

添加不同物料对蟹味菇菌渣堆肥的影响

汪峰¹, 湛江华¹, 姚红燕^{1*}, 胡振华², 顾增富², 戴瑶璐¹

(1. 宁波市农业科学研究院, 浙江宁波 315040; 2. 浙江恒海农业开发有限公司, 浙江宁波 315199)

摘要 [目的] 研究堆肥过程中温度、pH、有机碳、全量养分(全氮、全磷、全钾)和 C/N 的动态变化。[方法] 以蟹味菇菌渣作为主要堆肥原料进行高温堆肥试验, 设置: 纯菌渣(T₁)、菌渣: 猪粪=8:2(T₂)、菌渣: 猪粪=6:4(T₃)、菌渣: 猪粪=5:5(T₄)、菌渣: 羊粪=6:4(T₅)、菌渣: 猪粪: 水稻秸秆粉碎物=6:2:2(T₆), 研究堆肥过程中温度、pH、有机碳、全氮、全磷、全钾和 C/N 的动态变化。[结果] 堆体温度在 4 d 后均达到 50 ℃ 以上, 保持高温 30~40 d 后开始下降, 其中 50 ℃ 以上持续时间 T₁ 处理高达 40 d, 而 T₂、T₃ 处理仅为 27 d; 堆肥 pH 呈先快速上升后缓慢下降的趋势, 由开始的偏酸性(pH 5.5~6.7)到堆制结束时呈弱碱性(pH 7.5~8.3); 堆制过程中有机碳持续缓慢下降, 至堆肥结束时不同处理平均下降了 53.9%; 堆肥全氮含量在 9 d 前均先快速上升, 在 9~45 d 缓慢下降; 菌渣的比例越高, 堆制前后全氮增加幅度越高(T₆ 除外), 而全磷和全钾随着堆肥进程而逐渐被浓缩, 至堆肥结束均表现为 T₃ 和 T₄ 处理较高, 而 T₁ 和 T₅ 处理较低。[结论] 综合考虑堆肥质量和堆期等因素, 利用蟹味菇菌渣为主要原料规模化生产有机肥, T₂ 和 T₆ 处理的配方较适宜。

关键词 菌渣; 堆肥; 农业废弃物; 有机肥; 碳氮比; 蟹味菇

中图分类号 S141.4 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2018)14-0128-04

Effect of Different Materials on Fertilizer Efficiency during Co-composting with Spent Mushroom Substrate(*Hypsizygus marmoreus*)
WANG Feng, CHEN Jiang-hua, YAO Hong-yan et al (Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo, Zhejiang 315040)

Abstract [Objective] To study effect of different materials on fertilizer efficiency during co-composting with spent mushroom substrate(*Hypsizygus marmoreus*). [Method] The present study was designed to promote cyclic utilization of agricultural waste resources by taking *Hypsizygus marmoreus* residues (HMR) as investigated subject. Six treatments with varying compost composition (T₁, HMR; T₂, HMR: pig manure = 8:2; T₃, HMR: pig manure = 6:4; T₄, HMR: pig manure = 5:5; T₅, HMR: goat manure = 8:2; T₆, HMR: pig manure: rice straw = 6:2:2) were conducted to study dynamic changes of temperature, pH, organic carbon (OC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total potassium (TK) and C/N ratio during the natural fermentation. [Result] The temperature of all treatments were over 50 ℃ at about 4rd day. It maintained a high temperature from 30 to 40 d, and then began to decrease. Duration of the high-temperature composting in T₁ was 40 d, while T₃ and T₄ were 27 d. The pH of all treatments increased rapidly and then decreased smoothly, changing from faintly acid (pH 5.5-6.7) to alkalescency (pH 7.5-8.3). The OC content decreased in general, which decreased by an average of 53.9% at the end of the composting. The TN content increased rapidly from 0 to 9 d, and then decreased slowly until 45 d, which were increased greater while the ratio of the HMR got more until the end of the composting. However, TP and TK contents had been on a slow upward trend, Both of which were higher in T₃ and T₄, while lower in T₁ and T₅. [Conclusion] Considering the factors of the compost quality and production cycle comprehensively, the appropriate compost composition is T₂ and T₆ for making scale production of organic fertilizer using *Hypsizygus marmoreus* residues.

