

# 水葫芦高温堆肥过程中氮素损失及控制技术研究

王海候<sup>1,3</sup>, 沈明星<sup>1,3</sup>, 常志州<sup>2,3\*</sup>, 陆长婴<sup>1,3</sup>, 陈凤生<sup>1,3</sup>, 施林林<sup>1,3</sup>, 宋浩<sup>1,3</sup>

(1.江苏太湖地区农业科学研究所,江苏 苏州 215155;2.江苏省农业科学院资源与环境研究所,南京 210014;3.农业部苏州水稻土生态环境重点野外科学观测试验站,江苏 苏州 215155)

**摘要:**为减少水葫芦高温堆肥过程中氮素损失,采用静态高温好氧堆肥的方法,分析了水葫芦堆肥过程中氮素转化规律,研究了添加化学保氮剂对减少堆肥中氮素损失的效果。结果表明,水葫芦堆肥过程中总氮及有机氮含量均呈上升趋势,铵态氮与硝态氮含量均呈先上升后下降的趋势,总氮损失率为12.84%。水葫芦堆肥过程中氮素损失途径主要为以 $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 等气态形式逸出,其中堆肥前10 d是 $\text{NH}_3$ 挥发的高峰期,堆制后第5~9 d的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率最大,添加化学保氮剂对水葫芦堆肥过程第4~10 d的氮挥发具有显著的抑制作用, $\text{NH}_3$ 挥发量可减少23.82%,另外,化学保氮剂处理降低了堆制后第0~5 d的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率,增加了第9 d以后的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率,使用化学保氮剂原位控制水葫芦堆肥过程的氮素损失具有较好的效果,与常规对照相比,化学保氮剂对水葫芦堆体的保氮效率为32.70%。

**关键词:** 水葫芦; 高温堆肥; 氮素损失; 保氮剂

中图分类号: S141.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)06-1214-07

## Nitrogen Loss and Technique for Nitrogen Conservation in High Temperature Composting of Hyacinth

WANG Hai-hou<sup>1,3</sup>, SHEN Ming-xing<sup>1,3</sup>, CHANG Zhi-zhou<sup>2,3\*</sup>, LU Chang-ying<sup>1,3</sup>, CHEN Feng-sheng<sup>1,3</sup>, SHI Lin-lin<sup>1,3</sup>, SONG Hao<sup>1,3</sup>

(1. Taihu Research Institute of Agricultural Sciences, Suzhou 215155, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Key Scientific Observation & Experiment Station Paddy Field Eco-environment, Suzhou, Ministry of Agriculture, Suzhou 215155, China)

**Abstract:** This study aimed at investigating the mechanism of nitrogen loss and effect of ammonia-fixing synergist on reducing nitrogen loss in high temperature composting of hyacinth. An aerated static pile compost system was employed to compost the hyacinth. The results showed that both of the total N and org-N increased during composting process, while the  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  increased during 0~3 d of composting, then decreased. At the end of composting, total N loss accounted for 12.84%. Main ways of nitrogen loss during the composting process were volatilization in the form of ammonia( $\text{NH}_3$ ) and nitrous oxide( $\text{N}_2\text{O}$ ). The maximum release rate of  $\text{NH}_3$  was observed during the first 10 d of composting, while the maximum  $\text{N}_2\text{O}$  emission rate was observed at 5~9 d. The main role of ammonia-fixing synergist in reducing nitrogen loss was the reduction of  $\text{NH}_3$  volatilization during 4~10 d and the amount of  $\text{NH}_3$  volatilization decreased by 23.80%. When treated with ammonia-fixing synergist, the  $\text{N}_2\text{O}$  emission rate increased during the first 5 d, while decreased after 9 d of composting. The effect of adding ammonia-fixing synergist in nitrogen conservation was better than the control group and the nitrogen conservation ratio was 32.70%.

**Keywords:** hyacinth; high temperature composting; nitrogen loss; ammonia-fixing synergist

水葫芦具有极强的富集水体氮磷养分的能力,可在短期内迅速将氮磷养分吸收到体内,从而达到净化水体的目的,国内外已有许多应用水葫芦控制性种养

技术去除水体富营养化的研究报道<sup>[1-3]</sup>,但是,在这一技术体系中,水葫芦的后续利用是最关键的环节,决定着这一技术的应用前景。由于水葫芦植株富含氮磷钾养分,是良好的有机物料,采用高温好氧堆肥方法,可实现水葫芦的无害化、减量化、资源化利用。然而,高温好氧堆肥过程中氮素容易损失,其损失途径主要是铵态氮转化为氨气挥发,少量随水溶液流失,以及经硝化或反硝化作用引起的 $\text{NO}_3^-$ 排放,这不仅降低了堆肥的养分,而且带来了恶臭和酸雨等环境问题。因

收稿日期: 2010-12-11

基金项目: 科技部支撑计划(2009BAC63B02); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(10)228); 苏州市应用基础项目(SYN201010) 苏州市社会发展项目(SS201025)

