

魏黎欣, 李泽宇, 赵敏, 等. 寡雄腐霉菌株 GAQ1 对黄瓜猝倒病的防效及对黄瓜的促生作用[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(4): 701-708.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.04.006

寡雄腐霉菌株 GAQ1 对黄瓜猝倒病的防效及对黄瓜的促生作用

魏黎欣^{1,2}, 李泽宇^{2,3}, 赵敏², 苏东徽², 周冬梅², 魏利辉², 乐秀虎¹, 王楠²
(1. 河北工程大学园林与生态工程学院, 河北邯郸 056038; 2. 江苏省农业科学院植物保护研究所, 江苏南京 210014; 3. 南京农业大学植物保护学院, 江苏南京 211800)

摘要: 生物防治因具有环境友好和安全性, 在作物应对生物与非生物胁迫中备受关注, 然而当前市场上的生物防治产品数量仍远不及化学农药。本研究以从生姜田块中分离获得的生防卵菌——寡雄腐霉(*Pythium oligandrum*) 菌株 GAQ1 为研究对象, 系统评估了其对于瓜果腐霉(*Pythium aphanidermatum*) 的拮抗作用, 对黄瓜猝倒病的防治效果以及对黄瓜植株的促生作用。结果表明, 寡雄腐霉菌株 GAQ1 能够通过菌丝缠绕导致瓜果腐霉菌丝大面积失活或死亡。盆栽试验结果显示, 寡雄腐霉菌株 GAQ1 处理显著降低了黄瓜猝倒病的发病率, 病情指数由 71.9 下降至 21.9, 防治效果达 69.57%。此外, 黄瓜幼苗经 GAQ1 发酵液处理 28 d 后, 黄瓜植株的株高、根长、叶片数、SPAD 值、地上部鲜重和地下部鲜重等生长指标均显著提高, 增幅分别为 9.72%、65.48%、18.67%、5.74%、24.19% 和 78.35%。综上所述, 寡雄腐霉菌株 GAQ1 不仅对黄瓜猝倒病具有显著防治效果, 还能明显促进植株生长。本研究结果为寡雄腐霉菌株 GAQ1 的开发与应用提供了理论数据, 为瓜果腐霉所致病害的生物防治提供了新的候选菌株资源, 对实现绿色农业可持续发展具有积极意义。

关键词: 寡雄腐霉; 瓜果腐霉; 黄瓜; 生物防治; 促生作用

中图分类号: S436.421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)04-0701-08

Biocontrol efficacy of *Pythium oligandrum* strain GAQ1 against cucumber damping-off and its growth-promoting effects on cucumber

WEI Lixin^{1,2}, LI Zeyu^{2,3}, ZHAO Min², SU Donghui², ZHOU Dongmei², WEI Lihui², LE Xiuhu¹, WANG Nan²

(1. School of Landscape and Ecological Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Institute of Plant Protection, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China)

Abstract: Biological control has garnered significant attention due to its environmental friendliness and safety in addressing both biotic and abiotic stresses in crops. However, the number of commercially available biological control products remains far lower than that of chemical pesticides. This study focused on the biocontrol oomycete *Pythium oligandrum* strain

收稿日期: 2025-09-09

基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系项目(CARS-24-C-01); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目(21422012329)

作者简介: 魏黎欣(1999-), 女, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 主要从事生防卵菌 GAQ1 的功能研究。(E-mail) 986932891@qq.com

通讯作者: 乐秀虎, (E-mail) lexihu@163.com; 王楠, (E-mail) 20230035@jaas.ac.cn

GAQ1 ginger isolated from ginger field soil, and systematically evaluated its antagonistic effects against *P. aphanidermatum*, its efficacy in controlling cucumber damping-off, and its growth-promoting effects on cucumber plants. The results demonstrated that GAQ1 could achieve mycoparasitism through hyphal coiling, leading to extensive inactivation or death of *P. aphanidermatum* hyphae. Pot experiments revealed that GAQ1 treatment significantly

reduced the incidence of cucumber damping-off, with the disease index decreasing from 71.9 to 21.9 and a control efficacy of 69.57%. Furthermore, after four weeks of GAQ1 treatment, the growth parameters of cucumber plants including plant height, root length, leaf number, SPAD value, aboveground fresh weight, and underground fresh weight were significantly enhanced, with increases of 9.72%, 65.48%, 18.67%, 5.74%, 24.19%, and 78.35%, respectively. In conclusion, *P. oligandrum* GAQ1 not only exhibited remarkable control efficacy against cucumber damping-off but also significantly promoted plant growth. This study provides data support for the development and application of GAQ1, offers a new candidate strain resource for the biological control of diseases caused by *P. aphanidermatum*, and holds significant importance for advancing sustainable green agriculture.

Key words: *Pythium oligandrum*; *Pythium aphanidermatum*; *Cucumis sativus*; biological control; growth-promoting effect

