

# 福建沿海浪潮耦合漫堤风险评估: 以台风天兔为例\*

王凯<sup>1, 2, 3, 4</sup> 侯一筠<sup>1, 2, 3, 4, 5①</sup> 冯兴如<sup>1, 2, 4, 5①</sup> 李水清<sup>1, 2, 4, 5</sup> 傅赐福<sup>6</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环境与波动重点实验室 青岛 266071; 3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071; 5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 青岛 266237; 6. 国家海洋环境预报中心 北京 100081)

**摘要** 漫堤是天文潮、风暴潮与海浪等物理要素作用于海堤后海水翻越海堤的物理过程。本文利用天文潮-风暴潮-台风浪耦合模式(ADCIRC+SWAN)、基于非结构三角形网格和高分辨率地理数据(海堤位置和高程、岸线和水深等)构建福建沿海精细化漫堤风险等级评估系统。该系统在近岸网格分辨率最高达 50m, 可精确刻画福建沿海复杂地形。利用模拟的水位与海浪参数, 采用波浪爬高公式计算得到各海堤堤前波浪爬高。按照总水位与波浪爬高之和与海堤高程的对比, 将漫堤风险分为五个等级。对 2013 年的超强台风天兔过程进行后报检验。结果显示, 该系统计算的漫堤情况与灾后调查的漫堤实况基本一致, 结果准确, 说明本研究中采用的漫堤风险评估标准和方法是可行的。在此基础上, 设计了 4 种不同的台风强度等级, 对福建沿海 206 条海堤进行了漫堤风险等级评估, 探究台风强度对漫堤风险的影响。结果表明: 波浪爬高对漫堤风险的影响高于单纯的风暴潮增水; 风暴潮增水随台风强度的增强增量较小, 对于漫堤的风险影响较小; 福建沿海波浪爬高普遍较高, 随着台风强度的增强, 波浪爬高会显著增加漫堤的风险等级, 且应重视台风浪对海堤造成的冲击所导致的溃堤灾害。本研究可为沿海防灾减灾提供科学依据。

**关键词** 风暴潮; 台风浪; 波浪爬高; 漫堤; 风险评估

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20190900175

福建沿海位于西北太平洋台风的主要移动路径上, 台风及其引起的风暴潮灾害是福建沿海遭受的主要的海洋灾害之一。风暴潮灾害是由于台风风暴潮、天文大潮和台风浪等共同作用引起的沿岸水位异常上升造成的。根据国家海洋局 2018 年统计公报, 2018 年, 风暴潮灾害在各类海洋灾害中导致的直接经济损失最严重, 占直接经济损失总额的 93%; 海浪灾害导致的死亡人数(含失踪)最多, 占总死亡人数(含失踪)的 96%。其中, 风暴潮灾害给福建造成的直

接经济损失为 11.41 亿元, 占风暴潮灾害直接经济损失总额的 25.6%。海浪灾害对福建造成的直接经济损失为 0.13 亿元, 占海浪灾害直接经济损失总额的 37.1%; 并且海浪灾害导致福建 29 人死亡(含失踪), 占海浪灾害总死亡(含失踪)人数的 41.4%。

海堤是在河口和沿海地区修建的一种专门用来挡水的建筑物, 其目的是为了防止天文大潮的高潮位和台风风暴潮以及台风浪的侵袭, 保障沿海城市的工业设施和农田的安全。近年来, 为了提高沿海城

\* 国家重点研发计划项目, 2016YFC1402000 号, 2016YFC1401002 号, 2018YFC1407003 号; 自然科学基金项目, U1706216 号, 41606024 号, 41506023 号; 中科院战略先导专项, XDA19060202 号; 山东省联合基金, U1406402 号; 海洋公益性行业科研专项, 2009513 号。王凯, 博士研究生, E-mail: wangkai815@mails.ucas.edu.cn

通信作者: 侯一筠, 研究员, E-mail: yjhou@qdio.ac.cn; 冯兴如, 副研究员, E-mail: fengxingru07@qdio.ac.cn

收稿日期: 2019-09-18, 收修改稿日期: 2019-11-04

市的防洪抗灾能力,不少沿海城市都修建了不同等级的海堤。海堤在预防和减少海洋灾害方面发挥了重要的作用。但是由于海水的侵蚀,且有些海堤年久失修,当沿海地区遭遇的天文大潮和超强台风极易引发漫堤甚至溃堤灾害,给人民的生命和财产带来重大损失。因此,有必要研究风暴潮期间漫堤风险等级评估,以分析其风险性和危害程度。及时并且准确的漫堤风险等级评估会把人员伤亡和经济损失减小到最低程度。

漫堤风险等级评估一般以堤前水位是否超过堤顶高程来判断。20世纪50年代,国内外学者在物理模型试验和现场试验的基础上,提出了一系列越浪和波浪爬高的计算公式。国内许多学者对风暴潮漫堤开展了大量卓有成效的工作,尹宝树等(2006)针对黄河三角洲示范区,根据越浪的程度提出了漫堤灾害风险等级标准,并且根据其建立的浪潮耦合数值模式以及长期预报的结果,提出了风险评估的方法和步骤;傅赐福等(2014)利用 ADCIRC+SWAN 耦合模型构建福建沿海精细化风暴潮漫堤数值预报系统,利用预报潮位与近岸海浪波高数据采用通用爬高公式计算各海堤堤前爬高与海堤高程对比,并按爬高的大小分为四个漫堤等级;张莉等(2016)基于 SWAN 海浪模式和 MATLAB 软件,建立了福建沿海天文潮-风暴潮-台风浪耦合漫堤风险评估系统。

