

## 5种海岛典型园林绿化植物的耐盐性

陈 闻<sup>1,2</sup>, 王 晶<sup>1</sup>, 吴海平<sup>1</sup>, 张 玲<sup>1</sup>, 叶正钱<sup>2</sup>

(1. 浙江省舟山市农林科学研究院, 浙江 舟山 316000; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 为了解红叶石楠 *Photinia × fraseri*, 金森女贞 *Ligustrum japonicum* ‘Howardi’, 龟甲冬青 *Ilex crenata*, 金边黄杨 *Euonymus japonicus* 和夏鹃 *Rhododendron pulchrum* 等5种海岛典型园林绿化植物的耐盐性, 利用盆栽方式对5种植物进行盐分胁迫试验, 共设置4个处理, 即圃地土(ck, 盐质量分数 0.28 g·kg<sup>-1</sup>), 1.00, 2.00 和 4.00 g·kg<sup>-1</sup> 氯化钠, 测定相关的生长生理指标, 利用隶属函数法对5种植物的耐盐性进行综合评价。结果表明: 5种植物在盐分胁迫下均出现不同程度的受害症状, 土壤盐分为 4.00 g·kg<sup>-1</sup> 时, 夏鹃、红叶石楠和龟甲冬青全部死亡, 金森女贞和金边黄杨的存活率分别达到 60.00%和 66.67%。生物量下降, 降幅最高的是夏鹃, 为 30.03%~64.72%; 最低是龟甲冬青, 为 10.34%~44.46%; 红叶石楠、金森女贞和金边黄杨降幅范围分别达 20.54%~47.10%, 18.76%~51.90%和 26.71%~52.48%。净光合速率、气孔导度和蒸腾速率随盐分质量分数增加而降低, 胞间二氧化碳摩尔分数先下降后上升。随着盐胁迫质量分数的升高, 5种植物叶片中钠离子(Na<sup>+</sup>)明显积累, 增幅最大的为金边黄杨, 比 ck 增加 6.60~24.31 倍; 最小的是金森女贞, 较 ck 提高 1.44~1.82 倍; 钾离子(K<sup>+</sup>)质量分数变化并无明显规律, Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>比值上升。综合生长表现和生理指标测定结果认为, 5种植物的耐盐能力从高到低依次为金森女贞>金边黄杨>龟甲冬青>红叶石楠>夏鹃。图 3 表 5 参 25

**关键词:** 植物学; 盐分胁迫; 园林植物; 耐盐性; 隶属函数

**中图分类号:** S718.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2017)02-0283-11

## Salt tolerance of 5 typical landscape plant species in Zhoushan Islands

CHEN Wen<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, WU Haiping<sup>1</sup>, ZHANG Ling<sup>1</sup>, YE Zhengqian<sup>2</sup>

(1. Zhoushan Forestry Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Zhoushan 316000, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** To reveal the salt tolerance of 5 landscape plant species, *Photinia × fraseri*, *Ligustrum japonicum* ‘Howardi’, *Ilex crenata*, *Euonymus japonicus*, *Rhododendron pulchrum*, a pot experiment for 2-year-old seedlings was conducted to investigate the 5 plants’ growth status and physiology indexes under different salinity (NaCl) treatments, design with 4 treatments consisting of 0.28 g·kg<sup>-1</sup> control, 1.00, 2.00 and 4.00 g·kg<sup>-1</sup> soil salt mass fraction. Membership function value method was adopted to comprehensively evaluate salt tolerance of the 5 plants. The results show that the 5 plants showed different degree of salt-damaged symptoms; When soil salt mass fraction was 4.00 g·kg<sup>-1</sup>, *Rhododendron pulchrum*, *Photinia × fraseri* and *Ilex crenata* were all death, *Ligustrum japonicum* ‘Howardi’ and *Euonymus japonicus* survival rate reached 60.00% and 66.67% respectively. The biomass decreased under salt stress, *Rhododendron pulchrum* decline the largest, 30.03%–64.72%, while *Ilex crenata* decline the least, 10.34%–44.46%; *Photinia × fraseri*, *Ligustrum japonicum* ‘Howardi’ and *Euonymus japonicus* decline range was 20.54%–47.10%, 18.76%–51.90% and 26.71%–52.48%, respectively. With the increasing of salt content, the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate were decreased, but the utilization of CO<sub>2</sub> were increased. There were no visible change of K<sup>+</sup>,

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-11-02

基金项目: 浙江省林业厅推广项目(2015-2017); 浙江省舟山市科技计划资助项目(2014C31057)

作者简介: 陈闻, 工程师, 从事水土保持与土壤学研究。E-mail: chenwen1019@163.com

whereas  $\text{Na}^+$  concentration and  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  ratio all rose significantly with the increasing of salinity concentration. The most increases of  $\text{Na}^+$  was *Euonymus japonicus*, 6.60–24.31 times more than the ck, and the least increases is *Ligustrum japonicum* ‘Howardi’, compared with the ck increased by 1.44 – 1.82 times. The membership function was used to rank their salt tolerance followed in the order: *Ligustrum japonicum* ‘Howardi’ > *Euonymus japonicus* > *Ilex crenata* > *Photinia* × *fraseri* > *Rhododendron pulchrum*. [Ch, 3 fig. 5 tab. 25 ref.]

