

# 不同化学添加剂对猪粪堆肥中氮素损失的控制

史春梅<sup>1</sup>, 王继红<sup>1</sup>, 李国学<sup>2\*</sup>, 江滔<sup>2</sup>, 魏洪飞<sup>1</sup>, 马志宏<sup>2</sup>

(1.吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:**以氢氧化镁+磷酸、磷酸、磷酸二氢钾+氯化镁和磷酸二氢钙+氯化镁为固氮添加剂,以猪粪和玉米秸秆为原料,采用强制通风静态堆肥装置进行高温好氧堆肥试验,研究了不同化学添加剂对猪粪堆肥过程中的保氮效果。结果表明,化学添加剂可以显著降低堆肥过程中氨气的排放率。氢氧化镁+磷酸、磷酸、磷酸二氢钾+氯化镁和磷酸二氢钙+氯化镁的氮素损失分别占初始氮的13.15%、11.50%、10.69%和7.59%。与对照相比,各添加剂处理的固氮率为58.27%~75.90%。磷酸二氢钙+氯化镁处理的氮素损失最少,但堆肥过程中有机物降解受到明显的抑制作用。在堆肥结束时,各添加剂处理的有机物降解率仅为对照处理的58.48%~98.70%。最终堆肥产品的种子发芽指数为69.87%~118.24%,表明所有处理在堆置39 d后均达到腐熟。根据模糊评价的结果,该试验中的磷酸二氢钾和氯化镁是堆肥过程中最佳的固氮材料。

**关键词:**猪粪; 氮素损失; 氨气挥发; 腐熟

中图分类号 S141.4 文献标志码 A 文章编号:1672-2043(2011)05-1001-06

## Control of Different Chemical Additives on Nitrogen Loss During Composting of Pig Manure

SHI Chun-mei<sup>1</sup>, WANG Ji-hong<sup>1</sup>, LI Guo-xue<sup>2\*</sup>, JIANG Tao<sup>2</sup>, WEI Hong-fei<sup>1</sup>, MA Zhi-hong<sup>2</sup>

(1.College of Resource and Environment Science, Jilin Agricultural University, Jilin 130118, China; 2.College of Resource and Environment Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** Nitrogen conservation effect of different additives during the composting of pig manure and corn stalks was evaluated in this paper. The results showed that the additives not only reduced the NH<sub>3</sub> emission rate, but also shortened the time of the NH<sub>3</sub> emission. The treatments of Mg(OH)<sub>2</sub> + H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> + MgCl<sub>2</sub> and Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> + MgCl<sub>2</sub> reduced the nitrogen losses as 13.15%, 11.50%, 10.69% and 7.59% respectively. Compared with the CK treatment, the nitrogen fixation rates of the other treatments were from 58.27% to 75.90%. The nitrogen loss of the treatment Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> + MgCl<sub>2</sub> was the least, but it also lessened the pH value and finally had a significant inhibition effect on the organic matter degradation during the composting. After the trials were finished, the organic matter degradation rates of these treatments with additives were only from 58.48% to 98.70% of CK treatment. There were not significant effects on the C/N between the treatments. The germination index of the end products were from 69.87% to 118.24%, which indicated that all treatments were matured after 39 days. According to the results of fuzzy evaluation, it was concluded that both KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> and MgCl<sub>2</sub> were the optimal to be used as the nitrogen conservation materials for the compost.

**Keywords** pig manure; nitrogen loss; ammonia volatilization; maturity

堆肥是实现秸秆和畜禽粪便等废弃物资源循环利用的重要环节。在堆制过程中,有机物分解排放出氨气等臭气,污染周边环境,同时释放出的氧化亚氮等温室气体,导致大量氮素流失,进而造成堆肥产品的养分价值下降。研究表明<sup>[1]</sup>,畜禽粪便堆肥25 d后,

由于氨气挥发导致氮素大量损失,损失量占初始氮氮的47%~62%。影响氨气排放的主要因素有C/N、pH值、温度、通气状况、水分等<sup>[2]</sup>。近年来,国内外对保氮技术进行了不少研究,概括来讲主要有:物理法,如Zorpas等<sup>[3]</sup>研究了天然沸石对氨气的挥发的影响;生物法,如王卫平等<sup>[4]</sup>研究发现,添加复合微生物菌剂对堆肥中氨气挥发的抑制作用显著;化学法,如在堆肥中添加氢氧化镁和磷酸,不仅可以保氮固氮,还可以产生优质的缓效肥料磷酸铵镁<sup>[5]</sup>。由于一些磷酸盐不仅可以减少氨气的挥发,而且可以增加堆肥中的磷营

