

刘林培,管秀琼,李俊,等.食用茵菌渣协同白酒丢糟堆肥效果研究[J].江苏农业科学,2019,47(23):294-298.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.23.070

食用茵菌渣协同白酒丢糟堆肥效果研究

刘林培¹,管秀琼¹,李俊²,胡海军²,马永鹏¹

(1.四川轻化工大学生物工程学院,四川自贡 643000; 2.四川轻化工大学机械工程学院,四川自贡 643000)

摘要:为探究食用茵菌渣协同白酒丢糟堆肥效果,研究食用茵菌渣添加比例及其对堆肥的影响,用白酒丢糟为主料,食用茵菌渣为辅料,进行了为期 26 d 的堆肥试验,以期白酒丢糟堆肥技术提供新的参考。结果表明,以堆肥过程中色度、温度、pH 值、电导率(EC 值)、有机质含量及其降解率、C/N、T 值、水溶性有机碳及其与总有机氮的比值等判断,白酒丢糟堆肥添加食用茵菌渣的最佳比例为 20%~30%。其工艺参数:初始含水率为 55%,初始 pH 值为 6.5,连续通风量为 1.5 L/min,初始 C/N 为 26.5~29。

关键词:白酒丢糟;食用茵菌渣;堆肥;工艺参数

中图分类号: S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)23-0294-05

利用白酒丢糟制作有机肥,既能解决环保问题,又可实现资源再利用,具有较高的环保、经济和社会效益^[1]。由于丢糟本身的 C/N 和营养条件等均不适合直接堆肥^[2],必须外加氮源、营养元素和微量元素,而添加化学物质(如尿素)会极大增加生产和技术成本,严重制约丢糟有机肥的发展。

食用茵菌渣是食用茵收获后残留的物质,由菌丝体和大量的剩余营养组成。我国每年会产生约 5 214 万 t 的食用茵菌渣^[3]。由于食用茵菌渣体积密度低,无植物致病菌,并且含有蛋白酶、木质素分解酶、纤维素酶、半纤维素酶等多种酶

和大量的微量元素^[3-4],可以促进纤维素和木质素的降解,所以食用茵菌渣在堆肥中具有广阔的应用价值。本试验拟探究白酒丢糟堆肥添加食用茵菌渣的最佳比例及其影响,以期白酒丢糟堆肥技术提供新的参考。

1 材料与方法

1.1 堆肥材料

试验所用白酒丢糟取自四川某酒厂;食用茵菌渣取自四川自贡某农场;复合发酵菌剂为自购市售,有效菌种主要为枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、绿色木霉和酿酒酵母等,有效活菌数 ≥ 200 亿个/g。堆肥原料的物理和化学性质如表 1 所示。

1.2 堆肥反应器

如图 1 所示,堆肥反应器(0.45 m \times 0.4 m \times 0.3 m)底部装有多孔透气 PVC(聚氯乙烯)板和通气管道,外接充氧装

收稿日期:2019-08-30

基金项目:四川轻化工大学研究生创新基金(编号:Y2018062)。

作者简介:刘林培(1994—),男,四川什邡,硕士研究生,主要从事轻工废弃物资源化利用研究。E-mail: lpliu1994@163.com。

通信作者:管秀琼,硕士,教授,主要从事轻工废弃物资源化利用研究。E-mail: xqguan2004@163.com。

herbicides and booster biocides along estuarine continuums in the Bay of Vilaine area (Brittany, France) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(2): 651-666.

[11] 徐雄,李春梅,孙静,等.我国重点流域地表水中 29 种农药污染及其生态风险评价[J].生态毒理学报,2016,11(2): 347-354.

[12] Barchanska H, Sajdak M, Szczypka K, et al. Atrazine, triketone herbicides, and their degradation products in sediment, soil and surface water samples in Poland [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, 24(1): 644-658.

[13] Papadakis E N, Vryzas Z, Kotopoulou A, et al. A pesticide monitoring survey in rivers and lakes of northern Greece and its human and ecotoxicological risk assessment [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 116: 1-9.

