

功能膜覆盖好氧堆肥过程氨气减排性能研究

马双双¹ 孙晓曦¹ 韩鲁佳¹ 李仁权² UWE Schlick³ 黄光群¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 青海藏地堂生物科技开发有限公司, 西宁 810000;

3. UTV AG 公司, 巴登巴登 76534)

摘要: 畜禽粪便高温好氧堆肥过程中氨气的排放不仅污染环境,而且会降低有机肥氮素含量。因此,控制好氧堆肥过程中氨挥发是降低氮损失及减少堆肥周边环境恶臭的关键。为研究膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥过程氨气挥发的影响,以猪粪和小麦秸秆为试验原料,采用具有选择渗透性的 Gore 膜作为覆盖材料,在实验室好氧堆肥反应器系统中进行了为期 27 d 的好氧堆肥试验。试验设置覆膜组 and 对照组,采用开启 1 h、关闭 1 h 间歇通风方式,通风速率为 3 L/min,重点监测堆肥过程堆体温度、氧浓度和 NH₃ 排放速率等。研究表明:覆膜组比对照组高温期持续时间略长,更有利于杀死堆体有害病原菌;相比于对照组,覆膜组 NH₃ 排放量减少 18.87%;相比于温度峰值出现的时间,两组试验 NH₃ 峰值出现时间均延后,且覆膜组延后时间更长。

关键词: 氨气;减排;膜覆盖;好氧堆肥

中图分类号: S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)11-0344-06

Reduction of Ammonia Emission during Membrane-covered Aerobic Composting

MA Shuangshuang¹ SUN Xiaoxi¹ HAN Lujia¹ LI Renquan² UWE Schlick³ HUANG Guangqun¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Qinghai Zangditang Biological Technology Development Co., Ltd., Xining 810000, China

3. UTV AG, Baden-Baden 76534, Germany)

Abstract: The emission of ammonia in manure high temperature aerobic composting not only polluted the air but also reduced the nitrogen content of organic fertilizer. Therefore, the control of composting process of ammonia volatilization is the key of reducing nitrogen loss and environment odor emission. In order to study the effect of membrane covered on reducing the emission of ammonia in manure aerobic composting, pig manure and wheat straw were used as experimental materials, and Gore film with selective permeability was used as covering material, the aerobic composting trial was carried out in a lab-scale intelligent membrane-covered aerobic composting reactor system for 27 d. There were membrane-covered treatment and control treatment in this trial. Air blown at an hourly interval (flow velocity of 3 L/min through the pipe at the bottom of the reactor diffused through the composting material to maintain aerobic conditions. The composting temperature, oxygen content and ammonia concentration were measured during the composting. The results showed that the high temperature duration of the membrane-covered group was longer than that of the control group, and it was more beneficial to kill the harmful pathogens. Compared with the control group, the NH₃ emission in the membrane-covered group was decreased by 18.87%. Compared with the peak time of the temperature, the peak time of NH₃ peak in both groups was delayed, and the delay time of the membrane-covered group was longer, and the phenomenon that peak value of NH₃ lagged temperature was further revealed.

Key words: ammonia; emission reduction; membrane-covered; aerobic composting

收稿日期: 2017-07-21 修回日期: 2017-08-30

基金项目: 国家国际科技合作专项(2015DFA90370)和欧盟框架计划项目(690142)

作者简介: 马双双(1992—),女,博士生,主要从事生物质资源利用研究,E-mail: shuangshuangma@cau.edu.cn

通信作者: 黄光群(1979—),男,副教授,博士生导师,主要从事生物质资源利用研究,E-mail: huangguangqun@126.com

引言

好氧堆肥是解决畜禽粪便污染问题、实现其资源化利用的重要有效途径之一。但在好氧堆肥过程中,常伴随恶臭的产生,对周围的环境和人畜健康造成威胁^[1]。臭气主要成分为氨气和硫化氢等,大量的臭气排放不仅污染环境,而且会减低有机肥氮素含量^[2]。因此,控制堆肥过程中氨气的挥发是降低氮损失及减少堆肥周边环境恶臭的关键。

