

李爽. 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(22): 174-178.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.22.040

外源硅对干旱胁迫下大叶女贞光合作用及叶绿素荧光特性的影响

李爽

(武汉交通职业学院艺术学院, 湖北武汉 430063)

摘要:以盆栽大叶女贞幼苗为试材,研究在1% PEG-6000模拟干旱胁迫条件下,分别添加0、0.2、0.4、0.6 g/kg 外源硅(SiO₂)对大叶女贞光合作用及叶绿素荧光特性的影响。结果表明,随着干旱胁迫时间的延长,不同硅水平处理的大叶女贞叶片相对含水量(RWC)、光合色素含量、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(Φ_{psII})及光化学淬灭系数(q_p)等均逐渐下降,水分自然饱和亏(NSD)、非光化学淬灭系数(NPQ)逐渐上升,胞间二氧化碳浓度(C_i)则先降低后升高,且不同硅水平处理的变化幅度存在显著差异,以0.4 g/kg 硅水平处理效果最佳。胁迫12 d时,0.4 g/kg 硅水平处理的大叶女贞 RWC、叶绿素含量、类胡萝卜素含量、 P_n 、 G_s 、 T_r 、 F_v/F_m 、 Φ_{psII} 及 q_p 分别较0 d降低15.4%、52.34%、17.83%、34.65%、38.43%、21.84%、21.84%、23.33%和32.00%,而NSD、NPQ及 C_i 分别较0 d提升20.68%、66.18%和6.71%。胁迫12 d时,0.4 g/kg 硅水平处理的大叶女贞株高、茎粗及干质量分别较对照提升41.66%、15.09%和35.08%。综上所述,1% PEG-6000模拟干旱条件下,外源添加0.4 g/kg 的SiO₂可明显改善大叶女贞的叶片水分状况,抑制光合色素降解,提高叶片的光合作用速率,减轻光抑制程度,促进大叶女贞生长。

关键词:大叶女贞;模拟干旱;硅;光合作用;荧光参数

中图分类号:X173;S718.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)22-0174-05

干旱是我国较为常见的气象灾害之一,严重影响植物的生长发育,其危害程度在非生物逆境中占据首位^[1]。据统计,我国干旱和半干旱地区主要集中于北方,约占国土总面积的56%,而南方地区也因降水不均匀而常导致临时性干旱发生,干旱胁迫已成为限制园林植物生长发育的主要障碍因子,如何提高园林植物的耐旱性已成为当前亟待解决的关键问题之一^[2-3]。硅(Si)是植物生长发育不可或缺的元素之一,在土壤中含量非常丰富,但常以不溶性硅酸盐形式存在,因此,土壤中可被植物吸收利用的硅含量往往较低^[4-5]。目前,关于外援施硅对逆境下植物生长发育的影响,前人进行了大量的研究。吴森等研究表明,外援施硅可提高干旱胁迫下紫花苜蓿种子的发芽率、发芽势和胚根长,POD、SOD和CAT活性增加,MDA含量明显降低,耐旱性提高^[6];杨慧颖等研究表

明,外源施硅可使干旱胁迫下的肥皂草POD、SOD和CAT活性提高30%以上,相对电导率和MDA含量降低20%以上,有效提升了肥皂草的抗氧化能力,减缓干旱胁迫对细胞膜造成的破坏^[7];郑世英等研究表明,外源施用一定浓度的硅可有效促进干旱胁迫下野生大豆幼苗的生长,抗氧化酶活性明显提升,细胞膜透性明显降低,可在一定程度上缓解其因干旱胁迫造成的伤害,提高其抗旱能力^[8];曹逼力等研究表明,外源添加1.2 mmol/L Na₂SiO₃·9H₂O可明显改善1% PEG-6000模拟干旱胁迫条件下的番茄叶片水分状况,提高光合色素的含量和光化学效率,缓解因干旱胁迫造成的光抑制,有助于维持番茄叶片在干旱胁迫下的高光合速率^[9];孙山等研究表明,外源硅处理可明显降低干旱胁迫对甜茶叶片的PS I和PS II伤害程度,通过提高光合系统活性来促进PS I环式电子传递,甜茶幼苗的耐旱性得到显著提高^[10];林丽果等研究表明,外源添加硅可显著提高盐胁迫下高羊茅的出苗率、生物量、光合速率(P_n)和气孔导度(G_s),降低蒸腾速率(T_r)和胞间二氧化碳浓度(C_i),提高其耐盐性^[11];李天哲等研究表明,外援施