[14] Papadakis E N, Tsaoulas A, Kotopoulou A, et al. Pesticides in the surface waters of Lake Vistonis Basin, Greece: occurrence and environmental risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2015, 536(3): 793-802.

[15] Herrero Hernández E, Rodríguez Cruz M S, Posejman E, et al. Seasonal

distribution of herbicide and insecticide residues in the water resources of the vineyard region of La Rioja (Spain) [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 161-171.

[16] 徐英江,刘慧慧,任传博,等.莱州湾海域表层海水中三嗪类除草剂的分布特征[J].渔业科学进展,2014,35(3): 34-39.

[17] 钟志,刘士忠,郭远明,等.三唑磷在养殖泥蚶和缢蛏中的积累和消除规律[J].中国兽药杂志,2007,41(5): 18-20.

[18] Sheikh M A, Juma F S, Staehr P, et al. Occurrence and distribution of antifouling biocide Irgarol-1051 in coral reef ecosystems, Zanzibar [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 109(1): 586-590.

[19] Konda L N, Pásztor Z. Environmental distribution of acetochlor, atrazine, chlorpyrifos, and propisochlor under field conditions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(8): 3859-3863.

[20] 智昕,牛军峰,唐阵武,等.长江水系武汉段典型有机氯农药的生态风险评价[J].环境科学学报,2008,28(1): 168-173.

[21] 赵建亮,应光国,魏东斌,等.水体和沉积物中毒害污染物的生态风险评价方法体系研究进展[J].生态毒理学报,2011,6(6): 577-588.

表 1 堆肥原料的物理和化学性质

原料	含水率 (%)	pH 值	有机质含量 (%)	总氮含量 (%)	C/N
白酒丢糟	69.75 ± 0.20	3.16 ± 0.07	82.60 ± 0.52	2.48 ± 0.03	19.26 ± 0.19
食用菌菌渣	38.16 ± 0.17	9.03 ± 0.06	81.06 ± 0.08	1.37 ± 0.07	34.36 ± 1.74

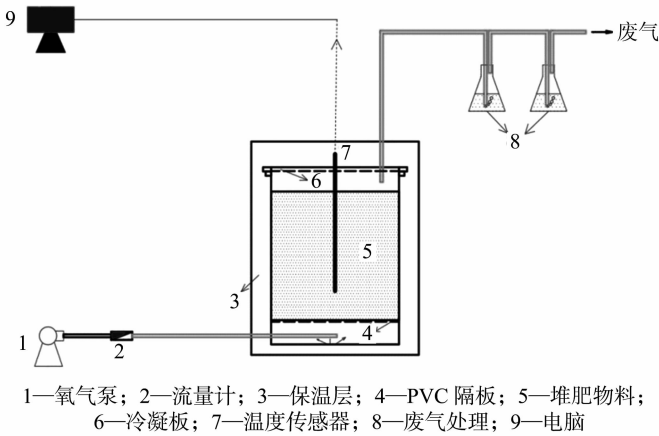


图1 堆肥反应器示意

置,提供系统通风;反应器顶部附着冷凝板,可使水汽冷凝回流,降低反应器含水率挥发速率;反应器中配有温度传感器,与电脑连接,用于监测系统温度。

1.3 堆肥系统与取样

以白酒丢糟为主料,食用菌菌渣为辅料,均以物料绝干质量的 0.1% 添加复合发酵菌剂,同时调节各堆肥系统初始环境(含水率为 55%,pH 值为 6.5),使其相同,设置通气量为 1.5 L/min,进行连续通风。将堆肥试验设计为 4 组不同食用菌菌渣添加比例[20%(T1)、30%(T2)、40%(T3)、50%(T4)],每组重复 3 次,进行为期 26 d 的试验。在堆肥后 0、2、4、7、11、18、21、26 d 对堆体进行物理外观变化的记录;在堆肥后 0、1、4、7、11、14、17、20、26 d 对系统进行人工翻堆,同时从每个堆肥系统的下部,中央和上部均匀混合采集新鲜样品(200 g 左右),将其分成 2 等份,1 份鲜样放置在 4 ℃ 处保存,进行色度、含水率、pH 值、电导率(EC 值)、氨态氮和硝态氮含量、可溶性有机碳含量的分析;1 份风干样粉碎过 0.25 mm 筛网,对总氮和有机质含量进行分析。

