

杨雨滢, 易建婷, 任小玉, 等. 生物质炭对城市污泥堆肥温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 567–575.

YANG Yu-han, YI Jian-ting, REN Xiao-yu, et al. Influences of biochar on greenhouse gas emissions during municipal sludge composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(3): 567–575.

生物质炭对城市污泥堆肥温室气体排放的影响

杨雨滢¹, 易建婷¹, 任小玉², 蒋越¹, 陈宏¹, 张成^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 海南省环境科学研究院, 海口 570206)

摘要:采用城市脱水污泥为研究对象, 设置两种堆肥处理(试验组: 添加水稻生物质炭; 对照组: 未添加生物质炭), 考察污泥堆肥过程温室气体动态变化特征以及添加生物质炭的影响。结果表明: 生物质炭能提高堆体温度、延长堆体高温期、加快堆体腐熟, 减少堆体 TC(总碳)、TOC(总有机碳)和氮素损失(特别是减少 NH_4^+-N 的损失), 两种处理 TC、TOC 和 TN(总氮)均呈显著性差异($P < 0.05$)。CH₄ 排放主要集中在高温期和降温期, 占 CH₄ 总排放量的 76.40%~82.40%, 添加生物质炭会促进 CH₄ 排放。CO₂ 排放主要集中在高温期和降温期, 占排放总量的 78.77%~78.83%, 添加生物质炭能减少 CO₂ 排放。超过 84% 的 N₂O 排放集中在腐熟期, 添加生物质炭能减少堆肥过程中 N₂O 排放, 试验组 N₂O 累积排放量比对照组低 18.94%。添加生物质炭对污泥堆肥处理具有一定的温室气体减排作用, 试验组与对照组 CO₂ 排放当量(以干污泥计)分别为 60.21 kg·t⁻¹ 和 67.19 kg·t⁻¹, 添加生物质炭能减排温室气体 10.39%。

关键词:城市污泥; 堆肥; 温室气体; 生物质炭; 排放特征

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)03-0567-09 doi:10.11654/jaes.2017-1229

Influences of biochar on greenhouse gas emissions during municipal sludge composting

YANG Yu-han¹, YI Jian-ting¹, REN Xiao-yu², JIANG Yue¹, CHEN Hong¹, ZHANG Cheng^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Hainan Provincial Research Academy of Environmental Sciences, Haikou 570206, China)

Abstract: Effects of biochar on greenhouse gas emissions were investigated by analyzing the dynamic characteristics of municipal sludge composting with and without biochar. The results showed that adding biochar increased the pile temperature, extended the altithermal temperature period, increased the decomposition rate of the composting pile, and reduced total carbon (TC), total organic carbon (TOC), and nitrogen loss (especially for NH_4^+-N). The TC, TOC, and total nitrogen (TN) levels showed significant differences ($P < 0.05$) between the two treatments. CH₄ emissions mainly occurred during the altithermal temperature period and cooling phase in both the treatments, accounting for 76.40%~82.40% of the total emissions. Biochar increased the CH₄ emissions, but this increase was non-significant compared with composting without biochar. CO₂ emissions were primarily concentrated in the altithermal temperature period and cooling phase, accounting for 78.77%~78.83% of the total CO₂ emissions. Unlike CH₄ emissions, biochar reduced CO₂ emissions. In addition, over 84% N₂O emissions occurred in the rotten period. Biochar significantly reduced the N₂O emissions, which were 18.94% lower than the treatment without biochar. CO₂ emission equivalents of dry sludge were estimated to be 60.21 and 67.19 kg·t⁻¹ in the with and without biochar treatments, respectively. The significant reduction in greenhouse gas emissions of 10.39% in the biochar treatment indicated that adding biochar reduced the greenhouse effect during sludge composting.

Keywords: municipal sludge; composting; greenhouse gas; biochar; emission characteristics

收稿日期: 2017-09-09 录用日期: 2017-11-27

作者简介: 杨雨滢(1993—), 女, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事废物处理处置与资源化利用研究。E-mail: 765772897@qq.com

* 通信作者: 张成 E-mail: zhcheng@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208426)

Project supported: The National Science Foundation of China(51208426)

近年来,我国污水处理量急剧增长,从2005年的524.5亿t增加到2014年的716.2亿t^[1],相应的污泥产量已突破3000万t(含水率80%)。国家新环保法的实施以及《水污染防治行动计划》的发布强调了我国污泥处理处置的迫切性,同时污泥处理处置也被列为“十三五”规划的重点方向。在现行的处理处置方式中,高温好氧堆肥是一种常用的污泥稳定化处理技术。堆肥过程中,堆体局部缺氧及厌氧好氧交替条件下会产生大量CH₄和N₂O,IPCC 2014年第5次会议报告显示^[2],CH₄、N₂O的100 a温室效应分别是等物质的量CO₂的25、298倍,因此堆肥过程中CH₄和N₂O排放量不容小觑。针对我国污泥处理处置现状及碳减排需求,如何减少堆肥过程中的温室气体排放引起了研究者的广泛关注。Yang等^[3]研究发现添加膨松剂可明显减少餐厨垃圾堆肥中CH₄、N₂O的排放,Luo等^[4]研究发现添加10%磷石膏会明显减少猪粪和秸秆混合堆肥过程中的CH₄和NH₃的排放量;陈是吏等^[5]研究发现过磷酸钙和双氰胺这两种添加剂联用能使污泥堆肥过程总温室气体排放量减少65%以上;易建婷等^[6]认为污泥与木屑混合堆肥过程的温室气体排放总量高于污泥与秸秆堆肥;Zhong等^[7]研究发现机械翻堆条垛式堆肥工艺温室气体排放当量显著高于强制通风+机械翻堆工艺。现阶段有关堆肥处理温室气体排放的研究主要集中在畜禽粪便、餐厨垃圾等堆肥过程中,针对城市污泥堆肥过程温室气体排放研究相对较少。有研究表明生物质炭因其多孔疏松、比表面积巨大、吸附性能强等特性而具有温室气体减排效果^[8],但不同研究间仍存在一些差异。如李丽劫等^[9]认为竹炭会促进堆体碳素代谢、促使某些产甲烷菌生长,从而促进猪粪堆肥过程中CH₄排放;而陶金沙等^[10]却发现小麦秸秆生物质炭能通过抑制易分解有机物的厌氧反应,从而显著降低猪粪堆肥中的CH₄排放。因此,本研究以城市污泥为对象,探究添加生物质炭对城市污泥堆肥过程温室气体排放的影响,分析温室气体动态变化特征和排放因子,为进一步研究城市污泥堆肥过程中温室气体排放特征提供基础数据,为控制污泥堆肥过程碳排放提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试污泥取自重庆市北碚区某污水处理厂脱水污泥,其重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、Ni)含量分别为(96.46±1.81)、(989.76±20.08)、(83.60±2.09)、(2.16±

