

硅对复合碱式盐胁迫下黑麦草生长及光合作用的影响

薛巨坤¹, 李继光¹, 靳亚忠², 陈丹凤³, 孙 慧⁴, 纪春艳¹

(1. 牡丹江师范学院 生命科学与技术学院, 黑龙江 牡丹江 157012; 2. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319;

3. 牡丹江医学院 附属第二医院, 黑龙江 牡丹江 157009; 4. 牡丹江大学 土木工程学院, 黑龙江 牡丹江 157011)

摘 要:以多年生黑麦草品种‘Ascend’为试材,采用基质培的方法,研究了硅对复合碱式盐 $\text{NaHCO}_3 : \text{Na}_2\text{CO}_3$ (1:1)胁迫下黑麦草生长和光合作用的影响。结果表明:浓度为 0.6% 的 $\text{NaHCO}_3 : \text{Na}_2\text{CO}_3$ (1:1)复合碱式盐胁迫下,硅处理有效促进了黑麦草的生长,减缓了叶绿素 a 的降低幅度,提高了叶绿素 b 和总叶绿素的含量,缓解了碱式盐胁迫对黑麦草叶片净光合速率的抑制,减缓了气孔导度、蒸腾速率、气孔限制值和水分利用率的降低,缓解了碱式盐胁迫对叶片光合作用的影响,但是硅缓解复合碱式盐 NaHCO_3 与 Na_2CO_3 对黑麦草的胁迫存在一定的浓度范围。

关键词:硅;碱式盐胁迫;生长;光合作用

中图分类号:X 53 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2013)14-0088-04

在农业生产中土壤盐碱化已成为影响农业生产和制约农业发展的一个重要因素。土壤中能对植物产生致害的盐类包括 NaCl 、 Na_2SO_4 等为代表的中性盐类,还有以 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 为主的碱性盐类,这是 2 种不同性质的胁迫—盐胁迫和碱胁迫。我国内陆苏打盐碱土占的比重较大,东北地区碱化草地面积比例已经超过 70%^[1]。许多学者研究了盐胁迫下植物体内 Na^+ 代谢、抗盐相关基因的分子生物学及信号传导等,多以 NaCl 为主^[2-4]。近年来许多学者研究了碱性盐胁迫对碱蓬^[5]、星星草^[6]、羊草和向日葵^[7]、长穗冰草^[8]、小冰麦^[9]、碱地风毛菊^[10]等耐盐碱性较强植物的生长、生理变化以及光合作用的影响,证明碱性盐胁迫对植物的致害作用强于中性盐胁迫。但是有关降低碱性盐胁迫对植物的伤害研究报道较少。刘建新等^[11]研究表明,适宜浓度的硝酸镧可以减轻 NaHCO_3 胁迫对黑麦草叶片光合机构的伤害,提高其体内抗氧化保护酶的活性,从而缓解碱胁迫对黑麦草的伤害。硅是禾本科植物的有益元素,对其生长是有益的,在提高植物对非生物胁迫—铝、锰等毒害,盐

害和干旱(水分)胁迫以及生物胁迫如病虫害等的抗性方面有重要的作用^[12-17]。但是在碱性盐胁迫下关于硅提高植物耐盐碱性和缓解盐害的研究鲜有报道。黑麦草(*Lolium perenne*)是常见的禾本科优质牧草和草坪用草种,在草坪建植和管理过程中,由于土壤、水源和干旱的气候条件使得草坪草受到碱性盐胁迫而导致草坪草受害死亡,尤其是对耐盐性较低的苗期伤害更大,造成草坪草成坪困难,养护管理和修复成本增加。因此,现以多年生黑麦草幼苗为试材,以 $\text{NaHCO}_3 : \text{Na}_2\text{CO}_3$ (1:1)的复合碱式盐为胁迫条件,研究了硅对碱性盐胁迫下黑麦草生长和光合作用的影响,并对其可能机制进行初步探讨,为更进一步研究硅在提高植物抗碱性盐胁迫作用及其原理等方面提供科学依据和为其在草坪建植和管理中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)‘Ascend’。

