

水葫芦堆肥中N₂O排放特征及其影响因子研究

王海候^{1,3}, 沈明星^{1,3}, 常志州^{2,3}, 陆长婴^{1,3}, 陈凤生^{1,3}, 施林林^{1,3}, 宋浩^{1,3}

(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:为了明确水葫芦堆肥过程N₂O排放的影响因子,为减少水葫芦堆肥过程中N₂O排放提供理论依据,笔者采用静态箱-气相色谱法,研究水葫芦(*Eichhornia crassipes*)堆肥过程中N₂O排放动态,探讨了堆温、C/N、氮素形态、化学保氮剂、翻堆频次对N₂O排放量的影响。结果表明:N₂O日均排放量在水葫芦堆肥后5~10天达最大值,N₂O累积排放量呈对数曲线变化趋势;N₂O日均排放量与堆温、NH₄⁺-N含量成极显著线性正相关,降低堆温、增加C/N比,可以减少水葫芦堆肥过程中N₂O排放量;添加化学保氮剂处理,可以降低水葫芦堆肥过程0~8天的N₂O排放量,但整个堆肥过程的N₂O累积排放量大于对照处理;减少翻堆频次可降低N₂O的排放。

关键词:水葫芦;氧化亚氮;排放量;影响因子

中图分类号:X705

文献标志码:A

论文编号:2011-1967

Study on Characteristics of N₂O Accumulative Emission and Its Influencing Factors in the Composting of Water Hyacinth

Wang Haihou^{1,3}, Shen Mingxing^{1,3}, Chang Zhizhou^{2,3}, Lu Changying^{1,3},

Chen Fengsheng^{1,3}, Shi Linlin^{1,3}, Song Hao^{1,3}

(¹Taihu Research Institute of Agricultural Sciences, Suzhou Jiangsu 215155;

²Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014;

³Key Scientific Observation & Experiment Station of Paddy Field Eco-environment, Suzhou, Ministry of Agriculture, Suzhou Jiangsu 215155)

Abstract: In order to clarify the characteristics of N₂O accumulative emission and its influencing factors, and it will provide the techniques for reducing N₂O accumulative emission in the composting of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). Composting is the common method in handling and using the harvested water hyacinth. However, few studies have been focused on greenhouse gas released from the composting. The objectives of this paper were to study the dynamics of nitrous oxide (N₂O) emission and the effects of different influencing factors such as composting temperature, carbon and nitrogen ratio(C/N), nitrogen forms, ammonia-fixing synergist, and pile-turning frequency on N₂O accumulative emission in the composting of hyacinth by using the static chamber-GC theory with manual method. The results showed that, N₂O daily mean emission reached a maximum during the fifth to tenth days, the N₂O accumulative emission could be fitted into regression model; N₂O daily mean emission were both significantly positive linear correlation to composting temperature and

基金项目:国家支撑计划“水葫芦资源化利用集成技术与工程示范”(2009BAC63B02);江苏省农业科技自主创新资金项目“环太湖地区有机农业生产关键技术创新”(CX(10)228);苏州市应用基础项目“农田内外生物质混合堆肥温室气体排放规律及控制”(SYN201010);苏州市社会发展项目“农村面源污染控制、转性与利用关键技术与示范”(SS201025)。

第一作者简介:王海候,男,1979年出生,江苏启东人,助理研究员,硕士,主要从事农业资源与环境研究。通信地址:215155 江苏省苏州市相城区望亭镇苏州农科院, Tel: 0512-65386740, E-mail: wanghaihou@126.com。

通讯作者:常志州,男,1957年出生,江苏句容人,研究员,博士,主要从事农业固体废弃物资源化技术研究。通信地址:210008 江苏省南京市钟灵街50号 江苏省农业科学院资源与环境研究所, Tel: 025-84390238, E-mail: czhizhou@hotmail.com。

收稿日期:2011-07-07, **修回日期:**2011-09-16。

ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) content, lowering the pile temperature and increasing the C/N could decrease the N₂O accumulative emission in the composting of hyacinth. Adding ammonia-fixing synergist could decrease the N₂O emission during the first 8 days of composting, while the whole N₂O accumulative emission treated with ammonia-fixing synergist was more than the control group. Reducing the pile-turning frequency can decrease the N₂O emission.

