

蚯蚓堆肥与益生菌配施对土壤肥力及微生物特性的影响^①

曾令涛^{1,2}, 王东升³, 王祯祎¹, 王斯琪¹, 盛雄杰¹, 常江杰^{1,2},
李辉信^{1,2}, 胡 锋^{1,2}, 焦加国^{1,2*}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095;

3 南京市蔬菜科学研究所, 南京 210042)

摘 要: 基于等量养分条件, 本试验研究了蚯蚓堆肥与解淀粉芽孢杆菌(X)和荧光假单胞菌(Y)两株不同功能益生菌配施对西瓜地土壤肥力和微生物特性的影响。结果表明, 不论添加益生菌与否, 蚯蚓堆肥较单施化肥或常规堆肥均提高了土壤速效养分含量, 显著增加了土壤微生物生物量和土壤酶活性, 其中土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量较常规堆肥提高了 14.7%。益生菌的添加活化了土壤养分, 增加了土壤细菌、放线菌、解淀粉芽孢杆菌和荧光假单胞菌数量, 降低了土壤真菌数量, 同时显著提高了土壤酶活性。各处理比较而言, 蚯蚓堆肥配施益生菌在土壤速效养分含量、土壤微生物生物量及土壤酶活性上提升作用最为明显, 其中蚯蚓堆肥配施混合益生菌处理 (VCXY) 的土壤细菌数量和蔗糖酶活性相较于常规堆肥配施混合益生菌处理 (CDXY) 分别提高了 32.0% 和 14.4%。方差分析结果表明, 蚯蚓堆肥和常规堆肥与益生菌在土壤速效磷、速效钾、微生物生物量碳、细菌数量、真菌数量、脲酶及蔗糖酶活性上存在显著交互作用。综上所述, 蚯蚓堆肥与益生菌配施可显著促进土壤肥力和微生物活性的改善, 可替代部分化肥用于设施蔬菜的绿色生产和土壤培肥。

关键词: 蚯蚓堆肥; 益生菌; 土壤肥力; 微生物生物量; 酶活性

中图分类号: S144.1

随着我国畜牧业规模化和集约化的不断发展, 农业有机废弃物越来越受到人们的关注, 一方面, 有机废弃物的无序化处理带来了环境污染; 另一方面, 由于有机废弃物含有的大量养分得不到合理利用而造成严重的资源浪费^[1-2]。畜禽粪便经发酵而成的有机堆肥, 既解决了农业有机废弃物的处置问题, 又具有培肥土壤和促进作物生长的作用, 有效地实现了畜禽粪便的养分再循环及其资源化利用^[3-5]。蚯蚓堆肥是对高温腐熟后的有机堆肥添加蚯蚓, 通过蚯蚓的吞食消化和生命活动等作用产生的一种新型有机堆肥, 结合了传统堆肥法与生物处理法两方面的优势, 具有良好的物理、化学和生物学特性, 可改善土壤生态环境, 提高作物产量和品质^[6-9]。土壤益生菌作为促进植株生长的一类土壤细菌, 具有活化土壤养分、提高土壤酶活性的作用^[10-11], 将其与有机堆肥混合而成的生物肥料, 兼具有机堆肥和益生菌的优势, 在有机堆肥给予益生菌良好的生长环境的同时, 益生菌也通过自身

活动及其分泌物促进了堆肥养分的转化^[12-13], 从而调节土壤微生物生态结构, 提高肥料利用率, 同时, 生物肥料的广泛应用有效地解决了畜禽粪便给环境带来的污染, 符合我国农业可持续发展的要求。

目前, 有研究报道称有机堆肥与益生菌配施对作物生长、产量和品质具有促进作用, 同时对多种作物病害具有防控作用^[14-16]。本试验选用蚯蚓堆肥和常规堆肥, 以及自主筛选的解淀粉芽孢杆菌和荧光假单胞菌两种不同功能的益生菌, 旨在研究蚯蚓堆肥与益生菌共同作用下对西瓜地土壤肥力和微生物特性的影响, 以期对蚯蚓堆肥的资源化利用提供理论和实践基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年在南京市蔬菜科学研究所温室大棚开展, 试验地点属亚热带湿润气候, 年均气温 15.4℃,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200106)和农业部引进国际先进农业科学技术计划项目(2015-Z42)资助。

* 通讯作者(jiaguojiao@njau.edu.cn)

作者简介: 曾令涛(1990—), 男, 山东章丘人, 硕士研究生, 主要从事土壤生物培肥方面研究。E-mail: 2013103062@njau.edu.cn

年均降雨量 1 106 mm，土壤类型为黄棕壤。供试常规堆肥为鲜牛粪经高温堆制发酵后的腐熟牛粪，蚯蚓堆肥为腐熟牛粪经蚯蚓处理后的产物，均由南京市博农生物科技有限公司提供；供试化肥为尿素(CON_2H_4)、过磷酸钙($\text{CaP}_2\text{H}_4\text{O}_8$)和氯化钾(KCl)；供试西瓜品种为 8424。

试验用两种益生菌为解淀粉芽孢杆菌 X (*Bacillus amyloliquefaciens*，保藏号 CGMCC No.5624)和荧光假单胞菌 Y(*Pseudomonas fluorescens*，保藏号 CGMCC