1.2 试验方法

于 2009 年 6~8 月在黑龙江八一农垦大学试验基地网室中进行。采用直径 25 cm、高 20 cm 的塑料盆,装入 1:1 的蛭石和珍珠岩(v/v)混合基质,并放置于遮雨棚的中间位置以防雨水进入,每天上午挪动盆花位置,保证各盆受光均匀。黑麦草的播种量为 100 粒/盆,播种 54 盆,出苗后每隔 3 d 浇 1/5 Hoagland 营养液 1 次,其它时间每日用自来水补充失水,以称重法确定失水量。当幼苗 2 叶 1 心时疏苗,每盆定苗 50 株。3 叶 1 心

第一作者简介:薛巨坤(1986-),男,硕士,现主要从事植物营养和植物生态等研究工作。

责任作者:纪春艳(1964-),女,教授,现主要从事细胞生物学和植物细胞工程等研究工作。

基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究面上资助项目(11551517);牡丹江师范学院青年学术骨干资助项目(G200901);牡丹江市科技局科技攻关资助项目(G200920065);黑龙江省教育厅科学技术研究面上资助项目(11551516)。

收稿日期:2013-03-04

时进行不同硅浓度的 Hoagland 营养液处理,每 3 d 处理 1 次,共处理 3 次。硅源为 $K_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ (化学纯),硅浓度分别为 0.5(A)、1.0(B)、1.5(C)、2.0(D)、2.5(E)、5.0(F)、10.0(G) mmol/L,营养液中由 K_2SiO_3 引入的 K^+ 从营养液成分 KNO_3 中扣除,同时引起的氮素损失由稀释的 HNO_3 来补充,各处理营养液 pH 用 NaOH 或 H_2SO_4 稀溶液调节至 6.0,营养液用蒸馏水(无硅)配制。每个处理重复 3 次,每重复 2 盆。处理 2 周后,对各硅处理的黑麦草进行浓度为 0.6% $NaHCO_3 : Na_2CO_3$ (1:1) 的复合碱式盐溶液胁迫处理,处理时间为下午 16:00~18:00 时。为防止盐碱冲击,第 1 次进行复合盐胁迫处理时浇灌溶液 200 mL,3 d 后浇灌 400 mL,6 d 后浇灌 500 mL,设对照 1(CK1)为无硅和碱式盐的 Hoagland 营养液处理,对照 2(CK2)为无硅复合碱式盐溶液胁迫处理。在碱式盐溶液胁迫处理后第 10 天进行生长指标和光合作用指标的测定。

1.3 项目测定

每个处理盆中选出 10 株黑麦草,从盆中取出,在茎基部把地上部与残根分开,利用卷尺测量高度。之后,分别称取地上部分鲜重,并用蒸馏水洗净植株,吸水纸吸去附着的水分,置 105℃ 烘箱内杀青 15 min,再在 80℃ 下干燥至恒定质量,称其干重,计算组织含水量(WLD):按叶片含水量占叶片干重的百分比计算,即 $WLD = (\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{干重} \times 100\%$ [18]。根据干、鲜质量数据,计算日相对增长率(RGR) [7]。取倒数 2~3 片功能叶用丙酮和乙醇混合液浸提,比色法测定叶绿素总含量,用 Li-6400 便携式光合作用测定系统(美国 LICOR 公司)测定黑麦草的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)和气孔限制值(L_s)水分利用效率(WUE)。测定时温度为 $(30 \pm 2)^\circ C$,光照强度 $1\,000\, \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,相对湿度 25%~30%, CO_2 浓度 $(380 \pm 10)\, \mu mol \cdot mol^{-1}$,其中 $L_s = 1 - C_i / C_a$ (C_a 为空气中 CO_2 浓度) [20], $WUE = P_n / T_r$ [21]。

2 结果与分析

2.1 硅对复合碱式盐胁迫下黑麦草生长的影响

由表 1 可知,黑麦草在受到复合碱式盐胁迫后生长

受到抑制。与无复合碱式盐胁迫处理(CK1)相比,复合碱式盐胁迫处理(CK2)的黑麦草株高降低了 27.6%、地上部鲜重降低了 41.6%、地上部干重降低了 29.6%,差异显著,而且其日相对增长率明显小于无复合碱式盐胁迫处理(CK1),生长速率减慢。与复合碱式盐胁迫处理(CK2)相比,用硅预处理后再进行复合碱式盐胁迫处理,一定程度上可以缓解黑麦草的生长抑制。在低浓度的硅(0.5 mmol/L)处理下,缓解生长抑制的效果不明显;随着硅浓度的增加,黑麦草的株高、地上部鲜重、干重以及日相对增长率都明显大于单独复合碱式盐胁迫处理(CK2),缓解作用明显;但是硅浓度超过 2.0 mmol/L(D)以后,各处理黑麦草的株高、地上部鲜重和干重以及日相对增长率开始降低,这可能由于硅浓度过高与碱式盐胁迫共同作用形成双重胁迫,说明利用硅缓解盐碱胁迫对黑麦草生长抑制存在一定的浓度范围。

