

氢氧化镁和磷酸固定剂控制堆肥氮素损失的研究

任丽梅¹, 贺琪², 李国学¹, 路鹏³, 沈玉君¹, 郭瑞¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 北京航天万源科技公司, 北京 100176; 3. 北京市环境卫生设计科学研究所, 北京 100028)

摘要: 利用原位控制思路, 在模拟堆肥试验的基础上, 通过实验室堆肥小试研究, 将麦麸和鸡粪按比例混合, 将不同配比、不同添加量、不同投加方式的固定剂应用于堆肥物料进行比较试验。结果表明, 3 种配比的固定剂适合应用于堆肥过程中进行氮素损失控制。与其他类固定剂相比, 磷酸比例高的添加剂具有较好的固定效果, 磷酸比例低的固定剂在堆肥化的初期具有相对较好的固定效果, 而且价格便宜。堆肥化过程中采用分批加入固定剂相对于物料混合时一次性加入等量固定剂的固定效果显著, 固定剂的加入可以在补水、翻堆时进行。采用与堆肥物料混匀和表面喷淋相结合方法比单独一种方法对氮的固定效果好。

关键词: 氢氧化镁; 磷酸; 堆肥; 原位控制; 固氮效果

中图分类号: X141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)04-0814-06

Effect of $Mg(OH)_2$ and H_3PO_4 Amendments on Nitrogen Conservation During Composting

REN Li-mei¹, HE Qi², LI GUO-xue¹, LU Peng³, SHEN Yu-jun¹, GUO Rui¹

(1. College of Resource and Environmental Science, China Agriculture University, Beijing 100094, China; 2. Beijing Hangtian Wanyuan Science & Technology Co., Ltd, Beijing 100176, China; 3. Beijing Environmental Sanitation Engineering Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: This study aimed at investigating the effects of absorbent mixture of magnesium hydroxide [$Mg(OH)_2$] and phosphorus acid (H_3PO_4) on controlling N loss, because the nitrogen loss caused by the release of ammonia gas was serious during composting. In this study, $Mg(OH)_2$ and H_3PO_4 was added into the mixture of chicken manure and wheat bran directly based on the principle of in-situ control. In order to compare the nitrogen fixation effect of absorbents and choose optimum application methods for practical application, the different ratio and dosage of $Mg(OH)_2+H_3PO_4$ were applied based on results of simulated composting. The total nitrogen (TN) and ammoniacal nitrogen (NH_4^+-N) were measured during composting, as well as nitrogen fixation ratio in different phases was analyzed. These results showed that more H_3PO_4 in additives could conserve more nitrogen in compost, however, using the additive which contains lower proportional H_3PO_4 in initial phase could reduce the cost. From the results of TN content and nitrogen fixation ratio, the effect of adding amendments in different phases was better (the maximum fixation ratio reached 95.54%) than adding them in a large quantity only once. The nitrogen conservation effect by mixing the amendments into composting materials or spraying them on composting materials respectively was not as effective as using two methods simultaneously.

Keywords: magnesium hydroxide; phosphorus acid; composting; in-situ control; effect of nitrogen conservation

好氧堆肥过程中氮素损失控制问题, 一直是国内外学者研究的热点^[1-4], 有学者提出原位控制思路^[5-6], 主要针对堆肥化过程来进行控制的方法, 如通过对堆肥化过程工艺条件的控制^[7]; 添加吸附材料、富碳物

料^[8]; 或者通过添加化学药剂与释放的氨进行反应^[9]; 还有的采用添加保氮除臭的微生物菌剂等^[10]。

近年来, 污水处理厂常应用鸟粪石 ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) 结晶反应去除污水中的氮和磷^[11-14], 利用此原理不仅能达到污水处理的目的, 而且能有效回收资源, 所生成的磷酸铵镁是一种优质缓效肥料^[15]。将鸟粪石结晶反应原理应用于好氧堆肥过程, 通过添加 Mg 盐和 P 盐使 NH_3 在堆肥中以磷酸铵镁结晶 ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) 的形式沉淀下来, 也可有效减少堆肥 NH_3 的挥发^[16-17], 然而, 堆肥环境不同于污水,

收稿日期: 2008-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30571084); 国家科技支撑项目 (2006BAD10B05); “十一五”国家科技支撑计划“京郊地区种养业废弃资源循环利用技术集成研究与示范” (2007BAD89B07)

