

适用于我国的稻纵卷叶螟长期预测模型

葛温伯¹ 胡 高¹ 陆明红² 姜玉英² 翟保平^{1*}

(1. 南京农业大学植物保护学院, 南京 210095; 2. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要: 为给我国稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 防治提供前期预警, 使用 R 语言软件对我国 15 个省市区稻纵卷叶螟发生等级与全球海温场资料进行遥相关分析, 绘制相关系数的时空间分布图, 筛选出显著相关海温区作为预测因子, 根据各省市区虫情数据组建回归模型+判别模型、BP 神经网络模型和支持向量机(SVM)模型, 比较 3 种模型的历史回检率和预测完全准确率。结果显示, 3 种模型对稻纵卷叶螟发生等级均有一定的预测能力, 其中判别模型+回归模型效果最好, 预检完全准确率可达到 75.0%, BP 神经网络模型次之, 预检完全准确率为 68.2%, SVM 模型预测效果最差, 预检完全准确率为 54.5%。进一步分析建模所使用的 50 个预测因子的空间位置, 在南印度洋和北大西洋确定 3 个预测指标, 预检准确率为 94.4%。通过海温场数据建立的我国 15 个省市区稻纵卷叶螟发生等级预测模型, 适用于长期预测预报。判别模型+回归模型更适合在样本量少、预测因子相关性强的地区建模, 而根据预测因子空间分布选择的预测指标进行定性预测准确率更高。

关键词: 稻纵卷叶螟; 发生等级; 海温; 相关分析; 长期预测

Long-term models suitable in China for forecasting rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis*

GE Wenbo¹ HU Gao¹ LU Minghong² JIANG Yuying² ZHAI Baoping^{1*}

(1. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu Province, China;

2. National Agro-Technical Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract: In order to guide the prevention and control of rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis*, the R software was used to explore the teleconnection correlation between the occurrence degree of *C. medinalis* and the global sea surface temperature (SST) data in the provinces, municipalities and autonomous regions of China and draw the spatial-temporal distribution map of correlation coefficient. Then, the significant relevant SST zone was selected as the predictive factor according to the provinces. The long-term forecasting models, including discriminant model+regression model, BP neural network model and Support Vector Machine (SVM) model were established for 15 provinces, municipalities and autonomous regions, respectively. By comparing the historical regression rate and prediction accuracy of the models, it was found that the complete accuracy rate of forecast by discrimination or regression model reached 75.0%, followed by BP neural network model with 68.2% and SVM model with 54.5%. Further analysis of the spatial location of the 50 predictors used in the modeling, three predictive indicators in the South Indian Ocean and the North Atlantic had a prediction accuracy of 94.4%. The results indicated that the SST data could be used to establish long-term prediction model for the occurrence degree of rice leaf roller in China with a high accuracy. The discriminant model+ regression model were more suitable for areas with fewer samples and strong correlation of predictors, and the prediction indexes

obtained by spatial analysis of significant relevant SST zone showed higher prediction accuracy.

Key words: rice leaf folder; occurrence degree; sea surface temperature; correlation analysis; long-term forecas

稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 是亚洲水稻产区最重要的暴发性害虫之一,具有大区域、长距离、季节性的迁飞习性,每年3—10月在我国有5次大规模的南北往返迁飞(张孝羲等,1981;王凤英等,2009)。2000年以来稻纵卷叶螟发生日益严重,2003年出现全国性的特大暴发,而后连年猖獗为害,2007年再次全国性大暴发(杨亚军等,2015)。2005—2015年稻纵卷叶螟年均发生面积为1 969万 hm^2 ,占水稻种植面积的66.3%,造成产量损失达702.7万t,占平均每年水稻总产量的3.6%(陆明红等,2018),对水稻安全生产构成了严重威胁。害虫发生时,只要防治措施及时得当就不会成灾,而实现有效防治的前提是对害虫虫情时空的连续监测和准确预测(翟保平和程家安,2006)。目前,国内可在病虫测报部门实现业务应用的病虫害预测模型模型较少,因此急需寻找可靠的预测因子,建立简单、易用、有效并能业务化运行的预测模型,以期对稻纵卷叶螟的防控提供先期预警。

目前稻纵卷叶螟的预测预报主要使用气象因子(包云轩等,2016)、大气环流特征量(高文婷等,2017)等预测因子进行的中短期预报,而长期预报主要使用海表面温度(sea surface temperature, SST)(简称海温)或气象气候要素为预测因子(白先达等,2011; Hu et al., 2019)。秦淑莲等(2003)研究结果表明,年际间气候波动变幻莫测,对害虫发生进行长期预测须找到能够引发大尺度气候变化的相关性强且稳定性高的预测因子,海温正是引发全球气候变化的大尺度气候背景场。海温极大地影响海洋与大气间动量、动力和水汽的交换,对海洋、大气和陆地间的相互作用及气候变化起着决定性作用(Wentz et al., 2000),对我国的季风(李峰和何金海,2000)、气温异常(朱艳峰等,2003)、夏秋降水(孙燕等,2006;赵永晶和钱永甫,2009)、江淮梅雨(王钟睿和钱永甫,2005)等气候和天气过程均有重大影响,而高空气流、温度、湿度、降水等要素恰恰是影响我国稻纵卷叶螟等迁飞性害虫发生的重要因子(Hu et al., 2010; 2014)。因此海温数据广泛应用于多种重要害虫的预测预报工作,如黏虫 *Mythimna separata* (赵圣菊, 1987)、褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、白背飞虱 *Sogatella furcifera* (冼晓青等, 2007; 高苹等,

2008; 包云轩等, 2016)、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Maelzer & Zalucki, 2000)、大豆食心虫 *Leguminivora glycinivorella* (吴瑞芬等, 2008)等。随着计算机技术和建模方法的发展,病虫害模型建模方法也呈现多样化,除了较简易的判别式模型(巫国瑞等, 1997)、判别模型(李军等, 2004)及最常用的回归模型(冼晓青等, 2007)外,还有反向传播(back propagation, BP)神经网络(汪四水和张孝羲, 2000)、支持向量机(support vector machine, SVM)(包云轩等, 2018)、卡尔曼滤波(包云轩等, 2016)等多种建模方法应用到病虫害建模工作中。如汪四水和张孝羲(2000)建立了江苏省南通市稻纵卷叶螟BP神经网络长期预报模型;包云轩等(2016)利用SVM、BP神经网络和多元线性回归方法对我国南方水稻主产区代表站点褐飞虱年迁入量进行了预测。

本研究拟通过全国15个省市市区稻纵卷叶螟发生等级与全球海温场遥相关的时空分布分析,筛选出显著相关海区的海温作为预测因子,组建判别模型或多元回归线性预测模型、BP神经网络模型和SVM模型,并根据所使用预测因子的空间分布寻找简易预测指标,对我国的稻纵卷叶螟发生等级和等级距平进行长期预测,以期为国家病虫测报部门提供业务运行的早期预警工具。

1 材料与方法

1.1 材料

虫情资料:2000—2018年我国15个省市市区稻纵卷叶螟发生等级数据来自全国农业技术推广服务中心测报处农作物重大病虫害数字化监测预警系统。包括江苏省、浙江省、安徽省、上海市、广东省、广西壮族自治区、海南省、福建省、四川省、贵州省、重庆市、湖南省、湖北省、江西省、河南省。

海温场资料:海温场数据为各地区逐年各月 $2^\circ \times 2^\circ$ 经纬度网格的全球月平均海表面温度数据,来源于美国国家海洋和大气管理局海表面温度V5版本数据集(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html>)。

1.2 方法

1.2.1 海温场数据处理

使用R语言软件(3.4.0版本)对月平均海温SST

进行滑动距平处理,以当年之前30年SST平均值计算海温距平值(sea surface temperature anomaly, SSTA),如2000年数据以1970—1999年SST平均值进行计算。

