

生物炭对沼渣堆肥理化性状及微生物种群变化的影响

张海滨^{1,2}, 孟海波², 沈玉君², 赵立欣^{2*}, 周海滨², 丁京涛²

(1 天津科技大学生物工程学院, 天津 300457; 2 农业部规划设计研究院农村能源与环保研究所/
农业部资源循环利用技术与模式重点实验室, 北京 100125)

摘要:【目的】近年来沼气工程发展迅速, 沼渣的合理利用成为制约沼气工程发展的瓶颈。本文通过试验探讨了添加生物炭制备沼渣堆肥的可行性, 为沼渣高效资源化利用提供一条安全可行的途径。【方法】供试沼渣为鸡粪沼气工程(干发酵, 沼渣经固液分离处理), 生物炭为果木于 550℃ 高温热解 2 h 制得。以沼渣为主要堆肥原料, 添加猪粪调节氮含量, 以 1 cm 左右玉米秸秆为调理剂, 控制物料 C/N 为 25 : 1, 含水率控制在 65%~70%, 在室温 25℃ 下堆置 30 d。生物炭添加量共设 0、2%、5% 和 10% 四个水平(表示为 CK、F1、F2、F3)。测定了沼渣堆肥过程中的理化性质及微生物含量变化。【结果】堆肥过程中, 各处理最高温度均达到 55℃ 以上, F1、F2 处理组高温持续时间在 6 d 左右, 达到无害化要求。pH 与 EC 具有相同变化规律, 均呈先上升后下降, 最后趋于平缓趋势。四组处理的 pH 值在 8.55~8.80 之间, F2 处理 pH 值始终大于其它三组处理, 且处于较高水平(>8.7), 升温期 pH 最大值达到 9.03。四组处理电导率均低于 1 mS/cm。与 CK 相比, F1、F2、F3 处理组有机质含量分别降低了 13.0%、9.3%、7.4%, 且总有机质含量均大于 45%, 总养分含量分别提高了 6.5%、4.3%、2.2%, 种子发芽指数也均在 85% 以上。添加生物炭对细菌、真菌、放线菌的影响不同。随着生物炭添加比例的提高, 细菌数量减少, 两者呈负相关; 放线菌数量呈上凹曲线型, F2 处理对放线菌具有最大抑制作用; 真菌数量随生物炭添加量增加而增加。不同处理堆肥腐殖质含量变化总体先减少后增加, 呈“V”字型, 第 11 d 达到最低值, 以 F1 处理组始终处于较高水平, 远高于其它三组处理, 最高值达到 24.08%, 最低为 17.92%。与 CK 对比, F1、F2、F3 处理组产品腐殖质含量分别提高了 8.12%、7.23%、7.43%。【结论】生物炭的添加能够延长堆肥的高温期, 改变堆肥理化性质, 促进堆肥腐熟, 提高总养分含量, 综合分析生物炭对微生物的影响, 添加 2% 的生物炭(干基比)对堆肥微生物的生长具有最大的促进作用, 显著促进堆肥腐熟。

关键词: 生物炭; 沼渣; 微生物; 腐殖质; 发芽指数

Effect of biochar addition on physicochemical properties and microbial population of biogas residue compost

ZHANG Hai-bin^{1,2}, MENG Hai-bo², SHEN Yu-jun², ZHAO Li-xin^{2*}, ZHOU Hai-bin², DING Jing-tao²
(1 College of Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2 Institute of Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agricultural Engineering/Key Laboratory of Technology and Model for Cyclic Utilization from Agricultural Resources, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China)

Abstract: 【Objectives】Biogas is an important and effective way in deal with the waste from intensive animal farming in China, however, the recycling use of biogas residue has become a bottleneck of restricting the development of biogas projects. This paper attempted to use the biogas residue to make safe compost. 【Methods】The tested biogas residue was from a chicken farm, the biochar was made of fruit wood through pyrolysis at 550℃ for 2 h. The biogas residue was the main raw material, the pig manure and maize straw of 1 cm long were used to adjust the C/N to 25 : 1, the moisture contents was controlled at 65%–70% during the composting. Biochar was added in rate of 0, 2%, 5% and 10% of the fermentation materials (dry-base ratio), and

收稿日期: 2017-11-01 接受日期: 2018-10-08

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAL04B03)资助。

联系方式: 张海滨 E-mail: hbzhang34@163.com; * 通信作者 赵立欣 E-mail: Zhaolixin5092@163.com

recorded as CK, F1, F2, and F3, respectively. The composting lasted 30 days at room temperature. The physical and chemical properties and the quality of composts were determined during the aerobic composting process.