Key words: water hyacinth; nitrous oxide; accumulative emission; influencing factors

0 引言

水葫芦(*Eichhornia crassipes*)可大量吸收水体氮、磷,且能富集水体中重金属,因而国内外许多工程将水葫芦选择为修复水体的植物^[1-3]。自2007年起,江苏省有关部门将控制性放养水葫芦作为太湖水体治理的重要措施之一,目前在水葫芦控制性种养、机械化打捞以及资源化利用等方面已取得阶段性成果^[4-6]。但是,如何在发挥水葫芦治理水体污染的同时,减少水葫芦利用中的环境风险,对于这一技术能否推广应用,具有十分重要的影响。

堆肥是水葫芦处理与利用的常用方法,可以实现水葫芦的无害化、减量化、资源化利用,但堆肥过程中会产生并释放大量的气体^[7],包括:CO₂、N₂O、CH₄、H₂S等,其中,N₂O排放既是堆肥物料中氮素的气态损失途径之一,又是大气温室气体重要排放源^[8]。近年来,国内外学者针对堆肥过程中N₂O排放量及影响因子展开了众多研究工作^[9-11],但他们关注的重点是畜禽粪便为材料的堆肥过程。水葫芦作为水生植物,其物质组成与动物源性有机物料不尽相同,堆肥过程N₂O的产生特征与排放规律也可能存在异同。为此,笔者运用静态箱-气相色谱法^[12-13],对水葫芦高温堆肥过程中N₂O累积排放量的变化动态进行研究,并探讨了影响水葫芦堆肥过程N₂O排放的因素,以期控制水葫芦堆肥过程N₂O排放提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验时间、地点

本试验于2010年8月—11月在江苏太湖地区农业科学研究所玻璃温房内进行。

1.2 试验材料

1.2.1 新鲜水葫芦 含水率95%,干基含C量38.4%、含N量1.6%、C/N 24.0,打捞自农科所周围池塘,先进行3~5 cm切碎,然后进行晾晒,将含水量降至65%~70%,备用。

1.2.2 稻草秸秆 含水率20%,干基含C量44.01%、含N量0.68%、C/N比64.72,3~5 cm切碎备用。

1.2.3 化学保氮剂 质量比,Mg(OH)₂:H₃PO₄:H₂O=3%:12%:85%,其中Mg(OH)₂、H₃PO₄均为分析纯,国药集

团化学试剂有限公司生产。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

(1)水葫芦堆肥过程中N₂O排放对C/N比及化学保氮剂的响应。试验设计:设计水葫芦与秸秆不同比例混合,使混合后物料C/N分别为:24、30、35;另外,以经晾晒处理后的纯水葫芦作为堆肥材料,设计添加与不添加(常规对照,C/N为24)化学保氮剂处理,化学保氮剂投加量占堆体总重的2%(折合干基占比为8%)^[14];试验共计4个处理,重复2次。采用堆肥反应器进行堆肥试验,反应器为立方体形,顶部无盖,底部有均匀分布的通气孔(φ=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 m³(长、宽、高均为1 m),其中一侧壁垂直方向均匀分布3个测温孔,其对面侧壁开有可嵌入挡板式出料口(长×宽为40 cm×30 cm),每个反应器可装入含水量65%左右的堆料约200 kg。堆肥期间,每天于9:00—11:00,用长度为60 cm的水银温度计测定堆温,每隔7天翻堆1次。

(2)水葫芦堆肥过程中N₂O排放对翻堆频次的响应。试验设计:翻堆频次设计3个水平,分别为3、7、14天/次,试验共计3个处理,重复2次。试验以3~5 cm切碎,并经晾晒处理后的纯水葫芦作为堆肥材料。试验反应器及操作过程与试验1.3.1(1)相同。堆肥期间,根据试验设计进行翻堆处理,直至试验结束。

1.3.2 样品采样与测定

(1)N₂O取样方法与测定。采用静态气体采集箱-气相色谱法。分别于堆肥开始后2、5、8、13、21、27、35天进行N₂O气体样品采集与监测。于9:00—11:00,各处理反应器上安装气样采集箱底座,将气体采集箱(采样箱由PVC材质制成,外部包有海绵和铝箔纸,防止太阳照射导致箱内温度变化过大,采样箱长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),安放在底座5 cm深的凹槽内,加水密封,分别于10、20、30 min后分别用针筒抽气50 mL,转移至100 mL铝箔气样袋,待分析。每个反应器重复3次。

(2)不同形态氮素测定。分别于堆肥开始后2、5、

8、13、21、27、35天,采集新鲜堆肥样品1 kg,分成3份。1份于105℃下烘干6 h,测水份;1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);1份自然风干,研磨后测定物料的全氮(H₂SO₄-H₂O₂消煮,凯氏氮与硝态氮之和)、有机氮(H₂SO₄-H₂O₂消煮,凯氏氮与铵态氮之差)。

