

多黏类芽孢杆菌 X-11 对温室番茄生长、产量及抗性的影响

王金庆¹, 傅应林¹, 闫凤超², 刘文志¹, 于文清¹

(1. 上饶师范学院生命科学院·赣东北地区植物保护与生态恢复重点实验室 江西上饶 334001;

2. 黑龙江北大荒现代农业服务集团有限公司 哈尔滨 150030)

摘要:多黏类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)是重要的生防菌,在农业生产中应用潜力巨大。前期研究筛选鉴定了1个多黏类芽孢杆菌新菌株X-11,为明确该菌株在番茄上的应用效果,采用温室盆栽和地栽相结合的方法,以清水为对照,评估不同浓度X-11菌液对番茄生长、产量及抗性的影响。盆栽试验结果表明,与对照相比,稀释50倍的X-11菌液叶面喷施15 d后,番茄叶宽显著增加10.68%;稀释50倍、200倍和800倍的X-11菌液叶面喷施可使番茄单株果数显著增加16.67%~47.92%,单果质量分别提高了53.62%、67.51%和28.25%,病毒病发病率显著降低,防效达到了31.37%~52.69%,以稀释50倍最高。此外,稀释800倍处理使单株果质量提高55.80%。用稀释50~200倍的X-11菌液灌根,能降低番茄株高、冠幅、叶长或叶宽,但对产量因子的促进作用不显著。X-11菌液叶面喷施联合灌根(R+L)较对照显著增加了地栽番茄株高、单株果质量、单果质量和产量,并使番茄顶叶和侧叶的冷害病情指数显著降低,防效分别达到56.40%和45.82%。综上,叶面喷施联合灌根是提升X-11菌液促生与抗逆效果的有效施用方式。本研究结果可为X-11在番茄栽培中的应用提供依据。

关键词:番茄;多黏类芽孢杆菌;促生;产量;抗性

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)06-130-08

Effects of *Paenibacillus polymyxa* X-11 on the growth, yield and resistance of tomato in greenhouse

Wang Jinqing¹, Fu Yinglin¹, Yan Fengchao², Liu Wenzhi¹, Yu Wenqing¹

(1. College of Life Science, Shangrao Normal University/Key Laboratory for Regional Plants Conservation and Ecological Restoration of Northeast Jiangxi, Shangrao 334001, Jiangxi, China; 2. Heilongjiang Beidahuang Modern Agricultural Service Group Co. Ltd., Harbin 150030, Heilongjiang, China)

Abstract: The *Paenibacillus polymyxa* group is one of the most important biocontrol bacteria with substantial potential for agricultural applications. A *P. polymyxa* novel strain X-11 was previously isolated and identified. To clarify the application effect of this strain on tomato, the effects of X-11 bacterial suspension with different concentration on tomato growth, yield, and stress resistance through pot and field experiments in greenhouse were detected. Pot experiment results demonstrated that, compared to the control, leaf spraying with a 50-fold dilution of X-11 bacterial suspension significantly increased tomato leaf width by 10.68% 15 days after application. Applications at 50-fold, 200-fold, and 800-fold dilutions of X-11 bacterial suspension enhanced the fruit number of per plant by 16.67% to 47.92%, and increased single fruit mass by 53.62%, 67.51%, and 28.25%, and as well as significantly reduced the incidence of viral diseases, with control efficiency ranging from 31.37% to 52.69%, peaking at the 50-fold dilution. Moreover, the 800-fold dilution raised the fruit mass per plant by 55.80%. Root irrigation with X-11 bacterial suspensions at 50 to 200-fold dilutions reduced plant height, crown breadth, leaf length, or leaf width, while the promote effect on yield-related factors was not statistically significantly. Compared with single application method, field-grown tomato with X-11 bacterial suspension by combining leaf spraying with root irrigation (R+L) enhanced the plant height, fruit number per plant and yield significantly. Moreover, R+L treatment reduced the cold damage index in both apical and lateral leaves markedly, with control efficiency reaching 56.40%

收稿日期:2025-10-08;修回日期:2025-11-25

基金项目:国家自然科学基金(32360698);江西省大学生创新创业训练计划(S202510416005)

作者简介:王金庆,男,在读本科生,研究方向为农业微生物及其蛋白激酶子。E-mail:536404762@qq.com

通信作者:刘文志,男,研究员,主要从事农业微生物及其蛋白激酶子研究与应用工作。E-mail:Liuwz19801005@sina.com

于文清,女,教授,主要从事农业微生物及其蛋白激酶子研究与应用工作。E-mail:wenqinguy09@163.com

and 45.82%, respectively. In conclusion, combining leaf spraying with root irrigation is an effective application method to enhance the promoting and stress-resistant effects of X-11 bacterial suspension. The results can provide a basis for the application of strain X-11 in tomato cultivation.

