麦类作物学报 2026,46(9):1259－1268
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.09.14

网络出版时间:2026-09-03
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260902.1529.006

靶向小麦茎基腐病复合微生物种衣剂配方的筛选及其盆栽防效评价

高瑜智[1],王艺璇[2],谢晓丽[2],高有军[3],李惠霞[1],刘永刚[1,2],张海英[2]

(1.甘肃农业大学植物保护学院,甘肃兰州 730070; 2.甘肃省农业科学院植物保护研究所,甘肃兰州 730070; 3.武威春飞作物科技有限公司,甘肃武威 733009)

摘 要:为获得对小麦茎基腐病具有协同防效的复合微生物种衣剂配方,以副地衣芽孢杆菌 ZYGT1811 和萎缩芽孢杆菌 ZY1825 作为种衣剂的主要活性成分,运用单因素试验、正交试验、滤纸片抑菌法等,筛选出适宜的分散剂、成膜剂及种衣剂复配比例。结果表明,ZYGT1811 和 ZY1825 间未表现出明显的相互拮抗作用,具有复配基础。当两者比例为 2∶1 时对假禾谷镰孢菌 MC-7 的抑菌率可达 64.17%,显著高于单菌处理时的抑菌率(58.12%和 60.20%)。筛选获得种衣剂适宜助剂体系的配方为 4%木质素磺酸钠、5%羟丙基甲基纤维素、1.5%乙二醇、0.1%黄原胶和 2%大红染料。经测试,该复合微生物种衣剂的理化指标符合 GB/T 17768-1999 以及相关行业标准,货架期可达 90 d,对小麦茎基腐病的盆栽防效为 60.56%。

关键词:芽孢杆菌;生防种衣剂;小麦茎基腐病;防治效果

中图分类号:S512.1; S435.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)09-1259-10

Screening of Compound Microbial Seed Coating Formulations Targeting Wheat Crown Rot and Evaluation of Their Control Efficacy in Pot Trials

Gao Yuzhi[1], Wang Yixuan[2], Xie Xiaoli[2], Gao Youjun[3], Li Huixia[1], Liu Yonggang[1,2], Zhang Haiying[2]

(1. College of Plant Protection, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Wuwei Chunfei Crop Technology Co., Ltd., Wuwei, Gansu 733009, China)

Abstract: To gain a compound microbial seed coating formulation with synergistic efficacy against wheat crown rot, *Bacillus paralicheniformis* ZYGT1811 and *Bacillus atrophaeus* ZY1825 were selected as the primary active components of the seed coating agent. Single-factor experiments, orthogonal tests, and the filter paper disc diffusion method were employed to screen for the optimal dispersant, film-forming agent, and the optimal mixing ratio of the seed coating agent. The results indicated that no significant mutual antagonism was observed between ZYGT1811 and ZY1825, providing a basis for their compounding. When the ratio of ZYGT1811 to ZY1825 was 2∶1, the synergistic inhibition rate against *Fusarium pseudograminearum* MC-7 reached 64.17%, which was significantly higher than the inhibition rates of the single-strain treatments(58.12% and 60.20%, respectively). Furthermore, the optimal auxiliary system formulation for the seed coating agent was determined as follows: 4% sodium lignosulfonate, 5% hydroxypropyl methylcellulose, 1.5% ethylene glycol, 0.1% xanthan gum, and 2% scarlet dye. Physicochemical property tests demonstrated that the compound microbial seed coating complied with GB/T 17768-1999 and relevant industrial standards. Its shelf life

收稿日期:2026-01-12 修回日期:2026-05-29
基金项目:甘肃省农业科学院院列区域协同创新项目(2024GAAS04);国家重点研发计划项目(2024YFD1400400)
第一作者 E-mail:1626569882@qq.com(高瑜智)
通讯作者 E-mail:liuyg@gsagr.ac.cn(刘永刚);haiwazhang@gsagr.ac.cn(张海英)

was up to 90 days, and the pot control efficacy against wheat crown rot was 60.56%.
Keywords: *Bacillus*; Biocontrol seed coating agent; Wheat crown rot; Control efficacy

小麦茎基腐病(Fusarium crown rot)是典型的真菌性土传病害,严重危害小麦产量和品质[1-2]。在中国北方麦区,假禾谷镰孢菌(*F. pseudograminearum*)是引起该病害的主要病原菌之一[3-4]。该病可从苗期开始侵染,并持续危害至成株期,造成小麦茎基部褐变、坏死,严重时引起白穗和籽粒灌浆不足,最终导致产量和品质下降[5-7]。目前,生产上可利用的稳定高抗小麦品种较为缺乏,化学药剂拌种仍是防控该病害的重要措施之一。然而,长期依赖化学药剂会增加病原菌抗药性风险,且药剂残留对农业生态环境易造成潜在影响[8]。因此,研发绿色安全、持效性较强的微生物种子处理技术,对小麦茎基腐病绿色防控具有重要意义[9]。

