

基础研究

金钗石斛促生长内生真菌 DN592 对番茄生长与果实营养品质的影响

刘元士^{1,2}, 何苏静², 王江娜², 李林², 余侃³, 袁雷¹, 李俊⁴, 起国海¹, 赵远卓², 徐德林²

(1. 遵义市种植业发展服务中心, 贵州 遵义 563000; 2. 遵义医科大学 基础医学院医学仪器分析教研室, 贵州 遵义 563006; 3. 遵义市农村发展服务中心, 贵州 遵义 563000; 4. 遵义医科大学 基础医学院免疫学教研室, 贵州 遵义 563006)

[摘要] **目的** 探讨中药材金钗石斛来源的内生真菌 DN592 对番茄生长及果实营养品质的影响, 为药用植物内生真菌在农产品营养强化中的应用提供依据。**方法** 通过盆栽及田间试验, 设置不同剂量 DN592 菌液处理, 测定番茄株高、根鲜重等生长指标, 以及果实甜度、番茄红素、维生素 C 等营养品质指标。**结果** 盆栽条件下, DN592 处理均显著抑制番茄株高, 同时根鲜重最大增幅达 104.0% ($P < 0.05$); 果实甜度、番茄红素和维生素 C 含量最高分别提升 50.2% ($P < 0.05$)、54.2% ($P < 0.05$) 和 88.7% ($P < 0.001$), 中剂量处理促根与提质效果更为均衡。田间试验中, 低剂量 DN592 处理显著增加果实横径与纵径 ($P < 0.05$), 营养品质指标呈上升趋势但未达显著水平。**结论** 金钗石斛内生真菌 DN592 兼具控旺促根与提升番茄营养品质的双重效应, 初步证实了药源内生菌转化应用于蔬菜生产的潜力, 可为绿色微生物菌剂开发提供新的菌种资源。

[关键词] 金钗石斛; 内生真菌 DN592; 番茄; 生长调控; 果实营养品质

[中图分类号] S641.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2096-8159(2026)07-0702-09

Effects of the growth-promoting endophytic fungus DN592 from *Dendrobium nobile* on tomato growth and fruit nutritional quality

Liu Yuanshi^{1,2}, He Sujing², Wang Jiangna², Li Lin², Yu Kan³, Yuan Lei¹, Li Jun⁴, Qi Guohai¹, Zhao Yuanzhuo², Xu Delin²

(1. Zunyi Planting Industry Development Service Center, Zunyi Guizhou 563000, China; 2. Department of Medical Instrumental Analysis, School of Basic Medical Sciences, Zunyi Medical University, Zunyi Guizhou 563006, China; 3. Zunyi Rural Development Service Center, Zunyi Guizhou 563000, China; 4. Department of Immunology, School of Basic Medical Sciences, Zunyi Medical University, Zunyi Guizhou 563006, China)

[Abstract] **Objective** This study aimed to investigate the effects of the endophytic fungus DN592, isolated from the Chinese medicinal plant *Dendrobium nobile*, on tomato growth and fruit nutritional quality, and to provide a basis for the application of medicinal plant-derived endophytic fungi in the nutritional biofortification of agricultural products. **Methods** Pot and field experiments were conducted with different doses of a DN592 fungal suspension. Growth indicators including plant height and root fresh weight were measured. In addition, fruit nutritional quality indicators such as sugar content, lycopene, and vitamin C were determined. **Results** Under pot conditions, all DN592 treatments significantly inhibited tomato plant height, while root fresh weight increased by up to 104.0% ($P < 0.05$). The maximum increases in fruit sugar content, lycopene, and vitamin C were 50.2% ($P < 0.05$), 54.2% ($P < 0.05$), and 88.7% ($P < 0.001$), respectively. The medium-dose treatment exhibited a more balanced effect on both root promotion and quality improvement. In the field experiment, the low-

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (NO:31960074); 教育部供需对接就业育人项目 (NO:2025030310008); 教育部产学合作协同育人项目 (NO:230901414190927)。

[通信作者] 徐德林, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 中药材资源开发与利用, E-mail: xudel2000@163.com。

dose DN592 treatment significantly increased the transverse and longitudinal diameters of tomato fruits ($P < 0.05$). The nutritional quality indicators showed an upward trend but did not reach significant levels. **Conclusion** The endophytic fungus DN592 from *Dendrobium nobile* demonstrates dual effects of suppressing excessive shoot growth and promoting root development while enhancing tomato fruit nutritional quality. This finding preliminarily confirms the potential of applying medicinal plant-derived endophytic fungi to vegetable production and provides new strain resources for the development of green microbial agents.

[**Key words**] *Dendrobium nobile*; endophytic fungus DN592; tomato; growth regulation; fruit nutritional quality

植物内生菌是指定殖于植物组织内部而不引起宿主明显病害症状的微生物类群,可与宿主植物形成稳定而复杂的共生关系,通过调控宿主激素平衡、供给营养元素及增强抗逆性等途径影响植物生长发育^[1-4]。金钗石斛为兰科石斛属多年生附生草本植物,中医认为其具有滋阴清热、生津止渴的功效^[5],现代药理研究也证实其活性成分具有抗氧化、抗炎、免疫调节及改善糖脂代谢等多种生物学活性^[6]。金钗石斛自然分布于营养贫瘠的环境,经长期进化与内生菌形成了高度协同的共生体系,其内生菌不仅参与宿主次生代谢产物的生物合成,更蕴含着丰富的生物功能与资源开发潜力^[7-8]。

