4 种典型滨海植物的耐盐能力

杜运领[1],陈玉珍[4,5],钱爱国[1],郦建锋[1],徐建强[1],傅菁菁[1],蔡鹭春[4,5],
孙元敏[2,3,4,5],刘 斌[4,5],张 飞[2,3,4,5],郑 滢[4,5],林 莉[4,5],
马 勇[2,3,4,5],汤坤贤[2,3,4,5]*,李开河[6]

(1.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122;
2.福建省海洋生态保护与修复重点实验室,福建 厦门 361005;
3.自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室,福建 厦门 361005;4.自然资源部第三海洋研究所,福建 厦门 361005;
5.自然资源部海峡西岸海岛海岸带生态系统野外观测研究站,福建 厦门 361005;
6.坡头区自然资源局,广东 湛江 524057)

摘要:滨海植物是海岸生态系统的重要组成部分,而绝大部分滨海植物的耐盐能力与生态适应机制尚不清楚,本研究选择马鞍藤(*Ipomoea pescaprae*)、小刀豆(*Canavalia cathartica*)、全缘冬青(*Ilex integra*)、大叶银边海桐(*Pittosporum pentandrum*)4 种滨海典型植物,通过对培养基质及植株叶片施加不同浓度的盐溶液,研究其根系和叶片的耐盐能力。主要结果如下:①根系胁迫中,盐度 10 导致大叶银边海桐、全缘冬青、小刀豆的老叶变黄或产生黄褐斑,盐度 20 和 30 促使植物叶片干枯、落叶,对叶片的损害从叶柄向叶脉延伸;盐度为 30 的叶片盐胁迫导致少量叶片从叶尖开始干枯;②小刀豆、马鞍藤、全缘冬青与大叶银边海桐分别可耐受盐度为 10、20、20、30 的短期(49 d)根系盐胁迫,藤本植物的耐盐能力为马鞍藤>小刀豆,灌木的耐盐能力为大叶银边海桐>全缘冬青;4 种植物均可耐受盐度 30 的叶片盐胁迫,耐盐能力为马鞍藤>全缘冬青>大叶银边海桐>小刀豆。结果表明,植物的生长状态值对植物耐盐能力的指示作用更为准确与直观;4 种植物均有较强的耐盐能力,均可以作为海岸带、海岛的植被修复品种。植被修复实践中应综合考虑修复位置的海岸高程和离海距离,海水与海浪的影响状况,确定适宜的的植物品种。

关键词:海洋生物学;植物生理;滨海植物;植被修复;根系盐胁迫;叶片盐胁迫
DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2022.01.003
中图分类号:P735 **文献标识码**:A **文章编号**:2095-4972(2022)01-0015-10

滨海植物是海岸生态系统的重要组成部分,是人工海岸生态化不可或缺的基础。海洋盐分是滨海植物生长的主要影响因子[1],主要表现在通过地下水入侵影响植物根系,涨潮或台风期间海水淹没影响植株,浪花飞溅影响近岸植物的茎叶,盐雾长期影响海岸带植物的叶片。盐胁迫对植物的形态结构和生理方面造成了一系列影响。在宏观方面,外部形态和生长状况是反映植物受盐害影响程度的最直观表现[2]。盐胁迫下,植物的株高、叶片数量、茎长及地上部分干物质重等均有所下降,地下部分含水量和幼苗根长下降幅度相对较小[3]。所有的高等植物均可通过渗透调节、增强抗氧化胁迫等生理调节方式减轻盐胁迫造成的伤害[4]。但不同的植物对盐胁迫的耐受机制存在差异。

目前对植物耐盐机制的研究已经比较深入,主要集中于经济作物[5-10]、园林植物[11-13]以及荒漠植物[14-15]。滨海地区植物资源丰富,对滨海植被耐盐机理的研究逐渐增多,叶维杨(2008)对厦门地区 10 种园林植物的耐盐性进行了研究,根据相对生长量、叶片中脯氨酸含量、叶片中丙二醛(MDA)含量得出

收稿日期:2020-09-30
基金项目:福建省科技计划资助项目(2017Y0059,2021Y0066);自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项基金资助项目(海三科 2019017,2020013);广东省自然资源厅海洋经济发展基金资助项目(2019011)
作者简介:杜运领(1981—),男,正高级工程师;E-mail: du_yl@ ecidi.com
* **通讯作者**:汤坤贤(1968—),男,博士,正高级工程师;E-mail: tangkx@ tio.org.cn

树种耐盐能力[16]。叶勇等(2004)在对 3 种泌盐红树植物的耐盐能力研究中发现,在盐度提高的情况下 3 种植物均具有泌盐量增加的效应,高盐度明显抑制非胎生种类老鼠簕(*Acanthus ilicfolius*)的萌根;25 以上的盐度可导致桐花树(*Aegiceras corniculatum*)和老鼠簕的萌苗率下降[17]。贺林等(2012)对滨海湿地植物番杏(*Tetragonia tetragonoides*)的耐盐能力进行了研究,通过生长及光合特性的研究发现番杏受抑制盐度为 600 mmol/L,是一种耐盐性高、具有食用价值的盐生植物,值得在滨海湿地生态修复工程重点推广[18]。此外除了对红树植物[19-21]以及碱蓬(*Suaeda glauca*)[22-23]等少数种类有较为系统的耐盐特性研究外,绝大部分滨海植物的耐盐能力与生态适应机制尚不清楚,许多优良的耐盐植物尚未得到充分利用。由于海岸的高程和离海距离不同,植物受盐胁迫影响的部位与程度不同,不同的海岸位置需要配置不同根系、叶片耐盐能力的植物。因此,确定不同植物的耐盐能力,并在不同滨海立地条件下选择适宜的植物具有重要的意义。

藤本植物马鞍藤(*Ipomoea pescaprae*)广布于热带亚热带沿海地区,可作为海滩固沙或覆盖植物;小刀豆(*Canavalia cathartica*)广布于热带亚洲,多生于海滨,攀援于石壁或灌木上。灌木全缘冬青(*Ilex integra*)多生于海滨山地;大叶银边海桐(*Pittosporum pentandrum*)生性强健,耐盐碱,且极富观赏价值,适合应用在滨海绿化。这 4 种植物具有较好的典型性与应用前景,本研究通过对它们的根系及叶片进行盐胁迫实验研究,了解其根系与叶片的耐盐能力,以期为海岛海岸带植被修复,生态海堤构建,人工海岸生态化改造等植被配置提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选用植物品种:藤本植物马鞍藤、小刀豆;灌木全缘冬青、大叶银边海桐。

