

模拟酸雨对小麦条锈病流行学组分的影响

王树和^{1,2} 孙佩璐¹ 周文楠¹ 刘 婷¹ 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开放实验室, 北京 100193; 2. 河南科技大学林学院, 洛阳 471023)

摘要: 为明确酸雨对小麦条锈病菌孢子萌发及病害流行学组分的影响, 采用不同酸度的模拟酸雨 (pH值分别为2.5、3.5、4.5和5.6) 处理小麦条锈病菌 *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* 生理小种CYR32和CYR33的夏孢子, 并将不同酸度模拟酸雨处理后的夏孢子接种小麦感病品种铭贤169, 采用组分分析法研究酸雨对病害发展过程的影响。结果表明, 随着模拟酸雨酸度的增强, 生理小种CYR32和CYR33的夏孢子萌发率均显著降低, 萌发24 h后对照组生理小种CYR32和CYR33的夏孢子萌发率分别为93.7%和79.8%, 在pH 3.5模拟酸雨处理后萌发率仅为13.1%和8.6%。温室内接种试验结果显示, 不同酸度模拟酸雨对生理小种CYR32和CYR33的侵染概率、潜育期和病情指数均有显著影响, 对生理小种CYR32和CYR33病斑扩展率影响不显著; 与对照相比, pH 3.5模拟酸雨处理后生理小种CYR32和CYR33的侵染概率分别下降79.9%和79.8%。结果表明强酸雨(pH 3.5)显著延长小麦条锈菌潜育期, 减少病斑产孢量, 降低病情指数和病害进展曲线下面积。

关键词: 模拟酸雨; 小麦条锈菌; 病害过程

Effect of simulated acid rain on disease progress of wheat yellow rust

Wang Shuhe^{1,2} Sun Peilu¹ Zhou Wennan¹ Liu Ting¹ Ma Zhanhong^{1*}

(1. Department of Plant Pathology, MOA Key Lab of Pest Monitoring and Green Management, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan Province, China)

Abstract: In order to determine the effect of acid rain on spores germination and disease progress of wheat yellow rust, germination of urediniospores of two races, CYR32 and CYR33, of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* was evaluated after 6, 12, 18, and 24 h incubation in different simulated acid rain treatments (pH 2.5, 3.5, 4.5 and 5.6) *in vitro*, and on epidemiological components of wheat stripe rust caused by *P. striiformis* f. sp. *tritici* were investigated with the spraying method in the greenhouse. Results showed that urediniospores germination of two races decreased significantly with increasing acidity of simulated rain. The spore germination rates of CYR32 and CYR33 were 93.7% and 79.8% after 24 h incubation at control treatment (pH 5.6), and that of CYR32 and CYR33 were only 13.1% and 8.6% at pH 3.5. In the greenhouse, the lesion expansion rates of CYR32 of *P. striiformis* f. sp. *tritici* (or CYR33) were not significant difference under the same days after inoculation. There were significant effects of acidity of simulated rain on infection efficiency, latent period, sporulation, disease index and the area under disease progress curve (AUDPC) of two races. The infection efficiency of CYR32 and CYR33 at pH 3.5 compared with the control treatment decreased 79.9% and 79.8%, respectively. This result suggested that heavy acid rain (pH 3.5) could significantly prolong the incubation period, reduce

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300702, 2017YFD0201703)

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

收稿日期: 2017-10-08

sporulation, decrease disease index and AUDPC.

Key words: simulated acid rain; *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*; disease progress

酸雨是当前世界重大的环境问题之一,自20世纪70年代末我国出现酸雨污染,目前已经成为继欧洲、北美之后的第三大酸雨区(Larssen et al., 2006; 张新民等, 2010),酸雨的危害主要表现在对生态系统的干扰和破坏以及对各种建筑材料的腐蚀(Okochi et al., 2000; Singh & Agrawal, 2008),甚至危害人的身体健康(Goyer et al., 1985),每年酸雨污染给我国经济造成严重损失(刘萍等, 2011)。

由植物-病原物构成的植物病害体系是生态系统中的一个子系统,酸雨不仅影响病原物,而且影响寄主及寄主-病原复合体(Shriner, 1978)。研究表明酸雨对寄主-病原物相互作用的影响是复杂的,可能是通过增加或降低寄主植物感病性、降低病原物活性或增强病原物致病力,在特定的寄主-病原关系中有所不同(Martin et al., 1987; Campbell et al., 1988; 袁志文, 1988)。如袁志文(1988)研究发现,在邻近重酸雨区(雨水 pH>4.5)马尾松落针病和马尾松赤落叶病的病情指数是无酸雨区的2.5倍,酸性降水对植物表皮的侵蚀增加植物对病原物的感病性;在重酸雨区(雨水 pH<4.5),病原物活性降低,2种病害的病情指数低于无酸雨区。另外,酸雨对病害的影响与接种处理对象(寄主或病原)以及接种处理的先后顺序也有关(Shriner, 1978; Britton et al., 1996),如Shriner(1978)研究表明,接种菜豆晕斑病菌 *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* 前的芸豆用模拟酸雨处理后,病情加重;接种后发病的芸豆再用模拟酸雨处理后病情减轻。

