

辅料配比及通风速率对污泥气流膜堆肥过程氮素迁移的影响

秦维, 蒋心茹, 刘明刚, 刘杨, 王茄灵, 姬高升, 许力山, 闫志英

引用本文:

秦维, 蒋心茹, 刘明刚, 刘杨, 王茄灵, 姬高升, 许力山, 闫志英. 辅料配比及通风速率对污泥气流膜堆肥过程氮素迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1357-1367.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1231>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

畜禽粪便堆肥过程中碳氮损失及温室气体排放综述

袁京, 刘燕, 唐若兰, 马若男, 李国学

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2428-2438 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0986>

炭基辅料对羊粪好氧堆肥中氮素损失的影响

王海候, 何胥, 陶玥玥, 金梅娟, 陆长婴, 施林林, 周新伟, 沈明星

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 928-936 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0664>

好氧堆肥中通风工艺与参数研究进展

徐鹏翔, 王越, 杨军香, 李季

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2403-2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0898>

利用保水剂调节污泥发酵起始水分的研究

李玉和, 胡伟, 秦端端, 房瑜静, 王小兵, 王小治, 封克

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2527-2534 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0724>

堆肥中不同氮素原位固定剂的综合比较研究

江滔, 常佳丽, 马旭光, 李国学

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 369-375 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0996>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

秦维, 蒋心茹, 刘明刚, 等. 辅料配比及通风速率对污泥气流膜堆肥过程氮素迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1357–1367.

QIN W, JIANG X R, LIU M G, et al. Effects of the additive ratio and aeration rate on sludge composting with airflow film[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6): 1357–1367.



开放科学 OSID

辅料配比及通风速率对污泥气流膜堆肥过程氮素迁移的影响

秦维^{1,2}, 蒋心茹¹, 刘明刚³, 刘杨¹, 王茹灵^{1,2}, 姬高升^{1,2}, 许力山¹, 闫志英^{1*}

(1. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 四川省环保产业集团有限公司, 成都 610041)

摘要:为探究污泥堆肥演变规律并优化污泥气流膜堆肥工艺参数,以园林垃圾和玉米秸秆作为辅料,通过对堆肥过程中的理化指标及可溶性有机物的三维荧光光谱等进行分析,分别研究了3种不同辅料配比、3档通风速率对气流膜堆肥过程氮素变化的影响。结果表明:与其他堆体相比,在辅料配比为7:3:1(污泥:园林垃圾:玉米秸秆)、通气速率为 $0.9\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的条件下,堆体总氮含量相对上升了9.65%,腐植酸类物质的荧光强度相对百分含量增加了76.62%,此条件下堆体内氮素向稳定的可利用含氮物质中迁移最多,堆肥效果最佳。研究表明,辅料添加量越大,高温阶段持续越长,无害化处理效果越好,但腐熟效果不佳;通风速率对堆肥过程中氮素的稳定化转移影响较大,合适的通风速率能使氮素向有利的方向迁移。

关键词:污泥堆肥;气流膜;辅料配比;通风速率;氮素;三维荧光光谱

中图分类号:S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)06-1357-11 doi:10.11654/jaes.2021-1231

Effects of the additive ratio and aeration rate on sludge composting with airflow film

QIN Wei^{1,2}, JIANG Xinru¹, LIU Minggang³, LIU Yang¹, WANG Jialing^{1,2}, JI Gaosheng^{1,2}, XU Lishan¹, YAN Zhiying^{1*}

(1. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sichuan Environmental Protection Industry Group Limited Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: To explore and optimize the process parameters of airflow film composting of sludge, garden waste and maize stalks were used as additives, and through the analysis of the physicochemical indicators during the composting process and the three-dimensional fluorescence spectra of dissolved organic matter, the effects of three levels of aeration rate on nitrogen changes under three different additive ratios were studied. Compared with other piles, when the ratio of additive was 7:3:1 (sludge: garden waste: maize stalks), and the aeration rate was $0.9\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, the total nitrogen content of the pile increased by 9.65%. The relative fluorescence intensity of humic acid substances increased by 76.62%. Under these conditions, the nitrogen migrated most to the stable and available nitrogen-containing substances, and demonstrated the best composting effect. This study showed that the larger the quantity of additives added, the longer the high-temperature phase was maintained, and the better the harmless treatment effect, although the maturity effect was poorer. The aeration rate has greater impact on the stable transfer of nitrogen during the composting, and proper aeration rate can lead nitrogen transfer in a favorable direction.

Keywords: sludge composting; air-flow film; additive ratio; aeration rate; nitrogen; three-dimensional fluorescence spectroscopy

收稿日期:2021-10-28 录用日期:2022-01-17

作者简介:秦维(1998—),女,重庆石柱县人,硕士研究生,主要研究方向为有机固废的资源化利用。E-mail:qinwei19@mails.ucas.ac.cn

*通信作者:闫志英 E-mail:yanzy@cib.ac.cn

基金项目:四川省科技厅重点研发项目(2021YFS0360, 2020YFN0031)

Project supported: The Key Research and Development Project of Sichuan Provincial Department of Science and Technology (2021YFS0360, 2020YFN0031)

污泥是污水处理厂产生的固体有机废弃物,其含有丰富的有机物,但同时也含有病原体、杂草种子和重金属等污染物,因此需通过合理处置来实现污泥的资源化利用^[1]。据《城乡建设统计年鉴》可知,我国污泥的年产量已超过6 000万t,污泥处置的需求将越来越大。目前,污泥处置方式主要有堆肥、土地填埋、焚烧以及建材利用等^[2]。其中,好氧堆肥具有降低污泥恶臭释放、有效杀死病原体、降解污泥中多种有毒有害物质和产生有机肥等优势,且投入成本低、操作简便,在污泥处置方面具有较好的应用前景^[3-4]。

中国作为农业大国,每年产生大量玉米秸秆、小麦秸秆等农业废弃物,这些废弃物具有含水率低、含碳量高的特点,将其作为辅料添加到污泥中进行混合堆肥,不仅能改善发酵产物品质,而且还能对农业废弃物进行资源化利用^[5-6]。另外,随着我国城市化进程的深入,城市绿化产生的大量园林垃圾也可作为污泥堆肥的辅料,LI等^[7]和ZHANG等^[8]的研究也表明园林垃圾作为污泥堆肥辅料可促进发酵过程、改善堆肥产物品质。

目前,国内的堆肥方式主要包括条垛式堆肥、槽式堆肥、反应器堆肥等^[9],这些堆肥技术存在受环境影响大、卫生条件差、臭气污染、产品质量不稳定以及应用局限性大等问题^[2,10]。气流膜覆盖堆肥技术是近年来兴起的一种静态堆肥技术^[10],气流膜可减少堆肥过程中臭气外逸,极大程度上缓解了臭气对周围环境的影响,且延长高温发酵阶段,缩短堆肥周期^[10-11]。气流膜覆盖结合底部曝气的堆肥系统已在工业中广泛应用^[12]。SUN等^[13]探究了膜覆盖技术在青藏高原污泥堆肥过程中的应用情况,发现气流膜能减少堆肥过程中温室气体及氨气的排放。GONZÁLEZ等^[14]通过对膜覆盖条件下污泥堆肥过程中理化指标及微生物的分析,发现半透膜将堆肥过程中的臭气排放率降低了约90%。ROBLEDO-MAHÓN等^[12]分析了膜覆盖污泥堆肥过程中的微生物多样性,发现半透膜覆盖系统对污水污泥堆肥具有适用性和有效性。以上研究虽分析了气流膜覆盖对堆肥过程中理化指标及微生物

