

我国玉米南方锈病研究进展

马占鸿* 孙秋玉 李磊福 张克瑜 高建孟 董佳玉

(中国农业大学植物保护学院植物病理学系, 北京 100193)

摘要: 玉米南方锈病是我国玉米的重要病害之一。近年来已成为玉米生产上的严重生物灾害, 全国常年发生面积在 667 万 hm^2 左右, 造成了严重的产量和经济损失, 如何有效防控已成为亟待解决的生产问题。该文综述了我国玉米南方锈病的发生危害情况、分布、发生流行和传播规律、研究热点及存在的问题等, 以期为该病害的研究和有效防控提供参考。

关键词: 玉米南方锈病; 流行病学; 发生规律; 抗性品种; 防治

Research progresses of southern corn rust in China: a review

Ma Zhanhong* Sun Qiuyu Li Leifu Zhang Keyu Gao Jianmeng Dong Jiayu

(Department of Plant Pathology, College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Southern corn rust is an important disease of maize in China. In recent years, it has become a serious biological disaster in maize production. The national annual occurrence area of the disease is 6.67 million hectares, resulting in serious yield and economic losses. How to effectively prevent and control this disease has become an urgent production problem to be solved. This paper summarized the occurrence, harm, distribution, epidemiology and transportation, research hotspots and existing problems of southern corn rust, in order to provide a reference for the research as well as effective prevention and control of the disease.

Key words: southern corn rust; epidemiology; occurrence regularity; resistant varieties; prevention and control

由多堆柄锈菌 *Puccinia polysora* Underw. 引起的玉米南方锈病是我国玉米上的重要病害之一。20 世纪 90 年代前, 该病害主要在我国南方玉米种植区发生, 随着全球气候变暖和玉米种植制度的调整, 逐步向我国北方扩展。目前, 该病害在我国分布范围广, 流行频率高, 其夏孢子可随气流进行远距离传播, 且具有暴发性的特点, 该病害已由次要病害上升为主要病害, 暴发时造成严重的产量损失。

1 玉米南方锈病的危害与识别

玉米锈病有 3 种类型, 分别是由多堆柄锈菌引起的南方锈病、由高粱柄锈菌 *P. sorghi* Schw. 引起的普通锈病和由玉米壳锈菌 *Physopella zae* (Mains)

Cummins et Ramachar 引起的热带锈病。我国玉米上发生的锈病只有玉米南方锈病和普通锈病, 且以玉米南方锈病为主。

玉米南方锈病是一种广泛发生于热带至温带玉米种植区的真菌性病害, 其暴发流行时对玉米产量和品质都有较大影响, 部分流行年份玉米产量损失高达 50%, 严重时甚至造成绝收。该病害在历史上多次大暴发, 造成了严重的产量损失。自 1949 年开始, 玉米南方锈病连续多年持续在非洲玉米产区暴发流行, 产量损失高达 50% (Rhind et al., 1952)。1972 年到 1974 年, 玉米南方锈病在美国玉米产区暴发流行, 造成 35%~45% 的产量损失 (Futrell et al., 1975)。据推测, 在美国南部地区玉米南方锈病大

基金项目: 国家自然科学基金(31772101, 31972211)

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

收稿日期: 2022-01-12

约每5年左右会发生一次大流行(刘骏等,2009),已成为俄亥俄州玉米生产中的重要病害(Ali & Yan, 2012)。2014年玉米南方锈病在美国佐治亚州造成了1 800万美元的经济损失(Little, 2014)。此外,玉米南方锈病也是影响巴西(Gustavo et al., 2015)、印度尼西亚(Baek et al., 2015)和泰国(Janruang et al., 2013)等国家玉米生产的重要病害之一。

在国内,玉米南方锈病于1997—1999年在浙江省淳安县大面积暴发(胡务义等,1999),1998年该病害在河北省邯郸市和沧州市以及山东省大部分地区也出现大面积暴发(刘玉瑛等,1999;王寿伦,1999);2004年该病害在河南省流行暴发,在豫南、豫东及豫中多地造成较大的产量损失(代秀云等,2008);2011年,该病害在河南省漯河市暴发,根据发病的严重度,病株率从5%到50%以上不等(付家锋等,2013);2014年,湖北省武汉市秋玉米产区暴发该病害,造成了严重的产量损失,减产达60%~70%,严重地块甚至绝收(汤少云等,2015)。在武汉市蔡甸区,超过220 hm²的夏播鲜食玉米发病,造成减产20%以上,15%的地块基本绝收(韩群营等,2015)。

