



李艳春, 叶菁, 刘岑薇, 林怡, 王义祥. 高温碱化预处理对番茄秸秆堆肥过程碳氮转化与损失的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(4): 96-105.
LI Yanchun, YE Jing, LIU Cenwei, LIN Yi, WANG Yixiang. Effect of high temperature and alkalization pretreatment on transformation and losses of C and N during tomato straw composting[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(4): 96-105.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.04.08

高温碱化预处理对番茄秸秆堆肥过程碳氮转化与损失的影响

李艳春 叶菁 刘岑薇 林怡 王义祥*

(福建省农业科学院 资源环境与土壤肥料研究所/福建省红壤山地农业生态过程重点实验室, 福州 350013)

摘要 番茄秸秆由于木质化程度高、降解性差等原因限制了其资源化利用效率。为探究高温碱化预处理对番茄秸秆堆肥过程中物质降解及转化的影响,以未经处理和高温碱化处理的番茄秸秆为主要原料,以玉米芯、鸭场垫料等为调理剂,设置常规堆肥(CK)和高温碱化预处理堆肥(PT)2个处理,利用自制的强制通风反应箱装置进行为期30 d的模拟堆肥试验,研究高温碱化预处理对番茄秸秆堆肥过程中碳、氮素转化与损失的影响。结果表明:PT处理的堆肥最高温度可达到67.20℃,比CK处理显著提高了7.77℃($P<0.05$),万度积温时长也比CK处理缩短1 d,堆体温度 ≥ 50 ℃的天数达到7 d,满足堆肥无害化卫生要求;堆肥结束(30 d)时,PT处理的腐殖质聚合度(1.37)和种子发芽指数(176.40%)都显著高于CK处理,但PT处理的干物质降解率、碳素损失率和氮素损失率分别比CK处理高出5.22%($P<0.05$)、7.46%($P<0.05$)和3.86%($P>0.05$)。因此,高温碱化预处理有利于提高番茄秸秆堆肥的发酵温度和效率,但同时也增加了高温期碳和氮损失。

关键词 高温碱化预处理; 番茄秸秆; 堆肥; 碳损失; 腐殖质碳; 氮损失

中图分类号 S141.4

文章编号 1007-4333(2025)04-0096-10

文献标志码 A

Effect of high temperature and alkalization pretreatment on transformation and losses of C and N during tomato straw composting

LI Yanchun, YE Jing, LIU Cenwei, LIN Yi, WANG Yixiang*

(Institute of Resources, Environment and Soil Fertilizer/Fujian Key Laboratory of Agricultural Ecological Process of Red Soil Mountain, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract The resource utilization efficiency of tomato straw is limited due to its high lignification degree and low degradability. High temperature and alkalization pretreatment can help to accelerate the decomposition and humification of straw. However, its effects on the degradation and transformation of straw during the composting process are still unclear. To explore the impact of high temperature and alkalization pretreatment on transformation and losses of C and N during tomato straw composting, two treatments including high temperature and alkalization pretreatment composting (PT) and conventional composting (CK) were conducted. Tomato straw was the main raw material, and corncob and duck farm cushions were conditioning agents. The simulated composting experiment was carried out using static forced-air composting boxes and the duration time was 30 d. The results showed that the highest temperature (67.20℃) of PT treatment was increased by 7.77℃ ($P<0.05$), and the time for accumulating 10 000 °C·h

收稿日期: 2024-09-08

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(2021L3021)

第一作者: 李艳春(ORCID: 0000-0001-9273-9213), 助理研究员, 主要从事生态农业研究, E-mail: lyc7758@163.com

通讯作者: 王义祥(ORCID: 0000-0003-0124-0260), 研究员, 主要从事碳氮循环研究, E-mail: sd_wolong@163.com

was decreased by 1 d compared to that of the CK. The days for the composting temperature $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ was 7 d in PT treatment, which fully met the demand of harmless thermophilic time. At the end of composting (30 d), the degree of humus polymerization and seed germination index of PT treatment were 1.37 and 176.40%, respectively, significantly higher than those of CK. However, the dry matter degradation rate, the carbon loss rate, and the nitrogen loss rate of PT treatment were increased by 5.22% ($P<0.05$), 7.46% ($P<0.05$), and 3.86% ($P>0.05$) compared with the CK, respectively. In conclusion, the high temperature and alkalization pretreatment improved the fermentation temperature and efficiency while increasing carbon and nitrogen's losses at the thermophilic composting stage.

Keywords high temperature and alkalization pretreatment; tomato straw; composting; carbon loss; humus carbon; nitrogen loss

我国是世界上最大的蔬菜生产国。据统计, 2022年蔬菜种植面积和产量分别达到2 237.5万 hm^2 和7.9亿t, 与此同时也产生了大量番茄、黄瓜、茄子等藤蔓类秸秆废弃物。由于藤蔓类蔬菜秸秆的纤维素和木质素含量高(占总有机质的50%以上)、碳氮比较低(11.8~16.9)、含水量高等原因^[1], 导致秸秆降解性差、单独堆肥困难、堆肥过程中升温慢以及病原菌去除效果差等问题, 无法达到堆肥无害化卫生标准, 从而限制了其资源化利用效率^[2]。目前, 大量藤蔓类蔬菜秸秆被直接丢弃或焚烧, 不仅造成资源浪费, 甚至引起环境污染等生态问题。

高温预处理能破坏秸秆中木质纤维素的复杂结构, 提高底物生物质的可及性, 从而加速秸秆分解和腐殖化、提高堆肥效率^[3-5]。曹云等^[6]研究发现, 超高温预处理不仅有利于堆肥过程的保氮, 而且能促进富里酸向胡敏酸的转化, 提高了堆肥产品的腐殖化水平。徐欣怡等^[7]研究表明短期高温预处理可以显著加速餐厨垃圾的堆肥进程, 并且提高堆肥产品质量。Huang等^[8]研究发现, 经高温预处理后, 猪粪、稻草堆料中的腐殖质前驱体如多酚、氨基酸、多糖和还原糖含量比传统堆肥提高44%~92%。可见, 高温预处理在促进腐殖质前体物质溶出、缩短堆肥进程、提高产品肥效等方面具有较大作用。此外, 碱处理也具有破坏木质纤维素复杂结构的作用, 但存在成本较高且污染环境的局限^[9-10]。陈广银等^[11]研究表明石灰预处理有利于树叶堆肥中有机质的降解, 有效降低堆肥总氮的损失, 其堆肥效果与石灰浓度密切相关。王砚等^[12]用氢氧化钙预处理水稻秸秆进行堆肥发现, 氢氧化钙能够对水稻秸秆结构产生破坏, 但其内部组织暴露较少, 对堆肥效率、质量的影响不明显。因此, 碱处理对堆肥效率的影响可能与碱的浓度有关, 有待进一步