演变的影响,但对堆肥最大的臭气释放问题的规律探索及控制技术研究却较少。因此,本研究以园林垃圾和玉米秸秆作为辅料进行堆肥,在气流膜覆盖静态好氧堆肥技术原理的基础上,通过控制不同辅料配比及通风速率,分析污泥气流膜堆肥过程中氨气(NH₃)释放和堆体铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)等理化指标的变化规律,探究不同辅料配比及通气速率对污泥堆肥过程中氮元素转化迁移的影响,并分析比较得出污泥气流膜堆肥的最佳参数,以期为污泥气流膜堆肥工艺的工程应用提供理论数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验污泥为成都市双流区某城市污水处理厂的脱水污泥;园林垃圾购于成都市郫都区金泥科技有限公司,玉米秸秆取自成都市郊区农田,两者均粉碎至1~3 cm备用。各物料的基本理化性质见表1。

1.2 试验装置

堆肥箱体积为150 L,堆体有效体积约为120 L,堆肥箱外部贴有厚度为3 cm的橡塑保温层,箱体底部铺设通气管道,为防止物料堵塞通气孔,通气管道上铺垫一层厚度为5 cm的多孔火山岩。堆体顶部覆盖的气流膜是由聚四氟乙烯微孔膜和其他纺织材料制作而成的复合半透膜,其购买于宁波登越新材料科技有限公司。堆肥过程中所用曝气装置为电磁式空气泵(额定排气量为50 L·min⁻¹),通风速率采用玻璃转子流量计(LZB-6,南京顺来达测控设备有限公司)计量并控制。

1.3 试验设计

试验于2021年4月17日至5月18日进行,设置3种不同辅料配比及3档通风速率,共9组试验,相同辅料配比的3组堆体分别设计不同的通风速率,其他参数保持一致,具体参数见表2。将污泥与园林垃圾、玉米秸秆按一定比例充分混匀后,装入自制堆肥箱中,使用气流膜覆盖箱体后进行静置堆肥。整个试验过程利用定时器控制进行间歇性通风,利用玻璃转子

表1 原料基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of raw materials

原料 Raw material	含水率 Moisture content/%	总碳 Total carbon/%	总氮 Total nitrogen/%	碳氮比 C/N	pH	有机质 Organic matter/%
污泥	84.03±0.01	30.81±0.21	5.36±0.08	5.75±0.25	6.86±0.01	53.12±0.35
园林垃圾	20.47±0.01	40.18±0.25	0.92±0.10	43.74±0.27	7.18±0.02	69.27±1.67
玉米秸秆	13.42±0.01	51.59±2.13	1.22±0.01	42.35±1.75	7.24±0.01	88.95±0.42

表2 试验设计及混合物料理化性质

Table 2 Experimental design and physicochemical properties of the mixture

实验组 Group	配比(污泥: 园林垃圾:秸秆) Proportion(sludge: garden waste:straw)	通风速率 Aeration rate/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	含水率 Moisture content/%	碳氮比 C/N
A ₁	5:3:1	0.3	57.91±0.05	35.80±0.47
A ₂		0.6		
A ₃		0.9		
B ₁	7:3:1	0.3	64.37±0.02	24.88±0.70
B ₂		0.6		
B ₃		0.9		
C ₁	10:3:1	0.3	68.52±0.01	21.40±1.02
C ₂		0.6		
C ₃		0.9		

流量计控制各个堆体的通风速率,频率为每天10次,每次运行20 min。

1.4 样品采集及测定方法

堆体温度采用插入式电子温度计测定,每天10:00和16:00测定堆体上、中、下层温度,取平均值作为当天的堆体温度,同时测定环境温度。膜内的 NH_3 浓度采用便携式臭气检测仪(MS600-2,深圳市逸云天电子有限公司)监测。将气流膜揭开后采集样品,分别采集第0、3、6、9、14、19、25、31天的堆肥样品,在堆体的上、中、下不同层次的多个点取样约300 g,混合均匀后一部分存放于4℃冰箱中,用于测定pH、含水率、 NH_4^+-N 含量和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量等,另一部分置于阴凉处风干,粉碎过筛后用于测定总氮(TN)、有机质、可溶性有机物(DOM)等指标。

pH采用pH计(梅特勒-托利多仪器有限公司Five Easy Plus)测定,含水率及有机质等按《有机肥料》(NY 525—2021)中的标准方法测定。 NH_4^+-N 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的测定方法参考《土壤农化分析》^[15], NH_4^+-N 采用KCl浸提-靛酚蓝比色法测定, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用紫外分光光度法测定。TN采用自动凯氏定氮仪(FOSS KT 200 Kjeltex)测定。将风干、粉碎过筛后的堆肥样品以1:10的质量比用纯水振荡提取24 h,然后离心过滤(0.45 μm 玻璃纤维滤膜)得到DOM溶液,将提取到的样品稀释10倍后用HORIBA-FluoroMax-4荧光光谱仪进行扫描^[16],激发波长 $E_x=200\sim 400\text{ nm}$,发射波长 $E_m=250\sim 550\text{ nm}$,扫描速度为1 200 $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$,扫描间隔均为5 nm。采用Excel、Origin 8.0等软件对数据进行分析及处理。

2 结果与讨论

2.1 堆体配比为5:3:1时不同通风速率对堆肥过程的影响

2.1.1 对堆体温度的影响

温度是评价堆肥进程最重要的指标之一,温度变化可反映出微生物生长代谢活性的变化。《城镇污水处理厂污泥处理 稳定标准》(CJ/T 510—2017)规定:市政污泥好氧发酵温度需达到55~65℃并持续3 d以上才满足无害化要求。由图1可以看出,3种不同通风速率的堆体升温速度均较快,堆肥第2天温度上升至55℃以上,A₁、A₂、A₃处理均在第3天达到最高温度,分别为68.9、68.4、67.8℃,随后通风速率较大的A₃处理的温度快速下降,且明显低于较小和中等通风速率的A₁、A₂处理的温度,这可能是因为A₃处理通风速率过大导致易降解物质迅速降解且热量较快散失。A₁、A₂处理在55℃以上维持了7 d,A₃处理在55℃以上维持了5 d,3个处理均达到了无害化处理的要求。堆肥第22天各处理温度下降至25℃左右并保持稳定,表明堆肥的发酵过程基本结束。结果表明,堆体配比为5:3:1时,通风速率0.9 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 偏大,不利于堆肥过程的稳定,且堆体高温维持时间较短,所以合理地控制通风速率不仅可以节约能源,还能促进物料的腐熟。

2.1.2 对堆体氮素变化的影响

NH_3 是堆肥过程中臭气的主要成分,大量 NH_3 不仅会影响堆肥操作人员的身体健康,而且也是堆体氮素损失的主要途径。 NH_3 的释放浓度与堆体温度相关,从图2a中可以观察到, NH_3 释放浓度先增加后下降。堆肥初期由于温度上升和易降解有机质的消耗,各堆体的 NH_3 浓度迅速增加,堆肥高温阶段也正是