**Key words:** botany; salt stress; landscape plants; salt tolerance; membership function

舟山是中国唯一以群岛建立的地级市，共有大小海岛 1 390 个，作为海岛地区，舟山的土地资源十分稀缺。据调查，舟山共有滨海盐碱土面积 2.5 万  $\text{hm}^2$ ，占全市陆域土壤总面积的 19.46%，广泛分布于舟山各个县区。目前舟山每年建设用地用量约 1 333  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>，并且建设用地量的需求逐年在增加。舟山的低丘缓坡开发资源基本枯竭，大量的建设用地保障只能靠滩涂围垦造地来完成。这也对城市建设中的园林绿化带来了新的挑战，短期围垦造地的土壤，盐分含量高，结构差，不适宜用作园林绿化，最主要的原因有 2 个：第一，下层土壤盐分随着时间的推移会逐渐上升至表土，影响植物生长；第二，园林绿化地浇灌用水主要来自周边的河道或者农用水库，这些水源本身的盐分含量就远远超过了农田灌溉用水水质标准。园林绿化是城市的自然空间，无论从保护城市环境、维护和改善城市生态平衡的要求出发，还是从园林美学的角度来说，要求城市必须具有较大的绿化数量，并以其特性来丰富城市景观<sup>[2]</sup>。因此，在盐碱地土壤条件下的园林绿化，选择适宜的植物是关键，那么了解植物的耐盐性就成为了一项十分必要的研究内容。目前，国内有关植物耐盐性的研究颇多，但大多以开展盐碱地防护林造林树种的研究为主，内容也比较全面系统，从植物的生长表现到生理变化均有涉及。例如，张华新等<sup>[3]</sup>研究了鹰爪豆 *Spartium junceum* 等 11 个国外引进树种在盐分胁迫下的生长变化；王树凤等<sup>[4]</sup>研究了 2 种栎树 *Quercus* spp. 在盐胁迫下的生长、对盐分的敏感性和耐受性及根系形态学参数变化以及根系对盐离子的吸收与积累。而关于植物耐盐性的评定方法也有很多种，如宗鹏鹏等<sup>[5]</sup>利用受害指数法来评价八棱海棠 *Malus robusta* 耐盐碱性；李庆贱等<sup>[6]</sup>用主成分分析法对不同白榆 *Ulmus pumila* 家系耐盐性进行综合评价；王臣等<sup>[7]</sup>利用隶属函数法评价比较 9 个楸树 *Catalpa bungei* 无性系的耐盐能力。相对于造林绿化树种来看，城市园林绿化植物的耐盐性研究开展得相对较少，红叶石楠 *Photinia* × *fraseri*，金森女贞 *Ligustrum japonicum* ‘Howardi’，龟甲冬青 *Ilex crenata*，金边黄杨 *Euonymus japonicus*，夏鹃 *Hododendron pulchrum* 这 5 种植物，在舟山海岛的应用占了非常大的比例，无论是村庄、小区绿化还是道路、城市公共绿地，几乎是处处可见，而目前有关这 5 种植物的耐盐性报道并不多，至于在海岛地区的生长状况、耐盐性更是鲜有报道。申亚梅等<sup>[8]</sup>对红叶石楠和金边黄杨进行了海水胁迫试验，结果表明，红叶石楠的耐盐性低于金边黄杨，并且两者均能适应 pH 8.50 以上的环境；宋盈颖等<sup>[9]</sup>研究认为，金森女贞属于耐盐性植物，在高盐胁迫下仍能保持稳定。而龟甲冬青和夏鹃的耐盐性研究尚未见报道。本研究以舟山海岛园林绿化中典型的 5 种植物为对象，通过盆栽耐盐性试验，观察 5 种植物在不同盐分质量分数胁迫下的生长状况，同时测定相关生理指标，运用模糊数学隶属函数值法对 5 种植物的耐盐能力进行排序，探明海岛典型园林绿化植物的耐盐性，旨在为舟山海岛城市园林绿化植物选择、养护管理等工作提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试苗木分别为夏鹃、金边黄杨、金森女贞、红叶石楠和龟甲冬青等 5 种植物 2 年生实生苗，在试验地经过缓苗期后备用。试验采用盆栽方式进行，苗木选取生长状况基本一致，且无病虫害，其中，金边黄杨平均高度 40.0 cm，地径 5.34 mm；夏鹃平均高度 36.0 cm，地径 9.09 mm；金森女贞平均高度 19.3 cm，地径 3.85 mm；龟甲冬青平均高度 28.9 cm，地径 6.53 mm；红叶石楠平均高度 35.4 cm，地径 5.82 mm。栽培容器为聚氯乙烯材质的透明花盆，规格为 18.0 cm（口径）×13.0 cm（底径）×16.0 cm（高），底部和四周均为密封。试验用土壤为普通圃地土，经晒干后备用。土壤基本理化性质：pH 6.79，有机质为 29.56  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，碱解氮为 145.50  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，有效磷为 56.27  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，速效钾为 128.65  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

## 1.2 试验设计与处理

试验于2015年5月在浙江省舟山市农林科学研究院试验基地进行。共设置4个处理(表1),以圃地土作为对照,即对照(ck,盐质量分数为 $0.28\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), $1.00$ , $2.00$ 和 $4.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,将氯化钠(NaCl)根据土壤干质量配制成上述质量分数的水溶液,一次性施入土壤,栽植 $1\text{ 株}\cdot\text{盆}^{-1}$ , $15\text{ 盆}\cdot\text{处理}^{-1}$ ,即15个重复,日常管理定期浇水、除草,以保证土壤盐分浓度基本不变,随机区组设计。具体试验方案见表1。

## 1.3 测定指标与方法

试验期间对植物生长情况及受害症状进行观察记录。在胁迫进行至10 d时,测定植物光合参数。光合参数采用澳作LCPro+便携式光合仪测定,包括叶片的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳摩尔分数、蒸腾速率等。试验前,对栽培用土进行基本理化性质测定,试验结束后,选择 $5\text{ 株}\cdot\text{处理}^{-1}\cdot\text{重复}^{-1}$ 测定生物量,即将植物整株挖起,用清水洗净后分为根、茎和叶3部分,放置烘箱内 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒量,分别称取干质量,之后测定叶片钠离子( $\text{Na}^+$ )和钾离子( $\text{K}^+$ )离子质量分数,采用硫酸-过氧化氢消煮法消化处理,用原子吸收光谱测定<sup>[10]</sup>。

## 1.4 数据处理

试验数据采用Excel 2013和SPSS 16.0软件进行统计分析。耐盐性综合评价采用模糊数学隶属函数值法,将某植物的各项耐盐指标换算成隶属函数值,然后对各项指标的隶属函数值求平均值,平均值越大,说明耐盐性越强。隶属函数计算公式如下:若指标与耐盐性成正相关,则 $z_{ij}=(x_{ij}-x_{i\min})/(x_{i\max}-x_{i\min})$ ;若指标与耐盐性成负相关,则 $z_{ij}=1-(x_{ij}-x_{i\min})/(x_{i\max}-x_{i\min})$ 。上述式中 $z_{ij}$ 表示*i*树种*j*指标的耐盐隶属函数值, $x_{ij}$ 表示*i*树种*j*指标的测定值, $x_{i\min}$ 和 $x_{i\max}$ 分别表示各树种中对应指标的最小值和最大值。

# 2 结果与分析

## 2.1 盐分胁迫对植物生长状况的影响

试验过程中,隔10 d观察1次植物的生长状况,持续观察60 d。结果表明:5种植物的对照(ck)处理,生长正常,均未出现受害症状;而 $1.00$ , $2.00$ 和 $4.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 等3种处理,则出现不同程度的受害症状,具体情况如表2所示。总体来看,5种植物的受害症状随着土壤盐分质量分数的升高和胁迫时间的延长而加剧,主要表现为叶片下垂、卷曲、脱落;叶色失绿、变黄、干枯呈深色。从5种植物的存活率来看(表3),在 $1.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤盐分胁迫下,金森女贞未出现受害症状,红叶石楠和夏鹃分别有5株和4株死亡,龟甲冬青和金边黄杨分别有2株和1株死亡;在 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下,夏鹃、红叶石楠和龟甲冬青的死亡数明显增加,存活率分别为26.67%,40.00%和46.67%;金森女贞和金边黄杨仅各有1株死亡;当土壤盐分达到 $4.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,夏鹃、红叶石楠和龟甲冬青全部死亡,金森女贞和金边黄杨的存活率分别达到60.00%和66.67%。

## 2.2 盐分胁迫对5种植物生物量的影响

表3是不同盐分质量分数胁迫下5种植物的生物量变化情况。由表3可知:5种植物的生物量随盐分质量分数的升高而呈下降的趋势。从地上生物量变化来看,3种盐分质量分数胁迫下,夏鹃较其对照下降幅度始终最高,为32.67%~60.59%。龟甲冬青在 $1.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 胁迫下,地上生物量降幅最小,总体降幅为11.05%~45.08%; $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分胁迫下,地上生物量降幅最小的是金边黄杨,其总体降幅介于19.63%~52.73%。红叶石楠在 $4.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分下,地上生物量较对照下降最少,降幅为22.28%~43.98%。金森女贞在 $1.00$ , $2.00$ 和 $4.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分胁迫下,地上生物量分别较对照下降21.13%,45.59%和56.16%。比较5种植物的地下生物量变化可以发现,在 $1.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分胁迫下,金边黄杨的降幅为最大,较对照下降39.24%;龟甲冬青最小,降幅为9.16%;夏鹃在 $2.00$ 和 $4.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分胁迫下,地下生物量降幅均为最高,分别达62.34%和69.60%,而降幅最小的分别是龟甲冬青(9.32%)和金森女贞(37.33%)。从总生物量的对比结果来看,降幅最高的是夏鹃,为30.03%~64.72%;最低是龟甲冬

