

# 新型植被海堤波浪溢流破坏的堤形敏感性研究

闫昊晨<sup>1</sup>, 王春美<sup>2</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

**摘要:** 通过理论分析研究高效加筋草皮垫防护海堤在不同波浪溢流作用下背水侧坡脚处的冲刷变形过程, 推导出坡脚冲刷厚度和草皮防护垫破坏历时的经验公式。比较分析 5 种不同形态海堤的破坏过程, 发现较缓的背水坡坡度以及添加副堤对减轻水流紊动切应力与防冲的效果明显, 减小堤顶宽度一定程度上可以降低紊动切应力和冲刷率, 而增大迎水侧坡度对坡脚的冲刷率影响不大。

**关键词:** 新型植被海堤; 波浪溢流; 冲刷; 破坏历时; 堤形敏感性

中图分类号: TV871

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2017) 01-0051-05

## Research on geometry sensitivity of HPTRM-strengthened levee under wave overflow

YAN Hao-chen<sup>1</sup>, WANG Chun-mei<sup>2</sup>

(1. School of Hydraulic and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu;

2. Hydraulic Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, Jiangsu )

**Abstract:** On the basis of theoretical analysis of erosion deformation process in the levee toe on the dorsal water side under different wave overflow, the equation of slope erosion thickness and turf protection pad damage duration is provided. With the help of analyzing the damage process of five different levee types, a narrower crest width or a lower land-side slope are more effective for the reduction of the bottom shear stress as well as the erosion rate. Besides, an additional mild berm is also helpful to the protection.

**Key words:** HPTRM-strengthened levee; wave overflow; erosion; damage duration; geometry sensitivity

我国沿海省份如江苏、浙江、福建等都是经济发达、人口稠密的地区, 然而这些地方经常面临着风暴潮等极端自然条件的威胁。如 2013 年浙江余姚受台风“菲特”影响以及高潮位的顶托, 堤防溢流垮塌致使 70% 以上城区受淹, 遭遇了新中国成立以来最严重水灾。海堤是抵御风暴潮灾害最主要的工程措施<sup>[1]</sup>。研究表明, 大量海堤因溢流发生破坏<sup>[2]</sup>, 而危害较大的往往是夏秋交替之际发生潮汐时期与过境台风联合造成的。海堤多为土质结构, 当风暴潮和海浪联合作用下发生漫顶溢流(简称波浪溢流)时

会在背水坡形成强紊动的高速水流, 可导致背水坡的防护层的损坏, 逐渐导致堤防溃决<sup>[3]</sup>。传统的砌石和水泥板等护坡结构, 往往存在缝隙处或者板下掏刷, 在溢流高速水流下很容易发生护坡结构本身的失稳等破坏。高效加筋草皮垫(HPTRM)是近年来出现的一种新型有效的护坡方式<sup>[4]</sup>, 加筋后的草皮根系更稳定, 与表层土壤形成板块结构, 在抵抗冲刷侵蚀方面起到了关键作用, 甚至比石砌护面更为有效<sup>[5]</sup>。本文主要研究高效加筋草皮垫防护海堤(简称新型植被海堤)在波浪溢流作用下背水侧坡脚处

收稿日期: 2016-06-23

作者简介: 闫昊晨(1994-), 男, 在读博士, 研究方向为海岸动力学。

的冲刷变形过程以及堤形对其的影响。

## 1 概述

海堤发生波浪溢流时的坡面水流结构和坡脚冲刷已有一定的研究成果。Hughes 等人通过二维水槽实验研究海堤发生波浪溢流时瞬时越浪量和背水侧坡脚水流结构,并指出背水侧高速强紊水流会对背水坡表面防护层造成损坏并侵蚀下层土壤<sup>[6-8]</sup>。Yuan 和 Li 等人曾建立了加筋植被海堤 1:1 的原尺寸模型,开展了 11 组不同出水高度和波高的溢流实验来模拟波浪作用下溢流情况<sup>[3]</sup>,并进一步通过黏土冲刷实验(EFA)分析了土壤在高效加筋草皮垫保护下水流侵蚀的破坏过程<sup>[9]</sup>。Pan 等人曾通过大型水槽实验观测了溢流水动力和水流切应力等水流特性并进一步研究了瞬时越浪量<sup>[10-11]</sup>。Yuan 和 Li 等人开展了三维海堤耦合溢流水动力模型对 JONSWAP 型随机波进行模拟计算,提出了考虑出水高度和波高等参数的坡脚时均流速、紊动能以及背水坡坡脚的冲刷力,得到了 5 种不同形态堤防(图 1)坡脚处的紊动切应力<sup>[12]</sup>:

$$\tau_1 = 0.1052 \cdot \rho g (-R_c) \left( \frac{-R_c}{H_{m0}} \right)^{-0.282} \quad (1)$$

$$\tau_2 = 0.969 \cdot \tau \quad (2)$$

$$\tau_3 = 0.896 \left( \frac{-R_c}{H_{m0}} \right)^{-0.0234} \cdot \tau \quad (3)$$

$$\tau_4 = 0.978 \left( \frac{-R_c}{H_{m0}} \right)^{0.0308} \cdot \tau \quad (4)$$

$$\tau_5 = 0.927 \cdot \tau \quad (5)$$

其中,  $\tau$  为底部切应力;  $H_{m0}$  为有效波高;  $-R_c$  为出水高度;  $\rho$  为水的密度。

以上研究初步揭示了新型植被海堤在强紊动溢流破坏时的水力特性,但未涉及到新型植被海堤破坏机理以及堤防形态的敏感性。本文通过理论分析结合前期成果研究新型植被海堤在波浪溢流时冲刷破坏过程以及海堤形态的影响。

## 2 HPTRM 防护海堤破坏机理分析

本文参考的实验使用的 HPTRM 是 Colbond Inc. 的 Enkamat R30 三维土工网垫<sup>[13]</sup>以及养护良好的狗草根组成的草皮垫。新型植被海堤冲刷破坏的过程一般分为植被层破坏、局部溢流破坏、在土体发生陡坎冲刷三个阶段<sup>[14]</sup>,本文主要针对其中的

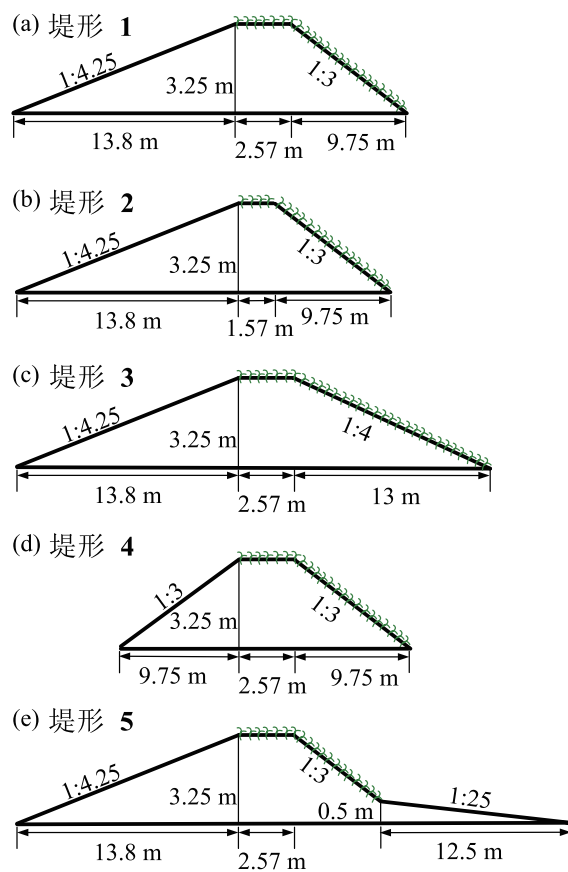


图 1 堤顶和背水侧由高效加筋草皮垫防护的五种不同几何尺寸的海堤

第一阶段,即草垫失效阶段。研究发现,土壤对其冲刷达到指定厚度以上时,草根对土壤基本不存在约束作用。在破坏过程中,我们认为切应力是引起土壤侵蚀的主要因素,大于临界切应力的床面切应力能引起土体冲刷,可以用以下土壤冲刷模型来计算冲刷率<sup>[12]</sup>:

$$E = \frac{dh}{dt} = K_d (\tau_0 - \tau_c)^b \quad (6)$$

其中,  $E$  是侵蚀率(mm/h);  $h$  为加筋草皮垫的侵蚀厚度(mm);  $t$  为作用时间(h);  $K_d$  为冲刷系数(mm/h/N/m<sup>2</sup>);  $\tau_c$  是临界切应力;  $b$  是经验指数,本文取 1<sup>[9]</sup>。