表 1 硅对复合碱式盐胁迫下黑麦草生长的影响

处理	株高 /cm	单株地上部鲜重 /mg	单株地上部干重 /mg	日相对增长率 /%
CK1	16.3±1.3a	77.20±2.69a	11.66±0.36a	32.50±2.27a
CK2	11.8±1.2c	45.06±1.37g	8.21±0.18e	10.10±0.90d
A	11.0±0.8c	44.09±2.44g	8.42±0.15e	11.10±1.30d
B	14.2±0.7b	61.63±1.45d	9.11±0.41d	21.30±0.50c
C	13.7±0.5b	65.22±1.64cd	9.61±0.27c	22.80±1.16c
D	15.1±0.7ab	72.65±2.29b	10.56±0.30b	27.30±1.71b
E	13.9±0.6b	67.18±3.25c	9.74±0.46c	27.00±1.59b
F	13.7±0.5b	57.89±2.26e	8.53±0.11e	21.00±1.27c
G	11.3±0.8c	50.12±1.13f	8.27±0.12e	20.10±0.60c

注:不同字母表示差异在 0.05 水平显著,下同。

2.2 硅对碱式盐胁迫下黑麦草叶片光合作用的影响

碱性盐胁迫严重影响植物生物量的积累,而生物量的积累又与光合作用密切相关。由表 2 可知,与对照 CK1 相比,单独复合碱式盐胁迫使黑麦草叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、气孔限制值和水分利用率明显降低,分别降低了 67.7%、34.1%、6.0%、12.6% 和 39.9%,而细胞间隙 CO_2 浓度显著升高($P < 0.05$)。利用不同浓度的硅进行预处理,缓解了碱式盐胁迫对黑麦草叶片净光合速率的抑制,减缓了气孔导度、蒸腾速率、气孔限制值和水分利用率的降低,缓解了碱式盐胁迫对叶

表 2 硅对复合碱式盐胁迫下黑麦草叶片光合作用的影响

处理	净光合速率 P_n / $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	气孔导度 G_s / $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	胞间间隙 CO_2 浓度 C_i / $\mu L \cdot L^{-1}$	蒸腾速率 T_r / $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	气孔限制值 L_s	水分利用率 / $g \cdot kg^{-1}$
CK1	8.44±0.75a	70.09±2.57a	252.92±5.11cd	2.89±0.15a	0.334±0.013ab	2.91±0.14a
CK2	3.17±1.12f	46.21±1.22e	269.13±8.76ab	1.81±0.31f	0.292±0.023cd	1.75±0.11d
A	3.92±0.72e	46.44±2.12e	270.86±5.10ab	2.21±0.15e	0.287±0.013cd	1.77±0.13d
B	5.11±1.01c	51.32±1.66d	255.78±3.90c	2.31±0.26d	0.327±0.010b	2.21±0.14bc
C	5.59±1.20b	55.29±1.98c	249.73±6.10cd	2.43±0.10d	0.343±0.016ab	2.29±0.12bc
D	6.57±1.30b	61.33±2.41b	243.21±6.26d	2.80±0.16b	0.360±0.017a	2.34±0.10bc
E	6.49±1.31b	59.05±1.90b	253.51±5.96cd	2.71±0.24b	0.333±0.017ab	2.39±0.15b
F	5.52±0.83d	53.98±2.71cd	266.81±3.42b	2.57±0.14c	0.298±0.010c	2.14±0.13c
G	3.41±1.20f	47.23±2.07e	277.51±4.96a	1.98±0.10ef	0.269±0.013d	1.72±0.11d

