

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳琳 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青宪,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响

赵晨阳^{1,2}, 李洪枚¹, 魏源送^{2*}, 钟佳², 郑嘉熹², 韩圣慧^{3*}, 万合锋²

(1. 首都经济贸易大学安全与环境工程学院, 北京 100070; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 我国畜禽粪便堆肥过程中有关温室气体(CH_4 、 N_2O)和 NH_3 排放的基础数据十分缺乏, 难以满足我国畜禽粪便温室气体减排的需求. 本研究以猪粪为研究对象, 通过现场试验和原位观测, 考察翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程中温室气体和氨气排放的影响. 结果表明, 翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程的温室气体(CH_4 、 N_2O)和氨气排放均具有显著影响, 不仅提高了温室气体和氨气的排放, 而且加大了氨气排放所占总氮损失的比例(对照组 42.2%、试验组 70.05%). 与 N_2O 相比, CH_4 是猪粪条垛堆肥过程中 CO_2 排放当量的主要贡献者.

关键词: 猪粪堆肥; 翻堆; 氨气; 温室气体

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0533-08

Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting

ZHAO Chen-yang^{1,2}, LI Hong-mei¹, WEI Yuan-song², ZHONG Jia², ZHENG Jia-xi², HAN Sheng-hui³, WAN He-feng²

(1. School of Safty and Environmental Engineering, Capital University of Economic and Business, Beijing 100070, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: It is of great concern for greenhouse gas (GHG) reduction of animal manure management in China due to the extreme lack of GHG emission data during animal manure composting. Therefore, the purpose of this study was to investigate the effects of turning frequency on the emission of GHG (CH_4 , N_2O) and NH_3 during swine manure windrow composting through on-site observation of a full scale test in Beijing. Results showed that the turning frequency had significant impacts on the emission of both GHG and ammonia, which did not only increase the emission of GHG and ammonia, but also increased the percentage of total nitrogen loss due to NH_3 emission (42.2% at turning once a week and 70.05% at turning twice a week, respectively). Compared with N_2O emission, CH_4 emission was the main contributor to Global Warming Potentials (GWPs).

Key words: swine manure composting; turning; ammonia; greenhouse gas

我国是畜禽养殖大国, 畜禽粪便产生量大, 2009 年全国畜禽粪便产生量 20.8 亿 t^[1]. 据统计, 我国肉猪产量全球第一^[2], 2011 年我国肉猪出栏头数 6.62 亿头, 年底存栏头数 4.68 亿头^[3]. 按照每万头生猪存栏养猪场日均粪便排放量 17.5 t^[4] 计算, 预计全国日产猪粪 81.9 万 t. 畜禽粪便富含有机质及营养成分, 我国每年有有机肥提供氮素 3 050.8 万 t, 其中人畜粪尿占 81.2%^[5]. 农业部发布的《畜禽粪便无害化处理技术规范》推广畜禽粪便的堆肥处理方式, 并取得了广泛应用. 畜禽粪便经堆肥处理后, 不但可以达到无害化、稳定化, 而且其中的速效养分更利于植物吸收, 堆肥产生的腐殖质能改良土壤^[6], 可作为优良的有机肥.

然而, 堆肥过程中会产生大量的氨气(NH_3)与

温室气体(CH_4 、 N_2O)^[7], 不仅带来环境问题, 也会造成氮素严重损失. 温室气体(CH_4 、 N_2O)的全球增温潜势(global warming potentials, GWP)分别为 CO_2 的 25 和 298 倍^[8]. 现有研究表明, 猪粪堆肥过程中因 NH_3 和 N_2O 的排放导致了氮素严重损失, 其中 NH_3 排放导致的氮素损失可达 32.3%~50.0%的总氮损失^[9, 10], N_2O 排放导致的氮素损失可达 0.09%~3.8%的总氮损失^[11, 12]. 此外, NH_3 不仅是酸雨的重要影响因素, 而且是堆肥工厂臭味物质

收稿日期: 2013-06-23; 修订日期: 2013-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41075090); 公益性行业(农业)科研专项(201303091)

作者简介: 赵晨阳(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为有机固体废物资源化, E-mail: cyzhao89@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ysw@rcees.ac.cn

的主要成分,我国 1993 年颁布的《恶臭污染物排放标准》(GB 14554-93)将氨气列入首要恶臭污染物.所以,堆肥过程中氨气和温室气体(CH_4 、 N_2O)的排放不仅降低了其土地利用价值,而且还会产生恶臭、酸雨、温室效应等新的生态环境问题,并危害人畜健康^[13, 14].

目前堆肥过程中固氮、温室气体减排的研究主要如下:调节含水率^[10, 15]、C/N 比、pH 值^[16];加入镁盐^[17]以及控制堆体温度.然而,对于条垛堆肥系统来说,有关翻堆频率对堆肥过程中温室气体和氨气排放影响的研究还相对较少.翻堆可调节堆体含水率、温度、含氧量,加速微生物反应^[18~20],是条垛堆肥过程关键控制手段之一.因此,本研究以猪粪条垛堆肥为对象,通过原位观测,考察猪粪条垛堆肥过程中翻堆频率对氨气和温室气体排放的影响,以期为猪粪堆肥工艺的优化和氨气、温室气体减排提供科技支撑.