1.2.2 预测因子筛选

Spearman秩相关分析法不依赖于总体数据的分布形式,适用于分析等级资料,本研究选取该方法对不同省市区的数据进行分析。湖北省由于虫情资料较短,且仅有2个发生等级,不适合使用Spearman秩相关,则使用Pearson相关法计算相关系数。在R语言软件中使用Spearman秩相关法计算各省市稻纵卷叶螟发生等级与前1年1—10月SSTA的相关系数,并进行显著性检验,分别在0.001、0.01、0.05显著性水平下筛选出显著相关的海温格点。剔除单个显著相关($P < 0.05$)的格点,定义出现连续4个或4个以上格点持续3个月稳定显著相关的海区为显著相关区。选出显著性强($P < 0.01$)、稳定性高(连续3个月存在)的显著相关区,取相关性强的月份及海区(大于或等于3个格点)的平均海温距平值作为1个预测因子。

1.2.3 判别模型建立

在选取的15个省市自治区中广东省、广西壮族自治区、四川省和湖北省由于稻纵卷叶螟发生等级数据分布的特殊性,进行判别模型建立。

广东省2000—2018年(2003年无数据)稻纵卷叶螟发生等级仅有3级和4级2个发生等级,适合建立两级判别模型。2000、2001、2011、2013—2018年发生等级为3级,划分为类别一,其余年份发生等级是4级,划分为类别二。

广西壮族自治区2000—2018年间同样仅有3级和4级2个发生等级,2000—2005、2009、2011—2018年的发生等级为3级划分为类别一,其余年份发生等级是4级划分为类别二,建立两级判别模型。

四川省2000—2018年平均发生面积所占比例仅为5.6%,但2009、2012年发生等级为4级,因此将2009、2012年划分为类别二,其余年份发生等级为2级或3级,划分为类别一,建立两级判别模型。

湖北省2010—2014、2016—2018年发生等级为3级,划分为类别一,2015年发生等级为4级,划分为类别二,建立两级判别模型。

以R语言建立上述4省区的Fisher线性判别模型并计算临界值。当预测值小于临界值,则判定省市预测类别为类别一(中发生);预测值大于临界值,则判定预测类别为类别二(重发生)。预测

时,判别模型预测类别与实际类别一致则正确,否则错误。

1.2.4 回归模型建立

江苏省、浙江省、安徽省、上海市、福建省、海南省、贵州省、重庆市、湖南省、江西省、河南省11个省市建立多元线性回归模型。建模时遵循以下原则:(1)避免多重共线性。使用2种方法判定:一是使用R语言中的kaapa函数计算K值,若 $K < 100$ 则可认为多重共线性较弱;二是用vif函数计算方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF),若 $VIF < 10$ 则可认为多重共线性较弱。(2)预测模型残差分布需符合正态性。使用R语言中shapiro.test函数检验残差分布, $P > 0.05$ 则可认为残差分布符合正态分布。然后通过向后逐步回归法组建回归模型,每个回归模型留存1~2个预测因子。R语言软件会计算出Adj- R^2 校正绝对系数值F统计量。某1个省市若有 n 个预测模型为 $\{Y_i\}$, $i=1, 2, \dots, n$,则计算集成模型

$$Y: Y = \left(a \left(\frac{b_i}{\sum_i b_i} \right) + (1-a) \left(\frac{c_i}{\sum_i c_i} \right) \right) \times \sum_i Y_i, \text{ 其中 } b_i \text{ 为}$$

预检完全正确年数, c_i 为回检完全正确年数, a 为预检的权重,若预检完全正确年数大于0时,则 $a=0.7$;若无预检完全正确年份,则 $a=0$ 。以集成模型为最终的预测模型。

1.2.5 BP神经网络模型建立

BP神经网络是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络,且对数据的分布没有要求,适用于非线性数据的处理及类别数据的建模工作(Widrow & Lehr, 1990)。15个省市使用与各自的判别模型或回归模型相同的预测因子,使用R语言建立BP神经网络模型。用反向传播算法对网络的权值和误差进行调整,使输出层的误差平方和小于初定的精度0.001,以各省建模年份的数据为训练样本,预留年份的稻纵卷叶螟发生等级为测试样本。

1.2.6 SVM模型的建立

SVM模型是一种二类分类模型,基本模型定义为特征空间上的间隔最大的线性分类器,学习策略是间隔最大化,最终转化为一个凸二次规划问题的求解。SVM模型更适合处理小样本、高纬度、非正态分布的数据(张学工, 2000)。在R语言软件上使用tune.svm函数筛选参数gamma和cost的最优值后使用svm()函数建立SVM模型,使用与回归模型和神经网络模型相同的预测因子。

1.2.7 模型准确率计算

回归模型、神经网络模型和SVM模型预测值

转化为级数:预测值 <1.5 为1级; $1.5\leq$ 预测值 <2.5 为2级; $2.5\leq$ 预测值 <3.5 为3级; $3.5\leq$ 预测值 <4.5 为4级; $4.5\leq$ 预测值为5级。当预测级别与实际级别完全一致则认为完全准确,1个级别及以内的差距认为基本准确,从而计算模型完全准确率和基本准确率。回检完全/基本准确率是指计算回检年份中完全准确/基本准确年份占总回检年份的比例,预检完全/基本准确率是指预检年份中完全准确/基本准确年份占总预检年份的比例。回检年份是建模工作中使用的年份,预检年份是建模中未使用的年份。例如广西壮族自治区使用2000—2014年数据进行建模,则回检年份为2000—2014年,2015—2019年则为预检年份。同时比较3种模型的预测结果,计算累计准确率,累计准确率是预测与实际相差等级小于等于当前等级的年份数量占总年份数量的比例。

1.2.8 预测指标确定

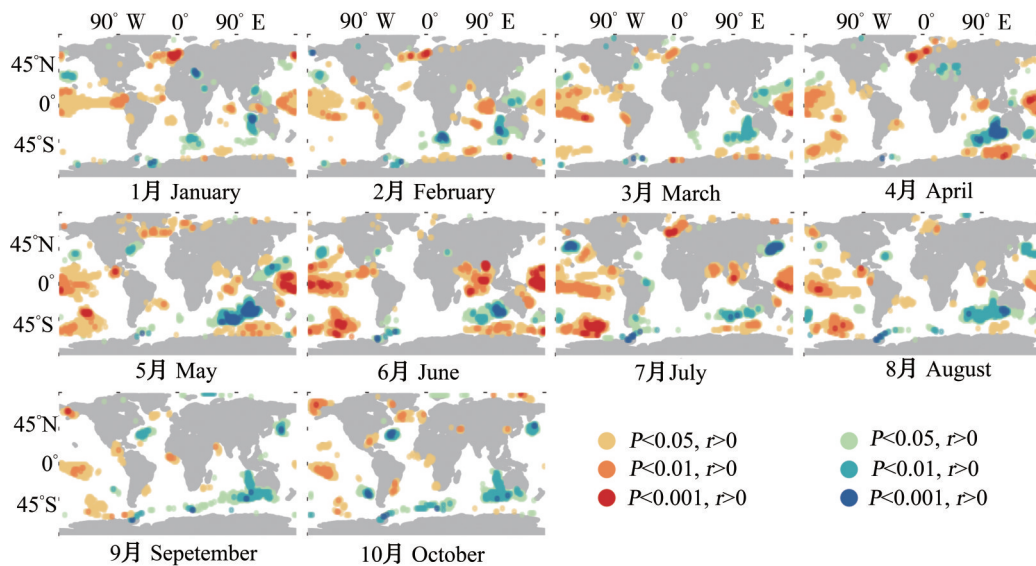
将预测因子的空间分布可视化,由于预测因子范围各异,因此1个预测因子只以其中心点表示。分析预测因子的空间分布,确定正预测因子或负预测因子密集的海域,划定合适的范围,计算前1年该

范围内包含的预测因子所在的月份平均海温距平值作为预测指标。计算2000—2018年各省市稻纵卷叶螟逐年平均发生等级为全国稻纵卷叶螟发生等级,以2000—2018年为常年平均值,计算全国稻纵卷叶螟逐年发生等级距平平均值。对比两迁害虫发生等级距平平均值与预测指标,寻找使准确率最高的临界值,计算预测指标准确率。

2 结果与分析

2.1 稻纵卷叶螟发生等级与全球海温场遥相关分析

以安徽省为例,由稻纵卷叶螟发生等级与前1年1—10月全球海温显著遥相关的时空分布(图1)可知,大洋洲西北方向海域存在1个连续10个月的显著负相关区,其范围和相关性都随时间的推移先增后减,5月份相关区范围最大且相关性最强。中太平洋、南太平洋各有1个连续8个月和5个月的显著正相关区;北大西洋自1—4月存在显著正相关区;4—8月北印度洋附近出现一片显著正相关区。以此选取这5个海区的海温作为预测因子。共筛选得到59个预测因子。



红色为正显著相关区域,蓝色为负显著相关区域。

Red is the positive significant relevant region; blue is the negative significant relevant region.

