

不同通风速率对堆肥腐熟度和含氮气体排放的影响

沈玉君^{1,2}, 李国学², 任丽梅², 郭 瑞²

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要: NH_3 和 N_2O 等含氮气体的排放不仅对堆肥腐熟度和堆肥产品的品质产生影响,同时也与环境污染有直接关系。以鸡粪、秸秆和干草皮为堆肥原料,采用好氧堆肥的方法,探讨了不同通风速率对堆肥腐熟度及 NH_3 和 N_2O 等含氮气体排放变化的影响。结果表明,通风速率为 0.01 、 0.1 、 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 的处理高温期持续时间分别为 0 、 11 、 7 d ; $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 的堆肥积温为 $16\,176.4 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}$,在各处理中为最高;到堆肥结束时,各处理的全碳降解率分别为 9.87% 、 24.94% 、 19.01% ,总氮增加率分别为 19.67% 、 32.00% 、 12.14% ,其中处理 A2 的有机质降解及总氮增加效果最好。对堆肥产物腐熟度的测试结果表明,除通风速率为 $0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 不能达到堆肥腐熟外,其他两个处理均达到了要求。氨气累积释放量与通气速率有关,通气速率越大,越有利于氨气的挥发。低的通气量可能会促成 N_2O 的生成,到堆肥结束时,3 个处理的 N_2O 平均排放率分别为 6.2 、 2.37 、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

关键词: 好氧堆肥;通风速率;腐熟度;含氮气体

中图分类号: S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)09-1814-06

The Impact of Composting with Different Aeration Rates on Maturity Variation and Emission of Gas Concluding N

SHEN Yu-jun^{1,2}, LI Guo-xue², REN Li-mei², GUO Rui²

(1.Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.College of Resources and Environment Science, China Agriculture University, Beijing 100193, China)

Abstract: NH_3 and N_2O influence not only on the maturity and quality of composting products, but also on the surrounding environment during composting. Based on aerobic composting, the impact of composting with different aeration rates on maturity variation and emission of gas concluding N was studied. Results indicated that the duration time of aeration rates which were 0.01 , $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ and $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ were 0 , 11 days and 7 days respectively during thermophilic phase. The accumulated temperature of the aeration rates $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ reached to $16\,176.4 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ which was the highest. By the end of composting, the total carbon of the runs with different aeration rates reached to 9.87% , 24.94% and 19.01% and the total nitrogen increased to 19.67% , 32.00% and 12.14% respectively. Of the different runs, A2 got the highest organic matter decreasing rate and total nitrogen increasing rate. The cumulative volatilization of ammonia decreased with the decline of the aeration rates. Low aeration rates could contribute to high flux of N_2O . The flux of N_2O of the three runs was 6.2 , $2.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ and $1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ respectively.

Keywords: aerobic composting; aeration rates; maturity; gas concluding N emission

NH_3 和 N_2O 是堆肥过程中排放的重要含氮气体。 NH_3 是主要的臭气物质,具有刺激性气味, NH_3 的排

放不仅带来严重的环境问题还会导致氮素损失,影响堆肥品质。 N_2O 是重要的温室气体,它的温室效应是 CO_2 的 296 倍 (IPCC, 2001), NO_x 是堆肥过程中 N 损失的途径之一^[1]。在堆肥过程中,通风速率是影响堆肥进程的重要因素,合理的通风不仅可以提高堆肥产品质量,而且可以节省能耗;过高的通风速率不仅造成通风损失过大,不利于维持堆体温度,而且会造成大量的氮素损失,减低堆肥产品的肥效,增加堆肥能耗;但过低的通风速率,会降低堆体中的氧浓度,造成堆

收稿日期:2010-04-20

基金项目: 国家自然科学基金“基于氮素损失原位控制的堆肥中 GHG 形成机理及减排研究”(40971177);“十一五”国家科技支撑计划项目“京郊地区种养业废弃资源循环利用技术集成研究与示范”(2007BAD89BP7)

作者简介: 沈玉君(1984—),女,博士,主要从事固体废弃物资源化研究。E-mail: shenyj.09b@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 李国学 E-mail: ligx@cau.edu.cn

