

# 小麦叶锈菌越夏与气象因子相关性初步分析

夏小双<sup>1</sup>, 李泓甫<sup>1</sup>, 张芹芹<sup>1</sup>, 高利<sup>1,2</sup>, 刘博<sup>1</sup>,  
陈万权<sup>1,2\*</sup>, 刘太国<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193;  
2. 农业农村部国家植物保护甘谷观测实验站, 天水 741200; 3. 农业农村部农产品质量安全生物性危害因子(植物源)控制重点实验室, 北京 100193)

**摘要** 小麦叶锈病是一种严重威胁小麦安全生产、依靠气流传播的真菌病害,近年来发生呈逐年加重趋势。为明确气象因子对小麦叶锈菌越夏的影响,本研究通过对全国 698 个气象站点 7 月—8 月最热 10 d 的日均温和平均日最高气温进行回归分析,对 7 月—8 月 0 cm 平均地温、平均风速、平均降水量、平均日照时数和平均相对湿度进行空间插值,提取了 93 个小麦叶锈菌越夏调查点的气象数据,再与调查点小麦叶锈菌能否越夏进行相关性分析,结果显示小麦叶锈菌越夏与 7 月—8 月最热 10 d 日均温和最热 10 d 平均日最高气温之间存在极显著相关性( $P < 0.01$ ),与其他气象因子相关性不显著( $P > 0.05$ ),结果为小麦叶锈病的越夏区划奠定了基础。

**关键词** 小麦叶锈病; 越夏; 气象因子; 回归分析; 地理信息系统; 相关性分析  
**中图分类号**: S435.121.43 **文献标识码**: A **DOI**: 10.16688/j.zwbh.2021191

## A preliminary correlation analysis between oversummering of *Puccinia triticina* and meteorological factors

XIA Xiaoshuang<sup>1</sup>, LI Hongfu<sup>1</sup>, ZHANG Qinqin<sup>1</sup>, GAO Li<sup>1,2</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>,  
CHEN Wanquan<sup>1,2\*</sup>, LIU Taiguo<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. National Agricultural Experimental Station for Plant Protection at Gangu, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianshui 741200, China;  
3. Key Laboratory of Control of Biological Hazard Factors (Plant Origin) for Agri-product Quality and Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

**Abstract** Wheat leaf rust is one of the fungal diseases that spread by air and seriously threaten the safety of wheat production. In recent years, the occurrence of wheat leaf rust is increasing year by year. In this study, the average day-temperature and the average maximum day-temperature of the 10 warmest days from July to August of 698 meteorological stations were analyzed by regression analysis, and the mean values of ground surface temperature, wind speed, precipitation, sunshine time and relative humidity were analyzed by spatial interpolation. The meteorological data of 93 investigation sites of wheat leaf rust were obtained afterwards. Then the correlation analysis was carried out between oversummering and meteorological factors. The results showed that oversummering had a significant correlation with the average day-temperature and average maximum day-temperature of the 10 warmest days from July to August ( $P < 0.01$ ), but had no significant correlation with other meteorological factors ( $P > 0.05$ ), which laid a foundation for classification of the oversummering regions of wheat leaf rust.

**Key words** wheat leaf rust; oversummering; meteorological factors; regression analysis; GIS; correlation analysis

收稿日期: 2021-03-31

修订日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(31671967); 国家重点研发计划(2018YFD0200500, 2018YFD0200400); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-ZDRW202002); 国家小麦产业技术体系(CARS-03)

\* 通信作者 E-mail: 陈万权 wqchen@ippcaas.cn; 刘太国 tgliu@ippcaas.cn

小麦叶锈病是由小麦叶锈菌 *Puccinia triticina* (*Pt*)引起的一种真菌病害,具有多次侵染和危害性强的特点,在三大小麦锈病中发生最为普遍和广泛<sup>[1]</sup>。小麦叶锈菌主要通过侵染小麦叶片影响植株的光合作用,造成小麦减产,发生严重时也危害叶鞘,但基本不侵染小麦的茎秆或穗部。

