

网络出版时间:2023-06-30 15:44

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.01.014

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1390.s.20230629.1645.011.html

芽孢杆菌固体菌剂对园林绿化废弃物堆肥的影响

沈丹青¹, 于鑫¹, 韩捷², 孙向阳¹, 李素艳¹, 孟童瑶¹, 郝丹¹

(1 北京林业大学 林学院 森林培育与保护教育部重点实验室/园林绿化废弃物综合利用中心, 北京 100083;

2 北京市香山公园管理处, 北京 100093)

【摘要】【目的】研究 2 种自主研发的芽孢杆菌固体菌剂 B01、B02 及其复合菌剂 (SB012) 在园林绿化废弃物堆肥上的应用效果, 为推广固体菌剂在园林绿化废弃物堆肥中的应用提供参考。【方法】以北京香山公园人工修剪或自然凋落的残体作为堆肥原材料, 设置不添加菌剂的空白处理 (CK) 以及添加芽孢杆菌固体菌剂 B01、B02、SB012 和市面上公认较优液体菌剂 EM 共 5 个处理, 其中固体复合菌剂 SB012 是将 B01 与 B02 按照质量比 3 : 1 混合而成, 加入菌剂后每日 12:00 测定 1 次堆肥温度; 每 7 d 采集 1 次样品, 测定不同处理堆肥的 pH、电导率 (EC)、白菜种子发芽指数 (GI) 和木质素、纤维素含量及其相对降解率以及腐殖酸、胡敏酸、富里酸含量与胡富比, 分析 B01、B02、SB012 对堆肥进程的影响。【结果】随着发酵时间延长, 不同处理的堆肥温度总体呈先上升后下降趋势。与 CK 处理相比, 添加 B01、B02、SB012 和 EM 菌剂均能促进园林绿化废弃物堆肥提前进入高温期, 其中 B01 处理堆肥温度峰值最高, 可达 72.1 °C; SB012 处理次之, 为 70.2 °C, 均高于 EM、CK 处理。随着发酵时间延长, 不同处理堆肥的 pH 总体呈升高趋势, EC 呈先升高后降低趋势, 直至堆肥结束 (42 d) 时, 不同处理的 pH 均高于 8.0, EC 为 0.76~1.04 mS/cm, 均达到了国家对绿化植物废弃物的堆肥产品要求。随着发酵时间延长, 不同处理白菜种子发芽指数 (GI) 总体呈先升高后降低趋势, 其中堆肥结束时 3 种固体菌剂的 GI 依次为 SB012>B01>B02, 均高于 EM 和 CK 处理, 且均满足对植物无毒害的标准 (GI≥85%)。5 个处理中, SB012 处理的木质素和纤维素相对降解率均最高, 分别达到 56.85% 和 79.84%, 且显著高于 EM 和 CK 处理。【结论】SB012 菌剂对园林绿化废弃物堆肥中纤维素、木质素的降解具有最好的促进效果, 其堆肥产品具有品质好、安全性高等优点, 可在园林绿化废弃物堆肥中推广应用。

【关键词】 芽孢杆菌; 微生物降解; 绿化废弃物; 堆肥

【中图分类号】 S141.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2024)01-0127-09

Effect of *Bacillus* solid bacterial inocula on compost of green waste

SHEN Danqing¹, YU Xin¹, HAN Jie², SUN Xiangyang¹, LI Suyan¹

MENG Tongyao¹, Hao Dan¹

(1 The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education/Research Center for Comprehensive Utilization of Green Wastes, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 Beijing Fragrant Hills Park Department, Beijing 100093, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the effects of two self-developed *Bacillus* solid inocula (B01 and B02) and their compound agent (SB012) on green waste compost to encourage the application of solid inocula. 【Method】 Five treatments including blank treatment without adding bacteria (CK), solid bacteria B01, B02 and SB012 as well as liquid bacteria EM, which is widely regarded as the best on the market, were applied to the plant residues artificially pruned or naturally withered from Beijing Fragrant Hills Park

【收稿日期】 2022-10-31

【基金项目】 科技部基础资源调查专项 (2021FY100802); 北京市自然科学基金项目 (6202021)

【作者简介】 沈丹青 (1998-), 男 (壮族), 云南广南人, 在读硕士, 主要从事园林废弃物处理与资源化利用研究。

E-mail: misakisice@163.com

【通信作者】 于鑫 (1983-), 女, 河北邯郸人, 高级实验师, 硕士, 主要从事固体废弃物资源化研究。 E-mail: yxin419@126.com

as raw materials for composting. The solid bactericide SB012 was created by combining B01 and B02 with mass ratio of 3 : 1. After inoculation, heap temperature was measured at 12:00 once per day. The samples were collected every 7 days to determine pH, electrical conductivity (EC), germination index (GI), humic extract, contents of humic acid and fulvic acid, ratio of humic acid to fulvic acid, and contents and relative degradation rates of lignin and cellulose in different compost treatments and the effects of B01, B02 and SB012 on composting process were evaluated. 【Result】 Over time, the temperature of compost under different treatments increased first and then decreased. Compared with CK, the addition of B01, B02, SB012 and EM promoted the green waste heaps to enter the high temperature stage in advance. The peak temperatures of B01 and SB012 composts reached 72.1 and 70.2 °C, both were higher than EM and CK. The EC decreased after initial increase, while the pH of the compost increased throughout all treatments. At the end of composting process, all treatments had a pH greater than 8.0 and their EC ranged from 0.76 to 1.04 mS/cm, all of which met the national standards for green waste compost products. The GI increased first and then decreased under different treatments, and the GI order of the three kinds of solid inocula at the end of composting was SB012>B01>B02, which will all higher than that of EM and CK, reaching the standard of no toxicity to plants ($\geq 85\%$). Among the five treatments, the highest relative degradation rates of lignin and cellulose were 56.85% and 79.84% in SB012 treatment, which were significantly higher than EM treatment and CK treatment. 【Conclusion】 The SB012 bactericide had the best promotion for cellulose and lignin components in landscaping waste compost with the advantages of excellent quality and safety.

