

杨 岩, 孙钦平, 李 妮, 等. 不同过磷酸钙添加量对蔬菜废弃物堆肥的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(1): 66-72.

YANG Yan, SUN Qin-ping, LI Ni, et al. Effects of Different Addition Amounts of Superphosphate on Vegetable Waste Compost[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(1): 66-72.

## 不同过磷酸钙添加量对蔬菜废弃物堆肥的影响

杨 岩<sup>1</sup>, 孙钦平<sup>2</sup>, 李 妮<sup>3</sup>, 刘本生<sup>2\*</sup>, 邹国元<sup>2</sup>, 李吉进<sup>2</sup>, 江丽华<sup>1\*</sup>, 刘月仙<sup>4</sup>

(1.山东省农业科学院农业资源与环境研究所/山东省植物营养与肥料重点实验室, 山东 济南 250100; 2.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 3.山东省农业科学院植物保护研究所, 山东 济南 250100; 4.中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘 要:** 试验研究了不同过磷酸钙添加量对蔬菜废弃物堆肥腐熟进程的影响。结果表明, 添加过磷酸钙能够提高堆体温度, 其中添加量为堆肥物料干重 10.26%时的最高温度值最高, 为 64.33℃。堆肥结束时, 添加过磷酸钙对各堆肥处理的 C/N 值无显著影响, 但降低了堆肥物料的 pH 值, 提高了电导率, 其中添加量介于物料干重 4.10%和 10.26%时的 EC 值显著高于 CK 处理( $P<0.01$ ); 添加量低于物料干重 10.26%时的 GI 值均显著高于 CK 处理( $P<0.01$ ), 其中添加量为物料干重 2.05%(S5 处理)时的值最大, 为 105.61%。添加过磷酸钙显著降低了堆肥的氮素损失率( $P<0.05$ ), 其中添加量为物料干重 2.05%时的氮素损失率最低, 仅为 23.94%, 且此添加量下的产投比最大, 为 3.93。本试验条件下, 添加过磷酸钙可显著提高堆肥腐熟度, 显著降低堆肥物料的氮素损失率, 其适宜添加量为物料干重的 2.05%。

**关键词:** 过磷酸钙; 蔬菜废弃物; 堆肥; 氮素损失; 成本效益

中图分类号: S141.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)01-0066-07

doi: 10.13254/j.jare.2016.0218

### Effects of Different Addition Amounts of Superphosphate on Vegetable Waste Compost

YANG Yan<sup>1</sup>, SUN Qin-ping<sup>2</sup>, LI Ni<sup>3</sup>, LIU Ben-sheng<sup>2\*</sup>, ZOU Guo-yuan<sup>2</sup>, LI Ji-jin<sup>2</sup>, JIANG Li-hua<sup>1\*</sup>, LIU Yue-xian<sup>4</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences/Shandong Province Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Jinan 250100, China; 2. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The effects of different addition amounts of superphosphate on vegetable waste compost were studied. Results showed that, addition of superphosphate improved the temperature during the compost. It had the highest temperature of 64.33 °C, when the addition quantity of superphosphate was 10.26% of dry matter weight. At the end of the composting, adding superphosphate had no significant effect on C/N, however, it decreased pH and improved the EC of the compost. The EC values were significantly higher than CK, when the addition amount was between 4.10% and 10.26% of dry matter weight. When the addition below 10.26%, the GI values were significantly higher than CK ( $P<0.01$ ), and the highest value was 105.61%, when the addition was 2.05% (S5). Adding superphosphate significantly reduced the nitrogen loss rate of composting ( $P<0.05$ ), and the lowest was 23.94%, when the addition was 2.05%, meanwhile, the input-output ratio was 3.93, which was the highest value. Under this experimental condition, adding superphosphate promoted the compost maturity significantly, reduced the nitrogen loss rate, and the optimal addition of superphosphate was 2.05% of dry matter weight.

