

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

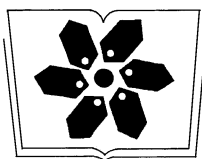
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 24 期
Vol.30 No.24
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 24 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

三江平原残存湿地斑块特征及其对物种多样性的影响	施建敏, 马克明, 赵景柱, 等 (6683)
叶片碳同位素对城市大气污染的指示作用	赵德华, 安树青 (6691)
土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响	张容娟, 布乃顺, 崔 军, 等 (6698)
缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用	董 燕, 王正银 (6707)
北京海淀公园绿地二氧化碳通量	李 霞, 孙 睿, 李 远, 等 (6715)
三峡库区消落带生态环境脆弱性评价	周永娟, 仇江啸, 王 姣, 等 (6726)
应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系	张 丹, 闵庆文, 成升魁, 等 (6734)
基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析	杨足膺, 赵 媛, 付伍明 (6741)
中国土地利用多功能性动态的区域分析	甄 霖, 魏云洁, 谢高地, 等 (6749)
遮荫处理对东北铁线莲生长发育和光合特性的影响	王云贺, 韩忠明, 韩 梅, 等 (6762)
臭氧胁迫对冬小麦光响应能力及 PS II 光能吸收与利用的影响	郑有飞, 赵 泽, 吴荣军, 等 (6771)
地表覆草和覆膜对西北旱地土壤有机碳氮和生物活性的影响	谢驾阳, 王朝辉, 李生秀 (6781)
喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子	彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等 (6787)
极干旱区深埋潜水蒸发量的测定	李红寿, 汪万福, 张国彬, 等 (6798)
灌木林土壤古菌群落结构对地表野火的快速响应	徐赢华, 张 涛, 李 智, 等 (6804)
稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响	区惠平, 何明菊, 黄 景, 等 (6812)
造纸废水灌溉对黄河三角洲盐碱地土壤酶活性的影响	董丽洁, 陆兆华, 贾 琼, 等 (6821)
神农宫扁角菌蚊幼虫种群分布及其与环境因子的相关性	顾永征, 李学珍, 牛长缨 (6828)
三亚珊瑚礁水域纤毛虫种类组成和数量分布及与环境因子的关系	谭烨辉, 黄良民, 黄小平, 等 (6835)
淞江鲈在中国地理分布的历史变迁及其原因	王金秋, 成 功 (6845)
黄海中南部小黄鱼生物学特征的变化	张国政, 李显森, 金显仕, 等 (6854)
甲基溴消毒对番茄温室土壤食物网的抑制	陈云峰, 曹志平 (6862)
离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例	盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 等 (6872)
乡土植物芦苇对外来入侵植物加拿大一枝黄花的抑制作用	李愈哲, 尹 昕, 魏 维, 等 (6881)
遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征	王 倩, 艾应伟, 裴 娟, 等 (6892)
古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量	孙鹏飞, 周宏飞, 李 彦, 等 (6901)
碟果虫实种子萌发对策及生态适应性	刘有军, 刘世增, 纪永福, 等 (6910)
原始兴安落叶松林生长季净生态系统 CO ₂ 交换及其光响应特征	周丽艳, 贾丙瑞, 曾 伟, 等 (6919)
五种红树植物通气组织对人工非潮汐生境的响应	伍卡兰, 彭逸生, 郑康振, 等 (6927)
亚高寒草甸不同生境植物群落物种多度分布格局的拟合	刘梦雪, 刘佳佳, 杜晓光, 等 (6935)
内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征	张 果, 周广胜, 阳伏林 (6943)
中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应	李甜江, 李根前, 徐德兵, 等 (6952)
增温与放牧对矮蒿草甸 4 种植物气孔密度和气孔长度的影响	张立荣, 牛海山, 汪诗平, 等 (6961)
基于 ORYZA2000 模型的北京地区早稻适宜播种期分析	薛昌颖, 杨晓光, 陈怀亮, 等 (6970)
专论与综述	
区域生态安全格局研究进展	刘 洋, 蒙古军, 朱利凯 (6980)
植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能	王 平, 盛连喜, 燕 红, 等 (6990)
农田水氮关系及其协同管理	王小彬, 代 快, 赵全胜, 等 (7001)
虫害诱导挥发物的生态调控功能	王国昌, 孙晓玲, 董文霞, 等 (7016)
土壤微生物资源管理、应用技术与学科展望	林先贵, 陈瑞蕊, 胡君利 (7029)
问题讨论	
从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势	黄茹莉, 徐中民 (7038)
基于植物多样性特征的武汉市城市湖泊湿地植被分类保护和恢复	郑忠明, 宋广莹, 周志翔, 等 (7045)
濒危兰科植物再引入技术及其应用	陈宝玲, 宋希强, 余文刚, 等 (7055)
研究简报	
实验条件下华北落叶松和白杆苗期生长策略的差异比较	张芸香, 李海波, 郭晋平 (7064)
基于源-库互反馈的温室青椒坐果时空动态模拟	马韞韬, 朱晋宇, 胡包钢, 等 (7072)
西双版纳小磨公路及其周边道路对蛇类活动的影响	孙 戈, 张 立 (7079)
温度变化对藻类光合电子传递与光合放氧关系的影响	张 曼, 曾 波, 张 怡, 等 (7087)
黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响	王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等 (7092)
食细菌线虫 <i>Caenorhabditis elegans</i> 的取食偏好性	肖海峰, 焦加国, 胡 锋, 等 (7101)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 424 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 48 * 2010-12

五种红树植物通气组织对人工非潮汐生境的响应

伍卡兰^{1,2,3}, 彭逸生¹, 郑康振¹, 李旭林¹, 陈桂珠^{1,*}

(1. 中山大学环境科学与工程学院/广东省污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275;