作者简介: 任丽梅 (1978—), 女, 博士研究生, 研究方向为固体废弃物处理与资源化。E-mail: aomei386@yahoo.com.cn

通讯作者: 李国学 E-mail: ligx@cau.edu.cn

其反应过程可能更为复杂,在堆肥中如何添加此类固定剂及添加后对堆肥氮素的影响等问题还需要作更深入的研究。

本文在实验室模拟堆肥环境,氢氧化镁和磷酸混合物作为固定剂的试验基础上^[18],通过实验室堆肥小试研究,将不同配比的氢氧化镁和磷酸的混合物按照不同添加方案进行小试试验,以探讨该混合添加剂控制堆肥过程中氨气释放的优选方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验以鸡粪和麦麸作为堆肥材料,鸡粪取自中国农业大学养鸡场,麦麸取自北京海淀兴隆实验动物养殖场。堆肥物料的基本性状见表 1。所选用固定剂为氢氧化镁、磷酸和水的混和物,按照 $\text{Mg}(\text{OH})_2:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}$ 的不同配比将固定剂分为 G1、G2 和 G3,并分别以不同量投加到物料中,如表 2 所示。

表 1 堆肥小试物料的基本性质

Table 1 Characteristics of composting materials

堆肥物料	含碳量/%	含氮量/%	C/N	水分含量/%
鸡粪	25.71	1.52	16.91	66.8
麦麸	33.7	2.6	12.96	10
混合物料	32.2	2.4	13.42	45

表 2 不同配比氢氧化镁与磷酸混合物

Table 2 The absorbent mixture of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and H_3PO_4 with different ratio

处理编号	固定剂(质量比)			固定剂占物料干物重比例/%
	氢氧化镁/%	磷酸/%	水/%	
CK	0	0	0	0
G1-1	2.7	9.2	88.1	4.4
G1-2	2.7	9.2	88.1	8.8
G1-3	2.7	9.2	88.1	13.2
G1-4	2.7	9.2	88.1	17.8
G1-5	2.7	9.2	88.1	22
G2-1	2.7	13.5	83.8	3.4
G2-2	2.7	13.5	83.8	6.9
G2-3	2.7	13.5	83.8	10.3
G2-4	2.7	13.5	83.8	13.7
G2-5	2.7	13.5	83.8	17.2
G3-1	2.6	17.7	79.7	2.5
G3-2	2.6	17.7	79.7	5
G3-3	2.6	17.7	79.7	7.4
G3-4	2.6	17.7	79.7	10
G3-5	2.6	17.7	79.7	12.4

注:投加比例为固定剂质量与物料质量的比值。

1.2 堆制方案

根据模拟试验的结果^[18],选取 G3-1、G3-2、G3-3、G2-1、G2-3、G2-4、G1-2、G1-3、G1-5 作为本研究的添加剂,对比单一添加和混合添加的效果,单一添加主要对比不同投加量的效果,混合添加主要对比堆肥不同阶段使用不同添加剂的效果,以及不同使用方式的效果。混合添加的配比原则总体遵循固氮效果较好且成本较低,尽量使不同添加方案的成本相近。最终筛选出较为合理的添加量和添加方式,为生产实践提供理论依据。研究采用实验室堆肥小试研究方法,将麦麸和鸡粪按比例混合,混合物料性质如表 1 所示。将盛有混合物料和氮素固定剂的微型堆肥装置放入智能光照培养箱,堆肥装置如图 1 所示。模拟室外堆肥温度控制堆体的温度,堆制过程中的温度控制如图 2 所示。堆制共设 16 个处理,如表 3 所示,各处理水分控制在 55% 左右,堆制 19 d。同时分别在 0、3、11、19 d 时取样,重量在 100~200 g,样品分成两份,一份为鲜样储存 4℃ 冰箱中待用,另一份在 105℃ 下烘干测定水分,粉碎待用。根据样品中含水率计算堆肥内水分,并以此作为补充水分的依据,使其保持 55%。在堆制过程中采用人工翻堆。

