

麻云霞,李钢铁,张宏武,等. 外源硅对酸枣生长和生理生化特征的影响[J].江苏农业学报,2018,34(5):1113-1119.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2018.05.021

外源硅对酸枣生长和生理生化特征的影响

麻云霞¹, 李钢铁¹, 张宏武², 梁田雨¹, 马媛¹, 王少雄¹, 潘羿壅¹

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010018; 2.巴彦淖尔市林业科学研究所,内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要: 为了探讨外源硅提高酸枣抗旱性的相关生理机制,确定最佳外源硅使用质量浓度。本试验以酸枣品种南枣1号为试验材料,采用水培试验,用PEG6000(聚乙二醇6000,渗透势约为-0.15 MPa)模拟干旱胁迫,研究干旱胁迫下硅对酸枣生长及生理特性的影响。结果表明,干旱胁迫对酸枣幼苗叶片造成了氧化胁迫和渗透胁迫,降低了光合色素含量和光合速率,抑制了酸枣的生物量积累。不同质量浓度的硅对酸枣所受干旱胁迫作用的缓解程度不同,硅质量浓度为0.5~1.5 mmol/L缓解效果较好,过多施硅反而会产生抑制作用。在干旱胁迫下,随着施硅质量浓度的增加,水分利用率呈增加趋势,抗氧化酶活性、生物量呈先上升后降低趋势,无机离子含量逐渐降低。说明施硅可以使酸枣光合作用加强,通过调控植物体的营养状况、自身新陈代谢,提高植物的抗氧化酶活性和改善植物对光能的利用效率帮助植物抵御干旱胁迫,其中1.5 mmol/L硅处理对干旱胁迫下植株的保护作用最显著。

关键词: 硅; 干旱胁迫; 酸枣; 生理生化

中图分类号: S665.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)05-1113-07

Effects of exogenous silicon on growth, physiological and biochemical characteristics of *zizyphus jujube* plant

MA Yun-xia¹, LI Gang-tie¹, ZHANG Hong-wu², LIANG Tian-yu¹, MA Yuan¹, WANG Shao-xiong¹, PAN Yi-yong¹

(1. Desert Science and Engineering College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Research Institute of Forestry in Bayan Nur City, Bayan Nur 015000, China)

Abstract: In order to explore relevant physiological mechanism of exogenous silicon in improving drought resistance of *zizyphus jujube* and determine the optimal concentration of exogenous silicon, *zizyphus jujube* Nanzao No.1 was used as material for hydroponic experiments. Using PEG6000 (polyethylene glycol 6000, osmotic potential was about -0.15 MPa) to imitate drought stress, and the effects of silicon on growth and psychological characteristics of *zizyphus jujube* under situation of drought stress were researched. The result indicated that drought stress caused oxidative stress and osmotic stress on leaves of *zizyphus jujube* seedling, decreased photosynthetic pigment content and photosynthetic rate, and inhibited the biomass accumulation of *zizyphus jujube*. The relieved degree of different concentration of silicon to drought stress for *zizyphus jujube* was different, relieved effect of silicon was better when the concentration ranged from 0.5 mmol/L to 1.5 mmol/L.

收稿日期:2017-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(31260202);林业公益性行业科研专项(201504412)

作者简介:麻云霞(1991-),女,内蒙古乌盟人,硕士研究生,主要从事荒漠化防治研究。(E-mail)1572666975@qq.com

通讯作者:李钢铁,(E-mail)13848817183@163.com

Under drought stress, with the increase of silicon concentration, water use efficiency increased, antioxidant enzyme activity and biomass increased first and then decreased, inorganic ions content gradually decreased. In conclusion, the application of silicon can strengthen photosynthesis of *zizyphus jujube*, improve the antioxidant en-

zyme activity and improve the light use efficiency of plant for helping plant to defend drought stress by regulating the nutritional status of plants and metabolism, the protective effect of 1.5 mmol/L silicon treatment on plants under drought stress is the most significant.

