

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.04.025

曹杰, 陈明江, 李瑞容, 等. 分子膜覆盖耦合生物炭对好氧发酵氨气减排及腐熟的影响[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 175-179

Cao Jie, Chen Mingjiang, Li Ruirong, et al. Effect of molecular membrane cover coupled with biochar on ammonia emission reduction and maturation in aerobic composting [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 175-179

分子膜覆盖耦合生物炭对好氧发酵氨气减排及腐熟的影响*

曹杰, 陈明江, 李瑞容, 曲浩丽, 王鹏军

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京市, 210014)

摘要:为揭示分子膜覆盖耦合生物炭对好氧发酵氨气减排及腐熟影响,以番茄秸秆和菌菇渣为原料,采用具有选择透过性膨体聚四氟乙烯(E-PTFE)材料分子膜,添加5%生物炭,在实验室规模(500 L)进行为期33天的好氧发酵试验。结果表明:分子膜覆盖耦合生物炭可有效提高好氧发酵物料温度,延长高温期持续时间,相比于对照组(CK)样品,覆膜耦合生物炭组(T1)样品种子发芽指数(GI值)达到70%的时间提前12天;发酵周期内,试验组(T1)氨气(NH₃)排放量比对照组(CK)减少34.8%。分子膜覆盖耦合生物炭好氧发酵技术可有效加快发酵反应进程,减少NH₃排放。

关键词:分子膜;生物炭;好氧发酵;氨气

中图分类号:S141.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2024)04-0175-05

Effect of molecular membrane cover coupled with biochar on ammonia emission reduction and maturation in aerobic composting

Cao Jie, Chen Mingjiang, Li Ruirong, Qu Haoli, Wang Pengjun

(Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing, 210014, China)

Abstract: In order to reveal the effects of molecular membrane coverage coupled with biochar on ammonia emission reduction and maturation in aerobic fermentation, this study used tomato straw and mushroom residue as raw materials, and used selectively permeable expanded polytetrafluoroethylene (E-PTFE) material molecular membranes with 5% biochar. A 33-day aerobic fermentation experiment was conducted on a laboratory scale (500 L). The results showed that molecular membrane coverage coupled with biochar could effectively increase the temperature of compost materials, extend the duration of the high temperature period. Compared with the control group (CK) sample, the time was advanced by 12 days when the seed germination index (GI value) of the Molecular Membrane Cover Coupled with Biochar group (T1) sample reached 70%. During the fermentation cycle, the ammonia (NH₃) emissions of the experimental group (T1) decreased by 34.8% compared to the control group (CK). Molecular membrane coverage coupled with biochar aerobic fermentation technology can effectively accelerate the fermentation reaction process and reduce NH₃ emissions.

Keywords: molecular membrane; biochar; aerobic composting; NH₃

0 引言

好氧发酵是指在氧气充足的条件下,利用好氧微生物对有机废弃物进行吸收、氧化以及分解的过程,是农业有机废弃物资源化利用最高效的途径^[1]。发酵后

产物富含有机质及营养元素,是化学肥料的优秀替代品,可有效提高土壤肥力^[2],提升农作物品质。但好氧发酵过程往往伴随着大量NH₃的挥发,不仅危害环境及人畜安全,亦会造成肥料中氮素损失,营养元素含量下降。因此,减少好氧发酵过程NH₃挥发极为重要。

收稿日期:2023年8月29日 修回日期:2023年10月4日

*基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2002105);江苏省重点研发计划项目(BE2022681)

第一作者:曹杰,男,1988年生,江苏句容人,硕士,助理研究员;研究方向为有机废弃物肥料化利用。E-mail: 779268581@qq.com

通讯作者:陈明江,男,1984年生,江苏扬州人,博士研究生,副研究员;研究方向为农业废弃物综合利用。E-mail: cmj_cn@163.com

在好氧发酵过程,有机氮通过氨化分解产生铵态氮。在高温(65℃~70℃)和pH(8.4~9.0)的环境下,铵态氮极易以NH₃的形式从好氧发酵系统中逸出。在原料确定的情况下,国内外研究人员大多选择通过添加外源物质来改变氮的化学反应过程^[3,4],以减少好氧发酵过程中NH₃排放。而过磷酸钙、沸石、木质泥炭和生物炭等因为良好的性能和便宜的价格成为减少好氧发酵过程NH₃排放而常用的添加剂。公开报道显示,生物炭对好氧发酵过程NH₃减排比例大约在10%~15%之间^[5,6]。

