

DOI:10.11937/bfyy.201506018

# 外源 $\text{Ca}^{2+}$ 对盐胁迫下唐古特白刺气孔形态的影响

宣亚楠, 刘 威, 高彦博, 杜玉玲, 闫永庆

(东北农业大学 园艺学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘 要:**以盐生植物唐古特白刺为试材,研究了不同浓度外源  $\text{Ca}^{2+}$  (0、5、10、15、20 mmol/L) 对不同浓度 NaCl (100、200、300、400 mmol/L) 胁迫下唐古特白刺的气孔形态变化的影响。结果表明:唐古特白刺气孔长度和宽度随盐浓度的升高均降低,NaCl 浓度为 200 mmol/L 处理下,气孔长度和宽度在  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 10 mmol/L 时出现最大值,NaCl 浓度  $\geq 300$  mmol/L 处理下,气孔长度和宽度在  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 15 mmol/L 时出现最大值。唐古特白刺表皮气孔密度随 NaCl 浓度升高,逐渐降低;随外源  $\text{Ca}^{2+}$  浓度升高,气孔密度先增加后降低,NaCl 浓度  $\leq 300$  mmol/L 时,各盐处理在  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 5 mmol/L 时气孔密度达到最大值,NaCl 浓度为 400 mmol/L 时,虽然气孔密度增大,但是部分气孔发育不成熟,有些变形严重,不能行使其功能,说明唐古特白刺的最大耐盐浓度为 300 mmol/L。

**关键词:**盐胁迫;  $\text{Ca}^{2+}$ ; 白刺; 气孔

**中图分类号:**S 793.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)06-0062-06

唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)属蒺藜科(Zygophyllaceae)白刺属(*Nitraria* L.)落叶小灌木,也是中国特有种,分布于中国新疆、西藏、宁夏等地。白刺果实可食,含多种人体需要的微量元素,果肉可做成果酱,种子可榨油。同时,白刺的嫩枝叶适口性好,营养比较丰富,是干旱地区很好的饲用植物。白刺具极强的抗逆性,其长期生长在自然条件异常严酷的环境中,是荒漠和半荒漠地区重要的建群种,具有极强的防风固沙、抗旱、抗盐碱、耐热、耐瘠薄等特性<sup>[1]</sup>。近年来,许多学者就其耐盐性进行了研究,倪建伟等<sup>[2]</sup>设置不同盐浓度,分析 3 种白刺在盐胁迫下的生长及生理生化响应;卢树昌等<sup>[3]</sup>对重盐碱区白刺耐盐性及其利用进行了研究,结果表明白刺不同生长阶段耐盐性不同,白刺是重盐碱区良好的盐土改良植物;闫永庆等<sup>[4]</sup>研究发现白刺对混合盐碱胁迫也有很强的适应力。故开发利用白刺资源不仅有着重要的经济价值,而且还有着很高的生态价值。

气孔是植物表皮的一个特殊结构,一般由成对的保卫细胞以及保卫细胞之间的孔隙组成<sup>[5]</sup>,它是植物与外界环境进行  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  等气体交换的重要通道<sup>[6]</sup>。虽然气孔总面积仅占叶片总面积的 5%,但是通过气孔蒸发的水分却占植物总失水量的 70%之多<sup>[7]</sup>。研究表明,在非生物胁迫条件下,植物叶片的气孔数目、分布状况、气孔导度、气孔指数会发生变化<sup>[8-10]</sup>。盐胁迫对植物的气孔密度、气孔开放率等都有影响<sup>[11]</sup>。郑国琦等<sup>[12]</sup>研究表明,枸杞随着 NaCl 浓度的增加,气孔导度下降。国槐和核桃气孔导度日进程峰值出现的时间比对照提前,峰值减小<sup>[13]</sup>。剑叶水稻平均气孔长度随盐胁迫程度增加的变化趋势是先增后降,气孔宽度随盐胁迫水平增加而增加<sup>[14]</sup>。任昱等<sup>[15]</sup>通过模拟不同人工增雨处理,研究白刺的气孔长度、宽度及密度变化表明,增雨后叶片上表皮和下表皮气孔长度、宽度均有不同程度的增加,任安祥<sup>[16]</sup>研究表明,盐处理后三色堇的气孔不同程度地迅速关闭,长时间盐胁迫使基层的叶片气孔密度略有增加;上层新叶的气孔密度显著降低。长时间盐胁迫使气孔的开放率也降低,越是新分化的叶片盐胁迫对其气孔影响也越大。