在适宜的环境条件下,多堆柄锈菌在玉米全生育期均可进行侵染(郑明祥等,2004)。被侵染的玉米叶片上出现橙黄至棕黄色锈状病斑,发病早期叶片上会出现褪绿斑,随着时间推移夏孢子堆成熟,表皮破裂后呈粉状(段定仁和何宏珍,1984)。在玉米生育期后期,随着孢子的扩散与侵染,玉米茎秆和穗部的苞叶上均会出现铁锈状病斑。在微观表现上,多堆柄锈菌夏孢子为淡黄色至金黄色,呈圆形或卵圆形,单胞,表面具稀疏小刺;冬孢子为栗褐色,呈椭圆形,先端平截、钝圆或渐尖,基部钝圆或渐狭;性孢子期和锈孢子期等菌体形态暂无报道(段定仁和何宏珍,1984;Sun et al., 2021)。黄莉群等(2020)针对玉米南方锈病与玉米普通锈病的病原菌夏孢子难以区分的情况,发明了一种区分2种锈病病原菌夏孢子的新方法,即使用95%的硫酸或75%的盐酸对这2种真菌的夏孢子进行处理,多堆柄锈菌的原生质体会收缩成一个球,而高粱柄锈菌的原生质体会收缩成几个球,以此区别2种玉米锈病。

2 玉米南方锈病的分布

玉米普通锈病在我国发现较早,最早于1937—1939年由戴芳澜、王云章等在陕西、贵州、西康(是中国原省级行政区,现所属区分别并入四川省和西

藏自治区)等省首次报道了该病(谌多仁,1963)。1940—1959年,先后在四川、广西、云南、台湾、甘肃、江苏和山东等省区发现该病(谌多仁,1963;梁克恭和武小菲,1993)。1978年,戚佩坤(1978)发现我国只有玉米普通锈病,主要分布在黑龙江、吉林、辽宁、山东、江苏、广西、台湾、陕西、甘肃、四川、云南和贵州等省区。玉米南方锈病在我国发现较晚,1972年该病害在海南省乐东黎族自治县尖峰地区首次被发现,随后于1974年和1979年在海南省陵水黎族自治县和崖县等地也分别发现该病害(段定仁和何宏珍,1984)。1976年孙明贤等也报道了玉米南方锈病在台湾省的发生和危害情况(梁克恭和武小菲,1993)。综上所述,在海南省和台湾省玉米南方锈病和普通锈病均有发生,我国其他地区均只发生了玉米普通锈病(梁克恭和武小菲,1993;刘玉瑛等,1999)。因此,一度认为我国发生的玉米锈病主要是普通锈病。直到1997年,浙江省淳安县大面积暴发玉米南方锈病,并于1998年发生面积进一步扩大(胡务义等,1999),且1998年在河北省邯郸市和沧州市也发现了玉米南方锈病(刘玉瑛等,1999)。此后,玉米南方锈病在我国多地多次暴发流行。刘骏等(2009)通过田间调查和文献整理,明确了海南省和黄淮海夏玉米区是我国玉米南方锈病发生的重点区域,其次是浙江、广东、广西等南方玉米种植省区和贵州、湖南等武陵山区,西南地区发病较少。目前,我国已确定发生玉米南方锈病的省(自治区、直辖市)有海南、广东、广西、福建、江西、湖南、贵州、云南、重庆、湖北、浙江、安徽、江苏、河南、陕西、山西、上海、山东、河北、天津、北京和辽宁(Sun et al., 2021)。玉米南方锈病在我国由次要病害上升为主要病害,从其每年的发生时间推测其菌源主要来自海南省、广东省和广西壮族自治区,而上述3个省区的菌源则主要来自东南亚各国及我国台湾省。

3 玉米南方锈病的发生流行与传播规律

3.1 发生流行

作为一种植物上的气传病害,玉米南方锈病的发生流行主要受病原、寄主和环境条件3方面因素的影响。

对于病原,引起玉米南方锈病的病原菌为多堆柄锈菌,其生活史包括大循环和小循环2种形式,且以小循环侵染为主。小循环为无性生殖过程,以夏孢子形式在不同地区间完成周年侵染和循环。大循环为有性生殖过程,在玉米生长季末期会在叶片组

织上产生冬孢子,经过担孢子、性孢子和锈孢子等多种形式后完成有性生殖过程。冬孢子不易被发现(Crouch & Szabo, 2011)且难以通过人工接种方式萌发(Cammack, 1962; Brewbaker et al., 2011),多堆柄锈菌有性生殖过程中的转主寄主研究也尚无明确结论,导致目前对于大循环的详细过程尚不明确(Cammack, 1959; 郭云燕等, 2013)。

对于寄主,我国主栽的玉米品种多为非抗性品种,虽然已有学者在抗病品种选育、抗病基因等方面做了大量研究工作,但仍没有高抗玉米南方锈病的玉米品种在全国大面积推广(张发军等, 2008; 李石初和杜青, 2010)。

