

## 白骨壤对关键环境因子的生态响应研究进展\*

# Ecological Responses of *Avicennia marina* to Key Environmental Factors: A Review

黄灵玉<sup>1,2</sup>, 胡宝清<sup>1</sup>, 范航清<sup>2</sup>

HUANG Ling-yu<sup>1,2</sup>, HU Bao-qing<sup>1</sup>, FAN Hang-qing<sup>2</sup>

(1. 广西师范学院地理科学与规划学院, 广西南宁 530001; 2. 广西科学院 广西红树林研究中心, 广西红树林保护重点实验室, 广西北海 536000)

(1. School of Geography and Planning, Guangxi Teachers Education University, Nanning, Guangxi, 530001, China; 2. Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi, 536000, China)

**摘要:**白骨壤(*Avicennia marina*)是红树林生态系统的先锋植物。为适应低温、高盐、淹水、土壤缺氧和潮水冲击等诸多不良因子的影响,白骨壤已特化出一套适应机制:包括形态结构、水分、光合作用、蒸腾作用、气孔导度、生物量和生长等。本文综述了白骨壤对低温、盐度、土壤、潮水浸淹、风浪作用等环境因子的生态响应,指出白骨壤作为先锋树种和乡土树种,对环境具有较强的耐受性和适应性并能有效保护生态安全,可作为红树林造林优先选择的树种,应深入研究其与各环境因子的生态响应机制,为红树林造林地选择及生态修复提供科学依据。

**关键词:**白骨壤 环境因子 生态响应

**中图分类号:** Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2014)04-0257-06

**Abstract:** *Avicennia marina* is a pioneer mangrove plant with a wide geographical and climatic distribution across the intertidal region where conditions are usually harsh, restrictive and dynamic. To cope with the impacts of intertidal environment, *A. marina* has developed a set of adaptation mechanisms in the terms of morphology, moisture content, photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, biomass and growth etc. For the purpose of promoting the protection and restoration of mangrove ecosystem, ecological responses of *A. marina* to temperature, salinity, soil properties, tidal waterlogging and water strength, etc, were reviewed in this paper. As a pioneer and indigenous mangrove plant, *A. marina* is highly tolerant and capable of protecting ecological security. Thus further studies should be conducted on the ecological response mechanism between *A. marina* and environmental factors.

**Key words:** *Avicennia marina*, environmental factors, ecological response

白骨壤(*Avicennia marina*)是马鞭草科多年生红树植物,广泛分布在印度洋和太平洋地区<sup>[1]</sup>,最

北可见于科威特接近 30°N 的地区<sup>[2]</sup>,最南于 38°S 的 Westernport Bay<sup>[3]</sup> 和 新西兰<sup>[4]</sup>,跨越纬度达 68°,也是中国分布面积最大的红树植物种类<sup>[5]</sup>,天然分布于海南三亚(18°N)到福建泉州(24°N)。白骨壤主要生长在潮间带的外滩,高潮带也可存活<sup>[6]</sup>,是红树植物中的先锋树种,具有适应性强、耐受性高等特点。由于白骨壤可生长于其它红树植物难以生长的裸滩,这为红树演替后期树种提供良好的生境,已成

收稿日期:2014-08-10

修回日期:2014-09-05

作者简介:黄灵玉(1987-),女,硕士,主要从事红树林湿地研究。

\* 中国滨海湿地资源及其主要生态环境效益综合调查项目(2013FY111805)和红树林海草系统保育与生态监测广西特聘专家专项资助。

为湿地人工造林优先考虑的树种。20世纪90年代我国已开展了白骨壤等红树先锋树种的育苗试验<sup>[7]</sup>,并摸索出了较成熟的育苗技术,但海滩的地理条件和气候因素仍严重影响着白骨壤的造林成活率<sup>[8]</sup>,尤其是低温、盐度、土壤基质、潮水浸淹、风浪等。本文在参阅前人的研究成果的基础上,就白骨壤对上述5类环境因子的生态响应研究进行综述。