$\text{Ca}^{2+}$  作为细胞内生理生化反应的第二信使偶联外信号,调控多种酶活性,在 ABA 和  $\text{H}_2\text{O}_2$  信号途径中,调控气孔关闭,增加外源  $\text{Ca}^{2+}$  浓度,通过膜流动诱导细胞质  $\text{Ca}^{2+}$  变化,增加耐盐性<sup>[17]</sup>,同时可调节离子通道以维持气孔功能<sup>[18]</sup>,外源  $\text{Ca}^{2+}$  对盐胁迫下的甜瓜气孔开度的调节反映在对气孔宽度的调节上,该调节效应受外界

**第一作者简介:**宣亚楠(1988-),女,硕士研究生,现主要从事园林植物逆境生理生态等研究工作。E-mail: xuanyanan2008@163.com.

**责任作者:**闫永庆(1966-),男,博士,教授,现主要从事园林植物逆境生理生态等研究工作。E-mail: yanyongqing1966@163.com.

**基金项目:**东北农业大学博士启动基金资助项目(2012RCB63);黑龙江省教育厅科学技术研究资助项目(11551052);黑龙江省自然科学基金面上资助项目(C2011427)。

**收稿日期:**2014-11-05

盐胁迫状况的影响<sup>[19]</sup>。低浓度  $\text{Ca}^{2+}$  会促进盐胁迫诱导的气孔开放,高浓度的  $\text{Ca}^{2+}$  能抑制盐胁迫诱导的气孔开放,起缓解盐胁迫的作用<sup>[20]</sup>。

目前对白刺的研究相对减少,部分研究集中在混合盐胁迫对白刺的生理指标影响的研究,外源水杨酸、 $\text{Ca}^{2+}$  对唐古特白刺在盐碱胁迫下的缓效作用,以及外源  $\text{H}_2\text{O}_2$  对过氧化物酶活性的影响<sup>[21]</sup>,而有关白刺在盐胁迫及外施  $\text{Ca}^{2+}$  下气孔变化的研究尚鲜见报道。该试验拟对盐胁迫白刺叶片气孔密度、大小及其气孔长宽比进行初步研究,为探索作物耐盐机理提供科学依据,同时探讨外源  $\text{Ca}^{2+}$  对盐胁迫下植物调控作用,以期对  $\text{Ca}^{2+}$  与植物耐盐性相关研究奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为盐生植物唐古特白刺。

### 1.2 试验方法

1.2.1 材料的培养 2012年3月,白刺育苗在东北农业大学园艺工程中心智能温室中进行,将温水浸种24 h后的唐古特白刺种子播种于装有纯净河沙的苗盘中育苗。待幼苗长出4~5片真叶时定植到10 cm×10 cm的塑料花盆中,栽培基质为园土:蛭石=1:1。2013年5月选取长势一致的1年生实生苗,用清水浸泡去除根际泥土,再用蒸馏水漂洗干净,并用去离子水冲洗后每盆3株种植于15 cm×15 cm的塑料花盆中,栽培基质为纯净河沙,用1/2 Hoagland全营养液浇灌培养,待充分缓苗后,进行盐胁迫处理。

1.2.2 试验处理 对唐古特白刺进行NaCl胁迫处理,设100、200、300、400 mmol/L 4个浓度梯度, $\text{CaCl}_2$  分别设0、5、10、15、20 mmol/L 5个浓度。试验采用完全随机区组试验设计,共设20个处理,每盆为1个处理,每处理3次重复,共60盆。将NaCl和 $\text{CaCl}_2$ 按设计浓度加入到Hoagland营养液中,进行浇灌处理。为防止盐激效应,各处理都以1/2 Hoagland+50 mmol/L NaCl作起始浓度<sup>[22]</sup>,此后每天递增50 mmol/L,达到预设浓度后,按各处理NaCl及 $\text{CaCl}_2$ 浓度连续处理7 d,每天浇灌1次,浇灌量为细沙持水量的2倍(每盆约200 mL),约2/3的溶液流出,从而将以前累积于细沙中的盐冲洗掉,以保持盐浓度的恒定。在处理结束后的第2天取样测定相关指标。