收稿日期 2010-11-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40971177);中德合作项目“中国农业、养殖业和城镇有机废弃物的资源化”

作者简介:史春梅(1986—),女,研究方向为废弃物处理与资源化。

E-mail shichunmei580121@126.com

\*通信作者:李国学 E-mail ligx@cau.edu.cn

养含量,许多学者用磷酸盐作为控制氮素损失和温室气体排放的固定剂。Jeong等<sup>[6]</sup>通过添加磷酸盐和氯化镁,使堆肥产品中铵态氮含量增加到1.4%。

本试验通过系统地研究氢氧化镁+磷酸、磷酸二氢钾+氯化镁、磷酸二氢钙+氯化镁对减少氮素损失的影响,以期为畜禽粪便堆肥化处理过程中氮素含量变化规律提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试猪粪取自北京市海淀区苏家坨养猪场,玉米秸秆取自河北省衡水地区,粉碎机切割为3 cm,其物料基本特性见表1。

表1 堆肥物料属性

Table 1 The properties of composting materials

原料	总有机碳 %g·kg <sup>-1</sup>	总氮 %g·kg <sup>-1</sup>	C/N	含水率/%
猪粪	349(5.82) <sup>b</sup>	26.5(0.07)	13.2	77.9(1.55)
秸秆	419(8.10)	9.9(0.12)	42.3	9.3(0.01)

注: a 基于干基计算; b 括号内为标准差。

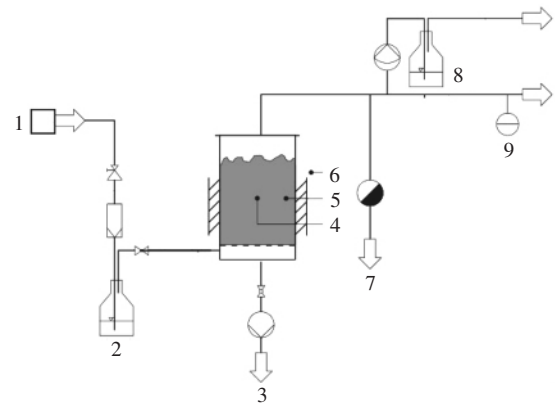
### 1.2 试验设计

用氢氧化镁、磷酸、磷酸二氢钾、氯化镁和磷酸二氢钙化学分析纯为固氮添加剂,以未添加固氮剂的堆肥作为对照。处理中添加剂的物质的量为初始氮(N)的20%,氢氧化镁+磷酸、磷酸二氢钾+氯化镁和磷酸二氢钙+氯化镁处理中的两种固氮剂按1:1(摩尔比)的比例添加。将称好的化学试剂溶于水,然后均匀洒在猪粪和玉米秸秆表面,进行多次翻拌,所有处理在60 L密闭堆肥化装置中进行高温好氧堆肥,试验装置如图1所示,采用强制连续通风,通风率为0.38 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>,堆制39 d,分别在0、4、10、18、39 d翻堆。

### 1.3 采样及测定

堆肥温度通过连接电脑的温度传感器直接读取,堆制期间每天测定氨气(NH<sub>3</sub>),固体样品在翻堆时进行取样,测定pH值、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、有机物(OM)、总氮(TN)和种子发芽率指数(GI)。

用水浸提鲜样,固液比为1:10,pH值用S-3C型pH计测定;干样中的OM用重铬酸钾氧化法测定;TN用凯氏定氮法测定,以上测定方法均参照土壤农化分析方法<sup>[7]</sup>。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的测定,用2 mol·L<sup>-1</sup>的氯化钾溶液浸提,稀释适当倍数,通过流动分析仪测定;GI的测定是取水浸提液5 mL于垫有9 cm滤纸的培养皿中,取10粒小白菜种子,重复3次,放置在