病害的发生流行不仅需要合适的病原和寄主,环境因素也发挥了至关重要的作用<sup>[2]</sup>。空气中大部分真菌的子囊孢子数量与空气相对湿度、降水量呈显著相关,且年平均最高温度是影响年份间孢子数量的主要因素<sup>[3]</sup>。Kulkarni 等<sup>[4]</sup>研究了潜育期、侵染期、气候等 6 个因素对小麦叶锈病发生的重要性,发现气候条件对小麦叶锈病的发生流行十分重要。对于影响小麦叶锈病发生流行的气象因子,国内外已有许多报道<sup>[5-7]</sup>。一般认为,小麦叶锈病的发生流行受温度、降水量、相对湿度等气象因子的影响,是多种气象因子综合作用的结果。

小麦叶锈菌以夏孢子世代完成周年病害循环,夏孢子越夏是病害侵染循环中关键的一环。有研究表明,在海拔 500 m,7 月日均温度 25.8℃ 的成都,小麦叶锈菌夏孢子很少能越夏;在海拔 1 900 m 左右,6 月—8 月日均温 19.5℃ 左右的四川盆地周围山地,越夏菌量最大<sup>[8]</sup>。以上仅为个别地点或地区有关小麦叶锈菌越夏的报道,缺乏针对小麦叶锈菌越夏与气象因子相关性的大尺度、系统性研究。明确影响小麦叶锈菌越夏的关键气象因子,能为小麦叶锈病的越夏区划和越夏区治理,以及病害在秋季侵染和次年春季流行的严重程度预测提供理论基础。因此,结合小麦叶锈菌越夏情况与多年气象数据,探明影响小麦叶锈菌越夏的关键气象因子,对小麦叶锈病的越夏区划及持续有效治理具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

空间数据:省级行政区图(1:400 万)和县级行政区图(1:400 万),由中国国家基础地理信息中心提供(<http://ngcc.sbsm.gov.cn>)。

气象数据:全国 699 个气象观测站点 2008 年、2010 年、2012 年、2013 年和 2015 年 0 cm 地温、风速、降水量、气温、日照时数和相对湿度的日值数据,由中国国家气象科学数据共享服务平台提供(<http://data.cma.cn>)。剔除日值数据少于 5 年的气象观

测站点,剩余 698 个。

小麦叶锈病越夏调查数据:来自中国农业科学院植物保护研究所,包括 2008 年、2010 年、2012 年、2013 年和 2015 年共 93 个越夏调查点。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 温度与经度、纬度和海拔高度的回归分析

小麦叶锈病从侵染到再次产生夏孢子一般需要 10 d,若小麦叶锈菌能够度过一年中 7 月—8 月最热的 10 d,则可以越夏。选取 2008 年、2010 年、2012 年、2013 年和 2015 年每年 698 个气象站点 7 月—8 月最热 10 d 的日均温和平均日最高气温与对应的经度、纬度和海拔高度,利用 SPSS 21.0 的线性回归工具进行回归分析,通过回归方程计算越夏调查点 7 月—8 月最热 10 d 的日均温和平均日最高气温。

#### 1.2.2 其他气象因子的空间插值处理

利用 EViews 10.0 对 2008 年、2010 年、2012 年、2013 年和 2015 年每年 698 个气象站点 7 月—8 月的 0 cm 平均地温、平均风速、平均降水量、平均日照时数和平均相对湿度进行平稳性假设检验,若满足二阶平稳(或本征)假设,则可用普通克里格法<sup>[9]</sup>。然后利用 ArcGIS 10.7 的 Geostatistical Analyst 工具,选择普通克里格法半变异函数指数模型对气象数据进行空间插值,在普通克里格法插值参数中,块金值与基台值的比值(nugget/sill,用 C/表示)越小越好<sup>[10]</sup>,回归系数(regression coefficient, R)越大越好,标准平均值(mean standardized, MS)越接近于 0 越好,均方根(root mean square, RMS)和平均标准误差(average standard error, ASE)越小越好,标准均方根(root-mean-square standardized, RMSS)越接近于 1 越好<sup>[11-12]</sup>。最后利用 Spatial Analyst 工具提取越夏调查点 7 月—8 月的 0 cm 平均地温、平均风速、平均降水量、平均日照时数和平均相对湿度的插值。

