

黄洁雪, 吉沐祥, 吴娥娇, 等. 土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂对连作草莓和土壤的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(1): 172-179.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.01.018

土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂对连作草莓和土壤的影响

黄洁雪¹, 吉沐祥¹, 吴娥娇², 耿中元², 乔玉山², 邬 劼¹, 笪小华³, 王晓琳¹

(1. 江苏丘陵地区镇江农业科学研究所, 江苏 镇江 212400; 2. 江苏省农业科学院果树研究所, 江苏 南京 210014; 3. 句容市雅青果业有限公司, 江苏 镇江 212403)

摘要: 为应对设施草莓土传病害频发问题, 本研究通过田间小区试验研究土壤消毒和草莓定植前联合施用微生物菌剂对草莓枯萎病发病率、土壤中镰刀菌属真菌相对丰度、草莓生长、土壤基本理化性质及土壤中相关酶活性的影响。土壤消毒设置有机物料闷棚处理(S1)和有机物料+闷棚菌剂闷棚处理(S2), 定植前设置施用紫牛有机肥处理(F1)、可施可力菌肥处理(F2)、三炬菌剂处理(F3)。结果表明, 与传统土壤消毒(S1F1)处理相比, S2F3处理能显著降低草莓枯萎病的发病率($P < 0.05$), 土壤中镰刀菌属真菌相对丰度下降幅度最大; S2F3处理草莓株高和头茬果产量显著增加($P < 0.05$); 此外, S2F3处理还能显著改变土壤中酶活性, 提高土壤有效磷含量, 其中过氧化氢酶活性显著降低($P < 0.05$), 脲酶活性、蔗糖酶活性显著提高($P < 0.05$)。综上所述, 土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂可有效抑制草莓土传病害发生, 促进草莓生长, 提高早期产量, 改善土壤性质。

关键词: 草莓; 土壤消毒; 微生物菌剂; 枯萎病

中图分类号: S628 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2026)01-0172-08

Effects of combined application of soil disinfection and pre-plant microbial agents on continuously cropped strawberry and soil

HUANG Jiexue¹, JI Muxiang¹, WU Ejiao², GENG Zhongyuan², QIAO Yushan², WU Jie¹, DA Xiaohua³, WANG Xiaolin¹

(1. Zhenjiang Institute of Agricultural Sciences in Hilly Area of Jiangsu Province, Zhenjiang 212400, China; 2. Institute of Pomology, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Jurong Yaqing Fruit Industry Co., Ltd., Zhenjiang 212403, China)

Abstract: To address the frequent occurrence of soil-borne diseases in facility-grown strawberries, this study conducted field plot experiments to investigate the effects of combined application of soil disinfection and pre-plant microbial agents on the incidence of strawberry wilt, the relative abundance of *Fusarium* fungi in the soil, strawberry growth, basic soil physicochemical properties, and the activity of relevant soil enzymes. Soil disinfection treatments included organic material combined with shed-closing treatment (S1) and organic material combined with shed-closing microbial agent treatment

(S2). Pre-planting treatments included the application of Ziniu organic fertilizer (F1), Keshi Keli microbial fertilizer (F2), and Sanju microbial agent (F3). The results showed that, compared with the traditional soil disinfection treatment (S1F1), the S2F3 treatment significantly reduced the incidence of strawberry wilt ($P < 0.05$) and resulted in the greatest decrease in the relative abundance of

收稿日期: 2025-01-07

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(24)1025]; 镇江市碳达峰碳中和科技创新专项基金项目(CN2023004)

作者简介: 黄洁雪(1986-), 女, 贵州安顺人, 博士, 助理研究员, 研究方向为果树营养调控与土壤改良。(E-mail) huangjiexue-8612@163.com

通讯作者: 王晓琳, (E-mail) morethan365@126.com

Fusarium fungi in the soil. The S2F3 treatment also significantly increased strawberry plant height and first-crop fruit yield ($P<0.05$). Furthermore, the S2F3 treatment significantly altered soil enzyme activities and increased soil available phosphorus content. Specifically, catalase activity significantly decreased ($P<0.05$), while urease and sucrase activities significantly increased ($P<0.05$). In summary, the combined application of soil disinfection and pre-plant microbial agents effectively suppresses the occurrence of soil-borne diseases in strawberries, promotes strawberry growth, increases early yield, and improves soil properties.

Key words: strawberry; soil disinfection; microbial agent; wilt disease

草莓(*Fragaria×ananassa* Duch.)是冬季鲜果的重要供应品类,深受消费者喜爱。近年来,中国草莓种植面积不断扩大,从2011年的 7.81×10^4 hm²增长至2020年的 1.32×10^5 hm²,10年间增幅达68.5%,果实总产量已位居世界第一,但单位面积产量仅排名世界第8^[1]。造成这一现象主要源于中国草莓以设施栽培为主,长期连作导致土壤中致病菌大量累积,土传病害逐年加重。草莓枯萎病是一种传播迅速、严重危害草莓生产的系统性土传病害,其致病菌主要为镰刀菌属中的尖孢镰刀菌草莓专化型(*Fusarium. oxysporum* f. sp. *fragariae*),该病菌侵染植株维管束后会阻碍水分和养分从根部向地上部运输,进而造成植株萎蔫死亡^[2]。

