

硅对燕麦幼苗秆锈病抗病能力的作用

李英浩 吕品 米俊珍 赵宝平 刘景辉* 薛国兴

(内蒙古农业大学 农学院,呼和浩特 010019)

摘要 为探究硅在燕麦抗秆锈病过程中的生理功能,以易感秆锈病的燕麦品种‘坝蓂1号’为试验材料,采用盆栽方法,分别浇灌含不同浓度(0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5和3.0 mmol/L) K_2SiO_3 的营养液,测定燕麦幼苗秆锈病抗性,叶片光合性能,抗氧化酶活性及渗透调节物质的含量等指标。结果表明:接种秆锈菌条件下,施用1.5 mmol/L K_2SiO_3 可显著提高燕麦幼苗抗秆锈病能力及叶片的光合特性、抗氧化酶活性和渗透调节能力。与0 mmol/L (CK)相比,燕麦幼苗干重和鲜重分别提高90.91%和74.71%,叶片叶绿素含量提高18.67%,净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)分别提高51.47%、285.71%、285.71%和27.78%,最大荧光(F_m)、光化学效率(F_v/F_m)和光合性能指数(PI_{ABS})分别提高19.62%、7.69%和5.84%,超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性分别提高35.66%和28.88%,丙二醛(MDA)、可溶性蛋白及脯氨酸含量分别降低50.00%、27.45%和16.62%。总之,外源施用 K_2SiO_3 能提高燕麦抗秆锈病的能力,且以1.5 mmol/L为最佳浓度。

关键词 硅; 燕麦; 秆锈病; 抗病性; 生理指标

中图分类号 S158;S512.6

文章编号 1007-4333(2022)08-0068-08

文献标志码 A

Effects of silicon on the resistance of oat seedlings to stem rust

LI Yinghao, LV Pin, MI Junzhen, ZHAO Baoping, LIU Jinghui*, XUE Guoxing

(College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract In order to explore the physiological function of silicon in oat seedlings' resistance to stem rust, the oat variety 'Bayou 1', which is highly susceptible to stem rust, was used as experimental material. The nutrient solutions containing different K_2SiO_3 concentrations (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 mmol/L, respectively) were irrigated into pot. The resistance of oat seedlings to stem rust, photosynthetic performance, antioxidant enzyme activity and osmotic regulation substance content of leaves were measured. The results show that: Under the condition of inoculation with stem rust, 1.5 mmol/L K_2SiO_3 significantly increased the resistance of oat seedlings to stem rust, photosynthetic characteristics, antioxidant enzyme activity and osmotic regulation ability of leaves. Compared with 0 mmol/L (CK), the dry weight and fresh weight of oat seedlings increased by 90.91% and 74.71%, respectively. Leaf chlorophyll content increased by 18.67%, net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s) and intercellular CO_2 concentration (C_i) increased by 51.47%, 285.71%, 285.71% and 27.78%, respectively. The maximum fluorescence (F_m), photochemical efficiency (F_v/F_m) and photosynthetic performance index (PI_{ABS}) were increased by 19.62%, 7.69% and 5.84%, respectively. The activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) were increased by 35.66% and 28.88%, respectively. The contents of malondialdehyde (MDA), soluble protein and proline were decreased by 50.00%, 27.45% and 16.62%. In conclusion, the exogenous application of silicon can improve the resistance of oat to stem rust, and 1.5 mmol/L is the optimal concentration of silicon.

Keywords silicon; oats; stem rust; disease resistance; photosynthesis

收稿日期: 2021-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0107900); 国家燕麦荞麦产业技术体系(CARS-08-B-5)

第一作者: 李英浩, 博士研究生, E-mail: 2466528827@qq.com

通讯作者: 刘景辉, 教授, 主要从事作物耕作学与栽培学研究, E-mail: cauljh@163.com

燕麦(*Avena sativa* L.)是我国北方农牧交错区和西北干旱区等生态脆弱区主要的粮饲兼用作物及优势特色作物,具有抗旱、耐瘠薄和适应性强等特性^[1-3]。燕麦秆锈菌(*Puccinia graminis* f. sp. *avenae*)引起的秆锈病是影响燕麦产量和品质的重大病害之一^[4],在我国东北三省和内蒙古自治区等地普遍发生且严重。植株感病后不但千粒重降低、面粉色黑不筋,而且茎秆易折断、籽粒质量下降^[5],据调查结果显示,燕麦秆锈病流行造成产量损失达5%以上^[6]。目前在燕麦生产中,对秆锈病的防治主要通过大量使用化学杀菌剂,这不但会严重污染环境,而且会大大降低籽粒的食用安全性。因此如何增强燕麦植株本身的抗病性,特别是提高植株的系统获得抗病性是目前亟待研究的问题。硅是地壳中最丰富的元素之一,虽然该元素不是植物生长的必要元素,但在提高植物抗病性上有重要作用,如硅对水稻白叶枯病^[7]、番茄根腐病^[8]、黄瓜炭疽病^[9]、番茄腐霉病^[10]和豇豆锈病^[11]等病害均有一定的防治效果,因此,探究硅对燕麦秆锈病的防效,对于开辟秆锈病防治的新途径和燕麦的安全高效生产具有重要意义。

