

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0132

蚯蚓粪与微生物菌剂配施对蜜瓜土壤理化性质及微生物群落的影响

马凤捷^{1,2}, 杨春胤^{1,2}, 王振龙^{1,2}, 张 靖^{1,2}, 施志国^{1,2}

(1. 甘肃省农业工程技术研究院 兰州 730030; 2. 武威市农田土壤改良与耕地保育技术创新中心 甘肃武威 733000)

摘要:为改善民勤蜜瓜种植区由长期连作导致的土壤有机质匮乏、养分失衡及微生物多样性下降等问题,本研究选用环保高效的蚯蚓粪与微生物菌剂,探究其对连作土壤理化性质及微生物群落的影响。结果表明,增施蚯蚓粪可显著提高土壤有机质与微生物氮含量,降低土壤容重,改善土壤结构,其中微生物碳含量呈先升后降趋势。微生物群落共现网络分析表明,细菌以变形菌门和酸杆菌门为关键类群,真菌以子囊菌门占优。 α -多样性分析表明,2倍蚯蚓粪处理较0.5倍处理显著提高了细菌与真菌多样性。产量虽未随蚯蚓粪用量显著变化,但3倍蚯蚓粪配施EM菌剂显著提升了蜜瓜维生素C和可溶性固形物含量。综上,3倍蚯蚓粪与EM菌剂联用可有效优化土壤微生态环境并改善蜜瓜品质,研究结果为民勤地区蜜瓜生态种植提供了理论支撑。

关键词:蜜瓜;蚯蚓粪;微生物菌剂;理化性质;微生物群落结构

中图分类号:S652

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)12-077-11

Effects of combined application of earthworm castings and microbial agents on the physicochemical properties and microbial community of continuous cropping soil of honey melon

MA Fengjie^{1,2}, YANG Chunyin^{1,2}, WANG Zhenlong^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, SHI Zhiguo^{1,2}

(1. Gansu Agricultural Engineering Technology Research Institute, Lanzhou 730030, Gansu, China; 2. Wuwei City Agricultural Soil Improvement and Farmland Conservation Technology Innovation Center, Wuwei 733000, Gansu, China)

Abstract: To address the issues of soil organic matter deficiency, nutrient imbalance, and reduced microbial diversity caused by long-term continuous monocropping in the Minqin melon cultivation area, this study utilized environmentally friendly and efficient vermicompost and microbial agents to investigate their synergistic effects on soil physicochemical properties and microbial community structure. The results showed that increasing the application of vermicompost significantly enhanced soil organic matter and microbial nitrogen content, reduced soil bulk density, and improved soil structure, while microbial carbon content exhibited an initial increase followed by a decrease. Co-occurrence network analysis of the microbial community revealed that Proteobacteria and Acidobacteria were the key bacterial phyla, whereas Ascomycota dominated the fungal community. Alpha-diversity analysis indicated that the 2×vermicompost treatment significantly increased both bacterial and fungal diversity compared to the 0.5×treatment. Although melon yield did not significantly vary with vermicompost application rate, the combination of 3×vermicompost with EM agent significantly improved fruit quality. In conclusion, the combined application of 3×vermicompost and EM agent effectively optimizes the soil microecological environment and enhances melon quality, providing a theoretical basis for ecological melon cultivation in the Minqin region.

Key words: Honeydew melon; Earthworm casting; Microbial agent; Physicochemical property; Microbial community structure

收稿日期:2025-02-05;修回日期:2025-04-11

基金项目:甘肃省软科学基金项目(23JRZH346);甘肃省自然科学基金(23JRRH0003);2023年省级重点人才项目;2024年甘肃省陇原人才(青年个人)项目(甘组通字(2024)4号)

作者简介:马凤捷,女,助理研究员,主要从事连作土壤改良和耕地质量提升研究工作。E-mail:2550663071@qq.com

通信作者:施志国,男,副研究员,主要从事作物栽培和土壤地力提升研究工作。E-mail:361297483@qq.com

民勤县地处河西走廊东北部,东西北三面被巴丹吉林腾格里沙漠包围,绿洲面积少,海拔1298~1936 m,全年日照时数3104 h,≥10 °C活动积温3757 °C,生长期平均温度20 °C,≥0 °C有效积温3149 °C,无霜期157 d,平均昼夜温差15.5 °C,年均降水量113.2 mm^[1],年均蒸发量2623 mm,光照时间长,昼夜温差大,极适宜瓜类作物生长^[2]。民勤县种植1.33万hm²蜜瓜,100多个品种,可以满足不同的市场需求,有较强的竞争优势。2024年民勤县蜜瓜种植面积10 000 hm²,总产量达到43.8万t,全产业链产值达19.06亿元,平均667 m²蜜瓜产量3000 kg,主产区蜜瓜种植户人均可支配收入1.92万元^[3-4]。

研究区土壤属于灌淤土,土层深厚,砂黏性好,土质疏松,适合瓜类作物生长,但该地区土壤有机质含量低,微生物群落多样性较差,外源有机物料添加和微生物菌剂配施是改善土壤质量和微生物群落结构的最切实有效的农业措施。研究表明,采用蚯蚓粪作为栽培基质,添加腐熟枝条并结合200倍稀释的光合细菌菌剂处理,对改善赤霞珠葡萄园根际土壤效果显著。该处理不仅有效降低了土壤pH,同时提升了有机质含量、电导率(EC)及氮素指标(包括碱解氮和全氮)^[5]。这一研究结果为生产实践提供了重要参考,表明合理控制菌剂用量既可保障作物生长需求,又能实现成本优化,为微生物菌剂的科学应用奠定了理论基础。施肥对土壤细菌群落多样性的影响较真菌群落多样性更显著,适当的有机物料添加能够增强土壤微生物网络的稳定性^[6],提高土壤微生物活性,促进养分循环^[7]。与未施用粪肥和菌剂的对照相比,蚯蚓粪和微生物菌剂均能提高土壤养分含量,促进葡萄生长和品质提升,二者配施对品质提升效果较好,可优先作为葡萄园区土地管理的方式^[8]。蚯蚓粪和微生物菌剂配施能够显著提高蜜瓜维生素C、可溶性蛋白和可溶性糖含量,降低蜜瓜有机酸和硝酸盐含量,产量提高了8.93%~29.59%^[9]。研究表明,蚯蚓粪与微生物联合施用对土壤改良和作物生长具有显著效果。杨宁等^[10]研究表明,在城市绿地建设中,蚯蚓粪与根际促生菌配合使用能有效提升土壤肥力。韩顺斌等^[11]通过试验证实,黄腐酸微生物菌剂与蚯蚓粪共同施用不仅可提高番茄产量和品质,还能改善其口感特性。

