

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2017.06.033

油菜秸秆比例对好氧堆肥过程及产品特性的影响

王世朋, 帅文亮, 王婷婷, 钟小忠, 孙照勇, 汤岳琴, 木田建次

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 采用堆肥工艺将农作物秸秆转化为有机肥还田是秸秆资源化利用的有效手段. 本研究以油菜秸秆为主要原料, 按不同比例同辅料混合(三组实验 R_1 、 R_2 和 R_3 中的油菜秸秆比例(湿重)分别为 45%、65%和 85%), 研究了油菜秸秆比例对高温好氧堆肥过程及产品特性的影响. 结果表明, 在 72d 的堆肥过程中, R_1 、 R_2 和 R_3 的有机物降解主要发生在堆肥过程前期, 堆肥结束时分别达到 34.06%、35.57%和 39.78%. 通过比较三组实验过程中样品的理化性质, 可知 R_3 最终样品满足了堆肥腐熟的各项指标, 且堆肥过程中氮损失最少; 其最终堆肥产品中未检测出 NH_4^+ , 总 N 含量、 NO_3^- 浓度和 GI 值分别达到 2.17%、1,844.93 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重和 102.66%.

关键词: 油菜秸秆; 堆肥; 氮素转化; 腐熟

中图分类号: X713 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)06-1334-07

Effect of rape straw ratio on performance of aerobic composting process and characteristic of final product

WANG Shi-Peng, SHUAI Wen-Liang, WANG Ting-Ting, ZHONG Xiao-Zhong,
SUN Zhao-Yong, TANG Yue-Qin, KIDA Kenji

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Composting is an effective method to convert crop straw into organic fertilizer. To maximum utilize rape straw, the effect of rape straw ratio on performance of aerobic composting process and final product was investigated. The rape straw proportion in feedstocks in R_1 , R_2 and R_3 were 45%, 65% and 85% (wet weight), respectively. The results showed that organic matter degradation in R_1 , R_2 and R_3 occurred mainly in the early stage of composting process, and achieved 34.06%, 35.57% and 39.78%, respectively at the end of composting process. In addition, the degradation of organic matter conformed to the first-order kinetic model. Comparing the physicochemical properties of samples during the composting process, the end-product of R_3 satisfied all the maturity indicators recommended by previous references. In the end-product of R_3 , NH_4^+ was not detected, and the total nitrogen content, NO_3^- concentration and germination index (GI) achieved 2.17%, 1,844.93 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (dry weight) and 102.66%, respectively.

Keywords: Rape straw; Composting; Nitrogen transformation; Maturity

收稿日期: 2017-01-17

基金项目: 四川省科技支撑计划(2017JY0110); 泸州市科技支撑计划(2015CDLZ-S06)

作者简介: 王世朋(1990-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为有机废弃物资源化利用. E-mail: shipengw425@163.com

通讯作者: 孙照勇. E-mail: szy@scu.edu.cn

1 引言

随着我国集约化农业的快速发展, 每年产生大量的农业有机废物, 其中作物秸秆的产量约 8.46×10^8 t/a, 然而 72.5% 的作物秸秆被焚烧、遗失或丢弃, 没有得到有效的利用^[1], 造成环境污染和资源浪费。油菜是我国重要的油料作物, 2015 年的种植面积为 753.4×10^4 hm², 占世界油菜种植面积的 25% 以上, 油菜籽的产量为 0.15×10^8 t^[2], 油菜生产的草谷比约为 2^[3], 则每年油菜秸秆的产量约为 0.30×10^8 t。目前作物秸秆的主要处理方式焚烧或直接还田, 秸秆焚烧排放大量的 CO₂ 等温室气体和颗粒物至大气环境中, 形成大气污染^[4]; 秸秆还田易造成土传病的传播和害虫的繁殖, 而且由于秸秆容重小和生物降解性差^[4], 直接还田不利于种子的发芽和生长, 降低作物产量。