#### 1.2.3 小麦叶锈菌越夏与气象因子的相关性分析

首先将 93 个越夏调查点的越夏情况转换为等级资料,即发生小麦叶锈病,其越夏情况记为 1;没有发生小麦叶锈病,其越夏情况记为 0。利用 SPSS 21.0 的描述统计分析工具对数据进行 z-score 标准化处理,利用双变量相关分析工具,选择 Spearman 系数分析越夏调查点越夏情况与 7 月—8 月的最热 10 d 日均温、最热 10 d 平均日最高气温、0 cm 平均地温、平均风速、平均降水量、平均日照时数和平均相对湿度之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度与经度、纬度和海拔高度的回归分析

由于2015年7月—8月最热10 d平均日最高气温的回归方程中纬度的回归系数未达到显著水

平,因此需要剔除该回归方程中的纬度;其余回归方程中经度、纬度和海拔高度的回归系数均达到极显著水平(表1~表3)。结合越夏调查点的经度、纬度和海拔高度数据,计算出越夏调查点7月—8月最热10 d的日均温和平均日最高气温。

表1 7月—8月最热10 d日均温与经度、纬度和海拔高度的t测验

Table 1 The t-test of average day-temperature in the 10 warmest days from July to August and longitude values, latitude values and altitude values

年份 Year	参数 Parameter		回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	t	P
2008	常量	Constant	46.849	0.777	60.293	<0.001
	经度	Longitude	-0.123	0.007	-18.311	<0.001
	纬度	Latitude	-0.109	0.008	-13.981	<0.001
	海拔	Altitude	-0.005	<0.001	-68.312	<0.001
2010	常量	Constant	50.773	1.077	47.122	<0.001
	经度	Longitude	-0.132	0.009	-14.092	<0.001
	纬度	Latitude	-0.169	0.011	-15.642	<0.001
	海拔	Altitude	-0.005	<0.001	-46.691	<0.001
2012	常量	Constant	50.290	0.815	61.710	<0.001
	经度	Longitude	-0.127	0.007	-17.979	<0.001
	纬度	Latitude	-0.182	0.008	-22.333	<0.001
	海拔	Altitude	-0.005	<0.001	-66.901	<0.001
2013	常量	Constant	48.980	1.104	44.356	<0.001
	经度	Longitude	-0.113	0.01	-11.782	<0.001
	纬度	Latitude	-0.176	0.011	-15.880	<0.001
	海拔	Altitude	-0.005	<0.001	-50.226	<0.001
2015	常量	Constant	55.336	0.862	64.167	<0.001
	经度	Longitude	-0.208	0.007	-27.814	<0.001
	纬度	Latitude	-0.053	0.009	-6.088	<0.001
	海拔	Altitude	-0.005	<0.001	-69.285	<0.001

表2 7月—8月最热10 d平均日最高气温与经度、纬度和海拔高度的t测验

Table 2 The t-test of average maximum day-temperature in the 10 warmest days from July to August and longitude values, latitude values and altitude values

年份 Year	参数 Parameter		回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	t	P
2008	常量	Constant	55.137	1.055	52.276	<0.001
	经度	Longitude	-0.164	0.009	-17.901	<0.001
	纬度	Latitude	-0.061	0.011	-5.737	<0.001
	海拔	Altitude	-0.004	<0.001	-46.071	<0.001
2010	常量	Constant	59.443	1.378	43.136	<0.001
	经度	Longitude	-0.174	0.012	-14.554	<0.001
	纬度	Latitude	-0.136	0.014	-9.824	<0.001
	海拔	Altitude	-0.004	<0.001	-31.729	<0.001
2012	常量	Constant	59.648	1.053	56.649	<0.001
	经度	Longitude	-0.178	0.009	-19.543	<0.001
	纬度	Latitude	-0.140	0.011	-13.298	<0.001
	海拔	Altitude	-0.004	<0.001	-47.398	<0.001
2013	常量	Constant	59.746	1.406	42.489	<0.001
	经度	Longitude	-0.164	0.012	-13.460	<0.001
	纬度	Latitude	-0.159	0.014	-11.320	<0.001
	海拔	Altitude	-0.005	<0.001	-37.695	<0.001
2015	常量	Constant	62.455	1.065	58.660	<0.001
	经度	Longitude	-0.238	0.009	-26.037	<0.001
	海拔	Altitude	-0.005	<0.001	-49.509	<0.001

表 3 7 月—8 月最热 10 d 日均温和平均日最高气温与经度、纬度和海拔高度的回归方程<sup>1)</sup>

Table 3 Regression equations of average day-temperature and average maximum day-temperature in the 10 warmest days from July to August and longitude values, latitude values and altitude values

