

孙 旭,刘臣伟,张龙江,等. 农业废弃物制备生物有机肥及其在小白菜栽培上的应用[J].江苏农业学报,2017,33(6):1333-1341.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2017.06.020

农业废弃物制备生物有机肥及其在小白菜栽培上的应用

孙 旭, 刘臣伟, 张龙江, 苏良湖
(环境保护部南京环境科学研究所,江苏 南京 210042)

摘要: 为解决传统堆肥产品功能单一、肥效较低的问题,以玉米秸秆与牛粪混合物为载体,枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)和拟茎点霉 B3(*Phomopsis liquidambari* B3)为接种微生物,采用二次接种发酵技术获得生物有机肥,并在田间栽培条件下评估其肥效。结果表明,玉米秸秆与牛粪混合堆肥过程中接种 *Bacillus subtilis* 和 *Phomopsis liquidambari* B3 可提高堆体最高温度,延长高温(>50 ℃)持续时间,缩短堆肥腐熟时间,加快堆肥进程。与不接种菌剂的传统有机肥相比,接种功能微生物的生物有机肥总养分和有机质含量分别增加了 21.1%和 23.8%,细菌和真菌数量分别提高 626%和 160%。小白菜栽培试验结果表明,施用有机肥能显著促进小白菜的生长和提升其品质,接种功能微生物的生物有机肥效果最好,小白菜产量比不施肥对照增加了 95.2%,比传统有机肥处理增加了 43.2%,可溶性糖和维生素 C 含量最高。接种功能微生物能够促进玉米秸秆与牛粪混合物快速发酵,堆制的生物有机肥品质优于传统有机肥。

关键词: 枯草芽孢杆菌;拟茎点霉 B3;农业废弃物;生物有机肥;小白菜;微生物群落结构

中图分类号: X71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)06-1333-09

Development of bio-organic fertilizer based on agricultural waste and application in bok choy

SUN Xu, LIU Chen-wei, ZHANG Long-jiang, SU Liang-hu

(Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: To resolve the problems, such as single function, low utilizing efficiency, existing in traditional composting products, the compost test was conducted using mixtures corn straw and cow manure to prepare bio-organic fertilizer (BOFs) with the technology of second fermentation, which inoculated *Bacillus subtilis* and *Phomopsis liquidambari* B3. And then field experiment was used to evaluate the BOFs quality. The results showed that addition of *Bacillus subtilis* and *Phomopsis liquidambari* B3 inoculants could improve the highest temperature of compost, shorten the time of reaching high temperature(>50℃) and extend the high temperature sustaining time, accelerate the composting process and maturity. Compared to those in traditional organic fertilizer treatment, the content of total nutrient and organic matter in BOFs with microorganism inoculation treatment increased respectively 21.1% and 23.8%, meanwhile, the number of bacteria and fungus

increased respectively 626.0% and 160.0%. The field experiment results showed that application of organic fertilizer could promote the quantity and quality of bok choy, while the effect of BOFs with microbial inoculation was best. Compared with that in the control and traditional organic fertilizer treatment, the fresh weight per plant in BOFs with microorganism inoculation treatment increased about 95.2% and 43.2%, respectively, and the content of

收稿日期:2017-10-13

基金项目:国家科技重大专项课题(2016YFD0800601);中央公益专项(GYZX170301)

作者简介:孙 旭(1986-),男,湖北襄阳人,博士,助理研究员,研究方向为农业废弃物资源化利用技术。(E-mail) sunxu98418@163.com

通讯作者:苏良湖,(E-mail) sulianghu@126.com

soluble sugar and vitamin C were highest. Therefore, in the view of compost and field experiment, addition of *Bacillus subtilis* and *Phomopsis liquidambari* B3 could speed maturity of the compost and enhance compost quality.

Key words: *Bacillus subtilis*; *Phomopsis liquidambari* B3; agricultural waste; bio-organic fertilizer; bok choy; microbial community structure

化肥是重要的农业生产资料,是粮食的“粮食”。据统计,中国 2013 年化肥生产量为 7.037×10^7 t(折纯),农用化肥施用量 5.912×10^7 t,每 667 m²农作物平均化肥使用量 21.9 kg^[1]。化肥在促进粮食和农业生产发展中发挥了不可替代的作用,但也带来了不可忽视的环境问题。为保障粮食安全和控制环境污染,2015 年农业部提出到 2020 年化肥用量零增长的目标,其中一项重要措施是有机肥替代化肥计划。中国有机肥资源总养分约 7.0×10^7 t,但实际利用不足 40%,其中畜禽粪便养分还田率为 50%左右,农作物秸秆养分还田率为 35%左右,有机肥利用效率偏低^[1]。因此,提高有机肥利用率,对于保障农业生态系统安全具有十分重要的现实意义。

