

谷子白发病发病规律及其经济阈值研究

李新畅¹, 郑然¹, 石爱丽^{1,2}, 苗向露², 张杰³, 李平³, 李海燕¹

(1. 承德市农林科学院, 河北承德 067000; 2. 丰宁满族自治县黄旗皇农业发展有限公司, 河北丰宁 068350;
3. 承德市农业技术推广站, 河北承德 067000)

摘要: 本研究采用田间定点定期系统调查方法, 追踪白发病的发病进程及其气候影响因素。通过人工接菌和在不同叶龄阶段施药措施, 评估白发病病情指数与产量损失率之间的关联性, 据此制定病害防治的经济阈值。研究结果显示, 在3~5叶期使用化学药剂喷施对白发病防治效果尤为显著, 与其余叶期相比能显著提高谷子产量。影响白发病严重程度的关键因素包括日间平均地温、夜间相对湿度和初始病害发生率, 其中白发病严重程度随温度升高而加剧。此外, 随着谷子植株生育期推进, 病情指数呈逐步上升趋势。逻辑斯蒂函数 $y = 58.52 / (1 + \exp(-0.085x + 1.69))$ 能最优拟合病情指数 x 与产量损失率 y 之间的关系。经分析, 谷子白发病的经济阈值对应的病情指数范围是 1.02~1.34。本研究首次提出谷子白发病的经济阈值, 明确了防治关键时期, 为河北春播区谷子白发病精准防控提供了理论依据。

关键词: 谷子白发病; 发病规律; 产量; 经济阈值

中图分类号: S515 **文献标识码:** A **文章编号:** 0488-5368(2026)04-0094-07

Epidemic Regularity and Economic Thresholds of Millet Downy Mildew

LI Xinchang¹, ZHENG Ran¹, SHI Aili^{1,2}, MIAO Xianglu², ZHANG Jie³,
LI Ping³, LI Haiyan¹

(1. Chengde Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Chengde, Hebei 067000, China;

2. Fengning Manchu Autonomous County Huangqihuang Agricultural Development Co., Ltd., Fengning, Hebei 068350, China;

3. Chengde Agricultural Technology Extension Station, Chengde, Hebei 067000, China)

Abstract: This study investigated the epidemiological characteristics of millet downy mildew in northern Hebei, as well as its effects on economic injury levels, economic thresholds, and millet yield. Disease development and the climatic factors influencing its occurrence were examined through fixed-point surveys conducted at regular intervals. Artificial inoculation and pesticide application at different leaf stages were carried out to evaluate the relationship between disease severity index and yield loss, and to establish the economic threshold for disease control. The results showed that chemical pesticide application during the 3-5-leaf stage was particularly effective in controlling millet downy mildew, resulting in higher yields than applications at other growth stages. The key factors affecting the disease severity index were average daytime soil temperature, nighttime relative humidity, and initial disease incidence, and the disease severity index increased as temperature rose. In addition, the disease severity index increased progressively with the advancement of millet growth stages. The logistic function $y = 58.52 / [1 + \exp(0.085x + 1.69)]$ provided the best fit for describing the relationship between disease severity index (x) and yield loss rate (y). The economic threshold for millet downy mildew is 1.02 to 1.34 in terms

收稿日期: 2025-04-25 修回日期: 2025-06-18

基金项目: 承德市科技计划项目“谷子白发病生防菌筛选及绿色防控技术集成与示范”(202305B053); 承德市科技计划项目“5种杂粮病虫害普查及典型病虫害绿色防控技术研究与示范”(202305B048)。

第一作者简介: 李新畅(1995-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事谷子病虫害绿色防控技术研究工作。

通信作者: 李海燕。

of disease severity index. This study proposes, for the first time, an economic threshold for millet downy mildew, clarifies the critical period for its prevention and control, and provides a theoretical basis for precise disease management in spring-sowing areas of Hebei Province.