Key words: Tomato; *Paenibacillus polymyxa*; Growth promotion, Yield; Resistance

多黏类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)属于厚壁菌门类芽孢杆菌科,是类芽孢杆菌的模式种^[1],在农业生产中发挥着重要作用^[2]。该微生物类群的抗菌特性和对植物生长的调节作用已经被广泛研究和证实^[3]。多黏类芽孢杆菌可通过固氮^[4]、溶磷^[5]、产生铁载体和植物生长调节物质^[6]促进植物生长,还能够诱导植物系统抗性^[6]及拮抗真菌来防治植物病害^[7]。如 WLY78 菌株通过固氮显著增加了黄瓜的根、芽长及干质量^[8],JY1-5 菌株可通过产生抗菌物质防治番茄灰霉病^[9],Sx3 菌株可保护水稻免受白叶枯病菌(*Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*)感染^[10]。多黏类芽孢杆菌可以有效防治尾孢属(*Cercospora*)引起的叶斑病^[11],还可以增强黄瓜对尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)的防御反应^[12],有效控制芸薹属(*Brassica*)作物中由根肿菌属(*Plasmodiophora brassicae*)引起的根肿病^[13]。最新研究发现,多黏类芽孢杆菌 D41 可以合成锌纳米颗粒,从而保护小麦(*Triticum aestivum* L.)免受镰刀菌(*Fusarium culmorum*)的感染^[14]。

多黏类芽孢杆菌已成为一种潜在的有应用价值的农用微生物制剂。因具有对人畜安全 and 无污染等优点,其应用价值得到极大认可,美国环保署更是将其列为可在商业上应用的微生物之一。截至 2025 年 10 月 5 日,NCBI 数据库中提交 335 个多黏类芽孢杆菌生物样本(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/biosample/?term=Paenibacillus%20polymyxa>),且每个月都会增加新的生物样本,这反映出研究者对多黏类芽孢杆菌具有较高的关注度。

由于多黏类芽孢杆菌不同菌株应用对象及作用机制存在差异化现象,在其菌剂研究与开发过程中,需对其适用对象、有效施用方式及剂量进行评价。笔者在前期研究中分离鉴定出 1 个多黏类芽孢杆菌新菌株 X-11,能够产生吲哚,具有固氮功能,可提高番茄种子发芽率,促进胚根和胚芽生长,具有诱导番茄防御酶活性增强的效应^[15],在调节植物生长和防治植物病害方面具有应用潜力。但以该菌株制成菌液在番茄上发挥作用的适宜施用方式及剂量尚未进行研究。笔者拟通过温室盆栽试验和地栽试验,研究 X-11 菌液不同浓度及不同施用方式对番茄生长及产量的影响,同时检测其对番茄

病毒病及冷害的防治效果,以期为该菌株在番茄生产中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试盆栽试验的番茄品种为粉冠,由山东寿禾种业有限公司培育;供试地栽试验的番茄品种为金玲珑(T-3060),由农友种业(中国)有限公司培育。

马铃薯蔗糖培养液(PSB)(马铃薯 200 g·L⁻¹、蔗糖 20 g·L⁻¹)和马铃薯蔗糖琼脂培养基(PSA)(马铃薯 200 g·L⁻¹、蔗糖 20 g·L⁻¹、琼脂粉 20 g·L⁻¹)按前期发表成果中描述的方法制备^[16]。有机无机复合培养液参照前期发表成果中描述的方法制备^[17],对培养基成分稍作优化,优化后的配方为:蔗糖 1.2 g、蛋白胨 1.2 g、玉米淀粉 2.6 g、MgSO₄·7H₂O 0.24 g、CaCO₃ 0.6 g、K₂HPO₄ 1.2 g、黄豆饼粉 6.0 g、蒸馏水 1 L。

1.2 多黏类芽孢杆菌 X-11 及其菌液制备

供试多黏类芽孢杆菌 X-11 目前存放于上饶师范学院生命科学学院植物病虫害生物防治实验室和中国普通微生物菌种保藏中心(保藏号:CGMCC No. 20476)。制备 X-11 菌液时,首先将斜面保藏培养物无菌操作接种于 PSA 平板中,培养 48 h 后,挑取单菌落接种于 PSB 中,置于 30 °C 摇床,转速设置为 180 r·min⁻¹,黑暗培养 24 h,再以该培养物作为接种液,接种于 1.1 中有机无机复合培养基中(接种量 1%),置于 30 °C 摇床,转速设置为 180 r·min⁻¹,黑暗培养 48 h,即得 X-11 菌株芽孢的菌悬液,有效活菌数为 1×10⁹ CFU·mL⁻¹。

1.3 盆栽试验

1.3.1 种植土准备 种植土由田园土、泥炭、椰糠、营养土、珍珠岩按体积比 5:2:1:1:1 混合制得;将种植土分装入口径为 30 cm、底部直径为 20 cm、深度 25 cm 的钵中,掺入史丹利三元复合肥(N、P₂O₅、K₂O 质量比 13:10:20)作为基肥,基肥添加量为 2 g·L⁻¹种植土。

1.3.2 处理方法 试验于 2021 年 9 月至 2022 年 5 月在上饶师范学院生命科学学院实践教学基地生态园玻璃温室内进行,采用随机排列设计。采用穴盘育苗将番茄培育至第 5 片真叶展开时,将其移栽至准备好种植土的盆钵中培养。

X-11 菌液处理方式分为叶面喷施和灌根处理,

每种处理方式下设置3个X-11菌液浓度,使用前将X-11菌液分别稀释50倍、200倍、800倍,每个处理设置5个生物学重复,以清水为空白对照(CK),盆钵随机排列置于温室内的水泥地面。

番茄长至12叶期时,取相应稀释度的X-11菌液处理番茄植株,每15 d处理1次,共处理3次。叶面喷施时,将X-11菌液稀释液均匀地喷施于番茄叶片上,以全部叶片表面附有一层细密的水滴且欲滴落为准,同一时期处理时,每株菌液施用量一致。灌根处理时,每株用50 mL相应浓度的X-11菌液稀释液处理。为确保菌液均匀渗入番茄根系,在处理前控制种植土水分含量,使种植土保持湿润,含水量约为最大持水量的60%,分别于第1次和第2次处理15 d后测量植株的株高、冠幅及生长点向下完全展开的第3片叶的叶长、叶宽。试验期间,定期给番茄浇水、施肥,采用单蔓整形,适时进行支架绑缚。番茄成熟时,每隔5~7 d采摘成熟果实,记录每株收获的番茄数量和质量。

