

混合盐胁迫对江苏省沿海常用绿化树种生长的影响及耐盐性评价

华建峰¹, 杜丽娟¹, 王菁丰², 韩路弯¹, 熊豫武¹, 殷云龙^{1,①}

[1. 江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014; 2. 宁波永丰园林建设有限公司, 浙江 宁波 315600]

摘要: 依据江苏滨海盐渍土的离子组成和含量, 采用土培法研究了经 0.0 (CK)、3.0、5.0 和 8.0 g · kg⁻¹ 混合盐胁迫处理后江苏沿海常用绿化植物(包括 16 种乔木和 8 种灌木)的盐害指数、死亡率、苗高生长量和相对干质量; 在此基础上, 依据 Logistic 方程和耐盐阈值(T_{50})对各种类的耐盐性进行了初步评价。结果表明: 随土壤中混合盐质量浓度的提高, 各种类的盐害指数和死亡率总体呈逐渐升高的趋势, 而苗高生长量和相对干质量总体呈逐渐下降的趋势, 但不同种类各指标的变化幅度有明显差异。总体上看, 经不同质量浓度混合盐胁迫处理后, 乔木树种中‘中山杉 406’(*Taxodium hybrid* ‘Zhongshanshan 406’)以及灌木树种中海滨木槿(*Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.)、海桐 [*Pittosporum tobira* (Thunb.) Ait.] 和匍地柏 [*Sabina procumbens* (Endl.) Iwata et Kusaka] 植株全部存活且盐害指数低, 而其他树种的死亡率较高甚至达到 100% 且盐害指数均较高; 乔木树种中银杏(*Ginkgo biloba* Linn.) 和‘中山杉 406’以及灌木树种中海滨木槿、匍地柏、黄杨 [*Buxus sinica* (Rehd. et Wils.) Cheng] 和海桐的相对干质量较高; 乔木树种中紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)、海棠 [*Malus spectabilis* (Ait.) Borkh.] 和‘中山杉 406’以及灌木树种中海桐、匍地柏和海滨木槿的苗高生长量较高。此外, 乔木树种中‘中山杉 406’、女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.) 和海棠以及灌木树种中海滨木槿、海桐、匍地柏、黄杨、日本珊瑚树 [*Viburnum odoratissimum* var. *awabuki* (K. Koch) Zabel ex Rumph.] 和石楠 (*Photinia serrulata* Lindl.) 的 T_{50} 值均较高。综合分析结果显示: 刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、银杏、台湾含笑 [*Michelia compressa* (Maxim.) Sarg.]、白蜡树 (*Fraxinus chinensis* Roxb.)、海棠、女贞、‘中山杉 406’、石楠和日本珊瑚树可耐受低浓度的混合盐胁迫, 黄杨和匍地柏可耐受中浓度的混合盐胁迫, 而海滨木槿和海桐可耐受高浓度的混合盐胁迫。

关键词: 混合盐胁迫; 绿化树种; 生长指标; 盐害指数; 耐盐阈值; 耐盐性

中图分类号: Q948.113; S728.603 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)03-0041-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.03.06

Effect of mixed salt stress on growth of common greening species in coastal area of Jiangsu Province and evaluation of their salt tolerance HUA Jianfeng¹, DU Lijuan¹, WANG Xiaofeng², HAN Luwan¹, XIONG Yuwu¹, YIN Yunlong^{1,①} (1. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Ningbo Yongfeng Landscape Construction Co., Ltd., Ningbo 315600, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(3): 41-49

Abstract: Based on composition and content of ion of coastal saline soil in Jiangsu Province, salt-injury index, mortality rate, height increment and relative dry weight of common greening species (including sixteen arbors and eight shrubs) in coastal area of Jiangsu Province after treated by mixed salt stress with 0.0 (CK), 3.0, 5.0 and 8.0 g · kg⁻¹ were researched by soil culture method. On this basis, salt tolerance of all species was evaluated preliminarily by Logistic equation and salt-tolerance threshold (T_{50}). The results show that with enhancing of mass concentration of mixed salt in soil, salt-injury index and mortality rate of all species generally appear the trend of increasing gradually, while height increment

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAB03B04); 宁波市科技计划项目(2015C10028); 江苏省科学技术厅科技支撑计划项目(BE2014377)

作者简介: 华建峰(1980—), 男, 江苏无锡人, 博士, 副研究员, 主要从事植物资源与生态环境方面的研究。

① 通信作者 E-mail: yinyun066@sina.com

and relative dry weight generally appear the trend of decreasing gradually, but there is an obvious difference in change range of all indexes of different species. In general, after treated by mixed salt stress with different mass concentrations, *Taxodium* hybrid ‘Zhongshanshan 406’ in arbor tree species and *Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc., *Pittosporum tobira* (Thunb.) Ait. and *Sabina procumbens* (Endl.) Iwata et Kusaka in shrub tree species all survive and their salt-injury indexes are low, while mortality rate of other tree species is higher, even reaches 100% with higher salt-injury index. Relative dry weight of *Ginkgo biloba* Linn. and *T.* hybrid ‘Zhongshanshan 406’ in arbor tree species and *H. hamabo*, *S. procumbens*, *Buxus sinica* (Rehd. et Wils.) Cheng and *P. tobira* in shrub tree species is higher. Height increment of *Amorpha fruticosa* Linn., *Malus spectabilis* (Ait.) Borkh. and *T.* hybrid ‘Zhongshanshan 406’ in arbor tree species and *P. tobira*, *S. procumbens* and *H. hamabo* in shrub tree species is higher. Moreover, T_{50} value of *T.* hybrid ‘Zhongshanshan 406’, *Ligustrum lucidum* Ait. and *M. spectabilis* in arbor tree species and *H. hamabo*, *P. tobira*, *S. procumbens*, *B. sinica*, *Viburnum odoratissimum* var. *awabuki* (K. Koch) Zabel ex Ruml. and *Photinia serrulata* Lindl. in shrub tree species is higher. The result of comprehensive analysis shows that *Robinia pseudoacacia* Linn., *G. biloba*, *Michelia compressa* (Maxim.) Sarg., *Fraxinus chinensis* Roxb., *M. spectabilis*, *L. lucidum*, *T.* hybrid ‘Zhongshanshan 406’, *P. serrulata* and *V. odoratissimum* var. *awabuki* can be tolerant to low concentration of mixed salt stress, while *B. sinica* and *S. procumbens* do middle concentration of mixed salt stress, and *H. hamabo* and *P. tobira* do high concentration of mixed salt stress.