Key words: silicon; drought stress; *Zizyphus jujube*; physiological and biochemical characteristics

世界上各国干旱面积分布较广,中国作为其中大国之一,干旱区面积占国土总面积一半以上,在防止其疆域蔓延和治理修复中投入了大量的物力和精力。在国内出版的科学研究报告中,干旱被视为环境危害之最^[1]。干旱是植物遭遇逆境胁迫最常见环境之一,对植物影响最大。水作为植株体内运输物质的载体,直接影响光合作用的产生和生理机制,并且,干旱会降低植物光合效率^[2]。同时干旱环境下通常会引起一系列对植物细胞、器官或组织有害的生理影响,如活性氧的堆积,而氧化损伤会使细胞受损和新陈代谢发生紊乱,会抑制植物的生长,使植物过早萎蔫^[3],因此,对植株抗旱性及作用机制的研究非常重要。

硅(Si)是地球上含量第二的元素,其广泛分布在土壤中,对植物生长存在正面效应^[4]。地表土中硅的平均含量为60%,但其中可以直接作用植物的有效硅含量仅为30~350 mg/kg^[5],并且许多土壤无法给植物提供充足的硅量,因此,施加适当质量浓度的硅肥可以改善植物生长状况,提高土壤肥力,使农作物产量增加^[6]。近几年,国内外学者从施加硅肥对植物抵抗逆境,抵抗重金属离子毒害,抵抗病虫害等几个方面进行了探索和报道。施硅使水稻的叶片表面因硅元素堆积产生“角质-双硅层”的特质覆盖膜,减小蒸腾速率,提高植株的保水性^[7]。硅肥的施加可以增强玉米在极端低温环境下的耐受性^[8]。在小麦上,施用硅肥可以提升小麦生长速率,增加光合色素含量,降低细胞膜透性,提高水分利用效率以及可溶性蛋白和可溶性糖的含量,且不同生长时期植物对硅肥的反应效能有所差异^[9]。

酸枣 [*Zizyphus jujuba* Mill var. *Spinosus* (Bunge) Hu ex H.F. Chou] 为鼠李科(Rhamnaceae)枣属(*Zizyphus* Mill)植物,原产于中国,灌木,少数为小乔木,别名山枣、棘。酸枣燃烧时提供较强热能,烧后残骸少,是新一代环保节能、经济适用的炭材和建筑雕塑用料的上乘材料^[10],是良好的能源物种、经济物种,同时含有大量的药用功能和营养功能。以往关于外源硅的研究大多集中在水稻、小麦、玉米等农作物及

黄瓜、番茄、豇豆等蔬菜上,而关于外源硅对其他灌木、小乔木植物的研究却鲜见报道。本试验通过对干旱胁迫条件下的酸枣添加外源硅,探究外源硅对模拟干旱条件下酸枣幼苗生理生化指标的影响,并探索减轻酸枣干旱胁迫伤害的最适硅质量浓度,从而为研究硅对调控植物生长发育的作用和增强植物抗逆性等方面提供理论依据,也为科学配置旱区植物景观和优化植物日常养护管理提供科学参考以及抗旱节水型沙地植被资源筛选和促进其规范化栽培提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料及处理

以酸枣品种南枣1号为供试材料,由巴彦淖尔市林业科学研究所提供。于2016年内蒙古农业大学科教示范区开展研究,使用Hoagland营养液水培育苗,酸枣幼苗的培养均在实验室内进行,试验期间平均温度为28℃左右,平均相对湿度为60.16%,晴天午间光照度为1400~1800 μmol/(m²·s)。用花盆作为水培器材,将塑料泡沫板打孔后置于盆表面做遮光处理,防止光照对根系发育造成影响,待幼苗长至3叶1心时,将幼苗栽在16 cm×15 cm×16 cm花盆内,每盆栽植2株,并且用泡沫板固定,放置在Hoagland营养液中培养,pH调至6~7,营养液每3 d更换一次。待幼苗长至6叶1心时,将长势均匀的酸枣苗移栽至载体的孔中水培,进行PEG6000处理。

试验共设6个处理:对照(CK),PEG处理,PEG+0.5 mmol/L Si处理(B₁),PEG+1.0 mmol/L Si处理(B₂),PEG+1.5 mmol/L Si处理(B₃),PEG+2.0 mmol/L Si处理(B₄),每个处理重复4次,PEG处理为营养液中聚乙二醇质量浓度为15%,渗透势约为-0.15 MPa。每个处理30盆,分成3组,随机区组排列。使用的硅源是硅酸钾,由所用硅源带入的钾量从配制Hoagland营养液的材料硝酸钾中去除,由此造成的NO₃⁻丢失用稀硝酸补偿^[11],以上化学药品均为分析纯。PEG处理10 d后采样测定各项指标。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 生物量等指标的测定 取酸枣植株,剪取地上部和地下部,用蒸馏水洗净,用吸水纸吸干表面的水分,称取鲜质量。然后将其在 110 °C 杀青 30 min,于 75 °C 烘干至恒重,称取干质量。参照韩晓日等^[12]的方法测定相对生长速率。测定试验期间植物所用灌水量,计算水分利用效率。