**Keywords:** superphosphate; vegetable waste; composting; nitrogen loss; cost-benefit

收稿日期: 2016-09-13

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项(201303089-2); 北京市科委重大项目“菜田果园面源污染综合防治技术研究与集成示范”(D161100005516003); 山东省 2015 年度农业重大应用技术创新项目“畜禽粪便资源化高效利用关键技术研究”

作者简介: 杨 岩(1987—), 男, 山东肥城人, 博士, 主要从事农业有机废弃物处理及农业施肥技术研究。

\* 通信作者: 刘本生 E-mail: 1920306362@qq.com; 江丽华 E-mail: jiangli8227@sina.com

随着蔬菜种植产业化进程的快速发展,我国蔬菜种植面积逐年增加,到2014年已达 $2.1 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,占全国农作物种植总面积的12.9%<sup>[1]</sup>,而随之产生的蔬菜废弃物则达到4.2亿t<sup>[2]</sup>。蔬菜废弃物有较高的养分含量(氮含量为3%~4%,磷含量为0.3%~0.5%,钾含量为1.8%~5.3%,以干物质计)<sup>[3]</sup>,若能合理利用,将成为化肥减施战略中重要的替代肥源。

堆肥作为传统的废弃物无害化处理技术,已被广泛地应用于各类蔬菜废弃物的处理研究中<sup>[4-6]</sup>。堆肥发酵中产生的高温能有效杀死病原微生物,对蔬菜废弃物进行无害化处理,并将其转化为肥料,是蔬菜废弃物无害化处理和肥料化再利用的有效途径<sup>[7]</sup>。但研究表明,堆肥过程是温室气体重要的排放源之一<sup>[8]</sup>,堆肥过程中产生大量 $\text{NH}_3$ 等,不仅对周围环境造成一定程度的污染,也降低了肥料的品质<sup>[9-10]</sup>。如何减少堆肥过程造成的环境污染及氮素损失已成为国内外研究的热点。在畜禽粪便堆肥过程中,添加过磷酸钙用以提高堆肥产品的磷含量,以及降低堆肥过程中的氮素损失研究已有较多报道<sup>[11-12]</sup>,其中罗一鸣等<sup>[13]</sup>在猪粪堆肥过程中添加初始物料干质量3.3%~6.6%的过磷酸钙使堆肥过程中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量减少了19.8%~35.7%;林小凤等<sup>[14]</sup>发现在堆肥原料中添加占总物料干质量10.0%~15.7%的过磷酸钙可减少60%~85%的总氮质量损失。但在蔬菜废弃物堆肥过程中添加过磷酸钙对堆肥进程影响及减少堆肥过程氮素损失的适宜添加量研究则鲜有报道。

本文以生菜废弃物为主要堆肥料,探讨适宜过磷

酸钙添加量对堆肥过程中腐熟度参数及物料氮素含量的变化,以得到蔬菜废弃物堆肥过程中促进堆肥进程及减少养分损失的过磷酸钙适宜添加量,为蔬菜废弃物高效化堆肥及化肥减施战略中的有机替代研究提供数据支持和技术参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

试验在北京市大兴区河津营绿福蔬菜生产合作社进行,所需鸡粪购买自当地有机肥经销商,其余原料均由当地农户提供(玉米秸秆粉碎处理),各种原料的基本性状见表1。

### 1.2 试验设计

试验于2014年5月24日—6月18日进行,共设6个处理,每个处理3次重复。除CK外,其余处理以过磷酸钙中P单质的量占混合物料初始总氮物质的量的5%~25%<sup>[13]</sup>设置5个不同添加比例,各处理物料鲜基总质量、过磷酸钙添加量等如表2所示。鸡粪与生菜废弃物的质量比为1:1(按干物质计),并用玉米秸秆(添加量为22.88 kg,以干重计)将C/N调至25。物料混合均匀后装入体积为 $0.77 \text{ m}^3$ 的发酵箱。物料装入前,将聚氯乙烯(PVC)管连接成栅栏状并按等间距交叉钻孔后铺于保温箱底部,6个箱子并连组成一套通气系统,每个箱子通气速率为 $0.27 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ,通气频率设定为前4 d每4 h通气15 min,第5 d开始每8 h通气15 min。由于高温期物料含水量下降较快,至第11 d时,进行翻堆加水,调节各处理含水

表1 堆肥原料的基本性状(%)

Table 1 Properties of raw materials used in composting (%)

堆肥原料	含水量(鲜基)	全碳	全氮	全磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	全钾( $\text{K}_2\text{O}$ )
生菜	93.18	26.96	2.83	1.04	4.47
鸡粪	34.69	30.45	3.09	2.19	2.13
玉米秸秆	14.73	40.49	0.66	0.15	0.62