图1 安徽省稻纵卷叶螟发生等级与前1年1—10月全球海温显著遥相关的时空分布图

Fig. 1 The spatial temporal distribution of teleconnection between global SSTA from January to October of the previous year and the occurrence degree of *Cnaphalocrocis medinalis* in Anhui Province

2.2 判别模型和回归模型建立

广东省、广西壮族自治区、四川省、湖北省4省区的Fisher线性判别模型均使用了4~5个预测因子(表1)。因样本较少,预测因子相关性较强,且都是

两级判别模型,其预测效果较好,回检和预检完全准确率皆为100.0%(表2)。但这些模型无法预测中发生、重发生之外的发生等级。

表1 4个省区稻纵卷叶螟发生等级判别模型

Table 1 Discriminant prediction models of occurrence degree of *Cnaphalocrocis medinalis* in four provinces and autonomous region

省区 Province and autonomous region	判别模型 Prediction model	临界值 Critical value	回检(准确率) Back-substitution check(precision)	预检(准确率) Prediction test (precision)	因子 Factor
广东省 Guangdong Province	$Y = -8.42X_1 + 4.02X_2 - 0.23X_3 + 2.88X_4$	3.19	14/14(100.0%)	4/4(100.0%)	X_1 : Jan_20°-32°E, 54°-56°S X_2 : Jan_26°-32°W, 54°-56°N X_3 : Apr_58°-64°W, 44°-46°N X_4 : Apr_10°-14°W, 54°-56°N
广西壮族自治区 Guangxi Zhuang Autonomous Region	$Y = -2.27X_1 - 0.41X_2 - 2.28X_3 + 2.08X_4$	0.93	15/15(100.0%)	4/4(100.0%)	X_1 : Mar_80°-88°E, 42°S-46°S X_2 : Apr_68°-72°W, 28°-32°N X_3 : Aug_64°-72°E, 48°-52°S X_4 : Sep_6°-10°E, 34°-36°S
四川省 Sichuan Province	$Y = -1.35X_1 + 0.33X_2 - 0.45X_3 - 2.44X_4 - 0.81X_5$	0.75	15/15(100.0%)	4/4(100.0%)	X_1 : Jan_124°-140°W, 8°-12°S X_2 : Feb_4°E-0°-10°W, 42°-46°S X_3 : Jun_82°-94°W, 2°N-8°S X_4 : Jul_154°-166°W, 14°-16°S X_5 : Aug_8°-16°W, 48°-50°N
湖北省 Hubei Province	$Y = 3.60X_1 + 0.69X_2 - 10.03X_3 - 10.22X_4$	7.47	8/8(100.0%)	1/1(100.0%)	X_1 : Feb_26°-32°E, 36°-40°S X_2 : Feb_152°-158°W, 46°-48°N X_3 : Jun_2°E-0°-10°W, 34°-36°S X_4 : Aug_50°-54°E, 40°-44°S

因子中月份_经纬度范围,表示前1年该月份该经纬度范围内平均海温距平值。Month_longitude and latitude indicate the average SSTA in this longitude and latitude range in that month of the previous year.

表2 4个省区稻纵卷叶螟判别模型的回检与预检

Table 2 Back-substitution check and prediction test of discriminant prediction models of *Cnaphalocrocis medinalis* in four provinces and autonomous region

年份 Year	广东省 Guangdong Province			广西壮族自治区 Guangxi Zhuang Autonomous Region			四川省 Sichuan Province			湖北省 Hubei Province		
	实际类别	预测值	预测类别	实际类别	预测值	预测类别	实际类别	预测值	预测类别	实际类别	预测值	预测类别
	Actual category	Predicted value	Predicted category	Actual category	Predicted value	Predicted category	Actual category	Predicted value	Predicted category	Actual category	Predicted value	Predicted category
2000	1(3)	-0.90	1	1(3)	-0.44	1	1(2)	-1.44	1	\	\	\
2001	1(3)	1.49	1	1(3)	-1.54	1	1(2)	-0.37	1	\	\	\
2002	2(4)	5.61	2	1(3)	-1.90	1	1(2)	-1.49	1	\	\	\
2003	\	\	\	1(3)	-2.52	1	1(3)	-0.23	1	\	\	\
2004	2(4)	7.95	2	1(3)	-0.44	1	1(2)	-2.33	1	\	\	\
2005	2(4)	5.66	2	1(3)	0.53	1	1(2)	-1.67	1	\	\	\
2006	2(4)	6.82	2	2(4)	3.29	2	1(2)	-1.98	1	\	\	\
2007	2(4)	5.86	2	2(4)	2.93	2	1(2)	-1.81	1	\	\	\
2008	2(4)	7.31	2	2(4)	2.92	2	1(2)	-0.95	1	\	\	\
2009	2(4)	6.07	2	1(3)	0.32	1	2(4)	1.88	2	\	\	\
2010	2(4)	5.09	2	2(4)	2.09	2	1(3)	-0.02	1	1(3)	-4.24	1
2011	1(3)	0.32	1	1(3)	0.33	1	1(2)	-2.86	1	1(3)	-3.01	1
2012	2(4)	6.76	2	1(3)	-2.37	1	2(4)	3.44	2	1(3)	-3.75	1
2013	1(3)	-1.31	1	1(3)	-1.67	1	1(3)	0.50	1	1(3)	-3.70	1
2014	1(3)	0.58	1	1(3)	-0.81	1	1(2)	-0.52	1	1(3)	-3.16	1
2015	1(3)	-1.48	1	1(3)	0.72	1	1(2)	-1.51	1	2(4)	17.99	2
2016	1(3)	-6.30	1	1(3)	-2.04	1	1(3)	-1.06	1	1(3)	-1.51	1
2017	1(3)	-5.00	1	1(3)	-0.98	1	1(2)	-3.51	1	1(3)	-1.92	1
2018	1(3)	-3.57	1	1(3)	-0.18	1	1(2)	-2.19	1	1(3)	2.57	1

1(3)表示实际发生等级为3级,划分为类别一。1(3) indicates the actual occurrence degree is 3 and the category is 1.

对江苏省等 11 个省市进行回归模型建立,共建立 18 个多元线性回归模型,平均回检完全准确率为 90.4%,回检基本准确率为 100.0%;预检完全准确率为 61.5%,预检基本准确率为 100.0%。所有模型均

使用 1~2 个预测因子,平均 Adj- R^2 校正绝对系数 0.85,平均 F 值为 41.6,所有模型 P 值皆小于 0.01,说明所有模型均解释了数据中大部分变化且极显著(表 3)。

表 3 11 个省市稻纵卷叶螟发生等级线性回归预测模型及集成模型

Table 3 Linear regressive prediction models and integrating models of *Cnaphalocrocis medinalis* occurrence degree in 11 provinces and municipalities