探讨。目前, 联合多种技术进行预处理堆肥的研究还鲜见报道, 高温碱化预处理能否有效提高藤蔓类秸秆堆肥效率值得深入研究。

目前, 不少研究开展了利用番茄秸秆进行堆肥的试验。如: 耿凤展等^[13]探讨了番茄秸秆堆肥作为番茄育苗基质的可行性; 高宁等^[14]研究了不同调理剂对番茄秸秆发酵特性的影响, 发现猪粪作为调理剂时发酵温度高且持续时间最长; 周顺等^[15]发现番茄秸秆好氧堆肥中添加氧化钙, 有助于减少堆肥过程中的氮素损失。然而, 关于应用高温碱化预处理技术对番茄秸秆堆肥过程中物质降解及转化的研究还未见报道。因此, 本研究以番茄秆为主要原料, 玉米芯、鸭场垫料等为调理剂, 通过自制强制通风反应箱进行堆肥试验, 探究高温碱化预处理对番茄秸秆堆肥过程中有机物质降解与腐殖质合成等方面的影响, 为进一步优化番茄秸秆堆肥工艺参数, 促进藤蔓类秸秆肥料化利用效率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

2023年8月从福建省惠安县农场收集番茄秸秆和玉米芯, 番茄秸秆切割成4~6 cm长的小段, 玉米芯粉碎成约2 cm的碎块。鸭场垫料收集自周边农场。试验材料的基本性质见表1。

1.2 试验设计

高温碱化预处理: 将切段后的番茄秸秆(54 kg)与一定量的氢氧化钙、硫酸铵混合(氢氧化钙用量为番茄秸秆干物质质量的0.5%, 氢氧化钙与硫酸铵的摩尔质量比为1:1), 调节秸秆含水率至55%~65%, 装入耐高温密封袋常温放置1 d(使秸秆充分浸润并防止氨气损失), 120 $^{\circ}\text{C}$ 高压蒸汽锅炉中加热

表1 堆肥原材料的基本性质
Table 1 Properties of composting materials

原材料 Raw material	有机碳/% Organic carbon	全氮/% Total nitrogen	碳氮质量比 $m(C):m(N)$	含水率/% Moisture content
番茄秸秆 Tomato straw	32.35	1.80	17.98	11.16
玉米芯 Corncob	41.64	0.56	73.79	7.59
鸭场垫料 Duck farm cushion	27.61	1.71	16.18	52.59

0.5 h(分批处理),室温下密封放置7 d(使氢氧化钙以及生成的氨气进一步破坏秸秆木质纤维素、软化秸秆),之后用作堆肥的原材料。上述预处理条件由前期预实验确定的,该条件下番茄秸秆纤维素降解明显。高温碱化预处理后番茄秸秆性质变化见表2。

表2 高温碱化预处理后番茄秸秆性质变化
Table 2 Changes of tomato straw properties after high temperature and alkalization pretreatment

番茄秸秆 Tomato straw	有机碳/% Organic carbon	全氮/% Total nitrogen	碳氮质量比 $m(C):m(N)$	含水率/% Moisture content	纤维素/% Cellulose	半纤维素/% Hemicellulose	木质素/% Lignin	pH
未经预处理 Un-pretreated	32.35 a	1.80 a	17.98 a	11.16 b	42.40 a	12.18 b	8.97 a	5.04 a
预处理后 Pretreated	32.30 a	1.97 a	16.40 a	62.50 a	35.57 b	16.81 a	8.80 a	4.91 b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间显著差异($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below.

设2个处理:秸秆直接堆肥(CK)和高温碱化预处理秸秆堆肥(PT)。CK和PT处理中番茄秸秆与玉米芯的干物质质量比均为1:1,通过添加鸭场垫料调节碳氮质量比至25:1。此外,每10 kg堆料中加入过磷酸钙0.3 kg。每个处理重复3次。

1.3 发酵方法

采用自制强制通风反应箱进行发酵,反应箱用PVC板制成,由发酵箱、通风口、进料口、筛板、排水管、鼓风机等组成,箱体长、宽、高均为100 cm,总体积1 000 L。混匀并调节堆料含水率至60%左右,装箱后约占反应箱体积的2/3。同时将1个装有约200 g物料的分解袋(20 cm × 20 cm,网孔200目)埋于相应的反应箱中部,用于堆肥物料干物质失重率的测定。利用数显温度计监测堆体温度,依据温度变化于堆肥第10天和第20天进行翻堆,堆肥时长为30 d。堆肥过程中鼓风机(鼓风量800 L/min)每隔8 h强制吹风2 min。

1.4 取样方法

堆肥于2023年8月30日开始,在堆肥第0、5、10、15、20、25、30天采集样品(沿对角线采集5点),

测定含水率、可溶性有机碳、铵态氮、硝态氮等指标。堆肥第0、10、20、30天取出反应箱中的分解袋称其质量再埋回箱内。

1.5 测定指标及方法

堆肥积温^[16-17]的计算公式如下:

$$T=\sum(T_i-T_0)\times \Delta t$$
 (1)

式中: T_i 为*i*时刻的堆温; T_0 为堆肥中微生物大量繁殖时的起始温度(生物学零度),以15℃作为堆肥反应的生物学零度; Δt 为 T_i 持续的时间。堆肥过程中,当有效积温高于10 000℃·h(万度积温)时,通常判定堆肥已基本腐熟。

