

王纯枝, 霍治国, 张蕾, 等. 北方地区小麦蚜虫气象适宜度预报模型构建. 应用气象学报, 2020, 31(3): 280-289.
DOI: 10.11898/1001-7313.20200303

北方地区小麦蚜虫气象适宜度预报模型构建

王纯枝¹⁾ 霍治国^{2)3)*} 张蕾¹⁾ 郭安红¹⁾ 黄冲⁴⁾ 陆明红⁴⁾

¹⁾(国家气象中心, 北京 100081)

²⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081)

³⁾(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

⁴⁾(全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘 要

根据 1958—2015 年我国北方地区 8 个主产省(市)小麦蚜虫分省发生面积和发生程度资料、1958—2015 年 601 个气象站点相应逐日气象资料和农业气象站小麦发育期资料, 采用相关分析、主成分分析和逐步回归等方法, 并利用相关系数法进行因子普查, 结合小麦蚜虫适宜生理气象指标和华北、黄淮小麦生育期规律, 筛选影响小麦蚜虫年发生程度的关键气象因子, 构建分区域的小麦蚜虫气象适宜度预报模型, 并将气象适宜度指数划分为非常适宜、适宜、较适宜、不适宜 4 个等级, 以反映气象条件对小麦蚜虫发生发展的适宜程度。结果表明: 筛选出影响华北小麦蚜虫年发生程度的 8 个关键气象因子, 影响黄淮小麦蚜虫年发生程度的 6 个关键气象因子。建立的华北、黄淮模型回代检验等级准确率分别为 91.2%, 93.1%, 2016—2018 年 3 年外推预报平均准确率均在 75% 以上; 利用黄淮模型反演苏皖两省 2016—2018 年小麦蚜虫发生等级、异地检验 3 年预报效果均较理想。模型适用于从气象角度对华北、黄淮及江淮地区小麦蚜虫发生等级进行监测和预报。

关键词: 华北; 黄淮; 小麦蚜虫; 归一化; 气象适宜度; 预报模型

引 言

小麦是我国重要的粮食作物之一, 北方地区是我国冬小麦的主产区, 其产量对我国粮食安全占有举足轻重的地位, 而小麦蚜虫是危害小麦产量和品质的主要虫害^[1-3], 研究我国北方主要小麦种植区域麦蚜气象适宜度预报预警技术, 对做好气象保障、降低小麦产量损失、确保粮食安全具有重要意义。小麦蚜虫俗称油虫、腻虫、蜜虫, 属同翅目(*Hemiptera*), 蚜科(*Aphidoidea*), 可对小麦进行刺吸危害, 麦长管蚜和禾谷缢管蚜是影响我国小麦生产的最主要害虫^[4-5], 麦长管蚜则是危害的优势种^[3, 6]。

我国北方小麦主产区以麦长管蚜(多为害上部叶片, 抽穗灌浆期集中穗部为害)和麦二叉蚜(喜在

苗期为害)发生数量最多, 为害最重, 其直接为害以成蚜、若蚜吸食小麦叶片、茎秆和嫩穗的汁液, 使被害部位形成条斑、枯萎, 植株生长停滞甚至整株枯死, 影响小麦光合作用及营养吸收、传导, 穗期易造成麦粒不饱满或形成秕粒, 使千粒重降低, 造成减产; 间接为害是麦蚜传播小麦病毒病^[3], 如为害较大的小麦黄矮病。小麦蚜虫在南方无越冬期, 在北方麦区以无翅胎生雌蚜在麦株基部叶丛或土缝内越冬, 或者以卵在麦苗枯叶上、杂草上、茬管中、土缝内越冬。麦蚜的越冬、发育和繁殖与气象条件密切相关^[7-10], 如麦长管蚜通常喜中温不耐高温, 适宜温度范围为 13~25℃, 适宜空气相对湿度范围为 40%~80%^[11]; 麦二叉蚜则喜干怕湿, 5 d 平均气温 16~25℃和空气相对湿度 35%~67%为其适宜的繁殖条件^[12-13]。

2019-11-21 收到, 2020-03-15 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研究发展计划(2017YFC1502402), 中国气象局国内外作物产量预报专项

* 通信作者, 邮箱: huozg@cma.gov.cn

气候条件是小麦蚜虫暴发成灾的主要影响因子^[14]。暖冬可使小麦蚜虫越冬存活率增加,发生期提前^[15],暖春有利于虫害扩展速度加快^[16],气候变暖可使小麦蚜虫虫害发生趋势加重^[11]。几乎所有大范围流行性农作物重大病虫害的发生发展均与气象条件密切相关^[7,10],温度、空气湿度等直接与害虫的生殖、行为、种群演变、分布和发生程度有关^[9-10,17]。目前,基于传统病虫害预测预报方法包括经验预测法、实验预测法和统计预测法^[18-19]。有学者开始运用现代非线性理论,将人工神经网络、相空间重构预测法^[20]、小波分析^[21]、马尔可夫链^[22]、支持向量机和局部支持向量回归^[1]、模糊认知图(FCM)算法^[8]等方法运用于蚜虫等害虫预测预报中,但由于算法复杂、训练过程长、维数较高、参数较多或不能满足全局算法一致等局限性,与传统的统计预测法相比,在业务中应用有限,统计预测法因组建模型相对简单、参数获取简便、应用推广便捷等优点,仍广泛应用^[3,23-25]。因此,本研究根据我国北方主要小麦种植区域 1958 年以来的小麦蚜虫发生面积、发生程度和气象资料,结合小麦发育期区域分布规律和麦蚜自身生物学特性,采用相关分析法、逐步回归法等,研究小麦蚜虫年发生程度与上年冬季至当年 6 月上旬气象因子间的关系,筛选与小麦蚜虫发生程度相关显著的关键气象因子及时段,构建北方小麦主产区不同区域的小麦蚜虫气象适宜度预报模型,用于评估危害程度,为政府和生产部门及时采取防范措施、有效防控提供科技支撑和决策依据。