Key words: *Bacillus* sp.; microbial degradation; green waste; compost

园林绿化废弃物经堆肥化过程制得的产品具有原材料易获取、环保、可再生等特点,是一种能够改善土壤理化性质、涵养水源、提高土壤生物多样性的多功能产品^[1-5]。但是,与农业废弃物相比,园林绿化废弃物含有大量木质素和纤维素,二者的大分子性质和结构特征降低了堆肥速率和堆肥产品质量^[6-7]。因此,如何高效降解木质素、纤维素是目前园林绿化废弃物堆肥的主要研究目标之一^[8-12]。研究表明,木质素、纤维素可由一些特定的细菌、真菌和放线菌降解^[13]。其中,芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)是配制微生物菌剂的一种常用菌种,不仅具有较强的耐高温、耐挤压、耐酸碱特性,能够利用芽孢形态应对极端外部胁迫,而且还具有较高的蛋白酶、脂肪酶、纤维酶产酶活性^[14-16]。

目前园林绿化废弃物在堆肥化过程中常用的菌剂多为液体菌剂,而液体菌剂在制备、运输和储存过程中需要严格的无菌条件,不宜长期贮藏,具有较大的局限性^[17]。与液体菌剂相比,固体菌剂几乎不含自由水,运输和贮藏不需要严格的无菌环境,能够长期存放在干燥环境下,且其主要以廉价易得的农副产品作为生产原料,成本低廉,这些优点使得固体菌剂具有比液体菌剂更高的实用性^[18]。因此,推动园林绿化废弃物领域专用固体菌剂的研究,对今后采用堆肥方式快速处理园林绿化废弃物、获得高品质

堆肥产品有重要意义。

目前,关于园林绿化废弃物堆肥领域中固体菌剂的研究处于起步阶段。笔者所在课题组前期研制出具有分泌木质素、降解纤维素酶能力的芽孢杆菌固体菌剂 B01 和 B02,并确定了其最佳复合配比,证明固体菌剂对堆肥木质素、纤维素的降解效果优于液体菌剂^[19]。但这些固体菌剂的堆肥效果验证试验是在实验室条件下进行的,与实际生产中的堆肥条件迥异,使得菌剂在生产实践中的应用存在不确定性^[19]。鉴于此,为进一步确定自主研发的芽孢杆菌固体菌剂在园林绿化废弃物堆肥中的实际应用效果,本研究在堆肥厂进行园林绿化废弃物堆肥的过程中,将 B01 和 B02 这 2 种固体菌剂及其复合菌剂(SB012)添加进堆体,探究其实际降解木质素、纤维素的效果及对堆肥进程的影响,以期在固体菌剂在园林绿化废弃物中的推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试菌株 芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)B01 和 B02,为北京林业大学园林绿化废弃综合利用研究中心前期筛选获得^[20]。EM 菌购自郑州农富康生物科技有限公司,为液体菌剂,主要成分为乳酸菌、芽孢杆菌、光合细菌、酵母菌、放线菌、醋酸菌等。

1.1.2 培养基 种子液培养基为牛肉膏蛋白胨液体培养基,其组成为:牛肉膏 3 g,蛋白胨 5 g,氯化钠 5 g,蒸馏水 1 000 mL。B01 固态发酵培养基配方(质量分数)为:35%麦麸、45%米糠、6%乳糖、6%黄豆粉和 8%硅藻土;B02 固态发酵培养基配方(质量分数)为:25%麦麸、50%米糠、7%乳糖、7%黄豆粉和 11%硅藻土;SB012 固态发酵培养基:将 B01 和 B02 固态发酵培养基按照质量比 3:1 的比例混合而成,具体方法见文献[19]。

1.1.3 堆肥场地与原材料 堆肥试验在北京香山堆肥厂的室内厂棚中进行,排除了阳光、雨水等自然干扰因素,堆肥地面为硬化水泥地,避免了土壤土著微生物、动物的影响。堆肥原材料为北京香山公园人工修剪或自然凋落的植物残体,主要由洋白蜡、泡桐和槭树残体组成,经粉碎机粉碎至粒径小于 20 mm。原材料基本属性:pH 7.72,电导率(EC)0.87 mS/cm,C/N 为 37.32:1,含水率 17.32%,木质素含量 21.49%,纤维素含量 35.64%,胡敏酸含量 10.97 g/kg,富里酸含量 56.06 g/kg。

1.2 试验方法

1.2.1 固体菌剂制备 挑取少量冷藏保存的芽孢杆菌 B01、B02 分别接种到装有 100 mL 灭菌牛肉膏蛋白胨液体培养基的 500 mL 锥形瓶中。在 37 ℃、200 r/min 条件下培养 48 h 后,吸取 0.1 mL 菌液接种到新的灭菌牛肉膏蛋白胨液体培养基中,在 37 ℃、200 r/min 条件下培养 48 h,即获得 B01、B02 的种子液。将 4.5 mL B01 种子液接种至装有 30 g B01 固态发酵培养基的 250 mL 锥形瓶中,调节料水质量比至 1:1,搅拌均匀后,将其置于恒温培养箱中,于 37 ℃培养 48 h 后,将固态发酵产物转移至 40 ℃烘箱中烘干,直至其含水率降至 15%,即制成 B01 固体菌剂。B02 固体菌剂的制备步骤同 B01,复合固体菌剂 SB012 则是将 B01 与 B02 固体菌剂按照质量比 3:1 混合后制得。

1.2.2 试验设计 本研究共设置 5 个处理,分别为不添加菌剂的空白处理(CK)以及添加固体菌剂 B01、固体菌剂 B02、固体复合菌剂 SB012 与 EM 菌剂处理,依次记为 CK、B01、B02、SB012 和 EM 处理,其中 CK 为空白对照组,EM 处理为条件对照组,B01、B02、SB012 处理为试验组,每组制备 1 个堆体。所有处理除添加菌剂不同外,其余条件均保持一致。