## 1 低温

### 1.1 低温对白骨壤分布的影响

低温是限制红树林向高纬度分布的重要因子<sup>[9]</sup>。大多数红树植物对低温很敏感,抗寒能力较弱,一般只能分布于最冷月平均温度不低于20℃的区域。白骨壤是红树植物中抗寒能力较强的树种之一,其分布范围向北可延伸到日本南部的宫吉岛<sup>[10]</sup>,向南可延伸到澳大利亚南部和新西兰等亚热带和温带地区<sup>[11]</sup>。在我国,张尧挺等<sup>[12]</sup>把白骨壤划分为抗低温广布种,最北可分布到福建泉州。Stuart等<sup>[13]</sup>对温度限制红树植物沿纬度分布的相关机理进行了研究,发现位于较低纬度的美洲大红树(*Rhizophora mangle*)、黑皮红树(*Avicennia germinans*)和红海榄(*Rhizophora stylosa*)导管直径较大,霜冻结冰引起了严重的导管栓塞,而位于较高纬度的白骨壤和桐花树(*Aegiceras corniculatum*)导管直径较小,霜冻结冰引起的导管栓塞不严重。因此,白骨壤较小的导管直径可能是它能在较高纬度分布的重要条件。Field等<sup>[14]</sup>也做了类似的研究,发现霜冻结冰引起导管传导功能丧失,50%的导管直径阈值为20~25μm,而白骨壤导管直径约为18μm,霜冻诱导的导管功能丧失几率为13%~14%。这说明白骨壤细而密的导管是其对低温适应的重要生理生态响应。

### 1.2 低温对白骨壤生长及生理过程的影响

低温影响植物生长发育、生理和光合特性<sup>[15]</sup>。对于白骨壤,低温会延长其物候期,推迟其开花结果的时间。如在澳大利亚南部温带地区,日均温度只有18℃,白骨壤几乎开不了花<sup>[16]</sup>。在低温胁迫处理下,白骨壤叶片热值降低,水分平衡失调,生理代谢活动减缓,这样可避免遭受更为严重的伤害<sup>[17]</sup>。当白骨壤的低温伤害症状出现时,光合速率明显降低。有实验研究表明,白骨壤叶片温度从25℃降低到15℃时,光合速率和气孔导度分别降低了46%和44%<sup>[18]</sup>。

全球气候变化伴随着飓风、洪水、干旱、森林火

灾以及其他极端气象事件发生的频率和强度增加<sup>[19]</sup>,可能会使白骨壤遭受严重伤害。如2008年初的南方低温寒害,使华南沿海各省的红树林遭受了不同程度的危害。其中,广西沿海降温幅度最大,防城港和钦州的白骨壤受害最为严重,近30%的叶片枯黄。福建沿海降温幅度较小,且该地区白骨壤由于长期适应于冬季较低的气温或在种植前经过抗寒锻炼,具有较强的抗寒能力,白骨壤没有出现叶片枯黄现象<sup>[20]</sup>。可见,白骨壤对温度的耐受能力与起源地密切相关,在白骨壤选种育苗时,种苗所在地的温度与造林地的温度条件应尽量相似。同时,为提高白骨壤的抗寒能力,在育苗过程中应对白骨壤进行抗寒驯化。

## 2 盐度

红树植物为适应长期高盐度的生长环境,一般有抗盐性和泌盐性的生态适应特点。白骨壤属于较典型的泌盐性植物,其叶片或茎表皮细胞可分化成盐腺,以此来排除体内多余的盐分,维持体内盐类低浓度,从而减轻盐对植物的伤害<sup>[21]</sup>,已被认为是最耐盐的红树植物种类<sup>[22]</sup>。有研究表明,桐花树和白骨壤在25%NaCl浓度的海水下均生长很快,但从幼苗生长、生物量、无机离子含量等指标来看,白骨壤比桐花树的耐盐性强<sup>[23]</sup>。叶勇等<sup>[24]</sup>也做了类似的研究,发现白骨壤的泌盐能力和对盐胁迫的耐受性较老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)和桐花树高。范航清等<sup>[25]</sup>对北仑河口红树林分布调查显示,白骨壤在河口上游有少量生长,在盐度较高的近海分布明显增多。