值得注意的是,从不同植物中分离获得的部分内生菌已被证实对农作物具有显著的生长促进作用,这类微生物被称为植物促生内生菌(plant growth-promoting endophyte, PGPE)。PGPE 可通过改善土壤养分有效性(如固氮和溶磷)、调节内源激素水平(如生长素和细胞分裂素),以及诱导植物系统抗性等多种途径来改善宿主植物的营养状况与抗逆能力,进而提升作物产量与品质^[9-12]。然而,PGPE 的促生效果受植物宿主类型、环境条件及菌株特性等多因素影响,存在不确定性^[13-14]。就金钗石斛而言,已有研究证实其部分内生真菌具有良好的植物促生活性。例如,不同生境下金钗石斛内生真菌群落差异显著影响宿主石斛碱的生物合成与生物量积累^[15];菌株 *Phyllosticta fallopiae* DN14 能够显著促进宿主组培苗生长并提高石斛碱含量^[16-17]。此外,部分兰科内生菌对非宿主植物亦表现促生作用,如 *Dendrobium moschatum* 来源的镰刀菌属内生菌具有较高的吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)分泌能力,其发酵液提取物可有效促进宿主种子萌发及非宿主兰花的原球茎发育^[18]。这些研究表明金钗石斛及其近缘种内生真菌具有可观的促生潜力,但现有研究多聚焦于宿主促生效果与次生代谢机制,对非宿主植物,尤其茄科蔬菜(如番茄)的应用效果与机制仍鲜有系统探讨。

番茄是全球最重要的经济蔬菜之一,也是中国居民膳食结构中不可或缺的组成部分,其果实是番茄红素、维生素 C 及酚类等抗氧化物质的核心来源,营养品质与膳食健康密切相关^[19-20]。然而,当前生产过量施用化肥农药导致土壤退化、植株抗逆性下降,并引发农药残留与硝酸盐富集等食品安全问题,长期摄入可加重肝肾代谢负担、扰乱内分泌乃至增加慢病风险,已成为公共卫生领域关注的重要问题^[21-22]。同时,设施栽培中番茄易徒长、根系弱,既影响产量,又降低果实营养品质和膳食价值。研发绿色、安全并能提升果实营养品质的栽培技术,是保障食品安全与膳食健康的迫切需求,而利用药用植物内生真菌为这一难题提供了安全有效的新思路^[23-25]。目前相关研究多集中于茄科内生菌和芽孢杆菌等常见类群^[26-27],而利用亲缘关系较远、专性共生的兰科植物内生菌调控番茄生长的研究仍处于起步阶段,尤其是兼具“促根、控旺、提质”多重功能的兰科镰刀菌,其作用机制及在营养医学、食品安全等领域的应用潜力,更有待系统挖掘。

本研究前期从金钗石斛植株中分离筛选出一株具有 IAA 分泌能力的促生内生真菌,鉴定为镰刀菌属菌株,命名为 DN592^[28]。本文以该菌株为供试对象,通过盆栽与田间试验,系统分析其对番茄生长性状及果实核心营养指标的调控效应,旨在挖掘金钗石斛的功能性微生物资源,为开发绿色安全的微生物菌剂、提升番茄膳食营养品质、降低农业化学投入带来的健康风险提供实验依据,同时为药用植物内生真菌在医学与食品安全等多维度领域的应用拓展新方向。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 主要试剂 供试菌株 DN592 由课题组从金钗石斛提取并完成鉴定。粉冠番茄苗购于寿光

欣欣然园艺有限公司;葡萄糖购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;马铃薯提取物、琼脂粉、苏丹 I 号均购于北京索莱宝科技有限公司;石油醚购于成都市科隆化学品有限公司;丙酮购于重庆川东化工(集团)有限公司;无水乙醇购于天津市富宇精细化工有限公司;2,6-二氯靛酚钠购于广检(广州)检测科技有限公司;抗坏血酸(维生素 C)购于广州市金华大化学试剂有限公司;2%草酸溶液、石英砂均购于上海麦克林生化科技有限公司;Ezup 柱式真菌基因组 DNA 抽提试剂盒购于天根生化科技(北京)有限公司。

1.1.2 主要仪器 实验所用仪器主要包括:超净工作台(SW-CJ-1D 型,生工生物工程(上海)股份有限公司);高压灭菌锅(CT65A,上海伯能仪器有限公司);恒温水浴锅(LC-WB-2,上海力辰邦西仪器科技有限公司);电子分析天平(LC-FA1004,上海力辰邦西仪器科技有限公司);电子天平秤(YH-A2003,惠州英衡电子秤有限公司);恒温震荡培养箱[HZQ-X700C(2111B),上海旻泉仪器有限公司];手持折光仪[TQ(0~32%)铝,衡水正旭电子科技有限公司];722G 可见分光光度计(071213070058,上海仪电分析仪器有限公司制造)。

1.2 方法

1.2.1 内生真菌培养基配制 马铃薯葡萄糖琼脂培养基配置方法:以蒸馏水为溶剂,依次添加马铃薯提取物 200 g/L,葡萄糖 20 g/L,琼脂 15 g/L,定容至 1 L 充分混匀;马铃薯葡萄糖液体培养基配方不含琼脂,仅添加马铃薯提取物 200 g/L,葡萄糖 20 g/L,蒸馏水定容至 1 L。

1.2.2 菌株鉴定 菌株 DN592 经纯化后采用 Ezup 柱式真菌基因组 DNA 抽提试剂盒提取真菌 DNA。采用引物 ITS1(TCCGTAGGTGAACCTGCGG)和 ITS4(TCCTCCGCTTATTGATATGC)进行 PCR 扩增。反应体系包括:基因组 DNA 2 μ L,2 $\times$ San Tap PCR Mix(含溴酚蓝)25 μ L,上、下游引物(10 μ mol/L)各 2 μ L,补充 ddH₂O 至 50 μ L。反应程序:94 $^{\circ}$ C 预变性 5 min,然后 94 $^{\circ}$ C 变性 30 s,55 $^{\circ}$ C 退火 30 s,72 $^{\circ}$ C 延伸 2.5 min,进行 35 个循环,最终 72 $^{\circ}$ C 延伸 10 min。随后进行 PCR 产物回收。将样品送往生工生物工程(成都)股份有限公司进行 ITS 测序,将测序结果与 NCBI 数据库进行比对,以相似度最高的物种作为鉴定依据。

