

接种枯草芽孢杆菌对沼渣堆肥效果的强化

吉婕莉, 王永忠

(重庆大学生物工程学院, 重庆 400030)

5 **摘要:** 针对沼渣堆肥因含有木质纤维素而导致堆肥时间过长, 腐熟不充分等问题, 实验研究了纤维素酶高产菌株枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis* Z2 不同接种量 (0、0.5%、1.5%、3% 和 10 5%) 对沼渣好氧堆肥特性的影响。结果表明: 与自然堆肥相比, 接种 *Bacillus subtilis* Z2 加快了木质纤维素降解, 降低了堆体 pH, 同时使腐殖化过程增强, 腐熟性能提高。当接种量为 3% 时, 纤维素、半纤维素和木质素去除率及成品堆肥的 GI 值最高, 与 CK 相比分别提高了 73.08%, 28.02%, 26.55% 和 31.05%, 其余腐熟指标也均优于其他组, 但对腐殖酸的生成无明显促进作用。当接种量为 0.5% 时, 成品堆肥的腐殖酸含量最高, 与 CK 相比提高了 32.14%, 有效促进了碳的腐殖化, 提高了堆肥产品质量

15 **关键词:** 沼渣; 好氧堆肥; 枯草芽孢杆菌; 木质纤维素; 腐殖酸

15 **中图分类号:** 请查阅《中国图书馆分类法》

Aerobic Composting Performance of Digested Residue Enhanced by *Bacillus subtilis* Z2 Addition

JI Jieli, WANG Yongzhong

20 (School of Biology Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030)

20 **Abstract:** In order to solve the problems of long composting period and insufficient maturity caused by lignocellulose in digested residue, the effects of different inoculation amounts of cellulose-producing strain *Bacillus subtilis* Z2 (0, 0.5%, 1.5%, 3% and 5%) on the composting characteristics of digested residue were studied. The results showed that the composting inoculated with *Bacillus subtilis* 25 accelerated lignocellulose degradation as compared with natural composting, resulting in the decrease of pH. Meanwhile, the humification and the maturity of pile were also enhanced. When the inoculation amount was 3%, the removal rates of cellulose, hemicellulose and lignin and the GI value at end of the compost were the highest, which were increased by 73.08%, 28.02%, 26.55% and 31.05% respectively compared with CK. The other maturity indexes were also better than those of other testing groups. 30 However, the formation of humic acid wasn't significantly promoted. When the inoculation amount was 0.5%, the humic acid content at end of the compost was the highest, which increased by 32.14% compared with CK. This result clearly indicates that inoculation *Bacillus subtilis* Z2 during lignocellulose composting effectively promoted the humification of carbon and improved the composting quality.

35 **Key words:** digested residue; aerobic composting; *Bacillus subtilis* Z2; lignocellulose; humic acid

0 引言

40 近年来, 农业秸秆和畜禽粪便的综合利用引起了各国广泛关注。固态沼气发酵因其具有耗水量低、产气率高、沼渣处理成本低等优点而成为处理农业废弃物的主流技术之一^[1, 2]。但固态发酵对有机物分解不够彻底, 沼渣通过堆肥可进一步分解残留有机物^[3, 4], 并通过腐殖质过程将碳储存在腐殖酸中, 提高最终有机肥肥效, 同时减少了碳的排放, 有利于实现碳中和。好氧堆肥是指在有氧条件下, 微生物对物料中的有机物进行分解和稳定化, 生成腐熟肥料的过程^[5], 具体可分为矿化和腐殖化两种阶段。矿化是指微生物将大分子有机物水解

45

作者简介: 吉婕莉 (1995-), 女, 硕士, 主要研究方向: 微生物资源及利用

通信联系人: 王永忠 (1968-), 男, 教授、博导, 主要研究方向: 微生物代谢调控. E-mail: wangyzy@cqu.edu.cn

利用,同时产生较不稳定的有机残基;腐殖化是指微生物将上阶段产生的有机残基在酶的作用下聚合为结构复杂和稳定的腐殖酸类物质。腐植酸能增加土壤微生物数量及活性,改善植物根系营养,促进作物生长^[6,7]。堆肥中的腐植酸还可以作为表面活性剂治理受到农药污染的土壤^[8,9],因此提高堆肥产品中的腐植酸含量具有良好的应用前景^[10]。

