

网络出版时间:2025-10-09

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20251009.0925.002

甲基营养型芽胞杆菌 Lw-6 与化学药剂复配防治小麦条锈病的研究

杨利飒¹, 贾瑞敏², 王保通², 王阳²

(1. 蓝田县农业技术推广中心, 陕西蓝田 710500; 2. 西北农林科技大学植物保护学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:为探究生防细菌甲基营养型芽胞杆菌 Lw-6 与化学药剂复配对小麦条锈病的防治效果, 以小麦条锈病菌 *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (*Pst*) 夏孢子为靶标菌, 通过相容性试验筛选出可与菌株 Lw-6 复配的化学药剂, 并利用盆栽试验筛选出最佳复配浓度, 最后通过温室和大田试验测定其防效和促生效果。结果表明, 烯唑醇 (Di) 与菌株 Lw-6 相容性最佳, 128 mg · L⁻¹ Di 与 Lw-6 发酵原液复配对小麦条锈病的盆栽防效和田间防效分别为 92.78% 和 86.22%, 均高于 Lw-6 或 Di 单独使用的防效。Lw-6 与 Di 复配处理后小麦千粒重、产量显著提高, 其中 6 500 mg · L⁻¹ 的 Lw-6 粉剂与 128 mg · L⁻¹ Di 复配的植保贡献率为 24.98%。综上所述, Lw-6 与烯唑醇复配可以有效防治小麦条锈病, 具有很好的应用潜力。

关键词: 条形柄锈菌; 甲基营养型芽胞杆菌; 烯唑醇; 农药减量

中图分类号: S512.1; S476

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)10-1432-09

Study on the Combination of *Bacillus methylotrophicus* Lw-6 and Chemical Fungicides in the Control of Wheat Stripe Rust

YANG Lisa¹, JIA Ruimin², WANG Baotong², WANG Yang²

(1. Lantian County Agricultural Technology Extension Center, Lantian, Shaanxi 710500, China;

2. Northwest A&F University, College of Plant Protection, Yangling, Shaanxi, 712100, China)

Abstract: In order to investigate the control efficacy of the combination of *Bacillus methylotrophicus* Lw-6 and chemical fungicides against wheat stripe rust, *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (*Pst*) urediniospores were used as the target fungus, and strain Lw-6 was screened through antagonistic tests *in vitro*. The chemical fungicide used in combination with Lw-6 was selected by compatibility testing, and the optimal concentration was selected by greenhouse pot tests. Finally, the control and growth promotion effects were determined by greenhouse pot tests and field test. The results showed that diniconazole had the best compatibility with strain Lw-6, and the combined application of 128 mg · L⁻¹ Di and Lw-6 fermentation liquid achieved 92.78% and 86.22% control efficacy against wheat stripe rust in pot experiments and field trials, respectively, which were higher than the controlling effects of using individual diniconazole or Lw-6. In addition, the 1 000-grain weight and yield of wheat were significantly increased after compound treatment, and the contribution rate of plant protection of 6 500 mg · L⁻¹ Lw-6 powder combined with 128 mg · L⁻¹ diniconazole was 24.98%. In summary, the combination of Lw-6 and diniconazole can effectively control wheat stripe rust, and it has promising application potential.

Keywords: *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*; *Bacillus methylotrophicus*; Diniconazole; Fungicide reduction

收稿日期: 2024-11-01 修回日期: 2024-12-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD140100502)

第一作者 E-mail: 1972572840@qq.com (杨利飒)

通讯作者 E-mail: wangyang2006@nwsuaf.edu.cn (王阳)

小麦条锈病是由条形柄锈菌小麦专化型 (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, *Pst*) 侵染引起的一种气传性病害,已成为目前小麦生产中最大的生物制约因素^[1-4]。每年全球因条锈病为害造成小麦产量损失 5.0×10^9 kg,折合人民币约 71.68 亿元^[5-6]。在中国,小麦条锈病发生过 8 次大流行,给小麦生产造成了严重的经济损失^[7-8]。目前,小麦条锈病的主要防治措施包括种植抗病品种以及喷施化学药剂。由于条锈菌繁殖快且极易发生变异,导致抗病品种易丧失抗性;杀菌剂的过度使用严重威胁着人畜健康和食品安全。因此,寻求环保且高效的防治方法势在必行。

在现代可持续农业大环境下,生物防治基于其环境友好、高效持久和低毒、低残留等特点,受到越来越广泛的关注^[9-10]。虽然生物防治可以大大减少化学药剂的使用频率和用量,减少残留和抗药性风险,但由于田间环境的复杂性,其效果通常不稳定,单独施用生防菌难以有效防治植物病害^[11]。使用低剂量化学药剂与生防菌复配,可以提高防效的同时降低杀菌剂用量,弥补二者缺陷。目前,国内外对生防菌与化学药剂复配防治植物病害的研究多有报道,如毕秋艳等^[12]用枯草芽胞杆菌 HMB-20428 与啞菌酯复配防治葡萄灰霉病,其田间防效达到 98.92%。枯草芽胞杆菌 RB14-C 因产生伊枯草菌素(iturin)和表面活性素(surfactin)而具有广谱抑菌效果,其与氟酰胺复配防治番茄枯萎病的盆栽防效为 70.00%^[13]。谢立等^[14]用枯草芽胞杆菌 Czkl 与根康复配防治橡胶树根病,其防效达 76.66%。在防治番茄早疫病过程中,用蜡芽芽胞杆菌处理种子,可以诱导番茄植株系统产生抗性,减少杀菌剂使用量,90 d 内喷药的频率可以从 20 次减少到 10 次^[15]。