分子膜覆盖好氧发酵技术以其高效、低运行成本^[7]、低气体排放等优点,在世界范围内得到了越来越多的研究和应用。González等^[8]使用工业规模的系统评估了好氧发酵过程,并表明膜覆盖技术提高好氧发酵堆体的温度,延长高温阶段的持续时间。马双双等^[9]利用某公司生产的分子膜进行好氧发酵,分别减少了68.4%和1.56%的N₂O和CO₂排放,从而降低了53.4%的GWP(全球变暖潜力)。公开报道显示,分子膜覆盖对好氧发酵过程NH₃减排比例大约在10%~20%之间^[10,11]。

根据先前的研究,生物炭和分子膜覆盖都可一定程度减少好氧发酵过程中的气体排放。然而这两种方法耦合对NH₃排放和好氧发酵产品质量的影响却鲜见报道。本文以番茄秸秆和蘑菇渣为原料,评估分子膜覆盖耦合生物炭对好氧发酵过程NH₃减排及腐熟影响,为环境友好型好氧发酵发展提供科学支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

好氧发酵原料的详细物理化学参数数据如表1所示。

表1 好氧发酵原料的理化参数

Tab. 1 Physicochemical properties of the composting samples %

原料	TC	TN	C/N	MC
番茄秸秆	42.3±1.21	1.65±0.07	25.7±0.64	25.7±1.34
菌菇渣	32.4±1.45	1.77±0.04	17.9±0.69	54.4±0.87
混合料	39.6±0.45	1.72±0.04	23.1±0.25	62.8±2.96

注:TC:总碳(以干物质计);TN:总氮(以干物质计);C/N:总碳与总氮的比值;MC:含水量。

新鲜番茄秸秆来源于江苏省南京市一蔬菜园区,菌菇渣采购于南京江宁区一废弃物处理点。将番茄秸秆用粉碎机粉碎至1~3cm,并将这些秸秆与蘑菇残渣以4:1(干重)的比例混合。在混合过程中用水将好氧发酵堆体的水分含量调节至62.8%,初始碳氮比

(C/N)为23:1。生物炭以稻壳为原料,于650℃厌氧条件下持续裂解10h,自然冷却后用0.38mm孔径滤网过筛。发酵菌剂由江苏省农业科学院生产,其主要为地衣芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、楼切链霉菌和米曲霉组成的微生物群落,有效活菌浓度超5000万/g,其添加量为总物料量干物质的3%。

1.2 试验装置

本文采用的试验装置主要包括一个500L的塑料罐(图1),底部有一根通气管,顶部、侧面和底部有3个固体取样口,顶部有1个气体收集和取样装置。所采用的分子膜厚度约为3mm,主要有3层:内层和外层为聚酯纤维,为膜提供了良好的耐腐蚀性和耐刮擦性;中间层为E-PTFE,其在125Pa下渗透指数为0.028m³/min。



图1 实物图

Fig. 1 Photographs of actual objects

1.3 试验方法

该试验发酵周期为33天,共设计2组,分别标记为对照组CK和试验组T1。将170kg混合完成的原料装入发酵装置,其中CK为敞口运行,T1于CK基础上混合添加8.5kg生物炭(总原始物料重量的5%)^[6],并使用分子膜将桶口密封。试验期间,使用小型旋涡风机以0.1m³/min^[12]的速率从底部进行持续曝气,以维持好氧发酵堆体内部氧气供给。

在试验期间的第0、3、9、15、21、27和33天下午2点,从堆体的上、中、下层采集固体样品,将这些样品充分混合并分成两个子样品。第一个子样本用于立即测定pH和EC,而另一个子样本则储存在-20℃的冰箱中,用于后续的发芽指数(GI)等测试,使用数字温度计每24h自动记录一次温度。每隔2天用气体采样袋收集一次气体样本,并及时测定其中NH₃含量。

1.4 测定指标及方法

含水率的测定采用105℃烘24h,差重法测定;总碳、总氮分别采用重铬酸钾容量法和凯氏定氮法测定^[13];NH₃采用安捷伦气象色谱仪测定;pH值及EC值采用雷磁酸碱度和电导率仪测定;GI值采用NY/T525—2021有机肥行业标准中规定标准测定。使用Excel2010及SPSS22.0进行数据处理和分析,使用Origin9.0进行作图。