堆肥是在人工控制的好氧环境下实现有机物快速生物降解的过程。堆肥过程中微生物将有机物转化为腐殖质等高分子物质, 获得的稳定产品可以作为肥料或土壤调理剂施用于土壤提升土壤肥效和改良土壤环境^[5]。堆肥化作为一种有效的处理固体有机废物的方法, 已广泛应用于农业有机废物的处理^[6,7]。由于油菜秸秆具有较高的 C/N, 一般认为不适宜单独堆肥, 而被作为调理剂与其他易降解有机废物混合调节 C/N 进行共堆肥^[8-10]。李冰等^[8]以猪粪为主料, 添加 9% 的油菜秸秆进行好氧堆肥, 结果显示猪粪堆肥过程中添加油菜秸秆可以有效减少水溶性 NH₄⁺-N 的积累和降低电导率;

Kulikowska & Klimiuk^[9] 研究了向污泥中添加 22% 的油菜秸秆进行堆肥时有机物的转化, 动力学结果表明堆肥过程中腐植酸的含量逐渐增加, 但腐植酸的聚合度较低; 兰时乐等^[10]以油菜秸秆和鸡粪为原料, 研究了不同油菜秸秆添加量时堆肥过程中营养元素的变化规律, 结果表明经过 30d 的堆置油菜秸秆添加量为 40%~50% 的高温期持续时间最长, 且产品质量较高。秸秆作为调理剂进行堆肥时的添加量一般在 50% 以下, 处理秸秆的量较少, 如何实现秸秆的快速腐解且大量处理秸秆成为关注的热点, 但国内外利用作物秸秆为主料进行堆肥的研究较少。

本研究以油菜秸秆为主要原料, 将油菜秸秆与辅料(菌渣、腐植酸、氨基酸提取物残渣和油粕的混合物)混合调节秸秆比例在 45~85% 进行堆肥实验, 研究油菜秸秆添加量对堆肥过程及产品特性的影响, 以期获得腐熟、稳定的堆肥产品, 从而实现油菜秸秆的减量化、无害化和资源化。

2 材料与方法

2.1 材料

2.1.1 堆肥材料 油菜秸秆由四川某农业公司提供, 油菜秸秆在田间收集后在厂区内堆置, 然后粉碎至 1~2cm。因为仅油菜秸秆堆肥不利于生物降解, 因此堆肥过程中添加辅料调节堆肥原料的营养结构, 以促进堆肥过程的顺利进行。堆肥原料的基本理化性质如表 1 所示。

表 1 堆肥原料的基本理化性质

Tab. 1 Physicochemical properties of the composting materials

原料	水分含量/%	挥发性固体含量/%干重	pH	NH ₄ ⁺ /mg · kg ⁻¹ 干重	NO ₃ ⁻ /mg · kg ⁻¹ 干重	C/N
油菜秸秆	68.84	79.93	8.04	182.44	ND	31.63
辅料	52.75	91.46	5.57	2 716.28	13.32	16.47

注: ND-未检出; 辅料为菌渣、腐植酸、氨基酸提取物残渣和油粕的混合物, 比例为菌渣:腐植酸:氨基酸提取物残渣:油粕=5:2:4:1

2.1.2 堆肥装置 堆肥反应器装置由本实验室研制, 装置构造参考作者等已发表文献^[6]。堆肥反应器是一个有可移动顶盖的圆柱形玻璃容器, 体积约为 28L(直径和高度分别为 300 和 400mm)。电加热带缠绕在玻璃反应器外通过微电脑控制堆肥的温度, 且反应器外部包裹聚苯乙烯泡沫箱以减少热量损失。堆肥过程中, 设定堆肥从室温以恒定的速率($0.5^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$)逐渐升温至 60°C 并在 60°C 维持

3d(若堆肥温度上升速度高于 $0.5^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$, 加热带不加热; 若堆肥温度上升速度低于 $0.5^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 通过加热带工作进行补热), 之后加热系统自动关闭, 堆肥温度降至 35°C 并维持该温度至堆肥结束。反应器顶盖上有三个开孔, 其中两个插入温度传感器分别监测堆肥中部和上部的温度, 中心另一开孔导出堆肥过程中排放的气体。用 2% H₂SO₄ 溶液(w/v)吸收排放气体中的 NH₃, 气体经冷凝干燥后

用红外分析器(RI-550A, Tokyo, Japan)检测气体中的 CO_2 含量. 由空气压缩机(0.4OP-7S, Hitachi, Japan)以恒定的速率($0.2\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重)向肥堆供给空气, 距离堆肥反应器的底部约 5cm 处设置一多孔聚氯乙烯板(PVC)用于支撑堆肥原料和使空气均匀分布. 温度传感器和红外分析仪连接微电脑自动检测和记录堆肥过程中肥堆温度、环境温度和排放气体中 CO_2 含量.