由条形柄锈菌小麦专化型 *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* 引起的小麦条锈病是气传病害,在田间主要通过夏孢子的传播进行危害,造成暴发流行,严重威胁小麦的生产安全(李振岐和曾士迈, 2002; Zeng & Luo, 2006)。夏孢子在散布、沉积或在小麦叶片表面萌发时是其生命中最脆弱的阶段,研究表明环境因素如空气污染和紫外线能减少夏孢子萌发,进而影响条锈病发生(Sharp, 1967; Cheng et al., 2014)。目前,酸雨对小麦条锈病菌夏孢子萌发及病害发生程度的研究尚未见报道。本研究采用不同酸度的模拟酸雨处理小麦条锈病菌夏孢子,观察酸雨对其夏孢子萌发的影响,将不同酸度模拟酸雨处理后的夏孢子接种感病品种铭贤169,采用组分分析法研究酸雨对病害发展过程的影响(Zadoks, 1971),

以期揭示酸雨对条锈病菌-小麦病害系统的影响,为小麦条锈病的防控提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料

供试菌株及小麦品种:小麦条锈病菌生理小种 CYR32 和 CYR33、小麦高感条锈品种铭贤169,中国农业大学植物病害流行实验室提供。

试剂及仪器:分析纯硫酸和硝酸,天津市化学试剂三厂。FE20 酸度计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;Li-3100A 叶面积仪,美国 LI-COR 公司;60 目筛的纱网,上虞市五四仪器厂。

1.2 方法

1.2.1 模拟酸雨的配制及试验设计

模拟酸雨的离子成分根据我国南方自然降雨的主要化学成分配制,将分析纯硫酸和硝酸按化学当量 5:1 配制成母液,然后加去离子水配制成不同酸度的模拟酸雨溶液。本试验共设置 5 个处理,即 pH 值分别为 2.5(特强酸雨)、3.5(强酸雨)、4.5(中度酸雨)和 5.6(弱酸雨)(Zhang et al., 2012)及去离子水处理(对照, pH 6.9),将 5 个处理溶液分别对供试菌株生理小种 CYR32 或 CYR33 进行试验,每个处理均重复 3 次。

1.2.2 小麦条锈病菌孢子萌发的测定

参照张永红等(2006)方法测定孢子萌发。每个处理取 100 mL 溶液,然后加入 3 mg 新鲜供试菌株夏孢子,于 9℃ 全黑暗条件萌发,分别于处理 6、12、18 和 24 h 后吸取夏孢子于载玻片上显微观察并拍照,以芽管伸长大于孢子直径的 1/2 为萌发标准,计算萌发率和萌发速率,萌发率=萌发孢子数/总孢子数×100%,萌发速率=相邻时间段萌发率之差/时间间隔(余仲东等, 2010)。

1.2.3 接种方法

将供试小麦品种播于直径 10 cm 花盆内,每个花盆播种约 20 粒小麦。当小麦第 1 片叶完全展开后接种,每个处理接种 5 盆小麦苗作为 1 个重复,共接种 15 盆小麦苗,接种时称取新鲜夏孢子 3 mg 加入到含有 0.02% Tween 80 的 20 mL 溶液中配制孢悬液。接种后的小麦苗黑暗保湿培养 24 h (10~14℃ 条件下),然后转人工气候室中培养,培养条件 10~14℃ 下 16 h 光照, 8 h 黑暗, 7 d 后开始调查发病情

况,分别测定其侵染概率、潜育期、病斑扩展率、单病斑产孢量和病情指数共5个流行组分。

1.2.4 病害流行学组分的测定方法

侵染概率的测定:参照 Luo & Zeng(1988)关于侵染概率的定义,根据侵染概率=单个叶片上的平均侵染位点数/(单位叶面积孢子数×叶面积)公式计算各处理的侵染概率。接种前随机选取50片小麦叶片用叶面积仪测定叶面积,计算平均叶面积。接种时在各处理小麦叶片间放置5片涂有凡士林的载玻片,用于测量单位面积上接种的孢子量。接种后每个处理随机选择10片叶片观测侵染位点数,待小麦叶片出现褪绿斑点时逐日定时记录褪绿斑点的数量,直到褪绿斑点不再增加,计算单个叶片上的平均侵染位点数。

潜育期的测定:从接种到第1个夏孢子堆破裂为止的时间定为潜育期,待每个处理的小麦叶片接种后出现褪绿花斑开始逐日观察记录每个处理小麦条锈病的潜育期,每个处理选择10片单病斑叶片进行统计并计算平均值。

病斑扩展率的测定:每个处理选择只有单个病斑的10片叶片用于测定病斑扩展率。参照 Cheng et al.(2014)方法测定病斑扩展率,接种后第14天开始测量,统计到接种后第26天。

病斑产孢量的测定:每个处理选择10片只有单病斑的叶片并标记。接种后第14天(潜育期结束)开始用指形管收集叶片上的夏孢子,每隔1 d收集1次,统计到接种后第26天。收集的夏孢子用0.02% Tween 80 配制成孢子悬浮液,将孢子浓度稀释后镜检计数。