### 1.3 项目测定

1.3.1 唐古特白刺叶表皮气孔形态扫描电镜观察 取处理后的叶片,经蒸馏水洗净后,切成3 mm×3 mm的小段,用2.5%戊二醛(4℃,pH 6.8)固定24 h,1.5%锇酸后固定,常规方法脱水,临界点干燥后粘台并做导电处理,离子渐射仪镀膜、日立S-3400N型扫描电子显微

镜下比较观察并照相。气孔的长度和宽度观测在扫描电子显微镜下进行测定,每等份选择10个视野,每视野选择2个气孔。

1.3.2 唐古特白刺叶表皮气孔密度光学显微镜观察 采摘当年生枝条上第7片叶。将叶片从叶尖到叶柄分成3等分,取中间的1/3,再将这部分叶片从两侧分成3等分,取中间的1/3。用镊子直接剥离或撕下定位取样的材料上和下表皮<sup>[23]</sup>。将剥离的唐古特白刺上、下表皮平展在滴有水滴的载玻片上,盖上盖玻片置于光学显微镜下观察。0.4×20倍显微镜(Nikon PHASE CONTRAST)下观测网格尺中的气孔数,再换算成单位面积内的气孔数,每段取10个观测值,计算10段的平均值,统计每平方毫米叶片上的气孔数目。

### 1.4 数据分析

试验数据采用Excel 2010和SPSS 17.0软件进行处理分析,Duncan方法进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 白刺叶片气孔形态特征

随盐胁迫浓度增大,叶表皮气孔的长度和宽度先增加后降低,盐处理使得气孔长度和宽度在200 mmol/L时明显增大(如图3中B0~B4),随 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度的增加,气孔长度和宽度先增加后降低,气孔形态特征为长椭圆形,盐胁迫使得单位叶面积气孔密度增大,叶表皮气孔保卫细胞为肾形,表面平滑,外具同心环绕的细条纹状纹饰(如图3中A0~A4),气孔器拱起(如图3中C0~C4),气孔下陷,几个普通的表皮细胞不规则地围绕着气孔,气孔壁出现角质条纹特征,有盐腺,分泌盐状结晶。

### 2.2 外源 $\text{Ca}^{2+}$ 对盐胁迫下唐古特白刺上表皮气孔长度、宽度、长宽比的影响

由表1可以看出,唐古特白刺气孔长度、宽度和长宽比随NaCl浓度的升高均降低。当NaCl浓度为100 mmol/L时,随着外源 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度升高,不同处理下唐古特白刺气孔长度差异显著,但均低于对照;NaCl浓度为200 mmol/L时,随着外源 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度升高,唐古特白刺气孔长度和宽度先增加后降低再增加,且增高幅度大于降低幅度,唐古特白刺气孔长度和宽度均在 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度为10 mmol/L时出现最大值,NaCl浓度为200 mmol/L较100 mmol/L变化明显;NaCl浓度为300 mmol/L时,随着外源 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度升高,气孔长度和宽度先降低后升高再降低,唐古特白刺气孔长度和宽度均在 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度为15 mmol/L时出现最大值;NaCl浓度为400 mmol/L时,随着外源 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度升高,气孔长度和宽度先升高后降低,均在 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度为15 mmol/L时出现最大值。

NaCl浓度为 $\geq 200$  mmol/L时,随着外源 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度升高,在盐胁迫下, $\text{Ca}^{2+}$ 有助于气孔长度和宽度的增加,并且高浓度的盐需要增加适当的 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度来缓解盐胁迫。

表 1

不同盐浓度及外源  $\text{Ca}^{2+}$  对唐古特白刺气孔特性的影响Table 1 Effect of different salt concentrations and exogenous  $\text{Ca}^{2+}$  on stomata characteristics of *Nitraria tangutorum*