适当的盐胁迫还能促进白骨壤的生长。比如在25%~50%NaCl浓度的海水中白骨壤生物量会增加<sup>[26]</sup>。而过低的盐度则不利于白骨壤与其他植物的竞争。当盐度超过白骨壤生长适宜范围时,白骨壤体内的主要生理过程会受到影响。如盐度过高会使白骨壤叶片的气孔导度变小,蒸腾作用减弱,表现出盐生植物和某些旱生植物的特征,来适应改变了的环境<sup>[27]</sup>。盐胁迫还会使白骨壤叶片的泌盐作用增强,叶和茎中的膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)含量升高,会加速植物体内自由基对膜的破坏作用。但是白骨壤根系对盐胁迫的响应与叶片完全相反,这可能与根中自由基清除系统活性高有关<sup>[28]</sup>。长期高盐胁迫会使白骨壤叶片积累大量的无机离子,而水分缺少,同时植物体内的K<sup>+</sup>浓度降低,会引起生理代谢功能紊乱,这些都直接或间接地导致白骨

壤光合作用减弱<sup>[29]</sup>。

### 3 土壤基质

白骨壤耐贫瘠,能生长在有机质少、养分含量低、土壤质地粗的裸滩上,有海上“马尾松”的美称。广西海滩主要为岩滩、沙滩和沙泥滩,淤泥滩很少,而白骨壤在广西海滩分布普遍,尤其能在沙质土上形成建群种,成为广西分布面积最大的红树林群落<sup>[30]</sup>。郑德璋等<sup>[31]</sup>的研究也表明,白骨壤对土壤的要求低,能生长在贫瘠的沙质土上。

不同的滩位或土壤质地(淤泥、半泥沙或沙质)白骨壤的生长状况也不同,以淤泥质潮滩生长最好。由向陆林带到向海林带白骨壤群落生长状况逐渐变差<sup>[32]</sup>。在养分丰富、土壤肥沃的淤泥质土内滩,白骨壤生长最高可达 3m,在沙土贫瘠,养分不足的外滩,白骨壤生长状况差,无明显主干,呈灌丛状,高度一般只有 1~1.2m<sup>[33]</sup>。

反过来白骨壤也会影响外滩土壤的发育过程,其先锋植株具有固沙聚淤作用,可使海水带来的粘粒沉积下来,加速土壤淤积,其枯枝落叶、死亡根系都会使土壤的有机质含量增加。经过多代白骨壤种群的改造,土壤养分和粘粒含量增加,土壤条件得到改善,不仅有利于白骨壤植株的生长,也有利于其他红树植物种类胚轴的插入和固着生长<sup>[34]</sup>。

### 4 潮水浸淹

#### 4.1 潮水浸淹对白骨壤根的形态结构的影响

白骨壤多分布在低潮区,受潮水浸淹的时间较长,发育有庞大的指状呼吸根以适应缺氧的生境。Dahdouh-Guebas 等<sup>[35]</sup>对肯尼亚 Gazi Bay 的白骨壤呼吸根的研究中发现,白骨壤呼吸根的密度非常高,特别是在临海区,平均密度为 1091.28m<sup>2</sup>,最高甚至达 1950m<sup>2</sup>。呼吸根富含气道,而白骨壤根中通气组织高达 70%,能保证根系供氧维持正常生长水平,在完全淹没时还起着储存氧气作用<sup>[36]</sup>。如具有 3~9 个呼吸根的较大的白骨壤植株根系中贮存的氧气至少可以在淹水条件下保持 6h 的有氧呼吸<sup>[37]</sup>。可见高密度的指状呼吸根是白骨壤对长期水淹环境生态适应的结果。

根系表面的皮孔是气体交换的门户。白骨壤的每个呼吸根上大约有 25 个皮孔,而在呼吸根与地下水平根系的交界处,皮孔还不止 25 个<sup>[38]</sup>。白骨壤具有皮孔的呼吸根在淹水后 3min 后可以完全恢复氧气的运送,而没有皮孔的呼吸根至少需要 10min

