中国农业大学学报 2024,29(3):79-86
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

周顺,李洋,张冠智,徐鹏,林爱雨,武永军,杨振超. 添加剂对番茄茎秆好氧堆肥发酵过程及氮素损失的影响[J]. 中国农业大学学报,2024,29(03):79-86.
ZHOU Shun, LI Yang, ZHANG Guanzhi, XU Peng, LIN Aiyu, WU Yongjun, YANG Zhenchao. Effects of additives on the fermentation process and nitrogen loss of tomato stem aerobic composting[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(03): 79-86.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.03.07

添加剂对番茄茎秆好氧堆肥发酵过程及氮素损失的影响

周 顺[1] 李 洋[1] 张冠智[1] 徐 鹏[1] 林爱雨[1] 武永军[2] 杨振超[1*]
(1. 西北农林科技大学 园艺学院/农业农村部西北设施园艺工程重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学 生命学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要 为研究减少在番茄茎秆好氧堆肥过程中氮素损失的途径,提高堆肥品质,以粉碎的番茄茎秆为原料,按物料干重分别加入5%的腐殖酸(T1)、氯化钙(T2)和过磷酸钙(T3),同时以不进行任何添加的堆体作为对照(CK),进行45 d的好氧堆肥试验。结果表明:3种添加剂均可降低堆肥过程中的氮素损失,同时减少了NH_3的挥发量;堆肥结束时,CK、T1、T2和T3处理的氮素损失率分别为18.04%、15.00%、12.65%和14.05%,累计NH_3挥发量为CK(1 648.11 mg/kg)>T1(1 330.35 mg/kg)>T3(995.35 mg/kg)>T2(528.11 mg/kg)。其中,添加氯化钙的处理保氮效果最好,与对照相比,氮素损失率低至12.65%,NH_3挥发量减少67.96%;各处理高温期均≥3 d,发芽指数≥80%,表明堆体已经腐熟,无植物毒性。综上,番茄茎秆好氧堆肥中添加氯化钙,对于减少堆肥过程中的氮素损失较为理想。本研究可为番茄茎秆好氧堆肥保氮工艺优化提供理论依据。

关键词 番茄茎秆; 好氧堆肥; 氮素损失; 氨挥发; 添加剂
中图分类号 S626 **文章编号** 1007-4333(2024)03-0079-08 **文献标志码** A

Effects of additives on the fermentation process and nitrogen loss of tomato stem aerobic composting

ZHOU Shun[1], LI Yang[1], ZHANG Guanzhi[1], XU Peng[1], LIN Aiyu[1], WU Yongjun[2], YANG Zhenchao[1*]
(1. College of Horticulture/Key Laboratory of Northwest Facility Horticulture Engineering of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
2. College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract In order to study the ways to reduce nitrogen loss during aerobic composting of tomato stalks and to improve the quality of compost, a 45 d aerobic composting test was conducted by using crushed tomato stalks as raw material. Five percent humic acid (T1), calcium chloride (T2) or calcium superphosphate (T3) were added according to the dry weight of the material, and at the same time, a heap without any additive was used as a control (CK). The results showed that: All three additives reduced the nitrogen loss during composting, as well as the volatilization of ammonia; At the end of composting, the nitrogen loss rates of CK, T1, T2 and T3 treatments at the end of composting were 18.04%, 15.00%, 12.65% and 14.05%, respectively, with the cumulative ammonia volatilization of CK (1 648.11 mg/kg)>T1 (1 330.35 mg/kg)>T3 (995.35 mg/kg)>T2 (528.11 mg/kg). Among them, the treatment with added calcium chloride

收稿日期: 2023-07-26
基金项目: 陕西省技术创新引导专项(2021QFY08-02);2021年陕西省千亿级设施农业专项;西藏高原设施蔬菜关键技术创新与集成(XZ202202YD0002C);设施蔬菜瓜果名优品种引进与标准化示范基地建设(QYXTZX-AL2023-07)
第一作者: 周顺(0009-0002-1299-7234),硕士研究生,E-mail: zhoushun994711779@163.com
通讯作者: 杨振超(0000-0002-0017-4348),副教授,主要从事设施农业环境工程研究,E-mail: yangzhenchao@mail.nwsuaf.edu.cn

had the best nitrogen retention effect with a low nitrogen loss rate of 12.65% and showed a 67.96% reduction in ammonia volatilization compared with the control; The high temperature period of all the treatments was ≥3 d, and the germination index was greater than or equal to 80%, which indicated that the heap had been rotted and was not phytotoxic. In conclusion, the addition of calcium chloride to the aerobic composting of tomato stalks is ideal for reducing nitrogen loss in the composting process. This study provides a theoretical basis for the optimization of nitrogen conservation process of tomato stalk aerobic composting.

