

DOI:10.13718/j.cnki.zwxy.2025.03.005

烟草青枯病早期预警模型的研究

耿丽^{1,2}, 王宏涛², 韩雨静², 王丽丽³,
宗浩³, 刘春菊⁴, 张超³, 谭效磊³,
任广伟², 王新伟², 陈海涛¹

1. 中国烟草总公司重庆市公司, 重庆 400023
2. 中国农业科学院烟草研究所/烟草行业病虫害监测预警与综合防治重点实验室, 山东 青岛 266101
3. 山东临沂烟草有限公司, 山东 临沂 276003
4. 山东潍坊烟草有限公司, 山东 潍坊 261205

摘 要: 为提升烟草青枯病监控预警水平, 实现早期预警, 基于人工气候室内盆栽精准控制试验, 利用正交设计方法系统研究了土壤温度、土壤湿度、土壤 pH 值和病原菌数量 4 个关键因子对烟草青枯病发生流行的影响, 初步建立了烟草青枯病早期预警模型, 实现了青枯病监控指标降维, 并开展了大田模型验证。结果表明: ①利用二元 Logistic 回归分析建立了烟草青枯病发生概率的预测模型 $P_{(M)} = \frac{1}{1 + e^{(13.992\ 5 - 0.375\ 8T - 10.329\ 9H)}}$, 模型总体正确百分比为 89.2%。②利用逐步回归分析, 建立了烟草青枯病病情指数、病害发生程度、接种 30 d 病害发生程度以及轻度危害流行期天数的预测模型, 模型的验证决定系数(R^2)分别为 0.640 9、0.715 3、0.894 4、0.818 4。为实现烟草青枯病精准预警和提前防控奠定了理论基础。

关 键 词: 烟草青枯病; 二元 Logistic 回归分析;
逐步回归分析; 预警模型

中图分类号: S435

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2025)03-0043-09

Study on Early Warning Model of Tobacco Bacterial Wilt

GENG Li^{1,2}, WANG Hongtao², HAN Yujing², WANG Lili³,
ZONG Hao³, LIU Chunju⁴, ZHANG Chao³, TAN Xiaolei³,

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 中国烟草总公司山东省公司项目“烟草青枯病精准预警关键技术研发”(202012); 中国烟草总公司绿色防控重大专项项目“烟草主要病虫害智能化监测预警关键技术研究”[110202101026(LS-01)]; 中国烟草总公司云南省公司项目“基于无人机的烟草精准植保技术体系研究与应用”(2021530000241020-2); 中国烟草总公司重庆市公司项目“重庆烟草病虫害智能预警体系关键技术开发与应用”(B20202NY1336)。

作者简介: 耿丽, 硕士研究生, 主要从事烟草病虫害监测预警研究。

通信作者: 王新伟, 副研究员。

REN Guangwei², WANG Xinwei², CHEN Haitao¹

1. Chongqing Branch of China National Tobacco Corporation, Chongqing 400023, China;

2. Institute of Tobacco Research of CAAS, Key Laboratory of Tobacco Pest Monitoring Controlling and Integrated Management, Qingdao Shandong 266101, China;

3. Shandong Linyi Tobacco Co. Ltd, Linyi Shandong 276003, China;

4. Shandong Weifang Tobacco Co. Ltd, Weifang Shandong 261205, China

Abstract: In order to improve the level of monitoring and early warning for tobacco bacterial wilt, the effects of soil temperature, soil humidity, soil pH and number of pathogens on the disease epidemic were studied through orthogonal design. The study was conducted with a precisely controllable pot experiment in a controlled-climate room. The early warning model of tobacco bacterial wilt was established and verified by the field data. The results showed that: ① By binary logistic regression analysis, a prediction model for the disease occurrence probability was established. The regression equation was $P_{(M)} = \frac{1}{1 + e^{(13.9925 - 0.3758T - 10.3299H)}}$, and the overall correct percentage was 89.2%. ② By stepwise regression analysis, the prediction model for disease index, disease occurrence degree, disease occurrence degree after 30 days of inoculation and the days of low-risk epidemic period were established, with the validation coefficient (R^2) of 0.6409, 0.7153, 0.8944 and 0.8184, respectively. This study laid a theoretical foundation for the realization of early warning and control of tobacco bacterial wilt.