1.3.3 试验仪器 N₂O测定采用带有Ni⁶³电子捕获检测器的岛津GC-14B气相色谱仪(日本岛津公司),柱温65℃,检测温度为300℃,载气流速40 mL/min;超纯水制造系统MUL9000(总馨企业(台湾)有限公司);T6普析通用新世纪紫外分光光度计(北京普析);DGH 9460A型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);FOSS全自动凯氏定氮仪Kjeltec 8400(FOSS公司)。

1.3.4 统计分析 气体日均排放量计算,见公式(1)。

$$F = \rho \times V \times (dc/dt) \times 24 \times [273 / (273 + T)] / m \dots \dots \dots (1)$$

式中: F 为被测气体日均排放量,mg/(kg·d); ρ 为被测气体标准状态下的密度(N₂O为1.978 kg/m³); V 为取样箱顶部空间的体积,m³; 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,℃; m 为堆体干基质量,kg。

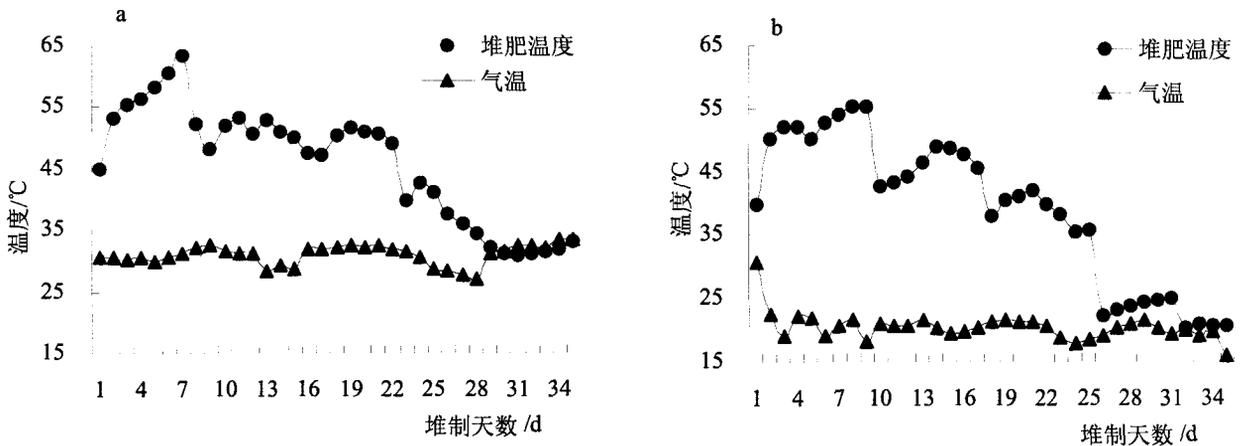
N₂O累积排放量计算方法为,将相邻2次取样时间点的N₂O排放速率平均值与该段时间的乘积,得出某一时段的N₂O排放量,再将各时间段N₂O排放量依次叠加。采用SPSS 13.0统计分析软件进行数理分析。

2 结果与分析

2.1 堆温对水葫芦堆肥过程中N₂O排放的影响

在堆体材料均为纯水葫芦、翻堆频次均为7天/次等条件下,8—9月、10—11月2个不同时间段水葫芦堆肥过程堆温的变化动态,见图1。由图1可知,水葫芦堆肥过程主要经历了高温期(堆温45℃以上)、降温期和稳定期3个阶段。8—9月时间段的最高堆温为63.50℃,平均堆温为45.82℃;10—11月时间段的最高堆温为55.31℃,平均堆温为39.02℃;2个时间段的平均堆温相差6.79℃。

由于8—9月时间段的气温变化幅度为27.1~33.6℃,平均气温为30.9℃,而10—11月时间段的气温变化幅度为16.1~30.6℃,平均气温为20.5℃,2个时间段的环境温度相差10.4℃,可能是造成堆温相差的主要原因。



a.8—9月;b.10—11月

图1 不同时间段水葫芦堆肥过程的堆肥温度及环境温度变化

图2所示为2次堆肥过程中N₂O排放量的变化动态。由图2a可知,水葫芦堆制后2天,N₂O日均排放量逐渐增加,堆制后5~8天的N₂O日均排放量最大,8~21天的N₂O日均排放量呈下降趋势,第21天后N₂O日均排放量变化幅度较小。由图2b可知,水葫芦堆肥过程中N₂O累积排放量呈先快速上升,后逐渐平缓的变化趋势,将N₂O累积排放量与堆肥时间进行曲线拟合分析,结果表明,水葫芦堆肥过程2个不同时间段N₂O累

