植物营养与肥料学报 2017, 23(4): 1037–1044 doi: 10.11674/zwyf.16284
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

过磷酸钙用量对猪粪堆肥过程及磷形态变化的影响

李 帆[1,2]，钱 坤[3]，武 际[1,2]，万水霞[1,2]，蒋光月[1,2]，朱宏斌[1,2*]
（1 安徽省农业科学院土壤肥料研究所，安徽合肥 230031；2 安徽养分循环与资源环境省级实验室，安徽合肥 230031；
3 安徽省农业科学院畜牧兽医研究所，安徽合肥 230031）

摘要:【**目的**】过磷酸钙作为常用的畜禽粪便堆肥添加剂，具有减少氮素损失率并提高氮、磷养分含量等优点，但其对磷的有效性和形态的影响有待深入探讨。通过试验研究不同过磷酸钙添加量对猪粪锯末好氧堆肥过程的影响及堆肥中不同形态磷含量和形态之间的相互转化规律，以期为畜禽粪便堆肥中磷素的转化及合理施用提供科学依据。【**方法**】将猪粪和锯末以质量比 (鲜重) 4∶1 的比例混合，然后按照猪粪和锯末干物质量的 5%、10%、15% 添加过磷酸钙，以不添加过磷酸钙作为对照 (CK)，进行 42 d 好氧堆肥，监测堆肥温度、含水率、pH、全氮、有机碳、全磷、有效磷、有机磷等指标。【**结果**】与 CK 相比，添加适量过磷酸钙可以显著提高堆肥的温度，增加高温持续期 2～10 d；提高堆肥物料的持水能力，加快有机碳降解。添加 5%～15% 的过磷酸钙可以显著降低堆肥初始 pH 值 0.33～0.68 个单位，有效抑制堆肥过程中铵态氮的挥发损失，CK、5%、10% 和 15% 的处理在堆肥结束时的氮素损失率分别为 29.4%、26.6%、18.5% 和 8.0%，全氮和全磷含量分别较堆肥初增加 17.3～34.2% 和 37.0%～123.1%。CK 有效磷含量随堆肥时间不断上升，第 42 d 较堆肥初增加 73.0%，而添加过磷酸钙 5%、10% 和 15% 的处理有效磷含量显著降低，分别较堆肥初减少了 4.0%、23.2% 和 41.8%。随着堆肥的进行，各处理中有效磷占全磷的比例均不断下降，表明堆肥过程降低了磷的有效性。堆肥前期以有机磷的矿化为主，后期以有机磷的合成为主，第 42 d 有机磷占全磷的比例 CK 最高 (22.1%)，添加 5%、10% 和 15% 过磷酸钙的处理分别为 15.4%、11.0% 和 8.7%。【**结论**】猪粪堆肥中添加过磷酸钙，可以有效减少氮素损失，加快有机物料降解，以 10% 的添加量效果最佳；堆肥过程降低了磷的有效性，随着过磷酸钙用量的增加有效磷的比例不断下降；腐熟后堆肥中的磷以无机态为主，有机磷占全磷的比例随着过磷酸钙用量的增加而递减。

关键词: 过磷酸钙；猪粪；好氧堆肥；氮素损失；磷形态

Influence of applying calcium superphosphate on swine manure composting and phosphorus transformation

LI Fan[1,2], QIAN Kun[3], WU Ji[1,2], WAN Shui-xia[1,2], JIANG Guang-yue[1,2], ZHU Hong-bin[1,2*]
(*1 Soil and Fertilizer Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2 Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Recycling, Resources and Environment, Hefei 230031, China; 3 Husbandry and Veterinary Medicine Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract:【**Objectives**】Calcium superphosphate is commonly used as an additive in animal manure composting, and can effectively reduce the nitrogen loss and increase the contents of nitrogen and phosphorus in the compost. However, its influence on availability and forms of phosphorus needs to be elucidated. 【**Methods**】Swine manure (mixed with sawdust in 4∶1 ratio in fresh weight) was mixed with calcium superphosphate under 0, 5%, 10% and 15% (in dry weight) before being aerobically composted for 42 days. Temperature, water content, pH, organic carbon, C/N ratio, total nitrogen, total phosphorus, available P and organic P were measured during the composting. 【**Results**】The addition of calcium superphosphate significantly increased the temperature and water-holding capacity of swine compost, and extended the

