

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0006

李菁, 闫岩, 魏韬书, 赵璐, 任荣荣, 屈媛媛, 呼天明, 龙明秀, 何树斌. 硅对 NaCl 胁迫下柳枝稷叶片光合色素及气体交换特性的影响. 草业科学, 2016, 33(11): 2283-2290.

Li J, Yan Y, Wei T S, Zhao L, Ren R R, Qu Y Y, Hu T M, Long M X, He S B. Effect of silicon on chlorophyll content and gas exchange characteristics of switchgrass under NaCl stress. Pratacultural Science, 2016, 33(11): 2283-2290.

硅对 NaCl 胁迫下柳枝稷叶片光合色素及 气体交换特性的影响

李 菁, 闫 岩, 魏韬书, 赵 璐, 任荣荣,
屈媛媛, 呼天明, 龙明秀, 何树斌

(西北农林科技大学动物科技学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以两个不同生态型的柳枝稷(*Panicum virgatum*) Alamo(低地型)和 Cave-in-Rock(高地型)为试验材料, 研究在 0、50、100 和 150 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度下, 分别添加 0、0.5、1.0 和 2.0 mmol · L⁻¹ 的外源硅(Na₂SiO₃ · 9H₂O)对其叶片光合色素含量及光合气体交换参数的影响。结果表明, Alamo 叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 以及叶绿素 a+b 的含量均随着 NaCl 浓度的升高呈现降低趋势, 但是 Cave-in-Rock 的变化趋势则相反。在无外源 Si 处理下, Alamo 叶片净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s) 在 50 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度下升高, 100 和 150 mmol · L⁻¹ 下降; Cave-in-Rock 的 P_n、G_s 和胞间 CO₂ 浓度(C_i) 随着 NaCl 浓度的增加逐渐降低。盐胁迫下, 适当浓度外源硅(Si) 的添加对 Alamo 和 Cave-in-Rock 叶绿素 a、叶绿素 a+b 和叶绿素 b、类胡萝卜素含量的提高具有积极的作用。外源 Si 的添加同样提高了盐胁迫下 P_n、G_s 和 C_i 等参数。本研究中, 1~2 mmol · L⁻¹ Na₂SiO₃ · 9H₂O 对盐胁迫下柳枝稷叶片光合色素及光合气体交换的促进作用较明显。

关键词:柳枝稷; 硅; 盐胁迫; 叶片光合色素; 气体交换参数

中图分类号: S540.1; Q945.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2016)11-2283-08*

Effect of silicon on chlorophyll content and gas exchange characteristics of switchgrass under NaCl stress

Li Jing, Yan Yan, Wei Tao-shu, Zhao Lu, Ren Rong-rong,
Qu Yuan-yuan, Hu Tian-ming, Long Ming-xiu, He Shu-bin

(Northwest A & F University College of Animal Science and Technology, Yangling 712100, China)

Abstract: The effects of silicon on chlorophyll content and gas exchange characteristics of two different ecotype varieties switchgrass (*Panicum virgatum*) including “Alamo”(lowland) and “Cave-in-Rock”(upland) under salt stress were investigated. The concentrations of NaCl and Si NaSiO₃ · 9H₂O were 0, 50, 100, 150 mmol · L⁻¹ and 0, 0.5, 1, 2 mmol · L⁻¹, respectively. The results showed that the chlorophyll contents of “Alamo” decreased significantly ($P < 0.05$) under salt stress, but that of “Cave-in-Rock” slightly increased. The net photosynthetic rate (P_n) and stomatal conductance (G_s) of “Alamo” increased at 50 mmol · L⁻¹ NaCl level, then decreased at 100 and 150 mmol · L⁻¹ levels of NaCl concentrations. P_n, G_s and intercellular CO₂

* 收稿日期: 2016-01-11 接受日期: 2016-06-14

基金项目: 西北农林科技大学基本科研业务费(2014YB007, 2014YB001); 西北农林科技大学博士科研启动费(Z111021312)

第一作者: 李菁(1991-), 女, 甘肃兰州人, 在读硕士生, 主要从事牧草栽培生理生态及牧草繁育的研究。E-mail: 15101259525@163.com

通信作者: 龙明秀(1971-), 女, 陕西宁强人, 副教授, 博士, 主要从事牧草栽培生理生态及牧草繁育研究。E-mail: longmingxiu@nwsuaf.edu.cn
何树斌(1983-), 男, 甘肃武威人, 讲师, 博士, 主要从事牧草抗逆生理生态研究。E-mail: heshubin@nwsuaf.edu.cn

concentration (C_i) of “Cave-in-Rock” decreased significantly ($P < 0.05$) with increasing NaCl levels. Optimal concentration of exogenous silicon addition had alleviated the reduction of chlorophyll and improved gas exchange ability of “Alamo” and “Cave-in-Rock” under salt stress. In our study, $1-2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ was the optimal concentration of silicon (Si).

