

海岸植物带对孤立波的波能耗散研究

龚尚鹏¹, 陈杰^{1,2,3*}, 蒋昌波^{1,2,4}, 何飞¹, 李佳徽¹

- (1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114;
2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
4. 湖南省环境保护河湖疏浚污染控制工程技术中心, 湖南 长沙 410114)

摘要:为揭示近岸植物对孤立波的消减机制,利用物理模型实验探究了不同水深、入射波高和植物密度下植物模型与孤立波的相互作用机理。研究表明:树根、树冠和整株植物模型波能耗散系数范围分别为 0.003~0.036, 0.010~0.110 和 0.020~0.130;植物树根和树冠具有不同的消减孤立波机制,其中树冠对孤立波的消减起主要作用;波能耗散系数随相对波高增大而增大;植物模型的波能耗散系数小于其各组分波能耗散系数的线性叠加;当植物消波时,植物各组分之间存在反协同效应,且反协同效应随相对波高的增大而增强;波能耗散系数随雷诺数的增大而增大,当根部或冠部分布密度较小时,耗散系数与雷诺数的敏感度更高。研究结果可为沿海地区人工防浪林的设计提供一定参考。

关键词:孤立波;海岸植物带;树根;树冠;波能耗散系数;雷诺数;反协同效应

中图分类号:P731.22; U656.31⁺1

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2020)03-0522-10

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.014

引用格式:GONG S P, CHEN J, JIANG C B, et al. Solitary wave energy dissipation by coastal vegetation[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(3): 522-531. 龚尚鹏, 陈杰, 蒋昌波, 等. 海岸植物带对孤立波的波能耗散研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(3): 522-531.

海啸作为一种破坏性极强的波浪,其在岸滩爬高后会对沿海岸地区造成严重的灾害^[1]。研究表明^[2-3],以红树林为代表的近岸植物能够有效消减波能。植物消减海啸波机制研究已成为海洋灾害研究的重要部分。

因海啸波的首波与孤立波相似,目前学术界多采用孤立波来模拟海啸波^[1,4]。基于此,学者们针对孤立波与植物相互作用开展了大量研究。部分学者通过数值模拟以揭示植物消减孤立波的机理。其中,Tang 等^[5]和 Maza 等^[6]分别通过二维非线性浅水方程和三维数值模型研究,发现植被区孤立波传播变形规律与水动力因素(波高和水深)相关。另一部分学者则通过物理模型实验来探究这种相互作用机制。例如,Huang 等^[7]和蒋昌波等^[8]分别以有机玻璃管和 PVC 管对红树林进行概化模拟,研究结果表明植物对海啸波的消减作用还受到植物因素(植物分布方式和分布密度)的影响。

尽管学者们分别基于数值模拟和物理模型实验探究了水动力因素和植物因素对植物消减海啸波的影响,但较少学者关注植物因素中的植物模型结构特征对植物消波的影响^[6]。实际情况中,以红树林为代表的近岸水生植物根系发达^[9-10]、枝叶茂盛^[11-12],当海啸波传播至近岸植被区时,其根、茎和叶均将消减海啸波,

收稿日期:2019-07-22

资助项目:国家自然科学基金重点项目——基于数据挖掘的南海岛礁演变机制及多尺度模拟预测技术研究(51839002);国家自然科学基金项目——海啸洪水作用下的水沙运动规律及砂质岸滩响应机制研究(51979014);湖南省教育厅科学研究项目重点资助项目——基于定量遥感的洞庭湖湿地芦苇对湖泊水动力特性影响研究(18A123);湖南省研究生科研创新项目——基于数据挖掘的植物消浪研究(CX2018B552)

作者简介:龚尚鹏(1995-),男,硕士,主要从事港口、海岸及近海工程方面研究. E-mail: gsp_1002@qq.com

* **通讯作者:**陈杰(1982-),男,教授,博士,主要从事海岸水沙动力过程及其数值模拟方面研究. E-mail: chenjie166@163.com

(王燕 编辑)

植物消波特性与植物模型结构特征密切相关。因此,有必要开展综合考虑植物结构特征的植物消波研究,以深入认知近岸水生植物消波机制。赵静^[13]在以往研究基础上,设计综合考虑植物树根、树干和树冠的植物模型来研究近岸植物与海啸波相互作用机制。但是,受制于其植物模型的复杂几何结构,赵静^[13]未能对植物根部及冠部的消波机制进行量化研究,此外,其仅通过设置实验对照组的方法难以分析出植物根、茎和叶各部分对海啸波的消减机制。为进一步分析植物结构特征对海啸波的消减作用,本研究拟在赵静^[13]基础上,提出定量概化的植物模型,进一步探讨近岸植物与海啸波相互作用机制。

1 实验方法

本实验研究不同水深、入射波高、植物密度和植物模型对孤立波波能耗散系数的影响。实验在长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室的波浪水槽内进行,水槽长 40.0 m,宽 0.5 m,高 0.8 m。将植物带布置于水槽中部,两端布置有消浪网以削弱波浪反射对实验结果的影响,共布置 8 个浪高仪测量实验结果。实验布置如图 1 所示。

