

文章编号: 1674-7054(2011)04-0378-05

## 红树林消波效应研究进展

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

**摘 要:** 对红树林消波效应研究的进展情况进行了综述。红树林消波效应的研究主要集中在东南亚地区, 研究的主要途径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, 其次是通过建立理论模型来模拟红树林对波浪的消减效应。

**关键词:** 红树林; 消波效应; 研究进展

**中图分类号:** S 718.55

**文献标志码:** A

红树林广泛分布于热带及亚热带海岸线上, 具有重要的海岸防护功能, 保护海岸线免受海水侵蚀和风暴潮危害。但是由于人类对海岸的利用不断增长而受到严重破坏。尤其是受沿海的养殖业、旅游开发及其他工业发展的影响, 使大量的红树林受到破坏甚至绝迹。近年来, 由于海啸灾难的袭击, 红树林的重要性才受到全球关注, 人类对红树林的减灾功能也有了更深入的认识和理解<sup>[1-5]</sup>。大量报道表明, 在没有自然生态(红树林)保护的地方受海啸损失最大, 而有完好的红树林蔽护的海岸社区则受到较少的破坏。例如 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚海啸的震源虽然离 Simeuleu 岛很近, 但是由于那里有稠密的红树林保护, 所以人员伤亡及财产损失都很低。同样, 在印度的东南部也发生海啸, 在有红树林密布的地方, 人员的伤亡及经济损失也少得多。红树林保护海岸、防灾减灾主要是通过缓解波浪来实现的。红树林是海岸带结构的重要组成部分, 有关波浪动态与海岸带结构特征(包括植被)的关系, 已有大量研究报道<sup>[6-12]</sup>。但对其消波效应的研究目前主要集中在东南亚地区, 而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<sup>[13-19]</sup>, 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<sup>[20-24, 29]</sup>。下面就红树林消波效应的研究进展作一综述。

### 1 消波效应观测研究

开展红树林消波效应的野外观测, 一般要选择直接临海的红树林, 从红树林外裸滩向红树林内分别设立波浪观测仪, 观测点根据研究的需要而定, 对研究地的波浪情况进行连续观测, 取样间隔时间为 20 ~ 60 min, 取样频率为 2 ~ 4 Hz, 每个间隔的取样数为 1 200 次左右。数据采集后统计分析每个取样间隔内的平均波高、有效波高、波周期、波谱等波浪特征。使用的波浪观测仪一般为小型的压力式传感器, 通过分析程序可以将水压(水深)数据转换成为波浪特征数据。PHUOC 等<sup>[18]</sup>从红树林缘至林内 80 m, 分别设立 5 个压力式波浪观测仪器, 仪器型号分别为 WG-730W (Valeport 公司)、MWR-I (Sanyo Sokki 公司)、OBS-3A (D&A 公司)及 CTD-606 (Valeport 公司), 野外测量时间共 16 d。每 20 ~ 30 min 取样 1 次, 取样频率为 2 ~ 5 Hz。QUARTEL 等<sup>[19]</sup>沿海岸剖面, 分别在开阔的潮间带滩涂、红树林边缘滩涂及红

收稿日期: 2011-11-03

基金项目: 国家林业科技支撑计划专题(2009BADB2B0404); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(6309)

作者简介: 陈玉军(1972-), 男, 河南信阳人, 中国林业科学研究院热带林业研究所副研究员。

树林中设立3套仪器测定流速及水位,每60 min 取样1次,取样频率为2 Hz。由于海面波浪受到风的直接影响,在红树林波浪监测时,需结合当地的气象观测资料,来获得研究地的风速风向数据。

