

喷施硅对蒙古黄芪抗氧化酶活性 以及产量和品质的影响

吴之涛^{1,2,3}, 张英英^{1,2,3}, 高正睿^{1,2,3}, 魏廷邦^{1,2,3}, 任宝仓^{1,2,3*}, 魏玉杰^{1,2,3}

(1 甘肃省农业工程技术研究院, 甘肃武威 733006; 2 甘肃省特种药源植物种质创新与安全利用重点实验室, 甘肃武威 733006; 3 武威市祁连山区道地中药材生态栽培技术创新中心, 甘肃武威 733006)

摘要:以蒙古黄芪为试验材料, 设置大田随机区组试验, 研究苗期、开花期和根茎伸长期叶面喷施不同浓度硅(500、1 000、2 000 和 4 000 mg/L)对蒙古黄芪生长发育、抗氧化酶活性、药材产量和品质的影响, 并检测施硅对黄芪白粉病、根腐病的防治效果, 以揭示硅对增强黄芪抗病性、提升品质和产量的影响机理, 为生产中蒙古黄芪的高效栽培提供理论依据。结果表明:(1)在不同生育时期, 喷施不同浓度硅能增加蒙古黄芪株高、茎粗、株幅和叶绿素含量, 促进蒙古黄芪生长, 并以 2 000 mg/L 硅处理效果较佳。(2)不同生育时期喷施硅能提高蒙古黄芪叶片 SOD、CAT、POD 和 APX 等抗氧化酶活性, 降低 MDA 含量, 以开花期、根茎伸长期 2 000 mg/L 硅处理较佳。(3)施硅能有效降低蒙古黄芪白粉病、根腐病的病情指数, 当施硅浓度为 2 000 mg/L 时防效均达到最高, 并分别达到 47.05% 和 39.08%。(4)施硅处理能有效提高蒙古黄芪单株干、鲜生物量、产量以及可溶性浸出物和黄芪甲苷含量等品质指标, 并在 2 000 mg/L 硅浓度处理下均达到最佳水平, 此时可溶性浸出物和黄芪甲苷含量分别比对照显著提高了 16.48% 和 31.96%。研究发现, 叶面喷施适宜浓度硅可显著增强蒙古黄芪对白粉病、根腐病的抗性, 促进植株生长, 进而显著提高药材产量, 改善药材品质, 并以硅浓度为 2 000 mg/L 时效果最佳。

关键词:硅; 蒙古黄芪; 生长; 抗氧化酶; 产量; 品质

中图分类号: Q945.79; S567.23⁺9 **文献标志码:** A

Effect of Spraying Silicon on Antioxidant Enzyme Activity, Yield and Quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*

WU Zhitao^{1,2,3}, ZHANG Yingying^{1,2,3}, GAO Zhengrui^{1,2,3},
WEI Tingbang^{1,2,3}, REN Baocang^{1,2,3*}, WEI Yujie^{1,2,3}

(1 Gansu Academy of Agri-Engineering Technology Wuwie, Gansu 733006, China; 2 Key Laboratory of the Special Medicine Source Plant for Germplasm Innovation and Safety Utilization in Gansu Province Wuwie, Gansu 733006, China; 3 Wuwei Technology Innovation Center of Genuine Medicinal Materials Ecological Cultivation in Qilian Mountain Area, Wuwei, Gansu 733006, China)

Abstract: We studied the effects of foliar spraying silicon (500, 1 000, 2 000, and 4 000 mg/L) on growth and development, antioxidant enzyme activity, yield and quality in *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* during seedling stage, flowering stage and rhizome elongation stage by randomized trial group, and

收稿日期: 2021-12-08; 修改稿收到日期: 2022-04-07

基金项目: 财政部、农业农村部“国家中药材产业技术体系(CARS-21)”；甘肃省青年科技基金计划项目(20JR5RA068)；甘肃省青年科技基金计划项目(20JR5RA069)；甘肃省农业工程技术研究院创新青年基金项目(GSNGY2020-07)；武威市中药材生态种植科技特派员创新创业基地

作者简介: 吴之涛(1989-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事作物真菌病害研究。E-mail: 285772983@qq.com