Key words: tobacco bacterial wilt; binary logistic regression analysis; stepwise regression analysis; warning model

烟草是我国重要的经济作物^[1], 受烟草青枯病危害, 每年烟叶产量损失达8 000 t以上。烟草青枯病的病原菌为青枯劳尔氏菌(*Ralstonia solanacearum*), 被认为是全球最具毁灭性的植物细菌性病原菌之一^[2]。一旦烟株被感染, 将严重影响烟草的产量和质量, 造成巨大的经济损失^[3], 在部分烟草种植区, 产量损失可达60%以上^[4]。目前, 针对青枯病的药剂防治尚缺乏理想的方案, 抗病品种的应用也因地域限制以及抗性丧失等问题而受限, 使得青枯病的防治工作面临重重困难^[5]。鉴于此, 提前采取有效的措施是烟草青枯病防控的关键, 实现对烟草青枯病的早期预测更是至关重要。

烟草青枯病的发生与流行受气象、土壤、病原菌、栽培管理措施等诸多因素的影响。在气象因子中, 温湿度扮演着关键角色, 高温高湿环境被证实有利于病害的发生与发展^[6-9]; 林勇等^[8]研究了气温和降水量与青枯病的关系并建立了预测方程; 黎妍妍等^[10]建立了烟草青枯病流行动态与气象因子的逐步回归模型。有研究表明, 土壤pH值可通过影响青枯病菌的消长、成膜能力和运动性, 从而改变青枯病菌的致病力。当土壤pH值处于5.0~8.0时, 青枯病菌发挥致病力, 最适pH值为6.0, 土壤pH值与青枯病病情指数呈高度负相关^[11-15]。田间病原菌数量与病害发生密切相关, 何永宏等^[16]通过系列浓度梯度的菌悬液接种试验发现, 烟草青枯病的侵染阈值为 3×10^2 cfu/g。青枯病菌的越冬菌量与青枯病病情指数呈正相关, 即越冬菌量越大, 发病越严重^[17]。赖荣泉等^[18]的研究发现, 烟株叶柄基部含菌量与青枯病发病率呈正比, 并建立了叶柄基部青枯病菌含量与大田烟株发病率的回归模型。李想等^[19]通过盆栽试验发现, 根际土壤中的青枯菌数量大于 10^7 cfu/g, 温度为30~35℃, 湿度大于75%时烟株易感染暴发青枯病, 但并未建立预测模型。

综合既往研究成果可知, 当前针对烟草青枯病的研究多聚焦于单一因素对病害发生的影

响,而基于气象、土壤、病原菌等多因素耦合的烟草青枯病预测模型却鲜有报道。本文通过正交设计的盆栽试验,研究了土壤温度、土壤湿度、土壤 pH 值、病原菌数量 4 因素对青枯病发病的影响,建立了多维度的青枯病发生概率及发生程度的预测模型,并对模型进行了大田验证,以期为青枯病的早期预警及防控策略提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 室内精准控制试验

1.1.1 试验材料与地点

供试烟草青枯病菌株和供试烟草品种“中烟 100”均由中国农业科学院烟草研究所植物保护研究中心提供;试验在中国农业科学院烟草研究所即墨试验基地开展。

1.1.2 试验设计及试验方法

室内盆栽试验采用 $L_{16}(4^5)$ 正交设计^[20]。如表 1 所示,试验设计了土壤温度(T)、土壤湿度(H)、土壤 pH 值(pH)、接菌量(N)4 个因子,每个因子设 4 个水平,共 16 组处理。具体试验方法如下:

选用长势均匀、大小一致的大十字期烟草幼苗,用无菌水漂洗根部后移栽至已经提前调好育苗土 pH 值的育苗盆中。随后置于 25 ℃ 人工气候室按常规管理方法培养 30 d,再分别接种不同浓度的青枯病病原菌菌悬液 10 mL。同时调节各处理的土壤湿度,置于不同大气温度的气候室进行培养,每组处理烟苗 20 株,重复 3 次。培养条件为光周期 12L:12D,空气相对湿度 $70\% \pm 5\%$ 。

通过调节人工气候室的大气温度来精准控制土壤温度,并利用温室宝装备实时监测土壤温度变化。对于土壤湿度的调控,初始湿度通过调整浇水量来设定,后续培养过程中同样借助温室宝装备实时跟踪湿度变化,若湿度下降,则适量补水以维持稳定。土壤 pH 值的调节采用 1 mol/L 的盐酸或氢氧化钠溶液,操作细节参考陈菁等^[21]的方法,在试验期间定期使用 pH 计进行测定,若 pH 值出现波动,则适时浇入预先调节好 pH 值的水来保持其稳定^[13]。病原菌的接种采用灌根法,具体步骤按照向立刚等^[22]的方法操作,接种后定期运用 RT-PCR 技术^[23]检测土壤中的病原菌数量,以监控病原菌的动态变化。

表 1 $L_{16}(4^5)$ 正交设计表

分组	土壤温度/℃	土壤湿度/%	土壤 pH 值	接菌量/(cfu · g ⁻¹)
1	20	45	5	2×10^2
2	20	60	6	2×10^4
3	20	75	7	2×10^6
4	20	90	8	2×10^8
5	25	45	6	2×10^6
6	25	60	5	2×10^8
7	25	75	8	2×10^2
8	25	90	7	2×10^4
9	30	45	7	2×10^8
10	30	60	8	2×10^6
11	30	75	5	2×10^4
12	30	90	6	2×10^2
13	35	45	8	2×10^4
14	35	60	7	2×10^2
15	35	75	6	2×10^8
16	35	90	5	2×10^6

1.1.3 数据调查方法

采用温室宝装备实时记录各处理每日的土壤温度、土壤湿度等数据。自接种之日起每天观察烟株的发病情况,待烟株首次出现青枯病的萎蔫症状后,每3 d调查一次发病率和病情指数,调查方法参照《烟草病虫害分级及调查方法》(GB/T 23222-2008)。

1.2 大田验证试验

1.2.1 试验地点

2021年在山东省沂水县四十里烟站和沂水试验站设置4个系统调查点,调查点面积约667 m²。调查田块土壤类型均为褐土,烟株移栽日期为4月28日。

1.2.2 数据调查方法

土壤温湿度调查:采用温室宝装备实时记录调查点烟叶移栽至采收结束时每日的大气温湿度、土壤温湿度等数据。土壤pH值和病原菌数量调查:烟株移栽后,采用五点取样法每7 d采集烟株根际土壤样品,检测土壤pH值和病原菌数量。病情调查:自田间初现青枯病症状开始,每7 d调查一次发病率和病情指数。

1.3 数据处理

1.3.1 病害发生概率预测模型

以接种时的土壤温度、土壤湿度、土壤pH值以及初始接菌量为自变量,以接种7 d烟株是否发病为因变量,利用二元Logistic回归分析,构建病害短期发生概率预测模型。模型中各变量的名称与定义详见表2。

表2 二元Logistic回归变量名称与定义

变量	变量名称	定义
因变量	烟草青枯病是否发生(M)	不发生=0,发生=1
	土壤温度(T)	实际数值
自变量	土壤湿度(H)	实际数值
	土壤pH值(pH)	实际数值
	初始接菌量(N)	对数函数转换

1.3.2 病害发生程度预测模型

以监测的土壤平均温度(T)、土壤平均湿度(H)、土壤pH值(pH)、初始接菌量(N)和接种天数(D)为自变量,以病情指数(I)、病害发生程度(Y)为因变量,采用逐步回归分析方法分别构建病情指数、病害发生程度的预测模型。