全氮(TN)和总有机碳(TOC)测定分别采用凯氏定氮法和重铬酸钾外加热法。腐殖质组成(包括胡敏酸和富里酸)的测定采用焦磷酸钠提取-重铬酸钾氧化法,参考《土壤农化分析》^[18]。铵态氮、硝态氮利用流动分析仪测定,可溶性有机碳(DOC)按 $m(\text{料}):m(\text{水})$ 为1:5浸提后利用岛津TOC仪测定。

干物质降解率(DR)、碳素、氮素损失率(CL、NL)的计算参照高文慧等^[19]的方法,计算公式如下:

$$DR_i = \frac{w_0 - w_i}{w_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$CL_i = \frac{w_0 \times c_0 - w_i \times c_i}{w_0 \times c_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$NL_i = \frac{w_0 \times n_0 - w_i \times n_i}{w_0 \times n_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中:DR_i、CL_i、NL_i分别为第*i*天干物质降解率、碳素损失率和氮素损失率,%;*w_i*为第*i*天物料干物质质量,kg;*w₀*为物料初始干物质质量,kg;*c_i*为第*i*天物料总有机碳含量,g/kg;*c₀*为物料初始总有机碳含量,g/kg;*n_i*为第*i*天物料全氮含量,g/kg;*n₀*为物料初始全氮含量,g/kg。

腐殖质聚合度(DP)的计算公式如下:

$$DP = HA/FA \quad (5)$$

式中:HA为胡敏酸含量,g/kg;FA为富里酸含量,g/kg。

种子发芽指数(GI)的测定方法依据 NY/T 525—2021《有机肥料》^[20]标准。将20 g新鲜堆肥样品与200 mL去离子水混合震荡1 h后过滤,取5 mL上清液加入铺有滤纸的培养皿中,取20粒青梗菜种子分散放置在滤纸上,25℃恒温箱培养2 d。同时以去离子水培养作为对照,每个处理重复3次。GI=(试验组发芽率×平均胚根长度)/(对照组发芽率×平均胚根长度)×100。

1.6 数据分析

利用Microsoft Excel 2010和Matlab 7.0软件进行数据处理与统计分析,多重比较采用LSD法。

2 结果与分析

2.1 堆肥温度变化

不同处理的堆肥温度变化规律见图1。可见:在30 d的堆肥过程中,2个处理均呈现出升温期、高温持续期、降温期与低温持续期的4个典型时期。其中:堆肥初始第0~2天为升温期,堆体温度急剧上升至55℃以上,PT处理较CK处理升温更快,堆肥第1天就达到50℃以上;第3~7天为高温持续期,PT处理的平均温度(61.66℃)明显高于CK处理(55.31℃);第8~20天为降温期,堆温从50℃下降到40℃以下;第20~30天为低温持续期,堆温在40℃以下波动。说明PT处理提高了高温期的平均温度。本研究在堆肥10和20 d时,打开发酵箱进行了翻堆操作,因此堆体温度有小幅先上升后下降的趋势。各处理堆肥的积温情况见表3。可见:PT处理的最高温度为67.20℃,比CK处理显著提高7.77℃;CK和PT处理堆温≥50℃的天数分别为6和7 d;PT处理达到万度积温用时为12 d,比CK处理缩短1 d。说明PT处理促进了堆体升温,增温效应明显。

表3 不同处理堆肥过程有效积温

Table 3 Effective accumulated temperature during composting under different treatments

处理 Treatment	最高堆温/℃ Highest temperature	≥50℃天数/d Days of temperature ≥50℃	有效积温/(℃·h) Available accumulated temperature	万度积温时长/d Days for accumulating 10 000℃·h
常规堆肥 CK	59.43 b	6 b	20 621.60 a	13 a
高温碱化预处理堆肥 PT	67.20 a	7 a	20 412.80 a	12 b

2.2 堆肥的干物质降解率

不同处理对堆肥过程中干物质降解率变化的影响见图2。可见:随着堆肥时间延长,2个处理的干物质降解率均呈增加趋势。至堆肥结束时(30 d),CK和PT处理干物质降解率分别为28.37%和33.59%,PT处理较CK处理显著高出5.22%。PT处理的干物质降解主要发生在高温期(0~10 d),对物料降解的贡献占到70.88%。CK处理在高温期对干物质降解的贡献仅占42.9%,在降温期(10~20 d)对物料降解的贡献占到47.50%。

说明PT处理提高了堆肥高温期的发酵效率。

2.3 堆肥的有机碳含量变化

不同处理对堆肥过程中总有机碳、碳素损失率和可溶性有机碳含量变化的影响见图3。由图3(a)可见:随着堆肥时间的延长,2个处理的总有机碳含量总体呈现下降趋势。堆肥结束时,CK和PT处理的总有机碳含量比初始值显著降低了4.04%和6.99%。由图3(b)可见:堆肥结束时,CK和PT处理的碳素损失率分别为30.79%和38.25%,PT处理的碳素损失率比CK显著高出7.46%,并且主要

