

许炜宏, 蔡榕硕. 海平面上升、强台风和风暴潮对厦门海域极值水位的影响及危险性预估[J]. 海洋学报, 2021, 43(5): 14–26, doi:10.12284/hyxb2021081

Xu Weihong, Cai Rongshuo. Impacts of sea level rise, strong typhoon and storm surge on extreme sea level in coastal waters of Xiamen and hazards estimation[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(5): 14–26, doi:10.12284/hyxb2021081

海平面上升、强台风和风暴潮对厦门海域极值水位的影响及危险性预估

许炜宏¹, 蔡榕硕^{1*}

(1. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要: 气候变化背景下海平面上升、强台风和风暴潮对我国东南沿海地区的洪涝灾害影响日益严重, 为应对气候变化的影响, 本文以位于我国东南沿海的厦门地区为例, 应用多种海洋大气观测资料和数理统计及模拟方法, 分析了历史上 9914 号和 1614 号两次台风对厦门海域极端海面高度 (极值水位) 的影响, 预估了未来海平面上升情景下厦门海域极值水位的变化及其危险性。结果表明: (1) 9914 号台风期间, 天文大潮、风暴增水和强降水的同时出现造成了厦门沿海地区超警戒极值水位 (732 cm) 的出现; (2) 风 (向岸强风)、雨 (强降水)、浪 (巨浪)、潮 (高潮位)、流 (急流) 等多致灾因子的共同作用是厦门沿海地区发生严重灾情的重要原因; (3) 在温室气体中等和高排放 (RCP4.5 和 RCP8.5) 情景下, 到 2050 年 (2100 年), 当前百年一遇的极值水位将分别变为 30 年 (2 年) 一遇 (RCP4.5) 和 25 年 (低于 1 年) 一遇 (RCP8.5) 的频繁极端事件。这表明未来厦门沿海极值水位的危险性将显著上升, 应采取充分的适应措施降低洪涝灾害风险。

关键词: 海平面上升; 台风; 风暴潮; 极值水位; 危险性

中图分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)05-0014-13

1 引言

在气候变暖背景下, 全球海平面加速上升, 强台(飓)风趋于频繁, 强台(飓)风和风暴潮导致低海拔 (小于 10 m) 沿海地区的洪涝灾害日趋严重^[1]。这是由于海平面的持续上升, 极端海面高度 (极值水位) 有升高的现象, 从而引起低海拔沿海地区极易被海水淹没或发生洪涝, 而未来极值水位事件的重现期还有明显缩短的趋势^[2]。极值水位主要由海平面高度、风暴增水和潮汐等构成, 而海平面高度的小幅上升也会显著增加沿海地区洪水灾害发生的频率和强度, 这是因

为海平面的上升抬高了风暴潮、潮汐和波浪的基础水位, 并且这种变化在陆架海区特别明显, 尤其是当风暴潮、波浪和天文大潮叠加到上升的海平面后产生的极值水位对沿海地区低洼地造成的洪涝灾害尤其严重^[3]。

近几十年来, 台(飓)风和风暴潮造成全球沿海地区的洪水灾害及社会经济的损失与日俱增。1975–2016 年, 全球 80.2% 因洪水死亡的人口位于距海岸线 100 km 的地区内^[4]。其中, 2005 年的“卡特尼娜”飓风袭击美国新奥尔良, 造成新奥尔良 80% 地区被洪水淹没, 部分地段水深高达 6 m, 并导致约 1 500 人死

收稿日期: 2020-04-16; 修订日期: 2020-05-20。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0604902, 2017YFA0604903, 2017YFA0604901); 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目 (海三科 2017030)。

作者简介: 许炜宏 (1995—), 男, 福建省晋江市人, 主要从事海洋环境研究。E-mail: xuweihong@tio.org.cn

* 通信作者: 蔡榕硕, 男, 研究员, 主要从事气候变化和海洋环境研究。E-mail: cairongshuo@tio.org.cn

亡,至少1 000亿美元的经济损失^[5]。1949–2009年,我国沿海地区共发生了220余次较为严重的台风风暴潮灾害^[6]。《中国海洋灾害公报》(1989–2018年)显示,台风风暴潮是造成我国直接经济损失最严重的海洋灾害^[7];并且,自2000年以来,台风风暴潮的出现频率较之前半个世纪有显著的增加^[8]。

基于《中国海洋灾害公报》(1989–2018年)公布的数据,本文统计表明,我国东南沿海地区特别是福建省和广东省是受到台风风暴潮影响最大的地区(表1)。其中,厦门市位于福建省南部沿海,台湾海峡西岸,由厦门岛、鼓浪屿和位于大陆沿海的同安区、翔安区、集美区和海沧区等组成,面积约为1 699 km²,有234 km的海岸线,常住人口411万,是我国东南沿海重要的中心城市。而厦门岛南部和东南部地势低平,呈现朝向东南开口的汤匙形态。历史上5903号、9914号、1614号等台风都曾引发了厦门市尤其是厦门岛低洼地较为严重的海岸洪水^[9]。研究表明,气候变化背景下未来东亚地区热带气旋的路径将逐渐偏北,并且达到强度峰值时的纬度越来越高^[10];到2050年,厦门市将可能是全球沿海地区受到洪水影响最大的城市之一,届时,海岸洪水每年给厦门市造成的经济损失将达到全市GDP的0.22%^[11]。因此,气候变化背景下海平面上升、台风和风暴潮对我国东南沿海尤其是厦门地区的影响与灾害风险,以及应对策略是值得高度重视的科学与社会问题。

1980年以来,我国沿海海平面呈现明显的上升趋势,

表1 1989–2018年我国沿海各省因风暴潮造成损失情况
Table 1 The losses caused by storm surges in each coastal provinces of China from 1989 to 2018

省份	死亡及失踪人数	直接经济损失/亿元
辽宁	3	22.33
河北	2	41.92
天津	9	3.43
山东	170	102.86
江苏	53	103.19
上海	22	39.92
浙江	1 942	691.16
福建	1 291	983.97
广东	487	990.56
广西	160	94.83
海南	221	371.48

势,上升速率达到3.3 mm/a,高于同期全球平均速率^[12],并且自2012年以来沿海海平面不断达到新的高度。其中,1993–2017年,沿海海平面上升速率和幅度分别为3.9 mm/a、100 mm^[13],也高于同期全球平均的3.0~3.1 mm/a、80 mm^[14–15]。其中,1993–2012年,福建和广东沿海海平面上升速率甚至分别达到3~4 mm/a、(3.6±0.7) mm/a^[16–17]。厦门地区潮位站的观测结果显示,1993–2012年厦门沿海海平面以3.1 mm/a的速度上升^[16]。2001年之后影响我国东南沿海地区的台风、强台风频率增加^[18],风暴潮灾害的频次和强度也随之提高。由此可见,未来在海平面持续上升背景下,台风和风暴潮将引起极值水位的进一步上升,并导致其危险性(致灾强度和频率)的增加,从而对我国东南沿海地区特别是厦门市沿海地区带来更大影响和灾害风险。

