

新疆泽普县小麦白粉病流行的时间动态及预测模型

聂晓^{2,3}, 周婷婷¹, 沈煜洋¹, 高海峰^{1*}, 刘伟^{2*},
范洁茹^{2*}, 李俊凯³, 周益林²

(1. 新疆农业科学院植物保护研究所, 农业农村部西北荒漠绿洲作物有害生物综合治理重点实验室, 乌鲁木齐 830091; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193; 3. 长江大学农学院, 荆州 434025)

摘要 2012年—2019年对泽普县春季小麦白粉病田间发生情况进行了系统调查, 并对数据进行了分析和模型拟合, 明确了当地白粉病春季发生和流行的特点。其病害春季流行曲线为典型的单峰S形曲线, 符合Logistic或Gompertz模型。在此基础上, 通过Pearson相关系数法分析了多年来该地小麦不同生育期白粉病病情指数与66个主要气象因子之间的相关关系, 筛选出影响小麦白粉病发生流行的关键气象因子为1月下旬平均日照时间、2月下旬平均气温、1月上旬—3月上旬平均气温和10月下旬—4月中旬平均日照时间, 并采用多元回归分析法建立了基于关键气象因子的小麦扬花期、灌浆初期和灌浆中期的病害预测模型。此研究结果可为当地小麦白粉病的防控提供技术支撑。

关键词 泽普县; 小麦白粉病; 病害流行时间动态; 预测模型

中图分类号: S431.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2021423

Temporal dynamics and forecasting models of wheat powdery mildew in Zepu county of Xinjiang

NIE Xiao^{2,3}, ZHOU Tingting¹, SHEN Yuyang¹, GAO Haifeng^{1*}, LIU Wei^{2*},
FAN Jieru^{2*}, LI Junkai³, ZHOU Yilin²

(1. Key Laboratory of Integrated Crop Pest Management in Northwestern Oasis of China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Plant Protection, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract The occurrence of wheat powdery mildew was systematically investigated in the field in Zepu county of Xinjiang during the spring of 2012–2019, and the epidemic characteristics of wheat powdery mildew were analyzed. The results showed the disease epidemic curves were the typical single-peak S-shaped curve, and fitted the Logistic or Gompertz model. Based on these results, the correlations between disease indexes in different wheat growth stages and 66 meteorological factors were analyzed using Pearson correlation coefficient method. The main meteorological factors influencing the occurrence and epidemics of wheat powdery mildew, including mean sunshine duration in late January, mean temperature in late February, mean temperature from early January to early March and mean sunshine duration from late October to mid-April, were determined. Then, the disease forecasting models at the flowering stage, early grain-filling stage or middle grain-filling stage were established using multiple regression analysis method. The results of this study will provide a technical support for the control of wheat powdery mildew in local regions.

Key words Zepu county; wheat powdery mildew; temporal dynamic of disease; forecasting model

收稿日期: 2021-08-04

修订日期: 2021-08-27

基金项目: 新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(2020E0215); 中国挪威国际合作项目(CHN-17/0019)

* 通信作者 E-mail: 高海峰 ghf20044666@163.com; 刘伟 wliusdau@163.com; 范洁茹 jrfan@ippcaas.cn

由专性寄生菌 *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* 引起的小麦白粉病是我国小麦生产上的重要病害,近年来在我国年发生面积为 600 万~1 000 万 hm^2 ,造成年平均损失约 40.11 万 $\text{t}^{[1]}$ 。若小麦白粉病发生早且重会严重影响小麦的生长发育,造成小麦分蘖数、成穗数和穗粒数等减少,千粒重下降,导致小麦产量降低^[2-3]。

作物病害的发生和流行规律以及预测预报研究是病害防治的重要依据^[4]。关于小麦白粉病流行的时间动态研究各地已有报道^[5]。王海燕^[6]分析了河南省 1980 年—1997 年小麦白粉病春季流行的时间动态,结果表明,河南省逐年春季流行程度波动大但无显著周期性;刘娜^[7]综合分析了四川省 2007 年—2012 年的小麦白粉病时间动态,结果显示 Logistic 模型能较好地描述该地区小麦白粉病病情指数的时间变化动态。

有关小麦白粉病的预测预报研究也有报道^[8-10]。曹克强等^[11]分析了 1985 年—1992 年河北省辛集市小麦白粉病调查资料,发现当地小麦白粉病的流行与品种的抗病性、病害发生期前一句的平均温度和总降水量有关,并依此建立了当地小麦白粉病中期预测模型;邵振润等^[12]分析了 1980 年—1993 年河南省温县小麦白粉病的发生流行情况,初步得到了影响该地小麦白粉病流行的主要因素是当年 3 月中旬病株率、3 月雨量和 3 月—4 月日照时数,并依此建立了当地白粉病预测模型。

