

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

杨宇, 魏源送*, 刘俊新

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 考察和比较了 2 种通风方式对添加氯化镁后猪粪高温堆肥过程中氮、磷养分保留的影响. 结果表明, 高温堆肥阶段结束后, 采用间歇通风方式堆体的氨气形态氮素损失量为 23.56 g, 采用连续通风方式堆体的氨气形态氮素损失量为 56.98 g, 前者氨气形态氮素损失量仅为后者的 41.35%, 这导致前者堆料中的总氮(TKN)含量比后者高出 9.8%. 通风方式对猪粪堆肥过程中的水溶态磷、总磷和分级磷没有显著影响, 但间歇通风堆体中易溶解态磷占总磷的比例从 27.6% 提高到 66.5%, 连续通风堆体易溶解态磷的从 27.3% 增加到 64.9%. 高温堆肥阶段结束后, 2 个堆体的总磷含量均为 17.2 g/kg. 2 个堆体中都生成了含有镁盐的混合晶体.

关键词: 氮磷保存; 氯化镁; 猪粪堆肥; 通风方式

中图分类号: X705; X713 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1238-06

Impacts of Different Aeration Modes on Nutrients Conservation During Swine Manure Composting with Magnesium Salt Addition

YANG Yu, WEI Yuan-song, LIU Jun-xin

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Experiments were carried out to investigate the effect of two aeration modes on nutrients conservation in the thermophilic stage of swine manure composting with adding magnesium chloride. These results indicated that in the end of thermophilic stage of composting, the ammonia nitrogen losses of the piles with the intermittent aeration and with continuous aeration, were 23.56 g and 56.98 g, respectively, which means the loss of ammonia nitrogen of swine composting by the intermittent aeration was just 41.35% of that by the continuous aeration. Such loss of ammonia nitrogen resulted in 9.8% higher of the total kjeldahl nitrogen (TKN) concentration in the pile with the intermittent aeration than that with the continuous aeration. No significant difference occurred between two piles in orthophosphate, sequential extraction phosphorus and the total phosphorus (TP). However, in the pile with intermittent aeration, the percentage of the easily dissolved phosphorous forms such as H_2O-P and $NaHCO_3-P$ was increased from 27.6% of TP to 66.5%, and the other pile from 27.6% to 64.9%. The TP concentrations in both piles were 17.2 g/kg in the end of thermophilic composting stage. The mixed crystals containing magnesium and phosphorus were formed in both piles of swine composting.

Key words: nutrients conservation; magnesium chloride; swine composting; aeration mode

随着畜禽养殖业的发展, 集约化程度迅速提高, 集约化养殖带来的环境问题也随之出现. 2004 年全国各类畜禽规模化养殖小区达到 4 万多个; 在牧区和半牧区, 2 000 多万头牲畜从放养改为圈养^[1]. 而年产 1 万头牛的联合企业每日粪尿排污量达 800 ~ 1 000 t, 一个万头猪场每年至少向周围排粪便 3 万 t (折合为 $3 \times 10^5 \sim 4.4 \times 10^5$ kg 的氮和 $3.2 \times 10^5 \sim 5.7 \times 10^5$ kg 的磷)^[2,3]. 如何有效地处理大量的富含氮磷的粪便, 减少其环境威胁, 是目前畜禽养殖业面临的巨大挑战.

堆肥技术是畜禽粪便处理和资源化的常用方法. 为了有效地减少粪便堆肥过程中氮素的损失, 改善磷素的形态, 多位研究者从以下 2 个方面进行了研究: ①堆肥的工艺条件, 如 pH 值、堆料含水率^[4]、

C/N^[4~6]、堆体温度^[7~9]、通风方式^[10~12]等因素; ②加入添加剂和调理剂, 如微生物调理剂^[13,14]、盐类和矿物质等^[15]. 已有的研究表明, 在加入盐类调理剂的情况下, 可以有效地减少高温堆肥阶段氨气的流失, 降低堆肥产品可溶解态磷的含量, 达到农田施用减少磷流失的目的^[16,17]. 但是在加入盐类的同时, 通风因素对畜禽粪便堆肥过程氮磷营养元素保存的影响还不是很清楚.