然而,目前关于台风和风暴潮对沿海城市洪水灾害的影响研究主要侧重于单个致灾因子如风暴潮^[19]、海平面上升^[20]对海岸洪水产生的影响,而对于台风、风暴潮、天文潮、潮流和极端降水等多致灾因子对沿海地区极值水位的叠加影响研究还相对较少。其中有关多致灾因子对我国东南沿海的厦门等地区的综合影响研究尚未见专门报道,而这对于沿海地区低洼地的防灾减灾有重要的意义和迫切性。为此,本文选择了历史上对厦门沿海地区造成严重影响的9914号“丹恩”和1614号“莫兰蒂”台风事件,分析了这两次台风影响期间的风暴增水、天文潮位、潮流场和降水过程,以及大气环流形势的变化,评估了海平面上升、风暴潮增水、天文潮和降水等多致灾因子对厦门沿海地区极值水位的叠加影响,预估了不同气候情景下未来海平面的变化和台风等极端事件对厦门沿海地区极值水位危险性的影响,以期为我国东南沿海地区应对气候和减灾防灾提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 资料

2.1.1 大气数据

本文选用了9914号“丹恩”和1614号“莫兰蒂”两个台风案例,其中,台风过程的最大风速、逐时降水站点数据源用中国气象局(CMA)厦门基本站(24.48°N, 118.07°E)数据资料(<http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0012.0001.html>),时间覆盖范围为1951年1月至2016年12月。台风路径资料源用中国气象局的热带气旋最佳路径数据集(CMA-BST)(http://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_zlhq.html),时间覆盖范围为1949–2018年。台风的大气环境背景场数据

源用欧洲中期数值预报中心 ERA-5 全球逐小时再分析格点资料,地面 10 m 风场以及海平面气压场(<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>)的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间覆盖范围为 1979 年 1 月至 2016 年 12 月。

2.1.2 海洋数据

本文以厦门海洋环境监测站 (24.44°N , 118.08°E , 简称厦门验潮站)潮位数据代表厦门沿海的潮位特征。潮位资料来自厦门海洋环境监测站的逐时观测资料,以及夏威夷大学海平面中心(UHSLC)的厦门验潮站逐时潮位数据资料,时间覆盖范围为 1954–1999 年 (<http://uhslc.soest.hawaii.edu/>)。海洋环境背景场数据选用欧洲中期数值预报中心的 ERA-5 全球逐小时再分析格点资料(分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$)中的波浪方向及有效波高数据。未来海平面高度数据选取国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的模式结果,主要为 CMCC-CM、CNRM-CM5、MIROC-ESM 等 29 个模式中 2030–2100 年的模拟试验数据结果,并采用多年加权平均获得未来海平面上升预估值(可能变化范围)^[21]。

2.2 方法

本文应用了数值模拟方法、水文概率统计模型和 Kendall 相关系数统计方法等。具体细节如下。

2.2.1 潮流场模拟

平面二维潮流基本方程组包括连续方程和动量方程如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} - fv + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{v}{t} + u \frac{v}{x} + v \frac{v}{\partial y} + g \frac{h}{y} + fu + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = 0, \quad (3)$$

式中, h 表示水位; H 表示水深; u 、 v 分别表示 x 、 y 方向的流速分量; f 为科氏力系数; C 表示谢才系数; t 表示时间; g 为重力加速度。

初始条件为

$$u(x, y)|_{t=0} = u_0(x, y), \quad (4)$$

$$v(x, y)|_{t=0} = v_0(x, y), \quad (5)$$

$$h(x, y)|_{t=0} = h_0(x, y). \quad (6)$$

具体的计算参数和条件如下所述:

(1) 边界条件: 岸边界法向量取 0, 水边界取自于全球近海潮波模型 TPOX 7.2。

(2) 计算区域: $24.35^\circ \sim 24.68^\circ\text{N}$, $117.96^\circ \sim 118.47^\circ\text{E}$ 范围的海域。

(3) 岸线数据: 采用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的全球自洽分层高分辨率地理数据库(GSH-HG v2.3.7)。

(4) 水深地形数据: 取自 NOAA 的 ETOPO1 (1-Minute Gridded Global Relief Data Collection) 全球地形起伏模型,空间分辨率为 $1'$,选取范围为 $24.3^\circ \sim 24.7^\circ\text{N}$, $117.8^\circ \sim 118.5^\circ\text{E}$ 。

(5) 风力强迫项数值: 取自欧洲中期数值预报中心 ERA-5 全球逐小时再分析格点资料(分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)中的地面 10 m 风场。

2.2.2 水文概率统计模型

本文采用了水文工程学常用的 Pearson-III 型分布曲线(简称 P-III 型分布)进行水文频率适线分析^[22],据此计算分析厦门在不同重现期下台风造成的极值水位高度。首先,根据历史的风暴潮事件数据计算经验频率点,再根据矩法得到 P-III 型分布曲线的参数估值 \bar{x} 、 C_v 、 C_s , 取得的最佳拟合曲线。

其中选用的数学期望公式为: $P = \frac{m}{n+1} \times 100\%$, 其中 P 为经验频率, m 为将实测水文数据值 x 从大到小的顺序排列后 x_m 的序号, n 为该系列数据的总项数, α 、 β 、 a_0 分别表示 P-III 型分布的形状、尺度和位置参数^[23]。P-III 型分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (x_0 \leq x < \infty). \quad (7)$$

另外水文上通常使用“重现期”来代替“频率”: $T = \frac{1}{P}$ (T 为重现周期,单位:年, P 为事件发生频率)

2.2.3 肯德尔(Kendall)相关系数

肯德尔相关系数是一个用来测量两个随机变量相关性的统计值。假设两个随机变量分别为 X 、 Y (也可以看做两个集合), 它们的元素个数均为 N , X 与 Y 中的对应元素组成一个元素对集合 XY 。肯德尔相关系数 τ 的取值范围在 -1 到 1 之间, 当 τ 为 1 时, 表示两个随机变量拥有一致的等级相关性; 当 τ 为 -1 时, 表示两个随机变量拥有完全相反的等级相关性; 当 τ 为 0 时, 表示两个随机变量是相互独立的。肯德尔相关系数表达式为

$$\tau = \frac{C - D}{\frac{1}{2}N(N-1)}. \quad (8)$$

本文中, X 为极值水位高度, Y 为对应时刻的降水量, C 表示集合 XY 中拥有一致性的元素对数(两个元素为一对); D 表示集合 XY 中拥有不一致性的元素对数^[24]。

2.2.4 未来极值水位计算方法

未来极值水位高度(ESL)主要通过海平面上升(SLR)的情况和未来风暴潮事件的水位(ST)叠加估

算而得^[25]

$$ESL = SLR + ST. \quad (9)$$

3 结果与分析

3.1 9914号“丹恩”和1614号“莫兰蒂”台风概况

1999年10月2日,9914号台风“丹恩”在菲律宾以东洋面生成,经菲律宾进入南海后,突然北折,正面袭击我国闽南地区,并于北京时间1999年10月9日

上午10时许,在漳州镇海角附近登陆,登陆时中心最大风力35 m/s,中心最低气压970 hPa(图1)。10月9日中午12时,台风再次登陆厦门市海沧区。期间,恰逢农历九月初一的天文大潮,台风风暴增水叠加天文大潮,引起潮位异常增高。与此同时,台风带来的短时强降水,造成厦门沿海地区严重洪水和内涝。此次台风造成厦门地区多处堤防损毁、12人死亡、4人失踪、727人受伤,直接经济损失约18.6亿元。