Keywords tomato stem; aerobic composting; nitrogen loss; ammonia volatilization; additive

我国是世界上番茄栽培面积较大、产量较高的国家，2021年番茄产量约为6.2万t，占蔬菜总产量的7%左右[1-2]。然而，番茄生产中产生的大部分的往往被无序堆放在田间地头自然腐烂，或者被当成废弃物随意丢弃，番茄秸秆未得到充分利用，而且容易滋生病虫害，造成环境污染。番茄茎秆营养成分高、有机质含量丰富，主要的资源化利用途径为还田处理[3]，但是直接还田易造成病原菌等有害物质的传播。好氧堆肥则是一种有效处理蔬菜废弃物的方式，在这个过程中有机物在好氧微生物的代谢作用下自发分解和稳定，不再易腐发臭，成为植物可利用的安全产品。然而，由于堆肥过程中的氮素转化，会产生少量温室气体和恶臭气体[4]。其中，NH_3的排放是主要问题，在堆肥的高温时期，微生物快速降解有机含氮物质，如蛋白质和氨基酸，并在短时间内产生大量NH_4^+，这导致堆肥堆的pH升高，大量NH_3排放损失[5]。NH_3排放占总气态氮排放的95%～98%，占总氮损失的79%～94%[6-7]，降低了最终堆肥产品的品质，造成了大气污染。因此，在蔬菜废弃物好氧堆肥过程中控制氮素的损失、减少NH_3的排放是好氧堆肥技术的关键。

番茄茎秆好氧堆肥过程中存在氮素损失，降低了肥料中的养分含量。NH_3挥发不仅减少了堆肥物料中的营养元素，还对环境造成污染。已有研究表明，在好氧堆肥过程中，外源添加剂在减少氮损失和NH_3排放方面效果显著[8]。近年来国内外对不同类型添加剂减少堆肥气体污染已进行较多研究，但受限于外源添加剂普遍成本较高或不易获得等原因，目前大多难以在实际生产中应用。其中，氯化钙可通过抑制氨氧化作用和稳定氨态氮，腐殖酸通过螯合作用稳定氮素，过磷酸钙通过促进微生物活性和与氮素形成沉淀来减少番茄茎秆好氧堆肥中氮素的损失[9-10]。此外，在堆肥过程中加入腐殖酸、氯化钙、过磷酸钙，还可以补充堆体中的营养成分。然而，已有研究多是针对单一添加剂的效果，对3种添加剂协同作用的可能效果的对比研究还鲜有报道。因此，为对比其在实际堆肥中的应用效果，本研究拟以番茄茎秆为基本材料，选取氯化钙、腐殖酸、过磷酸钙这3种经济常见的添加剂，研究其在减少番茄茎秆好氧堆肥过程中氮素损失的实际效果；同时，通过研究腐殖酸、氯化钙、过磷酸钙的添加对堆体理化性质、有机质降解的影响，进一步分析其对番茄茎秆好氧堆肥的影响，以期为番茄茎秆好氧堆肥保氮工艺优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试番茄茎秆于2022年6月回收自陕西省杨凌区农户，自然风干后，粉碎机切割为2～3 cm，该物料基本特征如下：含水率15.33%；总有机碳316.55 g/Kg；全氮19.76 g/Kg；C/N 16.02。腐殖酸购置于山东苍远生物科技有限公司，主要成分为黄腐酸（>50%）和氯化钾（12%）；氯化钙和过磷酸钙来自实验室，纯度>99%。

1.2 试验设计

本研究于2022-07—2022-09在陕西省杨凌区五泉镇试验基地进行。试验共设4个处理，分别为：CK，不加入添加剂；T1，添加5%腐殖酸（按物料干重计，下同）；T2，添加5%氯化钙；T3，添加5%过磷酸钙。各处理在堆肥开始前均加入原堆体质量0.5%的EM发酵菌剂，不同添加剂在堆料搅拌过程中均匀撒入，充分拌匀。加水调节含水率在40%～60%（以手握成团但不滴水为宜），每个堆体干物质量控制在100 kg，堆制成长宽高约为2 m×1 m×1 m的堆体进行好氧发酵，为了保证有氧过程，分别在第2、5、8、14、22、30、40天进行翻堆。

1.3 采样及测定

取样方法：分别于堆肥的第0、2、5、10、18、30、

45天共7个时期进行样品采集。每个时期每个处理采集500 g，样品在每个堆体的上中下3个层面分别取样并混匀。将这些样品分成2份，一份置于4 ℃条件下冷藏，用于测定堆肥过程中pH和EC值变化；一份置通风干燥处风干，用于测定堆肥处理不同时期铵态氮（NH_4^+-N）、硝态氮（NO_3^--N）、全氮（TN）、有机质（OM）、总有机碳（TOC）的含量以及种子发芽指数（GI）。

温度的测定：在每个处理的上、中、下层分别安置一个MT-8X型热电偶线，于每天的上午9:00记录数据并保存，取3点平均值为该堆体温度。同时测定上午9:00的室内温度，作为当天的室内温度。

pH和EC值的测定采用M（样品）:V（水）=1:10的水溶法进行测定，称取5.00 g样品置于样品瓶中，按照1:10的比例倒入称量好的50 mL蒸馏水，置于25 ℃摇床上120 r/min震荡1 h后用滤纸过滤，取滤液于烧杯中，用pH计（ST10，OHAUS，United States）和EC计（ST10C-C，OHAUS，United States）分别测定其pH和EC值，所有处理均称取样品3次，测定3次，取其均值。

有机碳采用重铬酸钾容量法（外加热法）测定；全氮采用凯氏定氮法测定；有机质采用重铬酸钾氧化法测定[11]。

铵态氮（NH_4^+-N）和硝态氮（NO_3^--N）含量的测定采用流动分析仪（A33，SEAL，德国）。称取5.00 g样品于150 mL锥形瓶中，加入50 mL KCl（1 mol/L），振荡1 h后过滤，滤液作为待测液，取2 mL待测液进行测定。