电脑通过温度传感器自动记录温度;将去离子水与堆肥鲜样在 1 g : 10 mL、30 ℃ 和 200 r/min 的条件下水平振荡 1 h,得到样品悬浮液。将悬浮液在 10 000 r/min 情况下离心 30 min 后通过 0.45 μm 水系滤器,得到堆肥浸提液^[5],进行色度、pH 值、EC 值、氨态氮和可溶性有机碳分析。色度、pH 值、EC 和可溶性有机碳用 XZ - WS 色度检测仪、雷磁 PHS - 3C 型酸度计、雷磁 DDS - 307A 型电导率仪和总有机碳 - 总氮分析仪(SHIMADZU TOC - V 系列)分别测定;凯氏氮含量用凯氏定氮法测定;氨态氮和硝态氮含量按照 NY/T 1116—2014《硝态氮、铵态氮、酰胺态氮含量的测定》进行测定;总氮含量等于凯氏氮含量加硝态氮含量,总有机氮含量等于凯氏氮含量减去氨态氮含量^[1];含水率在 105 ℃ 干燥 24 h 后测定;灰分用马弗炉 550 ℃ 炉温,保温 24 h 后测定;有机质含量是干质量与灰分之差^[6];有机碳含量根据公式:有机碳含

量 = $\frac{1 - \text{灰分含量}}{1.724} \times 100\%$ 计算。

1.4 数据分析

使用 Excel 2010 和 IBM SPSS 20 统计软件对堆肥过程数据进行分析,采用 Origin 8.5 进行图形绘制。采用 ANOVA 法检验各参数的统计差异。所有分析都假设有双尾和 95% 的置信度(或 α 为 0.05)。

2 结果与分析

2.1 系统的物理变化

通过对堆肥过程的观察发现,各处理初始状态大致呈黄褐色,均有不同程度的酸味,酸味随食用菌菌渣占系统比例的增加而减弱。不同处理在堆肥过程中的物理外观大体一致(表 2)。

表 2 堆肥过程中物理外观的变化

堆肥时间 (d)	颜色	气味	其他
0	黄褐色	酸味	—
2	浅褐灰色	少量刺鼻氨味	—
4	深褐色	明显氨味	少量白色菌体
7	棕褐色	氨味减少	少量霉菌
11	棕褐色	少量氨味伴随土腥味	手感松软
18	黑褐色	土腥味增加	手感松软
21	黑色	无臭且大量土腥味	—
26	黑色	无臭味	手感软、细、松

由表 3 可知,堆肥结束时,色度由高到低依次为 T2、T1、T4 和 T3,而且不同处理的色度差异显著($P < 0.05$)。与之对应,色度增加率最高为 T1,其次为 T2,分别达到了 307.70% 和 163.21% 均与其他处理差异显著,而 T3 和 T4 的色度增加率无显著差异,处于相对较低水平。由此可以判断,T1 最优,T2 次之,T3 和 T4 较差。

表 3 不同处理在堆肥初始和结束的色度变化

处理	初始色度(度)	结束色度(度)	色度增加率(%)
T1	2 000.00 ± 5.66a	8 154.00 ± 7.07c	307.70 ± 0.80c
T2	3 302.00 ± 18.38b	8 691.00 ± 4.24d	163.21 ± 1.34b
T3	3 922.00 ± 26.87c	7 481.00 ± 21.21a	90.75 ± 0.77a
T4	4 249.00 ± 11.31d	8 019.00 ± 14.14b	88.73 ± 0.17a