马鞍藤、小刀豆在自然资源部第三海洋研究所漳州古雷基地扦插培育;全缘冬青购自浙江舟山,大叶银边海桐来自厦门植物园。

1.2 实验设计与样品采集

2018 年 7 月将 2 年生大叶银边海桐、马鞍藤、全缘冬青移栽至古雷基地科研温室的盆钵中(盆内径 35 cm,高 21 cm),盆栽的基质按照河沙∶黄心土为 1∶1 的比例配制,缓苗 3 个月后开始盐胁迫实验。每种植物各选取 6 株正常浇灌淡水,作为空白对照组,实验设置如表 1。于 2018 年 10 月—12 月对植物进行胁迫实验。科研温室内光照强度约为外部的 2/3,白天温度比外部环境略高 1~3℃,湿度差异不大。

表 1 实验设置

Tab. 1 Experimental design setup

处理方式	盐度	重复数量/个			
		马鞍藤	小刀豆	全缘冬青	大叶银边海桐
CK(空白对照)	0	6	6	6	6
根胁迫处理	10	6	6	6	6
	20	6	6	6	6
	30	6	6	6	6
叶胁迫处理	30	6	6	6	6

根系盐胁迫处理:设置盐度为 10 (R-10)、20 (R-20)、30 (R-30)的根系盐胁迫组,每组分别浇灌盐度为 10、20、30 的盐水,每种处理各 6 株,每盆 1 株。实验期间,每周定期浇灌 1.0 L 相应盐度的溶液,保持土壤湿润。胁迫实验 49 d 后,停止浇灌盐溶液,采用淡水进行浇灌。

叶片盐胁迫处理:设置盐度 30 的叶片盐胁迫组(L-30),每种处理各 6 株。实验期间,叶片盐胁迫组每周用喷壶喷洒盐度 30 的盐水 2 次,每次喷洒至叶片完全潮湿,有水滴落为止(约 0.5 L),胁迫持续 49 d。每株植物根部土壤每周浇灌淡水 1.0 L,保持土壤湿润。

盐水:采用海水晶加自来水配置,用盐度计调节水中盐度至设定的盐度值。

指标观测:于每周浇水前观察植株叶片和芽的生长状态,观察时,与对照组相比,每处理 3 个重复

中有 3 个以上出现相同盐害症状,即记录该症状及其发生时间。同时选取 3 株分别采集叶片样本用于相关指标的测定。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　植株生长状态评价方法　盐胁迫会明显改变植物的生长状态,因此,整个实验期间,采用赋值法[24]对植株的生长状态赋予 0.0~5.0 之间的状态值进行统一的数值分析,具体赋值标准如表 2 所示。

表 2　植株生长状态赋值对照表

Tab. 2　Assignment comparison of plant growth status

植株成长状态	相应状态值
正常生长	5.0
极少叶微黄、叶黄	4.5
极少叶尖枯、叶干枯	4.0
少量叶黄、叶色淡、叶下垂	3.5
少量叶尖枯、叶干枯、叶色暗、叶卷曲	3.0
多数叶黄、叶色淡、叶下垂;枯后发新叶	2.5
多数叶尖枯、叶干枯下垂、叶色暗、叶卷曲	2.0
严重叶黄、叶色淡、叶下垂	1.5
严重叶尖枯、叶干枯、叶色暗、叶卷曲	1.0
几乎无绿叶	0.5
死亡	0.0

1.3.2　叶片水分指标测定　使用等效水分厚度(E_{TW}, g/m^2)表征叶片的水分状况。取一定面积的叶片(采用内径 7 mm 的打孔器对叶片进行打孔,每个处理各打孔取 30 片),称量鲜质量,将叶片放入烘箱内 105 ℃杀青 30 min,然后保持 65 ℃的温度烘干至恒量,称量干质量,按照下列公式计算样品叶片的 E_{TW}。

$$E_{TW} = (F_M - D_M)/L_A \quad (1)$$

式(1)中:L_A表示叶片面积(m^2),F_M表示叶片鲜重(g),D_M表示叶片干重(g)。

1.3.3　光合色素含量测定　光合色素含量测定采用 Amon 法,叶片组织破碎后采用 25 mL 无水乙醇避光浸提、过滤。用紫外可见分光光度计(UV-1800PC)测量 665、649 和 470 nm 波长下的吸光度(A_λ)值,根据如下公式计算 Chl a、Chl b 和碳的浓度值,最后得出 Chl a、Chl b 和碳的含量指标(mg/g)。

$$C_a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649} \quad (2)$$

$$C_b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665} \quad (3)$$

$$C_c = (1\,000A_{470} - 2.05C_a - 114.8C_b)/245 \quad (4)$$

式(2)、(3)中:A_{665}表示 665 nm 波长下的吸光度,A_{649}表示 649nm 波长下的吸光度,A_{470}表示 470 nm 波长下的吸光度,C_a表示 Chl a 的浓度(mg/L),C_b表示 Chl b 的浓度(mg/L),C_c表示碳的浓度(mg/L)

1.4　数据处理

数据采用 Excel 2010 进行前期统计与制图,并采用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)及 Pearson 相关性分析。

2　结果与分析

2.1　盐胁迫对植物生长状态的影响

根系盐胁迫下,马鞍藤叶片增厚变小,同时小刀豆与马鞍藤的盐害症状均表现为不同程度的叶卷曲,近根端叶片(主要为老叶)干枯后落叶,新叶变黄,叶色变淡;全缘冬青叶片首先出现黑色斑点,叶柄与叶脉变黑,然后逐渐扩散至全叶,直至叶片干枯。低浓度根系盐胁迫下大叶银边海桐无明显盐害症状;高浓度根系盐胁迫下大叶银边海桐叶色稍微变淡,大量落叶,但落叶完整,除部分落叶叶柄下端焦枯外,其他落叶几乎无其他明显损伤。叶片盐胁迫下,小刀豆的盐害症状表现为叶片有焦斑,随着胁迫时间的延长逐渐出现叶色变淡,大量枯叶;全缘冬青叶片颜色深浅不一,色素分布不均,部分老叶变成褐色;大叶银边海桐近根端叶色变淡,有少量落叶,新叶小,叶缘出现焦斑,部分芯芽灼伤;马鞍藤叶卷曲,叶小,叶片增厚。总体上,低浓度的根系盐胁迫导致大叶银边海桐、全缘冬青、小刀豆的老叶变黄或产生黄褐斑,高浓度的根系盐胁迫促使植物叶片干枯、落叶,对叶片的损害主要从叶柄向叶脉延伸。高浓度叶片盐胁迫下 4 种植物均有少量叶片尖端干枯,对叶片的损害从叶尖开始。随着胁迫浓度的增高与胁迫时间的延长,盐害症状愈加明显。