处理 Treatment		保卫细胞长度	保卫细胞宽度	保卫细胞长宽比
NaCl 浓度	$\text{CaCl}_2$ 浓度	Guard cell length	Guard cell width	Guard cell length-width
NaCl concentration/(mmol · L <sup>-1</sup> )	$\text{CaCl}_2$ concentration/(mmol · L <sup>-1</sup> )	/μm	/μm	ratio
100	0	32.393±2.364a	25.121±2.487a	1.3057±0.201a
	5	28.363±3.346ab	20.089±2.313b	1.436±0.289a
	10	28.278±2.127ab	20.811±2.509b	1.390±0.150a
	15	26.187±3.109b	20.106±2.495b	1.314±0.170a
	20	31.667±3.610a	21.006±3.210b	1.536±0.266a
200	0	24.892±2.315ab	19.680±2.542a	1.288±0.213a
	5	24.937±3.487ab	17.057±1.656ab	1.419±0.180a
	10	29.268±3.576a	20.108±1.898a	1.468±0.226a
	15	21.048±2.841b	15.793±1.727b	1.340±0.179a
	20	26.923±2.558a	18.900±1.195ab	1.427±0.132a
300	0	19.940±1.902b	16.005±2.055b	1.258±0.143b
	5	28.121±3.133a	19.505±3.137b	1.460±0.181ab
	10	24.943±2.452a	18.964±1.753b	1.328±0.202ab
	15	29.992±3.306a	24.592±2.936a	1.263±0.182b
	20	25.513±2.453a	15.847±1.349b	1.621±0.212a
400	0	20.515±2.727b	15.654±1.198a	1.316±0.185a
	5	19.700±1.504b	15.920±1.578a	1.245±0.126a
	10	23.358±2.256b	16.232±1.580a	1.448±0.166a
	15	29.630±1.580a	18.900±1.545a	1.578±0.159a
	20	28.000±1.903a	19.263±2.979a	1.489±0.262a

注:同列中不同小写字母表示差异显著性( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters show significant difference in the same column at 0.05 level.

迫对气孔伸长和加宽的影响,但过高的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度反而会抑制气孔伸长和加宽。除 NaCl 浓度为 300 mmol/L,各处理中气孔长宽比差异不显著,NaCl 浓度为 400 mmol/L 时,气孔出现变形、发育不完全的现象,不能行使其功能(D0-D4)。

### 2.3 外源 $\text{Ca}^{2+}$ 对盐胁迫下唐古特白刺上表皮气孔密度的影响

由图 1 可以看出,随 NaCl 浓度的升高,唐古特白刺上表皮气孔密度逐渐降低,随着外源  $\text{Ca}^{2+}$  浓度升高,不同盐处理下唐古特白刺气孔密度表现出先增加后降低,NaCl 浓度 $\leq 300$  mmol/L 时,各盐处理在  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 5 mmol/L 时达到最大值,虽然 NaCl 浓度为 400 mmol/L 在  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 20 mmol/L 时气孔密度最高,但是大部分气孔分化不成熟,不能行使其功能,并且严重变形,说明

盐胁迫在一定范围时,低浓度  $\text{Ca}^{2+}$  有助于气孔分化,增加气孔数目,促进植物生长,但  $\text{Ca}^{2+}$  浓度超过一定范围时,其促进作用减弱甚至抑制气孔密度增加。

### 2.4 外源 $\text{Ca}^{2+}$ 对盐胁迫下唐古特白刺下表皮气孔密度的影响

从图 2 可以看出,随 NaCl 浓度的升高,唐古特白刺下表皮气孔密度增加,且下表皮气孔密度均大于上表皮气孔密度。随着外源  $\text{Ca}^{2+}$  浓度升高,不同盐处理下唐古特白刺气孔密度表现出先增加后降低,除 400 mmol/L 外,其它各处理均在  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 5 mmol/L 时达到最大值,NaCl 浓度为 200 mmol/L 变化最为明显,400 mmol/L 处理随  $\text{Ca}^{2+}$  浓度( $\text{Ca}^{2+} \geq 10$  mmol/L)增加气孔密度增加,但是气孔出现变形被破坏并且一部分气孔分化未成熟,不能体现其功能。

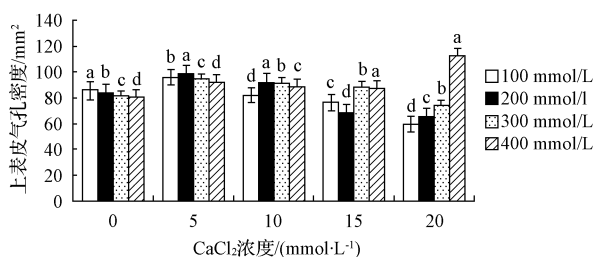


图 1 外源  $\text{Ca}^{2+}$  对盐胁迫下唐古特白刺叶片上表皮气孔密度的影响

Fig. 1 Effect of exogenous  $\text{Ca}^{2+}$  on upper epidermis stomatal density of *Nitraria tangutorum* under salt stress