对于环境条件,田耀加等(2014)通过萌发率测定试验发现水滴、光照颜色和孢子活力对于多堆柄锈菌的萌发至关重要,有水滴和无水滴情况下多堆柄锈菌孢子的萌发率分别为61.3%和3.3%,自然光、黑色光和蓝光交替有利于夏孢子萌发,在12~20℃条件下夏孢子在新鲜玉米叶片和风干玉米叶片上可分别保持10 d和30 d的活力。杨雪等(2015)对玉米南方锈病的发病温度范围进行了测定,发现玉米南方锈病可在15~31℃下发病,且最适温度范围为24~27℃。在田间环境下,多堆柄锈菌夏孢子仅需短时间的适宜条件即可完成侵染,温度和湿度是玉米南方锈病侵染循环过程中夏孢子萌发和侵染的重要制约因素(Debnath et al., 2019)。通常来说,在有露水的条件下只需6 h病原菌即可完成侵入和生长,而最理想的温度和湿度分别为23~28℃和16 h露水条件(Dolezal et al., 2009),当条件适宜时玉米南方锈菌会重复侵染循环,孢子堆释放的夏孢子最快会在7 d内侵染健康玉米并显症,从而使得病害短时间内达到大流行的程度(Debnath et al., 2019)。

3.2 传播规律

多堆柄锈菌以夏孢子形式通过高空气流等方式在不同地区间进行远程传播和流行,夏孢子的传播路径通常是从低纬度玉米种植区向高纬度玉米种植区传播,王晓鸣等(2020)通过对多堆柄锈菌进行离体培养,认为该菌在我国北方地区无法越冬,无法完成周年循环,每年发病的侵染源都由南方地区传播而来。

在病害短距离传播方面,王艳红等(2008)研究发现,在菌源区多堆柄锈菌夏孢子白天飞散数量略多于夜间,在小雨天飞散数量多于晴天,且空中孢子密度随高度及菌源距离的增加而递减。对于普通玉米锈病,高粱柄锈菌夏孢子单月可顺风传播90~100 m,单月可侧风传播50~60 m。

在远距离传播方面,目前对于具体传播路线尚无明确结论。王晓鸣等(2020)将南方锈病发生状况的调查结果与同期对该区域玉米生产形成影响的热带气旋活动情况进行对比分析,认为浙江省与福建省主要受来自台湾省方向的热带气旋影响,而我国广东省、广西壮族自治区与海南省主要受来自菲律宾方向的热带气旋影响。

4 我国抗南方锈病的玉米品种

目前,我国已鉴定的玉米抗性基因分别为*RppQ*(陈翠霞等, 2002; Chen et al., 2004; Zhou et al., 2007)、*RppP25*(刘章雄等, 2003; Zhao et al., 2013)、*RppC*(姚国旗等, 2013)、*RppD*(Zhang et al., 2010)、*RppS*(Wu et al., 2015)、*RppM*(Wang et al., 2020)和*RppCML496*(Lv et al., 2021)。不同玉米自交系的抗性基因在遗传分析和基因定位中所用的材料和手段各不相同(表1)。

表1 不同玉米自交系的抗性基因在遗传分析和基因定位中所用材料与

Table 1 Materials and methods used in genetic analysis and mapping of resistance genes in different maize inbred lines

抗病亲本 Resistant parent	感病亲本 Susceptible parent	抗性基因 Resistance gene	分子标记 Molecular marker
齐319 319 Qi	340, 9801, 478, etc.	<i>RppQ</i>	RADP, SSR, AFLP, etc.
P25/F939	F349	<i>RppP25</i>	SSR, InDel
W2D	W222	<i>RppD</i>	SSR, STS, CAPS, etc.
CML470	昌7-2 Chang 7-2	<i>RppC</i>	SSR
SCML205	京24 Jing 24	<i>RppS</i>	SSR, InDel
京2416K Jing 2416K	京2416 Jing 2416	<i>RppM</i>	SNP, InDel
CML496	lx9801	<i>RppCML496</i>	SNP