采用赋值法对植物的生长状态赋值并作图分析,如图 1 所示。方差分析显示,根系盐胁迫下,小刀豆、马鞍藤 R-30 组与 R-20 组生长状态值均分别于第 14 天与第 28 天起与对照组存在显著差异,R-10组生长状态在胁迫处理期间与对照组不存在显著差异;全缘冬青 R-30 组与 R-20 组与生长状态值分别于第 28 天与第 49 天起与对照组存在显著差异,R-10 组生长状态在胁迫期间与对照组不存在显著差异;大叶银边海桐 R-30 组生长状态值于第 42 天起与对照组存在显著差异;R-10 组与 R-20 组生长状态在胁迫期间与对照组均不存在显著差异。截至胁迫结束(第 49 天),全缘冬青与小刀豆 R-30 组成活率均为 50%,其余种类及胁迫组成活率均为

100%。正常浇水后,部分胁迫组生长状态得到改善。第 168 天,小刀豆与全缘冬青 R-10 组、R-20 组与 R-30 组存活率均为 0;大叶银边海桐 R-20 组与 R-30 组存活率均为 0,R-10 存活率 100%,但生长状态值与对照组有显著差异;马鞍藤 R-30 组存活率 0,R-20 与 R-10 组存活率均 100%,其中 R-20 组生长状态均与对照组有显著差异。叶片盐胁迫下, 4 种植物 L-30 组生长状态值截至胁迫结束(第 49 天)与对照组均不存在显著差异,生长状态值均大于 4.5,成活率均为 100%。停止喷洒盐水后,由于叶表仍附着盐分,持续对植株产生胁迫作用。第 168 天,4 种植物 L-30 组成活率仍为 100%,但小刀豆、全缘冬青和大叶银边海桐的生长状态均变差,与对照组存在显著差异。

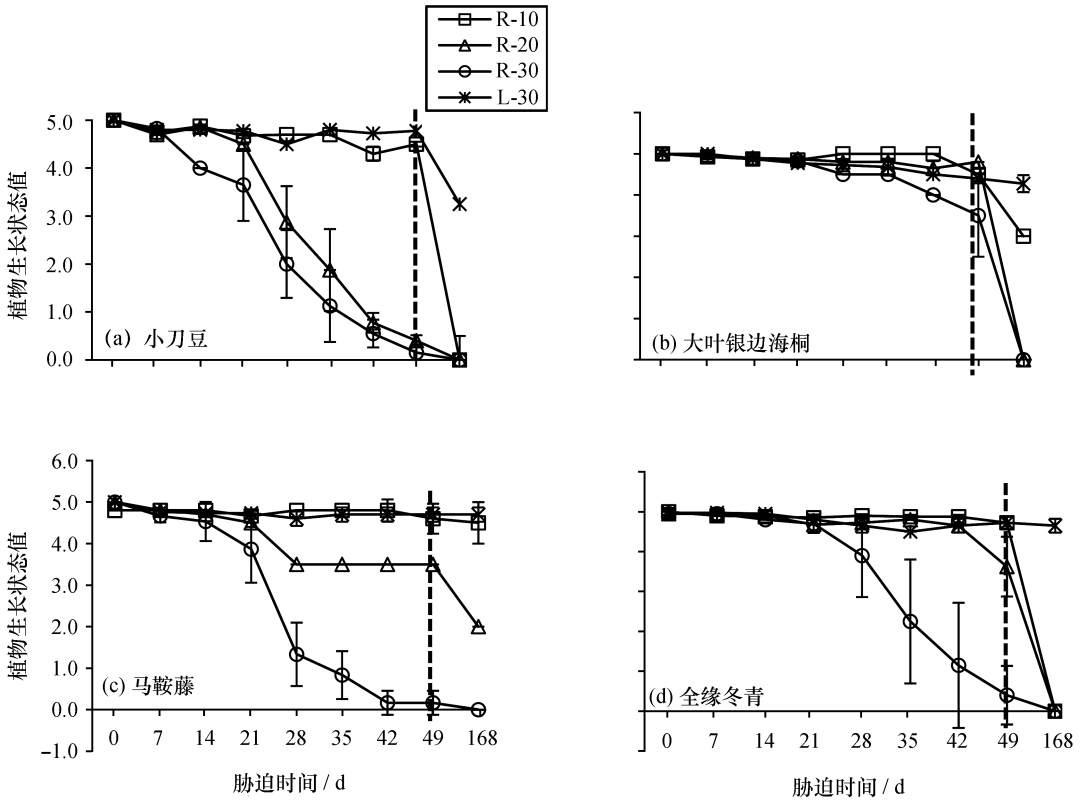

图 1 盐胁迫对植物生长状态的影响

Fig. 1 Effect of salt stress on the plant growth

根据实验结果,根系盐胁迫组,小刀豆、马鞍藤、全缘冬青与大叶银边海桐分别可耐受盐度为 10、20、20、30 的短期(49 d)根系盐胁迫。复水后(第 168 天),受土壤残留盐分的影响,马鞍藤具有更高的适应能力,R-10 组生长状态良好,R-20 组生长状态较胁迫结束时(第 49 天)略有下降,但成活率仍为 100%;大叶银边海桐仅 R-10 组存活,成活率 100%,但生长状态较对照组有较明显的下降。总体上,藤本组根系耐盐能力为马鞍藤>小刀豆,小乔木组根系耐盐能力为大叶银边海桐>全缘冬青。叶片盐胁迫组,4 种植物均可耐受盐度 30 的叶片盐胁迫,但根据生长状态判断,4 种植物的叶片耐盐能力为马鞍藤>全缘冬青>大叶银边海桐>小刀豆。