1.2.3 园林绿化废弃物堆体制备 将 200 kg(风干质量)堆肥原材料堆成直径 2 m、高 1 m 的圆锥体,

在逐渐堆高时浇水,控制含水量在 60%~70%。在浇水的同时施入菌剂,其中固体菌剂均匀撒施,EM 菌在无菌水中稀释 10 倍后喷施,菌剂施入量为堆体风干质量的 1%。

1.2.4 样品采集 每 7 d 采集 1 次样品,具体方法为:分别从堆体的上、中、下部采集样品,混合后用四分法采集 1 kg 样品,置于塑封袋带回实验室测定后续指标。每个堆体采集 3 份样品。样品采集完毕后翻堆并补充水分,控制含水量在 60%~70%。

1.2.5 测定指标及方法 ①堆体温度。加入菌剂后每日 12:00 测定 1 次堆体温度,在距离地面 30 cm 处平行于地面将温度计插入堆体中心,待读数稳定 30 s 后记录,重复 3 次取平均值。

②pH 和 EC。称取 10 g 鲜样于 100 mL 白色塑料瓶,加入 50 mL 蒸馏水,200 r/min 振荡 1 h,过滤,保留滤液,使用雷磁 PHS-25 pH 计测定 pH,使用 DDS-11A 数显电导率仪(量程为 2 mS/cm)测定 EC。

③发芽指数。取 10 g 鲜样于 100 mL 白色塑料瓶,加入 50 mL 蒸馏水,200 r/min 振荡 1 h,静置后吸取 5 mL 上清液,加入铺好 2 层滤纸的直径 9 cm 培养皿中,同时吸取相同体积的蒸馏水作为对照。在浸润的滤纸上放置 20 粒白菜种子(京绿 1 号),在 25 ℃培养箱中培养 2 d 后统计发芽数,测定根长,计算发芽率和发芽指数。重复 3 次,取均值。发芽指数=(堆肥浸提液处理的发芽率×根长)/(对照的发芽率×根长)×100%。

④胡敏酸(HA)与富里酸(FA)含量。采用焦磷酸钠-重铬酸钾容量法^[21]测定胡敏酸和富里酸含量。

⑤灰分含量。将镍坩埚置于 105 ℃的烘箱中烘至质量恒定,称其质量(m_1);称取一定质量(m_2)的样品置于镍坩埚内后,放入马弗炉,于 550 ℃灰化 6 h,取出后置于干燥皿冷却至室温,并称其质量(m_3)。灰分含量= $(m_3 - m_1) / m_2 \times 100\%$ 。

⑥纤维素、木质素含量及其相对降解率。使用 Hannon F800 纤维测定仪测定纤维素和木质素含量,具体测定方法参考文献[22]。引入灰分含量计算纤维素、木质素相对降解率,可以解决不同有机物降解速率差异造成的降解率异常问题。木质素、纤维素相对降解率的计算公式如下:

$$\text{相对降解率} = \frac{C_{L_0}/C_{A_0} - C_{L_i}/C_{A_i}}{C_{L_0}/C_{A_0}} \times 100\%$$

式中: C_{L_0} 为初始的木质素或纤维素含量, C_{L_i} 为第 i 天的木质素或纤维素含量, C_{A_0} 为初始的灰分含量,

C_{Ai} 为第 i 天的灰分含量。

1.3 数据统计与分析

试验数据用“平均值±标准误”表示。使用 Excel 2016、IBM SPSS Statistics 24 进行数据的统计与分析,使用 Sigmaplot 14.0 绘图。在保证数据样本满足方差齐性和正态分布的条件下,使用单因素方差分析比较平均值,多重比较选择图基(Tukey)检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同固体菌剂对园林绿化废弃物堆体温度的影响

堆体温度的高低反映了堆肥过程中微生物活性的强弱,各处理的堆体温度变化情况见图 1。图 1 显示,在整个堆肥过程中,气温维持在 14.3~22.6 °C。在堆肥 0~13 d 各处理堆体温度总体升高,

14~42 d 堆体温度总体下降。添加菌剂的处理均在第 5 天进入高温期(50 °C),比 CK 堆肥提前 1 d。处理第 12 天,B01、SB012 处理的最高温度分别达到 72.1 和 70.2 °C,均高于 CK 处理(69.8 °C);而 B02 和 EM 处理的最高温度均低于 CK 处理。研究表明,当堆肥温度达到 50 °C 并持续 10 d 以上时,就达到了高温堆肥无害化卫生标准^[23]。本研究中,EM、B01、CK、SB012、B02 处理堆体温度大于 50 °C 的持续时间分别为 18,17,16,14 和 14 d,均满足无害化卫生标准要求。综上,在 3 种固体菌剂中,B01 菌剂在维持堆体高温和提高堆肥温度方面效果最好,维持高温能力接近 EM 菌剂。