Key words: Millet downy mildew; Epidemic regularity; Yield; Economic threshold

河北是我国谷子主产区之一,由禾生指梗霉(*Sclerospora graminicola*)引起的谷子白发病,是春播区谷子主要病害之一,发生严重地块可导致谷子减产40%以上^[1,2]。*S. Graminicola* 侵染谷子幼嫩胚芽鞘区域或根部表现“芽腐”,苗期侵染叶片表现为“灰背”,侵染穗部表现为“白发”或“刺猬头”^[3,4]。关于谷子白发病的研究多集中于白发病防治措施^[5,6]、白发病菌致病力研究^[7,8]、抗白发病基因挖掘^[9]。仅李瑞等^[10]研究早期降雨量和地温对白发病的影响。但白发病发生流行时环境因子在其中发挥的作用尚未明确。白发病的防治措施多集中于抗病品种筛选^[11]、轮作倒茬^[12]、适期播种^[13]和药剂拌种等^[14],前人筛选多种杀菌剂均效果不理想^[15],市场稀缺白发病防效较好的叶面喷雾杀菌剂。

植物病害经济阈值是为控制病害并将病情指数维持在经济阈值以下,提出了阈值策略的管理方法,最小的成本获取最大防治效益,当病情指数达到阈值应采取控制措施^[16,17]。陈泰祥等^[18]研究了黄芩霜霉病的防治经济阈值;金小靖等^[19]明确条锈病对不同抗性品种的经济阈值;吕国强等^[20]研究了在自然条件下条锈病病情指数与小麦产量损失的关系和经济阈值;王澍等^[21]研究3种不同抗感性小麦品种在人工接菌条件下秆锈病的产量损失模型和防治指标;代玉立等^[22]采用逐步分析法建立了鲜食玉米的玉米大斑病经济阈值,并制定抗性品种分类的标准。相关植物病害经济阈值制定有大量的研究基础,当前谷子白发病的经济阈值制定处于空白。

本研究系统调查河北春播区谷子白发病的田间发生动态,总结发生消长规律,描述环境因子对白发病的影响;探究精甲霜灵种衣剂在谷子苗期喷

施的防治效果,明确防治关键时期;拟合病情指数和产量损失率的最佳模型,明确谷子白发病合理防控的经济阈值,为谷子白发病田间预报预测和防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试品种 冀谷 38,由河北省农林科学院谷子所提供,感病品种;

供试病原菌 由承德市农林科学院农业生态研究所提供;

供试药剂 350 g/L 精甲霜灵种衣剂(金阿普隆),购买于先正达农作物保护股份有限公司;

供试仪器 S21AN 远程温湿度记录仪,购买于徐州法拉电子科技有限公司。

1.2 田间试验

1.2.1 小区设计 试验于2024年5月在河北省隆化县承德市农林科学院科创基地实验田进行。种植30个小区,试验处理小区为4行区,行距0.45 m,行长5 m,每行种子量1 g,采用人工撒播方式,其余田间管理同常规。

1.2.2 试验设计 播种前一天将卵孢子与湿润过筛细土按1:10比例混合,将种子与菌土按照1:10比例装入种子袋,混匀,播种。设置7组药剂处理(每处理喷施精甲霜灵种衣剂1000倍液1次)和3组对照为田间自然处理(CK1):模拟白发病自然病情发生、田间接菌处理(CK2):接菌处理模拟白发病自然发病条件、药剂包衣处理(CK3精甲霜灵:种子比3:1000):模拟谷子生产上白发病防治措施,每处理3次重复。试验布置如图1。

| 药剂喷雾处理 | | | | | | | 对照 | | |
|--|--|--|--|--|---|--|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 处理 1 种子处 理:接菌 喷药时 期: 1 叶期 | 处理 2 种子处 理:接菌 喷药时 期: 3 叶期 | 处理 3 种子处 理:接菌 喷药时 期: 5 叶期 | 处理 4 种子处 理:接菌 喷药时 期: 7 叶期 | 处理 5 种子处 理:接菌 喷药时 期: 9 叶期 | 处理 6 种子处 理:接菌 喷药时 期: 11 叶期 | 处理 7 种子处 理:接菌 喷药时 期: 拔 节期 | 田间自 然处 理 CK1 种子处 理:无 | 田间接 菌处 理 CK2 种子处 理:接菌 | 药剂包衣处 理 CK3 种子处理:包 衣、不接菌 |

