

甘青特殊生境作物根腐类病害防病促生复合菌系构建

李雪萍¹, 马佳璇², 许世洋³, 孟欢², 李建军¹, 漆永红^{1*}

1 甘肃省农业科学院植物保护研究所 甘肃 兰州

2 甘肃农业大学 植物保护学院 甘肃 兰州

3 兰州大学 草地农业科技学院 甘肃 兰州

李雪萍, 马佳璇, 许世洋, 孟欢, 李建军, 漆永红. 甘青特殊生境作物根腐类病害防病促生复合菌系构建[J]. 微生物学报, 2025, 65(5): 1976-1994.

LI Xueping, MA Jiaxuan, XU Shiyang, MENG Huan, LI Jianjun, QI Yonghong. Construction of bacterial consortia for preventing root rot and promoting growth of crops cultivated in unique agro-ecosystems of Gansu and Qinghai Provinces[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2025, 65(5): 1976-1994.

摘要:【目的】为甘肃省和青海省特殊生境作物根腐类病害提供绿色安全有效的防治措施。【方法】通过平板对峙法及孟金娜平板法对 305 株供试细菌进行初筛, 对初筛得到的菌株利用发酵液法复筛, 然后采用凯氏定氮法、紫外分光光度计法、火焰分光光度计法分别测定复筛后优良菌株的固氮、溶磷、解钾、分泌吲哚-3-乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)、分泌铁载体、耐酸、耐碱及耐盐特性。最后针对甘肃省和青海省不同作物根腐类病害病原, 将不同功能优良菌株进行复配构建防病促生复合菌系, 测定其促生特性及抑菌能力, 筛选得到最优复合菌系, 分析其所涉及菌株的 16S rRNA 基因及 *gyrB* 基因序列, 确定各菌株的分类地位, 并通过盆栽法测定其防病促生作用。【结果】共筛选得到拮抗菌 86 株、溶磷菌 134 株。复筛得到拮抗菌 20 株, 其中 K87、LB17 等菌株抑菌效果良好且抑菌谱广。K87 对燕麦镰孢、木贼镰孢、尖镰孢、茄镰孢、微座孢的抑菌率分别为 87.53%、74.90%、75.15%、79.69%、88.43%; LB17 对尖镰孢、茄镰孢、麦根腐平脐蠕孢的抑菌率分别为 61.89%、87.52%、87.23%。对 8 株优良菌促生能力的测定发现: LB17 分泌铁载体能力最强, 铁载体活性单位(*su*)值为 0.32; K113 固氮性能较好, 固氮量为 0.08 g/L; K87 分泌 IAA 量最高, 达 9.87 mg/L; MP6 溶无机磷量最大, 为 1 470.69 $\mu\text{g/mL}$; K85 溶有机磷效果最好, 溶磷量为 1 321.23 $\mu\text{g/mL}$; MP41 解钾性能最好, 解钾量为 140.33 mg/L。最终构建形成优良复合菌系 14 组, 其中复合菌系 T2 综合性能最优, 固氮量为 0.212 g/L, 解钾量为 86.28 mg/L, 分泌 IAA 量为 16.91 mg/L, 对 6 种病原真菌的抑菌率均大于 60.00%, 对木贼镰孢的抑菌率为 87.69%。所涉及菌株 LB17、K87、MP6 均被鉴定为贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus*

资助项目: 甘肃省农业科学院重点研发计划(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 (2023GAAS22) and the National Natural Science Foundation of China (32060037).

*Corresponding author. E-mail: qiyonghong920@gsag.cn

Received: 2024-10-30; Accepted: 2025-02-20; Published online: 2025-04-02

velezensis), 对青稞根腐类病害的防效均在 70.00% 以上, 且促生效果明显。【结论】本研究构建形成了一种甘青特殊生境作物根腐类病害高效防病促生复合菌系。

关键词: 根腐病; 生防菌; 促生菌; 复合菌系; 青稞; 兰州百合

Construction of bacterial consortia for preventing root rot and promoting growth of crops cultivated in unique agro-ecosystems of Gansu and Qinghai Provinces

LI Xueping¹, MA Jiaxuan², XU Shiyang³, MENG Huan², LI Jianjun¹, QI Yonghong^{1*}

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

2 College of Plant Protection, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu, China

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

Abstract: [Objective] To provide environmental sustainable, safe, and efficacious management approaches for root rot impacting a range of crops in the unique agro-ecosystems of Gansu and Qinghai Provinces. [Methods] The plate confrontation method and the organophosphorus agar plate were used for preliminary screening of 305 strains of tested bacteria, and the strains obtained from preliminary screening were re-screened with the fermentation broth method. Subsequently, the nitrogen-fixing, phosphate-solubilizing, and potassium-solubilizing abilities of the strains were determined by the Kjeldahl method, ultraviolet spectrophotometry, and flame photometry, respectively. The siderophore-producing activity, the IAA content in the fermentation broth, as well as the acid, alkali, and salt tolerance of the strains, were determined by spectrophotometric methods. Finally, targeting the pathogens causing root rot in various crops in Gansu and Qinghai Provinces, bacterial consortia were constructed with different functional strains for disease prevention and plant growth promotion. The plant growth-promoting and antifungal effects of different consortia were evaluated, and the best consortium was selected. Furthermore, the 16S rRNA gene and *gyrB* of the strains in the best consortia were sequenced for identification. The root rot-preventing and plant growth-promoting effects of the best consortium were evaluated by the pot culture method. [Results] A total of 86 antagonistic strains and 134 phosphate-solubilizing strains were preliminarily screened out, and 20 antagonistic strains were selected after re-screening, among which strains K87 and LB17 demonstrated excellent broad-spectrum antifungal effects. Specifically, K87 showed inhibition rates of 87.53%, 74.90%, 75.15%, 79.69%, and 88.43% against *Fusarium avenaceum*, *F. equiseti*, *F. oxysporum*, *F. solani*, and *Microdochium bolleyi*, respectively. LB17 exhibited inhibition rates of 61.89%, 87.52%, and 87.23% against *F. oxysporum*, *F. solani*, and *Bipolaris sorokiniana*, respectively. Among the 8 strains with superior plant growth-promoting abilities, LB17 had the strongest siderophore-producing activity, with an iron carrier activity unit (*su*) value of 0.32, and K113 exhibited a good nitrogen-fixing capability, fixing nitrogen at a rate of 0.08 g/L. K87 secreted the highest amount of IAA, which reached 9.87 mg/L.

MP6 had the greatest ability to solubilize inorganic phosphorus, with a solubilization rate of 1 470.69 $\mu\text{g/mL}$, while K85 showed the best performance in solubilizing organic phosphorus, with a solubilization rate of 1 321.23 $\mu\text{g/mL}$. MP41 excelled in potassium solubilization, with a solubilization rate of 140.33 mg/L . Ultimately, 14 bacterial consortia were constructed, in which T2 exhibited the best synthetic performance, with a nitrogen-fixing rate of 0.212 g/L , a potassium solubilization rate of 86.28 mg/L , and an IAA secretion rate of 16.91 mg/L . Moreover, its inhibition rates against the 6 pathogenic fungi all reached over 60.00%, and even 87.69% against *F. equiseti*. Strains LB17, K87, and MP6 in this consortium were all identified as *Bacillus velezensis*. T2 demonstrated significant biocontrol efficacy against root rot in naked barley, with the control effects exceeding 70.00%, and exhibited remarkable plant growth-promoting properties. **[Conclusion]** This study developed an efficient bacterial consortium for the management of crop root rot and the promotion of crop growth in the unique agro-ecosystems in Gansu and Qinghai Provinces.

Keywords: root rot; biocontrol bacteria; plant growth-promoting bacteria; bacterial consortia; naked barley; Lanzhou lily

甘青(甘肃省、青海省)地区海拔高,光照充足,年均温度低,温差大,适合青稞、百合以及各种高原夏菜的种植及生长^[1]。其中,青稞喜凉耐寒,在甘肃省甘南藏族自治州、青海省西宁市周边、海北州、海南州、海西州、黄南州、玉树州和果洛州均有分布^[2-3]。其营养价值丰富,具有提高人体免疫力预防心脑血管疾病等功效,是当地藏区人民的主要粮饲作物^[4]。兰州百合喜冷凉湿润,主要分布在兰州市及周边地区,其口感甜美酥脆,具有降低视觉疲劳、抗氧化、调节人体免疫系统、稳定血糖等功效,是著名的保健食品^[5-8]。辣椒、番茄是甘肃省高原夏菜的主要品类,对菜农增收的贡献率超过 60%,是当地农村的支柱产业^[9-10]。然而,由于甘青地区多山脉,农业区面积占比小,甘肃省和青海省的耕种面积的分别占全省面积 12.62%^[11]和 2.84%^[12],连作现象严重,根腐类等土传病害易发。

根腐类病害在青稞上发生普遍。研究发现,镰孢根腐病^[13-14]、普通根腐病^[15]、微座孢根腐病^[16]、粉红粘帚霉根腐病^[17]是甘青地区青稞根腐病的 4 种常见类型。镰孢根腐病分布最广泛且病原种类多样,平均发病率约 20%,其优势病原为燕麦镰孢(*Fusarium avenaceum*)和木贼镰孢(*Fusarium equiseti*)^[13-14]。普通根腐病的平均发

生率为 5%–15%,优势病原为麦根腐平脐蠕孢(*Bipolaris sorokiniana*)^[15]。微座孢根腐病和粉红粘帚霉根腐病的病原分别为微座孢(*Microdochium bolleyi*)和粉红粘帚霉(*Clonostachys rosea*),仅在青海地区零星发病,但危害严重,致死率可达 100%^[16-17]。百合根腐类病害危害严重且隐蔽,包括枯萎病和根腐病 2 种常见病害类型。枯萎病分布广泛,发病率较高,部分地区发病率达到 70% 以上^[18],尖镰孢(*Fusarium oxysporum*)常为优势病原类群,致病性较强^[19]。百合根腐病的发生率多在 25% 左右,其中茄镰孢百合专化型为百合根腐病的优势病原^[20]。辣椒、番茄等蔬菜的根腐病发生率普遍在 20%–30% 之间,辣椒感染根腐病后,严重时产量减少 60% 以上;番茄感染根腐病后普遍减产 60%–90%,甚至造成绝产^[21],其优势病原均为尖镰孢和茄镰孢。

利用微生物菌剂防治根腐类病害是当前主要的生物防治手段,根据复合方式不同可分为微生物菌剂和复合微生物菌剂^[22]。微生物菌剂可直接或间接改善土壤营养状况,防治土传性病害,提高根系对养分的吸收利用,从而提高作物品质和产量^[23-24]。吕亮雨等^[25]发现,施用微生物菌剂后土壤有机质含量提高,作物吸收

