

三种泌盐红树植物对盐胁迫的耐受性比较

叶 勇¹, 卢昌义^{1*}, 胡宏友¹, 谭凤仪²

(1. 厦门大学海洋环境科学教育部重点实验室, 厦门 361005; 2. 香港城市大学生物及化学系, 香港)

摘要:在盐度 0、5、15、25 和 35(‰)下种植泌盐红树植物老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)和白骨壤(*Avicennia marina*)的繁殖体,以繁殖体萌发、幼苗生长、叶片泌盐量、叶片组织液盐含量和蒸腾蒸发量为指标,比较其对盐胁迫的耐受性。盐度提高对胎生种类桐花树和白骨壤的萌根速率无显著影响,但高盐度明显抑制非胎生种类老鼠簕的萌根。白骨壤的萌苗率不受盐度影响,但 25 以上的盐度导致桐花树和老鼠簕的萌苗率下降。在盐度范围 5~35 内,白骨壤幼苗的茎高生长随盐度的增加而减少,但减少量比桐花树小,而老鼠簕的减少量最大。老鼠簕因盐度提高而导致的叶片长度的减少量最大。在盐度提高的情况下 3 种植物均具有泌盐量增加的效应,在任一盐度下泌盐能力的顺序均为白骨壤>桐花树>老鼠簕。淡水培养时,3 种红树植物的叶片组织液盐含量(约 2‰)均高于环境盐度 0。在盐度范围 5~35 内,白骨壤的叶片组织液盐含量维持在较稳定的水平(4.3‰~5.0‰),桐花树的变化范围为 2.4‰~4.5‰,老鼠簕 2.3‰~5.3‰。淡水培养时,3 种植物的蒸腾蒸发量类似,但盐性条件下白骨壤的蒸腾蒸发量显著高于桐花树和老鼠簕。随着盐度的增加,老鼠簕的蒸腾蒸发量下降最多。这些结果均表明,3 种泌盐红树植物对盐胁迫的耐受性顺序为白骨壤>桐花树>老鼠簕。

关键词:耐盐性;老鼠簕;桐花树;白骨壤;泌盐红树植物

Comparisons of tolerances to salt stress among three salt-secreting mangrove species

YE Yong¹, LU Chang-Yi^{1*}, HU Hong-You¹, TAM Nora-Fong-Yee² (1. Key Lab. for Marine Environmental Science of Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen, 361005, China; 2. Department of Biology and Chemistry, City University of Hong Kong, Hong Kong, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2444~2450.

Abstract: Propagules of three salt-secreting mangrove species, *Acanthus ilicifolius*, *Aegiceras corniculatum*, and *Avicennia marina*, were germinated at salinities 0, 5, 15, 25 and 35. Their tolerance to salt stress was evaluated in terms of propagule germination, seedling growth, salt secretion from leaves and salt content in leaf tissue water, evaporation and transpiration. Root initiations of the two viviparous species, *Aegiceras* and *Avicennia*, were not significantly influenced by increased salinities but root initiations of the non-viviparous species (*Acanthus*) were significantly delayed at high salinities. Salinity also affected seedling establishment, the unfurling of the first pair of leaves, and the effects were species specific. The seedling establishment percentages in *Avicennia* were not significantly affected by salinities up to 35 while salinities over 25 significantly reduced the establishment of *Aegiceras* and *Acanthus*. Although increasing salinity seemed not to affect propagule germination and seedling establishment of *Avicennia*, its stem height decreased as salinities increased from 5 to 35. Nevertheless, the range of stem height decreases in *Avicennia* was less than that in *Aegiceras*, and *Acanthus* showed the largest reduction in height as salinities increased from 0 to 35. *Acanthus* also had the largest reduction in maximum leaf length due to high salinity. All of the three species secreted more salts as salinities increased but their salt secretion capacity differed, followed the descending order

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40276036, 40476040);福建省自然科学基金资助项目(D0410006);香港环境保护基金资助项目(9210007)

收稿日期:2004-04-05; **修订日期:**2004-07-19

作者简介:叶勇(1969~),男,江西万载人,博士,副研究员,主要从事红树林生态学研究。E-mail: yeyong5564@tom.co

* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail: lucy@xmu.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40276036, 40476040), Fujian Natural Science Foundation (D0410006) and the Environment and Conservation Fund of the HKSAR (No. 9210007)