积排放量与堆肥时间均成极显著的对数曲线相关,对数曲线方程分别为 $y_{8-9月} = 12.974 \ln(x) - 8.6441 (R^2 = 0.9617^{**})$ 、 $y_{10-11月} = 3.922 \ln(x) - 3.6163 (R^2 = 0.9425^{**})$ 。根据拟合的曲线方程,计算水葫芦堆肥过程中每公斤干基的N₂O最大累积释放量,其中,8—9月时间段堆肥处理为37.48 mg,10—11月时间段堆肥处理为10.33 mg,由于10—11月时间段的堆温比8—9月时间段低6.79℃,N₂O累积排放量降低了72.44%。

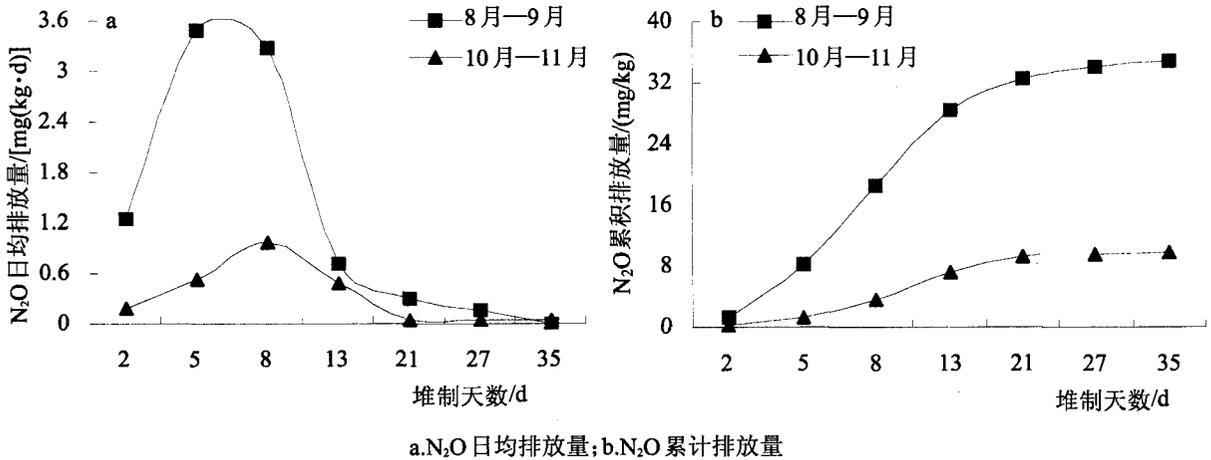


图2 水葫芦堆肥过程N₂O排放变化动态

2.2 C/N 比对水葫芦堆肥过程中N₂O排放的影响

不同碳氮比处理下,水葫芦堆肥体N₂O排放量变化有明显的差异(见图3)。由图3可知,C/N₂₄处理的N₂O日均排放量呈先上升后下降的变化趋势,于堆制后5~8天达最大值,从而表现为N₂O累积排放量于堆制后2~21天急剧上升,第21天后变化趋于平缓;C/N₃₀处理的N₂O日均排放量亦呈先上升后下降的变化趋势,但是其上升的高度明显较低,而下降速度则快于C/N₂₄的处理,并且C/N₃₀处理的N₂O日均排放量明显低于C/N₂₄处理;C/N₃₅处理的N₂O日均排放量则一直呈下降趋势。将N₂O累积排放量与堆肥时间进行曲线拟合分析,结果表明,水葫芦堆肥过程中,不同C/N处理的N₂O累积排放量与堆肥时间均成极显著的

对数曲线相关,对数曲线方程分别为 $y_{C/N24}=12.974\ln(x)-8.6441(R^2=0.9617^{**})$ 、 $y_{C/N30}=3.4084\ln(x)-0.5228(R^2=0.9247^{**})$ 、 $y_{C/N35}=0.7516\ln(x)+0.5444(R^2=0.8808^{**})$ 。整个堆肥过程中,不同C/N比处理的N₂O累积排放量由大到小依次为C/N₂₄、C/N₃₀、C/N₃₅,根据拟合的曲线方程,计算水葫芦堆肥过程中每公斤干基的N₂O最大累积释放量,其中,C/N₂₄处理为37.48 mg、C/N₃₀处理为11.59 mg、C/N₃₅处理为3.22 mg;C/N₃₀、C/N₃₅处理的N₂O累积排放量分别比C/N₂₄处理降低了69.08%、91.41%。可见,水葫芦堆肥体N₂O累积排放量随着C/N比的增加呈下降趋势,与Huang等^[15]发现N₂O累积排放量与C/N呈显著负相关关系($r=0.986$)的研究结果一致。