利用碱解氮、速效磷、速效钾等元素的能力大幅提高。Tu 等^[26]研究发现, 解淀粉芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌对百合枯萎病的防治效果良好, 分别可达 58.74% 和 68.93%。复合微生物菌剂由几种特定功能的有益微生物组成, 在维持根际土壤生态环境平衡的同时, 提高了微生物多样性和群落稳定性, 进一步提高了病害抑制率^[27-30]。丁钱华^[31]研究发现, 枯草芽孢杆菌、胶冻样芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌单菌株分别对小麦根腐病的防效为 23.7%、39.7%、9.6%, 制成复合菌剂后防效可达 68.9%, 远高于单一菌剂。卯婷婷等^[32]研究发现, 复合菌剂(枯草芽孢杆菌+粉红粘帚霉)对辣椒枯萎病的防效可达 60.5%。王子凡等^[33]研究发现, 施用复合微生物菌剂可显著提高土壤中的微生物数量, 土壤细菌群落增加 136.32%。然而, 微生物菌剂多为活菌产品, 具有地域性, 引进菌剂难以适应且稳定性差, 针对甘青特殊区域特色作物的本土复合微生物菌剂研究较少。鉴于此, 本研究针对甘青特殊生境作物青稞、兰州百合、辣椒及番茄等筛选防病促生菌株, 研究优良菌株的固氮、溶磷、解钾、分泌吲哚-3-乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)及铁载体等促生特性, 以及耐酸、耐碱和耐盐能力, 选取最优菌株明确其互作效应, 针对不同作物不同病原构建复合菌系, 并测定其防病促生功能, 综合评价得到最优复合菌系, 为甘青地区特殊生境作物根腐类病害的防控提供有效的菌剂配方及菌种资源。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 病原真菌

燕麦镰孢(*Fusarium avenaceum*)、木贼镰孢(*Fusarium equiseti*)、尖镰孢(*Fusarium oxysporum*)、茄镰孢(*Fusarium solani*)、麦根腐平脐蠕孢(*Bipolaris sorokiniana*)、微座孢(*Microdochium bolleyi*), 均来源于甘肃省农业科

学院植物保护研究所经济作物病害研究室。

1.1.2 供试菌株

305 株供试菌株, 均为甘肃省农业科学院植物保护研究所经济作物病害研究室自主分离保藏, 分离自青稞、百合、番茄、辣椒根际及根际土壤。

1.1.3 培养基

LB 培养基、PDA 培养基(potato dextrose agar)、PKO 无机磷培养基(Pikovaskaia's)、蒙金娜有机磷培养基、NFM 无氮培养基(nitrogen free medium)和钾长石培养基参考文献[34]配制; King's B 培养基参考文献[35]配制。上述培养基中不加入琼脂即为其培养液。

1.2 防病促生菌初筛

分别将供试病原真菌及防病促生菌活化后, 采用平板对峙法^[36]对拮抗菌进行初筛。将已活化的病原真菌菌饼($d=0.6$ cm)接种于 PDA 培养基中央, 同时在四周等距离处接种已活化的细菌, 置于 25 °C 恒温培养箱中培养 7 d 后, 测定抑菌圈直径。同时将已活化的细菌接种于蒙金娜有机磷平板, 5 d 后观察是否产生溶磷圈, 并测定溶磷圈直径^[36]。

1.3 菌株复筛

参考李雪萍等^[36]方法, 将筛选得到的同时具有拮抗和溶磷能力的菌株接入 LB 培养液中, 30 °C、180 r/min 摇床培养 48 h 后, 将菌液装入 10 mL 离心管中, 4 °C、12 000 r/min 离心 10 min, 用无菌针管(10 mL)吸取上清液 1 mL, 经 0.22 μ m 微孔滤膜过滤后, 滤液涂布于 PDA 平板上, 制成带毒平板, 并以未涂布无菌发酵液的 PDA 平板作为对照, 分别接入供试病原真菌(菌饼直径 0.6 cm), 每处理 3 重复, 于 25 °C 下恒温培养 7 d 后, 测量病原菌菌落直径, 计算生长抑制率^[36], 如公式(1)所示。

生长抑制率=(对照平板病原菌菌落直径-带毒平板病原菌菌落直径)/(对照平板菌落直径-接入菌饼直径) $\times 100\%$ (1)

1.4 优良菌株促生特性测定

选取 1.3 中抑菌率最为优良的菌株, 活化后接入 LB 培养液中, 30 °C、180 r/min 摇床培养 48 h 后, 按照许世洋等^[34]的方法, 采用钼锑抗比色法测定磷含量、凯氏定氮法测定氮含量、火焰分光光度法测定可溶性钾含量; 参考韦鑫等^[37]的方法, 采用分光光度计法测定铁载体活性, 如公式(2)所示; 培养 5 d 后, 参考程鑫宇等^[35]方法, 采用紫外分光光度计法测定发酵液中 IAA 的含量。

$$\text{铁载体活性单位}(su)=[(A_r-A_s)/A_r] \quad (2)$$

式中: A_r 为不接菌培养液吸光值, A_s 为接菌培养后处理组吸光值。

1.5 优良菌株耐酸、耐碱及耐盐特性

参考王艳霞等^[38]的方法, 对筛选得到的菌株进行活化, 取 1 mL 活化后 OD_{660} 值 ≥ 0.5 的菌液, 分别接入 pH 为 3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0、11.0、12.0 的培养液中, 以及盐(NaCl)浓度为 1%、5%、10%、15%、20% 的 LB 培养液中, 30 °C、180 r/min 摇床培养 48 h, 采用分光光度法测定各菌液 OD_{660} 值。

1.6 防病促生复合菌系的构建与筛选

采用两两十字划线法^[34]测定优良菌株之间是否存在拮抗作用。针对不同病原选取互相无拮抗作用且功能不同的菌株进行组合形成不同的复合菌系配方。根据各配方取 1 mL 活化后 OD_{660} 值 ≥ 0.5 的菌液, 按照体积比 1:1 接入三角瓶中(装液量 100 mL/250 mL), 30 °C、180 r/min 摇床培养 48 h, 形成复合菌系, 每菌系 3 重复。按照 1.4 的方法测定各复合菌系的溶磷量、固氮量、解钾量、分泌 IAA 及分泌铁载体能力, 进行综合分析得到优良复合菌系。最后按照菌株复筛的方法测定优良复合菌系的抑菌能力, 确定抑菌能力最强的菌系为最优复合菌系。

1.7 最优复合菌系菌种鉴定

采用 DNA 提取试剂盒(Bacterial DNA Kit, Omega Bio-tek 公司), 按照其说明书提取筛选得

到的最优复合菌系所涉及菌株的 DNA, 16S rRNA 基因通用引物(27F: 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'; 1492R: 5'-TACGGCTACCTTGTTACGACTT-3'), *gyrB* 引物(F: 5'-GAAGTCATCATGACCGTTCTGCAYGCNGGNGGNAARTTYGA-3'; R: 5'-AGCAGGGTACGGATGTGCGAGCCRTCNCNACRTCNGCRTCNGTCAT-3') 进行 PCR 扩增^[39]。PCR 反应体系(25 μ L): 正、反向引物(10 μ mol/L)各 1 μ L, DNA 模板 1 μ L, 2 $\times$ PCR Mix 12.5 μ L, ddH₂O 9.5 μ L。PCR 反应程序: 94 °C 预变性 3 min; 94 °C 变性 30 s, 55 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 30 s, 共 35 个循环; 72 °C 终延伸 10 min。经 1% 琼脂糖凝胶电泳检测合格后, 委托生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。将测序结果在 NCBI 中进行 BLAST 同源性比对, 选取相似序列及外源基因序列, 利用 MEGA 11.0 软件中的邻接法构建系统发育树, 并以 Bootstrap 1 000 重复检验其可信度。

1.8 最优复合菌系的防病促生作用

以青稞镰孢根腐病、微座孢根腐病及普通根腐病为靶标, 采用盆栽法对最优复合菌系 T2 的防病促生作用进行测定, 参考李雪萍等^[13]的方法对青稞进行催芽处理及移栽, 生长 10 d 后, 挑选长势相近的青稞幼苗并标记。设置 6 个处理: 对照组 CK1 (燕麦镰孢+木贼镰孢灌根)、CK2 (微座孢灌根)、CK3 (麦根腐平脐蠕孢灌根) 及处理组 M1 (T2 复合菌系+燕麦镰孢+木贼镰孢灌根)、M2 (T2 复合菌系+微座孢灌根)、M3 (T2 复合菌系+麦根腐平脐蠕孢灌根), 每处理 3 重复, 每重复 10 株, 各处理接入病原菌孢子悬浮液 30 mL (孢子浓度为 2×10^6 CFU/mL)。4 d 后, CK1、CK2、CK3 用 LB 培养液灌根(30 mL/株), M1、M2、M3 用 4×10^8 CFU/mL 的复合菌系 T2 发酵液灌根(30 mL/株)。10 d 后统计病情指数、株高、茎粗等指标。参考文献[13,15-16]的分级标准, 计算病情指数和防效, 如公式(3)和公式(4)所示。

$$\text{病情指数} = \sum (\text{病级株数} \times \text{代表数值}) / \text{株数总和} \times \text{发病最重级的代表数值} \times 100 \quad (3)$$

防效=(对照组发病率-处理组发病率)/对照组发病率 $\times 100\%$ (4)

1.9 数据统计与分析

采用 Excel 软件进行数据整理及作图, 使用 DPS15.2 软件进行方差分析(Duncan's 检验)和综合分析(Topsis 法)^[34]。

2 结果与分析

2.1 菌株初筛

2.1.1 拮抗菌初筛

如表 1 所示, 共筛选得到拮抗菌 86 株。其中, 15 株菌对燕麦镰孢的拮抗效果较好, K87 的抑菌圈直径最大, 为 15.28 mm, 其余菌株的抑菌圈直径在 8.78–15.11 mm 之间。53 株菌对木贼镰孢的拮抗效果较好, 其中 21 株的抑菌圈直径大于 30 mm, 超过 59% 的拮抗菌株对其他病原也表现出不同程度的拮抗作用。27 株菌对尖镰孢的拮抗效果较好, 抑菌圈直径范围在 22.48–33.16 mm 之间。35 株菌对茄镰孢拮抗效果较好, 抑菌圈直径最大可达 38.52 mm, 最小为 10.8 mm, 拮抗能力差异较大。仅 6 株菌对麦根腐平脐蠕孢的拮抗效果较好, 抑菌圈直径范围在 12.70–21.71 mm 之间, 且这 6 株菌对本研究中的其余 3 种以上病原菌均有拮抗效果。32 株菌对微座孢的拮抗效果较好, 抑菌圈直径最大为 30.99 mm, 最小为 16.94 mm。图 1 为部分拮抗菌的拮抗效果图。

2.1.2 溶磷菌初筛

如表 2 所示, 共筛选得到溶磷菌 134 株。其中, MP6、MP41、K87 的溶磷圈直径最大, 分别为 37.79、35.67、32.89 mm; K85 次之, 溶磷圈直径为 27.49 mm; K102 等 5 株菌的溶磷圈直径在 15–20 mm 之间, 其余菌株的溶磷圈直径均在 15 mm 以下, 80% 的菌株溶磷圈直径在 10 mm 左右。图 2 为部分溶磷菌的溶磷效果图。