表2 试验设计

Table 2 Design of the experiment

处理	每箱中过磷酸钙添加量/kg	P单质占总N的量/%	过磷酸钙添加量占物料干重比例/%	每箱中生菜+鸡粪+玉米秸秆的量/kg	混合物料含水率/%
CK	0	0	0	124.97	71.99
S5	0.72	5	2.05	124.97	71.58
S10	1.44	10	4.10	124.97	70.77
S15	2.15	15	6.16	124.97	69.57
S20	2.87	20	8.21	124.97	68.01
S25	3.59	25	10.26	124.97	66.11

率至 60%。待堆体温度下降且基本保持不变时,试验结束。

### 1.3 测定指标及分析方法

堆肥期间,每日测定堆肥表层下 30 cm 处温度,取上午 9:00 和下午 15:00 时的平均数为当日温度;堆肥第 0、4、8、15、26 d 取样,测定指标包括 pH、EC、全碳、全氮、全磷、发芽指数(GI)、含水率等,并在堆肥结束时称量物料总鲜重,以测定堆肥过程中的氮素损失,计算公式如式 1:

$$\text{氮素损失率}(\%) = \{1 - [\text{堆肥结束时的物料氮素含量} \times \text{堆肥结束时的物料鲜重} \times (100 - \text{含水率})] / [\text{堆肥开始时的物料氮素含量} \times \text{堆肥开始时的物料鲜重} \times (100 - \text{含水率})]\} \times 100 \quad (1)$$

全碳、全氮、全磷的测定按照 NY 525—2012 中的相关步骤进行;pH 值和 EC 值采用固(风干样)液比 1:10 的悬浮液测定;GI(%)的测定方法为称取 10 g 鲜样,加入 100 mL 蒸馏水,震荡 1 h,室温静置 1 昼夜,过滤,吸取 5 mL 滤液于铺有滤纸的 9 cm 培养皿内,播 50 粒饱满的油菜种子(夏绿 2 号),28 °C 恒温培养箱中培养 48 h,以蒸馏水作对照<sup>[15]</sup>。计算公式如式 2 所示:

$$\text{GI}(\%) = (\text{处理发芽率} \times \text{处理平均根长}) / (\text{对照发芽率} \times \text{对照平均根长}) \times 100 \quad (2)$$

### 1.4 数据处理与分析

数据处理使用 Excel 2010 和 SAS 统计分析软件,方差分析采用 SSR 多重比较法。

## 2 结果与分析

### 2.1 过磷酸钙不同添加量对堆肥温度变化的影响

堆肥期间各处理的温度变化如图 1 所示。自堆肥开始至第 11 d,各处理温度均维持在 50 °C 以上,且各

处理维持在 50 °C 以上的天数总体上随过磷酸钙添加量的增大而增加,S25 处理的天数最长,达 15 d。自第 2 d 起,各处理温度连续保持在 55 °C 以上,持续时间均达 7 d,为堆肥腐熟及达到卫生指标提供了保证。各处理在翻堆后均出现了温度下降的情况,但添加过磷酸钙的处理均重新升至 50 °C 以上,其中 S5 处理维持在 50 °C 以上的天数为 2 d,而 S10、S15 和 S20 处理为 4 d。

### 2.2 过磷酸钙不同添加量对堆肥 C/N 值变化的影响

随着堆肥的进行,各处理 C/N 值整体呈下降的趋势(图 2)。堆肥开始的前 11 d 各处理 C/N 值下降幅度最大,结合图 1 可知,此时处于堆肥高温期;与 CK 处理相比,添加过磷酸钙显著降低了堆肥高温期的 C/N 值( $P < 0.01$ ),且随过磷酸钙添加量增加而降低,第 8 d 时的取样最低值为 16.59,比 CK 处理低 42.01%,这可能是添加过磷酸钙为微生物提供磷营养而促进了微生物对物料有机物的分解。堆肥结束时,添加过磷酸钙处理的物料 C/N 值低于 CK 处理,但未达显著性水平;各处理的 C/N 值介于 11.19~13.02 之间,达到了一般腐熟堆肥的 C/N 值范围<sup>[16]</sup>。

