

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.02.005

# 海啸波作用下泥沙运动

## ——V. 红树林影响下的岸滩变化

陈杰<sup>1,2</sup>, 管喆<sup>1</sup>, 蒋昌波<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114)

**摘要:**近年来频发的海啸灾害造成巨大损失, 而红树林具有很好的减小海啸灾害的作用。实验采用PVC圆管来概化模拟红树林, 以无黏性沙堆砌而成1/10~1/20组合坡概化岸滩, 选取孤立波模拟海啸波。实验结果表明, 红树林的存在对岸滩剖面变化产生了较大影响, 适当增加植物分布密度, 并优化植物的分布方式, 可有效减小海啸波对岸滩的冲刷危害。在本次实验条件下, 得到了岸滩冲刷坑尺度、淤积沙坝尺度、最大冲刷深度、最大淤积高度与红树林的分布方式和密度、海啸波波高、泥沙比重和岸滩坡度之间的关系式, 揭示了沙质岸滩剖面变化与红树林、海啸波水动力特性、泥沙颗粒、岸滩坡度之间的内在联系, 为减小海啸灾害提供科学依据。

**关键词:**岸滩演变; 海啸波; 红树林; 植物分布密度; 植物分布方式

**中图分类号:** TV142      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2016)02-0206-08

近年来海啸灾害频发, 严重威胁着沿岸人民的生命安全, 海啸波引起的岸滩冲刷对近岸地区特别是建筑物危害巨大<sup>[1]</sup>。红树林是一种生长在热带、亚热带低能海岸潮间带上部的湿地木本生物群落。大量现场调研表明, 红树林具有很好的减小海啸灾害的作用, 有“海岸卫士”之称<sup>[2-3]</sup>。

现阶段针对红树林的生态系统<sup>[4]</sup>和湿地环境<sup>[5]</sup>开展了大量的研究工作, 而水动力方面研究相对较少, Huang等<sup>[6]</sup>、王俊<sup>[7]</sup>和蒋昌波等<sup>[8]</sup>学者开展了红树林与海啸波相互作用的水动力实验研究工作, 目前红树林对海啸波作用下岸滩变化影响的研究尚未见报道。

近年来, 国内外学者开展了海啸波作用下的岸滩冲刷研究工作, 主要从3方面展开: ①泥沙起动和推移质运动<sup>[9]</sup>; ②岸滩剖面变化, 包括实验研究<sup>[10-11]</sup>和数值模拟<sup>[12-13]</sup>; ③建筑物局部冲刷, 研究对象主要为墩柱<sup>[14-15]</sup>、沿海公路<sup>[16]</sup>、潜堤<sup>[17]</sup>和直立堤<sup>[18]</sup>。现有研究表明海啸波会引起剧烈的岸滩冲淤变化, 但海啸波受到不同的近岸建筑物的影响, 冲淤变化特性各有不同。红树林影响下的海啸波引起的岸滩变化有待深入探讨。因此为弥补现有研究不足, 本文拟基于波浪水槽实验, 开展红树林影响下的海啸岸滩演变研究。

## 1 实验概述

实验在长沙理工大学波浪水槽内进行, 水槽长40.0 m, 宽0.5 m, 高0.8 m。实验布置如图1所示, 在水槽内建立垂向二维直角坐标系, 以斜坡起点为原点, 波浪传播方向为 $x$ 轴正方向, 垂直向上方向为 $z$ 轴正方向。

天然生长的红树林枝叶繁茂、根系发达, 要准确模拟难度较大。参考Huang等<sup>[6]</sup>、王俊<sup>[7]</sup>和蒋昌波等<sup>[8]</sup>实验, 采用PVC圆管来概化模拟红树林, 忽略了根系和枝叶。PVC圆管的优点为刚度好, 与波浪作用

收稿日期: 2015-09-14; 网络出版时间: 2016-03-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20160314.2210.020.html>

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51239001); 国家自然科学基金资助项目(51409022)