寡雄腐霉 (*Pythium oligandrum*) 是一种用于生物防治的卵菌,广泛分布于多种作物根际。该菌隶属于卵菌门 (Oomycete) 霜霉目 (Peronosporales) 腐霉科 (Pythiaceae) 腐霉属 (*Pythium*)^[1]。该属成员多为病原菌,而寡雄腐霉不仅可以有效抑制或杀灭植物病原真菌、卵菌及线虫,还能显著促进植物生长,展现出重要的农业应用价值,显著区别于其他腐霉属成员^[2-5]。寡雄腐霉可在植物根际迅速定殖并争夺空间和养分,同时可分泌多种酶类,包括几丁质酶、纤维素酶、果胶酶和葡聚糖酶等细胞壁降解酶类及多种蛋白酶,这些酶协同降解病原菌细胞壁,之后通过菌丝直接侵袭病原菌并消耗病原菌营养物质,导致其细胞死亡^[3]。同时,寡雄腐霉可分泌寡雄蛋白等微生物相关分子,激活植物体内的茉莉酸和乙烯依赖性信号通路,进而提升植物的系统性免疫力,增强植物对病原菌的防御能力^[1]。此外,寡雄腐霉可分泌色胺等植物生长素前体,提高内源吲哚乙酸 (IAA) 含量,促进植物根系生长,提升其吸收养分的能力,并提高植物对非生物胁迫的抗性^[6]。已报道的寡雄腐霉 PO-1^[7]、CQ2010^[8]、S213N^[9] 及 DV74 等菌株对疫霉菌 (*Phytophthora*)^[10]、腐霉菌 (*Pythium*)^[11-12]、镰刀菌 (*Fusarium*)^[13]、立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani*)^[14-15] 等病原菌导致的病害具有良好的防治效果,同时对水稻^[16]、辣椒^[12]、烟草^[9]、番茄^[17]、草莓^[18] 等多种作物有明显的促生作用。然而,目前成功商品化并广泛应用的寡雄腐霉菌株极为有限,随着环保型农业需求的日益增长,亟需开发更多来源的寡雄腐霉产品,以构建更为精准、高效且持久的病害绿色防治新策略。

瓜果腐霉 (*Pythium aphanidermatum*) 是一种重要的土传病原菌,寄主范围广泛,可侵染包括辣椒^[19]、黄瓜^[20] 等瓜果蔬菜及小麦^[21]、大豆^[10] 等粮

油作物在内的 60 多种植物,引起幼苗猝倒病、成株期根腐病及茎基腐病,对农业生产构成严重威胁^[22]。该病原菌通过卵孢子的形态在土壤和水中长期存活,借助雨水及灌溉传播;在适宜条件下瓜果腐霉萌发产生芽管或孢子囊,并直接侵染寄主植物的种子、根部和茎基部等,导致根茎缢缩、腐烂、植株倒伏甚至死亡,从而引发猝倒病^[23-24]。黄瓜 (*Cucumis sativus* L., 葫芦科) 是瓜果腐霉的重要寄主之一,作为一种在全球广泛栽培的蔬菜作物,具有显著的生物与经济价值。中国是全球黄瓜最主要的生产国,种植面积约占全球的 54%,2024 年产量更达到全球总产量的 70%^[25-26]。然而,黄瓜在幼苗期对瓜果腐霉尤为敏感,在高温高湿条件下更易受到严重侵染,导致产量显著下降^[27],瓜果腐霉的侵染已成为制约黄瓜安全生产的重要因素。目前,对该病原菌的防治高度依赖化学药剂,微生物防治研究主要集中于链霉菌属^[28]、芽孢杆菌属^[29]、木霉菌属^[30] 以及假单胞菌属^[31] 等类群。因此,亟需发掘更多高效、绿色且适于规模化应用的生防微生物资源,为解决瓜果腐霉引起的病害提供可持续防治策略。

实验室前期分离获得的寡雄腐霉 GAQ1 菌株,可通过菌丝缠绕作用,显著抑制群结腐霉 (*Pythium myriotylum*)^[32]、辣椒疫霉 (*Phytophthora capsici*)^[12] 菌丝生长,导致其大面积死亡。同时对上述病原菌引起的生姜茎基腐病及辣椒疫病分别有 80.00% 和 69.16% 的防治效果。此外,寡雄腐霉菌株 GAQ1 处理对番茄和辣椒的株高、根长及叶绿素含量等生长指标均有显著促进作用^[4,12]。然而,寡雄腐霉菌株 GAQ1 对瓜果腐霉所致的作物苗期猝倒病是否有防治效果尚未明确。本研究拟通过平板对峙试验和盆栽试验,探究寡雄腐霉菌株 GAQ1 对瓜果腐霉菌的拮抗作用、对黄瓜猝倒病的防治效果以及对黄瓜幼

苗的促生作用。本研究旨在为 GAQ1 菌株的开发应用提供杀菌谱方面的数据支撑,并为瓜果腐霉的防治发掘新的生物防治菌种资源。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试菌株:寡雄腐霉菌株 GAQ1 和瓜果腐霉菌由江苏省农业科学院植物保护研究所提供。

V8 固体培养基:取 V8 果蔬汁 100 mL,加入碳酸钙(CaCO_3)1 g,混匀后于 5 000 r/min 离心 5 min。取上清液,经 3 层纱布过滤后,加入琼脂粉 15 g,用 ddH_2O 定容至 1 L,于 121 °C 高压灭菌 20 min。

V8 液体培养基:配制方法同 V8 固体培养基,但不添加琼脂粉。

供试黄瓜品种为新泰密刺。将黄瓜种子播种于装有营养土基质的育苗穴盘中,置于 25 °C 玻璃温室 内培养,待幼苗生长至 2 片子叶充分展开时备用。

1.2 试验方法

1.2.1 寡雄腐霉菌 GAQ1 对瓜果腐霉的平板拮抗试验 将瓜果腐霉和寡雄腐霉 GAQ1 菌株分别接种至 V8 固体培养基上,在 25 °C 恒温培养箱中黑暗培养 36 h。使用直径为 6 mm 打孔器,在寡雄腐霉菌株 GAQ1 和瓜果腐霉菌落边缘取菌饼备用。在 V8 固体培养基一侧接种寡雄腐霉菌株 GAQ1 菌饼,另一侧接种瓜果腐霉菌饼。以两侧均接种寡雄腐霉菌株 GAQ1 菌饼和两侧均接种瓜果腐霉菌饼作为对照组,每组处理包含 3 个以上重复。分别在 24 h 和 48 h 观察寡雄腐霉菌株 GAQ1 和瓜果腐霉的生长情况,并用 10 mL 0.01% 台盼蓝染色 3 min,再用纯水冲洗至背景色基本消失,观察染色情况,同时在显微镜下观察并记录寡雄腐霉菌株 GAQ1 对瓜果腐霉进行拮抗时的菌丝形态。

