

硅对燕麦抗秆锈病及抗氧化特性的影响

李英浩^{1,2} 杨澳¹ 刘景辉¹ 田露² 米俊珍¹

(¹内蒙古农业大学农学院/内蒙古高校燕麦工程研究中心/燕麦内蒙古自治区工程实验室/内蒙古农业大学杂粮产业协同创新中心, 010019, 内蒙古呼和浩特; ²内蒙古自治区农牧业科学院, 010031, 内蒙古呼和浩特)

摘要 为探究硅对秆锈病菌侵染下燕麦叶片生理特性的影响,明确其提升燕麦秆锈病抗性的生理机制,以易感秆锈病的燕麦品种“坝蓂1号”为试验材料开展盆栽试验,分别设置CK(不施硅,不接种秆锈菌)、+Si-P(施硅,不接种秆锈菌)、-Si+P(不施硅,接种秆锈菌)和+Si+P(施硅,接种秆锈菌)4个处理,研究施用1.5 mmol/L硅对秆锈病菌侵染后燕麦叶片发病进程、活性氧含量和抗氧化酶活性等的影响。结果表明,施硅处理有效延缓了燕麦秆锈病的发病进程,且发病症状明显减轻;秆锈病菌侵染导致叶片 O_2^- 和过氧化氢含量迅速升高,同时叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等活性、丙二醛(MDA)含量及相对电导率迅速提升,抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性则迅速降低;在接种秆锈病菌后7 d内,施硅处理降低了叶片活性氧含量,同时提升了SOD、POD及CAT活性,降低了APX活性和MDA含量;在接种后11 d内,降低了叶片相对电导率。施硅增强了燕麦叶片的抗氧化防御能力,降低了膜脂过氧化程度,提高了燕麦对秆锈病的抗性。

关键词 硅; 燕麦; 秆锈病; 活性氧; 抗氧化酶

燕麦(*Avena sativa* L.)是营养与保健谷物,其籽粒富含蛋白质、维生素及 β -葡聚糖等成分,可粮饲兼用^[1]。近年来,我国燕麦种植面积约70万 hm^2 ,产量约85万t,位居世界第8位^[2]。燕麦多生长于高寒、贫瘠和干旱等恶劣环境,具有抗旱、耐瘠薄和适应性强等特性,是我国北方及西北干旱冷凉等生态脆弱区的主要优势特色作物^[3]。燕麦秆锈病是典型的真菌病害,在我国燕麦主产区周期性发生,大幅度降低了籽粒产量与品质,严重制约燕麦产业可持续发展。近年来,随着燕麦市场需求增长,种植面积持续扩大,新品种不断涌现,其主产区秆锈病流行态势愈发严峻,内蒙古、吉林和河北等地尤为突出^[4]。目前,燕麦秆锈病抗性研究尚属空白,因此,提升燕麦的秆锈病抗性已成为我国燕麦生产中亟待解决的关键问题,对推动燕麦产业高质量发展具有重要意义。

研究^[5-7]证实,硅肥不仅能促进作物生长发育,提升产量与品质,还可有效增强作物的抗虫^[8]、抗病^[9-11]、抗旱^[12-13]、抗冻^[14]及耐盐性^[15],缓解重金属胁迫^[16-17],并提高抗辐射伤害能力^[18-19]。

在抗病领域,硅元素可显著提升部分作物对真菌病害的抗性^[20],如水稻白叶枯病^[21]、番茄根腐病^[22]、黄瓜炭疽病^[23]、番茄腐霉病^[24]及小麦锈病^[25]等。相较于传统化学农药防治,施用硅肥作为一种环境友好型综合病害防控手段既能增强作物抗病性,又能降低籽粒农药残留、提升作物品质,对推动农业绿色高质量发展具有重要意义。

植物活性氧(ROS)作为细胞新陈代谢的产物,主要包含超氧阴离子、过氧化氢(H_2O_2)和羟自由基等。在植物与病原菌的互作过程中,ROS的产生是植物抗病最早期的反应之一^[26]。多数植物体内存在与抗病性相关的抗氧化酶类,如超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)等,这些酶既能抑制ROS形成,又能清除已生成的ROS,进而延缓植物衰老,是缓解细胞ROS损伤的主要酶类。研究^[27-28]表明,在植物-病原菌互作过程中,硅可通过参与相关生理生化反应来提高感病植物体内抗氧化酶活性,从而增强植物抗病性。然而,目前硅增强植物抗病性的作用机理尚不完全明确,且硅在感染秆锈病的燕麦体内诱导

作者简介:李英浩,主要从事作物抗逆栽培生理研究, E-mail: 15947616475@163.com; 杨澳为共同第一作者,主要从事作物抗逆栽培生理研究, E-mail: 18631861620@163.com