省市 Province and municipality	模型 Model	F	Adj- R^2	P	回检 Back test	预检 Prediction test	因子 Factor
江苏省 Jiangsu Province	$Y_i=4.38-1.73X_i-1.32X_2$	68.7	0.94***	0.00	10/10	0/1	X_1 : Jul_108°-110°W, 28°S & 104°-108°W, 30°S & 100°-106°W, 32°S & 98°-104°W, 34°S X_2 : Sep_70°-78°E, 20°-22°S
	$Y_2=4.07+1.03X_3-0.35X_4$	50.9	0.92***	0.00	10/10	0/1	X_3 : Apr_28°-34°W, 38°-42°N X_4 : May_148°-154°W, 42°-44°N
	$IM=1/2Y_i+1/2Y_2$				10/10	1/1	
浙江省 Zhejiang Province	$Y_i=3.68-30.25X_i-1.40X_2$	32.3	0.82***	0.00	13/15	3/4	X_1 : Jan_136°-152°W, 74°S & 148°-152°W, 76°S X_2 : Feb_8°-26°E, 50°-52°W
安徽省 Anhui Province	$Y_i=1.83+2.33X_i+2.59X_2$	47.4	0.88***	0.00	10/14	1/4	X_1 : Jan_2°-10°W, 58°-60°N X_2 : Jun_84°-92°E, 0°-2°N
	$Y_2=2.73+2.03X_3-1.07X_4$	37.3	0.85***	0.00	11/14	2/4	X_3 : May_134°-142°W, 36°-40°S X_4 : May_78°-84°E, 44°-46°S
上海市 Shanghai Municipality	$IM=0.38Y_i+0.62Y_2$				13/14	3/4	
	$Y_i=5.15-2.75X_i$	39.2	0.83***	0.00	9/9	1/1	X_1 : Sep_74°-84°E, 26°-28°S
	$Y_2=3.75-2.55X_2$	20.2	0.71**	0.00	7/9	1/1	X_2 : Mar_178°E-180°-174°W, 54°-56°S
海南省 Hainan Province	$IM=0.52Y_i+0.48Y_2$				8/9	1/1	
	$Y_i=2.80+0.77X_i+0.67X_2$	44.4	0.86***	0.00	15/15	1/4	X_1 : Jun_56°-58°W, 38°S & 58°-62°W, 40°S & 62°-64°W, 42°S X_2 : Sep_106°-114°W, 4°-10°N
福建省 Fujian Province	$Y_i=4.17-0.71X_i-0.93X_2$	31.7	0.81***	0.00	9/15	2/4	X_1 : Mar_82°-90°E, 38°-42°S X_2 : Jul_118°-126°W, 30°-34°S
	$Y_2=3.70+0.57X_3-2.12X_4$	30.3	0.81***	0.00	9/15	3/4	X_3 : Aug_88°-94°W, 20°-24°S X_4 : Sep_32°-54°E, 52°-54°S
	$IM=0.43Y_i+0.57Y_2$				9/15	2/4	
贵州省 Guizhou Province	$Y_i=3.73-3.03X_i$	64.2	0.90***	0.00	7/8	/	X_1 : May_46°-54°E, 48°-54°S
	$Y_2=3.09-2.56X_2$	40.2	0.85***	0.00	8/8	/	X_2 : Jun_144°-150°W, 24°-28°S
	$IM=1/2Y_i+1/2Y_2$				8/8	/	
重庆市 Chongqing Municipality	$Y_i=3.13-0.51X_i-0.40X_2-1.1X_3$	34.5	0.88***	0.00	14/15	1/4	X_1 : Jan_150°-154°E, 44°-46°N X_2 : Jul_176°E-180°-176°W, 42°-46°N X_3 : Jul_86°-90°W, 28°-30°N
湖南省 Hunan Province	$Y_i=3.63+0.92X_i-1.12X_2$	29.4	0.80***	0.00	14/15	4/4	X_1 : Jan_22°-30°W, 56°-58°N X_2 : Sep_78°-100°E, 38°-42°S

续表3 Continued

省市 Province and municipality	模型 Model	<i>F</i>	Adj- <i>R</i> ²	<i>P</i>	回检 Back test	预检 Prediction test	因子 Factor
江西省 Jiangxi Province	$Y_1=3.28-0.81X_1-0.59X_2$	77.3	0.94***	0.00	10/10	0/1	X_1 :May_78°-84°W, 24°-26°N X_2 :Jun_4°E-0°-12°W, 60°-62°N
	$Y_2=3.34-0.36X_3-2.01X_4$	55.4	0.92***	0.00	10/10	1/1	X_3 :Feb_128°-138°W, 22°-26°N X_4 :Jun_50°-60°E, 36°-38°S
	$Y_3=3.45-0.50X_5-0.678X_6$	23.3	0.83***	0.00	10/10	1/1	X_5 :Jan_124°-126°W, 40°-50°N X_6 :Apr_106°-114°W, 0°-2°N
	$IM=0.10Y_1+0.45Y_2+0.45Y_3$				10/10	1/1	
河南省 Henan Province	$Y_1=1.97-0.92X_1+1.52X_2$	21.4	0.74***	0.00	9/15	3/4	X_1 :Feb_106°-114°E, 26°-40°S X_2 :Feb_34°-36°W, 54°-56°N

*, **, ***分别表示在0.05、0.01和0.001水平显著相关。*IM*为集成模型。因子中月份_经纬度范围,表示前一年该月份该经纬度范围内平均海温距平值。*, **, *** indicate significant correlation at the level of 0.05, 0.01 and 0.001 level. *IM* indicates an integrating model. Month_longitude and latitude indicates the average SSTA in this longitude and latitude range in that month of the previous year.

6个省市有1个以上的模型通过了筛选,因此共可组建6个集成预测模型,以集成模型为该省市的最终回归模型(表3)。最终11个省市确定11个回归模型,平均回检完全准确率为90.3%,回检基本准确率为100.0%;预检完全准确率为64.5%,预检基

本准确率为100.0%。模型回检完全/基本准确率较高,原因是筛选的预测因子相关性强、稳定性高,利于建模。预检完全准确率低于回检完全准确率,但并没有预报与实际差距1级以上的情况发生,基本准确率可以达到100.0%(表4)。

表4 11个省市稻纵卷叶螟回归模型详细预检结果

Table 4 Back-substitution check and prediction test of multiple regressive predicting models in 11 provinces and municipalities

省市 Province and municipality	2015			2016			2017			2018		
	预测值- 预测值 实际值		实际值- predicted value- real value	预测值- 预测值 实际值		实际值- predicted value- real value	预测值- 预测值 实际值		实际值- predicted value- real value	预测值- 预测值 实际值		实际值- predicted value- real value
	Predicted value	Real value		Predicted value	Real value		Predicted value	Real value		Predicted value	Real value	
江苏省 Jiangsu Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	3.99	4	-0.01
浙江省 Zhejiang Province	3.69	4	-0.31	3.49	3	0.49	3.33	3	0.33	3.58	3	0.58
安徽省 Anhui Province	2.82	3	-0.18	3.21	2	1.20	2.78	3	-0.22	2.54	2	0.54
上海市 Shanghai Municipality	/	/	/	/	/	/	/	/	/	2.94	3	-0.06
海南省 Hainan Province	3.65	4	-0.35	4.92	4	0.92	1.96	3	-1.04	3.96	3	0.96
福建省 Fujian Province	3.95	4	-0.05	3.71	4	-0.29	4.23	3	1.23	3.56	3	0.56
贵州省 Guizhou Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
重庆市 Chongqing Municipality	2.91	2	0.91	2.20	3	-0.80	2.26	3	-0.74	3.18	3	0.18
湖南省 Hunan Province	3.29	3	0.29	2.00	2	0.00	2.45	2	0.45	2.62	3	-0.38
江西省 Jiangxi Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	3.08	3	0.08
河南省 Henan Province	1.03	1	0.03	0.43	1	-0.57	0.20	1	-0.80	1.91	1	0.91

最终 15 省市区确定 15 个判别或回归预测模型,其中广东省、广西壮族自治区、四川省、湖北省为判别模型;江苏省、安徽省、上海市、福建省、贵州省、江西省为集成回归模型;浙江省、海南省、贵州省、重庆市、河南省为回归模型。皆可提前 1 年做出预测,平均回检完全准确率为 90.7%,回检基本准确率为 100.0%;预检完全准确率为 75.0%,预检基本准确率为 100.0%。

2.3 BP神经网络模型

共建立 15 个 BP 神经网络模型(表 5),平均回检完全准确率为 98.6%,回检基本准确率为 100.0%;预

检完全准确率为 68.2%,预检基本准确率为 97.7%。河南省 2015—2018 年的预测值非常低,原因是河南省的 1 个正预测因子在 2015—2018 年对应的数值异常小,所以导致模型预测结果数值极小,但同样可以说明模型预测 2015—2018 年发生等级低,实际也确实如此,2015—2018 年河南省稻纵卷叶螟发生程度皆为最低的 1 级。安徽省 2016 年预测值偏高,福建省 2017 年预测值偏高,海南省 2017 年预测值偏低,这与回归模型的预测结果相同。表明 BP 神经网络模型回检准确率较高,预检完全准确率也接近 70.0%,但处理极端数据时会出现极端的预测值。

