

5种热带农业废弃物好氧堆肥过程中的变化及堆肥产物施用效应分析

黄艳艳^{1,2}, 杨旭¹, 雷菲³, 杨红竹¹, 吴荣芳¹, 李建宏¹, 林清火^{1,2,①}

(1. 中国热带农业科学院橡胶研究所, 海南海口 571101; 2. 儋州橡胶林土壤环境海南省野外科学观测站, 海南儋州 571737;
3. 海南省农业科学院农业环境与土壤研究所 海南省耕地保育重点实验室, 海南海口 571199)

摘要: 为了探明中国热带地区农业废弃物的堆肥效果及堆肥产物的施用效应, 对海南省 5 种典型农业废弃物(包括蔗渣、橡胶木屑、椰糠、菠萝叶和木薯秆)好氧堆肥过程中温度、养分含量和堆肥腐熟度指标的变化进行了比较, 并分析了不同堆肥产物对连茬小白菜(*Brassica campestris* subsp. *chinensis* Makino)单株干质量及土壤主要理化指标的影响。结果表明: 5 种农业废弃物的好氧堆肥过程均可分为升温期、高温期、降温期和腐熟期 4 个阶段, 高温期可持续 6~11 d。堆肥 28 d, 5 种农业废弃物的 pH 值(pH 7.81 至 pH 8.55)、电导率($1\ 575\sim 3\ 604\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)及堆肥产物培养的小白菜种子发芽指数(106.7%~140.0%)均达到 NY/T 525—2021 公布的腐熟标准。堆肥前后的养分含量总体上存在显著($P<0.05$)差异, 堆肥后有机质、全氮、全磷、全钾和总养分含量分别为 40.46%~47.26%、1.82%~2.28%、1.96%~2.62%、1.45%~2.04%和 5.74%~6.31%。与无肥料处理组和化肥处理组相比, 5 个堆肥产物处理组土壤的有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量以及 pH 值和总孔隙度总体上显著升高, 土壤容重却显著降低, 蔗渣、橡胶木屑和椰糠堆肥产物处理组的小白菜单株干质量显著升高。综上所述, 供试 5 种农业废弃物的堆肥效果总体较好, 其中, 蔗渣、橡胶木屑和椰糠堆肥产物对小白菜的增产效果较好。

关键词: 热带农业废弃物; 好氧堆肥; 腐熟标准; 施用效应; 资源化利用

中图分类号: S141.4; X712 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2023)06-0050-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.06.06

Changes of five tropical agricultural wastes during aerobic composting process and analysis on application effects of the compost products HUANG Yanyan^{1,2}, YANG Xu¹, LEI Fei³, YANG Hongzhu¹, WU Rongfang¹, LI Jianhong¹, LIN Qinghuo^{1,2,①} (1. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China; 2. Soil Environment of Rubber Plantation of Danzhou, Hainan Observation and Research Station, Danzhou 571737, China; 3. Hainan Key Laboratory of Arable Land Conservation, Institute of Agricultural Environment and Soil, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571199, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(6): 50-58

Abstract: In order to clarify the composting effects of agricultural wastes in tropical areas of China and the application effects of the compost products, the changes of temperature, nutrient contents, and compost maturity indexes of five typical agricultural wastes (containing bagasse, rubber sawdust, coconut husk, pineapple leaf, and cassava stalk) in Hainan Province during aerobic composting process were compared, and the effects of different compost products on dry mass per plant of continuous cropping *Brassica campestris* subsp. *chinensis* Makino and main physicochemical indexes of soil were analyzed. The

收稿日期: 2023-03-30

基金项目: 海南省自然科学基金项目(321QN330); 海南省耕地保育重点实验室开放课题(GDBY202001); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1630022022030)

作者简介: 黄艳艳(1984—), 女, 山东菏泽人, 硕士, 助理研究员, 主要从事新型肥料研究。

①通信作者 E-mail: qinghuo@163.com

引用格式: 黄艳艳, 杨旭, 雷菲, 等. 5种热带农业废弃物好氧堆肥过程中的变化及堆肥产物施用效应分析[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(6): 50-58.

results show that the aerobic composting processes of five agricultural wastes all can be divided into four stages, namely mesophilic stage, thermophilic stage, cooling stage, and maturity stage, and the thermophilic stage can last 6–11 d. When composting for 28 d, the pH value (from pH 7.81 to pH 8.55), electrical conductivity ($1\ 575 - 3\ 604\ \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$), and germination index (106.7%–140.0%) of *B. campestris* subsp. *chinensis* seeds cultivated with compost products all reach the rotten maturity standard announced by NY/T 525–2021. There are significant ($P < 0.05$) differences in nutrient contents between before and after composting in general, and the contents of organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, and total nutrients after composting are 40.46%–47.26%, 1.82%–2.28%, 1.96%–2.62%, 1.45%–2.04%, and 5.74%–6.31%, respectively. Compared with no fertilizer treatment group and chemical fertilizer treatment group, the contents of organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium, pH value, and total porosity of soil of five compost products treatment groups significantly increase in general, but the soil bulk density significantly decreases, and the dry mass per plant of *B. campestris* subsp. *chinensis* of bagasse, rubber sawdust, and coconut husk compost product treatment groups significantly increase. In conclusion, the composting effects of five test agricultural wastes are relatively good in general, in which, the yield-increasing effects of compost products of bagasse, rubber sawdust, and coconut husk on *B. campestris* subsp. *chinensis* are relatively good.