Key words Edible fungi residue; Composting; Agricultural wastes; Organic fertilizer; C/N ratio; *Hypsizygus marmoreus*

我国是食用菌生产大国, 2013 年产量超过 3 169 万 t, 食用菌年生产量占世界 75% 左右, 年产值超过 2 000 亿元^[1-2]。食用菌生产主要利用作物秸秆、木屑、棉籽壳、牲畜粪便等副产物, 通过生物转化生产人类需要的优质蛋白质源^[3]。然而, 随着我国食用菌生产规模的不断扩大, 作为食用菌副产物的菌渣不合理利用(焚烧、丢弃), 给当前我国食用菌产业和农村生态环境带来不良影响。研究表明, 菌渣中含有大量的菌体蛋白质、代谢产物和其他未被充分利用的营养成分^[4-5], 大量养分元素含量甚至高于鲜粪。通过无害化堆肥的方式实现食用菌菌渣的资源化循环利用, 可以避免资源浪费^[6]、提高土壤生产潜力^[7-10]、修复污染土壤^[11-12], 并减少自身对生态环境造成的污染^[13-15]。

为了获得成熟的菌渣有机肥生产技术, 需要对菌渣堆肥的控制工艺开展深入研究, 实现菌渣废弃物的减量化、资源化、无害化利用^[16]。近年来, 在以金针菇^[14, 17-18]、双孢蘑菇^[19]、杏鲍菇^[10]、香菇^[20]、秀珍菇^[21]等菌渣为主要原料的快

速堆肥过程研究方面取得了显著进展, 然而不同食用菌资源的栽培基质配方差异较大, 有关蟹味菇菌渣堆肥技术研究较少。在国内蟹味菇产业高速发展形势下, 为了更好地开发利用蟹味菇菌渣, 笔者设置菌渣与有机物料(猪粪、羊粪、稻草)的高温堆肥试验, 研究堆肥过程中温度、pH、有机碳、全量养分(全氮、全磷、全钾)和 C/N 的动态变化, 以期对菌渣有机肥堆制工艺优化和农业废弃物资源循环利用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料 堆肥材料中的菌渣为蟹味菇菌渣, 蟹味菇栽培基质由木屑、玉米芯、棉籽皮、米糠、麦麸等按一定比例配方而成。菌渣由慈溪市瑞丰农业投资有限公司提供, 猪粪、羊粪和稻草均由浙江恒海农业开发有限公司提供, 供试材料基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计 堆肥以蟹味菇菌渣、畜禽粪便(猪粪、羊粪)、水稻秸秆粉碎物为主要原料, 每个处理体积为 2 m³, 根据菌渣与不同有机物料体积的不同比例设置 6 个处理: T₁ 纯菌渣; T₂ 菌渣: 猪粪 = 8:2; T₃ 菌渣: 猪粪 = 6:4; T₄ 菌渣: 猪粪 = 5:5; T₅ 菌渣: 羊粪 = 6:4; T₆ 菌渣: 猪粪: 水稻秸秆粉碎物 = 6:2:2。堆肥从 2017 年 8 月 23 日至 10 月 24 日, 堆期 63 d。堆肥采用传统式堆肥, 制作方法参照当地生产工艺, 将

基金项目 宁波市科技富民项目(2016C10032); 宁波市生态循环农业项目(2015ST006); 宁波市农村科技创新创业资金项目(2014C92012)。

作者简介 汪峰(1982—), 男, 安徽潜山人, 助理研究员, 博士, 从事农业资源利用研究。* 通讯作者, 高级农艺师, 硕士, 从事农业资源利用研究。

收稿日期 2018-02-26

原材料用搅拌机充分搅拌均匀后堆放于发酵槽中,调节初始含水率至 50%~60% 进行发酵,每 10 d 进行人工翻堆 1 次。

表 1 供试材料基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical characteristics of compost materials