小麦条锈病发病情况调查:每个处理从接种后第12天开始调查病情,每隔1 d调查1次,共调查8次。参照农业行业标准 NY/T 1443.1—2007,计算病情指数和病害进展曲线下面积(the area under disease progress curve, AUDPC),病害进展曲线下面积 $A = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{D_i + D_{i+1}}{2} \right) (t_{i+1} - t_i)$, 其中 n 为病情调查次数, D_i 为接种后第 i 天的病情指数, t_i 为接种后的第 i 天, $D = I \times \bar{S} \times 100$, 其中 I 表示发病率, $\bar{S}$ 表示平均严重度, $I = \text{调查发病叶片} / \text{调查总叶片数} \times 100\%$, $\bar{S} = \sum (s_i \times l_i) / L \times 100$, 其中 s_i 为严重度值, l_i 为各严重度值对应的病叶数, L 为调查总病叶数。

1.3 数据分析

采用 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析,利用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨对小麦条锈病菌孢子萌发的影响

不同酸度模拟酸雨处理的小麦条锈病菌生理小种 CYR32 和 CYR33 夏孢子萌发率差异较大,随着模拟酸雨酸度的增强,夏孢子萌发率显著降低($P < 0.05$)。对照组处理 24 h 后,生理小种 CYR32 和 CYR33 的夏孢子萌发率分别为 93.7% 和 79.8%;与对照相比,弱酸雨(pH 5.6)处理 6、12、18 和 24 h 后,2 个小麦条锈病菌生理小种夏孢子萌发率均未受到抑制;与对照相比,特强酸雨(pH 2.5)和强酸雨(pH 3.5)处理 6、12、18 和 24 h 后,2 个小麦条锈病菌夏孢子萌发率均受到显著抑制($P < 0.05$),pH 3.5 和 pH 2.5 的模拟酸雨处理 24 h 后,生理小种 CYR32 的夏孢子萌发率仅为 13.1% 和 2.0%,生理小种 CYR33 的夏孢子萌发率仅为 8.6% 和 1.5%。2 个生理小种 CYR32 和 CYR33 对中度酸雨(pH 4.5)处理 24 h 的忍受程度有差异,前者与对照显著差异($P < 0.05$),后者与对照无显著差异(图 1-A~B)。

不同酸度模拟酸雨对条锈病菌生理小种 CYR32 和 CYR33 在不同萌发阶段萌发速率的影响显著差异($P < 0.05$),pH 5.6、pH 4.5 和对照 3 个处理中生理小种 CYR32 和 CYR33 在 0~6 h 的萌发速率显著高于其它 3 个时间段(6~12、12~18 和 18~24 h)的萌发速率($P < 0.05$),随时间增长,萌发速率逐渐减小(图 1-C~D)。pH 4.5 处理后生理小种 CYR33 在 18~24 h 的萌发速率高于其它处理(图 1-D)。另外,不同酸度模拟酸雨处理 6 h 后,夏孢子萌发形成的芽管长度有明显差异,模拟酸雨酸度越高菌丝生长受抑制越严重(图 2)。

2.2 模拟酸雨对小麦条锈病流行组分的影响

2.2.1 模拟酸雨对小麦条锈病菌侵染概率的影响

不同酸度模拟酸雨对 2 个小麦条锈病菌生理小种夏孢子侵染概率均有显著影响($P < 0.05$),随着模拟酸雨酸度的提高,小麦条锈病菌的侵染概率显著下降($P < 0.05$)。与对照相比,生理小种 CYR32 在 pH 5.6、pH 4.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后侵染概率分别下降 14.5%、47.2% 和 79.9%;与对照相比,生理小种 CYR33 在 pH 5.6、pH 4.5 和 pH 3.5 模拟酸雨处理后侵染概率分别下降 9.0%、52.7% 和 79.8%;除生理小种 CYR33 在弱酸雨(pH 5.6)处理后的侵染概率与对照无显著差异外,每个生理小种的其它处理与对照的小麦条锈病菌的侵染概率均差异显著($P < 0.05$,图 3-A)。经特强酸雨(pH 2.5)处理后 2 个小麦