泽普县位于新疆西南部,属暖温带大陆性干旱气候,年均气温在 11.7℃ 左右,平均年日照时数 2 665.2 h,年平均降水量 58.4 mm,小麦种植面积超过 1.5 万 hm^2 ^[13-14]。近年来,白粉病已成为当地小麦上的常发病害,对小麦产量造成一定影响,但对当地小麦白粉病春季流行特点及预测预报研究未见报道。因此,本研究于 2012 年—2019 年对新疆泽普县小麦白粉病进行了系统调查,明确了该病在当地的春季流行规律,在此基础上通过分析病害发生流行与气象因子的关系,建立了泽普县病害预测模型,研究结果可为当地小麦白粉病的防治提供技术支撑。

1 研究方法

1.1 调查地点与时间

2012 年核桃-小麦间作麦田设在泽普县依玛乡汉族大队,2013 年—2019 年核桃-小麦间作麦田设在泽普县波斯卡姆乡 4 村。试验地核桃品种为‘温 185’,

小麦品种为‘新冬 20 号’。播种时间在每年的 10 月 5 日左右,收获时间在 6 月 10 日左右。田间小麦白粉病发病情况系统调查为每年 5 月上旬到六月上旬。

1.2 调查方法

普查采取随机 5 点取样,每点实查 10 m 双行,记录白粉病的始发时间。在白粉病开始发生后,进行定期定株的系统调查,调查期间每 5 d 或 7 d 调查 1 次,采用对角线 5 点取样法(四角和中心各取一点),每点固定调查 20 茎,每茎调查所有叶片的发病级别,白粉病病害分级标准参照改进后的“0~9”级法^[15]。0 级:无病;1 级:第 1 段叶片的病斑面积占整片叶面积的 2% 以下;2 级:第 2 段叶片有轻微病斑,第 1 段叶片轻度发病(病斑占叶面积 3%~10%);3 级:第 3 段叶片轻度发病,第 2 段叶片中度发病(病斑占叶面积 11%~25%),第 1 段叶片严重发病(病斑占叶面积 25% 以上);4 级:第 4 段叶片轻度发病,第 3 段及其以下叶片中度到严重发病;5 级:第 5 段叶片轻度发病,第 4 段及其以下叶片中度到严重发病;6 级:第 6 段叶片轻度发病,第 5 段及其以下叶片中度到严重发病;7 级:第 7 段叶片轻度发病,第 6 段及其以下叶片中度到严重发病。有时旗叶偶有少数病斑;8 级:旗叶轻度或中度发病,旗叶以下叶片中度到严重发病;9 级:整株叶片严重发病,穗部不同程度发病。

把植株自下而上分成 9 个等份,按不同高度病叶(或穗)的不同严重度来确定级别,计算病情指数。

病情指数 = $\Sigma[(\text{各级病茎数} \times \text{各级代表值})] \times 100 / (\text{调查总茎数} \times 9)$ 。

1.3 气象资料的收集

泽普县 2012 年—2017 年气象资料如日平均气温、日平均相对湿度、日平均光照时数等均来自于泽普县气象局。

1.4 数据处理

主要采用 Python 3.9 中的 Numpy 1.21.1、Matplotlib 3.4.2 和 Scipy 1.7.0 库建立小麦白粉病春季流行动态模型;采用 Microsoft 365 中的 Excel 软件拟合小麦白粉病春季流行曲线;采用 RGui 4.1.0 软件中 Pearson 相关系数分析了从小麦播种后至病害发生相应生育期的气象因子与小麦白粉病病情指数的相关性,并筛选了预测的关键主导因子或变量;采用 RGui 4.1.0 软件中的多元回归分析方法建立了病害的预测模型。

2 结果与分析

2.1 新疆泽普县小麦白粉病流行的时间动态

2012 年—2019 年对泽普县小麦白粉病的发生和流行情况进行系统调查,其春季流行曲线如图 1 所示。泽普县小麦白粉病春季流行曲线大部分年份表现为 S 形

曲线。白粉病一般始见于 5 月上旬,病情指数增长缓慢,田间表现为零星发病,始发期内病情指数较小;大部分年份,5 月下旬至 5 月底,病害迅速扩展,病害进入盛发期;6 月初至 6 月上旬,病害增长速度渐缓,病害进入衰退期。8 年春季流行曲线显示,2017 年发病最早,2012 年、2013 年和 2014 年发病较晚。

