

何建杨,吴鑫雨,周 懂,等. 间作调控小麦抗氧化酶活性及丙二醛含量降低小麦白粉病发生率[J]. 江苏农业科学,2023,51(11):113–119.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2023.11.016

间作调控小麦抗氧化酶活性及丙二醛含量降低小麦白粉病发生率

何建杨,吴鑫雨,周 懂,李海叶,刘振洋,肖靖秀

(云南农业大学资源与环境学院,云南昆明 650201)

摘要:小麦蚕豆间作可以降低小麦白粉病 (*Erysiphe graminis* f. sp. *tritici*),但不同氮水平下间作提高小麦抗性的机制尚不清楚。通过盆栽试验,设置 2 种种植模式[单作小麦 (MW) 和小麦蚕豆间作 (IW)]和 3 个施氮水平[75、150、225 mg/kg (分别为 N1、N2、N3)],分别于白粉病菌接种 0 h、12 h、1 d、2 d、3 d、6 d、10 d 调查小麦白粉病发病率及病情指数,同时测定单作小麦叶片的过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性和丙二醛 (MDA) 含量。结果表明,只有种植模式、氮水平与种植模式交互作用对小麦白粉病发病率有显著影响,但随着氮水平增加,小麦白粉病发病率和病情指数也增加。在病原菌接种后 3 d 单作小麦出现白粉病病斑,病原菌接种后 5~10 d,在 3 个氮水平下,间作分别降低小麦白粉病发病率和病情指数 29%、24%、21% 和 23%、21% (N3 水平除外)。病原菌接种后单作小麦叶片 POD、CAT 和 SOD 活性明显提高,随后降低;病原菌接种后 12 h,3 个氮水平下间作叶片 POD 活性较单作分别提高 56%、49%、29%,接种后 10 d 时,N2、N3 水平下间作较单作分别提高 31% 和 22%;接种 1 d 后,N1、N2 下间作小麦叶片的 CAT 活性较单作提高 18%、28%;但 3 个氮水平下,单作小麦叶片 SOD 活性未见规律性差异。在 N1 水平下,病原菌侵染 0~2 d 后,间作的 MDA 含量表现为间作低于单作;N2、N3 水平下,0~4.5 d 时间作的 MDA 含量低于单作。说明间作调控病原菌侵染初期小麦抗氧化酶活性及膜脂过氧化程度是提高小麦抗白粉病的机制之一。

关键词:小麦蚕豆间作;白粉病;抗氧化酶活性;丙二醛含量;发病率;病情指数

中图分类号:S435.121.4⁺6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2023)11–0113–06

小麦白粉病是由专性寄生真菌 *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* 引起的一种重要的真菌病害,流行年份导致小麦产量损失严重^[1],是威胁我国小麦生产的主要病害之一^[2]。白粉病可在小麦的各个生长阶段侵染危害,发病严重时会导致小麦籽粒形成空粒、瘪粒,甚至腐烂,千粒质量随之下降^[3]。化学防治不能满足农业绿色发展的需求^[4],因此,培育抗性品种和生物防治已成为防治小麦白粉病的主要途径^[5–7]。

生物多样性是植物病害流行的天然屏障,可以持续控制作物病害的发生^[8]。Boudreau 等对 200 多

组间作体系的研究发现,间作改变了田间小气候、寄主植物的形态学和生理学结构,直接抑制或者降低了病害的发生^[9]。Zhang 等通过 meta 分析也发现,不同氮水平下豆科禾本科间作可以降低作物 45% 的病害率,尤其在病害流行的早期,间作有效地控制了小麦锈病和白粉病的发生^[10]。此外,氮素管理可以有效调节植物病害的发生^[11],尤其是专性寄生物(白粉病菌)的侵染通常与植物氮素营养水平密切相关^[12]。因此,在间作系统中,虽然间作能有效降低小麦病害和病情指数^[13],但病害也会随施氮量增加而增加^[14]。但与单一种植相比,间作通常可以调控小麦体内氮、磷、钾等养分元素的吸收、累积和分配,从而降低病害的发生^[15–16]。

植物体内超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 等的活性作为植物体自我保护机制,当植物受到生物或非生物胁迫时,作物会产生大量活性氧来抑制膜脂过氧化^[17],CAT 酶是清除活性氧过程中的主要抗氧化酶^[18],丙二醛 (MDA) 含量的积累造成细胞及膜的伤害,可以用来

收稿日期:2022–08–13

基金项目:国家自然科学基金(编号:32060718、31760611);云南省高层次人才支持计划“青年拔尖人才”项目(编号:YNWR–QNBj–2019–130)。

作者简介:何建杨(1995–),男,云南曲靖人,硕士研究生,主要从事养分资源高效利用研究。E–mail:192027343@qq.com。

通信作者:肖靖秀,博士,教授,主要从事植物营养与病害控制研究。

E–mail:xiaojingxiuxj@126.com。

对膜脂受损程度进行检测,反映细胞膜脂过氧化程度的强弱^[19]。通过研究发现,在霜霉病侵染后抗病品种叶片中 SOD 活性与霜霉病抗性呈正相关^[20],接种炭疽病菌后,POD 活性显著升高^[21],西瓜幼苗接种枯萎病菌后幼苗根部 POD、CAT 活性显著增强^[22],不同抗性品种的月季受到白粉病侵染后,叶片中抗氧化酶活性增强及 MDA 含量也显著升高^[23]。