当前,蚯蚓粪与微生物菌剂的协同增效机制及其在蜜瓜提质增效栽培中的应用正成为设施农业研究的前沿领域。笔者基于民勤绿洲西渠镇蜜瓜

主产区的生态特征,系统探究蚯蚓粪与菌剂配施对栽培基质的综合改良效应,通过建立多参数耦合评价体系,构建基于土壤健康-微生物活性-蜜瓜品质三元协同的精准施肥模型,以期为干旱区蜜瓜产业的绿色可持续发展提供技术范式与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2024年在甘肃省武威市民勤县西渠镇蜜瓜种植基地进行,降水稀少,光照充足,昼夜温差大,年均降水量110 mm,蒸发量高达2644 mm,昼夜温差25.2 °C,年均气温7.8 °C,日照时数3 073.5 h,无霜期162 d。试验前土壤容重1.34 g·cm⁻³,有机质含量(w,后同)23.2 g·kg⁻¹,速效钾含量46.0 mg·kg⁻¹,有效磷含量11.2 mg·kg⁻¹。

1.2 材料

试验蜜瓜品种为银蒂,来自甘肃省河西瓜菜研究所。试验用的根际促生菌购自中农绿康生物技术有限公司,微生物肥有效活菌数≥8亿·g⁻¹;主要菌剂为芽孢杆菌、解磷菌、解钾菌;EM复合微生物菌剂购自洛阳市益生菌企业研发中心,有效活菌数5亿·g⁻¹,主要菌剂为枯草芽孢杆菌;蚯蚓粪购自史丹利生物肥料有限公司,主要成分是蚯蚓粪有机肥,全量氮、磷、钾含量分别为3.50%、2.23%、4.12%,有机质含量为42.10%,pH为7.52。

1.3 试验设计

本试验在民勤县西渠镇大田进行,采用两因素完全随机区组设计,因素1为蚯蚓粪用量,以蚯蚓粪用量15 000 kg·hm⁻²为基准施肥量(Q),设置7500 kg·hm⁻²(0.5Q)、30 000 kg·hm⁻²(2Q)、45 000 kg·hm⁻²(3Q)4个水平;因素2为微生物菌剂种类,包括根际促生菌(P)、EM微生物菌剂(E)2个水平,共计8个处理,每个处理设3个重复小区,小区面积为40 m²,两个小区之间隔离行的宽度为60 cm,每个小区定植蜜瓜100株,株行距均为40 cm。不同处理的施肥方案如表1所示。

试验于2024年3月育苗,4月中下旬移栽,播前各处理统一施尿素(N含量16%)225 kg·hm⁻²,磷酸二铵(N含量16%、P含量46%)375 kg·hm⁻²,硫酸钾(K₂O含量52%)225 kg·hm⁻²作基肥一次性施入。覆膜种植,膜上设置滴灌带,20~30 d浇1次水,种植后,15~30 d后查看幼苗成活情况,及时查苗补苗,结合补苗进行除草。蜜瓜开花期、果实膨大期是浇水的2个关键时期,在6月中下旬到7月

表 1 不同处理施肥方案
Table 1 Fertilization schemes for different treatments

处理 Treatment	肥料类型 Fertilizer type	蚯蚓粪用量 Earthworm castings dosage/(kg·hm ²)	根际促生菌用量 Dosage of rhizosphere promoting bacteria/(L·hm ²)	EM 微生物菌剂用量 EM microbial agent dosage/(L·hm ²)
0.5Q.P	0.5 倍蚯蚓粪+根际促生菌 0.5 Times earthworm castings+rhizosphere growth promoting bacteria	7 500	15	0
Q.P	蚯蚓粪+根际促生菌 Earthworm castings+rhizosphere growth promoting bacteria	15 000	15	0
2Q.P	2 倍蚯蚓粪+根际促生菌 2 Times earthworm castings+rhizosphere growth promoting bacteria	30 000	15	0
3Q.P	3 倍蚯蚓粪+根际促生菌 3 Times earthworm castings+rhizosphere growth promoting bacteria	45 000	15	0
0.5Q.E	0.5 倍蚯蚓粪+EM 微生物菌剂 0.5 Times earthworm castings+EM microbial inoculant	7 500	0	225
Q.E	蚯蚓粪+EM 微生物菌剂 Earthworm castings+EM microbial inoculant	15 000	0	225
2Q.E	2 倍蚯蚓粪+EM 微生物菌剂 2 Times earthworm castings+EM microbial inoculant	30 000	0	225
3Q.E	3 倍蚯蚓粪+EM 微生物菌剂 3 Times earthworm castings+EM microbial inoculant	45 000	0	225

根据土壤墒情浇水,浇水量不宜过大,果实生长期追施 1 次钾肥(硫酸钾 75 kg·hm²),其他管理措施均与当地农户管理一致。

1.4 样品采集与处理

在果实膨大期和成熟期采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤样品约 100 g,用于微生物量碳和微生物量氮含量的测定;在果实成熟期采集 0~20 cm 土壤,用于土壤养分含量的测定;在成熟期佩戴无菌手套采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤,土壤混匀过筛放入自封袋中,保存于-80 °C 冰箱,用于土壤微生物群落结构分析。土壤样品每个小区采集 3 个重复,每个处理采集 9 个重复。于蜜瓜果实成熟期,每个处理 3 个小区,每个小区采摘 3 个果实,相当于每个处理随机采摘 9 个表面完整、无损伤、无病虫害的蜜瓜,带回实验室,进行品质指标测定。

1.5 测定指标和方法

采用电位法测定土壤 pH,通过重铬酸钾外加热法结合硫酸亚铁滴定测定有机质含量;采用碱解扩散法测定水解性氮含量;使用环刀法测定土壤容重;采用碳酸氢钠浸提与紫外分光光度联用技术测定有效磷含量;通过乙酸铵浸提配合火焰光度计定量测定速效钾含量;采用硫酸钾浸提-碳氮分析仪测定微生物量碳、微生物量氮,以上测定参照鲍士旦^[12]的方法进行。采用 PRO-101 型数显糖度计测定可溶性固形物含量;采用 2,6-二氯靛酚滴定法测定维生素 C 含量^[12];采用硬度计测定果实硬度。

采用土壤 DNA 抽提试剂盒(HiPureSoilDNAKitB, Magen 公司)提取 DNA。利用琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 质量,合格后用于 PCR 扩增。提取样品的总基因组 DNA 后,对细菌 16S rRNA 的 V3-V4 区以及真菌的 ITS 区域进行扩增,正向引物分别为 CCTACGGNGGCWGCAG 和 CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA, 反向引物分别为 GGACTTACHVGGGTWTCTAAT 和 GCTGC-GTTCTTCATCGATGC^[13]。利用 Illumina Novaseq6000 平台进行测序,测序得到的数据通过拼接,得到较长序列后进行分析。上述过程均委托南京集思慧远生物科技有限公司完成。

1.6 数据分析

采用 Microsoft Excel 97-2003 整理试验数据,采用 SPSS 27.0 软件进行方差分析,采用 Duan 法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓粪与微生物菌剂配施对土壤养分含量的影响