2 结果与分析

2.1 分子膜覆盖耦合生物炭对好氧发酵腐熟影响

2.1.1 温度变化

温度是好氧发酵过程重要参数,堆体内部温度的高低是好氧微生物代谢活力的总要体现,持续4~5天55℃以上的高温是杀灭发酵原料中虫卵、病原体及其他有害生物的关键。试验过程物料好氧发酵温度变化见图2。

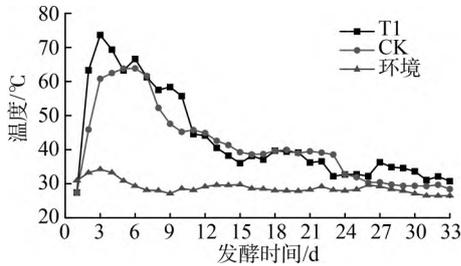


图2 发酵过程温度变化

Fig. 2 Changes of temperature of different treatments during the composting

两组物料温度在试验开始后迅速升高,其中T1组在第3天达到73.6℃的最高温度,而CK组最高温度则在第6天出现,且只有63.8℃。好氧发酵中温度的升高归因于微生物利用原料中碳源和氮源产生的热量,图2还显示,T1组超过55℃以上高温持续时间为9天,比CK组高温期持续时间长4天,更有利于杀灭原料中有害病菌,这突出了分子膜覆盖耦合生物炭的方法在提高和保持好氧发酵温度方面的优越性。

2.1.2 pH 以及 EC 值变化

发酵过程物料 pH 值变化如图3所示。

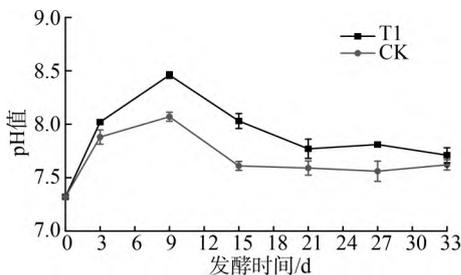


图3 发酵过程 pH 值变化

Fig. 3 Changes of pH values of different treatments during the composting

好氧发酵过程中 NH_3 的释放与好氧发酵堆体的 pH 值密切相关^[14]。这主要是因为铵态氮的积累和好氧发酵过程 NH_3 浓度的增加提高了相关的 pH 值。同时,高 pH 值促进了 NH_3 向环境的释放。

两组试验物料 pH 值均呈现先增加随后降低的趋势。T1 和 CK 样品的最大 pH 值分别为 8.46 和 8.07,且 T1 全程高于 CK,两组处理样品 pH 值差异性显著 ($P < 0.05$)。 NH_3 的产生和酸的降解是发酵早期样品

pH 值增加的主要原因^[15]。随后大部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 通过硝化作用逐渐转化,而有机物降解产生的短链有机酸则可能会在后期降低样品的 pH 值。相对于 CK 样品, T1 样品的 pH 值较高可能是因为分子膜内侧的水膜溶解了一部分 NH_3 , NH_3 溶解在水中后变成碱性,并回落到堆体中,这将导致样品 pH 值增加。两组试验样品的最终 pH 值分别为 7.71、7.62,均符合 NY/T 525—2021 行业标准要求。电导率 (EC) 值反映了好氧发酵堆体中可溶性成分的盐度,高盐度会通过渗透压对植物造成损害。发酵过程物料 EC 值的变化如图4所示。

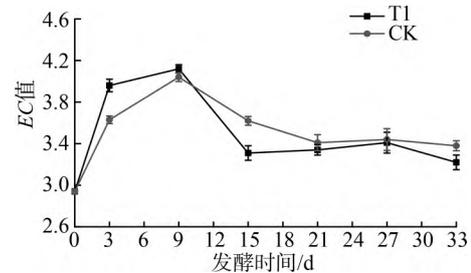


图4 发酵过程 EC 值变化

Fig. 4 Changes of EC values of different treatments during the composting

T1 和 CK 样品的 EC 值变化与 pH 值变化相似,在试验开始后的前9天均呈上升趋势,随后逐步降低并稳定,T1 和 CK 样品的最大 EC 值分别为 4.12 mS/cm 和 4.04 mS/cm,而最终值分别为 3.22 mS/cm 和 3.38 mS/cm。试验开始后有机物的快速矿化导致可溶性矿物盐,如铵离子和磷酸盐的释放,此可能是 EC 值在初始阶段增加的原因。然后,随着发酵的进行, NH_3 的产生和矿物盐的沉淀,EC 值逐渐降低,并在随后的时间内逐步稳定,两组处理样品 EC 值并未表现出显著差异 ($P > 0.05$)。