表1 5种植物盐分胁迫试验方案

处理/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	土壤初始含 盐量/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	干土加盐 量/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	干土质量/ ( $\text{kg}\cdot\text{盆}^{-1}$ )	加盐量/ ( $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ )
对照	0.28	0	2.5	0
1.00	0.28	0.72	2.5	1.8
2.00	0.28	1.72	2.5	4.3
4.00	0.28	3.72	2.5	9.3

青, 为 10.34%~44.46%; 红叶石楠、金森女贞和金边黄杨降幅范围分别为 20.54%~47.10%, 18.76%~51.90%和 26.71%~52.48%。5种植物的根茎比变化没有明显的规律, 红叶石楠在 1.00 和 2.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  盐分胁迫下, 根茎比高于对照, 而盐分达到 4.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时, 要小于对照; 金边黄杨则相反; 龟甲冬青和金森女贞在 3 种不同质量分数盐分胁迫下, 均高于对照; 夏鹃仅在 1.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  盐分胁迫下, 根茎比大于对照。

从方差分析结果来看: 红叶石楠在 3 种不同质量分数盐分胁迫下, 生物量显著低于对照 ( $P<0.05$ ), 而根茎比与对照之间并无显著差异, 地下生物量在 3 种不同质量分数之间的差异性均达到显著水平 ( $P<0.05$ ), 在 1.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  盐分胁迫下, 地上生物量和总生物量显著高于 2.00 和 4.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理 ( $P<0.05$ )。龟甲冬青地上生物量和总生物量在盐分质量分数为 2.00 和 4.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时, 显著低于对照 ( $P<0.05$ ), 而地下生物量仅在盐分质量分数达到 4.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时与对照产生显著差异 ( $P<0.05$ )。金森女贞在 3 种不同质量分数盐分处理下, 地上生物量和总生物量始终显著低于对照 ( $P<0.05$ ), 而地下生物量也仅在质量分数达到 4.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时低于对照 ( $P<0.05$ ), 根茎比与对照并无显著差异。金边黄杨和夏鹃在 3 种不同

表 2 盐分胁迫下 5 种植物的受害症状

Table 2 Salt-damaged symptom of five plant species under salt stress

树种	处理/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	不同盐胁迫时间的受害症状					
		10	20	30	40	50	60 d
红叶石楠	1.00	4 株叶片下垂, 其中 2 株叶片失绿, 少量脱落。	1 株整体干枯, 4 株下部老叶干枯下垂, 叶呈黄褐色。	3 株枯死, 2 株下部枯死, 上部有少量叶片。	4 株枯死, 1 株下部叶片全部脱落。	5 株枯死, 叶片未完全脱落。	5 株死亡, 叶片全部脱落。
	2.00	7 株下部老叶干枯, 其余植株新叶下垂。	4 株整体干枯; 3 株老叶干枯, 叶片脱落较多; 其余部分老叶干枯下垂。	4 株枯死, 2 株少数上部叶完好, 下部枯死。	5 株枯死, 其中 4 株叶片掉光; 2 株上部有少量叶, 下部叶脱落。	7 株枯死, 其余植株叶片下垂干枯。	9 株死亡。
	4.00	12 株下部老叶干枯, 卷曲。	4 株新叶叶尖部分干枯, 下部老叶全部脱落; 其余整株叶片干枯下垂。	仅 1 株上部留少量新叶; 其余均枯死, 有 1 株叶片完全脱落。	所有植株全部干枯, 部分植株有少量叶片。	全部死亡, 叶片完全脱落。	全部死亡, 叶片完全脱落。
龟甲冬青	1.00	有 2 株少量叶片变黄。	4 株均有少量叶片呈黄色。	4 株少量叶片干枯, 其中 2 株叶片少量脱落。	4 株叶片大量干枯, 仅有少量叶片呈黄色, 其中 2 株叶片大量脱落。	2 株留有少量叶片呈黄色, 其余叶片均干枯; 2 株叶片脱落严重。	2 株死亡。
	2.00	2 株少量叶片干枯, 呈黄褐色。	7 株个别叶片干枯, 叶片呈灰色。	2 株叶干枯, 叶片严重脱落; 5 株少量叶干枯, 呈褐色。	2 株枯死; 5 株叶片脱落较多。	3 株枯死; 6 株叶片脱落严重; 其余少量脱落。	8 株死亡; 其余未死留部分叶。
金森女贞	1.00	未见明显症状。	未见明显症状。	未见明显症状。	未见明显症状。	未见明显症状。	未见明显症状。
	2.00	2 株少量叶片失绿, 呈黄褐色。	1 株整体干枯; 1 株部分叶片干枯。	5 株叶片轻微下垂卷曲; 1 株整体干枯, 叶片大量脱落。	1 株枯死; 1 株叶明显卷曲; 其余植株叶轻微卷曲。	1 株枯死, 3 株叶片严重卷曲; 其余植株叶片轻微卷曲。	1 株死亡。
	4.00	3 株少量叶片干枯, 呈黄褐色, 其中 1 株叶片有脱落。	1 株干枯; 1 株叶片 1/2 面积干枯; 5 株叶下垂卷曲, 叶片少量脱落。	2 株枯死; 8 株叶明显失绿、卷曲、下垂, 叶片严重脱落。	5 株枯死; 6 株叶严重卷曲; 1 株叶片严重脱落严重; 2 株叶轻微卷曲。	5 株枯死, 其余植株叶片严重卷曲、下垂。	6 株死亡, 其余植株叶片严重卷曲、下垂。

表 2 (续)