生物有机肥是指特定功能的微生物与主要以动植物残体(如畜禽粪便、农作物秸秆等)为来源并经无害化处理、腐熟的有机物料复合而成的一类兼具微生物肥料和有机肥效应的肥料^[2]。生物有机肥营养丰富,可改良土壤,提高化肥利用效率、作物抗病能力和农产品品质,常常与化肥配施或单独施用^[3-8]。目前,生物有机肥大多由秸秆、醋糟、污泥、畜禽粪便等单一或多种有机物料发酵而来,这种有机肥功能单一、肥效低。有研究结果表明接种功能微生物不仅可以加快堆肥腐熟进程,还可以提升生物有机肥的附加值^[9-11]。例如向藻泥、菜粕、羽毛粉混合物中接种功能菌 SQR9,可显著提高堆肥产品中总氮含量,而且可以促进黄瓜和番茄生长,提高产品品质^[2]。施用生物有机肥可显著增加蓝莓根区土壤水分含量、养分含量以及土壤微生物数量,降低土壤容重和总孔隙度,提高蓝莓产量和品质^[12]。接种微生物种类、数量以及接种时间等通常是影响生物有机肥品质的关键因素^[13-14]。枯草芽孢杆菌是较为常见的生防菌,常被作为堆肥腐熟接种微生物使用。拟茎点霉 B3 能分泌漆酶,促进土壤纤维素酶活性,加快茅苍术凋落物和花生秸秆的降解。本课题组前期研究发现拟茎点霉属菌株 B3、绿色木霉、黑曲霉及枯草芽孢杆菌混合菌剂能加速水稻秸秆和猪粪混合物的发酵,拟茎点霉 B3、绿色木霉、黑曲霉复合菌剂与有机肥配施能改善土壤

微生物区系,提高土壤酶活性,增加草莓产量^[15-17]。拟茎点霉 B3 和枯草芽孢杆菌作为堆肥腐熟接种菌剂,是否能促进堆肥腐熟进程和提升堆肥产品品质还有待进一步研究。

因此,本试验以玉米秸秆和牛粪为堆肥原料,拟茎点霉 B3 和枯草芽孢杆菌为接种微生物,采用二次接种发酵技术研究功能性微生物菌剂对生物有机肥品质及肥效的影响,以期对农业废弃物肥料化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

堆肥原料玉米秸秆和牛粪由江苏省镇江市三明生物有限公司提供,基本性质见表 1。拟茎点霉菌株 B3 (*Phomopsis liquidambari* B3)由南京师范大学提供,枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)购自广东省微生物菌种保藏中心。

表 1 玉米秸秆和牛粪的基本特性

Table 1 Basic properties of maize straw and cow manure

原料	碳含量 (%)	氮含量 (%)	碳/氮比 (C/N)	含水率 (%)	pH
玉米秸秆	40.88	1.28	31.94	11.92	6.69
牛粪	38.61	2.36	16.36	16.72	8.56

栽培地点设在镇江市三明生物有限公司菜地(119°24'55.17"E, 32°0'42.19"N),此菜地已连续 3 年施用醋糟和污泥发酵的有机肥。土壤为黄棕壤, pH 值为 7.65,全氮 0.88 g/kg,碱解氮 76.12 mg/kg,全磷 2.32 g/kg,速效磷 10.57 mg/kg,全钾 14.21 g/kg,速效钾 164.14 mg/kg,有机质 27.85 g/kg。

试验小白菜品种为矮脚黄。

1.2 堆肥试验

1.2.1 微生物菌剂制备 拟茎点霉 B3 以马铃薯葡萄糖液体培养基培养, *Bacillus subtilis* 以牛肉膏蛋白胨液体培养基培养。以 10%接种量接入固体培养基中,固体培养基质为麸皮、糠和稻壳混合物(质量

比 6:3:1,料水比为 1.0:1.2)。搅拌均匀后在 28 ℃ 静置培养 7 d 后,拟茎点霉 B3 有效活菌数约 1×10^5 CFU/g 左右,*Bacillus subtilis* 有效活菌数达到 6.5×10^9 CFU/g。

1.2.2 堆肥试验 于 2016 年 5 月 1 日在镇江市三明生物有限公司堆肥厂进行玉米秸秆和牛粪的好氧发酵试验。将 2 000 kg 玉米秸秆和 400 kg 牛粪混匀,调节含水率为 70%,碳/氮比(C/N)为 29 左右,分成 6 个高 1.5 m、直径 2.0 m 的圆垛,设置 1 个对照(TA)和 1 个接种菌剂处理组(TB),每个试验组 3 个平行。进行 60 d 的好氧发酵试验,人工翻堆,前 30 d 每 4 d 翻堆 1 次,每次翻堆时补充适量的水,后 30 d 每 10 d 翻堆 1 次。处理组采用二次接种方式发酵,*Bacillus subtilis* 和拟茎点霉 B3 纯培养固体接种物等比例混合作为接种菌剂,其接种量为堆体质量的 0.2%,第 1 次接种时间为堆肥第 0 d,第 2 次接种时间为堆肥后第 30 d。

