

甘谷县春季空气中小麦条锈菌孢子动态的监测 及其与气象因素的相关性分析

谷医林¹ 王翠翠¹ 初炳瑶¹ 骆 勇^{1,2*} 马占鸿^{1*}

(1. 中国农业大学植物病理学系, 农业部作物有害生物监测与绿色防控重点实验室,
北京 100193; 2. 美国加州大学 Kearney 农业研究中心, Parlier 93648)

摘要: 为了解甘谷县春季空气中小麦条锈菌 *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* 夏孢子的动态变化、孢子密度与病情的关系以及气象因素对孢子密度和病情的影响, 利用孢子捕捉器和定量 PCR 法对 2013—2015 年春季甘谷县南山和北山地区空气中小麦条锈菌夏孢子密度的动态变化进行监测, 同时调查病情和记录相同时间段的气象因素, 并利用 Pearson 和 Spearman 等级相关进行相关分析。结果显示, 甘谷县南山和北山地区春季夏孢子动态变化趋势相似, 均在 5—6 月出现孢子密度的峰值。南山和北山地区空气中的孢子密度与各地区田间病情指数显著相关, 且相关系数分别达到 0.851 和 0.931。除 2013 年外, 空气中孢子密度与温度、光照呈正相关, 而与相对湿度、降水量呈负相关; 南山地区田间病情指数与光照、温度和降水天数显著相关, 北山地区田间病情指数则仅与平均相对湿度显著相关。根据空气中小麦条锈菌夏孢子的监测并结合当地的气象因素有助于制定合理的病害防治策略, 实现对小麦条锈病的定点和定期防治。

关键词: 小麦条锈病; 孢子密度; 病情指数; 监测; 气象因素

Dynamic of airborne spores of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* and its correlation with meteorological factors in spring in Gangu County

Gu Yilin¹ Wang Cuicui¹ Chu Bingyao¹ Luo Yong^{1,2*} Ma Zhanhong^{1*}

(1. Department of Plant Pathology, MOA Key Laboratory for Monitoring and Green Management of Crop Pests, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Kearney Agricultural Center, University of California, Parlier 93648, California State, USA)

Abstract: To monitor the dynamic of airborne spore of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, analyze the relationship between spore density and disease, and the effect of meteorological factors on airborne spore density and disease severity in spring in Gangu County, the spore trap and real-time PCR were used to detect the dynamic of airborne spore at South Mountain and North Mountain in spring from 2013 to 2015, and investigate the disease severity and record the meteorological data, the correlations between them were analyzed using Pearson and Spearman. The results showed that the patterns of dynamic of airborne spore at two locations were similar, and the airborne spore density reached the maximum level during May to June. There were positive and significant correlation between spore density and disease index at two locations, and the coefficient reached 0.851 at South Mountain and 0.931 at North Mountain. The airborne spore density had positive correlation with temperature and sunlight duration, and had negative correlation with the relative humidity and rainfall except for 2013. Disease index of South Mountain had significant correlation with sunlight, temperature and rainfall day, that of North Mountain

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300702, 2017YFD0201703), 国家自然科学基金(31371881)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: mazh@cau.edu.cn, ygluo@ucanr.edu

收稿日期: 2016-10-26

was only significantly correlated with the average relative humidity. Thus, based on monitoring the dynamic of airborne spore density and meteorological factors, it is conducive to make rational disease management, to achieve accurate management of wheat stripe rust.