福建沿海东临广阔的西北太平洋,由于其特殊的地理位置,每年夏季和秋季经常遭受到台风的侵袭,是我国易受海洋灾害影响的区域之一,海洋灾害形势复杂严峻。近年来,随着全球变暖和海平面上升,极端气候事件不断增多,热带气旋中产生台风的比例上升,登陆或者严重影响福建沿海的强台风频率不断上升,强台风甚至超强台风频繁袭击福建沿海。本文拟针对台风风暴潮灾害较为严重的福建海域建立浪潮耦合漫堤系统,设计四种不同强度的台风等级对福建沿海 206 条海堤进行漫堤风险等级评估研究,对比了在不同台风强度下风暴潮增水与波浪爬高对于漫堤风险的影响程度,为我国的海洋防灾减灾提供参考。

## 1 高分辨率风暴潮漫堤风险评估系统的建立

为了进行台风过程下的漫堤风险评估,本研究首先使用 ADCIRC+SWAN 耦合模式针对福建沿海建立了高分辨率的天文潮-风暴潮-台风浪耦合数值系统。

### 1.1 台风风场和气压场

要模拟台风引起的风暴潮和海浪,需要将台风过程中的气压场和风场作为模式的强迫场,风场的

准确性直接影响模式模拟的准确性。经过比较和验证,本研究采用了在福建沿海地区应用效果较好的 Jelesnianski 台风模型(Jelesnianski, 1965),该模型考虑了台风移动速度对于台风风场的影响,其对风场和气压场的计算公式如下:

当  $0 < r < R$  时

$$\begin{cases} W_x = V_x \frac{r}{r+R} - W_R \left(\frac{r}{R}\right)^2 [(x-x_0)\sin\theta + (y-y_0)\cos\theta] \\ W_y = V_y \frac{r}{r+R} + W_R \left(\frac{r}{R}\right)^2 [(x-x_0)\cos\theta - (y-y_0)\sin\theta] \\ P_a = P_0 + \frac{1}{4}(P_\infty - P_0) \left(\frac{r}{R}\right)^3 \end{cases} \quad (1)$$

当  $r > R$  时,

$$\begin{cases} W_x = V_x \frac{R}{r+R} - W_R \left(\frac{r}{R}\right)^\beta [(x-x_0)\sin\theta + (y-y_0)\cos\theta] \\ W_y = V_y \frac{R}{r+R} + W_R \left(\frac{r}{R}\right)^\beta [(x-x_0)\cos\theta - (y-y_0)\sin\theta] \\ P_a = P_\infty - \frac{3}{4}(P_\infty - P_0) \left(\frac{R}{r}\right) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $V_x, V_y$  分别为台风中心的移动速度;  $(x_0, y_0)$  为台风中心坐标;  $(x, y)$  为计算点的位置;  $\theta$  为入流角,取  $20^\circ$ ;  $\beta$  为衰减系数,取 0.4;  $r$  为计算点到台风中心的距离;  $R$  为最大风速半径;  $(W_x, W_y)$  为计算点的风速;  $P_a$  为计算点的气压; 中心气压  $P_0$  使用 Atkinson 等(1977)提出的经验公式,如公式(3)所示,其中  $W_R$  表示最大风速,  $P_\infty$  表示无穷远处的大气压(取 1013.25hPa)。

$$W_R = 3.029 \times (P_\infty - P_0)^{0.644} \quad (3)$$

最大风速半径是确定台风影响范围的关键参数,本研究中最大风速半径  $R$  使用 MEF 经验公式(许灵静等, 2016):

$$R = 28.52 \text{th} [0.0873(\varphi - 28)] + 12.22 \exp\left(\frac{P_0 - P_\infty}{33.86}\right) + 0.2v + M \quad (4)$$

其中,  $P_\infty$  为无穷远处的大气压(取 1013.25hPa);  $P_0$  为台风的中心气压(单位 hPa);  $\varphi$  为台风中心的纬度(单位为  $^\circ$ );  $v$  为台风中心的移动速度;  $M$  为起算半径,取 45km。台风的位置、中心气压等基本信息来自中国气象局热带气旋资料中心最佳路径数据集(Ying *et al*, 2014) (<http://tcdata.typhoon.org.cn/>)。

## 1.2 风暴潮模式

目前, 可用于风暴潮模拟的数值模式有很多, 风暴潮模式不仅要使网格的计算区域足够大, 能够描述海水的运动, 而且要考虑沿海地区复杂地形对模拟结果的影响。ADCIRC 型具有计算效率高和稳定性好的优点, 应用较为广泛。因此, 本研究选取由美国北卡罗来纳州大学 Luetlich 博士和美国诺特丹大学 Westerink 博士等人共同主持开发的 ADCIRC 模式 (Westerink *et al.*, 1992)。ADCIRC 采用三角形网格可以在水深变化剧烈的区域使用更高的分辨率, 能很好的拟合复杂的岸线, 而在地形变化缓慢的地方采用低分辨率, 既满足了计算要求, 又节省了计算资源和计算时间 (Blain *et al.*, 1998)。

