

研究报告

一种根腐类病害防病促生复合微生物菌系的优化及其效应

李建军¹, 许世洋², 马佳勇¹, 漆永红¹, 李雪萍^{*1}

1 甘肃省农业科学院植物保护研究所, 甘肃 兰州 730070

2 兰州大学 草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020

李建军, 许世洋, 马佳勇, 漆永红, 李雪萍. 一种根腐类病害防病促生复合微生物菌系的优化及其效应[J]. 微生物学通报, 2025, 52(3): 1118-1133.

LI Jianjun, XU Shiyang, MA Jiayong, QI Yonghong, LI Xueping. Optimization and application of a bacterial consortium for preventing root rot and promoting plant growth[J]. Microbiology China, 2025, 52(3): 1118-1133.

摘要: 【背景】根腐类病害成因复杂, 防治困难。复合微生物菌系功能性强, 结构稳定, 适用于根腐类病害绿色防控。【目的】优化复合微生物菌系的配比, 研究其防病促生效应, 为其大规模生产应用奠定基础。【方法】以前期筛选得到的优良复合菌系为基础, 采用正交试验设计其配比, 通过 Topsis 综合分析各处理的抑菌、溶磷、固氮、解钾等功能, 得到最优复合菌系配比。通过室内盆栽及田间试验测定对作物根腐类病害的防效、对作物生长的影响及根际土壤营养成分的变化, 明确优化后复合菌系的防病促生效应。【结果】菌株 SYP006:SYP033:SYP092:SYP202:SYP400 配比为 4:2:3:1:4 时复合菌系的综合功能最佳, 命名为‘土微微 4 号’。室内盆栽对番茄根腐病的防效为 48.9%, 对辣椒根腐病的防效为 60.9%, 同时番茄(*Solanum lycopersicum*)、辣椒(*Capsicum annuum*)的株高、茎粗及鲜重显著增加($P<0.05$), 根际土壤 pH 降低、盐含量降低, 碱解氮、速效磷、速效钾等养分含量增加, 细菌及放线菌数量增加, 真菌数量降低。田间应用对辣椒根腐病的防效为 47.94%, 增产率为 7.65%; 对百合枯萎病的防效为 63.43%, 同时百合株高显著增加($P<0.05$); 对枸杞根腐病的防效为 56.11%, 枸杞(*Lycium barbarum*)产量增加 119.99%; 最佳用量均为 10 L/667 m²。【结论】复合菌系‘土微微 4 号’有良好的防治根腐类病害、促进作物生长、改良土壤养分、调节土壤微生态的作用。

关键词: 防病促生; 复合菌系; 辣椒根腐病; 百合枯萎病; 土壤养分

资助项目: 甘肃省农业科学院重点研发计划(2022GAAS47, 2023GAAS22); 国家自然科学基金(32060037)

This work was supported by the Key Research and Development Program of Gansu Academy of Agricultural Sciences (2022GAAS47, 2023GAAS22) and the National Natural Science Foundation of China (32060037).

*Corresponding author. E-mail: lixueping@gsagr.cn

Received: 2024-05-09; Accepted: 2024-07-19; Published online: 2024-08-27

Optimization and application of a bacterial consortium for preventing root rot and promoting plant growth

LI Jianjun¹, XU Shiyang², MA Jiayong¹, QI Yonghong¹, LI Xueping^{*1}

1 Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China

2 College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China

Abstract: [Background] Multifaceted factors contribute to the occurrence of root rot, posing challenges to the management of the disease. Bacterial consortia characterized by robust functionality and structural integrity emerge as viable candidates for the sustainable management of root rot. [Objective] To optimize the proportions of strains in the bacterial consortium and elucidate its disease-preventing and plant growth-promoting effects, thus establishing a foundation of the large-scale application of the bacterial consortium in agricultural practice. [Methods] We employed orthogonal design to optimize the structure of the bacterial consortium that had been obtained. The Topsis comprehensive analysis was conducted to evaluate the inhibitory effects on pathogens and the phosphorus-solubilizing, nitrogen-fixing, and potassium-solubilizing capabilities of each treatment, on the basis of which the optimal composition of the bacterial consortium was obtained. Furthermore, indoor pot experiments and field trials were conducted to assess the performance of the optimized consortium in preventing root rot and promoting plant growth, and the changes in nutrient content of rhizosphere soil were measured. [Results] The optimal bacterial consortium, designated as ‘Tuweiwei No. 4’ (SYP006:SYP033:SYP092:SYP202:SYP400=4:2:3:1:4), demonstrated significant control effect on root rot in *Solanum lycopersicum* and *Capsicum annuum*, with inhibition rates of 48.9% and 60.9%, respectively. Additionally, greenhouse pot experiments revealed that the plant height, stem diameter, and fresh weight of *S. lycopersicum* and *C. annuum* plants treated with the bacterial consortium increased ($P<0.05$). Meanwhile, the treatment with the bacterial consortium reduced the pH and salt content and increased the available nitrogen, available phosphorus, and available potassium in rhizosphere soil. Moreover, the treatment increased bacteria and actinomycetes and decreased fungi in the rhizosphere soil. The application of the consortium in the field exhibited the control efficacy of 47.94% on root rot and increased the yield of *C. annuum* by 7.65%. In the cultivation of *Lilium davidii* var. *unicolor*, the consortium achieved the control efficacy of 63.43% and increased the plant height ($P<0.05$). In the cultivation of *Lycium barbarum*, the consortium inhibited root rot with the efficacy of 56.11% and increased the yield by 119.99%. The optimal dose for application in the field was 10 L/667 m². [Conclusion] The bacterial consortium ‘Tuweiwei No. 4’ exhibited good performance in controlling root rot, promoting crop growth, improving soil nutrient content, and regulating soil microecology.

Keywords: plant disease prevention and growth promotion; bacterial consortium; *Capsicum annuum* root rot; *Lilium davidii* wilt; soil nutrient

根腐类病害种类多样,包括普通根腐病、镰孢根腐病、茎基腐病、枯萎病、干腐病等多种能引起根部腐烂症状的病害。不同类型根腐病其病原也不尽相同,普通根腐病的病原多为麦根腐平脐蠕孢(*Bipolaris sorokiniana*)^[1],镰孢根腐病、茎基腐病、枯萎病、干腐病多由镰孢菌(*Fusarium sp.*)引起^[2-5],除此之外,还包括由微座孢(*Microdochium bolleyi*)引起的微座孢根腐病^[6]、由粉红粘帚霉(*Clonostachys rosea*)引起的粉红粘帚霉根腐病^[7]、由腐霉(*Pythium spp.*)引起的腐霉根腐病等^[8]。根腐病发生后,往往表现为主根和侧根变得稀疏,严重时根部变褐、变黑、腐烂,质地变软;植物地上部分由于根系吸水及养分供给能力下降表现出植株矮小、失绿变黄及萎蔫等症^[9]。由此可见,根腐类病害病原繁杂多样,发生症状隐秘,往往地上症状表现明显时根部已完全腐烂或发病程度极重,防治较为困难。根际微生物与根腐类等土传病害联系紧密,其可以通过促进植物生长及诱导植物生长及对病原产生抗性来达到防治病害的目的,并具备绿色、安全、高效等优势^[10]。其中,芽孢杆菌(*Bacillus sp.*)因理化性质稳定、繁殖能力强、在土壤中群体数量丰富且抑菌谱广而成为较为重要的生防微生物资源^[11]。枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)因能快速适应不良环境且定殖性能良好而被广泛使用^[12];贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)的抑菌谱较广,对多种病原有较强的抑菌作用及促生作用而被大量研究^[13];莫哈韦芽孢杆菌(*Bacillus mojavensis*)则对镰孢菌的拮抗作用较强,同时能促进植物生长,使植物生物量及叶绿素含量显著增加^[14];耐受盐芽孢杆菌(*Bacillus halotolerans*)则能诱导相关防御基因表达,具有良好的促生作用及提升植物自身免疫力的作用^[15]。但在田间应用中,气候及土壤条件复杂,单一菌剂发挥的作