年份 Year	日均温的回归方程 Regression equation of average day-temperature	平均日最高气温的回归方程 Regression equation of average maximum day-temperature
2008	$y=46.849-0.123 x_1-0.109 x_2-0.005 x_3$	$y=55.137-0.164 x_1-0.061 x_2-0.004 x_3$
2010	$y=50.773-0.132 x_1-0.169 x_2-0.005 x_3$	$y=59.443-0.174 x_1-0.136 x_2-0.004 x_3$
2012	$y=50.290-0.127 x_1-0.182 x_2-0.005 x_3$	$y=59.648-0.178 x_1-0.140 x_2-0.004 x_3$
2013	$y=48.980-0.113 x_1-0.176 x_2-0.005 x_3$	$y=59.746-0.164 x_1-0.159 x_2-0.005 x_3$
2015	$y=55.336-0.208 x_1-0.053 x_2-0.005 x_3$	$y=62.455-0.238 x_1-0.005 x_3$

1)  $y$  为温度,  $x_1$  为经度,  $x_2$  为纬度,  $x_3$  为海拔高度。

$y$  is temperature,  $x_1$  is longitude,  $x_2$  is latitude,  $x_3$  is altitude.

## 2.2 其他气象因子的空间插值处理

### 2.2.1 二阶平稳性假设检验

利用 EViews 10.0 单位根检验工具进行二阶平稳性假设检验,选择增广迪基-福勒检验方法(Augmented Dickey-Fuller test, ADF 检验)。ADF 检验有水平、

一阶差分和二阶差分 3 种,在水平上检验气象因子序列在含时间趋势和截距的检验式下的显著水平(表 4),结果显示序列是平稳的。因此,7 月—8 月的 0 cm 平均地温、平均风速、平均降水量、平均日照时数和平均相对湿度可以利用普通克里格法进行空间插值。

表 4 气象因子序列二阶平稳性假设检验<sup>1)</sup>

Table 4 The results of two stationarity hypothesis test of meteorological factors

年份 Year	气象因子 Meteorological factor	ADF 检验 统计量 ADF $t$ -statistic	检验临界值 Test critical values		$P$
			0.01 水平 0.01 level	0.05 水平 0.05 level	
2008	0 cm 平均地温 Average ground surface temperature	-4.703	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均风速 Average wind speed	-10.437	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均降水量 Average precipitation	-10.551	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均日照时数 Average sunshine time	-6.232	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均相对湿度 Average relative humidity	-6.047	-3.971	-3.416	< 0.001
2010	0 cm 平均地温 Average ground surface temperature	-5.411	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均风速 Average wind speed	-10.878	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均降水量 Average precipitation	-7.579	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均日照时数 Average sunshine time	-7.322	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均相对湿度 Average relative humidity	-6.600	-3.971	-3.416	< 0.001
2012	0 cm 平均地温 Average ground surface temperature	-4.953	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均风速 Average wind speed	-11.050	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均降水量 Average precipitation	-7.704	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均日照时数 Average sunshine time	-4.084	-3.971	-3.416	0.006 9
	平均相对湿度 Average relative humidity	-6.507	-3.971	-3.416	< 0.001
2013	0 cm 平均地温 Average ground surface temperature	-4.928	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均风速 Average wind speed	-19.571	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均降水量 Average precipitation	-6.754	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均日照时数 Average sunshine time	-8.120	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均相对湿度 Average relative humidity	-6.310	-3.971	-3.416	< 0.001
2015	0 cm 平均地温 Average ground surface temperature	-5.013	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均风速 Average wind speed	-11.231	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均降水量 Average precipitation	-6.946	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均日照时数 Average sunshine time	-5.603	-3.971	-3.416	< 0.001
	平均相对湿度 Average relative humidity	-5.808	-3.971	-3.416	< 0.001

1) ADF 检验统计量的绝对值大于 1% 水平检验临界值的绝对值或  $P$  值小于 0.01, 说明在 99% 极显著水平下拒绝原假设, 变量序列是平稳的; ADF 检验统计量的绝对值大于 5% 水平检验临界值的绝对值或  $P$  值小于 0.05, 说明在 95% 显著水平下拒绝原假设, 变量序列是平稳的。

The absolute value of ADF  $t$ -statistic is greater than the absolute value of 1% level test critical value, or  $P$ -value is less than 0.01, which indicates that the original hypothesis is rejected at 99% significant level, and the variable sequence is stable; the absolute value of ADF  $t$ -statistic is greater than the absolute value of 5% level test critical value, or  $P$ -value is less than 0.05, which indicates that the original hypothesis is rejected at 95% significance level, and the variable sequence is stable.