种子发芽指数的测定：称取新鲜发酵样品5.0 g以M（样品）:V（水）=1:10比例与蒸馏水混合，25 ℃震荡1 h后用滤纸过滤。取滤纸放入培养皿中，加入5 mL滤液，滤纸上放入20颗小白菜种子。以清水为对照，置于25 ℃环境下培养36 h，测量种子的发芽数和胚根长，进行发芽指数（GI）计算，进行3次重复。计算公式如下：

$$GI=\frac{\text{发芽率}\times\text{种子根长}}{\text{对照发芽率}\times\text{对照种子根长}}\times 100\% \quad (1)$$

NH_3的采集：每隔3 d在堆体中心取样2.0 kg，放入密封泡沫箱（32.7 cm×20.8 cm×16.5 cm）中，将50 mL 2%的硼酸（滴加混合指示剂1 ml）放置于泡沫箱中吸收24 h。

NH_3的测定采用硼酸吸收酸滴定法[12]：吸收NH_3后用0.01 mol/L稀硫酸标准溶液滴定，根据稀硫酸消耗的量计算出NH_3的释放量。

氮素损失率（NL）计算方式，参考林小凤等[13]，具体公式如下：

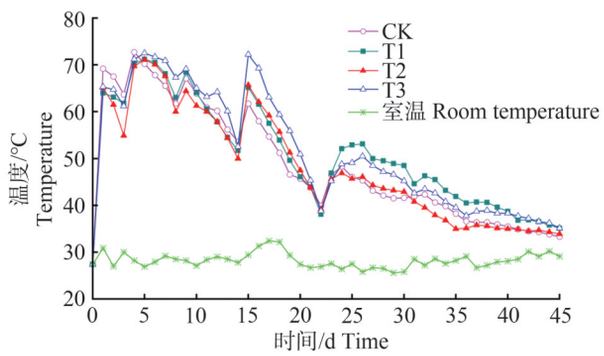
$$NL=\frac{X_0\times M_0-X_i\times M_i}{X_0\times M_0}\times 100\% \quad (2)$$

式中：X_0为堆体初始全氮（TN）质量分数；X_i为堆肥结束时TN质量分数；M_0为堆体初始干重，kg；M_i为堆肥结束时干重，kg。

2　结果与分析

2.1　番茄茎秆好氧堆肥过程中温度变化规律

不同添加剂对温度影响结果见图1，整体上各处理堆体温度变化趋势基本一致。根据温度变化，堆肥通常可分为加热、高温、冷却和成熟4个典型阶段。具体过程如下：起初，随着有机物质的降解，微生物代谢产生大量热量，堆体温度升高；后随着易降解物质的耗尽，温度下降至接近环境水平，这意味着堆肥的腐熟。4个处理均在第2天进入高温期（≥55 ℃）。CK、T1、T2和T3的最高温分别为72.7、71.2、71.1和72.2 ℃，高温持续时间分别为15、15、15和18 d（图1）。研究表明堆肥过程中温度维持在55 ℃以上超过3 d，即可杀灭堆体中的病原体[14]，因此，4个处理的最高温度到70 ℃以上，并且持续时间长，保证了堆肥的无害化和腐熟；堆温在



CK，无添加；T1，5%腐殖酸；T2，5%氯化钙；T3，5%过磷酸钙。下同。

CK, no addition; T1, 5% humic acid; T2, 5% calcium chloride; T3, 5% calcium superphosphate. The same below.

图1　不同处理堆肥过程中温度的变化

Fig. 1　Temperature changes during composting process with different treatments

第30天翻堆之后下降幅度较大，40 d之后堆肥腐熟，温度接近于环境温度。就堆体温度变化情况来看，加入添加剂对堆体的腐熟程度和堆肥完成时间并无影响（图1）。

2.2 番茄茎秆好氧堆肥过程中pH、EC值、发芽指数及有机质降解率变化规律

不同添加剂对pH、EC值、发芽指数及有机质降解率变化规律影响结果见图2。由如图2(a)可见：整体上4种处理的pH均随堆肥时间推移呈先迅速升高，然后又缓慢升高再降低的趋势，但不同处理之间pH高低具有明显的差异；由于有机物质降解和NH_4^+积累，前5天堆体的pH呈直线上升趋势，随着NH_3挥发和堆体腐熟，pH变化趋势平缓，堆肥结束时pH在8.0～8.5。在好氧堆肥过程中，NH_3的挥发主要是高pH造成，当堆体pH≥7时，NH_4^+开始向转化为NH_3方向移动，造成氮素以NH_3挥发方式损失[15-16]。本研究从第10天到堆肥结束，与对照组相比，添加腐殖酸、氯化钙和过磷酸钙的处理均可显著降低堆肥的pH。其中，添加氯化钙的处理对降低堆肥的pH效果最佳。