Key words: tropical agricultural waste; aerobic composting; rotten maturity standard; application effect; resource utilization

中国是一个农业大国,每年可产生约 1.04×10^9 t 的农作物秸秆和 3.05×10^9 t 的畜禽粪便,这些农业废弃物尚未得到有效利用,造成了重大的资源浪费,并产生了严重的环境污染问题^[1]。好氧堆肥是目前实现农业废弃物减量化、无害化和资源化的主要措施之一,已成为国内外相关领域的研究重点^[2–3]。已有研究发现,椰糠与马粪混合堆肥,能有效调节堆肥进程,提高养分回收率^[4];施用香蕉(*Musa nana* Lour.)和菠萝[*Ananas comosus* (Linn.) Merr.]茎叶为主料、鸡粪为辅助料的堆肥产物,可提高芥菜[*Brassica juncea* (Linn.) Czern.]的产量和品质^[5];木薯(*Manihot esculenta* Crantz)茎叶堆肥产物可提高土壤养分含量,促进水稻(*Oryza sativa* Linn.)养分吸收^[6];蔗渣与鸡粪的堆肥效果良好,并能有效降解 99.0%以上的抗生素^[7];蔗渣与污泥的堆肥产物可作为苗木栽培基质^[8];蔗渣与鱼废弃物或城市污泥堆肥亦能制成有机肥,用于农业生产^[9–10]。还有研究发现,将堆肥产物还田可提高土壤孔隙度,改善土壤团聚体结构,提高土壤养分含量,增强土壤中动物和微生物的活性^[11–13]。由此可见,农业废弃物堆肥可用于作物生产实践,起到增产、培肥地力、改良土壤等效果。

热带地区终年可以进行农业生产,因此,每年会产生大量的农业废弃物。据统计,海南省热带植物纤维性废弃物年产量不少于 1.0×10^7 t^[4,14]。这些热带农业废弃物含有未被分解的蛋白质、脂肪和糖类物

质,有利于细菌的生长,若将其随意丢弃或排放到环境中,定会造成资源浪费和环境污染。众所周知,热带地区的耕地使用强度较高,土壤酸化、板结、有机质含量下降等问题较为严重,农业废弃物的堆肥发酵产物可有效改善热带地区土壤质量退化问题^[15]。因此,利用热带地区的典型农业废弃物资源进行堆肥,并将堆肥产物用于土壤改良,是实现热带地区农业废弃物绿色环保利用的一种有效方式。

为了探究中国热带地区农业废弃物的堆肥效果及堆肥产物的施用效应,笔者选用海南省5种典型农业废弃物(包括蔗渣、橡胶木屑、椰糠、菠萝叶和木薯秆)进行好氧堆肥实验,比较了不同农业废弃物堆肥过程中温度、养分含量和堆肥腐熟度指标的变化,并分析了不同农业废弃物堆肥产物对连茬小白菜(*Brassica campestris* subsp. *chinensis* Makino)单株干质量和土壤主要理化指标的影响,以期为热带地区农业废弃物的资源化利用研究提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 堆肥原料来源 堆肥选用的农业废弃物中,蔗渣来自洋浦绿宝丰农资有限公司堆肥厂;橡胶木屑来自中国热带农业科学院橡胶研究所木材厂;椰糠、菠萝叶和木薯秆来自中国热带农业科学院橡胶研究

所土壤肥料基地周边农场,经风干粉碎成长度 2~3 cm 的小段。堆肥使用的氮源为鸡粪,来自中国热

带农业科学院热带作物品种资源研究所蛋鸡养殖场。上述堆肥原料的基本理化性质见表 1。

表 1 不同堆肥原料的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of different compost raw materials

堆肥原料 Compost raw material	含水量/% Water content	有机碳含量/(g·kg ⁻¹) Organic carbon content	全氮含量/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen content	全磷含量/(g·kg ⁻¹) Total phosphorus content	全钾含量/(g·kg ⁻¹) Total potassium content	C/N ¹⁾
蔗渣 Bagasse	16.08	668.90	4.99	2.50	2.70	134.05
橡胶木屑 Rubber sawdust	11.59	471.32	2.91	0.42	1.99	161.96
椰糠 Coconut husk	9.35	494.20	5.04	0.41	7.12	98.06
菠萝叶 Pineapple leaf	5.38	448.72	7.03	7.64	1.71	63.83
木薯秆 Cassava stalk	3.28	419.81	7.13	1.73	5.11	58.88
鸡粪 Chicken manure	82.38	269.36	25.71	25.45	24.63	10.48

¹⁾ 有机碳含量与全氮含量的比值 Ratio of organic carbon content to total nitrogen content.

1.1.2 堆肥装置 采用 WD-FYQ60L 密闭发酵罐(北京鸿远鹏奥科技有限公司)进行好氧堆肥实验。使用的密闭发酵罐由进气管、进气管道、金属罐体、温度记录系统、排水管道和排气管道组成。

1.1.3 土壤来源 使用的土壤为中国热带农业科学院橡胶研究所土壤肥料基地内 0~20 cm 土层的土壤,为片麻岩发育的砖红壤。将土壤风干,过筛(孔径 2 mm),备用。土壤有机质含量 18.55 g·kg⁻¹、全氮含量 0.88 g·kg⁻¹、全磷含量 0.79 g·kg⁻¹、全钾含量 17.73 g·kg⁻¹、有效磷含量 8.02 mg·kg⁻¹、速效钾含量 20.58 mg·kg⁻¹,pH 4.86。

1.1.4 小白菜种子和化肥来源 使用的小白菜种子为在当地市场购买的品种‘速生 5 号’(‘Fast Growing No. 5’)种子。使用的化肥有尿素(云南云天化股份有限公司)、钙镁磷肥(南宁市广肥农资有限公司)和氯化钾(济南众鑫化工有限公司),均购自儋州大成福盛源农资服务站。

1.2 方法

1.2.1 农业废弃物好氧堆肥及采样方法 在 2021 年 11 月 20 日,将 5 种农业废弃物分别与鸡粪充分混匀,各自装入体积 60 L 的密闭发酵罐内进行好氧堆肥实验,共持续 28 d。每个处理 1 个发酵罐,每个发酵罐物料的初始碳氮比在 25:1 左右,含水量在 60%~70%。发酵罐的通风供氧方式为间歇通风和定期翻堆,设置为每小时通风 30 min 后暂停通风 30 min,通风速率为 0.2 m³·h⁻¹,并在好氧堆肥第 1、第 3、第 7、第 14、第 21 和第 28 天进行翻堆和样品采集。翻堆后,将堆体平铺,采用对角线采集法采集至少