条锈菌生理小种 CYR32 和 CYR33 夏孢子尽管有一定的萌发率,但均失去侵染能力,故不再统计侵染概

率、潜育期、病斑扩展率、病斑产孢量和病情指数等指标。

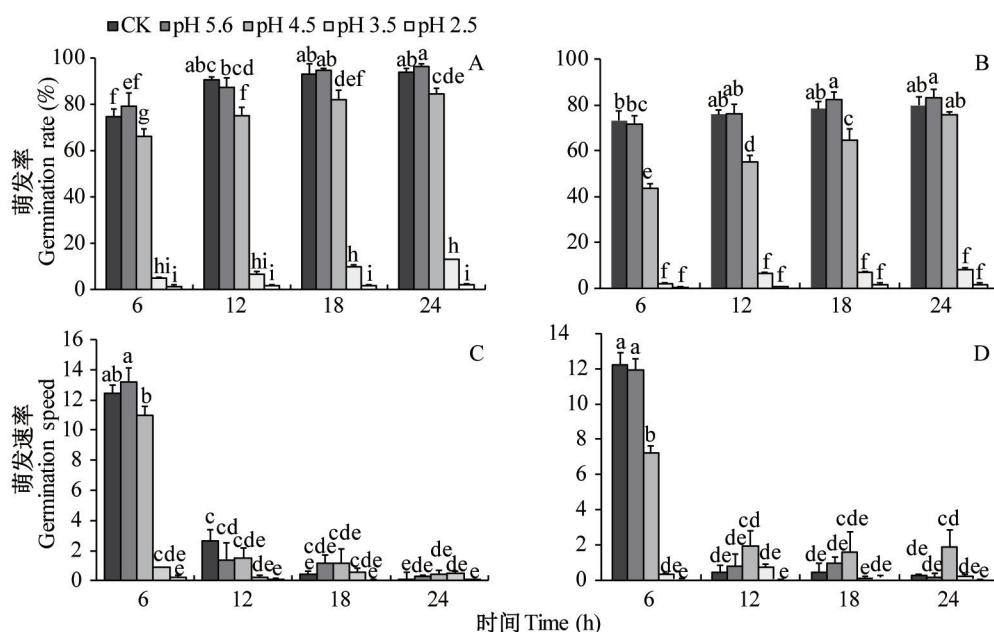


图1 不同酸度模拟酸雨对小麦条锈病菌生理小种 CYR32(A,C)和 CYR33(B,D)夏孢子萌发的影响

Fig. 1 Effects of different simulated acid rain on spore germination of race CYR32 (A,C) and CYR33 (B,D) of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici

图中数据为平均数±标准误。不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

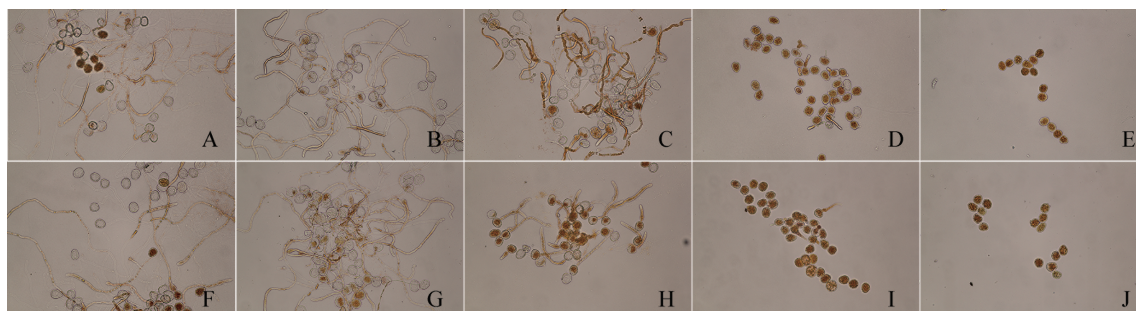


图2 小麦条锈病菌生理小种 CYR32(A~E)和 CYR33(F~J)夏孢子在不同酸度模拟酸雨处理 6 h 后的萌发图(200×)

Fig. 2 Spore germination of race CYR32 (A~E) and CYR33 (F~J) of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici in simulated acid rain after 6 h of incubation (200×)

A, F: 对照; B, G: pH 5.6; C, H: pH 4.5; D, I: pH 3.5; E, J: pH 2.5。A, F: CK; B, G: pH 5.6; C, H: pH 4.5; D, I: pH 3.5; E, J: pH 2.5.

2.2.2 模拟酸雨对小麦条锈病潜育期的影响

不同酸度模拟酸雨对2个小麦条锈病菌生理小种的潜育期均有显著影响($P < 0.05$, 图3-B)。在不同酸度模拟酸雨(pH为3.5、4.5和5.6)和对照处理后,生理小种 CYR32 的平均潜育期分别是12.3、11.6、11.0和11.0 d,生理小种 CYR33 的平均潜育期分别是12.6、11.6、11.0和11.0 d;与对照相比,强酸雨(pH 3.5)显著延长2个小麦条锈病菌生理小种的

潜育期($P < 0.05$),中度酸雨(pH 4.5)和弱酸雨(pH 5.6)对2个条锈病菌生理小种的潜育期无显著影响(图3-B)。

2.2.3 模拟酸雨对小麦条锈病病斑扩展率的影响

中度酸雨(pH 4.5)、弱酸雨(pH 5.6)处理与对照相同,2个小麦条锈病菌生理小种的病斑扩展在接种后第14天最快,生理小种 CYR32 的病斑扩展率分别为67.4%、72.8%和78.9%,生理小种 CYR33 的

