基于大尺度因子的江苏稻区稻瘟病气象等级长期预测

徐 敏[1]， 徐经纬[2]， 高 苹[1]， 吴洪颜[1*]， 罗晓春[1]， 任义方[1]

（1. 江苏省气象局，南京 210008；2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室，气候与环境变化国际合作联合实验室，气象灾害预报预警与评估协同创新中心，资料同化研究与应用中心，南京 210044）

摘要 为较早地准确预测水稻稻瘟病发生发展的气象等级，利用大气环流和太平洋海温对气象条件影响的滞后性，采用最优相关和空间拓扑分析技术，结合滑动平均和主成分识别法，筛选出对江苏稻区稻瘟病指数影响最显著且稳定独立的大尺度预报因子，分别建立了基于大气环流因子和基于海温因子的稻瘟病气象等级长期预测模型。经历史拟合和试报检验，模型效果理想，能提前一个月预测出水稻稻瘟病发生的气象等级。该模型的预测结果对江苏稻区稻瘟病防治具有重要意义。

关键词 水稻稻瘟病； 气象等级预测； 海温； 大气环流指数

中图分类号： S431.2，S 435.111.41 **文献标识码：** A **DOI：** 10.3969/j.issn.0529－1542.2017.04.006

Long-term prediction models based on large-scale factors for meteorological grade of the rice blast in Jiangsu rice area

Xu Min[1]， Xu Jingwei[2]， Gao Ping[1]， Wu Hongyan[1]， Luo Xiaochun[1]， Ren Yifang[1]

（1. *Meteorological Bureau of Jiangsu Province*，*Nanjing* 210008，*China*；2. *Key Laboratory of Meteorological Disaster*，*Ministry of Education*（*KLME*），*Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change*（*ILECE*），*Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*（*CIC-FEMD*），*Center for Data Assimilation Research and Application*（*CDARA*），*Nanjing University of Information Sciences & Technology*（*NUIST*），*Nanjing* 210044，*China*）

Abstract In order to predict the degree of meteorological grade of rice blast early and accurately，two long-term prediction models of meteorological grade for rice blast were established based on the atmospheric circulation factors and based on SST factors by the optimal correlation and spatial topological analysis technology and the impact of atmospheric circulation and Pacific SST on meteorological conditions (tread effect). In addition，the methods of moving average and principal component were used for the forecast factor having stability and independence to the comprehensive index of rice blast. Furthermore，through the historical fitting and forecast testing，the results of the prediction models were satisfactory. The meteorological grade of rice blast could be predicted by the models at least one month in advance. Therefore，the prediction results have a significant guiding meaning for agricultural prevention and control of rice blast in Jiangsu rice area.

Key words rice blast； prediction model of meteorological grade； sea surface temperature； atmospheric circulation index

水稻稻瘟病是由被称为灰梨孢或稻梨孢的真菌引起，该真菌属于半知菌亚门[1]。稻瘟病菌不仅能侵染水稻，还能侵染小麦、大麦等农作物的茎叶，以及植物的根部[2]。稻瘟病是我国稻区最严重的病害之一，一般流行年份可造成10%～20%的减产，严重发生时损失高达40%～50%[3]，严重制约我国水稻生产。近年来在我国南北稻区及部分感病品种上呈偏重流行态势，老病区和感病品种普遍发病，具有

收稿日期： 2016－09－02 **修订日期：** 2016－12－07
基金项目： 公益性行业（气象）科研专项（GYHY201306035）；江苏省气象局科研基金面上项目（KM201504，KM201707）
* 通信作者 E-mail：jsqx_zqzb@126.com

