

伍会萍,丁振杰,倪细炉. NaCl胁迫对长苞香蒲和芦苇生长及光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(24):134-138.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.24.035

# NaCl胁迫对长苞香蒲和芦苇生长及光合特性的影响

伍会萍<sup>1,2</sup>, 丁振杰<sup>1,2</sup>, 倪细炉<sup>2</sup>

(1. 宁夏林业研究院种苗生物工程国家重点实验室, 宁夏银川 750004;  
2. 宁夏银川城市森林生态系统国家定位观测研究站, 宁夏银川 750004)

**摘要:**选择2种水生植物(长苞香蒲、芦苇)作为材料进行盆栽试验,用不同浓度(100、200、300 mmol/L)的NaCl对2种植物幼苗进行盐胁迫处理,以自来水培养的植物作为对照,研究不同浓度的NaCl对2种水生植物生物量、光合等生理生化指标的影响。结果表明,在相同NaCl浓度胁迫下,2种植物的生长量均随着时间的延长而增加;在不同NaCl浓度胁迫下,长苞香蒲、芦苇的生长量随着盐浓度的升高而呈现下降趋势。2种植物的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性随着盐胁迫浓度的增加而降低;2种植物的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间CO<sub>2</sub>浓度都随着盐浓度的升高而降低,且整体上随着胁迫时间的延长呈先增加后降低的趋势。在不同盐胁迫时间和盐胁迫强度下,芦苇的光合生理指标整体上高于长苞香蒲。2种植物的丙二醛(MDA)含量随着盐胁迫浓度的增大而提高,在对照条件下,芦苇的丙二醛含量较高,而在盐胁迫下,香蒲的丙二醛含量高于芦苇。总体来看,芦苇的耐盐性高于长苞香蒲。

**关键词:**芦苇;长苞香蒲;盐胁迫;光合作用;生长特性;光合特性;宁夏

**中图分类号:** S432.3<sup>+</sup>1; S184 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)24-0134-05

宁夏拥有的各类湿地资源有25.6万hm<sup>2</sup>,占宁夏总面积的4.9%,比全国平均水平高1.2个百分点<sup>[1]</sup>。这些湿地主要分布在黄河、艾依河、清水河两侧和腾格里沙漠、毛乌苏沙漠边缘,它们在维持生态平衡、保持生物多样性和珍稀物种资源以及涵养水源、蓄洪防旱、降解污染、调节气候、控制土壤侵蚀等方面均起到重要作用<sup>[2]</sup>。水生植物作为湿地生态系统中的生产者,一方面为湿地生态系统提供能量和有机物质,另一

方面其枯萎后的分解产物又为湿地提供了养分<sup>[3-5]</sup>。对于植物盐碱胁迫下光合作用及抗盐机制的研究大多集中在农作物或拟南芥等模式植物上<sup>[6-8]</sup>,而较少考虑到盐胁迫对湿地水生植物的影响,这对于了解湿地水生植物在盐混合胁迫时的生理响应是不完备的。同时,对于盐碱化湿地的保护和生态修复也缺乏充实的资料支持。因此,开展水生植物对湿地盐碱化生理响应的研究显得尤为重要,也有助于更好地促进生态系统发展的可持续性。

盐浓度对于植物体的影响程度也不相同,在对拟南芥盐胁迫的研究中发现,盐分抑制了拟南芥根系对大量元素的吸收,从而影响植物的营养供给<sup>[9]</sup>。长苞香蒲为香蒲科香蒲属多年生挺水植物,喜光照,适应性强,耐盐性较好<sup>[10]</sup>。芦苇属禾本科芦苇属,也是水体绿化中常用的水生植物,根据生理类型划分,芦苇属于聚盐植物,根据生态类型划分,芦苇属于水生盐生植物<sup>[11]</sup>。本研究通过分析芦苇、香蒲在盐胁迫后生理生化特性的变化,探讨这2种水生植物的耐盐机制。

收稿日期:2017-08-10

基金项目:国家国际科技合作专项(编号:2015DFA90900);国家自然科学基金(编号:31660045);中国博士后基金(编号:2016M602629);宁夏自然科学基金(编号:NZ15221)。

作者简介:伍会萍(1989—),女,宁夏固原人,工程师,主要从事逆境植物生理学研究。Tel:(0951)5667116;E-mail:2280583022@qq.com。

通信作者:倪细炉,博士,副研究员,主要从事逆境植物生理学研究。E-mail:nixilu110@163.com。

plants[J]. *Current Opinion in Plant Biology*,2014,21:133-139.