Key words: wheat stripe rust; density of airborne spore; disease index; monitoring; meteorological factors

小麦条锈病是由条形柄锈菌小麦专化型 *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* 侵染引起的世界范围内小麦病害之一。我国地形复杂,小麦种植范围广,良好的寄主和气候为小麦条锈病的发生和流行提供了条件。该病害严重威胁着我国的小麦生产,自建国以来的4次全国大流行均造成约10亿kg的粮食损失(Wan et al., 2004)。

病害的发生不仅需要合适的病原和寄主,环境因素在病害的发生和流行中也起到了至关重要的作用(Scholthof, 2007; Bebbler et al., 2013),任何病原物的成功侵染和发病,都需要合适的气候因子作为基础。李娟等(2011)基于温、湿度条件对陕西省苹果褐斑病菌 *Marssonina coronaria* 的发生规律和流行程度进行了研究并成功构建了预测模型,该模型能够很好地预测病害的发生。Haskouri et al. (2016)通过孢子捕捉器获得空气中子囊孢子的动态,结合气象因素分析得出空气中大部分子囊孢子与空气相对湿度、降水呈显著相关;而最高温度是影响年份间孢子数量较大差异的主要因素。Carisse & Philion (2002)证明了莴苣霜霉病菌 *Bremia lactucae* 孢子释放与温、湿度、风速有一定关系,其与夜间相对湿度(大于95%)的相关系数达到0.79,并以夜间相对湿度大于95%为基础,构建了相对孢子浓度和夜间累积温度的预测模型。Coakley & Line (1981)研究了积温对小麦条锈病病情的影响,利用不同时期的积温变化能够很好地解释小麦条锈病的发生情况,Coakley et al. (1984)基于积温变化和病情指数构建了回归方程,预测值可达到真值的60%。小麦条锈菌为活体专性寄生菌,其依靠寄主才能生存并完成生活史。赵杰等(2011)研究证明,虽然小麦条锈菌转主寄主在病害循环中起到一定的作用,但是小麦条锈病的发生和发展依然主要依赖于夏孢子的侵染和传播。然而,关于空气中小麦条锈菌孢子动态的监测以及其与田间病情和气象因素的关系却鲜有报道。甘谷县地处山区,海拔相差较大,所以小麦种植和收获时间存在差异,形成了生长季的重叠,有利于小麦条锈菌的越冬和越夏(马占鸿等, 2005; 石守定等, 2005),同时也是我国小麦条锈病菌新小种策源地之一(陈万权等, 2007)。甘谷县南山和北山地区

为重要的小麦种植区且两地微气候存在明显差异,可代表甘谷县2种不同的小麦生长环境。在甘谷县秋苗病情调查中仅能发现零星病叶,对未发病叶片进行定量检测时发现,大部分叶片中均检测到小麦条锈菌的DNA,且含量较高(潘阳等, 2016),因此,可以推断越冬后的早春气候可能是保证其完成越冬后于春季发病的主要因素之一。

鉴于甘谷县在我国小麦条锈菌传播和小种形成中的重要地位,了解影响甘谷县小麦条锈病的发生和发展的因素对预测我国小麦条锈病病情变化至关重要。本研究通过监测甘谷县春季小麦返青后空气中小麦条锈菌夏孢子的动态变化和田间病情的发展情况,分析孢子密度与田间病情的关系及春季气候条件对空气中小麦条锈菌孢子变化及田间病情的影响,以期为实现小麦条锈病定点、定期的科学防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

数据及来源:2013—2015年3—6月的当地日平均温度、日最高温度、日最低温度、日平均风速、日照时间、日平均相对湿度、日降水量等气象数据来自中国气象数据网。

试剂及仪器:10×PCR Buffer、MgCl₂、dNTP、Taq DNA聚合酶,宝生物工程(大连)有限公司;Power-Soil® DNA Isolation Kit土壤基因组提取试剂盒,美国MO Bio Laboratories有限公司。Multi-vial cyclone sampler孢子捕捉器,英国Burkard Manufacturing有限公司;Vortex-2涡旋仪,美国Scientific公司;FastPrep-24,美国MP Biomedicals公司;1 000、200、100和10 μL移液器,德国Eppendorf公司;MyiQ™2双色实时定量PCR仪,美国Bio-Rad公司。