5 个点的样品,样品总质量约 600 g,每个发酵罐每次采集 3 份样品。每份样品混匀后平均分成 2 份,一份置于 4 °C 冰箱内保存,用于 pH 值、电导率、小白菜种子发芽指数、铵态氮含量和硝态氮含量测定;另一份风干后粉碎并过筛(孔径 2 mm),用于有机质、全氮、全磷(以 P₂O₅计)和全钾(以 K₂O 计)含量测定。

1.2.2 堆肥过程中相关指标的测定

1.2.2.1 温度测定 每天 9:00,通过发酵罐上的自动控制系统直接读取不同处理堆体中心的温度,同时监测发酵罐周围环境的空气温度。

1.2.2.2 主要养分含量测定 参照 NY/T 525—2021 中的方法测定有机质、全氮、全磷和全钾含量;参考鲁如坤^[16]159-162 的方法,将样品与 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液 1:10(m/V)混匀,振荡 30 min 后静置 5 min,用定性滤纸过滤;取上清液,用 AutoAnalyzer3 全自动连续流动分析仪(德国 Seal 公司)测定铵态氮和硝态氮含量。计算有机碳含量,计算公式为有机碳含量=有机质含量/1.724,再计算有机碳含量与全碳含量的比值,即 C/N。总养分含量为全氮、全磷和全钾含量的总和。每份样品各指标重复测定 2 次。

1.2.2.3 堆肥腐熟度指标测定 将 pH 值、电导率和小白菜种子发芽指数作为判定堆肥腐熟度的重要指标^[17]。将样品与去离子水 1:10(m/V)混匀,振荡 30 min 后静置 4 h 以上,定性滤纸过滤,取上清液,待测。取 20 mL 上清液,采用 S220-B pH 计(瑞士 Mettler-Toledo 公司)测定 pH 值,采用 FE38 电导率仪(瑞士 Mettler-Toledo 公司)测定电导率。另取 10 mL 上清液,滴入垫有 2 层定性滤纸的培养皿(直

径9 cm)中,均匀摆放10粒小白菜种子,置于25℃培养箱中避光培养48 h后,统计发芽种子数(胚根与种子等长视为种子发芽),并使用游标卡尺(精度1 mm)测量主根长度。以同体积去离子水代替上清液为对照,每个处理3次重复。分别计算种子发芽率和种子发芽指数,计算公式分别为种子发芽率=(发芽种子数/种子总数)×100%和种子发芽指数=[(处理组种子发芽率×处理组主根平均长度)/(对照组种子发芽率×对照组主根平均长度)]×100%。

1.2.3 堆肥产物施用效应分析

1.2.3.1 堆肥产物种植小白菜的方法

于2022年3月至5月采用5种农业废弃物好氧堆肥28 d后的有机物料在中国热带农业科学院橡胶研究所土壤肥料基地进行堆肥产物施用效应实验。共设置7个处理,CK1组为无肥料处理组(即空白对照),CK2组为化肥处理组(即阳性对照),Ba组为蔗渣堆肥产物处理组,RS组为橡胶木屑堆肥产物处理组,CH组为椰糠堆肥产物处理组,PL组为菠萝叶堆肥产物处理组,CS组为木薯秆堆肥产物处理组。采用盆栽法进行实验,使用的花盆为长18 cm、宽16 cm、高25 cm的塑料花盆,每盆装土9.5 kg,施肥量为土壤质量的5%,以N、P、K含量最高的CK2组为标准,N、P₂O₅、K₂O施用量分别为0.150、0.052和0.090 g·kg⁻¹^[18],其他组用尿素、钙镁磷肥和氯化钾补充到等量的N、P、K水平。播种前将肥料与土壤充分混匀。每个处理连茬种植两季,出苗后每盆保留长势较一致的幼苗5株,每季种植时间均为40 d,每个处理3次重复。实验期间,每2~4 d浇1次水,并在播种后第3和第5周,采用广谱性低毒农药(阿维菌素和多菌灵)喷施幼苗各1次(2种药间隔2~3 d),预防病虫害。

1.2.3.2 小白菜单株干质量测定

在每季小白菜成熟时,收集地上部分,先于105℃杀青30 min,再于85℃烘干至恒质量;用精度0.01 g电子天平称量每盆所有幼苗的地上部总干质量,再计算单株地上部干质量。每处理3次重复。

1.2.3.3 土壤理化指标测定

待第2季小白菜收获后,参照王玮璐等^[19]的研究方法,采用环刀法测定每盆中间位置的土壤容重,计算土壤总孔隙度,采用环刀浸水法测定毛管孔隙度。采用四分法在每个花盆中采集土壤样品500 g,风干后过筛(孔径2 mm),采用电位法^{[16]13-14}测定pH值,采用重铬酸钾容量法^{[16]107-108}测定有机质含量,采用凯氏定氮法^{[16]147-148}

测定全氮含量,采用碱解蒸馏法^{[16]150-152}测定碱解氮含量,采用^{[16]181-182}钼锑抗比色法测定有效磷含量,采用乙酸铵浸提-火焰光度法^{[16]193-194}测定速效钾含量。每份样品各指标重复测定2次。