### 2.3 过磷酸钙不同添加量对堆肥 pH 值和 EC 值变化的影响

由表 3 可知,各处理间堆肥原始物料 pH 值差异不显著,这可能与试验所用过磷酸钙为颗粒型,且添加量相对较少有关。堆肥结束后各处理 pH 值由开始时的 6.52~6.58 上升至 6.74~7.66,其中 S20 和 S25 处理的 pH 值最低,可能是这两个处理添加的过磷酸钙量较多,降低了堆肥物料 pH 值,并在一定程度上抑制了因有机酸被分解及氨气固定所引起的 pH 值升高的效果。堆肥结束时,除 S5 处理外,其余过磷酸钙添加处理的 pH 值均与 CK 处理差异极显著( $P < 0.01$ )。

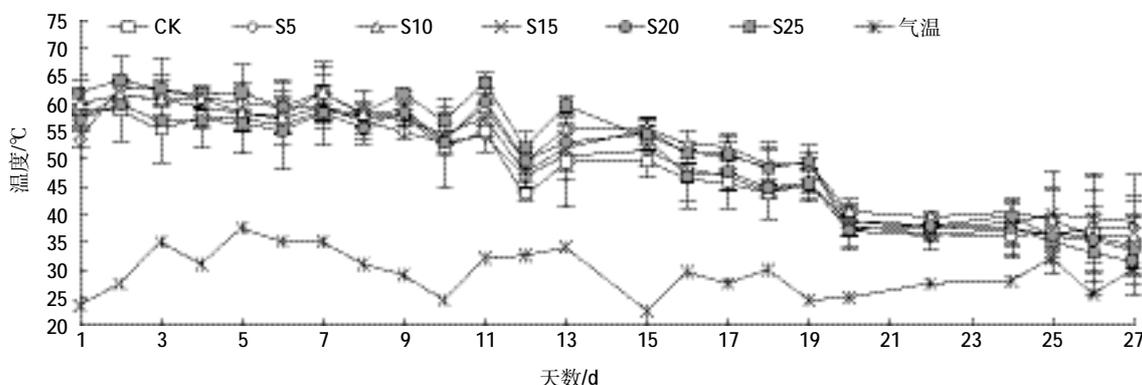


图 1 不同过磷酸钙添加量对各堆肥处理温度变化的影响

Figure 1 The influence of different superphosphate addition amounts on the changes of temperature during composting

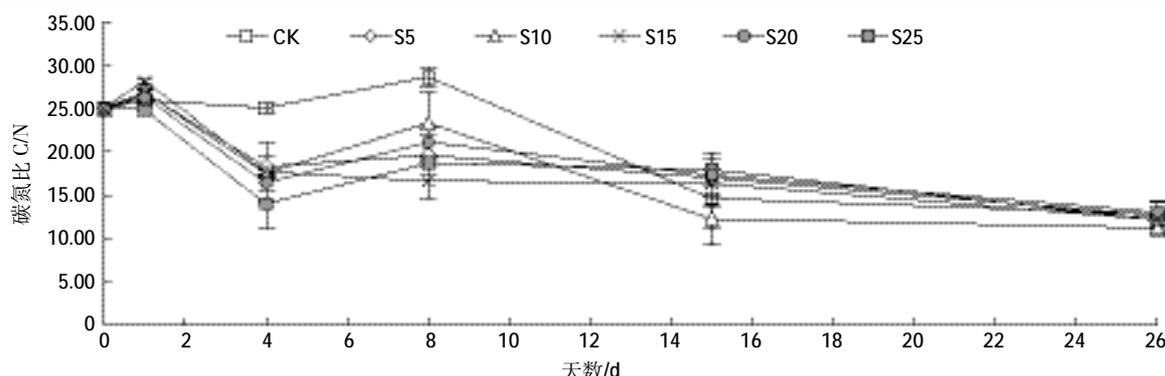


图 2 不同过磷酸钙添加量对各堆肥处理 C/N 值变化的影响

Figure 2 The influence of different superphosphate addition amounts on the changes of C/N during composting

表 3 不同过磷酸钙添加量对堆肥产品的 pH 值和 EC 值的影响

Table 3 The influence of different superphosphate addition amounts on the pH and EC of compost products