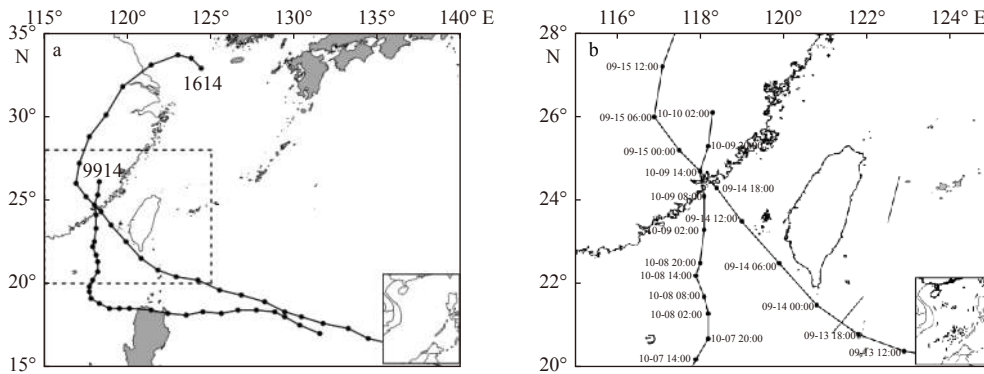


图1 9914号、1614号台风全局路径(a)及其局部路径(b)

Fig. 1 The whole tracks (a) and the partial tracks (b) of typhoon No.9914 and No.1614

2016年9月10日14时1614号台风“莫兰蒂”在菲律宾以东洋面生成后,向西北方向行进,穿过巴士海峡后,直接扑向厦门,成为自“5903”号台风后,登陆闽南的最强台风(图1)。2016年9月15日凌晨3时许在厦门市翔安区登陆,登陆时中心最大风力52 m/s,中心最低气压935 hPa。此次台风造成厦门地区因灾死亡1人、重伤2人,直接经济损失约102亿元^[26]。

3.2 9914号台风期间海洋和大气过程对极值水位的影响

3.2.1 9914号台风期间天文潮位、风暴增水和降水过程对极值水位的影响

图2为1999年10月9日01时至20时,9914号台风过程的降水、风暴增水和厦门验潮站潮位的变化。由图2可见,在9日(农历九月初一)9914号台风登陆前(03时至12时),厦门验潮站的潮位逐步升高,到12时达到天文大潮最高潮位585 cm,并出现了实测潮位为732 cm的极值水位(厦门验潮站警戒水位700 cm);期间,风暴增水基本保持着1.2 m以上的增水幅度,最大增水达1.71 m,尤其是从08时至11时,风暴增水基本处于最高值。台风过程累计降水量达208 mm,每小时降水量逐渐增大,至12时达到过程降水量的峰值(29 mm/h),即每小时最大降水量。与此同时,厦门验潮站水位达到峰值,即出现

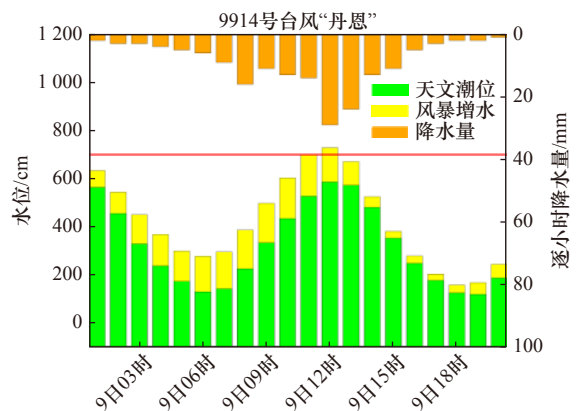


图2 9914号台风“丹恩”期间厦门海域的天文潮位、风暴增水和降水过程

Fig. 2 The astronomical tide, storm surge and precipitation in coastal waters of Xiamen during the period of No.9914 Typhoon Dan

732 cm的极值水位。即天文大潮位、风暴增水和降水量最大同时出现(所谓“三碰头”),三者的共同作用造成了异常偏高的超警戒极值水位的出现,从而导致厦门岛沿岸低洼地发生严重的洪涝灾害。有研究表明,当强风暴潮与强降水相遇时,出现洪水的概率比二者单独出现要高得多^[27-28]。

3.2.2 9914号台风期间大气环流对极值水位的影响

图3为9914号台风“丹恩”登陆前后的大气背景

场变化。该图是采用经实测数据修正的ERA-5逐时海平面风场和气压场再分析资料,以及CMA台风最佳路径集资料绘制的。研究表明,风力和强降水均是风暴潮增水的重要因素。随着台风向岸抵近,大量海水涌入厦门海域的同时,由于风场和低气压的作用,并且到台风登陆时(12时),降水量达到最大,为29 mm/h,厦门海域内出现持续且较强的风暴增水。由图3可见,本次台风在登陆前后的移动速度偏慢。观测资料显示,厦门气象基本站在9日07时至当天15时出现持续的12级(32.7 m/s)大风。台风登陆前的持续大风时间基本与厦门验潮站的大幅度增水时间重叠。例如,在台风登陆前的一段时间(9日06时前)(图3a,图3b),福建沿海以偏北大风为主。在台风即将登陆前的时段内(9日10–12时),厦门海域的风向逐步转为东南风、南风 and 西南风向,大气的低层风场有利于驱动外海的海水向厦门海域方向输运堆积;同时,该海域处于台风低压区,这又有利于台风对海水的抽吸作用。值得注意的是,台风强度在临近登陆前还出现

了一次增强,最大风速达到40 m/s,中心最低气压为965 hPa。简言之,台风登陆前(12时之前),在持续向岸强风的驱动和台风中心低压的抽吸作用下,外海海水不断向厦门海域内堆积,造成厦门验潮站从9日凌晨至中午观测到较长时间的显著增水现象。而台风登陆后(12时之后),随着台风移动方向和位置的变化,台风不断北移、风力减弱以及风向转变,并且低压中心的气压逐步升高,因此,有利于风暴增水的条件随之消失。

3.2.3 9914号台风期间潮流和波浪对极值水位的影响

图4为模拟的9914号台风过程中厦门岛周边海域(简称厦门海域)4个典型时刻的表层潮流场变化。本文关于厦门海域潮流场的潮位和潮流模拟验证与文献[29]验证材料与方法一致,故省略。由图可见,在涨潮阶段,潮波由开边界传入,被金门岛阻断分为南北两支。北支经厦门岛北部进入同安湾海域。南支达到厦门岛南部海域时,又被分为两支,一支沿