收稿日期:2018-08-14

作者简介:李爽(1983—),女,湖北武汉人,硕士,讲师,主要从事园林植物栽培及环境设计研究。E-mail:1846679582@qq.com。

[8] Kim H U, Lee K R, Go Y S, et al. Endoplasmic reticulum - located PDAT1 - 2 from castor bean enhances hydroxy fatty acid accumulation in transgenic plants [J]. Plant & Cell Physiology, 2011, 52(6): 983-993.

[9] 曾娟, 郭佩佩, 欧阳勇, 等. 海南蓖麻籽中脂肪酸的组成分析[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2009, 27(3): 259-260.

[10] 徐杰, 胡国华, 张大勇, 等. 大豆籽粒发育过程中脂肪酸组分

的累积动态[J]. 作物学报, 2006, 32(11): 1759-1763.

[11] 张尧锋, 张冬青, 丁厚栋, 等. 甘蓝型高油油菜籽粒发育过程中脂肪酸的组成分析[C]//中国作物学会油料作物专业委员会第六次代表大会暨学术年会论文集. 福州: 中国作物学会, 2008.

[12] 刘念, 范其新, 蒙大庆, 等. 油菜籽粒发育过程中脂肪酸累积模式及相关分析[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(1): 21-26.

硅可明显促进镉胁迫下水稻幼苗的生长,抗氧化防御体系显著提升,细胞超微结构得到明显改善,镉胁迫抗性显著提升^[12]。综上所述,外源硅可以缓解植物因逆境胁迫而造成的伤害,提高植物抗逆性。

大叶女贞(*Ligustrun lucidum* Ait)又称冬青,属木犀科女贞属,其叶片有较强的滞尘抗烟及隔音功能,且四季常青,已成为我国各地园林绿化的主要树种之一^[13]。目前,关于大叶女贞的研究主要集中在抗寒性^[14]、耐旱性^[15]、重金属富集^[16]、滞尘效应^[17]及耐盐性^[18]等方面,但是关于提高大叶女贞耐旱性的栽培措施鲜有相关报道,尤其是外源施硅对干旱胁迫下大叶女贞光合作用及叶绿素荧光特性方面的研究更是尚未见相关报道。鉴于上述背景,本试验以大叶女贞为试验材料,从大叶女贞叶片水分状况、光合色素含量、光合作用、叶绿素荧光特性及生物量5个方面入手,研究外源施硅对干旱胁迫下大叶女贞生长及光合生理指标的影响,筛选最佳的外源硅添加浓度,以期为大叶女贞的节水抗旱栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2017年4月在湖北省武汉市洪山区林业局苗圃进行。以大叶女贞幼苗为试验材料进行盆栽试验,花盆规格为35 cm×45 cm,每盆装草炭土7 kg,定植1株,缓苗期1个月,缓苗期间进行正常的水肥管理及病虫害防治。2017年5月从恢复苗中选取大小、长势一致的苗木进行干旱胁迫试验。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 干旱胁迫试验采用PEG-6000模拟方法进行,在2016年预试验的基础上确定PEG-6000处理浓度为1%,每隔4 d浇灌1次,处理时间为12 d。试验设4个硅处理水平,即施硅(SiO₂)量分别为0、0.2、0.4、0.6 g/kg,分别用CK、T₁、T₂、T₃表示,以不添加PE-G6000和SiO₂为CK₀,共5个处理。每个处理30盆,随机区组,3次重复。分别于试验处理后0、3、6、9、12 d的10:00和11:00测定叶片水分状况、光合色素含量、光合参数及叶绿素荧光参数;于试验处理的12 d测定大叶女贞植株的生长指标。