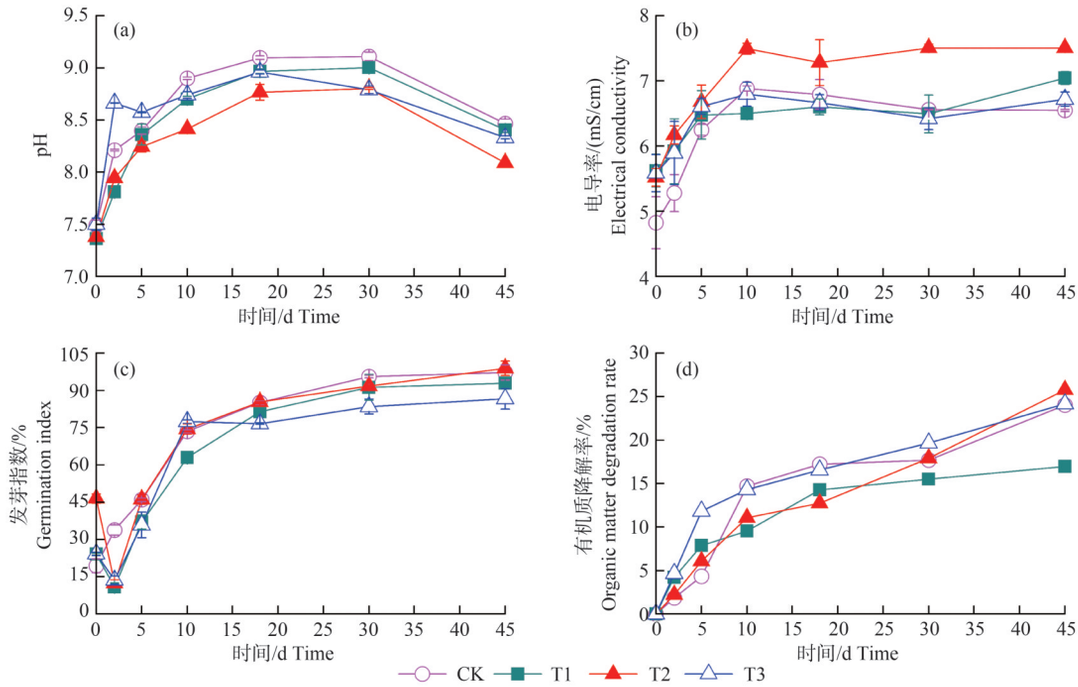


图2 不同处理堆肥过程中pH(a)、电导率(b)、发芽指数(c)和有机质降解率(d)的变化

Fig. 2 Changes in pH (a), EC (b), germination index (c) and organic matter degradation rate (d) during composting under different treatments

EC值可以揭示堆体的盐分含量以及堆肥对种子发芽和植物生长的潜在影响[17]。由图2(b)可见：加入添加剂会提高堆体的初始EC值，这是由于添加剂的加入使堆体中的可溶性离子增多。堆肥开始时EC值升高，其可能的原因是，在堆肥过程中随着有机物不断降解，盐分不断释放；同时，堆肥质量的损失，导致盐分浓缩，从而使堆肥的EC值升高。随着小分子的挥发、离子之间的沉淀反应以及腐殖化过程中的络合反应，堆肥第10天至堆肥结束，EC值缓慢降低并最终稳定。加入氯化钙的堆体EC值高于其他处理，可能的原因是加入氯化钙影响了堆体的腐熟。堆肥结束时，CK、T1、T2和T3处理的EC值分别为6.55、7.04、7.50和6.72。

堆肥产品的种子发芽指数(GI)是评价堆肥成熟度的重要生物指标之一，当GI≥80%时，可认为堆肥完全腐熟，已消除对植物的毒性[18]。各堆体的GI变化由图2(c)可见：第0天，T2处理的发芽指数为46.47%，远高于其他处理，其可能原因是加入氯化钙能促进种子萌发，提升发芽率和发芽势[19]。T1、T2、T3处理的GI在第2天时有所下降，这与较高的EC值有关。随着堆肥过程进行，堆肥植物毒性逐渐降低，GI逐渐升高，各堆体的GI分别在第18、18、18和30天时达到80%，表明堆肥已成熟且无植物毒性。

堆肥化的目的是实现有机废弃物的减量化、无害

化和资源化，有机质降解率直接反映了堆肥的腐熟程度[20]。由图2(d)可见：有机质的降解主要发生在堆肥前期和中期，有机质发生剧烈的生物降解，与前期较高的NH_3排放速率相符合。随后，各组的降解效率逐渐降低，堆肥结束时，4个处理的有机质降解率分别为24.04%、16.96%、25.78%和24.18%，其中，加入腐殖酸的处理有机质降解率相比CK降低了7.08%，说明加入腐殖酸可能会对堆体的腐熟产生不良影响。

2.3　番茄茎秆好氧堆肥过程中铵态氮和硝态氮变化规律

不同添加剂对铵态氮和硝态氮的变化规律影响结果见图3。堆肥过程中铵态氮含量与NH_3的释放密切相关，NH_3释放是氮素损失的主要原因[21]。由图3(a)可见：铵态氮含量在堆肥开始时迅速上升，并在第2天达到峰值，最初快速上升是由于高pH和高温条件下抑制的微生物硝化作用，氨化作用增强。此后，铵态氮持续向硝态氮或有机氮转化以及堆肥基质的稳定，铵态氮含量持续下降。在整个堆肥过程中，T1、T2、T3处理的铵态氮含量均高于CK，堆肥结束后各处理氨态氮含量由高到低依次为T3＞T2＞T1＞CK，添加腐殖酸、氯化钙、过磷酸钙均能增加堆肥的铵态氮含量，且过磷酸钙增加铵态氮效果更明显。