1.2 方法

1.2.1 样本的采集

利用孢子捕捉器于2013、2014和2015年春季3—6月在甘谷县的南山地区(105°21'44" E, 34°40'26" N)和北山地区(105°17'14" E, 34°47'8" N)持续采集空气中大小为32~40 μm×22~29 μm的小麦条锈菌夏孢子。孢子捕捉器进气量为16.5 L/min,直

接将采集样本收集到1.5 mL离心管中,每周二、周四、周六和周日进行采集,每2周更换1次收集管。将含有样品的收集管置于-20℃保存,用于DNA提取。

1.2.2 样本DNA的提取、扩增及孢子浓度的计算

采用PowerSoil® DNA Isolation Kit提取样本总DNA。为有效地将收集管中的夏孢子转移至PowerBead Tubes中,首先自PowerBead Tubes中取500 μ L上清液至收集管中,利用涡旋仪充分振荡洗脱及简单离心,然后用移液器将其混匀转移至PowerBead Tubes中;加入经60℃水浴预热的60 μ L C1溶液,用FastPrep-24在6.0 m/s条件下振荡40 s,冰浴5 min,相同条件下重复振荡1次;参考试剂盒中操作说明完成DNA提取,最终得到100 μ L DNA溶液。

按照李勇等(2015)方法对样本DNA进行Real-time PCR扩增,上游引物:AACCCTCTCATTAATAATTTTG,下游引物:CCAAGTTATAGAAAAGTGACTTA,探针:FAM-ATTACAGCAGCACTCAACATCCATT-BHQ1。20 μ L PCR体系:10 $\times$ PCR Buffer 2.0 μ L、25 μ mol/L MgCl₂ 3.2 μ L、2 500 μ mol/L dNTP 2.0 μ L、引物各0.3 μ L、探针0.25 μ L、5 U/ μ L Taq酶0.6 μ L、模板DNA 2.0 μ L,最后加入ddH₂O补足20 μ L。反应条件:95℃ 3 min;94℃ 20 s,55℃ 30 s,72℃ 30 s,40个循环,各循环72℃时采集荧光信号。每个样本DNA重复检测3次,记录平均Ct值。根据李勇等(2015)已构建的标准曲线计算每个样本中条锈菌夏孢子的数量,并根据孢子捕捉器的采样效率将其转换为空气中孢子密度,即夏孢子数量/ m^3 。

1.2.3 小麦条锈病田间发病情况调查

分别于2013、2014和2015年春季3—6月对甘谷县南山和北山地区田间小麦条锈病的发病情况进行调查。以孢子捕捉器放置点为核心,对其周围约1 km范围的小麦田块进行调查,每个田块随机选取5个点,每点选择30株小麦约100片叶子,记录每片叶子的发病严重程度,计算发病率和病情指数。小麦条锈病的病情严重程度根据夏孢子堆占叶面积的大小划分(商鸿生等,1990),即0、1%、5%、10%、20%、40%、60%、80%和100%。发病率=发病叶片数/调查总叶片数 $\times$ 100%;病情指数=发病率 $\times$ 严重程度 $\times$ 100。

1.2.4 相关性分析方法

将2次病情调查时间间隔中所有孢子捕捉器得到的空气中的孢子密度累加,即为累积孢子密度。采用Pearson相关分析法对2013、2014和2015年3年两地区空气中孢子密度的累积量和对应时间点的病情指数进行相关性分析。考虑到温度、湿度、降水、

光照和风速对小麦条锈菌夏孢子产生和扩散均有一定影响,而气象因素与孢子密度变化可能并非很好的线性关系,因此采用Spearman等级相关分析法对单日孢子密度与单日气象因素的相关性进行分析。由于病情的扩展是一个阶段性的发展,故以2次病情调查期间时间间隔为单位,计算该时间段的平均风速、累积光照、平均温度、最高温度、最低温度、平均湿度、累积降水量和降水天数,并采用Spearman相关分析法分析这些因素与病情指数的相关性。