1.2.2 测定指标及方法 (1)叶片水分状况测定。选取各处理植株的第3张至第4张展开叶,称其鲜质量(m_t),然后在蒸馏水中浸泡24 h,用吸水纸将其表面水分吸干,称量其饱和鲜质量(m_s),最后在干燥箱内105℃杀青30 min并于75℃烘干至恒质量,称量其干质量(m_d),按照如下公式计算

叶片相对含水量(RWC) = $(m_t - m_d) / (m_s - m_d)$ 、自然饱和和亏缺(NSD) = $(m_s - m_t) / (m_s - m_d)$ 。(2)光合参数测定。光合色素含量测定采用丙酮比色法。选取各处理植株的第3张功能叶,用Li-6400XT型便携式光合作用仪(美国LI-COR公司)进行净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间隙CO₂浓度(C_i)及蒸腾速率(T_r)测定。(3)叶绿素荧光参数测定。选取各处理植株的第3张功能叶,用FMS-2型便携脉冲调制式荧光测定仪进行测定,具体方法为:在测定前将植株暗适应20 min,然后在 F_v/F_m 模式下用0.12 μmol/(m²·s)光进行照射并测定初始荧光 F_0 ;然后用4 000 μmol/(m²·s)强饱和脉冲光进行激发并进行最大荧光 F_m 测定,脉冲时间为0.7 s;在自然光照射后,用4 000 μmol/(m²·s)强饱和脉冲光进行激发,测定光适应下的最大荧光 F_m' ;关闭自然光后,立即用远红光进行照射,测定稳态荧光 F_s 及光适应下的初始荧光 F_0' ,按如下公式计算各参数:PS II最大原初光能转化效率(F_v/F_m) = $1 - F_0/F_m$;PS II实际光能转化效率(Φ_{PSII}) = $1 - F_s/F_m'$;光化学猝灭系数(q_p) = $(F_m' - F_s) / (F_m' - F_0')$;非光化学猝灭系数 $q_N = F_m/F_m' - 1$ 。

1.2.3 数据分析 采用Microsoft Excel 2013软件进行数据处理和作图,采用SPSS 18.0软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞叶片水分状况的影响

由图1-a可知,随着干旱胁迫时间的延长,4种处理的叶片相对含水量均呈现逐渐降低的趋势,且不同处理的降低幅度存在明显差异。在干旱胁迫12 d时,CK₀的相对含水量较0 d不存在明显差异,而CK、T₁、T₂及T₃处理的相对含水量分别较0 d降低39.94、25.75、15.4、36.41个百分点;由图1-b可知,随着干旱胁迫时间的延长,4种处理的叶片水分自然饱和和亏变化趋势与相对含水量相反,且降低幅度因处理不同而存在明显差异。在干旱胁迫12 d时,CK₀的水分自然饱和和亏与0 d变化不大,而CK、T₁、T₂及T₃处理的水分自然饱和和亏分别较0 d提升46.2、28.49、20.68、39.83个百分点。这说明外源施硅可明显提升干旱胁迫下大叶女贞叶片的保水能力,且提升幅度以0.4 g/kg处理效果最佳。