在堆肥腐熟的过程中，铵态氮化合物和硝态氮化合物是植物最常利用的2种氮素形态，硝态氮化合物比铵态氮化合物更容易被植物吸收利用。由于高温抑制了硝化细菌的活性，堆肥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[22]。由图3(b)可见：每个处理初始的硝态氮含量为105.70～109.07 mg/kg，硝态氮浓度在整个高温阶段都保持在较低水平，是由于高pH和温度阻碍了硝化作用。随后，随着pH和温度的下降，硝酸盐含量持续上升并稳定。堆肥结束后，T2和T3处理的硝酸盐含量略高于对照，较CK分别增加27.53、41.89 mg/kg；而T1处理降低硝态氮含量，较CK减少94.85 mg/kg，表明添加5%腐殖酸可能会影响番茄茎秆堆肥过程中的硝化作用。

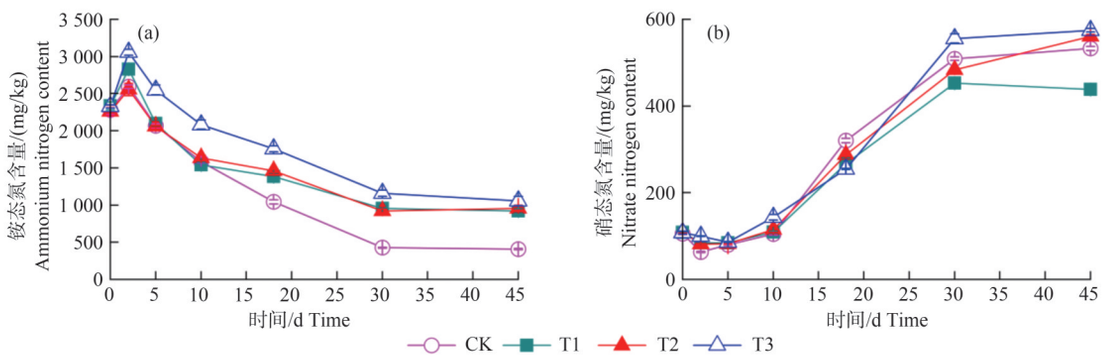


图3　不同处理堆肥过程中铵态氮(a)和硝态氮(b)含量的变化

Fig. 3　Changes in ammonium (a) and nitrate nitrogen (b) content during different composting processes

2.4　番茄茎秆好氧堆肥过程中NH_3的挥发量及累积排放量变化规律

不同添加剂对NH_3挥发量及累积排放量变化规律影响结果见图4。NH_3释放是氮素损失的主要原因[23]。由图4(a)可见：4个处理的NH_3挥发量变化趋势一致，呈先升高后下降的趋势，NH_3的挥发主要集中在升温期和高温期阶段。CK、T1、T2、T3处理的NH_3挥发最大量均出现在第9天，分别为238.00、166.30、111.95、187.60 mg/kg，这是由于堆肥初期的氨化细菌类代谢能力强，分解含氮有机物时可产生的大量NH_4^+-N，导致pH升高，这是NH_3挥发的直接原因[24]。在第18天后NH_3的释放量明显减少，与其前体物氨氮含量降低、硝化细菌作为优势菌属有关。与对照相比，其他处理在高温期NH_3释放量低于对照，挥发时间也明显缩短，添加化学添加剂对于堆肥中减少NH_3的释放量效果明显。

由图4(b)可见：与CK相比，T1、T2和T3处理中的累积NH_3排放量要低得多，分别减少了39.6%、68.0%和19.3%。T2处理NH_3累计排放量少于T1、T3，这可能是由于氯化钙降低了堆体的pH。这些结果表明，添加剂可以有效的减少堆肥过程中的NH_3排放。

2.5　不同添加剂对番茄茎秆好氧堆肥过程中全氮及氮素损失率的影响

不同添加剂对全氮及氮素损失变化规律影响结果见图5。氮是植物生长和代谢所需要的重要元

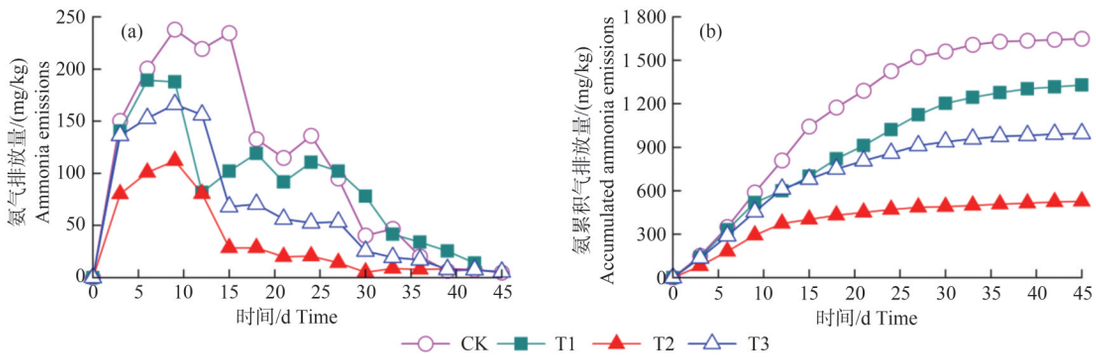


图 4 不同处理堆肥过程中 NH_3 排放量(a)及 NH_3 累积排放量(b)