Key words: mixed salt stress; greening species; growth index; salt-injury index; salt-tolerance threshold; salt tolerance

江苏省海岸线长约 954 km, 滩涂总面积占全国的 1/4, 并以每年 13.3 km² 的速度继续向外淤涨。多年来, 江苏省通过滩涂围垦增加了大量土地, 有力支持了沿海地区的经济发展。但围垦的同时不能忽略对生态环境的保护, 而绿化适生植物, 尤其是乔木和灌木的选择是沿海滩涂地区生态环境保护成败的关键^[1]。由于盐胁迫可以引发植物体内的渗透胁迫和离子毒害, 以及养分亏缺和氧化胁迫等次生伤害, 干扰植物正常的生理代谢, 导致其生长受阻甚至死亡^[2], 因而, 筛选耐盐绿化树种是沿海滩涂生态环境保护和美化的基础。

目前能够用于沿海滩涂城乡绿化建设的耐盐树种不多, 许多学者对此也进行了大量研究。胡晓立等^[3]的研究结果表明: 紫叶李 [*Prunus cerasifera* f. *atropurpurea* (Jacq.) Rehd.]、黑杆樱李 (*P. urasifers* ‘nigra’) 和紫叶矮樱 (*P. × cistenena* ‘Pissardii’) 3 种李属 (*Prunus* Linn.) 彩叶植物均能适应一定程度的 NaCl 胁迫; 杜丽娟等^[4]认为: 在混合盐胁迫条件下, 海桐 [*Pittosporum tobira* (Thunb.) Ait.] 和匍地柏 [*Sabina procumbens* (Endl.) Iwata et Kusaka] 的耐盐性较强, 可在沿海滩涂绿化中发挥重要作用; 张玲菊等^[5]选择了 27 种常用绿化乔木和灌木进行水培实验, 以 NaCl 胁迫条件下植物的形态变异作为耐盐树种的形态 (指标) 变化特征, 筛选出龙柏 (*Sabina chinensis* ‘Kaizuca’)、红楠 (*Machilus thunbergii* Sieb.

et Zucc.)、枣树 (*Ziziphus jujube* Mill.)、厚叶石斑木 [*Rhaphiolepis umbellata* (Thunb.) Makino]、金边黄杨 (*Euonymus japonicus* var. *aurea-marginatus* Hort.) 和芙蓉菊 [*Crossostephium chinense* (Linn.) Makino] 6 种耐盐绿化植物。目前有关植物耐盐性的研究大多采用 NaCl 单一胁迫及水培法, 如对唐古特白刺 (*Nitraria tangutorum* Bobr.)^[2]、红树植物^[6]、卫矛 [*Euonymus alatus* (Thunb.) Sieb.] 和美国白蜡 (*Fraxinus americana* Linn.)^[7] 耐盐性的研究, 不能如实反映立地土壤实际盐分组成以及植物的受胁迫状况。此外, 实验方法和实验条件 (如温度和相对湿度等) 的差异也可导致实验结果的不同, 对耐盐植物的选择有一定影响。因此, 目前亟待采取适宜的方法和标准对沿海滩涂常用绿化乔木和灌木进行耐盐性研究。

基于江苏省沿海地区的生态环境特点, 参考植物的景观价值、配置模式以及植物属性 (针叶、阔叶、常绿和落叶) 等因素, 作者从江苏沿海地区常用的木本绿化植物中选择女贞 (*Ligustrum lucidum* Ait.)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.) 和海桐等 16 种乔木和 8 种灌木为研究对象, 模拟沿海土壤盐分组成, 对供试植物进行混合盐胁迫处理, 并根据其生长量、盐害指数和胁迫症状等确定不同植物的耐盐能力, 以期筛选出具有较高耐盐性的乔木和灌木种类, 为保护和美化江苏省沿海地区的生态环境、丰富江苏沿海地区的植被类型提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 材料

供试植物包括16种乔木和8种灌木。乔木包括银杏(*Ginkgo biloba* Linn.)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)、槐树(*Sophora japonica* Linn.)、合欢(*Albizia julibrissin* Durazz.)、刺槐、二球悬铃木[*Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd.]、意杨(*Populus euramericana* 'I-214')、白蜡树(*Fraxinus chinensis* Roxb.)、'中山杉406'(*Taxodium hybrid* 'Zhongshanshan 406')、台湾含笑[*Michelia compressa* (Maxim.) Sarg.]、栎树(*Koelreuteria paniculata* Laxm.)、海棠[*Malus spectabilis* (Ait.) Borkh.]、紫叶李、女贞、天竺桂(*Cinnamomum japonicum* Sieb.)和臭椿[*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle]。灌木包括南天竹(*Nandina domestica* Thunb.)、海桐、黄杨[*Buxus sinica* (Rehd. et Wils.) Cheng]、匍地柏、石楠(*Photinia serrulata* Lindl.)、海滨木槿(*Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.)、木槿(*H. syriacus* Linn.)和日本珊瑚树[*Viburnum odoratissimum* var. *awabuki* (K. Koch) Zabel ex Rumphl.]。供试植物均购自江苏省沭阳绿杨园艺花木场,大都为生长良好、长势一致的2年生苗。其中,银杏、紫穗槐、槐树、合欢、刺槐、白蜡树、台湾含笑、栎树、女贞、天竺桂和臭椿为实生苗;二球悬铃木、意杨、'中山杉406'和所有灌木种类为扦插苗;海棠和紫叶李为嫁接苗,砧木分别为山荆子[*Malus baccata* (Linn.) Borkh.]和桃(*Amygdalus persica* Linn.)。

于2011年4月,将供试植株种植于花盆中,每盆1株;种植容器为高40 cm,上、下直径分别为30和25 cm的塑料花盆;按V(黄泥土):V(泥炭土):V(珍珠岩)=5:2:1的比例配制混合基质,每盆装入混合基质5.5 kg。将供试植株置于室外进行常规管理,2个月后移入温室并培养2周进行缓苗,于2011年6月进行盐胁迫处理。

1.2 方法

1.2.1 混合盐溶液的配制及处理方法 参照文献[4],根据江苏省南通市如东县滨海盐渍土的离子组成和含量配制不同质量浓度的NaCl、Na₂SO₄和NaHCO₃混合盐溶液。

混合盐胁迫处理在温室中进行,共设置0.0(对照)、3.0、5.0和8.0 g·kg⁻¹4个处理水平。采用浇

灌法,逐次加入混合盐溶液以平衡蒸发的水分^[8],具体处理过程如下:3.0 g·kg⁻¹处理组仅加混合盐溶液1次、5.0 g·kg⁻¹处理组分2次加入混合盐溶液、8.0 g·kg⁻¹处理组分3次加入混合盐溶液,使各处理组土壤中混合盐的最终质量浓度分别达到3.0、5.0和8.0 g·kg⁻¹;每次间隔2 d加入混合盐溶液,并尽可能保证盐分与土壤混合均匀。实验采用完全随机区组设计,每处理7盆,视为7次重复。混合盐胁迫期间按需浇水;盆下放置托盘,每周定期将托盘内渗出的盐分和基质倒回原盆中,以避免盐分和水分流失。胁迫时间为45 d。