微生物菌剂具有环境友好、残留风险低、病原菌抗性风险相对较低等优势,是植物病害绿色防控的重要发展方向[10-11]。目前,生防菌的研究方向主要聚焦于新型生防微生物资源的开发与鉴定[12]、生防作用机制的深入解析[13]、生防菌的遗传改良与效能提升、生防制剂研发与产业化应用,以及针对特定病害的生防方案构建等方面。芽孢杆菌类微生物具有极强的抗逆性,在生物防治领域得到广泛应用[14-15],并且在微生物菌剂研发中具有巨大的应用潜力。本课题组前期从荒漠沙土中分离获得副地衣芽孢杆菌(*Bacillus paralicheniformis*)ZYGT1811 和萎缩芽孢杆菌(*Bacillus atrophaeus*)ZY1825,两株菌对多种植物病原真菌具有抑制活性,具有作为根际生防菌开发利用的潜力[16]。鉴于单一菌剂存在防控谱窄、防效不稳定等局限性,生防菌的研究已逐步从单一菌株转向多菌株复配。本研究以 ZYGT1811 和 ZY1825 为主要活性成分,制备一种兼具病害防控、增强幼苗抗逆性以及改良土壤微生态复合微生物种衣剂,并评价其对小麦茎基腐病的防控效果及幼苗生长的影响,旨在明确复合微生物种衣剂在小麦茎基腐病防控中的应用潜力,为小麦茎基腐病绿色防控提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验菌株副地衣芽孢杆菌菌株 ZYGT1811 和萎缩芽孢杆菌菌株 ZY1825 均由甘肃省农业科学院植物保护研究所分离,保藏于中国典型培养物保藏中心,保藏编号分别为 CCTCC No. M 2020759 和 CCTCC No. M 2021736。供试小麦品种为矮抗 58,购自河南滑丰种业科技有限公司。小麦茎基腐病原菌为假禾谷镰孢菌 MC-7,由甘肃省农业科学院植物保护研究所分离、鉴定并保存。供试培养基为 LB 培养基(初始 pH 为 7.0±0.2)、PDA 培养基(初始 pH 为 6.0±0.2)、萎缩芽孢杆菌液体培养基(马铃薯 200 g,蔗糖 15 g,酵母浸粉 12 g,硫酸镁 5 g,蒸馏水 1 000 mL,初始 pH 为 7.0±0.2)和副地衣芽孢杆菌液体培养基(蛋白胨 10 g,酵母膏 5 g,氯化钠 10 g,蒸馏水 1000 mL,初始 pH 为 7.0±0.2),灭菌条件均为 121 ℃,30 min。助剂成分分别为分散剂(木质素磺酸钠、羧甲基淀粉钠、壳聚糖、SD-811)、成膜剂(甲基纤维素、羟丙基甲基纤维素、阿拉伯树胶、聚乙烯醇)、防冻剂(乙二醇)、增稠剂(黄原胶)。

1.2 两种生防芽孢杆菌对假禾谷镰孢菌 MC-7 的拮抗效果

采用滤纸片抑菌法测定两株生防菌对 MC-7 的拮抗活性。先将 ZYGT1811 和 ZY1825 进行活化处理,活化后将其置于各自的专用液体培养基中,在 32 ℃、210 r·min^{-1} 的条件下培养 24 h,然后按照 1%的比例分别接种到新的液体培养基中,在相同条件下继续培养 24 h 以备后续使用(菌液浓度调至约 1×10^9 cfu·mL^{-1})。将培养 5~7 d 的 MC-7 接种到 PDA 平板中央,在四周等距放置 6 mm 浸有生防菌菌液的滤纸片,以病原菌单独生长为空白对照,3 次重复。于 25 ℃、黑暗条件下培养 5~7 d 后,计算抑菌率(I),$I=(D_{ck}-D_w)/D_{ck}\times100\%$,$D_{ck}$ 为对照组病原菌菌落直径,D_w 为处理组病原菌菌落直径,采用十字交叉法测量菌落直径并取平均值。

1.3 两种生防芽孢杆菌的相容性测定

参照吴颖等[17]的方法,将两种生防芽孢杆菌交叉培养来确定其生物相容性。取 20 μL ZYGT1811 的菌液涂布在固体 LB 培养基表面,将 ZY1825 的菌液点接在平板上;再以 ZY1825 涂布、ZYGT1811 点接进行反向验证,30 ℃下培养 2 d 后观察两种菌的生长情况。若两种菌生长正常且互不影响,则认为两种菌株生长不存在拮

抗作用,若出现抑菌圈,则表明菌株不相容。

1.4　生长曲线的测定

测定 ZYGT1811、ZY1825 以及两者复合后的生长曲线。将两株芽孢杆菌活化后于 32 ℃、210 r·min^{-1} 条件下过夜培养得到种子液,按接种量 1%接种在液体 LB 培养基中(复合芽孢杆菌的接种液为 ZYGT1811 和 ZY1825 的种子液按体积比 1∶1 均匀混合),于上述条件下振荡培养。分别在 2、4、8、12、16、20、24、28、32、36、40、44、48 h 取样,样品用无菌水 10 倍梯度稀释,取 10^{-4}、10^{-5}、10^{-6} 3 个浓度梯度的稀释液 100 μL 涂布于 LB 平板上于 28 ℃恒温黑暗培养 24 h,每个浓度 3 次重复,统计菌落数并绘制生长曲线。

1.5　复合生防菌剂对 MC-7 的最优配比筛选

将 ZYGT1811 与 ZY1825 的菌液按体积比 1∶1、1∶2、1∶3、2∶1、2∶3、3∶1、3∶2 的比例混合制成复合生防菌剂,将两株单菌及复合生防菌剂与种子质量比 1∶50 进行种子包衣。采用纸间发芽法测定发芽率,每个处理 100 粒种子,3 次重复,设空白对照,4 d 后计算发芽率,发芽率＝发芽种子/总种子数×100%;采用滤纸片法测定各菌剂对 MC-7 的抑菌率。

1.6　助剂系统的配方优化

1.6.1　分散剂筛选

根据分散性测定方法[18]观察分散剂的分散状况,可将分散效果分为优、良、差 3 个等级。

1.6.2　成膜剂筛选

选用成膜剂制成的悬液与小麦种子按 1∶50 包衣,根据国家标准 GB/T 17768—1999[19]测试悬液的包衣均匀度和脱落率。

1.6.3　助剂体系配方优化

采用四因素三水平[L9(3^4)]正交试验设计(表 1),以筛选出的分散剂和成膜剂与增稠剂黄原胶、防冻剂乙二醇按相应的质量分数与 2%大红染料混合,再与添加了 1%复合生防菌剂的液体培养基混合,重复 3 次。在 32 ℃、210 r·min^{-1} 的条件下摇床培养 24 h,稀释平板计数法测定活菌数,筛选出助剂体系配方的最佳比例。

1.7　复合生防菌剂与助剂体系的最优配比筛选

将筛选的复合生防菌剂和助剂体系按体积比($v_{菌剂}/v_{助剂}$)以 1∶1、1.5∶1、2∶1、2.5∶1、3∶1 均匀混合,设空白对照。把 5 个处理按药种比 1∶50 包衣到小麦上,测定发芽率和对 MC-7 的抑菌率。

表 1　混合助剂配方筛选各因素不同水平试验设计

Table 1　Evaluation of mixed additive formulations by experimental design with varying values for each factor

水平 Level	因素 Factor			
	A/%	B/%	C/%	D/%
1	3.00	3.00	1.00	0.10
2	4.00	4.00	1.50	0.20
3	5.00	5.00	2.00	0.30

A:分散剂;B:成膜剂;C:防冻剂;D:增稠剂。表 5 同。

A: Dispersing agent; B: Film-forming agent; C: Antifreeze; D: Thickening agent. The same in table 5.