2.2 菌株复筛

复筛共得到 20 株抑菌效果良好的菌株(表

3), 部分菌株抑菌效果如图 3 所示。其中, K87 对 5 种病原[燕麦镰孢(*F. avenaceum*)、尖镰孢(*F. oxysporum*)、茄镰孢(*F. solani*)、麦根腐平脐乳孢(*B. sorokiniana*)、微座孢(*M. bolleyi*)]均有良好的抑制效果, 抑菌率均在 75.00% 以上。LB17 对 4 种病原[尖镰孢(*F. oxysporum*)、茄镰孢 *F. solani*)、麦根腐平脐蠕孢(*B. sorokiniana*)、微座孢(*M. bolleyi*)]均有抑制作用, 抑菌率均超过 61.00%。针对不同病原菌, 11 株菌对燕麦镰孢的抑菌效果较好, 抑菌率在 44.79%–87.54% 之间; 10 株菌对木贼镰孢的抑菌效果较好, 抑菌率在 61.89%–92.88% 之间。对尖镰孢抑菌效果良好的菌株数最多, 共 12 株, 占初筛菌株的 59%, 其中抑菌率最高为 80.18%; 6 株菌对茄镰孢的抑菌效果良好, 抑菌率均在 69.00% 以上; 对麦根腐平脐蠕孢抑菌效果较好的菌株仅有 6 株, 最高抑制率为 87.23%, 最低为 53.36%; 对微座孢抑制效果较好的菌株有 11 株, 占初筛有抑菌能力菌株的 34%, 最高抑菌率可达 92.55%。

2.3 优良菌株的促生特性

由表 4 可知, LB17 分泌铁载体能力最强, *su* 值为 0.32, 同时其溶无机磷能力较强, 为 1 102.95 $\mu\text{g/mL}$ 。K113 固氮能力最强, 固氮量为 0.08 g/L, 其余菌株固氮量则在 0.04–0.06 g/L 之间。K87 分泌 IAA 能力最强, 可达 9.87 mg/L, 其余菌株分泌 IAA 能力较弱, 为 5.69–6.85 mg/L。K85 溶有机磷能力最强, 为 1 321.23 $\mu\text{g/mL}$, 同时分泌铁载体 *su* 值在 0.2 以上。MP6 溶无机磷能力最强, 为 1 470.69 $\mu\text{g/mL}$, 同时具有良好的溶有机磷(1 141.86 $\mu\text{g/mL}$)及解钾(40.90 mg/L)能力。MP41 解钾能力最强, 为 140.33 mg/L。

2.4 优良菌株耐酸、耐碱、耐盐能力

2.4.1 耐酸能力

如图 4 所示, 测定优良菌株的耐酸能力发现, 各菌株在 pH 7.0 条件下 OD_{660} 值最高, 均大于 2.0。在 pH 5.0 时, 菌株 K56 和 MP41 的 OD_{660} 值降低至 0.9 以下, 说明菌株 K56 和

表1 拮抗菌抑菌圈直径

Table 1 Inhibition zone diameter of the antagonistic bacteria

Target pathogen	Strain No.	IZD (mm)	Target pathogen	Strain No.	IZD (mm)	Target pathogen	Strain No.	IZD (mm)
<i>Fusarium avenaceum</i>	K87	15.28±0.16a	<i>Fusarium oxysporum</i>	K103	15.58±0.09tuv	<i>Bipolaris sorokiniana</i>	LB7	23.35±1.18jkl
	K11	15.11±0.40a		K120	14.93±0.13uv		LB6	23.12±0.51kl
	K91	14.53±0.44ab		K110	14.45±0.41vw		LB33	22.24±0.88lm
	K38	14.43±0.16ab		K118	13.39±0.26wx		LB35	22.05±0.57lm
	K37	13.73±0.30bc		LB3	13.01±0.25wxy		LB26	21.34±0.60mn
	K79	13.71±0.24bc		LB4	12.67±0.38xy		K96	21.33±0.57mn
	K12	12.94±0.27cd		LB13	12.34±0.53xy		K105	21.17±0.36mno
	K34	14.42±0.31ab		LB5	11.61±0.42yz		LB8	21.00±0.99mno
	LB35	12.00±0.44de		K86	11.43±0.23yz		LB5	20.86±0.94mno
	K102	11.94±0.03de		K121	10.68±0.33z		LB44	19.97±0.24nop
<i>Fusarium equiseti</i>	LB33	11.25±0.50ef	<i>Fusarium solani</i>	LB36	31.61±0.43j	<i>Microdochium bolleyi</i>	LB13	19.46±0.22op
	LB11	10.94±0.48ef		LB40	18.39±0.36r		LB4	18.70±0.88pq
	K71	10.53±0.38f		K33	33.16±0.55a		K100	17.59±0.33qr
	LB10	8.78±0.15g		K102	31.69±0.24ab		K98	17.44±0.28qr
	LB16	12.01±0.49de		K91	30.47±1.14abc		LB16	16.67±0.11rs
	K91	42.23±0.16a		K29	30.01±0.93abcd		K89	16.61±0.41rs
	LB44	41.59±1.24a		N22	27.45±0.56bcde		K119	15.41±0.16s
	K115	38.72±0.08b		K87	27.35±0.76bcdef		K56	10.80±0.36t
	K105	38.69±0.33b		K117	27.22±5.95bcdef		LB17	21.71±0.03a
	K113	38.32±0.53bc		K12	26.54±0.91cdefg		K91	20.55±0.02b
<i>Fusarium solani</i>	LB35	37.47±1.21bc		LB33	26.42±0.71cdefg		K33	11.37±0.01e
	LB17	36.83±0.51cd		LB64	26.02±0.23cdefgh		LB33	9.28±0.03f
	K87	35.86±0.46de		N20	25.32±0.80defgh		K102	13.74±0.06c
	LB33	35.53±0.36def		K16	25.18±0.49efgh		K34	12.70±0.10d
	K56	35.21±0.07efg		K71	24.66±0.90efgh		K102	30.99±0.52a
	LB2	34.71±0.36efgh		LB67	24.56±0.57efgh		K87	30.69±0.51a
	LB11	34.63±0.28efgh		K34	24.32±2.45efghi		LB10	28.26±0.41b
	LB27	16.17±0.75tu		K93	23.60±0.49efghi		K119	27.50±0.63bc
	K96	26.09±0.32lmn		LB7	23.57±0.68efghi		LB33	27.47±0.76bc
	K102	34.20±0.54fgh		LB6	23.29±1.80efghi		LB11	27.46±0.27bc
<i>Fusarium solani</i>	LB26	33.98±0.51fgh		LB75	22.13±0.56ghij		MP2	27.09±0.27bcd
	LB16	33.73±0.55gh		LB73	21.34±0.54hij		LB30	26.10±0.87cde
	LB15	33.42±0.37hi		K37	21.33±0.73hij		LB35	25.91±0.65cde
	K85	32.07±0.33ij		LB34	19.77±0.56ijk		LB31	25.62±0.64de
	K117	31.69±0.32j		K79	18.46±0.95jk		LB27	25.49±0.22de
	LB32	31.48±0.14j		LB26	17.89±0.46jk		LB7	24.62±0.90ef
	LB28	30.50±0.44jk		LB28	16.12±0.21k		K118	24.61±0.08ef
	LB1	29.93±0.90k		K26	25.57±0.51defgh		K117	24.50±0.30ef
	LB10	29.63±1.39k		K11	22.48±0.73fghij		MP8	24.46±0.39ef
	LB20	27.51±0.16l		K87	38.52±0.46a		LB32	23.72±0.64fg
<i>Fusarium solani</i>	LB7	27.50±0.68l		LB17	37.10±0.80ab		K100	22.98±0.08fgh
	LB14	26.47±0.89lm		K116	36.34±0.44b		LB16	22.94±0.38fgh
	K119	25.88±0.15mn		K114	34.26±0.62c		K86	22.27±0.55ghi
	LB34	25.64±0.38mn		K113	34.22±0.39c		LB40	21.97±0.89hij
	LB8	25.11±0.68mn		LB20	31.14±0.40d		LB34	21.95±0.58hij
	K51	24.71±0.15n		LB15	30.62±0.24d		LB37	21.65±0.36hijk
	LB25	22.75±0.35o		K85	30.20±0.59de		K91	21.39±0.69hijk
	LB21	22.10±0.77op		LB14	29.82±0.71def		LB24	21.14±0.89ijk
	N66	21.40±0.30opq		K91	28.89±0.62efg		MP14	20.39±0.02jkl
	LB24	21.31±0.53opq		K102	28.48±0.19fgh		LB9	19.97±0.52kl
<i>Fusarium solani</i>	LB37	21.03±0.21pq		K115	28.03±0.24ghi		LB18	19.90±0.22kl
	N48	19.99±0.33q		LB2	27.18±0.12hi		MP13	19.34±0.78l
	LB38	18.35±0.39r		LB11	26.55±0.03i		MP16	19.24±0.43l
	LB19	17.76±0.28rs		LB28	24.97±0.24j		K89	19.16±0.20l
	K98	16.67±0.37st		LB21	24.12±0.88jk		MP12	17.49±0.60m
	LB6	15.97±0.14tuv		LB10	24.05±0.18jk		MP17	16.94±0.56m

IZD indicates inhibition zone diameter of the antagonistic bacteria. The data are expressed by mean±SD, and different lowercase letters after the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same as below.

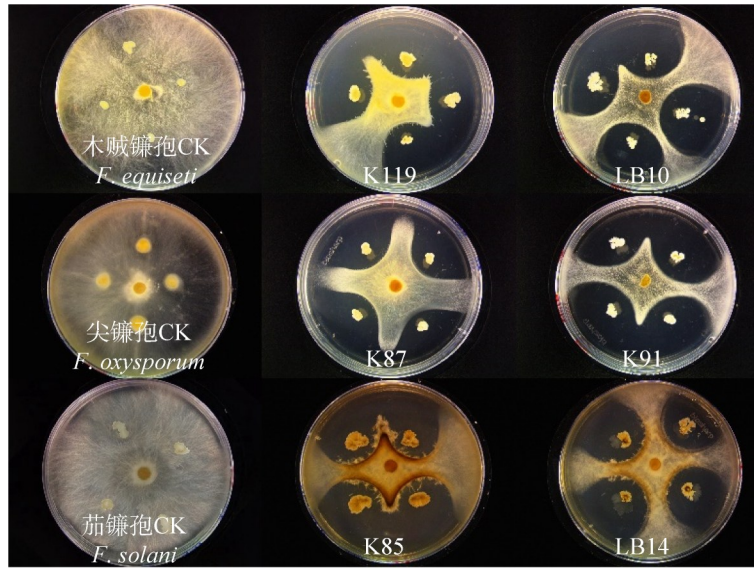


图1 部分拮抗菌的抑菌效果

Figure 1 Antifungal effects of partial antagonistic bacteria.