2. 深圳市宝安区水产科学研究所, 深圳 518104, 3. 深圳市海上田园旅游发展有限公司, 深圳 518104)

摘要:红树植物自然条件下生长于河口、海岸潮间带。受潮汐作用影响,红树植物在生理、形态、结构上对渍水环境产生了相应的适应机制。其中红树植物通气组织的发达程度与其耐淹水的能力具有很高的相关性,是衡量红树植物耐淹浸能力的重要依据。利用测定孔隙率和石蜡切片面积比两种方法揭示了华南地区 5 种红树植物优势种:白骨壤 (*Avicennia marina*)、红海榄 (*Rhizophora stylosa*)、木榄 (*Bruguiera gymnorhiza*)、秋茄 (*Kandelia candel*) 和桐花树 (*Aegiceras corniculatum*) 在自然条件和人工生境下根通气组织的发育规律,并用石蜡切片研究了茎和叶的通气组织发育状况。结果表明:两种方法测得根的通气组织发育程度的结果相关性显著 ($P < 0.05$)。5 种红树植物通气组织主要产生于根部,茎和叶发育较少,除了潮汐生境中白骨壤根的通气组织为根、茎、叶总和的 48.16%、非潮汐生境中桐花树根为 43.81%,其余树种根部通气组织占总体的 50% 以上。自然潮间带生境中,桐花树、木榄、白骨壤、秋茄、红海榄,通气组织分别为 $(14.98 \pm 3.34)\%$ 、 $(27.83 \pm 2.3)\%$ 、 $(29.64 \pm 3.17)\%$ 、 $(30.09 \pm 4.12)\%$ 、 $(42.12 \pm 3.14)\%$,通气组织比例与其在潮间带上的分带性和演替序列较为吻合。非潮汐人工生境下,红海榄、木榄、秋茄、桐花树和白骨壤根部通气组织较自然生境下均有所增加,说明各树种对非潮汐淹浸条件具备一定的适应力。根据非潮汐生境下通气组织的比例可判定它们对恒定水位的适应能力依次为:桐花树 > 白骨壤 > 秋茄 > 木榄 > 红海榄。红树植物对非潮汐淹浸条件的适应有利于在沿海地区开展人工生境下红树林的栽培与推广应用,研究结果对提高栽培成活率,更限度地发挥红树林的生态服务价值,具有重大的实践意义。

关键词:红树植物;通气组织;非潮汐生境;适应性

Responses of aerenchyma in five mangrove species on artificial-non-tidal habitats

WU Kalan^{1,2,3}, PENG Yisheng¹, ZHENG Kangzhen¹, LI Xulin¹, CHEN Guizhu^{1,*}

1 Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat - Sen University, Guangzhou 510275, China

2 Shenzhen Bao An Fisheries Research Institute, Shenzhen 518104, China

3 Shenzhen Waterlands Tourism Development Ltd., Shenzhen 518104, China

Abstract: In nature, Mangroves grow at estuarines and coastal intertidal area. They have adaptive mechanism of physiological, morphological and structural characters to the water-logging conditions induced by the tidal effects. The development of mangrove aerenchyma was proved to be highly related to their adaptability to inundation, and also considered as the major factor to evaluate the mangrove tolerance to inundation. The root aerenchyma developments were compared between natural and artificial habitats by porosity measurement and paraffin section for *Avicennia marina* (Am), *Rhizophora stylosa* (Rs), *Bruguiera gymnorhiza* (Bg), *Kandelia candel* (Kc) and *Aegiceras corniculatum* (Ac), five dominant mangrove species in southern China. The leaf and stem aerenchyma of these five mangrove species were also studied by paraffin section. Results indicated that the measurements of two methods were statistically significantly correlative ($P < 0.05$) for root aerenchyma. The most of aerenchyma resulted from the roots for these five mangrove trees. The roots

基金项目:国家 863 计划项目 (2007AA091703);联合国环境规划署/全球环境基金“南中国海”资助项目 (GF/3010-07-03)

收稿日期:2009-11-10; **修订日期:**2010-09-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenguizhu@yeah.net

aerenchyma accounted for more than 50% except that root aerenchyma of Am in tidal habitats was 48.16%, and Ac in non-tidal habitats was 43.81% of the sum (in root, stem, and leaf). The aerenchyma of Ac, Bg, Am, Kc, and Rs was $(14.98 \pm 3.34)\%$, $(27.83 \pm 2.3)\%$, $(29.64 \pm 3.17)\%$, $(30.09 \pm 4.12)\%$, and $(42.12 \pm 3.14)\%$ in natural intertidal habitats, respectively. This distribution of aerenchyma was accordant to the mangrove tidal zonation and vegetation successional sequence in the southern China coast. The root aerenchyma of Rs, Bg, Kc, Am, and Ac increased in non-tidal artificial habitats compared to natural tidal habitats, indicating adaptability to non-tidal conditions flooding for these mangrove species in some degree. The increase of root aerenchyma development was least in Ac, while most in Rs. It was inferred that those species of less adaptive to inundation, i. e. Bg and Rs, increased their root aerenchyma more to tolerate steady water level condition. They could be considered as more sensitive to water level change. By contrast, the species of more adaptive to inundation, i. e. Ac and Am, increased their root aerenchyma less. This could be considered as a less sensitive phenomenon to water level change. Under non-tidal conditions, the aerenchyma of Ac, Am, Kc, Bg and Rs was $(56.38 \pm 2.41)\%$, $(40.88 \pm 1.03)\%$, $(39.18 \pm 1.21)\%$, $(35.70 \pm 0.57)\%$ and $(19.28 \pm 0.63)\%$, respectively. Judging from root aerenchyma developments in non-tidal habitats, their adaptabilities to the steady inundation condition were as following sequence: Ac > Am > Kc > Bg > Rs. The adaptability of mangrove to non-tidal inundation condition increased the feasibility. The result was important to enhance the survival rate of mangrove planting, and expand planting area for improving coast ecological services.