Key words: *Panicum virgatum*; silicon; salt stress; chlorophyll; gas exchange characteristics

Corresponding author: Long Ming-xiu E-mail: longmingxiu@nwsuaf.edu.cn

He Shu-bin E-mail: heshubin@nwsuaf.edu.cn

柳枝稷(*Panicum virgatum*)是一种起源于北美大草原的暖季型 C_4 植物。依据其栖息地、染色体数、分子特性等因素的不同,将其划分为低地型和高地型生态类型,前者是四倍体,高 $1.5 \sim 2 \text{ m}$,适宜生长在潮湿的环境中,后者有六倍体或十二倍体,高 $3 \sim 4 \text{ m}$,一般生长在较为干燥的地方^[1]。柳枝稷是具有一定营养价值的饲料,可直接生产干草也可用来放牧^[2]。柳枝稷的适应性较好,在一些边缘土地上能够改良土壤和发展生长。此外,柳枝稷还被认为是生产纤维素乙醇的能源作物^[3]。20 世纪初,柳枝稷被成功引种到我国黄土丘陵地区的陕北安塞种植,表现出抗旱、耐寒和产草量较高等特点^[4]。

土壤盐渍化是植物生长面临的最主要的非生物胁迫之一,全世界大约 20% 的耕地和 50% 灌溉土地正遭遇不同程度盐渍化的影响^[5]。因此,土壤盐渍化是农业生产面临的巨大挑战之一。盐胁迫影响了植物一系列重要的生物化学反应,例如,盐胁迫导致植物水分亏缺^[6],细胞膜质过氧化^[7],叶绿素浓度和光合气体交换速率降低^[8-9],矿质营养元素的吸收受阻等,最终导致植物生物量减少或死亡^[10]。

硅(Si)是地壳中含量仅次于氧(O)的第二大元素,以不溶性硅酸盐的形式存在于土壤中^[11]。植物能以硅酸钠(Na_2SiO_3)、硅酸钙(CaSiO_3)和硅酸(H_4SiO_4)等形式吸收硅^[12],是植物生长的必需元素^[13]。一定量的硅对植物生长发育是有益的,如促进植株生长^[14],提高植物抵御逆境的能力等^[15]。Si 能够缓解逆境胁迫对植物的伤害是植物抗逆生理研究中的热点。例如,硅能够提高逆境胁迫下金丝小枣(*Zizyphus jujube*)^[16]、玉米(*Zea mays*)^[17]等植物叶片的叶绿素含量并改善光合气体交换的能力。柳枝稷生长在边缘土地上,常被用于改良盐渍化土地,但 Si 对盐胁迫下 C_4 植物柳枝稷光合生理特征影响的研究仍鲜有报道,本研究以低地型和高地型柳枝稷为试验材料,进行不同梯度的盐胁迫和外源 Si 添加,旨在阐明盐胁迫下不同生态型柳枝稷的叶绿素及光合气体交换的特征,以及硅调控盐胁迫下柳枝稷叶绿素及光合

气体交换参数的规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种低地型(Alamo)和高地型(Cave-in-Rock)柳枝稷,由美国南达科他州立大学提供。

1.2 试验方法

1.2.1 种子萌发及幼苗培养 挑选饱满均一的柳枝稷种子在 95% 的酒精中消毒 5 min,蒸馏水冲洗数次后放在培养皿中,在 30°C 的培养箱中发芽 7 d。选取生长均一且完整的幼苗移栽到由蛭石和珍珠岩混合的育苗盘内(体积比为 3 : 1)。移栽后的育苗盘置于西北农林科技大学动物科技学院温室[昼夜温度为 $(30 \pm 5)^\circ\text{C}$ / $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$]内进行生长。隔天分别定量浇灌 1 L 水以及 500 mL 1/2 Hoagland 营养液^[18],培养 30 d 后进行处理。

1.2.2 试验处理 试验用分析纯氯化钠(NaCl)设 4 个盐处理浓度,0、50、100 和 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Na_0 、 Na_{50} 、 Na_{100} 、 Na_{150}); Si 处理用分析纯硅酸钠($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)设 0.0、0.5、1.0 和 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Si_0 、 $\text{Si}_{0.5}$ 、 $\text{Si}_{1.0}$ 、 $\text{Si}_{2.0}$)。每处理 5 个重复。处理期间,除了补充水及 Hoagland 营养液外,每周每个处理苗盘均分别浇灌 1 L 的 NaCl 溶液和 1 L 的 Na_2SiO_3 溶液。盐浓度的添加量准确扣除了因加入 Na_2SiO_3 而引入的钠离子。处理 45 d 后进行叶绿素含量和光合气体交换参数的测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶片光合色素含量的测定 随机称取完整且健康的植物叶片 0.1 g,加少量石英砂、碳酸钙及 80% 丙酮在研钵中研磨至匀浆发白,过滤到 25 mL 棕色容量瓶中,并用少量丙酮数次冲洗研钵、杵、残渣及滤纸,将叶绿体色素全部转移至容量瓶中,最后定容至 25 mL,摇匀。利用紫外分光光度计(日本,岛津 uv3100)在 663、645 和 470 nm 下测定吸光度,并计算出叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量^[19]。

1.3.2 光合气体参数的测定 选取柳枝稷中上部健

康无损伤的叶片,在 09:00 用 LI 6400 便携式光合仪 (LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA) 测定各处理叶片的光合气体交换参数,净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i),气孔限制值 (L_s) 计算公式:

气孔限制值 (L_s) = $1 - C_i/C_a$ 。 C_a 为样品室内 CO_2 浓度。

每个处理测定 5 株。测定时设定光照强度在 $800 \mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$,参比室 CO_2 浓度为 $(400 \pm 10) \mu mol \cdot mol^{-1}$,相对湿度 (RH) 为 60%~70%。