蚯蚓粪与微生物菌剂配施对土壤各理化性质的影响如表 2 所示,随着蚯蚓粪用量的增加,根际促生菌处理土壤容重呈先升后降的趋势,EM 微生物菌剂处理土壤容重呈降-升-降的趋势。在相同菌肥处理下,3Q.P 和 3Q.E 处理容重最小,土壤质地最好。随着蚯蚓粪用量的增加,土壤有机质含量呈增

加的趋势,在相同菌肥处理下,3Q.P 比其他根际促生菌处理分别提高 8.15%、5.44%、3.70%;3Q.E 比其他 EM 微生物菌剂处理分别提高 13.57%、10.57%、3.29%。土壤有效磷含量各处理间差异不显

著;3Q.E 处理的土壤速效钾含量最高,但仅与 Q.P 处理差异显著,与其他处理差异不显著。Q.E 处理的水解性氮含量最高,显著高于其他处理。以上结果表明,3Q.P 处理对改良土壤结构和提高养

表 2 蚯蚓粪与微生物菌剂配施对土壤养分含量的影响

Table 2 Effects of combined application of earthworm castings and microbial agents on soil nutrients content

处理 Treatment	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	w(有机质) Organic matter content/ (g·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available potassium content/(mg·kg ⁻¹)	w(水解性氮) Hydrolyzable nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)
0.5Q.P	1.31±0.02 c	23.3±0.3 cd	13.7±1.7 a	61.0±15.1 ab	34.9±5.7 b
Q.P	1.31±0.01 c	23.9±0.1 bc	11.2±1.1 a	46.0±5.2 b	34.4±2.1 b
2Q.P	1.32±0.02 c	24.3±0.2 ab	14.3±4.7 a	56.3±8.1 ab	40.6±9.5 b
3Q.P	1.27±0.01 d	25.2±0.6 a	15.9±4.3 a	57.7±13.6 ab	41.5±10.1 b
0.5Q.E	1.38±0.03 ab	22.1±0.3 e	15.8±0.7 a	63.3±4.5 ab	50.6±9.6 b
Q.E	1.36±0.02 ab	22.7±0.7 de	16.0±1.0 a	69.7±3.8 ab	68.9±5.1 a
2Q.E	1.40±0.01 a	24.3±0.5 ab	13.9±2.1 a	69.0±9.6 ab	32.9±0.8 b
3Q.E	1.35±0.00 b	25.1±0.4 a	11.4±1.5 a	74.3±4.7 a	50.0±8.0 b

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference between different treatments($P<0.05$). The same below.

分含量的效果最好。

2.2 蚯蚓粪与微生物菌剂配施对土壤微生物量的影响

蚯蚓粪和微生物菌剂配施对土壤微生物量的影响见表 3。结果表明,在果实膨大期,0~20 cm 土层,2Q.P 处理微生物量碳含量最大,Q.E 处理最小;

3Q.E 处理微生物量氮含量最大,0.5Q.P 处理微生物量氮含量最小。在果实成熟期,0~20 cm 土层,3Q.P 处理微生物量碳含量最大,0.5Q.P 处理微生物量碳含量最小;2Q.E 处理微生物量氮含量最大,0.5Q.P 处理微生物量氮含量最小。在 0~20 cm 土层,果实膨大期 2 倍蚯蚓粪用量和 3 倍蚯蚓粪用量微生物

表 3 蚯蚓粪和微生物菌剂配施对土壤微生物量的影响

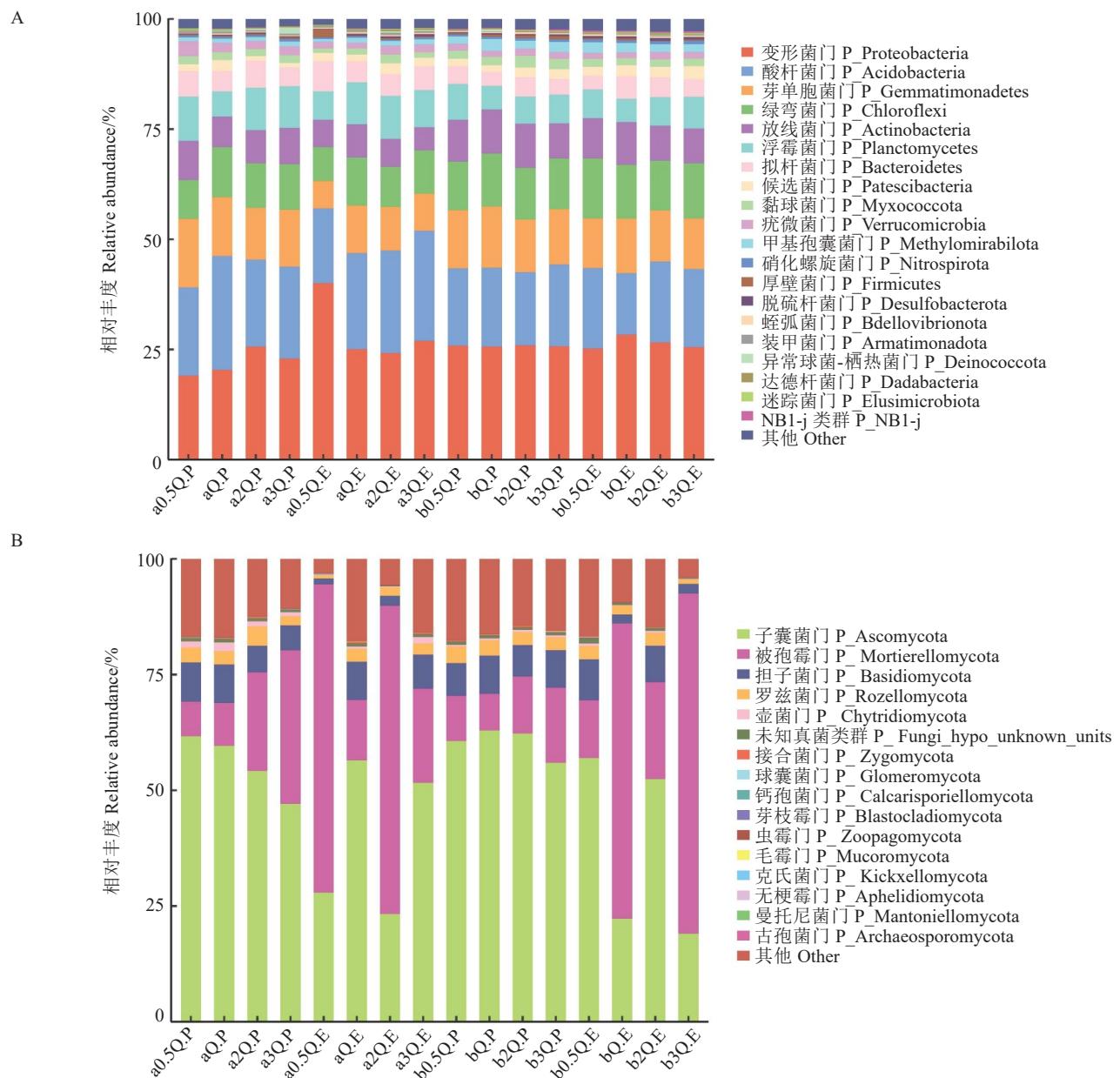
Table 3 Effects of combined application of earthworm castings and microbial agents on soil microbial biomass mg·kg⁻¹