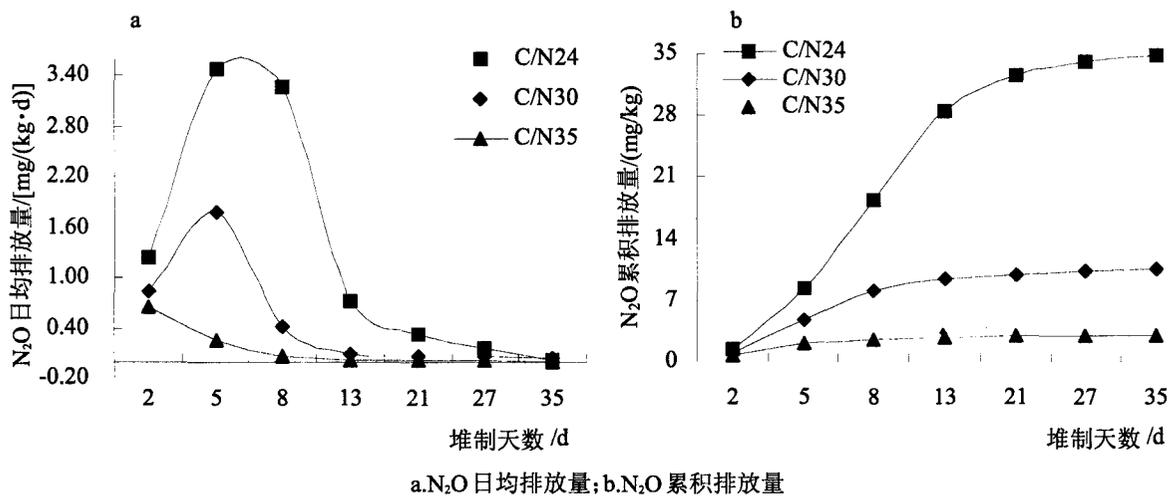


图3 C/N 比对水葫芦堆肥中N₂O排放动态变化的影响

2.3 氮素形态对水葫芦堆肥过程中N₂O排放的影响

堆肥过程中,铵态氮的硝化与硝态氮的反硝化过程,均可释放N₂O,不同形态的氮素作为硝化与反硝化反应的底物,影响N₂O的产生与释放。为了阐明氮素

形态比对水葫芦堆肥过程N₂O排放的影响,将N₂O日均排放量与水葫芦堆肥体各形态氮素含量进行相关分析(见表1),结果表明,N₂O日均排放量与ON、NO₃⁻-N、NO₃⁻-N/TN关系不密切,分别与NH₄⁺-N、NH₄⁺-N/

表1 水葫芦堆肥过程中N₂O日均排放量与各形态氮素含量的相关性

氮素形态	NH ₄ ⁺ -N/(mg/kg)	NO ₃ ⁻ -N/(mg/kg)	NH ₄ ⁺ -N/NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N/TN	NO ₃ ⁻ -N/TN	ON/(g/kg)
N ₂ O日均排放量	0.821**	0.284	0.596**	0.788**	0.336	-0.385

注:**表示差异性达0.01显著水平。

NO₃⁻-N、NH₄⁺-N/TN成极显著线性正相关。可见,水葫芦堆肥过程中,NH₄⁺-N含量越高,N₂O日均排放量则越大。

2.4 添加化学保氮剂对水葫芦堆肥过程中N₂O排放的影响

图4所示为添加化学保氮剂处理下,水葫芦堆肥过程N₂O排放量变化动态。由图4可知,水葫芦堆肥过程中N₂O日均排放量呈先上升后下降的变化趋势,N₂O累积排放量呈先快速上升,后逐渐平缓的变化趋势。将N₂O累积排放量与堆肥时间进行曲线拟合分析,结果表明水葫芦堆肥过程,添加与不添加化学保氮剂处理的N₂O累积排放量与堆肥时间均成极显著的对

数曲线相关,对数曲线方程分别为 $y_{\text{对照}}=12.974\ln(x)-8.6441(R^2=0.9617^{**})$ 、 $y_{\text{保氮剂处理}}=22.339\ln(x)-24.2(R^2=0.9189^{**})$ 。虽然不同处理的N₂O累积排放量呈相同的变化趋势,但添加化学固氮剂对N₂O排放具有明显的影响(见图4),主要表现为堆制后0~8天,化学保氮剂处理的N₂O排放量低于对照处理;第8天后,化学保氮剂处理的堆体N₂O排放量则明显高于对照处理。根据拟合的曲线方程,计算水葫芦堆肥过程中每公斤干基的N₂O最大累积释放量,其中,对照处理为37.48 mg、保氮剂处理为55.22 mg。整个堆肥过程中,添加化学保氮剂处理与常规对照相比,N₂O累积排放量提高了47.33%。