关于生防菌与化学药剂复配防治小麦条锈病的研究还未见报道。甲基营养型芽胞杆菌 Lw-6 是课题组前期筛选出的一株对条锈菌具有拮抗作用的生防菌剂,本研究拟通过测定相容性筛选出与菌株 Lw-6 最佳复配的化学药剂,并通过盆栽和田间试验明确其防病及促生效果,为小麦条锈病的绿色防控提供参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

生防菌剂:甲基营养型芽胞杆菌 Lw-6 生防菌剂,活菌数为 2.0×10^9 CFU · g⁻¹,由西北农林

科技大学蔬菜病害及生物防治实验室提供。

药剂种类:20% 三唑酮乳油(triadimefon, Tr),江苏剑牌农化股份有限公司;40% 已唑醇悬浮剂(hexaconazole, He),安徽省四达农药化工有限公司;25% 粉唑醇悬浮剂(flutriafol, Fl),盐城利民农化有限公司;25% 丙环唑乳油(propiconazole, Pr),山东东泰农化有限公司;30% 烯唑醇悬浮剂(diniconazole, Di),江苏剑牌农化股份有限公司。

小麦品种:水源 11,由西北农林科技大学小麦病原真菌监测及抗病遗传实验室提供。

1.2 菌剂的活化与发酵液的制备

取 1 g 甲基营养型芽胞杆菌 Lw-6 生防菌剂与 99 mL 无菌水混合,28 °C、180 r · min⁻¹ 摇培 1 h 后,4 °C、12 000 r · min⁻¹ 离心 20 min,取上清液 1 mL,分别稀释 10⁴、10⁵、10⁶ 倍;将稀释后的菌液均匀涂布在固体 Luria-Bertani (LB) 平板上培养 24 h;挑取 Lw-6 单菌落接种于 250 mL 的盛有 100 mL LB 液体培养基的锥形瓶中,28 °C、180 r · min⁻¹ 摇培 24 h 制备发酵液(fermentation liquid, FL),活菌浓度为 1.0×10^8 CFU · mL⁻¹。

1.3 生防菌对 *Pst* 夏孢子萌发抑制率测定

分别取 10 mL 稀释 0、10、100、1 000 倍的 Lw-6 发酵液(Lw-6 FL)置于无菌小皿内,以无菌水(sterile distilled water, SDW)为对照,称取 0.5 mg *Pst* 夏孢子均匀抖落在不同浓度 Lw-6 FL 上,在黑暗环境下 9 °C 培养 12 h 后,用光学显微镜观察 *Pst* 夏孢子的萌发情况,并根据公式(1)计算萌发抑制率,每个处理 3 皿,试验重复 3 次。

$$\text{萌发抑制率} = (\text{对照萌发率} - \text{处理萌发率}) / \text{对照萌发率} \times 100\% \quad (1)$$

1.4 生防菌与药剂的相容性测定

将 Lw-6 FL 分别接到含 0、25、50、100、150、200 mg · L⁻¹ 的 5 种供试化学药剂的 LB 液体培养基中,在恒温摇床上 28 °C、180 r · min⁻¹ 培养 24 h 后,利用紫外分光光度计测量 OD₆₀₀;将 OD₆₀₀ 较高的菌液梯度稀释 10⁴、10⁵、10⁶ 倍后,用平板计数法统计活菌数,并根据公式(2)计算相容性,确定与 Lw-6 相容性最好的化学药剂及浓度,每个处理设置 3 个重复,试验重复 3 次。

$$\text{相容性} = (\text{对照活菌数} - \text{处理组活菌数}) / \text{对照活菌数} \times 100\% \quad (2)$$

1.5 化学药剂最佳复配浓度的筛选

选择与菌株 Lw-6 相容性最好的化学药剂,

将不同浓度药剂与 Lw-6 FL 复配,以筛选出对小麦条锈病防治效果最佳的复配浓度。根据预试验结果,本试验设置处理如下:化学药剂和生防菌 Lw-6 FL 单独喷施;Lw-6 FL 分别与不同浓度梯度的化学药剂 1:1 复配,SDW 为对照。将小麦播种于 7 cm×7 cm×8 cm 的方形盆中,每个盆 9~10 粒种子,在 13 ℃、16 h 光照、20 ℃、8 h 黑暗环境下培养 8 d;按照设计用喷壶喷施 30 mL 不同处理液,24 h 后,称取 0.1 g *Pst* 夏孢子溶于 500 μL 电子氟化液制成 *Pst* 悬浮液,每片叶子利用移液枪接种 10 μL 悬浮液,14 d 后调查条锈病严重度(S),并根据公式(3)和(4)计算病情指数(DI)和防治效果(CE)。每个处理重复 3 盆,试验重复 3 次。

$$DI = \frac{\sum_{i=0}^n (X_i \cdot S_i)}{\sum_{i=0}^n (X_i \cdot S_{\max})} \times 100 \quad (3)$$

$$CE = (DI_{\text{对照}} - DI_{\text{处理}}) / DI_{\text{对照}} \times 100\% \quad (4)$$

其中,DI 为病情指数,CE 为防治效果, i 为病级数(0~ n), X_i 为 i 级的单元数, S_i 为 i 级严重度, S_{\max} 为最高严重度。

1.6 生防菌对小麦的促生效果测定

选取颗粒饱满、大小一致的小麦种子用 SDW 冲洗 60 s,在 1% 的次氯酸钠中浸泡 30 s 后,SDW 漂洗 3 次,晾干备用;将生防菌 Lw-6 的 FL(1.0×10^8 CFU·mL⁻¹) 分别稀释 10^2 、 10^3 和 10^4 后进行浸种,以 SDW 为对照。浸种 4 h 后,将种子腹沟朝下均匀放置于铺有湿润滤纸的培养皿(直径为 8.5 cm)中,每皿放置 20 粒种子,3 个重复。于 25 ℃ 黑暗条件下保湿培养,露白后移栽至 7 cm×7 cm×8 cm 花盆中,每盆 8 颗种子,移栽 48 h 后均匀浇灌 30 mL 对应浓度的菌液,于第 14 天和第 30 天后测量小麦幼苗株高、根长、鲜重、干重,每个处理 6 盆,每次测定 15 株。试验重复 3 次。