1 材料与方法

1.1 猪粪条垛堆肥工艺

供试验所用的猪粪来自于位于北京市通州区某大型养猪场,调理剂采用蘑菇渣,试验场地为京郊某大型露天猪粪堆肥厂.猪粪、蘑菇渣和堆料的初始特征如表 1 所示.

表 1 猪粪条垛堆肥试验的堆料特性

Table 1 Composition and properties of materials for swine manure windrow composting

项目	指标	原料		初始混料
		猪粪	蘑菇渣	
指标	电导率/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	1.86	1.55	2.92
	pH	6.67	5.97	6.54
	含水率/%	76.89	40.70	60.04
	有机质/%	81.02	89.12	75.18
	C/N 比	8.70	20.28	15.39
	总氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	42.73	19.88	19.98
	总磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	29.14	0.87	27.08
配料	蘑菇渣:猪粪(体积比)	—	—	4:1
	猪粪/kg	—	—	2 230
	蘑菇渣/kg	—	—	1 720
	总计/kg	—	—	3 950

堆肥试验于 2012 年 10 月底~12 月中下旬进行,堆体呈三棱柱形,堆体(长×宽×高)约 25 m×1.5 m×0.6 m,体积约为 11.25 m³,质量约为 3.95 t.其中试验组高温期(前 4 周 28 d)由翻堆机(Backhus 16.0,德国 Backhus 公司)每周翻堆 2 次;对照组高温期由上述翻堆机每周翻堆一次,后腐熟期均不翻堆,

整个试验持续 55 d,其中后腐熟期 27 d.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 气体样品

温室气体(CH_4 、 N_2O)样品采集采用静态箱平衡法^[21].将覆有铝箔的采样箱(PVC,长×宽×高=34 cm×22 cm×16 cm)扣置于堆体上,严防扰动堆体并做好密封,每隔 3 min 用 60 mL 注射器采集一次,共 4 次,在 24 h 内完成样品测试.气样采用气相色谱仪(Agilent 4890, USA)同时分析 CH_4 和 N_2O ,分别采用 FID(Flame Ionization Detector)和 ECD(Electron Capture Detector)检测器检测 CH_4 和 N_2O 浓度,结合检测气峰面积与标气峰面积比值,分别换算出 CH_4 和 N_2O 浓度.检测系统参数设置如下:①FID 检测器温度 250℃,色谱柱内径 2 mm,填充 60/80 目 13XMS 不锈钢柱,分析柱温 55℃;载气:高纯 N_2 气(>99.999%),流速 30 $\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$;载气有洁净空气和制备氢气(高纯氢气发生器 HG-1803A,科普生,中国),流量分别为 400 $\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ 和 30 $\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$.②ECD 检测器温度 350℃,前置内径 2 mm 不锈钢填充柱,填入 80/100 目 Porapak Q 分子筛;分析柱为内径 2 mm、80/100 目 Porapak Q 分子筛填充柱,柱温 55℃;载气为 Ar- CH_4 (10%),流速 30 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$.样品分析进气 15 mL,定量阀控制 10 mL 气样进入检测器分析.

氨气样品采集采用通气法^[22, 23]:在两片圆形海绵上分别均匀喷洒 15 mL 磷酸甘油溶液并将其装入 PC 材质塑料管(内部直径 16 cm,高 15 cm)内,上层海绵置于管顶以隔绝外界气体干扰,下层海绵距底面 4 cm 以收集氨气,将该装置置于采样点约 1 h,取出下层海绵浸泡于 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯化钾溶液中振荡 1 h,测量浸润液体积 V(mL),并按照国家环境保护标准(HJ 535-2009)测定浸润液中氨氮浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

温室气体与氨气的布点方式和采样频率相同.试验组与对照组堆体均设置 4 个采样点,分别位于距堆体端点 5 m、10 m、15 m、20 m 的位置,且 1 号、3 号同位于三棱柱堆体一侧,2 号、4 号同位于另一侧,堆体的温室气体与氨气排放通量为 4 个采样点的均值.采样频率为初期(前 14 d)每周 3 次,随后每周 2 次.此外,在第 2 次气体采样时考察翻堆前后试验组气体排放情况,第 4 次采样时考察对照组翻堆前后气体排放情况,第 10 次采样时(随后进入腐熟期)同时考察试验组与对照组翻堆前后气体排放情况.具体方法为在翻堆前采样一次,翻堆

后立即再采样一次。以下为温室气体和氨气排放通量的计算公式。

(1) 累积排放量 3 种气体(NH_3 、 CH_4 、 N_2O)的累积排放量均按照公式(1)计算。

$$Q = S \times \sum \Delta f_i t_i \quad (1)$$

式中, Q 为气体累积排放量, mg ; S 为堆体总表面积, m^2 ; Δf_i 为第 $i-1$ 至第 i 次采样期间平均排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; $\Delta f_i = (f_{i-1} + f_i)/2$, f_i 为第 i 次采样的排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, f_0 取 0; t_i 为第 $i-1$ 至第 i 次采样间隔时间(t_0 代表建堆当天), h 。