Received date: 2004-04-05; **Accepted date:** 2004-07-19

Biography: YE Yong, Ph.D., Associate professor, mainly engaged in ecology. E-mail: yeyong5564@tom.com

of *Avicennia* > *Aegiceras* > *Acanthus* at any given salinity. When seedlings were cultured in tap water, all three mangrove species had the salt concentrations in the leaf tissue water (about 2%) higher than the environmental salinity 0. Under saline conditions (salinities 5~35), salt concentrations in leaf tissue water of *Avicennia* were maintained at a steady level, around 4.3% to 5.0% with little changes. On the contrary, salt concentrations increased from 2.4% to 4.5% in *Aegiceras* and the corresponding increases in *Acanthus* were from 2.3% to 5.3%. The evaporation and transpiration rates of these three species were similar under the tap water condition (salinity 0); however, *Avicennia* had significantly higher rates than *Acanthus* and *Aegiceras* under saline conditions (salinities 5~35). The decline in evapo-transpiration rates was most significant in *Acanthus*. These parameters all indicated that salt tolerance among the three salt-secreting mangrove species was in the descending order of *Avicennia* > *Aegiceras* > *Acanthus*.

Key words: salt tolerance; *Acanthus ilicifolius*; *Aegiceras corniculatum*; *Avicennia marina*; salt-secreting mangrove species
文章编号:1000-0933(2004)11-2444-07 中图分类号:Q948.1 文献标识码:A

红树林分布于热带亚热带海岸潮间带,通常受到盐胁迫。红树植物通过两种方式抵抗盐胁迫:(1)通过拒盐途径防止过多的盐分进入植物体;(2)通过叶片盐腺的泌盐防止进入植物体的盐分在体内累积^[1, 2]。香港海岸带有8种真红树植物,即老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、海漆(*Excoecaria agallocha*)、银叶树(*Heritiera littoralis*)、秋茄(*Kandelia candel*)和榄李(*Lumnitzera racemosa*),其中老鼠簕、桐花树和白骨壤的叶片具有盐腺,为泌盐种类^[3, 4]。在香港海岸红树林中,这3种泌盐植物具有明显的潮间带分带现象,从陆到海的分带序列为老鼠簕、桐花树和白骨壤^[4]。

大量文献表明,盐度提高显著影响桐花树和白骨壤的生长和生理。桐花树和白骨壤均为胎生种类,其种子在母树上就萌发形成繁殖体。桐花树繁殖体成熟掉落后,进一步萌发成幼苗的速度在盐度约为3时最快,而白骨壤在盐度15 萌苗最快,并将这种差异归因于盐度对胚胎储存物再分布的差异^[5~7]。中等的盐度水平促进桐花树^[8]和白骨壤^[5, 9~11]的生长。桐花树和白骨壤均在25‰海水盐度(约9)下生长最快,但从一些生长指标来看,白骨壤比桐花树的耐盐性强^[12]。耐盐性强的物种如白骨壤的水分利用更加保守,水分吸收速率随环境盐度提高而减少^[7]。但未见非胎生泌盐红树植物老鼠簕对盐度耐受性的研究报道。本研究以繁殖体萌发、幼苗生长、叶片泌盐量、叶片组织液盐含量和蒸发蒸腾量为指标,比较香港海岸带泌盐红树植物种类老鼠簕、桐花树和白骨壤对不同盐度(0~35)的反应。

1 材料与方法

1.1 植物培养

从香港海岸红树林采集3种泌盐红树植物老鼠簕、桐花树和白骨壤的成熟繁殖体。老鼠簕的繁殖体为种子,单粒重0.015~0.020 g,长宽分别约为1.5 cm和1.2 cm。桐花树和白骨壤为隐胎生物种,其胚胎在母树上发育后伸出种皮但不伸出果皮,整个果实为一个繁殖体^[2]。桐花树成熟繁殖体柱状,重约0.5 g,长3.5~5 cm,直径约0.5 cm;白骨壤成熟繁殖体扁平状,重约6.0 g,长2.0~3.0 cm,宽1.5~2.5 cm。

同一物种的9颗繁殖体种植于套塑料网框的塑料盆,经自来水冲洗3次的海沙(约350 g)为培养基质。各盆按处理盐度浇水(约300 ml)淹至沙基表面,各物种设置处理盐度0、5、15、25和35(用速溶海盐与自来水配制),每处理3个重复盆。每日用自来水补充蒸发蒸腾的水分,培养时间3个月。