片光合作用的影响。与单独碱式盐胁迫处理相比,加硅的处理在碱式盐胁迫下黑麦草叶片气孔导度、蒸腾速率、气孔限制值和水分利用率随硅浓度的增加呈现先增大后降低的现象,而细胞间隙 CO_2 浓度则是先降低而后又逐渐增大的现象,硅浓度为 10.0 mmol/L(G) 的处理中黑麦草叶片净光合速率和蒸腾速率与单独复合碱式盐胁迫处理(CK2)之间无显著差异,而低硅浓度处理(A和B)和高浓度 10.0 mmol/L(G) 的处理中气孔导度、细胞间隙 CO_2 浓度、气孔限制值和水分利用率与单独复合碱式盐胁迫处理(CK2)之间无显著差异,除此之外其余处理与单独复合碱式盐胁迫处理(CK2)之间差异显著,说明当硅浓度在一定范围内可以缓解碱式盐胁迫对黑麦草叶片光合作用的抑制,提高水分利用率,但是并没有使其恢复到对照 CK1 的水平,由此可知硅在缓解碱式盐胁迫对黑麦草光合作用的抑制存在浓度限制。

2.3 硅对复合碱式盐胁迫下黑麦草叶片光合色素含量的影响

由表 3 可知,黑麦草叶片叶绿素 a、b 和叶绿素总含量(叶绿素 a+叶绿素 b)在复合碱式盐胁迫下(CK2)明显低于对照处理 CK1。低浓度硅预处理后,并没有提高复合碱式盐胁迫下黑麦草的叶绿素 a 的含量,但是提高了叶绿素 b 和叶绿素总量的含量。随着硅浓度的增加,各处理的黑麦草叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量出现先增大又降低的现象,硅浓度大于 2.0 mmol/L 之后,各处理的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量就出现不同程度的降低,当硅浓度为 10.0 mmol/L(G) 时,与单独复合碱式盐胁迫处理(CK2)之间无差异。说明用一定浓度的硅进行预处理,可以缓解复合碱式盐对黑麦草叶片光合色素的破坏和对叶绿素的合成抑制。

表 3 硅对复合碱式盐胁迫下黑麦草光合色素含量的影响

处理	叶绿素 a / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$	叶绿素 b / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$	叶绿素总含量 / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$
CK1	$10.68 \pm 0.55a$	$12.07 \pm 0.82bcd$	$22.7 \pm 1.2a$
CK2	$5.90 \pm 1.08c$	$7.32 \pm 0.34e$	$14.8 \pm 0.7ef$
A	$5.87 \pm 0.79c$	$10.74 \pm 0.67cd$	$16.3 \pm 1.1de$
B	$6.23 \pm 0.80c$	$11.28 \pm 0.59bcd$	$17.5 \pm 0.7cd$
C	$6.75 \pm 0.84bc$	$14.31 \pm 0.40a$	$17.7 \pm 0.8cd$
D	$7.86 \pm 0.83b$	$12.70 \pm 0.98b$	$20.3 \pm 1.4b$
E	$6.88 \pm 0.66bc$	$12.37 \pm 0.88bc$	$18.5 \pm 0.8c$
F	$5.84 \pm 0.86c$	$10.51 \pm 0.28d$	$16.5 \pm 1.1de$
G	$5.74 \pm 0.41c$	$7.81 \pm 0.74e$	$14.1 \pm 0.6f$

3 讨论与结论

盐碱胁迫下植物的生长受到抑制,生物量生成降低^[22],而且碱胁迫下对植物的生长抑制强于中性盐胁迫^[23],碱胁迫对植物的伤害是盐胁迫和 pH 共同作用的结果^[8]。盐胁迫既直接影响植物生长,又影响光合作用从而间接影响生长,且浓度越大,作用时间越长,越明

显^[24]。该试验采用多年生黑麦草作为试验材料,利用 NaHCO_3 与 Na_2CO_3 复合盐作为碱胁迫条件,发现浓度为 0.6% 的碱式盐胁迫下黑麦草的株高、地上部鲜重和干重显著低于对照 CK1(无硅和碱式盐的 Hoagland 营养液处理),并且在碱式盐胁迫下黑麦草的日相对生长率明显降低(表 1),说明复合碱式盐胁迫下明显抑制了黑麦草的生长,所得结果与前人在其它植物上研究的结果相同^[25-26]。