2.2 不同固体菌剂对园林绿化废弃物堆肥 pH 和 EC 的影响

不同处理堆肥的 pH 和 EC 变化情况见图 2。

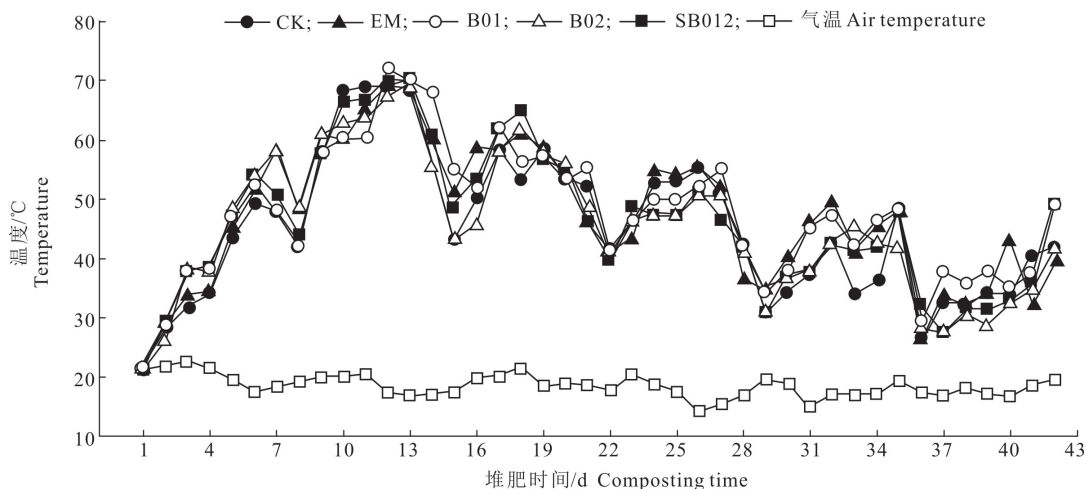


图 1 不同固体菌剂对园林绿化废弃物堆体温度的影响

Fig. 1 Influence of several solid inocula on temperature of green waste compost

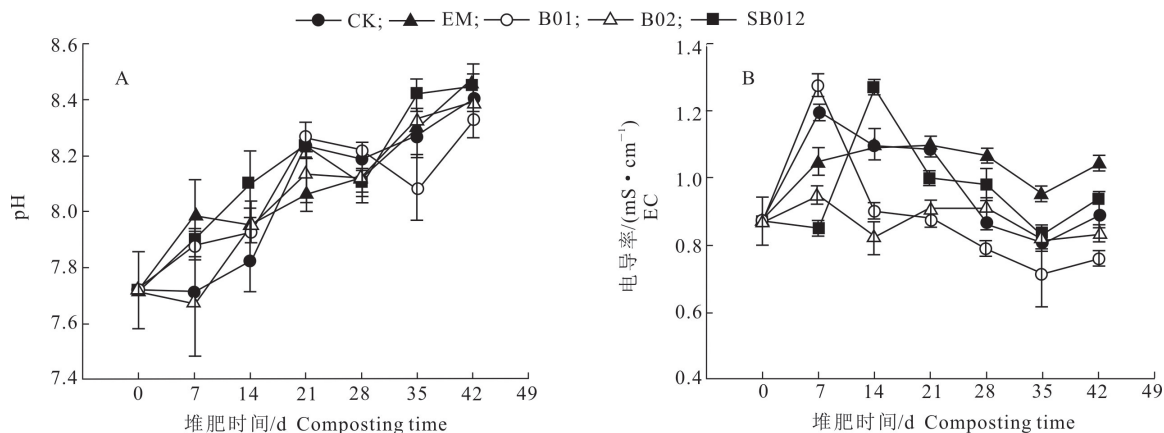


图 2 不同固体菌剂对园林绿化废弃物堆肥 pH (A) 和电导率(B)的影响

Fig. 2 Influence of several solid inocula on pH (A) and EC (B) of green waste compost

由图 2-A 可知,各处理的 pH 均随堆肥时间的延长总体呈增长趋势。发酵结束(42 d)时,各处理堆肥的 pH 由高到低依次为 EM(8.48 ± 0.05) > SB012(8.45 ± 0.03) > CK(8.40 ± 0.03) > B02(8.39 ± 0.07) > B01(8.33 ± 0.07),同一时间不同处理间 pH 无显著差异,且均满足《GB/T 31755—2015 绿化植物废弃物处置和应用技术规程》中碱性改良基质的标准^[24]。

图 2-B 显示,随着堆肥时间的延长,不同处理堆肥的 EC 总体上呈先上升后下降再上升的趋势。与堆肥前(0 d)相比,第 42 天时 CK、EM 和 SB012 处理的 EC 均有增加,其中 EM 处理增幅最大,为 19.54%;而 B01、B02 处理的 EC 分别降低了 12.64%和 4.60%。发酵结束(42 d)时各处理堆肥的 EC 由大到小排序为 EM((1.04 ± 0.02) mS/cm) > SB012((0.94 ± 0.01) mS/cm) > CK((0.89 ± 0.03) mS/cm) > B02((0.83 ± 0.02) mS/cm) > B01((0.76 ± 0.01) mS/cm),均满足《GB/T 31755—2015 绿化植物废弃物处置和应用技术规程》中对绿化植物废弃物堆肥产品 EC 的要求($0.5 \sim 10.0$ mS/cm)^[24]。

2.3 不同固体菌剂对白菜种子发芽指数的影响

图 3 显示,在堆肥过程中,不同处理白菜种子发芽指数(GI)总体呈先上升后下降趋势。除第 0 天外,其余堆肥时间下不同处理的 GI 均大于 85%,满足《GB/T 31755—2015 绿化植物废弃物处置和应用技术规程》中的相关要求^[24]。堆肥结束时,B01、B02 和 SB012 处理的 GI 均显著高于 CK 和 EM 处理($P < 0.05$),其中 SB012 处理的 GI 最高,达到了 141.42%,较 EM 和 CK 处理分别提高了 30.99%

和 53.95%,表明 SB012 处理在促进堆肥腐熟效果上明显优于其他处理,获得的堆肥产品安全性最高,对植物毒害最小。

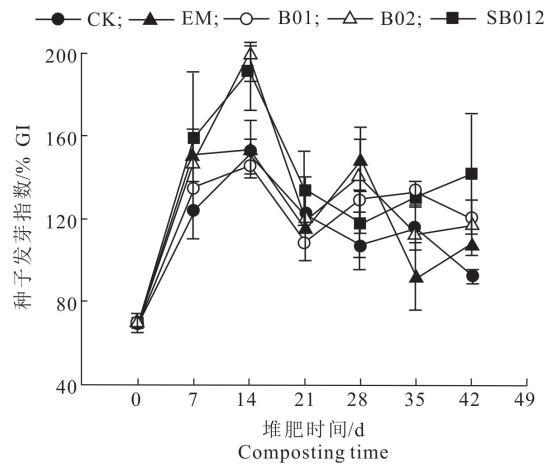


图 3 不同固体菌剂对白菜种子发芽指数的影响

Fig. 3 Influence of several solid inocula on germination index of Chinese cabbage