1.2 测定指标

每日记录各盆萌根与萌苗数。萌根时间为繁殖体开始萌根的时间,第1对叶片张开的时间为萌苗时间。培养结束时,测量幼苗的生长指标包括茎高和最大叶片长度。

在培养的最后1周测定叶片泌盐量和组织液盐含量。用去离子水洗去叶片(每盆取2片日龄约40 d的叶)表面的盐分,然后吸干表面水分。24 h后采摘叶片,称重后于表面皿中用一定量去离子水漂洗,测定漂洗液中的盐分含量,该值表示叶片泌盐量。测定完泌盐量后,其中1片叶用于测定含水量(70℃烘干法)和面积(剪纸称重法),另1片叶用一定量去离子水研磨成匀浆液,测定匀浆液中的盐分含量,该值表示叶片组织液中的盐分含量。根据叶片的面积、泌盐时间(1 d)、漂洗液盐分含量,计算单位面积和单位时间内的泌盐量;根据叶片的组织液量(以水分量估算)和匀浆液盐分含量计算单位组织液中盐分含量。漂洗液和匀浆液盐分含量均通过电导率估算。配置多个盐度梯度的水溶液,测定电导率,得出盐分含量与电导率的直线相关方程为: $y = 10.773x$ ($df = 5, r = 0.9991$),其中 y 为电导率(ms/cm), x 为盐分含量(%)。

在培养的最后1周测定各盆的蒸发蒸腾速率,根据各盆24 h的重量(精确度0.01 g)减少值估算。

1.3 数据处理

计算各处理的平均值和标准误。以物种和盐度为因素,用方差分析统计物种间、盐度间的差异以及物种和盐度的相互作用。

2 结果

2.1 繁殖体萌苗

低盐度和高盐度下老鼠簕繁殖体分别在 3 d 和 7 d 萌根(表 1)。种植于盐度 0 和 5 的老鼠簕繁殖体 6 d 达最大萌根率(图 1a),盐度 25 以下的最终萌根率均为 100%,盐度 35 时为 60%。所有盐度处理下桐花树均在 6 d 开始萌根,萌根率随盐度提高而下降,10 d 所有盐度下各处理均达最大萌根率 100%(图 1b)。盐度对白骨壤繁殖体萌根无显著影响,各处理盐度下均在 3 d 开始萌根并在 11 d 萌根达到最大萌根率(表 1,图 1c)。

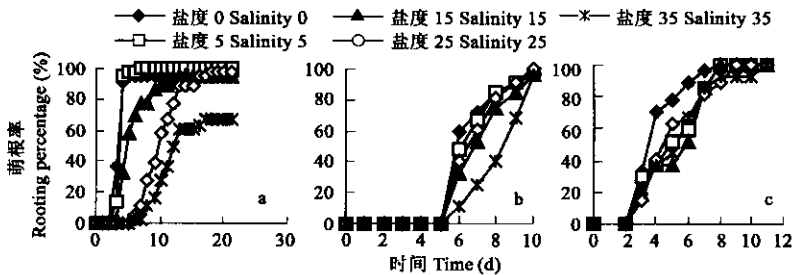


图 1 盐度对老鼠簕(a)、桐花树(b)和白骨壤(c)繁殖体萌根率的影响

Fig. 1 Effects of salinity on rooting percentages of propagules of *Acanthus* (a), *Aegiceras* (b), and *Avicennia* (c)

3 个物种繁殖体的萌根对盐度的反应差异显著(表 1 和表 2)。白骨壤繁殖体的始萌根速度比桐花树快。盐度对白骨壤和桐花树的萌根速度均无显著影响,但高盐度明显抑制老鼠簕繁殖体萌根。盐度低于 15 时老鼠簕繁殖体萌根速度与白骨壤相当,但高盐度下老鼠簕繁殖体萌根速度比桐花树还慢。

表 1 盐度对分泌盐红树植物始萌根时间和最终萌苗率的影响

Table 1 Effects of salinity on root initiation and final establishment percentages of salt-secreting mangrove species

盐度 Salinity	始萌根时间 Root initiation (d)			最终萌苗率 Final establishment rate (%)		
	老鼠簕 <i>Acanthus</i>	桐花树 <i>Aegiceras</i>	白骨壤 <i>Avicennia</i>	老鼠簕 <i>Acanthus</i>	桐花树 <i>Aegiceras</i>	白骨壤 <i>Avicennia</i>
0	3.0±0.0 ^b	6.0±0.0 ^a	3.0±0.0 ^a	100.0±0.0 ^a	100.0±0.0 ^a	100.0±0.0 ^a
5	3.0±0.0 ^b	6.0±0.0 ^a	3.0±0.0 ^a	100.0±0.0 ^a	96.3±5.2 ^a	100.0±0.0 ^a
15	3.7±0.5 ^b	6.0±0.0 ^a	3.0±0.0 ^a	100.0±0.0 ^a	100.0±0.0 ^a	100.0±0.0 ^a
25	7.7±1.6 ^a	6.0±0.0 ^a	3.3±0.5 ^a	91.7±11.8 ^a	85.2±5.2 ^b	100.0±0.0 ^a
35	7.3±0.9 ^a	5.7±0.5 ^a	3.0±0.0 ^a	27.8±3.9 ^b	38.4±22.7 ^c	100.0±0.0 ^a
显著性 Significance	$P<0.05$	$P>0.05$	$P>0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$	$P>0.05$

