

# 秋茄(*Kandelia obovata*)和无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)红树人工林消波效应量化研究\*

陈玉军<sup>1</sup> 廖宝文<sup>1</sup> 黄勃<sup>2</sup> 张乔民<sup>3</sup> 徐大平<sup>1</sup>  
陈元海<sup>4</sup> 林卫海<sup>4</sup> 李玫<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所 广州 510520; 2. 海南大学海洋学院 海口 570228;  
3. 中国科学院南海海洋研究所 广州 510301; 4. 海南东寨港国家级自然保护区管理局 海口 571129)

**提要** 采用野外监测的方法对海南东寨港三江湾秋茄和无瓣海桑红树人工林的消波效应进行了量化研究。结果表明, 裸露海滩的消波作用较弱, 波浪在经过裸滩 50m 后, 1/10 波高、1/3 波高和平均波高分别减低 2.9%、4.4%和 5.8%。红树林的消波作用显著, 总体来说, 波浪在经过秋茄林 50m 后, 1/10 波高、1/3 波高和平均波高分别减低 46.3%、46.4%和 46.1%, 在经过无瓣海桑林 50m 后分别减低 30.1%、29.6%和 28.8%。红树林的消波率随林分基部断面积的增大而增加; 在浅水区域, 红树林的消波率随水深增加而降低; 在水深相同的条件下, 红树林的消波效应随着波高的增加而增强; 红树林的消波率与波浪的传播距离呈非线性正相关性, 随着传播距离的增加, 波高持续降低, 但降幅减小。

**关键词** 人工红树林, 秋茄, 无瓣海桑, 消波效应

**中图分类号** P735

风暴潮灾害是沿海地区的频发事件(齐鹏等, 2010), 分析海洋波浪特征是沿海灾害研究的重要环节(李丙瑞等, 2010)。红树林在热带及亚热带地区发挥着重要的海岸防护功能, 能够保护海岸线免受海水侵蚀和暴潮危害。近年来的海啸灾难, 使人类对红树林的减灾功能有了更深入的认识和理解(Kathiresan *et al*, 2005; Alongi, 2008; Cochard *et al*, 2008; Yanagisawa *et al*, 2009)。红树林保护海岸、防灾减灾主要是通过缓解波浪来实现的。定量研究红树林对波浪的消减效应, 是了解红树林的减灾价值, 构建和评价海岸带生态防护体系的重要依据, 为增强沿海地区防御自然灾害能力提供技术支撑。

对红树林消波效应的研究, 国外主要集中在东南亚地区, 多数研究是通过野外测量来分析红树林

对波浪的消减情况以及波浪消减率与红树林植被特征、水文特征的相关性(Brinkman *et al*, 1997; Mazda *et al*, 1997a, b, 2005, 2006; Phuoc *et al*, 2006; Quartel *et al*, 2007; Wahid *et al*, 2007), 也有一些研究通过建立理论模型来模拟红树林对波浪的消减情况(Massel *et al*, 1999; Struve *et al*, 2003; Mendez *et al*, 2004; Phuoc *et al*, 2008; Teh *et al*, 2009)。国内早在 1966 年曾开展过水槽试验, 建立了利用树干半径、树冠半径、林带宽度、波长等计算防波林消波系数的公式(章家昌, 1966), 这是迄今为止国内仅有的对红树林消波效益计算的参考公式。张乔民(1993, 1997)根据章家昌(1966)的计算公式制作了依据红树林枝叶遮蔽系数与林分相对宽度直接查算消波系数的图表, 并经过相关的验证。目前国内尚未见有对红树林消波效应的实

\* 国家林业科技支撑计划专题“消浪红树林带防护效益研究及人工红树林生态功能恢复评价”, 2009BADB2B0404 号; 国家级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“海南东寨港红树林生态效益研究”, 6309 号。陈玉军, 副研究员, E-mail: yu-junchen@hotmail.com

通讯作者: 廖宝文, 研究员, E-mail: mangro@pub.guangzhou.gd.cn; 黄勃, 教授, E-mail: huangbohbl@163.com

收稿日期: 2011-03-10, 收修改稿日期: 2011-06-23

测及量化的研究。秋茄和无瓣海桑是我国红树林中有典型代表性的种类, 在华南沿海均有普遍分布。本研究主要通过长期的野外观测, 研究和分析海南东寨港秋茄和无瓣海桑人工林消波效应的定量指标, 为我国红树林消波功能的评价提供科学依据。