用有限且效果往往不稳定。

复合微生物菌剂指包括一种或多种有益微生物和微生物载体,并含有一定数量的活菌,具有迅速补充土壤中的有益菌、抑制有害菌、调节土壤 pH 值、提高土壤肥力、增强植物抗病虫害能力和促进植物生长的作用,能很好地克服单一菌剂应用的缺点^[16]。贝莱斯芽孢杆菌和黑曲霉(*Aspergillus niger*)组合形成的微生物菌剂对由尖镰孢(*Fusarium oxysporum*)引起的毛白杨枯萎病和炭疽病防效良好^[17];赵璐等^[18]研究表明,木美土里复合微生物菌剂对苹果再植病害的防治效果达 87.78%,同时具有显著的促生作用;Deng 等^[19]研究表明,以耐受盐芽孢杆菌、苜蓿中华根瘤菌(*Sinorhizobium meliloti*)、巨大芽孢杆菌(*Bacillus megatherium*)、枯草芽孢杆菌组成的复合微生物菌剂显著提高了土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾的含量,以及转化酶、脲酶的活性,同时能促进苜蓿、黑麦草生长,并对其根际土壤微生物群落结构产生影响。针对根腐病类等土传病害,许世洋等^[20]研究发现,由枯草芽孢杆菌、特基拉芽孢杆菌(*Bacillus tequilensis*)、耐受盐芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌、环状芽孢杆菌(*Bacillus circulans*)复合而成的菌剂对辣椒镰孢根腐病的田间防效高达 88.52%,并且具有促生效应及改良土壤养分的作用。李雪萍等^[21]报道了一种由耐寒短杆菌(*Brevibacterium frigoritolerans*)、蜡样芽孢杆菌(*B. cereus*)、枯草芽孢杆菌组成的复合菌剂 BP5,田间施用后对百合枯萎病防效可达 68%,并且能有效提升百合品质及土壤质量。然而,这些复合微生物菌剂均是等比例复合而成,其最佳配比尚不清楚,限制了菌株最大限度发挥其协同作用。同时,田间施用效果及最佳用量并不明确,阻碍了其大面积示范及推广应用。

番茄、辣椒、百合、枸杞等为我国西北地

区甘肃省特色经济作物，近年来随着我国农业集约化生产模式不断发展、国民健康饮食需求的日益增长，其种植面积不断扩大，普遍存在长期连作现象，根腐类等土传病害频发。而尖镰孢(*Fusarium oxysporum*)、腐皮镰孢(*Fusarium solani*)、腐霉(*Pythium* spp.)和立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)等为上述经济作物共有的主要优势病原类群，可长期定殖于其根际，传播隐秘、扩张迅速、危害严重，作物被侵染后，产量、品质衰退明显，甚至绝收，严重威胁着西北地区农业高质量、可持续发展^[20-23]。甘肃省土壤环境气候条件复杂，不同作物的生境不同，引进菌剂多难以适应本土环境条件而效果不佳。前期研究中^[24]，本课题组通过从以上作物根际土壤中筛选防病促生等功能菌株，筛选优化得到了一种本土化耐盐碱复合微生物菌系，其包括枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*) 2株，摩加夫芽孢杆菌(*B. mojavensis*)、贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*)及耐盐芽孢杆菌(*B. halotolerans*)各1株，特性测定表明，其具有溶磷、固氮、解钾等促生功能，同时对尖镰孢、腐皮镰孢、

腐霉、立枯丝核菌具有良好的拮抗作用，具有良好的本土应用潜力。因此，本研究在此基础上对该复合菌系的组成比例进行优化，同时结合甘肃省特色作物生长条件，选择室内盆栽或大田试验测定优化后的复合微生物菌系，即‘土微微4号’的功能，以期为该复合微生物菌系的大规模生产及应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 样品

摩加夫芽孢杆菌(*B. mojavensis*) SYP006、贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*) SYP033、枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*) SYP092、耐盐芽孢杆菌(*B. halotolerans*) SYP202、枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*) SYP400，本实验室保存，来源于番茄、辣椒、百合及枸杞根际土壤，采用甘油管法-80℃低温保藏，同时在中国典型培养物保藏中心保藏，保藏编号为 CCTCC M 2022354-2022358，其特性如表1所示。

根腐病病原菌尖镰孢(*F. oxysporum*)、腐皮镰孢(*F. solani*)、腐霉(*Pythium* spp.)和立枯丝核

表1 供试菌株特性

Table 1 Characteristics of the selected strains

Item	SYP006	SYP033	SYP092	SYP202	SYP400
Amount of dissolved organic phosphorus (μg/mL)	143.600±1.440	/	220.050±2.670	/	303.420±2.520
Amount of dissolved inorganic phosphorus (μg/mL)	800.560±2.620	97.270±0.860	1 202.030±0.660	202.040±0.860	240.340±1.820
Amount of fixed nitrogen (g/L)	1.122±0.007	0.107±0.002	/	0.060±0.001	0.083±0.006
Amount of dissolved potassium (mg/L)	100.600±1.460	392.480±2.250	/	473.200±1.000	101.360±2.050
Rate of fungistasis (%)					
<i>Fusarium oxysporum</i>	26.620±0.190	90.320±0.370	/	77.340±0.700	66.320±0.220
<i>Fusarium solani</i>	32.140±1.590	88.600±0.120	/	62.730±0.590	30.240±1.410
<i>Pythium</i> spp.	42.010±0.390	85.650±0.600	/	64.030±3.270	88.100±0.080
<i>Rhizoctonia solani</i>	22.320±0.040	86.740±0.310	/	72.420±1.200	62.440±0.890
Salt resistance (%)	10	9	10	9	9
Alkali resistance (pH)	9.810±0.020	10.500±0.040	9.320±0.050	10.200±0.030	9.330±0.070

/: 该菌株不具备此项功能。

/: The strain without the function.

菌(*Rhizoctonia solani*)为本课题组自有,采用甘油管法-80 °C低温保藏。兰州百合枯萎病病原腐皮镰孢(*F. solani*)和尖镰孢(*F. oxysporum*)由甘肃省农业科学院植物保护研究所生防研究室提供。

供试菌系由 SYP006、SYP033、SYP092、SYP202、SYP400 按 1:1:1:1:1 的比例混合培养得到。

盆栽试验所用番茄和辣椒种子均购买于甘肃省农业科学院种子市场,番茄品种为‘阳光908’,辣椒品种为‘陇椒5号’;田间试验所用辣椒品种为螺丝椒;百合品种为市售兰州百合;枸杞品种为‘宁杞1号’,10年树龄。

1.2 培养基、主要试剂和仪器

LB 培养基和马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基参考文献[25]配制;Pikovaskaia's (PKO)无机磷培养基和蒙金娜有机磷培养基参考文献[26]配制;无氮培养基(nitrogen free medium, NFM)和钾长石培养基参考文献[20]配制。其中,琼脂购自北京索莱宝科技有限公司。

2×10^9 CFU/g 枯草芽孢杆菌水分散粒剂,寿光市绿士达生物工程有限公司;30%噁霉灵水剂,山东恒利达生物科技有限公司; 2×10^{11} CFU/g 解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)可湿性粉剂,江西盾牌化工有限责任公司。其余试剂(分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

智能人工光照培养箱,宁波江南仪器厂;超净工作台,北京莱艾特科技发展有限公司;正置显微镜, Olympus 公司;离心机, Sigma Laborzentrifugen 公司;全温振荡培养箱,拓赫机电科技(上海)有限公司;血球计数板,上海市求精生化试剂仪器有限公司;酶标仪,深圳市良谊实验室仪器有限公司;土壤碱解氮检测仪、土壤速效磷检测仪、土壤速效钾检测仪,泰州

市正大科教仪器设备厂;酸度计,上海雷磁仪器厂。

1.3 复合菌系的优化

设置不同的接种量(2%、4%、6%、8%)将各菌株进行混合发酵,如表2所示,设置 $L_{16}(4^5)$ 正交试验,将各菌株在 LB 平板活化后接种于液体 LB 培养基中(装液量:50 mL/150 mL 三角瓶),30 °C、150 r/min 摇床培养 36–48 h,各菌株培养液浓度达到 10^8 CFU/mL 后,按表2中各处理比例再次接入 LB 培养液中,混合发酵培养 36–48 h,再次测定发酵培养液浓度达到 10^8 CFU/mL 后,接入 PKO 无机磷、蒙金娜有机磷、NFM、钾长石培养基,测定各处理的溶磷、固氮、解钾能力及抑菌率,最后采用 Topsis 综合分析各处理综合能力大小并进行排名。测定方法按照许世洋等^[20]的方法进行。

表2 各菌株最佳配比量实验设计

Table 2 Optimal proportions of different strains by orthogonal experimental design

Treatment	SYP006 (%)	SYP033 (%)	SYP092 (%)	SYP202 (%)	SYP400 (%)
T1	2	2	2	2	2
T2	2	4	4	4	4
T3	2	6	6	6	6
T4	2	8	8	8	8
T5	4	2	4	6	8
T6	4	4	2	8	6
T7	4	6	8	2	4
T8	4	8	6	4	2
T9	6	2	6	8	4
T10	6	4	8	6	2
T11	6	6	2	4	8
T12	6	8	4	2	6
T13	8	2	8	4	6
T14	8	4	6	2	8
T15	8	6	4	8	2
T16	8	8	2	6	4