(2) 氨气排放通量按公式(2)计算。

$$f_{\text{NH}_3} = c \times V / (A \times t) \quad (2)$$

式中, f_{NH_3} 为氨气排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; A 为海绵有效面积, m^2 ; t 为采样时间, h ; c 为浸润液的氨氮浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为浸润液体积, L 。

(3) 温室气体(CH_4 、 N_2O)排放通量按照公式(3)计算。

$$f_i = \frac{h \times (\Delta c / \Delta t) \times M \times 60 \times 273}{273 + (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) / 4} \quad (3)$$

式中, f_i 为 CH_4 或 N_2O 排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; h 为采样箱高度, m ; $\Delta c / \Delta t$ 是箱内温室气体摩尔浓度随时间的变化率, $\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$; M 为每 mol 温室气体对应 C 或 N 元素的摩尔质量; $273 / [273 + (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) / 4]$ 为温度校正系数, $T_1 \sim T_4$ 分别表示采气时箱内的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.2 固体样品

固体样品的采样布点与气体采样布点相同, 试验组与对照组均采集 4 个点, 每个采样点均采集堆体表层(堆料表面以下 10~20 cm)、中心区域和底部的堆料, 混合均匀后采用四分法取样并将样品冷藏带回实验室分析。采样频率如下, 前两周每周采集 2 次, 之后每周采集 1 次。由于堆肥结束时堆体

与环境温度均过低(-10°C), 堆体完全冰冻, 未能采集到堆肥结束(第 55 d)固样。所有数据均应用 SPSS 20.0 (Chicago, USA) 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 有机质、含水率、pH、电导率和堆体温度的变化

如图 1、图 2 所示, 试验组与对照组的堆料含水率和有机质均随着堆肥时间的增加而降低, 在堆肥第 12 d 下起了中雨, 由于露天堆肥, 堆料的含水率与有机质出现较为明显的波动, 此后逐渐走低, 对照组中有机质在高温期呈波浪状变化, 这可能是由于堆肥期间对照组的翻堆频率低于试验组, 导致堆料均匀性低于试验组。对比看来, 降雨对试验组含水率和有机质去除效果影响较小, 可能与翻堆更为频繁, 加快水分蒸发有关。堆肥结束后, 试验组的含水率和有机质的去除率分别达到了 21.07% 和 28.82%, 而对照组的含水率和有机质的去除率分别仅为 10.43% 和 26.61%。上述结果表明, 科学增加翻堆频率利于堆料中水分和有机质的去除, 但影响并不显著(t 检验, $P=0.37$ 和 $P=0.82$)。随着堆肥时间加长, 试验组与对照组堆料 pH 均由约 6.5 缓慢上升至 9.5 左右, 且无显著差别(t 检验, $P=0.61$); 两组堆料电导率均呈现缓慢下降趋势, 均由 $2.9 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 降至 $1.7 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 左右。堆温方面, 堆体中层温度普遍高于表层和底层温度, 试验组和对照组在高温阶段均能维持较高的堆体温度, 中层甚至达到接近 70°C 的高温, 然而, 进入后腐熟期, 特别是堆肥 35 d 以后, 试验组和对照组均呈现明显的降温趋势, 特别是对于试验组而言, 降温趋势更为明显, 最终堆体温度 9.31°C 的平均堆温也明显低于对照组的 26.75°C , 可见增加高温期翻堆频率可使腐

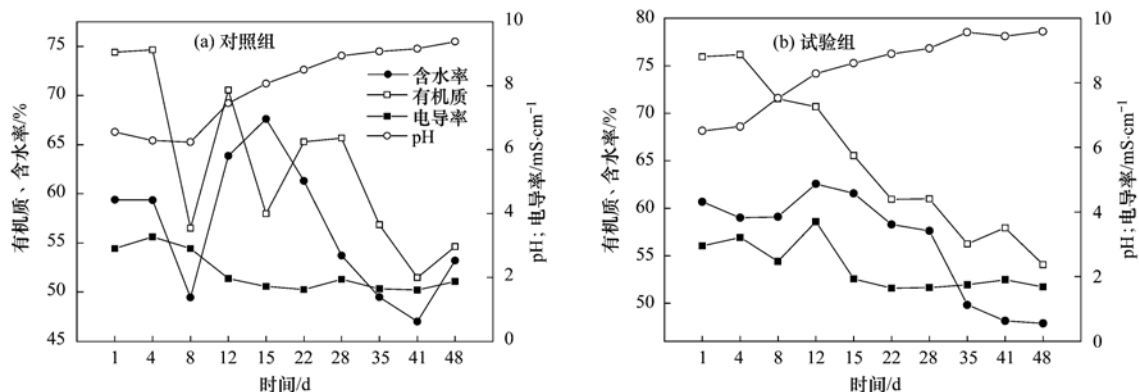


图 1 猪粪条垛堆肥过程的堆料含水率、有机质、pH 值和电导率变化

Fig. 1 Changes of pH value, electric conductivity, moisture content and organic matter during the swine manure windrow composting