才能恢复根内氧气的运送<sup>[36]</sup>。皮孔不仅有利于氧气的进入,也有利于挥发性物质如乙醇和乙烯等的排出<sup>[39]</sup>。

#### 4.2 潮水浸淹对白骨壤生长与生理过程的影响

浸淹时间过长将导致白骨壤的一些生长发育特性改变,如生长减缓、叶片衰老、气孔关闭、光合速率下降等<sup>[40]</sup>。对白骨壤小苗的淹水胁迫研究表明:叶绿素含量、根活力、生物量及生长量随淹水时间的延长均有先增后减的趋势,均在 8~12h·d<sup>-1</sup>的淹水处理下保持较高值,淹水时间≥16h·d<sup>-1</sup>后,生长变差,生物量显著下降<sup>[41]</sup>。长期处于淹水状态会导致白骨壤生境缺氧严重,沉积物厌氧增强,产生毒害物质,如 CH<sub>4</sub>、FeS 等,植物体也会产生乳酸、乙醇和苹果酸等毒害物质,阻碍白骨壤生长<sup>[42,43]</sup>。根系的缺氧环境也会使白骨壤叶片的水势和气孔导度减少,光合作用和呼吸作用受到极显著抑制<sup>[44]</sup>。

### 5 风浪

风浪影响着红树林沿海岸纵向的分布格局<sup>[45]</sup>。白骨壤与其他红树植物一样一般分布于港湾、河口湾、泻湖水域、海岸沙坝等受到风浪良好掩护的地方。强波浪作用的岸线不仅妨碍泥沙沉积而且直接阻碍胚轴着床定植过程,幼苗生长也会受到影响<sup>[46]</sup>。

白骨壤根系发达,发育有 4 种类型的根:缆状根、气生根、营养根和锚根,其中缆状根可伸展到离植株体超过 10m 的地方<sup>[47]</sup>。白骨壤庞大的根系,特别是发达的缆状根,使植物体牢牢地扎根于滩涂上,加上植株交错生长形成严密的栅栏,增强了海滩面的摩擦力,从而起到阻挡水流、减弱流速作用。

白骨壤能够生长在风浪大、水流活动频繁的外滩上与其繁殖体的隐胎生现象有关。白骨壤繁殖体能从母树上不断积累营养和能量,发育有一些幼苗的特征,使其落地之后便是一个完善的个体<sup>[48]</sup>。当水流减缓,繁殖体迅速搁浅定植,幼苗的根生长到一定长度后,便能阻挡风浪和海流的水动力,避免再次漂浮<sup>[49]</sup>。因此,白骨壤繁殖体大多定植生长在母树的附近,一般在 1km 之内,极少数能分散到 10km 之外<sup>[50,51]</sup>。

有学者对白骨壤等红树植物的消浪作用进行了定量化的研究。Phuoc 等<sup>[52]</sup>测定了越南南部 Can Gio 的红树林消浪作用。该地区红树林植被在林带的前缘 100m 分布有白骨壤群落和红树科植物群落。波浪经过红树林仅 20m 后,在林缘水深为

1.9m 或 2.1m 的情况下,波高降低约 50%~70%;波浪经过红树林 40m 后,在林缘水深为 2.5m 的情况下,波高降低约 50%。虽然白骨壤的抗风浪能力较红树属植物差<sup>[53]</sup>,但对于生长在外滩上,最先遭受浪击影响的白骨壤来说,其对外海波浪的消弱作用不可忽视。

## 6 结束语

总体来说,白骨壤对温度、盐度、土壤、潮水浸淹及风浪等环境因子的适应性、耐受性较强,可以生长在环境条件较为恶劣的生境中。不同的环境条件影响,白骨壤所表现的生态适应特征也不同。因此在引种时,树种来源地的环境条件与造林地的环境条件要相似,以提高造林的成活率。

近年来我国红树林造林树种多选择无瓣海桑,但其是否会造成生态入侵尚不能确定,为确保生态安全,应结合宜林地的状况优先考虑乡土树种<sup>[54]</sup>。白骨壤的耐受性和适应性较强,是一种良好的造林先锋红树植物种。鉴于造林成功与否与造林地环境条件密切相关,红树植物对各环境因子的生态响应研究将会持续升温。