体局部厌(缺)氧,从而产生大量臭气以及 NO_x 、甲烷等温室气体^[2-3],给周边环境带来严重的污染和危害^[4]。张相锋^[5]在 2 m^3 的静态好氧堆肥中试装置中以蔬菜和花卉废弃物为原料,采用 0.005 、 0.0075 、 $0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{VS} \cdot \text{h}^{-1}$ 3 个水平的通风量进行堆肥试验,结果表明,通风量为 $0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{VS} \cdot \text{h}^{-1}$ 堆肥降解蔬菜和花卉废弃物的效果最好。焦洪超^[6]认为 $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 的通风量对猪粪堆肥的效果最佳。多数研究表明,氨气的释放随通风速率的增加而增加^[7-8],然而,Li^[9]以 0.125 、 0.25 、 0.50 、 $0.75 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的通风速率进行堆肥试验表明, $0.50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的通风速率堆肥氨气释放量最大。因此,不同通风速率对堆肥腐熟及氨气排放的研究还存在不同观点。通风速率对于 N_2O 的影响研究较少,本文设置 0.01 、 0.1 、 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 3 个通气速率,探索不同通气速率对堆肥腐熟和含氮气体排放的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试鸡粪取自中国农科院,秸秆取自河北省衡水地区,经过粉碎机切割为 5 cm 左右的小段,草皮取自中国农业大学昌平试验站。其基本性状见表 1。

表 1 不同通气速率静态堆肥物料的基本性状

Table 1 Initial conditions of the material composting of different ventilation

原料类型	含碳量/%	含氮量/%	C/N	含水率/%
鸡粪	28.20 ± 0.29	2.1 ± 0.07	13.4 ± 0.21	49 ± 0.38
秸秆	44.57 ± 0.38	0.63 ± 0.003	71 ± 0.61	16.7 ± 0.18
草皮	32.31 ± 0.30	0.34 ± 0.001	95 ± 0.82	7.44 ± 0.07

1.2 试验方法

将鸡粪、秸秆、草皮按一定比例混合,调节混合物料 C/N 比为 25,含水率为 60%,将原料装入 60 L 密闭化堆肥装置中,根据理论计算值所需通风速率为 $0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,设处理一为通风速率 $0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ (A1)。据研究表明^[10],在生产中实际通风量取值为 $0.05 \sim 0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,另设两处理通风速率分别为 $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ (A2) 和 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ (A3)。试验过程中,处理 A1 在通风 30 min 、停止 30 min 7 d 之后连续通风;处理 A2、A3 通风 30 min 、停止 30 min 。鼓风机功率为 45 W 。

密闭堆肥化装置是由不锈钢制成的双层圆桶状结构,顶部密封,高度为 70 cm ,外直径为 46 cm ,罐壁

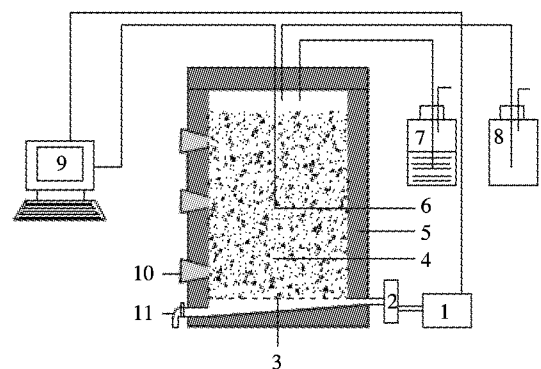
厚 5 cm 。

堆制期间,利用温度反馈自动控制系统每 0.5 h 自动记录堆体温度,并于 0、3、8、11、14、17、21、26、29 d 取固体样 $100 \sim 300 \text{ g}$,样品分成两份,一份为鲜样储存 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中待用,另一份在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干测定水分,粉碎留做干样待用。

每日释放的氨气用装有 2% 硼酸的吸收瓶吸收;温室气体每日取样,取样时间为上午 10:00—10:30,取样时将医用注射器从堆肥罐顶部活塞处深入堆体上部空间迅速采样,采完后立即使用锡箔纸密封,用 GC-9900 气相色谱仪测定其含量。气相色谱仪装有电子捕获检测器 (electron capture detector, ECD),火焰电离检测器 (flame ionization detector, FID) 和热传导检测器 (thermal conductivity detector, TCD)。

1.3 试验装置

试验装置见图 1。



(1)空气泵;(2)气体流量计;(3)筛板;(4)堆肥原料;(5)绝热层;(6)温度传感器;(7) NH_3 吸收瓶;(8) N_2O 吸收瓶;(9)自动化控制系统;(10)采样口;(11)渗滤液收集口

