

罗 渊, 袁 京, 李国学, 等. 种子发芽试验在低碳氮比堆肥腐熟度评价方面的适用性[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 179-185.

LUO Yuan, YUAN Jing, LI Guo-xue, et al. Applicability of seed germination test to evaluation of low C/N compost maturity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 179-185.

种子发芽试验在低碳氮比堆肥腐熟度评价方面的适用性

罗 渊¹, 袁 京¹, 李国学^{1*}, 李恕艳¹, 江 滔², 谭 钧³, 邢文军³

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 乐山师范学院, 化学学院, 四川 乐山 614004; 3. 香港中向国际有限公司, 北京 100024)

摘 要: 为了研究种子发芽率和根长与种子发芽率指数(GI)评价指标的关系、取值及其在低碳氮比堆肥腐熟度评价方面的适用性, 以猪粪为堆肥原料, 进行了两组堆肥试验。其中一组添加初始物料湿重 15% 的木本泥炭作为调理剂和固氮剂, 另一组在添加相同比例木本泥炭的基础上再添加过磷酸钙进行优化, 过磷酸钙的添加比例约为初始物料干重的 16%。通过两种种子(萝卜种子和白菜种子)的发芽试验, 结合概率统计原理对堆肥的腐熟度进行了评价。研究表明, 两个处理在整个堆肥过程中均维持了较高的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量 ($1.77\sim 3.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ DM}$), 而较高的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量是抑制种子根长伸长的主要原因。因此, 将种子发芽率(SG)和相对种子根长(RRG)这两个指标相结合比种子发芽率指数(GI)这单一指标更能准确地评价低碳氮比堆肥的腐熟度, 当 $\text{SG}\geq 70\%$ 且 $\text{RRG}\geq 50\%$ 时, 表明堆肥已达到腐熟且对作物无盐害。

关键词: 猪粪; 木本泥炭; 过磷酸钙; 腐熟度; 种子发芽率; 相对种子根长

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2016)01-0179-07 doi:10.11654/jaes.2016.01.024

Applicability of seed germination test to evaluation of low C/N compost maturity

LUO Yuan¹, YUAN Jing¹, LI Guo-xue^{1*}, LI Shu-yan¹, JIANG Tao², TAN Jun³, XING Wen-jun³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Chemistry, Leshan Normal University, Leshan 614004, China; 3. The Hong Kong International Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: Seed germination(SG), germination index(GI), and relative root growth(RRG) have been widely used to evaluate the maturity of composts. This research was to examine their applicability to the evaluation of low C/N compost maturity. Two treatments, pig manure amended with woody peat at 15% of the initial composting material wet weight(T1) and T1 supplied with superphosphate at 16% the initial composting material dry weight, were designed. Two kinds of seeds(radish seeds and cabbage seeds) were examined. Results showed that accumulation of ammonium nitrogen in the compost was observed in two treatments, with ammonium nitrogen ranging from $1.77\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ DM}$ to $3.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ DM}$. High ammonium nitrogen was a major factor inhibiting the root elongation. It was better for compost maturity evaluation to use combined SG and RRG than GI. Both $\text{SG}\geq 70\%$ and $\text{RRG}\geq 50\%$ would indicate that the composts are mature and don't cause salt damages to crops.

Keywords: pig manure; woody peat; superphosphate; maturity; seed germination; relative root growth

随着我国畜禽养殖业集约化程度的提高, 专业化特征越来越明显, 导致养殖业与种植业日益分离, 循

环农业的链条中断。从事养殖的不种地, 畜禽粪便不能当作肥料; 种地的不再从事养殖, 农田靠施用化肥, 使畜禽粪便用作农田肥料的比重大幅度下降, 畜禽粪便乱堆乱排的现象越来越普遍^[1]。因此, 如何实现畜禽粪便的资源化利用成为一个亟待解决的问题, 而好氧堆肥作为一种畜禽粪便资源化利用的重要途径, 在国内外得到广泛的研究与应用^[2-4]。

用低碳氮比物料进行堆肥, 可以增加堆肥产品的含氮量, 从而提高堆肥产品的养分含量, 但同时堆肥

收稿日期: 2015-07-03

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目“农业废弃物高效循环利用关键技术研究”(2012BAD14B01), “珠三角地区农牧高效循环技术集成与示范”(2012BAD14B16); 香港中向国际木本泥炭农业领域应用研究项目; 国家自然科学基金(41201282); 中小企业发展专项资金中欧国际合作项目(SQ2013ZOA000008)

