放集中在升温期和降温腐熟期, 添加竹炭能减少16.37%~41.52%的N₂O排放, 竹炭添加量越多, 减排效果越好($P<0.05$)。S1、S2和S3处理CO₂排放当量(以干污泥计)分别为37.57、35.10和35.44 kg·t⁻¹, 比CK处理减少了14.81%~20.41%。添加竹炭能降低污泥堆肥温室气体排放, 其中, 以S2处理的减排效果较为显著。

关键词: 城市污泥; 堆肥处理; 竹炭; 温室气体; 排放特征

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4390-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703224

Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process

XIANG Qiu-jie¹, YANG Yu-han¹, ZHANG Cheng^{1,3*}, XIANG Xin-yi², MU Zhi-jian^{1,3}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. School of Geographical and Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China)

Abstract: Effect of adding bamboo biochar into the compost at different dosages on greenhouse gas emissions was investigated by analyzing the dynamic characteristics of the process of municipal sludge composting with four different composts (S1: adding 2.5% bamboo biochar, S2: adding 5% bamboo biochar, S3: adding 10% bamboo biochar, CK: without bamboo biochar). The results showed that CH₄ emissions mainly occurred during the heating period and the beginning of the altithermal period, accounting for 99.01%-99.81% of the total emissions. When the added bamboo biochar is less than 5%, CH₄ emissions decrease with the increase in the amount of bamboo biochar. If it is more than 5%, CH₄ emissions will clearly increase. CO₂ emissions mainly occurred during the heating period and the altithermal period, accounting for 75.65%-86.58% of the total emissions. Adding bamboo biochar can reduce 3.37%-13.48% of the CO₂ emissions but there is no significant difference between the treatments ($P>0.05$). N₂O emissions mainly occurred during the heating period and the rotten period. Adding bamboo biochar can reduce the emissions of N₂O; the more the amount of bamboo biochar, the less N₂O emissions ($P<0.05$). The emission factors of CK, S1, S2, and S3 were 44.10, 37.57, 35.10, and 35.44 kg·t⁻¹ of dry sludge, respectively. S1, S2, and S3 showed 14.81%-20.41% reduction in greenhouse gas emissions owing to the addition of bamboo biochar, indicating that bamboo biochar can reduce the carbon emissions in the process of sludge composting.

Key words: municipal sludge; compost; bamboo biochar; greenhouse gas; emission characteristics

随着我国城市化进程的加快, 污水处理规模连年增长, 污泥产量也随之增加。据报道, 我国污泥年产量已高达7000万t, 包括3500万t城市污泥和3500万t工业污泥, 而污泥处理处置和资源化利用率却不足50%^[1]。2015年, 我国新环境保护法和《水污染防治行动计划》的实施强调了污泥处理处置的迫切性。高温好氧堆肥因其成本低、时间短、有机物降解充分以及堆肥品质高等优点而被广泛用于污泥稳定化处理^[2], 同时, 由于污泥含有大量的

有机物质, 堆肥过程会排放大量的温室气体, 因而引起了国内外学者的广泛关注。研究表明, 一些外源添加剂能有效降低好氧堆肥产生的温室气体排放。如Luo等^[3]研究表明添加10%磷石膏会明显减

收稿日期: 2017-03-26; 修订日期: 2017-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208426); 西南大学资源环境学院“光炯”培育项目(20130103)

作者简介: 向秋洁(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为固废处理处置及资源化, E-mail: 360289530@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhcheng@126.com

少猪粪和秸秆混合堆肥过程中的 CH_4 和 NH_3 的排放量. Wang 等^[4]发现添加芦苇秆和沸石的堆肥预处理结合蚯蚓处理技术能有效减少鸭粪中温室气体的排放. Yang 等^[5]研究认为在餐厨垃圾中添加膨松剂可明显减少 CH_4 、 N_2O 的排放. Lehmann^[6]的研究表明生物质炭农用是提高土壤肥力、减少温室气体排放的新途径. 陈是吏等^[7]研究发现添加过磷酸钙和双氰胺可以显著减少污泥堆肥 CH_4 和 N_2O 排放. Chowdhury 等^[8]用不同调理剂进行禽畜粪便堆肥,发现堆体温室气体排放当量大小为生物质炭 < 塑料软管 < 木片. 目前,有关堆肥过程温室气体排放的研究多集中在畜禽粪便、农业废弃物等固体废物,而有关城市污泥堆肥过程中温室气体排放特征以及添加生物质炭对碳排放的影响研究还较少. 竹炭作为生物质炭的一种,具有性质稳定、孔隙结构丰富、比表面积大和吸附能力强等优点. 因此,本文在课题组前期研究^[9]的基础上,进一步分析添加不同用量竹炭对城市污泥堆肥过程 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 排放的影响,以期为进一步开展污泥堆肥处理处置碳减排研究提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于 2015 年 10 月 11 日~11 月 24 日在西南大学试验大棚中进行,以 50 kg 城市污泥为堆肥基质,12.5 kg 稻草为调理剂,分别添加 0、2.5%、