点多面广、发病品种多、发生频率趋高、面积趋大、为害趋重的特点[4-6]。

稻瘟病的发生流行受菌源、气象因子及寄主植物水稻三者影响，因此可根据菌量、气象条件、栽培条件或寄主生育状况、侵染状况进行预测[2]。稻瘟病属于再侵染频繁的病害，初始菌量的多少决定流行程度，气象条件也对其影响很大，温度主要影响稻瘟病菌的生长发育，湿度则影响病原菌孢子的形成、萌发和侵入，雨水飞溅易致气传孢子的释放和传播。王建忠等[7]指出稻瘟病的发生、流行及危害与气象条件密切相关，属于典型的“气象型”病害，在稻瘟病流行年份，水稻生长前期的气候特点主要表现为温暖、多雨寡照；水稻生长中后期的气候特点表现为低温、多雨寡照[8-9]。因此，利用气象条件与稻瘟病间的关系，建立稻瘟病气象等级预测模型是可行的。我国学者从 20 世纪 80 年代起，在农作物病害发生发展与气象条件的关系、发生的气象环境成因、气象预测预报等研究方面取得了重要进展，何永坤等[10]从稻瘟病发病机理出发，建立了其发生发展的气象条件促病指数和气象条件等级预报指标，利用 72 h 的短期天气预报开展稻瘟病发生发展的气象等级预报；郭瑞鸽等[11]针对江西早稻利用统计方法建立了稻瘟病发生的气象条件监测预警方法，开展预警时同样采用的是短期天气预报；黄春艳等[12]应用逐步回归法建立了黑龙江稻区稻瘟病流行趋势预测数学模型，预报因子为 6 月下旬至 7 月中旬的各旬关键气象因子；胡毅等[13]利用贝叶斯判别法和神经网络建立了四川省稻区稻瘟病发病率及其等级预报模式，预报因子为 3 月上旬至 6 月上旬各旬的主要气象要素。

从已有研究来看，稻瘟病气象等级的预测时效基本上只有 3 d 左右，预测精度依赖于短期天气预报的准确度，预测时效短不利于稻瘟病防治工作的开展。为了延长预测时效，本研究将以江苏稻区为例，在综合稻瘟病指数和稻瘟病气象等级指标的研究成果基础上，根据长期预报方法，利用最优相关和空间拓扑分析技术，筛选出对综合稻瘟病指数影响显著的海温预报因子和大气环流预报因子，分别建立其长期预报模型，并进行模型检验。若能提前一个月且准确地预测出稻瘟病气象等级，则可为提前采取有效防治措施提供科学依据，同时对保障粮食安全具有十分重要的现实意义。

1　资料与方法

1.1　研究资料

（1）气象资料：1978－2015 年，江苏全省 67 个气象站逐日气象资料，日降水量、日平均温度、日均相对湿度、日照时数。

（2）环流指数：1978－2015 年，来自国家气候中心的 74 项逐月大气环流指数，包括不同区域副热带高压面积和强度指数、极涡面积指数、纬向环流指数、经向环流指数、南方涛动指数、东亚槽强度和位置等。

（3）海温资料：1978－2015 年，来自美国大气与海洋管理局网站气候诊断中心的太平洋海区（10°S～50°N、120°E～80°W）逐月海表面温度，水平分辨率是 5°×5°（图 1）。

