

海平面上升对中国红树林影响的几个问题*

傅海峰 陶伊佳 王文卿**

(滨海湿地生态系统教育部重点实验室(厦门大学), 福建厦门 361102)

摘要 海平面上升对分布在海岸交错带的红树林有着直接的影响。温度、波浪与潮汐、底质与盐度等因素控制着红树林的分布。海平面上升引起潮汐浸淹程度增加影响红树林在潮滩上的横向分布,红树林向陆地一侧迁移。在中国,海平面上升与海堤的阻隔共同威胁着红树林的生存,红树林主要分布地的小潮差增加了红树林对海平面上升的敏感性。中国红树林对海平面上升异常敏感。目前国内关于海平面上升对红树林影响的研究主要存在的问题是:缺乏从红树林群落结构角度研究海平面上升与海堤对红树林的影响,红树林地面高程变化研究薄弱,亟需建立一个红树林应对海平面上升的监测网络——地面高程水平标志层监测网络。

关键词 红树林; 威胁因素; 群落结构; 地面高程; 监测网络

中图分类号 Q142.9 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2014)10-2842-07

Some issues about the impacts of sea level rise on mangroves in China. FU Hai-feng, TAO Yi-jia, WANG Wen-qing** (Key Laboratory of the Coastal and Wetland Ecosystems (Xiamen University), Ministry of Education, Xiamen 361102, Fujian, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(10): 2842-2848.

Abstract: It is universally acknowledged that global average sea level is rising and mangroves existing in coastal zones would suffer disturbance of sea level rise. Distributions of mangroves are controlled by main factors including temperature, wave, tide, substrate and salinity. Increased inundation caused by sea level rise would impact the transverse distribution of mangroves on the tidal flat, and mangroves are obliged to transgress inland. In China, sea level rise together with seawalls is threatening the survival of mangroves and small tidal range increases the susceptibility of mangroves to sea level rise. Mangroves of China are extremely sensitive to sea level rise. Presently, there exist several problems about the impacts of sea level rise on mangroves of China. (1) Little research concentrates on the impacts of sea level rise and seawalls on mangroves from the perspective of mangrove community structure. (2) Changes of mangrove ground elevation are poorly understood, which are usually compared with local rises in sea level to predict the effects of sea level rise on mangroves. (3) A monitoring network based on surface elevation table-marker horizon system is urgently needed to observe how mangroves of China respond to sea level rise.

Key words: mangroves; threat factors; community structure; surface elevation; monitoring network.

在全球变化的大背景下,红树林生态系统的健康不仅依赖于系统本身对环境变化的适应能力,更依赖于人类活动对这种适应能力的干扰(Scavia *et al.* 2002)。围垦、城市与港口开发、污染、海岸侵蚀、油气资源开发、生物资源过度利用和海平面上升等因素是造成滨海湿地退化的主要原因(谷东起

等 2003)。邓自发等(2010)总结了全球变化对滨海湿地生态系统的影响后指出,作为海陆交错带的滨海生态系统是海洋与陆地的过渡带,是承受全球变化及其引起海平面上升等影响最为前沿、最为重要的缓冲带。

现在红树林主要面临海陆两个方面的干扰:陆地一侧是不断增加的海岸居民数量,海洋一侧则是海平面的缓慢上升(Walters *et al.* 2008)。海平面

* 国家自然科学基金项目(41276076)资助。

** 通讯作者 E-mail: mangroves@xmu.edu.cn

收稿日期: 2014-01-23 接受日期: 2014-07-02

上升对红树林的影响引起了世界范围内的关注。由于绝大部分红树林存在后缘有海堤围堵、海平面上升速率高和红树林主要分布区潮差相对较小的特点,我国的红树林对海平面上升异常敏感。目前国内越来越多的研究涉及到海平面上升对红树林的影响,但在海平面上升与海堤对红树林群落结构的影响以及堤前红树林对海平面上升的响应机制方面的研究处于薄弱状态。研究海堤与海平面上升对红树林的影响以及评估中国红树林对海平面上升的响应,将对我国南方红树林的管理、海堤的建设提供依据。

1 影响红树林分布的主要因素

1.1 温度

气候是决定红树林自然分布的主要因素,主要表现在温度方面,温度影响红树植物体内水分和养分的运输,控制着红树林分布的南北纬度界限(Stuart *et al.* 2007)。在中国,红树林分布在热带、亚热带海岸区域。红树植物的种类分布随纬度的升高和平均温度的下降而减少(王文卿和王瑁,2007)。中国所有原生真红树植物种类都可在海南省找到,广东、广西均有11种,香港9种,台湾8种,福建7种,浙江只有人工引种的秋茄(何斌源等,2007)。其中福建福鼎(27°17'N)是中国红树林天然分布的北界,浙江乐清湾(28°25'N)是中国红树林人工引种最北的地方。