1.3 数据分析

采用SPSS 21.0进行数据统计及相关性分析,采用双侧检验法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 两地区春季孢子密度动态及病情指数

2014年、2015年甘谷县南山地区孢子密度与2013年存在明显差异,2014年和2015年空气中孢子密度都有明显的峰值,且峰值时间都在5—6月,而2013年春季孢子密度整体较低没有峰值;北山地区3年的孢子密度变化规律与南山地区的相似。2014年和2015年南山地区孢子密度明显高于北山地区,而2013年两地区无明显差异。2013、2014和2015年,南山地区病情指数均明显大于北山地区;南山地区和北山地区的病情指数均在2015年最大,分别为22.02和7.44(图1)。

2.2 春季累积孢子密度与病情指数的相关性

南山和北山地区的田间病情指数的变化与当地空气中孢子密度动态变化存在相似的趋势。相关分析结果显示,南山和北山地区的累积孢子密度与田间病情指数呈显著正相关,在 $P<0.01$ 水平下其相关系数 r 分别为0.851和0.931(图1)。

2.3 空气中孢子密度与气象因素的相关性分析

除2013年温度条件外,2013—2015年其它气象因素对空气中孢子密度的影响基本相似。2014年和2015年,北山地区空气中孢子密度与平均温度、最高温度和最低温度均呈显著正相关,南山地区孢子密度与最低温度虽呈正相关但未达到显著水平,而与平均温度、最高温度呈显著正相关;2013年孢子密度与平均温度、最高温度和最低温度均呈负相关,且北山地区孢子密度与其呈显著负相关。日照时数与两地孢子密度也呈正相关,但仅在2015年达到显著水平。平均相对湿度与孢子密度呈负相关,且大部分达到显著水平。平均风速、降水量对空气中孢子密度的影响均未达到显著水平(表1)。