材料 Material	含水率 Water content %	有机碳 Organic C g/kg	全氮 Total N g/kg	全磷 Total P g/kg	全钾 Total K g/kg	总养分 Total nutrient g/kg	C/N	pH (2.5:1.0)
菇渣 Mushroom residue	50.5	293	22.6	7.1	23.2	52.8	13.0	5.53
猪粪 Pig manure	59.6	198	31.5	26.1	17.1	74.7	6.3	7.77
羊粪 Goat manure	21.6	281	30.3	14.9	16.3	61.5	9.3	7.82
稻草粉碎物 Rice straw	23.7	424	11.5	1.2	6.3	19.0	36.9	6.85

1.3 测定项目与方法 堆体温度调查:堆肥开始后,将温湿度记录仪探头置于堆体中心位置,每隔 24 h 定时监测堆温,同时记录环境温度。

样品采集与测试:分别在 0、9、18、27、36、45、54、63 d 采用多点法采集堆肥样品,塑封袋保存带回实验室,用于理化性质的分析。pH 采用玻璃电极测定,水土比 2.5:1.0;有机碳采用重铬酸钾容量法测定;全氮采用半微量开氏法测定;全磷采用碳酸钠熔融法测定;速效磷采用 Olsen-P 法浸提,钼锑抗比色测定;全钾用氢氧化钠熔融法测定;速效钾采用醋酸铵浸提,火焰光度法测定^[22]。

1.4 数据处理与分析 试验数据采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,用单因素方差分析法(one-way ANOVA)中的 Duncan 新复极差法进行不同处理样本间的差异显著性分析($P < 0.05$),均采用 Excel 2013 软件做图。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度的变化 堆肥过程中温度的变化反映了堆体内微生物活性的变化,同时又是使堆肥达到无害化和稳定化的重要条件,是堆肥工艺过程中的关键因素^[16]。堆沤过程一般分为 4 个阶段:升温、高温、降温及平稳阶段。温度过低不足以杀死有害病原菌,有机质降解缓慢,进而延长有机肥生产周期。而温度过高($>65\text{ }^{\circ}\text{C}$)则杀死部分有益微生物,延缓堆肥进程,同时增加氮挥发损失量。前期研究证实有机固体废弃物最佳堆肥温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[17]。

由图 1 可知,堆肥过程中,周围环境温度(AT)在 $16.5\sim 31.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;堆肥前期(0~5 d)堆温快速上升,堆制 4 d 后均达 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,原料中易分解有机质被微生物分解转化,产生大

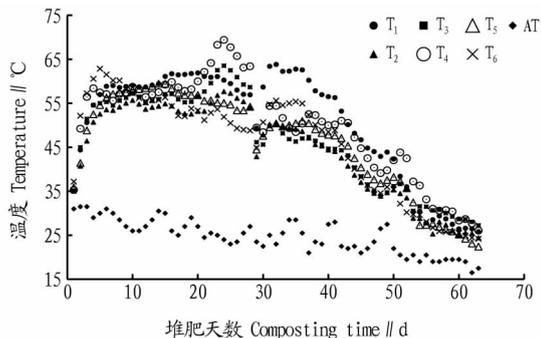


图 1 不同处理温度的变化

Fig. 1 Change of temperature under different treatments

量热量。高温持续时间在不同堆肥处理中存在差异(表 2),不同处理 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上持续时间表现为 $T_1 > T_4 > T_6 > T_5 > T_2 = T_3$, T_1 处理高达 40 d,而 T_2 、 T_3 处理仅为 27 d。其中 T_1 、 T_3 、 T_4 、 T_6 处理的堆肥最高温度可达 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,其保持 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的时间分别为 17、4、8、5 d。因此,该研究所有处理堆温与持续时间均达到我国制定的《粪便无害化卫生标准(GB 7959—2012)》。在堆肥时间达 30~40 d 后,堆肥温度缓慢下降,通过 20~30 d 的稳定腐熟化过程,温度趋于环境温度。

表 2 不同处理高温持续时间

Table 2 Duration time of the high-temperature composting under different treatments

处理 Treatment	高温持续时间 Duration time of the high temperature composting			低温腐熟开始时间 Start time of low temperature composting
	$>50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$>60\text{ }^{\circ}\text{C}$	$>65\text{ }^{\circ}\text{C}$	
T_1	40	17	0	43
T_2	27	0	0	32
T_3	27	4	0	32
T_4	36	8	4	43
T_5	30	0	0	37
T_6	33	5	0	38