1.8　复合微生物种衣剂的制备

将筛选得到的分散剂、成膜剂、防冻剂、增稠剂与无菌水混合分散均匀得到助剂体系配方组成,高速剪切乳化 40 min 后加入复合生防菌剂(10^9 cfu·mL^{-1}),于砂磨机内研磨 2～3 次后出料,得到复合微生物种衣剂成品。

1.8.1　复合微生物种衣剂的理化性质测定

参考 GB/T 1601-1993[20]方法测定复合微生物种衣剂的 pH 值;参考 GB/T 17768-1999[19]的方法测定低温贮存稳定性、采用数字式旋转黏度计测定黏度、热贮稳定性(置于 50 ℃的恒温箱中放置 14 d 后,测定其质量、活菌数、黏度等指标是否变化);参考 GB 20287-2006[21]测定活菌数;参考 GB/T 17768-1999[19]方法测定包衣均匀度。

1.8.2　复合微生物种衣剂的货架期

参考 GB 20287-2006[21]方法测定货架期:将种衣剂置于常温(25 ℃)下,每隔 10 d 取一次样,测定活菌数,持续至活菌数指标达不到国标要求,以失效前最后一次取样时间定为该复合微生物种衣剂的货架期。

1.9　复合微生物种衣剂对小麦茎基腐病的防效

采用菌土法[22]测定小麦茎基腐病室内防效。称取 25 g 粟粒,置于 500 mL 锥形瓶,冲洗干净后加蒸馏水浸泡 12 h,将多余水倒出,于 121 ℃高压灭菌 1 h,室温放置 2 d 后再于 121 ℃高压灭菌 30 min,冷却到室温后打取 MC-7 菌饼到粟粒体中,25 ℃培养 1 周后在超净工作台内混匀,继续放置 1 周,待菌丝布满粟粒时,在通风背光处晾干使用。带菌粟粒接种体按土壤(灭菌)重量 0.5%比例混制成菌土。以药种比 1∶50 包衣小麦种子,每盆装土 200 g,播种 50 粒小麦种子,出苗后间苗,每盆保留 30 株幼苗。每处理 3 次重复,设置空白对照。温室条件为昼/夜温度 25 ℃/20 ℃,光周

期 12 h/12 h。30～35 d 记录试验结果(按每盆留存的 30 株小麦全部调查统计结果)。室内盆栽 FCR 分级标准[22]:0 级,整株健康无症状;1 级,植株第一叶鞘变褐,有轻微症状;3 级,植株第一叶鞘明显变褐或者变黑;5 级,植株第二叶鞘变褐或者变黑;7 级,植株第三叶鞘变褐或变黑;9 级,植株死亡。计算病情指数(DI)和防治效果。

$$DI=\frac{\sum 各级病株数\times 相应病级}{调查总株数\times 最高病级}\times 100;$$

$$防治效果=\frac{对照病情指数-处理病情指数}{对照病情指数}\times 100\%。$$

1.10 数据统计与分析

正交试验采用极差分析确定各因素影响大小及最优组合;其他单因素试验采用单因素方差分析和 Duncan 多重比较。使用 SPSS 26.0 软件进行方差分析,运用 BioRender 和 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 两种生防芽孢杆菌的生物相容性及其对 MC-7 的拮抗效果

两种菌株在相互作用中均能正常生长(图 1),且未观察到抑菌圈的产生,表明 ZYGT1811 和 ZY1825 之间不存在拮抗作用,具有较好的生物相容性。

ZYGT1811 在 0～12 h 处于指数增长期,12～28 h 增速减缓,活菌数于 28 h 达到最大(2.43×10^9 cfu·mL^{-1}),28 h 后基本保持稳定(图 2)。ZY1825 的活菌数在 0～8 h 处于对数增长期,8～24 h 进入稳定期,活菌数增长放缓,于 24 h 达到最大值(9.1×10^9 cfu·mL^{-1})。24 h 后活菌数逐渐下降。复合菌的活菌数在 0～8 h 为指数增长期,8～24 h 缓慢增长,并在 24 h 达到最大,此时活菌数为 5.1×10^9 cfu·mL^{-1},24 h 后活菌数逐渐减少。复合菌总活菌数变化趋势介于两株单菌之间,结合相容性分析结果表明,两菌株间无抑制作用,可以共同培养。

ZYGT1811 和 ZY1825 对小麦茎基腐病的病原菌 MC-7 有明显的抑制效果(图 3),抑菌率分别达 58.12% 和 60.20%,表明 ZYGT1811 和 ZY1825 均对 MC-7 具有较强的体外拮抗活性,可作为后续复合生防菌剂构建的候选菌株。

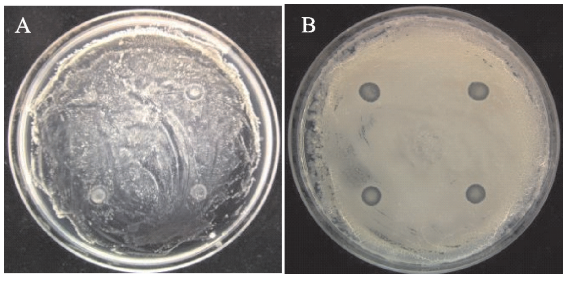
2.2 复合生防菌剂对 MC-7 的最优配比筛选

ZYGT1811 和 ZY1825 不同配比的复合生防菌剂处理后小麦种子发芽率为 90.33%～94.67%,各处理与对照差异不显著(表 2),说明两株生防菌及其复配处理对小麦种子发芽无明显抑制作用。

ZYGT1811 和 ZY1825 不同配比复合生防菌对 MC-7 的抑菌带宽度为 1.02～1.16 cm,抑菌率 56.27%～64.17%,当 ZYGT1811 与 ZY1825 的配比为 2∶1 时,抑菌带宽度最大(1.16 cm),抑菌率达 64.17%,且分别显著高于 ZYGT1811 和 ZY1825 单株抑菌率。

2.3 助剂体系筛选与配方优化

由表 3 可知,4 种分散剂的分散效果存在差异。木质素磺酸钠处理悬液呈云雾状,分散均匀,无明显沉降或絮凝,分散效果优于其他分散剂,因此选用其作为后续配方分散剂。



A:ZYGT1811 涂布,ZY1825 点接;B:ZY1825 涂布,ZYGT1811 点接。

A: ZYGT1811 Spread, ZY1825 Spot-inoculated; B: ZY1825 Spread, ZYGT1811 Spot-inoculated.