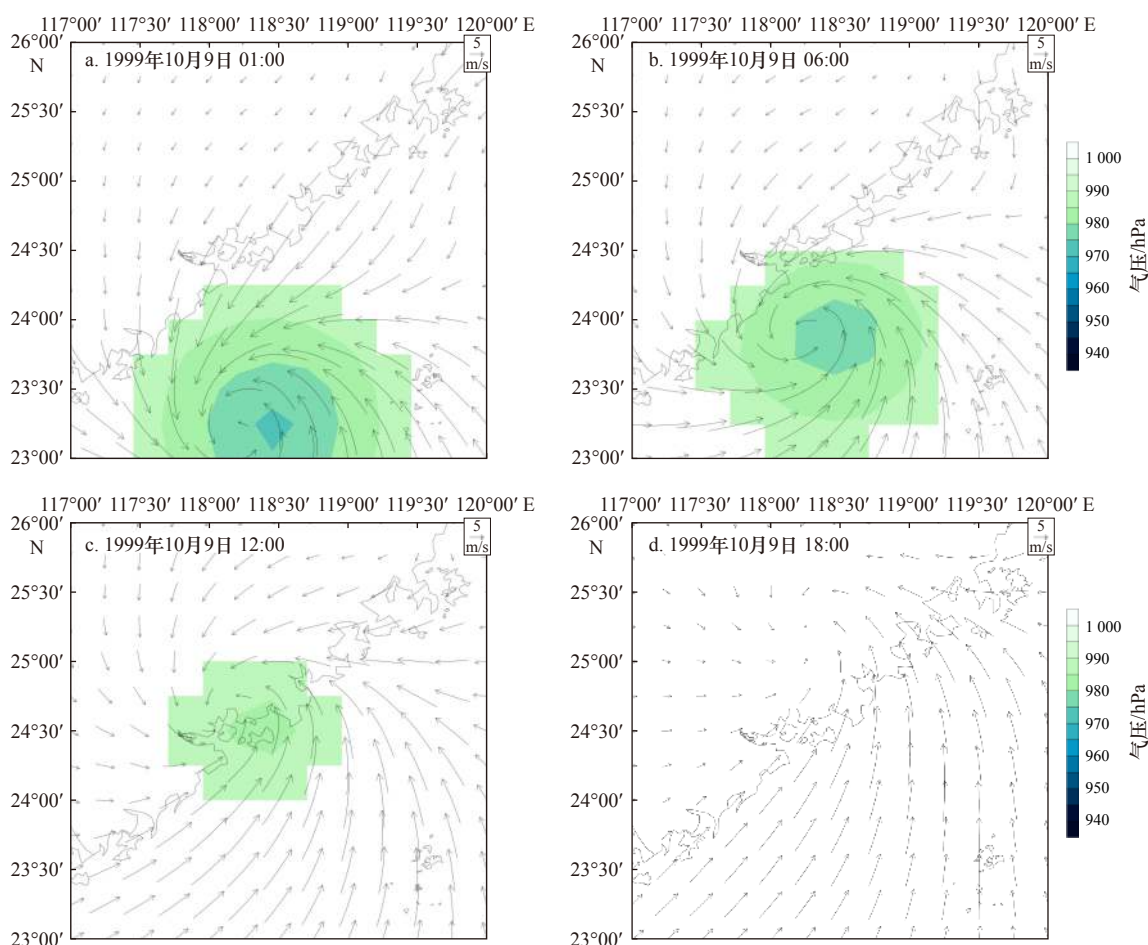


图3 1999年10月9日9914号台风“丹恩”登陆前后厦门海域海平面气压和地面10 m风场的变化(资料源自ERA-5)

Fig. 3 The change of sea level pressure and the 10 m wind field in coastal waters of Xiamen during the landing time of No.9914 Typhoon

Dan on October 9, 1999 (data from ERA-5)

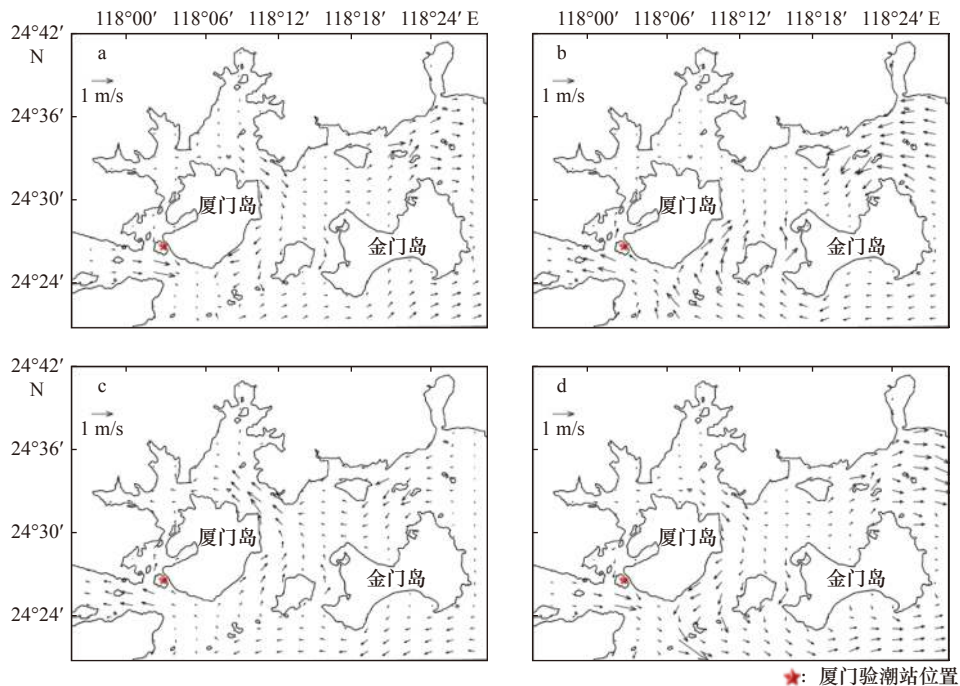


图4 1999年10月9日9914号台风“丹恩”期间厦门岛周边海域的表层潮流场

Fig. 4 Surface flow field in coastal waters of Xiamen during the period of No.9914 Typhoon Dan on October 9, 1999

a. 低潮(06时); b. 涨急(10时); c. 高潮(12时); d. 落急(15时)

a. Low tide (06:00); b. flood peak (10:00); c. high tide (12:00); d. ebb peak (15:00)

岸线北上,而另一支则进入九龙江河口区。

9914号台风登陆前(06–10时),厦门海域正处于从低平潮向高平潮过渡、落潮流向涨潮流转变过程中。至10时,由外海向厦门海域的涨潮流达到涨急阶段,外海的海水大量涌入厦门海域内;至12时,涨潮流流速趋于最小,潮位转为高平潮,来自外海的海水在厦门海域内堆积,使得潮位达到最高位。台风期间,向岸的持续风场有利于外海表层水向厦门海域输送,增强了涨潮流对厦门岛东南部沿岸形成超警戒极值水位的作用。在12时的高平潮之后,潮流场逐步转为落潮流,至15时,潮流达到落急阶段;随后,台风北移、风向改变,气压场削弱,潮位迅速回落。