No.7130)，均为南京农业大学资环学院土壤生态实验室自行筛选的专利菌，分别具有解钾、解磷及一定的促生功能。将两种益生菌进行实验室培养，待菌液活菌数量达 10^9 cfu/ml 后，按照 10：1 的固液比分别与蚯蚓堆肥和常规堆肥混合，保持适宜温度和含水量培养 4 天，经选择性培养基测定堆肥中解淀粉芽孢杆菌和荧光假单胞菌浓度分别为 1.2×10^9 cfu/g 和 8.3×10^9 cfu/g，置阴凉处保存备用。供试土壤及有机堆肥理化性质见表 1。

表 1 供试土壤和有机堆肥基本性质
Table 1 Physico-chemical properties of tested soil and organic compost

材料	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
供试土壤	5.5	25.8	2.7	0.4	20.8	102.8	190.1
常规堆肥	6.8	462.8	20.7	11.8	4.6	4 792.0	1 567.3
蚯蚓堆肥	6.4	332.7	22.2	7.5	6.1	4 103.1	885.0

1.2 试验设计

试验共设 10 个处理(表 2)，每个处理 3 次重复，共 30 个小区，随机区组排列，每个小区面积 6.8 m²，定植 8 株西瓜。试验采用等量养分设计原则，总养分标准

为 N 240.0 kg/hm²、P₂O₅ 345.0 kg/hm²、K₂O 330.0 kg/hm²，有机堆肥施用量为 10.5 t/hm²(干重)，养分不足的处理以化肥补齐，肥料以沟施方式于西瓜苗移栽前一次性施入。

表 2 试验处理及具体施肥情况
Table 2 Information of experimental treatments and fertilization

处理	处理代号	具体施肥情况(kg/hm ²)
不施肥	CK	不施任何肥料
单施化肥	CF	尿素(514)、过磷酸钙(565)、氯化钾(514)
常规堆肥	CD	牛粪(10 500)
常规堆肥+解淀粉芽孢杆菌	CDX	牛粪(10 500)、尿素(48)、过磷酸钙(C94)、氯化钾(423)
常规堆肥+荧光假单胞菌	CDY	牛粪(10 500)、尿素(48)、过磷酸钙(94)、氯化钾(423)
常规堆肥+解淀粉芽孢杆菌+荧光假单胞菌	CDXY	牛粪(10 500)、尿素(48)、过磷酸钙(94)、氯化钾(423)
蚯蚓堆肥	VC	蚓粪(10 500)
蚯蚓堆肥+解淀粉芽孢杆菌	VCX	蚓粪(10 500)、尿素(13)、过磷酸钙(27)、氯化钾(393)
蚯蚓堆肥+荧光假单胞菌	VCY	蚓粪(10 500)、尿素(13)、过磷酸钙(27)、氯化钾(393)
蚯蚓堆肥+解淀粉芽孢杆菌+荧光假单胞菌	VCXY	蚓粪(10 500)、尿素(13)、过磷酸钙(27)、氯化钾(393)

注：括号内数据为施肥量。

于 2015 年 3 月 28 日进行西瓜苗的移栽定植，株间距 40 cm，花期自然授粉，田间灌溉采用滴灌方式，保持良好通风，各处理间田间管理一致。分别在西瓜盛花期(2015 年 5 月)和收获期(2015 年 6 月)采集土壤样品，采集的土壤样品带回实验室测定土壤化学性质、土壤微生物指标和土壤酶活性。

1.3 测定指标与方法

有机肥理化指标测定：参照国家有机肥料相关标准^[17-19]。

土壤肥力指标测定：参照《土壤农化分析》^[20]。

土壤微生物指标测定：微生物生物量碳氮采用氯仿熏蒸浸提法测定；微生物呼吸采用黑暗培养-气相色谱法测定；细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基培养测定；真菌采用马丁氏培养基培养测定；放线菌采用高氏一号培养基培养测定；解淀粉芽孢杆菌和尖孢镰刀菌采用相应选择性培养基培养测定^[21-22]；荧光假单胞菌采用 CFC 选择性培养基培养测定。

土壤酶活性测定：脲酶采用苯酚-次氯酸钠比色法测定；酸性磷酸酶采用氯代二溴对苯醌亚胺比色法测定；蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定；过

氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定。

1.4 数据分析

使用 Excel 2003 处理数据和制表, Origin 9 软件制图, SPSS 20 软件对数据进行显著性检验 ($P<0.05$) 和方差分析。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓堆肥与益生菌配施对土壤肥力的影响

由表 3 可知, 与单施化肥(CF)或常规堆肥处理(CD)相比, 不论添加益生菌与否, 蚯蚓堆肥均提高了土壤速效养分含量。与单施化肥相比, 蚯蚓堆肥和常

规堆肥显著提高了土壤 pH, 土壤有机质(SOM)也有一定程度的提高, 但无显著差异。

在西瓜盛花期, 蚯蚓堆肥及其配施益生菌处理的土壤速效养分含量较常规堆肥均有不同程度提高, 其中单施蚯蚓堆肥处理的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量较常规堆肥提高了 14.7%。解淀粉芽孢杆菌 X 和荧光假单胞菌 Y 益生菌的添加, 不同程度促进了土壤速效养分含量的提高, 其中土壤速效钾和速效磷含量显著增加。所有处理中, VCXY 处理的速效磷含量最高, 相比于 VC 处理提高了 18.0%, VCX 处理的速效钾含量最高, 相比于 CDX 处理提高了 5.8%。