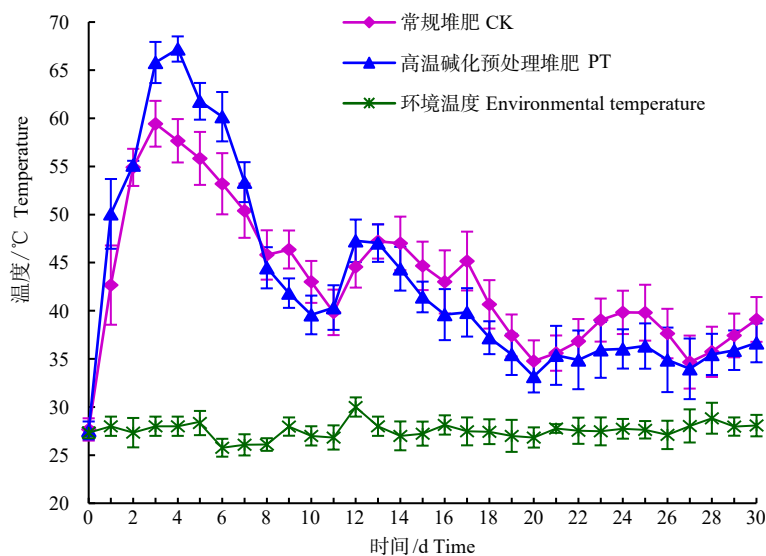


图1 不同处理堆肥过程中温度变化

Fig. 1 Temperature variation during composting under different treatments

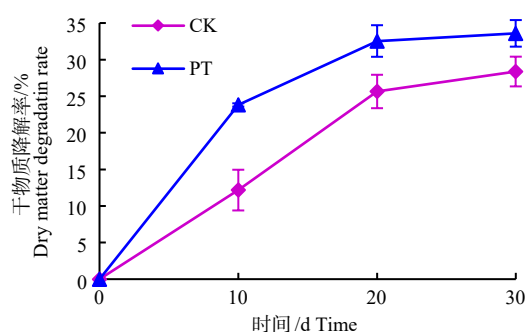


图2 不同处理堆肥过程中的干物质降解率变化

Fig. 2 Changes in dry matter degradation rate during composting under different treatments

发生在堆肥的高温期,然而CK处理的碳素降解主要发生在高温期和降温期。由图3(c)可见:可溶性有机碳含量在堆肥初期有一定波动变化,总体呈下降趋势,2个处理之间无显著性差异。此外,堆肥结束时,CK和PT处理的可溶性有机碳含量比初始值显著降低了65.24%和57.55%,说明到发酵后期大量的可溶性有机碳被微生物吸收利用转化为相对复杂的含碳物质。

2.4 堆肥的腐殖化特征

堆肥过程是物料中有机物质转变为腐殖质的过程。不同处理对堆肥过程中腐殖质碳、胡敏酸碳、富里酸碳以及腐殖质聚合度变化的影响见图4。由图4(a)可见:CK处理的腐殖质碳含量呈波动增加的趋势,堆肥结束时比初始值增加了34.91%;PT处理的腐殖质碳含量呈先增加后降低的趋势,

堆肥结束时比初始值降低了3.81%。由图4(b)可见:随着堆肥时间的延长,CK处理的胡敏酸碳含量呈持续增加趋势,PT处理呈现出先增加后降低的趋势,到堆肥结束时,CK和PT处理的胡敏酸碳含量分别比初始值增加了1.65倍和85.30%。由图4(c)可见:2个处理的富里酸碳含量变化趋势一致,均呈现出先增加后降低的趋势,在堆肥10 d时达到最高值,堆肥结束时,分别比初始值降低了11.05%和42.09%。腐殖质聚合度(DP),也称为胡富比(胡敏酸/富里酸),是评价堆肥腐熟度的一个重要指标。由图4(d)可见:在堆肥的第10天和第20天时,PT处理的DP值高于CK,堆肥结束时CK和PT处理的DP值分别为1.05和1.37,处理间差异显著,说明PT处理加快了堆肥腐熟进度。

2.5 氮素组分变化

不同处理对堆肥过程中全氮、氮素损失率、铵态氮和硝态氮含量变化的影响见图5。由图5(a)可见:随着堆肥时间的延长,2个处理的全氮含量总体呈增加的趋势。堆肥结束时,CK和PT处理的全氮含量相较于初始值分别增加了18.93%和23.03%,但处理间的差异不显著。由图5(b)可见:至堆肥结束时,CK和PT处理的氮素损失率分别为14.29%和18.15%,PT处理比CK处理高出3.86%,但差异不显著。由图5(c)可见:CK处理铵态氮浓度呈先上升后下降的趋势,PT处理铵态氮含量整体呈下降趋势,堆肥结束时,CK和PT的铵态氮含量较初

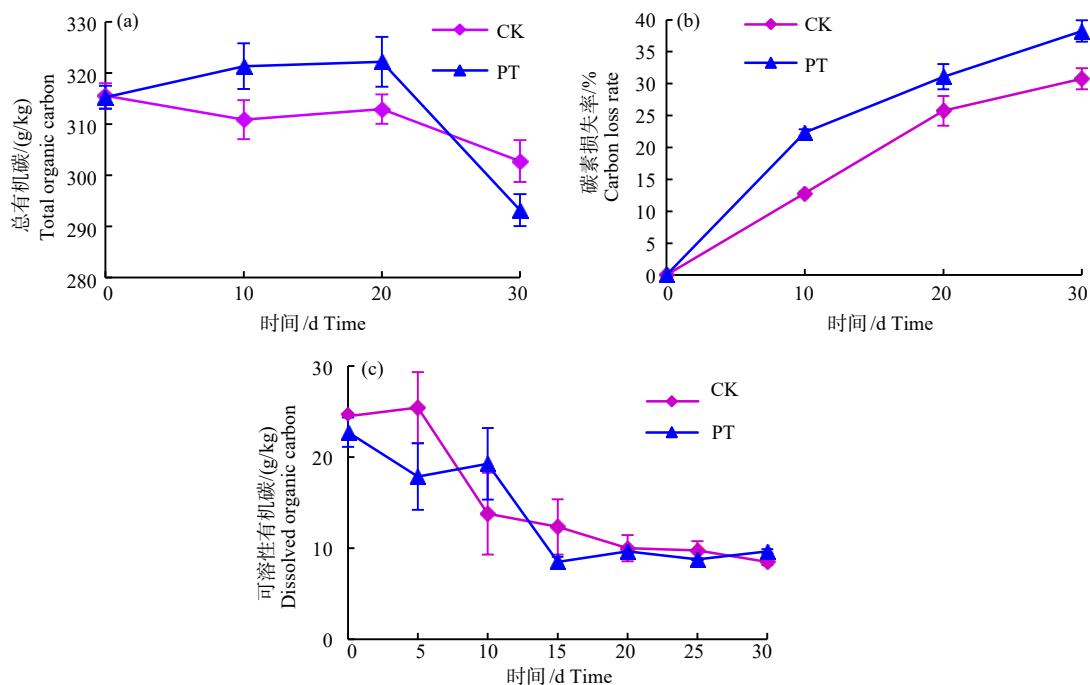


图3 堆肥过程中总有机碳(a)、碳素损失率(b)以及可溶性有机碳(c)的变化

Fig. 3 Changes in total organic carbon (a), carbon loss rate (b), and dissolved organic carbon (c) during composting