## 1 研究地区和方法

### 1.1 研究区概况

研究地点设在海南东寨港国家级自然保护区内, 该区是我国红树林生长最好、种类最丰富的红树林保护区, 1992 年被列入《国际重要湿地公约》国际重要湿地名录。研究区位于 19°51′—20°01′N, 110°32′—110°37′E, 年均温度 23.3—23.8℃, 最冷月气温 17.1℃, 最热月气温 28.4℃, 年降雨量 1676.4mm, 海水盐度 21.9。总面积 3337.6hm<sup>2</sup>, 天然红树林 1773hm<sup>2</sup>, 人工林 251hm<sup>2</sup>, 红树植物共 15 科、32 种。波浪监测点设在三江湾区域, 为三江河的入海口, 地域开阔, 红树林受风浪直接影响。

### 1.2 研究方法

在海南东寨港三江湾开阔滩涂上, 选择无瓣海桑(*Sonneratia apetala* Buch.-Ham.)人工林及秋茄(*Kandelia obovata* Sheue, Liu et Yong)人工林作为监测对象, 长期监测红树林的消波效应。红树植物无瓣海桑原产孟加拉国, 属前沿裸滩定居的先锋树种, 树体高大、生长迅速; 红树植物秋茄为当地乡土树种, 生长较缓慢。无瓣海桑和秋茄林带为东西走向, 林带临海面朝正北方向。

波浪测定仪设立在无瓣海桑人工林和秋茄人工林内(表 1), 沿与林带垂直方向距林带临海边缘 25m、50m、75m、100m 处, 同时在林带临海边缘和林外裸滩设立波浪测定仪作对照测量。另外在裸滩设立风速风向仪以获得风速风向数据。通过分析野外观测数据研究波浪在红树林及裸滩传递过程中的减低效应。

于 2008—2010 年对研究地的波浪情况进行长期全天候观测, 取样间隔为 60min, 取样频率为 2Hz,

每个间隔的取样数为 1200 次。数据采集后统计分析每 60min 内的 1/10 波高、1/3 波高、平均波高等波浪特征。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区域的波浪特征

**2.1.1 全年的波浪特征** 研究区域全年各月均以低波高的波浪出现频率高, 波高越大, 出现的频率越低。1/10 波高小于 10cm 的波浪出现的频率, 在各月均超过 67.1%, 其中 2、3 月份为 100%。全年仅在 9 月和 10 月出现 1/10 波高大于 25cm 的波浪, 且出现频率仅为 1.3%和 0.7%, 其它月份的 1/10 波高一般低于 20cm。7 月、9 月和 10 月份的 1/10 波高最大值分别达到 24.5cm、33.3cm 和 27.6cm, 2 月和 3 月的 1/10 波高最大值仅为 6.3cm 和 8.3cm(表 2)。

**2.1.2 波浪与水深的关系** 研究区所获得的波浪数据的水深位于 0.33—1.14m 的范围内, 其中 76%的数据介于水深 0.5—0.8m 之间, 说明此区间是海水经常性淹浸的水位(图 1)。由波高分布情况可知, 水深是波浪产生的必要条件之一。较大的水深条件为较大波浪的产生提供了前提, 若水深较小, 则不会产生较大的波浪。随着水深增加, 海面波浪的最大值增加, 表 3 显示了不同水深范围内的波高最大值。

**2.1.3 海面波浪与风速的关系** 当水深在 0.5—1.0m 的情况下, 当平均风速小于 6m/s 时, 研究区裸滩的波高较小, 1/10 波高小于 10.51cm, 且所测数据大部分小于 5.0cm, 6m/s 以内的风速变化对波高无显著影响(图 2)。这表明波浪的大小是受海面风速的制约的, 在风速较小的情况下无法产生较大的波浪。当风速大于 6m/s 时, 随着风速的增加, 海面波浪能量增大, 波高随着增加。但海面风速的增加只是为波浪的增高提供了一种可能, 因为在风速大于 12m/s 时, 1/10 波高范围为 13.38—27.36cm, 变幅较大, 表明在风速较大时, 波高的大小随风速并非呈线性变化的, 波浪与风速并无确切的定量关系。1/3 波高和平均波高随平均风速的变化趋势与 1/10 波高具有相似的特性。

表 1 研究对象的林分结构特征  
Tab.1 Structure of studied mangrove forest stands

| 林分类型    | 树高(m) | 地径(cm) | 胸径(cm) | 林分密度(hm <sup>-2</sup> ) | 地表断面蓄积(m <sup>2</sup> /hm <sup>2</sup> ) | 胸高断面蓄积(m <sup>2</sup> /hm <sup>2</sup> ) |
|---------|-------|--------|--------|-------------------------|--|--|
| 秋茄人工林   | 5.5   | 8.1    | 6.7    | 2700                    | 94.71                                    | 9.51                                     |
| 无瓣海桑人工林 | 10.8  | 27.4   | 19.6   | 700                     | 45.53                                    | 25.26                                    |

