湖南农业大学学报(自然科学版) 2025，51(3)：42–49. DOI：10.13331/j.cnki.jhau.2025.03.006
Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)

引用格式：
林艳，李鑫，陶禹，陈佳伟，饶力群. 贝莱斯芽孢杆菌XY40–1悬浮种衣剂的创制及对茄子生长的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版)，2025，51(3)：42–49.
LIN Y，LI X，TAO Y，CHEN J W，RAO L Q. The preparation of *Bacillus velezensis* strain XY40-1 suspension for seed coating and its effect on eggplant growth[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)，2025，51(3)：42–49.
投稿网址：http://xb.hunau.edu.cn

贝莱斯芽孢杆菌XY40–1悬浮种衣剂的创制及对茄子生长的影响

林艳[1]，李鑫[2,3]，陶禹[2]，陈佳伟[1]，饶力群[1*]

(1. 湖南农业大学生物科学技术学院，湖南 长沙 410128；2. 湖南省蔬菜研究所，湖南 长沙 410125；3. 植物内生微生物资源挖掘与利用湖南省工程研究中心，湖南 长沙 410125)

摘要：本研究以贝莱斯芽孢杆菌XY40–1生物农药悬浮剂为基础，通过添加成膜剂、警戒色、增效剂，配制新型生物悬浮种衣剂，并以茄子为研究对象，对贝莱斯芽孢杆菌XY40–1种衣剂的质量功效进行验证。结果表明：以6%聚乙烯吡咯烷酮为成膜剂，0.4%碱性品红为警戒色，50 nmol/L吡咯喹啉醌为增效剂时，所制备的种衣剂质量指标均符合国家标准；此时，种衣剂活菌数达到2.5×10^9 cfu/mL，pH为7.647，成膜性合格，倾倒性合格，包衣均匀度为92%，包衣脱落率为7.67%，黏度为100 mPa·s。温室栽培试验结果显示，与对照组相比，药种比为1∶35的试验组茄子的发芽势、发芽率、出苗率分别提高了364.77%、13.49%、67.43%；此外，该种衣剂还提升了对褐纹病的防病效果，病株率降低40.42%，病害指数降低38.26%。

关键词：生物农药；贝莱斯芽孢杆菌；生物悬浮种衣剂；茄子

中图分类号：S476 **文献标志码**：A **文章编号**：1007–1032(2025)03–0042–08

The preparation of *Bacillus velezensis* strain XY40-1 suspension for seed coating and its effect on eggplant growth

LIN Yan[1]，LI Xin[2,3]，TAO Yu[2]，CHEN Jiawei[1]，RAO Liqun[1*]

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agriculture University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Hunan Vegetable Research Institute, Changsha, Hunan 410125, China; 3. Hunan Engineering Research Center of Endophytic Microbial Resources Exploration and Utilization in Plants, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract: This study developed a novel biological suspension seed coating agent by formulating the *Bacillus velezensis* strain XY40-1-based biopesticide suspension with film-forming agents, warning dyes, and synergists. Using eggplant as the test crop, the quality and efficacy of the formulation were systematically evaluated. The results showed that by integrating with film-forming agents(6% polyvinylpyrrolidone), warning pigments(0.4% alkaline fuchsin), and synergists(50 nmol/L pyrroloquinoline quinone), the quality of the prepared seed coating agent meet the national standards, with live bacterial count of 2.5×10^9 cfu/mL, pH of 7.647, with qualified film-forming properties and pourability, and with 92% coating uniformity, a detachment rate of 7.67%, and a viscosity of 100 mPa·s. In the greenhouse cultivation trial, eggplant seeds were treated with a seed coating formulation at a agent to seed ratio of 1∶35, and the results showed that the germination potential, germination rate, and emergence rate of eggplants in the experimental group increased by 364.77%, 13.49% and 67.43%, respectively, compared to the control. Moreover, the seed coating agent demonstrated enhanced efficacy against

收稿日期：2024–07–09 **修回日期**：2025–05–14
基金项目：湖南省重点研发计划项目(2023NK2020)；湖南省农业科技创新资金项目(2023CX44、2023CX116)
作者简介：林艳(1999—)，女，湖南浏阳人，硕士研究生，主要从事生物防治及生物农药产品开发，15874224262@163.com；*通信作者，饶力群，博士，教授，主要从事植物逆境生物化学及分子生物学研究，raoliqun@163.com

Phomopsis blight, with disease incidence being reduced by 40.42% and disease index being reduced by 38.26%.