国内外控制堆肥过程氨气挥发研究主要措施有添加添加剂和覆盖处理。如添加过磷酸钙,其主要原理是其酸性对堆肥过程 pH 值的升高具有调节作用,并且游离酸可以与氨气发生反应,生成磷酸铵和硫酸铵等^[3]。但只能少量使用,否则其较高的酸性会影响堆肥的过程和品质^[4]。目前,覆盖处理多见于覆盖腐熟堆肥和无纺土工布的应用,但多由于覆盖处理导致堆体厌氧,从而使温室气体排放量增加^[5]。

近年来,功能膜覆盖好氧堆肥技术以其对气候、气溶胶和臭气的综合防治功能^[6],已被广泛应用到废弃物好氧堆肥。其核心覆盖材料 Gore 膜,中间层采用膨体聚四氟乙烯膜(e-PTFE),膜上均布 0.2 μm 孔径的微孔,内外层则采用具有防紫外和耐腐蚀特点的聚酯膜。但关于膜覆盖畜禽粪便好氧堆肥及与不覆膜好氧堆肥系统的对比研究鲜见报道。

本文采用 Gore 膜作为覆盖材料,试验设置覆盖和不覆盖的对比处理,以研究膜覆盖对好氧堆肥过程氨气减排的影响及其作用机制。

1 材料与方 法

1.1 试验方法

新鲜猪粪采自中国农业科学院昌平试验场,小麦秸秆采自中国农业大学上庄实验站,切短至 3~5 cm 备用。按碳氮比 15、含水率 60% 对上述物料进行均匀混合调配。

好氧堆肥试验设置对照组和覆膜组两个处理,两组试验分别采用好氧堆肥反应器系统^[7]和膜覆盖好氧堆肥反应器系统^[8],其主体结构如图 1、2 所示。两组反应器系统主体相同且有效容积均为 90 L (内径为 450 mm,高度为 600 mm)。因实验室规模好氧堆肥过程连续通风易加剧堆体热量损失,不利于升温 and 杀灭病原菌^[9],结合已有相关研究^[8],本研究采用开启 1 h、关闭 1 h 间歇通风方式,根据前期预试验,通风速率采用 3 L/min。

堆肥过程每隔 12 h 记录堆体上、中、下层温度及氧浓度数值;使用 500 mL 铝箔采气袋采集反应器

出口气体;分别在初始和第 3、6、9、12、15、18、21、27 天取堆体固体样品, -20℃ 保存备用。

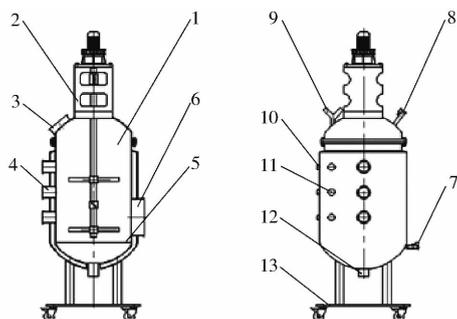


图 1 好氧堆肥反应器系统主罐体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intelligent aerobic composting reactor system

1. 物料舱 2. 搅拌系统 3. 入料口 4. 取样口 5. 布气筛网
6. 出料口 7. 进气口 8. 补水口 9. 出气口 10. 温度传感器通道
11. 氧浓度传感器通道 12. 沥出液收集口 13. 可移动式支撑底座

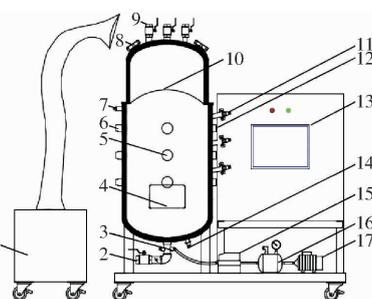


图 2 膜覆盖好氧堆肥反应器系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of membrane-covered aerobic composting reactor

1. 尾气净化装置 2. 滤液聚集视窗 3. 进气口 4. 出料口
5. 取样口 6. 氧浓度传感器 7. 压力传感器 1 (膜下压力)
8. 视窗 9. 出气口 10. 选择渗透性膜 11. 压力传感器 2
12. 温度传感器 13. 自动控制系统 14. 压力传感器 3 (进风压)
15. 流量计 16. 气囊 17. 气泵