玉米自交系齐319中的抗性基因*RppQ*由显性单基因控制,在特定序列扩增(sequence character-

ized amplified region, SCAR)标记MA7和扩增片段长度多态性(amplified fragment length polymor-

phism, AFLP)标记M-CCG/E-AGA157之间,遗传距离分别为0.46 cM和1.71 cM(Zhou et al., 2007)。玉米自交系CML470中的抗性基因*RppC*为显性单基因,位于简单重复序列(simple sequence repeat, SSR)标记umc1380和umc1291之间,与2个标记的遗传距离分别是3.5 cM和8.8 cM(姚国旗等, 2013)。玉米自交系W2D的抗性基因*RppD*由1个主基因控制,该基因位于SSR标记umc1318和酶切扩增多态性序列(cleaved amplified polymorphism sequence, CAPS)标记CAPS858之间,大约2 Mb的物理遗传距离(Zhang et al., 2010)。玉米自交系P25的抗性基因也由1个主基因控制,呈加性效应,主基因在F₂、B₁和B₂群体的遗传率分别为81.88%、38.14%和55.1%(刘章雄等, 2003),该主基因被命名为*RppP25*,在SSR标记P091和插入缺失(insertion-deletion, InDel)标记M271之间,在该区域内确定了1个编码NBS-LRR蛋白的候选抗性基因GRMZM2G060884和2个与之共分离的分子标记M214和M019(Zhao et al., 2013)。玉米自交系SC-ML205对玉米南方锈病的抗性由单个基因*RppS*控制,初步定位在玉米的10号染色体上(Wu et al., 2015);等位性检测发现抗性基因*RppQ*、*RppP25*和*RppD*不是等位基因,但3个抗性基因存在紧密连锁关系(Zhang et al., 2010);抗性基因*RppS*也不是上述3个抗性基因的等位基因(Wu et al., 2015);但是抗性基因*RppC*与*RppQ*、*RppP25*、*RppD*和*RppS*之间并没有进行等位性检测,根据连锁的分子标记等信息无法明确*RppS*与其他4个抗性基因的等位关系。

除上述基因外,在2号(艾堂顺等, 2018)、3号(陈文娟等, 2019; Lu et al., 2020)、4号(Deng et al., 2019; 2020; 张金钰等, 2020)、5号(艾堂顺等, 2018; Lu et al., 2020)、6号(艾堂顺等, 2018; Lu et al., 2020)、7号(陈文娟等, 2019)、8号(陈文娟等, 2019)、9号(Deng et al., 2019; Lu et al., 2020; 张金钰等, 2020)和10号(艾堂顺等, 2018; 陈文娟等, 2019; 王兵伟等, 2019)染色体上也鉴定出多个数量性状基因座(quantitative trait locus, QTL)位点,可以部分解释玉米对南方锈病的抗性。

5 玉米南方锈病研究团队及关注点

尽管我国从事玉米南方锈病研究的团队较少,但由于近年来玉米南方锈病已成为我国的主要玉米病害,许多对此感兴趣的单位或个人开始重视该病害的研究,目前主要有中国农业科学院作物科学研

究所的王晓鸣团队、青岛农业大学的宋希云团队和中国农业大学的马占鸿团队等。

中国农业科学院作物科学研究所的王晓鸣团队重点通过对台风路径分析和基于单体间序列重复(inter-simple sequence repeat, ISSR)分子遗传标记的群体遗传学方法研究了玉米南方锈病在我国的遗传多样性和传播路径。目前,该团队通过对采自我国不同省的多堆柄锈菌不同地理种群的遗传相关性解析及其与热带气旋的相关性分析,探究了我国玉米南方锈病初侵染源的多源性,推测我国大陆玉米南方锈病的初侵染源来自我国台湾省和东南亚国家。

青岛农业大学的宋希云团队基于ISSR标记对我国山东、江苏、浙江、河南和海南等省的多堆柄锈菌进行了群体遗传学研究,推测我国山东省的玉米南方锈病初侵染源来自菲律宾或我国台湾省。

中国农业大学马占鸿团队重点从多堆柄锈菌的生物学特性、病害检测、品种抗性和病原菌寄生适合度以及群体遗传学等方面对玉米南方锈病进行了系统研究。近年来,该团队研究并明确了玉米南方锈病在我国的分布,包括越冬区和流行区;明确了玉米南方锈病的发病温度范围;建立了玉米南方锈病的分子检测方法;探究了不同省多堆柄锈菌的相对寄生适合度及不同玉米品种对不同地区多堆柄锈菌的抗性水平;开发了多堆柄锈菌多态性SSR标记,为玉米南方锈菌群体遗传学研究提供参考。

6 问题与讨论

纵观我国玉米南方锈病的发生历史,该病害一直是我国玉米生产上的重要病害之一,且缺少有效的防治策略。随着全球气候变化、玉米品种更替、玉米种植制度和栽培方式的调整,对该病害的检测、监测、预测和防控将是重中之重。虽然玉米南方锈病在我国已引起各方关注,并在研究上取得一些进展,但仍处于初级阶段,还有很多科学问题亟待深入研究解决。例如,玉米南方锈病在我国的传播规律,包括起源、初侵染源、历史和近期传播规律等;东南亚国家多堆柄锈菌菌株传向我国的分子佐证等;为何该病初期只分布在我国海南省和台湾省,后来扩散到全国,是否存在耐低温菌株;为何该病在我国玉米上发病时间集中,流行速度快;我国玉米南方锈病越冬区的病原菌与我国北方病害的关系,以及该病在我国的传播路径;该病害是否存在转主寄主,若存在又是什么植物。只有明确多堆柄锈菌初侵染源和传