表2 研究区全年各月的波浪特征

Tab.2 Wave traits of studied area among months throughout the year

| 时间<br>(年.月) | 1/10 波高频率(%) |       |       |       |       |       |       | 1/10 波高<br>最大值(cm) | 1/10 波高<br>平均值(cm) |
|-------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|--------------------|
|             | $H_1$        | $H_2$ | $H_3$ | $H_4$ | $H_5$ | $H_6$ | $H_7$ |                    |                    |
| 2010.01     | 37.0         | 48.1  | 14.9  | 0     | 0     | 0     | 0     | 12.8               | 6.4                |
| 2010.02     | 76.9         | 23.1  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 6.3                | 3.6                |
| 2010.03     | 92.1         | 7.9   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 8.3                | 2.3                |
| 2010.04     | 53.5         | 29.1  | 15.1  | 2.3   | 0     | 0     | 0     | 17.9               | 5.1                |
| 2010.05     | 76.7         | 21.7  | 1.7   | 0     | 0     | 0     | 0     | 11.1               | 2.9                |
| 2010.06     | 94.2         | 4.3   | 1.4   | 0     | 0     | 0     | 0     | 10.2               | 1.6                |
| 2010.07     | 68.8         | 20.8  | 6.5   | 1.3   | 2.6   | 0     | 0     | 24.5               | 4.0                |
| 2010.08     | 87.7         | 11.0  | 1.4   | 0     | 0     | 0     | 0     | 12.3               | 2.3                |
| 2010.09     | 55.4         | 22.8  | 11.2  | 6.7   | 2.6   | 1.0   | 0.3   | 33.3               | 6.1                |
| 2010.10     | 60.5         | 21.7  | 11.2  | 5.4   | 0.4   | 0.7   | 0     | 27.6               | 5.3                |
| 2010.11     | 41.4         | 25.7  | 27.1  | 5.7   | 0     | 0     | 0     | 16.7               | 7.1                |
| 2010.12     | 59.2         | 37.0  | 3.8   | 0     | 0     | 0     | 0     | 15.0               | 4.1                |

注:  $H$  表示波高,  $H_1: 0 < H < 5\text{cm}$ ;  $H_2: 5 < H < 10\text{cm}$ ;  $H_3: 10 < H < 15\text{cm}$ ;  $H_4: 15 < H < 20\text{cm}$ ;  $H_5: 20 < H < 25\text{cm}$ ;  $H_6: 25 < H < 30\text{cm}$ ;  $H_7: 30 < H < 35\text{cm}$ ;  $H_8: 35 < H < 40\text{cm}$ 。图6同

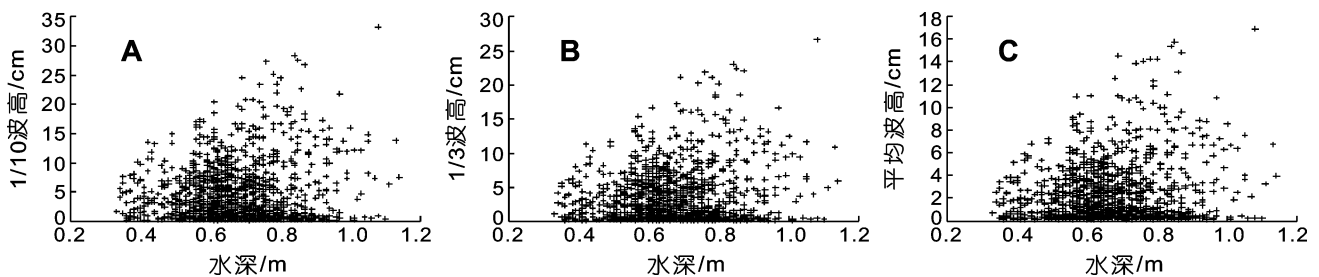


图1 裸滩波高特征与水深的相关性

Fig.1 Relationship between wave height and water depth at bare mudflat

表3 不同水深条件下裸滩的波高最大值

Tab.3 Maximum of wave height at different water depth at bare mudflat

| 波高类型    | 波高上限(cm) |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | $D_0$    | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ | $D_4$ | $D_5$ | $D_6$ | $D_7$ | $D_8$ |
| 1/10 波高 | 10.2     | 15.0  | 17.4  | 24.6  | 27.4  | 28.4  | 21.8  | 33.3  | 13.9  |
| 1/3 波高  | 8.1      | 11.7  | 15.4  | 21.2  | 21.9  | 23.1  | 16.7  | 26.7  | 10.9  |
| 平均波高    | 5.1      | 7.2   | 10.9  | 14.5  | 14.3  | 15.8  | 10.8  | 16.9  | 6.8   |