作者简介: 罗 渊(1989—), 男, 硕士, 研究方向为固体废弃物处理与资源化。E-mail: yuantian3873@163.com

* 通信作者: 李国学 E-mail: ligx@cau.edu.cn

过程中又存在氮素损失严重的问题,主要表现为氨气(NH_3)排放造成的臭气污染。所以,用于堆肥的固氮材料一直是国内外研究的热点。常见的固氮材料包括高碳物质(锯末、草炭和蚯蚓粪等)、物理吸附剂(泥炭和沸石等)、化学药剂(硫酸亚铁、氯化铁和过磷酸钙等)、外源菌剂以及一些新型材料(脲酶抑制剂和硝化抑制剂)^[5]。堆肥产品腐熟与否决定了堆肥过程的成败,而有效地评价低碳氮比堆肥的腐熟度就显得尤为重要。Zucconi 等^[6]通过研究,提出了种子发芽指数(GI)这一指标后,该指标作为评价堆肥腐熟度的生物学指标在国内外得到广泛应用^[7-10]。但 GI 在评价低碳氮比堆肥腐熟度方面却受到限制,原因是低碳氮比堆肥中大量存在的 NH_4^+ 抑制了种子的发芽和根的生长,这一结论也得到了普遍的共识^[8,11-14]。此外,GI 是由种子的相对发芽比例和相对根长计算得到,而这一指标没有考虑所用种子本身的发芽率,即没有考虑抽样误差带来的影响,难免使其对堆肥腐熟度的评价结果产生偏差。

本研究在选用木本泥炭作为低碳氮比堆肥调理剂和固氮剂的基础上,通过添加过磷酸钙对堆肥过程进行优化。研究选取萝卜和白菜种子(前者颗粒较大,后者颗粒较小,一般认为这两种种子对堆肥浸提液的敏感程度不同^[12]),结合概率统计的基本原理,利用种子发芽率(SG)和种子相对根长(RRG)指标对低碳氮比堆肥腐熟度进行了评价,以期通过这两个指标对 GI 指标评价方法进行改进,从而更有效地指导科学研究和实际生产。

1 材料与方法

1.1 供试种子

试验选用的种子为聚红水果萝卜种子和四季小白菜种子,均购自中国农业科学院蔬菜花卉研究所,其入袋发芽率均为 85%。

1.2 供试物料及添加剂

堆肥物料由新鲜猪粪和木本泥炭混合而成,其 C/N 约为 16,含水率为 62.06%,木本泥炭的添加比例为物料总湿重的 15%。猪粪为干清粪,取自北京市海淀区苏家坨养猪场,鲜基含水率为 69.74%,干基总碳(Total carbon, TC)含量为 30.99%,干基总氮(Total nitrogen, TN)含量为 2.68%。木本泥炭呈粉末状,由香港中向国际有限公司提供,鲜基含水率为 21.52%,干基总碳含量为 52.14%,干基总氮含量为 0.65%。添加剂过磷酸钙购自市场,产地为湖北省钟祥市,其 P_2O_5 的

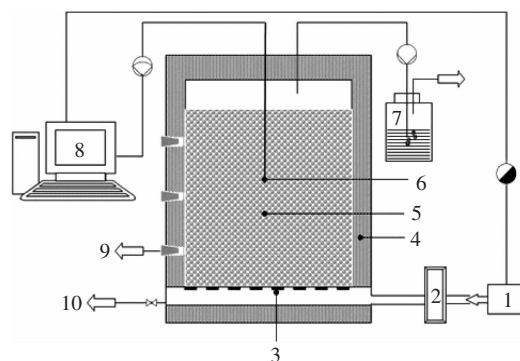
含量 $\geq 12\%$ 。

1.3 试验设计及试验装置

试验共设 2 个处理,即不添加过磷酸钙处理(对照)和添加过磷酸钙处理。各处理的物料鲜重、添加剂用量如表 1 所示。物料和添加剂经充分混合后,装入 60 L 密闭式发酵罐中进行堆肥(图 1)。发酵罐为不锈钢制成的双层圆桶状结构,顶部密封,高度为 70 cm,外直径为 46 cm,壁厚 5 cm。发酵罐由软件 C-LGX 系统控制,通过该系统可以根据时间或堆体温度自动控制通风量,并自动记录温度。试验过程连续通风,通风量为 $0.36 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$ 。试验于 2014 年 8 月到 9 月之间在中国农业大学上庄实验站进行,为期 28 d。堆肥过程中除在第 3 d 翻堆一次外,其后每隔 7 d 翻堆一次。翻堆时采用多点法取样,每次取样 300 g,一半冷冻保存,用于湿样指标(含水率、pH、电导率、铵态氮和硝态氮以及生物学评价指标)的测定,另一半风干后粉碎,研磨,过 0.149 mm 筛后贮存,用于干样指标(总碳和总氮)的测定。

