安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 726-733
Journal of Anhui Agricultural University [DOI] 10.13610/j.cnki.1672-352x.20260720.001

张国漪，刘艺璇，卫正宇，等. 一株兼具促生抗病能力的纤维素降解菌的筛选、鉴定及培养条件优化[J]. 安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 726-733.
Zhang Guoyi, Liu Yixuan, Wei Zhengyu, et al. Screening, identification and cultivation condition optimization of a cellulose-degrading bacterium with both plant growth-promoting and disease resistance[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2026, 53(4): 726-733.

一株兼具促生抗病能力的纤维素降解菌的筛选、鉴定及培养条件优化

张国漪，刘艺璇，卫正宇，刘思媛，葛虹璐，丁可欣，胡占琴，马　超*
(农田生态保育与养分资源高效利用安徽省重点实验室，安徽省绿色磷肥智能制造与高效利用工程研究中心，自然资源部江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室，安徽农业大学资源与环境学院，安徽 合肥 230036)

摘　要：【目的】筛选适用于番茄秸秆废弃物堆体处理的纤维素降解微生物，获得高效稳定的功能菌株，以促进农业有机废弃物资源的高效利用。【方法】采用透明圈法，从腐解番茄秸秆中筛选纤维素降解菌，测定其纤维素酶活性、产 IAA 能力及拮抗病原菌能力；通过 16S rRNA 基因序列分析对该菌株进行种属鉴定；利用液态摇瓶培养和盆栽试验评估菌株的实际促腐、促生及抗病效果；最后通过单因素试验探究该菌株的最佳生长条件。【结果】筛选获得一株兼具促生与抗病功能的纤维素降解菌株 Hzq23，经鉴定为铜绿假单胞菌（*Pseudomonas aeruginosa*），其纤维素酶活性达 799.71 μg·min^{-1}·g^{-1}。与对照组相比，Hzq23 菌液在摇瓶培养 15 d 时，番茄秸秆降解率显著提高 10.43%（P＜0.05）；培养至 55 d 时，秸秆腐解率进一步提高 15.24%，番茄鲜质量、株高和根长分别增加 42.2%、42.2%和 43.7%，对青枯病的生防效果提高 50%。最佳生长条件试验结果表明，该菌株最适碳源和氮源分别为葡萄糖和蛋白胨，最适 pH、温度和装液量分别为 8.0、28 ℃和 50 mL/250 mL。【结论】菌株 Hzq23 具有高效降解纤维素、促生和抗青枯病的多重功能，可用于多功能微生物菌剂的开发与生产。将其应用于农业场景，可加速番茄秸秆腐解转化、提高秸秆资源利用率，同时有效促进作物生长并防治蔬菜病害，具有较高的应用价值。

关键词：铜绿假单胞菌；秸秆纤维素降解；作物促生；番茄青枯病；培养条件优化
中图分类号：X 71；X172　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672−352X (2026)04−0726−08

Screening, identification and cultivation condition optimization of a cellulose-degrading bacterium with both plant growth-promoting and disease resistance

Zhang Guoyi, Liu Yixuan, Wei Zhengyu, Liu Siyuan, Ge Honglu, Ding Kexin, Hu Zhanqin, Ma Chao
(Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Efficient Utilization of Nutrient Resources, Engineering Research Center of Green Phosphorus Fertilizer Intelligent Manufacture and Efficient Utilization in Anhui Province, Key Laboratory of JiangHuai Arable Land Resources Protection and Eco-restoration, Ministry of Natural Resources, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to screen cellulose-degrading microorganisms suitable for composting tomato straw waste and obtain functionally stable and efficient microbial strains, thereby promoting the efficient utilization of agricultural organic waste resources. **[Method]** In this study, cellulose-degrading bacteria were screened from decomposed tomato straw using the transparent circle method, and their cellulase activity, indole-3-acetic acid (IAA) production capacity, and antagonistic activity against pathogenic bacteria were determined. The strain was identified by 16S rRNA gene sequence analysis. Liquid shake-flask experiments and pot experiments were conducted to evaluate the strain's actual straw degradation-promoting effect, plant growth-promoting effect, and disease-suppressive activity, respectively. A single- factor experiment was then performed to determine the optimal growth

收稿日期：2025-10-13；**录用日期：**2026-03-19；**网络出版日期：**2026-07-20
基金项目：国家自然科学基金项目（32071628）；安徽省高校科学基金项目（2024AH020002）；安徽省教育厅农田退化及污染生态修复创新团队项目（2025AHGXZK10034）
共同第一作者：张国漪，博士，讲师，E-mail：2012034@ahau.edu.cn；刘艺璇，本科生，E-mail：1807341086@qq.com
* **通信作者：**马　超，博士，教授，博士生导师，E-mail：chaoma@ahau.edu.cn

conditions for the strain. **[Result]** A cellulose-degrading strain, Hzq23, exhibiting plant growth-promoting and disease-suppressive functions, was isolated and identified as *Pseudomonas aeruginosa*, with a cellulase activity of 799.71 μg·min^{-1}·g^{-1}. Compared with the control group, the tomato straw degradation rate increased significantly by 10.43% ($P < 0.05$) after 15 d of incubation with the Hzq23 bacterial suspension in shake flasks; after 55 d of incubation, the straw decomposition rate further increased by 15.24%. Tomato fresh weight, plant height, and root length increased by 42.2%, 42.2%, and 43.7%, respectively, and the biocontrol efficacy against bacterial wilt increased by 50%. Results on optimal growth conditions indicated that glucose and peptone were the optimal carbon and nitrogen sources, respectively. The optimal pH, temperature, and liquid volume (reflecting ventilation condition) were 8.0, 28 ℃, and 50 mL in a 250 mL Erlenmeyer flask, respectively. **[Conclusion]** The screened strain Hzq23 exhibits efficient cellulose degradation, plant growth promotion, and antagonistic activity against bacterial wilt pathogens. It is suitable for fermentation-based production of multifunctional microbial agents. When applied in agricultural settings, it can accelerate the decomposition and transformation of tomato straw, enhance straw resource utilization, effectively promote crop growth, and suppress vegetable diseases, demonstrating high application value.