Table 2 Continued

树种	处理/ (g·kg <sup>-1</sup> )	不同盐胁迫时间的受害症状					
		10	20	30	40	50	60 d
金边黄杨	1.00	1 株下部老叶干枯、卷曲、失绿；2 株下部老叶有少量脱落。	所有植株叶片失绿；1 株干枯；8 株有少量叶片脱落，其中 2 株下部老叶变黄。	2 株整体干枯，叶呈黄色；3 株下部老叶干枯，上部新叶卷曲；2 株下部少量叶呈淡黄色；有少量叶片脱落。	5 株整体干枯，呈黄色；1 株 1/2 叶片干枯。	5 株干枯，呈黄褐色；2 株轻度干枯、卷曲、失绿；其余少量叶干枯变黄。	1 株枯死；5 株叶呈黄褐色；1 株整体叶片失绿，呈黄色。
	2.00	1 株下部老叶卷曲、干枯、失绿；6 株下部叶片少量脱落。	所有植株叶片失绿；1 株干枯，叶呈黄色；7 植株叶片少量脱落。	2 株整体干枯；2 株下部干枯，上部叶卷曲；其余叶片失绿，轻微卷曲；均有少量叶片脱落。	4 株整体干枯；1 株 2/3 叶片干枯；1 株 1/3 叶片干枯。	6 株整体干枯，其中 3 株叶呈褐色，3 株叶呈黄褐色；1 株下部叶严重脱落，上部叶叶尖干枯。	1 株枯死；6 株整体干枯，叶呈褐色；1 株叶片失绿，呈黄色。
	4.00	2 株下部少量叶片干枯、下垂、失绿；6 株叶片有少量脱落。	1 株叶片严重脱落；3 株干枯；9 株有少量叶片脱落；所有植株叶片失绿变黄。	4 株整体干枯，其中 1 株叶片掉光，1 株下部叶片脱落严重；其余植株叶呈黄色。	3 株枯死；2 株干枯，叶片大量脱落；3 株 1/2 叶片干枯。	5 株枯死；4 株 1/2 叶片干枯，并严重脱落；其余植株叶呈黄褐色，少量脱落。	5 株死亡；4 株叶片掉光，枝条仍呈绿色。
夏鹃	1.00	2 株下部老叶呈黄色。	所有植株下部老叶变黄，叶片少量脱落；有 1 株少量叶片叶尖失绿。	所有植株叶尖失绿，叶片脱落较多，下部老叶呈黄褐色。	4 株叶尖干枯，呈黄褐色，叶片大量脱落；1 株整体干枯；2 株 1/3 叶片干枯；其余少量叶片干枯。	2 株整体干枯，呈褐色；1 株仅留少量绿叶，其余叶片干枯；5 株 1/2 叶片干枯。	4 株枯死，1 株 1/2 叶片干枯，2 株部分叶有 1/2 面积干枯。
	2.00	1/3 植株下部老叶变黄，2 株新叶出现干枯。	2 株少量叶片叶尖出现干枯，呈黄褐色；9 株叶片脱落。	6 株叶片 1/2 面积干枯；其余少量叶尖枯黄，叶片均有脱落。	4 株整体干枯；2 株叶尖干枯；3 株少量叶片干枯，叶片严重脱落。	9 株整体干枯，呈褐色；4 株上部干枯，下部叶 1/2 面积干枯；2 株少量叶片干枯。	11 株枯死；1 株上部叶干枯；3 株剩少量叶片。
	4.00	7 株整体干枯，上部叶呈黄褐色。	9 株叶片干枯、下垂，呈黄褐色，有少量叶片脱落。	10 株叶片枯黄；5 株叶尖干枯，叶片严重脱落。	10 株枯死；4 株 1/2 叶片干枯，叶片严重脱落。	14 株枯死；1 株叶片干枯，呈褐色，大量脱落。	全部死亡。

质量分数盐分胁迫下，生物量均显著低于对照( $P<0.05$ )，金边黄杨在 4.00 g·kg<sup>-1</sup> 盐分胁迫下，生物量显著低于 1.00 和 2.00 g·kg<sup>-1</sup> 处理( $P<0.05$ )；而夏鹃在 1.00 g·kg<sup>-1</sup> 盐分下要显著高于 2.00 和 4.00 g·kg<sup>-1</sup> 处理( $P<0.05$ )，金边黄杨在 1.00 和 2.00 g·kg<sup>-1</sup> 下，根茎比要显著低于对照( $P<0.05$ )，而夏鹃在 3 种不用质量分数盐分处理下，与对照并无显著差异。

### 2.3 盐分胁迫下对 5 种植物光合参数的变化

由表 4 可知：5 种植物的净光合速率随着盐分质量分数的升高而呈下降的趋势。在 1.00 g·kg<sup>-1</sup> 盐分胁迫下，净光合速率降幅最大的是龟甲冬青，较对照下降了 49.27%，最小的是红叶石楠，为 8.66%；在 2.00 g·kg<sup>-1</sup> 盐分胁迫下，红叶石楠的降幅依然最低，为 20.58%，而最高的是下降 61.99%；当盐分质量分数增加到 4.00 g·kg<sup>-1</sup> 时，5 种植物的净光合速率降幅均超过 50.00%，其中最高的龟甲冬青达到 88.05%，最小的金森女贞也达到 52.20%。方差分析结果表明：当盐分质量分数达到 4.00 g·kg<sup>-1</sup> 时，5 种植物的净光合速率均显著低于对照( $P<0.05$ )，而 3 种不同盐分质量分数之间，只有龟甲冬青和夏鹃

表3 盐分胁迫对5种植物生物量的影响

Table 3 Effect of salt stress on biomass of five plant species

树种	处理/(g·kg <sup>-1</sup> )	地上生物量/g	地下生物量/g	根茎比/%	总生物量/(g·株 <sup>-1</sup> )	存活率/%
红叶石楠	对照	6.93 ± 0.52 a	2.03 ± 0.07 a	29.56 ± 1.55 ab	8.96 ± 0.57 a	100
	1.00	5.38 ± 0.48 b	1.74 ± 0.10 b	32.70 ± 2.87 a	7.12 ± 0.52 b	66.67
	2.00	4.11 ± 0.48 c	1.23 ± 0.06 c	30.81 ± 3.79 ab	5.34 ± 0.48 c	40.00
	4.00	3.88 ± 0.12 c	0.86 ± 0.09 d	22.34 ± 2.97 b	4.74 ± 0.05 c	0
金森女贞	对照	5.90 ± 0.24 a	1.72 ± 0.14 a	29.24 ± 1.17 a	7.62 ± 0.52 a	100
	1.00	4.65 ± 0.22 b	1.54 ± 0.21 ab	33.19 ± 2.85 a	6.19 ± 0.46 b	100
	2.00	3.21 ± 0.11 c	1.37 ± 0.59 ab	43.07 ± 10.69 a	4.58 ± 0.56 c	93.33
	4.00	2.59 ± 0.14 c	1.08 ± 0.07 b	42.16 ± 3.75 a	3.67 ± 0.21 d	60
龟甲冬青	对照	13.81 ± 1.00 a	8.30 ± 0.30 a	60.42 ± 2.76 b	22.11 ± 2.18 a	100
	1.00	12.29 ± 0.27 a	7.54 ± 0.20 a	61.38 ± 1.82 b	19.83 ± 0.64 a	86.67
	2.00	8.41 ± 0.84 b	7.52 ± 0.14 a	91.50 ± 10.31 a	15.93 ± 0.83 b	46.67
	4.00	7.59 ± 0.98 b	4.69 ± 0.44 b	64.25 ± 10.41 b	12.28 ± 1.05 c	0
金边黄杨	对照	10.61 ± 0.16 a	6.00 ± 0.37 a	56.50 ± 3.35 a	16.61 ± 0.44 a	100
	1.00	8.53 ± 0.43 b	3.64 ± 0.29 b	42.61 ± 1.40 b	12.17 ± 0.71 b	93.33
	2.00	8.01 ± 0.28 b	3.54 ± 0.14 b	44.36 ± 3.06 b	11.55 ± 0.23 b	93.33
	4.00	5.02 ± 0.27 c	2.88 ± 0.39 c	56.96 ± 4.92 a	7.90 ± 0.65 c	66.67
夏鹃	对照	27.36 ± 0.75 a	23.09 ± 0.47 a	84.53 ± 3.04 ab	50.45 ± 0.84 a	100
	1.00	18.42 ± 0.65 b	16.88 ± 0.41 b	91.96 ± 4.92 a	35.30 ± 0.47 b	73.33
	2.00	10.84 ± 0.51 c	8.69 ± 0.06 c	80.64 ± 4.10 ab	19.53 ± 0.51 c	26.67
	4.00	10.78 ± 1.03 c	7.02 ± 0.62 d	67.28 ± 11.42 b	17.80 ± 0.45 c	0