Key Words: mangroves; aerenchyma; non-tidal habitats; adaptability

红树林是生长在热带和亚热带海岸潮间带的木本植物群落,拥有巨大的生态、经济、社会价值,在防风防浪、促淤固岸、防护海岸堤坝、调控海岸生态平衡等方面发挥着重要的作用,其生态服务价值在全球 16 类生态系中,位列第四^[1]。随着经济的发展,人口剧增,毁林养殖、海水污染等问题日趋严重,红树林生态系统遭受了严重的破坏。人们日益认识到红树林的重要性,在海岸潮间带开展了一系列的造林活动恢复红树林。学术界普遍认为红树林的生长需要一定潮汐作用^[2-4],但是自然潮间带的立地条件恶劣,严重地制约了红树林的造林成活率和造林面积增长^[5]。

红树植物长期适应潮汐周期性的淹浸生境,涨潮时耐受土壤缺氧胁迫,红树植物根、茎、叶薄壁组织内细胞分离或整个细胞崩溃形成大量的气室或空腔,这些气室或空腔集成通气组织^[6-7]。通气组织作为植物对淹水缺氧条件适应的一项重要指标^[8-10],一方面通过增强对氧的吸收和在体内的扩散或减少向外的逸失,维持组织中适宜的氧水平,以保障其正常的生理功能;另一方面细胞崩溃死亡,细胞组织对氧的需求水平降到最低水平,以维持生存^[8-11],其存在是植物应对渍水条件产生趋避性和耐受性共存的一种适应机制。人工条件下长期水淹环境对红树植物造成的主要环境压力实质与潮汐环境一致,均表现为缺氧胁迫;但是潮汐淹浸具有周期性和固定性的特点,人工非潮汐生境则保持相对恒定的淹浸水位,其淹浸时间和水位由红树林栽培生境的利用状况决定。自然条件下生长在淹浸-干露交替环境中的红树植物是否对人工非潮汐生境的长时间淹浸缺氧环境具有适应性?其通气组织在恒定水位浸淹下会有什么样的变化?解决上面的问题,对于在华南沿海地区海水养殖塘内种植红树林,构建和运转滩涂种植-养殖耦合系统,利用红树林的净化作用实现生态养殖具有决定性的作用。

红树植物经过长期适应与演化,发育出一套适合潮间带生长的抗淹水缺氧机制^[11-12],而且在不同高程的滩涂上,这些生理上和结构上的适应特性具有显著的梯度变化^[13-14]。通气组织的发达程度作为研究红树植物耐潮汐淹水能力的一个重要指标^[15-16],已有不少研究报道^[17],然而非潮汐生境下红树植物对淹水缺氧条件的适应性还未见报道。实践证明红树植物可以在非潮汐生境下生长并发挥净化环境^[18-22]和水产养殖^[23]等方面的作用。探讨红树植物对非潮汐水淹环境的适应能力,研究华南沿海 5 种主要的红树林建群种——白骨壤 (*Avicennia marina*)、红海榄 (*Rhizophora stylosa*)、木榄 (*Bruguiera gymnorrhiza*)、秋茄 (*Kandelia candel*) 和

桐花树 (*Aegiceras corniculatum*) 的通气组织在潮汐和非潮汐生境下的发育、变化规律,选育对人工生境适应性较强的树种开展栽培,对指导红树林在人工生境下的引种、造林具有重要作用。

1 材料与方法

1.1 研究地点的自然环境

1.1.1 深圳福田红树林保护区

深圳福田红树林保护区林地面积约 111 hm²,林带宽几十至 200 m 不等,面临深圳湾,其海岸属不规则半日潮^[24],平均潮差约 1.3 m,对面为香港米埔红树林自然保护区。该地共有红树植物 10 科 11 属 12 种,此外还引种了 5 科 6 属 10 种。红树林群落树高 3—6 m,郁闭度 80% 以上。红树植物群落以秋茄、白骨壤、桐花树为优势种,伴以少量木榄、老鼠簕 (*Acanthus ilicifolius*)、红海榄等^[25]。

1.1.2 深圳海上田园旅游区

深圳海上田园旅游区 (113°45′53.0″E, 22°45′14.4″N) 位于珠江口东岸,深圳西部珠江入海口。国家 863 项目在园区内人工构建了 13 个种植养殖塘和 3 个对照塘,种植岛主要种植卤蕨 (*Acrostichum aureum*)、桐花树、白骨壤、秋茄、木榄、红海榄等红树种。海上田园为人工围垦后构建的养殖塘,水位根据养殖需要而进行人工调控,在养殖周期内基本保持不变,种植岛上的红树植物长期浸淹在没有潮汐变化的恒定水位中,目前生长状况良好。

1.2 实验材料

以华南沿海 5 个主要红树植物种:白骨壤、红海榄、木榄、秋茄、桐花树为研究对象。天然潮间带生境的 5 个树种采自深圳福田红树林自然保护区,非潮汐淹浸生境的 5 个树种来自深圳海上田园旅游发展有限公司。2008 年 10 月,分别从以上两个地方选取胸径相当的 3a 以上的这 5 种红树植物的植株 3 到 5 株,自根尖开始分别每株取 100—150 mm 长的侧根数段,叶取每株植物当年生成成熟叶片若干 (即顶端往下数第 5 到 7 片),取所采叶片着生位置附近的茎若干段,全部剪成小段,现场使用 FAA 固定液固定,带回实验室洗净以备制作石蜡切片。2009 年 1 月,以相同的方法从上述两个地点采集 5 种红树植物的带土鲜根,带回实验室马上进行根孔隙度测定。