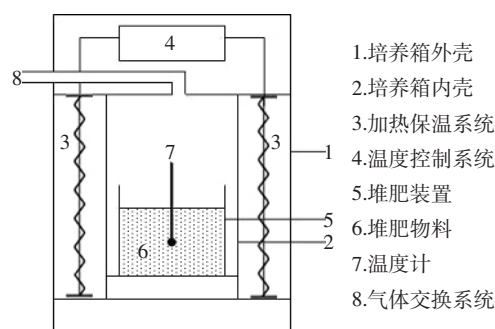


图 1 堆肥装置结构示意图

Figure 1 The structure of composting experimental devices

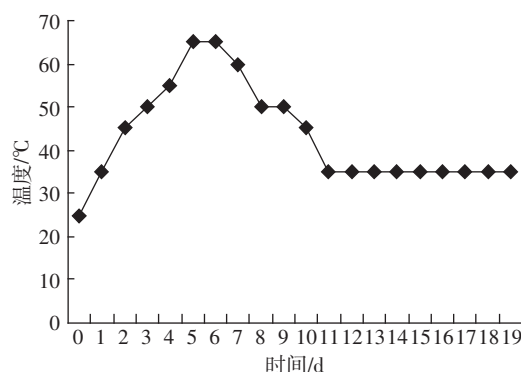


图 2 堆肥小试温度曲线控制

Figure 2 Graph of daily temperature during composting

表 3 堆肥小试实验设计表

Table 3 The design of doses and methods of adding adsorbents

处理	固定剂种类	投加时间/d	投加方式
CK			
1	G1-2	0	与物料混匀
2	G1-3		
3	G1-5		
4	G2-1		
5	G2-3		
6	G2-4		
7	G3-1		
8	G3-2		
9	G3-3		
10	G1-2+G3-2	0+3	
11	G1-2+G3-1		
12	G3-1+G3-1+G3-1	0+3+11	
13	G1-2+G3-1+G2-1		
14	G1-1+G3-1+G3-1		
15	G3-1+G3-1	0	与物料混匀+喷淋堆体表面

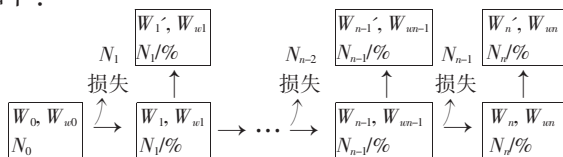
1.3 测定指标与方法

(1)测定指标:全氮(TN)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、有机氮。

(2)测定方法:TN 采用硫酸-高氯酸联和红外消煮后通过凯氏定氮法测定; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的测定采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液浸提,固液比为 1:20,滤液上流动分析仪测定;有机氮含量为总氮含量与无机氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量的差。

(3)氮素损失率及氮素固定率计算方法

依据物料平衡和氮素平衡的原理,氮素损失过程如下:



其中:

n ——取样次数;

W_0 ——堆肥开始时堆肥原料总重量,鲜重,kg;

W_{u0} ——堆肥开始时堆肥样品含水量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;

W_n ——每次取完样后堆肥重量,鲜重,kg;

W_{un} ——每次取样时堆肥含水量, %;

W_n' ——每次取的样品重量,鲜重,kg;

N_n ——每次取样的全氮含量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;

根据氮素平衡则有:

第一次取样前后: $W_0 \times (1 - W_{u0}) \times N_0 = (W_1 + W_1') \times$

$(1 - W_{u1}) \times N_1 + N_1$ 损失

第二次取样前后: $W_1 \times (1 - W_{u1}) \times N_1 = (W_2 + W_2') \times$

$(1 - W_{u2}) \times N_2 + N_2$ 损失

依此类推,每次取样间隔均有氮素损失。

第 n 次取样前后,氮素平衡式:

$W_{n-1} \times (1 - W_{un-1}) \times N_{n-1} = (W_n + W_n') \times (1 - W_{un}) \times N_n + N_n$ 损失

则总的全氮损失量: $N_{\text{总损失量}} = N_1 \text{ 损失} + N_2 \text{ 损失} + \dots + N_n \text{ 损失}$