注:  $D$  表示水深,  $D_0: D < 0.4\text{m}$ ;  $D_1: 0.4\text{m} < D < 0.5\text{m}$ ;  $D_2: 0.5\text{m} < D < 0.6\text{m}$ ;  $D_3: 0.6\text{m} < D < 0.7\text{m}$ ;  $D_4: 0.7\text{m} < D < 0.8\text{m}$ ;  $D_5: 0.8\text{m} < D < 0.9\text{m}$ ;  $D_6: 0.9\text{m} < D < 1.0\text{m}$ ;  $D_7: 1.0\text{m} < D < 1.1\text{m}$ ;  $D_8: 1.1\text{m} < D < 1.2\text{m}$ ;  $D_9: 1.2\text{m} < D < 1.3\text{m}$ 。表4、图5同

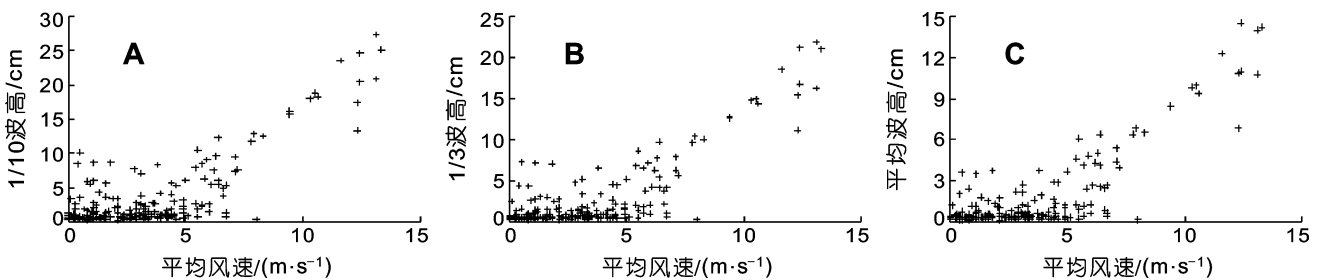


图2 裸滩波高特征与平均风速的关系

Fig.2 Relationship between wave height and wind speed at bare mudflat

### 2.2 波浪经过裸滩的自然减弱特征

波浪经过裸露海滩时,受到底泥的摩擦,有一部分能量损失,波高减低。由于研究区为泥质滩,底质较光滑,波浪在经过裸滩 50m 后,波高减低程度较弱,1/10 波高、1/3 波高和平均波高分别减低了 2.9%、4.4% 和 5.8%(图 3、表 4)。在不同水深条件下,波浪经过裸滩的消退程度不同,但未见有明显规律性。在水深为 0.7—0.9m 时,可能由于风力等其它外界因素的影响,波浪高度出现少量增加的现象。

### 2.3 红树林对波浪的消减效应

**2.3.1 不同林分结构的消波效应** 海南东寨港秋茄人工林和无瓣海桑人工林对浅水域波浪均具有明显的消减效应。波浪在经过林分 50m 后,秋茄人工林能将 1/10 波高、1/3 波高和平均波高分别减低 46.3%、46.4%和 46.1%,无瓣海桑人工林能将 1/10 波高、1/3 波高和平均波高分别减低 30.1%、29.6%和 28.8%(图 4)。由于林分结构的差异(表 1),造成秋茄人工林与无瓣海桑人工林消波效应明显不同,秋茄人工林的消波

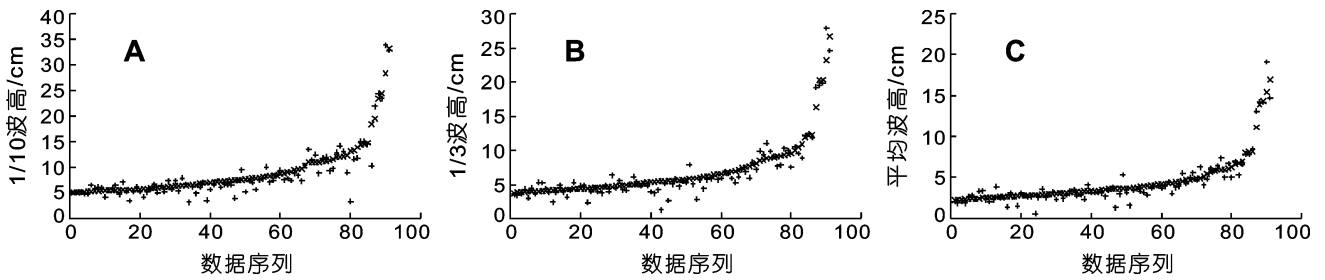


图 3 波浪经过裸滩 50m 前后的变化

Fig.3 Wave height comparison between waves before and after 50m across bare mudflat