1.2.3 菌液的制备 使用接种环挑取 PDA 培养基上活化的菌株的菌丝,接种至 100 mL PDB 培养

基中,重复 15 次。25.0 $^{\circ}$ C 120 r/min 恒温振荡培养 2 周。将重复获得的菌液混合摇匀,测量菌液浓度调整为 1.25×10^5 CFU/mL 后备用,应用于后续的盆栽和田间实验。

1.2.4 盆栽试验 试验在室外开阔空间进行,温度维持在 15~30 $^{\circ}$ C。采用完全随机设计,以番茄植株作为实验材料,设 3 个接种处理:T1(低剂量,5 mL 菌液)、T2(中剂量,10 mL 菌液)、T3(高剂量,15 mL 菌液),以相同容积的无菌培养基作为对照组(CK),每组 6 次重复,共 24 盆。营养土经 121 $^{\circ}$ C 高压灭菌 20 min 后晾干,花盆用 75%乙醇消毒。每盆装灭菌土至 3/4 处,移栽番茄苗,培养 7 d 后进行接菌处理。分别向 T1、T2、T3 组根部注射相应剂量菌液,CK 组注射等量无菌培养基,每隔 24 h 处理 1 次,连续 3 次。后续各组浇水均为无菌水。从接菌第 4 天开始记录株高持续至第 28、102 天后进行收获植株测定根直径和根总长等植株生长性状,以及果实甜度、番茄红素和维生素 C 等核心营养品质指标。

1.2.5 田间试验 于遵义苟坝九丰农业园区番茄试验示范基地进行实验,位于贵州省遵义市播州区枫香镇花茂村(北纬 27 $^{\circ}$ 30'~27 $^{\circ}$ 40',东经 106 $^{\circ}$ 20'~106 $^{\circ}$ 30'),属中亚热带季风性湿润气候区,年平均气温 15.3 $^{\circ}$ C。试验采用完全随机设计,以番茄植株作为实验材料,设 3 个接种处理:T1(低剂量,5 mL 菌液)、T2(中剂量,10 mL 菌液)、T3(高剂量,15 mL 菌液),以不接菌为对照组(CK),每组 15 次重复。分别向 T1、T2、T3 组根部注射相应剂量菌液,CK 组注射等量无菌水。从注射菌液记为第 1 天,92 d 后收获果实并测定植株株高。植株生长和果实品质性状的采集方式参照盆栽试验。

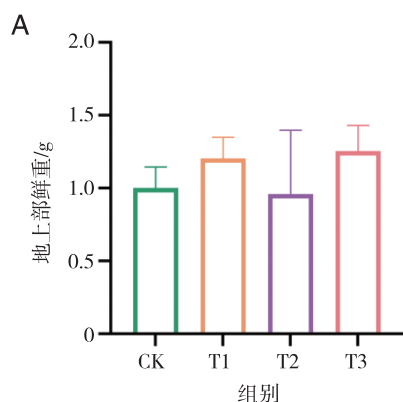
1.2.6 番茄指标测量 株高、根直径、根总长、果实横径、果实纵径等形态指标统一使用精度 0.1 cm 的卷尺测量,各项指标均重复测量 3 次;植株地上部分与根系鲜重使用精度 0.1 g 的电子天平称量;果实甜度使用手持折光仪进行测定,横向切割果实后,将汁液挤出滴在折光仪棱镜上,对果实均测定 3 次;番茄红素含量采用可见分光光度法进行测定,以苏丹 I 号试剂配置浓度为 0.2、0.4、0.6、0.8 μ g/mL 的标准溶液绘制标准曲线,样品处理步骤:将番茄洗净、去皮,分别称量番茄浆 1.5 g 于 1.5 mL 离心管内,再加入 2 mL 乙醇,摇匀 10 min 后于 5 000 r/min 离心 10 min 弃去上清液,

加入 16 mL 丙酮-石油醚(体积比 2:1)混合液,并置于 35 ℃ 水浴锅中,避光浸浴 1~1.5 h,每 20 分钟左右摇动 1 次,取上清液于 20 mL 具塞刻度管内,并补加石油醚至刻度以及以石油醚为空白,测定处于 502 nm 下的吸光度,按照标准曲线计算出番茄红素含量;维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚钠法测定,称取 5 g 果肉,添加 2% 草酸溶液进行研磨匀浆,最后定容至 50 mL,过滤后取所得滤液开展滴定操作,根据消耗的 2,6-二氯酚钠溶液体积计算维生素 C 含量^[29]。

1.3 统计学分析 本研究实验数据采用 IBM SPSS Statistics 29.0 软件进行数据整理与描述性统计,结果以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示;原始数据经 Excel 归一化处理后,采用 GraphPad Prism 9.5 软件进行统计学分析。多组间比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA),满足方差齐性($P > 0.05$)前提下,选用 Dunnett 检验进行组间事后多重比较并输出校正后 P 值。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 菌株的 ITS 测序 经 ITS 序列比对,菌株 DN592 与 *Fusarium subglutinans* (NCBI 比对号 MW020026.1)相似性达 98.96%。纯化后再次测序确认未发生变异,相似度为 100%。