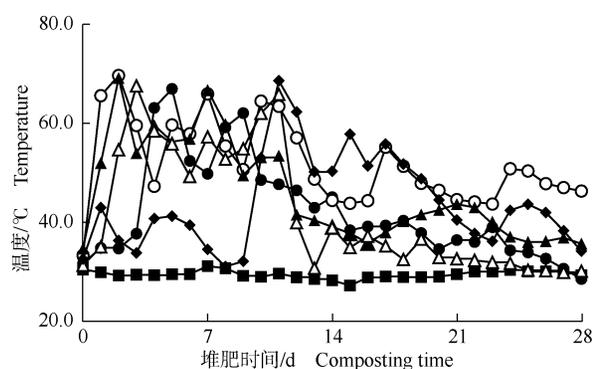
1.3 数据处理及统计分析

采用EXCEL 2010软件对数据进行统计、制表和制图,并采用SPSS 22.0软件对不同处理间的各指标进行方差分析($P<0.05$)。

2 结果和分析

2.1 堆肥过程中温度的变化

不同热带农业废弃物好氧堆肥过程中温度的变化见图1。各处理的温度均呈现升温期、高温期、降温期和腐熟期4个阶段,但每个处理不同阶段温度变化有较大差异。升温期,橡胶木屑和椰糠堆肥处理组的升温速度最快,温度均在第2天达到最高值(分别为69.93℃和69.40℃),菠萝叶堆肥处理组的温度在第3天达到最高值(67.80℃),蔗渣堆肥处理组的温度在第5天达到最高值(67.23℃),而木薯秆堆肥处理组的升温速度最慢,温度在第11天才达到最高值(68.90℃)。供试的5个堆肥处理组基本上都存在翻堆后温度短暂下降、而后迅速升高的现象。比较发现,橡胶木屑堆肥处理组高温期(温度超过50℃)时间最长,共持续了11 d;蔗渣堆肥处理组高温期时间最短,只维持了6 d;其余3个堆肥处理组高温期时间相对较长,维持了8~9 d。



■: 环境温度 Ambient temperature; ●: 蔗渣 Bagasse; ○: 橡胶木屑 Rubber sawdust; ▲: 椰糠 Coconut husk; △: 菠萝叶 Pineapple leaf; ◆: 木薯秆 Cassava stalk.

图1 不同热带农业废弃物好氧堆肥过程中温度的变化
Fig.1 Change of temperature of different tropical agricultural wastes during aerobic composting process

2.2 堆肥过程中堆肥腐熟度指标的变化

不同热带农业废弃物好氧堆肥过程中的 pH 值、电导率和小白菜种子发芽指数变化见图 2。结果表明:虽然不同农业废弃物在堆肥前(堆肥 0 d)的 pH 值差异较大,但在堆肥后(堆肥 28 d)的 pH 值(pH 7.81至pH 8.55)差异变小。值得注意的是,堆肥 7 d 内,蔗渣和木薯杆的 pH 值呈下降趋势。堆肥后

菠萝叶、木薯杆、蔗渣、木屑和椰糠的电导率分别为 3 235、2 455、3 604、2 112 和 1 575 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,均较堆肥前有一定下降,且彼此间差异小于堆肥前。堆肥过程中,5 种农业废弃物堆肥产物培养的小白菜种子发芽指数均呈现逐渐升高的趋势,且在堆肥 7 d 内快速升高、在堆肥 7 d 后缓慢升高;堆肥后各处理的小白菜种子发芽指数为 106.7%~140.0%。

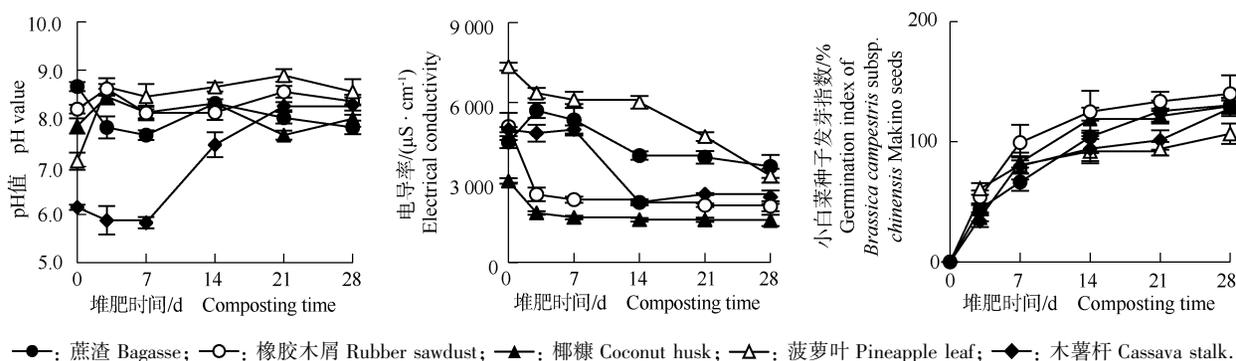


图 2 不同热带农业废弃物好氧堆肥过程中堆肥腐熟度指标的变化
Fig. 2 Changes of compost maturity indexes during aerobic composting of different tropical agricultural wastes

2.3 堆肥前后主要养分含量的变化

不同热带农业废弃物好氧堆肥前后主要养分含量的变化见表 2。结果表明:不同农业废弃物堆肥前后的养分含量总体上存在显著($P < 0.05$)差异。其中,5 种农业废弃物堆肥后的全氮、全磷、全钾和硝态氮含量总体上显著升高,升高幅度分别为 32.85%~85.24%、20.36%~130.59%、26.27%~50.00% 和 33.04%~148.57%,而 5 种农业废弃物堆肥后的有机质和铵态氮含量及 C/N 则显著降低,降低幅度分别为 11.53%~28.08%、5.29%~99.76% 和 42.61%~58.48%。

由表 2 可见:堆肥后,木薯杆的有机质含量最高(47.26%),橡胶木屑的有机质含量最低(40.46%);蔗渣的全氮含量最高(2.28%),菠萝叶的全氮含量最低(1.82%);菠萝叶的全磷含量最高(2.62%),蔗渣的全磷含量最低(1.96%);橡胶木屑的全钾含量最高(2.04%),木薯杆的全钾含量最低(1.45%);蔗渣的铵态氮含量最高($580.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),橡胶木屑的铵态氮含量最低($5.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),并且,除蔗渣外,其余 4 种农业废弃物堆肥后的铵态氮含量均低于 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,达到腐熟标准;菠萝叶的硝态氮含量和 C/N 均最高(分别为 $2 526.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 13.78),橡

胶木屑的硝态氮含量和 C/N 均最低(分别为 $1 014.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 10.48);橡胶木屑的总养分含量最高(6.31%),木薯杆的总养分含量最低(5.74%)。

由表 2 还可见:堆肥前,不同农业废弃物间的有机质、全磷、铵态氮和硝态氮含量总体上存在显著差异,木薯杆的总养分含量显著低于蔗渣,不同农业废弃物间的其他指标则基本上无显著($P > 0.05$)差异。堆肥后,不同农业废弃物间的有机质、全磷、铵态氮和硝态氮含量仍总体上存在显著差异,且不同农业废弃物间的全钾含量也存在显著差异,但不同农业废弃物间的总养分含量无显著差异。