作者简介: 陈杰(1982—), 男, 广西桂林人, 副教授, 博士, 主要从事海岸动力过程及其模拟技术研究。

E-mail: chenjie166@163.com

通信作者: 蒋昌波, E-mail: jcb36@163.com

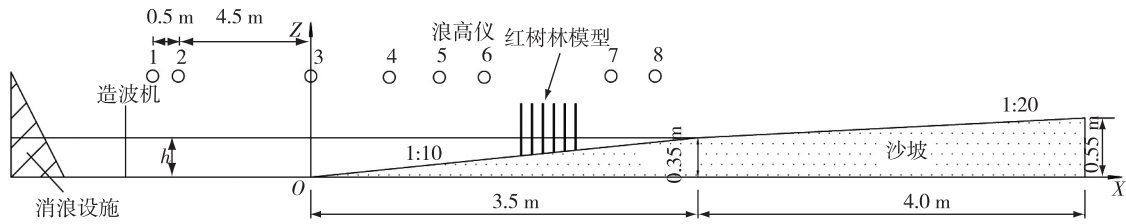


图 1 实验布置

Fig. 1 Experimental setup

时不会产生明显变形。根据调查 15 年树龄的红树林直径 20 cm 左右, 树龄 20~50 年的红树林直径 20~25 cm。考虑到造波机的造波性能, 几何比尺采用 1:20。实验 PVC 圆管高 50 cm, 直径  $d_i$  为 1.0 cm, 实际模拟的树干直径为 20 cm。实验时将 PVC 管插置在有机玻璃底板上以便固定模型, 模型布置在  $x=2.0\sim 2.5$  m 的位置。根据植物的常见种植分布方式, 如图 2 所示, 实验共设计 4 种分布方案, 间距  $l=2.5$  cm。其中模型 1、模型 2、模型 4 为矩形分布, 模型 3 为菱形分布。

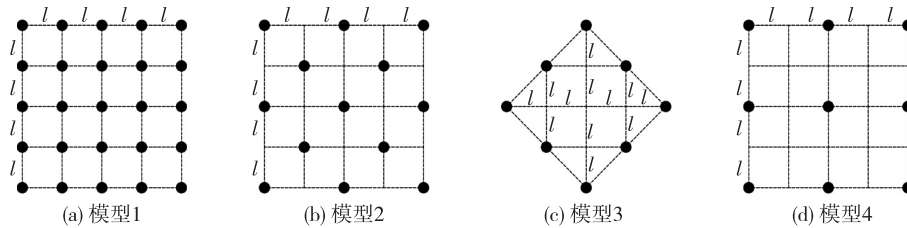


图 2 红树林模型分布方式

Fig. 2 Mangrove distribution mode

采用下式进行植物分布密度  $\varphi$  的计算:

$$\varphi = \frac{nS_i}{S} \tag{1}$$

式中:  $n$  为植物根数;  $S_i$  为单个植物横截面面积;  $S$  为整个分布区域面积。植物分布密度  $\varphi$  如表 1 所示。

定义植物系数  $\Psi$  如下:

$$\Psi = n \frac{\varphi^2}{\bar{l}^2} \tag{2}$$

式中:  $\varphi$  为植物分布密度, 定义如式(1)所示;  $\bar{l}$  为植物之间的平均间距。植物系数  $\Psi$  可综合反应植物分布方式和密度的影响。

表 1 实验工况

Table 1 Research cases

组次	模型	植物分布方式	植物分布密度 $\varphi$	植物系数 $\Psi$	波高 $H/cm$	组次	模型	植物分布方式	植物分布密度 $\varphi$	植物系数 $\Psi$	波高 $H/cm$
1	无红树林	—	—	—	6.0	9	模型 2	矩形分布	0.062 1	15.20	12.0
2	无红树林	—	—	—	9.0	10	模型 3	菱形分布	0.062 1	20.86	6.0
3	无红树林	—	—	—	12.0	11	模型 3	菱形分布	0.062 1	20.86	9.0
4	模型 1	矩形分布	0.124 3	60.80	6.0	12	模型 3	菱形分布	0.062 1	20.86	12.0
5	模型 1	矩形分布	0.124 3	60.80	9.0	13	模型 4	矩形分布	0.031 1	3.80	6.0
6	模型 1	矩形分布	0.124 3	60.80	12.0	14	模型 4	矩形分布	0.031 1	3.80	9.0
7	模型 2	矩形分布	0.062 1	15.20	6.0	15	模型 4	矩形分布	0.031 1	3.80	12.0
8	模型 2	矩形分布	0.062 1	15.20	9.0						

参考蒋昌波等<sup>[10-11]</sup>和陈杰等<sup>[16-18]</sup>实验,将海岸地形简化为1:10和1:20组合斜坡,在水深 $h=35.0$  cm处变坡。与众多海啸泥沙实验一样<sup>[9-11,14-18]</sup>,由于按比尺无法选择到合适的模型沙,因此斜坡采用筛分好的无黏性细沙堆成,通过估算保证实验条件下泥沙会发生起动。对细沙进行5次随机取样,筛分实验结果显示细沙平均中值粒径为 $d_{50}=0.369$  mm,平均不均匀系数( $C_u=d_{60}/d_{10}$ )为2.82,平均曲率系数( $C_c=d_{30}^2/(d_{10}d_{60})$ )为1.117,沙比重 $s_d$ 为2.51。实验采用孤立波来模拟海啸波,考虑到海啸波常是多次侵袭,因此,进行多个波逐个作用的实验。预备实验和已有研究成果表明,6个波作用后地形基本不发生变化,可认为达到平衡状态。实验工况如表1所示。