2.2 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞叶片光合色素含量的影响

由图2-a可知,CK₀处理的大叶女贞叶片叶绿素含量无显著变化,而CK、T₁、T₂及T₃处理的叶绿素含量均随着干旱

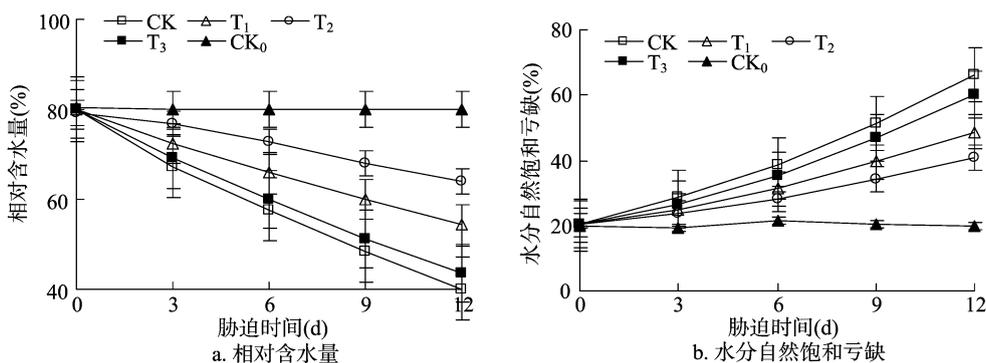


图1 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞叶片水分状况的影响

胁迫处理时间的延长而显著降低,且不同处理间的降低幅度存在明显差异。胁迫12 d时,CK、 T_1 、 T_2 及 T_3 较0 d分别降低72.08%、56.72%、52.34%和67.35%;类胡萝卜素含量变化趋势与叶绿素明显不同, T_1 及 T_2 处理的类胡萝卜素含量随着干旱胁迫时间的延长而呈现先升高后降低的趋势,而CK及 T_3 处理则逐渐降低。干旱胁迫3 d时, T_1 及 T_2 处理的类

胡萝卜素含量分别较0 d提升3.47%和6.59%;干旱胁迫12 d时,CK、 T_1 、 T_2 及 T_3 较0 d分别降低51.16%、24.32%、17.83%和39.06%。这说明外源施硅可明显减缓因干旱胁迫而造成的大叶女贞叶片光合色素降解,且以0.4 g/kg处理效果最佳,浓度过高或过低均可对缓解效应产生显著影响。

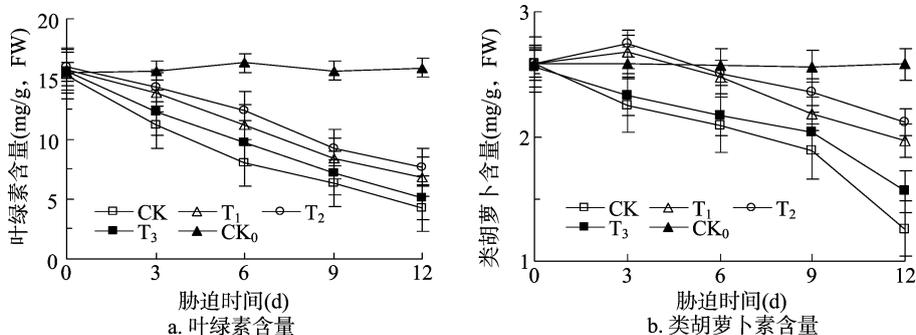


图2 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞叶片光合色素含量的影响

2.3 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞光合参数的影响

由图3-a可知,干旱胁迫可显著降低大叶女贞叶片的净光合速率(P_n),且降低幅度随着胁迫时间的延长逐渐变大;同时,硅处理可明显提升干旱胁迫下大叶女贞 P_n ,提升幅度因浓度大小而存在明显差异。干旱胁迫6 d时,CK、 T_1 、 T_2 及 T_3 较0 d分别降低31.27%、19.21%、13.44%和27.15%;而干旱胁迫12 d时,CK、 T_1 、 T_2 及 T_3 较0 d分别降低73.96%、44.42%、34.65%和59.83%。干旱胁迫条件下,大叶女贞叶片气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)的变化趋势与 P_n 变化一致,硅处理可明显缓解干旱胁迫对 G_s 和 T_r 的影响(图3-b、图3-d)。干旱胁迫12 d时,CK、 T_1 、 T_2 及 T_3 处理的 G_s 较0 d分别降低76.23%、43.08%、38.43%和61.65%;CK、 T_1 、 T_2 及 T_3 处理的 T_r 较0 d分别降低50.85%、27.07%、

21.84%和38.24%。由图3-c可知,随着干旱胁迫时间的延长,大叶女贞叶片的胞间二氧化碳(C_i)浓度呈现先降低后升高的趋势;同时,硅处理可明显降低干旱胁迫下大叶女贞叶片 C_i ,降低幅度因浓度大小而存在明显差异。干旱胁迫3 d时,CK、 T_1 、 T_2 及 T_3 较0 d分别降低26.83%、16.35%、21.73%和25.13%;而干旱胁迫12 d时,CK、 T_1 、 T_2 及 T_3 较0 d分别提升16.39%、8.78%、6.71%和12.57%。这说明外源施硅可明显提升干旱胁迫下大叶女贞叶片的光合性能,以0.4 g/kg处理效果最佳,浓度过高或过低均可影响提升效果。