收稿日期: 2016–03–24 **接受日期:** 2016–09–27
基金项目: 农业部生物有机肥创制重点实验室开放课题（BOFC2015KA06）；公益性行业专项（201503122-06）；安徽省农科院创新基金（15B1008，15A1011）；安徽省生猪产业现代农业生产发展资金项目资助。
作者简介: 李帆（1980—），男，河南驻马店人，助理研究员，主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail：lifan4318@163.com
* 通信作者 E-mail：zhuhongbin2016@163.com

thermophilic phase for 2–10 days. The addition amounts of 5%–15% of calcium superphosphate significantly decreased the initial pH values of the compost by 0.33–0.68. The nitrogen losses after composting process, due to ammonium nitrogen volatilization, were 29.4% (CK), 26.6% (5% addition), 18.5% (10% addition) and 8.0% (15% addition), respectively. The final total nitrogen and total phosphorus concentrations in all treatments increased by 17.3%–34.2% and 37.0%–123.1%. Compared with the initial P content, the available P content in the treatment with no additive superphosphate was increased by 73.0% after 42 days of the composting, while those in the treatments with 5%, 10% and 15% superphosphate addition were decreased by 4.0%, 23.2% and 41.8%, respectively. During the process of composting, the ratios of available P over total phosphorous were continuously decreased in all treatments, demonstrating that the composting lowered the availability of phosphorous. The organic P was influenced by both the mineralization and phosphorus synthesis. In the final compost, the ratio of organic P to the total phosphorous was 22.1% in the control, which was higher than the treatments with 5%, 10% and 15% superphosphate addition, in which the ratios were 15.4%, 11.0% and 8.7%, respectively. 【**Conclusions**】Calcium superphosphate addition in swine manure composting could effectively alleviate the nitrogen loss in the compost. The optimal addition of calcium superphosphate was 10% in dry weight. The composting process decreased the availability of phosphorus in the compost, which was not conducive to the P absorption and utilization by crops. Inorganic phosphorus was the main form of phosphorous in the final compost, and adding superphosphate decreased the content of organic P in the final compost.

Key words: calcium superphosphate; swine manure; composting; nitrogen loss; phosphorus form

磷是植物生长所必需的三大营养元素之一，畜禽粪便有机肥是土壤中磷素的重要来源。在堆肥高温好氧发酵的过程中加入过磷酸钙不仅可以提高堆肥中磷含量，还可以抑制氨挥发而减少氮素损失率[1–2]，提高堆肥品质，在生产中得到了广泛的应用。此外，过磷酸钙作为添加剂在控制温室气体排放[3–4]方面国内外也开展了大量的研究，而堆肥过程对磷的有效性和形态转化方面尚缺乏系统深入的研究。研究表明，畜禽粪便中可以被 H_2O 和 $NaHCO_3$ 浸提的磷占总磷的 48%～87%，这部分磷活性高而且容易流失而造成环境污染[5]。有研究认为畜禽粪便堆肥过程可以促进无机磷向有机磷的转化，从而提高磷的有效性及对植株的利用率[6]，也有学者认为有机废弃物堆肥过程中有效态磷的含量有所下降[7]。研究和探讨堆肥过程中磷的含量及形态变化不仅对有机肥的科学合理施用有着指导意义，还有助于正确评价有机物料中磷素的生物有效性及其农田流失风险[8–9]。本研究选取新鲜猪粪为研究对象，添加不同比例的过磷酸钙进行堆肥发酵，研究无机磷肥的加入对堆肥过程的影响及磷含量变化和形态之间的相互转化规律，以期为畜禽粪便堆肥中磷素的转化及合理施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地点位于安徽省农科院畜牧兽医研究所凤阳示范基地，取基地养猪场的新鲜猪粪作为研究对象，取周边木材加工厂的锯末作为调理剂，市售过磷酸钙 (P_2O_5 ≥ 12.0%) 作为添加剂。堆肥主要原材料的初始性质见表 1。

表 1 堆肥原料的初始性质

Table 1 Initial properties of composting materials

物料 Raw material	含水率 Moisture content (%)	总氮 Total N (g/kg)	总磷 Total P (g/kg)	有机碳 Organic C (g/kg)	碳氮比 C/N ratio	pH
猪粪 Swine manure	80.7	34.8	24.8	407.5	11.7	7.30
锯末 Sawdust	10.3	4.2	0.4	508.0	120.7	6.56

堆肥试验装置如图 1 所示，为自制加工的塑料桶，桶底部和桶壁上开有直径 2.5 cm 的通气孔若干，有效容积 50 L。将猪粪和锯末以质量比 (鲜重) 4∶1 的比例混合，然后按照猪粪和锯末干物质量的 5%、10% 和 15% 添加过磷酸钙，以不添加过磷酸钙作为对照 (CK)，调节混合物料含水率约为 60%，每一处理 3 次重复。将物料充分混合均匀后装入塑料桶中，然后将塑料桶放置在长 × 宽 × 高为 1.2 m × 1.2 m × 1.2 m 的堆肥池内，桶四周和底部填充小麦秸秆进行保温，顶部覆盖石棉瓦遮挡降雨。堆肥开始后，每 3 天进行一次翻堆并取样，分别从堆肥不同部位采集并混合均匀样品约 800 g，其中一部分鲜样

图 1　堆肥试验装置照片

Fig. 1　Pictures of composting reactors

用于测定含水率，其余样品风干粉碎过 1 mm 孔径尼龙筛，用于测定 pH 值、全氮、有机碳、全磷、有效磷、有机磷等指标。

1.2　测定指标及方法

每天上午 9:00 和下午 15:00 左右用水银温度计于堆肥上、中、下层各测定 3 个点的温度，取平均值代表堆肥内部温度，同时测定环境温度；含水率测定采用鲜样 105℃ 烘干法；pH 值采用样水比 1∶10 (m/v) 浸提电极法测定；全氮测定采用 H_2SO_4–H_2O_2 消煮，半微量凯氏定氮法；有机碳测定采用重铬酸钾容量法；全磷测定采用钒钼黄比色法[10]；有效磷测定采用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提，钼锑抗比色法；有机磷测定采用灼烧法[11]。