5% 和 10% (占污泥的质量分数) 的竹炭,即 CK(污泥:稻草 = 100:25)、S1(污泥:稻草:竹炭 = 100:25:2.5)、S2(污泥:稻草:竹炭 = 100:25:5) 和 S3(污泥:稻草:竹炭 = 100:25:10),CK、S1、S2 和 S3 处理初始物料总量分别为 62.50、63.75、65.00、67.50 kg,各混合堆体基本性质见表 1. 堆体物料充分混合后,放入课题组自制堆肥箱^[9],堆肥箱有效尺寸为 0.90 m × 0.45 m × 0.71 m(长 × 宽 × 高),CK、S1、S2 和 S3 处理堆体初始体积相差不大,分别约为 0.273、0.275、0.277、0.282 m³. 整个试验过程中采取强制通风 + 人工翻堆的方式进行好氧堆肥. 通风系统采用时间控制,设置通风/关闭为 20 min·h⁻¹,通风量为 0.1 m³·(min·m³)⁻¹. 前 2 周每周翻堆 2 次,随后每周翻堆 1 次. 整个堆肥过程持续 44 d,期间不额外补充水分. 城市污泥取自于重庆市某污水处理厂的脱水污泥,稻草来源于西南大学试验农场(剪碎至 2~3 cm),竹炭为市面販售.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 气体采集与分析

气体样品采集采用静态暗箱法,堆肥第 1 周每天采样,此后分别在堆肥第 9、10、14、20、25、30、37、44 d 采集样品. 采样时间固定在采样日上午 08:00~09:00. 采样箱由箱体和底座两部分组成,箱体为不透明的 PVC 塑料柱体,箱体内径 39 cm,高 30 cm. 采样时,将箱体置于底座凹槽中,并用纯水液封,以隔绝箱体内外气体交换. 用 60 mL 聚丙

表 1 不同调理剂堆肥混合体的基本性质

Table 1 Basic properties of the composts mixed with different conditioners						
名称	总质量/kg	体积/m ³	含水率/%	pH	TN/g·kg ⁻¹	TOC/g·kg ⁻¹
原污泥	—	—	81.02	8.11	28.44	301.67
竹炭	—	—	11.47	9.80	6.95	—
稻草	—	—	11.28	6.83	20.36	356.53
CK	62.50	0.273	68.45	7.85	25.30	318.43
S1	63.75	0.275	66.71	7.89	25.11	335.67
S2	65.00	0.277	67.58	8.10	25.22	358.65
S3	67.50	0.282	65.41	8.17	25.06	371.24

烯注射器采集箱体内气体 50 mL,每间隔 3 min 采集 1 次,共采集 4 次. 气样采集后立刻带回实验室用日本岛津 GC-2014 气相色谱仪进行测定,定量分析检测 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 浓度,结合色谱峰面积和标气浓度计算出样品中各气体浓度,从而得出气体排放通量(F)和累积排放量(Q),计算公式如下:

$$F = h \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{M \times 273}{22.41 \times \left(273 + \frac{T_1 + T_2}{2}\right)} \times 60$$

$$Q = A \times \sum \Delta F_{it_i}$$

式中, F 为气体排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; h 为静态箱的高度, m; $\Delta c/\Delta t$ 为单位时间内气体样的浓度变化值; M 为 1 mol CH_4 、 CO_2 或 N_2O 对应的 C 或者 N 的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $273/\left(273 + \frac{T_1 + T_2}{2}\right)$ 为绝对温度的校正系数; T_1 、 T_2 分别为采集第一个、最后一个样品时采样箱内的气体温度, $^{\circ}\text{C}$; Q 为气体累积排放量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; i 为取样次数; t 为相邻两次测

定的时间间隔, h; A 为表面积, m^2 .

1.2.2 固体样品采集与分析

采用剖面法采集第 1、3、6、9、14、20、25、30、37、44 d 的固体样品. 采样时, 将表层、中层、下层样品混合均匀, 用四分法获取样品 500 g 并存放于自封袋中. 样品带回实验室后, 部分置于冰箱冷藏, 用于测定堆体基本性质; 部分样品风干并研磨过筛, 用于测定总氮(TN)和总有机碳(TOC)等.

1.3 数据分析

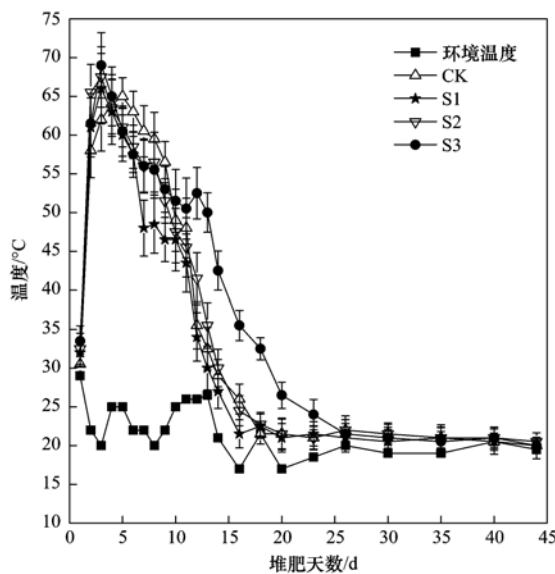
试验数据用 EXCEL、SPSS 19.0 和 ORIGIN 8.5 进行数据整理和图表分析.