表 3 蚯蚓堆肥与益生菌配施对土壤肥力的影响
Table 3 Effects of interaction between vermicompost and probiotics on soil fertility

处理	pH	SOM (g/kg)	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)		NO ₃ -N (mg/kg)		速效磷 (mg/kg)		速效钾 (mg/kg)	
			盛花期	收获期	盛花期	收获期	盛花期	收获期	盛花期	收获期
CK	5.6±0.2b	25.5±2.2a	35.8±2.1b	24.7±1.8a	84.0±8.1d	56.8±1.4e	86.4±3.1f	72.0±5.4f	185.5±12.9e	151.0±10.5e
CF	5.5±0.1b	25.3±1.9a	50.8±2.8a	30.7±1.3a	126.6±11.2bc	72.0±2.6d	121.3±4.7a	80.8±4.4ef	250.3±5.8a	213.2±7.9a
CD	6.1±0.3a	27.2±1.2a	41.0±2.7ab	30.8±4.8a	116.9±8.1c	99.7±3.6c	98.0±4.5e	84.2±3.8e	202.5±9.5de	165.5±9.5d
CDX	6.1±0.5a	26.3±1.8a	40.2±2.4ab	30.9±2.1a	130.4±17.0bc	99.1±3.2c	97.4±5.3e	85.7±6.2de	225.6±15.5c	179.3±8.8c
CDY	6.0±0.3a	27.2±2.6a	38.9±3.2ab	27.3±3.6a	125.7±15.5bc	103.6±4.9bc	111.4±2.3bc	99.4±3.9ab	204.4±16.2cd	169.5±6.0cd
CDXY	6.0±0.1a	27.7±2.2a	38.1±4.4ab	28.1±1.8a	121.9±9.6c	102.9±6.6bc	109.4±4.7cd	95.1±1.7bc	231.8±12.2bc	175.5±6.5c
VC	6.2±0.2a	27.3±2.3a	42.0±3.9ab	30.4±2.5a	129.8±5.8bc	114.4±6.1ab	100.8±7.6e	89.6±5.6cd	211.2±5.6cd	172.4±15.2c
VCX	6.1±0.6a	26.8±1.3a	41.1±2.0 ab	32.1±6.6a	141.6±12.0ab	117.4±8.0a	102.8±4.6de	93.9±3.9bcd	238.5±8.7b	195.7±8.0b
VCY	6.2±0.3a	28.0±2.5a	38.3±3.3ab	28.4±3.4a	144.8±4.7a	117.2±13.4a	114.3±3.7abc	106.4±5.7a	215.6±8.5cd	176.6±4.2c
VCXY	6.2±0.4a	26.9±3.0a	43.1±3.5ab	28.6±2.6a	142.4±8.7a	114.0±3.8ab	119.0±3.9ab	105.5±3.5a	235.8±4.9b	192.0±5.0b