氮素损失率的计算参照 Paredes 等[12]的方法，即假定堆肥过程中灰分总量无损失，推导得出氮素损失率的计算公式：

$$N_L = \frac{N_0 - (H_0/H_n) \times H_n}{N_0} \times 100\%$$

式中：N_L 为氮素损失率 (%)；N_0 为堆肥 0 天时全氮含量 (%)；H_0 为堆肥 0 天时灰分含量 (%)；N_n 为堆肥 n 天时全氮含量 (%)；H_n 为堆肥 n 天时灰分含量 (%)。

试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 软件进行处理和分析。

2　结果与分析

2.1　堆肥过程中温度、含水率和 pH 变化

堆肥过程中各处理都经历了快速升温、高温持续和降温三个阶段 (图 2)。堆肥初期，物料中的微生物快速增殖，易分解有机物迅速消耗产生大量的热，使得堆体温度迅速升高，CK、添加 5%、10% 和 15% 过磷酸钙的处理达到的最高温度分别为 69.5、72.0、71.7 和 69.0℃，达到最高温度所需的时间分别为 5、4、7 和 7 d。可以看出，随着过磷酸钙用量的增加，堆肥的升温过程变慢，CK 和 5% 的处理升温速度要明显快于 10% 和 15% 的处理。各处理保持在 55℃ 以上的高温持续时间分别为 15、17、25 和 11 d，均符合无害化[13]处理的要求。与 CK 相比，5% 和 10% 处理可以显著提高堆肥高温持续阶段的温度并延长高温持续时间，而 15% 的处理有可能因为过磷酸钙的用量过大，其中的酸性物质对微生物的活性产生了一定的抑制作用，使得前期升温速度和高温期持续时间均低于 CK。

由堆肥过程中含水率的变化 (图 2) 可知，各堆肥处理的含水率随着高温蒸发和微生物活动消耗不断减少，到第 42 d，CK、5%、10% 和 15% 的处理含水率分别较堆肥初减少了 35.4%、31.3%、29.6% 和 24.1%。堆肥中水分的快速蒸发主要集中在前 24 d，水分的损失量约占到堆肥全过程水分损失量的 65.0%～95.6%，从第 24 d 开始，随着堆肥进入降温阶段和微生物活性减弱，含水率降低并逐渐趋于稳定。总体来看，堆肥含水率的下降随着过磷酸钙用量的增大而减小，这主要是由于过磷酸钙对水蒸气的吸附从而抑制了水分的蒸发[14]，堆肥物料的持水能力提高，有利于减少高温堆肥过程中水分的过量散失。

堆肥过程中各处理的 pH 值总体表现为先下降再升高，然后缓慢下降并趋于稳定 (图 2)。堆肥的初始 pH 值随着过磷酸钙用量增加而降低，与 CK 相比，添加 5%、10% 和 15% 的过磷酸钙使得堆肥初始 pH 值分别下降了 0.33、0.57 和 0.68 个单位。堆肥初期细菌和真菌分解有机物而释放出有机酸并不断累积导致 pH 值下降，随着有机酸的进一步降解，pH 值逐渐升高。其中 CK 处理初期 pH 值下降到第 3 d 开始回升，于第 12 d 升高到 7.71 后便开始缓慢降低，

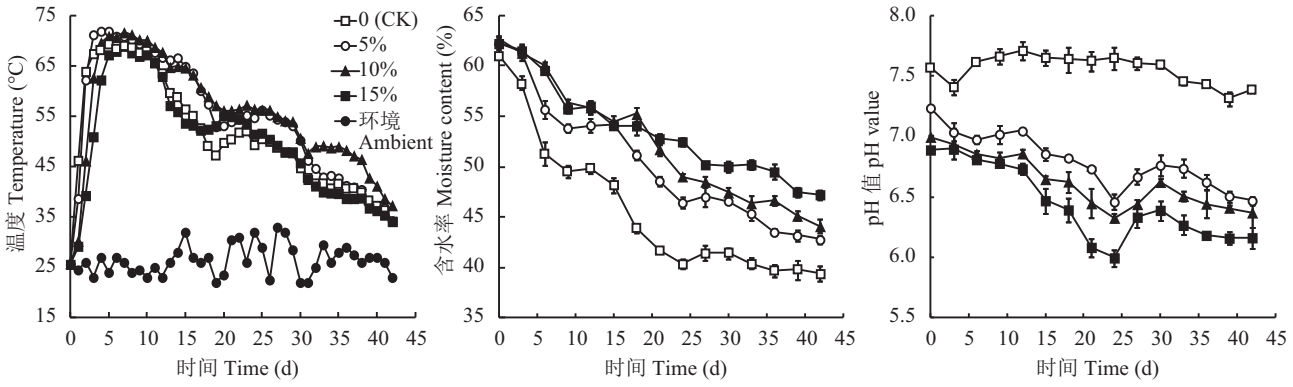

图 2 堆肥过程中温度、含水率和 pH 变化

Fig. 2 Changes of temperature, moisture content and pH value during the composting