注:结果是 3 次重复的平均值 ± 标准偏差。同行不同小写字母后表示显著差异 ($P < 0.05$)。

2.2 温度的变化

温度是影响堆肥过程及其微生物活性的重要因素之一,其高低决定了堆肥速率的快慢^[7]。由图 2 可知,所有处理均

在堆肥后 1 d 达最高温,但不同处理的最高温度有所不同: $T2 > T1 > T3 > T4$ 。与此相似,不同处理的高温期 ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上)维持时间亦有所差别。 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 和 $T4$ 高温期维持时间分别为 4、4、2、2 d。在堆肥中后期,所有处理的温度均缓慢下降,但下降趋势有所不同。 $T1$ 和 $T2$ 下降趋势一致, $T3$ 和 $T4$ 下降趋势一致,且 $T1$ 和 $T2$ 的温度明显低于 $T3$ 和 $T4$ 的温度,更快接近室温。这可能是由于 $T1$ 和 $T2$ 的初始 C/N 处在 25~30 的适宜范围^[8], $T4$ 的初始 C/N 较高。适宜的初始 C/N 有利于微生物的繁殖,消耗有机物,产生大量的热,更快达到腐熟。由此可以判断, $T2$ 的温度变化情况最优, $T1$ 次之, $T3$ 和 $T4$ 较差。

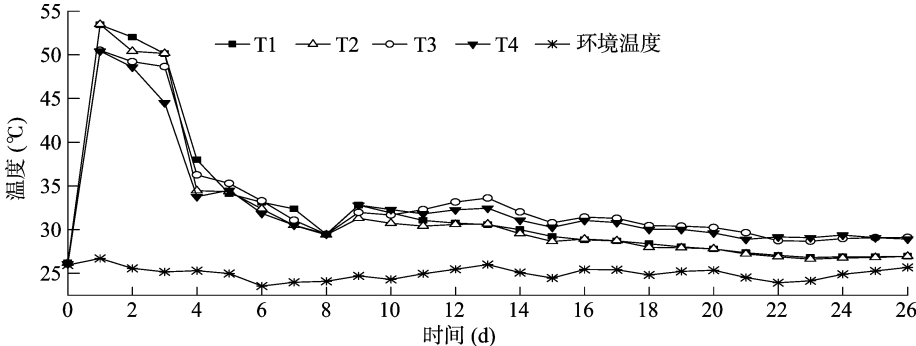


图2 不同处理在堆肥过程中温度的变化

2.3 pH 值和 EC 值的变化

pH 值和 EC 值是重要的堆肥参数,能影响最终产品对植物生长的适宜性。由图 3 - A 可知,所有处理 pH 值的变化趋势相似,均先升高后降低再升高至逐步稳定。在堆肥的初期,氨的释放占主导地位,pH 值的升高主要与氨气的释放有关。随后,由于微生物活性增加使系统中的有机物分解产生低分子量脂肪酸以及硝化作用,pH 值略有下降。此后,堆体含氮物质的不断降解,使系统 pH 值升高,逐步稳定。从堆肥后

11 d 开始至堆肥结束,所有处理的 pH 值均无明显差异,并达到稳定状态。而 pH 值相对稳定意味着发酵过程结束,堆体进入成熟阶段^[9]。堆肥结束时,所有处理的 pH 值均符合成熟标准 ($5.5 < \text{pH 值} < 8.5$)^[10]。

EC 值的变化与 pH 值的变化趋势大致相反,且所有处理 EC 值的变化趋势基本一致(图 3 - B)。堆肥开始时 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 的 EC 值最高,分别为 4.72、4.87、5.02、5.16 mS/cm,随后下降,至堆肥 4 d 后略有上升,在堆肥后 7 d 再次降低。