1.4 复合菌系防病促生特性测定方法

番茄、辣椒多以设施栽培为主,选择室内盆栽试验验证复合菌系对其的效应。挑选苗长为 20 cm 左右且长势相近的番茄(辣椒)幼苗移栽至花盆中,1 株/盆,设 CK1 (病原菌灌根,番茄对照组)、CK2 (病原菌灌根,辣椒对照组)、TM(复合菌系‘土微微 4 号’+病原菌灌根,番茄处理组)、TP(复合菌系‘土微微 4 号’+病原菌灌根,辣椒处理组)等 4 个处理,每处理 5 个重复,具体为:在移栽后第 5 天,分别接入孢子浓度为 2×10^6 CFU/mL 的尖镰孢与腐皮镰孢的混合孢子悬浮液 30 mL,后分别在移栽第 15、25、35 天对照组用 LB 培养液灌根(30 mL/株),处理组用 4×10^8 CFU/mL 复合菌系灌根(30 mL/株),在第 45 天分别统计番茄株高、茎粗、鲜重、病情指数,同时测定土壤 pH、可溶性盐浓度、碱解氮、速效磷、速效钾和土壤微生物数量。pH 和可溶性盐浓度的测定分别采用电极法和电导法^[27];土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量分别采用土壤碱解氮检测仪、土壤速效磷检测仪、土壤速效钾检测仪测定;细菌、真菌和放线菌数量的测定采用平板计数法^[28]。

番茄病级标准参考李潇等^[23]方法进行,分级标准如下:0 级:健康无病;1 级:根基部变褐,不软腐,不缢缩,叶子健康,根无明显病斑;2 级:根基部变褐,并有明显缢缩,叶尖或叶片发黄,根变褐;3 级:根基部变褐腐烂,叶片发黄,根变褐甚至变黑;4 级:根及根基部腐烂,整株幼苗坏死。

辣椒病级标准参考许世洋等^[20]方法,分级标准如下:0 级:健康无病;1 级:根系稍有变色,占全部根系 10%以下,植株不萎焉;2 级:根系明显变褐,变色根系占总根系 10%–30%,植株开始萎焉;3 级:根系变褐占总根系 30.1%–50.0%,植株明显萎焉;4 级:根系变褐

占全部根系的 50.1%–80.0%,植株萎焉变黄;5 级:种子腐烂不能发芽或全株枯死。

病情指数 = $\frac{\sum(\text{病级株数} \times \text{代表数值})}{\text{株数总和}} \times \text{发病最重级的代表数值} \times 100$ (1)

防效 = $\frac{(\text{对照病情指数} - \text{处理病情指数})}{\text{对照病情指数}} \times 100\%$ (2)

1.5 复合菌系田间应用于辣椒根腐病的防治及效应

在我国西北地区,辣椒露天栽培面积较广,因此田间验证该复合菌系对其效果。试验设在甘肃省兰州市安宁区甘肃省农业科学院,地势平坦,肥力中等,前茬为辣椒。试验田辣椒为垄作栽培,2021 年 5 月 19 日移栽,株行距为 30 cm×30 cm,品字形定植。试验期间于 5 月 19 日、6 月 22 日、7 月 28 日、8 月 20 日和 9 月 7 日浇水 5 次,其他田间管理按常规进行。试验采取小区排列,小区面积为面积 10 m²(宽 1.0 m,长 10.0 m),共设 9 个处理,分别为 CK1 (空白对照)、CK2 (2 亿 CFU 枯草芽孢杆菌,菌剂对照,用量为 30 g/10 m²)、CK3 (30%噁霉灵水剂,药剂对照,用量为稀释 800 倍后 25 mL/10 m²)、TP1–TP6(复合菌系‘土微微 4 号’,处理组,用量分别为 30、60、90、120、150、180 mL/10 m²),每处理 4 个重复。辣椒定植后处理组于 6 月 23 日进行 1 次‘土微微 4 号’灌根;7 月 28 日进行第 1 次人工接菌(根腐病菌,浓度是 8×10^6 CFU/mL) 4 mL/株;9 月 6 日进行了第 2 次人工接菌 5 mL/株。对照组加入相应量的药剂或水。辣椒定植并根施‘土微微 4 号’后至收获末期,根据对照区发病情况,不定期调查并记录辣椒根腐病发病株数。同时据田间不定期观察,试验药剂各处理区植株是否生长正常,有无任何不良影响,说明供试药剂在试验剂量范围内对辣椒的安全性。结果期对试验田进行 2 次测产,合并计算对作物产量的影响。调查方法参考

GB/T 17980.32—2000^[29]进行,用公式(3)计算发病率和防效。

$$\text{发病率}(\%) = \text{发病株数} / \text{调查总株数} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{防治效果}(\%) = (1 - CK_0 \times PT_1 / CK_1 \times PT_0) \times 100 \quad (4)$$

公式(4)中: CK_0 : 空白对照区施药前发病率; PT_0 : 处理区施药前发病率; CK_1 : 空白对照区施药后发病率; PT_1 : 处理区施药后发病率。

1.6 复合菌系田间应用于百合枯萎病的防治及效应

兰州百合生境特殊,因此选择田间试验该复合微生物菌系对其效应。试验设在甘肃省兰州市榆中县马坡乡旧庄村,慢坡地,肥力中等,前茬为柴胡。试验田百合为露地直播,于2021年4月30日播种种球,株行距为20 cm×35 cm。其他田间管理按常规进行。试验采取大区设计,长32 m、宽6.5 m,播种前,按种球常规用量350 kg/667 m²、药(菌)液量按2.5 L/100 kg稀释均匀后进行拌种。设CK1(空白对照)、CK2(2亿CFU枯草芽孢杆菌,菌剂对照,用量为2.0 kg/667 m²)、CK3(30%噁霉灵水剂,药剂对照,药种比1:4 000)、TL1-TL6(复合菌系‘土微微4号’,处理组,用量分别为2、4、6、8、10、12 L/667 m²)等9个处理。百合出苗后5月下旬到6月中上旬不定期调查,齐苗后调查各处理的出苗率,枯萎病显症后调查发病率,9月中下旬调查株高。同时,不定期进行田间观察各处理区植株生长是否正常,有无任何不良影响,说明供试药剂在试验剂量范围内对百合的安全性。出苗率和发病率的调查采用全区5点取样,每点100株样方,记缺苗数、发病株数;株高调查时3点取样,每点10株左右,测量记录株高。用公式(5)、(6)计算发病率和防效:

$$\text{发病率}(\%) = \text{发病株数} / \text{调查总株数} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{防治效果}(\%) = CK - PT / CK \times 100 \quad (6)$$

公式(6)中: CK : 空白对照区发病率; PT : 药

剂处理区发病率。

1.7 复合菌系田间应用于枸杞根腐病的防治及效应

靖远枸杞是甘肃省特色经济作物,生长条件特殊,土壤盐碱含量高,田间验证该复合微生物菌剂的作用更具有生产实际意义。试验设在甘肃省白银市靖远县五合镇白茨林村,势平坦,肥力中等,枸杞树龄10年,株行距为1.5 m×2.0 m。试验期间于5月6日、6月8日和7月11日浇水3次,其他田间管理按常规进行。试验采取大区设计,面积667–1 000 m²,2021年春季枸杞萌芽前于4月22日进行灌根,设CK1(空白对照)、CK2(2亿CFU枯草芽孢杆菌,用量为2.0 kg/667 m²)、CK3(200亿解淀粉芽孢杆菌可湿性粉剂,用量为1.2 kg/667 m²)、TG1-TG3(复合菌系‘土微微4号’,处理组,用量分别为5、10、15 L/667 m²)等6个处理,稀释后按500 kg/667 m²(4–5 L/株)进行灌根,每株树周围离茎基部50 cm左右选3点,用追肥枪插入土壤中,每点停顿3–4 s,将菌液灌入枸杞根部。灌根时及枸杞落叶后调查枸杞树的树冠、茎粗;枸杞采摘期分次(6–7次)测量记录产量;根腐病表现明显时(7–8月)调查枸杞根腐病发病情况。方法为:避开边行,选择中间行,每处理根据行长调查1–3行,间隔1–2行,统计枸杞树冠、茎粗和产量;调查全部植株根腐病发病程度,记录发病株数,根据树冠叶片黄化程度、数量及落叶状况共分5级,分级标准如下:0级:叶绿无黄叶;1级:1–3个枝条叶片黄化或脱落;2级:4–6个枝条叶片黄化或脱落;3级:树冠6个以上枝条至1/2总枝条叶片黄化或脱落;4级:1/2以上总枝条叶黄或脱落。

用公式(7)、(8)计算发病率和防效:

$$\text{发病指数}(\%) = \frac{\sum(\text{各级病株数} \times \text{相对级数值})}{\text{调查总株数} \times 4} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{防治效果(\%)} = \frac{\text{CK} - \text{PT}}{\text{CK}} \times 100 \quad (8)$$