作者简介: 王海候(1979—)男,江苏启东人,硕士,助研,主要从事农业资源与环境研究。E-mail: wanghaihou@126.com

\* 通讯作者: 常志州 E-mail: czhizhou@hotmail.com

此,控制堆肥过程氮素损失一直是国内外学者的研究热点<sup>[4-6]</sup>。目前控制方法主要有2种:一是改变工艺条件,如适量的通风、控温、加湿等;二是添加吸附材料或富碳物料、或者添加与释放氨进行反应的化学试剂、以及添加保氮除臭的微生物菌剂等<sup>[7]</sup>。

近年来,一些学者利用鸟粪石结晶反应原理,通过添加镁盐,去除和回收污水、垃圾渗滤液中的氮和磷<sup>[8-11]</sup>,不仅能达到污水处理的目的,而且能有效保护和节约有限的自然资源。将鸟粪石结晶反应应用于好氧堆肥过程,通过添加镁盐和磷盐使 $\text{NH}_3$ 在堆肥中以磷酸铵镁结晶( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )的形式沉淀下来,可有效减少堆肥过程 $\text{NH}_3$ 的挥发<sup>[12-13]</sup>。因此,有关利用化学保氮剂控制堆肥过程氮素损失的研究报道较多<sup>[14-17]</sup>,但是,绝大多数研究主要针对动物源性畜禽粪便堆肥过程。水葫芦作为水生植物有机物料,其物质组成与动物源性有机物料不尽相同,堆肥过程氮素转化规律及损失特征也可能不同,而有关化学保氮剂对控制水生植物有机物料堆肥过程氮素损失作用效果的报道并不多见。

为此,本文研究了水葫芦高温堆肥过程中氮素转化规律及损失特征,同时,探讨了化学保氮剂对减少水葫芦堆肥过程氮素损失的作用效果,旨在为控制水葫芦堆肥过程氮素损失以及化学保氮剂在水葫芦堆肥生产中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计及实施概况

试验于2010年8月初至9月下旬,在江苏太湖地区农业科学研究所玻璃温房内进行。试验材料:水葫芦(打捞于农科所农田四周池塘)干基含C量38.4%、含N量1.6%、C/N 24。打捞出水的水葫芦(含水率95%),先进行3~5 cm切碎处理,再进行晾晒处理,控制含水率65%~70%。

堆肥于反应器中进行,反应器为立方体形,顶部无盖,底部有均匀分布的通气孔( $\phi=2$  cm),孔面积总和约为底部面积的1/3,反应器箱底装有4个活动轮,轮高25 cm;反应器容积为 $1\text{ m}^3$ (长、宽、高均为1 m),其中一侧壁居中垂直方向均匀分布3个测温孔,其对面侧壁开有可嵌入挡板式出料口(长40 cm,宽30 cm),每个反应器可装入堆料200 kg。

以经晾晒处理后的水葫芦作为堆肥材料,设计添加与不添加(常规对照)化学保氮剂处理,化学保氮剂(质量比 $\text{Mg}(\text{OH})_2:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}=3:12:85$ )投加量占堆体

总重的2%(折合干基占比为8%)<sup>[17]</sup>。重复2次。

堆肥期间于每日9:00—11:00测定堆体温度,每隔7 d左右翻堆1次,根据堆体实际水分适当添加水,保持堆体含水量65%左右,直至试验结束。

### 1.2 样品采集与测定

(1)分别在堆制后0、3、7、14、21、28、35 d采集新鲜堆肥样品1 kg,分成3份。一份于 $105^\circ\text{C}$ 下烘干6 h,测水分;一份鲜样与去离子水为1:10的重量比振荡30 min后过滤,水浸提液测定铵态氮(凯氏定氮法)、硝态氮(紫外分光光度法);一份自然风干,研磨后测定物料的全氮( $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消煮,凯氏氮与硝态氮之和)、有机氮( $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消煮,凯氏氮与铵态氮之差)、灰分含量(马弗炉 $550^\circ\text{C}$ 烘干法)。

(2) $\text{NH}_3$ 挥发强度测定,采用2%硼酸溶液吸收-稀硫酸反滴定法。堆肥开始后,将已知截面面积( $\phi=20$  cm,  $h=30$  cm)且开口向下的圆柱形透明有机玻璃箱安装于堆体上,箱内放入装有50 mL 2%硼酸吸收液的烧杯,箱顶部有一气压平衡孔,与软管连接并向上延伸至2.5 m高,利用硼酸收集塑料箱覆盖范围内挥发的 $\text{NH}_3$ ,每1~2 d用 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸滴定硼酸吸收液1次,并记录硫酸滴定量,直至堆肥结束。每个堆体的 $\text{NH}_3$ 挥发强度测定重复3次。