随着水深或潮位的变化,红树林的消波效应也会出现显著的变化。MAZDA 等<sup>[14]</sup>对越南 Tong King 三角洲人工秋茄红树林进行野外测定时发现,沿波浪方向每100 m 红树林对波浪的消减率随水深而异。MAZDA 等<sup>[15]</sup>对泰国北部海岸1种海桑属植物的消波效应观测时发现,在浅水范围内,由于气生根向上逐渐变细,随水深的增加根系对波浪的拉拖力变小,造成对波浪的消减率减低,但当水位高于密集的枝叶时,对波浪的消减率又随着水位的增加而增加,这表明生长密集的红树林枝叶能有效消减巨大的波浪能量(出现于台风等风暴情况下)。波浪所受阻力和涡动速度在红树林湿地的水文动态中起着主导作用。根据植物的特征值可以预测阻力系数和涡动系数,这些系数跟淹没的植被密度有紧密关系,而植被密度是随潮水深度而变化的,因此随着水深不同,红树林的消波效应出现显著差异<sup>[16]</sup>。

波浪在红树林中的消减与波浪传播的距离有关。PHUOC 等<sup>[18]</sup>对越南南部 Can Gio 的红树林野外测定表明,波浪经过红树林内较短的距离后降低得非常迅速(林缘波高为0.35~0.4 m)。在林内20 m 处波能降低50%~70%,40 m 处降低50%左右,超过40 m 后波能持续减低,但降幅较小。

红树林的消波效应同时受树木年龄的影响。MAZDA 等<sup>[14]</sup>发现人工秋茄红树林幼林对于波浪消减的效应不明显,而当红树林生长到一定高度时,100 m 宽的林带对波浪消减率达80%。

与裸露泥滩相比,红树林的消波率要高得多。QUARTEL 等<sup>[19]</sup>对越南红河三角洲红树林生态系统的消波效应进行了研究,表明在经过裸滩的沙质表面,波浪高度和能量密度由于底部的磨擦而减低,但随水深的增加,效应越不明显。在红树林植被中,底泥的磨擦较小,红树林树干、枝条及地面根系则形成极高的阻力。秋茄红树林植被对波浪的阻力可以由公式表示为  $C_D = 0.601e^{0.1548A}$  ( $A$  表示在一定水深条件下水下突出的障碍物的断面积),对于无红树林的泥滩,公式表示为  $C_D = 0.601$ 。100 m 的裸露泥滩上波高消减率在10%以内,红树林对波高的消减率则是泥滩的5~7.5倍。

## 2 消波效应模拟研究

在野外观测数据的基础上,建立红树林消波效应的经验方程,可以模拟红树林的消波效应。BRINK-MAN 等<sup>[13]</sup>通过野外观测,利用2种途径对红树林消波效应进行了模拟,一种是把红树林看作具有一定参数特征的多孔渗水介质,另一种是涡流模型,计算阻力系数。由于野外观测工作量大,且难以对不同类型的红树林消波情况进行观测,因此,目前大多数消波效应模拟的研究,是建立在室内水槽试验或现有水文物理模型的基础上。

章家昌<sup>[25]</sup>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,这是目前为止国内仅有的对红树林消波效益的定量计算的公式。张乔民等<sup>[26-27]</sup>根据章家昌的计算公式制作了根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,并经过验证提出,红树林覆盖度>0.4,宽度>100 m,树高>2.5 m(小潮差海岸)或>4.5 m(大潮差海岸),消波系数可达80%以上。陈达森<sup>[28]</sup>根据湛江沿海波浪分布情况,运用章家昌提出的防波林消波系数公式,以防波效益80%为目标,通过计算和综合分析得:湛江沿岸营造红树林时,在潮差小(约2 m)海区,营造宽度应为80~120 m;在潮差大(约4 m)海区,营造宽度应为200~300 m。STRUVE 等<sup>[21]</sup>通过水槽和集成水深的模拟试验,研究模拟红树林所产生的阻力,证明阻力指数是随着树木表面积的增加而增大的。