2 结果与讨论

2.1 堆体基本性质

2.1.1 温度和含水率变化特征

各堆体经历 1~2 d 的升温期就进入了高温期



(50°C 以上), CK、S1、S2 和 S3 处理高温持续时间分别为 7、5、8、12 d, 最高温度分别为 65、66、67.5 和 69°C (图 1). 添加竹炭有利提高堆体温度, 这与 Chen 等^[10]的研究结果一致. 李丽劼^[11]的研究表明添加 3% 竹炭可延长高温期, 而孙文彬^[12]的研究发现添加竹炭会缩短高温期, 且高温持续时间随添加量的增大而减小. 这是由于竹炭富含多种微量元素, 可为微生物提供营养物质, 促进有机物质降解产热, 其持水性和吸附性也能减少堆体水分蒸发散热; 同时, 竹炭又具有丰富的空隙结构, 有利于气体内外交换, 促进堆体通风散热. 堆体含水率整体呈下降趋势 (图 1), CK、S1、S2 和 S3 处理含水率分别下降了 20.85%、29.15%、26.05% 和 26.16%. 竹炭能增大堆肥物料孔隙度, 促进空气流通; 其自身微孔结构也为堆体水分散失提供了通道, 从而加快堆体脱水, 刘微等^[13]的研究也有相似结果.

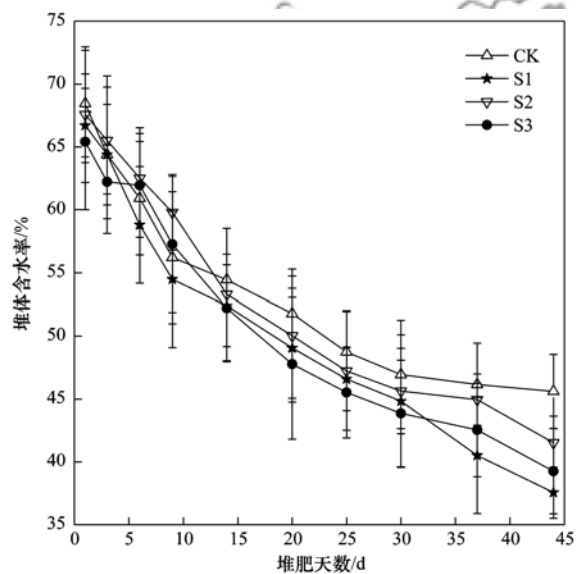


图 1 堆体温度和含水率变化情况

Fig. 1 Changes in temperature and moisture content during sludge composting

2.1.2 TOC 和 TN 变化特征

堆体 TOC 含量均呈持续下降趋势 (图 2). 堆肥前 25 d, 微生物活性强, 迅速将可溶糖、有机酸和淀粉等分解成 CO_2 和水^[14], 并大量挥发, 堆体 TOC 明显减少, 占总损失量的 77.40%~96.72%. 此后, 微生物开始利用纤维素、半纤维素和木质素等较难分解物质^[15,16], 堆体 TOC 含量缓慢下降并趋于稳定. 堆体腐熟后, CK、S1、S2 和 S3 处理堆体物料总量分别降为 41.32、40.75、39.13 和 38.98 kg, 各堆体 TOC 损失率分别为 62.66%、68.73%、68.66% 和 71.53%. 添加竹炭增加了堆体有机碳损失, 但处理间不存在显著差异 ($P >$

0.05), 这与孙文彬^[12]的研究结果相似. 在整个堆肥过程中, TOC 含量表现为 $\text{CK} < \text{S1} < \text{S2} < \text{S3}$, 添加竹炭会增加堆体的有机碳源, 且随竹炭添加量的增大而增加.

几种处理 TN 含量总体呈下降趋势 (图 2), CK、S1、S2 和 S3 处理 TN 损失率分别为 65.01%、71.23%、69.93% 和 71.92%, 添加竹炭能减少堆体氮素总量, 但处理间不存在显著差异 ($P > 0.05$). 堆体氮素损失主要发生在升温期 and 高温期, 在高温高碱性环境下, 有机碳矿化, 有机氮分解的 NH_3 大量挥发, 部分水溶性氮随渗滤液流失^[17]; 同时, 由于堆体供氧不均, 硝态氮在缺氧条件下反硝