1.2.3 样品采集与测定 堆肥前后 30 d 每隔 2 d 用温度计测定堆垛四周及中间区域 30 cm 深处的温度,取平均值作为堆体温度,后 30 d 每隔 10 d 测定堆垛温度。每次翻堆前取发酵物 100 g 左右保存于 -20 ℃。取 3 g 堆肥样品,按照 1:10 质量比加入蒸馏水,充分振荡、离心后测定上清液 pH。采用 CHN-O-Rapid 元素分析仪测定堆肥样品的碳/氮比,种子发芽指数(GI)参考竹江良等的方法^[18]测定,其他理化指标的测定方法参照文献^[19],细菌和真菌数量测定采用平板计数法。

1.3 栽培试验

1.3.1 试验设计 于 2016 年 9 月 26 日在镇江市三明生物有限公司菜地进行小白菜栽培试验。设置 3 个试验组,即 1 个不施肥的对照组(CK)和 2 个有机肥处理组,每个试验组 3 个平行种植区域(15 m×1 m)。有机肥为方法 1.2 发酵的传统有机肥(TA)和生物有机肥(TB),施入量均为 2 t/hm²。小白菜生长期为 60 d,整个生长期不再施肥,各处理水肥管理均保持一致,种植期间适时浇水,实时监控作物的生长情况,记录不同施肥处理对作物生长、产量以及性状的影响。

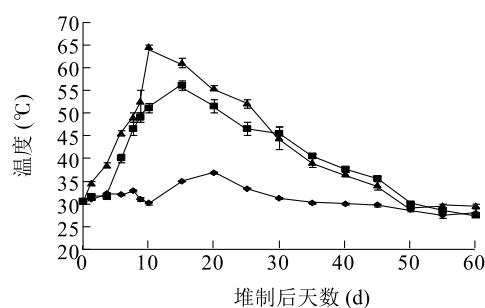
1.3.2 样品采集与测定 收获生长 60 d 的小白菜,将小白菜连根小心取出,去除土壤,用水冲洗,经蒸馏水洗涤后备用。现场采用便携式 SPAD 仪(SPAD-502)读取 SPAD 值,并测量株高和叶宽。可

溶性糖采用 LH-T32 型便携式糖度计测定,维生素 C 含量采用荧光法测定^[20]。同时采用多点取样法采集土壤样品,参照文献^[21]对土壤理化性质进行分析,土壤微生物群落结构采用 Illumina Miseq 高通量测序法^[22]进行分析,本研究中 Illumina Miseq 测序获得的序列在 NCBI Sequence Read Archive (SRA) 上的登录号为 SRS1608166。

2 结果

2.1 添加外源微生物对玉米秸秆与牛粪混合物堆肥过程及堆肥产品的影响

2.1.1 对堆体温度的影响 温度是表征堆肥腐熟程度的一个重要参数。接种微生物菌剂对玉米秸秆与牛粪混合物发酵温度的影响如图 1 所示,处理组(TB)最高温度达到 65.4 ℃,出现在堆制后第 11 d,高温阶段(>50 ℃)持续时间长达 26 d;而对照组在堆制后第 16 d 堆体温度达到最高,为 56.1 ℃,50 ℃ 以上持续时间仅为 10 d。一般认为,堆体温度在 50 ℃ 以上保持 5~7 d 可保证堆肥达到卫生学指标和腐熟的必要条件^[23]。接种微生物菌剂能提高堆体温度、延长堆体高温持续时间。



—◆— 环境温度; —■— 对照(TA); —▲— 接种菌剂处理(TB)

图 1 玉米秸秆与牛粪混合物堆肥过程中温度变化

Fig.1 Changes of temperature during the composting process of corn straw and cow manure mixtures

2.1.2 pH 值的变化 如图 2 所示,堆肥过程中对照组 pH 呈现先上升后下降的趋势,变化范围为 7.7~8.8,而接种微生物菌剂处理组并未改变 pH 的变化趋势,但同一时期处理组 pH 均低于对照组。接种微生物菌剂可加快堆肥的发酵速率,将更多的有机质转化为有机酸,降低堆肥的 pH^[24]。经 60 d 发酵后对照组和试验组有机肥 pH 分别为 8.1 和 7.6,均符合有机肥的国家标准(pH 5.5~8.5)^[19]。

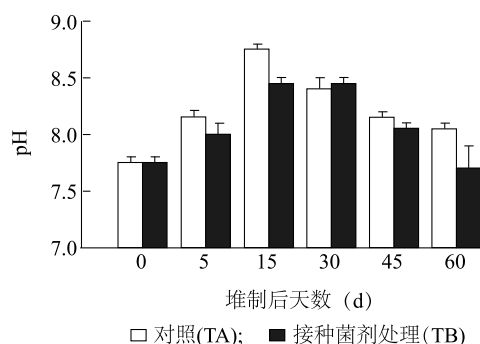
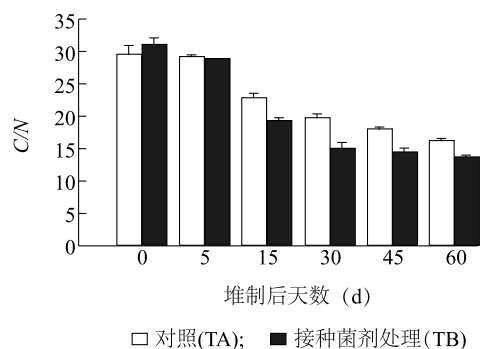