为了避免数值解法引起的错误, ADCIRC 求解通用波连续方程 (GWCE) 计算水位的变化, GWCE 由连续方程带入动量方程得到, 球坐标系下垂向平均的二维连续方程形式如下:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{R_e \cos \varphi} \left( \frac{\partial (HU)}{\partial \lambda} + \frac{\partial (VH \cos \varphi)}{\partial \phi} \right) = 0, \quad (5)$$

其中,  $t$  代表时间;  $R_e$  代表地球的半径;  $\lambda$  和  $\varphi$  分别代表经度和纬度;  $\xi$  代表自由海面距离大地水准面的高度;  $H$  代表海面到海底的总深度;  $U$  和  $V$  分别代表经向和纬向的垂直平均流速。

ADCIRC 求解基于深度平均的动量方程获得流场数据, 动量方程在球坐标中的形式如下所示:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= fv - \frac{g}{R_e \cos \varphi} \frac{\partial \left[ \zeta + \frac{P_s}{g\rho_0} - \alpha\eta \right]}{\partial \lambda} + \\ &\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tau_{z\lambda}}{\rho_0} \right) - b_\lambda + m_\lambda + \frac{uv \tan \phi}{R_e}, \\ \frac{dv}{dt} &= -fu - \frac{g}{R_e} \frac{\partial \left[ \zeta + \frac{P_s}{g\rho_0} - \alpha\eta \right]}{\partial \phi} + \\ &\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tau_{z\phi}}{\rho_0} \right) - b_\phi + m_\phi + \frac{u^2 \tan \phi}{R_e} \end{aligned}, \quad (6)$$

其中,  $g$  代表重力加速度;  $P_s$  代表海表大气压;  $R_e$  代表地球半径;  $\rho_0$  代表海水的密度;  $f$  代表柯氏参数;  $\lambda$ 、 $\varphi$ 、 $z$  分别代表经度、纬度和垂向深度;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别代表流速的在球坐标 3 个坐标上的分量;  $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{R_e} \frac{\partial}{\partial \phi} + w \frac{\partial}{\partial z}$  为球坐标下对时间  $t$  的全微分;  $\frac{\tau_{z\lambda}}{\rho_0}$ 、 $\frac{\tau_{z\phi}}{\rho_0}$  代表垂向应力;  $m_\lambda$ 、 $m_\phi$  代表径向和纬向的水平应力梯度;  $b_\lambda$ 、 $b_\phi$  代表径向和纬向的斜压

压强梯度;  $\eta$  代表牛顿平衡潮势;  $\alpha$  是常数。更多有关 ADCIRC 模型的详细描述可参看其用户手册 (<http://adcirc.org/home/documentation/users-manual-v52/>)。

## 1.3 海浪模式

本研究采用的目前国际上通用的第三代海浪模式 SWAN (Booij *et al.*, 1999), SWAN 模式是由荷兰 Delft 科技大学在 WAM 模式基础上研发的第三代浅水海浪模式, 经过多年不断的改进, 已经趋于成熟。SWAN 支持三角形网格, 避免了精细模拟时的嵌套计算, 可以高效地对包含远海和近岸整个区域的海浪进行模拟。

当波浪背景流场中传播时, 波浪的动谱能量密度守恒, 但是能量密度不守恒。因此, 在 SWAN 模型中, 用二维动谱能量密度  $N(\sigma, \theta)$  来描述随机海浪场  $E(\sigma, \theta)$ , 两者之间的关系有:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma, \quad (7)$$

其中,  $\sigma$  为相对频率,  $\theta$  为波向。

SWAN 海浪模式使用波作用平衡方程, 笛卡尔坐标系和球坐标系都可以使用, 笛卡尔坐标系下的方程形式:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S_{\text{tot}}}{\sigma} \quad (8)$$

其中,  $x$ 、 $y$  为地理坐标;  $t$  为时间;  $\theta$  为传播方向;  $\sigma$  为相对频率; 左边第一项代表动谱能量密度  $N$  随着时间的变化, 第二项和第三项代表动谱能量密度  $N$  在几何空间的传播 (变化率为  $C_x$  和  $C_y$ ), 第四项和第五项代表地形和流场导致的频移和折射对动谱能量密度  $N$  的作用。  $S_{\text{tot}}$  是波能源函数项, 代表系统中能量的输入和输出, 包括风浪的生成、发展, 底面摩擦、白浪、波浪破碎导致的能量损失和波-波相互作用。

SWAN 中的源项由如下 6 个过程组成:

$$S_{\text{tot}} = S_{\text{in}} + S_{\text{nl3}} + S_{\text{nl4}} + S_{\text{ds,w}} + S_{\text{ds,b}} + S_{\text{ds,br}} \quad (9)$$