2.2 方法

2.2.1 实验设计及采样 本研究设置三组实验, 如表 2 所示. 堆肥过程启动前将油菜秸秆与辅料按一定的比例混合均匀并称重后放入堆肥反应器. 前两周每 4d 翻堆一次, 之后每 7d 翻堆一次. 翻堆时将反应器内的物料全部转移至另一容器, 记录物料重量并手动混合均匀. 采用五点取样法取两个样品(每个样品约 20g), 每个样品分成两份, 分别储存于 4°C 和 -20°C 用于理化性质的分析.

2.2.2 分析方法 新鲜堆肥样品用于分析水分含量(Moisture content, MC)、总固体(Total solid, TS)、挥发性固体(Volatile solid, VS)、pH、电导率(Electric conductivity, EC)、可溶性总有机碳

(Soluble total organic carbon, S-TOC)、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和种子发芽指数(Germination index, GI). 新鲜堆肥样品在烘箱 105°C 下烘干至恒重测定水分含量和总固体含量, 然后利用马弗炉在 600°C 下灼烧 2h 测定样品挥发性固体含量. 总碳(Total carbon, TC)和总氮(Total nitrogen, TN)用元素分析仪(vario EL CUBE, Elementar)测定. 堆肥样品的水浸提取液用于分析水溶性成分, 水浸提取液的制备参考 Sun 等^[6]的制备方法. 浸提液的 pH 和电导率分别用 pH 电极(PHS-3C, 雷磁)和电导率计(Conductivity meter SG3, Mettler Toledo SevenGo™)测定, 可溶性总有机碳用 TOC 仪(TOC-V_E, Shimadzu)测定, NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度用阴阳离子色谱仪(ICS-1500, Dionex)测定.

表 2 堆肥实验设计

Tab. 2 Design of composting experiments

实验组	油菜秸秆含量/%, 湿重	C/N	含水率/%
R ₁	45	20.51	61.45
R ₂	65	23.65	63.18
R ₃	85	27.36	67.39

堆肥过程中理论累积 CO_2 产量(假定有机物全部降解时)计算公式如下:

理论累积 CO_2 产量(L) =

$$\frac{\text{堆肥初始物料总重量(kg, 湿重)} \times \text{TS}(\%) \times \text{TC}(\%) \times 1000 \times 22.4(\text{L} \cdot \text{mol}^{-1})}{12 \times 100 \times 100} \quad (1)$$

堆肥过程中有机物的降解率计算公式如下:

有机物降解率(%) =

$$\frac{\text{堆肥初始物料的总有机物质量(kg)} - \text{第 } n \text{ 次翻堆时物料中的总有机物质量(kg)}}{\text{堆肥初始物料的总有机物质量(kg)}} \times 100 \quad (2)$$

种子发芽实验: 用移液器吸取 8mL 水浸提取液或超纯水(对照)于放有 Whatman #2 滤纸且已灭菌的 9cm 培养皿中, 均匀地放入 10 粒水芹种子(*Lepidium sativum* L.) 在 20°C 下避光培养 48h, 每个样品重复 3 次. 统计发芽种子的个数和测量发芽种子的根长按下式计算种子发芽指数(GI)^[6]:

$$\text{GI}(\%) = \frac{\text{处理组种子发芽率}(\%) \times \text{处理组种子根长度}(\text{mm})}{\text{对照组种子发芽率}(\%) \times \text{对照组种子根长度}(\text{mm})} \times 100 \quad (3)$$

2.2.3 数据统计分析

实验数据采用 SPSS 22.0 进行统计分析, 利用单因素方差分析法(ANOVA)进行不同处理组差异显著性检验, 差异显著性检验水平为 0.05.