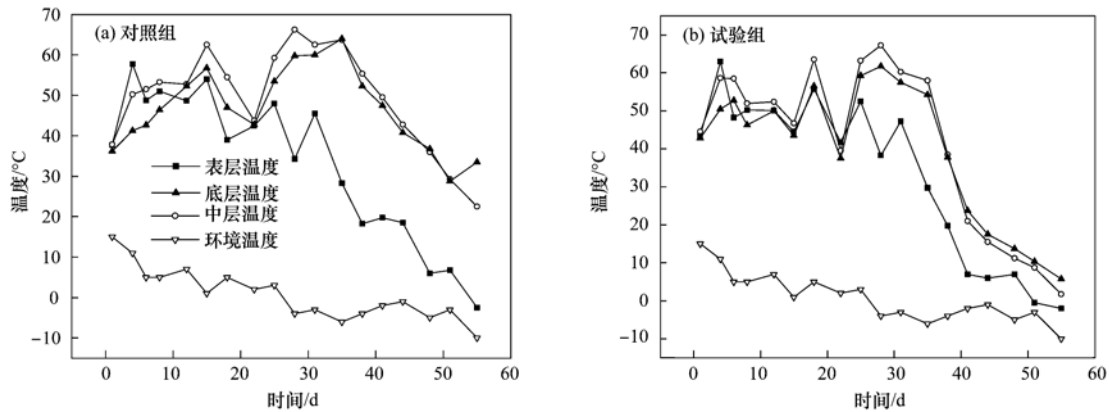


图2 猪粪条垛堆肥过程的堆温变化

Fig. 2 Change of pile temperatures and ambient temperature during the swine manure windrow composting

熟期较快降温,两者存在显著性差异(t 检验, $P = 0.01$).

2.2 温室气体与氨气的排放

如图3所示,试验组 CH_4 排放通量在高温期逐渐升高,第25 d 出现一次峰值 [$1205.67 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; 后腐熟期第31 d 出现峰值 [$1188.34 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],随后逐渐下降. 对照组 CH_4 排放通量在高温期第18 d 达到了最大峰值 [$608.04 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],随后缓慢下降; 后腐熟期也相对平缓,未能出现峰值. 同对照组相比,试验组 CH_4 的排放通量峰值出现较晚,除个别采样时间

(第8、18 d)以外,其余采样时间的排放通量均高于对照组,试验组排放通量均值高达 [$2127.80 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 高于对照组 [$828.46 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]. 试验组 C 元素累积排放量 [14.64 kg] 占原料中总碳 (TC) 损失 [277.08 kg] 的 5.28 %,也高于对照组 C 元素累积排放量 [5.28 kg] 占原料中总碳 (TC) 损失 [336.52 kg] 的 1.57 %. t 检验结果表明,试验组和对照组的 CH_4 排放通量存在显著性差异 ($P = 0.034$).

试验组 N_2O 排放通量在高温期第22 d 达到一次峰值 [$8.36 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],其余时间的排放通量均

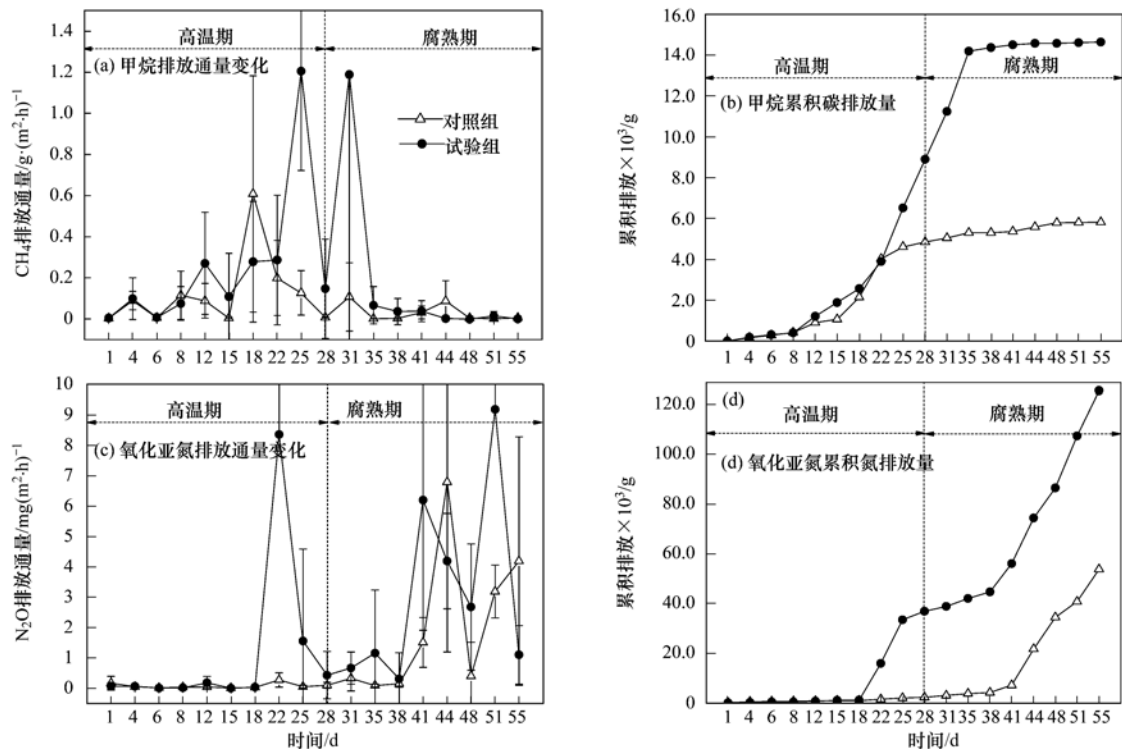
图3 猪粪条垛堆肥过程温室气体 (CH_4 、 N_2O) 排放特征

Fig. 3 Fluxes and accumulative emissions of CH_4 and N_2O during swine manure windrow composting