播路径,才能为“源头治理”和“切断传播路径”等的病害防控策略提供依据。

多堆柄锈菌在我国的生理小种及分布有待进一步鉴定和分析。当前,我国没有鉴别玉米南方锈菌生理小种的鉴别寄主体系,也没有对我国大陆地区的生理小种进行鉴定,因此目前挖掘的抗病基因是对混菌的抗性,不是对具体生理小种的抗性。明确多堆柄锈菌生理小种的频率及分布,将为我国玉米品种的合理布局和抗病育种提供参考。

我国玉米南方锈病的监测与预测有待加强。今后应利用卫星遥感成像、孢子飞散动态与病情、气象因子、5G技术和人工神经网络等模型创建玉米南方锈病监测预警技术,为该病害的精准监测和预测提供技术支持。

致谢:值此《植物保护学报》创刊60周年之际,应约撰写了此文,在此感谢中国农业大学植物病害流行实验室博士后孙秋玉、博士生高建孟、张克瑜、李磊福和硕士生董佳玉等同学协助搜集整理材料。感谢学报编辑部主任高峰的大力支持和不断督促。

参 考 文 献 (References)

- Ai TS, Tian ZQ, Li HM, Deng C, Ding JQ, Zhang XL, Liu HF, Zhu WL, Li ZM. 2018. Mapping and effectiveness analysis for resistance genes of southern corn rust in maize. *Journal of Henan Agricultural University*, 52(4): 514–518 (in Chinese) [艾堂顺, 田志强, 李会敏, 邓策, 丁俊强, 张学林, 刘海富, 朱伟岭, 李志敏. 2018. 玉米南方锈病抗病QTL鉴定和效应分析. *河南农业大学学报*, 52(4): 514–518]
- Ali F, Yan JB. 2012. Disease resistance in maize and the role of molecular breeding in defending against global threat. *Journal of Integrative Plant Biology*, 54(3): 134–151
- Baek SB, Son BY, Kim JT, Lee JS, Bae HH, Kim SG, Lee SK, Lee BM, Seo MJ, Park CH, et al. 2015. Maize production and constraints to increasing productivity in Indonesia. *Journal of the Korean Society of International Agriculture*, 27(5): 609–613
- Brewbaker JL, Kim SK, So YS, Logroño M, Moon HG, Ming R, Lu XW, Josue AD. 2011. General resistance in maize to southern rust (*Puccinia polysora* Underw.). *Crop Science*, 51(4): 1393–1409
- Cammack RH. 1959. Studies on *Puccinia polysora* Underw., III: description and life cycle of *P. polysora* in West Africa. *Transactions of the British Mycological Society*, 42(1): 55–58
- Cammack RH. 1962. *Puccinia polysora*: a review of some factors affecting the epidemiology in West Africa. //Proceedings of Sixth Commonwealth Mycology Conference, pp. 134–138
- Chen CX, Wang ZL, Yang DE, Ye CJ, Zhao YB, Jin DM, Weng ML, Wang B. 2004. Molecular tagging and genetic mapping of the disease resistance gene *RppQ* to southern corn rust. *Theoretical and Applied Genetics*, 108(5): 945–950
- Chen CX, Yang DE, Wang ZL, Jin DM, Wang HG, Wang B. 2002. Inheritance of resistance to southern corn rust in the inbred line Qi319. *Acta Genetica Sinica*, 29(10): 903–906, 942 (in Chinese) [陈翠霞, 杨典洱, 王振林, 金德敏, 王洪刚, 王斌. 2002. 齐319携带的南方玉米锈病抗性基因的遗传初析. *遗传学报*, 29(10): 903–906, 942]
- Chen DR. 1963. A preliminary study on the corn rust (*Puccinia sorghi* Schw.). *Journal of Plant Protection*, 2(4): 446–447 (in Chinese) [谌多仁. 1963. 玉米锈病研究简报. *植物保护学报*, 2(4): 446–447]
- Chen WJ, Lu L, Li WC, Zhang XJ, Sun SL, Zhu ZD, Wang XM, Duan CX. 2019. QTL mapping for resistance to southern corn rust in maize. *Journal of Plant Genetic Resources*, 20(3): 521–529 (in Chinese) [陈文娟, 路璐, 李万昌, 张小杰, 孙素丽, 朱振东, 王晓鸣, 段灿星. 2019. 玉米抗南方锈病基因的QTL定位. *植物遗传资源学报*, 20(3): 521–529]
- Crouch JA, Szabo LJ. 2011. Real-time PCR detection and discrimination of the southern and common corn rust pathogens *Puccinia polysora* and *Puccinia sorghi*. *Plant Disease*, 95(6): 624–632
- Dai XY, Yu MY, Xu MX, Liu YC, Xia YF, Liu AH. 2008. Discussion of maize germplasm improvement. *Journal of Maize Sciences*, 16(1): 56–58 (in Chinese) [代秀云, 于明彦, 许明学, 柳迎春, 夏远峰, 刘爱华. 2008. 玉米种质改良问题探讨. *玉米科学*, 16(1): 56–58]
- Debnath S, Chhetri S, Biswas S. 2019. Southern rust disease of corn: a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(11): 855–862
- Deng C, Li HM, Li ZM, Tian ZQ, Chen JF, Chen GS, Zhang XC, Ding JQ, Chang YX. 2019. New QTL for resistance to *Puccinia polysora* Underw in maize. *Journal of Applied Genetics*, 60(2): 147–150
- Deng C, Lv M, Li XY, Zhao XD, Li HM, Li ZM, Tian ZQ, Leonard A, Jaqueth J, Li BL, et al. 2020. Identification and fine mapping of *qSCR4.01*, a novel major QTL for resistance to *Puccinia polysora* in maize. *Plant Disease*, 104(7): 1944–1948
- Dolezal W, Tiwari K, Kemeraït R, Kichler J, Sapp P, Pataky J. 2009. An unusual occurrence of southern rust, caused by *Rpp9*-virulent *Puccinia polysora*, on corn in southwestern Georgia. *Plant Disease*, 93(6): 676
- Duan DR, He HZ. 1984. Description of a rust *Puccinia polysora* on corn in Hainan Island. *Acta Mycologica Sinica*, 3(2): 125–126 (in Chinese) [段定仁, 何宏珍. 1984. 海南岛玉米上的多堆柄锈菌. *真菌学报*, 3(2): 125–126]
- Fu JF, Liu JY, Wu WH, Yan HX, Yuan LZ, Zhao YQ. 2013. The occurrence and integrated control of southern corn rust in Luohe City. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, (4): 134–135 (in Chinese) [付家锋, 柳家友, 吴伟华, 闫海霞, 袁刘正, 赵月强. 2013. 漯河市玉米南方锈病的发生与综合防治. *农业科技通讯*, (4): 134–135]
- Futrell MC, Hooker AL, Gene SE. 1975. Resistance in maize to corn