杨艳芳等^[12]研究指出,外源硅能显著降低小麦白粉病的严重度,相对免疫效果达38.8%,同时接种白粉病后,硅显著地提高了叶片净光合速率,抗氧化酶活性以及渗透调节物质含量,意味着硅可通过参与植物的生理生化反应,从而提高植物抗病性^[12]。目前,关于外源硅增强燕麦秆锈病抗性的研究尚未见报道,本研究以易感秆锈病的燕麦品种‘坝蓼1号’为试验材料,用不同浓度的硅酸盐处理后,测定燕麦秆锈病抗性、叶片光合性能、抗氧化酶活性及渗透调节物质含量等指标,旨在探究硅在燕麦抗秆锈病过程中的生理功能,以期应用硅防治燕麦秆锈病提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

选用易感秆锈病的燕麦品种‘坝蓼1号’为试验材料,供试燕麦秆锈菌从张家口市农业科学院燕麦生产试验田采集,试验所用的硅酸盐(K_2SiO_3)及其他化学试剂均为分析纯,所用营养液参照 Hoagland^[13]经典配方进行配置。

1.2 试验方法

1.2.1 燕麦幼苗培养

试验采用盆栽方法,供试土壤为蛭石与泥炭土

按质量比为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,种子经次氯酸钠消毒后播种在花盆中,每盆10粒。燕麦出苗后将花盆置于日光温室中进行培养。

1.2.2 接种方法

待燕麦幼苗第一叶充分展开即一叶一心时期,参照李天亚^[14]描述的方法进行接种。具体方法:将分离纯化后的秆锈病菌置于培养皿内,首先用前端削成扁平的牙签挑取秆锈菌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℃的黑暗环境中保湿16~20 h后,移入人工温室内进行培养,温度控制在20~25℃,14 h(光)/10 h(暗),接种6 d后开始每天观察病斑(夏孢子堆)发展情况,待接种15 d观测侵染后表型(发病率、严重度等指标)。

1.2.3 试验设计

设置7个外源硅(K_2SiO_3)浓度梯度,分别为0(对照,CK)、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mmol/L,不同处理的营养液中通过添加相等浓度的氯化钾(KCl)来补充由于硅的浓度不同而带来的钾含量的差异,每个处理3次重复。从燕麦出苗开始每隔3 d分别用不同浓度的含硅营养液进行浇灌,每盆约200 mL,待幼苗长至“一叶一心”时进行接种,待接种15 d后观察病斑(夏孢子堆)发展情况。

1.2.4 测试指标及方法

待接种秆锈病菌后第15天进行各指标测定并取样,取样部位为带有明显秆锈菌孢子的叶片。

秆锈病侵染型包括发病率:发病叶片数占调查叶片总数的百分率, %。

严重度:病叶上秆锈菌夏孢子堆所占据的面积与叶片总面积的百分率, %。

最高病级:分级标准参照 Stewart等^[15]的方法。

采用硅钼蓝比色法^[16]测定叶片硅含量;采用烘干称重法^[17]测定幼苗干鲜重;采用乙醇提取法^[18]测定叶绿素含量;应用CIRAS-3便携式光合作用测定系统测量光合参数(净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 、胞间 CO_2 浓度 C_i);用FMS-2便携式脉冲调制式荧光仪测定叶绿素荧光参数(初始荧光 F_0 、最大荧光 F_m 、光化学效率 F_v/F_m 、光合性能指数 PI_{ABS})。可溶性蛋白含量、叶绿素含量、脯氨酸含

量、丙二醛 MDA 含量、过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性等指标的测定参照李合生^[19]的方法。

1.3 数据分析

试验数据采用 Excel 2016 软件进行处理和作图,利用 SPSS 22.0 软件进行方差分析,并运用 Duncan's 检验法对显著性差异进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同硅浓度对燕麦秆锈病防效的影响

从图 1 可知,施用不同浓度的硅后,叶片表现出

不同的发病状况,且随着硅浓度的增加叶片所产生的秆锈菌孢子量呈现“先减少后增多”的变化趋势,0 mmol/L 硅处理的叶片上孢子量最多,1.5 mmol/L 硅处理的叶片孢子量最少,叶片仅表现出褪绿发黄现象。因此,外源施用硅可以有效提高燕麦秆锈病抗性,且以 1.5 mmol/L 为最佳浓度。