说明: 表中同一列数后注有不同英文字母者为达到新复极差检验 5%显著水平。

存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

盐分胁迫下5种植物气孔导度的总体变化也是随盐分质量分数增加而下降,在1.00 g·kg<sup>-1</sup>胁迫下,金森女贞的降幅最大,达到63.30%,金边黄杨降幅最小,为8.38%;当盐分超过2.00 g·kg<sup>-1</sup>时,5种植物气孔导度的降幅均大于50.00%,其中夏鹃在2.00 g·kg<sup>-1</sup>时降幅最高,达到69.28%,红叶石楠在4.00 g·kg<sup>-1</sup>胁迫下,降幅居第1位,高达75.05%。从方差分析结果来看,金森女贞和龟甲冬青从1.00 g·kg<sup>-1</sup>开始,显著低于对照( $P < 0.05$ );而红叶石楠、金边黄杨和夏鹃在盐分质量分数达到2.00 g·kg<sup>-1</sup>后气孔导度开始显著下降( $P < 0.05$ )。

5种植物的胞间二氧化碳摩尔分数总体随盐分质量分数的增加呈现先下降后上升的趋势。红叶石楠和金森女贞在不同盐分胁迫下,二氧化碳摩尔分数始终低于对照,但差异并不显著。而龟甲冬青、金边黄杨和夏鹃,在1.00和2.00 g·kg<sup>-1</sup>盐分胁迫下,二氧化碳摩尔分数小于对照,且没有显著差异,但当盐质量分数达到4.00 g·kg<sup>-1</sup>,胞间二氧化碳摩尔分数显著增加( $P < 0.05$ )。

蒸腾速率的变化规律与净光合速率一致,即随着盐分质量分数的增加而下降。在1.00和2.00 g·kg<sup>-1</sup>盐分胁迫下,龟甲冬青的蒸腾速率降幅达到最大,夏鹃的降幅则为最小;在4.00 g·kg<sup>-1</sup>盐分胁迫下,5种植物的降幅均超过50.00%,其中,夏鹃的蒸腾速率急剧下降,降幅达到最高,为83.71%,红叶石楠的降幅最小,为60.28%。方差分析结果表明:金森女贞、龟甲冬青和金边黄杨在盐分质量分数达到1.00 g·kg<sup>-1</sup>时,蒸腾速率开始显著低于对照( $P < 0.05$ );而红叶石楠和夏鹃在盐分胁迫质量分数大于2.00 g·kg<sup>-1</sup>时,与对照产生显著差异( $P < 0.05$ )。

#### 2.4 盐分胁迫对5种植物叶片钠离子(Na<sup>+</sup>)质量分数的影响

在盐分(氯化钠)胁迫下,Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>离子对植物的毒害作用相近,因此,可以用Na<sup>+</sup>质量分数来衡量植物的受害程度。5种植物叶片Na<sup>+</sup>质量分数变化如图1所示。

从图1可以看出:随着盐分质量分数的增加,5种植物叶片Na<sup>+</sup>质量分数呈上升的趋势,其中增幅最大的为金边黄杨,比对照增加6.60~24.31倍;变幅最小的是金森女贞,较对照提高1.44~1.82倍。

表 4 盐胁迫下 5 种植物主要光合参数的变化

Table 4 Variations of photosynthetic parameters of five plant species under salt stress

树种	净光合速率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )				气孔导度/( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )			
	对照	1.00	2.00	4.00 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	对照	1.00	2.00	4.00 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
红叶石楠	3.69±0.12 a	3.37±0.46 a	2.93±0.66 a	1.25±0.50 b	53.33±8.80 a	40.00±5.80 ab	23.33±6.70 bc	13.33±3.30 c
金森女贞	6.81±0.58 a	3.96±0.35 b	3.32±0.44 b	3.25±0.13 b	100.00±10.00 a	36.70±17.60 b	43.30±6.70 b	40.00±11.50 b
龟甲冬青	5.91±0.03 a	3.00±0.11 b	2.47±0.08 c	0.71±0.04 d	43.30±3.30 a	23.30±3.30 b	16.70±3.30 b	13.30±3.30 b
金边黄杨	2.01±0.10 a	1.76±0.23 ab	1.22±0.12 bc	0.84±0.25 c	80.00±5.80 a	73.30±8.80 a	20.00±5.80 b	36.70±3.30 b
夏鹃	1.24±0.04 a	0.95±0.05 b	0.47±0.04 c	0.31±0.08 c	43.30±8.80 a	36.70±3.30 a	13.30±3.30 b	13.30±3.30 b

树种	胞间二氧化碳摩尔分数/( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )				蒸腾速率/( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )			
	对照	1.00	2.00	4.00 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	对照	1.00	2.00	4.00 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
红叶石楠	272.67±4.98 a	238.67±10.27 a	174.00±8.14 b	260.00±19.30 a	1.18±0.19 a	0.99±0.07 ab	0.66±0.18 bc	0.47±0.02 c
金森女贞	251.33±0.88 a	225.67±32.62 a	248.67±30.33 a	245.33±11.55 a	1.77±0.13 a	1.31±0.15 b	1.09±0.10 b	0.58±0.03 c
龟甲冬青	158.00±1.00 b	131.33±20.33 b	157.67±12.02 b	341.00±13.43 a	1.23±0.01 a	0.50±0.04 b	0.58±0.04 b	0.35±0.03 c
金边黄杨	294.00±4.62 b	306.00±9.85 b	266.67±12.72 c	338.33±8.57 a	3.39±0.06 a	2.48±0.23 b	1.66±0.21 c	1.26±0.05 c
夏鹃	327.33±2.60 b	297.67±2.40 b	313.67±21.22 b	432.67±13.87 a	1.49±0.06 a	1.40±0.04 a	1.05±0.13 b	0.24±0.02 c

说明: 表中同一行数据后注有不同英文字母者为达到新复极差检验 5% 显著水平。

方差分析结果表明：金森女贞、龟甲冬青、金边黄杨和夏鹃在 1.00, 2.00 和 4.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  盐胁迫下，叶片的  $\text{Na}^+$  质量分数显著高于对照 ( $P < 0.05$ )，而红叶石楠仅在 4.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  盐胁迫下与对照表现出显著差异 ( $P < 0.05$ )。在 4.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  盐胁迫下，龟甲冬青和金边黄杨叶片  $\text{Na}^+$  质量分数要显著高于 1.00 和 2.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理 ( $P < 0.05$ )；夏鹃在 4.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  盐胁迫下仅显著高于 1.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理 ( $P < 0.05$ )，与 2.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间并无显著差异；而红叶石楠和金森女贞 3 种不同盐分质量分数之间的差异性均不显著。

### 2.5 盐胁迫对 5 种植物叶片钾离子 ( $\text{K}^+$ ) 质量分数的影响

5 种植物叶片  $\text{K}^+$  质量分数变化见图 2。从图 2 中看出：相比  $\text{Na}^+$  离子而言，在不同质量分数盐胁迫下，各植物叶片  $\text{K}^+$  质量分数变化趋势并不一致。具体来看，龟甲冬青的叶片  $\text{K}^+$  质量分数随着盐质量分数的增加呈递减的趋势，降幅为 17.24%~35.52%；金边黄杨的变化趋势则相反，增幅为 0.62%~10.00%；夏鹃的叶片  $\text{K}^+$  质量分数随着盐质量分数增加呈先增后减的变化趋势，红叶石楠则表现为先减后增；而金森女贞在不同盐质量分数胁迫下叶片  $\text{K}^+$  质量分数并没有明显的变化规律。

从方差分析的结果来看，仅龟甲冬青在 4.00  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  盐胁迫下，叶片  $\text{K}^+$  质量分数显著低于对照 ( $P < 0.05$ )，其他 4 种植物的不同处理间均没有显著差异。