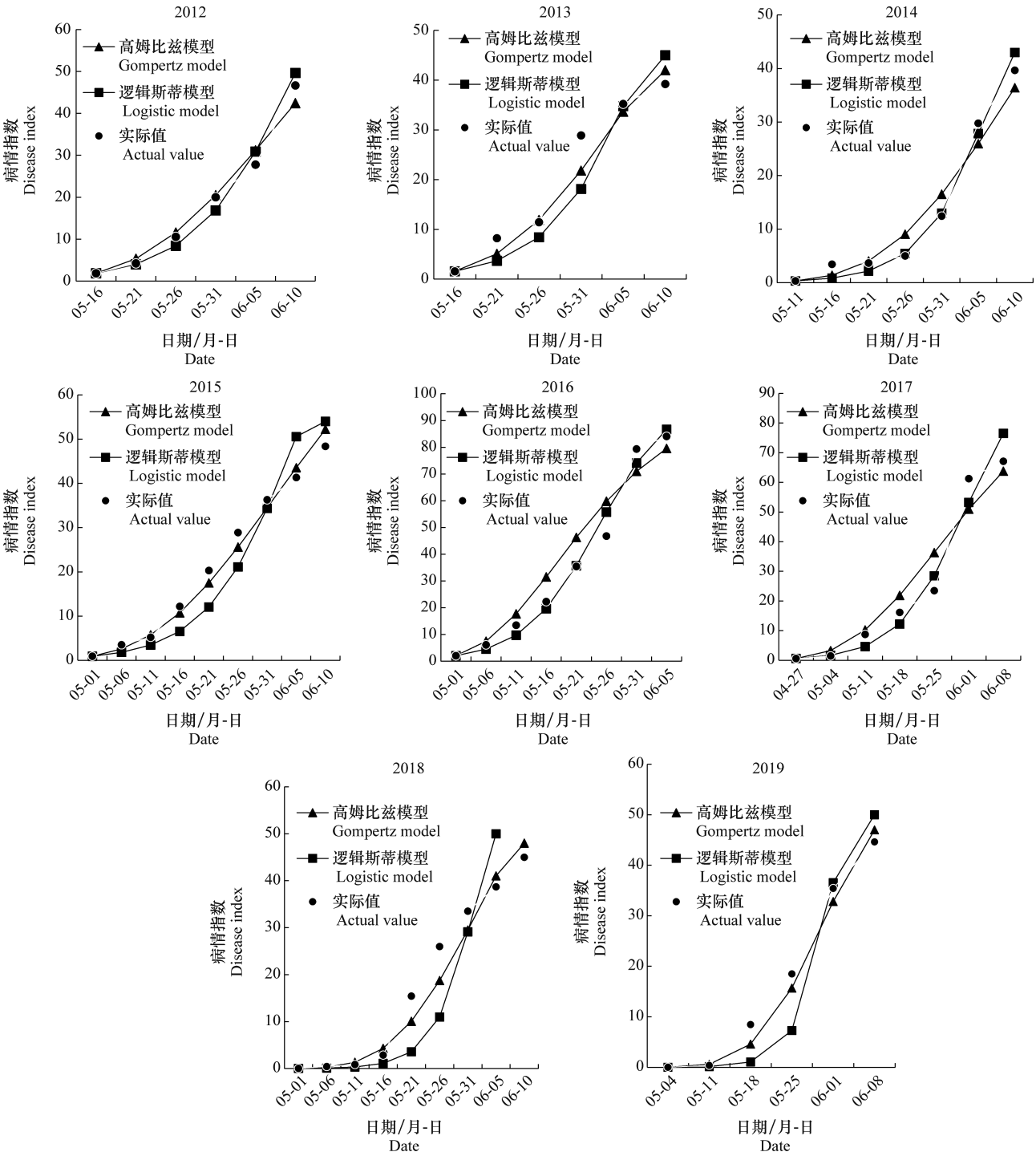


图 1 新疆泽普县小麦白粉病春季流行曲线

Fig. 1 The epidemic curves of wheat powdery mildew in Zepu county of Xinjiang during the spring

对 2012 年—2019 年泽普县小麦白粉病的春季流行曲线进行拟合的结果表明,泽普县 2012 年—2019 年的春季流行曲线符合 Logistic 模型或 Gompertz 模型(表 1)。Logistic 模型的基本形式为: $x=1/[1+B(e^{-rt})]$,式中 x 代表小麦白粉病病情指数/100, B 为积分常数, r 为 Logistic 模型的流行速率, t 为时间天数。Gompertz 模型的基本形式为: $x=\exp[-B\exp(-rt)]$,式中 x 代表小麦白粉病病情

指数/100, B 为积分常数, r 为 Gompertz 模型的流行速率, t 为时间天数。

由表 1 可看出,Logistic 模型或 Gompertz 模型都能较好地对数据进行拟合,其中 Logistic 模型对 2012 年、2014 年、2016 年和 2017 年小麦白粉病流行情况拟合较好,Gompertz 模型对 2013 年、2015 年、2018 年和 2019 年的小麦白粉病流行情况拟合较好。