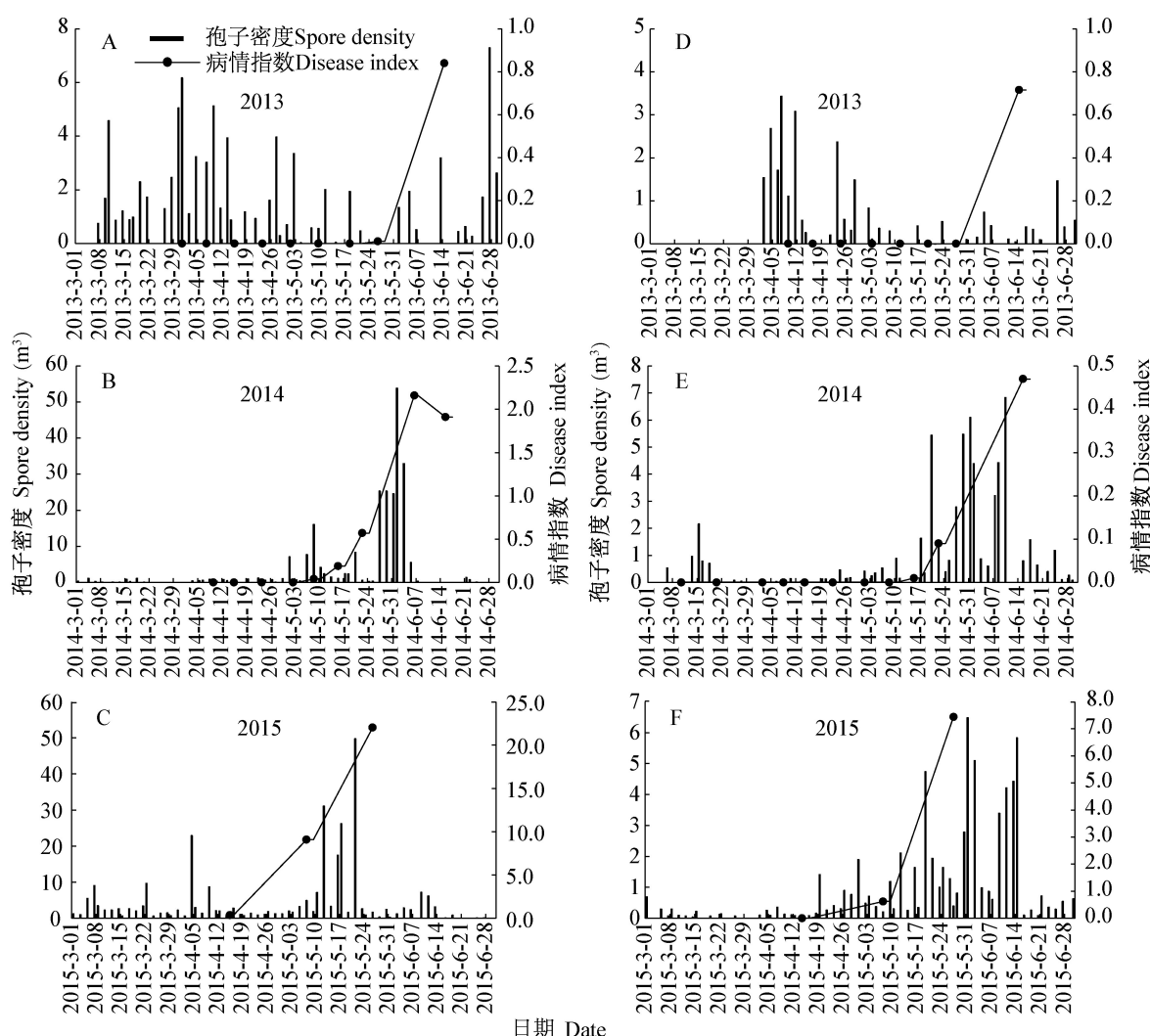


图1 2013—2015年春季南山(A~C)和北山地区(D~F)空气中小麦条锈菌孢子密度及病情指数
Fig. 1 The dynamics of airborne spores of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* and disease index at South Mountain (A~C) and North Mountain (D~F) in spring from 2013 to 2015

2.4 小麦条锈病情与气象因素的相关性分析

甘谷县南山和北山两地小麦条锈病病情指数与气象因素的关系相似,但其显著性明显不同。南山地区小麦条锈病病情指数与平均温度、最高温度、最低温度、累积光照、降水天数均呈显著正相关,而平均风速、平均相对湿度和累积降水量对南山地区小麦条锈病病情指数的影响未达显著水平。北山地区病情指数仅与平均相对湿度呈显著相关,与其它因素有正相关关系但均未达到显著水平(表2)。

3 讨论

越冬菌源的存在使得甘谷县春季自田间小麦发病之前便能检测到空气中小麦条锈菌孢子,再加上越冬前侵入秋苗的病原(潘阳等,2016)均有利于春季小麦条锈病的发生。春季小麦返青后,随着气温

的升高以及其它气象因素的改变,更有利于小麦条锈菌的侵染和病害的扩展。因此春季南山和北山地区病情呈现一个逐渐增加的趋势。田间病情发展的同时能够产生大量的夏孢子,并随气流扩散在空气中,增加空气中病原孢子的密度。由于甘谷县是小麦条锈菌的重要核心菌源地之一,因此推断尽管可能存在邻近地区向甘谷县传播的可能,但当地捕捉监测到的条锈菌夏孢子,尤其是春季田间植株发病后,其主要来源仍是该地区的发病田块,而这两者之间存在显著相关性也同样说明这点。在全国范围内的小麦条锈病流行中,甘谷县春季小麦条锈菌孢子可能并非起到一个直接的作用,然而春季小麦条锈菌菌量越大,则在该地区完成越夏的菌源量就可能越大,对下季小麦种植和生长的威胁就越大。

表1 甘谷县空气中小麦条锈菌夏孢子密度与气象因素的相关性

Table 1 The correlation between airborne spore density of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* and meteorological factors in Gangu County