1.3 测定方法

1.3.1 孔隙率的测定

选择 100—150 mm 长的侧根若干,大约 0.6—0.8 g,切成 50 mm 小段,利用比重瓶法^[26-29]测定鲜根的孔隙度。

将抽真空 12 h 的蒸馏水注入 25 mL 的耐热比重瓶中,室温下称重,然后将称重后的根样置于注水比重瓶中再次称重。从比重瓶中取出根样移入装满蒸馏水的液闪瓶中吊成真空直到没有所泡产生为止,然后将抽成真空后的根样转回到装满水的比重瓶中再次称重。每次均记录当时的室温以便于计算时的矫正。

孔隙率的计算公式如下:

$$\text{孔隙率}(\%) = 100 \times [(FA - FB) / (FW + TW - FB)]$$

式中,FA 表示抽气后比重瓶、水和根样的总重量;FB 表示抽气前比重瓶、水和根样的重量;FW 表示比重瓶和水的总重量;TW 表示根样的鲜重。

1.3.2 通气组织面积比的测定

采用石蜡切片法获得白骨壤、桐花树、秋茄、木榄、红海榄根、茎、叶横切切片,用 NikonE80i 显微镜观察并运用 ACT-2U 软件和 SimplePCI 软件进行图像捕捉,计算根、茎、叶整个横切切片总面积 (S 总横切面) 和切片中气道 (或空腔) 即通气组织面积 (S 通气组织)^[19]。茎通气组织大小以茎横切面中通气组织面积占整个茎横切面总面积的百分率 (100% × S 通气组织 / S 总横切面) 来度量。

1.4 统计分析

试验结果用算术平均数 (标准误表示)。利用 Microsoft Excel 2003 做图、SPSS 16.0 数据分析软件进行试验

数据的统计计算,进行方差分析前对所有数据进行了正态性及方差齐性检验,并采用 Pearson 相关性分析两种方法所得根部组织的相关性,用 LSD 单因素方差分析(One-Way ANOVA)对根、茎、叶中通气组织的差异性进行检验。

2 结果与分析

2.1 以孔隙率和切片面积比所反映的五种红树植物通气组织的比较

图 1 所示为分别以孔隙率和切片面积比所反应的 5 种红树植物根通气组织的发育情况,由图 1a 可知,潮汐生境中 5 种红树以孔隙率所反应的通气组织最发达为红海榄, (42.12 ± 3.14)%, 随后依次为秋茄, (30.09 ± 4.12)%、白骨壤, (29.64 ± 3.17)%、木榄, (27.83 ± 2.3)%, 桐花树最小, (14.98 ± 3.34)%。以切片面积比所反应的通气组织均小于孔隙率的值,但 5 个红树种间的比较,以孔隙率与切片面积所表示的发达情况基本一致,红海榄的最大,为 (1.28 ± 2.41)%, 白骨壤, (9.7 ± 0.57)%, 秋茄 (9.39 ± 1.21)% 木榄, (7.62 ± 1.03)%, 桐花树 (5.59 ± 0.63)%。潮汐生境下两种方法所表示的白骨壤、秋茄、木榄通气组织差异不显著 ($P > 0.05$), 白骨壤、秋茄、木榄 3 个树种与红海榄、桐花相互之间差异显著。图 1b 中非潮汐生境中 5 个树种以孔隙率和切片面积所反应的发达情况完全一致,最大的红海榄孔隙率为 (56.38 ± 2.41)%、切片面积比 (30.75 ± 4.32)%, 最小的桐花树孔隙率为 (19.28 ± 0.63)%、切片面积比 (7.32 ± 0.42)%。Pearson 秩相关性分析潮汐与非潮汐两种生境中以孔隙率和切片面积比所反应的 5 种红树植物根通气组织显著相关 ($P < 0.05$)。

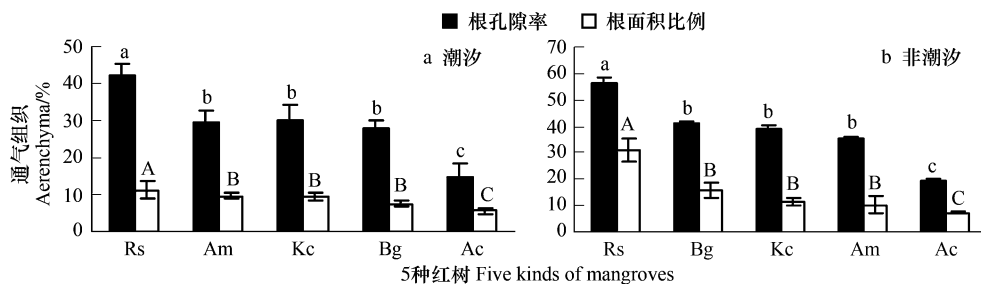


图 1 两种方法表示的红树植物根通气组织的比较

Fig. 1 The comparison of mangrove roots aerenchyma from two methods

图中数据为平均值 $\pm$ 标准误差,同一系列不同字母表示通气组织差异显著(显著性水平 $P = 0.05$), Am: 白骨壤 *Avicennia marina*, Ac: 桐花树 *Aegiceras corniculatum*, Kc: 秋茄 *Kandelia candel*, Rs: 红海榄 *Rhizophora stylosa*, Bg: 木榄 *Bruguiera gymnorhiza*

2.2 通气组织在 5 种红树植物根、茎、叶中的分布情况

红树植物根、茎、叶中通气组织的发育情况以切片面积比的数值来衡量,无论潮汐还是非潮汐生境 5 种红树植物的根均发育出发达的通气组织(图 2),除了潮汐生境中白骨壤根的通气组织为总和的 48.16%、非潮