土壤消毒是预防控制草莓土传病害的重要措施,目前草莓生产中主要采用化学熏蒸、太阳能消毒和厌氧消毒3种方法。常用化学熏蒸剂包括棉隆、石灰氮等,其中棉隆对镰刀菌、疫霉菌、腐霉菌的抑制效果均超过90%^[3]。化学熏蒸剂虽然灭杀效率高,但大多具有刺激性或对人体有害,不仅对操作要求严格,还会对非靶标生物产生强烈灭杀作用,显著改变土壤微生物群落组成,降低土壤中酶的活性,增加耐药病原体,长期施用会导致作物产量下降、土壤肥力降低^[4-5]。太阳能高温还原消毒是将太阳能消毒与厌氧消毒相结合,每年7-8月于棚内撒施米糠、菜籽饼等有机物料,灌水后覆膜密闭20~60 d,该方法可改善土壤理化性质、降低真菌丰度,有效减少土壤中尖孢镰刀菌数量^[6-7],其优点是简单易行、成本较低,但消毒效果受闷棚时长、天气状况、有机碳源种类、发酵程度及密闭性等因素影响。为应对复杂的土壤环境,生产中常结合多种措施进行综合预防控制^[8]。

土壤消毒,尤其是化学熏蒸剂的使用,在快速杀灭病原菌的同时改变了土壤微生物群落结构,其中耐药性菌群会大量增殖并占据优势生态位,

有益微生物的绝对数量以及部分种属的相对丰度下降,病原菌在作物再次种植后会迅速增殖^[9-10]。因此,无论是化学熏蒸还是其他消毒方法,在土壤消毒后补充有益微生物已成为抑制病原菌的有效手段。植物根际促生菌(PGPR)是对植物健康和生长有益的根际微生物,具有促进养分可利用性与同化吸收、抑制病原微生物、改善非生物胁迫环境、分泌植物激素等功能,既是植物生物防治菌种的潜在来源,也可作为可持续农业中肥料和农药的绿色替代品^[11-12]。研究表明,在太阳能消毒后,采用蘸根或灌根方式施用PGPR能显著降低黄瓜根腐病的病情指数和死亡率,其中甲基营养型芽孢杆菌(*Bacillus methylotrophicus*) YB-4菌液蘸根和短短芽孢杆菌(*Brevibacillus brevis*) LWG-5菌液灌根的防治效果均可超过89.00%^[13];采用二道眉芥菜进行生物熏蒸后,施入枯草芽孢杆菌能显著降低土壤中大丽轮枝菌数量和茄子黄萎病的病情指数^[14]。

截至2025年1月,中国登记用于防治枯萎病的生防菌产品共19个,且均为单一菌剂。但在生产实践中,单独施用生防菌防治枯萎病的效果不够稳定;而化学熏蒸以外的土壤消毒方法虽然对枯萎病有一定抑制效果,但仍存在提升空间。因此,研发更高效、安全且环保的防治技术十分必要。本研究在太阳能高温还原消毒阶段,增施兼具生物防治功能与腐熟有机物料作用的闷棚菌剂,并在消毒后施用基肥时增施具有生物防治效果的菌剂,旨在探究土壤消毒与菌剂联用对草莓枯萎病的防治效果,及其对草莓生长和土壤养分供应能力的影响,以期为草莓生态型土壤处理提供新的技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验于2023年在江苏省镇江市句容市白兔

镇的句容市雅青果业有限公司草莓超高垄种植大棚(31°98'N, 119°35'E)内开展,该大棚垄高 70 cm,种植层(0~20 cm)由 50% 基质(泥炭、蛭石、珍珠岩、醋糟等)与 50% 土壤混合而成,土壤类型为黄棕壤。试验前 3 年该地块草莓枯萎病平均发病率约 30%。供试草莓品种为红颊。

供试材料包括绿地康闷棚菌剂(含解淀粉芽孢杆菌 $\geq 5.0 \times 10^8$ CFU/g),购自中农绿康(北京)生物技术有限公司;有机物料为市售豆饼、米糠和醋糟;紫牛有机肥(有机质含量 $\geq 90\%$, N 含量+ P_2O_5 含量+ K_2O 含量 $\geq 12\%$),购自巴彦淖尔市德源肥业有限公司;可施可力菌肥(有机质含量 $\geq 60\%$, 含枯草芽孢杆菌 KN-42 $\geq 5.0 \times 10^8$ CFU/g, 胶冻样芽孢杆菌 $\geq 5.0 \times 10^7$ CFU/g, 腐殖酸含量 $\geq 10\%$),购自武汉科诺生物科技股份有限公司;三炬微生物菌剂(解淀粉芽孢杆菌+胶冻样类芽孢杆菌+烟草节杆菌 $\geq 2.0 \times 10^8$ CFU/g),购自福建三炬生物科技股份有限公司。