波高测量采用加拿大WG-50型浪高仪和超声波水位计。浪高仪最小测量周期为 $1.5\ \mu\text{s}$ ,误差为0.4%,采样频率为50 Hz。超声波水位计采样频率为20 Hz,测量精度为0.2 mm。地形测量采用URI-IIIU超声波地形仪,测量误差为 $\pm 1$  mm。实验同时采用分辨率为 $1920\times 1080$ 的Logitech C910高清摄像头从水槽侧面进行拍摄记录,视频的采样频率为15 Hz。

实验首先将斜坡铺好整平,安装好红树林模型,水槽灌满水,浸泡沙质斜坡12 h以后,再缓慢将水位降低到实验水深,约30 min后开始造波,测量波高数据。待水面充分平静后,进行下一次造波,共进行6个波的逐个作用,最后待水面充分平静后测量最终地形。实验开始前开展大量预备实验,对造波机可靠性和重复性、地形变化重复性、仪器设备的可靠性进行验证。预备实验结果表明,地形沿水槽宽度方向基本无变化,呈现二维特性,因此地形测量选取水槽的中心断面进行。完成一个组次的实验之后,把整个斜坡的沙子全部翻动搅拌,使泥沙均匀混合,再重新铺好斜坡并整平,接着重复上述步骤开始下一次组次实验。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 红树林存在对岸滩剖面变化的影响

图3分别给出波高 $H$ 为12 cm的孤立波作用下有红树林和没有红树林的岸滩剖面变化实验结果。可以看出在孤立波作用下岸滩发生了明显的冲刷和淤积变化。实验录像结果显示,水流回落时滩肩发生冲刷,泥沙在离岸区堆积,呈沙坝剖面,结果与蒋昌波等<sup>[9-10]</sup>实验一致。在植物模型前,孤立波由于植物的阻挡产生雍高,通过植物模型后波高急剧减小,但并没有发生波浪破碎,透射波仍以孤立波的形式继续传播。对比有无红树林的实验结果,可以发现红树林的存在虽然不能完全阻止海啸冲刷危害的发生,但是还是对岸滩剖面变化产生了较大影响,影响的程度随其分布方式和密度的不同而变化。

### 2.2 入射波高对岸滩剖面变化的影响

图4分别给出红树林在相同的分布方式和密度情况下不同入射波高作用后岸滩剖面变化实验结果,其中床面变化值由6个孤立波作用后的最终地形值减去初始地形值得到。可以看出入射波高的变化改变了最大冲刷深度值和最大淤积高度值。随着入射波高增大,岸滩形成的冲刷坑和淤积沙坝的形状基本保持不变,仅最大冲刷深度值和最大淤积高度值随之增大,进而造成最大冲刷位置往向岸方向略微移动,最大淤积位置往离岸方向略微移动。

### 2.3 分布密度对岸滩剖面变化的影响

图5分别给出在相同的入射波高和红树林分布方式情况下植物密度的变化对岸滩剖面形态产生的影响。Huang等<sup>[6]</sup>、王俊<sup>[7]</sup>和蒋昌波等<sup>[8]</sup>实验结果显示,在植物分布形式相同的情况下,植物分布密度越大,孤立波反射系数和波能衰减系数越大,透射系数越小。可以看出在相同的分布方式情况下,随着植物分布密度的增加,孤立波通过植物模型后衰减越剧烈,造成最大冲刷深度值和最大淤积高度值逐渐减小,对岸滩起到一定的保护作用。同时还可以看出,随着植物分布密度的增加,在 $H=6$  cm波高时,岸滩上冲刷坑和淤积沙坝的形状基本保持不变;在 $H=9$  cm和12 cm波高时,岸滩上冲刷坑的形状基本保持不变,但是淤积沙坝的形状发生了改变,在密度较大时由单峰型变成了双峰型。