(3) $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率测定采用静态气体采集箱-气相色谱法<sup>[18-19]</sup>。在堆制后2、5、9、13、16、20、29 d,于早上9:00—11:00,各处理堆体上安装气样采集箱底座,盖上气体采集箱(长20 cm、宽20 cm、高30 cm,内部容积为12 L,取样口位于2/3箱高处),水密封,分别于10、20、30 min后用针筒抽气50 mL,转移至100 mL气样袋,待分析。每个堆体重复3次。利用气相色谱仪(HP6890)测定气样中 $\text{N}_2\text{O}$ 的浓度。 $\text{N}_2\text{O}$ 由ECD(带有 $\text{Ni}^{63}$ 电子捕获检测器,岛津GC-14B气相色谱仪)检测。气体排放通量计算公式如下:

$$F=p \cdot V \cdot (dc/dt) \cdot 273/(273+T)/m$$

式中: $F$ 为被测气体排放速率 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $p$ 为被测气体标准状态下的密度( $\text{N}_2\text{O}$ 为 $1.978\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $V$ 为取样箱顶部空间的体积 $\text{m}^3$ ;  $dc/dt$ 为采样箱内被测气体的浓度变化率;  $T$ 为采样过程中采样箱内的平均温度 $^\circ\text{C}$ ;  $m$ 为堆体干基质量 $\text{kg}$ 。

### 1.3 计算方法

根据堆制腐熟过程中灰分无损失(绝对量不变),推导氮素损失率<sup>[20]</sup>的计算公式:

$$N_{\text{损失率}}(\%)=(N_0-H_0)/(H_n \times N_n)/N_0 \times 100\%$$

式中: $N_0$ 为堆肥为0 d时全氮质量分数(以干基

计), %  $H_0$  为堆肥 0 d 时灰分含量分数, %  $N_n$  为堆肥  $n$  d 时全氮质量分数, %  $H_n$  为堆肥  $n$  d 时灰分质量分数, %。

氮素固定率<sup>[15]</sup>的计算如下:

$$N_{\text{固定率}}(\%) = (N_{\text{CK 损失率}} - N_{\text{处理损失率}}) / N_{\text{CK 损失率}} \times 100\%$$

#### 1.4 数据处理

采用 SPSS13.0 统计分析软件进行数理分析, 采用 Excel 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆肥过程中温度变化

堆温变化反映了堆体内微生物活性的变化, 堆肥初期嗜温性微生物的旺盛代谢, 使堆体温度不断上升, 嗜热性微生物的适宜温度为 45~65 °C, 当堆温升高到 45 °C 以上, 即进入高温阶段, 嗜热性微生物逐渐代替了嗜温性微生物, 根据堆体温度, 堆肥化进程可划分为升温期、高温期、降温期和稳定期 4 个阶段<sup>[21]</sup>。

由图 1 可以看出, 水葫芦堆肥过程的升温阶段很短, 主要经历了高温期、降温期和稳定期 3 个阶段。水葫芦堆制后第 2 d, 温度均上升到 50 °C 以上; 第 7 d 达到最高温度, 2 个处理的最高堆温分别为 64.0、63.0 °C, 堆制后第 23 d, 温度低于 45 °C 进入降温期, 第 30 d 堆体温度维持在 30 °C 左右, 进入稳定期。整个堆肥过程, 化学保氮剂处理与常规对照的温度变化趋势一致, 无明显差异。化学保氮剂处理与常规对照的堆温 50 °C 以上均持续了 15 d 以上, 符合高温堆肥无害化要求。

### 2.2 堆肥过程中不同形态氮素含量变化

堆肥过程中, 物料各形态氮素, 在微生物的作用下, 会发生如有机氮矿化、氨挥发、硝化及反硝化等过程, 都可能会导致氮素的损失。

图 2 为水葫芦堆肥过程中各形态氮素含量的动态变化, 水葫芦堆肥过程总氮及有机氮含量变化均呈上升趋势, 其中高温阶段上升幅度较大。图 2 结果表明, 水葫芦堆肥过程中, 铵态氮与硝态氮含量均于堆制后 0~3 d 迅速增加, 堆制 3 d 后分别达最大值, 之后逐渐降低。其中, 铵态氮含量于堆制后第 14 d 就低于 400 mg·kg<sup>-1</sup>, 无明显的变化, 而硝态氮含量在堆肥降温期与稳定期仍不断下降, 说明堆肥后期硝态氮的损失量较大。

化学保氮剂处理的各形态氮素含量变化见图 2。与常规对照相比, 化学保氮剂处理提高了堆体总氮、有机氮含量, 但差异幅度较小, 在堆肥升温期及高温期, 化学保氮剂处理与常规对照的铵态氮及硝态氮含量的差异较为明显, 堆制后 0~14 d, 化学保氮剂处理提高了水葫芦堆肥体铵态氮含量, 降低了硝态氮含量。

### 2.3 堆肥过程 NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O 排放损失

#### 2.3.1 NH<sub>3</sub> 挥发

根据水葫芦堆肥过程 NH<sub>3</sub> 挥发量测定结果可知, NH<sub>3</sub> 挥发主要集中在堆肥初期的高温阶段, 堆制 10 d 后, 用 2% 硼酸试剂吸收再滴定, 测定值已经很小, 几乎检测不出 NH<sub>3</sub> 挥发量。图 3 结果表明, 水葫芦堆制后第 1 d 即产生 NH<sub>3</sub> 挥发, 0~4 d 的氨挥发量占总量的 34.85%, 4~10 d 的 NH<sub>3</sub> 挥发累积量随着堆制天数的增加, 先快速倍增, 之后增加趋势逐渐平缓, 氨挥发量占总量的 62.71%, 堆制 10 d 后, NH<sub>3</sub> 挥发累积量无明显的增加趋势, 且 10~35 d 的氨挥发仅占总量的 2.44%。