图5为9914号台风期间厦门附近海域的平均波浪方向和有效波高的分布。厦门海域的波浪方向与地面风向出现了同步的变化。台风登陆前(06–11时),在向岸大风的驱动下,厦门海域掀起了巨浪,06时波浪由外海向厦门海域传播(图5b),至12时台风中心附近海域的有效波高达到了4m以上(图5c)。

台风大风、暴雨峰值与天文高潮相遇,厦门验潮站增水的幅度处于高位,出现风(风暴增水)、雨(暴雨)和潮(天文高潮)最大“三碰头”的情景。在三者叠加的作用下,厦门验潮站实测潮位达到过程峰值,厦门沿海出现了40年一遇的超警戒极值水位。13时

后,台风登陆后减弱并北上,海水和潮波逐渐转为沿岸线方向传播,降水强度骤减,潮水退去,水位回落。

台风期间,1999年10月9日11–12时,除了上述“三碰头”的重要影响之外,向岸的强风、急流和波浪也同时发挥了显著的作用。调查表明,1999年10月9日,在台风正面的袭击下,恰遇天文大潮,伴随狂风和暴雨,风暴潮挟卷着大量海水,巨浪冲击厦门南部尤其是东南部海岸并越过堤岸,造成了长达1160m护岸的损毁和沿岸街道的淹没,沙滩冲刷剧烈,岸线明显后退,防护林木折毁严重^[30]。

综上所述,9914号台风期间,厦门沿海地区发生的洪涝灾害,是海平面上升背景下风(向岸强风)、雨(强降水)、浪(巨浪)、潮(高潮位)、流(急流)等多致灾因子共同作用的结果。

3.3 1614号台风期间海洋和大气过程对极值水位的影响

图6为2016年9月14日18时至9月15日13时,1614号台风过程的降水、风暴增水和厦门验潮站潮位的变化。在1614号台风登陆前(14日18–23时),厦门验潮站潮位不断升高,至23时达到最高潮位,但期间的增水基本相同;15日02时风暴增水开始加强,台风于03时登陆,风暴增水在05时达到最大值。1614号台风过程的明显降水始于14日22时,并逐步

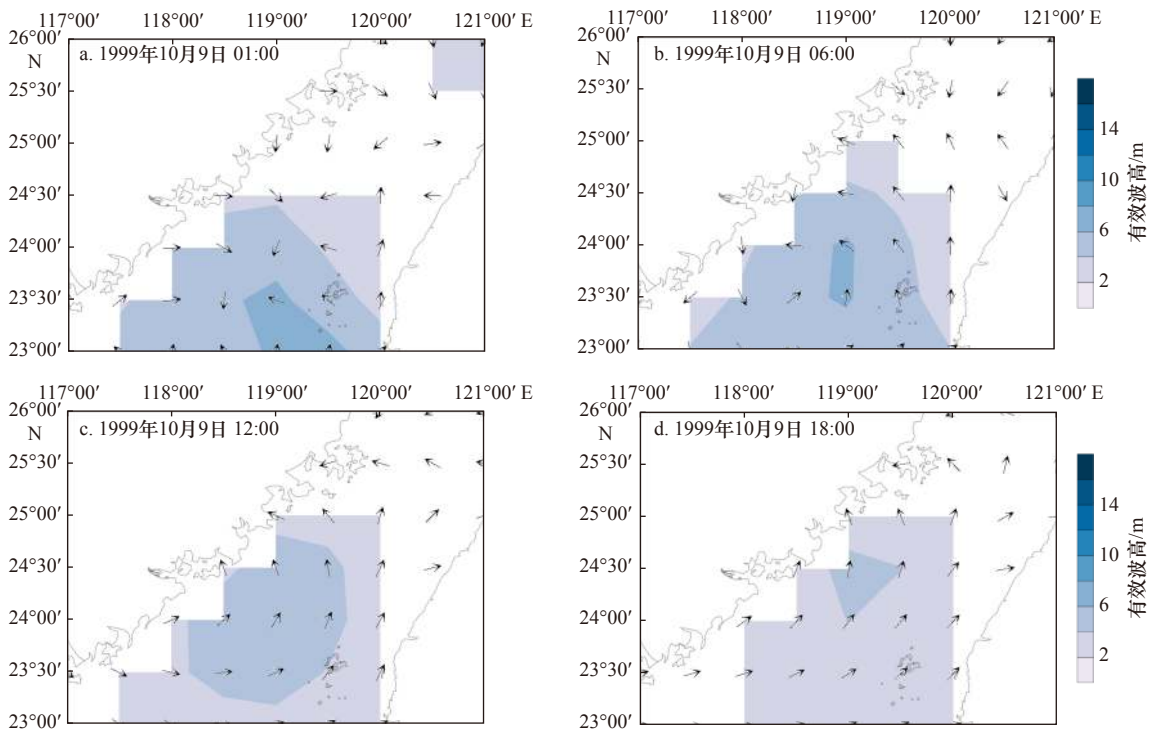


图 5 1999 年 10 月 9 日 9914 号台风“丹恩”期间厦门附近海域平均波浪方向和有效波高(资料来源 ERA-5)

Fig. 5 Wave direction and significant wave height in coastal waters of Xiamen during the period of No.9914 Typhoon Dan on October 10, 1999 (data from ERA-5)

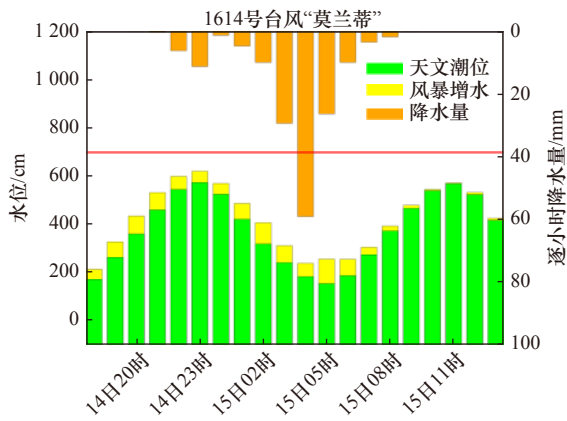


图 6 1614 号台风“莫兰蒂”影响期间厦门海域天文潮位、风暴增水和降水过程

Fig. 6 The astronomical tide, storm surge and precipitation in coastal waters of Xiamen during the period of No.1614 Typhoon Meranti

增大, 台风登陆后 3 h(03-05 时)的每小时降水量达到最强阶段, 在 04 时达到每小时最大降水量(58.9 mm)。

对比 1614 号和 9914 号台风期间的潮位、风暴增水和降水过程, 可以发现有以下较明显的差异。一是 1614 号台风过程的强降水时间短, 降水强度大。1614 号台风的降水主要集中在台风登陆后的 03-05 时, 该时段厦门地区降水量激增, 累计降水量将近