生育期 Growth period	处理 Treatment	0~20 cm		20~40 cm	
		w(微生物量碳) Microbial biomass carbon content	w(微生物量氮) Microbial biomass nitrogen content	w(微生物量碳) Microbial biomass carbon content	w(微生物量氮) Microbial biomass nitrogen content
果实膨大期 Fruit swelling period	0.5Q.P	75.0±0.4 e	26.1±0.5 d	64.9±1.4 bc	23.0±0.5 e
	Q.P	79.4±0.5 d	28.3±0.3 cd	69.1±0.2 a	25.0±0.4 de
	2Q.P	86.5±0.0 a	33.6±1.1 ab	67.0±0.5 ab	29.3±0.3 bc
	3Q.P	82.6±1.1 bc	34.0±0.5 ab	69.9±0.3 a	31.9±0.6 ab
	0.5Q.E	78.7±0.2 d	29.3±0.9 c	60.1±0.4 d	26.0±0.4 cde
	Q.E	74.8±0.1 e	28.6±1.1 cd	64.4±1.9 bc	27.1±0.5 cd
成熟期 Maturation stage	2Q.E	84.0±1.6 b	31.9±0.7 b	65.2±0.1 bc	32.6±2.7 ab
	3Q.E	81.0±0.7 cd	35.1±0.6 a	63.0±0.5 c	33.2±1.0 a
	0.5Q.P	57.5±1.8 d	32.7±0.5 e	53.1±0.6 ab	30.7±0.5 bc
	Q.P	60.1±1.2 cd	34.7±0.6 cd	56.4±0.5 a	31.8±1.5 ab
	2Q.P	64.8±1.2 ab	33.1±0.5 de	55.6±1.3 ab	32.4±1.1 ab
	3Q.P	67.9±1.0 a	36.3±0.3 bc	54.7±1.0 ab	30.0±0.3 bc
	0.5Q.E	60.7±0.4 bcd	33.1±0.6 de	53.2±3.0 ab	28.4±0.5 c
	Q.E	64.7±1.1 ab	37.2±0.3 ab	50.6±1.7 b	31.2±1.0 abc
	2Q.E	64.6±1.8 ab	38.6±0.0 a	55.9±1.1 ab	33.8±0.3 a
	3Q.E	63.2±0.3 bc	38.0±1.0 ab	52.8±0.7 ab	31.9±0.7 ab

量碳和微生物量氮含量高于相同菌剂的其他处理;成熟期根际促生菌+2倍(3倍)蚯蚓粪用量微生物量碳含量高于其他处理,EM微生物菌剂+2倍(3倍)蚯蚓粪用量微生物量氮含量高于其他处理。20~40 cm土层,果实膨大期2倍蚯蚓粪用量和3倍蚯蚓粪用量微生物量氮含量高于相同菌剂的其他处理;成熟期EM微生物菌剂+2倍蚯蚓粪用量微生物量氮含量高于其他处理。

2.3 微生物群落细菌和真菌门水平相对丰度

高通量测序结果(图1-A)表明,在细菌门中获得20个确定类群,占总类群的97.15%~98.72%,变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、放线菌门(Actinobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、疣微菌门(Verrucomicrobia)为主要优势菌门。其中变形菌门的相对丰度最高,占19.03%~40.07%,在a0.5Q.E最高,其次是bQ.E,在a0.5Q.P处理最低,较a0.5Q.E



注:a代表0~20 cm土层深度,b代表20~40 cm土层深度。下同。

Note: a represents soil layers of 0~20 cm, b represents soil layers of 20~40 cm. The same below.

图1 蚯蚓粪和微生物菌剂处理根际土壤细菌(A)和真菌(B)门水平上相对丰度

Fig. 1 Relative abundance of bacteria(A)and fungi(B)phyla in rhizosphere soil treated with earthworm castings and microbial agents at the horizontal level

降低了 52.5%。

高通量测序结果(图 1-B)表明,真菌中子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)和被孢霉门(Mortierellomycota)为主要优势菌门,占真菌中总类群的 77.2%~95.8%。子囊菌门的相对丰度占比最高,为 19.05%~62.95%,其次是被孢霉门,为

7.48%~73.45%。而担子菌门、罗兹菌门、壶菌门相对丰度较低,相对丰度最高值仅为 8.44%。随着蚯蚓粪用量的增加,抑制了子囊菌门的发育,促进了担子菌门的发育。