2.1.3 种子发芽指数 (GI 值) 变化

GI 值是好氧发酵过程的重要参数,可用于评估好氧发酵产品的稳定性和潜在风险。如果好氧发酵产品的 GI 达到 50%,则认为该产品不具有植物毒性,而如果 GI 值超过 70%,则认为该产品已腐熟^[16]。发酵过程物料 GI 值变化如图5所示。

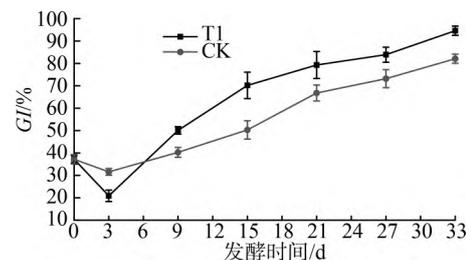


图5 发酵过程 GI 值变化

Fig. 5 Changes of GI values of different treatments during the composting

两组试验样品的 GI 值在试验开始后略有下降, 然后逐渐增加, 直到试验结束。初始阶段 GI 值的降低可能是因为有机物的快速降解过程产生了不利于种子发芽的物质。T1 样品 GI 值在试验开始后的第 9 天和第 15 天分别达到 50% 和 70%, 而 CK 样品 GI 值达到 50% 和 70% 的时间是试验开始后的第 15 天和第 27 天, 分别比 T1 晚了 6 天和 12 天, 且两组试验样品的 GI 值差异性达到显著水平 ($P < 0.05$)。T1 和 CK 样品的最终 GI 值分别为 94.6% 和 82.1%, 均满足有机肥行业最新标准 NY/T 525—2021 要求。以上现象表明, 分子膜覆盖耦合生物炭技术可以有效提高发酵反应速度, 从而缩短好氧发酵周期。发酵速度的提高与堆体温度相对较高有关, 这加速了有机物的降解。

2.2 分子膜覆盖耦合生物炭对氨气减排影响

在好氧发酵过程中, NH_3 的排放占总氮损失的 75% 以上^[17]。发酵过程的 NH_3 排放率和累积排放量如图 6 所示。

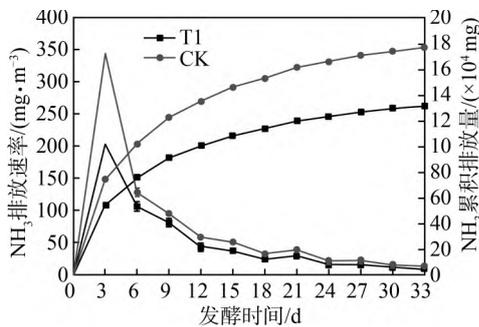


图 6 发酵过程氨气排放速率及累积排放量

Fig. 6 Emission rate and the cumulative emission of NH_3 during composting

两组试验 NH_3 排放在试验开始后均急剧上升, 随后逐渐下降。两组试验 NH_3 排放速率均在试验开始后的第 3 天达到最大值, 其中 T1 组最大排放速率为 204.3 mg/m^3 , CK 组最大排放速率为 342.9 mg/m^3 。本文中两组试验的 NH_3 排放主要集中在发酵开始后的前 18 天。这与该试验阶段发酵物料中温度的快速升高、高温发酵和有机氮的快速矿化有关。随后, 由于有机物的消耗和氨化细菌活性的降低, NH_3 的排放在随后的时间内逐渐减少。Yasuyuki 等^[18]指出, 好氧发酵过程中排放的 NH_3 主要与高温阶段有关, 随后在堆体温度逐步下降中逐渐减少, 这与本文中获得的結果一致。CK 组在试验周期内累积 NH_3 排放总量为 176 726 mg, 而 T1 组累积排放总量为 131 137 mg, 比 CK 组减少 34.8%, 差异性显著 ($P < 0.05$)。这表明分子膜覆盖耦合生物炭技术方法可有效减少好氧发酵过程 NH_3 排放。这种减少主要是由于生物炭巨大的比表面积可以吸附一部分氨气以及分子膜内表面的冷

凝水蒸气溶解了部分 NH_3 , 这两部分共同作用使大量 NH_3 得以保留在堆体内部, 并在微生物的作用下得以固持。林婉嫔等^[19]认为生物炭对好氧发酵过程氨的吸附不仅取决于其比表面积, 也与生物炭阳离子交换量成正相关。