Fig. 4 Ammonia emissions (a) and cumulative ammonia emissions (b) during composting processes with different treatments

素。由图 5(a)可见:TN 含量在前 5 天略微有所下降,随后持续上升。TN 最初的减少可能是由于高温期 NH_3 的大量排放,后期随着物料不断消耗,出现相对浓缩效应,导致氮素含量不断增加。由于 T2 处理中的 NH_3 排放量较低,氮素以晶体的形式保存到堆体中,堆肥结束时,与 CK 处理相比,观察到了较高的 TN 含量,堆肥结束时,3 种添加剂均提高了堆体的 TN 含量。

由图 5(b)可见:各处理保氮效果排列依次为 T2>T3>T1>CK;与 CK 相比所有添加剂都显著减少了堆体的氮素损失。腐殖酸、氯化钙、过磷酸钙在番茄茎秆好氧堆肥中都有良好的保氮效果。其中,氯化钙保氮效果最好,氮素损失率低至 12.65%,较 CK 降低了 29.88%。

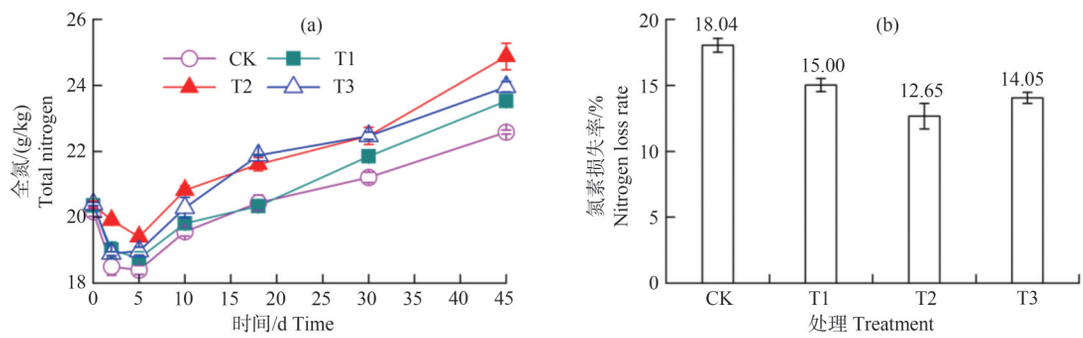


图 5 不同处理堆肥过程中全氮含量(a)变化及氮素损失率(b)

Fig. 5 Changes in total nitrogen content (a) and nitrogen loss rate (b) during different composting treatments

3 讨论与结论

本研究通过在番茄茎秆中加入氯化钙、腐殖酸、过磷酸钙 3 种添加剂进行好氧堆肥试验,发现 3 种添加剂均能满足好氧堆肥的腐熟标准。其中,添加过磷酸钙使高温期延长了 3 d,且发芽指数计算结果表明,添加剂的加入不会对植物生长产生毒性;不同添加剂堆肥过程中的 pH 均呈现先升高再降低的趋势,这与杨岩等[25]研究结果一致。不同添加剂处理后堆体的全氮含量均有不同程度的增加,其中添加氯化钙的处理增加比例最高,这与曹丽娜等[26]堆肥结束全氮含量呈下降趋势的研究结果并不一致,可能是由于堆肥材料的差异性造成,鸡粪的氮含量较高,且鸡粪中的有机氮易于降解,在堆肥过程中,有机氮会被快速分解释放出来,导致全氮含量下降,本研究中番茄茎杆中的结构较为坚硬且含有较多的纤维素和木质素,这些物质在堆肥过程中分解较慢,将有机氮转化为无机氮,因此使全氮含量上升。在高温阶段堆体有机质降解进程加速,矿化作用强烈,铵态氮达到最大浓度,随后逐渐降低,由于温度过高,抑制了硝化反应,这个阶段 NH_3 挥发强烈,堆体硝态氮浓度也维持在较低水平。

在堆肥过程中,外源添加剂的添加可以在一定程度上调控氮素的损失。然而,不同类型的保氮调理剂对于有机物料的保氮效果表现出一定的差异。郑瑞生等[27]研究不同比例沸石对猪粪堆肥过程中

保氮效果的影响，结果表明沸石能抑制堆体NH_3挥发，提高了堆肥中全氮含量；史春梅等[28]以猪粪和玉米秸秆混合作原料，添加不同的添加剂，研究表明各添加剂处理均能降低堆体氮素损失，固氮率也达 58.3%～75.9%。本研究结果表明，3 种添加剂处理在堆肥过程中的NH_3挥发总量仅为 CK 处理的 32.04%～80.72%，不同处理氮素损失率较 CK 显著提升，在固氮和减少NH_3排放方面，与已有研究结果不尽一致。这是因为保氮剂种类和有机物料来源虽不同，堆肥过程中的保氮原理不尽相同。腐殖酸、氯化钙、过磷酸钙通过促进微生物活性和与氮素形成沉淀来减少番茄茎秆好氧堆肥中氮素的损失。这些机制相互协同作用，能够有效提高氮素的利用率。此外，对于添加剂添加量的优化，以及添加剂对堆肥产物质量的影响也需要进一步验证。在未来的研究中，可以考虑采用更多的添加剂，以及不同添加剂的组合，来寻求更好的调控效果。同时，可以进一步探索添加剂对堆肥过程中其他关键参数的影响，例如温度、湿度、通气率等，以实现对堆肥过程的精确调控。