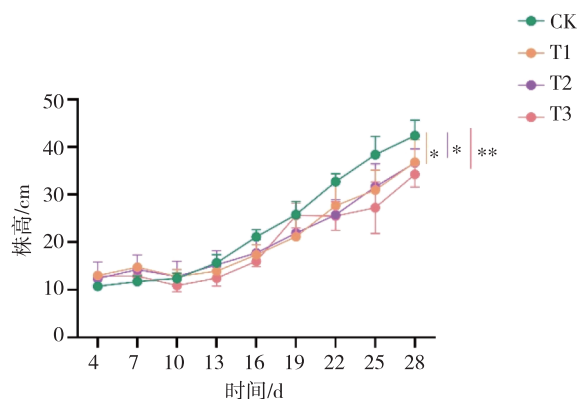
A:不同剂量菌液处理组对番茄地上部鲜重的影响;B:不同剂量菌液处理组对番茄根鲜重的影响;*:与 CK 比较, $P < 0.05$ 。

图2 菌株对番茄鲜重的影响

2.2.3 菌株对番茄根系形态的影响 各处理组根平均直径和根总长与 CK 组相比均无显著差异(图3,

2.2 盆栽试验

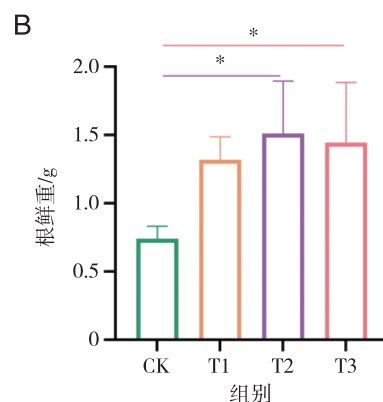
2.2.1 菌株对番茄株高的影响 菌株处理显著抑制了番茄幼苗的株高。接种后第 28 天,与 CK 组相比,T1、T2 和 T3 处理组的株高分别降低了 13.1% ($P < 0.05$)、13.5% ($P < 0.05$) 和 19.1% ($P < 0.001$),见图 1。



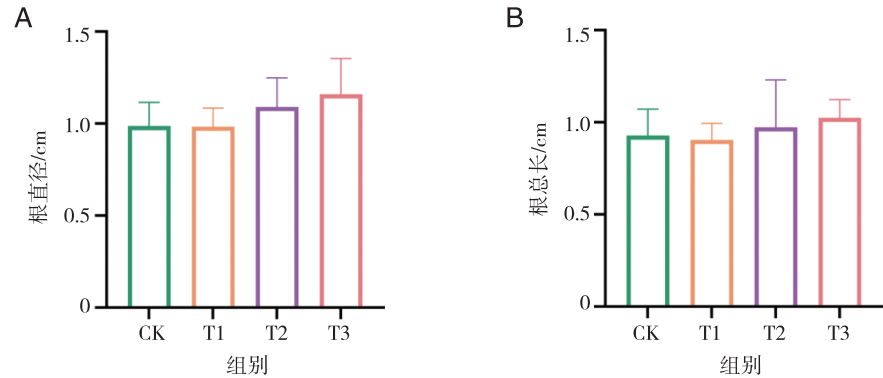
CK:对照组;T1:低剂量组(5 mL);T2:中剂量组(10 mL);T3:高剂量组(15 mL);*、*:与 CK 比较, $P < 0.05$ 、 $P < 0.001$ 。

图1 菌株对番茄株高的影响

2.2.2 菌株对番茄鲜重的影响 菌株处理对番茄地上部鲜重无显著影响($P > 0.05$,图 2A),但对根鲜重有显著促进作用(图 2B)。T2 和 T3 处理组根鲜重较 CK 组相比增幅分别为 104.0% ($P < 0.05$) 和 95.0% ($P < 0.05$)。



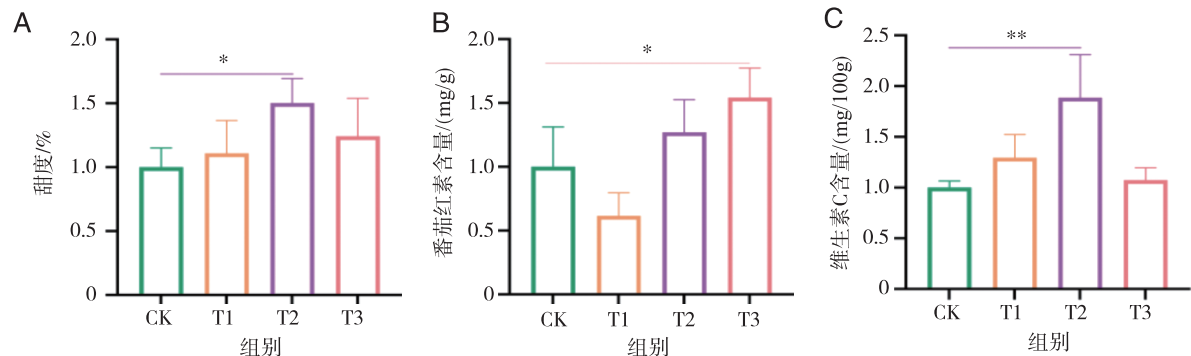
$P > 0.05$),表明在本实验条件下,该菌株并未显著改变番茄根系的整体形态构型。



A:不同剂量菌液处理组对番茄根直径的影响;B:不同剂量菌液处理组对番茄根总长的影响。

图3 菌株对番茄根直径和根总长的影响

2.2.4 菌株对番茄果实品质影响 甜度检测结果显示,外源菌株处理可显著提高番茄果实甜度(图4A),其中T2处理组甜度较CK组增幅为50.2% ($P<0.05$);果实番茄红素含量表现出组间差异,T1处理组番茄红素含量降低,T2和T3处理组均提高番茄红素含量(图4B),且T3处理组的效果最为显著,增幅为54.2% ($P<0.05$);此外,菌株处理显著提升果实中维生素C的含量(图4C),以T2处理组效果最为显著,较CK组维生素C含量增幅分别为88.7% ($P<0.001$)。