图1 谷子苗期精甲霜灵种衣剂喷雾布置图

1.3 田间调查

1.3.1 防治效果调查 在谷子成熟前期调查各处理发病情况,按 1.5 公式(1)计算防效。

1.3.2 发生规律调查 2024 年 6 月 4 日开始调查,每 7 天调查 1 次,调查小区内全部植株,直到谷子成熟前期停止调查。依据 1.5 病害分级标准,确定病级并按 1.5 公式(2)和(3)计算病情指数和发病率。使用 S21AN 远程温湿度记录仪,每 5 分钟记录 1 次田间土壤小气候温湿度数据。

1.3.3 产量损失率调查 各试验小区全部收获进行测产,最后折算亩产。以 CK 3 为对照,按 1.5 公式(4)计算产量损失率。

1.4 经济危害允许水平和防治经济阈值计算

使用两种方法制定谷子白发病经济阈值。参考陈泰祥等^[18]使用的 Ruesink 模型计算经济危害允许水平和经济阈值;参考金小靖等^[23]使用的丁岩钦模型制定经济阈值。

1.5 调查统计方法

参照本试验室制定的病害分级标准,记录发病叶片(株)数量及情况。1 级:全株叶片病斑占叶面积 < 5%,能完全抽穗,在成熟时田间“白发”或“刺猬头”病株率 0%~1.0%。3 级:全株叶片病斑占叶面积 5.1%~10%的病斑,或抽穗期受到一定影响,在成熟时田间“白发”或“刺猬头”病株率 1.1%~3%。5 级:全株叶片病斑占叶面积 10.1%~25%,或抽穗期受到一定影响,在成熟时田间“白发”或“刺猬头”病株率 3.1%~5.0%。7 级:全株叶片病斑占叶面积 5.1%~50%,或抽穗期受到一定影响,在成熟时田间“白发”或“刺猬头”病株率

5.1%~10.0%。9 级:全株叶片病斑占叶面积 50.1%以上,或抽穗期受到一定影响,田间“白发”或“刺猬头”病株率 10.1%以上。

获得数据采用 Excel 2013 和 SPSS 25.0 软件进行病情指数与湿温度、产量损失率相关性等回归分析。采用 Duncan 氏新复极差法比较不同处理间差异显著性。

防治效果(%)=(对照组发病率-处理组发病率)/对照组发病率×100 (1)

病情指数=Σ[各级病株(病叶)×病级数]/调查总数×最高级数×100 (2)

发病率(%)=发病株数/调查总株数×100 (3)

产量损失率(%)=(对照组产量-处理组产量)/对照组产量×100 (4)

2 结果与分析

2.1 谷子苗期不同阶段施药对谷子白发病的影响

从图 2 看出谷子不同叶龄和拔节期的白发病发病率均显著低于 CK 1 和 CK 2 ($F=18.053, P=0.001$), 3 叶龄和 5 叶龄发病率最低分别为 1.43% 和 1.40%。谷子白发病发病率随谷苗生长呈增加-降低-增加的趋势。从表 1 看出,在谷子苗期不同叶龄和拔节期施药均有一定防效。施药处理同田间自然处理 CK1 差异显著 ($F=3.89, P=0.02$), 与田间接菌处理 CK 2 差异显著 ($F=3.84, P=0.021$)。其中 3 叶期和 5 叶期对白发病防治效果显著,用药 1 次后防效达 95% 以上,与其他生育阶段喷药差异显著。除 1 叶期、7 叶期和拔节期外,其余叶期防效均在 80% 以上。