图2 玉米秸秆与牛粪混合物堆肥过程中 pH 的变化

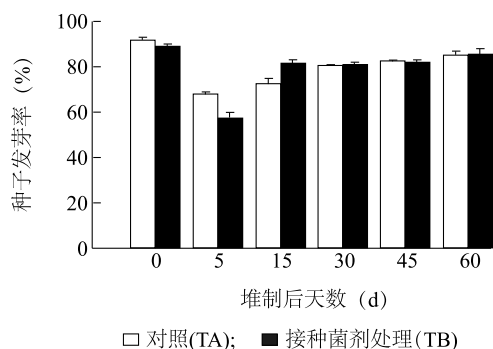
Fig.2 Changes of pH during the composting process of corn straw and cow manure mixtures

2.1.3 碳/氮比的变化 堆肥过程中碳/氮比 (C/N) 的变化在一定程度上可以反映玉米秸秆与牛粪混合物发酵腐熟的程度,通常认为堆肥 C/N 在 20 以下,可视为堆肥已腐熟^[18]。如图 3 所示,接种微生物菌剂处理组 C/N 在第 15 d 已降低至 20 以下,而对照组则需要 30 d;经 60 d 发酵后,对照组和处理组 C/N 均在 13.5 至 16.5 之间,已完全腐熟,表明接种微生物菌剂能促进玉米秸秆与牛粪混合物发酵,缩短达到腐熟的时间。

图3 玉米秸秆与牛粪混合物堆肥过程中 C/N 的变化Fig.3 Changes of C/N during the composting process of corn straw and cow manure mixtures

2.1.4 种子发芽指数的变化 种子发芽指数 (GI) 常被用来测定堆肥的生物毒性,是表征堆肥腐熟程度的重要生物学指标之一,通常堆肥 GI 值达到 80% 以上则认为堆肥已完全腐熟^[25]。对照组和处理组 GI 值均呈先下降后上升的趋势(图 4)。在堆制后前 5 d,处理组 GI 值均低于对照组,这可能是由于接种微生物菌剂后加快了有机质的降解,产生了较多的有毒物质(氨和低级脂肪酸等),抑制了青菜种子

的发芽^[26]。在第 15 d 时处理组 GI 值大于 80%,而对照组在第 30 d 时才达到 80%。经过 60 d 发酵,对照组和处理组 GI 值分别为 83% 和 85%,表明接种微生物菌剂可加快堆肥腐熟进程。

图4 玉米秸秆与牛粪混合物堆肥过程中种子发芽率 (GI) 的变化Fig.4 Changes of germination index (GI) during the composting process of corn straw and cow manure mixtures

2.1.5 对有机肥品质的影响 经过 60 d 发酵,对照组和处理组有机肥养分、重金属含量和微生物学指标均符合有机肥的国家标准^[19](表 2 和表 3)。接种微生物菌剂发酵的生物有机肥总养分含量比传统的有机肥增加了 21.1%,其中总氮和总磷分别增加 37.9% 和 33.0%,有机质增加了 23.8%,细菌和真菌数量分别提高 626% 和 160%,表明接种微生物菌剂提升了有机肥的品质。

2.2 玉米秸秆与牛粪混合物传统有机肥和生物有机肥对小白菜生长的影响

为考察传统有机肥和生物有机肥的肥效,在大田条件下进行了 60 d 的小白菜栽培试验。从表 4 可以看出,施用有机肥的小白菜农艺性状优于不施肥的小白菜。施用传统有机肥和生物有机肥的小白菜产量分别为 20.89 t/hm² 和 29.91 t/hm²,较不施肥对照分别提高了 36.4% 和 95.2%。生物有机肥处理的小白菜株高显著大于对照。小白菜产量不仅与单株质量密切相关,还与其株高、叶宽有关。相比于不施肥的小白菜,施用传统有机肥可使株高和叶宽分别增加 33.3% 和 17.1%,而施用生物有机肥则分别提高 55.4% 和 37.7%。 $SPAD$ 值是表征小白菜光合作用的一个重要参数,不同施肥处理的小白菜 $SPAD$ 值大小依次为生物有机肥处理>传统有机肥处理>不施肥对照。

表 2 玉米秸秆与牛粪混合物堆制的传统有机肥和生物有机肥的养分含量和重金属含量

Table 2 The nutrient content and heavy metal indexes of traditional organic fertilizer and bio-organic fertilizer by composting corn straw and cow manure

有机肥	水分含量 (%)	有机质 含量 (%)	pH	总氮含量 (%)	磷(P ₂ O ₅) 含量 (%)	钾(K ₂ O) 含量 (%)	重金属含量(mg/kg)				
							砷	汞	铅	镉	铬
传统有机肥	15	42.8	8.3	1.40	1.12	1.79	2.34	0.041	18.2	0.2	100.0
生物有机肥	19	53.0	7.5	1.93	1.49	1.80	2.63	0.034	11.6	0.4	21.5
限值	≤30	≥45.0	5.5~8.5	-	-	-	15.00	2.000	50.0	3.0	150.0