刘景辉为通信作者,主要从事作物栽培学与耕作学研究, E-mail: cauljh@163.com

基金项目:燕麦全产业链科技创新团队(BR22-12-05);国家燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS-07);国家重点研发计划国际合作重点专项(2018YFE0107900)

收稿日期:2024-09-19;修回日期:2024-11-08;网络出版日期:2025-04-09

抗病的机制尚未见报道。鉴于此,本研究以易感秆锈病的燕麦品种“坝菝 1 号”为材料,探究施硅对秆锈病菌侵染后燕麦叶片 ROS 含量和抗氧化酶活性的影响,以及其与燕麦秆锈病抗性诱导的关系,旨在从抗氧化特性角度揭示硅提高燕麦秆锈病抗性的生理机制,为研发新型燕麦秆锈病绿色防控措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用易感秆锈病燕麦品种“坝菝 1 号”^[29]为试验材料。试验所用秆锈病菌 (*Puccinia graminis* f. sp. *avenae*, 以下简称 Pga) (小种 TKR) 由沈阳农业大学病理学实验室提供。试验所用硅酸盐 (K_2SiO_3) 及其他化学试剂均为分析纯。

1.2 试验设计

采用盆栽试验方法,供试土壤为蛭石与泥炭土按质量比 1:1 的比例混合而成。泥炭土中 N+P+K 含量 > 10 g/kg, 有机质含量 > 50 g/kg, pH 7.0~8.5。塑料盆高 12 cm, 直径 15 cm, 每盆装混合土 1 kg, 种子经 NaClO 消毒后播种于花盆中, 每盆 15 粒。燕麦出苗后将花盆置于温室中进行培养, 每隔 3 d 浇灌 1 次 Hoagland 营养液, 每盆 200 mL。每天光照时间 13 h, 用冷光源的白色荧光灯进行补光, 光照时维持室温 27 °C, 夜晚维持室温 23 °C。

设置 4 个处理, 分别为 CK (不施硅, 不接种秆锈菌)、+Si-P (施硅, 不接种秆锈菌)、-Si+P (不施硅, 接种秆锈菌) 和 +Si+P (施硅, 接种秆锈菌), 每个处理重复 3 次。从燕麦出苗开始每隔 3 d 使用含 1.5 mmol/L K_2SiO_3 的 Hoagland 营养液 (前期研究^[30]结果已证明该浓度抗病效果最佳) 进行浇灌, 不施硅处理加入含 3.0 mmol/L KCl 的营养液, 以补充由于施硅量不同带来的钾含量差异, 每盆浇灌 200 mL。

待燕麦幼苗第一叶充分展开, 即一叶一心时期, 参照李天亚等^[4]的方法进行病原菌接种。将分离纯化后的秆锈病菌株置于培养皿内, 首先用前端削成扁平的牙签挑取秆锈菌株, 均匀涂抹于叶片背面, 接种时各叶片涂抹菌要定量且保持一致。接种后的叶片用 0.05% 吐温 20 水溶液喷雾形成保湿膜, 放置在 16~18 °C 的黑暗环境中保湿 16~20 h

(图 1) 后, 移入人工温室内进行培养, 温度控制在 20~25 °C, 14 h (光) / 10 h (暗)。

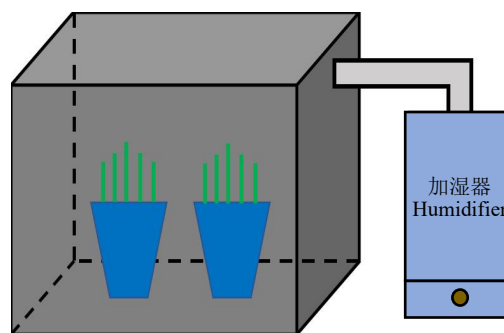


图 1 暗处理培养装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of dark treatment culture device

分别于接种后 1、3、7 和 11 d 进行拍照, 对比观察植株的抗病效应, 并且分别在 0 d (接种前) 和接种后 1、3、5、7、9 和 11 d 采集各个处理下的燕麦叶片样品, 用液氮冷冻, 在 -80 °C 下保存, 用于生理指标的测定。