Keywords: biopesticides; *Bacillus velezensis*; biological suspension seed coating agent; eggplant

生物农药的开发及利用对我国食品安全和环境保护具有重要意义[1]。种衣剂是一种复合制剂，具有保护种子和促进生长的功能[2–3]。悬浮种衣剂是目前种子处理剂中应用最广的剂型[4]，根据功能或用途可将其分为物理型种衣剂、化学型种衣剂、生物型种衣剂、特异型种衣剂和综合型种衣剂5类[5]。生物型种衣剂作为一种环境友好型的生物农药制剂，因其安全、高效、环保等特性而备受推崇，其主要成分为植物有益微生物(PBM)或其分泌物，能有效推动植物的生长进程，提升植物对营养元素的摄取能力，助力土壤肥力的恢复，并显著增强植物对各种生物和非生物胁迫的耐受性[6–7]。通过种子包衣，可以有效地将PBM接种到种子上[5]。目前已被报道制备种衣剂的微生物有：贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)ZXC–1[8]、短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*)GBSC66[9]、多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)[10]、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)[11]等。

芽孢杆菌(*Bacillus*)作为一种在生物防治领域得到广泛应用的微生物，具有生长与繁殖速度快的特点，能迅速有效地在植物根际进行定殖。其中，贝莱斯芽孢杆菌因其出色的广谱高效抑菌能力，受到了关注和重视[12–13]。贝莱斯芽孢杆菌PEBA 20对多种植物微生物病害均有抗菌作用，且能够促进植物生长[14]。夏明聪等[15]的研究结果表明，使用贝莱斯芽孢杆菌YB–14发酵液拌种后，小麦对纹枯病的田间防治效果达63.37%。王江平等[16]以贝莱斯芽孢杆菌ZLP–101为关键菌种，辅以解淀粉芽孢杆菌ZLP–01和枯草芽孢杆菌ZLP–121，研制出的多功能复合微生物种衣剂对地下害虫蛴螬防效达70.71%，对玉米立枯病的防效达83.64%。孙美红等[17]选用贝莱斯芽孢杆菌G–1及其次级代谢产物(脂肽)制备悬浮种衣剂，发现该种衣剂对高粱丝黑穗病菌的盆栽侵染抑制率达87.74%，表明该种衣剂对高粱丝黑穗病菌具有良好的抑制效果。

周池等[18]的研究表明贝莱斯芽孢杆菌XY40–1对多种辣椒病害表现出较强的抑制效果，同时兼具促生效果。在平板对峙试验中，该菌株对疫霉的抑制率高达 83.74%，以XY40–1为关键菌研发的生物悬浮剂对疫病防效达65.63%[19]。本试验以前期研究的生物悬浮剂为基础创制生物悬浮种衣剂，探索成膜剂、警戒色、增效剂的成分及其最佳用量，并以茄子为试验对象，研究贝莱斯芽孢杆菌XY40–1生物种衣剂的功效，以期为贝莱斯芽孢杆菌XY40–1生物种衣剂的后续开发与利用提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料

供试菌株：贝莱斯芽孢杆菌XY40–1(*B. velezensis* XY40–1)，由中国典型培养物保藏中心保藏，编号为CCTCC NO: M 2022342。细菌种子液浓度为2.05×10^9 cfu/mL。贝莱斯芽孢杆菌XY40–1(以下简称菌株XY40–1)生物悬浮剂配方为：木质素磺酸钠1.5%、吐温–80 2.0%、2%黄原胶母液8.0%、脱脂乳粉0.5%、乙二醇4.0%、卡松0.16%、二甲基硅油0.2%。

供试种子：红宝二号茄子，购自湖南湘研种业有限公司。

供试试剂：成膜剂包括聚乙烯醇、聚丙烯酰胺、阿拉伯树胶、桃胶粉、甲酰胺、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)；警戒色包括甜菜红、辣椒红、三氧化二铁、碱性品红；增效剂为吡咯喹啉醌(PQQ)。

1.2 方法

1.2.1　成膜剂种类及用量的筛选

选择聚乙烯醇、聚丙烯酰胺、阿拉伯树胶、桃胶粉、甲酰胺、PVP为备选成膜剂，按玻板成膜法[20]分别测定其成膜性，按成膜质量分为I、II、III 3个等级。I级成膜，膜可以完整地从玻板上刮下；II级成膜，膜不可以从玻板上完整刮下；III级成膜，玻板上无完整膜。透水性、透气性参考李海龙[21]的方法测定；包衣均匀度、包衣脱落率参考GB/T 17768—1999[22]测定。分析不同浓度成膜剂对生防菌存活率、成膜性、包衣均匀度、包衣脱落率的影响，筛选出最适用量。各试验和处理均重复3次。

1.2.2 警戒色种类及用量的筛选

将成膜剂与生物悬浮剂配制成混合溶液，再分别加入甜菜红、辣椒红、三氧化二铁、碱性品红，混合静止30 min后测定生防菌活菌数，并观察其色泽和分层情况等。各试验和处理均重复3次。