2.4 堆肥产物的施用效应分析

2.4.1 堆肥产物对小菜单株干质量的影响

不同热带农业废弃物堆肥产物对小菜单株干质量的影响见图 3。结果表明:与无肥料处理组相比,5 种农业废弃物堆肥产物处理组的小菜单株干质量均升高,且除木薯杆堆肥产物处理组外,其余农业废弃物堆肥产物处理组的小菜单株干质量均显著($P < 0.05$)升高。与化肥处理组相比,木薯杆堆肥产物处理组的小菜单株干质量降低,其余农业废弃物堆肥产物处理组的小菜单株干质量均升高,其中,蔗渣、橡胶木屑和椰糠堆肥产物处理组的小菜单株干质量显著升

表 2 不同热带农业废弃物好氧堆肥前后主要养分含量变化 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

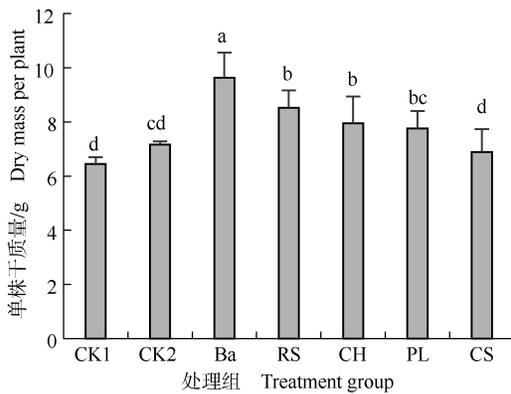
Table 2 Changes of main nutrient contents of different tropical agricultural wastes before and after composting ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

AW ²⁾	有机质含量/% Organic matter content		全氮含量/% Total nitrogen content		全磷含量/% Total phosphorus content		全钾含量/% Total potassium content	
	堆肥前 Before composting	堆肥后 After composting	堆肥前 Before composting	堆肥后 After composting	堆肥前 Before composting	堆肥后 After composting	堆肥前 Before composting	堆肥后 After composting
Ba	61.29±1.03a	44.71±1.63b *	1.49±0.22a	2.28±0.43a *	0.85±0.19c	1.96±0.03b *	1.21±0.11ab	1.57±0.12bc *
RS	52.14±0.30d	40.46±1.23d *	1.22±0.23a	2.26±0.27a *	1.67±0.21b	2.01±0.21b	1.36±0.08a	2.04±0.13a *
CH	58.11±0.83b	41.79±0.24cd *	1.42±0.22a	2.01±0.14a *	1.55±0.06b	2.06±0.19b *	1.24±0.17ab	1.74±0.11b *
PL	56.27±1.55c	43.15±1.43bc *	1.37±0.16a	1.82±0.08a *	2.01±0.06a	2.62±0.23a *	1.18±0.16ab	1.49±0.04c *
CS	53.42±0.37d	47.26±1.24a *	1.28±0.08a	2.04±0.25a *	1.60±0.23b	2.26±0.19b *	1.08±0.08b	1.45±0.11c *

AW ²⁾	铵态氮含量/(mg·kg ⁻¹) Ammonium nitrogen content		硝态氮含量/(mg·kg ⁻¹) Nitrate nitrogen content		C/N		总养分含量/% Total nutrient content	
	堆肥前 Before composting	堆肥后 After composting	堆肥前 Before composting	堆肥后 After composting	堆肥前 Before composting	堆肥后 After composting	堆肥前 Before composting	堆肥后 After composting
Ba	612.80±8.00d	580.40±11.12a *	1 292.10±19.07c	2 050.20±68.11b *	24.23±3.98a	11.65±2.62ab *	3.54±0.08b	5.80±0.34a
RS	2 520.13±50.94c	5.98±0.47d *	470.95±20.36d	1 014.26±16.37d *	25.24±4.82a	10.48±1.56b *	4.24±0.51ab	6.31±0.19a
CH	3 402.76±12.88b	358.26±8.46b *	409.07±16.34e	1 016.82±3.43d *	24.13±4.08a	12.09±0.92ab *	4.21±0.45ab	5.80±0.16a
PL	3 378.87±27.21b	14.71±0.91cd *	1 483.95±20.19a	2 526.64±13.45a *	24.01±3.38a	13.78±1.10a *	4.55±0.38a	5.93±0.36a
CS	6 011.90±158.94a	25.14±0.64c *	1 216.08±11.42b	1 617.86±14.96c *	24.26±1.44a	13.59±2.01ab *	3.96±0.40ab	5.74±0.05a

¹⁾ 同列中不同小写字母表示在不同农业废弃物间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different agricultural wastes. * : 表示在堆肥前后存在显著 ($P<0.05$) 差异 Indicating the significant ($P<0.05$) differences between before and after composting. C/N: 有机碳含量与全氮含量的比值 Ratio of organic carbon content to total nitrogen content.

²⁾ AW: 农业废弃物 Agricultural waste. Ba: 蔗渣 Bagasse; RS: 橡胶木屑 Rubber sawdust; CH: 椰糠 Coconut husk; PL: 菠萝叶 Pineapple leaf; CS: 木薯秆 Cassava stalk.



CK1: 无肥料处理组 No fertilizer treatment group; CK2: 化肥处理组 Chemical fertilizer treatment group; Ba: 蔗渣堆肥产物处理组 Bagasse compost product treatment group; RS: 橡胶木屑堆肥产物处理组 Rubber sawdust compost product treatment group; CH: 椰糠堆肥产物处理组 Coconut husk compost product treatment group; PL: 菠萝叶堆肥产物处理组 Pineapple leaf compost product treatment group; CS: 木薯秆堆肥产物处理组 Cassava stalk compost product treatment group.

柱子上方的不同小写字母表示在不同处理组间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases above the columns indicate the significant ($P<0.05$) differences between different treatment groups.