表2 溶磷菌溶磷圈直径

Table 2 Solubilization zone diameter of the phosphate-solubilizing bacteria

No.	PSZD (mm)	No.	PSZD (mm)	No.	PSZD (mm)	No.	PSZD (mm)	No.	PSZD (mm)
CK	0.00±0.00	K38	11.21±0.01	K115	8.88±0.01	K17	10.78±0.20	MP8	8.83±0.03
K86	7.33±0.02	K37	10.97±0.04	K116	9.68±0.02	K6	9.76±0.02	MP12	13.64±0.04
K87	32.89±0.01	K79	12.59±0.01	K92	11.81±0.01	K5	7.76±0.02	MP13	13.68±0.01
K89	8.65±0.05	K12	7.01±0.01	K93	8.77±0.03	MP1	10.84±0.03	MP14	9.60±0.01
K91	10.27±0.03	K71	8.58±0.02	K94	11.54±0.02	MP7	11.19±0.05	MP16	6.75±0.07
K100	8.25±0.03	MP41	35.67±0.02	K95	7.41±0.02	MP10	11.23±0.07	MP17	7.82±0.04
K102	17.67±0.20	MP6	37.79±0.02	K72	11.21±0.01	MP11	10.19±0.05	K110	8.50±0.03
K117	9.93±3.34	MP9	16.49±0.02	K73	9.98±0.01	MP29	10.23±0.07	K112	6.90±0.01
K118	8.37±0.04	MP5	9.69±0.01	K74	12.98±0.01	MP28	9.23±0.07	K113	8.70±0.67
K119	14.29±0.01	MP3	8.71±0.01	K75	9.45±0.01	MP26	7.81±0.07	K114	11.28±0.01
LB7	9.59±0.03	K53	7.76±0.05	MP31	7.45±0.01	MP25	8.73±0.07	K34	10.90±0.01
LB9	15.56±0.06	K52	10.48±0.03	MP32	12.66±0.01	LB21	13.23±0.07	LB17	16.69±0.01
LB10	9.48±0.13	K61	8.38±0.01	MP33	9.24±0.01	LB22	8.99±0.06	K16	11.22±0.40
LB11	7.90±0.04	K62	13.26±0.02	K63	8.40±0.01	LB23	10.29±0.05	K45	13.74±0.01
LB16	11.68±0.01	K67	8.47±0.02	K35	7.30±0.02	LB25	8.29±0.05	K57	13.21±0.01
LB18	8.85±0.04	K85	27.49±0.01	K21	8.50±0.01	LB28	9.17±0.03	K11	7.85±0.03
LB24	12.77±0.03	K90	9.53±0.10	K22	9.70±0.01	LB38	9.84±0.02	K42	11.05±0.01
LB27	6.24±0.04	K108	8.58±0.29	K23	10.26±0.03	LB3	10.25±0.02	K58	8.10±0.01
LB30	12.39±0.01	K107	7.89±0.01	K24	8.64±0.01	LB2	7.25±0.02	K65	10.77±0.01
LB31	16.68±0.21	LB36	11.68±0.01	K25	7.90±0.01	LB29	13.28±0.02	K43	10.98±0.01
LB32	8.32±0.04	LB8	13.36±0.02	K26	7.75±0.21	K40	7.43±0.02	K44	11.43±0.01
LB33	11.62±0.04	LB6	7.38±0.09	K27	7.48±0.42	K41	8.56±0.02	K33	16.31±0.02
LB34	5.16±0.92	LB5	8.93±0.01	K28	10.79±0.42	MP36	7.31±0.01	MP2	16.34±0.04
LB35	7.60±0.01	LB1	8.72±0.03	K31	10.94±0.42	MP39	9.23±0.01	K104	9.85±0.03
LB37	7.41±0.02	K103	11.08±0.03	K13	13.26±0.42	MP40	7.23±0.01	K15	11.62±0.39
LB40	10.29±0.01	K105	10.86±0.02	K14	8.69±0.39	K111	10.91±0.01	MP34	12.24±0.02

PSZD indicates solubilization zone diameter of the phosphate-solubilizing bacteria.

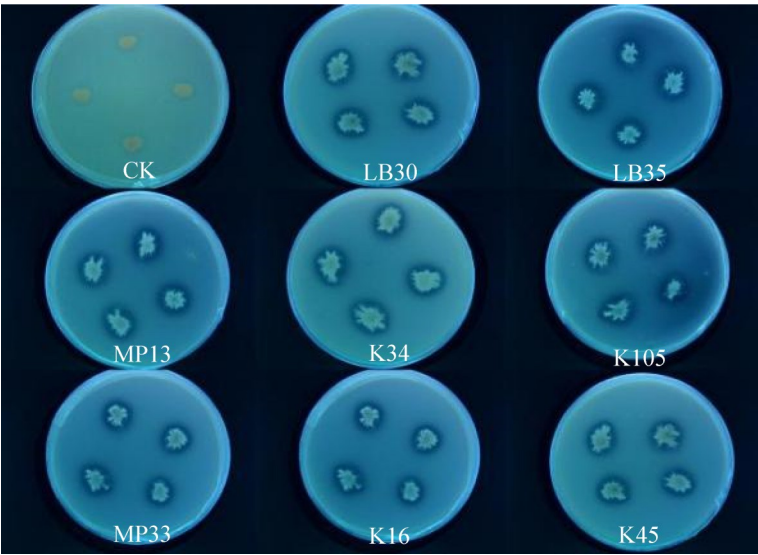


图2 部分溶磷菌的溶磷效果
Figure 2 Solubilization effects of partial phosphate-solubilizing bacteria.

表3 拮抗菌的抑菌率
Table 3 Antifungal rate of the antagonistic bacteria

Target pathogen	Strain No.	Antifungal rate (%)	Target pathogen	Strain No.	Antifungal rate (%)
<i>Fusarium avenaceum</i>	K56	87.54±0.01a	<i>Fusarium oxysporum</i>	K71	72.02±0.02j
	K87	87.53±0.02a		K11	65.70±0.02k
	K37	66.52±0.06b		LB16	61.31±0.01lmn
	LB16	66.05±0.03bc		K34	61.21±0.01lmn
	LB35	56.87±0.02de		K21	65.70±0.02k
	K11	55.46±0.01def	<i>Fusarium solani</i>	LB17	87.52±0.01a
	K91	54.86±0.03efg		K11	83.09±0.01b
	K34	53.89±0.04efgh		K87	79.69±0.01c
	K38	52.14±0.02fghi		K38	69.04±0.04d
	LB33	49.80±0.05hij		K21	79.74±0.01c
<i>Fusarium equiseti</i>	K79	44.79±0.02k		K102	79.74±0.02c
	K102	92.88±0.02a	<i>Bipolaris sorokiniana</i>	LB17	87.23±0.03a
	LB64	82.01±0.03b		K91	82.47±0.02b
	K91	81.23±0.01bc		K34	57.61±0.01de
	K34	79.92±0.04cd		K33	53.36±0.03f
	K21	79.43±0.02cd		K102	66.81±0.02c
	K56	78.06±0.05de		LB33	58.09±0.01d
	K87	74.90±0.01fgh	<i>Microdochium bolleyi</i>	LB33	92.55±0.01a
	K117	74.92±0.02fgh		K33	89.69±0.02c
	LB33	73.75±0.02h		K37	89.17±0.02c
<i>Fusarium oxysporum</i>	LB17	61.89±0.01i		K34	89.04±0.01c
	LB33	80.18±0.03ab		K20	88.58±0.03cd
	K33	78.99±0.04bc		K87	88.43±0.04cd
	K37	78.14±0.02bcd		K56	65.63±0.01e
	K38	75.40±0.01ef		LB17	57.37±0.01f
	K87	75.15±0.01efg		K91	54.54±0.01g
	K102	75.05±0.02efgh		K71	45.16±0.03h
	LB34	74.39±0.01fghi		LB64	91.50±0.04ab

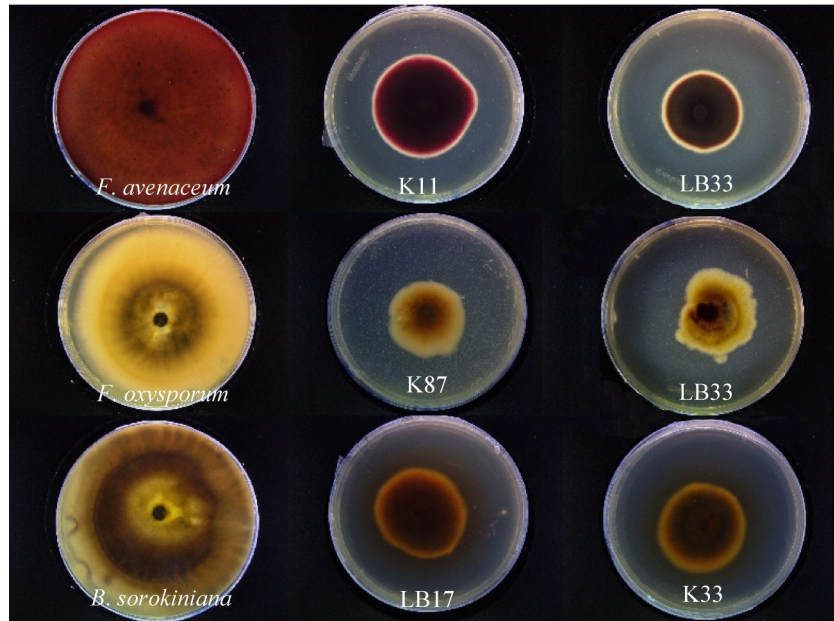


图3 部分拮抗菌发酵液抑菌效果

Figure 3 Antifungal efficacy of the fermentation broth from selected antagonistic bacteria.