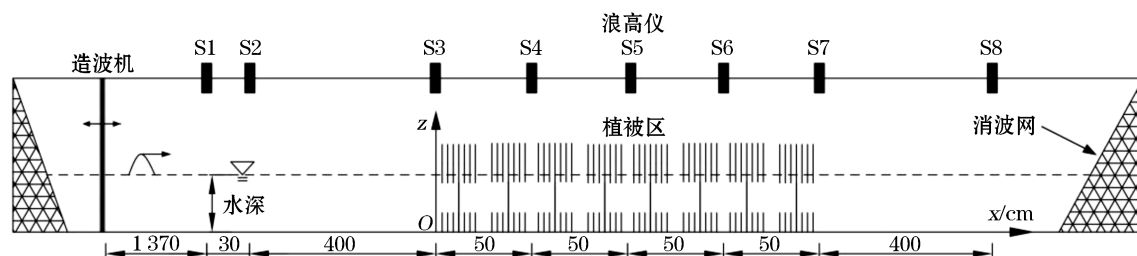


图 1 实验布置

Fig.1 Layout of the experiment

赵静^[13]试验模型设置如图 2a 所示,该模型虽与真实植物具有较高的相似度,但模型的树叶部分空间结构分布复杂,研究者无法进行定量概化研究,同时无法研究树根和树叶密度对波浪的影响。在赵静^[13]的研究基础上,结合 Kit^[14]和 Mazda 等^[15]对红树林海岸相关树种的调查资料,并参考 Dekker^[16]和 Burger^[17]研究,同时考虑到实验室仪器条件限制,设计实验所需要的改进“模型树”(图 2b),其原型为根系发达的成熟红树。模型几何比尺为 1 : 10,实验中植物根、茎和叶均采用有机玻璃管进行模拟,其中,植物茎的有机玻璃管

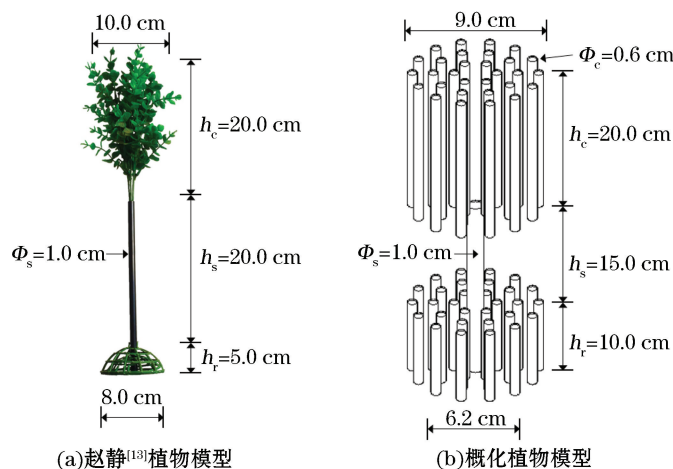


图 2 植物模型

Fig.2 Vegetation model

外径 Φ_s 为 1.0 cm, 植物树叶和树根的有机玻璃管外径 Φ_c 均为 0.6 cm, 树根垂向高度 h_r 为 10.0 cm, 树叶垂向高度 h_c 为 20.0 cm。为模拟不同密度的树冠和树根情况, 实验分别针对树冠和树根设置 2 种密度 (30 根/株, 图 3b; 16 根/株, 图 3c)。为方便固定植物模型, 将植物放置在长 200.0 cm, 宽 50.0 cm 和厚 0.8 cm 的有机玻璃面板 (图 3a) 上。在植物模型垂直于波浪传播方向设置 4 株, 沿波浪传播方向设置 16 株, 分布密度为 64 株/ m^2 。正方形分布, 植物中心间距为 12.3 cm。

实验工况如表 1 所示, 考虑到实际海啸波的波况及实验仪器限制, 试验测试 4 种水深, 每种水深测试 4 种入射波波高对植物波能耗散的影响。

表 1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

模型编号	模 型	h/m	H/m
M1	根 (16 根/株)	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.35	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.45	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
M2	根 (30 根/株)	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.35	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.45	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
M3	茎	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
M4	叶 (16 根/株)	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.35	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.45	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
M5	叶 (30 根/株)	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.35	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.45	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
M6	根 (30 根/株) + 茎	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.35	0.05, 0.07, 0.09, 0.12