2.2 堆肥过程中 pH 的变化 pH 是反映堆肥过程的重要参数,堆体中的微生物需要在一定 pH 范围内发挥活性,因此适宜的 pH 可以最大程度地保留堆肥中的有效养分,从而提高堆肥效率和质量。一般认为堆肥过程的适宜 pH 为 $6.5\sim 7.5$ 。由图 2 可知,堆制开始(0 d)各处理的 pH 在 $5.5\sim 6.7$,偏酸性,其中 T_1 处理的 pH 最低,而 T_4 最高。各处理 pH 在 0~9 d 快速上升,然后开始缓慢下降,并趋于稳定。堆制前期由于有机氮在微生物作用下发生了强烈的矿化分解,并产生大量的 NH_3 ,导致 pH 快速上升;随后多次翻堆使 NH_3 大量挥发,另外硝化作用加强,产生大量的 H^+ ,使 pH 回落,最终达到稳定平衡,堆肥结束时(63 d),各堆肥处理 pH 表现为 $T_3 > T_4 > T_2 > T_5 = T_6 > T_1$,pH 在 $7.5\sim 8.3$,均呈弱碱性。

2.3 堆肥过程中养分的变化 在堆肥过程中,有机物不断分解成 CO_2 、 H_2O 、 NH_3 等物质损失,碳和氮绝对量及总干物质量随着堆肥的进程逐渐减少,而磷和钾绝对量不会出现大的变化。但由于不同堆肥处理的速率和效果不同,因此堆肥中 N、P、K 总养分的相对含量变化存在差异。