综上所述,除了养分能够调控病害发生以外,作物体内自身的抗性物质变化也跟病害发生密切相关,大量研究证实间作能有效降低小麦病害的发生,前人从间作调控矿质营养、田间气候等角度解析了间作降低小麦病害发生的机制^[15]。但在小麦蚕豆间作体系中的研究较少,所以本研究从小麦蚕豆间作对小麦白粉病防控的影响展开研究。探讨在间作与氮素调控下单间作小麦抗氧化酶活性及丙二醛含量对小麦白粉病病原菌侵染的响应,旨在为深入了解间作降低病害发生提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与试验材料

盆栽试验于 2020 年 9 月 30 日开始,在云南农业大学植物营养系实验室完成,供试土壤采自云南农业大学后山农场,其基本理化性状如下:有机质含量为 26.46 g/kg、全氮含量为 2.89 g/kg、碱解氮含量为 92 mg/kg、速效磷含量为 16 mg/kg、速效钾含量为 116 mg/kg、pH 值为 5.7。

小麦白粉病菌菌种:混合型白粉病菌,来自四川省广泛流行的白粉病菌株,由四川省农业科学院提供;在恒温恒湿培养箱(温度为 18 ℃,湿度为 60%)中连续种植小麦,到小麦三叶期接种白粉病菌进行菌种扩繁。

试验供试品种:小麦(*Triticum aestivum* L.)品种是由江苏省农业科学院提供的易感白粉病的扬麦 15;蚕豆(*Vicia faba* L.)品种为玉溪大粒豆。

试验供试肥料:尿素(含 N 46.0%)、普通过磷酸钙(含 P₂O₅ 16.0%)、硫酸钾(含 K₂O 50.0%)。

1.2 试验设计与管理

试验设计为 2 因素试验,因素 1 为种植模式,设小麦单作(MW),小麦蚕豆间作(IW);因素 2 为 3 个施氮水平(N1、N2、N3),小麦施氮量分别为 75、150、225 mg/kg 干土,共 6 个处理,每个处理 3 次重复,7 次采样,共计 126 盆;盆栽试验使用 230 mm × 130 mm 的塑料花盆。单作小麦每盆 6 株,分 2 行排

列,行距为 10 cm,株距为 5 cm;小麦与蚕豆间作,小麦、蚕豆各种 1 行,行距为 10 cm,小麦株距为 5 cm,每盆 3 株,蚕豆株距 10 cm,每盆 2 株。

盆栽试验开始前挑选颗粒饱满、大小均匀且无病虫害的小麦种子避光催芽 3 d。

试验前每盆称 1.5 kg 土,倒入各处理称好的肥料,拌匀后转入试验花盆中,标记处理后将花盆随机摆放在培养架上;每隔 2 d 浇 1 次水,每盆浇水 200 mL。

1.3 病菌接种

出苗 15 d 后开始接种,挑选恒温恒湿培养箱中前期培养长势相同的感病小麦,取布满白粉病病斑的叶片中段 5 cm,每 3 株试验小麦用 1 段感病叶片来摩擦接种。为保证分生孢子活性,剪 1 段接种 1 次,逐盆快速接种^[24]。

1.4 样品采集分析

小麦叶片采集:在小麦白粉菌接种后的 0 h(接种前采样)、12 h、1 d、2 d、3 d、6 d 和 10 d 时分别采集新鲜叶片,混匀后每盆叶片分装入冻存管中,管壁做标记后立即存放在 -80 ℃ 低温冰箱中,备用。

样品分析:小麦叶片的 POD、CAT、SOD 活性和 MDA 含量分别使用 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量检测试剂盒(苏州格锐思生物技术有限公司)测定^[25]。

1.5 小麦白粉病病害调查

于小麦白粉病菌接种后各时期采样叶片进行调查,依据 NY/T 613—2002《小麦条锈病测报调查规范》的 8 级严重度分级标准记载病级^[26],计算发病率和病情指数,计算公式如下:

发病率 = 发病叶片数/调查总叶片数 × 100%;

病情指数 = \sum (各级病叶数 × 该病级值)/(总叶片数 × 发病最重级代表数值) × 100。

1.6 数据处理与方差分析

数据采用 Excel 软件进行处理。采用 SPSS 25.0 软件分别对单间作条件下白粉病菌侵染对小麦发病率和病情指数进行单因素和双因素分析,对病原菌接种后小麦叶片氧化酶活性进行数据分析;用最小显著差异法(Duncan's)分析各处理的差异显著性($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同氮水平条件下白粉病菌侵染单间作小麦的发病率和病情指数