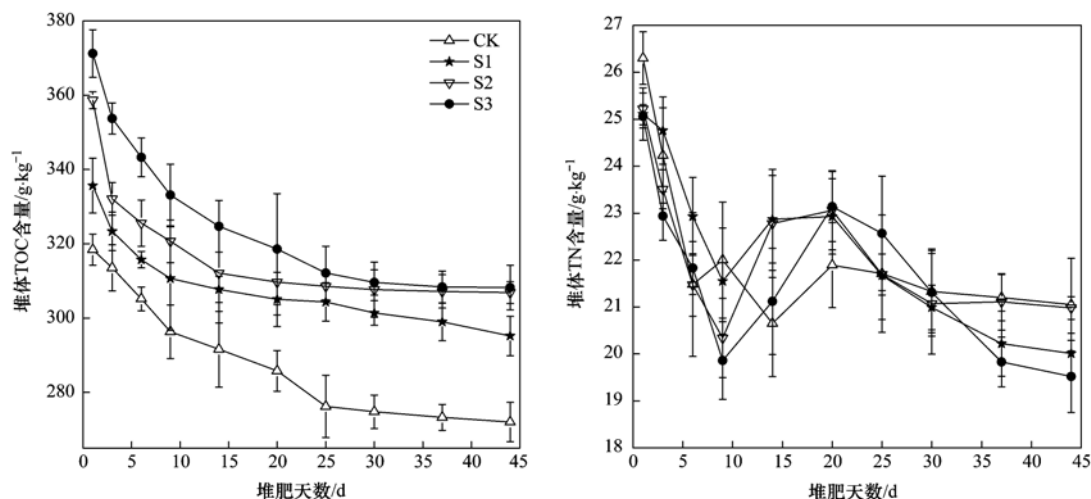


图2 污泥堆肥过程中堆体 TOC 和 TN 变化情况

Fig. 2 Changes in total organic carbon and total nitrogen during municipal sludge composting

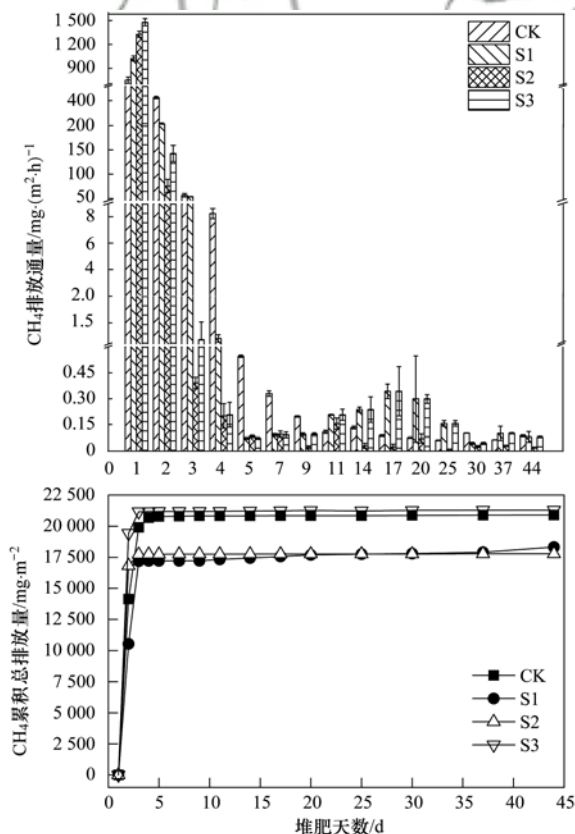
化形成 NO_x 挥发^[18], 从而造成氮素损失.

2.2 CH_4 排放特征

堆体 CH_4 排放通量总体呈下降趋势(图3), 堆肥初期, 曝气量不足, 堆体内部局部厌氧, 产甲烷菌快速分解可溶性脂、有机酸和蛋白质等有机物质, 产生大量 CH_4 气体, 与易建婷等^[9]和 Fukumoto 等^[19]的研究结果类似, CK、S1、S2 和 S3 处理 CH_4 最大排放通量分别为 751.51、1 024.18、1 326.62 和 477.07 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 随着堆体温度的快速上升, 堆体 O_2 的消耗速率高于补充速率, 堆体供氧不足, 氧化还原电位下降; 再加上 CO_2 的排放增大了堆体内的厌氧区域, 进一步促进了 CH_4 排放^[20]. 堆肥后期, 堆体内可降解碳源逐渐减少, 温度降至室温, 堆体 O_2 含量增加, 厌氧环境得以改善^[19], 堆体 CH_4 排放速率降低并趋于稳定.

CK、S1、S2 和 S3 处理 CH_4 累积总排放量分别为 20.89、18.32、17.78 和 21.29 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (图3), 处理间无显著差异($P > 0.05$). 堆体 CH_4 排放主要集中在堆肥前 5 d, 占总排放量的 99.01% ~ 99.81%; 5 d 后, CH_4 排放变化不明显. 陶金沙等^[21]用不同剂量生物质炭进行猪粪堆肥, 发现生物质炭可显著降低 CH_4 排放量, 且随生物质炭添加量的增大而依次减少. 在本试验中, 当竹炭添加量低于 5% 时, 添加量越多, 堆体 CH_4 排放量越少; S1、S2 处理 CH_4 排放量分别比 CK 减少了 12.30% 和 14.89%. 这是由于竹炭孔隙度高, 改善了堆肥的通风供氧能力和通气条件, 能吸附 CH_4 和持留水分, 减少堆体 CH_4 排放^[22]. 但当竹炭添加量高于 5% 时, CH_4 排放量又明显增加, S3 比 S2 增加了 19.74%. 李丽