1.空气泵 2.加湿瓶 3.渗滤液 4.温度传感器  
5.堆肥原料 6.隔热层 7.冷凝管 8.洗瓶 9.氧气测定

图1 强制通风静态堆肥装置示意图

Figure 1 The diagram of equipment for composting with mandatory ventilation

20℃培养箱中培养48 h,测定发芽率。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度变化

图2为整个堆肥过程中各处理温度的变化规律,各处理均经历了4个阶段,即初始阶段、高温阶段、降温阶段以及腐熟阶段。在堆肥第1 d嗜温微生物降解有机质时,产生大量的热量,由于固定剂添加种类不同,各处理达到50℃的快慢和持续时间是不同的,除磷酸处理外,各处理的温度均上升到50℃以上。在第5 d翻堆之后,热量和水分散失,物料均匀分布,微生物继续分解易降解有机物,高温阶段持续了一段时期,各处理堆肥温度在55℃条件下均保持了3 d以上,达到我国粪便无害化卫生标准要求<sup>[8]</sup>。磷酸二氢钾+氯化镁、磷酸二氢钙+氯化镁和对照3个处理的最高温度甚至达到70℃,保证了堆肥的无害化和腐熟。堆温在第18 d翻堆之后下降幅度较大,30 d之后堆肥腐熟,温度接近于环境温度。

### 2.2 pH值

如图3所示,由于化学添加剂中H<sup>+</sup>的释放,降低了堆肥中的pH值,4个添加剂处理的pH值均低于对照。堆肥初期,微生物在环境温度下繁殖代谢,有机酸逐渐产生,堆体内pH值下降<sup>[9]</sup>。由于磷酸处理初始pH值比较低,随着温度的升高,嗜温微生物活动减弱,堆内pH值逐渐升高。氢氧化镁处理中OH<sup>-</sup>含量略高,pH值在8.0左右,其他添加剂处理的pH值均维持在6.5~8.0之间。在高温期,除磷酸二氢钾+氯化镁处理外,其他处理的pH值都达到最大值,说明高

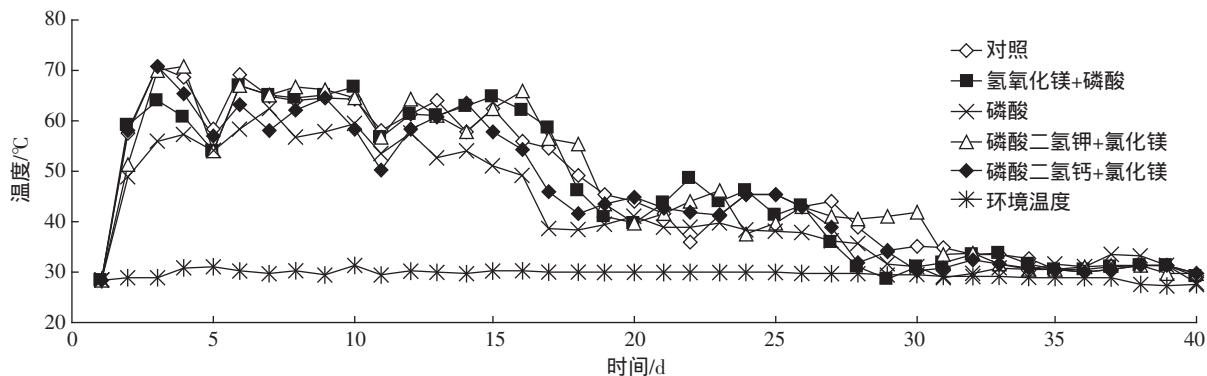


图2 堆肥过程中温度的变化

Figure 2 Changes of temperature during composting

温期是  $\text{NH}_3$  挥发的主要阶段,这和 Tiquia<sup>[10]</sup>的研究结果一致;在降温过程中,pH 值变化趋势平缓;在堆肥结束时,pH 值在 7~8.5 之间。