2.4 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞叶绿素荧光参数的影响

由图4-a、图4-b可知,随着干旱胁迫时间的延长,大叶女贞叶片的PS II最大光合效率(F_v/F_m)及PS II实际光合效率(Φ_{PSII})均逐渐降低;同时,外源施硅可显著提升干旱胁迫

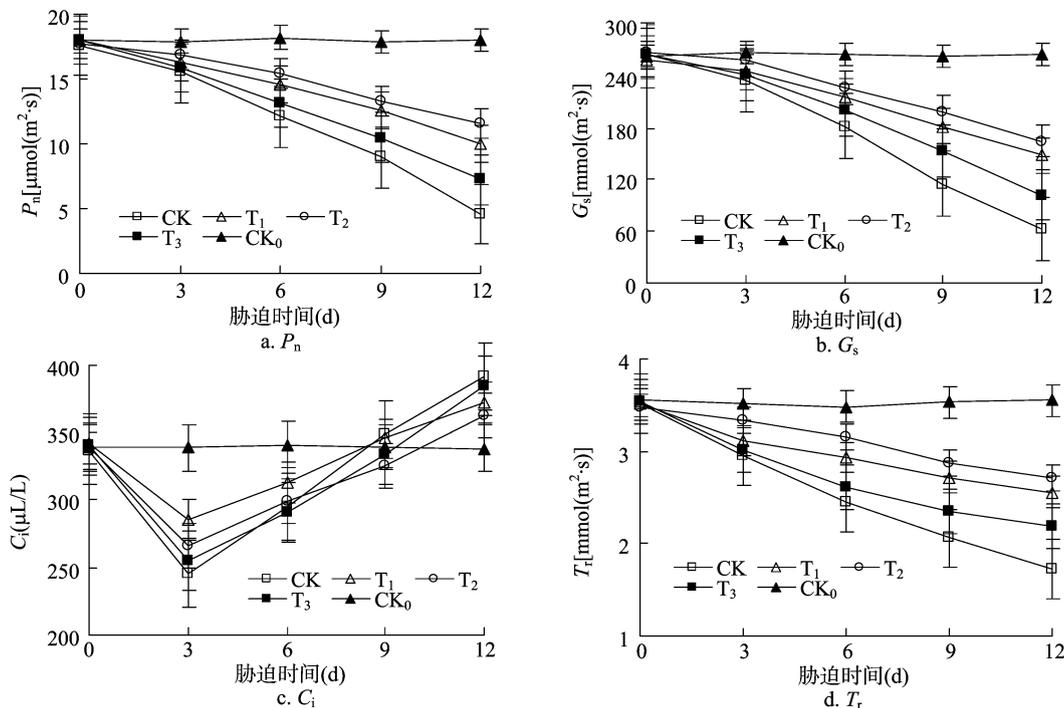


图3 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞光合参数的影响

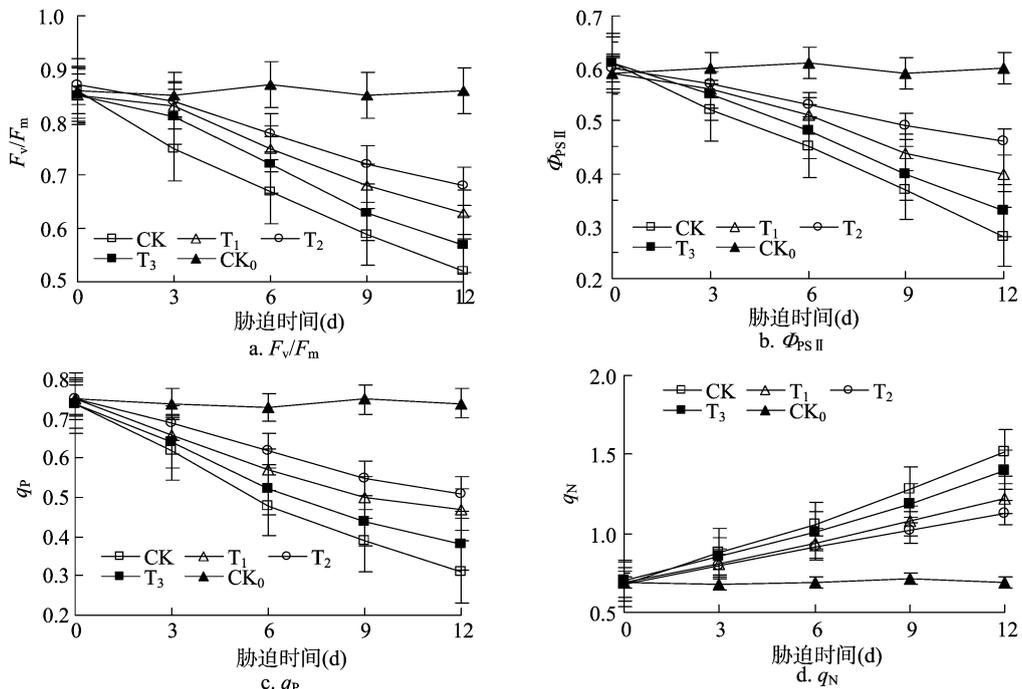


图4 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞叶绿素荧光参数的影响

胁迫下的大叶女贞叶片 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} , 且提升幅度因浓度不同而存在明显差异。干旱胁迫 12 d 时, CK、T₁、T₂ 及 T₃ 的 F_v/F_m 较 0 d 分别降低 39.53%、25.88%、21.84% 和 32.94%, 而 CK₀ 较 0 d 无明显变化; CK、T₁、T₂ 及 T₃ 的 Φ_{PSII} 较 0 d 分别降低 54.1%、32.2%、23.3% 和 45.9%, 而 CK₀ 较 0 d 无明显变化。这说明干旱胁迫会对大叶女贞的光合作用系统 II 造成损害, 进而降低其 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} , 而外源施硅可明显缓解干旱胁迫造成的损害, 以 0.4 g/kg 处理效果最佳, 浓度过高或过低均降低缓解效应。