劫^[11]的研究也发现添加竹炭(3%)可促进碳素代谢, 显著提高堆体 CH_4 排放. 这可能是由于竹炭可为微生物提供较大表面积的多孔性疏水环境, 改善微生物的附着性能, 有利于微生物的繁殖和生长, 同时, 竹炭富含多种营养成分和微量元素, 能加快微生物的生长速率, 改变其群落结构和数量. Pietikäinen 等^[23]和 Steiner 等^[24]的研究发现生物炭能够显著提高微生物群落多样性及生物学活性, 黄向东^[25]也发

图3 CH_4 排放通量和累积排放量Fig. 3 Fluxes and accumulative emissions of CH_4

现添加3%、6%和9%竹炭处理的微生物群落多样性指数(Shannon 指数)均高于对照组. 本试验中, 由于S3处理组竹炭添加量较大, 为微生物的生长提供了更多的营养元素, 可能增加了中温型和嗜热型产甲烷菌的数量, 提高了产甲烷菌对碱性、高温环境的适应能力, 从而促进堆体 CH_4 产生^[12,26].

2.3 CO_2 排放特征

堆肥前2 d, 温度适宜, 微生物活动强烈, 有机

物大量分解, 堆体 CO_2 排放速率立即达到最大, CK、S1、S2 和 S3 处理分别为 24.22、18.08、25.04 和 $15.87 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (图4). 随着堆肥时间的延长, 堆体持续高温, 易降解的有机物浓度急剧下降, 中温微生物大量失活甚至死亡^[25], CO_2 排放速率显著降低. 降温腐熟期, 中温微生物继续分解堆体残余有机物, CO_2 排放速率维持在较稳定的低水平状态.

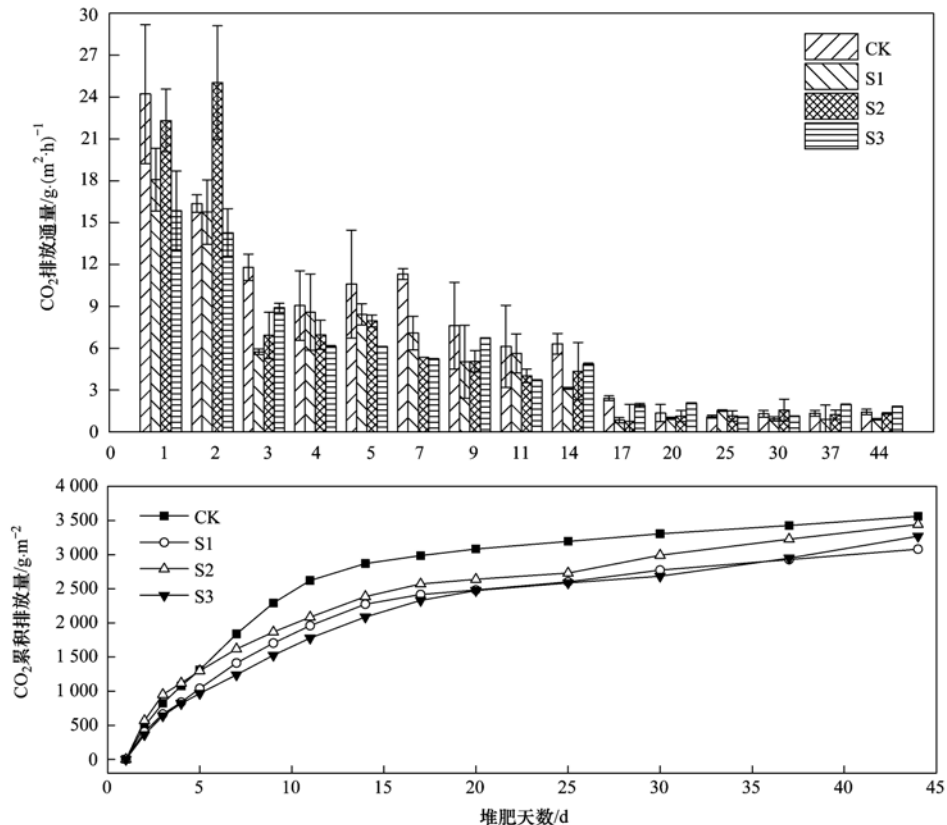


图4 CO_2 排放通量和累积排放量

Fig. 4 Fluxes and accumulative emissions of CO_2

CK、S1、S2 和 S3 处理 CO_2 累积排放量分别为 3.56、3.08、3.44 和 3.27 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图4), CO_2 排放主要集中在堆肥前3周, 占总排放量的 75.65% ~ 86.58%, 这是因为堆肥初期有机物充足且微生物活动强烈. 与 CK 相比, 试验组 CO_2 排放量分别降低了 13.48%、3.37% 和 8.15%, 表明添加竹炭堆肥在一定程度上减少堆体 CO_2 排放, 但各处理 CO_2 排放量无显著差异 ($P > 0.05$). 陶金沙等^[21]添加小麦秸秆生物质炭进行猪粪堆肥, 结果显示猪粪与生物质炭的比例分别为 5:1 和 2.3:1 时, CO_2 排放总量较对照处理显著降低了 20.21% 和 41.10%, 且添加量越多, 其 CO_2 排放量越少; 严慧霞^[27]研究也发现添加生物质炭能降低堆体 CO_2 的排放速率. 而