以监测的土壤温度(T)、土壤湿度(H)、土壤pH值(pH)、初始接菌量(N)为自变量,以接种30 d病害发生程度(Z)、轻度发生流行期天数(F ,即病情指数达到5的天数)为因变量,采用逐步回归分析方法构建预测模型。其中,青枯病发生程度划分参考《烟草病害预测预报调查规程》(YC/T 341.1—2010)^[24]。

1.3.3 模型的大田验证

病害发生概率预测模型:以5月26日、6月2日、6月9日、6月16日、6月23日、6月30日、7月6日的土壤温度和湿度的滑动平均值为参数指标,利用模型预测数据采集7 d后青枯病发生的概率,判断预测值与实际情况是否符合,计算符合率,符合率计算参考杨银娟等^[25]的方法。

轻度发生流行期天数预测模型:将病害始发前 7 d 的土壤温度、土壤湿度、土壤 pH 值和病原菌数量的平均值带入模型中,对模型进行验证。

以上所有数据均使用 Excel 进行整理,并通过 SPSS 26.0 进行分析。

2 结果与分析

2.1 基于室内精准控制试验模型的建立

2.1.1 烟草青枯病发生流行分析

接种 30 d 时各处理的病情指数及其增长速率如表 3 所示,结果表明,在 $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 4 个处理中,只有处理 1($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $H=45\%$ 、 $pH=5$ 、 $N=2\times 10^2$)未发病,其余 3 个处理均发病,表明若其他条件合适,青枯病在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仍可发生;处理 15($T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $H=75\%$ 、 $pH=6$ 、 $N=2\times 10^8$)发病最早,接种后 6 d 发病;处理 6($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $H=60\%$ 、 $pH=5$ 、 $N=2\times 10^8$)病情发展最快,病情指数增长速率为 3.14,病情最重。

表 3 病情指数和病情增长速率统计表

分组	病情指数	病情指数增长速率
1	0.00±0.00	0.00±0.00
2	5.93±2.50	0.25±0.10
3	15.43±2.31	0.64±0.10
4	32.96±8.87	1.37±0.37
5	71.81±19.81	2.99±0.83
6	88.40±8.26	3.68±0.34
7	13.19±2.47	0.55±0.10
8	55.00±7.13	2.29±0.30
9	54.32±1.01	2.26±0.04
10	54.90±6.01	2.29±0.25
11	34.07±13.26	1.42±0.55
12	36.30±5.47	1.51±0.23
13	22.92±3.16	0.95±0.13
14	18.52±4.00	0.77±0.17
15	83.33±7.75	2.71±0.30
16	75.31±10.07	3.14±0.42

注:图中数据为平均值±标准差。

2.1.2 烟草青枯病发生概率的预测模型

二元 Logistic 回归分析结果显示,土壤温度和土壤湿度两个指标进入最终模型,两自变量均与因变量显著相关($p<0.05$),表明其在青枯病的发生中起至关重要的作用。烟草青枯病发生概率的预测模型为:

$$P_{(M)} = \frac{1}{1 + e^{(13.992\ 5 - 0.375\ 8T - 10.329\ 9H)}}$$

式中, $P_{(M)}$ 为烟草青枯病发生的概率, T 为土壤温度, H 为土壤湿度。

模型精度检验如表 4 所示,模型系数的 Omnibus 检验 $p<0.05$,表明模型总体有统计学意义;采用霍斯默-莱梅肖检验对模型进行拟合优度检验,显著性水平为 0.690,说明统计结果不显著($p>0.05$),拒绝原假设,模型拟合度较好,对数据具有一定的解释能力;正确率表示模型预测结果与实际结果一致的比例,本次模型正确率为 89.2%,说明模型的精度较好。

表4 二元 Logistic 回归模型精度评价表

霍斯默-莱梅肖检验			模型系数的 Omnibus 检验			正确率检验/%
卡方	自由度	<i>p</i>	卡方	自由度	<i>p</i>	89.2
0.742	2	0.690	16.040	2	<0.001	