图 3 不同热带农业废弃物好氧堆肥产物对小白菜单株干质量的影响
Fig. 3 Effects of aerobic compost products of different tropical agricultural wastes on dry mass per plant of *Brassica campestris* subsp. *chinensis* Makino

高,增幅分别为 34.48%、19.04%和 10.94%。

2.4.2 堆肥产物对土壤主要理化指标的影响 不同热带农业废弃物好氧堆肥产物对土壤主要理化指标的影响见表 3。由表 3 可见:5 个堆肥产物处理组中,蔗渣堆肥产物处理组的土壤有机质含量最高 ($27.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),木薯秆堆肥产物处理组的土壤有机质含量最低 ($18.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);菠萝叶、蔗渣和椰糠堆肥产物处理组的土壤有机质含量显著高于无肥料处理组和化肥处理组,较无肥料处理组升高了 68.20%~104.52%,较化肥处理组升高了 60.47%~95.12%。5 个堆肥产物处理组中,蔗渣堆肥产物处理组的土壤全氮含量最高 ($1.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),椰糠堆肥产物处理组的土壤全氮含量最低 ($1.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);5 个堆肥产物处理组的土壤全氮含量显著高于无肥料处理组和化肥处理组,较无肥料处理组升高了 62.79%~96.51%,较化肥处理组升高了 50.54%~81.72%。5 个堆肥产物处理组中,椰糠堆肥产物处理组的土壤碱解氮含量最高 ($133.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),菠萝叶堆肥产物处理组的土壤碱解氮含量最低 ($100.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);5 个堆肥产物处理组的土壤碱解氮含量显著高于无肥料处理组,

升高幅度为 203.34%~302.17%,且仅椰糠堆肥产物处理组的土壤碱解氮含量显著高于化肥处理组,升高幅度为 48.93%。5 个堆肥产物处理组中,菠萝叶堆肥产物处理组的土壤有效磷含量最高(27.86 mg·kg⁻¹),椰糠堆肥产物处理组的土壤有效磷含量最低(18.39 mg·kg⁻¹);除椰糠堆肥产物处理组的土壤有效磷含量略低于化肥处理组外,5 个堆肥产物处理组的土壤有效磷含量显著高于无肥料处理组和化肥处理组,较无肥料处理组升高了 184.48%~254.45%,较化肥处理组升高了 20.28%~49.86%。5 个堆肥产物处理组中,椰糠堆肥产物处理组的土壤速效钾含量最高(76.43 mg·kg⁻¹),菠萝叶堆肥产物处理组的土壤速效钾含量最低(45.11 mg·kg⁻¹);5 个堆肥产物处理组的土壤速效钾含量显著高于无肥料处理组和化肥处理组,较无肥料处理组升高了 130.39%~290.35%,较化肥处理组升高了 12.46%~90.55%。5 个堆肥产物处理组中,蔗渣堆肥产物处理组的土壤 pH 值最高(pH 8.36),椰糠堆肥产物处理组的土壤 pH 值最低(pH 7.41);5 个堆肥产物处理组的土壤 pH 值显著高于无肥料处理组和化肥处理组,

较无肥料处理组升高了 24.75%~40.74%,较化肥处理组升高了 49.40%~68.55%。

由表 3 还可见:5 个堆肥产物处理组中,木薯秆堆肥产物处理组的土壤容重最高(1.20 g·cm⁻³),蔗渣堆肥产物处理组的土壤容重最低(0.87 g·cm⁻³);除木薯秆堆肥产物处理组的土壤容重略低于化肥处理组外,5 个堆肥产物处理组的土壤容重显著低于无肥料处理组和化肥处理组,较无肥料处理组降低了 21.57%~43.14%,较化肥处理组降低了 13.67%~37.41%。5 个堆肥产物处理组中,菠萝叶堆肥产物处理组的土壤总孔隙度最高(65.32%),椰糠堆肥产物处理组的土壤总孔隙度最低(54.37%);除椰糠堆肥产物处理组的土壤总孔隙度略高于化肥处理组外,5 个堆肥产物处理组的土壤总孔隙度显著高于无肥料处理组和化肥处理组,较无肥料处理组升高了 25.74%~51.06%,较化肥处理组升高了 13.25%~36.05%。5 个堆肥产物处理组中,蔗渣堆肥产物处理组的土壤毛管孔隙度最高(39.11%),橡胶木屑堆肥产物处理组的土壤毛管孔隙度最低(30.78%);5 个堆肥产物处理组与无肥料处理组和化肥处理组间的差异显著。

表 3 不同热带农业废弃物好氧堆肥产物对土壤主要理化指标的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Effects of aerobic compost products of different tropical agricultural wastes on main physicochemical indexes of soil ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 ²⁾ Treatment group ²⁾	有机质 含量/(g·kg ⁻¹) Organic matter content	全氮 含量/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen content	碱解氮 含量/(mg·kg ⁻¹) Alkali-hydrolyzable nitrogen content	有效磷 含量/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus content	速效钾 含量/(mg·kg ⁻¹) Available potassium content	pH 值 pH value	容重/(g·cm ⁻³) Bulk density	总孔隙度/% Total porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity
CK1	13.49±1.23c	0.86±0.04b	33.20±11.50c	7.86±0.59e	19.58±1.15c	5.94±0.20d	1.53±0.09a	43.24±3.00d	29.56±0.03g
CK2	14.14±0.81c	0.93±0.07b	89.65±3.32b	18.59±0.27d	40.11±4.01c	4.96±0.12e	1.39±0.16ab	48.01±5.18cd	34.71±0.06c
Ba	27.59±1.80a	1.69±0.49a	127.28±10.14b	22.36±2.12c	73.88±4.13a	8.36±0.32a	0.87±0.05d	61.41±1.61ab	39.11±0.01a
RS	20.83±2.77bc	1.48±0.18a	108.46±19.17b	25.32±2.08ab	71.13±0.50a	7.89±0.08b	1.07±0.09cd	58.48±3.12ab	30.78±0.07f
CH	22.69±2.31bc	1.40±0.37a	133.52±58.02a	18.39±0.70d	76.43±0.44a	7.41±0.13c	0.99±0.05cd	54.37±2.25bc	34.22±0.13d
PL	25.40±1.29bc	1.58±0.01a	100.71±3.83b	27.86±2.60a	45.11±4.05b	7.68±0.25bc	1.09±0.20cd	65.32±1.61a	36.28±0.00b
CS	18.75±4.80bc	1.54±0.19a	108.46±15.69b	24.28±1.11bc	75.43±3.25a	7.52±0.08c	1.20±0.07bc	57.98±6.62ab	32.99±0.02e

¹⁾ 同列中不同小写字母表示在不同处理组间差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different treatment groups.

