

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.018

# 通风速率对市政污泥好氧堆肥氮素转化的影响

李思敏<sup>1,2,3</sup>, 李思雨<sup>1,2,3</sup>, 唐锋兵<sup>1,2,3</sup>, 张义竞<sup>1,2,3</sup>, 许 铮<sup>1,2,3</sup>,  
王彦飞<sup>1,2,3</sup>

(1. 河北工程大学 污水处理及资源化利用河北省工程研究中心, 河北 邯郸 056038;

2. 河北工程大学 河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心, 河北 邯郸 056038;

3. 河北工程大学 邯郸市城市水利用技术重点实验室, 河北 邯郸 056038)

**摘 要:** 堆肥过程中氮素的转化对堆肥产品的肥效有着重要影响。以市政污泥和蘑菇渣为原料,按照湿质量比1:0.7混合后进行为期26 d的好氧堆肥,设置3个不同通风速率的堆体A[ $2.4 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ]、B[ $2.9 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ]、C[ $3.3 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ],考察通风速率对堆肥过程中含氮有机物转化及 $\text{NH}_3$ 挥发的影响。结果表明,堆肥完成后A、B、C堆体的总氮损失率介于16.90%~25.10%之间, $\text{NH}_3$ 挥发占总氮损失的比例介于68.49%~72.97%之间。B堆体通风速率下 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 向 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 转化更多,B堆体 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 含量较A和C堆体分别增加了30.31%和8.98%。结构方程模型显示,不同通风速率下,酸解氨态氮(AN)最易转化为 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,通风速率为 $2.9 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 时微生物代谢活跃,促进了氨基糖态氮(ASN)的积累,且 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 转化为难以矿化的酸解未知态氮(HUN),增加了对氮素的固定。兼顾腐熟条件和氮素损失,通风速率以 $2.9 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 为宜。

**关键词:** 市政污泥; 好氧堆肥; 通风速率; 氮素转化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0121-07

## Effect of Ventilation Rate on Nitrogen Transformation of Municipal Sludge in Aerobic Composting

LI Si-min<sup>1,2,3</sup>, LI Si-yu<sup>1,2,3</sup>, TANG Feng-bing<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yi-jing<sup>1,2,3</sup>,  
XU Zheng<sup>1,2,3</sup>, WANG Yan-fei<sup>1,2,3</sup>

(1. Hebei Engineering Research Center for Sewage Treatment and Resource Utilization, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Technology Innovation Center of Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Handan Key Laboratory of Urban Water Utilization Technology, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** The transformation of nitrogen in composting process has an important impact on the fertilizer efficiency of composting products. Municipal sludge and mushroom residue were mixed with the wet weight ratio of 1:0.7 and then aerobic composted for 26 days. Three piles with different ventilation rates, namely pile A [ $2.4 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ], pile B [ $2.9 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ] and pile C [ $3.3 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ], were set to investigate the effect of ventilation rate on the transformation of nitrogen-containing organic matter and

基金项目: 河北省重点研发计划项目(18273806D); 河北省创新能力提升计划项目(20567646H); 邯郸市科学技术研究与  
与发展计划项目(20312904004)

$\text{NH}_3$  volatilization during composting. After composting, the total nitrogen loss rate of the 3 piles (A, B and C) ranged from 16.90% to 25.10%, and the proportion of  $\text{NH}_3$  volatilization in total nitrogen loss ranged from 68.49% to 72.97%. In pile B, more  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  was transformed into  $\text{NO}_3^--\text{N}$ , and the  $\text{NO}_3^--\text{N}$  of pile B was increased by 30.31% and 8.98% compared with that of pile A and pile C, respectively. The structural equation model showed that amine nitrogen (AN) was most easily transformed into  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  under different ventilation rates. When the ventilation rate was  $2.9 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , the microorganism was more active, which promoted the accumulation of amino sugar nitrogen (ASN). In addition,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  was transformed into non-biodegradable hydrolysable unknown nitrogen (HUN), which increased the fixation of nitrogen. Considering both maturity conditions and nitrogen loss, the optimum ventilation rate was  $2.9 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ .

**Key words:** municipal sludge; aerobic composting; ventilation rate; transformation of nitrogen

随着我国城镇污水处理设施建设的快速发展,市政污泥产量不断增加。以市政污泥为原料进行好氧堆肥,将其转化为腐熟无害的肥料,可以有效利用污泥中的氮、磷、钾和有机物等营养成分,且具有操作简单、成本低廉等优点。氮素作为植物生长所必需的营养元素,堆肥中如何降低其损失、实现高效固定直接影响堆肥产品的质量。堆肥中氮的损失主要是由于氨挥发、转化及无机氮的转化等造成的,其中氨挥发导致的氮素损失占总氮损失的绝大部分<sup>[1]</sup>。污泥堆肥中90%的氮以有机氮形式存在,在氨排放中起主导作用<sup>[2]</sup>,有机氮组分随着氮的损失发生复杂转化。因此,探明有机氮向 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的转化及氨转化路径,对减少堆肥过程中 $\text{NH}_3$ 的挥发和氮素损失、优化堆肥工艺参数等具有积极意义。

当前关于氮素转化和 $\text{NH}_3$ 挥发损失的研究主要集中在无机氮方面<sup>[3]</sup>,关于有机氮组分对 $\text{NH}_3$ 挥发的影响研究较少。功能菌群通过生物酶作用对有机氮的转化及氨的合成起决定作用<sup>[4-5]</sup>,pH、温度、通风速率等直接影响微生物的代谢过程和酶的活性,其中通风速率的影响尤为显著且易于控制,适当的通风速率有助于减少氮素损失<sup>[6-7]</sup>。笔者以市政污泥和蘑菇渣为原料进行好氧槽式堆肥,研究通风速率对堆体理化性质、氮形态和有机氮组分转化的影响,分析不同有机氮组分对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 生成的贡献,为提高堆肥成品质量及减少市政污泥堆肥过程中臭气的二次污染、氮素损失和优化通风参数提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验污泥为某污水厂的脱水污泥,蘑菇渣取自

周边蘑菇种植基地,污泥与粉碎后的蘑菇渣按湿质量比为1:0.7混合均匀,堆肥原料理化性质见表1。

表1 原料理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of raw materials

项目	含水率/%	有机质/%	总碳/%	总氮/%	C/N	pH
市政污泥	80.39	71.27	18.54	2.04	9.09	7.89
蘑菇渣	46.88	55.00	30.80	0.78	39.49	6.95
混料	70.00	57.70	23.08	1.13	20.42	7.80

注:“a”表示基于干物质质量的测定值。

### 1.2 试验方案

在阳光棚下搭建槽式堆肥装置进行好氧堆肥试验,试验装置如图1所示。

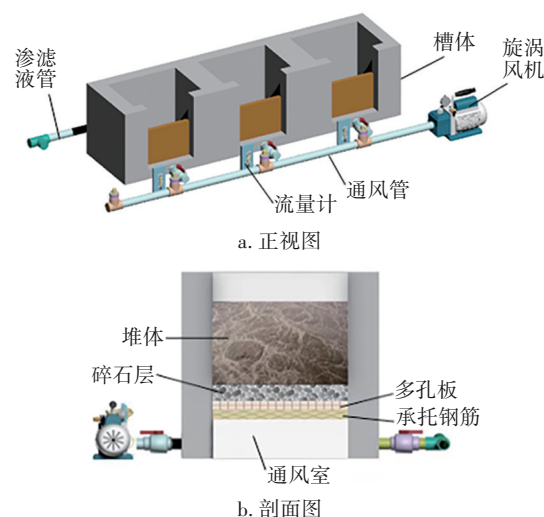


图1 堆肥装置示意

Fig.1 Schematic diagram of composting device

单个堆肥槽的尺寸为长×宽×高=1 m×1 m×1.3

m,堆体高度为70 cm,下部通风室高度约为30 cm,通风室上部安装钢筋作为支撑,承托钢筋上铺设多孔板及粒径为5 cm的碎石层(厚度为10 cm)使布气均匀。试验设置3个堆体(A、B、C),采用旋涡风机进行强制通风,由流量计控制通气量分别为1.7、2.0、2.3 m<sup>3</sup>/h,通风速率分别为2.4、2.9、3.3 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)。采用间歇式通风方式,每小时开20 min、关40 min,每日定时测定堆体和环境温度。