1.2.3 增效剂用量的筛选

以PQQ为增效剂，测试不同浓度(50、75、100、200、300 nmol/L)PQQ处理下种子的发芽势及发芽率。各试验和处理均重复3次。

1.2.4 种衣剂项目指标的测定

将菌株XY40–1转接至LB培养基中，36~39 ℃，160~200 r/min振荡培养10 ~ 18 h，得到发酵液，将其配制为生物悬浮剂后加入成膜剂、警戒色、增效剂。按照GB 20287—2006[23]测定活菌数；按照GB/T 1601—1993[24]测定pH；参考GB/T 17768—1999[22]测定倾倒性、黏度、包衣均匀度及包衣脱落率。

1.2.5 菌株XY40–1悬浮种衣剂用量的筛选

按药种质量比1∶25、1∶35、1∶45对种子进行包衣，以未包衣种子为对照，以种子萌发率为评价标准，探究最佳药种比。各试验和处理均重复3次。

1.2.6 悬浮种衣剂促生效果及防效的测定

选择红宝二号茄子种子用于种衣剂发芽率与苗期生长势验证。对照组为未包衣种子，处理组为XY40–1悬浮种衣剂处理种子，每组设置3组重复。用10%次氯酸钠对茄子种子表面消毒10 min，再用无菌水清洗5 ~ 6次，种子风干后与种衣剂按照最佳药种比混合后自然晾干，置于培养皿中，25 ℃黑暗培养，分别于第3 d与第7 d统计发芽势与发芽率。

将种子播种至土壤中，25 ℃温室培养，15 d后统计出苗率。30 d后测定茄子株高、茎粗、茎长、根系性状、酶活性、叶绿素含量以及叶片光合参数。以27%苯醚·咯·噻虫悬浮种衣剂处理为阳性对照，未包衣处理种子为空白对照，评估生物种衣剂的防病效果。根据文献[25]鉴定病情分级。

参照黄火清[26]的方法进行茄子褐纹病的抗性分级鉴定。

1.2.7 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 22.0 进行数据统计分析；采用GraphPad Prism 8.0绘图。

2 结果与分析

2.1 成膜剂的筛选

选择聚乙烯醇、聚丙烯酰胺、阿拉伯树胶、桃胶粉、甲酰胺、PVP进行成膜剂筛选研究，结果表明，6种成膜剂中，聚乙烯醇、聚丙烯酰胺为II级成膜；阿拉伯树胶、桃胶粉、甲酰胺黏稠，无法延展成膜，成膜性较差，为III级成膜；仅PVP成膜性为I级成膜。因此，选择PVP进行后续的用量筛选试验，进一步探究其用量。将用量为4%、5%、6%、7%的PVP分别加至配制的生物悬浮剂中，对种子进行包衣处理，测定其成膜时间、包衣均匀度、包衣脱落率。从表1可以看出，4%、5% PVP 透水性与透气性较差，水溶性较高，其包衣后的膜大部分溶解，包衣均匀度与包衣脱落率不符合国家标准；6% PVP水溶性较低，透水性、透气性最佳，成膜性合格，包衣均匀度为92%，包衣脱落率为7.67%，符合国家标准。因此，本研究成膜剂为用量6%的PVP。

表1 不同用量PVP的物理性能

Table 1 Physical properties of PVP at different dosages

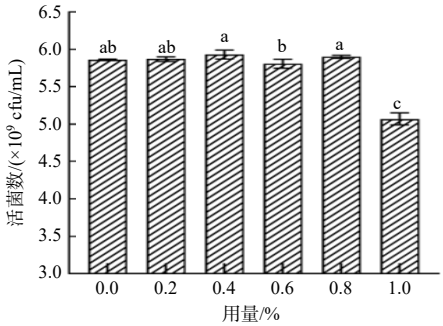
用量/%	水溶性/%	透水性/%	透气性/%	成膜性	包衣均匀度/%	包衣脱落率/%
4	(97.87±0.30)a	(1.89±0.08)c	(2.52±0.09)b	合格	(86.33±0.58)c	(12.33±0.58)a
5	(92.61±0.50)b	(1.91±0.05)c	(2.59±0.07)b	合格	(90.33±0.58)b	(10.33±0.58)b
6	(87.42±0.44)d	(2.54±0.06)a	(4.82±0.11)a	合格	(92.00±0.00)a	(7.67±0.58)c
7	(89.77±0.50)c	(2.24±0.19)b	(4.77±0.09)a	合格	(92.00±0.00)a	(7.67±0.58)c

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.2 警戒色的筛选

将6%的PVP与XY40–1生物悬浮剂配制成混合溶液，添加甜菜红的发酵液的活菌数为2.72×10^9 cfu/mL，添加辣椒红的发酵液的活菌数为4.00×10^9 cfu/mL，均显著低于对照组的(4.50×10^9 cfu/mL)，说明甜菜红、辣