3 结果

3.1 堆肥过程中温度的变化

堆肥过程中微生物分解物料中有机物产生

CO_2 和 H_2O , 同时释放大量的热使肥堆温度升高. 因此, 温度变化反映了微生物的活性^[11]. 三组实验的肥堆温度变化如图 1 所示, 可以看出, 堆肥开始后肥堆温度迅速上升, 并在 1~2d 内达到 60°C , 之后温度继续升高, R₁、R₂ 和 R₃ 肥堆中心的最高温度分别达到 65.3、69.1 和 65.9°C .

3.2 堆肥过程中有机物降解率变化和累积 CO_2 产量 堆肥过程中有机物降解率的变化如图 2a 所

示.可以看出,三组实验的有机物降解率变化趋势相似,且可分为有机物降解率快速增长(前30d)和缓慢增长两个阶段(后42d),第二阶段堆肥进入腐熟期.堆肥结束三组实验 R₁、R₂ 和 R₃ 的有机物降解率分别达到 34.06%、35.57% 和 39.78%. CO₂ 的产量也可以反映堆肥过程中有机物的降解效率,三组实验累积 CO₂ 产量如图 2b 所示,可以看出,累积 CO₂ 变化趋势同有机物降解率变化趋势相似,堆肥过程累积 CO₂ 产量迅速增加主要集中在堆肥前期(30d),堆肥结束时 R₁、R₂ 和 R₃ 的累积 CO₂ 产量分别为 583.7、472.7 和 414.4L,分别占理论产量的 34.34%、31.06% 和 33.87%,这和根据有机物减少量计算的降解率较为接近.

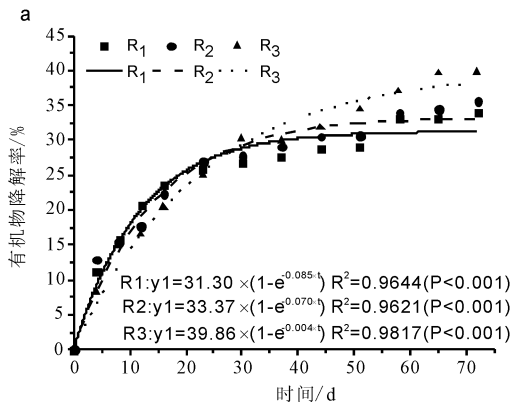


图2 堆肥过程中有机物降解率变化及累积 CO₂ 产量

Fig. 2 Changes in organic matter degradation efficiency (a) and cumulative CO₂ emission (b) during composting process

3.3 堆肥过程中理化指标的变化情况

3.3.1 氮素的转化 图3显示了堆肥过程中氮素的变化.堆肥初始阶段三组实验的 NH₄⁺ 浓度变化趋势相似(图3a),NH₄⁺ 浓度快速上升并在第一次翻堆时达到峰值,随后逐渐下降.堆肥结束时,R₁ 和 R₂ 两组实验 NH₄⁺ 浓度仍保持较高浓度分别为 4,477.73 和 1,074.02mg · kg⁻¹ 干重,而 R₃ 在经过 51d 堆肥之后未检测到 NH₄⁺.堆肥过程中 NO₃⁻ 浓度的变化如图 3a 所示,R₁、R₂ 和 R₃ 分别堆至 44、30 和 58d 开始出现 NO₃⁻,随后其浓度迅速增加.堆肥结束时,R₁、R₂ 和 R₃ 样品中 NO₃⁻ 浓度分别为 1,950.10、4,574.61 和 1,844.93mg · kg⁻¹ 干重.

图 3b 显示了堆肥过程中样品总氮含量的变化情况.R₁、R₂ 和 R₃ 的总氮含量分别增加至 2.48%、2.37% 和 2.17%(图 3b).总氮含量的增加是由于有机碳的降解速率快于有机氮造成的浓缩效应所致^[12].这也和 R₁、R₂ 和 R₃ 的 C/N 呈现逐渐下降的趋势符合(图 3b),堆肥结束时三组实验的 C/N 从 20.51、