### 1.3 样品采集与指标测定

堆肥过程中,以堆体填充当天记为第0天,分别于第0、2、4、6、9、12、16、19、22、26天从堆体混合取样约200 g,样品分为两份,一份于4℃冷藏用来测定NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量,一份风干研磨后过筛用于TN、有机氮组分的测定。

温度采用温度计测定;氨气采用通气法收集<sup>[8]</sup>,采用纳氏试剂法测定;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N按照《土壤硝态氮的测定 紫外分光光度法》(GB/T 32737—2016)测定;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N按照《土壤农化分析》(第2版)中氯化钾浸提靛蓝比色法测定;总氮采用元素分析仪测定;有机氮及其组分采用Bremner酸解法<sup>[9]</sup>测定;总氮损失率( $N_{\text{损失率}}$ )根据堆肥过程中灰分绝对量不变计算<sup>[10]</sup>,见式(1)。

$$N_{\text{损失率}} = (N_0 - H_0/H_1 \times N_1) / N_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: $N_0$ 、 $N_1$ 分别为堆肥初始和结束时总氮质量分数,%; $H_0$ 、 $H_1$ 分别为堆肥初始和结束时灰分质量分数,%。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆肥过程中温度的变化

堆肥过程中温度的变化见图2。堆肥过程中各堆体的温度均呈现先升后降并逐渐趋于稳定的变化趋势。第2天各堆体均进入高温分解阶段(堆体温度>50℃),A、B、C堆体分别达到最高温度(59、66和61℃),其中B堆体的温度最高,可见适宜的通风速率有利于好氧微生物的生命活动。在整个堆肥过程中,A、B、C堆体温度在50℃以上的持续天数分别为10、12和10 d,均符合《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—2012)的要求。堆肥积温可反映堆体中微生物的生命活动,可用作衡量堆肥稳定化过程。在堆肥前10 d,A、B、C堆体的堆肥积温分别为4 632、5 400和5 136℃·h,可见B堆体的堆肥积温最高,说明在B通风速率下微生物的生长代谢活动

较活跃。

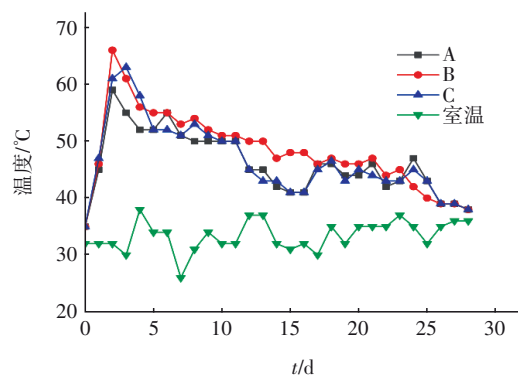
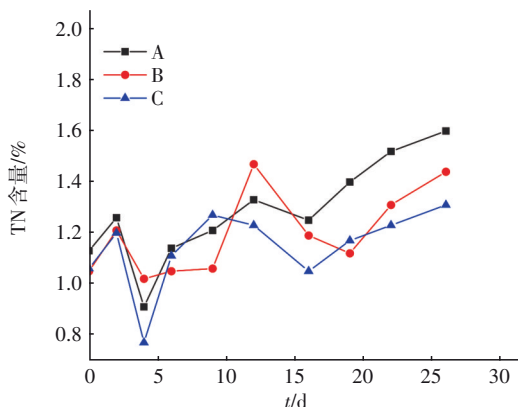


图2 堆肥过程中温度的变化

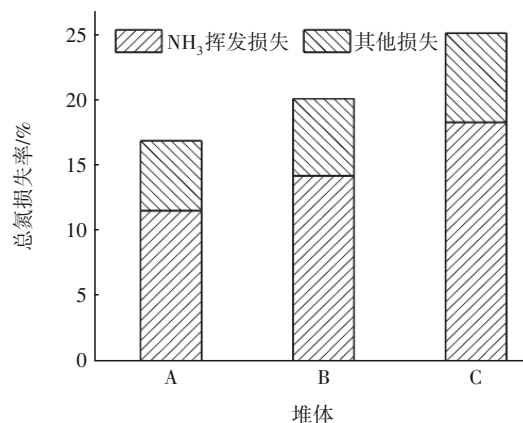
Fig.2 Change of temperature during composting