在试验期间,番茄感染了病毒病,第3次处理15 d后,统计每株叶片总数和发病叶片数(发病叶片扭曲变形、边缘上卷,甚至叶片上有黑色斑块)。以发病叶片数与总叶片数的比值计算发病率,并计算相对防效。相对防效/%=(对照发病率-处理发病率)/对照发病率×100。

1.4 地栽试验

1.4.1 试验地基本概况 试验于2021年9月至2022年6月在上饶师范学院生命科学学院实践基地生态园玻璃温室内进行。土壤pH 5.2,有机质含量(w,后同)5.8%,速效磷含量33.2 mg·kg⁻¹,速效钾含量162.1 mg·kg⁻¹,碱解氮含量18.8 mg·kg⁻¹。

1.4.2 试验设计 采用随机区组排列设计。将金玲珑番茄种子在穴盘中育苗,待幼苗长出5片真叶时取长势一致的幼苗移栽至生态园大田中,移栽前将大田划分为6个小区,每个小区面积20 m²。为避免菌液处理后干扰临近植株,将行株距设置为50 cm×40 cm。

设置X-11菌液处理(X-11)和对照(CK)两个处理组,处理方式为叶面喷施与灌根联合(L+R),处理组和对照组各3个生物学重复。番茄苗移栽7 d后,将X-11菌液用清水稀释200倍,按1.3.2所述盆栽试验的处理方式进行叶面喷施和灌根处理。试验期间共处理2次,2次处理间隔30 d。田间管理按照常规操作进行。

1.4.3 番茄生长情况调查及产量测定 在第2次

处理后30 d,在每个小区内选择具有代表性的10株植株,测定番茄的株高、冠幅、倒数第4片叶的叶长、叶宽。在番茄果实成熟期间,每5~7 d对每株成熟果实进行采摘,在每个小区内选择固定的10株番茄,记录收获的单株果数、单株果质量,计算平均单果质量,并计算理论产量,累加每个小区收获的番茄质量,计算小区产量,取每个处理组中3个小区产量进行统计分析。

1.4.4 番茄冷害发病情况调查 2022年1—2月,玻璃日光温室内日最低气温降至4℃以下达11 d,气温一度达到0℃以下,导致番茄植株遭受冷害,3月初,观察到番茄叶片出现冷害症状。从每个小区随机选取10株番茄调查发病情况。选取植株上冷害症状最严重的一片复叶进行调查,观察到其顶叶与相邻侧叶上有明显的冷害症状,记录顶叶及最相邻的2个侧叶的发病等级。根据叶片病斑面积将病害等级划分为7级,0级:全叶无颜色变化;1级:叶边缘轻微失绿;2级:褪绿面积小于叶面积的1/10,病斑直径小于1 mm;3级:叶面积的1/10~1/5褪绿,病斑直径为1~3 mm;4级:叶面积的1/5~1/3褪绿,病斑直径为3~6 mm;5级:叶面积的1/3~1/2褪绿,病斑直径大于6 mm;6级:叶面积一半及以上褪绿,病斑直径大于6 mm。计算病情指数(DI)和防治效果(CE)。

$$DI=100 \times [\sum (ni \times i)] / (N \times I); CE\% = (DI_{ck} - DI_{X-11}) / DI_{ck} \times 100。$$

式中,*ni*表示发病等级为*i*的叶片数量;*N*=10(调查叶片总数);*I*=6(最高发病等级)。DI_{ck}和DI_{X-11}分别表示对照和X-11菌液处理叶片的病情指数。

1.5 数据分析

采用SPSS 19.0软件对各处理之间的差异进行统计学分析(显著性水平 $P<0.05$);采用Excel 2021软件绘图。

2 结果与分析

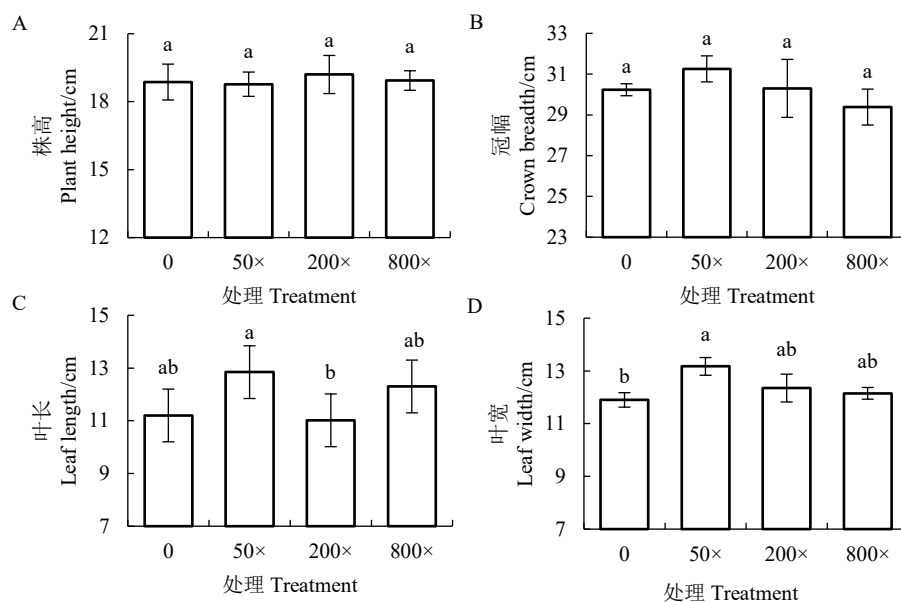
2.1 X-11菌液叶面喷施处理对盆栽番茄生长、产量及病毒病防效的影响

2.1.1 X-11菌液叶面喷施处理对番茄生物性状的影响 第一次叶面喷施X-11菌液15 d后的测量结果表明,各处理的番茄株高、冠幅差异均不显著(图1-A~B);用稀释200倍菌液处理的番茄叶长显著小于稀释50倍的处理,其他处理间差异不显著(图1-C);不同浓度菌液处理均增加了番茄叶宽,其中稀