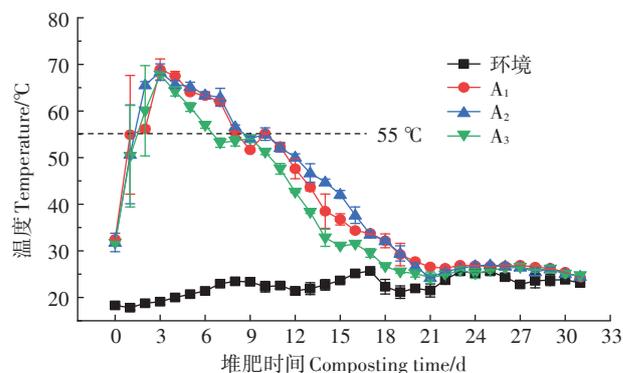


图1 A组堆体温度的变化

Figure 1 The temperature change of group A

NH_3 排放的峰值阶段,高温期过后,由于易降解有机质耗尽、温度下降和氨化细菌活性降低等原因, NH_3 的排放开始逐渐减少。整个堆肥过程中,3种不同通风速率的膜内 NH_3 浓度没有明显差异,仅在峰值阶段, A_1 处理与 A_3 处理之间有显著差异($P<0.05$)。结果表明通风速率越大,逸散的 NH_3 越多,导致膜内 NH_3 浓度越低,堆体内以 NH_4^+-N 形式存在的氮素减少不利于氮素转化为稳定状态而保留,这与YUAN等^[17]对通风速率对污泥堆肥氮素影响的研究结果相一致。但在气流膜的覆盖下,一定范围内的通风速率对 NH_3 释放的影响较小,气流膜使堆体内产生的大量 NH_3 被阻隔在膜内,溶于膜内层的水分子后,以 NH_4^+-N 的形式回到堆体中^[18],再由硝化细菌将不稳定的 NH_4^+-N 转化为稳定的 NO_3^--N ,从而有利于堆体的氮素保留。

由图2b可知,堆肥初期大量含氮有机物在微生物的作用下分解, NH_4^+-N 含量急剧上升,并且各堆体都在堆肥的第6天上升到最大值,后期由于堆体中的 NH_4^+-N 以 NH_3 的形式大量挥发,以及硝化作用将 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N , NH_4^+-N 含量又呈现下降趋势,最后趋于稳定。结果显示,通风速率最大的 A_3 处理中 NH_4^+-N 含量峰值和稳定值显著低于其他两组($P<0.05$),而 A_1 处

理与 A_2 处理之间差异不显著($P>0.05$),各堆体内的 NH_4^+-N 含量在堆肥结束时为 $A_3<A_2<A_1$,表明通风速率越大, NH_4^+-N 含量越小,这是因为较大的通风速率使堆体内部气压较大,造成更多 NH_4^+-N 以 NH_3 的形式逸散。硝化作用可以将有机物降解产生的氨转化为更稳定的 NO_3^--N ^[19],堆肥后期(40℃以下),堆体内硝化作用逐渐增强,大量 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N ,这标志着堆肥进入腐熟期^[20-21]。各堆体的 NO_3^--N 含量在堆肥前期呈现上升趋势(图2c),第10天左右开始下降,堆肥结束时, A_1 处理的 NO_3^--N 含量较高, A_2 、 A_3 处理的 NO_3^--N 含量较低,可能是因为这两组堆体中可利用的氨较少,所以生成的 NO_3^--N 较少。

堆肥过程中的TN含量变化如图2d所示, A_1 、 A_2 、 A_3 处理的TN含量均呈现上升趋势,最终含量分别为(0.43±0.01)%、(0.42±0.01)%、(0.38±0.01)%, A_1 与 A_3 处理、 A_2 与 A_3 处理之间的TN含量存在显著差异($P<0.05$),说明在此条件下通风速率对TN含量有一定的影响,通风速率越大, NH_3 挥发越多,导致TN损失越大。综合分析温度、 NO_3^--N 和TN等指标, A_1 处理的通风速率(0.3 m³·h⁻¹)更适合配比为5:3:1的堆体。

综上所述,虽然气流膜覆盖可以减少部分氮素的

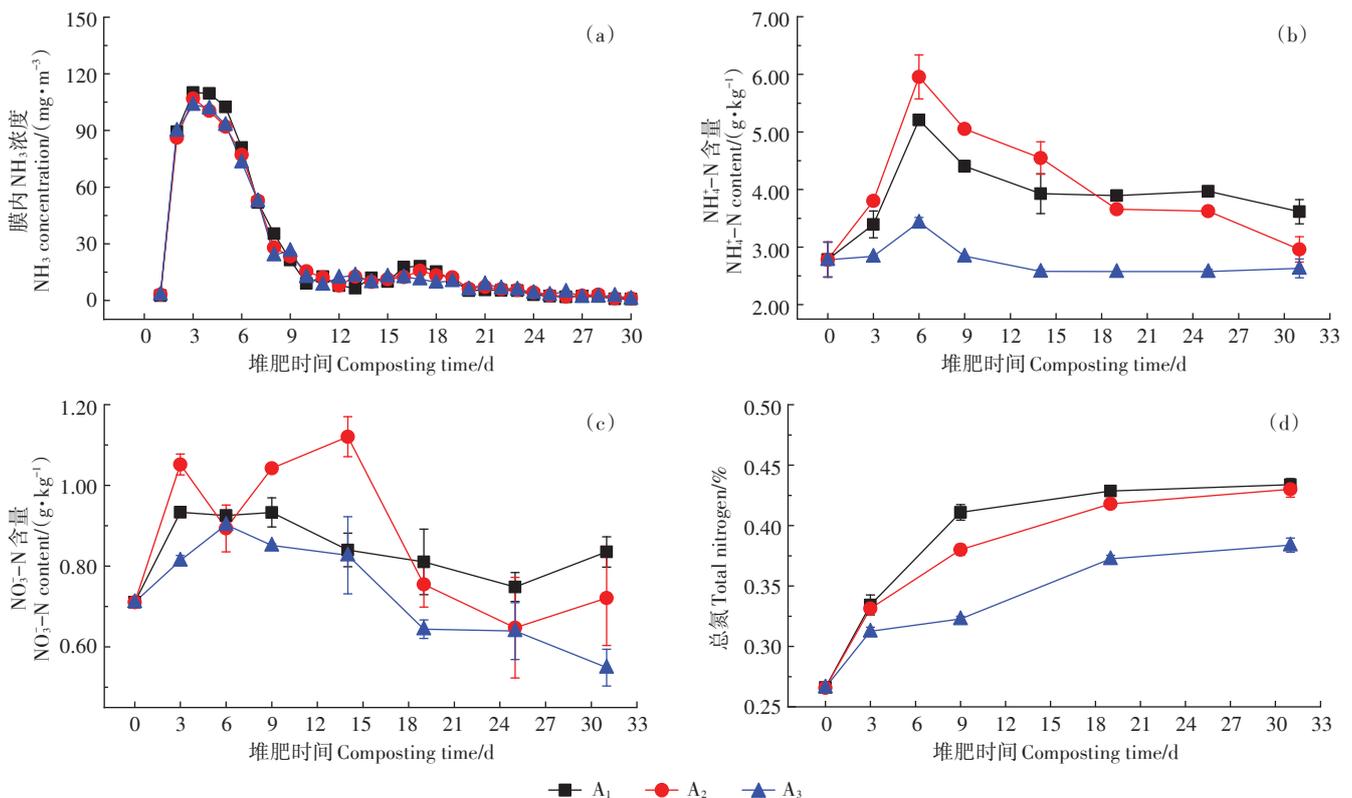


图2 A组堆体中 NH_3 浓度及铵态氮、硝态氮、总氮含量的变化

Figure 2 Changes of ammonia, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and total nitrogen in the group A