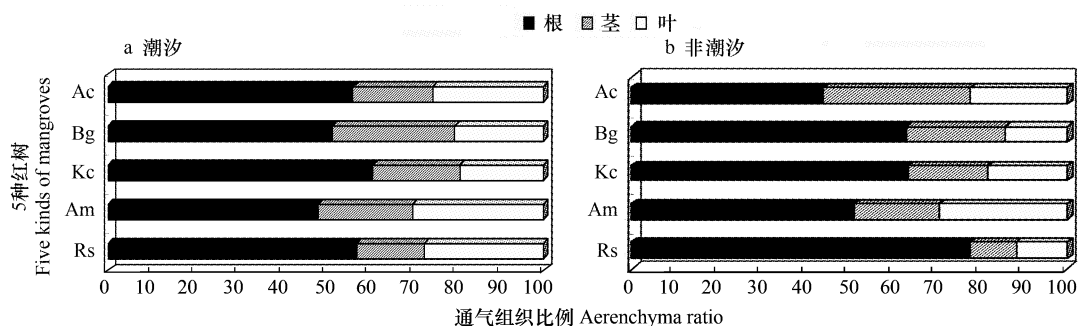


图 2 通气组织在红树植物根、茎、叶中的分布

Fig. 2 The distribution of Aerenchyma in the mangrove roots, stems and leaves

汐生境中桐花树为 43.81%, 其余 4 个树种根部通气组织占总体的一半以上, 潮汐生境中最高为秋茄, 达到总体 60.87%、非潮汐生境中最高为红海榄 77.65%。潮汐和非潮汐生境下 5 种红树植物茎、叶中通气组织差异均不显著 ($P > 0.05$) (LSD 单因素方差分析)。两种不同方式的淹水生境下, 秋茄、木榄茎部通气组织大于叶, 其 3 个树种均为茎部通气组织小于叶。

2.3 天然生境中 5 种红树植物通气组织发达程度比较

图 1a 潮汐生境下 5 种红树植物根通气组织大小表现为红海榄 > 秋茄、白骨壤 > 木榄 > 桐花树, 其中, 以孔隙率所表示的秋茄稍大于白骨壤, 以切片面积比表示的白骨壤稍大于秋茄, 但两者相差极小。图 3a 潮汐生境下 5 种红树植物茎通气组织大小依次为白骨壤、木榄、红海榄、秋茄、桐花树; 叶中通气组织白骨壤最大, 其次为红海榄、桐花树、秋茄, 木榄的最小 (图 3b)。潮汐生境下, 5 个树种不同器官通气组织的发达情况不一, 其中白骨壤茎和叶通气组织均是 5 种中最发达, 桐花树根、茎通气组织均是 5 种中最小的, 其余树种根、茎、叶中通气组织在 5 个树种的比较中不具有同一排序。

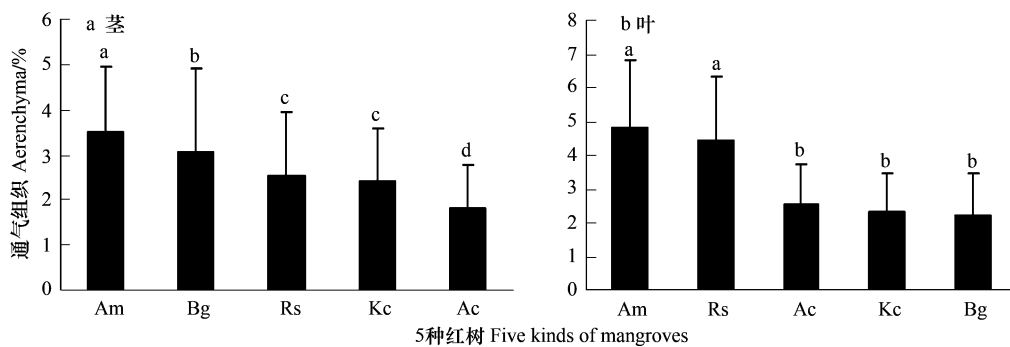


图 3 自然潮间带生境中红树植物茎、叶通气组织比较

Fig. 3 The comparison of mangrove plant stems, leaf aerenchyma in the natural intertidal zone habitats

2.4 非潮汐生境较潮汐生境下红树植物通气组织的变化

非潮汐生境相对潮汐生境, 5 种红树植物以切片面积比所表示的通气组织均出现了增大 (图 4a), 根部通气组织变化最大的为红海榄, 其次为木榄, 秋茄、桐花树, 白骨壤变化最小。其中白骨壤根部变化仅为 0.55%, 叶通气组织变化相对而言是 3 种器官中发生变化最大的, 茎的通气组织和根一样, 变化微小。桐花树在根部通气组织变化很小的情况下, 茎中通气出现了较大的变化, 同时是 5 个树种中茎中通气组织变化最大的。红海榄根中通气组织发生大的变化, 叶中却没出什么变化。秋茄各器官变化较为均匀, 没有某个器官的突变, 也没有某个器官的没有反应。木榄根、茎、叶中通气组织均出现了较大的变化。

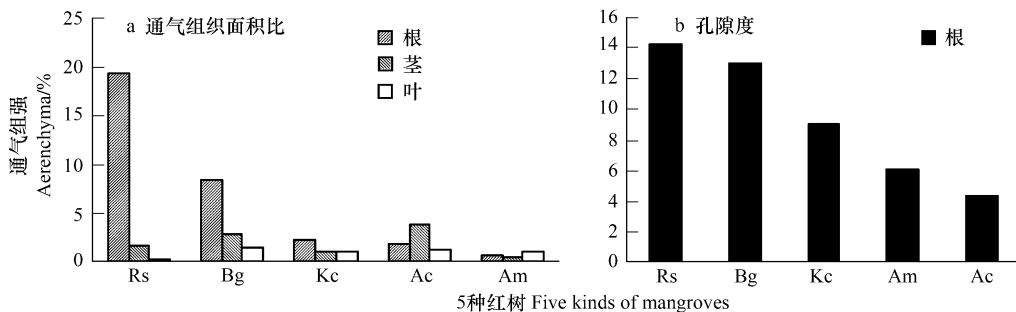


图 4 非潮汐较潮汐生境红树植物通气组织的变化

Fig. 4 The changes of mangrove aerenchyma between non-tidal and tidal habitat

非潮汐生境下, 以孔隙率表示的根部通气组织较潮汐生境也一致出现增大 (图 4b), 最大的为红海榄, 14.26%, 与以切片面积表示的一样, 木榄、秋茄分居第二、第三, 分别为 13.05%、9.09%, 白骨壤增大 6.06%,