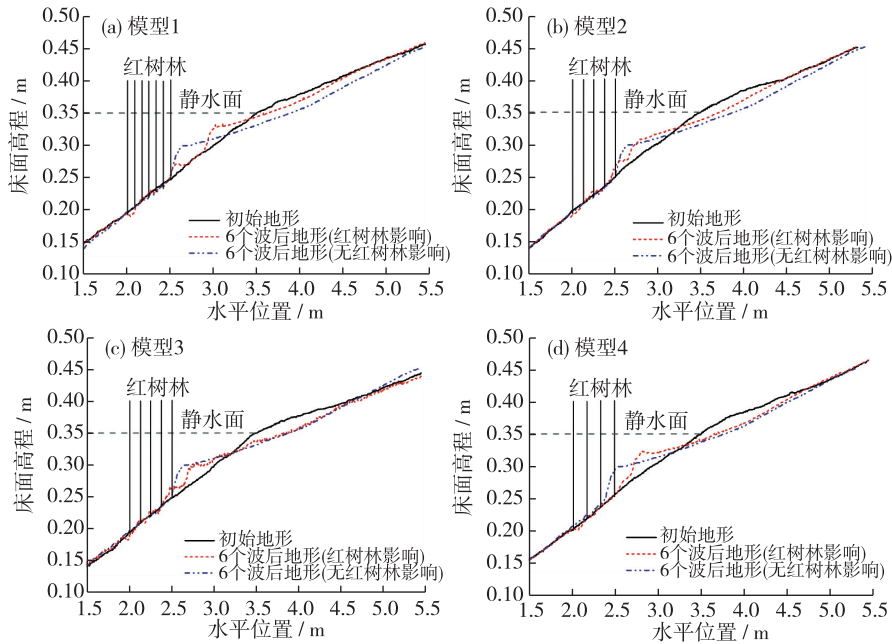


图 3 孤立波 ( $H=12\text{ cm}$ ) 作用下岸滩剖面变化的实验结果

Fig. 3 Experimental result of bed profiles changes under  $H=12\text{ cm}$  solitary waves actions

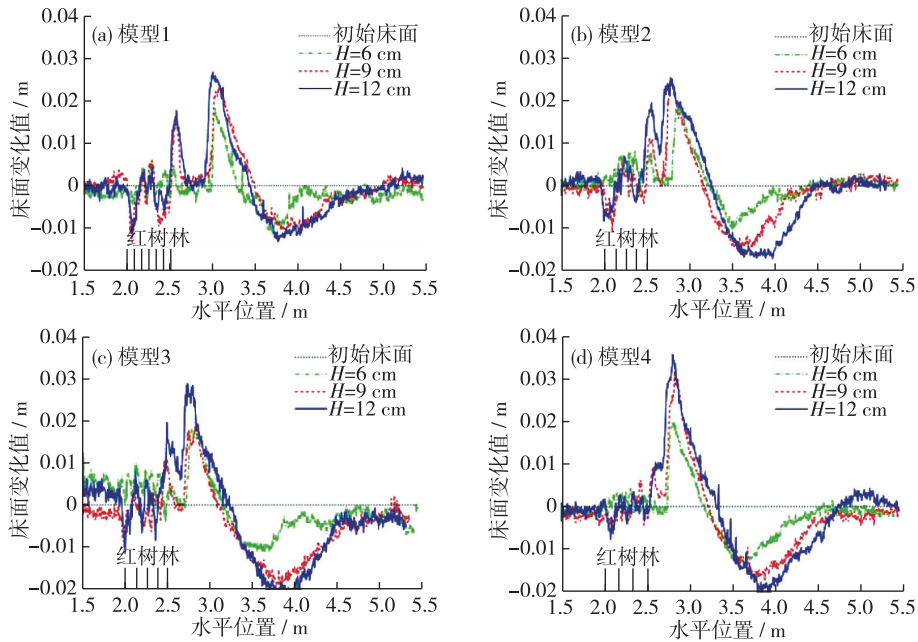


图 4 入射波高对岸滩剖面变化的影响

Fig. 4 Change of beach profile influenced by incident water height

### 2.4 分布方式对岸滩剖面变化的影响

图 6 分别给出在相同的入射波高和红树林分布密度方式情况下植物分布方式的变化对岸滩剖面形态产生的影响。可以看出在相同的植物密度情况下, 分布方式不同会造成最大冲刷深度值和最大淤积高度值的变化, 但岸滩上冲刷坑和淤积沙坝的形状基本保持不变。蒋昌波等<sup>[8]</sup>实验结果显示, 在植物分布密度相同的情况下, 植物垂直于孤立波传播方向上分布越紧密, 孤立波反射系数和波能衰减系数越大, 透射系数越小。因此优化植物的分布方式可以有效减小海啸对岸滩冲刷的危害。