1.2.2 叶片光合色素含量的测定 光合色素包括叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素,采用张志良等^[13]的方法进行测定,使用紫外分光光度计测定不同波段下的吸光度,每个处理 3 次重复。

1.2.3 抗氧化酶活性的测定 称取约 0.5 g 叶片,加 1 ml 预冷的磷酸缓冲液在冰浴上研磨成浆,4 °C 下 4 000 r/min 离心 15 min,上清液即为粗酶液,用于超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的测定。SOD 活性测定采用氮蓝四唑(NBT)法,POD 活性测定采用愈创木酚法,CAT 活性测定采用紫外分光光度计法^[14]。

1.2.4 叶绿素荧光参数的测定 测定前将酸枣幼苗暗适应一夜,6 月 1 日凌晨用德国 Walz 公司生产的 PAM-2000 便携式荧光仪测定第 3 片真叶的叶绿素初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m),并计算可变荧光($F_v = F_m - F_0$),PS II 原初光能转化效率(F_v/F_m)。

1.2.5 无机离子含量的测定 称取 0.3 g 烘干磨碎的叶片样品放置 150 ml 三角瓶内,加入 5 ml 高氯酸和 15 ml 浓硝酸浸泡(静置过夜),然后在电热板上于 180 °C 下消煮至透明色,冷却后用去离子水定容至 50 ml,用 Vurian 公司(美国)生产的 SpectrAA220FS 火焰原子吸收光谱仪测定 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 含量。

1.3 数据处理

数据采用 SPSS 软件包进行方差分析。其中处

理平均数间差异显著性采用 Duncan's 新复极差法进行检验。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下硅对酸枣幼苗生长的影响

由表 1 可知,单一干旱胁迫(PEG)处理的相对生长速率低于对照(CK)和各施硅处理(B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4),但各施硅处理相对生长速率低于对照,干旱胁迫抑制了酸枣幼苗的生长发育,施硅提高了干旱胁迫下植株的相对生长速率。干旱胁迫处理第 10 d, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 处理相对生长速率比 PEG 处理分别提高 11.54%、23.08%、50.00%、15.38%。PEG 处理与 CK 相比,酸枣地上部和地下部鲜质量以及地上部和地下部干质量都显著降低($P < 0.05$),分别降低了 43.76% 和 59.88%、55.06% 和 49.38%。与 PEG 处理相比,干旱胁迫条件下,施硅处理调节了植物生物量的聚集,且随着施硅质量浓度增加,酸枣幼苗地上部和地下部鲜质量以及地上部和地下部干质量呈先升高后降低的趋势,低质量浓度硅处理可以明显促进酸枣地上部和地下部鲜质量以及地上部和地下部干质量的增加,0.5~1.5 mmol/L 硅处理能改善干旱胁迫下酸枣幼苗发育状况,说明在这期间不同质量浓度硅均能促进植株的发育,减轻干旱胁迫对酸枣幼苗各生理机能的影响,在硅质量浓度为 1.5 mmol/L 时效果达到最好,而在硅质量浓度为 2.0 mmol/L 时,酸枣地上部和地下部鲜质量以及地上部和地下部干质量呈降低趋势。另外,硅处理还显著提高了干旱胁迫下酸枣的水分利用效率,最高可提高 41.67%,这些结果说明硅提高了植株的保水能力。试验结果表明,施用适当质量浓度硅可缓解干旱胁迫下酸枣幼苗的发育状况。

表 1 干旱胁迫下硅对酸枣幼苗生长的影响

Table 1 Effects of silicon on growth of *zizyphus jujube* seedlings under drought stress