0.01)、(2.76±0.05)、(36.32±0.22) mg·kg⁻¹。玉米秸秆来自西南大学试验农场,剪碎至3~5 cm,水稻生物质炭购于商丘市三利新能源有限公司,为水稻秸秆在500℃条件下热解炭化3 h,破碎过0.35 mm筛所得,基本性质见表1。

1.2 试验设计

试验于2015年4月16日至6月4日在西南大学试验大棚中进行,设置试验组(污泥:秸秆:水稻生物质炭=20:5:1,质量比)和对照组(污泥:秸秆=4:1,质量比)两种处理,每种处理设置3个重复。污泥和调理剂充分混合后放入课题组自制堆肥箱(图1),其有效尺寸为0.90 m×0.45 m×0.71 m(长×宽×高),有效体积约为0.288 m³。整个试验过程中采取强制通风+人工翻堆^[11]的方式进行好氧堆肥,通风系统采用定时器进行控制,设置通风/关闭时间为20 min/1 h,通风量约为0.1 m³·min⁻¹·m⁻³^[6],每周翻堆一次,整个堆肥过程持续50 d,期间不额外补充水分。

1.3 气体样品采集与分析

温室气体采集采用组合静态箱(图2),由箱体和底座两部分构成,箱体由不透明PVC圆柱管制成,内径为39 cm,高30 cm。箱面上分别开有小孔连接气压缓冲袋与三通阀,以便维持气压平衡与气体采集。采样时将采样箱扣在底座凹槽部位,液封以隔绝箱体内

表1 堆体的基本性质

Table 1 Basic characteristics of the mixing pile

堆肥原料	含水率/%	pH值	TC/ g·kg ⁻¹	TN/ g·kg ⁻¹	TOC/ g·kg ⁻¹	C/N
城市污泥	81.02	—	598.49	27.79	301.67	—
水稻生物质炭	2.22	10.24	578.35	7.68	—	—
玉米秸秆	15.03	—	492.07	8.92	419.63	—
试验组	66.08	8.01	536.55	25.30	353.61	21.21
对照组	67.71	7.82	512.23	24.12	312.76	21.24

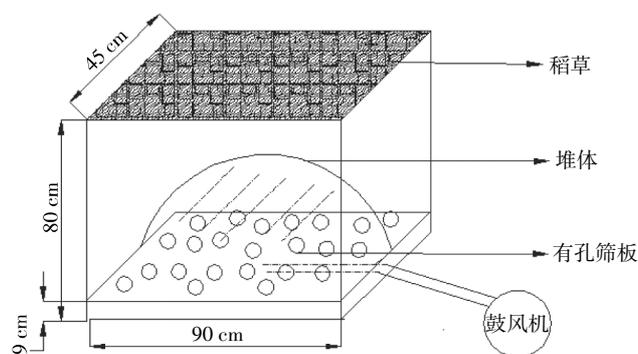


图1 堆肥装置示意图

Figure 1 The sketch map of composting process

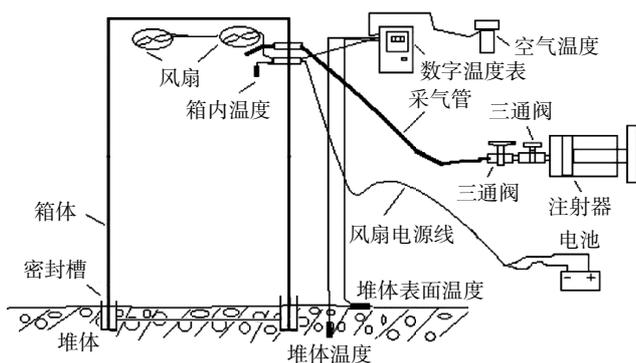


图2 气体采集装置示意图

Figure 2 Schematic diagram of sampling gas

外气体交换。气体样品分别在第1、2、3、4、5、6、8、10、12、16、23、30、37、50 d 采集,采样时间为上午8:00至9:00。气样由60 mL连有三通阀的注射器进行采集,每间隔3 min 采集1次,共采集4次,密封进气口后于20 h内完成测定。采用日本岛津GC-2014气相色谱仪进行测定,分别采用FID(Flame Ionization Detector)和ECD(Electron Capture Detector)检测器检测 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 浓度,结合检测气峰面积与标气峰面积比值换算出样品中各气体浓度。检测系统参数设置如下:FID检测器温度 $250\text{ }^\circ\text{C}$,色谱柱内径2 mm,柱箱温度 $55\text{ }^\circ\text{C}$,载气为高纯 $\text{N}_2(>99.999\%)$,流量 $15\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$;ECD检测器温度 $300\text{ }^\circ\text{C}$,色谱柱内径2 mm,柱箱温度 $55\text{ }^\circ\text{C}$,载气为高纯 $\text{N}_2(>99.999\%)$,流量 $25\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。样品分析进气15 mL,定量阀控制10 mL气样进入检测器分析。使用下列公式计算气体排放通量(f)和累积排放量(Q)^[12],将采样时间内的浓度平均值作为当日单位时间排放通量。