1.2.2 危害症状调查 混合盐胁迫期间,每周观察和记录供试各植物种类幼苗叶片形态、颜色等性状的变化,并对危害症状进行观察、描述和统计。然后根据叶片受害程度,划分盐害等级并赋值,计算不同混合盐水平下各植物种类的盐害指数。盐害程度分为5个等级^[9]:0级为全株无盐害症状,赋值0分;1级为轻度盐害,全株少部分叶片(约20%)的叶尖和叶缘发黄,赋值1分;2级为中度盐害,全株约50%的叶片枯焦并发黄,赋值2分;3级为重度盐害,全株50%以上的叶片枯焦并发黄,赋值3分;4级为极重度盐害,全株叶片几乎全部(多于90%)枯焦并脱落,或植株死亡,赋值4分。胁迫结束时,统计各植物种类幼苗的存活株数。

按照以下公式计算盐害指数和幼苗死亡率:盐害指数=[\sum (相应盐害等级的分值×相应盐害等级的株数)]/(最高盐害等级的分值×总株数)×100%;幼苗死亡率=(幼苗死亡株数/供试幼苗总株数)×100%。

1.2.3 生长指标测定 分别于胁迫前和胁迫结束时用钢卷尺(精度1 mm)测量供试各种类所有幼苗的株高(即地面到顶梢的垂直高度),并按照公式“苗高生长量=胁迫处理后幼苗的株高-胁迫处理前幼苗的株高”计算各处理组的苗高生长量。

胁迫结束后,各树种每处理随机抽取4株幼苗,依次用自来水和去离子水冲洗干净并吸干水分,置于75℃条件下烘干至恒质量,自然冷却后称取干质量。按照公式“相对干质量=(处理组植株的平均干质量/对照组植株的平均干质量)×100%”计算各处理组的全株相对干质量。

1.2.4 耐盐阈值确定 参照刘炳响等^[10]和莫惠栋^[11]的方法,根据叶片的盐害指数拟合Logistic方程“ $y=K/(1+ae^{-bx})$ ”;式中:y为叶片盐害指数,x为土壤

中混合盐质量浓度, K 及 a 和 b 为该方程的拟合参数。该方程拐点处的土壤混合盐质量浓度 [Logistic 曲线的拐点出现在 $x = (\ln a)/b$ 处] 即为盐害指数降到对照 50% 时的土壤混合盐质量浓度, 据此确定供试各种类的耐盐阈值 $T_{50}^{[12]}$ 。

1.3 数据分析

采用 EXCEL 2003 和 SPSS 16.0 统计分析软件进行数据统计和分析。采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较 ($P < 0.05$)。

2 结果和分析

2.1 混合盐胁迫条件下供试树种盐害指数和死亡率的分析

经不同水平混合盐胁迫处理后 16 种乔木和 8 种灌木的盐害指数和死亡率分别见表 1 和表 2。随土壤中混合盐质量浓度的提高, 16 种乔木和 8 种灌木的盐

害指数和死亡率总体呈升高的趋势。

由表 1 可见: 在混合盐质量浓度 $3.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中, 意杨的死亡率和盐害指数均高于 50%; 与对照组相比, 其生长情况较差, 叶片不同程度地出现变黄、卷曲、干枯、脱落等盐害症状, 甚至死亡。在混合盐质量浓度 $5.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中, 紫叶李、天竺桂和臭椿的死亡率均高于 50%, 盐害指数均在 87.5% 以上; 与对照相比, 受胁迫症状明显。在混合盐质量浓度 $8.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中, 紫穗槐、槐树、合欢、二球悬铃木、白蜡树、台湾含笑、栾树和女贞的死亡率均高于 50%, 盐害指数均高于 78.5%; 而银杏、刺槐、‘中山杉 406’ 和海棠的死亡率均低于 50%, 盐害指数分别为 82.14%、75.00%、42.86% 和 70.00%。总体上看, 在混合盐质量浓度 3.0 、 5.0 和 $8.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中, ‘中山杉 406’ 的死亡率均为 0.00%。结合盐害指数和死亡率可见, ‘中山杉 406’ 的受害症状最轻、耐盐性较强, 其次为海棠、刺槐、栾树和银杏。

表 1 经不同水平混合盐胁迫处理后 16 种乔木树种的盐害指数和死亡率

Table 1 Salt-injury index and mortality rate of sixteen arbor tree species after treated by mixed salt stress with different levels

处理组 ¹⁾ Treatment group ¹⁾	供试乔木树种的盐害指数/% ²⁾ Salt-injury index of arbor tree species tested ²⁾															
	Gb	Af	Sj	Aj	Rp	Pa	Pe	Fc	Th	Mc	Kp	Ms	Pc	Ll	Cj	Aa
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	46.43	46.43	67.86	25.00	33.33	39.29	92.86	14.29	0.00	32.14	28.57	4.17	25.00	7.14	75.00	71.43
2	64.00	61.00	71.00	58.00	66.67	85.71	100.00	53.57	4.17	42.86	60.71	16.67	87.50	46.43	92.86	89.29
3	82.14	82.14	89.29	100.00	75.00	96.43	100.00	82.14	42.86	78.57	85.71	70.00	100.00	92.86	100.00	100.00

处理组 ¹⁾ Treatment group ¹⁾	供试乔木树种的死亡率/% ²⁾ Mortality rate of arbor tree species tested ²⁾															
	Gb	Af	Sj	Aj	Rp	Pa	Pe	Fc	Th	Mc	Kp	Ms	Pc	Ll	Cj	Aa
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	14.29	42.86	28.57	0.00	16.67	0.00	71.43	0.00	0.00	28.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.57
2	14.29	42.86	42.86	0.00	16.67	42.86	100.00	14.29	0.00	28.57	0.00	0.00	83.33	14.29	71.43	57.14
3	28.57	57.14	71.43	100.00	33.33	85.71	100.00	71.43	0.00	57.14	57.14	33.33	100.00	85.71	100.00	100.00

¹⁾ CK: 混合盐质量浓度 $0.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Mixed salt with mass concentration of $0.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 1: 混合盐质量浓度 $3.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Mixed salt with mass concentration of $3.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 2: 混合盐质量浓度 $5.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Mixed salt with mass concentration of $5.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 3: 混合盐质量浓度 $8.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Mixed salt with mass concentration of $8.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