表 5 15 个省市区稻纵卷叶螟 BP 神经网络模型详细预检结果

Table 5 Back-substitution check and prediction test of BP neural network predicting models in 15 provinces , municipalities and autonomous regions												
省市区 Province, municipality and autonomous region	2015			2016			2017			2018		
	预测值	实际值	预测值- 实际值	预测值	实际值	预测值- 实际值	预测值	实际值	预测值- 实际值	预测值	实际值	预测值- 实际值
	Predicted value	Real value	Predicted value- real value	Predicted value	Real value	Predicted value- real value	Predicted value	Real value	Predicted value- real value	Predicted value	Real value	Predicted value- real value
江苏省 Jiangsu Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	3.47	4	-0.53
浙江省 Zhejiang Province	3.47	4	-0.53	3.49	3	0.49	3.37	3	0.37	3.49	3	0.49
安徽省 Anhui Province	2.57	3	-0.43	3.53	2	1.53	3.14	3	0.14	3.14	2	1.14
上海市 Shanghai Municipality	/	/	/	/	/	/	/	/	/	2.61	3	-0.39
广东省 Guangdong Province	3.18	3	0.18	3.27	3	0.27	3.07	3	0.07	3.15	3	0.15
广西壮族自治区 Guangxi Zhuang Autonomous Region	3.30	3	0.30	2.99	3	-0.01	2.96	3	-0.04	2.96	3	-0.04
海南省 Hainan Province	3.68	4	-0.32	3.46	4	-0.54	1.64	3	-1.36	3.51	3	0.51
福建省 Fujian Province	4.19	4	0.19	3.37	4	-0.63	4.23	3	1.23	3.71	3	0.71
四川省 Sichuan Province	2.54	2	0.54	2.04	3	-0.96	1.92	2	-0.08	1.78	2	-0.22
贵州省 Guizhou Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
重庆市 Chongqing Municipality	2.22	2	0.22	3.26	3	0.26	3.26	3	0.26	3.74	3	0.74
湖南省 Hunan Province	3.33	3	0.33	1.96	2	-0.04	2.59	2	0.59	2.60	3	-0.40
湖北省 Hubei Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	3.06	3	0.06
江西省 Jiangxi Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	2.83	3	-0.17
河南省 Henan Province	-2.38	1	-3.38	-3.18	1	-4.18	-3.56	1	-4.56	-2.49	1	-3.49

2.4 SVM模型

共建立 15 个 SVM 模型, 平均回检完全准确率为 99.5%, 回检基本准确率为 100.0%; 预检完全准确率为 52.3%, 预检基本准确率为 93.2%。湖南省 2016、2017 年 SVM 模型预报比实际大 2 级(表 6), 但在回归模型中预测完全准确, BP 神经网络模型中 2016 年完全准确, 2017 年基本准确。湖南省有 2 个稻纵卷叶螟预测因子, 预测因子一是正相关因子, 对应 2016、2017 年数值异常低, 预测因子二是负相关因子, 对应 2016、2017 年数值偏高, 2 个预测因子对

这 2 年湖南省褐飞虱发生情况的预测都是较轻, 实际情况是 2016、2017 年湖南褐飞虱发生为 2 级, 是自 2000 年以来发生等级最轻的 2 年。但 SVM 模型的预测值却偏高许多, 这 2 年都预报为 4 级, 比实际发生等级偏高 2 级。河南省 2016—2018 年的预测值偏高, 与 BP 神经网络模型的预测结果完全相反。SVM 模型虽然有非常高的回检完全/基本准确率, 但预检完全/基本准确率较低, 结果不稳定, 处理极端数据时可能得到完全相反的异常结果。

表 6 15 个省市自治区稻纵卷叶螟 SVM 模型详细预检结果

Table 6 Back-substitution check and prediction test of multiple regressive predicting models in 15 provinces, municipalities and autonomous regions

省市区 Province, municipality and autonomous region	2015			2016			2017			2018		
	预测值 Predicted value	实际值 Real value	预测值- 实际值 Predicted value- real value	预测值 Predicted value	实际值 Real value	预测值- 实际值 Predicted value- real value	预测值 Predicted value	实际值 Real value	预测值- 实际值 Predicted value- real value	预测值 Predicted value	实际值 Real value	预测值- 实际值 Predicted value- real value
江苏省 Jiangsu Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	3.86	4	-0.14
浙江省 Zhejiang Province	3.78	4	-0.22	3.89	3	0.89	3.79	3	0.79	3.92	3	0.92
安徽省 Anhui Province	2.61	3	-0.39	3.21	2	1.21	2.95	3	-0.05	2.80	2	0.80
上海市 Shanghai Municipality	/	/	/	/	/	/	/	/	/	2.45	3	-0.55
广东省 Guangdong Province	3.36	3	0.36	3.51	3	0.51	3.48	3	0.48	3.26	3	0.26
广西壮族自治区 Guangxi Zhuang Autonomous Region	3.17	3	0.17	3.07	3	0.07	3.04	3	0.04	3.04	3	0.04
海南省 Hainan Province	3.66	4	-0.34	3.03	4	-0.97	2.41	3	-0.59	3.04	3	0.04
福建省 Fujian Province	3.93	4	-0.07	3.27	4	-0.73	4.01	3	1.01	3.65	3	0.65
四川省 Sichuan Province	2.55	2	0.55	2.65	3	-0.35	2.43	2	0.43	2.23	2	0.23
贵州省 Guizhou Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
重庆市 Chongqing Municipality	2.41	2	0.41	2.92	3	-0.08	3.39	3	0.39	3.48	3	0.48
湖南省 Hunan Province	3.73	3	0.73	4.17	2	2.17	4.17	2	2.17	3.98	3	0.98
湖北省 Hubei Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	3.32	3	0.32
江西省 Jiangxi Province	/	/	/	/	/	/	/	/	/	3.13	3	0.13
河南省 Henan Province	1.49	1	0.49	2.11	1	1.11	2.51	1	1.51	2.21	1	1.21

2.5 3种模型评价比较

3种模型中回归+判别模型的效果最好且最为稳定,预检完全准确率为75.0%,预检基本准确率100.0%,没有预测结果与实际等级相差在1个级别以上的情况发生。BP神经网络模型次之,预检完全准确率为68.2%,预检基本准确率97.7%,有1次预

报与实际级别相差2级。SVM模型则效果最差,预检完全准确率为54.5%,预检基本准确率为93.2%,有3次预报与实际级别相差2级(表7)。

河南省BP神经网络模型、湖南省和河南省SVM模型的预报结果的异常说明在处理极端数据时BP神经网络模型和SVM模型并不稳定。

表7 3种模型预测结果的比较

Table 7 Comparison of the forecast results of three prediction models

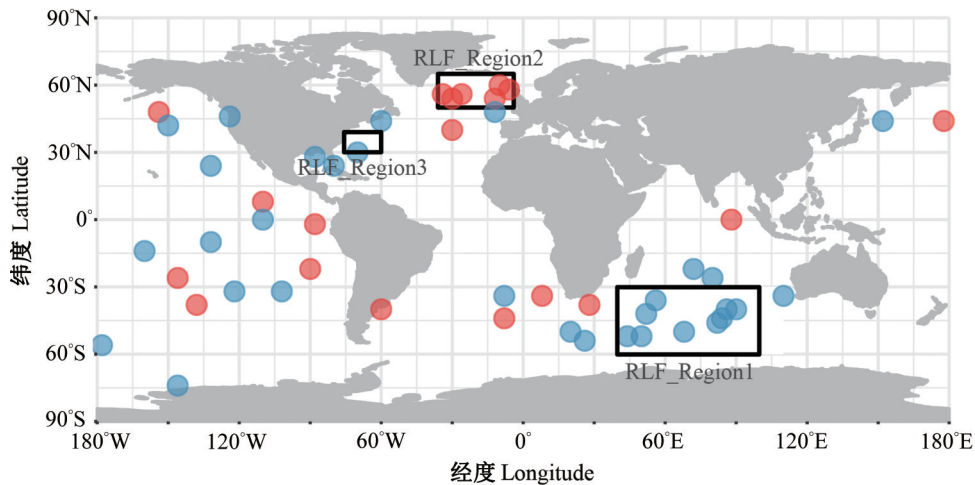
模型 Model	预报与实际相差等级 Grade difference between the forecast value and actual value			样本总量 Total sample
	0	1	2	
判别模型+回归模型 Discriminant model+regression model	33(75.0%)	11(100.0%)	0(100.0%)	44
BP神经网络 Back propagation neural network	30(68.2%)	13(97.7%)	1(100.0%)	44
支持向量机 Support vector machine	24(54.5%)	18(93.2%)	3(100.0%)	44

括号内为累计准确率。The number in bracket is the cumulative accuracy.