120 mm。二是此次台风过程虽然也出现了明显的增水, 但风暴增水的强度相对较小, 且由于此次台风过程不处于天文大潮期, 因此台风期间厦门验潮站并未出现超警戒的极值水位。值得注意的是, 在台风登陆后 2 h, 厦门海域处于天文低潮期。前人的研究认为在落潮时段, 天文-风暴潮耦合非线性项产生的是负增水效果^[31]。但是, 此时却有相反的现象, 台风登陆后 1 h(04 时)出现台风过程的最大增水值, 1 h 后(05 时)风暴增水峰值出现。由此看来, 强降水也是本次台风期间出现风暴最大增水的重要因素之一。

本文进一步计算分析了近 20 年来影响厦门的风暴潮增水事件以及对应的降水数据的 Kendall 相关系数。结果表明, Kendall 系数 τ 值为 0.15。这表明, 在厦门海域的风暴潮增水事件中, 降水与风暴潮增水存在一定程度的正相关关系。结合本文分析的两个台风事件的具体降水、增水过程以及历史数据统计分析, 可以推测强降水和风暴潮的叠加也是造成增水量突然增加的重要因素。

图 7 为 1614 号台风“莫兰蒂”登陆前后厦门附近海域海平面气压和风场的变化。相对于 9914 号台风“丹恩”而言, 1614 号台风“莫兰蒂”有着更大的影响范围、更大的强度, 对海水水体有更强的驱动力和抽吸

作用。在14日20时,厦门海域进入了台风的10级风圈,海平面气压低于950 hPa,台风最大风力超过了50 m/s。在台风登陆的前两小时,相关海域风场情况与9914号台风的情况几乎一致。厦门附近海域由原先偏北大风为主,逐渐向东南风向转变。在向岸强风以及台风抽吸作用下,验潮站已有50 cm以上幅度的增水。而在风暴增水达到峰值的05时前后,风场和气压场的配置并未出现明显变化。09时过后,台风北移深入内陆,台风的风力明显减弱,低压中心填塞。

另外,值得注意的是,1614号台风“莫兰蒂”登陆前后虽未引起厦门沿海出现超警戒极值水位,但却造成厦门地区空前的森林和城市行道树的大量损毁^[32-33]。

图8为1614号台风期间厦门附近海域的平均波浪方向和有效波高的分布。在1614号台风的影响下,厦门附近海域的海洋环境与风场也有着较为一致的变化关系。1614号台风过程的潮流场与9914号台风过程的情况基本一致,但是在此次过程的台风登陆时刻,厦门海域的天文潮过程处于落潮阶段,因

此,并未出现超高潮位的情况。由于此次台风的强度空前,近岸出现了较强的增水,厦门验潮站实测的最大风暴增水幅度达到1 m。15日03时台风登陆前后,在大风的驱动下,巨浪袭击岸线,厦门附近海域有效波高都在3 m左右。在出现波浪越堤效应的同时,叠加有超强台风带来的短时强降水,这是造成此处沿岸低洼地淹没的主要原因。

3.4 RCP4.5、RCP8.5情景下厦门验潮站极值水位和重现期预估

图9为在温室气体中等和高排放(RCP4.5、RCP8.5)情景下厦门验潮站极值水位和重现期(相对于1954-1999年)的变化。未来随着气候的持续变暖,全球海平面将进一步上升,许多地区沿海地区极值水位危险性将明显的增加^[2-3]。为了预估未来厦门沿海地区极值水位危险性的变化,本文应用了1954-1997年间厦门历史验潮站的观测数据,以及RCP4.5和RCP8.5情景下厦门海域海平面变化的预估值^[21],通过水文概率模型P-III型线进行适线分析,获得了年极值水位的频

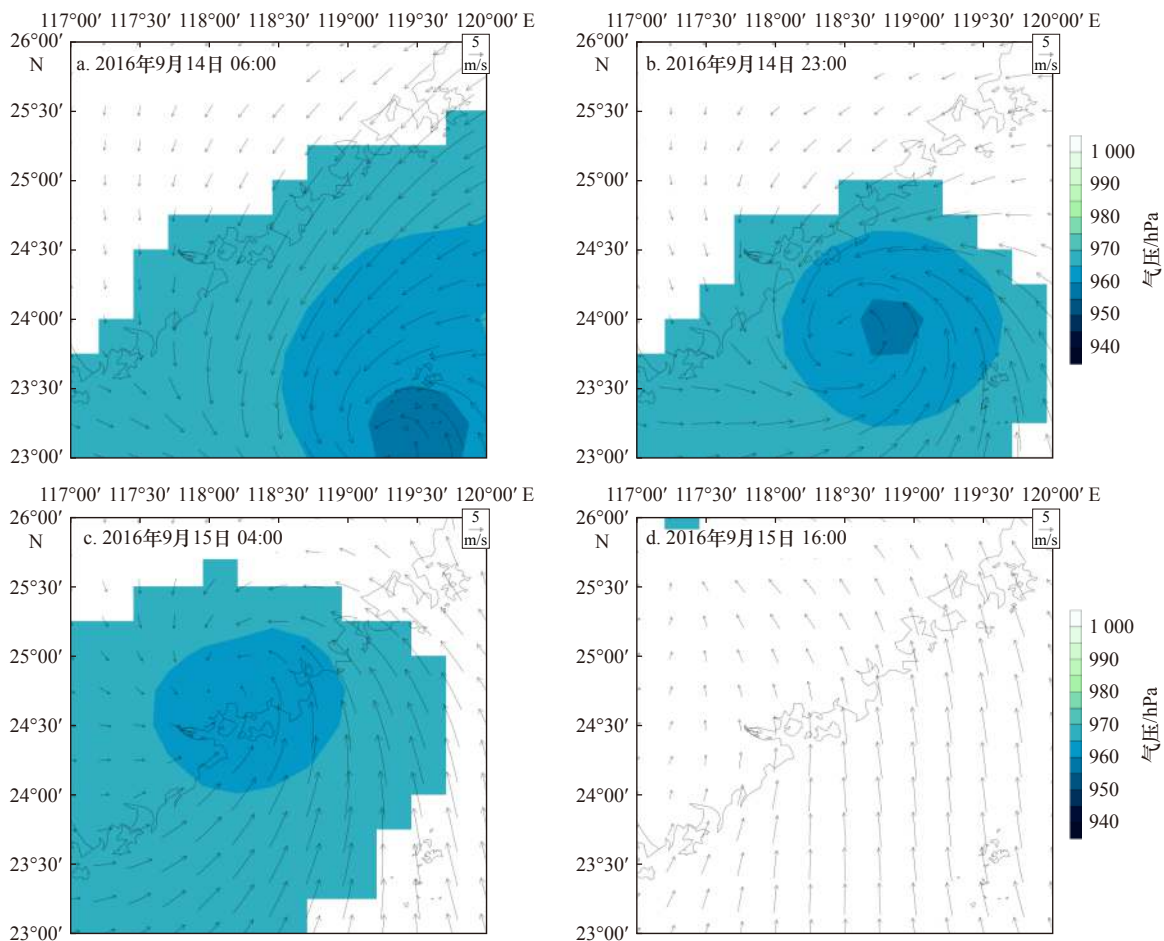


图7 2016年9月14-15日1614号台风“莫兰蒂”登陆前后厦门附近海域海平面气压和10 m风场的变化(资料源自ERA-5)