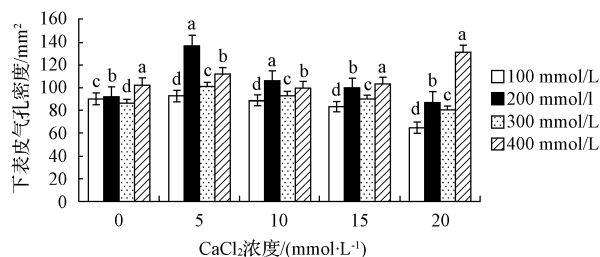
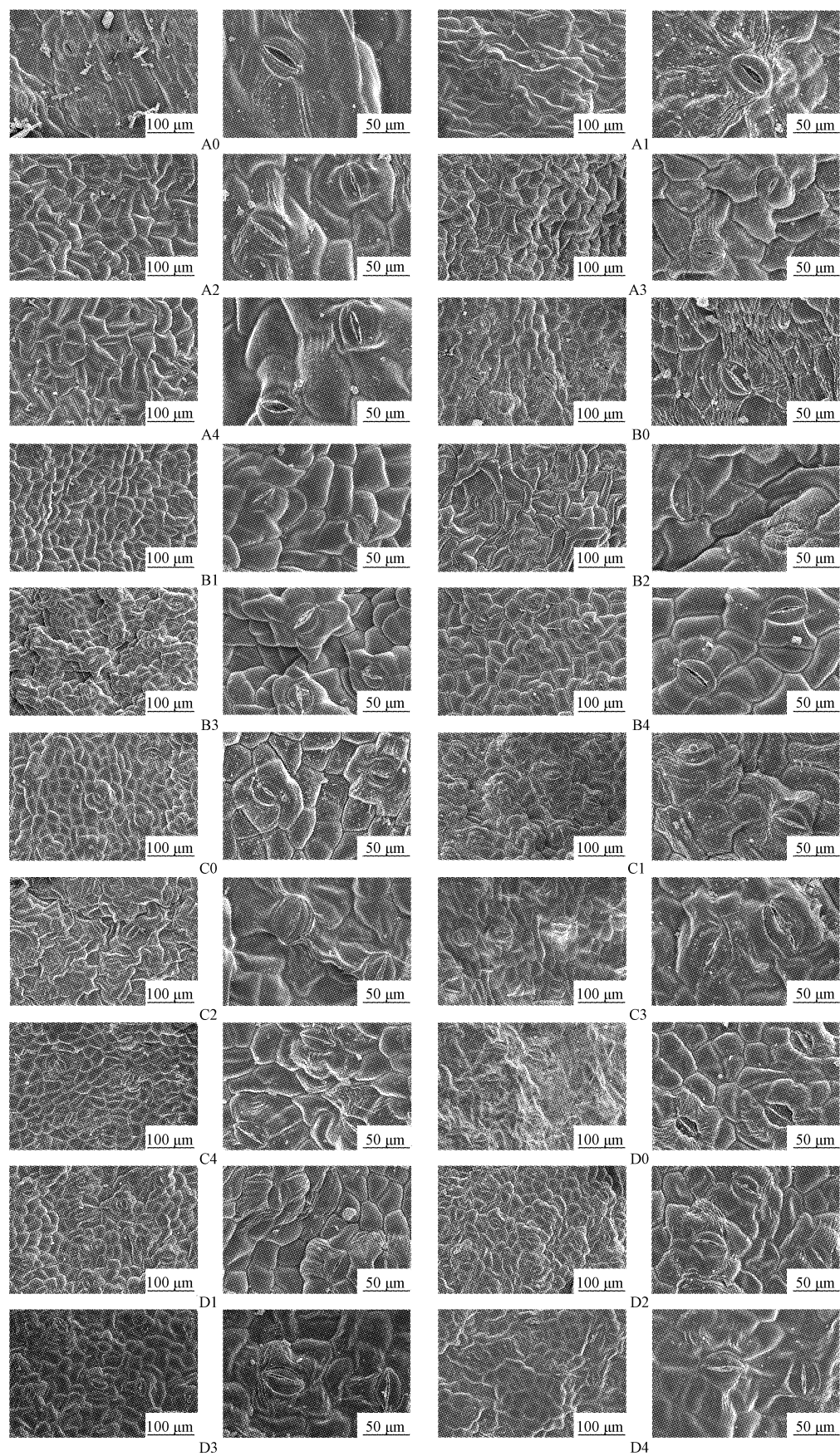