2.6 预测因子的空间分布及3个预测指标的筛选

建模工作中共使用了50个预测因子。其中18个分布于太平洋(36%),13个分布于印度洋(26%),19个分布于大西洋(38%)(图2)。印度洋的13个预测因子中,仅有1个正相关因子的中心点位于赤道,其余12个皆为负相关预测因子,位置较为密集,集中于南印度洋温带海域内,因此定义30°~60°S,40°~100°E范围为RLF_Reigion1,12个负显著相关区全部或部分位于RLF_Reigion1内。将RLF_Reigion1范围内前1年3、5、6、8、9月平均海

温距平值定义为预测指标1,月份的选择是RLF_Reigion1中包含的12个预测因子所在的月份。60°N北大西洋海域存在1个正相关预测因子密集区域50°~64°N,4°~36°W,定义此范围为RLF_Reigion2,将RLF_Reigion2范围内前1年1、2、4、6月平均海温距平值作为1个正预测指标,定义为预测指标2。30°N附近西大西洋区域具有较多的负预测因子,定义30°~40°N,60°~76°W范围海域为RLF_Reigion3,该海域前1年4、5、7月份平均海温距平值定义为RLF预测指标3。



红圈代表用于稻纵卷叶螟建模的正预测因子,蓝圈代表用于稻纵卷叶螟建模的负预测因子。The red circle represents positive predictor used for the RLF models, and the blue circle represents negative predictor used for the *Cnaphalocrocis medinalis* models.

图2 用于稻纵卷叶螟建模的预测因子空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution of *Cnaphalocrocis medinalis* using predictors

对比稻纵卷叶螟发生等级距平值与预测指标1可发现,两者存在极显著负相关关系($r=-0.68, P<0.01$) (图3)。预测指标1临界值为0.045,可清楚区分稻纵卷叶螟发生程度的轻重。小于0.045的年份,稻纵卷叶螟发生等级距平值皆为正值;大于0.045的年份,稻纵卷叶螟发生等级距平值为负值,仅有2002年预测错误。预测指标1总体准确率为94.4%。

对比稻纵卷叶螟发生等级距平值与预测指标2可发现,两者存在极显著正相关关系($r=0.69, P<0.01$) (图4)。预测指标2以0.4为临界值,小于0.4的年份,稻纵卷叶螟发生等级距平值皆为负;大于0.4的10年中,有9年的稻纵卷叶螟发生等级距平值为正,出现错误的是2011年。预测指标2总体准确率为94.4%。

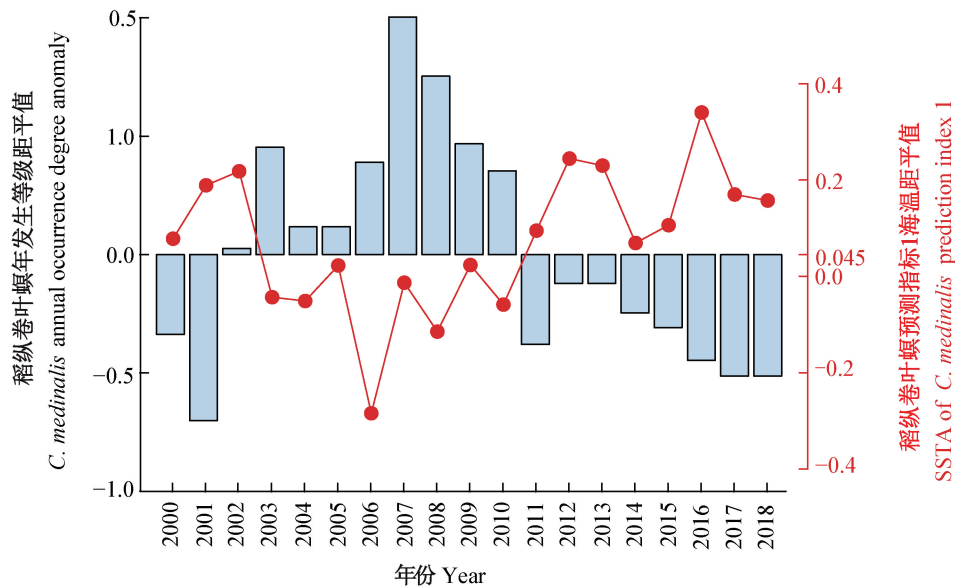


图3 2000—2018年稻纵卷叶螟年平均发生等级距平(柱状)与稻纵卷叶螟预测指标1(折线)对比图

Fig. 3 Histogram of the annual mean degree anomaly of *Cnaphalocrocis medinalis* from 2000 to 2018 and the broken line graph of prediction index 1

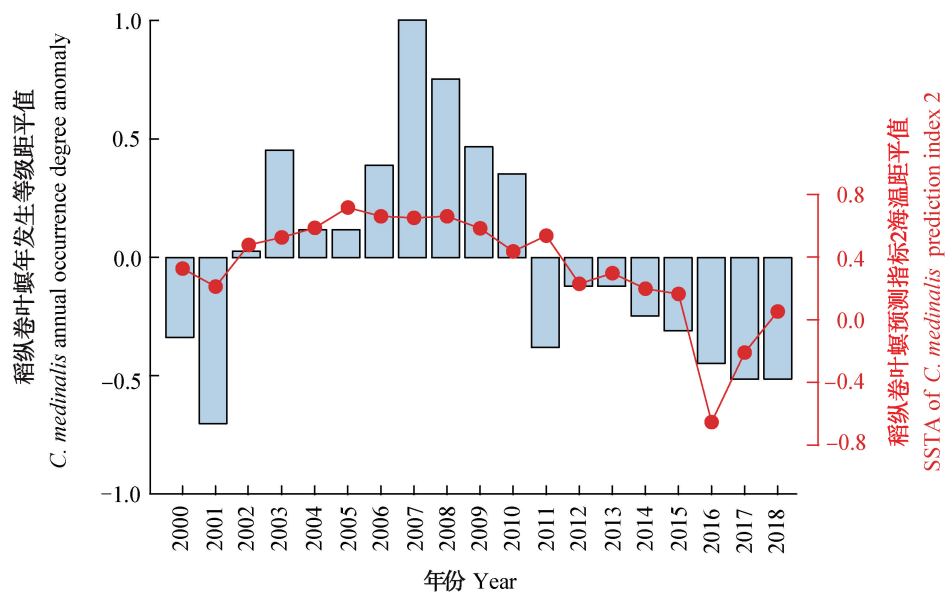


图4 2000—2018年稻纵卷叶螟年平均发生等级距平(柱状)与稻纵卷叶螟预测指标2(折线)对比图

Fig. 4 Histogram of the annual mean degree anomaly of *Cnaphalocrocis medinalis* from 2000 to 2018 and the broken line graph of the prediction index 2