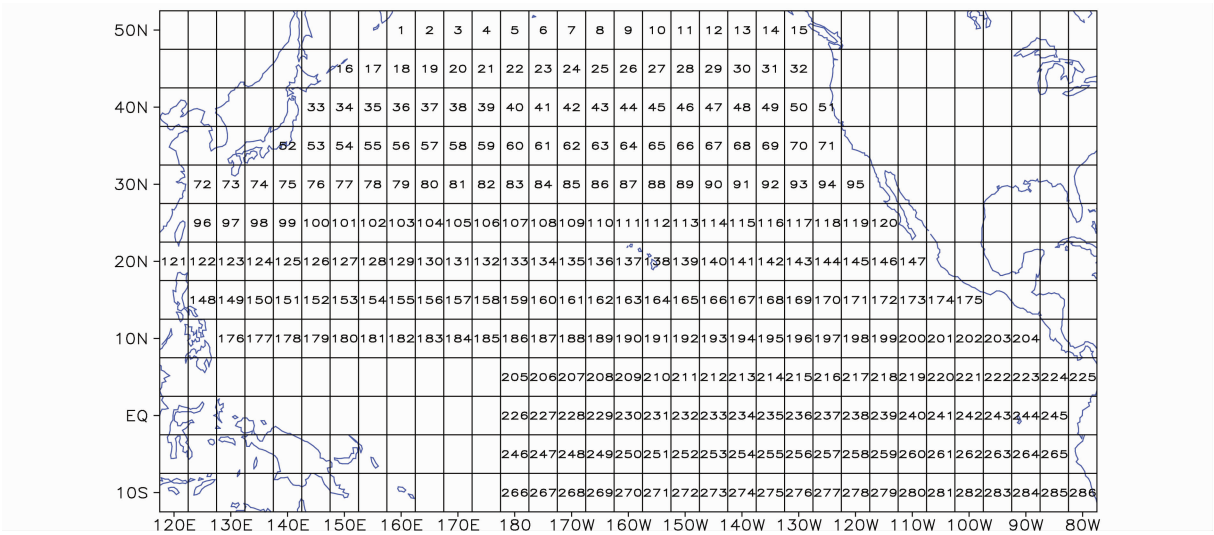


图 1　1978－2015 年北太平洋海温场 286 个格点编号示意图

Fig. 1　The north Pacific SST field 286 lattice code diagram

1.2 研究方法

1.2.1 综合稻瘟病指数的算法

适宜的气象条件是水稻稻瘟病大发生的直接诱发因素，当气温在 20～30℃、空气相对湿度 90%以上、稻株表面水膜保持 6～10 h，稻瘟病就容易发生[10]。对于江苏稻区，6—8 月为稻瘟病发生流行的主要时期，该时段覆盖了水稻的叶瘟和穗颈瘟发病期，因此在构建稻瘟病指数时，综合考虑了叶瘟指数和穗颈瘟指数，并对综合稻瘟病指数所对应的气象等级进行了划分，具体计算公式和等级划分见文献[14]。

1.2.2 最优化算法

为了实现提前一个月预测出稻瘟病气象等级的目标，充分利用稻瘟病发生的气象条件对大气环流与海温响应的滞后性[15-16]，采用相关分析筛选出与综合稻瘟病指数相关的大气环流指数和海温格点。为了取得更加显著的相关效果，应用最优化相关处理技术[17]进行膨化处理，经过最优化处理可寻找到相关显著的因子。

最优化处理计算公式如下：

$$H = (|x-b|/B+0.5)^{a} \quad (1)$$

其中，x 为大尺度预报因子（大气环流指数或太平洋海温），H 为经过变换的大尺度预报因子，a、b 为待定参数，根据经验，a、b、B 取值范围如下：

$$a \in (-10,-1/10) \text{ 或 } a \in (1/10,10)$$

$$x_{\min}+(x_{\max}-x_{\min})/4 \leqslant b \leqslant x_{\max}-(x_{\max}-x_{\min})/4$$

$$B = \max(x_{\max}-b, b-x_{\min})$$

待定参数 a、b 用最优化技术求出，令目标函数为：

$$f(a,b) = 1-R^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

其中，R 为变换后的大尺度预报因子 H 与综合稻瘟病指数的相关系数，经过最优化处理后，可得到一系列与综合稻瘟病指数相关最显著的大尺度预报因子。

2 结果与分析

2.1 基于大尺度气象因子的综合稻瘟病指数预测模型

2.1.1 大气环流预报因子筛选与预测模型的建立

由于江苏地区稻瘟病的易发关键期是 8 月份，因此预报因子截止到 7 月份，通过因子膨化，从上一年 1 月至当年 7 月共 19 个月，对 74 项大气环流特征量进行所有时段组合，并计算各组合时段的平均值，经过筛选，得到 21 个兼具稳定性和独立性的大气环流影响因子，具体为：不同时间段北非大西洋北美副高面积指数（110°W～60°E）、东太平洋副高面积指数（175°W～115°W）、西太平洋副高强度指数（110°W～180°）、南海副高强度指数（100°E～120°E）、太平洋副高强度指数（110°E～115°W）、不同时间段北半球副高脊线（5°E～360°）、北半球副高脊线（5°E～360°）、北半球副高北界（5°E～360°）、不同时间段太平洋副高北界（110°E～115°W）、太平洋区极涡面积指数（2 区 150°E～120°W）、北美区极涡面积指数（3 区 120°W～30°W）、北半球区极涡强度指数（5 区 0～360°）、不同时间段大西洋欧洲环流型 C、亚洲纬向和经向环流指数（60°E～150°E）、印缅槽（15°N～20°N，80°E～100°E）、编号台风。

对上述筛选出的显著相关因子，进行逐步回归，由其中 7 个因子建立了基于大气环流因子的综合稻瘟病指数的预测模型，方程如下：

$$Z_{hl} = -0.539H_1+0.685H_2-0.490H_3+0.364H_4+0.231H_5-0.914H_6-3.150H_7+14.267$$