2.4 不同固体菌剂对园林绿化废弃物纤维素和木质素降解的影响

图 4-A 显示,随着堆肥时间延长,各处理纤维素含量总体呈波动下降的趋势。经过 42 d 的发酵,各处理的纤维素含量由最初的 35.64%降低至 23.20%~27.96%,其中 SB012 处理纤维素含量最低,其次是 B02 处理。木质素是园林绿化废弃物中最难降解的物质之一^[25]。由图 4-B 可知,随着发酵时间延长,所有处理的木质素含量总体上均呈上升趋势。堆肥结束时,各处理的木质素含量由最初的 21.49%升高到 29.22%~30.91%,其中 B01 处理木质素含量最低,CK 处理最高。

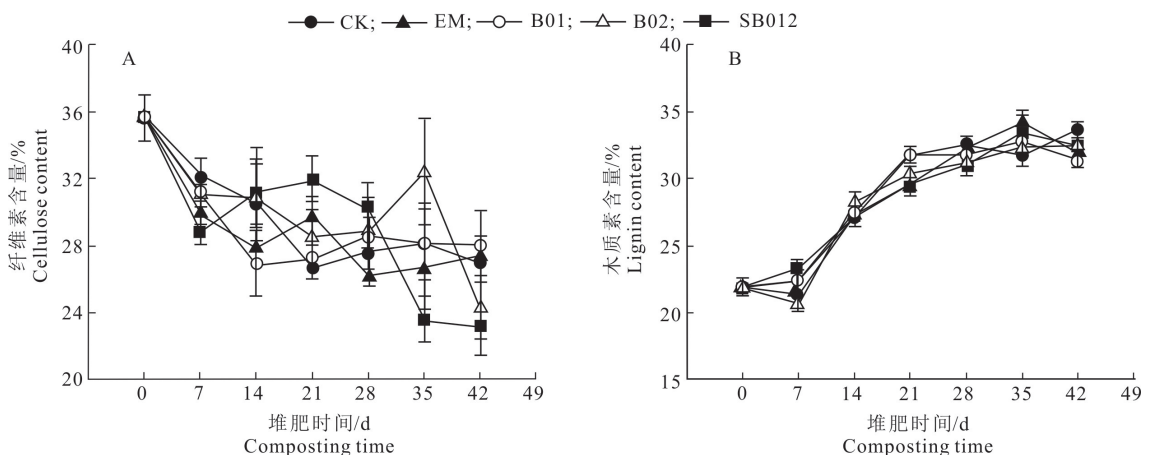


图 4 不同固体菌剂对园林绿化废弃物发酵过程中纤维素和木质素含量的影响

Fig. 4 Influence of several solid inocula on cellulose and lignin contents of green waste compost

堆肥结束时,各处理的纤维素、木质素相对降解率见图 5。

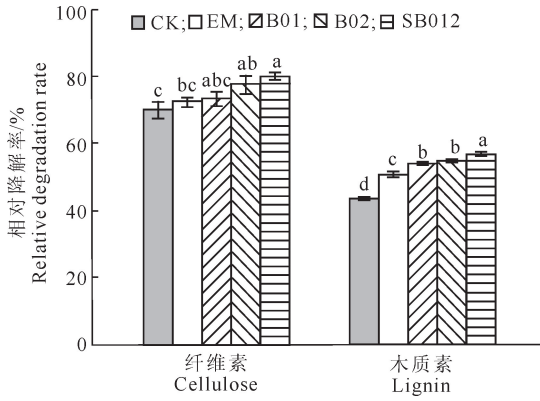


图 5 堆肥结束时不同固体菌剂对园林绿化废弃物中木质素和纤维素相对降解率的影响

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

图 5 堆肥结束时不同固体菌剂对园林绿化废弃物中木质素和纤维素相对降解率的影响
Fig. 5 Influence of different solid inocula on relative degradation rates of lignin and cellulose in green waste at the end of composting

图 5 显示, B01、B02 和 SB012 处理的纤维素相对降解率为 73.46%~79.84%, 明显高于 CK 和 EM 处理, 表明添加固体菌剂能促进园林绿化废弃物中纤维素组分的降解。其中 SB012 处理降解纤维素效果最好, 其纤维素相对降解率较 CK 提高了 13.55%, 较 EM 处理提高了 10.29%, 表明 SB012 降解园林绿化废弃物中的纤维素方面潜力最大。各处理的木质素相对降解率由大到小依次为: SB012 (56.85%) > B02 (54.89%) > B01 (54.02%) > EM (50.75%) > CK (43.86%), 且 SB012 处理的木质素相对降解率显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 分别比 EM 和 CK 处理提高了 12.02% 和 29.62%。B01 处理与 B02 处理的木质素相对降解率无显著差异, 但二者也均显著高于 EM 和 CK 处理。表明在纤维素、木质素降解方面, B01 和 B02 的能力相近, 但均低于 SB012。

