

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.010

# 浮式植物体消浪效果的试验研究

赵东梁<sup>1</sup>, 韩梅<sup>2</sup>, 喻国良<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:**通过大量水槽试验, 研究植物消浪装置消浪效率与植物密度、植物带相对宽度、波陡之间的关系, 分析植物高度大于波高的前提下影响浮式植物规则波作用下消浪效率的因素。结果表明, 浮式植物消浪装置具有良好的消浪效果, 在植物带高度大于波高的前提下, 植物带密度和相对宽度是影响消浪效果的最重要因素。

**关键词:**浮式植物带; 消浪效率; 规则波; 防波堤

中图分类号: TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2015)05-0053-05

## Experimental study on effectiveness of floating vegetation on wave dissipater

ZHAO Dongliang<sup>1</sup>, HAN Mei<sup>2</sup>, YU Guoliang<sup>1</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** By studying the connection among the efficiency of the floating vegetation wave dissipater device, the density and region width of vegetation and gradient of the wave with sufficient flume experiments, the effectiveness of floating vegetation on wave dissipation was studied and the factors that influence the efficiency of wave dissipation, under the condition of the height of vegetation being higher than the wave height and under the effect of floating vegetation regular wave, were analyzed. The results show that floating vegetation wave dissipater device works efficiently. Under the condition of the height of vegetation being higher than the wave height, the density and the relative width of the vegetation region are the most important factors that influence the wave dissipation efficiency.

**Key words:** floating vegetation region; wave dissipation efficiency; regular wave; breakwater

波浪是扰动底泥, 增加水体浊度, 直接降低水体水质的根源, 也是造成岸线、滩涂侵蚀的一个主要动力因素, 近岸破碎波浪掀沙往往危及堤岸安全。波浪还是近岸带和湖滨带水生植物的破坏因子, 大波浪不但使水生植物无法根植, 而且可直接损毁已有水生植物。因此, 有必要减少波浪作用, 以保护湖泊水质、岸线、海滨和湖滨水生带。

工程上常用的消浪方法有实体坝(堤)消浪、透空坝(堤、桩)消浪、植物消浪。在植物消浪方面, 国内外就刚性植物和柔性植物两方面开展了不少研究, 这仍然是一个热点课题。文献[1]提出了一种

植被地区波浪计算模型, 包括对不同水深下植被地区的消波和波浪破碎的计算。Möller<sup>[2]</sup>针对英国东海岸湿地植物发展了一种通过数字照相技术评估植物密度的方法, 进而调查了大片湿地植物对孤立波波高的削减作用。Augustin等<sup>[3]</sup>利用水槽试验和数值模拟研究了挺水和非挺水湿地植物的消浪作用。Charlotta等<sup>[4]</sup>对浅水湖泊中芦苇的消波效果进行了现场实测和模型试验。Kassi等<sup>[5]</sup>利用天然海滨湿地观测数据评估刚性植物消浪模型和植物波浪耦合运动模型时, 发现柔性植物的消浪效果是刚性植物的一半; 模型必须选择合适的拖曳力系数。Paul

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大科技专项(GU0100007)

作者简介: 赵东梁(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口海岸工程。E-mail: zhao\_dongliang@126.com