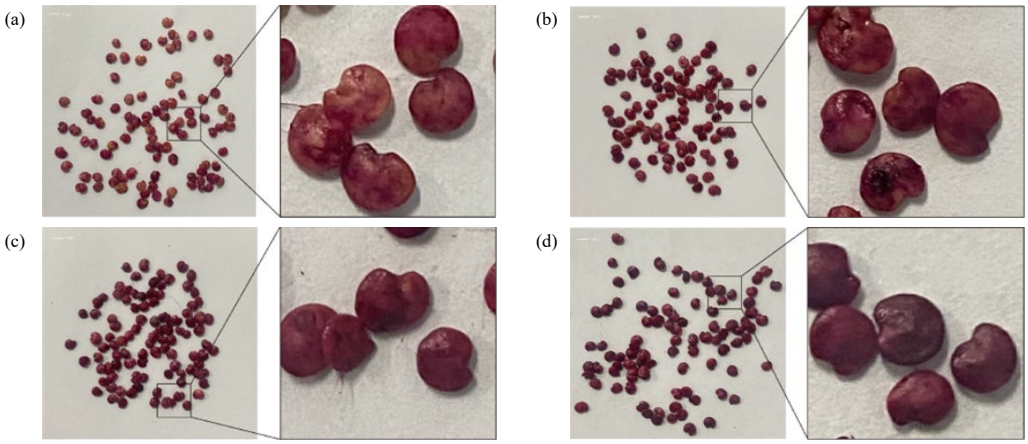
椒红与 XY40–1的生物相容性较差；加入碱性品红的发酵液的活菌数(4.53×10^9 cfu/mL)与对照组的无显著差异，混合后无分层现象；添加三氧化二铁的发酵液的活菌数(5.90×10^9 cfu /mL)显著高于对照组的，表明其与 XY40–1的生物相容性好，但混合后会产生分层现象。因此，选择碱性品红为警戒色材料。碱性品红用量探究试验结果如图1所示，添加0.2%、0.4%、0.6%、0.8%的碱性品红较对照组的活菌数无显著性差异；添加1.0%碱性品红的活菌数显著降低。在悬浮种衣剂中加入0.2%、0.4%、0.6%、0.8%的碱性品红透亮均匀、颜色良好，从经济角度考虑，选择用量0.4%对种子进行包衣，自然晾干后观察包衣色泽。如图2所示，含0.4%、0.6%碱性品红的种衣剂包衣色泽为警戒色。



图柱上不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

图1　不同碱性品红用量处理下XY40–1菌株的活菌数

Fig. 1　Viable cell counts of strain XY40-1 under different basic fuchsin concentrations



(a) 碱性品红用量为0.2%；(b) 碱性品红用量为0.4%；(c) 碱性品红用量为0.6%；(d) 碱性品红用量为0.8%

图2　不同碱性品红用量处理后茄子种子的上色效果

Fig. 2　Coloration on eggplant seeds treated with different concentrations of basic fuchsin

2.3　增效剂浓度的筛选

由表2可知，50、75、100、200、300 nmol/L PQQ均能提高茄子发芽势，其中50、75 nmol/L的提升效果显著，发芽势增幅分别达200.00%、133.29%；50 nmol/L处理的发芽率为96.67%，高于其他处理的。因此，选择PQQ浓度为50 nmol/L。

表2　不同浓度PQQ处理后茄子的发芽势及发芽率

Table 2　Germination potential and germination rate of eggplant seeds treated with different PQQ concentrations

PQQ浓度/(nmol·L^{-1})	发芽势/%	发芽率/%
0	(7.00±3.61)c	93.67±3.21
50	(21.00±5.29)a	96.67±1.53
75	(16.33±1.53)ab	96.33±1.53
100	(10.67±2.31)bc	96.00±1.73
200	(10.00±5.29)bc	95.33±1.53
300	(9.67±4.73)bc	94.00±1.00

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.4　菌株XY40–1悬浮种衣剂使用量筛选

从表3可以看出，经XY40–1悬浮种衣剂包衣的茄子的发芽势、发芽率较对照的均显著提升。当药种比为1∶35时，发芽势高达31.00%，显著高于其他处理的，发芽率达95.33%，发芽势、发芽率分别较对照高364.77%、13.49%。当药种质量比为1:25时，虽然发芽率高达96%，但发芽势仅有17.67%。因此，综合2个指标结果，得知最佳药种比为1∶35。

表3　不同药种比包衣后茄子的发芽势及发芽率

Table 3　Germination potential and germination rate of eggplant seeds coated with different drug-to-seed ratios

药种比	发芽势/%	发芽率/%
CK	(6.67±3.51)c	(84.00±4.58)b
1∶25	(17.67±2.52)b	(96.00±1.00)a
1∶35	(31.00±3.61)a	(95.33±1.53)a
1∶45	(16.67±3.06)b	(91.33±1.15)a

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.5 菌株XY40–1悬浮种衣剂项目指标检测结果

对菌株XY40–1悬浮种衣剂主要指标性能进行检测，结果显示，种衣剂活菌数为2.5×10^9 cfu/mL；外观为玫瑰红色、可流动的均匀悬浮液，长期存放后有少量沉淀或分层，但置于室温下手动摇晃可恢复原状,无结块现象;pH为7.647;黏度为100 mPa·s;成膜性合格；倾倒性合格；包衣均匀度为92%；包衣脱落率为7.67%。