项目	处理	pH 值	EC/mS·cm <sup>-1</sup>
原始物料	CK	6.57±0.09Aa	3.59±0.12Aa
	S5	6.56±0.35Aa	3.49±0.06Aa
	S10	6.52±0.33Aa	4.09±0.08Aa
	S15	6.52±0.26Aa	3.95±0.74Aa
	S20	6.58±0.21Aa	3.72±0.55Aa
	S25	6.56±0.15Aa	4.10±0.65Aa
堆肥产品	CK	7.66±0.02Aa	3.85±0.01Dd
	S5	7.47±0.25Aa	3.80±0.02Dd
	S10	7.17±0.01Bb	5.02±0.05Bb
	S15	7.00±0.01BCbc	5.61±0.04Aa
	S20	6.88±0.01BCcd	4.75±0.03Cc
	S25	6.74±0.13Cd	5.63±0.06Aa

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05),不同大写字母表示不同处理间差异极显著(P<0.01)。下同。

Note: Different small letters indicate significant differences among different treatments(P<0.05); Different capital letters indicate significant differences among different treatments(P<0.01). The same below.

堆肥结束时,各处理堆肥产品的 EC 值均高于原始物料,且总体随过磷酸钙添加量的增加而升高(表 3)。除 S5 处理外,其余添加过磷酸钙的堆肥产品与 CK 处理的 EC 值差异极显著(P<0.01),S15 和 S25 处理的 EC 值显著高于其余处理,分别为 5.61 mS·cm<sup>-1</sup> 和 5.63 mS·cm<sup>-1</sup>,但二者间无显著差异。各处理 EC 值均小于 9.0 mS·cm<sup>-1</sup>,对种子发芽无抑制作用<sup>[7]</sup>。

#### 2.4 过磷酸钙不同添加量对堆肥发芽指数(GI)变化的影响

堆肥开始时,各处理的发芽指数介于 66.15%~69.96%,无显著差异(图 3),均处于植物的可承受范围<sup>[8]</sup>;随着堆肥的进行,各处理 GI 值总体呈现出先降低后升高的趋势,到堆肥第 15 d 时,S15 处理的 GI 值最高,为 92.89%,且添加过磷酸钙处理的 GI 值均高于 80%,显著高于 CK 处理(P<0.01),达基本腐熟程度<sup>[9]</sup>,较对照处理提前 10 d 以上。堆肥结束时,除 S25 处理外,其余添加过磷酸钙的处理 GI 值均显著高于 CK 处理(P<0.01);其中 S5 和 S10 处理的 GI 值显著高于其他添加过磷酸钙的处理(P<0.01),相较 CK 处理分别提高 19.86%和 12.89%。

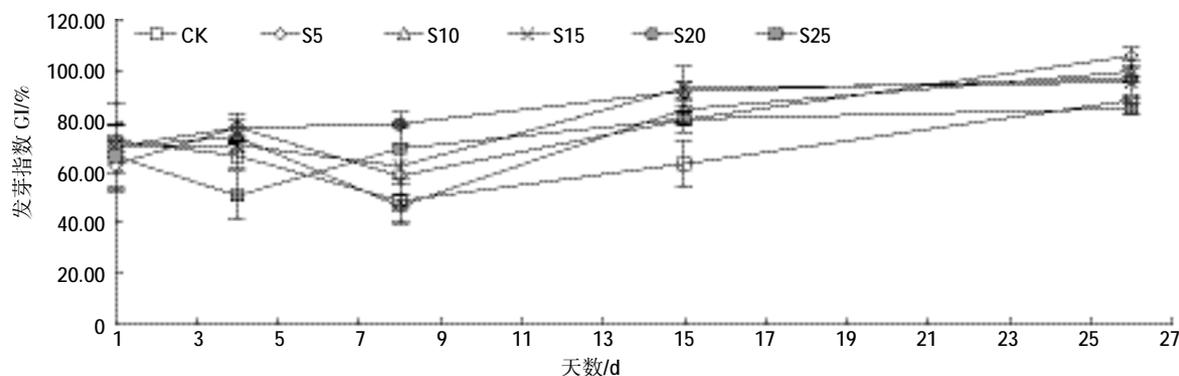
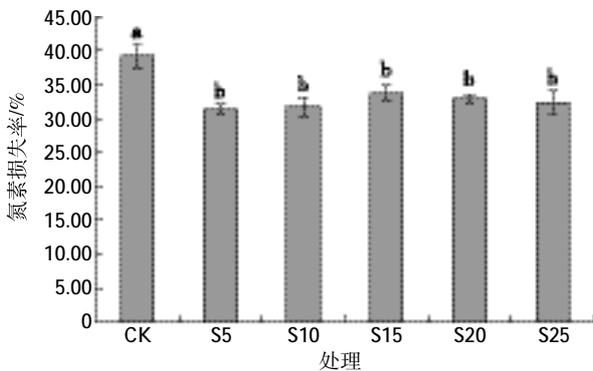