²⁾ Gb: 银杏 *Ginkgo biloba* Linn.; Af: 紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn.; Sj: 槐树 *Sophora japonica* Linn.; Aj: 合欢 *Albizia julibrissin* Durazz.; Rp: 刺槐 *Robinia pseudoacacia* Linn.; Pa: 二球悬铃木 *Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd.; Pe: 意杨 *Populus euramericana* 'I-214'; Fc: 白蜡树 *Fraxinus chinensis* Roxb.; Th: ‘中山杉 406’ *Taxodium hybrid* ‘Zhongshanshan 406’; Mc: 台湾含笑 *Michelia compressa* (Maxim.) Sarg.; Kp: 栾树 *Koelreuteria paniculata* Laxm.; Ms: 海棠 *Malus spectabilis* (Ait.) Borkh.; Pc: 紫叶李 *Prunus cerasifera* f. *atropurpurea* (Jacq.) Rehd.; Ll: 女贞 *Ligustrum lucidum* Ait.; Cj: 天竺桂 *Cinnamomum japonicum* Sieb.; Aa: 臭椿 *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle.

由表 2 可见: 在混合盐质量浓度 $3.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中南天竹的盐害指数为 71.43%, 在混合盐质量浓度大于 $5.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中其幼苗全部死亡。在混合盐质量浓度 $3.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中, 木槿、石楠和黄杨出现盐害症状; 在混合盐质量浓度 $8.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土

壤中, 木槿全部死亡, 石楠和黄杨的死亡率分别达 71.43% 和 28.57%。在混合盐质量浓度 $3.0 \sim 8.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中, 海滨木槿、海桐、日本珊瑚树和匍地柏的盐害指数和死亡率均较低, 其中海滨木槿、海桐和匍地柏的死亡率均为 0.00%。

表2 经不同水平混合盐胁迫处理后8种灌木树种的盐害指数和死亡率

Table 2 Salt-injury index and mortality rate of eight shrub tree species after treated by mixed salt stress with different levels

处理组 ¹⁾ Treatment group ¹⁾	供试灌木树种的盐害指数/% ²⁾ Salt-injury index of shrub tree species tested ²⁾								供试灌木树种的死亡率/% ²⁾ Mortality rate of shrub tree species tested ²⁾							
	Nd	Pt	Bs	Sp	Ps	Hh	Hs	Vo	Nd	Pt	Bs	Sp	Ps	Hh	Hs	Vo
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	71.43	0.00	10.71	0.00	17.86	0.00	39.29	0.00	42.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.29	0.00
2	100.00	14.29	35.71	17.85	53.57	3.57	60.71	20.83	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.29	16.67
3	100.00	10.71	53.57	14.29	92.86	7.14	100.00	37.50	100.00	0.00	28.57	0.00	71.43	0.00	100.00	16.67

¹⁾ CK: 混合盐质量浓度 0.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 0.0 g · kg⁻¹; 1: 混合盐质量浓度 3.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 3.0 g · kg⁻¹; 2: 混合盐质量浓度 5.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 5.0 g · kg⁻¹; 3: 混合盐质量浓度 8.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 8.0 g · kg⁻¹.

²⁾ Nd: 南天竹 *Nandina domestica* Thunb.; Pt: 海桐 *Pittosporum tobira* (Thunb.) Ait.; Bs: 黄杨 *Buxus sinica* (Rehd. et Wils.) Cheng; Sp: 匍地柏 *Sabina procumbens* (Endl.) Iwata et Kusaka; Ps: 石楠 *Photinia serrulata* Lindl.; Hh: 海滨木槿 *Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.; Hs: 木槿 *H. syriacus* Linn.; Vo: 日本珊瑚树 *Viburnum odoratissimum* var. *awabuki* (K. Koch) Zabel ex Rumphl. 南天竹、海桐、黄杨、匍地柏和石楠的盐害指数数据引自文献[4] Data of salt-injury index of *N. domestica*, *P. tobira*, *B. sinica*, *S. procumbens* and *P. serrulata* are cited from reference [4].

2.2 混合盐胁迫条件下供试树种苗高生长量的分析

经不同水平混合盐胁迫处理后 16 种乔木和 8 种灌木的苗高生长量分别见表 3 和表 4。

由表 3 可见:随混合盐质量浓度的提高,16 种乔木的苗高生长量均呈逐渐下降的趋势,但不同树种间苗高生长量的降幅有较大差异。在混合盐质量浓度 3.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,除白蜡树、台湾含笑、紫叶李和女贞外,其他树种的苗高生长量均显著低于对照 ($P < 0.05$)。在混合盐质量浓度 5.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,刺

槐、紫穗槐、白蜡树和海棠的苗高生长量分别较对照下降 68.50%、62.93%、57.17% 和 61.20%,而其他树种的苗高生长量较对照的降幅为 69.28% ~ 95.87%。在混合盐质量浓度 8.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,仅银杏、紫穗槐、刺槐、‘中山杉 406’、台湾含笑、栾树和海棠的存活数多于 3 株,其中紫穗槐、海棠和‘中山杉 406’的苗高生长量较对照的降幅分别为 65.74%、76.87% 和 84.03%,而其余 4 种乔木的苗高生长量较对照的降幅均在 90% 以上。

表3 经不同水平混合盐胁迫处理后16种乔木树种的苗高生长量($\bar{X} \pm SD$)Table 3 Height increment of sixteen arbor tree species after treated by mixed salt stress with different levels ($\bar{X} \pm SD$)

处理组 ¹⁾ Treatment group ¹⁾	供试乔木树种的苗高生长量/cm ²⁾ Height increment of arbor tree species tested ²⁾							
	Gb	Af	Sj	Aj	Rp	Pa	Pe	Fc
CK	4.33±0.58a	47.67±1.53a	17.33±6.43a	6.33±4.16a	18.00±6.08a	9.00±2.65a	19.67±2.89	4.67±1.15a
1	2.33±0.58b	25.00±8.54b	4.67±3.79b	2.00±1.00b	7.67±2.52b	4.33±2.52b	-	3.00±1.73a
2	1.33±0.58bc	17.67±1.53b	2.33±1.15b	0.33±0.58b	5.67±4.04b	2.33±2.31b	-	2.00±1.73a
3	0.33±0.58c	16.33±2.08b	-	-	0.33±0.58b	-	-	-

处理组 ¹⁾ Treatment group ¹⁾	供试乔木树种的苗高生长量/cm ²⁾ Height increment of arbor tree species tested ²⁾							
	Th	Mc	Kp	Ms	Pc	Ll	Cj	Aa
CK	8.33±4.93a	2.33±1.15a	4.67±2.08a	44.67±4.93a	23.33±8.08a	17.67±7.37a	19.00±1.73a	8.00±1.00a
1	2.67±1.53b	1.00±1.00ab	2.00±1.00b	23.33±5.69b	10.67±6.35a	7.00±2.65ab	2.33±0.58b	2.00±1.00b
2	2.00±1.00b	0.33±0.58b	0.67±1.15b	17.33±3.06bc	-	2.00±2.00b	-	0.33±0.58b
3	1.33±0.58b	0.00±0.00b	0.33±0.58b	10.33±4.93c	-	-	-	-

¹⁾ CK: 混合盐质量浓度 0.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 0.0 g · kg⁻¹; 1: 混合盐质量浓度 3.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 3.0 g · kg⁻¹; 2: 混合盐质量浓度 5.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 5.0 g · kg⁻¹; 3: 混合盐质量浓度 8.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 8.0 g · kg⁻¹.