由表 1 可知,在病菌接种后不同氮水平对小麦

白粉病的发病率无显著性影响,种植模式及氮水平和种植模式交互作用对小麦白粉病的发病率有显著影响,而氮水平和种植模式均对小麦白粉病的病情指数无显著性影响。但是随着氮水平的提高,小麦白粉病发病率和病情指数随之提高。

在本试验条件下,病原菌接种后 3 d 单间作小麦叶片出现白粉病病斑,接种后 3~4 d,单间作小麦叶片 DI 和 DSI 均无明显差异。由图 1 可知,从接种后 5 d 开始,3 个施氮水平下(除了接种后 9 d 时的 N3 水平),间作显著降低了小麦白粉病的 DI,N1、N2、N3 水平下降幅平均分别为 29%、24% 和 21%。

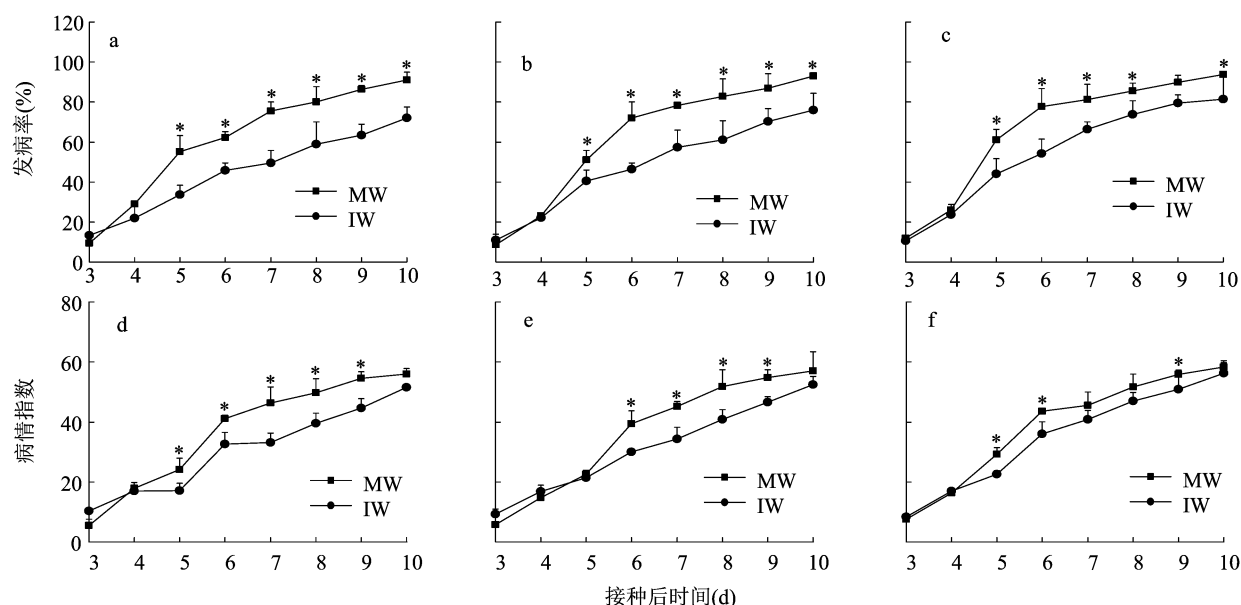
N1、N2 水平下,病原菌接种后 5~9 d,与单作

相比,间作显著降低了小麦叶片的 DSI,降幅平均为 23% 和 21%;N3 水平下,DSI 在 5、6、9 d 间作较单作的降幅分别为 23%、17%、9%。

表 1 不同氮水平下白粉病菌侵染对单间作小麦叶片发病率和病情指数的影响

因子	发病率(%)	病情指数
氮水平	ns	ns
种植模式	**	ns
氮水平×种植模式	*	ns

注:表中 ns 表示不同处理间小麦发病率与病情指数无显著差异;“*”“**”分别表示不同处理间小麦 DI 与 DSI 在 0.05、0.01 水平存在显著差异。



图中 a、b、c、d、e 和 f 分别表示发病率、病情指数的 N1、N2、N3 等 3 个氮水平,“*”表示同一时间和施氮水平单间作小麦叶片 DI 与 DSI 差异显著;MW 表示单作小麦;IW 表示间作小麦

图 1 不同施氮水平下白粉病菌侵染对单间作小麦叶片 DI 与 DSI 的影响

2.2 不同施氮水平下,白粉病菌侵染对单间作小麦叶片抗氧化酶活性的影响

由表 2 可知,SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量受氮水平和种植模式的调控,但仅 SOD 活性受氮水平×种植模式的显著影响。