图 3 不同过磷酸钙添加量对各堆肥处理发芽指数(GI)变化的影响

Figure 3 The influence of different superphosphate addition amounts on the changes of GI during composting

### 2.5 过磷酸钙不同添加量对堆肥氮素损失的影响

图 4 表明, 添加过磷酸钙能够显著降低堆肥的氮素损失率( $P<0.05$ ), 与 CK 处理相比, S5、S10、S15、S20 和 S25 处理的氮素损失率分别降低 19.99%、18.99%、13.74%、16.08% 和 17.33%, 但不同添加量处理间无显著差异; 各处理氮素固定率介于 35.08%~51.03% 之间。经测定, CK、S5、S10、S15、S20 和 S25 处理堆肥的全磷 ( $P_2O_5$ ) 含量分别为 0.86%、1.10%、1.27%、1.50%、1.75% 和 1.83%。因此, 添加过磷酸钙既可以减少堆肥过程中的氮素损失, 又能提高堆体的磷含量, 从而提高堆肥的肥效品质。



图中不同小写字母表示各处理间差异显著( $P<0.05$ )  
Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ( $P<0.05$ )

图 4 不同过磷酸钙添加量对各堆肥处理氮素损失的影响  
Figure 4 The influence of different superphosphate addition amounts on the loss rate of N during composting

### 2.6 过磷酸钙不同添加量的成本效益分析

为探讨添加过磷酸钙对化肥减施战略中的有机替代及降低农民生产成本的贡献率, 分析了添加过磷酸钙增加的养分及此部分养分所能替代的化肥成本, 具体见表 4。

从表 4 可看出, 与对照相比, 蔬菜废弃物堆肥过程中添加不同量的过磷酸钙, 养分含量均有所提高, 方差分析结果表明, 不同过磷酸钙添加量对堆肥中的氮素养分和  $P_2O_5$  养分含量的增加均达极显著水平 ( $P<0.01$ ), 且  $P_2O_5$  养分含量随过磷酸钙添加量的增加而显著增加 ( $P<0.01$ ), 其中以 S25 的养分提升效果最佳。从添加过磷酸钙的成本和养分增加替代化肥带来的效益来看, 尽管 S25 所产生的绝对价值最高, 但其成本也最高, 分析产投比(即增加养分产生价值除以添加过磷酸钙的成本所得)可知, S5 处理的值最大, 即过磷酸钙添加量为堆肥物料干重 2.05% 时, 可以最大限度实现化肥的有机替代, 进而降低农民生产成本。

### 3 讨论

本试验中各处理在堆肥开始后即进入高温期, 且添加过磷酸钙的处理温度均高于对照处理, 与姜继韶<sup>[9]</sup> 在猪粪秸秆堆肥时添加过磷酸钙减缓堆肥初期温度升高的结论并不一致, 这可能与堆肥原料及试验通风设计等参数有关。与其他化学添加剂一样, 堆肥过程中添加少量过磷酸钙可提高堆肥腐熟度, 减少氮素损失, 并提高堆肥磷含量; 过量使用则可能抑制堆肥进程<sup>[13]</sup>或使有害物质进入土壤, 污染农田土壤环境<sup>[20]</sup>。本试验条件下, 各处理堆肥结束时的发芽指数总体随过磷酸钙添加量的增加而降低。当过磷酸钙添加量为初始物料干质量 10.26% (S25) 时, 发芽指数略低于 CK 处理, 为 84.83%, 表现出一定的生物毒性, 因此, 当过磷酸钙添加量大于初始物料干质量的 10.26% 时, 可能对堆肥进程产生显著的抑制作用, 应进行发芽指数试验进行验证。这与罗一鸣等<sup>[13]</sup>提出的在猪粪堆肥过程中过磷酸钙的添加量超过初始物料干质量

表 4 不同过磷酸钙添加量的成本效益分析  
Table 4 Cost-benefit analysis of different superphosphate addition amounts