### 参考文献:

- [1] Maguire T L, Peakall R, Saenger P. Comparative analysis of genetic diversity in the mangrove species *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. (Avicenniaceae) detected by AFLPs and SSRs [J]. *Theor Appl Genet*, 2002, 104: 388-398.
- [2] Dodd R S, Blasco F, Rafii Z A, et al. Mangroves of the United Arab Emirates: Ecotypic diversity in cuticular waxes at the bioclimatic extreme [J]. *Aquatic Botany*, 1999, 63: 291-304.
- [3] Duke N C. Phenological trends with latitude in the mangrove tree *Avicennia marina* [J]. *Journal of Ecology*, 1990, 78: 113-133.
- [4] De Lange Willem P, de Lange P J. An appraisal of factors controlling the latitudinal distribution of mangrove (*Avicennia marina* var. *resinifera*) in New Zealand [J]. *Journal of Coastal Research*, 2001, 9(3): 219-223.
- [5] 国家林业局森林资源管理司. 全国红树林资源调查报告[R]. 北京: 中华人民共和国国家林业局, 2002. Forestry Division of Forest Resources Management, National Survey of Mangrove Resources[R]. Beijing: State Forestry Administration of the People's Republic of China, 2002.
- [6] 周涵韬, 林鹏. 盐胁迫下红树植物蛋白质的比较分析[J]. *海洋科学*, 2007, 34(4): 5-7.
- [7] Zhou H T, Lin P. Comparative study of *Avicennia marina* proteins salt-tolerant conditions using two-dimensional electrophoresis [J]. *Marine Sciences*, 2007, 34(4): 5-7.
- [8] 陈伟, 钟才荣. 红树植物白骨壤的育苗技术[J]. *热带海洋*, 2006, 34(4): 26-27.
- [9] Chen W, Zhong C R. Nursery technology of mangrove *Avicennia marina* plant [J]. *Tropical Forestry*, 2006, 34(4): 26-27.
- [10] 林鹏. 红树林的种类及其分布[J]. *林业科学*, 1987, 23(4): 481-490.
- [11] Lin P. Distribution of mangrove species [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1987, 23(4): 481-490.
- [12] 林鹏, 沈瑞池, 卢昌义. 六种红树植物的抗寒特性研究[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1994, 33(2): 249-139.
- [13] Lin P, Shen R C, Lu C Y. The characteristics of chilling-resistance on six mangrove plants [J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 1994, 33(2): 249-139.
- [14] Wakushima S, Kuraishi S, Sakurai N. Soil salinity and pH in Japanese mangrove forests and growth of cultivated mangrove plants in different soil conditions [J]. *Journal of Plant Research*, 1994, 107: 39-46.
- [15] Duke N C. A systematic revision of the mangrove genus *Avicennia* (Avicenniaceae) in Australia [J]. *Aust J Syst Bot*, 1991, 4: 299-324.
- [16] 张尧挺, 林鹏. 中国海岸红树植物区系研究[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1984, 23(2): 232-239.
- [17] Zhang R T, Lin P. Studies on the flora of mangrove-plants from the coast of China [J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 1984, 33(2): 249-239.
- [18] Stuart S A, Choat B, Martin K C, et al. The role of freezing in setting the latitudinal limits of mangrove forests [J]. *New Phytologist*, 2007, 173: 576-583.
- [19] Field T S, Brodribb T. Stem water transport and freeze-thaw xylem embolism in conifers and angiosperms in a Tasmanian treeline heath [J]. *Oecologia*, 2001, 127: 314-320.
- [20] 郭淑红, 薛立, 张柔, 等. 4种幼苗对低温胁迫的光合生理响应[J]. *华南农业大学学报*, 2012, 33(3): 373-377.
- [21] Guo S H, Xue L, Zhang Y, et al. Photosynthetic response of four species seedlings to low temperature stress [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2012, 33(3): 373-377.
- [22] Duke N C. Phenological trends with latitude in the