挥发,但通气速率对气流膜堆肥仍然具有较大的影响,越高的通气速率会引起越多的臭气外逸和更多的氮素损失,且不利于堆体保温,这与DOUBLET等^[22]的研究结果一致。本研究不仅通过调节通风速率的方式来减少氮素损失,还通过调节辅料添加量使堆体内的氮素向有利的方向转移。

2.2 堆体配比为7:3:1时不同通风速率对堆肥过程的影响

2.2.1 对堆体温度的影响

如图3所示,堆肥初期不同处理的堆体均快速升温,第2天温度上升至60℃左右, B_1 、 B_2 、 B_3 处理的最高温分别为67.9、63.9、65.1℃,分别在55℃以上维持了6、5、5 d,3个堆体在8~13 d的温度均维持在50℃左右,之后持续下降,第21天后无明显变化且接近环境温度,发酵过程基本结束。从图3可以看出,在堆肥的降温阶段,堆体温度受通风速率的影响比前期更大,通风速率越大,堆体温度越低。因此在堆肥的降温阶段可适当减小通气速率,这样在满足好氧发酵的基础上,能够使物料更好地腐熟,从而提高发酵效率^[23]。

2.2.2 对堆体氮素变化的影响

由图4a可知,在整个堆肥过程中,3种不同通风

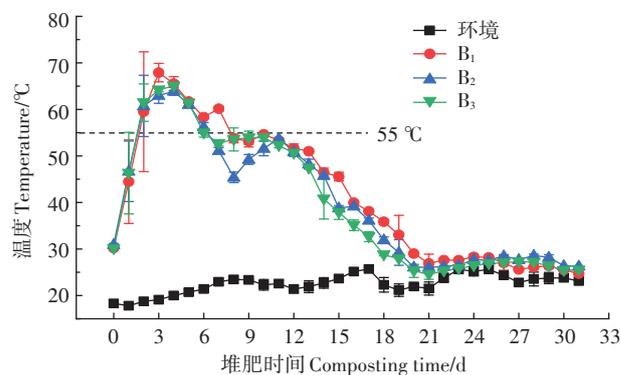


图3 B组堆体温度的变化

Figure 3 The temperature change of group B

速率处理的堆体膜内 NH_3 浓度没有明显差异,高温阶段 NH_3 浓度为 $B_2 < B_3 < B_1$,与温度的变化趋势对比发现, NH_3 浓度受堆体温度的影响较大,即堆体温度越高, NH_3 释放浓度越大。

由图4b可知,各堆体内 NH_4^+-N 含量的变化呈现相同趋势,即先上升后下降,最后趋于稳定。随着通气速率的增加,氨化作用减弱, NH_3 的挥发增加,所以3种处理的 NH_4^+-N 含量为 $B_1 > B_2 > B_3$ 。结果表明,通气速率与堆体内 NH_4^+-N 含量呈负相关,通气速率越大,

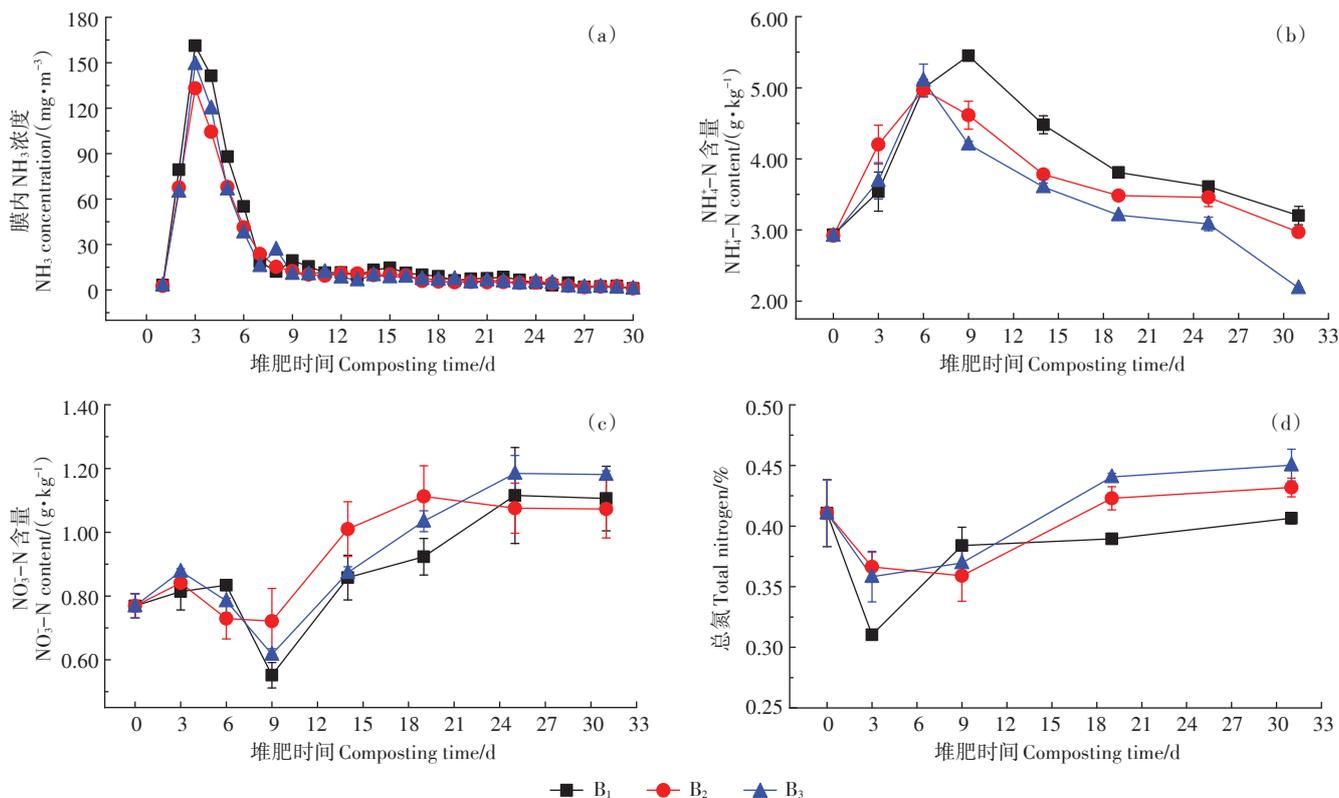


图4 B组堆体中 NH_3 浓度及铵态氮、硝态氮、总氮含量的变化

Figure 4 Changes of ammonia, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and total nitrogen in the group B

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量越小。各堆体 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化趋势与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相反,即前期呈现下降趋势,后期随着堆体温度下降 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量逐渐增加,最后保持稳定(图 4c)。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在高温期快结束时有一个最小峰值,这与黄华等^[24]的研究结果相似,原因可能是前期堆体温度高、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积和溶氧少导致了硝化作用被抑制。而堆肥后期,堆体温度较低,含水率下降,透气性增大,硝化作用不断增强, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量不断上升。堆肥结束时, B_1 、 B_2 、 B_3 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别为 (1.11 ± 0.10) 、 (1.07 ± 0.09) 、 (1.20 ± 0.01) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别上升了 43.81%、39.58%、53.61%,通风速率最大的 B_3 处理与其他两组之间的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量有显著差异 ($P<0.05$)。结果表明,合适的通风速率有利于堆体内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的积累^[17]和堆肥的腐熟。