1.2 波浪与潮汐

红树林一般位于隐蔽海岸。这些海岸波浪冲击力小,水流缓慢,淤泥易沉积,可以形成大面积相对平缓的泥滩,为红树林的生存繁殖创造了必要条件。中国红树林主要分布于一些隐蔽性的河口港湾,如福建漳江口、台湾淡水河口、广东深圳湾、广西钦州湾、海南东寨港等。

红树林生长在海岸潮间带,受海水周期性淹水的影响。红树林一般位于平均海平面以上的滩涂区域(Grindrod & Rhodes,1984;张乔民等,2001)。虽然红树植物能适应盐水浸淹的环境,但其生理特征决定了红树植物不能长时间浸淹在海水中(Chen *et al.* 2005;He *et al.* 2007)。海平面上升会导致近海一侧红树林处于平均海平面以下,红树林面临被淹没的风险。红树林生长带与潮汐水位之间存在严格的对应关系(张乔民等,2001)。各种红树植物根据各自对生境的不同要求在滩涂的不同位置上排列成带,从内到外形成与海岸垂直的生态序列(王文

卿和王瑁,2007)。海桑属植物、白骨壤和桐花树常分布于海岸最外缘,这类植物耐水淹能力强,被称为先锋植物,属于演替前期树种。秋茄、红海榄等一般生长在滩涂中部,属于演替中期树种。在红树林内缘(近陆地一侧),分布着演替后期的树种,如木榄、海莲、海漆、角果木等。不同树种的耐淹水能力不同(陈鹭真等,2006;He *et al.* 2007),其对海平面上升的反应也不同,海平面上升引起红树林潮汐浸淹程度的增加会导致红树林群落结构发生变化。海平面控制着红树林在滩涂上的分布(Ellison,2006),海平面上升威胁着红树林的生存。

1.3 底质与盐度

红树林适合生长于富含有机质的淤泥质滩涂上,少数的红树种类生长于砂质滩涂或岩滩上,如广西北海大冠沙的沙生红树林、广西钦州湾特有的岩滩红树林等。中国红树林主要分布于河口港湾地区的中咸水区域,这些区域夏季盐度常小于2‰,冬季盐度可达15‰~20‰(张乔民等,2001)。不同红树植物的耐盐能力不同。红树林能在0~90‰的盐度范围内生长(Augustinus,1995),其中光叶白骨壤能够适应的土壤盐度可达100‰(Smith,1992)。但红树植物都有最适宜的盐度范围,盐度过高或过低都不利于其生长,如福建秋茄的适宜海水盐度为7.5‰~21.2‰,过高或过低均抑制秋茄生长(林鹏,1997)。

2 与全球变化密切相关的我国红树林威胁因素

2.1 海堤

修建海堤是围垦、围塘养殖、城市与港口开发必不可少的环节。截至2009年,中国已经在其18000 km的海岸线上建设了13800 km的海堤,建成了世界上仅次于荷兰的最完善的海堤防御体系。可以说,海堤是中国目前最大的海岸工程,也是滨海湿地土地利用格局变化的最大表现方式。红树林对海堤具有明显的保护作用(Wolanski,2007;Alongi,2009)，“海堤+堤前红树林”被认为是具有巨大生态、经济和社会效益的防护模式(林鹏和傅勤,1995;范航清,2000;林鹏,2003),受到了广泛的认可。中国红树林的保护、管理和恢复,都是依照这种模式展开的。2001年全国湿地调查结果表明,中国80%的红树林是堤前红树林,广东堤前红树林的比例更是高达90%(国家林业局森林资源管理司,2002)。海堤阻断了红树林的退路,加剧了海岸侵

蚀,降低了红树林的潮滩沉积速率(Saenger 2002)。海堤干扰了河口地区的自然水文过程(范航清和黎广钊,1997; Lovelock & Ellison 2007),而这一过程对红树植物的正常生长和生物多样性的维持是至关重要的(Macintosh & Ashton 2002; Lovelock & Ellison 2007)。海堤被认为是红树林应对海平面上升的主要障碍,堤前红树林是对海平面上升最敏感的红树林(Lovelock & Ellison 2007)。

2.2 海平面上升

中国沿海海平面变化总体呈波动上升趋势。1980—2012年,中国沿海海平面上升速率为 $2.9 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,高于全球海平面平均上升速率(国家海洋局 2013)。2012年,中国沿海海平面较常年平均海平面(将1975—1993年的平均海平面定为常年平均海平面)高122 mm,为1980年以来最高位,较2011年高53 mm(国家海洋局 2013)。