由表 1 可知,施用硅酸盐溶液可显著降低燕麦叶片秆锈病的发病率和严重程度,即在 K_2SiO_3 浓度为 0~1.5 mmol/L 时,硅浓度越高,燕麦秆锈病的发病率、严重程度及最高病级越低,不同硅浓度处理对秆锈病的防治效果具有显著差异($P<0.05$)。1.5 mmol/L

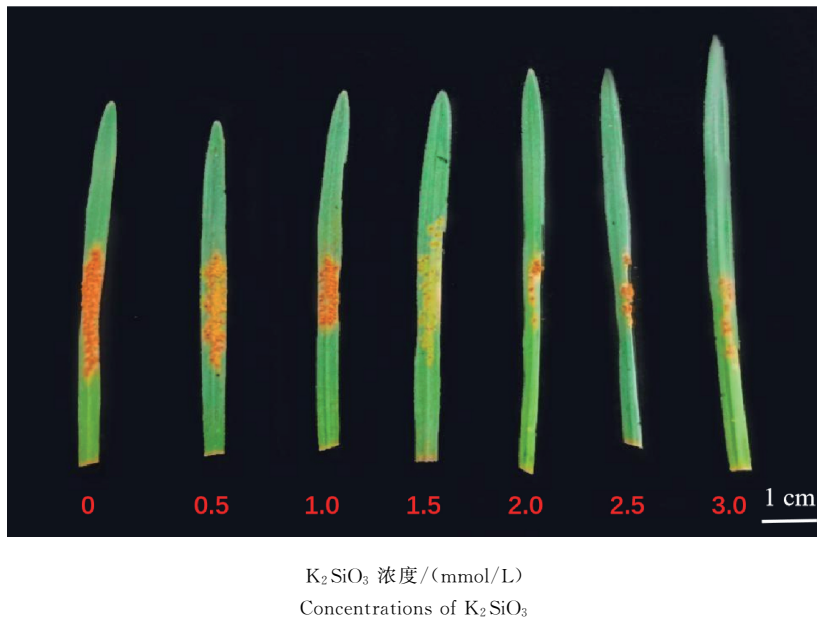


图 1 不同浓度硅处理下燕麦秆锈病的抗病效应

Fig. 1 Resistance to oat stem rust under different concentrations of silicon

表 1 不同浓度硅处理对燕麦秆锈病的防治效果

Table 1 Control effect of different treatments of silicon concentrations on oat stem rust

K_2SiO_3 浓度/(mmol/L) Concentration of K_2SiO_3	发病率/% Incidence	最高病级 Highest disease level	防治效果/% Control effect	严重程度/% Severity
0 (CK)	100.00±0.00 a	4 级	0.00±0.00 f	7.05±0.14 a
0.5	95.96±2.22 b	4 级	6.56±0.28 e	6.85±0.27 a
1.0	90.70±1.46 c	3 级	21.25±0.23 d	6.02±0.15 b
1.5	72.04±1.87 e	2 级	31.25±0.86 a	4.56±0.20 c
2.0	82.04±1.70 d	3 级	30.25±0.61 b	6.74±0.17 b
2.5	82.33±2.05 d	3 级	25.45±0.51 c	6.21±0.25 b
3.0	83.53±1.55 d	3 级	25.25±0.26 c	6.25±0.24 b

注:不同的小写字母表示不同处理之间在 0.05 水平上差异显著。数值是 3 个重复变量的平均值±标准误差。下同。

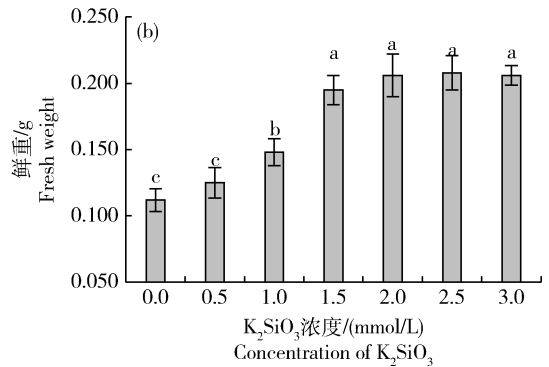
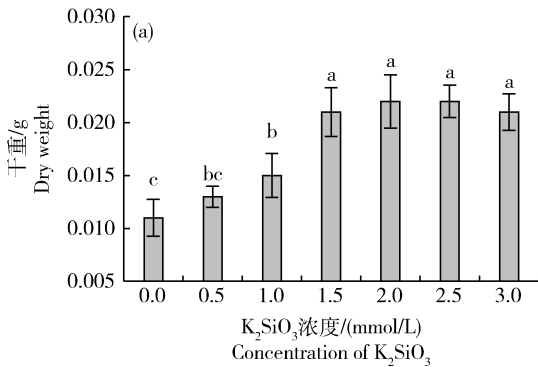
Note: Different lowercase letters indicate that there is a significant difference at the level of 0.05 between different treatments. The value is the mean±standard error of the three repeated variables. The same below.