根据现有的水文动力模型,结合红树林植物的结构特征,可以对红树林消波模型进行研究和模拟。BURGER<sup>[29]</sup>利用调整后的SWAN模型(Simulating Waves Near Shore)进行波浪消减研究。模型是将红树林植被沿垂直方向分成不同层次对待,将各个层次的波浪消减累加成整个植被高度的波能消减量。波能的消减是以植被特征和波浪参数来体现的。植被特征包括阻力系数、树木直径、林分密度及植被高度等。阻力系数是惟一需要校准的参数。但模型中忽略了底质磨擦、植被的移动及惯性。消波模型表达为

$$S_{veg} = \frac{8\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \rho C_D b_v N_v \left( \frac{gk}{2\delta} \right)^2 \frac{\sinh^3 k\alpha h + 3\sinh k\alpha h}{2k \cosh^3 kh} E \sqrt{E},$$

其中  $C_D$  为阻力系数  $b_v$  为林木直径  $\alpha h$  为植物高度。TEH 等<sup>[24]</sup> 利用 Morison 方程模拟了红树林对海啸的波能、波高及波速的减低作用。对于波高和波速分别为 1.0 m 和 1.0 m · s<sup>-1</sup> 的 1 km 长的海啸 500 m 宽的红树林对波高和波速的减低率可以达到 0.55 和 0.50。

MASSEL 等<sup>[20]</sup> 建立了用于预测由于风引起的随机波在红树林中衰减的理论模型。波浪消减的原理是将红树林看作杂乱的介质, 这种介质的特征是由红树林树干及所处位置的几何学来决定的。波浪消减率与红树林的密度、根部和树干直径以及波浪的波谱特性密切相关。PHUOC 等<sup>[23]</sup> 通过研究建立了在任意水深条件下非单一红树林中波浪传播的理论模型。研究应用了经过调整的微坡度消波方程来模拟红树林中不断变化的水深条件下的波浪情况, 并利用随机最小化的理念对波浪树干相互作用的非线性方程进行线性化。证实波浪与树干间的相互作用以及波浪的破碎化是波浪在红树林中消减的主要机制, 且大部分波浪能量在红树林中较小的距离范围内得到了消减。MENDEZ 等<sup>[22]</sup> 通过研究提出了 1 种能够估计波浪经过植被区的递减过程的经验模型, 不同植物可以给定不同的参数指标, 在波高平方根数据方面, 模拟的结果与实验数据极为接近。

### 3 研究展望

SWAN 模型(simulating waves near shear)是由荷兰代尔夫特大学工程学院的环境流体机械团队开发的, 现已发展为第 3 代版本(2005 年), 为免费软件程序, 公众可根据需要对其进行调整和使用。SWAN 程序需要利用 Fortran90 程序编译。SWAN 源代码包括不同的子程序, 其中子程序 swancom2 包含一些消波的公式, 子程序 INPVEG 涉及参数的输入, 子程序 SVEG 用于计算波能的消减。所利用的植被特征参数为阻力系数、植被高度、植物密度和直径。

以海洋水文学理论为基础, 以 SWAN 模型为原型, 通过野外观测所获得的水文、植被方面的数据计算模型参数, 对最初模型进行调校, 以获得适于观测点实际情况的消波模型。将红树林分成不同的层次进行研究, 树冠、树干、根部 3 个层次, 分层次模拟消波效应, 最后将各个层次的参数累加成整个红树林植被的消波方程。树干及根部由于相对固定, 利用圆柱体理论研究, 树冠由于具有柔韧性会在水体中摆动, 参照相关盐生植被(如米草等)的消波情况进行研究。

经过理论研究和数学模拟, 根据 SWAN 原型衍生相应的红树林减波模型。在此基础上, 将实测的红树林植被参数与波浪参数引入到最初的模型中, 将模拟结果与实测的波浪数据进行比较, 对最初形成的模拟方程进行较准, 以最终确定与实测情况相一致的减波模型及相关减波参数。模型表达式为

$$d = f(x_1, x_2, \dots, x_i; y_1, y_2, \dots, y_i; z_1, z_2, \dots, z_i),$$

其中  $d$  为波浪消减率,  $x_i$  为植被参数, 如根系高度、密度及直径; 树干高度、密度、直径; 冠高、冠幅、覆盖度; 观测点距红树林缘的距离等;  $y_i$  为水文参数, 如林缘波浪、水位等参数;  $z_i$  为底泥参数等。

