

张荣, 徐丹丹, 姜焰鸣, 等. 温度和露时对荔枝霜疫霉侵染发病的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(2): 88-94.
ZHANG Rong, XU Dandan, JIANG Yanming, et al. Effects of temperature and wetness duration on litchi downy blight caused by *Peronophythora litchii* [J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(2): 88-94.

温度和露时对荔枝霜疫霉侵染发病的影响

张荣^{1†}, 徐丹丹^{2†}, 姜焰鸣³, 江立群⁴, 习平根⁴, 陈厚彬¹, 姜子德⁴

(1 华南农业大学园艺学院, 广东广州 510642; 2 深圳职业技术学院应用化学与生物技术学院/博士后创新实践基地, 广东深圳 518055; 3 华南农业大学工程基础教学与训练中心, 广东广州 510642; 4 华南农业大学农学院/广东省微生物信号与作物病害防控重点实验室, 广东广州 510642)

摘要:【目的】研究不同温度和露时条件下荔枝霜疫霉 *Peronophythora litchii* 病菌孢子囊的萌发和侵染动态, 并以此为变量构建数学模型, 以期为病害精准预测预报及防控提供参考和依据。【方法】在人工控温、控湿条件下, 研究温度 (15~30 °C) 和露时 (2~24 h) 对荔枝霜疫霉孢子囊萌发和侵染的影响; 选用韦布尔模型的修正式, 在 SAS 软件中拟合得到准确度较好的孢子囊萌发和发病严重度模型, 进而绘制其对应的等高线风险预测图。【结果】温度、露时及其交互作用可显著影响荔枝霜疫霉孢子囊的萌发及寄主发病的严重度。荔枝霜疫霉孢子囊萌发率和寄主发病严重度随着露时的延长而逐渐升高。在温度为 25 °C 时, 所有露时处理条件下的孢子囊萌发率达到最高; 露时相同的条件下, 当温度为 25 °C 时, 孢子囊侵染荔枝果实发病严重度最强。当温度为 22~30 °C、露时为 3~24 h 时, 叶片的病害严重度超过 0.2; 孢子囊侵染果实发病迅速且严重, 当温度为 15~30 °C、露时约 2~3 h 时, 果实发病的严重度高于 0.6。荔枝霜疫霉侵染叶片和果实发病严重度模型分别为 $f(t, \theta) = \{1 - \exp[-(0.1943 \times t)^2]\} / \cosh[(\theta - 27.7696) \times 0.9277/2]$ 和 $f(t, \theta) = \{1 - \exp[-(0.4693 \times t)^2]\} / \cosh[(\theta - 24.556) \times 0.1709/2]$ 。【结论】荔枝霜疫病发生依赖于温度和露时, 本研究建立的模型可以用于指导生产上防治该病害的施药时间和次数。

关键词: 温度; 露时; 荔枝霜疫霉; 孢子囊; 萌发; 侵染; 模型

中图分类号: S431

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2020)02-0088-07

Effects of temperature and wetness duration on litchi downy blight caused by *Peronophythora litchii*

ZHANG Rong^{1†}, XU Dandan^{2†}, JIANG Yanming³, JIANG Liqun⁴, XI Pinggen⁴, CHEN Houbin¹, JIANG Zide⁴
(1 College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Department of Applied Chemistry and Biotechnology/Postdoctoral Innovation Practice Base, Shenzhen Polytechnic College, Shenzhen 518055, China; 3 Engineering Fundamental Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China; 4 College of Agriculture, South China Agricultural University/Guangdong Province Key Laboratory of Microbial Signals & Disease Control, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To study the germination and infecting dynamics of sporangia of *Peronophythora litchii* under different temperature (θ) and wetness duration (t), construct mathematical models based on θ and t , and provide references for precision prediction, prevention and control of litchi downy blight. 【Method】Under controlled temperature and wetness, the effects of temperature (15 to 30 °C) and wetness duration (3 to 24 h) on

收稿日期: 2019-07-03 网络首发时间: 2020-01-07 11:39:16

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20200106.0923.030.html>

作者简介: 张荣 (1979—), 女, 高级实验师, 博士, E-mail: r-zhang@scau.edu.cn; 徐丹丹 (1988—), 女, 助理研究员, 博士, E-mail: happyxudandan@126.com; †对本文贡献相同; 通信作者: 姜子德 (1962—), 男, 教授, 博士, E-mail: zdjiang@scau.edu.cn