²⁾ CK1: 无肥料处理组 No fertilizer treatment group; CK2: 化肥处理组 Chemical fertilizer treatment group; Ba: 蔗渣堆肥产物处理组 Bagasse compost product treatment group; RS: 橡胶木屑堆肥产物处理组 Rubber sawdust compost product treatment group; CH: 椰糠堆肥产物处理组 Coconut husk compost product treatment group; PL: 菠萝叶堆肥产物处理组 Pineapple leaf compost product treatment group; CS: 木薯秆堆肥产物处理组 Cassava stalk compost product treatment group.

3 讨论和结论

3.1 不同热带农业废弃物好氧堆肥过程中相关指标的变化特征

温度是堆肥反应无害化的重要指标之一,是判断

堆肥能否顺利进行、物料是否腐熟的一个重要参考指标^[20]。观测结果表明:供试 5 种农业废弃物好氧堆肥过程中的高温期可持续 6~11 d,满足 NY/T 525—2021 公布的腐熟标准,由此认为供试 5 种农业废弃物的堆肥产物均达到有机肥料堆肥的无害化基本要求。堆肥后,5 种农业废弃物的 pH 值均稳定在

pH 8.0左右,这可能与堆肥过程中形成了碳酸氢盐缓冲体系有关^[21-22],具体原因有待后续深入研究。各处理初始电导率差异较大,随着堆肥进程持续,各处理电导率总体呈下降趋势,最终达到稳定状态,这可能与堆肥时腐殖质、胡敏酸等有机组分的生成有关^[20]。堆肥产物培养的小白菜种子发芽指数则随着堆肥进程逐渐升高,堆肥7 d后均达到80%以上,说明供试农业废弃物在堆肥过程中逐渐腐熟,对植物的毒性越来越低,有机肥基本分解完毕^[15,19,21,23]。

本研究结果表明:5种农业废弃物堆肥后的全氮含量显著($P<0.05$)高于堆肥前,有机质含量显著低于堆肥前。究其原因可能是在不同农业废弃物的好氧堆肥过程中,含碳化合物的降解速率高于含氮化合物,随着好氧堆肥进程的持续,全氮含量的“浓缩效应”越来越明显^[24]。受浓缩效应影响,堆肥后全磷和全钾含量亦呈升高趋势。一般认为,堆肥产物的铵态氮含量低于 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 不会对作物产生不良影响^[15,21]。本研究结果显示:除蔗渣外,其余4种农业废弃物堆肥后的铵态氮含量均低于 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,据此认为,施用橡胶木屑、椰糠、菠萝叶和木薯秆堆肥产物不会对作物产生负面影响。5种农业废弃物堆肥后的硝态氮含量显著高于堆肥前,这可能是因为堆肥后期温度降低,硝化细菌活性明显高于堆肥前期,使得硝化反应能顺利进行,从而将铵态氮不断转化为硝态氮,导致硝态氮含量明显升高^[25]。

3.2 不同热带农业废弃物堆肥产物对土壤理化性质的影响

与无肥料处理组相比,5个堆肥产物处理组的土壤全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量均显著升高,说明施用供试农业废弃物堆肥产物能够有效提升土壤的全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量,土壤有机质含量总体上也呈现升高趋势^[26-27]。全氮含量是衡量土壤氮素水平的一个重要指标,与土壤中有机质的分解和积累密切相关^[28]。受土壤微生物代谢活动影响,土壤C/N通常会稳定在一定的范围内,有机碳和全氮含量会呈现相似的变化趋势^[29]。农业废弃物堆肥产物中含有大量的水溶性碳^[3,20],可为微生物生长提供充足的碳源,促进微生物繁殖,从而在土壤养分含量上表现出较化肥处理组明显升高的特征,说明堆肥产物内充足的养分不仅能够补充土壤养分,而且能够促进土壤的可持续耕作^[30]。研究表明:5个堆肥产物处理组的土壤pH值在pH 7.41至pH 8.36之

间,可有效改善土壤酸碱性。这是因为供试的5种农业废弃物的堆肥产物呈碱性,可中和土壤中的部分 H^+ ^[6]。土壤容重是衡量土壤疏松程度和孔隙状况的一个重要指标,能够反映土壤的通透性和通气性^[31]。本研究发现,不同堆肥产物均能够降低土壤容重,这可能是因为供试堆肥产物疏松多孔,含有大量的腐殖质和未腐熟生物质^[32-33]。

众所周知,土壤养分提高和物理结构改善有利于作物生长^[34-39],本研究结果也证实了这一点。总体来看,与无肥料处理组和化肥处理组相比,不同堆肥产物处理组的土壤养分水平显著提高,土壤容重显著下降,土壤总孔隙度显著升高,小白菜单株干质量显著升高。然而,本实验存在种植面积小、周期短、种植作物种类少、检测作物生长指标少等问题,后续应进行深入和系统研究,尤其要增加对大田常见作物的相关研究。

3.3 结论

依据NY/T 525—2021,供试5种热带农业废弃物好氧堆肥过程中高温期持续时间均超过5 d,pH值和电导率均达到腐熟标准,堆肥产物培养的小白菜种子发芽指数超过80%,也达到腐熟标准。5种农业废弃物的堆肥效果总体较好,其堆肥产物能够改善土壤理化性质,促进小白菜生长,其中,蔗渣、橡胶木屑和椰糠堆肥产物对小白菜的增产效果明显优于菠萝叶和木薯秆堆肥产物。

参考文献:

- [1] 彭筱迪,郑鹏,刘坤,等.农业废弃物资源化利用技术研究现状[J].中国资源综合利用,2023,41(5):120-123.
- [2] AKDENIZ N. A systematic review of biochar use in animal waste composting[J]. Waste Management, 2019, 88: 291-300.
- [3] 黄霞,何莹莹,张艺蝶,等.基于生物炭强化有机固废好氧堆肥资源化的研究进展[J].化工进展,2022,41(8):4544-4554.
- [4] SWARNAM T P, VELMURUGAN A, PANDEY S K, et al. Enhancing nutrient recovery and compost maturity of coconut husk by vermicomposting technology[J]. Bioresource Technology, 2016, 207: 76-84.
- [5] 匡石滋,田世尧,刘传和,等.香蕉菠萝茎叶堆肥对芥菜产量、品质及土壤肥力的影响[J].广东农业科学,2013,40(21):66-69.
- [6] HAWLADER N H, FAKIR M S A, AHMAD M, et al. Cassava leaf compost influences growth, yield and nutrient uptake of rice[J]. Annual Research and Review in Biology, 2020, 35(9): 23-33.
- [7] ALAVI N, SARMADI K, GOUDARZI G, et al. Attenuation of tetracyclines during chicken manure and bagasse co-composting:

- degradation, kinetics, and artificial neural network modeling[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 1203–1210.
- [8] MANCA A, DA SILVA M R, GUERRINI I A, et al. Composted sewage sludge with sugarcane bagasse as a commercial substrate for *Eucalyptus urograndis* seedling production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 269: 122145.
- [9] ARANGANATHAN L, RAJASREE S R R, GOVINDARAJU K, et al. Spectral and microscopic analysis of fulvic acids isolated from marine fish waste and sugarcane bagasse co-compost [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, 29: 101762.
- [10] 魏阳, 彭勃, 汪元南, 等. 利用复合菌系处理甘蔗渣及城市污泥堆肥效果[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(7): 316–320.
- [11] LIU X, GUO K, HUANG L, et al. Responses of absolute and specific enzyme activity to consecutive application of composted sewage sludge in a Fluventic Ustochrept[J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(5): e177796.
- [12] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征[J]. *土壤学报*, 2008, 45(3): 459–465.
- [13] 葛翠萍, 赵军, 王秀峰, 等. 东北黑土区坡耕地地形因子对土壤水分和容重的影响[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(6): 16–19.
- [14] 李志刚, 谭乐和. 海南省热带农业废弃物资源化利用状况及对策[J]. *热带农业科学*, 2009, 29(8): 47–50.
- [15] 黄艳艳, 杨旭, 杨红竹, 等. 碳氮比对热带地区鸡粪和蔗渣堆肥腐熟进程的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(21): 61–68.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [17] 王国英, 袁京, 孔艺霖, 等. 堆肥种子发芽指数测定方法与敏感性种子筛选[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 220–227.
- [18] 衡曦彤. 矿源腐植酸菌剂对小白菜生长和土壤性质的影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021: 12–13.
- [19] 王玮璐, 贺康宁, 张潭, 等. 青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和导水率和持水能力的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(2): 69–77.
- [20] 王国英, 袁京, 孔艺霖, 等. 堆肥种子发芽指数测定方法与敏感性种子筛选[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 220–227.
- [21] 邵森, 杨淑英, 张增强, 等. 不同处理对高含水率奶牛粪堆肥的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 982–989.
- [22] BRITO L M, COUTINHO J, SMITH S R. Methods to improve the composting process of the solid fraction of dairy cattle slurry[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 8955–8960.
- [23] 李荣华, 张广杰, 秦睿, 等. 粉煤灰和猪粪好氧混合堆肥过程中养分转化研究[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(4): 100–105, 142.
- [24] KARWAL M, KAUSHIK A. Co-composting and vermicomposting of coal fly-ash with press mud: changes in nutrients, micronutrients and enzyme activities[J]. *Environmental Technology and Innovation*, 2020, 18: 100708.
- [25] THOMPSON A G, WAGNER-RIDDLE C, FLEMING R. Emissions of N₂O and CH₄ during the composting of liquid swine manure[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, 91: 87–104.
- [26] 程艳丽, 邹德乙. 长期定位施肥残留养分对作物产量及土壤化学性质的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(1): 64–67.
- [27] 孙瑞莲, 朱鲁生, 赵秉强, 等. 长期施肥对土壤微生物的影响及其在养分调控中的作用[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1907–1910.
- [28] 朱秋莲. 论土壤氮素循环研究现状及发展前沿[J]. *西藏农业科技*, 2013, 35(2): 9–16.
- [29] 陈浩天, 张地方, 张宝莉, 等. 园林废弃物不同处理方式的环境影响及其产物还田效应[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 239–244.
- [30] 曹云, 黄红英, 吴华山, 等. 超高温堆肥提高土壤养分有效性和水稻产量的机理[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 481–491.
- [31] 游浩宇, 陈大刚, 徐开未, 等. 不同改良措施对猕猴桃园土壤理化性质变化的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2022, 40(6): 826–837.
- [32] 刘国伟. 长期施用生物有机肥对土壤理化性质影响的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004: 40.
- [33] 李彬, 潘根兴, 王维锦, 等. 施用生物质炭对葡萄生长及土壤肥力的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46(5): 1168–1173.
- [34] 孔凡磊, 陈阜, 张海林, 等. 轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 150–155.
- [35] 侯贤清, 李荣. 免耕覆盖对宁南山区土壤物理性状及马铃薯产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 112–119.
- [36] 王海候, 陆长婴, 沈明星, 等. 炭基有机肥对水稻产量及土壤养分的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(7): 104–107.
- [37] 廖磊, 熊峰, 周月明, 等. 农业废弃物堆肥碳素动态转化规律及其在柑橘园的施用效果[J]. *湖北农业科学*, 2020, 59(2): 30–36.
- [38] 郭春铭. 生猪养殖垫料快腐菌剂筛选及堆肥在蔬菜上的应用效果研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012: 43–44.
- [39] 任红楼. 有机废弃物的堆肥化处理及在茶园中的应用效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009: 41–42.

(责任编辑: 佟金凤)