[13] Wang H, Zhang M S, Guo R, et al. Effects of salt stress on ion balance and nitrogen metabolism of old and young leaves in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *BMC Plant Biology*,2012,12:194.

[14] Murtaza B, Murtaza G, Sabir M, et al. Nitrogen management in rice-wheat cropping system in salt-affected soils [J]. *Soil Science: Agricultural and Environmental Prospectives*,2016:67-89.

[15] 张梦如,杨玉梅,成蕴秀,等. 植物活性氧的产生及其作用和危害[J]. *西北植物学报*,2014,34(9):1916-1926.

[16] 周和锋,李会欣,邵学新,等. 不同盐度水淹胁迫对海滨木槿生理特性的影响[J]. *浙江林业科技*,2013,33(6):41-45.

[17] 薄鹏飞,孙秀玲,孙同虎,等. NaCl胁迫对海滨木槿抗氧化系统和渗透调节的影响[J]. *西北植物学报*,2008,28(1):113-118.

[18] 商宏艳,张士花,杜希华. 不同盐处理对海滨木槿种子离子含量

及抗氧化酶活性的影响[J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*,2009,24(4):117-120.

[19] 何文亮,黄承红,杨颖丽,等. 盐胁迫过程中抗坏血酸对植物的保护功能[J]. *西北植物学报*,2004,24(12):2196-2201.

[20] 刘延吉,张蕾,田晓艳,等. 盐胁迫对碱茅幼苗叶片内源激素、NAD激酶及Ca<sup>2+</sup>-ATPase的效应[J]. *草业科学*,2008,25(4):51-54.

[21] Zhang J H, Jia W S, Yang J C, et al. Role of ABA in integrating plant responses to drought and salt stresses [J]. *Field Crops Research*,2006,97(1):111-119.

[22] Kaya C, Ashraf M, Diikiilitas M, et al. Alleviation of salt stress-induced adverse effects on maize plants by exogenous application of indoleacetic acid (IAA) and inorganic nutrients - a field trial [J]. *Australian Journal of Crop Science*,2013,7(2):249-254.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与试验设计

试验地位于宁夏银川市金凤区(森森现代科技园的试验基地),研究区属黄河中温带大陆性气候。基本气候特点如下:光照充足,年平均气温为9.5~11.4℃,相对湿度为45%~66%;干旱少雨,年平均降水量为180~200 mm左右;蒸发强烈,平均蒸发量为1 300.0~2 200.0 mm;冬季严寒,夏季炎热。

供试材料选择在宁夏分布比较广泛的芦苇、长苞香蒲2种湿地植物,选用的芦苇幼苗高55 cm,鲜质量20 g,长苞香蒲幼苗高80 cm、鲜质量55 g。试验于2016年4月中旬进行,采用桶栽试验,栽培土壤采用沙壤土(全盐量小于0.2%且过2 mm筛)。2种植物分别移栽于装有土壤的桶内(桶高85 cm,上口直径74 cm,下口直径52 cm,土壤厚度40 cm),每桶种植4株。本研究共设4个处理:(1)对照(CK);(2)浇灌100 mmol/L盐水30 L(A<sub>1</sub>);(3)浇灌200 mmol/L盐水30 L(A<sub>2</sub>);(4)浇灌300 mmol/L盐水30 L(A<sub>3</sub>)。每个处理设置3个重复,缓苗后第3周进行盐胁迫处理,每周按时补水1次至30 L[自来水的含盐量为550~600 mg/L,电导率(EC)为800~900 μS/cm,pH值为6.8~7.2],正常管护,5月底开始测定2种植物的生长指标和光合参数,每月测定1次,至8月底结束,取材料测定酶活性及丙二醛(MDA)含量。