在全球变化的各种效应中,海平面上升是对红树林的最大威胁之一(Jagtap *et al.* 2007; Gilman *et al.* 2008; Gopal 2013)。海平面上升导致红树林淹水时间和频率的增加,进而影响红树林的生长和发育(Chen *et al.* 2005; He *et al.* 2007),同时使得红树林不得不向陆地一侧后退(Lovelock & Ellison 2007; Doyle *et al.* 2010)。红树林海岸响应海平面变化的一个重要机制——红树林生物地貌功能(促淤功能)可在一定程度上抵消海平面上升增加浸淹强度的负面影响(卢昌义等,1995; 张乔民和张叶春,1997; 张乔民,1998; Middleton 2012)。如果红树林区的沉积速率能够跟上海平面上升速率或红树林向陆地一侧的后退不受干扰,海平面上升对红树林不会造成很大的负面影响(Scavia *et al.* 2002; Gilman *et al.* 2008)。例如,1927—1995年,美国佛罗里达州地区海平面上升了14 cm,因为大面积盐沼被红树林取代,红树林面积没有下降反而增加了近50%(Ross *et al.* 2000)。但是,红树林退化严重削弱或彻底消除红树林防浪护岸捕沙促淤的生物地貌功能,使海岸物质平衡由净收入转为净损失,海岸动态由淤积或稳定转变为侵蚀后退,最终导致红树林丧失抵消海平面上升增加浸淹强度的负面影响的能力(张乔民,2007)。海平面上升使潮差和波高增大,改变了海洋水动力平衡,加重了海岸侵蚀(Bruun,1962; 李加林等,2005)。国家海洋局2003年和2006年对全国重点海岸段调查显示,我国大部分岸段的侵蚀速度仍在加快(郑淑英,2007)。王福

等(2010)对天津滨海新区潮间带的高程及坡度进行了测量和计算后发现,与20世纪80年代相比,滩面已变陡、变窄、变低。2001年以来,我们调查了海南、广东和广西的部分红树林区,发现普遍存在不同程度的侵蚀。广东和海南2省区在我国沿海各省区中海平面上升速率最快(图1),而这2省区正是我国红树林的集中分布区,红树林面积占全国的57%(图2)。

2.3 小潮差

海平面上升对红树林的影响与潮差有关,潮差越小,红树林对海平面上升越敏感(张乔民等,1997; Nicholls & Hoozemans 2005; Ellison & Zouh, 2012)。当海平面发生变化时,受影响林地的比例在潮差小的区域大于潮差大的区域(Lovelock & Ellison 2007)(图3)。

从表1可以看出,我国红树林分布区的潮差存

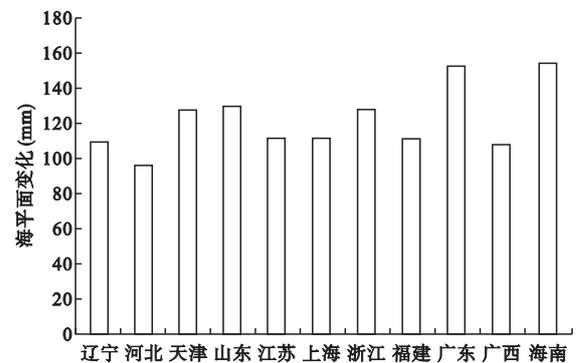


图1 2012年我国沿海各省区海平面相对常年变化(国家海洋局 2013)

Fig. 1 Sea level changes of Chinese coastal provinces and regions in 2012 compared with the changes of average year. 未统计台湾、香港、澳门地区数据。1975—1993年的平均海平面定为常年平均海平面(简称常年)。

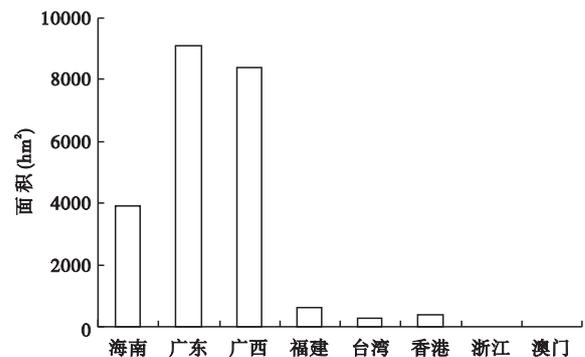


图2 我国主要红树林分布省区红树林面积(王文卿和王璿,2007)