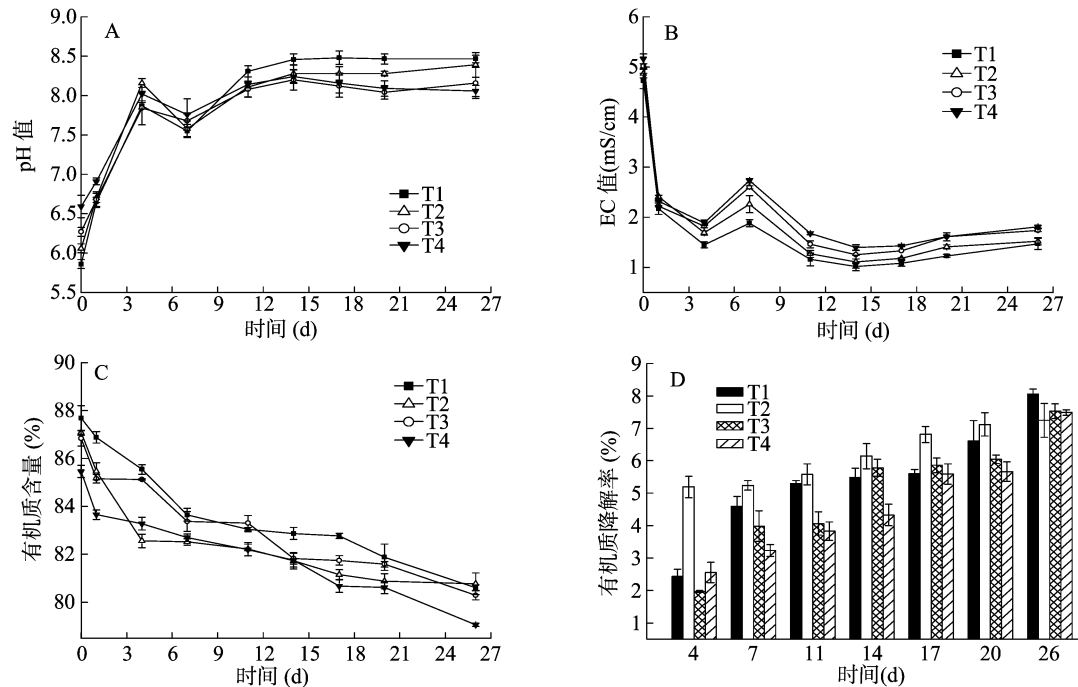


图3 不同处理在堆肥过程中 pH 值(A)、电导率(B)、有机质(C)和有机质降解率(D)的变化

堆肥后 14 d 时, T1、T2、T3 和 T4 的 EC 值最低, 分别为 1.02、1.11、1.25、1.4 mS/cm。此后, 所有处理的 EC 值开始逐步升高, 直至堆肥结束。堆肥初期, EC 值快速降低可能是由于食用菌菌渣中水溶性物质(如氨基酸)的生物降解所致。随后 EC 值略有增加可能是由于有机物分解过程中释放出矿物盐。此后, EC 值降低, 可能是氨挥发和矿物盐沉淀的结果。然而, 由于系统干质量的净损失, EC 值不断增加, 直到堆肥结束。到堆肥结束时, 所有处理的 EC 值均被中等敏感植物认为是可以忍受的(EC 值 < 4 mS/cm)^[11]。

2.4 有机质及其降解率的变化

有机质是微生物生存与繁殖的营养物质, 其含量的变化可以反映堆肥腐熟的进程, 根据其降解程度可以判断堆肥的腐熟度^[12]。由图 3 - C 和图 3 - D 可知, 所有处理有机质含量的变化趋势类似, 在整个堆肥过程中均不断下降。研究表明, 食用菌菌渣中含有多种可被微生物利用的易降解物质, 可以促进微生物的生长, 从而促进有机质的降解, 但不同食用菌菌渣比例的有机质降解程度却大不相同^[13]。到堆肥后 4、7、11、14、17、20 d 时, T2 的有机质降解率分别高达 5.19%、5.24%、5.58%、6.14%、6.81% 和 7.12%, 明显高于同时期其他 3 个处理。到堆肥结束时, T1 的有机质降解率最高, 达到 8.06%,