- mangrove tree *Avicennia marina* [J]. Journal of Ecology, 1990, 78: 113-133.
- [17] 杨盛昌, 李云波, 林鹏. 冷胁迫下红树植物白骨壤和桐花树叶片热值的变化[J]. 台湾海峡, 2003, 22 (1): 46-52.  
Yang S C, Li Y B, Lin P. Change of leaf caloric value from *Avicennia marina* and *Aegiceras corniculatum* mangrove plant sunder cold stress [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2003, 22 (1): 46-52.
- [18] Wen Y K, Chen N S, Tyng T T. Sensitivity to chilling temperatures and distribution differ in the mangrove species *Kandelia candel* and *Avicennia marina* [J]. Tree Physiology, 2004, 24: 859-864.
- [19] IPCC ( Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC fourth assessment report [R]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al(eds). Climate Change in 2007: The Physical Science Basis. Cambridge, Cambridge University Press, 2007: 996.
- [20] 陈鹭真, 王文卿, 张宜辉, 等. 2008年南方低温对我国红树植物的破坏作用[J]. 植物生态学报, 2010, 34 (2): 186-194.  
Chen L Z, Wang W Q, Zhang Y H, et al. Damage to mangroves from extreme cold in early 2008 in southern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34 (2): 186-194.
- [21] 林鹏. 中国红树林生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
Lin P. Mangrove Ecosystem in China[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [22] Elster C, Perdomo L, Schnetter M L. Impact of ecological factors on the regeneration of mangroves in the Cinaga Grande de Santa Marta, Colombia [J]. Hydrobiologia, 1999, 413: 35-46.
- [23] Burchett M D, Clarke C J, Field C D, et al. Growth and respiration in two mangrove species at a range of salinities[J]. Physiol Plant, 1989, 75(2): 299-303.
- [24] 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): 2444-2450.  
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): 2444-2450.
- [25] 范航清, 何斌源. 北仑河口的红树林及其生态恢复原则[J]. 广西科学, 2001, 8(3): 210-214.  
Fan H Q, He B Y. The mangroves and their ecological restoration principles of Beilun Estuary, Guangxi, China[J]. Guangxi Sciences, 2001, 8(3): 210-214.
- [26] Khan A M, Aziz I. Salinity tolerance in some mangrove species from Pakistan [J]. Wetlands Ecology and Management, 2001, 9: 219-223.
- [27] 郑海雷, 林鹏. 红树植物白骨壤对盐度的某些生理反应[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1997, 36 (1): 135-139.  
Zhen H L, Lin P. Some physiological responses of *Avicennia marina* to Salinity[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 1997, 36(1): 135-139.
- [28] Ball M C, Farquhar D G. Photosynthetic and stomatal responses of two mangrove species, *Aegiceras corniculatum* and *Avicennia marina*, to long term salinity and humidity conditions [J]. Plant Physiol, 1984, 74: 1-6.
- [29] Burchett M D, Clarke C J, Field C D, et al. Growth and respiration in two mangrove species at a range of salinities[J]. Physiologia Plantarum, 1989, 75 (2): 299-303.
- [30] 梁士楚. 广西红树林群落的数量分类[J]. 广西科学院学报, 1993, 9 (2): 8-12.  
Liang S C. Numerical classification of mangrove communities in Guangxi[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 1993, 9(2): 8-12.
- [31] 郑德璋, 廖宝文, 郑松发. 红树林主要树种造林与经营技术研究[M]. 北京: 科技出版社, 1993: 248-365.  
Zhen D Z, Liao B W, Zheng S F. Studies on the Techniques of Afforestation and Management of Main Mangrove Species[M]. Beijing: Science Press, 1993: 248-365.
- [32] 范航清, 尹毅, 劳丽荣. 广西海岸白骨壤红树植物地上部生物量的相关分析[J]. 广西科学院学报, 1993, 9 (2): 25-30.  
Fan H Q, Yin Y, Lao L R. Correlation analysis of aboveground biomass of coastal mangrove *Avicennia marina* in Guangxi[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 1993, 9 (2): 25-30.
- [33] 李信贤, 温远光, 何妙光. 广西红树林类型及生态[J]. 广西农学院学报, 1991, 10 (4): 70-81.  
Li X X, Wen Y G, He M G. The types and ecology of mangrove in Guangxi autonomous region[J]. Journal Guangxi Agricultural College, 1991, 10 (4): 70-81.
- [34] 范航清, 尹毅, 黄向东, 等. 广西沙生红树植物——土壤相互作用及群落演替的研究[J]. 广西科学院学报, 1993, 40(2): 26-29.  
Fan H Q, Yin Y, Huang X D, et al. Interaction of sandy mangrove plant-soil and succession of community in Guangxi[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 1993, 40(2): 26-29.