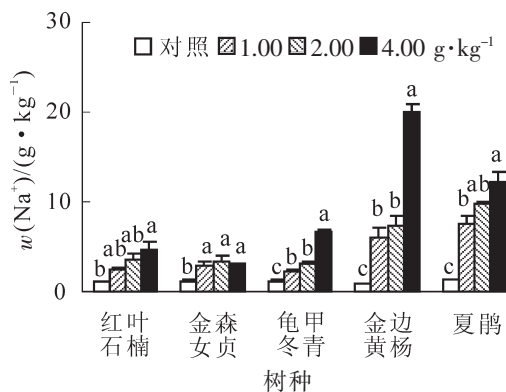


图 1 盐胁迫对 5 种植物叶片钠离子的影响

Figure 1 Effects of the concentrations of  $\text{Na}^+$  in leaves of five plant species under salt stress

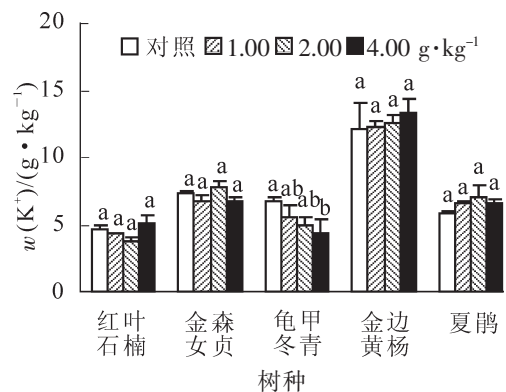


图 2 盐胁迫对 5 种植物叶片钾离子的影响

Figure 2 Effects of the concentrations of  $\text{K}^+$  in leaves of five plant species under salt stress

### 2.6 盐胁迫对 5 种植物叶片 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 比值的影响

图 3 是 5 种植物在不同质量分数盐胁迫下叶片中  $\text{Na}^+$  质量分数与  $\text{K}^+$  质量分数的比值。由图 3 可以看出： $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值的变化趋势与  $\text{Na}^+$  质量分数一致，即随盐质量分数的增加而增加，其中增幅最大的是

金边黄杨, 比对照提高了 6.14~20.74 倍; 增幅最小的为金森女贞, 较对照增加了 1.68~1.80 倍。

方差分析结果表明: 不同质量分数盐胁迫下, 金森女贞、金边黄杨和夏鹃的  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值显著高于对照 ( $P < 0.05$ ); 红叶石楠和金森女贞的 3 个不同盐质量分数之间没有显著性差异; 金边黄杨在  $4.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  盐分胁迫下与  $1.00$  和  $2.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理表现出显著差异 ( $P < 0.05$ ); 夏鹃  $4.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理显著高于  $1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $P < 0.05$ ); 龟甲冬青只在  $4.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  盐分胁迫下显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), 而  $1.00, 2.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  及对照差异并不显著。

## 2.7 耐盐性综合评价

本研究采用隶属函数法对 5 种植物在盐分胁迫下的 7 项生长生理指标进行综合评价。通过隶属函数将各指标的测定值转换成隶属函数值并进行累加, 取平均数进行不同植物间的比较。平均隶属函数值越大, 说明植物的耐盐性越强。对 5 种植物的平均隶属函数值进行排序得到表 5。在  $1.00, 2.00$  和  $4.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  等 3 种盐分胁迫下, 5 种植物的耐盐能力从高到低依次为金森女贞 > 金边黄杨 > 龟甲冬青 > 红叶石楠 > 夏鹃。

表 5 5 种植物各指标隶属函数值及耐盐性综合评价

Table 5 Function value of subordination and synthetical evaluation on salt tolerance of five plant species

处理/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	树种	生物量 <sup>+</sup>	存活率 <sup>+</sup>	钠钾比 <sup>-</sup>	净光合速率 <sup>+</sup>	气孔导度 <sup>+</sup>	胞间二氧化碳 摩尔分数	蒸腾速率 <sup>+</sup>	综合隶属值	耐盐排序
1.00	红叶石楠	0.03	0	0.82	0.80	0.33	0.39	0.25	0.37	4
	金森女贞	0.47	0.60	0.97	1.00	0.27	0.46	0.41	0.60	1
	龟甲冬青	0	1.00	1.00	0.68	0	1.00	0	0.53	3
	金边黄杨	0.21	0.80	0.87	0.27	1.00	0	1.00	0.59	2
	夏鹃	1.00	0.20	0	0	0.27	0.05	0.45	0.28	5
2.00	红叶石楠	0.05	0.20	0.51	0.86	0.33	0.90	0.07	0.42	4
	金森女贞	0.76	0.30	1.00	1.00	1.00	0.42	0.47	0.71	1
	龟甲冬青	0	1.00	0.77	0.70	0.11	1.00	0	0.51	3
	金边黄杨	0.47	1.00	0.83	0.26	0.22	0.30	1.00	0.58	2
	夏鹃	1.00	0	0	0	0	0	0.44	0.21	5
4.00	红叶石楠	0.08	0	0.67	0.32	0	0.92	0.12	0.30	4
	金森女贞	0.61	0	1.00	1.00	1.00	1.00	0.33	0.71	1
	龟甲冬青	0	0.90	0.14	0.14	0	0.49	0.61	0.33	3
	金边黄杨	0.30	1.00	0.26	0.18	0.88	0.50	1.00	0.59	2
	夏鹃	1.00	0	0	0	0	0	0	0.14	5

说明: 表中“+”表示耐盐指标与耐盐性成正相关, “-”表示指标与耐盐性成负相关。

## 3 讨论与结论

在盐分胁迫的研究中, 植物的形态表现和生长状况是其耐盐能力最直观的表现, 而对于多年生植物来说, 在盐胁迫条件下, 存活率是衡量其耐盐性的一个可靠指标<sup>[11]</sup>。已有研究表明<sup>[12]</sup>: 盐分对植物的危害外在症状主要包括前期叶片失绿变黄、卷曲, 中期叶片枯黄、灼烧坏死或呈斑状, 至后期叶片脱落以及枝条枯萎等。国内已有报道用植物具体盐害症状来评价植物的耐盐性, 例如宗鹏鹏等<sup>[5]</sup>依据八棱海棠的不同盐害症状划分受害等级, 再量化为受害指数评价其耐盐性。张华新等<sup>[3]</sup>根据植株生长量和受害症状划分耐盐等级来评价鹰爪豆等 11 个树种的耐盐性, 结果与运用隶属函数法得出的结论较为一致。本试验中, 5 种植物在盐分胁迫下均表现出不同程度的受害症状, 主要表现为叶片下垂、卷曲、脱落;

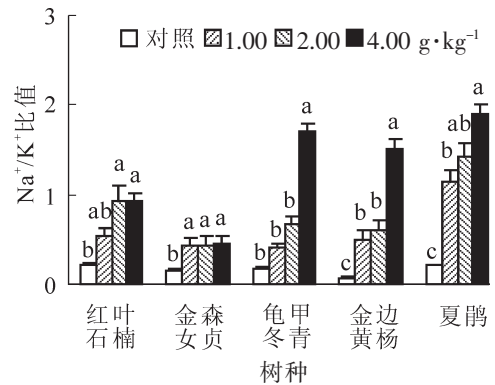


图 3 盐分胁迫对 5 种植物叶片  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  比值的影响

Figure 3 Effects of the concentrations of  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  ratio in leaves of five plant species under salt stress