明显高于其他 3 个处理。此时, T2、T3 和 T4 的有机质降解率已无明显差异。由此可以判断, T1 和 T2 有机质降解率优于 T3 和 T4。

2.5 C/N 和 T 值的变化

C/N 常用作堆肥腐熟度的指标。由图 4 - A 可知, T1、T2、T3、T4 的 C/N 分别从堆肥开始时的 26.5、29.20、29.29、32.40 持续下降, 到堆肥结束时分别为 18.13、19.69、20.43、21.63。吴银宝等认为 C/N 小于 20 为腐熟标准, 若由此判断, 到堆肥结束时仅 T1 和 T2 腐熟^[14]。但将 C/N 作为堆肥腐熟指标的争议一直存在, 有学者认为 C/N 与堆肥原料有关, 提出采用堆肥终点 C/N 与初始 C/N 的比值(T 值)来评价堆肥腐熟度^[15]。有研究者认为腐熟堆肥的 T 值应介于 0.49 与 0.72 之间^[16]。由图 4 - B 可见, 所有处理的 T 值变化趋势相似, 在整个堆肥过程中均不断下降。但在整个堆肥过程中, 不同处理的 T 值差异明显。在堆肥后 1、4、7、11 d 时, T1 和 T2 的 T 值虽无明显差异但均明显低于同时期的其余 2 组处理。在堆肥后 14、17、26 d 时, T2 的 T 值明显低于其他 3 个处理。T1、T2、T3、T4 分别在堆肥后 26、14、26、26 d(T 值分别为 0.68、0.71、0.70、0.67) 达到腐熟标准。由此可以判断, T2 的 C/N 和 T 值变化情况最优, T1 次之, T3 和 T4 较差。