注: 同列不同小写字母表示处理间存在显著性差异($P<0.05$), 下表同。

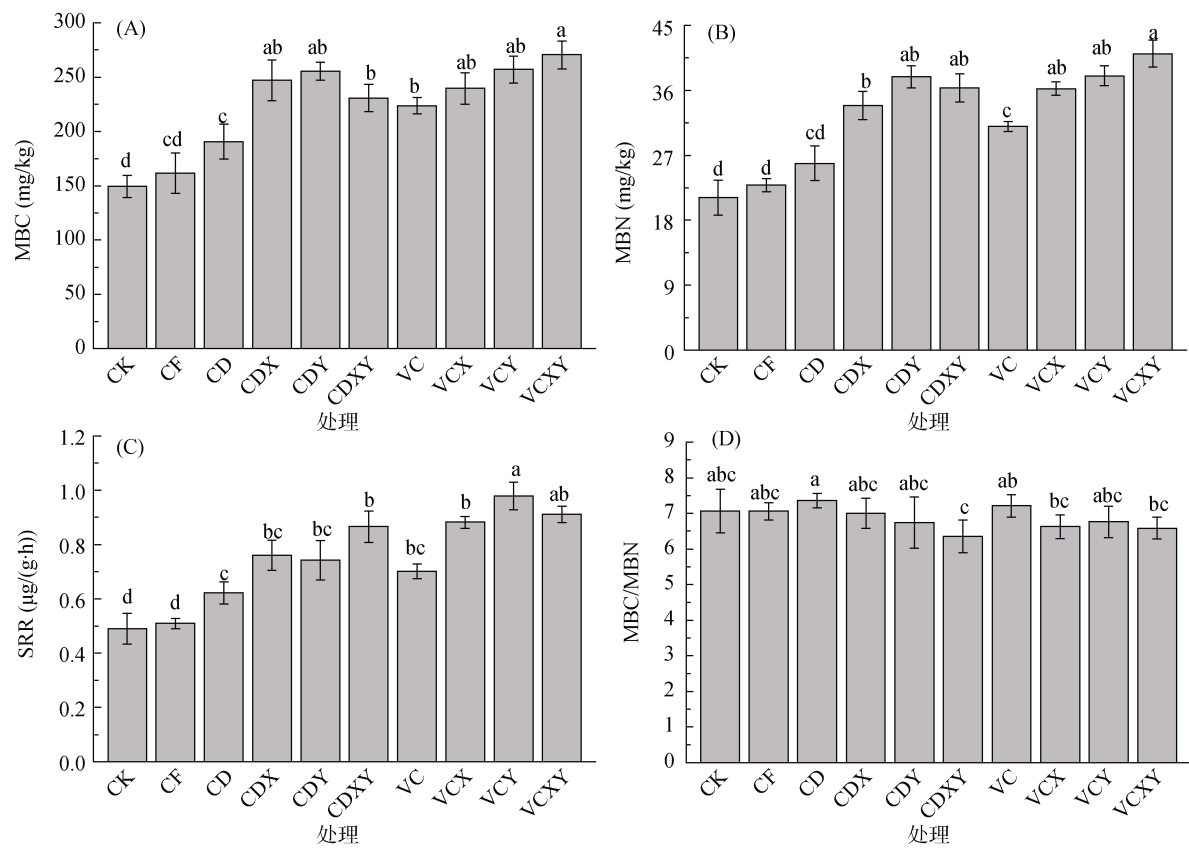
西瓜收获期的土壤速效养分含量较盛花期均有不同程度的降低, 且各处理间变化趋势与盛花期基本一致, 其中单施蚯蚓堆肥处理的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、速效磷和速效钾含量较单施常规堆肥处理显著增加。值得注意的是, 在西瓜盛花期, 单施化肥的速效磷含量高于蚯蚓堆肥和常规堆肥及其配施益生菌处理, 而在西瓜收获期, 蚯蚓堆肥和常规堆肥及其配施益生菌的速效磷含量均高于单施化肥处理。各处理间比较而言, 蚯蚓堆肥配施益生菌处理对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和速效磷含量提升作用最为显著, 其中 VCXY 处理的速效磷含量相比于 CDXY 处理提高了 8.8%, 说明蚯蚓堆肥及其配施益生菌对土壤速效养分的提升作用显著且优于常规堆肥。

2.2 蚯蚓堆肥与益生菌配施对土壤微生物特性的影响

2.2.1 蚯蚓堆肥与益生菌配施对土壤微生物生物量的影响 由图 1 可以看出, 各处理间土壤微生物生物量碳(MBC)和土壤微生物生物量氮(MBN)与土壤

呼吸速率(SRR)的变化规律基本一致。不论添加益生菌与否, 有机堆肥的施用均提高了 MBC、MBN 和 SRR, 且蚯蚓堆肥的作用更为明显。益生菌的添加对 MBC、MBN 和 SRR 也有一定的促进作用, 其中 MBN 显著增加。各处理间比较而言, 蚯蚓堆肥配施益生菌处理的 MBC、MBN 和 SRR 均最大, 其中 VCXY 处理的 MBC 和 MBN 较 CDXY 处理分别提高了 17.2% 和 13.1%。MBC/MBN 是反映土壤微生物群落组成及结构变化的指标, 一般而言, 土壤真菌的碳氮比大于土壤细菌。本试验中单施有机堆肥处理提高了 MBC/MBN, 而益生菌的施入则降低了 MBC/MBN, 其中以 CDXY 处理最低, 说明有机堆肥及益生菌的施入对土壤微生物群落结构产生了一定的影响。

2.2.2 蚯蚓堆肥与益生菌配施对土壤微生物数量的影响 由表 4 可知, 不论添加益生菌与否, 有机堆肥均提高了土壤细菌、放线菌、解淀粉芽孢杆菌和荧光假单胞菌数量, 且以蚯蚓堆肥的作用更为明显。各处理间比较而言, 蚯蚓堆肥配施益生菌处理的土壤细菌、



(图中小写字母不同表示处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平，下同)
图 1 蚯蚓堆肥与益生菌配施对土壤微生物生物量的影响

Fig. 1 Effects of interaction between vermicompost and probiotics on soil microbial biomass

表 4 蚯蚓堆肥与益生菌配施对土壤微生物数量的影响

Table 4 Effects of interaction between vermicompost and probiotics on soil microbial population