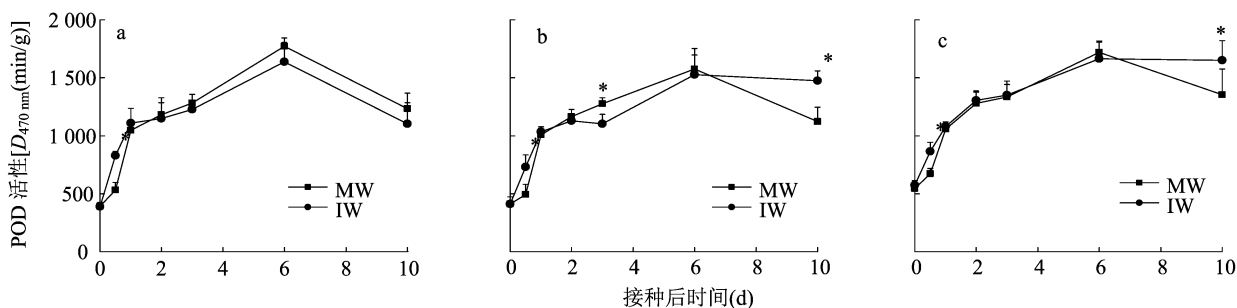
表 2 在不同氮水平接种后各时期抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响

因子	SOD	POD	CAT	MDA
氮水平	***	***	***	***
种植模式	***	***	***	**
氮水平×种植模式	***	ns	ns	ns

注:表中 ns 表示单间作模式下不同氮水平接种后与抗氧化酶活性和丙二醛含量无显著差异;“*”“**”“***”分别表示单间作模式下不同氮水平接种后与抗氧化酶活性和丙二醛含量在 0.05、0.01、0.001 水平存在显著差异。

2.2.1 过氧化物酶 由图 2 可知,小麦白粉病病原菌接种后单间作小麦叶片 POD 活性均明显提高,病原菌接种后 6 d 单间作小麦叶片 POD 活性达到最高。在 N1、N2、N3 水平下,病原菌接种后 12 h,间作小麦叶片酶活性较单作分别提高 56%、49%、29%;但病原菌接种后 1~6 d,单间作小麦叶片 POD 活性无显著差异(除了在 N2 水平下接种后 3 d);病原菌接种后 10 d,在 N2、N3 水平下,间作小麦叶片酶活性较单作分别提高 31%、22%。

2.2.2 过氧化氢酶 由图 3 可知,小麦白粉病病原菌接种后单间作小麦叶片 CAT 活性均明显提高,病原菌接种后 2 d 单间作小麦叶片 CAT 活性达到最高。在 N1、N2 水平下,病原菌接种后 1 d,间作小麦



“*”表示同一时间单间作小麦叶片抗氧化酶活性差异显著；图中a、b和c分别表示N1、N2、N3等3个氮水平；图3、图4同

图2 接种病菌后在不同氮水平下单间作小麦 POD 活性

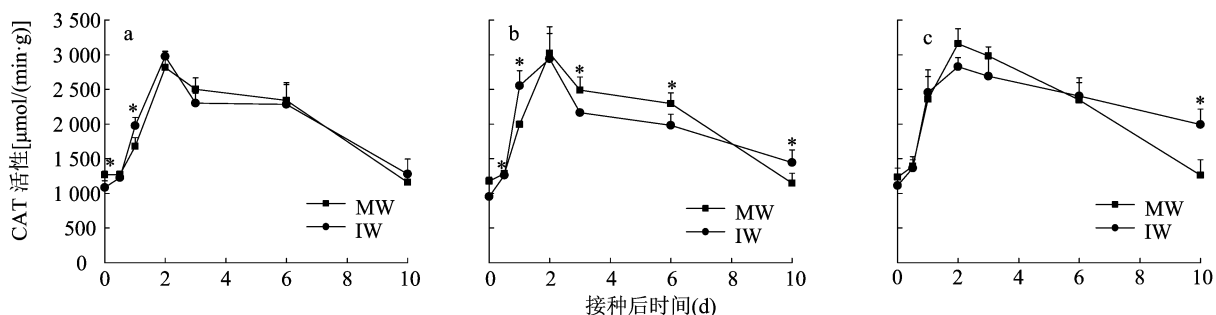


图3 接种病菌后在不同氮水平下单间作小麦 CAT 活性

叶片 CAT 活性较单作分别提高 18% 和 28%；病原菌接种后 2~8 d, 单间作小麦叶片 CAT 活性无显著差异(除了在 N2 水平下接种后 3、6 d)；病原菌接种后 10 d, 在 3 个氮水平下, 间作小麦叶片酶活性较单作均有提高, 且在 N2、N3 水平下, 分别提高 26%、58%。

2.2.3 超氧化物歧化酶 由图 4 可知, 小麦白粉病病原菌接种后单间作小麦叶片 SOD 活性均明显提

高(除间作在 6 d 以后较低), 单间作小麦叶片 SOD 酶活性分别在病原菌接种后 2~3 d 达到最高, N2、N3 水平下分别在接种后 1.0~2.5 d 和 2.5~5.0 d 时间作酶活性比单作高且分别在 2、3 d 时提高 37% 和 61%, 其他时间均为单作比间作酶活性高。在 3 个氮水平下, 接种后 6、10 d 时, 间作较单作酶活性分别降低 50%、42%；65%、59%；38%、49%。