K_2SiO_3 时,燕麦秆锈病的发病率、严重度显著低于其他处理,而防治效果均显著高于其他处理($P < 0.05$)。1.5 mmol/L K_2SiO_3 时,燕麦叶片的发病率和严重度比对照分别降低 27.96%和 35.32%,防治效果提高 31.25%,且病级水平最低。综上,施用 1.5 mmol/L 的 K_2SiO_3 对燕麦秆锈病具有最佳的防治效果。

2.2 不同硅浓度对燕麦幼苗干鲜重的影响

由图 2 可知,在 K_2SiO_3 0~1.5 mmol/L 时,燕

麦幼苗的单株干重和鲜重均随硅浓度的增加而增加,1.5 mmol/L K_2SiO_3 时,幼苗的干重和鲜重显著高于其他浓度处理,且燕麦幼苗的单株干重和鲜重比 CK 分别增加 90.91%和 74.71%($P < 0.05$);当 K_2SiO_3 从 1.5 增至 3.0 mmol/L 时,幼苗的单株干重和鲜重均基本维持不变。综上,在秆锈菌侵染条件下,1.5 mmol/L K_2SiO_3 为可促进燕麦幼苗生长的最佳浓度。



不同的小写字母表示不同处理之间在 0.05 水平上差异显著。数值是 3 个以上重复变量的平均值±标准误差。下同。

Different lowercase letters indicate that there is a significant difference at the level of 0.05 between different treatments. The value is the mean ± standard error of the three repeated variables. The same below.

图 2 不同浓度硅处理的燕麦幼苗的干重(a)和鲜重(b)

Fig. 2 Dry weight (a) and fresh dry weight (b) of oat seedlings under different treatments of silicon concentrations

2.3 不同硅浓度对燕麦叶片硅含量和叶绿素含量的影响

由图 3 可知,不同硅浓度处理均对燕麦幼苗叶片中硅含量及叶绿素含量产生一定程度的影响。 K_2SiO_3 浓度为 0~1.5 mmol/L 时,叶片硅含量及叶

绿素含量均随硅处理浓度的增加而增加。其中 1.5 mmol/L 的 K_2SiO_3 处理下,叶片硅含量和叶绿素含量相比 CK 分别提高 66.67%和 18.67%;当 K_2SiO_3 从 1.5 增至 3.0 mmol/L 时,叶片硅含量基本保持不变,而叶绿素的含量显著下降。

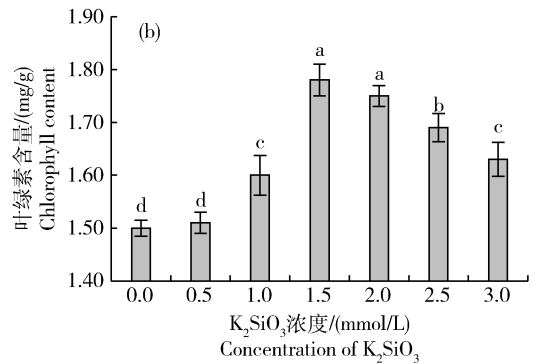
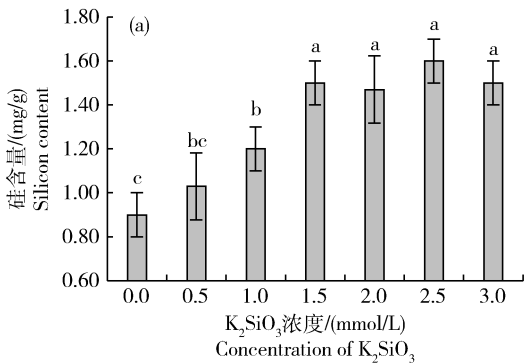


图 3 不同硅浓度处理的燕麦叶片的硅(a)和叶绿素(b)含量

Fig. 3 Silicon content (a) and chlorophyll content (b) of oat leaves under different treatments of silicon concentrations