Keywords: *Pseudomonas aeruginosa*; straw cellulose degradation; plant growth promotion; tomato bacterial wilt; cultivation condition optimization

随着经济社会的快速发展，蔬菜在居民食物消费中的重要性日益突出，消费量持续增长[1]。目前，蔬菜已成为我国第二大农作物。数据显示，近 10 年来，我国蔬菜产量由 2013 年的 63 197.98 万 t 增加到 2022 年的 79 997.22 万 t，增长约 26.58%；其播种面积和总产量均占世界总量的 50%以上[2]。然而，高产背后，采收、加工及流通环节也产生了大量废弃物[3]。这些废弃物若被随意倾倒或堆积，不仅造成资源的严重浪费，变质的废弃物还会引发严重的环境污染问题，对居民的生活质量、身体健康以及蔬菜产业的可持续发展构成显著威胁。

蔬菜废弃物富含有机质、纤维素、糖类及蛋白质等营养物质[4-6]，具备较高的资源化利用潜力。然而，部分蔬菜废弃物（如番茄秸秆）具有含水量高、木质化程度高的特性，且现有堆肥、直接还田等技术存在养分转化慢、易传播病害、依赖化学添加剂等局限，导致其资源化利用效率偏低[7]。基于此，本研究聚焦纤维素降解菌株的筛选，并将其应用于蔬菜废弃物处理，通过生物手段优化蔬菜废弃物处理技术，既可破解废弃物高效转化难题，又能实现资源循环与环境保护的协同，进而为农民增收、推动农业可持续发展，并为落实绿色发展理念与碳中和目标提供重要支撑。

针对蔬菜废弃物木质化程度高、纤维素难降解导致的自然腐解慢、转化效率低等问题，前人已开展相关探索，尝试通过筛选高效降解纤维素的菌株以突破技术瓶颈[8]。例如，Wang 等[9]筛选得到 3 株高效产纤维素酶的菌株：A24（GenBank 登录号 MT740356.1，*Brevibacillus borstelensis*）、A49（GenBank 登录号 MT740358.1，*Bacillus cereus*）和 A61（GenBank 登录号 MT740357.1，*Paenibacillus* sp.），其中 A49 菌株的 CMCase 平均活性达到 15.63 U·mL^{-1}；张冬雪等[10]从水稻田中分离筛选出 6 株具有纤维素降解能力的菌株，将菌株 F19 接种至水稻秸秆，25 d 后秸秆降解率达 13.58%；杨金波等[11]从牛羊粪中分离筛选出纤维素降解菌，接种后发酵 5 d 即可实现 14.70%的降解率，为后续同类研究提供了参考。

为满足农业生产中抗病、促生等多功能需求，菌株选育已不再局限于单一功能，而是向兼具多重功能的方向发展[12]。已有研究证实，多功能菌株在农业生产中具有显著应用价值。例如，胡占琴等[13]发现，植生拉乌尔菌 M15H2 在促生、促腐及抗水稻条斑病方面均具有显著作用；冯宝珍等[14]从番茄中筛选出的 FQ-G3 菌株，既能有效抑制灰葡萄孢病害，又能促进番茄幼苗生长。蔬菜连作障碍导致土壤养分匮乏、微生物种群失衡，病虫害发生加剧[15-16]，进而影响下一季作物的生长态势与产量品质。其中，番茄青枯病作为典型的土传细菌性病害，具有传播速度快、危害范围广、防治难度大等特点，给番茄产业造成巨大经济损失，是番茄连作种植中亟待解决的病害问题。生防微生物的应用可通过调节土壤微生态结构、丰富土壤微生物种群，实现对病原菌的有效抑制，同时避免因化学杀菌剂滥用引发的病菌抗药性风险[17]；植物促生菌则可通过产生植物激素直接刺激幼苗生长，显著改善植株的生长发育状况[18]。因此，开展以兼具秸秆降解与病害防控功能的产 IAA 多功能菌株的筛选与应用为核心切入点，可为提升农业生产效益和推动绿色农业发展提供切实可行的技术支撑。

本研究以番茄秸秆为材料，筛选兼具高效纤维素降解能力、作物促生作用及番茄青枯病防治效果

的多功能菌株，验证其促生、腐解及抗病效果，结合形态学与分子生物学方法明确其分类地位，并探究其最适生长条件，以期为番茄秸秆资源高效利用和多功能微生物菌剂研发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 *样品* 试验于 2021 年在安徽农业大学进行，番茄秸秆和土壤均来源于安徽省马鞍山市和县蔬菜科技示范园，番茄品种为“上海合作 903”。

1.1.2 *培养基* LB 培养基：酵母浸粉 5 g，蛋白胨 10 g，氯化钠 10 g，去离子水 1 000 mL，固体培养基加琼脂 18 g。

纤维素富集培养基：CMC-Na20 g，微晶纤维素 5 g，纤维素粉 5 g，K_2HPO_4 1 g，KNO_3 1 g，$MgSO_4·7H_2O$ 0.2 g，$CuCl_2·2H_2O$ 0.1 g，$FeCl_3$ 0.02 g，去离子水 1 000 mL。