该研究中还发现 0.6% 的 NaHCO_3 与 Na_2CO_3 复合碱式盐胁迫导致黑麦草叶片叶绿素 a、b 和叶绿素总含量的降低,同时引起黑麦草叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、气孔限制值和水分利用率明显降低,细胞间隙 CO_2 浓度显著升高。逆境胁迫条件下,造成植物叶片光合速率降低的主要因素包括由于气孔的部分关闭导致的气孔限制和由于叶肉细胞光合活性下降而导致非气孔限制 2 类^[25]。Farquhar 等^[27]认为,光合参数中只有净光合速率(Pn)和细胞间隙 CO_2 浓度(Ci)均减小,而气孔限制值(Ls)增大时,可以推定光合速率的下降是由气孔导度的降低而导致的;当净光合速率(Pn)下降,细胞间隙 CO_2 浓度(Ci)升高,而气孔限制值(Ls)减小时,可以推定光合速率下降是由叶肉细胞光合活性的降低引起的。由此可知在 NaHCO_3 与 Na_2CO_3 复合碱式盐胁迫下黑麦草叶片净光合速率的降低主要是由于非气孔因素限制导致的。而有研究报道指出,非气孔因素中活性氧的增加是主导因素,它既破坏叶绿素,影响了类囊体膜的稳定性,降低了叶绿体对光能的吸收,抑制了光能的合理分配,从而使得光合速率下降;同时还破坏质膜透性,抑制细胞生长,促进酶的降解,进而抑制光合作用。

该试验中,发现复合碱式盐(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)胁迫下,黑麦草叶片光合参数也出现相同的变化趋势,但是在利用硅预处理后,黑麦草叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)、气孔限制值(Ls)和水分利用率随硅浓度的增加出现先增大后减小现象,而胞间 CO_2 浓度(Ci)出现先降低后升高,说明在复合碱式盐(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)胁迫下,低浓度的硅通过调节光合参数,增强了黑麦草叶片的光合作用,促进了光合产物的积累,缓解了复合碱式盐(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)对生长的抑制;但是当硅浓度增大时,有可能对黑麦草又产生了硅酸盐的胁迫,从而影响了黑麦草的光合参数和叶绿素的生成,光合作用减弱,光合产物积累降低,从而抑制了生长。硅如何影响复合碱式盐(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)胁迫下黑麦草的光合作用和叶绿素的生成以及调节黑麦草生长的机理还有待进一步研究。

该试验结果表明,在复合碱式盐(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)胁迫下,降低了黑麦草叶片叶绿素的含量,降低了

光合作用,干物质积累减少,抑制了黑麦草的生长。当利用不同浓度的硅处理后,缓解了复合碱式盐(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)对黑麦草叶片叶绿素的破坏作用,改变了碱式盐胁迫下叶片的光合参数,促进了光合作用和叶绿素的生成,促进了幼苗的生长;当硅浓度大于2.5 mmol/L之后,黑麦草的株高、地上部鲜重和干重以及日生长率又降低,说明黑麦草受到了双重盐胁迫,由此可知硅在缓解复合碱式盐(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)对黑麦草生长的胁迫时,存在着一定的浓度范围。