### 2.2 堆肥过程中TN的变化

堆肥过程中各堆体TN含量和总氮损失率的变化如图3所示。



a. TN 含量



b. 总氮损失率

图3 堆肥过程中各堆体TN含量和总氮损失率的变化

Fig.3 Change of TN content and total nitrogen loss rate in different piles during composting

由图3可知,整体上TN含量呈先下降后上升的变化趋势。堆肥初期,由于堆体温度升高导致氨挥

发及有机氮矿化造成大量氮损失使TN含量下降,随着堆肥时间的增加,干物质浓缩效应大于氮素的矿化作用后TN含量出现上升。堆肥完成时,A、B、C堆体的TN含量分别上升至1.60%、1.44%和1.31%,总氮损失率分别为16.90%、20.12%和25.10%。A堆体通风速率下总氮损失率最小,对比图2可知,B堆体和C堆体下的通风速率提高了堆肥积温,因此堆肥过程中要控制合理的通风速率,在减少氮素损失的同时促进堆肥过程中微生物的代谢活性。

## 2.3 堆肥过程中无机氮的变化

### 2.3.1 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化

堆肥过程中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的变化见图4。

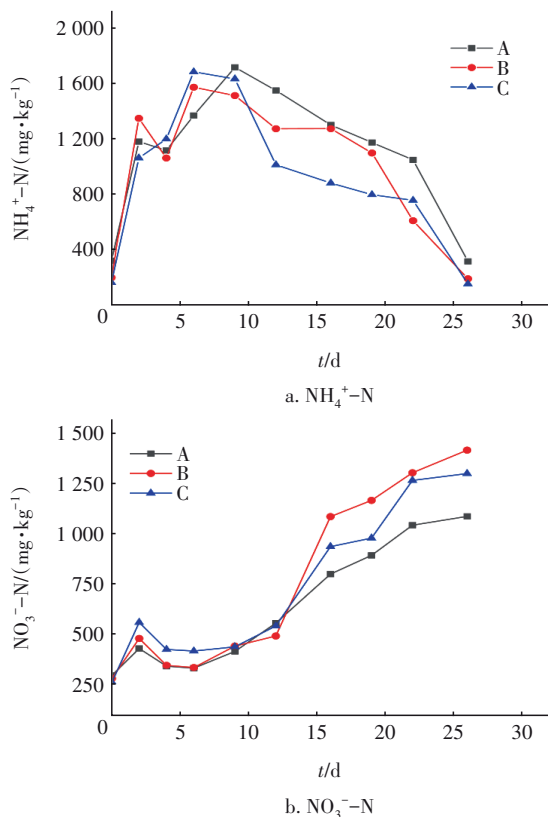


图4 堆肥过程中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的变化

Fig.4 Change of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen contents during composting

B堆体和C堆体的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在堆肥前期急速上升,第6天时分别达到峰值1574.55和1686.00  $\text{mg}/\text{kg}$ ,A堆体在第9天达到最高值1718.98  $\text{mg}/\text{kg}$ 。分析认为,有机氮的矿化造成  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量升高,随着可降解有机氮减少和堆体温度的下降,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在硝化细菌作用下不断转化为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,从而使  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量下降,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量增加。至堆肥结束时,A、B、

C堆体的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量分别为1087.94、1417.72和1300.94  $\text{mg}/\text{kg}$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量分别为315.09、189.75和152.47  $\text{mg}/\text{kg}$ 。相比  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的峰值,C堆体通风速率下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  损失率最大,而B堆体通风速率下  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  积累量更多,说明B堆体通风速率下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  向  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  转化得更多,硝化作用更强。