²⁾ Gb: 银杏 *Ginkgo biloba* Linn.; Af: 紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn.; Sj: 槐树 *Sophora japonica* Linn.; Aj: 合欢 *Albizia julibrissin* Durazz.; Rp: 刺槐 *Robinia pseudoacacia* Linn.; Pa: 二球悬铃木 *Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd.; Pe: 意杨 *Populus euramericana* ‘I-214’; Fc: 白蜡树 *Fraxinus chinensis* Roxb.; Th: ‘中山杉 406’ *Taxodium hybrid* ‘Zhongshanshan 406’; Mc: 台湾含笑 *Michelia compressa* (Maxim.) Sarg.; Kp: 栾树 *Koeleruteria paniculata* Laxm.; Ms: 海棠 *Malus spectabilis* (Ait.) Borkh.; Pc: 紫叶李 *Prunus cerasifera* f. *atropurpurea* (Jacq.) Rehd.; Ll: 女贞 *Ligustrum lucidum* Ait.; Cj: 天竺桂 *Cinnamomum japonicum* Sieb.; Aa: 臭椿 *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle. 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$). -: 幼苗全部死亡或存活数少于 3 株,无法进行苗高生长量的统计分析 Seedlings all die or survival number of seedlings is less than three, so height increment cannot be statistically analyzed.

表4 经不同水平混合盐胁迫处理后8种灌木树种的苗高生长量($\bar{X}\pm SD$)¹⁾
Table 4 Height increment of eight shrub tree species after treated by mixed salt stress with different levels ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理组 ¹⁾ Treatment group ¹⁾	供试灌木树种的苗高生长量/cm ²⁾ Height increment of shrub tree species tested ²⁾							
	Nd	Pt	Bs	Sp	Ps	Hh	Hs	Vo
CK	7.67±1.51a	6.67±2.08ab	4.67±1.15a	9.00±1.00a	11.00±2.65a	18.33±3.51a	32.00±10.15a	3.67±0.58a
1	3.33±1.53b	11.00±5.57a	2.00±1.00b	8.00±1.00a	8.33±4.93a	17.00±2.00a	32.33±4.04a	2.33±0.58b
2	-	4.33±2.52ab	1.33±0.58b	6.33±2.52a	1.33±0.58b	13.67±5.03a	12.67±2.08b	1.33±0.58bc
3	-	2.00±1.00b	0.33±0.58b	5.67±1.53a	-	13.67±4.16a	-	0.67±0.58c

¹⁾ CK: 混合盐质量浓度 0.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 0.0 g · kg⁻¹; 1: 混合盐质量浓度 3.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 3.0 g · kg⁻¹; 2: 混合盐质量浓度 5.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 5.0 g · kg⁻¹; 3: 混合盐质量浓度 8.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 8.0 g · kg⁻¹.

²⁾ Nd: 南天竹 *Nandina domestica* Thunb.; Pt: 海桐 *Pittosporum tobira* (Thunb.) Ait.; Bs: 黄杨 *Buxus sinica* (Rehd. et Wils.) Cheng; Sp: 匍地柏 *Sabina procumbens* (Endl.) Iwata et Kusaka; Ps: 石楠 *Photinia serrulata* Lindl.; Hh: 海滨木槿 *Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.; Hs: 木槿 *H. syriacus* Linn.; Vo: 日本珊瑚树 *Viburnum odoratissimum* var. *awabuki* (K. Koch) Zabel ex Rumphl. 同列不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$). -: 幼苗全部死亡或存活数少于3株,无法进行苗高生长量的统计分析 Seedlings all die or survival number of seedlings is less than three, so height increment cannot be statistically analyzed.

由表4可见,随混合盐质量浓度的提高,8种灌木的苗高生长量基本上呈逐渐下降的趋势。在混合盐质量浓度 3.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,南天竹、日本珊瑚树和黄杨的苗高生长量均较对照显著下降 ($P<0.05$),而海桐的苗高生长量则显著高于对照,其他树种的苗高生长量均与对照无显著差异。在混合盐质量浓度 5.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,海桐、匍地柏和海滨木槿的苗高生长量均低于对照,但与对照间的差异不显著,黄杨、石楠、木槿和日本珊瑚树的苗高生长量均显著低于对照,南天竹植株存活数在3株以下,无法进行统计分析。在混合盐质量浓度 8.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,南天竹、石楠和木槿的植株存活数均少于3株,海桐、匍地柏和海滨木槿的苗高生长量均与对照无显著差异,仅黄杨和日本珊瑚树的苗高生长量显著低于对照。

2.3 混合盐胁迫条件下供试树种相对干质量的分析
经不同水平混合盐胁迫处理后16种乔木和8种灌木的相对干质量分别见表5和表6。

由表5可见:随混合盐质量浓度的提高,16种乔木的相对干质量均呈逐渐下降的趋势。在混合盐质量浓度 3.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,天竺桂、白蜡树和二球悬铃木的相对干质量较对照降低了近50%,下降幅度远高于其他树种,表明这3种乔木的生物量积累易受盐胁迫抑制。在混合盐质量浓度 5.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,紫穗槐、白蜡树、女贞和栎树的相对干质量明显低于对照,而海棠、‘中山杉406’和银杏的相对干质量均在73.48%以上,较对照的降幅较小。在混合盐质量浓度 8.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,仅银杏、‘中山杉406’、台湾含笑、栎树和海棠的存活数大于或等于3株,其

表5 经不同水平混合盐胁迫处理后16种乔木树种的相对干质量
Table 5 Relative dry weight of sixteen arbor tree species after treated by mixed salt stress with different levels

处理组 ¹⁾ Treatment group ¹⁾	供试乔木树种的相对干质量/% ²⁾ Relative dry weight of arbor tree species tested ²⁾															
	Gb	Af	Sj	Aj	Rp	Pa	Pe	Fc	Th	Mc	Kp	Ms	Pc	Ll	Cj	Aa
CK	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1	94.28	60.90	89.54	96.63	67.60	57.28	80.57	54.09	83.61	59.61	62.79	101.59	82.94	62.87	53.17	78.42
2	77.81	32.64	57.11	59.42	50.12	-	53.72	42.35	73.48	52.92	49.87	78.63	-	35.16	-	-
3	64.63	-	-	-	-	-	-	-	70.37	37.06	28.33	43.11	-	-	-	-

¹⁾ CK: 混合盐质量浓度 0.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 0.0 g · kg⁻¹; 1: 混合盐质量浓度 3.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 3.0 g · kg⁻¹; 2: 混合盐质量浓度 5.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 5.0 g · kg⁻¹; 3: 混合盐质量浓度 8.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 8.0 g · kg⁻¹.