对比稻纵卷叶螟年发生等级距平与预测指标3可

发现,两者存在极显著负相关关系($r=-0.70, P<0.001$)。

预测指标3数值小于0.4的年份,稻纵卷叶螟发生程度距平值皆为负值;数值大于0.4的11年中,有10年的稻纵卷叶螟发生等级距平值为正值,出现错误的是

2003年(图5)。预测指标3总体准确率为94.4%。所选3个预测指标总体准确率为94.4%,对全国稻纵卷叶螟总体发生程度有非常好的指示作用。

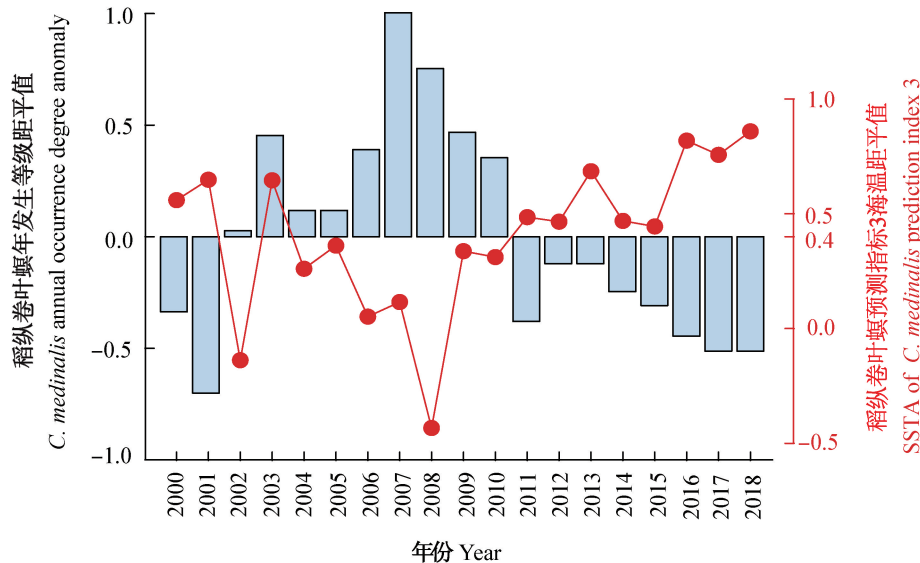


图5 2000—2018年稻纵卷叶螟年平均发生等级距平(柱状)与稻纵卷叶螟预测指标3(折线)对比图

Fig. 5 Histogram of the annual mean degree anomaly of *Cnaphalocrocis medinalis* from 2000 to 2018 and the broken line graph of the prediction index 3

3 讨论

我国稻纵卷叶螟发生同全球海域皆存在显著相关区,大部分显著相关区的范围和相关性都随时间推移先增后减,其最大值一般皆出现于中间月份。因此本文研究在挑选预测因子时,1个显著相关区只取1个预测因子,这样获取的预测因子相关性强,利于建模,同时也避免了建模中多重共线性的发生。共筛选出59个预测因子,用于建模的因子为50个,预测因子的使用率为84.8%。

卢小凤和霍治国(2013)认为BP神经网络模型的预报准确率高于多元线性回归模型,这是由于BP神经网络模型特别适用于非线性等复杂问题的处理。包云轩等(2018)发现SVM模型预测褐飞虱迁入量效果最好,BP神经网络次之,多元线性回归模型效果最差。上述研究结果与本试验略有不同,本研究中判别模型+线性回归模型的回检准确性虽弱于BP神经网络和SVM模型,但预测效果是三者中最最好的。究其原因可能是因为本研究所使用的样本量少,预测因子线性相关性强,所以建立的线性模型预测效果更好,BP神经网络模型和SVM模型更适合处理非线性数据,当样本量较多或有非线性预测因子存在的情况下,BP神经网络模型和SVM模型

会有更好的预测效果。现阶段我国稻纵卷叶螟长期预测工作的客观条件是样本量少、预测因子线性相关性强,所以线性回归模型的预测效果强于BP神经网络模型和SVM模型。

本研究在计算全国稻纵卷叶螟平均发生等级时并未考虑各省区之间水稻种植面积的差别,但也足以反映我国稻纵卷叶螟发生的总体趋势。2000—2018年间我国稻纵卷叶螟暴发年份为2003、2007年(陈晓等,2013;刘万才等,2016),本试验结果显示,全国稻纵卷叶螟发生等级距平在2003年和2007年都是正距平且距平值较高的年份,符合实际情况。因此以预测因子的空间分布来寻找全国性的预测指标是可行的。本研究筛选出的3个全国稻纵卷叶螟平均发生等级距平的预测指标的平均预测准确率为94.4%,适于测报部门的业务应用,但这3个预测指标所在海域的海温对我国稻纵卷叶螟发生等级的具体影响机制尚需深入探讨。

参 考 文 献 (References)

- BAI XD, TANG GT, ZHANG YX, ZOU LX, JIANG YZ. 2010. Meteorological condition grades forecast for occurrence of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée. Chinese Journal of Agrometeorology, 31 (4): 607–611 (in Chinese) [白先达, 唐广田, 张雅昕, 邹丽霞, 蒋运志. 2010. 稻纵卷叶螟发生的气象条件等级预报. 中国农业气

- 象, 31(4): 607–611]
- BAO YX, CHEN XY, XIE XJ, WANG L, LU MH. 2016. Short-term forecasting models on occurrence of rice leaf roller based on Kalman filter algorithm. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 37(5): 578–586 (in Chinese) [包云轩, 陈心怡, 谢晓金, 王琳, 陆明红. 2016. 基于卡尔曼滤波算法的稻纵卷叶螟短期预测模型. *中国农业气象*, 37(5): 578–586]
- BAO YX, TANG PR, SUN SS, LU MH, XIE XJ, LIU WC. 2018. Identifying and predicting impacts of abnormal climate conditions of the Indochina Peninsula on catastrophic immigration of *Nilaparvata lugens* (Stål) in South China. *Acta Ecologica Sinica*, 38(8): 2934–2947 (in Chinese) [包云轩, 唐辟如, 孙思思, 陆明红, 谢晓金, 刘万才. 2018. 中南半岛前期异常气候条件对中国南方稻区褐飞虱灾变性迁入的影响及其预测模型. *生态学报*, 38(8): 2934–2947]
- CHEN X, LIU WC, ZHU JS, ZHANG XX, ZHAI BP. 2013. Climatic factors influencing the 2003 outbreak of *Cnaphalocrocis medinalis* in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 615–621 (in Chinese) [陈晓, 刘万才, 朱建生, 张孝羲, 翟保平. 2013. 2003年我国稻纵卷叶螟特大发生的气候背景. *应用昆虫学报*, 50(3): 615–621]
- HU G, LU F, ZHAI BP, LU MH, LIU WC, ZHU F, WU XW, CHEN GH, ZHANG XX. 2014. Outbreaks of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) in the Yangtze River Delta: immigration or local reproduction? *PLoS ONE*, 9(2): e88973
- HU G, LU MH, Reynolds DR, WANG HK, CHEN X, LIU WC, ZHU F, WU XW, XIA F, XIE MC, et al. 2019. Long-term seasonal forecasting of a major migrant insect pest: the brown planthopper in the Lower Yangtze River Valley. *Journal of Pest Science*, 92: 417–428
- HU G, XIE MC, LIN ZX, XIN DY, HUANG CY, CHEN W, ZHANG XX, ZHAI BP. 2010. Are outbreaks of *Nilaparvata lugens* (Stål) associated with global warming? *Environmental Entomology*, 39(6): 1705–1714
- GAO P, WU JG, YANG RM, LIU M, HUANG JF. 2008. Remote correlations between situation indicators of rice leaf roller during its immigration period in Jiangsu Province and sea surface temperature of west Pacific as well as their long-term prediction models. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(9): 2056–2066 (in Chinese) [高苹, 武金岗, 杨荣明, 刘梅, 黄敬峰. 2008. 江苏省稻纵卷叶螟迁入期虫情指标与西太平洋海温的遥相关及其长期预报模型. *应用生态学报*, 19(9): 2056–2066]
- GAO WT, CHEN XY, BAO YX, WANG L, XIE XJ, LU MH. 2017. Application of singular cross-spectrum analysis in the prediction of *Cnaphalocrocis medinalis*' occurrence in southern China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 38(9): 583–596 (in Chinese) [高文婷, 陈心怡, 包云轩, 王琳, 谢晓金, 陆明红. 2017. 奇异交叉谱分析方法在中国南方稻纵卷叶螟发生预测中的应用. *中国农业气象*, 38(9): 583–596]
- LI F, HE JH. 2000. The decadal change of the interaction between northern Pacific SSTA and East Asian summer monsoon. *Journal of Tropical Meteorology*, 16(3): 260–271 (in Chinese) [李峰, 何金海. 2000. 北太平洋海温异常与东亚夏季风相互作用的年代际变化. *热带气象学报*, 16(3): 260–271]
- LI J, JIANG YP, YANG QZ, WANG ZX. 2004. Objective prediction models for damage caused by brown planthopper to late planted rice. *Entomological Knowledge*, 40(1): 24–29 (in Chinese) [李军, 蒋耀培, 杨秋珍, 王志雄. 2004. 单季晚稻褐飞虱发生程度综合客观预报模型. *昆虫知识*, 40(1): 24–29]
- LIU WC, LIU ZD, HUANG C, LU MH, LIU J, YANG QP. 2016. Statistics and analysis of crop yield losses caused by main diseases and insect in recent 10 years. *Plant Protection*, 42(5): 1–9 (in Chinese) [刘万才, 刘振东, 黄冲, 陆明红, 刘杰, 杨清坡. 2016. 近10年农作物主要病虫害发生危害情况的统计和分析. *植物保护*, 42(5): 1–9]
- LU MH, LIU WC, HU G, ZHAI BP, HOANG AT, DO HK. 2018. Analysis of the relationships of rice planthopper and rice leaf folder occurrence between China and Vietnam. *Plant Protection*, 44(3): 31–36 (in Chinese) [陆明红, 刘万才, 胡高, 翟保平, HOANG AT, DO HK. 2018. 中越水稻迁飞性害虫稻飞虱、稻纵卷叶螟发生关系分析. *植物保护*, 44(3): 31–36]
- LU XF, HUO ZG. 2013. Meteorological forecast models for the occurrence grade of rice planthopper in Guilin of Guangxi, South China. *Chinese Journal of Ecology*, 32(9): 2444–2450 (in Chinese) [卢小凤, 霍治国. 2013. 桂林地区稻飞虱发生等级气象预报模型. *生态学杂志*, 32(9): 2444–2450]
- MAELZER DA, ZALUCKI MP. 2000. Long range forecasts of the numbers of *Helicoverpa punctigera* and *H. armiger* (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia using the southern oscillation index and the sea surface temperature. *Bulletin of Entomological Research*, 90(2): 133–146
- QIN SL, ZHAI BP, ZHANG XX, QU XF, JIANG YY. 2003. Teleconnection between sea surface temperature in North Pacific and outbreaks of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) in northern and eastern China: an approach for long-term forecast. *Acta Entomologica Sinica*, 46(4): 479–488 (in Chinese) [秦淑莲, 翟保平, 张孝羲, 屈西峰, 姜玉英. 2003. 棉铃虫发生与北太平洋海温的遥相关及其长期灾变预警. *昆虫学报*, 46(4): 479–488]
- SUN Y, WANG QQ, QIAN YF, ZHANG YS, ZHAO K. 2006. Relation between the summer rainfall anomalies in North China and the global SSTA. *Plateau Meteorology*, 25(6): 1127–1138 (in Chinese) [孙燕, 王谦谦, 钱永甫, 张友妹, 赵凯. 2006. 华北地区夏季降水与全球海温异常的关系. *高原气象*, 25(6): 1127–1138]
- WANG FY, HU G, CHEN X, SHEN HM, LUO SY, XIN DY, XU SG, ZHANG XX, ZHAI BP. 2009. Analysis on the causes of recent outbreaks of *Cnaphalocrocis medinalis* in Nanjing, China. *Chinese Journal of Rice Science*, 23(5): 537–545 (in Chinese) [王凤英, 胡高, 陈晓, 沈慧梅, 罗善煜, 辛德育, 徐盛刚, 张孝羲, 翟保平. 2009. 近年来广西南宁稻纵卷叶螟大发生原因分析. *中国水稻科学*, 23(5): 537–545]
- WANG SS, ZHANG XX. 2000. A neutral network approach to long-term forecasting for rice leafroller. *Journal of Plant Protection*, 27(4): 313–316 (in Chinese) [汪四水, 张孝羲. 2000. 基于神经网络的稻纵卷叶螟长期预测. *植物保护学报*, 27(4): 313–316]