1.2.2 寡雄腐霉菌株 GAQ1 对黄瓜猝倒病的盆栽防效试验 感染瓜果腐霉病麦粒的培养:将小麦浸泡于无菌水中,每日观察吸水情况并换水。待小麦体积膨胀至原体积 2 倍时,用纱布过滤多余水分,用无菌水冲洗 3 遍,于 121 °C 灭菌 20 min,备用。用无菌打孔器从生长在 V8 固体培养基上的瓜果腐霉菌落边缘取菌饼,扩繁至 V8 固体培养基中央。25 °C 培养至菌丝长至接近培养皿边缘。将备用的小麦粒均匀铺于长满瓜果腐霉菌丝的固体培养基上,于 25 °C 继续培养 7 d,直至菌丝完全包裹小麦粒,备用。取

新鲜的直径为 6 mm 的寡雄腐霉菌株 GAQ1 菌饼 60 个,加入装有 100 mL V8 液体培养基的 500 mL 锥形瓶中,置于 25 °C 的摇床,于 90 r/min 摇培 3 d 至产生寡雄腐霉菌株 GAQ1 菌球,混匀备用。

移栽处于 2 张子叶期的黄瓜幼苗,每盆种植 1 株。待幼苗生长至一叶期时,将预先备好的寡雄腐霉菌株 GAQ1 发酵液进行灌根处理,每盆用量为 50 mL,并以未灌根的幼苗作为对照组。灌根 24 h 后,参照 Daly 等^[32]的接种方式,将包裹菌丝的小麦种子作为接种物,埋入黄瓜根际附近(距离黄瓜茎 1~2 cm)的基质中,深度为 4~5 cm。接种病麦粒 14 d 后观察地上部病害症状(如叶片黄化、死亡),参照 Pu 等^[33]的分级标准评估病害严重程度,并计算病情指数及寡雄腐霉菌株 GAQ1 处理对黄瓜猝倒病的防治效果。本研究设置只接种瓜果腐霉病麦粒和接种寡雄腐霉菌株 GAQ1 发酵液与瓜果腐霉病麦粒 2 个处理组,每个处理组至少包含 8 棵植株,重复 3 次。

发病严重程度分级标准:0 级,黄瓜叶片及茎基部生长态势正常,未呈现发病症状;1 级,黄瓜茎基部出现典型的水渍状病斑;2 级,黄瓜茎基部出现扩散性水渍病斑,发展为褐色斑痕;3 级,黄瓜植株基部茎秆出现软腐现象并导致幼苗发生倒伏;4 级,黄瓜茎基部发生腐烂,导致植株最终死亡。

病情指数 = $\frac{\sum(\text{各级病株数} \times \text{对应发病级别})}{(\text{处理总株数} \times \text{最高级数})} \times 100$

防治效果 = $\frac{(\text{对照平均病情指数} - \text{处理平均病情指数})}{\text{对照平均病情指数}} \times 100\%$

1.2.3 寡雄腐霉菌株 GAQ1 对黄瓜的促生作用 黄瓜幼苗移栽后生长 7 d,接种寡雄腐霉菌株 GAQ1 发酵液,操作方法参照方法 1.2.2。14 d 后再次进行灌根处理,对照组则灌入等量的清水。接种寡雄腐霉菌株 GAQ1 28 d 时,测量植株的 SPAD 值。随后从土壤中轻轻取出植物根部,用清水冲洗掉根部附着的基质,冲洗干净后吸干多余水分,随后测量植物的株高、根系长度、茎秆直径、叶片数以及地上部和地下部的鲜重。测量完毕后,将植株置于烘箱中,于 105 °C 杀青 30 min 然后于 75 °C 烘干至重量不变,分别测量地上部分与地下部分的干燥质量。试验共设只接种寡雄腐霉菌株 GAQ1 发酵液与加入等量清水 2 个处理组,每个处理组至少包含 8 棵植株,重复 3 次。