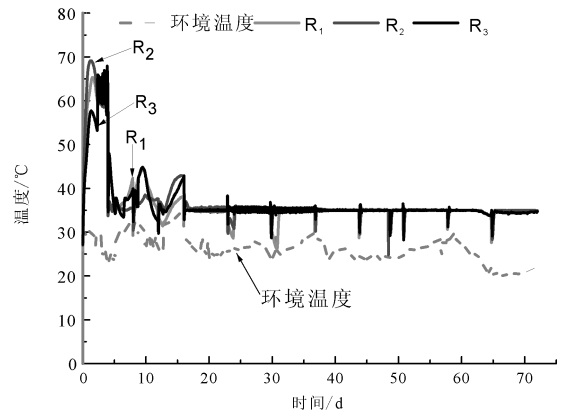
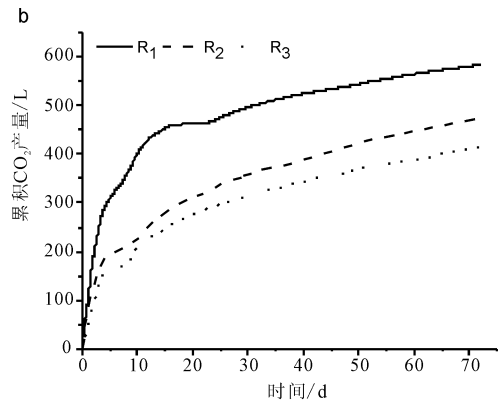


图1 堆肥过程中肥堆温度的变化

Fig. 1 Changes in pile temperature during composting process



23.65 和 27.36 降至 17.11、17.15 和 15.98.

根据堆肥过程中总氮含量的变化计算了堆肥过程中氮的损失率,R₁、R₂ 和 R₃ 的氮损失率分别为 18.57%、8.93% 和 1.77%,结果说明油菜秸秆比例适当增加可以有效减少堆肥过程中的氮损失.其中 NH₃ 的排放是导致堆肥过程中氮损失的主要原因,图 3c 显示了堆肥过程中 NH₃ 的累积排放量,可以看出 NH₃ 的排放主要集中于堆肥的初始阶段(前 16d),而 R₁ 中 NH₃ 的排放相对于 R₂ 和 R₃ 存在较大差异($P < 0.05$),16d 之后 NH₃ 的排放量仍较高.

3.3.2 其他理化指标

(1) 水分含量和 pH 的变化

堆肥过程中水分含量的变化如图 4a 所示.可以看出,堆肥过程中水分含量逐渐降低,堆肥结束时水分含量分别为 50.39%、58.83% 和 66.46%.Liang 等^[13]研究表明堆肥过程中水分含量不低于 50% 能够保证堆体微生物具有较高的活性.因此,三组实验的水分含量在整个堆肥过程中均保持在

适宜的范围内,能够维持较高的微生物活性,有利于有机物的降解。

pH 能够反映微生物在一定环境条件下的代谢活动,微生物代谢营养物质可以引起 pH 的改

变^[14]. 三组实验堆肥过程中 pH 的变化均表现为先上升后下降随后保持稳定的趋势(图 4b),堆置 12d 后,三组实验的 pH 值基本稳定在 6.75~7.40 之间。

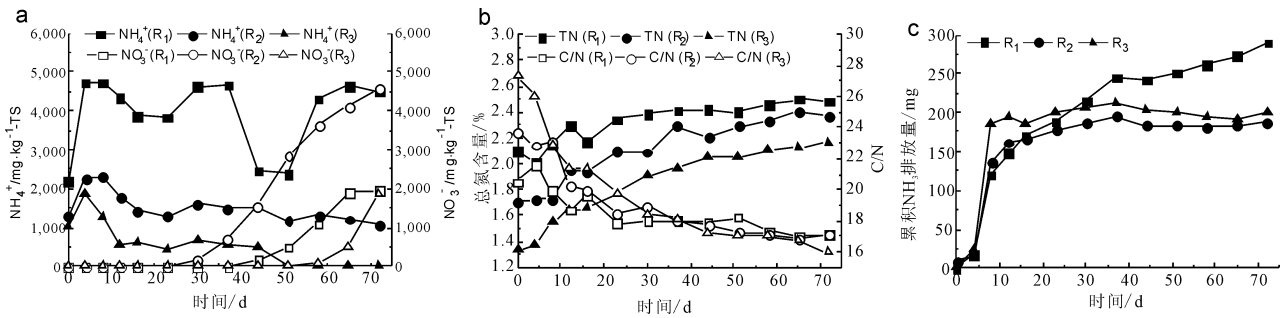


图 3 堆肥过程中氮素的变化

Fig. 3 Changes in nitrogen during composting process (a, NH_4^+ & NO_3^- ; b, total nitrogen content & C/N; c, cumulative NH_3 emission)