### 1.2 指标测定

1.2.1 生长指标的测定 (1)生物量。5—8月将不同处理下的2种植物(对照和处理每组各测定3株植物)分别取地上、地下2个部分,称量鲜质量后在105℃下杀青15 min,于85℃烘干至恒质量并称量干质量。(2)株高。在每个处理下对于测定生物量的植物用钢卷尺测量地上部分株高。

1.2.2 光合参数的测定 选择在每月日期相近、天气晴朗的

某天09:00—11:00时段进行光合参数的测定,使用GFS-3000光合测定仪(美国)测定,此时段内光量子通量密度为(1 502±123) μmol/(m<sup>2</sup>·s),大气中CO<sub>2</sub>浓度为(381.3±6.7) μmol/mol,大气温度为(26.9±1.9)℃,相对湿度(RH)为(30.7±3.0)%,在光照度为1 000 lx的条件下,测定芦苇、长苞香蒲的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度,每个处理各测定3株植物。

1.2.3 其他指标的测定 丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸比色法<sup>[12]</sup>,过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用紫外吸收法<sup>[12]</sup>,超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用抑制四唑氮蓝(NBT)光还原比色法<sup>[12]</sup>。

### 1.3 数据处理

试验数据采用Excel作图,用SPSS Statistics 22.0软件进行统计分析,运用One-way ANOVA进行单因素方差分析,并用Duncan's检验法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度NaCl处理对植物生长的影响

由表1可以看出,长苞香蒲、芦苇的生长量均随着时间延长而增加。随着盐浓度的提高,长苞香蒲和芦苇的生长量呈现下降趋势,且长苞香蒲和芦苇的生物量随着盐浓度的增加而变化的规律一致。与CK相比,长苞香蒲和芦苇各处理的地上干质量、地下干质量、株高整体上显著降低,其中在A<sub>3</sub>浓度处理下下降得最多。分化系数随着盐浓度提高而降低,并且随着时间延长而出现显著差异。在A<sub>3</sub>浓度处理下,长苞香蒲地上干质量在5月显著下降57.16%(*P*<0.05),地下干质量在8月显著下降了42.23%,株高在8月显著下降了17.35%。在A<sub>3</sub>浓度处理下,芦苇地上干质量在6月显著下降了44.41%,地下干质量、株高在7月分别显著下降了39.49%、22.27%(*P*<0.05)。