1.4 统计分析

使用 Excel 2003 软件对数据进行处理和图表绘制,使用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,对同一品种不同处理下的生理指标进行单因素方差分析,并用 Duncan 法进行多重比较;对不同品种相同处理下进行 F 检验。

2 结果与分析

2.1 外源 Si 添加对 NaCl 胁迫下两个生态型柳枝稷叶片光合色素含量的影响

在 Si_0 处理下,Alamo 叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和叶绿素 a+b 含量均随着 NaCl 浓度的升高而降低,且 Na_{100} 和 Na_{150} 均与 Na_0 间差异显著 ($P < 0.05$)。当盐浓度达到 $150 mmol \cdot L^{-1}$ 时,上述光合色素各组分降到最低,相比 Na_0 分别降低了 56.58%、57.30%、70.15% 和 64.94% (图 1)。

外源 Si 对 Alamo 叶片光合色素各组分也有影响。在 Na_0 水平下, $Si_{0.5}$ 与 Si_0 相比,其叶绿素 b 的含量增加,但两者差异并不显著 ($P > 0.05$),其余各组分与 Si_0 相比均有不同程度的降低;而在 Na_{100} 处理下, $Si_{2.0}$ 处理的叶绿素 a 及叶绿素 a+b 含量与 Si_0 相比分别增加了 24.82% 和 17.44% ($P < 0.05$);在 Na_{150} 处理下, $Si_{0.5}$ 、 $Si_{1.0}$ 和 $Si_{2.0}$ 处理的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 和类胡萝卜素的含量均显著高于 Si_0 ($P < 0.05$)。此外,与 $Si_0 Na_0$ 相比,各盐处理下 Alamo 叶片中叶绿素 a 的下降程度低于叶绿素 b,所以叶绿素 a/b 均有所增加。

Cave-in-Rock 叶片光合色素各组分亦受 NaCl 和 Si 的影响 (图 1)。在 Si_0 处理下,叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 的含量均随 NaCl 浓度的增加而呈现上升趋势,且 Na_{150} 与 Na_0 差异显著 ($P < 0.05$),这与盐胁迫下 Alamo 叶片光合色素含量的变化趋势相反 (图 2)。在 Si_0 处理下 Na_0 和 Na_{50} 处理时,Alamo 和 Cave-in-Rock 之间的叶片光合色素各组分含量存在显

著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 差异 (图 1)。

外源 Si 的添加同样对 Cave-in-Rock 叶绿素各组分也有影响。在 Na_0 时, $Si_{1.0}$ 和 $Si_{2.0}$ 均能提高其叶片光合色素的含量,而且在 $Si_{0.5}$ 、 $Si_{1.0}$ 时 Cave-in-Rock 和 Alamo 之间的叶片光合色素各组分含量存在显著 ($P < 0.05$) 或极显著差异 ($P < 0.01$) (图 1)。在 Na_{50} 时,与 $Si_0 Na_{50}$ 相比,外源硅的添加,能不同程度地提高 Cave-in-Rock 叶片光合色素各组分含量;在 Na_{100} 时, $Si_{1.0}$ 处理下叶片类胡萝卜素和叶绿素 a+b 含量比 Si_0 处理分别增加了 76.92% 和 33.73% ($P < 0.05$);在 Na_{150} 时, Si_1 和 Si_2 处理下,Cave-in-Rock 叶片类胡萝卜素含量相比 Si_0 分别增加了 36.36% 和 22.73% ($P < 0.05$),而且 Cave-in-Rock 与 Alamo 间叶片光合色素各组分含量差异极显著 ($P < 0.01$) (图 1)。此外,在 Na_{50} 盐浓度下, $Si_{1.0}$ 和 $Si_{2.0}$ 处理显著提高了叶绿素 b 的含量 ($P < 0.05$)。

2.2 外源 Si 添加对 NaCl 胁迫下两个生态型柳枝稷光合气体交换参数的影响

在无外源 Si 处理下,随着 NaCl 浓度的升高,Alamo 叶片 P_n 和 G_s 均呈现出先升高后降低的变化趋势 (图 2)。其中, Na_{50} 与 Na_0 相比, P_n 两者无显著差异 ($P > 0.05$), $G_s Na_{50}$ 显著高于 Na_0 ($P < 0.05$); Na_{100} 和 Na_{150} P_n 和 G_s 与 Na_0 相比均无显著差异 ($P > 0.05$)。 C_i 随 NaCl 浓度的升高而降低,与 Na_0 相比, Na_{50} 降低了 4.31%, Na_{100} 和 Na_{150} 分别显著降低了 32.11% 和 59.53% ($P < 0.05$);而 L_s 随着 NaCl 浓度的增加而增加,与 Na_0 相比, Na_{50} 、 Na_{100} 和 Na_{150} 分别显著增加了 39.81%、59.89% 和 64.42% ($P < 0.05$)。