(2) 可溶性总有机碳(S-TOC)的变化

微生物生长需要足够的可溶性物质提供营养,可溶性总有机碳反映了堆肥过程中微生物生长可利用的营养水平.堆肥过程中,三组实验 S-TOC 的变化趋势相似,在初始阶段(前 16d)快速下降至 $10,000\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干重以下,随后缓慢下降最后维持在 $6,000\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干重以下.经过 72d 的堆肥过程,最终样品的 S-TOC 浓度分别为 1,361.83、1,545.65 和 $5,142.92\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干重(图 4c).

(3) 电导率(EC)的变化

电导率是评价堆肥应用于农业安全性的一个重要参数,EC 过高可能影响植物种子的发芽和植物的生长.图 4d 显示了三组实验堆肥过程中 EC 的变化. R_1 、 R_2 和 R_3 的 EC 在堆肥过程中均呈增加趋势,分别从 3.15 、 2.97 和 $2.89\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 增加至 5.29 、 4.18 和 $3.88\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$.一般认为腐熟堆肥安全利用的 EC 限值为 $4\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ^[15],三组实验中仅 R_3 满足有机肥安全利用的限值。

3.4 堆肥成熟度评价

种子发芽指数(GI)常作为生物指标评价堆肥腐熟度和是否具有植物毒性,Bustamante 等^[11]认为 $\text{GI}>80\%$ 表明堆肥没有植物毒性,达到完全腐熟.三组实验的种子发芽指数变化如图 5 所示,均显示出 GI 先降低然后持续增加的趋势.最低 GI 值($<70\%$)出现在堆肥初始阶段(高温期),随后 GI 逐渐升高,堆肥结束时三组实验的 GI 值分别达到 120.94% 、 103.35% 和 102.66% 。

4 讨论

好氧堆肥过程是多种微生物共同作用的生物

化学过程.堆肥前期原料中含有较多的易降解有机物被微生物转化为 CO_2 和 H_2O ,同时释放大量的热;随着堆肥过程的进行易降解有机物在堆肥前期消耗殆尽,剩余的主要为难降解物质(如木质纤维素)^[12],堆肥进入腐熟阶段.因此,堆肥过程有机物降解率的变化表现为两个阶段,且堆肥开始后温度迅速上升.Zhang & He^[16]建议维持连续高温($>55^\circ\text{C}$)3d 是杀死病原菌的基本条件,因此三组实验堆肥温度在 60°C 维持 3d.高温保持 3d 后,温度迅速降低至 35°C ,这是由于向肥堆通入室温空气的“冷却”作用所致。

氮是植物营养所需的大量元素,堆肥过程中氮素的转化体现了堆肥产品的质量.研究表明氮素的损失主要发生在升温和高温阶段,本研究三组实验的氮损失主要发生在堆肥前期与前人的研究结果一致,这是因为 NH_4^+ 在堆肥前期形成,在高温和高 pH 条件下促使 NH_4^+ 向 NH_3 转化并从肥堆中逸出.16d 之后 R_1 的 NH_3 排放量仍高于 R_2 和 R_3 (图 3c),这与 R_1 堆肥过程中 NH_4^+ 浓度持续较高有关.三组实验堆肥过程中 NH_4^+ 浓度和 pH 均表现为先上升后下降的趋势(图 3a,4b),这是由于含氮物质被微生物分解生成 NH_4^+ 所致,随后由于 NH_3 挥发的原因造成 NH_4^+ 浓度和 pH 逐渐下降^[17].堆肥结束时, R_1 和 R_2 仍具有较高的 NH_4^+ 浓度,这可能是由于 R_1 和 R_2 实验原料中含有较多腐植酸对 NH_4^+ 产生结合作用所致.Plaza 等^[18]研究表明堆肥过程产生的腐植酸具有较大阳离子结合能力.三组实验堆肥前期均未检测到 NO_3^- ,这是由于高温环境($>40^\circ\text{C}$,前 5d)^[19]及有机物降解引起的溶解氧缺乏抑制了硝