【 Results 】 During the composting process, the highest temperature in all the treatments reached above 55.0°C, and the high temperature lasted for 6 days in F1 and F2, which met the harmless requirements. The variation of pH and EC was the same, all showed the trend of increasing first and then decreasing, and finally tending to be flat. The pH values in all the four treatments were in range from 8.55 to 8.80, and the pH of F2 treatment was always higher than those of the other three groups (>8.7) with the maximum pH of 9.03 during the heating period. The electrical conductivity of all treatments was below 1 mS/cm. Compared with CK, the organic matter contents in F1, F2 and F3 were respectively reduced by 13.0%, 9.3% and 7.4%, nevertheless, they were all higher than 45%; the total nutrient contents were increased by 6.5%, 4.3% and 2.2%; the seed germination indices were all higher than 85%. The addition of biochar could increase the number of microbes, but the effects on bacteria, fungi and actinomycetes were different. With the increase of biochar addition proportion, the number of bacteria were reduced, the number of actinomycetes showed a concave trend and the greatest inhibitory effect was in F2, and the number of fungi was increased. The humus contents in composts of all treatments decreased first and then increased, showing the "V" shape, reaching the lowest value on the 11th day. The humic acid content in F1 treatment was higher than those in the other three groups, the highest value was 24.08%, the lowest was 17.92%. Compared with CK, the humus contents of the final product were increased by 8.12%, 7.23% and 7.43% in F1, F2 and F3 treatments, respectively. **【 Conclusions 】** The addition of biochar could prolong the high temperature duration, change the physical and chemical properties of biogas residue compost, promote the maturity and improve the total nutrient contents. Among the three addition proportions tested, the addition of 2% biochar (dry basis ratio) performs the best for the composting process.

Key words: biological activated carbon; biogas residue; microorganism; humus; germination index

在厌氧环境下, 有机废弃物在微生物作用下经过发酵产生沉积物, 即沼渣。沼渣营养物质丰富, 是优质的农田填料, 但不合理的处理会造成环境污染, 资源浪费。据不完全统计, 2005年至2015年期间我国沼气工程由1.2万处猛增至11.09万处, 沼渣数以千万计^[1]。沼渣制肥是解决沼渣资源化利用、防止二次污染的有效途径。沼渣以难降解有机物为主, 例如纤维素类物质^[2], 不适合单独好氧发酵, 通过添加污泥、畜禽粪便^[3-4]、微生物菌剂^[5-6]等方法, 可以提高沼渣堆肥腐熟效果, 达到有机肥标准。

生物炭富含有机质, 具有微孔结构^[7-11], 是堆肥过程中理想的添加材料, 有利于改变堆肥环境并提高堆肥产品的品质。有研究表明, 猪粪堆肥中添加9%的竹炭可以提高约65%的总氮含量^[12-13]; 同时, 向畜禽粪便中添加生物炭可以促进堆肥腐熟, 加速有机物降解, 提高腐殖酸含量^[10, 13]; 生物炭的添加还可以促进微生物繁殖, 提高微生物数量, 进而改善堆肥条件^[14]。

然而, 生物炭对沼渣堆肥理化特性的影响缺乏研究, 生物炭如何影响微生物数量还未见报道。本

研究以生物炭为添加剂, 研究生物炭对沼渣堆肥过程中理化性质、微生物数量及堆肥腐熟的影响, 以为生物炭基沼渣肥的研发提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 堆肥原料

沼渣取自北京大兴区留民营鸡粪沼气工程(干发酵, 沼渣经固液分离处理), 猪粪取自大兴青云店, 玉米秸秆取自北京市大兴区青云店镇孝义村周边农田; 生物炭购于河南商丘三利公司, 由果木于550°C高温热解2 h制得。供试材料理化性质详见表1。

1.2 堆肥设备

堆肥设备采用农业部规划设计研究院自主研发发酵罐, 为双层圆筒状结构, 由不锈钢制成, 顶部密封, 为密闭式堆肥反应器。堆肥设备外径45 cm, 高46 cm, 管壁厚5 cm, 容积为60 L。试验过程中通过鼓风机曝气, 提高氧气浓度, 曝气风速0.1 m³/(m³·min), 每个堆肥设备布设三个专用温度传感器, 分别连续监测上、中、下三个不同高度堆体温

表 1 堆肥原理想理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of compost materials

原料 (干基) Raw material (dry base)	C (%)	N (%)	C/N	含水率 (%) Moisture
猪粪 Pig manure	8.82	0.57	15.58	70.0
秸秆 Straw	38.28	0.84	45.57	12.7
沼渣 Biogas residue	25.39	1.55	16.38	62.4
生物炭 Biological C	58.42	0.60	97.37	7.5

度。根据经验值设计堆肥设备自动化曝气时长 5 min、间隔 40 min, 采用时间反馈控制好氧发酵 (图 1)。

1.3 试验设计

以沼渣为主要堆肥原料, 添加猪粪调节氮含量, 以 1 cm 左右玉米秸秆为调理剂, 控制物料 C/N 为 25 : 1, 含水率控制在 65%~70%, 在室温 25℃ 下堆置 30 d。试验共设 4 个处理, F1、F2、F3 分别添加

2%、5%、10% 比例的生物炭, 以 CK 为对照, 生物炭添加量按物质干重比计算, 具体见表 2。

1.4 样品采集

堆制过程中, 利用温度反馈自动控制系统每 30 min 自动记录堆体温度, 并在堆肥不同阶段分别监测堆体电导率、pH 值、腐殖质的变化, 堆肥结束后测定有机肥产品行业指标及种子发芽指数。堆肥过程中分别在 1、2、4、8、12、16、20、30 d 采集堆肥样品 300 g, 每次样品分成 2 份, 一份保存在 -80℃ 微生物保存冰箱中待用, 一份用于检测各理化指标。各指标做 3 次平行。

1.5 测定方法

1) 堆肥温度: 用温度反馈自动控制系统实时监测并记录。

2) pH 值、电导率 (electrical conductivity, EC): 称取过 $\Phi 1$ mm 筛的风干样 5.0 g 于 100 mL 烧杯中,