监测点 Location	年份 Year	平均风速 Average wind velocity	日照时数 Sunlight	平均温度 Mean temperature	最高温度 High temperature	最低温度 Low temperature	平均相对湿度 Mean relative humidity	降水量 Rainfall
南山 South Mountain	2013	-0.007	0.262	-0.103	-0.002	-0.220	-0.325*	-0.161
	2014	-0.071	0.204	0.249*	0.290*	0.141	-0.067	-0.067
	2015	-0.021	0.246**	0.260**	0.242**	0.154	-0.231*	-0.109
北山 North Mountain	2013	-0.114	0.118	-0.445**	-0.305*	-0.481**	-0.317*	-0.007
	2014	0.007	0.066	0.445**	0.430**	0.357**	-0.278*	0.080
	2015	-0.172	0.242*	0.554**	0.559**	0.457**	-0.132	-0.046

*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关和极显著相关。* or ** indicates significant correlation at $P<0.05$ or $P<0.01$ level, respectively.

表2 甘谷县小麦条锈病病情指数与气象因素的相关性

Table 2 The correlation between disease index of wheat stripe rust and meteorological factors in Gangu County

监测点 Location	平均风速 Average wind velocity	累积光照 Accumulative sunlight	平均温度 Mean temperature	最高温度 High temperature	最低温度 Low temperature	平均相对湿度 Mean relative humidity	累积降水量 Accumulative rainfall	降水天数 Rain day
南山 South Mountain	0.352	0.519**	0.560**	0.616**	0.470*	0.070	0.197	0.452*
北山 North Mountain	0.429	0.143	0.303	0.329	0.203	0.829*	0.257	0.203

*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关和极显著相关。* or ** indicates significant correlation at $P<0.05$ or $P<0.01$ level, respectively.

小麦条锈病在甘谷县常年发生且能完成周年循环,该地区基本上可以满足病害发生的菌源条件,而造成周年间发病程度差异的最可能的因素是气象条件,同时气象因素也是影响空气孢子密度发生周年变化的一个重要因素(Skjøth et al., 2016)。湿度是影响小麦条锈病流行的最重要的气象因素之一(张旭东等, 2003)。而降水则是增加空气湿度的最直接有效的途径,研究证明连续的阴雨天气有利于小麦条锈病的发生(熊增海等, 2011),尤其是春季降水对小麦条锈病发生和流行至关重要(曹宏和兰志先, 2003),本研究同样证明了这点。早春的降水对于早期病原量的累积极为重要,有助于后期病害的大面积流行。小麦条锈菌的侵入和萌发需要近乎饱和的湿度条件(Rapilly, 1979),较高的相对湿度和降水是小麦条锈病发生的先决条件,然而空气湿度偏高,不利于条锈菌夏孢子随气流扩散,降水则更能够加速孢子的沉降,降低空气中孢子密度。本研究发现空气中条锈菌夏孢子密度与相对湿度和降水均呈负相关关系,于舒怡等(2016)同样证明了高湿和降水会降低空气中孢子密度。

本研究发现,甘谷县南山地区田间发病时间较北山地区更早,且空气中小麦条锈菌孢子密度和田

间发病程度都明显高于北山地区,而两地孢子密度和病情与气象因素的相关性都较为一致,造成这种情况的原因极有可能是两地微气候的差异,甘谷县自南向北湿度逐渐降低,因此,南山地区的微环境很有可能更利于小麦条锈病的发生和发展。故在甘谷县可以有针对性地进行小麦条锈病的防治,在早春多雨的年份适当提前两地的药剂防治时间,尤其是南山地区可以增加施药次数;而干旱年份可以仅对南山地区施药防治,北山地区病情发生较轻时可不用药。