表 3 玉米秸秆与牛粪混合物堆制的传统有机肥和生物有机肥的微生物学指标

Table 3 The microbiology indexes of traditional organic fertilizer and bio-organic fertilizer by composting corn straw and cow manure

有机肥	粪大肠菌群 (MPN/g)	蛔虫卵死 亡率 (%)	细菌数量 (×10 ⁹ CFU/g)	真菌数量 (×10 ⁷ CFU/g)
传统有机肥	3	96	1.33	8.35
生物有机肥	39	96	8.33	13.30
限值	<100	>95	≥0.20	≥0.20

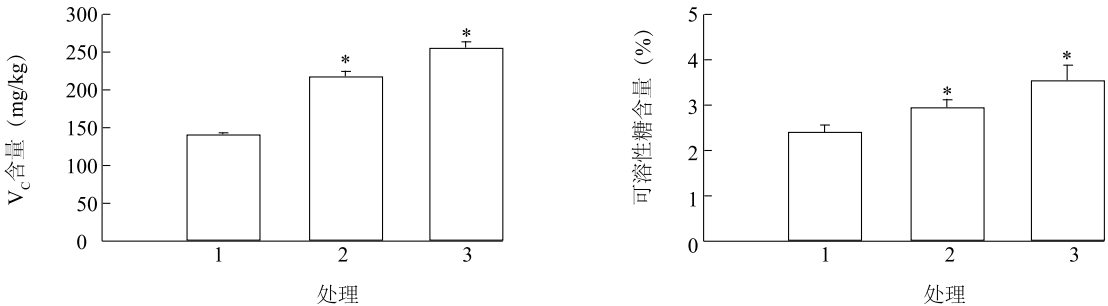
可溶性糖含量是表征小白菜品质和营养价值的一项重要参数。维生素 C(V_c) 含量对于衡量小白菜口感和耐贮性也具有重要的参考价值^[27]。从图 5 可看出,与不施肥处理的小白菜相比,施用传统有机肥和生物有机肥的小白菜可溶性糖含量分别提高 22.1%和 47.1%,V_c 含量分别增加 52. %和 82.1%。表明施用有机肥可提高小白菜可溶性糖和 V_c 含量,施用生物有机肥的小白菜品质要好于施入传统有机肥的小白菜。

表 4 不同施肥处理对小白菜农艺学性状的影响

Table 4 The effects of different fertilizer treatments on the agronomic characters of bok choy

处理	鲜质量 (g,1 株)	干质量 (g,1 株)	含水率 (%)	产量 (t/hm ²)	株高 (cm)	叶宽 (cm)	SPAD 值
对照	31.87±3.47a	5.18±1.85a	83.76±6.1a	15.32	11.56±1.51a	8.15±1.11a	45.0±4.0a
施传统有机肥	55.60±2.63b	6.10±0.97ab	89.03±3.2ab	20.89	15.41±2.33ab	9.54±1.11ab	48.0±3.0ab
施生物有机肥	199.70±11.90c	17.20±2.78c	91.39±4.1b	29.91	17.96±1.58bc	11.22±0.94b	54.0±6.0b

同一列中不同字母表示差异达到显著水平(P<0.05)。



1:不施肥对照;2:施用传统有机肥;3:施用生物有机肥。*表示与对照相比差异显著(P<0.05)。

图 5 不同施肥处理对小白菜品质的影响

Fig.5 The effects of different fertilizer treatments on quality of bok choy

2.3 玉米秸秆与牛粪混合物传统有机肥和生物有机肥对土壤环境的影响

土壤养分含量是表征土壤肥力的重要参数之

一。从表 5 可以看出,与不施有机肥土壤相比,传统有机肥和生物有机肥处理的土壤有机质含量分别增加 56.4%和 68.3%,土壤全氮、全磷、全钾含量也明

显增加。另外,施入传统有机肥和生物有机肥的土壤电导率分别为 124.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和 66.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 分别为不施肥对照土壤的 85.6% ($P<0.05$) 和 46.0%

($P<0.01$)。表明有机肥能显著提升土壤养分及有机质含量,改善土壤盐碱状况,生物有机肥的效果优于传统有机肥。

表 5 不同施肥处理对土壤养分的影响

Table 5 The effects of different fertilizer treatments on the soil nutrient

处理	含水率 (%)	pH	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	全氮 (g/kg)	全磷 (mg/kg)	全钾 (g/kg)	有机质 (g/kg)
对照	15.4	7.87	145.2	0.09	414	1.00	10.10
施传统有机肥	20.1	7.56	124.3	0.13	497	1.30	15.80
施生物有机肥	20.1	8.16	66.8	0.11	457	1.47	17.00