1.3 数据分析

使用 Prism10.1.2 软件对测量数据进行统计分析。

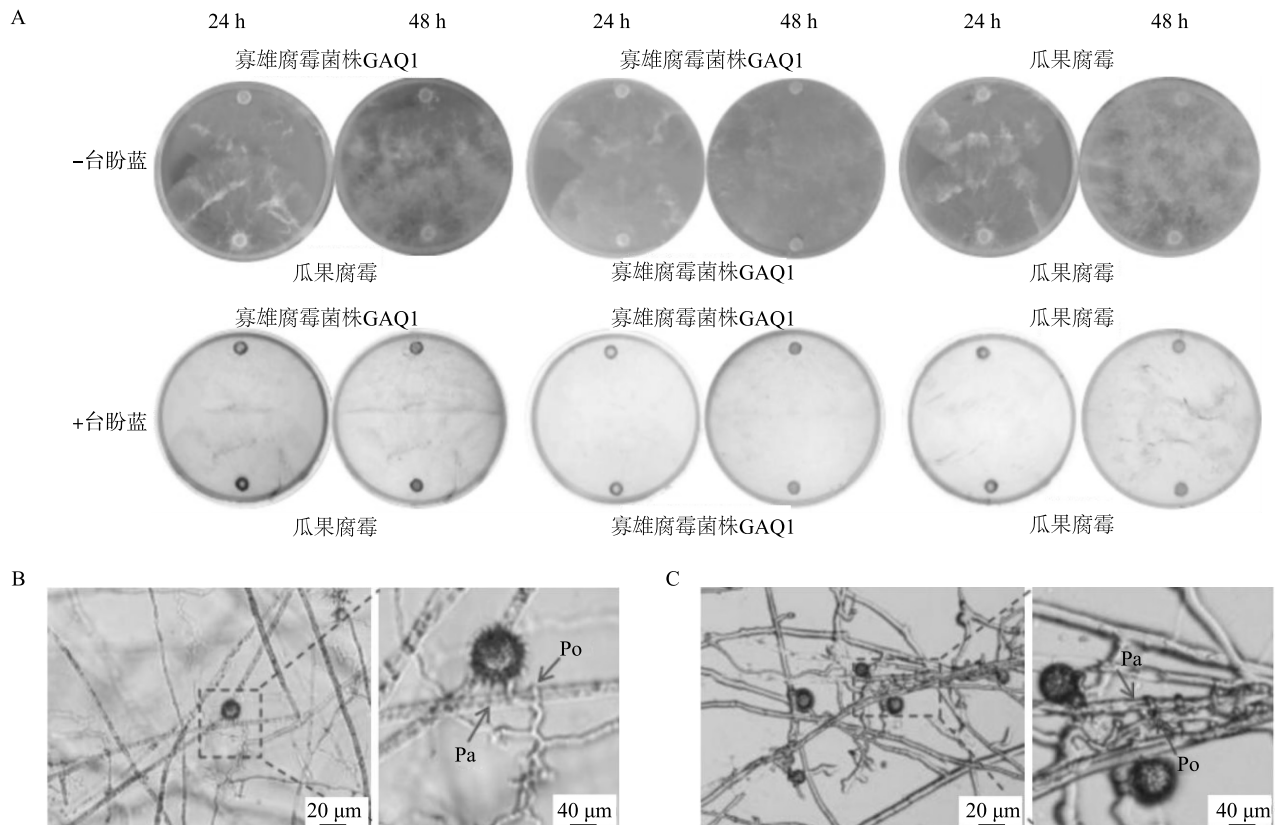
2 结果与分析

2.1 寡雄腐霉菌株 GAQ1 对瓜果腐霉的拮抗作用

本研究采用平板对峙法,结合台盼蓝染色及显微观察技术,评估了寡雄腐霉菌株 GAQ1 对瓜果腐霉的拮抗作用。结果显示,寡雄腐霉菌株 GAQ1 与瓜果腐霉在 V8 固体培养基上的生长速率无显著差异。当菌丝前沿尚未接触时,双方均未出现台盼蓝染色现象,表明菌丝仍保持活性。当菌丝生长 24 h 时,2 株菌株对峙区域台盼蓝染色开始显示蓝色,表明部分菌丝已丧失活性;随着培养时间延长至 48 h,蓝色区域逐渐向瓜果腐霉方向扩展(图 1A)。台盼蓝染色结果明确显示,寡雄腐霉成功拮抗了瓜果腐霉,因为菌丝失活现象仅限于瓜果腐霉的原有生长

区域。而在同种菌株对峙(如寡雄腐霉菌株 GAQ1-寡雄腐霉菌株 GAQ1 及瓜果腐霉-瓜果腐霉)的情况下,未观察到台盼蓝染色现象(图 1A)。

光学显微镜观察发现,台盼蓝染色主要发生在较粗的瓜果腐霉菌丝上;而寡雄腐霉菌株 GAQ1 的纤细菌丝则未被染色(图 1B)。试验中清晰观察到寡雄腐霉菌株 GAQ1 的细菌丝环绕在瓜果腐霉染色的粗菌丝上,存在菌丝缠绕现象(图 1C)。同时,还观察到原有瓜果腐霉生长区域出现了刺状卵孢子,该结构是寡雄腐霉菌株 GAQ1 及其近缘种的典型特征^[34],而瓜果腐霉不具备此特性。刺状卵孢子的出现进一步证实了寡雄腐霉菌株 GAQ1 已定殖于瓜果腐霉原先生长的培养板区域。此试验结果表明寡雄腐霉菌株 GAQ1 对瓜果腐霉存在明显的寄生作用。



A:寡雄腐霉菌株 GAQ1 与瓜果腐霉在自对峙(寡雄腐霉菌株 GAQ1-寡雄腐霉菌株 GAQ1、瓜果腐霉-瓜果腐霉)及互对峙(寡雄腐霉菌株 GAQ1-瓜果腐霉)培养中的菌丝状态代表性图片,分别于菌丝生长 24 h 及 48 h 进行台盼蓝染色;B:寡雄腐霉菌株 GAQ1 菌丝缠绕瓜果腐霉菌丝经台盼蓝染色后的代表性显微图片(比例尺:20 μm 与 40 μm);C:寡雄腐霉菌株 GAQ1 菌丝缠绕瓜果腐霉菌丝的代表性显微图片(比例尺:20 μm 与 40 μm)。Po 旁箭头指向寡雄腐霉菌株 GAQ1 菌丝(细);Pa 旁箭头指向瓜果腐霉菌丝(粗)。图中虚线框表示低倍镜(20 μm 标尺对应视图)下被选取、随后在高倍镜(40 μm 标尺对应视图)中详细观察的区域;虚线则用于连接低倍与高倍视图。