图 2 外源  $\text{Ca}^{2+}$  对盐胁迫下唐古特白刺叶片下表皮气孔密度的影响

Fig. 2 Effect of exogenous  $\text{Ca}^{2+}$  on lower epidermis stomatal density of *Nitraria tangutorum* under salt stress





注:字母 A~D 分别代表 NaCl 浓度 100、200、300、400 mmol/L,数字 1~5 分别代表 CaCl<sub>2</sub> 浓度 0.5、10、15、20 mmol/L。

图 3 不同处理下白刺叶片表皮气孔形态

Fig. 3 The form of epidermis stomatal of *Nitraria tangutorum* under different treatments



### 3 讨论

唐古特白刺是一种盐生植物,叶片肉质,倒卵状长椭圆形,且叶表面密被绒毛,通过显微镜观测,表皮由一层平坦而排列紧密的细胞构成,表面有较厚的质膜,章英才等<sup>[24]</sup>对盐生植物的形态学解剖表明该结构可有效调节蒸腾作用和排盐作用。

气孔是叶片与外界环境进行气体和水分交换的重要通道,对植物光合作用和蒸腾作用有重要意义<sup>[25]</sup>。植物面对环境胁迫会做出各种响应以减轻胁迫,从而提高植物的抗逆性<sup>[26]</sup>。该试验利用扫描电镜对唐古特白刺表皮气孔进行观察,发现随盐处理,表皮分泌更多盐粒(如图3中A0、B0、C0、D0),表皮细胞形状基本无变化,呈近椭圆形或卵圆形,细胞凹凸变化不明显。随盐处理气孔呈明显不规则型且下陷,可以减少叶肉细胞水分散失。上下表皮都有气孔分布,下表皮气孔数远大于上表皮,说明植物在盐渍环境下有相应的调整外部结构的适应能力,这与沈禹颖<sup>[27]</sup>对3种盐生植物叶表皮的观测结果一致。

随盐浓度增加,唐古特白刺气孔长宽均降低,但适当增加外源  $\text{Ca}^{2+}$  浓度可有效增加气孔的长度和宽度。增加的外源  $\text{Ca}^{2+}$  可通过膜流动促进细胞质中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度增加,诱导植物,关闭保卫细胞<sup>[28]</sup>,细胞质中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度增加可减轻对  $\text{Na}^{+}$  的吸收,调节  $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$  比例、增强植物抗盐性<sup>[29]</sup>。该试验中随外源  $\text{Ca}^{2+}$  浓度升高,不同盐处理下气孔长度、宽度均表现为不同程度的先升高后下降。不同  $\text{Ca}^{2+}$  浓度对不同盐胁迫下气孔的长度和宽度的促进作用不同,高浓度的盐处理需要增加适当  $\text{Ca}^{2+}$  浓度缓解盐胁迫对气孔伸长和加宽的影响,但  $\text{Ca}^{2+}$  浓度过高会抑制气孔生长。气孔长宽比在  $\text{NaCl}$  浓度为  $300\text{ mmol/L}$ ,各处理差异显著, $\text{NaCl}$  浓度为  $400\text{ mmol/L}$  时,气孔出现变形、发育不完全的现象,说明唐古特白刺可以忍受的最高盐浓度为  $300\text{ mmol/L}$ ,与闫永庆等<sup>[4]</sup>研究结果一致。

许多学者研究发现,干旱、盐、水分胁迫可增大气孔密度、迫使叶面积变小,从而增加单位叶面积上气孔数量。该试验发现随  $\text{NaCl}$  浓度升高,白刺上表皮气孔密度逐渐降低,下表皮气孔密度逐渐增加,且气孔部分关闭,叶面积不同程度减小,表明盐胁迫可改变白刺叶片结构和叶面积大小,以降低蒸腾作用。

#### 参考文献

- [1] 谢小丁,刘玉新,徐化凌,等.唐古特白刺在黄河三角洲滨海盐碱地的引种[J].湖北农业科学,2009,48(9):2115-2117.
- [2] 倪建伟,武香,张华新,等.3种白刺耐盐性的对比分析[J].林业科学研究,2012,25(1):48-53.
- [3] 卢树昌,苏卫国.重盐碱区白刺耐盐性及其利用进行研究[J].天津农学院学报,2004,11(4):31-35.
- [4] 闫永庆,刘兴亮,王崑,等.白刺对不同浓度混合盐碱胁迫的生理响

应[J].植物生态学报,2010(10):1213-1219.