基金项目: 国家荔枝龙眼产业技术体系建设项目 (CARS-32); 农业农村部热作病虫害疫情监测与防治项目 (151821301082351701)

sporangia germination of *P. litchii* and its infection on litchi were studied. Using the modified Weibull model, the sporangia germination model and disease severity model with good accuracies were fitted in SAS software. The corresponding contour risk prediction maps were drawn. 【Result】 Sporangia germination and disease severity were significantly affected by temperature, wetness duration and their interactions. The sporangia germination rate and disease severity increased along with the prolongation of wetness duration. At the temperature of 25 °C, the sporangia germination rate reached the highest for all wetness duration treatments. In the same wetness duration, the disease severity of litchi fruit was the highest at 25 °C. When the temperature was 15–30 °C and the wetness duration was 2–3 h, the disease severity of litchi leaf was above 0.2. The sporangia infected fruits seriously and quickly, and the disease severity of fruit was above 0.6 under the temperature of 22–30 °C and the wetness duration of 3–24 h. The disease severity models of leaf and fruit due to infection by *P. litchii* were $f(t, \theta) = \{1 - \exp[-(0.1943 \times t)^2]\} / \cosh[(\theta - 27.7696) \times 0.9277/2]$ and $f(t, \theta) = \{1 - \exp[-(0.4693 \times t)^2]\} / \cosh[(\theta - 24.556) \times 0.1709/2]$, respectively. 【Conclusion】 The occurrence of litchi downy blight depends on temperature and wetness duration. Our models can be used to guide the time and frequency of fungicide application for disease prevention and control.

Key words: temperature; wetness duration; *Peronophythora litchii*; sporangium; germination; infection; model

荔枝霜疫病由荔枝霜疫霉 *Peronophythora litchii* 引起,是造成荔枝果实褐变腐烂、产量降低和产量不稳定的主要病害,在我国荔枝栽培区普遍发生^[1-2];该病为害荔枝新梢、嫩叶及花穗,在气候条件适宜发病的年份,可引起荔枝产业经济损失高达80%以上,严重限制了荔枝产业的发展^[3]。

关于荔枝霜疫霉对温湿度适应性的研究多为温度或者湿度单独对荔枝霜疫霉孢子囊萌发和侵染的影响,Chen等^[4]研究台湾地区的荔枝霜疫霉在V8汁培养基中,菌丝生长的温度范围为8~32 °C,最适生长温度为24~28 °C;Liu等^[5]研究华南地区的荔枝霜疫霉在PDA培养基中,菌丝生长温度为12~32 °C,最适生长温度为28~30 °C;蔡学清等^[6]研究认为在24~28 °C条件下,果实最易被荔枝霜疫霉侵染且发病最重;黄河等^[7]认为荔枝霜疫霉孢子囊遇水立即脱落。荔枝霜疫病的发生和流行与日照时数、降雨天数有关,日照时数和降雨天数直接影响果园的温度和寄主露时,连续降雨数天即可造成该病害流行,且病害来势凶猛,一旦发生便迅速扩展蔓延^[8]。因此,监测种植区环境条件,结合物候期对病害发生进行有效的预测预报,在其发病前期和初期采取有效的防治措施,对遏制病害的流行有害至关重要。Montone等^[9]通过监测草莓叶片露时得到相应的预测模型应用于草莓病害的预警系统中;Roubal等^[10]依据降雨量、温度及相对湿度等环境因素预测 *Fusicladium oleagineum* 对橄榄的侵染及潜伏期;Uysal等^[11]探索了温度、露时及叶龄对菠菜炭疽病菌侵染及扩展的影响。而有关荔枝霜疫

病发生的流行条件、预测预报方法等报道较少^[12]。

农作物病虫害预测预报是植物保护工作的基础,是实现防灾减灾的重要保证。本研究在人工控温、控湿条件下,研究温度、露时(即寄主湿润持续时间)对荔枝霜疫霉孢子囊萌发和侵染的影响,以为荔枝霜疫病监测预警提供依据,提高预测预报准确性。

1 材料和方法

1.1 材料

叶片和果实接种试验选取的荔枝品种均为‘怀枝’。

荔枝霜疫霉菌株(编号SHS3)由华南农业大学植物病理学系真菌研究室分离、鉴定和保存。菌株培养用PDA培养基。

1.2 方法

1.2.1 温度和露时对孢子囊萌发的影响 叶片和果实上孢子囊萌发的观察参考蒋继志等^[13]的方法并稍作改动:选取长势一致的嫩叶和成熟果实置于保鲜盒中,将玻璃纸剪成均等大小(2 cm×2 cm),于无菌水中浸湿后附着于叶片或果实表面;然后吸取10 μL的孢子囊悬浮液($1 \times 10^4 \text{ mL}^{-1}$)滴于玻璃纸上,每个叶片或果实滴5滴,将叶片或果实分别放置在15、20、25和30 °C条件下培养,待达到相应的露时2、4、8、12和24 h后,置玻璃纸于载玻片上,在显微镜下观察孢子囊的萌发情况。每个处理设置3次重复,每次重复至少计数100个孢子囊。

1.2.2 温度和露时对叶片和果实感病的影响 荔

枝叶片的接种方法参考 Neufeld 等^[14] 和 Arauz 等^[15] 的方法并稍作改动。将孢子囊悬浮液喷雾接种于嫩叶上,至有液滴滴落。荔枝果实的接种方法:取新鲜的荔枝成熟果实用清水清洗后晾干,将果实孢子囊悬浮液中浸泡 1 min 后取出。