添加化学保氮剂可显著降低水葫芦堆肥过程中的 NH<sub>3</sub> 挥发量, 由图 3 可知, 堆制后 0~4 d, 化学保氮剂处理与常规对照的 NH<sub>3</sub> 挥发量动态变化一致, 堆制第 4 d 后, 化学保氮剂处理的水葫芦堆肥体 NH<sub>3</sub> 挥

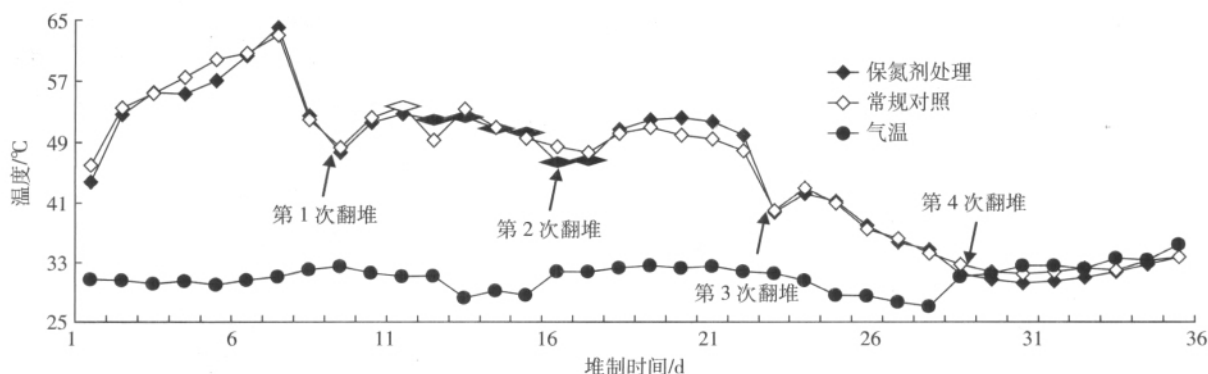


图 1 堆肥过程中温度的变化

Figure 1 Changes in pile temperature during the composting process



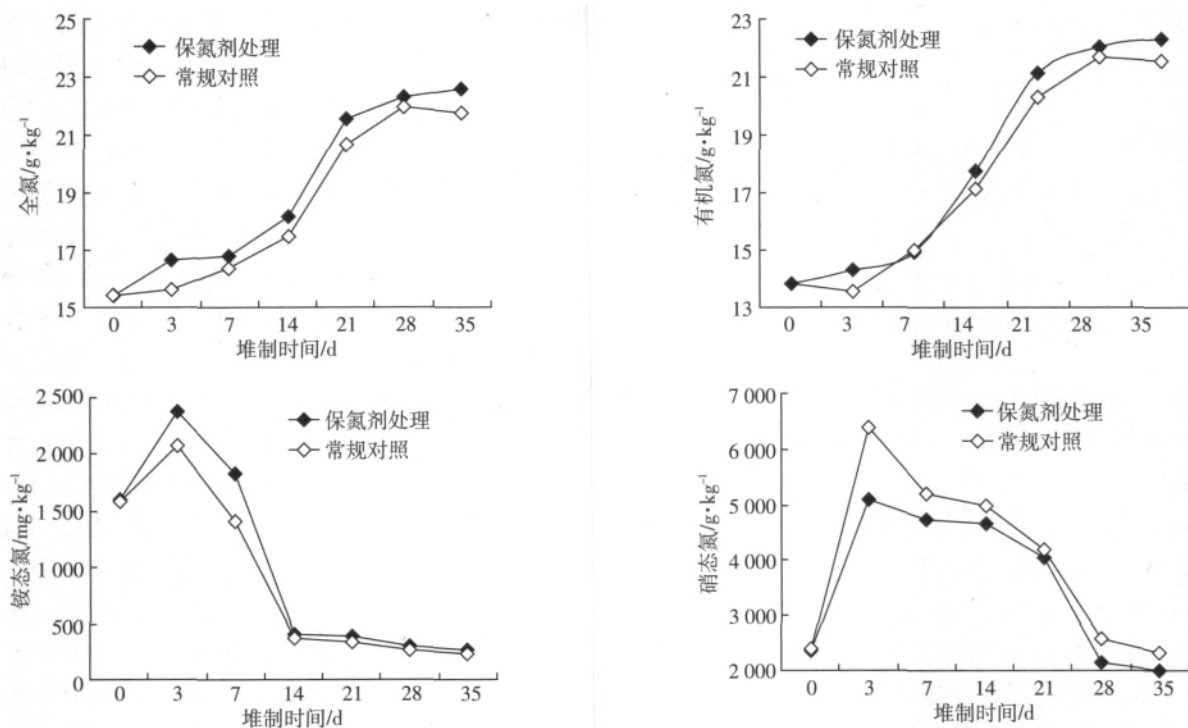


图2 堆肥过程中各形态氮的变化

Figure 2 Changes of different nitrogen forms during composting

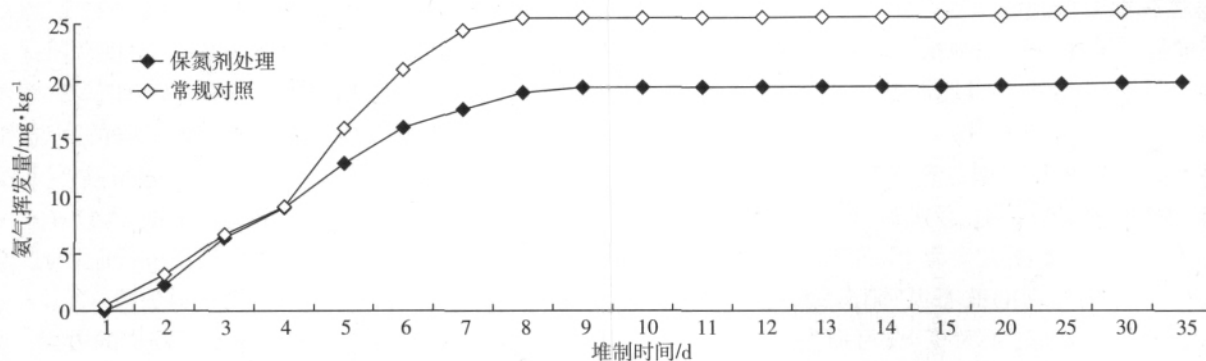


图3 水葫芦堆肥过程中氨累积挥发量的变化

Figure 3 Changes of accumulation of ammonia volatilization during composting of hyacinth

发量明显低于常规对照处理, 成对数据  $T$  检验结果表明, 化学保氮剂处理的  $\text{NH}_3$  挥发累积量与常规对照相比达极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 可见, 添加化学保氮剂对水葫芦堆肥过程第 4~10 d 的氨挥发具有显著的抑制作用。

将  $\text{NH}_3$  累积挥发量与堆肥时间的关系进行曲线拟合分析, 结果表明水葫芦堆肥过程  $\text{NH}_3$  挥发累积量与堆肥时间呈极显著的对数曲线相关, 对数曲线方程分别为

$$y_{\text{处理}} = 9.8388 \ln(x) - 2.6362 \quad (R^2 = 0.9545^{**})$$

$$y_{\text{对照}} = 13.064 \ln(x) - 4.009 \quad (R^2 = 0.9106^{**})$$