病斑扩展率分别为68.0%、70.8%和79.3%,随后随着时间增长,病斑扩展率逐渐下降;重酸雨(pH 3.5)处

理在接种后第16天小麦条锈病菌病斑扩展最快,之后随时间延长病斑扩展率逐渐下降(图4)。

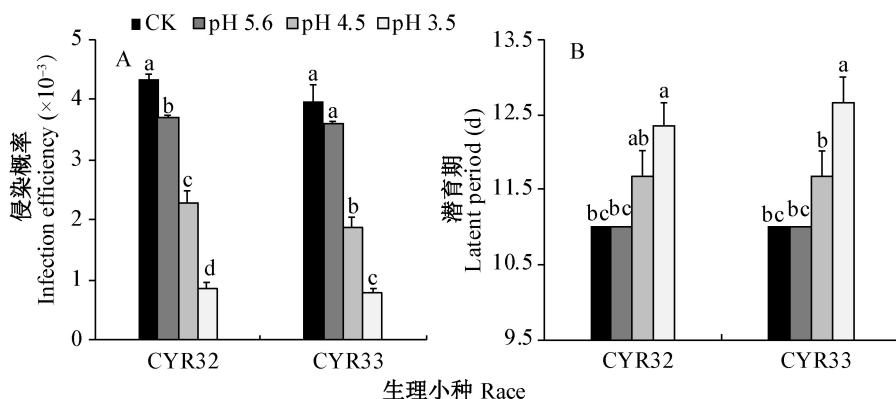


图3 模拟酸雨对小麦条锈病菌生理小种CYR32和CYR33侵染概率(A)和潜育期(B)的影响

Fig. 3 Effects of different simulated acid rain on the infection efficiency (A) and latent period (B) of race CYR32 and CYR33 of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*

图中数据为平均数 $\pm$ 标准误。不同字母表示同一生理小种在不同模拟酸雨处理经Duncan氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data are mean $\pm$ SE. Different letters indicate significant difference between the same race at different simulated acid rain treatments at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

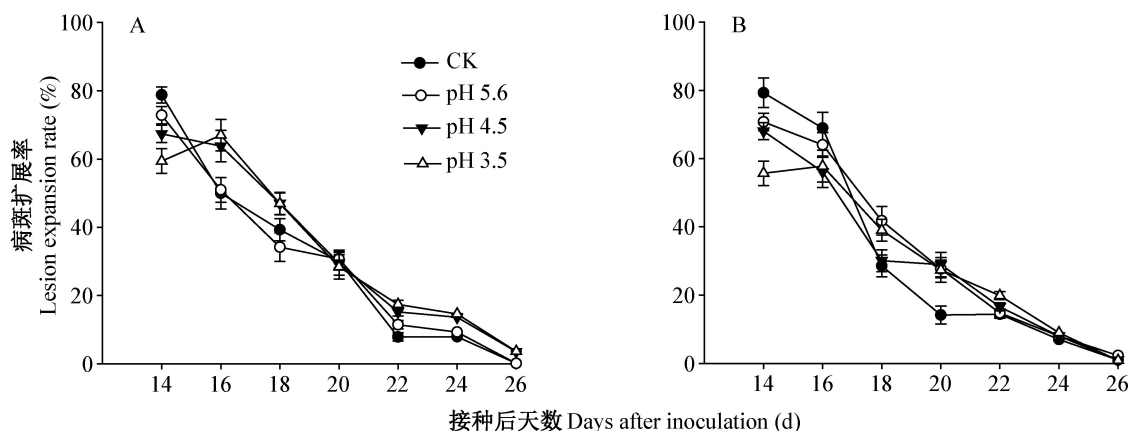


图4 模拟酸雨处理对条锈病菌生理小种CYR32(A)和CYR33(B)的病斑扩展率的影响

Fig. 4 Effects of different simulated acid rain on the lesion expansion rate of race CYR32 (A) and CYR33 (B) of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*

图中数据为平均数 $\pm$ 标准误。Data are mean $\pm$ SE.

2.2.4 模拟酸雨对小麦条锈病病斑产孢量的影响

模拟酸雨处理与对照相同,小麦条锈病菌生理小种CYR32和CYR33的病斑产孢量随着时间的延长均表现为先增长后降低的单峰曲线。与对照相比,同一时间点不同酸度模拟酸雨处理的2个小麦条锈病菌生理小种的病斑产孢量均有减少,与其对照相比均差异不显著;中度酸雨(pH 4.5)、弱酸雨(pH 5.6)和对照处理的2个小麦条锈病菌生理小种的病斑产孢量高峰出现在接种后18 d,生理小种CYR32的病斑产分别为 1.23×10^6 、 1.48×10^6 和 $1.75 \times$

10^6 ,生理小种CYR33的病斑产孢量分别为 1.28×10^6 、 1.46×10^6 和 1.84×10^6 ;强酸雨(pH 3.5)处理的2个小麦条锈病菌生理小种的病斑产孢量高峰迟于对照处理(图5)。

2.2.5 模拟酸雨对小麦条锈病病情的影响

不同酸度模拟酸雨处理的小麦条锈病病情指数和AUDPC差异显著($P < 0.05$)。经强酸雨(pH 3.5)处理后,小麦条锈菌生理小种CYR32和CYR33的病情指数与其它处理的均存在差异显著($P < 0.05$),表明强酸雨显著降低小麦条锈病的发生;生理小种