图 1 两种芽孢杆菌间的拮抗性

Fig. 1 Antagonism between two *Bacillus* strains

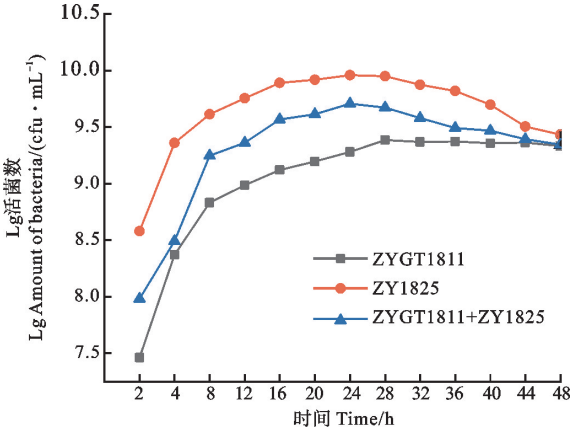
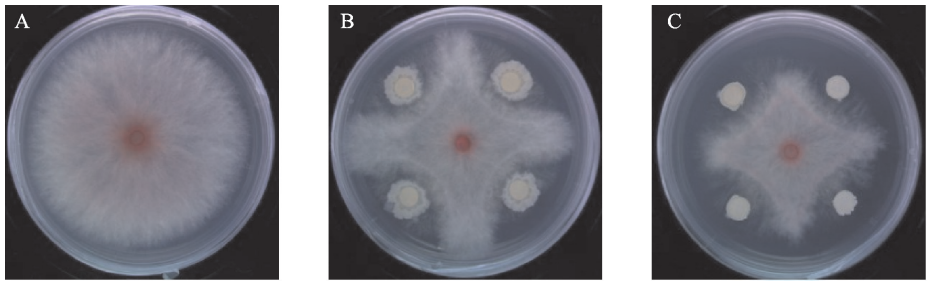


图 2 单菌及复合菌随培养时间变化的生长曲线

Fig. 2 Growth curves of single and mixed *Bacillus* cultures



A:对照;B:ZYGT1811 滤纸片与 MC-7 对峙;C:ZY1825 滤纸片与 MC-7 对峙。

A: Control; B: Dual culture assay of ZYGT1811 filter paper discs against MC-7; C: Dual culture assay of ZY1825 filter paper discs against MC-7.

图 3　两株生防芽孢杆菌对 MC-7 的拮抗作用

Fig. 3　Antagonistic effects of two *Bacillus* strains against MC-7

表 2　ZYGT1811 与 ZY1825 不同配比对小麦种子发芽率及 MC-7 抑菌率的影响

Table 2　Effects of different ratios of ZYGT1811 and ZY1825 on wheat seed germination rate and inhibition rate of MC-7

处理 Treatment	发芽率 Germination rate	抑菌带宽度 Inhibition zone width/cm	抑菌率 Inhibition rate/%
CK	93.67±1.53a		
1:1	91.00±2.00a	1.11 ±0.01bc	61.10±0.33bc
1:2	90.67±2.89a	1.07±0.05d	59.06±2.51d
1:3	91.33±0.58a	1.08±0.01cd	59.55±0.50cd
2:1	94.67±1.15a	1.16±0.01a	64.17±0.38a
2:3	90.33±3.21a	1.08±0.01cd	59.62±0.70cd
3:1	91.33±2.52a	1.02±0.01e	56.27±0.40e
3:2	91.67±3.06a	1.10±0.01bcd	60.66±0.37bcd
ZYGT1811	92.33±0.58a	1.04±0.01e	57.31±0.65e
ZY1825	91.33±2.52a	1.13±0.01b	62.11±0.26b

同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。表 4、6 同。

Different lowercase letters with in the same columns indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same in tables 4 and 6.

在 4 种成膜剂中,羟丙基甲基纤维素与聚乙烯醇的包衣脱落率低于其他两种成膜剂(表 4),且二者无显著差异。其中,羟丙基甲基纤维素的包衣均匀度最高,为 97%,因此选用其作为后续配方成膜剂。

选取经筛选的分散剂木质素磺酸钠,成膜剂羟丙基甲基纤维素,并加入防冻剂乙二醇和增稠剂黄原胶进行正交试验。经极差分析,增稠剂黄原胶对复合菌的活菌数影响最大,其次是成膜剂羟丙基甲基纤维素,分散剂和防冻剂影响较小(表 5)。根据各因素水平下活菌数均值比较,助剂体系适宜组合为 4%木质素磺酸钠,5%羟丙基甲基纤维素、1.5%乙二醇、0.1%黄原胶,2%大红染料(均为质量分数)。对筛选出的助剂体系进行验证试验,此处理得到的活菌数为 7.13×10^9 cfu·mL^{-1},故助剂体系的最优组合为 A2B3C2D1。

2.4　复合生防菌剂与助剂体系适宜配比筛选

复合生防菌剂与助剂体系不同配比处理的小麦种子发芽率为 97.00%～98.33%,对照为 98.67%(图 4),不同处理间差异不显著,所有处理的发芽率均在 97%以上,说明复合生防菌剂与助剂体系不同配比处理对小麦种子发芽无明显抑制作用。