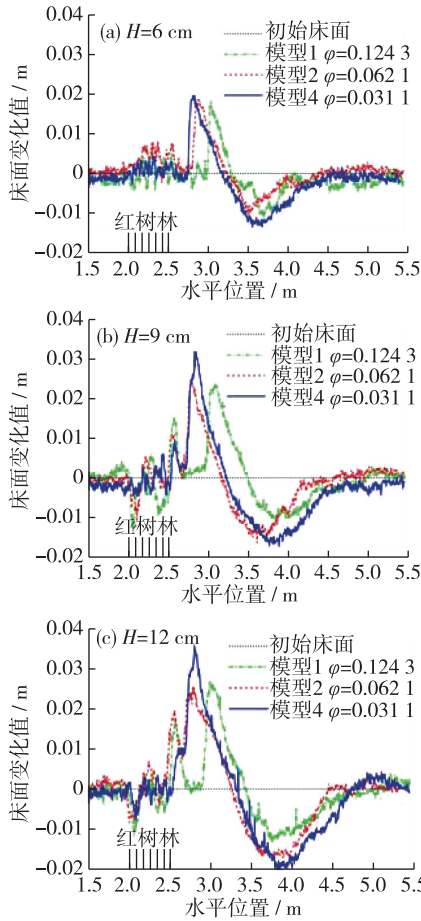


图5 分布密度对岸滩剖面变化的影响

Fig. 5 Change of beach profile influenced by distribution density

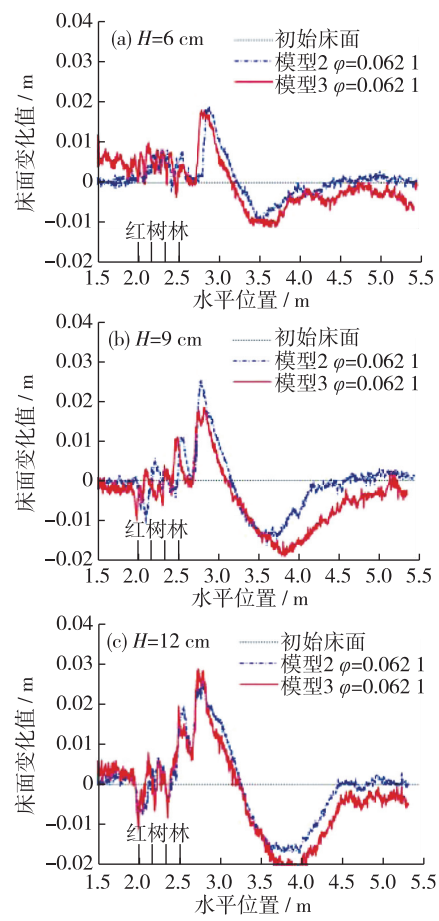


图6 分布方式对岸滩剖面变化的影响

Fig. 6 Change of beach profile influenced by distribution mode

## 2.5 结果讨论

受到海啸波、红树林、泥沙和岸滩等因素共同影响，红树林影响下的海啸波作用下岸滩剖面变化规律复杂。实验研究发现其主要影响因素有海啸波波高、植物的分布方式和分布密度、泥沙粒径、泥沙比重、岸滩坡度等。因此在红树林影响下的海啸波作用下岸滩剖面变化规律可用下式表示：

$$f(A_e, A_d, d_{e \max}, d_{d \max}, H, \psi, d_{50}, \gamma_s, \gamma_w, \tan \alpha) = 0 \quad (3)$$

式中： $A_e$ 为冲刷坑面积； $A_d$ 为淤积沙坝面积； $d_{e \max}$ 为最大冲刷深度； $d_{d \max}$ 为最大淤积高度； $H$ 为海啸波波高； $\psi$ 为综合反应植物分布方式和密度影响的植物系数； $d_{50}$ 为泥沙中值粒径； $\gamma_s$ 为泥沙的有效重度； $\gamma_w$ 为水的有效重度； $\tan \alpha$ 为斜坡坡度。因此，式(3)可变为如下形式：

$$\Pi \left( \underbrace{\frac{A_e}{H^2}, \frac{A_d}{H^2}, \frac{d_{e \max}}{H}, \frac{d_{d \max}}{H}}_{\text{岸滩演变}}, \underbrace{\frac{H}{d_{50}}}_{\text{海啸波}}, \underbrace{\psi}_{\text{红树林}}, \underbrace{s_d}_{\text{泥沙}}, \underbrace{\tan \alpha}_{\text{岸滩}} \right) = 0 \quad (4)$$

式中： $A_e/H^2$ 为岸滩冲刷坑的尺度； $A_d/H^2$ 为岸滩淤积沙坝的尺度； $d_{e \max}/H$ 和 $d_{d \max}/H$ 分别为岸滩最大冲刷和淤积的尺度，以上4个参数可用来表征岸滩剖面变化的影响； $H/d_{50}$ 为海啸波波高尺度，可用来表征海啸波水动力的影响； $\psi$ 为综合反应植物分布方式和密度的植物系数，可用来表征红树林的影响； $s_d = \gamma_s/\gamma_w$ 为泥沙比重，可用来表征泥沙的影响； $\tan \alpha$ 为岸滩坡度，可用来表征岸滩的影响。