公式(8)中: CK: 空白对照区发病指数; PT: 药剂处理区发病指数。

同时观察整个生育期枸杞生长情况, 表观判断剂在试验剂量范围内对枸杞植株生长是否正常, 是否安全, 有无任何不良影响。

1.8 数据处理

所有数据采用 Microsoft Excel 2007 进行处理并作图, 采用 DPS 15.10 进行差异显著性分析(Duncan 新复极差法)及 Topsis 综合分析。

2 结果与分析

2.1 复合菌系的优化结果

如表 3 所示, 不同处理各项特性不一, 处理 T14 溶有机磷能力最强, 为 391.68 $\mu\text{g}/\text{mL}$, T13 溶无机磷能力最强, 达 1 670.03 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 固氮能力则是 T16 最好, 为 1.640 g/L, T15 解钾能力最好, 为 669.53 mg/L, 处理 T4 的抑菌能力最好, 对尖镰孢的抑菌率为 95.61%, 对腐霉的抑菌率为 92.32%, 对立枯丝核菌的抑菌率为 91.03%, T8 对腐皮镰孢的抑菌力最强, 达 92.85%, 与其他处理差异显著($P < 0.05$)。经 Topsis 综合分析发现, T14 的综合性能最优, 统计量为 0.863 1, 排名第 1, 因此, 确定复合菌系各菌株 SYP006:SYP033:SYP092:SYP202:SYP400 最佳配比为 4:2:3:1:4, 优化后的复合菌系命名为‘土微微 4 号’。

2.2 复合菌系的防病促生作用

2.2.1 复合菌系对番茄及辣椒根腐病的防效及促生作用

如表 4 所示, 复合菌系对番茄及辣椒的促生作用显著($P < 0.05$), 番茄处理组(TM)株高比对照(CK1)增高 35 cm, 茎粗增加 1.45 mm, 鲜重增重 5.22 g, 并且根腐病的病情指数大幅降低, 防效为 48.9%。辣椒处理组(TP)株高较其对

照(CK2)增加 25.8 cm, 茎粗增加 1.15 mm, 鲜重增加 7.05 g, 对根腐病的防效为 60.9%。

2.2.2 复合菌系对番茄及辣椒根际土壤特性的影响

如表 5 所示, 复合菌系‘土微微 4 号’的施用有助于改良番茄及辣椒根际土壤养分特性, 番茄处理组(TM)及辣椒处理组(TP)较对照而言其 pH、电导率均略有下降, 土壤速效养分碱解氮、速效磷、速效钾等含量显著升高($P < 0.05$), 番茄处理组(TM)较其对照(CK1)碱解氮含量增加 20 mg/kg, 速效磷含量增加 10 mg/kg, 速效钾含量增加 51 mg/kg。

2.2.3 复合菌系对番茄及辣椒根际土壤中不同微生物数量的影响

如表 6 所示, 施用复合菌系‘土微微 4 号’后, 番茄处理组(TM)及辣椒处理组(TP)根际细菌和放线菌数量显著增加($P < 0.05$), 真菌数量显著降低($P < 0.05$), 如辣椒施用‘土微微 4 号’后, TP 细菌数量较对照(CK2)高出 3.6×10^6 CFU/g, 真菌数量下降了 9.4×10^4 CFU/g。

2.3 复合菌系对辣椒根腐病的防治作用及效应

经田间应用发现, 复合菌系‘土微微 4 号’对辣椒安全。如图 1 所示, 灌施 1 次后对根腐病具有一定的防治效果, 除 TP2 (60 mL)外, 其余防效在 20.38%–47.94%之间, TP6 (12.0 L/667 m^2)的防效最好, 为 47.94%, 与对照 CK2 (枯草芽孢粉剂)和 CK3 (噁霉灵水剂)差异不显著($P < 0.05$)。但 TP6 (180 mL)、TP5 (150 mL)、TP4 (120 mL)、TP3 (90 mL)的产量均显著高于 CK2 (枯草芽孢粉剂)和 CK3 (噁霉灵水剂) ($P < 0.05$)。CK2 的增产率为 2.07%, CK3 的增产率为 3.86%, ‘土微微 4 号’处理除 TP2 外, 其余处理的增产率在 4.96%–7.65%之间。此外, 复合菌系‘土微微 4 号’对辣椒根腐病的防效和增产率

表3 各处理特性
Table 3 Characteristics of different treatments

Treatment	Amount of dissolved organic phosphorus (μg/mL)	Amount of dissolved inorganic phosphorus (μg/mL)	Amount of fixed nitrogen (g/L)	Amount of dissolved potassium (mg/L)	Rate of fungistasis (%)			Topsis comprehensive analysis		
					<i>Fusarium oxysporum</i>	<i>Fusarium solani</i>	<i>Pythium</i> spp. <i>Rhizoctonia solani</i>			
T1	316.93±2.83m	1 582.68±2.45j	1.300±0.010j	652.93±0.58j	92.74±0.67h	90.51±0.82e	89.60±2.11c	88.32±0.93d	0.000 7	16
T2	322.78±1.98l	1 602.37±1.13h	1.323±0.016i	667.87±3.17cd	94.33±1.22bcdef	90.49±0.52e	90.22±0.45bc	89.27±1.63bcd	0.119 2	15
T3	327.55±2.58k	1 623.49±0.89g	1.325±0.001i	668.38±0.55bcd	94.62±0.29bcde	90.88±0.14de	91.82±0.31ab	90.18±0.23abc	0.179 1	14
T4	339.95±0.56h	1 646.94±1.13d	1.363±0.005h	673.83±7.37ab	95.61±0.12a	91.37±0.32bcde	92.32±1.35abc	91.03±0.13a	0.310 2	13
T5	363.31±2.03e	1 592.76±0.90i	1.478±0.008g	662.74±4.84defg	93.72±0.24fg	91.03±0.32cde	91.30±0.22abc	89.71±0.48abcd	0.550 1	7
T6	323.95±1.42l	1 602.65±3.35h	1.482±0.002fg	674.26±1.36a	93.82±0.08efg	91.67±1.51abcde	91.63±0.22abc	90.61±0.31ab	0.370 2	12
T7	346.20±2.25g	1 653.32±1.13c	1.486±0.009fg	656.69±3.55hij	94.79±0.06abcd	92.03±1.75abcd	91.04±1.98abc	89.76±0.22abcd	0.484 5	8
T8	331.56±2.34j	1 630.79±3.39f	1.496±0.011ef	663.07±0.28def	95.13±0.47ab	92.85±0.31a	90.93±1.26bc	89.23±0.06bcd	0.421 5	10
T9	322.32±1.42l	1 654.27±4.25c	1.506±0.004de	673.75±0.98ab	94.23±0.33cdef	91.93±0.39abcde	89.98±0.42bc	88.93±0.11cd	0.403 3	11
T10	332.42±0.86j	1 662.58±1.72b	1.513±0.003cd	666.74±4.41cde	93.82±0.45efg	90.90±0.37de	89.76±1.73abc	90.67±0.25ab	0.451 8	9
T11	380.44±1.42b	1 625.30±2.63g	1.519±0.006cd	664.51±0.21cdef	94.03±0.22def	92.36±1.08abc	91.58±0.16abc	89.77±0.45abcd	0.714 7	4
T12	352.31±0.86f	1 639.84±3.99e	1.523±0.007c	661.34±3.01efgh	93.73±0.36fg	91.54±0.26abcde	91.38±0.19abc	90.52±0.10ab	0.567 5	6
T13	371.93±2.45c	1 670.03±1.39a	1.613±0.018b	657.09±2.25ghij	93.73±0.30fg	91.23±0.59bcde	90.67±0.45abc	89.49±2.28abcd	0.782 9	2
T14	391.68±1.49a	1 657.26±4.18c	1.626±0.008ab	654.76±2.69ij	93.05±0.45gh	90.82±0.56de	91.48±0.28abc	90.05±0.6abc	0.863 1	1
T15	336.90±0.56i	1 635.64±4.30ef	1.632±0.002a	669.53±0.64abc	94.62±0.36bcde	91.78±0.10abcde	90.81±1.18abc	90.46±0.16abc	0.593 7	5
T16	367.20±1.42d	1 622.45±5.56g	1.640±0.007a	660.35±3.56fghi	95.01±0.35abc	92.58±0.39ab	91.29±0.67abc	90.88±0.29a	0.774 1	3

表中不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at P<0.05. The same below.