直至堆肥结束；而添加过磷酸钙 5%、10%、15% 的处理初期 pH 下降阶段一直持续到 24 d，随后上升到第 30 d 后再次缓慢下降。至堆肥结束添加过磷酸钙的处理 pH 范围在 6.16～6.47，显著低于 CK 处理，总体上各处理均能满足商品有机肥标准 pH 值为 5.5～8.5 的要求[10]。

2.2 堆肥过程中全氮、有机碳和 C/N 变化

堆肥过程中全氮含量变化总体呈现出先下降后上升的趋势 (图 3)。堆肥前期 (0～6 d) 猪粪中的氮被微生物分解转化为铵态氮并在高温条件下以 NH_3 的形式挥发，导致堆肥中总氮含量的下降[15]并于第 6 d 达到最低；从第 6 d 开始随着堆肥中有机物质的分解和 NH_3 挥发的减弱使堆肥中的氮得到“浓缩”，总氮含量不断增加。到第 42 d，各处理的全氮含量分别较堆肥初增加 34.2%、17.3%、24.0% 和 26.4%。

由堆肥过程中有机碳含量的变化 (图 3) 可知。随着堆肥中的有机质不断分解，有机碳含量逐渐降低。经过 42 d 的堆肥发酵，CK、5%、10% 和 15% 的处理有机碳含量分别比堆肥初下降了 8.1%、10.2%、17.0% 和 11.0%，表明添加过磷酸钙可以加快堆肥中有机质的降解过程，10% 的添加量对有机质的降解作用最大，5% 和 15% 的处理差别不大。

堆肥过程中各处理的 C/N 总体呈现出先升高后降低的趋势 (图 3)。堆肥前期易分解有机物大量消耗使得堆肥中的碳以 CO_2 的形式损失，同时 65℃ 以上的高温环境加剧了堆肥中的氮以 NH_3 的形式挥发，0～6 d 堆肥中氮的损失速率超过碳的损失速率，C/N 表现出上升趋势。从第 6 d 开始，随着堆肥温度缓慢下降，铵态氮挥发的持续减弱和硝态氮合成的不断加强，堆肥总氮含量不断升高，而有机质的分解持续加强，C/N 呈现出逐渐降低的趋势。至堆肥结束，CK、5%、10% 和 15% 的处理 C/N 分别为 21.5、17.5、16.0 和 17.0。作为检验堆肥产品腐熟度的常用指标，一般认为堆肥产品 C/N 下降到 15～20 即可认为堆肥达到腐熟[16]。

2.3 堆肥过程中氮素损失率

通过计算各堆肥处理的起始和结束 (42 d) 时的全氮和灰分数据 (表 2) 可知，CK、5%、10% 和 15%

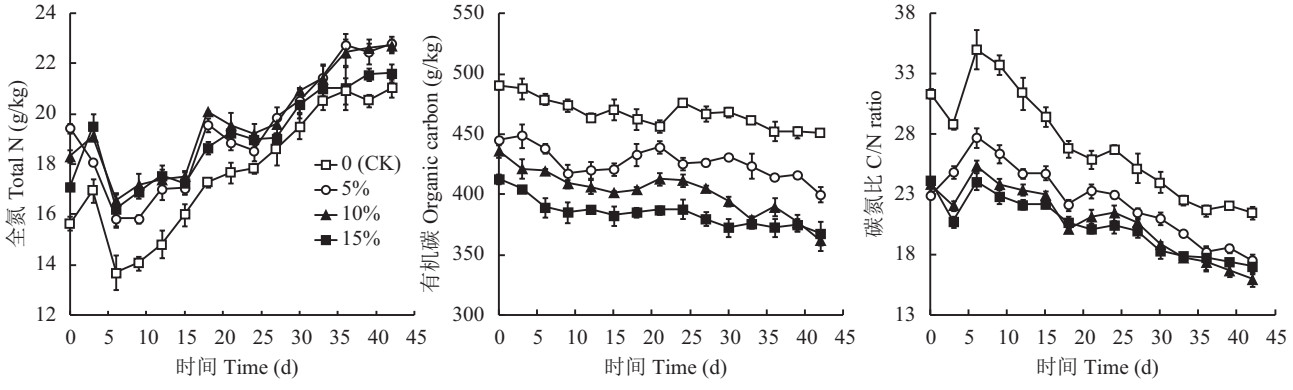

图 3 堆肥过程中全氮、有机碳和 C/N 比变化

Fig. 3 Changes of total N, organic carbon and C/N ratio during the composting

的处理在堆肥结束时的氮素损失率分别为 29.4%、26.6%、18.5% 和 8.0%，可以看出随着堆肥中过磷酸钙用量的增加，氮素损失率明显降低，这与其他学者的研究结果[17]基本一致。由于过磷酸钙的加入，铵离子与磷酸根、硫酸根结合生成较稳定的磷酸铵或硫酸铵，同时物料 pH 值变为弱酸性抑制了碱性条件下铵离子以 NH_3 形式挥发而造成的氮损失，从而有效地降低了堆肥过程中的氮素损失率。