1.3 测定指标与方法

严重度为病叶上秆锈菌夏孢子堆所占面积与叶片总面积的百分率; 参照 Stewart 等^[31]的分级标准判断最高病级; 参照张国良等^[32]的方法测定超氧阴离子自由基 ($O_2^{\cdot-}$) 含量; 参照 Jaleel 等^[33]的方法测定 H_2O_2 含量; 采用氮蓝四唑法^[34]测定 SOD 活性; 采用氧化还原滴定法^[35]测定 CAT 活性; 采用愈创木酚法^[35]测定 POD 活性; 采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法^[35]测定 MDA 含量; 参照陈巧等^[36]的方法测定脂氧合酶 (LOX) 活性; 参照 Tan 等^[37]的方法测定 APX 活性; 参照李合生^[38]的方法测定质膜透性, 即相对电导率 (EC)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行数据处理和作图, 利用 SPSS 22.0 软件进行方差分析, 运用新复极差法对显著性差异进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施硅对燕麦秆锈病抗性的影响

在接种秆锈病菌的条件下, 对施硅与不施硅处理的燕麦植株症状进行观察 (图 2)。接种后 3 d, 不施硅处理的燕麦叶片出现细小斑点, 而施硅处理叶片未见症状; 接种后 7 d, 施硅处理叶片开始出现斑点; 接种后 11 d, 施硅处理叶片的秆锈病症状较不施硅处理明显减轻, 与不施硅处理

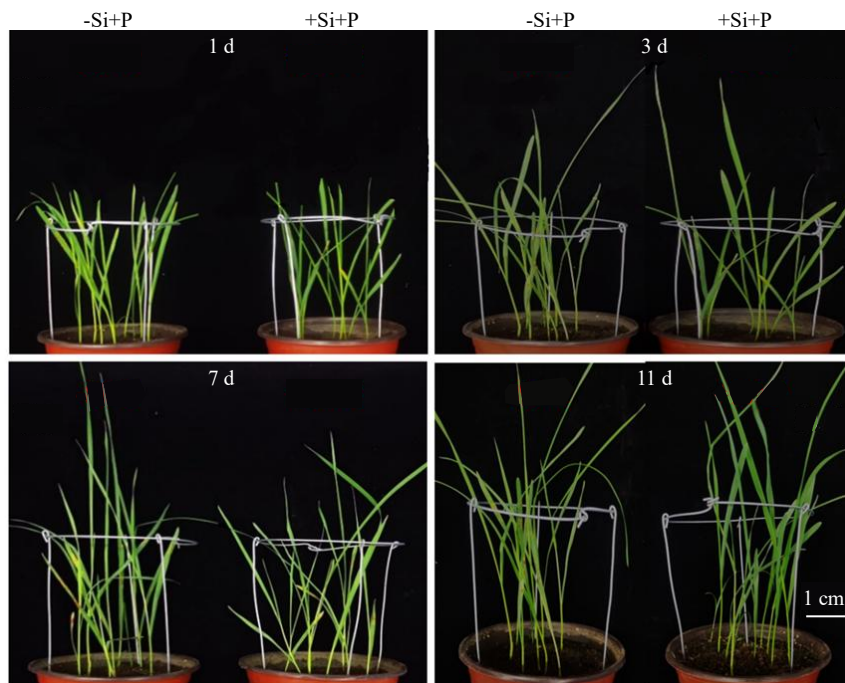


图 2 施硅对燕麦秆锈病抗性的影响

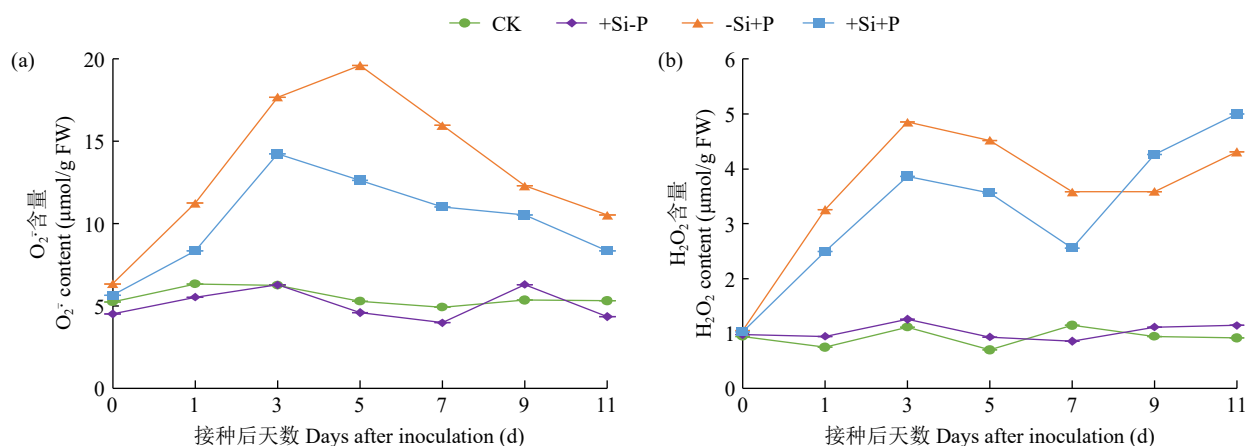
Fig.2 Effect of silicon application on the resistance to stem rust in oats