表 1 新疆泽普县小麦白粉病春季流行动态模型¹⁾

Table 1 The epidemic dynamic models of wheat powdery mildew in Zepu county of Xinjiang during the spring				
年份 Year	春季流行动态模型 Spring epidemic dynamics model		R ²	显著性 Statistical significance
2012	Logistic 模型	$x=1/[1+53.054(e^{-0.158t})]$	0.987	***
	Gompertz 模型	$x=\exp[-3.990\exp(-0.062t)]$	0.982	***
2013	Logistic 模型	$x=1/[1+63.103(e^{-0.176t})]$	0.842	**
	Gompertz 模型	$x=\exp[-4.160\exp(-0.067t)]$	0.934	***
2014	Logistic 模型	$x=1/[1+302.030(e^{-0.190t})]$	0.970	***
	Gompertz 模型	$x=\exp[-5.714\exp(-0.058t)]$	0.962	***
2015	Logistic 模型	$x=1/[1+106.527(e^{-0.134t})]$	0.914	***
	Gompertz 模型	$x=\exp[-4.678\exp(-0.049t)]$	0.987	***
2016	Logistic 模型	$x=1/[1+48.020(e^{-0.164t})]$	0.982	***
	Gompertz 模型	$x=\exp[-3.892\exp(-0.081t)]$	0.946	***
2017	Logistic 模型	$x=1/[1+168.492(e^{-0.150t})]$	0.961	***
	Gompertz 模型	$x=\exp[-5.133\exp(-0.058t)]$	0.939	***
2018	Logistic 模型	$x=1/[1+3\,332.333(e^{-0.241t})]$	0.800	*
	Gompertz 模型	$x=\exp[-8.112\exp(-0.063t)]$	0.950	***
2019	Logistic 模型	$x=1/[1+4\,999(e^{-0.284t})]$	0.849	**
	Gompertz 模型	$x=\exp[-8.517\exp(-0.073t)]$	0.973	***

1) “***” “**” “*”分别表示在 0.1%,1%,5%水平差异显著。
“***” “**” “*” indicate significant differences at the 0.1%, 1%, and 5% levels, respectively.

2012 年—2019 年的小麦白粉病 Logistic 模型拟合的流行速率分别为 0.158、0.176、0.190、0.134、0.164、0.150、0.241 和 0.284,即根据 Logistic 模型拟合结果,2015 年白粉病流行速率最慢,2019 年流行速率最快。2012 年—2019 年的小麦白粉病 Gompertz 模型拟合的流行速率为 0.062、0.067、0.058、0.049、0.081、0.058、0.063 和 0.073,即根据 Gompertz 模型拟合结果,2015 年流行速率最慢,2016 年流行速率最快。

2.2 小麦各生育期白粉病发生与气象因子的关系分析

在分析了新疆泽普县小麦白粉病流行时间动态的基础上,对 2012 年—2017 年该地小麦播种后

至病害发生相应小麦生育期的气象因子与小麦白粉病病情指数的相关关系进行分析,结果(表 2)表明,小麦白粉病扬花期病情指数(Y_1)与 1 月下旬平均日照时间呈极显著负相关,与 2 月下旬平均气温呈显著正相关;小麦白粉病灌浆初期病情指数(Y_2)与 1 月上旬平均气温和 4 月上旬平均相对湿度呈显著正相关,与 11 月下旬平均日照时间和 4 月上旬平均日照时间呈显著负相关,与 1 月下旬平均日照时间呈极显著负相关;小麦白粉病灌浆中期病情指数(Y_3)与 11 月下旬平均日照时间和 4 月上旬平均日照时间呈显著负相关,与 1 月上旬平均气温呈显著正相关,与 1 月下旬平均日照时间呈极显著负相关。

表 2 气象因子与小麦各生育期白粉病病情指数的相关性

Table 2 Correlations between meteorological factors and powdery mildew disease index during different wheat growth stages