1.4 试验方法

(1) 堆体温度: 由温度探头通过传感器每隔 2 h 自动采集一次。



(1)空气泵;(2)气体流量计;(3)筛板;(4)绝热层;(5)堆肥原料;
(6)温度传感器;(7)洗气瓶;(8)自动化控制系统;
(9)采样口;(10)渗滤液收集口

图 1 密闭式堆肥反应器示意图

Figure 1 Diagram of aerated static pile device for composting

表 1 试验设计

Table 1 Design of experiment

处理	猪粪+木本泥炭/kg	过磷酸钙/kg
WP	37.71	—
WP + SSP	37.71	2.94

注:WP、WP+SSP 分别代表未添加过磷酸钙和添加过磷酸钙的处理;过磷酸钙的添加比例约为混合物料干重的 16%;过磷酸钙的添加量根据混合物料初始总氮的 20%与过磷酸钙中磷元素等摩尔的原则计算得到^[15]。

(2)含水率:在 $(105\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重。

(3)水浸提液:将湿样和去离子水按 1:10(W/V)的比例混合,于摇床上以 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转动 30 min,静置 10 min 后,取其上清液过滤所得。

(4)KCl 浸提液:将湿样用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液按 1:10(W/V)的比例浸提,取其上清液过滤所得,具体方法同(3)。

(5)pH、电导率(EC):用 MP521 型 pH/电导测定仪测定水浸提液所得。

(6)生物学评价指标:取 5 mL 水浸提液加入直径为 9 cm 且铺有滤纸的培养皿内,点播 10 粒饱满的种子,置于 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 培养箱中,培养 48 h 后测量种子发芽率和根长,计算种子发芽率(Seed germination, SG)、相对种子根长(Relative root growth, RRG)和种子发芽率指数(Germination index, GI)。对照为去离子水培养。各指标的计算公式分别为:

$$\text{SG}(\%) = \frac{\text{对照(处理)的发芽种子数}}{\text{对照(处理)的总种子数}} \times 100$$

$$\text{RRG}(\%) = \frac{\text{处理的种子总根长}}{\text{对照的种子总根长}} \times 100$$

$$\text{GI}(\%) = \frac{\text{处理发芽种子数} \times \text{处理种子总根长}}{\text{对照发芽种子数} \times \text{对照种子总根长}} \times 100$$

(7)铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$):取 KCl 浸提液,经适当稀释后用流动分析仪(Auto Analyzer 3, Seal, 德国)测定所得。

(8)总碳(TC)、总氮(TN):将风干样于 50°C 烘干后,通过元素分析仪测定所得。

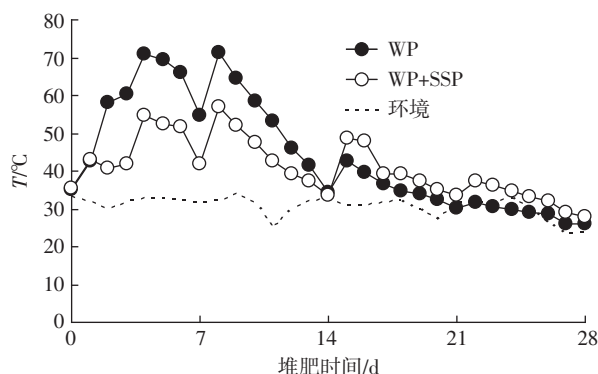
以上每个样品做 3 次平行测定后取其平均值,数据的统计分析借助 MATLAB 7.0 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 温度的变化

温度是保证通过堆肥过程实现无害化的首要条件,同时也是反映堆肥有机物降解程度的重要指标之一。堆肥开始时,原料中易于被微生物降解的有机物大量分解,各处理的温度迅速上升。未添加过磷酸钙和添加过磷酸钙处理的堆体温度分别在第 2 d 与第 4 d 达到 50°C 以上,高温期(50°C 以上)的持续时间分别达到 10 d 和 5 d(图 2),堆体最高温度分别达到 71°C 和 57°C 。统计分析结果表明,高温期各处理间温度差异极显著($P<0.01$)。根据我国粪便无害化卫生标准(GB 7959—2012),各处理均达到了无害化的要求。与作为膨胀剂和调理剂的秸秆^[16]和锯末^[17]相比,木本泥炭也可以起到平衡水分和调节孔隙度的作用^[18],保证