表 4 复合菌系对番茄及辣椒根腐病的防效及促生作用

Table 4 Preventing root rot and growth-promoting effects of the bacterial consortium on *Solanum lycopersicum* and *Capsicum annuum* plants

Treatment	Plant height (cm)	Thick stems (mm)	Fresh weight (g)	Disease index	Control effect (%)
CK1	31.60±1.30b	2.63±0.01b	13.94±0.64b	90	
TM	66.60±3.38a	4.08±0.04a	19.16±0.68a	46	48.9
CK2	33.00±1.86b	2.89±0.01b	20.83±1.64b	87	
TP	58.80±2.69a	4.04±0.02a	27.88±1.83a	34	60.9

表 5 复合菌系对番茄及辣椒根际土壤特性的影响

Table 5 Effects of the bacterial consortium on *Solanum lycopersicum* and *Capsicum annuum* rhizosphere soil characteristics

Treatment	pH	Electrical conductivity (mS/cm)	Alkaline nitrogen (mg/kg)	Available phosphorus (mg/kg)	Available potassium (mg/kg)
CK1	8.47±0.01a	1.800±0.003a	88.00±0.16b	62.00±0.34b	83.00±0.51b
TM	8.36±0.02b	1.700±0.001b	108.00±0.83a	72.00±0.63a	134.00±0.31a
CK2	8.46±0.03a	1.300±0.001a	73.00±0.85b	65.00±0.94b	140.00±0.21b
TP	8.31±0.03b	1.100±0.003b	79.00±0.96a	74.00±0.38a	182.00±0.87a

表 6 复合菌系对番茄及辣椒根际土壤微生物数量的影响

Table 6 Effects of the bacterial consortium on *Solanum lycopersicum* and *Capsicum annuum* rhizosphere soil microbial quantity

Treatment	Number of bacteria ($\times 10^6$ CFU/g)	Number of fungi ($\times 10^5$ CFU/g)	Number of actinomycetes ($\times 10^6$ CFU/g)
CK1	1.25±0.15b	1.30±0.02a	1.68±0.12b
TM	2.42±0.01a	0.13±0.01b	2.76±0.23a
CK2	3.40±0.03b	1.23±0.04a	4.90±0.03b
TP	7.00±0.05a	0.29±0.01b	5.60±0.06a

均有随施用量增加而提升的趋势，但当用量大于 150 mL/10 m² 之后，其产量增加不显著 ($P<0.05$)，因此，确定复合‘土微微 4 号’田间最佳用量为 10 L/667 m²。

2.4 复合菌系对百合枯萎病的防治作用及效应

根据大田试验不定期观察可知，复合菌系‘土微微 4 号’拌种对百合安全，出苗时间较为一致；出苗率在 93.6%–96.8%之间。如图 2 所

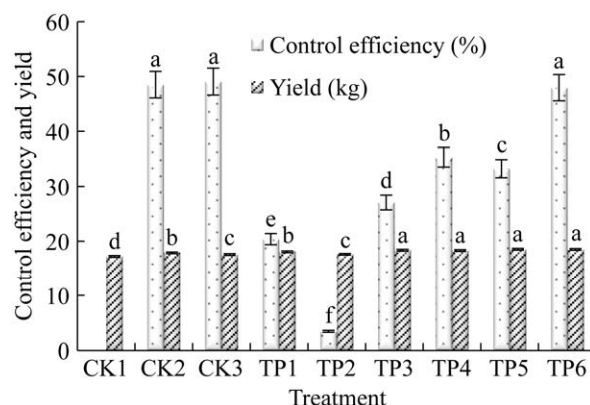


图 1 复合菌系大田防治辣椒根腐病的防效及增产效应 图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Figure 1 Effects of the bacterial consortium on preventing root rot and yield increasing rate of *Capsicum annuum*. The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

示，‘土微微 4 号’对百合枯萎病的防效在 54.48%–63.43%之间，处理 TL5 (10 L/667 m²)的防效最好，为 63.43%，优于对照组，并且与其

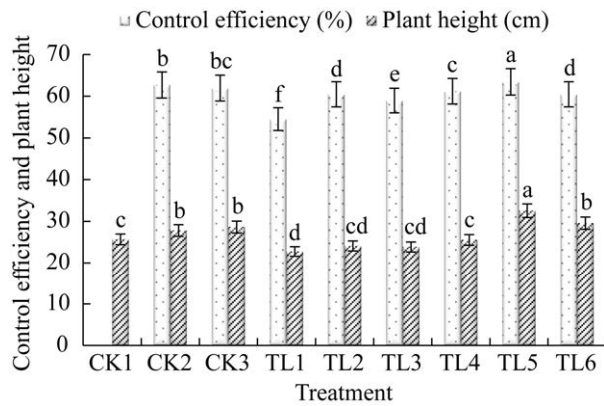


图2 复合菌系大田防治百合枯萎病的防效及促生效应

Figure 2 Wilt preventing root rot and growth-promoting effects on *Lilium davidii* var. *unicolor* plants of the bacterial consortium.

他处理间差异显著($P < 0.05$)。调查株高发现,‘土微微4号’处理 TL5 株高最高,为 32.54 cm,显著优于其余处理($P < 0.05$);其次为处理 TL6 和对照 CK2、CK3。因此,复合菌系‘土微微4号’防治百合枯萎病的最佳用量为 10 L/667 m²。

2.5 复合菌系对枸杞根腐病的防治作用及效应

经田间不定期观察发现,复合菌系‘土微微4号’对枸杞安全,灌施1次后对根腐病具有一定的防治效果(图3),TG1 (5 L/667 m²)的防效为 37.39%, TG2 (10 L/667 m²)的防效为 56.11%, TG3 (15 L/667 m²)的防效为 36.71%,与 TG1 及对照 CK2 (2 亿 CFU 枯草芽孢杆菌水分散粒剂)相当,而对照 CK3 (200 亿解淀粉芽孢杆菌可湿性粉剂)的防效为 40.93%,仅次于处理 TG2,差异显著($P < 0.05$),因此,复合菌系‘土微微4号’防治枸杞根腐病的最佳用量为 10 L/667 m²。

如图4所示,施用菌剂及对照处理对10年枸杞树龄的茎粗影响较小,复合菌系施用前后增幅小于2%,但各处理的增幅差异显著($P < 0.05$),处理 TG1 (5 L/667 m²)的增幅最大,为 1.74%,

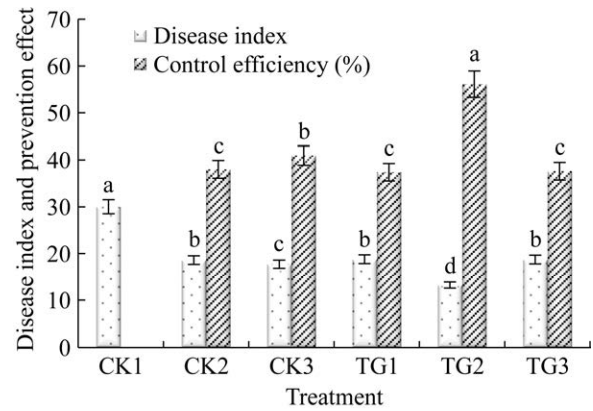


图3 复合菌系大田防治枸杞根腐病的防效

Figure 3 Root rot preventing effect on *Lycium barbarum* of the bacterial consortium by field experiments.

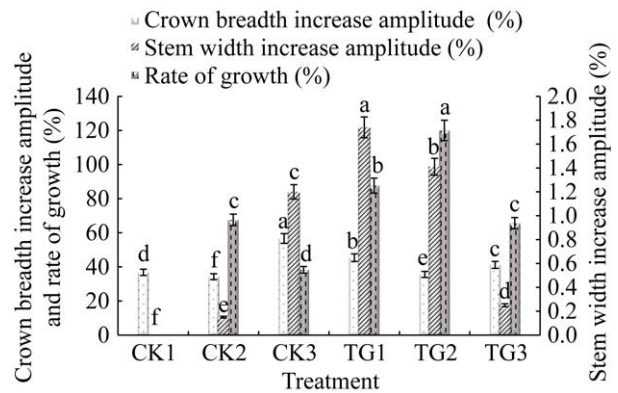


图4 复合菌系对枸杞生长量的影响

Figure 4 Effect of the bacterial consortium on *Lycium barbarum* growth indications by field experiments.