相比，施硅处理下秆锈病严重度降低 35.61%，差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.2 施硅对感病燕麦叶片 ROS 代谢的影响

O_2^- 和 H_2O_2 可通过启动膜脂过氧化或膜脂脱酯作用对植物造成损伤。如图 3 所示，在不接种秆锈病菌的条件下，无论是否施硅，燕麦叶片的 O_2^- 和 H_2O_2 含量均无明显变化，且施硅与不施硅处理间的差异不明显。接种秆锈病菌后，叶片 O_2^- 含量在侵染初期迅速上升，于接种后 5 d 达峰值后随

即下降（图 3a）；施硅处理下，叶片 O_2^- 含量于接种后 3 d 达峰值，且在接种后 1~7 d 内较不施硅处理降低 19.45%~35.66%。接种秆锈病菌后，不施硅和施硅处理下燕麦叶片 H_2O_2 含量均在侵染初期迅速升高，分别于接种后 3 d 和 11 d 达峰值（图 3b）；在接种后 1~7 d 内，与不施硅处理相比，施硅处理下 H_2O_2 含量降低了 20.41%~28.49%。综上，施硅可有效降低秆锈病菌侵染下燕麦叶片的 ROS 含量，进而提高其抗病性。

图 3 接种秆锈菌与施硅处理对燕麦叶片 O_2^- 和 H_2O_2 含量的影响Fig.3 Effects of inoculation with Pga and silicon application on the contents of O_2^- and H_2O_2 in oat leaves