外源 Si 的添加同样影响了 Alamo 的光合气体交换参数。在各个盐胁迫处理下, P_n 随 Si 浓度的增加大致呈现先降低后升高的趋势 (图 2), Si_2 提高了各盐浓度下的 P_n ;在 $Si_{1.0}$ 处理下,相比 Na_0 和 Na_{150} , $Si_{1.0}$ 提高了 Na_{50} 和 Na_{100} 的 G_s ,而在 $Si_{2.0}$ 处理下, $Si_{2.0}$ 只提高了 Na_{50} 的 G_s ,但与 $Si_0 Na_{50}$ 和 $Si_0 Na_{100}$ 相比,差异并不显著 ($P > 0.05$)。而在 Na_{50} 和 Na_{150} 处理下, Si_1 处理显著提高了 C_i ($P < 0.05$)。添加外源 Si 对 L_s 无规律影响。

盐胁迫对 Cave-in-Rock 的气体交换参数的影响表现各异 (图 2)。盐胁迫下, P_n 、 G_s 和 C_i 随着盐浓度的增加逐渐减低,且 Na_{100} 和 Na_{150} 显著低于 Na_0 和 Na_{50} ($P < 0.05$),但 L_s 逐渐升高且 Na_{100} 和 Na_{150} 显著高于 Na_0 和 Na_{50} 。以 P_n 为例,与 Na_0 相比 S_{50} 、 S_{100} 和 S_{150} 、分别降低了 12.84%、32.46% 和 35.13%。外源 Si 的添加同样调节了盐胁迫下 Cave-in-Rock 的气体交

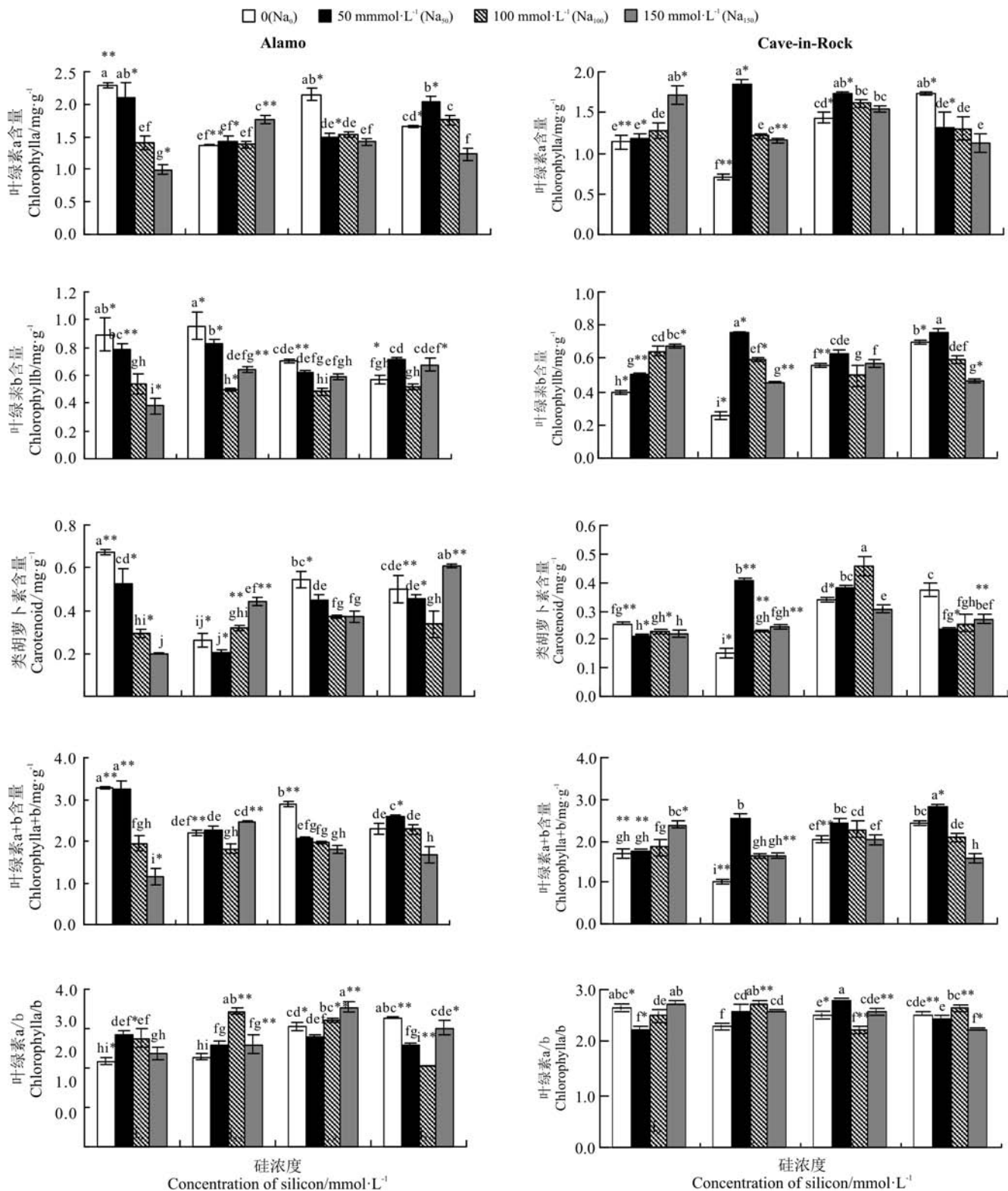


图 1 外源 Si 添加对 NaCl 胁迫下 Alamo 和 Cave-in-Rock 叶片光合色素含量的影响

Fig.1 Effect of Si addition on photosynthetic pigment content of Alamo and Cave-in-Rock under NaCl stress

注:不同字母表示不同硅处理浓度间差异显著($P<0.05$), * 和 * * 分别表示 F 检验品种间差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)。下同。
Note: Different lower case letters in the legends mean significant difference among different concentrations of Si at 0.05, * , * * mean F -values are significant difference at 0.5 level and 0.01 level, respectively. The same below.