TG2 (10 L/667 m²)次之。施用复合菌系‘土微微4号’使枸杞树的冠幅显著增加($P < 0.05$),在 35.57%–45.40%之间,处理 TG1 增幅最大,为 45.4%,但显著低于对照 CK3 (200 亿解淀粉芽孢杆菌可湿性粉剂) ($P < 0.05$)。就产量而言,处理 TG2 (10 L/667 m²)的增产效果最为显著,较对照增产 119.99%,对照 CK2 (2 亿/克枯草芽孢杆菌水分散粒剂)及 CK3 (200 亿解淀粉芽孢杆菌可湿性粉剂)的增产率分别为 67.55%和 38.30%,均低

于复合菌系‘土微微 4 号’各处理,说明复合菌系‘土微微 4 号’对枸杞的增产效果良好,确定其最佳用量为 10 L/667 m²。

3 讨论

真菌是引起作物根腐类土传病害最主要的病原类群之一,受寄主遗传特异性及不同地区气候、土壤条件、栽培方式等差异影响,不同地区不同作物的根腐类病害类型不尽相同,优势病原也存在一定差异^[30-31]。本研究以甘肃省特色经济作物根腐类病害优势病原尖镰孢(*F. oxysporum*)、腐皮镰孢(*F. solani*)、腐霉(*Pythium* spp.)及立枯丝核菌(*R. solani*)为靶标^[20,32],将前期筛选得到的具优良防病促生效应的菌系进行优化,优化所得菌系‘土微微 4 号’对尖镰孢、腐皮镰孢、腐霉及立枯丝核菌抑菌率分别高达 95.61%、92.85%、92.32%和 91.03%,较单一菌株抑菌性能大幅提升,说明复合优化菌系对辣椒、番茄、百合和枸杞优势病原均具有更佳抑制效应,并且之间协同增效作用明显,这与赵思崎等^[33]、黄慧婧等^[34]研究结果一致。优化组成菌系的溶磷、固氮、解钾等促生特性也优于单一菌株,即使在复合菌系处理中排名最末的处理 T1,其溶有机磷量为 316.93 μg/mL,大于最强溶有机磷菌株 SYP400 的溶有机磷量(303.42 μg/mL);溶无机磷量为 1 582.68 μg/mL,大于最强溶无机磷菌株 SPY092 的溶磷量(1 202.03 μg/mL);固氮量为 1.3 g/L,大于最强固氮量菌株 SPY006(1.122 g/L);解钾量为 652.93 mg/L,大于最强解钾量菌株 SPY202(473.2 mg/L),进一步说明所构建复合菌系间具有优良的协同提效作用。

研究表明^[35],当菌剂菌种组成超过 3 种时会影响其使用效果,菌种数量越多则菌种之间则越易产生相互抑制或竞争作用,影响其理想

作用发挥。而本研究所选取 5 株菌复合组成的微生物菌系防病促生效应较单一菌株均有不同程度的提升,这可能与本研究选取菌株均为芽孢杆菌属(*Bacillus*),同属菌株之间兼容性更强有关,具体的协同作用机制尚需进一步研究。目前,多数关于复合微生物菌系(菌剂)研究以功能特性各异的菌株等比例组配而成,弱化了菌株成分比例“量变”引起的“质变”效应,如本研究优化得到的菌系 T1(由各菌株等比例配比而成)的溶磷、固氮、解钾促生特性和对不同病原抑制效果的 Topsis 综合排名最低,而其他非等比例组配菌系综合效应更优,说明对复合菌剂中菌株组配比例的优化能够有效激发其综合效应。正交试验设计能够以少量试验代替常规析因分析要求的全面试验,省时省力且所得结果具有科学性和普遍意义,在微生物菌剂的制备与优化中得到了广泛应用^[36-38]。本研究采用正交试验设计对菌剂菌株配比进行了优化,但结果发现所得菌系各功能特性的室内测定效果表现不一,对最佳配比的选择造成了困扰。但限于针对该问题尚缺乏统一的评价方法和标准,因此,引入 Topsis 综合分析法对菌系进行综合评价从而得到最优配比,盆栽及田间试验应用也表现出优良的功能效应,说明 Topsis 综合分析法适用于菌系组配优化。大量研究发现^[36,39],培养基质、温度、湿度、pH 等也是影响菌系功能效应的重要因素,关于该菌系其他优化培养条件亟须进一步明确。此外,复合菌系‘土微微 4 号’田间应用于辣椒根腐病、百合枯萎病、枸杞根腐病防治效果均与田间常用药剂相差不多,最佳用量下甚至优于田间常用药剂,验证其防治效应优良,具有极大的田间应用和推广潜力,但对其他作物的根腐类病害的防治效果仍待进一步探究。田间自然发病状态下根腐病等土传病害病原类型更为多样、病害成因也更

为复杂^[32,40],说明本研究筛选得到复合微生物菌剂具有广泛的抑菌谱,对除本研究优势病原之外的其他病原也可能具有优良的抑制效果,对其他致病因子也可能具有优良防治效应,具体仍需进一步试验验证。

国内外有关农用复合微生物菌剂的研究发现,单一菌剂存在对环境依赖性强、菌量需求大、效果发挥不稳定、有益特性谱范围小等缺点。而复合微生物菌剂用于病害绿色防控具有适用范围广、绿色、安全、高效的特点,在兼顾病害防控的同时,还可有效促进作物生长发育、增产提质,并能活化土壤养分、促进土壤养分周转、调理土壤微生态向健康演化等,是世界范围内的一大研究热点^[33,35]。本研究发现,复合微生物菌系对其根际土壤的影响较大,无论是番茄还是辣椒,在使用复合菌系‘土微微 4 号’后,其根际土壤速效养分碱解氮、速效磷、速效钾等含量均显著升高($P<0.05$),说明该微生物复合菌系能促进作物根际土壤中碱解氮、速效磷和速效钾的积累和释放,同时也证实了溶磷菌与固氮菌联合使用时,其溶磷效应进一步增强及有益土壤微生物对土壤养分有改良作用的理论^[41]。复合微生物菌剂的防病促生作用与植株根系土壤微生物群落的动态调整也密切相关,本研究发现施用复合菌系‘土微微 4 号’后,番茄及辣椒根际土壤细菌、放线菌数量显著增加,而真菌数量显著降低。究其原因,可能是本研究复合菌系中菌株均来源于本土,具有较强的定殖能力,能够充分适应植株根际土壤环境并大量繁殖。而细菌是植株根际土壤中丰度最高、数量最多、对土壤环境变化响应最为灵敏的微生物群落,其中有很多菌株具有防病促生效果,复合菌系施用后,其中的菌株可作为植株根际土壤微生物群落关键成员,刺激根际招募其他防病促生菌^[42]。同时接种的根腐病病

原真菌也能够刺激植株根际土壤中的防病促生细菌及放线菌富集以抵御其侵染^[43],以及土壤养分的改良有效增强了寄主植物的抗病能力^[44]。从而使植株根际土壤微生态得到了改善,并向健康方向演化,能够有效抑制病原真菌的生存、繁殖,故细菌和放线菌的数量增加,真菌数量降低。具体机制仍需进一步深入探究。

本研究发现,‘土微微 4 号’复合菌系对作物生长安全,田间应用于辣椒根腐病、百合枯萎病及枸杞根腐病均表现优良的防病促生性能,反映了该菌系较强的适应能力和稳定性^[40]。但不同梯度使用量对不同作物的效果表现不一,这可能与田间不同应用地区的气候、土壤等生态环境因素差异有关^[45],如兰州百合生长环境往往是海拔较高、气候凉爽、日照充足、土壤肥沃且排水良好,而靖远枸杞的土壤环境多以盐碱地为主,辣椒则种植面积广泛,不同的气候环境及种植模式下均有相应适宜的品种;也可能由于不同作物抗性差异所致,具体原因尚待探讨。除此之外,复合菌系应用后对植株的防病促生效果均有随施用量增加而提升的趋势,但用量过高效能不再增长或有所衰退,究其原因可能是菌剂的过量施用强烈干扰了土壤微生物群落结构,菌株定殖占据群落优势地位后大量繁殖,过高的养分需求与植株本身的营养吸收形成了竞争作用,并限制了其他有益微生物的生长、繁殖,削弱了微生物群落整体的功能效应^[39]。还可能由于菌株大量定殖后功能效应的发挥使得土壤养分过快释放而产生了一定的负面效应^[10]。因此,微生物菌剂田间应用及大面积推广前应充分考虑其剂量效应,既保证其功能效应的高效发挥,又避免能源的浪费。

4 结论

本研究优化得到复合微生物菌系菌株

SYP006:SYP033:SYP092:SYP202:SYP400 最佳配比为 4:2:3:1:4。该复合微生物菌系‘土微微 4 号’有良好防治根腐类病害、促进作物生长、增加作物产量、提升土壤养分、降低土壤盐碱含量、调节土壤微生态的作用；田间使用安全，最佳用量为 10 L/667 m²。本研究为我国西北地区本土化菌剂的研发及特色经济作物根腐类病害防控、土壤调理提供了绿色有效的技术手段。