3 结论

1) 经研究表明, 分子膜覆盖耦合生物炭发酵技术可有效提高堆体的温度, 延长 55 °C 以上高温持续时间, 这有利于更好地杀灭病原菌等病害, 有机废弃物无害化效果更佳。同时 GI 值达到 50% 和 70% 的时间分别提前 6 天和 12 天, 加速了发酵反应的进程, 缩短了发酵周期。

2) 分子膜覆盖耦合生物炭发酵技术可有效降低发酵过程中 NH_3 排放, 减少环境污染。与对照组相比, 发酵周期内该技术可减少 NH_3 排放约 34.8%, 减排效果明显好于公开报道的分子膜覆盖和添加生物炭的单项技术。

参 考 文 献

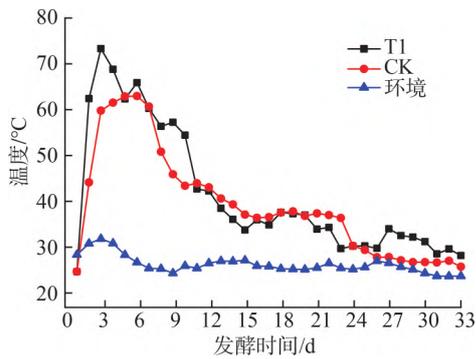
- [1] 史昌明, 佟敏, 崔亚茹, 等. 飞灰添加量对沼渣、牛粪共堆肥的影响[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(10): 222—227. Shi Changming, Tong Min, Cui Yaru, et al. Effect of fly ash addition on biogas residue and cow dung co-composting [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(10): 222—227.
- [2] Hubbe M, Nazhad M, Sanchez C. Composting as a way to convert cellulosic biomass and organic waste into high-value soil amendments: A review [J]. Bioresources, 2010, 5(4): 2808—2854.
- [3] Jiang Tao, Ma Xuguang, Tang Qiong, et al. Combined use of nitrification inhibitor and struvite crystallization to reduce the NH_3 and N_2O emissions during composting [J]. Bioresource Technology, 2016, 217: 210—218.
- [4] 陈耀宁, 黄爱知, 黎媛萍, 等. 硝化抑制剂对农业废物好氧堆肥理化性质及反硝化功能基因的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8): 4451—4456. Chen Yaoning, Huang Aizhi, Li Yuanping, et al. Effect of nitrification inhibitor on physico-chemical properties and denitrification functional genes during agricultural waste composting [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(8): 4451—4456.
- [5] 李旭, 路明芝, 师晓爽, 等. 多孔填充剂促进牛粪秸秆高温恒温堆肥有机质降解减少氮损失[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 132—137. Li Xu, Lu Mingyi, Shi Xiaoshuang, et al. Accelerating organic matter degradation and reducing NH_3 emission during constant high temperature composting of cattle manure and corn straw with addition of porous material [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(11): 132-137.
- [6] 徐路魏, 王旭东. 生物质炭对蔬菜废弃物堆肥化过程氮素转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1160-1166.
Xu Luwei, Wang Xudong. Effect of biochar on nitrogen transformation in vegetable wastes during composting [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(6): 1160-1166.
- [7] 赵汝东, 董桓诚, 黄华, 等. 我国畜禽粪污肥料化利用研究现状[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 151-156.
Zhao Rudong, Dong Huancheng, Huang Hua, et al. Research status of fertilizer utilization of livestock and poultry in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 151-156.
- [8] González Inmaculada, Robledo-Mahon Tatiana, Andrea Silva-Castro Gloria, et al. Evolution of the composting process with semi-permeable film technology at industrial scale [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 115: 245-254.
- [9] Ma Shuangshuang, Xiong Jinpeng, Wu Xiaoyi, et al. Effects of the functional membrane covering on the gas emissions and bacterial community during aerobic composting [J]. Bioresource Technology, 2021, 326: 125660.
- [10] 马双双, 孙晓曦, 韩鲁佳, 等. 功能膜覆盖好氧堆肥过程氨气减排性能研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 344-349.
Ma Shuangshuang, Sun Xiaoxi, Han Lujia, et al. Reduction of ammonia emission during membrane-covered aerobic composting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2017, 48(11): 344-349.
- [11] Li Yinchao, Liu Yongdi, Yong Xiaoyu, et al. Odor emission and microbial community succession during biogas residue composting covered with a molecular membrane [J]. Bioresource Technology, 2020, 297, 122528.
- [12] 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 Yujun, Li Guoxue, Ren Limei, 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.
- [13] 李红霞, 蔡禄, 季祥, 等. 羊粪好氧堆肥最佳工艺参数的优化研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(6): 215-220.
Li Hongxia, Cai Lu, Ji Xiang, et al. Optimization of optimum process parameters for aerobic composting of sheep manure [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(6): 215-220.
- [14] 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.
- [15] Jia X, Wang M, Yuan W, et al. The influence of biochar addition on chicken manure composting and associated methane and carbon dioxide emissions [J]. Bioresources, 2016, 11(2): 5255-5264
- [16] Saidi Neyla, Kouki Soulwene, Mhiri Fadhel, et al. Microbiological parameters and maturity degree during composting of posidonia oceanica residues mixed with vegetable wastes in semi-arid pedo-climatic condition [J]. Journal of Environmental Sciences 2009, 21(10): 1452-1458.
- [17] Jiang Tao, Schuchardt Frank, Guoxue Li, et al. Gaseous emission during the composting of pig feces from Chinese Ganqinfen system [J]. Chemosphere 2013, 90(4): 1545-1551.
- [18] Yasuyuki Fukumoto, Kazuyoshi Suzuki, Kazutaka Kuroda, et al. Effects of struvite formation and nitrification promotion on nitrogenous emissions such as NH_3 , N_2O and NO during swine manure composting [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 1468-1474.
- [19] 林婉婷, 夏建国, 肖欣娟, 等. 不同热解温度茶渣生物炭对茶园土壤吸附解吸 NH_4^+-N 的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 326-332.
Lin Wanpin, Xia Jianguo, Xiao Xinjuan, et al. Effect of NH_4^+-N adsorption-desorption by tea residue biochar prepared at different pyrolysis temperature in tea plantation soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 326-332.