- [5] 郑玉龙,姜春玲,冯玉龙.植物的气孔发生[J].植物生理学通讯,2005,41(6):847-850.
- [6] Hetherington A M, Woodward F I. The role of stomata in sensing and driving environmental change[J]. Nature, 2003, 424: 901-908.
- [7] 高春娟,夏晓剑,师恺,等.植物气孔对全球环境变化的响应及其调控防御机制[J].植物生理学报,2012,48(1):20-21.
- [8] 韦海建,杨惠敏,赵亮.遮荫环境对白三叶草气孔和光合特性的影响[J].草业科学,2007,24(10):94-97.
- [9] Royer D L. Stomal density and stomal index as indicators of paleoatmospheric  $\text{CO}_2$  concentration[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2001, 114: 1-28.
- [10] 刘婧,王宝山,谢先芝.植物气孔发育及其调控研究[J].遗传,2011,33(2):131-135.
- [11] 王碧霞,曾永海,王大勇,等.叶片气孔分布及生理特征对环境胁迫的响应[J].干旱地区农业研究,2010,28(2):122-125.
- [12] 郑国琦,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(6):1355-1359.
- [13] 张川红,尹伟伦,沈应柏.盐胁迫对国槐与核桃气孔的影响[J].北京林业大学学报,2003,24(2):2-4.
- [14] 孙佳妮.盐胁迫对水稻叶片气孔性状及生理功能影响的研究[J].农业科技与装备,2010(6):14-16.
- [15] 任昱,卢琦,吴波,等.白刺叶片气孔特征对人工模拟降雨的响应[J].生态学报,2014,34(21):6101-6106.
- [16] 任安祥.盐胁迫对三色苜蓿叶片气孔分化及开闭的影响[J].园艺学报,2010,37(3):479-484.
- [17] Israelsson M, Siegel R S, Young J, et al. Guard cell ABA and  $\text{CO}_2$  signaling network updates and  $\text{Ca}^{2+}$  sensor priming hypothesis[J]. Curr Opin Plant Biol, 2006, 9(6): 654-661.
- [18] Zhao X, Wang Y L. Extracellular  $\text{Ca}^{2+}$  regulating stomatal movement and plasma membrane  $\text{K}^{+}$  channels in guard cells of *Vicia faba* under salt stress[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(11): 1970-1976.
- [19] 王黎敏,黄丹枫,张屹东.外源  $\text{Ca}^{2+}$  对盐胁迫下甜瓜叶片气孔开度的调节[J].长江蔬菜,2011(2):36-39.
- [20] Hamilton D W A, Hills A, Köhler B, et al.  $\text{Ca}^{2+}$  channels at the plasma membrane of stomatal guard cells are activated by hyperpolarization and abscisic acid[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2000, 97: 4967-4972.
- [21] 袁晓婷,刘威,宣亚楠,等.盐胁迫下唐古特白刺对外源  $\text{Ca}^{2+}$  的生理响应[J].植物生理学报,2014,50(1):88-94.
- [22] 弋良朋,王祖伟.盐胁迫下3种滨海盐生植物的根系生长和分布[J].生态学报,2011,31(5):1195-1202.
- [23] 梁维,杨晓红,陈吉裕,等.几种用于光学显微镜观测的桑叶表皮整体制片方法比较[J].蚕业科学,2009,35(1):116-118.
- [24] 章英才,闫天珍.花花柴叶片解剖结构与生态环境关系的研究[J].宁夏农学院学报,2003,24(1):31-34.
- [25] Chaerle L, Saibo N, van Der Straeten D. Tuning the pores: towards engineering plants for improved water use efficiency[J]. Trends Biotechnol, 2005, 23(6): 308-315.
- [26] 王碧霞,曾永海,王大勇,等.叶片气孔分布及生理特征对环境胁迫的响应[J].干旱地区农业研究,2010,28(2):122-125.
- [27] 沈禹颖.三种盐生植物叶表的扫描电镜观察(简报)[J].草业学报,1997,3(6):32-36.
- [28] Zhu J K. Regulation of ion homeostasis under salt stress[J]. Curr Opin Plant Biol, 2003, 6: 441-445.
- [29] McClung C R. Plant circadian rhythms[J]. Plant Cell, 2006, 18: 792-803.