式中，Z_{hl} 为水稻综合稻瘟病指数，H_1……H_7 为经过线性和非线性处理的大气环流预报因子，计算公式和含义见表 1。

表 1 综合稻瘟病指数预测模型中的大气环流预报因子[1)]

Table 1 The mathematical expression of atmospheric circulation predictor in the long-term prediction model of composite index of rice blast

预报因子 Predictor	表达式 Expression	影响时段 Period affected	含义 Symbolic meaning	相关系数 Correlation coefficient
H_1	$(\lvert x_1-14.64\rvert/3.36+0.5)^{2.97}$	上年 5 月 May last year	北半球副高脊线 Subtropical high ridge line of the northern hemisphere	−0.421
H_2	$(\lvert x_2-10.19\rvert/4.81+0.5)^{-2.46}$	上年 1 月－上年 3 月 January-March last year	北半球副高脊线 Subtropical high ridge line of the northern hemisphere	0.403
H_3	$(\lvert x_3-216.56\rvert/37.44+0.5)^{-2.27}$	上年 12 月 December last year	太平洋区极涡面积指数 Polar vortex area index of the Pacific area	−0.404
H_4	$(\lvert x_4-7.12\rvert/7.88+0.5)^{-2.77}$	当年 5 月－当年 7 月 May-July the present year	大西洋欧洲环流型 European Atlantic circulation type	0.453

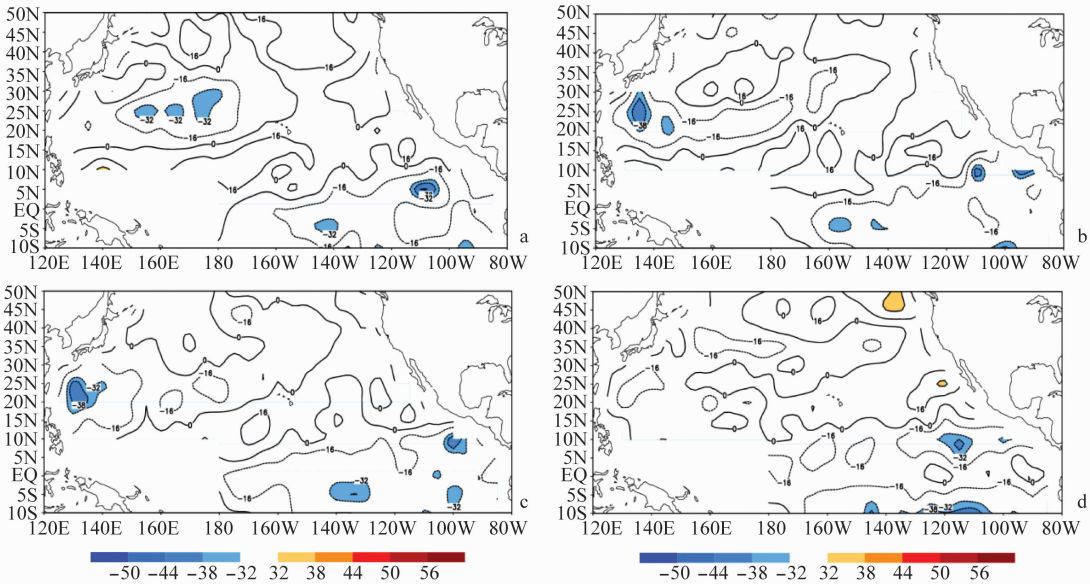
续表 1　Table 1(Continued)

预报因子 Predictor	表达式 Expression	影响时段 Period affected	含义 Symbolic meaning	相关系数 Correlation coefficient
H_5	$(\lvert x_5-95.58\rvert/27.25+0.5)^{-2.61}$	上年 5 月－上年 7 月 May-July last year	亚洲纬向环流指数 Asian zonal circulation index	0.506
H_6	$(\lvert x_6-41.50\rvert/11+0.5)^{-1.50}$	当年 6 月－当年 7 月 June-July the present year	亚洲经向环流指数 Asian meridional circulation index	－0.547
H_7	$(\lvert x_7-16\rvert/26+0.5)^{0.75}$	当年 3 月 March the present year	印缅槽 Indian-Myanmar trough	－0.506

1) 通过 0.01 显著性检验的 F 值是 0.418，通过 0.001 显著性检验的 F 值是 0.519，x_1……x_7 是对应的大气环流指数值。
F value is 0.418 by significance test of 0.01. F value is 0.519 by significance test of 0.001. x_1……x_7 is the atmospheric circulation index value.

