

硅对干旱胁迫下野生大豆幼苗生长和生理特性的影响

郑世英¹, 郑晓彤², 耿建芬¹, 郑芳¹, 李士平¹, 潘恩敬¹, 李东臣¹

(1. 德州学院 生态与园林建筑学院, 山东 德州 253023; 2. 中国人民大学 统计学院, 北京 100872)

摘要:为探讨外源硅对干旱胁迫下野生大豆生长的影响,以野生大豆为试验材料,研究不同浓度外源硅对干旱胁迫下大豆幼苗的生长及生理特性的影响。结果表明:干旱胁迫会使野生大豆鲜重、干重、叶绿素含量、根系活力及 SOD、CAT、POD 活性降低,细胞膜透性、MDA、游离脯氨酸及可溶性糖含量增加。随着硅处理浓度的不断升高,野生大豆鲜重、干重、叶绿素含量、根系活力逐渐增加;低浓度硅胁迫提高了 SOD、CAT、POD 活性,降低了细胞膜透性、MDA、游离脯氨酸及可溶性糖含量,随着硅胁迫浓度的不断提高,SOD、CAT、POD 活性逐渐下降,细胞膜透性、MDA、游离脯氨酸及可溶性糖含量先下降再升高。说明一定浓度的外源硅能有效促进干旱胁迫下野生大豆幼苗的生长,提高抗氧化酶活性,降低细胞膜透性、MDA、游离脯氨酸及可溶性糖含量,能够缓解干旱胁迫对野生大豆幼苗的危害,提高野生大豆抗旱能力。

关键词:硅;干旱胁迫;野生大豆;生理特性

中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2018.02.0263

Effects of Silicon on Growth and Physiological Characteristics of Wild Soybean Seedlings Under Drought Stress

ZHENG Shi-ying¹, ZHENG Xiao-tong², GENG Jian-fen¹, ZHENG Fang¹, LI Shi-ping¹, PAN En-jing¹, LI Dong-chen¹

(1. College of Ecology and Landscape Architecture, Dezhou University, Dezhou 253023, China; 2. School of Statistics, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: In order to explore the effect of exogenous silicon on the growth of wild soybean under drought stress, the effects of different concentrations of exogenous silicon on the growth and physiological characteristics of soybean seedlings under drought stress were studied. The results showed that drought stress could reduce the fresh weight, dry weight, chlorophyll content, root vigor and SOD, CAT, POD activity of wild soybean, and increase cell membrane permeability, MDA content, free proline and soluble sugar content. With the increasing of silicon concentration, fresh weight, dry weight, chlorophyll content and root vigor of wild soybean increased. Low concentration of silicon stress increased the activity of SOD, CAT and POD, reduced cell membrane permeability, MDA content, free proline and soluble sugar content, with the increasing of silicon stress concentration, SOD, CAT, POD activity gradually decreased, cell membrane permeability, MDA content, free proline and soluble sugar content decreased first and then increased. It indicated that exogenous silicon could effectively promote the growth of wild soybean seedlings under drought stress, improve the antioxidant enzyme activity, reduce cell membrane permeability, MDA content, free proline and soluble sugar of content, so exogenous silicon can alleviate the harm of drought stress to wild soybean seedlings and improve the drought resistance of wild soybean.

Keywords: Silicon; Drought stress; Wild soybean; Physiological property

干旱胁迫是自然界最主要的非生物胁迫之一,地球上大约有 1/3 的土地属于缺水的干旱和半干旱地区,我国约有 1/2 的土地属于干旱半干旱地区,甚至半湿润、湿润地区也经常会受到季节性或临时性的干旱胁迫^[1]。野生大豆(*Glycine soja*)多为一年生或多年生草本植物,为栽培大豆(*Glycine max*)的祖先物种,具有高蛋白、抗性强、适应广和繁殖能力强等特性^[2]。豆类植物因需水量高,根系不发达,因此对水分胁迫较敏感,黑龙江省鸡东县属中温带大陆性季风气候,具有十年九旱的气候特征,鼓粒期遇到干旱对大豆生产影响最大^[3]。硅元素是地球表面的重要元素之一,对大多数植物的生长具有促