### 2.3.2 $\text{NH}_3$ 的挥发情况

堆肥过程中  $\text{NH}_3$  的挥发情况如图5所示。

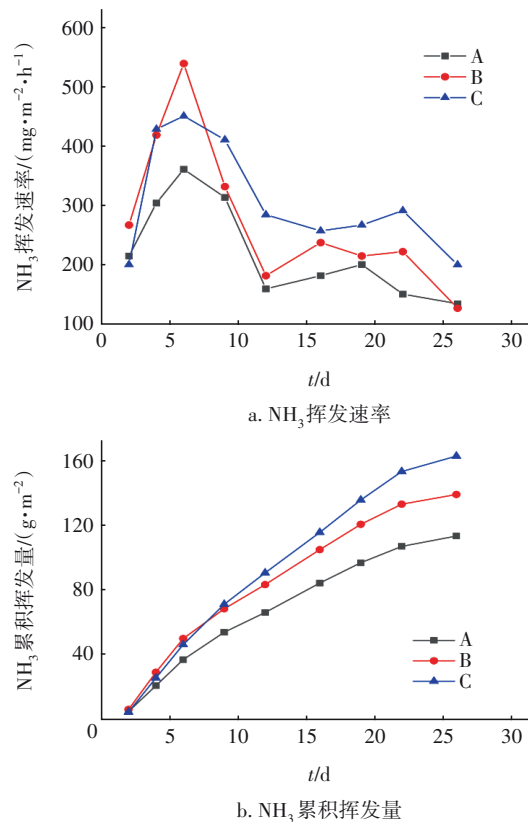


图5 堆肥过程中  $\text{NH}_3$  的挥发情况

Fig.5 Ammonia volatilization during composting

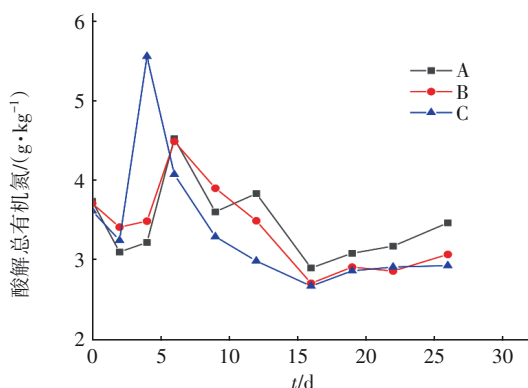
由图5(a)可知,堆肥初期,A、B、C堆体  $\text{NH}_3$  的挥发速率迅速增加,均在第6天达到最大值,分别为360.41、539.12和450.47  $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,其中B堆体的  $\text{NH}_3$  挥发速率最大,这是由于其堆温较高导致含氮有机物矿化速率更快。由图5(b)可知,C堆体的累积挥发量最大为163.33  $\text{g}/\text{m}^2$ ,相比B堆体增加了17.06%,相比A堆体增加了43.54%。A、B、C堆体  $\text{NH}_3$  挥发造成的氮损失占总氮损失的比例分别为68.49%、70.76%和72.97%,说明氮素损失大部分是由于  $\text{NH}_3$  挥发造成的,且通风速率越高损失率越大。

## 2.4 堆肥过程中酸解有机态氮及其组分的转化

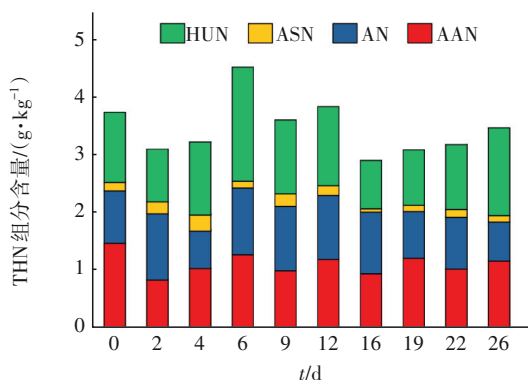
Bremner<sup>[9]</sup>将有机氮分为酸解有机氮(THN)和



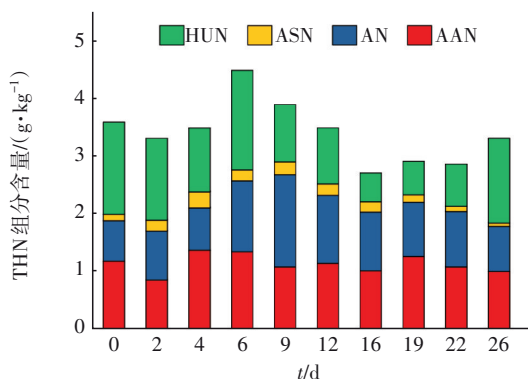
非酸解有机氮(UTHN),其中酸解有机氮包括氨基酸态氮(AAN)、氨基糖态氮(ASN)、酸解氨态氮(AN)和酸解未知态氮(HUN)。试验过程中,各堆体THN含量及组分的变化如图6所示。由图6(a)可知,堆肥前2 d微生物代谢的有机氮主要为易利用的THN,因而其含量下降。随着堆肥的进行,UTHN被微生物分解利用转化为THN,使A、B、C堆体的THN含量分别达到最大值4.52、4.49、5.56 g/kg。堆肥后期,THN逐渐被微生物分解利用导致其含量减少,堆肥结束时A、B、C堆体的THN相比初始状态分别减少了7.57%、17.25%和20.06%,说明较低通风速率下堆体THN损失较小。