2.4 不同硅浓度对燕麦叶片光合参数的影响

由表 2 可知,接种秆锈病菌后,施用不同浓度的硅对燕麦叶片各项光合参数均产生较大影响,

在 K_2SiO_3 浓度为 0~1.5 mmol/L 时,燕麦叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 及 C_i 均随硅处理浓度的增加逐渐升高,当硅浓度增加到 1.5 mmol/L 后,各项值开始下

降。与CK相比,1.5 mmol/L K_2SiO_3 燕麦叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 及 C_i 值分别升高 51.47%、285.71%、285.71%和 27.78%;与 1.5 mmol/L K_2SiO_3 处理

相比,3.0 mol/L K_2SiO_3 处理的叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 及 C_i 值分别降低 15.86%、68.15%、53.09%和 22.06%。

表 2 不同浓度硅处理的燕麦叶片的光合参数

Table 2 Photosynthetic parameters of oat leaves under different treatments of silicon concentrations

K_2SiO_3 浓度/(mmol/L) Concentration of K_2SiO_3	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) P_n	蒸腾速率/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) T_r	气孔导度/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) G_s	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) C_i
0 (CK)	2.04±0.04 e	0.35±0.02 f	0.021±0.012 e	262.50±4.29 e
0.5	2.05±0.04 e	0.39±0.02 f	0.023±0.007 d	269.20±6.88 e
1.0	2.36±0.03 d	1.12±0.03 c	0.052±0.017 bc	301.11±8.40 c
1.5	3.09±0.03 a	1.35±0.03 a	0.081±0.010 a	335.42±9.65 a
2.0	2.99±0.04 b	1.30±0.02 b	0.074±0.014 ab	320.53±10.53 b
2.5	2.65±0.03 c	0.93±0.02 d	0.040±0.010 cd	284.82±5.35 d
3.0	2.60±0.02 c	0.42±0.01 e	0.038±0.020 cd	261.41±3.97 e

2.5 不同硅浓度对燕麦叶片荧光参数的影响

由表 3 可知,在秆锈病菌侵染条件下施用不同浓度的硅溶液,燕麦叶片各项荧光参数均出现明显变化, F_m 、 F_v/F_m 及 PI_{ABS} 均随硅处理浓度的增加呈现出逐渐升高的变化趋势, F_o 变化趋势相反,当 $K_2SiO_3 > 1.5$ mmol/L 时,除 F_o 外其余各项值逐渐

显著降低($P < 0.05$)。1.5 mmol/L K_2SiO_3 处理的燕麦叶片 F_m 、 F_v/F_m 及 PI_{ABS} 比 CK 分别升高 19.62%、7.69%和 5.84%, F_o 比 CK 降低 9.82%;与 1.5 mmol/L K_2SiO_3 处理相比,3.0 mmol/L K_2SiO_3 处理的叶片 F_m 、 F_v/F_m 及 PI_{ABS} 分别降低 15.32%、5.95%和 5.52%,而 F_o 升高 9.80%。

表 3 不同浓度硅处理的燕麦叶片荧光参数

Table 3 Fluorescence parameters of oat leaves under different treatments of silicon concentrations

K_2SiO_3 浓度/(mmol/L) Concentration of K_2SiO_3	初始荧光 F_o	最大荧光 F_m	光化学效率 F_v/F_m	性能指数 PI_{ABS}
0 (CK)	443.49±7.77 a	2 059.38±28.16 c	0.78±0.03 b	1.37±0.02 c
0.5	439.12±9.67 ab	2 087.20±37.51 c	0.79±0.03 b	1.39±0.02 bc
1.0	421.15±10.49 c	2 156.43±27.44 b	0.80±0.02 b	1.40±0.02 bc
1.5	399.95±7.37 d	2 463.45±29.80 a	0.84±0.02 a	1.45±0.02 a
2.0	402.71±8.89 d	2 156.58±17.27 b	0.81±0.03 ab	1.42±0.03 ab
2.5	425.02±5.20 bc	2 100.67±33.09 c	0.80±0.01 b	1.39±0.01 bc
3.0	439.16±9.05 ab	2 086.15±15.00 c	0.79±0.02 b	1.37±0.02 c

2.6 不同硅浓度对燕麦叶片抗氧化酶及渗透调节物质的影响

由表 4 可知,秆锈病侵染条件下,不同浓度硅处理对燕麦叶片中抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响也不同。在 K_2SiO_3 0~1.5 mmol/L 时,随着硅浓度不断增大,叶片 SOD 和 POD 活性逐渐升

高,而 MDA、可溶性蛋白和脯氨酸含量逐渐降低。当 $K_2SiO_3 > 1.5$ mmol/L 时,各项指标随硅浓度增加均呈现与前一阶段相反的变化趋势。1.5 mmol/L K_2SiO_3 处理的燕麦叶片 SOD 和 POD 活性比 CK 分别升高 35.66%和 28.88%,MDA、可溶性蛋白和脯氨酸含量比 CK 分别降低 50.00%、27.45%和 16.62%。