图 1 强制通风静态堆肥反应器示意图

Figure 1 Sketch map of static pile composting reactor with mandatory ventilation

1.4 测定指标及方法

(1)堆肥温度:温度自动监测系统。

(2)堆肥积温计算方法: $T = \sum (T_i - T_0) \times \Delta t$

式中 T_i 为 i 时刻的堆温; T_0 为堆肥中微生物大量繁殖时的起始温度(生物学零度); Δt 为持续的时间。以 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为堆肥反应的生物学零度,以此种条件下堆肥的积温来衡量堆肥稳定化过程的温热条件。

(3)含水率:烘干法测定。

(4)pH 值、EC、GI: 用水浸提鲜样,固液比为 1:10,过滤后滤液保存于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中待测。pH 值用 S-3C 型 pH 计,EC 用 DDS-11A 型电导率仪。GI 的测定

是取上述浸提液 8 mL 于垫有滤纸的培养皿中,取 10 粒种子,然后放置在 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 的培养箱中培养,分别在 24 h 和 96 h 测定发芽率。用发芽率指数 GI(Germination Index)来评价堆肥的毒性,GI 由下式确定:

$$\text{GI}(\%) = (\text{浸提液种子发芽率} \times \text{根长}) \times 100 / (\text{对照种子发芽率} \times \text{根长})$$

(5)TOC:采用重铬酸钾容量法-磷酸浴外加热法测定。

(6)TN:采用硫酸-高氯酸联合红外消煮后通过凯氏定氮法测定。

(7) NH_3 用 2%硼酸吸收,饱和后用 1:2 的 H_2SO_4 滴定; N_2O 采用装有热导检测器(thermal conductivity detector, TCD)的 GC-9000 型气相色谱仪测定。其中 N_2O 用 1.8×3 mm Q 80/100 型柱,载气为 He 气,进气口、检测器、柱温分别为 100°C 、 150°C 、 78°C 。

2 结果与分析

2.1 腐熟度指标的变化

2.1.1 温度的变化

堆肥过程中,堆料内部温度上升是微生物对堆料中有机物质旺盛分解的结果,也是堆肥发酵顺利进行的证明。堆体温度在 $50\sim 55^{\circ}\text{C}$ 条件下保持 5~7 d,是杀灭堆料所含致病微生物和害虫卵,保证堆肥卫生指标合格和堆肥腐熟的重要条件(GB 7959—1987)。从图2可明显看出,处理 A1 在整个堆肥发酵过程中温度始终维持在 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$,未达到高温,并不能杀死堆料中的病原菌,说明处理 A1 供气量不足,好氧微生物因缺氧而活性降低,出现了局部厌氧发酵,抑制了反应的进行,完全不能满足堆体腐熟的需要。处理 A2 和 A3 堆体温度的变化均经历了 4 个阶段:升温阶段、高温阶段、降温阶段和稳定阶段。堆肥初期,堆料中易分

解的有机质在微生物的作用下迅速分解,堆体产生大量的热量导致堆体温度快速上升,处理 A2 1 d 后即进入高温阶段($>50^{\circ}\text{C}$),处理 A3 的升温速度慢,达到高温期的时间较 A2 晚 1 d,高温发酵阶段,处理 A2 高温期持续了 11 d,而处理 A3 持续时间为 7 d。由各处理的比较可以看出,通风处理对堆体温度提高及好氧微生物活动的重要性。A3 的高温持续时间较 A2 短,且堆肥降温期及稳定期温度均低于 A2,这主要是因为 A3 采用 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 的通风速率,其通风量过大,以至堆肥后期过量的通风使堆体降温加快。

在整个堆肥发酵过程中, $0.01\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ (A1)、 $0.1\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ (A2)和 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ (A3)3 种不同通气量处理的堆肥积温分别是 9 486.22、16 176.40、13 877.52 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$,以 A2 的堆肥积温最高,说明 $0.1\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 的通气速率有利于微生物的生长和繁殖。处理 A3 堆体积温略低于 A2,这与其通气量过大有直接关系。而 A1 远远不足的通气量导致其堆体积温最低。