微生物是土壤物质和能量循环的驱动泵,其群落组成对小白菜的生长有重要影响。如图 6 所示,与不施肥对照土壤相比,施用有机肥后土壤中部分优势细菌发生明显变化。在门分类水平,施用有机肥对变形菌门细菌相对丰度的影响不大,而增加了酸杆菌门和绿弯菌门细菌相对丰度,降低了芽单胞菌门细菌相对丰度。其中施用生物有机肥处理的土壤中酸杆菌门细菌相对丰度增加到 26.3%,约为不施肥对照土壤的 2.2 倍;芽单胞菌门细菌相对丰度则下降到 5.1%,仅占不施肥对照土壤的 36.1%。在纲分类水平,施用有机肥处理土壤中酸杆菌门的 Acidobacteria-6 和 Chloracidobacteria 相对丰度得到提高,而芽单胞菌纲细菌相对丰度从不施肥的 11.1%下降到 3.0%左右。表明有机肥能改变土壤细菌群落组成,出现特异性的优势种属微生物。

3 讨论

化肥过量施用不仅导致农业生产成本增加和资源浪费,也造成耕地板结和土壤酸化等一系列环境问题。有机肥具有营养元素丰富,可改良土壤环境和促进作物生长等特点,被广泛地应用到农业生产中。生物有机肥中富含的有益微生物,可提高有机肥养分含量,增强作物抗性和肥料利用效率,提升有机肥产品附加值,因此将功能性微生物菌剂应用于有机肥生产对于农业废物资源化利用及有机肥行业发展具有重要的现实意义^[7]。

本研究以玉米秸秆和牛粪混合物为载体,采用二次发酵技术,分别在发酵初期和腐熟期接种一定量的枯草芽孢杆菌和拟茎点霉 B3 混合菌剂,经 60 d 的高温好氧发酵制备功能性生物有机肥。结果表明接种有益微生物能够加速玉米秸秆和牛粪混合物

的堆肥腐熟进程,增加有机肥养分含量,这与前人的研究结果^[11]一致。通常情况下,堆肥初期由于易降解物质丰富,细菌大量繁殖成为优势种,而在高温期堆肥温度高达 45.0 $^{\circ}\text{C}$ 以上,超过大多数微生物的耐受温度,仅有少数细菌、放线菌以及真菌存活,随着堆肥温度的降低,腐熟期内微生物数量有所恢复,仍低于堆肥初期,活菌数偏低^[28]。魏彦红等^[29]将锯末和牛粪堆制 35 d 后获得的有机肥细菌含量为 1.0×10^8 CFU/g,真菌为 5.0×10^3 CFU/g,分别为本研究中生物有机肥细菌和真菌含量的 1.2% 和 0.003%。这可能与接种微生物菌剂种类和接种次数有关,本研究接种的枯草芽孢杆菌广泛分布在土壤及腐败的有机物中,可长期耐受 60 $^{\circ}\text{C}$ 高温,在 120 $^{\circ}\text{C}$ 温度下也能存活 20 min,是堆肥高温阶段的代表性微生物,而拟茎点霉 B3 是从重阳木中分离到的一株植物内生真菌,可离开宿主存活于土壤中,该 B3 菌能分泌漆酶,促进纤维素酶活性,加快茅苍术凋落物和花生秸秆的降解^[16,30-32]。因此,堆肥初期接种枯草芽孢杆菌和拟茎点霉 B3 可增加堆肥微生物数量,提高微生物代谢活性,加速有机物的降解,促进堆肥腐熟进程;堆肥腐熟期接种枯草芽孢杆菌和拟茎点霉 B3 能够进一步降解难降解物质,增加有机肥活菌数,提升有机肥产品品质。

施用生物有机肥处理的小白菜单株鲜质量达到 199.7 g,分别是不施肥对照和普通有机肥处理的 6.3 倍 ($P<0.01$) 和 3.6 倍 ($P<0.01$),可溶性糖和维生素 C 含量分别比不施肥对照提高 47.1% 和 82.1%,小白菜产量和品质得到显著提升。有研究结果表明施用生物有机肥能提高大白菜、西瓜、草莓、小白菜等作物的产量和品质^[27,33-35]。周成^[36]通过二次接种白生防菌和解磷菌发酵水稻秸秆和猪粪