Fig. 2 Mangroves area of provinces distributed in China

表1 中国主要红树林分布地的潮差和红树林面积
Table 1 Tidal range and mangroves area of main mangroves locations in China

地点	平均潮差 (m)	红树林面积 (hm ²)	文献来源
海口东寨港	1.00	1733	王文卿和王瑁, 2007
文昌清澜港	0.75	1223	王文卿和王瑁, 2007
儋州新英港	1.75	133	王文卿和王瑁, 2007
珠江口	1.36	491	王文卿和王瑁, 2007
广东湛江	2.53	7256	王文卿和王瑁, 2007
广西山口	2.45	730	王文卿和王瑁, 2007
广西北仑河口	2.24	1131	王文卿和王瑁, 2007
广西钦州湾	2.25	3057	王文卿和王瑁, 2007
福建漳江口	2.32	118	王文卿和王瑁, 2007
福建九龙江口	2.98	110	王文卿和王瑁, 2007
福建泉州湾	4.27	300	王文卿和王瑁, 2007
福建福鼎	4.16	7	王文卿和王瑁, 2007
浙江乐清湾	5.15	10	王文卿和王瑁, 2007; 宋国利等, 2011

在从南到北逐步增大的趋势, 95% 以上的红树林所在的海岸潮差小于 2.6 m。小潮差决定了我国的红树林对海平面上升的敏感程度。

3 存在的问题

3.1 缺乏从红树林群落结构角度研究海平面上升与海堤对红树林的影响

澳大利亚著名的河口水文专家 Wolanski (2007) 总结了海平面上升的各种潮汐、水文和基质的效应后指出, 淹水时间延长和淹水频率提高是海平面上升对红树林生态系统最主要、最直接的影响因素, 这种观点得到广泛认同 (He et al. 2007; Doyle et al. , 2010)。模拟实验结果表明, 伴随相对海平面升高

而来的淹水时间延长和淹水频率提高对红树植物幼苗的生长造成了不利影响, 表现为: 生长下降、有效光合面积减小、净光合速率下降等 (Kitaya et al. , 2002; Chen et al. 2005; He et al. 2007)。不同树种的耐淹水能力是不同的 (陈鹭真等 2006; He et al. , 2007)。因此, 不同树种对海平面升高有不同的反应。相对海平面升高不仅会导致堤前红树林林带宽度变窄、红树林面积减少, 还必然会导致红树林群落结构的变化。在加勒比海地区, 模拟红树林应对海平面上升的结果显示: 海平面上升到一定程度, 该地区的美洲大红树与萌芽白骨壤种群的数量均降低, 但由于树种间对海平面上升的敏感度不同, 动植物多样性等群落结构也发生变化, 美洲大红树以及与之密切相关的生物会减少, 萌芽白骨壤以及与之相关的生物将占领大部分生境 (Budny 2011)。类似现象已经在堤前盐沼湿地得到验证 (李玉宝等, 2009; Kang et al. 2009)。杨桂山等 (2002) 对江苏堤前盐沼湿地研究发现, 相对海平面上升可引起潮滩湿地生态发生逆向演替, 生物多样性减少、生产量下降和生态类型趋于单一, 原来处于较高潮位的茅草生长受到抑制, 逐步被盐蒿取代, 同时由于海堤的阻碍, 损失的茅草滩得不到相应的补偿, 最终将可能消失, 而处于低潮位处的大米草沼泽, 其外缘将不断为光滩所取代。2006年6月, 在澳大利亚召开了一次有关红树林与全球变化的小型国际会议, 与会学者强调了红树植物分布格局在研究红树林应对海平面上升的响应机制中的重要性 (Gilman et al. , 2006)。但是在国内几乎所有的有关海平面上升对

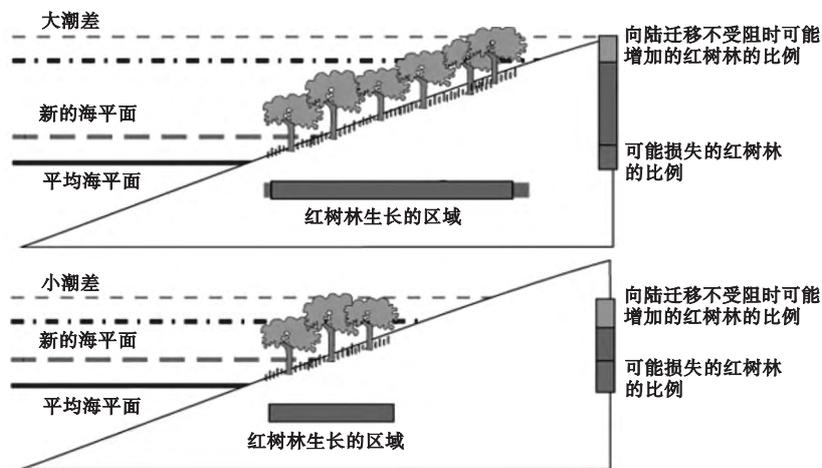


图3 潮差大小影响受海平面威胁的林地面积的比例 (Lovelock & Ellison, 2007)