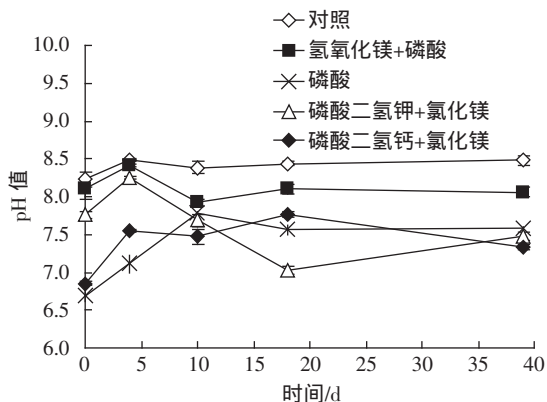


图3 堆肥过程中 pH 值的变化

Figure 3 Changes of pH value during composting

### 2.3 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}$

各堆肥处理的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  变化趋势如图 4 所示,随着堆体进入高温阶段,有机物大量降解,产生  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 。一部分  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  转化为  $\text{NH}_3$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ,由于通风而挥发;一部分转化为有机 N 和  $\text{NO}_3^--\text{N}$ 。大部分添加剂处理的最终  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的含量比初始的高,添加剂处理的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量明显高于对照处理,说明固定剂通过化学沉淀反应或低的 pH 值将  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  固定下来。总体上,在温度不变的情况下,pH 是决定  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NH}_3$  平衡的关键,酸性环境有利于  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的存在,减少  $\text{NH}_3$  挥发<sup>[11]</sup>。本试验中的磷酸处理 pH 值低于其他处理,所以该处理的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量最高,其次是磷酸二氢钙+氯化镁处理。

由于高温抑制了硝化细菌的活性,高温期几乎不会发生硝化作用,硝化作用主要发生在堆肥腐熟期<sup>[12]</sup>。

如图 5 所示,每个处理初始的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量在  $0.07\sim 0.11 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,在降温阶段, $\text{NH}_4^+-\text{N}$  在硝化细菌的作用下转化为  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,各处理  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量变化呈上升的趋势,并且添加剂处理的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量上升幅度大于对照处理。磷酸处理的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量的上升幅度最明显,主要是由于磷酸对  $\text{NH}_3$  的吸收,堆体中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量增加,有利于其向  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的转化。

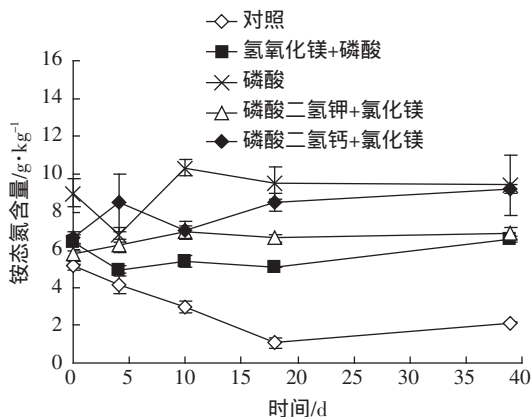


图4 堆肥过程中铵态氮含量的变化

Figure 4 Changes of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  concentration during composting

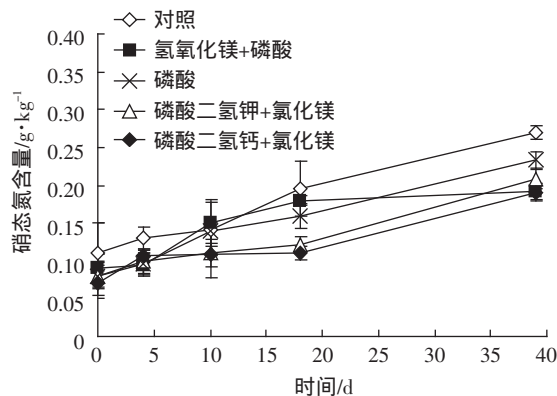


图5 堆肥过程中硝态氮含量的变化

Figure 5 Changes of  $\text{NO}_3^--\text{N}$  concentration during composting

## 2.4 NH<sub>3</sub> 和 N 素平衡分析

如图 6 所示,氨气的产生与温度呈显著的正相关关系,各处理在第 5 d 出现一个高峰,由于化学添加剂对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的固定,使 NH<sub>3</sub> 的挥发量明显减少。15 d 之后 NH<sub>3</sub> 的释放量减少,可见 NH<sub>3</sub> 排放主要集中在堆肥高温前期,这与 Pagans 等<sup>[13]</sup>的观点相同。随着堆温的下降,硝化作用增强,而有机 N 矿化作用减弱,NH<sub>3</sub> 挥发量随之减少。与对照相比,其他处理在 NH<sub>3</sub> 快速挥发阶段的释放速率不仅低于对照,而且挥发时间也明显缩短,表明添加不同种类的化学添加剂对于堆肥中减少 NH<sub>3</sub> 的释放量效果明显。在整个堆肥过程中,磷酸二氢钙+氯化镁和磷酸两个处理的 pH 值都在 8 以下,显著抑制了铵盐向 NH<sub>3</sub> 的转化,同时磷酸二氢钙增加了堆肥中有机磷的含量。