对于稳定的漫顶溢流,水流可以认为是连续不断的,那么冲刷侵蚀的过程也是连续不断的,假定冲刷切应力和蚀性系数在这段时间内保持不变,则:

$$\Delta h(t_0) = h(0) - h(t_0) = K_d (\tau_0 - \tau_c) t_0 \quad (7)$$

其中,  $\Delta h(t_0)$  是  $t_0$  时间内的侵蚀厚度,单位为 mm;  $h(0)$ 、 $h(t_0)$  分别是  $t = 0$  和  $t = t_0$  时的土壤厚度。但由于波浪的随机性,切应力实际是不断变化的,

甚至未必是连续的, 所以对于整体过程, 上式须进行调整才能适用。依然假定冲刷系数不变, 则有:

$$\Delta h(\Delta T) = K_d \sum_{i=1}^n \left[ \int_{\Delta t_i} (\tau_0(t) - \tau_c) dt \right] \quad (8)$$

其中,  $\Delta T$  是总时间;  $\tau_0(t)$  是背水侧底部切应力, 是随时间变化的量;  $\Delta t_i$  是  $\tau_0(t)$  大于  $\tau_c$  的历时。

为了便于计算, 此处定义几个时均概念上的切应力:

$$\overline{\tau_{0i}} = \frac{\int_{\Delta t_i} \tau_0(t) dt}{\Delta t_i} \quad (9)$$

$$\overline{\tau_{02i}} = \frac{\int_{\Delta t_{2i}} \tau_0(t) dt}{\Delta t_{2i}} \quad (10)$$

$$\overline{\tau_0} = \frac{\int_{\Delta T} \tau_0(t) dt}{\Delta T} \quad (11)$$

$$\overline{\tau_{02}} = \frac{\int_{\Delta T_2} \tau_0(t) dt}{\Delta T_2} \quad (12)$$

其中,  $\Delta t_i$  是第  $i$  个波越过所经历的时间;  $\Delta t_{2i}$  是第  $i$  个波段内底部切应力小于临界切应力的时段, 即  $\Delta t_{2i} = \Delta t_i - \Delta t_{1i}$ ;  $\Delta T_2$  是在  $\Delta T$  内底部切应力小于临界切应力的总历时;  $\overline{\tau_{0i}}$ 、 $\overline{\tau_{02i}}$ 、 $\overline{\tau_0}$  和  $\overline{\tau_{02}}$  分别是底部切应力在  $\Delta t_i$ 、 $\Delta t_{2i}$ 、 $\Delta T$  和  $\Delta T_2$  内的时均值。则有:

$$\sum_{i=1}^n \left[ \int_{\Delta t_i} (\tau_0(t) - \tau_c) dt \right] = \sum_{i=1}^n \left[ \int_{\Delta t_i} (\tau_0(t) - \tau_c) dt \right] + \sum_{i=1}^n \left[ \int_{\Delta t_{2i}} (-\tau_0(t) + \tau_c) dt \right] \quad (13)$$

其中,

$$\sum_{i=1}^n \left[ \int_{\Delta t_{2i}} (-\tau_0(t) + \tau_c) dt \right] = \sum_{i=1}^n \left[ \Delta t_{2i} (\tau_c - \overline{\tau_{02i}}) \right] \quad (14)$$

同时,

$$\Delta h(\Delta T) = K_d \sum_{i=1}^n (\overline{\tau_{0i}} - \tau_c) \Delta t_i - K_d \left[ \sum_{i=1}^n (\overline{\tau_{0i}} - \tau_c) \Delta t_i - \sum_{i=1}^n \int_{\Delta t_i} (\tau_0(t) - \tau_c) dt \right] \quad (15)$$

即得:  $\Delta h(\Delta T) =$

$$K_d \sum_{i=1}^n \left[ (\overline{\tau_{0i}} - \tau_c) \Delta t_i + (\tau_c - \overline{\tau_{02i}}) \Delta t_{2i} \right] \quad (16)$$

在引起冲刷侵蚀的情况下, 一般有  $\overline{\tau_{0i}} > \tau_c$   $> \overline{\tau_{02i}}$ 、 $\Delta t_i$ 。不妨假定:

$$\overline{\tau_{0i}} \gg \tau_c > \overline{\tau_{02i}} \quad (17)$$

所以, 公式 (16) 可简化为:

$$\begin{aligned} \Delta h(\Delta T) &\approx K_d \sum_{i=1}^n (\overline{\tau_{0i}} - \tau_c) \Delta t_i \\ &= K_d (\overline{\tau_0} - \tau_c) \Delta T \end{aligned} \quad (18)$$