* 通信作者: 任宝仓, 研究员, 主要从事作物病虫害绿色防控研究。E-mail: 463573198@qq.com

also detected the control effect of foliar spraying silicon on powdery mildew and root rot to reveal the mechanism of silicon on enhancing disease resistance, improving quality and yield of *A. membranaceus* var. *mongholicus*, and provide theoretical basis for efficient cultivation of *A. membranaceus* var. *mongholicus* in production. The results showed that: (1) the application of different concentrations of silicon could increase plant height, stem diameter, plant width and chlorophyll content, and promote the growth of *A. membranaceus* var. *mongholicus*, and better treated with 2 000 mg/L silicon concentration. (2) Spraying silicon with different concentrations could increase the activities of antioxidant enzymes such as SOD, CAT, POD and APX and reduce the content of MDA in different growth stages. It was better at 2 000 mg/L silicon concentration during flowering and rhizome elongation. (3) When the silicon concentration was 2 000 mg/L, the control effects of *A. membranaceus* var. *mongholicus* against powdery mildew and root rot reached the highest, 47.22% and 38.80% respectively. (4) Spraying silicon with different concentrations could increase the dry and fresh biomass, yield, soluble extract and astragaloside IV content of single plant of *A. membranaceus* var. *mongholicus*. When the concentration of silicon was 2 000 mg/L, the contents of soluble extract and astragaloside IV increased by 16.48% and 31.96% respectively. It was found that foliar spraying of appropriate concentration of silicon could significantly enhance the resistance to powdery mildew and root rot of *A. membranaceus* var. *mongholicus*, promote plant growth, significantly improve the yield and quality of medicinal materials, and the effect was the best when the silicon concentration was 2 000 mg/L.

Key words: silicon; *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*; growth; antioxidant enzyme; yield; quality

中药材黄芪为豆科植物蒙古黄芪(*Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*)或膜荚黄芪(*Astragalus membranaceus*)的干燥根,性温、味甘,具有补气升阳、利尿消肿、托毒生肌的功效^[1],在临床上应用广泛,素有“十药八芪”之称。目前,野生黄芪种质资源日渐稀少,已被列为国家三级保护植物,生产中黄芪药材主要以人工栽培为主^[2]。膜荚黄芪在栽培过程中根部形态变异较大,易产生“鸡爪根”,商品性较差,严重影响药材产量和品质,大多数产区主要以蒙古黄芪为栽培品种^[3]。黄芪作为甘肃省的道地药材,随着纳入药食同源管理,市场消费需求逐年增大,受耕地面积的限制,黄芪连作种植后导致土壤养分失衡,有害病原菌不断积累,病害发生日趋加重,严重影响黄芪产量和品质,已成为制约该产业高质量发展的重要因素之一^[4]。

硅是地壳中第二大元素,虽然该元素不是植物生长必需的矿质元素,但大量研究表明,硅可以增强植物的抗逆耐胁迫能力^[5],促进植物生长并提高产量^[6]。目前关于硅的抗性机制研究,主要集中在物理屏障假说和诱导抗性假说两个方面。一部分研究表明,植物施硅处理后能在表皮组织形成硅化细胞,组织硅质化后形成机械屏障以阻碍病原的入侵^[7]。另一部分研究表明,植物与病原菌互作过程中,施硅处理能提高植物抗氧化酶活性(SOD、CAT、POD和APX等),有效清除植物体内活性氧,从而增强植物

的抗病能力^[8]。

迄今,前人利用硅防治植物病害已有相关报道,其中硅对水稻白叶枯病、稻瘟病^[9-10]、小麦白粉病^[11]、葡萄白粉病^[12]、黄瓜炭疽病^[13]、番茄根腐病^[14]等病害均有一定的防治效果,但对黄芪病害的防治研究却鲜有报道。本试验以蒙古黄芪为试验材料,研究了喷施不同浓度硅对蒙古黄芪生长发育动态、抗氧化酶活性、药材产量和品质的影响,分析了施硅对黄芪白粉病、根腐病的防治效果,初步揭示了施硅增强黄芪抗病性、提升品质和产量的机理,为大田生产中蒙古黄芪的高效栽培提供了理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地设在国家中药材产业技术体系河西综合试验站试验基地(102°51'0" E, 37°40'30" N),属北温带大陆性干旱气候,干旱少雨,日照充足,昼夜温差大。海拔高度 1 786 m,年平均降水量 158 mm,蒸发量 2 021 mm,年平均气温 7.7 °C,无霜期 155 d。试验区土壤为厚层灌漠土,土壤容重 1.63 g·cm⁻³,耕层土壤碱解氮 68.5 mg·kg⁻¹,速效磷 48.6 mg·kg⁻¹,速效钾 283.7 mg·kg⁻¹,有机质含量 19.80 g·kg⁻¹,pH 值为 8.5。试验地前茬作物为黄芪。

1.2 试验材料

供试一年生蒙古黄芪种苗从甘肃省岷县当归城

中药材交易市场购买,种苗平均根长(32.75±6.12) cm,根粗(5.13±1.06) mm,单根重(3.86±1.93) g;供试硅肥途保康(可溶性Si≥50 g/L)由江门市植保有限公司生产。