2.4　堆肥过程中全磷、有效磷和有机磷变化

堆肥过程中的磷不易挥发，无论形态如何变化其滞留在堆肥中的总量不变，随着有机物质的分解，堆肥中养分出现浓缩效应[18]，总磷的浓度不断升高 (图 4)。CK、5%、10% 和 15% 的处理全磷含量随着过磷酸钙用量的增大依次梯度增加，至 42 d 分别较堆肥初增加了 123.1%、60.6%、57.0% 和 37.0%。

堆肥中有效磷含量的变化不同处理之间差异较大 (图 4)。CK 处理呈现持续增加的趋势，至 42 d 有效磷含量较堆肥初增加了 73.0%；5% 处理前 33 d 有效磷含量缓慢增加，随后持续下降，至 42 d 含量略低于堆肥初，降幅 4.0%；10% 和 15% 的处理变化规律较为一致，呈现出 0～3 d 升高，3～21 d 快速降低，从 21 d 开始基本趋于稳定，42 d 时有效磷含量降幅比较明显，分别较堆肥初下降了 23.2% 和 41.8%。

随着总磷含量的不断上升和有效磷含量的缓慢上升或者下降，各处理有效磷占全磷的比例总体呈现出不断下降的趋势 (图 4)。其中 CK 处理有效磷占全磷的比例要明显高于添加过磷酸钙的处理，仅比堆肥初下降了 22.4%；5%、10% 和 15% 的处理由于难降解过磷酸钙的加入，对堆肥中的有效磷起到稀释作用，随着过磷酸钙用量的增加有效磷占全磷的比例依次降低，分别较堆肥初下降了 40.3%、51.1% 和 57.5%。

堆肥前期猪粪中的有机磷在微生物分泌的磷酸酶作用下水解矿化导致有机磷的含量不断降低[19]，到

表 2　堆肥初始和 42 d 时全氮及灰分含量 (%)

Table 2　Total N and ash contents in the compost at the beginning and 42nd day

过磷酸钙比例 Calcium superphosphate ratio	全氮 Total N		灰分 Ash	
	0 d	42 d	0 d	42 d
0 (CK)	1.6	2.1	8.6	16.4
5%	2.0	2.3	15.8	25.2
10%	1.8	2.3	18.2	27.7
15%	1.7	2.2	22.0	30.2