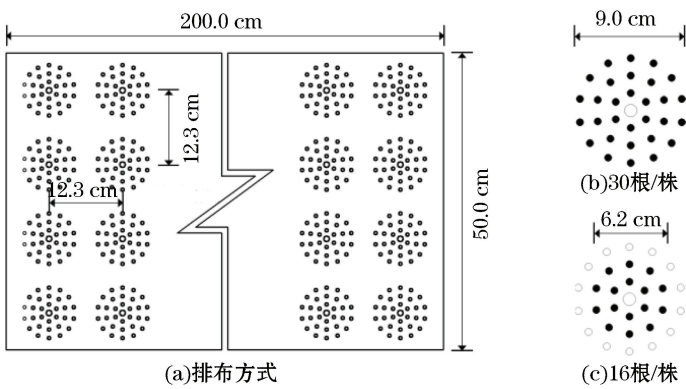


图 3 植物布置形式

Fig.3 Arrangement forms of the vegetation model

续表

模型编号	模 型	h/m	H/m
M7	茎+叶(30 根/株)	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.35	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.45	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
M8	根(16 根/株)+茎+叶(16 根/株)	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.35	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.45	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
M9	根(16 根/株)+茎+叶(30 根/株)	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.35	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.45	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
M10	根(30 根/株)+茎+叶(16 根/株)	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.35	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.45	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
M11	根(30 根/株)+茎+叶(30 根/株)	0.25	0.03, 0.05, 0.07, 0.09
		0.30	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.35	0.05, 0.07, 0.09, 0.12
		0.45	0.03, 0.05, 0.07, 0.09

注: h 为实验水深, H 为入射波波高。为使行文简洁,“根(30 根/株)+茎”和“茎+叶(30 根/株)”在正文中分别表述为“根茎”和“茎叶”,“根(16 根/株)+茎+叶(16 根/株)”、“根(16 根/株)+茎+叶(30 根/株)”、“根(30 根/株)+茎+叶(16 根/株)”和“根(30 根/株)+茎+叶(30 根/株)”在正文中表述为“根茎叶”

实验首先放置植物模型,再预热造波机,保证造波机性能稳定,开启数据采集系统,确保浪高仪正常工作。调整水槽中水位至实验水位,待水面平静后开始造波,测量植被区沿程波面波高。实验中,植被区内部波高测量采用加拿大 WG-50 型浪高仪。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 $128\ \text{Hz}$ 。植被区外部波高测量采用德国 ULS 80D 型超声波非接触式浪高仪,该浪高仪的采样频率为 $50\ \text{Hz}$,精确度为 $0.01\ \text{mm}$,并配合 Uralab 浪高仪采集系统进行数据采集。数据采集从造波机造波开始,到孤立波传播过程结束。为保证每组次实验液面平静,相邻 2 次实验间隔 $10\ \text{min}$,再进行下一次造波;重复上述步骤完成下一组次实验。

2 植被区波能耗散及雷诺数基本理论

2.1 植被区孤立波波能耗散系数

为分析植被区的消波效应,定义植被区孤立波波能耗散系数,以表征植被区的消波能力。孤立波能量 E 可表示为

$$E = \frac{8}{3\sqrt{3}}\rho gh^{\frac{3}{2}}H^{\frac{3}{2}}, \tag{1}$$

式中: ρ 为水的密度, g 为重力加速度, h 为实验水深, H 为孤立波波高。

根据能量守恒定律, 孤立波与植被相互作用时, 能量分布满足

$$E_i = E_r + E_t + E_l, \quad (2)$$

式中: E_i 为孤立波入射波能; E_r 为孤立波反射波能; E_t 为透射孤立波波能; E_l 为植被区孤立波耗散波能。可分别将入射波高值、反射波高值和透射波高值带入式(1)计算得到 E_i , E_r 和 E_t 。由式(2)可知:

$$E_l = E_i - E_r - E_t. \quad (3)$$

参考 Liu 等^[18], 无量纲化的植被区波能耗散系数可定义为

$$C_l = E_l / E_0, \quad (4)$$

式中: E_0 为波高等于水深时的孤立波波能, 且 $E_0 = \frac{8}{3\sqrt{3}} \rho g h^3$ 。

2.2 植物模型的雷诺数

为综合探究植物因素和水动力因素对植物消波的影响, 基于代表性的使用圆柱体模拟的植物模型定义雷诺数 Re 。孤立波波面方程为

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right], \quad (5)$$

式中: x 为波浪水质点水平位置; t 为时间; c 为波速, $c = \sqrt{g(h+H)}$ 。

由式(5)可知, 水体任一点 (x, z) 处水质点运动的水平分速 u 和垂直分速 w 的一阶解分别为

$$u = \sqrt{gh} \frac{H}{h} \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right], \quad (6)$$

$$w = \sqrt{3gh} \left(1 + \frac{z}{h} \right) \left(\frac{H}{h} \right)^{\frac{3}{2}} \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right] \tanh \left[\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right]. \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得植被区理想化的水质点运动轨迹(图4)。由图4可看出, 植物模型将分别从水平和垂直两个方向对海啸波波能进行消减。当海啸波传播至植被区时, 在波峰到来前, 水质点做向上和向前运动($u > 0$, $w > 0$), 此时植物冠部水平截面将产生紊动耗散; 波峰通过后, 水质点做向下和向前运动($u > 0$, $w < 0$), 植物根部水平截面将产生紊动耗散。实验中植物冠部和根部外径分别为 0.6 cm, 考虑最大密度情况(30 根/株), 冠部和根部水平横截面面积总和均为 8.4 cm^2 , 且植物冠部和根部分别在水质点上升($w > 0$)和下降($w < 0$)阶段产生波能耗散。