由图 4-c、图 4-d 可知, 随着干旱胁迫时间的延长, 大叶女贞叶片的光化学淬灭 (q_p) 逐渐降低, 而非光化学淬灭 (NPQ) 则呈现逐渐上升趋势; 外源施硅可显著提升干旱胁迫下的大叶女贞叶片 q_p 、显著降低 NPQ, 且提升 (或降低) 幅度因浓度而存在明显差异。干旱胁迫 12 d 时, CK、T₁、T₂ 及 T₃ 的 q_p 较 0 d 分别降低 58.11%、37.33%、32.00% 和 48.65%, 而 CK₀ 较 0 d 无明显变化; CK、T₁、T₂ 及 T₃ 的 NPQ 较 0 d 分别提升 122.06%、76.81%、66.18%、100%, 而 CK₀ 较 0 d 无明显变化。这说明干旱胁迫会导致 q_p 降低和 NPQ 提升, 大叶女贞叶片通过热散耗的形式来消耗更多的能量, 而外源施硅可明显提升干旱胁迫下的大叶女贞 q_p , 降低 NPQ, 以 0.4 g/kg 处理效果最佳, 浓度过高或过低均会降低缓解效应。

2.5 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞生长的影响

由表 1 可知, 干旱胁迫显著影响大叶女贞生长, 而外源施硅可明显提升干旱胁迫下的大叶女贞的株高、茎粗及干质量。干旱胁迫 12 d 时, CK 处理的大叶女贞株高、茎粗及干质量分别为 16.25 cm、1.06 cm 和 3.05 g, CK₀、T₁、T₂ 及 T₃ 的株高分别较 CK 增高 56%、24.62%、41.66% 和 10.52%, 茎粗分别较 CK 增粗 27.36%、7.55%、15.09% 和 4.72%, 干质量分别较 CK 增质量 42.95%、23.28%、35.08% 和 5.57%。这说明干旱胁迫对大叶女贞的生长造成显著影响, 而外源施硅可明显