2.1.2 营养元素的变化

在堆肥化过程中,有机物中氮素主要是通过 NH_3 、 N_2O 、堆肥渗滤液等形式损失,碳素绝对含量的降低主要是以有机质分解产生 CO_2 的形式脱离堆体,各种元素的损失最终导致堆料总干物重的降低。经过 25 d 的高温好氧快速堆肥化过程,处理 A1 的总干物重只从开始的 7.28 kg 降到了堆肥结束时的 5.98 kg(表 2),干物质减少率仅为 17.89%,而处理 A2、A3 的干物质减少率分别达 35.34%和 33.04%。比较各处理全氮绝对含量的减少率,3 个处理分别为 1.74%、14.65%和 24.93%。处理 A1 远远低于另外两个处理,主要是因为 A1 并未达到高温期,堆料中的有机物不能在微生物的作用下充分的降解。处理 A3 的全氮绝

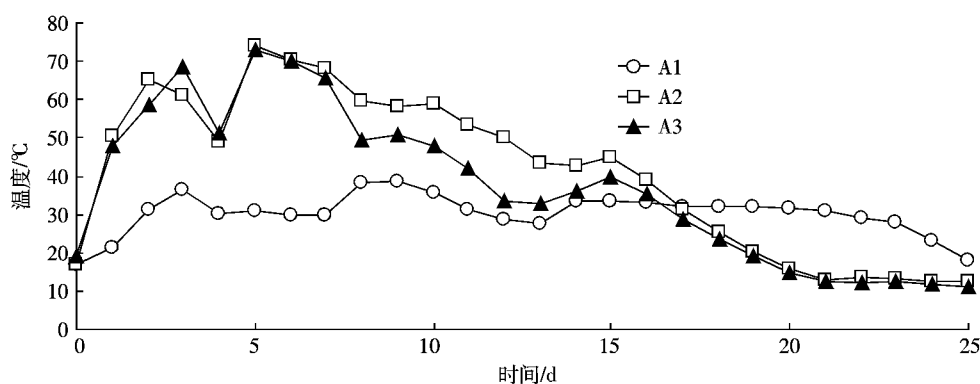


图2 不同通气速率的堆肥温度变化

Figure 2 Changes of temperature during the composting of different ventilation

表 2 主要营养元素绝对量的变化

Table 2 Changes of nutritious element during the composting

处理	总干物重/kg			全 N/g			全 C/kg		
	堆制前	堆制后	减少率/%	堆制前	堆制后	减少率/%	堆制前	堆制后	减少率/%
A1	7.28±0.128	5.98±0.081	17.89	162.38±7.08	159.55±6.95	1.74	3.21±0.140	2.43±0.109	24.30
A2	7.26±0.124	4.69±0.063	35.34	162±2.81	138.27±8.07	14.65	3.26±0.143	1.58±0.112	51.47
A3	7.30±0.111	4.89±0.075	33.04	162.84±7.08	122.24±9.09	24.93	3.26±0.149	1.77±0.078	45.77

对含量减少率高于 A2, 主要是因为 A3 通气量过大, 导致了较多的氮素以氨气的形式挥发。3 个处理全碳绝对含量的减少率以处理 A2 最大, 达 51.47%, 说明该处理有机碳降解较充分。

比较各处理全氮的含量变化(图 3a), 由于堆肥过程中, 总干物重的下降幅度明显大于全氮下幅度, 最终导致全氮相对含量增加, 各处理总氮增加率分别为 19.67%、32.00%、13.93%。由图 3b 可见, 随着堆肥的进行各处理有机质逐渐被降解, 3 个处理的降解率分别为 9.87%、24.94%、19.01%, 说明通气量过大和不足均不利于有机物的降解。这是因为通气量过大和不足都将减缓堆体的升温速率并降低堆体温度, 从而影

响微生物的代谢繁殖, 抑制反应的进行。为了达到较高的有机物降解率, 装置适宜的通气速率为 $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

伴随着有机物的降解, 有机氮通过铵化作用转化为 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 。如图 4 所示, 处理 A1 在整个堆肥期间都呈上升趋势, 这主要是由于 NH_4^+ 没有通过转化为 NH_3 释放而损失掉。而处理 A2 和 A3 则呈现先上升后下降的趋势, 0~7 d 两个处理的 NH_4^+-N 呈上升趋势, 这主要是归因于氨化作用, 2~7 d 是处理 A2 和 A3 的 NH_4^+ 和 NH_3 生成的关键时期, 分别在第 4 d 和第 7 d 达到最大值 $2.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 之后随着氨气的大量挥发, NH_4^+-N 含量逐渐下降, 到堆肥结束时, 3 个处理的 NH_4^+-N 含量分别为 3.34 、 1.89 、 $1.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可以看出, 通气率越高, NH_4^+-N 含量越低, 低的通风量有利于 NH_4^+-N 的保留。