羧甲基纤维素培养基：CMC-Na 15 g，NH_4NO_3 1 g，酵母膏 1 g，$MgSO_4·7H_2O$ 0.5 g，K_2HPO_4 1 g，琼脂 15 g，去离子水 1 000 mL。

CMC-Na 刚果红培养基：CMC-Na 18 g，K_2HPO_4 0.5 g，$MgSO_4·7H_2O$ 0.25 g，明胶 2 g，刚果红 0.2 g，琼脂 15 g，去离子水 1 000 mL。

NA 培养基：牛肉膏 3 g、蛋白胨 10 g、氯化钠 5 g 和蒸馏水 1 000 mL，121 ℃灭菌 20 min，固体培养基加琼脂 20 g。

1.2 方法

1.2.1 *菌株的分离与筛选* 无菌条件下称取 0.5 g 番茄秸秆样品，接种至纤维素富集培养基中，于 36 ℃、180 r·min^{-1} 的摇床中振荡培养 3 d。取培养后的菌液梯度稀释至 10^{-4}、10^{-5}、10^{-6}，分别涂布于羧甲基纤维素培养基，培养后挑取平板上的单菌落，在 LB 培养基上反复划线纯化，获得单菌落。

初筛：将纯化菌株制成菌饼，接种于 CMC-Na 刚果红培养基，30 ℃培养 24 h 后，观察菌落周围透明圈的形成情况，采用十字交叉法测量透明圈直径（*D*）与菌落直径（*d*），并计算其比值[19]。

复筛：将培养 48 h 的青枯病菌菌悬液稀释 1 000 倍，均匀涂布于 NA 平板，静置 10 min 后，选取初筛中 *D*/*d* 比值较高的菌株，均匀点接于上述平板，30 ℃培养 24 h 后观察抑菌圈形成情况，筛选并保存抑菌效果良好的目标菌株[20-21]。

1.2.2 *菌株 Hzq23 的鉴定* 形态鉴定和生理生化特性研究参考文献[22-23]。细菌基因组 DNA 的提取及 16S rDNA 扩增参照文献[24]，由上海凌恩生物科技有限公司完成，序列经 NCBI 数据库 BLAST 同源序列比对，结合形态学和生理生化特征确定菌株种属。

1.2.3 *菌株 Hzq23 羧甲基纤维素（CMC）酶活测定* 菌株接种至液体发酵培养基，于 28 ℃、180 r·min^{-1} 恒温振荡培养 48 h，制备菌悬液。取菌悬液置于 10 mL 离心管中，在 10 000 r·min^{-1}、4 ℃条件下冷冻离心 10 min，收集菌体沉淀后，送至苏州科铭生物技术有限公司进行纤维素酶活性测定。

1.2.4 *菌株 Hzq23 IAA 含量测定* 菌株接种于含 100 mg·L^{-1} L-色氨酸的 LB 液体培养基中，于 36 ℃、180 r·min^{-1} 条件下振荡培养 24 h。取 10 mL 培养后的菌液，5 000 r·min^{-1} 离心 10 min，取上清液，加入等体积 Salkowski 比色液（量取 50 mL 35% $HClO_4$ 溶液与 1 mL 0.5 mol·L^{-1} $FeCl_3$ 溶液，混合均匀后置于棕色试剂瓶中避光保存），避光静置显色 30 min 后，在 530 nm 处测定其吸光度，最后依据 IAA 标准曲线计算菌株产 IAA 的浓度[25]。

1.2.5 *菌株 Hzq23 秸秆降解能力测定* 番茄秸秆清理、烘干、粉碎后，过筛（孔径 0.425 mm，40 目），按固液比 1∶25 加入 1%十二烷基硫酸钠溶液，烘干至恒重，制备脱脂脱蜡秸秆粉。称取 5 g 该秸秆粉置于三角瓶中，加入 30 mL 无菌水和 2 g 硝酸钠；处理组加入 10 mL 浓度约为 10^8 CFU·mL^{-1} 的菌液，对照组加入 10 mL 无菌水，置于 36 ℃、160 r·min^{-1} 摇床培养。分别于培养第 15 天和第 55 天取出三角瓶，将瓶中秸秆置于铺有三层纱布的漏斗中过滤，弃去滤液，收集纱布上的秸秆。将收集的秸秆置于 80 ℃烘箱中烘干至恒重。每组试验设置 3 个重复，采用失重率法计算秸秆腐解率[26]。

1.2.6 *菌株 Hzq23 的实际促生能力* 番茄种子经浸种、消毒、催芽处理后，每盆播种 5 粒，将土壤含水量调至田间最大持水量的 60%。选取长势一致的番茄植株，设置两个处理：（1）接种处理：向土壤中接种 30 mL 浓度约为 10^8 CFU·mL^{-1} 的 Hzq23 菌液；（2）对照处理（CK）：向土壤中加入等体积无菌水，每处理重复 5 次。培养 49 d 后，测定植株株高、根长、鲜质量和干质量等生长指标[27]。

1.2.7 *菌株 Hzq23 拮抗番茄青枯病的能力* 选择大小均匀、成熟饱满且无霉变的番茄种子。用 75%的酒精对种子进行表面消毒 5 min，再用体积分数为 1%的次氯酸钠溶液浸泡 5 min，最后用无菌水清洗 5 次备用。消毒后将种子分为两组：处理组用浓度为 1×10^8 CFU·mL^{-1} 的 Hzq23 菌液在 28 ℃条件下浸泡 12 h；对照组用灭活的同浓度菌液浸泡，每组