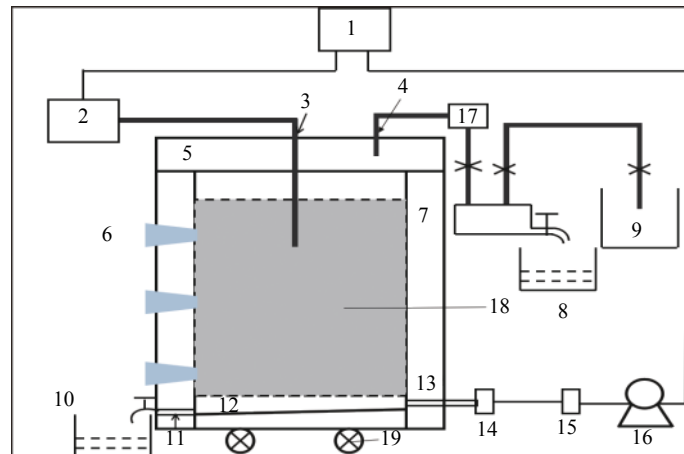


图 1 强制通风静态堆肥反应器示意图

Fig. 1 Sketch map of static pile composting reactor with mandatory ventilation

[注 (Note): 1—电脑 Computer; 2—温度采集器 Temperature collector; 3—温度探头接口 Temperature probe interface; 4—尾气探头接口 Exhaust probe interface; 5—盖子 Cover; 6—取样口 Sampling port; 7—保温层 Insulating layer; 8—排水处 Drainage port; 9—尾气处理 Exhaust gas treatment; 10—渗滤液收集 Leachate collecting; 11—渗滤液排出口 Leachate discharge outlet; 12—筛板 Sieve plate; 13—进气口 Air inlet; 14—流量计 Flow meter; 15—电磁阀 Electromagnetic valve; 16—气泵 Gas mercury; 17—尾气收集 Exhaust collection; 18—物料层 Material layer; 19—轮子 Wheel.]

表 2 不同原料配比 (kg)

Table 2 Different raw material ratios

处理 Treatment	玉米秸秆 Maize straw (含水率 Moisture 12.7%)	沼渣 Biogas residue (含水率 Moisture 62.4%)	猪粪 Pig manure (含水率 Moisture 70.0%)	生物炭 Biochar	总氮 Total N	总炭 TOC
F1	6.0	10.0	4.0	0.20	0.11	3.07
F2	6.0	10.0	4.0	0.50	0.11	3.07
F3	6.0	10.0	4.0	1.02	0.11	3.07
CK	6.0	10.0	4.0	0	0.11	3.07

加 50 mL 水 (经煮沸驱除二氧化碳), 搅动 15 min, 静置 30 min, 用 pH 计测定 pH, 用电导率仪测定 EC。

3) 种子发芽率指数 (germination index, GI): 取堆肥浸提液 20 mL, 倒入垫有滤纸的培养皿中 (对照取 20 mL 清水), 取 30 粒油菜种子于 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温恒湿培养箱中培养 48 h 测定发芽率^[15]。

$$GI = \frac{\text{浸提液种子发芽率} \times \text{根长}}{\text{对照种子发芽率} \times \text{根长}} \times 100\%$$

4) 腐殖质含量: 重铬酸钾—硫酸法。

5) 微生物数量: 荧光定量 PCR (绝对定量), 由北京美吉桑格生物科技有限公司测定。

1.6 数据处理

采用 Origin10.0 软件进行作图分析, 采用 SPSS statistics19.0 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度的变化