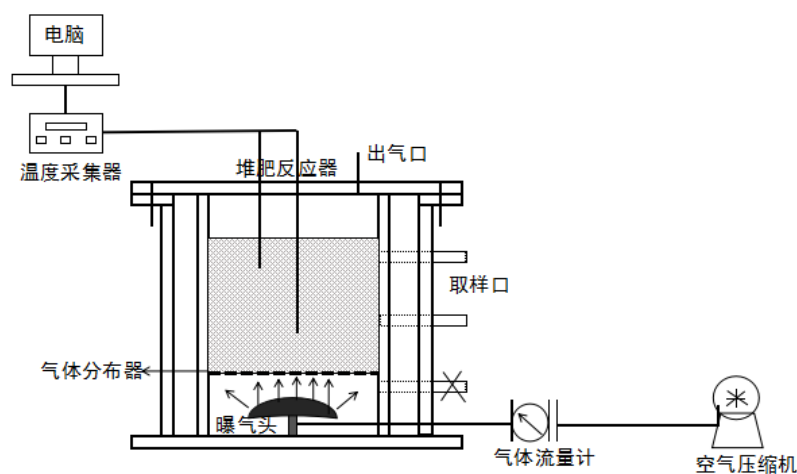
50 猪粪掺混稻秆固态沼气发酵结束后剩余的沼渣仍含有一定量的木质纤维素。木质纤维素因其结构复杂,难以被微生物利用,而成为制约沼渣腐熟效率的关键因素^[11]。接种对木质纤维素分解能力强的微生物,可以加快腐熟进程,提高堆肥质量^[12,13]。有研究报道,枯草芽孢杆菌提取物在纤维素分解过程中具有较高的纤维素酶活性,并有效促进了纤维素的降解^[14]。Yin 等人使用 Biolog 方法,发现芽孢杆菌与碳水化合物代谢密切相关^[15]。本课题前期
55 也筛选出了一株可高产纤维素酶的菌种 *Bacillus subtilis* Z2。因此将枯草芽孢杆菌接种到堆肥体系中,有利于改善堆肥的生物转化特性。

本研究以 90%沼渣和 10%稻秆为堆肥原料,在堆肥期间补充本实验室前期筛选的纤维素酶高产菌株枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis* Z2,从理化性质、木质纤维素去除率、腐殖酸含量、腐熟度四个方面评价不同枯草芽孢杆菌接种量对沼渣好氧堆肥的效果,以解决沼渣堆肥
60 时间长、有机质降解率低、腐熟不充分的问题,提高沼渣堆肥经济效益,实现畜禽粪污和秸秆等废弃物资源综合利用的完整产业链。

1 材料与方法

1.1 实验装置

沼渣堆肥系统由前期沼气发酵反应器改装而来,其由堆肥反应器和通气系统等组成,如图 1 所示。其中柱状堆肥区 ($\Phi 140\text{mm} \times 200\text{mm}$) 总体积为 3L,有效容积为 2.5L。反应器的盖子上有三个孔;两个用于插入热电偶,一个用于排气出口。在堆肥过程中使用两个热电偶
65 测量堆肥堆中心和顶部的温度。在反应器底部安装微孔曝气头,曝气头上方的支撑板上安装气体分布器,以实现进入反应器的气体均流作用。气体由空气压缩机驱动,由气体流量计调节气流大小。



70

图 1 堆肥反应器系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of testing system in the composting.

1.2 菌种和堆肥原料

沼渣为实验室前期猪粪掺混稻秆固态沼气发酵后剩余的残渣。固态沼气发酵在总固体含量为 25% 的条件下运行，所以沼渣无需固液分离，即可进行堆肥。稻秆来源于重庆市江津区，实验前用粉碎机粉碎至 0.85mm。利用沼渣为主要原料，结合稻秆来调节堆体的碳氮比和含水量。堆肥原料的基本性质见表 1。枯草芽孢杆菌为实验室前期从重庆市江津区玉米秸秆堆肥表层土壤中通过初筛、复筛得到的一株名为 *Bacillus subtilis* Z2 的产纤维素酶的菌株（保藏编号：CCTCC NO:M2020002）。

表 1 原料和接种物的基本理化性质

Tab. 1 Basic physical and chemical properties of experimental materials.