2.4 ASVs 分布 upset 图分析

ASVs 分布 upset 图结果如图 2 所示,在细菌属

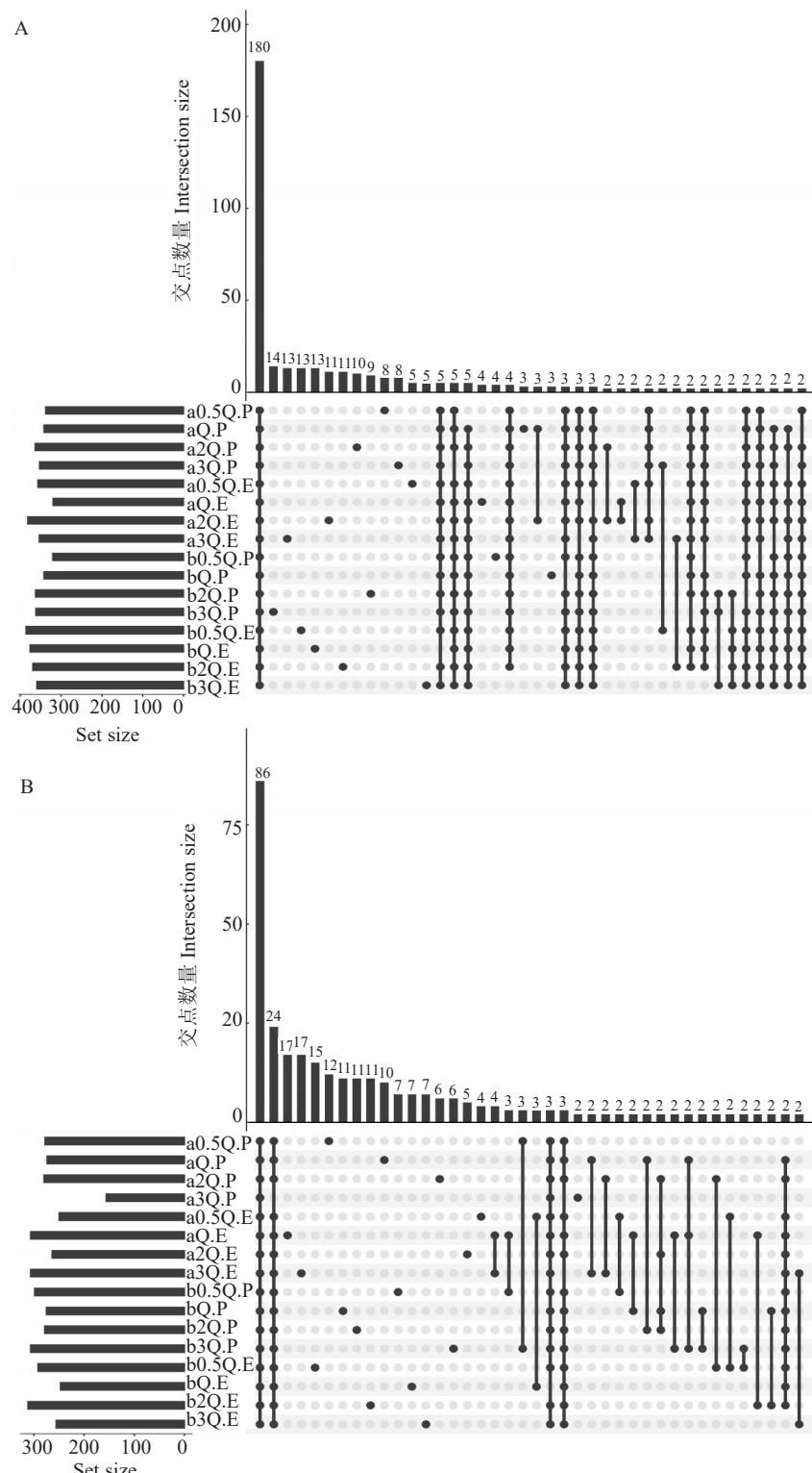


图 2 细菌属(A)和真菌(B)属水平 ASVs 分布 upset 图

Fig. 2 Upset plot of ASVs distribution at the bacterial genus(A)and fungal genus(B)levels

水平上,16组样本中共检测到180个共有ASVs,0.5Q.P及Q.P、2Q.P、3Q.P、0.5Q.E、Q.E、2Q.E、3Q.E的细菌群落中特有的ASVs分别为12、6、19、22、18、17、22、18个,表明3Q.P和2Q.E特有ASVs较多。Q.P和Q.E的细菌群落中特有的ASVs分别为59和75个,表明配施EM微生物菌剂处理较配施根际促生菌处理特有的ASVs较多。

由图2-B可知,在真菌属水平上,16组样本共检测到86个共有ASVs,0.5Q.P及Q.P、2Q.P、3Q.P、0.5Q.E、Q.E、2Q.E、3Q.E的细菌群落中特有的ASVs分别为19、21、17、8、19、24、16、24个,表明Q.P、Q.E、3Q.E特有的ASVs较多,随着施用蚯蚓粪用量的增加,配施根际促生菌处理特有的ASVs呈先增加后降低的趋势,配施EM微生物菌剂处理特有的ASVs呈先增加后降低再增加的趋势。Q.P和Q.E的真菌群落中特有的ASVs分别为65和83个,表明EM微生物菌剂较根际促生菌特有的

ASVs较多。

2.5 蜜瓜根际土壤微生物 α -多样性指数分析

蚯蚓粪和微生物菌剂处理对土壤微生物群落多样性的影响呈显著差异,由表4可知,各个处理土壤细菌和真菌物种覆盖度指数均在0.99以上,且各处理间差异不显著,表明测序结果能够全面地反映土壤细菌和真菌的丰富度。蚯蚓粪和微生物菌剂处理的土壤细菌Chao1、Ace、Shannon指数不同处理间存在显著差异,且Ace、Chao1指数均以2Q.E处理最高,Shannon指数以3Q.P最高,而土壤细菌Simpson指数在各处理间差异均不显著。真菌中,Ace指数随着蚯蚓粪用量的增加呈先升高后降低的趋势,Q.P、Q.E、2Q.E处理的Ace指数和Chao1指数位居前三,蚯蚓粪配施根际促生菌的各处理的Shannon指数差异不显著,蚯蚓粪配施EM微生物菌剂处理随着蚯蚓粪用量的增加呈先升后降的趋势。总体而言,土壤真菌Chao1、Ace、Shannon指数

表4 蜜瓜根际土壤微生物 α -多样性指数分析

Table 4 Analysis of alpha diversity index of soil microorganisms in the rhizosphere of honeydew melon

菌类 Fungi	处理 Treatment	Ace 指数 Ace index	Chao1 指数 Chao1 index	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	物种覆盖度指数 Species coverage index/%
细菌 Bacteria	0.5Q.P	2 684.1±136.2 b	2 668.8±102.6 b	9.906±0.16 ab	0.99±0.00 a	0.999 0±0.00 a
	Q.P	2 734.7±123.2 b	2 723.9±135.9 a	9.888±0.23 ab	0.99±0.00 a	0.998 9±0.00 a
	2Q.P	2 581.3±131.5 c	2 572.1±128.3 c	9.967±0.61 ab	0.99±0.00 a	0.998 7±0.00 a
	3Q.P	2 807.7±110.3 b	2 795.6±132.4 a	10.055±0.24 a	0.99±0.01 a	0.999 4±0.00 a
	0.5Q.E	2 376.0±108.6 c	2 363.8±96.8 d	8.991±0.32 b	0.98±0.00 a	1.000 0±0.00 a
	Q.E	2 585.8±105.6 c	2 570.7±142.9 c	9.799±0.18 ab	0.99±0.02 a	0.998 8±0.00 a
	2Q.E	2 906.8±106.2 a	2 894.3±135.8 a	10.031±0.17 a	0.99±0.00 a	0.999 0±0.00 a
	3Q.E	2 476.0±96.5 c	2 476.0±115.6 d	9.916±0.35 ab	0.99±0.02 a	0.998 8±0.00 a
真菌 Fungus	0.5Q.P	1 087.0±56.8 b	1 087.0±51.6 a	7.606±0.35 a	0.98±0.00 a	0.999 8±0.00 a
	Q.P	1 129.0±62.5 a	1 129.0±39.5 a	7.622±0.51 a	0.98±0.00 a	1.000 0±0.00 a
	2Q.P	1 063.3±62.4 b	1 063.0±71.2 a	7.156±0.18 a	0.98±0.00 a	0.999 9±0.00 a
	3Q.P	728.0±45.2 c	728.0±36.4 b	7.325±0.38 a	0.95±0.01 a	0.999 9±0.00 a
	0.5Q.E	741.4±52.3 c	739.2±62.8 b	3.645±0.41 b	0.80±0.00 b	1.000 0±0.00 a
	Q.E	1 199.0±43.5 a	1 199.1±49.5 a	7.640±0.38 a	0.98±0.00 a	1.000 0±0.00 a
	2Q.E	1 178.0±60.5 a	1 178.0±45.8 a	7.482±0.25 a	0.98±0.02 a	0.999 9±0.00 a
	3Q.E	828.4±65.3 c	828.6±63.5 b	3.744±0.32 b	0.62±0.00 c	1.000 0±0.00 a