处理	相对生长速率 (mg/d)	地下部鲜质量 (g, 1 株)	地上部鲜质量 (g, 1 株)	地下部干质量 (g, 1 株)	地上部干质量 (g, 1 株)	水分利用效率 ($\mu\text{mol}/\text{mmol}$)
CK	0.45±0.03a	8.00±0.08a	17.80±0.02a	0.81±0.03a	8.90±0.15a	0.48±0.02ab
PEG	0.26±0.04b	3.21±0.23d	10.01±0.23d	0.41±0.56d	4.00±0.11d	0.57±0.01a
B_1	0.29±0.01b	3.67±0.11d	11.33±0.44d	0.51±0.16c	4.13±0.28c	0.60±0.03a
B_2	0.32±0.04a	5.11±0.36b	14.90±0.40b	0.55±0.01b	4.66±0.66b	0.64±0.02a
B_3	0.39±0.02a	5.44±0.15b	14.94±0.13b	0.60±0.02b	4.67±0.17b	0.68±0.03a
B_4	0.30±0.02a	3.99±0.99d	12.98±0.21c	0.50±0.10c	4.01±0.17d	0.68±0.04a

同一列数据不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。CK:对照;PEG:单一干旱胁迫处理; B_1 :PEG+0.5 mmol/L Si; B_2 :PEG+1.0 mmol/L Si; B_3 :PEG+1.5 mmol/L Si; B_4 :PEG+2.0 mmol/L Si。

2.2 干旱胁迫下硅对酸枣幼苗光合色素含量的影响

由表2得出,PEG处理下叶绿素a(Chl.a)、叶绿素b(Chl.b)、叶绿素a+b(Chl.a+Chl.b)、叶绿素a/叶绿素b与CK相比较低且差异显著($P < 0.05$),分别降低了50.86%、44.51%、49.82%和11.57%。施硅可提高光合色素含量,加入不同质量浓度的硅处理后, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 处理酸枣幼苗的Chl.a含量与PEG处理相比分别增加了1.75%、3.13%、9.63%和11.13%, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 处理酸枣幼苗的Chl.b含量与PEG处理相比分别增加了12.99%、28.81%、75.71%和74.58%, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 处理酸枣幼苗的Chl.a+Chl.b含量与PEG处理

相比分别增加了3.79%、7.78%、21.60%和22.62%。说明施硅处理缓解了干旱胁迫对叶绿素的伤害,但不能恢复到对照水平,并且施硅处理下Chl.a/Chl.b值低于PEG处理, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 处理的Chl.a/Chl.b含量比PEG处理的Chl.a/Chl.b减少9.76%、19.96%、37.69%和36.36%。干旱胁迫下,外源硅质量浓度增加的同时,Chl.a和Chl.a+Chl.b均呈上升趋势,Chl.b总量在0.5~1.5 mmol/L硅处理下逐渐增加,2.0 mmol/L开始下降,Chl.a/Chl.b在0.5~1.5 mmol/L硅处理下呈下降趋势,1.5 mmol/L硅处理时到达最小值,为2.81 mg/g,之后逐渐出现回升。

表2 干旱胁迫下硅对酸枣幼苗光合色素含量的影响

Table 2 Effects of silicon on photosynthetic pigment content of *zizyphus jujube* seedlings under drought stress

处理	叶绿素 a (mg/g)	叶绿素 b (mg/g)	叶绿素 a+b (mg/g)	叶绿素 a/叶绿素 b
CK	16.28±0.32a	3.19±0.18a	19.47±0.21a	5.10±0.18a
PEG	8.00±0.56c	1.77±0.12d	9.77±0.02d	4.51±0.22b
B_1	8.14±0.08c	2.00±0.50c	10.14±0.15c	4.07±0.19b
B_2	8.25±0.01c	2.28±0.16c	10.53±0.11c	3.61±0.25c
B_3	8.77±0.20b	3.11±0.21c	11.88±0.30b	2.81±0.31d
B_4	8.89±0.70b	3.09±0.16b	11.98±0.26b	2.87±0.11d

同一列数据不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。CK:对照;PEG:单一干旱胁迫处理; B_1 :PEG+0.5 mmol/L Si; B_2 :PEG+1.0 mmol/L Si; B_3 :PEG+1.5 mmol/L Si; B_4 :PEG+2.0 mmol/L Si。