鉴于甘谷县在我国小麦条锈病流行和传播中的地位,本研究基于国家气象局的气象资料分析甘谷县不同地区小麦条锈菌孢子动态和病情的发展,有利于在整体上了解较大范围内气象因素对不同小气候下小麦条锈病的影响,可以做到把握整体,区别对待。然而由于监测年限较短,难以构建出准确的预测模型。因此,可在今后的研究中在此地进行长期监测,累积多年数据,构建基于气象因素的、科学合理的空气中小麦条锈菌孢子动态和田间病情的预测模型,不仅对甘谷县小麦条锈病的早期预测预报具有重要意义,更能够为全国范围内小麦条锈病发生预测提供合理的参考。

参考文献 (References)

- Bebber DP, Ramotowski MAT, Gurr SJ. 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Climate Change*, 3(11): 985–988
- Cao H, Lan ZX. 2003. A discussion on the occurrence and control of wheat stripe rust in Longdong district. *Journal of Triticeae Crops*, 23(3): 144–147 (in Chinese) [曹宏, 兰志先. 2003. 试论陇东小麦条锈病发生原因与防治对策. *麦类作物学报*, 23(3): 144–147]
- Carisse O, Phillon V. 2002. Meteorological factors affecting periodicity and concentration of airborne spores of *Bremia lactucae*. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 24(2): 184–193
- Chen WQ, Xu SC, Wu LR. 2007. Epidemiology and sustainable management of wheat stripe rust caused by *Puccinia striiformis* West. in China: a historical retrospect and prospect. *Scientia Agricultura Sinica*, 40(S1): 177–183 (in Chinese) [陈万权, 徐世昌, 吴立人. 2007. 中国小麦条锈病流行体系与持续治理研究回顾与展望. *中国农业科学*, 40(S1): 177–183]
- Coakley SM, Boyd WS, Line RF. 1984. Development of regional models that use meteorological variables for predicting stripe rust disease on winter wheat. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(8): 1234–1240
- Coakley SM, Line RF. 1981. Climatic variables that control development of stripe rust disease on winter wheat. *Climatic Change*, 3(3): 303–315
- Haskouri FE, Bouziane H, del Mar Trigo M, Kadiri M, Kazzaz M. 2016. Airborne ascospores in Tetouan (NW Morocco) and meteorological parameters. *Aerobiologia*, 32(4): 669–681
- Li J, Gou LX, Hu XM, Ren FP, Wei JF, An DR. 2011. Effects of climate factors on the epidemic of apple *Marssonina* blotch in Shaanxi Province and related prediction models. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(1): 268–272 (in Chinese) [李娟, 苟丽霞, 胡小敏, 任福平, 卫军峰, 安德荣. 2011. 气象因素对陕西省苹果褐斑病流行的影响及预测模型. *应用生态学报*, 22(1): 268–272]
- Li Y, Gu YL, Wu BM, Jin SL, Cao SQ, Wang XM, Sun ZY, Luo Y, Ma ZH. 2015. Establishment of a duplex *TaqMan* real-time PCR method for quantifying *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* and *Blumeria graminis* f. sp. *tritici*. *Acta Phytopathologica Sinica*, 45(2): 205–210 (in Chinese) [李勇, 谷医林, 吴波明, 金社林, 曹世勤, 王晓明, 孙振宇, 骆勇, 马占鸿. 2015. 小麦条锈病菌和白粉病菌多重 *TaqMan* Real-time PCR 方法的建立. *植物病理学报*, 45(2): 205–210]
- Ma ZH, Shi SD, Wang HG, Zhang MR. 2005. Climate-based regional classification for overwintering and overwintering of *Puccinia striiformis* in China with GIS and geostatistics. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 33(S): 11–13 (in Chinese) [马占鸿, 石守定, 王海光, 张美荣. 2005. 我国小麦条锈病菌越冬又越夏地区的气候区划. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 33(S): 11–13]