2.3 施硅对感病燕麦叶片保护酶系统的影响

不同处理下燕麦叶片保护酶系统的变化情况

如图 4 所示。在不接种秆锈病菌时，无论是否施硅，燕麦叶片保护酶系统的各组份含量基本保持

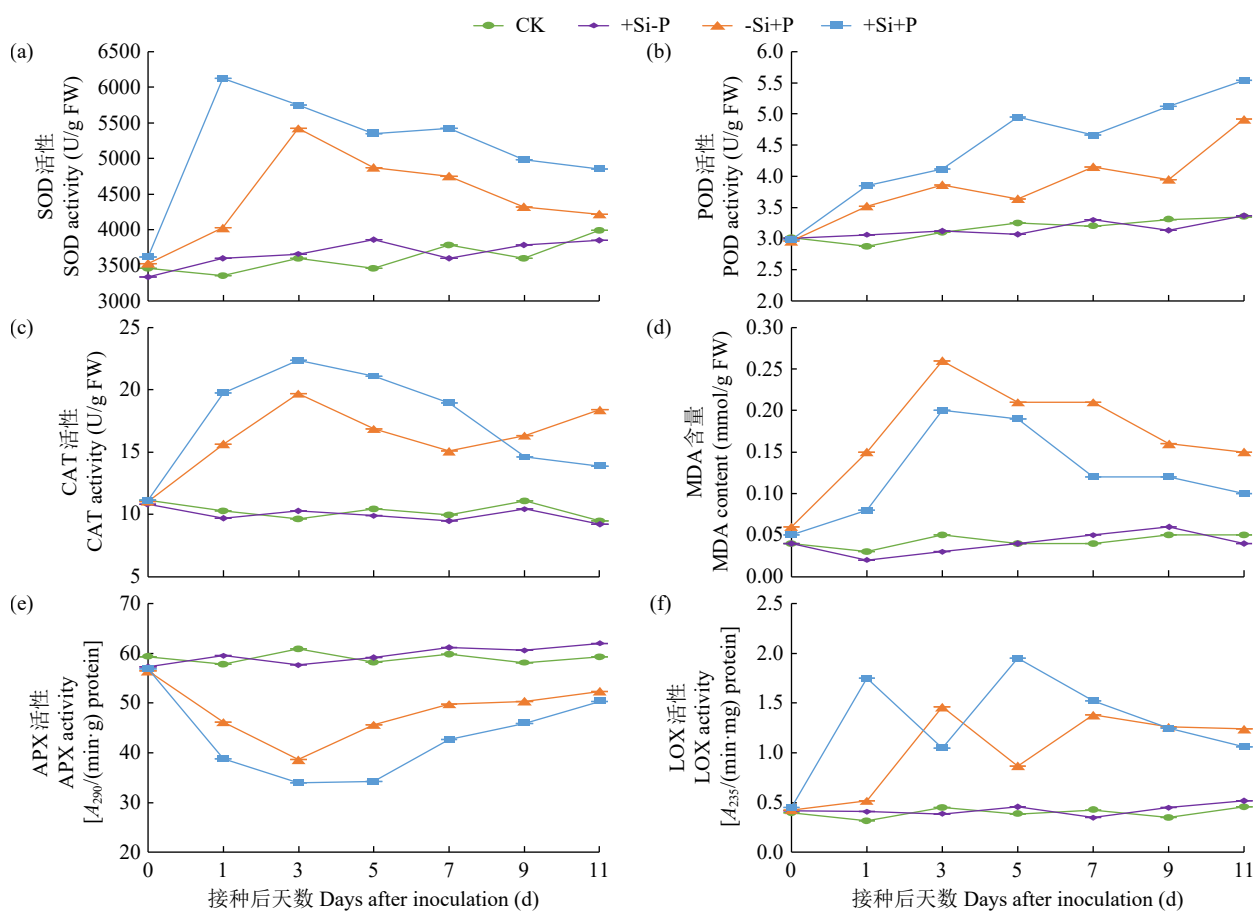


图 4 接种秆锈菌与施硅处理对燕麦叶片保护酶系统的影响

Fig.4 Effects of inoculation with Pga and silicon application on protective enzyme system of oat leaves

稳定，且施硅与不施硅处理间差异不明显。

SOD 是植物识别病原物时产生初始抗性信息的关键酶，可催化 O_2^- 发生歧化反应生成 O_2 和 H_2O_2 。接种秆锈病菌后，燕麦叶片 SOD 活性随接种时间的延长呈先升高后降低的趋势，于接种后 3 d 达峰值；施硅处理下，SOD 活性在短时间内迅速上升，于接种后 1 d 即达峰值，随后迅速下降；与不施硅处理相比，施硅处理下的 SOD 活性在接种后 1~11 d 内提高 5.98%~52.14%。POD 可清除氧化代谢过程中产生的 H_2O_2 。接种秆锈病菌后，无论是否施硅，POD 活性均随接种时间的延长逐渐升高；与不施硅处理相比，施硅处理下的 POD 活性在接种后 1~11 d 内提高 6.74%~35.99%。CAT 在植物 ROS 代谢中可将 H_2O_2 分解为 H_2O 。在接种秆锈病菌的条件下，无论是否施硅，CAT 活性在接种后 3~7 d 均呈先升后降的变化趋势；在接种后 1~7 d 内，施硅处理下的 CAT 活性较不施硅处理提高 13.59%~26.18%；但施硅处理下的 CAT 活性自接种后 7 d 开始持续下降，至接种后 9 d 时低

于不施硅处理。MDA 是膜脂氧化的主要产物，其含量可反映膜脂过氧化程度。接种秆锈病菌后，MDA 含量均迅速升高，于接种后 3 d 达峰值后逐渐下降；在接种后 1~11 d 内，施硅处理下的 MDA 含量较不施硅处理降低 9.52%~42.86%。APX 是植物 ROS 代谢中的重要抗氧化酶之一，尤其是叶绿体中清除 H_2O_2 的关键酶。接种秆锈病菌后，施硅与不施硅处理下叶片 APX 活性均随接种时间延长呈先升后降的趋势；在接种后 1~9 d 内，与不施硅处理相比，施硅处理下的 APX 活性降低 8.78%~24.94%。LOX 在植物体内可作为抗菌性物质，参与植物衰老过程及抗病性过敏坏死反应，其代谢会产生 ROS 和氧自由基，导致细胞膜受损。接种秆锈病菌后，无论是否施硅，LOX 活性均出现 2 个峰值；不施硅处理下，峰值分别出现在接种后 3 d 和 7 d；施硅处理下，峰值均提前 2 d，即出现在接种后 1 d 和 5 d，且在大部分时间内，施硅处理下的 LOX 活性较不施硅处理提高。综上，施硅可有效提高秆锈病菌侵染下燕麦叶片的抗氧

化酶活性, 进而增强其抗病性。

2.4 施硅对感病燕麦叶片质膜透性的影响

不同处理对燕麦叶片质膜透性的影响如图 5 所示, 在不接种秆锈病菌的情况下, 施硅与不施硅处理的叶片 *EC* 均无明显变化。接种秆锈病菌后, 施硅与不施硅处理的 *EC* 变化规律基本一致, 侵染初期, 叶片 *EC* 逐渐上升, 接种后 3~7 d 进入平稳阶段, 随后再次持续升高。在接种后 1~11 d 内, 施硅处理下的 *EC* 较不施硅处理降低 3.27~7.38 个百分点。