猪粪好氧堆肥的顺利进行。过磷酸钙的添加对堆体有机物降解过程产生了影响,堆体内在升温阶段起主导作用的嗜热微生物活性可能受到了一定抑制,造成升温缓慢,与罗一鸣等^[15]的研究结果相似。Jeong 等^[19]对堆肥中磷酸盐和镁盐混合材料添加量的研究发现,其添加量超过原料总氮物质的量的 20%,会对堆肥过程中有机物的降解产生不利的影响。因此,在堆肥过程实现无害化的条件下,添加过磷酸钙避免了堆体出现过高的温度,有利于后续堆肥过程的进行。



WP、WP+SSP 分别代表未添加和添加过磷酸钙的处理。下同

图 2 堆肥过程中温度的变化

Figure 2 Changes of temperature during composting

2.2 种子发芽率(SG)和相对种子根长(RRG)的变化

种子发芽率(SG)是指所选用的一定数量种子中发芽种子所占的比率。种子发芽的概率是指一批种子中发芽种子所出现的稳定的频率。对单个种子来说只有发芽和不发芽两种结果,对一袋种子来说,一般不是 100%发芽而有一个发芽的概率,即种子包装袋上注明的人袋发芽率。本研究供试种子的人袋发芽率为 85%。由供试种子发芽的概率计算得到表 2 中 10 粒种子发芽情况的概率。

在整个堆肥过程中,各处理不同类型种子 SG 变化幅度较小,均维持在 70%以上,即 10 粒种子中至少有 7 粒种子发芽(图 3)。由表 2 可以看出,10 粒种子的发芽数 ≥ 7 (即 $\text{SG} \geq 70\%$)的概率大于 0.05,而发芽数 < 7 (即 $\text{SG} < 70\%$)的概率小于 0.05。根据小概率原理^[20],10 粒种子的发芽数 < 7 的事件在一次试验中往往是不会出现的。这说明,当 $\text{SG} \geq 70\%$ 时,堆肥浸提液对种子发芽无影响。此外,当空白(去离子水)试验的 $\text{SG} < 70\%$ 时,说明供试的种子本身存在发芽率偏低的问题,因而试验结果不可靠,需要更换种子。此次试验中,空白(去离子水)的 SG 达到 70%以上(表 3),保证了试验结果的可靠性。此外,在空白中,白菜种子的

表 2 10 粒种子发芽情况的概率分布

Table 2 Probability distribution of number of germinated seeds out of ten seeds

发芽粒数(X)	1~4	5	6	7	8	9	10
概率(P)	<0.001	0.001	0.011	0.057	0.193	0.387	0.349

注:X 服从二项分布,其对应的 P 根据二项分布的公式计算^[20]。

表 3 空白(去离子水)的种子发芽率和种子总根长

Table 3 Seed germination and total root growth in deionized water

SG/%		种子总根长/mm	
萝卜种子	白菜种子	萝卜种子	白菜种子
80±10	100±0	51±10	219±18

总根长为萝卜种子的 4.3 倍(表 3),在一定程度上说明白菜种子和萝卜种子对外界环境的敏感程度不同。

在整个堆肥过程中,各处理不同类型种子 RRG 均出现较大幅度的波动,说明堆肥浸提液对种子根长伸长的影响比对种子发芽的影响大(图 4)。堆肥结束时,RRG 均达到了 50%以上,且萝卜种子 RRG 高于白

菜种子 RRG。

2.3 种子发芽率指数(GI)的变化

堆肥最终将作为有机肥用于作物的生产,GI 是一个生物学指标,它综合反映了堆肥产品的植物毒性的大小,被认为是最敏感、最可靠的堆肥腐熟度评价指标^[8]。一般当种子 GI≥50%时,堆肥对植物基本没有毒性^[6];当 GI≥80%时,堆肥对植物完全没有毒性^[12]。在整个堆肥过程中,各处理不同类型种子 GI 呈先上升后下降再上升的整体趋势(图 5)。新鲜猪粪的初始 GI 并不低,堆肥开始后才迅速下降,在经过一段时间的种子抵制期后,开始回升。堆肥结束时,不同处理、不同种子的 GI 均达到 50%以上,说明堆肥达到了腐熟。GI 的这种变化趋势说明,堆肥过程中会产生大量的植物毒性物质,如有机酸等^[21],而这些植物毒性物质随着堆肥时间的延长(堆肥趋于腐熟),才会逐渐减少。这也表明将新鲜猪粪等有机固体废弃物进行堆肥后施用的重要性。