### 2.2.2 普通克里格法插值

利用普通克里格法半变异函数指数模型进行空间插值。7月—8月的0 cm平均地温、平均风速、平均降水量、平均日照时数和平均相对湿度的插值参

数(表5)显示,所有C/都小于75%,其余参数也较为理想,因此适用此模型。利用提取工具,提取越夏调查点7月—8月的0 cm平均地温、平均风速、平均降水量、平均日照时数和平均相对湿度的插值。

表5 气象因子普通克里格法插值参数<sup>1)</sup>

Table 5 Ordinary Kriging interpolation parameters of meteorological factors

年份 Years	气象因子 Meteorological factors	C//%	R	MS	RMS	ASE	RMSS
2008	0 cm 平均地温 Average ground surface temperature	0	0.847 9	-0.001 2	2.505 0	1.480 3	1.682 8
	平均风速 Average wind speed	49.59	0.396 7	-0.003 9	0.680 3	0.679 1	0.997 9
	平均降水量 Average precipitation	14.53	0.772 0	0.000 5	1.493 4	1.683 5	0.914 7
	平均日照时数 Average sunshine time	2.41	0.852 2	0.001 1	0.777 5	0.669 4	1.208 1
	平均相对湿度 Average relative humidity	0	0.839 4	0.003 8	5.098 5	3.187 8	1.638 8
2010	0 cm 平均地温 Average ground surface temperature	0	0.855 6	-0.002 4	2.565 4	1.484 1	1.735 2
	平均风速 Average wind speed	52.52	0.376 8	-0.003 1	0.671 4	0.667 0	1.002 7
	平均降水量 Average precipitation	18.92	0.755 6	0.001 5	1.505 8	1.893 1	0.815 6
	平均日照时数 Average sunshine time	0	0.838 9	-0.000 3	0.739 1	0.664 8	1.160 1
	平均相对湿度 Average relative humidity	0.56	0.804 8	0.000 4	5.407 1	3.641 9	1.478 8
2012	0 cm 平均地温 Average ground surface temperature	0	0.836 9	0.003 6	2.621 4	1.559 3	1.671 5
	平均风速 Average wind speed	44.74	0.342 9	-0.002 5	0.684 5	0.668 7	1.019 3
	平均降水量 Average precipitation	19.16	0.715 8	0.000 7	1.498 8	1.652 0	0.932 3
	平均日照时数 Average sunshine time	6.68	0.781 9	0.001 1	0.731 1	0.748 7	0.976 2
	平均相对湿度 Average relative humidity	62.36	0.713 2	-0.003 7	5.580 2	4.860 0	1.145 0
2013	0 cm 平均地温 Average ground surface temperature	0	0.882 9	0.003 5	2.591 7	1.735 1	1.491 2
	平均风速 Average wind speed	56.04	0.362 7	-0.006 1	0.737 3	0.769 2	0.961 3
	平均降水量 Average precipitation	19.24	0.751 9	0.000 4	1.635 5	1.993 0	0.833 6
	平均日照时数 Average sunshine time	11.43	0.782 3	0.001 0	0.691 0	0.806 8	0.855 9
	平均相对湿度 Average relative humidity	6.20	0.713 0	-0.001 3	5.769 5	5.202 8	1.098 8
2015	0 cm 平均地温 Average ground surface temperature	1.49	0.803 9	0.002 3	2.525 2	1.623 9	1.530 7
	平均风速 Average wind speed	45.29	0.343 3	-0.000 7	0.662 5	0.641 2	1.029 0
	平均降水量 Average precipitation	9.25	0.797 3	0.001 5	1.531 6	1.454 8	1.084 7
	平均日照时数 Average sunshine time	0	0.888 7	-0.004 1	0.826 6	0.560 4	1.538 1
	平均相对湿度 Average relative humidity	0	0.880 1	-0.003 0	5.022 5	3.423 8	1.466 8

1) C/: 块金值与基台值的比值;R:回归系数;MS:标准平均值;RMS:均方根;ASE:平均标准误差;RMSS:标准均方根。  
C/: The nugget/sill ratio; R: Regression coefficient; MS: Mean standardized; RMS: Root mean square; ASE: Average standard error; RMSS: Root-mean-square standardized.