将接种过的叶片分别于 15、20、25 和 30 °C 条件下培养,接种过的果实分别于 20、25 和 30 °C 条件下培养,待达到相应的露时 2、4、8、12 和 24 h 后,用强风吹干叶片和果实,重新置于各自的培养温度下,24 h 后将所有的处理移至白天 24 °C、晚上 20 °C、12 h 光暗交替、75%~90% 相对湿度下继续培养 7 d。每天观察叶片或果实的发病情况并记录发病等级,计算接种 3 d 的病情指数。每个处理设置 3 次重复,每次重复至少接种 50 片叶片或 30 颗果实。

叶片发病分级标准:0 级,无病斑;1 级,病斑面积占叶片面积的 1%~25%;2 级,病斑面积占叶片面积的 26%~50%;3 级,病斑面积占叶片面积的 51%~75%;4 级,病斑面积占叶片面积的 75% 以上。

果实发病分级标准参考 Qu 等^[16] 的方法并稍作修改。0 级:果皮未出现病斑;1 级:病斑面积占整个果皮面积的 5% 以下;3 级:病斑面积占整个果皮面积的 6%~15%;5 级:病斑面积占整个果皮面积的 16%~25%;7 级:病斑面积占整个果皮面积的 26%~50%;9 级:病斑面积占整个果皮面积的 50% 以上。

病害发生严重度计算公式如下:

$$\text{严重度} = \frac{\sum(\text{叶片数/果实数} \times \text{病级值})}{\text{总叶片数/果实数} \times \text{制定的最高病级值}} \circ$$

1.3 数据模型拟合

模型拟合采用 SAS(9.4 版本) 软件进行分析。在 Neufeld 等^[14] 分析方法的基础上略作修改,首先用初步方差分析法分析孢子囊萌发试验的 3 组重

复、孢子囊侵染叶片试验的 3 组重复、侵染果实的 2 组重复是否有明显差异,若无明显差异,后续则取各组重复试验的平均值进行分析。其次对孢子囊在叶片、果实上萌发及侵染试验分两步进行分析,第一步使用 SAS 中的 PROC GLM 过程分析比较温度 (θ)、露时 (t) 以及它们的交互效应 ($\theta \times t$) 对孢子囊萌发和寄主发病严重度的影响;第二步则以方程 $f(t, \theta) = \{1 - \exp[-(B \times t)^2]\} / \cosh[(\theta - F) \times G/2]$ 拟合模型。该模型是韦布尔函数的修正式,其中斜体小写字母为自变量,大写斜体字母为参数。 B 代表变量 y 响应自变量露时 (t) 的固有增长率, F 和 G 分别代表变量 y 响应最佳温度和温度 (θ) 的固有变化率。使用 SAS 中的 PROC NLIN 过程,将孢子囊平均萌发率和寄主平均发病严重度分别拟合至非线性模型。使用 SAS PROC REG 过程分析孢子囊萌发率和寄主发病严重度观察值和预测值的相关性,评估模型拟合的可靠性。根据参数估计的显著性、渐近标准误差的大小评估模型的拟合优度,使用 MATLAB MESH 制作孢子囊在叶片、果实上萌发和侵染的三维曲面图。

1.4 病害风险预测模型

通过拟合模型 $f(t, \theta)$ 产生 t 和 θ 的函数,预测发病严重程度。根据最终模型参数估算温度和露时的范围,使用 MATLAB CONTOUR 制作等高线图,预测荔枝嫩叶和成熟果实霜疫病发生的严重度。

2 结果与分析

2.1 孢子囊萌发及寄主发病程度响应温度和露时的方差分析

方差分析结果(表 1)表明孢子囊萌发、孢子囊侵染嫩叶和孢子囊侵染成熟果实响应温度和露时的重复试验之间的差异不显著 ($P > 0.05$),因此可使

表 1 温度和露时对荔枝霜疫霉孢子囊萌发及荔枝叶片、果实发病程度影响的方差分析

Table 1 Analysis of variance for the effects of temperature and wetness duration on sporangia germination of *Peronophythora litchii* and disease severities of litchi leaf and fruit

来源 Source	叶片 Leaf						果实 Fruit					
	孢子囊萌发率			病害严重度			孢子囊萌发率			病害严重度		
	Sporangia germination rate			Disease severity			Sporangia germination rate			Disease severity		
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>P</i>	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>P</i>	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>P</i>	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>P</i>
重复 Replication	2	0	0.961 6	2	0.08	0.398 2	2	0	0.991 5	1	0	0.991 0
温度(θ) Temperature	3	0.89	0.000 1	3	0.61	0.000 1	3	0.38	0.000 1	2	0.06	0.000 1
露时(t) Wetness duration	4	1.41	0.000 1	4	0.46	0.000 1	4	6.62	0.000 1	4	0.71	0.000 1
$\theta \times t$	12	0.23	0.000 1	12	0.35	0.008 0	12	0.20	0.000 1	8	0.09	0.007 1