Mukherjee 等^[28]认为生物质炭的多孔性可以提高堆体 O_2 供应, 促进好氧微生物分解有机物而产生 CO_2 ; 同时, 生物质炭可促进矿化易分解碳向 CO_2 转化, 从而增加 CO_2 排放, 与本研究略有差异. 这可能是由于竹炭中含有较多的稳定态有机化合物, 难以被微生物降解, 同时, 竹炭自身含有大量碳素, 能固定堆体部分 CO_2 , 降低堆体微生物的可利用性碳源^[21]. 另一方面, 竹炭比表面积大, 吸附能力强, 能吸附某些微生物或酶, 使其失活或钝化, 抑制堆体 CO_2 产生^[29].

2.4 N_2O 排放特征

堆体 N_2O 排放主要集中在升温期和降温腐熟期 (图5). 堆体形成后, 立即产生并排放大量 N_2O ,

CK、S1、S2 和 S3 处理分别为 21.86、19.85、13.01 和 11.04 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。随后 2 周, N_2O 排放通量持续下降并保持低水平状态。3 周后, N_2O 排放通量又显著增加。堆肥初期, 部分物料处于缺氧和厌氧状态, 在反硝化作用下产生大量 N_2O , 并随着温度的增加而不断逸出。此后, 高温高碱性环境改变了反硝化菌群的丰富度, 氮素代谢受到抑制^[30], 堆体 N_2O 排放通量急剧下降。但由于堆肥表面氧气充足, 温度湿度适宜, 硝化细菌可继续发挥硝化作用; 同时, 堆体内存在局部厌氧区域, 反硝化细菌能将 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 转化成 N_2O ^[31], 再加上升温期残留的 N_2O , 因此高温期堆体 N_2O 仍有排放且保持低水平排放速率。腐熟期, 堆体温度降低, 堆体内部氧气分布不均, 微生物同时发生好氧硝化和厌氧反硝化作用, 堆体 N_2O 排放通量增加。

堆肥前 25 d, N_2O 累积排放量较小(图 5), 25 d 后, N_2O 排放量显著上升。堆肥后期, 堆体供氧能力增强, 氧化还原电位升高, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量增加, 促进 N_2O 产生^[32]; 再加上降温腐熟期持续时间长, 因此 N_2O 排放总量较大。CK、S1、S2 和 S3 处

理 N_2O 排放量分别为 1.71、1.43、1.27 和 1.00 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 各处理间存在显著差异($P < 0.05$)。与 CK 相比, S1、S2 和 S3 处理分别减少了 16.37%、25.73% 和 41.52%, 表明添加竹炭会显著减少堆体 N_2O 的排放, 且竹炭添加量越多, 堆体 N_2O 排放量越少。这可能是由于竹炭能增强堆体的通气供氧能力, 改善堆体内的厌氧环境, 抑制反硝化作用; 同时, 还能吸附一定量的 NH_3 、 NH_4^+ 和 NO_3^- , 减少 N_2O 的转化和排放^[33]。

2.5 温室气体综合增温效应

为了更加准确地反映堆体温室气体综合增温效应, 采用 IPCC 2014 年第 5 次会议报告的温室气体增温潜势表示方法(CO_2 不计入其内)进行温室效应核算, CK、S1、S2 和 S3 处理 CO_2 排放当量(以干污泥计)分别为 44.10、37.57、35.10 和 35.44 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ (表 2)。陶金沙等^[21]的研究表明添加生物质炭的量越大, 猪粪堆肥过程中温室气体的排放量越小。本试验中, S1、S2 和 S3 处理 CO_2 排放当量分别比 CK 减少了 14.81%、20.41% 和 19.64%, 添加竹炭有利于堆肥过程中的温室气体减排, 其中以 S2 处理的碳减排结果最好。