其中  $S_{\text{in}}$  代表风能输入项,  $S_{\text{nl3}}$  代表三波非线性相互作用,  $S_{\text{nl4}}$  代表四波非线性相互作用引起的能量传递项,  $S_{\text{ds,w}}$  代表波陡过高引起的白帽耗散,  $S_{\text{ds,b}}$  代表底摩擦引起的能量耗散,  $S_{\text{ds,br}}$  代表水深变浅导致海浪破碎造成的能量耗散。

## 1.4 耦合模式

海洋中的波动和流动现象是相互影响的, 水位和流场会影响波浪的传播以及破碎位置; 波浪传播所产生的辐射应力会影响水位和流场。因此, 波流过程的耦合十分必要。本研究使用美国北卡罗来纳州立大学 (North Carolina State University) 的 Dietrich 博士开发的 ADCIRC 和 SWAN 的耦合方法 (Dietrich *et al.*, 2011)。

ADCIRC 和 SWAN 是由同一个风场驱动的。由

于 ADCIRC 的数值格式是发散的, 所以根据 Courant 条件, 其运行的时间步长为 2s; 但是 SWAN 采取全隐式绝对稳定的差分格式是无条件收敛的, 所以其计算的时间步长设置为 1800s, 本耦合模式数据交换的时间间隔 SWAN 计算时间步长相同。

漫堤风险等级评估系统根据耦合模式计算结果(总水位、波浪爬高)对福建海域 206 条海堤进行可视化风险等级评估, 海堤数据来源于海洋公益性行业科研专项(2009513)。Feng 等(2016)对这个耦合模式进行了详细的检验, 与实测结果吻合的很好, 为可靠的

漫堤风险评估打下了良好的基础

## 2 数值实验方案

本研究使用的计算网格引用自(Feng *et al*, 2016), 该网格从远海到近岸逐渐加密, 沿岸网格分辨率最高达 50m, 对福建沿海复杂地形和海堤信息实现了高精度的刻画, 同时又大大提高了计算效率。模式在开边界处加入了 8 个主要天文分潮( $M_2$ 、 $S_2$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$  和  $Q_1$ )的调和常数进行驱动, 调和常数来自于 NAO99 潮汐模型(Matsumoto *et al*, 2000)。

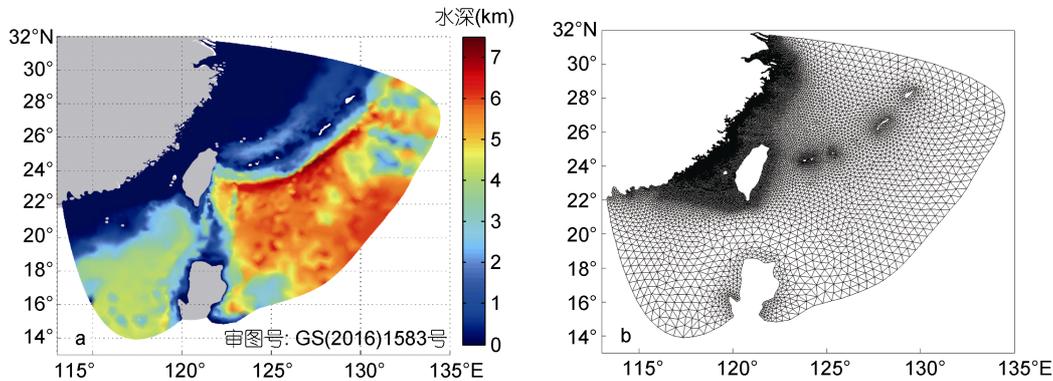


图 1 计算区域水深(a)和模式计算网格(b)

Fig.1 Water depth of computational domain(a) and computational grid of the model(b)

### 2.1 漫堤风险等级评估方案

海堤的漫堤和越浪程度主要受到海堤的高度、水位和波高的控制, 在不同的水位和波浪条件下, 同一海堤形成越浪和漫堤的可能性差别很大。因此, 海堤的越浪漫堤风险, 应当依据实际情况进行具体的评估。本文采用尹宝树等(2006)提出的漫堤越浪风险程度标准, 将海堤风险等级根据堤前水位与波浪爬高之和与海堤高程的对比分成五个等级:

一级: 最大波浪爬高远未达到堤顶(距离堤顶大于 0.5m);

二级: 最大波浪爬高接近堤顶(距离堤顶小于 0.5m);

三级: 部分海浪越过堤顶, 越浪率小于或等于 13%;

四级: 越浪率大于 13%, 至总水位与堤顶齐高;

五级: 总水位高于堤顶高度。

总水位为风暴潮与天文潮的耦合水位。

### 2.2 波浪爬高计算

波浪爬高是波浪向岸传播遇到海堤时, 海堤坡面上的水体的爬高程与静水高程之差。波浪爬高的准确计算在漫堤灾害预报中起着重要的作用。《海港水文规范》推荐的直立堤波浪爬高公式为  $H_c/d = B(H_w/d)^A$ , 其中  $H_c$  为爬高,  $d$  为堤前水深,  $H_w$  为入射波