B 组各堆体的 TN 含量变化如图 4d 所示,整体呈堆肥初期略有下降、后期上升的趋势,这与 GUO 等^[6]和 HAN 等^[25]的研究结果一致。堆肥结束时,3 种不同通风速率处理的 TN 含量为 $B_3>B_2>B_1$,其中 B_1 处理的 TN 含量相对下降 1.00%,而 B_2 、 B_3 处理堆体相对上升 5.16%、9.65%。合适的通风速率能够为堆体内微生物活动提供充足的氧气,不会引起过多的氮素损失且有利于氮素的转化及固定;若通风速率太小,则会导致物料中的含氮有机物降解不完全,有机氮的固定及无机氮的转化也会减弱,最终的堆肥产品中有效态氮含量也会减少。综合上述指标,通风速率为 $0.9\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 时更适合配比为 7:3:1 的堆体,该条件有利于氮素的积累且没有引起更多的氮素损失。

2.3 堆体配比为 10:3:1 时不同通风速率对堆肥过程的影响

2.3.1 对堆体温度变化的影响

C_1 、 C_2 、 C_3 的温度变化如图 5 所示, C_1 、 C_2 、 C_3 处理之间的温度在升温及降温阶段均无明显差异,且在第 3 天达到最高温,分别为 63.0、64.6、62.4 $^{\circ}\text{C}$,其中 C_2 处理的温度在堆肥第 2 天上升到 55 $^{\circ}\text{C}$ 以上, C_1 、 C_3 处理的堆体温度在 55 $^{\circ}\text{C}$ 以上仅维持了 3 d, C_2 处理在 55 $^{\circ}\text{C}$ 以上维持了 4 d,达到最高温后各堆体温度开始下降,第 9 天各堆体的温度下降至 40 $^{\circ}\text{C}$ 左右。堆肥后期各堆体均有明显的二次升温现象,这说明堆体内不易降解的有机质较多,高温期未能降解完全^[13],二次升温可延长中温阶段时长,这有利于物料彻底腐熟,但 3 种处理的高温维持时间均较短,可能是因为辅料添加量较少,堆体孔隙度低,较低的通风速率不能为堆体内微生物活动提供足够的氧气,微生物代谢活动减弱

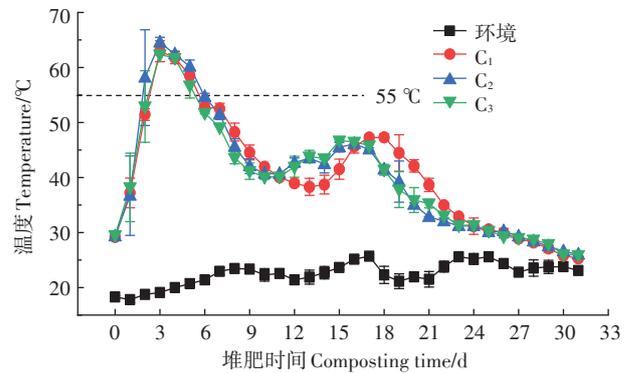


图 5 C 组堆体温度的变化

Figure 5 The temperature change of group C

导致高温维持时间短。

2.3.2 对堆体氮素变化的影响

如图 6a 所示,C 组各堆体膜内 NH_3 浓度的变化与 A 组及 B 组相似, NH_3 排放的峰值出现在高温阶段,且高温阶段的 NH_3 浓度有明显差异 ($C_3<C_2<C_1$),与温度的变化趋势一致。

C 组各堆体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化如图 6b 所示,堆肥初期含量快速上升,后期逐渐降低。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化与 A、B 两组的变化规律相同,即通风速率越大, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量越低。由图 6c 可知, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化规律与 B 组相似,在堆肥前期温度快速升高使供氧不足,反硝化作用占优势,导致 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量下降。堆肥后期,适宜的温度和充足的氧气使 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量上升。C 组各堆体的最终 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量为 $C_3>C_2>C_1$,表明在辅料配比为 10:3:1 的条件下,通风速率越大,堆体内的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 积累越多,辅料添加量越少的堆体需要更大的通气速率来维持堆肥过程的稳定。

如图 6d 所示,C 组各堆体的 TN 含量呈前期下降后期上升的变化趋势,堆肥结束时,各堆体 TN 含量分别上升 7.1%、6.9%、8.3%。在 C 组的辅料配比条件下,3 种不同通风速率处理的堆体 TN 含量没有显著差异 ($P>0.05$),说明当辅料添加量减少时,通风速率对堆体 TN 含量的影响会减弱。

2.4 不同堆体腐熟程度评价

9 组堆体在堆肥结束时的理化性质如表 3 所示,硝化指数已经被广泛应用于评价堆肥腐熟程度和堆肥产品的质量^[26]。硝化指数 <0.5 ,表示腐熟完全,0.5~3.0 表示基本腐熟, >3.0 表示未腐熟^[27]。但仅用硝化指数评价堆肥腐熟度具有一定的局限性,所以本研究通过有机质降解率、高温维持天数以及硝化指数 3 个指标综合评价了各堆体的发酵效果。

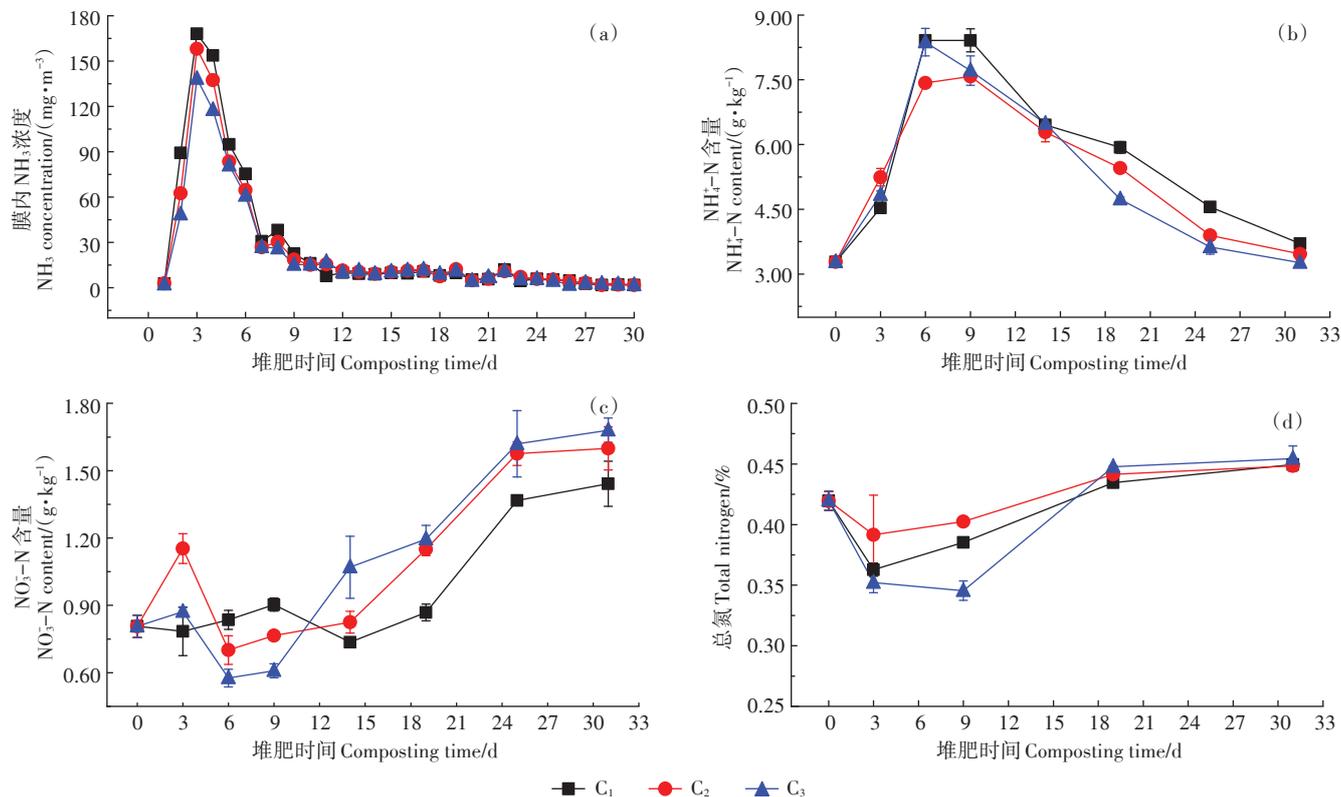
图6 C组堆体中NH₃浓度及铵态氮、硝态氮、总氮含量的变化

Figure 6 Changes of ammonia, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and total nitrogen in the group C