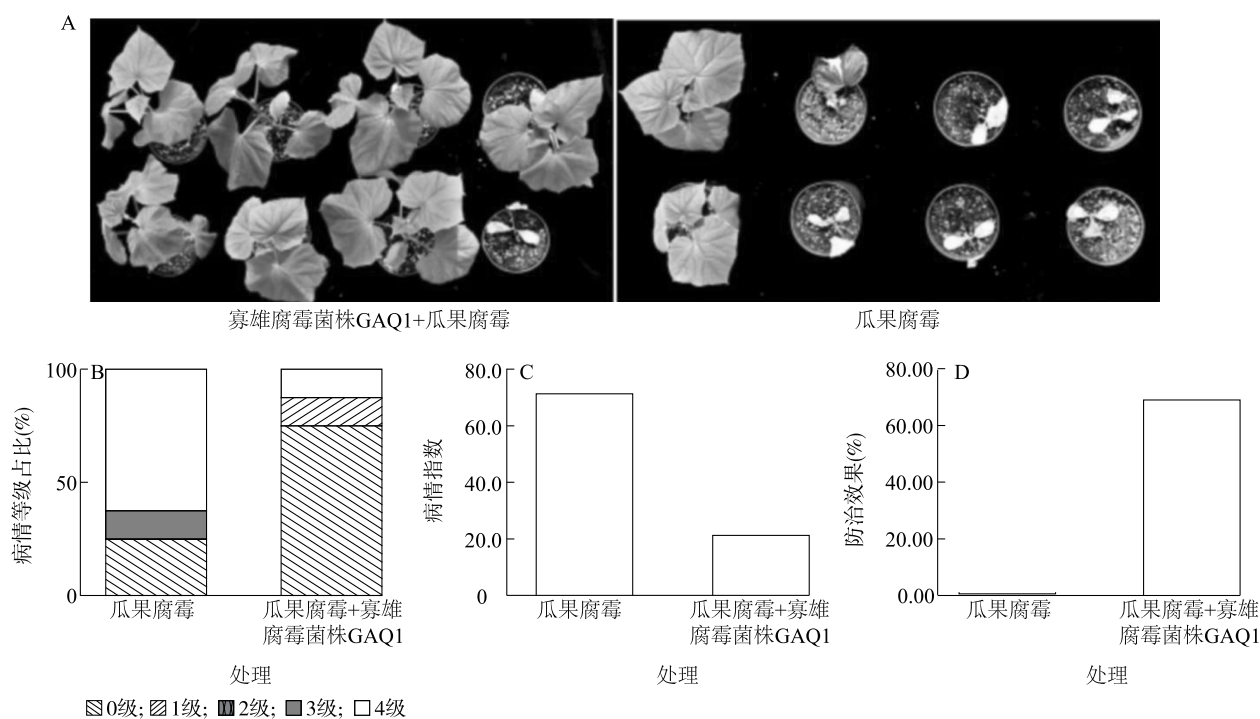
图 1 寡雄腐霉菌株 GAQ1 对瓜果腐霉的平板拮抗作用

Fig.1 Antagonistic effect of *Pythium oligandrum* strain GAQ1 against *Pythium aphanidermatum* in plate culture

2.2 寡雄腐霉菌株 GAQ1 对黄瓜猝倒病具有防治效果

为考察寡雄腐霉菌株 GAQ1 对瓜果腐霉引发的病害的防治潜力,本研究选择感病黄瓜品种新泰密刺为试验材料,生长 7 d 时使用寡雄腐霉菌株 GAQ1 发酵液灌根,24 h 后接种瓜果腐霉包裹的小麦粒,于接种第 14 d 观察地上部发病情况。结果显示,仅接种瓜果腐霉的对照组中黄瓜幼苗存活率为 37.5%,而接种瓜果腐霉和寡雄腐霉菌株 GAQ1 的处理组中黄瓜幼苗存活率为 87.5%,比对照组显著

提高了 50.0 个百分点(图 2A)。统计不同处理的病情等级发现,对照组 4 级和 3 级占比 75.0%,而经寡雄腐霉菌株 GAQ1 处理后,4 级和 3 级占比下降为 12.5%(图 2B);对照组病情指数为 71.9,经寡雄腐霉 GAQ1 菌株处理的黄瓜病情指数降至 21.9,显著低于对照组(图 2C),防治效果达到 69.57%(图 2D)。以上结果充分表明,寡雄腐霉菌株 GAQ1 可有效降低黄瓜幼苗的病情等级,对黄瓜猝倒病具有防治作用。



A: 接种 14 d 后不同处理组(对照组:仅接种瓜果腐霉;处理组:寡雄腐霉菌株 GAQ1 处理 24 h 后接种瓜果腐霉)黄瓜植株的发病表型; B: 不同处理组黄瓜猝倒病的病情等级; C: 不同处理组黄瓜猝倒病的病情指数; D: 施用寡雄腐霉菌株 GAQ1 后的防治效果。