同一列数据上标的不同字母表示在 0.05 的水平上差异显著 Means in the same column with different letters in the same column are significantly different at level of 0.05

表 2 双因素方差分析结果

Table 2 Results of two-way ANOVA

方美 Source of variation	始萌根 Root initiation	最终萌苗 Final establishment	基高 Stem height	最大叶长 Maximum leaf length	叶泌盐量 Leaf salt secretion	叶盐含量 Leaf salt concentration	萌发蒸腾量 Evaporation and transpiration
Salinity (Sa)	12.8 [*]	51.9 ^{***}	100.9 ^{***}	174.2 ^{***}	130.9 ^{***}	158.3 ^{***}	159.0 ^{***}
Species (Sp)	71.5 [*]	19.9 [*]	3043.5 ^{***}	61.1 [*]	317.7 ^{***}	65.2 [*]	355.0 ^{***}
Sa×Sp	12.6 ^{***}	14.0 ^{***}	24.8 ^{***}	56.3 ^{***}	28.8 ^{***}	14.3 ^{***}	19.7 ^{***}

F 值的显著性 F-values are given and significant effects: * $P<0.05$; ** $P<0.01$, *** $P<0.001$

盐度 0 时,26 d 老鼠簕繁殖体的萌苗率达 100%,盐度 5 和 15 时则在 30 d 达最大萌苗率 100%(表 1 和图 2a)。然而,盐度 25 和 35 时则在超过 40 d 才达最大萌苗率,分别为 92%和 28%。盐度 0、5 和 15 时桐花树繁殖体均在 30 d 达最大萌苗率 100%,而盐度 25 和 35 时的最终萌苗率分别为 85%和 38%(表 1 和图 2b),说明桐花树繁殖体在盐度超过 25 时萌苗慢且盐度越高萌苗率越低,而在盐度 0 时萌苗快且受盐度变化影响。盐度对白骨壤繁殖体萌苗速度影响不显著,所有盐度下均在 8 d 开始出叶,且所有繁殖体均在 18 d 前成苗(图 2c)。

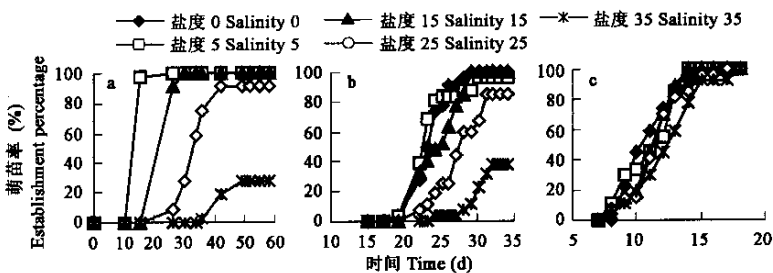


图2 盐度对老鼠簕(a)、桐花树(b)和白骨壤(c)繁殖体萌苗率的影响

Fig. 2 Effects of salinity on seedling establishment rates of propagules of *Acanthus* (a), *Aegiceras* (b), and *Avicennia* (c)

3个物种间的最终萌苗率差异显著,且存在盐度与物种间的显著相互作用(表2)。高盐度下白骨壤最终萌苗率显著高于老鼠簕和桐花树。盐度对白骨壤的最终萌苗率无显著影响,盐度低于15时桐花树和老鼠簕的最终萌苗率与白骨壤一样,均为100%,但盐度15时老鼠簕和桐花树的最终萌苗率分别为28%和38%。

2.2 幼苗生长

盐度对老鼠簕($F=106.3, p<0.001$)和桐花树($F=40.72, p<0.001$)幼苗的茎高增长均有极显著影响。盐度范围5~35内,这两个物种的茎高增长均随盐度的增加而减少(图3a和3b)。盐度从0到35,老鼠簕茎高增长减少43%,多于桐花树的减少量(35%)。盐度从0到5,白骨壤幼苗的茎高增长随盐度提高而增加,但在盐度高于15时却随盐度的增加而减少($F=44.34, p<0.001$,图3c)。茎高增长在物种与盐度间存在显著相互作用(表2);老鼠簕和桐花树的幼苗在盐度0最高,而白骨壤幼苗在中等盐度(5~15)最高,最低盐度(0)的幼苗高度与最高盐度(35)相当。

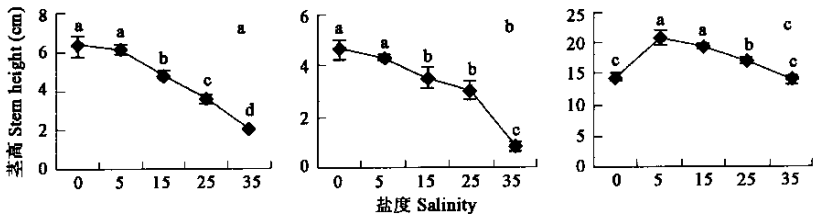


图3 盐度对老鼠簕(a)、桐花树(b)和白骨壤(c)幼苗茎高生长的影响

Fig. 3 Effects of salinity on stem height of seedlings of *Acanthus* (a), *Aegiceras* (b), and *Avicennia* (c)