如表3所示,A组处理的高温维持时间相对较长,A₁、A₂处理的有机质降解率较高,但A组3个堆体的硝化指数均大于3,表明A组在30 d内并未腐熟。B组处理的高温期时长均达到了无害化要求,其中B₃处理的有机质降解率较其他两组大,3个处理硝化指数均小于3,说明B组基本腐熟,其中B₃的硝化指数

最小,腐熟程度最大。C组各堆体的有机质降解率偏低,高温期时长均较短,且C₁、C₃未达到无害化要求,其硝化指数均小于3,其中C₃的硝化指数最小,表明C₃的腐熟程度相对较好,但其高温期仅维持了3 d,这可能是因为C组的辅料添加量小、堆体含水率高、孔隙度低,所以需要更大的通气速率才能为微生物活动

表3 堆肥结束时各堆体的理化性质

Table 3 Physicochemical properties of each pile at the end of composting

实验组 Group	高温期 High temperature period/d	有机质含量 Organic matter/%	有机质降解率 Organic matter degradation rate/%	硝化指数 Nitrification index
A ₁	7	48.09±1.35ab	20.26±0.02b	4.33
A ₂	7	45.18±1.42cde	25.08±0.02a	4.11
A ₃	5	49.53±0.51a	17.86±0.01bcd	4.34
B ₁	6	47.26±0.13abc	6.53±0.01e	2.90
B ₂	5	43.80±2.35de	13.37±0.05d	2.77
B ₃	5	40.54±0.61g	19.81±0.01b	2.23
C ₁	3	46.22±0.58bcd	8.71±0.01e	2.01
C ₂	4	43.29±0.58ef	14.48±0.01cd	2.17
C ₃	3	41.03±0.46fg	18.95±0.01bc	1.94

注:硝化指数通过计算NH₄⁺-N含量与NO₃⁻-N含量的比值得出;高温期指堆体温度>55℃的天数。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

Note: The nitrification index is calculated by calculating the ratio of the content of NH₄⁺-N to the content of NO₃⁻-N; the high temperature period refers to the days when the temperature is >55 °C. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments (P<0.05).

提供充足的氧气,使堆体温度维持高温。

综合比较得出,堆体B₃(辅料配比为7:3:1,通气速率为0.9 m³·h⁻¹)的发酵效果最佳。

2.5 不同堆体中 DOM 的荧光特性

三维荧光光谱因具有灵敏度高、操作简便以及无损测试 DOM 组分和结构等优点,被广泛应用于堆肥 DOM 的腐殖化演变机制等研究^[28]。文献报道^[29-30],一般可根据不同的激发/发射波长将 DOM 的荧光区域分成 5 个部分(图 7),分别为区域 I: Ex=200~250 nm/Em=280~330 nm,区域 II: Ex=200~250 nm/Em=330~380 nm,代表简单的芳香类蛋白质;区域 III: Ex=200~250 nm/Em=380~550 nm,代表类富里酸物质;区域 IV: Ex=250~450 nm/Em=280~380 nm,代表可溶性微生物副产物;区域 V: Ex=250~450 nm/Em=380~550 nm,代表类腐植酸物质。从图 7 中的 A 组荧光光谱图可看出, A-0 d 的荧光区域出现 4 个明显的荧光峰,而堆肥结束后各组在第 31 天的图中仅在区域 III 和区域

V 出现了荧光峰且峰值增强。A-0 d、B-0 d 与 C-0 d 均出现了明显的可溶性微生物副产物峰, B 组及 C 组的光谱图中各区域荧光峰的变化与 A 组具有相似的变化规律,在 3 组不同辅料配比处理的堆体中,分别是 A₁、B₃、C₃ 的类腐植酸物质荧光强度较大,说明通风速率为 0.3 m³·h⁻¹ 更适合 A 组堆体,而 0.9 m³·h⁻¹ 更适合 B 组和 C 组堆体。结果表明,随着堆肥的进行, DOM 中大量类蛋白质物质逐渐减少,被分解转化为类富里酸及类腐植酸物质等,使得这两类物质的荧光信号逐渐增加,这与 YU 等^[31]的研究结果一致。通过三维荧光光谱图可清晰看到各个荧光峰的位置变化,但对于各荧光峰的荧光强度还需进一步量化才能进行比较和分析。

对各个荧光区域进行区域积分,能更清楚地解释堆肥 DOM 的组分衍变规律^[32-33]。文献报道称,未腐熟的堆肥物料中通常存在大量结构简单且易降解的类蛋白质物质,随着堆肥不断腐熟,易降解类蛋白质物质含