1.3 试验设计

本试验采用单因素随机区组设计,共设置5个处理,硅喷施浓度依次为500、1 000、2 000和4 000 mg/L,CK为喷施等量清水,每个处理又分为苗期(5月27)、开花期(7月8日)和根茎伸长期(9月26日)3个喷施时期。于2021年4月7日大田移栽黄芪种苗,采用露头覆膜栽培方式,行距40 cm,株距15 cm,每个处理3次重复,共15个小区,小区面积为30 m²(7.5 m×4 m),小区间隔60 cm。各试验小区除喷施硅以外,氮肥施用尿素(纯N约46.6%),氮肥用量100 kg·hm⁻²,按基肥:中期追肥=2:1分施,磷肥为过磷酸钙(P₂O₅约14%),纯磷施用量150 kg·hm⁻²,钾肥为氧化钾(K₂O约25%),纯钾30 kg·hm⁻²均作基肥,其他栽培管理措施同大田一致。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 地上部生长指标 每个小区选择30株生长一致的植株挂牌标记,黄芪不同生育时期施硅7 d后测定黄芪株高、株幅、茎粗和叶绿素含量。株高和株幅用卷尺测定;茎粗指距离地面1 cm处主茎直径,采用数显式游标卡尺(0~150 mm)测定;叶绿素含量(SPAD值)用手持式SPAD-502叶绿素仪(日本柯尼卡美能达株式会社)进行测定,时间选择在早上9:00—10:00。

1.4.2 叶片抗氧化酶活性及丙二醛含量 黄芪不同生育时期施硅3 d后选取生长部位一致的叶片测定SOD(超氧化物歧化酶)、POD(过氧化物酶)、CAT(过氧化氢酶)、APX(抗坏血酸过氧化物酶)活性和MDA(丙二醛)含量,选用北京索莱宝有限公司生化试剂盒,根据说明书要求,使用SP-765型紫外可见分光光度计(上海光谱仪器有限公司)进行测定。

1.4.3 白粉病和根腐病防效 黄芪营养生长后期调查白粉病的发病情况,每个小区随机调查30株,每株调查上中下部位各10片叶子,根据叶片的症状特征计算病情指数。病情分级标准如下^[15]:

- 0级:植株叶片无病斑;
- 1级:植株叶片病斑面积占叶面积的1/4;
- 2级:植株叶片病斑面积占叶面积的1/4~1/2;
- 3级:植株叶片病斑面积占叶面积的1/2~3/4;

4级:植株叶片病斑面积占叶面积的3/4以上。

2021年10月21日黄芪采挖后调查根腐病的发病情况,每个小区随机调查30株,根据根部的病斑特征计算病情指数。病情指数分级标准如下^[16]:

- 0级:健康无病斑;
- 1级:根部有1~2个黑色凹陷病斑;
- 2级:根部有3~5个黑色凹陷病斑;
- 3级:根部有6~10个黑色凹陷病斑,表皮粗糙;
- 4级:根部有10个以上黑色凹陷病斑,部分病斑连片形成网状纵列。

病情指数=[∑(病级代表值×株数)]/(最高病级代表值×调查总株数)×100

防治效果=(对照病情指数-处理病情指数)/对照病情指数×100%

1.4.4 药材产量及品质 挂牌标记的黄芪植株单独采挖(2021年10月21日),测定根长、根粗、侧根数、单株根鲜重和干重;小区实收后计产,根据小区面积折算产量;黄芪品质委托甘肃数字本草检验中心有限公司检测,对黄芪甲苷含量、灰分和可溶性浸出物进行测定。

1.5 数据分析

试验数据用Microsoft Excel 2013整理,利用SPSS22.0统计分析软件,采用Duncan新复极差法进行差异性显著分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度硅处理对蒙古黄芪生长发育动态的影响

在不同生育时期喷施不同浓度硅以后,蒙古黄芪株高、茎粗、株幅、叶绿素含量均不同程度地高于同期对照(表1)。其中,各硅浓度处理蒙古黄芪株高在苗期、开花期、根茎伸长期均显著高于对照,但不同浓度处理间差异不显著;各生育时期不同浓度硅处理对茎粗影响大多不显著,仅苗期硅浓度为500 mg/L时、根茎伸长期硅浓度2 000 mg/L时显著高于对照,增幅分别为23.10%和30.05%。硅浓度为2 000 mg/L时,株幅在开花期各浓度处理、苗期除2 000 mg/L处理、根茎伸长期1 000和2 000 mg/L处理均显著高于对照,同期各浓度处理间大多无显著差异;各生育时期施硅处理对植株叶绿素含量与对照均无显著差异。可见,在蒙古黄芪生长前期,低浓度硅处理有助于植株生长发育,而在生长中后期中高浓度硅处理的促生作用较好。

表 1 不同浓度硅处理下蒙古黄芪生长指标的变化

Table 1 The growth index of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* under different concentrations of silicon