2.5 不同固体菌剂对园林绿化废弃物堆肥腐熟的影响

不同处理堆肥的腐殖酸、胡敏酸、富里酸含量及胡富比的变化见图 6。

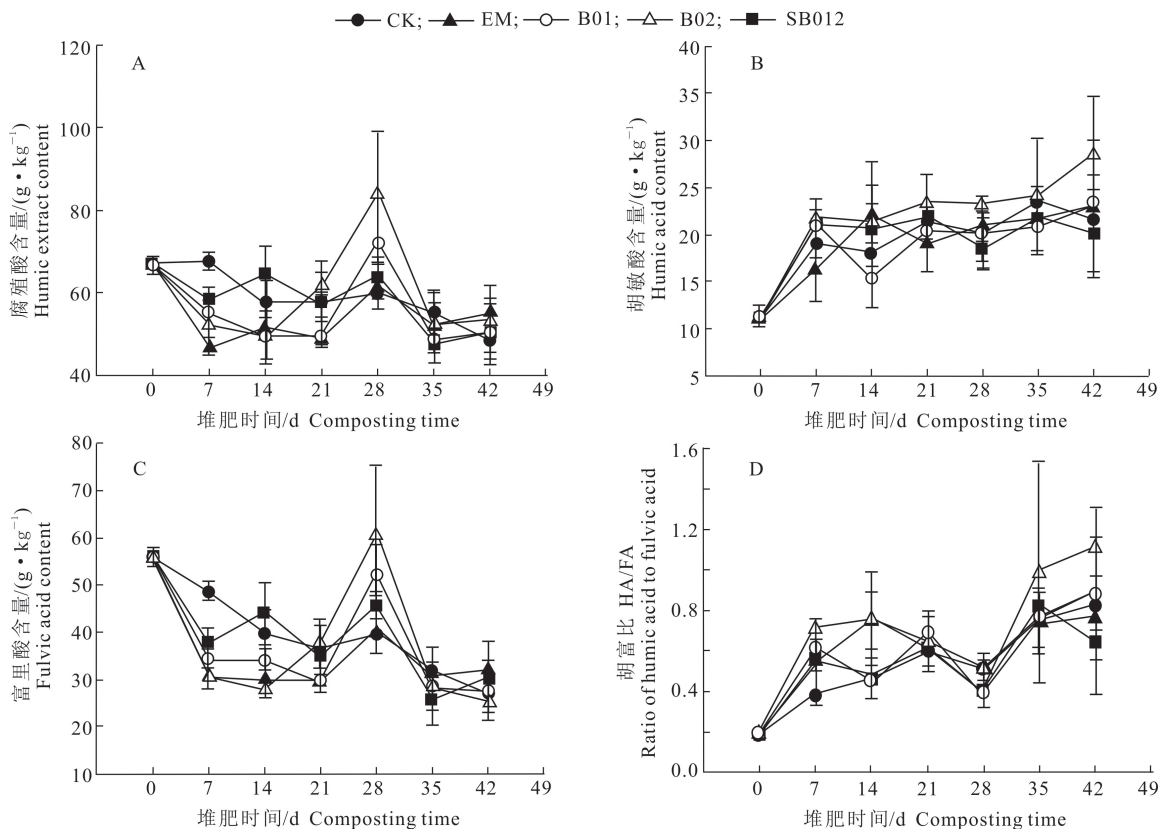


图 6 不同固体菌剂对园林绿化废弃物发酵过程中腐殖酸 (A)、胡敏酸 (B) 和富里酸 (C) 含量及胡富比 (D) 的影响
Fig. 6 Influence of different solid inocula on humic extract (A), humic acid (B), fulvic acid (C) and ration of humic acid to fulvic acid (D) in green waste compost

由图 6-A 可见, 随着发酵时间的延长, 各处理的

腐殖酸含量总体上呈先下降后上升再下降的趋势。

至堆肥发酵结束时,各处理的腐殖酸含量依次为:EM ((55.32±3.57) g/kg) > B02 ((53.92±8.20) g/kg) > SB012 ((50.85±7.61) g/kg) > B01 ((50.78±6.85) g/kg) > CK ((48.50±4.42) g/kg),且各处理的腐殖酸含量无显著差异。

由图 6-B 可知,随着发酵时间延长,各处理胡敏酸含量总体呈升高的趋势,至堆肥发酵结束时,B02 处理的胡敏酸含量最高,达到了(28.53±6.22) g/kg,相较于原材料提高了 160.14%;SB012 处理的胡敏酸含量最低。

图 6-C 显示,随着发酵时间延长,各处理富里酸含量总体上呈先下降后上升再下降的趋势。堆肥发酵结束时,3 个固体菌剂处理中,SB012 处理的富里酸含量最高,为(30.74±3.13) g/kg;B02 处理的富里酸含量最低,为(25.39±2.55) g/kg。

由图 6-D 可见,随着发酵时间延长,各处理的胡富比呈先上升后下降再上升的趋势。至堆肥结束时,各处理胡富比依次为 B02(1.12±0.19) > B01(0.90±0.27) > CK(0.83±0.13) > EM(0.78±0.39) > SB012(0.65±0.09),但不同处理间的差异均不显著。

3 讨 论

园林绿化废弃物中木质素和纤维素的体量庞大、难以降解等,是限制其好氧堆肥效率和产品品质的主要问题。为针对性地解决上述问题,本研究将 3 种自主研发的固体菌剂 B01、B02 和 SB012 添加到园林绿化废弃物堆肥中,通过探究其对常见堆肥指标、木质素和纤维素降解以及堆体腐熟 3 方面的影响,拟选出效果最优的菌剂,为固体菌剂在实际生产中的应用提供依据。

本研究发现,与 CK 和 EM 处理相比,B01 处理能提高堆体温度峰值(72.1 °C),在整个堆肥周期中保持高温(>50 °C) 17 d,仅次于 EM 处理。但 B01 对木质素和纤维素的降解能力略低于其他 2 种固体菌剂。这可能是由于 B01 在堆肥前期更倾向于利用性质更活跃的物质获得能量,能够更快地积累热量,从而促进堆体升温^[26]。同时,堆肥结束时 B01 处理的 EC 显著低于其他处理,这可能是由于 B01 菌剂能够促进有机酸类和盐类缩合成大分子的胡敏酸,使得 B01 处理胡敏酸含量较高的同时也降低了 EC^[27]。