堆肥原料	含水量 (moisture content, %)	pH	碳氮比 (C/N)	纤维素 (hemicellulose, %)	半纤维素 (hemicellulose, %)	木质素 (lignin, %)
沼渣	70.28	6.03	13.85	17.61	20.06	5.71
稻秆	2.89	7.31	48.94	35.28	47.42	7.43

1.3 实验方案

取沼渣 486 g，粒径为 0.85 mm 的稻秆 54 g 于堆肥反应器中，接种枯草芽孢杆菌，充分混合后进行堆肥实验，通气量为 0.75 L/min。各组均设置 3 个平行实验，每隔 5 d 取样并混合均匀，样品置于 4℃ 冰箱保存，并测定含水量、pH、GI、HA、水溶性 TOC、水溶性 TN 以及木质纤维素基质组分的含量，并计算 T 值。

枯草芽孢杆菌活化操作：在超净工作台内，用接种环在前期于冰箱保存的枯草芽孢杆菌斜面培养基上轻轻挑取 2 环于新鲜配制的液体种子培养基内（10 mL），摇匀密封，然后放置 37℃ 恒温摇床内培养 12 h。取种子培养液 6 mL 于 300 mL 培养基内继续在 37℃ 恒温摇床内扩大培养 12 h。将枯草芽孢杆菌菌液按堆肥基质总干重的 0.5%、1.5%、3% 和 5% 接种于堆肥反应器内。未添加枯草芽孢杆菌的堆肥记为 CK。

1.4 分析方法

1.4.1 含水量的检测

采用重量法测定。将样品在真空干燥箱中（105±1）℃ 的条件下烘干至恒重，烘干前和烘干后的重量差与样品烘干前重量比值即为含水量。

1.4.2 pH 的检测

样品与去离子水以 1:10 (w/v) 混合，室温下振荡 30min。离心过滤得浸提液，用 pH 计测定。

1.4.3 水溶性有机碳 (TOC) 的测量

称取样品按照 1:20 (w/v, 以干重计) 加入去离子水，在室温下于 150 r/min 水平摇床上振荡浸提 30 min，浸提后的样品在 4000 r min⁻¹ 的离心机中离心 15 min，取上清液，过 0.22

μm 滤膜，将滤液稀释后用 TOC 仪测定水溶性 TOC 含量。

1.4.4 水溶性有机氮 (TN) 的测量

115 取 1.4.3 中过 0.22 μm 滤膜的滤液稀释后按照碱性过硫酸钾紫外分光光度法测定样品中的水溶性 TN 含量。C/N 为 TOC 和 TN 的比值。

1.4.5 木质纤维素含量的测定

纤维素、半纤维素和木质素的测定参考 Van Soest 方法^[16]。

1.4.6 腐殖酸 (HA) 含量的测定

110 HA 的测定采用重铬酸钾容量法^[17]。

1.4.7 种子发芽指数 (GI) 的测定

取 1.4.2 中的浸提液 5mL 于内衬有滤纸的培养皿内，取 10 粒青菜种子整齐摆放在滤纸上，在 25℃ 的恒温培养箱中暗培养 72 h，用去离子水作为空白对照，每个样品设 3 个重复。计算方法见式 (1)。

$$GI = \frac{\text{样品种子发芽数} \times \text{发芽根长}}{\text{对照种子发芽数} \times \text{发芽根长}} \times 100\%$$