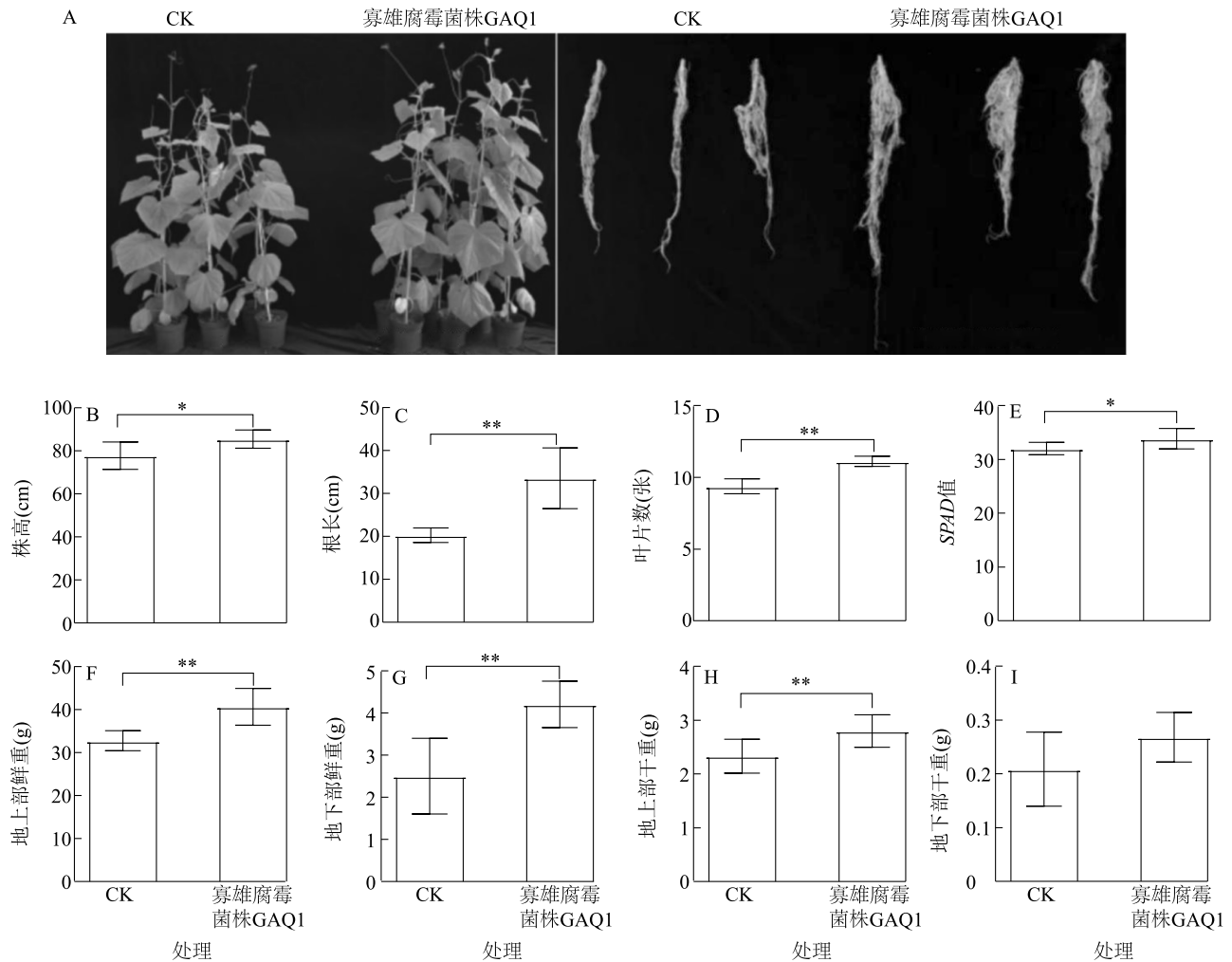
图 2 寡雄腐霉菌株 GAQ1 对黄瓜猝倒病的盆栽防治效果

Fig.2 The pot experiment on the control effect of *Pythium oligandrum* strain GAQ1 against cucumber damping-off disease

2.3 寡雄腐霉菌株 GAQ1 促进黄瓜的生长

试验室前期研究发现寡雄腐霉菌株 GAQ1 对辣椒和番茄有显著的促生作用,为了明确 GAQ1 对黄瓜是否有促生作用,以清水为对照,试验组加入菌株 GAQ1 发酵液,进行盆栽试验。结果表明,经寡雄腐霉 GAQ1 菌株处理 28 d 后,黄瓜植株的长势、株高明显优于对照组植株,根系与对照组相比更发达(图 3A)。统计不同处理生长指

标发现,与对照组相比,使用 GAQ1 处理 28 d 后黄瓜植株的株高增加 9.72%,根长增加 65.48%,叶片个数增加 18.67%,SPAD 值增加 5.74%,黄瓜植株地上部鲜重增加 24.19%,黄瓜植株地下部鲜重增加 78.35%,地上部干重增加 20.02%,地下部干重增加 28.44%(图 3B~图 3I)。总体而言,寡雄腐霉菌株 GAQ1 对黄瓜植株有明显的促生长作用。



A:不同处理组[对照组:清水(CK);试验组:寡雄腐霉菌株 GAQ1 发酵液灌根处理 28 d(GAQ1)]生长 35 d 后黄瓜植株的地上部及地下部生长表型;B~I:不同处理组株高(B)、根长(C)、叶片数(D)、SPAD 值(E)、地上部鲜重(F)、地下部鲜重(G)、地上部干重(H)、地下部干重(I)。*、** 分别表示经 Student's *t* 检验分析,对照组与处理组存在显著差异($P < 0.05$)、极显著差异($P < 0.01$),误差线代表标准误。

图 3 寡雄腐霉菌株 GAQ1 对黄瓜的促生作用

Fig.3 Growth-promoting effects of *Pythium oligandrum* strain GAQ1 on cucumber

3 讨论

寡雄腐霉是一种卵菌类微生物,在生物防治领域具有广阔的应用前景,自 1943 年由美国植物病理学家 Charles Drechsler 首次报道以来,相关研究已逾 80 年^[1]。大量研究结果表明,寡雄腐霉不仅能有效抑制真菌、卵菌、线虫、细菌等植物病原的生长,还具有明显的植物促生作用^[3-4,15]。然而,该菌在实际生产应用方面存在田间条件下菌株稳定性和生物活性难以维持等瓶颈,导致目前商业化应用成功的案例极为有限,其中应用成功的案例较为知名的是由捷克生物制剂股份有限公司开发的商品化微生物菌剂

“捷越”(1 g 含 1.00×10^6 个孢子的寡雄腐霉菌可湿性粉剂)。为突破这些限制,从田间环境中分离出来源多样、稳定性更高且活性更强的菌株是一种可行的策略。