表4 优良菌株的促生特性

Table 4 Plant growth-promoting potential of the superior strains

Strain No.	Nitrogen-fixing quantity (g/L)	Dissolved inorganic phosphorus ($\mu\text{g/mL}$)	Dissolved organic phosphorus ($\mu\text{g/mL}$)	Potassium-releasing quantity (mg/L)	Producing IAA (mg/L)	Producing siderophore (<i>su</i>)
CK	0.000 0 $\pm$ 0.000 1	0.00 $\pm$ 0.01	0.00 $\pm$ 0.01	0.00 $\pm$ 0.01	0.000 $\pm$ 0.001	0.000 0 $\pm$ 0.000 1
LB17	0.051 2 $\pm$ 0.000 2d	1 102.95 $\pm$ 0.02b	586.45 $\pm$ 0.03e	43.17 $\pm$ 0.02b	5.687 $\pm$ 0.001g	0.320 0 $\pm$ 0.043 0a
K113	0.080 3 $\pm$ 0.000 4a	909.84 $\pm$ 0.04d	744.68 $\pm$ 0.07d	33.70 $\pm$ 0.02g	6.781 $\pm$ 0.005c	0.310 2 $\pm$ 0.000 3a
K87	0.059 6 $\pm$ 0.001 6c	367.63 $\pm$ 0.13h	432.79 $\pm$ 0.10g	25.75 $\pm$ 0.02h	9.873 $\pm$ 0.003a	0.263 7 $\pm$ 0.000 3b
K85	0.060 2 $\pm$ 0.002 0b	949.69 $\pm$ 0.09c	1 321.23 $\pm$ 0.09a	35.52 $\pm$ 0.03ef	5.790 $\pm$ 0.006f	0.258 0 $\pm$ 0.001 2b
MP6	0.060 6 $\pm$ 0.002 0b	1 470.69 $\pm$ 0.20a	1 141.86 $\pm$ 0.04c	40.90 $\pm$ 0.02c	6.672 $\pm$ 0.023d	0.170 6 $\pm$ 0.000 3c
K33	0.042 8 $\pm$ 0.000 3e	569.64 $\pm$ 0.01f	436.47 $\pm$ 0.03f	36.23 $\pm$ 0.03d	5.950 $\pm$ 0.001e	0.170 2 $\pm$ 0.000 3c
K56	0.043 6 $\pm$ 0.000 3f	458.87 $\pm$ 0.02g	336.92 $\pm$ 0.04h	35.86 $\pm$ 0.03de	6.649 $\pm$ 0.012d	0.133 4 $\pm$ 0.000 7d
MP41	0.053 7 $\pm$ 0.000 4cd	742.27 $\pm$ 0.02e	1 272.80 $\pm$ 0.04b	140.33 $\pm$ 0.03a	6.852 $\pm$ 0.008b	0.132 9 $\pm$ 0.000 6d

MP41 耐酸性较差, 其余菌株的 OD_{660} 值虽有所降低, 但均在 1.5–1.7 之间。在 pH 4.0 的培养液中, K56 几乎不生长, MP41、K87、K33 的 OD_{660} 值高于 1.6, 表明 MP41、K87、K33 具有较好的耐酸能力。在 pH 3.0 条件下, 各菌株的 OD_{660} 值均接近 CK, 低于 0.02, 说明各菌株在

pH 3.0 环境下均不能生长。因此, 确定在 pH 4.0、5.0、6.0 条件下均生长良好的菌株 LB17、K87、K113 为耐酸菌株。

2.4.2 耐碱能力

如图 5 所示, 当培养液 pH 值为 8.0 时, 各菌株 OD_{660} 值下降, 但除 LB17、K113 外均大于

1.5。当培养液 pH 达到 9.0 及以上时, 各菌株 OD_{660} 值均显著下降, 但 MP6 在 pH 10.0 以上溶液中的 OD_{660} 值显著高于 ($P<0.05$) 其他菌株。因此, 确定 MP6 为耐碱菌株。

2.4.3 耐盐能力

如图 6 所示, 各菌株在盐浓度为 1% 时, OD_{660} 值均大于 2.0, 生长情况良好。当盐浓度达到 5% 时, 各菌株 OD_{660} 值显著下降 ($P<0.05$), 其中菌株 K85、K113、K33、K56 的 OD_{660} 值均小于 1.3。当盐浓度达到 10% 时, K113、K33、K56 的 OD_{660} 值接近 0.2, 说明 10% 的盐浓度完全抑制了 K113、K33、K56 的生长, 而 LB17、

MP41、K85、K87 的 OD_{660} 值仍大于 1.1。当盐浓度达到 15% 及 20% 时, 各菌株 OD_{660} 值极低, 不具参考性。因此, 确定在 5% 和 10% 盐浓度下生长均良好的菌株 LB17、MP41、K87 为耐盐菌株。

2.5 优良防病促生复合菌系构建与筛选

2.5.1 优良菌株间的互作效应

如图 7 所示, 菌株 K87 与菌株 MP41 相交处断开, 说明两者可能存在拮抗作用, 因此在构建复合菌系时, 应避免将这 2 株菌组合在同一复合菌系中。其余菌株间未出现此现象, 可以互相组合。组合结果发现, 针对不同病原,

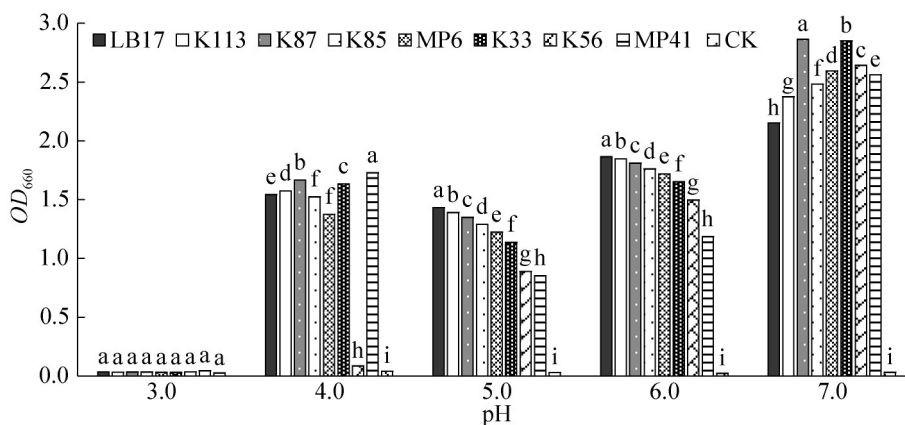


图4 优良菌株的耐酸能力

Figure 4 Acid tolerance of the superior strains.

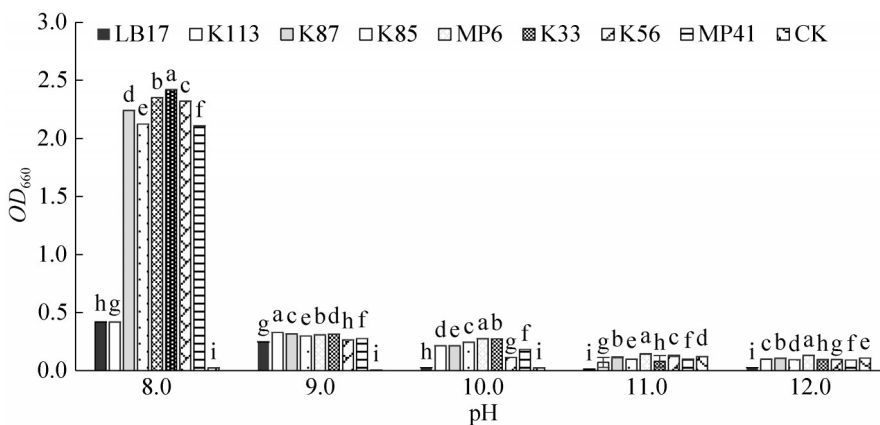


图5 优良菌株的耐碱能力

Figure 5 Alkali tolerance of the superior strains.

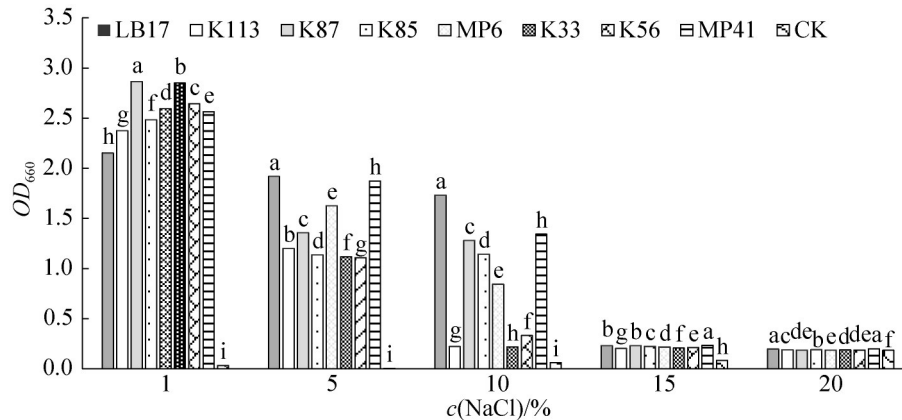


图6 优良菌株的耐盐能力

Figure 6 Salt tolerance of the superior strains.

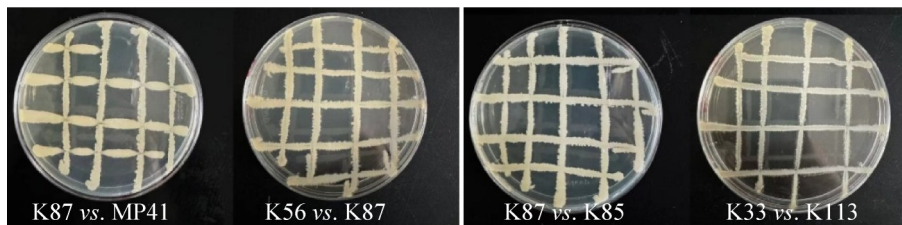


图7 优良菌株间的互作效应

Figure 7 Compatibility of the superior strains.

将不同功能菌株组合, 共形成 14 组(T1-T10、T12-T15)菌系配方(表 5)。

2.5.2 复合菌系的促生特性

如表 5 所示, 在 14 组复合菌系中, T2 的固氮量和解钾量最高, 分别为 0.212 0 g/L 和 86.28 mg/L。T13 的溶有机磷量、溶无机磷量及分泌铁载体量最高, 分别为 482.00 μg/mL、425.35 μg/mL 和 *su* 值 0.4702; T4 分泌 IAA 能力最强, 为 51.63 mg/L。Topsis 综合评价显示, T2 和 T13 的统计量分别为 0.611 和 0.579, 高于其他组, 因此确定为优良复合菌系配方。

2.5.3 优良复合菌系的抑菌特性

如图 8 所示, 复合菌系 T2 的抑菌性较 T13 更强, 对木贼镰孢的抑菌率最高, 达 87.69%, 对茄镰孢和微座孢的抑菌率分别为 77.84% 和 76.71%; 对燕麦镰孢、尖镰孢、麦根腐平脐蠕

孢的抑菌率分别为 60.26%、65.71% 和 64.46%。复合菌系 T13 对供试真菌的抑菌性也较强, 对麦根腐平脐蠕孢的抑制效果最强, 为 64.45%, 其次是木贼镰孢, 抑菌率为 63.68%; 对微座孢、燕麦镰孢的抑菌率分别为 47.45% 和 53.99%, 而对茄镰孢、尖镰孢的抑菌率较低, 分别为 19.47% 和 19.56%, 且普遍低于 T2。因此, 确定 T2 为最优复合菌系。

2.6 最优复合菌系菌种鉴定

如图 9 所示, 基于 16S rRNA 基因序列构建的系统发育树显示, 最优复合菌系 T2 所涉及的菌株 LB17、K87 和 MP6 与贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*) 的遗传距离均小于 0.01, 1 000 次重复自展支持率为 99, 其序列提交至 GenBank, 获得登录号分别为 PQ211017、PQ211018、PQ211019。进一步构建其 *gyrB* 序列