提升干旱胁迫下的大叶女贞的株高、茎粗及干质量, 以 0.4 g/kg 处理效果最佳, 浓度过高或过低均降低提升效果。

表 1 外源硅对干旱胁迫下大叶女贞生长的影响

不同处理	株高 (cm)	茎粗 (cm)	干质量 (g)
CK	16.25a	1.06a	3.05a
T ₁	20.25b	1.14b	3.76b
T ₂	23.02c	1.22c	4.12c
T ₃	17.96a	1.11ab	3.22a
CK ₀	25.35d	1.35d	4.36d

注: 同列数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

相对含水量 (RWC) 和饱和水分亏缺 (NSD) 是反映植物叶片水分状况的重要指标。本研究结果表明, 随着干旱程度的加剧, 大叶女贞叶片 RWC 逐渐降低, NSD 则逐渐升高; 外源添加适量硅可明显降低干旱胁迫下大叶女贞叶片的 RWC, 提升其 NSD, 其中以 0.4 g/kg 处理效果最佳, RWC 和 NSD 分别较 0 d 降低 15.4% 和提升 20.68%, 本结果与曹逼力等的研究结果^[9] 较为一致。这说明外源添加适量硅可明显改善干旱胁迫下植物叶片的水分状况, 其可能是由于外源硅可在植物非生理活性部位形成“硅-角双层”结构, 明显减少水分散失, 进而提高植物保水能力。

光合作用对植物的生长发育具有重要影响, 而叶片光合色素含量则是决定光合作用强弱的重要因素之一。本研究中, 随着干旱胁迫程度的加剧, 大叶女贞叶片叶绿素和类胡萝卜素含量呈现逐渐降低的趋势; 外源添加适量硅, 可明显缓解大叶女贞因干旱胁迫而造成的光合色素降解, 其中以 0.4 g/kg 处理效果最佳, 叶绿素和类胡萝卜素含量分别较 0 d

降低52.34%和17.83%;净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和胞间二氧化碳(C_i)是衡量光合作用的重要参数。本研究中,随着干旱胁迫程度的加剧,大叶女贞叶片 P_n 、 G_s 和 T_r 逐渐降低,而 C_i 则呈现先上升后下降的趋势;与对照相比,外源添加适量硅可明显提升干旱胁迫下大叶女贞叶片光合参数 P_n 、 G_s 、 T_r ,降低 C_i ,其中以0.4 g/kg处理效果最佳, P_n 、 G_s 、 T_r 分别较0 d降低34.65%、38.43%和21.84%, C_i 较0 d提升6.71%;本结果与曹逼力等的研究结果^[9-10]较为一致。这说明外源添加适量硅可明显提升干旱胁迫下大叶女贞的光合色素含量及光合强度,其原因可能是:一方面,外源适量硅可明显缓解大叶女贞因干旱胁迫而造成光合色素降解,进而提高光合速率;另一方面,外源适量硅可减少干旱胁迫下大叶女贞叶片水分散失,避免因过度失水而造成大叶女贞叶片的 G_s 过度降低,进而提升干旱胁迫下大叶女贞的净光合速率和蒸腾速率。

F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 是衡量植物光合作用受抑制程度的重要指标^[19-20]。本研究中,随着干旱胁迫程度加剧,大叶女贞叶片的 F_v/F_m 及 Φ_{PSII} 均呈现逐渐降低趋势;外源添加适量硅可明显提升干旱胁迫下大叶女贞叶片的 F_v/F_m 及 Φ_{PSII} ,其中以0.4 g/kg处理效果最佳, F_v/F_m 及 Φ_{PSII} 分别较0 d降低21.84%和31.33%; q_p 是反映用于光化学电子传递的能量的指标,而NPQ则是反映以热耗散形式散发的能量的指标^[20]。本研究中,随着干旱胁迫程度加剧,大叶女贞叶片的 q_p 逐渐降低,而NPQ则呈现逐渐升高的趋势;外源添加适量硅可明显提升干旱胁迫下大叶女贞叶片的 q_p ,降低其NPQ,其中以0.4 g/kg处理效果最佳, q_p 较0 d降低32.00%,而NPQ则较0 d提升66.18%;这说明外源添加适量硅可明显减轻干旱胁迫对大叶女贞叶片光合系统的破坏,提升干旱胁迫下大叶女贞叶片的PS II活性,提高其光能利用率。