因而可将垂向波能耗散忽略, 仅考虑植物在水平方向上对海啸波产生的波能耗散作用。

由式(6)可知, 对于给定的任意水平 x 位置处, u 均为定值, 因此, 植被区任意 x 处不同水深位置的植物对海啸波所产生的波能耗散均为定值, 即不同水深位置植物的特征宽度仅与植物几何特征相关。同时, 实验根茎叶均采用圆柱模拟, 据此, 根茎叶植物模型雷诺数 Re 计算方法:

$$Re = \frac{u_{\max} b_v}{\nu} = \frac{u_{\max} s}{\nu h}, \quad (8)$$

式中: ν 为水的运动黏滞系数, ν 取 $1.01 \times 10^{-6} \text{ kPa} \cdot \text{s}$; b_v 为单株植物特征长度; s 为植物沿波浪传播方向的投影面积, s 计算方式如图5所示, 假设波浪沿箭头方向由前向后传播, 则三维植物模型(图5a)沿波浪传播方向的投影图形为图5b, 图5b的封闭面积则为三维植物沿波浪传播方向的投影面积。 $u_{\max}$ 可由式(6)确定

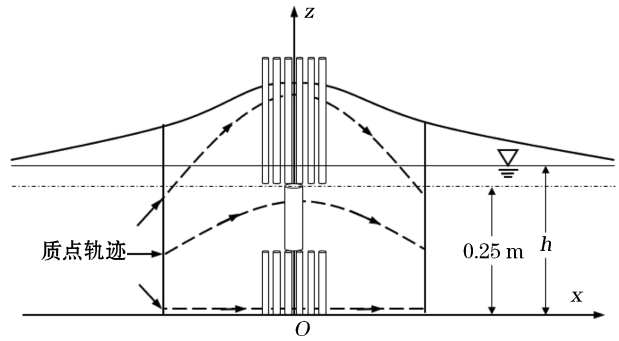


图4 水质点运动轨迹图

Fig.4 Moving track of the water particle

为 $u_{\max} = \sqrt{\frac{gH^2}{h}}$ 。

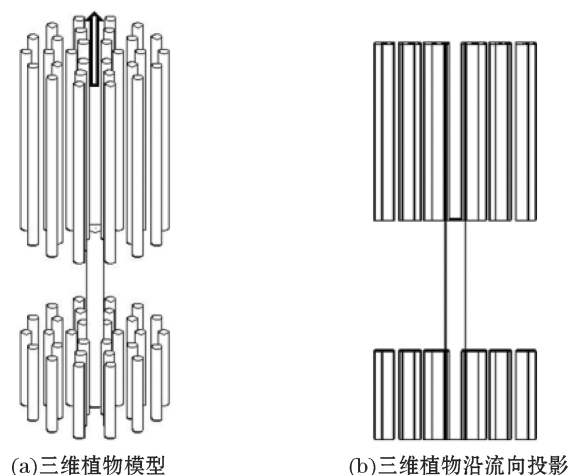


图 5 植物沿波浪传播方向的投影面积计算图示

Fig.5 Calculation of projected area of the plants along wave propagation direction

3 结果分析

3.1 植被区波面高程时间曲线

模型 6 在水深 $h=0.35$ m, 波高 $H=0.09$ m 时浪高仪测得的实验结果如图 6 所示, 横坐标为时间 t , 纵坐标为波面高程 η 。由 S3 号浪高仪采集的植被区前入射波的波面高程时间过程曲线(图 6a)可以看出, 孤立波入射波波形良好, 传播至植被区时, 由于植物阻挡而产生反射波。由 S7 号浪高仪采集的植被区后透射波的波面高程时间过程曲线(图 6b)可以看出, 孤立波经过植被区后, 透射波仍以孤立波的形式继续传播, 但波高发生显著衰减, 即植被区会消减海啸波。