化菌的活性;随后其浓度迅速增加,这是因为堆肥过程高温期过后肥堆温度维持在 35℃左右且有充足

的氧气供应,硝化菌的活性逐渐增强,从而导致样品中 NO_3^- 浓度逐渐增加。

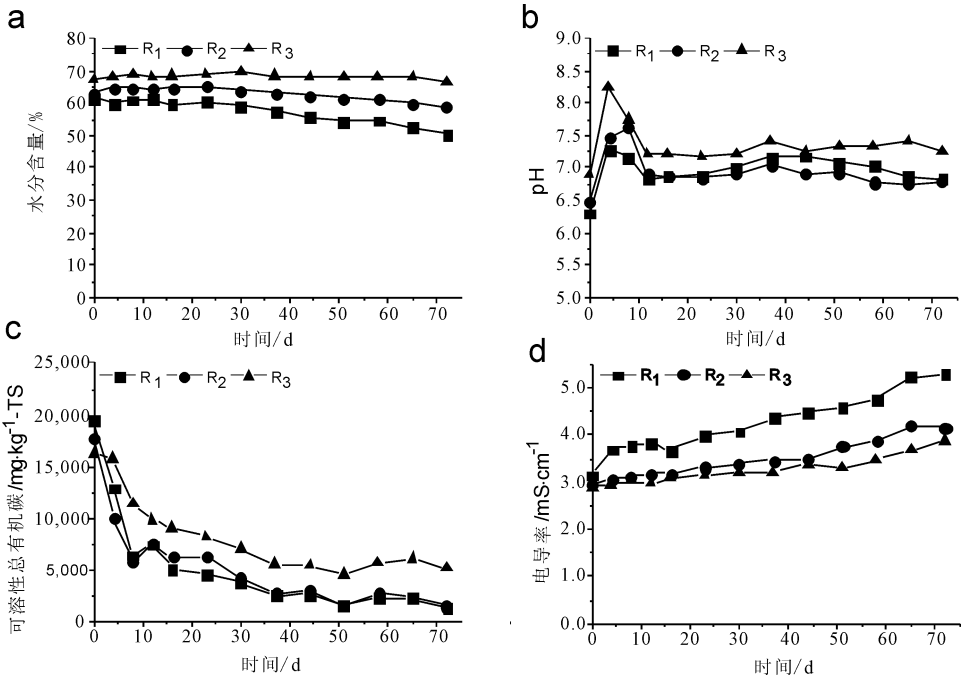


图 4 堆肥过程中理化性质的变化

Fig. 4 Changes in physicochemical properties

a, moisture content; b, pH; c, S-TOC; d, EC) during composting process

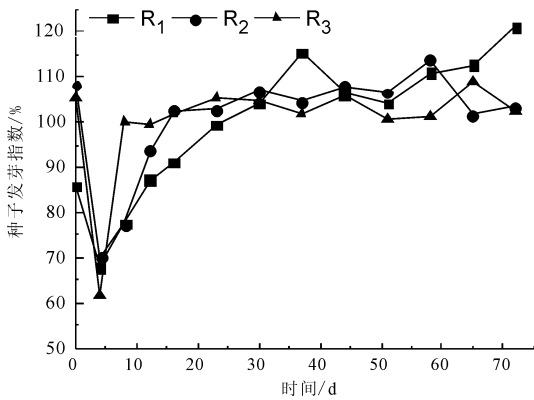


图 5 堆肥过程中种子发芽指数的变化

Fig. 5 Changes in germination index during composting process

本研究为了提高油菜秸秆的处理效率,对比了不同油菜秸秆比例对好氧堆肥过程和产品特性的影响.堆肥的腐熟度和稳定性严重影响产品的质量,因此监测堆肥过程中理化性质和 GI 的变化评价堆肥产品的腐熟度,结果表明油菜秸秆比例为 85%时,经过 72d 的堆置样品中未检测到 NH_4^+ , C/N 降至 15.98、S-TOC 浓度降至 $5,142.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重、EC 值为 $3.88 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 GI 值达到 102.66%,均满足腐熟标准^[11,15],相对于其他两组实验且具有较低的氮损失。