指标 Index	生育期 Growth stage	硅浓度 Silicon concentration/(mg/L)				
		0(CK)	500	1 000	2 000	4 000
株高 Plant height /cm	苗期 Seedling stage	34.87±1.77b	43.00±2.17a	41.27±1.78a	42.33±1.22a	42.33±1.62a
	开花期 Flowering stage	71.60±2.20c	79.67±1.62ab	85.53±1.20a	82.27±2.55ab	76.80±2.42bc
	根茎伸长期 Rhizome elongation	104.67±2.11b	114.00±1.35a	111.78±0.97a	115.33±1.07a	107.22±4.67a
茎粗 Stem diameter /mm	苗期 Seedling stage	4.07±0.24b	5.01±0.07a	4.79±0.10ab	4.39±0.38ab	4.71±0.31ab
	开花期 Flowering stage	4.93±0.37a	5.57±0.29a	5.69±0.13a	5.30±0.27a	5.71±0.31a
	根茎伸长期 Rhizome elongation	5.59±0.32b	6.18±0.40b	6.14±0.25b	7.27±0.27a	6.43±0.15ab
株幅 Plant width /cm	苗期 Seedling stage	18.73±0.18c	22.13±0.18ab	22.67±0.79a	20.33±1.11bc	23.33±0.64a
	开花期 Flowering stage	25.87±2.32b	33.60±0.77a	34.67±0.29a	36.27±0.92a	33.53±0.85a
	根茎伸长期 Rhizome elongation	44.11±0.80b	44.67±0.67ab	47.22±0.68a	47.33±0.33a	44.78±1.46ab
叶绿素含量 Chlorophyll (SPAD)	苗期 Seedling stage	40.15±1.55a	44.41±0.31a	42.81±0.79a	41.75±1.74a	44.17±1.61a
	开花期 Flowering stage	39.21±0.63b	41.93±0.61ab	42.41±1.29a	44.51±1.07a	43.06±0.96a
	根茎伸长期 Rhizome elongation	42.69±4.03a	44.70±1.87a	43.52±1.07a	43.03±2.34a	44.23±0.47a

注:同列小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著,下同

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among treatments at 0.05 level, the same as follows

表 2 不同浓度硅处理对蒙古黄芪白粉病、根腐病的防治效果

Table 2 Control effect of different concentrations of silicon on powdery mildew and root rot of *A. membranaceus* var. *mongholicus*

硅浓度 Silicon concentration /(mg/L)	白粉病 Powdery mildew		根腐病 Root rot	
	病情指数 Disease index	防治效果 Control effect/%	病情指数 Disease index	防治效果 Control effect/%
0(CK)	53.33a	—	55.93a	—
500	34.63b	35.06a	42.96b	23.19c
1 000	33.70b	36.81a	37.41cd	33.11b
2 000	28.24b	47.05a	34.07d	39.08a
4 000	33.61b	36.98a	40.37bc	27.82c

2.2 不同浓度硅处理对蒙古黄芪抗性氧化酶活性和丙二醛含量的影响

图 1 显示,蒙古黄芪 3 个生育时期施硅处理的 SOD、CAT、POD 和 APX 活性均不同程度高于同期对照,且整体均随着硅浓度的增加呈先升高后降低趋势。其中,蒙古黄芪 SOD 活性仅在开花期当硅浓度为 2 000 mg/L 时与对照差异显著,增幅达到 56.45%,其他时期各处理间与对照差异均不显著。CAT 活性苗期、开花期和根茎伸长期 2 000 mg/L 浓度处理显著高于对照,增幅分别达到 178.10%、141.85% 和 200.99%,除根茎伸长期 500、1 000 mg/L 浓度处理外,其余时期其他处理间与对照均无显著差异。POD 活性随生育期推进整体表现为增加趋势,并在开花期、根茎伸长期 2 000 mg/L 浓度处理时显著高于对照,增幅分别达到 34.59% 和

33.20%,除苗期 4 000 mg/L 浓度处理外,其余时期其他处理间与对照差异不显著。APX 活性仅在根茎伸长期 2 000 mg/L 处理下显著高于对照,增幅为 207.74%,其他生育期与对照差异不显著。同时,蒙古黄芪 3 个生育时期施硅处理的 MDA 含量均低于对照,且整体随着硅浓度的增加有逐渐降低的趋势,但同期各处理间与对照间均差异不显著。可见,蒙古黄芪抗氧化酶活性在各生育期不同浓度施硅处理下大多无显著变化,未受到过氧化伤害,但在开花期、根茎伸长期喷施 2 000 mg/L 硅多有利于显著提高。