进作用。研究表明,硅能提高许多植物对逆境胁迫的抗性,增加植物的生物学产量^[2],降低植物的蒸腾速率^[4],作物吸收硅后能够促进其生长发育并且提高对环境的适应性^[4]。目前,关于硅或干旱单一因子胁迫对野生大豆生理指标的影响已有研究^[5-6],而有关二者复合处理对野生大豆生理特性的影响研究较少。为此,通过研究不同浓度的硅及不同程度的干旱处理及其相互作用对野生大豆生理特性的影响,旨在为合理配置外源硅及水资源管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试野生大豆种子于2015年10月采自山东省东营市黄河入海口的盐碱滩上自然生长的野生大豆,其土壤平均含盐量均大于1%。

1.2 试验设计

试验于2016年5月在德州学院生态与园林建筑学院温室内进行。选取籽粒饱满、大小一致的野生大豆种子,在0.1% HgCl₂溶液中消毒10 min,然后自来水冲洗干净后浸种6 h,用小刀划破种皮,种植于20 cm的花盆内,盆内装入用自来水冲洗干净的细湿沙。待大豆幼苗长至两叶一心时,每个花盆中保留长势一致的幼苗3株,进行干旱胁迫处理。利用PEG6000模拟干旱条件(渗透势约为0.50 MP)。试验处理:(1)对照(CK);(2)PEG;(3)Si1:PEG+0.1 mmol·L⁻¹ Si;(4)Si2:PEG+0.5 mmol·L⁻¹ Si;(5)Si3:PEG+1.0 mmol·L⁻¹ Si。每个处理6个

重复。试验中所用的Si为硅酸钾(分析纯),干旱胁迫20 d后测定生长量及各项生理指标。

1.3 方法

生物量的测定:每个处理取3株大豆幼苗,利用蒸馏水冲洗,用吸水纸把其表面水分吸干,分别称取地上、地下鲜重(fresh weight, FW)。然后于110℃温度条件下杀青10 min,在烘箱内80℃烘干至恒重,分别称取其地上、地下干重(dry weight, DW)。

叶绿素含量的测定采用丙酮研磨提取法^[7];根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[7];细胞膜透性(CMP)测定采用相对电导率法^[7];超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑法^[7]。过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用紫外分光光度法^[8]。过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚显色法^[8],丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸法^[8]。脯氨酸含量的测定采用酸性茚三酮法^[8],可溶性糖含量的测定采用蒽酮—浓硫酸法^[8]。

2 结果与分析

2.1 硅对干旱胁迫下野生大豆幼苗生物量的影响

如表1所示,与对照相比,干旱胁迫下野生大豆的地下和地上鲜重、干重均显著下降($P\leq 0.05$),分别为对照的62.80%、50.74%和57.74%、41.32%。与PEG单独处理相比,随着外源硅调节浓度的增加,野生大豆地下和地上鲜重、干重呈现逐渐上升的趋势。

表1 硅对干旱胁迫条件下野生大豆幼苗生物量的影响

Table 1 Effect of silicon on *Glycine Soja* growth under drought stress (g·盆⁻¹)

处理 Treatment	地下部鲜重 FW of underground	地下部干重 DW of underground	地上部鲜重 FW of shoot	地上部干重 DW of shoot
CK	6.02 ± 0.12 a	0.71 ± 0.01 a	20.16 ± 0.14 a	7.89 ± 0.14 a
PEG	3.78 ± 0.21 d	0.41 ± 0.02 d	10.23 ± 0.09 d	3.26 ± 0.17 d
Si1	3.97 ± 0.24 d	0.42 ± 0.02 d	11.29 ± 0.15 c	3.87 ± 0.15 c
Si2	4.33 ± 0.27 b	0.47 ± 0.01 c	11.87 ± 0.21 d	4.08 ± 0.13 b
Si3	4.89 ± 0.30 b	0.52 ± 0.01 b	12.42 ± 0.23 b	4.35 ± 0.12 b

同列不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平显著差异。下同。
Different lowercase in the same column mean significant difference at 5% level. The same as below.