本研究综合分析 pH、发芽指数、EC 值、氮素损失率等指标分析在番茄茎秆好氧堆肥过程中氮素损失情况，主要结论如下：1）3 种添加剂均未对堆肥的腐熟造成影响；2）3 种添加剂均可降低堆肥的氮素损失率，同时减少了NH_3的挥发量。其中，添加氯化钙的处理保氮效果最好，与对照相比，氮素损失率低至 12.65%，NH_3挥发量减少 67.96%。因此，番茄茎秆好氧堆肥中可选择初始物料干质量 5% 的氯化钙作为添加剂，可以达到减少氮素损失、提高堆肥品质的效果。而且，氯化钙为一种低成本、易获得的原料，在堆肥工程实践中具有一定的应用价值。

参考文献　Reference

[1] 陈米会，金超，陈春．不同处理方式对黑珍珠樱桃番茄产量的影响[J]．农技服务，2023，40(8)：36-39
Chen M H, Jin C, Chen C. Effects of different treatments on tomato yield of black pearlcherry [J]. *Agricultural Technology service*, 2023, 40(8): 36-39 (in Chinese)

[2] 谭乐增，杨晓东，李夕进，孙莎莎．育苗基质添加不同调节剂对番茄幼苗生长发育的影响[J]．园艺与种苗，2023，43(9)：1-3，34
Tan L Z, Yang X D, Li X J, Sun S S. Effects of different regulators added to seedling substrate on growth and development of tomato seedlings[J]. *Horticulture & Seed*, 2023, 43(9): 1-3, 34 (in Chinese)

[3] 李火金，蔡尽忠．蔬菜废弃物堆肥化处理概述[J]．生物学教学，2019，44(7)：67-68
Li H J, Cai J Z. Summary of composting treatment of vegetable waste[J]. *Biology Teaching*, 2019, 44(7): 67-68(in Chinese)

[4] 陈冰，张思梦，蒲志红．我国农村有机生活垃圾好氧堆肥研究进展[J]．绿色科技，2020(10)：7-9
Chen B, Zhang S M, Pu Z H. Research progress on aerobic composting of rural organic domestic waste in China [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2020(10): 7-9 (in Chinese)

[5] Shan G C, Li W G, Gao Y J, Tan W B, Xi B D. Additives for reducing nitrogen loss during composting: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 307:127308

[6] Beck-Friis B, Smars S, Jonsson H, Kirchmann H. Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 78(4): 423-430

[7] Martins O, Dewes T. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1992, 42(2): 103-111

[8] Cao Y, Wang X, Bai Z, Chadwick D, Misselbrook T, Sommer S G, Qin W, Ma L. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: A meta-analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235: 626-635

[9] 孔凡克，王丽霞，李煜喆，邵蕾．腐殖酸保氮剂对降低堆肥过程中氮损失的影响[J]．热带农业科学，2021，41(3)：30-36
Kong F K, Wang L X, Li Y Z, Shao L. Effect of humic acid nitrogen-retaining agent on reducing nitrogen loss during composting[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, 41(3): 30-36 (in Chinese)

[10] 罗一鸣，李国学，Frank Schuchardt，王坤，江滔，罗文海．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, Wang K, Jiang T, Luo W H. Effects of additive superphosphate on NH_3, N_2O and CH_4 emissions during pig manure composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 235-242 (in Chinese)

[11] 鲍士旦．土壤农化分析[M]．3版．北京：中国农业出版社，2000
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)

[12] 高华，秦清军，谷洁，李鸣雷，张亚健．除臭菌剂在家禽粪便无害化处理中的效果研究[J]．西北农林科技大学学报：自然科学版，2004，32(11)：59-64
Gao H, Qin Q J, Gu J, Li M L, Zhang Y J. Study on the effects of deodorizing microorganism on poultry manure composting[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2004, 32(11): 59-64 (in Chinese)

[13] 林小凤，李国学，贺琪，邹积鑫．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 X F, Li G X, He Q, Zou J X. Materials of controlling nitrogen loss during composting [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(5): 975-978 (in Chinese)

[14] 高鹏，鲁耀雄，崔新卫，卢红玲，聂新星，张鸿，彭福元．不同添加剂对畜禽粪便堆肥的保氮效果[J]．湖南农业科学，2021，(6)：38-42
Gao P, Lu Y X, Cui X W, Lu H L, Nie X X, Zhang H, Peng F Y. Effect of different additives on nitrogen in retention of livestock manure compost[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021(6): 38-42 (in Chinese)

[15] 常瑞雪，甘晶晶，陈清，李彦明．碳源调理剂对黄瓜秧堆肥进程和碳氮养分损失的影响[J]．农业工程学报，2016，32(S2)：254-259
Chang R X, Gan J J, Chen Q, Li Y M. Effect of carbon resources conditioner on composting process and carbon and nitrogen loss during

composting of cucumber stalk[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 254-259 (in Chinese)

[16] 翁洵, 王炎, 郑孟菲, 何长征. 堆肥过程中氮素转化及保氮措施研究进展[J]. 中国农学通报, 2017,33(27): 26-32
Weng X, Wang Y, Zheng M F, He C Z. Nitrogen transformation and nitrogen conservation in composting: Research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(27): 26-32 (in Chinese)