图 2 显示, 四组处理温度均经历了“上升—下

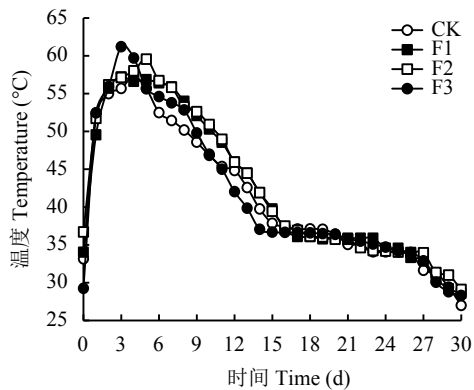


图 2 堆肥过程中温度的变化

Fig. 2 Changes in temperature during the composting

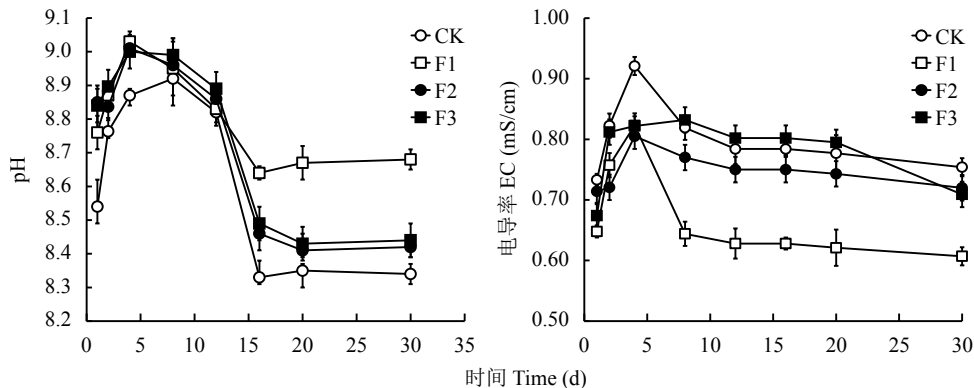


图 3 堆肥过程中 pH 和电导率的变化

Fig. 3 Variation of pH and EC during composting

降—稳定”的变化过程。这是因为升温期, 微生物快速分解利用堆体中易降解有机物, 大量繁殖并产生大量热能, 堆肥温度迅速上升; 进入高温期温度达到 55°C 以上, 导致大量微生物失活, 并在曝气作用下水蒸气带走大量的热能, 堆肥温度开始下降; 微生物复苏以后, 堆肥开始腐熟, 发酵过程结束^[16]。随着生物炭添加比例的增加, 各堆肥处理最高温度分别达到 57.28°C 、 59.54°C 、 61.02°C 、 57.2°C ; 处理 F1、F2 不仅可达到 55°C 以上, 而且高温持续时间在 6 天左右, 堆肥可达无害化标准; 但处理 F3、CK 维持时间仅 3 天, 达不到无害化标准 (好氧堆肥无害化工艺条件: 堆层温度 55°C 以上需维持 3 天以上^[17])。

添加生物炭沼渣堆肥与普通堆肥对比, 可以更快的达到高温期, 延长高温期时间。F3 处理与 F1、F2、CK 相比较, 最高温度可以达到 61.02°C , 但高温期维持时间短, 达不到无害化要求。这主要是因为生物炭的微孔结构可以增加持水性, 较高的含水率有利于保温; 而过高的生物炭添加比例会增加堆体孔隙率, 在高温曝气的情况下, 会加速水分的流失, 不利于保温, 从而导致温度高而时间短^[18]。

2.2 堆肥过程中 pH、EC 的变化

图 3 显示, 堆肥初期各处理的 pH 值在 $8.55 \sim 8.80$ 之间, 且后期变化趋势相同, 均呈先上升, 后下降, 最后趋于平缓趋势。堆肥过程中, F1 处理 pH 值始终大于其它三组处理, 处于较高水平 (>8.7), 且升温期达到 pH 最大值 9.03, 这说明 F1 有机质分解较快, 产生大量 NH_3 , $\text{NH}_4\cdot\text{OH}$ 的存在导致 pH 值的升高; CK 处理 pH 值始终处于低水平, 堆肥后期达到最小值 8.34。

堆肥重要因素之一是可溶性盐的浓度 (EC), 主要以离子态存在于浸提液中, 且对作物具有毒害作

用。研究显示, 堆肥腐熟的指标之一是不超过电导率限值 4.0 mS/cm ^[19]。由不同处理电导率变化 (图 3) 可知, 沼渣经过二次发酵, 所有处理电导率均低于 1 mS/cm (沼渣经过初次厌氧发酵, 大量可溶性盐进入沼液), 变化趋势与 pH 相似, 表现为升温期上升, 高温期达到最大值, 降温期下降趋于平缓; 四组处理电导率均在降温期达到最小值, 依次为 $F3 > CK > F2 > F1$, $F1$ 处理电导率最低, 在 0.6 mS/cm 左右。

图 3 显示, 生物炭对 pH、EC 具有显著影响。CK 处理 pH 始终处于低水平, 生物炭的添加促进了微生物的繁殖, 分解有机物产生大量 NH_3 和小分子有机酸, 碱化作用大于酸化作用, 引起 pH 上升; 进入高温期以后, 微生物活性降低, 小分子有机酸酸化作用凸显, pH 降低; 降温期温度下降以后, 小分子有机酸被逐渐矿化降解, 堆体的 pH 值稍有升高并趋于稳定。堆肥过程中 EC 变化趋势与 pH 变化趋势类似, 但是 EC 下降速率较快, 主要原因是生物炭对盐基离子具有一定的吸附作用, 减少水溶性盐含量; 同时, 微生物对盐基离子具有降解作用^[4]。因此, 适当地添加生物炭可以延长高温期, 降低 EC 值。

2.3 堆肥过程中微生物的变化

2.3.1 细菌 图 4 显示, 堆肥过程中细菌总量在升温期与降温期分别达到最大值, 产生两次波峰, 高

温期细菌总量降低, 这是由于堆肥初期微生物利用易降解有机物, 如可溶性单糖、粗蛋白大量繁殖; 高温期温度达到 55°C 以上; 高温阶段大量细菌失活, 导致微生物数量急剧减少; 降温阶段温度下降, 周围环境再次适宜微生物的生长, 细菌复壮; 但堆肥后期有机物较难降解, 无法满足细菌的生长需要从而导致细菌总量再次减少。微生物数量表现出升温期急剧增长, 高温期减少, 后期再增长的趋势; 堆肥前期 (0~8 d) $F1 > CK > F2 > F3$, 堆肥后期 (9~30 d) $F1 > F2 > F3 > CK$; 其中, $F1$ 处理细菌数量远多于其它三组处理, CK 处理在堆肥前期 (0~8 d) 细菌数量要高于 $F2$ 、 $F3$ 处理, 但堆肥后期 (9~30 d) $F2$ 、 $F3$ 处理反而超过 CK 处理, 说明生物炭特有的微孔结构给细菌提供了有利于细菌生长的微环境^[20-21]。