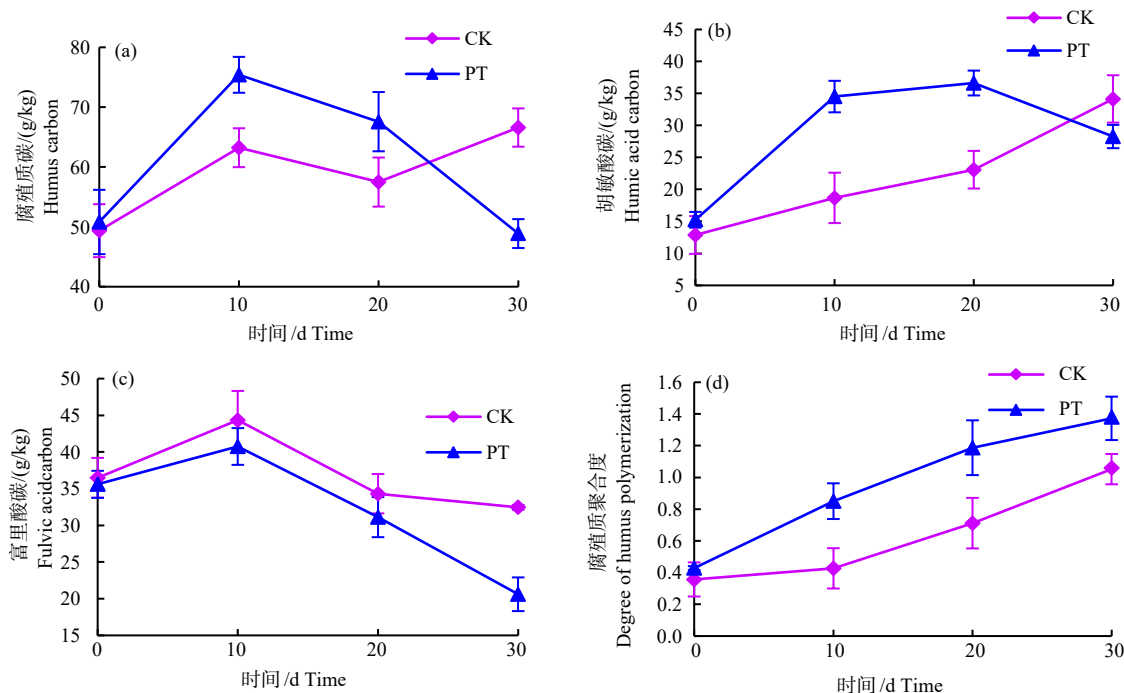


图4 堆肥过程中腐殖质碳(a)、胡敏酸碳(b)、富里酸碳(c)以及腐殖质聚合度(d)的变化

Fig. 4 Changes in humus carbon (a), humic acid carbon (b), fulvic acid carbon (c), and degree of humus polymerization (d) during composting

始值分别下降了87.72%和73.36%。由图5(d)可见:2个处理的硝态氮含量整体呈下降趋势,堆肥初期(0~10 d),PT的硝态氮含量显著高于CK,堆肥

结束时,2个处理的硝态氮含量都很低。

2.6 堆肥的碳氮比

不同处理对堆肥过程中碳氮比变化的影响见

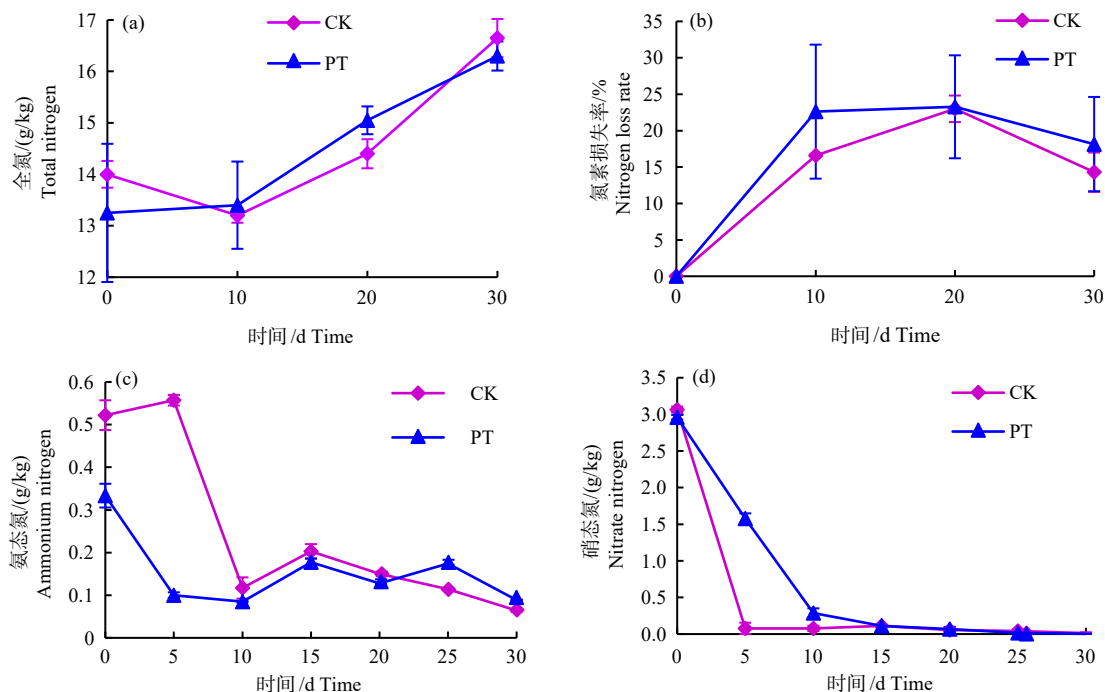


图5 堆肥过程中全氮(a)、氮素损失率(b)、铵态氮(c)以及硝态氮(d)的变化

Fig. 5 Changes in total nitrogen (a), nitrogen loss rate (b), ammonium nitrogen (c), and nitrate nitrogen (d) during composting