×: 经过裸滩前波高(对照), +: 经过裸滩 50m 后波高

表 4 不同水深条件下波浪经过裸滩 50m 的消退情况

Tab.4 Wave attenuation after 50m across bare mudflat at different water depth

| 波高类型    | 消波率(%) |       |       |       |       |       |       |       | 平均  |
|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
|         | $D_1$  | $D_2$ | $D_3$ | $D_4$ | $D_5$ | $D_6$ | $D_7$ | $D_8$ |     |
| 1/10 波高 | 12.0   | 15.7  | 3.1   | -5.6  | -6.4  | —     | 1.0   | 0.2   | 2.9 |
| 1/3 波高  | 11.2   | 15.0  | 1.5   | -4.4  | -8.6  | —     | 7.9   | 8.2   | 4.4 |
| 平均波高    | 11.1   | 14.9  | 1.0   | -4.7  | -10.9 | —     | 13.2  | 16.0  | 5.8 |

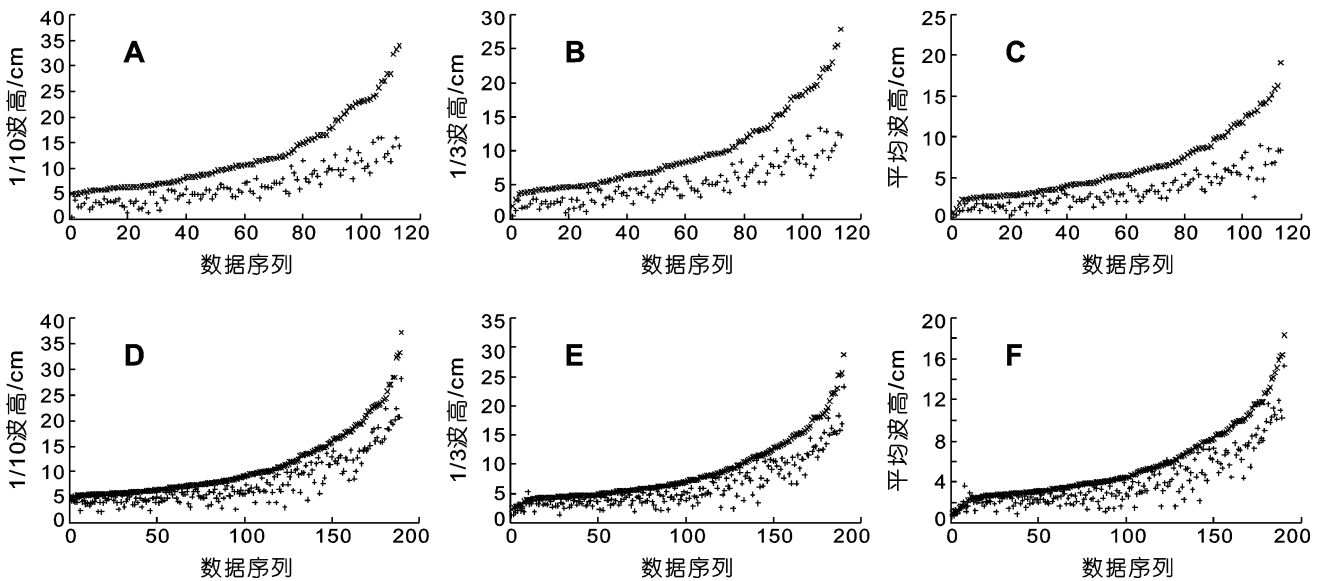


图 4 波浪经过红树林 50m 前后的波高对比情况

Fig.4 Wave height comparison between waves before and after 50m across mangrove forest stand

注: A、B、C 为秋茄人工林, D、E、F 为无瓣海桑人工林。×: 红树林外波高(对照), +: 经过红树林 50m 后波高

效应要明显优于无瓣海桑人工林,秋茄林的消波率(1/10波高)约为无瓣海桑林的1.54倍。

波浪红树林中传播的过程中,主要受到林木枝干及地上根的阻力而不断消弱,因此在波浪所波及的水深范围内,林木生物量所占空间对于波浪的消弱起着关键作用。由于秋茄林外(对照)波浪数据的水深范围为0.43—1.22m,无瓣海桑林外(对照)波浪的水深范围为0.56—1.22m,造成两者消波效应差异的林分结构特征主要在于林木基部(1.22m以下)所占的生物量空间。林木断面蓄积是代表林木所占生物量空间的重要指标,而且从所处的高度而言,林木地表断面面积对于消减波浪的重要程度要高于胸高断面面积。无瓣海桑人工林的胸高断面蓄积虽高于秋茄林,但秋茄林的地表断面面积要远高于无瓣海桑林,并且秋茄林的地表和胸高断面面积之和为无瓣海桑林的1.47倍。二者断面面积之比(1.47)与消波率之比(1.54)较接近,说明林木基部断面面积与消波率存在正相关性,林木基部断面面积越大,对波浪的消减效应越明显。