表5 优良复合菌系的促生特性

Table 5 Plant growth-promoting potential of the superior bacterial consortia

Bacterial consortium	Nitrogen-fixing quantity (g/L)	Potassium-releasing quantity (mg/L)	Dissolved organic phosphorus (μg/mL)	Dissolved inorganic phosphorus (μg/mL)	Producing IAA (mg/L)	Producing siderophore (su)	Comprehensive analysis
T1 (K87+LB17)	0.107 1± 0.000 2e	84.00± 0.10b	300.56± 2.03g	351.86± 2.30d	9.94± 0.02m	0.276 0± 0.001 2f	0.302
T2 (K87+LB17+MP6)	0.212 0± 0.000 0a	86.28± 0.10a	346.50± 0.77e	413.11± 2.03c	16.91± 0.05h	0.328 4± 0.000 3e	0.611
T3 (K87+LB17+MP6+K85)	0.018 9± 0.000 1k	71.78± 0.10f	437.60± 2.03b	419.23± 1.53b	18.56± 0.03e	0.181 6± 0.001 3j	0.376
T4 (K56+LB17)	0.012 1± 0.000 1l	43.01± 0.01h	255.40± 0.01i	299.80± 0.77f	51.63± 0.09a	0.210 9± 0.000 3i	0.464
T5 (K56+LB17+K113)	0.104 7± 0.000 2f	39.72± 0.03l	322.77± 2.03f	328.13± 3.05e	19.39± 0.03d	0.368 6± 0.000 3c	0.434
T6 (K56+LB17+MP6+K113)	0.011 1± 0.000 0l	43.97± 0.01g	263.25± 3.63i	273.00± 0.77g	20.28± 0.01c	0.176 6± 0.001 5k	0.249
T7 (K33+LB17)	0.045 3± 0.000 1i	41.30± 0.01k	386.31± 1.33d	409.43± 0.15c	15.59± 0.00j	0.260 0± 0.000 9g	0.320
T8 (K33+LB17+MP6)	0.018 0± 0.000 0k	42.12± 0.03j	403.91± 0.77c	413.25± 2.66c	15.00± 0.04kl	0.339 2± 0.000 9d	0.335
T9 (K33+LB17+MP6+K113)	0.149 2± 0.000 0b	80.40± 0.01e	259.22± 1.53i	275.50± 2.63g	18.28± 0.02f	0.112 7± 0.000 0m	0.471
T10 (MP6+K85+MP41+K113)	0.037 2± 0.000 3j	42.19± 0.03j	281.43± 1.53h	298.27± 2.03f	23.54± 0.02b	0.226 9± 0.000 6h	0.306
T12 (K113+MP41)	0.073 0± 0.002 5h	30.37± 0.03m	212.98± 8.68k	233.19± 1.53i	14.98± 0.02l	0.164 1± 0.000 9l	0.234
T13 (LB17+K113+MP41)	0.141 0± 0.000 0c	81.26± 0.01c	482.00± 0.77a	425.35± 0.01a	15.10± 0.05k	0.470 2± 0.000 9a	0.579
T14 (K87+LB17+MP6+K113)	0.077 6± 0.000 0g	80.78± 0.10d	257.69± 0.01i	348.02± 0.01d	15.88± 0.03i	0.413 6± 0.001 2b	0.464
T15 (K87+LB17+MP6+MP41)	0.135 2± 0.000 1d	42.82± 0.01i	233.19± 2.03j	247.74± 1.53h	18.11± 0.04g	0.112 2± 0.000 3m	0.376

系统发育树(图 9)发现, LB17 和 K87 与贝莱斯芽孢杆菌标准株 BCRC 17467 (DQ903176.1)的遗传距离为 0, 1 000 次重复自展支持率为 98; MP6 与贝莱斯芽孢杆菌标准株 NRRL 41580^T (EU138622.1)的遗传距离为 0, 1 000 次重复自展支持率为 99, 其序列提交至 GenBank, 获得登录号分别为 PQ144581、PQ144582、PQ144583。因此, 确定菌株 LB17、K87、MP6

的分类地位为贝莱斯芽孢杆菌。

2.7 最优复合菌系的防病促生作用

如表 6 所示, 对照组 CK1 (燕麦镰孢+木贼镰孢灌根)、CK2 (微座孢灌根)、CK3 (麦根腐平脐蠕孢灌根)的青稞根腐病病情指数为 85.00–86.50, 处理组 M1 (T2 复合菌系+燕麦镰孢+木贼镰孢灌根)、M2 (T2 复合菌系+微座孢

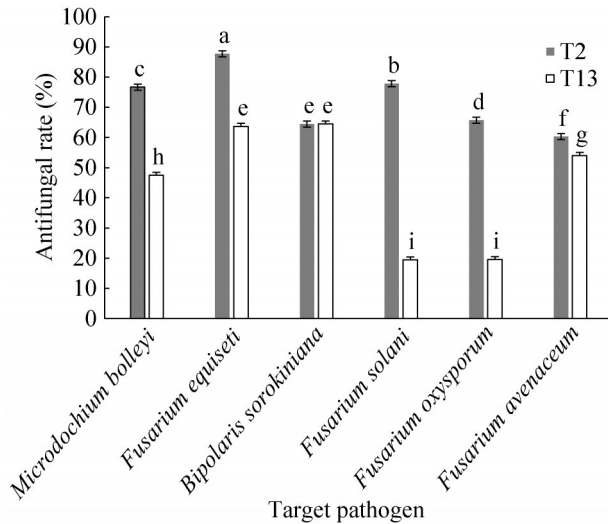


图8 优良复合菌系对病原真菌的抑菌率

Figure 8 Antifungal rate of the superior bacterial consortia against pathogenic fungi.

灌根)、M3 (T2 复合菌系+麦根腐平脐蠕孢灌根) 的病情指数为 21.50–25.25。最优复合菌系

T2 对青稞镰孢根腐病、微座孢根腐病、普通根腐病的防效分别为 72.35%、70.81%、75.07%。处理组 M1、M2、M3 的株高分别为 30.11、30.22、30.71 cm，茎粗分别为 0.114、0.123、0.114 mm，显著高于对照组($P<0.05$)。株高增幅为 13.28%–34.00%，茎粗增幅为 55.0%–65.8%。

3 讨论与结论

微生物菌剂因其良好的防效、较长的持效期，以及环境友好和可再生性强等优势，已成为控制作物病害的主要途径之一。其中，芽孢杆菌属在国内外研究中最为常见^[40]。芽孢杆菌具有快速定殖、逆境生存能力强^[41]、抑菌性能好^[42]、可诱导免疫系统反应^[43]以及部分菌株具有分解农药残留等功能^[44]，因此被大量制成微生物菌剂，应用于多种作物病害的防控，并可替代化学药剂的使用。解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus*

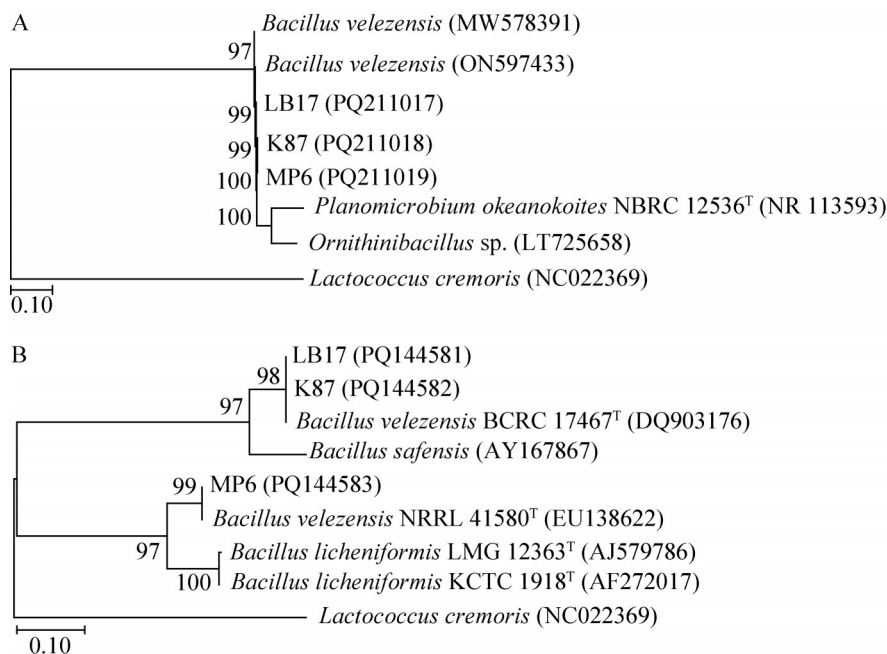


图9 基于16S rRNA基因(A)和gyrB基因(B)的系统发育树

Figure 9 Phylogenetic tree constructed by the neighbor-joining method based on the sequences from 16S rRNA gene (A) and *gyrB* (B) locus of the strains. The accession numbers of the sequences in GenBank are shown following the species name, and the superscript “T” indicates the type strain. The branch numbers indicate the bootstrap support rate; The scale bar indicates a nucleotide substitution rate of 0.10.

表6 最优复合菌系T2对青稞根腐病的防效及促生作用

Table 6 Root rot control efficacy and plant growth promoting effect on naked barley of the optimal bacterial consortium T2

Treatment	Disease index	Control effect (%)	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)
CK1	85.00±3.90a	—	19.75±2.89b	0.058±0.010b
M1	23.50±4.74b	72.35	30.11±1.24a	0.114±0.012a
CK2	86.50±3.16a	—	19.89±3.37b	0.042±0.013b
M2	25.25±5.19b	70.81	30.22±1.27a	0.123±0.010a
CK3	86.25±2.12a	—	26.63±1.65b	0.051±0.015b
M3	21.50±5.67b	75.07	30.71±1.19a	0.114±0.011a

“—” indicates the treatment was absent from control effect.

amyloliquefaciens)^[45]、短小芽孢杆菌(*B. pumilus*)^[46]、贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*)、耐盐芽孢杆菌(*B. halotolerans*)和蜡样芽孢杆菌(*B. cereus*)等对根腐类病害的防控效果尤为显著。施春兰等^[47]研究发现,解淀粉芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌对烟草根腐病菌的抑制率在60%左右,枯草芽孢杆菌、耐盐芽孢杆菌以及蜡样芽孢杆菌对草莓灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea*)、尖镰孢菌(*Fusarium oxysporum*)和链格孢菌(*Alternaria alternata*)的抑制率为50.1%–72.1%。Lan等^[48]研究发现,解淀粉芽孢杆菌对立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)的抑制率为58%。

贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*)是近年来芽孢杆菌属中一种新型且热门的生防细菌,其生防效果良好,具有很大的开发潜力,尤其在根腐类病害防控方面表现出色。陈静等^[49]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌 TCS001 对草莓灰霉病病原有明显的抑制作用,抑制率可达72.18%。何明川等^[50]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌对烟草黑胥病的抑菌率为62.87%。Wang等^[51]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌 BER1 菌株对番茄青枯病的抑制率为49.0%。李界秋等^[52]研究发现,4种贝莱斯芽孢杆菌对尖镰孢的抑制率为40.56%–56.30%。本研究中筛选得到的贝莱斯芽孢杆菌 LB17 和 K87 的防效均优于已报道的同类菌株。LB17 对麦根腐平脐蠕孢的抑制率为87.23%,同时对尖镰孢和茄镰孢的抑制率分别为87.52%和