2.1.2　海温预报因子筛选与预测模型的建立

海洋对我国气候的影响存在后延效应，因此我们计算了上年 1 月至当年 7 月海温与综合稻瘟病指数的相关系数，受篇幅限制，文中以相关性较好的 4 个月份为例(图 2)，从海温场的相关系数空间分布图上可以看出，综合稻瘟病指数与上年 5 月(图 2a)、6 月(图 2b)、7 月(图 2c)、9 月(图 2d)太平洋海温均存在高相关区(蓝色区域，通过 0.05 显著性检验)，上年 5 月的显著负相关区位于(23°N～27°N，150°E～180°)，上年 6 月和 7 月的显著负相关区域较为接近，均位于 25°N 附近的东太平洋区域，上年 9 月的显著负相关区已经转移到赤道以南的西太平洋区域。由此可见，太平洋海温对综合稻瘟病指数具有可预报性，而且海温的后延效应可大幅提高预测模型的预测时效。



a: 上年5月; b: 上年6月; c: 上年7月; d: 上年9月. 已扩大100倍, 填色区域是指相关系数通过了0.05显著性检验
a: May last year; b: June last year; c: July last year; d: September last year. Correlations increase by 100 times and the colored areas indicate significant difference (P<0.05)

图 2　综合稻瘟病指数与太平洋海温的相关系数

Fig. 2　Correlation coefficient between composite index of rice blast and sea surface temperature

由于太平洋海温是一个场，若是独立的格点具有相关性并没有实际意义，所以在寻找综合稻瘟病指数的海温相关因子时需要考虑空间相关格点数，在此利用空间拓扑分析原理，筛选出空间相连格点≥4 个的海区，将此海区影响时段的海温平均值作为一个海温预报因子，然后再将所选因子进行最优化处理。经过筛选，共有 22 个海温因子入选，经过逐步回归后，由其中 7 个因子构建了预测模型，方程如下：

$$Z_{sst}=-1.935S_1-0.284S_2+0.003S_3+15.276S_4-0.770S_5+0.133S_6-0.338S_7-0.544$$

式中，Z_{sst} 为水稻综合稻瘟病指数，S_1……S_7 为经过线性和非线性处理的海温预报因子，计算公式和相关信息见表 2。

表 2 综合稻瘟病指数预测模型中的海温预报因子[1)]

Table 2 The mathematical expression of sea surface temperature predictor in the long-term prediction model of composite index of rice blast

预报因子 Predictor	表达式 Expression	影响时段 Period affected	高相关海区格点数 Lattice sites in highly correlated area	相关系数 Correlation coefficient
S_1	$(\lvert y_1-136.75\rvert/30+0.5)^{0.82}$	上年 5 月 May last year	4	−0.479
S_2	$(\lvert y_2-299.45\rvert/17.45+0.5)^{-3.54}$	上年 7 月 July last year	5	−0.543
S_3	$(\lvert y_3-246.98\rvert/12.13+0.5)^{-10}$	上年 9 月 September last year	9	0.417
S_4	$(\lvert y_4-232.13\rvert/10.27+0.5)^{0.125}$	上年 3 月 March last year	7	0.559
S_5	$(\lvert y_5-279.11\rvert/18.31+0.5)^{-2.12}$	上年 4 月 April last year	5	−0.516
S_6	$(\lvert y_6-274.29\rvert/20.44+0.5)^{-4.24}$	上年 6 月 June last year	11	0.525
S_7	$(\lvert y_7-167.59\rvert/37.88+0.5)^{4.56}$	上年 7 月 July last year	17	0.514

1) 通过 0.01 显著性检验的 F 值是 0.418，通过 0.001 显著性检验的 F 值是 0.519，y_1……y_7 是对应海区海温格点的平均值。
F value is 0.418 by significance test of 0.01. F value is 0.519 by significance test of 0.001. y_1……y_7 is the atmospheric circulation index value.