1 资料和方法

1.1 资料来源

研究区为我国北方冬小麦主产区 8 个省(市),包括河北、北京、天津、山西、河南、山东、江苏和安

徽。1949—2018 年各省小麦蚜虫年发生面积、发生程度等级、实际损失及 2012—2018 年始发期、盛发期资料来源于全国农业技术推广服务中心,其中发生程度等级序列连续性偏差,山西 1949—1972 年资料整体欠缺。1981—2018 年冬小麦常年发育期和不同年份发育期资料来源于国家气象中心。气象资料来源于国家气象中心,由于气象资料从 1958 年开始有较完整记录,故采用长度为 1958—2018 年,要素包括上年 12 月至当年 6 月上旬的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、空气相对湿度、大雨(暴雨)日数等。另外,引进了温雨系数指标 C ,即

$$C = P/T. \quad (1)$$

式(1)中, P 为月或旬累积降水量(单位:mm), T 为月或旬平均气温(单位:°C)。

1.2 资料处理

考虑到各省虫害实际发生程度等级资料序列不完整,而发生面积序列相对完整,为使建立的小麦蚜虫气象等级指标具有业务实用性,参照于彩霞等^[26]对稻飞虱发生面积率的划分标准,计算 1958—2018 年各省小麦蚜虫发生面积平均值,以平均值上下波动 50% 为等级间隔,对小麦蚜虫发生面积进行轻、偏轻、偏重和重 4 个等级划分,1 级表示轻发生(对应气象等级为不适宜),2 级表示偏轻发生(对应气象等级为较适宜),3 级表示偏重发生(对应气象等级为适宜),4 级表示重发生(对应气象等级为非常适宜)。小麦蚜虫测报国家标准^[27]将蚜虫发生程度划分为 5 级(轻发生、偏轻发生、中等发生、偏重发生、大发生),为了保持一致,验证时将中等发生和偏重发生合并为偏重等级,即合并后的偏重发生等级对应发生面积分为 3 级,大发生对应发生面积分为 4 级,其余等级一一对应不变。表 1 给出了各省小麦蚜虫发生面积分级及对应发生程度等级划

表 1 小麦蚜虫发生等级划分

Table 1 Classification for occurrence area of wheat aphids

小麦主产省(市)	小麦蚜虫发生面积等级划分/万公顷次			
	轻	偏轻	偏重	重
河北	[0,83)	[83,164)	[164,245]	>245
山西	[0,25)	[25,49)	[49,72]	>72
北京	[0,6)	[6,10)	[10,15]	>15
天津	[0,5)	[5,7)	[7,10]	>10
河南	[0,107)	[107,213)	[213,318]	>318
山东	[0,105)	[105,208)	[208,310]	>310
江苏	[0,51)	[51,100)	[100,149]	>149
安徽	[0,30)	[30,58)	[58,86]	>86

分。经对各省发生面积分级与实际发生程度等级进行一致性分析,发现华北、黄淮等级匹配一致性准确率分别为 90.3%,95.8%(华北样本量 $n=93$,黄淮样本量 $n=72$),因此,采用发生面积分级代替实际发生程度等级可行。

气象站点的选择依据中国气象地理区划^[28],并利用中国土地利用图^[29]和 ArcGIS 分析工具中的叠加 Intersect 功能剔除高山、城市开发区等非农田站点,操作在 ArcMap10.2 环境下完成,最终选取 8 个省(市)601 个气象站点(图 1),其中在华北选取 246

站,包括北京 10 站、河北 133 站、天津 11 站、山西 92 站;在黄淮选取 216 站,包括山东 106 站、河南 110 站;在苏皖两省选取 139 站,包括安徽 70 站、江苏 69 站。时间均为 1958—2018 年。对地面气象资料,先将气象站点上年 12 月至当年 6 月上旬的逐日资料处理成旬平均和月平均资料,再计算各省(市)气象要素和温雨系数的区域平均,以及上年冬季平均气温、最高气温、最低气温的逐年区域平均值,以便与各省虫害发生面积相对应。