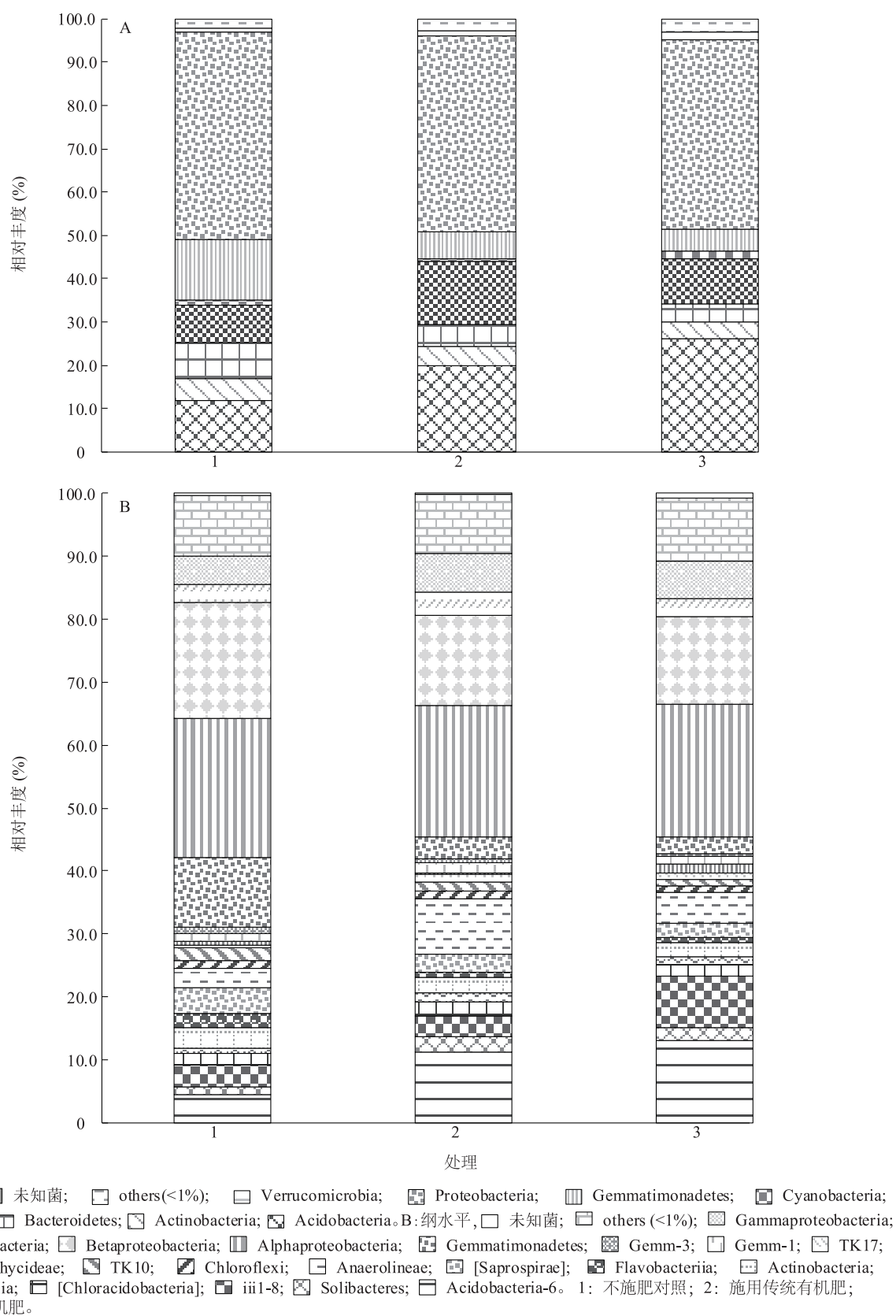


图6 不同施肥处理对土壤细菌群落组成的影响

Fig.6 The effects of different fertilizer treatments on the bacterial community structure of soil samples