2.3 干旱胁迫下硅对酸枣幼苗活性氧清除酶活性的影响

SOD、POD、CAT为植株体内活性氧清除剂,在逆境中其活性的增加有利于提高植物在逆境中的耐受性。由表3可知,PEG处理下酸枣幼苗SOD、POD、CAT的活性分别比CK低39.91%、32.57%和37.80%。施硅处理后SOD、POD和CAT活性增加,但都仍低于CK。与PEG处理相比, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 处理的SOD活性分别提高19.46%、58.72%、63.98%和52.10%,POD活性提高18.70%、41.53%、46.89%和36.35%,CAT活性提高23.12%、32.12%、57.91%和27.00%。干旱胁迫下,随着硅质量浓度的增加,酸枣幼苗叶片SOD、POD、CAT活性呈先升后降趋势,在硅质量浓度为1.5 mmol/L时,达到最大值,硅浓度达到2.0 mmol/L(B_4)时,SOD、POD、CAT活性分别比 B_3 处理降低了7.24%、7.18%、19.58%。试验结果表

明,适当质量浓度硅处理能显著提高干旱胁迫下SOD、POD、CAT这3种酶的活性,缓解酸枣幼苗体内生成的自由基对细胞膜的伤害作用,从而提高植物抗干旱胁迫的能力。

表3 干旱胁迫下硅对酸枣幼苗SOD、POD和CAT活性的影响

Table 3 Effects of silicon on the activities of SOD, POD and CAT of *zizyphus jujube* seedlings under drought stress

处理	SOD 活性 (U/g,FW)	POD 活性 (U/g,FW)	CAT 活性 [U/(g·min),FW]
CK	143.87±6.53a	153.80±8.78a	87.89±1.12a
PEG	86.45±7.21b	103.70±6.41b	54.67±6.26b
B_1	103.27±5.98b	123.09±5.01b	67.31±5.45b
B_2	137.21±2.20a	146.77±3.72a	72.23±3.28a
B_3	141.76±8.25a	152.33±6.01a	86.33±6.56a
B_4	131.49±5.59a	141.39±4.29a	69.43±2.50b

同一列数据不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。CK:对照;PEG:单一干旱胁迫处理; B_1 :PEG+0.5 mmol/L Si; B_2 :PEG+1.0 mmol/L Si; B_3 :PEG+1.5 mmol/L Si; B_4 :PEG+2.0 mmol/L Si。

2.4 干旱胁迫下硅对酸枣幼苗叶绿素荧光参数的影响

F_0 是 PS II 反应中心完全开放时的最小荧光产量,PS II 反应中心的破坏或不可逆失活会引起 F_0 的增加; F_m 是 PS II 反应中心完全关闭时的最大荧光产量,反映 PS II 的电子传递情况; F_v 是可变荧光,反映 PS II 原初电子受体 QA 的还原情况,是 PS II 反应中心光化学活性高低的标志。由表 4 可知,PEG 处理下酸枣幼苗 F_0 高于对照,其他 4 个施硅处理的 F_0 低于 PEG 处理,分别降低了 3.93%、3.93%、0.36%、4.64%,说明硅可以缓解干旱胁迫对 PS II 反应中心的影响。PEG 处理和 CK 比较, F_m 与

F_v 分别下降了 1.67%、3.11%, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 处理和 PEG 处理相比, F_m 增加幅度较小, F_v 也呈上升趋势,说明外源物质硅能提升干旱胁迫下叶绿素荧光产量。 F_v/F_m 与 F_v/F_0 为植株在受到外界侵害时光能转化中心较为灵敏的反应指标,同时被视作对逆境抵抗性能强弱的判别指标。干旱胁迫下,PEG 处理的酸枣幼苗 F_v/F_m 与 F_v/F_0 值都低于对照,分别降低了 1.55%、6.67%, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 处理的酸枣幼苗的 F_v/F_m 和 F_v/F_0 值均增加,并且和 CK 相近,说明外源硅提高了 PS II 反应中心原初光能转化效率和潜在光化学活性,增强了酸枣幼苗对逆境环境的抵抗能力。

表 4 干旱胁迫下硅对酸枣幼苗叶绿素荧光参数的影响

Table 4 Effects of silicon on the chlorophyll fluorescence parameters of *zizyphus jujube* seedlings under drought stress

处理	固定荧光(F_0) [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	最大荧光(F_m) [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	可变荧光(F_v) [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	可变荧光/最大荧光 (F_v/F_m)	可变荧光/固定荧光 (F_v/F_0)
CK	270	1 200	931	0.776	3.45
PEG	280	1 180	902	0.764	3.22
B_1	269	1 191	921	0.773	3.42
B_2	269	1 193	927	0.777	3.45
B_3	279	1 190	936	0.787	3.35
B_4	267	1 190	935	0.786	3.50