释 50 倍的处理较 CK 显著增加 10.68%(图 1-D)。

第 2 次叶面喷施 X-11 菌剂 15 d 后的测量结果表明,株高在处理间差异不显著(图 2-A);X-11 菌液稀释 50 倍和 200 倍处理的冠幅显著小于 CK,稀释 800 倍处理与 CK 差异不显著(图 2-B);稀释 200 倍处理的叶长显著小于 CK(图 2-C);稀释 50 倍处理对番茄叶宽的影响不显著,稀释 200 倍和 800 倍处理显著减小了叶宽(图 2-D)。

2.1.2 X-11 菌液叶面喷施处理对番茄产量因子的影响 叶面喷施各浓度的 X-11 菌液均显著提高了番茄单株果数,提高幅度在 16.67%~47.92%之间(图 3-A);稀释 50 倍和 200 倍处理的单果质量分别显著提高了 53.62%和 67.51%,稀释 800 倍处理与其他处理间差异不显著(图 3-B);稀释 800 倍处理的单株果质量较 CK 显著提高了 55.80%,其他处理之间差异不显著(图 3-C)。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters represent significant difference among treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同浓度多黏类芽孢杆菌 X-11 菌液叶面喷施处理下番茄的生物性状(第 1 次处理后 15 d)

Fig. 1 Tomato biological traits under different concentrations of *Paenibacillus polymyxa* X-11 bacterial suspension treatments by leaf spraying (15 days after the first treatment)

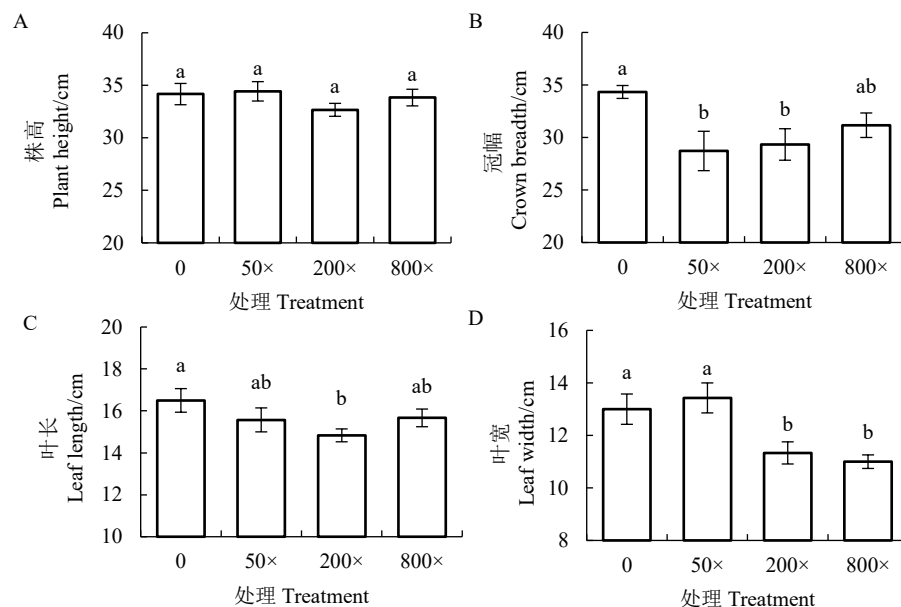


图 2 不同浓度多黏类芽孢杆菌 X-11 菌液叶面喷施处理下番茄生物性状(第 2 次处理后 15 d)

Fig. 2 Tomato biological traits under different concentrations of *Paenibacillus polymyxa* X-11 bacterial suspension treatments by leaf spraying (15 days after the second treatment)