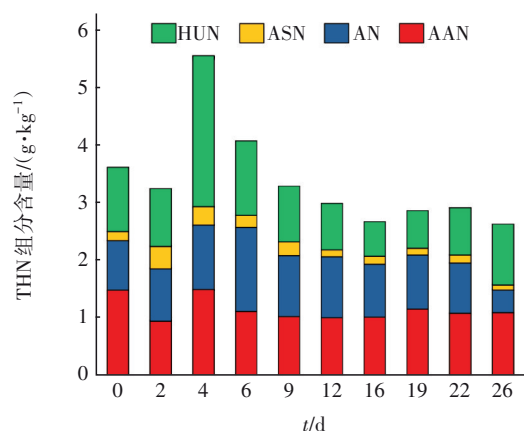
a. 各堆体THN含量变化



b. A堆体THN各组分含量变化



c. B堆体THN各组分含量变化



d. C堆体THN各组分含量变化

图6 堆肥过程中各堆体THN含量及组分变化

Fig.6 Change of THN content and components during composting

不同堆体中AAN含量占THN的比例介于25%~45%。堆肥初期,各试验组AAN含量迅速下降,A、B、C堆体AAN含量在第2天分别达到最小值0.82、0.85和0.94 g/kg,损失率分别为43.84%、27.97%和36.49%。分析原因为微生物对氨基酸态物质的分解、利用及在酶作用下向AN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化;随着堆肥的进行,由于有机质的降解及干物质的浓缩效应使得AAN含量上升。至堆肥结束时,A、B、C堆体AAN的损失率分别为21.23%、15.25%和26.35%,表明B堆体通风速率下AAN的损失小,其减少了 $\text{NH}_3$ 损失,增强了对氮的固定。

不同堆体中AN含量占THN的比例为15%~40%。堆肥初期(0~10 d),A、B、C堆体分别于第6、9、6天达到最大值1.16、1.60和1.46 g/kg,增幅分别为27.47%、128.57%和69.70%。B堆体AN含量显著高于A堆体和C堆体,说明B堆体下的通风率更能促进AAN和ASN向AN转化以及大分子含氮有机物的降解,使AN含量迅速上升。堆肥结束时,A堆体和C堆体的AN含量分别减少了25.27%、54.65%,而B堆体增加了10.26%,可知C堆体的AN含量损失最大,这是因为其氨气挥发损失最大,促进了矿化作用;B堆体后期AN含量的损失小于前期的增长,所以堆肥结束时AN含量相对于堆肥开始时有小幅上升。

ASN对氮循环过程中的微生物活性具有指示作用<sup>[11]</sup>。不同堆体中ASN占THN的比例介于2%~5%,A、B、C堆体ASN含量在第4、4、2天分别达到最大值0.28、0.28和0.38 g/kg,增长率分别为86.67%、

154.55%和143.75%。这是因为堆肥初期易降解有机物充足,微生物代谢活跃,ASN含量迅速增加,其中B堆体增长幅度最大,认为该通风速率下堆体中的微生物量更丰富,代谢速率更高,促进了ASN的积累。随着有机质的不断降解和堆体温度的下降,微生物量逐渐下降,导致ASN含量不断下降。

HUN的成分尚未清楚,其是THN中难以矿化的组分。不同堆体中HUN占THN的比例约为20%~50%。堆肥结束时,A堆体HUN含量高于B、C堆体,相比堆肥初始状态增长了25.49%,说明A堆体的通风速率有利于HUN的固定。