1.7 田间防治效果的测定

于 2022—2023 年在陕西省杨凌区西北农林科技大学曹新庄试验农场进行田间试验。试验采用随机区组设计,共设置七组处理:SDW(对照)、Lw-6 FL、Lw-6 FL + Di、Lw-6 粉剂(biocontrol powder, BP)、Lw-6 BP + Di、Di、综合防治(integrated control, IC),其中,Lw-6 BP 指用 Lw-6 菌剂与水配制成浓度 $6\,500$ mg·L⁻¹ 的菌液,IC 是指 20% 三唑酮乳油 $1\,000$ mg·L⁻¹ + 4.5% 的高效氯氰菊酯 750 mg·L⁻¹ + 98% 磷酸二氢钾 $3\,000$ mg·L⁻¹ 等比例混合均匀,分别于小麦扬花前期和灌浆期喷施。小区面积 5 m²,小麦

行距 20 cm,小区间距 30 cm,各处理重复 3 次。2022 年 10 月 20 日播种,按常规进行田间管理。根据病害流行预测预报,在小麦条锈病发病前,2023 年 4 月 18 日和 23 日分别对各小区按照设计喷施处理溶液 550 mL;次日,利用撒粉法将 *Pst* 夏孢子粉与滑石粉以 1:25 的比例混合均匀装入干燥试管中,试管口用双层纱布封口,敲击试管将夏孢子粉均匀抖落在小麦叶片上,每个小区混合菌粉用量为 5 g,接种前后用喷雾器在麦苗上喷水雾保湿。

为了明确生防菌与化学药剂复配对小麦条锈病的田间防治效果,在喷施处理后 7 d 和 14 d,采用五点取样法从各小区采集叶片,每个点 10 片,调查小麦条锈病的发病率和严重度。在小麦成熟期,每个小区随机采集 50 株小麦测穗粒数;按小区收获、脱粒,自然晒干后称重,计算单产;随机取 1 000 粒测千粒重。参照刘万才^[16]方法计算挽回产量、植保贡献率和最大损失率:

$$\text{挽回产量} = \text{不同防控处理产量} - \text{对照产量} \quad (5)$$

$$\text{植保贡献率} = (\text{综合防治产量} - \text{不同防控处理产量}) / \text{综合防治产量} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{最大损失率} = (\text{综合防治产量} - \text{对照产量}) / \text{综合防治产量} \times 100\% \quad (7)$$

1.8 数据处理与分析

使用 Excel 2021 统计试验数据,用 SPSS Statistics 20.0 进行数据差异显著性分析,用 GraphPad Prism 8 作图。

2 结果与分析

2.1 生防菌 Lw-6 对 *Pst* 夏孢子萌发的影响

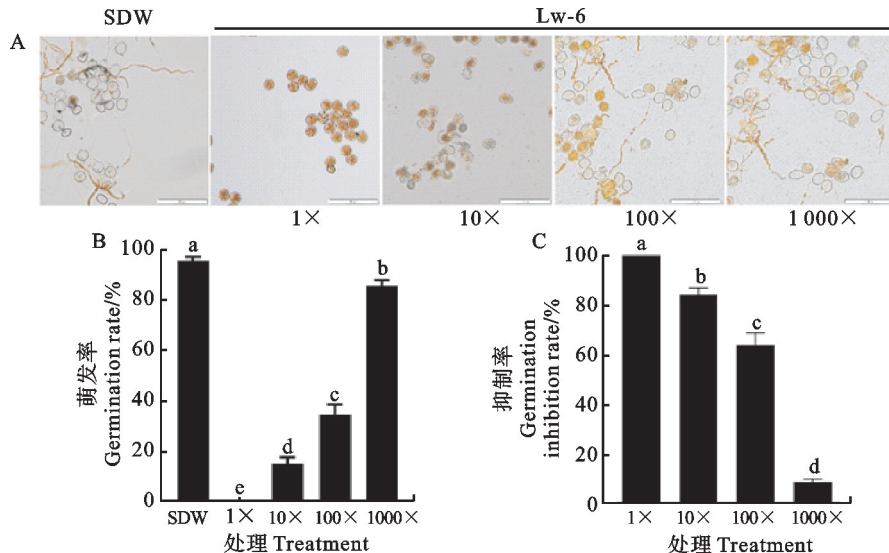
由图 1A 可知,*Pst* 夏孢子在含有 Lw-6 FL 的皿中萌发异常。与无菌水培养相比,Lw-6 FL 及其 10 倍、100 倍、1 000 倍稀释液培养的夏孢子萌发率均显著降低($P < 0.05$),*Pst* 夏孢子在 Lw-6 FL 中不萌发,Lw-6 FL 的 10 倍稀释液对 *Pst* 夏孢子萌发抑制率高达 84.13%(图 1B)。

2.2 生防菌 Lw-6 与不同药剂的相容性分析

试验结果(图 2)显示,Lw-6 菌液的 OD₆₀₀ 值随着各供试药剂施用浓度升高而显著降低($P < 0.05$),当 Tr 和 Pr 浓度为 200 mg·L⁻¹ 时,Lw-6 完全不生长;在 He、Fl、Di 的 5 种浓度中均可生长,其中当 Di 浓度为 50 mg·L⁻¹ 时,Lw-6 菌液的 OD₆₀₀ 值与对照无显著差异(图 2E)。对各药