等<sup>[6]</sup>结合生物特性和潮汐流影响,探讨了潜水植物的消波效果,发现波浪衰减与海草植物叶片刚度、密度、长度密切相关。Jadhav 等<sup>[7]</sup>研究了台风期间海滨湿地削减波高的发布概率。Akgul 等<sup>[8]</sup>探讨了挺水植物的波浪衰减和波动力的影响。Hu 等<sup>[9]</sup>在实验室内研究了波流同时存在情况下的植物消浪问题。Philip 等<sup>[10]</sup>通过水槽试验和数值模拟,研究了非均匀植物波高的削减规律。在国内,早在 1965 年,南京水利科学研究所的章家昌<sup>[11]</sup>在室内模拟平台上和野外平缓的滩地上种植防波林,考虑了林木主干和林木枝叶的消波作用,以及林木枝叶沿树干分布,提出了计算林木的消波性能公式。颜学恭等<sup>[12]</sup>对长江中下游防浪林不同类型林带结构进行了原型的消浪效果观测试验,根据实测数据,防浪林排数在 6~9 排可消浪 33%~38%,10~15 排可消浪 49%~57.6%,20~25 排可消浪 64%~71%,消浪效果显著。胡崑等<sup>[13]</sup>对在岸坡上种植桧柏树进行了模型试验,发现防浪林的宽窄影响防浪护岸效果,并认为斜坡消浪效果好于平坡消浪。1989 年宋连清等<sup>[14-15]</sup>在浙江南部沿海生物促淤海岸防护研究中,通过现场观测发现,护花米草因其植株高大、杆茎粗壮、生长密集而具有良好的消浪护岸作用,当风浪通过草带宽度为 10~40 m 时,消浪能力为 45%;40 m 以上宽草带,消浪能力为 67%;60 m 以上宽草带,消浪能力为 78%;200 m 以上草带宽可消减台风浪高达 89%。陈德春等<sup>[16]</sup>探讨了人工水草缓流的消波作用。杨建明<sup>[17]</sup>对护岸植物消浪效果进行的试验表明:植物带的宽度越大,消浪效果越好;水淹植物越深(不及植物顶),消浪效果越明显;当波浪周期达到某一值时,植物摇摆和波浪趋于同步,此时消浪作用几乎消失。

笔者认为,随着我国对生态环境和生态景观的日益重视,为实现工程价值与环境景观的效益最大化,宜将消浪技术与生态景观有机结合。本文拟对浮式植物消浪装置的消浪效果展开试验研究。

## 1 试验介绍

### 1.1 试验设计

试验在上海交通大学多功能水槽内进行,水槽长 12 m,宽 1 m,深 0.8 m,造波周期范围 0.5~5 s,两端有良好的消波设施。浮式植物消浪装置如图 1 所示,植物种植在由高分子材料制成的矩形植物生长框内,生长框高 7.5 cm,长 98 cm。生长框两侧浮筒为两端封闭的 PVC 管,为生长框提供漂浮力。试验中选用高 22 cm、头径为 6.046 cm 的圆叶聚乙烯刚性植物,在试验条件下植物不倒伏,且高出生长框上

沿 8.5 cm,确保入射波高小于植物高度。根据消波装置尺寸,试验水深范围取 30~52.5 cm,入射波高范围 0.45~0.85 cm。

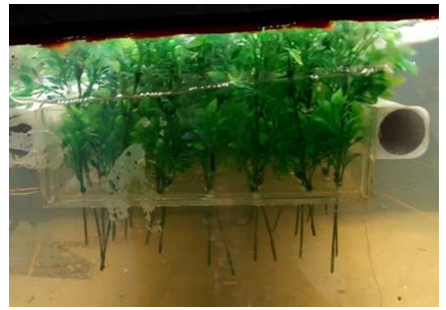


图 1 试验中漂浮式植物消浪装置

试验的整体布置如图 2 所示,植物生长框浮于水面,生长框迎浪侧和背浪侧分别对称布置两根锚绳,锚绳中部悬挂重物,底端固定于底床;在锚绳中部适当增加重量以保持装置在波浪作用下的稳定性;适当增加生长框内碎石重量,使生长框在静水条件下其上缘与水面齐平。漂浮式植物消浪装置距离造波机 5 m,在波浪作用下在水槽中做二维运动。装置前后 1.5 m 处各布置两个浪高仪,用于记录波面变化。浪高仪 1 号、2 号的间距与浪高仪 3 号、4 号的间距均为 0.25 m,测量数据采用 Goda 两点法<sup>[18]</sup>分离反射波高和透射波高,进而求得反射系数及透射系数,据此分析消浪效率。试验开始前,对所用测量仪器进行标定校准,以保证测量数据的准确性。