时间 Time	气象因子 Meteorological factor	相关系数(<i>r</i>)及 <i>P</i> 值 Correlation coefficient (<i>r</i>) and <i>P</i> value		
		与扬花期病情指数 <i>Y</i> ₁ With disease index <i>Y</i> ₁ at the flowering stage	与灌浆初期病情指数 <i>Y</i> ₂ With disease index <i>Y</i> ₂ at the early grain-filling stage	与灌浆中期病情指数 <i>Y</i> ₃ With disease index <i>Y</i> ₃ at the middle grain-filling stage
10 月中旬 Mid-October	平均气温	$r=-0.671, P=0.215$	$r=-0.175, P=0.778$	$r=-0.434, P=0.466$
	平均相对湿度	$r=0.637, P=0.248$	$r=0.304, P=0.619$	$r=0.304, P=0.619$
	平均日照时间	$r=-0.495, P=0.397$	$r=0.212, P=0.732$	$r=0.097, P=0.877$
10 月下旬 Late October	平均气温	$r=0.267, P=0.664$	$r=-0.451, P=0.446$	$r=-0.369, P=0.542$
	平均相对湿度	$r=0.571, P=0.315$	$r=0.534, P=0.354$	$r=0.485, P=0.408$
	平均日照时间	$r=-0.782, P=0.118$	$r=-0.638, P=0.247$	$r=-0.725, P=0.165$
11 月上旬 Early November	平均气温	$r=-0.078, P=0.884$	$r=-0.502, P=0.311$	$r=-0.367, P=0.474$
	平均相对湿度	$r=0.296, P=0.568$	$r=0.005, P=0.993$	$r=0.004, P=0.994$
	平均日照时间	$r=0.049, P=0.927$	$r=0.316, P=0.542$	$r=0.174, P=0.742$
11 月中旬 Mid-November	平均气温	$r=0.216, P=0.680$	$r=0.583, P=0.225$	$r=0.513, P=0.298$
	平均相对湿度	$r=0.117, P=0.826$	$r=-0.264, P=0.613$	$r=-0.271, P=0.604$
	平均日照时间	$r=0.392, P=0.442$	$r=0.489, P=0.326$	$r=0.557, P=0.250$
11 月下旬 Late November	平均气温	$r=0.582, P=0.226$	$r=0.300, P=0.563$	$r=0.320, P=0.537$
	平均相对湿度	$r=0.045, P=0.933$	$r=0.418, P=0.410$	$r=0.266, P=0.610$
	平均日照时间	$r=-0.680, P=0.137$	$r=-0.817, P=0.047$	$r=-0.869, P=0.025$
12 月上旬 Early December	平均气温	$r=0.258, P=0.622$	$r=0.492, P=0.322$	$r=0.463, P=0.355$
	平均相对湿度	$r=-0.118, P=0.824$	$r=-0.212, P=0.687$	$r=-0.241, P=0.645$
	平均日照时间	$r=-0.137, P=0.796$	$r=0.057, P=0.915$	$r=-0.001, P=0.998$
12 月中旬 Mid-December	平均气温	$r=-0.562, P=0.246$	$r=-0.169, P=0.749$	$r=-0.269, P=0.606$
	平均相对湿度	$r=0.007, P=0.990$	$r=-0.056, P=0.916$	$r=-0.116, P=0.827$
	平均日照时间	$r=-0.375, P=0.464$	$r=-0.287, P=0.581$	$r=-0.343, P=0.506$
12 月下旬 Late December	平均气温	$r=0.377, P=0.461$	$r=0.617, P=0.192$	$r=0.563, P=0.245$
	平均相对湿度	$r=-0.662, P=0.152$	$r=-0.574, P=0.234$	$r=-0.664, P=0.150$
	平均日照时间	$r=0.292, P=0.575$	$r=0.151, P=0.775$	$r=0.209, P=0.692$
1 月上旬 Early January	平均气温	$r=0.771, P=0.072$	$r=0.877, P=0.022$	$r=0.846, P=0.034$
	平均相对湿度	$r=-0.744, P=0.090$	$r=-0.418, P=0.410$	$r=-0.472, P=0.344$
	平均日照时间	$r=0.196, P=0.710$	$r=-0.280, P=0.592$	$r=-0.175, P=0.741$
1 月中旬 Mid-January	平均气温	$r=0.630, P=0.180$	$r=0.219, P=0.677$	$r=0.336, P=0.515$
	平均相对湿度	$r=-0.532, P=0.277$	$r=-0.126, P=0.812$	$r=-0.225, P=0.669$
	平均日照时间	$r=-0.089, P=0.867$	$r=-0.416, P=0.412$	$r=-0.436, P=0.388$
1 月下旬 Late January	平均气温	$r=-0.072, P=0.892$	$r=-0.085, P=0.872$	$r=-0.053, P=0.921$
	平均相对湿度	$r=0.149, P=0.778$	$r=-0.313, P=0.547$	$r=-0.274, P=0.599$
	平均日照时间	$r=-0.926, P=0.008$	$r=-0.918, P=0.010$	$r=-0.943, P=0.005$
2 月上旬 Early February	平均气温	$r=-0.075, P=0.888$	$r=0.165, P=0.755$	$r=0.197, P=0.708$
	平均相对湿度	$r=0.140, P=0.792$	$r=0.202, P=0.701$	$r=0.161, P=0.760$
	平均日照时间	$r=0.004, P=0.994$	$r=-0.277, P=0.595$	$r=-0.242, P=0.643$
2 月中旬 Mid-February	平均气温	$r=0.075, P=0.888$	$r=0.231, P=0.659$	$r=0.277, P=0.595$
	平均相对湿度	$r=-0.356, P=0.489$	$r=-0.257, P=0.624$	$r=-0.319, P=0.537$
	平均日照时间	$r=-0.441, P=0.381$	$r=-0.747, P=0.088$	$r=-0.695, P=0.126$
2 月下旬 Late February	平均气温	$r=0.891, P=0.017$	$r=0.672, P=0.143$	$r=0.747, P=0.088$
	平均相对湿度	$r=-0.432, P=0.393$	$r=-0.278, P=0.594$	$r=-0.330, P=0.522$
	平均日照时间	$r=0.742, P=0.091$	$r=0.755, P=0.083$	$r=0.749, P=0.087$
3 月上旬 Early March	平均气温	$r=0.666, P=0.149$	$r=0.522, P=0.288$	$r=0.628, P=0.182$
	平均相对湿度	$r=-0.437, P=0.386$	$r=-0.287, P=0.581$	$r=-0.347, P=0.500$
	平均日照时间	$r=-0.385, P=0.451$	$r=-0.597, P=0.211$	$r=-0.459, P=0.360$
3 月中旬 Mid-March	平均气温	$r=0.046, P=0.931$	$r=-0.296, P=0.569$	$r=-0.138, P=0.794$
	平均相对湿度	$r=-0.244, P=0.642$	$r=0.141, P=0.789$	$r=0.027, P=0.959$
	平均日照时间	$r=-0.751, P=0.085$	$r=-0.621, P=0.189$	$r=-0.643, P=0.168$