2.2 盐胁迫对植物叶片水分状况的影响

如图 2 所示,叶片盐胁迫导致小刀豆与马鞍藤叶片等效水分厚度(E_{WT})在整个胁迫周期中均大于胁迫前的状态,全缘冬青与大叶银边海桐叶片等效水分厚度(E_{WT})总体上略有增加,但增幅很小。根系盐胁迫下,低盐胁迫下(R-10),马鞍藤、全缘冬青与小刀豆的叶片等效水分厚度增加;高盐胁迫下(R-30),大叶银边海桐与小刀豆的叶片等效水分厚度降低。其中大叶银边海桐在所有浓度的根系盐胁迫下叶片等效水分厚度均降低。

方差分析显示,马鞍藤 L-30 组叶片水分状况于胁迫第 14 天起即显著增加;大叶银边海桐 R-20 胁迫组叶片水分状况在胁迫的第 7、14、21 天较胁迫前显著降低,而后又逐渐升高至与对照组无显著差异;

其余胁迫组在胁迫期间水分状况存在波动,但与胁迫前的水分状况差异不显著。

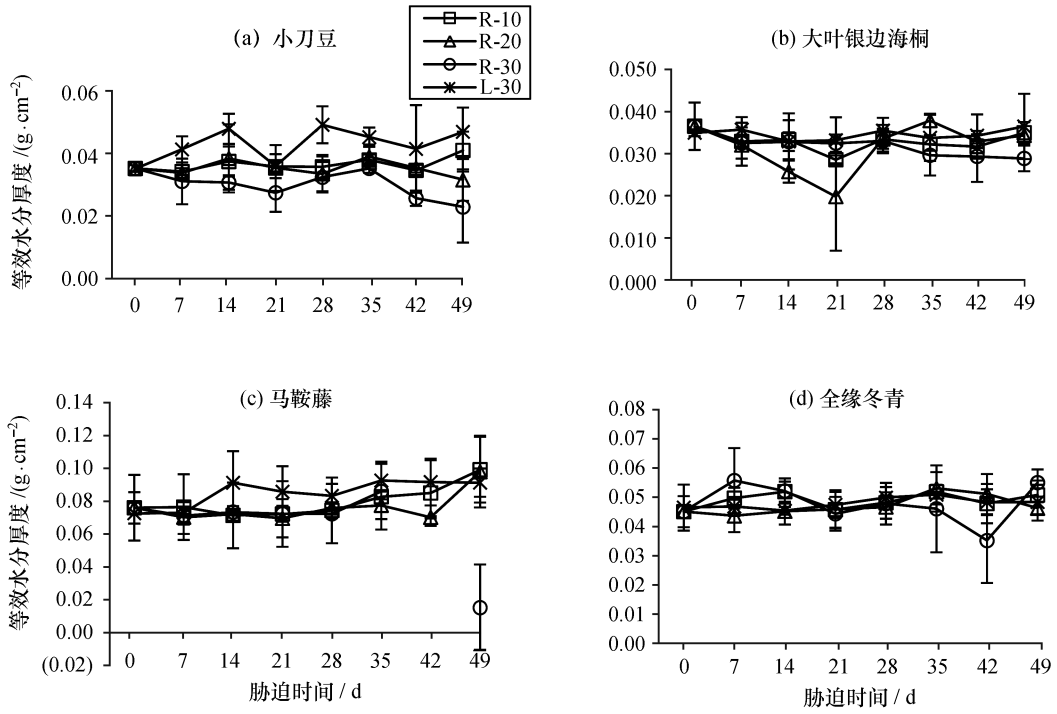

图 2　根系盐胁迫对植物等效水分厚度的影响

Fig. 2　Effect of root-salt stress on plant equivalent water thickness

2.3　盐胁迫对植物光合色素含量的影响

小刀豆 R-10 组叶绿素含量在第 35 天以前高于对照组,第 35—43 天与对照组差异不大,第 49 天则低于对照组;R-20 与 R-30 叶绿素含量在第 14 天前高于对照组,第 14 天之后低于对照组,后期 R-30 叶绿素含量降幅大于 R-20;R-10 组叶绿素含量在第 7 天略高于对照组,第 7 天之后均略低于对照组;L-30 组叶绿素含量在第 21 天后低于对照组(图 3)。叶片盐胁迫下,马鞍藤的叶绿素含量降低;根系盐胁迫下,马鞍藤的叶绿素含量升高随着盐胁迫浓度的升高而减低,与对照组相比,低浓度根系盐胁迫下叶绿素含量升高,高浓度根系盐胁迫下叶绿素含量降低。其中,马鞍藤 R-10 组与 R-20 组在胁迫期间叶绿素含量均有所增加,R-10 组增幅大于 R-20 组;R-30 胁迫处理组在第 7 天时高于对照组,第 14—21 天叶绿素含量略低于对照组,而后又上升至对照组的叶绿素含量水平。全缘冬青 R-30 胁迫组叶绿素含量增加,可能由于短期高浓度盐胁迫下,植株轻度脱水使叶片含水量降低但并未对植株生长造成显著影响而使叶绿素含量相对上升;R-20 与对照组差异不大,R-10 前期与对照组差异不大,后期(第 35 天以后)低于对照组;L-30 前期(第 28 天以前)高于对照组,后期(第 28 天以后)低于对照组。根系盐胁迫与叶片盐胁迫对大叶银边海桐的叶绿素含量影响总体表现为促进作用,但由于大叶银边海桐叶子边缘为白色,叶绿体分布不均匀,随机采样对实验结果可能有所影响。

方差分析显示,小刀豆 L-30 组叶绿素含量与对照组存在显著差异,其余胁迫组叶绿素含量在胁迫期间与对照组差异不显著。马鞍藤 R-10 组在第 7、14、28 天与对照组差异显著,其余组不显著;R-20 组在第 14 天差异显著;R-30 组在第 21、35 天差异显著;L-30 组在第 35 天差异显著。全缘冬青与大叶银边海桐各胁迫组叶绿素含量在胁迫期间与对照组差异不显著。

2.4　指标间相关性

对根系 3 个盐浓度胁迫组在胁迫第 35 天的生长状态、等效水分厚度及叶绿素含量指标进行 Pearson 相关分析,4 种植物的生长状态均与盐胁迫程度呈极显著负相关关系,植物的生长状态可以很好的表示植物受根系盐胁迫毒害的程度(表 3)。小刀豆叶绿素含量与根系盐胁迫浓度呈显著相关关系。马鞍藤的等效水分厚度与全缘冬青的叶绿素含量均与根系盐胁迫浓度成正相关,但相关性不显著。植物的生长状态变化对耐盐能力具有更为明确的指示意义,等效水分厚度和叶绿素含量必须结合其他指标和结构特点