Fig. 7 The change of sea level pressure and the 10 m wind field in coastal waters of Xiamen during the landing time of No.1614 Typhoon Meranti from September 14, 2016 to September 15, 2016 (data from ERA-5)

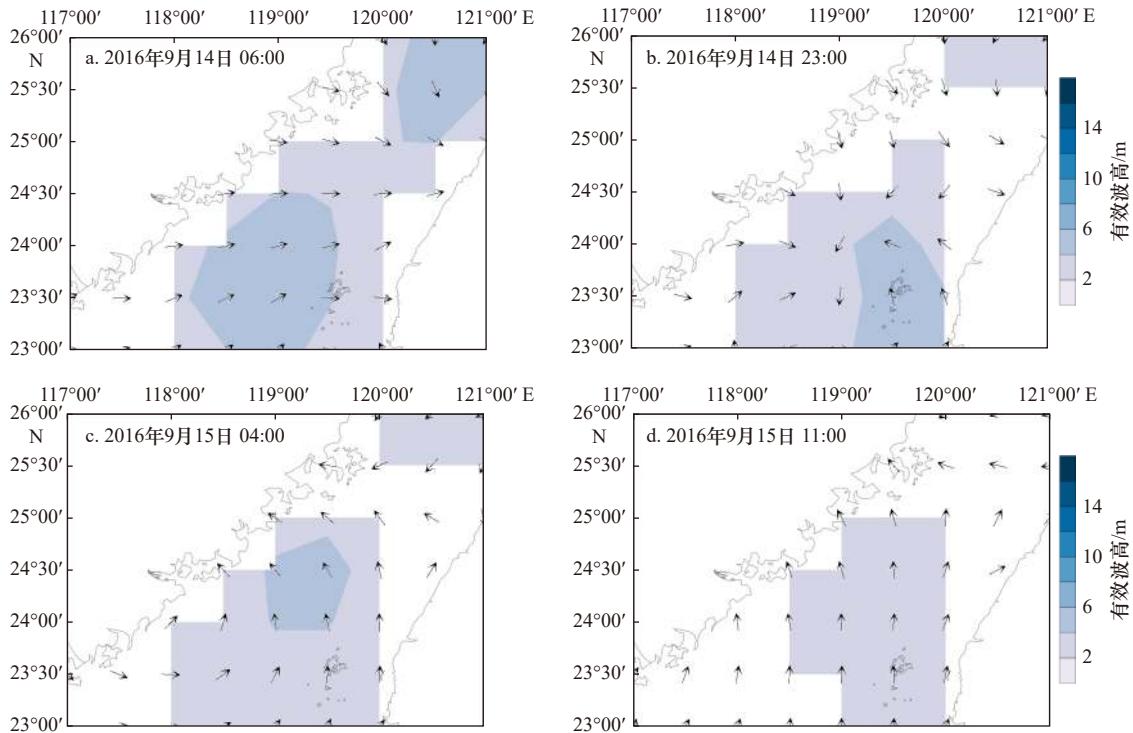


图 8 2016 年 9 月 14-15 日 1614 号台风“莫兰蒂”期间厦门岛周边海域平均波浪方向和有效波高(资料源自 ERA-5)
 Fig. 8 Wave direction and significant wave height in coastal waters of Xiamen during the period of No.1614 Typhoon Meranti from September 14, 2016 to September 15, 2016 (data from ERA-5)

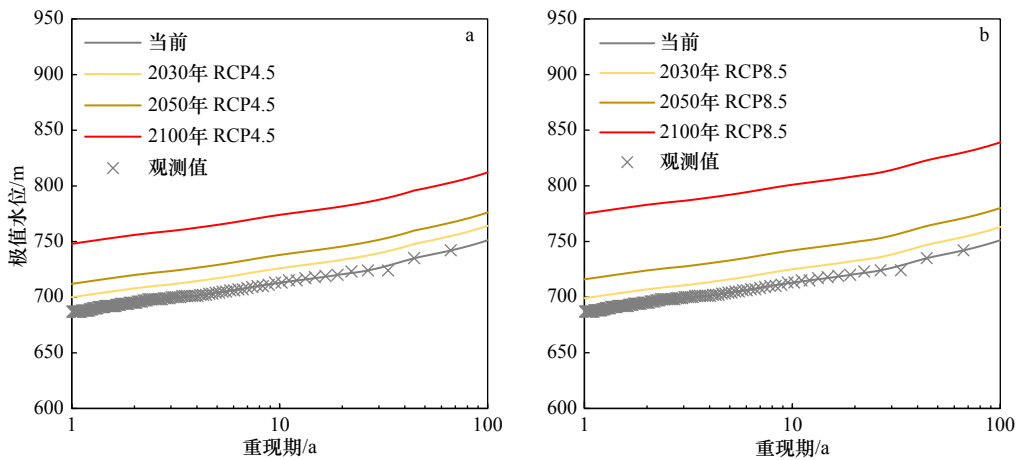


图 9 在 RCP4.5(a) 和 RCP8.5(b) 情景下未来厦门验潮站的极值水位事件和重现期(相对于 1954-1999 年平均海平面)的变化
 Fig. 9 The relation between expected extreme sea level events and return period at Xiamen tidal gauge station, references to 1954-1999 mean sea level and future conditions for RCP 4.5 (a) and RCP 8.5 (b) scenarios

率曲线(图 9)。其中,极值水位的高度与其重现期呈对数线性关系。

基于历史观测数据的概率曲线分析表明,在叠加不同情景下未来厦门沿海海平面变化的预估值(取中值)后,由图 9(不同颜色实线)可以看出,在 RCP4.5 情景下,9914 号台风风暴潮引起厦门沿海地区发生 40 年一遇的极值水位(732 cm)事件,到 2030 年,732 cm 水位的出现频率将提高到 18 年一遇,在 2050 年达

6 年一遇,而到 2100 年,将成为低于 1 年一遇的事件。而在 RCP8.5 的情景下,同期的频率比 RCP4.5 情景更高,但差距不是很大。

表 2 和表 3 为不同气候(RCP4.5、RCP8.5)情景下当前厦门验潮站 50 年一遇和 100 年一遇的极值水位和重现期(相对于 1954-1999 年)的变化。由表 2 可见,当前 50 年一遇的极值水位为 737 cm,在 RCP4.5 情景下,到 2030 年,50 年一遇的极值水位将变为 750 cm;

表2 不同气候(RCP4.5、RCP8.5)情景下厦门验潮站50年一遇和100年一遇的极值水位的变化(相对于1954–1999年)

Table 2 1-in-50-year and 1-in-100-year extreme sea level events at Xiamen tidal gauge station, referenced to 1954–1999 for RCP (4.5, 8.5) scenarios

气候情景	时间	重现期/a	对应极值水位高度/cm
	当前	50	737
		100	751
RCP4.5	2030年	50	750
		100	764
	2050年	50	762
		100	776
2100年	50	798	
	100	812	
RCP8.5	2030年	50	751
		100	765
	2050年	50	765
		100	779
	2100年	50	822
		100	836