2.1.3 烟草青枯病发生程度预测模型

通过逐步回归分析分别构建了病情指数、病害发生程度、接种 30 d 病害发生程度、轻度发生流行期天数的预测模型,相关模型及精度检验如表 5 所示,模型均通过显著性检验,决定系数分别为 0.640 9、0.715 3、0.894 4 和 0.818 4。参数分析结果表明(表 6),土壤温度对 4 个模型均有极显著影响,病原菌数量对接种 30 d 病害发生程度预测模型的影响较大,接种天数对病情指数及病害发生程度模型的影响较大。

表5 烟草青枯病预测模型及精度检验

因变量	逐步回归模型	R^2	<i>p</i>
病情指数	$I = -42.073\ 3 + 1.322\ 3T + 40.393\ 2H - 4.543\ 1pH + 0.918\ 2D + 0.403\ 8N^2 - 18.531\ 2H^3 + 6.000\ 8 \times 10^{-4} D^3$	0.640 9	0.013 1
病害发生程度	$Y = -21.873\ 6 + 1.981\ 1T + 3.042\ 5H - 0.109\ 1pH + 0.272\ 3N + 0.137\ 3D - 0.068\ 6T^2 + 8.134\ 9 \times 10^{-4} T^3 - 1.230\ 1H^3 - 2.205\ 0 \times 10^{-5} D^3$	0.715 3	0.025 6
接种 30 d 病害发生程度	$Z = -60.565\ 7 + 5.901\ 3T + 0.685\ 6N - 0.186\ 4T^2 + 1.930\ 0 \times 10^{-3} T^3 + 1.066\ 08H^3 - 2.69 \times 10^{-3} N^3$	0.894 4	0.045 1
轻度发生流行期天数	$F = 841.789\ 0 - 37.616\ 9T - 10.712\ 0H - 233.380\ 0pH + 1.404\ 0T^2 + 37.459\ 0pH^2 - 0.439\ 0N^2 - 0.017\ 3T^3 - 1.977\ 4pH^3 + 0.027\ 5N^3$	0.818 4	0.019 6

表6 参数的偏 R^2 及其检验

自变量	病情指数		病害发生程度		接种 30 d 病害发生程度		轻度发生流行期天数	
	<i>R</i>	<i>p</i>	<i>R</i>	<i>p</i>	<i>R</i>	<i>p</i>	<i>R</i>	<i>p</i>
<i>D</i>	0.308 4**	<0.000 1	0.397 9**	<0.000 1				
D^3	0.005 7**	0.006 8	0.002 7	0.037 5				
<i>N</i>			0.153 6**	<0.000 1	0.380 3**	<0.000 1		
N^2	0.172 4**	<0.000 1					0.031 0	0.019 6
N^3					0.012 4	0.040 6	0.227 0**	<0.000 1
<i>T</i>	0.097 3**	<0.000 1	0.124 6**	<0.000 1	0.222 4**	<0.000 1	0.291 3**	0.000 1
T^2			0.001 8	0.085 4	0.211 3**	<0.000 1	0.058 3**	0.009 0
T^3			0.003 0	0.025 6	0.011 0	0.045 1	0.028 1	0.035 6
<i>H</i>	0.007 7**	0.001 8	0.020 0**	<0.000 1			0.077 6**	0.007 7
H^3	0.004 7	0.013 1	0.005 7**	0.002 4	0.057 1**	<0.000 1		
<i>pH</i>	0.044 7**	<0.000 1	0.006 0**	0.002 2			0.033 7	0.028 9
pH^2							0.026 4	0.063 4
pH^3							0.045 1	0.030 7

注: ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上差异有统计学意义。

2.2 基于大田数据的模型验证

2.2.1 大田青枯病病情指数增长情况分析

选择 4 个点开展烟草青枯病系统调查,调查结果如图 1 所示,烟株移栽后 65 d 左右初见青枯病症状,累计调查 7 次,4 个调查点烟草青枯病的病情指数增长趋势一致,均呈前期缓慢、中期迅速增长、后期平稳的特征,最后一次调查时的病情指数为 16.21~24.43。