续表 2 Table 2(Continued)

时间 Time	气象因子 Meteorological factor	相关系数(<i>r</i>)及 <i>P</i> 值 Correlation coefficient (<i>r</i>) and <i>P</i> value		
		与扬花期病情指数 <i>Y</i> ₁ With disease index <i>Y</i> ₁ at the flowering stage	与灌浆初期病情指数 <i>Y</i> ₂ With disease index <i>Y</i> ₂ at the early grain-filling stage	与灌浆中期病情指数 <i>Y</i> ₃ With disease index <i>Y</i> ₃ at the middle grain-filling stage
3 月下旬 Late March	平均气温	<i>r</i> =0.297, <i>P</i> =0.568	<i>r</i> =0.279, <i>P</i> =0.593	<i>r</i> =0.390, <i>P</i> =0.445
	平均相对湿度	<i>r</i> =−0.552, <i>P</i> =0.257	<i>r</i> =−0.362, <i>P</i> =0.481	<i>r</i> =−0.480, <i>P</i> =0.335
	平均日照时间	<i>r</i> =−0.124, <i>P</i> =0.815	<i>r</i> =−0.507, <i>P</i> =0.304	<i>r</i> =−0.369, <i>P</i> =0.471
4 月上旬 Early April	平均气温	<i>r</i> =0.001, <i>P</i> =0.999	<i>r</i> =−0.283, <i>P</i> =0.587	<i>r</i> =−0.300, <i>P</i> =0.563
	平均相对湿度	<i>r</i> =0.535, <i>P</i> =0.274	<i>r</i> =0.843, <i>P</i> =0.035	<i>r</i> =0.804, <i>P</i> =0.054
	平均日照时间	<i>r</i> =−0.732, <i>P</i> =0.098	<i>r</i> =−0.812, <i>P</i> =0.050	<i>r</i> =−0.846, <i>P</i> =0.034
4 月中旬 Mid-April	平均气温	<i>r</i> =0.681, <i>P</i> =0.137	<i>r</i> =0.697, <i>P</i> =0.124	<i>r</i> =0.805, <i>P</i> =0.053
	平均相对湿度	<i>r</i> =−0.161, <i>P</i> =0.760	<i>r</i> =−0.119, <i>P</i> =0.823	<i>r</i> =−0.130, <i>P</i> =0.806
	平均日照时间	<i>r</i> =−0.711, <i>P</i> =0.113	<i>r</i> =−0.645, <i>P</i> =0.166	<i>r</i> =−0.567, <i>P</i> =0.240
4 月下旬 Late April	平均气温	<i>r</i> =0.232, <i>P</i> =0.659	<i>r</i> =0.180, <i>P</i> =0.733	<i>r</i> =0.269, <i>P</i> =0.606
	平均相对湿度	<i>r</i> =0.047, <i>P</i> =0.929	<i>r</i> =0.349, <i>P</i> =0.498	<i>r</i> =0.407, <i>P</i> =0.423
	平均日照时间	<i>r</i> =0.039, <i>P</i> =0.941	<i>r</i> =0.066, <i>P</i> =0.901	<i>r</i> =0.211, <i>P</i> =0.689
5 月上旬 Early May	平均气温	—	<i>r</i> =0.552, <i>P</i> =0.256	<i>r</i> =0.527, <i>P</i> =0.282
	平均相对湿度	—	<i>r</i> =−0.493, <i>P</i> =0.320	<i>r</i> =−0.412, <i>P</i> =0.417
	平均日照时间	—	<i>r</i> =−0.257, <i>P</i> =0.623	<i>r</i> =−0.232, <i>P</i> =0.659
5 月中旬 Mid-May	平均气温	—	—	<i>r</i> =0.319, <i>P</i> =0.537
	平均相对湿度	—	—	<i>r</i> =0.029, <i>P</i> =0.956
	平均日照时间	—	—	<i>r</i> =−0.436, <i>P</i> =0.388