1.2 测试方法

参照 TMECC 标准方法 (03.09-A 和 05.07-A) 分别测定猪粪、麦秸和初始混合物料的含水率和挥发性固体含量;利用 Vario ELIII 型元素分析仪测定总碳、总氮质量分数并计算碳氮比。每个样品做 3 个平行试样,取平均值作为最终结果。

温度的测定采用 PT100 型传感器;氨气含量采用比色管测量(日本 GASTEC 公司),用气泵每次抽取 50 mL 或 100 mL 气袋中的气体,待比色管颜色不再变化,读数并记录对应数值。

将鲜样按液料比 10 mL/g 浸提过滤取上清液,利用酸碱度计和电导率仪测定样品 pH 值和电导率。

1.3 数据分析

分别利用 Excel 2013 和 OriginPro 2015 进行数据处理及图形绘制。

2 结果与讨论

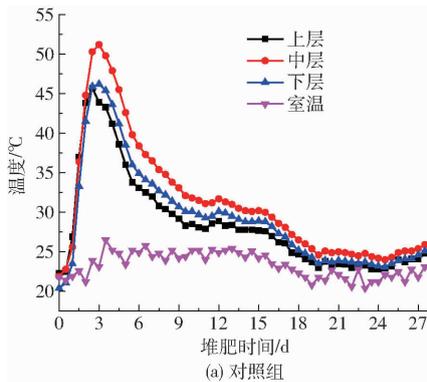
2.1 堆肥物料基础特性

表1所列堆肥原料及初始混合物料基本理化特性。由表1可知,猪粪碳氮比较低,秸秆碳氮比较高,二者相结合可以很好地调节初始物料的碳氮比;且添加秸秆可以增加堆体孔隙率,以满足好氧堆肥过程微生物对氧气的需求。

2.2 堆肥过程主要理化指标动态变化

2.2.1 温度

图3所示分别是对照组和覆膜组堆体温度动态变化曲线,两组试验上、中、下层温度变化趋势相同,升温期、高温期和降温期整体保持一致,符合堆肥温度变化趋势;且均在堆肥第3天达到高温期,是微生物快速降解有机物所致^[10]。覆膜组高温期时间比对照组略长,更有利于杀死堆体有害病原菌。在堆肥第12天,覆膜组温度开始回升,并直至堆肥结束,堆体中心温度维持在31℃左右,更有利于堆体后腐熟,与已有文献研究一致^[8]。



物快速降解有机物所致^[10]。覆膜组高温期时间比对照组略长,更有利于杀死堆体有害病原菌。在堆肥第12天,覆膜组温度开始回升,并直至堆肥结束,堆体中心温度维持在31℃左右,更有利于堆体后腐熟,与已有文献研究一致^[8]。

表1 堆肥原料及初始混合物料基本理化特性

Tab.1 Basic physicochemical properties of raw materials and mixture

参数	猪粪	小麦秸秆	混合物料
含水率/%	62.49 ± 3.64	5.09 ± 0.09	59.63 ± 3.46
挥发性固体质量分数/%	77.05 ± 1.01	93.68 ± 0.09	79.51 ± 0.96
总碳质量分数/%	40.93 ± 0.99	41.64 ± 0.24	41.68 ± 0.96
总氮质量分数/%	3.36 ± 0.08	0.89 ± 0.06	3.25 ± 0.08
碳氮比	12.19 ± 0.04	52.10 ± 3.39	15.13 ± 0.27

注:表中数值为3次重复测量结果的平均值 ± 标准差。

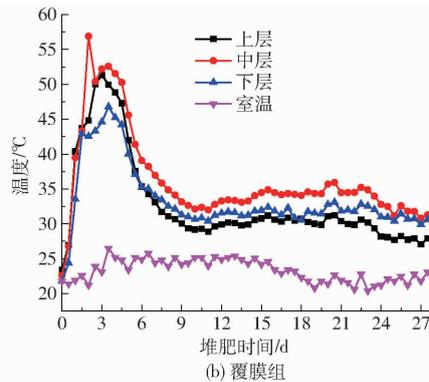


图3 堆肥过程温度变化曲线

Fig.3 Changes of temperature during composting

2.2.2 氧气

微生物在氧气的作用下降解有机质,生成水和二氧化碳,故堆体中氧气含量可以反映微生物的活动情况。图4所示为两堆体中层氧气体积分数动态变化曲线。在堆肥开始3d内,覆膜组和对照组氧气体积分数分别下降到2.2%和13.9%,这由微生物大量分解有机质所致。在整个堆肥过程,对照组氧气体积分数均高于覆膜组,可能是由于覆膜后堆体产生微正压环境,微生物对氧气利用率提高^[8]。