2.2 硅对干旱胁迫下野生大豆叶绿素含量的影响

如表2所示,单独干旱胁迫下,野生大豆叶绿素含量明显低于对照,叶绿素a、b及a/b分别降低了64.43%、53.85%和23.02%。与单独PEG处理相

比,加入了浓度分别为0.1、0.5和1.0 mmol·L⁻¹的硅处理后,野生大豆叶绿素a含量分别增加了36.67%、47.88%和55.18%,叶绿素b含量分别增加30.56%、79.63%和93.52%,差异显著($P\leq$

0.05),说明加入外源硅缓解了单纯干旱胁迫对叶绿素 a 和 b 的伤害,但不能够完全恢复到对照处理的程度;叶绿素 a/b 数量随着硅处理浓度的增加而逐渐降低,并且差异显著($P\leq0.05$)。

表 2 硅对干旱胁迫条件下野生大豆叶绿素 a、b 和叶绿素 a/b 的影响

Table 2 Effect of silicon on the chlorophyll content in <i>Glycine Soja</i> under drought stress			
处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b Chlorophyll b /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
CK	16.56 ± 0.52 a	2.34 ± 0.36 a	7.08 ± 0.32 a
PEG	5.89 ± 0.33 b	1.08 ± 0.15 b	5.45 ± 0.27 b
Si1	8.05 ± 0.40 c	1.41 ± 0.17 c	5.71 ± 0.18 b
Si2	8.71 ± 0.19 c	1.94 ± 0.11 d	4.49 ± 0.13 c
Si3	9.14 ± 0.24 c	2.09 ± 0.13 d	4.37 ± 0.12 c

2.3 硅对干旱胁迫下野生大豆根系活力和细胞膜透性的影响

如表 3 所示,干旱胁迫下野生大豆的根系活力明显降低,与对照相比,根系活力降低了 27.60%。加入硅胁迫后,随着硅胁迫处理浓度的增加,根系活力不断增加。与单独干旱处理相比,加入了浓度分别为 0.1,0.5 和 1.0 mmol·L⁻¹ 的硅处理后,野生大豆根系活力分别升高了 4.85 %、17.96% 和 29.73%。干旱胁迫下野生大豆根系活性下降,说明干旱导致根系受到损伤,呼吸能力降低,活力下降。

表 3 硅对干旱胁迫下野生大豆根系活力及细胞膜透性的影响

Table 3 Effect of silicon on the root activity and CMP in <i>Glycine Soja</i> under drought stress		
处理 Treatment	根系活力 Root activity/(μg·mg ⁻¹ ·h ⁻¹)	相对电导率 REC/%
CK	11.38 ± 0.45 a	36.74 ± 1.38 a
PEG	8.24 ± 0.34 b	50.18 ± 2.14 b
Si1	8.64 ± 0.32 b	46.72 ± 2.57 b
Si2	9.72 ± 0.56 c	40.31 ± 3.15 c
Si3	10.69 ± 0.37 d	42.87 ± 2.61 c

干旱胁迫下,野生大豆叶片的相对电导率比对照增加了 36.58%,说明干旱条件导致野生大豆幼苗叶片细胞膜受到伤害,增加了细胞膜通透性^[9]。加入浓度为 0.1,0.5 和 1.0 mmol·L⁻¹ 的硅处理后,野生大豆相对电导率分别比 PEG 处理降低了

6.90%、19.67% 和 14.57%。但仍高于对照处理,由此说明加入外源硅能够有效缓解干旱胁迫对野生大豆叶片细胞膜的损伤,增强了野生大豆幼苗抗旱性。

2.4 硅对干旱胁迫下野生大豆活性氧清除酶系统的影响

如表 4 所示,干旱胁迫下,与对照相比,野生大豆 SOD、CAT 和 POD 活性均降低,分别降低了 34.19%、39.92% 和 41.93%。说明干旱胁迫导致野生大豆保护酶活性降低。与单独干旱处理相比,加入了浓度分别为 0.1,0.5 和 1.0 mmol·L⁻¹ 的硅处理后,野生大豆 SOD 活性分别增加了 9.95%、14.53% 和 1.61%,CAT 活性分别增加了 18.50%、26.28% 和 10.30%,POD 活性分别增加了 27.41%、36.72% 和 17.68%。均显著高于单独干旱处理,但均低于对照处理,由此表明,硅提高了干旱胁迫下野生大豆植株的 POD、SOD 和 CAT 活性,抑制了自由基的积累,从而增强了野生大豆植株的抗旱能力。

表 4 硅对干旱胁迫下野生大豆保护酶活性的影响

Table 4 Effects of silicon on the SOD、CAT and POD activity in <i>Glycine Soja</i> under drought stress (U·g ⁻¹ FW)			
处理 Treatment	SOD	CAT	POD
CK	81.25 ± 1.56 a	42.38 ± 1.24 a	98.45 ± 2.36 a
PEG	53.47 ± 1.73 b	25.46 ± 0.69 b	57.17 ± 1.45 b
Si1	58.79 ± 2.04 c	30.17 ± 0.78 c	72.84 ± 2.33 c
Si2	61.24 ± 2.16 c	32.15 ± 1.02 c	78.16 ± 3.06 d
Si3	54.33 ± 1.87 b	28.08 ± 0.54 c	67.28 ± 1.87 e