高,  $A$ 、 $B$  为系数, 分别为:

$$A = T_* / (0.00913 T_*^2 + 0.636 T_* + 1.2515), \quad (10)$$

$$B = 2.3104 - 2.5907 T_*^{0.5941}, \quad (11)$$

$$T_* = \bar{T} \sqrt{g/d}, \quad (12)$$

$$\bar{T} = \frac{T_s}{1.15}, \quad (13)$$

式中,  $T_s$  为有效波周期;  $\bar{T}$  为平均波周期;  $T_*$  为无因次波周期。

## 3 台风天兔漫堤风险等级评估

北京时间 2013 年 9 月 17 日 02 时, 台风天兔(1319)在菲律宾以东的西北太平洋上形成, 最大风速 18m/s(8 级), 台风中心最低气压 1000hPa; 天兔缓慢向西移动并且逐渐增强, 18 日 20 时增强为台风, 19 日 11 时增强为强台风, 9 月 19 日 17 时增强为超强台风并且维持了 30h, 期间最大风速为 52m/s(16 级), 中心最低气压为 930hPa; 之后台风继续往西北方向移动, 于 21 日 20 时减弱为强台风, 9 月 22 日 19 时 40 分左右在广东省汕尾市南部沿海地区登陆, 登陆时最大风速为 45m/s(14 级), 中心最低气压为 940hPa。台风天兔期间受风暴潮和台风浪的共同影响, 福建省受灾人

口 9.29 万人, 紧急转移安置 14.46 万人, 水产养殖受灾面积达 3.03 千公顷, 40 艘渔船遭受毁坏, 264 艘渔船损坏, 码头损毁 1.26km, 防波堤损毁 7.36km, 海堤和护岸损毁 4.86km, 直接经济损失达 6.36 亿元。天兔在登陆时恰逢天文大潮, 风暴潮增水与天文大潮叠加, 加重了灾情。本文对超强台风天兔期间, 福建沿海的风暴潮漫堤风险等级进行评估, 同时以超强台风天兔为基础, 设计四种不同台风强度, 研究不同台风强度下福建沿岸海堤的漫堤风险等级。

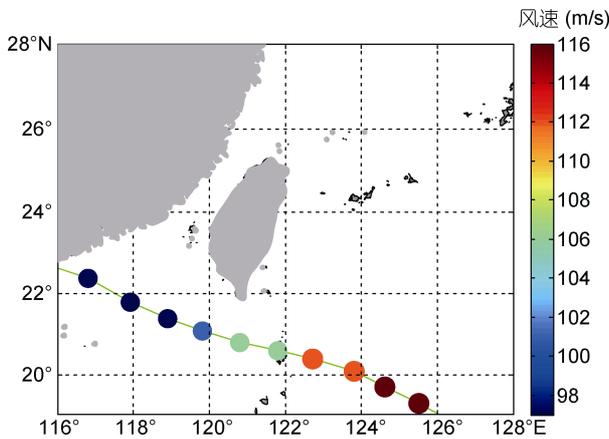


图 2 台风天兔路径  
Fig.2 Trajectory of the typhoon Usagi

将风险等级评估结果与本次台风期间福建沿海有实况调查的两条海堤的漫堤情况进行比较验证, 实况调查数据来自(张莉等, 2016)。系统评估结果显示, 东山县沃角海堤和东山县康美海堤漫堤风险等级为五级, 即总水位高于堤顶高度, 说明这两处海堤会发生漫堤、漫滩甚至溃堤灾害, 在灾后调查中发现, 这两处海堤被不同程度的毁坏, 说明本系统模拟得到的漫堤风险等级评估基本准确。

表 1 台风强度等级  
Tab.1 Typhoon intensity scale

强度等级	登陆时刻最大风速(m/s)
一	45
二	35
三	55
四	65

注: 其中强度一为真实登陆时刻最大风速, 其余三个为构造风速, 构造风速的每个时刻的最大风速均由对应时刻的真实最大风速等比例换算得到; 其中强度一对应 14 级台风, 强度二对应 12 级台风, 强度三对应 16 级台风, 强度四对应 18 级台风

表 2 台风天兔过程漫堤风险等级预报及实况对比  
Tab.2 Comparison in risk level of overtopping seawall between the hindcast and the actual situation during Typhoon Usagi

海堤名称	海堤高度(m)	风险等级	调查实况	备注
东山县沃角海堤	4.7	五级	冲毁 180m	一致
东山县康美海堤	3.6	五级	冲毁 20m	一致

在不同台风强度的情况下, 对海堤逐条进行了风险等级划分, 并在此基础上做了统计分析, 并将结果显示在(图 3)中。得出在强度一的情况下, 有 35 处海堤的漫堤风险等级达到了四级, 10 处海堤的漫堤风险等级达到了五级; 在强度二的情况下, 有 35 处海堤的漫堤风险等级达到了四级, 7 处海堤的漫堤风险等级达到了五级; 在强度三的情况下, 有 48 处海堤的漫堤风险等级达到了四级, 10 处海堤的漫堤风险等级达到了五级; 在强度四的情况下, 有 55 处海堤的漫堤风险等级达到了四级, 10 处海堤的漫堤风险等级达到了五级。