本研究所用寡雄腐霉 GAQ1 菌株分离自生姜茎基腐病发病田块中健康植株根际土壤^[32]。前期研究结果已明确该菌株对卵菌门重要病原菌——群结腐霉和辣椒疫霉菌引起的病害具有良好的防治效果(防治效果 $> 69\%$)^[12,32]。然而,寡雄腐霉菌株 GAQ1 对卵菌门其他病原菌(如瓜果腐霉)的生防效果尚不明确。本研究发现,寡雄腐霉菌株 GAQ1 处理能有效拮抗瓜果腐霉,并减轻由其引发的黄瓜幼

苗猝倒病,使病情指数显著下降 50.0 个百分点,防治效果达到 69.57%。以上结果提示寡雄腐霉菌株 GAQ1 可能对卵菌病原引起的根腐病具有广谱防治潜力。

本研究还观察到寡雄腐霉菌株 GAQ1 处理后,黄瓜 SPAD 值增加 5.74%,同时,黄瓜幼苗的株高、根长、植株鲜重等生长指标显著或极显著提升。叶绿素含量的提升,能够有效增强光合作用,进而促使植物吸收更多养分,最终促进生长。李伟山等^[12]研究发现,用寡雄腐霉菌株 GAQ1 处理后,辣椒植株的叶绿素 a 含量提高 13.72%,叶绿素 b 含量提高 9.72%,株高增加 10.11%,株重增加 33.23%,根重增加 24.72%。以上结果说明寡雄腐霉菌株 GAQ1 可能通过提高植物叶绿素含量,进而提高植物生物量,促进植物生长。然而,寡雄腐霉菌株 GAQ1 在不同田间环境下的生防效果及促生作用的稳定性与普适性,后续仍需通过多区域田间试验加以评估。

为探究其生防机制,本研究观察到寡雄腐霉菌株 GAQ1 可通过菌丝缠绕瓜果腐霉菌丝,同时发现瓜果腐霉菌丝与寡雄腐霉菌株 GAQ1 菌丝接触后,即可被台盼蓝染为蓝色,且随着接触时间的延长,蓝色的面积不断增大,说明瓜果腐霉菌丝大面积失活死亡。前期研究也报道了该菌株可分别对群结腐霉和辣椒疫霉菌的菌丝产生类似的缠绕作用,导致病原菌菌丝断裂、解体并最终失活,从而有效抑制其生长^[12,32]。转录组与蛋白组学分析结果揭示,在寡雄腐霉菌株 GAQ1 与群结腐霉拮抗过程中,多种蛋白水解酶及纤维素酶的表达量显著上调^[32]。表明这些酶类可能通过破坏群结腐霉细胞壁的完整性,致使其内部结构崩解,从而发挥拮抗作用。与多数寡雄腐霉菌株相似,利用菌丝缠绕、水解酶降解的重寄生作用可能是寡雄腐霉菌株 GAQ1 发挥生防效果的主要机制。

值得注意的是,前期研究发现在离体叶片接种和盆栽接种试验中,寡雄腐霉菌株 GAQ1 对辣椒疫霉菌病的防效均显著优于商品化菌剂“多利维生”(与“捷越”为同一产品,菌株均为 DV74/M1,“捷越”为“多利维生”在中国市场使用的品牌名)。然而寡雄腐霉菌株 GAQ1 发酵液处理组辣椒植株的株高、株重及根重等生长指标均低于“多利维生”菌剂处理组,降幅分别为 6.67%、12.25%和 3.71%^[12]。这一现象清晰地表明,不同来源的寡雄腐霉菌株在生物

防治效能与植物促生作用方面可能存在显著差异。因此,深入解析更多寡雄腐霉菌株的特性,并基于其各自的优势如强拮抗性、强促生性或特定环境的适应性,开发具有针对性的菌株资源,对于优化寡雄腐霉的生防应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] BENHAMOU N, LE FLOCH G, VALLANCE J, et al. *Pythium oligandrum*: an example of opportunistic success [J]. *Microbiology*, 2012, 158(11): 2679-2694.
- [2] 姜一鸣, 黄海鹰, 陈勇. 寡雄腐霉生防机理及应用研究进展 [J]. *中国生物防治学报*, 2017, 33(3): 401-407.
- [3] BĚLONOŽNÍKOVÁ K, HYSKOVÁ V, CHMELÍK J, et al. *Pythium oligandrum* in plant protection and growth promotion: secretion of hydrolytic enzymes, elicitors and tryptamine as auxin precursor [J]. *Microbiological Research*, 2022, 258: 126976.
- [4] XUE Y W, LI W S, LI M N, et al. Biological control of a root-knot nematode *Meloidogyne incognita* infection of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) by the oomycete biocontrol agent *Pythium oligandrum* [J]. *Journal of Fungi*, 2024, 10(4): 265.
- [5] 薛原, 王真娣, 袁嘉雯, 等. 寡雄腐霉生防机制及其在农业中的应用进展 [J]. *生物灾害科学*, 2024, 47(2): 149-158.
- [6] PICARD K, PONCHET M, BLEIN J P, et al. Oligandrin. A proteinaceous molecule produced by the mycoparasite *Pythium oligandrum* induces resistance to *Phytophthora parasitica* infection in tomato plants [J]. *Plant Physiology*, 2000, 124(1): 379-395.
- [7] 王子洋, 熊雨洁, 冯发运, 等. 寡雄腐霉对禾谷镰刀菌防效及其产孢诱导剂筛选 [J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(18): 101-107.
- [8] 耿明明, 黄建国. 寡雄腐霉发酵液的动物毒性及对辣椒的促生防病效应 [J]. *植物保护学报*, 2016, 43(2): 307-313.
- [9] 赵建, 吴叶宽, 袁玲, 等. 寡雄腐霉发酵液对烤烟生长的影响及对烟草黑胫病的防治作用 [J]. *植物保护学报*, 2013, 40(1): 68-72.
- [10] SAYED S R M, ABDELMOHSEN S A M, ABDELZAHER H M A, et al. Myco-suppression analysis of soybean (*Glycine max*) damping-off caused by *Pythium aphanidermatum* [J]. *Plants*, 2021, 10(4): 788.
- [11] YOU X D, BARRAUD J, TOJO M. Suppressive effects of *Pythium oligandrum* on soybean damping off caused by *P. aphanidermatum* and *P. myriotylum* [J]. *Annual Report of the Kansai Plant Protection Society*, 2019, 61: 9-13.
- [12] 李伟山, 刁敏, 周冬梅, 等. 寡雄腐霉 GAQ1 对辣椒疫病的防效及对辣椒的促生作用 [J]. *植物保护学报*, 2022, 49(3): 956-965.
- [13] NG C A, PERNICA M, LITVANOVA K, et al. Biocontrol using *Pythium oligandrum* during malting of *Fusarium*-contaminated barley [J]. *Fermentation*, 2023, 9(3): 257.
- [14] PATKOWSK E. Effectiveness of grapefruit extract and *Pythium*