图6。可见:随着堆肥时间的延长,2个处理的碳氮比均呈下降趋势。堆肥起始时,CK和PT处理碳氮比分别为22.54和23.92;至堆肥结束时,CK和PT处理的碳氮比分别下降至18.19和17.99,2个处理的碳氮比都低于20,说明堆肥完全腐熟。

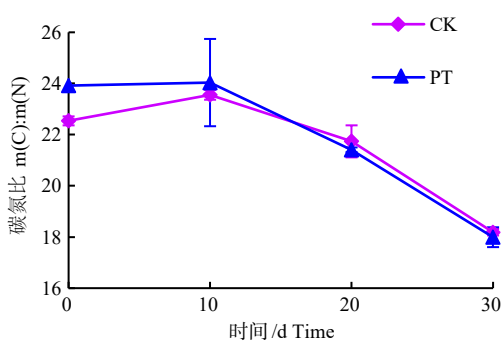


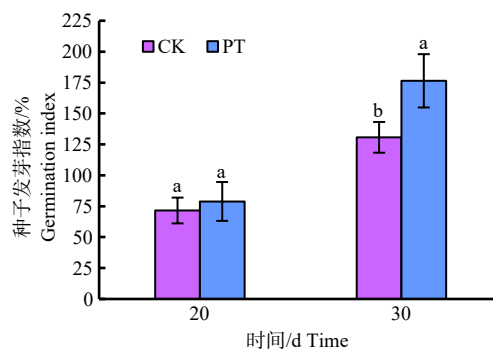
图6 不同处理堆肥过程中碳氮比变化

Fig. 6 Changes in $m(C):m(N)$ during composting under different treatments

2.7 种子发芽指数

一般采用GI评价堆肥产品腐熟度,当GI>50%时,可以认为堆肥对种子基本无毒性,堆肥已腐熟;当GI>70%时,堆肥已完全腐熟,符合NY/T

525—2021《有机肥料》^[20]标准。不同处理对堆肥过程中种子发芽指数变化的影响见图7。可见:堆肥20 d时,CK和PT处理的GI值分别为71.55%和78.86%,已基本符合有机肥标准;持续发酵至30 d,PT处理的GI值达到176.40%,显著高于CK处理(130.70%),说明PT处理有利于堆肥浸提液种子发芽指数的提高。



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

图7 不同处理堆肥过程中种子发芽指数变化

Fig. 7 Changes in germination indices during composting under different treatments

3 讨 论

温度变化是评价堆肥腐熟程度的最重要检测指标之一。畜禽粪便无害化处理技术规范 GB/T 36195—2018《畜禽粪便无害化处理技术规范》^[21]规定,采用反应器等好氧堆肥进行无害化处理的标准为保持堆体发酵温度 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间不少于7 d。本研究中,PT处理堆温 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数达到了7 d,亦即达到了堆肥卫生无害化的基础时长。万度积温可作为判定堆肥基本成熟的条件^[16-17]。PT处理的万度积温用时12 d,比CK处理缩短1 d。可以看出,高温碱化预处理后的堆肥不仅升温快,而且升温期达到的最高温度和高温持续时间都有明显提升,有利于加速堆肥生物无害化进程,与前人研究结果^[22]一致。其原因可能在于,高温、碱化以及预处理过程中的氨化作用都有利于促进番茄秸秆纤维素的降解(表2),使得堆肥初期堆体中易被微生物利用的营养物质增加,加快微生物新陈代谢速率,从而释放能量,加快发酵进程及提高堆体温度^[12]。此外,从堆肥温度变化可以看出CK处理在降温期和低温持续期的温度高于PT处理,说明高温碱化预处理提高了堆肥高温期发酵效率,减少了对降温期的依赖性,而CK处理由于高温期发酵不充分,仍然需要依赖后期发酵以完成堆肥物料的充分降解。

堆肥是在微生物作用下使堆料中不稳定有机物发生分解、转化以及合成腐殖酸等比较稳定有机物的过程,因此可以用堆肥进程中总有机碳含量变化反映碳素物质的变化规律^[23-24]。本研究发现,随着堆肥时间的延长,堆料的含碳有机物发生矿化分解,导致有机碳含量总体呈下降趋势,这主要是由于有机质作为碳源被微生物矿化为 CO_2 所导致的^[25],与曹云等^[22]的研究结果一致。总氮含量是评价堆肥品质、氮素保留效果的重要依据。本研究中,全氮含量随着堆肥的进行表现出增加的趋势,原因可能是由于浓缩效应,也就是堆肥过程中堆料质量减少的速度比氮素减少的速度更快,致使堆肥过程中总氮相对富集^[26-27]。随着堆肥的进行,硝态氮含量呈现出不断降低的趋势,其可能原因是随着物料发生微生物降解、物料的颗粒和孔隙度变小,导致反硝化作用大于硝化作用,将一部分硝态氮还原成氮气,因此硝态氮含量不断降低^[28]。

堆肥过程的实质是有机物质稳定化和腐殖化

的过程,腐殖质含量是影响堆肥腐熟度及其农用水果的重要指标^[29-30]。堆肥结束时,PT处理的腐殖质碳含量比堆肥前有所降低,而CK处理却有所增加。目前有关堆肥过程中腐殖质含量变化的情况,不同学者得出的结论不同,其原因可能与堆肥原料选择、工艺、过程条件控制等有关。鲍艳宇等^[31]的研究发现,奶牛粪好氧堆肥过程中腐殖酸碳含量呈逐渐增加的趋势;与之不同,李国学等^[32]的研究却发现猪粪堆肥后腐殖质总量下降约15%。腐殖质聚合度(DP)可以反映堆肥进程中胡敏酸和富里酸之间的相互消长和转化过程^[27,33],因能较好地评价腐熟程度和腐殖质的聚合情况被广泛使用。尽管不同研究发现堆肥后腐殖质含量变化有所不同,但普遍认为堆肥结束后腐殖物质中的DP值将增大^[34],与本研究结果一致。由于富里酸相比胡敏酸分子量小且稳定性差,较低的腐殖质聚合度($\text{DP}<1$)常被视为堆体未腐熟^[35]。堆肥过程中,PT处理的腐殖质聚合度都明显高于CK处理,到发酵结束时(30 d)达到1.37,显著高于CK处理(1.05),说明PT处理加快了腐熟进度。