2.3 不同浓度硅处理对蒙古黄芪白粉病、根腐病的防治效果及其与抗氧化酶活性间关系

表 2 显示,不同浓度硅处理对蒙古黄芪白粉病、根腐病均有一定的防治效果。其中,各硅处理对蒙古黄芪白粉病的病情指数和防治效果与对照相比均

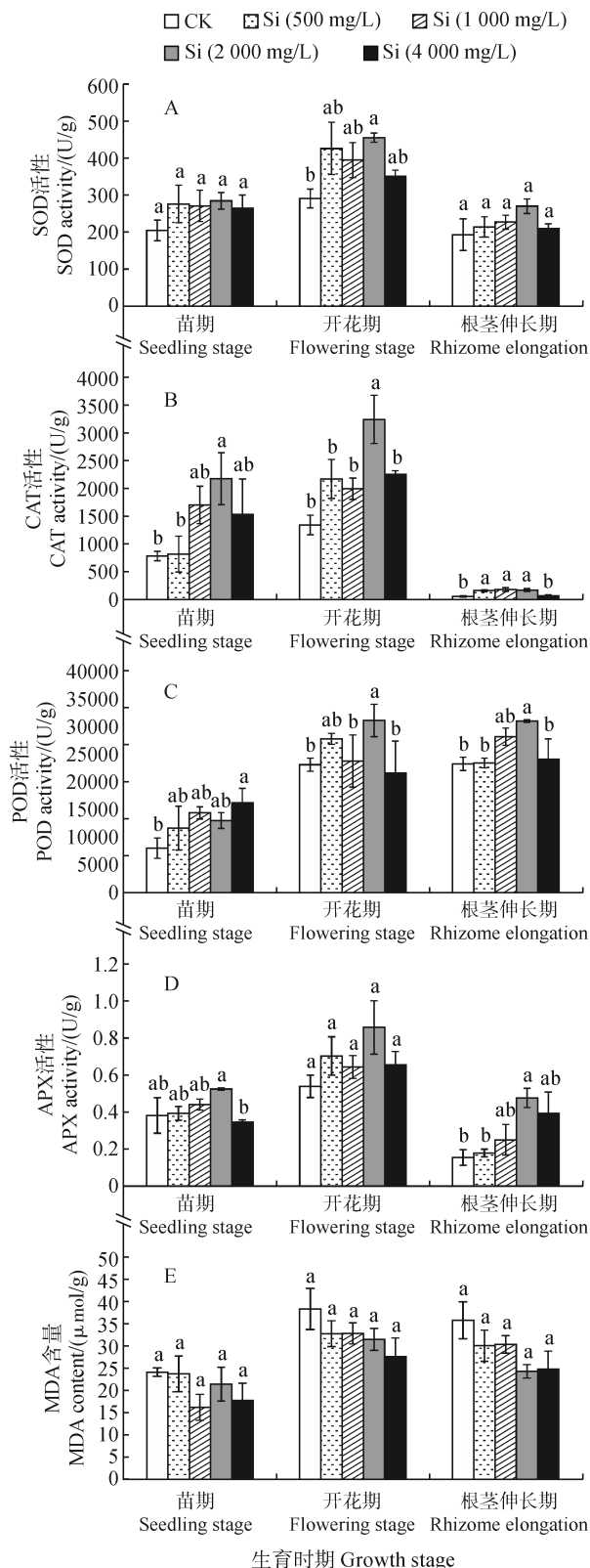


图1 各生育期不同浓度硅处理下蒙古黄芪抗氧化酶活性和丙二醛含量的变化

Fig. 1 The antioxidant enzyme activities and malondialdehyde content of *A. membranaceus* var. *mongholicus* under different concentrations of silicon at different stages

达到显著水平,且当硅浓度为2000 mg/L时病情指数最低(28.24)、防效最高(47.05%),但各硅处理间均无显著差异。各硅处理对蒙古黄芪根腐病的病情指数和防治效果分别在34.07~42.96、23.19%~39.08%之间,也以2000 mg/L硅处理病情指数最低、防效最佳,显著高于其他处理。

同时,从表3可以看出,蒙古黄芪白粉病、根腐病病情指数与CAT、POD、SOD和APX活性呈负相关,其中白粉病病情指数与POD活性、根腐病病情指数与APX活性的相关系数均达到显著水平;而白粉病、根腐病病情指数均与MDA含量呈显著正相关。

2.4 不同浓度硅处理对蒙古黄芪产量和品质的影响

蒙古黄芪采挖后对药材外观性状指标和产量进行测定,结果显示(表4):不同浓度硅处理蒙古黄芪的根长、根粗、单根鲜重和单根干重均不同程度高于对照,侧根数均低于对照。其中,根长在500 mg/L硅处理下达到最大值,根粗在2000 mg/L硅处理下达到最大值,侧根数此时达到最小值,但在各施硅处理及对照间均无显著差异;单根鲜重、单根干重和产量均在2000 mg/L硅处理下达到最大值,且在此时与对照差异显著,增幅分别为30.97%、33.79%和32.29%,它们在其他硅处理下与对照无显著差异。