表1 NaCl胁迫对2种植物生长及生物量的影响

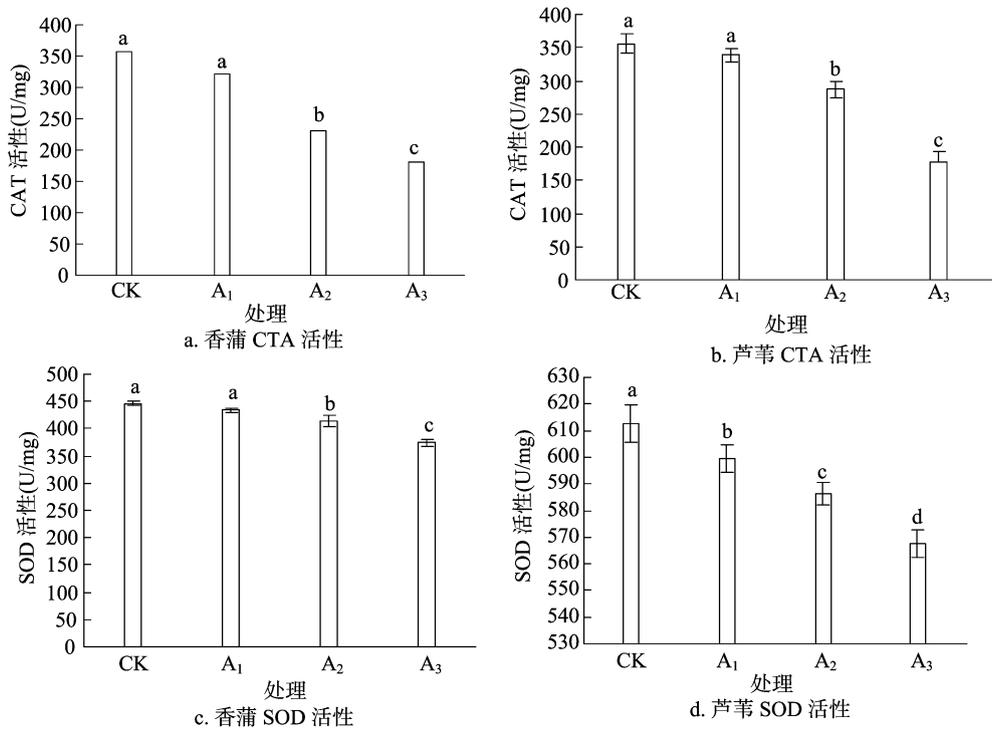
月份	胁迫强度处理	长苞香蒲				芦苇			
		地上干质量(g)	地下干质量(g)	株高(cm)	分化系数	地上干质量(g)	地下干质量(g)	株高(cm)	分化系数
5	CK	8.45±0.65a	15.47±1.11a	103.08±3.83a	0.67±0.58a	4.24±0.22a	2.71±0.26a	66.52±2.97a	4.00±1.00a
	A <sub>1</sub>	6.67±0.40b	13.81±0.90b	99.58±0.77a	0.67±0.58a	3.70±0.41a	2.12±0.07b	63.11±1.65ab	4.00±1.00a
	A <sub>2</sub>	4.28±0.20c	12.55±0.59b	97.21±2.43ab	0.33±0.58a	2.72±0.34b	2.03±0.10b	62.18±2.91ab	3.00±0.00ab
	A <sub>3</sub>	3.62±0.70c	12.34±0.64b	92.90±4.92b	0.00±0.00a	2.51±0.58b	1.93±0.03b	60.08±2.29b	1.67±0.58b
6	CK	41.92±3.13a	35.47±1.11a	124.65±4.24a	1.33±0.58a	22.29±1.59a	5.23±0.69a	80.09±2.46a	7.67±1.53a
	A <sub>1</sub>	37.39±2.06b	33.15±2.86a	118.36±2.63b	0.67±0.58a	19.41±1.51b	4.89±0.47a	78.56±2.73a	7.33±0.58a
	A <sub>2</sub>	26.43±1.23c	25.30±2.72b	106.87±3.52c	0.67±0.58a	13.06±0.76c	3.88±1.10ab	75.18±5.00ab	5.67±1.53ab
	A <sub>3</sub>	22.25±0.89d	24.57±2.20b	101.88±2.28c	0.33±0.58a	12.39±1.12c	3.32±0.80b	71.67±1.71b	4.67±1.53b
7	CK	46.45±2.75a	53.12±1.93a	146.64±7.54a	2.33±0.58a	39.42±0.81a	31.93±0.25a	107.03±2.68a	12.00±1.00a
	A <sub>1</sub>	44.55±2.07a	44.79±4.28b	140.94±2.41ab	1.67±0.58ab	38.04±1.49a	31.47±1.11a	101.70±3.21b	10.33±1.53a
	A <sub>2</sub>	42.80±1.71ab	42.74±1.74b	132.64±3.98bc	1.33±0.58ab	32.07±2.14b	27.24±1.50b	96.82±3.23b	7.67±1.53b
	A <sub>3</sub>	38.96±3.23b	36.19±2.65c	124.62±5.27c	0.67±0.58b	23.37±0.76c	19.32±0.68c	83.19±1.35c	6.67±1.53b
8	CK	55.14±3.66a	126.98±6.90a	178.61±2.77a	2.67±0.58a	59.93±2.20a	93.97±6.13a	132.78±4.14a	17.67±1.15a
	A <sub>1</sub>	48.27±2.57b	93.61±6.30b	175.68±2.61a	1.67±0.58ab	55.51±0.77b	90.63±5.14a	126.25±3.06b	15.00±1.00b
	A <sub>2</sub>	49.46±2.71b	84.79±5.54b	164.88±4.22b	1.33±0.58ab	49.09±2.81c	85.28±9.47ab	115.36±2.89c	13.00±1.00c
	A <sub>3</sub>	39.73±1.95c	73.36±3.50c	147.63±4.01c	1.00±1.00b	39.35±1.12d	73.16±4.41b	105.55±2.97d	9.67±0.58d