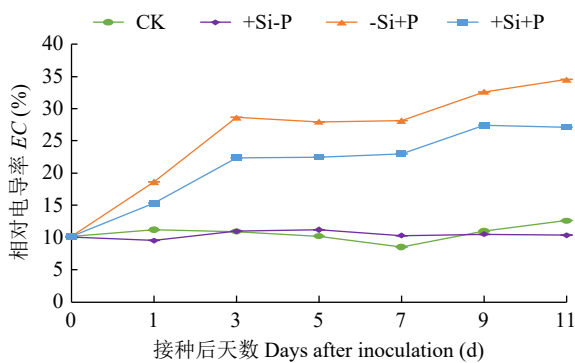


图 5 接种秆锈菌与施硅处理对燕麦叶片质膜透性的影响
Fig.5 Effects of inoculation with Pga and silicon application on plasma membrane permeability of oat leaves

3 讨论

植物过敏反应 (如 ROS 的快速产生) 是指植物受病原物侵染后, 引发的局部、快速的细胞凋亡过程, 该过程可有效阻止病原物扩散, 同时伴随一系列防卫反应, 增强植物抗病性^[39]。氧化爆发是植物对病原物侵染的早期响应, 会引发膜脂过氧化, 破坏膜系统, 最终导致组织受损。本研究中, 燕麦叶片受秆锈病菌侵染前期, O_2^- 和 H_2O_2 短暂且快速积累, 积累的 ROS 在细胞环境中氧化有机化合物, 引发膜脂过氧化, 进而造成氧化伤害^[40]。大量积累的 ROS 使质膜透性增大, 电解质大量外渗, 致使 MDA 含量和 *EC* 明显上升。而细胞质膜过氧化主要产物 MDA 和 *EC* 的变化等是衡量细胞膜受损程度的重要指标^[41]。

鉴于 ROS 的高度反应特性, SOD、POD 和 CAT 共同构成植物体内有效的 ROS 清除系统, 可有效清除植物体内的自由基和过氧化物^[42], 这解释了燕麦接种秆锈病菌后, 叶片 SOD、POD 和 CAT 活性迅速升高的现象。本研究结果显示, 接种秆锈

病菌后, 燕麦叶片 LOX 活性明显升高, 增强了膜脂过氧化, 引发过敏反应, 提高了燕麦对秆锈病的抗性。秆锈病发病后期, 由于病原菌持续攻击, 叶片细胞毒性增强, 膜脂过氧化严重, 导致叶片保护酶系统代谢紊乱, 各抗氧化酶变化规律不一致。本研究中, 秆锈病菌侵染初期, 施硅处理提高了叶片 SOD、POD 和 CAT 活性, 有助于叶片更快清除 ROS 和过氧化物, 缓解膜脂氧化损伤, 抑制电解质大量外渗, 降低 *EC*, 从而提高燕麦对秆锈病的抗性。侵染后期, 尽管 ROS 过量积累, 抗氧化酶系统代谢紊乱, 但施硅处理仍提高了 SOD 和 POD 活性, 且发病后期施硅处理的 CAT 活性低于不施硅处理, 这促进了 H_2O_2 的适量积累。 H_2O_2 具有直接抗菌作用, 还可作为信号分子诱导其他防卫基因表达^[43], 而 SOD、POD 和 CAT 相互配合, 有效帮助燕麦抵抗秆锈病菌。接种秆锈病菌后 3 d, SOD 活性开始降低, 而施硅处理使叶片 POD 活性持续上升, 表明硅维持了 SOD 和 POD 之间的协调性。张国良等^[27]发现水稻感染纹枯病菌后, 施硅处理的 MDA 含量总体低于不施硅处理, 而 SOD 活性始终高于不施硅处理; 感病后第 4 天, 施硅处理下 SOD 活性较低、POD 活性较高, 而不施硅处理的 POD 活性较低, 说明感染纹枯病后, 硅能够维持水稻叶片 SOD 和 POD 之间的协调性, 这与本研究结果相似。

4 结论

秆锈病菌侵染引发燕麦叶片膜脂过氧化, 损害细胞膜, 进而导致过敏反应的发生。外源硅可增强燕麦对秆锈病的抗性, 施硅能够帮助燕麦清除体内的活性氧, 减轻细胞膜的氧化损伤。

参考文献

- [1] Bekele W A, Wight C P, Chao S, et al. Haplotype-based genotyping-by-sequencing in oat genome research. *Plant Biotechnology Journal*, 2018, 16(8): 1452-1463.
- [2] 任长忠, 崔林, 何峰, 等. 我国燕麦荞麦产业技术体系建设与发展. *吉林农业大学学报*, 2018, 40(4): 524-532.
- [3] Zhao Z, Liu J H, Jia R Z, et al. Physiological and TMT-based proteomic analysis of oat early seedlings in response to alkali stress. *Journal of Proteomics*, 2019, 193: 10-26.
- [4] 李天亚, 吴限鑫, 王浩, 等. 我国燕麦秆锈菌生理小种与毒力分析. *麦类作物学报*, 2014, 34(4): 552-556.
- [5] 薛高峰, 张贵龙, 孙焱鑫, 等. 喷施不同形态硅对温室番茄生