叶色失绿、变黄、干枯呈深色,最后死亡。从5种植物的受害症状和存活率对比来看,金森女贞的耐盐性表现最好,在 $1.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分胁迫下,未出现明显的受害症状,在 $2.00$ 和 $4.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分胁迫下,受害死亡植株数也少于其他4种植物。其次是金边黄杨,到试验结束时, $1.00$ 和 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分胁迫下仅死亡1株, $4.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分下有5株死亡,龟甲冬青在 $1.00$ 和 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分胁迫下的耐盐表现要好于红叶石楠和夏鹃,但红叶石楠在 $1.00$ 和 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 盐分胁迫的存活率仍略高于夏鹃。依照这个结论,5种植物的耐盐性高低排序也与本研究最终根据隶属函数法计算得到的结果相一致。

研究表明<sup>[13]</sup>:随着胁迫盐质量分数的增加,植物的新陈代谢过程受到影响,从而抑制了植物的生长,因此,生物量是植物对盐分胁迫反应的综合体现,生物量积累是表征其受害程度的重要指标。王树凤等<sup>[4]</sup>认为:高质量分数盐分胁迫明显抑制了弗吉尼亚栎 *Quercus virginiana* 和麻栎 *Quercus acutissima* 地上部生物量的积累,而低质量分数盐分胁迫对弗吉尼亚栎地上部干质量的影响不明显,但显著抑制了麻栎地上部干质量。本研究中,5种植物的生物量均随着胁迫质量分数的增加而减少。有研究认为<sup>[12]</sup>:植物的耐盐性可以通过其在一定时间盐胁迫条件下生物量累积相对对照下降的百分比来衡量。若以此为标准,本研究中夏鹃的生物量降幅最高,即耐盐性最差,而龟甲冬青降幅最小,则耐盐性最好。

根茎比的变化反映出植物不同部位对盐胁迫环境的敏感程度,从而引起生物量分配模式的变化,因此,生物量分配策略是植物在盐胁迫下的适应机制之一<sup>[14]</sup>。不同植物都有各自的应对盐分胁迫的机制和策略。研究表明<sup>[15]</sup>:盐胁迫下,植物根系生长的敏感性要低于地上部,因此,盐胁迫下根茎比增加。然而,对一些滨海盐生植物来说,根系对盐分胁迫的敏感程度要高于地上部分,因此,在高盐分胁迫下,根茎比值反而要降低<sup>[16]</sup>。本研究中红叶石楠和夏鹃在低质量分数盐分胁迫下,盐分对地上部生长影响较大,地上生物量降幅大于地下部分,根茎比值上升,而在高质量分数盐分胁迫下,根系生长受到严重影响,地下部生物量降幅急剧上升,植物通过减少生物量在根系的分配以降低对盐分的吸收,同时减少盐分向地上部运输,减轻对植物的毒害作用,因此,根茎比逐渐下降<sup>[17]</sup>。而对金边黄杨来说,在低质量分数盐分胁迫下,根茎比值下降,在高盐环境下,根茎比上升,规律类似与石南叶白千层 *Melaleuca ericifolia*<sup>[18]</sup>,在高盐分胁迫下增加了生物量在根系的分配,促进根系对水分和营养的获取,以维持植物的生长能力,也稀释了细胞内的盐分。龟甲冬青和金森女贞在不同质量分数盐分胁迫下,根茎比要高于对照,说明盐分胁迫对植物地上部分生长的抑制作用大于地下部分,植物通过增加根系生物量,减少地上部生物量来应对胁迫,这与王树凤等<sup>[4]</sup>的研究结果相一致。

光合参数是评价植物耐盐性的重要指标,不同植物在不同浓度、时间的盐分胁迫下,光合参数的变化存在较大差异。汪贵斌等<sup>[19]</sup>研究发现:落羽杉 *Taxodium distichum* 的净光合速率、气孔导度等指标均随盐分质量分数的增大而下降。张川红等<sup>[20]</sup>对国槐 *Sophora japonica* 等几种苗木的研究表明,核桃 *Juglans regia* 和中林46杨 *Populus × euramericana* ‘Zhonglin-46’ 在盐分胁迫短期内净光合速率明显下降;绒毛白蜡 *Fraxinus velutina* 的降幅较小,且能忍受一定时间和质量分数的盐分胁迫;而国槐在一定时间和盐质量分数胁迫下,净光合速率持续上升。目前,关于盐分胁迫影响植物光合作用的研究,主要有3种观点<sup>[21]</sup>:一是认为植物光合系统对盐分较敏感,盐分主要作用于叶绿体,导致叶绿体失水,抑制了光合过程;第2种观点认为,盐分胁迫对植物的影响首先体现在对植物气孔的抑制,即气孔效应与非气孔效应起作用,气孔关闭引起的植物体内二氧化碳的减少或盐分进入植物体内抑制碳同化过程中的相关酶活性,都会改变光合途径,从而抑制植物光合作用;还有一种观点认为,盐分进入植物体内,破坏了植物细胞中色素、蛋白质和脂类的复合体,光合色素从而遭到破坏,叶片色素不断降低,从而严重抑制光合作用。从本研究结果来看,5种植物的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率随盐分质量分数的升高而下降,胞间二氧化碳摩尔分数随盐分质量分数的增加呈先下降后上升的趋势,结合植物生长表现,盐分胁迫对该5种植物光合作用的影响更多应该是植物细胞的色素受到破坏而导致光合作用下降。

盐胁迫下,过量的盐离子会对植物造成毒害、渗透胁迫和营养亏缺等方面的影响。毒害包括 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 对细胞膜系统的伤害,导致膜透性增大,电解质外渗,引起细胞代谢失调;渗透胁迫主要是由于根系环境中高浓度盐离子的存在,致使植物吸收水分困难;营养亏缺则是高浓度的盐离子与营养元素产生竞争,干扰植物吸收营养元素,造成体内养分元素缺乏,影响植物生长<sup>[22]</sup>。 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 是被用于进行渗透调节的主要离子,不同的植物有不同的调节机制,在体内的分配方式也各不相同,维持 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 比

值的平衡是植物进行渗透调节的重要机制<sup>[21]</sup>。植物的耐盐性取决于限制 Na<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>进入, 选择性吸收 K<sup>+</sup>的能力, 土壤中高浓度 Na<sup>+</sup>会严重影响植物对 K<sup>+</sup>的吸收和运输, 导致植物体内 K<sup>+</sup>质量分数降低, 随着盐分含量增加, 大部分植物体内的 Na<sup>+</sup>质量分数增加, K<sup>+</sup>质量分数降低, 而耐盐植物则能通过减少K<sup>+</sup>外流以维持细胞内较低的 Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>比值, 从而维持正常的细胞代谢, 进而提高抵抗盐胁迫的能力<sup>[23-24]</sup>。从本试验的结果来看, 5种植物在不同质量分数盐分胁迫下, 叶片 Na<sup>+</sup>质量分数和 Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>比值随盐质量分数的增加而增加, 而叶片 K<sup>+</sup>质量分数变化趋势并不一致, 这主要是由于植物对 Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>的这种渗透调节机制不仅存在于叶片中, 同时也存在于根系之中<sup>[25]</sup>。

本研究选取 7 个与植物耐盐性相关的生长和生理指标, 利用隶属函数法对 5 种园林绿化植物的耐盐性进行评价, 得到如下结果: 在 1.00, 2.00 和 4.00 g·kg<sup>-1</sup> 等 3 种盐分质量分数胁迫下, 5 种植物的耐盐能力从高到低依次为金边黄杨>金边黄杨>龟甲冬青>红叶石楠>夏鹃, 与这 5 种植物在舟山海岛地区的生长耐盐实际情况基本相符。