注:同列数据后标有不同小写字母表示差异显著(*P*<0.05)。

### 2.2 不同浓度NaCl处理对2种植物酶活性的影响

如图1所示,2种植物的2种酶活性均随着盐浓度的提

高而降低。与对照相比,长苞香蒲过氧化氢酶、超氧化物歧化酶活性在A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>浓度处理下显著下降,在A<sub>3</sub>浓度处理下分



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

图1 不同盐浓度对长苞香蒲和芦苇酶活性的影响

别显著下降了 49.02%、16.07%；芦苇过氧化氢酶活性在 A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 浓度处理下显著下降，其中在 A<sub>3</sub> 处理下显著下降了 50%，盐胁迫各处理的超氧化物歧化酶活性均显著下降。整体来看，在盐胁迫影响下，芦苇中 2 种酶活性受到的影响较长苞香蒲大。

### 2.3 不同浓度 NaCl 处理对叶片光合生理的影响

如图 2 所示，在不同盐浓度下 2 种植物的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度整体上随着胁迫时间的延长出现先增加后降低的趋势，并且 2 种植物的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度均随着盐浓度的提高而降低（在 6 月芦苇的 A<sub>1</sub> 浓度处理下的净光合速率、蒸腾速率除外）。与 CK 相比，长苞香蒲 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 处理的上述光合特性指标均下降，且 A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 处理的光合特性指标显著下降 ( $P < 0.05$ )，A<sub>1</sub> 处理的净光合速率、气孔导度则在 6 月开始出现显著差异。与 CK 相比，芦苇 A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 处理光合特性均显著下降 ( $P < 0.05$ )，而 A<sub>1</sub> 浓度处理在 6 月的净光合速率、蒸腾速率则上升，气孔导度及胞间 CO<sub>2</sub> 浓度则出现下降。整体上对比 2 种植物可知，随着时间的延长和盐浓度的增加，芦苇的光合特性指标较长苞香蒲高。