式 (18) 可以准确预测波浪溢流时背水坡脚一定时间内的冲刷深度的前提是式 (17) 必须成立。Yuan 等人开展了三维海堤波浪溢流水动力数值模拟时发现坡脚的水流切应力远远大于临界切应力, 公式 (17) 是成立的。则得到新型植被海堤波浪溢流背水坡脚冲刷厚度公式:

$$\Delta h(\Delta T) = K_{d,H} (\overline{\tau_0} - \tau_{c,H}) \Delta T, \Delta T \leq \Delta T_0 \quad (19)$$

其中,  $K_{d,H}$  是蚀性系数;  $\tau_{c,H}$  是新型植被海堤的背水侧坡脚土壤冲刷的临界切应力;  $\Delta h$  超过草垫厚度时草垫失效。根据上式, 可得草垫失效历时  $\Delta T_0$  为:

$$\Delta T_0 = \frac{\Delta h(\Delta T_0)}{K_{d,H} (\overline{\tau_0} - \tau_{c,H})} \quad (20)$$

其中,  $\Delta h(\Delta T_0)$  即为草垫厚度, 本文为分析方便, 取为 100 mm。

### 3 海堤形态的敏感性分析

因为 Yuan 等通过数模研究已经得到 5 种不同堤形下背水侧坡脚的水流切应力经验公式<sup>[12]</sup>, 见式 (2)–(5), 代入式 (18) 和 (19) 可以得到冲刷厚度和失效历时与出水高度、有效波高等波浪参数之间的关系式:

$$\begin{aligned} \Delta h(\Delta T) &= K_{d,m} \left[ x_i \rho g (-R_c) \left( \frac{-R_c}{H_{m0}} \right)^{y_i} - \tau_{c,H} \right] \Delta T, \\ \Delta T &\leq \Delta T_0 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\Delta T_0 = \frac{\Delta h(\Delta T_0)}{K_{d,H} \left[ x_i \rho g (-R_c) \left( \frac{-R_c}{H_{m0}} \right)^{y_i} - \tau_{c,H} \right]} \quad (22)$$

其中,  $x$ 、 $y$  分别是作为系数和指数的相关参数, 因堤防形态不同而异, 角标  $i$  的取值为 1 ~ 5, 分别对应五种堤形。参考式 (2)–(5), 我们可以得到不同值对应的参数值如表 1。

表 1 式 (21)、(22) 中参数对应数值表

i	1	2	3	4	5
$x_i$	0.1052	0.1019	0.0943	0.1029	0.0975
$y_i$	-0.2820	-0.2820	-0.3054	-0.3128	-0.2820

为了便于比较,不妨代入前沿所述 EFA 试验中得到在良好植被防护土壤水流冲刷的相关数据<sup>[9]</sup>,即 $\tau_c=18.50\text{N/m}^2$ , $K_d=0.031\text{mm/h/N/m}^2$ 。通过给定出水高度 $-R_c$ 和有效波高 $H_{m0}$ 即可得到冲刷厚度和破坏历时。当 $-R_c=H_{m0}=0.3$ 时,可以得到背水侧坡脚处冲刷厚度 $\Delta h$ 和总时间 $\Delta T$ 的关系曲线如图2。