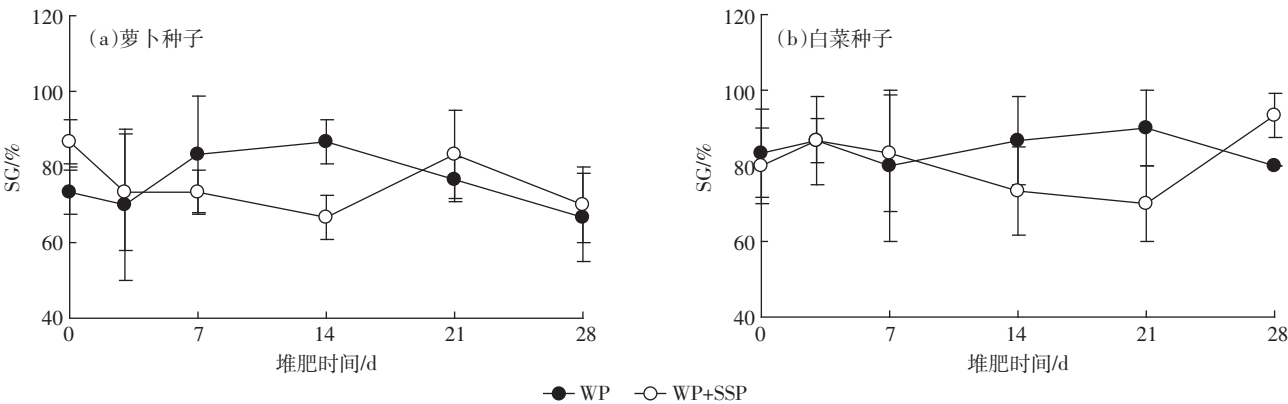


图 3 堆肥过程中种子发芽率的变化

Figure 3 Changes of seed germination rate during composting

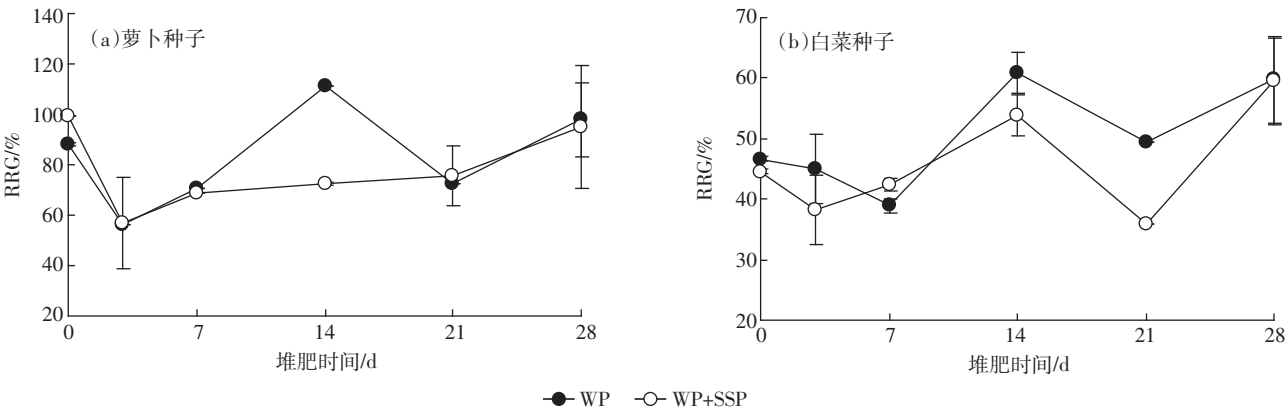


图 4 堆肥过程中相对种子根长的变化

Figure 4 Change of relative root growth during composting

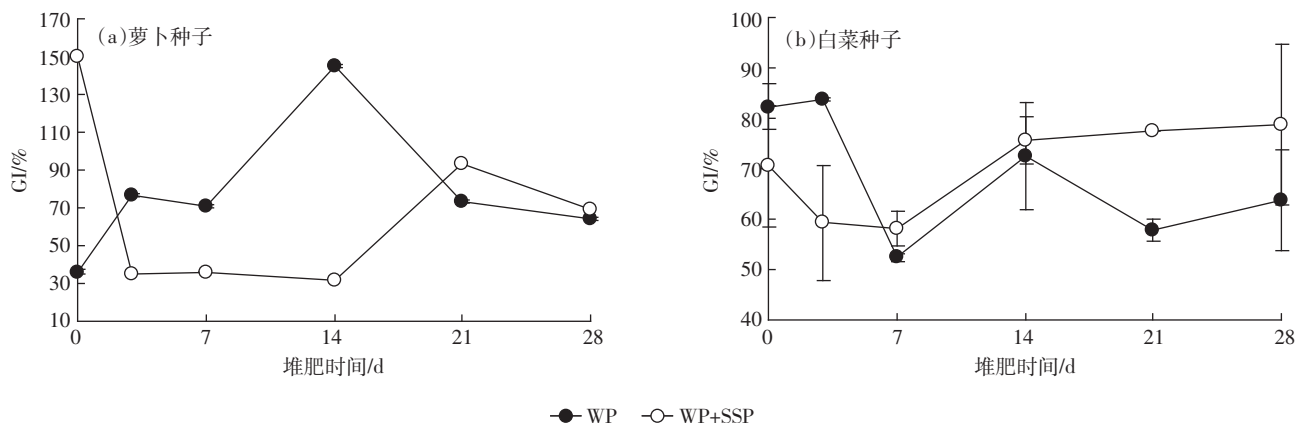


图 5 堆肥过程中种子发芽率指数的变化

Figure 5 Changes of seed germination index during composting

2.4 堆肥过程中化学指标(pH、EC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)的变化

从表 4 可以看出,在整个堆肥过程中,两个处理的 pH 值均维持在一个适宜的范围内(7.9~8.6),处理间差异不显著($P>0.05$),说明添加过磷酸钙对 pH 无显著影响。两个处理的 EC 值均低于 $4.0 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的限值,不会对作物造成盐害,但处理间差异显著($P=0.02$),说明添加过磷酸钙提高了堆肥的含盐量。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈现先增大后减小的趋势,处理间差异不显著($P>0.05$)。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈现先减少后缓慢变化的趋势,处理间差异不显著($P>0.05$)。Tiquia 等^[22]研究认为,在堆肥高温期,硝化细菌活性受到严重抑制,硝化作用主要发生在堆肥后腐熟期。笔者认为,本试验整个堆肥过程中高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量抑制了硝化细菌的活性,可能是导致硝化作用减弱的主要原因。这也从另一方面说明了木本泥炭在好氧堆肥中起到良好的固氮作用。