2.3.2 不同水深条件下红树林的消波效应 在不同的水深条件下,秋茄人工林和无瓣海桑人工林的消波效应存在巨大差异(图5)。随着水深的增加,红树林的消波效应呈下降的趋势。在水深0.4—0.5m区间,秋茄林的消波率最高,对1/10波高、1/3波高和平均波高的消波率分别为73.5%、69.5%和65.9%,在水深1.1—1.2m区间的消波率最低,分别为33.1%、33.7%和33.2%,最高消波率分别是最低消波率的2.22、2.06和1.98倍。无瓣海桑林在水深0.5—0.6m区间的消波率最高,对1/10波高、1/3波高和平均波高的消波率分别为43.4%、36.7%和31.4%,在水深1.2—1.3m区间的消波率最低,分别为12.7%、9.6%和7.8%,前者分别是后者的3.42、3.83和4.00倍。

由于要适应生长于松软的泥滩上,秋茄红树林和无瓣海桑红树林具有根部发达、树干基部粗大的特征,并且树干从地表向上粗度变小,尖削度大。由表1可知,秋茄红树林的地表断面面积

达到胸高断面面积的9.96倍,无瓣海桑红树林的地表断面面积是胸高断面面积的1.8倍。因此,当水深增加时,载波水体所接触的林木生物量体积相对变小,波浪所受的磨擦阻力也相应变小,造成红树林的消波率下降。

2.3.3 红树林对不同波高的消波效应 在水深相同的情况下,随着波浪高度的增加,秋茄人工林和无瓣海桑人工林的消波率也随之有增加的趋势(图6)。其中,在1.0—1.2m的水深区间,秋茄人工林当波高为5—10cm时消波率最低,为26.7%,当波高为25—30cm时消波率最高,为54.8%,是最低值的2.05倍;无瓣海桑人工林当波高为5—10cm时的消波率为4.2%,当波高为25—30cm时消波率为27.0%,二者之间的差异更大。由于水深较浅时海面所能产生的波浪相对较小,因此在水深为0.4—0.6m时所测得的波高上限为15cm,在水深0.6—0.8m水平时的波高上限为25cm,但消波效应同样表现出随波高增大而增强的趋势。

2.3.4 波浪传播距离对消浪效应的影响 随波浪在红树林中的传播,波浪能量逐渐削弱,波高逐渐降低(表5)。秋茄林的消波率与波浪在林分中的传播距离呈非线性正相关。波浪在红树林中传播的最初减弱效应最强,之后波高的降幅逐渐减小。在波浪最初经

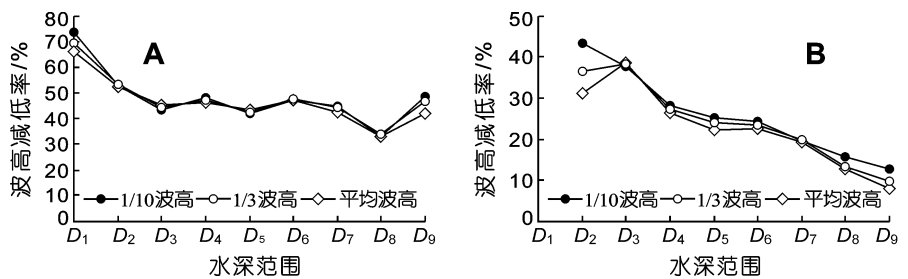


图5 不同水深情况下红树林的消波效应

Fig.5 Wave attenuation effect of mangrove at different water depth

注: A为秋茄人工林, B为无瓣海桑人工林

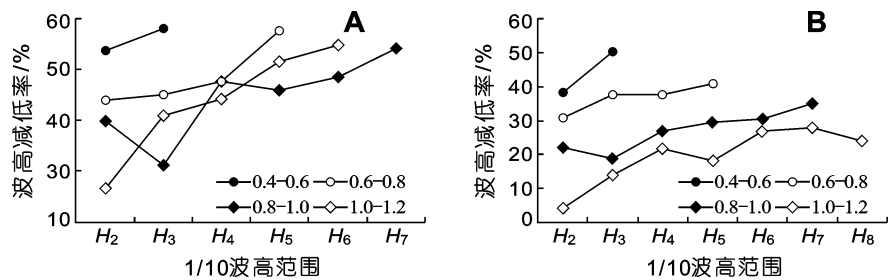


图6 相同水深条件下红树林对不同波高的消减效应

Fig.6 Attenuation effect of mangrove on waves with different height at the same water depth