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

$$Q = A \times \sum \Delta f_i t_i$$

式中: f 为气体排放通量, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; Q 为气体累积排放量, mg ; h 为静态箱的高度, m ; $\Delta c/\Delta t$ 为单位时间内气体样品的浓度变化率; M 为1 mol CH_4 、 CO_2 或 N_2O 对应的C或者N的摩尔质量, $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $273/(273 + \frac{T_1 + T_2}{2})$ 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, $^\circ\text{C}$; 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 。

1.4 固体样品采集与分析

固体样品分别在试验第1、4、8、12、16、23、30、37、50 d 进行采集,采用剖面采样法采集不同深度的固体样品,将表层、中层、下层样品500 g混合均匀,以四分法获取样品,存放于自封袋带回实验室分析,测定堆体基本性质、铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、总碳(TC)、总氮(TN)和总有机碳(TOC)等理化指标。堆体基本性质及相关指标测定方法参见文献[13],其中,TC用元素分析仪测定,TN用硫酸-高氯酸联合红外消煮后通过凯氏定氮法测定,TOC用重铬酸钾容量法-磷酸浴外加热法测定。堆体温度采用MC-TNSD温度仪测定,分别在堆体四周4个点、中心部位选择3个固定点,深入堆料30 cm内测定,取平均值。采用Origin 8.5和SPSS 23.0进行作图和统计分析。

2 结果与讨论

2.1 温度变化特征

试验组和对照组在堆肥初期迅速进入高温期($>50\text{ }^\circ\text{C}$),其最高堆温分别为 70.5 、 $67.7\text{ }^\circ\text{C}$ (图3)。堆肥试验于4月中旬开始,重庆气温较高,人工混合堆料较机械混合疏松,部分物料在内部孔隙处被氧化分解并产热,堆体温度升高较快,升温期较短,堆肥1 d即进入高温期。沈玉君等^[13]研究鸡粪堆肥时也发现通气量为 $0.1\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 的堆体在堆肥1 d后就能迅速

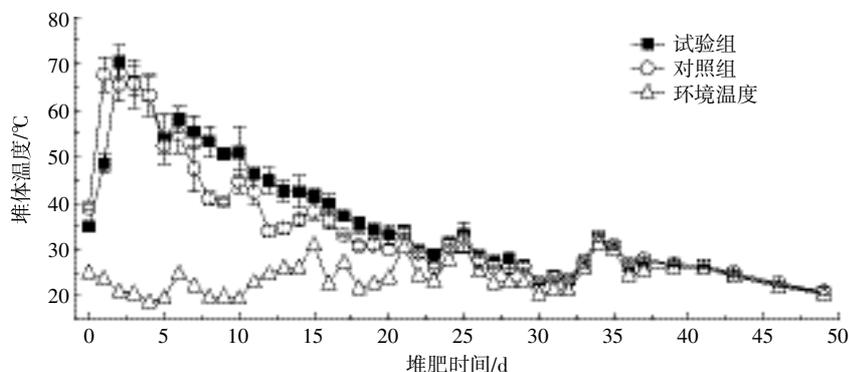


图3 堆体温度及环境温度变化

Figure 3 Temperature changes of pile and circumstances during sludge composting

进入高温期。高温持续时间分别为 11、7 d, 两试验组平均堆温比对照组高 2 °C, 且高温期延长了 4 d。表明生物质炭的添加能够提高堆体温度、延长堆体高温期, 从而有利于堆体有机质的降解, 加快堆体腐熟, 这与 Sonoki 等^[14]的研究结果相似。生物质炭较大的比表面积和强大的孔隙结构有利于改善堆体通风性能, 为微生物分解有机物提供充足的氧气, 通过增强微生物活性、代谢能力与产热能力而促进堆体温度上升, 延长高温持续时间。

2.2 温室气体排放特征

2.2.1 CH₄ 变化特征

试验组与对照组两种处理 CH₄ 排放通量总体呈下降趋势(图 4)。CH₄ 排放均在堆肥初期较高, 分别为 598.02、575.91 mg·m⁻²·h⁻¹, 这与陶金沙等^[10]、Fukumoto 等^[15]的研究结果相似。堆肥第 1 d 曝气量不足, 局部厌氧而产生大量 CH₄, 同时由于堆体迅速进入高温期, 有机物大量分解, 堆体供氧不足, 产生大量 CH₄。随着大部分有机物被微生物利用, 可降解碳源减少, 堆体温度下降, CH₄ 排放速率降低并趋于稳定。江滔等^[16]研究发现在堆肥前 5 d, CH₄ 排放速率极低, 但 CH₄ 排放速率随堆体温度升高而迅速增加。两种处理 CH₄ 排放主要集中高温期和降温期, 占排放总量的 76.40%~