## 2.5 堆肥过程中氮素转化的相关性分析

结构方程模型(SEMs)是将不同因子之间相互

作用关系可视化的有效方法<sup>[12]</sup>。本研究采用SEMs分析堆肥过程中有机氮组分和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 之间的转化关系,通过相关性系数的大小判断转化的相关性。因果关系基于以下假设:①AN可以水解为AAN和ASN,AAN和ASN之间可以相互转化;②HUN和AN、ASN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 之间可以转化。SEMs分析得到的3个模型的拟合指数如图7所示(红色和蓝色箭头分别表示正相关和负相关,灰色箭头表示无显著关系,箭头上的数字是标准化路径系数,指示关系的影响大小;\*表示 $P<0.05$ ,\*\*表示 $P<0.01$ ,\*\*\*表示 $P<0.001$ ),均符合拟合的要求( $\chi^2/\text{df}<2$ , $P>0.05$ , $\text{GFI}>0.950$ , $\text{CFI}>0.900$ , $\text{RMSEA}<0.05$ ),表明本试验中有机氮组分的转化可用结构方程模型阐明。

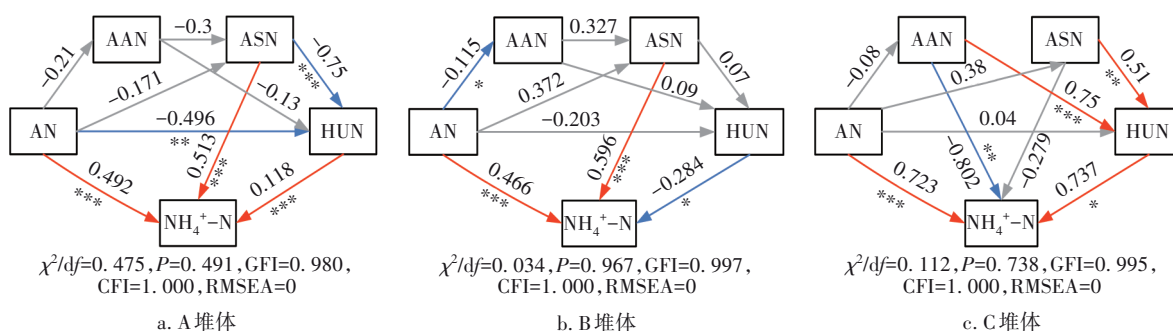


图7 堆肥过程中有机氮组分向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of organic nitrogen components transforming into  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  during composting

A堆体和B堆体中AN、ASN与HUN的转化对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的生成有显著的直接

影响,具体见表2,而C堆体中AN、AAN、HUN对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 产生显著的直接

表2 堆肥过程中有机氮组分向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化的影响

Tab.2 Effects of organic nitrogen components transforming into  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  during composting

酸解有机氮组分	直接影响			间接影响			总影响		
	A堆体	B堆体	C堆体	A堆体	B堆体	C堆体	A堆体	B堆体	C堆体
AAN	0.000	0.000	-0.802	-0.218	0.167	0.488	-0.218	0.167	-0.314
ASN	0.513	0.596	-0.279	-0.167	0.175	0.378	0.346	0.771	0.099
AN	0.492	0.466	0.723	-0.058	0.058	0.065	0.434	0.524	0.788
HUN	0.118	-0.284	0.737	0.000	0.000	0.000	0.118	-0.284	0.737

A堆体中有机氮组分对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 生成的影响依次是AN(0.434)>ASN(0.346)>HUN(0.118)>AAN(-0.218),且HUN通过影响AN和ASN对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化产生间接影响而降低了AN和ASN向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化。B堆体中有机氮组分对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 生成的影响为ASN(0.771)>AN(0.524)>AAN(0.167)>HUN(-0.284),说明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向难以矿化的HUN转化,增加氮素固定。且AAN通过影响AN转化对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的生成产生间接影响,从而促进其向AAN的转化及

ASN的积累。C堆体有机氮组分对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 生成的影响为AN(0.788)>HUN(0.737)>ASN(0.099)>AAN(-0.314),相比A、B堆体,C堆体的通风速率条件明显提高了AN和HUN向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化,可见更大的通风速率使难以矿化的HUN转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。B通风速率促进了ASN的积累,通过HUN的合成增加了对堆肥物料中氮素的固定。