本研究中,B02 处理堆肥的木质素和纤维素降解率均略高于 B01 处理,这是由于 B02 菌株除具备

B01 菌株分泌锰过氧化物酶、木质素过氧化物酶和纤维素酶的能力外,还具有分泌漆酶的能力^[20]。这 4 种酶在园林绿化废弃物木质素和纤维素降解过程中起着关键作用^[28-31]。此外,在园林绿化废弃物腐熟过程中,B02 处理还能促进更稳定的腐殖质形成,从第 28 天至堆肥结束,B02 处理的富里酸含量由 60.94 g/kg 降至 25.39 g/kg,是降幅最大的处理。而且,堆肥结束时 B02 处理的胡敏酸含量和胡富比均最高。这与 Duan 等^[32]和李怨艳等^[33]的研究结果一致,表明特定菌剂的添加有利于推进堆肥腐殖化进程。

本研究中,SB012 处理堆肥的木质素和纤维素降解率均明显高于其他处理。这是由于将 B01 和 B02 固体菌剂复合后,二者之间相互协同的产酶体系,能进一步形成更适宜的木质素和纤维素降解环境,从而进一步提高对园林绿化废弃物中木质素和纤维素的降解效果。吴庆珊等^[34]在羊粪堆肥腐熟过程中将自主研发的菌剂 M 与市售菌剂 R 混合施用,发现该处理能明显降低物料中的纤维素含量,且效果明显优于单一菌剂 M 或 R;胡亚东等^[35]在餐厨垃圾堆肥试验中探究 WD 和 TB 两种菌剂单独施用及其二者复合施用的效果,结果显示复合菌剂处理较单一菌剂能使堆肥提前腐熟,加快堆肥进程。由此可见,合理利用不同微生物间的协同作用,对堆肥效果和堆肥品质的提升具有显著作用。此外,发酵结束时,SB012 处理还能显著提高白菜种子发芽指数,表明发酵结束时堆肥产品具有良好的稳定性和较低的植物毒性,可安全施于土壤。

本研究中,无论是从木质素和纤维素相对降解率还是从白菜种子发芽指数来看,B01、B02 和 SB012 3 种固体菌剂在园林绿化废弃物中的应用效果均优于 EM 菌剂,可能是固态菌剂在调节堆体含水率的环节比液体菌剂更不容易淋溶流失,能够使目标菌群更稳定地扩繁,这也是固体菌剂的优势之一。

4 结 论

将芽孢杆菌固体菌剂 B01 和 B02 按质量比 3:1 混合制成的 SB012 固体复合菌剂,添加到园林绿化废弃物堆肥后,能显著促进木质素、纤维素降解,促进白菜种子发芽;经过 42 d 的腐熟,添加 SB012 固体菌剂制备的堆肥产品品质较优,各项指标均满足《GB/T 31755—2015 绿化植物废弃物处置和应用技术规程》^[24]所规定的要求,可以安全地在园林绿

化废弃物堆肥中推广应用。

[参考文献]

- [1] 郝利峰,孙向阳,李雪珂,等.不同外源添加物对园林绿化废弃物腐熟过程的影响[J].中国农学通报,2012,28(7):302-306.
Hao L F, Sun X Y, Li X K, et al. Effects of different exogenous additives in landscaping waste composting [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(7): 302-306.
- [2] 张传严,席北斗,张强,等.堆肥在土壤修复与质量提升的应用现状与展望[J].环境工程,2021,39(9):176-186.
Zhang C Y, Xi B D, Zhang Q, et al. Application status and prospect of compost in soil remediation and quality improvement [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(9): 176-186.
- [3] 康跃,李素艳,孙向阳,等.园林废弃物木质素降解真菌的筛选、鉴别及其能力研究[J].林业科学研究,2019,32(3):80-87.
Kang Y, Li S Y, Sun X Y, et al. Study on screening, identification and capability of lignin-degrading fungi for landscaping waste [J]. Forest Research, 2019, 32(3): 80-87.
- [4] 刘瑜,赵佳颖,周晚来,等.城市园林废弃物资源化利用研究进展[J].环境科学与技术,2020,43(4):32-38.
Liu Y, Zhao J Y, Zhou W L, et al. Progress on resource utilization of urban garden waste [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(4): 32-38.
- [5] Reyes-Torres M, Oviedo-Ocaña E, Dominguez I, et al. A systematic review on the composting of green waste: feedstock quality and optimization strategies [J]. Waste Management, 2018, 77: 486-499.
- [6] Fersi M, Mbarki K, Gargouri K, et al. Assessment of organic matter biodegradation and physico-chemical parameters variation during co-composting of lignocellulosic wastes with *Trametes trogii* inoculation [J]. Environmental Engineering Research, 2019, 24(4): 670-679.
- [7] Yu K F, Li S Y, Sun X Y, et al. Application of seasonal freeze-thaw to pretreat raw material for accelerating green waste composting [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 239: 96-102.
- [8] 张海滨,孟海波,沈玉君,等.好氧堆肥微生物研究进展[J].中国农业科技导报,2017,19(3):1-8.
Zhang H B, Meng H B, Shen Y J, et al. Research progress on microbial aerobic composting [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(3): 1-8.
- [9] 李洪涛,王涵,臧翔云,等.堆肥过程中纤维素酶活与纤维素降解相关研究[J].东北农业大学学报,2016,47(6):33-40.
Li H T, Wang H, Zang X Y, et al. Correlation study on cellulose activities and lignocellulose degradation during composting [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(6): 33-40.
- [10] Langsdorf A, Volkmar M, Holtmann D, et al. Material utilization of green waste: a review on potential valorization methods [J]. Bioresources and Bioprocessing, 2021, 8(1): 1-26.
- [11] Yu K F, Li S Y, Sun X Y, et al. Maintaining the ratio of hydrosoluble carbon and hydrosoluble nitrogen within the optimal range to accelerate green waste composting [J]. Waste Management, 2020, 105: 405-413.
- [12] Atiwesh G, Parrish C C, Banoub J, et al. Lignin degradation by microorganisms: a review [J]. Biotechnology Progress, 2022, 38(2): e3226.
- [13] Lundell T K, Mäkelä M R, Hildén K. Lignin-modifying enzymes in filamentous basidiomycetes-ecological, functional and phylogenetic review [J]. Journal of Basic Microbiology, 2010, 50(1): 5-20.
- [14] 赵新林,赵思峰.枯草芽孢杆菌对植物病害生物防治的作用机理[J].湖北农业科学,2011,50(15):3025-3028.
Zhao X L, Zhao S F. Research advance in controlling plant diseases by *Bacillus subtilis* [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(15): 3025-3028.
- [15] 敖静,李杨,刘晓辉,等.一株枯草芽孢杆菌GX7在鸡粪中的定殖及发酵作用的研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2019,34(5):867-873.
Ao J, Li Y, Liu X H, et al. Study on the colonization and fermentation of *Bacillus subtilis* GX7 in chicken manure [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2019, 34(5): 867-873.
- [16] 江高飞,暴彦灼,杨天杰,等.高温秸秆降解菌的筛选及其纤维素酶活性研究[J].农业环境科学学报,2020,39(10):2465-2472.
Jiang G F, Bao Y Z, Yang T J, et al. Screening of thermophilic cellulolytic bacteria and investigation of cellulase thermostability [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2465-2472.
- [17] 孟童瑶,李素艳,邹荣松,等.固定化木质素降解菌对园林废弃物堆肥的影响[J].浙江农林大学学报,2021,38(1):38-46.
Meng T Y, Li S Y, Zou R S, et al. Effect of immobilized lignin-degrading bacteria on green waste composting [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, 38(1): 38-46.
- [18] 顾娟,齐希光,李秀芬,等.固态微生物菌剂的制备及其在好氧堆肥中的应用[J].环境工程学报,2020,14(1):253-261.
Gu J, Qi X G, Li X F, et al. Preparation of solid microbial inoculants and its application in aerobic composting [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(1): 253-261.
- [19] 付冰妍,孙向阳,余克非,等.降解园林废弃物专用固体复合菌的构建及其堆肥效应研究[J].环境科学研究,2021,34(5):1231-1237.
Fu B Y, Sun X Y, Yu K F, et al. Construction of solid composite inoculum for green waste degradation and its effect on composting [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(5): 1231-1237.
- [20] 余克非.园林绿化废弃物堆肥优势降解菌的筛选及复合菌剂配比研究[D].北京:北京林业大学,2020.
Yu K F. Isolation of lignocellulolytic microorganisms to develop a composite inoculum for green waste composting [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [21] Yu K F, Sun X Y, Li S Y, et al. Application of quadratic regression orthogonal design to develop a composite inoculum