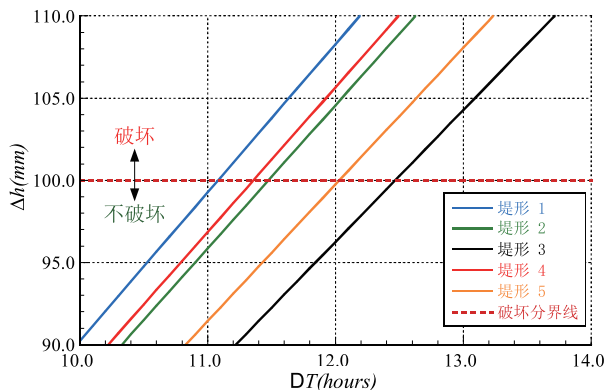


图2 冲刷厚度和总时间的关系曲线

可以得出,堤形1的破坏时间约为11.1h,堤形3的破坏时间最长,达12.5h,堤形5次之,约为12h,堤形2和堤形4较为接近,分别为11.5h和11.4h。五种不同堤形在相同时间的大小关系基本上是恒定的,其中第三种和第五种堤形明显优于其他三种,减缓了侵蚀破坏的时间。可见减小背水侧坡度以及加筑副堤可以有效降低溢流的紊动强度,使堤防的抵抗能力提高。而减小堤顶宽度和增大迎水侧坡度的做法不甚有效。理论上,后者有利于降低溢流的水平分速度,但也许增加了其紊动强度,故不能起到明显的优化效果。

为了更直观表示不同尺寸堤防造成的抗冲刷能力的差异对防止涌浪冲刷能力的影响,可着重抽取两个完成破坏的总时间(如 $\Delta T=6\text{h}$ 和 $\Delta T=14\text{h}$ ,而达到破坏条件的厚度仍认为是 $h=100\text{mm}$ )不同出水高度和有效波高的关系曲线,若某种几何条件下对应的点在某总时间所对应的曲线之下,则说明涌浪发生经过该时长后该尺寸的堤防还未破坏,详见图3、图4。

可见相同情况下,满足破坏的值越小,即越容易破坏,则其优化效果越差。从图像中容易看出,破坏时间为6h的情况下,当有效波高 $H_{m0}$ 低于0.90m时(或出水高度 $-R_c$ 大于0.44m),默认的堤形1是最容易破坏的方案,但当 $H_{m0}$ 大于0.90m时堤形4反而更容易破坏;在破坏时间为14h时以有效波高 $H_{m0}=0.40\text{m}$ 为临界点(或 $-R_c=0.20\text{m}$ )也出现类

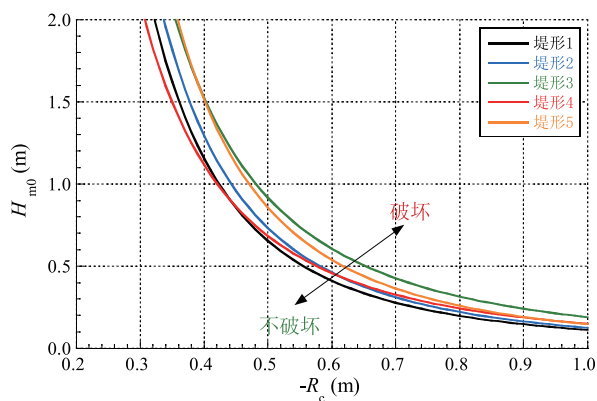


图3 冲刷侵蚀破坏时间为6h时的出水高度与有效波高关系曲线

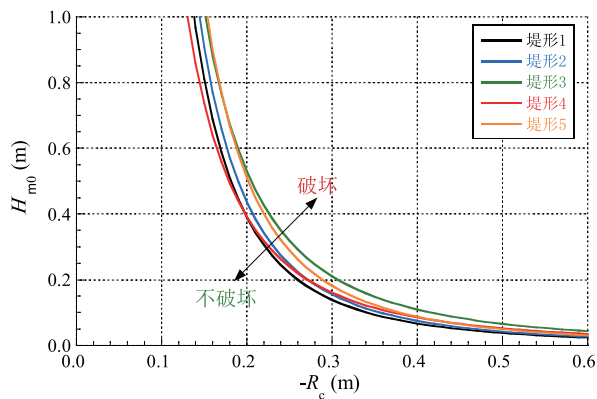


图4 冲刷侵蚀破坏时间为14h时的出水高度与有效波高关系曲线

似规律,印证了上文增大迎水侧坡度将增大溢流的紊动强度的猜测。堤形2较堤形1减小了堤顶宽度,在两组图像中处于中等的位置,说明有一定的优化效果,或许适当减小堤顶宽度有利于降低溢流的紊动能。此外可以明显看出,堤形3和堤形5仍是效果最好的方案,在破坏时间为6h时有效波高 $H_{m0}$ 大于1.60m( $-R_c \leq 0.38\text{m}$ ),或在破坏时间为14h时有效波高 $H_{m0}$ 大于0.72m( $-R_c \leq 0.17\text{m}$ )时,加筑副堤的效果比减小背水侧坡度的做法更为明显,反之,减小背水侧坡度的做法更加有效。可知在波动幅度较小的溢流情况下,采用坡度较缓的背水坡是消减紊动的优选方案,而在波动幅度较大的情况下,加筑副堤起到了增大流程、减缓坡度变化的作用,对消减紊动能、减小局部切应力更加有效。