用试验数据平均值进行后续分析。温度、露时极显著影响孢子囊的萌发及叶片、果实接种 3 d 后的病害严重度 ($P < 0.0001$); 温度和露时的交互作用也可以显著影响孢子囊的萌发及寄主发病的严重度 ($P < 0.01$)。

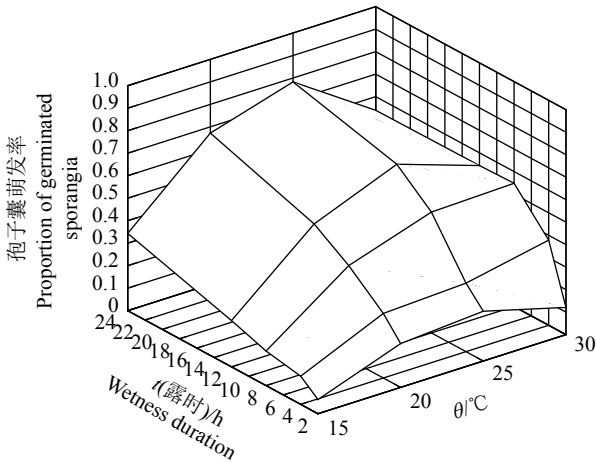
2.2 不同温度和露时对孢子囊萌发的影响情况

荔枝霜疫霉孢子囊在温度为 15~30 °C 时, 露时

为 2 h 时即开始萌发, 且萌发率随着露时的延长而逐渐增大; 在温度为 25 °C 时, 所有露时处理条件下的孢子囊萌发率达到最大值。孢子囊在叶片上萌发率大于 0.2 的温度为 25 °C, 露时 ≥ 2 h 或温度 20 和 30 °C, 露时 ≥ 4 h(图 1A); 在果实上孢子囊萌发率大于 0.6 的温度为 20 和 30 °C, 露时 ≥ 12 h 或温度 25 °C, 露时 ≥ 8 h(图 1C)。

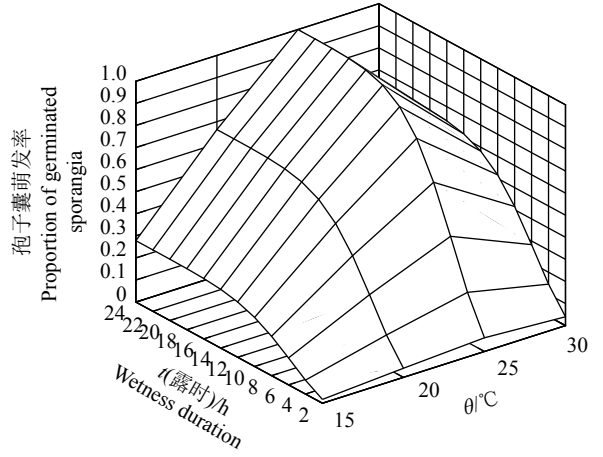
A: 叶片观察值

Observed value of leaf



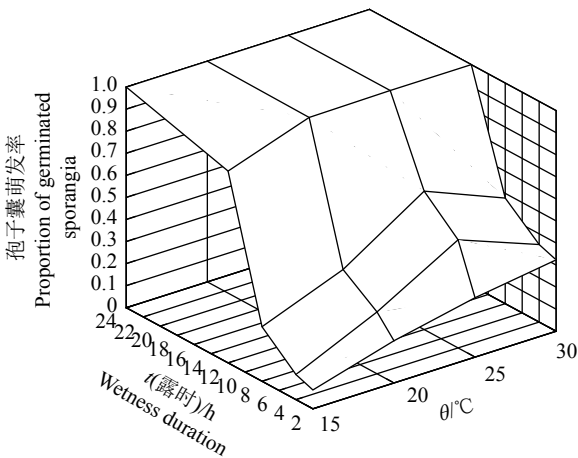
B: 叶片预测值

Predicted value of leaf



C: 果实观察值

Observed value of fruit



D: 果实预测值

Predicted value of fruit

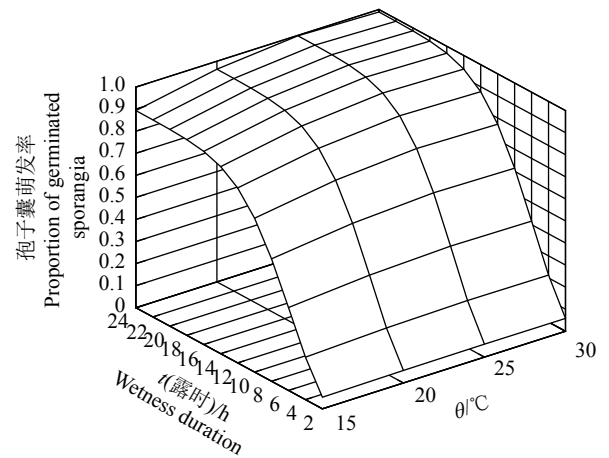


图 1 不同温度和露时处理下荔枝霜疫霉孢子囊在荔枝叶片和果实上的萌发率

Fig. 1 Sporangia germination rates of *Peronophythora litchii* on litchi leaf and fruit under the conditions of different temperature and wetness duration