115

2 结果及讨论

2.1 堆肥过程中含水量和 pH 的变化

本实验在整个发酵过程中，反应器温度一直在 25℃ 左右，故含水量的变化与温度关系不大。在堆肥过程中，堆体的含水量对好氧微生物生长至关重要，一般最适含水量为 50%~60%^[18]。由图 2 (a) 可知，各组起始含水量在 64% 左右，之后整体均呈下降的趋势。堆肥结束后含水量分别为 47.95%，43.21%，42.12%，43.31% 和 47.25%，与起始相比分别减少了 24.20%，32.91%，34.49%，32.96% 和 27.41%。相对 CK 而言，其余组含水量下降得多可能是因为枯草芽孢杆菌的加入导致堆肥微生物活动相对更强烈，产生更多热，使堆体较多水分蒸发^[12, 19]。

120

125 在堆肥过程中，pH 值会受到微生物代谢产物的影响而发生改变，因此 pH 值是反映好氧发酵进程的直观指标之一^[20]。pH 值变化如图 2 (b) 所示，各组堆肥起始 pH 值在 8.49 左右。在堆肥过程中，各 pH 值在第 5 d 有所上升，是因为在发酵初期蛋白质被降解为小分子氨基酸，氨基酸分解释放的铵离子增加了堆体的 pH 值^[21]。随着堆肥的进行，pH 值均逐渐下降并在腐熟后期趋于稳定，下降可能是因为木质纤维素降解产生更多的小分子有机酸。接种枯草芽孢杆菌的处理组 (0.5%、1.5% 和 3%) pH 下降程度高于 CK，可能是因为枯草芽孢杆菌的加入，加快了木质纤维素降解形成挥发性有机酸 (VFAs) 的速率。

130

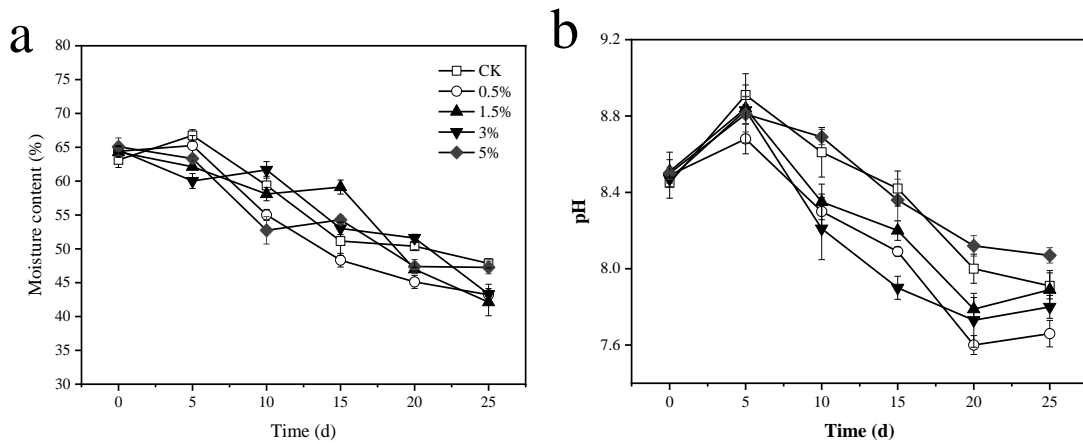


图 2 堆肥过程中含水量(a)和 pH (b)的变化

Fig. 2 Changes of moisture content (a) and pH(b) during composting.

135 **2.2 堆肥过程中木质纤维素含量的变化**

木质纤维素是堆肥基质中的主要大分子物质，其降解速率代表了堆体中微生物对有机物质的分解能力。从图 3 可知，好氧堆肥结束后，各处理组木质纤维素基质组分的含量均有所下降，但各组分去除率并不是随着接种量的增加而增加，其中接种量为 0.5%、1.5% 和 3% 的处理组的木质纤维素去除率均高于 CK，表明枯草芽孢杆菌有助于提高堆体的矿化能力，促进木质纤维素的转化，这与 Hu 等人的研究结果相似^[13]。接种量为 3% 的处理组的纤维素、半纤维素和木质素去除率最高，分别为 49%，30.84% 和 10.15%，与 CK 相比分别提高了 73.08%，28.02% 和 26.55%，可看出对纤维素的降解效果更明显，这证实了实验前期筛选的枯草芽孢杆菌的高产纤维素酶能力。另外接种量为 5% 的处理组木质纤维素去除率均低于其他组，原因可能是过量的枯草芽孢杆菌打破了原有堆体中的微生物群落结构平衡，使微生物代谢能力减弱。