2.5 堆肥过程中各化学、腐熟度指标间的相关性分析

对处理间的同一腐熟度评价指标(GI、SG 和 RRG)进行统计分析,结果表明:对于萝卜种子,处理间 GI、SG、RRG 变化差异均不显著($P>0.05$);对于白

菜种子,处理间 GI、SG、RRG 变化差异也均不显著($P>0.05$)。因此,只对其中未添加过磷酸钙的处理在堆肥过程中各化学和腐熟度指标间的相关性进行了分析(表 5)。① $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与萝卜种子 GI 和 RRG、白菜种子 GI 和 RRG 均呈显著负相关的关系,与 pH、EC 均无显著相关性,表明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是抑制种子根长伸长的主要因素。这与之前的一些研究结果一致。Tiquia 等^[22]研究了利用六种不同蔬菜种子的相对种子发芽率、相对种子根长和发芽率指数来评价猪粪和木屑堆肥的植物毒性,并通过多元回归分析了堆肥的植物毒性与多种化学指标的关系,发现 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是影响堆肥植物毒性的主要因素。Huang 等^[17]的研究结果表明, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和 GI 呈显著负相关的关系($R=-0.556$, $P=0.04$)。②萝卜种子 GI 与 RRG 呈显著正相关的关系,萝卜种子 RRG 和白菜种子 RRG 呈显著正相关的关系,可见与 GI 指标相比,不同种类种子 RRG 指标对堆肥腐熟度的评价结果具有一致性。此外,虽然 GI 指标将堆肥浸提液对种子发芽和种子根长伸长两方面的影响结合了起来,但是由于没有考虑到种子本身的差异所带来的影响,即认为所选用的种子发芽的概

表 4 堆肥过程中 pH、EC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化

Table 4 Changes of pH, electrical conductivity, ammonium and nitrate during composting