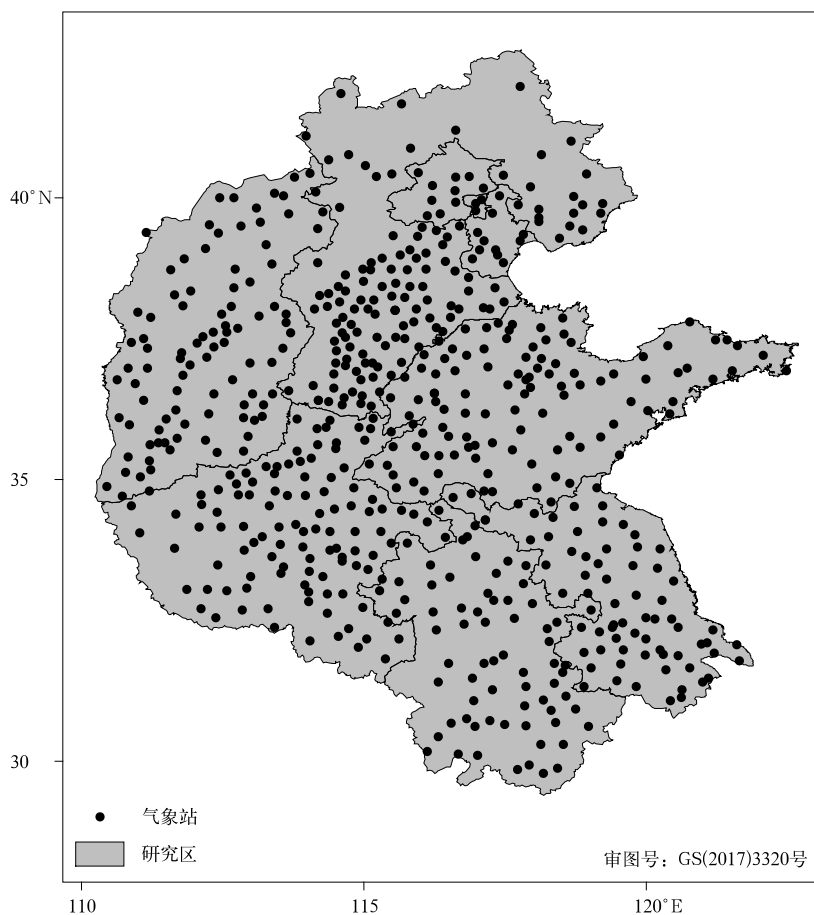


图 1 研究区内气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the study area

1.3 研究方法

1.3.1 相关分析

小麦蚜虫发生程度以年发生面积为依据,因子普查采用 Pearson 相关分析法,分析年发生程度与上年 12 月至当年 6 月上旬不同旬、月时段组合地面气象要素和上年冬季平均气温、最高气温、最低气温

间的相关关系,筛选与麦蚜发生程度显著相关的华北、黄淮关键气象因子及影响时段,相关系数的检验采用双尾 t 检验。

1.3.2 独立性检验

选用主成分识别法进行因子的独立性检验^[30-32],剔除共线性因子,建立因子间的相关矩阵 R 。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & \cdots & r_{pp} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

剔除共线性自变量数量的确定方法: r_{ij} 为因子 i 和 j 之间的相关系数, 求相关系数矩阵 \mathbf{R} 的特征值 λ_i , 若因子间存在共线性, 则有特征根接近 0。因此, 如果有 k 个特征量值近似等于 0, 则证明因子之间有 k 重共线性, 需要剔除 k 个自变量。主成分分析法的具体步骤详见文献[33-34]。

1.3.3 因子归一化

在筛选出关键因子后, 由于各因子影响程度不同、量纲不同, 不便直接应用, 因此, 对各关键气象因子采用极差化方法进行标准化处理(归一化法, 使数据均分布在 0~1 之间)。

1.3.4 气象适宜度综合指数和模型构建

利用华北、黄淮分区域归一化处理后的关键气象因子与对应省份小麦蚜虫发生面积划分等级建立华北、黄淮小麦蚜虫气象适宜度预报模型, 小麦蚜虫发生发展气象适宜度综合指数计算公式为

$$Z = C_0 + \sum_{i=1}^n (Y_i \times K_i). \quad (3)$$

式(3)中, Z 为小麦蚜虫发生发展气象适宜度综合指数, C_0 为常数, Y_i 为归一化后的第 i 项关键气象因子, K_i 为第 i 项归一化关键因子的回归系数, n 为因子个数。

将 1958—2015 年华北、黄淮地区资料用于建模和模型拟合回代检验, 2016—2018 年华北、黄淮及苏皖两省资料用于模型外推预报检验。

2 结果与分析

2.1 小麦蚜虫气象适宜度预报模型

2.1.1 关键气象因子筛选

根据小麦蚜虫生物学特性^[4-5]和小麦常年发育期规律^[35], 华北、黄淮小麦蚜虫为害特点见表 2。小麦蚜虫主要为害期为冬小麦拔节至乳熟前期, 盛发期为冬小麦抽穗开花期; 华北麦蚜主要为害期通常为 4 月上旬至 5 月中旬, 盛发期为 4 月下旬至 5 月上旬; 黄淮麦蚜主要为害期为 3 月下旬至 5 月上旬, 盛发期为 4 月中下旬(表 2)。小麦蚜虫为害盛期, 蚜虫种类主要是小麦穗期优势种麦长管蚜^[5]。分析春季至夏初冬小麦主产区 8 个省(市)逐旬平均气温变化发现, 4 月上旬安徽、河南两省平均气温已达到适宜麦长管蚜发生发展的基点气温(13℃)^[11], 4 月中旬至 6 月上旬 8 个省(市)逐旬平均气温基本都在麦长管蚜发生发展的适宜生理气象指标范围(13~25℃), 仅 4 月中旬山西省平均气温偏低, 说明小麦蚜虫为害盛期气温条件并非影响其发生程度的主导限制因子。因此, 探讨冬春季的气象条件对麦长管蚜的影响及其相互关系尤为必要。

表 2 北方小麦主产区小麦蚜虫为害特点^[4-5, 27, 35]

Table 2 Damage characteristics of wheat aphids in the main wheat growing areas in the northern China (from Reference [4-5, 27, 35])

冬小麦主产区	麦蚜为害特点	开始为害期(苗蚜)	主要为害期(苗蚜、穗蚜)	为害盛期(穗蚜)	为害末期(穗蚜)
华北	麦蚜发生时段	11 月上旬左右	4 月上旬—5 月中旬	4 月下旬—5 月上旬	5 月下旬—6 月上旬
	冬小麦发育期	分蘖期	拔节-乳熟前期	抽穗开花期	乳熟期
黄淮	麦蚜发生时段	11 月中旬左右	3 月下旬—5 月上旬	4 月中下旬	5 月中下旬
	冬小麦发育期	分蘖期	拔节-乳熟前期	抽穗开花期	乳熟期