REFERENCES

- [1] 李雪萍, 刘梅金, 许世洋, 郭建伟, 漆永红, 李敏权. 青稞普通根腐病的调查与病原鉴定[J]. 草业学报, 2021, 30(7): 190-198.
LI XP, LIU MJ, XU SY, GUO JW, QI YH, LI MQ. Investigation and pathogen identification of common root rot of Qingke barley (*Hordeum vulgare* var. *nudum*)[J]. Acta Prataculturac Sinica, 2021, 30(7): 190-198 (in Chinese).
- [2] 李雪萍, 李敏权, 许世洋, 刘梅金, 漆永红, 李建军, 李晓蓉. 青稞镰孢根腐病原鉴定及致病性分析[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(9): 1149-1161.
LI XP, LI MQ, XU SY, LIU MJ, QI YH, LI JJ, LI XR. Pathogens identification and pathogenicity analysis of *Fusarium* root rot on naked barley[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(9): 1149-1161 (in Chinese).
- [3] 金哲雄, 廖薇, 张闯, 黄有军, 吴酬飞, 仇智灵, 苏秀, 林海萍. 引起山核桃干腐病的镰刀菌鉴定[J]. 植物病理学报, 2024, 54(2): 443-446.
JIN ZX, LIAO W, ZHANG C, HUANG YJ, WU CF, QIU ZL, SU X, LIN HP. Identification of *Fusarium oblongum* causing trunk canker disease on *Carya cathayensis*[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2024, 54(2): 443-446 (in Chinese).
- [4] 杨波, 王喜刚, 郭成瑾, 沈瑞清. 引起青海省马铃薯根腐类病害的镰刀菌种类鉴定[J]. 植物病理学报, 2019, 49(3): 420-423.
YANG B, WANG XG, GUO CJ, SHEN RQ. Identification of some *Fusarium* species associated with potato root rot in Qinghai Province[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2019, 49(3): 420-423 (in Chinese).
- [5] GARCIA-ESTRADA RS, MARQUEZ I, OSUNA-GARCIA LA, TOVAR-PEDRAZA JM, CRUZ-LACHICA I. First report of *Ralstonia pseudosolanacearum* causing wilt disease in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants from Mexico[J]. Plant Disease, 2023. DOI: 10.1094/PDIS-08-22-1838-PDN.
- [6] 李雪萍, 李建宏, 漆永红, 郭成, 李潇, 李敏权. 青稞微座孢根腐病原鉴定[J]. 植物病理学报, 2019, 49(5): 705-710.
LI XP, LI JH, QI YH, GUO C, LI X, LI MQ. Identification of the pathogens causing *Microdochium* root rot on naked barley[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2019, 49(5): 705-710 (in Chinese).
- [7] 李雪萍, 许世洋, 李建军, 张怡忻, 漆永红, 汪学苗, 蒋晶晶, 范雨轩, 李敏权. 一种由粉红粘帚霉引起的青稞根腐病[J]. 微生物学通报, 2022, 49(2): 598-605.
LI XP, XU SY, LI JJ, ZHANG YX, QI YH, WANG XM, JIANG JJ, FAN YX, LI MQ. First report of root rot on naked barley (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. f.) caused by *Clonostachys rosea* in Qinghai-Xizang Plateau, China[J]. Microbiology China, 2022, 49(2): 598-605 (in Chinese).
- [8] SHAH GS, RUSTAMANI MA, KHUHRO RD, RAJPUT NA, LODHI AM. First report of root rot of spinach caused by *Pythium aphanidermatum* in Pakistan[J]. Journal of Plant Pathology, 2021, 103(4): 1369-1370.
- [9] 许世洋, 李敏权, 刘梅金, 徐冬丽, 漆永红, 周兰兰, 汪学苗, 李凤庆, 李雪萍. 青稞根腐病防病促生细菌的筛选及其菌剂防效[J]. 微生物学通报, 2022, 49(7): 2575-2586.
XU SY, LI MQ, LIU MJ, XU DL, QI YH, ZHOU LL, WANG XM, LI FQ, LI XP. Screening of bacteria with biocontrol effects against naked barley root rot accompany with plant growth-promoting properties and the biocontrol effects of the bacterial inoculant[J]. Microbiology China, 2022, 49(7): 2575-2586 (in Chinese).
- [10] 周益帆, 白寅霜, 岳童, 李庆伟, 黄艳娜, 蒋玮, 何川, 王金斌. 植物根际促生菌促生特性研究进展[J]. 微生物学通报, 2023, 50(2): 644-666.
ZHOU YF, BAI YS, YUE T, LI QW, HUANG YN, JIANG W, HE C, WANG JB. Research progress on the growth-promoting characteristics of plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Microbiology China, 2023, 50(2): 644-666 (in Chinese).
- [11] SHAFI J, TIAN H, JI MS. *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: a review[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2017, 31(3): 446-459.
- [12] NORDGAARD M, BLAKE C, MARÓTI G, HU GH, WANG Y, STRUBE ML, KOVÁCS ÁT. Experimental evolution of *Bacillus subtilis* on *Arabidopsis thaliana* roots reveals fast adaptation and improved root colonization[J]. iScience, 2022, 25(6): 104406.
- [13] LEE G, CHOI H, LIU HF, HAN YH, PAUL NC, HAN GH, KIM H, KIM PI, SEO SI, SONG J, SANG H. Biocontrol of the causal brown patch pathogen *Rhizoctonia solani* by *Bacillus velezensis* GH1-13 and development of a bacterial strain specific detection method[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1091030.
- [14] GHAZALA I, CHIAB N, SAIDI MN, GARGOURI-BOUZID R. Volatile organic compounds from *Bacillus mojavensis* I4 promote plant growth and inhibit phytopathogens[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2022, 121: 101887.
- [15] TSALGATIDOU PC, THOMLOUDI EE, DELIS C, NIFAKOS K, ZAMBOUNIS A, VENIERAKI A, KATINAKIS P. Compatible consortium of endophytic *Bacillus halotolerans* strains Cal.130 and Cal.f.4 promotes plant growth and induces systemic resistance against *Botrytis cinerea*[J]. Biology, 2023, 12(6): 779.
- [16] SAVARESE C, COZZOLINO V, VERRILLO M, VINCI G, de MARTINO A, SCOPA A, PICCOLO A. Combination of humic biostimulants with a microbial inoculum improves lettuce productivity, nutrient uptake,