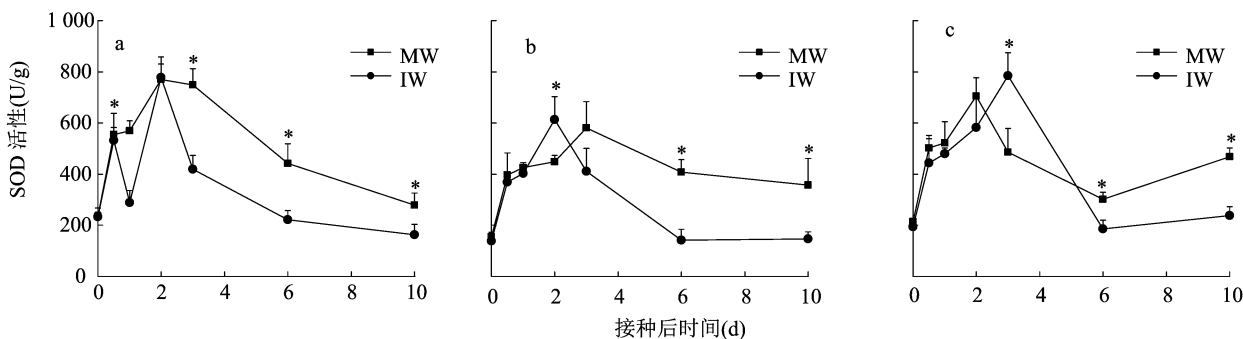


图4 接种病菌后在不同氮水平下单间作小麦 SOD 活性 ($P < 0.05$)

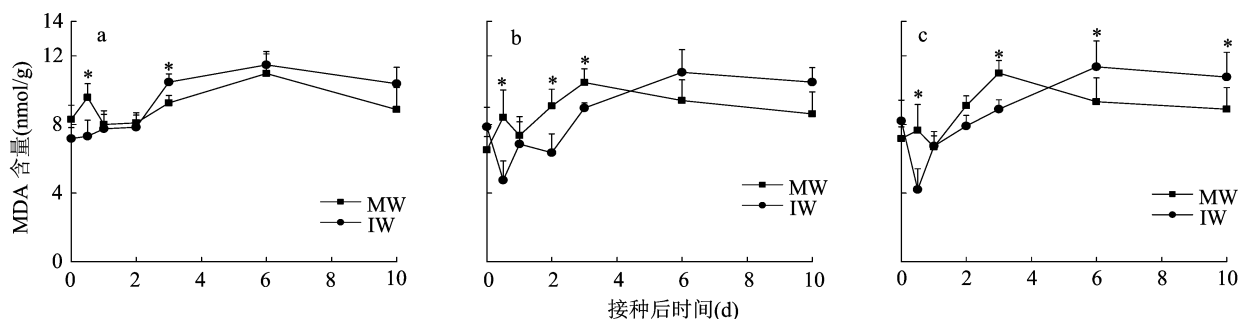
2.3 病菌侵染对小麦叶片丙二醛含量的影响

MDA 含量受到氮水平、种植模式的影响, 但不受氮水平和种植模式交互作用的影响。由图 5 可知, 小麦白粉病病原菌接种后 0~2 d 时 N1 水平和 0~5 d 时 N2、N3 水平间作的 MDA 含量较单作低, 在 N1 水平下 12 h 间作较单作降低了 24%；N2、N3 水平下分别在 12 h、2 d (N3 水平除外) 和 3 d 间作

含量较单作降低 43%、30%、14%、45%、19%。其他时间均为间作含量高于单作, 接种后 6、10 d, N3 水平间作含量较单作分别提高 22%、21%。

3 结论与讨论

在田间试验条件下, 前人研究证实了间作可以明显降低小麦锈病^[16]和白粉病^[4]的发生, 与单作相



* 代表同一时间单间作小麦叶片丙二醛含量差异显著；图中 a、b 和 c 分别代表 N1、N2 和 N3 等 3 个氮水平

图5 接种病菌后在不同氮水平下单间作小麦 MDA 含量

比间作降低了蚕豆锈病^[27]和赤斑病^[28]的发病率和病情指数,但随着施氮量的增加,小麦白粉病和锈病的发病率和病情指数也显著增强^[29],但间作的控病效果不受氮水平的影响。本研究与前人研究结果相同,不同氮水平下间作均可以降低小麦白粉病的发生,但在 N3 水平下单间作病情指数无差异。Zhang 等通过 meta 分析表明,间作控病效果往往在病害发生前期更为突出,但在本试验条件下却发现人为接种,间作不能有效抑制病原菌的定殖,但是能缓解病害的侵染和降低病害危害程度^[10]。