表 4 不同浓度硅处理的燕麦叶片抗氧化酶及渗透调节物质

Table 4 Antioxidant enzymes and osmotic regulators in oat leaves under different treatments of silicon concentrations

K ₂ SiO ₃ 浓度/ (mmol/L) Concentration of K ₂ SiO ₃	超氧化物歧化酶 活性/(U/g) Superoxide dismutase activity	过氧化物酶活性/ (U/g) Peroxidase activity	丙二醛含量/ (mmol/g) Malondialdehyde content	可溶性蛋白 含量/(g/g) Soluble protein content	脯氨酸含量/ (μg/mg) Proline content
0(CK)	5 525.95±88.28 d	3.22±0.06 e	0.16±0.02 a	21.20±0.07 a	401.80±5.05 a
0.5	6 445.01±82.10 c	3.36±0.07 f	0.14±0.02 a	19.85±0.12 b	396.46±6.90 a
1.0	6 889.87±93.63 b	3.55±0.05 d	0.12±0.01 ab	17.52±0.05 d	386.01±9.35 a
1.5	7 496.48±99.05 a	4.15±0.08 a	0.08±0.02 c	15.38±0.07 f	335.01±10.41 c
2.0	7 523.75±100.25 a	3.95±0.03 b	0.09±0.01 bc	16.23±0.04 e	345.40±12.93 bc
2.5	7 012.73±97.34 b	3.75±0.09 c	0.13±0.04 ab	17.41±0.05 d	352.45±8.60 b
3.0	6 958.31±70.67 b	3.52±0.03 d	0.14±0.03 a	19.36±0.03 c	386.07±7.74 a

3 讨 论

硅对植物的生长发育有良好的促进作用,主要表现在促进植物健壮生长^[20-21]、提高植物对干旱胁迫、盐胁迫和细菌或真菌病害等胁迫的抵御能力^[22]。薛高峰等^[7]研究发现,水稻遭受白叶枯病菌侵染后,外源施用硅处理的植株生物量均显著高于不加硅处理。这与本研究结果一致,施硅后可以显著提高秆锈病胁迫下燕麦幼苗的干鲜重。Dannon等^[23]研究结果表明,外源施用硅能显著降低番茄青枯病的发病率,降低病情指数。本研究结果显示,外源施用硅同样可以显著降低燕麦秆锈病的发病率,显著增强燕麦的抗病性,且与其他处理相比,1.5 mmol/L K₂SiO₃ 处理燕麦对秆锈病具有最佳的防治效果。

植物的光合作用是干物质积累形成的基础,较高的光合碳同化能力是植物生存的前提^[24]。研究表明,导致植物光合效率下降的原因分为气孔限制(G_s 和 C_i 同时下降)和非气孔限制(G_s 下降而 C_i 维持不变或者上升)2种^[25-26]。本研究中,燕麦叶片 P_n 、 G_s 和 C_i 随着硅浓度的增加而提升,由此推测,秆锈病侵染条件下施硅可以通过调节叶片气孔开闭进而促进光合作用。植物受到病菌侵染后,叶片光合机构受到损伤,叶片的叶绿体片层结构遭到破坏,叶绿素含量降低,直接影响叶片的光合作用^[27],有研究表明硅元素可缓解因病菌侵染导致的光合代谢紊乱^[28],本研究也印证了这一结果,接种秆锈病菌后外源施用硅可以通过改变叶片的荧光动力学参数

提高光合能力。然而李焕丽等^[29]研究指出,适量施硅可以有效提高黑穗病原菌接种的甘蔗叶片的 P_n ,一旦施硅过量,则导致甘蔗叶片 C_i 升高,进而降低 P_n ;这与本研究结果不同,秆锈病侵染下施用高浓度硅会降低燕麦叶片的 C_i ,这可能是由于作物种类的不同。