以下是在 4 种强度下漫堤风险等级均达到了五级的 7 处海堤, 有必要做好防范措施。

选取了其中四条典型的海堤做出堤前风暴潮增水和波浪爬高过程曲线。

由图 4 可知, 在台风强度为最低级别时, 四条海堤的风暴潮增水普遍低于 1m。随着台风强度的增强,

表 3 海堤信息  
Tab.3 Seawall information

海堤名称	堤顶高度(m)	最高堤前水位(m)			
		强度一	强度二	强度三	强度四
漳浦县花厝海堤	4.4	4.75	4.60	4.89	4.97
漳浦县漳浦盐场海堤	3.2	3.87	3.60	4.10	4.25
漳浦县江口海堤	3.6	4.13	4.03	4.24	4.30
漳浦县杜浔海堤	2.2	3.46	3.27	3.59	3.65
云霄县青崎海堤	5.0	5.28	5.05	5.46	5.58
东山县康美海堤	3.6	4.29	4.06	4.48	4.64
东山县沃角海堤	4.7	4.91	4.74	5.05	5.14

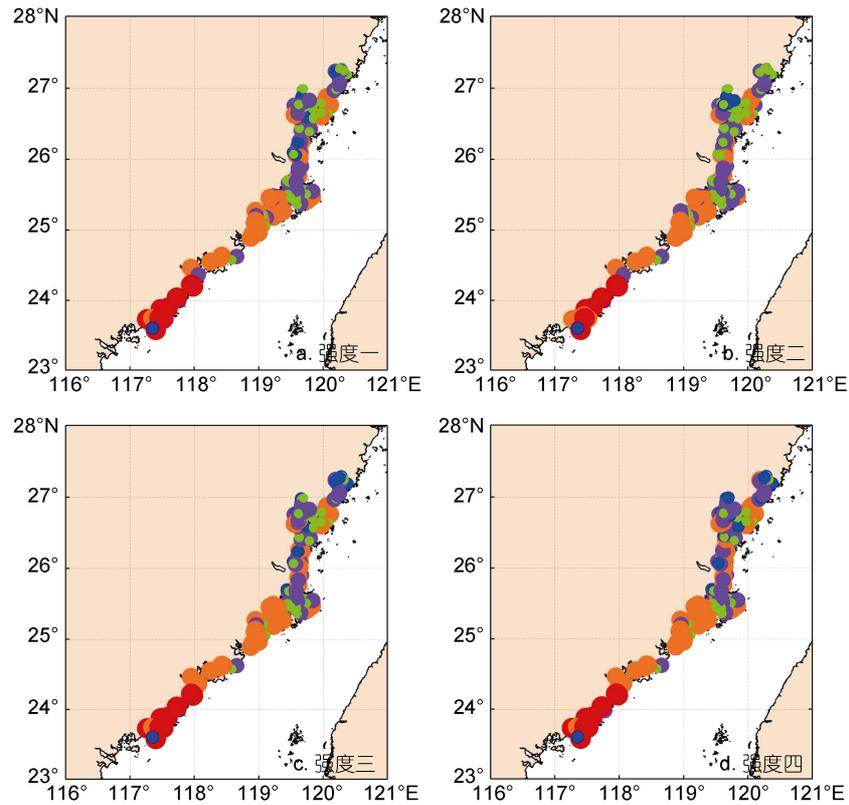


图3 不同台风强度下的漫堤风险等级

Fig.3 Risk level of overtopping seawall under different typhoon intensities

注: 绿色实心点: 漫堤风险等级为一级; 蓝色实心点: 漫堤风险等级为二级; 紫色实心点: 漫堤风险等级为三级; 橙色实心点: 漫堤风险等级为四级; 红色实心点: 漫堤风险等级为五级