首先采用单因子相关分析方法, 计算华北、黄淮各省小麦蚜虫发生面积与上年 12 月至当年 6 月上旬各旬(月)气象因子包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、空气相对湿度、大雨(暴雨)日数、无雨日数、温雨系数以及上年冬季平均气温、最高气温、最低气温等的相关系数, 筛选出相关系数达到 0.05 显著性水平的因子共 40 个, 并进行独立性检验, 结合北方小麦主产区蚜虫为害特点(表 2),

最终筛选出影响华北地区小麦蚜虫年发生程度的关键气象因子 8 个, 分别为上年冬季平均气温、当年 3 月温雨系数、3 月最高气温大于等于 25℃ 的日数、3 月下旬日照时数、4 月上旬平均气温、4 月下旬最高气温大于等于 28℃ 的日数、4 月大雨日数和 5 月上旬空气相对湿度介于 40%~80% 范围的日数; 筛选出影响黄淮地区小麦蚜虫年发生程度的关键气象因子 6 个, 分别为上年冬季平均气温、当年 1 月下旬

降水量、3月上旬空气相对湿度大于80%的日数、3月平均气温、4月温雨系数和4月下旬无雨日数。

具体见表3和表4。

由表3、表4可见,小麦蚜虫发生与冬季、春季

表3 华北地区小麦蚜虫发生程度与关键气象因子相关系数
Table 3 Correlation coefficients between the occurrence area of wheat aphids and key meteorological factors in North China

主要气象因子	关键影响时段	相关系数
平均气温(T_w)	上年冬季	0.39***
平均气温(T_{41})	4月上旬	0.332***
温雨系数(C_3)	3月	-0.24**
最高气温大于等于25℃的日数($D_{T_{mx3}}$)	3月	0.393***
最高气温大于等于28℃的日数($D_{T_{mx13}}$)	4月下旬	-0.32***
日照时数(S_{33})	3月下旬	-0.36***
大雨日数(D_{P_4})	4月	-0.312***
空气相对湿度40%~80%的日数($D_{H_{51}}$)	5月上旬	0.27**

注:① T, T_{mx}, C, D, S, H, P 分别表示平均气温、最高气温、温雨系数、日数、日照时数、空气相对湿度、降水量,各指标后下标数字表示×月×旬,如 T_{41}, C_3 分别表示4月上旬平均气温、3月温雨系数, T_w 表示冬季平均气温,以此类推。下同。 $D_{T_{mx3}}, D_{T_{mx13}}, D_{P_4}, D_{H_{51}}$ 分别表示3月最高气温大于等于25℃的日数、4月下旬最高气温大于等于28℃的日数、4月大雨日数、5月上旬空气相对湿度介于40%~80%的日数。

②*, **和***分别表示达到0.05, 0.01和0.001显著性水平(样本量为217)。

表4 黄淮地区小麦蚜虫发生程度与关键气象因子相关系数
Table 4 Correlation coefficients between the occurrence area of wheat aphids and key meteorological factors in the Huanghuai Area

主要气象因子	关键影响时段	相关系数
平均气温(T_w)	上年冬季	0.59***
平均气温(T_3)	3月	0.61***
降水量(P_{13})	1月下旬	-0.56***
空气相对湿度大于80%的日数($D_{H_{31}}$)	3月上旬	-0.355***
温雨系数(C_4)	4月	-0.233*
无雨日数($D_{P_{43}}$)	4月下旬	0.381***

注: P 表示降水量。 $D_{H_{31}}, D_{P_{43}}$ 分别表示3月上旬空气相对湿度大于80%的日数、4月下旬无雨日数,其余各指标后下标紧跟数字同表3类推。*, **和***分别表示达到0.05, 0.01和0.001显著性水平(样本量为116)。

尤其春季的气象因子密切相关,冬春不同时段平均气温与华北、黄淮小麦蚜虫发生面积均呈显著正相关,冬季气温偏高,利于小麦蚜虫越冬基数提高,春季气温偏高,利于小麦蚜虫发生发展,这与文献[3, 8, 15, 24]的研究结果一致,热量对小麦蚜虫发生发展具有正相关协同作用。3月、4月温雨系数与华北、黄淮小麦蚜虫发生程度呈显著负相关,春季降水偏少、气温偏高,温雨系数偏小,利于苗蚜和穗蚜的发生发展。华北小麦蚜虫发生面积与3月最高气温大于等于25℃的日数和5月上旬空气相对湿度为40%~80%的日数呈显著正相关,与3月温雨系数、3月下旬日照时数、4月下旬最高气温大于等于28℃的日数和4月大雨日数呈显著负相关。黄淮小麦蚜虫发生面积与1月下旬降水量、3月上旬空气相对湿度大于80%的日数和4月温雨系数呈显著

负相关,与4月下旬无雨日数呈显著正相关。这是由于小麦蚜虫在不同虫态、不同小麦发育期对空气湿度、日照时数、水分条件的要求存在差异所致。据研究^[24],热量和水分条件是影响小麦蚜虫种群消长的关键气象因素,水分因子(降水和湿度)具有反向抑制作用,其中大雨有冲刷作用,大雨日数越多,越利于抑制小麦蚜虫发生发展;相反,无雨日数越多,越有利于小麦蚜虫的暴发流行。

2.1.2 小麦蚜虫气象适宜度模型的建立

用华北区域对应省份小麦蚜虫发生面积等级序列与华北归一化的8个关键气象因子进行回归分析,建立华北小麦蚜虫气象适宜度预报模型如下:

$$Z_{nc} = 2.304 + 1.423Y_1 - 0.88Y_2 - 0.267Y_3 - 1.399Y_4 + 1.343Y_5 - 0.474Y_6 - 0.091Y_7 + 0.247Y_8. \quad (4)$$