同一列数据不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。CK:对照;PEG:单一干旱胁迫处理; B_1 :PEG+0.5 mmol/L Si; B_2 :PEG+1.0 mmol/L Si; B_3 :PEG+1.5 mmol/L Si; B_4 :PEG+2.0 mmol/L Si。

2.5 干旱胁迫下硅对酸枣幼苗无机离子含量的影响

由表 5 可知,相比正常水分条件下,幼苗的无机离子含量在单一干旱胁迫环境中大量积累,PEG 处理下酸枣幼苗的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{3+} 含量较对照分别增加 24.33%、62.85%、33.08%、30.10% 和 28.32%,其中以 Na^+ 的积累幅度最大。施硅处理下,各离子含量均呈降低趋势, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 4 个处理的 K^+ 含量相比 PEG 处理分别降低了 13.38%、

16.85%、20.27% 和 24.65%; Na^+ 含量分别降低了 5.43%、9.74%、38.35% 和 38.47%; Ca^{2+} 含量分别降低了 7.88%、9.73%、18.91% 和 19.30%; Mg^{2+} 含量分别降低了 5.91%、8.74%、22.11% 和 22.62%; Fe^{3+} 含量分别降低了 10.30%、10.84%、19.08% 和 21.71%。在干旱胁迫下,施硅可以调节植物所积累的无机离子含量,从而提升植株的抗旱性。

表 5 干旱胁迫下硅对酸枣幼苗无机离子含量的影响

Table 5 Effects of silicon on the content of inorganic ion of *zizyphus jujube* seedlings under drought stress

处理	K^+ (g/kg)	Na^+ (g/kg)	Ca^{2+} (g/kg)	Mg^{2+} (g/kg)	Fe^{3+} (mg/kg)
CK	15.99±0.04b	4.98±0.84bc	9.34±0.03b	2.99±0.04b	278.90±0.04b
PEG	19.88±1.78a	8.11±0.89a	12.43±0.01a	3.89±0.03a	357.89±0.42a
B_1	17.22±3.22a	7.67±0.24a	11.45±0.03a	3.66±0.02a	321.02±0.37a
B_2	16.53±0.34b	7.32±0.58a	11.22±0.03a	3.55±0.01a	319.08±0.20a
B_3	15.85±0.56b	5.00±0.11bc	10.08±0.02b	3.03±0.05b	289.62±0.04b
B_4	14.98±0.37b	4.99±0.83bc	10.03±0.01b	3.01±0.01b	280.19±0.04b

同一列数据不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。CK:对照;PEG:单一干旱胁迫处理; B_1 :PEG+0.5 mmol/L Si; B_2 :PEG+1.0 mmol/L Si; B_3 :PEG+1.5 mmol/L Si; B_4 :PEG+2.0 mmol/L Si。

3 讨论

3.1 干旱胁迫下硅处理对植物生长的影响

生物量是植物体内生理性能和营养成分积累的重要指标,其含量多少直接决定植物的生长状况^[15]。生物量可以分成地上和地下两部分,地下生物量同时表明了植物根系的活力和发展特性。通常在逆境环境下,受胁迫植株根系会产生相应的变化,从而减轻植物所受到的危害^[16]。试验结果表明,逆境环境下,酸枣幼苗生长状况发生显著不同,植物的发育变差。在 PEG 处理下,随着硅质量浓度不断增加,地上、地下生物量都呈先上升再下降的趋势,其中适当的硅质量浓度是 0.5~1.5 mmol/L,过多施硅反而会产生抑制作用,且在硅质量浓度为 1.5 mmol/L 时处理效果最好,可显著提高酸枣植株的抗旱性,这与前人在其他作物上研究所取得的结论基本一致^[17-18],而随着硅质量浓度的持续增加,其生物量积累显著减低。水分利用效率表明植株对水分的吸收和转化过程,叶片水分利用效率在干旱胁迫时升高,原因可能是由于酸枣幼苗在一个相对短暂的逆境环境下,通过关闭部分气孔使蒸腾速率下降,减少了蒸腾失水,这与郝敬虹等^[19]关于外源水杨酸对黄瓜的研究结果一致。适宜质量浓度的硅对干旱胁迫下酸枣幼苗的发育具有促进作用,这和王耀品等提出植株的生长速率是对逆境胁迫最直观的反应相一致^[20],干旱胁迫下,高质量浓度硅导致植株长势变差、耐旱性能降低的关键因素归结为以下几个方面:植物蒸腾速率加快,流失大量水分;相对生长速率变快,地下部分的碳水化合物转运的总量降低;光合色素含量减少,光化学活性减弱;土壤溶液质量浓度增大,水势降低,影响植物对水分的吸收。这与孙明^[21]对干旱胁迫和施氮对结缕草整个种群的格局变化和个体生理指标的影响得出的结论相似。