2.5 硅对干旱胁迫下野生大豆 MDA 含量和渗透调节物质含量的的影响

如表 5 所示,干旱胁迫增加了野生大豆 MDA 含量,较对照增加了 63.52%。加入了浓度分别为 0.1,0.5 和 1.0 mmol·L⁻¹ 的硅处理后,野生大豆 MDA 含量分别降低了 16.67%、21.71% 和 12.56%,均高于对照。说明外源硅可降低干旱胁迫下野生大豆的 MDA 含量。

干旱胁迫下,游离脯氨酸和可溶性糖含量大量积累,较对照分别增加了 21.12% 和 42.84%。加入了浓度分别为 0.1,0.5 和 1.0 mmol·L⁻¹ 的硅处理后,野生大豆脯氨酸和可溶性糖含量分别较单独干旱处理降低了 11.97%、14.18%、2.94% 和 5.75%、17.38%、13.61%,但均高于对照(表 5)。

表5 硅对干旱胁迫条件下野生大豆丙二醛含量
和叶片渗透调节物质含量的影响

Table 5 Effects of silicon on the MDA and
osmotic adjustment substance content
in *Glycine Soja* under drought stress

处理 Treatment	丙二醛 MDA /(nmol·g ⁻¹ FW)	游离脯氨酸 Free proline /(mg·g ⁻¹ FW)	可溶性糖 Soluble sugar /(mg·g ⁻¹ FW)
CK	18.45 ± 0.17 a	7.86 ± 0.24 a	11.32 ± 0.35 a
PEG	30.17 ± 0.36 b	9.52 ± 0.33 b	16.17 ± 0.42 b
Si1	25.14 ± 0.43 c	8.38 ± 0.18 c	15.24 ± 0.27 b
Si2	23.62 ± 0.15 c	8.17 ± 0.26 c	13.36 ± 0.30 c
Si3	26.38 ± 0.42 c	9.24 ± 0.37 b	13.97 ± 0.28 c

3 结论与讨论

干旱胁迫下,大豆的光合作用会受到抑制,造成光合器官的破坏^[9],影响植物的正常生长,降低生物量。本研究表明,干旱胁迫均降低了野生大豆的地下部干、鲜重和地上部干、鲜重,说明干旱降低了野生大豆的光合效率。0.1,0.5和1.0 mmol·L⁻¹外源硅处理均提高了干旱胁迫下野生大豆的地下部干、鲜重和地上部干、鲜重。这可能与加入外源硅能够改变叶片的结构,提高植物的光合效率有关,硅通过改变植株叶片结构而降低蒸腾,提高保水能力^[10]。本研究中,干旱胁迫导致叶绿素 a、b 均降低,而外源硅条件下,提高了叶绿素 a、b 含量,说明外源硅通过增加叶绿素 a、b 含量,保障了野生大豆光合作用的顺利进行,提高了野生大豆光合效率,从而促进野生大豆的生长,增强了其耐干旱能力。

根系是植物重要的吸收和合成器官,其生长状况和活力水平直接影响植物地上部的营养状况,根系活力指作物根系的吸收、合成、氧化和还原能力等,是一种客观地反映根系生命活动的生理指标^[11]。根系活力对植物地上部的生长产生的直接影响与根系呼吸密切相关。干旱胁迫条件下,外源硅提高了野生大豆根系活力,可能硅提高了野生大豆代谢能力,缓解了干旱对植物的伤害。细胞膜透性是评价植物对逆境胁迫的指标之一,其大小与胁迫程度呈正相关^[12]。细胞膜透性增大是由于膜受到损伤而引起,而细胞膜损伤与膜脂过氧化作用具有相关性,逆境胁迫是通过促进膜脂过氧化作用而导致细胞膜受到伤害^[13]。干旱胁迫下野生大豆幼苗叶片细胞膜透性大小用相对电导率表示。本研究表明加入外源硅后,细胞膜透性降低,有效缓解了干旱胁迫对野生大豆细胞膜的损伤,促进了野生