根据拟合的曲线方程, 计算水葫芦堆肥过程中每 1 kg 干基的  $\text{NH}_3$  最大累积挥发量, 其中, 常规对照为 42.44 mg, 化学保氮剂处理为 32.33 mg, 化学保氮剂处理下,  $\text{NH}_3$  挥发量可减少 23.82%。

### 2.3.2 $\text{N}_2\text{O}$ 排放

由图 4 可知, 水葫芦堆肥过程  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率呈先上升后下降的变化趋势, 其中, 常规对照的  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率于堆制后第 5 d 达最大值  $145.25 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , 化学保氮剂处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率于堆制后第 9 d 达最大值  $190.55 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 第 10 d 后  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率不断下降, 至第 30 d 左右  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率基本接近于

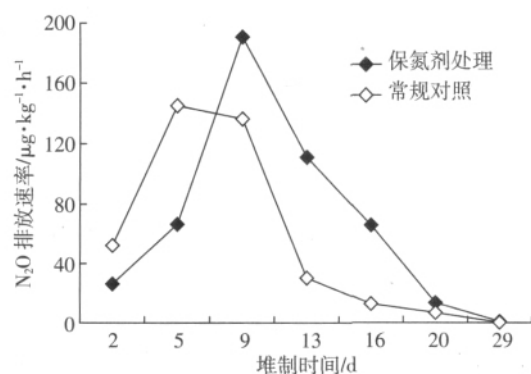


图4 水葫芦堆肥过程中氧化亚氮排放速率的变化

Figure 4 Change of  $N_2O$  emission rate during composting of hyacinth

零,可见,水葫芦堆肥过程中,以 $N_2O$ 形态损失的氮,在堆制后第5~9 d的损失速率最大。

添加化学固氮剂对 $N_2O$ 排放速率具有明显的影响(图4),主要表现为堆制后0~5 d,化学保氮剂处理的 $N_2O$ 排放速率明显低于常规对照;第9 d后,化学保氮剂处理的堆体 $N_2O$ 排放速率则明显高于对照处理。虽然不同处理的 $N_2O$ 排放速率呈相同的变化趋势,但化学保氮剂处理与常规对照相比,延缓了 $N_2O$ 排放过程在堆肥期间的出现时间。