处理	细菌 (10^7 cfu/g)	真菌 (10^4 cfu/g)	放线菌 (10^5 cfu/g)	解淀粉芽孢杆菌 (10^5 cfu/g)	荧光假单胞菌 (10^5 cfu/g)	尖孢镰刀菌 (10^3 cfu/g)
CK	1.3 ± 0.2 f	1.8 ± 0.2 cd	5.5 ± 0.3 e	3.2 ± 0.1 d	5.3 ± 0.3 e	4.2 ± 0.2 a
CF	1.6 ± 0.1 ef	2.2 ± 0.1 bc	5.6 ± 0.4 e	3.8 ± 0.3 d	5.1 ± 0.1 e	5.1 ± 0.5 b
CD	2.5 ± 0.3 e	2.6 ± 0.2 ab	7.3 ± 0.2 d	4.5 ± 0.2 cd	6.6 ± 0.3 d	1.3 ± 0.2 c
CDX	4.8 ± 0.2 c	1.3 ± 0.3 de	7.5 ± 0.5 d	11.2 ± 0.5 ab	6.9 ± 0.7 d	0.7 ± 0.05 c
CDY	5.2 ± 0.1 c	1.1 ± 0.1 e	7.1 ± 0.7 d	4.9 ± 0.7 c	8.3 ± 0.6 ab	0.5 ± 0.03 c
CDXY	5.0 ± 0.3 c	0.9 ± 0.2 e	7.8 ± 0.4 cd	8.6 ± 0.6 bc	8.1 ± 0.5 bc	0.7 ± 0.1 c
VC	3.7 ± 0.4 d	3.2 ± 0.3 a	8.4 ± 0.3 abc	5.3 ± 0.2 c	7.2 ± 0.3 d	1.3 ± 0.2 c
VCX	6.4 ± 0.3 ab	1.2 ± 0.2 de	8.0 ± 0.4 bcd	12.3 ± 1.1 a	6.7 ± 0.5 cd	0.6 ± 0.09 c
VCY	5.8 ± 0.1 bc	0.8 ± 0.1 e	8.8 ± 0.2 ab	4.4 ± 0.2 cd	9.3 ± 0.5 a	0.7 ± 0.1 c
VCXY	6.6 ± 0.3 a	1.5 ± 0.3 de	9.1 ± 0.4 a	9.5 ± 0.7 b	8.9 ± 0.7 ab	0.7 ± 0.04 c

放线菌、解淀粉芽孢杆菌和荧光假单胞菌数量均最大，其中 VCXY 处理的土壤细菌和放线菌数量相比于 CDXY 处理分别提高了 32.0% 和 16.7%。益生菌的添加显著提高了土壤细菌数量，解淀粉芽孢杆菌和荧光假单胞菌数量也得到相应的增加，其中 VCXY 处理相比于 VC 处理土壤解淀粉芽孢杆菌数量提高了 79.2%，VCY 处理相比于 VC 处理土壤荧光假单胞菌数量提高了 38.8%，说明益生菌施入土壤之后定殖情况良好。尖孢镰刀菌是西瓜枯萎病的致病菌，属于

真菌类，益生菌的添加显著降低了土壤真菌和尖孢镰刀菌数量，土壤真菌的碳氮比大于土壤细菌，本研究益生菌降低土壤 MBC/MBN 的试验结果与此相吻合，原因可能是由于在同一土壤环境容量下，随着细菌不断地定殖和繁殖，占用了大量的空间与营养，从而抑制了土壤真菌的生长与繁殖。