82.40%, 其累积排放量分别为 23.49、22.46 g·m⁻²。试验组 CH₄ 排放量略高于对照组, 但两种处理 CH₄ 排放通量变化差异性不显著($P>0.05$)。堆肥过程中 CH₄ 主要由易分解有机物在缺氧或厌氧条件下产生, 而生物质炭对堆体溶解性有机碳^[17]、微生物量碳^[18]等活性有机碳含量^[19]有明显影响, 导致堆体中活性有机质易被产甲烷菌利用, 从而增加 CH₄ 排放。李丽劫等^[9]认为添加生物质炭会促进猪粪堆肥过程中 CH₄ 排放, 可能是由于生物质炭促进了堆体某些碳素代谢, 也有可能是生物质炭中某种微量元素改变了堆体微生物群落, 促使部分产甲烷菌生长, 有利于 CH₄ 排放。但陶金沙等^[10]却发现生物质炭能显著降低猪粪堆肥的 CH₄ 排放, 且 CH₄ 排放量随生物质炭添加量的增加而降低, 其认为生物质炭能通过疏松堆体结构、改善通风供氧能力而减少 CH₄ 产生。堆肥基质、调理剂均有可能影响堆体 CH₄ 排放, 且不同堆体其有机碳稳定性存在差异, 因此, 生物质炭对 CH₄ 排放的影响机制仍需进一步研究。

2.2.2 CO₂ 变化特征

两种处理 CO₂ 排放趋势大致相同, 在前 10 d 波动较为明显, 随后逐渐下降并趋于稳定(图 5), 排放通量在 3.36~49.31 g·m⁻²·h⁻¹ 之间。堆肥前期, 大部分

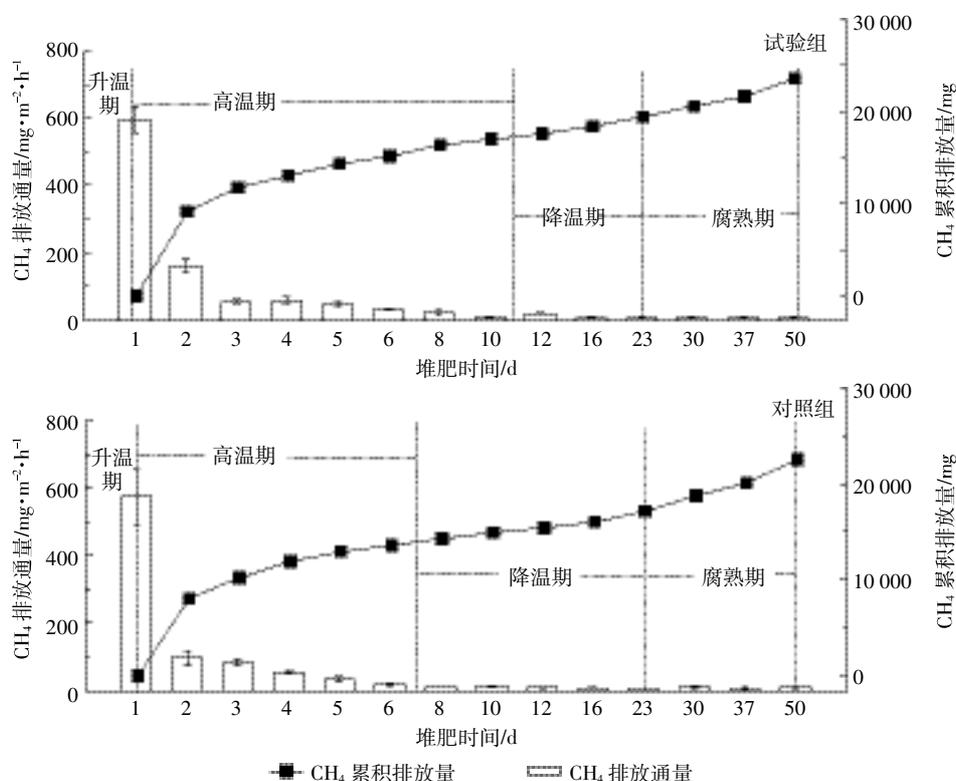
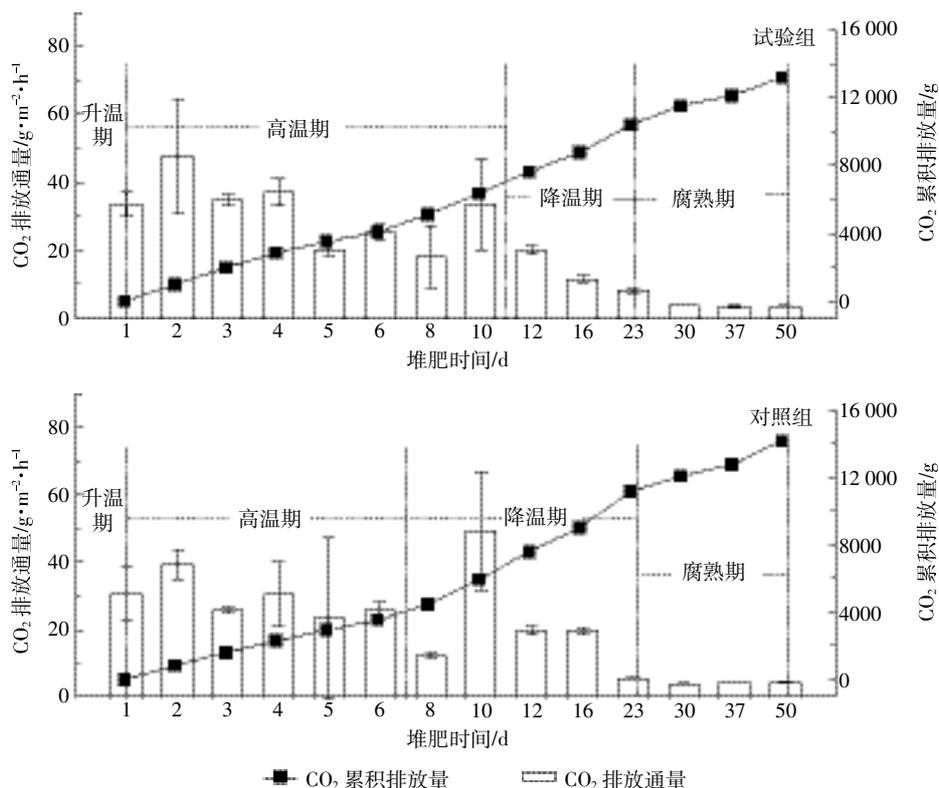