A:不同剂量菌液处理组对番茄甜度的影响;B:不同剂量菌液处理组对番茄红素含量的影响;C:不同剂量菌液处理组对番茄维生素C含量的影响;*、**:与CK组比较, $P<0.05$ 、 $P<0.001$ 。

图4 菌株对番茄果实指标的影响

2.3 田间试验
2.3.1 番茄表观测量 田间试验条件下,菌株DN592处理对番茄植株生长表现出与盆栽试验一致的趋势,即在一定程度上抑制株高生长。与CK组相比,T2处理组株高增量显著降低了11.4% ($P<0.05$),T1、T3处理组虽未达显著水平 ($P>0.05$),但也表现出抑制倾向。然而,在产量相关性状方面,T1和T3处理组的单株结果数呈增加趋势,但与CK组无统计学差异 ($P>0.05$),其中T3处理组增幅达12.2%。更为重要的是,果实大小指标呈现积极响应:T1处理组果实横径和纵径分别较CK组增加35.9%和28.7% ($P<0.05$),T2处理组纵径亦显著增加23.0% ($P<0.05$,表1)。

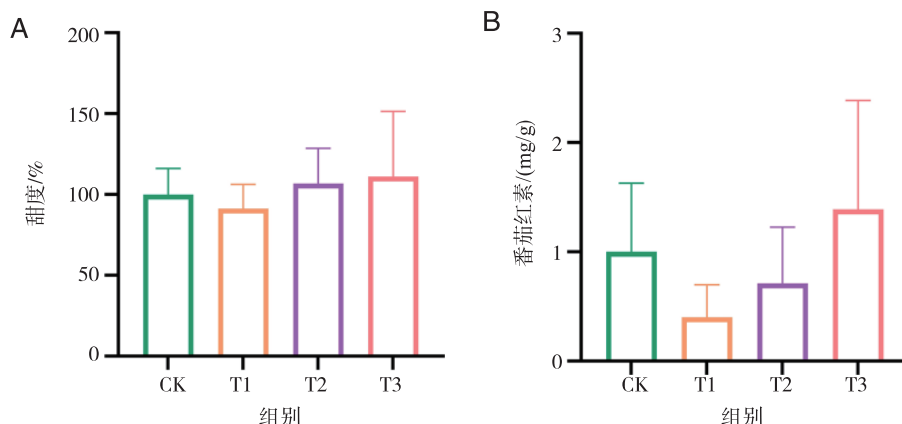
表1 不同处理对番茄植株田间表型性状的影响

组别	株高增量/cm	结果数/个	果实横径/cm	果实纵径/cm
CK	47.36 ± 10.80	7.07 ± 1.34	4.88 ± 1.14	4.57 ± 0.54
T1	47.99 ± 4.98	7.87 ± 1.13	6.63 ± 1.21 *	5.88 ± 0.99 *
T2	41.97 ± 15.18 *	7.07 ± 1.34	5.57 ± 0.59	5.62 ± 0.24 *
T3	39.55 ± 7.54	7.93 ± 1.16	4.90 ± 0.98	4.52 ± 0.98

* :与CK组比较, $P<0.05$ 。

2.3.2 番茄果实指标测量 如图 5 所示,与盆栽试验中果实品质指标显著改善不同,田间条件下 DN592 处理对果实营养品质的调控效应较弱。虽然 T2、T3 处理组果实甜度呈现上升趋势,增幅分

别为 6.8% 和 11.2%,但各处理组与 CK 组之间均无显著差异($P>0.05$,图 5A)。类似地,T3 处理组番茄红素含量虽有一定程度增加,但均未达到统计学差异($P>0.05$,图 5B)。



A:不同剂量菌液处理组对番茄甜度的影响;B:不同剂量菌液处理组对番茄红素含量的影响。

图5 菌株对番茄植株田间果实指标的影响

3 讨论

3.1 菌株 DN592 菌液对番茄生长发育的影响

外界环境变化可作为胁迫信号被植物感知,接种微生物菌剂通常被植株视为一种温和的胁迫刺激,进而调控光合产物向根系和次生代谢方向分配,以提升植株整体抗逆性与环境适应性^[30]。本研究结果表明,菌株 DN592 处理显著抑制番茄株高,这一现象与刁风伟等^[31]的研究结果一致。盆栽试验中,尽管 DN592 对番茄幼苗株高具有一定抑制作用,最大降幅达 19.1%,但该菌株显著促进根系生长,根鲜重最大增幅达 104.0%,显示出独特的“控旺促根”的植物-微生物互作效应。镰刀菌属菌株多被报道为植物病原菌,但本研究中的 DN592 菌株并未表现明显的致病性,反而展现出良好的促根与品质调控效应。类似现象在木霉的研究中亦有报道^[32],其促生效应更多体现在增强根系生理功能而非形态学的显著改变,该发现为本研究结论提供了有力的支持,其核心原因可能是内生菌与宿主植物长期协同进化形成的共生特性,形成了非致病性的共生特性^[33]。

已有研究证实,与本菌株同源的 *Fusarium subglutinans* 可通过分泌 IAA 发挥植物生长调控作用,推测本菌株 DN592 的促生机制可能与 IAA 介导的激素调控途径密切相关^[34];同时,Contreras-Cornejo