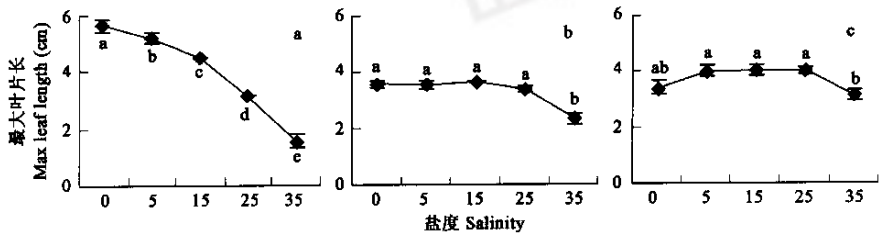


图4 盐度对老鼠簕(a)、桐花树(b)和白骨壤(c)幼苗最大叶片长度的影响

Fig. 4 Effects of salinity on maximal leaf length of seedlings of *Acanthus* (a), *Aegiceras* (b), and *Avicennia* (c)

老鼠簕幼苗的最大叶片长度随盐度提高而显著减小($F=301.9, p<0.001$,图4a)。盐度范围0~25内,桐花树和白骨壤幼苗的最大叶片长度均不因盐度变化而有显著变化;盐度超过25时,最大叶片长度随盐度提高而减小(图4b和4c)。物种与盐度对幼苗的最大叶片长度具有显著相互作用的效应(表2),盐度对老鼠簕的影响最明显,而桐花树和白骨壤能忍受25以上的盐度。

2.3 叶片泌盐量和组织液盐含量

老鼠簕叶片泌盐量随盐度提高而增加($r=0.985$, $p<0.01$),但泌盐量增加的程度与盐度范围有关(图 5a):中等盐度范围内,盐度从 5 到 25,每增加 10,泌盐量增加约 $0.1\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$;而盐度从 0 到 5 和从 25 到 35,泌盐量分别增加约 $0.2\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。桐花树叶片的泌盐量随盐度提高而增加($r=0.994$, $p<0.01$),泌盐量增加的程度与盐度范围有关(图 5b):低盐度范围内,盐度从 0 到 5,泌盐量增加约 $0.1\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$;而盐度从 5 到 35,每增加 10,泌盐量分别增加约 $0.6\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。与老鼠簕和桐花树相比,白骨壤叶片的泌盐量与盐度的线性关系更不显著($r=0.914$, $0.01<p<0.05$,图 5c):低盐度范围内,盐度从 0 到 5,泌盐量增加值较大,约为 $1.8\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$;盐度从 25 到 35,泌盐量增加约 $1.3\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$;而中等盐度范围内泌盐量随盐度提高而增加值较不明显,盐度从 5 到 25,泌盐量增加约 $0.8\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,而盐度从 5 到 15,泌盐量无显著增加。盐度对 3 种泌盐红树植物叶片泌盐量的影响具显著差异(表 2),泌盐量随盐度提高而增加的序列为白骨壤>桐花树>老鼠簕(图 5)。

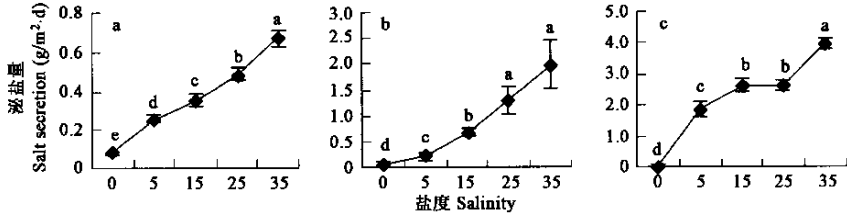


图 5 盐度对老鼠簕(a)、桐花树(b)和白骨壤(c)叶片泌盐量的影响

Fig. 5 Effects of salinity on salt secretion from leaves of *Acanthus* (a), *Aegiceras* (b), and *Avicennia* (c)