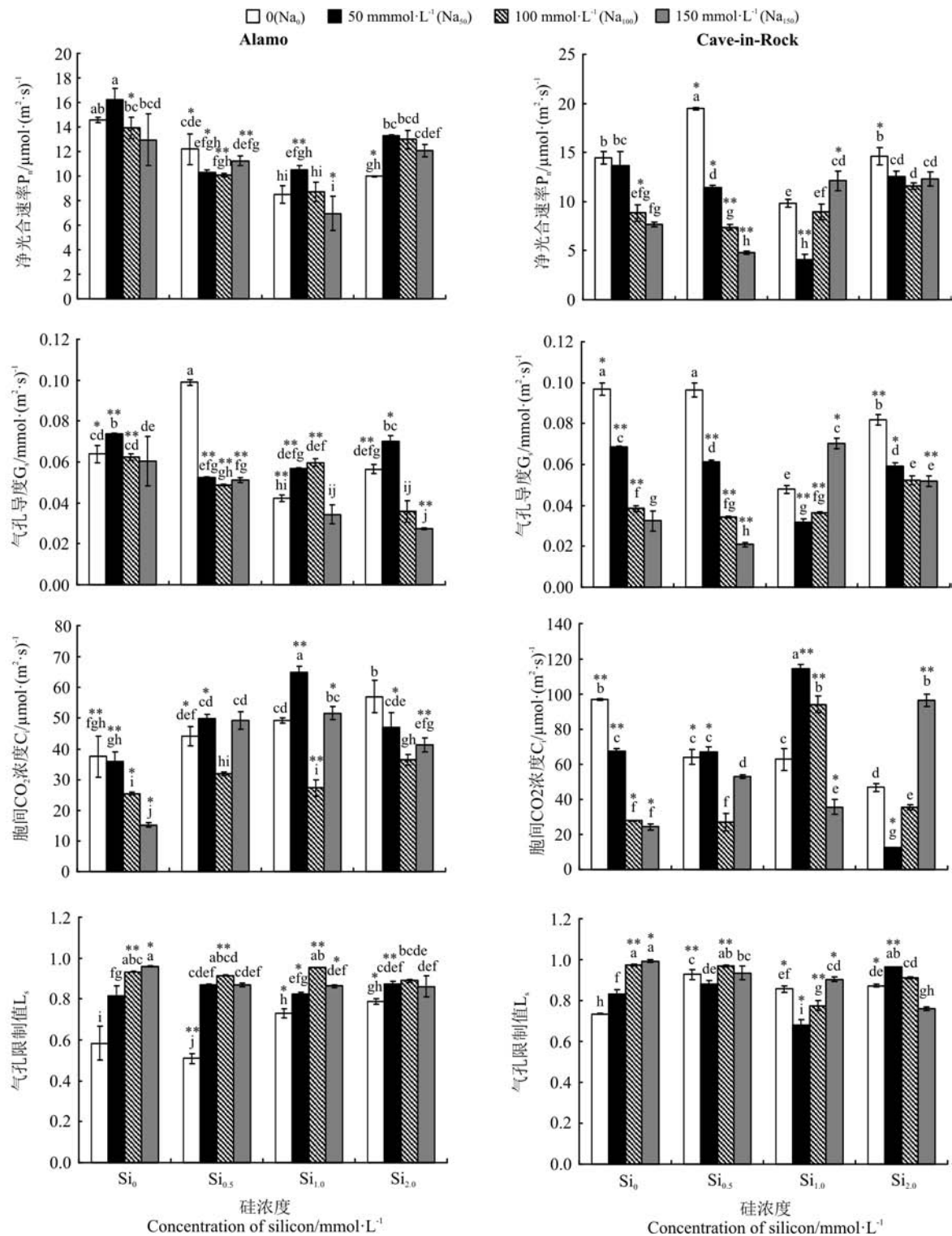


图 2 外源 Si 添加对 NaCl 胁迫下 Alamo 和 Cave-in-Rock 光合气体交换参数的影响

Fig.2 Effect of Si addition on photosynthetic gas exchange parameters of Alamo and Cave-in-Rock under NaCl stress

换参数。尽管外源 Si 的添加并没有提高 Na₅₀ 处理下的 P_n 和 G_s,但 Si_{1.0}显著提高了 Na₁₅₀ 处理下叶片的 P_n 和 G_s(图 2);Si_{2.0}显著提高了 Na₁₀₀ 和 Na₁₅₀ 处理下叶片的 P_n 和 G_s($P<0.05$)。总体看,Si_{1.0}对 Na₅₀ 和 Na₁₀₀ 下 Cave-in-Rock 叶片 C_i 的提高效果显著,而 Si_{2.0}对