均以Q.E处理最高,表明1倍蚯蚓粪用量配施EM微生物菌剂处理可显著提高土壤真菌丰富度与多样性。

2.6 共现网络

土壤细菌门水平共现网络特征参数如表5所示,根际促生菌处理和EM微生物菌剂处理的相关程度各不相同,EM微生物菌剂处理的节点、平均度和正向链接比例均高于根际促生菌处理;EM微生

物菌剂处理所有的节点中,变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)为占比最多的节点,分别为32.2%、24.29%、9.6%、9.04%;根际促生菌处理所有的节点中,变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、放线菌门(Actinobacteria)为占比最多的节点,分别为25.44%、22.49%、14.2%、11.24%,

表 5 土壤门水平共现网络特征参数

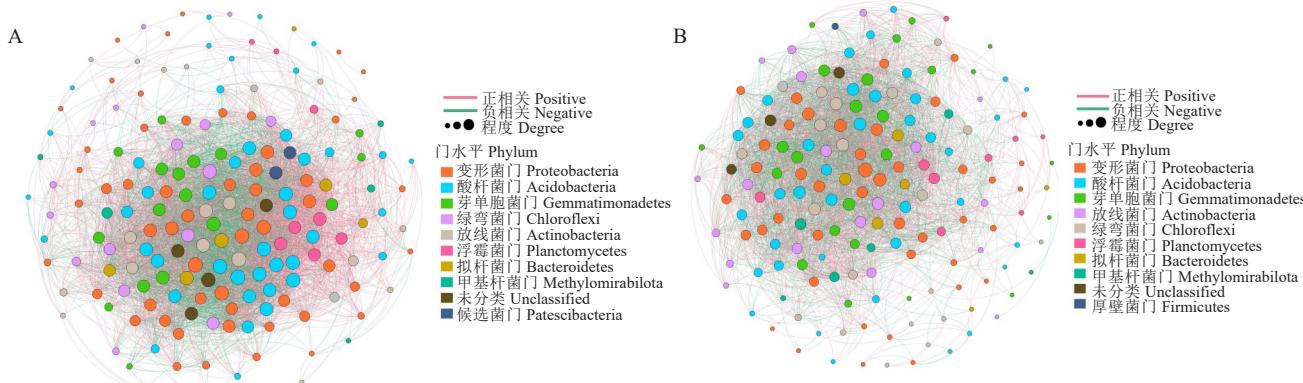
Table 5 Horizontal co-occurrence network characteristic parameters of soil phyla

菌类 Fungi	节点 Node	平均度 Average degree	平均路径长度 Average path length	正向链接占比 Positive edge ratio/%
细菌 Bacteria				
E:EM 微生物菌剂	177	54.282	1.986	63.95
E: EM microbial agent				
P:根际促生菌	169	46.544	2.047	52.34
P: Rhizosphere growth promoting bacteria				
真菌 Fungus				
E:EM 微生物菌剂	109	47.009	1.915	97.98
E: EM microbial agent				
P:根际促生菌	134	12.343	2.696	78.47
P: Rhizosphere growth promoting bacteria				

说明变形菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门、放线菌门、绿弯菌门与其他物种的关系密切,在土壤中占有非常重要的地位(图 3)。

土壤真菌门水平共现网络特征参数如表 5 所示,根际促生菌处理和 EM 微生物菌剂处理相关程度各不相同,EM 微生物菌剂处理的的平均度和正向链接比均高于根际促生菌处理;EM 微生物菌剂

处理所有的节点中,子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)、被孢霉门(mortierellomycota)为占比最多的节点,分别为 66.3%、11.01%、6.42% (图 4-A);根际促生菌处理所有的节点中,子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)、被孢霉门(mortierellomycota)为占比最多的节点,分别为 66.43%、11.19%、5.97% (图 4-B)。以上结果说明子



注: A. EM 微生物菌剂; B. 根际促生菌。下同。

Note: A. EM microbial agent; B. Rhizosphere growth promoting bacteria. The same below.

图 3 细菌共现网络图

Fig. 3 Bacterial co-occurrence network diagram

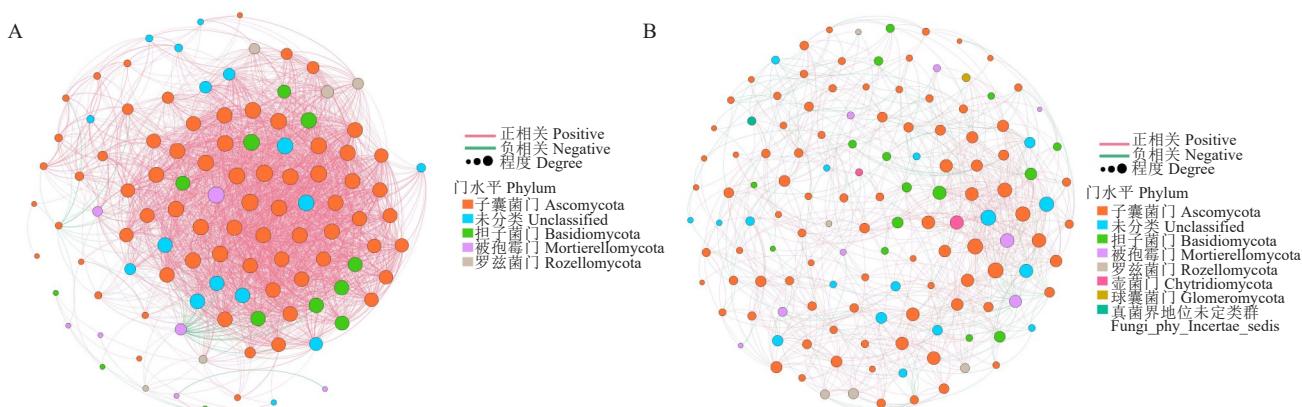


图 4 真菌共现网络图

Fig. 4 Fungal co-occurrence network diagram

囊菌门、担子菌门、被孢霉门与其他物种的关系密切,在土壤中占有非常重要的地位。

2.7 蚯蚓粪与微生物菌剂配施对蜜瓜产量和品质的影响

从表 6 可以看出,不同处理的蜜瓜产量为 74 729~87 414 kg·hm⁻²,其中 3Q.P 处理最高,较 0.5Q.P 处理显著提高了 16.97%,从 0.5QP 到 3QP,随着蚯蚓粪施用量的增加,蜜瓜产量呈增加趋势。不同处理的蜜瓜维生素 C 含量在 8.48~9.37 mg·100 g⁻¹,随着蚯蚓粪施用量增加,蚯蚓粪+

根际促生菌处理的维生素 C 含量呈先升后降的趋势,蚯蚓粪+EM 微生物菌剂处理的维生素 C 含量呈升-降-升的变化趋势,3Q.E 处理的维生素 C 含量较 0.5Q.E 处理显著提高了 10.50%。不同处理的蜜瓜可溶性固形物含量在 10.73%~14.70%,随着蚯蚓粪施用量增加,蚯蚓粪+根际促生菌处理呈先降低后升高的趋势,蚯蚓粪+EM 微生物菌剂处理呈不断升高的趋势,3Q.E 处理最高,较 2Q.P 处理显著提高了 3.97 百分点。蚯蚓粪和微生物菌剂配施对蜜瓜硬度的影响较小,随着蚯蚓粪用量增加,硬度逐渐降低。