设置 3 个重复。随后将两组种子分别置于铺有滤纸的培养皿中（每皿 55 粒），放入光照培养箱中催芽，培养条件设定为温度 28 ℃、光照 16 h·d^{-1}、黑暗 8 h·d^{-1}、湿度为 70%，期间每隔 2 h 观察滤纸湿度，及时补充无菌水以保持湿润。催芽 1～2 d，待种子露白后终止催芽并转入育苗盘育苗。番茄幼苗长至两叶一心期时，从对照组和处理组中各选取 3 株长势一致的幼苗移栽至盆栽中。培养 5 d 后，处理组植株灌根 30 mL 浓度为 1×10^8 CFU·mL^{-1} 的 Hzq23 菌液，对照组灌根等体积灭活菌液。一周后，所有植株均灌根接种 1×10^8 CFU·株$^{-1}$ 的青枯病菌液；接种病原菌一周后，观察并统计植株生长指标及发病情况[28]。

1.2.8　菌株 Hzq23 的最佳生长条件研究　将 50 mL LB 液体培养基装于 250 mL 三角瓶中，按体积分数 1%接种 Hzq23 菌液，于 30 ℃、180 r·min^{-1} 摇床培养，开展菌株生长条件优化试验。试验设置 5 组变量：初始碳源（麦芽糖、蔗糖、乳糖、木糖、葡萄糖、甘露醇）、初始氮源（硫酸铵、硝酸钾、蛋白胨、酵母粉、尿素、谷氨酸）、初始 pH（4、5、6、7、8、9、10）、培养温度（24、28、32、36、40、44 ℃）和培养基初始装液量（25、50、75、100、125、150 mL）。培养 24 h 后，测定菌液吸光度（OD_{600}），以评价菌株生长情况。每组设置 3 个重复[29]。

1.3　统计分析

采用 SPSS 26.0 进行数据统计分析，Origin 9.0 软件绘制图形。利用单因素方差分析（One-way ANOVA）和 Duncan 检验（P＜0.05）分析试验不同处理间的差异。

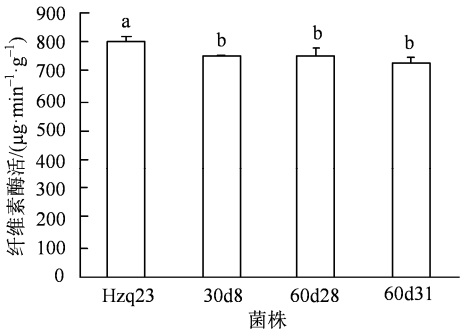
2　结果与分析

2.1　菌株分离与筛选结果

从番茄秸秆中共筛选出 4 株具有纤维素降解能力的细菌（Hzq23、30d8、60d28、60d31），这些菌株均能在 CMC-Na 刚果红固体培养基上产生透明水解圈。其中菌株 Hzq23 产纤维素酶活性最高，达 799.71 μg·min^{-1}·g^{-1}（图 1）。同时，仅该菌株对青枯病菌表现出明显抑制作用（图 2）。此外，Hzq23 菌株产 IAA 能力也较强，浓度达 4.27 mg·L^{-1}（表 1）。因此确定 Hzq23 为兼具纤维素降解、作物促生及青枯病抗性的多功能菌株，后续通过秸秆降解试验与盆栽试验进一步验证其促腐、促生和抗病效果。

2.2　菌株 Hzq23 的形态、生理生化及遗传性状

Hzq23 在 LB 培养基上形成的单菌落呈灰白色、扁平湿润、边缘不规则、不透明，质地均匀，易挑取（图 3）。生理生化特征显示，菌株 Hzq23 为革兰氏阴性菌，兼性厌氧，可产过氧化氢酶；淀粉水解、柠檬酸盐利用及明胶液化试验均为阳性，甲基红试验和 V-P 试验均为阴性（表 2）。结合 16S rRNA 序列分析，鉴定该菌株为铜绿假单胞菌（*Pseudomonas aeruginosa*）（图 4）。该菌株已于 2023 年 8 月 7 日送交中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心保藏，保藏编号为 CGMCC No. 28121。



柱形上不同小写字母表示处理间差异显著（P＜0.05）。

图 1　菌株产纤维素酶活性

Figure 1　Cellulase activity of different strains

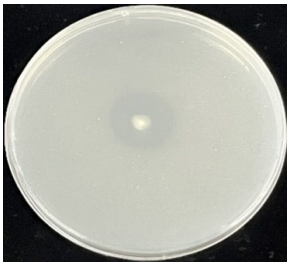


图 2　菌株 Hzq23 抑病圈图

Figure 2　Inhibition zone of strain Hzq23 against ralstonia solanacearum

表 1　菌株产 IAA 质量浓度

Table 1　IAA concentrations of screened strains

细菌编号	IAA 质量浓度/（mg·L^{-1}）
Hzq23	4.27±0.08^a
30d8	3.08±0.04^b
60d28	6.79±0.04^c
60d31	2.21±0.08^d

注：表中数据均为测定值的平均值±标准差（n=3），每列中不同小写字母表示处理间差异显著（P＜0.05）。

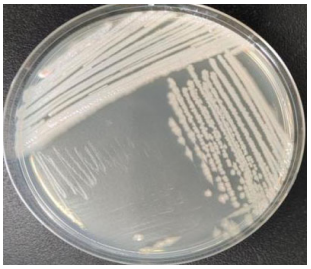
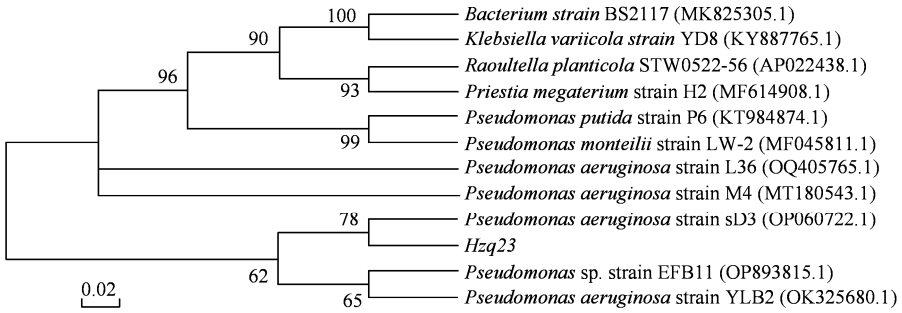