目前关于施用硅可加强植物对真菌病害的防御能力有2种不同的观点。一种观点认为硅在细胞中聚集起到了物理屏障的作用,不仅防止真菌菌丝的入侵,而且还减轻了真菌对细胞壁的降解作用^[30],这可能是硅提高燕麦秆锈病抗性的一方面原因。另一种观点认为硅可参与植物寄主和病原物相互作用的生理代谢过程,经过一系列生理生化反应和信号转导,激活寄主防卫基因,诱导植株系统抗病性的表达而起到了抑制病害的作用^[31-32]。SOD 和 POD 是与植物抗病相关的抗氧化酶,主要功能是通过歧化反应清除超氧阴离子自由基^[33]。本研究中,外源施用硅显著提高秆锈病侵染条件下燕麦叶片 SOD 和 POD 活性,从而提高燕麦对秆锈病菌的抗性。MDA 是膜脂过氧化作用的末端产物,其含量能够代表膜脂过氧化的程度^[34]。本研究结果显示,施用较高浓度的外源硅可使叶片 MDA 含量降低,说明秆锈病胁迫下较高浓度的硅能够降低电解质外渗率,抑制丙二醛积累,抑制膜脂过氧化作用^[35]。综上所述,外源施硅可以有效降低燕麦的秆锈病发病率,具有良好的抗病效果。有关硅在植物抗病过程中的生理机制是复杂的,需要进一步深入的研究和验证。

4 结 论

接种秆锈病菌条件下,与 0 mmol/L(CK)相比,施用 1.5 mmol/L K_2SiO_3 可显著提高燕麦幼苗秆锈病抗性、光合特性(P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、 F_m 、 F_v/F_m 和 PI_{ABS})、叶绿素含量、抗氧化酶活性(SOD、POD)和渗透调节物质的含量(可溶性蛋白和脯氨酸)。由此说明,外源施用硅能通过参与燕麦的生理生化反应提高幼苗抗秆锈病的能力,且以 1.5 mmol/L 为最佳硅浓度。

参考文献 References

[1] 任长忠, 胡跃高. 中国燕麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013
Ren C Z, Hu Y G. *Chinese Oatology* [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2013 (in Chinese)

[2] Han L, Eneji A E, Steinberger Y. Comparative biomass production of six oat varieties in a saline soil ecology [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, 45 (19): 2552-2564

[3] Marshall A, Cowan S, Edwards S, Griffiths I, Howarth C, Langdon T, White E. Crops that feed the world 9: Oats—a cereal crop for human and livestock feed with industrial applications[J]. *Food Security*, 2013, 5(2): 13-33

[4] Stakman E C, Levine M N, Bailey D L. Biologic forms of *Puccinia graminis* on varieties of *Avena* spp[J]. *Journal of Agricultural Research*, 1923, 24: 1013-1018

[5] 杨海鹏. 燕麦秆锈病[J]. 内蒙古农业科技, 1984, 12(4): 44-46
Yang H P. Oat stem rust[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 1984, 12(4): 44-46 (in Chinese)

[6] Li T Y, Xu Y W, Zhang X, Wu X X, Zhang Y Z, Xuan Y H, Wang S. Virulence characterization of *Puccinia graminis* f sp *avenae* and resistance of oat cultivars in China [J]. *Plant Disease*, [2021-05-20]. DOI: 10.1094/PDIS-06-21-1239-RE

[7] 薛高峰, 孙万春, 宋阿琳, 李兆君, 范分良, 梁永超. 硅对水稻生长、白叶枯病抗性及病程相关蛋白活性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(4): 690-697
Xue G F, Sun W C, Song A L, Li Z J, Fan F L, Liang Y C. Influence of silicon on rice growth, resistance to bacterial blight and activity of pathogenesis-related proteins[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(4): 690-697 (in Chinese)

[8] Huang C H, Roberts P D, Datnoff L E. Silicon suppresses *Fusarium* crown and root rot of tomato [J]. *Journal of Phytopathology*, 2011, 159(7-8): 546-554

[9] 梁永超, 孙万春. 硅和诱导接种对黄瓜炭疽病的抗性研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(3): 261-266
Liang Y C, Sun W C. Resistance of cucumber against

anthracnose induced by soluble silicon and inoculated *Colletotrichum lagenarium* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(3): 261-271 (in Chinese)

[10] 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 [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 58(3): 569-577

[11] Heath M C, Stumpf M A. Ultrastructural observations of penetration sites of the cowpea rust fungus in untreated and silicon depleted French bean cells [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 1986, 29: 27-39

[12] 杨艳芳, 梁永超, 姜运生, 孙万春. 硅对小麦过氧化物酶、超氧化物歧化酶和木质素的影响及其与抗白粉病的关系[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 813-817
Yang Y F, Liang Y C, Lou Y S, Sun W C. Influences of silicon on peroxidase, superoxide dismutase activity and lignin content in leaves of wheat (*Triticum aestivum* L) and its relation to resistance to powdery mildew [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(7): 813-817 (in Chinese)

[13] Jiang J F, Li J G, Dong Y H. Effect of calcium nutrition on resistance of tomato against bacterial wilt induced by *Ralstonia solanacearum* [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2013, 136(3): 547-555