CYR32 经中度酸雨(pH 4.5)处理后的病情指数与对照差异显著($P<0.05$), 而 CYR33 在中度酸雨(pH 4.5)处理后的病情指数与对照差异不显著。弱酸雨(pH 5.6)处理后, 小麦条锈菌生理小种 CYR32 和

CYR33 病情指数与对照均无显著差异(图 6-A), 但是 2 个生理小种的 AUDPC 均显著低于对照($P<0.05$, 图 6-B)。表明不同酸度模拟酸雨对小麦条锈病的发生均有影响。

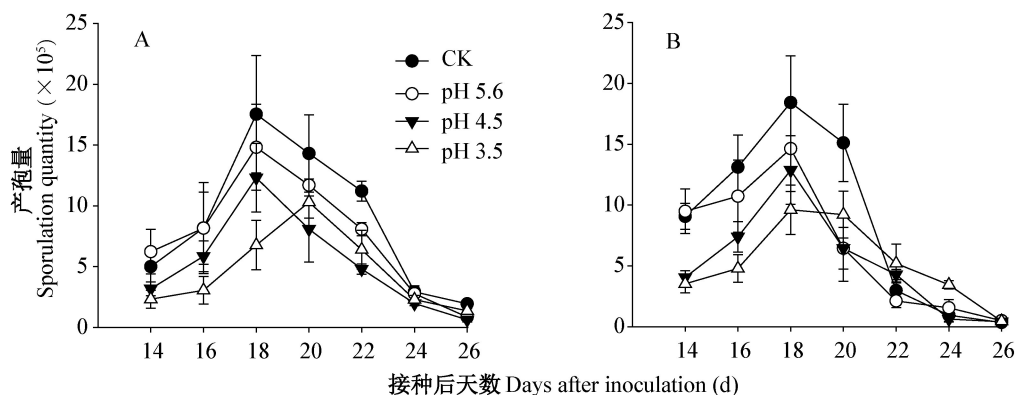


图5 模拟酸雨处理对条锈病菌生理小种 CYR32(A)和 CYR33(B)的病斑产孢量的影响

Fig. 5 Effects of different simulated acid rain on the sporulation quantity of race CYR32 (A) and CYR33 (B) of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici

图中数据为平均数±标准误。Data are mean±SE.

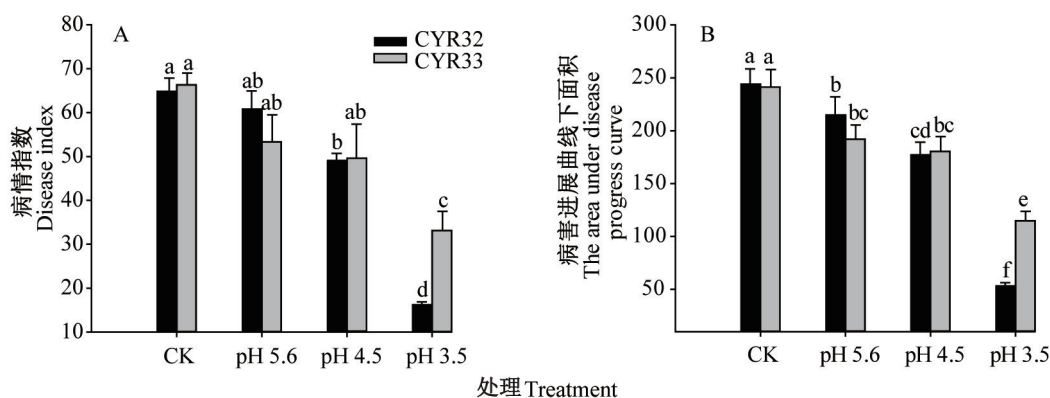


图6 模拟酸雨处理后小麦条锈病生理小种病情指数(A)和病害进展曲线下面积(B)

Fig. 6 Effects of different simulated acid rain on disease index (A) and AUDPC (B) of race CYR32 and CYR33 of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici

图中数据为平均数±标准误。不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

3 讨论

影响小麦条锈病菌夏孢子萌发的因素除了夏孢子本身的一些特性,如自我抑制因子、代谢物和萌发刺激物等(Staples & Macko, 1984),更重要的是外部环境因素,其中温度和湿度是最关键的因素(Rapilly, 1979; Chen et al., 2014),其次萌发液中含有的离子和孢子数量(Staples & Macko, 1984; 张永红等, 2006)、水化(张永红等, 2006)、紫外线强度(Cheng et al., 2014)以及空气污染(Sharp, 1967)等对孢子萌

发也有影响。本次研究明确了环境中酸雨对夏孢子萌发的影响,不同酸度的模拟酸雨对小麦条锈病菌夏孢子萌发的影响差异显著,随着酸雨强酸增强,小麦条锈病菌夏孢子萌发率下降。van Bruggen et al. (1986)以不同酸度(pH 为 2.8、3.4、4.0、4.6)的酸雾对茄链格孢 *Alternaria solani* 和致病疫霉 *Phytophthora infestans* 处理后观察分生孢子和孢子囊的萌发率,结果显示孢子和孢子囊萌发率也随着酸度值下降而降低。Martin et al. (1987)研究不同酸度的模拟酸雨对马铃薯晚疫病病菌 *Phytophthora infestans* 孢子萌发