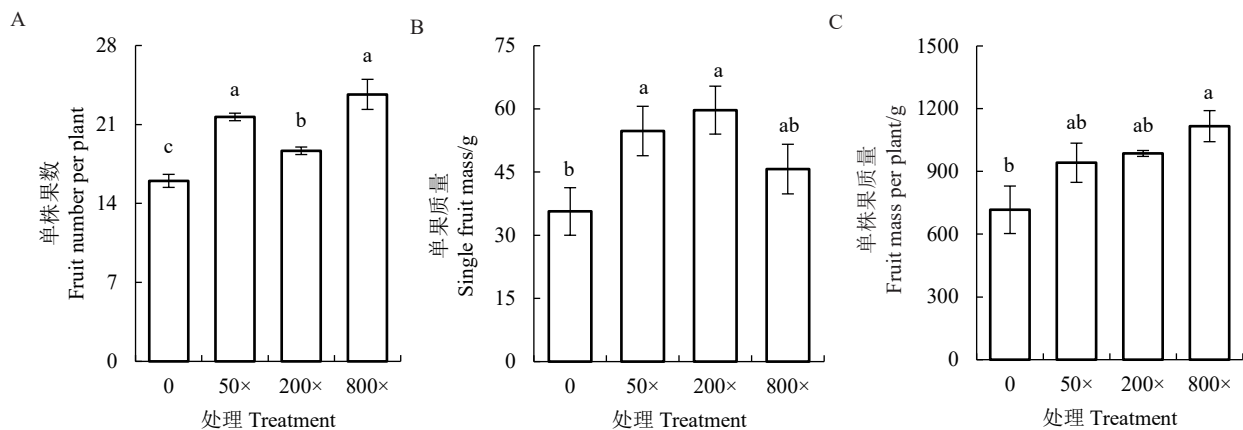


图 3 不同浓度多黏类芽孢杆菌 X-11 菌液叶面喷施处理对番茄产量的影响
Fig. 3 Effects of different concentrations of *Paenibacillus polymyxa* X-11 bacterial suspension treatments by leaf spraying on tomato yield

2.1.3 X-11 菌液叶面喷施处理对番茄病毒病的影响 未施用 X-11 菌液(CK)的番茄叶片病毒病发病率最高,达到 44.21%,叶面喷施各稀释倍数的 X-11 菌液均显著降低了番茄病毒病发病率,防效达到了 31.37%~52.69%,其中稀释 50 倍处理的防效显著高于另外 2 个稀释度处理(表 1)。由此可见,叶面喷施 X-11 菌剂可有效防治番茄病毒病。

表 1 不同浓度多黏类芽孢杆菌 X-11 菌液叶面喷施处理下番茄病毒病发生情况

Table 1 The status of tomato virus disease under different concentrations of *Paenibacillus polymyxa* X-11 bacterial suspension treatments by leaf spraying

处理 Treatment	发病率 Incidence rate/%	防效 Control efficiency/%
CK	44.21±1.95 a	
50×	20.77±2.79 c	52.69±6.36 a
200×	30.13±2.79 b	31.37±6.36 b
800×	28.46±2.81 bc	35.17±6.41 b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different small letters in the same column represent significant difference among treatments($P<0.05$). The same below.

2.2 X-11 菌液灌根处理对盆栽番茄生长、产量及病毒病防效的影响

2.2.1 X-11 菌液灌根处理对番茄生长的影响 X-11 菌液第 1 次灌根处理 15 d 后的测量结果表明,与对照相比,X-11 对番茄株高、冠幅及叶长的影响均不显著,但稀释 200 倍处理的冠幅显著低于稀释 50 倍的处理;用稀释 200 倍的菌液灌根,显著减小了叶宽,但其他浓度处理对叶宽的影响不显著(图 4)。

用 X-11 菌液第 2 次灌根处理 15 d 后的测量结

果表明,稀释 200 倍处理的番茄株高显著低于 CK,其他处理间差异不显著(图 5-A);该稀释倍数菌液处理下的冠幅显著低于 CK 和稀释 800 倍处理,其他处理间差异不显著(图 5-B);叶长在各处理间差异不显著(图 5-C);用稀释 50 倍的菌液灌根,显著减小了番茄叶宽,但稀释 200 倍和 800 倍处理对叶宽的影响不显著(图 5-D)。

2.2.2 X-11 菌液灌根处理对番茄产量和病毒病的影响 X-11 菌液灌根处理对番茄单果质量、单株果数及单株果质量均未产生影响(数据未展示)。病毒病调查结果表明,用不同浓度 X-11 菌液灌根对番茄病毒病的影响存在差异,其中稀释 50 倍和 200 倍处理可降低病毒病发病率,但其影响未达到显著水平,防效分别为 29.55%和 26.09%(表 2)。

2.3 X-11 菌液叶面喷施联合灌根处理对地栽番茄生长、产量及病害发生情况的影响

2.3.1 X-11 菌液叶面喷施联合灌根处理对番茄生长的影响 用稀释 200 倍的 X-11 菌液叶面喷施联合灌根(L+R)处理,显著增加了地栽番茄的株高和冠幅,但对叶长和叶宽的影响不显著(表 3)。

2.3.2 X-11 菌液叶面喷施联合灌根处理对番茄产量的影响 X-11 菌液 L+R 处理可使番茄单株果质量和单果质量分别显著提高 40.83%和 28.20%,理论产量和小区产量分别显著提高 40.72%和 50.09%,单株果数增加幅度为 14.20%,但差异不显著(表 4)。