2.2 模型的拟合检验和试报检验

为了检验基于大气环流因子和基于海温因子的预测模型的拟合效果，将综合稻瘟病指数的实际值和模拟值进行了对比(图 3)，可以看出两类预测模型的模拟结果与综合稻瘟病指数的实际值都非常接近，波动特征基本一致，尤其是病害重的极端年份，1980、1986、1987、2003、2011 年的综合稻瘟病指数均超过 12，对照表 1，这些年份稻瘟病发生的气象条件等级为强适宜，两类模型均能准确模拟出稻瘟病发生程度的气象等级。基于大气环流因子的预测模型的拟合值平均相对误差是 7.8%，基于海温因子的预测模型的拟合值平均相对误差是 7.5%，海温模型的误差相对小一些。两类模型均通过了 0.01 的显著性检验，拟合效果好。

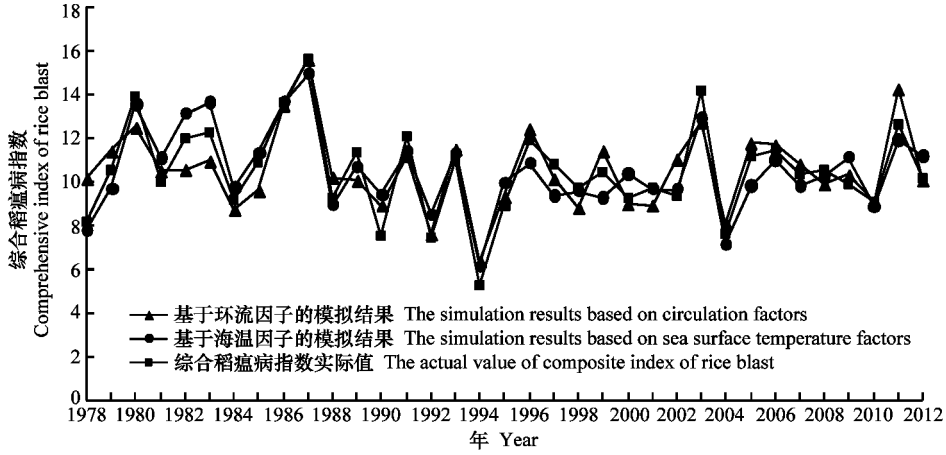


图 3 1978−2012 年综合稻瘟病指数两类长期预测模型的拟合检验

Fig. 3 Fitting test of two long-term prediction models of composite index of rice blast during 1978−2012

利用 2013−2015 年的资料进行试报检验，从表 4 可以看出，利用大气环流因子构建的预测模型预测出的近 3 年综合稻瘟病指数与实际值的误差范围是 0.18～0.67，其中 2014 年预测出的气象条件对病害的适宜程度为“弱适宜”，低于实际的气象等级“适宜”，其余两年的气象等级预报均为正确；利用海温因子构建的预测模型预测出的近 3 年综合稻瘟病指数与实际值的误差范围是−0.34～0.28，预测值

与实际值非常接近,预测的气象条件对稻瘟病病害的适宜程度均正确。从近 3 年试报效果来看,基于海温因子的模型预测效果要好于基于环流因子的模型预测效果。

表 3　综合稻瘟病指数预测模型的试报检验(综合稻瘟病指数/气象等级)

Table 3　Test of two long-term prediction models of composite index of rice blast (composite index of rice blast / meteorology grade)

年份 Year	基于环流因子的预报值 Forecast value of prediction model based on the circulation factors	基于海温因子的预报值 Forecast value of prediction model based on sea surface temperature factors	实际值 Actual value
2013	8.89/(1)	8.79/(1)	9.07/(1)
2014	9.97/(1)	10.68/(2)	10.35/(2)
2015	11.14/(2)	11.74/(2)	11.81/(2)