氮素损失率: $N_{\text{损失率}}(\%) = \frac{N_{\text{总损失量}}}{N_{\text{初始量}}} \times 100$

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

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程中全氮的变化趋势

如图 3 所示,添加固定剂的各处理总氮含量在整个堆制过程中都明显高于对照 CK,CK 的含氮量经过 19 d 的堆肥化处理呈下降趋势,下降最快的阶段是升温期和高温期,降温阶段和腐熟阶段全氮含量变化不大,到 19 d 堆肥化结束时其全氮含量较 11 d 时的全氮含量略高一点。而添加固定剂的各处理全氮含量整体上看均有增加,各处理在第 3 d(升温阶段)全氮含量均有较高的增加趋势。处理 1、2、3、4、5 在第 11 d(高温阶段)的含氮量与第 3 d 相比没有显著的变化,其中处理 1、3 略有降低,处理 2、4、5、7、8 的含氮量都有不同幅度的上升,而处理 6、9 在 11 d 时含氮量降低较多。在堆肥化第 19 d(降温阶段、腐熟阶段)相对于第 11 d 时,9 个处理全氮均没有较大的变化。分析堆肥开始阶段一次性投加固定剂的 9 个处理,发现不同配比的固定剂随着投加量的增多,在第 3 d 时其含氮量呈升高趋势,而这几个处理在高温阶段、降温阶段、腐熟阶段固定效果均不是很好。从图中可以看出 2 次投加固定剂和 3 次投加固定剂各处理(处理 10~

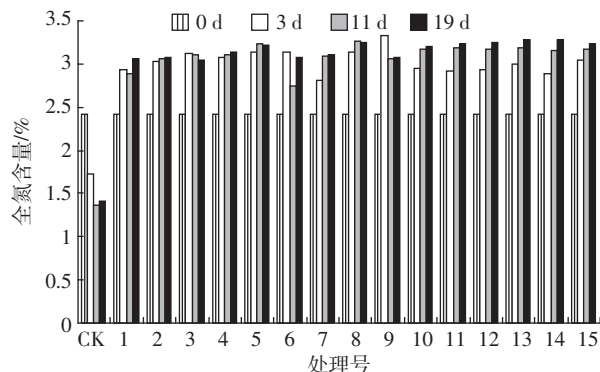


图 3 添加固定剂堆肥化过程中全氮变化

Figure 3 Changes of total-N content of different treatments

15)的全氮含量变化趋势基本相同,整个堆肥过程中都呈上升趋势,3 d时含氮量均显著提高,11 d时又有一个较大的提高,堆肥化后期全氮含量仍有提高,较前10个处理的提高幅度明显。可见堆肥化过程中分批添加固定剂对各阶段的氮素损失固定效果有好处。

2.2 堆肥过程中各氮素形态的变化趋势

堆肥化过程中的硝态氮含量测定显示,各处理硝态氮含量太小几乎接近于0,故在对氮素形态分析时认为它为0。

图4和图5分别显示了堆肥化过程中铵态氮和有机氮的变化趋势,堆肥化过程中CK处理在0、3、11、19 d的铵态氮呈上升趋势,而有机氮呈下降趋势,表明堆肥化各阶段的主要氮素变化形式为大分子非水溶性有机氮氧化分解为小分子水溶性有机氮和铵态氮,而在19 d时有机氮含量仍呈显著下降趋势,说明堆肥化还远未达到腐熟^[19]。