2.2.3 蚯蚓堆肥与益生菌互作对土壤酶活性的影响 由图 2 可以看出，与单施化肥或常规堆肥相比，不论添加益生菌与否，蚯蚓堆肥均提高了土壤酸性磷酸酶和

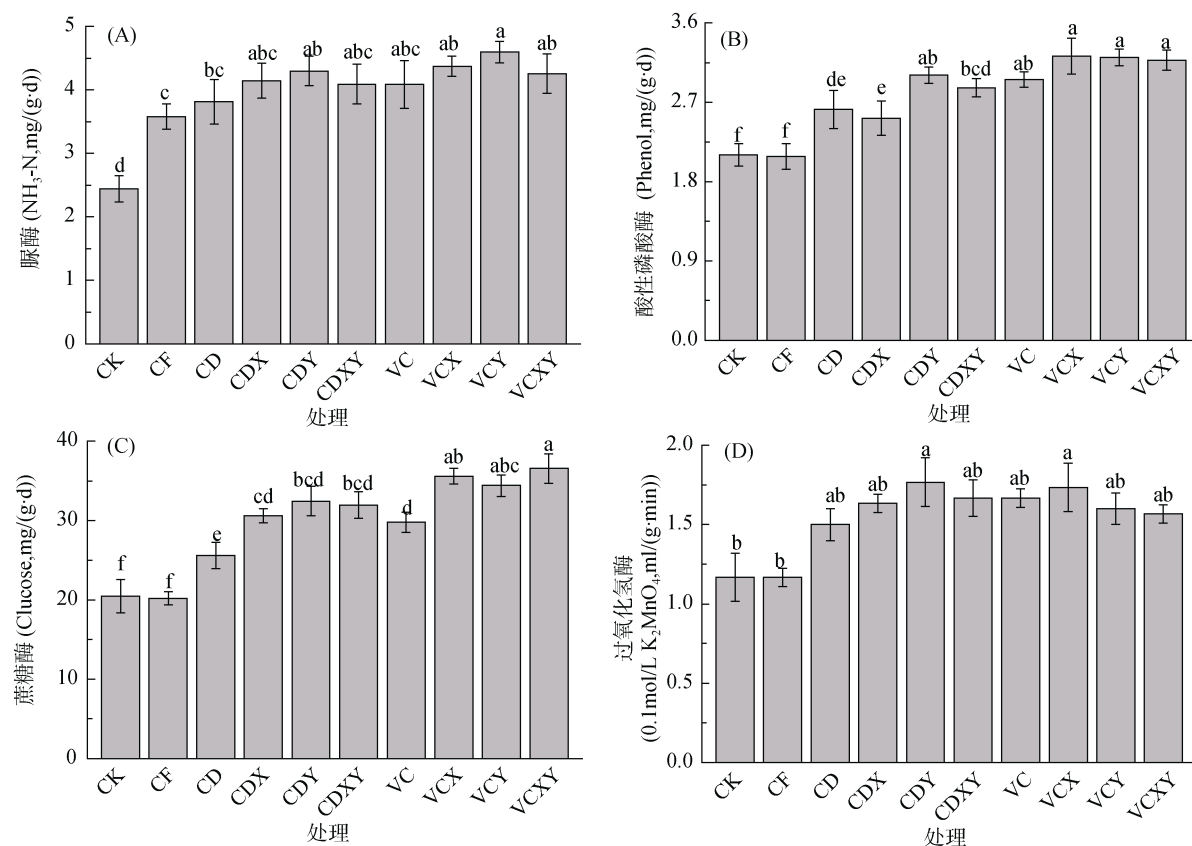


图 2 蚯蚓堆肥与益生菌配施对土壤酶活性的影响

Fig. 2 Effects of interaction between vermicompost and probiotics on soil enzyme activities

蔗糖酶活性,其中 VC 处理相比于 CD 处理显著增加。益生菌的添加提高了土壤酶活性,其中 VCY 处理的土壤脲酶和酸性磷酸酶活性与 VC 处理相比分别提高了 12.5% 和 11.8%,值得注意的是,各处理间土壤过氧化氢酶活性无显著差异,这可能是受到土壤类型以及肥料等综合因素的影响。各处理间比较而言,土壤脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶的最大值处理均为蚯蚓堆肥配施益生菌,其中 VCXY 处理的土壤蔗糖酶活性相比于 CDXY 处理提高了 14.4%,说明蚯蚓堆肥及其配施益生菌对土壤酶活性的提升作用显著且优于常规堆肥。

3 讨论

本研究结果表明,不论添加益生菌与否,与单施化肥或常规堆肥相比,蚯蚓堆肥均提高了土壤速效养分含量,增加了土壤微生物生物量和土壤酶活性。化肥施入土壤后养分含量迅速增加,西瓜盛花期 CF 处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、速效磷和速效钾含量均高于其他处理,但释放的养分易因灌溉和土壤的吸附固定而降低其利用率,其中以速效磷尤为明显,而有机堆肥养分释放缓慢,持续供应作物生长^[3]。试验各处理比较而言,在整个西瓜生长期,VC 处理的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、

速效磷和速效钾含量均高于 CD 处理,且西瓜收获期土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和速效磷含量的最大值均为蚯蚓堆肥配施益生菌处理,说明蚯蚓堆肥及益生菌的施入为西瓜中后期的生长提供了更加充足的养分供应;土壤微生物特性是土壤质量的重要组成部分,也是影响土壤微生物生态环境的重要因素^[23]。蚯蚓堆肥和常规堆肥的添加均提升了土壤微生物活性,且以蚯蚓堆肥配施益生菌的效果最为突出,其中 VC 处理的 MBC 较 CD 处理提高了 17.3%,VCXY 处理的土壤细菌数量和土壤蔗糖酶活性较 CDXY 处理分别提高了 33.0%和 14.4%。已有研究报道表明^[24-28],有机堆肥和益生菌均具有提高土壤养分和土壤微生物活性的作用,本试验中蚯蚓堆肥与益生菌配施对土壤养分和微生物活性的提升作用更为明显。此外, Pant 等^[29] 和 Zhang 等^[30] 的研究表明,蚯蚓堆肥中提取出的堆肥茶(浸出液)等物质对土壤质量提升和植物生长均具有明显促进作用。

益生菌的添加促进了土壤速效养分的提高,显著增加了土壤微生物生物量和土壤酶活性,且以蚯蚓堆肥配施益生菌的提升作用更为明显,其中 VCXY 处理相比于 CDXY 处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量和 MBC 含量分别提高了 10.8% 和 17.2%。益生菌的添加显著提

高了土壤细菌和放线菌数量,解淀粉芽孢杆菌和荧光假单胞数量也得到相应的提升,且以蚯蚓堆肥中的益生菌浓度最高,说明施入的益生菌在蚯蚓堆肥中的定殖情况最佳,而定殖后的益生菌通过利用土壤难溶性钾硅酸盐和磷酸盐生长繁殖的方式显著提高了土壤速效钾和速效磷含量。有机肥和益生菌的施入,提升了土壤微生物数量,微生物通过自身活动和分泌有机酸等方式活化土壤和肥料养分,而活化后的养分又为微生物的生长繁殖提供了良好的物质基础,两者相互促进,共同提升了土壤质量^[31-32]。相对于常规堆肥,蚯蚓堆肥除具有良好的生化性质外,还具有疏松多孔、表面积大的物理性质,更有利于益生菌的生长与繁殖。方差分析结果表明(表 5),有机堆肥与益生菌在土壤速效磷、速效钾、MBC、细菌数量、真菌数量、脲酶及蔗糖酶活性上有显著的交互作用。Davoud 等^[33]研究表明,蚯蚓粪和丛枝菌根真菌(AMF)生物肥料对土壤体积质量等土壤物理性质具有积极的影响。