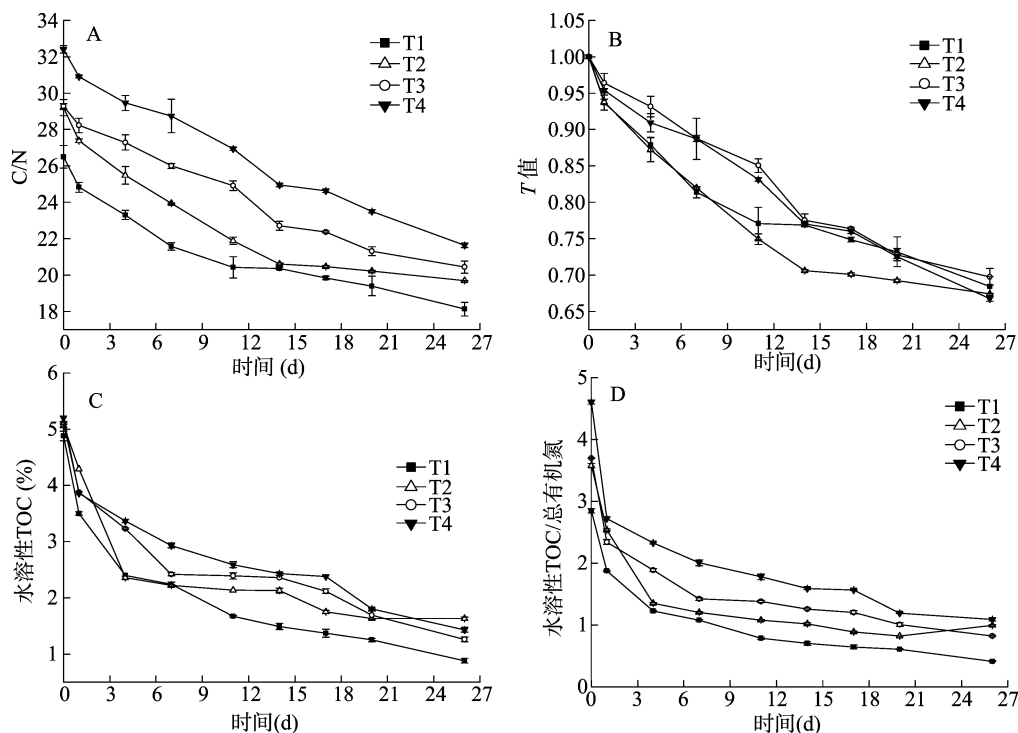


图4 不同处理在堆肥过程中 C/N(A)、T 值(B)、水溶性有机碳(C)和水溶性有机碳/总有机氮(D)的变化

2.6 水溶性有机碳及其与总有机氮比值的变化

水溶性有机碳是堆肥中微生物可直接利用的碳源, 也是可以被微生物直接用来合成自身物质的成分^[17]。由图 4 - C 和 4 - D 可知, T1、T2、T3 和 T4 的水溶性有机碳分别从堆肥开始时的 4.88%、5.07%、5.11% 和 5.20% 持续下降, 到堆肥结束时分别为 0.88%、1.63%、1.26% 和 1.43%。水溶性有机碳不断降低可能是由于有机物分解产生的水溶性有机碳不断被微生物利用消耗, 这与 Leita 等的研究^[18]相似, 但与李瑞鹏等的研究^[19]不同。这可能是由于在不同的堆肥原料和条件

下, 水溶性有机碳的动态变化规律并不完全相同。Garcia 等对城市废弃物堆肥的研究结果表明, 堆肥中水溶性有机碳含量小于 5 g/kg 时达到腐熟^[15]。若由此判断, 到堆肥结束时仅 T1 腐熟。但李承强等指出, 堆肥过程中的水溶性有机碳变化比较复杂, 将水溶性有机碳含量作为腐熟度指标存在争议, 建议将水溶性有机碳与总有机氮的比值作为评价腐熟度的标准, 并认为腐熟标准水溶性有机碳/总有机氮应小于 0.7^[20]。由图 4 - D 可知, 不同处理的水溶性有机碳与总有机氮的比值不断下降, 其值间差异显著。在整个堆肥过程中, T1 的水

溶性有机碳与总有机氮的比值明显低于同时期的其他3个处理。相同的是,T1的水溶性有机碳与总有机氮的比值在堆肥后17 d为0.66,达到建议的腐熟标准,而T2、T3和T4的水溶性有机碳与总有机氮的比值直至堆肥结束也未达建议的腐熟标准。由此可以判断,T1的水溶性有机碳及其与总有机氮的比值变化情况优于T2、T3和T4。

3 结论

(1)堆肥结束时,色度由高到低依次为T2、T1、T4和T3。不同处理的色度差异显著($P < 0.05$)。与之对应,T1、T2和T3、T4的色度增加率同样差异显著($P < 0.05$),T3和T4差异不显著,色度增加率最高为T1,其次为T2,而T3和T4的色度增加率并无显著差异,处于相对较低水平。由此可以判断,T1最优,T2次之,T3和T4较差。

(2)T1、T2、T3和T4均在堆肥后1 d达最高温,其最高温度 $T2 > T1 > T3 > T4$,高温期维持时间分别为4、4、2、2 d。T1、T2比T3、T4更快接近室温。由此可以判断,T2的温度变化情况最优,T1次之,T3和T4较差。

(3)到堆肥结束时,所有处理的pH值均符合成熟标准($5.5 < \text{pH值} < 8.5$),所有处理的EC值均被中等敏感植物认为是可以忍受的(EC值 $< 4 \text{ mS/cm}$)。

(4)所有处理的有机质含量变化趋势相似,在整个堆肥过程中均不断下降,而T2的有机质降解率明显高于同时期其他3个处理。到堆肥结束时,T1的有机质降解率最高,明显高于其他3个处理。由此可以判断,T1和T2的有机质降解率优于T3和T4。

(5)若用C/N判断,到堆肥结束时仅T1和T2腐熟。在堆肥前半期,T1和T2的 T 值均低于同时期的其他2组处理。在堆肥中后期,T2的 T 值明显低于其他3个处理。根据 T 值的变化,T1、T2、T3、T4分别在堆肥后26、14、26、26 d达到腐熟标准。由 T 值判断,T2发酵情况最优,T1次之,T3和T4较差。