其中, Z_{nc} 为在具有一定虫源条件下仅考虑气象条件影响的当年华北小麦蚜虫发生发展气象适宜度指数, $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7, Y_8$ 分别为上年冬季平均气温 (T_w)、当年 3 月温雨系数 (C_3)、3 月最高气温大于等于 25℃ 的日数 ($D_{T_{mx3}}$)、3 月下旬日照时数 (S_{33})、4 月上旬平均气温 (T_{41})、4 月下旬最高气温大于等于 28℃ 的日数 ($D_{T_{mx43}}$)、4 月大雨日数 (D_{P4}) 和 5 月上旬空气相对湿度为 40%~80% 的日数 (D_{H51})。方程复相关系数为 0.682, 达到 0.001 显著性水平, 样本量 $n=217$ 。

用黄淮区域对应省份小麦蚜虫发生面积等级序列与黄淮归一化的 6 个关键气象因子进行回归分析, 构建黄淮小麦蚜虫气象适宜度预报模型如下:

$$Z_{hh} = 0.605 + 2.085Y_1 - 0.725Y_2 - 1.41Y_3 + 0.796Y_4 + 0.443Y_5 + 1.667Y_6 \quad (5)$$

其中, Z_{hh} 为当年黄淮小麦蚜虫发生发展气象适宜度指数, $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6$ 分别为上年冬季平均气

温 (T_w)、当年 1 月下旬降水量 (P_{13})、3 月上旬空气相对湿度大于 80% 的日数 (D_{H31})、3 月平均气温 (T_3)、4 月温雨系数 (C_4) 和 4 月下旬无雨日数 (D_{P43})。方程复相关系数为 0.688, 达到 0.001 显著性水平, 样本量 $n=116$ 。

Z 值越大表示气象条件对小麦蚜虫发生发展越有利, 反之越不利。为方便实际应用, 将北方地区小麦蚜虫资料中华北 217 个样本和黄淮 116 个样本的小麦蚜虫发生程度从小到大排序, 分析虫害发生程度分别为轻(1级)、偏轻(2级)、偏重(3级)和重(4级)(对应小麦蚜虫测报标准^[27]中等和偏重合并后)4 个不同级别的样本分布, 将气象适宜度指数 Z 值划分为 4 个级别(表 5): 1 级为气象条件不适宜虫害发生发展, $Z < 1.5$; 2 级为气象条件较适宜虫害发生发展, $1.5 \leq Z < 2.5$; 3 级为气象条件适宜虫害发生发展, $2.5 \leq Z < 3.5$; 4 级为气象条件非常适宜虫害发生发展, $Z \geq 3.5$ 。

表 5 华北、黄淮小麦蚜虫发生发展气象适宜度指数分级表

Table 5 Classification of meteorological suitability index for the occurrence and development of wheat aphids in North China and the Huanghuai Area

气象条件	气象适宜度综合指数 Z	气象适宜度等级	虫害发生等级
非常适宜虫害发生发展	$Z \geq 3.5$	4	重发生
适宜虫害发生发展	$2.5 \leq Z < 3.5$	3	偏重发生
较适宜虫害发生发展	$1.5 \leq Z < 2.5$	2	偏轻发生
不适宜虫害发生发展	$Z < 1.5$	1	轻发生

2.2 小麦蚜虫气象适宜度模型的检验

利用 1958—2015 年资料进行模型回代拟合检验, 华北和黄淮小麦蚜虫气象适宜度等级与实际发生等级相比, 区域模型拟合级别一致平均准确率均在 90% 以上(表 6)。由表 6 两区域分级拟合结果可知, 4 个级别拟合准确率均不小于 80%, 2 级(气象条件较适宜)和 3 级(气象条件适宜)预报准确率均

达到 90% 以上, 其中华北 2 级、3 级基本正确的准确率达 100%, 气象条件较适宜和适宜等级的预报效果比气象条件不适宜(1 级)明显好, 即随着预报适宜程度增加, 预报准确率明显提升; 4 级(气象条件非常适宜)预报准确率较 2 级和 3 级虽有所下降, 但华北 4 级预报准确率在 85% 以上, 黄淮在 90% 以上, 预报效果仍较好。

表 6 1958—2015 年华北和黄淮小麦蚜虫气象适宜度模型回代拟合准确率

Table 6 Hindcast accuracy of forecast models of meteorological suitability for wheat aphids in North China and the Huanghuai Area from 1958 to 2015

区域	各级别数量	等级				合计
		1 级	2 级	3 级	4 级	
华北	实际发生相应级别数量	57	43	60	57	217
	预报与实际相符数量	46	43	60	49	198
	准确率/%	80.7	100.0	100.0	86.0	91.2
黄淮	实际发生相应级别数量	41	19	20	36	116
	预报与实际相符数量	36	18	20	34	108
	准确率/%	87.8	94.7	100.0	94.4	93.1

注: 预报与实际一致为正确, 相差 1 个等级为基本正确, 相差 2 个或 2 个以上等级为错误。

利用分区域虫害气象适宜度模型对2016—2018年华北和黄淮小麦蚜虫气象适宜度等级进行预报,利用黄淮区域气象适宜度模型对江苏、安徽两省2016—2018年小麦蚜虫气象适宜度等级进行外推预报检验,结果见表7和表8。由表7可以看到,与实际发生面积分级相比,模型对2016—2018年华北和黄淮小麦蚜虫气象适宜度等级预报平均准确率分别为75%和100%;黄淮模型外推至苏皖地区,两省预报3年平均准确率为100%(表8),效果理想。研究还表明:建立的小麦蚜虫气象等级预报模型对蚜虫发生偏重年份预报准确率较偏轻年份更高,说明模型对偏重年份的灾害等级的反映和响应效果更好。