DOI:10.11937/bfyy.201506019

# 美人蕉+梭鱼草人工湿地植物组合处理高浓度畜禽废水的净化效应和生理响应研究

陈金发

(西昌学院 工程技术学院,西昌 四川 615013)

**摘要:**以自然湿地中采集的梭鱼草和美人蕉为试材,在室外模拟条件下研究了这2种湿地植物组合在高浓度畜禽废水条件下的净化作用及植物生理变化。并探讨了该湿地植物组合对废水的净化作用与生物学效应之间的关系。结果表明:该种植物组合对高浓度畜禽废水有较好的净化处理效果;COD、TP、NH<sub>3</sub>-N分别从1 615~2 364、33~71、115~224 mg/L下降到136~280、17~76、0.5~9.0 mg/L,均能达标排放。周期结束植物各项生理指标正常,生长状况良好,选用的梭鱼草和美人蕉组合搭配建造人工湿地不仅有良好的景观效果,而且对畜禽废水有较好的净化作用。

**关键词:**人工湿地;畜禽废水;抗氧化酶系统;胁迫

**中图分类号:**S 555+.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)06-0067-05

近年随着禽养殖业的快速发展,畜禽养殖业的自身发展与环境保护的矛盾日益突出。未经处理的畜禽废水含有大量的污染物,污染负荷很高。畜禽污水排入江

河湖泊中,造成水体N、P量升高,导致水体严重富营养化。我国畜禽养殖业废弃物的配套处理设施少,处理水平低下。近年来,人工湿地具有净化污染物效果好、运行费用低、易维护等特点作为污水处理技术已被广泛应用<sup>[1]</sup>。国内外在人工湿地技术、湖滨带生态修复、生态景观设计等方面进行了大量的研究。人工湿地作为一种具有污水处理和水环境生态改善双重功能的工程技

**作者简介:**陈金发(1976-),男,福建莆田人,硕士,副教授,研究方向为污染控制与循环经济。E-mail:84536683@qq.com.

**基金项目:**四川省科技厅应用基础研究资助项目(2013JY0131)。

**收稿日期:**2014-11-10

## Effect of Exogenous Ca<sup>2+</sup> on Stomatal Morphology of *Nitraria tangutorum* Under Salt Stress

XUAN Ya-nan, LIU Wei, GAO Yan-bo, DU Yu-ling, YAN Yong-qing  
(College of Horticulture, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030)

**Abstract:** With *Nitraria tangutorum* as experimental material, effect of the different concentrations (0, 5, 10, 15, 20 mmol/L) of exogenous Ca<sup>2+</sup> on stomatal morphology characteristics of *Nitraria tangutorum* under different concentrations (100, 200, 300, 400 mmol/L) of salt stress were researched. The results showed that the *Nitraria tangutorum* stomatal length and width were both lower with the increase of NaCl concentration, there was a maximum of stomatal length and width under NaCl concentration for 200 mmol/L and Ca<sup>2+</sup> concentration of 10 mmol/L, when Ca<sup>2+</sup> concentration was 15 mmol/L and salt stress (NaCl ≥ 300 mmol/L), there was a maximum of stomatal length and width. Along with the increase of NaCl concentration, stomatal density of *Nitraria tangutorum* epidermis decreased gradually, as the exogenous Ca<sup>2+</sup> concentration increasing, stomatal density of *Nitraria tangutorum* hypodermis under different salt processing showed decreasing after increasing first, each treatment reached maximum with the Ca<sup>2+</sup> concentration (5 mmol/L) and NaCl concentration (≤ 300 mmol/L); stomatal density of *Nitraria tangutorum* increased under NaCl concentration (400 mmol/L), but part of porosity development was not mature, some deformation was serious, unable to exercise its function, it indicated that *Nitraria tangutorum* suffered the maximum concentration (NaCl 300 mmol/L) to salt stress.

**Keywords:** salt stress; Ca<sup>2+</sup>; *Nitraria tangutorum*; stomatal