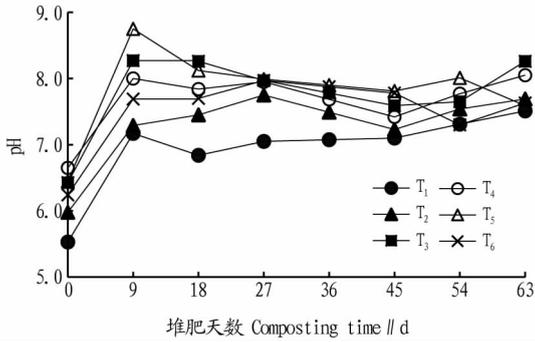


图2 不同处理 pH 的变化

Fig. 2 Change of pH under different treatments

由图3可知,各处理全氮含量在0~9 d快速上升,随后缓慢下降,45 d后又逐渐上升。前期全氮含量快速上升反映了堆肥经过高温后的快速腐熟,干物质迅速下降;随后有机

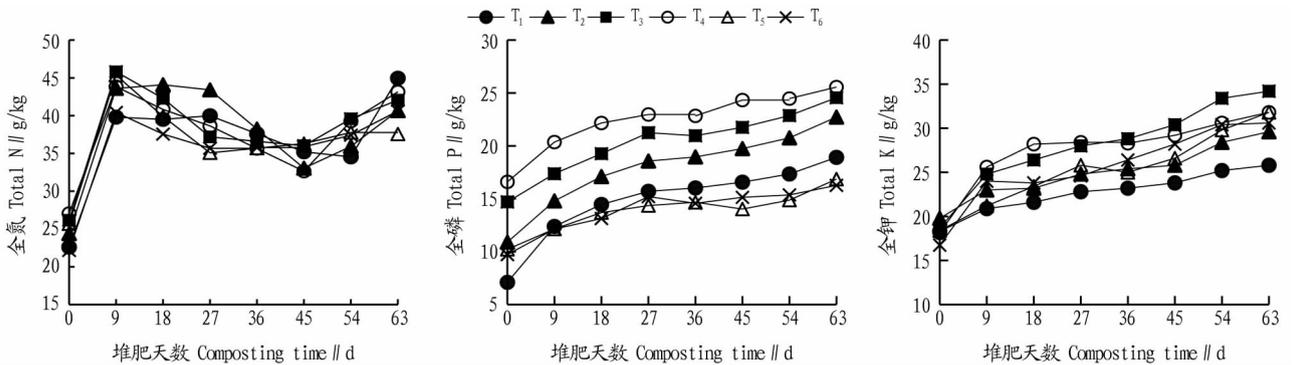


图3 不同处理堆肥养分的变化

Fig. 3 Changes of nutrient under different treatments

碳持续缓慢下降,至堆肥结束时下降了53.9%。有机碳降解

氮矿化生成的 NH_3 随着翻堆损失,使堆肥中的总氮下降;堆肥后期温度急剧下降, NH_3 损失开始减少,但有机物持续损失,导致总干物质下降幅度大于全氮损失幅度,堆肥全氮含量出现一定回升。菌渣的比例越高,堆制前后全氮增加幅度越高(T_6 除外)。堆制结束时 T_1 处理的全氮含量最高,达45.0 g/kg,比堆制0 d增加98.9%;而 T_5 处理全氮含量最低,仅为37.6 g/kg,比堆制前增加46.3%。

堆肥过程中全磷和全钾的变化趋势大致相同,其含量在0~9 d快速上升,随后上升幅度缓慢。由于有机物质的降解造成干物质减少,全磷和全钾等养分表现出“浓缩效应”。堆肥结束时各处理全磷和全钾平均含量分别比0 d增加9.3和12.3 g/kg,最终全磷含量表现为 $T_4 > T_3 > T_2 > T_1 > T_5 > T_6$,全钾含量表现为 $T_3 > T_4 = T_5 > T_6 > T_2 > T_1$,全磷和全钾含量均为 T_3 和 T_4 处理较高。

2.4 堆肥过程中有机碳和 C/N 的变化 堆肥中易被微生物利用的有机物占60%~70%,被分解的有机物以 CO_2 的形式损失,因此通过堆肥可实现有机物料减量化和矿质养分浓缩,提高堆肥肥效。从图4可以看出,在整个堆制阶段,有机碳持续缓慢下降,至堆肥结束时下降了53.9%。有机碳降解

幅度受堆肥原料成分的影响,其中加入羊粪的 T_5 处理下降幅度最高,达65.6%,加入猪粪和稻草秸秆粉碎物的 T_6 处理下降54.8%。而对于不同猪粪和菌渣配比的堆制,菌渣比例越高,有机碳损失越大,这可能与适宜C/N有利于微生物活性发挥有关。

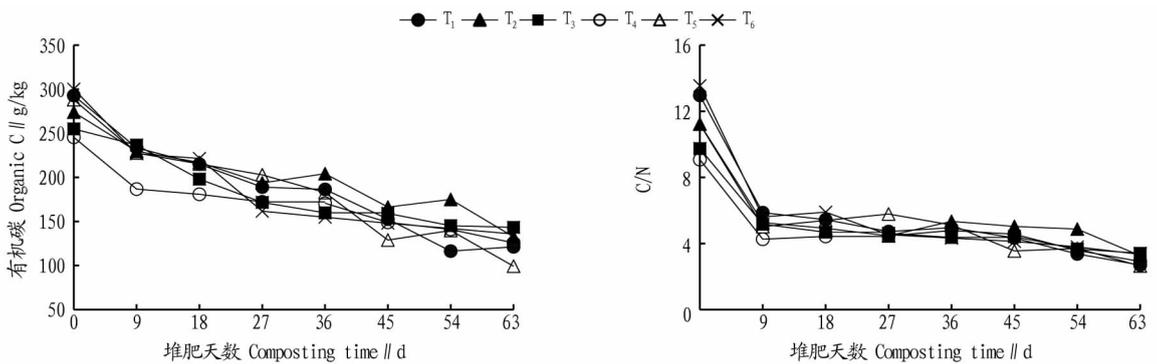


图4 不同处理有机碳和 C/N 的变化

Fig. 4 Changes of organic C and C/N under different treatments

3 讨论

(1) Meng 等^[23]研究表明,菌渣堆肥在5 d后温度达到50℃,但添加猪粪处理的高温持续时间较纯菌渣处理时间延长,抗病微生物多样性增加,碳降解微生物和植物病原真菌相对数量减少。该研究中高温持续时间与 Meng 等^[23]研究结果不一致,可能原因是堆制原料的不同,该研究蟹味菇