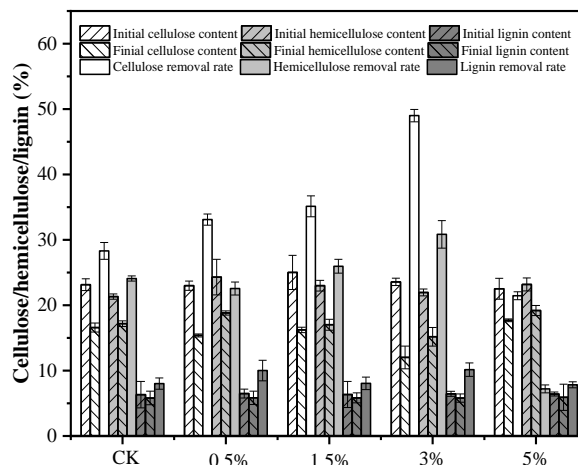


图 3 好氧堆肥前后纤维素、半纤维素、木质素含量以及去除率的变化

Fig. 3 Evolution of cellulose, hemicellulose and lignin content before and after composting and removal rate.

150 **2.3 堆肥过程中腐殖酸 (HA) 含量的变化**

腐殖化是将有机物转化为腐殖酸的过程，也是堆肥固碳的关键步骤。腐殖酸含量是影响

堆肥腐熟度及其农用效果的重要指标^[22, 23]。在本实验中, HA 含量变化如图 4 所示, 可知各处理组均呈先下降后上升的趋势, 这与李怨艳等人的研究结果一致^[24]。起始堆体中 HA 含量在 73 mg/g 左右, 在第 5 d 分别降到 50.28, 55.56, 51.23, 49.74 和 45.53 mg/g, 这是因为厌氧发酵结束后剩余沼渣中的 HA 结构简单不稳定。微生物除了利用木质纤维素等有机物质, 也会利用 HA 中不稳定的部分作为其碳源物质^[17], 此时堆体矿化作用强于腐殖化过程。随着发酵的进行, 堆肥基质中易分解的有机物被大量分解后, 微生物的降解作用逐渐趋弱, 生化聚合过程逐渐占据优势, HA 含量开始呈增长的趋势, 另外, 难以降解的木质素碳架也会结合到 HA 中^[25], 使得 HA 结构变得复杂稳定。堆肥结束后, 各组 HA 含量依次为 97.89, 129.36, 102.95, 100.53 和 85.78 mg/g, 与起始相比, 分别提高了 34.83%, 77.42%, 37.93%, 36.07% 和 20.66%, 其中 0.5% 的接种量明显提高了 HA 的产量, 达到固碳目的。在堆肥中后期, 接种量为 0.5% 的处理组的 HA 含量上升幅度明显高于 CK, 说明接种适量的枯草芽孢杆菌可以加速堆肥的腐殖化进程, 提高腐殖化程度及产品质量。然而, HA 含量的变化与前面木质纤维素降解效果不一致, 3% 的接种量明显提高了木质纤维素的去除, 但 HA 产量与空白组几乎相等。Duan 等在牛粪和麦秆堆肥中添加芽孢杆菌也发现了相似的现象^[26], 在大的接种量条件下, 被降解的木质纤维素最终更多以 CO₂ 形式散出或者被微生物分解用于自身生长而并未生成用来形成 HA 的前体物质, 因而 HA 含量较低。

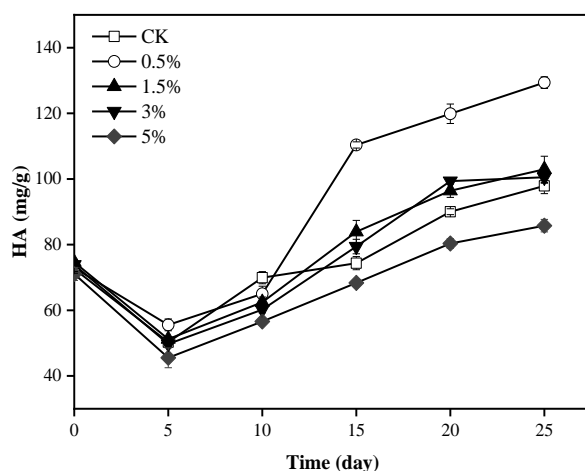


图 4 堆肥过程中 HA 含量的变化

Fig. 4 Changes of HA content during composting.