同时,不同浓度硅处理对于提升蒙古黄芪品质具有促进作用(表5),施硅处理和对照黄芪药材水分、灰分、可溶性浸出物和黄芪甲苷含量均优于2020版《中国药典》标准。其中,各硅处理黄芪药材水分和灰分均不同程度低于对照,但仅硅浓度为500和4000 mg/L时的灰分含量降幅达到显著水平,所有处理水分含量和1000、2000 mg/L施硅处理的灰分含量均与对照差异不显著。各施硅处理的可溶性浸出物和黄芪甲苷含量均不同程度高于对照,但仅在2000 mg/L硅处理下显著高于对照和其他处理,此时分别比对照显著提高了16.48%和31.96%。

3 讨论

硅对植物的生长发育具有明显的促进作用,施硅能有效提高植株叶片叶绿素含量和光合速率,增加光合产物的积累;硅被植物吸收后主要分布在输导组织,通过改善矿质元素的吸收,增强根系活力,从而促进植株营养器官的生长^[17]。本试验研究结果表明,不同浓度硅处理均能提高蒙古黄芪的株高、茎粗和株幅,适宜的硅浓度(1000 mg/L和2000 mg/L)

表 3 病情指数与抗氧化酶及丙二醛的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between disease index and antioxidant enzyme activities and malondialdehyde content

指标/Index	白粉病病情指数 Disease index of powdery mildew	CAT 活性 CAT activity	POD 活性 POD activity	SOD 活性 SOD activity	APX 活性 APX activity	MDA 含量 MDA content
根腐病病情指数 Disease index of root rot	0.724**	-0.226	-0.326	-0.345	-0.534*	0.529*
白粉病病情指数 Disease index of powdery mildew	1.000	-0.043	-0.502*	-0.226	-0.483	0.509*

注: * 代表 $P < 0.05$ 的显著性差异水平, ** 代表 $P < 0.01$ 的极显著性差异水平

Note: * indicates significant difference at $P < 0.05$ level, ** indicates extremely significant difference at $P < 0.01$ level

表 4 不同浓度硅处理下蒙古黄芪外观性状及产量构成

Table 4 Appearance and yield components of *A. membranaceus* var. *mongholicus* under different concentrations of silicon

硅浓度 Silicon concentration (mg/L)	根长 Root length / cm	根粗 Root diameter / mm	侧根数 Lateral roots	单根鲜重 Single fresh weight/ g	单根干重 Single dry weight/ g	产量 Yield (kg · hm ⁻²)
0(CK)	45.87 ± 1.18a	13.73 ± 0.25a	3.43 ± 0.15a	53.69 ± 3.10b	26.04 ± 1.82b	4 496.62b
500	49.67 ± 0.48a	13.49 ± 0.35a	3.33 ± 0.27a	65.36 ± 5.00ab	33.29 ± 2.61ab	5 692.85ab
1 000	47.73 ± 1.30a	13.79 ± 0.51a	3.41 ± 0.15a	66.43 ± 5.21ab	33.53 ± 2.61ab	5 732.45ab
2 000	48.43 ± 1.71a	14.39 ± 0.19a	3.13 ± 0.07a	70.32 ± 5.17a	34.84 ± 3.21a	5 948.63a
4 000	45.63 ± 0.90a	13.25 ± 0.29a	3.23 ± 0.07a	55.05 ± 4.34b	27.31 ± 2.23b	4 706.15b

表 5 不同浓度硅处理下蒙古黄芪品质分析

Table 5 The quality of *A. membranaceus* var. *mongholicus* under different concentrations of silicon

硅浓度 Silicon concentration/(mg/L)	水分含量 Water content/%	灰分含量 Ash content/%	可溶性浸出物含量 Soluble extract/%	黄芪甲苷含量 Content of astragaloside IV/%
0(CK)	6.6 ± 0.12a	3.1 ± 0.06a	26.7 ± 0.70b	0.097 ± 0.003b
500	6.4 ± 0.35a	2.7 ± 0.15b	25.2 ± 1.53b	0.101 ± 0.001b
1 000	6.2 ± 0.40a	2.9 ± 0.03ab	26.9 ± 0.32b	0.106 ± 0.008b
2 000	6.2 ± 0.26a	2.9 ± 0.06ab	31.1 ± 0.50a	0.128 ± 0.002a
4 000	6.4 ± 0.50a	2.7 ± 0.12b	27.7 ± 0.53b	0.093 ± 0.002b
2020 版药典标准 Pharmacopoeia standard in 2020	≤10.0	≤5.0	≥17.0	≥0.080

能显著地促进蒙古黄芪的生长。可能是施硅一方面提高了叶片叶绿素含量,促进光合产物积累,促进营养元素吸收,另一方面施硅后叶片表面形成的硅化细胞和表皮组织里形成的角质——硅双层结构使植株抗氧化能力增强,提高了蒙古黄芪的抗病能力。这与 Mateos-Naranjo^[18]、郑世英等^[19] 在不同作物上施硅的研究结论一致。但在本研究中,当硅浓度增加到 4 000 mg/L 时,与其他硅处理相比,蒙古黄芪的生长受到一定的抑制,这表明施硅对蒙古黄芪的生长存在剂量效应,推测原因可能是高浓度硅处理(4 000 mg/L)会对蒙古黄芪根系产生毒害作用,影响矿质养分的吸收,不利于植株的生长。