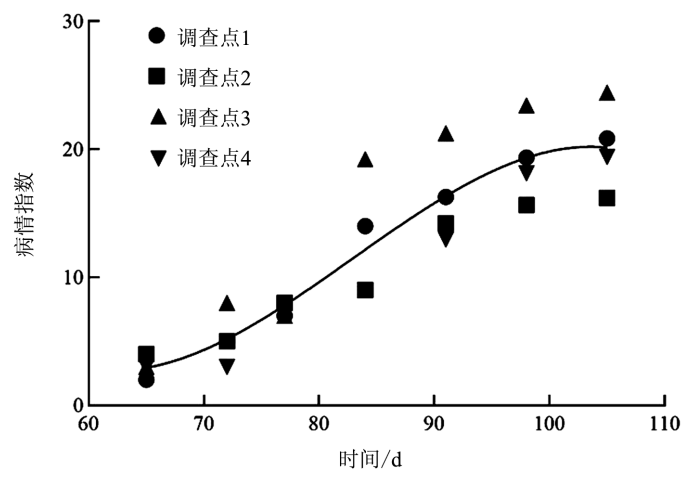


图 1 烟草青枯病移栽后病情指数动态变化

2.2.2 烟草青枯病发生概率预测模型的验证

基于土壤温度和土壤湿度 2 个指标,利用青枯病发生概率预测模型对大田青枯病的发生概率进行预测,结果如表 7 所示,将预测结果与病情调查的实际结果进行比较,在预测的 21 条数据中,有 17 条预测结果与实际情况相符,预测结果与实际情况一致的比例为 80.95%。表明上述模型的验证效果较好。

表 7 青枯病发生概率预测模型的验证

调查结果	预测结果		调查总数/次	预测准确率/%
	发生	不发生		
发生	7	2	9	77.78
未发生	2	10	12	83.33
合计	9	12	21	80.95

2.2.3 轻度发生流行期天数预测模型的验证

青枯病轻度发生流行期天数预测结果如表 8 所示,预测值与实际值的符合率最低为 68.64%,平均符合率为 71.81%,模型验证效果较好,可用于预测沂水烟区病害发生程度达到 2 级所需天数。

表 8 低危害流行期天数模型的验证结果

地点	土壤温度/℃	土壤湿度/%	pH 值	病原菌数量/ log(cfu · g ⁻¹)	预测值	实际值	符合率/%
调查点 1	23.61	21.97	7.28	8.08	15.42	20.25	68.68
调查点 2	27.60	36.21	5.37	7.26	13.60	17.86	68.64
调查点 3	26.29	25.64	5.45	7.55	13.55	16.52	78.10

3 讨论

研究结果表明,土壤初始菌源量、土壤温度和土壤湿度是影响青枯病发生的关键性因素,在初始土壤菌源量为 2×10^2 cfu/g,土壤温度和土壤湿度均偏低时,青枯病未发生,因此可以将

初始土壤菌源量 2×10^2 cfu/g 作为判断青枯病发生风险的关键指标,这与何永宏等^[16]通过盆栽试验确定的烟草青枯病的侵染阈值相近,可使用该指标开展烟田土壤的早期筛查,确定烟草青枯病发生的风险区域。