老鼠簕叶片组织液盐含量随盐度提高而显著增加($r=0.988$, $p<0.01$,图 6a),但低盐度范围内,盐度从 0 到 5,盐含量不因盐度提高而有显著变化;盐度从 5 到 35,每增加 10,盐含量约增加 1%。桐花树叶片组织液盐含量随盐度提高而显著增加($r=0.994$, $p<0.01$,图 6 b),盐度每增加 10,盐含量约增加 0.8%。与老鼠簕和桐花树相比,白骨壤叶片组织液盐含量与盐度的线性关系较不明显($r=0.783$, $p>0.05$,图 6c)。盐度从 0 到 5,盐含量的增加值最多(约为 2.5%);盐度从 5 到 25,每增加 10,盐含量约增加 0.5%;盐度从 25 到 35,盐含量无显著变化。盐度对 3 种泌盐红树植物叶片组织液盐含量的影响显著不同(表 2),盐度从 0 到 5,盐含量随盐度提高而增加的序列为白骨壤>桐花树>老鼠簕;盐度从 5 到 35,盐含量随盐度提高而增加的序列为老鼠簕>桐花树>白骨壤(图 6)。

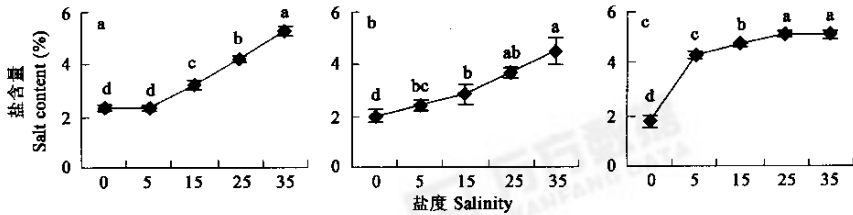


图 6 盐度对老鼠簕(a)、桐花树(b)和白骨壤(c)叶片组织液盐含量的影响

Fig. 6 Effects of salinity on salt content in leaf tissue water of *Acanthus* (a), *Aegiceras* (b), and *Avicennia* (c)

2.4 蒸发蒸腾量

老鼠簕盆的蒸发蒸腾量随盐度提高而线性下降(图 7a)。桐花树蒸发蒸腾量也随盐度提高而减少,但高盐度和低盐度范围内随盐度提高的蒸发蒸腾减少量比老鼠簕盆小(图 7 b)。与老鼠簕和桐花树的情况不同,白骨壤盆的蒸发蒸腾量在中等盐度下最大(图 7c)。

3 讨论

河口海岸生境植物的萌苗能力与耐盐性有关^[13~15]。盐度提高导致盐土和淡土植物的种子萌苗速率减缓^[15~17]。盐度提高导致种子吸水量减少,从而抑制萌发和根生长^[18]。盐度的增加对两种胎生红树植物桐花树和白骨壤繁殖体的萌根速度无显著影响,但明显延长非胎生红树植物老鼠簕繁殖体的萌根速度(表 1),说明胎生物种的繁殖体比非胎生物种的耐盐性强。通过从母树连续吸收盐分或脱盐过程,胎生繁殖体对盐度的适应在其胎生阶段就已形成^[19, 20]。盐度对两种胎生红树植物桐花树和白骨壤繁殖体的萌根速度无显著影响,说明萌苗阶段的早期发育取决于繁殖体本身而不是外部盐度。然而,盐度对最终萌苗率的影响在桐花树和白骨壤间不同,25 以上盐度下桐花树的最终萌苗率下降而白骨壤的值不变,说明桐花树繁殖体萌苗阶段的后期发育受盐度影响。

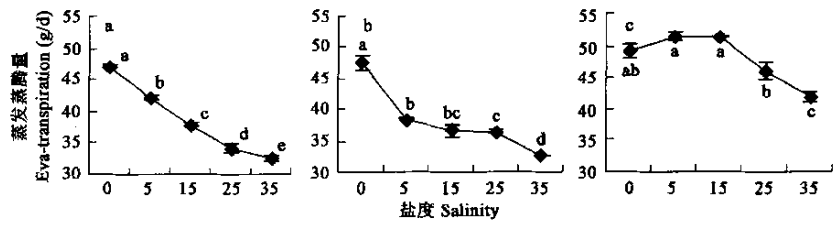


图 7 盐度对老鼠簕(a)、桐花树(b)和白骨壤(c)盆蒸发蒸腾量的影响

Fig. 7 Effects of salinity on eva-transpiration of *Acanthus* (a), *Aegiceras* (b), and *Avicennia* (c) pots

育取决于外部盐度,而白骨壤繁殖体萌苗阶段的后期发育依然与繁殖体本身密切相关。从整个萌苗过程来看,3种泌盐红树植物的耐盐性依次为白骨壤>桐花树>老鼠簕。

就幼苗生长而言,盐度对3种泌盐红树植物的效应不同。在盐度范围5~35内,虽然老鼠簕和桐花树幼苗的茎高生长均随盐度提高而减少,但老鼠簕的减少量比桐花树大,说明后者的耐盐性比前者强。白骨壤的茎高生长在盐度5~15最大,且因盐度波动其值的变化量较老鼠簕和桐花树小,表明这3种植物中白骨壤的耐盐性最强,因此耐盐性次序为白骨壤>桐花树>老鼠簕。前人的很多报道也证实白骨壤比桐花树更耐盐,因为白骨壤在中等盐度下具有最大生长量,而桐花树则在低盐度下生长量最大^[5~7]。