170

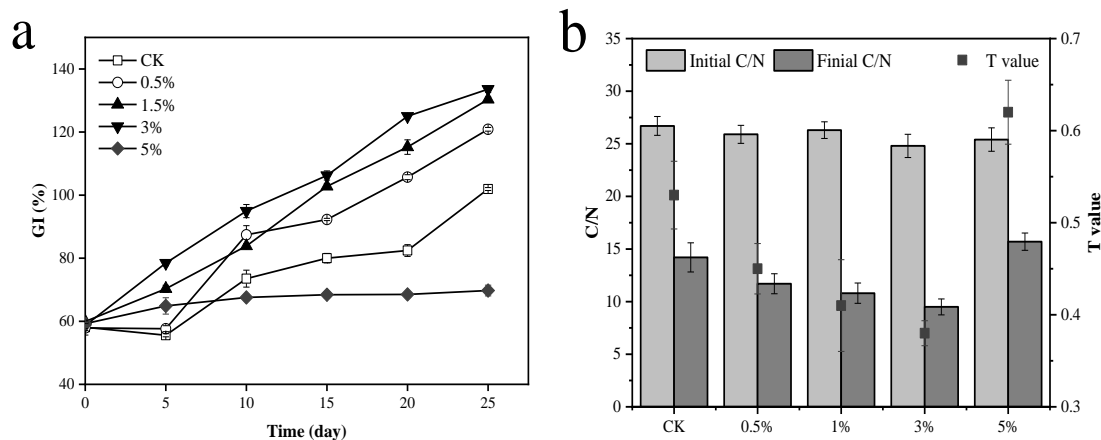
2.4 堆肥过程中腐熟度指标的变化

种子发芽指数 (GI) 是检验堆肥浸提液对植物毒性大小的重要指标, 也是判定堆肥腐熟程度的重要指标^[27]。GI 大于 50% 时堆肥腐熟, 大于 80% 时表明堆肥对植物完全没有毒性^[28]。有研究报道当 GI 值大于 101% 时, 堆肥产品具有植物营养素-植物刺激剂的特性, 可作为肥料用于农业生产^[29]。整个堆肥期间, GI 随时间变化如图 5(a) 所示, 各组整体均呈逐渐升高趋势。起始 GI 在 58% 左右, 堆肥结束后, 各组 GI 分别为 101.95%, 120.87%, 130.35%, 133.61% 和 69.75%, 相对起始分别提高了 75.44, 108.83%, 117.54%, 127.79% 和 17.72%, 其中枯草芽孢杆菌接种量为 3% 的 GI 提高得最多, 且明显高于 CK, 表明 3% 的接种量对堆体中 NH₃ 和有机酸等植物毒性物质的分解效果最好。接种量为 5% 的处理组最终的 GI 低于 80%, 也明显低于 CK, 表明枯草芽孢杆菌对堆肥腐熟性能的提高受剂量限制。另外, 在堆肥整个期间, 接种量为 0.5%, 1.5% 和 3% 的处理组的 GI 均高于 CK, 表明枯草芽孢杆菌的