3　结论与讨论

本研究为稻瘟病气象等级的预测研究提供了新思路,通过找寻稻瘟病的大尺度气象预报因子,构建了稻瘟病气象等级的长期预测模型,并对模型进行了验证,通过了 0.01 显著性水平检验,说明预测模型切实可行,可提前一个月预测出稻瘟病的气象等级,为提前准备稻瘟病的科学防治提供了充足时间,弥补了原有稻瘟病气象等级预测时效短的不足。大尺度气象预报因子的找寻,一是根据中长期天气预报原理,海温的变化会引起大气环流系统的改变[18],从而影响到各地的气象条件,而气象条件的变化会影响稻瘟病的发生发展;二是充分利用了海温和大气环流对局地气象条件影响的滞后性,使得预测模型的预测时效延伸到了一个月。

选育和种植抗病品种虽然是控制稻瘟病发生流行的最经济、环保的措施,但在一定年限后,选育出的抗病品种仍可能变成感病品种。因此,当稻瘟病发生流行时,速效的化学防治仍然是最佳手段,有效防治稻瘟病的前提是进行有效的预测,只有及时准确地掌握了稻瘟病发生发展的趋势,才能抓住用药最佳时机,实现有效防治[19]。值得注意的是,通过本研究构建的稻瘟病气象等级长期预测模型,预测出的气象等级与稻瘟病发生流行实际等级可能会存在不一致的情形,因为稻瘟病气象等级是表示气象因子对稻瘟病发生发展的适宜程度,而实际田间的稻瘟病除了受气象条件影响外,还与植株抗病能力、病原数量、氮肥施用量和施用时期等有关。因此,在开展稻瘟病的实际预测时,需要综合考虑气象因素和管理水平以及水稻本身的抗病能力。

参考文献

[1]　任鄄胜,肖陪村,陈勇,等.水稻稻瘟病病菌研究进展[J].现代农业科学,2008,15(1):19-23.

[2]　曾士迈,杨演.植物病害流行学[M].北京:农业出版社,1986:184-190.

[3]　孙国昌,杜新法,陶荣祥.水稻稻瘟病防治研究进展和 21 世纪研究设想[J].植物保护,2000,26(1):33-35.

[4]　王艳青.近年来中国水稻病虫害发生及趋势分析[J].中国农学通报,2006,22(2):343-347.

[5]　赵梦,欧阳芳,张永生,等.2000-2010 年我国水稻病虫害发生与为害特征分析[J].生物灾害科学,2014,37(4):275-280.

[6]　舒畅,潘华.江西水稻病虫害发生与防治浅议[J].气象与减灾研究,2006,29(1):61-64.

[7]　王建忠,郑文静,张燕之.水稻稻瘟病的发病原因及综合防治[J].农业科技通讯,2006(8):24-25.

[8]　刘静,王健林,宋迎波,等.宁夏水稻稻瘟病发生程度的气象等级预报[J].安徽农业科学,2009,37(1):5021-5023.

[9]　刘志恒,王世维,魏松红,等.2011—2012 年辽宁省稻瘟病菌种群动态分析[J].沈阳农业大学学报,2014,45(4):393-397.

[10]　何永坤,阳园燕,罗孳孳.稻瘟病发生发展气象条件等级业务预报技术研究[J].气象,2008,34(12):110-113.

[11]　郭瑞鸽,杜筱玲,刘文英,等.江西早稻瘟病发生的气象条件监测预警方法[J].气象与减灾研究,2008,31(3):48-51.

[12]　黄春艳,张匀华,商世吉,等.黑龙江稻区稻瘟病流行趋势预测数学模型研究[J].植物保护,1995,21(2):8-11.

[13]　胡毅,向卫国,赵纯波,等.四川省稻瘟病发病率及其等级预报初探[J].成都气象学院学报,1994,9(4):60-67.

[14]　任义方,高苹,朱凤.江苏省稻瘟病发生程度的气象等级预报[J].江苏农业科学,2016,44(8):151-154.

[15]　高苹,武金岗,杨荣明,等.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的研究[J].应用生态学报,2008,19(8):2056-2066.

[16]　陈烈庭.太平洋海气相互作用时空变化[J].气象学报,1983,41:296-304.

[17]　汤志成,孙涵.最优化因子处理及加权多重回归模型[J].气象学报,1992,50(4):514-517.

[18]　章基嘉,葛玲.中长期天气预报基础[M].北京:气象出版社,1983:254-282.

[19]　齐龙,马旭,梁柏,等.稻瘟病监测预测方法研究现状及流行风险评估体系构建初探[J].中国农学通报,2011,27(33):213-216.

(责任编辑:田　喆)