因具有供氧、散热和去除水分的作用^[18], 通风

收稿日期: 2008-06-10; 修订日期: 2008-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578156); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA06Z344)

作者简介: 杨宇(1982~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制和污泥处理与处置, E-mail: yangyu05@mails.gucas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: yswei@cees.ac.cn

是畜禽粪便堆肥过程中影响氮素保存的一个重要因素.通风方式可以分为连续通风和间歇通风.2种方式对畜禽粪便堆肥堆体温度、堆料理化性质的改变均有很大不同^[19].因此,本研究的目的是在加入镁盐的情况下,系统考察连续和间歇通风这2种通风方式对猪粪高温堆肥过程中氮磷营养元素保存的影响,以为优化猪粪堆肥工艺参数提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

堆肥所用猪粪来自北京郊区某养猪场,调理剂采用北京郊区某木材加工厂的木屑.堆料和调理剂的初始特征如表1所示.

表1 猪粪堆肥原料的特征参数

项目	容重/kg·m ⁻³	总磷(DM)/g·kg ⁻¹	C/N	含水率/%
猪粪	712	9.32	14.9	68.2
木屑	98	0.85	—	4.7
混合后	644	9.16	15.2	60.6

1.2 试验方法

根据所采用的2种通风方式,猪粪堆肥试验包含2个堆体,每个堆体均使用14.32 kg鲜猪粪.2个堆体均按照鲜猪粪总氮含量的20%添加氯化镁(MgCl₂·6H₂O).用木屑调整堆料的含水率为60.6%,混合均匀后放置到2个同样的堆肥反应器中(如图1).

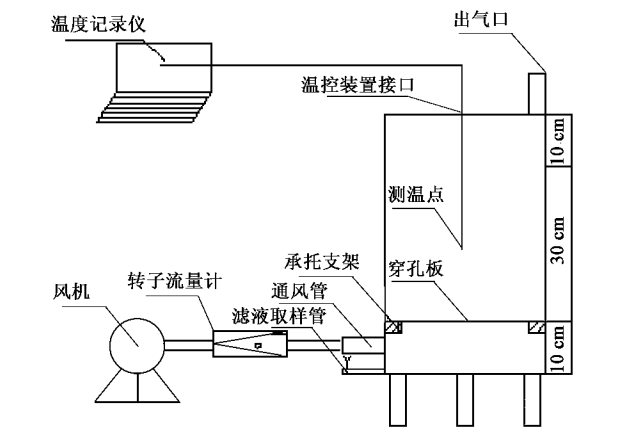


图1 堆肥试验装置示意

一个堆体采用连续通风方式,试验系统所需的通风量设定为0.32 m³/h.另外一个堆体采取间歇通风方式,总通风量与连续通风的堆体相同,风机采取时间控制方式,通10 min停5 min(0.48 m³/h).

1.3 采样和分析方法

采样时间分别为堆肥试验的第1周隔天采样(先气体,后固体)及以后每7 d采1次样.气体采样与测定方法如下:利用气体采样器(QC-2型,北京市劳动保护科学研究所)采样,以10 mL 0.005 mol/L的H₂SO₄作为吸收液吸收10 min(在间歇堆体通风的10 min同时采样),然后再用纳氏试剂比色的方法测定吸收液中氨根离子浓度,再折算成氨气的浓度[mg/(L·min)].固体采样后,丢弃大的木片和无机废物,在24 h内测定含水率、有机质、pH、PO₄³⁻-P、NH₄⁺-N等指标.经过105℃干燥12 h后的样品密封保存在4℃冷库,烘干后样品过2 mm筛后,在1个月内测定总氮(TKN)、总磷(TP)和分级磷.总氮采用凯氏定氮法测定.总磷测定采用HClO₄-H₂SO₄法^[20].分级磷的测定采用去离子水H₂O、0.5 mol/L的NaHCO₃、0.1 mol/L的NaOH和1 mol/L的HCl依次提取的方法^[6].

其中猪粪堆肥过程中氮素损失量的计算如下:

氮素损失总量: $W = \sum_{i=0}^n c_i \times Q_i$

式中,W为猪粪堆肥过程中氨气损失总量,mg; c_i为猪粪堆肥过程中每日排放的氨气浓度,mg/L; Q_i为堆肥过程通风流量,L/d; i为堆肥时间,d.

所有统计分析(包括ANOVA方差分析)采用SPSS 13.0完成.