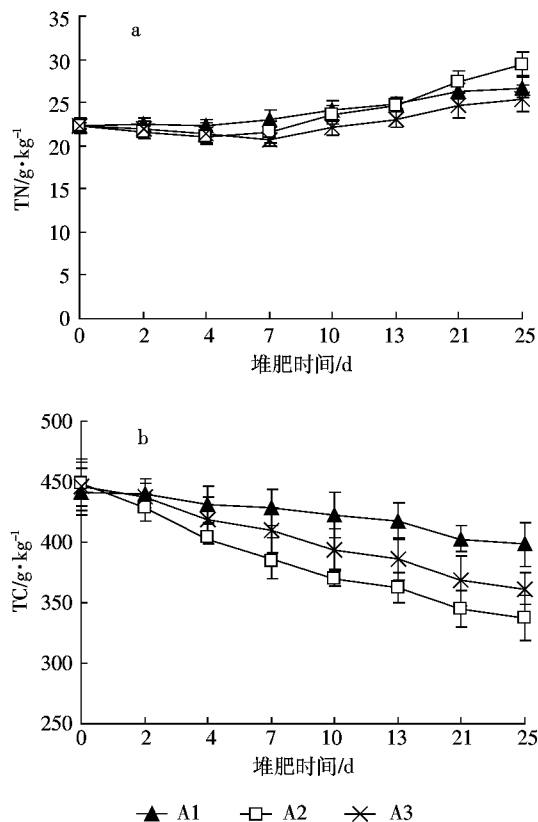


图 3 不同通气速率的堆肥全氮、全碳变化

Figure 3 Changes of TN and TC during the composting of different ventilation

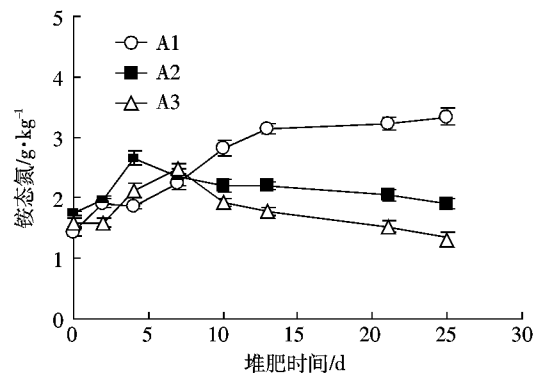


图 4 不同通气速率在堆肥过程中的铵态氮含量变化

Figure 4 Changes of NH_4^+-N concentration during composting

2.1.3 腐熟度指标的变化

表 3 列出不同通风速率条件下各堆肥产品的腐熟度测试结果, 种子发芽系数作为堆肥腐熟度指标可以有效地评价不同通气条件对堆肥腐熟的影响^[1]。至堆肥结束时, 两个处理的发芽指数均接近或超过 100%, 说明 0.1 、 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 的通气速率均能使堆肥产品达到腐熟。其他堆肥腐熟指标也表明, 除 A1 不能达到堆肥腐熟外, 其余两个处理均达到了要求。

表 3 不同处理堆肥产品腐熟度测试结果

Table 3 Result of products' maturity of different ventilation

处理	EC/mS·cm ⁻¹		GI/%		E4/E6		C/N 比	
	测试值	要求	测试值	要求	测试值	要求	测试值	要求
A1	2.67	≤4.3	42	>80	2.64	尽量低	14.39	<20
A2	2.11	≤4.3	97	>80	1.86		11.01	<20
A3	2.18	≤4.3	106.28	>80	1.84		11.48	<20