1.2 试验设计

田间试验采用双因素随机区组设计,共设置 6 个处理,分别为 S1F1 处理、S1F2 处理、S1F3 处理、S2F1 处理、S2F2 处理、S2F3 处理,其中, S 因素为夏季闷棚土壤消毒处理, S1 为单用有机物料(米糠 3 000 kg/hm²+豆饼 1 125 kg/hm²+醋糟 30 t/hm²)闷棚土壤消毒, S2 为有机物料与闷棚菌剂联用(米糠 3 000 kg/hm²+豆饼 1 125 kg/hm²+醋糟 30 t/hm²+闷棚菌剂 300 kg/hm²)闷棚土壤消毒; F 因素为草莓定植前施用微生物剂处理, F1 为紫牛有机肥(1 200 kg/hm²)、F2 为可施可力菌肥(1 800 kg/hm²)、F3 为三炬微生物菌剂(1 800 kg/hm²)。S1F1 处理为传统管理方式,在闷棚土壤消毒处理和基肥中均未使用菌剂(肥),作为本试验的对照。供试小区面积为 12 m²,每个处理设 3 次重复。2023 年 7 月 3 日,准确称取土壤消毒处理所需物料,混合均匀后分别撒施入各处理小区,并与 0~20 cm 表层土翻拌均匀,随后上水保湿,覆膜后进行夏季高温闷棚,这期间补充 2 次水。2023 年 9 月 1 日,土壤消毒处理结束后开展基肥处理,准确称取各物料后分别施入各处理小区,并与 0~20 cm 表层土翻拌均匀,随后上水保湿。3 d 后选取生长一致的健壮草莓苗,保留 3 叶 1 心后移栽(出现死苗后需补栽)。所有处理追肥和田间管理一致,按照当地常规管理进行。

1.3 样品采集及指标测定

1.3.1 草莓植株生长发育指标测定 2023 年 10 月 8 日调查幼苗期草莓植株的发病率。统计小区内定植总株数,其中整株无发病症状记为健康,出现叶片萎蔫则记为发病^[15],并计算发病率。每个处理小区选取具有代表性的草莓植株 5 株,3 次重复,共计 15 株,用直尺测定株高、倒数第 2 片完全展开叶中心小叶的长、宽和叶柄长,用 SPAD-502 Plus 仪测定叶片 SPAD 值,用游标卡尺测量茎粗。

1.3.2 草莓产量测定 每 3~4 d 采摘 1 次,记录 2024 年 1 月 30 日前每个小区头茬商品果(单果重 10 g 以上)总产量,1 月 3 日测定二级果单果重。

1.3.3 土壤取样及理化性质测定 2023 年 10 月 8 日取各小区 0~20 cm 土层样品,剔除杂物后制备鲜样和干样。鲜样过 5 目筛后混合均匀,测土壤中酶的活性并进行土壤微生物多样性分析。干样过筛混匀后测定土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、速效氮含量、速效磷含量、速效钾含量,测定方法参照《土壤农化分析》^[16]。

1.3.4 土壤中酶的活性测定 采用 ELISA 试剂盒测定土壤中酶的活性,其中过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、多酚氧化酶活性试剂盒是江苏科特生物科技有限公司产品,酸性磷酸酶活性试剂盒是南京陌凡生物科技有限公司产品。

1.3.5 镰刀菌属真菌相对丰度测定 基于 Illumina HiSeq 测序平台进行土壤微生物多样性分析,通过 ITS 区域测序,计算镰刀菌属真菌的相对丰度,由百迈客生物科技有限公司完成。

1.4 数据分析

表中数据均为 3 次重复的平均值 \pm 标准差。分别用 Microsoft Excel 软件和 Origin Pro 8 软件处理数据和作图,用 DPS 软件对数据进行双因素方差分析(固定模型),用 Duncan's 检验法进行多重比较。

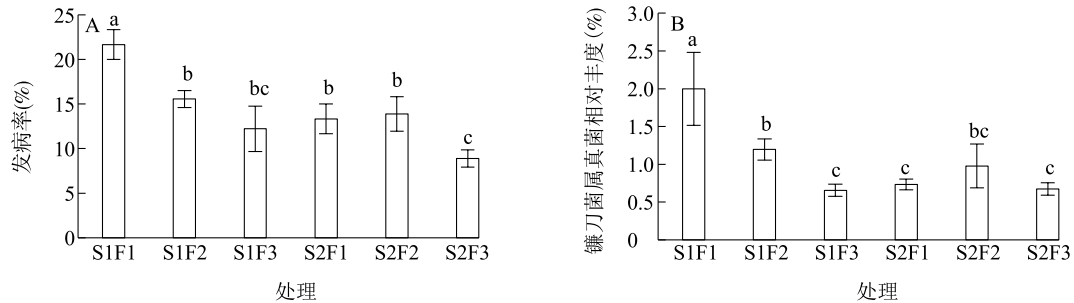
2 结果与分析

2.1 土壤消毒与定植前施用微生物菌剂处理对草莓枯萎病发病率和土壤中镰刀菌属真菌相对丰度的影响

从图 1A 可见,与 S1F1 处理相比,其余各处理草莓枯萎病发病率均显著降低($P < 0.05$),其中 S2F3 处理草莓枯萎病发病率最低。从图 1B 可见,所有施用微生物菌剂的土壤中镰刀菌属真菌相对丰