## 3 结论

① 通风速率越低总氮损失率和 $\text{NH}_3$ 挥发量越

小,堆肥结束时A、B和C堆体的总氮损失率分别为16.90%、20.12%和25.10%,其中氨挥发分别占总氮损失的68.49%、70.76%和72.97%。B通风速率下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化更多,堆肥结束时,B堆体 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量相比A堆体和C堆体分别增加了30.31%和8.98%。

② 3个通风速率下AN和HUN容易转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,通风速率为 $3.3\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 时明显提高了AN和HUN向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化,增大了氨挥发形式的氮素损失;通风速率为 $2.9\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 时,堆肥积温最高,微生物更活跃,有利于ASN的积累,且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为难以矿化的HUN增加了氮素的固定;当通风速率为 $2.4\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 时,AN和ASN可转化为HUN,从而减少向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化。兼顾腐熟状态和氮素损失,确定最佳通风速率为 $2.9\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 。

#### 参考文献:

- [1] CHANG R X, GUO Q Y, CHEN Q, *et al.* Effect of initial material bulk density and easily-degraded organic matter content on temperature changes during composting of cucumber stalk [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 80(6): 306–315.
- [2] CHEN M L, WANG C, WANG B R, *et al.* Enzymatic mechanism of organic nitrogen conversion and ammonia formation during vegetable waste composting using two amendments [J]. *Waste Management*, 2019, 95: 306–315.
- [3] 卢月,徐建玲.堆肥的温室气体排放和氮素转化进展研究[J].*环境科学与管理*,2019,44(5):57–60.  
LU Yue, XU Jianling. Research progress on greenhouse gas emission and nitrogen transformation during composting [J]. *Environmental Science and Management*, 2019, 44 (5): 57–60(in Chinese).
- [4] CHEN M L, HUANG Y M, WANG C, *et al.* The conversion of organic nitrogen by functional bacteria determines the end-result of ammonia in compost [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 299:122599.
- [5] ZHU L J, ZHAO Y, ZHANG W S, *et al.* Roles of bacterial community in the transformation of organic nitrogen toward enhanced bioavailability during composting with different wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 285:12316.
- [6] CHANG R X, LI Y M, CHEN Q, *et al.* Effects of carbon-based additives and ventilation rate on nitrogen loss and microbial community during chicken manure composting[J]. *PLoS ONE*, 2020, 15(9):e0229880.
- [7] 聂二旗,郑国砥,高定,等. 适量通风显著降低鸡粪好氧堆肥过程中氮素损失[J]. *植物营养与肥科学报*, 2019,25(10):1773–1780.  
NIE Erqi, ZHENG Guodi, GAO Ding, *et al.* Moderate intensity of ventilation can significantly reduce nitrogen loss during aerobic composting of chicken manure [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10): 1773–1780 (in Chinese).
- [8] 赵晨阳,魏源送,葛振,等. 连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征[J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2798–2806.  
ZHAO Chenyang, WEI Yuansong, GE Zhen, *et al.* Emissions of greenhouse gas and ammonia from sewage sludge composting by continuous aerated turning pile [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2798–2806 (in Chinese).
- [9] BREMNER J M. *Organic Forms of Nitrogen* [M]. Madison: American Society of Agronomy, 1965: 1238–1255.
- [10] PAREDES C, ROIG A, BERNAL M P, *et al.* Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2000, 32(3):222–227.
- [11] 李仰征,李兰,王小二,等. 地表覆被等环境条件对黔西北土壤有机氮组分的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2020,22(10):157–166.  
LI Yangzheng, LI Lan, WANG Xiaor, *et al.* Effects of environmental factors such as surface cover on soil organic nitrogen composition in northwestern district of Guizhou [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020,22(10):157–166 (in Chinese).
- [12] ZHOU H X, ZHAO Y, YANG H Y, *et al.* Transformation of organic nitrogen fractions with different molecular weights during different organic wastes composting [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 262: 221–228.

作者简介:李思敏(1968– ),男,陕西乾县人,博士,教授,研究方向为污废水处理理论与技术。

E-mail:chyeli@126.com

收稿日期:2021-10-11

修回日期:2021-11-06

(编辑:任莹莹)