植物体中活性氧(ROS)是一种重要的信号分子,主要分布在植物细胞的叶绿体和线粒体中,主要以 O_2^- 、 $\cdot OH$ 和 H_2O_2 的形式存在,在植物体中活性氧的产生和清除始终保持一种动态平衡状态,当植株遭受逆境胁迫(干旱、病原菌入侵等)时,动态平衡被打破,活性氧大量产生,会对植株产生毒害作用^[20]。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)是植物体内重要的抗氧化酶,能够有效清除植物体内多余的活性氧,从而减轻活性氧对膜质过氧化物的伤害,在保护膜系统方面具有重要的作用。丙二醛(MDA)是植物体内膜质过氧化产物,在逆境

胁迫下含量急剧升高,会增加膜质的过氧化损伤程度,因此通常将 MDA 含量作为反映植物抗逆性的生理指标之一^[21]。本研究结果表明,施硅能有效降低蒙古黄芪白粉病、根腐病的病情指数,在蒙古黄芪的 3 个生育时期,叶面喷施不同浓度硅处理均能提高蒙古黄芪叶片抗氧化酶(SOD、CAT、POD 和 APX)活性,降低 MDA 含量。其原因可能是当植株受到病害胁迫后施硅能激发蒙古黄芪的防御系统,POD 和 APX 活性的提高有助于清除 H₂O₂,APX 与 POD、SOD 等抗氧化酶具有协同作用,从而提高蒙古黄芪抵御白粉病菌和根腐病菌的能力。这与前人在水稻^[9]、豇豆^[22]等作物的相关施硅研究结果相似。同时,本研究中不同生育时期施硅后,抗氧化酶活性和 MDA 含量基本呈现先升高后降低的趋势,在开花期达到最高,可能与开花期当地高温少雨,蒙古黄芪生长代谢旺盛遭受干旱和病虫害双重逆境胁迫有关,为有效缓解活性氧对膜质的危害,施硅后会显著提高植株抗氧化酶活性,降低 MDA 含量,这与 Kim 等^[23]报道的施硅研究结果相一致。另外,当硅浓度为 4 000 mg/L 时,与其他硅浓度相比抗氧化酶活性降低,可能是因为蒙古黄芪在高浓度硅胁迫下,植株体内活性氧大量积累,在一定程度上会破坏 SOD、CAT、POD 和 APX 的活性结构,使植物自身清除活性氧的能力下降,在细胞水平上对植物膜质

造成过氧化损伤,从而影响植株的生长。本试验仅从生理生化方面揭示了硅提高蒙古黄芪抗病性的作用机理,施硅后能否提高抗病相关基因的转录表达水平,还需要从分子生物学层面进一步验证。

施硅对提高作物产量和品质具有重要作用,目前大多数研究主要集中在禾谷类作物和园艺作物上,均认为施用适宜浓度硅肥能够提高作物产量和改善品质^[24-25]。但在中药材方面的研究却鲜有报道。蒙古黄芪以根入药,药材根的外观性状和品质是衡量药材根个体质量的重要指标。在本试验中施硅能增加蒙古黄芪根长、根粗、单根鲜重和单根干重,促进蒙古黄芪增产。分析增产的原因可能是施硅有助于提高蒙古黄芪抗性,进而促进 N、P 和 K 等营养元素吸收,提高光合效率,促进地上部分光合产物向地下部分转运和富集,有助于植株根部生长。同时,施硅后蒙古黄芪的内在品质(水分、灰分、可溶性浸出物和黄芪甲苷含量)均优于 2020 版《中国药典》标准,可能与施硅增强植株的抗逆胁迫能力有关,从而提高碳氮代谢产物含量,这与张文晋^[26]报道的在旱盐胁迫下硅提高甘草产量和品质的研究结果相一致。综合评价不同浓度硅处理对蒙古黄芪生长和品质的影响,认为当硅浓度为 2 000 mg/L 时具有较好的防病促生作用,能显著提高蒙古黄芪药材产量,改善药材品质。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 2020 版(一部)[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:315.
- [2] 秦雪梅,李震宇,孙海峰,等. 我国黄芪药材资源现状与分析[J]. 中国中药杂志,2013,38(19):3234-3238.
QIN X M, LI Z Y, SUN H F, et al. Status and analysis of *Astragalus Radix* resource in China[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2013,38(19):3234-3238.
- [3] 姬丽君,席旭东,晋小军. 蒙古黄芪物候期研究[J]. 草业学报,2013,22(1):60-67.
JI L J, XI X D, JIN X J. A study on phenological phases of *Astragalus membranaceus* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013,22(1):60-67.
- [4] 马莹莹,关一鸣,王秋霞,等. 黄芪主要病害及防治措施研究进展[J]. 特产研究,2019,41(4):101-107.
MA Y Y, GUAN Y M, WANG Q X, et al. Research progress on main diseases and control measures of *Astragalus membranaceus* [J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 2019,41(4):101-107.
- [5] GONG H J, CHEN K M. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012,34(4):1589-1594.
- [6] TAMAI K, MA J F. Reexamination of silicon effects on rice growth and production under field conditions using a low silicon mutant[J]. *Plant and Soil*, 2008,307(1-2):21-27.
- [7] CAI K Z, GAO D, LUO S M, et al. Physiological and cytological mechanisms of silicon-induced resistance in rice against blast disease[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008,134(2):324-333.
- [8] 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[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(5):1023-1028.
SUN W C, XUE G F, ZHANG J, et al. Influences of silicon on activities of key defense enzymes in rice leaves infected by *Magnaporthe grisea* in relation to rice blast resistance[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009,15(5):1023-1028.
- [9] 刘红芳,宋阿琳,范分良,等. 施硅对水稻白叶枯病抗性及其叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22