61.89%;而K87对百合根腐病病原茄镰孢的抑制率达75.15%。

目前针对多种作物根腐病病原均有效的复合菌系研究较少。本研究成功研发出一种抑菌谱更广的T2复合菌系,其对百合、番茄、辣椒等不同作物上分离的根腐病病原(如茄镰孢、尖镰孢)以及青稞根腐病病原(如微座孢、木贼镰孢、麦根腐平脐蠕孢、燕麦镰孢)的抑菌率分别为77.84%、65.71%、76.71%、87.69%、64.46%、60.26%,且抑菌率均超过60.00%,显示出良好的本土根腐类病害防治潜力。在促生功能方面,复合菌剂T2的固氮能力显著提高,固氮量为0.212 g/L,分泌IAA能力相较单一菌株平均提升了2.6倍,解钾及分泌铁载体能力均提升了2倍,解钾量达86.28 mg/L,分泌IAA量达16.91 mg/L。Du等^[53]研究发现,单一菌株对香蕉枯萎病的抑制率为21.21%–60.61%,平均控制效果为47.27%,而复合菌剂(芽孢杆菌属)的生防菌株组合的控制效果平均为72.73%,与本研究结果一致。黄文茂等^[54]研究发现,由恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)、弯曲芽孢杆菌(*B. flexus*)、坚强芽孢杆菌(*B. firmus*)和贝莱斯芽孢杆菌组成的复合菌剂施用于辣椒根际土壤后,溶磷、解钾菌和固氮量较对照均提高了5倍以上。本研究所构建的复合菌系对青稞根腐类病害的防效良好,且具有较强的促生作用,其对土壤的影响及对其他作物的田间效应有待

进一步研究。

作者贡献声明

李雪萍：实验设计、数据核查、论文撰写；
马佳璇：菌株筛选、特性测定、菌种鉴定；
许世洋：数据汇总、图表绘制、英文写作；
孟欢：辅助菌种鉴定、盆栽试验；
李建军：辅助菌株筛选、特性测定；
漆永红：负责数据核查、论文核查、保障实验条件。

作者利益冲突公开声明

作者声明不存在任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

参考文献

- [1] 赵佳丽, 兰措卓玛, 王伟, 王寒冬, 王稳, 沈纪萍. 基于MaxEnt模型的青藏高原青稞适生区对气候变化响应的分析[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(10): 1626-1638.
- [2] ZHAO JL, LAN CUO ZM, WANG W, WANG HD, WANG W, SHEN JP. Response of suitable area of highland barley in the Qinghai-Xizang Plateau to climate change based on Maximum Entropy Model analysis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(10): 1626-1638 (in Chinese).
- [3] 范雨婷, 王可心, 张海霞, 马萍, 李婧, 吴晶, 谈有金, 王健斌, 贺晓艳, 杜双奎. 发芽青稞营养成分及功能特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 403-411.
- [4] FAN YT, WANG KX, ZHANG HX, MA P, LI J, WU J, TAN YJ, WANG JB, HE XY, DU SK. Research progress on nutritional components and functional characteristics of sprouted highland barley[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 403-411 (in Chinese).
- [5] 陈鲁鹏, 姚晓华, 姚有华, 李新, 吴昆仑. 青藏高原青稞品质评价体系构建及生态区划分析[J]. 西北植物学报, 2023, 43(4): 667-678.
- [6] CHEN LP, YAO XH, YAO YH, LI X, WU KL. Construction of quality evaluation system and analysis of ecological regionalization of Qinghai-Xizang Plateau hulless barley[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2023, 43(4): 667-678 (in Chinese).
- [7] 刘雅洁, 李茂, 李超, 李文博, 田敏, 潘佳佳, 赵辉, 余国武, 冯宗云. 75份青稞种质的品质性状综合评价[J/OL]. 麦类作物学报, 2024. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MLZW20240517003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [8] LIU YJ, LI M, LI C, LI WB, TIAN M, PAN JJ, ZHAO H, YU GW, FENG ZY. Comprehensive evaluation of quality traits of 75 highland barley germplasm[J/OL]. China Industrial Economics, 2024. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MLZW20240517003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ> (in Chinese).
- [9] GAO DD, CHEN H, LIU HH, YANG XH, GUO PH, CAO X, CAI Y, XU HW, YANG JT. Structure characterization and antioxidant activity analysis of polysaccharides from Lanzhou lily[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 976607.
- [10] ZHANG KW, LYU T, LYU YM. Transcriptional insights into lily stem bulblet formation: hormonal regulation, sugar metabolism, and transcriptional networks in LA lily 'Aladdin'[J]. Horticulturae, 2024, 10(2): 171.
- [11] JIN L, ZHANG YL, YAN LM, GUO YL, NIU LX. Phenolic compounds and antioxidant activity of bulb extracts of six *Lilium* species native to China[J]. Molecules, 2012, 17(8): 9361-9378.
- [12] YANG W, WANG P, ZHANG W. Review on preservation techniques of edible lily bulbs in China[J]. Journal of Food, 2022, 20(1): 172-182.
- [13] 雷波, 陈炜, 马英杰. 甘肃省蔬菜产业现状及高质量发展对策研究[J/OL]. 北方园艺, 2024. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BFYY20240627001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [14] LEI B, CHEN W, MA YJ. Study on the present situation of vegetable industry in Gansu Province and its high-quality development countermeasures[J/OL]. China Industrial Economics, 2024. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BFYY20240627001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [15] 孙源谦, 颌建明. 甘肃高原夏菜农业保险发展中的问题与建议[J]. 中国蔬菜, 2023(9): 7-13.
- [16] SUN YQ, XIE JM. Problems existing in developing agricultural insurance for Gansu highland summer vegetable and several suggestions[J]. China Vegetables, 2023(9): 7-13 (in Chinese).
- [17] 张德纯. 甘肃兰州百合[J]. 中国蔬菜, 2020(10): 41.
- [18] ZHANG DC. Lily in Lanzhou, Gansu[J]. China Vegetables, 2020(10): 41 (in Chinese).
- [19] 王楚凡, 牛俊. 西北地区主要粮食作物种植的水、碳足迹及布局优化[J]. 中国农业科学, 2024, 57(6): 1137-1152.
- [20] WANG CF, NIU J. Water and carbon footprint and layout optimization of major grain crops in the northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(6): 1137-1152 (in Chinese).
- [21] 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.
- [22] 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).
- [23] ZHOLDOSHBKOVA S, BOZOĞLU T, ERPER I, DERVIŞ S, ÖZER G. A new host for *Fusarium algeriense* causing crown and root rot on barley in Kyrgyzstan[J]. New Disease Reports, 2022, 46(2): e12139.
- [24] 李雪萍, 刘梅金, 许世洋, 郭建炜, 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.
- [25] 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 Prataculturae Sinica, 2021, 30(7): 190-198 (in Chinese).
- [16] 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).
- [17] 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, ANG XM, JIANG JJ, FAN YX, LI MQ. *Clonostachys rosea*, a pathogen of root rot in naked barley (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. f.) on the Qinghai-Xizang plateau, China[J]. Microbiology China, 2022, 49(2): 598-605 (in Chinese).
- [18] 翟雅鑫, 姚晨阳, 薛丽芳, 曹挥, 李新风, 杜方, 郝晓娟. 一株百合枯萎病菌的鉴定及其生物学特性研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 1-6.
ZHAI YX, YAO CY, XUE LF, CAO H, LI XF, DU F, HAO XJ. Identification and biological characteristics of a fungal isolate causing lily *Fusarium* wilt[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 38(5): 1-6 (in Chinese).
- [19] 牟晓玲, 李潇潇, 师桂英, 王文珠, 李谋强, 张爱菊. 兰州百合枯萎病病原菌鉴定及罹病组织超微结构观察[J]. 植物保护学报, 2022, 49(4): 1111-1118.
MU XL, LI XX, SHI GY, WANG WZ, LI MQ, ZHANG AJ. Identification of pathogens causing *Fusarium* wilt of Lanzhou lily, and the observation of cell ultrastructures in the infected bulb scales[J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(4): 1111-1118 (in Chinese).
- [20] 安智慧, 石延霞, 刘永春, 李宝聚. 李宝聚博士诊疗手记(二十一)百合根腐病原鉴定及防治方法[J]. 中国蔬菜, 2010(3): 23-24.
AN ZH, SHI YX, LIU YC, LI BJ. Dr. Li baoju's notes on diagnosis (XXI) pathogen identification and control methods of lily root rot[J]. China Vegetables, 2010(3): 23-24 (in Chinese).
- [21] 刘翔, 姜兴印, 王雪婷, 朱文亚, 姚向峰, 王金花, 张凤文. 辣椒根腐病菌对咯菌腈的敏感性及其抗性突变体的生物学性状[J]. 植物保护, 2023, 49(3): 113-120, 134.
LIU X, JIANG XY, WANG XT, ZHU WY, YAO XF, WANG JH, ZHANG FW. Sensitivity of *Fusarium solani* to fludioxonil and the biological characteristics of its resistant mutants[J]. Plant Protection, 2023, 49(3): 113-120, 134 (in Chinese).
- [22] ZHANG L. Effects of microbial manure on growth and physiological characteristics to kidney bean[J]. African Journal of Microbiology Research, 2012, 6(10): 2489-2492.
- [23] 杜建峰, 吴伟, 张晓英, 李洋, 丁新华. 番茄颈腐根腐病的发生及其防治研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36(10): 200-206.
DU JF, WU W, ZHANG XY, LI Y, DING XH. Research progress on the occurrence and control of *Fusarium* crown and root rot of tomato[J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36(10): 200-206 (in Chinese).
- [24] 刘希港, 李楠, 季托, 周波, 魏珉, 李静, 杨凤娟. 微生物菌剂和玉米蛋白酵素对番茄叶片生理特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11): 3039-3044.
LIU XG, LI N, JI T, ZHOU B, WEI M, LI J, YANG FJ. Effects of microbial agents and corn protein ferment on physiological characteristics in leaves and yield of tomato[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(11): 3039-3044 (in Chinese).
- [25] 吕亮雨, 段国珍, 苏彩凤, 郭寰, 樊光辉. 木霉菌微生物菌剂对枸杞生长及土壤性状的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(4): 476-482.
LÜ LY, DUAN GZ, SU CF, GUO H, FAN GH. Effects of microbial agents on growth and soil properties of *Lycium barbarum* L.[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, 53(4): 476-482 (in Chinese).
- [26] TU J, ZHAO X, YANG YR, YI YJ, WANG HY, WEI BY, ZENG LB. Two *Bacillus* spp. strains improve the structure and diversity of the rhizosphere soil microbial community of *Lilium brownii* var. *viridulum*[J]. Microorganisms, 2023, 11(5): 1229.
- [27] LI BN, SHEN LX. Effects of soluble organic fertilizer combined with inorganic fertilizer on greenhouse tomatoes with different irrigation techniques[J]. Agriculture, 2024, 14(2): 313.
- [28] HASSINE M, AYDI-BEN-ABDALLAH R, JABNOUN-KHIREDDINE H, DAAMI-REMADI M. Soil-borne and compost-borne *Penicillium* sp. and *Gliocladium* spp. as potential microbial biocontrol agents for the suppression of anthracnose-induced decay on tomato fruits[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2022, 32(1): 20.
- [29] 刘聪, 万翠翠, 宋旭, 夏光富, 傲耐, 桑加拉, 王奎明, 王军. 复合菌剂对新疆辣椒的促生效果和根际真核生物群落结构的影响[J/OL]. 应用生态学报, 2024. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=YYSB20240507001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
LIU C, WAN CC, SONG X, XIA GF, AO N, SANG JL, WANG KM, WANG J. Effects of compound fungi on growth promotion and rhizosphere eukaryotic community structure of pepper in Xinjiang[J/OL]. China Industrial Economics, 2024. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=YYSB20240507001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ> (in Chinese).
- [30] 曹麟, 王宇龙, 卜俊文, 宋天骄, 刘玉涛, 韦小敏, 林雁冰. 微生物菌剂对绞股蓝药效成分及根际细菌群落的影响[J]. 微生物学报, 2024, 64(7): 2323-2336.
CAO L, WANG YL, BU JW, SONG TJ, LIU YT, WEI XM, LIN YB. Effects of microbial agents on the active constituents and rhizosphere bacterial community of *Gynostemma pentaphyllum*[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(7): 2323-2336 (in Chinese).
- [31] 丁钱华. 微生物菌剂对小麦抗病能力的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(8): 1794-1797.
DING QH. Effect of microbial agent on wheat disease resistance[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(8): 1794-1797 (in Chinese).
- [32] 卯婷婷, 陶刚, 赵兴丽, 王琦, 李世东. 4种微生物菌剂对辣椒主要病害的生物防治作用[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(10): 200-206 (in Chinese).