才能较为准确的综合评价植物抗盐能力大小。

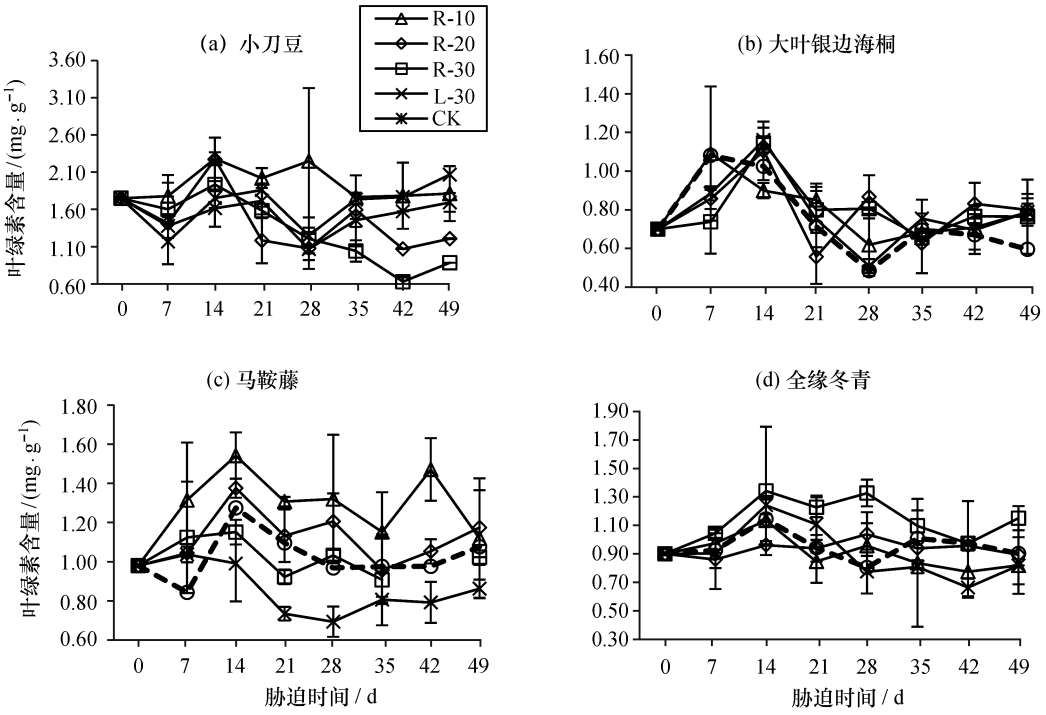

图 3 根系盐胁迫对植物叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effect of root-salt stress on chlorophyll content

表 3 植株各指标与盐胁迫程度的相关性分析

Tab. 3 Correlation coefficient between salt stress level and index parameters

植物种类	生长状态	等效水分厚度	叶绿素含量
马鞍藤	−0.834**	0.556	−0.204
小刀豆	−0.911**	−0.238	−0.705*
大叶银边海桐	−0.837**	−0.106	−0.182
全缘冬青	−0.726**	−0.085	0.214

注:“*”表示显著差异,“**”表示极显著差异。

2.5 讨论

2.5.1 *盐胁迫对植物形态的影响* 根系盐胁迫下,土壤中可溶性盐分过多,使土壤水势降低导致植物吸水困难,造成植物生理干旱,形成渗透胁迫。渗透胁迫使植物细胞渗透势降低,伤害细胞膜透性进而使离子失调,继而对光合、呼吸作用产生影响,破坏植物体能量平衡[25]。叶片盐胁迫下,含 NaCl 的盐雾沉降于叶片表面,盐雾中的 Na^+和 Cl^-透过叶角质层而被吸收积累,引起植物在形态和生理上发生与盐胁迫相似的反应[26]。长期盐胁迫下,植物的生长存在两个阶段,第一阶段是对短期胁迫的响应,由水或渗透胁迫造成;第二阶段是对长期胁迫的调整,由植物体内的离子毒害作用造成[2,27]。为减轻盐胁迫造成的危害,植物在形态结构和生理方面形成了一系列适应盐环境的机制。外部形态和生长状况是反映植物受盐碱伤害程度的最直观表现[2]。盐胁迫下,植物通过改变形态(如叶片退化,气孔小而下陷,叶细胞表面具蜡质,叶、茎肉质化等)[4,28-31],调整生物量分配(如改变根冠比、降低生物量等)[3,32-34]等方式以适应盐胁迫环境。在长期胁迫的第一阶段主要抑制幼叶的生长,第二阶段主要加速老叶的衰老[27]。本研究结果表明,根系盐胁迫和叶片盐胁迫均会对植物形态产生影响,根系盐胁迫下,马鞍藤叶片随胁迫的盐浓度增加而变小,老叶枯落;叶片盐胁迫导致马鞍藤叶片稍有蜷曲,叶片变厚。低浓度的根系盐胁迫导致大叶银边海桐、全缘冬青、小刀豆的老叶变黄或产生黄褐斑。高浓度的根系盐胁迫促使植物叶片干枯、落叶,对叶片的损害主要从叶柄向叶脉延伸;高浓度的叶片盐胁迫导致少量叶片尖端干枯,对叶片的损害从叶尖开始。该结果与卞阿娜等(2015)[35]的研究结果相一致,根系盐胁迫下叶片病斑较多分布于叶片中心区;叶片盐胁迫下叶尖、叶缘较早表现出受害症状。陈国军等

(2018)[36]发现盐雾胁迫处理厚叶石斑木(*Rhaphiolepis umbellata*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)、鱼藤(*Derris trifoliata*)、苦檻蓝(*Myoporum bontioides*)、倒卵叶润楠(*Machilus obovatifolia*)、单叶蔓荆(*Vitex rotundifolia*)、酸味子(*Antidesma japonicum*)、银毛树(*Tournefortia argentea*)、苦郎(*Clerodendrum inerme*)9 种植物后,植物的叶片均受到不同程度的盐害,表现出失绿发黄、萎蔫干枯、失水变褐等现象。