- rust, controlled by a single dominant gene. *Crop Science*, 15(4): 597–599
- Guo YY, Chen MG, Sun SL, Wu XF, Jiang K, Zhu ZD, Li HJ, He YQ, Wang XM. 2013. Genetic diversity of *Puccinia polysora* Underw. in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 46(21): 4523–4533 (in Chinese) [郭云燕, 陈茂功, 孙素丽, 武小菲, 江凯, 朱振东, 李洪杰, 何月秋, 王晓鸣. 2013. 中国玉米南方锈病病原菌遗传多样性. *中国农业科学*, 46(21): 4523–4533]
- Gustavo M, Kaian ACK, Fernando E, Regis TV, Silvio DF, Vanessa AE, Eloisa M, Willian BR, Jonas FE. 2015. Effect of fungicide application times in the control management of leaf foliar diseases in maize. *African Journal of Agricultural Research*, 10(38): 3686–3695
- Han QY, Huang MS, Li SR, Zeng XJ, Hu G, Lei XH, Yao L. 2015. The causes of outbreak and integrated controlling of southern rust of summer-sowing fresh corn in Caidian District of Hubei Province in 2014. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 43(11): 104–106 (in Chinese) [韩群营, 黄明生, 李守荣, 曾学军, 胡刚, 雷雄浩, 姚璐. 2015. 2014年湖北蔡甸夏播鲜食玉米南方锈病暴发原因及综防对策. *安徽农业科学*, 43(11): 104–106]
- Hu WY, Tang YQ, Ruan YL, Yu ZP. 1999. The damage of southern corn rust is serious year by year in Chun'an County. *Plant Protection*, 25(6): 50 (in Chinese) [胡务义, 唐有全, 阮义理, 余樟平. 1999. 淳安县玉米南方型锈病危害逐年严重. *植物保护*, 25(6): 50]
- Huang LQ, Zhang KY, Dong JY, Sun QY, Li LF, Ma ZH. 2020. A fast method for distinguishing southern rust pathogen *Puccinia polysora* from common rust pathogen *Puccinia sorghi*. *Journal of Plant Protection*, 47(6): 1385–1386 (in Chinese) [黄莉群, 张克瑜, 董佳玉, 孙秋玉, 李磊福, 马占鸿. 2020. 玉米南方锈病菌和普通锈病菌的快速区分方法. *植物保护学报*, 47(6): 1385–1386]
- Janruang P, Unartngam A, Unartngam J. 2013. Genetic differentiation within the *Puccinia polysora* population occurred on inbred lines of maize in Thailand. *International Journal of Agricultural Technology*, 9: 1497–1505
- Li SC, Du Q. 2010. Preliminary report on identification of maize germplasm resources resistant to southern corn rust. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, (21): 187, 189 (in Chinese) [李石初, 杜青. 2010. 玉米种质资源抗南方玉米锈病鉴定初报. *现代农业科技*, (21): 187, 189]
- Liang KG, Wu XF. 1993. Occurrence and damage of maize rust in China. *Plant Protection*, 19(5): 34 (in Chinese) [梁克恭, 武小菲. 1993. 我国玉米锈病的发生与为害情况. *植物保护*, 19(5): 34]
- Little EL. 2014. Georgia plant disease loss estimates. GA, USA: UGA Extension, pp. 22
- Liu J, Ma Q, Yu K, Wang XM. 2009. Distribution of southern corn rust and corn varieties resistance to the rust in China. *Crops*, (3): 71–75 (in Chinese) [刘骏, 马青, 于凯, 王晓鸣. 2009. 我国玉米南方锈病发生区域和玉米品种田间抗性的研究. *作物杂志*, (3): 71–75]