剂 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理的菌落生长情况进行统计,结果显示,Lw-6 在 F1 中的活菌数显著低于其他处理,其相容性最低,在 Di 中活菌数最多。对照中 Lw-6 的活菌数为 $8.87 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$, $25 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ Di 处理的活菌数为

$8.20 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$,与生防菌的相容性达到 94.11%,较 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Di 与生防菌的相容性无显著差异;Lw-6 与 F1 的相容性最低,其中 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ F1 与 Lw-6 相容性仅为 15.85%(图 2F)。后续将使用 Di 与 Lw-6 进行复配试验。

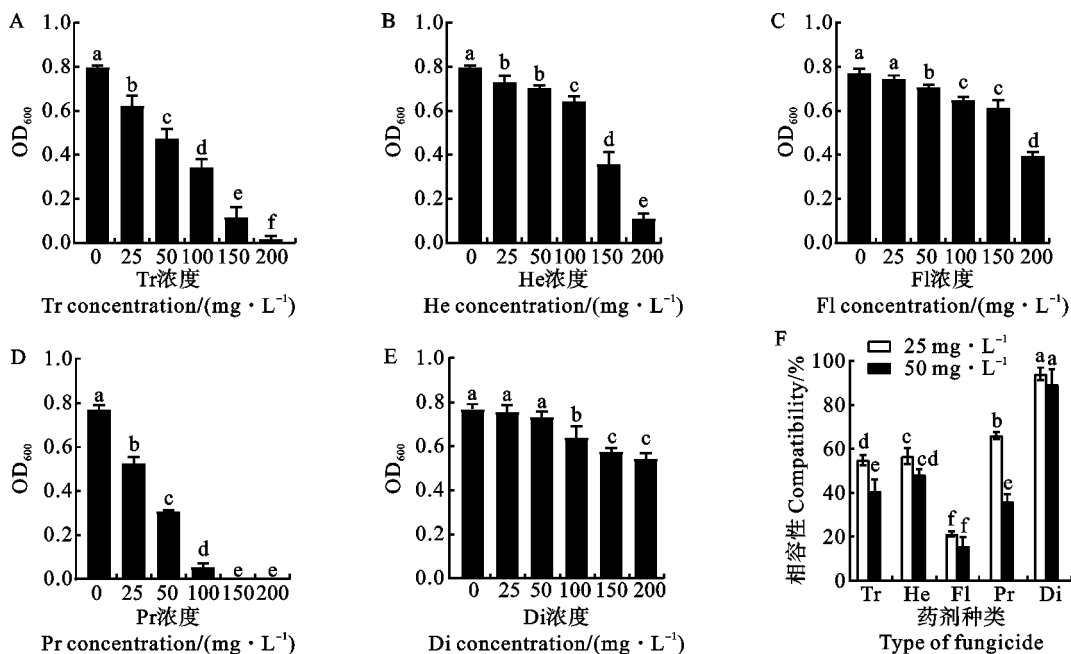


A: 光学显微镜下的 *Pst* 夏孢子的萌发状态, Bar = 100 μm ; B: *Pst* 夏孢子的萌发率; C: *Pst* 夏孢子的萌发抑制率。SDW: 无菌水; 1 \times : Lw-6 发酵液; 10 \times : Lw-6 发酵液 10 倍稀释液; 100 \times : Lw-6 发酵液 100 倍稀释液; 1 000 \times : Lw-6 发酵液 1 000 倍稀释液。图柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 误差棒表示标准差。下同。

A: Urediniospores status in each treatment under optical microscopy, Bar = 100 μm ; B: Germination rate of *Pst* urediniospores with different treatments. C: Inhibition rate of *Pst* urediniospore germination with different treatments. SDW: Sterile distilled water; 1 \times : Stock of Lw-6 FL; 10 \times : 10 times diluent of FL; 100 \times : 100 times diluent of Lw-6 FL; 1 000 \times : 1 000 times diluent of Lw-6 FL. Different letters above columns indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$); Error bars in the figure represents standard deviation. The same in table 2.

图 1 Lw-6 FL 对 *Pst* 夏孢子萌发的影响

Fig. 1 Effect of Lw-6 FL on the germination of *Pst* urediniospores



Tr: 三唑酮; He: 已唑醇; Fl: 粉唑醇; Pr: 丙环唑 Di: 烯唑醇。

Tr: Triadimefon; He: Hexaconazole; Fl: Flutriafol; Pr: Propiconazole; Di: Enazole.

图 2 供试化学药剂对 Lw-6 生长的影响

Fig. 2 Effects of tested chemicals on the growth of Lw-6

2.3 Lw-6 FL 与 Di 最佳复配浓度分析

根据 2.2 结果,设置 11 个处理:Di、Lw-6 FL 单独喷施,Lw-6 FL 分别与浓度为 1、2、4、8、16、32、64 和 128 mg · L⁻¹ 的 Di 按 1:1 复配,SDW 为对照。盆栽试验结果(图 3)显示,与对照相比,Di、Lw-6 及其复配处理的 *Pst* 夏孢子堆明显减少,128 mg · L⁻¹ Di 与 Lw-6 FL 复配处理的叶片上几乎看不到夏孢子堆。

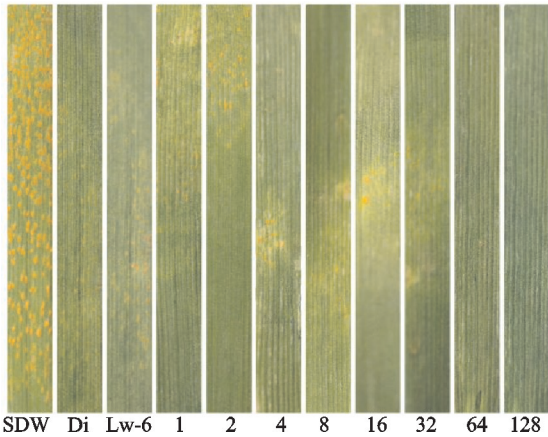


图 3 不同处理小麦叶片 *Pst* 侵染情况
1~128 指 1~128 mg · L⁻¹ Di 与 Lw-6 FL 按 1:1 复配。
1~128 refers to the 1:1 combination of 1 to 128 mg · L⁻¹ Di and Lw-6 fold liquid.