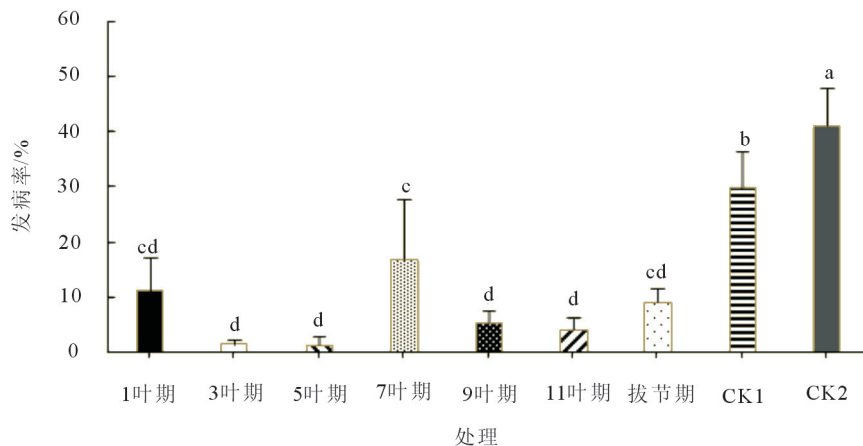


图 2 谷子不同处理的白发病发病率

注:图中数据为平均数±标准差,不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

表1 冀谷38施药后防治效果

| 施药阶段 | 防治效果/% | |
|------|---------------|----------------|
| | 同CK1对比 | 同CK2对比 |
| 1叶期 | 58.39±19.31bc | 71.22±20.17abc |
| 3叶期 | 95.52±1.32a | 96.57±2.17a |
| 5叶期 | 95.81±2.57a | 96.64±3.81a |
| 7叶期 | 42.01±20.89c | 56.64±29.67c |
| 9叶期 | 80.23±7.08ab | 86.01±7.32ab |
| 11叶期 | 86.32±5.56ab | 89.68±5.60ab |
| 拔节期 | 67.38±8.35abc | 76.51±9.03abc |