2 结果与分析

2.1 堆体温度

图2中可以看到,间歇通风堆体温度在40℃以上保持了6 d,且有2 d保持在50℃以上;连续通风堆体升温速率明显低于间歇通风堆体的堆温,且仅有1 d温度达到了45℃.因为2个堆体添加镁盐的量相同,所以温度上的差异主要来源于通风方式的差别.可见,间歇通风方式有利于堆体温度的上升和保持.然而,两者的堆温均没有达到粪便无害化卫生标准(GB 7959-87)的要求,原因主要如下:①试验运行期间的平均气温均为8.36℃,加之试验堆体小(有效容积21.2 L),这就造成堆肥过程产生的热量不能维持住需要的堆温.②已有研究表明^[17],添加镁盐,虽能保留氮磷养分,但会影响堆温,所以,镁盐添加量需要优化.

2.2 pH、含水率和VS

2个堆体的pH值均在7~9之间变化,其最大

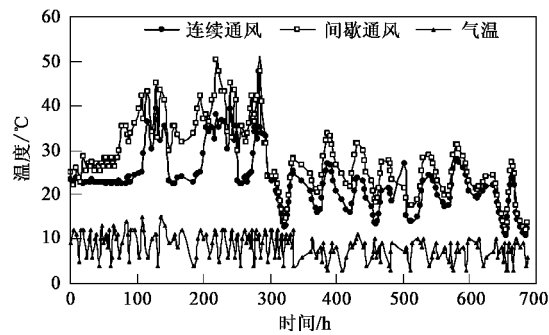
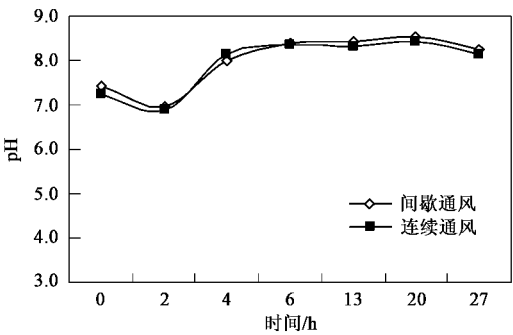


图 2 猪粪堆肥过程中高温阶段的堆体温度和 pH 变化

Fig.2 Profiles of pile temperature and pH in the thermophilic stage of swine manure composting



值均出现在堆肥的第 1 次高温期.从图 2 可以看出, 2 个堆体的 pH 值差异不大.方差分析表明,这两者 pH 值的差异不显著($p = 0.851$),表现出一定的相关性.

从图 3 可以看出,猪粪堆肥过程中含水率和挥发性有机物存在缓慢下降的趋势,二者的变化具有一定的相似性.上述结果表明,2 种通风方式对猪粪堆肥过程的 pH、含水率和 VS 变化没有影响.

2.3 氮素保存

从图 4 可知,堆肥过程中水溶性的氨氮浓度降低,在第 13 d 后趋于稳定.统计分析结果表明,通风方式的不同并没有导致 2 个堆体的氨氮差异显著($p = 0.502$).2 个堆体中的硝态氮均呈现上升趋势($p = 0.962$).

总氮(TN)和 NH_3 排放量可直观地反映堆肥过程中氮素的保存效果.如图 4 所示,堆体物料中总氮含量相差不大.从氨气排放的变化来看,随着堆肥时间的延长,其排放的浓度呈现先增高后减小的趋势.

物料衡算的结果表明,间歇通风方式下堆体的

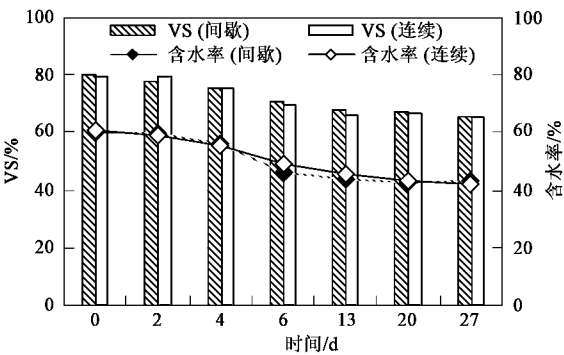


图 3 猪粪堆肥过程中高温阶段堆体含水率和 VS 的变化

Fig.3 Changes of moisture content and volatile solids in the thermophilic stage of swine manure composting

氮素损失量为 23.56 g (占堆料初始总氮量的 12.4%),连续通风方式下堆体的氮素损失量为 56.98 g (占堆料初始总氮量的 30.3%),前者氨态氮损失量是后者的 41.35%.由此可知,添加镁盐的情况下,间歇通风方式有助于保存氮素,其堆料中总氮量比连续通风方式下的堆体高 9.8%.