2.2 氨气的排放规律

从图 5 可以看出,在整个堆肥过程中,处理 A1 的氨气释放速率基本为 0,这主要是因为 $0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 的通气速率过低,无法满足好氧要求,使堆体出现了局部厌氧发酵,微生物的代谢活动产生了较多的有机酸,pH 较低(图 6),从而影响氨气的挥发。对于处理 A2、A3,氨气释放速率变化趋势基本相同,经历了升温期较低、高温期急剧增加、降温期下降并趋于平缓的过程。在堆肥开始的 1~2 d 内,因易分解性有机物质含量高,其快速分解产生较多的有机酸和含硫化合物使 pH 较低(图 6),不会造成 NH_3 的大量挥发。但堆肥进行到 3~4 d 后,随着堆肥内部温度的升高和一些有机酸等物质逐渐分解,导致 pH 上升(图 6),因而产生大量氨气。降温期由于易降解有机质逐渐减少、温度回落,堆肥趋于腐熟,氨气的释放速率随之降低。比较 A2、A3 两个通风处理可以看出,在整个堆肥过程中,尤其是堆肥高温阶段,处理 A3 的氨气释放速率明显高于 A2,从而证明了氨气的挥发速率和通风大小有关,通气量越大,越容易导致氮素以氨气的形式挥发损失。到堆肥结束时,各处理的氨气累积挥发量分别为 0.07、17.43、32.42 g,以处理 A3 的挥发量最大。

2.3 N_2O 排放

如图 7 所示,在试验期间,处理 A1 的 N_2O 的释

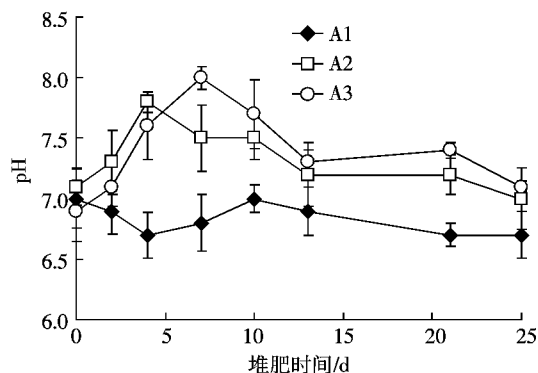
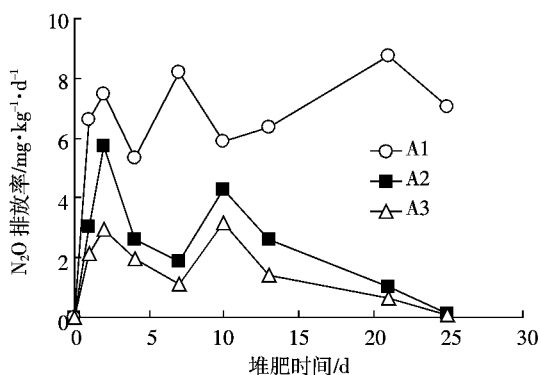


图 6 不同通气速率堆肥的 pH 变化

Figure 6 Changes of pH during composting of different ventilation

图 7 堆肥过程中不同通气速率的 N_2O 排放浓度及排放率变化Figure 7 Changes of NH_3 emission rate during composting

呈现上下波动的变化趋势,分别在第 2、7、21 d 出现排放高峰,3 个排放高峰的排放率分别为 7.49、8.22、 $8.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。而处理 A2 和 A3 的 N_2O 排放变化趋势一致,且排放量显著低于处理 A1,它们都在堆肥第 1 d 就达到排放高峰,分别为 5.72 、 $2.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,之后逐渐下降;在第 10 d 有又一个上升,达到第