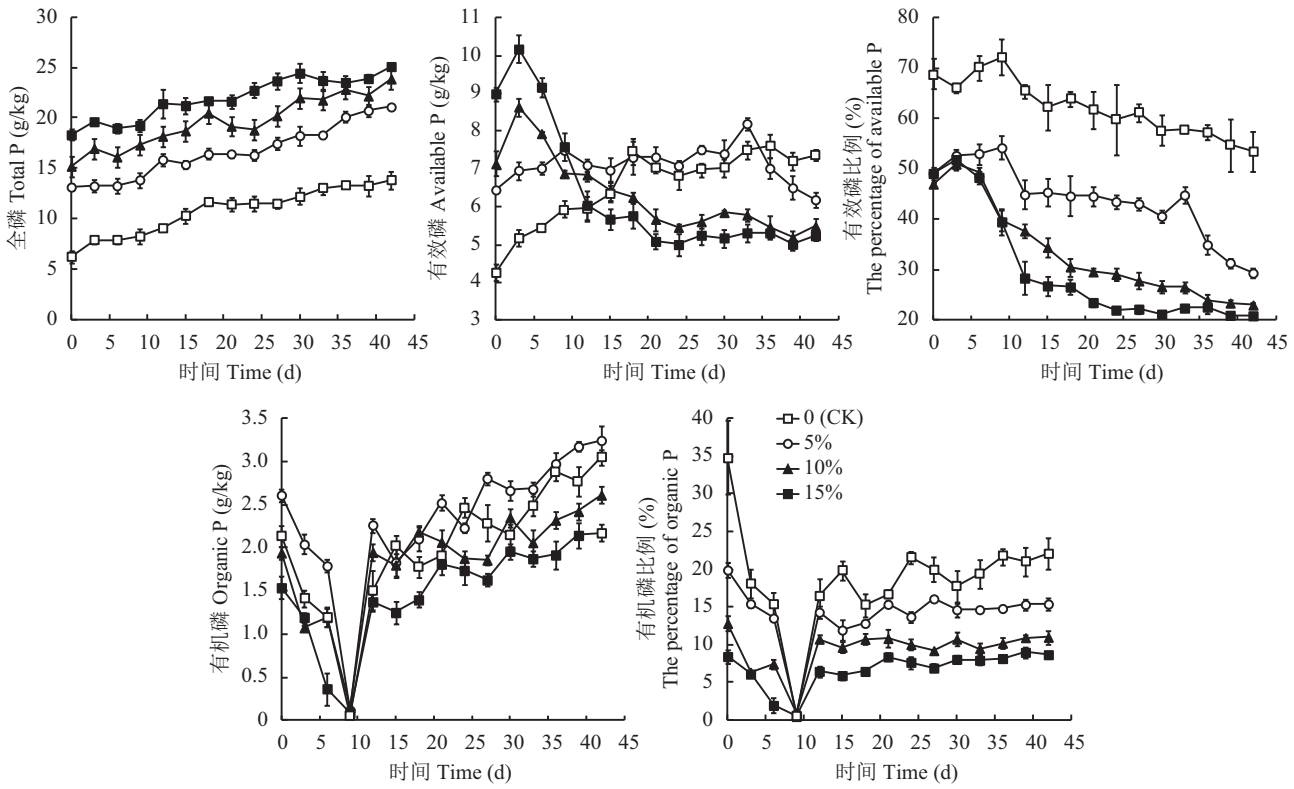

图 4　堆肥过程中全磷、有效磷、有机磷含量变化

Fig. 4　Changes of total P, available P and organic P content during the composting

第 9 d 各个处理的有机磷含量几乎检测不出；之后随着堆肥腐殖化过程和微生物对无机磷的吸收固定而将其转化为有机磷，堆肥中的有机磷含量不断“浓缩”而出现缓慢回升，到第 42 d，CK、5%、10% 和 15% 的有机磷含量分别较堆肥初增加了 42.2%、24.3%、34.5% 和 41.4% (图 4)。

堆肥过程中有机磷占全磷的比例变化规律与有机磷含量变化类似，表现为前期 (0～9 d) 的快速下降和后期的缓慢升高 (图 4)。CK 处理有机磷的比例整体高于 5%、10% 和 15% 的处理，而且随着过磷酸钙用量的增加，各处理中有机磷占全磷的比例依次降低，这主要是过磷酸钙中无机磷的加入对堆肥中的有机磷产生稀释效应所引起的。

3 讨论

3.1 过磷酸钙对堆肥过程的影响

从堆肥中有机碳降解的程度来看，过磷酸钙这类酸性物质的加入促进了有机物的降解，这与胡雨彤等[18]的研究结果相似。以 10% 过磷酸钙的处理有机质降解最大，进一步增大过磷酸钙用量，有机质降解反而减少，同时 15% 过磷酸钙的处理还明显地造成了堆肥升温速度缓慢，高温持续时间缩短等不利于堆肥腐熟的影响，再加上成本因素综合考量，猪粪堆肥中过磷酸钙的添加量不宜超过干物质量的 10%。

3.2 过磷酸钙对堆肥中氮的影响

过磷酸钙作为添加剂对全氮含量的影响十分显著。初始堆肥中的全氮来源于猪粪和锯末，其含量随着过磷酸钙用量的增加而递减，同时 CK 处理由于没有添加过磷酸钙，堆肥中的氮以 NH_3 的形式挥发而含量降低，所以初始堆肥中全氮含量 5% > 10% > 15% > CK。堆肥过程中全氮含量主要受两个因素的共同影响：1) 铵态氮在高温条件下转变为 NH_3 挥发造成的含量减少；2) 有机质分解产生的浓缩效应引起的含量增加。猪粪堆肥的前期 (0～6 d) 全氮含量下降说明铵态氮的挥发起到主要作用，后期全氮含量稳步升高则主要以浓缩效应为主。猪粪堆肥的氮素挥发损失主要发生在堆肥的 0～6 d，这与前人的研究结果[17–18]基本一致。随着过磷酸钙用量增加，猪粪堆肥的氮素损失率降低，氮素固定率升高，15% 过磷酸钙的处理氮素固定率达到 72.9%，略低于林小凤等[20]向鸡粪中添加 15% 过磷酸钙时氮素固定率为 85% 的结果，这与堆肥原料有关，更重要的是受到堆肥初始 C/N 比的影响。本试验中添加过磷酸钙的 3 个处理堆肥初始 C/N 比约为 23，高于林小凤等初始 C/N 为 15 的设定，低 C/N 比条件下氨态氮的挥发损失更为严重[21]，使得过磷酸钙对氨态氮挥发的抑制效果更为明显。整个堆肥过程中添加过磷酸钙的处理全氮含量均高于 CK 处理，说明添加过磷酸钙可以减少氮素损失，提高堆肥中全氮含量。