在模型计算时, 植被参数为被海水淹没部分的数值。在经过野外数据验证后, 可对模拟模型进行校正和简化, 生成针对被测定的红树林类型的特定的消波方程。

### 4 讨论

红树林是海洋生态系统的一部分, 如何将海洋水文模型与红树林相结合, 从而模拟红树林对波浪的衰减效应是当前国际红树林水文研究的焦点。在海洋水文模型方面, SWAN 模型目前发展已较成熟, 该模型适合于浅海区域水文动态模拟, 在学术界已被接受和应用。SWAN 模型把波浪遇到的障碍物作为圆柱体来对待, 同时圆柱体是不受水力作用而摆动的。一方面, 红树林枝干及根系在海洋水力的作用下产生较小的偏移, 可初步看作固定的圆柱体形状, 其在水流中的轻微晃动及树体表面的磨擦力可通过一定的参数进行适当修正, 因此可以用 SWAN 模型来研究其水文效应。另一方面, 红树林树冠部分的枝叶则会

在水力作用下产生较大的晃动,利用 SWAN 来模拟其水力作用难度较大。目前,国际上已有对海岸盐生植被(如米草属植物)的水文生态效应进行模拟和研究,而红树林树冠物理特性则与这些盐生植被相似,因此可以参考现有海岸盐生植被水文生态效能来模拟红树林树冠的减波效应<sup>[30]</sup>。在此基础上,将红树林树干、根部及树冠的模拟结果累加,形成整个红树林生态系统的减波模拟模型是可行的。

## 参考文献:

- [1] KATHIRESAN K, RAJENDRAN N. Coastal mangrove forests mitigated tsunami [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 65(3): 601–606.
- [2] ALONGI D M. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 76(1): 1–13.
- [3] COCHARD R, RANAMUKHAARACHCH S L, SHIVAKOTI G P, et al. The 2004 tsunami in aceh and southern thailand a review on coastal ecosystems, wave hazards and vulnerability [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2008, 10(1): 3–40.
- [4] YANAGISAWA H, KOSHIMURA S, GOTO K, et al. The reduction effects of mangrove forest on a tsunami based on field surveys at Pakarang Cape, Thailand and numerical analysis [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 81(1): 27–37.
- [5] STIMPSON I. Japan's tohoku earthquake and tsunami [J]. *Geology Today*, 2011, 27(3): 96–98.
- [6] GHARBI S, VALKOY G, HAMDIS, et al. Numerical and field study of ship-induced waves along the St. lawrence waterway, canada [J]. *Natural Hazards* 2010, 54(3): 605–621.
- [7] ICHIKAWA M, SAITOH T, MIAO G P. Theoretical analysis of wave and structure interaction around a composite-type coastal structure—a case study of a seawall and detached breakwaters [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*. 2010, 22(5): 482–488.
- [8] SIERRA J P, GONZALEZ M D, MESTRES M, et al. Numerical model for wave overtopping and transmission through permeable coastal structures [J]. *Environmental Modelling & Software*. 2010, 25(12): 1897–1904.
- [9] ZIJLEMA M. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids [J]. *Coastal Engineering*. 2010, 57(3): 267–277.
- [10] GÜNTHER S, WIELAND M, SIEGMUND A. Change detection analysis for assessing the vulnerability and protective effect of beach forests in case of the tsunami 2004 in thailand [J]. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 2011(4): 247–260.
- [11] HUANG Z H, YAO Y, SIMS Y, et al. Interaction of solitary waves with emergent, rigid vegetation [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(10): 1080–1088.
- [12] TONELLI M, PETTI M. Simulation of wave breaking over complex bathymetries by a Boussinesq model [J]. *Journal of Hydraulic Research* 2011, 49(4): 473–486.
- [13] BRINKMAN R M, MASSEL S R, RIDD P V, et al. Surface Wave Attenuation in Mangrove Forests [C]//Pacific Coasts and Ports 97: Proceedings of the 13th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 6th Australasian Port and Harbour Conference. Christchurch, N. Z.: Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, 1997: 909–914.
- [14] MAZDA Y, MAGI M, KOGO M, et al. Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam [J]. *Mangroves and Salt Marshes*, 1997, 1(2): 127–135.
- [15] MAZDA Y, MAG M, IKEDA Y, et al. Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia sp* [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2006, 14(4): 365–378.
- [16] MAZDA Y, KOBASHI D, OKADA S. Tidal-scale hydrodynamics within mangrove swamps [J]. *Wetlands Ecology and Management* 2005, 13(6): 647–655.
- [17] MAZDA Y, WOLANSKI E, KING B, et al. Drag force due to vegetation in mangrove swamps [J]. *Mangroves and Salt Marshes*, 1997, 1(3): 193–199.
- [18] 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.