表 5 有机堆肥和益生菌对土壤肥力和微生物特性影响的方差分析

指标	因子(自由度)		
	有机堆肥(1)	益生菌(3)	有机堆肥×益生菌
NH ₄ ⁺ -N (收获期)	0.11	0.99	0.04
NO ₃ ⁻ -N (收获期)	26.02**	0.24	0.28
速效磷	21.99**	32.58**	10.69*
速效钾	3.41*	72.44**	1.12*
MBC	18.59**	32.56**	13.79**
MBN	5.86*	15.36*	0.99
细菌	34.45**	28.82**	12.45**
真菌	11.61*	32.17**	7.22*
放线菌	37.34**	2.73	1.76
脲酶	7.35*	12.49*	5.05*
酸性磷酸酶	15.89**	7.81*	0.18
蔗糖酶	19.30**	11.19**	4.57*
过氧化氢酶	0.01	1.33	0.30

注：*和**分别代表在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关。

蚯蚓堆肥及益生菌的施用一定程度上降低了西瓜枯萎病发病率,本试验中土壤真菌和尖孢镰刀菌数量随益生菌的施入呈下降趋势。蚯蚓堆肥中含有大量微生物,经蚯蚓消化后有益微生物的数量成倍增加,且施入的益生菌在蚯蚓堆肥中得以良好定殖,在同一土壤环境容量下,益生菌的大量繁殖增强了其对营养和空间的竞争力,从而抑制了真菌和病原菌的生长,减少病原菌对寄主植物根系的伤害;另一方面蚯蚓堆肥中含有一定数量的拮抗微生物,与施入的益生菌相

似,都能产生抗生素及其他次生代谢物质,抑制真菌及病原菌的繁殖,减少植物土传病害的发生^[34]。丁文娟等^[35]和王丽丽等^[36]研究证明生物有机肥的施用降低了土壤真菌数量,而有研究结果则表明施入的生物有机肥增加了土壤真菌数量^[37],这可能与施入菌剂的种类及土壤性质等综合因素有关。

4 结论

总之,不论添加益生菌与否,与单施化肥或施用常规堆肥相比,蚯蚓堆肥的施用均可提高土壤肥力和土壤微生物活性,一定程度上抑制了西瓜枯萎病的发生。蚯蚓堆肥与益生菌的配施减少了因畜禽粪便造成的生态环境污染,降低了农业化肥的施用,同时还提高了土壤质量,本研究结果可为实现有机废弃物的资源化利用提供技术支撑。

参考文献：

[1] 吴海勇,李明德,刘琼峰,等. 农业有机废弃物还田的生态经济效益研究[J]. 土壤, 2012, 44(5): 769-775

[2] 李波,魏成熙,文庭池,等. 农业有机废弃物发酵后的有机肥对植烟土壤微生物数量及酶活性的影[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 821-825

[3] 全少伟,时连辉,刘登民,等. 不同有机堆肥对土壤性状及微生物生物量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 110-117

[4] 王宏武,冯柱安,胡钟胜,等. 长期施用有机堆肥对土壤性状与烟叶质量的影响[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(2): 6-16

[5] 罗佳,刘丽珠,王同,等. 养猪发酵床垫料有机肥对辣椒产量及土壤微生物多样性的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1 101-1 106

[6] Zaller J G. Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effect on germination, biomass allocation, yield and fruit quality of three tomato varieties[J]. Scientia Horticulture, 2007, 112: 191-199

[7] 刘婷,任宗玲,张池,等. 蚯蚓堆制处理对农业有机废弃物的化学及生物学影响的主成分分析[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 779-784

[8] Kumar G C, Bhunia C G, Kumar S C. The effect of vermicompost and other fertilizers on cultivation of tomato plants[J]. Journal of Horticulture and Forestry, 2011, 2: 42-45

[9] Oo A N, Iwai C B, Saenjan P, et al. Soil properties and maize growth in saline and non-saline soils using cassava-industrial waste compost and vermicompost with or without earthworms[J]. Land Degradation & Development, 2015, 26(3): 300-310

[10] 韩晓阳,张丽霞,黄晓琴,等. 氮素转化菌对茶树根际土壤微生物群落和养分含量的影响[J]. 茶业科学, 2015, 35(5): 405-414

[11] Piromyou P, Buranabanyat B, Piyada T, et al. Effect of plant growth promoting rhizobacteria(PGPR) inoculation