根据2016—2018年农业农村部对虫情实际发生等级监测结果(表7和表8),2016—2018年河北

省小麦蚜虫实际发生程度分别为4级、4级和3级,山西、山东、河南和安徽4省分别均为3级,天津市和江苏省分别均为2级、3级、3级,北京均为2级。经检验,气象适宜度等级与小麦蚜虫实际发生等级监测结果相比,模型预测华北、黄淮及安徽、江苏两省基本正确(相差不超过1个等级)的平均准确率分别为91.7%,100%,100%和100%,模型预报效果较好。由表8可以看到,利用黄淮模型外推预报苏皖两省2016—2018年小麦蚜虫气象适宜度等级,与实际发生等级相比,两省预报3年平均基本正确准确率为100%;单独看,两省3年中预报等级每年均正确或基本正确,基本正确准确率均为100%,模型外推预报效果较为理想。因此,建立的分区域模型适用于华北、黄淮和江淮地区小麦蚜虫发生发展气象适宜度等级预报。

表7 2016—2018年华北和黄淮小麦蚜虫气象适宜度预报模型预报准确率

Table 7 Extrapolated accuracy of forecast models of meteorological suitability for wheat aphids in North China and the Huanghuai Area from 2016 to 2018

区域	省/市	年份	实际发生面积分级	预报气象等级	误差(与发生面积分级比)	实际发生程度等级	误差(与实发程度等级比)
华北	河北	2016	3	3	一致	4	基本一致
		2017	3	4	基本一致	4	一致
		2018	3	3	一致	3	一致
	山西	2016	2	3	基本一致	3	一致
		2017	2	4	相差2级	3	基本一致
		2018	2	2	一致	3	基本一致
	天津	2016	3	3	一致	2	基本一致
		2017	4	4	一致	3	基本一致
		2018	4	2	相差2级	3	基本一致
北京	2016	1	2	基本一致	2	一致	
	2017	1	4	相差3级	2	相差2级	
	2018	1	2	基本一致	2	一致	
黄淮	山东	2016	4	4	一致	3	基本一致
		2017	4	4	一致	3	基本一致
		2018	4	3	基本一致	3	一致
	河南	2016	4	4	一致	3	基本一致
		2017	4	4	一致	3	基本一致
		2018	3	2	基本一致	3	基本一致

注:预报与实际一致为正确,相差1个等级为基本正确,相差2个或2个以上等级为错误。

表8 2016—2018年黄淮小麦蚜虫气象适宜度预报模型外推预报准确率

Table 8 Extension forecasting accuracy of meteorological suitability models for wheat aphids in the Huanghuai Area from 2016 to 2018

区域	年份	实际发生面积分级	预报气象等级	误差(与发生面积分级比)	实际发生程度等级	误差(与实发程度等级比)
安徽	2016	4	4	一致	3	基本一致
	2017	4	4	一致	3	基本一致
	2018	3	2	基本一致	3	基本一致
江苏	2016	4	3	基本一致	2	基本一致
	2017	4	4	一致	3	基本一致
	2018	3	3	一致	3	一致

注:预报与实际一致为正确,相差1个等级为基本正确,相差2个或2个以上等级为错误。

3 结论与讨论

本文基于1958—2015年北方小麦主产区8个省(市)小麦蚜虫逐年发生面积及对应的601个气象站逐日气象资料,采用相关分析、主成分分析和逐步回归等方法,从上年12月至当年6月上旬各气象要素不同时间段的旬值、月值和上年冬季平均气温、最高气温、最低气温中,筛选出影响华北和黄淮小麦蚜虫年发生程度的关键气象因子及其影响时段,构建分区域的小麦蚜虫气象适宜度指数和预报模型,可支持业务应用,得到以下主要结论:

1) 影响华北小麦蚜虫发生发展的关键气象因子有8个,分别是上年冬季平均气温、当年3月温雨系数、3月最高气温大于等于25℃的日数、3月下旬日照时数、4月上旬平均气温、4月下旬最高气温大于等于28℃的日数、4月大雨日数和5月上旬空气相对湿度为40%~80%的日数;影响黄淮麦蚜发生发展的关键气象因子有6个,分别是上年冬季平均气温、当年1月下旬降水量、3月上旬空气相对湿度大于80%的日数、3月平均气温、4月温雨系数和4月下旬无雨日数。

2) 利用构建的分区域小麦蚜虫气象适宜度模型对华北和黄淮麦蚜发生发展气象等级进行预报,2016—2018年3年平均试报准确率均在75%以上,预报效果较好。利用黄淮小麦蚜虫气象适宜度模型预报苏皖两省2016—2018年小麦蚜虫发生等级,预报误差不超过1级,模型异地预报3年苏皖分省等级均基本正确,效果较好,这说明黄淮小麦蚜虫气象适宜度模型对江淮地区麦蚜发生等级有一定的指示性,可用于江淮麦蚜发生等级反演和预报。

3) 模型考察开始时间为上年冬季,结束时间最迟为5月上旬。结合不同区域小麦蚜虫盛发期的时间分布,对华北、黄淮和江淮可从上年冬季起,利用模型监测计算某省或某站小麦蚜虫发生发展气象适宜度指数,判别相应气象等级,进行预测预报,如4月中旬可发布灾害预警,当预报未来一句或一个月气象条件利于虫害发生时,可将4月下旬至5月上旬气象关键因子在常年值基础上,根据预报波动幅度微调,用于开展麦蚜发生发展预报预警服务。