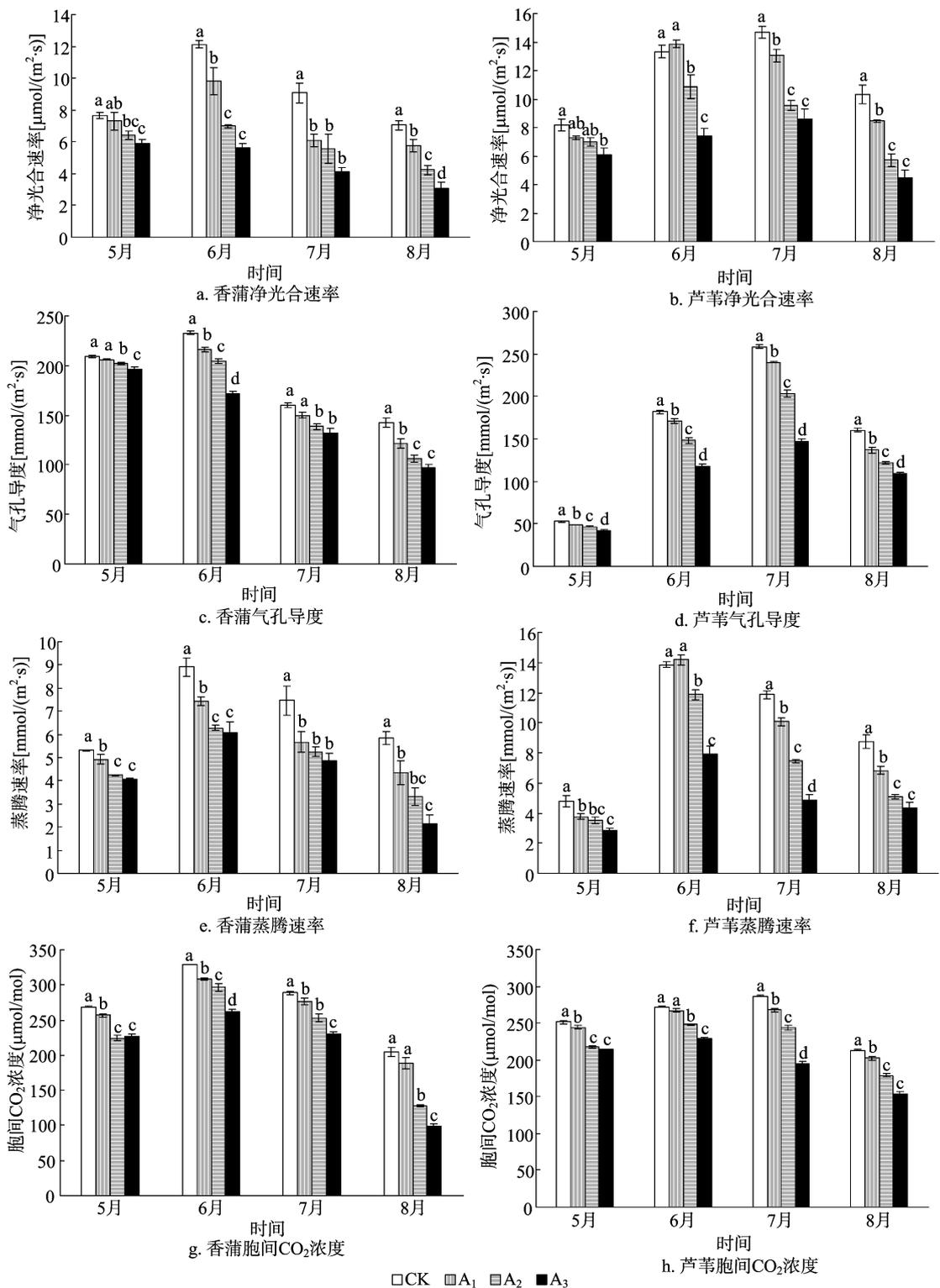
### 2.4 不同浓度 NaCl 处理对叶片丙二醛含量的影响

如图 3 所示，2 种植物的丙二醛含量整体上随着盐胁迫浓度的增大而提高。与 CK 相比，长苞香蒲 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 处理的丙二醛含量分别显著提高 16.64%、35.71%、36.28%，且三者之间差异显著 ( $P < 0.05$ )；芦苇 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 处理的丙二醛含量与 CK 相比，分别显著提高 12.13%、9.58%、10.81%，三者之间的差异同样显著 ( $P < 0.05$ )。同时对比 2 种植物发现，在无胁迫时，芦苇的丙二醛含量较高，而在盐胁迫下，长苞香蒲的丙二醛含量较芦苇的丙二醛含量变化大，且在 A<sub>3</sub> 浓度处理下，长苞香蒲的丙二醛含量高于芦苇的丙二醛含量。

## 3 讨论

植物鲜质量及干质量的变化能较好地反映植物在受到逆境胁迫时生物量的变化情况，虽然生物量是一个综合指标，受到多种因素的影响，并不能完全反映植物受到逆境胁迫的情况，但是，盐胁迫下生物量的变化可作为评估盐胁迫程度和植物抗盐能力的指标之一<sup>[13]</sup>。盐胁迫主要通过离子胁迫和渗透胁迫影响植物的生长和发育。在本研究中，2 种植物在盐胁迫下的生物量均表现为下降，并且随着盐浓度的提高，生物量出现了显著下降，具体表现为：在 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 浓度处理下，2 种植物地上干质量、地下干质量、株高均低于 CK，其中在 A<sub>3</sub> 处理下显著低于 CK ( $P < 0.05$ )，说明在一定范围内，随着盐浓度的提高，盐对这 2 种植物的生长胁迫影响越严重。可能是由于盐胁迫所产生的离子胁迫以及渗透胁迫会影响植物组织和器官的生长和分化，且盐浓度越高，离子胁迫、渗透胁迫越严重，对植株生长的影响也就越大。