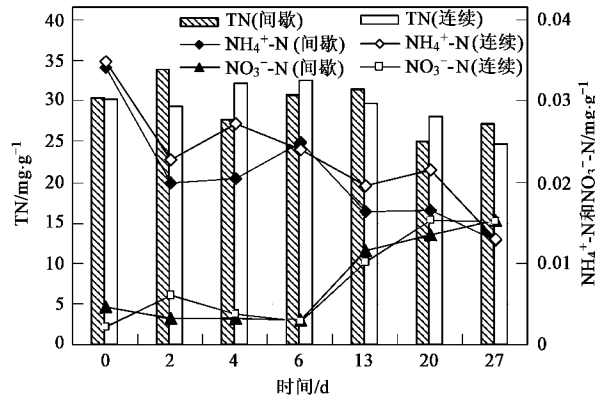
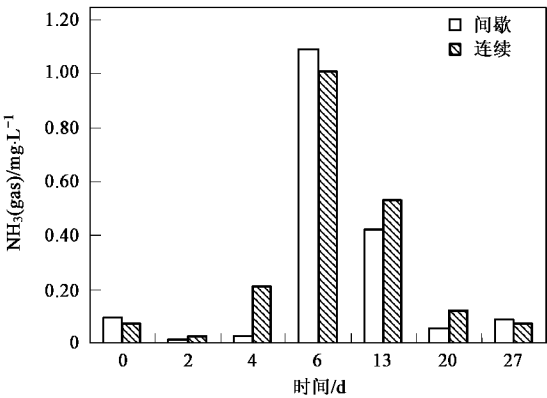


图 4 猪粪堆肥过程中高温阶段堆体 NH_4^+ -N、 NH_3 和 TN 的变化

Fig.4 Changes of NH_4^+ -N, NH_3 and TN in the thermophilic stage of swine manure composting



2.4 磷素变化

2.4.1 总磷 (TP)

在猪粪堆肥期间,2个堆体的总磷变化规律较一致(图5),随着堆肥时间的延长,总磷的含量也随之增长,这主要是随着堆料含水率下降而带来的浓缩效应.正磷酸盐呈下降趋势,最后趋于平稳.

2.4.2 分级磷

不同形态的磷更能反映出添加镁盐后对于堆肥产品性质带来的影响.一般认为,用H₂O、NaHCO₃、NaOH、HCl依次提取出来的磷,其稳定性逐渐增强,而易溶性逐渐减弱.其中采用去离子水和NaHCO₃提取的磷主要是易溶解部分的磷,而采用NaOH和HCl提取的磷反映的是难溶解部分的磷,包括植酸等难溶性的化合物^[6,21].经过堆肥处理后,间歇通风堆体中易溶解态磷占总磷的比例从27.6%提高到

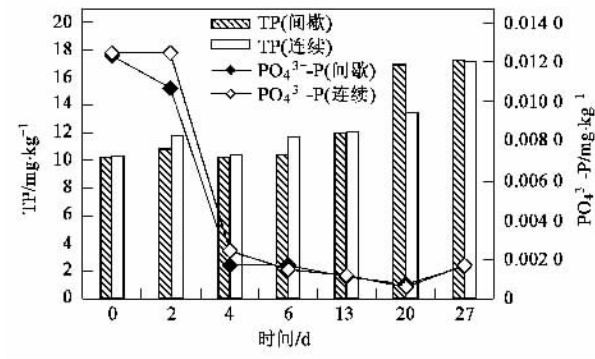


图5 猪粪堆肥过程中高温阶段堆体总磷(TP)和正磷酸盐的变化
Fig.5 Changes of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and TP in the thermophilic stage of swine manure composting

66.5%,而连续通风堆体易溶解态磷的从27.3%提高到64.9%(图6).两者变化规律比较相似.