2.3.3 X-11 菌液叶面喷施联合灌根处理对番茄冷害发生情况的影响 冷害调查结果显示,对照组复叶的顶叶和侧叶的病情指数分别为 86.7 和 53.9, X-11 菌液 L+R 处理的病情指数分别为 37.8 和

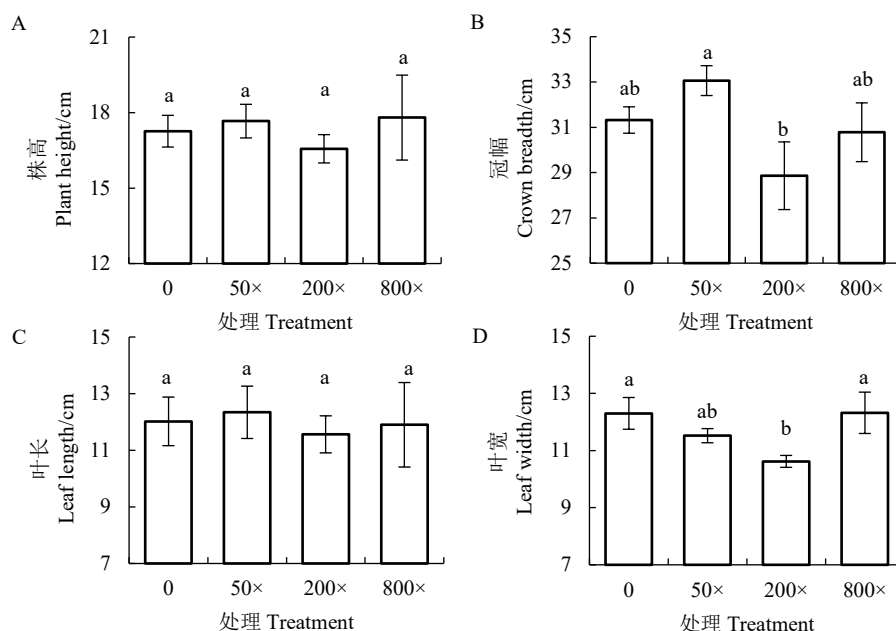


图4 不同浓度多黏类芽孢杆菌X-11菌液灌根处理下番茄生物性状(第1次处理后15 d)

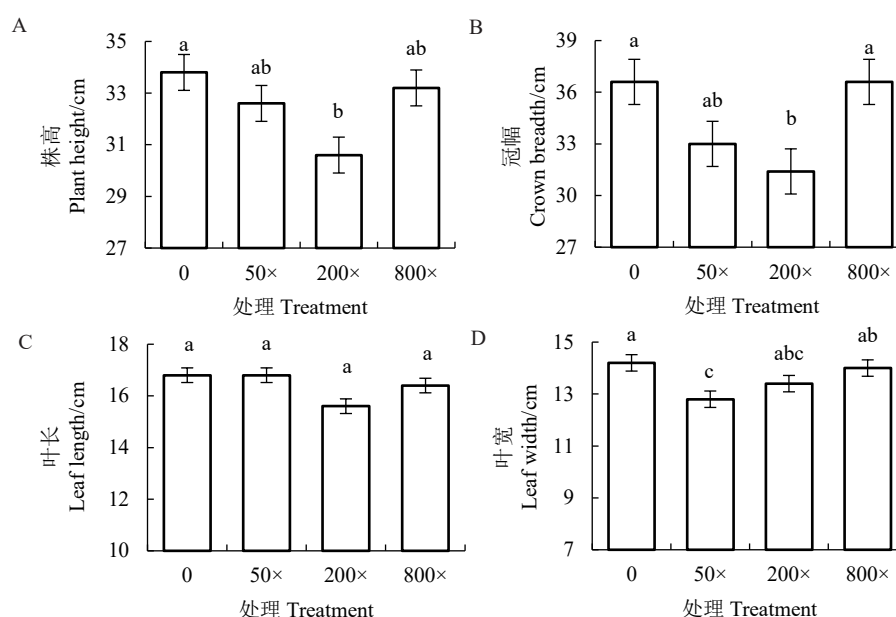
Fig. 4 Tomato biological traits under different concentrations of *Paenibacillus polymyxa* X-11 bacterial suspension treatments by root irrigation (15 days after the first treatment)

图5 不同浓度多黏类芽孢杆菌X-11菌液灌根处理下番茄生物性状(第2次处理后15 d)

Fig. 5 Tomato biological traits under different concentrations of *Paenibacillus polymyxa* X-11 bacterial suspension treatments by root irrigation (15 days after the second treatment)

29.2,均显著低于对照组(图6)。X-11菌液L+R处理对顶叶和侧叶冷害的防效分别为56.40%和45.82%。由此可见,X-11叶面喷施联合灌根处理减轻了冷害发生程度。

3 讨论与结论

本研究通过盆栽及地栽试验证实,多黏类芽孢杆菌X-11可显著促进番茄生长、提高产量,并增强

对病毒病和冷害的抗性。灌根处理降低了株高、冠幅、叶长和叶宽,但产量因子无显著变化,表明X-11可能通过优化光合产物分配、提高果实库强实现增产。该结果与多数多黏类芽孢杆菌的促生防病作用相符^[3,9,18-26]。X-11的促生机制可能包括固氮^[4]、溶磷^[5]及产生植物生长调节物质^[6,8]等。

叶面喷施X-11稀释50、200倍菌液,使单果质量分别显著提高53.62%和67.51%;稀释800倍使

表 2 不同浓度多黏类芽孢杆菌 X-11 菌液灌根处理下番茄病毒病发生情况

Table 2 Status of tomato virus disease under different concentrations of *Paenibacillus polymyxa* X-11 bacterial suspension treatments by root irrigation

处理 Treatment	发病率 Disease rate/%	防效 Control efficiency/%
CK	40.86±4.97 ab	
50×	28.79±1.52 b	29.55±3.71 a
200×	30.20±5.16 ab	26.09±12.62 a
800×	44.33±2.86 a	-8.46±7.00 b

表 3 多黏类芽孢杆菌 X-11 叶面喷施联合灌根处理下番茄生物性状

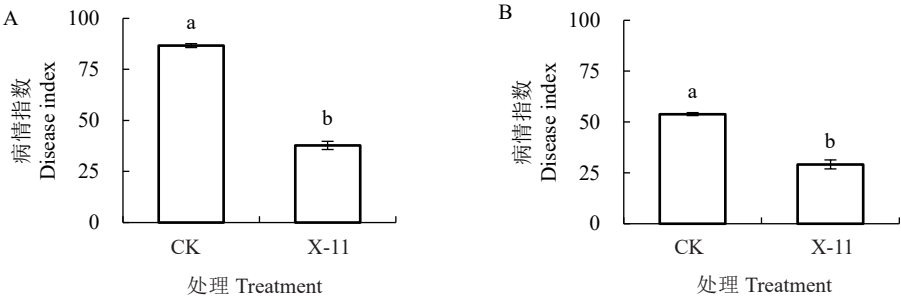
Table 3 Tomato biological traits under the treatment of *Paenibacillus polymyxa* X-11 bacterial suspension treatments by leaf spraying combined with root irrigation