图 3 不同处理小麦叶片 *Pst* 侵染情况

Fig. 3 *Pst* infection in wheat leaves under different treatments

Lw-6 FL 及其与 Di 复配处理的小麦条锈病的病情指数均显著低于对照(表 1)。Lw-6 FL 处理的防效是 64.43%,128 mg · L⁻¹ Di 处理的防效为 73.89%,二者复配的防效为 92.78%,显著高于其他处理;64 mg · L⁻¹Di 与 Lw-6 FL 复配的防效为 81.96%,比 Lw-6 FL 单独处理防效高 28.35%,在降低杀菌剂用量 50%同时防效增加了 16.90%。

表 1 Lw-6 与 Di 复配对小麦条锈病的盆栽防效

Table1 Effect of Lw-6 combined with Di on wheat stripe rust in pot test

处理 Treatment	病情指数 Disease index	防效 Control efficacy/%
CK (SDW)	80.83±4.10a	—
128 Di	21.67±1.50c	73.89±1.36cd
LW-6 FL	28.75±1.91b	64.43±2.36e
LW-6 FL+1 Di	28.91±0.72b	64.26±0.89e
LW-6 FL+2 Di	25.83±1.10bc	68.56±1.03de
LW-6 FL+4 Di	22.50±1.25bc	71.65±0.31cd
LW-6 FL+8 Di	21.25±2.89c	73.71±0.63cd
LW-6 FL+16 Di	21.83±1.10c	73.51±1.54cd
LW-6 FL+32 Di	19.58±1.01cd	75.77±1.36c
LW-6 FL+64 Di	14.58±0.83d	81.96±1.03b
LW-6 FL+128 Di	5.83±0.42e	92.78±0.51a

1~128 Di 指 1~128 mg · L⁻¹ Di;表中数据为平均值±标准误差;同列数据后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。表 3~表 5 同。

1-128 Di refers 1 to 128 mg · L⁻¹ Di; data are mean value ± standard error; Different letters following data in same column represent significant difference among treatments (P < 0.05). The same in tables 3-5.

后续使用 128 mg · L⁻¹Di 与 Lw-6 FL 复配进行大田试验。

2.4 生防菌 Lw-6 对小麦幼苗生长的影响

由表 2 可知,Lw-6 FL 的不同浓度稀释液均可以不同程度地促进小麦幼苗生长;相较于对照,播种后 14 d 和 30 d,Lw-6 FL 的 100 和 1 000 倍稀释液处理组的株高、根长、鲜重、干重均显著提高(P<0.05),其中 1 000 倍稀释液处理的促生效果最佳。综上,一定浓度的 Lw-6 对小麦幼苗具有较好的促生作用。

表 2 Lw-6 对小麦幼苗形态指标的影响

Table 2 Effects of Lw-6 on morphological indices of wheat seedlings

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	鲜重 Fresh weight/g	干重 Dry weight/g	
14 d	SDW	25.54±0.37d	8.19±0.68b	0.33±0.02c	0.03±0.01b
	100×	29.32±0.40c	11.31±0.50a	0.41±0.02a	0.04±0.01a
	1 000×	35.36±0.31a	12.01±0.14a	0.38±0.01ab	0.04±0.00a
	10 000×	27.29±0.32b	11.01±0.24a	0.36±0.02bc	0.03±0.00b
30 d	SDW	38.05±0.86d	11.55±0.50d	0.71±0.05d	0.06±0.00c
	100×	46.16±0.18b	15.78±0.33b	0.97±0.02b	0.09±0.00b
	1 000×	48.10±0.92a	18.06±0.50a	1.08±0.06a	0.12±0.00a
	10 000×	39.21±0.87c	13.47±0.35c	0.87±0.04c	0.06±0.00c

相同时间同列数据后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Different letters following data within same stage and column represent significant differences among treatments(P<0.05).

2.5 大田防治效果分析

为明确生防菌与化学药剂复配在田间的施用效果,分别将 Lw-6 FL 和 Lw-6 BP 与药剂 Di 进行复配后喷施,结果(图 4)显示,对照组小麦叶部褪绿枯死严重,其余各个处理均可以减轻该发病症状,其中 Lw-6 BP 与 Di 复配处理下症状最轻,叶部仅见少量枯死斑。

Lw-6 FL 和 Lw-6 BP 处理的防效相当,在喷施处理后 7 d 和 14 d 均能显著降低小麦条锈病的病情指数(表 3),Lw-6 BP 与 Di 复配的病情指数较对照降低了 49.67。Lw-6 BP 单独处理田间防效为 60.16%~66.80%;Lw-6 BP 与 Di 复配田间防效为 79.91%~89.36%,高于 Di 单独防效(71.52%~72.46%)。

2.6 生防菌与化学药剂复配对小麦产量构成的影响

由大田产量测定结果(表 4)可以看出,与对照相比,各个 Lw-6 与 Di 复配处理小麦千粒重、水上区产量显著提高($P < 0.05$),穗粒数均不同程度提高。生防菌与化学药剂复配处理下小区产量均显著高于二者单独处理的产量。