- WANG ZR, QIAN YF. 2005. The affection of sea-surface temperature anomaly to meiyu onset date of Yangtze-Huaihe River valley. *Journal of Applied Meteorological Science*, 16(2): 193-204 (in Chinese) [王钟睿, 钱永甫. 2000. 海温异常对江淮流域入梅的影响. *应用气象学报*, 16(2): 193-204]
- WENTZ FJ, GENTEMANN C, SMITH D, CHELTON D. 2000. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds. *Science*, 288(5467): 847-850
- WIDROW B, LEHR MA. 1990. 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation. *Proceedings of the IEEE*, 78(9): 1415-1442
- WU GR, YU XP, TAO LY. 1997. Long term forecast on the outbreak of brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) and white backed planthopper (*Sogatella furcifera* Horvath). *Scientia Agricultura Sinica*, 30(4): 25-29 (in Chinese) [巫国瑞, 俞晓平, 陶林勇. 1997. 褐飞虱和白背飞虱灾害的长期预测. *中国农业科学*, 30(4): 25-29]
- WU RF, HUO ZG, WANG PF, LÜ JH, YAN WX. 2008. The relations of atmospheric circulation and ocean temperature to the occurrence area attacked by soybean pod borers in China as well as its long-term forecast. *Chinese Journal of Ecology*, 27(4): 596-600 (in Chinese) [吴瑞芬, 霍治国, 王鹏飞, 吕景华, 闫伟兄. 2008. 全国大豆食心虫发生面积与大气环流、海温的关系及其长期预测预报. *生态学杂志*, 27(4): 596-600]
- XIAN XQ, ZHAI BP, ZHANG XX, CHENG XN, WANG JQ. 2007. Teleconnection between ENSO indices and the early immigration of brown planthopper: implication for its medium and long-term forecast. *Acta Ecologica Sinica*, 27(8): 3144-3154 (in Chinese) [洗晓青, 翟保平, 张孝羲, 程遐年, 王建强. 2007. 褐飞虱 (*Nilaparvata lugens* (Stål))前期迁入与 ENSO 指标的遥相关及其中长期预测. *生态学报*, 27(8): 3144-3154]
- YANG YJ, XU HX, ZHENG XS, TIAN JC, LU YH, LÜ ZX. 2015. Progress in management technology of rice leaffolders in China. *Journal of Plant Protection*, 42(5): 691-701 (in Chinese) [杨亚军, 徐红星, 郑许松, 田俊策, 鲁艳辉, 吕仲贤. 2015. 中国水稻纵卷叶螟防控技术进展. *植物保护学报*, 42(5): 691-701]
- ZHAI BP, CHENG JA. 2006. The conference summary of workshop on the two primary migratory pests of rice, rice planthopper and rice leaf roller, in 2006. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(4): 585-588 (in Chinese) [翟保平, 程家安. 2006. 2006 年水稻两迁害虫研讨会纪要. *昆虫知识*, 43(4): 585-588]
- ZHAO SJ. 1987. A study on prediction models for immigrating period of moths of first-generation in the outbreaking region of second-generation army worm by using sea surface temperature data. *Journal of Academy of Meteorological Science*, (1): 88-96 (in Chinese) [赵圣菊. 1987. 用海温预测二代粘虫发生区一代成虫迁入期的模式研究. *应用气象学报*, (1): 88-96]
- ZHANG XG. 2000. Introduction to statistical learning theory and support vector machines. *Acta Automatica Sinica*, 26(1): 32-42 (in Chinese) [张学工. 2000. 关于统计学习理论与支持向量机. *自动化学报*, 26(1): 32-42]
- ZHANG XX, GENG JG, ZHOU WJ. 1981. Advance in studies on the migration of rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée). *Plant Protection*, 7(6): 2-7 (in Chinese) [张孝羲, 耿济国, 周威君. 1981. 稻纵卷叶螟迁飞规律的研究进展. *植物保护*, 7(6): 2-7]
- ZHU YF, CHEN LX, YU RC. 2003. Analysis of the relationship between the China anomalous climate variation and ENSO cycle on the Quasi-four-year scale. *Journal of Tropical Meteorology*, 19(4): 345-356 (in Chinese) [朱艳峰, 陈隆勋, 宇如聪. 2003. 中国气候异常变化与 ENSO 准四年循环的联系分析. *热带气象学报*, 19(4): 345-356]
- ZHAO YJ, QIAN YF. 2009. Analyses of the impacts of global SSTA on precipitation anomaly in China. *Journal of Tropical Meteorology*, 25(5): 561-570 (in Chinese) [赵永晶, 钱永甫. 2009. 全球海温异常对中国降水异常的影响. *热带气象学报*, 25(5): 561-570]

(责任编辑:王璇)