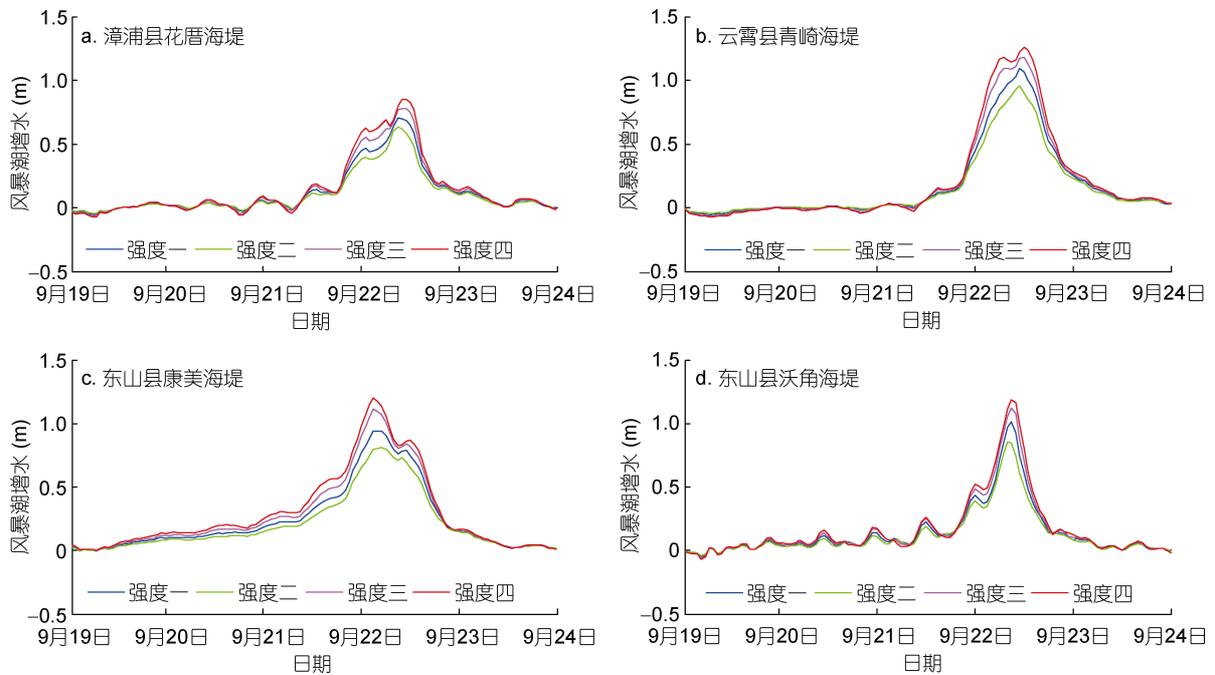


图4 四种不同强度情况下风暴潮增水时间序列

Fig.4 Time series of storm surge under four typhoon intensity scales

风暴潮增水也在逐渐增加, 当台风强度达到最大时, 风暴潮增水最大可达 1.3m。但是风暴潮增水的值相对于福建沿岸海堤的高度较小, 台风强度增强导致的风暴潮水位的的增长对海漫堤风险等级影响程度很小。在福建省现有的海堤条件下, 漫堤风险等级达到五级的海堤一般都是高度较低的海堤, 除了强度二由于台风强度较低, 只有 7 条海堤漫堤风险等级达到五级以外(图 3), 其余台风强度条件下, 都是漳浦县杜浔海堤等 10 条海堤的漫堤风险等级达到五级(图 3), 风暴潮水位的升高没有使更多的海堤的堤前水位超

过海堤高度。

由图 5 可知, 即使在最低台风强度情况下, 波浪爬高普遍都超过了 2m, 在强度四的情况下波浪爬高最大可达 4.7m, 波浪爬高的值比风暴潮增水的值大很多, 考虑波浪爬高后, 海堤由于越浪导致的漫堤风险会大大增加, 从强度二到强度四, 漫堤风险等级为四级的海堤从 35 条迅速上升到 55 条(图 3)。台风浪引起的 4m 高的越浪对海堤的冲击力会很大, 会导致海堤有溃堤甚至毁堤的风险, 需要增强沿岸海堤对于台风浪的防范措施。