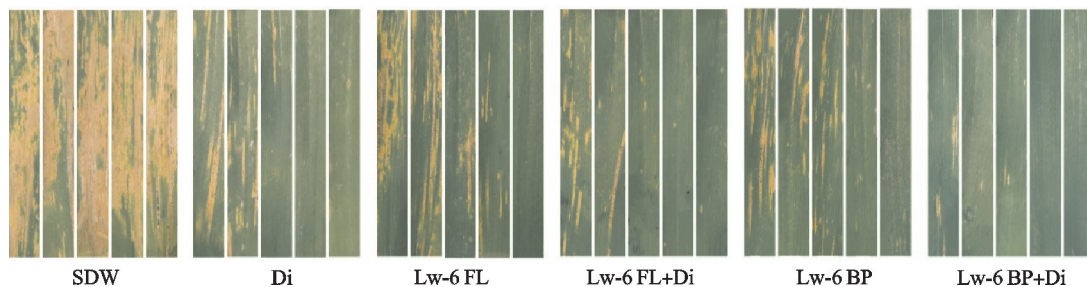
2.7 生防菌与化学药剂复配的植保贡献率分析

分析不同处理对小麦条锈病防控的植保贡献

率结果(表 5)显示,与 CK 相比,各处理的产量均显著提高($P < 0.05$);生防菌与化学药剂复配处理的产量分别为 $6\,291.70\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6\,509.71\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,均显著高于二者单独施用。CK 的产量损失率达 33.60%,其余各处理的产量损失率显著降低,其中 Lw-6 BP+Di 复配的产量损失率最低(8.63%),挽回产量最高,植保贡献率达 24.97%。生防菌与化学药剂复配防控小麦条锈病的植保贡献率为 21.89%、24.98%,显著高于二者单独使用。

3 讨论

小麦条锈病是 21 世纪全球小麦生产生物制约因素之一,由于其发生频率高、范围广、损失重、难防治,给中国粮食安全和农业生产带来巨大威胁^[17]。夏孢子是条锈菌主要为害型态,能够在 一个侵染季节内多次侵染小麦^[18]。因此,几乎所有相关研究均集中于夏孢子及其侵染结构^[19]。目前,已经有多位学者将夏孢子作为靶标菌来筛选小麦条锈菌的拮抗微生物^[20]。本研究亦将其作为靶标菌,以夏孢子萌发抑制率为指标,筛选出小麦条锈菌的拮抗菌。



FL: 发酵液;BP: 粉剂。表 3~表 5 同。

FL: Fermentation liquid; BP: Biocontrol powder. The same in table 3—5.

图 4 不同处理后田间叶片发病情况

Fig. 4 Leaf disease in the field after different treatments

表 3 不同处理对小麦条锈病田间防效

Table 3 Effect of different treatments on wheat stripe rust in field trail

处理 Treatment	第二次处理 7 d 7 days after the second treatment		第二次处理 14 d 14 days after the second treatment	
	病情指数 Disease index	防效 Control efficacy/%	病情指数 Disease index	防效 Control efficacy/%
SDW	16.30±1.77a	—	55.60±1.63a	—
Lw-6 FL	7.87±0.51b	51.48±1.98d	22.01±1.94b	60.33±4.17c
Lw-6 FL+Di	3.51±0.40c	78.11±3.97a	7.63±0.72d	86.22±1.70a
Lw-6 BP	6.49±0.65b	60.16±0.59c	18.49±1.62bc	66.80±2.18bc
Lw-6 BP+Di	3.27±0.37c	79.91±1.73a	5.93±1.11d	89.36±1.77a
Di	4.58±0.12c	71.52±3.51b	15.33±2.96c	72.46±5.13a

表 4 不同处理对小麦产量的影响

Table 4 Effects of different treatments on wheat yield

处理 Treatment	千粒重 1 000-grain weight/g	穗粒数 Grains per spike	小区产量 Yield per plot/kg
SDW	35.01±0.38f	31.67±0.94c	2.36±0.01f
Lw-6 FL	37.38±0.16e	33.33±0.47bc	2.67±0.03e
Lw-6 FL+Di	42.10±0.15b	34.67±0.47ab	3.14±0.05c
Lw-6 BP	38.15±0.16d	33.67±0.82bc	2.64±0.03e
Lw-6 BP+Di	42.72±0.55b	35.33±0.47ab	3.25±0.08b
Di	39.51±0.18c	34.00±0.47ab	3.01±0.01d
IC	46.43±0.64a	35.67±0.47a	3.56±0.03a

IC:综合防治。

IC: Integrated control.

表 5 不同处理防控小麦条锈病的植保贡献率

Table 5 Contribution rate of plant protection to control wheat stripe rust under different treatments

处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	挽回产量 Yield recovered/ (kg·hm ⁻²)	植保贡献率 Plant protection contribution rate/%	产量损失率 Yield loss rate/%
SDW	4 731.05±26.5f	—	—	33.60±0.85a
Lw-6 FL	5 350.10±51.68e	619.05±62.18e	8.69±0.93e	24.91±1.16b
Lw-6 FL+Di	6 291.70±99.41c	1 560.65±89.47c	21.89±1.08c	11.70±1.44d
Lw-6 BP	5 283.65±62.69e	552.60±36.88e	7.76±0.53e	25.84±1.42b
Lw-6 BP+Di	6 509.71±159.27b	1 778.65±170.85b	24.98±2.58b	8.63±2.58d
Di	6 020.43±29.54d	1 289.35±53.83d	18.10±0.83d	15.51±0.68c
IC	7 125.65±57.07a	2 394.60±67.02a	33.61±1.19a	—

芽胞杆菌属(*Bacillus* spp.)生防菌可通过分泌蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶等多种水解酶来抑制病原菌生长,并且由于其易定殖和产芽胞的特性,已被广泛用于防治植物病害^[21-25]。甲基营养型芽胞杆菌在大田条件下对番茄灰霉病和烟草灰霉病等真菌病害具有明显的防效和促进植物生长作用^[26-27]。本研究发现,该属的细菌 Lw-6 对小麦条锈病具有较好的盆栽和大田防效以及促生效果,在生产实践中有很大的应用潜力。