2.3 不同温度和露时对叶片和果实发病程度的影响

露时相同的条件下, 当温度为 25 °C 时, 孢子囊为害荔枝嫩叶和成熟果实最为严重; 所有的温度处理下, 叶片和果实的发病程度随着露时延长而加重。相同的处理条件下, 孢子囊为害果实比叶片更

为严重和迅速(图 2)。荔枝叶片接种孢子囊后, 温度为 25 °C, 露时 ≥ 2 h 时, 病害严重度可达 0.2; 或者温度为 20 或 30 °C 时, 露时 ≥ 4 h; 而温度为 15 °C 时, 则需露时 ≥ 12 h(图 2A)。果实接种孢子囊后, 温度为 25 °C、露时 ≥ 2 h 或者温度为 20 和 30 °C、露时 ≥ 4 h, 果实的病情指数即可超过 0.6(图 2C)。

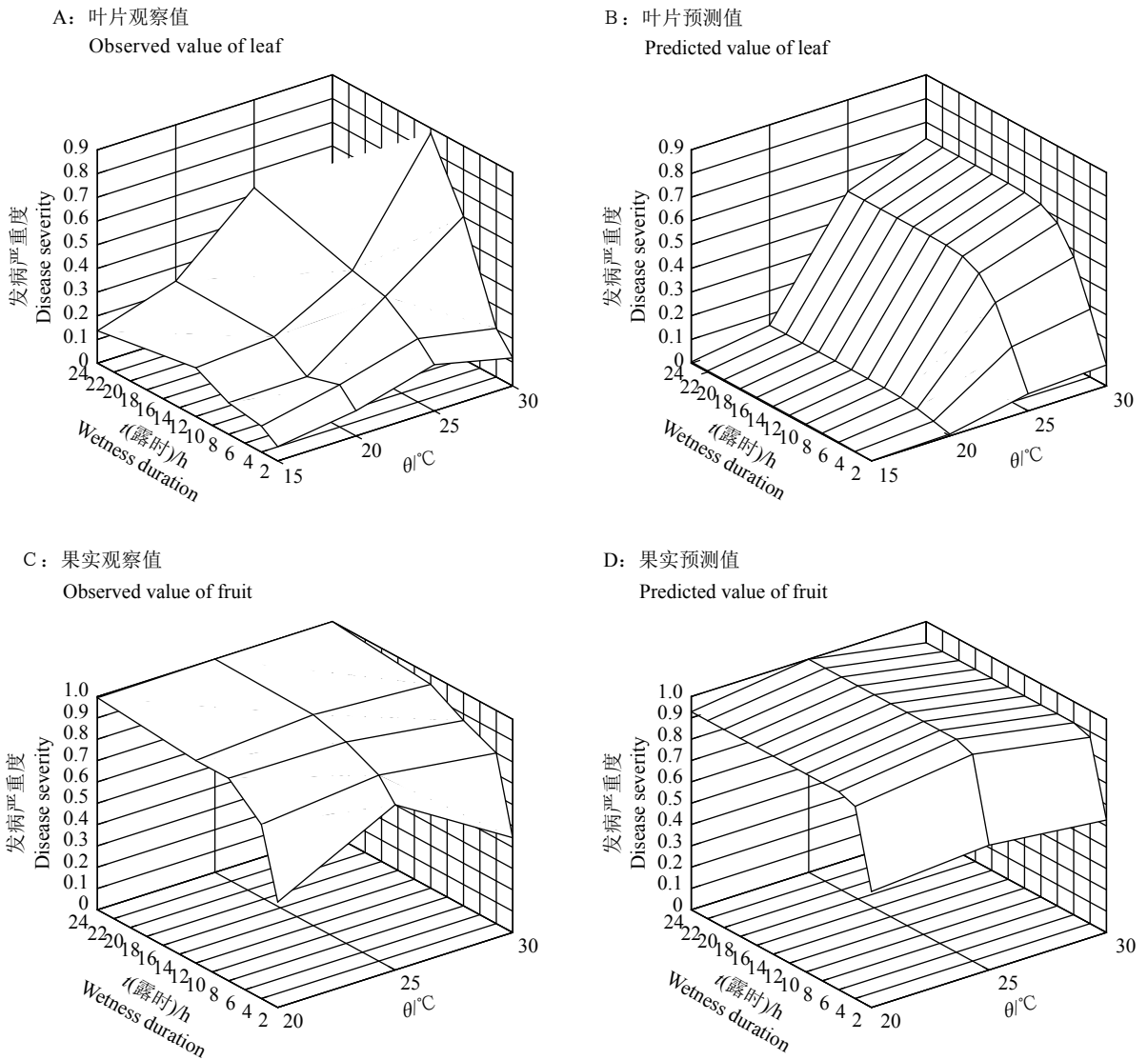


图 2 荔枝叶片和果实接种荔枝霜疫霉孢子囊 3 d 后的病情指数

Fig. 2 Disease severity of litchi leaf and fruit at three days after inoculation with *Peronophthora litchii* sporangia

2.4 模型的参数估计和检验

选用韦布尔模型的修正式, 在 SAS 软件中拟合得到了准确度较好的孢子囊萌发和发病严重度模型 $f(t, \theta) = \{1 - \exp[-(B \times t)^2]\} / \cosh[(\theta - F) \times G/2]$ 。模型很好地描述了温度和露时对荔枝霜疫霉孢子囊萌发和侵染的影响。孢子囊萌发率和病害严重度随露时变化呈 S 形曲线, 随温度变化呈单峰形曲线 (图 1B、1D 和图 2B、2D)。模型拟合的渐进参数估计值均有效且差异显著 ($P < 0.05$), 近似标准误差均较小 (表 2)。

从预测值和观测值相关性分析来看, 孢子囊对叶片和果实萌发率的预测值和观测值差异不显著 ($P > 0.05$), 即可认为预测值与观测值无差异, 模型拟合效果较好, 其决定系数 (r^2) 分别为 0.931 2 和 0.948 4; 孢子囊侵染叶片和果实病害严重度的预测值和观测值差异不显著 ($P > 0.05$), 即可认为预测值

与观测值无差异, 模型拟合效果较好, 决定系数分别为 0.814 7 和 0.991 6 (表 3)。

2.5 病害风险预测

根据荔枝嫩叶和成熟果实接种孢子囊 3 d 后的病害严重度的模型, 制得相应的风险预测等高线图 (图 3)。依据荔枝霜疫霉侵染叶片风险预测图可以推算出病害严重度从 0.1~0.9 变化所对应的温度和露时。当温度为 22~30 °C、露时约为 3~24 h 时, 叶片的病害严重度达到 0.2 以上 (图 3A)。依据侵染果实风险预测图可以推算出病害严重度从 0.5~0.9 变化所对应的温度和露时。由图 3B 可知, 荔枝霜疫霉为害果实更易成灾, 当温度为 15~30 °C、露时约 2~3 h 时, 果实发病的严重度高达 0.6。因此, 在荔枝果实接近成熟时, 必须严格监控温度和露时, 及时发布霜疫病发生流行的预警信息。