较低;在后腐熟期排放通量逐渐升高并于第41 d 和第51 d 达到峰值,分别为 $6.20\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 、 $9.19\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,排放通量最大值出现在第51 d. 对照组 N_2O 排放通量在高温期均较低且平缓;进入后腐熟期后呈逐渐上升趋势,在第44 d 达到最大值 $[6.79\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$,在堆肥结束当天达到第二次峰值 $[4.19\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$,且仍处于较高的水平. 同对照组相比,试验组 N_2O 排放通量峰值出现较早,且除个别采样时间(第44 d、第55 d)以外,其余采样时间的排放通量均高于对照组,试验组排放通量均值高达 $[2.01\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$,高于对照组 $[0.97\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$. 试验组N元素累积排放量 $[125.36\text{ g}]$ 占原料中总氮(TN)损失 $[18\,625.59\text{ g}]$ 的0.67%,高于对照组N元素累积排放量 $[53.69\text{ g}]$ 占原料中总氮(TN)损失 $[20\,328.34\text{ g}]$ 的0.26%. t 检验分析结果表明,这两者的 N_2O 排放通量不存在显著性差异($P=0.074$).

从累积排放量来看,① CH_4 :试验组和对照组在

高温期的累积排放量分别占总累积排放量的60.8%和83.2%,说明 CH_4 排放主要发生在高温期;② N_2O :试验组和对照组在后腐熟期的累积排放量分别占总累积排放量的70.4%和96.1%,说明 N_2O 排放量主要发生在后腐熟期. t 检验分析结果表明, CH_4 和 N_2O 的累积排放量均存在显著性差异. ($P=0.000$ 和 $P=0.004$)

如图4所示,试验组和对照组的氨气排放出现过几次较大波动(如第15 d),N元素累积排放量分别为14.24 kg和7.67 kg,且均在堆肥第15 d 排放通量出现最大值[分别为 $1\,246.59\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $353.82\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]. 整体对比而言,试验组氨气排放均高于对照组,且 t 检验分析结果表明,氨气排放通量和累积排放量均存在显著性差异($P=0.038$ 和 $P=0.002$). 这与试验组翻堆频率增加,供氧条件好,促进微生物氨化作用,氨气作为微生物反应产物排放增加有关;另一方面翻堆加快了堆体内部的水汽和气体挥发速度,加速了氨气的排放^[24].

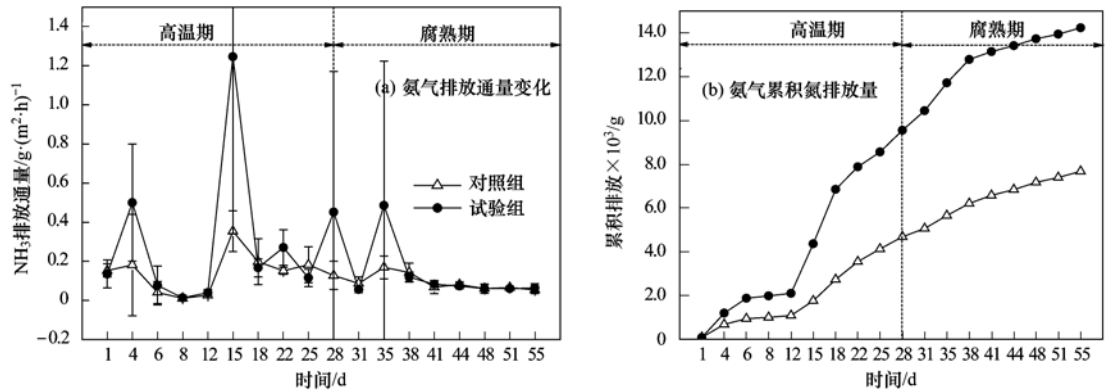


图4 猪粪条垛堆肥过程的氨气排放特征

Fig. 4 Fluxes and accumulative of NH_3 emissions during the swine manure windrow composting

翻堆前后温室气体(CH_4 、 N_2O)以及氨气的排放情况如表2所示. 为了观测高温期翻堆前后气体排放变化,采集建堆后第一次(试验组为第4 d,对照组为第8 d)翻堆前后和最后一次翻堆前后气体

样品进行检测. CH_4 翻堆后排放整体呈下降趋势(除第28 d 对照组),可见翻堆改善了堆体内部的氧含量,厌氧区域减少;翻堆后 N_2O 与氨气的排放较翻堆前均呈明显的上升趋势(氨气除第4 d 试验组).