2.3 新疆泽普县小麦白粉病预测模型

在相关分析的基础上筛选出影响小麦白粉病发生流行的关键因子,分别为 1 月下旬平均日照时间、2 月下旬平均气温、1 月上旬—3 月上旬平均气温和

10 月下旬—4 月中旬平均日照时间,据此采用多元回归分析分别建立了泽普县小麦白粉病扬花期、灌浆初期和灌浆中期病情指数的预测模型,其模型与模型参数见表 3。

表 3 新疆泽普县小麦白粉病预测模型

Table 3 The wheat powdery mildew forecasting models in Zepu county of Xinjiang

预测模型 Forecasting model	模型参数 Model parameter
$Y_1=4.592-0.705X_1+0.522X_2, R^2=0.935, P=0.017$	<i>Y</i> ₁ 为扬花期病情指数, <i>X</i> ₁ 为 1 月下旬平均日照时间, <i>X</i> ₂ 为 2 月下旬平均气温
$Y_2=52.267+1.109X_1-6.986X_2, R^2=0.878, P=0.043$	<i>Y</i> ₂ 为灌浆初期病情指数, <i>X</i> ₁ 为 1 月上旬—3 月上旬平均气温, <i>X</i> ₂ 为 10 月下旬—4 月中旬平均日照时间
$Y_3=117.416+3.136X_1-14.814X_2, R^2=0.891, P=0.036$	<i>Y</i> ₃ 为灌浆中期病情指数, <i>X</i> ₁ 为 1 月上旬—3 月上旬平均气温, <i>X</i> ₂ 为 10 月下旬—4 月中旬平均日照时间

3 结论与讨论

由泽普县小麦白粉病春季流行曲线分析结果可知,当地小麦白粉病的春季流行曲线为典型的单峰 S 形曲线,且不同年份小麦白粉病始发时间、发生发展及最终病情均存在一定差异。Logistic 模型或 Gompertz 模型能够反映泽普县小麦白粉病随时间增长的动态情况。其中 Logistic 模型或 Gompertz 模型中的病害流行速率 *r* 是反映病害流行快慢的重要参数,它集中反映了各种环境因素影响下病原物、寄主群体之间的相互作用。因此,建立白粉病的 Logistic 模型和 Gompertz 模型,并获得其病害流行

速率对于病害流行预测、损失估计和防治决策十分重要。

通过分析泽普县不同小麦生育期的白粉病病情指数与气象因子的相关性明确了 1 月与 4 月的一些关键气象因子与当地扬花期到灌浆期白粉病病情指数相关性较强,尤其是 1 月下旬平均日照时间。

本文所建预测模型与历史病情资料拟合度较高,但本文病害流行数据量偏少,只有 8 年,所以该预测模型的准确率仍需进一步优化和检验,因此今后需要长期收集泽普县的小麦白粉病发生流行数据,这也是建立预测预报模型最基础的工作。

method for rice root-knot nematode (*Meloidogyne graminicola*) [J]. European Journal of Plant Pathology, 2016, 146(2): 281–291.

[25] ANDERSON A R, COLLINGE J E, HOFFMANN A A, et al. Thermal tolerance trade-offs associated with the right arm of chromosome 3 and marked by the *hsr-omega* gene in *Drosophila melanogaster* [J]. Heredity, 2003, 90(2): 195–202.

[26] STRATMAN R, MARKOW T A. Resistance to thermal stress in desert *Drosophila* [J]. Functional Ecology, 1998, 12(6): 965–970.