2.3.2 放线菌 整个堆肥过程中, 放线菌变化趋势与细菌类似, 呈“上升—下降—再上升”趋势, 但在数量上比细菌低两个数量级; 堆肥过程中, 放线菌微生物量 $F1 > F3 > CK > F2$, $F1$ 处理放线菌数量显著多于其它处理, $F2$ 处理始终处于低水平, $F3$ 处理处于中间水平 (图 4)。这可能是由于生物炭不但具有保护微生物、提供微环境的优势, 同时具有相对减少碳源的劣势, 影响微生物生存; 当优势大于劣势, 对微生物产生正作用, 反之, 产生负作用。

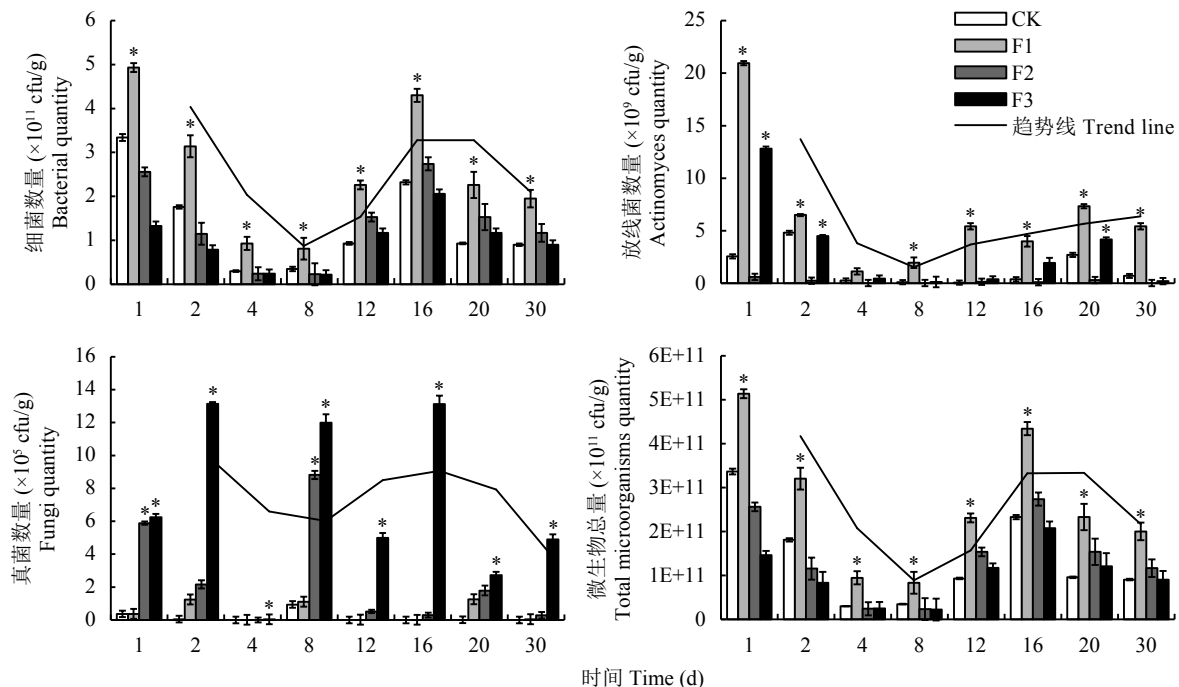


图 4 堆肥过程中微生物数量的变化

Fig. 4 Changes of microbial quantity during composting

[注 (Note): CK、F1、F2、F3 生物炭添加量分别为添加 0%、2%、5%、10% Biochar addition is 0, 2%, 5% and 10% in CK, F1, F2 and F3; *— $P < 0.05$.]

2.3.3 真菌 由图 4 可知,在数量上,真菌远比细菌、放线菌要少,且真菌对堆肥环境的变化更加敏感,因此,堆肥过程中真菌的变化较为明显。堆肥过程中,真菌的数量 $F3 > F2 > F1 > CK$, CK 处理真菌数量最低,真菌数量与生物炭添加比例成正比,生物炭对真菌具有保护作用,提供了适宜的微环境。

2.3.4 微生物总量 四组处理变化趋势相同,堆肥微生物中,细菌占比较大,细菌比放线菌要高 2 个数量级,比真菌要高 6 个数量级,因此微生物总量的变化趋势与细菌类似,先上升后下降再上升;而 F1 处理生物量远高于其它处理,升温期(1 天)达到最大值 5.14×10^{11} cfu/g,高温期(8 天)达到最小值 0.8×10^{11} cfu/g。堆肥过程中,堆肥初期主要降解一些易降解有机物,微生物增殖迅速,温度在 1 天内达到 50°C , pH、EC 等理化指标同时呈上升趋势;达到高温期(55°C 以上)以后,严重影响微生物生理活性,微生物数量减少,随着降解活动的减少, pH、EC 等理化指标开始下降,温度达到顶峰以后也开始下降;随着温度的降低,堆肥环境逐渐适宜微生物生长,微生物开始繁殖,堆肥达到腐熟阶段,温度、pH、EC 变化趋势趋于平缓。