度均显著低于 S1F1 处理,其中 S1F3 处理、S2F1 处理和 S2F3 处理的土壤中镰刀菌属真菌相对丰度分别为 S1F1 的 32.82%、36.75%和 33.72%。这表明,

施用微生物菌剂能有效降低土壤中镰刀菌属真菌的相对丰度,降低草莓枯萎病发病率。



A:草莓枯萎病发病率;B:土壤中镰刀菌属真菌相对丰度。S1F1:单用有机物料闷棚土壤消毒,定植前施用紫牛有机肥;S1F2:用有机物料闷棚土壤消毒,定植前施用可施可力菌肥;S1F3:用有机物料闷棚土壤消毒,定植前施用三炬微生物菌剂;S2F1:用有机物料+闷棚菌剂闷棚土壤消毒,定植前施用紫牛有机肥;S2F2:用有机物料+闷棚菌剂闷棚土壤消毒,定植前施用可施可力菌肥;S2F3:用有机物料+闷棚菌剂闷棚土壤消毒,定植前施用三炬微生物菌剂。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图1 土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂处理对草莓枯萎病发病率和土壤中镰刀菌属真菌相对丰度的影响

Fig.1 Effects of combined soil disinfection and pre-planting microbial agent treatments on the incidence of strawberry wilt and the relative abundance of *Fusarium* fungi in soil

2.2 土壤消毒与定植前施用微生物菌剂处理对草莓植株生长的影响

从表1和表2可见,土壤消毒处理和定植前施用微生物菌剂处理均会显著影响草莓株高($P < 0.05$),且二者具有互作效应。S2F3处理草莓株高显著高于S1F1处理、S1F2处理、S1F3处理和S2F1处理。土壤消毒处理会显著影响叶柄长($P < 0.05$),

定植前施用微生物菌剂处理则无显著影响($P > 0.05$),且两因素无互作效应,因此S2(S2F1、S2F2、S2F3)处理的叶柄长均显著高于S1(S1F1、S1F2、S1F3)处理。各处理对草莓茎粗、叶面积和SPAD值无显著影响($P > 0.05$)。总体而言,施用微生物菌剂可以促进植株长高。

表1 土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂对草莓植株生长的影响

Table 1 Effects of combined soil disinfection and pre-planting microbial agent treatments on strawberry plant growth

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	心叶外第2展平叶		
			叶面积(cm^2)	叶柄长(cm)	SPAD值
S1F1	13.67±1.82bc	10.51±1.31a	30.56±6.14a	9.07±1.88b	45.02±2.03a
S1F2	12.93±1.13c	10.26±1.07a	29.10±6.68a	9.30±2.26b	45.52±2.21a
S1F3	13.50±1.38bc	10.70±0.74a	28.01±4.45a	9.03±1.66b	44.72±2.92a
S2F1	13.40±1.12c	10.97±1.69a	26.36±4.13a	10.10±2.71a	44.21±2.02a
S2F2	14.23±1.57ab	10.33±0.94a	28.45±5.80a	10.33±1.79a	44.93±2.17a
S2F3	14.90±1.21a	10.79±0.92a	30.45±5.23a	10.37±2.01a	45.49±1.89a

S1F1、S1F2、S1F3、S2F1、S2F2、S2F3 见图1注。SPAD值:SPAD-502 Plus叶绿素测定仪测定值。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 土壤消毒与定植前施用微生物菌剂处理对草莓产量的影响

土壤消毒和定植前施用微生物菌剂处理对草莓产量和单果重的影响如图2所示。从图2A可见,S2F3处理头茬商品果产量显著高于S1F1处理($P <$

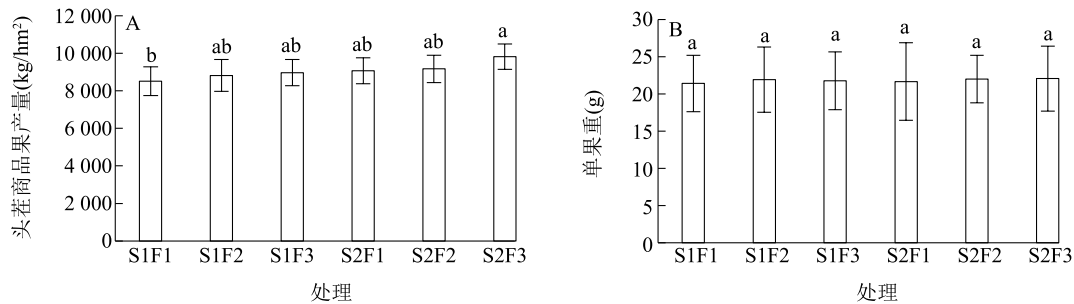
0.05),但从图2B可知各处理草莓单果重差异不显著($P > 0.05$)。分析土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂增产的主要原因是单位面积健康植株的比例提高,减少了死苗补苗造成的上市延迟,提高了前期高单价商品果的产量。

表2 土壤消毒与定植前施用微生物菌剂联用对草莓生长指标影响的方差分析

Table 2 Analysis of variance (ANOVA) of the effects of combined soil disinfection and pre-planting microbial agent treatments on strawberry growth indicators