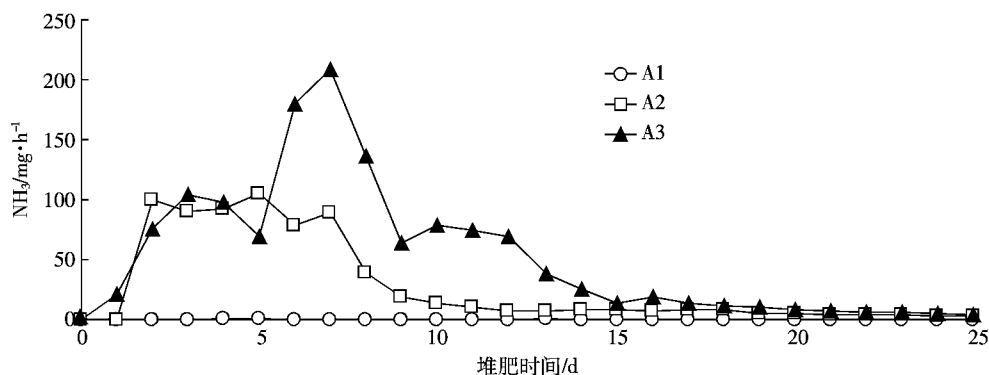


图 5 不同通气速率堆肥过程中氨气释放速率

Figure 5 The ammonia volatilization rate of different ventilation

二个排放高峰,分别为 4.27 、 $3.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;第 13 d 以后排放浓度和排放率逐渐下降,实验结束时,排放浓度和排放率接近于 0。处理 A1 高的 N_2O 排放可能与其条件适于反硝化作用有关,即:①硝酸盐供应充足;②易氧化的有机物的充足供应;③pH 在 4~8 之间;④温度在 4°C 以上;⑤氧气含量较低^[12]。同时这种条件在整个堆肥期都适宜。处理 A2 和 A3 则由于供氧充足,温度和 pH 值较高而不利于反硝化作用的发生,因此只有微量的 N_2O 产生。 N_2O 排放高峰出现在堆肥前期可能与高温有关,到堆肥结束时,3 个处理的 N_2O 平均排放率分别为 6.2 、 2.37 、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。该结果显示,通气量越高, N_2O 的排放量越低。

3 结论

(1)通风速率为 0.01 、 0.1 、 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 的处理高温期持续时间分别为 0、11、7 d; $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 的堆肥积温是 $16\ 176.4^\circ\text{C} \cdot \text{h}$, 在各处理中为最高;到堆肥结束时,各处理全碳降解率分别为 9.87%、24.94%、19.01%;总氮增加率分别为 19.67%、32.00%、12.14%;处理 A2 的有机质降解及总氮增加效果最好;对堆肥产物腐熟度的测试结果表明,除通风速率为 $0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 不能达到堆肥腐熟外,其他两个处理均达到了要求。

(2)通气速率越大,越有利于氨气的挥发。到堆肥结束时,各处理的氨气累积挥发量依次为 0.07、17.43、32.42 g。

(3) N_2O 排放高峰出现在堆肥前期,这可能与堆肥高温有关。低的通气量可能会促成 N_2O 的生成。到堆肥结束时,3 个处理的 N_2O 平均排放率依次为 6.2 、 2.37 、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] Barrington S, Choinière D, Trigui M, et al. Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses[J]. *Bioresource Technology*, 2002.
- [2] Rynk R, Kamp M, Willson G B, et al. On farm composting handbook[M]. Cooperative Extension Service, North Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, NY, USA, 1992.
- [3] Yasuyuki Fukumoto, Takashi Osada, Dai Hanajima, et al. Patterns and quantities of NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during swine manure composting without forced aeration effect of compost pile scale[J]. *Biore-source Technology*, 2003, 89: 109–114.
- [4] 常勤学, 魏源送, 夏世斌. 堆肥通风技术及进展[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(10): 98–108.
CHANG Qin-xue, WEI Yuan-song, XIA Shi-bin. Progress on technology of aeration in composting[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 30(10): 98–108.
- [5] 张相锋, 王洪涛, 聂永丰. 通风量对蔬菜和花卉废弃物混合堆肥的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 134–137.
ZHANG Xiang-feng, WANG Hong-tao, NIE Yong-feng. Effect of ventilation rate on vegetable waste and flower straw co-composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(10): 134–137.
- [6] 焦洪超, 张洪芳, 栾炳志, 等. 不同通风量对猪粪好氧堆肥效果的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 173–177.
JIAO Hong-chao, ZHANG Hong-fang, LUAN Bing-zhi, et al. Effects of ventilation on aerobic composting of swine feets[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(12): 173–177.
- [7] Elwell D L, Keener H M. 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.
- [8] Yu H, Huang G H. Effects of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(6): 2005–2011.
- [9] Li X, Zhang R, et al. Characteristics of dairy manure composting with rice straw[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(2): 359–367.
- [10] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 130–131.
LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Solid wastes composting and organic fertilizer production[M]. Beijing: Chemical Engineering Press, 2000: 130–131.
- [11] Zucconi F, Forte M, Monae A, et al. Biological evaluation of compost maturity[J]. *Biocycle*, 1981, 22: 27–39.
- [12] Knowles R. Denitrification[J]. *Microbiol Rev*, 1982, 46: 43–70.

[1] Barrington S, Choinière D, Trigui M, et al. Effect of carbon source on