盐胁迫会使植物生化反应过程受到影响，其中通过酶来进行代谢调控是一种重要的方式。SOD 是一种在需氧有机体中普遍存在的起到植物细胞组织保护作用的酶，作为植物内源性的活性氧清除剂，SOD 能够有效地清除活性氧，使之保持在较低水平，从而使其较少对膜结构和功能产生破坏。CAT 与 SOD 一样是酶促防御系统的保护酶，它们能够协同作用，防御活性氧或其他过氧化自由基对细胞膜系统的伤害。因此，SOD、CAT 活性通常用来作为鉴定植物耐盐毒害的生化指标<sup>[14]</sup>。在本试验中，2 种植物的 2 种酶活性均随着盐浓度的提高而降低。这与 McKerise 等的研究结果<sup>[15-16]</sup> 相反，可能是因为随时间延长，SOD、CAT 的抗氧化胁迫能力下降，对于长苞香蒲，其过氧化氢酶、超氧化物歧化酶活性在 A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>



同一时间不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图2 不同浓度 NaCl 处理对 2 种植物净光合速率、气孔导度、蒸腾速率与胞间  $\text{CO}_2$  浓度的影响

浓度处理下显著下降,其中在  $A_3$  浓度处理下分别显著下降 49.02%、16.07%。芦苇的过氧化氢酶活性在  $A_2$ 、 $A_3$  浓度处理下显著下降,其中在  $A_3$  处理下显著下降了 50%。在盐胁迫影响下,芦苇的 2 种酶活性较长苞香蒲大,说明盐胁迫对芦苇抗氧化酶的影响更大,盐胁迫所产生的氧化破坏作用对芦苇更明显。

光合作用是将光能转化为化学能并为植物提供能量的过程。研究盐胁迫对植物光合特性的影响可以有效地评价不同盐浓度胁迫对 2 种植物的损害程度<sup>[17]</sup>。在本研究中,2 种植物的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间  $\text{CO}_2$  浓度均随着盐胁迫浓度的提高而下降,这与龚明等的研究结果<sup>[18-19]</sup>一致,表明长苞香蒲、芦苇与其他植物一样,盐胁迫会导致 2 种

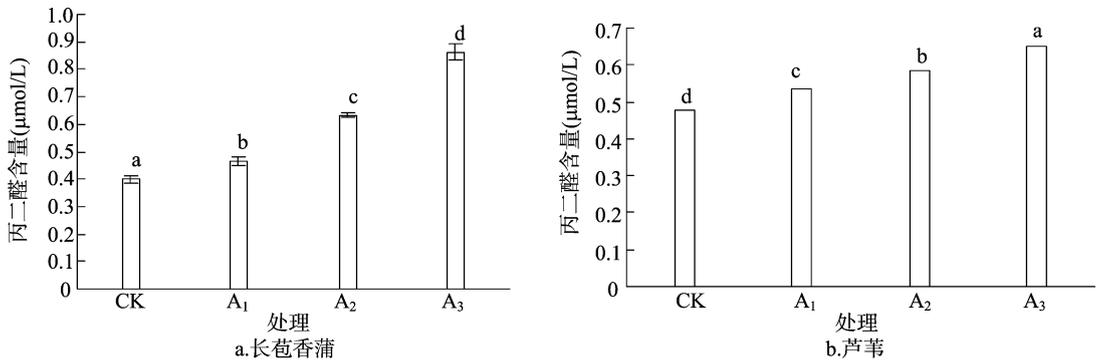


图3 不同浓度 NaCl 处理对 2 种植物丙二醛含量的影响

植物的叶片气孔导度下降,且蒸腾速率下降后净光合速率和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度也下降。光合特性均随着时间增加出现先高后低的趋势,说明 6、7 月光照较强,光合作用增强。同时对比 2 种植物发现,芦苇的光合特性较香蒲高,说明在盐胁迫下长苞香蒲的光合特性较芦苇小。

在盐胁迫过程中丙二醛会产生有害物质,其含量的高低可作为分析盐胁迫对植物影响大小的重要指标。在本试验中,2 种植物丙二醛含量随着盐胁迫浓度的增大而增大,在盐胁迫下,长苞香蒲的丙二醛含量较芦苇的丙二醛含量变化大,且在 A<sub>3</sub> 浓度处理下,长苞香蒲的丙二醛含量高于芦苇的丙二醛含量,可见盐胁迫时间和浓度的增大对长苞香蒲影响较芦苇大。由以上分析可知,随着盐胁迫浓度的增大及胁迫时间的延长,长苞香蒲植株体内含有的氧化物质较多,毒害作用也越大。