研究表明,生防菌在防治植物易感品种病害方面效果显著,但对中抗及以上品种的防效欠佳,且在田间环境下单独施用难以稳定有效地防治植物病害^[28]。本研究通过相容性试验,筛选出了一种既能有效防治病害又不影响生防菌 Lw-6 正常生长的化学药剂—烯唑醇(Di),并发现低剂量 Di 与生防菌 Lw-6 复配对小麦条锈病的防效显著提高。作为一种三唑类广谱内吸性杀菌剂,Di 已被多个研究证实对小麦条锈病具有良好的田间防治

效果^[29-31]。在生产实践中,2 800 mg·L⁻¹ Di 的防效为 80.69%^[32],而在本研究中,128 mg·L⁻¹ 的 Di 与生防菌 Lw-6 复配的田间防效为 89.36%,不仅减少了化学药剂的施用量,且提高了病害的防治效率。

对于生防菌与化学药剂复配的研究已有较多报道。Ji 等^[33]研究发现,氟醚菌酰胺能促进甲基营养型杆菌 TA-1 在植物表面形成生物膜,帮助生防菌定殖,还能促使番茄植株产生促进 TA-1 存活物质,提高了生防菌防治的稳定性。解淀粉芽胞杆菌 JCK-12 通过增加禾谷镰刀菌细胞膜的通透性,增加病原菌对杀菌剂的敏感度^[34]。烯唑醇通过在真菌的麦角甾醇生物合成中抑制 14 α-脱甲基化作用,对真菌细胞膜起作用,从而起到杀菌作用^[35]。本研究中,128 mg·L⁻¹ 烯唑醇不影响芽胞杆菌的正常生长,表明其对 Lw-6 活性的影响不大,二者复配的增效机制有待进一步研究。

综上,甲基营养型芽胞杆菌 Lw-6 能有效抑制 *Pst* 夏孢子萌发, Lw-6 与 Di 具有较好的相容性,二者复配具有协同作用,能有效降低盆栽和田间小麦条锈病的病情指数;6 500 mg · L⁻¹ 的 Lw-6 粉剂与 128 mg · L⁻¹ Di 复配的田间防效高达 89.36%,与单独使用 Di 相比,降低用药量的同时增加了防效,在生产实践中具有极大应用潜力,可用于小麦条锈病的绿色防治。

参考文献:

- [1] CHAVES M S, MARTINELLI J A, WESP-GUTERRES C, et al. The importance for food security of maintaining rust resistance in wheat [J]. *Food Security*, 2013, 5(2): 157.
- [2] GANGWAR O P, BHARDWAJ S C, KUMAR S, et al. Overcoming stripe rust of wheat: A threat to food security. In management of wheat and barley diseases [J]. *Apple Academic Press*, 2017: 115.
- [3] SCHWESSINGER B. Fundamental wheat stripe rust research in the 21st century [J]. *New Phytologist*, 2017, 213(4): 1625.
- [4] BADAR R, AHMED A, BATOOL S, et al. *Puccinia tritici*-na: Wheat stripe(yellow) rust pathogen: A review [J]. *Pakistan Journal of Phytopathology*, 2023, 35(2): 473.
- [5] WELLINGS C R. Global status of stripe rust: A review of historical and current threats [J]. *Euphytica*, 2011, 179(1): 129.
- [6] BEDDOW J M, PARDEY P G, CHAI Y, et al. Research investment implications of shifts in the global geography of wheat stripe rust [J]. *Nature Plants*, 2015, 1(10): 1.
- [7] CHEN X M. Epidemiology and control of stripe rust *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* on wheat [J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2005, 27(3): 314.
- [8] 刘万才, 王保通, 赵中华, 等. 我国小麦条锈病历次大流行的历史回顾与对策建议[J]. 中国植保导刊, 2022, 42(6): 21.
- LIU W C, WANG B T, ZHAO Z H, et al. Historical review and countermeasures of wheat stripe rust epidemics in China [J]. *China Plant Protection*, 2022, 42(6): 21.
- [9] ZHANG F, ZHU Z, YANG X, et al. *Trichoderma harzianum* T-E5 significantly affects cucumber root exudates and fungal community in the cucumber rhizosphere [J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 72: 41.
- [10] KIM T G, KNUDSEN G R. Relationship between the biocontrol fungus *Trichoderma harzianum* and the phytopathogenic fungus *Fusarium solani* f. sp. *pisi* [J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 68: 57.
- [11] 谷春艳, 苏贤岩, 杨雪, 等. 解淀粉芽胞杆菌 WH1G 与咪鲜胺协同防治草莓炭疽病[J]. 植物保护, 2018, 44(2): 184.
- GU C Y, SU X Y, YANG X, et al. Synergistic effect of antagonistic bacteria WH1G and prochloraz against strawberry anthracnose [J]. *Plant Protection*, 2018, 44(2): 184.
- [12] 毕秋艳, 韩秀英, 马志强, 等. 枯草芽胞杆菌 HMB-20428 与化学药剂互作对葡萄霜霉病菌抑制作用和替代部分化学药剂减量用药应用[J]. 植物保护学报, 2018, 45(6): 1396.
- BI Q Y, HAN X Y, MA Z Q, et al. Inhibitory effects of *Bacillus subtilis* HMB-20428 interacted with chemical fungicides and decrement of chemical fungicides on oomycete pathogen *Plasmopara viticola* [J]. *Journal of Plant Protection*, 2018, 42(6): 1396.
- [13] KRISHNAMOORTHY K, SANKARALINGAM A, NAKKEERAN S. Management of head rot of cabbage caused by *Sclerotinia sclerotiorum* through combined application of fungicides and biocontrol *Bacillus amyloliquefaciens* [J]. *International Journal of Chemical Studies*, 2017, 5: 401.
- [14] 谢立, 贺春萍, 梁艳琼, 等. 枯草芽胞杆菌 Czk1 与化学药剂协同防治橡胶树根病[J]. 热带作物学报, 2020, 41(8): 1625.
- XIE L, HE C P, LIANG Y Q, et al. Synergistic effect of fungicides and *Bacillus subtilis* Czk1 against rubber root diseases [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(8): 1625.
- [15] SILVA H S A, ROMEIRO R S, CARRER FILHO R, et al. Induction of systemic resistance by *Bacillus cereus* against tomato foliar diseases under field conditions [J]. *Journal of Phytopathology*, 2004, 152(6): 371.
- [16] 刘万才. 试论植物保护贡献率的测算方法[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(8): 5.
- LIU W C. Discussion of the evaluation of plant protection contribution rate [J]. *China Plant Protection*, 2021, 41(8): 5.
- [17] SCHWESSINGER B. Fundamental wheat stripe rust research in the 21st century [J]. *New Phytol*, 2017, 213: 1625.
- [18] JIAO M, TAN C, WANG L, et al. Basidiospores of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* succeed to infect barberry, while urediniospores are blocked by non-host resistance [J]. *Protospasma*, 2017, 254(6): 2237.
- [19] CHEN X. Integration of cultivar resistance and fungicide application for control of wheat stripe rust [J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2014, 36(3): 311.
- [20] LI H, ZHAO J, FENG H, et al. Biological control of wheat stripe rust by an endophytic *Bacillus subtilis* strain E1R-j in greenhouse and field trials [J]. *Crop Protection*, 2013, 43: 201.
- [21] 王蕊, 王腾, 李二峰. 生防芽胞杆菌在植物病害领域的研究进展[J]. 天津农学院学报, 2021, 28(4): 71.
- WANG R, WANG T, LI E F. Research advances of biocontrol *Bacillus* in the field of plant diseases [J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2021, 28(4): 71.
- [22] KULKOVA I, DOBRZYŃSKI J, KOWALCZYK P, et al. Plant growth promotion using *Bacillus cereus* [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(11): 9759.
- [23] ZHANG N, WANG Z, SHAO J, et al. Biocontrol mechanisms of *Bacillus*: Improving the efficiency of green agriculture [J]. *Microbial Biotechnology*, 2023, 16(12): 2250.
- [24] LABIADH M, DHAOUADI S, CHOLLET M, et al. Anti-