- Pan Y, Gu YL, Luo Y, Ma ZH. 2016. Establishment and application of duplex real-time PCR quantitative determination method on latent infection of wheat stripe rust. *Acta Phytopathologica Sinica*, 46(4): 485–491 (in Chinese) [潘阳, 谷医林, 骆勇, 马占鸿. 2016. 双重 real-time PCR 定量测定小麦条锈菌潜伏侵染方法的建立与应用. *植物病理学报*, 46(4): 485–491]
- Rapilly F. 1979. Yellow rust epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 17: 59–73
- Scholthof KBG. 2007. The disease triangle: pathogens, the environment and society. *Nature Reviews Microbiology*, 5(2): 152–156
- Shang HS, Ren WL, Wang SM. 1990. The discussion of a grading standard of wheat stripe rust severity. *Plant Protection*, (1): 31 (in Chinese) [商鸿生, 任文礼, 王素梅. 1990. 小麦条锈病严重程度分级标准图的探讨. *植物保护*, (1): 31]
- Shi SD, Ma ZH, Wang HG, Zhao ZH, Jiang YY. 2005. Climate-based regional classification for overwintering of *Puccinia striiformis* in China with GIS and geostatistics. *Journal of Plant Protection*, 32(1): 29–32 (in Chinese) [石守定, 马占鸿, 王海光, 赵中华, 姜玉英. 2005. 应用 GIS 和地统计学研究小麦条锈病菌越冬范围. *植物保护学报*, 32(1): 29–32]
- Skjoth CA, Damialis A, Belmonte J, de Linares C, Fernández-Rodríguez S, Grinn-Gofroń A, Jędrzycka M, Kasprzyk I, Magyar D, Myszkowska D, et al. 2016. *Alternaria* spores in the air across Europe: abundance, seasonality and relationships with climate, meteorology and local environment. *Aerobiologia*, 32(1): 3–22
- Wan AM, Zhao ZH, Chen XM, He ZH, Jin SL, Jia QZ, Yao G, Yang JX, Wang BT, Li GB, et al. 2004. Wheat stripe rust epidemic and virulence of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in China in 2002. *Plant Disease*, 88(8): 896–904
- Xiong ZH, Liu L, Liu B, Yin XH. 2011. The relationships between outbreak of wheat stripe rust and climatic conditions. *Journal of Qinghai University (Nature Science)*, 29(4): 26–28 (in Chinese) [熊增海, 刘丽, 刘兵, 殷显辉. 2011. 小麦条锈病发生流行与气候条件的关系. *青海大学学报(自然科学版)*, 29(4): 26–28]
- Yu SY, Liang CH, Liu L, Liu CY, Fu JF. 2016. Correlation among grape downy mildew epidemic rate, airborne sporangium density of *Plasmopara viticola* and environmental factors in Shenyang. *Journal of Plant Protection*, 43(3): 434–441 (in Chinese) [于舒怡, 梁春浩, 刘丽, 刘长远, 傅俊范. 2016. 沈阳地区葡萄霜霉病流行速率、空中孢子囊密度与环境因素的相关性. *植物保护学报*, 43(3): 434–441]
- Zhang XD, Yin D, Wan X, Fu C. 2003. Impact of meteorological condition on stripe rust of winter wheat in Gansu Province. *Agricultural Meteorology*, 24(4): 26–28 (in Chinese) [张旭东, 尹东, 万信, 傅朝. 2003. 气象条件对甘肃冬小麦条锈病流行的影响研究. *中国农业气象*, 24(4): 26–28]
- Zhao J, Zhang HC, Yao JN, Huang LL, Kang ZS. 2011. Confirmation of *Berberis* spp. as alternate hosts of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* on wheat in China. *Mycosystema*, 30(6): 895–900 (in Chinese) [赵杰, 张宏昌, 姚娟妮, 黄丽丽, 康振生. 2011. 中国小麦条锈菌转主寄主小檗的鉴定. *菌物学报*, 30(6): 895–900]

(责任编辑:张俊芳)