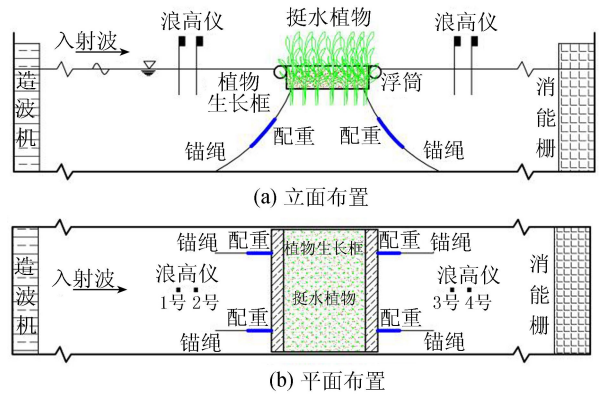


图 2 试验整体布置

### 1.2 试验工况

试验中,水深 0.35 m,分别针对两种入射波高,4 种周期(0.881 s、0.784 s、0.693 s、0.640 s)的规则波,5 种不同植物生长框宽度,9 种不同植物密度开展了试验,试验共计 360 组,试验工况汇总见表 1。波高采集采用 SDA100 传感器数据采集系统,采样间隔为 0.01 s,每次采样时间取 120 s,每组试验至少重复 3 次,试验结果取平均值。

表1 试验工况汇总表

水深 $d/m$	波高 $H/m$	装置宽度 $B/m$	植物密度 $\rho$
0.35	0.08	0.45, 0.35, 0.25, 0.20, 0.15	2.010, 1.809, 1.608, 1.407, 1.212, 1.005, 0.804, 0.603, 0
0.35	0.06	0.45, 0.35, 0.25, 0.20, 0.15	2.010, 1.809, 1.608, 1.407, 1.212, 1.005, 0.804, 0.603, 0

## 2 消浪效率试验结果分析

影响植物生长框消浪效果的因素有:植物刚度、植物密度、植物茎叶情况、植物生长框宽度、入射波高、植物生长框入水深度及挺水高度、植物根须入水情况等。植物的消浪情形非常复杂,为简化起见,模拟植物挺水高度均大于越浪高度,挺水部分茎叶分布均匀,植物生长框挺水高度为0,模拟植物在消浪过程中基本没有发生倒伏,植物生长框入水深度、植物根须入水情况保持不变,且入水深度所占水深的比例小于1/7。为了反映装置的消浪效果,本文将消浪装置对波高的削减程度定义为消浪效率,则生长框消浪效率 $\beta$ 与各影响因素之间的关系可以表示为

$$\beta = 1 - C_t = 1 - H_t/H_i = f_1(\rho, B, H, L) \quad (1)$$

式中: $\beta$ 为装置的消浪效率(从0到1的无量纲数); $C_t$ 为透射系数; $H_t$ 为消浪装置后透射波高; $H_i$ 为消浪装置前入射波高; $\rho$ 为植物密度; $B$ 为装置宽度; $L$ 为波长; $H$ 为波高。

为便于无量纲化和简化测量与计算,定义植物密度 $\rho$ 为植物头径面积之和与植物生长框底板面积的比值,即

$$\rho = (\frac{\pi D^2}{4} N) / s \quad (2)$$

式中: $D$ 为单棵植物的头径; $N$ 为矩形框内植物棵数; $s$ 为植物生长框底板面积。

将式(1)函数中的变量表示为无量纲形式:

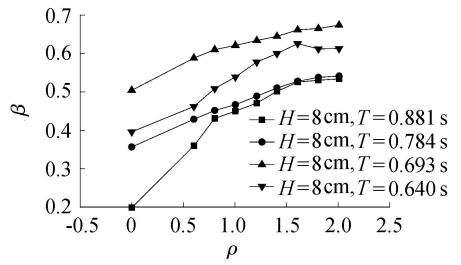
$$C_t = \frac{H_t}{H_i} = f_2(\frac{1}{\rho}, \frac{B}{L}, \frac{H}{L}) \quad (3)$$

下面将着重从植物密度、消浪装置的相对宽度 $B/L$ 、波陡 $H/L$ 这3方面讨论该装置的消浪效果。

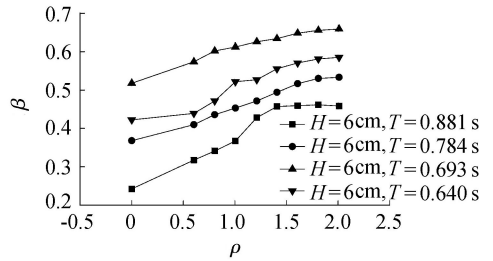
### 2.1 植物密度对消浪效率的影响

如图3所示,在水深0.35 m,波高为0.08 m、0.06 m,入射波周期 $T$ 为0.881 s、0.784 s、0.693 s、0.640 s和植物生长框宽度为0.35 m的情况下,消浪效率都是随植物密度的增大而增大,当植物密度大于1.6时,消浪效率增大的趋势逐渐变缓,最后趋于一个常数。这说明,当植物密度大到一定程度之后,装置的消浪效果进一步提升的空间小,即,继续增加植物密度对改善装置的消浪效果影响不大。本组试验表明,无论入射波高为0.08 m还是0.06 m,都是