#### 4 参考文献

- [1] 杨升, 梁娟, 封薇薇, 等. 舟山海岛滩涂资源开发利用与可持续发展研究[J]. 海洋开发与管理, 2012, **24**(3): 17 - 21.  
YANG Sheng, LIANG Juan, FENG Weiwei, *et al.* Zhoushan island beaches exploitation and utilization of resources and susutainable development research [J]. *Ocean Dev Manage*, 2012, **24**(3): 17 - 21.
- [2] 吴琼. 新型城镇化下乡村聚落的植物景观研究: 以舟山本岛乡村为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
WU Qiong. *Study on the Plant Landscape of Rural Settlement Under the New Urbanization: Taking the Zhoushan Island as Example* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [3] 张华新, 刘正祥, 刘秋芳. 盐胁迫下树种幼苗生长及其耐盐性[J]. 生态学报, 2009, **29**(5): 2263 - 2271.  
ZHANG Huaxin, LIU Zhengxiang, LIU Qiufang. Seedling growth and salt tolerance of tree species under NaCl stress [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(5): 2263 - 2271.
- [4] 王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 等. 盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(4): 1021 - 1029.  
WANG Shufeng, HU Yunxue, SUN Haijing, *et al.* Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(4): 1021 - 1029.
- [5] 宗鹏鹏, 曲艳华, 柴朋, 等. 八棱海棠耐盐碱性评价[J]. 中国农业大学学报, 2013, **18**(3): 96 - 100.  
ZONG Pengpeng, QU Yanhua, CHAI Peng, *et al.* Evaluation on the resistance of *Malus robusta* Rehd. to alkalinity and salinity [J]. *J China Agric Univ*, 2013, **18**(3): 96 - 100.
- [6] 李庆贱, 李悦, 陈志强, 等. 不同白榆家系苗期耐盐碱综合评价[J]. 东北林业大学学报, 2011, **39**(3): 8 - 11.  
LI Qingjian, LI Yue, CHEN Zhiqiang, *et al.* Integrated evaluation of saline-alkali tolerance of *Ulmus pumila* seedlings from different families [J]. *J Northeast For Univ*, 2011, **39**(3): 8 - 11.
- [7] 王臣, 虞木奎, 王宗星, 等. 9 个楸树无性系对盐胁迫的差异响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, **35**(2): 20 - 24.  
WANG Chen, YU Mukui, WANG Zongxing, *et al.* Difference of response to salt stress of nine clones of *Catalpa bungei* [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2011, **35**(2): 20 - 24.
- [8] 申亚梅, 童再康, 马进, 等. 海水胁迫下 2 种观赏植物的生长与生理特性比较[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26**(4): 490 - 497.  
SHEN Yamei, TONG Zaikang, MA Jin, *et al.* Seawater stress on vegetative and physiological characteristics of *Photinia glabra* × *P. fraseri* 'Red Robin' and *Euonymus japonica* 'Aureo-marينات' cuttings [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26**(4): 490 - 497.
- [9] 宋盈颖, 张饮江, 李博炎, 等. 盐胁迫对金边黄杨生理特征的影响[J]. 上海农业学报, 2016, **32**(2): 89 - 93.  
SONG Yingying, ZHANG Yinjiang, LI Boyan, *et al.* Effect of salt stress on physiological characteristics of *Ligustrum higginsii* [J]. *Acta Agric Shanghai*, 2016, **32**(2): 89 - 93.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] MUNNS R. Comparative physiology of salt and water stress [J]. *Plant Cell Environ*, 2002, **25**(2): 239 - 250.

- [12] KOZLOWSKI T T. Responses of woody plants to flooding and salinity [J]. *Tree Physiol*, 1997, **1**(7): 129 – 163.
- [13] VICENTE O, BOSCAIU M, NARANJO M Á, *et al.* Responses to salt stress in the halophyte *Plantago crassifolia* (Plantaginaceae) [J]. *J Arid Environ*, 2004, **58**(4): 463 – 481.
- [14] 李峰, 谢永宏, 覃盈盈. 盐胁迫条件下湿地植物的适应策略[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(2): 314 – 321.  
LI Feng, XIE Yonghong, QIN Yingying. Adaptive strategies of wetland plants in salt stress environment [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28**(2): 314 – 321.
- [15] BERNSTEIN N, MEIRI A, ZILBERSTAIN M. Root growth of Avocado is more sensitive to salinity than shoot growth [J]. *J Am Soc Hortic Sci*, 2004, **129**(2): 188 – 192.
- [16] 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.  
YI Liangpeng, WANG Zuwei. Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(5): 1195 – 1202.
- [17] MAUCHAMP A, MÉSLEARD F. Salt tolerance in *Phragmites australis* populations from coastal Mediterranean marshes [J]. *Aquatic Bot*, 2001, **70**(1): 39 – 52.
- [18] SALTER J, MORRIS K, BAILEY P C E, *et al.* Interactive effects of salinity and water depth on the growth of *Melaleuca ericifolia* Sm (Swamp paperbark) seedlings [J]. *Aquatic Bot*, 2007, **86**(3): 213 – 222.
- [19] 汪贵斌, 曹福亮. 土壤盐分和水分含量对落羽杉光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, **28**(3): 14 – 18.  
WANG Guibin, CAO Fuliang. Effects of soil water and salt contents on photosynthetic characteristics [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2004, **28**(3): 14 – 18.
- [20] 张川红, 沈应柏, 尹伟伦, 等. 盐胁迫对几种苗木生长及光合作用的影响[J]. 林业科学, 2002, **38**(2): 27 – 31.  
ZHANG Chuanhong, SHEN Yingbai, YIN Weilun, *et al.* Effect of salt stress on photosynthesis and growth of four tree species seedlings [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38**(2): 27 – 31.
- [21] 刘昊华. 几种滨海盐碱地绿化植物耐盐特性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.  
LIU Haohua. *The Study of Several Afforestation Plants Salt-tolerance in Coastal Saline* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [22] 汪贵斌, 曹福亮, 游庆方, 等. 盐胁迫对4树种叶片中 $K^+$ 和 $Na^+$ 的影响及其耐盐能力的评价[J]. 植物资源与环境学报, 2001, **10**(1): 30 – 34.  
WANG Guibin, CAO Fuliang, YOU Qingfang, *et al.* Effects of salt stress on concentrations of  $Na^+$ ,  $K^+$  and  $Na^+/K^+$  in the leaves of four tree species and evaluation of salt tolerance [J]. *J Plant Resour Environ*, 2001, **10**(1): 30 – 34.
- [23] 左照江, 张汝民, 高岩. 盐胁迫下植物细胞离子流变化的研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(5): 805 – 811.  
ZUO Zhaojiang, ZHANG Rumin, GAO Yan. Advances in plant cell ion flux with salt stress: a review [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2014, **31**(5): 805 – 811.
- [24] MANSOUR M M F, SALAMA K H A. Cellular basis of salinity tolerance in plant [J]. *Environ Exp Bot*, 2004, **52**(2): 113 – 122.
- [25] 宋丹. 几种引进树种幼苗耐盐特性及其耐盐性评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.  
SONG Dan. *Study on Characters and Assessments of Salt Tolerance in the Seedlings of Several Introductory Tree Species* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006.