- 长发育及品质的影响. 中国农学通报, 2012, 28(16): 272-276.
- [6] 葛少彬, 刘敏, 蔡昆争, 等. 硅介导稻瘟病抗性的生理机理. 中国农业科学, 2014, 47(2): 240-251.
- [7] Meena V D, Dotaniya M L, Coumar V, et al. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. Proceedings of the National Academy of Sciences, India, 2014, 84(3): 505-518.
- [8] 韩永强, 刘川, 侯茂林. 硅介导的水稻对二化螟幼虫钻蛀行为的影响. 生态学报, 2010, 30(21): 5967-5974.
- [9] Rodrigues F A, Benhamou N, Datnoff L E, et al. Ultrastructural and cytochemical aspects of silicon-mediated rice blast resistance. Phytopathology, 2003, 93(5): 535-546.
- [10] Rémus-Borel W, Menzies J G, Bélanger R R. Silicon induces antifungal compounds in powdery mildew-infected wheat. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2005, 66(3): 108-115.
- [11] Shetty R, Fretté X, Jensen B, et al. Silicon-induced changes in antifungal phenolic acids, flavonoids, and key phenylpropanoid pathway genes during the interaction between miniature roses and the biotrophic pathogen *Podosphaera pannosa*. Plant Physiology, 2011, 157(4): 2194-2205.
- [12] Hattori T, Inanaga S, Araki H, et al. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. Physiologia Plantarum, 2005, 123(4): 459-466.
- [13] Chen W, Yao X Q, Cai K Z, et al. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. Biological Trace Element Research, 2011, 142(1): 67-76.
- [14] Liang Y C, Zhu J, Li Z J, et al. Role of silicon in enhancing resistance to freezing stress in two contrasting winter wheat cultivars. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64(3): 286-294.
- [15] 郑世英, 郑芳, 徐建, 等. 外源硅对 NaCl 胁迫下小麦幼苗生长及光合特性的影响. 麦类作物学报, 2015, 35(1): 111-115.
- [16] 郑煜基, 陈能场, 张雪霞, 等. 硅肥施用对重金属污染土壤甘蔗镉吸收的影响研究初探. 生态环境学报, 2014, 23(12): 2010-2012.
- [17] Neumann D, Zur N U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. Phytochemistry, 2001, 56(7): 685-692.
- [18] 方长甸, 王清水, 余彦, 等. 硅及其吸收基因 *Lsi1* 调节水稻耐 UV-B 辐射的作用. 作物学报, 2011, 37(6): 1005-1011.
- [19] Goto M, Ehara H, Karita S, et al. Protective effect of silicon on phenolic biosynthesis and ultraviolet spectral stress in rice crop. Plant Science, 2003, 164(3): 349-356.
- [20] Sun W C, Zhang J, Fan Q H, et al. Silicon-enhanced resistance to rice blast is attributed to silicon-mediated defense resistance and its role as physical barrier. European Journal of Plant Pathology, 2010, 128(1): 39-49.
- [21] 薛高峰, 孙万春, 宋阿琳, 等. 硅对水稻生长、白叶枯病抗性及其病程相关蛋白活性的影响. 中国农业科学, 2010, 43(4): 690-697.
- [22] Huang C H, Roberts P D, Datnoff L E. Silicon suppresses fusarium crown and root rot of tomato. Journal of Phytopathology, 2011, 159(7/8): 546-554.
- [23] 梁永超, 孙万春. 硅和诱导接种对黄瓜炭疽病的抗性研究. 中国农业科学, 2002, 35(3): 267-271.
- [24] Heine G, Tikum G, Horst W J. The effect of silicon on the infection by and spread of *Pythium aphanidermatum* in single roots of tomato and bitter melon. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(3): 569-577.
- [25] Mourad A M I, Sallam A, Belamkar V, et al. Molecular marker dissection of stem rust resistance in Nebraska bread wheat germplasm. Scientific Reports, 2019, 9(1): 11694.
- [26] Thoma I, Loeffler C, Sinha A K, et al. Cyclopentenone isoprostanes induced by reactive oxygen species trigger defense gene activation and phytoalexin accumulation in plants. Plant Journal, 2003, 34(3): 363-375.
- [27] 张国良, 戴其根, 张洪程. 施硅增强水稻对纹枯病的抗性. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(5): 600-606.
- [28] 孙万春, 薛高峰, 张杰, 等. 硅对水稻防御性关键酶活性的影响及其与抗稻瘟病的关系. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1023-1028.
- [29] 袁军海, 曹丽霞, 张立军, 等. 冀西北地区燕麦主栽品种(系)抗秆锈病鉴定. 植物保护, 2014, 40(1): 165-168.
- [30] 李英浩, 吕品, 米俊珍, 等. 硅对燕麦幼苗秆锈病抗病能力的作用. 中国农业大学学报, 2022, 27(8): 68-75.
- [31] Stewart D M, Roberts B J. Identifying races of *Puccinia Graminis* f. sp. *avenae*: a modified international system. (1970-09-01) [2024-09-19]. <https://ageconsearch.umn.edu/record/171842>.
- [32] 张国良, 陈文军, 仇利民, 等. 不同基因型水稻苗期对 1,2,4-三氯苯胁迫的生理响应. 作物学报, 2009, 35(4): 733-740.
- [33] Jaleel C A, Manivannan P, Sankar B, et al. Calcium chloride effects on salinity-induced oxidative stress, proline metabolism and indole alkaloid accumulation in *Catharanthus roseus*. Comptes Rendus Biologies, 2007, 330(9): 674-683.
- [34] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [35] 萧浪涛, 王三根. 植物生理学实验技术. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [36] 陈巧, 陈书霞, 王聪颖, 等. 黄瓜脂氧合酶基因 *CsLOX2* 的克隆及表达分析. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2285-2297.
- [37] Tan W, Liu J, Dai T, et al. Alterations in photosynthesis and antioxidant enzyme activity in winter wheat subjected to post-anthesis water-logging. Photosynthetica, 2008, 46(1): 21-27.
- [38] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [39] 徐松华. 逆境条件下植物体内活性氧代谢研究进展. 安徽农学通报, 2021, 27(21): 29-32.
- [40] Schützendubel A, Polle A. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(372): 1351-1365.
- [41] 计红芳, 张令文, 宋瑞清. 绒白乳菇发酵液提取物对杨树叶枯病菌几种重要酶活性的影响. 北京林业大学学报, 2009, 31(4): 51-54.
- [42] Reyes B G D L, Yun S J, Herath V, et al. Phenotypic, physiological, and molecular evaluation of rice chilling stress response at the vegetative stage. Methods in Molecular Biology, 2013, 956: 227-241.
- [43] 胡茂林, 罗来鑫, 李健强. 稻曲病菌侵染对水稻小穗发育的影响及 H₂O₂ 的变化趋势. 植物病理学报, 2018, 48(2): 169-175.