处理	过磷酸钙添加成本/ 元·t <sup>-1</sup> 堆肥	堆肥产品养分含量		养分增加产生的价值/元·t <sup>-1</sup>			产投比
		N/%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /%	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	合计	
CK	0.00	1.08±0.01Cc	0.86±0.01Ef				
S5	3.46	1.23±0.00ABb	1.10±0.02De	4.99	8.60	13.58	3.93
S10	6.91	1.22±0.02Bb	1.27±0.04Cd	4.56	14.82	19.38	2.80
S15	10.32	1.11±0.01Cc	1.50±0.00Bc	0.95	23.01	23.96	2.32
S20	13.78	1.23±0.01ABb	1.75±0.01Ab	4.99	31.70	36.69	2.66
S25	17.24	1.28±0.04Aa	1.83±0.09Aa	6.44	34.55	40.99	2.38

注: 效益分析表中养分增加产生价值是将氮素折算成尿素和将  $P_2O_5$  折算成过磷酸钙所得, 成本计算时价格按尿素 1 500 元·t<sup>-1</sup>、过磷酸钙 600 元·t<sup>-1</sup>。

的9.9%时,将对堆肥进程产生显著抑制作用的结论相一致。因此在蔬菜废弃物堆肥处理研究过程中应注意对过磷酸钙临界最大添加量的研究,但具体添加量受堆肥原料等条件影响较大,还需视具体情况而定。

堆肥过程中添加化学物质降低物料pH值具有简单高效的优点,也是减少氮素损失的重要途径。过磷酸钙含有磷酸、硫酸等游离酸,并具有一定的吸湿性,可通过调节堆肥物料含水率和pH值来减少氨挥发,还能增加堆肥中的磷含量,因此成为堆肥过程中减少氮素损失的重要添加物。本试验条件下,过磷酸钙添加量为初始物料干质量的2.05%~10.26%时,氮素固定率达35.08%~51.03%,与林小凤等<sup>[14]</sup>提出的过磷酸钙添加量占物料总干质量的9.99%~15.71%时,氮素固定率可达60%~85%的结论一致,氮素固定率数值略有偏差可能与堆肥原料和过磷酸钙添加量等试验条件的不同有关。此外,试验中各处理的氮素损失率均显著低于CK处理,且过磷酸钙添加量为物料干重2.05%时的产投比最高,当过磷酸钙添加量低于2.05%时,可能存在产投比更高且氮素损失率亦显著低于CK的临界值,亦需进一步研究确定。

#### 4 结论

(1)添加过磷酸钙使堆肥处理全程的平均温度增高,其中过磷酸钙添加量占物料干质量4.10%~10.26%时,平均温度值显著高于CK处理,且添加比例为4.10%时的平均温度值最高,为51.90℃。

(2)添加过磷酸钙对堆肥产品的C/N值无显著影响,添加量大于物料干质量2.05%时,物料EC值显著高于CK处理;当添加量大于8.21%时,物料pH值超出堆肥安全标准范围(7.0~8.5),堆肥产品的GI值亦显著低于CK处理。此外,第15d时,添加过磷酸钙的堆肥处理发芽指数已达80%以上,较CK处理提早10d以上。

(3)添加过磷酸钙显著降低了堆肥的氮素损失率,其中过磷酸钙添加量为物料干质量2.05%时的氮素损失率最低,比CK处理降低19.99%,且此时产投比最大,为3.93。综上所述,本试验条件下过磷酸钙的适宜添加量应为物料干质量的2.05%。