#### 2.4 添加化学保氮剂对控制堆肥氮素损失的效果

本文根据有机物料堆制腐熟过程中灰分无损失的原理<sup>[20]</sup>,计算氮素损失率。表1所示为水葫芦堆肥前后各形态氮素的损失率分析结果,水葫芦常规堆肥过程中,铵态氮、硝态氮、有机氮分别下降89.73%、39.85%、3.99%,总氮损失率为12.84%。

化学保氮剂处理的铵态氮、硝态氮、有机氮分别下降88.24%、47.49%、-0.55%,总氮损失率为8.64%;与常规对照相比,化学保氮剂对水葫芦堆体的固氮效率为32.70%。

表1 堆肥前后各形态氮素的损失率及保氮剂固氮效果

Table 1 Loss percentage of different nitrogen forms and effect of nitrogen conservation during composting

类别	铵态氮/%	硝态氮/%	有机氮/%	总氮/%	固氮效果/%
保氮剂处理	88.24	47.49	-0.55	8.64	32.70
常规对照	89.73	39.85	3.99	12.84	—

### 3 讨论

#### 3.1 水葫芦高温堆肥过程中各形态氮素变化及损失特征

水葫芦常规堆肥过程总氮及有机氮含量变化均呈上升趋势,其中高温阶段上升幅度较大,这可能是

由于有机物的矿化分解, $CO_2$ 的损失而引起的干物质减少,从而造成氮素占比的提高。一般认为堆肥过程中,高温期有机物不断分解,铵态氮含量迅速上升,而硝化细菌生长受抑制,硝态氮含量变化幅度较小;降温期和稳定期的铵态氮转化为硝态氮,铵态氮含量下降,硝态氮含量上升。本试验结果表明,铵态氮与硝态氮含量均于堆制后0~3 d迅速增加,在第3 d分别达最大值,之后逐渐降低,铵态氮与硝态氮含量呈现相同的变化趋势,其原因可能是水葫芦虽然进行切碎处理,但是物料颗粒间隙相对较大,含氧浓度相对较高,提高了硝化作用强度,从而促使硝态氮含量在堆肥初期显著提高;堆肥后期堆体体积不断缩小,物料逐渐紧实,虽然定期翻堆,仍容易形成厌氧环境,同时堆温不断下降,反硝化损失也降低了硝态氮含量。

本试验过程中堆体无渗滤液产生,所以气态形式逸出的氮应是堆肥过程全部的氮损失。水葫芦堆肥过程 $NH_3$ 挥发量测定结果表明, $NH_3$ 挥发主要集中在堆肥初期的高温阶段,水葫芦堆制后第1 d即产生 $NH_3$ 挥发,0~4 d的氮挥发占总量的34.85%,4~10 d的氮挥发占总量的62.71%,10~35 d的氮挥发仅占总量的2.44%; $N_2O$ 排放速率呈先上升后下降的趋势, $N_2O$ 排放高峰主要出现在堆制后的5~9 d。水葫芦堆肥过程中,在堆肥初期的高温阶段,氮素以 $NH_3$ 、 $N_2O$ 等气态形式损失的速率较高,这可能与该阶段的高温环境,使 $NH_3/NH_4^+$ 平衡向生成 $NH_3$ 方向移动和决定 $NH_3$ 的排放,另外, $NH_4^+$ 通过氧化,转化为 $NO_3^-$ , $N_2O$ 是这一过程的副产物,虽然提高堆体含氧量可控制 $N_2O$ 排放,但无法预防来自硝化过程的 $N_2O$ 损失<sup>[22]</sup>。

#### 3.2 添加化学保氮剂控制堆肥氮素损失的效果

堆肥过程中,化学保氮剂对不同来源有机物料的保氮效果存在一定差异。林小凤等以新鲜鸡粪与麦秸作为堆料,添加不同比例的氯化铁、过磷酸钙及其混合物作为保氮剂,结果表明堆肥体总氮、铵态氮、硝态氮都有不同程度的增加,并且保氮效率随着保氮剂添加量的增加而提高,最高可达85%<sup>[15]</sup>。任丽梅等将氢氧化镁和磷酸混合物作为保氮剂应用于鸡粪与麦麸混合堆肥过程,结果表明,堆肥体总氮、铵态氮均有增加,但硝态氮含量几乎接近于 $0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,不同投加量条件下,固氮效率为73.1%~97%<sup>[16]</sup>。本试验结果表明,与对照相比,化学保氮剂处理的总氮、有机氮、铵态氮含量均有增加,但硝态氮含量却降低,除硝态氮含量外,其他形态的氮素含量变化与前人结论一致,硝态氮含量变化的不一致,可能与不同研究报道中所选的

化学保氮试剂类型及堆肥材料的差异性有关。另外,化学保氮剂对水葫芦堆肥过程氮素损失的固定效率32.70%,与动物源性的畜禽粪便固氮效率相比,差异幅度较大。一方面这可能与不同来源的有机物料堆肥过程的氮素损失率不同有关,畜禽粪便堆肥过程的氮素损失率平均为40%以上<sup>[17]</sup>,而水葫芦常规堆肥处理的氮素损失率为12.84%;另一方面可能与保氮剂的试剂类型及投加量不同有关<sup>[15,17]</sup>。