图 4 CH₄ 排放通量及累积排放量

Figure 4 Flux and accumulative emissions of CH₄

图5 CO₂ 排放通量及累积排放量Figure 5 Flux and accumulative emissions of CO₂

易降解有机物被微生物氧化分解, 转化为 CO₂、H₂O 等小分子物质, 随着堆体可降解碳源的减少, CO₂ 排放速率逐渐下降并趋于稳定, 腐熟期 CO₂ 排放通量低于 4.44 g·m⁻²·h⁻¹。两种处理 CO₂ 排放主要集中在高温期和降温期, 占排放总量的 78.77%~78.83%。试验组与对照组 CO₂ 累积排放量分别为 13.18、14.15 kg·m⁻², 试验组较对照组 CO₂ 低 6.85%, 与陶金沙等^[10]的研究结果类似。本研究中, 堆肥前 8 d 试验组 CO₂ 排放量高于对照组 (分别为 5.10、4.45 kg·m⁻²), 至堆肥结束, 试验组 CO₂ 排放量低于对照组, 说明 CO₂ 减排主要集中在堆肥中后期。生物质炭虽为外加碳源, 但含较多稳定态有机化合物, 难以被微生物分解利用, 同时其具有较大的比表面积与强吸附性, 能吸附某些微生物或酶, 使其失活或钝化^[20], 或使部分有机物包被于生物质炭的孔隙内, 从而抑制其分解^[21], 减少堆体 CO₂ 排放。

2.2.3 N₂O 变化特征

两种处理 N₂O 排放趋势大致相同(图 6), 排放通量在 0.07~72.22 mg·m⁻²·h⁻¹ 之间。试验组与对照组 N₂O 平均排放通量分别为 10.51、11.71 mg·m⁻²·h⁻¹, 累积排放量分别为 2.77、3.41 g·m⁻², 分别占初始 TN 的

0.78%、0.56%。堆肥第 1 d 和腐熟期排放速率较大, 且超过 84% 的 N₂O 排放集中在腐熟期。有研究^[22-23]表明, 过高的温度会抑制硝化细菌的活性, N₂O 排放主要集中在温度较低且堆料中有明显 NO₂ 积累的后腐熟阶段。而江滔等^[16]则认为 N₂O 排放集中在堆肥初期, 主要是由于表层堆体温度较低且供氧充足, 适合硝化细菌生长。试验组 N₂O 累积排放量比对照组低 18.94%, 表明添加生物质炭能减少堆肥过程中 N₂O 排放, 这与 Jia 等^[24]的研究结果一致。生物质炭自身多孔性能可吸附滞留水分, 改变堆体氧化还原条件以及微生物菌群 (特别是反硝化菌群), 其高 pH 值改变反硝化菌群丰富度, 减少产 N₂O 细菌群落, 并通过孔隙结构物理吸附 NH₃^[25]、化学吸附 NH₄^[26], 达到保氮减排 N₂O 的效果。

2.3 TC 和 TOC 变化特征

由于生物质炭的添加, 试验组堆体初始 TC、TOC 值高于对照组(图 7)。两种处理 TC、TOC 总体呈降低趋势, 且在堆肥前期(前 2 周)降速较大。其中, 试验组 TC、TOC 减少量分别占堆肥过程中总减少量的 95.90%、81.07%; 对照组 TC、TOC 减少量则占总减少量的 71.80%、67.34%, 这与堆体中不稳定物质在高温