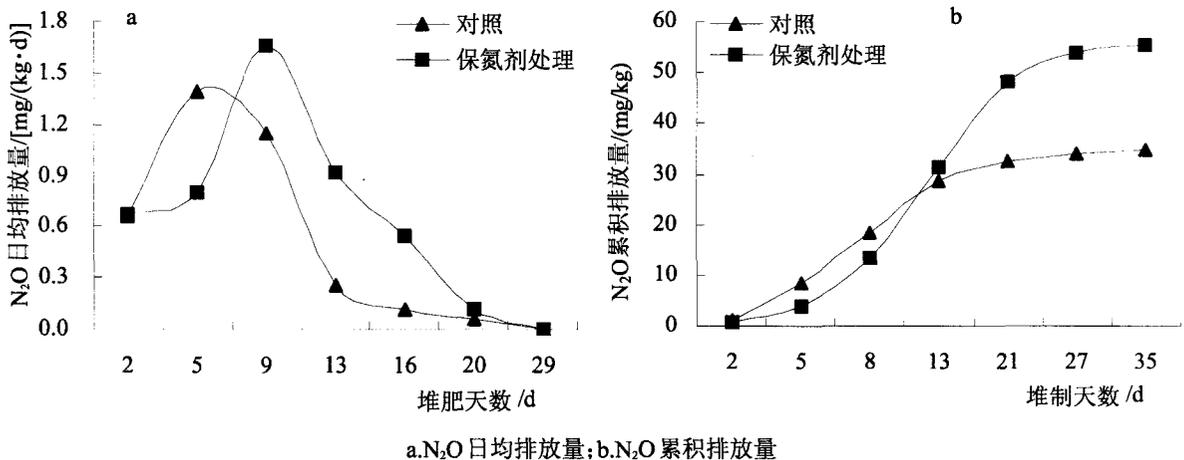


图4 保氮剂对水葫芦堆肥中N₂O排放动态变化的影响

2.5 翻堆频次对水葫芦堆肥过程中N₂O排放的影响

由图5可知,不同翻堆频次处理下,N₂O日均排放量均呈先上升后下降的变化趋势,水葫芦堆制后2~21天,N₂O累积排放量均呈先快速上升的变化趋势,之后上升幅度逐渐平缓,N₂O累积排放量与堆肥时间的曲线拟合分析表明,不同翻堆频次处理的水葫芦堆肥过程N₂O累积排放量与堆肥时间均成极显著的对数曲线相关,对数曲线方程分别为 $y_{3\text{天/次}}=4.1805\ln(x)-4.5432(R^2=0.9102^{**})$ 、 $y_{7\text{天/次}}=3.922\ln(x)-3.6163(R^2=0.9425^{**})$ 、 $y_{14\text{天/次}}=1.8879\ln(x)-2.001(R^2=0.9165^{**})$ 。翻堆频次处理对水葫芦堆肥体N₂O排放量具有明显的影响作用,14天/次翻堆处理的N₂O日均排放量、累积排放量最低,明显低于3天/次与7天/次处理,而3天/次与7天/次处

理的N₂O累积排放量差异幅度较小,并且在堆制后2~21天,7天/次处理的N₂O累积排放量大于3天/次处理,之后则表现为3天/次处理的N₂O累积排放量略大于7天/次处理,这与7天/次处理的N₂O前期日均排放量较大有关。根据拟合的曲线方程,计算水葫芦堆肥过程中每公斤干基的N₂O最大累积释放量,其中,3天/次处理为10.32 mg、7天/次处理为10.33 mg、14天/次处理为4.71 mg。14天/次处理的N₂O累积排放量与3天/次与7天/次处理相比,降低了54.40%。