(6)若由水溶性有机碳判断,到堆肥结束时仅T1腐熟。而采用水溶性有机碳与总有机氮的比值评价,则T1在堆肥后17 d为0.66,达到建议的腐熟标准,而T2、T3和T4的水溶性有机碳与总有机氮的比值直至堆肥结束也未达建议的腐熟标准。由水溶性有机碳与总有机氮的比值可以判断,T1优于T2、T3和T4。

综合考虑,在为期26 d的堆肥试验中,T1和T2处理的发酵情况优于T3和T4处理,即白酒糟堆肥添加食用菌菌渣的最佳比例为:20%~30%。其工艺参数:初始含水率为55%,初始pH值为6.5,连续通风量为1.5 L/min,初始C/N为26.5~29。

参考文献:

- [1]郭夏丽,王兴胜,朱正威,等.白酒糟高温好氧堆肥过程中氮素转化规律及堆肥周期探究[J].郑州大学学报,2014,35(5):116-119.
- [2]施安.国内白酒工业固体酒糟环保生态化利用的现状与前景[J].中国酿造,2006,25(3):4-7.
- [3]周祥,严媛媛,陈爱晶.食用菌菌渣资源化利用研究进展[J].

食用菌,2018(1):9-12.

- [4]Fang W,Zhang P Y,Gou X Y,et al. Volatile fatty acid production from spent mushroom compost: effect of total solid content [J]. Biodeterioration,2016,113:217-221.
- [5]Hachicha R,Rekik O,Hachicha S,et al. Co-composting of spent coffee ground with olive mill wastewater sludge and poultry manure and effect of *Trametes versicolor* inoculation on the compost maturity [J]. Chemosphere,2012,88(6):677-682.
- [6]Awasthi M K,Pandey A K,Bundela P S,et al. Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamic [J]. Bioresource Technology,2015,182:200-207.
- [7]陈同斌,黄启飞,高定,等.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.
- [8]刘盛萍.生物垃圾快速好氧堆肥的研究[D].合肥:合肥工业大学,2006:5-5.
- [9]Chen Y X,Huang X D,Han Z Y,et al. Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting [J]. Chemosphere,2010,78(9):1177-1181.
- [10]Silva M E F,Lemos L T,Bastos M M,et al. Recovery of humic-like substances from low quality composts [J]. Bioresource Technology,2013,128:624-632.
- [11]Lasaridi K,Protopapa I,Kotsou M,et al. Quality assessment of composts in the Greek market; the need for standards and quality assurance [J]. Journal of Environmental Management,2006,80(1):58-65.
- [12]Domeizel M,Khalil A,Prudent P. UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost [J]. Bioresource Technology,2004,94(2):177-184.
- [13]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]. Bioresour Technol,2014,171:274-284.
- [14]吴银宝,汪植三,廖新伟,等.猪粪堆肥腐熟指标的研究[J].农业环境科学学报,2003,22(2):189-193.
- [15]Garcia C,Hernandez T,Costa F,et al. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2008,23(13/14):1501-1512.
- [16]卢秉林,王文丽,李娟,等.添加小麦秸秆对猪粪高温堆肥腐熟进程的影响[J].环境工程学报,2010(4):926-930.
- [17]鲍艳宇,颜丽,娄翼来,等.鸡粪堆肥过程中各种碳有机化合物及腐熟度指标的变化[J].农业环境科学学报,2005,24(4):820-824.
- [18]Leita L,Nobili M D. Water-Soluble fractions of heavy metals during composting of municipal solid waste [J]. Journal of Environmental Quality,1991,20(1):73-78.
- [19]李瑞鹏,于建光,常志州,等.麦秸和奶牛场废弃物联合堆肥试验[J].江苏农业学报,2012,28(1):65-71.
- [20]李承强,魏源送,樊耀波,等.堆肥腐熟度的研究进展[J].环境工程学报,1999(6):1-12.