²⁾ Gb: 银杏 *Ginkgo biloba* Linn.; Af: 紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn.; Sj: 槐树 *Sophora japonica* Linn.; Aj: 合欢 *Albizia julibrissin* Durazz.; Rp: 刺楸 *Robinia pseudoacacia* Linn.; Pa: 二球悬铃木 *Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd.; Pe: 意杨 *Populus euramericana* ‘1-214’; Fc: 白蜡树 *Fraxinus chinensis* Roxb.; Th: ‘中山杉406’ *Taxodium hybrid* ‘Zhongshanshan 406’; Mc: 台湾含笑 *Michelia compressa* (Maxim.) Sarg.; Kp: 栎树 *Koelreuteria paniculata* Laxm.; Ms: 海棠 *Malus spectabilis* (Ait.) Borkh.; Pc: 紫叶李 *Prunus cerasifera* f. *atropurpurea* (Jacq.) Rehd.; Ll: 女贞 *Ligustrum lucidum* Ait.; Cj: 天竺桂 *Cinnamomum japonicum* Sieb.; Aa: 臭椿 *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle. -: 幼苗全部死亡或存活数少于3株,无法进行相对干质量的统计分析 Seedlings all die or survival number of seedlings is less than three, so relative dry weight cannot be statistically analyzed.

表6 经不同水平混合盐胁迫处理后8种灌木树种的相对干质量

Table 6 Relative dry weight of eight shrub tree species after treated by mixed salt stress with different levels

处理组 ¹⁾ Treatment group ¹⁾	供试灌木树种的相对干质量/% ²⁾ Relative dry weight of shrub tree species tested ²⁾							
	Nd	Pt	Bs	Sp	Ps	Hh	Hs	Vo
CK	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1	60.56	126.66	114.24	96.65	76.60	126.66	57.33	100.55
2	-	112.49	115.52	95.21	66.74	126.17	46.43	70.53
3	-	66.13	74.63	96.44	-	113.88	-	51.36

¹⁾ CK: 混合盐质量浓度 0.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 0.0 g · kg⁻¹; 1: 混合盐质量浓度 3.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 3.0 g · kg⁻¹; 2: 混合盐质量浓度 5.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 5.0 g · kg⁻¹; 3: 混合盐质量浓度 8.0 g · kg⁻¹ Mixed salt with mass concentration of 8.0 g · kg⁻¹.

²⁾ Nd: 南天竹 *Nandina domestica* Thunb.; Pt: 海桐 *Pittosporum tobira* (Thunb.) Ait.; Bs: 黄杨 *Buxus sinica* (Rehd. et Wils.) Cheng; Sp: 匍地柏 *Sabina procumbens* (Endl.) Iwata et Kusaka; Ps: 石楠 *Photinia serrulata* Lindl.; Hh: 海滨木槿 *Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.; Hs: 木槿 *H. syriacus* Linn.; Vo: 日本珊瑚树 *Viburnum odoratissimum* var. *awabuki* (K. Koch) Zabel ex Ruppl. -; 幼苗全部死亡或存活数少于3株,无法进行相对干质量的统计分析 Seedlings all die or survival number of seedlings is less than three, so relative dry weight cannot be statistically analyzed. 南天竹、海桐、黄杨、匍地柏和石楠的相对干质量数据引自文献[4] Data of relative dry weight of *N. domestica*, *P. tobira*, *B. sinica*, *S. procumbens* and *P. serrulata* are cited from reference [4].

中栎树、台湾含笑和海棠的相对干质量较低,分别为 28.33%、37.06% 和 43.11%; 而银杏和‘中山杉 406’的相对干质量均较高,分别为 64.63% 和 70.37%。

由表 6 可以看出:随混合盐质量浓度的提高,8 种灌木的相对干质量总体呈逐渐下降的趋势。在混合盐质量浓度 3.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,南天竹、石楠和木槿的相对干质量较对对照明显下降,分别为 60.56%、57.33% 和 76.60%,而其他 5 种灌木的相对干质量则较对照小幅下降或有所升高,表明南天竹、木槿和石楠的生物量积累易受到盐胁迫的抑制。海滨木槿、海桐和日本珊瑚树的相对干质量在混合盐质量浓度

3.0 g · kg⁻¹ 的土壤中最,而黄杨的相对干质量在混合盐质量浓度 5.0 g · kg⁻¹ 的土壤中最。在混合盐质量浓度 8.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,海滨木槿的相对干质量仍高于对照,表现出极强的耐盐性。在混合盐质量浓度 3.0 ~ 8.0 g · kg⁻¹ 的土壤中,匍地柏的相对干质量均略低于对照,且变化幅度较小。

2.4 混合盐胁迫条件下供试树种 Logistic 方程和耐盐阈值的分析

经不同水平混合盐胁迫处理后 16 种乔木和 8 种灌木的 Logistic 方程和耐盐阈值 (T_{50}) 分别见表 7 和表 8。结果显示:除台湾含笑和木槿外,其他 15 种乔

表7 混合盐胁迫条件下16种乔木的 Logistic 方程和耐盐阈值 (T_{50})Table 7 Logistic equation and salt-tolerance threshold (T_{50}) of sixteen arbor tree species under condition of mixed salt stress