180

补充使堆体腐熟速率高于自然堆肥处理,体现出明显的促进堆肥无害化的效果,这个结论与徐谓等人的研究结果一致^[30]。

185 碳和氮的变化是堆肥的基本特征之一,因此 C/N 是最常用于评价腐熟度的重要参数^[31]。
 一般认为 C/N 比降至 (15~20) : 1 以下时认为堆肥腐熟。由 2.10(b)可知,本实验各处理组堆肥均满足这一要求。有研究认为,不同堆肥原料的 C/N 比差异较大,使用 C/N 比作为堆肥的腐熟评价指标不够全面,而结合终点和初始 C/N 的比值(T 值)来评价堆肥腐熟更为合理^[32],其中 T 值<0.6 时堆肥腐熟。从图 5(b)可知,各处理组在堆肥结束后 C/N 比分别降至 14.2, 11.7, 10.8, 9.5 和 15.7,均满足堆肥腐熟对 C/N 比的要求。其中接种量为 0.5%, 1.5% 和 3% 的处理组 C/N 下降幅度明显高于 CK,表明接种枯草芽孢杆菌使堆体中的生物活性大大加强,有机物质被大量利用。另外,各组 T 值分别为 0.53, 0.45, 0.41, 0.38 和 0.62。综合各项腐熟指标,可认为 CK 和枯草芽孢杆菌接种量为 0.5%、1.5% 和 3% 的处理组堆肥均已达到腐熟,其中接种量为 3% 的处理组腐熟效果最佳。



195 图 5 堆肥过程中 GI (a)、C/N 比(b)和 T 值(c)的变化

Fig. 5 Changes of GI (a)、C/N ratio (b) and T value (c) during composting.

3 结论

200 实验研究了枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis* Z2 不同接种量对沼渣好氧堆肥性能的影响。结果表明:在沼渣堆肥期间补充枯草芽孢杆菌有助于沼渣的矿化、腐殖化及腐熟。当枯草芽孢杆菌接种量为 3% 时,纤维素、半纤维素和木质素去除率最高,分别为 49%、16.13% 和 19.35%; GI 达到 133.61%, C/N 降至 9.50 以及 T 值为 0.38,腐熟效果最好。当枯草芽孢杆菌接种量为 0.5% 时,明显促进了腐殖酸的生成,最终腐殖酸含量值高达 129.36 mg/g,固碳效果最好,提高了最终堆肥产品质量。综合考虑,本实验认为在实际生产中,枯草芽孢杆菌在堆肥中的最佳接种量为 0.5%。

205

[参考文献] (References)

[1] Huang W W, Zhao Z W, Yuan T, et al. Enhanced dry anaerobic digestion of swine excreta after organic nitrogen being recovered as soluble proteins and amino acids using hydrothermal technology[J]. Biomass & Bioenergy, 2018, 108: 120-125.