- [19] QUARTEL S , KROOM A , AUGUSTINUS P G E F , et al. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta , Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 2007 29( 4) : 576 – 584.
- [20] MASSEL S R , FURUKAWA K , BRINKMAN R M. Surface wave propagation in mangrove forests [J]. *Fluid Dynamics Research* , 1999 24( 4) : 219 – 249.
- [21] STRUVE J , FALCONER R A , WU Y. Influence of model mangrove trees on the hydrodynamics in a flume [J]. *Estuarine , Coastal and Shelf Science* , 2003 58( 1) : 163 – 171.
- [22] MENDEZ F J , LOSADA I J. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields [J]. *Coastal Engineering* , 2004 51( 2) : 103 – 118.
- [23] Phuoc V L H , Massel S R. Energy dissipation in non-uniform mangrove forests of arbitrary depth [J]. *Journal of Marine Systems* , 2008 , 74( 1/2) : 603 – 622.
- [24] TEH S Y , KOH H L , LIU P L , et al. Analytical and numerical simulation of tsunami mitigation by mangroves in Penang , Malaysia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* 2009 36( 1) : 38 – 46.
- [25] 章家昌. 防波林的消波性能 [J]. *水利学报* , 1966 ( 2) : 49 – 52.
- [26] 张乔民. 红树林防浪护岸机理与效益评价 [G] // 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, 1993: 853 – 861.
- [27] 张乔民. 红树林防浪效益定量计算初步分析 [J]. *南海研究与开发* , 1997( 3) : 1 – 6.
- [28] 陈达森. 从防波效益分析湛江沿海红树林营造宽度 [J]. *湛江海洋大学学报* , 1999 , 19 ( 4) : 41 – 44.
- [29] BURGER B. Wave attenuation in mangrove forests. Numerical modelling of wave attenuation by implementation of a physical description of vegetation in SWAN [D]. Delft : Delft University of technology 2005.
- [30] MOLLER I , SPENCER T , FRENCH J R , et al. The sea-defence value of salt marshes: Field evidence from north norfolk [J]. *J. CIWEM* , 2001( 15) : 109 – 116.

## Progresses in the Study of Wave Attenuation Effect of Mangroves

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>

( 1. Research Institute of Tropical Forestry , Chinese Academy of Forestry , Guangzhou 510520 , China;

2. Ocean College , Hainan University , Haikou 570228 , China;

3. South China Sea Institute of Oceanology , Chinese Academy of Sciences , Guangzhou 510301 , China;

4. Hainan Dongzhai Harbor National Nature Reserve , Haikou 571129 , China)

**Abstract:** In this paper , the research progresses in the study of wave attenuation effect of mangroves were reviewed. Most of such researches were implemented at South-east Asia. The attenuation effect was studied mainly by analyzing field monitoring data , the correlation between attenuation rate and vegetation , and hydrological traits. And some other researches were carried out by developing theoretical model to estimate the attenuation effect.

**Key words:** mangrove; wave attenuation effect; research progress