最小的为桐花树,增加 4.3%。相对切片所得的通气组织数值,5 个树种孔隙率的增加值最大值小于切片面积的增加,最小值大于切片面积的增加。

3 讨论

3.1 通气组织测定方法比较

国内外对通气组织的研究主要用石腊切片法^[30-31]和孔隙率法^[32-33],石腊切片法通过大量切片的统计从平面角度获得通气组织的数值,而孔隙率则从立体的角度,测出整个空隙部分占根部的比值。本研究通过用石腊切片通气组织占横切面面积比与孔隙率两种方法测定 5 种红树植物根部通气组织,从研究结果得出,以石腊切片法和以孔隙率法所得出 5 种红树植物通气组织的相关性显著($P < 0.05$),切片面积所测得的通气组织数值均小于孔隙率所得值,但是 5 种红树植物通气组织的大小排序基本一致。其中潮汐生境中 2 种方法所得值白骨壤与秋茄顺序出现交换,秋茄的孔隙率稍大于白骨壤,白骨壤的切片面积比稍大于秋茄,其余 3 种红树植物两种方法所得值大小排序一致;非潮汐生境中 5 个树种以孔隙率和切片面积所反应的发达情况完全一致。通过切片面积比和孔隙率两种方法衡量通气组织均可以研究通气组织的发达程度,可用于通气组织定性比较。由于孔隙率法测定立体上的孔隙的大小,其所得值理论上应超过切片面积比,本研究的结果与理论一致。但是由孔隙率测得的值通常大于通气组织的真实值,而切片面积比的值会较通气组织的真值偏小,目前,对通气组织的研究还没有一种很精确的方法,切片面积比与孔隙率对于通气组织的定性研究具较高的可行性。

3.2 红树植物对非潮汐生境的解剖学适应策略

通气组织作为植物耐淹的一项重要指标^[34],提供了一种扩散途径,减少氧气从植物地上部向渍水或缺氧根系运输的阻力,以保证根的代谢需要^[35];加之细胞的崩溃死亡,其自身对氧气的需求量也下降。本研究中的 5 种红树植物为了适应环境,根、茎、叶的通气组织都产生了相应的响应,与天然潮间带生境相比,非潮汐生境促进了根、茎、叶通气组织的发育,非潮汐与自然潮间带两种不同的淹水条件带来的环境压力是一致的,但非潮汐生境的长期渍水和缺氧产生了更大的环境压力。

研究结果显示,对于木榄、白骨壤、秋茄、红海榄、桐花树这 5 种红树植物,潮汐产生的周期性淹浸-干露条件并非其生长的必要条件,将红树植物引种到人工的非潮汐环境加以利用,有效地提高红树林的栽培成活率,红树林的生态服务功能从天然生境推广到人工生境中。

本文中 5 种红树植物对非潮汐生境的长期渍水条件分别具有各自的适应策略:① 桐花树和木榄除根部通气组织显著增加外,还通过增加茎、叶部通气组织来进行适应;② 红海榄根部通气组织显著增加,同时茎部通气组织数量增多,体积增大;③ 白骨壤、秋茄根部通气组织显著增加,而且叶的通气组织亦显著增加。

3.3 自然潮间带中 5 种红树植物耐淹水能力与通气组织发育情况的相关性分析

3.3.1 5 种红树植物通气组织对潮间带淹水的适应

在福田红树林保护区天然潮间带林区中,自然生境下桐花树作为演替阶段的先锋树种,往往生长在低潮滩的位置,其种群的平均淹浸时间长、水位深,因此对淹水条件的适应力是最强的。红海榄作为演替中前期的种类,一般分布在海滩中段、桐花树群落的后缘,平均淹浸时间较桐花树短,而且淹浸水位也有所下降。白骨壤、秋茄在木榄所处潮滩以内的整个垂直的潮滩都有分布,适应性较广。木榄出现在海滩后缘的高潮带,通常作为演替顶极阶段的种群,是平均淹浸时间最短、水深最小的种群。

本研究结果显示在福田红树林自然保护区潮间带,5 种红树植物根通气组织发育情况为:红海榄 > 白骨壤 > 秋茄 > 木榄 > 桐花树。长期生长在较低潮带的桐花树,在较长时间、较深水位的淹水胁迫下,其并未产生大量的通气组织抵御淹水胁迫。在其代谢适应范围内加以调整,足以调节环境压力而维持自身生长,体现出对潮间带淹水具有较强的耐受性。白骨壤和秋茄的自然分布潮滩位置相近,通气组织的发育情况也比较相近,说明它们的自然分布状况与通气组织的发育具有较高的相关性。白骨壤和秋茄通气组织介于红海榄和木榄之间,其生长的平均潮位与红海榄相近,但在通气组织的发育形成方面较红海榄少,它们对淹水条件的忍耐

能力应大于红海榄;这两种红树植物所处的滩面高程低于木榄,产生更多的通气组织避开淹水压力,较后者前者可以通过启动调节机制,避开增更大的淹水压力,提高对淹水的适应力。