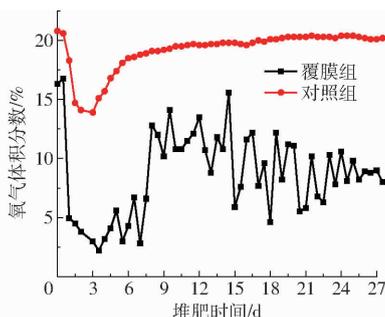


图4 堆肥过程氧气体积分数变化曲线

Fig.4 Changes of oxygen content during composting

2.2.3 挥发性固体质量分数

图5是两堆体挥发性固体质量分数随时间的变化曲线。初始物料挥发性固体质量分数为79.51%,堆肥结束时,对照组和覆膜组挥发性固体质量分数分别为77.27%和74.79%。覆膜后,曝气时堆体内氧气分布更均匀,致使覆膜组挥发性固体降解率较高。因两组试验均为实验室规模,体积偏小,挥发性固体降解有限,但符合中小型反应器好氧堆肥挥发性固体降解规律^[7]。

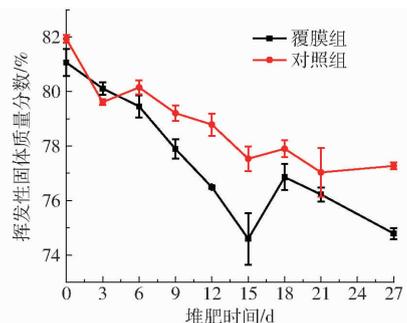


图5 堆肥过程挥发性固体质量分数变化曲线

Fig.5 Dynamics of volatile solid during composting

2.2.4 pH 值和电导率

已有研究表明^[11-12],堆肥过程氨气挥发与堆体 pH 值呈现高度相关。这主要是因为堆体中铵态氮的累积,氨浓度上升,导致 pH 值上升,同时也加剧了氨以气体的形式挥发到环境中。图 6 所示两组试验的 pH 值变化均呈现先升后降的趋势。其中对照组上升较快,第 3 天达到 8.82,而覆膜组在第 9 天达到 8.87,pH 值增大是由有机物质的剧烈分解引起的^[13];最后均稳定在 8.75 左右。

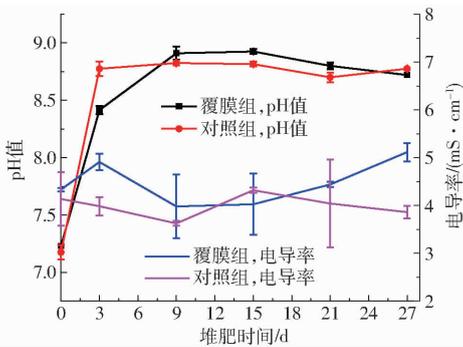


图 6 堆肥过程 pH 值和电导率变化曲线

Fig. 6 Dynamics of pH value and EC during composting

堆肥浸提液电导率数值能反映堆肥含盐量的高低。在两组试验中,堆肥前 9 d,随着温度的升高,大量的有机养分被微生物消耗,导致电导率有明显的下降。随着堆肥的进行,电导率开始缓慢上升,这可能与有机质降解过程中释放可溶性盐有关^[14]。

2.3 堆肥过程总氮质量分数变化

畜禽粪便中的氮素主要以有机氮的形式存在,堆肥过程中在微生物作用下,不断矿化转变为铵态氮。铵态氮在高温和高 pH 值的作用下,以氨气的形式挥发到环境中,造成氮素含量下降。图 7 所示为两组试验的总氮含量变化趋势图,整体呈现先下降后上升的趋势。在堆肥高温期,氮素主要通过氨气挥发损失。覆膜组总氮质量分数从初始的 3.20% 下降到堆肥结束的 2.58%,总氮损失 19.38%;对照组总氮质量分数从初始的 3.17% 下降到 2.40%,总氮损失 24.29%。相比于对照组,覆膜可以减少堆肥过程氮素损失。