从表 2 可以看出,添加磷酸二氢钙+氯化镁的处理保氮效果最好,而磷酸的效果次之,磷酸二氢钾+氯化镁和氢氧化镁+磷酸的效果不如前两个处理。在本研究中,NH<sub>3</sub>-N 对 N 损失贡献比例为 70%左右,对照的 NH<sub>3</sub>-N 损失占初始 N 的 23.20%,其他添加剂处理明显低于对照( $P < 0.05$ ),说明化学添加剂可以不同程度地减少 N 素损失,各添加剂处理之间 N 素损失差异不大。有研究表明<sup>[14]</sup>,氢氧化镁+磷酸的摩尔比为 1:4 时,固氮率可以达到 97%以上。在本试验中,两种物质的摩尔比为 1:1,固氮率为 58.27%。

## 2.5 OM 和 C/N

如表 3 所示,各添加剂处理在一定程度上抑制了 OM 的降解。氢氧化镁+磷酸和磷酸二氢钾+氯化镁两个处理的 OM 降解率接近于对照处理。磷酸处理的 OM 降解率最低,磷酸二氢钙+氯化镁处理的 pH 值略高于磷酸处理,所以,该处理的 OM 降解率低。有学者认为<sup>[15]</sup>,过量磷酸盐的加入对堆肥有负面影响,因为过

表 2 不同处理的氮物质损失

处理	NH <sub>3</sub> -N 损失/ %	其他/ %	N 损失/ %
对照	23.20	8.31	31.51
氢氧化镁+磷酸	9.60	3.55	13.15
磷酸	7.10	4.40	11.50
磷酸二氢钾+氯化镁	8.46	2.23	10.69
磷酸二氢钙+氯化镁	5.45	2.14	7.59

低的 pH 值会使微生物活性降低,同时过量磷元素不利于微生物生存。在整个堆制过程中,碳源被消耗,转化成二氧化碳和腐殖质,而氮源以 NH<sub>3</sub> 的形式散失,转变为硝酸盐和亚硝酸盐,或是被生物体同化吸收。从图 7 可以看出,所有堆肥处理的 C/N 随着堆肥的进行而呈现出下降趋势,每个处理之间差异不显著。

表 3 堆肥过程中 OM 的降解率

处理	堆肥前/kg	堆肥后/kg	降解率/%
对照	6.51	2.37	63.65
氢氧化镁+磷酸	7.18	2.67	62.82
磷酸	6.92	4.34	37.22
磷酸二氢钾+氯化镁	7.54	3.15	58.22
磷酸二氢钙+氯化镁	7.00	3.90	44.20

## 2.6 种子发芽率指数 GI

GI 是评价堆肥腐熟度及植物毒理性质的一个重要敏感参数。如果  $GI > 50\%$ ,则认为基本无毒性<sup>[16]</sup>,当 GI 达到 80%~85%时,可认为对植物没有毒性。磷酸二氢钾+氯化镁和磷酸二氢钙+氯化镁两个处理在第 18 d 的发芽率已达到 80%。如图 8 所示,由于各添加剂使堆肥中的可溶性盐类的浓度升高,初始的 GI 低于对照处理,随着堆温升高,所有处理的发芽率指数呈上