Fig.3 Effects of tidal range on the proportion of mangroves affected by rising sea level

红树林植物影响的研究都局限于红树林面积(或林带宽度)的变化,缺乏从红树林群落种类组成和群落结构角度研究海平面上升对红树林植被影响的报道。

研究海堤对红树林的影响,不仅对海堤的规划、维护和管理有指导意义,且对红树林的保护和管理也是必不可少的。目前有关海堤对红树林影响的研究以定性描述为主,如海堤对红树林面积、水文、沉积过程的影响(范航清和黎广钊,1997; Lovelock & Ellison 2007; Wolanski 2007)。Polidoro等(2010)分析了全球所有红树植物种类的生存现状,发现近16%的现存种类处于濒危状态,而这些种类全部分布于高潮带,人类活动包括海堤建设是造成这些物种濒危的主要原因。海堤对堤外残留的红树林群落结构、生物多样性的影响至今未见报道。我们检索了“中国学术期刊网络出版总库”,搜得1979—2012年国内正式发表的、题目中包含“海堤”的文献632篇,其中海堤的设计、建设与维护方面的文章600篇(占95%),仅有7篇文章涉及滨海湿地的演化、保护与修复(占1%)。

3.2 红树林地面高程变化研究薄弱

中国红树林潮滩沉积速率的研究一直是个薄弱环节,至今只有一些零星的报道。海南东寨港和文昌清澜港(标志桩法)、广东廉江高桥(^{210}Pb 同位素定年法)、福建沿海(重复水准测量法)和西江河口(地形图对比法)等地的红树林潮滩沉积速率已经有报道(林惠来,1981;郑德璋等,1995;张乔民等,1996)。此外,曾昭璇等(1965)测定了珠江口红树林潮滩沉积速率。但是,这些研究所用的方法不统一,没有涵盖中国的主要红树林群落类型(白骨壤林和桐花树林),一些关键区域如广西珍珠湾、广东湛江通明海等地的资料处于空白。

过去普遍认为,海平面上升对红树林的影响取决于红树林潮滩沉积速率与海平面上升速率之间的对比关系(Scavia *et al.* 2002;张乔民,2007; Gilman *et al.* 2008)。若海平面上升速率低于红树林潮滩沉积速率,红树林就有可能向外侧光滩发展,反之红树林将受到海平面上升的威胁(张乔民和张叶春,1997)。谭晓林和张乔民(1997)在总结了我国部分红树林的沉积速率后得出结论,中国大部分红树林潮滩沉积速率介于 $4.1 \sim 57 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,接近或大于2030年前的海平面上升速率,红树林面积基本上能保持稳定。

但是,上述结论是在忽略地面沉降的基础上得出的。由于土壤浅部下沉等活动的影响,湿地地面高程的变化速率常小于潮滩沉积速率(Cahoon *et al.*, 1995)。世界部分大三角洲(包括长江和黄河三角洲)的地面沉降速率均在 $6 \sim 100 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上,为目前理论海平面上升率的5~100倍(Milliman *et al.*, 1989)。Cahoon和Hensel(2006)对一些地区的红树林潮滩沉积与地面高程变化数据库进行分析,结果显示,研究地点的潮滩平均沉积速率达到 $5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,但是由于红树林地面沉降(主要为浅部沉降)的影响,潮滩平均地面高程抬升速率只有 $1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。因此,在研究海平面上升对红树林的影响时,地面沉降是一个不可忽略的因素。同时地面沉降的存在增加了精确估算海平面上升量的难度(李加林等,2005)。地面高程变化的测量对于预测海平面上升对湿地的影响至关重要,目前科学界一致认为应该测量地面高程变化(地面沉降和淤积等综合结果)来评估海平面上升对红树林的影响(仇晴川和张乔民,2009)。国内关于红树林地面高程变化的研究鲜有报道。

3.3 缺乏红树林应对海平面上升的监测网络

对海平面的监测是防治相对海平面上升的基础(胡俊杰,2005)。作为对海平面上升最敏感的红树林生态系统,需要有一个好的预警系统和牢靠的对策方案,以减少其危害(胡俊杰,2005)。但国内至今没有针对性的监测体系(仇晴川和张乔民,2009;宗虎城等,2010)。