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	心叶外第2展平叶		
			叶面积 (cm ²)	叶柄长 (cm)	SPAD
S	**			**	
F	*				
S×F	**				

S:夏季闷棚土壤消毒处理;F:草莓定植前施用微生物菌剂处理;S×F:土壤消毒处理与定植前施用微生物菌剂处理交互作用。*表示影响显著($P<0.05$);**表示影响极显著($P<0.01$)。



A:头茬商品果产量;B:二级果单果重。S1F1、S1F2、S1F3、S2F1、S2F2、S2F3 见图1注。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图2 土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂对草莓头茬果的影响

Fig.2 Effects of combined soil disinfection and pre-planting microbial agent treatments on strawberry first-crop fruit

表3 土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂对土壤中酶活性的影响

Table 3 Effects of combined soil disinfection and pre-planting microbial agent treatments on soil enzyme activities

处理	过氧化氢酶活性(U)	脲酶活性(U)	蔗糖酶活性(U)	酸性磷酸酶活性(U)	多酚氧化酶活性(U)
S1F1	78.72±1.36a	98.06±11.35b	106.26±16.28b	0.52±0.13a	53.91±4.54a
S1F2	72.26±1.62b	137.55±16.59a	104.56±7.75b	0.36±0.08a	58.63±6.04a
S1F3	66.73±1.99c	129.27±15.47a	114.89±5.47ab	0.47±0.11a	58.84±4.51a
S2F1	68.66±3.98c	146.22±6.52a	108.72±14.81ab	0.50±0.09a	57.49±6.14a
S2F2	66.16±2.11c	141.98±11.70a	117.55±9.10ab	0.49±0.03a	54.37±2.90a
S2F3	66.20±1.11c	144.19±13.72a	122.15±5.94a	0.51±0.05a	52.76±4.25a

S1F1、S1F2、S1F3、S2F1、S2F2、S2F3 见图1注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表4 土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂对土壤中酶活性影响的方差分析

Table 4 Analysis of variance (ANOVA) of the effects of combined soil disinfection and pre-planting microbial agent treatments on soil enzyme activities

处理	过氧化氢酶活性	脲酶活性	蔗糖酶活性	酸性磷酸酶活性	多酚氧化酶活性
S	**	**			
F	**	*			
S×F	**	**			

S、F、S×F 见表2注。*表示影响显著($P<0.05$);**表示影响极显著($P<0.01$)。

2.4 土壤消毒与定植前施用微生物菌剂处理对土壤中酶活性的影响

从表3和表4可见,土壤消毒处理和草莓定植前施用微生物菌剂处理均会显著或极显著影响过氧化氢酶活性和脲酶活性,且两因素存在交互作用。与S1F1处理相比,其余处理土壤中过氧化氢酶活性均显著下降($P<0.05$),脲酶活性均显著上升($P<0.05$)。S2F3处理蔗糖酶活性与S1F1处理相比显著提高了14.95%。此外,各处理土壤中酸性磷酸酶活性和多酚氧化酶活性之间无显著差异($P>0.05$)。由此可知,相比单用有机物料闷棚土壤消毒与定植前施用有机肥,有机物料+闷棚菌剂闷棚土壤消毒与定植前施用微生物菌剂对土壤微生物的活动有更加强烈的影响。

2.5 土壤消毒与定植前施用微生物菌剂处理对土壤养分含量的影响

从表 5 和表 6 可见,土壤消毒处理和草莓定植前施用微生物菌剂处理均会显著影响土壤有效磷含量($P<0.05$),但两因子之间不存在交互作用。与 S1F1 处理相比,S2F1 处理和 S2F3 处理土壤有效磷

含量显著提高($P<0.05$);其余土壤理化性质各处理间无显著差异($P>0.05$)。总之,有机物料+闷棚菌剂土壤消毒与定植前施用有机肥或有机物料+闷棚菌剂土壤消毒与定植前施用微生物菌剂能够有效提高土壤有效磷含量。

表 5 土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂对土壤养分含量的影响

Table 5 Effects of combined soil disinfection and pre-planting microbial agent treatments on soil nutrient content

处理	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	全磷含量 (g/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	全钾含量 (g/kg)	有效钾含量 (mg/kg)
S1F1	48.20±13.72a	3.08±0.27a	225.81±14.96a	1.52±0.42a	237.40±33.11c	16.17±0.53a	503.40±64.64a
S1F2	41.53±14.55a	3.20±0.35a	224.37±27.65a	1.48±0.21a	213.44±19.86c	16.63±0.17a	492.66±15.80a
S1F3	40.38±12.22a	3.27±0.34a	225.03±31.64a	1.58±0.22a	281.53±57.67bc	16.24±0.66a	518.20±45.16a
S2F1	50.39±15.58a	3.48±0.55a	300.46±59.65a	1.63±0.03a	376.00±21.34a	16.71±0.50a	528.93±22.97a
S2F2	48.90±13.72a	2.81±0.27a	266.19±43.31a	1.73±0.28a	264.44±64.18bc	16.20±0.23a	509.43±20.93a
S2F3	42.20±12.34a	2.99±0.69a	228.41±31.89a	1.64±0.31a	336.66±50.30ab	16.28±0.17a	517.26±28.01a