### 2.3 小麦叶锈菌越夏与气象因子的相关性分析

越夏调查点小麦叶锈菌越夏情况与7月—8月的最热10 d日均温、最热10 d平均日最高气温、0 cm平均地温、平均风速、平均降水量、平均日照时数和平均相

对湿度之间的相关性分析(表6)显示,小麦叶锈菌越夏与7月—8月最热10 d日均温和最热10 d平均日最高气温之间存在极显著相关性,P值均小于0.01;与其他气象因子的相关性不显著,P值均大于0.05。

表6 小麦叶锈菌越夏与气象因子相关性分析<sup>1)</sup>

Table 6 The results of correlation analysis between oversummering of *Puccinia triticina* and meteorological factors

气象因子 Meteorological factor	越夏 Oversummering	
	相关系数 Correlation coefficient	P
最热10 d日均温 Average day-temperature in the 10 warmest days	-0.355**	0.000
最热10 d平均日最高气温 Average maximum day-temperature in the 10 warmest days	-0.330**	0.001
0 cm平均地温 Average ground surface temperature	-0.178	0.088
平均风速 Average wind speed	0.167	0.110
平均降水量 Average precipitation	-0.079	0.452
平均日照时数 Average sunshine time	0.130	0.216
平均相对湿度 Average relative humidity	-0.098	0.349

1) \* 和 \*\* 分别表示在置信度(双侧)为0.05和0.01时显著相关。  
\* and \*\* represents the correlation is significant at 0.05 and 0.01 levels (two-tailed), respectively.

### 3 讨论

小麦叶锈病的发生流行受多种气象因子综合作用,然而,影响小麦叶锈菌越夏的气象因子目前尚未见报道。本研究通过参考其他麦类真菌病害的研究经验,认为温度是影响小麦叶锈菌越夏的关键气象因子。

尽管小麦叶锈菌对温度的耐受性较高,但温度仍然是制约小麦叶锈菌生长的重要因素。关于我国小麦叶锈菌的越夏调查报道较少,据记载,我国小麦叶锈菌主要在四川、贵州、云南等地区的山地和高原越夏,这些地区夏季温度普遍不高。1951 年—2000 年西南地区 7 月日均温不高于 23.7℃,7 月平均日最高气温不高于 29.1℃<sup>[13]</sup>,适合小麦叶锈菌越夏。与此同时,1951 年—2007 年山东和河南 6 月—8 月日均温在 26℃ 以上<sup>[14]</sup>,1961 年—2006 年中南和华东地区 6 月—8 月日均温在 27℃ 左右<sup>[15]</sup>,这些地区小麦叶锈菌不能越夏,或者仅能在海拔较高的山区越夏。这在一定程度上支持了本研究的结论。

越夏是小麦叶锈病周年病害循环中最困难、最重要的环节,越夏存活的叶锈菌量对秋季小麦叶锈菌侵染和次年春季该病害的流行都有着举足轻重的影响。同时,越夏也与我国小麦品种抗病性的丧失和病菌新小种的产生息息相关<sup>[16]</sup>。因此,对小麦叶锈菌进行越夏区划,进而为越夏区治理提供指导是很有必要的。对于其他麦类真菌病害,例如小麦条锈病和小麦白粉病,普遍认为温度是影响病原菌越夏的决定因素<sup>[18-19]</sup>,有学者以温度作为界限指标对它们进行了越夏区划<sup>[11,17]</sup>。目前小麦叶锈病的越夏区划存在两个主要问题:以什么气象因子作为区划指标,该气象因子的病害终止阈值是多少。为了解决上述问题,本研究通过分析小麦叶锈菌越夏与气象因子的相关性,在理论上证明了温度是影响小麦叶锈菌越夏的关键气象因子,从而为我国小麦叶锈菌的越夏区划奠定了基础。