2.4 堆肥过程氨气动态变化

两组堆肥过程氨气质量浓度变化如图 8 所示。堆肥初期,由于含氮有机物的降解及温度和 pH 值升高,氨气排放量增加^[15]。对照组和覆膜组氨气排放质量浓度峰值分别出现在第 4 天和第 7 天,基本上与总氮含量急剧下降时间相吻合。覆膜可延缓氨气的排放,与已有研究报道一致^[16]。

膜内与对照组对比,氨气产生量减少 9.22%;膜内与膜外相比,堆肥过程中覆膜导致氨气总排放

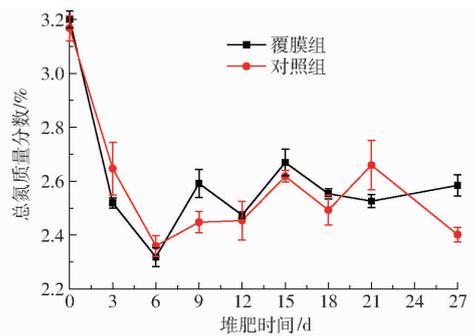


图 7 堆肥过程总氮质量分数变化曲线

Fig. 7 Dynamics of total nitrogen during composting

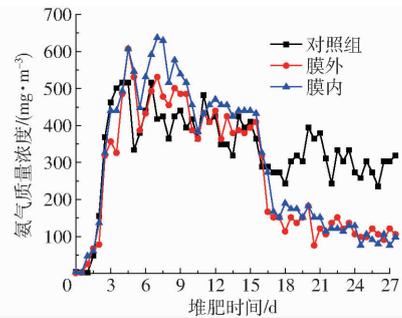


图 8 堆肥过程氨气质量浓度变化曲线

Fig. 8 Dynamics of ammonia emissions during composting

量减少 10.64%。膜外与对照组相比,氨气累积排放量减少 18.87%。减排主要原因是水蒸气遇冷在膜的内表面凝结成一层水膜,当挥发的氨气向外逸散遇到膜时会溶解在水膜中,并以铵态氮的形式存在,随着水膜的不断积累,在重力作用下氨态氮随着水的下落再次回到堆体中,继续被微生物分解,从而阻拦了部分氨气的逸散^[6,17]。

同时,对照组和覆膜组氨气排放质量浓度峰值出现时间均滞后于温度峰值出现时间,这可能是由于温度升高,微生物活跃, NH_4^+ 优先被微生物同化,与已有研究结果一致^[14,18]。

2.5 氨气减排效果比较分析

目前,好氧堆肥覆盖物主要分为非生物覆盖和生物覆盖,非生物覆盖材料包括塑料、无纺土工布和膜材料等^[19-22];生物覆盖材料包括腐熟堆肥、草和膨润土等。生物覆盖材料氨气减排效果多优于非生物覆盖材料,主要是由于生物覆盖材料有助于吸收堆体所产生的氨气。但同时也存在使氨气排放量增加的现象,例如覆盖材料为腐熟堆肥,在高温和适宜的 pH 值环境下腐熟堆肥中的 NH_4^+ 易以氨气的形式挥发出来,导致氨气总排放量增加^[16,23]。

现有相关研究多集中于覆盖和翻堆相结合对氨气减排的影响,氨气减少量在 30% 以下,与本研究结果相近。图 9 为本研究与其他非生物覆盖材料氨气减排效果对比图,Gore 膜与无纺土工布减排效果差异不明显,但二者都优于塑料覆盖。