图 3　菌株 Hzq23 的菌落形态观察

Figure 3　Observation of colony morphology of strain Hzq23



括号内序号为 GenBank 登录号；分支点上的数值表示 bootstrap 支持率；标尺代表 0.02 个核苷酸替换位点（遗传距离）。

图 4 基于菌株 Hzq23 的 16S rRNA 基因序列构建的系统发育树

Figure 4 Phylogenetic tree of strain Hzq23 based on 16S rRNA gene sequences constructed using the neighbor-joining method

表 2 菌株 Hzq23 的生理生化特征

Table 2 Physiological and biochemical characteristics of strain Hzq23

项目	结果	项目	结果
淀粉水解	+	柠檬酸盐利用试验	+
V-P 试验	−	明胶液化试验	+
甲基红试验	−	革兰氏染色	−
接触酶试验	+	好氧性试验	兼性厌氧

注：“+”表示阳性反应；“−”表示阴性反应。

表 3 菌液 Hzq23 对番茄秸秆的降解效果

Table 3 Degradation of tomato straw by strain Hzq23 in shake-flask culture %

处理	培养 15 d	培养 55 d
无菌水	23.21±0.22	25.66±1.23
Hzq23	25.63±1.16*	29.57±2.83

注：*表示处理间差异显著（$P<0.05$）。

2.3 菌株 Hzq23 的秸秆降解能力

摇瓶试验表明，培养 15 d 时，Hzq23 菌液处理组番茄秸秆降解率达 25.63%，较无菌水处理组提高 10.43%（$P<0.05$），表明该菌液可加速秸秆早期腐解；培养 55 d 时，菌液处理组番茄秸秆降解率较无菌水处理组提高 15.24%（表 3），且达到较高腐解速率所需时间较对照组缩短，进一步证实 Hzq23 菌液可持续促进番茄秸秆腐解。

2.4 菌株 Hzq23 的番茄促生及抑病能力

IAA 分泌能力测定结果显示，Hzq23 菌株具备分泌 IAA 的能力，定量检测得 IAA 分泌量为 4.27 mg·L^{-1}。番茄植株经 Hzq23 菌液处理后，生长指标显著提升（$P<0.05$），其中植株地上部鲜质量、株高和根长较无菌水处理组分别增加 42.2%、42.2%和 43.7%，表明 Hzq23 菌株对番茄植株具有显著的促生作用。抑菌圈试验结果表明，Hzq23 菌株对青枯病病原菌具有抑制作用；进一步的盆栽防治试验显示，无菌水处理组番茄植株的病情指数为 100%，而接种 Hzq23 菌液组的病情指数降至 50%，生防效果为 50%（表 4），证实 Hzq23 菌株对番茄青枯病具有一定防控效能（图 5）。

表 4 菌液 Hzq23 对番茄幼苗促生及防治青枯病病害的影响

Table 4 Effects of the inoculated strain Hzq23 on tomato plants

处理	株高/cm	根长/cm	鲜质量/g	干质量/g	病情指数	生防效果/%
无菌水	11.25±0.63	6.75±0.30	2.96±0.34	0.44±0.04	100	0.00
Hzq23	16.00±0.80*	9.70±0.53*	4.21±0.05*	0.52±0.02	50±19.05	50±19.23

注：*表示处理间差异显著（$P<0.05$）。

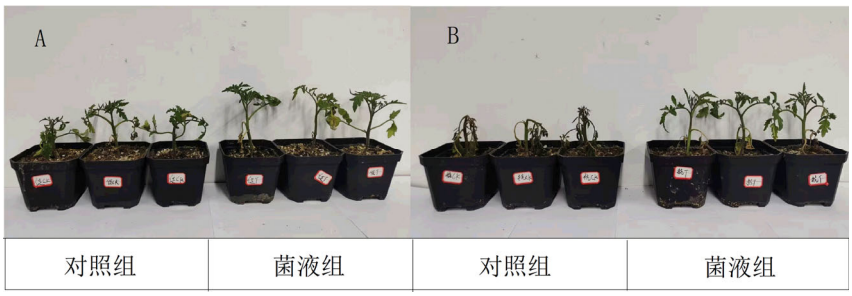
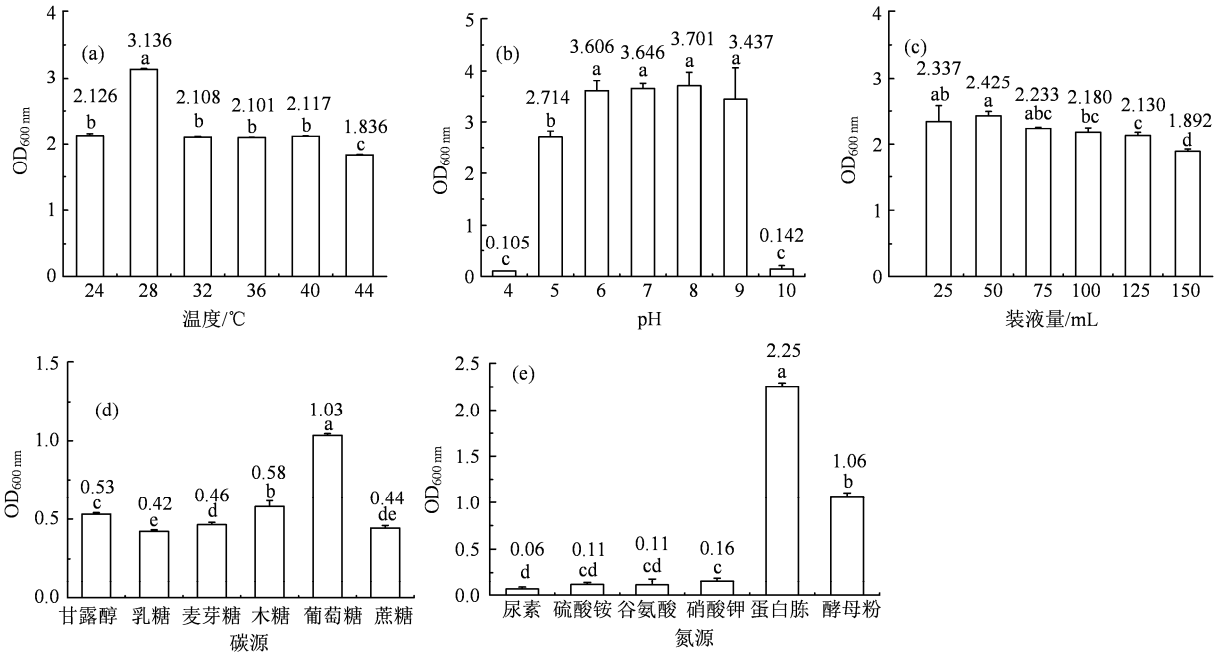