2.5.2　盐胁迫对植物叶片水分状况及光合色素含量的影响　与对照相比,盐雾胁迫处理下 9 个树种叶片的含水量和叶绿素含量均显著下降,MDA 含量增加。稀盐是植物避盐的主要方式之一[4],主要通过从外界吸收较多的水分并储存在植物体内,使茎叶肉质化来提高组织含水量,稀释盐分,降低盐浓度[37]。本研究中,马鞍藤、全缘冬青与小刀豆在高浓度的叶片盐胁迫与中低浓度的根系盐胁迫下,叶片水分厚度均有所增加,表明这 3 种植物在盐胁迫下具有一定的稀盐能力以适应盐胁迫环境。叶片光合色素含量是反映植物光合能力的一个重要指标,环境因子的改变会引起叶绿体色素含量的变化,进而引起光合性能的改变[38]。有关研究表明,盐胁迫可能破坏植物叶绿体结构,使体内叶绿素含量下降;但也有学者认为,低浓度盐胁迫可以使叶绿素含量增加[39-40]。胡爱双等(2009)探究了盐胁迫对 2 个八棱海棠(*Malus robusta*)株系生长及光合荧光特性的影响,发现盐胁迫降低了 2 个株系的光合色素含量、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,耐盐株系的光合色素含量及光合参数的下降程度低于普通海棠株系的上述指标[41]。本研究中,低浓度的根系盐胁迫使马鞍藤与小刀豆的叶绿素含量较对照组显著增加,但随着盐浓度的提高及胁迫时间的延长,叶片中的叶绿素含量随着盐浓度的增加而呈下降趋势;而全缘冬青的叶绿素含量则在高浓度根系盐胁迫下有所增加,低浓度胁迫下略有降低;大叶银边海桐的叶绿素含量在盐胁迫下的变化规律不明显。盐胁迫下 4 种植物叶绿素含量的变化情况并未呈现出规律性趋势,与前人的研究有相同亦有不符。相关分析表明,除小刀豆的叶绿素含量与根系盐胁迫浓度有显著相关外,其余种类的根系盐胁迫下,叶绿素含量与根系盐胁迫浓度叶绿素含量相关性不显著。因此,叶绿素含量指标不能直接反映植物抗盐性大小,必须与其他指标结合分析,才能较为准确的综合评价植物抗盐能力[42]。

2.5.3　植物耐盐能力在海岸海岛植被修复中的应用　海洋盐分主要通过地下水入侵、浪花飞溅、盐雾等方式对滨海植物的根、茎、叶产生影响。因此,在进行海岸带植被修复与滨海景观绿化时,应选用具有耐盐、耐盐雾的滨海植物,以提高植物存活率,降低工程及后期管理养护费用[43]。本次实验的 4 种植物均有较强的耐盐能力,可以作为海岸带、海岛的植被修复品种。但不同植物对根系与叶片的耐盐能力有所差异。根据植物的耐盐能力,综合考虑海岸带高程和离海远近:①在海水短时间淹没或海浪长时间影响区域,如高潮线附近的滩涂,宜选择根、叶均有较强的耐盐能力的马鞍藤;②地下水受海水入侵影响较大,但受海浪影响较小的区域,如沙滩后滨可选择马鞍藤及根系具有较强耐盐能力的小刀豆;③有一定高程或离海较远的海岸区域,如滨海步道可选用具有一定耐盐能力同时兼具景观效果的全缘冬青和大叶银边海桐。

3　结论

(1)4 种典型滨海植物叶银边海桐、全缘冬青、马鞍藤、小刀豆的受盐胁迫后形态特征:根系盐胁迫下叶片病斑较多分布于叶片中心区;叶片盐胁迫下叶尖、叶缘较早表现出受害症状。

(2)4 种典型滨海植物均具有较强的耐盐能力,不同植物的根系耐盐能力和叶片耐盐能力不同,根据植物的耐盐特性,在不同高程和离海较远的海岸位置应选择适宜的植物。

(3)植物叶片耐盐能力普遍大于根系耐盐能力,可以利用海岸植物的枝叶抵御海浪冲击,构建生态海岸或开展海岸生态化改造。

参考文献:

[1] RODRÍGUEZ-GALLEGO L, SABAJ V, MASCIADRI S, et al. Salinity as a major driver for submerged aquatic vegetation in coastal lagoons: a multi-year analysis in the subtropical Laguna de rocha[J]. Estuaries and Coasts, 2015, 38(2): 451-465.

[2] 王佺珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5 565-5 577.
WANG Q Z, LIU Q, GAO Y N, et al. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5 565-5 577.

[3] LIU B S, KANG C L, WANG X, et al. Physiological and morphological responses of *Leymus chinensis* to saline-alkali stress[J]. Grassland Science, 2015, 61(4): 217-226.

[4] 张金林, 李惠茹, 郭姝媛, 等. 高等植物适应盐逆境研究进展[J]. 草业学报, 2015, 24(12): 220-236.
ZHANG J L, LI H R, GUO S Y, et al. Research advances in higher plant adaptation to salt stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(12): 220-236.

[5] APARICIO C, URRESTARAZU M, CORDOVILLA M D P. Comparative physiological analysis of salinity effects in six olive genotypes[J]. Hort Science, 2014, 49(7): 901-904.

[6] BOJÓRQUEZ-QUINTAL E, VELARDE-BUENDÍA A, KU-GONZÁLEZ Á, et al. Mechanisms of salt tolerance in habanero pepper plants (*Capsicum chinense* Jacq.): proline accumulation, ions dynamics and sodium root-shoot partition and compartmentation[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 605.

[7] FLOWERS T J. Improving crop salt tolerance[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(396): 307-319.

[8] 刘凤歧, 刘杰淋, 朱瑞芬, 等. 4 种燕麦对 NaCl 胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 草业学报, 2015, 24(1): 183-189.
LIU F Q, LIU J L, ZHU R F, et al. Physiological responses and tolerance of four oat varieties to salt stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(1): 183-189.

[9] 汪雪峰, 盛夏冰, 谭炎宁, 等. 盐胁迫对杂交稻隆两优华占及其亲本种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 杂交水稻, 2021, 36(1): 75-81.
WANG X F, SHENG X B, TAN Y N, et al. Effects of salt stress on seed germination and seedling growth of hybrid rice longliangyou Huazhan and its parents[J]. Hybrid Rice, 2021, 36(1): 75-81.