基于本文的实验数据，如图7所示，建立岸滩冲刷坑的尺度以及淤积沙坝的尺度分别与红树林的分布方式和密度、海啸波波高尺度、泥沙比重和岸滩坡度之间的关系式，如式(5)和式(6)所示，趋势线拟合度分别为0.51和0.65，其中 $\eta_T = \tan \alpha / (s_d \psi)$ 。

$$\frac{A_e}{H^2} = 60.578 \left( \frac{H}{d_{50}} \right)^{-0.026} \eta_T^{0.004} - 49.796 \quad (5)$$

$$\frac{A_d}{H^2} = 1464.128 \left( \frac{H}{d_{50}} \right)^{-1.039} \eta_T^{0.148} - 0.422 \quad (6)$$

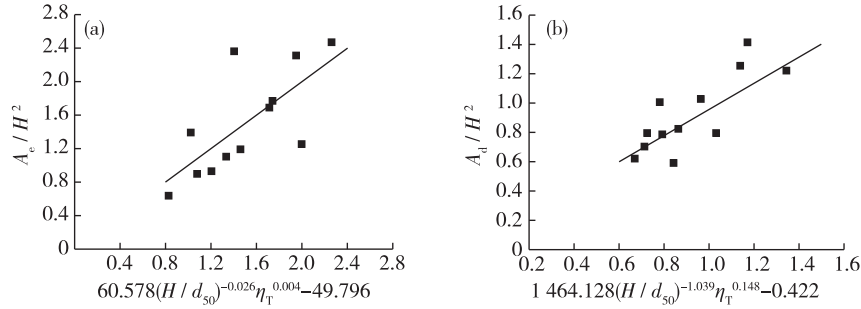


图 7 岸滩冲刷坑/淤积沙坝的尺度与植物、波高、泥沙和岸滩坡度之间的关系

Fig. 7 Relation between trend of beach erosion / deposition area and vegetation parameters, dimensionless wave height, dimensionless specific weight parameter, beach slope

基于本文的实验数据, 如图 8 所示, 建立岸滩最大冲刷深度以及最大淤积高度分别与红树林的分布方式和密度、海啸波波高尺度、泥沙比重和岸滩坡度之间的关系式, 如式(7)和式(8)所示, 趋势线拟合度分别为 0.50 和 0.68。

$$\frac{d_{e \max}}{H} = 4.721 \left( \frac{H}{d_{50}} \right)^{-0.013} \eta_T^{0.004} - 4.108 \quad (7)$$

$$\frac{d_{d \max}}{H} = 4.512 \left( \frac{H}{d_{50}} \right)^{-0.024} \eta_T^{0.007} - 3.515 \quad (8)$$

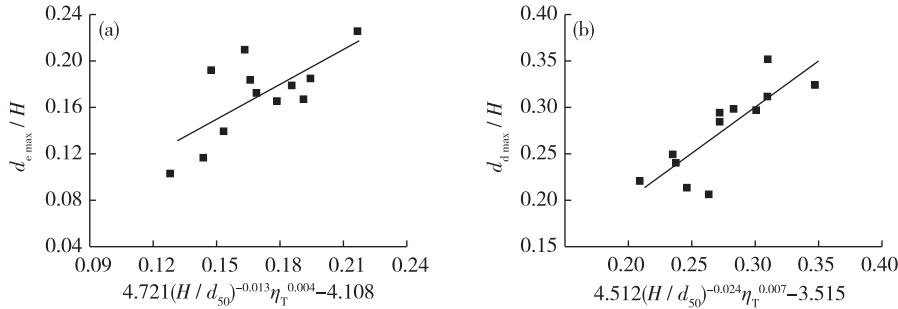


图 8 岸滩最大冲刷/淤积高度与植物、波高、泥沙和岸滩坡度之间的关系

Fig. 8 Relation between dimensionless maximum of deposition / erosion depths and vegetation parameters, dimensionless wave height, dimensionless specific weight parameter, beach slope