大豆幼苗抗旱性增加,缓解了干旱胁迫的影响。

植物在逆境环境下,往往发生膜质过氧化作用,其最终产物是 MDA,其含量大小能够反映植物遭受逆境胁迫的伤害程度,含量越大,表示受伤害程度越大^[14]。MDA 是细胞膜脂过氧化作用的产物,反映植物对逆境条件反应的强弱。逆境胁迫下,MDA 产生数量能够代表膜质过氧化程度^[15]。楼靓珺等^[16]研究表明 MDA 含量随干旱时间的延长而增加。本研究表明,干旱胁迫导致膜质过氧化程度增加,而外源硅处理下野生大豆抗细胞膜脂过氧化作用的能力减弱。

植物组织在受到干旱等逆境胁迫时候能够产生自由基^[11]。自由基能够引起膜脂过氧化、损坏膜系统和蛋白质等破坏植物功能分子。逆境胁迫下植物体中的保护酶系统,能降低或消除自由基^[14]。例如,SOD 能够消除超氧化物阴离子自由基而产生 H₂O₂,H₂O₂ 能够被 CAT 和 POD 分解形成 H₂O。POD 可清除线粒体或胞浆中产生的浓度较低的 H₂O₂。保护酶系统包括许多酶和还原型物质,其中,SOD、CAT 和 COD 是主要的抗氧化酶,它们具有清除植物体内有害物质的作用,起到保护植物膜系统的作用^[15]。本试验结果表明,干旱胁迫下,SOD、CAT 和 COD 活性均降低,加入外源硅后,均增加了 3 种保护酶的活性,并且活性均高于对照,说明干旱胁迫能诱导野生大豆体内保护酶活性的升高,可以有效清除一部分由于干旱而生成的活性氧,以避免对植物产生伤害。外源硅能够降低保护酶活性,说明硅胁迫缓解了干旱对野生大豆的伤害,这与王丽燕^[17]的结果一致。

脯氨酸和可溶性糖是叶片有机渗透调节物质,当遇到逆境环境,它们会在植物体内大量积累,从而保持细胞膜和原生质胶体的稳定性,可保证原生质和环境的渗透平衡^[18]。干旱胁迫下,野生大豆脯氨酸和可溶性糖均增加,而外源硅处理均降低了干旱胁迫下野生大豆的脯氨酸和可溶性糖含量。脯氨酸通过调节细胞渗透压以维持细胞的含水量和膨压。脯氨酸也可以通过改善植物细胞膜和其它大分子物质的水环境增强细胞结构的稳定性^[18]。植物体内脯氨酸的积累与植物抗逆性有关,可作为抗逆性筛选的指标。糖是合成有机物的主要能量来源,通过渗透调节对原生质胶体和细胞膜起稳定作用,在植物对干旱胁迫的适应性调节中增加渗透性溶质^[19-20]。干旱胁迫下,为了抵抗干旱逆境,野生大豆脯氨酸和可溶性糖含量均升高,外源硅处理下,二者均降低,说明硅缓解了干旱对野生大豆的伤害。

可见,干旱胁迫下,外源硅对野生大豆生长和生理均有影响。干旱胁迫下合理施用硅能够提高野生大豆的抗旱性,并且可以通过提高野生大豆抗氧化酶活性,降低膜脂过氧化程度,增加渗透调节物质积累,提高光合速率进而促进生长。

参考文献

[1] 胡小梅,张必弦,朱延明,等. 野生大豆资源的研究与利用[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(22): 1311-1313. (Hu X M, Zhang B X, Zhu Y M, et al. Research and utilization of wild soybean resources[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(22): 1311-1313.)

[2] 陈伟,蔡昆争,陈基宁. 硅和干旱胁迫对水稻叶片光合特性和矿质养分吸收的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2620-2628. (Chen W, Cai K Z, Chen J N. Effects of silicon application and drought stress on photosynthetic traits and mineral nutrient absorption of rice leaves[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2620-2628.)

[3] 侯亚秋,张剑侠. 干旱对大豆的影响及防御措施[J]. 黑龙江气象, 2005(4): 23-24. (Hou Y Q, Zhang J X. Influence of drought on soybean and its defensive measures[J]. Heilongjiang Meteorology, 2005(4): 23-24.)

[4] 李明,王根轩. 干旱胁迫对甘草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(4): 503-507. (Li M, Wang G X. Effect of drought stress on activities of cell defense enzymes and lipid peroxidation in glycyrrhiza uralensis seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(4): 503-507.)