图 5 菌液 Hzq23 对番茄幼苗促生（A）及青枯病（B）的防治作用

Figure 5 Effect of bacterial strain Hzq23 on promoting tomato plant growth (A) and preventing bacterial wilt (B)



柱形上不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。

图 6　不同温度(a)、pH（b)、装液量（c)、碳源（d）及氮源（e）对菌株 Hzq23 生长的影响

Figure 6　Effects of different temperature (a), pH (b), liquid volume (c), carbon (d) and nitrogen sources (e) on the growth of strain Hzq23

2.5　菌株 Hzq23 最适生长条件分析

菌株 Hzq23 在 28 ℃时生长量最大，OD_{600} 达到 2.136（图 6（a））；随 pH 升高菌株生长呈逐渐上升趋势，pH 达到 8.0 时，生长量达到最大，OD_{600} 为 3.701（图 6（b））；装液量为 50 mL/250 mL 时，菌株 Hzq23 的 OD_{600} 值最高，为 2.425，随装液量的增加，菌株生长呈逐渐下降趋势（图 6（c））；不同碳源条件下，Hzq23 菌液浓度顺序为葡萄糖＞木糖＞甘露醇＞麦芽糖＞蔗糖＞乳糖（图 6（d））；不同氮源条件下，Hzq23 菌液浓度为蛋白胨＞酵母粉＞硝酸钾＞谷氨酸>硫酸铵＞尿素（图 6（e））。

3　讨论

3.1　菌株 Hzq23 产纤维素酶能力及其对秸秆降解的影响

秸秆主要由纤维素、半纤维素和木质素等难降解物质组成，其中纤维素含量最高，在自然状态下腐解速度较慢。目前国内外学者普遍认为，秸秆还田配施产纤维素降解酶的腐秆菌可有效加速秸秆降解[30-31]。本研究从番茄秸秆中筛选出一株纤维素酶活性较高的铜绿假单胞菌（*Pseudomonas aeruginosa*）Hzq23，其产纤维素酶活性高达 799.71 $\mu g \cdot min^{-1} \cdot g^{-1}$。在摇瓶条件下，Hzq23 组番茄秸秆的前期降解速度显著提升。前人研究发现，假单胞菌属是重要的纤维素降解菌来源之一[32]。张冬雪等[10]从水稻秸秆中筛选获得的菌株 F19，秸秆降解率为 13.58%；杨金波等[11]从牛羊粪中获得的菌株在 5 d 内实现 14.70%的秸秆降解率；强震宇等[33]筛选出针对玉米秸秆降解的促腐菌，15 d 腐解率为 12.18%。本研究筛选的菌株 Hzq23 通过分泌纤维素酶降解纤维素，显著缩短秸秆腐解进程，为秸秆还田的高效腐解菌应用提供有效依据。

3.2　菌株 Hzq23 对番茄生长的影响

盆栽试验结果表明，接种 Hzq23 菌液后，番茄地上部鲜质量、株高和根长均显著提高。植物促生细菌（PGPR）通过分泌 IAA 等植物激素直接刺激植物细胞分裂与伸长，是促进作物生长的重要机制之一。何宏涛等[34]研究发现，番茄根际促生菌 FQD47-2 和 FQD13 能显著增加幼苗生物量，具有促生效果。Abd-Alla 等[35]筛选出 12 株链霉菌属菌株，其产 IAA 浓度为 3.5～22.5 $mg \cdot L^{-1}$。本试验研究发现，菌株 Hzq23 表现出较强的产 IAA 能力（4.27 $mg \cdot L^{-1}$），表明其不仅具备纤维素降解功能，还能通过激素途径有效促进作物生长，是一株兼具“促腐”与“促生”功能的复合功能菌株。

3.3　菌株 Hzq23 对番茄青枯病的生物防治作用

番茄青枯病作为最具侵染力和破坏力的土传病害之一[27]，生物防控是控制该病害最有效的途径之一。本研究通过平板和盆栽试验，证实 Hzq23 对青枯病病原菌（青枯劳尔氏菌）具有显著抑制作用，盆栽防效达 50%。研究发现，假单胞菌作为根际优势微生物，可分泌多种抑制病原菌的代谢产物[36]，