堆肥过程中,化学保氮剂处理的铵态氮、有机氮分别下降了88.24%、-0.55%,总氮损失率为8.64%,其铵态氮含量下降幅度仅比对照低1.49%,有机氮没有下降反而上升。其原因可能是有机氮的分解与铵态氮合成小分子水溶性有机氮是一个可逆的平衡过程,化学保氮剂处理的铵态氮合成作用大于常规对照处理。

化学保氮剂处理由于提供酸性环境,使铵离子不能以氨气的形式挥发。水葫芦堆肥体在高温阶段氨挥发强度较大,添加化学保氮剂对高温阶段的 $\text{NH}_3$ 挥发具有较好的控制效果,这与李冰等研究结论一致<sup>[14]</sup>。添加化学保氮剂对 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率具有明显的影响,化学保氮剂处理降低了堆制后0~5 d的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率,这与化学保氮剂提高了水葫芦堆肥初期的铵态氮含量、降低了硝态氮含量以及整个堆肥过程有机氮没有损失反而增加的结论相吻合,其原因可能是保氮剂固定了铵态氮,铵态氮硝化作用强度减弱,从而进一步减少了由硝化作用而产生的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放;另外,化学保氮剂处理提高了第9 d之后的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率,这可能与本试验所添加的化学保氮剂的组分比例与使用量兼顾了经济效益有关<sup>[17]</sup>。堆制一定天数以后铵态氮转化与有机氮的分解基本达到平衡,其后平衡被打破,有机氮分解占主导地位<sup>[16]</sup>,从而导致化学保氮剂处理在该时间段的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率大于常规对照。

## 4 结论

(1)水葫芦堆肥过程中,堆温变化明显呈现出高温期、降温期和稳定期3个阶段,整个堆肥过程,化学保氮剂处理与常规对照相比,温度变化趋势一致,无明显差异;两处理的堆温都在50℃以上持续了15 d以上,符合高温堆肥无害化要求。

(2)水葫芦堆肥过程中总氮及有机氮含量均呈上升趋势,铵态氮与硝态氮含量均呈先上升后下降的趋势,与初始阶段相比,堆肥结束后铵态氮、硝态氮、有机氮分别下降了89.73%、39.85%、3.99%,总氮损失率

为12.84%。

(3)水葫芦堆肥过程中,氮素损失主要以 $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 等气态形式逸出,其中 $\text{NH}_3$ 挥发主要集中在堆肥初期的10 d内, $\text{N}_2\text{O}$ 排放高峰主要出现在堆制后的第5~9 d,添加化学保氮剂对水葫芦堆肥过程第4~10 d的氨挥发具有显著的抑制作用, $\text{NH}_3$ 挥发量可减少23.82%;添加化学保氮剂对 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率具有明显的影响作用,化学保氮剂处理降低了堆制后第0~5 d的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率,提高了第9 d以后的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率。

(4)添加化学保氮剂处理的总氮损失率为8.64%,与常规对照相比,化学保氮剂对水葫芦堆体的保氮效率为32.70%,因此,采用质量比 $\text{Mg}(\text{OH})_2:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}=3:12:85$ 的混合物作为化学保氮剂、投加量占堆体总重的2%(折合干基占比为8%)对原位控制水葫芦堆肥过程的氮素损失具有一定的效果,但是本研究使用的保氮剂的组分比例及使用量是以畜禽粪便堆肥材料为基础的,而以控制水葫芦堆肥过程中氮素损失为目的,其化学保氮剂适宜施用方法还有待于作进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1447-1450.  
TONG Chang-hua, YANG Xiao-e, PU Pei-min. Purification of eutrophicated water by aquatic plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1447-1450.
- [2] Amanda M Nahlik, William J Mitsch. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28: 246-257.
- [3] 郑建初, 常志州, 陈留根, 等. 水葫芦治理太湖流域水体氮磷污染的可行性研究[J]. 江苏农业科学, 2008, 3: 247-250.  
ZHENG Jian-chu, CHANG Zhi-zhou, CHEN Liu-gen, et al. Study on feasibility of hyacinth treating water N and P pollution in the Taihu Lake area[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2008, 3: 247-250.
- [4] Raviv M, Medina S, Karasnovsky A, et al. Conserving nitrogen during composting[J]. *Bio Cycle*, 2002, 43(9): 48.
- [5] JFriis B Beck, Smars S, Jonsson H, et al. Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a composting reactor under different temperature regimes[J]. *Agric Eng Res*, 2001, 78(4): 423-430.
- [6] 李国学, 李玉春, 李彦富. 固体废弃物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 252-256.  
LI Guo-xue, LI Yu-chun, LI Yan-fu. Advance on composting of solid waste and utilization of additives[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2): 252-256.
- [7] 杨延梅, 刘鸿亮, 杨志峰, 等. 控制堆肥过程中氮素损失的途径和方