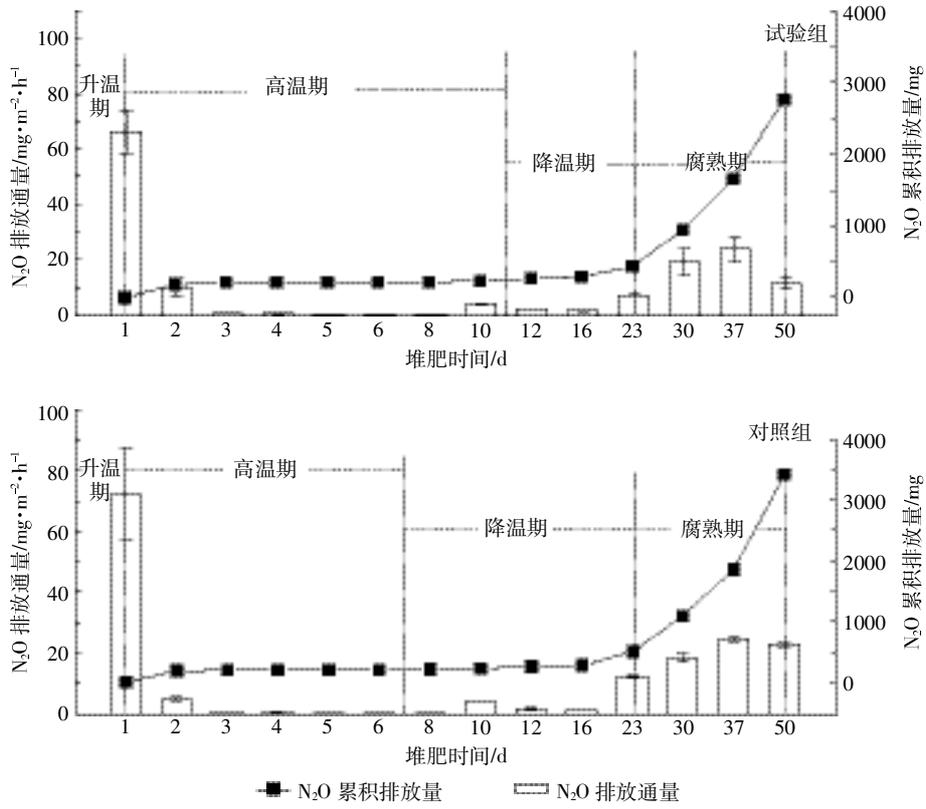


图 6 N₂O 排放通量及累积排放量

Figure 6 Flux and accumulative emissions of N₂O

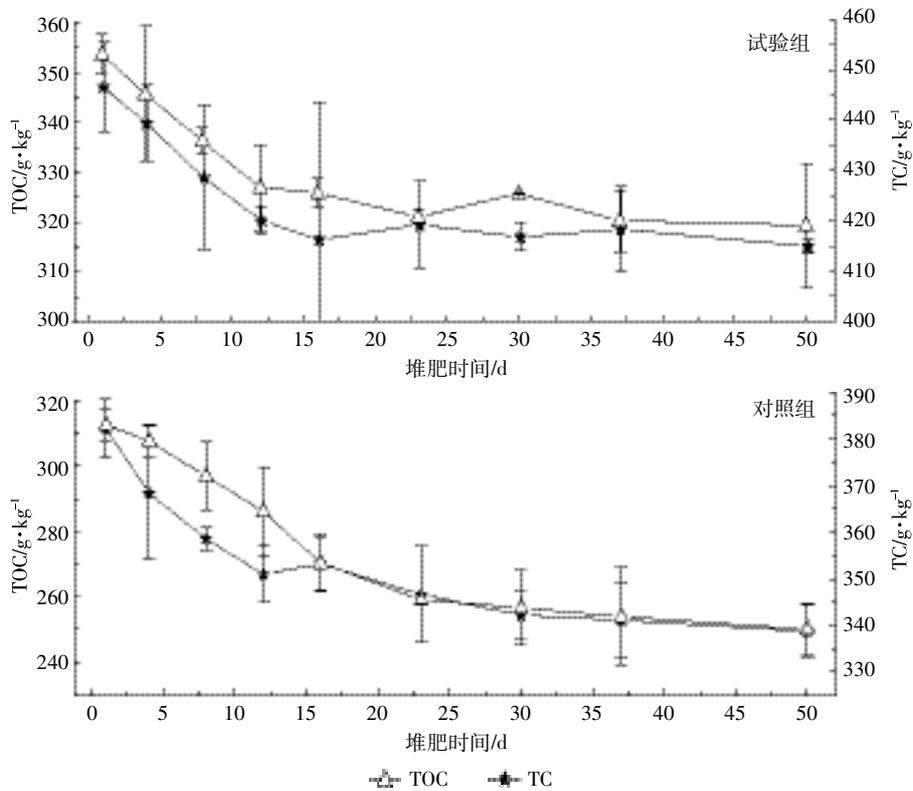


图 7 堆体 TC 和 TOC 变化

Figure 7 Change of total carbon and total organic carbon during composting

期快速分解转化为 H_2O 、 CO_2 等小分子物质有关^[27]。整个堆肥过程中, 试验组 TC 和 TOC 分别减少 31.57、34.18 $g \cdot kg^{-1}$, 对照组则分别减少 43.50、62.74 $g \cdot kg^{-1}$ 。试验组 TC、TOC 降幅均小于对照组, 两种处理 TC、TOC 均呈极显著差异 ($P < 0.01$), 这可能与生物质炭带入部分有机碳源以及其自身固碳作用有关^[28], 外源生物质炭能够提高堆体中溶解性有机质的芳香性、腐殖化程度^[29], 从而有利于腐殖质进一步稳定, 加快堆体腐熟。

2.4 氮素变化特征

试验组与对照组 NH_4^+-N 呈现先增加后减小的变化趋势(图 8), 至堆肥结束, 两种处理 NH_4^+-N 总量分别减少了 12.08%、70.26%, 试验组减少量明显低于对照组。生物质炭能吸附堆肥过程中的 NH_4^+-N , 从而减少 NH_4^+-N 的损失, 同时加快好氧微生物对含氮有机物的代谢效率^[7], 通过生物氧化作用提高表面酸性基团(特别是羧基团)^[30]与 NH_4^+-N 结合, 降低氮素损失。两种堆体在堆肥前期(前 12 d) $NO_3^- - N$ 含量较低(约为 0.021~0.120 $g \cdot kg^{-1}$), 高温期堆体温度较高, 微生物主要进行氨化作用, 随着堆体温度的降低, 硝化作用增强^[31], NH_4^+-N 转化为 $NO_3^- - N$, $NO_3^- - N$ 含量迅速增

加, 至堆肥结束, 试验组 $NO_3^- - N$ 含量为对照组的 1.5 倍。添加生物质炭可显著提高堆体 $NO_3^- - N$ 含量, 具有一定的保氮作用, 这与生物质炭表面基础官能团的强吸附力有关^[15]。