- 2020, 36(2): 258-264.
- MAO TT, TAO G, ZHAO XL, WANG Q, LI SD. Biological control of four kinds of microbial preparations against main diseases of pepper[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2020, 36(2): 258-264 (in Chinese).
- [33] 王子凡, 李燕, 张庆银, 王丹丹, 师建华, 耿晓彬, 田东良, 钟增明, 赵晓明, 齐连芬. 微生物菌剂对设施番茄主要病害及土壤微生物群落的影响[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(6): 102-112.
- WANG ZF, LI Y, ZHANG QY, WANG DD, SHI JH, GENG XB, TIAN DL, ZHONG ZM, ZHAO XM, QI LF. Effect of microbicides on main diseases and soil microbial communities of tomatoes in facilities[J]. China Agricultural Science and Technology Herald, 2024, 26(6): 102-112 (in Chinese).
- [34] 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. 辣椒镰孢根腐病防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 annuum*[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2022, 62(7): 2735-2750 (in Chinese).
- [35] 程鑫宇, 王继莲, 麦日艳古·亚生, 李明源. 盐爪爪根际土壤产 IAA 菌株分离及促生特性分析[J]. 草业学报, 2024, 33(4): 110-121.
- CHENG XY, WANG JL, Mairiyangu-Yasheng, LI MY. Isolation and growth-promoting characteristics of rhizobacteria producing indole-3-acetic acid from the rhizosphere soil of *Kalidium foliatum*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(4): 110-121 (in Chinese).
- [36] 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).
- [37] 韦鑫, 韦兴迪, 曾庆飞, 李亚娇, 丁磊磊, 王小利. 1 株白三叶根际产铁载体菌的功能特性及培养条件[J]. 草业科学, 2024, 41(4): 919-930.
- WEI X, WEI XD, ZENG QF, LI YJ, DING LL, WANG XL. Functional characteristics and optimum fermentation condition of a siderophore-producing bacteria from the rhizosphere of *Trifolium repens*[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(4): 919-930 (in Chinese).
- [38] 王艳霞, 解志红, 张蕾, 常大勇. 田菁根际促生菌的筛选及其促生耐盐效果[J]. 微生物学报, 2020, 60(5): 1023-1035.
- WANG YX, XIE ZH, ZHANG L, CHANG DY. Screening of plant growth promoting and salt tolerant rhizobacteria in *Sesbania cannabina*[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2020, 60(5): 1023-1035 (in Chinese).
- [39] 申云鑫, 施竹凤, 李铭刚, 赵江源, 王楠, 冯路遥, 莫艳芳, 陈齐斌, 杨佩文. 贝莱斯芽孢杆菌 SH-1471 发酵条件优化及其番茄枯萎病的防治效果[J]. 微生物学报, 2024, 64(1): 220-237.
- SHEN YX, SHI ZF, LI MG, ZHAO JY, WANG N, FENG LY, MO YF, CHEN QB, YANG PW. *Bacillus velezensis* SH-1471: optimization of fermentation conditions and evaluation of the biocontrol effect on tomato *Fusarium* wilt[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(1): 220-237 (in Chinese).
- [40] TIWARI P, BOSE SK, PARK KI, DUFOSSÉ L, FOUILLAUD M. Plant-microbe interactions under the extreme habitats and their potential applications[J]. Microorganisms, 2024, 12(3): 448.
- [41] SHALINI C, SILAMBARASAN M, KUMAR KU, THANKAPPAN S, KUMAR PD. Effect of co-inoculants rhizophos on the growth and yield of black gram [*Vigna mungo* (L.) Hepper] [J]. Journal of Experimental Agriculture International, 2024, 46(6): 1-6.
- [42] KRISHNAMOORTHY K, SANKARALINGAM A, NAKKEERAN S. Growth of *Sclerotinia sclerotiorum* causing head rot disease of cabbage on various carbon and nitrogen sources[J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2016, 12(4): 261-263.
- [43] ANDRIĆ S, MEYER T, ONGENA M. *Bacillus* responses to plant-associated fungal and bacterial communities[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 1350.
- [44] LI XY, LIU Q, GAO YG, ZANG P, ZHENG T. Effects of a co-bacterial agent on the growth, disease control, and quality of ginseng based on rhizosphere microbial diversity[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 647.
- [45] 吴琼, 张甜甜, 李茂营, 吴慧玲, 郭绍贵, 张洁, 任毅, 张海英, 宫国义. 解淀粉芽孢杆菌 5 号防控西瓜 CGMMV 机制初探[J]. 园艺学报, 2024, 51(10): 2427-2438.
- WU Q, ZHANG TT, LI MY, WU HL, GUO SG, ZHANG J, REN Y, ZHANG HY, GONG GY. Preliminary study on the prevention and control effect of *Bacillus amyloliquefaciens* strain 5 on cucumber green mottled mosaic virus disease on watermelon[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2024, 51(10): 2427-2438 (in Chinese).
- [46] 冯永新, 关辉, 靳彦峰, 徐伟, 张卫东, 谭宏祥, 王静, 王杰. 短小芽孢杆菌与化学杀细菌剂协同防治烟草青枯病研究[J]. 中国烟草科学, 2021, 42(4): 44-49.
- FENG YX, GUAN H, JIN YF, XU W, ZHANG WD, TAN HX, WANG J, WANG J. Synergistic control effect of *Bacillus pumilus* AR03 and fungicides against tobacco bacterial wilt[J]. Chinese Tobacco Science, 2021, 42(4): 44-49 (in Chinese).
- [47] 施春兰, 曾舒泉, 王志江, 谢永辉, 詹筱国, 黄永迪, 吴国星, 高熹, 秦得强. 2 株烟草病害拮抗细菌的分离鉴定和发酵条件优化研究[J]. 江西农业学报, 2023, 35(7): 81-90.
- SHI CL, ZENG SQ, WANG ZJ, XIE YH, ZHAN YG, HUANG YD, WU GX, GAO X, QIN DQ. Isolation and identification of two antagonistic bacterial strains against tobacco diseases and optimization of fermentation conditions[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2023, 35(7): 81-90 (in Chinese).
- [48] LAN Q, LIU Y, MU R, WANG X. Biological control effect of antagonistic bacteria on potato scurvy[J]. Experimental Botany, 2024, 75(9): 2604-2630.
- [49] 陈静, 江雅琴, 陈滢冲, 周梦诗, 李威汛, 陈杰, 袁静. 贝

- 莱斯芽孢杆菌 TCS001 与化学杀菌剂对草莓灰霉病的协同防效评价[J]. 农药, 2024, 63(8): 604-608.
- CHEN J, JIANG YQ, CHEN YC, ZHOU MS, LI WX, CHEN J, YUAN J. Evaluation of synergistic control efficacy of *Bacillus valesiae* TCS001 and chemical fungicides against gray mold of strawberry[J]. *Agrochemicals*, 2024, 63(8): 604-608 (in Chinese).
- [50] 何明川, 施春兰, 魏聪聪, 曾舒泉, 兰明先, 唐萍, 王志江, 伍显录, 陆光钰, 谢永辉. 烟草黑胫病拮抗细菌的分离、鉴定及发酵条件优化[J]. 南方农业学报, 2022, 53(6): 1604-1615.
- HE MC, SHI CL, WEI CC, ZENG SQ, LAN MX, TANG P, WANG ZJ, WU XL, LU GY, XIE YH. Isolation, identification and optimization of fermentation conditions of antagonistic bacteria against tobacco black shank[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2022, 53(6): 1604-1615 (in Chinese).
- [51] WANG N, DING J, CHEN YT, ZHU YL, ZHANG LN, WEI YQ, LI J, XU T, DING GC. *Bacillus velezensis* BER1 enriched *Flavobacterium daejeonense*-like bacterium in the rhizosphere of tomato against bacterial wilt[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2023, 99(6): fiad054.
- [52] 李界秋, 宋文欣, 蒙姣荣, 王忠文. 6株贝莱斯芽孢杆菌对土传病原菌的抑制活性及其作用机理[J]. 福建农业学报, 2022, 37(3): 371-380.
- LI JQ, SONG WX, MENG JR, WANG ZW. Inhibitory activity and mechanism of *Bacillus velezensis* strains against soil-borne pathogens[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37(3): 371-380 (in Chinese).
- [53] DU CJ, YANG D, YE YF, PAN LF, ZHANG J, JIANG SB, FU G. Construction of a compound microbial agent for biocontrol against *Fusarium* wilt of banana[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1066807.
- [54] 黄文茂, 易伦, 彭思云, 黄承森, 程代松, 韩丽珍. PGPR复合菌剂对辣椒生长及根际土壤微生物结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1): 195-201.
- HUANG WM, YI L, PENG SY, HUANG CS, CHENG DS, HAN LZ. Effect of PGPR compound bacterial agents on growth of chilli and changes of soil microbial structure[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(1): 195-201 (in Chinese).