[27] HOFFMANN A A, HALLAS R, SINCLAIR C, et al. Rapid loss of stress resistance in *Drosophila melanogaster* under adaptation to laboratory culture [J]. Evolution, 2001, 55(2): 436–438.

[28] DAVID J R, GIBERT P, MORETEAU B, et al. The fly that came in from the cold: geographic variation of recovery time from low-temperature exposure in *Drosophila subobscura* [J]. Functional Ecology, 2003, 17(4): 425–430.

[29] AYRINHAC A, DEBAT V, GIBERT P, et al. Cold adaptation in geographical populations of *Drosophila melanogaster*: phenotypic plasticity is more important than genetic variability [J]. Functional Ecology, 2004, 18(5): 700–706.

[30] 陈兵, 康乐. 昆虫对环境温度胁迫的适应与种群分化[J]. 自然科学进展, 2005(3): 11–17.

[31] MCGAUGHRAN A, SOMMER R J. Natural variation in cold tolerance in the nematode *Pristionchus pacificus*: the role of genotype and environment [J]. Biology Open, 2014, 3(9): 832–838.

[32] FORGE T A, MACGUIDWIN A E. Impact of thermal history on tolerance of *Meloidogyne hapla* second-stage juveniles to external freezing [J]. Journal of Nematology, 1992, 24(2): 262–268.

[33] SINCLAIR B J. Field ecology of freeze tolerance: interannual variation in cooling rates, freeze-thaw and thermal stress in the microhabitat of the alpine cockroach *Celatoblatta quinquemaculata* [J]. Oikos, 2001, 93: 286–293.

[34] 曾波, 闫彩霞, 余莲. 我国南方地区 1960—2009 年冬季气温分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(2): 46–52.

[35] 黄琰, 封国林, 董文杰. 近 50 年中国气温、降水极值分区的时空变化特征[J]. 气象学报, 2011, 69(1): 125–136.

[36] 孙建奇, 敖娟. 中国冬季降水和极端降水对变暖的响应[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 674–679.

[37] TAO Fulu, ZHANG Zhao, SHI Wenjiao, et al. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981–2009 in China, and late rice was just opposite [J]. Global Chang Biology, 2013, 19(10): 3200–3209.

[38] ZHANG Lei, YANG Bingyun, LI Sen, et al. Potential rice exposure to heat stress along the Yangtze River in China under RCP8.5 scenario [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 248: 185–196.

[39] WHARTON D A. Cold tolerance strategies in nematodes [J]. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 1995, 70: 161–185.

[40] WHARTON D A. The environmental physiology of Antarctic terrestrial nematodes: a review [J]. Journal of Comparative Physiology B, 2003, 173(8): 621–628.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 59 页)

参考文献

[1] 黄冲, 姜玉英, 李春广. 1988 年—2018 年我国小麦主要病虫害发生危害及演变分析[J]. 植物保护, 2020, 46(6): 186–193.

[2] 刘孝坤. 我国小麦白粉病研究的进展[J]. 农牧情报研究, 1989(8): 1–10.

[3] 姜玉英, 曾娟. 小麦病虫草害发生与监控[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.

[4] 曾士迈. 植物病害流行学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1986.

[5] 刘万才, 邵振润. 我国小麦白粉病的发生状况、原因及趋势浅析[M]//刘万才. 小麦白粉病测报与防治技术研究. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[6] 王海燕. 河南小麦白粉病逐年春季流行时间动态[J]. 植物保护学报, 2000, 27(3): 238–242.

[7] 刘娜. 四川省小麦白粉病的流行研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2013.

[8] 李光博, 曾士迈, 李振岐. 小麦病虫草鼠害综合治理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1990.

[9] 曾士迈. 植保系统工程导论[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994.

[10] 刘万才, 邵振润, 姜瑞中. 小麦白粉病测报与防治技术研究总结报告[M]//刘万才. 小麦白粉病测报与防治技术研究. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[11] 曹克强, 王革新, 李双悦, 等. 小麦白粉病中期预测模型的建立[J]. 河北农业大学学报, 1994, 17(1): 57–61.

[12] 邵振润, 刘万才, 姜瑞中, 等. 豫北麦区小麦白粉病中期测报技术研究[J]. 植物保护, 1996, 22(6): 11–14.

[13] 刘梅, 阿不都热依木·吾斯曼. 新疆泽普县小麦病虫害无人机飞防技术[J]. 农业工程技术, 2020, 40(32): 33.

[14] 朱光辉. 喀什泽普县红枣间作模式的经济效益分析[J]. 中国市场, 2014(34): 115–116.

[15] 盛宝钦, 段霞瑜. 对记载小麦成株白粉病“0~9 级法”的改进[J]. 北京农业科学, 1991(1): 38–39.

(责任编辑: 杨明丽)