2.6 菌株XY40–1悬浮种衣剂对茄子生长的影响

2.6.1 对茄子出苗率、生长势的影响

茄子播种前按药种比1:35包衣，测定其苗期出苗率，结果如表4所示。播种15 d后包衣茄子种子出苗率达73.67%，显著高于CK的，相较于对照增幅达67.43%。30 d后测定茄子幼苗的农艺性状，包衣茄子的株高、茎粗、茎长、根长、根系面积、根体积均高于对照的，其中，茎粗为0.48 cm，根体积为35.30 cm^3，均显著优于CK的；根长1 026.04 cm，根系表面积543.91 cm^2，均极显著优于未包衣茄子的，分别比CK高40.46%、36.25%。表明XY40–1种衣剂对茄子的出苗率及生长势有较明显的促进作用。

表4 XY40–1处理后茄子的出苗率及苗期农艺性状

Table 4 Emergence rate and seedling-stage agronomic traits of eggplant treated with strain XY40-1

处理	出苗率/%	株高/cm	茎粗/cm	茎长/cm	根长/cm	根系表面积/cm^2	根体积/cm^3
CK	44.00±5.29	11.60±0.76	0.41±0.01	4.17±0.63	730.50±71.66	399.21±16.43	25.11±4.36
XY40–1悬浮种衣剂	73.67±4.04**	12.73±0.68*	0.48±0.04*	4.87±0.22	1 026.04±175.88***	543.91±0.23***	35.30±5.91**

注：*表示P<0.05，**表示P<0.01，***表示P<0.001。

2.6.2 对茄子苗期叶绿素含量、叶片光合参数的影响

播种30 d后测定茄子苗期叶绿素含量及叶片光合参数，结果见表5。从表5可知，经种衣剂包衣处理的茄子苗期叶绿素含量、净光合速率均极显著(P<0.001)高于对照的，分别较对照提高了6.1 mg/g、2.91 μmol/(m^2·s)；蒸腾速率较CK提高了0.62 mmol/(m^2·s)，胞间CO_2浓度显著(P<0.01)提高了7.93 μmol/(m^2·s)。该结果表明菌株XY40–1悬浮种衣剂能提高植株活力。

表5 不同处理后茄子苗期的叶绿素含量及叶片光合参数

Table 5 Chlorophyll content and leaf photosynthetic parameters of eggplant under different treatments at seedling stage

处理	叶绿素含量/(mg·g^{-1})	净光合速率/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	蒸腾速率/(mmol·m^{-2}·s^{-1})	胞间CO_2浓度/(μmol·m^{-2}·s^{-1})
CK	40.15±1.95	8.35±0.62	7.06±0.39	285.71±3.53
XY40–1悬浮种衣剂	46.25±2.29***	11.26±1.23***	7.68±0.32*	293.64±3.46**

注：*表示 P<0.05，**表示P<0.01，***表示P<0.001。

2.6.3 对茄子苗期抗氧化酶含量的影响

由表6可知，播种30 d后经菌种XY40–1悬浮种衣剂包衣的茄子幼苗过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性分别为85.56、95.21、33.66 μg/g，均高于CK的 ，丙二醛(MDA)含量低于CK的。该结果表明菌株XY40–1悬浮种衣剂处理可有效提高茄子苗期抗氧化酶活性，从而促进植株的生长。

表6 XY40–1悬浮种衣剂处理后茄子苗期的CAT、POD、SOD活性及MDA含量

Table 6 CAT, POD, SOD and MDA in eggplant seedlings treated with XY40-1 suspension seed coating agent

处理	CAT活性/(μg·g^{-1})	POD活性/(μg·g^{-1})	SOD活性/(μg·g^{-1})	MDA含量/(nmol·g^{-1})
CK	53.43±5.95	70.88±7.96	16.10 ±5.46	3.12±0.86
XY40–1悬浮种衣剂	85.56±9.19**	95.21±8.26*	33.66±1.64**	1.88±0.24

注：*表示 P<0.05，**表示P<0.01。

2.7 菌株XY40–1悬浮种衣剂对茄子褐纹病的温室防病效果

茄子播种30 d后均感染褐纹病。由表7可知，菌株XY40–1悬浮种衣剂包衣处理的茄子病株率、病害指数显著低于CK的，与CK比较，病株率降低40.42%，病害指数降低38.26%。菌株XY40–1悬浮种衣剂与27%苯醚·咯·噻虫种衣剂的防病效果无显

著性差异。该结果表明菌株XY40–1悬浮种衣剂对茄子褐纹病有较好的防病效果。

表7　XY40–1悬浮种衣剂处理后茄子对褐纹病的温室防病效果

Table 7　Greenhouse control efficacy of strain XY40-1 suspension seed coating agent against eggplant phomopsis blight