3 结论

(1)N₂O日均排放量在水葫芦堆肥后5~10天达最大值,N₂O累积排放量与堆肥时间呈极显著的对数曲线相关。

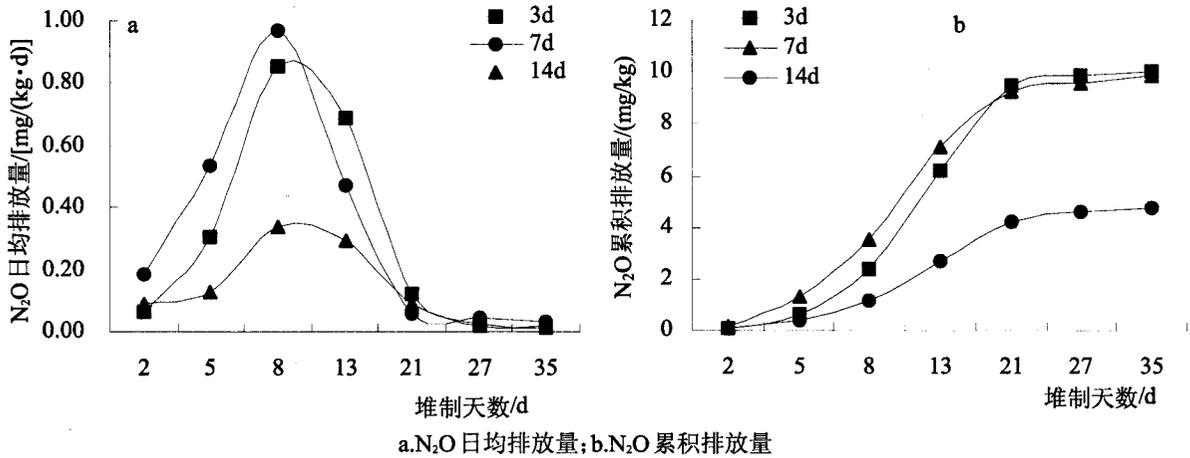


图5 翻堆频次对水葫芦堆肥N₂O排放动态变化的影响

(2)水葫芦堆肥过程N₂O日均排放量与堆温成极显著线性正相关,平均堆温降低6.79℃,N₂O累积排放量减少了72.44%。

(3)提高碳氮比可以降低水葫芦堆肥体的N₂O排放量;C/N30、C/N35处理的N₂O累积排放量分别比C/N24处理降低了69.08%、91.41%。

(4)水葫芦堆肥过程中N₂O日均排放量与NH₄⁺-N关系密切,NH₄⁺-N含量越高,N₂O日均排放量则越大。

(5)采用质量比Mg(OH)₂:H₃PO₄:H₂O=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%)可以降低水葫芦堆肥过程0~8天的N₂O排放量,但整个堆肥过程的N₂O累积排放量与常规对照相比,提高了47.33%。

(6)14天/次翻堆处理的N₂O累积排放量最小,与3天/次与7天/次处理相比,降低了54.40%。

4 讨论

(1)一般认为,N₂O是有机氮在微生物作用下,经硝化及反硝化过程产生,而微生物的活动与堆温密切相关,微生物活性会随着堆温变化而发生改变,其参与的相关生物化学反应速率也会随之改变,从而最终影响堆肥体N₂O的产生和排放^[16]。本研究结果表明,由于10—11月时间段的堆温比8—9月的时间段低6.79℃,水葫芦堆肥过程中N₂O累积排放量减少了72.44%,可见,降低水葫芦堆肥堆温,可以减少水葫芦堆肥的N₂O排放量。为了进一步说明堆温对水葫芦堆肥过程N₂O排放的影响,将N₂O日均排放量与堆温进行相关分析,结果表明,8—9月时间段水葫芦堆肥过程N₂O日均排放量与堆温成极显著线性正相关($r=0.447^{**}$, $n=42$),10—11月时间段水葫芦堆肥过程N₂O日均排放量亦与堆温成极显著线性相关($r=0.563^{**}$, $n=42$),这与Sharp等^[17]认为硝化和反硝化作用产生N₂O

的速率随着温度的上升而增加的研究结论相一致。

(2)堆肥过程中,高温期有机物不断分解,铵态氮含量迅速上升,降温期和稳定期的NH₄⁺通过氧化,转化为NO₃⁻,N₂O是这一过程的副产物,虽然提高堆肥物料中氧分压可控制反硝化过程的N₂O释放,但无法预防来自硝化过程的N₂O损失^[18]。本研究结果表明,水葫芦堆肥过程中,N₂O排放与NH₄⁺-N含量关系密切,NH₄⁺-N含量越高,N₂O日均排放量则越大,与前人的研究结论一致,这是否意味着堆肥过程中N₂O的产生与排放主要来自于NH₄⁺-N的硝化过程,还有待进一步研究;另外,C/N30、C/N35处理的N₂O累积排放量分别比C/N24处理降低了69.08%、91.41%,其原因可能与C/N30、C/N35处理的NH₄⁺-N含量较低有关。