表 3　分散剂分散效果评价

Table 3　Evaluation of dispersibility of different dispersants

分散剂 Dispersing agent	外观状态 Appearance	分散性 Dispersibility
壳聚糖 Chitosan	颗粒 Particles	良 Good
木质素磺酸钠 Sodium lignosulfonate	云雾状 Cloudy	优 Excellent
SD-811	絮状 Flocculent	差 Bad
羧甲基淀粉钠 Sodium carboxymethyl starch	颗粒 Particles	良 Good

表 4　成膜剂不同指标测定

Table 4　Assessment of various indications of the film-forming agent

成膜剂 Film-forming agent	包衣脱落率 Coating shedding rate/%	包衣均匀度 Coating uniformity/%
甲基纤维素 Methylcellulose	5.65±0.42b	92
羟丙基甲基纤维素 Hydroxypropyl methylcellulose	3.22±0.23c	97
阿拉伯树胶 Gum arabic	8.03±0.37a	87
聚乙烯醇 Polyvinyl alcohol	3.82±0.18c	95

表 5 不同助剂正交试验 $L_9(3^4)$结果

Table 5 Results of $L_9(3^4)$ orthogonal test for additive formulation optimizations

配方 Formula	因子 Factor				活菌数 Viable count/($\times10^9$ cfu·mL^{-1})
	A	B	C	D	
1	1(3%)	1(3%)	1(1%)	1(0.1%)	2.79
2	1(3%)	2(4%)	2(1.5%)	2(0.2%)	4.51
3	1(3%)	3(5%)	3(2%)	3(0.3%)	3.13
4	2(4%)	1(3%)	2(1.5%)	3(0.3%)	4.36
5	2(4%)	2(4%)	3(2%)	1(0.1%)	6.23
6	2(4%)	3(5%)	1(1%)	2(0.2%)	5.80
7	3(5%)	1(3%)	3(2%)	2(0.2%)	2.68
8	3(5%)	2(4%)	1(1%)	3(0.3%)	2.11
9	3(5%)	3(5%)	2(1.5%)	1(0.1%)	7.00
$K1$	3.48	3.28	3.57	5.34	
$K2$	5.46	4.28	5.29	4.33	
$K3$	3.93	5.31	3.95	3.20	
R	1.98	2.03	1.72	2.14	

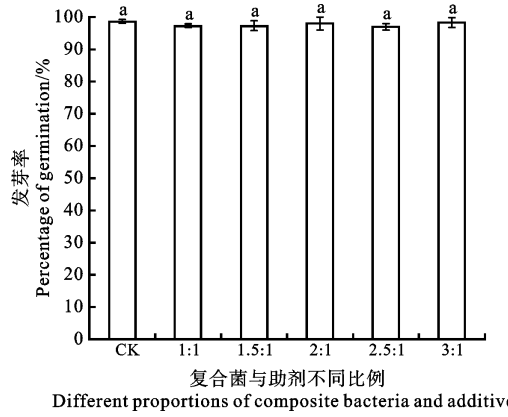


图 4 复合生防菌剂与助剂体系不同配比对小麦种子发芽率的影响

Fig. 4 Effects of different mixing ratios of compound biocontrol agent and auxiliary system on wheat seed germination rate

由表 6 和图 5 可知，复合生防菌剂与助剂体系按不同比例混合后均对 MC-7 表现出抑制作用。不同处理抑菌带宽度为 1.05～1.11 cm，抑菌率为 59.91%～63.39%。其中，复合生防菌剂∶助剂体系为 2∶1、2.5∶1 和 3∶1 时，抑菌带宽度和抑菌率均处于较高水平，且 3 个处理间差异不显著。综合种子发芽安全性、抑菌活性和配方成本，在保证抑菌效果的前提下，选择复合生防菌剂∶助剂体系＝2∶1 作为后续种衣剂制备的适宜配比。

表 6 复合生防菌剂与助剂体系不同配比对 MC-7 的抑制作用

Table 6 Inhibitory effects of different mixing ratios of compound biocontrol agent and auxiliary system against MC-7

处理 Treatment	抑菌带宽度 Inhibition zone width/cm	抑菌率 Inhibition rate/%
1∶1	1.05±0.08c	59.91±0.41c
1.5∶1	1.07±0.04b	60.95±0.23b
2∶1	1.10±0.05a	62.93±0.27a
2.5∶1	1.10±0.12a	62.74±0.70a
3∶1	1.11±0.05a	63.39±0.28a

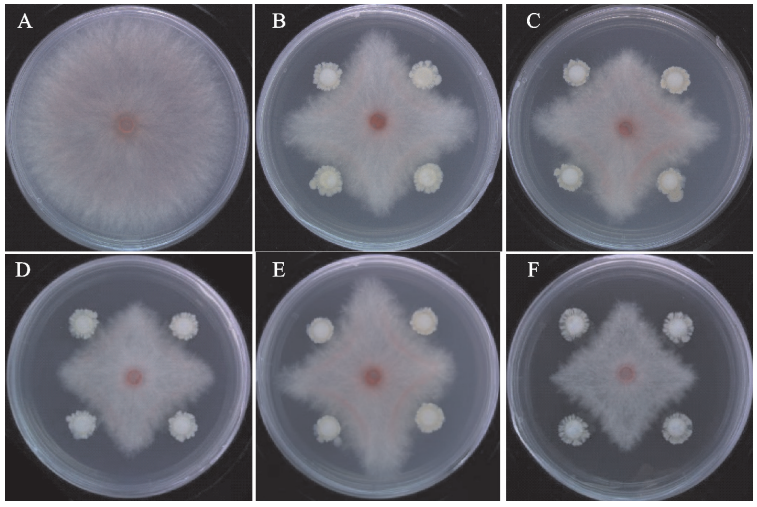
同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$.