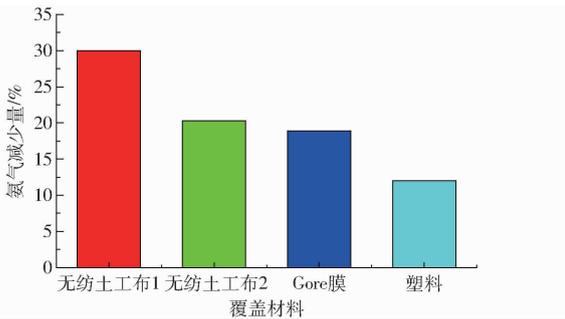


图9 不同覆盖材料氨气减排效果对比

Fig.9 Comparison of reducing ammonia emission with different covered materials

3 结论

(1)覆膜处理比无覆盖处理好氧堆肥高温期持续时间长,更有利于杀死堆体有害病原菌;覆膜后堆体氧气分布更均匀,且利用率提高,有机质降解更完全。

(2)覆膜可以减少氨气排放。相比于对照组,膜内氨气产生量减少9.22%,膜外氨气排放量减少18.87%;由于膜的阻碍和膜内表面水膜吸收作用,膜外比膜内氨气减少10.64%。

(3)相比于温度峰值出现的时间,氨气出现峰值的时间均延后,且覆膜组延后时间更长。

参 考 文 献

- FRASER B S, LAU A K. The effects of process control strategies on composting rate and odor emission [J]. *Compost Science & Utilization*, 2013, 8(4): 274 - 292.
- KITHOME M, PAUL J W, BOMKE A A. Reducing nitrogen losses during simulated composting of poultry manure using adsorbents or chemical amendments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28(1): 194 - 201.
- 熊建军,刘淑英,邹国元,等. 高温堆肥过程中除臭保氮技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 444 - 448. XIONG Jianjun, LIU Shuying, ZOU Guoyuan, et al. Research progress on deodorizing and reducing nitrogen loss from high temperature compost system [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(1): 444 - 448. (in Chinese)
- 吕丹丹,种云霄,吴启堂,等. 过磷酸钙对氨气的吸附解吸特性研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(11): 2506 - 2510. LÜ Dandan, ZHONG Yunxiao, WU Qitang, et al. Adsorption and desorption of calcium superphosphate to ammonia gas [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2506 - 2510. (in Chinese)
- 江滔, SCHUCHARDT Frank, 李国学. 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, SCHUCHARDT Frank, LI Guoxue. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(10): 212 - 217. (in Chinese)
- 陈佩芝,盛清凯. 德国 UTV - GORE 膜覆盖式畜禽粪便高温好氧发酵法[J]. *猪业科学*, 2016, 33(6): 52 - 53.
- 张安琪,黄光群,张绍英,等. 好氧堆肥反应器试验系统设计与性能试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 156 - 161. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140725&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.025. ZHANG Anqi, HUANG Guangqun, ZHANG Shaoying, et al. Design and test on an experimental aerobic composting reactor system [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 156 - 161. (in Chinese)
- 孙晓曦,马双双,韩鲁佳,等. 智能型膜覆盖好氧堆肥反应器设计与试验[J/IOL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 240 - 245. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161229&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.029. SUN Xiaoxi, MA Shuangshuang, HAN Lujia, et al. Design and test on lab-scale intelligent membrane-covered aerobic composting reactor [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 240 - 245. (in Chinese)
- SCAGLIA B, TAMBONE F, GENEVINI P L, et al. Respiration index determination: dynamic and static approaches[J]. *Compost Science & Utilization*, 2000, 8(2): 90 - 98.
- GUO R, LI G, JIANG T, et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 112(58): 171 - 178.
- 李冰,王昌全,江连强,等. 有机辅料对猪粪堆肥中氨气挥发的抑制效应及其影响因素分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(5): 987 - 993. LI Bing, WANG Changquan, JIANG Lianqiang, et al. Inhibitory effect of auxiliary organic materials on ammonia volatilization in composting and the influencing factors [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 987 - 993. (in Chinese)
- 朱新梦,董雯怡,王洪媛,等. 牛粪堆肥方式对温室气体和氨气排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 258 - 264. ZHU Xinmeng, DONG Wenyi, WANG Hongyuan, et al. Effects of cattle manure composting methods on greenhouse gas and ammonia emissions [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(10): 258 - 264. (in Chinese)
- SÁNCHEZMONEDERO M A, SERRAMIÁ N, CIVANTOS C G, et al. Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agro industrial by-products[J]. *Chemosphere*, 2010, 81(1): 18.
- SZÁNTÓ G. NH₃ dynamics in composting: assessment of the integration of composting in manure management chains [J]. *Advanced Materials*, 2009, 7(3): 283 - 286.