等^[35]研究表明,棘孢木霉可通过活化植物生长素相关通路来特异性促进根系发育,据此推测,本研究中 DN592 可能通过类似的激素信号途径调控番茄根系建成;此外,微生物接种引发的温和胁迫也可能诱导植株启动“生长—防御权衡”策略,进而表现为地上部控旺、地下部促根的表型^[36]。从公共卫生与食品安全角度,这种“控旺促根”的调控效应具有重要的应用价值:一方面,发达的根系可提升番茄对土壤养分的吸收利用效率,减少化肥的施用量^[37];另一方面,健壮根系可增强植株对土传病害的抗性,降低农药的使用频次,最终减少番茄果实中的农药残留与硝酸盐富集,降低农产品摄入带来的人体健康风险^[38-39]。田间试验中,菌株 DN592 对番茄产量相关性状及果实大小均具有积极调控作用,果实数量、横径和纵径均呈上升趋势。其中,T1 处理的果实横径和纵径增幅尤为显著,分别达 35.9% 和 28.7%,推测 DN592 处理可能促进了果实细胞扩展与物质积累,进而改善果实性状。值得注意的是,本研究菌株 DN592 源自中药材金钗石斛,其开发应用不仅可丰富有益微生物菌种资源,更能拓展中药材的多维度利用场景,契合中医药现代化与健康中国战略的融合发展需求^[40-41]。

3.2 菌株 DN592 菌液对番茄果实营养品质的影响 果实的营养品质是决定番茄膳食健康价值的核心,其营养成分的合成与积累,受遗传背景、栽培

环境、微生物互作等多重因素调控^[42]。本研究盆栽条件下,菌株 DN592 处理显著提升番茄果实甜度、番茄红素和维生素 C 含量,最大增幅分别达 50.2%、54.2% 和 88.7%,该结果趋势与鲁凯珩等^[43]及王锐竹等^[44]的研究结果一致,表明该菌株在设施农业中具备良好的品质改良潜力。本研究中 DN592 调控的几个核心指标,均与人体健康密切相关:番茄红素是脂溶性强抗氧化剂,可通过清除体内活性氧,减轻脂质过氧化损伤,保护血管内皮细胞,同时可促进免疫系统功能,在慢性非传染性疾病的一级预防中具有重要作用^[45-47];维生素 C 是水溶性必需维生素,除抗氧化作用外,还参与机体免疫细胞的增殖分化、胶原合成与铁元素的吸收,是维持机体正常免疫功能与营养状况的核心营养素^[48];而果实甜度的提升,可改善番茄的适口性,进而提升居民对番茄的食用意愿与摄入量,增加膳食中抗氧化营养素的摄入,形成良性循环。本研究中,中剂量 DN592 处理可同时显著提升果实甜度与维生素 C 含量,高剂量处理可显著提升番茄红素含量,说明可通过调整菌株施用剂量,定向调控番茄果实的营养成分,满足不同的膳食营养需求。而低剂量处理下番茄红素含量下降,可能是低浓度菌液定殖密度有限、信号分子浓度未达到激活类胡萝卜素合成通路的临界阈值,植株光合碳同化物优先分配至根系生长,产生碳源分流效应,致使番茄红素合成前体底物供给不足^[49-50]。关于果实营养品质的调控机制,推测 DN592 在番茄根系定殖后,可通过分泌微生物相关分子模式、激活茉莉酸等系统抗性信号通路,系统调控果实中次生代谢产物的合成与积累^[51],而金钗石斛内生真菌长期与宿主协同进化,天然具备激活植物次生代谢的能力,这也是其能显著诱导番茄抗氧化物质积累的重要原因。与盆栽试验不同,田间条件下 DN592 对番茄果实品质指标虽具有提升趋势,但未达到显著水平,造成盆栽与田间效应差异的原因可能与田间土壤微生物群落结构复杂、环境异质性高、菌株定殖竞争能力弱,难以形成稳定高效的共生体系有关^[52]。此外,本试验中番茄在生长后期遭受青枯病侵染,亦可能干扰菌株 DN592 的促生与提质效果^[53],导致果实品质指标未能表现出显著差异。上述结果表明,后续需进一步优化菌株的田间施用方式、接种时期与配套栽培技术,提升其田间定殖效率与作用稳定性,实现番茄果实营养品质的稳定提升。

实验中不同浓度 DN592 处理在株高抑制、根系促生及品质提升方面的效应强度差异,可能源于菌液浓度对根际有效定殖密度与信号分子浓度阈值的影响:浓度过低则促生信号不足以充分激活调控通路,浓度过高可能超出菌株最适生态位或引发植株防御反馈,削弱正向调控效果^[54-56]。目前,关于菌株 DN592 的促生机制仍有待深入解析,盆栽与田间效应差异是否与菌株定殖能力、土壤养分状况、土著微生物竞争互作等因素相关,其调控番茄生长与品质的激素信号、分子通路及根际微生态机制尚不明确。

综上所述,金钗石斛来源的内生真菌 DN592 展现出通过调控植株营养分配关系,协同提升番茄根系功能和果实品质的多重潜力。将该菌株开发为微生物接种剂,不仅有助于减少化肥农药投入,提升番茄品质与产业效益,也为药用植物功能性微生物资源在蔬菜绿色生产中的跨界应用提供典型范例。后续研究应重点解析 DN592 的激素调控分子机制与关键次生代谢通路激活效应,并集成优化田间应用技术体系,为推动药用植物源微生物制剂在设施蔬菜中的规模化应用提供理论与技术支撑,同时为药用植物内生真菌在营养医学与预防医学领域的应用提供实验依据与新思路。

本研究结果显示,金钗石斛内生真菌菌株 DN592 对番茄兼具控旺促根、提质增效的双重作用。盆栽试验结果表明,该菌株能够显著矮化番茄株高、促进根系生物量积累,同时改善果实营养品质;其中施用中剂量的 DN592 处理在促根系生长、提升果实甜度与维生素 C 含量上综合表现最为均衡,可初步确定为最佳施用浓度。而田间试验结果有所差异,低剂量 DN592 可明显增大番茄果实横径与纵径,但对果实各项营养品质指标并未产生显著性提升效果,说明该菌株规模化田间应用的配套施用方案仍有待进一步优化。综上所述,本研究不仅为中药材来源功能性微生物资源的挖掘与开发利用积累了试验数据,也为采用微生物手段绿色改良番茄品质、提质增产提供了菌种材料与可行技术参考。