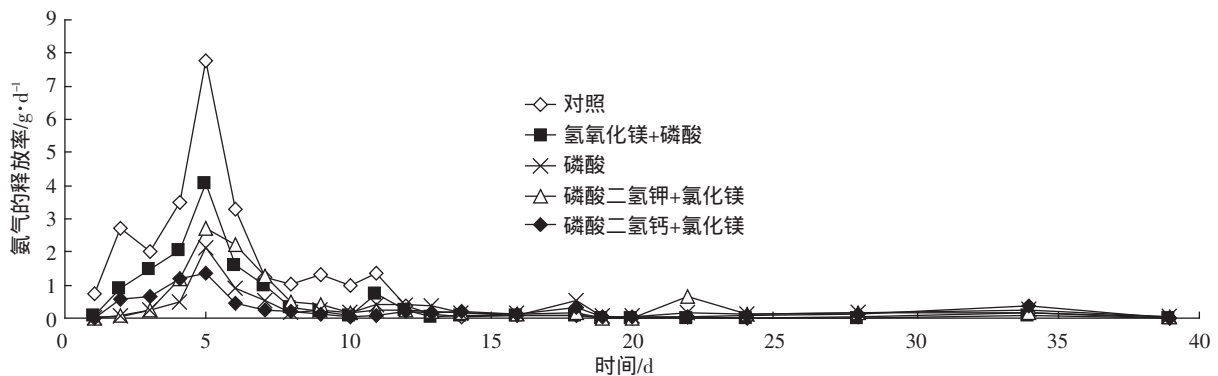


图 6 堆肥过程中 NH<sub>3</sub> 排放率的变化

Figure 6 Changes of NH<sub>3</sub> emission rate during composting

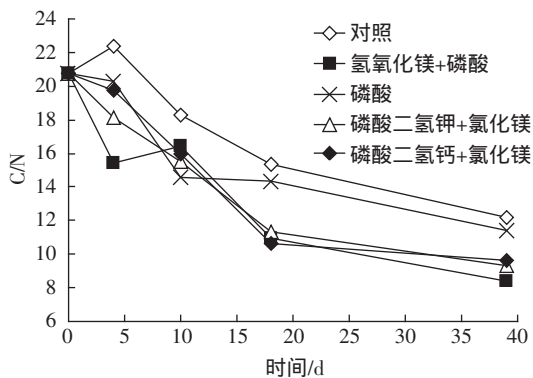


图 7 堆肥过程中 C/N 排放率的变化

Figure 7 Changes of C/N emission rate during composting

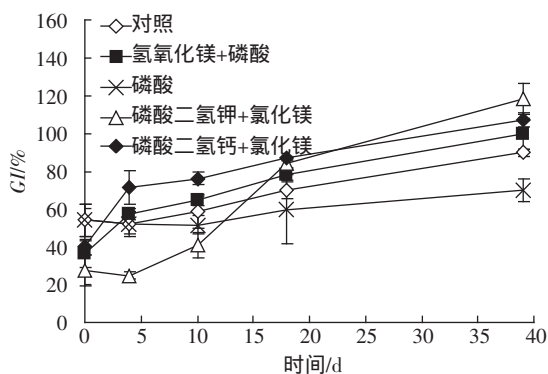


图 8 堆肥过程中的 GI 变化

Figure 8 Changes of GI during composting

升趋势,除磷酸处理,其他添加剂处理在堆肥结束时的 GI 高于对照处理。磷酸二氢钾+氯化镁处理的发芽率指数明显高于对照( $P < 0.05$ ),说明加入磷酸二氢钾+氯化镁可以有效地改善物料属性,促进微生物活性,增强有机物的降解,最终有利于堆肥腐熟。

## 2.7 不同处理的模糊评价

### 2.7.1 确定模糊评价因子

模糊评价是从多方面对事物进行一个总的评价,使结果更加客观,从而取得更好的实际效果。本研究主要选用堆肥高温期( $\geq 55^\circ\text{C}$ )持续时间(d)、N 损失(%),OM 降解率(%)和种子发芽率 GI(%)4 个指标进行评价,筛选出最优的保氮处理。由于本研究主要目的是在保证堆肥腐熟度的同时实现控制 N 素损失,所选用的评价体系与以往报道的研究<sup>[17]</sup>有所不同。根据以上研究结果,每个评价因子的具体值如表 4 所示。