注: A为秋茄人工林, B为无瓣海桑人工林。图例数据单位为m

过秋茄林 25m 的距离内, 林分对波浪的减低效应最明显, 对 1/10 波高、1/3 波高和平均波高分别减低 31.8%、31.2%和 30.8%, 在从 25m 传播到 100m 的过程中, 传播距离为 75m, 1/10 波高、1/3 波高和平均波高仅减低 26.8%、27.4%和 26.7%。

消波效应在红对林中随传播距离减弱的规律, 与前述消波率随波高增加的规律是一致的。因为波浪在林中传播的过程中, 波高逐渐变小, 造成在相同距离上的消波率降低, 所以在红树林中传播距离越长, 消波效应也就越低。

表 5 波浪在秋茄人工林中的减低过程

Tab.5 Wave attenuation process across artificial *K. obovata* forest

| 经过红树林的<br>距离(m) | 消波率(%)  |        |      |
|-----------------|---------|--------|------|
|                 | 1/10 波高 | 1/3 波高 | 平均波高 |
| 25              | 31.8    | 31.2   | 30.8 |
| 50              | 40.5    | 41.0   | 41.0 |
| 75              | 52.5    | 53.2   | 54.8 |
| 100             | 58.6    | 58.6   | 57.5 |

注: 所测数据的林缘水深为 0.64—0.86m, 林缘 1/10 波高范围为 5.0—12.8cm

### 3 讨论

在海南东寨港三江湾红树林分布区域, 以较低波高的波浪出现频率最大, 1/10 波高小于 10cm 的频率在全年各月均超过 67%, 仅在 9 月和 10 月出现较大波高的波浪(1/10 波高大于 25cm), 因此该时间段是红树林消波效应观测的较理想时间。

水深和风速均是形成较大波浪的必要条件。水深和风速越大, 就可能形成越大的波浪。在进行红树林消波效应观测时, 应尽量选择潮差较大、涨潮淹水较深的区域进行, 同时能尽量在台风期观测, 以获得较显著的波浪数据。

裸露的海滩对波浪有一定的减弱作用, 波浪在经过裸滩 50m 后, 1/10 波高、1/3 波高和平均波高的减低率分别为 2.9%、4.4%和 5.8%。

海南东寨港三江湾秋茄人工林和无瓣海桑人工林均对波浪具有显著的消减效应。由于树木枝干等对于波浪起着阻碍作用, 林木生物量体积对于红树林的消波效应起着关键作用。在林分结构特征中, 林分的基部断面积最能体现林分的生物体积, 与林分的消波率有着紧密的联系。断面积越大, 消波率越高。

在浅水区域, 红树林的消波率随水深增加而降低。在水深相同的条件下, 红树林对波浪的消减效应

随着波浪高度的增加而增强。本研究的红树林区域水深范围局限在 0.4—1.3m 之间, 所测得的波高未超过 40cm, 对于水深超过 1.3m 或者波高超过 40cm (1/10 波高)情况下红树林的消波效应, 需要进一步进行深入研究。

波高在红树林中的递减与波浪的传播距离呈非线性正相关性, 随着波浪在红树林中传播距离的增加, 波高持续减低, 但降幅逐渐减小。

### 参 考 文 献

- 齐 鹏, 李明杰, 侯一筠, 2010. 基于信息扩散原理的渤、黄海沿岸风暴潮灾害风险分析. 海洋与湖沼, 41(4): 628—632
- 李丙瑞, 范海梅, 田纪伟等, 2010. 小振幅海洋内波的演变、破碎和所致混合. 海洋与湖沼, 41(6): 807—815
- 张乔民, 1993. 红树林防浪护岸机理与效益评价. 见: 中国海洋工程学会编. 第七届全国海岸工程学术讨论会论文集(下). 北京: 海洋出版社, 853—861
- 张乔民, 1997. 红树林防浪效益定量计算初步分析. 南海研究与开发, (3): 1—6
- 章家昌, 1966. 防波林的消波性能. 水利学报, (2): 49—52
- Alongi D M, 2008. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 76(1): 1—13
- Brinkman R M, Massel S R, Ridd P V *et al*, 1997. Surface Wave Attenuation in Mangrove Forests. In: Pacific Coasts and Ports '97: Proceedings of the 13<sup>th</sup> Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 6<sup>th</sup> Australasian Port and Harbour Conference. Christchurch, N. Z.: Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, 2: 909—914
- Cochard R, Ranamukhaarachchi S L, Shivakoti G P *et al*, 2008. The 2004 tsunami in Aceh and Southern Thailand, a review on coastal ecosystems, wave hazards and vulnerability. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 10(1): 3—40
- Kathiresan K, Rajendran N, 2005. Coastal mangrove forests mitigated tsunami. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 65(3): 601—606
- Massel S R, Furukawa K, Brinkman R M, 1999. Surface wave propagation in mangrove forests. Fluid Dynamics Research, 24(4): 219—249
- Mazda Y, Kobashi D, Okada S, 2005. Tidal-scale hydrodynamics within mangrove swamps. Wetlands Ecology and Management 13(6): 647—655
- Mazda Y, Magi M, Ikeda Y *et al*, 2006. Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp. Wetlands Ecology and Management, 14(4): 365—378
- Mazda Y, Magi M, Kogo M *et al*, 1997a. Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam.