在确定了烟草青枯病高风险发生区域后(土壤初始菌源量大于 2×10^2 cfu/g),基于二元 Logistic 回归分析建立了青枯病发生概率预测模型,基于逐步回归分析建立了病情指数、病害程度及低危害流行期天数预测模型。从模型拟合结果可知,影响青枯病发生概率的关键因子为病害始发前 7 d 的土壤温度和土壤湿度,这与多数研究结论一致^[7-9, 10-12]。在土壤湿度不变的情况下,土壤温度每增加一个单位,青枯病发生的概率增加 1.4 倍,反之,在土壤温度保持不变时,湿度每增加一个单位病害发生概率增加 1.1 倍,可见土壤温度对病害发生概率的影响更为明显。土壤温度和土壤湿度可以通过多种方式影响植物病原菌^[26],包括影响病原菌在土壤中的生存、移动和增殖^[27],影响病原菌入侵性^[28]或间接影响植物防御的激活^[29],可通过以上两个指标预测田间青枯病的流行概率,当发生概率大于 50% 时,青枯病存在发生风险,若连续 3 d 发生概率较高,建议立即采取措施,实现青枯病的提前预警与提前防治。值得注意的是,在青枯病发生概率预测模型中,土壤温度和土壤湿度为关键影响因子,土壤 pH 值与初始菌源量未进入最终模型。在青枯病发生程度预测模型中,初始菌源量对模型的贡献程度增大,而土壤 pH 值对模型的贡献程度仍较低。原因在于青枯病短期发生概率预测模型是以土壤中存在青枯病病原菌为基础开发的,病原菌含量的高低不能成为青枯病是否发生的关键因素,但能够影响青枯病的发病速度和发生程度,土壤温度和土壤湿度等环境因素成为青枯病是否发生的关键因素;土壤 pH 值主要影响了土壤中微生物的群落结构,从而对青枯病发生产生间接影响^[13],对青枯病是否发生贡献度较小,但会影响青枯病的发病速度和发生程度。

室内精准控制实验中环境条件单一,烟株长势弱,抗性低,但青枯病的发生流行还受到烟草品种、土壤类型、土壤微生物、生态环境等诸多复杂因素的影响。本研究仅选择了土壤温度、土壤湿度、土壤 pH 值和初始菌源量 4 个主要因素构建了青枯病发生流行预警模型,未对烟草品种、土壤类型和土壤微生物等因素进行进一步探索,因此在模型验证中仅选择与试验烟草品种、土壤类型和土壤微生物等一致的区域开展,进一步扩大模型验证区域还需要结合田间烟草品种、土壤类型和土壤微生物等其他因素对模型进一步优化,提高模型的适用性和精准度。

4 结论

掌握病害田间流行动态,适时做出病害预报,是进行病害防治的关键^[30]。本研究基于室内盆栽试验,研究分析了影响烟草青枯病发生流行的关键因子,提出了初始土壤菌源量 2×10^2 cfu/g 作为青枯病发生风险的判定依据,土壤温度和土壤湿度为青枯病发生概率的关键性指标,并分别基于二元 Logistic 回归分析和逐步回归分析建立了烟草青枯病发生概率预测模型和青枯病发生程度预测模型,田间验证准确率分别在 80% 和 60% 以上,该研究成果为下一步实现烟草青枯病的智能监测和精准预警提供了理论支撑。

参考文献:

- [1] 王怀鑫. 国内外烟草业发展比较研究 [J]. 农业科技与信息, 2016(28): 19-20.
- [2] MANSFIELD J, GENIN S, MAGORI S, et al. Top 10 Plant Pathogenic Bacteria in Molecular Plant Pathology [J]. Molecular Plant Pathology, 2012, 13(6): 614-629.
- [3] 薛梅, 曾婉琳, 张荣, 等. 防控烟草青枯病植物免疫诱抗剂的筛选及其防治效果测定 [J]. 广东农业科学, 2021, 48(6): 87-92.