- (3): 768-775.
- LIU H F, SONG A L, FAN F L, *et al.* Effects of silicon application on resistance against bacterial blight and antioxidant defense activities of rice leaves[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, **22**(3): 768-775.
- [10] SEEBOLD K W Jr, DATNOFF L E, CORREA-VICTORIA F J, *et al.* Effects of silicon and fungicides on the control of leaf and neck blast in upland rice[J]. *Plant Disease*, 2004, **88**(3): 253-258.
- [11] 杨艳芳, 梁永超, 娄运生, 等. 硅对小麦过氧化物酶、超氧化物歧化酶和木质素的影响及与抗白粉病的关系[J]. *中国农业科学*, 2003, **36**(7): 813-817.
- YANG Y F, LIANG Y C, LOU Y S, *et al.* 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.
- [12] BOWEN P, MENZIES J, EHRET D, *et al.* Soluble silicon sprays inhibit powdery mildew development on grape leaves [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1992, **117**(6): 906-912.
- [13] 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): 267-271.
- 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): 267-271.
- [14] 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.
- [15] 陈泰祥, 陈秀蓉, 王艳, 等. 甘肃省黄芪白粉病病原鉴定及田间药效试验[J]. *农药*, 2013, **52**(8): 599-601.
- CHEN T X, CHEN X R, WANG Y, *et al.* Pathogen identification and chemical control of powdery mildew on *Astragalus membranaceus* [J]. *Agrochemicals*, 2013, **52**(8): 599-601.
- [16] 何晨, 史娟, 沈海, 等. 不同药剂处理对黄芪根腐病的防治效果[J]. *草业科学*, 2013, **30**(12): 1 948-1 952.
- HE C, SHI J, SHEN H, *et al.* Research of different pesticide treatment on controlling the root disease of *Astragalus mongholicus* [J]. *Pratacultural Science*, 2013, **30**(12): 1 948-1 952.
- [17] EPSTEIN E. Silicon in plants: Facts vs. concepts[J]. *Studies in Plant Science*, 2001, **8**: 1-15.
- [18] MATEOS-NARANJO E, ANDRADES-MORENO L, DAVY A J. Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, **63**: 115-121.
- [19] 郑世英, 郑建峰, 徐建, 等. 外源硅对 PEG 胁迫下小麦幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, **35**(2): 74-78.
- ZHENG S Y, ZHENG J F, XU J, *et al.* Effects of exogenous silicon on plant growth and activity of anti-oxidative enzymes in wheat seedlings under drought stress[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, **35**(2): 74-78.
- [20] MITTLER R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, **7**(9): 405-410.
- [21] LI G, WAN S W, ZHOU J, *et al.* Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of Castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels[J]. *Industrial Crops and Products*, 2010, **31**(1): 13-19.
- [22] 李国景, 刘永华, 朱祝军, 等. 外源硅对长豇豆锈病抗性的影响及其生理机制[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2007, **33**(3): 302-310.
- LI G J, LIU Y H, ZHU Z J, *et al.* Effect of exogenous silicon on resistance of *Asparagus bean* rust and its physiological mechanism[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2007, **33**(3): 302-310.
- [23] KIM Y H, KHAN A L, WAQAS M, *et al.* Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**: 510.
- [24] HUSSAIN S, MUMTAZ M, MANZOOR S, *et al.* Foliar application of silicon improves growth of soybean by enhancing carbon metabolism under shading conditions[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, **159**: 43-52.
- [25] 张梅. 施硅对石灰性土壤上鲜食葡萄生长、产量及果实品质性状的影响[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2018.
- [26] 张文晋. 早盐逆境下硅提高甘草药材产量和品质的生理生化机制研究[D]. 银川: 宁夏医科大学, 2017.

(编辑: 裴阿卫)