干旱胁迫可对植物的生长发育产生显著影响。本研究结果表明,随着干旱胁迫程度加剧,大叶女贞株高、茎粗及干质量明显降低,而外源添加适量硅可明显提升干旱胁迫下大叶女贞的株高、茎粗及干质量。其中,以0.4 g/kg处理效果最佳,株高、茎粗及干质量分别较CK提升41.66%、15.09%和35.08%。这说明外源添加适量硅可明显促进干旱胁迫下大叶女贞的生长,其可能是由于外源添加适量硅可显著增强干旱胁迫下大叶女贞的光合速率所致。

综上所述,1% PEG-6000模拟干旱条件下,外源添加0.4 g/kg SiO₂可明显改善大叶女贞的叶片水分状况,抑制光合色素降解,提高叶片的光合作用速率,减轻光抑制程度,促进大叶女贞生长。

参考文献:

[1]包秀霞,包秀平,廉勇. 干旱胁迫对内蒙古草原多根葱生理生

化指标的影响[J]. 华北农学报,2017,32(1):233-238.

- [2]郭慧,吕长平,郑智,等. 园林植物抗旱性研究进展[J]. 安徽农学通报,2009,15(7):53-55.
- [3]李杰,金研铭,王洪涛,等. 长春地区六种绒线菊属植物耐旱性比较研究[J]. 北方园艺,2011(10):56-59.
- [4]Zhu Y X, Gong H J. Beneficial effects of Silicon on salt and drought tolerance in plants [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014,34(2):455-472.
- [5]康建军,赵文智,岳利军,等. K₂SiO₃促进梭梭生长并增强其抗旱性[J]. 草业科学,2015,32(10):1631-1640.
- [6]吴森,刘信宝,丁立人,等. PEG模拟干旱胁迫下硅对紫花苜蓿萌发及生理特性的影响[J]. 草地学报,2017,25(6):1258-1264.
- [7]胡慧颖,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(10):77-86.
- [8]郑世英,郑晓彤,耿建芬,等. 硅对干旱胁迫下野生大豆幼苗生长和生理特性的影响[J]. 大豆科学,2018,37(2):263-267.
- [9]曹逼力,李炜蕾,徐坤. 干旱胁迫下硅对番茄叶片光合荧光特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(2):495-501.
- [10]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.
- [11]林雨果,宋锐,林选栋,等. 不同盐浓度下硅对高羊茅苗期生长及光合特征的影响[J]. 草业科学,2017,34(7):1442-1451.
- [12]李天哲,陈爱婷,李彩,等. 镉胁迫下硅对水稻幼苗生长与生理响应的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(6):1072-1078.
- [13]林艳,郭伟珍,徐振华,等. 大叶女贞抗寒性及冬季叶片丙二醛和可溶性糖含量的变化[J]. 中国农学通报,2012,28(25):68-72.
- [14]李忠喜,姚莹莹,罗晓雅,等. 抗寒型大叶女贞的筛选及其抗寒性与相对电导率的关系[J]. 上海农业学报,2012,28(2):21-24.
- [15]王念,朱延林,赵逢晖,等. 干旱胁迫对6个类型大叶女贞的生理影响及抗旱性评价[J]. 上海农业学报,2015,31(3):44-47.
- [16]童方平,李贵,杨勿享,等. 镉矿区大叶女贞重金属富集特性研究[J]. 中国农学通报,2015,31(30):244-248.
- [17]王会霞,石辉,张雅静,等. 大叶女贞叶面结构对滞留颗粒物粒径的影响[J]. 安全与环境学报,2015,15(1):258-262.
- [18]王春芳,邵孝侯,方元平,等. 土壤盐胁迫对大叶女贞幼苗生理指标的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(8):4538-4539.
- [19]梁永超,张永春,马同生. 植物的硅素营养[J]. 土壤学进展,1993,21(3):7-14.
- [20]徐晨,刘晓龙,李前,等. 供氮水平对盐胁迫下水稻叶片光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物学报,2018,53(2):185-195.