- Mangroves and Salt Marshes, 1(2): 127—135
- Mazda Y, Wolanski E, King B *et al*, 1997b. Drag force due to vegetation in mangrove swamps. *Mangroves and Salt Marshes*, 1(3): 193—199
- Mendez F J, Losada I J, 2004. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering*, 51(2): 103—118
- Phuoc V L H, Massel S R, 2006. Experiments on wave motion and suspended sediment concentration at Nang Hai, Can Gio mangrove forest, Southern Vietnam. *Oceanologia*, 48(1): 23—40
- Phuoc V L H, Massel S R, 2008. Energy dissipation in non-uniform mangrove forests of arbitrary depth. *Journal of Marine Systems*, 74(1—2): 603—622
- Quartel S, Kroon A, Augustinus P G E F *et al*, 2007. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(4): 576—584
- Struve J, Falconer R A, Wu Y, 2003. Influence of model mangrove trees on the hydrodynamics in a flume. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58(1): 163—171
- Teh S Y, Koh H L, Liu P L *et al*, 2009. Analytical and numerical simulation of tsunami mitigation by mangroves in Penang, Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(1): 38—46
- Wahid S M, Babel M S, Bhuiyan A R, 2007. Hydrologic monitoring and analysis in the Sundarbans mangrove ecosystem, Bangladesh. *Journal of Hydrology*, 332(3—4): 381—395
- Yanagisawa H, Koshimura S, Goto K *et al*, 2009. The reduction effects of mangrove forest on a tsunami based on field surveys at Pakarang Cape, Thailand and numerical analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81(1): 27—37

## STUDIES ON THE QUANTITATIVE ATTENUATION EFFECT OF ARTIFICIAL MANGROVE *KANDELIA OBOVATA* AND *SONNERATIA APETALA* ON WAVES

CHEN Yu-Jun<sup>1</sup>, LIAO Bao-Wen<sup>1</sup>, HUANG Bo<sup>2</sup>, ZHANG Qiao-Min<sup>3</sup>, XU Da-Ping<sup>1</sup>,  
CHEN Yuan-Hai<sup>4</sup>, LIN Wei-Hai<sup>4</sup>, LI Mei<sup>1</sup>

(1. *Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, 510520*; 2. *Ocean College, Hainan University, Haikou, 570228*; 3. *South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510301*; 4. *Hainan Dongzhai Harbor National Nature Reserve, Haikou, 571129*)

**Abstract** Attenuation effect of artificial mangrove *Sonneratia apetala* and *Kandelia obovata* on waves was studied quantitatively through field monitoring at Sanjiang Bay, Dongzhai Harbor, Hainan. The results showed that bare mudflat could only attenuate waves slightly, with 1/10 wave height, 1/3 wave height and mean wave height reduced by 2.9%, 4.4% and 5.8% respectively after the waves traveled 50m across the mudflat. Significant attenuation effect on waves could be seen of both artificial mangrove forests. In general, 1/10 wave height, 1/3 wave height and mean wave height were reduced by 46.3%, 46.4% and 46.1% respectively after the waves traveled 50m across artificial *K. obovata* forest stand, and the same indexes were reduced by 30.1%, 29.6% and 28.8% respectively on artificial *S. apetala* forest stand. Larger section area of mangrove forest stand turned to result in higher wave attenuation rate. At shallow water area, attenuation rate of mangrove forest decreased as the water grew deeper. While at the same water depth, attenuation rate of mangrove increased as wave height grew higher. Attenuation rate of mangrove on waves kept a nonlinearly positive relationship with travel distance of the waves. With the extension of waves across mangrove forest, wave height tended to be reduced continually, while the decline rate became less significant gradually.

**Key words** Artificial mangrove forest, *Kandelia obovata*, *Sonneratia apetala*, Attenuation effect on waves