微生物是堆肥过程中的主要参与者,与堆肥环境之间具有相互作用^[22-25],与有机物的降解、腐熟息息相关。堆肥温度与微生物之间是相互影响的,微生物的生长繁殖势必会引起堆肥温度的变化,且适宜的堆肥温度有利于微生物的生长,而高温会产生抑制作用。由图 2 可知,堆体在第 4 天达到 55°C ,第 11 天温度下降到 55°C 以下;微生物总量在第 4 天达到谷值,第 11 天开始回升;微生物增长出现两次峰值,一次出现在升温期,一次出现在降温期,变化趋势与温度相反,体现了温度与微生物之间的相互影响作用。

细菌作为沼渣堆肥过程中的主要微生物,相比于真菌、放线菌,大的比表面积可以提高细菌对可溶性底物的利用效率,加快细菌繁殖^[26],在数量上远高于真菌、放线菌;细菌量堆肥前期(0~8 d) $F1 > CK > F2 > F3$,堆肥后期(9~30 d) $F1 > F2 > F3 > CK$,说明细菌与生物炭添加量之间呈负相关,过量的生物炭并不利于细菌的生长,生物炭具有较低的生物有效性^[27],难以被细菌降解利用,同时存在于生物炭中的有毒挥发性物质对细菌具有毒害作用^[28-29],从而对细菌生长产生负作用。

放线菌具有发达的菌丝和细胞壁,很少利用纤

维素,但它们可以容易地利用半纤维素,并在一定程度上分解木质素,放线菌还可以耐受高温和碱性环境^[30-31]。沼渣堆肥过程中,放线菌数量 $F1 > F3 > CK > F2$,说明生物炭对放线菌的影响呈上凹型,适量生物炭对放线菌有最高的抑制作用。这是因为生物炭除了直接提供微生物生长场所以外,还可能引起沼渣堆肥理化性质的改变、养分含量与有效性的增减等^[32-33],这些改变会导致放线菌发生不同的生长代谢反馈,改变生长分布状况,最终导致放线菌数量不同的变化趋势^[34-35]。

真菌对于沼渣堆肥物料的腐熟和稳定具有重要意义^[2]。研究表明,真菌的生长繁殖受堆肥温度的影响显著,绝大部分的真菌是嗜温性菌,其最适温度为 $25 \sim 30^\circ\text{C}$ 。对于真菌微生物量,堆肥过程中 $F3 > F2 > F1 > CK$,说明生物炭对真菌的影响呈正相关,添加生物炭有利于真菌生长,主要原因是生物炭的高芳香化表面、孔隙结构及对水肥吸附作用使其为真菌栖息提供良好的“微环境”^[36-37],有利于真菌生长,从而提高真菌数量。综合试验结果表明,F1 对沼渣堆肥微生物总量具有最大正相关性,显著促进堆肥腐熟。

2.4 堆肥过程中腐熟度的变化

图 5 显示,腐殖质含量总体表现为先减少后增加的趋势,呈“V”字型,第 11 天达到最低值,F1 始终处于较高水平,远高于其它三组处理($F1 > F2 > CK > F3$),最高值达到 24.08%,最低为 17.92%,F3 处于最低水平;与 CK 对比,F1、F2、F3 处理腐殖质含量分别提高了 8.12%、7.23%、7.43%。

沼渣堆肥过程中,腐殖质同时存在分解与合成的反应,堆肥初期微生物活性高、数量多,腐殖质中的一些小分子物质(以富里酸为主)被微生物分

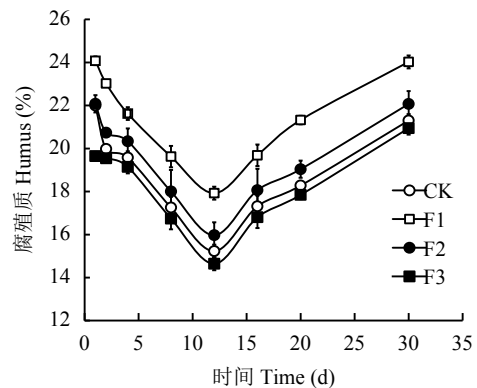


图 5 堆肥过程中腐殖质的变化

Fig. 5 Changes in humus during the composting

解、利用, 大分子的腐殖质 (以胡敏酸为主) 累积, 合成与分解处于一个大的动态平衡之中。图 5 表明, 腐殖质的含量变化呈“V”字型, 腐殖质的积累主要发生在堆肥后期, 说明沼渣堆肥后期对于有机肥的腐熟、稳定是不可或缺的阶段, 与孙向平^[38]的研究一致。

单因素方差分析结果 (表 3) 表明, 生物炭的添加显著影响腐殖质的形成 ($P < 0.05$), 与 CK 对比, F1、F2、F3 处理腐殖质含量分别提高了 8.12%、7.23%、7.43%。关于堆肥中腐殖质的形成, 有研究认为存在两种途径: 一是在微生物作用下, 木质素的侧链氧化生成木质素类衍生物, 构成了腐殖质的核心和骨架, 这是腐殖质形成的重要途径之一^[39], 二是由微生物代谢后的单聚体聚合而成^[40]。两种途径均突出了微生物的作用, 猜测生物炭通过影响沼渣堆