S1F1、S1F2、S1F3、S2F1、S2F2、S2F3 见图 1 注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表 6 土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂对土壤养分含量影响的方差分析

Table 6 Analysis of variance (ANOVA) of the effects of combined soil disinfection and pre-planting microbial agent treatments on soil nutrient content

处理	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	全磷含量 (g/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	全钾含量 (g/kg)	有效钾含量 (mg/kg)
S					**		
F					*		
S×F							

S、F、S×F 见表 2 注。* 表示影响显著($P<0.05$); ** 表示影响极显著($P<0.01$)。

3 讨论

本研究结果表明,闷棚菌剂土壤消毒和定植前施用微生物菌剂均可有效降低草莓枯萎病发病率,而且土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂具有加成效应,能进一步降低土壤中镰刀菌属真菌的相对丰度,有效抑制草莓枯萎病的发生。解淀粉芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌可有效预防控制香蕉、黄瓜、鹰嘴豆等多种作物枯萎病,这些生防菌产生的脂肽类抗生素如 C14-伊枯草菌素 A、C14-伊枯草菌素 A5 及环脂肽 Epiclicin,可诱导植物防御相关基因表达并产生防御酶、蛋白酶和纤维素酶,从而降低土壤中有害真菌的数量^[17-19]。大多数研究结果表明,有益微生物复合或联合应用比单一应用效果更好。张龄尹等^[20]研究发现,与对照相比,2 株芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)、1 株链霉菌(*Streptomyces* sp.)和 1 株肠杆菌(*Enterobacter* sp.)联合使用香蕉枯萎病原菌数量降低了 92.13%,显著优于单一菌株和两

两组组合。此外,设施草莓夏季 6-8 月休闲期具备高温条件和时间窗口,非常适宜开展高温闷棚土壤消毒处理。目前生产中以添加有机物料的高温闷棚措施为主。有机物在厌氧环境下被分解,产生对微生物有害的乙酸、丁酸等挥发性小分子,这种高温酸性环境能够改变土壤微生物群落结构并杀灭土传病原菌^[21]。本研究中增施的耐高温闷棚菌剂以解淀粉芽孢杆菌为主要有效菌种,其不仅具有耐高温的特性,还能分泌纤维素酶,可有效提高有机物料腐熟程度、土壤温度和杀菌小分子浓度,进而增强土壤消毒效率。肖蓉等^[22]筛选出 1 株具有纤维素降解功能的细菌 JN2,对草莓镰刀菌有强烈拮抗作用,可作为闷棚菌种资源。闷棚结束和定植前的短暂“微生物真空期”亟需填充大量有益微生物以驱动真菌群落的生态演替,抑制有害真菌的复苏扩增。常芳娟等^[23]对连续两年种植西瓜的田块进行生物熏蒸,后配施微生物菌剂,结果发现,与仅采用生物熏蒸相比,生物熏蒸配施微生物菌剂的土壤中真菌生物多

样性提高,群落结构向有益方向发展。本研究中 S2F3 处理的综合效果优于 S2F2 处理,这表明,土壤消毒和定植前施用微生物菌剂的组合对控制土传病害——枯萎病具有重要实践意义。

本研究中定植前施用微生物菌剂的处理能够显著提高草莓植株株高($P < 0.05$)。这是因为许多植物根际促生菌因基因组中存在保守的功能基因,能够产生植物激素并具有溶磷解钾能力,根际促生菌定殖于植物根系周围,分泌激素并活化土壤养分,从而促进植物生长。例如,胶冻样芽孢杆菌(*Paenibacillus mucilaginosus*) G78 菌株具有溶解磷酸盐和产生吲哚乙酸(IAA)的能力^[24];解淀粉芽孢杆菌 Bs006 菌株可在香蕉根部快速定殖,对植物有很好的促生作用^[25];解淀粉芽孢杆菌 GB03 菌株可显著提高高羊茅中吲哚乙酸含量并降低细胞分裂素和脱落酸含量^[26]。Udaya 等^[27]和 Ma 等^[28]的研究结果表明,解淀粉芽孢杆菌在防治香蕉枯萎病、黄瓜枯萎病的同时也能提高植株的株高,这与本研究结果一致。草莓结果期长且需分批收获,定植早期将枯萎病发病率降到最低可有效减少死苗后补苗造成的上市延迟,并且能够显著提高早期产量^[29]。本研究结果显示,土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂的 S2F3 处理对草莓早期产量有显著提升作用($P < 0.05$),但各处理单果重差异不显著($P > 0.05$)。