- and primary and secondary metabolism[J]. *Plant and Soil*, 2022, 481(1): 285-314.
- [17] DAWWAM GE, SEHIM AE. Promising biological agents represented in *Bacillus velezensis* 33RB and *Aspergillus niger* 46SF endophytic isolates for controlling *Populus tomentosa* wilt and anthracnose diseases[J]. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 2022, 32(1): 144.
- [18] 赵璐, 刘胜, 胡同乐, 王亚南, 王树桐, 曹克强. 复合微生物菌剂对苹果再植病害的生防效果测定及拮抗菌株鉴定[J]. *植物保护学报*, 2019, 46(1): 208-215. ZHAO L, LIU S, HU TL, WANG YN, WANG ST, CAO KQ. Determination for control effect of microbial manure against apple replant disease and the identification of antagonistic strain against *Fusarium oxysporum*[J]. *Journal of Plant Protection*, 2019, 46(1): 208-215 (in Chinese).
- [19] DENG L, WANG T, LUO W, HE LY, LIANG ZS. Effects of a compound microbial agent and plants on soil properties, enzyme activities, and bacterial composition of Pisha sandstone[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(38): 53353-53364.
- [20] 许世洋, 范雨轩, 汪学苗, 张怡忻, 柴继宽, 李建军, 李敏权, 漆永红, 李雪萍. 辣椒镰孢根腐病促生细菌的筛选及其效应[J]. *微生物学报*, 2022, 62(7): 2735-2750. XU SY, FAN YX, WANG XM, ZHANG YX, CHAI JK, LI JJ, LI MQ, QI YH, LI XP. The *Fusarium* root rot-controlling effect and growth-promoting effect of the bacteria in the rhizosphere of *Capsicum annum*[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(7): 2735-2750 (in Chinese).
- [21] 李雪萍, 张怡忻, 李建军, 许世洋, 漆永红, 荆卓琼, 郭致杰, 李敏权. 兰州百合防病促生细菌筛选及其效果评价[J]. *中国生物防治学报*, 2022, 38(5): 1296-1307. LI XP, ZHANG YX, LI JJ, XU SY, QI YH, JING ZQ, GUO ZJ, LI MQ. Screening of disease-control and growth-promoting bacteria and their effects on Lanzhou lily[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(5): 1296-1307 (in Chinese).
- [22] 王国琴, 杜雪倩, 马聪, 朱滕滕, 郑蕊, 岳思君. 枸杞根腐病原菌鉴定及其拮抗菌的筛选[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(6): 245-253. WANG GQ, DU XQ, MA C, ZHU TT, ZHENG R, YUE SJ. Identification of the pathogen causing root rot of *Lycium barbarum* and screening of antagonists[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(6): 245-253 (in Chinese).
- [23] 李潇, 李雪萍, 漆永红, 郭成, 李敏权. 番茄颈腐根腐病原鉴定及其品种抗性鉴定[J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(5): 121-127. LI X, LI XP, QI YH, GUO C, LI MQ. Identification and variety resistance of the pathogen of tomato crown and root rot[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(5): 121-127 (in Chinese).
- [24] 李雪萍, 许世洋, 李建军, 李敏权, 郭致杰, 漆永红, 荆卓琼, 马佳勇. 一种复合微生物, 复合微生物菌剂和应用: ZL202210583480.3[P]. 2023-04-14. LI XP, XU SY, LI JJ, LI MQ, GUO ZJ, QI YH, JING ZQ, MA JY. A compound microorganism, composite microbial agent and its application: ZL202210583480.3[P]. 2023-04-14 (in Chinese).
- [25] 曲春鹤, 何付丽, 刘培福, 纪明山, 赵长山, 高黎力. 辣椒根腐病拮抗细菌的筛选、鉴定及其抑菌促生作用[J]. *东北农业大学学报*, 2012, 43(7): 89-94. QU CH, HE FL, LIU PF, JI MS, ZHAO CS, GAO LL. Selection and identification of antagonistic bacteria against *Fusarium solani* and its effect[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 43(7): 89-94 (in Chinese).
- [26] 杨莱, 高婷, 李滢璟, 魏崇瑶, 高森, 马莲菊. 辣椒根际促生菌的分离筛选及抗病促生特性研究[J]. *生物技术通报*, 2020, 36(5): 104-109. YANG M, GAO T, LI YJ, WEI CY, GAO M, MA LJ. Isolation and screening of plant growth-promoting rhizobacteria in pepper and their disease-resistant growth-promoting characteristics[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2020, 36(5): 104-109 (in Chinese).
- [27] 唐继伟, 李娟, 车升国, 徐久凯, 田昌玉, 林治安, 赵秉强. 长期单施不同量化肥和有机肥后盐化潮土 pH 和 EC 的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(8): 1300-1307. TANG JW, LI J, CHE SG, XU JK, TIAN CY, LIN ZA, ZHAO BQ. Changes in pH and EC of salinized fluvo-aquic soil after long-term application of chemical or organic fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(8): 1300-1307 (in Chinese).
- [28] 李生仪, 孙延亮, 赵俊威, 刘选帅, 赵建涛, 马春晖, 张前兵. 施氮对苜蓿根际土壤微生物数量、酶活性及干草产量的影响[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(4): 113-120. LI SY, SUN YL, ZHAO JW, LIU XS, ZHAO JT, MA CH, ZHANG QB. Effects of nitrogen addition on microbial quantity, enzyme activity in rhizosphere soil and alfalfa hay yield[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(4): 113-120 (in Chinese).
- [29] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 农药-田间药效试验准则(一)——杀菌剂防治番茄早疫病和晚疫病: GB/T 17980.32—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Pesticide-Guidelines for the field efficacy trials (I) – Fungicides against early and late blight of tomato: GB/T 17980.32—2000[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000 (in Chinese).
- [30] 杨珍, 戴传超, 王兴祥, 李孝刚. 作物土传真菌病害发生的根际微生物机制研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 12-22. YANG Z, DAI CC, WANG XX, LI XG. Advance in research on rhizosphere microbial mechanisms of crop soil-borne fungal diseases[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 12-22 (in Chinese).
- [31] 李超楠, 李洪涛, 李运朝, 李俊花, 及华, 章丽, 王琳. 苍术根腐病及其防治研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(12): 2840-2846. LI CN, LI HT, LI YC, LI JH, JI H, ZHANG L, WANG L. Research progress and control of root rot in *Atractylodes lancea*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(12): 2840-2846 (in Chinese).
- [32] 陈晓霞, 于红豆, 李梦玮, 李婧怡, 徐彬弘, 张楠楠, 石福孙. 基于文献计量分析的根腐病研究现状及趋势[J]. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(3): 623-632.

- CHEN XX, YU HD, LI MW, LI JY, XU BH, ZHANG NN, SHI FS. Research status and trends on root rot based by bibliometrics analysis[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2024, 30(3): 623-632 (in Chinese).
- [33] 赵思崎, 王敬敬, 杨宗政, 李晴晴, 杨榕, 赵维, 徐松, 朱丹, 黄志勇. 微生物复合菌剂的制备[J]. 微生物学通报, 2020, 47(5): 1492-1502.
ZHAO SQ, WANG JJ, YANG ZZ, LI QQ, YANG R, ZHAO W, XU S, ZHU D, HUANG ZY. Preparation of microbial compound agents[J]. Microbiology China, 2020, 47(5): 1492-1502 (in Chinese).
- [34] 黄慧婧, 罗坤. 芽孢杆菌与杀菌剂复配防治植物病害的研究进展[J]. 微生物学通报, 2021, 48(3): 938-947.
HUANG HJ, LUO K. Research progress in the control of plant diseases by the combination of *Bacillus* and fungicides[J]. Microbiology China, 2021, 48(3): 938-947 (in Chinese).
- [35] 韩文明, 章法源. 微生物菌剂在农业生产中的应用研究[J]. 农业科技通讯, 2023(11): 154-157.
HAN WM, ZHANG F. Research on the application of microbial inoculants in agricultural production[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2023(11): 154-157 (in Chinese).
- [36] 马佳勇, 李雪萍, 李建军, 漆永红, 许世洋. 抗镰孢菌根腐类病害复合微生物菌剂培养基及发酵工艺优化[J]. 中国酿造, 2023, 42(11): 215-223.
MA JY, LI XP, LI JJ, QI YH, XU SY. Optimization of medium and fermentation process of compound microbial agent against *Fusarium* root rot disease[J]. China Brewing, 2023, 42(11): 215-223 (in Chinese).
- [37] 王呈玉, 温芳悦, 萧龙珍, 崔俊涛, 赵成爱, 刘淑霞. 溶磷菌剂发酵工艺条件的优化及其促生效果[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(4): 408-413.
WANG CY, WEN FY, XIAO LZ, CUI JT, ZHAO CA, LIU SX. Optimization of fermentation conditions for phosphate-solubilizing microbial inoculants and their growth promoting effect[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2019, 41(4): 408-413 (in Chinese).
- [38] JI LJ, SI YF, LIU HF, SONG XL, ZHU W, ZHU AP. Application of orthogonal experimental design in synthesis of mesoporous bioactive glass[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2014, 184: 122-126.
- [39] WANG M, LIU Y, WANG S, WANG K, ZHANG Y. Development of a compound microbial agent beneficial to the composting of Chinese medicinal herbal residues[J]. Bioresource Technology, 2021, 330: 124948.
- [40] 杨秀梅, 王继华, 王丽花, 吴学尉, 彭绿春, 瞿素萍. 百合枯萎病病原鉴定与ITS序列分析[J]. 西南农业学报, 2010, 23(6): 1914-1916.
YANG XM, WANG JH, WU LH, WU XW, PENG LC, QU SP. Identification and its sequence analysis of pathogen of lily wilt[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2010, 23(6): 1914-1916 (in Chinese).
- [41] ELHAISSOUFI W, GHOULAM C, BARAKAT A, ZEROUAL Y, BARGAZ A. Phosphate bacterial solubilization: a key rhizosphere driving force enabling higher p use efficiency and crop productivity[J]. Journal of Advanced Research, 2022, 38: 13-28.
- [42] SANTOYO G. How plants recruit their microbiome? New insights into beneficial interactions[J]. Journal of Advanced Research, 2022, 40: 45-58.
- [43] 杨林桦, 杜晓雪, 张佳宁, 谢田朋, 杨涛. 病原菌胁迫下植物“呼救”策略的研究进展[J]. 微生物学通报, 2025, 52(1): 17-32.
YANG LH, DU XX, ZHANG JN, XIE TP, YANG T. Research progress in the “cry for help” strategy of plants under pathogen stress[J]. Microbiology China, 2025, 52(1): 17-32 (in Chinese).
- [44] 刘京伟, 李香真, 姚敏杰. 植物根际微生物群落构建的研究进展[J]. 微生物学报, 2021, 61(2): 231-246.
LIU JW, LI XZ, YAO MJ. Research progress on assembly of plant rhizosphere microbial community[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, 61(2): 231-246 (in Chinese).
- [45] 邓振镛, 张强, 孙兰东, 王润元, 刘明春, 姚晓英, 徐金芳. 甘肃特种作物对气候暖干化的响应特征及适应技术[J]. 中国农学通报, 2012, 28(15): 112-121.
DENG ZY, ZHANG Q, SUN LD, WANG RY, LIU MC, YAO XY, XU JF. Response characteristics of climatic hot-drying on special crops and adaptive technique in Gansu Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(15): 112-121 (in Chinese).