处理	病株率/%	病害指数/%	抗性分级
CK	(78.33±2.89)a	(27.00±2.65)a	感病
XY40–1悬浮种衣剂	(46.67±2.89)b	(16.67±1.63)b	中抗
27%苯醚·咯·噻虫	(45.00±5.00)b	(16.00±3.61)b	中抗

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

3　讨论

微生物药剂的应用不仅对调节植物生长和抑制病害耐药性有积极影响，而且比传统的化学防治更加环保和便捷[27]。种子包衣是农药减施最主要的手段之一[28]。生物型种衣剂具有改变土壤微生态群落结构、促进植株生长、降低环境污染的优点[29–30]。种衣剂只吸水不溶解，能通过种子表面成膜剂空间网状结构中的孔道，将其所携带的菌剂等种衣物质向根部缓慢释放，随种子发芽及幼苗生长而转运至植株的各部分，从而使生物菌剂持续发挥作用[31]。本研究基于贝莱斯芽孢杆菌XY40–1悬浮剂配方，以茄子为试验对象，测定种衣剂的质量指标及功效。结果显示，菌株XY40–1悬浮种衣剂处理后茄子的出苗率、生长势、抗氧化酶活性、叶绿素含量以及叶片的光合参数均显著提高，防病效果明显增强，表明该种衣剂有助于促进植物生长发育，提升防治效果。

PVP是具有柔性链状结构的两亲性聚合物，具有较高的溶解性、黏合能力、分散能力、吸附能力，且无毒廉价，化学性质稳定[32]，将其作为种衣剂成膜剂，能够有效控制产品成本。目前大多数成膜剂对种子的萌发具有一定的抑制作用，而PVP对种子萌发影响较小且其成膜性良好。PQQ能够促进细胞的生长[33]和增殖[34]，同时也是重要的细菌呼吸途径的辅助因子[35]。1 μmol/L PQQ处理不仅能促进贝莱斯芽孢杆菌菌液发酵，还通过显著提高纤维素酶、木聚糖酶、蛋白酶和几丁质酶等非挥发性胞外代谢物活性，从而增强其广谱病原菌抑制效果[36]。本研究表明，当PQQ作为增效剂在种衣剂中使用时，50 nmol/L的用量能显著提高茄子种子的发芽势与发芽率，由此可见PQQ在生物种衣剂应用中具有较高的价值。

根系生长状况是评价壮苗的重要指标，良好的根系状况可以促进养分吸收。生物制剂拌种后可通过刺激根系生长、调节营养转化影响生物活性，促使作物生长[37]。同时生物制剂拌种通过改变根际环境来提高作物的出芽率和生产力[38–39]。贝莱斯芽孢杆菌能产生吲哚乙酸(IAA)与铁载体，促进作物生长与根系发育[40–41]。本研究中XY40–1悬浮种衣剂包衣处理能够促进茄子根长、根系表面积与根体积的增加，从而增强茄子苗期对养分的吸收能力。SOD、POD、CAT、MDA是植物体内主要活性氧清除酶，在植物的抗病应答中发挥着重要作用[42–43]。在播种前采用药种比为1∶35的XY40–1悬浮种衣剂对茄子包衣处理，能提高茄子的抗氧化酶活性，提高植株的活力与抗病性。但目前该种衣剂还存在一些如微生物菌种单一、上色不够均匀、储存条件苛刻等问题，后期将开展贝莱斯芽孢杆菌种衣剂机理研究以及混合贝莱斯芽孢杆菌悬浮种衣剂的创制，并研究其在其他作物上的应用效果，进一步优化生物种衣剂的制备工艺。

4　结论

本研究表明，贝莱斯芽孢杆菌XY40–1悬浮种衣剂的配方为：木质素磺酸钠1.5%、吐温–80 2.0%、2%黄原胶母液8.0%、脱脂乳粉0.5%、乙二醇4.0%、卡松0.16%、二甲基硅油0.2%、聚乙烯吡咯烷酮6%、碱性品红0.4%、PQQ浓度50 nmol/L，遵循此配方制备的XY40–1悬浮种衣剂活菌数达2.5×10^9 cfu/mL，其质量指标均符合国家标准，是一款合格的种衣剂产品。在温室环境下的栽培试验中，当以1∶35的药种比例应用于茄子种子包衣时，茄子的发芽势提升了364.77%，发芽率提高了13.49%，出苗率提高了67.43%，对褐纹病的抵抗力也增强了，病株率降低40.42%，病害指数降低38.26%，表明菌种XY40–1悬浮种衣剂对茄子褐纹病有较好的防病效果。

参考文献：

[1]　魏珣，张娟，江易林，等. 生物农业前沿技术研究进展[J]. 中国生物工程杂志，2024，44(1)：41–51.