堆肥化过程中各处理铵态氮整体呈增加趋势,处理4、13具有相同的变化规律,在3 d时铵态氮显著

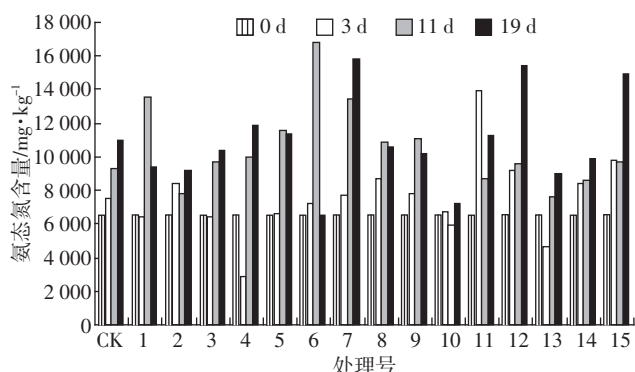


图4 添加固定剂堆肥化过程中铵态氮变化

Figure 4 Changes of ammoniacal-N content of compost with different adsorbents

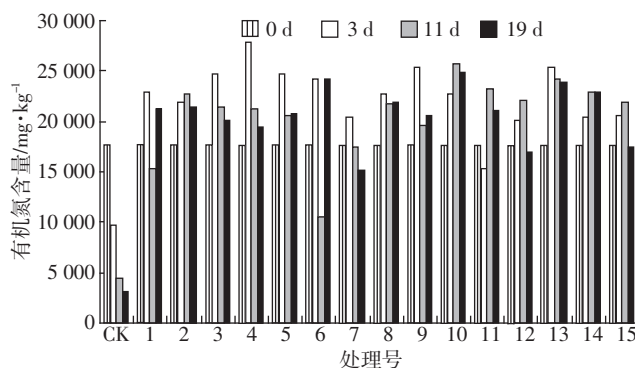


图5 添加固定剂堆肥化过程中有机氮变化

Figure 5 Change of organic N content of compost with different adsorbents

减少,与CK相比较分别减少了4 665.8、2 922.4 mg·kg⁻¹,有机氮显著升高,而后铵态氮逐渐上升,有机氮逐渐下降;而处理11、15铵态氮含量相对于CK有较高的增加,分别增加了6 408.5、2 246.3 mg·kg⁻¹,其余各处理与CK接近。从图3看出全氮含量是增加的,表明铵态氮减少并不是损失,而是通过细胞质合成作用生成小分子水溶性有机氮,也就是说固定剂控制住了氮素的损失,而后铵态氮含量的升高,表明堆体内氮素变化以大分子有机物氧化分解为主导地位。处理2、10、11、15在堆肥化的第3 d,铵态氮含量相对于0 d时有一定的增加,而有机氮则减少,在第11 d时处理11铵态氮含量显著降低,而其余3个处理基本保持不变或略微有些减少,说明固定剂固定的氮素在3~11 d时被合成小分子有机氮,到11 d时铵态氮的合成与有机氮的分解基本达到平衡,而后,平衡被打破,有机氮氧化分解占主导地位。处理1、6、8、9的铵态氮含量在第3、11 d时均有一定的增加,而处理6、9有机氮在11 d时显著降低,到19 d时铵态氮含量有一定的减少,表明铵态氮的增加既有固定剂的作用,也有堆体内微生物氧化分解有机氮的作用。处理3、5、7、12、14在0、3、11、19 d时铵态氮的变化规律与CK基本相似,但从全氮含量的差别上可以看出施用固定剂对堆肥化氮素损失控制的效果。

2.3 堆肥过程中各阶段氮素固定效果

从图6中可以看出,不同处理0~3 d的固定率规律性不明显,这与模拟堆肥试验的结果不一致^[18],可能是由于下列原因造成:首先,堆肥物料粒径大小等原因很难使所有处理具有绝对的均匀性,这种差异对堆肥过程中的氮素固定率还是有一定的影响;其次,模拟堆肥试验的结论是在模拟堆肥化高温阶段的条件下试验所得,其pH值在8.5左右,而在堆肥化的初期,由于有机酸的形成使堆肥物料pH值较低,约在6~7左右,这种差异对氢氧化镁与磷酸混合固定剂的影响很大。据资料显示,H₃PO₄是一种弱酸,分三步电离,在pH<9时,主要得到Mg(H₂PO₄)₂,溶液中PO₄³⁻浓度很低,不利于MgNH₄PO₄沉淀生成,当pH值很高(11左右),生成比MgNH₄PO₄(K_{sp}=2.5×10⁻¹⁰)更难溶于水的沉淀Mg₃(PO₄)₂(K_{sp}=9.8×10⁻²³),溶液中几乎不含有Mg²⁺和PO₄³⁻^[20-21]。考虑到堆肥化本身的特性,所以认为在堆肥化的初期使用G1固定剂有较好的效果,如图6所示。处理3具有很好的固定效果,固定率达到97.59%,而处理10、11、13、14在混合物料时也是使用G1固定剂,也有较好的固定效果,而处理1

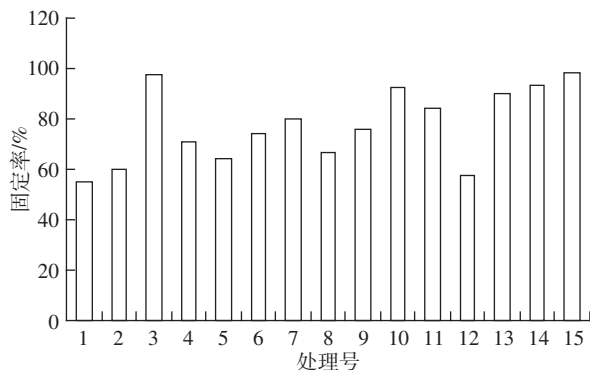


图 6 0~3 d 氢氧化镁和磷酸混合固定剂不同投加方案的固定率
Figure 6 Nitrogen fixation ratio of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and H_3PO_4 by different scheme during first 3 days