的影响,结果显示马铃薯晚疫病菌对酸雨具有较强的耐受性,当模拟酸雨pH 3.0时,该病菌孢子囊萌发率最高,当模拟酸雨pH 3.6和pH 5.6时,游动孢子萌发率最高。由此可见,不同病害的病原菌对不同酸度的模拟酸雨耐受性是不同的。

本研究发现,小麦条锈病菌生理小种CYR33在中度酸雨(pH 4.5)处理6 h后,孢子萌发和生长明显受到抑制,在处理24 h后,萌发率与对照无显著差异,中度酸雨处理后的最终病情指数与对照无显著差异,推测小麦条锈病菌夏孢子在酸雨处理后受到一定程度的伤害,其自身的生理条件发生变化,适应一段时间后萌发侵染寄主,表明小麦条锈病菌夏孢子能承受一定酸度的酸雨,这种适应性能否在后代群体中表现有待进一步研究。Vosatka & Dodd (1998)发现适应酸性环境的丛枝菌根真菌*Acaulospora tuberculata*提高了对酸雨的耐受性。一定酸度的模拟酸雨对菌丝的生长有抑制作用,但是来源于酸性土壤的菌株外生菌丝的活性受到的抑制作用小于来源于中性土壤的菌株。

侵染概率是病原物的传播体着落于寄主体表后,在一定条件下侵染成功,引致发病的概率。本试验结果表明,小麦条锈病菌夏孢子在模拟酸雨处理后侵染概率差异显著,随着模拟酸雨酸度值下降,小麦条锈病菌的侵染概率也下降。同样,Shafer et al. (1985)发现樟疫霉*Phytophthora cinnamomi*的游动孢子侵染羽扇豆*Lupinus angustifolius* cv. Tiftblue也是随着模拟酸雨酸度值的下降,侵染概率降低。

在小麦-条锈病菌构成的病害体系中,酸雨不仅对条锈病菌产生影响,同时对寄主小麦也有影响,研究发现酸雨对小麦生长和产量有较大影响,抑制小麦的生长,减少生物量的积累(麦博儒等,2008;卞雅姣等,2013)。在酸雨胁迫下,当酸雨pH≤3.5时,叶面积和单位面积鲜叶质量明显下降,产量显著低于对照;pH<2.5时,植株高度明显降低,叶片表面可见明显损伤(麦博儒等,2008)。本研究未对接种前和接种后的小麦进行酸雨处理,需进一步开展相关试验,以揭示酸雨对小麦和条锈病菌互作影响。

参 考 文 献 (References)

Bian YJ, Huang J, Sun QS, Jiang D, Jiang HD, Zhou Q. 2013. Effects of different acidity acid rain on yield, protein and starch content and components in two wheat cultivars. *Acta Ecologica Sinica*, 33(15): 4623–4630 (in Chinese) [卞雅姣, 黄洁, 孙其松, 姜东, 江海东, 周琴. 2013. 模拟酸雨对小麦产量及籽粒蛋白质和淀

粉含量及组分的影响. *生态学报*, 33(15): 4623–4630]

Britton KO, Berrang P, Mavity E. 1996. Effects of pretreatment with simulated acid rain on the severity of dogwood anthracnose. *Plant Disease*, 80(6): 646–649

Campbell CL, Bruck RI, Sinn JP, Martin SB. 1988. Influence of acidity level in simulated rain on disease progress in four plant pathosystems. *Environmental Pollution*, 53(1/2/3/4): 219–234

Chen WQ, Wellings C, Chen XM, Kang ZS, Liu TG. 2014. Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Molecular Plant Pathology*, 15(5): 433–446

Cheng P, Ma ZH, Wang XJ, Wang CQ, Li Y, Wang SH, Wang HG. 2014. Impact of UV-B radiation on aspects of germination and epidemiological components of three major physiological races of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Crop Protection*, 65: 6–14

Goyer RA, Bachmann J, Clarkson TW, Ferris BG Jr., Graham J, Mushak P, Perl DP, Rall DP, Schlesinger R, Sharpe W, et al. 1985. Potential human health effects of acid rain: report of a workshop. *Environmental Health Perspectives*, 60: 355–368

Larssen T, Lydersen E, Tang D, He Y, Gao J, Liu H, Duan L, Seip HM, Vogt RD, Mulder J, et al. 2006. Acid rain in China. *Environmental Science & Technology*, 40(2): 418–425

Li ZQ, Zeng SM. 2002. Wheat rusts in China. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [李振岐, 曾士迈. 2002. 中国小麦锈病. 北京: 中国农业出版社]