5 结 论

本研究结果表明,以油菜秸秆为主料,添加辅料进行实验室规模堆肥生产有机肥是可行的.经过 72d 的堆肥过程,根据秸秆比例的不同,有机物降解率分别达到 34.06%、35.57% 和 39.78%.理化分析结果表明,三组实验中 R_3 (秸秆比例为 85%) 的 pH、C/N、 NH_4^+ 浓度、S-TOC 浓度和 EC 值等指标均达到腐熟标准,GI 值达到 102.66%,而且实验范围内油菜秸秆比例的增加有利于氮的保持。

参考文献:

- [1] Li K, Liu R H, Sun C. A review of methane production from agricultural residues in China[J]. Renew Sust Energy Rev, 2016, 54: 857.
- [2] 宋新南, 房仁军, 王新忠, 等. 油菜秸秆资源化利用技术研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24: 984.
- [3] Liao C P, Yan Y J, Wu C Z, et al. Study on the distribution and quantity of biomass residues resource in China [J]. Biomass Bioenergy, 2004, 27: 111.
- [4] Kausar H, Sariah M, Saud H M, et al. Development of compatible lignocellulolytic fungal consortium for rapid composting of rice straw[J]. Int Biodeter Biodegr, 2010, 64: 594.

- [5] Jurado M M, Suárez-Estrella F, López M J, *et al.* Enhanced turnover of organic matter fractions by microbial stimulation during lignocellulosic waste composting[J]. *Bioresour Technol*, 2015, 186: 15.
- [6] Sun Z Y, Zhang J, Zhong X Z, *et al.* Production of nitrate-rich compost from the solid fraction of dairy manure by a lab-scale composting system[J]. *Waste Manage*, 2016, 51: 55.
- [7] Abdel-Rahman M A, El-Din M N, Refaat B M, *et al.* Biotechnological application of thermotolerant cellulose-decomposing bacteria in composting of rice straw[J]. *Ann Agr Sci*, 2016, 61: 135.
- [8] 李冰, 王昌全, 江连强, 等. 有机辅料对猪粪堆肥中氨气挥发的抑制效应及其影响因素分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14: 987.
- [9] Kulikowska D, Klimiuk E. Organic matter transformations and kinetics during sewage sludge composting in a two-stage system[J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102: 10951.
- [10] 兰时乐, 曹杏芝, 戴小阳, 等. 鸡粪与油菜秸秆高温堆肥中营养元素变化的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28: 564.
- [11] Bustamante M A, Paredes C, Marhuenda-Egea F C, *et al.* Co-composting of distillery wastes with animal manures; carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability[J]. *Chemosphere*, 2008, 72: 551.
- [12] Brito L M, Mourão I, Coutinho J, *et al.* Simple technologies for on-farm composting of cattle slurry solid fraction[J]. *Waste Manage*, 2012, 32: 1332.
- [13] Liang C, Das K C, McClendon R W. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend[J]. *Bioresour Technol*, 2003, 86: 131.
- [14] 李霞, 祝德义, 曾维才, 等. 水解胶原蛋白对枯草芽孢杆菌生长的影响[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2016, 53: 1386.
- [15] Sharma A, Sharma R, Arora A, *et al.* Insights into rapid composting of paddy straw augmented with efficient microorganism consortium[J]. *Int J Recy Org Waste Agri*, 2014, 3: 1; Brito L M, Mourão I, Coutinho J, *et al.* Simple technologies for on-farm composting of cattle slurry solid fraction[J]. *Waste Manage*, 2012, 32: 1332.
- [16] Zhang Y, He Y. Co-composting solid swine manure with pine sawdust as organic substrate[J]. *Bioresour Technol*, 2006, 97: 2024.
- [17] Wang Z, Gao M, Wang Z, *et al.* Comparison of physicochemical parameters during the forced-aeration composting of sewage sludge and maize straw at different initial C/N ratios[J]. *J Air Waste Manage*, 2013, 63: 1130.
- [18] Plaza C, Senesi N, Pola A, *et al.* Acid-base properties of humic and fulvic acids formed during composting[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 7141.
- [19] Sánchez-Monedero M A, Roig A, Paredes C, *et al.* Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures[J]. *Bioresour Technol*, 2001, 78: 301.