堆肥时间/d	WP				WP+SSP			
	pH	EC/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DM}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DM}$	pH	EC/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DM}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DM}$
0	7.8±0.0	2.16±0.02	2.60±0.10	29.84±1.79	7.9±0.1	2.11±0.05	2.34±0.07	26.77±0.10
3	8.2±0.1	1.65±0.16	2.99±0.09	27.45±0.23	8.1±0.1	2.06±0.03	2.50±0.08	26.01±0.18
7	8.6±0.1	1.62±0.04	2.95±0.07	26.55±0.04	8.2±0.1	2.15±0.03	3.40±0.04	26.20±0.09
14	8.2±0.1	1.67±0.13	1.77±0.06	26.40±0.29	8.3±0.0	2.08±0.06	2.81±0.04	26.60±0.37
21	8.2±0.1	1.87±0.06	2.20±0.07	26.04±0.40	8.3±0.0	2.29±0.13	2.69±0.01	26.08±0.07
28	8.3±0.1	1.89±0.07	2.15±0.06	26.12±0.17	8.3±0.1	2.22±0.02	2.04±0.07	26.24±0.26

表 5 堆肥过程中各化学指标、腐熟度指标间的相关系数($n=6$)Table 5 Correlation coefficients between chemical indexes and maturity indexes($n=6$)

	pH	EC	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	SG(萝卜)	SG(白菜)	RRG(萝卜)	RRG(白菜)	GI(萝卜)	GI(白菜)
pH	1.000 0									
EC	-0.622 9	1.000 0								
NH ₄ ⁺ -N	0.140 2	0.143 4	1.000 0							
NO ₃ ⁻ -N	-0.780 0	0.687 6	0.389 2	1.000 0						
SG(萝卜)	0.234 7	-0.629 2	-0.276 6	-0.235 5	1.000 0					
SG(白菜)	-0.350 5	-0.254 6	-0.280 9	-0.130 0	0.195 3	1.000 0				
RRG(萝卜)	-0.180 3	0.002 5	-0.841 8*	-0.085 8	0.295 8	-0.173 9	1.000 0			
RRG(白菜)	-0.147 6	-0.103 8	-0.903 6*	-0.341 5	-0.019 8	0.123 6	0.821 1*	1.000 0		
GI(萝卜)	0.027 0	-0.223 5	-0.811 8*	-0.239 7	0.493 5	-0.184 2	0.964 5*	0.749 4	1.000 0	
GI(白菜)	0.333 1	-0.519 1	-0.842 9*	-0.693 0	0.611 8	0.187 2	0.676 3	0.648 6	0.788 2	1.000 0

注:以上结果是针对未添加过磷酸钙处理(WP)的分析;“*”代表显著性相关,即 $P<0.05$ 。

率为 100%,使其对腐熟度的评价结果产生了偏差。

在无有机酸存在的情况下,高盐分是抑制种子发芽的主要因素,因为种子发芽是一个吸胀的过程,水分是影响种子发芽的关键性因素,而盐分含量与水分含量成反比。腐熟度反映的是堆肥的一种有机化学特性^[23],它表示是否存在对植物有害的有机酸,所以测量腐熟度应该区分有机酸和盐类对植物生长的影响,而通过 SG 和 RRG 这两个指标可以把有机酸和盐类化合物对植物生长的影响区分开来。或者说,SG 指标可以评价堆肥对种子发芽的影响,而 RRG 指标可以评价堆肥对种子根长伸长的影响。

通过对上述试验结果的分析 and 比较得出,当 $SG<70\%$ 时,说明堆肥浸提液对种子发芽有抑制作用,堆肥中存在小分子有机酸,未达到腐熟,或是堆肥达到了腐熟,但盐分含量超过了限值,对种子发芽有抑制作用;当 $SG\geq 70\%$ 时,说明堆肥浸提液对种子发芽没有影响,即种子发芽率达到了空白(去离子水)的要求(此时,RRG 和 GI 的值相等),且当 $RRG\geq 50\%$,即 $GI\geq 50\%$ 时,说明堆肥浸提液对种子根长伸长没有影响,堆肥对作物没有毒性。

3 结论

在供试种子入袋发芽率为 85% 的条件下,通过对试验结果的分析得出:当 $SG<70\%$ 且 $EC<4.0\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时,堆肥未达到腐熟;当 $SG\geq 70\%$ 且 $RRG\geq 50\%$ 时,堆肥达到腐熟且对作物无盐害。

在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较高的情况下,SG 和 RRG 对猪粪堆肥腐熟度的评价效果优于 GI。但由于堆肥原料来源广泛,这两种指标在其他原料(如污泥、生活垃圾