肥微生物进而影响腐殖质的合成。

2.5 有机肥品质

由上可知, 本试验中四组不同处理均达到高温期 (55℃ 以上), F1、F2 可满足无害化标准 (55℃ 以上维持 3 d 以上); 与 CK 相比, F1、F2、F3 有机质含量分别提高了 12.96%、9.26%、7.41%, 总养分含量分别提高了 6.5%、4.3%、2.2%, 且有机质含量均大于 45%; 四组处理 pH 值始终处于 8.0 以上, 电导率低于 1 mS/cm, 由图 6 种子发芽指数变化可以看出, 所有处理种子发芽指数均在 85% 以上, 依次为 F1 > F2 > F3 > CK, 无毒害作用; 除含水率外, 总养分、粪大肠菌群数、蛔虫卵死亡率等均符合中华人民共和国农业行业标准《NY525-2012 有机肥料》^[41]。堆肥结束后可以适当晾晒, 调节含水率, 达到有机肥标准 (表 4)。

表 3 单因素方差分析
Table 3 Variance analysis of single factor

项目 Item		SS	df	MS	F	P
细菌 Bacteria	组间 Inter-group	26.538	7	3.791	5.557	0.001
	组内 Intra-group	16.373	24	0.682		
	总数 Total variation	42.910	31			
放线菌 Actinomycete	组间 Inter-group	234.530	7	33.504	2.176	0.074
	组内 Intra-group	369.560	24	15.398		
	总数 Total variation	604.090	31			
真菌 Fungi	组间 Inter-group	97.018	7	13.860	0.828	
	组内 Intra-group	401.676	24	16.736		
	总数 Total variation	498.693	31			
腐殖质 Humus	组间 Inter-group	736.711	7	105.244	5.934	0.000
	组内 Intra-group	425.632	24	17.735		
	总数 Total variation	1162.343	31			

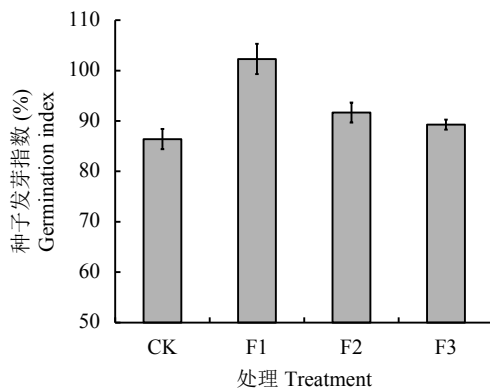


图 6 种子发芽指数

Fig. 6 Germination index

3 结论

1) 生物炭能够延长高温期, 提高有机质和总养分含量。

2) 添加生物炭可以有效降低细菌菌群数量, 促进真菌生长, 进而加快沼渣肥的腐熟, 且提高沼渣堆肥腐殖质含量。

3) 综合试验结果, 添加 2% 生物炭 (干基) 对促进堆肥腐熟、提高养分含量效果最显著。添加过多生物炭将不利于堆肥的腐熟。

表 4 有机肥产品相关指标测定值及有机肥行业标准值(干基)

Table 4 Values of quality items of the produced organic fertilizers and the standards value by the organic fertilizer industry standard (Dry base)

指标 Index	CK	F1	F2	F3	行业标准 Industry standard
有机质 Organic matter (%)	47	54	49	50	>45
含水率 Moisture content (%)	38	37	38	39	<30
总氮 Total N (%)	1.87	2.10	1.78	1.86	
总磷 Total P (%)	5.74	6.01	5.84	5.87	
总钾 Total K (%)	1.61	1.76	1.59	1.74	
总养分 Total nutrient (%)	9.22	9.87	9.61	9.47	>5
粪大肠菌群数 Fecal coliform number (cfu/g)	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<100
蛔虫卵死亡率 Ascaris egg death rate (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	>95

参 考 文 献:

- [1] 李景明, 薛梅. 中国沼气产业发展的回顾与展望[J]. 可再生能源, 2010, 28(3): 1-5.
Li J M, Xue M. Review and prospect on biogas development in China[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(3): 1-5.
- [2] 牛俊玲, 高军侠, 李彦明, 等. 堆肥过程中的微生物研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 185-189.
Niu J L, Gao J X, Li Y M, et al. Evaluation of the role of microorganisms in composting[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(6): 185-189.
- [3] 宋彩红, 夏训峰, 席北斗, 等. 响应曲面法优化沼渣混合物料堆肥配比研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1474-1479.
Song C H, Xia X F, Xi B D, et al. Optimization of biogas residue mixed with livestock manure co-composting using response surface methodology[J]. China Environmental Science, 2012, 32(8): 1474-1479.
- [4] 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.
- [5] 张强, 孙向阳, 任忠秀, 等. 调节C/N及添加菌剂与木酢液对园林绿化废弃物堆肥效果的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 990-998.
Zhang Q, Sun X Y, Ren Z X, et al. Effects of regulating of C/N ratio and adding different concentrations of microbe fungus and wood vinegar on composting of landscaping waste[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(4): 990-998.
- [6] 王小琳, 陈世昌, 袁国锋, 等. 促腐剂在鸡粪堆肥发酵中的应用研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1210-1214.
Wang X L, Cheng S C, Yuan G F, et al. Effects of transformation promoter on fermentation of chicken manure compost[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2009, 15(5): 1210-1214.
- [7] Gerard C, Zofia K, Stavros K, et al. Relations between environmental black carbon sorption and geochemicals or bent characteristics[J]. Environ Science and Technology, 2004, 38(13): 3632-3640.
- [8] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1402-1417.
Yuan S, Zhao L X, Meng H B, et al. The main types of biochar and their properties and expectative researches[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1402-1417.
- [9] Busscher W J, Novak J M, Evans D E, et al. Influences of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand[J]. Soil Science, 2010, 175(1): 10-14.
- [10] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37: 1477-1488.
- [11] Steiner C, Das K C, Melear N, et al. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1236-1242.
- [12] 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.
- [13] Dias B O, Silva C A, Higashikawa F S, et al. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(4): 1239-1246.
- [14] Li H, Ying X C, Wei X W. Impacts upon soil quality and plant growth of bamboo charcoal addition to composted sludge[J]. Environmental Technology, 2012, 33(1): 6-68.
- [15] 魏自民, 王世平, 魏丹, 等. 生活垃圾堆肥过程中有机态氮形态的动态变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 194-198.
Wei Z M, Wang S P, Wei D, et al. Dynamic changes of organic nitrogen forms during the municipal solid wastes composting[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 194-198.
- [16] 候月卿, 沈玉君, 孟海波, 等. 生物炭和腐殖酸类对猪粪堆肥重金属的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 205-215.
Hou Y Q, Shen Y J, Meng H B, et al. Passivating effect of biochar and humic acid materials on heavy metals during composting of pig manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11): 205-215.
- [17] 沈玉君, 李国学, 任丽梅, 等. 不同通风速率对堆肥腐熟度和含氮气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1814-1819.