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	冠幅 Crown breadth/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm
CK	32.50±1.88 b	32.82±1.99 b	12.26±0.53 a	11.27±0.53 a
X-11	37.24±1.49 a	36.75±2.13 a	12.92±0.55 a	11.48±0.53 a

表 4 多黏类芽孢杆菌 X-11 叶面喷施联合灌根处理对番茄产量的影响

Table 4 Effects of *Paenibacillus polymyxa* X-11 bacterial suspension treatments by leaf spraying combined with root irrigation on tomato yield

处理 Treatment	单株果数 Fruit number per plant	单株果质量 Fruit mass per plant/g	单果质量 Single fruit mass/g	理论产量 Theoretical yield/(kg·hm ²)	小区产量 Plot yield/kg
CK	98.22±2.12 a	761.43±2.23 b	7.34±0.62 b	38 071.55±111.76 b	72.85±1.30 b
X-11	112.17±10.22 a	1 072.32±53.21 a	9.41±0.48 a	53 573.78±2 678.43 a	109.34±4.76 a



注:A、B 分别为顶叶和侧叶的病情指数。
Note: A and B represent the disease index of top leaf and lateral leaf, respectively.

图 6 多黏菌类芽孢杆菌 X-11 菌液叶面喷施联合灌根处理下番茄叶片的冷害发生情况

Fig. 6 Cold damage status in tomato leaves under the treatment of *Paenibacillus polymyxa* X-11 bacterial suspension treatments by leaf spraying combined with root irrigation

单株果质量显著提高 55.80%。50~800 倍处理显著降低病毒病发病率,最高防效达 52.69%,表明叶面喷施可减轻病毒病对产量的不利影响。其抗病性与菌株产生的抗菌物质有关,如几丁质酶、蛋白酶^[21]、多肽抗生素^[27-28]及 3-吡啶乙酸^[11]等,这些物质可抑制病原并诱导系统抗性。前期研究也证实 X-11 具有固氮、产吡啶功能^[15]和广谱抗菌活性,可合成多种抗菌产物(未发表),这可能是其促生抗逆的重要基础。

施用方式对菌液效果有显著影响。叶面喷施在促生、增产及病毒病防效方面均优于灌根。多黏类芽孢杆菌可在根、茎、叶中定殖^[29-30];灌根主要依赖根际竞争抑制病原,叶面喷施则使菌体与抗菌物质更直接作用于侵染部位。叶面喷施与灌根联合(L+R)处理显著降低了顶叶与侧叶的冷害病情指数,表明 X-11 可诱导广谱抗性,且双重施用可能通

过根际-叶面协同形成更全面保护。

综上所述,多黏类芽孢杆菌 X-11 具有促进番茄生长和增强番茄对病毒病和冷害胁迫抗性的特征。叶面喷施可促进盆栽番茄叶片生长、增加单株果数、单果质量及单株果质量,对病毒病的防效可达 52.69%;用不同浓度 X-11 菌液灌根虽然能降低盆栽番茄株高、冠幅、叶长或叶宽,但对产量因子的影响不显著;而叶面喷施与灌根联合处理则显著增加了地栽番茄株高,单株果质量、单果质量和产量,且显著降低了番茄叶片的冷害病情指数。总之,X-11 菌液叶面喷施与灌根联合施用可达到理想效果,本研究结果为 X-11 菌液在番茄生产中的应用提供了数据支撑。

参考文献

[1] Truper H G. The type species of the genus *Paenibacillus* Ash et al. 1994 is *Paenibacillus polymyxa*. Opinion 77[J]. International