本研究中 5 种红树植物通气组织所反映耐淹浸能力,与其经长期的自然选择所体现的对潮汐淹浸能力,即在天然潮间带的分布序列表现为:桐花 > 白骨壤 > 秋茄 > 红海榄 > 木榄,是一致的。这与陈鹭真等^[34]的研究结论一致,通气组织的发达程度与耐淹水的能力具有较高的相关性。

3.4 红树植物对非潮汐生境适应性的初步探讨

3.4.1 5 种红树植物对非潮汐人工生境的适应

红海榄非潮汐生境较潮汐生境通气组织的变化程度是五种红树植物中最大,桐花树的变化最小,木榄、秋茄、白骨壤在从潮间带到人工非潮汐条件过渡的过程中,通气组织也产生了显著变化。红树植物在其耐受范围内通过调整生理、形态、结构的特征对水淹方式的改变产生响应,本研究所选的指标通气组织,其变化是水淹胁迫响应中最主要的指标之一,研究中已在自然潮间带下的淹水对此加以验证。天然情况下分布于高潮滩的木榄受潮汐浸淹时间相对较短,对水淹环境的耐受力较弱,自然选择分布于高潮滩,环境淹水压力相对较小;而在恒定水位的环境中,木榄因其代谢适应的耐受范围较小,必须启动调节机制,形成更多通气组织以满足个体对氧气的需求,以避免更为恶劣的淹水胁迫。与此相反,桐花树在天然潮间带分布于低潮滩,长期适应较长时间的淹浸,对水淹环境具有较强的耐受力;即使在恒定水位的淹水环境中,其通气组织的变化也不大。本研究中五种红树植物通气组织均对两种方式的淹水产生响应,长期适应潮间带的红树植物,对于人工非潮汐淹水同样具有一定的适应性,而且主要通过通气组织的变化以调整其对淹水压力的潜在避缺氧能力而提高自身的适应性。

3.4.1 5 种红树植物对非潮汐人工生境的适应

在人工非潮汐生境下,这 5 种红树植物根通气组织的发达程度,从大到小依次为红海榄、木榄、秋茄、白骨壤、桐花树。对于同一个红树种,通气组织越发达,耐淹水能力越强。不同种之间因对氧气的需求量不一样,例如在渍水条件下,小麦根内通气组织的发育程度或产生通气组织的能力有明显的基因型差异,而且这种差异与小麦的抗涝性密切相关,抗涝性强的麦基因型有较发达的通气组织^[36]。本研究中 5 个树种生长于同一水位的恒定淹水下,在天然潮间带生境中耐淹浸能力越弱的种类,如木榄和红海榄,在恒定水位生境中通气组织却越发达,显示它们对淹浸条件改变更为敏感;相反天然条件下耐淹浸能力较强的种类,如桐花树,在恒定水位的人工非潮汐条件下通气组织没有显著变化,它们对淹浸条件的改变不如前者敏感。依据研究结果,初步认为五种红树植物对非潮汐淹水的耐受能力为:桐花树 > 白骨壤 > 秋茄 > 木榄 > 红海榄。

通过对五种红树植物通气组织的研究,初步筛选出对淹水适应能力较强的树种桐花树、白骨壤、秋茄。同时通气组织红树植物本身对淹水的适应有其相应的范围,还需要进一步研究 5 个树种对非潮汐淹水的临界深度和最佳深度,以为人工非潮汐生境中红树林造林淹水水位的确定提供确切的数据指导。

致谢:感谢华南濒危动物研究所邹发生研究员、广州大学缪绅裕教授对写作的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Costanza R, d'Arge R, Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, V. O'Neill R, Paruelo J, G. Raskin R, Sutton P, Belt M V D. The value of the world's Ecosystem Services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [2] Wang W Q, Zhang F S. The physiological and molecular mechanism of adaptation to anaerobiosis in higher plants. *Plant Physiology Communications*, 2001, 37: 63-70.
- [3] Ellison A M. Mangrove restoration: do we know enough?. *Restoration Ecology*, 2000, 8(3): 219-229.
- [4] Elster C. Reasons for reforestation success and failure with three mangrove species in Colombia. *Forest Ecology and Management*, 2000, 23(1): 149-158.
- [5] Liao B W, Zheng D Z, Zheng S F, Li Y. Current situation and future prospects of coastal mangrove forests in South China. *Protection Forest Science and Technology*, 1996, 4: 30-34.
- [6] Chen L Z, Wang W Q, Lin P. Influence of waterlogging time on the growth of *Kandelia candel* seedlings. *Acta Oceano. Sinica*, 2004 n R Z. *Plant Physiology*. Beijing: Chinese Higher Education Press, 2001, 23: 149-157.
- [7] Watkin E L J, Thomson C J. and Greenway H. Root development and aerenchyma formation in two wheat cultivars and triticale cultivar grown in