基质氮素营养充足,且采用的是瓶装灭菌方法,其栽培后微生物数量偏少,导致后续堆肥发酵时间更长。

堆肥温度高低变化及高温持续时间受物料C/N影响,理论上微生物分解有机物较适宜的C/N为25左右^[16]。过高或过低的C/N均会抑制微生物的生长和活性,进而影响堆肥温度。该研究各处理温度均符合堆肥腐熟要求,表明

C/N 能满足微生物活动的要求,而 T_1 处理(纯菌渣)中高温持续时间较其他处理长,一方面可能是菌渣中难分解的纤维素含量较高,另一方面食用菌培养料经过灭菌处理,没有外源菌剂添加情况下,菌渣中微生物群落结构简单,影响了堆制腐熟时间。 T_4 处理有 4 d 堆肥温度超过 $65\text{ }^\circ\text{C}$,过高的温度会杀死部分有益微生物,延缓了堆肥进程,不利于优质有机肥工业化生产^[6]。

(2) C/N 是评价堆肥腐熟程度的主要参数之一,一般认为腐熟的堆肥 C/N 小于 20。该研究堆肥 C/N 在前期快速下降,第 9 天不同处理的 C/N 已相对接近,为 4.3 ~ 5.9,后期 C/N 缓慢下降,至堆肥结束时 C/N 均降至 3.0 左右,达到堆肥腐熟标准。研究表明,以猪粪为主要原料的堆肥 C/N 为 25 ~ 30,有利于发挥微生物最大活性^[24]。而该研究除稻草秸秆外,其余 3 种主要原料 C/N 均较低,各处理初期 C/N 在 9.1 ~ 13.5,属于偏低水平,因此未来大规模菌渣有机肥堆制中应加大高 C/N 有机物料(如秸秆、米糠等)的投入。

(3) 目前,我国东部沿海地区食用菌产业已形成集群效应,部分蟹味菇生产企业每日可产出菌渣 10 t 以上。通过对堆肥工艺的优化可以促进菌渣、畜禽粪便等农业废弃物进行合理利用,未来需进一步联合食用菌生产企业、有机肥生产企业和种植农户,将农业生态循环与盐渍土改良结合起来,形成区域内部绿色、节能、高效的物质循环模式。

4 结论

(1) 从堆肥进程上考虑, T_1 (纯菌渣)处理的发酵时间最长, $50\text{ }^\circ\text{C}$ 以上持续时间高达 40 d, T_2 (菌渣:猪粪 = 8:2) 和 T_3 (菌渣:猪粪 = 6:4) 处理的堆制时间较纯菌渣处理缩短了 13 d, T_5 (菌渣:羊粪 = 6:4) 和 T_6 (菌渣:猪粪:水稻秸秆粉碎物 = 6:2:2) 处理较纯菌渣处理缩短了 7 ~ 10 d, 从有机肥规模化生产效率上考虑, T_2 、 T_3 处理最适宜。

(2) 从堆肥质量上考虑,各处理堆温均符合《粪便无害化卫生标准》,达到杀菌杀虫效果;堆肥最终 pH 在 7.5 ~ 8.3, T_3 和 T_4 处理超过 8.0;除 T_6 处理外,菌渣比例越高,堆制前后全氮增加幅度越高,全磷和全钾含量均表现为 T_3 和 T_4 处理较高,而 T_1 和 T_5 处理较低。

(3) 综合考虑堆肥进程和堆肥质量,利用蟹味菇菌渣为主要原料规模化生产有机肥,使用 T_2 (菌渣:猪粪 = 8:2) 和 T_6 (菌渣:猪粪:水稻秸秆粉碎物 = 6:2:2) 处理的配方较适宜。

(4) 当前稻草秸秆的粉碎技术及其利用成本过高是制约利用其进行堆肥的主要因素,由于猪粪和菌渣的 C/N 均较低,建议适当增加米糠等 C/N 较高的添加料,进一步提高堆肥效率。