Effects of Silicon on Stem Rust Resistance and Antioxidant Properties in Oats

Li Yinghao^{1,2}, Yang Ao¹, Liu Jinghui¹, Tian Lu², Mi Junzhen¹

(¹College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University/Oat Engineering Research Center of Inner Mongolia Universities/Oat Engineering Laboratory of Inner Mongolia Autonomous Region/Collaborative Innovation Center of Grain Industry of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China; ²Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, Inner Mongolia, China)

Abstract To explore the effects of silicon (Si) on the physiological characteristics of oat leaves infected by *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* and clarify the physiological mechanism of silicon-induced resistance to stem rust, a pot experiment was conducted using ‘Bayou 1’, an oat cultivar highly susceptible to stem rust, as the experimental material. Four treatments were established: CK (no silicon, no stem rust pathogen inoculation), +Si-P (silicon application, no stem rust pathogen inoculation), -Si+P (no silicon, stem rust pathogen inoculation), and +Si+P (silicon application, stem rust pathogen inoculation). This study investigated the effects of 1.5 mmol/L silicon application on the disease progression, reactive oxygen species content, and antioxidant enzyme activities of oat leaves after stem rust pathogen infection. The results showed that silicon application effectively delayed the disease development process of oat stem rust, and significantly alleviated disease symptoms. Stem rust pathogen infection led to a rapid increase in O_2^- and hydrogen peroxide content in leaves. Simultaneously, the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT), malondialdehyde (MDA) content, and relative electrical conductivity of leaves increased rapidly, while ascorbate peroxidase (APX) activity decreased rapidly. Within seven days after stem rust pathogen inoculation, silicon application reduced the reactive oxygen species content in leaves, while increasing the activities of SOD, POD, and CAT, and decreasing APX activity and MDA content. Furthermore, silicon application reduced the relative electrical conductivity of leaves within 11 days after inoculation. Silicon application enhanced the antioxidant defense ability of oat leaves, reduced the degree of membrane lipid peroxidation, and enhanced oat resistance to stem rust.

Key words Silicon; Oat; Stem rust; Reactive oxygen species; Antioxidant enzymes