- Liu YY, Shi J, Wang QL. 1999. Southern corn rust in Hebei Province in 1998. *Plant Protection*, 25(3): 53 (in Chinese) [刘玉瑛, 石洁, 王庆雷. 1999. 1998年河北省发生南方型玉米锈病. *植物保护*, 25(3): 53]
- Liu ZX, Wang SC, Dai JR, Huang LJ, Cao HH. 2003. Studies of genetic analysis and SSR linked marker location of gene resistance to southern rust in inbred line P₂₅ of maize. *Acta Genetica Sinica*, 30(8): 706–710 (in Chinese) [刘章雄, 王守才, 戴景瑞, 黄烈健, 曹海河. 2003. 玉米P₂₅自交系抗锈病基因的遗传分析及SSR分子标记定位. *遗传学报*, 30(8): 706–710]
- Lu L, Xu ZN, Sun SL, Du Q, Zhu ZD, Weng JF, Duan CX. 2020. Discovery and fine mapping of *qSCR6.01*, a novel major QTL conferring southern rust resistance in maize. *Plant Disease*, 104(7): 1918–1924
- Lv M, Deng C, Li XY, Zhao XD, Li HM, Li ZM, Tian ZQ, Leonard A, Jaqueth J, Li BL, et al. 2021. Identification and fine-mapping of *RppCML496*, a major QTL for resistance to *Puccinia polysora* in maize. *The Plant Genome*, 14(1): e20062
- Qi PK. 1978. Handbook of the pathogens of maize, sorghum and millet. Beijing: Science Press, pp. 100–104 (in Chinese) [戚佩坤. 1978. 玉米、高粱、谷子病原手册. 北京: 科学出版社, pp. 100–104]
- Rhind D, Waterston JM, Deighton FC. 1952. Occurrence of *Puccinia polysora* Underw. in west Africa. *Nature*, 169(4302): 631
- Sun QY, Li LF, Guo FF, Zhang KY, Dong JY, Luo Y, Ma ZH. 2021. Southern corn rust caused by *Puccinia polysora* Underw: a review. *Phytopathology Research*, 3: 25
- Tang SY, Xu ZX, Hu DM, Wang LF, Ji H. 2015. Characteristics of southern corn rust and control measures in Wuhan City in 2014. *Hubei Plant Protection*, (2): 46–47 (in Chinese) [汤少云, 徐曾娟, 胡冬梅, 王凌锋, 纪辉. 2015. 武汉市2014年秋玉米锈病发生特点与防治措施. *湖北植保*, (2): 46–47]
- Tian YJ, Zhao SG, Zhang J, Wang QY, Huang LH, Chen HD. 2014. Research progress on corn rust in China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 30(4): 226–231 (in Chinese) [田耀加, 赵守光, 张晶, 王秋燕, 黄亮华, 陈红弟. 2014. 中国玉米锈病研究进展. *中国农学通报*, 30(4): 226–231]
- Wang BW, Qin JM, Shi CQ, Zheng JX, Qin YA, Huang AX. 2019. QTL mapping and genetic analysis of a gene with high resistance to southern corn rust. *Scientia Agricultura Sinica*, 52(12): 2033–2041 (in Chinese) [王兵伟, 覃嘉明, 时成俏, 郑加兴, 覃永媛, 黄安霞. 2019. 一个高抗玉米南方锈病基因的QTL定位及遗传分析. *中国农业科学*, 52(12): 2033–2041]
- Wang S, Zhang RY, Shi Z, Zhao YX, Su AG, Wang YD, Xing JF, Ge JR, Li CH, Wang XQ, et al. 2020. Identification and fine mapping of *RppM*, a southern corn rust resistance gene in maize. *Frontiers in Plant Science*, 11: 1057
- Wang SL. 1999. Corn rust was prevalent in parts of Shandong, Henan and Jiangsu provinces in 1998. *Plant Protection Technology and Extension*, 19(3): 40–41 (in Chinese) [王寿伦. 1999. 山东、河南