- 法综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(2) :213-216.
- YANG Yan-mei, LIU Hong-liang, YANG Zhi-feng, et al. Methods and techniques in the control of nitrogen loss during the composting—a review[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2005, 41(2) :213-216.
- [8] De-Bashan Luz E, Bashan Yoav. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997—2003)[J]. *Water Research*, 2004, 38(19) :4222-4246.
- [9] 王绍贵, 张 兵, 汪慧贞. 以鸟粪石的形式在污水处理厂回收磷的研究[J]. 环境工程, 2005, 23(3) :78-81.
- WANG Shao-gui, ZHANG Bing, WANG Hui-zhen. Study on P recovery as guano from wastewater treatment plant[J]. *Environmental Engineering*, 2005, 23(3) :78-81.
- [10] Ganrot Zsofia, DaveGran, NilssonEva. Recovery of N and P from human urine by freezing, struvite precipitation and adsorption to zeolite and active carbon[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(16) :3112-3121.
- [11] Suzuki Kazuyoshi, Tanaka Yasuo, Kuroda Kazutaka. Recovery of phosphorous from swine wastewater through crystallization[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(14) :1544-1550.
- [12] Jeong Yeon-Koo, Kim Jin-Soo. A new method for conservation of nitrogen in aerobic composting processes[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 79(2) :129-133.
- [13] Jeong Yeon-Koo, Hwang Sun-Jin. Optimum doses of Mg and P salts for precipitating ammonia into struvite crystals in aerobic composting[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(1) :1-6.
- [14] 李 冰, 王昌全, 江连强, 等. 化学改良剂对稻草猪粪堆肥氨气释放规律及期腐熟进程的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4) :1653-1661.
- LI Bing, WANG Chang-quan, JIANG Liang-qiang, et al. Effect of chemical amendments on  $\text{NH}_3$  emissions and compost maturity during co-composting of pig manure straw [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4) :1653-1661.
- [15] 林小凤, 李国学, 任丽梅, 等. 氯化铁和过磷酸钙控制堆肥氮素损失的效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4) :1662-1666.
- LIN Xiao-feng, LI Guo-xue, REN Li-mei, et al. Effect of  $\text{FeCl}_3$  and  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  as amendments on reducing nitrogen loss during composting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4) :1662-1666.
- [16] 任丽梅, 贺 琪, 李国学, 等. 氢氧化镁和磷酸固定剂控制堆肥氮素损失的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4) :814-819.
- REN Li-mei, HE Qi, LI Guo-xue, et al. Effect of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  and  $\text{H}_3\text{PO}_4$  amendments on nitrogen conservation during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4) :814-819.
- [17] 任丽梅, 贺 琪, 李国学, 等. 氢氧化镁和磷酸混合添加剂在模拟堆肥中的保氮效果研究及其经济效益分析 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(4) :225-228.
- REN Li-mei, HE Qi, LI Guo-xue, et al. Effect of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  and  $\text{H}_3\text{PO}_4$  amendments on nitrogen conservation during simulated aerobic composting and its benefit analysis[J]. *Transactions of CSAE*, 2008, 24(4) :225-228.
- [18] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. 中国农业气象, 2002, 23(4) :47-52.
- XIE Jun-fei, LI Yu-e. A Review of studies on mechanism of greenhouse gas(CHG) emission and its affecting factors in arable soils[J]. *Chinese Journal of Agro-meteorology*, 2002, 23(4) :47-52.
- [19] 李玉娥, 饶敏杰. 动物废弃物源甲烷排放量的估算与减缓技术选择[J]. 农村生态环境学报, 1995, 11(3) :8-12.
- LI Yu-e, RAO Min-jie. Methane emitted from livestock manure and mitigation technologies[J]. *Rural Eco-Environment*, 1995, 11(3) :8-12.
- [20] 曹喜涛, 黄为一, 常志州, 等. 鸡粪堆制过程中氮素损失及减少氮素损失的机理[J]. 江苏农业学报, 2004, 20(2) :106-110.
- CAO Xi-tao, HUANG Wei-yi, CHANG Zhi-zhou, et al. Mechanism of nitrogen loss and reduction in nitrogen loss during the compost of chicken manure[J]. *Jiangsu of Agr Sci*, 2004, 20(2) :106-110.
- [21] 黄懿梅, 安韶山, 白红英, 等. 鸡粪与不同秸秆高温堆肥中氮素的变化特征 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(11) :53-58.
- HUANG Yi-mei, AN Shao-shan, BAI Hong-ying, et al. Study on nitrogen changes during the composting of chicken manure and different straws under higher temperature[J]. *Jour of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For(nat Sci Ed)*, 2004, 32(11) :53-58.
- [22] 单德鑫, 李淑芬, 许景钢. 固体有机废弃物堆肥过程中氮的转化[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(2) :265-269.
- SHAN De-xin, LI Shu-fen, XU Jing-gang. Nitrogen transformations in solid organic waste composting[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(2) :265-269.