2.5 复合微生物种衣剂的质量指标及货贺期

通过活菌数及理化指标的测定，所制备复合微生物种衣剂活菌数为 1.05×10^9 cfu·mL^{-1}，pH 值为 7.76，黏度为 196 mPa·s，包衣均匀度 90%，成膜时间为 1.34 min，最低成膜温度－10 ℃(表 7)，耐高温高湿，包衣安全性等方面均符合国家标准 GB/T 17768—1999[19]。

随着贮藏时间延长，复合微生物种衣剂活菌数逐渐下降(图 6)。初始活菌数为 1.05×10^9 cfu·mL^{-1}，在 25 ℃条件下贮藏 90 d 后，活菌数仍达到 2.31×10^8 cfu·mL^{-1}，高于微生物菌剂相关标准[21]要求，说明该种衣剂在室温条件下具有一定贮藏稳定性。



A 为对照;B～F 为复合生防菌剂与助剂体系不同配比处理,依次为 1∶1、1.5∶1、2∶1、2.5∶1、3∶1。

A is Control; B－F are different mixing ratios of compound biocontrol agent and auxiliary system, corresponding to 1∶1, 1.5∶1, 2∶1, 2.5∶1 and 3∶1, respectively.

图 5　复合生防菌剂与助剂体系不同配比对 MC-7 的抑制作用

Fig. 5　Inhibitory effects of different mixing ratios of compound biocontrol agent and auxiliary system against MC-7

表 7　复合微生物种衣剂质量指标测定结果

Table 7　Quality indicators of the compound microbial seed coating agent

项目 Item	标准 Standard	复合微生物种衣剂 Compound microbial seed coating agent
活菌数 Viable bacteria count/(cfu・mL^{-1})	≥2×10^8	1.05×10^9
pH	5～8	7.76
黏度范围 Viscosity range(25 ℃)/(mPa・s)	100～600	196
包衣均匀度 Coating uniformity/%	≥90	90
成膜时间 Film-forming time/min	≤5.0	1.34
包衣耐磨性 Coating wear resistance	无明显脱落 No apparent separation	合格 Qualified
最低成膜温度 Minimum film-forming temperature/℃	≤－5	－10
耐高温高湿性 Resistance to high temperature and high humidity	不粘连 No adhesion	合格 Qualified
包衣安全性 Coating safety percentage/%	≥CK-2	合格 Qualified
低温稳定性 Low temperature stability	可恢复 Recoverable	合格 Qualified
热贮稳定性 High temperature stability	合格 Qualified	合格 Qualified

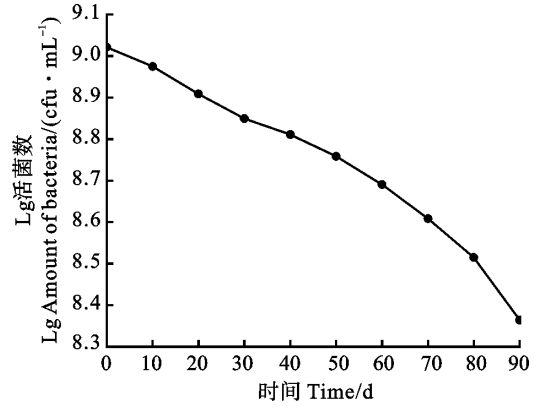


图 6　25 ℃贮藏条件下复合微生物种衣剂活菌数变化

Fig. 6　Changes in viable cell count of the compound microbial seed coating agent during storage at 25 ℃

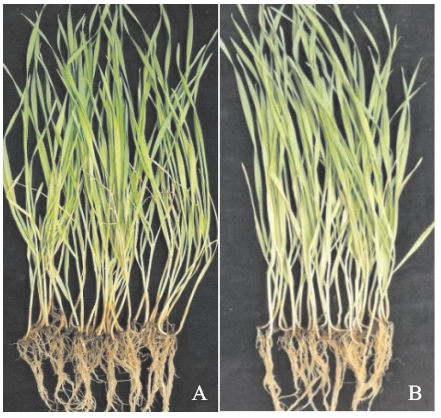
2.6　复合微生物种衣剂对小麦茎基腐病的室内防效

室内盆栽试验结果(表 8 和图 7)表明,复合微生物种衣剂包衣处理可降低小麦茎基腐病发病

表 8　复合微生物种衣剂对小麦茎基腐病盆栽防效

Table 8　Control efficacy of compound microbial seed coating agent against wheat crown rot in pot experiments

处理 Treatment	病情指数 Disease index	防治效果 Control efficacy/%
CK	52.59	—
复合微生物种衣剂 Compound microbial seed coating agent	20.74	60.56



A：未包衣接菌对照；B：复合微生物种衣剂包衣处理。

A：Uncoated inoculated control；B：Treated with compound microbial seed coating agent.

图 7 复合微生物种衣剂对小麦茎基腐病的盆栽防效

Fig. 7 Control efficacy of the compound microbial seed coating agent against *Fusarium* crown rot of wheat in pot experiment

程度。与未包衣接菌对照相比，复合微生物种衣剂处理的小麦茎基腐病病情指数由 52.59 降至 20.74，防治效果为 60.56%。该结果说明，复合微生物种衣剂在室内盆栽条件下对小麦茎基腐病具有一定防控潜力。

3 讨论

目前，复合微生物种衣剂的研究已成为微生物菌剂领域的研究热点[23-24]，其由两种及以上功能互补性的微生物构建[25]，通过生态位分化[26]、协同抑菌[27]等机制发挥作用，其防控作用通常比单一菌剂更高、更稳定。吴跃星[28]研制的 TBB 复合种衣剂，搭配不同功能的微生物，对玉米茎腐病、穗腐病及纹枯病的防治效果均超过 42%，有效突破了单一菌株的功能局限，弥补了单菌株应用的短板。本研究中，ZYGT1811 和 ZY1825 均对 MC-7 表现出较强体外拮抗活性，且两株菌在平板交叉培养条件下未表现出明显拮抗作用，具备复配应用基础。二者按 ZYGT1811∶ZY1825＝2∶1 复配后，对 MC-7 的抑菌率达到 64.17%，高于单菌处理，说明复配处理在体外抑菌活性上具有一定优势。