如抗生素、铁载体和酚酸[36-37]。郝芳敏等[38]筛选到一株假单胞菌 Bc1-20，发现其对甜瓜枯萎病的防治效果达 52.34%，且能显著增加甜瓜幼苗生物量。Hzq23 对青枯病的拮抗作用可能与其产生特定抗菌物质或占据有效生态位点[39]有关。将兼具生防和促生功能的菌株应用于秸秆还田，不仅可加速有机物转化，还能在根际构建有益微生物屏障，调节土壤微生态，从而缓解连作障碍[15,17]。

3.4 菌株 Hzq23 最适生长条件探究

本试验通过控制变量法，明确菌株最适生长条件（碳源：葡萄糖；氮源：蛋白胨；pH 8.0；温度 28 ℃；装液量 50 mL/250 mL），并根据其特性优化匹配最适生长环境[40]。如刘垒从黄芪“甘芪 1 号”根系中筛选出 B16 菌株，其最适培养温度为 15～25 ℃，最适 pH 为 7.0，最适碳源和氮源分别为酵母提取物和蛋白胨；优化培养条件后，B16 的繁殖数量及 IAA 产量均极显著提高[41]。许佳露等[42]筛选的黑曲霉最适生长温度为 20 ℃，最适碳源为葡萄糖，最适 pH 为 5.0。Shu 等[43]筛选的植物乳杆菌以活菌数为指标时，最优条件为 40 ℃、山羊奶粉 16%、乳清粉 0.60%。本研究发现，Hzq23 在碱性（pH 8.0）条件下生长最佳，这与多数常见土壤细菌偏好中性环境有所不同。这一特性使其可能更适应于局部碱化的土壤环境或特定堆肥场景，为其在土壤生态修复中的应用提供了独特优势。

4 结论

本研究从高温闷棚条件下的番茄秸秆中分离筛选出假单胞菌属的多功能菌株 Hzq23，该菌株兼具促进秸秆降解、促进作物生长及防治番茄青枯病的能力。摇瓶培养 15 d 时，其秸秆降解率较对照显著提高 10.43%（$P<0.05$）；55 d 时，秸秆降解率较对照提高 15.24%，可加速秸秆资源化利用。盆栽试验中，该菌株使番茄地上部鲜质量、株高和根长较对照组分别增加 42.2%、42.2%和 43.7%，有效促进作物生长；同时将青枯病病情指数由 100%降至 50%，生防效果达 50%，为连作番茄田的废弃物处理与病害防控提供了绿色解决方案。Hzq23 的最适生长条件明确：碳源和氮源分别为葡萄糖和蛋白胨，pH 为 8.0，温度为 28 ℃，装液量为 50 mL/250 mL，该参数为后续菌剂生产提供了关键技术支撑。

参考文献：

[1] 闫豪玮, 穆月英. 蔬菜产业监测预警体系建设研究 基于蔬菜市场价格监测预警[J]. 蔬菜, 2023(5): 1-10.

[2] 罗娟, 赵立欣, 于佳动, 等. 我国蔬菜废弃物利用研究进展与发展建议[J/OL]. 中国瓜菜, (2024-02-24) [2025-10-12]. https://doi.org/10.16861/j.cnki.zggc.202423.0476.

[3] Zhang X M, Zhu Y, Li J L, et al. Exploring dynamics and associations of dominant lignocellulose degraders in tomato stalk composting[J]. J Environ Manag, 2021, 294: 113162.

[4] 黄维成. 贺州市蔬菜废弃物空间分布、污染风险及利用潜力分析[J]. 广西农学报, 2025, 40(2): 104-111, 141.

[5] 程维. 蔬菜废弃物温和水解逐级利用技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.

[6] 孙小妹, 俞兆鹏, 吕文军, 等. 番茄秸秆原位还田配施腐解菌剂对番茄生产的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 136-144.

[7] Liang W Q, Li S Q, Liu J Z, et al. Additives change microbiota to promote humic acid formation in composting of vegetable wastes[J]. Ind Crops Prod, 2025, 232: 121307.

[8] 孟祥海, 王佰成, 张星哲, 等. 食用菌菌渣高效降解菌的筛选及主菌株产酶环境优化[J]. 黑龙江农业科学, 2023(12): 55-63.

[9] Wang J J, Bao F, Wei H X, et al. Screening of cellulose-degrading bacteria and optimization of cellulase production from *Bacillus cereus* A49 through response surface methodology[J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 7755.

[10] 张冬雪, 文亚雄, 罗志威, 等. 纤维素降解菌的分离筛选及其对水稻秸秆的降解效果分析[J]. 江西农业学报, 2020, 32(1): 72-76.

[11] 杨金波, 杜中平, 韩睿. 牛羊粪中纤维素降解菌的筛选鉴定及产酶条件优化[J]. 中国酿造, 2024, 43(9): 118-123.

[12] 宫秀杰, 钱春荣, 于洋, 等. 近年纤维素降解菌株筛选研究进展[J]. 纤维素科学与技术, 2021, 29(2): 68-77.

[13] 胡占琴, 张默晗, 邬刚, 等. 一株多功能秸秆木质素降解菌株的筛选、鉴定及条件优化[J]. 安徽农业大学学报, 2024, 51(4): 638-643.

[14] 冯宝珍, 李培谦, 刘缙, 等. 番茄内生菌的分离鉴定及菌株 FQ-G3 抗病促生特性[J]. 微生物学报, 2024, 64(1): 208-219.

[15] 姬生平. 蔬菜大棚种植存在的问题与对策措施[J]. 世界热带农业信息, 2023(5): 10-11.