Liu P, Xia F, Pan JY, Chen YP, Peng HM, Chen SH. 2011. Discuss on present situation and countermeasures for acid rain prevention and control in China. *Environmental Science and Management*, 36(12): 30–35 (in Chinese) [刘萍, 夏菲, 潘家永, 陈益平, 彭花明, 陈少华. 中国酸雨概况及防治对策探讨. *环境科学与管理*, 36(12): 30–35]

Luo Y, Zeng SM. 1988. Component analysis of slow-rusting resistance of wheat cultivars to stripe rust (*Puccinia striiformis*) (I). *Scientia Sinica (Series B)*, 31: 217–227

Mai BR, Zheng YF, Liang J, Liu X, Li L, Zhong YC. 2008. Effects of simulated acid rain on leaf photosynthate, growth, and yield of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(10): 2227–2233 (in Chinese) [麦博儒, 郑有飞, 梁骏, 刘霞, 李璐, 钟燕川. 模拟酸雨对小麦叶片同化物、生长和产量的影响. 2008. *应用生态学报*, 19(10): 2227–2233]

Martin SB, Campbell CL, Bruck RI. 1987. Influence of acidity level in simulated rain on disease progress and sporangial germination, infection efficiency, lesion expansion, and sporulation in the potato late blight system. *Phytopathology*, 77(6): 969–974

Okochi H, Kameda H, Hasegawa SI, Saito N, Kubota K, Igawa M. 2000. Deterioration of concrete structures by acid deposition: an assessment of the role of rainwater on deterioration by laboratory and field exposure experiments using mortar specimens. *Atmospheric Environment*, 34(18): 2937–2945

Rapilly F. 1979. Yellow rust epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 17: 59–73

Shafer SR, Bruck RI, Heagle AS. 1985. Influence of simulated acidic rain on *Phytophthora cinnamomi* and *Phytophthora* root rot of

- blue lupine. *Phytopathology*, 75(9): 996–1003
- Sharp EL. 1967. Atmospheric ions and germination of uredospores of *Puccinia striiformis*. *Science*, 156(3780): 1359–1360
- Shriner DS. 1978. Effects of simulated acidic rain on host-parasite interactions in plant diseases. *Phytopathology*, 68(2): 213–218
- Singh A, Agrawal M. 2008. Acid rain and its ecological consequences. *Journal of Environmental Biology*, 29(1): 15–24
- Staples RC, Macko V. 1984. Germination of urediospores and differentiation of infection structures.//Bushnell WR, Roelfs AP. 1984. The cereal rusts. Vol 1. Origins, specificity, structure, and physiology. Orlando: Academic Press, pp. 255–289
- van Bruggen AHC, Osmeloski JF, Jacobson JS. 1986. Effects of stimulated acidic mist on germination of *Alternaria solani* and *Phytophthora infestans* *in vitro* and their infection efficiency and sporulation on potato. *Phytopathology*, 77(4): 564–570
- Vosatka M, Dodd JC. 1998. The role of different arbuscular mycorrhizal fungi in the growth of *Calamagrostis villosa* and *Deschampsia flexuosa*, in experiments with simulated acid rain. *Plant and Soil*, 200(2): 251–263
- Yu ZD, Li XX, Guo ZQ, Ren ZZ, Cao ZM, Ma EJ, Gao ZH, Song XB. 2010. Effect of temperature and leaf extractions on the germination of *Melampsora larici-populina* Klebon uredospore. *Journal of Northeast Forestry University*, 38(7): 109–112 (in Chinese) [余仲东, 李秀信, 郭志青, 任争争, 曹支敏, 马娥娇, 高智辉, 宋晓彬. 2010. 温度和叶表化学物质对松杨栅锈菌夏孢子萌发的影响. 东北林业大学学报, 38(7): 109–112]
- Yuan ZW. 1988. Acid rain and the occurrence of diseases in *Pinus massoniana*. *Journal of Ecology*, 7(5): 50–52 (in Chinese) [袁志文. 1988. 酸雨与马尾松病害的发生调查初报. 生态学杂志, 7(5): 50–52]
- Zadoks JC. 1971. Systems analysis and dynamics of epidemics. *Phytopathology*, 61: 600–610
- Zeng SM, Luo Y. 2006. Long-distance spread and interregional epidemics of wheat stripe rust in China. *Plant Disease*, 90(8): 980–988
- Zhang XM, Chai FH, Wang SL, Sun XZ, Han M. 2010. Research progress of acid precipitation in China. *Research of Environmental Sciences*, 23(5): 525–532 (in Chinese) [张新民, 柴发合, 王淑兰, 孙新章, 韩梅. 2010. 中国酸雨研究现状. 环境科学研究, 23(5): 527–532]
- Zhang XY, Jiang H, Jin JX, Xu XH, Zhang QX. 2012. Analysis of acid rain patterns in northeastern China using a decision tree method. *Atmospheric Environment*, 46: 590–596
- Zhang YH, Huang LL, Kang ZS. 2006. Study on germination condition of urediospores of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Mycosystema*, 25(4): 656–659 (in Chinese) [张永红, 黄丽丽, 康振生. 2006. 小麦条锈菌 CY32 夏孢子萌发研究. 菌物学报, 25(4): 656–659]

(责任编辑:张俊芳)