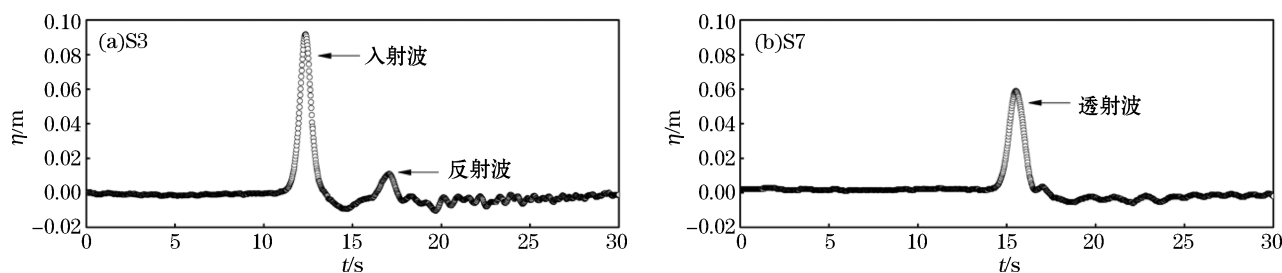


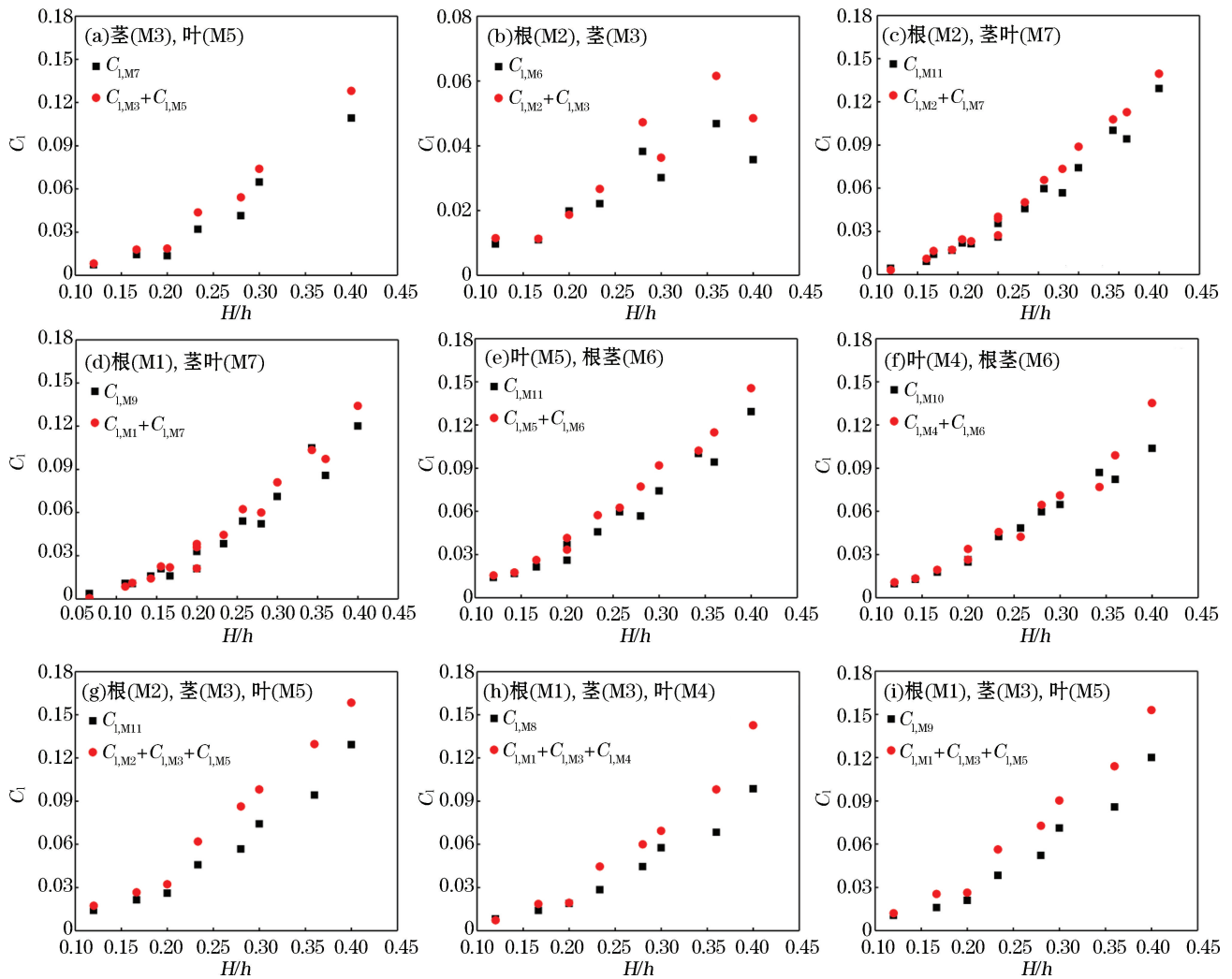
图 6 植被区波面高程时间过程曲线($h=0.35$ m, $H=0.09$ m)

Fig.6 Time-series elevation of the wave surface in the vegetation areas ($h=0.35$ m, $H=0.09$ m)

3.2 根、茎和叶对海啸波的消减机制

由不同植物模型波能耗散系数 C_i 随相对波高 H/h 的变化规律(图 7)可看出, C_i 随 H/h 增大而增大, 且 C_i 对 H/h 的敏感度随 H/h 的增大而增强。这说明, 随着孤立波相对波高增强, 植物对海啸波的消减效果增强。对于不同的植物模型, C_i 的叠加值均大于实测值, 且叠加值与实测值的差值随 H/h 的增大而增强。这说明, 包含根茎叶的植物与海啸波相互作用时, 其对海啸波的波能耗散值小于根、茎、叶各组分波能耗散值的线性叠加。根、茎、叶在消减海啸波时, 各组分(根、茎、叶)呈现反协同效应, 通过将各组分进行组合,