的效果不好可能是物料均匀性的原因。图中可以看出处理 15 具有较好的固定效果,而处理 15 与处理 8 使用 G3 固定剂,而且投加量相同,只是投加方式不同,这也说明了堆体表面喷淋固定剂也会收到较好的固定效果。

随着堆肥化的进行,由于物料的自身原因所导致的非均匀性会逐渐减弱,通过图 7、图 8 我们对 1~9 处理进行比较分析表明,不同配比的固定剂随着投加量的增加固定效果也会更好,而处理 3 在第 11、19 d 固定率的逐渐下降,逐渐低于 G2、G3 固定剂各处理的固定率,这是因为随着堆肥化的进行 pH 逐渐升高,G2、G3 自身固定效果相对较好的优势得以体现。处理 10、11 为分两次投加固定剂的处理,其在第 11、19 d 的固定效果相对于前 9 个仅在混合物料时投加固定剂的处理要好,图中其优势并没有被显著地体现,这主要是因为一般堆肥化过程中在升温阶段氮素损失相对较小,而高温阶段是氮素损失的重要时期,所以作者认为在混合物料时使用 G1-1 固定剂不但

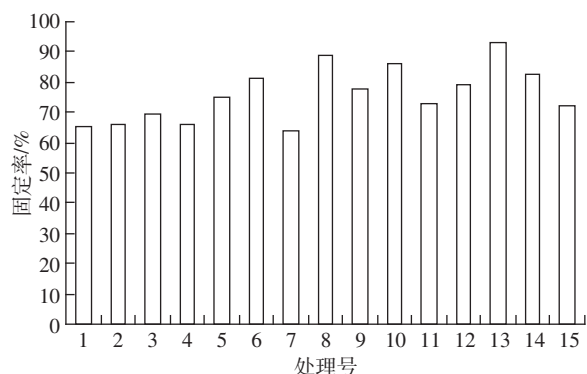


图 7 0~11 d 氢氧化镁和磷酸混合固定剂不同投加方案的固定率
Figure 7 Nitrogen fixation ratio of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and H_3PO_4 by different scheme during first 11 days

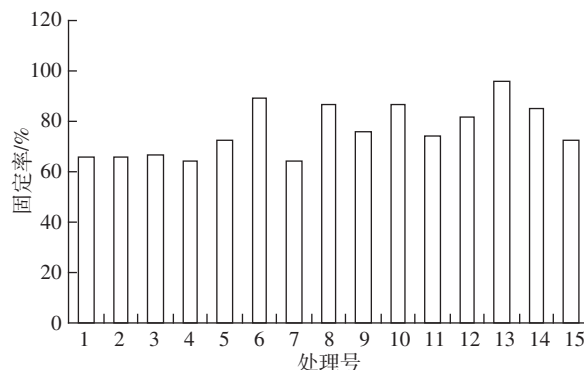


图 8 0~19 d 氢氧化镁和磷酸混合固定剂不同投加方案的固定率
Figure 8 Nitrogen fixation ratio of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and H_3PO_4 by different scheme during composting

有好的固定效果,而且成本较低。此次堆肥化试验由于两种物料的含氮量均较高导致了堆肥化的升温阶段氮素大量损失甚至超过了高温阶段,各阶段氮素损失率为 0~3 d 时 47.65%、3~11 d 时 35.43%、11~19 d 时 1.19%,而处理 10、11 是由于在物料混合时投加固定剂 G1-2 的量较少。处理 15 在 11 d 和 19 d 的固定率逐渐被各处理赶上,说明对物料表面喷淋固定剂适合在堆肥化氮素损失较快、大量氨气挥发的时候。

不同处理 0~19 d 的固定率(总固定率)如图 8 所示,经过 19 d 的堆肥化,各处理对氮素的固定率均达到 65%以上,表明了氢氧化镁和磷酸的混合固定剂对堆肥化过程中氮素损失控制的效果显著,处理 13 的固定率达到了 95.54%,而处理 12、14 的固定率也分别为 81.57%、85.41%,表明了分阶段加入固定剂的优势,同样表明了堆肥化初期使用 G1 固定剂的优势。

3 小结

(1) G3-1、G3-2、G3-3、G2-1、G2-3、G2-4、G1-2、G1-3、G1-5 几种投加量的固定剂应用于堆肥化中均有较好的固定效果。表明 G3、G2、G1 3 种配比的固定剂适合应用于堆肥过程中进行氮素损失控制。