- on microbial community structure in rhizosphere of forage corn cultivated in Thailand[J]. *European Journal Soil Biology*, 2011, 47(1): 44–54
- [12] 胡可, 李华兴, 卢维盛, 等. 生物有机肥对土壤微生物活性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2): 303–306
- [13] 邵丽, 谷洁, 张社奇, 等. 生物复混肥对土壤微生物功能多样性及土壤酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(6): 1 153–1 159
- [14] Marcotel I, Hernandez T, Garcia C, et al. Influence of one or two successive annual application of organic fertilizers on the enzyme activity of a soil under barley cultivation[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 79: 147–154
- [15] 曹丹, 宗良纲, 肖峻, 等. 生物肥对有机黄瓜生长及土壤生物学特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2 587–2 592
- [16] Luo J, Ran W, Hu JA, et al. Application of bio-organic fertilizer significantly affected fungal diversity of soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(6): 2 039–2 048
- [17] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准 (NY525-2012) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
- [18] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准 (NY/T300-1995)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995
- [19] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准 (NY/T301-1995)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [21] 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): 1 194–1 202
- [22] Komada H. Development of selective medium for quantitative isolation of *Fusarium oxysporum* from natural soil[J]. *Review of Plant Protection Research*, 1975, 8: 114–125
- [23] 田小明, 李俊华, 王成, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(3): 481–488
- [24] 邵华伟, 葛春辉, 马彦茹, 等. 施入城市生活垃圾堆肥对玉米植株重金属分布及土壤养分的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2013, 30(6): 58–63
- [25] Su L L, Ta Y W, Pei N L, et al. The use of vermicompost in organic farming: Overview, effect on soil and economic[J]. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(6): 1 143–1 156
- [26] 陈波, 马海林, 刘方春, 等. 生物有机肥对樱桃生长及根际土壤生物学特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 267–271
- [27] Ilker U, Ismail E T. Short-term effect of vermicompost application on biological properties of an alkaline soil with high lime content from Mediterranean region of Turkey[J]. *The Scientific World Journal*, 2014: 395 282–395 282
- [28] 孙薇, 钱勋, 付青霞, 等. 生物有机肥对秦巴山区桃园土壤微生物群落和酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1 224–1 233
- [29] Pant A, Radovich T J K, Hue N V, et al. Effect of vermicompost tea (Aqueous extract) on pak choi yield, quality, and on soil biological properties[J]. *Compost Science & Utilization*, 2011, 19(4): 279–292
- [30] Zhang H, Tan S N, Wong W S, et al. Mass spectrometric evidence for the occurrence of plant growth promoting cytokinins in vermicompost tea[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50: 401–403
- [31] Jayakumar P, Natarajan S. Microbial diversity of vermicompost bacteria that exhibit useful agricultural traits and waste management potential[J]. *Springer Plus*, 2012, 1: 26
- [32] 孙运杰, 马海林, 刘方春, 等. 植物根际促生菌对蓝莓根际土壤养分与微生物数量的影响[J]. *山东农业科学*, 2014, 46(1): 66–69
- [33] Davoud A, Behnaz A, Abdolhossein A, et al. Effects of Vermicompost and arbuscular mycorrhizal fungi on soil properties and growth of medicago polymorpha L[J]. *Compost Science & Utilization*, 2015, 22(3): 142–153
- [34] Tajbakhsh J, Goltapeh E M, Ajit V. Vermicompost as a biological soil amendment (Chapter 13) // Karaca A. *Biology of earthworms, soil biology*[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011
- [35] 丁文娟, 曹群, 赵兰凤, 等. 生物有机肥施用期对香蕉枯萎病及土壤微生物的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(8): 1 575–1 582
- [36] 王丽丽, 石俊雄, 袁赛飞, 等. 微生物有机肥结合土壤改良剂防治烟草青枯病[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 150–156
- [37] 荆瑞勇, 王丽艳, 郭永霞. 生物有机肥对盆栽小白菜土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(2): 79–89

Effects of Interaction Between Vermicompost and Probiotics on Soil Fertility and Microbial Properties

ZENG Lingtao^{1,2}, WANG Dongsheng³, WANG Zhenyi¹, WANG Siqu¹, SHENG Xiongjie¹,
CHANG Jiangjie^{1,2}, LI Huixin^{1,2}, HU Feng^{1,2}, JIAO Jiaguo^{1,2*}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2 Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China;

3 Nanjing Institute of Vegetable Science, Nanjing 210042, China)

Abstract: The effects of the application of vermicompost mixed with two different functional probiotics *Bacillus amyloliquefaciens* (X) and *Fluorescent pseudomonas* (Y) on the fertility and microbial properties of soil were studied under the same nutrient level. The results showed that whether mixed with probiotics or not, compared with chemical fertilizer and conventional compost, vermicompost could improve soil available nutrient contents, increase soil microbial biomass and enzyme activities significantly. In terms of soil NO_3^- content, the application of vermicompost was 14.7% higher than conventional compost. The application of probiotics promoted the activation of soil nutrients, increased the number of soil bacteria, actinomycetes, *Bacillus amyloliquefaciens* and *Fluorescent pseudomonas*, decreased the number of soil fungi, and improved soil enzyme activities significantly. The application of vermicompost mixed with probiotics was more obvious in increasing soil available nutrient contents, soil microbial biomass carbon and nitrogen, the amounts of soil microbial biomass and enzyme activities than other treatments, and soil bacteria number and invertase of vermicompost mixed with probiotics XY were 32.0% and 14.4% higher than conventional compost mixed with probiotics XY. Variance analysis showed that significant interactions between organic compost and probiotics on soil available phosphorus, available potassium, microbial biomass carbon, bacteria and fungi numbers, urease and invertase activities. These results indicated that the vermicompost mixed with probiotics has significant improving effects on soil fertility and microbial properties, which is a good choice of the replacement of chemical fertilizers for protecting vegetable green production and soil fertilities improvement.

Key words: Vermicompost; Probiotics; Soil fertility; Microbial biomass; Enzyme activity