表2 翻堆前后猪粪条垛堆肥的气体排放状况

Table 2 Emission fluxes of CH_4 , N_2O and NH_3 before and after turning during the swine manure windrow composting							
类别	指标	第4 d			第28 d		
		翻堆前	翻堆后	涨幅/%	翻堆前	翻堆后	涨幅/%
试验组	$\text{CH}_4/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	98.48	70.18	-0.29	146.89	55.71	-0.62
	$\text{N}_2\text{O}/\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	64.44	427.1	5.63	427.95	4 789.92	10.19
	$\text{NH}_3/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	499.76	66.12	-0.87	451.91	1 314.19	1.91
类别	指标	第8 d			第28 d		
		翻堆前	翻堆后	涨幅/%	翻堆前	翻堆后	涨幅/%
对照组	$\text{CH}_4/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	115.64	18.78	-0.84	7.17	17.29	1.41
	$\text{N}_2\text{O}/\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	33.17	97.31	1.93	95.82	1 189.24	11.41
	$\text{NH}_3/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	14.7	33.29	1.26	127.9	2 749.11	20.49

有研究表明通风率增加条件下(每 kg 干料 $0.24 \sim 0.72 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)会增加 N_2O 的排放损失 ($1.5\% \sim 2.1\%$ TN 增加至 $5.2\% \sim 7.3\%$ TN), 且抑制 CH_4 排放 ($>6.4\%$ TC 降低至 $<4.2\%$ TC)^[25]. 可见翻堆一方面改善了堆体内部含氧量, 促进了氨化作用使之释放了更多的氨气, 另一方面人为扰动可以加速堆体内部气体的挥发. 现场采集气体气密性较差, 操作难度较大以及气体不易保存可能是少数数据与整体规律不符的主要原因.

2.3 氮素变化

如图 5 所示, 试验组与对照组堆料中水溶性氨、硝态氮、亚硝态氮、总氮等指标变化趋势相似. 水溶性氨与硝态氮总体呈比较均匀的下降趋势, 对照组水溶性氨和硝态氮在堆肥结束时分别下降了 88.60% 和 81.47% , 试验组则分别下降了 90.93% 和 83.56% , 可见加大高温期翻堆频率对堆体中水溶性氨和硝态氮的下降有促进作用. 对

照组和试验组的亚硝态氮在堆肥高温期均含量较低且变化不大, 待堆肥进入后腐熟期其含量开始缓慢上升并呈加速上升趋势, 这一方面是由于高温期堆体温度高于 40°C , 亚硝化菌受到抑制, 亚硝化反应受阻, 造成堆体亚硝酸盐含量较低, 另一方面由于后腐熟期停止翻堆, 堆体内氧含量急剧下降, 堆体温度回落, 亚硝化细菌活性得以增加, 但由于含氧量较低, 硝化反应受阻, 导致反应堆体内部亚硝酸盐含量升高. 最终对照组和试验组的亚硝态氮含量分别是堆肥开始的 13.18 倍和 11.54 倍, 试验组亚硝酸盐增长相对较低, 可以推断在后腐熟期, 试验组氧气含量相对较高, 前期的高翻堆频率对于增加堆体内部氧含量以及增加堆体自由空域有积极作用. 对照组总氮含量呈持续地下降趋势, 试验组总氮呈先上升后下降的趋势, 最终对照组和试验组总氮分别下降 18.1% 和 19.8% , 未见明显的差别 (t 检验, $P=0.99$).

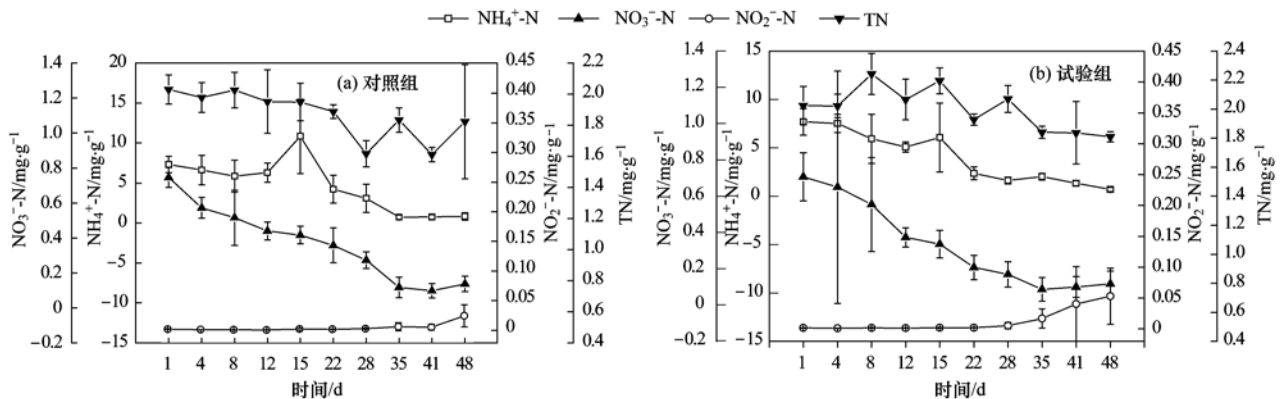


图 5 猪粪条垛堆肥过程的氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总氮变化

Fig. 5 Changes of NH_4^+-N , NO_3^--N , NO_2^--N and TN during the swine manure windrow composting