表2 模型参数估计¹⁾

Table 2 Parameter estimates for the model

参数 Parameter	荔枝叶片 Litchi leaf								荔枝果实 Litchi fruit							
	孢子囊萌发率				病害严重度				孢子囊萌发率				病害严重度			
	Sporangia germination rate				Disease severity				Sporangia germination rate				Disease severity			
	<i>e</i>	ASE	ACI _L	ACI _U	<i>e</i>	ASE	ACI _L	ACI _U	<i>e</i>	ASE	ACI _L	ACI _U	<i>e</i>	ASE	ACI _L	ACI _U
<i>B</i>	0.13	0.01	0.10	0.16	0.19	0.05	0.09	0.30	0.12	0.01	0.10	0.15	0.47	0.03	0.39	0.54
<i>F</i>	24.91	0.61	23.63	26.19	27.77	0.29	27.16	28.38	26.46	11.56	2.08	50.84	24.56	0.96	22.47	26.64
<i>G</i>	0.39	0.05	0.30	0.49	0.93	0.12	0.67	1.18	0.08	0.10	-0.14	0.30	0.17	0.03	0.10	0.25

1) *B*代表变量*y*响应自变量露时(*t*)的固有增长率,*F*和*G*分别代表变量*y*响应最佳温度和温度(θ)的固有变化率,*e*为参数估计值,ASE为参数近似标准误差,ACI_L、ACI_U为参数在95%置信区间的近似下限和上限

1) *B* represents the inherent growth rate of variable *y* responding to the independent variable(*t*), *F* and *G* represent the inherent changing rates of variable *y* responding to the best temperature and temperature(θ) respectively, *e* represents the estimate value of parameter, ASE is asymptotic standard error, ACI_L and ACI_U are the asymptotic lower and upper limits of estimates in 95% confidence interval respectively