试验组和对照组 TN 均呈现先下降后上升的变化趋势, 2 周后逐渐降低并保持平稳(图 6), 整个堆肥过程表现为氮素损失, 两种处理 TN 含量分别减少了 11.15%、12.89%。堆肥前期有机物被分解产生大量 NH_3 , 在高温、高 pH 值等条件下难以转化为其他稳定形态, 通风作用下以气体形式散失, 导致氮素损失。试验组 TN 高于对照组, 呈显著差异 ($P < 0.05$), 这可能与生物质炭表面官能团吸附气态氮素、降低氨挥发有关, 也可能是外源生物质炭通过调节堆体养分比例, 从而促进了固氮菌固定氮素。两种处理 C/N 比呈先升高后降低的变化趋势, 且试验组堆体 C/N 比始终高于对照组。秦莉等^[32]研究发现, 高 C/N 比堆体 CH_4 累积排放量高于低 C/N 比, 且高温期越长 CH_4 排放量越大, 这与本研究结果相符。

2.5 温室气体排放因子及排放量

根据 IPCC 2014 年第 5 次会议报告温室气体增温潜势表示方式^[2], 对污泥堆肥过程温室气体排放

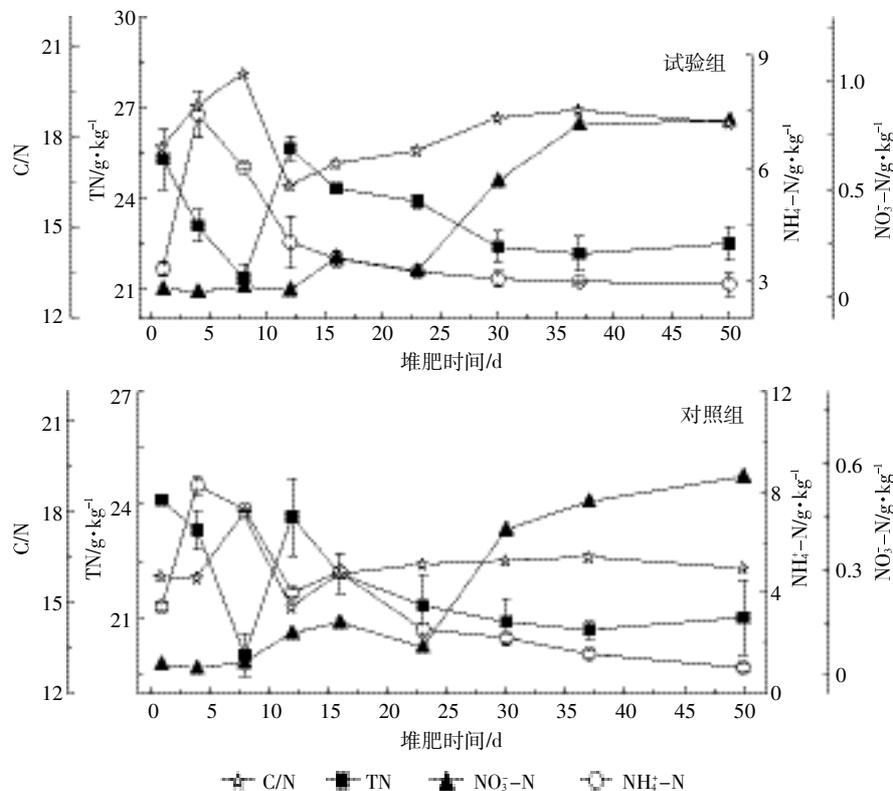


图 8 堆体氮素变化

Figure 8 Change of nitrogen during composting

表2 温室气体排放因子和排放量

Table 2 Emission factor and accumulative emissions of greenhouse gas

试验处理	CH ₄		N ₂ O		CO ₂ 排放当量/kg·t ⁻¹		
	排放量/g·m ⁻²	排放因子/kg·t ⁻¹	排放量/g·m ⁻²	排放因子/kg·t ⁻¹	CH ₄	N ₂ O	合计
试验组	23.49	1.002	2.77	0.118	25.05	35.16	60.21
对照组	22.46	0.959	3.41	0.145	23.98	43.21	67.19

因子进行估算(表2)。试验组 CH₄ 排放因子(1.002 kg·t⁻¹ 干污泥)略高于对照组(0.959 kg·t⁻¹ 干污泥),但 N₂O 排放因子(0.118 kg·t⁻¹ 干污泥)低于对照组(0.145 kg·t⁻¹ 干污泥),试验组与对照组总 CO₂ 排放当量分别为60.21 kg·t⁻¹ 和 67.19 kg·t⁻¹(以干污泥计)。本研究表明,添加生物质炭虽然会增加堆体 CH₄ 排放,但能减少堆体 N₂O 排放;污泥堆肥 CO₂ 排放当量估算结果表明,生物质炭有利于污泥堆肥过程中温室气体总量的减排,试验组 CO₂ 排放当量比对照组减少 10.39%,在污泥堆肥处置过程中添加生物质炭具有一定的碳减排作用。

3 结论

(1) 生物质炭能延长堆体高温期,加快堆体腐熟。同时,生物质炭不仅能够吸附堆肥过程中的 NH₄⁺-N,还能显著提高腐熟结束后堆体 NO₃⁻-N 含量,具有较强的保氮作用。