表 6 蜜瓜产量和品质指标

Table 6 Honey melon yield and quality indicators

处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	硬度 Hardness/(kg·cm ⁻²)	w(维生素 C) Vitamin C content/(mg·100 g ⁻¹)
0.5Q.P	74 729±1 547 b	12.23±0.38 bc	4.43±0.04 a	8.63±0.07 c
Q.P	78 858±1 930 ab	11.77±0.27 bc	4.31±0.02 ab	8.92±0.03 b
2Q.P	79 821±884 ab	10.73±1.00 c	4.30±0.03 ab	9.25±0.06 a
3Q.P	87 414±371 a	12.60±0.12 b	4.18±0.02 b	9.10±0.13 ab
0.5Q.E	81 803±5 168 ab	10.80±0.99 bc	4.40±0.01 ab	8.48±0.17 c
Q.E	78 525±4 993 ab	11.97±0.32 bc	4.30±0.06 ab	9.29±0.09 a
2Q.E	84 822±2 593 ab	12.47±0.18 bc	4.29±0.07 ab	9.25±0.08 a
3Q.E	81 118±3 902 ab	14.70±0.32 a	4.22±0.03 b	9.37±0.05 a

3 讨论与结论

蚯蚓粪富含有机质、腐殖酸及微生物菌群,可作为植物养分供应和土壤理化性质改善的常用有机肥基质^[14-15],然而,其对蜜瓜生长和品质的影响尚不清楚。本研究表明,施用适量的蚯蚓粪对改良土壤结构、提高蜜瓜产量和品质具有重要作用,这与前人在葡萄^[5]、青梗菜^[16]等作物上的研究结果相一致。曹云娥等^[17]研究表明,采用蚯蚓粪进行异位与原位堆肥处理,可显著改善土壤理化性质,具体表现为土壤电导率降低 25%~38%,有机质含量提升 1.8~2.3 倍,全量及速效态氮磷钾养分含量同步增加。该处理方式对缓解设施番茄连作引发的次生盐渍化与碱化问题具有显著效果,其中牛粪基质预发酵后接种蚯蚓的处理方案较传统腐解工艺更为高效。蚯蚓粪作为完全腐熟的生物有机肥,其价值不仅体现在含有 4.2%~5.6% 的氮磷钾总量,更因其富含赤霉素(GA3)、吲哚乙酸(IAA)、玉米素(ZR)等植物内源激素类似物,以及具有生物活性的腐殖酸类物质(含量 32%~45%),这些组分可通过协同增效作用显著增强外源益生菌的定殖能力^[18-19]。黄楠等^[20]研究表明,蚯蚓粪配施 PAM 处理显著提高甜瓜的产量和维生素 C 含量。研究表明,蚯蚓粪加入

到草炭型育苗基质中,随着蚯蚓粪添加量的增加,育苗基质的容重、EC 值呈逐渐升高的趋势,而基质中细菌和真菌数量及中性磷酸酶、碱性磷酸酶活性均呈先升高后降低的变化趋势,添加蚯蚓粪能通过改善育苗基质性质,促进幼苗生长^[21]。许泽华等^[22]研究表明,蚯蚓粪配施菌肥的效果显著低于牛粪配施菌肥,科学配施有机肥与生物菌肥可通过协同增效作用显著增强土壤养分与微生物的有效性,同时有效调控土壤营养元素动态平衡与酶活性稳态,最终实现番茄果实综合品质指标的显著提升。

微生物菌剂由于含有机质和其他养分,因此施用于土壤中既能够增加土壤的碳源,又能促进有益菌群的繁殖,改善土壤环境,提升作物对养分的吸收利用。微生物共现网络复杂性与养分利用率呈正相关,其结构的复杂性增强可促进菌群间的互作效应,从而提高资源利用效率^[23]。本试验表明,蜜瓜根际土壤微生物共现网络中,配施 EM 微生物菌剂处理的网络节点的平均度和正向链接比均高于配施根际促生菌,这不仅说明蚯蚓粪益生菌肥施用后的群落结构更加复杂和稳定,也证明蚯蚓粪益生菌肥的施用导致微生物之间的相互作用增强,有助于构建健康的根际微生态^[24]。蚯蚓粪本身含有丰富的微生物,可通过根际能源供给优化根际有益菌群的

种类和分布,强化其与病原真菌争夺竞争碳、氮等营养资源的能力^[25]。研究表明,变形菌门、放线菌门、厚壁菌门等菌群在有机质矿化与养分循环中起核心作用^[26],在本试验中,细菌中变形菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门、绿弯菌门、放线菌门、浮霉菌门、拟杆菌门、疣微菌门为主要优势菌门,真菌门中子囊菌门、担子菌门和被孢霉门为优势菌门,随着蚯蚓粪用量的增加,优势菌门增加,细菌优势菌门的分布主要由养分驱动^[27]。马二磊等^[28]研究表明,微生物菌剂配施蚯蚓粪能优化连作甜瓜土壤的真菌组成,降低镰刀菌属的相对丰度。

通过适量施用蚯蚓粪改良连作土壤,可有效提升作物生理机能,不仅能显著提高种子萌发率,还能促进根、茎、叶等营养器官的协同发育。研究表明,该措施可使植株地上部生物量增加23%~37%,地下部生物量提升18%~29%,整体农艺性状得到系统性优化^[29~31]。在品质形成方面,蚯蚓粪处理可刺激果实中可溶性糖(增幅12%~15%)和维生素C(提高20%~25%)的生物合成,同时将硝酸盐含量控制在安全阈值(降幅达30%~45%),总酸度也显著降低^[32~34]。本研究表明,蚯蚓粪配施菌肥对蜜瓜可溶性固形物和维生素C含量影响较大,进而改善蜜瓜风味。曹亚茹等^[35]研究表明,将蚯蚓粪有机肥与化肥配施可有效优化葡萄生殖生长,使花序数量、有效结果枝比例及单穗质量等关键指标获得显著提升。在瓜类作物栽培方面,冯腾腾等^[36]通过配比试验证实了蚯蚓粪有机肥对黄瓜生长的积极效应,当施用比例适当时,植株发育状态达到最佳水平。张宁^[37]针对西瓜栽培的研究进一步扩展了这一发现,其试验数据显示,蚯蚓堆肥不仅能促进主蔓和侧蔓的伸长生长,还可使茎秆粗度显著增加18%~25%。本试验中蚯蚓粪肥施入土壤后不仅为蜜瓜生长提供充足的营养物质,而且提高土壤有机质含量和微生物含量,加速土壤有益菌群的生长与繁殖,从而提高肥料利用效率,促进作物增产,这与田给林等^[31]的研究结果基本一致。