[17] 吴飞龙, 叶美锋, 吴晓梅, 林代炎, 翁伯琦. 添加菌糠对猪粪渣堆肥过程及氨排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 598-604
Wu F L, Ye M F, Wu X M, Lin D Y, Weng B Q. Effects of mushroom bran addition on the process and NH_3 emissions of swine feces residue composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(03): 598-604 (in Chinese)

[18] Li Y Y, Han Y Y, Zhang Y R, Fang Y R, Li S Y, Li G X, Luo W H. Factors affecting gaseous emissions, maturity, and energy efficiency in composting of livestock manure digestate [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 731: 139157

[19] 汪之波, 周向军, 郝春红. 两种化学试剂对黄芩和柴胡种子萌发的影响[J]. 种子, 2009, 28(6): 54-58
Wang Z B, Zhou X J, Hao C H. Influence of two chemical reagents on baicalin and Bupleurum seeds germination[J]. *Seed*, 2009, 28(6): 54-58 (in Chinese)

[20] 路明艺, 师晓爽, 冯权, 徐琬莹, 郭荣波. 不同牡蛎壳粉添加量对沼渣堆肥有机质降解及氮损失的影响[J]. 中国沼气, 2021, 39(3): 13-20
Lu M Y, Shi X S, Feng Q, Xu W Y, Guo R B. Effects of different addition amount of oyster shell powder on organic matter degradation and nitrogen loss of biogas residue compost[J]. *China Biogas*, 2021, 39(3): 13-20 (in Chinese)

[21] Tong B X, Wang X, Wang S Q, Ma L, Ma W Q. Transformation of nitrogen and carbon during composting of manure litter with different methods[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122046

[22] 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

[23] 薛晶晶, 李彦明, 常瑞雪, 王珏, 彭粮欢. 厨余与园林废物共堆肥过程氮素转化及损失[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 192-197
Xue J J, Li Y M, Chang R X, Wang J, Peng L H. Nitrogen transformation and loss during co-composting of kitchen and garden wastes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(10): 192-197 (in Chinese)

[24] GajalakshmI S, Abbasi S A. Solid waste management by composting: State of the art [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2008, 38(5): 311-400

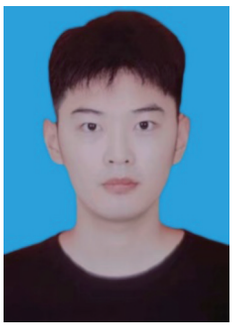
[25] 杨岩, 孙钦平, 李妮, 刘春生, 李吉进, 刘本生, 邹国元. 添加过磷酸钙对蔬菜废弃物堆肥中氨气及温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报,2015, 26(1):161-167
Yang Y, Sun Q P, Li N, Liu C S, Li J J, Liu B S, Zou G Y. Effects of superphosphate addition on NH_3 and greenhouse gas emissions during vegetable waste composting [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1):161-167 (in Chinese)

[26] 曹丽娜, 王岩, 王跃, 李沛, 郑珂, 刘佳琪, 李红丽. 添加麦秸对鸡粪堆肥过程中氮素减排及细菌群落的影响[J]. 农业环境科学学报,1-13
Cao L N, Wang Y, Wang Y, Li P, Zheng K, Liu J Q, Li H L. Effects of wheat straw addition on nitrogen emission reduction and bacterial community during chicken manure composting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*,1-13 (in Chinese)

[27] 郑瑞生, 封辉, 李延. 沸石在猪粪堆肥过程中保氮效果研究[J]. 环境科学报, 2010, 30(5): 1017-1022
Zheng R S, Feng H, Li Y. Nitrogen conservation in swine manure compost with zeolite[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(5): 1017-1022 (in Chinese)

[28] 史春梅, 王继红, 李国学, 江滔, 魏洪飞, 马志宏. 不同化学添加剂对猪粪堆肥中氮素损失的控 制[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 1001-1006
Shi C M, Wang J H, Li G X, Jiang T, Wei H F, Ma Z H. Control of different chemical additives on nitrogen loss during composting of pig manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 1001-1006 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 周顺,硕士研究生,就读于西北农林科技大学园艺学院农艺与种业专业。本科毕业于山东农业大学设施农业科学与工程专业。研究生期间参与西藏高原设施蔬菜关键技术创新与集成项目、温室环境智能调控技术与设备研发项目,获得研究生奖学金2次。主要从事蔬菜废弃物循环利用及有机栽培方面的研究。发表学术论文3篇。

通讯作者简介: 杨振超,博士,研究生导师,西北农林科技大学西安都市农业试验示范站站长,杨凌示范区立体绿化产业技术联盟理事长,中国农业工程学会、中国农学会都市与休闲农业分会和美国园艺学会、美国农学会会员。主要研究领域是设施农业、都市农业、休闲农业、有机农业和光伏农业。研究方向是植物工厂光热水气等环境精准调控、作物有机茎杆废弃物有机生态循环利用技术以及现代农业园区规划与管理。先后主持国家“863”计划课题、国家支撑计划课题、陕西省科技攻关计划等各类课题20多项,出版教材或专著14本,发表学术论文60余篇,其中SCI/EI收录10余篇,软件著作权1个,授权国际专利1件,国内专利6件,获国家教学成果二等奖1项。