我国幅员辽阔,经、纬度跨越较广,并且存在复杂的地形地貌,因此形成了多种多样的气候条件。本研究初步探明了影响小麦叶锈菌越夏的关键气象因子,有助于了解不同气候条件下小麦叶锈菌的越夏情况,一方面能够为越夏与气象因子关系模型的构建奠定基础,从而预测病害在秋季侵染和次年春季流行的严重程度;另一方面能够为小麦叶锈菌的

越夏区划和越夏区治理提供理论基础。越夏区治理可以有效控制秋季菌源的数量,降低小麦叶锈病的流行强度,进而减少病害造成的小麦产量损失和经济损失。本研究存在两个尚未解决的问题,一是越夏调查点较少,难以构建精准的预测模型;二是小麦叶锈病的病害终止温度阈值尚不明确,无法进行准确的越夏区划。因此,在今后的研究中,一是需要增加越夏调查的频次,扩大越夏调查的范围,再结合气象数据,构建出小麦叶锈菌越夏与气象因子的关系模型;二是需要开展小麦叶锈菌群体温度敏感性研究,获得小麦叶锈病的病害终止温度阈值,为越夏区划提供界限指标。这样不仅能为小麦叶锈菌的越夏区划提供科学依据,也对小麦叶锈病的预测预报、防控防治等研究具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 彭淑渊. 小麦叶锈病的综合防治技术[J]. 现代农业, 2013 (2): 30-31.
- [2] BEBBER D P, RAMOTOWSKI M A T, GURR S J. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world [J]. Nature Climate Change, 2013, 3(11): 985-988.
- [3] HASKOURI F E, BOUZIANE H, TRIGO M, et al. Airborne ascospores in Tetouan (NW Morocco) and meteorological parameters [J]. Aerobiologia, 2016, 32(4): 669-681.
- [4] KULKARNI R N, CHOPRA V L, SINGH D. Relative importance of components affecting the leaf rust progress curve in wheat [J]. Theoretical and Applied Genetics, 1982, 62(3): 205-207.
- [5] 刘泉姣, 唐玉兰, 张柏松. 山东小麦叶锈病发生规律与防治研究[J]. 山东农业科学, 1989(1): 10-13.
- [6] 张会孔, 陈振东. 模糊多级判别技术预测小麦叶锈病发生趋势[J]. 植物保护, 1998, 24(6): 7-9.
- [7] KUMAR P V. Development of weather-based prediction models for leaf rust in wheat in the Indo-Gangetic plains of India [J]. European Journal of Plant Pathology, 2014, 140: 429-440.
- [8] 黄光明, 姚革, 夏先全, 等. 四川地区小麦叶、秆锈菌的越冬和越夏[J]. 植物保护, 2005, 31(6): 67-68.
- [9] 颜慧敏. 空间插值技术的开发与实现[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
- [10] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] 李伯宁. 基于 GIS 的小麦白粉病的越夏和越冬区划[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [12] 王晓晶, 马占鸿, 姜玉英, 等. 基于 2002—2012 年气象数据的中国小麦条锈病菌越夏区划[J]. 植物保护学报, 2018, 45 (1): 124-137.

- [J]. *Journal of Entomology & Zoology Studies*, 2017, 92 (55): 92-95.
- [25] CAI Hongjiao, BAI Yan, WEI Hui, et al. Effects of tea saponin on growth and development, nutritional indicators, and hormone titers in diamondback moths feeding on different host plant species [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2016, 131: 53-59.
- [26] PHAM T A, HWANG S Y. High temperatures reduce nutrients and defense compounds against generalist *Spodoptera litura* F. in *Rorippa dubia* [J]. *Arthropod-Plant Interactions*, 2020, 14(3): 333-344.
- [27] GORE J, LEONARD B R, CHURCH G E, et al. Behavior of bollworm (Lepidoptera: Noctuidae) larvae on genetically engineered cotton [J]. *Economic Entomology*, 2002, 95: 763-769.
- [28] 王冬妍, 王振营, 何康来, 等. 转 Bt 基因抗虫玉米对亚洲玉米螟幼虫取食行为的影响[J]. *昆虫知识*, 2005, 42(3): 270-274.
- [29] PARKER C D, LUTTRELL R G. Interplant movement of *Heliothis virescens* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae in pure and mixed plantings of cotton with and without expression of the Cry1Ac delta-endotoxin protein of *Bacillus thuringiensis* Berliner [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1999, 92(4): 837-845.
- [30] 朱慧萍, 宋新元, 张明, 等. 亚洲玉米螟幼虫在抗虫和耐除草剂转基因玉米上取食行为的变化[J]. *沈阳农业大学学报*, 2010, 41(2): 206-209.
- [31] 王桂花, 赵庆杰, 吕宝乾, 等. 取食 Bt 蛋白对棉铃虫和斜纹夜蛾幼虫爬行能力的影响[J]. *热带作物学报*, 2014, 35(7): 1409-1415.
- [32] VENKATESH Y N, PRASAD N V V S D, RAMESH K B, et al. Growth and development of *Spodoptera litura* (Fab.) on dual toxin transgenic Bt cotton [J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2017, 6(10): 2204-2214.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 97 页)