注:表中数据为平均数±标准差,同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

2.2 谷子白发病田间发生消长动态

5月18日到9月10日试验地土壤小气候夜

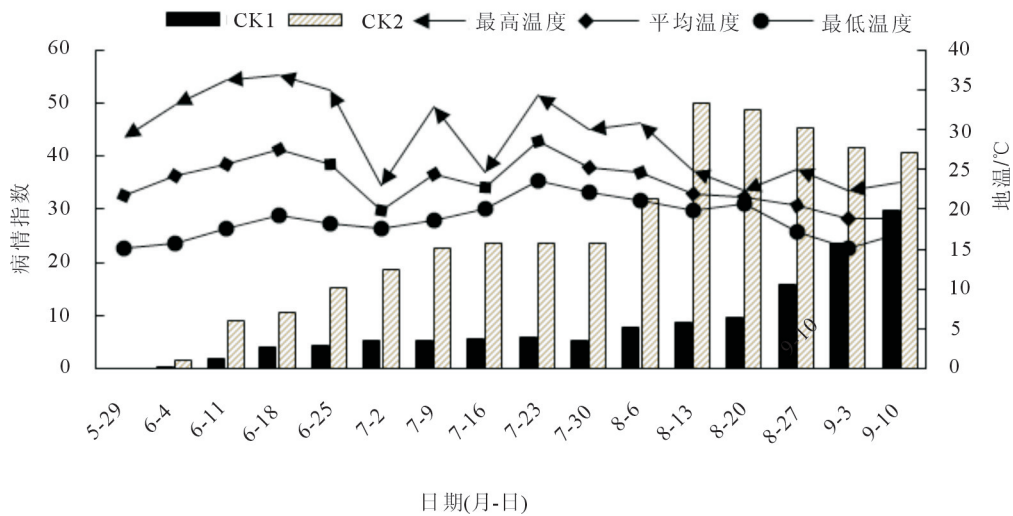


图3 土壤温度与白发病流行的关系

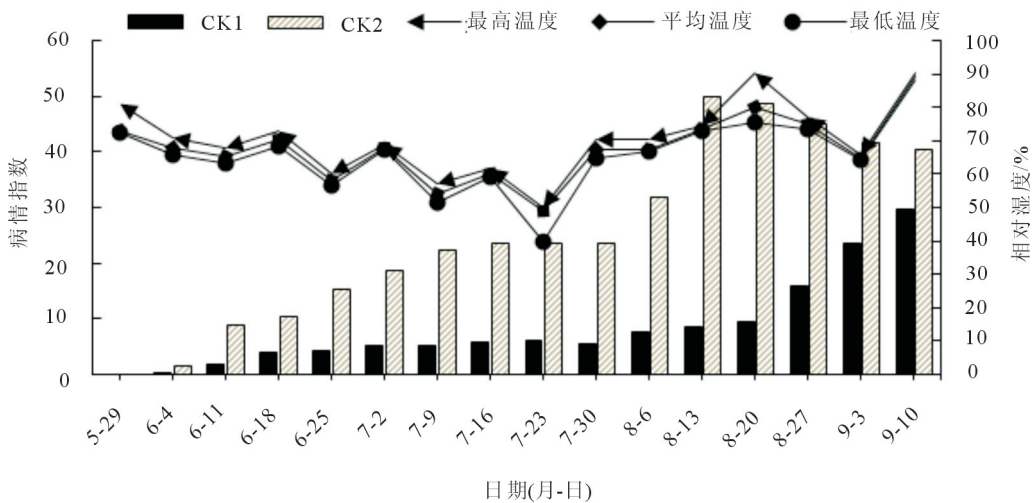


图4 土壤相对湿度与白发病流行的关系

间平均相对湿度在52.36%~90.04%之间,平均74.74%;夜间平均相对湿度在80%以上的有66d,占56.89%。日间平均地温在14.66℃~31.89℃之间,平均26.04℃,夜间平均地温20.89℃。6月4日到9月10日地温都可满足白发病菌萌发,并且田间湿度相对较高,有利于白发病菌的萌发和侵染。在7月16日谷子进入孕穗期CK1和CK2发病率和病情指数增长迅速,可见这个时期病害显症迅速。8月20日以后CK2病情指数和发病率不再增加,日均地温22.69℃,晚间平均地温19.74℃,夜间平均相对湿度70.41%,尽管日间地温高于20℃,但夜间地温较低影响病菌侵染(图3、图4)。

2.3 谷子白发病病情指数、病情指数增长率与温湿度的关系

对谷子白发病病情指数、病情指数增长率与日间平均地温、夜间相对湿度和病情基数等进行回归分析,可得 $y_1 = -0.271 x_1 + 0.073 x_2 + 1.171 x_3 + 3.107, r^2 = 0.960$; $y_2 = -2.649 x_1 + 78.78, r^2 = 0.758$ 。式中: y_1 :病情指数; y_2 :病情指数增长率; x_1 :日间平均地温, x_2 :夜间相对湿度, x_3 :病情基数。由此可知,谷子白发病的病情指数与白天平均地温、夜间相对湿度和病情基数之间存在着显著相关性,从影响程度来看,病情基数影响大于日间平均地温和夜间平均湿度。病情指数增长率与日间平均地温存在一定相关性。

2.4 谷子成熟期白发病病情指数与产量损失的回归分析

谷子白发病病情指数 x 和产量损失率 y 进行相关分析,成熟期病情指数与产量损失率呈极显著正相关 $r = 0.927^{**}$ 。拟合 5 种函数模型,逻辑斯蒂函数 $y = 58.52 / (1 + \exp(-0.085x + 1.69))$, $r^2 = 0.961$;二次函数 $y = -0.0038 x^2 + 1.20 x + 7.80$, $r^2 = 0.939$;线性函数 $y = 1.06 x + 9.60$, $r^2 = 0.874$;指数函数 $y = 13.02 \exp(0.0347 x)$, $r^2 = 0.803$;幂函数 $y = 9.256 x^{0.45}$, $r^2 = 0.948$ (图 5)。其中逻辑斯蒂函数拟合度最优、二次函数和幂函数拟合次优,最后是线性函数和指数函数。