近年来,一种既能够监测红树林林地潮滩地表高程的变化又能测量沉积速率的地表高程——水平标志层测量体系(Surface Elevation Table-Marker Horizon, SET-MH测量体系)受到了越来越多学者的青睐。SET-MH测量体系由Boumans和Day(1993)构建,后经Cahoon等(2002)改进,现被广泛用于盐沼、红树林地面高程变化速率的研究,其中在红树林地展开的研究位点分布于位于加勒比海和西太平洋区域的国家(Thomas & Ridd 2004; Cahoon & Hensel 2006; McIvor *et al.* 2013),初步建立了全球红树林SET-MH数据库。SET-MH测量体系积累的数据能够准确反映潮滩地表高程变化,提高了预测海平面上升对红树林影响的能力(Cahoon & Hensel 2006;仇晴川和张乔民,2009)。该体系适用于建立监测网络进行长期的监测工作,以建立中国的红树林潮滩沉积速率与地表高程抬升速率的数据库,还可以推动

我国在红树林地面沉降方面的研究(仇晴川和张乔民 2009)。

4 展 望

从红树植物群落种类组成和群落结构变化角度定量评估海平面上升和海堤对堤外残留红树林群落结构、生物多样性的影响,建立红树林应对海平面上升的监测网络以及中国红树林潮滩沉积速率与地面高程变化速率的数据库,并预测堤前红树林对海平面上升的响应机制,不仅为我国政府制定积极客观的红树林应对海平面上升的策略提供科学的依据,也为我国南方海堤的建设和管理提供基础。