关键时段关键气象因子对小麦蚜虫发生发展具有决定性作用。以小麦蚜虫发生典型年2014年为例,该年黄淮海大部地区小麦穗期蚜虫偏重发

生^[36],主要原因是春季气温偏高,3月山东、河南平均气温分别为10.5℃和12.0℃(均高于常年值6.7℃和8.6℃),分别位居历史次高和首位;4月上旬河北、北京、天津、山西区域平均气温分别为14.7℃,15.3℃,15.2℃和12.6℃(均高于常年值11.6℃,11.4℃,12.0℃和9.7℃),京津冀气温均位居历史首位,气温显著偏高加快了生物发育进程,小麦发育期和蚜虫发生期均提前,山东小麦蚜虫始发期为当年2月20日,偏早约1个月。2014年关键时段关键气象因子中温度和湿度均在穗期优势种麦长管蚜发生发展的适宜气象条件范围内,高温少雨导致5月初河北中南部、山东中西部及半岛西部和河南北部部分地区出现旱情^[37],温高光足,适宜的光、温、水条件和干旱叠加效应,促进了小麦穗期蚜虫的发生为害,造成2014年小麦产量损失达 9.186×10^5 t^[36],这与前人研究结论吻合,水分缺乏可以提高干旱地区小麦蚜虫潜在的适应能力,小麦蚜虫将耗费更多的时间取食^[38]。

关键气象因子的选取是从小麦蚜虫发生发展的适宜生理气象指标和区域气候特征考虑,对进行小麦蚜虫监测预报有较好指示意义。由于不同地区气候条件及小麦蚜虫发育进程和作物发育期本身的差异,小麦蚜虫的气象适宜度在时间和空间上存在一定差异,春季强降雨是影响麦长管蚜种群消减的关键因子之一^[38-39],强降雨多不利于小麦蚜虫爆发,而降水偏少、无雨日数偏多及导致的干旱,有利于小麦蚜虫发生发展。全球气候变暖导致的温室效应和极端天气等衍生的干旱等灾害的频频发生^[40-43],导致小麦蚜虫对逆境环境适应能力的显著提高^[11,44-45]。这也是本研究针对不同区域建立不同的小麦蚜虫气象适宜度综合指标的意义所在。

本文仅考虑在一定虫源基数条件下地面气象条件对小麦蚜虫发生发展的适宜性,但小麦蚜虫是迁飞性害虫,其发生发展除受地面气象条件的重要影响外,还受大尺度环流背景、虫源基数、自身生物学特性、寄主作物及品种、天敌情况、耕作栽培方式、施肥和灌溉水平、田间管理措施及人为防治等综合因素的影响^[3,8,24],北方小麦主产区小麦蚜虫发生发展气象适宜度等级仅对地面气象条件的满足程度进行了分析。实际应用中,可结合小麦蚜虫气象适宜度等级监测预报与其他因素综合考虑小麦蚜虫的发生情况,开展相关农业气象业务和服务。