### 2.7.2 确定评价因子等级

根据不同处理的 4 个指标划分为 4 个等级(1 级、2 级、3 级、4 级),各评价因子对应的分级指标如表 5 所示。

### 2.7.3 建立每个评价因子的隶属度函数模型

以堆肥高温期( $\geq 55^\circ\text{C}$ )持续时间(单位 d,以  $x$

表 4 不同处理的评价因子

Table 4 Values of all evaluation factors of different treatments

处理	$\geq 55^\circ\text{C}$ 维持天数/d	N 损失/%	OM 降解率/%	GI/%
对照	15	31.51	63.65	89.82
氢氧化镁+磷酸	16	13.15	62.82	99.54
磷酸	8	11.50	37.22	69.87
磷酸二氢钾+氯化镁	16	10.69	58.22	118.24
磷酸二氢钙+氯化镁	14	7.59	44.20	107.42

表 5 各评价因子分级指标

Table 5 Classification of compost maturity level

项目	1 级	2 级	3 级	4 级
$\geq 55^\circ\text{C}$ 维持时间/d	20	15	10	5
N 损失/%	5	15	25	35
OM 降解率/%	65	55	45	35
GI/%	120	100	80	60

表示)分别建立隶属度模型,如下所示:

$$y_1 = \begin{cases} 0 & x \leq 15 \\ 0.2(x-15) & 15 < x < 20 \\ 1 & x \geq 20 \end{cases}$$

$$y_2 = \begin{cases} 0 & x \leq 10 \text{ 或 } x \geq 20 \\ 0.2(x-10) & 10 < x \leq 15 \\ 0.2(20-x) & 15 < x < 20 \end{cases}$$

$$y_3 = \begin{cases} 0 & x \leq 5 \text{ 或 } x \geq 15 \\ 0.2(x-5) & 5 < x \leq 10 \\ 0.2(15-x) & 10 < x < 15 \end{cases}$$

$$y_4 = \begin{cases} 0 & x \geq 10 \\ 0.2(10-x) & 5 < x < 10 \\ 1 & x \leq 5 \end{cases}$$

式中  $y_1, y_2, y_3, y_4$  为各评价因子不同等级隶属度值,其他各项指标也按同样的方法求出隶属度函数。

### 2.7.4 评价因子权重

本研究运用的权重计算式为:

$$w_i = \left( \frac{c_i}{s_i} \right) / \sum_{i=1}^m \frac{c_i}{s_i}$$

式中  $w_i$  为第  $i$  种评价因子的权重,  $c_i$  为第  $i$  种评价因子实测值,  $s_i$  为第  $i$  种评价因子分级标准平均值,  $m$  为评价因子个数。

计算出各因子权重后,组成权重模糊矩阵  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ 。对于堆肥高温期持续时间、OM 降解率和 GI 来说,数值越大越好,所以相应权重应取其倒数。

### 2.7.5 模糊综合评价

表 6 为隶属度矩阵  $R$  与权重矩阵  $W$  的模糊复合运算的结果。

表6 模糊评价结果

Table 6 Results of the fuzzy mathematics evaluation

处理	模糊评价矩阵	评价等级
对照	$W \cdot R = \{0.187, 0.239, 0.349, 0.375\}$	4级
氢氧化镁+磷酸	$W \cdot R = \{0.254, 0.288, 0.023, 0.000\}$	2级
磷酸	$W \cdot R = \{0.121, 0.121, 0.328, 0.328\}$	3级
磷酸二氢钾+氯化镁	$W \cdot R = \{0.293, 0.293, 0.200, 0.000\}$	1级
磷酸二氢钙+氯化镁	$W \cdot R = \{0.258, 0.275, 0.349, 0.080\}$	3级

从表6可知,4种添加剂处理的综合评价优于对照处理,其中磷酸二氢钾+氯化镁处理的隶属度为0.293,评价等级为1级,说明该处理在保氮及腐熟程度方面具有显著的优势;氢氧化镁+磷酸处理的隶属度为0.288,评价等级为2级;磷酸处理的隶属度为0.328,磷酸二氢钙+氯化镁处理的隶属度为0.349,两个处理的评价等级都为3级;对照处理的隶属度为0.375,评价等级为4级。

### 3 结论

(1)从试验结果可以看出,NH<sub>3</sub>挥发主要集中在堆肥前期,氢氧化镁+磷酸、磷酸、磷酸二氢钾+氯化镁、磷酸二氢钙+氯化镁4个处理对NH<sub>3</sub>的排放都有一定的抑制作用,表明这4种处理适用于堆肥的氮素损失控制。其中,固氮效果最好的是磷酸二氢钙+氯化镁处理。