- 210 [2] Alessandro C, Francesco D B, Sonia L. Dry anaerobic digestion of cow manure and agricultural products in a full-scale plant: Efficiency and comparison with wet fermentation[J]. Waste Management , 2018, 71: 704-710.
- [3] Wang T T, Wang S P, Zhong X Z, et al. Converting digested residue eluted from dry anaerobic digestion of distilled grain waste into value-added fertilizer by aerobic composting[J]. Journal of Cleaner Production, 2017(166): 530-536.
- 215 [4] Teglia C, Tremier A, Martel J L. Characterization of Solid Digestates: Part 2, Assessment of the Quality and Suitability for Composting of Six Digested Products[J]. Waste Biomass Valorization, 2011, 2(2): 113-126.
- [5] Wang Q, Awasthi M K, Zhao J C, et al. Improvement of pig manure compost lignocellulose degradation, organic matter humification and compost quality with medical stone[J]. Bioresource Technology, 2017, 243: 771-777.
- 220 [6] 袁婉潼. 生物腐殖酸对盐碱土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(01): 1-4+45.
- [7] 张瑜, 王若楠, 邱小倩, 等. 腐植酸对植物生长的促进作用[J]. 腐殖酸, 2018(02): 5-9.
- [8] Yuan Y, Xi B D, He X S, et al. Compost-derived humic acids as regulators for reductive degradation of nitrobenzene[J]. Journal of hazardous materials. 2017, 339: 378-384.
- [9] 杨承建, 曾清如, 曹优明, 等. 腐殖酸极性与有机农药吸附行为的关系[J]. 环境科学学报, 2007(08): 1320-1325.
- 225 [10] 薛兆骏, 彭永臻, 王鹏鹞, 等. 自发热持续高温好氧堆肥碳、氮、腐殖酸变化过程[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4094-4098.
- [11] 岳丹, 王磊, 乔莉娟, 等. 高效纤维素降解菌株筛选及其复合微生物菌剂在有机堆肥中的应用效果[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 273-276.
- 230 [12] 刘维维, 金晓, 辛寒晓, 等. 强化型 EM 菌剂对金针菇菌糠堆肥的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(22): 78-85.
- [13] Hu T, Wang X J, Zhen L S, et al. Effects of inoculating with lignocellulose-degrading consortium on cellulose-degrading genes and fungal community during co-composting of spent mushroom substrate with swine manure[J]. Bioresource Technology. 2019, 291: 1-36.
- 235 [14] Siu-Rodas, Y, de los Angeles Calixto-Romo, et al. Bacillus subtilis with endocellulase and exocellulase activities isolated in the thermophilic phase from composting with coffee residues[J]. Rev. Argent Microbio. 2018, 50(3): 234-243.
- [15] Yin Y N, GU J, Wang X J, et al. Effects of rhamnolipid and Tween-80 on cellulase activities and metabolic functions of the bacterial community during chicken manure composting[J]. Bioresource Technology, 2019, 288: 1-9.
- 240 [16] Vansoest P J. USE OF DETERGENTS IN ANALYSIS OF FIBROUS FEEDS .2. A RAPID METHOD FOR DETERMINATION OF FIBER AND LIGNIN[J]. Journal of the Association of Official Agricultural Chemists, 1963, 46(5): 829-+.
- [17] 王楠. 基于腐殖酸生物合成的木质纤维素好氧固态发酵特性研究[D]. 重庆大学, 2019.
- 245 [18] Ge M S, Zhou H B, Shen Y J, et al. Effect of aeration rates on enzymatic activity and bacterial community succession during cattle manure composting[J]. Bioresource Technology, 2020, 304: 1-10.
- [19] 卢洋洋, 杨硕, 张玉, 等. 不同复合微生物菌剂对牛粪堆肥效果的影响[J]. 家畜生态学报, 2021, 42(02): 43-49.
- [20] 勾长龙, 高云航, 刘淑霞, 等. 微生物菌剂对堆肥发酵影响的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(06): 1244-1247.
- 250 [21] Yang X C, Han Z Z, Ruan X Y, et al. Composting swine carcasses with nitrogen transformation microbial strains: Succession of microbial community and nitrogen functional genes[J]. Science of the Total Environment, 2019, 688: 555-566.
- [22] Qi H S, Zhao Y, Zhao X Y, et al. Effect of manganese dioxide on the formation of humin during different agricultural organic wastes compostable environments: It is meaningful carbon sequestration[J]. Bioresource Technology, 2020, 299: 1-8.
- 255 [23] Zhao X L, Li B Q, Ni J P, et al. Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(01): 232-240.
- [24] 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.
- 260 [25] 卢松. 微生物处理玉米秸秆的腐解特征研究[D]. 西南大学, 2010.
- [26] 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]. Bioresource Technology, 2020, 303: 1-8.
- 265 [27] Wang X, Jonathan A S, Wong W C. Influence of lime on struvite formation and nitrogen conservation during food waste composting[J]. Bioresource Technology., 2016, 217: 227-232.
- [28] Tiquia S M, Tam N F Y. Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge[J]. Bioresource Technology, 1998, 65(1-2): 43-49.
- [29] Aggelis G, Ehalotis C, Nerud F, et al. Evaluation of white-rot fungi for detoxification and decolorization of effluents from the green olive debittering process[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 59(2-3): 353-360.
- 270 [30] 徐谓, 王心怡, 王定一, 等. 接种高温芽孢杆菌促进堆肥腐熟研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(05): 1134-1141.
- [31] 陶娟娟. 淮南市污水厂污泥资源化利用研究[D]. 安徽理工大学, 2012.
- [32] 董存明, 张曼, 邓小垦, 等. 不同碳氮比条件下鸡粪和椰糠高温堆肥腐熟过程研究[J]. 生态与农村环