4 结 论

为探讨高温碱化预处理对番茄秸秆堆肥过程中物质降解及转化的影响,本研究分析了常规堆肥和高温碱化预处理堆肥过程中温度变化、腐殖化特征、碳素和氮素的组分变化、种子发芽指数等指标特征。主要结论如下:

1)高温碱化预处理可提高堆体发酵温度,堆体温度 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数达到7 d,满足堆肥无害化卫生要求;

2)堆肥结束时,高温碱化预处理的腐殖质聚合度和发芽指数显著高于CK处理,但干物质降解率、碳素损失率和氮素损失率分别比CK处理高出5.22%、7.46%和3.86%。

参考文献 References

- [1] 牛明芬,刘振民,马建,秦美玲,赵明会.不同调理剂对尾菜低C/N堆肥腐殖化效果的影响[J].土壤与作物,2023,12(3):314-325
Niu M F, Liu Z M, Ma J, Qin M L, Zhao M H. Effects of different conditioners on humification of low C/N compost with vegetable waste [J]. *Soils and Crops*, 2023, 12(3): 314-325 (in Chinese)
- [2] 张飞雪,周利利,周肖瑜,沈卫新,李艳冬,陈丽萍,赵根.我国番茄秸秆废弃物资源化利用研究进展[J].蔬菜,2023(2):28-32

- Zhang F X, Zhou L L, Zhou X Y, Shen W X, Li Y D, Chen L P, Zhao G. Research progress on resource utilization of tomato straw waste in China[J]. *Vegetables*, 2023(2): 28-32 (in Chinese)
- [3] Wu D, Wei Z M, Mohamed T A, Zheng G R, Qu F T, Wang F, Zhao Y, Song C H. Lignocellulose biomass bioconversion during composting: Mechanism of action of lignocellulase, pretreatment methods and future perspectives[J]. *Chemosphere*, 2022, 286: 131635
- [4] Wang P, Chang J, Yin Q Q, Wang E Z, Zhu Q, Song A D, Lu F S. Effects of thermo-chemical pretreatment plus microbial fermentation and enzymatic hydrolysis on saccharification and lignocellulose degradation of corn straw[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 194: 165-171
- [5] 祝其丽, 何明雄, 谭芙蓉, 代立春, 吴波. 木质纤维素生物质预处理研究现状[J]. *生物技术进展*, 2015, 5(6): 414-419
- Zhu Q L, He M X, Tan F R, Dai L C, Wu B. Progress on pretreatment technologies of lignocellulosic biomass[J]. *Current Biotechnology*, 2015, 5(6): 414-419 (in Chinese)
- [6] 曹云, 黄红英, 孙金金, 吴华山, 段会英, 徐跃定, 靳红梅, 常志州. 超高温预处理对猪粪堆肥过程碳氮素转化与损失的影响[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1792-1800
- Cao Y, Huang H Y, Sun J J, Wu H S, Duan H Y, Xu Y D, Jin H M, Chang Z Z. Effect of hyperthermophilic pretreatment on transformation and losses of C and N during pig manure composting [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(5): 1792-1800 (in Chinese)
- [7] 徐欣怡, 彭韵, 李芯雯, 李蕾, 伍迪, 张虹, 石德智, 彭绪亚. 短期高温预处理对餐厨垃圾堆肥进程及产品质量的影响[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(3): 255-264
- Xu X Y, Peng Y, Li X W, Li L, Wu D, Zhang H, Shi D Z, Peng X Y. Effect of short-term high temperature pretreatment on food waste composting process and product quality [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(3): 255-264 (in Chinese)
- [8] Huang Y, Danyang L, Shah G M, Chen W, Wang W, Xu Y D, Huang H Y. Hyperthermophilic pretreatment composting significantly accelerates humic substances formation by regulating precursors production and microbial communities [J]. *Waste Management*, 2019(92): 89-96
- [9] Sun R C, Lawther J M, Banks W B. Influence of alkaline pre-treatments on the cell wall components of wheat straw[J]. *Industrial Crops and Products*, 1995, 4(2): 127-145
- [10] Kim S, Holtzaple M T. Delignification kinetics of corn stover in lime pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(5): 778-785
- [11] 陈广银, 王德汉, 吴艳, 刘承昊, 项钱彬, 李俊飞. 石灰预处理对树叶堆肥过程中养分转化的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(1): 77-82
- Chen G Y, Wang D H, Wu Y, Liu C H, Xiang Q B, Li J F. Effect of lime-pretreatment on nutrient transformation of leaves compost [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 77-82 (in Chinese)
- [12] 王砚, 李念念, 朱端卫, 周文兵, 陈焰鑫, 伍玉鹏. 水稻秸秆预处理对猪粪高温堆肥过程的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 1754-1759
- Wang Y, Li N N, Zhu D W, Zhou W B, Chen Y X, Wu Y P. Influence of straw pretreatment on the thermophilic composting process with pig manure [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1754-1759 (in Chinese)
- [13] 耿凤展, 李荣华, 高波, 蔡华, 王达菲, 葛梦娇, 杨振超. 番茄秸秆高温堆肥作为番茄育苗基质的循环利用研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(1): 102-106
- Geng F Z, Li R H, Gao B, Cai H, Wang D F, Ge M J, Yang Z C. Composting of tomato residues and cow dung under the aerobic condition and its recyclable potential in tomato nursery seedling [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(1): 102-106 (in Chinese)
- [14] 高宁, 李建明, 孔政. 番茄秸秆堆肥发酵特性及对冬季大棚环境的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(14): 172-177
- Gao N, Li J M, Kong Z. Fermentation characteristics of tomato straw compost and its impact on greenhouse environment in winter[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(14): 172-177 (in Chinese)
- [15] 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(3): 79-86
- Zhou S, Li Y, Zhang G Z, Xu P, Lin A Y, Wu Y J, Yang Z C. Effects of additives on the fermentation process and nitrogen loss of tomato stem aerobic composting[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(3): 79-86 (in Chinese)
- [16] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 黄泽春, 郑玉琪, 李艳霞. 城市污泥好氧堆肥过程中积温规律的探讨[J]. *生态学报*, 2002, 22(6): 911-915
- Chen T B, Huang Q F, Gao D, Huang Z C, Zheng Y Q, Li Y X. Accumulated temperature as an indicator to predict the stabilizing process in sewage sludge composting[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 911-915 (in Chinese)
- [17] Wang D M, Mao Y L, Mai L W, Yu Z, Lin J C, Li Q F, Yuan J, Li G X. Insight into humification of mushroom residues under addition of rich-N sources: Comparing key molecular evolution processes using EEM-PARAFAC and 2D-FTIR-COS analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 329: 117079
- [18] 鲍士旦. 土壤农业化学[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)
- [19] 高文慧, 李波, 叶菁, 林怡, 王义祥, 翁伯琦. 生物炭添加对猪粪堆肥氮素形态和损失的影响[J]. *福建农业学报*, 2019, 34(12): 1440-1446
- Gao W H, Li B, Ye J, Lin Y, Wang Y X, Weng B Q. Effects of biochar addition on form and loss of nitrogen in composting pig manure [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34(12): 1440-1446 (in Chinese)
- [20] NY/T 525—2021. 有机肥料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- NY/T 525—2021. Organic fertilizer [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021 (in Chinese)
- [21] GB/T 36195—2018. 畜禽粪便无害化处理技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
- GB/T 36195—2018. Technical specification for sanitation treatment of livestock and poultry manure [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018 (in Chinese)
- [22] 曹云, 黄红英, 钱玉婷, 王琳, 徐跃定, 靳红梅, 孙金金, 常志州. 超高温预处理装置及其促进鸡粪稻秸好氧堆肥腐熟效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 243-250
- Cao Y, Huang H Y, Qian Y T, Wang L, Xu Y D, Jin H M, Sun J J, Chang Z Z. Hyperthermophilic pretreatment device and its application on improving decomposition effect for chicken manure and rice straw aerobic composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(13): 243-250 (in Chinese)
- [23] Sanchez-Monedero M A, Cayuela M L, Roig A, Jindo K, Mondini C, Bolan N. Role of biochar as an additive in organic waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 1155-1164
- [24] Wang Q, Awasthi M K, Zhao J C, Ren X N, Li R H, Wang Z, Wang M J, Zhang Z Q. Improvement of pig manure compost lignocellulose degradation, organic matter humification and compost quality with