[14] 李天亚, 吴限鑫, 王浩, 陈思, 曹远银. 我国燕麦秆锈菌生理小种与毒力分析[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(4): 552-556
Li T Y, Wu X X, Wang H, Chen S, Cao Y Y. The race and virulence patterns of *Puccinia graminis* f sp *avenae* in China [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(4): 552-556 (in Chinese)

[15] Stewart D, Roberts B J. *Identifying Races of Puccinia graminis* f sp *avenae* a Modified International System [M]. Washington: Agricultural Research Service, [2021-05-21]. DOI: 10.1063/1.3137718

[16] Ma J F, Higashitani A, Sato K, Takeda K. Genotypic variation in silicon concentration of barley grain [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 383-387

[17] 郑世英, 梁淑霞, 郑芳, 李士平, 潘恩敬, 李东臣. 硅对盐胁迫下小麦幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 德州学院学报, 2020, 36(2): 50-53
Zheng S Y, Liang S X, Zheng F, Li S P, Pan E J, Li D C. Effects of exogenous silicon on plant growth and activity of anti-oxidative enzymes in wheat seedlings under salt stress [J]. *Journal of Dezhou University*, 2020, 36(2): 50-53 (in Chinese)

[18] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985
Gao J F. *Plant Physiology Experimental Guidance* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1985 (in Chinese)

[19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological*

- Biochemical Experiment* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [20] Hossain M T, Mori R, Soga K, Wakabayashi K, Kamisaka S, Fujii S, Yamamoto R, Hoson T. Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other *Poaceae* seedlings[J]. *Journal of Plant Research*, 2002, 115(1): 23-27
- [21] Ma J F, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2006, 11(8): 392-397
- [22] 葛少彬, 刘敏, 骆世明, 蔡昆争. 硅和稻瘟病菌接种对水稻植株有机酸含量的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(11): 3002-3009
- Ge S B, Liu M, Luo S M, Cai K Z. Influence of silicon application and *Magnaporthe oryzae* infection on organic acids contents in rice plants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 3002-3009 (in Chinese)
- [23] Dannon E A, Wydra K. Interaction between silicon amendment, bacterial wilt development and phenotype of *Ralstonia solanacearum* in tomato genotypes[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2004, 64(5): 233-243
- [24] 郭有燕, 刘宏军, 孔东升, 闫芳, 张亚娟, 刘东花. 干旱胁迫对黑果枸杞幼苗光合特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2016, 36(1): 124-130
- Guo Y Y, Liu H J, Kong D S, Yan F, Zhang Y J, Liu D H. Effect of drought stress on photosynthesis characteristics of *Lycium ruthenicum* seedlings [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(1): 124-130 (in Chinese)
- [25] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(3): 324-349
- [26] Hao S X, Cao H X, Wang H B, Pan X Y. The physiological responses of tomato to water stress and re-water in different growth periods [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 143-154
- [27] 刘倩茹, 李强, 王亚红, 王芳, 刘恒, 田月娥, 王保通. 小偃 22 受条锈菌侵染后的光合生理研究[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(2): 378-383
- Liu Q R, Li Q, Wang Y H, Wang F, Liu H, Tian Y E, Wang B T. Effect of infection on photosynthetic physiology of xiaoyan 22[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2): 378-383 (in Chinese)
- [28] Mateosnaranjo E, Andradesmoreno L, Davy A J. Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 63(4): 115-121
- [29] 李换丽. 硅对番茄幼苗抗盐性的影响及机理初探[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015
- Li H L. The effect and mechanism of exogenous silicon on salt resistance of tomato seedlings[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2015 (in Chinese)
- [30] Yoshida S. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant[J]. *Bulletin of the National Institute Agricultural Sciences Series B*, 1965, 15: 1-58
- [31] Cherif M, Asselin A, Belanger R R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp[J]. *Phytopathology*, 1994, 84(3): 236-242
- [32] Chérif M, Menzies J G, Benhamou N, Belanger R R. Studies of silicon distribution in wounded and *Pythium ultimum* infected cucumber plants[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 1992, 41(5): 371-385
- [33] Mehdy M C. Active oxygen species in plant defense against pathogens[J]. *Plant Physiology*, 1994, 105(2): 467-472
- [34] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, 7(9): 405-410
- [35] 张杰, 闫志坚, 尹强, 王慧, 万永青, 于洁, 孟元发, 王育青. 硅对干旱胁迫下燕麦幼苗光合和生理特性的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(4): 50-55
- Zhang J, Yan Z J, Yin Q, Wang H, Wan Y Q, Yu J, Meng Y F, Wang Y Q. Effects of silicon on photosynthetic and physiological characteristics of oat seedlings under drought stress[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(4): 50-55 (in Chinese)

责任编辑：吕晓梅