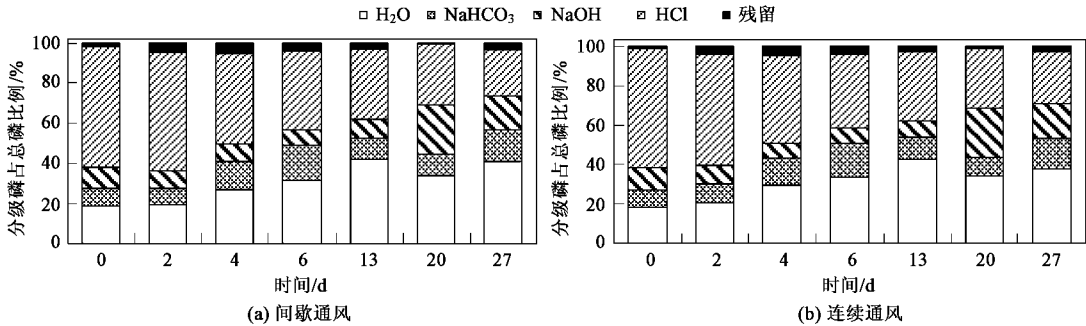


图6 猪粪堆肥过程中高温阶段堆体分级磷的变化
Fig.6 Changes of fraction of phosphorus in the thermophilic stage of swine manure composting

2.4.3 磷酸盐晶体

在这2个堆体的堆肥过程中,均形成了白色晶体(图7).从电镜照片[图7(I-a),7(II-a)]中可以看出,在采用不同通风方式的堆体中形成的晶体在结构上有一定的相似性.表面元素分析的结果(表2)也表明了2种晶体的类似性.另外根据表2结果

表2 采用不同通风方式堆体中的晶体表面元素比

元素	质量百分比/%		原子数百分比/%	
	连续通风	间歇通风	连续通风	间歇通风
C	39.04	44.03	50.72	55.37
N	4.94	3.49	5.5	3.77
O	31.52	31.07	30.75	29.34
Mg	7.05	8.82	4.52	5.48
P	14.76	11.75	7.44	5.73
K	2.69	0.83	1.07	0.32

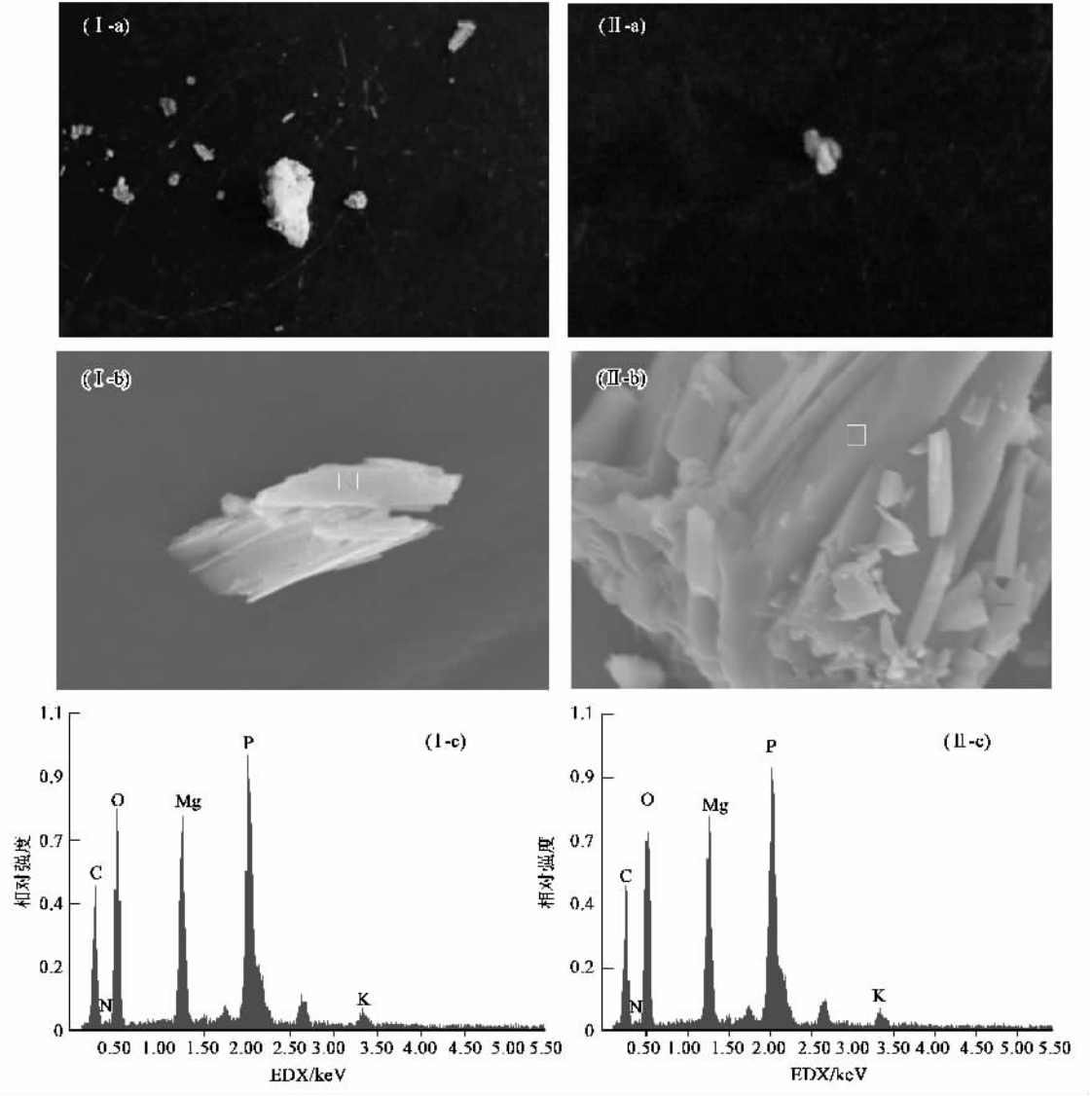
计算,连续通风堆体中晶体的O:P(摩尔比,下同)=4.2:1 间歇通风堆体中晶体的O:P=5.3:1.而标准