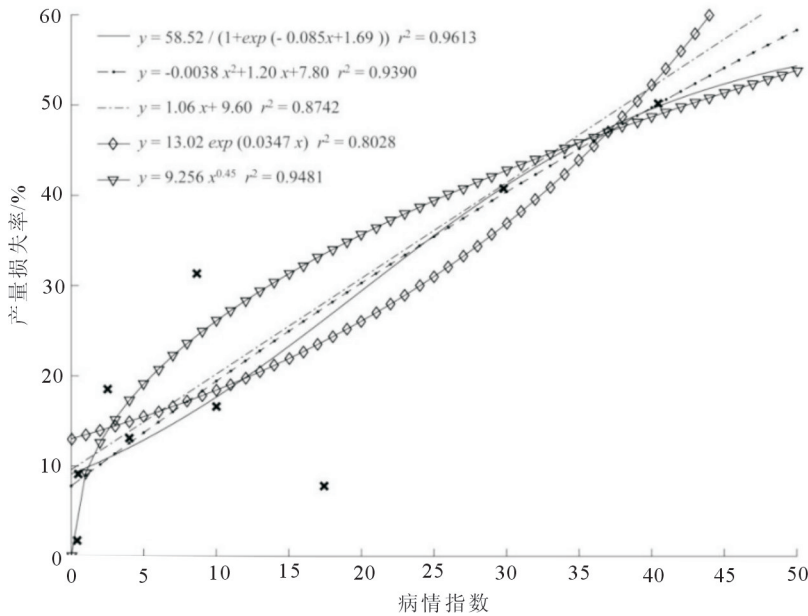


图 5 不同病情指数与冀谷 38 产量损失率的回归分析

2.5 谷子不同生育阶段白发病病情指数与谷子损失率的关系

对苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期的白发病病情指数与产量、产量损失率做相关分析,4 个生育期的病情指数与产量的相关系数分别是 -0.301、-0.697*、-0.645 和 -0.622,其中拔节期病情指数与产量呈显著负相关;病情指数与产量损失率相关系数分别为 0.266、0.878**、0.823** 和 0.802**,其中拔节期病情指数与产量损失率相关系数最大,并极显著正相关。结果表明谷子各生育阶段白发病病情指数与产量损失率呈正相关,与产

量呈负相关,拔节期是白发病发生的关键期,拟合逻辑斯蒂曲线 $y = 50.19 / (1 + \exp(-0.50 x + 1.11))$, $r^2 = 0.957$,能最优体现拔节期病情指数 x 与产量损失率 y 之间关系。

2.6 感染谷子白发病的产量

冀谷 38 产量在不同叶龄施药各处理组与对照组差异均显著 ($F = 112.51, P = 0.0001$) 产量损失率 ($F = 124.92, P = 0.0001$) (表 2)。除 7 叶期处理外,3 叶期施药处理产量最高为 202.88 kg,与 CK 3 产量无显著差异,产量损失率最低为 1.75%;拔节期施药处理产量最低为 141.72 kg,产量损失率为

31.30%。

表2 冀谷38产量及产量损失率

| 处理 | 产量(kg / 667 m ²) | 产量损失率/% |
|------|------------------------------|---------------|
| 1叶期 | 172.31±5.19 d | 16.57±1.34 de |
| 3叶期 | 202.88±3.93 a | 1.746±1.29 g |
| 5叶期 | 187.59±3.40 b | 9.15±0.11 f |
| 7叶期 | 115.33±1.97 g | 44.37±0.11 f |
| 9叶期 | 179.26±3.40 c | 13.13±3.95 ef |
| 11叶期 | 168.14±1.96 d | 18.54±2.07 d |
| 拔节期 | 141.74±6.68 e | 31.30±5.10 c |
| CK 1 | 122.28±3.93 f | 40.75±2.76 b |
| CK 2 | 102.83±5.20 h | 50.14±4.159 a |
| CK 3 | 206.49±3.74 a | - |

2.7 谷子白发病经济危害允许水平和防治经济阈值

在本研究中,防治成本包括人工费用及药剂费用,总计为76元/667m²。效益因子设定为2,谷子的市场单价为4.0元/kg。最佳防治效果为95.52%,据此得出经济允许损失水平为9.81%。依据冀谷38的逻辑斯蒂函数 $y = 58.52 / (1 + \exp(-0.085x + 1.69))$,可推算出白发病的临界病情指数 x 为1.02。基于丁岩钦经济阈值模型,仅考虑通过施药挽回的损失,并在环境影响最小化的情况下,设定生态效应指数 p 为2(p 的取值范围为1至2)。通过关键期病情指数与产量损失率的关系 $y = 50.19 / (1 + \exp(-0.50x + 1.11))$,从而确定冀谷38的经济阈值为病情指数1.34。

3 结论与讨论

白发病始发期是谷子苗期,田间白发病病情指数随着谷子生长呈逐渐上升的趋势,白发病发生的关键时期在谷子拔节期,同时也是病害始盛期,在灌浆期达发病高峰期。病情发展受田间日间平均地温、夜间相对湿度和病情基数的共同影响。谷子产量损失率与病情指数的关系呈逻辑斯蒂曲线。适用于河北春播区谷子(小米)白发病防治措施为田间调查白发病病情指数达到1.02~1.34时,晴天使用350g/L精甲霜灵种子处理剂1000倍液药剂叶面喷雾,对谷子生产有一定指导意义。