3 讨论

3.1 温室气体排放

对于 CH_4 而言, 从试验组和对照组每日排放通量对比来看, 除个别天数 (8 d 、 18 d) 以外, 其他采样时间试验组的排放通量均高于对照组, 试验组的累积总排放量也明显高于对照组. CH_4 的排放主要由于堆体中氧气浓度不足, 微生物发生厌氧消化, 微生物在厌氧条件下将有机物分解产生 CH_4 . 试验组采用高温期每周翻堆两次的堆肥方式, 对照组采用每周一次的翻堆方式, 试验组堆体内部的氧气浓度应该相对较高, 然而却观测到了 CH_4 排放较高. 已有研究也同样观测到类似现象: De Guardia 等^[26]则发现通风量越高 (以干污泥计 $3.25 \sim 16.63$

$\text{L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$), CH_4 累积排放量呈线性增加 ($1.0 \sim 16.6 \text{ g CH}_4\text{-C}$). Hao 等^[27]观测到机械翻堆的条垛猪粪堆肥的 CH_4 排放量高于被动通风堆肥系统 (不翻堆). 分析原因可能缘于: ①由于本次堆肥期间温度较低, 堆肥结束时环境温度甚至达到 -10°C , 观察发现, 堆体表面会结成一层类似于结痂的物质 (质硬), 有可能阻碍 CH_4 的排放, 而较为频繁的翻堆破坏了结痂物质, 增加了对堆体的扰动, 反而促进了 CH_4 的排放 (CH_4 排放主要存在于翻堆期间); ②与堆体内部含氧量相比, 人为扰动才是堆体 CH_4 排放的主要影响因素. 也有研究表明, 调整辅料比为 $0.23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 使含水率自 76% 下降至 35% , 增加了堆料自由空域, 可显著减少 CH_4 的排放^[28], 这说明甲烷在腐熟期的排放下降一方面是

由于停止翻堆减少了扰动,另一方面是由于含水率下降,增加了堆体的自由空域。

对于 N_2O 而言,从试验组和对照组每日排放通量对比来看,结果与 CH_4 排放相似,除个别天数(44 d、55 d)以外,其他采样时间试验组的排放通量均高于对照组,试验组的累积总排放量也明显高于对照组。有研究表明:通风率增加条件下 $[0.24 \sim 0.72 \text{ L} \cdot (\text{kg} \cdot \text{dm} \cdot \text{min})^{-1}]$ 会增加 N_2O 的排放损失(1.5% ~ 2.1% TN 增加至 5.2% ~ 7.3% TN)^[25],本试验组翻堆次数较多,增大了堆体内部的自由空域,改善了通风条件,氧含量升高造成微生物反硝化作用更为剧烈,导致最终 N_2O 排放增加。此外后腐熟期 N_2O 排放明显增加,主要由于堆温高于 40°C (高温期)时不利于 N_2O 产生,这是因为高温期硝化菌的活性受抑制,减少了 N_2O 排放通量^[29],而后腐熟期堆温下降后,硝化菌的活性增强,进而导致 N_2O 排放通量升高^[30]。

根据 IPCC 中明确的温室气体增温潜势表示方式,以 CO_2 当量(kg eCO_2)表示温室气体所产生的全球增温潜势,以干猪粪计算,分别得出试验组的 CO_2 当量为 $327.30 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 干猪粪(其中包括 19.52 kg CH_4 和 $393.98 \text{ g N}_2\text{O}$),对照组的 CO_2 当量为 $154.68 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 干猪粪(其中包括 7.76 kg CH_4 和 $168.75 \text{ g N}_2\text{O}$),仅为试验组的0.47,说明增加高温期翻堆频率将显著地增加温室气体排放,进而增加温室气体所产生的全球增温潜势。

3.2 氮素保存

堆料中的氮素以 NH_4^+ 形态为主,起初对照组和试验组的铵态氮分别占到总氮的28.7%和29.6%,对照组和试验组堆体总氮随着氨气的排放而逐渐降低, t 检验存在显著性差异(P 值分别为0.05、0.017)。根据物料衡算,对照组和试验组的总氮损失分别为18.1%和19.8%。对照组和试验组通过氨气形式共排放7.68 kg和14.24 kg的氮元素,分别占堆体初始总氮的7.62%和13.88%,且分别占到总氮损失的42.2%和70.05%,有研究表明堆肥过程主要的氮素损失源于气态 NH_3 (46.8% ~ 77.4% TN)^[7, 31];且翻堆频率的增加不利于N素保存和 NH_3 的减排^[32],与本试验结果相符。通过 N_2O 形式分别仅排放26.58 g和13.29 g的氮元素,几乎可以忽略不计。显而易见,增加翻堆频率将会增加氨气的排放,总氮损失略有增加但并不显著(t 检验, $P=0.99$)。此外,分析表明堆体物料的pH值与其硝态氮含量呈明显的线性相关性, $\text{pH}=9.89 -$

$5.13 \times \text{NO}_3^-$,可见硝态氮含量的变化是堆体pH变化的主要影响因素(回归方程 $P < 0.001$)。

4 结论

(1)翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程的温室气体排放具有显著影响。试验组的温室气体(CH_4 、 N_2O)的C、N元素累积排放量(分别为14.63 kg和125.36 g)均明显高于对照组(分别为5.82 kg和53.69 g),进而加大了全球增温潜势(以 eCO_2 /干猪粪计,试验组和对照组分别为327.30、154.68 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)。 CH_4 排放主要来自于高温期(试验组和对照组分别占总排放的60.8%和83.2%), N_2O 排放主要来自于后腐熟期(试验组和对照组分别占总排放的70.4%和96.1%)。