表3 模型检验与拟合公式

Table 3 Verification and fitting formula of model

指标 Index	预测值与观测值相关性		模型拟合公式 Model fitting formula
	Relationship of observed value and predicted value		
	<i>r</i> ²	<i>P</i>	
孢子囊在荔枝叶片上的萌发率 Sporangia germination rate on litchi leaf	0.931 2	0.601 5	$f(t, \theta) = \{1 - \exp[-(0.126 6 \times t)^2]\} / \cosh[(\theta - 24.908 4) \times 0.394 2/2]$
孢子囊在荔枝果实上的萌发率 Sporangia germination rate on litchi fruit	0.948 4	0.140 0	$f(t, \theta) = \{1 - \exp[-(0.123 1 \times t)^2]\} / \cosh[(\theta - 26.457 4) \times 0.084 4/2]$
荔枝叶片发病严重度 Disease severity of litchi leaf	0.814 7	0.052 8	$f(t, \theta) = \{1 - \exp[-(0.194 3 \times t)^2]\} / \cosh[(\theta - 27.769 6) \times 0.927 7/2]$
荔枝果实发病严重度 Disease severity of litchi fruit	0.991 6	0.919 1	$f(t, \theta) = \{1 - \exp[-(0.469 3 \times t)^2]\} / \cosh[(\theta - 24.556) \times 0.170 9/2]$

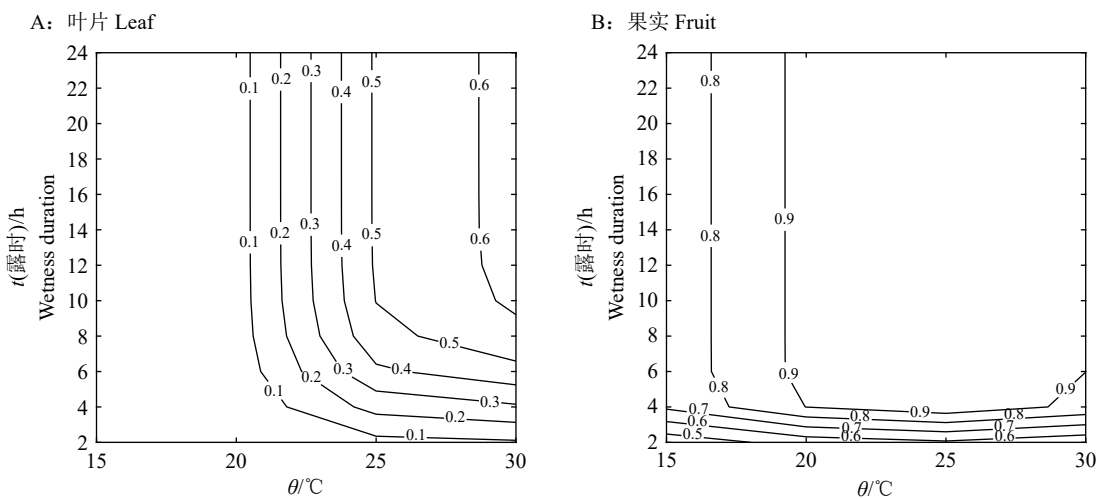


图3 荔枝霜疫霉侵染荔枝叶片和果实的风险预测图

Fig. 3 Risk prediction charts for Peronophthora litchi infecting litchi leaf and fruit

3 讨论与结论

温度和湿度在病原孢子产生和病害的发生过程中起着至关重要的作用^[17]。据报道,病原真菌孢

子的近距离传播在一定程度上依赖于局部的温度和湿度^[18]。近年来,多用定量分析模型研究温度和露时对病原菌孢子萌发侵染的影响。在卵菌病害的研究中, Arauz 等^[15]通过定量分析模型研究了温度

和露时对黄瓜霜霉病菌 *Pseudoperonospora cubensis* 孢子萌发和侵染的影响; Rakotonindraina 等^[19] 则结合分析模型研究了不同气象条件、土质等外界因素影响下马铃薯晚疫病菌 *Phytophthora infestans* 对马铃薯的为害。在果园病害的研究中, Li 等^[20] 定量研究了温度和相对湿度对梨黑星病菌 *Venturia nashicola* 分生孢子萌发和侵染的影响。本研究在人工控温、控湿条件下, 定量分析了 4 组温度 (15~30 °C)、5 组露时 (2~24 h) 对荔枝霜疫霉孢子囊萌发和侵染的影响, 利用 SAS 软件构建了以温度和露时为自变量的函数。并在此基础上, 制得荔枝霜疫霉侵染嫩叶和成熟果实相对应的风险预测图。在卵菌侵染叶片的试验中, Neufeld 等^[14] 研究认为病害严重度不大于 0.1 时, 为轻度发病, 病害严重度为 0.1~0.2 时属于中度发病, 不小于 0.2 则为重度发病。参考此标准, 本研究认为霜疫霉侵染荔枝嫩叶时, 当温度为 22~30 °C、露时为 3~24 h 时, 叶片的病害严重度达到 0.2 以上, 认定为嫩叶发病严重, 应及时防治。孢子囊为害成熟果实则更加迅速和严重, 当温度为 15~30 °C、露时约 2~3 h 时, 果实的病害严重度即高达 0.6, 足可为害成灾。