[10] 方义生, 曹东, 杨红丽, 等. 大豆耐盐相关基因研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(4): 512-526.
FANG Y S, CAO D, YANG H L, et al. Research progress of salt-tolerance genes in soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(4): 512-526.

[11] YAN K, XU H L, ZHAO S J, et al. Saline soil desalination by honeysuckle (*Lonicera japonica* Thunb.) depends on salt resistance mechanism [J]. Ecological Engineering, 2016, 88: 226-231.

[12] 刘育梅, 宋志瑜, 池敏杰, 等. 5 种山榄科果树叶片组织结构与耐盐性的相关性[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(2): 300-304.
LIU Y M, SONG Z Y, CHI M J, et al. Correlation between leaf anatomy and salt tolerance of 5 sapotaceae species[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2017, 56(2): 300-304.

[13] 姜云天, 李玉梅, 陈晨霞, 等. 盐胁迫对四季秋海棠幼苗生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2020(16): 62-69.
JIANG Y T, LI Y M, CHEN C X, et al. Effects of salt stress on physiological characteristics of *Begonia semperflorens* link et otto seedlings[J]. Northern Horticulture, 2020(16): 62-69.

[14] 张瑞群, 马晓东, 吕豪豪. 多枝柽柳幼苗生长及其根系解剖结构对水盐胁迫的响应[J]. 草业科学, 2016, 33(6): 1 164-1 173.
ZHANG R Q, MA X D, LYU H H. Response of growth and anatomical structure of roots of *Tamarix ramosissima* seedlings to salinity and water stress[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(6): 1 164-1 173.

[15] 陈春晓, 谢秀华, 王宇鹏, 等. 盐分和干旱对沙枣幼苗生理特性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4 540-4 550.
CHEN C X, XIE X H, WANG Y P, et al. Effects of salt and drought on the physiological characteristics of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4 540-4 550.

[16] 叶维杨. 厦门地区 10 种园林植物的耐盐性研究[J]. 现代农业科学, 2008(8): 16-18.
YE W Y. Study on salt tolerance of 10 species of garden plants in Xiamen Area[J]. Modern Agricultural Sciences, 2008(8): 16-18.

[17] 叶勇,卢昌义,胡宏友,等.三种泌盐红树植物对盐胁迫的耐受性比较[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2 444-2 450.
YE Y, LU C Y, HU H Y, et al. Comparisons of tolerances to salt stress among three salt-secreting mangrove species[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2 444-2 450.

[18] 贺林, 王文卿, 林光辉. 盐分对滨海湿地植物番杏生长和光合特征的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3 044-3 049.
HE L, WANG W Q, LIN G H. Effects of salinity on the growth and photosynthetic characteristics of a coastal wetland plant species *Tetragonia tetragonoides* (Pall.) Kuntze[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12): 3 044-3 049.

[19] SCHOLANDER P F, HAMMEL H T, HEMMINGSEN E, et al. Salt balance in mangroves[J]. Plant Physiology, 1962, 37(6): 722-729.

[20] 梁芳, 黄秋伟, 於艳萍, 等. 濒危半红树植物玉蕊对盐胁迫的生理响应及其相关性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 12-18.
LIANG F, HUANG Q W, YU Y P, et al. Physiological response of endangered semi-mangrove *Barringtonia racemosa* to salt stress and its correlation analysis[J]. Journal of Central South University of Forestry Science and Technology, 2019, 39(10): 12-18.

[21] 黄丽, 谭芳林, 林捷, 等. 木榄幼苗对淹水-盐胁迫的生理响应[J]. 防护林科技, 2018(12): 1-4.
HUANG L, TAN F L, LIN J, et al. Physiological response of *Bruguiera gymnorrhiza* seedlings to flooding stress and salt stress[J]. Protection Forest Science and Technology, 2018(12): 1-4.

[22] 张爱琴, 庞秋颖, 阎秀峰. 碱蓬属植物耐盐机理研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3 575-3 583.
ZHANG A Q, PANG Q Y, YAN X F. Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3 575-3 583.

[23] 王彬, 张春银, 杨姗姗, 等. 不同盐碱胁迫对“绿海碱蓬 1 号”种子萌发的影响[J]. 天津农业科学, 2020, 26(6): 15-20.
WANG B, ZHANG C Y, YANG S S, et al. Effect of different salt and alkali stress on seed germination of “Lv Hai *Suaeda glauca* No.1”[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2020, 26(6): 15-20.

[24] 陈慧英, 汤坤贤, 孙元敏, 等. 海岛植被修复中的耐旱植物筛选及抗旱技术研究[J]. 应用海洋学学报, 2016, 35(2): 223-228.
CHEN H Y, TANG K X, SUN Y M, et al. Drought-tolerant plants screening and drought-resistant technology research for island vegetation resto-