- 和江苏部分地区玉米锈病1998年流行. 植保技术与推广, 19(3): 40-41]
- Wang XM, Liu J, Guo YY, Duan CX, Zhu ZD, Sun SL, Yang ZH. 2020. Multiorigins of initial infection sources of *Puccinia polysora* causing southern rust of maize in China. *Journal of Maize Sciences*, 28(3): 1-14, 30 (in Chinese) [王晓鸣, 刘骏, 郭云燕, 段灿星, 朱振东, 孙素丽, 杨知还. 2020. 中国玉米南方锈病初侵染源的多源性. *玉米科学*, 28(3): 1-14, 30]
- Wang YH, Jiang ZY, Wen JW, Huang FJ, Jian DB, Yang XD. 2008. Studies on spores flying disease gradient and space distribution of corn common rust. *Journal of Maize Sciences*, 16(3): 117-120 (in Chinese) [王艳红, 姜兆远, 温嘉伟, 黄福杰, 见德宝, 杨信东. 2008. 普通型玉米锈病菌孢子飞散、传播及空间分布研究. *玉米科学*, 16(3): 117-120]
- Wu XJ, Li N, Zhao PF, He Y, Wang SC. 2015. Geographic and genetic identification of *RppS*, a novel locus conferring broad resistance to southern corn rust disease in China. *Euphytica*, 205(1): 17-23
- Yang X, Ding XL, He ZL, Ma ZH. 2015. Determination of temperature required by southern corn rust. *Plant Protection*, 41(5): 145-147, 150 (in Chinese) [杨雪, 丁小兰, 何增磊, 马占鸿. 2015. 玉米南方锈病发生温度范围测定. *植物保护*, 41(5): 145-147, 150]
- Yao GQ, Shan J, Cao B, Cui LG, Du SL, Han ZJ, Liu TS, Li CL, Wang LM. 2013. Mapping the maize southern rust resistance gene of inbred line CML470. *Journal of Plant Genetic Resources*, 14(3): 518-522 (in Chinese) [姚国旗, 单娟, 曹冰, 崔良国, 都森烈, 韩志景, 刘铁山, 李翠兰, 汪黎明. 2013. 玉米自交系CML470抗南方锈病基因的定位. *植物遗传资源学报*, 14(3): 518-522]
- Zhang FJ, Meng ZD, Mu CH, Li WC, Sun Q, Ding ZH, Wang LM, Wang HG. 2008. Selection and identification of maize inbred lines resisting southern corn rust. *Shandong Agricultural Sciences*, 40(9): 77-79 (in Chinese) [张发军, 孟昭东, 穆春华, 李文才, 孙琦, 丁照华, 汪黎明, 王洪刚. 2008. 抗南方锈病玉米自交系的筛选及评价. *山东农业科学*, 40(9): 77-79]
- Zhang JY, Pu HJ, Liu PF, Chen QC, Zhang ZL, Jiang F. 2020. QTL mapping for southern rust resistance in fresh sweet corn. *Journal of China Agricultural University*, 25(4): 82-88 (in Chinese) [张金钰, 蒲浩杰, 刘鹏飞, 陈青春, 张姿丽, 蒋锋. 2020. 鲜食甜玉米南方锈病抗性QTL定位分析. *中国农业大学学报*, 25(4): 82-88]
- Zhang Y, Xu L, Zhang DF, Dai JR, Wang SC. 2010. Mapping of southern corn rust-resistant genes in the W2D inbred line of maize (*Zea mays* L.). *Molecular Breeding*, 25(3): 433-439
- Zhao PF, Zhang GB, Wu XJ, Li N, Shi DY, Zhang DF, Ji CF, Xu ML, Wang SC. 2013. Fine mapping of *RppP25*, a southern rust resistance gene in maize. *Journal of Integrative Plant Biology*, 55(5): 462-472
- Zheng MX, Hu WY, Ruan YL, Zhang AZ, Wang SH. 2004. Infected period of urediniospores of *Puccinia polysora* Underw in Zhejiang of China. *Journal of Plant Protection*, 31(4): 439-440 (in Chinese) [郑明祥, 胡务义, 阮义理, 张爱忠, 汪诗华. 2004. 玉米南方型锈病夏孢子的侵染时期. *植物保护学报*, 31(4): 439-440]
- Zhou CJ, Chen CX, Cao PX, Wu SW, Sun JW, Jin DM, Wang B. 2007. Characterization and fine mapping of *RppQ*, a resistance gene to southern corn rust in maize. *Molecular Genetics and Genomics*, 278(6): 723-728

(责任编辑:李美娟)