## 4 结语

本文通过理论分析结合前期成果,研究高效加筋草皮垫防护海堤在不同波浪溢流作用下背水侧坡脚处的冲刷变形过程,推导出坡脚冲刷厚度和草皮防护垫破坏历时的经验公式。结合前人成果比较分



析5种不同形态海堤的敏感性,发现减小紊动能和冲刷率,背水坡坡度较缓、添加副堤以及适当减小堤顶宽度是有利的,而增大迎水侧坡度不能降低坡脚的冲刷率,反而会使溢流的紊动更加强烈。在海堤设计过程中,除了按强度和稳定性要求进行堤形设计,尤其是使用高效加筋草皮垫等新型防护技术时,可以适当考虑上述有利于限制海堤冲刷、延长海堤破坏时间的海堤形态。

#### 参考文献:

- [1] 季永兴, 卢永金, 张燎军. 基于破坏路径分析的海堤安全主要影响因素识别 [C]. 风险分析和危机反应中的信息技术—中国灾害防御协会风险分析专业委员会年会, 2014.
- [2] 范红霞, 周益人, 李鹏. 海堤越浪量及后坡越浪流研究进展 [J]. 水运工程, 2008 (08), 14–19.
- [3] YUAN Saiyu, LI Lin, AMINI Farshad, TANG Hongwu. Numerical study of turbulence and erosion of an HPTRM-strengthened levee under combined storm surge overflow and wave overtopping [J]. Journal of Coastal Research, 2014, 30 (1), 142–157.
- [4] GOODRUM, R. A Comparison of Sustainability for Three Levee Armoring Alternatives [C]. Optimizing Sustainability Using Geosynthetics, the 24th Annual GRI conference Proceedings, Dallas, Texas; GRI. 2001, pp. 40–47.
- [5] MUIJS, J.A. Grass cover as a Dike Revetment. Translation of TAW-brochure “Grasmat als Dijkbekleding”, Rijkswaterstaat, Delft, 1999.
- [6] HUGES S.A., NADAL N.C. Laboratory study of combined wave overtopping and storm surge overflow of a levee [J]. Coastal Engineering, 56 (3), 2009, 244–259.
- [7] HUGES S.A., Scholl B., THORNTON C. Wave overtopping hydraulic parameters on protected-side slopes [C]. Proceedings of the 32nd USSD Annual Conference, New Orleans, Louisiana, 2012, pp.1453–1466.
- [8] HUGES S.A., SHAW J. Continuity of instantaneous wave overtopping discharge with application to stream power concepts [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering, 137 (1), 2011, 12–25.
- [9] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, LI Lin, PAN Yi, AMINI Farshad. Combined wave and surge overtopping erosion failure model of HPTRM levees: Accounting for grass-mat strength [J]. Ocean Engineering, 2015, 109, 256–269.
- [10] PAN Yi, LI Lin, AMINI Farshad, KUANG Cuiping. Full scale HPTRM strengthened levee testing under combined wave and surge overtopping conditions: overtopping hydraulics, shear stress and erosion analysis [J]. Journal of Coastal Research, 2013, 29 (1), 182–200.
- [11] PAN Yi, KUANG Cuiping, LI Lin, AMINI Farshad. Full-scale laboratory study on distribution of individual wave overtopping volumes over a levee under negative freeboard [J]. Coastal Engineering, 2015, 97: 11–20.
- [12] YUAN Saiyu, LI Lin, AMINI Farshad, TANG Hongwu. Sensitivity of combined turbulent wave overtopping and storm surge overflow response to variations in levee geometry [J]. Journal of Coastal Research, 2014, 31 (3), 702–713.
- [13] KELLY D., THOMPSON R. Comprehensive hurricane levee design: development of the controlled overtopping levee design logic [C]. Proceedings of the SAME Technology Transfer Conference and Lower Mississippi Regional Conference. Vicksburg, MS, March, 2008; 17–19.
- [14] HANSON G.J., TEMPLE D.M. Performance of bare earth and vegetated steep channels under long duration flows [C]. ASAE Meeting Presentation, 2001.

(责任编辑: 徐丽娜)