乔木种类 Arbor species	Logistic 方程 Logistic equation	拟合度 ¹⁾ Model-fitting degree ¹⁾	$T_{50}/g \cdot kg^{-1}$
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	$y = 72.847 / (1 + 4020.449e^{-2.661x})$	0.978*	3.12
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	$y = 71.334 / (1 + 3980.827e^{-2.951x})$	0.969*	2.81
槐树 <i>Sophora japonica</i>	$y = 80.292 / (1 + 2875.221e^{-2.950x})$	0.968*	2.70
合欢 <i>Albizia julibrissin</i>	$y = 101.916 / (1 + 3167.518e^{-3.321x})$	0.978*	2.42
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	$y = 75.228 / (1 + 1670.017e^{-2.455x})$	0.966*	3.02
二球悬铃木 <i>Platanus × acerifolia</i>	$y = 94.640 / (1 + 1975.915e^{-6.905x})$	0.973*	1.10
意杨 <i>Populus euramericana</i> ‘I-214’	$y = 97.778 / (1 + 246.147e^{-4.432x})$	0.998**	0.81
白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i>	$y = 82.909 / (1 + 583.624e^{-1.904x})$	0.996**	3.04
中山杉 406 <i>Taxodium hybrid</i> ‘Zhongshanshan 406’	$y = 44.672 / (1 + 2072.671e^{-1.802x})$	0.991**	4.24
台湾含笑 <i>Michelia compressa</i>	$y = 81.074 / (1 + 306.451e^{-1.709x})$	0.906	3.34
栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	$y = 86.181 / (1 + 473.584e^{-1.853x})$	0.965*	3.33
海棠 <i>Malus spectabilis</i>	$y = 82.855 / (1 + 650.384e^{-1.736x})$	0.999**	3.73
紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i> f. <i>atropurpurea</i>	$y = 100.074 / (1 + 4794.006e^{-3.384x})$	0.991**	2.50
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	$y = 94.725 / (1 + 834.380e^{-1.738x})$	0.999**	3.87
天竺桂 <i>Cinnamomum japonicum</i>	$y = 101.175 / (1 + 460.995e^{-3.834x})$	0.979*	1.59
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	$y = 103.267 / (1 + 566.712e^{-5.427x})$	0.992**	1.16

¹⁾ * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

表8 混合盐胁迫条件下8种灌木的Logistic方程和耐盐阈值(T_{50})Table 8 Logistic equation and salt-tolerance threshold (T_{50}) of eight shrub tree species under condition of mixed salt stress

灌木种类 Shrub species	Logistic 方程 Logistic equation	拟合度 ¹⁾ Model-fitting degree ¹⁾	$T_{50}/g \cdot kg^{-1}$
南天竹 <i>Nandina domestica</i>	$y=90.743/(1+424.684e^{-3.472x})$	0.962*	1.74
海桐 <i>Pittosporum tobira</i>	$y=14.309/(1+822.538e^{-1.541x})$	0.993**	11.46
黄杨 <i>Buxus sinica</i>	$y=54.121/(1+391.601e^{-1.339x})$	0.995**	6.03
匍地柏 <i>Sabina procumbens</i>	$y=17.872/(1+1176.686e^{-1.665x})$	0.993**	9.63
石楠 <i>Photinia serrulata</i>	$y=94.534/(1+556.899e^{-1.329x})$	0.991**	4.75
海滨木槿 <i>Hibiscus hamabo</i>	$y=7.280/(1+250.601e^{-1.090x})$	0.994**	11.77
木槿 <i>Hibiscus syriacus</i>	$y=101.645/(1+408.479e^{-1.323x})$	0.921	2.54
日本珊瑚树 <i>Viburnum odoratissimum</i> var. <i>awabuki</i>	$y=37.585/(1+2351.193e^{-1.594x})$	0.998**	4.87

¹⁾ * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

木和7种灌木的Logistic方程的拟合度均达到显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)水平。供试16种乔木和8种灌木的 T_{50} 值变化范围分别为0.81~4.24和1.74~11.77 $g \cdot kg^{-1}$;在16种乔木中,‘中山杉406’、女贞、海棠、台湾含笑、栾树、银杏、白蜡树和刺槐的 T_{50} 值较高,分别为4.24、3.87、3.73、3.34、3.33、3.12、3.04和3.02 $g \cdot kg^{-1}$;在8种灌木中,除南天竹和木槿的 T_{50} 值较低外,海滨木槿、海桐、匍地柏、黄杨、日本珊瑚树和石楠的 T_{50} 值均较高,分别为11.77、11.46、9.63、6.03、4.87和4.75 $g \cdot kg^{-1}$ 。

3 讨 论

盐胁迫可以抑制植物的营养生长和生殖生长,改变植物的形态和解剖学结构,造成植物损伤甚至导致非盐生植物的死亡。受盐害后被子植物主要出现叶片灼烧坏死或呈斑驳状、叶片脱落以及枝条枯萎等受害症状^[13],而盐胁迫下多年生植物的存活率和盐害症状是衡量其耐盐性的可靠指标之一^[14]。杨升等^[7]根据供试树种的盐害症状表现,初步评定卫矛的耐盐能力较强、沙枣(*Elaeagnus angustifolia* Linn.)的耐盐能力次之、美国白蜡的耐盐能力较弱。张华新等^[15]根据苗木存活和生长情况验证了11个树种的耐盐性。本研究中,随着土壤中混合盐质量浓度的提高,供试的16种乔木和8种灌木的盐害症状均逐渐加重,各种类的叶片相继出现不同程度的卷曲、枯黄、萎蔫和脱落等症状。结合盐害指数和死亡率可以看出:在供试的16种乔木中,‘中山杉406’的胁迫症状最轻、耐盐性较强,其次为海棠、刺槐、栾树和银杏,也具有一定的耐盐性。经质量浓度3.0~8.0 $g \cdot kg^{-1}$ 混合盐胁迫处理后,在供试的8种灌木中,海滨木槿、海桐

和匍地柏的盐害指数和死亡率增幅较小,表现出较强的耐盐性。

植物的高生长和生物量累积也是表征其受盐害程度的常用生长指标^[16],其中,生物量是植物对盐胁迫反应的综合体现,是植物耐盐性的直接指标^[17-18]。随着土壤中混合盐质量浓度的提高,供试的16种乔木和8种灌木的苗高生长量总体上呈逐渐下降的趋势,但经质量浓度0.0、3.0和5.0 $g \cdot kg^{-1}$ 混合盐胁迫处理后白蜡树和海桐的苗高生长量差异不显著,而经质量浓度0.0、3.0、5.0和8.0 $g \cdot kg^{-1}$ 混合盐胁迫处理后海滨木槿和匍地柏的苗高生长量均无显著差异。总体上看,在不同质量浓度混合盐胁迫条件下供试16种乔木和8种灌木的相对干质量均减少,与前人^[17-20]的研究结论一致,但个别树种的相对干质量并未发生明显变化。在混合盐质量浓度较低的胁迫条件下,匍地柏的相对干质量与对照差异较小,而海滨木槿、海桐、黄杨和日本珊瑚树的相对干质量甚至不同程度高于对照;而在混合盐质量浓度8 $g \cdot kg^{-1}$ 的胁迫条件下,匍地柏的相对干质量仍未有明显变化,而海滨木槿的相对干质量仍高于对照。这可能是由于低水平的混合盐胁迫能促进喜盐植物的生长,当盐分浓度超过其最适浓度时,其生长随混合盐质量浓度的提高而降低^[7]。由Logistic方程拟合及耐盐阈值(T_{50})的分析结果可见:在供试的所有乔木和灌木树种中,海棠、女贞和‘中山杉406’3种乔木以及海滨木槿、海桐、黄杨、匍地柏、日本珊瑚树和石楠6种灌木均具有较高的 T_{50} 值,其中,海滨木槿和海桐的 T_{50} 值较高,均高于11.0 $g \cdot kg^{-1}$,这与供试树种在不同水平混合盐胁迫条件下表现出的受害症状和生长状况相一致。