- [4] WANG H C, GUO H, CAI L, et al. Effect of Temperature on Phenotype Characterization of *Ralstonia solanacearum* from Tobacco [J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2020, 42(2): 164-181.
- [5] 郑向华, 魏楚丹, 刘琼光, 等. 广东烟草青枯病发生与流行因素研究[J]. 广东农业科学, 2012, 39(16): 56-59.
- [6] BITTNER R J, ARELLANO C, MILA A L. Effect of Temperature and Resistance of Tobacco Cultivars to the Progression of Bacterial Wilt, Caused by *Ralstonia solanacearum* [J]. Plant and Soil, 2016, 408(1): 299-310.
- [7] 杨佩文, 杨群辉, 倪明, 等. 烟草青枯病发生流行气象因素分析及土壤调理防控技术[J]. 西南农业学报, 2017, 30(05): 1104-1108.
- [8] 林勇, 徐茜, 陈志厚, 等. 烤烟青枯病田间发生动态及其与气象因素的相关性 [J]. 中国烟草科学, 2016, 37(3): 57-61.
- [9] 陈代明, 江其朋, 张世渠, 等. 影响烟草青枯病发生的关键气象因子分析 [J]. 植物医生, 2020(1): 39-44.
- [10] 黎妍妍, 王林, 孙光伟, 等. 清江流域烟区烟草青枯病流行时间动态及气象因素分析[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(04): 77-83.
- [11] 王贻鸿, 赵云峰, 孔凡玉, 等. 酸碱度对烟草青枯菌生长特性的影响 [J]. 烟草科技, 2018, 51(9): 27-32.
- [12] 汪汉成, 余婧, 蔡刘体, 等. 温度、湿度、接菌量及 pH 对烟草青枯病菌致病力的影响 [J]. 中国烟草科学, 2017, 38(5): 8-12.
- [13] LI S L, LIU Y Q, WANG J, et al. Soil Acidification Aggravates the Occurrence of Bacterial Wilt in South China [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 703.
- [14] 张广雨, 褚德朋, 刘元德, 等. 生物炭及海藻肥对烟草生长、土壤性状及青枯病发生的影响 [J]. 中国烟草科学, 2019, 40(5): 15-22.
- [15] 褚德朋, 许永幸, 高强, 等. 海藻多糖与有机物料对烟草青枯病的防控效果[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(04): 58-65.
- [16] 何永宏, 曾乙心, 刘林, 等. 温度和品种抗性对烟草青枯病潜育期的影响 [J]. 烟草科技, 2017, 50(6): 16-20, 32.
- [17] 匡希茜, 何永宏, 符容蓉, 等. 烟田土壤带菌量与烟草青枯病发生的相关性分析 [J]. 烟草科技, 2018, 51(9): 20-26.
- [18] 赖荣泉, 王刚, 赖成连, 等. 烟株青枯病的动态监测技术研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(25): 129-133.
- [19] 李想, 刘艳霞, 蔡刘体, 等. 烟草青枯病菌在烟草根际的定殖及最适发病条件 [J]. 植物保护学报, 2016, 43(5): 796-804.
- [20] 庞超明, 黄弘. 试验方案优化设计与数据分析 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2018.
- [21] 陈菁, 曾辉, 刘芳. 土壤 pH 值对甘蔗前期营养生长的影响[J]. 现代农业科技, 2020(03): 11-13.
- [22] 向立刚, 汪汉成, 郭华, 等. 基于盆栽试验的苯并噻唑硫酮对感染青枯病烟株根围土壤细菌群落结构的影响 [J]. 烟草科技, 2020, 53(10): 1-9.
- [23] 程承, 李石力, 刘颖, 等. 试验土壤中烟草青枯病菌的 RT-qPCR 检测分析 [J]. 烟草科技, 2017, 50(1): 12-16.
- [24] 国家烟草专卖局. 烟草病害预测预报调查规程第 4 部分: 青枯病: YC/T 341. 4—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-12.
- [25] 杨银娟, 鞠中安, 曹婷婷, 等. 黄瓜霜霉病中期预警模型的研究 [J]. 上海农业学报, 2019, 35(1): 53-57.
- [26] AUNG K, JIANG Y J, HE S Y. The Role of Water in Plant-Microbe Interactions [J]. Plant Journal, 2018, 93(4): 771-780.
- [27] KEARNS D B. A Field Guide to Bacterial Swarming Motility [J]. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8(9): 634-644.
- [28] LI Y, UDDIN W, KAMINSKI J E. Effects of Relative Humidity on Infection, Colonization and Conidiation of *Magnaporthe oryzae* on Perennial Ryegrass [J]. Plant Pathology, 2014, 63(3): 590-597.
- [29] PANCHAL S, CHITRAKAR R, THOMPSON B K, et al. Regulation of Stomatal Defense by Air Relative Humidity [J]. Plant Physiology, 2016, 172(3): 2021-2032.
- [30] 曾士迈, 杨演. 植物病害流行学 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.