3.3 过磷酸钙对堆肥中磷的影响

堆肥初期有效磷含量表现为 15% > 10% > 5% > CK，这与堆肥初过磷酸钙的用量相关，说明初期堆肥中的有效磷主要来源于过磷酸钙中有效态的无机磷，至 42 d 堆肥结束，有效磷含量则变为 CK > 5% > 10% > 15%，与堆肥初期规律刚好相反。CK 处理有效磷含量的增加是因为在没有外源磷素添加条件下，堆肥过程对养分的浓缩效应产生的结果。添加过磷酸钙的处理在升温阶段 (0～3 d)，易分解有机物转变为小分子有机酸，活化了过磷酸钙中部分矿物态的无机磷，使得堆肥中有效磷活性升高；在高温持续阶段 (3～21 d)，堆肥中有效磷含量降低可能有两方面的原因，一是有效态的磷与堆肥中的铁、铝等离子结合，形成难溶性的磷酸铁、铝化合物，二是堆肥中的 Ca^{2+} 和磷通过堆肥反应生成磷酸二钙、磷酸八钙和羟基磷酸钙等难溶解态的化合物[22]，使得堆肥中磷的有效性显著降低，而且随着过磷酸钙用量的增大，有效磷降低的程度加剧。邓佳等[23]对 7 种有机肥中磷形态采用 DOU 法进行分级，结果表明不易被植物吸收利用的 HCl 提取态磷占全磷比例达 47.8%～85.0%，而植物可吸收的 H_2O 提取态磷和 $NaHCO_3$ 提取态磷的比例仅为 3.4%～16.4% 和 0.6%～13.3%，其结论与本试验结果堆肥中有效磷含量占全磷的比例逐渐降低相符合。虽然 CK 处理有效磷的含量有所增加，但其所占总磷的比例却不断降低，而且添加过磷酸钙的各处理中，有效磷在全磷中所占的比例均不断降低，说明猪粪堆肥过程降低了磷的有效性，使其向不易于被植物直接吸收利用的形态转化。该过程与磷肥施入土壤后被吸附固定，有效性逐渐降低的过程相类似[24]。堆肥中磷的有效性降低，从另一个角度表明速效态的磷转化为缓效态，降低了其堆放或施入土壤后迁移流失的风险。

堆肥过程中同时存在着有机磷的矿化和合成两种作用，有机磷的含量则取决于二者共同作用的结果。堆肥初期有机磷主要来源于易分解的猪粪，0～9 d 为有机质快速矿化阶段，有机碳降解量占到整个堆肥周期的 40.8%～60.9%。随着有机物的快速分解，猪粪中磷脂、核酸等易分解的活性有机磷矿化

为无机磷[25]，使得堆肥中有机磷含量显著下降，直至第 9 d 猪粪中的有机磷分解消耗殆尽，各处理中有机磷含量接近于零。随后堆肥中腐殖化过程和微生物对无机磷的吸收转化持续进行，与腐殖酸络合的磷酸盐和微生物量磷不断增加，堆肥中有机磷含量缓慢上升，这与赵晶晶等[26]对不同有机物料中有机磷矿化进程的研究结果相类似。本试验中，第 42 d 各堆肥处理中有机磷占全磷的比例仅为 8.7%～22.1%。Gagnon 等[27]对 7 种有机堆肥测定发现无机磷占全磷的 73%～96%；王旭东等[28]研究结果也表明粪肥中无机磷占全磷的 54.6%～63.2%，与本研究的结果相一致。这表明猪粪堆肥中的磷主要以无机态磷为主。堆肥中有机磷占全磷的比例不仅取决于浓缩效应，还必须考虑到过磷酸钙中无机磷的加入而带来的稀释效应。整个堆肥过程中，5%、10% 和 15% 过磷酸钙的处理有机磷占全磷的比例均低于不添加过磷酸钙的 CK 处理，即是由稀释效应所主导的。

4　结论

1) 猪粪堆肥中添加过磷酸钙，可以有效减少氮素损失，提高堆肥产品中氮、磷的含量，加快有机物料的降解，以 10% 的添加量效果最佳。

2) 猪粪堆肥过程降低了磷的有效性，有效磷占全磷的比例随堆肥时间下降，且随过磷酸钙用量的增加而降低。

3) 腐熟后堆肥中的磷以无机态为主，过磷酸钙的加入稀释了堆肥中有机磷的比例，随过磷酸钙用量增加，有机磷占全磷的比例递减。

参 考 文 献：

[1] Martina P, Eva S, Andreas B. Nitrogen and carbon losses from dung storage in urban gardens of Niamey, Niger[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 87(1): 103–114.

[2] 杨岩, 孙钦平, 李妮, 等. 添加过磷酸钙对蔬菜废弃物堆肥中氨气及温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 161–167.
Yang Y, Sun Q P, Li N, *et al*. Effects of superphosphate addition on NH3 and greenhouse gas emissions during vegetable waste composting[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 161–167.

[3] Liu J S, Xie Z B, Liu G, *et al*. A holistic evaluation of CO_2 equivalent greenhouse gas emissions from compost reactors with aeration and calcium superphosphate addition[J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(2): 177–185.

[4] 罗一鸣, 李国学, Frank Schuchardt, 等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 235–242.
Luo Y M, Li G X, Schuchardt F, *et al*. Effects of additive superphosphate on NH_3, N_2O and CH_4 emissions during pig manure composting[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 235–242.

[5] Li G, Li H, Leffelaar P A, *et al*. Characterization of phosphorus in animal manures collected from three (dairy, swine, and broiler) farms in China[J]. Plos One, 2014, 9(7): e102698.