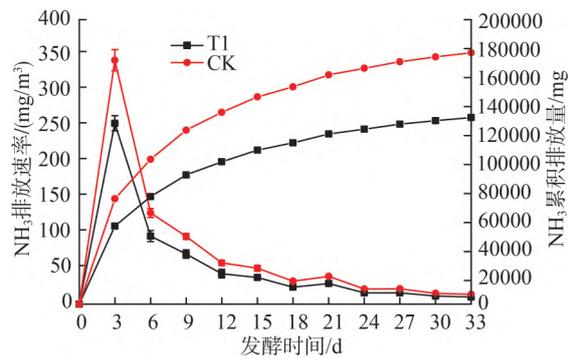
论文精选:分子膜覆盖耦合生物炭对好氧发酵氨气减排及腐熟的影响

成果简介

为揭示分子膜覆盖耦合生物炭对好氧发酵氨气减排及腐熟影响,以番茄秸秆和菌菇渣为原料,采用具有选择透过性膨体聚四氟乙烯(E-PTFE)材料分子膜,添加5%生物炭,在实验室规模(500 L)进行为期33天的好氧发酵试验。结果表明:分子膜覆盖耦合生物炭可有效提高好氧发酵物料温度,延长高温期持续时间,相比于对照组(CK)样品,覆膜耦合生物炭组(T1)样品种子发芽指数(GI值)达到70%的时间提前12天;发酵周期内,试验组(T1)氨气(NH₃)排放量比对照组(CK)减少34.8%。分子膜覆盖耦合生物炭好氧发酵技术可有效加快发酵反应进程,减少NH₃排放。该研究由国家重点研发计划项目(2022YFD2002105)、江苏省重点研发计划项目(BE2022681)资助。



发酵过程温度



发酵过程氨气排放速率及累积排放量

智流膜生物发酵反应装置参数

名称	参数
物料发酵温度	40 °C ~ 70 °C
处理量(每 10 m)	50 ~ 60 m ³
处理周期	20 ~ 30 d
运行成本	20 ~ 30 元/t



智流膜生物发酵反应装置

团队介绍

该成果由农业农村部南京农业机械化研究所农业生产废弃物资源化利用装备创新团队研发,团队首席科学家为龚艳研究员。团队主要致力于农业生产废弃物肥料化利用装备、设施蔬菜机械化以及西甜瓜产业全程机械化装备研究,取得了多项重要成果。

联系方式

联系人:陈明江,电话:025-84346003,邮箱:cmj_cn@163.com