由于海啸波作用下岸滩冲淤变化非常复杂, 造成部分数据点与拟合线偏离较大, 但从整体上看呈幂函数关系, 即随着海啸波波高  $H$  的增加, 植物系数  $\psi$  的减小, 岸滩冲淤尺度  $A_e$  和  $A_d$ 、最大冲淤深度值  $d_{e \max}$  和  $d_{d \max}$  随之增加, 海啸侵蚀加剧。海啸波引起的岸滩冲刷危害巨大, 最大冲淤深度值是最关注的指标, 因而此处重点讨论。由式(7)和式(8)可以推求出组次 6 情况下产生的最大冲刷深度为 1.59 cm, 最大淤积深度为 2.73 cm。实验测量得到最大冲刷深度为 1.31 cm, 最大淤积深度为 2.68 cm, 理论值和实验值偏差不大。由式(7)和式(8)可以预测本实验没有开展的部分工况结果, 图 9 给出入射波波高  $H$  从 3 cm 增大至 18 cm 以及植物系数  $\psi$  从 5 增大至 100 的理论计算结果。可以看出随着入射波高  $H$  的增大, 最大冲淤深度值  $d_{e \max}$  和  $d_{d \max}$  随之增加。植物系数  $\psi$  从 5 增大至 40,  $d_{e \max}$  和  $d_{d \max}$  迅速减小, 红树林的防护效果明显; 当植物系数  $\psi$  继续从 40 增大至 100,  $d_{e \max}$  和  $d_{d \max}$  减小的趋势变缓, 红树林的防护效果有限。

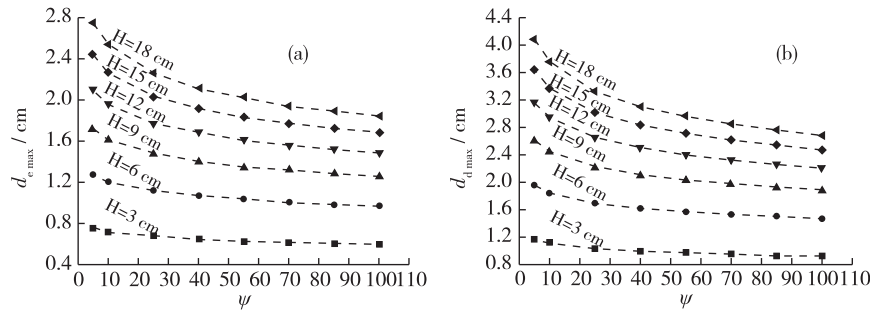


图9 岸滩最大冲刷/淤积高度值与植物系数和波高之间的变化关系

Fig. 9 Variation of maximum of deposition / erosion depths with vegetation parameters and incident wave height

### 3 结 论

(1) 在本次实验条件下,得到了岸滩冲刷坑尺度、淤积沙坝尺度、岸滩最大冲刷深度、最大淤积高度与红树林的分布方式和密度、海啸波波高尺度、泥沙比重和岸滩坡度之间的关系式,揭示了沙质岸滩剖面变化与红树林、海啸波水动力、泥沙、岸滩剖面之间的内在联系,为减小海啸灾害提供科学依据。

(2) 红树林的存在可以适当地减小岸滩的冲淤变化,对岸滩起到一定的保护作用。随着植物分布密度的增加,孤立波通过植物模型后衰减越剧烈,最大冲刷和淤积深度值均迅速减小,但当植物系数增长到一定程度后,最大冲刷和淤积深度减小的趋势逐渐变缓。

(3) 植物分布方式的变化同样会造成最大冲刷深度值和最大淤积高度值的变化,优化植物的分布方式可减小海啸对岸滩冲刷的危害。

#### 参考文献:

- [1] 陈杰, 蒋昌波, 邓斌, 等. 海啸作用下岸滩演变与床沙组成变化研究综述[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 750-758. (CHEN J, JIANG C B, DENG B, et al. Review of beach profile changes and sorting of sand grains by tsunami waves [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 750-758. (in Chinese))
- [2] TANAKA N, SASAKI Y, MOWJOOD M I M, et al. Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2007, 3: 33-45.
- [3] KATHIRESAN K, RAJENDRAN N. Coastal mangrove forests mitigated tsunami[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 65: 601-606.
- [4] 林鹏. 中国红树林研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(2): 592-603. (LIN P. A review on the mangrove research in China[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2001, 40(2): 592-603. (in Chinese))
- [5] 戴纪翠, 倪晋仁. 红树林湿地环境污染地球化学的研究评述[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 779-784. (DAI J C, NI J R. Advances of studies on biogeochemistry of environmental pollution in mangrove wetlands [J]. Marine Environmental Science, 2009, 28(6): 779-784. (in Chinese))
- [6] HUANG Z H, YAO Y, SHAWN Y S, et al. Interaction of solitary waves with emergent, rigid vegetation[J]. Coastal Engineering, 2011, 38: 1080-1088.
- [7] 王俊. 海岸红树林与海啸波相互作用的实验研究[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2011, 9(3): 1-4. (WANG J. Experimental study on interactions of tsunami wave with coastal mangrove forest [J]. Journal of Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, 2011, 9(3): 1-4. (in Chinese))
- [8] 蒋昌波, 王瑞雪, 陈杰, 等. 非淹没刚性植物对孤立波传播变形影响实验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2012, 9(2): 51-56. (JIANG C B, WANG R X, CHEN J, et al. Laboratory investigation on solitary wave transformation through the emergent rigid vegetation [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 9(2): 51-56. (in Chinese))
- [9] JIANG C B, CHEN J, YAO Y, et al. Study on threshold motion of sediment and bedload transport by tsunami waves [J]. Ocean Engineering, 2015, 100: 97-106.