(2) 在堆肥化过程中采用分批加入固定剂相对于物料混合时一次性加入等量固定剂的固定效果显著,分批加入固定剂可以在对堆体进行加水、翻堆时与物料混匀。

(3) 固定剂与物料混匀和堆体表面喷淋固定剂配合使用效果比混匀等量固定剂的固定效果要好,对堆体喷淋固定剂具有操作简单,效果显著的特点,而且根据堆体释放氨气量的多少可以随时补充固定剂。

(4) G1 类固定剂在堆肥化的初期具有相对较好的固定效果,而且价格便宜。

(5) 根据堆肥化过程中堆肥升温阶段 pH 较低、

氮素损失相对较少,堆肥高温阶段 pH 相对较高、氮素损失较多,堆肥降温阶段、腐熟阶段 pH 相对较低、氮素损失相对较少的特点,可以认为最佳的氮素损失控制方案为:在堆肥物料混合时加入 G1-2 与物料充分混匀,在堆肥化进入高温前加入 G3-1 与物料混匀,高温期可对堆体进行监控,一旦出现氨气释放快、释放量大的情况,随时向堆体表面喷淋 G3-1,在堆肥化的降温阶段和腐熟阶段加入 G2-1 与物料混匀。

(6)本试验结果为氢氧化镁和磷酸固定剂在堆肥生产中的使用提供了理论依据,对于磷酸铵镁复合体的检验,其具体形成机理、存在数量、养分释放效果等有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Raviv M, Medina S, Karasnovsky A, et al. Conserving nitrogen during composting[J]. *Bio Cycle*, 2002, 43(9):48.
- [2] Friis 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 贺琪. 堆肥氮素转化及原位减少氮素损失的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2004:37-50.
HE Qi. Studies on the nitrogen transform and reducing nitrogen loss during composting[D]. Beijing:China Agricultural University, 2004:37-50.
- [6] 林小凤. 好氧堆肥化过程中氮素损失的原位控制机制研究[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
LIN Xiao-feng. Study on mechanism of situ-control on the nitrogen loss during aerobic composting[D]. Beijing:China Agricultural University, 2005.
- [7] Solano M L, Iriarte F, Ciria P, et al. SE—structure and environment: performance characteristics of three aeration systems in the composting of sheep manure and straw[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 79(3):317-329.
- [8] Eklind Y, Kirchmann H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: nitrogen turnover and losses[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 74(2):125-133.
- [9] HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, HUANG Dan-lian, et al. Use of potassium dihydrogen phosphate and sawdust as adsorbents of ammoniacal nitrogen in aerobic composting process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 141(3):736-744.
- [10] 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_3 emission during pig manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4):693-697.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Ganrot Zsofia, Dave Göran, Nilsson Eva. 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.
- [14] Suzuki Kazuyoshi, Tanaka Yasuo, Kuroda Kazutaka. Recovery of phosphorus from swine wastewater through crystallization[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(14):1544-1550.
- [15] 曾之平,赵天渊,任保增,等. 利用碱厂滤过母液制取磷酸铵镁的研究[J]. 纯碱工业, 1995(6):14-19.
ZENG Zhi-ping, ZHAO Tian-yuan, REN Bao-zeng, et al. Application of filtrated mother liquor from soda plant on producing the MgNH_4PO_4 [J]. *Soda Industry*, 1995(6):14-19.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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 H_3PO_4 amendments on nitrogen conservation during simulated aerobic composting and its benefit analyses [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4):225-228.
- [19] 李国学,张福锁. 固体废物堆肥化与有机无机复混肥生产[M]. 北京:化学工业出版社, 2000.
LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Solid wastes composting and organic fertilizer production[M]. Beijing:Chemical Engineering Press, 2000.
- [20] 全武刚,王继徽. 磷酸铵镁除磷脱氮技术[J]. 工业用水与废水, 2002, 33(5):4-6.
TONG Wu-gang, WANG Ji-hui. Removal of ammonium and phosphate by magnesium ammonium phosphate process[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2002, 33(5):4-6.
- [21] 钟理,詹怀宇, D O Hill. 化学沉淀法除去废水中的氨氮及其反应的探讨[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(6):54-57.
ZHONG Li, ZHAN Huai-yu, D O HILL. $\text{NH}_3\text{-N}$ removal in wastewater by chemical precipitation and exploration of reaction[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2000, 22(6):54-57.