土壤中的酶是具有催化作用的高分子活性物质^[30-31],属于土壤有机质矿化和养分循环等过程的主要调节物质。本研究中与 S1F1 处理相比,定植前施用微生物菌剂均会显著降低土壤过氧化氢酶活性($P < 0.05$),显著提高土壤脲酶活性($P < 0.05$),S2F3 处理还可以显著提高土壤蔗糖酶活性($P < 0.05$)。其中,闷棚菌剂降低土壤过氧化氢酶活性可能与其在厌氧还原条件下增强了对好氧微生物的杀灭作用有关。有氧条件下,不同研究中微生物菌剂对土壤过氧化氢酶活性的影响各不相同。这可能是由于土壤酶活性是一个动态过程,不同的检测时间对结果影响较大。例如,对设施黄瓜施用解淀粉芽孢杆菌 TF28 菌液后,与对照相比,土壤过氧化氢酶活性在 0~56 d 的动态监测中时高时低^[32]。草莓施用解淀粉芽孢杆菌 TR2 菌液 30 d 后土壤过氧化氢酶活性才显著高于对照,而 30 d 之前的检测结果都无显著差异^[33]。彭艳等^[34]对连种 3 季苦荞的土壤施用微生物菌剂,苦荞成熟后检测土壤,发现其中过氧化氢酶活性降低,与本试验结果一致。关于土壤脲酶活性和蔗糖酶活性

的大多数研究结果表明,施用微生物菌剂能够提高土壤脲酶活性和蔗糖酶活性^[34-35]。土壤脲酶活性上升速度较快,其中草莓施用解淀粉芽孢杆菌 TR2 菌液 7 d 后土壤脲酶活性就显著高于对照^[33]。闷棚时增施闷棚菌剂能够显著提高土壤有效磷含量,这是因为解淀粉芽孢杆菌是一种高效解磷菌。解磷微生物能够促进土壤中的难溶性磷转化为有效磷,其中芽孢杆菌属的解磷指数最高,解磷微生物丰度越大,土壤磷有效性越高^[36]。解淀粉芽孢杆菌与富含有机磷的堆肥组合,可有效替代矿质磷肥,提高玉米植株体内磷的含量^[37]。沈婷婷等^[38]利用生防菌剂对西瓜枯萎病的防治结果与本研究结果类似,解淀粉芽孢杆菌 B6 在有效抑制西瓜枯萎病的同时,还能提高土壤有效磷含量。为进一步探究有机物料+闷棚菌剂土壤消毒与定植前施用微生物菌剂改善土壤理化性质的作用机理,本研究将进一步检测并分析土壤微生物群落结构和土壤酶活性的动态变化。

4 结论

综合而言,土壤消毒与定植前联合施用微生物菌剂可显著降低土壤镰刀菌属真菌相对丰度和土壤过氧化氢酶活性,提高土壤脲酶活性和土壤有效磷含量,改善土壤微生态,进而显著减轻草莓枯萎病的发生并促进植株生长,提高早期产量。本研究结果为草莓枯萎病生物防治提供了新的途径及思路,在草莓绿色生产中具有一定的应用潜力。

参考文献:

- [1] 刘畅,王 晓,李宪松,等. 我国草莓生产态势及国内外比较分析[J]. 中国果树,2023(7):136-140.
- [2] 吴 祥,姚克兵,吉沐祥,等. 句容地区草莓枯萎病病原菌的分离鉴定及田间防治[J]. 江苏农业学报,2015,31(4):764-770.
- [3] 胡学军,孙 海,田蒙生,等. 农艺措施及土壤消毒对设施草莓土传病害的防效[J]. 中国植保导刊,2021,41(5):65-68.
- [4] CHEN R, JIANG W T, XU S Z, et al. An emerging chemical fumigant: two-sided effects of dazomet on soil microbial environment and plant response[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2021,29(2):3022-3036.
- [5] WANG Y, YANG X M, XU M G, et al. Variations of soil phosphatase activity and phosphorus fractions in ginger fields exposed to different years of chloropicrin fumigation[J]. Journal of Soils and Sediments,2022,22(5):1372-1384.
- [6] 糜 林,杨金辉,霍恒志,等. 土壤高温还原消毒法克服草莓黄萎病试验[J]. 江苏农业科学,2010(5):179-180.