参考文献

- [1] 曲元刚,赵可夫. NaCl 和 Na_2CO_3 对盐地碱蓬胁迫效应的比较[J]. 植物生理与分子生物学报,2003,29(5):387-394.
- [2] 李品芳,侯振安,龚元石. NaCl 胁迫对苜蓿和羊草苗期生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(2):211-217.
- [3] Paul M H, Ray A B. Plant cellular and molecular responses to high salinity[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 2000,51:463-499.
- [4] Carmina G, Ana M R, Carmen M B, et al. The yeast HAL1 gene improves salt tolerance of transgenic tomato[J]. Plant Physiology,2000,123:393-402.
- [5] Ma C L, Wang P P, Cao Z Y. Cloning and differential gene expression of two catalases in *Suaeda salsa* in response to salt stress[J]. Acta Botanica Sinica,2003,45(1):93-97.
- [6] 杨春武,贾娜尔·阿汗,石德成,等. 复杂盐碱条件对星星草种子萌发的影响[J]. 草业学报,2006,15(5):45-50.
- [7] 颜宏,赵伟,盛艳敏,等. 碱胁迫对羊草和向日葵的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(8):1497-1501.
- [8] 黄立华,梁正伟,王志春,等. 苏打盐碱胁迫对长穗冰草幼苗生长和 K^+ 、 Na^+ 含量的影响[J]. 中国草地学报,2006,28(5):60-65.
- [9] 杨国会. 碱胁迫诱导小冰麦有机酸积累和分泌的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(7):77-84.
- [10] 夏方山,董秋丽,董宽虎. 碱性盐胁迫对碱地风毛菊苗期脯氨酸代谢途径的影响[J]. 中国草地学报,2011,33(1):48-53.
- [11] 刘建新,王鑫,王瑞娟,等. NaHCO_3 胁迫下硝酸铵对黑麦草幼苗光合机构的保护作用[J]. 应用生态学报,2010,21(11):2836-2842.
- [12] Hodson M J, Evans D E. Aluminium/silicon interactions in higher plants[J]. J. Exp. Bot.,1995,46:161-171.
- [13] Shi Q H, Bao Z Y, Zhu Z J, et al. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase[J]. Phytochemistry,2005,66(13):1551-1559.
- [14] 樊哲仁,王晓东,唐琳. 硅对盐胁迫下麻疯树种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国油料作物学报,2010,32(2):217-221.
- [15] 李清芳,马成仓,季必金. 硅对干旱胁迫下玉米水分代谢的影响[J]. 生态学报,2009,29(8):4163-4168.
- [16] 孙万春,梁永超. 硅和接种炭疽菌对黄瓜过氧化物酶活性的影响及其与抗病性的关系[J]. 中国农业科学,2002,35(6):1560-1564.
- [17] 杨艳芳,梁永超,姜运生. 硅对小麦过氧化物酶、超氧化物歧化酶和木质素的影响及其与抗白粉病的关系[J]. 中国农业科学,2003,36(7):813-817.
- [18] 雷玉娟,张振文,白团辉,等. 硅对盐胁迫下葡萄幼苗生理效应的影响[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(5):165-168.
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2003:134-144,184-185.
- [20] 郑国琪,许兴,徐兆桢,等. 盐胁迫对枸杞光合作用的气孔与非气孔限制[J]. 西北植物学报,2002(22):1355-1359.
- [21] 曲桂敏,沈向,王鸿霞,等. 不同品种苹果树水分利用效率及有关参数的日变化[J]. 果树科学,2000,17(1):7-11.
- [22] 刘建新,王瑞娟,王鑫,等. $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 对盐胁迫下黑麦草幼苗生长及抗逆生理特性的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):353-357.
- [23] 白文波,李品芳,李保国. NaCl 和 NaHCO_3 胁迫下马蔺生长与光合特性的反应[J]. 土壤学报,2008,45(2):328-335.
- [24] 郭书奎,赵可夫. NaCl 胁迫抑制玉米幼苗光合作用的可能机理[J]. 植物生理学报,2011,27(6):461-466.
- [25] 吴成龙,尹金来,徐阳春,等. 碱胁迫对菊芋幼苗生长及其光合作用和抗氧化作用的影响[J]. 西北植物学报,2006,26(3):447-454.
- [26] 刘建新,王鑫,胡浩斌,等. 硝酸铵对碱胁迫下黑麦草幼苗生长和光合生理的影响[J]. 植物研究,2010,30(6):674-679.
- [27] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annu. Rev. Plant Physiol.,2011,33:317-345.

Effect of Silicon on Ryegrass Growth and Photosynthesis Under Composite Subsalt Stress

XUE Ju-kun¹, LI Ji-guang¹, JIN Ya-zhong², CHEN Dan-feng³, SUN Hui⁴, JI Chun-yan¹

(1. College of Life Sciences and Technology, Mudanjiang Normal College, Mudanjiang, Heilongjiang 157012; 2. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319; 3. The Second Affiliated Hospital of Mudanjiang Medical College, Mudanjiang, Heilongjiang 157009; 4. School of Civil Engineering, Mudanjiang University, Mudanjiang, Heilongjiang 157011)

Abstract: Taking ryegrass 'Ascend' as test material, through soilless culture, the effect of silicon on ryegrass growth and photosynthesis were studied under the stress of composite subsalt NaHCO_3 and Na_2CO_3 (1 : 1). The results showed that under the stress of NaHCO_3 and Na_2CO_3 (1 : 1) with 0.6% concentration, silicon treatment effectively promoted ryegrass growth, slowed down the decline in Chlorophyll a, increased the content of both Chlorophyll b and total chlorophyll, mitigated the inhibition of ryegrass leaf net photosynthetic rate, slowed the reduction in stomatal conductance, transpiration rate, stomata limitation and water using efficiency, and alleviated the influence of composite subsalt stress on leaf photosynthesis. However, it was within a certain concentration range that ryegrass became under the stress of silicon alleviated composite subsalt NaHCO_3 and Na_2CO_3 .

Key words: silicon; subsalt stress; development; photosynthesis