[6] 赵素芬, 刘建新, 倪娉娣. 畜禽废弃物高温好氧堆肥过程中磷素的变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 384–386.
Zhao S F, Liu J X, Ni M D. Dynamic phosphorus contents during aerobic and thermophilic composting of livestock wastes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(2): 384–386.

[7] Wei Y, Zhao Y, Xi B, *et al*. Changes in phosphorus fractions during organic wastes composting from different sources[J]. Bioresource Technology, 2015, 189: 349–356.

[8] Kleinman P J A, Sharpley A N, Wolf A M, *et al*. Developing an environmental manure test for the phosphorus index[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2006, 37: 2137–2155.

[9] Lü D A, Yan B X, Wang L X, *et al*. Changes in phosphorus fractions and nitrogen forms during composting of pig manure with rice straw[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(10): 1855–1864.

[10] NY 525–2012. 有机肥料[S].
NY 525–2012. Organic fertilizer [S].

[11] Saunders W M H, Williams E G. Observations on the determination of total organic phosphorus in soils[J]. European Journal of Soil Science, 1955, 6(2): 254–267.

[12] Paredes C, Roig A, Bernal M P, *et al*. Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes[J]. Biology and Fertilizer of Soils, 2000, 32(3): 222–227.

[13] GB 7959–1987. 粪便无害化卫生标准[S].
GB 7959–1987. Sanitary standard for the non-hazardous treatment of night soil [S].

[14] 吕丹丹, 种云霄, 吴启堂, 等. 过磷酸钙对氨气的吸附解吸特性研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2506–2510.
Lü D D, Chong Y X, Wu Q T, *et al*. Adsorption and desorption of calcium superphosphate to ammonia gas[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(11): 2506–2510.

[15] Szanto G L, Hamelers H V, 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.

[16] Garcia C, Hernandez T, Costa F, *et al*. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1992, 23(13–14): 1501–1512.

[17] 任云, 崔春红, 刘奋武, 等. 蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1760–1766.
Ren Y, Cui C H, Liu F W, *et al*. Study on composting of cyanobacteria amended with different N loss inhibitor[J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1760–1766.

[18] 胡雨彤, 时连辉, 刘登民, 等. 添加硫酸对牛粪堆肥过程及其养分变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 718–725.

Hu Y T, Shi L H, Liu D M, *et al*. Effects of adding sulphuric acid on composting process of cattle manure and changes of main nutrients[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(3): 718–725.

[19] 姜一, 步凡, 张超, 陈立新. 土壤有机磷矿化研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 160–166.
Jiang Y, Bu F, Zhang C, Chen L X. Research advances on soil organic phosphorus mineralization[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(5): 160–166.

[20] 林小凤, 李国学, 任丽梅, 等. 氯化铁和过磷酸钙控制堆肥氮素损失的效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1662–1666.
Lin X F, Li G X, Ren L M, *et al*. Effect of $FeCl_3$ and $Ca(H_2PO_4)_2$ as amendments on reducing nitrogen loss during composting[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1662–1666.

[21] 黄向东, 韩志英, 石德智, 等. 畜禽粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 247–254.
Huang X D, Han Z Y, Shi D Z, *et al*. Nitrogen loss and its control during livestock manure composting[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 247–254.

[22] 刘冠男, 董黎明. 水体中Ca^{2+}对湖泊沉积物磷吸附特征的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(2): 36–41.
Liu G N, Dong L M. Sorption isotherms of calcium to sediments of lake in different phosphorus concentrations[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(2): 36–41.

[23] 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 等. 不同有机物料中的磷形态特征研究[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1098–1104.
Deng J, Hu M K, Zhao X L, *et al*. Characterization of phosphorus forms in different organic materials[J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 1098–1104.

[24] 唐文忠, 李楠, 单保庆. 土地处理系统表层土壤中磷赋存形态及其转化过程[J]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2383–2390.
Tang W Z, Li N, Shan B Q. Partitioning and transformation of phosphorus in surface soil of land treatment system[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(6): 2383–2390.

[25] 赵少华, 宇万太, 张璐. 土壤有机磷研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2189–2194.
Zhao S H, Yu W T, Zhang L, *et al*. Research advance in soil organic phosphorus[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2189–2194.

[26] 赵晶晶, 陈欣, 史奕, 等. 有机物料中有机磷矿化进程的研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1114–1117.
Zhao J J, Chen X, Shi Y, *et al*. Research progresses in the mineralization of organic phosphorus in organic materials[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(6): 1114–1117.

[27] Gagnon B, Demers I, Ziadi N, *et al*. Forms of phosphorus in composts and in compost-amended soils following incubation[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92: 711–721.

[28] 王旭东, 胡田田, 李全新, 等. 有机肥料的磷素组成及供磷能力评价[J]. 西北农业学报, 2001, 10(3): 63–66.
Wang X D, Hu T T, Li Q X, *et al*. A evaluation on the phosphorus component of organic materials and its phosphorus supply capacity[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2001, 10(3): 63–66.