POD、SOD、CAT 等抗氧化酶活性与抗病性呈正相关关系,是植物体内重要的活性氧清除酶^[30],主要作用是使活性氧维持在正常水平,从而防止活性氧对细胞膜的毒害^[31]。POD 酶是抵御病原体入侵和扩展的重要防御措施^[32]。本研究中,病菌接种后 0~24 h 和 6~10 d 时, N2、N3 水平下间作的 POD 活性高于单作,这一结果与前人研究结果一致,但笔者发现在 N2 和 N3 水平下,病害发生高峰期时,间作的 POD 活性很高,至于其发挥什么样的作用机制,目前还不清楚,后续还需深入探讨。SOD 活性与植物体受到生物或非生物胁迫作出的抗性反应有关,主要作用是将 O_2^- 歧化为 H_2O_2 和 O_2 ^[33],而 CAT 是清除植物体内 H_2O_2 最有效的酶^[34]。CAT 和 SOD 活性在病菌侵染后的前期迅速升高而降低植物体内 H_2O_2 和 O_2^- 等活性氧的积累,中后期酶活性降低是由于小麦叶片中抗氧化体系功能随病害加重而降低,从而导致体内活性氧积累,加剧膜脂过氧化作用和破坏细胞膜结构,导致抵御病原菌入侵能力减弱^[35],本研究中 CAT 和 SOD 活性的状况与前人研究结果一致;有研究发现间作模式下的 CAT 和 SOD 活性高于单作,如玉米大豆间作中,间作玉米的 CAT 和 SOD 活性高于单作^[36]、茄子与甜菜间作在镉 (Cd) 胁迫下,间作可以提高甜菜 CAT、

SOD 活性,降低 Cd 毒性^[37],本研究中 CAT 活性均在 N1、N2 水平下病原菌接种后 0~2 d 和 8~10 d 时,间作高于单作;SOD 活性分别在 N2、N3 水平下病原菌接种后分别在 1.0~2.5 d 和 3~5 d 时间作高于单作,说明在不同氮水平下间作调控了小麦抗氧化酶活性以抵御病害的侵染。

MDA 作为膜脂过氧化的产物之一,与膜脂过氧化的程度有关^[38]。研究发现,在逆境或生物胁迫下间作 MDA 含量低于单作,如一定范围 Cu^{2+} 胁迫条件下,玉米豌豆间作中间作玉米的 MDA 含量较单作降低^[17],茄子与大蒜间作,间作大蒜 MDA 含量低于单作^[39]。本试验条件下,3 个氮水平下病原菌接种后 0~3 d,间作小麦叶片 MDA 含量低于单作。但是在病害发生的后期(接种后 4~10 d),间作 MDA 含量高于单作。通常情况下 MDA 的含量反映植物细胞有害物质积累程度,其含量越高表示细胞膜受损程度越大^[40],本研究条件下病害侵染后期间作小麦叶片 MDA 含量高于单作,其具体作用机制如何尚不清楚,与病害发生的关系也有待进一步明确。

盆栽试验条件下,小麦白粉病的发生受氮水平和种植模式的影响,间作可以有效降低小麦白粉病的发病率和病情指数。3 个氮水平下,白粉病病菌接种 12 h 后,间作提高了 POD 活性 29%~56%, N1、N2 水平下,病菌接种 24 h,间作提高 CAT 活性 18%~28%;0~48 h 间作较单作降低了 MDA 含量。研究结果表明,小麦蚕豆间作可以有效调控小麦叶片 POD 和 CAT 活性及膜脂过氧化程度,降低小麦白粉病的发生。

参考文献:

- [1] Morgounov A, Tufan H A, Sharma R, et al. Global incidence of wheat rusts and powdery mildew during 1969—2010 and durability of resistance of winter wheat variety Bezostaya 1[J]. European Journal of Plant Pathology, 2012, 132(3): 323—340.