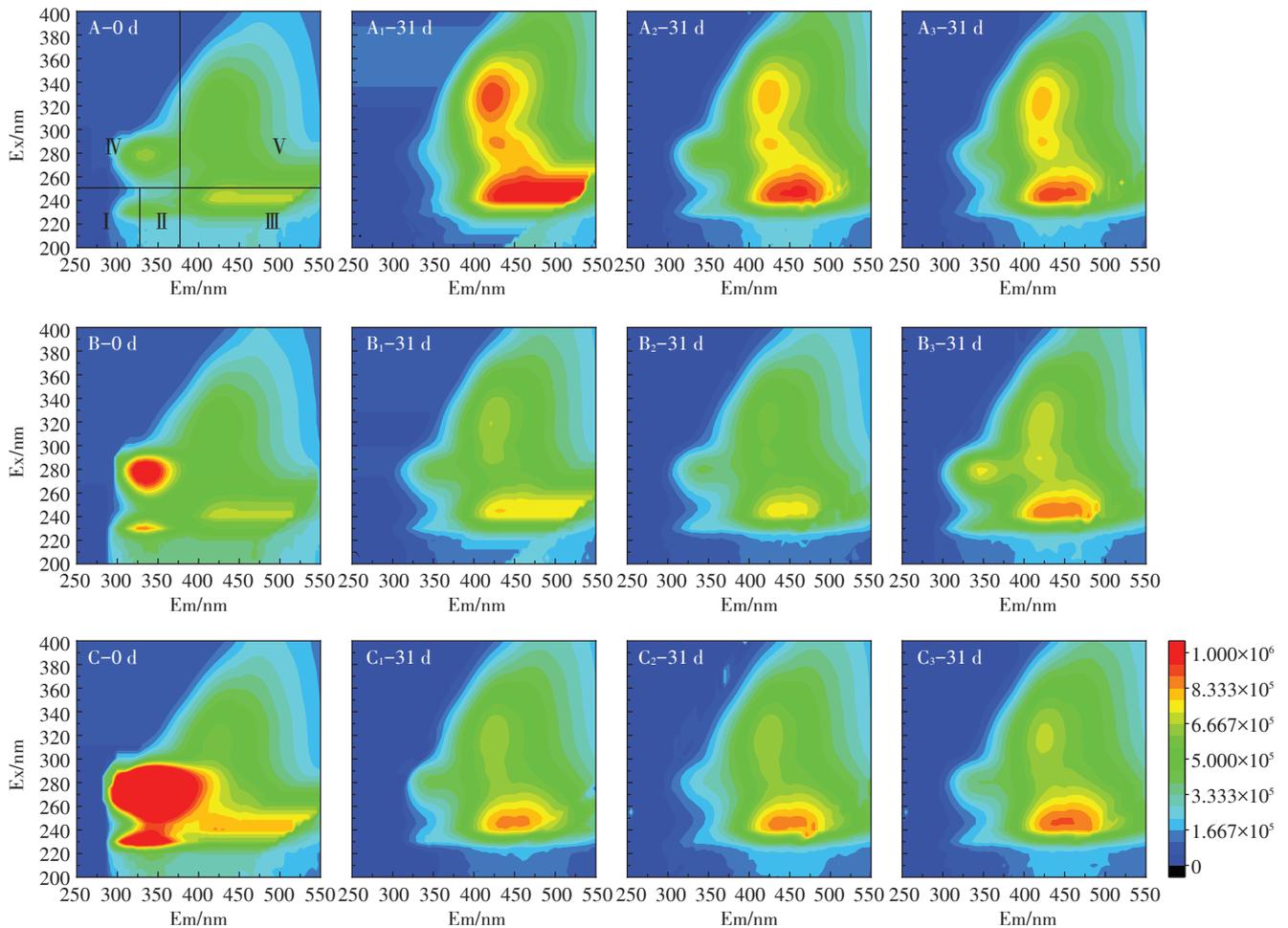


图 7 堆肥初始及结束时 DOM 的三维荧光光谱

Figure 7 Three-dimensional fluorescence spectra of DOM at the beginning and end of composting

量变低,而类腐植酸物质会不断增加^[34]。本研究的9组堆体初始及结束时样品中DOM的区域积分如图8所示,A、B、C 3组初始样品中DOM组分的占比情况相似,B、C组在IV区域的荧光强度高于A组,可能是因为B、C组堆体中污泥比例更高,可溶性微生物副产物含量更高。3组荧光强度的变化具有相同的趋势,堆肥结束时区域I、II和区域IV荧光强度的百分含量较初始含量明显降低,区域III的变化不明显,而区域V的百分含量显著上升,9组区域V的荧光强度相对含量分别上升了29.52%、29.03%、30.82%、70.34%、64.84%、76.62%、64.55%、63.07%、65.20%,其中B₃堆体中的类腐植酸物质含量增加最多,该结果也与各组硝化指数规律一致。污泥含量高的堆体腐熟程度较高,但堆体腐熟程度同样受到通风速率的影响,合适的通风速率有利于堆体内的微生物将含氮有机物降解转化为稳定且可利用的营养物质。结果表明,随着堆肥的进行,类蛋白质物质被不断降解,类腐植酸物质不断生成,这与HE等^[35]的研究结果相似,说明堆体内的氮素逐渐转移到了结构复杂且稳定的富里酸、腐植酸等物质中。其次,A组堆肥结束后,在区域III和区域V有明显的两个荧光峰,而B组与C组在这两个区域的荧光强度弱于A组,可能是因为A组辅料添加比例更高,碳含量更高,而类腐植酸物质(区域V)分子量、碳含量和腐殖化程度均高于富里酸类物质(区域III)^[36],因此辅料更多的A组中的碳元素更多地转移进入分子量大的腐植酸,通风速率更低的A₁组,因为大分子物质降解得不够彻底,而更容易缩合为腐植酸、富里酸类物质,因此荧光信号强于A₂、A₃组,对于蛋白质类含量更高的B、C堆体,通风速率越高,区域III的荧光峰值越高,越有利于类富里酸物质的形成。

2.6 辅料配比及通风速率对污泥气流膜堆肥过程的影响分析

通过上述研究结果分析可得,在污泥气流膜堆肥中,辅料添加太多会导致堆肥时间延长、腐熟不完全,最终生成的NO₃-N、TN含量也更低,这可能是因为辅料中含有大量的纤维素、木质素等物质不易降解,导致物料最终腐熟程度较低,同时大量辅料使得混合后的物料孔隙度大,水分及NH₃快速散失导致大量NH₄⁺-N未能及时转化为稳定态氮素。辅料添加量太小则使堆体初始含水率较高,堆体透气率降低,氧气含量降低,这些因素会限制内部微生物活动,使得堆体高温期缩短,无法满足物料无害化处置要求,辅料添加量小同样会造成堆体初始C/N较低,不利于氮素的保

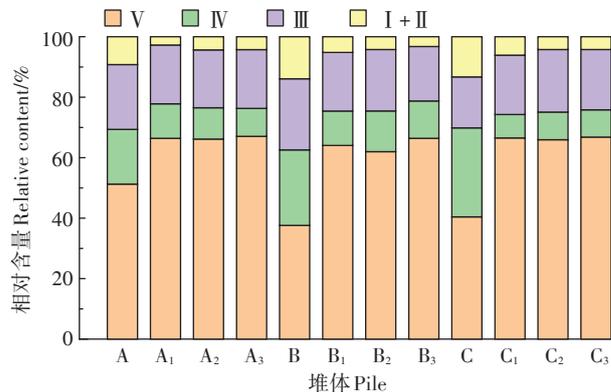


图8 堆肥初始及结束时4种荧光组分相对百分含量

Figure 8 Changes in the relative percentages of the four fluorescent components

留。对于辅料占比较大的堆体,通气速率不应过高,否则会使NH₃外逸,也会使堆体不易保温。而对于辅料占比低、C/N低的堆体,在一定范围内通气速率越高越有利于堆体内有机质的降解及腐熟。在堆肥过程中,污泥中的蛋白质类物质经氨化作用转化为NH₃释放到膜内,溶于水后经硝化作用形成NO₃-N,将氮素固定在堆体中,合适的辅料添加量及通气速率能使氮素向有利的方向转移,在减少臭气逸出膜外的同时提高产物的速效肥力。

3 结论

(1)气流膜有效阻隔NH₃外逸,不仅减小了污泥堆肥对环境造成的臭气污染,同时使大量NH₃以NH₄⁺-N的形式回落到堆体中,为堆体内氮素的转化和稳定提供了更多的底物,有利于氮素保留,进而提高堆肥产品质量。

(2)通风速率对堆肥能否成功具有决定性作用,且影响堆肥稳定性,速率过大会造成堆体内大量氮素以NH₃的形式散失,不利于氮素保留及稳定化迁移;辅料配比决定堆体的初始碳氮比,辅料添加量过低会抑制有机质降解,导致大量含氮有机物无法向腐殖质等大分子物质转移,降低物料腐熟程度。本研究通过分析堆体的氮素变化得出,在辅料配比为7:3:1(污泥:园林垃圾:玉米秸秆),通风速率为0.9 m³·h⁻¹的条件下,大量氮素被固定到腐殖质等稳定的大分子有机物中,堆肥效果最佳。

参考文献:

- [1] ROBLEDO-MAHÓN T, MARTÍN M A, GUTIÉRREZ M C, et al. Sewage sludge composting under semi-permeable film at full-scale: Evalu-