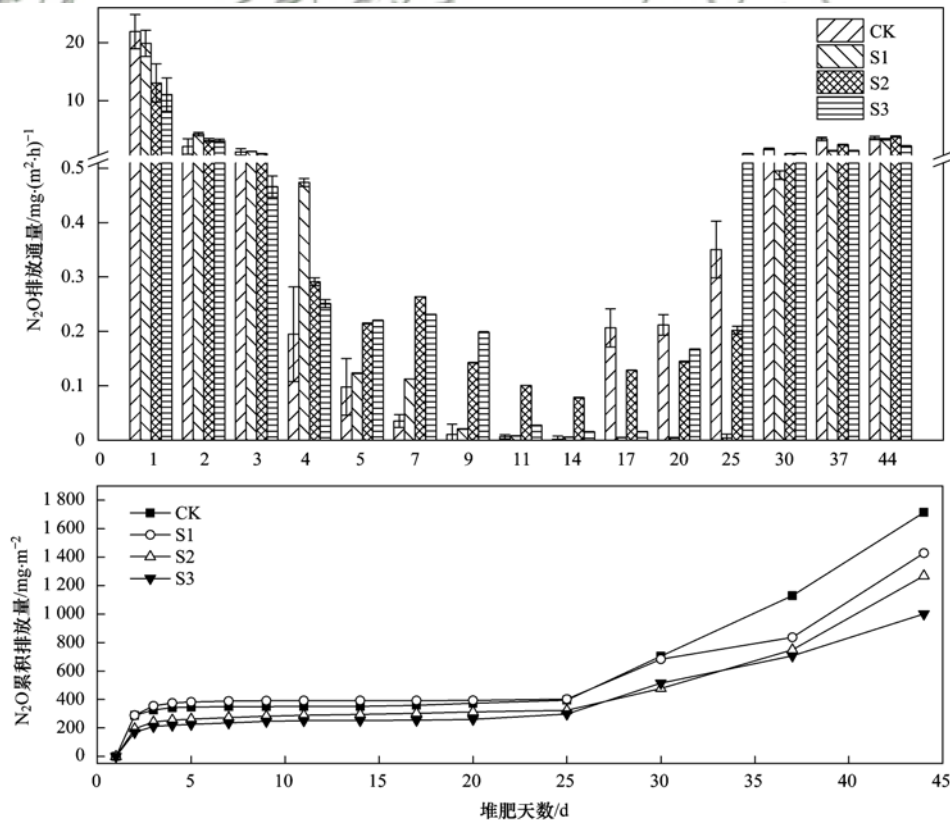


图 5 N_2O 排放通量和累积排放量

Fig. 5 Fluxes and accumulative emissions of N_2O

表 2 污泥堆肥温室气体排放估算

Table 2 Emissions of greenhouse gases during municipal sludge composting

试验处理	CH ₄		N ₂ O		CO ₂ 排放当量(以 CO ₂ eq/干污泥计)		
	排放量 /g·m ⁻²	排放因子(以干污泥计) /kg·t ⁻¹	排放量 /g·m ⁻²	排放因子(以干污泥计) /kg·t ⁻¹	CH ₄	N ₂ O	合计
CK	20.89	0.892	1.71	0.073	22.29	21.80	44.10
S1	18.32	0.780	1.43	0.061	19.51	18.06	37.57
S2	17.78	0.759	1.27	0.054	18.97	16.14	35.10
S3	21.29	0.909	1.00	0.043	22.72	12.73	35.44

3 结论

堆体 CH₄ 排放主要集中在升温期和高温前期, 当竹炭添加量低于 5% 时, CH₄ 排放量随添加量的增加而减少; 高于 5% 时, CH₄ 排放量又明显增加. CO₂ 主要在升温期和高温期排放, 添加竹炭可减少 3.37% ~ 13.48% 的 CO₂ 排放. N₂O 集中在升温期和降温腐熟期排放, 添加竹炭能显著降低 N₂O 排放, 竹炭添加量越多, 减排效果越好. CK、S1、S2 和 S3 处理 CO₂ 排放因子(以干污泥计)分别为 44.10、37.57、35.10 和 35.44 kg·t⁻¹, 添加竹炭可减排温室气体 14.81% ~ 20.41%.

参考文献:

[1] 陈秋喜. 2016 年污泥处置行业分析报告[EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/4dca83975acfa1c7ab00ec68.html>, 2016-07-16.

[2] 刘佳, 李婉, 许修宏, 等. 接种纤维素降解菌对牛粪堆肥微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3073-3081. Liu J, Li W, Xu X H, et al. Effect of cellulose-decomposing strain on microbial community of cow manure compost [J]. Environmental Science, 2011, 32(10): 3073-3081.

[3] Luo Y M, Li G X, Luo W H, et al. Effect of phosphogypsum and dicyandiamide as additives on NH₃, N₂O and CH₄ emissions during composting [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(7): 1338-1345.

[4] Wang J Z, Hu Z Y, Xu X K, et al. Emissions of ammonia and greenhouse gases during combined pre-composting and vermicomposting of duck manure [J]. Waste Management, 2014, 34(8): 1546-1552.

[5] Yang F, Li G X, Yang Q Y, et al. Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting [J]. Chemosphere, 2013, 93(7): 1393-1399.

[6] Lehmann J. A handful of carbon [J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.

[7] 陈是史, 袁京, 李国学, 等. 过磷酸钙和双氰胺联用减少污泥堆肥温室气体及 NH₃ 排放[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 199-206. Chen S L, Yuan J, Li G X, et al. Combination of superphosphate and dicyandiamide decreasing greenhouse gas and NH₃ emissions during sludge composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 199-206.

[8] Chowdhury M A, de Neergaard A, Jensen L S. Composting of solids separated from anaerobically digested animal manure; effect of different bulking agents and mixing ratios on emissions of greenhouse gases and ammonia [J]. Biosystems Engineering, 2014, 124: 63-77.

[9] 易建婷, 杨雨谔, 张成, 等. 冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2738-2744. Yi J T, Yang Y H, Zhang C, et al. Emissions characteristics of greenhouse gas from sewage sludge composting process in winter [J]. Environmental Science, 2016, 37(7): 2738-2744.