种衣剂主要通过包裹种子表层来形成均匀致密、附着力强且具备防护效用的功能性薄膜，以此起到防治病害、促产增收等的作用。复合微生物种衣剂的研制中，确定了核心功能菌后，助剂体系的选择是决定其能否成功应用的关键。本研究通过正交试验，筛选出种衣剂助剂体系的适宜配方为 4%木质素磺酸钠、5%羟丙基甲基纤维素、1.5%乙二醇、0.1%黄原胶及 2%大红染料（质量分数）。其中，木质素磺酸钠的分散效果明显优于其他供试分散剂，这与李丽程等[29]选择将 4.8%木质素磺酸钠作为贝莱斯芽孢杆菌 Y426-7 可湿性粉剂助剂配方之一的研究结果具有相似性。王海燕[30]研究表明在种衣剂配方中添加 5%羟丙基甲基纤维素可表现出优良的包衣应用效果，该配比下制剂成膜速度较快，其成膜效果最佳，包衣均匀度高达 98.5%，且包衣好的玉米种子在储存 7 d 后的发芽率仍可维持在 90.1%。本研究筛选出的 5%的羟丙基甲基纤维素是助剂体系的适宜配方与其相似。

复合微生物种衣剂的货架期易受制剂剂型、菌株组合、保护剂添加及储存条件等多重因素影响，低温、干燥、避光的储存条件可减少菌体代谢消耗，－20 ℃低温储存能最大程度保留菌剂生物活性。但温度太低，助剂体系会因此分层、底部沉淀，破坏体系稳定性。而常温下温度波动、高湿度会加速菌体死亡，缩短货架期。乙二醇作为防冻剂是悬浮型制剂研发中的常规选择[31]，其添加可有效维持整个分散体系的低温稳定性，避免颗粒聚结或沉淀，同时可保护芽孢杆菌等微生物的活性。黄原胶与多数合成增稠剂不同，它属于微生物发酵产生的天然生物聚合物[32]，这一特性使其在“环境友好型”农药制剂研发中具有显著优势，也契合农药制剂朝着更安全、更环保方向发展的行业趋势。本研究研制的复合微生物种衣剂在室温、干燥的条件下货架期可达 90 d。

本研究筛选的复合微生物种衣剂理化指标符合国家相关标准要求，其活菌数可达 1.05×10^{9} cfu·mL^{-1}，货架期可达 90 d，按药种比 1∶50 包衣小麦后对其茎基腐病的盆栽防治效果可达 60.56%。

参考文献：

[1]刘晓航. 小麦茎基腐病发生特点及综合防治措施[J]. 安徽农学通报，2024，30(18)：78.

Liu X H. Occurrence characteristics and comprehensive control measures of Fusarium crown rot of wheat [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*，2024，30(18)：78.

[2]赵利民，冯超红，蒋 向，等. 小麦茎基腐病防治技术研究进展[J]. 中国植保导刊，2022，42(11)：22.

Zhao L M, Feng C H, Jiang X, *et al*. Research progress on control technology of Fusarium crown rot of wheat [J]. *China Plant Protection*, 2022, 42(11): 22.

[3]李怡文,李桂香,黄中乔,等.假禾谷镰孢引起的小麦茎基腐病发生危害与防控研究进展[J].农药学学报,2022,24(5):949.
Li Y W, Li G X, Huang Z Q, *et al*. Research progress on the occurrence, damage and prevention of Fusarium crown rot caused by Fusarium *pseudograminearum* [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2022, 24(5): 949.

[4]Kang R J, Li G N, Zhang M J, *et al*. Expression of *Fusarium pseudograminearum* FpNPS9 in wheat plant and its function in pathogenicity [J]. *Current Genetics*, 2020, 66(1): 229.

[5]栾冬冬,贾吉玉,王光州,等.中国小麦茎基腐病的发生现状及防治策略[J].麦类作物学报,2022,42(4):512.
Luan D D, Jia J Y, Wang G Z, *et al*. Occurrence status and control strategies of wheat crown rot in China [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(4): 512.

[6]Tang Z, Kong W R, Xu M, *et al*. A method to inoculate millet grain-colonized *Fusarium pseudograminearum* on wheat to obtain reproducible disease symptoms [J]. *Bio-Protocol*, 2025, 15(1380): e5438.

[7]王逍冬,王永芳,董志平,等.小麦-玉米一年两熟区小麦茎基腐病周年发生规律与综合治理[J].植物病理学报,2025,55(4):846.
Wang X D, Wang Y F, Dong Z P, *et al*. Annualoc currence pattern and integrated management of wheat Fusarium crown rot in wheat-maize double cropping regions [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2025, 55(4): 846.

[8]杨 云,贺小伦,胡艳峰,等.黄淮麦区主推小麦品种对假禾谷镰刀菌所致茎基腐病的抗性[J].麦类作物学报,2015,35(3):339.
Yang Y, He X L, Hu Y F, *et al*. Resistance of wheat cultivars in Huang-Huai Region of China to crown rot caused by *Fusarium pseudograminearum* [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(3): 339.

[9]潘胜凤,冯曾威,姚 青,等.基于根际微生物的作物土传病害绿色防治研究进展[J].微生物学报,2026,66(2):495.
Pan S F, Feng Z W, Yao Q, *et al*. Green control of soil-borne crop diseases: Advances in rhizosphere microbe research [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(2): 495.

[10]El-Saadony M T, Saad A M, Soliman S M, *et al*. Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: Mechanisms, challenges and future perspectives [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 923880.

[11]Manetsberger J, Gómez N C, Soria-RodríGuez C, *et al*. Simply versatile: The use of peribacillus simplex in sustainable agriculture [J]. *Microorganisms*, 2023, 11(10): 2540.

[12]Liu Q H, Johnson R, Adusei-Fosu K. *Lecanicillium aphanocladii*: A biocontrol agent against insect pests and phytopathogens [J]. *Pest Management Science*, 2026, 82(5): 4089.

[13]周曼曼,苏秀红,梁慎,等.山药根腐病生防菌 Y33 的鉴定及防病促生机制[J/OL].中国实验方剂学杂志,1-13[2026-07-25]. https://doi.org/10.13422/J.cnki.syfjx.20260314.
Zhou M M, Su X H, Liang S, *et al*. Identification of biocontrol bacteria Y33 against dioscorea opposita root rot and investigation into mechanisms of disease prevention and growth promotion [J/OL]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 1-13[2026-07-25]. https://doi.org/10.13422/J.cnki.syfjx.20260314.