参考文献

- 陈鹭真,林 鹏,王文卿. 2006. 红树林淹水胁迫响应研究进展. *生态学报*, **26**(2): 586-593.
- 仇晴川,张乔民. 2009. 湿地地表高程变化的测量与研究. *海洋地质动态*, **25**(11): 15-20.
- 邓自发,欧阳琰,谢晓玲,等. 2010. 全球变化主要过程对海滨生态系统生物入侵的影响. *生物多样性*, **18**(6): 605-614.
- 范航清,黎广钊. 1997. 海堤对广西沿海红树林的数量、群落特征和恢复的影响. *应用生态学报*, **8**(3): 240-244.
- 范航清. 2000. 海岸环保卫士——红树林. 南宁: 广西科学技术出版社.
- 谷东起,赵晓涛,夏东兴. 2003. 中国海岸湿地退化压力因素的综合分析. *海洋学报*, **25**(1): 78-85.
- 国家海洋局. 2013. 2012年中国海平面公报[EB/OL]. (2013-03-08) [2013-12-30]. http://www.coi.gov.cn/gongbao/haipingmian/201303/t20130308_26217.html
- 国家林业局森林资源管理司. 2002. 全国红树林资源调查报告. 北京: 国家林业局.
- 何斌源,范航清,王 瑁,等. 2007. 中国红树林湿地物种多样性及其形成. *生态学报*, **27**(11): 4859-4870.
- 胡俊杰. 2005. 相对海平面上升的危害与防治对策. *地质灾害与环境保护*, **16**(1): 166-170.
- 李加林,张殿发,杨晓平,等. 2005. 海平面上升的灾害效应及其研究现状. *灾害学*, **20**(2): 49-53.
- 李玉宝,梁福根,严丽华. 2009. 温州沿海互花米草变迁及其与滩涂开发响应. *海洋环境科学*, **28**(3): 321-325.
- 林 鹏,傅 勤. 1995. 中国红树林的环境生态及经济利用. 北京: 高等教育出版社.
- 林 鹏. 1997. 中国红树林生态系. 北京: 科学出版社.
- 林 鹏. 2003. 中国红树林湿地与生态工程的几个问题. *中国工程科学*, **5**(6): 33-38.
- 林惠来. 1981. 福建红树林海岸的初步观察. *海洋科技资料*, (2): 56-63.
- 卢昌义,林 鹏,叶 勇,等. 1995. 全球气候变化对红树林生态系统的影响与研究对策. *地球科学进展*, **10**(4): 341-347.
- 宋国利,臧淑英,梁 熠,等. 2011. 乐清湾湿地生态服务功能及价值测算. *自然灾害学报*, **20**(3): 120-124.
- 谭晓林,张乔民. 1997. 红树林潮滩沉积速率及海平面上升对我国红树林的影响. *海洋通报*, **16**(4): 29-35.
- 王 福,裴艳东,李建芬,等. 2010. 天津潮间带高程现状与滨海新区城市安全. *地质通报*, **29**(5): 682-687.
- 王文卿,王 瑁. 2007. 中国红树林. 北京: 科学出版社.
- 杨桂山,施雅风,张 琛. 2002. 江苏滨海潮滩湿地对潮位变化的生态响应. *地理学报*, **57**(3): 325-332.
- 曾昭璇,黄少敏,张杰人. 1965. 河口区红树林海岸地形演变及其农业评价——以珠江三角洲河口为例//中国地理学会地貌专业委员会,中国地理学会 1963年年会论文选集(地貌学). 北京: 科学出版社: 90-91.
- 张乔民,隋淑珍,张叶春,等. 2001. 红树林宜林海洋环境指标研究. *生态学报*, **21**(9): 1427-1437.
- 张乔民,温孝胜,宋朝景,等. 1996. 红树林潮滩沉积速率测量与研究. *热带海洋*, **15**(4): 55-60.
- 张乔民,于红兵,陈欣树,等. 1997. 红树林生长带与潮汐水位关系的研究. *生态学报*, **17**(3): 258-265.
- 张乔民,张叶春. 1997. 华南红树林海岸生物地貌过程研究. *第四纪研究*, (4): 344-353.
- 张乔民. 1998. 红树林生物地貌过程及其对人类活动和海平面上升的响应//中山大学近岸海洋科学与技术研究中心,97 海岸海洋资源与环境研讨会论文集. 香港: 香港科技大学海岸与大气研究中心出版: 179-185.
- 张乔民. 2007. 热带生物海岸对全球变化的响应. *第四纪研究*, **27**(5): 834-844.
- 郑德璋,郑松发,廖宝文. 1995. 海南岛清澜港红树林发展动态研究. 广州: 广东科技出版社.
- 郑淑英. 2007. 应对海平面上升灾难. *瞭望*, (43): 112.
- 宗虎城,章卫胜,张金善. 2010. 中国近海海平面上升研究进展及对策. *水利水运工程学报*, (4): 43-51.
- Jagtap TG, Nagle VL, 刘 媛. 2007. 印度次大陆红树林生境对气候变化的响应与适应. *Ambio-人类环境杂志*, **36**(4): 310-317.
- Alongi DM. 2009. *The Energetics of Mangrove Forests*. Dordrecht: Springer.
- Augustinus PGEF. 1995. *Geomorphology and sedimentology of mangroves*// Perillo GME, ed. *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Development in Sedimentology 53. Amsterdam: Elsevier Science BV: 333-357.
- Boumans RMJ, Day JW. 1993. High precision measurements of sediment elevation in shallow coastal areas using a sedimentation-erosion table. *Estuaries*, **16**: 375-380.
- Bruun P. 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbors Division*, **80**: 117-130.
- Budny M. 2011. Potential response of Caribbean mangroves to sea level rise [EB/OL]. (2011-04-07) [2013-12-30]. <http://dspace.carthage.edu/xmlui/bitstream/handle/123456789/152/Michelle%20Budny.pdf?sequence=1>.
- Cahoon DR, Hensel PF. 2006. High resolution global assessment of mangrove responses to sea-level rise: A review// Gilman E, ed. *Proceedings of the Symposium on Mangrove Responses to Relative Sea-Level Rise and Other Climate Change Effects*. Catchments to Coast. USA: the Western Pacific Regional Fishery Management Council: 9-17.
- Cahoon DR, Lynch JC, Hensel P, et al. 2002. High-precision measurements of wetland sediment elevation. I. Recent improvements to the sedimentation-erosion table. *Journal of Sedimentary Research*, **72**: 730-733.
- Cahoon DR, Reed DJ, Day Jr JW. 1995. Estimating shallow