Na₁₅₀ 下 C_i 的提高效果显著;同时,Si_{2.0} 也显著降低 Na₁₀₀ 和 Na₁₅₀ 处理下的 L_s(图 2)。

在 Na₅₀ 处理下,Alamo 和 Cave-in-Rock 间 G_s 和 C_i 差异极显著($P<0.01$);在 Na₁₀₀ 处理下,Alamo 和 Cave-in-Rock 间 P_n、G_s、C_i 和 L_s 分别存在显著($P<0.05$)或

极显著($P < 0.01$)的差异;在 Na_{150} 处理下, C_i 和 L_s 具有显著差异($P < 0.05$);在 Na_0 处理下, 0.5、1.0 和 2.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Si 的添加使得 Alamo 和 Cave-in-Rock 的气体交换参数分别存在显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)差异;在 $\text{Na}_{50}\text{Si}_{1.0}$ 处理下, 两个生态型柳枝稷的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 L_s 差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)。

3 讨论与结论

光合气体交换能力直接影响了植物的生长及产量, 而叶片光合色素含量的高低是影响光合能力的重要因素之一。本研究中, 无外源 Si 处理下 Alamo 叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素的含量随着盐浓度的增加均降低, 而叶绿素 a/b 逐渐升高。前者是由于盐胁迫破坏了叶绿体的结构, 降低了叶绿素含量^[8,20], 而后者可能是盐胁迫下叶绿素酶活性增强, 主要降解叶绿素 b 导致的^[20], 这与青稞(*Hordeum vulgare*)^[21]的研究结果一致。本研究中 Cave-in-Rock 叶绿素对盐胁迫的响应规律与 Alamo 相反, 盐浓度不但没有抑制反而增加了其叶绿素含量, 这与杜菲等^[20]的研究结果相一致, 而这可能是由于 Cave-in-Rock 为八倍体植物, 而 Alamo 为四倍体植物^[22], 二者倍性的不同, 导致较高浓度盐胁迫($< 200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)下, Cave-in-Rock 叶绿素含量呈上升趋势^[20]。但与此同时, Cave-in-Rock 的 P_n 随着盐浓度的升高而明显降低, 而 Alamo 的 P_n 则在 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时有小幅升高, 然后显著降低($P < 0.05$)。这说明, 叶绿素含量的高低与其 P_n 和抗盐性强弱之间并无直接的关系^[23]。大量研究表明, 适量外源 Si 的添加能提高盐胁迫下植物叶绿素的含量^[16-17], 本研究对 Alamo 和 Cave-in-Rock 的研究也证实了上述结论。外源 Si 的添加维持了逆境胁迫下植物叶片较高的水势, 缓解了盐胁迫对叶绿体超微结构的破坏作用^[24], 抑制了叶绿素酶对叶绿素的降解^[17,19], 从而提高了其盐胁迫下叶绿素的含量。但逆境胁迫下外源 Si 对植物叶绿素合成的促进机制尚需进一步补充分子证据来揭示。

盐胁迫严重降低了植物的 P_n ^[8]。本研究中, 高浓度盐胁迫下 Alamo 和 Cave-in-Rock 的 P_n 均明显降低, 只是不同生态型的柳枝稷抗盐能力有差异, 导致其 P_n 下降幅度不同。但是, 在 Na_{50} 处理下, Cave-in-Rock 的 P_n 低于 Na_0 , Alamo 却高于 Na_0 , 而 Alamo 耐盐性较 Cave-in-Rock 相对较低, 这可能是由于 Alamo 和 Cave-in-Rock 倍性、分蘖能力之间存在差异, 进而导致 Cave-in-Rock 耐盐性虽高于 Alamo, 但其在 Na_{50} 时的 P_n 却呈现轻微下降的趋势^[20,22]。此外, 关于柳

枝稷叶片细胞形态学结构的研究^[22]表明, 不同生态型柳枝稷的气孔面积大小、硅细胞密度大小、液泡长度以及叶脉厚度间存在差异, 这可能也是导致 Alamo 和 Cave-in-Rock 的 P_n 在 Na_{50} 时呈现出不同变化趋势的原因之一。逆境对植物光合碳同化的限制主要由气孔因素和非气孔因素所导致^[25]。对 Alamo 的研究表明, 重度盐胁迫下, 柳枝稷光合作用的减弱主要是由气孔因素所引起的^[26]。本研究中, 在高浓度盐胁迫下两个生态型柳枝稷的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 均显著降低, 也进一步说明气孔因素是限制盐胁迫下柳枝稷 P_n 下降的主要原因。但是, 盐胁迫下 P_n 的降低是由气孔限制还是非气孔限制导致的是一个复杂的问题, 受植物生长阶段等多个因素影响。本研究中, 一定量外源 Si 的添加缓解了盐胁迫对植物光合作用的影响, 提高了两个生态型柳枝稷的光合气体交换参数。一方面外源 Si 的添加增加了逆境胁迫下植物叶表皮的栅栏组织和气孔密度, 提高了 1,5-二磷酸核酮糖(RuBP)羧化酶的活性^[27], 从而直接促进了光合气体交换的进行;另一方面, 外源 Si 的添加增加了逆境胁迫下植物根系的分支和对水分的吸收能力, 改善了叶片的水分状况^[24], 提高了植物抗氧化酶和非酶抗氧化剂等的活性^[28], 增强了渗透调节能力, 促进了类黄酮和其它酚类物质的积累^[29], 从而有效清除和阻止活性氧对植物的损伤^[28], 降低了叶肉细胞质膜的渗透性^[30], 改善了光合细胞的内环境。此外, 外源 Si 的添加还通过增加逆境胁迫下植物可溶性蛋白质的含量和磷的含量^[31], 改变植物组织的 C : N : P, 降低对 Na^+ 的吸收, 通过降低 Na^+ / K^+ 等方式改善了植物在逆境胁迫下的营养状况^[32]。但是, 外源 Si 的添加对植物的促进作用并不呈正比, 适量外源 Si 的添加能够促进根系和地上部分的生长^[33], 但高浓度的 Si 会抑制植物生长^[15]。本研究, 提高盐胁迫下叶绿素积累和光合气体交换的最佳外源 Si 的浓度是不一样, 这可能与物种的选择和试验处理手段等的差异有关^[17]。