在入射波周期为0.693 s、植物密度接近2.0时消浪效果最好,消浪效率大约为66%。



(a) 入射波高为0.08 m

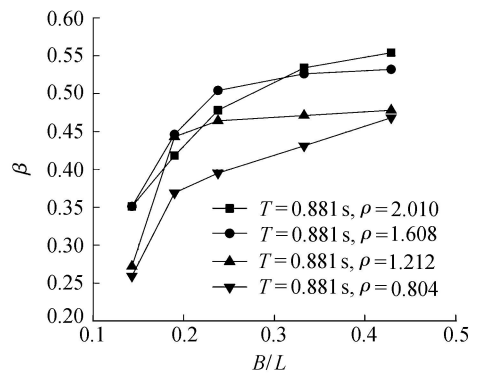


(b) 入射波高为0.06 m

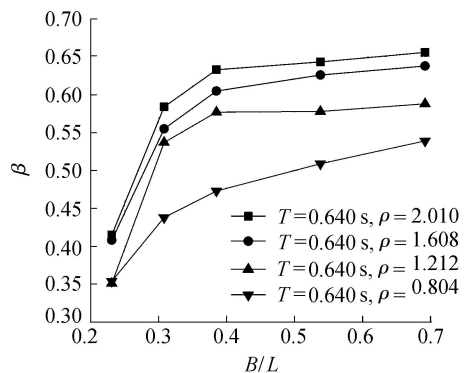
图3 消浪效率 $\beta$ 与植物密度 $\rho$ 的关系

### 2.2 相对宽度对消浪效率的影响

如图4所示,在水深0.35 m,波高0.08 m,入射波周期为0.881 s、0.640 s,植物生长框宽度分别为0.45 m、0.35 m、0.25 m、0.20 m、0.15 m的情况下,消浪效率总是随相对宽度的增大而增大,当相对宽度增大到某一值时,消浪效率将达到某一平衡值,说明对于此时的相对宽度,装置的消浪效果趋于最佳。



(a) 波高0.08 m, 周期0.881 s



(b) 波高0.08 m, 周期0.640 s

图4 消浪效率 $\beta$ 与相对宽度 $B/L$ 的关系

图4(a)中消浪效率在相对宽度大于0.33时达到稳定,图4(b)中消浪效率在相对宽度大于0.38时达到稳定。在消浪效率达到稳定之后,消浪效率随植物密度的增加而增大,这与图3反映的变化关系相符合。值得注意的是,当周期不同时,消浪效率趋于稳定时的临界点不同;同一入射波周期下,植物密度不相同,消浪效率趋于稳定时的临界点也会不同。正因为如此,图4(a)中4条曲线出现交叉。结合其他组次试验,发现当相对宽度大于0.4时,消浪效果均趋向于稳定。此外,从图3的两幅图也可以看出,消浪效率并不与入射波周期呈反比关系。入射波周期为0.640 s的消浪效率小于周期为0.693 s时的消浪效率。这说明植物生长框的消浪作用在某一波长范围内效果最佳,消浪装置的最佳效果取决于波浪的某一特定周期。这点与杨建明<sup>[17]</sup>的结论类似。

### 2.3 入射波波高对消浪效率的影响

如图5所示,在水深0.35 m,入射波周期为0.881 s、0.640 s,植物密度为2.01、0.804,入射波波高分别为0.08 m、0.06 m的情况下,无论入射波周期为0.881 s还是0.640 s,在同一植物密度下,波高为0.08 m时的消浪效率均大于波高为0.06 m时的消浪效率,入射波高越大,消浪效果越明显。这可能是植物下部茎多叶少的原因。当然,前提是挺水植物的高度必须大于波浪高度。