[2]　赵磊磊，聂立水，朱清科，等. 种子包衣及其在中国的应用研究[J]. 中国农学通报，2009，25(23)：126–131.

[3] 韩晓丽. 全程有机/绿色植保体系的示范推广及生物种衣剂在玉米上的应用[D]. 南京：南京农业大学，2019.
[4] 刘振华，徐永旺，尚逸军. 浅谈如何提高悬浮种衣剂质量[J]. 种子科技，2010，28(8)：9–11.
[5] 韩雪，高馨竹，龚伟军，等. 微生物种子包衣的应用与研究进展[J]. 微生物学通报，2023，50(12)：5534–5547.
[6] JIANG Y J，LI Q H，MAO W Q，et al. Endophytic bacterial community of *Stellera chamaejasme* L. and its role in improving host plants' competitiveness in grasslands[J]. Environmental Microbiology，2022，24(8)：3322–3333.
[7] PARMAR S，SHARMA V K，LI T，et al. Fungal seed endophyte FZT214 improves *Dysphania ambrosioides* Cd tolerance throughout different developmental stages[J]. Frontiers in Microbiology，2022，12：783475.
[8] 江苏省农业科学院. 一种贝莱斯芽孢杆菌水稻生物种衣剂及其制备方法和用途：CN202210985127.8[P]. 2022–10–11.
[9] 无锡亚克生物科技有限公司. 一种油菜生物种衣剂及其制备方法和用途：CN201210435042.9[P]. 2013–04–03.
[10] 青岛蔚蓝生物集团有限公司，青岛和协生物科技有限公司. 一种生物种衣剂及其应用：CN201611096156.X[P]. 2017–04–26.
[11] 江苏里下河地区农业科学研究所. 用于防治蔬菜土传病害的复合生物种衣剂及其制备和使用方法：CN201410145233.0[P]. 2014–08–13.
[12] 张德锋，高艳侠，王亚军，等. 贝莱斯芽孢杆菌的分类、拮抗功能及其应用研究进展[J]. 微生物学通报，2020，47(11)：3634–3649.
[13] STEIN T. *Bacillus subtilis* antibiotics：structures，syntheses and specific functions[J]. Molecular Microbiology，2005，56(4)：845–857.
[14] QIAN Q，LI Y H，ZENG D L，et al. Isolation and genetic characterization of a fragile plant mutant in rice(*Oryza sativa* L.)[J]. 中国科学通报(英文版)，2001(46)：2082–2085.
[15] 夏明聪，邓晓旭，齐红志，等. 贝莱斯芽孢杆菌YB-145对小麦纹枯病的防治效果及促生作用[J]. 河南农业科学，2021，50(10)：76–83.
[16] 王江平，王雅娜，张飞燕，等. 防治玉米土传病和地下害虫蛴螬复合微生物种衣剂的研制[J]. 中国生物防治学报，2023，39(5)：1124–1132.
[17] 孙美红，王彩琴，王蓉，等. *Bacillus velezensis* G-1脂肽悬浮种衣剂的制备及其对高粱丝黑穗病菌的防侵染效果[J]. 作物学报，2024，50(6)：1467–1485.
[18] 周池，周诗晶，陶禹，等. 贝莱斯芽孢杆菌XY40-1：全基因组特征分析及对辣椒疫病的生物防治效果评价[J]. 微生物学报，2024，64(12)：4882–4901.
[19] 刘洁，陶禹，陈芳，等. 贝莱斯芽胞杆菌XY40-1悬浮剂研制及对辣椒疫病防治效果[J/OL]. 中国生物防治学报，2025：1–10. (2025–03–27). https://link.cnki.net/doi/10.16409/j.cnki.2095-039x.2025.02.002.
[20] 袁晓娟，尹旭格，曹欣，等. 含短小芽孢杆菌的种衣剂对棉花枯萎病防治效果的研究[J]. 新疆农业大学学报，2019，42(5)：365–371.
[21] 李海龙. 绿豆种衣剂研究及其作用效果的初步分析[D]. 大庆：黑龙江八一农垦大学，2019.
[22] GB/T 17768—1999. 悬浮种衣剂产品标准编写规范[S].
[23] GB 20287—2006. 农用微生物菌剂[S].
[24] GB/T 1601—1993. 农药pH值的测定方法[S].
[25] MAHADEVAKUMAR S，AMRUTHAVALLI C，SEIDHAR K R. Prevalence，incidence and molecular characterization of *Phomopsis vexans*(*Diaporthe vexans*) causing leaf blight and fruit rot disease of brinjal in Karnataka(India)[J]. Plant Pathology & Quarantine，2017，7(1)：29–46.
[26] 黄火青. 茄子褐纹病接种体系建立和抗褐纹病资源鉴定研究[D]. 广州：华南农业大学，2017.
[27] 高绍凯，邓金奇，李晨曦，等. 辣椒炭疽病拮抗内生菌的分离鉴定及防效试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版)，2024，50(4)：60–64.
[28] 贾秋珍，范宏伟，宋雄儒，等. 5种种衣剂对甘肃省小麦散黑穗病防治效果[J]. 农药，2020，59(4)：306–307，312.
[29] 刘睿. 新型大豆生物种衣剂SN102的研制及田间防效研究[D]. 沈阳：沈阳农业大学，2017.
[30] 王丹英，应云卉，徐春梅，等. 水稻种子包衣技术的研究与应用[J]. 中国稻米，2012，18(5)：20–24，29.
[31] 杨丹，郑娇莉，李飞，等. 中国生物型种衣剂的研究进展[J]. 湖北农业科学，2020，59(22)：9–12，19.
[32] 苏洋，徐梦，鲍冕宇，等. 聚乙烯吡咯烷酮协助导电聚合物防腐涂层的构建及性能研究[J]. 涂料工业，2024，54(4)：9–15.
[33] CHOI O，KIM J，KIM J G，et al. Pyrroloquinoline quinone is a plant growth promotion factor produced by *Pseudomonas fluorescens* B16[J]. Plant Physiology，2008，146(2)：657–668.
[34] KIMURA K，TAKADA M，ISHII T，et al. Pyrroloquinoline quinone stimulates epithelial cell proliferation by activating epidermal growth factor receptor through redox cycling[J]. Free Radical Biology and Medicine，2012，53(6)：1239–1251.
[35] BAJPAI P，DARRA A，AGRAWAL A. Microbe-mitochondrion crosstalk and health：an emerging paradigm[J]. Mitochondrion，2018，39：20–25.
[36] 姚苏航，陶禹，陈芳，等. 外源吡咯喹啉醌对贝莱斯芽胞杆菌发酵及抑菌活性的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报，2024：1–15. (2024–04–26). https://link.cnki.net/