对于泌盐植物而言,植物从底质吸收的盐分一部分滞留于体内用于渗透调节,其余的则被分泌出体外。叶片中的盐腺分泌多种盐离子,外界盐分对泌盐的促进作用是泌盐红树植物的普遍现象^[7, 21~24]。本研究的结果也证实了这一点;3种泌盐红树植物的泌盐量均随环境盐度的增加而增加。然而,在一定盐度下这3种泌盐红树植物间的泌盐量不同,依次为白骨壤>桐花树>老鼠簕,与生长对盐度的反应类似,同样也反映出耐盐性次序为白骨壤>桐花树>老鼠簕。

淡水条件下,3种泌盐红树植物均具有比环境盐度高得多的叶片组织液盐含量(约2%)。在其它红树植物也有类似报道^[9, 11, 25~27],这有利于盐性环境下渗透调节功能^[28]。组织液盐含量高的植物去除进入叶片的过量盐分的能力更强,且生长于高盐度环境的耐盐性强的植物泌盐量趋于饱和而气孔导度趋于最小化^[24],这样可防止叶片盐分的进入量和分泌量之间的失衡。进入叶片细胞的盐分将干扰代谢过程;若盐分在叶片细胞内大量积累将导致叶片脱水^[29]。生长于不同盐度(5~35)的白骨壤幼苗的叶片组织液盐含量较为稳定,保持在4.3%~5.0%,而桐花树和老鼠簕的叶片组织液盐含量则随环境盐度的变化而有较大变化,相应的变化范围分别为2.4%~4.5%和2.3%~5.3%,说明这3种泌盐红树植物中,白骨壤组织液盐含量随环境盐度变化的波动最小,且能在高盐度下维持水势,因此具有最强的耐盐性。相反,桐花树和老鼠簕的组织液盐含量随环境盐度提高而大幅增加,高盐度下可能引起体内盐分失衡以及细胞脱水。

淡水条件小3种泌盐红树植物的蒸发蒸腾量类似,但盐性条件下白骨壤的蒸发蒸腾量显著高于桐花树和老鼠簕。Torrecillas等对*Cistus*属两个物种的研究表明,具有更强和有效吸收水分能力的*Cistus monspeliensis*比*Cistus albidus*的耐盐性更强^[30]。盐性条件下(盐度5~35),桐花树的蒸发蒸腾量随盐度的波动比老鼠簕小,说明更耐盐的植物具有更保守的水分利用特点,而且随盐度的增加这种保守性增强,Ball也观察到类似现象^[7]。

总之,通过本研究的结果可知,无论从繁殖体萌苗还是幼苗的一些生长和生理指标来看,这3种泌盐红树植物对盐胁迫的耐受性顺序为白骨壤>桐花树>老鼠簕。与盐度有关的这3种泌盐红树植物的造林策略为:在盐度25以上的海滩,仅适合种植白骨壤;中等盐度海滩还可种植桐花树;老鼠簕则只适宜在较低盐度海滩种植。该结论在河口区红树林恢复工程中具有一定指导意义。

References:

[1] Mizrachi D, Pannier R, Pannier F. Assessment of salt resistance mechanisms as determinant physio-ecological parameters of zonal distribution of mangrove species I. Effect of salinity on nitrogen metabolism balance and protein synthesis in the mangrove species *Rhizophora mangle* and *Avicennia nitida*. *Bot. Mar.*, 1980, **53**: 289~296.

[2] Tomlinson P B. *The Botany of Mangroves*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.

[3] Tam N F Y, Wong Y S, Lu C Y, *et al.* Mapping and characterization of mangrove plant communities in Hong Kong. *Hydrobiologia*, 1997, **354**: 1~10.

[4] Tam N F Y, Wong Y S. Conservation and sustainable exploitation of mangroves in Hong Kong. *Trees*, 2002, **16**: 224~229.