[14]Juneja V K, Osoria M, Altuntas E G, *et al*. Effects of spore purity on the wet heat resistance of *Clostridium perfringens*, *Bacillus cereus* and *Bacillus subtilis* spores [J]. *Food Research International*, 2024, 177: 113904.

[15]Setlow P. Spores of *Bacillus subtilis*: Their resistance to and killing by radiation, heat and chemicals [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2006, 101(3): 514.

[16]Dunlap C A, Kwon S W, Rooney A P, *et al*. *Bacillus paralicheniformis* sp. nov., isolated from fermented soybean paste [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2015, 65(Pt_10): 3487.

[17]吴 颖,侯潞丹,张 杰.复合微生物菌剂中各菌株间的拮抗试验及培养条件的筛选[J].浙江农业学报,2016,28(5):820.
Wu Y, Hou L D, Zhang J. Antagonistic effect of bacterial strains in complex microbial inoculants and the screening of their culture condition [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, 28(5): 820.

[18]吴学民,冯建国,马 超.农药制剂加工实验[M].2 版.北京:化学工业出版社,2014.
Wu X M, Feng J G, Ma C. Processing experiment of pesticide preparation [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.

[19]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.悬浮种衣剂产品标准编写规范:GB/T 17768-1999[S].北京:中国标准出版社,2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Guidelines on drafting standards of suspension concentrates for seed dressing: GB/T 17768-1999 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.

[20]国家市场监督管理总局.农药 pH 值的测定方法:GB/T 1601-1993[S].北京:中国标准出版社,1994.
State Administration for market regulation. Determination method of pH value for pestcides: GB/T 1601-1993 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.

[21]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.农用微生物菌剂:GB 20287-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
General Administration of quality supervision, inspection and quarantine of the People's Republic of China. Microbial inoculants in agriculture: GB 20287-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.

[22]田晓明,蒋晶晶,张海英,等.甘肃省不同生态区小麦茎基腐病病原鉴定及其致病力分析[J].麦类作物学报,2025,45(12):1711.
Tian X M, Jiang J J, Zhang H Y, *et al*. Identification of wheat

crown rot pathogens and analysis of their pathogenicity in different ecological zones of Gansu Province [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(12): 1711.

[23]庄沈亮,李 坤,侯巨梅,等. 木霉-芽孢杆菌固体共培养条件优化及对豇豆枯萎病防治效果研究[J]. 中国生物防治学报, 2025, 41(5): 1141.
Zhuang S L, Li K, Hou J M, *et al*. Optimization of solid-state co-culture conditions of *Trichoderma-Bacillus* and its control efficacy on cowpea Fusarium wilt [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2025, 41(5): 1141.

[24]李俊州,马毅楠,曾文,等. 皮尔瑞俄类芽孢杆菌 S6330 防病促生及土壤改良功能研究[J/OL]. 中国土壤与肥料, 1-18 [2026-07-25]. https://link.cnki.net/urlid/11.5498.s.20251212.1914.002.
Li J Z, Ma Y N, Zeng W, *et al*. Multifunctional analysis of biological control and plant growth-promoting capacity and soil improvement of *Paenibacillus peoriae* S6330 [J/OL]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1-18 [2026-07-25]. https://link.cnki.net/urlid/11.5498.s.20251212.1914.002.

[25]杨 军,胡嘉莉,游 佳,等. 基于枯草芽孢杆菌 Bs-Z15 的复合菌剂对棉花的促生抗病效应[J]. 微生物学通报, 2025, 52(12): 5827.
Yang J, Hu J L, You J, *et al*. Growth-promoting and disease-resistant effects of a *Bacillus subtilis* Bs-Z15-based composite microbial agent on cotton [J]. *Microbiology China*, 2025, 52(12): 5827.

[26]杨 凯,陈 凯,李红梅,等. 哈茨木霉 LTR-2 与产脲节杆菌 DnL1-1 协同对小麦茎基腐病的防治效果与机理[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(6): 1385.
Yang K, Chen K, Li H M, *et al*. Biocontrol efficacy and action mechanism of *Trichoderma harzianum* LTR-2 and *Arthrobacter ureafaciens* DnL1-1 against crown rot of wheat [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(6): 1385.

[27]刘玉涛,杨 斌,张 凯,等. 链霉菌剂种子包衣对小麦幼穗分化及生物学特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(8): 990.
Liu Y T, Yang B, Zhang K, *et al*. Effect of seed coating with *Streptomyces* on panicle differentiation and biological characteristics of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(8): 990.

[28]吴跃星. 复合种衣剂 TBB 防治玉米主要土传病害的初步研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2023: 31.
Wu Y X. Complex seed coating agent TBB control maize soil-borne diseases [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023: 31.

[29]李丽程,邱莉童,王婧宇,等. 贝莱斯芽孢杆菌 Y426-7 可湿性粉剂研制及其对人参疫病的防治效果[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2026, 54(5): 155.
Li L C, Qiu L T, Wang J Y, *et al*. Development of *Bacillus velezensis* Y426-7 wettable powder and its biocontrol effect against ginseng *Phytophthora* blight [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2026, 54(5): 155.

[30]王海燕. 羟丙基甲基纤维素(HPMC)作为种衣成膜剂的应用性能研究[J]. 天津农业科学, 2018, 24(6): 62.
Wang H Y. Study on the application performance of hydroxypropyl methyl cellulose as a kind of membrane-forming agent [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2018, 24(6): 62.

[31]向 兴,李雪莲,赵 辉,等. 10%烯效唑悬浮种衣剂的研制[J]. 农药, 2015, 54(11): 792.
Xiang X, Li X L, Zhao H, *et al*. Development of uniconazole 10% flowable concentrate for seed coating [J]. *Agrochemicals*, 2015, 54(11): 792.

[32]Jadav M, Pooja D, Adams D J, *et al*. Advances in xanthan gum-based systems for the delivery of therapeutic agents [J]. *Pharmaceutics*, 2023, 15(2): 402.