- [20] 蒋兴川, 谢兴伟, 董文霞, 等. 甘蔗和玉米不同生育时期叶片挥发物组成及其对亚洲玉米螟的电生理活性[J]. *植物保护*, 2014, 40(3): 10-19.
- [21] SUN Xiao, LIU Zhuang, ZHANG Aijun, et al. Electrophysiological responses of the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis*, to rice plant volatiles [J/OL]. *Journal of Insect Science*, 2014, 14: 70. DOI: 10.1093/jis/14.1.70.
- [22] 李祥, 张小娇, 肖春, 等. 不同性别和交配状态的马铃薯块茎蛾对马铃薯挥发物的触角电位反应[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(3): 547-555.
- [23] KAMALA JAYANTHI P D, KEMPRAJ V, AURADE R M, et al. Specific volatile compounds from mango elicit oviposition in gravid *Bactrocera dorsalis* females [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2014, 40(3): 259-266.
- [24] 严善春, 杨慧, 高璐璐, 等. 落叶松挥发物及 7 种药剂对兴安落叶松鞘蛾嗅觉和产卵反应的影响[J]. *林业科学*, 2008, 44(12): 83-87.
- [25] 周强, 徐涛, 张古忍, 等. 虫害诱导的水稻挥发物对褐飞虱的驱避作用[J]. *昆虫学报*, 2003, 46(6): 739-744.
- [26] ZHANG Qinghe, SCHLYTER F, ANDERSON P. Green leaf volatiles interrupt pheromone response of spruce bark beetle, *Ips typographus* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1999, 25(12): 2847-2861.
- [27] SUCKLING D M, GIBB A R, DALY J M, et al. Behavioral and electrophysiological responses of *Arhopalus tristis* to burnt pine and other stimuli [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2001, 27(6): 1091-1104.
- [28] BRUCE T J, WADHAMS L J, WOODCOCK C M. Insect host location: a volatile situation [J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(6): 269-274.
- [29] 钟永志, 谢明惠, 林璐璐, 等. 草地贪夜蛾对氧化芳樟醇的趋性[J]. *植物保护*, 2020, 46(4): 178-180.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 103 页)

- [13] 班军梅, 缪启龙, 李雄. 西南地区近 50 年来气温变化特征研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2006(3): 346-351.
- [14] 张楠, 苗春生, 邵海燕. 1951—2007 年华北地区夏季气温变化特征[J]. *气象与环境学报*, 2009, 25(6): 23-28.
- [15] 高蓉, 郭忠祥, 陈少勇, 等. 近 46 年来中国东部季风区夏季气温变化特征分析[J]. *地理科学*, 2009, 29(2): 255-261.
- [16] CHEN W Q, WU L R, LIU T G, et al. Race dynamics, diversity, and virulence evolution in *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, the causal agent of wheat stripe rust in China from 2003 to 2007 [J]. *Plant Disease*, 2009, 93(11): 1093-1101.
- [17] 马占鸿, 石守定, 姜玉英, 等. 基于 GIS 的中国小麦条锈病菌越冬区气候区划[J]. *植物病理学报*, 2004(5): 455-462.
- [18] 王吉庆, 陆家兴, 刘守俭. 甘肃地区小麦条锈病菌越冬规律的初步研究[J]. *植物病理学报*, 1965, 8(1): 1-9.
- [19] 邹亚飞. 我国小麦白粉病越冬区划分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.

(责任编辑: 杨明丽)