(3)化学保氮剂(Mg(OH)₂与H₃PO₄混合剂)通过与NH₄⁺以磷酸铵镁结晶的形式沉淀下来,起到了固氮作用,减少了NH₄⁺-N的转化及损失,从而具有保氮效果^[14]。本研究结果表明,整个堆肥过程中化学保氮剂处理的N₂O累积排放量大于对照处理,但其0~8天的N₂O排放量低于对照处理,主要原因可能为化学保氮剂减少了堆制后0~8天的铵态氮浓度,从而减少了由硝化作用而产生的N₂O排放;另外,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,堆肥一定天数以后,因有机氮分解占主导地位^[14],铵态氮产生量大于化学保氮剂对NH₄⁺-N固定量,因而导致化学保氮剂处理在该时间段的N₂O排放增加,更多原因还需要作进一步研究。

(4)翻堆不仅能打破堆温和氧气浓度的层次效应,而且还能使物料颗粒变细、暴露新的堆肥表面、改善通气性能、提高有机物降解速率^[19-20]。Hao等^[9]研究表明,翻堆可以促使牛粪好氧堆肥过程N₂O排放通量增加72.7%。本研究结果表明,翻堆频次对水葫芦堆肥过

程中 N_2O 累积排放量具有明显的影响作用,整个堆肥过程,14天/次翻堆处理的 N_2O 累积排放量明显小于3天/次与7天/次处理,一方面可能是频繁翻堆促进了水葫芦堆肥过程的气体排放;另一方面,可能是翻堆频次少不利于堆肥的再次升温和高温的维持^[21],导致堆肥过程有机物分解速率的下降,从而减少了 N_2O 的排放。

(5)堆肥过程的 N_2O 排放还受水分、pH等因素的影响^[22]。堆肥体水分会影响硝化与反硝化过程,谢军飞等在猪粪堆肥试验中,发现堆肥物料干湿交替会促进 N_2O 的生成与排放^[11];同时,反硝化菌最适宜的pH 6~8,活动范围在3.5~11.2之间^[12]。然而,以水生植物为材料的堆肥过程中 N_2O 排放对水分、pH的响应关系尚不明确,有待进一步研究。

参考文献

- [1] MALIK A. Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of water Hyacinth[J].*Environment International*,2007(33):122-138.
- [2] 张文明,王晓燕.水葫芦在水生态修复中的研究进展[J].*江苏环境科技*,2007,20(1):55-58.
- [3] 姜敏,廖柏寒,刘红玉.3种水生漂浮植物处理富营养化水体的研究[J].*中国生态农业学报*,2005,13(3):194-195.
- [4] 董昌华,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.
- [5] AMANDA M N, WILLIAM J M. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica[J].*Ecological Engineering*,2006(28):246-257.
- [6] 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.
- [7] 秦莉,沈玉君,李国学,等.不同C/N比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J].*农业环境科学学报*,2009,28(12):2668-2673.
- [8] BARRINGTON S, CHOINIERE D, TRIGUI M, et al. Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses[J].*Bioresource Technology*,2002,83(3):189-194.
- [9] HAO X, CHANG C, LARNEY F J. Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting[J].*Journal of Environment Quality*,2001(30):376-386.
- [10] 谢军飞,李玉娥,董红敏,等.堆肥处理蛋鸡粪时温室气体排放与影响因子关系[J].*农业工程学报*,2003,19(1):192-195.
- [11] 谢军飞,李玉娥.不同堆肥处理猪粪温室气体排放与影响因子初步研究[J].*农业环境科学学报*,2003,22(1):56-59.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] HUANG G F, WONG J W C, WU Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J].*Waste Management*,2004,24(8):805-813.
- [16] 陆日东,李玉娥,万运帆,等.堆放奶牛粪便温室气体排放及影响因子研究[J].*农业工程学报*,2007,23(8):198-204.
- [17] SHARPE R R, HARPER L A. Methane emissions from an anaerobic swine lagoon[J].*Atmospheric Environment*,1999(33):3627-3633.
- [18] 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.
- [19] WALKER L P, NOCK T D, GOSSETT J M, et al. The role of periodic agitation and water addition in managing moisture limitations during high-solids aerobic decomposition[J].*Process Biochemistry*,1999(34):601-612.
- [20] SCHLOSS P D, CHAVES B, WALKER L P. The use of the analysis of variance to assess the influence of mixing during composting[J].*Process Biochemistry*,2000(35):675-684.
- [21] KEUEHER B P, LEAHY J J, HENLHAN A M, et al. Advances in poultry litter disposal technology-a review[J].*Bio resource Technology*,2002(83):27-36.
- [22] 蒋静艳,黄耀.农业土壤 N_2O 排放的研究进展[J].*农业环境保护*,2001,20(1):51-54.