- stagnant agar and aerated nutrient solution. *Annals of Botany*, 1998, 81: 349-354.
- [8] Armstrong W, Strange M E, Cringle S, Becket P M. Microelectrode and modeling study of oxygen distribution in roots. *Annals of Botany*, 1994, 74: 287-299.
- [9] Drew M C, He C J, Morgan P W. Programmed cell death and aerenchyma formation in roots. *Trends in Plant Science*, 2000, 5: 123-127.
- [10] Jackson M B, Armstrong W. Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence. *Plant Biology*, 1999, 1: 274-287.
- [11] Scholander P F, Van Dam L, Scholander S I. Gas exchange in the roots of mangroves. *American Journal of Botany*, 1995, 42: 92-98.
- [12] Armstrong W, Bründle R, Jackson M B. Mechanisms of flood tolerance in plants. *Acta Botanica Neerlandica*, 1994, 43: 307-358.
- [13] Pezeshki S R, DeLaune R D, Patrick W H. Differential response of selected mangroves to soil flooding and salinity: Gas exchange and biomass partitioning. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20: 869-874.
- [14] Youssef T, Saenger P. Anatomical adaptive strategies to flooding and rhizosphere oxidation in mangrove seedlings. *Australian Journal of Botany*, 1996, 44: 297-313.
- [15] Allaway W G, Curran M, Hollington L M, Ricketts M C, Skelton N J. Gas space and oxygen exchange in roots of *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. var. *australasica* (Walp.) Moldenke ex N. C. Duke, the Grey mangrove. *Wetlands Ecology and Management*, 2001, 9: 211-218.
- [16] Ashord A E, Allaway W G. There is a continuum of gas space in young plants of *Avicennia marina*. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, 295, 5-11.
- [17] Andersen F, Kristensen E. Oxygen microgradients in the rhizosphere of the mangrove *Avicennia marina*. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 44: 201-204.
- [18] Miao S Y, Chen G Z, DeLaune R D, Jugsujind A. Partitioning and removal of Cd and Mn using a simulated mangrove wastewater treatment system. *Journal of Environmental Science and Health*, 2007, 42(4): 405-411.
- [19] Ye Y, Tam F Y, Lu C Y. Effects of livestock wastewater on seedlings of two mangrove species. *arboretum. Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 766-770.
- [20] Jing Y X, Ren Y L, Chen G Z. Studies of eco-physiological characteristics of three mangrove species in constructed wetland sewage treatment system. *Acta Ecologica Sinica*. 2005, 20(3): 528-532.
- [21] Boonsong K, Piyatirativorakul S, Patanaopnphaiboon P. Potential use for mangrove plantation as constructed wetland for municipal wastewater treatment. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 48(5): 257-266.
- [22] Yang Q, Tam N F Y, Wong Y S, Luan T G, Su W S, Lan C Y, Shin P K S, Cheung S G. Potential use of mangroves as constructed wetland for municipal sewage treatment in Futian, Shenzhen. China. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 57: 735-743.
- [23] She Z M, Lin J X, Peng Y G. A preliminary study on mangrove and aquaculture system. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 837-840.
- [24] Zhang H D, Chen G Z. Study on Futian Mangrove Wetland Ecosystems, Shenzhen. Guangdong: Guangdong Science and Technology Press, 1998: 2-3, 35.
- [25] Li Y Y. Anatomical characteristics of leaves in several mangrove species. Xiamen: Xiamen University, 2006.
- [26] Kludze H K, DeLaune R D, Patrick W H. Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice. *Journal of Soil Science Society of America*, 1993, 51: 386-391.
- [27] Raskin I. A method for measuring leaf volume, density, thickness, and internal gas volume. *Horticultural Science*, 1983, 18: 698-699.
- [28] Thomson C J, Armstrong W, Waters I, Greenway H. Aerenchyma formation and associated oxygen movement in seminal and nodal roots of wheat. *Plant Cell Environment*, 1990, 13: 395-403.
- [29] Eric J W V, Gerard M B. Measurement of porosity in very small samples of plant tissue. *Plant and Soil*, 2003, 253: 81-90.
- [30] Fan M S, Bai R Q, Zhao X F, Zhang J H. Aerenchyma formed under phosphorus deficiency contributes to the reduced root hydraulic conductivity in maize roots. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49(5): 598-604.
- [31] Lenochová Z, Soukup A, Votrubová O. Aerenchyma formation in maize roots. *Biologia Plantarum*, 2009, 53(2): 263-270.
- [32] Suralta R R, Yamauchi A. Root growth, aerenchyma development, and oxygen transport in rice genotypes subjected to drought and waterlogging. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 64: 75-82.
- [33] Striker G G, Insausti P, Grimoldi A, Vega A S. Trade-off between root porosity and mechanical strength in species with different types of aerenchyma. *Plant, Cell and Environment*, 2007, 30: 580-589.
- [34] Chen L Z, Lin P, Wang W. Q. Mechanisms of mangroves waterlogging resistance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 586-593.
- [35] Fan M S, Zhang F S. Aerenchyma formation in plant and its physiological and ecological significance. *Plant Physiology Communications*, 2002, 38(6): 615-618.
- [36] Kong Y, Wang Z. Research Progress on Aerenchyma Formation in Plant Roots. *Chinese Bulletin of Botany*, 2008, 25(2): 248-253.

参考文献:

- [5] 廖宝文, 郑德璋, 郑松发, 李云. 我国华南沿海红树林造林现状及其展望. *防护林科技*, 1996, 4: 30-34.
- [19] 叶勇, 谭凤仪, 卢昌义. 牲畜废水对两种红树植物幼苗的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 766-770.
- [20] 靖元孝, 任延丽, 陈桂珠. 人工湿地污水处理系统 3 种红树植物生理生态特性. *生态学报*, 2005, 20(3): 528-532.
- [23] 余忠明, 林俊雄, 彭友贵, 陈桂珠. 红树林与水产养殖系统初步研究. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 837-840.
- [24] 张宏达, 陈桂珠. 深圳福田红树林湿地生态系统研究. 广东: 广东科技出版社, 1998: 2-3, 35.
- [25] 李元跃. 几种红树植物叶的解剖学研究. 厦门: 厦门大学, 2006.
- [34] 陈鹭真, 林鹏, 王文卿. 红树植物淹水胁迫响应研究进展. *生态学报*, 2006, 26(2): 586-593.
- [35] 樊明寿, 张福锁. 植物通气组织的形成过程和生理生态学意义. *植物生理学通讯*, 2002, 38(6): 615-618.
- [36] 孔好, 王忠. 植物根内通气组织形成的研究进展. *植物学通报*, 2008, 25(2): 248-253.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 24 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 24 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元