- subsidence in microtidal salt marshes of the southeastern United States: Kaye and Barghoorn revisited. *Marine Geology*, **128**: 1–9.
- Chen LZ, Wang WQ, Lin P. 2005. Photosynthetic and physiological responses of *Kandelia candel* L. Druce seedlings to duration of tidal immersion in artificial seawater. *Environmental and Experimental Botany*, **54**: 256–266.
- Doyle TW, Krauss KW, Conner WH, et al. 2010. Predicting the retreat and migration of tidal forests along the northern Gulf of Mexico under sea-level rise. *Forest Ecology and Management*, **259**: 770–777.
- Ellison J, Zouh I. 2012. Vulnerability to climate change of mangroves: Assessment from Cameroon, Central Africa. *Biology*, **1**: 617–638.
- Ellison J. 2006. Mangrove palaeoenvironmental response to climate change// Gilman E, ed. Proceedings of the Symposium on Mangrove Responses to Relative Sea-Level Rise and Other Climate Change Effects. Catchments to coast. USA: the Western Pacific Regional Fishery Management Council: 9–17.
- Gilman EL, Ellison J, Coleman R. 2006. Historical reconstruction of mangrove position and assessment of mangrove responses to projected relative sea-level rise// Gilman E, ed. Proceedings of the Symposium on Mangrove Responses to Relative Sea-Level Rise and Other Climate Change Effects. Catchments to Coast. USA: the Western Pacific Regional Fishery Management Council: 18–41.
- Gilman EL, Ellison J, Duck NC, et al. 2008. Threats to mangroves from climate change and adaptation options. *Aquatic Botany*, **89**: 237–250.
- Gopal G. 2013. Future of wetlands in tropical and subtropical Asia, especially in the face of climate change. *Aquatic Sciences*, **75**: 39–61.
- Grindrod J, Rhodes EG. 1984. Holocene sea-level history of a tropical estuary: Missionary Bay, North Queensland// Thom BG, ed. Coastal Geomorphology in Australia. Sydney: Academic Press Australia: 151–178.
- He BY, Lai TH, Fan HQ, et al. 2007. Comparison of flooding-tolerance in four mangrove species in a diurnal tidal zone in the Beibu Gulf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **74**: 254–262.
- Kang JW, Moon SR, Park SJ, et al. 2009. Analyzing sea level rise and tide characteristics change driven by coastal construction at Mokpo coastal zone in Korea. *Ocean Engineering*, **36**: 415–425.
- Kitaya Y, Jintana V, Piriyaoytha S, et al. 2002. Early growth of seven mangrove species planted at different elevations in a Thai estuary. *Trees*, **16**: 150–154.
- Lovelock CE, Ellison J. 2007. Vulnerability of mangroves and tidal wetlands of the Great Barrier Reef to climate change// Johnson JE, Marshall PA, eds. Climate Change and the Great Barrier Reef: A Vulnerability Assessment. Australia: Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office: 237–269.
- Macintosh DJ, Ashton EC. 2002. A review of mangrove biodiversity conservation and management. Denmark: Centre for Tropical Ecosystems Research.
- Melvor A, Spencer T, Möller I, et al. 2013. The response of mangrove soil surface elevation to sea level rise. The Nature Conservancy and Wetlands International, Natural Coastal Protection Series: Report, 3 [EB/OL]. [2014-05-18]. <http://coastalresilience.org/science/mangroves/surface-elevation-and-sea-level-rise>
- Middleton BA. 2012. Global Change and the Function and Distribution of Wetlands. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Milliman JD, Broadus JM, Gable F. 1989. Environmental and economic implication of rising sea level and subsiding deltas, The Nile and Bengal examples. *Ambio*, **18**: 340–345.
- Nicholls RJ, Hoozemans FMJ. 2005. Global vulnerability analysis// Schwartz M, ed. Encyclopedia of Coastal Science. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers: 486–491.
- Polidoro BA, Carpenter KE, Collins L, et al. 2010. The loss of species: Mangrove extinction risk and geographic areas of global concern. *PLoS ONE*, **5**: 1–10.
- Ross MS, Meeder JF, Sah JP, et al. 2000. The southeast saline Everglades revisited: 50 years of coastal vegetation change. *Journal of Vegetation Science*, **11**: 101–112.
- Saenger P. 2002. Mangrove Ecology, Silviculture and Conservation. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Scavia D, Field JC, Boesch DF, et al. 2002. Climatic change impacts on U. S. coastal and marine ecosystems. *Estuaries and Coasts*, **25**: 149–164.
- Smith III TJ. 1992. Forest structure// Robertson AI, Alongi DM, eds. Tropical Mangrove Ecosystems, Coastal and Estuarine Studies 41. Washington DC: American Geophysical Union: 101–136.
- Stuart SA, Choat B, Martin KC, et al. 2007. The role of freezing in setting the latitudinal limits of mangrove forests. *New Phytologist*, **173**: 576–583.
- Thomas S, Ridd PV. 2004. Review of methods to measure short time scale sediment accumulation. *Marine Geology*, **207**: 95–114.
- Walters BB, Römbäck P, Kovacs JM, et al. 2008. Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forest: A review. *Aquatic Botany*, **89**: 220–236.
- Wolanski E. 2007. Estuarine Ecohydrology. Amsterdam: Elsevier.

作者简介 傅海峰,男,1989年生,硕士研究生,从事红树林生态学研究。E-mail: peakandsea@163.com
责任编辑 魏中青