参考文献

[1] 王秀美,牟少敏,时爱菊,等.局部支持向量回归在小麦蚜虫预

- 测中的研究与应用. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016, 47(1): 52-56.
- [2] 杨益众, 林冠伦, 胡长富. 麦蚜为害对小麦品质和产量的影响及其防治指标的初步研究. 植物保护学报, 1992, 19(2): 152; 158.
- [3] 程芳芳, 王玉岗, 李红卫, 等. 郑州市麦蚜发生气象条件分析及预报研究. 气象与环境科学, 2012, 35(3): 81-84.
- [4] 刘绍友. 农业昆虫学. 杨凌: 天则出版社, 1990.
- [5] 牟吉元. 农业昆虫学. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 225-237.
- [6] 杨效文. 麦长管蚜穗型蚜研究初报. 华北农学报, 1991, 6(2): 103-107.
- [7] 侯英雨, 张蕾, 吴门新, 等. 国家级现代农业气象业务技术发展. 应用气象学报, 2018, 29(6): 641-656.
- [8] Zhang K, Pan Q, Yu D, et al. Systemically modeling the relationship between climate change and wheat aphid abundance. *Science of The Total Environment*, 2019(674): 392-400.
- [9] Drake V A. The influence of weather and climate on agriculturally important insects; An Australian Perspective. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1994, 45(3): 487-509.
- [10] 叶彩玲, 霍治国, 丁胜利, 等. 农作物病虫害气象环境成因研究进展. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 90-97.
- [11] 霍治国, 李茂松, 王丽, 等. 气候变暖对中国农作物病虫害的影响. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1926-1934.
- [12] 刘芳菊. 杨凌地区小麦蚜虫发生规律及大发生原因与控制技术. 陕西农业科学, 2012(5): 159-161.
- [13] 华南农学院. 农业昆虫学(上册). 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [14] 李淑华. 气候变化对中国农业病虫害的影响//邓根云. 气候变化对中国农业的影响. 北京: 北京科学技术出版社, 1993: 223-234.
- [15] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.
- [16] 霍治国, 李茂松, 李娜, 等. 季节性变暖对中国农作物病虫害的影响. 中国农业科学, 2012, 45(11): 2168-2179.
- [17] Mattson W J, Haack R A. The role of drought in outbreaks of Plant eating insects. *Bioscience*, 1987, 37(2): 110-118.
- [18] 张孝羲, 翟保平, 牟吉元, 等. 昆虫生态及预测预报. 北京: 中国农业出版社, 1985.
- [19] 郭建平. 农业气象灾害监测预测技术研究进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 620-630.
- [20] 马飞, 许晓风, 张夕林, 等. 相空间重构与神经网络融合预测模型及其在害虫测报中的应用. 生态学报, 2002, 22(8): 1297-1301.
- [21] 靳然, 李生才. 基于小波神经网络的麦蚜发生程度预测模型. 昆虫学报, 2015, 58(8): 893-903.
- [22] 吴华新, 金珠群, 韩敏晖. 用马尔可夫链分析法预测棉铃虫发生趋势. 浙江农业学报, 2003(6): 33-36.
- [23] 王纯枝, 张蕾, 郭安红, 等. 基于大气环流的稻纵卷叶螟气象预测模型. 应用气象学报, 2019, 30(5): 565-576.
- [24] 刘明春, 蒋菊芳, 史志娟, 等. 小麦蚜虫种群消长气象影响成因及预测. 中国农业气象, 2009, 30(3): 440-444.
- [25] 吴门新, 庄立伟, 侯英雨, 等. 中国农业气象业务系统(CAgMSS)设计与实现. 应用气象学报, 2019, 30(5): 513-527.
- [26] 于彩霞, 霍治国, 张蕾, 等. 中国稻飞虱发生的大气环流指示指标. 生态学杂志, 2014, 33(4): 1053-1060.
- [27] 姜玉英, 刘玉琴, 刘万才, 等. 小麦蚜虫测报调查规范(NY/T 612-2002). 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [28] 中国气象局预测减灾司, 中国气象局国家气象中心. 中国气象地理区划手册. 北京: 气象出版社, 2006.
- [29] 吴传钧. 中国土地利用图(1:400万). 北京: 测绘出版社, 2001.
- [30] 韩永翔, 葛秉钧. 甘肃省玉米产量的主成分分析. 应用气象学报, 1995, 6(2): 252-256.
- [31] 汤志成, 高苹. 作物产量预报系统. 中国农业气象, 1996, 17(2): 49-52.
- [32] 田俊, 霍治国. 江西省早稻雨洗花灾害指标构建与灾损评估. 应用气象学报, 2018, 29(6): 657-666.
- [33] Liu R X, Kuang J, Gong Q, et al. Principal component regression analysis with SPSS. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2003, 71(2): 141-147.
- [34] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 北京: 气象出版社, 2000.
- [35] 毛留喜, 魏丽编著. 大宗作物气象服务手册. 北京: 气象出版社, 2015.
- [36] 全国农业技术推广服务中心. 农作物重大病虫害监测预警工作年报(2014). 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [37] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2014年). 北京: 气象出版社, 2015.
- [38] 戴鹏. 不同干旱地区麦长管蚜对缺水胁迫的响应及其遗传基础. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [39] 曹雅忠, 郭予元, 胡毅, 等. 麦长管蚜自然种群生命表研究初报. 植物保护学报, 1989(4): 239-243.
- [40] 霍治国, 范雨娟, 杨建堂, 等. 中国农业洪涝灾害研究进展. 应用气象学报, 2017, 28(6): 641-653.
- [41] 霍治国, 尚莹, 邹定荣, 等. 中国小麦干热风灾害研究进展. 应用气象学报, 2019, 30(2): 129-141.
- [42] Hartmann D L, Tank A M G K, Rusticucci M, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basic. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535.
- [43] 周广胜, 何奇瑾, 汲玉河. 适应气候变化的国际行动和农业措施研究进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 527-533.
- [44] 李晶晶. 夜间温度升高对小麦蚜虫实验种群的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [45] Awmack C S, Harrington R, Leather S R. Host plant effects on the performance of the aphid 91Aulacorthum solani (Kalt.) (Homoptera: Aphididae) at ambient and elevated CO₂. *Global Change Biology*, 1997(3): 545-549.

Construction of Forecasting Model of Meteorological Suitability for Wheat Aphids in the Northern China

Wang Chunzhi¹⁾ Huo Zhiguo²⁾³⁾ Zhang Lei¹⁾ Guo Anhong¹⁾ Huang Chong⁴⁾ Lu Minghong⁴⁾

¹⁾ (National Meteorological Center, Beijing 100081)

²⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

³⁾ (Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

⁴⁾ (National Agro-Technical Extension and Service Center, Beijing 100125)

Abstract

The forecasting and early warning technology of meteorological suitability of wheat aphids in the main growing areas can provide a scientific basis for disaster prevention and high yield. Based on data of the occurrence area of wheat aphids, winter wheat growth period and daily meteorological data at 601 observation stations from 1958 to 2015 in 8 main wheat production provinces of the northern China, relationships between surface meteorological factors and the occurrence area of wheat aphids for every province in North China and Huanghuai Area are fully analyzed using methods of correlation analysis, principal component analysis and stepwise regression analysis in various time-periods from last December to 10 June. Results indicate that the key meteorological factors which affect the occurrence area of wheat aphids in North China are average air temperature of last winter and in the first ten days of April, temperature-precipitation coefficients and the number of days with maximum air temperature (no less than 25°C) in March, sunshine hours in the third ten days in March, the number of days with daily maximum air temperature (no less than 28°C) in the third ten days of April, the number of heavy rain days (no less than 25 mm) in April, the number of days with relative air humidity between 40% and 80% in the first ten days in May. The key meteorological factors which affect the occurrence area of wheat aphids in Huanghuai Area are average air temperature of last winter and in March, precipitation in the third ten days of January, the number of days with relative air humidity (more than 80%) in the first ten days in March, temperature-precipitation coefficients in April, the number of rainless days in the third ten days in April. The meteorological suitability forecasting models of wheat aphids are established based on the normalized key meteorological factors in North China and Huanghuai Area. Hindcast validation results show that the forecasting accuracy for meteorological suitability models is 91.2%, 93.1% in North China and Huanghuai Area. The accuracy of extrapolation forecasting in 2016–2018 is higher than 75% in the former two areas respectively. The average accuracy of extrapolation forecasting from 2016 to 2018 is 100% in Anhui and Jiangsu using the meteorological suitability forecasting model in Huanghuai Area. Models can be put into operational application in Huang-Huai-Hai region of China.

Key words: North China; Huanghuai Area; wheat aphids; normalized; meteorological suitability; forecasting model