的磷酸镁和磷酸氢镁晶体O:P=4:1.因此堆体中生成的晶体不是磷酸镁或者磷酸氢镁纯晶体,而是含有磷素和镁盐的混合晶体.另外考虑到初始堆体物料完全一样,唯一的差异来自于通风方式的不同.从表面元素分析和晶体结构来看,可以断定2种晶体是同一种物质.

3 讨论

该研究在运行过程中存在的最大问题就是堆温没有达到粪便无害化卫生标准(GB 7959-87)的要求,主要是低环境气温和小堆体所造成的热量不能平衡,加之添加的镁盐也影响了堆温^[17].众所周知,在实际的畜禽粪便堆肥过程中,堆温能满足粪便无害化卫生标准(GB 7959-87)的要求.所以,镁盐对堆温的影响需要进一步研究,如优化添加量,使之既能保存氮磷养分,又能不影响堆温.

McCrory等^[22]指出在堆肥中添加氯化物和硝酸



a. 数码照片;b. 扫描电子显微镜 SEM(3000X);c. 能量弥散 X 射线检测 EDX; I . 连续通风; II . 间歇通风
图 7 采用不同通风方式堆体中形成的晶体

Fig.7 Crystals formed in the swine manure composting process with different aeration modes

盐用于稳定堆肥过程中的 pH 值,可以减少 NH_3 的逸出. Jeong 等^[23]报道在粪便中加入氯化镁和磷酸盐,也起到了保存氮素的目的;同时有磷酸氢镁晶体的产生.笔者过去的研究也表明^[17],在猪粪堆肥过程中加入镁盐,形成了含有磷酸镁的混合晶体,并且起到保存氮素的作用.所以粪便堆肥过程中加入氯化镁,一方面起到稳定 pH 值的作用;另一方面可以形成含有磷素镁的混合晶体,降低水溶态磷的比例,可减少猪粪堆肥产品施用后因暴雨径流带来的磷流失.这种变化规律类似于畜禽粪便堆肥时添加铝盐起到的磷素形态变化从而改善磷素结构的作用^[17].
根据本研究已有的前期试验结果,猪粪堆肥过程中加入镁盐后是否有晶体产生与加入镁盐的量有

关.例如,在分别加入约占猪粪总氮含量 5%和 10%的镁盐时,猪粪堆肥过程中没有发现晶体的产生.
在猪粪堆肥过程中加入相同量镁盐的情况下,间歇通风方式有助于保存氮素,但是优势不是很明显,总氮含量仅比连续通风方式下的堆体高 9.8%;且 2 种通风方式对于磷素的转化和保存影响不大.其原因可能在于本实验中,2 种堆体的总通风量相同,仅仅是单位通风速率不同.所以 2 个堆体在供氧上没有明显差异,这造成 2 个堆体中的氨氮和硝态氮变化差异不大.