3.2 干旱胁迫下硅处理对抗氧化酶活性及叶绿素荧光参数的影响

植物体内的 *SOD*、*POD*、*CAT* 是植物体内重要的抗氧化系统,清除过剩的自由基,防止膜质过氧化和细胞膜受到伤害^[22]。逆境环境使植物代谢平衡被打破,活性氧大量产生以及积累其他有毒物质,从而影响植物光合结构和光合速率,细胞发生膜质过氧化效应^[23]。试验结果表明,干旱胁迫下 *SOD*、*POD*、*CAT* 活性显著低于对照,干旱胁迫下,抗氧化酶系

统为了减轻外界对植株的生理伤害,消除有毒物质,使自身活性下降。抗氧化酶活性会随着硅质量浓度的增加,出现先上升再下降的趋势,这与杨慧颖^[24]对肥皂草,孙山^[25]对平邑甜茶的研究结论相同。硅质量浓度为 0.5~1.5 mmol/L 时, *SOD*、*POD*、*CAT* 活性增强,与余群^[26]对早熟禾的研究中得出随着硅质量浓度的增加 *CAT* 呈下降趋势的结论不同,其原因可能是抗氧化酶活性的变化会随着不同植物、同一植物不同生长时期、胁迫时间及程度的变化而变化。试验结果表明,干旱显著降低了酸枣叶片的叶绿素荧光参数,说明干旱胁迫破坏了植物的光合结构。干旱胁迫下,主要荧光参数 F_0 显著增加, F_m 、 F_v 、 F_v/F_m 与 F_v/F_0 值都下降,这与张永强等^[27]的研究结果一致, F_m 和 F_v 的同趋势变化表明水分调控对 F_v 的作用效果是因为 F_m 的变动而出现,而不是由 F_0 变化引起的。在出现干旱胁迫时,施硅能够缓解 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的变化幅度,增强光化学活性,从而提高光化学效率。

3.3 干旱胁迫下硅处理对无机离子含量的影响

目前对逆境环境下植株渗透调节的试验结果证明,在干旱环境下,很多树种会通过可溶性有机溶质或无机离子来改善植株的水分状况和维持细胞膨压,为其正常生命活动创造条件,合理的施硅在促进植株地上部分生长的同时,也促进了根系生长、无机离子的吸收和运转,由于植物产生有机渗透调节物质的能量代谢消耗较大,因此通过无机离子进行渗透调节是有效的抗旱途径^[28]。试验结果表明,逆境环境对酸枣的叶片无机渗透调节物质有显著作用,具体表现为 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 含量均在逐渐上升。而在 PEG 处理下,不同质量浓度的硅对植物均有调节生理反应的作用,都减轻干旱胁迫对植物造成的负面效应。Pei 等^[29]在小麦上进行研究,发现在 PEG 模拟干旱的条件下,外源硅的施加也降低了植物无机离子的含量。Kaya 等^[30]研究结果也得出类似结论。总之根据前人总结,虽然施硅处理降低了无机离子含量,但无机离子吸收的总量还是增加的^[31]。因此在干旱胁迫下,施硅处理可以调节无机离子的吸收和积累,但关于其中如何运转及吸收的生理过程则需要更深入研究。

总之,干旱胁迫下植物生长速度开始减缓,增施硅可提高干旱胁迫下酸枣幼苗的保水能力,相对缓解干旱胁迫所造成的抗氧化酶活性下降并调节无机

离子含量,减轻干旱对叶片光合作用的不良影响,提升水分利用效率,促进植物的生长发育,从而从整体上提高了酸枣幼苗的抗旱性。

参考文献:

- [1] 国家科学技术委员会,气候[M].北京:科学技术文献出版社,1990.
- [2] 张其德.干旱对植物的影响[J].植物杂志,1990,1(1):26-29.
- [3] JALEEL C A, RIADH K, GOPI R, et al. Antioxidant defense responses; physiological plasticity in higher plants under abiotic Constraints[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2009, 31(3): 427-436.
- [4] 杜建雄,刘金荣.硅对干旱胁迫下草坪草叶片保护酶系统及丙二醛含量的影响[J].草原与草坪,2010,30(1):45-49.
- [5] 高丹,陈基宁,蔡昆争,等.硅在植物体内的分布和吸收及其在病害逆境胁迫中的抗性作用[J].生态学报,2010,30(10):2745-2755.
- [6] 刘奇华,孙召文,信彩云,等.叶面施硅对水稻干物质生产及产量的影响[J].山东农业科学,2017,49(5):86-87.
- [7] AGARIE S H U, H ANAOKA N, UENO O, et al. Effect of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage[J]. Plant Production Science, 1998, 1(2): 96-103.
- [8] 陈兵兵,石元亮,陈智文.不同P、K、Si肥对玉米苗期抗寒效果的研究[J].中国农学通报,2011,27(3):85-89.
- [9] 郝立冬.硅肥对春小麦生长及产量品质的影响[D].大庆:八一农垦大学,2013.
- [10] 郭春芳,孙云,唐玉海,等.水分胁迫对茶树叶片叶绿素荧光特性的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(3):560-564.
- [11] LIANG Y C. Effects of silicon on enzyme activity and sodium potassium and calcium concentration in barley under salt stress[J]. Plant Soil, 1999, 209(11): 217-224.
- [12] 韩晓日,侯玉慧,姜琳琳,等.硅对盐胁迫下黄瓜幼苗生长和矿质元素吸收的影响[J].土壤通报,2006,37(6):1162-1165.
- [13] 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,2003.
- [14] 王学奎,黄见良.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2015.
- [15] 高秀萍,张勇强,童兆平,等.梨树在自然干旱条件下叶片解剖学特征[J].山西农业科学,2001,29(1):62-64.
- [16] BEARD J B. Turfgrass water stress; Drought resistance components physiological mechanisms and species-genotypes diversity Takahashi(ed) Proceedings of the Sixth International Turfgrass Research Conference [J]. Japanese Society of Turfgrass Science, 1989, 5(5): 23-28.
- [17] 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.
- [18] 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,2007,12(3):531-536.
- [19] 郝敬虹,易旸,尚庆茂,等.干旱胁迫下外源水杨酸对黄瓜幼苗膜脂过氧化和光合特性的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):717-723.
- [20] 王耀晶,马聪,张薇,等.干旱胁迫下硅对草莓生长及生理特性的影响[J].核农学报,2013,27(5):703-707.
- [21] 孙明,安渊,王齐,等.干旱胁迫和施氮对结缕草种群特征和生理特性的影响[J].草业科学,2010,27(9):57-63.
- [22] 樊怀福,郭世荣,段九菊,等.外源NO对NaCl胁迫下黄瓜幼苗生长和谷胱甘肽抗氧化酶系统的影响[J].生态学报,2008,28(6):2511-2517.
- [23] 樊怀福,杜长霞,郭世荣,等.钙和NO对NaCl胁迫下黄瓜幼苗生长和活性氧代谢的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1224-1231.
- [24] 杨慧颖,邓雅楠,许凌欣,等.干旱胁迫下硅对肥皂草抗氧化系统及膜质稳定性的影响[J].草业学报,2017,26(12):77-86.
- [25] 孙山,徐秀玉,程来亮,等.干旱胁迫下硅对平邑甜茶光合功能的影响[J].植物生理学报,2015,51(12):2231-2238.
- [26] 余群.干旱胁迫下硅肥对草地早熟禾苗期生长发育的影响[D].兰州:兰州大学,2014.
- [27] 张永强,毛学森,孙宏勇,等.干旱胁迫对冬小麦叶绿素荧光的影响[J].中国生态农业学报,2002,10(4):13-15.
- [28] 蔡喜悦,陈晓德,李朝政,等.干旱胁迫下外源钙对石灰岩地区复羽叶栎树种子萌发的影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1341-1346.
- [29] PEI Z F, MING D F, LIU D, et al. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2010, 29(1): 106-115.
- [30] KAYA C, TUNA L, HIGGS D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions[J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29(8): 1469-1480.
- [31] HAYASAKA T, FUJII H, NAMAI T. Silicon content in rice seedlings to protect rice blast fungus at the nursery stage[J]. Journal of General Plant Pathology, 2005, 71(3): 169-173.

(责任编辑:姜华珏)