其消波效果减弱。且孤立波非线性愈强,其反协同效应愈强。



注: ■为整体模型的波能耗散系数 C_1 实测值, ●为各组分模型波能耗散系数 C_1 的叠加值

图7 不同植物模型的波能耗散系数的实测值与叠加值随相对波高的变化规律

Fig.7 Variations of the measured and superimposed values of the wave energy dissipation coefficients of different vegetation models against the relative wave heights

Huang 等^[7]、Wang 等^[19]和 Yang 等^[20]等众多学者研究了类孤立波的海啸波与近岸水生植物的相互作用机制,其研究倾向于忽略植物根、茎和叶几何特征的差异性。本研究选取具有代表性的 Huang 等^[7]的结果进行讨论。Huang 等^[7]采用单根有机玻璃管模拟红树林,其玻璃管直径为 0.01 m,与本实验模拟树干的有机玻璃管直径相同。Huang 等^[7]的孤立波相对波高范围为 0.13~0.40,本实验孤立波非线性范围为 0.12~0.40。根、茎和叶对海啸波的消减机制分析表明,当孤立波相对波高为 0.20 时,植物各组分(树根、树干、树冠)在消波时已呈现显著的反协同效应。类比本研究,Huang 等^[7]中植物根部和冠部的分布密度可视为为本实验模型仅包含圆柱的极限情况,其实验结果相比真实情况的失真性主要体现在:真实植物的树根、树干和树叶之间消波时存在反协同效应。

3.3 植被区波能耗散与雷诺数关系分析

由不同植物模型波能耗散系数 C_1 随雷诺数 Re 的变化规律(图 8)显示, C_1 均随 Re 增大而增大。由图 8a

可知,根模型(M1, M2)的 C_1 在水深较低($h=0.30, h=0.35$ m)时小于叶模型(M4, M5)的 C_1 ,说明冠部的消浪效果较根部好。当水深较大($h=0.45$ m)时,2 种模型的 C_1 相近。值得注意的是:对比 2 种不同密度的叶模型可以发现,在同等条件下,密度越小(M4)的模型 C_1 反而对 Re 的敏感度越强,这是因为当模型植物密度小时,植物特征长度 b_v 小,计算得到 Re 小,一般理解上 C_1 会随密度减小而减小,但此时 b_v 对 C_1 的影响更大。从图 8b 可以看出,根茎模型(M6)的 C_1 范围为 $0.007 \sim 0.05$,茎叶模型(M7)的 C_1 范围为 $0.002 \sim 0.11$ 。同水深情况下茎叶模型的 C_1 明显大于根茎模型,说明茎叶的消波能力更强。同时茎叶模型的 C_1 对 Re 的敏感度更强,说明植物冠部消浪的影响比根部强;对比 M8, M9, M10 和 M11(图 8c)可以发现,增大根部与冠部的密度将使 C_1 对 Re 的敏感度增强。分析发现,对于根(M2)和根茎(M6)模型而言,植物模型的 C_1 随 Re 的增大而增大,两模型的差距较小(图 8d);而对于叶模型(M5)和茎叶(M7)而言,两模型的消浪差距较大。