(2)增加高温期翻堆频率增加了氨气排放(试验组和对照组的氮素总累积排放量分别为14.24 kg和7.68 kg),氮素损失主要源于氨气排放(试验组、对照组分别达到42.2%和70.05%的总氮损失)。可见加大翻堆频率将导致氨气排放加剧,并提高了氨气排放占总氮损失的比例,但氨气排放占总氮损失的比例没有显著性差异(试验组和对照组分别为19.8%和18.1%)。

参考文献:

- [1] 张田,卜美东,耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1241-1249.
- [2] FAO. The state of food and agriculture of the united nations[EB/OL]. <http://www.fao.org/docrep/009/a0800e/a0800e00.htm>.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2012[M]. 北京: 中国计划出版社, 2012. 1782-1785.
- [4] 辛总秀. 减轻畜禽粪便对环境污染的现状和技术探索[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2004, 34(4): 35-37.
- [5] 李玲玲. 有机肥氮素有效性和替代化肥氮比例研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011. 31-34.
- [6] 李铁民, 马溪平, 刘宏生. 环境微生物资源原理与应用[M]. 北京: 北京化学工业出版社, 2005. 8-11.
- [7] Szanto G L, Hamelers H V M, Rulkens W H, et al. NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during passively aerated composting of straw-rich pig manure[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(14): 2659-2670.
- [8] IPCC. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York: Nature Publishing Group, 2007. 987-995.
- [9] 钟佳. 污泥/猪粪堆肥化及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2013. 18-23.
- [10] El Kader N A, Robin P, Paillat J M, et al. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting[J]. Bioresource Technology, 2007, 98

- (14): 2619-2628.
- [11] 郑嘉熹, 魏源送, 吴晓凤, 等. 猪粪堆肥过程保氮固磷及温室气体(N_2O)减排研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2047-2055.
- [12] Fukumoto Y, Suzuki K, Osada T, *et al.* Reduction of nitrous oxide emission from pig manure composting by addition of nitrite-oxidizing bacteria[J]. Science of the Total Environment, 2006, **40**(21): 6787-6791.
- [13] Olesen J E, Sommer S G. Modelling effects of wind speed and surface cover on ammonia volatilization from stored pig slurry[J]. Atmospheric Environment Part A General Topics, 1993, **27**(16): 2567-2574.
- [14] Zhang R H, Day D L, Christianson L L, *et al.* A computer model for predicting ammonia release rates from Swine Manure Pits[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1994, **58**(4): 223-229.
- [15] Tamura T, Osada T. Effect of moisture control in pile-type composting of dairy manure by adding wheat straw on greenhouse gas emission [J]. International Congress Series, 2006, **1293**(1): 311-314.
- [16] Zhang Y, He Y. Co-composting solid swine manure with pine sawdust as organic substrate[J]. Bioresource Technology, 2006, **97**(16): 2024-2031.
- [17] 杨宇, 魏源送, 刘俊新. 不同通风方式对添加镁盐后猪粪堆肥过程中氮磷保存的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1238-1243.
- [18] 化党领, 刘方, 李国学, 等. 翻堆与覆盖工艺对猪粪秸秆堆肥性质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(12): 210-217.
- [19] 刘方. 翻堆覆盖工艺及季节对槽式堆肥的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011. 32-35.
- [20] Larney F J, Olson A F, Carcamo A A, *et al.* Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and summer [J]. Bioresource Technology, 2000, **75**(2): 139-148.
- [21] 王艳强. 川中丘陵区草地土壤-植物系统 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 通量研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005. 26-28.
- [22] 万合锋. 猪粪堆肥及其在蔬菜地利用全过程中温室气体(N_2O 、 CH_4)和 NH_3 排放特征研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012. 18-23.
- [23] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥科学报, 2002, **8**(2): 205-209.
- [24] 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其腐熟进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1653-1661.
- [25] Jiang T, Schuchardt F, Li G, *et al.* Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(10): 1754-1760.
- [26] De Guardia A, Petiot C, Rogeau D. Influence of aeration rate and biodegradability fractionation on composting kinetics [J]. Waste Management, 2008, **28**(1): 73-84.
- [27] Hao X, Xu S, Larney F J, *et al.* Inclusion of antibiotics in feed alters greenhouse gas emissions from feedlot manure during composting[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, **89**(2): 257-267.
- [28] Sommer S G, Møller H B. Emission of greenhouse gases during composting of deep litter from pig production - effect of straw content[J]. Journal of Agricultural Science, 2000, **134**(3): 327-335.
- [29] Etinger T R. A Comparative study of nitrification in soils from arid and semi-arid areas of israel[J]. Journal of Soil Science, 1969, **20**(2): 307-315.
- [30] Hao X Y, Chang C, Larney F J. Carbon, nitrogen balances and greenhouse gas emission during cattle feedlot manure composting [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**(1): 37-44.
- [31] Martins O, Dewes T. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes[J]. Bioresource Technology, 1992, **42**(2): 103-111.
- [32] Parkinson R, Gibbs P, Burchett S, *et al.* Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure [J]. Bioresource Technology, 2004, **91**(2): 171-178.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行