doi/10.13327/j.jjlau.2024.20494.

[37] 邵玮玮，于淑婷，王丽，等. 根瘤菌剂和种衣剂拌种对不同品种大豆结瘤能力和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料，2022(6)：188–194.

[38] 陈腊，米国华，李可可，等. 多功能植物根际促生菌对东北黑土区玉米的促生效果[J]. 应用生态学报，2020，31(8)：2759–2766.

[39] 姚延轩，接伟光，胡崴，等. 微生物菌肥对大豆生长发育及根际土壤性质的影响综述[J]. 湖北农业科学，2019，58(20)：21–24，38.

[40] SU Z H，LIU G G，LIU X M，et al. Functional analyses of the *Bacillus velezensis* HMB26553 genome provide evidence that its genes are potentially related to the promotion of plant growth and prevention of cotton *Rhizoctonia* damping-off[J]. Cells，2023，12(9)：1301.

[41] LI S P，XIAO Q L，YANG H J，et al. Characterization of a new *Bacillus velezensis* as a powerful biocontrol agent against tomato gray mold[J] . Pesticide Biochemistry and Physiology，2022，187：105199.

[42] 张宁，毕研飞，郭静，等. 不同抗性甜瓜接种蔓枯病菌后PAL、PPO与POD活性的变化[J]. 植物生理学报，2016，52(8)：1169–1175.

[43] CHI M，BHAGWAT B，LANE W D，et al. Reduced polyphenol oxidase gene expression and enzymatic browning in potato(*Solanum tuberosum* L.) with artificial microRNAs[J]. BMC Plant Biology，2014，14(1)：62.

责任编辑：毛友纯
英文编辑：罗　维

（上接第15页）

[25] 贾健，朱金峰，杜修智，等. 不同种植模式对烤烟根际土壤微生物、土壤养分和烟叶质量的影响[J]. 西南农业学报，2016，29(10)：2300–2306.

[26] 王光华，刘俊杰，于镇华，等. 土壤酸杆菌门细菌生态学研究进展[J]. 生物技术通报，2016，32(2)：14–20.

[27] ZHENG Y X，YANG M，WU J G，et al. Study on interaction between bacterial community and microecological environment in rhizosphere soil of tobacco root rot caused by *Fusarium solani*[J]. Materials Express，2021，11(2)：166–173.

[28] 杨兰. 湘西地区烟草黑胫病研究[D]. 长沙：湖南农业大学，2013.

[29] YIN S J，ZHANG X，SUO F Y，et al. Effect of biochar and hydrochar from cow manure and reed straw on lettuce growth in an acidified soil[J]. Chemosphere，2022，298：134191.

[30] 王凯悦，张仲富，王好才，等. 哈尼梯田传统耕作方式下的水稻土壤微生物多样性及功能特征分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学)，2022，42(2)：56–66.

[31] GRIFFITHS B S，RITZ K，BARDGETT R D，et al. Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions：an examination of the biodiversity-ecosystem function relationship[J]. Oikos，2000，90(2)：279–294.

责任编辑：毛友纯
英文编辑：罗　维