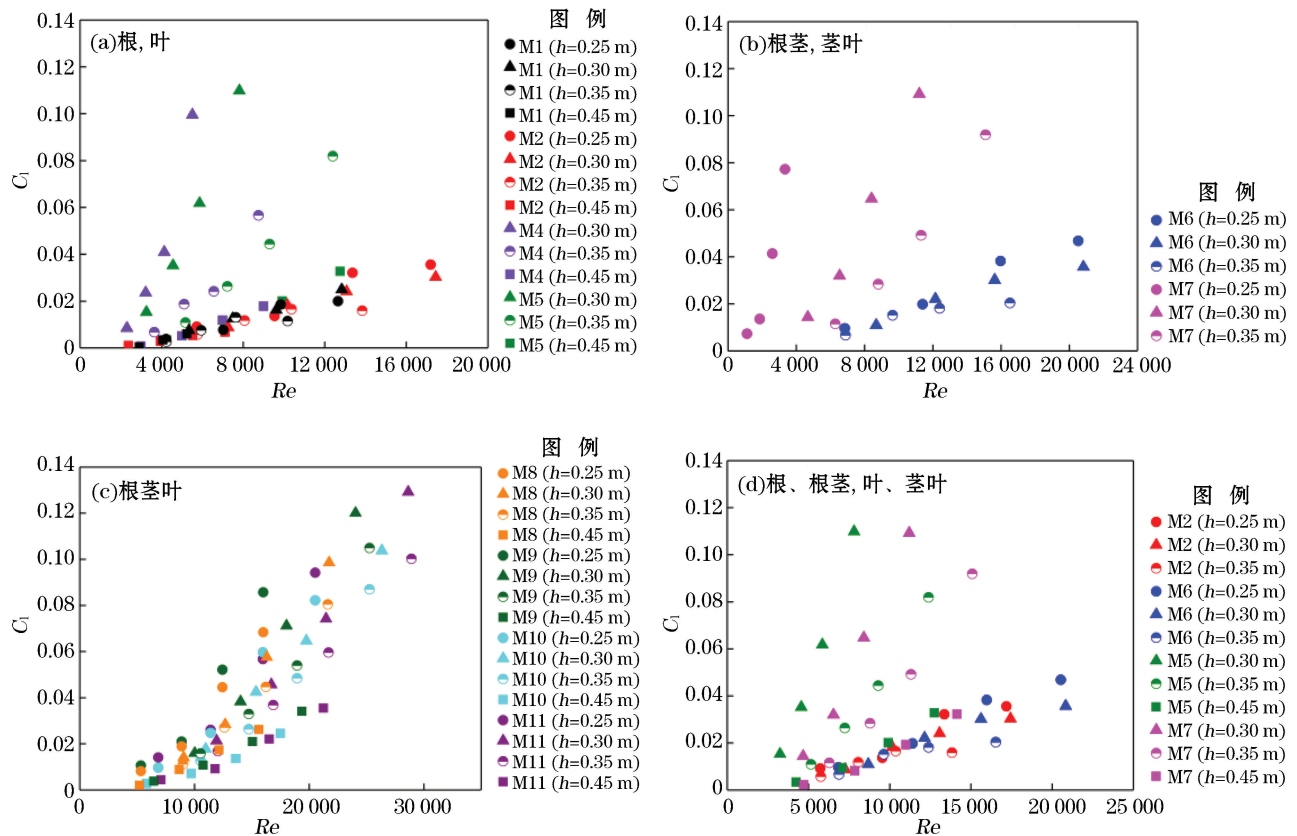


图 8 不同植物模型的波能耗散系数随雷诺数的变化规律

Fig.8 Variations of the wave energy dissipation coefficients of different vegetation models with the Reynolds number

从植被区波能耗散与雷诺数关系分析可知,根部和冠部消波存在差异性。其主要原因有:1)冠部和根部的波能耗散主要为水平方向紊动耗散。植被区 x 处的植物冠部在消波时,其有效阻水面积 S 具有非定常性, S 依赖于波速 c 和时间 t 。与此不同的是, x 处的植物根部在消波时,其 S 具有定常性。实验模型的根部垂向高度为 0.1 m,冠部底端距水槽底部垂直距离为 0.25 m。若考虑试验水深为 0.30 m 的情况,当孤立波波峰处于植物前方 1.8 m ($6h$)处时,植物周围水质点可视为起动零界点,此时植物的根部和冠部的 S 一致。但因 x 处植物冠部的 S 具有非定常性,将先增大后减小,整个孤立波作用过程中冠部时均 S 值大于根部,导致植物冠部波能耗散大于植物根部。2)对于类红树林的近岸水生植物,相比根部,其冠部更接近悬臂梁结构。实验中观察到,在来波作用下,植物冠部将出现一定程度弯曲。在材料弹性恢复力的作用下,冠部在恢复至垂直状态过程中,枝叶的机械运动将产生剧烈的紊动耗散,这将增强冠部的消波能力。

4 结 语

本研究以物理模型实验为基础,结合各工况下的波能耗散系数和雷诺数探究了植物各组分对孤立波的消减机制,研究成果将有助于为以植物为主的生态防浪护岸工程提供一定的理论依据。主要结论:

1)树冠主导包含根茎叶的植物对孤立波的消减作用,植物各组分具有不同的消波机制;

2)波能耗散系数随相对波高增大而增大,且波能耗散系数对相对波高的敏感度随相对波高的增大而增强;

3)植物模型的波能耗散系数小于其各组分波能耗散系数的线性加和,当植物消波时,根、茎和叶之间存在反协同效应,在相对波高范围内(0.12~0.40),这种反协同效应随着波浪非线性的增强而增强;

4)植物模型的波能耗散系数随雷诺数的增大而增大,当根部分布密度或者冠部分布密度较小时,耗散系数与雷诺数的敏感度更高。

参考文献(References):