- fungal lipopeptides from *Bacillus* strains isolated from rhizosphere of *Citrus* trees [J]. *Rhizosphere*, 2021, 19: 100399.
- [25] SONI R, KEHARIA H. Phytostimulation and biocontrol potential of gram-positive endospore-forming bacilli [J]. *Planta*, 2021, 254(3): 49.
- [26] 邱珂. 甲基营养型芽胞杆菌 Lw-6 防治灰霉病研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- QIU K. Study of *Bacillus methylotrophilus* Lw-6 against *Botrytis cinerea* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [27] 皮娜娜, 王玺茜, 罗建军, 等. 贝莱斯芽胞杆菌防控植物病害的研究进展[J]. 广东农业科学, 2024, 51(6): 48.
- PI N N, WANG X Q, LUO J J, *et al.* Research progress on the prevention and control of plant diseases by *Bacillus velezensis* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2024, 51(6): 48.
- [28] JOCHUM C C, OSBORNE L E, YUEN G Y. Fusarium head blight biological control with *Lysobacter enzymogenes* strain C3 [J]. *Biological Control*, 2006, 39: 336.
- [29] BARRO J P, FORTE C T, TRENTIN D, *et al.* Effectiveness of different fungicide formulations and number of applications in controlling wheat leaf rust [J]. *Summa Phytopathologica*, 2017, 43(4): 276.
- [30] BASANDRA K, SHARMA B K, BASANDRAI D. Efficacy of triazole fungicides for the integrated management of yellow rust, leaf rust and powdery mildew of wheat [J]. *Plant Disease Research*, 2013, 28(2): 135.
- [31] WANYERA R, MACHARIA J K, KILONZO S M, *et al.* Foliar fungicides to control wheat stem rust, race TTKS (Ug99), in Kenya [J]. *Plant Disease*, 2009, 93(9): 929.
- [32] 郑雪梅, 兰香珊, 张国升, 等. 5种药剂对小麦条锈病的防效[J]. 农技服务, 2024, 41(5): 47.
- ZHENG X M, LAN X H, ZHANG G S, *et al.* The control efficacy of five kinds of pesticides on wheat stripe rust [J]. *Agricultural Technology Service*, 2024, 41(5): 47.
- [33] JI X, LI J, MENG Z, *et al.* Synergistic effect of combined application of a new fungicide fluopimomide with a biocontrol agent *Bacillus methylotrophicus* TA-1 for management of gray mold in tomato [J]. *Plant Disease*, 2019, 103(8): 1991.
- [34] KIM K, LEE Y, HA A, *et al.* Chemosensitization of *Fusarium graminearum* to chemical fungicides using cyclic lipopeptides produced by *Bacillus amyloliquefaciens* strain JCK-12 [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 2010.
- [35] 杨森. 三唑类杀菌剂作用机理和残留检测技术分析研究[J]. 农药科学与管理, 2020, 41(6): 6.
- YANG S. Analysis and research on the mechanism of action and residue detection technology of triazole fungicides [J]. *Pesticide Science and Administration*, 2020, 41(6): 6.