- [10] 蒋昌波, 陈杰, 程永舟, 等. 海啸波作用下泥沙运动: I: 岸滩剖面变化分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 665-672. (JIANG C B, CHEN J, CHENG Y Z, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: I: beach profile evolution[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 665-672. (in Chinese))
- [11] 蒋昌波, 陈杰, 程永舟, 等. 海啸波作用下泥沙运动: II: 床沙组成变化分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 802-807. (JIANG C B, CHEN J, CHENG Y Z, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: II: sorting of sand grains on seabed [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(6): 802-807. (in Chinese))
- [12] 蒋昌波, 陈杰, 程永舟, 等. 海啸波作用下泥沙运动: III: 数学模型的建立与验证[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 91-97. (JIANG C B, CHEN J, CHENG Y Z, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: III: numerical model development and verification [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 91-97. (in Chinese))
- [13] 蒋昌波, 邓涯, 陈杰, 等. 孤立波作用下岸滩剖面变化成因的水动力数值分析[J]. 水动力研究与进展: A 辑, 2014, 29(6): 713-722. (JIANG C B, DENG Y, CHEN J, et al. Hydrodynamic numerical study on the reasons of beach profile change under solitary wave[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics: Series A, 2014, 29(6): 713-722. (in Chinese))
- [14] TONKIN S, YEH H, KATO F, et al. Tsunami scour around a cylinder [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 496: 165-192.
- [15] NAKAMURA T, KURAMITSU Y, MIZUTANI N. Tsunami scour around a square structure [J]. Coastal Engineering Journal, 2008, 50(2): 209-246.
- [16] 陈杰, 蒋昌波, 隆院男, 等. 海啸波作用下泥沙运动: IV: 建筑物局部冲刷[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 832-837. (CHEN J, JIANG C B, LONG Y N, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: IV: local scour around structure[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 832-837. (in Chinese))
- [17] 陈杰, 肖桂振, 蒋昌波, 等. 潜堤对海啸波作用下岸滩剖面变化影响试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2014, 11(3): 58-64. (CHEN J, XIAO G Z, JIANG C B, et al. Experimental study on sandy beach profile waves under effect of submerged changes by tsunami breakwater[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 11(3): 58-64. (in Chinese))
- [18] 陈杰, 杨武, 蒋昌波, 等. 海啸波作用下直立堤局部冲刷实验研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(6): 616-622. (CHEN J, YANG W, JIANG C B, et al. Experimental study of local scour around vertical breakwater by tsunami waves [J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(6): 616-622. (in Chinese))

## Study of sediment transport by tsunami waves: V: influence of mangrove\*

CHEN Jie<sup>1,2</sup>, GUAN Zhe<sup>1</sup>, JIANG Changbo<sup>1,2</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In recent years, frequent tsunami disasters have caused huge losses. Mangrove forests had significant effects to tsunami disaster mitigation. The laboratory experiments were conducted to investigate the changes of cross-shore beach profiles by the tsunami waves under the influence of mangrove. The mangrove models were made of polyvinyl chloride circular tubes. The 1/10—1/20 composite slopes were constructed using the non cohesive sand. A series of solitary waves was selected as incident wave in the flume. The results show that the mangrove has great influence on the beach profile evolution. The tsunami scouring could significantly decrease as plant distribution density appropriate increase and distribution of plants optimizing. Based on the experimental data presented in this paper, an empirical relation was obtained to express the relationship between trend of beach erosion/deposition area, dimensionless maximum of deposition/erosion depths and vegetation distribution density and mode, dimensionless tsunami wave height, dimensionless specific weight parameter, beach slope etc. The study shows the internal connection of between sandy beach profile evolution and mangrove, hydrodynamics of tsunami wave, sediment and beach slope. The findings of this study have the potential to assist the tsunami disaster mitigation.

**Key words:** beach profile evolution; tsunami wave; mangrove; plant distribution density; plant distribution

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51239001; No. 51409022).