谷子3~5叶期使用350g/L精甲霜灵种子处理剂1000倍液药剂叶面喷雾1次对白发病防治

效果最佳,谷子产量在187.59kg~202.88kg,与CK3(药剂包衣处理)产量206.49kg差异较小,与其余处理相比能显著提高谷子产量。1叶龄施药防效不佳,因施药时约有50%幼苗还未出土,推测出土慢的幼苗受到白发菌侵染风险高与张则君等^[24]谷子幼芽出土慢,更容易受到白发病病菌侵染结论一致。7叶龄药剂防治效果不佳,因当天施药后4h内降雨冲刷,影响药剂防效。尽管喷药后受到降雨因素的影响,防效较差为42.01%,但对白发病仍起到作用。与前人白发病防治措施^[5-6]相比,叶面喷雾易于操作,为白发病防治提供新的思路,本研究中只使用一种药剂,长期使用同一种药剂病原菌容易产生抗性^[25],后期应进行不同类型杀菌剂筛选,轮换使用药剂提高化学防治效果。

植物病害发生流行是受多种环境因子互作影响,与寄主情况菌源数量密切相关^[26-27],谷子白发病发生同样也受温湿度、降雨共同作用影响^[10]。根据田间定点定时调查结果表明河北春播区6月上旬田间湿度在40%以上,地温在20℃以上时有利于白发菌侵染,此时田间出现“灰背”灰背,进入病害始盛期,当7月中旬出现“白尖”症状时,为病害盛发期,8月下旬开始有“白发”和“刺猬头”,夜间地温低于20℃发病率下降,进入病害衰退期。前人研究表明地温^[10]、湿度是影响白发病发生的必要条件^[28]。本研究在前人研究基础上将地温和湿度同发病进程结合观察,得到多项式 $y_1 = -0.271x_1 + 0.073x_2 + 1.171x_3 + 3.107$ 能最优拟合病情指数 y_1 与日间地温 x_1 、夜间相对湿度 x_2 和病情基数 x_3 之间的关系。

前人研究表明植物病害损失曲线不一定是直线,还可能是幂函数、对数函数等^[29-30],本研究中逻辑斯蒂函数 $y = 58.52 / (1 + \exp(-0.085x + 1.69))$ 能最优拟合病情指数 x 与产量损失率 y 的关系。陈泰祥等^[18]从经济允许危害水平角度制定黄芩霜霉病经济阈值,本研究在此基础上,考虑了环境影响最小化的情况并采用关键期病情指数拟合曲线和成熟期病情指数拟合曲线共同确定了经济阈值的范围,针对谷子白发病经济阈值更为精准。当防效达到95.52%时,白发病的经济危害允许水平为9.81%,适用于河北春播区谷子(小米)白发病防治的经济阈值为田间调查白发病病情指数达到1.02~1.34时开展药剂喷雾防治。在谷子苗期3~5叶晴天喷施1次1000倍液精甲霜灵种衣剂,精准施药控制谷子白发病的发生。试验未涉及到与叶瘟病、黑穗病和粟叶甲等多种病虫害的复合经

济阈值,通过制定白发病经济阈值的思路符合经济阈值制定提供理论支持。

田间生产中,应通过综合防治措施来减轻谷子白发病的危害。农业防治应科学选种,适当轮作;做好田间通风,维持好田间湿度;及时清除销毁田间病残体;合理施肥,提高谷子抗性。化学防治一般选择种子包衣或病情指数达到 1.02~1.34 时开始药剂防治。

参 考 文 献:

- [1] 方路斌,李平,陈洁,等. 冀南夏谷区谷子白发病的发生与防治措施[J]. 陕西农业科学, 2016, 62(5): 82-83.
- [2] 邢占民,郭久林,韩建国,等. 冀北谷子连作障碍田病虫害主要为害种类及发生程度调查[J]. 种子科技, 2017, 35(12): 129-131.
- [3] 张宝俊,张育铭,孙卓楠,等. 禾生指梗霉菌侵染对谷子幼穗分化及发育的影响[J]. 植物病理学报, 2023, 53(4): 679-689.
- [4] Shetty H S, Raj S N, Kini K, *et al.* Downy mildew of pearl millet and its management[J]. 2016.
- [5] 李萍花. 不同浓度下 25% 甲霜霉威拌种对谷子白发病的田间防效[J]. 陕西农业科学, 2016, 62(7): 24-25.
- [6] 井苗,付志忠,汪奎,等. 谷子白发病的防治[J]. 陕西农业科学, 2015, 61(6): 60.
- [7] 赵艳群,杨辉,叶彩萍. 榆林市谷子白发病菌致病力差异研究[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(4): 44-45.
- [8] 史关燕,杨成元,麻慧芳,等. 山西省谷子白发病菌种分类及致病能力的研究[J]. 农学学报, 2013, 3(10): 15-19.
- [9] 韩海丽. 晋谷 21 及抗病突变体抗白发病基因挖掘[D]. 太谷:山西农业大学, 2023.
- [10] 李瑞,龚增利,叶彩萍,等. 环境因素对谷子白发病的影响相关性研究[J]. 陕西农业科学, 2023, 69(6): 95-97.
- [11] 岳娟. 抗感白发病谷子品种生理、品质及农艺性状比较及抗病候选基因分析[D]. 太谷:山西农业大学, 2021.
- [12] 徐丽霞,董雪,张艾英,等. 不同轮作模式对谷子生理生化指标和产量的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(3): 68-76.
- [13] 梁鸡保,李瑞,王蓉,等. 品种、茬口和播期对谷子白发病发病率的影响[J]. 安徽农学通报, 2023, 29.
- [14] 杨俊伟,王建军,贾鑫,等. 不同药剂拌种对谷子白发病的防控效果[J]. 园艺与种苗, 2023, 43(10): 89-90.
- [15] 李济宸,杨大俐,甘跃进,等. 瑞毒霉(Ridomil)防治谷子白发病(*Sclerospora graminicola* (Sacc) Schroet)的研究[J]. 河北农学报, 1982, 7(4): 77-78.
- [16] Zhao T, Xiao Y, Smith R J. Non-smooth plant disease models with economic thresholds[J]. *Mathematical Biosciences*, 2013, 241(1): 34-48.
- [17] Tang S, Xiao Y, Cheke R A. Dynamical analysis of plant disease models with cultural control strategies and economic thresholds[J]. *Mathematics & Computers in Simulation*, 2010, 80(5): 894-921.
- [18] 陈泰祥,杨小利,陈秀蓉,等. 甘肃省黄芪霜霉病发病规律及防治经济阈值研究[J]. 草业学报, 2015, 24(9): 113-120.
- [19] 金小靖,康晓慧,陈万权,等. 条锈病对小麦产量的影响及其经济阈值研究[J]. 中国植保导刊, 2022, 42(5): 39-43.
- [20] 吕国强,李金榜,彭红,等. 小麦条锈病对产量的影响及为害损失率[J]. 中国植保导刊, 2022, 42(10): 62-66.
- [21] 王澍,曹远银,李天亚,等. 小麦秆锈病防治指标研究[J]. 河南农业科学, 2011, 40(9): 78-80.
- [22] 代玉立,甘林,滕振勇,等. 鲜食玉米大斑病经济阈值及品种抗性分级标准[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2021, 49(4): 71-80.
- [23] 金小靖,康晓慧,陈万权,等. 条锈病对冬小麦产量的影响及其经济阈值[J]. 贵州农业科学, 2022, 50(4): 79-85.
- [24] 张则君,王绍志. 太原市谷子白发病加重原因分析及防治对策[J]. 现代农业科技, 2017, (23): 96.
- [25] 欧阳燕菲,赵洪,张昭景,等. 海南省香蕉灰纹病田间发生消长动态初报[J/OL]. 热带农业科学, 2025, 45(6): 32-35.
- [26] 林嘉豪,户雪敏,段维彤,等. 湖北小麦条锈病预测模型的构建及应用[J]. 植物保护, 2025, 51(1): 161-168.
- [27] 王杰,徐方媛,蒋萍,等. 主要气象因子对核桃叶斑病发生动态的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 127-133.
- [26] 闫鑫,王鹤,黄国丽,等. 谷子白发病菌最适侵染条件及接菌技术研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 98-104.
- [29] 崔娟,李旋,许喆,等. 柳叶刺蓼对玉米生长的影响及其经济阈值研究[J]. 玉米科学, 2017, 25(5): 141-144.
- [30] 李文博,崔娟,徐伟,等. 野黍对东北春大豆生长发育的影响及其经济阈值[J]. 大豆科学, 2019, 38(4): 584-588.