- [35] Dahdouh-Guebas F, De Bondt R, Abeysinghe P D, et al. Comparative study of the disjunct zonation pattern of the grey mangrove *Avicennia Marina* (Forsk.) Vierh. in Gazi Bay (Kenya) [J]. Bulletin of Marine Science, 2004, 74(2): 237-252.
- [36] Curran M. Gas movements in the roots of *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1985, 12(2): 97-108.
- [37] Curran M, Cole M, Allaway W G. Root aeration and respiration in young mangrove plants (*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh) [J]. Exp Bot, 1986, 37: 1225-1233.
- [38] Hovenden M J, Allaway W G. Horizontal structures on pneumatophores of *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh—a new site of oxygen conductance [J]. Ann Bot, 1994, 73: 377-383.
- [39] 余叔文, 汤章城. 植物生理与分子生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 739-751.  
Yu S W, Tang Z C. Plant Physiology and Molecular Biology [M]. Beijing: Science Press, 1998: 739-751.
- [40] Naidoo G, Rogalla H, von Willert D J. Gas exchange responses of a mangrove species, *Avicennia marina*, to waterlogged and drained conditions [J]. Hydrobiologia, 1997, 352: 39-47.
- [41] 廖宝文, 邱凤英, 张留恩, 等. 红树植物白骨壤小苗对模拟潮汐淹没时间的生长适应性 [J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1345-1351.  
Liao B W, Qiu F Y, Zhang L E, et al. Adaptability of mangrove *Avicennia marina* seedlings to simulated tide-inundated times [J]. Environmental Science, 2010, 31(5): 1345-1351.
- [42] Udy J W, Dennison W C. Growth and physiological responses of three seagrass species to elevated sediment nutrients in Moreton Bay, Australia [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1997, 217(2): 253-277.
- [43] 卢吕文, 高海燕, 陈光程, 等. 盐渍和水渍对高等植物的联合作用 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2005, 44(增刊): 69-74.  
Lu L Y, Gao H Y, Chen G C, et al. Combined effects of water logging and salinification on higher plants [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2005, 44 (Sup. ): 69-74.
- [44] Pezeshki S R, Delaune R D, Patrick W H Jr. Differential response of selected mangroves to soil flooding and salinity: Gas exchange and biomass [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1990, 20(7): 869-874.
- [45] 刘亮, 范航清. 红树林宜林因子研究 [J]. 湿地科学与管理, 2010, 6(2): 57-60.  
Liu L, Fan H Q. A review on suitable factors for mangrove plantation [J]. Wetland Science & Management, 2010, 6(2): 57-60.
- [46] Rao A N. Mangrove ecosystems of Asia and Pacific [C]//NUDP/UNESCO. Mangrove of Asia and the Pacific: Status and Management. Technical Report of the NUDP/UNESCO Research and Training Pilot Programme on Mangrove Ecosystem in Asia and the Pacific (RAS/79/002). Quezou: JMC Press, 1986, 1-48.
- [47] Purnobasuki H, Suzuki M. Aerenchyma tissue development and gas-pathway structure in root of *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh [J]. J Plant Res, 2005, 118: 285-294.
- [48] 闫中正, 王文卿, 黄伟滨. 红树胎生现象及其对潮间带生境适应性研究进展 [J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2317-2323.  
Yan Z Z, Wang W Q, Huang W B. Development of the viviparous hypocotyl of mangrove and its adaptation to inter-tidal habitats: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2317-2323.
- [49] Balke T, Bouma T J, Horstman E M, et al. Windows of opportunity: Thresholds to mangrove seedling establishment on tidal flats [J]. Marine Ecology Progress, 2011, 440: 1-9.
- [50] Clarke P J, Myerscough P J. Buoyancy of *Avicennia marina* propagules in South-eastern Australia [J]. Aust J Bot, 1991, 39: 77-83.
- [51] Clarke P J. Dispersal of grey mangrove (*Avicennia marina*) propagules in southeastern Australia [J]. Aquatic Botany, 1993, 45: 195-204.
- [52] Phuoc V L H, Massel S R. Experiments on wave motion and suspended sediment concentration at Nang Hai, Can Gio mangrove forest, Southern Vietnam [J]. Oceanologia, 2006, 48 (1): 23-40.
- [53] Kathiresan K, Rajendran N. Coastal mangrove forests mitigated tsunami [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 65(3): 601-606.
- [54] 彭逸生, 周炎武, 陈桂珠. 红树林湿地恢复研究进展 [J]. 生态学报, 2008, 28(2): 786-797.  
Peng Y S, Zhou Y W, Chen G Z. The restoration of mangrove wetland: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 786-797.