- 15 BERNAL M P, ALBURQUERQUE J A, MORAL R, et al. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5444–5453.
- 16 黄华, 黄懿梅, 刘学玲, 等. 覆盖处理对猪粪秸秆堆肥中氮素转化和堆肥质量的影响[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(3): 780–786.
HUANG Hua, HUANG Yimei, LIU Xueling, et al. Effect of covering on nitrogen transformation and the quality of pig manure-straw compost [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(3): 780–786. (in Chinese)
- 17 李广坤. 功能膜覆盖式污泥好氧堆肥系统的效能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
LI Guangkun. Research on effectiveness of aerobic sludge composting with functional membrane coverage [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016. (in Chinese)
- 18 ELWELL D L, KEENER H M, WILES M C, et al. Odorous emissions and odor control in composting swine manure/sawdust mixes using continuous and intermittent aeration[J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(5): 1307–1316.
- 19 刘宁, 赵义武, 史春梅. 覆盖、翻堆对堆肥过程中 N_2O 、氨气排放规律的研究[J]. *环境卫生工程*, 2013, 21(1): 53–57.
LIU Ning, ZHAO Yiwu, SHI Chunmei. Effects of covering and turning on emission regularity of N_2O and NH_3 during composting process [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2013, 21(1): 53–57. (in Chinese)
- 20 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 Guoxue, 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. (in Chinese)
- 21 化党领, 刘方, 李国学, 等. 翻堆与覆盖工艺对猪粪秸秆堆肥性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 210–216.
HUA Dangling, LIU Fang, LI Guoxue, et al. Effect of turning and covering techniques on pig manure-straw composting property [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(12): 210–216. (in Chinese)
- 22 HANSEN M N, HENRIKSEN K, SOMMER S G. Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: effects of covering [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(22): 4172–4181.
- 23 LUO W H, YUAN J, LUO Y M, et al. Effects of mixing and covering with mature compost on gaseous emissions during composting [J]. *Chemosphere*, 2014, 117(1): 14–19.

(上接第 343 页)

- 12 TITIRICI M M, ANTONIETTI M. Chemistry and materials options of sustainable carbon materials made by hydrothermal carbonization [J]. *Chemistry Society Reviews*, 2010, 39: 103–116.
- 13 WAHYUDIONO M SASAKI, GOTO M. Conversion of biomass model compound under hydrothermal conditions using bath reactor [J]. *Fuel*, 2009, 88(9): 1656–1664.
- 14 SATHITSUKSANO H N, ZHU Z G, WI S, et al. Cellulose solvent-based biomass pretreatment breaks highly ordered hydrogen bonds in cellulose fibers of switchgrass [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2011, 108(3): 521–529.
- 15 SINAG A, KRUSE A, MANIAM P. Hydrothermal conversion of biomass and different model compounds [J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2012, 71: 80–85.
- 16 LU X W, PELLECHIA P J, FLORA J R V, et al. Influence of reaction time and temperature on product formation and characteristics associated with the hydrothermal carbonization of cellulose [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 138: 180–190.
- 17 BARBIER J, CHARON N, DUPASSIEUX N, et al. Hydrothermal conversion of lignin compounds. A detailed study of fragmentation and condensation reaction pathways [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 46: 479–491.
- 18 郭淑青, 董向元, 刘开拓. 麦秆湿解反应水溶液循环对固形产物的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 185–189.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150525&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.025.
GUO Shuqing, DONG Xiangyuan, LIU Kaituo. Effects of water recirculation on characteristics of solid products from hydrothermal treated wheat straw [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5): 185–189. (in Chinese)
- 19 郭淑青, 刘开拓, 董向元. 温度对麦秆湿解产物特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(26): 4508–4514.
GUO Shuqing, LIU Kaituo, DONG Xiangyuan. Influence of temperature on product characteristics associated with the hydrothermal treatments of wheat-straw [J]. *Proceedings of CSEE*, 2014, 34(26): 4508–4514. (in Chinese)
- 20 XIE Z, WHITE R J, WEBER J, et al. Hierarchical porous carbonaceous materials via ionothermal carbonization of carbohydrates [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(20): 7434–7442.