(2) CH₄ 和 CO₂ 排放主要集中在高温期和降温期,N₂O 排放则集中在腐熟期,添加生物质炭一方面促进 CH₄ 排放,但同时能减少 CO₂ 和 N₂O 排放。生物质炭有利于污泥堆肥过程中温室气体总量的减排,添加生物质炭能减排温室气体 10.39%。

(3) 生物质炭一定程度上可以减少污泥堆肥过程产生的温室气体,这对于我国污泥处理处置及资源化利用具有重要的意义。但生物质炭对于污泥堆肥过程不同温室气体排放的影响机理尚不清楚,仍需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 国家环境保护部. 关于公布 2014 年全国城镇污水处理设施名单的公告[EB/OL]. (2015-05-25) http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201506/t20150609_303209.htm.
Ministry of Environmental Protection of the PRC. Announcements on the 2014 national urban sewage treatment facilities list [EB/OL]. (2015-05-25) http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201506/t20150609_303209.htm.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Copenhagen: IPCC, 2014.
- [3] 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(1): 1393-1399.
- [4] 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.
- [5] 陈是吏, 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 Shi-li, YUAN Jing, LI Guo-xue, 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.
- [6] 易建婷, 杨雨洽, 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 Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, et al. Emissions characteristics of greenhouse gas from sewage sludge composting process in winter[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7): 2738-2744.
- [7] Zhong J, Wei Y S, Wan H F, et al. Greenhouse gas emission from the total process of swine manure composting and land application of compost [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81: 348-355.
- [8] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139: 469-475.
- [9] 李丽劼. 竹炭的添加对猪粪堆肥过程氮素持留与温室气体减排的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
LI Li-jie. Effects of bamboo charcoal on nitrogen conservation and greenhouse gas emissions reduction during swine manure composting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [10] 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 Jin-sha, LI Zheng-dong, LIU Fu-li, 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.
- [11] Wang M J, Awasthi M K, Wang Q, et al. Comparison of additives amendment for mitigation of greenhouse gases and ammonia emission during sewage sludge co-composting based on correlation analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 520-527.
- [12] 郑嘉嘉, 魏源送, 吴晓风, 等. 猪粪堆肥过程保氮固磷及温室气体(N₂O)减排研究[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 2047-2055.

- ZHENG Jia-xi, WEI Yuan-song, WU Xiao-feng, et al. Nutrients conservation of N & P and greenhouse gas reduction of N₂O emission during swine manure composting[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 2047-2055.
- [13] 沈玉君, 李国学, 任丽梅, 等. 不同通风速率对堆肥腐熟度和含氮气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1814-1819.
- SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, REN Li-mei, et al. The impact of composting with different aeration rates on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1814-1819.
- [14] Sonoki T, Furukawa T, Jindo K, et al. Influence of biochar addition on methane metabolism during thermophilic phase of composting[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2012, 53(7): 617-625.
- [15] Fukumoto Y, Osada T, Hanajima D, et al. Patterns and quantities of NH₃, N₂O and CH₄ emissions during swine manure composting without forced aeration-effect of compost pile scale[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 89(2): 109-114.
- [16] 江 滔, Frank Schuchardt, 李国学, 等. 冬季堆肥中翻堆和覆盖对温室气体和氨气排放的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 212-217.
- JIANG Tao, FRANK Schuchardt, LI Guo-xue, et al. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10): 212-217.
- [17] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 1-9.
- [18] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, et al. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from water logged paddy soil with biochar[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(6): 930-939.
- [19] 张 斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4844-4853.
- ZHANG Bin, LIU Xiao-yu, PAN Gen-xing, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4844-4853.
- [20] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon(biochar)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(4): 1295-1301.
- [21] Lu W W, Ding W X, Zhang J H, et al. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: A negative priming effect[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 12-21.
- [22] 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.
- [23] Mulbry W, Ahn H. Greenhouse gas emissions during composting of dairy manure: Influence of the timing of pile mixing on total emissions [J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 126(39): 117-122.
- [24] Jia X Y, Yuan W Q, Ju X T. Effects of biochar addition on manure composting and associated N₂O emissions[J]. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2015, 5: 56-61.
- [25] 付祥峰, 刘琪琪, 李恋卿, 等. 生物质炭对猪粪堆肥过程中氮素转化及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1893-1900.
- FU Xiang-feng, LIU Qi-qi, LI Lian-qing, et al. Effects of biochar on nitrogen transformation and greenhouse gas emissions during swine manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1893-1900.
- [26] Li H, Wu W X, Liu Y X, et al. Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, 16(1): 1-9.
- [27] 杨 帆, 李国学, 江 滔, 等. 蚯蚓辅助堆肥处理蔬菜废弃物及其温室气体减排效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 190-196.
- YANG Fan, LI Guo-xue, JIANG Tao, et al. Vermicomposting treatment of vegetable waste and its greenhouse gas emissions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 190-196.
- [28] Bolan N S, Kunhikrishnan A, Choppala G K, et al. Stabilization of carbon in composts and biochars in relation to carbon sequestration and soil fertility[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 424(4): 264-270.
- [29] 闫金龙, 江 滔, 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 Jin-long, JIANG Tao, ZHAO Xiu-lan, 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.
- [30] Bruno O, Carlos A, Fábio S, et al. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(4): 1239-1246.
- [31] 江 滔, 李国学, 唐 琼, 等. 腐熟堆肥筛上粗颗粒对堆肥化过程中温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7): 1363-1370.
- JIANG Tao, LI Guo-xue, TANG Qiong, et al. Effect of adding coarse materials from matured compost on greenhouse gas emissions from organic wastes during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7): 1363-1370.
- [32] 秦 莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 C/N 比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2668-2673.
- QIN Li, SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, et al. The impact of composting with different C/N on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2668-2673.