综上所述,笔者系统解析蚯蚓粪和微生物菌剂配施对民勤蜜瓜连作土壤的改良机制及品质提升效应。蚯蚓粪配施EM菌剂可显著优化土壤结构,增强细菌与真菌的群落稳定性及网络互作强度,通过调控根际微生态,提升蜜瓜维生素C与可溶性固形物含量,实现品质协同优化。研究结果为干旱区蜜瓜连作障碍的生态修复与绿色生产提供了理论依据。

参考文献

- [1] 赵兴彦.民勤县节水工作的评价、探索与思考[J].农业开发与装备,2019(8):41-42.
- [2] 李晶,马玉霞,詹文平,等.民勤县蜜瓜产业发展现状与建议[J].中国瓜菜,2020,33(12):113-116.
- [3] 李军善.民勤县蜜瓜产业提质增效路径探析[J].广东蚕业,2024,58(2):100-102.
- [4] 唐宗云,李政路.民勤蜜瓜产业发展探析[J].农业科技与信息,2024(1):134-137.
- [5] 赵津津,撒晓梅,李明,等.有机肥和微生物菌剂配施对‘赤霞珠’葡萄根际土壤细菌群落多样性的影响[J].西北农业学报,2024,33(11):2134-2145.
- [6] 张翰林,白娜玲,郑宪清,等.秸秆还田与施肥方式对稻麦轮作土壤细菌和真菌群落结构与多样性的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(3):531-539.
- [7] 唐志伟,翁颖,朱夏童,等.秸秆还田下中国农田土壤微生物生物量碳变化及其影响因素的Meta分析[J].生态环境学报,2023,32(9):1552-1562.
- [8] 撒晓梅,丁琴,李明.蚯蚓粪和微生物菌剂对土壤养分及红地球葡萄生理特性的影响[J].甘肃农业大学学报,2025,60(1):158-165.
- [9] 马凤捷,杨春胤,宿翠翠,等.蚯蚓粪和微生物菌剂互作对蜜瓜生长和土壤养分的影响[J].黑龙江农业科学,2023(9):25-34.
- [10] 杨宁,徐兆丰,蒋秋艳.蚯蚓粪与根际促生菌配施对城市土壤肥力的影响[J].上海师范大学学报(自然科学版),2022,51(1):47-55.
- [11] 韩顺斌,华军,马丽君.黄腐酸微生物菌剂和蚯蚓粪配施对日光温室番茄产量和品质的影响[J].农业科技与信息,2020(14):15-17.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [13] 高正睿,宿翠翠,王玉红,等.不同消毒方式对特殊药材连作土壤理化性质、酶活性及微生物群落的影响[J].山东农业科学,2024,56(2):86-94.
- [14] 申佳丽,魏彦凤,丁增伟,等.蚯蚓粪与脱硫石膏配施对设施黄瓜连作障碍的效应研究[J].核农学报,2024,38(6):1163-1174.
- [15] 王树强,许红丽,孙彩霞,等.菌糠牛粪蚯蚓堆肥对草莓土壤理化性质和细菌多样性的影响[J].江苏农业科学,2023,51(17):218-230.
- [16] 万水霞,李帆,王静,等.微生物菌剂对青梗菜土壤理化性质及生长的影响[J].安徽农业科学,2022,50(24):160-162.
- [17] 曹云娥,尹翠,吴泽帅,等.蚯蚓原位堆肥提升番茄连作土壤质量研究[J].植物营养与肥料学报,2022,28(2):247-259.
- [18] 王艳阳.Q96、Q161菌剂与蚯蚓粪配施对陕南土壤细菌群落及烤烟产质量的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
- [19] 撒晓梅.蚯蚓粪、枝条及光合菌剂配施对‘赤霞珠’葡萄园土壤质量和浆果品质的影响[D].银川:宁夏大学,2023.
- [20] 黄楠,刘继培,赵跃.蚯蚓粪配施不同土壤改良剂对甜瓜产量、品质及土壤理化性质的影响[J].中国土壤与肥料,2024(3):153-158.
- [21] 白晓凤,陆伟,张宇昌,等.蚯蚓粪对草炭型育苗基质及黄瓜幼苗的影响[J].中国瓜菜,2024,37(10):75-81.
- [22] 许泽华,马军,李百云,等.不同用量有机肥和生物菌肥配施对

设施番茄土壤性能和品质的影响[J].中国瓜菜,2025,38(3):131-137.

[23] MA L, ZHANG J B, LI Z Q, et al. Long-term phosphorus deficiency decreased bacterial-fungal network complexity and efficiency across three soil types in China as revealed by network analysis[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 148:103506.

[24] ZHOU J Z, DENG Y, LUO F, et al. Functional molecular ecological networks[J]. mBio, 2010, 1(4):e00169-10.

[25] 刘一凡,杨丽娟,王红,等.蚯蚓粪肥在农业生产中的应用效果及研究进展[J].土壤通报,2021,52(2):474-484.

[26] DE CARVALHO T S, JESUS E D, BARLOW J, et al. Land use intensification in the humid tropics increased both alpha and beta diversity of soil bacteria[J]. Ecology, 2016, 97 (10) : 2760-2771.

[27] JANKOWSKI K, SCHINDLER D E, HORNER-DEVINE M C. Resource availability and spatial heterogeneity control bacterial community response to nutrient enrichment in lakes[J]. PLoS One, 2014, 9(1):e86991.

[28] 马二磊,黄芸萍,臧全宇,等.4种微生物菌剂对多年连作甜瓜土壤真菌群落的影响[J].中国瓜菜,2021,34(4):15-20.

[29] CANELLAS L P, OLIVARES F L, OKOROKOVA-FAÇANHA A L, et al. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots[J]. Plant Physiology, 2002, 130(4):1951-1957.

[30] PLAZA C, HERNÁNDEZ D, GARCÍA-GIL J C, et al. Microbial activity in pig slurry-amended soils under semiarid conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36 (10) : 1577-1585.

[31] 田桂林,张潞生.蚯蚓粪缓解草莓连作土壤障碍的作用[J].植物营养与肥料学报,2016,22(3):759-767.

[32] 韩顺斌,马丽君,华军,等.蚯蚓粪和化肥配施对日光温室番茄产量和品质的影响[J].农业科技与信息,2020(13):19-21.

[33] 张永平,乔永旭,赵绪明,等.蚯蚓粪作基肥对夏播花生生长与产量的影响[J].江苏农业科学,2014,42(8):97-99.

[34] 柏彦超,周雄飞,赵学辉,等.蚯粪基质克服西瓜连作障碍的应用效果研究[J].中国农学通报,2011,27(8):212-216.

[35] 曹亚茹,沈文忠,张绪美,等.蚯粪肥和化肥配施对葡萄生长、品质及产量的影响[J].上海农业学报,2020,36(5):86-90.

[36] 冯腾腾,黄怀成,陈飞,等.不同蚯蚓粪施用量对连作黄瓜农艺性状、产量和品质的影响[J].南方农业学报,2018,49(8):1575-1580.

[37] 张宁.蚯蚓堆肥对西瓜和番茄生长、品质及产量的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2012.