[10] Chen Y X, Huang X D, Han Z Y, et al. Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting [J]. Chemosphere, 2010, 78(9): 1177-1181.

[11] 李丽劫. 竹炭的添加对猪粪堆肥过程氮素滞留与温室气体减排的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. 43-52. Li L J. Effects of bamboo charcoal on nitrogen conservation and greenhouse gas emissions reduction during swine manure composting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. 43-52.

[12] 孙文彬. 生物质炭对城市污泥好氧堆肥过程中碳素转化及堆肥品质的影响[D]. 重庆: 重庆西南大学, 2013. 18-21. Sun W B. Effects of biochar on transformation of organic matter during sewage sludge composting and quality of compost [D]. Chongqing: Southwest University, 2013. 18-21.

[13] 刘微, 霍荣, 张津, 等. 生物质炭对番茄秸秆和鸡粪好氧堆肥氮磷钾元素变化的影响及其机理[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 289-294. Liu W, Huo R, Zhang J, et al. Effects of biochar on N, P and K transformation of tomato straw and chicken manure composting and mechanisms [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 289-294.

[14] El Kader N A, Robin P, Paillat J M, et al. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(14): 2619-2628.

[15] 魏自民, 李英军, 席北斗, 等. 三阶段温度控制接种法对堆肥有机物质变化影响[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 540-544. Wei Z M, Li Y J, Xi B D, et al. Effect of using three stages inoculation controlled by temperature on organic matter transformation during composting process [J]. Environmental Science, 2008, 29(2): 540-544.

[16] 魏源送, 李承强, 樊耀波, 等. 不同通风方式对污泥堆肥的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 54-59. Wei Y S, Li C Q, Fan Y B, et al. Effect on sewage sludge

- composting with different aeration modes [J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(3): 54-59.
- [17] Mahimairaja S, Bolan N S, Hedley M J, *et al.* Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment [J]. *Bioresource Technology*, 1994, **47**(3): 265-273.
- [18] 贺琪, 李国学, 张亚宁, 等. 高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(1): 169-173.
- He Q, Li G X, Zhang Y N, *et al.* N loss and its characteristics during high temperature composting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, **24**(1): 169-173.
- [19] Fukumoto Y, Osada T, Hanajima D, *et al.* Patterns and quantities of NH_3 , NO_2 and CH_4 emissions during swine manure composting without forced aeration-effect of compost pile scale [J]. *Bioresource technology*, 2003, **89**(2): 109-114.
- [20] Hao X Y, Chang C, Larney F J, *et al.* Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(2): 376-386.
- [21] 陶金沙, 李正东, 刘福理, 等. 添加小麦秸秆生物质炭对猪粪堆肥腐熟程度及温室气体排放的影响[J]. *土壤通报*, 2014, **45**(5): 1233-1240.
- Tao J S, Li Z D, Liu F L, *et al.* Effects of wheat straw biochar on maturity extent and greenhouse gases emissions during swine manure composting[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, **45**(5): 1233-1240.
- [22] Szanto G L, Hamelers H V M, Rulkens W H, *et al.* NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during passively aerated composting of straw-rich pig manure[J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(14): 2659-2670.
- [23] Pietikainen J, Kikkilä O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus[J]. *Oikos*, 2000, **89**(2): 231-242.
- [24] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, *et al.* Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and Amazonian dark earths in central Amazonia-preliminary results [A]. In: Glaser B, Woods W I (Eds.). *Amazonian Dark Earth: Explorations in Space and Time* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2004: 195-212.
- [25] 黄向东. 竹炭与竹醋液对猪粪堆肥过程污染物控制效果及堆肥资源化利用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. 51-58.
- Huang X D. Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on pollutant control during pig manure composting and resource utilization of compost [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. 51-58.
- [26] Peng X, Ye L L, Wang C H, *et al.* Temperature-and duration-dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an ultisol in southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, **112**(2): 159-166.
- [27] 严慧霞. 生物质炭对堆肥及稻作的农学与环境效应研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014. 20-29.
- Yan H X. The agriculture and environment effects of biochar on composting and paddy cultivation [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014. 20-29.
- [28] Mukherjee A, Lal R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions [J]. *Agronomy*, 2013, **3**(2): 313-339.
- [29] Cathcart T P, Wheaton F W, Brinsfield R B. Optimizing variables affecting composting of blue-crab scrap [J]. *Agricultural Wastes*, 1986, **15**(4): 269-287.
- [30] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(4): 1295-1301.
- [31] 赵晨阳, 李洪枚, 魏源送, 等. 翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 533-540.
- Zhao C Y, Li H M, Wei Y S, *et al.* Effects of turning frequency on emission of greenhouse gas and ammonia during swine manure windrow composting[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 533-540.
- [32] Wang C, Lu H H, Dong D, *et al.* Insight into the effects of biochar on manure composting: evidence supporting the relationship between N_2O emission and denitrifying community [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(13): 7341-7349.
- [33] Peigné J, Girardin P. Environmental impacts of farm-scale composting practices[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, **153**(1-4): 45-68.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparision of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)