- [2] 曹廷杰,陈永兴,李 丹,等. 河南小麦新育成品种(系)白粉病抗性鉴定与分子标记检测[J]. 作物学报,2015,41(8):1172 – 1182.
- [3] 王晓宇,冯 伟,王永华,等. 小麦白粉病严重度与植株生理性状及产量损失的关系[J]. 麦类作物学报,2012,32(6):1192 – 1198.
- [4] 武英鹏,原宗英,刘敏捷,等. 小麦抗感品种间作和混种对白粉病的控制效果[J]. 麦类作物学报,2021,41(5):646 – 651.
- [5] 杨美娟,黄坤艳,韩庆典. 小麦白粉病及其抗性研究进展[J]. 分子植物育种,2016,14(5):1244 – 1254.
- [6] 王奥霖,赵亚男,孙超飞,等. 小麦不同抗性品种对 6 种杀菌剂防治小麦白粉病效果的影响[J]. 植物保护,2021,47(6):285 – 290.
- [7] 赵 磊,孙振宇,黄 冲,等. 小麦品种混种对条锈病控制效果及产量影响的研究[J]. 中国农业大学学报,2010,15(5):49 – 54.
- [8] Boudreau M A, Shew B B, Andracko L E D. Impact of intercropping on epidemics of groundnut leaf spots: defining constraints and opportunities through a 7 – year field study [J]. Plant Pathology, 2016, 65(4):601 – 611.
- [9] Boudreau M A. Diseases in intercropping systems [J]. Annual Review of Phytopathology, 2013, 51(1):499 – 519.
- [10] Zhang C C, Dong Y, Makowski D, et al. Intercropping cereals with faba bean reduces plant disease incidence regardless of fertilizer input: a meta – analysis [J]. European Journal of Plant Pathology, 2019, 154(4):931 – 942.
- [11] 吴凤芝,周新刚. 不同作物间作对黄瓜病害及土壤微生物群落多样性的影响[J]. 土壤学报,2009,46(5):899 – 906.
- [12] Dordas C. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture: a review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2008, 28(1):33 – 46.
- [13] 朱锦惠,郭增鹏,董 坤,等. 间作系统氮调控对小麦氮钾营养及条锈病发生的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020, 28(2):236 – 244.
- [14] 陈远学,李 隆,汤 利,等. 小麦 || 蚕豆间作系统中施氮对小麦氮营养及条锈病发生的影响[J]. 核农学报,2013,27(7):1020 – 1028.
- [15] 朱锦惠,董 艳,肖靖秀,等. 小麦与蚕豆间作系统氮肥调控对小麦白粉病发生及氮素累积分配的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12):3985 – 3993.
- [16] 肖靖秀,郑 毅,汤 利,等. 小麦蚕豆间作系统中的氮钾营养对小麦锈病发生的影响[J]. 云南农业大学学报,2005,20(5):640 – 645.
- [17] 王晓维,黄国勤,徐健程,等. 铜胁迫和间作对玉米抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2014,33(10):1890 – 1896.
- [18] 刘一鸣,杨智仙,董 艳. 对羟基苯甲酸胁迫间作对蚕豆枯萎病发生和根系抗氧化酶活性的影响[J]. 核农学报,2017,31(5):987 – 995.
- [19] Weismann D, Hartvigsen K, Lauer N, et al. Complement factor H binds malondialdehyde epitopes and protects from oxidative stress [J]. Nature, 2011, 478(7367):76 – 81.
- [20] 丁九敏,高洪斌,刘玉石,等. 黄瓜霜霉病抗性 with 叶片中生理生化物质含量关系的研究[J]. 辽宁农业科学,2005(1):11 – 13.
- [21] 李 丽,何雪梅,李昌宝,等. 炭疽病菌侵染对香蕉采后品质变化及抗病相关酶活性的影响[J]. 现代食品科技,2017,33(9):83 – 90.
- [22] 侯 茜,羊杏平,张 曼,等. 西瓜幼苗根系防御酶活性变化与枯萎病抗性的关系[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):147 – 149.
- [23] 闫亚杰,耿广琴,李 涛. 月季感染白粉病后叶片抗氧化酶活性与 MDA 含量的变化[J]. 甘肃科学学报,2010,22(3):68 – 71.
- [24] 韩庆典,胡晓君,黄坤艳,等. 小麦白粉病菌对小麦幼苗 MDA 含量及防御酶活性的影响[J]. 分子植物育种,2016,14(10):2803 – 2811.
- [25] Yang L, Zhou J H, Lai L M, et al. Evaluating physiological changes of grass and semishrub species with seasonality for understanding the process of shrub encroachment in semiarid grasslands [J]. Functional Plant Biology, 2020, 47(7):628 – 638.
- [26] 中华人民共和国农业部. 小麦白粉病测报调查规范:NY/T 613—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [27] 郭增鹏,董 坤,朱锦惠,等. 施氮和间作对蚕豆锈病发生及田间微气候的影响[J]. 核农学报,2019,33(11):2294 – 2302.
- [28] 鲁 耀,郑 毅,汤 利,等. 施氮水平对间作蚕豆锰营养及叶赤斑病发生的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2):425 – 431.
- [29] Chen Y X, Zhang F S, Tang L, et al. Wheat powdery mildew and foliar N concentrations as influenced by N fertilization and belowground interactions with intercropped faba bean [J]. Plant and Soil, 2007, 291(1/2):1 – 13.
- [30] 左进华,陈安均,孙爱东,等. 番茄果实成熟衰老相关因子研究进展[J]. 中国农业科学,2010,43(13):2724 – 2734.
- [31] 宋培玲,张 键,郝丽芬,等. 不同抗性油菜品种接种黑胫病菌防御酶活性变化研究[J]. 华北农学报,2015,30(2):110 – 115.
- [32] Weissinger H, Gosch C, Abdel – Fattah H, et al. Peroxidase activity in roots and root exudates of strawberry – linked to the resistance to root pathogens [J]. Mitteilungen Klosterneuburg, 2013, 63(4):208 – 212.
- [33] Boonsiri K, Ketsa S, van Doorn W G. Seed browning of hot peppers during low temperature storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(3):358 – 365.
- [34] Afzal F, Khurshid R, Ashraf M, et al. Reactive oxygen species and antioxidants in response to pathogens and wounding [M]//Oxidative damage to plants. Amsterdam:Elsevier, 2014:397 – 424.
- [35] Mandal S, Mitra A, Mallick N. Biochemical characterization of oxidative burst during interaction between *Solanum lycopersicum* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2008, 72(1/2/3):56 – 61.
- [36] 杨雪丽,吴吉英子,刘 凡,等. 大豆品种对间作玉米苗期根系生长及抗氧化特性的影响[J]. 四川农业大学学报,2021,39(1):11 – 18.
- [37] Wu C F, Liu J, Sun J, et al. Effects of intercropping with *Vigna radiata* and *Vigna umbellata* on antioxidant enzyme activity of *Cyphomandra betacea* seedlings under cadmium stress [J]. IOP