(2)所有处理的C/N都呈现下降趋势,磷酸二氢钙+氯化镁和磷酸两个处理的有机物降解率显著低于其他处理。

(3)通过种子发芽率可以确定,所有处理都达到腐熟,磷酸二氢钾+氯化镁处理的发芽率最高,说明这一处理可以使堆肥快速腐熟。

因此,从模糊数学评价的结果分析,添加磷酸二氢钾+氯化镁是保氮的最佳处理方式,但对于两者具体的添加比例还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Kithome M, Paul J W, Bomke A A. Reducing nitrogen losses during simulated composting of poultry manure using adsorbents or chemical amendments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28: 194-201.
- [2] 吴淑杭, 姜震方, 俞清英. 畜禽粪堆肥技术进展[J]. *上海农业学报*, 2003, 19(1): 50-52.  
WU Shu-hang, JIANG Zhen-fang, YU Qing-ying. Progress in technologies of the composting animal manure[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2003, 19(1): 50-52.
- [3] Zorpas A A, Constantinides T, Vlyssides A G, et al. Heavy metal uptake by natural Zeolite and metals partitioning in sewage sludge compost[J].

*Bioresource Technology*, 2000, 72(2): 113-119.

- [4] 王卫平, 汪开英, 薛智勇, 等. 不同微生物菌剂处理对猪粪堆肥中氨挥发的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(4): 693-697.  
WANG Wei-ping, WANG Kai-ying, XUE Zhi-yong, et al. Effects of microbial agents on NH<sub>3</sub> emission during pig manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 693-697.
- [5] Lee J E, Rahmam M M, Ra C S. Dose effects of Mg and PO<sub>4</sub> sources on the composting of swine manure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169: 801-807.
- [6] Jeong Y K, Kim J S. A new method for conservation of nitrogen in aerobic composting process[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 79(2): 129-133.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-49.  
BAO Shi-dan. Soil analysis in agricultural chemistry [M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Publishing Company, 2000: 25-49.
- [8] GB 7959-1987, 粪便无害化卫生标准[S].  
GB 7959-1987, Sanitary standard for the non-hazardous treatment of might soil[S].
- [9] Eklind Y, Kirchmann H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. Nitrogen turnover and losses [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 74: 125-133.
- [10] Tiquia S M, Tam N F Y. Fate of nitrogen during composting of chicken litter[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110: 535-541.
- [11] Ndegwa P M, Hristov A N, Arogo J, et al. A review of ammonia emission mitigation techniques for concentrated animal feeding operations [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100: 453-469.
- [12] Tiquia S M, Tam N F Y. Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles[J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37: 869-880.
- [13] Pagans E, Barrena R, Font X, et al. Ammonia emissions from the composting of different organic wastes dependency on process temperature [J]. *Chemosphere*, 2006, 62: 1534-1542.
- [14] 林小凤, 李国学, 贺琪, 等. 堆肥化过程中氮素损失控制材料的添加试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(5): 975-978.  
LIN Xiao-feng, LI Guo-xue, HE Qi, et al. Materials of controlling nitrogen loss during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5): 975-978.
- [15] 胡天觉, 曾光明, 黄国和, 等. 好氧堆肥中不同吸附料对氨吸附效果及堆肥性质的影响[J]. *环境科学*, 2005, 26(1): 190-195.  
HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, HUANG Guo-he, et al. Influence of different sorbents on adsorption effect of ammonia and compost property in aerobic composting[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 190-195.
- [16] Neyla S, Soulwene K, Fadhel M, et al. Microbiological parameters and maturity degree during composting of *Posidonia oceanica* residues mixed with vegetable wastes in semiarid pedoclimatic condition [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21: 1452-1458.
- [17] 张永涛, 张增强, 孙西宁. 模糊数学法在堆肥腐熟度评价中的应用[J]. *环境卫生工程*, 2009, 17(4): 45-48.  
ZHANG Yong-tao, ZHANG Zeng-qiang, SUN Xi-ning. Application of fuzzy mathematics in evaluation of composting maturity [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2009, 17(4): 45-48.