[参考文献]

- [1] 翟伟笑,朱朝华,李欣荣,等. 黄芪(*Astragalus membranaceus*(fisch.) bge.)种子内生细菌群落结构和功能[J]. 生态学杂志, 2025, 44(11): 3578-3587.
- [2] 姜超,刘春燕,曹旭,等. 植物内生菌多样性及其在作

- 物生产中的作用机制研究进展[J]. 贵州农业科学, 2026, 54(1):56-67.
- [3] Hardoim P R, Van Overbeek L S, Berg G, et al. The hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes[J]. Microbiol Mol Biol Rev, 2015, 79(3): 293-320.
- [4] Chauhan S, Kumari P, Deepa N, et al. Proteomic insights into plant-endophyte interactions: advancing understanding of mutualistic symbiosis and plant resilience[J]. Crit Rev Biotechnol, 2026, 46(3):440-459.
- [5] 阙彩霞,杨燕妮,王再花,等. 金钗石斛不同开花时期挥发性物质成分与超微结构特征分析[J/OL]. 广西植物, 1-14 [2026-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/45.1134.Q.20260224.1254.002>.
- [6] 蒋勇炫,毛黔华,林夏萍,等. 金钗石斛生物碱对乙酰氨基酚诱导小鼠急性肝损伤的保护作用[J]. 遵义医科大学学报, 2024, 47(11): 1047-1053.
- [7] 张逸群,陈家栋,李梦妮,等. 药用植物铁皮石斛内生菌多样性研究进展[J]. 浙江农业科学, 2025, 66(7): 1627-1631.
- [8] 童文君. 美花石斛内生菌多样性分析及促生潜力研究[D]. 南京:南京师范大学, 2014.
- [9] 张敏,张丽莉,王虹云,等. 植物内生菌及其在番茄生长发育中的作用研究进展[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(7): 10-16.
- [10] 杨洪一, Oumar A A, 郭普悦, 等. 植物内生菌抗重金属胁迫及土壤修复研究进展[J]. 现代农业科技, 2026(8): 94-97.
- [11] 马莹,曹梦圆,石孝均,等. 植物促生菌的功能及在可持续农业中的应用[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1555-1568.
- [12] Ruiz K B, Novello G, Tejos R, et al. Exploring quinoa's plant growth-promoting bacteria: a pseudomonas seed endophyte promotes salinity tolerance and modifies root architecture in arabidopsis thaliana[J]. Plant Stress, 2026, 21: 101371.
- [13] 张静怡,赵龙飞,刘梦洁. 植物内生菌多样性、功能及应用研究进展[J]. 微生物学报, 2025, 65(4): 1446-1468.
- [14] 翟凯辉,张影影,高夕全. 种子内生菌促生机制和抗病机理研究进展[J]. 农业生物技术学报, 2023, 31(9): 1965-1979.
- [15] Li L, Liu C, Wen W, et al. Dendrobine biosynthesis in dendrobium nobile in four different habitats is affected by the variations in the endophytic fungal community[J]. Front Microbiol, 2022, 13: 981070.
- [16] Chen W, Sun Q, Wang J, et al. Colonization by the endophytic fungus phyllosticta fallopiae combined with the element Si promotes the growth of dendrobium nobile[J]. Int J Biol Macromol, 2024, 274(Pt 2): 133343.
- [17] Chen W, Wang J, Song J, et al. Exogenous and endophytic fungal communities of dendrobium nobile lindl. across different habitats and their enhancement of host plants' dendrobine content and biomass accumulation[J]. ACS Omega, 2023, 8(13): 12489-12500.
- [18] Shah S, Paudel M R, Thapa B B, et al. Extract from endophytic fusarium isolates stimulates seed germination of the host and protocorm development of non-host orchids[J]. Commun Integr Biol, 2024, 18(1): 2439798.
- [19] 黎艳,孙孟园,蒋亨珂,等. 类受体激酶调控根生长发育的研究进展[J]. 西北植物学报, 2018, 38(12): 2336-2346.
- [20] 姜喆卉,王小龙,王守创,等. 番茄风味物质代谢途径解析与分子育种研究进展[J]. 生物技术通报, 2026, 42(3): 60-78.
- [21] 李君明,项朝阳,王孝宣,等. “十三五”我国番茄产业现状及展望[J]. 中国蔬菜, 2021(2): 13-20.
- [22] 牛艳,王晓静,陈翔,等. 中国番茄产业发展的现状问题和对策及宁夏番茄产业发展成效[J]. 黑龙江农业科学, 2022, 45(12): 70-74.
- [23] 李晴,柴霜,冯千禧,等. 植物内生菌在农作物方面的应用探析[J]. 种子科技, 2021, 39(12): 8-9.
- [24] 冯燕辉,熊娟,黎烨,等. 接种2种不同促生菌对番茄根菌群结构及多样性的影响[J]. 福建农业科技, 2021, 52(6): 6-14.
- [25] 徐云燕,刘杰,刘波. 金钗石斛生物碱对小鼠肠道菌群的作用[J]. 遵义医科大学学报, 2025, 48(9): 889-895.
- [26] 伍善东,雷平,郭照辉,等. 1株番茄青枯病内生拮抗细菌的分离鉴定及盆栽防效[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(6): 627-630.
- [27] 刘玉婷,郭静,张重义,等. 根际微生态视角下的中药材道地性研究进展[J]. 中国现代中药, 2025, 27(8): 1594-1602.
- [28] 李肇高. 内生真菌共培养金钗石斛合成石斛碱的技术体系构建及分子机制分析[D]. 遵义:遵义医科大学, 2024.
- [29] 范广斌,岳万勇,李梅,等. 不同营养液灌溉和栽培密度对番茄生长和品质的影响[J]. 种子科技, 2026, 44(5): 32-34.
- [30] Pieterse C M, Zamioudis C, Berendsen R L, et al. Induced systemic resistance by beneficial microbes[J]. Annu Rev Phytopathol, 2014, 52: 347-375.
- [31] 刁风伟,黄琰哲,许子荣,等. 根际细菌对番茄幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(11): 32-35.