[16] Li W H, Liu Q Z. Changes in fungal community and diversity in strawberry rhizosphere soil after 12 years in the greenhouse[J]. J Integr Agric, 2019, 18(3): 677-687.

[17] 漆艳香, 谢艺贤, 彭军, 等. 香蕉根际微生态及其与枯萎病防治之间的关系[J]. 生物技术通报, 2024, 40(6): 57-67.

[18] 马超, 张默晗, 胡占琴, 等. 一株兼具解磷促生能力木质素降解菌的筛选、鉴定及发酵优化[J]. 安徽农业大学学报, 2025, 52(2): 310-315.

[19] 付增宇, 郭玮, 李志超, 等. 低温地区纤维素降解菌的筛选鉴定与纤维素酶活力测定[J]. 贵州农业科学, 2024,

52(3): 79-85.

[20] 卢晓虹, 许敏, 李甜爽, 等. 番茄青枯病拮抗菌株的筛选、鉴定及发酵条件的优化[J]. 山西农业科学, 2022, 50(5): 698-708.

[21] 薛梅, 曾婉琳, 张荣, 等. 防控烟草青枯病植物免疫诱抗剂的筛选及其防治效果测定[J]. 广东农业科学, 2021, 48(6): 87-92.

[22] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[23] 布坎南. 中国科学院微生物研究所译. 伯杰细菌鉴定手册 [M]. 8 版. 北京: 科学出版社, 1984.

[24] 石金炼, 王智谦, 吕腾, 等. 高效降解发酵饲料中亚硝酸盐菌株 JBA-3 全基因组测序及相关基因功能分析[J]. 中国饲料, 2025(4): 9-12.

[25] 马耀武, 张麒宇, 杨淼, 等. 烟草根际促生菌的筛选鉴定及促生性能研究[J]. 生物技术通报, 2025, 41(3): 271-281.

[26] 吴婧, 聂彩娥, 朱媛媛, 等. 一株兼具产 IAA 能力纤维素降解菌的筛选、鉴定及条件优化[J]. 生物技术通报, 2020, 36(12): 54-63.

[27] 徐欣韵, 王宁, 丁佳, 等. 番茄青枯病拮抗菌的定向筛选及其抗病促生机制研究[J]. 微生物学报, 2021, 61(10): 3276-3290.

[28] 杨天杰, 王玉鑫, 王佳宁, 等. 不同基质生物有机肥防控番茄土传青枯病及促生效果研究[J]. 土壤, 2021, 53(5): 961-968.

[29] 张子赟, 朱林, 胡占琴, 等. 砂姜黑土中兼具促生功能的纤维素降解菌的筛选及其应用[J]. 土壤, 2023, 55(5): 1062-1069.

[30] 张慧, 赵恪, 林陈强, 等. 纤维素降解菌的分离筛选及产酶条件优化[J]. 福建农业学报, 2023, 38(9): 1117-1123.

[31] 张运晖, 赵瑛, 张艳萍, 等. 一株玉米秸秆纤维素降解放线菌的筛选、鉴定及酶学特性研究[J]. 微生物学杂志, 2023, 43(3): 52-59.

[32] Tatusova T, Dicuccio M, Badretdin A, et al. NCBI prokaryotic genome annotation pipeline[J]. Nucleic Acids Res, 2016, 44(14): 6614-6624.

[33] 强震宇, 朱林, 朱媛媛, 等. 一株兼具秸秆腐解能力玉米促生菌的筛选、鉴定及发酵优化[J]. 微生物学通报, 2023, 50(2): 526-540.

[34] 何宏涛, 王玉虎, 周洪友, 等. 番茄根际产生长素菌株分离及其对番茄和马铃薯幼苗的促生作用[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(19): 219-225.

[35] Abd-Alla' M H, El-Sayed E A, Rasmey A M. Indole-3-acetic acid (IAA) production by *Streptomyces atrovirens* isolated from rhizospheric soil in Egypt[J]. J Biol Earth Sci, 2013,3 (2): 182-193.

[36] 王静, 顾婷, 郑洒洒, 等. 一株腐臭假单胞菌 P683 的多功能特性测定与基因组分析[J]. 生物资源, 2024, 46(1): 20-31.

[37] 李育虹. 佩拉德尼亚假单胞菌 LH21 防治番茄青枯病机制初步分析[D]. 南宁: 广西大学, 2025: 1-63.

[38] 郝芳敏, 董文杰, 臧全宇, 等. 一株甜瓜枯萎病拮抗菌的筛选、鉴定及生防效果[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(12): 26-32.

[39] Zhang Z Y, Dong Y D, Chen X, et al. Ecological niche imprints the structure and network of microbial communities in *Lonicera japonica* Thunb[J]. Plant Soil, 2025, 513(1): 1541-1555.

[40] 蒋希峰, 杨帆, 王爽, 等. 解淀粉芽孢杆菌 BQD1 培养条件优化及对尖孢镰刀菌抑制效果[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(17): 123-126, 132.

[41] 刘垒, 郭凤霞, 陈垣, 等. 蒙古黄芪内生细菌产 IAA 菌株筛选与培养条件优化[J]. 草原与草坪, 2024, 44(2): 145-154.

[42] 许佳露, 张平, 李美芳, 等. 产铁载体菌株的分离、培养条件优化及初步应用[J]. 微生物学通报, 2022, 49(3): 1004-1016.

[43] Shu G W, Yang H, Chen H, et al. Effect of incubation time, inoculum size, temperature, pasteurization time, goat milk powder and whey powder on ACE inhibitory activity in fermented milk by *L. plantarum* LP69[J]. Acta Sci Pol Technol Aliment, 2015, 14(2): 107-116.