有机载体获得的生物有机肥,可提高小白菜的生长和品质,其单株鲜质量和可溶性糖含量分别为 90 g 和 1.3%,分别仅为本研究中生物有机肥处理的小白菜的 45.1% 和 56.5%。这可能与接种的微生物种类有关,本研究中枯草芽孢杆菌和拟茎点霉 B3 均为有益生防菌,分离自土壤和植物体内,根际定殖能力强,能够分泌枯草菌素和漆酶等活性物质,可抑制革兰氏阳性细菌、镰刀菌、赤霉病菌等常见病原菌,促进作物对土壤养分的吸收^[31,37-39]。另外,施入生物有机肥增加了土壤有机质和养分含量,降低了土壤盐分,改变了土壤微生物群落结构,酸杆菌门细菌相对丰度显著提高,这与韩丽娜等^[27]的研究结果相一致,酸杆菌门的某些种属细菌具有降解纤维素功能,尤其是在酸性环境中对植物残体的降解发挥重要作用^[27,40]。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国农业部. 到 2020 年化肥使用量零增长行动方案[J]. 青海农技推广, 2015(2):3-5,11.
- [2] 张苗,施娟娟,曹亮亮,等. 添加三种外源蛋白研制生物有机肥及其促生效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1194-1202.
- [3] 史书强,赵颖,何志刚,等. 生物有机肥配施化肥对马铃薯土壤养分运移及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 154-157.
- [4] 罗佳,刘丽珠,王同,等. 有机肥与化肥配施对黄瓜产量及土壤微生物多样性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(5):774-779.
- [5] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6):144-149.
- [6] 韦彩会,何永群,李婷婷,等. 施肥与耕作技术集成对木薯养分积累、分配及淀粉含量的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(5):632-637.
- [7] MARTINEZ-BLANCO J, LAZCANO C, CHRISTENSEN T H. Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013, 33(4):721-732.
- [8] 王长军,王肇陟,王世荣. 生物有机肥、腐殖酸对水稻产量和土壤化学性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1):93-95.
- [9] LOPEZ-GONZALEZ J A, LOPEZ M J, VARGAS-GARCIA M C. Tracking organic matter and microbiota dynamics during the stages of lignocellulosic waste composting[J]. Bioresource Technology, 2013, 146(10):574-84.
- [10] 席北斗,刘鸿亮,黄国和,等. 复合微生物菌剂强化堆肥技术研究[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(5):262-264.
- [11] HIMANEN M, HANNINEN K. Effect of commercial mineral-based additives on composting and compost quality[J]. Waste Management, 2009, 29(8):2265-2273.
- [12] 李志友. 生物有机肥对蓝莓根区土壤养分及微生物学特性的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2):37-42.
- [13] ZHANG L, SUN X. 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(1):274-84.
- [14] JUSOH M L C, MANAF L A, LATIFF P A. Composting of rice straw with effective microorganisms (EM) and its influence on compost quality[J]. Iranian Journal of Environmental Health Sciences & Engineering, 2013, 10(1):1-9.
- [15] 郝玉敏,戴传超,戴志东,等. 拟茎点霉 B3 与有机肥配施对连作草莓生长的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(21):6695-6704.
- [16] DAI C C, CHEN Y, TIAN L S, et al. Correlation between invasion by endophytic fungus *Phomopsis* sp and enzyme production [J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(11): 1324-1330.
- [17] 孙旭,郝玉敏,苏良湖,等. 微生物菌剂对稻秆-猪粪-蘑菇渣堆肥腐熟进程及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 27(44):167-171.
- [18] 竹江良,刘晓琳,李少明,等. 两种微生物菌剂对烟草废弃物高温堆肥腐熟进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):194-199.
- [19] 中华人民共和国农业部. 生物有机肥: NY 884-2012 [S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中抗坏血酸的测定: GB 5009.86-2016 [S]. 北京:中国标准出版社, 2016.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 南京:河海大学出版社, 2000.
- [22] 杨浩,张国珍,杨晓妮,等. 16SrRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1704-1716.
- [23] 中华人民共和国农业部. 畜禽粪便无害化处理技术规范: NY/T 1168-2006 [S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- [24] 辛世杰. 微生物菌剂在有机废弃物堆肥中的作用及其机理研究[D]. 上海:上海交通大学农业与生物学院, 2012.
- [25] 石其伟,刘强,荣湘民,等. 不同微生物菌剂对水稻秸秆发酵效果的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2006, 32(3):264-268.
- [26] 李玉红,王岩,李清飞. 外源微生物对牛粪高温堆肥的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S2):609-612.
- [27] 韩丽娜,丁哲利,曾会才,等. 功能性有机肥对大白菜生长的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(10):1718-1723.
- [28] MEHTA C M, PALNI U, FRANKE-WHITTLE I H, et al. Compost: its role, mechanism and impact on reducing soil-borne plant diseases[J]. Waste Management, 2014, 34(3):607-622.
- [29] 魏彦红,郁继华,颜建明,等. 不同添加剂对牛粪高温堆肥的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(3):52-56.
- [30] WANG H B, HAN L R, FENG J T, et al. Evaluation of microbial-

- ly enhanced composting of *sophora flavescens* residues[J]. Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2016, 51(2):63-70.
- [31] 谢星光,戴传超,苏春沧,等. 内生真菌对花生残茬腐解及土壤酚酸含量的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(38):36-45.
- [32] LIU C, SHENG J, CHEN L, et al. Biocontrol activity of *Bacillus subtilis* isolated from agaricus bisporus mushroom compost against pathogenic fungi[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(26):6009-6018.
- [33] LI S X, SHEN Q R, ZHENG X Q, et al. Effect of organic microbe fertilizer application on watermelon growth and soil microorganisms under continuous mono-cropping[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(2):169-174.
- [34] TENG G X, QIU H Z, ZHANG C H, et al. Effect of microbial organic fertilizer on seedling growth, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 19(6):1255-1260.
- [35] 杜 莹,黄兴学,周国林,等. 轮作和有机肥对连作小白菜生长及土壤微生物特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(6):498-503.
- [36] 周 成. 生物有机肥的研制及其在蔬菜上的应用效果初探[D].长沙:湖南农业大学, 2009.
- [37] 周 骏,梅艳珍,杨 腾,等. 内生真菌拟茎点霉 B3 产漆酶分批发酵动力学[J]. 食品科学, 2014, 35(5):183-187.
- [38] 史 央,戴传超,吴耀春,等. 植物内生真菌强化还田秸秆降解的研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1):144-149.
- [39] 毕延刚,田永强. 堆肥和枯草芽孢杆菌协同调控黄瓜幼苗生长的机制探究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(28):71-78.
- [40] 王光华,刘俊杰,于镇华,等. 土壤酸杆菌门细菌生态学研究进展[J]. 生物技术通报, 2016, 31(2):14-20.

(责任编辑:张震林)