- [32] Shores M, Harman G E, Mastouri F. Induced systemic resistance and plant responses to fungal biocontrol agents [J]. *Annu Rev Phytopathol*, 2010, 48: 21-43.
- [33] Cosner J, Pandharikar G, Tremble K, et al. Fungal endophytes[J]. *Curr Biol*, 2025, 35(19): 904-910.
- [34] Islam R. Protective fusarium spp. in plant growth promotion: a novel approach[J]. *Eur J Biotech Biosci*, 2025, 13(1): 16-22.
- [35] Contreras-Cornejo H A, Macías-Rodríguez L, Cortés-Penagos C, et al. A plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in arabidopsis[J]. *Plant Physiol*, 2009, 149(3): 1579-1592.
- [36] Huot B, Yao J, Montgomery B L, et al. Growth-defense tradeoffs in plants: a balancing act to optimize fitness [J]. *Mol Plant*, 2014, 7(8): 1267-1287.
- [37] 张国显, 范永怀, 赵凤艳, 等. 化肥减量配施有机物料对设施番茄生长、光合特性、产量及品质的影响[J]. *中国科技论文*, 2018, 13(6): 698-703.
- [38] 李博, 张曼, 熊正琴. 施用氮肥与生物炭对菜地净综合温室效应的影响[J]. *中国科技论文*, 2014, 9(9): 1057-1062.
- [39] 连青龙, 张跃峰, 丁小明, 等. 我国北方设施蔬菜质量安全现状与问题分析[J]. *中国蔬菜*, 2016, 20(7): 15-21.
- [40] 王艳, 银洁, 田雪飞, 等. 中医药助力健康中国战略的价值与实践路径探析[J]. *湖南中医药大学学报*, 2023, 43(7): 1240-1244.
- [41] 赵佳璇, 王建. 习近平健康中国观的发展脉络、核心内涵及实践路径——以《习近平关于健康中国论述摘编》为考察视角[J]. *卫生法学*, 2026, 34(2): 23-32.
- [42] 王锐竹, 王丽, 田猛, 等. 熊蜂授粉对设施番茄产量、品质及效益的影响[J]. *天津农林科技*, 2018, 35(2): 5-6.
- [43] 鲁凯珩, 金清, 曹沁, 等. 不同微生物菌剂对田间西红柿品质以及土壤酶活性的影响[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 48(2): 197-206.
- [44] 王锐竹, 张艳玲, 于艳洁, 等. AM 真菌对番茄产量品质及根区环境的影响[J]. *天津农林科技*, 2016(2): 22-23.
- [45] 张鹏. 茄科植物番茄红素联合盐酸坦索罗辛治疗 BPH 及 LUTS 的临床疗效及安全性评价[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(8): 2710-2714.
- [46] 孟凯丽, 孙世东. 番茄红素生物活性及其淀粉基复合稳定剂研究进展[J]. *粮油科学与工程*, 2025, 39(6): 17-22.
- [47] Imran M, Ghorat F, Ul-Haq I, et al. Lycopene as a natural antioxidant used to prevent human health disorders [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2020, 9(8): 706.
- [48] Rowland A, Edwards S, Prieto-Bellver G, et al. A comprehensive review of the physiology and evidence base to guide the use of ergogenic and medical supplements for enhanced cycling performance[J]. *J Int Soc Sports Nutr*, 2026, 23(1): 2630487.
- [49] Ibiang S R, Sakamoto K. Modulation of phytochemicals and essential trace elements in fruits of different tomato cultivars by the endophytic fungus *penicillium pinophilum* EU0013s [J]. *Microbes Environ*, 2022, 37(3): ME22026.
- [50] Negwer E J, Bilger W. Kinetics of caffeoylquinic acid formation in N-deficient sunflower as a test of the growth-defense trade-off framework [J]. *J Exp Bot*, 2026, 77(4): 1309-1323.
- [51] Yu Y, Gui Y, Li Z, et al. Induced systemic resistance for improving plant immunity by beneficial microbes[J]. *Plants (Basel)*, 2022, 11(3): 386.
- [52] 宋经元, 郭顺星. 离体培养时真菌对铁皮石斛和金钗石斛生长的影响[J]. *中国医学科学院学报*, 2001, 23(6): 547-551.
- [53] 王位, 薛鸣, 雷婷越, 等. 番茄青枯病拮抗菌的筛选及防治效果[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(1): 30-36.
- [54] Sanchez-Contreras M, Bauer W D, Gao M, et al. Quorum-sensing regulation in rhizobia and its role in symbiotic interactions with legumes [J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2007, 362(1483): 1149-1163.
- [55] Götz-Rösch C, Sieper T, Fekete A, et al. Influence of bacterial N-acyl-homoserine lactones on growth parameters, pigments, antioxidative capacities and the xenobiotic phase II detoxification enzymes in barley and yam bean [J]. *Front Plant Sci*, 2015, 6: 205.
- [56] 赵卫松, 李社增, 鹿秀云, 等. 解淀粉芽胞杆菌 PHODB35 对小麦的促生作用及产量影响[J]. *中国生物防治学报*, 2019, 35(3): 399-406.

[收稿 2025-04-03; 修回 2026-06-16]

(编辑:王先恒)