ration[J]. Journal of Applied Oceanography, 2016, 35(2): 223-228.
[25] TAIZ L, ZEIGER E. Photosynthesis: physiological and ecological considerations[J]. Plant Physiology, 2002, 9: 171-174.
[26] KEKERE O. Responses of *Kyllinga peruviana* Lam. to sea water spray[J]. Journal of Plant Studies, 2014, 3(2): 30-38.
[27] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-681.
[28] ZHANG J L, SHI H Z. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance[J]. Photosynthesis Research, 2013, 115(1): 1-22.
[29] FLOWERS T J, COLMER T D. Salinity tolerance in halophytes[J]. New Phytologist, 2008, 179(4): 945-963.
[30] FERREIRA C, SIMIONI C, SCHMIDT É C, et al. The influence of salinity on growth, morphology, leaf ultrastructure, and cell viability of the seagrass *Halodule wrightii* Ascherson[J]. Protoplasma, 2017, 254(4): 1 529-1 537.
[31] ALAM M A, JURAIMI A S, RAFII M Y, et al. Salinity-induced changes in the morphology and major mineral nutrient composition of purslane (*Portulaca oleracea* L.) accessions[J]. Biological Research, 2016, 49: 24.
[32] BAHARM A, BEHROUZ R. How does the root of *Salicornia herbacea* response to salinity in comparison to the shoot? [C]//ICBEM. International Conference on Biotechnology and Environment Management(ICBEM 2011). Hong Kong: Asia-Pacific Chemical, Biological & Environmental Engineering Society (APCBEES), 2011.
[33] JIANG H, DU H Y, BAI Y Y, et al. Effects of spatiotemporal variation of soil salinity on fine root distribution in different plant configuration modes in new reclamation coastal saline field[J]. Environmental Science and Pollution Research Internation, 2016, 23(7): 6 639-6 650.
[34] ALAM M A, JURAIMI A S, RAFII M Y, et al. Effect of salinity on biomass yield and physiological and stem-root anatomical characteristics of *Purslane* (*Portulaca oleracea* L.) accessions[J]. BioMed Research International, 2015, 2015: 105 695.
[35] 卞阿娜, 林鸣, 王文卿. 根系与叶片盐处理对枇杷幼苗生长及体内矿质元素分布的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(3): 273-279.
BIAN A N, LIN M, WANG W Q. Effects of salt treatment on growth and compartmental allocation of mineral elements in *Eriobotrya japonica* seedlings[J].Plant Physiology Journal, 2015, 51(3): 273-279.
[36] 陈国军, 刘维刚, 徐迎春, 等. 9 种滨海植物盐雾的耐性评价[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(3): 341-347.
CHEN G J, LIU W G, XU Y C, et al. Evaluation of salt spray tolerance of 9 coastal plants[J]. Journal of Forest and Environment, 2018, 38(3): 341-347.
[37] 王东明, 贾媛, 崔继哲. 盐胁迫对植物的影响及植物盐适应性研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(4): 124-128.
WANG D M, JIA Y, CUI J Z. Advances in research on effects of salt stress on plant and adaptive mechanism of the plant to salinity[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(4): 124-128.
[38] 姜国斌, 丁丽娜, 金华, 等. 盐胁迫对杨树幼苗叶片光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 辽宁林业科技, 2007(1): 20-23.
JIANG G B, DING L N, JIN H, et al. Effects of salt stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of poplar seedlings[J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2007(1): 20-23.
[39] 翁锦周, 林江波, 林加耕, 等. 盐胁迫对桉树幼苗的生长及叶绿素含量的影响[J]. 热带作物学报, 2007, 28(4): 15-20.
WENG J Z, LIN J B, LIN J G, et al. Effect of salt stress on the growth and the content of chlorophyll in seedling leaves of *Eucalyptus*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2007, 28(4): 15-20.
[40] 金雅琴, 李冬林, 丁雨龙, 等. 盐胁迫对乌桕幼苗光合特性及叶绿素含量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(1): 29-33.
JIN Y Q, LI D L, DING Y L, et al. Effects of salt stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll content of *Sapium sebiferum* seedlings [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science), 2011, 35(1): 29-33.
[41] 胡爱双, 肖丹丹, 张小栋, 等. 盐胁迫对 2 个八棱海棠株系生长与光合荧光特性的影响[J]. 经济林研究, 2020, 38(3): 208-215.
HU A S, XIAO D D, ZHANG X D, et al. Effects of salt stress on growth and photosynthetic fluorescence of two strains of *Malus robusta* Rehd[J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(3): 208-215.
[42] 肖雯, 贾恢先, 蒲陆梅. 几种盐生植物抗盐生理指标的研究[J]. 西北植物学报, 2000, 20(5): 818-825.
XIAO W, JIA H X, PU L M. Studies on physiological index of some halophytes[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2000, 20(5): 818-825.
[43] 张琳婷, 王文卿, 姜德刚. 厦门大兔屿种子植物区系分析及其植被修复对策研究[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(3): 81-87.
ZHANG L T, WANG W Q, JIANG D G. Analysis of seed flora and its remediation strategies on Xiamen Datu Island[J]. Ocean Development and Management, 2017, 34(3): 81-87.

Salt tolerance of four typical coastal plants

DU Yunling[1], CHEN Yuzhen[4,5], QIAN Aiguo[1], LI Jianfeng[1], XU Jianqiang[1], FU Jingjing[1], CAI Luchun[4,5], SUN Yuanmin[2,3,4,5], LIU Bin[4,5], ZHANG Fei[2,3,4,5], ZHENG Ying[4,5], LIN Li[4,5], MA Yong[2,3,4,5], TANG Kunxian[2,3,4,5*], LI Kaihe[6]

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Ltd., Hangzhou 311122, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Xiamen 361005, China;
3. Key Laboratory of Marine Ecology Conservation and Restoration, MNR, Xiamen 361005, China;
4. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China; 5. Observation and Research Station of Island and Coastal Ecosystem in the Western Taiwan Strait, MNR, Xiamen 361005, China;
6. Natural Resources Bureau of Potou District, Zhanjiamg 524057, China)

Abstract: Coastal plants are important members of coastal ecosystem, however the knowledges of salt tolerance and their ecological adaptations have not been fully understood yet. In this paper, salt tolerance of four typical plants, *Ipomoea pescaprae*, *Canavalia cathartica*, *Ilex integr* and *Pittosporum pentandrum*, are studied for purpose of coastal vegetation restoration. The plants were exposed to different gradient of NaCl solutions used leaf surface spray and root system absorption and the plant status, equivalent water thickness and chlorophyll content were observed and measured. The main results included that the salinity of 10 turned the old leaves of *P. pentandrum*, *I. integra* and *C. cathartica* yellow or caused yellow-brown spots. The salinities of 20−30 caused plant leaves to wither extending from the petiole to the vein and fall. The salinity of 30 caused some leaves to wither from the tip of leaves. Moreover, *I. pescaprae*, *C. cathartica*, *I. integr* and *P. pentandrum* could tolerate salinities of 10, 20, 20 and 30 in short-term stress on the roots, respectively. For Liana, the salt tolerance of *I. pescaprae* was higher than that of *C. cathartica*. While for dungarunga, the salt tolerance of *P. pentandrum* was higher than that of *I. integra*. All leaves of 4 plants su- stained the salinity stress of 30, the salt-tolerant ability turns out to be *I. pescaprae* > *I. integra* > *P. pentandrum* > *C. cathartica*. The results showed that the indexes of plant status gave better indications of salt tolerance. All 4 plants of high tolerance under salt stress can be used for coastal vegetation restoration. In practice, factors of coast elevations, distance to the sea, water and wave effects should all be fully considered in choosing proper plants for the restoration.

Key words: marine biology; plant physiology; coastal vegetation; vegetation restoration; root-salt stress; leaf-salt stress

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2022.01.003

(责任编辑:杜俊民)