本研究获得的荔枝霜疫霉侵染荔枝嫩叶和成熟果实的风险预测图可为实际生产中的荔枝霜疫病预测预报提供参考, 但仍存在不足, 例如在构建模型后, 使用 SAS PROC REG 过程分析孢子囊萌发率和寄主发病严重度观察值和预测值的相关性, 认为预测值与观测值无差异, 模型拟合效果较好。模型的准确性, 还要结合生产实际中病害发生流行期的温度和露时进行进一步验证。

参考文献:

- [1] ANN P, KO W. Blossom blight of litchi in Taiwan caused by *Peronophythora litchii*[J]. *Plant Dis*, 1984, 68(9): 826.
- [2] 戚佩坤. 广东果树真菌病害志[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [3] WANG H, SUN H, STAMMLER G, et al. Generation and characterization of isolates of *Peronophythora litchii* resistant to carboxylic acid amide fungicides[J]. *Phytopathology*, 2010, 100(5): 522-527.
- [4] CHEN L C, LAI S C, LEE C C, et al. Effect of environmental factors on mycelial growth of *Peronophythora litchii*[J]. *Plant Pathol Bul*, 1998, 7(3): 128-133.
- [5] LIU J, LIU A Y, CHEN W X. Studies on the biological characteristics of lychee downy blight[J]. *Acta Hort*, 2005, 665: 415-420.
- [6] 蔡学清, 吴昌镇, 林通, 等. 环境因子对荔枝霜疫霉生长

- 及侵染的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(9): 283-288.
- [7] 黄河, 王春平, 徐大雅. 荔枝霜疫霉的研究[J]. *真菌学报*, 1983, 2(4): 201-206.
- [8] 张荣. 荔枝霜疫霉侵染过程研究及农业措施控制作用初探[D]. 广州: 华南农业大学, 2012: 63-64.
- [9] MONTONE V O, FRAISSE C W, PERES N A, et al. Evaluation of leaf wetness duration models for operational use in strawberry disease-warning systems in four US states[J]. *Int J Biometeorol*, 2016, 60(11): 1-14.
- [10] ROUBAL C, REGIS S, NICOT P C. Field models for the prediction of leaf infection and latent period of *Fusicladium oleagineum* on olive based on rain, temperature and relative humidity[J]. *Plant Pathol*, 2013, 62(3): 657-666.
- [11] UYSAL A, SENER K. Influence of inoculum density, temperature, wetness duration, and leaf age on infection and development of spinach anthracnose caused by the fungal pathogen *Colletotrichum spinaciae*[J]. *Eur J Plant Pathol*, 2017(S1): 1-12.
- [12] 张荣, 吕华强, 姜子德, 等. 落花落果对荔枝园霜疫霉初侵染源萌发的作用[J]. *中国植保导刊*, 2014, 34(3): 13-16.
- [13] 蒋继志, 郑小波. 用纤维素膜技术研究致病疫霉侵入前与植物相互作用的新方法[J]. *植物病理学报*, 1996, 3: 269-275.
- [14] NEUFELD K N, OJIAMBO P S. Interactive effects of temperature and leaf wetness duration on sporangia germination and infection of cucurbit hosts by *Pseudoperonospora cubensis*[J]. *Plant Dis*, 2012, 96(3): 345-353.
- [15] ARAUZ L F, NEUFELD K N, LLOYD A L, et al. Quantitative models for germination and infection of *Pseudoperonospora cubensis* in response to temperature and duration of leaf wetness[J]. *Phytopathology*, 2010, 100(9): 959-967.
- [16] QU H X, SUN G C, JIANG Y M, et al. Pathogenesis-related proteins in litchi after inoculation with *Peronophythora litchii*[J]. *Acta Hort*, 2001, 558: 439-442.
- [17] GRANKE L L, HAUSBECK M M. Influence of environment on airborne spore concentrations and severity of asparagus purple spot[J]. *Plant Dis*, 2010, 94(7): 843-850.
- [18] PAN Z, LI X, YANG X B, et al. Prediction of plant disease through modelling and monitoring airborne pathogen dispersal[J]. *CAB Reviews*, 2010, 5(18): 1-11.
- [19] RAKOTONINDRAINAINA T, CHAUVIN J É, PELLÉR, et al. Modeling of yield losses caused by potato late blight on eight cultivars with different levels of resistance to *Phytophthora infestans*[J]. *Plant Dis*, 2012, 96(7): 935-942.
- [20] LI B, ZHAO H, LI B, et al. Effects of temperature, relative humidity and duration of wetness period on germination and infection by conidia of the pear scab pathogen (*Venturia nashicola*)[J]. *Plant Pathol*, 2003, 52(5): 546-552.