[5] 王林红,乔潇,乔亚科,等. PEG模拟干旱胁迫下不同类型大豆的生理生化影响[J]. 大豆科学, 2014, 33(3): 370-373. (Wang L H, Qiao X, Qiao Y K, et al. Physiological and biochemical responses of different soybeans under PEG simulated drought stress[J]. Soybean Science, 2014, 33(3): 370-373.)

[6] 沈雪峰,李召虎,段留生,等. 硅对大豆碳代谢及产量形成的影响[J]. 大豆科学, 2013, 32(2): 193-196. (Shen X F, Li Z H, Duan L S, et al. Effect of silicon on carbon metabolism and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2013, 32(2): 193-196.)

[7] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 57-60. (Zhang Z L, Qu W J. A guide of physiological experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 57-60.)

[8] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000: 76-78. (Gao J F. Plant physiology experiment technology[M]. Xi'an: World Book Inc., 2000: 76-78.)

[9] 王厚鑫,刘鸣达,张惠,等. 施硅对草地早熟禾生长特性和抗旱性的影响[J]. 北方园艺, 2007, 31(9): 135-137. (Wang H X, Liu M D, Zhang H, et al. Effect of Si application on Kentucky Bluegrass on growth characteristic and drought-resistance[J]. Northern Horticulture, 2007, 31(9): 135-137.)

[10] 周秀杰,赵红波,马成仓,等. 外源硅对黄瓜叶片组织结构和保水能力的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 556-559. (Zhou X J, Zhao H B, Ma C C, et al. Effects of exogenous silicon on leaf structure and water-holding capacity of cucumber plant[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(3): 556-559.)

[11] 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): 75-78. (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): 75-78.)

[12] 何淑平,靳亚忠,王鹏. 硅对干旱胁迫下四棱豆幼苗生物量和生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 263-267. (He S P, Jin Y Z, Wang P. Effects of silicon on biomass and physiological properties of winged bean seedling under drought stress[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 263-267.)

[13] 李清芳,马成仓,尚启亮. 干旱胁迫下硅对玉米光合作用和保护酶的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 531-536. (Li Q F, Ma C C, Shang Q L. Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 531-536.)

[14] 郑世英,王景平,李士平. 干旱胁迫对野生及栽培大豆幼苗生理特性及抗氧化酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 35-38. (Zheng S Y, Wang J P, Li S P. The effects of drought stress on characteristics and activities of antioxidase of *Glycine soja* and *Glycine max*[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 35-38.)

[15] 刘俊,廖柏寒,周航,等. 镉胁迫对大豆花荚期生理生态的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 176-182. (Liu J, Liao B H, Zhou H, et al. Effects of Cd²⁺ on the physiological and biochemical properties of *Glycine max* in flowering-podding phase[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 176-182.)

[16] 楼靓珺,宋新山,赵晓祥. 苗期大豆对土壤水分和空气湿度变化的生理生化响应[J]. 草业科学, 2013, 30(6): 898-903. (Lou L J, Song X S, Zhao X X. Response of physiology and biochemistry of soybean seedling to soil water deficit and air humidity[J]. Pratical Science, 2013, 30(6): 898-903.)

[17] 王丽燕. 硅对野生大豆幼苗耐盐性的影响及其机制研究[J]. 大豆科学, 2013, 32(5): 659-663. (Wang L Y. Effects of exogenous silicon on germination of *Glycine soja* under salt stress[J]. Soybean Science, 2013, 32(5): 659-663.)

[18] 李雁博,张蕴薇,哈依夏. 须芒草、藜草和柳枝稷对干旱和盐胁迫的生理响应[J]. 草业科学, 2014, 31(5): 905-914. (Li Y B, Zhang Y W, Ha Y X. Physiological responses of bluestem, reed canarygrass and switchgrass under drought and salinity stress[J]. Pratical Science, 2014, 31(5): 905-914.)

[19] 包卓,孟祥英,张晓松,等. 干旱胁迫对 5 种园林绿化植物光合速率和渗透调节的影响[J]. 江苏农业科学, 2010(3): 225-227. (Bao Z, Meng X Y, Zhang X S, et al. Effects of drought stress on photosynthetic rate and osmotic adjustment of 5 landscape plants[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2010(3): 225-227.)

[20] 丁燕芳,梁永超,朱佳,等. 硅对干旱胁迫下小麦幼苗生长及光合参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 471-478. (Ding Y F, Liang Y C, Zhu J, et al. Effects of silicon on plant growth, photosynthetic parameters and soluble sugar content in leaves of wheat under drought stress[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(3): 471-478.)