综合研究结果显示:对低水平混合盐胁迫具有耐性的树种有刺槐、银杏、台湾含笑、白蜡树、海棠、女

贞、‘中山杉406’、石楠和日本珊瑚树,对中等水平混合盐胁迫具有耐性的树种有黄杨和匍地柏,而海滨木槿和海桐对高水平混合盐胁迫具有耐性,这一结果与杜丽娟^[21]对江苏临海高等级公路沿线绿化植物的苗木存活率和生长情况的调查结果一致。海滨木槿原产亚洲东部沿海地区,具有典型的盐生植物特征,能耐短时间海水浸泡^[22-23];采用海滨木槿嫁接木槿可以提高木槿的耐盐能力,能扩大木槿属(*Hibiscus* Linn.)植物的适栽区域^[24-25]。可见,海滨木槿在沿海滩涂绿化过程中应用价值较高,可进一步推广种植。

旱生植被的演替过程主要包括地衣群落、苔藓群落、旱生草本群落、灌木群落、乔木群落等阶段。在植物群落演替过程中,先锋种属于r对策者,其适应能力强且能迅速占据裸地,生长速率快但生物量的积累速率不高;而顶极种是典型的K对策者,对外界扰动或者贫瘠环境的适应能力差,生长缓慢但生物量可大量积累^[26]。本研究中,灌木的耐盐能力总体上强于乔木,与上述结论吻合。

通过上述的研究和分析,初步确定了各树种的耐盐性,可为江苏沿海地区造林绿化过程中植物的选择和配置模式的构建提供参考。但在实际工作中,除选择合适的耐盐植物外,做到适地适树,并制定与沿海气候、土壤条件相适应的绿化造林技术,也是保障和提高沿海地区生态建设水平的重要技术环节。

参考文献:

- [1] 魏秀君,殷云龙,芦治国,等. NaCl胁迫对5种绿化植物幼苗生长和生理指标的影响及耐盐性综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(2): 35-42.
- [2] 杨秀艳,张华新,张丽,等. NaCl胁迫对唐古特白刺幼苗生长及离子吸收、运输与分配的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(9): 165-171.
- [3] 胡晓立,李彦慧,陈东亮,等. 3种李属彩叶植物对NaCl胁迫的生理响应[J]. 西北植物学报, 2010, 30(2): 370-376.
- [4] 杜丽娟,华建峰,周冬琴,等. 混合盐胁迫对几种绿化常用灌木生长及相关生理指标的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(2): 197-202.
- [5] 张玲菊,黄胜利,周纪明,等. 常见绿化造林树种盐胁迫下形态变化及耐盐树种筛选[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(5): 833-838.
- [6] 陈坚,李妮亚,刘强,等. NaCl处理下两种引进红树的光合及抗氧化防御能力[J]. 植物生态学报, 2013, 37(5): 443-453.
- [7] 杨升,刘正祥,张华新,等. 3个树种苗期耐盐性综合评价及指标筛选[J]. 林业科学, 2013, 49(1): 91-98.
- [8] 谢小丁,邵秋玲,李扬. 九种耐盐植物在滨海盐碱地的耐盐能力试验[J]. 湖北农业科学, 2007, 46(4): 559-561.
- [9] 卢树昌,苏卫国. 重盐碱区耐盐植物筛选试验研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(增刊): 19-24.
- [10] 刘炳响,王志刚,梁海永,等. 盐胁迫对不同生境白榆生理特性与耐盐性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1481-1489.
- [11] 莫惠栋. Logistic方程及其应用[J]. 江苏农学院学报, 1983, 4(2): 53-57.
- [12] 刘一明,程凤枝,王齐,等. 四种暖季型草坪植物的盐胁迫反应及其耐盐阈值[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 192-199.
- [13] KOZLOWSKI T T. Responses of woody plants to flooding and salinity[J]. Tree Physiology, 1997, 1: 1-29.
- [14] MUNNS R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. Plant, Cell and Environment, 2002, 25: 239-250.
- [15] 张华新,宋丹,刘正祥. 盐胁迫下11个树种生理特性及其耐盐性研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(2): 168-175.
- [16] ALI A, TUCHER T C, THOMPSON T L, et al. Effects of salinity and mixed ammonium and nitrate nutrition in the growth and nitrogen utilization of barley[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2001, 186: 223-228.
- [17] VICENTE O, BOSCAIU M, NARANJO M A, et al. Responses to salt stress in the halophyte *Plantago crassifolia* (Plantaginaceae)[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58: 463-481.
- [18] LEVITT J. Response of Plants to Environmental Stress[M]. New York: Academic Press, 1980: 365-434.
- [19] 曹帮华,郁万文,吴丽云,等. 盐胁迫对刺槐无性系生长和离子吸收、运输、分配的影响[J]. 山东农业大学学报:自然科学版, 2005, 36(3): 353-358.
- [20] 冯蕾,白志英,路丙社,等. 氯化钠胁迫对枳椇和皂荚生长、叶绿素荧光及活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2503-2508.
- [21] 杜丽娟. 江苏沿海常用绿化植物的耐盐性评价及耐盐生理研究[D]. 南京:江苏省·中国科学院植物研究所, 2013: 57-63.
- [22] 俞慈英,徐树华. 海滨木槿的驯化及开发利用前景[J]. 林业科学研究, 1999, 12(2): 210-213.
- [23] 李会欣,吴明,方炎明,等. NaCl胁迫对海滨木槿叶片生理特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(3): 55-61.
- [24] 芦治国,殷云龙,於朝广,等. NaCl胁迫条件下木槿嫁接苗和扦插苗及其砧木海滨木槿的生理差异[J]. 植物资源与环境学报, 2011, 20(4): 49-57.
- [25] 芦治国,殷云龙,於朝广. 以海滨木槿为砧木嫁接培育耐盐型木槿属苗木的方法:中国, 200910184249.1[P]. 2010-02-03.
- [26] 李俊清. 森林生态学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2010: 261.

(责任编辑:张明霞)