4 结论

(1)在猪粪堆肥过程中添加镁盐的情况下,采用

间歇通风方式堆体的总氮(TKN)含量比采用连续通风方式堆体的总氮(TKN)含量高 9.8%,并且采用间歇通风方式堆体的氨气形态氮素损失量为 23.56 g,而采用连续通风方式堆体的氨气形态氮素损失量为 56.98 g,前者氨气形态氮素损失量是仅为后者的 41.35%.

(2)2 种通风方式对猪粪堆肥过程中磷素的形态没有显著影响,2 个堆体在高温堆肥期间水溶态磷、总磷和分级磷的变化规律基本一致.

(3)在猪粪堆肥过程中,2 个堆体均形成了含有磷素和镁盐的混合晶体.

参考文献:

[1] 中国农业年鉴编辑部.中国农业年鉴 2005[M].北京:中国农业出版社,2005.209-215.

[2] 中国农业大学,上海市农业广播电视大学,华南农业大学等.家畜粪便学[M].上海:上海交通大学出版社,1996.49-77.

[3] Tiquia S M, Tam N F Y. Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles [J]. Process Biochemistry, 2002, **37**(8): 869-880.

[4] 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**: 311-314.

[5] Zhang Y, He Y. Co-composting solid swine manure with pine sawdust as organic substrate [J]. Bioresource Technology, 2006, **97**(16): 2024-2031.

[6] Dou Z, Toth J D, Galligan D T, *et al.* Laboratory procedures for characterizing manure phosphorus [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**(2): 508-514.

[7] Hobsom A M, Frederickson J, Dise N B. CH₄ and N₂O from mechanically turned windrow and vermicomposting systems following in-vessel pre-treatment [J]. Waste Management, 2005, **25**(4): 345-352.

[8] 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.

[9] Chiumenti A, Da Borso F, Rodar T, *et al.* Swine manure composting

by means of experimental turning equipment [J]. Waste Management, 2007, **27**(12): 1774-1882.

[10] 常勤学,魏源送,刘俊新. 通风控制方式对动物粪便堆肥过程的影响 [J]. 环境科学学报, 2006, **26**(4): 595-600.

[11] 魏源送,中、小型污水处理厂高效低耗污泥堆肥技术研究 [D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心,2000.95-128.

[12] 魏源送,王敏健,王菊思. 堆肥技术及进展 [J]. 环境科学进展, 1999, **7**(3): 11-23.

[13] Fukumoto Y, Suzuki K, Osada T, *et al.* Reduction of Nitrous Oxide Emission from Pig Manure Composting by Addition of Nitrite-Oxidizing Bacteria [J]. Environ Sci Technol, 2006, **40**(21): 6787-6791.

[14] Kuroda K, Hanajima D, Fukumoto Y, *et al.* Isolation of thermophilic ammonium-tolerant bacterium and its application to reduce ammonia emission during composting of animal wastes [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2004, **68**(2): 286-292.

[15] 郑丹,阎静,陶光灿,等. 添加无机肥料对高温堆肥化及磷素有效性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(6): 1631-1635.

[16] Dou Z, Zhang G Y, Stout W L, *et al.* Efficacy of alum and coal combustion by-products in stabilizing manure phosphorus [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, **32**(4): 1490-1497.

[17] 杨宇,魏源送,刘俊新. 镁盐添加对猪粪堆肥过程中氮、磷养分保留的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2672-2677.

[18] Mason I G. Mathematical modelling of the composting process: A review [J]. Waste Management, 2006, **26**(1): 3-21.

[19] 杨国义,夏钟文,李芳柏,等. 不同填充料对猪粪堆肥腐熟过程的影响 [J]. 土壤肥料, 2003, (3): 29-33.

[20] 南京农业大学. 土壤农化分析 [M]. (第二版). 南京: 南京农业大学出版社, 1985.

[21] Dou Z X, Knowlton K F, Kohn R A, *et al.* Phosphorus characteristics of dairy feces affected by diets [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, **31**(6): 2058-2065.

[22] McGrory D F, Hobbs P J. Additives to reduce ammonia and odor emissions from livestock wastes: a review [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30**(2): 345-355.

[23] Jeong Y K, Kim J S. A new method for conservation of nitrogen in aerobic composting processes [J]. Bioresource Technology, 2001, **79**(2): 129-133.