- medical stone[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 771-777
- [25] Sharma K, Garg V K. Management of food and vegetable processing waste spiked with buffalo waste using earthworms (*Eisenia fetida*) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(8): 7829-7836
- [26] Qian X Y, Shen G X, Wang Z Q, Guo C X, Liu Y Q, Lei Z F, Zhang Z Y. Co-composting of livestock manure with rice straw: Characterization and establishment of maturity evaluation system[J]. *Waste Management*, 2014, 34(2): 530-535
- [27] Yang F, Li Y, Han Y H, Qian W T, Li G X, Luo W H. Performance of mature compost to control gaseous emissions in kitchen waste composting [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 262-269
- [28] Wang S G, Zeng Y. Ammonia emission mitigation in food waste composting: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 13-19
- [29] 姚武, 顾燕青, 巫阳, 顾优丽, 龚梦丹, 朱维琴. 畜粪堆肥过程中腐殖质形成特征研究进展[J]. 杭州师范大学学报: 自然科学版, 2014, 13(5): 517-522
- Yao W, Gu Y Q, Wu Y, Gu Y L, Gong M D, Zhu W Q. On the formation characteristics of humic substances in livestock manure compost [J]. *Journal of Hangzhou Normal University: Natural Science Edition*, 2014, 13(5): 517-522 (in Chinese)
- [30] Song C H, Li M X, Wei Z M, Jia X, Xi B D, Liu D M, Zhu C W, Pan H W. Effect of inoculation with multiple composite microorganisms on characteristics of humic fractions and bacterial community structure during biogas residue and livestock manure co-composting[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2016, 91(1): 155-164
- [31] 鲍艳宇, 周启星, 娄翼来, 颜丽, 关连珠. 奶牛粪好氧堆肥过程中不同含碳有机物的变化特征以及腐熟评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2111-2116
- Bao Y Y, Zhou Q X, Lou Y L, Yan L, Guan L Z. Change patterns of different carbon-containing compounds in dairy manure during its aerobic composting and assessment of composting maturity [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2111-2116 (in Chinese)
- [32] 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 G X, Zhang F S. *Composting of Solid Waste and Production of Organic Compound Fertilizer* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000 (in Chinese)
- [33] 孙向平, 李国学, 肖爱平, 时红, 王耀明, 李扬阳. 添加不同比例玉米秸秆对猪粪高温堆肥过程中胡敏酸的结构组成及红外光谱特性影响分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2413-2418
- Sun X P, Li G X, Xiao A P, Shi H, Wang Y M, Li Y Y. Analysis on the impact of composting with different proportions of corn stalks and pig manure on humic acid fractions and IR spectral feature [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(9): 2413-2418 (in Chinese)
- [34] Kulikowska D. Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting [J]. *Waste Management*, 2016, 49: 196-203
- [35] Bernal M P, Alburquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment, a review [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5444-5453

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 李艳春, 博士, 福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所助理研究员。主要从事生态农业、植物与土壤微生物相互作用等研究。主持福建省自然科学基金项目、福建省公益类项目等研究课题 10 余项。在《应用生态学报》、《中国生态农业学报》、*European Journal of Soil Biology* 等期刊发表第一作者学术论文 20 余篇, 出版论著 1 部。



通讯作者简介: 王义祥, 博士, 研究员, 博士生导师, 现任福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所副所长。主要从事恢复生态与生态农业技术等研究, 先后主持承担国家科技支撑计划课题、福建省科技计划重点项目、省自然科学基金等多项研究课题。在 *Environmental Pollution*、*Pedosphere*、《农业工程学报》等国内外期刊上发表第一作者(含通讯作者)文章 60 多篇。出版专著 1 部, 参编 3 部, 有 12 项成果获省部级以上科技奖励。