- [7] 戚嘉琦,吴欣欣,胡珍珠,等.日光高温闷棚对草莓连作土壤真菌群落的影响[J].北方园艺,2021(15):89-96.
- [8] 吉沐祥,陈宏州,庄义庆,等.设施草莓土传病害无害化综合防治技术[J].江苏农业科学,2015,43(2):126-127.
- [9] 杨馥霞,汤玲,贺欢,等.不同熏蒸剂对草莓连作土壤养分和微生物群落的影响[J].微生物学通报,2023,50(6):2452-2467.
- [10] 赵鹏宇,燕平梅,赵晓东,等.威百亩熏蒸后土壤微生物群落重建及功能恢复[J].植物保护,2021,47(3):44-53.
- [11] BABALOLA O O. Beneficial bacteria of agricultural importance [J]. Biotechnology Letters, 2010, 32(11):1559-1570.
- [12] CHANDRAN H, MEENA M, SWAPNIL P. Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture [J]. Sustainability, 2021, 13(19):10986.
- [13] 贺字典,苏长青,高云飞,等.太阳能消毒与植物根际促生菌(PGPR)联合对黄瓜根腐病的防治效果[J].植物保护,2020,46(6):246-253.
- [14] 张春怡,曲红云,桑平,等.土壤消毒结合微生物菌剂防控茄子黄萎病及对根际真菌群落结构的影响[J].北方园艺,2020(7):27-35.
- [15] 周通.草莓枯萎病生防菌的筛选及其生物有机肥研究[D].大连:大连理工大学,2018.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2016.
- [17] SINGH P, XIE J, QI Y H, et al. A thermotolerant marine *Bacillus amyloliquefaciens* s185 producing iturin a5 for antifungal activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* [J]. Marine Drugs, 2021, 19(9):516.
- [18] REN L, YUAN Z Q, XIE T Y, et al. Extraction and characterization of cyclic lipopeptides with antifungal and antioxidant activities from *Bacillus amyloliquefaciens* [J]. Journal of Applied Microbiology, 2022, 133(6):3573-3584.
- [19] MAGESHWARAN V, GUPTA R, SINGH S, et al. Endophytic *Bacillus subtilis* antagonize soil-borne fungal pathogens and suppress wilt complex disease in chickpea plants (*Cicer Arietinum* L.) [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13:994847.
- [20] 张龄尹,刘珊珊,魏文哲,等.香蕉枯萎病病原菌群的构建及其生防效果研究[J].南京农业大学学报,2024,47(5):898-906.
- [21] ZHU W J, WANG W P, HONG C L, et al. Influence of reductive soil disinfection on the chemical and microbial characteristics of a greenhouse soil infested with *Fusarium oxysporum* [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2022, 118:101805.
- [22] 肖蓉,邓舒.一株兼具降解纤维素和抗草莓重茬病害能力细菌的筛选和应用[J].果树资源学报,2020,1(6):7-10.
- [23] 常芳娟,张贵云,张丽萍,等.生物熏蒸配施微生物菌剂对西瓜连作土壤真菌群落结构的影响[J].中国生态农业学报,2022,30(2):248-257.
- [24] WANG D, POINSOT V, LI W, et al. Genomic insights and functional analysis reveal plant growth promotion traits of *Paenibacillus mucilaginosus* G78 [J]. Genes, 2023, 14(2):392.
- [25] GAMEZ R, CARDINALE M, MONTES M, et al. Screening, plant growth promotion and root colonization pattern of two rhizobacteria (*Pseudomonas fluorescens* ps006 and *Bacillus amyloliquefaciens* bs006) on banana cv. williams (musa acuminata colla) [J]. Microbiological Research, 2019, 220:12-20.
- [26] WANG Q, OU E L, WANG P C, et al. *Bacillus amyloliquefaciens* gb03 augmented tall fescue growth by regulating phytohormone and nutrient homeostasis under nitrogen deficiency [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:979883.
- [27] UDAYA C Y S, NAKKEERAN S, SOORIANATHASUNDARAM K. Biohardening of tissue cultured banana plantlets of cv. ney poovan for the management of fusarium wilt of banana with *Bacillus amyloliquefaciens* (vb7) triggers defence gene products and growth promotion [J]. Current Journal of Applied Science and Technology, 2020, 39(48):352-366.
- [28] MA T, YANG C D, CAI F F, et al. Optimizing fermentation of *Bacillus amyloliquefaciens* 3-5 and determining disease suppression and growth in cucumber (*Cucumis sativus*) [J]. Biological Control, 2022, 176:105070.
- [29] 姜莉莉,王开运,武玉国,等.含高效固氮解淀粉芽孢杆菌生物有机肥在草莓上的应用效果[J].北方园艺,2018(20):7-12.
- [30] 李佳,张雅丽,郭晓明,等.牛粪还田区根际和非根际土壤酶活性特征研究[J].江苏农业科学,2025,53(1):256-261.
- [31] 崔学宇,胡林,彭玉娇,等.不同施肥处理对盆栽芒果土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J].江苏农业科学,2024,52(24):220-225.
- [32] 胡基华,李晶,张淑梅,等.解淀粉芽孢杆菌 TF28 对设施连作黄瓜根际土壤酶活性和微生物的调节[J].江苏农业科学,2020,48(7):152-156.
- [33] 赵雨萌,缪佩佩,王旭东,等.解淀粉芽孢杆菌 TR2 对草莓土壤酶活性的影响与防病促生作用[J].中国生物防治学报,2022,38(2):495-501.
- [34] 彭艳,江燕,刘代铃,等.有机质和微生物菌剂对苦苣连作农艺性状及土壤酶活性的影响[J].分子植物育种,2023,21(4):1287-1293.
- [35] 陈梦多,胡春艳,马肖静,等.植物根际细菌 HQ1-2 的根际定殖与土壤微生态调节及枯萎病防治[J].中国生物防治学报,2023,39(4):924-932.
- [36] DJUUNA I A F, PRABAWARDANI S, MASSORA M. Population distribution of phosphate-solubilizing microorganisms in agricultural soil [J]. Microbes and Environments, 2022, 37(1):21041.
- [37] VINCI G, COZZOLINO V, MAZZEI P, et al. Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* and different phosphorus sources on maize plants as revealed by nmr and gc-ms based metabolomics [J]. Plant and Soil, 2018, 429(1/2):437-450.
- [38] 沈婷婷,张琇,杨国平,等.生防菌剂对西瓜根际土壤微生物群落和尖孢镰刀菌属的影响[J].西北农林科技大学学报,2023,51(7):115-125.

(责任编辑:黄克玲)