#### 4 总结

在盐胁迫下,长苞香蒲和芦苇的生长量均随着时间的延长而增加。随着盐浓度的提高,香蒲和芦苇的生长量呈现下降趋势,在几个生长季节,芦苇和香蒲的生物量随着盐浓度增加的变化规律均一致。2 种植物的 SOD、CAT 活性随着盐胁迫浓度的增加而降低。2 种植物的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度整体上随着盐浓度的提高而降低,且整体上随着胁迫时间的延长出现先增加后降低的趋势。2 种植物的丙二醛含量整体上随着盐胁迫浓度的增大而提高。在无胁迫条件下,芦苇的丙二醛含量较高,而在盐胁迫条件下,长苞香蒲的丙二醛含量较芦苇的丙二醛含量提升幅度大。总体来看,芦苇较香蒲对盐胁迫更耐受。

#### 参考文献:

- [1] 赵可夫. 盐生植物资源及盐碱土改良利用研究动态[J]. 资源与环境,1989(1):40-43.
- [2] 卫萍萍, 魏向宁, 曹园园. 基于产业结构变化的区域生态环境效应分析与评价——以宁夏回族自治区银川市为例[J]. 绿色科技,2014(10):29-31.
- [3] Burdick D M, Buchsbaum R, Holt E. Variation in soil salinity associated with expansion of *Phragmites australis* in salt marshes[J]. Environmental and Experimental Botany,2001,46(3):247-261.
- [4] Takemura T, Hanagata N, Sugihara K, et al. Physiological and

biochemical responses to salt stress in the mangrove, *Bruguiera gymnorhiza*[J]. Aquatic Botany,2000,68(1):15-28.

- [5] Yang Y N, Sheng Q, Zhang L, et al. Desalination of saline farmland drainage water through wetland plants [J]. Agricultural Water Management,2015,156:19-29.
- [6] 盖玉红, 牛陆, 董宝池, 等. 不同浓度盐、碱胁迫对野生大豆光合特性和生理生化特性的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(5):89-93.
- [7] 范方, 张玉霞, 姜健, 等. 盐胁迫对紫花苜蓿生长及光合生理特性的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(17):14-18.
- [8] 高显颖. 不同浓度盐碱胁迫对水稻生长及生理生态特性影响[D]. 长春:吉林农业大学,2014.
- [9] Attia H, Karray N, Rabhi M, et al. Salt-imposed restrictions on the uptake of macroelements by roots of *Arabidopsis thaliana*[J]. Acta Physiologiae Plantarum,2008,30(5):723-727.
- [10] 李庆华. 人工湿地植物重金属分布规律及富集性研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [11] 张淑萍. 芦苇分子生态学研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2001.
- [12] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3版. 台北:艺轩图书出版社,2009.
- [13] 张俊莲, 张国斌, 王蒂. 向日葵耐盐性比较及耐盐生理指标选择[J]. 中国油料作物学报,2006,28(2):176-179.
- [14] 董发才, 苗琛, 荆艳彩, 等. 小麦根系过氧化氢积累与耐盐性的关系[J]. 武汉植物学研究,2002,20(4):293-298.
- [15] McKersie B D, Murnaghan J, Jones K S, et al. Iron-superoxide dismutase expression in transgenic alfalfa increases winter survival without a detectable increase in photosynthetic oxidative stress tolerance[J]. Plant Physiology,2000,122(4):1427-1437.
- [16] 李志刚, 张玉霞, 董丽杰. 沙生牧草和盐生牧草抗氧化特性比较[J]. 中国草地学报,2007,29(5):115-118.
- [17] 葛江丽, 石雷, 谷卫彬, 等. 盐胁迫条件下甜高粱幼苗的光合特性及光系统 II 功能调节[J]. 作物学报,2007,33(8):1272-1278.
- [18] 龚明, 丁念诚, 贺子义, 等. 盐胁迫下大麦和小麦叶片脂质过氧化伤害与超微结构变化的关系[J]. 植物学报,1989,31(11):841-846,903.
- [19] 姜超强, 李杰, 刘兆普, 等. 盐胁迫对转 *AtNHX1* 基因杨树光合特性与叶绿体超微结构的影响[J]. 西北植物学报,2010,30(2):301-308.