参考文献

[1] 李芬妮,张俊彪,沈雪.我国食用菌产业布局变迁的态势分析[J].食药

- 用菌,2017(1):1-5.
- [2] 张俊彪,李鹏.我国食用菌新兴产业发展的战略思考与对策建议[J].华中农业大学学报(社会科学版),2014,33(5):1-7.
- [3] 严玲,姜庆,王芳.食用菌菌渣循环利用模式剖析:以成都市金堂县为例[J].中国农学通报,2011,27(14):94-99.
- [4] 韩建东,官志远,姚强,等.金针菇菌渣栽培秀珍菇的营养成分分析[J].中国食用菌,2013,32(6):30-31,35.
- [5] 匡云波,蔡丽婷,叶智文,等.金针菇栽培原料与菌渣中营养成分的变化分析[J].亚热带农业研究,2017,13(3):187-190.
- [6] HUBBE M A, NAZHAD M, SANCHEZ C. Composting as a way to convert cellulosic biomass and organic waste into high-value soil amendments: A review[J]. BioResources, 2010, 5(4):2808-2854.
- [7] MI W H, WU L H, BROOKES P C, et al. Changes in soil organic carbon fractions under integrated management systems in a low-productivity paddy soil given different organic amendments and chemical fertilizers[J]. Soil and tillage research, 2016, 163:64-70.
- [8] ZHANG L, SUN X Y. Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar[J]. Bioresource technology, 2014, 171:274-284.
- [9] MI W H, SUN Y, XIA S Q, et al. Effect of inorganic fertilizers with organic amendments on soil chemical properties and rice yield in a low-productivity paddy soil[J]. Geoderma, 2018, 320:23-29.
- [10] LOU Z M, SUN Y, ZHOU X X, et al. Composition variability of spent mushroom substrates during continuous cultivation, composting process and their effects on mineral nitrogen transformation in soil[J]. Geoderma, 2017, 307:30-37.
- [11] KÄSTNER M, MILTNER A. Application of compost for effective bioremediation of organic contaminants and pollutants in soil[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2016, 100(8):3433-3449.
- [12] ASEMOLOYE M D, JONATHAN S G, JAYEOLA A A, et al. Mediatonal influence of spent mushroom compost on phytoremediation of black-oil hydrocarbon polluted soil and response of *Megathyrus maximus* Jacq. [J]. Journal of environmental management, 2017, 200:253-262.
- [13] 孙建华,袁玲,张翼.利用食用菌菌渣生产有机肥料的研究[J].中国土壤与肥料,2008(1):52-55.
- [14] 张云飞,郭旭晶,代莉蓉,等.金针菇菌渣堆肥生产有机肥的研究[J].中国沼气,2015,33(6):24-27.
- [15] 张园,耿春女,何承文,等.堆肥过程中有机质和微生物群落的动态变化[J].生态环境学报,2011,20(11):1745-1752.
- [16] 李季,彭生平.堆肥工程实用手册[M].2版.北京:化学工业出版社,2011.
- [17] 周江明,王利通,徐庆华,等.适宜猪粪与菌渣配比提高堆肥效率[J].农业工程学报,2015,31(7):201-207.
- [18] CAI M M, ZHANG K, ZHONG W D, et al. Bioconversion-composting of golden needle mushroom (*Flammulina velutipes*) root waste by black soldier fly (*Hermetia illucens*, Diptera:Stratiomyidae) larvae, to obtain added-value biomass and fertilizer[J]. Waste and biomass valorization, 2017, 9:1-9.
- [19] 胡清秀,卫智涛,王洪媛.双孢蘑菇菌渣堆肥及其肥效的研究[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1902-1909.
- [20] 田伟,刘明庆,席运官.微生物菌剂对以猪粪和香菇菌渣为原料的快速堆肥过程的影响[J].江苏农业科学,2013,41(6):301-304.
- [21] 周祖法,闫静,王伟科,等.不同配方菌渣堆肥效果比较[J].浙江农业科学,2017,58(1):171-173.
- [22] 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.
- [23] MENG X Y, LIU B, XI C, et al. Effect of pig manure on the chemical composition and microbial diversity during co-composting with spent mushroom substrate and rice husks[J]. Bioresource technology, 2018, 251:22-30.
- [24] 秦莉,沈玉君,李国学,等.不同 C/N 比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2668-2673.