总之, 盐胁迫下, C_4 能源植物柳枝稷叶绿体结构被破坏, 光合气体交换参数降低, 由于两个生态型柳枝稷抗盐能力存在差异, 故其对盐胁迫的响应程度有所不同。外源 Si 的添加能够缓解盐胁迫的伤害, 改善叶绿素的构成, 提高光合气体交换的能力。由于植物种的不同和试验处理手段的差异, 最佳的外源 Si 添加浓度在各研究中是有差异的。本研究中, $1.0 \sim 2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Si 对盐胁迫下柳枝稷叶绿素及光合气体交换的积极作用较明显。

参考文献 References:

- [1] Parrish D J, Fike J H. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. *Critical Reviews in Plant Science*, 2005, 24(5-6): 423-459.
- [2] Heaton E A, Flavell R B, Mascia P N, Thomas S R, Dohleman F G, Long S P. Herbaceous energy crop development: Recent progress and future prospects. *Current Opinion in Biotechnology*, 2008, 19(3): 202-209.
- [3] 宗俊勤, 郭爱桂, 陈静波, 刘建秀. 7 种多年生禾草作为能源植物潜力的研究. *草业科学*, 2012, 29(5): 809-813.
Zong J Q, Guo A G, Chen J B, Liu J X. A study on biomass potentials of perennial gramineous energy plants. *Pratacultural Science*, 2012, 29(5): 809-813. (in Chinese)
- [4] 徐炳成, 山仑, 李凤民. 黄土丘陵半干旱区引种禾草柳枝稷的生物量与水分利用效率. *生态学报*, 2005, 25(9): 2206-2213.
Xu B C, Shan L, Li F M. Aboveground biomass and water use efficiency of an introduced grass, *Panicum virgatum*, in the semi-arid loess hilly-gully region. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2206-2213. (in Chinese)
- [5] Viswanathan C, Andréand J, Zhu J K. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science*, 2005, 45(2): 437-448.
- [6] Sankar B, Jaleel C A, Manivannan P, Kishorekumar A, Somasundaram R, Panneerselvam R. Drought induced biochemical modifications and proline metabolism in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench. *Acta Botanica Croatica*, 2007, 66(1): 43-56.
- [7] 李雁博, 张蕴薇, 哈依夏, 杜金鸿, 刘源, 陈果, 王佳珍. 须芒草、藨草和柳枝稷对干旱和盐胁迫的生理响应. *草业科学*, 2014, 31(5): 905-914.
Li Y B, Zhang Y W, Hayixia, Du J H, Liu Y, Chen G, Wang Q Z. *Physiolgical responce*s of bluestem, reed canatygrass and switchgrass under drought and salinity stress. *Paratacultural Science*, 2014, 31(5): 905-914. (in Chinese)
- [8] 王玉祥, 张博, 王涛. 盐胁迫对苜蓿叶绿素、甜菜碱含量和细胞膜透性的影响. *草业科学*, 2009, 26(3): 53-56.
Wang Y X, Zhang B, Wang T. Effect of salt stress on the contents of chlorophyll and betaine and its membrane permeability of *Medicago sativa*. *Pratacultural Science*, 2009, 26(3): 53-56. (in Chinese)
- [9] 逢好胜, 张会慧, 田野, 敖红, 孙广玉. 硝态氮对 Na_2CO_3 胁迫下桑树幼苗生长和光合特性的影响. *草业科学*, 2014, 31(8): 1515-1522.
Pang H S, Zhang H H, Tian Y, Ao H, Sun G Y. Effects of NO_3^- -N on growth and photosynthetic characteristics of mulberry seedlings under Na_2CO_3 stress. *Pratacultural Science*, 2014, 31(8): 1515-1522. (in Chinese)
- [10] Lutts S, Kinet J M, Bouharmont J. Effects of salt stress on growth, mineral nutrition and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Plant Growth Regulation*, 1996, 19(3): 207-218.
- [11] Zhu Y X, Gong H J. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 455-472.
- [12] Sattar A, Cheema M A, Basra S M A, Wahid A. Optimization of source and rate of soil applied silicon for improving the growth of wheat. *Pakistan Journal of Agriculture Sciences*, 2013, 50(1): 63-68.
- [13] 李换丽, 朱永兴, 宫海军. 硅调控植物抗盐性机理的研究进展. 北京: 中国科技论文在线, [2015-10-30]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201510-306>.
Li H L, Zhu Y X, Gong H J. Progress in research on mechanisms for silicon-mediated salt tolerance in plants. Beijing: Science Paper Online, [2015-10-30]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201510-306>. (in Chinese)
- [14] 郭兴华, 郭正刚, 刘慧霞, 周雪荣. 硅对植物的有益作用及其对草坪草研究的启示. *草业科学*, 2010, 27(3): 55-61.
Guo X H, Guo Z G, Liu H X, Zhou X R. Benefits of silicon nutrition on plants and its enlightenment to turf grass research. *Pratacultural Science*, 2010, 27(3): 55-61. (in Chinese)
- [15] 康建军, 赵文智, 岳利军, 赵明, 郑颖. K_2SiO_3 促进梭梭生长并增强其抗旱性. *草业科学*, 2015, 32(10): 1631-1640.
Kang J J, Zhao W Z, Yue L J, Zhao M, Zheng Y. K_2SiO_3 promotes the growth and improves drought resistance of *Haloxylon ammodendron*. *Pratacultural Science*, 2015, 32(10): 1631-1640. (in Chinese)
- [16] 胡东峰. 硅对金丝小枣盐胁迫的缓解效应. 南京: 南京林业大学硕士学位论文, 2007.
Hu D F. The buffer effect of silicon on *Zizyphus jujuba* cv. Jinsi-xiaozao under salt stress. Master Thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007. (in Chinese)
- [17] 李佐同, 高聚林, 王玉凤, 杨克军. 硅对 NaCl 胁迫下玉米幼苗生理特性的影响. *玉米科学*, 2011, 19(2): 73-76.