和厨余等)堆肥腐熟度评价方面的适用性还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 吴景贵, 孟安华, 张振都, 等. 循环农业中畜禽粪便的资源化利用现状及展望[J]. 吉林农业大学学报, 2011, 33(3): 237-242, 259.
WU Jing-gui, MENG An-hua, ZHANG Zhen-du, et al. Present situations and prospects for resource utilization of livestock and poultry feces in recycling agriculture[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2011, 33(3): 237-242, 259.
- [2] Qian X Y, Shen G X, Wang Z Q, et al. Co-composting of livestock manure with rice straw: Characterization and establishment of maturity evaluation system[J]. *Waste Management*, 2014, 34(2): 530-535.
- [3] Moral R, Paredes C, Bustamante M A, et al. Utilisation of manure composts by high-value crops: Safety and environmental challenges[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5454-5460.
- [4] Daniel M, Gunnar H, Werner B, et al. The value of composting in Germany—economy, ecology, and legislation[J]. *Waste Management*, 2013, 33(3): 536-539.
- [5] 张玉兰, 孙彩霞, 段争虎, 等. 堆肥原位保氮技术研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 1000-1004.
ZHANG Yu-lan, SUN Cai-xia, DUAN Zheng-hu, et al. Research progress on reducing nitrogen loss from compost system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 1000-1004.
- [6] Zucconi F, Monaco A, Debertoldi M, et al. Biological evaluation of compost maturity[J]. *Biocycle*, 1981, 22(4): 27-29.
- [7] 李艳霞, 王敏健, 王菊思. 有机固体废物堆肥的腐熟度参数及指标[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 98-103.
LI Yan-xia, WANG Min-jian, WANG Ju-si. The maturity indexes and standards of organic solid waste composting[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(2): 98-103.
- [8] 黄国锋, 吴启堂, 孟庆强, 等. 猪粪堆肥化处理的物质变化及腐熟度评价[J]. 华南农业大学学报, 2002, 23(3): 1-4.
HUANG Guo-feng, WU Qi-tang, MENG Qing-qiang, et al. Substance

- changes and maturity evaluation during pig manure composting[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2002, 23(3):1-4.
- [9] Pampuro N, Santoro E, Cavallo E. Evaluation of maturity and fertilizer capacity of compost derived from swine solid fraction[C]//International Conference on Agricultural Engineering-AgEng 2010:towards environmental technologies, Clermont-Ferrand, France, 6-8 September 2010. Cemagref, 2010.
- [10] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京:化学工业出版社, 2000.
- LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Solid waste composting and organic compound fertilizer production[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [11] 李 季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 二版. 北京:化学工业出版社, 2011.
- LI Ji, PENG Sheng-ping. Practical handbook of composting engineering[M]. 2nd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [12] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter[J]. *Environment Pollution*, 1996, 93(3):249-256.
- [13] Kapanen A, It A Vaara M. Ecotoxicity tests for compost applications[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, 49(1):1-16.
- [14] 汤江武, 吴逸飞, 薛智勇, 等. 畜禽固废弃物堆肥腐熟度评价指标的研究[J]. 浙江农业学报, 2003, 15(5):23-26.
- TANG Jiang-wu, WU Yi-fei, XUE Zhi-yong, et al. Study on evaluation index of maturity of livestock and poultry solid wastes[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2003, 15(5):23-26.
- [15] 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_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.
- [16] Guo R, Li G X, Jiang T, et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost[J]. *Biore-source Technology*, 2012, 112:171-178.
- [17] Huang G F, Wong J W C, Wu Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J]. *Waste Management*, 2004, 24(8):805-813.
- [18] 姜继韶, 黄懿梅, 黄 华, 等. 猪粪秸秆高温堆肥过程中碳氮转化特征与堆肥周期探讨[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11):2511-2517.
- JIANG Ji-shao, HUANG Yi-mei, HUANG Hua, et al. Carbon and nitrogen dynamics and stabilization time of a swine manure-straw compost[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11):2511-2517.
- [19] Jeong Y K, Hwang S J. Optimum doses of Mg and P salts for precipitating ammonia into struvite crystals in aerobic composting[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(1):1-6.
- [20] 方 萍, 何 延. 试验设计与统计[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2003.
- FANG Ping, HE Yan. Experimental design and statistics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003.
- [21] Ofori-Budu G K, Hogarth J N, Fobil J N, et al. Harmonizing procedures for the evaluation of compost maturity in two compost types in Ghana[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(3):205-209.
- [22] Tiquia S M, Richard T L, Honeyman M S. Carbon, nutrient, and mass loss during composting[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 62(1):15-24.
- [23] Khan N, Clark I, Sánchez-Monedero M A, et al. Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar[J]. *Biore-source Technology*, 2014, 168:245-251.