- Shen Y J, Li G X, Ren L M, *et al.* The impact of composting with different aeration rates on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1814–1819.
- [18] 张继宁, 吕凡, 邵立明, 等. 木炭对污泥堆肥有机质减量和腐熟度的影响[J]. *同济大学学报*, 2014, 42(2): 577–581.
Zhang J N, Lü F, Shao L M, *et al.* Impact of wood biochar on organics degradation and maturity of sewage sludge[J]. *Journal of Tongji University*, 2014, 42(2): 577–581.
- [19] 魏自民. 生物垃圾微生物强化堆肥技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. 14.
Wei Z M. Microbiological enhanced composting of biological waste[M]. *China Environmental Science Press*, 2008. 14.
- [20] Berna M P, Alburquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100: 5444–5453.
- [21] Masanori S. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underly in ghumus[J]. *Oikos*, 2000, 89(2): 231–242.
- [22] 宋彩红, 贾璇, 李明晓, 等. 沼渣与畜禽粪便混合堆肥发酵效果的综合评价[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(24): 227–234.
Song C H, Jia X, Li M X, *et al.* Comprehensive evaluation of co-composting fermentation effect of biogas residue mixed with livestock manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(24): 227–234.
- [23] Gray K R, Sherman, K, Biddlestone A J. A review of composting part 1[J]. *Process Biochemistry*, 1971, 6: 32–36.
- [24] Wang C, Guo X H, Hui D D, *et al.* Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste-A compost maturity analysis perspective[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 6512–6519.
- [25] Sullivan D M, Bary A I, Thomas D R, *et al.* Food waste compost effects on fertilizer nitrogen efficiency, available nitrogen, and tall fescue yield[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 154–161.
- [26] Tuomela M, Vikmanb M, Hatakka A, *et al.* Biodegradation of ligninino compost environment A review[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72(2): 169–183.
- [27] Demisie W, Liu Z, Zhang M. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil[J]. *Catena*, 2014, 121: 214–221.
- [28] Jonathan D, Goro U, Yudai S, *et al.* Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(4): 1259–1270.
- [29] Girvan M S, Campbell C D, Killham K, *et al.* Bacterial diversity promotes community stability and functional resilience after perturbation[J]. *Environmental Microbiology*, 2005, 7(3): 301–313.
- [30] Grossman J M. Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineral[J]. *Microbial Ecology*, 2010, 60(1): 192–205.
- [31] 杨恋, 杨朝晖, 曾光明, 等. 好氧堆肥高温期的嗜热真菌和嗜热放线菌群落结构[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(12): 2514–2521.
Yang L, Yang Z H, Zeng G M, *et al.* Succession of the rmophilic fungi and actinomycetes communities during the the rmophilic period of aerobic composting[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(12): 2514–2521.
- [32] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-A review[J]. *Biology and Fertility of soils*, 2002, 35(4): 219–230.
- [33] Pietikainen J, Kiikkila O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus[J]. *Oikos*, 2000, 89(2): 231–242.
- [34] Castaldi S, Riondino M, Baronti S, *et al.* Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(9): 1464–1471.
- [35] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, *et al.* Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1/2): 311–324.
- [36] Laird D A, Fleming P, Davis D D, *et al.* Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3–4): 443–449.
- [37] Knicker H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon: A review[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(1): 91–118.
- [38] 孙向平. 不同控制条件下堆肥过程中腐殖质的转化机制研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2016.
Sun X P. The humuns transformation mechanism research during composting under different controlled conditions[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2016.
- [39] Brunetti G, Soler R P, Matarrese F, *et al.* Composition and structural characteristics of humified fractions during the co-composting process of spent mushroom substrate and wheat straw[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(22): 10859–10865.
- [40] Amir S, Lemee H M, Merlina G. Structural characterization of humic acids, extracted from sewage sludge during composting, by thermochemolysis-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(2): 410–422.
- [41] NY525-2012, 有机肥[S].
NY525-2012, Manure[S].