杨琦,刘思琪,李云仙,等. CYP74A2 在白粉菌诱导月季对甜菜夜蛾产生抗性中的功能及其生物信息学分析[J]. 江苏农业科学,2023,51(11):119-127. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.11.017

CYP74A2 在白粉菌诱导月季对甜菜夜蛾产生抗性中的功能及其生物信息学分析

杨琦,刘思琪,李云仙,杨发忠

(西南地区林业生物质资源高效利用国家林业与草原局重点实验室/西南林业大学,云南昆明 650233)

摘要:为明确 CYP74A2 基因在白粉菌诱导月季产生对甜菜夜蛾的抗性过程中的功能,并对 CYP74A2 作生物信息学分析,利用转录组测序获得的差异表达基因进行功能富集分析。结果表明, α -亚麻酸代谢产生的茉莉酸是白粉菌诱导月季产生对甜菜夜蛾抗性的主要挥发性成分之一,发现该通路中共有 5 个 CYP74A2 差异表达基因,分别是 LOC112173678、LOC112172343、LOC112172188、LOC112173396 和 LOC112169957。采用 qRT-PCR 验证 CYP74A2 基因的功能,利用 NCBI、KEGG 等数据库找到 CYP74A2 同源蛋白并结合 ExPASy-ProtParam、TMHMM、SignalP 6.1、MEME、SOPMA、SWISS-MODEL、MEGA 11 等在线工具或软件对 CYP74A2 进行生物信息学分析。通过 ExPASy-ProtParam 分析发现,CYP74A2 蛋白分子量都在 54.3 ku 左右,是一种稳定的亲水性蛋白。该类蛋白无跨膜结构和信号肽,亚细胞定位于细胞质和叶绿体中,少量分布于质膜和细胞核内。SOPMA 预测结果表明该类蛋白以 α -螺旋为主,SWISS-MODEL 对 CYP74A2 蛋白三维建模的结果与 SOPMA 预测结果一致。系统发育分析结果表明,月季 CYP74A2 蛋白与草莓 CYP74A2 蛋白亲缘性最近。MEME 对蛋白的保守基序分析结果表明,CYP74A2 蛋白具有底物识别位点 SRS-1、P450s 的保守序列、血红素结合域以及血红素结合域的 I 型螺旋。研究结果为探明 CYP74A2 基因的生物学功能及白粉菌诱导月季产生对甜菜夜蛾抗性的生物分子学机制提供了依据。

关键词:月季;白粉菌;甜菜夜蛾;CYP74A2;茉莉酸;生物信息学

中图分类号:S436.8⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)11-0119-09

月季(*Rosa chinensis* Jacq.)别称玫瑰、月季花、中国月季,在云南省的鲜切花生产中,切花月季占据了鲜切花产量的 40% 以上^[1-2]。甜菜夜蛾 [*Spodoptera exigua* (Hübner)] 和月季白粉菌 [*Podosphaera pannosa* (Wallr.:Fr.)] 是云南省月季种植过程中主要的有害生物^[3-4]。甜菜夜蛾是鳞翅目夜蛾科的一种杂食性害虫,其寄主植物达 170

多种。目前,还没有对甜菜夜蛾有效的生物防治,而长期使用化学试剂会导致土壤污染以及甜菜夜蛾耐药性的增强,据统计,甜菜夜蛾已对 38 种有效化学成分产生抗药性^[5]。

Karban 等研究发现,真菌病原体大丽轮枝菌 (*Verticillium dahliae*) 感染棉花幼苗后,二斑叶螨 (*Tetranychus urticae*) 的种群增长速度降低^[6]。这一结果表明,2 种高度无关的生物如果共享同一寄主,它们之间则可能发生强烈的相互作用,这揭开了由寄主植物介导的病虫互作关系的序章。该领域也成为国内外研究的热点^[7-9],但是截至目前,该领域的研究主要是从现象上阐明了共享寄主的病虫间存在着寄主植物介导的间接互作关系,而对于互作的生物分子学机制研究仍不清楚,特别是关于白粉

收稿日期:2022-08-03

基金项目:云南省农业联合项目(编号:202101BD070001-107);国家自然科学基金(编号:32060695、31560517、31160354)。

作者简介:杨琦(1997—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要研究方向为生物分子学研究。E-mail:814362076@qq.com。

通信作者:杨发忠,博士,副教授,主要研究方向为生物分子学研究。E-mail:yangfazhong105@163.com。

Conference series Earth and Environmental Science, 2019, 233 (4):042019.

[38] Wu W, Hua Y F, Lin Q L. Effects of oxidative modification on thermal aggregation and gel properties of soy protein by malondialdehyde[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(3):485-493.

[39] Wang M Y, Wu C N, Cheng Z H, et al. Growth and physiological changes in continuously cropped eggplant (*Solanum melongena* L.) upon relay intercropping with garlic (*Allium sativum* L.)[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6:262.

[40] 陈佳,孔治有,覃鹏. 加速老化处理对小麦种子膜透性、发芽率和丙二醛含量的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(3):50-53.