- for promoting lignocellulose degradation during green waste composting [J]. *Waste Management*, 2018, 79: 443-453.
- [22] 牛明杰,郑国砥,朱彦莉,等. 城市污泥与调理剂混合堆肥过程中有机质组分的变化 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 1016-1023.
- Niu M J, Zheng G D, Zhu Y L, et al. Dynamic of organic matter fractions during sewage sludge and bulking agent composting [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 1016-1023.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 40199—2021 城市园林废弃物资源回收和深加工技术要求 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 40199—2021 Technical requirements for resource recovery and further processing of urban garden waste [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 31755—2015 绿化植物废弃物处置和应用技术规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 31755—2015 Technical regulation of disposal and application for greenery waste [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [25] Brown M E, Chang M C. Exploring bacterial lignin degradation [J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2014, 19: 1-7.
- [26] 张磊, 陈雅丽, 陈双林, 等. 低温型复合腐熟剂的研制及其对牛粪堆肥的处理效果 [J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(5): 308-312.
- Zhang L, Chen Y L, Chen S L, et al. Development of low-temperature composite decomposition agent and its effect on cow dung compost [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(5): 308-312.
- [27] 郭小夏, 刘洪涛, 常志州, 等. 有机废物好氧发酵腐殖质形成机理及农学效应研究进展 [J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(6): 489-498.
- Guo X X, Liu H T, Chang Z Z, et al. Review of humic substances developed in organic waste aerobic composting and its agronomic effect [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(6): 489-498.
- [28] De Gonzalo G, Colpa D I, Habib M H, et al. Bacterial enzymes involved in lignin degradation [J]. *Journal of Biotechnology*, 2016, 236: 110-119.
- [29] Bhat M, Bhat S. Cellulose degrading enzymes and their potential industrial applications [J]. *Biotechnology Advances*, 1997, 15(3/4): 583-620.
- [30] Wu D, Wei Z M, Mohamed T A, et al. Lignocellulose biomass bioconversion during composting: mechanism of action of lignocellulase, pretreatment methods and future perspectives [J]. *Chemosphere*, 2022, 286(1): 131635.
- [31] Andlar M, Rezić T, Mardetko N, et al. Lignocellulose degradation: an overview of fungi and fungal enzymes involved in lignocellulose degradation [J]. *Engineering in Life Sciences*, 2018, 18(11): 768-778.
- [32] Duan M L, Zhang Y H, Zhou B B, et al. Effects of *Bacillus subtilis* on carbon components and microbial functional metabolism during cow manure-straw composting [J]. *Biore-source Technology*, 2020, 303: 122868.
- [33] 李恕艳, 李吉进, 张邦喜, 等. 菌剂对鸡粪堆肥腐殖质含量品质的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 268-274.
- Li S Y, Li J J, Zhang B X, et al. Influence of inoculants on content and quality of humus during chicken manure composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 268-274.
- [34] 吴庆珊, 周桂雄, 方正, 等. 一种纤维素降解复合菌剂在羊粪堆肥中的应用效果评价 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(3): 608-618.
- Wu Q S, Zhou G X, Fang Z, et al. Evaluation of application effect of a composite cellulose-degrading microbial agent in sheep manure composting [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 43(3): 608-618.
- [35] 胡亚冬, 范德朋, 孔维杰, 等. 复合菌剂强化餐厨垃圾好氧生物处理性能研究 [J]. *环境工程*, 2022, 40(4): 97-105.
- Hu Y D, Fan D P, Kong W J, et al. Improvement of food waste aerobic biological treatment performance by compound microbial agents [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(4): 97-105.