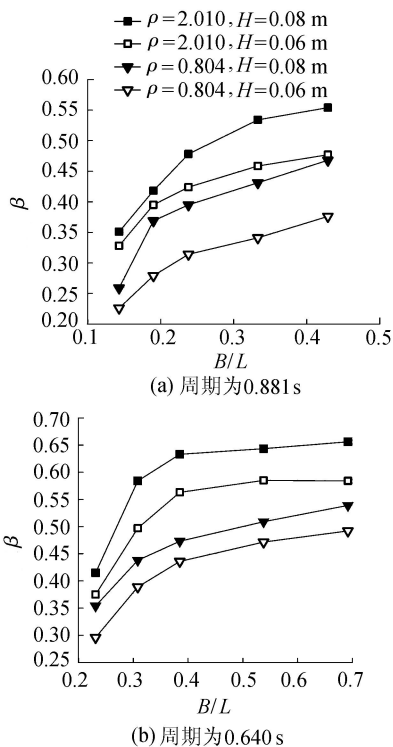


图5 消浪效率 $\beta$ 与波高 $H$ 的关系

### 2.4 消浪效率公式

通过以上对消浪效率与其影响因素关系的分

析,从360个试验工况中选取160个,对其试验数据做回归分析,得到透射系数的无量纲公式为

$$C_t = 0.2258 \left(\frac{1}{\rho}\right)^{0.2000} \times \left(\frac{B}{L}\right)^{0.3267} \times \left(\frac{H}{L}\right)^{0.2049} \quad (4)$$

则消浪效率公式为

$$\beta = 1 - 0.2258 \left(\frac{1}{\rho}\right)^{0.2000} \times \left(\frac{B}{L}\right)^{0.3267} \times \left(\frac{H}{L}\right)^{0.2049} \quad (5)$$

从图6可知,试验实测的消浪效率值与由公式(5)得到的计算值基本吻合,实测值与计算值的相关系数为0.87,96%的实测值与计算值的误差在20%以内。公式及试验数据表明,足够的植物密度和植物宽度前提下,该消浪装置可以削减来波的波高达65%。

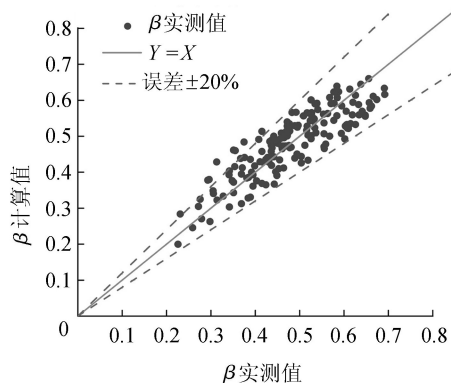


图6 消浪效率计算值与实测值比较

该消浪装置的消浪效果与颜学恭等<sup>[12]</sup>介绍的长江中下游不同结构防浪林的消浪效果相当,但略低于浙江南部沿海的生物促淤海岸防护工程中护花米草的消浪效果。导致消浪效果偏低的原因,可能在于植物生长框在水面上水平方向的固定欠佳,植物生长框的前后运动导致了次生波的出现,以及植物后方产生的尾涡相对于固定在床面上的刚性植物而言要小,因此,其消浪效率相对偏低。但与Möller<sup>[2]</sup>的野外调查结果相比,该装置的削减来波效率比英国东海岸湿地植物的消浪效率高,后者最大约35%。英国东海岸盐沼植物为草类,在波浪作用下的刚度小,能够随波逐流,因此,其消浪效率低于刚性植物。

值得指出的是,式(5)存在一些局限性,如对植物茎叶分布、框体和植物根入水的相对深度、植物刚度等因素没有作进一步考虑。同时,本次试验中相对植物宽度的范围为0.143~0.692 m,波陡的范围为0.057~0.123,因此,植物宽度及波高的试验组次也应增加。植物生长框的水平固定、锚绳的受力等有待深入开展研究。