- Journal of Systematic & Evolutionary Microbiology, 2005, 55 (1):513.
- [2] Song W W, Dai M M, Gao S S, et al. Volatile organic compounds produced by *Paenibacillus polymyxa* J2-4 exhibit toxic activity against *Meloidogyne incognita*[J]. Pest Management Science, 2024, 80(3):1289-1299.
- [3] Ma J Y, Liu J L, Shi Y X, et al. Coating seeds with *Paenibacillus polymyxa* ZF129 microcapsule suspension enhanced control effect on *Fusarium* root rot and promoted seedling growth in cucumber[J]. Biology, 2025, 14(4):375.
- [4] Padda K P, Puri A, Chanway C P. Plant growth promotion and nitrogen fixation in canola (*Brassica napus*) by an endophytic strain of *Paenibacillus polymyxa* and its GFP-tagged derivative in a long-term study[J]. Botany, 2016, 94(12):1209-1217.
- [5] Wang Y L. Phosphate solubilization of *Paenibacillus polymyxa* and *Paenibacillus macerans* from mycorrhizal and non-mycorrhizal cucumber plants[J]. African Journal of Microbiology Research, 2012, 6(21):4567-4573.
- [6] Mei L, Liang Y, Zhang L, et al. Induced systemic resistance and growth promotion in tomato by an indole-3-acetic acid-producing strain of *Paenibacillus polymyxa*[J]. Annals of Applied Biology, 2014, 165(2):270-279.
- [7] Ranjbar H H, Hosseini-Abari A, Ghasemi S M. Antibacterial activity of epsilon-poly-L-lysine produced by *Stenotrophomonas maltophilia* HS4 and *Paenibacillus polymyxa* HS5, alone and in combination with bacteriophages[J]. Microbiology, 2023, 169 (7):001363.
- [8] Li Q, Liu S, Li Y B, et al. Nitrogen fixation by *Paenibacillus polymyxa* WLY78 is responsible for cucumber growth promotion[J]. Plant and Soil, 2022, 473(1/2):1-10.
- [9] Zhang Q X, Xing C L, Li S Y, et al. *In vitro* antagonism and biocontrol effects of *Paenibacillus polymyxa* JY1-5 against *Botrytis cinerea* in tomato[J]. Biological Control, 2021, 160:104689.
- [10] Abdallah Y, Yang M, Zhang M C, et al. Plant growth promotion and suppression of bacterial leaf blight in rice by *Paenibacillus polymyxa* Sx3[J]. Letters in Applied Microbiology, 2019, 68 (5):423-429.
- [11] Adhikari R, Monkhung S, Mongkol R, et al. *Paenibacillus polymyxa* reduces leaf spot disease caused by *Cercospora* sp. and has potential to promote growth in green oak lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*) in the commercial hydroponic farm[J]. Acta Horticulturae, 2022, 1339:463-470.
- [12] Du N S, Yang Q, Xue L, et al. *Paenibacillus polymyxa* NSY50 improves defense against *Fusarium oxysporum* by increasing photosynthetic efficiency, sucrose metabolism, and antioxidant capacity in cucumber[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023, 42(4):2246-2257.
- [13] Kang H J, Fan T F, Lin Z H, et al. Development of chitosan/carrageenan macrobeads for encapsulation of *Paenibacillus polymyxa* and its biocontrol efficiency against clubroot disease in *Brassica* crops[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 264:130323.
- [14] Al-Quwaie D A. Antifungal activity of zinc nanoparticles biosynthesized by *Paenibacillus polymyxa* D41 provides potent control against *Fusarium culmorum* in wheat[J]. Journal of Plant Pathology, 2024, 106(2):671-682.
- [15] 刘文志, 贺丹, 李鹏, 等. 多黏类芽孢杆菌新菌株 X-11 及其对番茄和水稻的促生效应[J]. 生物技术通报, 2024, 40(9):249-259.
- [16] 于文清, 廖雅莉雯, 张译心, 等. 多黏类芽孢杆菌 X-11 培养条件优化及其对马家柚的促生效果[J]. 上饶师范学院学报, 2024, 44(3):44-57.
- [17] 于文清, 刘文志, 胡广民, 等. 土壤类芽孢杆菌(*Paenibacillus terrae*)新菌株 NK3-4 及其功能[J]. 微生物学通报, 2014, 41(4):621-628.
- [18] 杨文奇. 多黏类芽孢杆菌 SC2 对樱桃番茄促生作用及可湿性粉剂的制备[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2025.
- [19] 金美芳, 林茂兹, 陈春香, 等. 多黏类芽孢杆菌 S960 对番茄生长与光合生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(5):941-948.
- [20] 王艺茹, 潘培培, 沈虎生, 等. 番茄疫霉根腐病菌拮抗细菌 HP8-1 的鉴定及生物防治潜力[J]. 河南农业大学学报, 2024, 58(1):78-86.
- [21] 张建强, 魏涛, 赖鑫, 等. 多黏类芽孢杆菌 YF 对番茄灰霉病的生防机制初探[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(10):61-67.
- [22] Liu W C, Wu X L, Bai X L, et al. Fusaricidins in *Paenibacillus polymyxa* A21 and their antagonistic activity against *Botrytis cinerea* on tomato[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2018, 5(2):262-270.
- [23] 曾立, 程万里, 余豪, 等. 多黏类芽孢杆菌 KM2501-1 发酵液对番茄根结线虫的防治效果[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(5):1046-1050.
- [24] Singh R R, Wesemael W M L. Endophytic *Paenibacillus polymyxa* LMG27872 inhibits *Meloidogyne incognita* parasitism, promoting tomato growth through a dose-dependent effect[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:961085.
- [25] 马桂珍, 王淑芳, 暴增海, 等. 多黏类芽孢杆菌 L1-9 菌株对番茄早疫病的抑菌防病作用[J]. 中国蔬菜, 2010(12):55-59.
- [26] Yi J C, Zhang D J, Cheng Y J, et al. The impact of *Paenibacillus polymyxa* HY96-2 luxS on biofilm formation and control of tomato bacterial wilt[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(23/24):9643-9657.
- [27] Beatty P H, Jensen S E. *Paenibacillus polymyxa* produces fusaricidin-type antifungal antibiotics active against *Leptosphaeria maculans*, the causative agent of blackleg disease of canola[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2002, 48(2):159-169.
- [28] Huang E, Yousef A E. Draft genome sequence of *Paenibacillus polymyxa* OSY-DF, which coproduces a lantibiotic, paenibacillin, and polymyxin E1[J]. Journal of Bacteriology, 2012, 197(17):4739-4740.
- [29] 赵新海, 钟丽娟, 张庆华, 等. 多黏类芽孢杆菌在黄瓜叶面和土壤中定殖能力及其对土壤微生物的影响[J]. 世界农药, 2009, 31(5):25-27.
- [30] Haggag W M, Timmusk S. Colonization of peanut roots by biofilm-forming *Paenibacillus polymyxa* initiates biocontrol against crown rot disease[J]. Journal of Applied Microbiology, 2010, 104(4):961-969.