- ation of odour emissions and relationships between microbiological activities and physico-chemical variables[J]. *Environment Research*, 2019, 177:108624.
- [2] 张云龙. 高效好氧堆肥的关键工艺因素优化及腐殖化机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. ZHANG Y L. Study on optimization of key influencing factors and humification mechanism of high efficiency aerobic composting[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [3] 郭广慧, 陈同斌, 雷梅, 等. 污泥堆肥产物在农业利用中的潜力和问题[J]. 中国给水排水, 2016, 32(20):34-38. GUO G H, CHEN T B, LEI M, et al. Potentials and problems in application of composted sewage sludge to agricultural utilization[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(20):34-38.
- [4] 金树权, 周金波, 陈若霞, 等. 污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(10):3969-3974. JIN S Q, ZHOU J B, CHEN R X, et al. Effects of sludge compost used as lawn medium on lawn growth and soil and water environment[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(10):3969-3974.
- [5] 黄俊熙, 严兴, 雷芳, 等. 添加辅料对污泥堆肥产品的生物肥效的影响[J]. 环境工程, 2021, 39(3):142-147. HUANG J X, YAN X, LEI F, et al. Improvement of biological fertilizer efficiency of sludge compost products by adding auxiliary materials[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(3):142-147.
- [6] 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]. *Biore-source Technology*, 2012, 112:171-178.
- [7] LI Y, SUN B, DENG T, et al. Safety and efficiency of sewage sludge and garden waste compost as a soil amendment based on the field application in woodland[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 222:112497.
- [8] ZHANG D, LUO W, LI Y, et al. Performance of co-composting sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste at different proportions[J]. *Biore-source Technology*, 2018, 250:853-859.
- [9] 张向前, 路战远, 程玉臣, 等. 纳米膜有机废弃物堆沤技术的发展与应用[J]. 北方农业学报, 2020, 48(6):56-61. ZHANG X Q, LU Z Y, CHENG Y C, et al. Development and application of nanofilm organic waste composting technology[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2020, 48(6):56-61.
- [10] 杨丽楠, 李昂, 袁春燕, 等. 半透膜覆盖好氧堆肥技术应用现状综述[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10):3559-3564. YANG L N, LI A, YUAN C Y, et al. Review on the application of semi-permeable membrane-covered composting system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(10):3559-3564.
- [11] CUI P, BAI Y, LI X, et al. Enhanced removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements during sewage sludge composting covered with a semi-permeable membrane[J]. *J Hazard Mater*, 2020, 396:122738.
- [12] ROBLEDO-MAHÓN T, ARANDA E, PESCIABOLI C, et al. Effect of semi-permeable cover system on the bacterial diversity during sewage sludge composting[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 215:57-67.
- [13] SUN X, MA S, HAN L, et al. The effect of a semi-permeable membrane-covered composting system on greenhouse gas and ammonia emissions in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 204:778-787.
- [14] GONZÁLEZ I, ROBLEDO-MAHÓN T, SILVA-CASTRO G A, et al. Evolution of the composting process with semi-permeable film technology at industrial scale[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 115:245-254.
- [15] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1980. Nanjing Agricultural College. Soil analysis in agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1980.
- [16] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER JERRY A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(24):5701-5710.
- [17] YUAN J, CHADWICK D, ZHANG D, et al. Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting[J]. *Waste Management*, 2016, 56:403-410.
- [18] LI Y, LIU Y, YONG X, et al. Odor emission and microbial community succession during biogas residue composting covered with a molecular membrane[J]. *Biore-source Technology*, 2020, 297:122518.
- [19] 邱珊, 赵龙彬, 马放, 等. 不同通风速率对厌氧残余物沼渣堆肥的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8):2402-2408. QIU S, ZHAO L B, MA F, et al. The influence of aeration rate on intermittent forced-aeration composting of biogas residue[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(8):2402-2408.
- [20] 李思敏, 赵阳悦, 唐锋兵. 辅料配比对市政污泥堆肥效果的影响[J]. 当代化工, 2020, 49(4):564-567, 571. LI S M, ZHAO Y Y, TANG F B. Influence of additive ratio on municipal sludge composting effect[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(4):564-567, 571.
- [21] BERNAL M P, ALBURQUERQUE J A, MORAL R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review[J]. *Biore-source Technology*, 2009, 100(22):5444-5453.
- [22] DOUBLET J, FRANCOU C, POITRENAUD M, et al. Sewage sludge composting: Influence of initial mixtures on organic matter evolution and N availability in the final composts[J]. *Waste Management*, 2010, 30(10):1922-1930.
- [23] 金珠理达, 王顺利, 邹荣松, 等. 猪粪堆肥快速发酵菌剂及工艺控制参数初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3):586-591. JIN Z L D, WANG S L, ZOU R S, et al. Microbial agents and the optimum control parameters for pig manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3):586-591.
- [24] 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 H, HUANG Y M, LIU X L, 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.
- [25] HAN Z, QI F, WANG H, et al. Odor assessment of NH₃ and volatile sulfide compounds in a full-scale municipal sludge aerobic composting plant[J]. *Biore-source Technology*, 2019, 282:447-455.
- [26] ZHANG L, SUN X. Changes in physical, chemical, and microbiologi-

- cal properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171:274-284.
- [27] MENG L, ZHANG S, GONG H, et al. Improving sewage sludge composting by addition of spent mushroom substrate and sucrose[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 253:197-203.
- [28] 余旭芳, 周俊, 任兰天, 等. 小麦秸秆堆肥水溶性有机物的结构和组成演变[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(4):1199-1204. YU X F, ZHOU J, REN L T, et al. Compositional and structural evolutions of dissolved organic compounds during composting of wheat straw[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(4):1199-1204.
- [29] YU G H, LUO Y H, WU M J, et al. PARAFAC modeling of fluorescence excitation-emission spectra for rapid assessment of compost maturity[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(21):8244-8251.
- [30] GUO L, LU M, LI Q, et al. Three-dimensional fluorescence excitation-emission matrix (EEM) spectroscopy with regional integration analysis for assessing waste sludge hydrolysis treated with multi-enzyme and thermophilic bacteria[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171:22-28.
- [31] YU G H, WU M J, LUO Y H, et al. Fluorescence excitation-emission spectroscopy with regional integration analysis for assessment of compost maturity[J]. *Waste Management*, 2011, 31(8):1729-1736.
- [32] 申钊颖, 弓晓峰, 江良, 等. 利用荧光区域积分法解析鄱阳湖 DOM 组成及来源[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(5):196-203. SHEN Z Y, GONG X F, JIANG L, et al. Analysis of the composition and source of DOM in Poyang Lake by using regional integration method[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(5):196-203.
- [33] 刘晓明, 余震, 周普雄, 等. 污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析[J]. 环境科学, 2018, 39(8):3807-3815. LIU X M, YU Z, ZHOU P X, et al. Spectroscopic characterization of DOM during hyperthermophilic composting of sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8):3807-3815.
- [34] YUAN D H, AN Y C, HE X S, et al. Fluorescent characteristic and compositional change of dissolved organic matter and its effect on heavy metal distribution in composting leachates[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(19):18866-18878.
- [35] HE X, XI B, WEI Z, et al. Spectroscopic characterization of water extractable organic matter during composting of municipal solid waste [J]. *Chemosphere*, 2011, 82(4):541-548.
- [36] 罗琼. 污泥堆肥富里酸与腐植酸的纯化与应用研究[D]. 天津:天津大学, 2019. LUO Q. Purification and application of fulvic acid and humic acid from sludge compost[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.

(责任编辑:李丹)