- [1] 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. 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.
- [2] CHEN J, HE F, JIANG C B, et al. Experimental investigation on drag coefficient of rigid vegetation influenced by regular waves[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3): 433-445. 陈杰, 何飞, 蒋昌波, 等. 植物消波机制的实验与理论解析研究进展[J]. *水科学进展*, 2018, 29(3): 433-445.
- [3] ZHANG M L, ZHANG H X, XU H Y, et al. Energy attenuation of regular and irregular waves in rigid vegetated waters[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2017, 32(3): 369-372. 张明亮, 张洪兴, 徐红印, 等. 规则波和不规则波在刚性植物区波能衰减的试验研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2017, 32(3): 369-372.
- [4] PENG H, CHEN J, JIANG C B, et al. Experimental investigation on tsunami wave attenuation under the effect of rigid vegetation distribution[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(6): 1159-1168. 彭浩, 陈杰, 蒋昌波, 等. 刚性植物分布方式对海啸波消减影响实验研究[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(6): 1159-1168.
- [5] TANG J, CAUSON D, MINGHAM C, et al. Numerical study of vegetation damping effects on solitary wave run-up using the nonlinear shallow water equations[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 75(5): 21-28.
- [6] MAZA M, LARA J L, LOSADA I J. Tsunami wave interaction with mangrove forests: a 3-D numerical approach[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 98: 33-54.
- [7] HUANG Z, YAO Y, SIM S Y, et al. Interaction of solitary waves with emergent, rigid vegetation[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(10): 1080-1088.
- [8] JIANG C B, WANG R X, CHEN J, et al. Laboratory investigation on solitary wave transformation through the emergent neritic vegetation[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2012, 9(2): 51-56. 蒋昌波, 王瑞雪, 陈杰, 等. 非淹没近岸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.
- [9] CUC N T K, SUZUKI T, DE RUYTER VAN STEVENINCK E D, et al. Modelling the impacts of mangrove vegetation structure on wave dissipation in Ben Tre Province, Vietnam, under different climate change scenarios[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 31(2): 340-347.
- [10] SUZUKI T, ZIJLEMA M, BURGER B, et al. Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 59(1): 64-71.
- [11] HE F, CHEN J, JIANG C B, et al. Experimental investigation on the characteristics of regular wave height attenuation in vegetation field[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(1): 146-158. 何飞, 陈杰, 蒋昌波, 等. 规则波作用下植物带波高衰减特性实验研究[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(1): 146-158.
- [12] BAI Y C, YANG J M, HU M, et al. Model test of vegetation on the bank to attenuate waves and protect embankments[J]. *The Ocean Engineering*, 2005, 23(3): 65-69. 白玉川, 杨建民, 胡媚, 等. 植物消浪护岸模型实验研究[J]. *海洋工程*, 2005, 23(3): 65-69.
- [13] ZHAO J. Laboratory Investigation on wave damping with roots, trunks and crowns of vegetation[D]. Changsha: Changsha University of

- Science & Technology, 2016. 赵静. 考虑根、茎、叶的植物消浪特性试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [14] KIT L W. Wave attenuation function of mangroves along Singapore's northern coast[D]. Singapore: national university of Singapore, 2016.
- [15] MAZDA Y, WOLANSKI E, KING B, et al. Drag force due to vegetation in mangrove swamps[J]. *Mangroves & Salt Marshes*, 1997, 1(3): 193-199.
- [16] DEKKER F. Hydrodynamics and Morphodynamics in and around Mangrove Forests[D]. Enschede, Netherlands: University of Twente, 2006.
- [17] BURGER B. Wave attenuation in Mangrove forests[D]. Delft, Netherlands: Technology University of Delft, 2005.
- [18] LIU H, GHIDAOUI M S, HUANG Z, et al. Numerical investigation of the interactions between solitary waves and pile breakwaters using BGK-based methods[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, 61(12): 3668-3677.
- [19] WANG Q, GUO X Y, WANG B L, et al. Experimental measurements of solitary wave attenuation over shallow and intermediate submerged canopy[J]. *China Ocean Engineering*, 2016, 30(3): 375-392.
- [20] YANG Y, IRISH J L, WEISS R. Impact of patchy vegetation on tsunami dynamics[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2017, 143(4): 04017005-1-04017005-16.

Solitary Wave Energy Dissipation by Coastal Vegetation

GONG Shang-peng¹, CHEN Jie^{1,2,3}, JIANG Chang-bo^{1,2,4}, HE Fei¹, LI Jia-hui¹

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

2. *Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province*, Changsha 410114, China;

3. *Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province*, Changsha 410114, China;

4. *Engineering and Technical Center of Hunan Provincial Environmental Protection for River-Lake Dredging Pollution Control*, Changsha 410114, China)

Abstract: To reveal solitary wave attenuation by coastal vegetation, the interaction mechanism between solitary wave and vegetation model is experimentally studied by means of vegetation models under the conditions of different water depth, incident wave height and plant density. The results show that the wave energy dissipation coefficients of the roots, the crowns and the whole plant are in the range of $0.003 \sim 0.036$, $0.010 \sim 0.110$ and $0.020 \sim 0.130$, respectively. The roots and crowns of the plant are different in the mechanism of solitary wave energy dissipation, of which the crowns of the plant play a major part in the solitary wave energy dissipation. The wave energy dissipation coefficients of the vegetation increase with the relative wave height and those of the vegetation model are less than the linear superposition of the wave energy dissipation coefficients of its components. When plant dissipates the waves, an anti-synergistic effect occurs between the components of the plant and can be enhanced with the increase of relative wave height. The wave energy dissipation coefficients of the plant increase with the increasing of Reynolds number. If the roots or crowns of the plant are distributed densely, their wave energy dissipation coefficients are even more sensitive to the Reynolds number. These results are of guidance for designing artificial wave protection forest in coastal areas.

Key words: solitary wave; coastal vegetation; roots of the plant; crowns of the plant; wave energy dissipation coefficient; Reynolds number; anti-synergistic effect

Received: July 22, 2019