- [5] Clarke L D, Hannon N J. The mangrove swamp and salt marsh communities of the Sydney district Ⅲ. Plant growth in relation to salinity and waterlogging. *J. Ecol.*, 1970, **58**: 351~369.
- [6] Connor D J. Growth of grey mangrove (*Avicennia marina*) in nutrient culture. *Biotropica*, 1969, **1**: 36~40.
- [7] Ball M C. Salinity tolerance in the mangroves *Aegiceras* and *Avicennia* I. Water use in relation to growth, carbon partitioning and salt balance. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1988, **15**: 447~464.
- [8] Ball M C, Anderson J M. Sensitivity of photosystem II to NaCl in relation to salinity tolerance. Comparative studies with thylakoids of the salt-tolerant mangrove, *Avicennia marina*, and the salt-sensitive pea, *Pisum sativum*. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1986, **13**: 689~698.
- [9] Downton W J S. Growth and osmotic relations of the mangrove *Avicennia marina*, as influenced by salinity. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1982, **9**: 519~528.
- [10] Burchett M D, Clarke C J, Field C D, *et al.* Salinity, growth and root respiration in the grey mangrove, *Avicennia marina*. *Physiol Plant.*, 1984, **60**: 113~118.
- [11] Clough B F. Growth and salt balance of the mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. and *Rhizophora stylosa* Griff. in relation to salinity. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1984, **11**: 419~430.
- [12] Burchett M D, Clarke C J, Field C D, *et al.* Growth and respiration in two mangrove species at a range of salinities. *Physiol. Plant.*, 1989, **75**: 299~303.
- [13] Harradine A R. Effect of salinity on germination and growth of *Pennisetum macrourum* in southern Tasmania. *J. Appl. Ecol.*, 1982, **19**: 273~282.
- [14] Krauss K W, Chambers J L, Allen J A. Salinity effects and differential germination of several half-sib families of baldcypress from different seed sources. *New Forest*, 1998, **15**: 53~68.
- [15] Katembe W J, Ungar I A, Mitchell J P. Effect of salinity on germination and seedling growth of two *Atriplex* species (Chemopodiaceae). *Ann. Bot.*, 1998, **82**: 167~175.
- [16] Ungar I A. Germination ecology of halophytes. In: Sen D N, Rajpurohit K S eds. *Contributions to the ecology of halophytes*. The Hague: Dr W Junk Publishers, 1982. 143~154.
- [17] Khan M A, Ungar I A. The effect of salinity and temperature on germination of polymorphic seeds and growth of *Atriplex triangularis*. *Am. J. Bot.*, 1984, **71**: 481~489.
- [18] Werner J E, Finkelstein R R. Arabidopsis mutants with reduced response to NaCl and osmotic stress. *Physiol. Plant*, 1995, **93**: 659~666.
- [19] Joshi G V, Pimplaskar M, Bhosale L J. Physiological studies in germination of mangroves. *Bot. Mar.*, 1972, **45**: 91~95.
- [20] Zheng W J, Wang W Q, Lin P. Dynamics of element contents during the development of hypocotyls and leaves of certain mangrove species. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 1999, **233**: 247~257.
- [21] Boon P I, Allaway W G. Assessment of leaf-washing techniques for measuring salt secretion in *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Aust. J. Plant. Physiol.*, 1982, **9**: 725~734.
- [22] Boon P I, Allaway W G. Rates and ionic specificity of salt secretion from excised leaves of the mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Aquat. Bot.*, 1986, **26**: 143~153.
- [23] Drennan P, Pammenter N W. Physiology of salt secretion in the mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *New Phytol.*, 1982, **91**: 597~606.
- [24] Sobrado M. Effect of drought on leaf gland secretion of the mangrove *Avicennia germinans* L. *Trees*, 2002, **16**: 1~4.
- [25] Ball M C, Chow W S, Anderson J M. Salinity-induced potassium deficiency causes loss of functional photosystem II to NaCl in leaves of the grey mangrove, *Avicennia marina*, through depletion of the atrazine-binding polypeptide. *Aust. J. Plant. Physiol.*, 1987, **14**: 351~361.
- [26] Naidoo G. Effects of salinity and nitrogen on growth and relations in the mangrove, *Avicennia* (Forsk.) Vierh. *New Phytol.*, 1987, **107**: 317~325.
- [27] Hwang Y H, Chen S C. Effects of ammonium, phosphate, and salinity on growth, gas exchange characteristics, and ionic contents of seedlings of mangrove *Kandelia candel* (L.) Druce. *Bot. Bull. Acad. Sin.*, 2001, **42**: 131~139.
- [28] Flowers T J, Hajibagheri M A, Clipson N J W. Halophytes. *Quarterly Rev. Biol.*, 1986, **61**: 313~337.
- [29] Munns R, Passioura J B. Effect of prolonged exposure to NaCl on the osmotic pressure of leaf xylem sap from intact transpiring barley plants. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1984, **11**: 497~507.
- [30] Torrecillas A, Rodríguez P, Sánchez-Blanco M J. Comparison of growth, leaf water relations and gas exchange of *Cistus albidus* and *C. monspeliensis* plants irrigated with water of different NaCl salinity levels. *Sci. Hortic.*, 2003, **97**: 353~368.