- Li Z T, Gao J L, Wang Y F, Yang K J. Effect of silicon on protective enzymes activities physiological characteristics of maize seedling under salt stress. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(2): 73-76. (in Chinese)
- [18] Hoagland D R, Arnon D I. *The Water-culture Method for Growing Plants without Soil*. Berkeley: University of California, 1950.
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 杜菲, 陈新, 杨春华, 张蕴薇. NaCl 胁迫对不同柳枝稷材料种子萌发与幼苗生长的影响. *草地学报*, 2011, 19(6): 1018-1024.
Du F, Chen X, Yang C H, Zhang Y W. Effects of NaCl stress on seed germination and seedling growth of different switchgrass materials. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(6): 1018-1024. (in Chinese)
- [21] 段辉国, 赵涛, 付伟丽, 曾晓芸, 谢兴伟, 易方舟. NaCl 胁迫对青稞幼苗部分生理指标的影响. *内江师范学院学报*, 2012, 27(6): 42-44.
Duan H G, Zhao T, Fu W L, Zeng X Y, Xie X W, Yi F Z. Effects of NaCl stress on some physiological indices in hulless barley seedling. *Journal of Neijiang Normal University*, 2012, 27(6): 42-44. (in Chinese)
- [22] 安雨. 黄土高原引种柳枝稷的生态适应性研究. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2011.
An Y. Research on the ecological adaptation of introduced switchgrass in the loess plateau. Master Thesis. Yangling: Northwest A & F University, 2011. (in Chinese)
- [23] 范希峰, 侯新村, 朱毅, 武菊英. 盐胁迫对柳枝稷苗期生长和生理特性的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1476-1480.
Fan X F, Hou X C, Zhu Y, Wu J Y. Impacts of salt stress on the growth and physiological characteristics of *Panicum virgatum* seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1476-1480. (in Chinese)
- [24] Haghghi M, Pessarakli M. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherrytomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*, 2013, 161(2): 111-117.
- [25] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 317-345.
- [26] 赵春桥, 李继伟, 范希峰, 侯新村, 武菊英, 胡跃高, 刘吉利. 不同盐胁迫对柳枝稷生物量、品质和光合生理的影响. *生态学报*, 2015, 35(19): 6489-6495.
Zhao C Q, Li J W, Fan X F, Hou X C, Wu J Y, Hu Y G, Liu J L. Effects of salt stress on biomass, quality, and photosynthetic physiology in switchgrass. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6489-6495. (in Chinese)
- [27] Asmar S A, Castro E M, Pasqual M, Pereira F J, Soares J D R. Changes in leaf anatomy and photosynthesis of micropropagated banana plantlets under different silicon sources. *Scientia Horticulturae*, 2013, 161(2): 328-332.
- [28] Al-Aghabary K, Zhu Z, Shi Q H. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(12): 2101-2115.
- [29] Bieza K, Lois R. An *Arabidopsis* mutant tolerant to lethal ultraviolet-B levels show constitutively elevated accumulation of flavonoids and other phenolics. *Plant Physiology*, 2001, 126(3): 1105-1115.
- [30] Liang Y C, Shen Q R, Shen Z G, Ma T S. Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 1996, 19(1): 173-183.
- [31] Eneji A E, Inanaga S, Muranaka S, Li J, Hattori T, An P, Tsuji W. Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31(2): 355-365.
- [32] Schaller J, Brackhage C, Gessner M O, Bauker E, Dudel E G. Silicon supply modifies C : N : P stoichiometry and growth of *Phragmites australis*. *Plant Biology*, 2012, 14(2): 392-396.
- [33] 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. *Journal of Plant Research*, 2002, 115(1117): 23-27.

(责任编辑 苟燕妮)