### 3 结 语

基于波浪水槽试验,对浮式植物消浪装置的消浪效果展开了研究。结果表明,该浮式植物消浪装置具有良好的消浪效果,在足够的植物密度和装置宽度情况下,消浪效率接近 65%。在受规则波作用下,消浪装置的植物密度和植物生长框相对宽度是影响消浪效果的主要因素。在本试验条件下,植物密度越大,消浪效果越好,当植物密度超过 1.6 时,消浪效果趋于稳定;相对宽度越大,消浪效果越好,当相对宽度大于 0.4 时,消浪效果趋向于稳定。本研究成果可为我国湖泊和海岸的消浪工程设计提供参考。

#### 参考文献:

- [1] FERNANDO J M, INIGO J L. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields [J]. *Coastal Engineering*, 2004, 51(2): 103-118.
- [2] MÖLLER I. Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: results from a UK East coast salt marsh [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 69(3): 337-351.
- [3] AUGUSTIN L N, IRISH J L, LYNETT P. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation [J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(3): 332-340.
- [4] CHARLOTTA B L, MAGNUS L. Wave damping in reed: field measurements and mathematical modeling [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136: 222-233.
- [5] KASSI C R, STEPHEN M H, JULIA C M. Wave dissipation by flexible vegetation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(18): 1029-1033.
- [6] PAUL M, BOUMA T J, AMOS C L. Wave attenuation by submerged vegetation: combining the effect of organism traits and tidal current [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 444: 31-41.
- [7] JADHAV R S, CHEN Q. Probability distribution of wave heights attenuated by salt marsh vegetation during tropical cyclone [J]. *Coastal Engineering*, 2013, 82: 47-55.
- [8] AKGUL M A, YILMAZER D, OGUZ E, et al. The effect of an emergent vegetation (i. e. *Phragmites Australis*) on wave attenuation and wave kinematics [J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65: 147-152.
- [9] HU Z T, SUZUKI, ZITMAN T, et al. Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current-wave flow [J]. *Coastal Engineering*, 2014, 88: 131-142.
- [10] PHILIP J B, DANIEL T C, WU W C. Laboratory observations and numerical simulations of wave height attenuation in heterogeneous vegetation [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2014, 140(1): 56-65.
- [11] 章家昌. 防波林的消波性能 [J]. *水利学报*, 1965, 12(2): 49-52. (ZHANG Jiachang. Wave dissipation performance for wave break forest [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1965, 12(2): 49-52. (in Chinese))
- [12] 颜学恭, 曾祥培, 徐德新. 长江中游防浪林消能效益分析与研究 [J]. *武汉水利电力大学学报*, 1997, 30(3): 51-53. (YAN Xuegong, ZENG Xiangpei, XU Dexin. Investigation on energy dissipation benefit of wind-wave protection forests in middle reach of Changjiang River [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 1997, 30(3): 51-53. (in Chinese))
- [13] 胡岫, 白玉川, 杨建民. 利用植被消浪护岸的模型实验研究 [J]. *实验室研究与探索*, 2007, 26(12): 37-40. (HU Mei, BAI Yuchuan, YANG Jianmin. Model test research of the shore protection with vegetation for wave reduction [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2007, 26(12): 37-40. (in Chinese))
- [14] 宋连清. 互花米草及其对海岸的防护作用 [J]. *东海海洋*, 1997, 15(1): 11-19. (SONG Lianqing. *Spartina alterniflora* and its effects of the coastal protection [J]. *Donghai Marine Science*, 1997, 15(1): 11-19. (in Chinese))
- [15] 傅宗甫. 互花米草消浪效果试验研究 [J]. *水利水电科技进展*, 1997, 17(5): 45-47. (FU Zongfu. Experimental study on the effectiveness of wave dissipater with *spartina alterniflora* [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 1997, 17(5): 45-47. (in Chinese))
- [16] 陈德春, 周家苞. 人工水草缓流和消波研究 [J]. *河海大学学报*, 1998, 26(5): 99-103. (CHEN Dechun, ZHOU Jiabao. A study of the effect of artificial seaweeds on current slowing and wave absorbing [J]. *Journal of Hohai University*, 1998, 26(5): 99-103. (in Chinese))
- [17] 杨建明. 植物消浪护岸动力机理论分析与模型试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [18] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments [C]// *Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering*. New York: ASCE, 1976: 828-845.

(收稿日期: 2014-11-08 编辑: 彭桃英)