#### 参考文献:

- [1] 国家统计局.中国统计年鉴2015[M].北京:中国统计出版社,2015.  
National Bureau of Statistics of China.China statistical yearbook 2015 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 莫舒颖.蔬菜残株堆肥化利用技术研究[D].北京:中国农业科学院,2009.  
MO Shu -ying. Study on technique of vegetable residues compost [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Master Dissertation, 2009. (in Chinese)
- [3] 黄鼎曦,陆文静,王洪涛.农业蔬菜废弃物处理方法研究进展和探讨[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(11):38-42.  
HUANG Ding-xi, LU Wen-jing, WANG Hong-tao. Progress on study of agricultural vegetable waste treatment[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2002, 3(11): 38-42. (in Chinese)
- [4] 席旭东,晋小军,张俊科.蔬菜废弃物快速堆肥方法研究[J].中国土壤与肥料,2010(3):62-66.  
XI Xu-dong, JIN Xiao-jun, ZHANG Jun-ke. The study of rapid composting method by vegetable wastes [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(3): 62-66. (in Chinese)
- [5] 郭雅妮,全攀瑞,申恒钢,等.蔬菜与水果废物共堆肥降解的研究[J].西安工程大学学报,2009,23(4):79-81.  
GUO Ya-ni, TONG Pan-rui, SHEN Heng-gang, et al. Study on co-composting degradation of vegetable waste and fruit waste[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2009, 23(4): 79-81. (in Chinese)
- [6] Maniadas K, Lasaridi K, Manios Y, et al. Integrated waste management through producers and consumers education: Composting of vegetable crop residues for reuse in cultivation[J]. Journal of Environmental Science and Health Part B - pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2004, B39 (1): 169-183.
- [7] Yoge V, Raviv M, Hadar Y, et al. Induced resistance as a putative component of compost suppressiveness[J]. Biological Control, 2010, 54(1): 46-51.
- [8] LIU J S, XIE Z B, LIU G, et al. A holistic evaluation of CO<sub>2</sub> equivalent greenhouse gas emissions from compost reactors with aeration and calcium superphosphate addition[J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(2):177-185.
- [9] Eghball B J. Nutrient, carbon, and mass loss during composting of beef cattle feedlot manure[J]. Environment Quality, 1997, 26: 189-193.
- [10] Cronjé A L, Turner C, Williams A G, et al. The respiration rate of composting pig manure[J]. Compost Science & Utilization, 2004, 12(2): 119-129.
- [11] 吴银宝,汪植三,廖新梯,等.猪粪堆肥臭气产生与调控的研究[J].农业工程学报,2001,17(5):82-87.  
WU Yin-bao, WANG Zhi-san, LIAO Xin-di, et al. Study on the odor production and control of swine manure composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(5): 82-87. (in Chinese)
- [12] Torkashvand A M. Improvement of compost quality by addition of some amendment[J]. Australian Journal of Crop Science, 2010, 4(4): 252-257.
- [13] 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 Yi-ming, LI Guo-xue, Frank Schuchardt, et al. Effects of additive superphosphate on NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions during pig manure

- composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 235-242. (in Chinese)
- [14] 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 Xiao-feng, LI Guo-xue, REN Li-mei, et al. Effect of  $\text{FeCl}_3$  and  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  as amendments on reducing nitrogen loss during composting[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1662-1666. (in Chinese)
- [15] Yang Y, Li N, Sun Q P, et al. Research on vegetable waste aeration oxygen-supply compost and its ammonia volatilization. Advances in Environmental Technologies III [C]. Switzerland: Advanced Materials Research, 2014: 2845-2850.
- [16] 黄国锋, 钟流举, 张振钿, 等. 有机固体废弃物堆肥的物质变化及腐熟度评价[J]. 应用生态学报. 2003, 14(5): 813-818.  
HUANG Guo-feng, ZHONG Liu-ju, ZHANG Zhen-dian, et al. Physico-chemical changes and maturity evaluation of solid organic waste compost [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(5): 813-818. (in Chinese)
- [17] Tiquia S M, Tam N F T. Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig manure sawdust litter and pig sludge[J]. Biore-source Technology, 1998, 65(1): 43-49.
- [18] 龚建英, 田锁霞, 王智中, 等. 微生物菌剂和鸡粪对蔬菜废弃物堆肥化处理的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(8): 2813-2817.  
GONG Jian-ying, TIAN Suo-xia, WANG Zhi-zhong, et al. Effect of inoculation and poultry dung on composting of vegetable residue[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(8): 2813-2817. (in Chinese)
- [19] 姜继韶. 猪粪秸秆高温堆肥添加剂的选择及其保氮机理的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.  
JIANG Ji-shao. Study on selection and mechanism of nitrogen conservation additives during swine manure-straw composts[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- [20] 王卫平, 朱凤香, 钱红, 等. 接种发酵菌剂和添加不同调理剂对猪粪发酵堆肥氮素变化的影响 [J]. 浙江农业学报, 2005, 17(5): 276-279.  
WANG Wei-ping, ZHU Feng-xiang, QIAN Hong, et al. Effect of inoculating microorganism agent and adding different attendant agents on changes of nitrogen during composting of pig manure[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2005, 17(5): 276-279. (in Chinese)