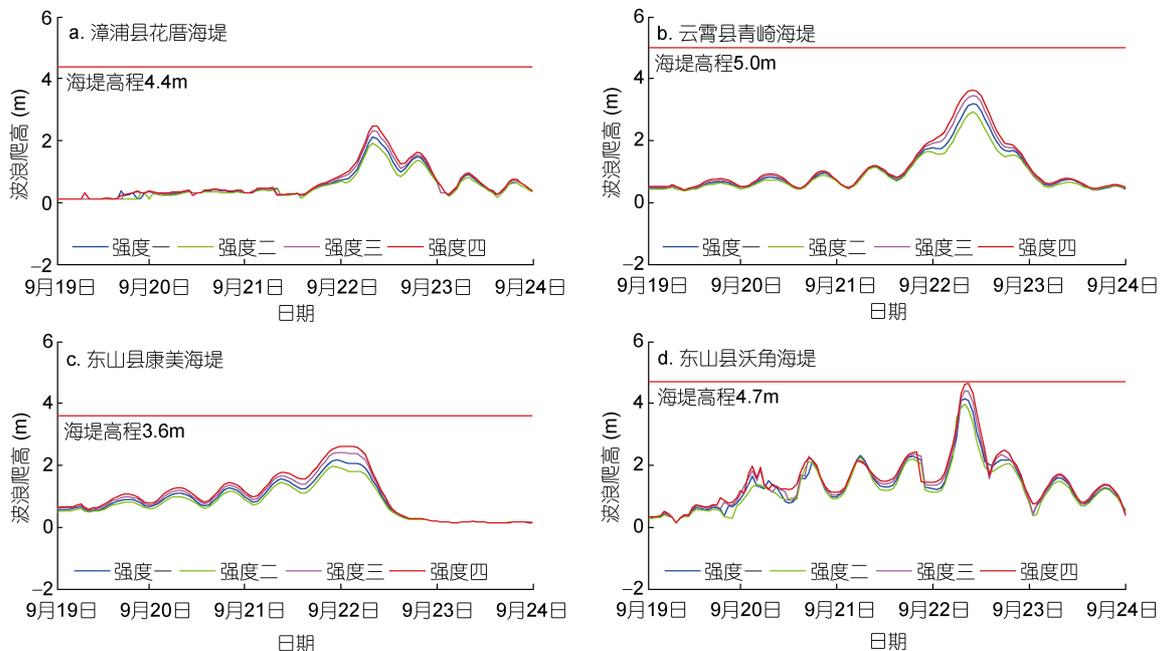


图 5 四种不同强度情况波浪爬高时间序列

Fig.5 Time series of wave run-up under four typhoon intensity scales

## 4 结论

本文建立了福建沿海地区天文潮-风暴潮-台风浪耦合漫堤风险等级评估系统。通过波浪爬高所及高程与海堤高程进行比较的方式来判断漫堤风险等级; 选取 2013 年超强台风天兔, 并且制定了 4 种不同的台风强度等级, 通过数值模拟对福建沿海 206 条海堤进行了漫堤风险等级评估, 并给出了漫堤风险等级分布图。结果表明: 波浪爬高对漫堤风险的影响高于单纯的风暴潮增水; 风暴潮增水随台风强度的增强增量较小, 对于漫堤的风险影响较小; 福建沿海波浪爬高普遍较高, 随着台风强度的增强, 波浪爬高会显著增加漫堤的风险等级, 并且应该重视台风浪对海堤造成的冲击所导致的溃堤甚至毁堤灾害, 本研究可为沿海防灾减灾提供科学依据。

致谢 本文的数值模拟是在中国科学院海洋研究所的高性能计算平台上完成的, 特此致谢。

## 参 考 文 献

- 尹宝树, 徐艳青, 任鲁川等, 2006. 黄河三角洲沿岸海浪风暴潮耦合作用漫堤风险评估研究. 海洋与湖沼, 37(5): 457—463
- 许灵静, 杨 波, 江文胜, 2016. 台风对杭州湾水交换影响的定量研究. 中国海洋大学学报, 46(6): 29—41
- 张 莉, 商少平, 张 峰等, 2016. 福建沿岸天文潮-风暴潮-台风浪耦合漫堤预警系统. 海洋预报, 33(5): 61—69
- 傅赐福, 于福江, 刘秋兴等, 2014. 风暴潮-近岸浪耦合漫堤数值预报技术及业务化应用. 见: “全球变化下的海洋与湖沼生态安全”学术交流会议论文集. 南京: 中国海洋湖沼学会
- Atkinson G D, Holliday C R, 1977. Tropical cyclone minimum sea level pressure/maximum sustained wind relationship for the western North Pacific. Monthly Weather Review, 105(4):

421—427

- Blain C A, Westerink J J, Luettich Jr R A, 1998. Grid convergence studies for the prediction of hurricane storm surge. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 26(4): 369—401
- Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H, 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4): 7649—7666
- Dietrich J C, Zijlema M, Westerink J J *et al*, 2011. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering*, 58(1): 45—65
- Feng X R, Yin B S, Yang D Z, 2016. Development of an unstructured-grid wave-current coupled model and its application. *Ocean Modelling*, 104: 213—225
- Jelesnianski C P, 1965. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf. *Monthly Weather Review*, 93(6): 343—358
- Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M, 2000. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan. *Journal of Oceanography*, 56(5): 567—581.
- Westerink J J, Luettich R A, Baptists A M *et al*, 1992. Tide and storm surge predictions using finite element model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(10): 1373—1390
- Ying M, Zhang W, Yu H *et al*, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(2): 287—301

## RISK ASSESSMENT OF OVERTOPPING SEAWALL UNDER WAVES AND SURGES FOR FUJIAN COAST: A CASE STUDY OF TYPHOON USAGI

WANG Kai<sup>1, 2, 3, 4</sup>, HOU Yi-Jun<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>, FENG Xing-Ru<sup>1, 2, 4, 5</sup>, LI Shui-Qing<sup>1, 2, 4, 5</sup>, FU Ci-Fu<sup>6</sup>

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China*; 2. *Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 4. *Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 5. *Function Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*; 6. *National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China*)

**Abstract** Overtopping seawall is a physical process of seawater climbing over seawall after physical elements acting on the seawall such as astronomical tide, storm surge, and typhoon waves. In this paper, a fine risk level assessment system of overtopping seawall in Fujian coast, South China, is established, in which astronomical tide, storm surge and typhoon waves are coupled based on unstructured triangular meshes and high-resolution geographic data (location and elevation of seawall, shoreline and water depth) using ADCIRC+SWAN. The system can accurately depicts the complex terrain along Fujian coast in resolution of up to 50m in the nearshore grid. Using the simulated water level and wave parameters, a formula of wave runup is used to calculate the wave runup in front of each seawall. According to the comparison of the sum of total water level and wave runup and seawall elevation, the risk level of overtopping seawall is divided into five levels. We made a hindcast on the process of super Typhoon Usagi in 2013, the risk level of overtopping seawall is basically the same as that of post-disaster investigation. The results are accurate and shows that the risk assessment criteria and methods for overtopping seawall adopted in this study are feasible. On this basis, four different typhoon intensity scales were designed, 206 seawalls along Fujian coast have been assessed for overtopping seawall risk to investigate the impact of typhoon intensity on the risk of overtopping seawall. The results show that the impact of wave runup on the risk of overtopping seawall is higher than that of pure storm surge. The increase of storm surge is small with the enhance of typhoon intensity, and has small impact on the risk of overtopping seawall. The wave runup is generally high along the coast of Fujian Province, with the enhance of typhoon intensity, the wave runup will significantly increase the risk level of overtopping seawall, and attention should be paid to the disaster of seawall breaking caused by the shock of typhoon waves on the seawall. This study can provide a scientific basis for disaster prevention and mitigation in similar coastal areas.

**Key words** storm surge; typhoon waves; wave runup; overtopping seawall; risk assessment