- oligandrum* in the control of bean and peas pathogens[J]. Journal of Plant Protection Resource, 2006, 46(1): 15-28.
- [15] CHEN S Q, DALY P, ZHOU D M, et al. The use of mutant and engineered microbial agents for biological control of plant diseases caused by *Pythium*; achievements versus challenges [J]. Fungal Biology Reviews, 2022, 40: 76-90.
- [16] 欧阳由男, 夏陆欣, 朱练峰, 等. 寡雄腐霉制剂“多利维生”对水稻的促长与防病增产效果[J]. 中国稻米, 2007, 13(6): 48-51.
- [17] 贾瑞莲, 耿明明, 袁玲. 寡雄腐霉发酵液对温室番茄生长及灰霉病的防治作用[J]. 植物保护学报, 2015, 42(5): 827-833.
- [18] VESTBERG M, KUKKONEN S, SAARI K, et al. Microbial inoculation for improving the growth and health of micropropagated strawberry[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 27(3): 243-258.
- [19] MUTHUKUMAR A, ESWARAN A, SANJEEVKUMAS K. Exploitation of *Trichoderma* species on the growth of *Pythium aphanidermatum* in chilli [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2011, 42(4): 1598-1607.
- [20] POSTMA J, BONANTS P J, VAN OS E A. Population dynamics of *Pythium aphanidermatum* in cucumber grown in closed systems [J]. Mededelingen, 2001, 66(2a): 47-59.
- [21] AL-SHEIKH H. Two pathogenic species of *Pythium*: *P. aphanidermatum* and *P. diclinum* from a wheat field [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2010, 17(4): 347-352.
- [22] RAI M, ABD-ELSALAM K A, INGLE A P. *Pythium* [M]. Boca Raton; CRC Press, 2020: 77-91.
- [23] AL-MAHMOOLI I H, FINCKH M R, VELAZHAHAN R, et al. *Pythium* and *Globisporangium* species associated with cucumber rhizosphere causing damping-off and their effects on cucumber seed decay in Oman [J]. Archives of Microbiology, 2024, 206(9): 374.
- [24] PARVEEN T, MEENA M, JAIN T, et al. *Pythium aphanidermatum* and its control measures [M]. Boca Raton; CRC Press, 2020: 299-313.
- [25] KAUR M, SHARMA P. Recent advances in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2022, 97(1): 3-23.
- [26] FENG S J, ZHANG J P, MU Z H, et al. Recent progress on the molecular breeding of *Cucumis sativus* L. in China [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2020, 133(5): 1777-1790.
- [27] AFANDI A, BORJIGIN C, HIENO A, et al. Highly clonal *Pythium aphanidermatum* population infecting greenhouse plants in Japan [J]. Archives of Phytopathology and Plant Protection, 2023, 56(16): 1255-1266.
- [28] KAWICHA P, PENGPROH R, THANYASIRIWAT T, et al. Bio-products derived from *Bacillus stercoris* isolate B. PNR1 and *Streptomyces* sp. isolate S. PNR29 for enhanced plant growth and disease control in tomato [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2025, 53(5): 1530-1546.
- [29] THEPBANDIT W, NAWONG S, ATHINUWAT D. Potential of a microbial co-culture composed of *Bacillus vallismortis* TU-Organ21 and *Bacillus subtilis* TU-Organ1 to improve the efficacy of controlling Damping-off caused by *Pythium aphanidermatum* in kale [J]. Plant Pathology, 2025, 74(6): 1527-1543.
- [30] 陈凯, 隋丽娜, 赵忠娟, 等. 木霉共培养发酵对黄瓜枯萎病的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(1): 108-114.
- [31] SOROUR A, ZOBAIR N, GHANEM K, et al. Rhamnolipid from *Pseudomonas* sp. as a green surfactant for enhanced phytoremediation [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 29780.
- [32] DALY P, CHEN S Q, XUE T Q, et al. Dual-transcriptomic, microscopic, and biocontrol analyses of the interaction between the bioeffector *Pythium oligandrum* and the *Pythium* soft-rot of ginger pathogen *Pythium myriotylum* [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 765872.
- [33] PU X M, XIE B Y, LI P Q, et al. Analysis of the defence-related mechanism in cucumber seedlings in relation to root colonization by nonpathogenic *Fusarium oxysporum* CS-20 [J]. FEMS Microbiology Letters, 2014, 355(2): 142-151.
- [34] PLAATSNITERINK A J V D. Monograph of the genus *Pythium* [J]. Studies in Mycology, 1981, 21: 1-244.

(责任编辑: 陈海霞)