表3 不同气候(RCP4.5、RCP8.5)情景下厦门验潮站当前50年一遇和100年一遇极值水位的重现期的变化(相对于1954–1999年)

Table 3 The return period of recent 1-in-50-year and 1-in-100-year extreme sea level events at Xiamen tidal gauge station, referenced to 1954–1999 for RCP (4.5,8.5) scenarios

气候情景	当前重现期/a	时间	相同高度未来重现期/a
RCP4.5	50	2030年	26
		2050年	10
	100	2100年	<1
		2030年	55
RCP8.5	50	2050年	30
		2100年	2
	100	2030年	25
		2050年	8
	100	2100年	<1
		2030年	53
		2050年	25
		2100年	<1

到2050年将变为762 cm;到2100年将变为798 cm(取海平面变化预估值的中值)。在RCP8.5情景下,到2030年,当前50年一遇的极值水位高度将变为751 cm;到2050年将变为765 cm;到2100年将变为822 cm。

另外,值得注意的是,当前厦门验潮站100年一遇极值水位在RCP4.5情景下,相对于1954–1999年平均海平面,到2030年将变为55年一遇;至2050年,将变为30年一遇;到2100年,将成为2年一遇。而在RCP8.5情景下,到2030年,将变为53年一遇;至2050年,将变为25年一遇;至2100年,将低于1年一遇。由此可见,未来厦门地区极值水位的危险性将大幅上升。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于历史上9914号、1614号两次台风过程的观测和再分析数据,本文分析了台风登陆厦门地区前后,厦门海域的海洋和大气环境的变化,包括天文潮位、风暴增水和降水、海平面气压和 wind 等变化,影响厦门海域极值水位的各种因素和过程,以及不同气候情景下未来厦门海域极值水位和重现期的变化,得到以下几点结论:

(1)在1999年10月9日9914号台风“丹恩”登陆前的数小时内,厦门附近海域持续有向岸12级大风(32.7 m/s),最大风速达到40 m/s,中心最低气压为965 hPa,厦门验潮站持续出现1.2 m的风暴增水;至台风登陆时(12时),每小时降水量达到最大值(29 mm),天文大潮达到最高潮位585 cm,厦门验潮站出现732 cm的极值水位,超过了700 cm的警戒水位。

(2)9914号台风影响期间,在持续向岸强风和台风中心低压的驱动、抽吸以及涨潮流的作用下,厦门附近外海海域的海水不断向厦门海域内输运堆积,强风、低压和涨潮流对风暴增水起到了正面的驱动作用。天文大潮最高潮位、风暴最大增水和最大降水量三者的同时出现与共同作用造成了异常偏高极值水位(732 cm)的出现。台风正面袭击厦门地区时,恰遇天文大潮,风(向岸强风)、雨(暴雨)、浪(巨浪)、潮(高潮位)、流(急流)造成的风暴潮是厦门沿海地区发生人员伤亡、护岸损毁、街道淹没,以及大量经济损失等严重灾情的重要原因。

(3)在不同气候(RCP4.5、RCP8.5)情景下,到21世纪中叶和末期,当前厦门验潮站50年和100年一遇极值水位将变得很频繁,其危险性将显著上升。例如,在RCP4.5情景下,到2050年和2100年,当前百年一遇的极值水位将变为30年一遇和2年一

遇;在 RCP8.5 情景下,到 2050 年和 2100 年,当前百年一遇的极值水位将变为 25 年一遇和低于 1 年一遇。

(4)在不同气候(RCP4.5、RCP8.5)情景下,未来全球和我国沿海海平面将持续上升,强台风将趋多,这将抬高极值水位的基础水位^[3],因此,我国沿海极值水位将有显著增高的趋势,极值水位的重现期将缩短,但具体的变化将有待我们进一步深入预估。可以预计的是,我国东南沿海包括厦门地区如果仅维持现有的防洪排涝标准和基础设施,海岸洪涝灾害风险将极可能显著增加。因此,为降低未来的沿海地区洪涝灾害风险,应加强研究并采取充分的适应气候变化措施。

4.2 讨论

Emanuel^[34]模拟研究表明,到 21 世纪末,在登陆前迅速增强的热带气旋可能将会大幅增加。Kossin^[35]

的研究发现,在全球平均温度上升 0.5℃,全球热带气旋的移动速度减缓约 10%,尤其是在西北太平洋地区,减幅达到了 21%。这表明未来热带气旋(台风)登陆期间的风暴增水和降水可能比现在的预估更高。本文利用了验潮站的历史观测资料和未来极值水位重现期的计算方法,分析的未来海平面变化情景下极值水位和重现期的变化,在一定程度上反映了不同气候情景下未来极值水位事件危险性(强度和重现期)的变化,但尚未更充分考虑未来强热带气旋(强台风)变化情况,因此,还有待将此情况一并纳入预估分析。

致谢:衷心感谢王慧研究员和王彦明博士对本文工作的大力支持和帮助。

参考文献:

- [1] Rhein M, Rintoul S R, Aoki S, et al. Observations: Ocean[M]//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014: 255–316.
- [2] Oppenheimer M, Glavovic B, Hinkel J, et al. Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities[R/OL]//Pörtner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, et al. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. [2019–09–24]. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/>.
- [3] 蔡榕硕,谭红建.海平面加速上升对低海拔岛屿、沿海地区及社会的影响和风险[J].气候变化研究进展,2020,16(2):163–171. Cai Rongshuo, Tan Hongjian. Impacts and risks of accelerating sea level rise on low lying islands, coasts and communities[J]. Climate Change Research, 2020, 16(2): 163–171.
- [4] Hu Pan, Zhang Qiang, Shi Peijun, et al. Flood-induced mortality across the globe: spatiotemporal pattern and influencing factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 171–182.
- [5] Beven II J L, Avila L A, Blake E S, et al. Atlantic hurricane season of 2005[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(3): 1109–1173.
- [6] 于福江,董剑希,叶琳,等.中国风暴潮灾害史料集1949–2009[M].北京:海洋出版社,2015. Yu Fujiang, Dong Jianxi, Ye Lin, et al. Collection of Storm Surge Disasters Historical Data in China 1949–2009[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.
- [7] 自然资源部.1989年–2018年中国海洋灾害公报[EB/OL]. [2019–09–24]. <http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgg/zghyzhgb/> Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 1989–2018 Chinese marine disaster bulletin[EB/OL]. [2019–09–24]. <http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgg/zghyzhgb/>
- [8] Fang Jiayi, Liu Wei, Yang Saini, et al. Spatial-temporal changes of coastal and marine disasters risks and impacts in Mainland China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 139: 125–140.
- [9] 李夏火,陈美娜,蓝虹,等.9914号台风风暴潮、巨浪特点分析及其预报[J].海洋预报,2000,17(2):25–33. Li Xiahuo, Chen Meina, Lan Hong, et al. The analysis and forecast of storm surges and mountainous waves caused by Typhoon 9914[J]. *Marine Forecasts*, 2000, 17(2): 25–33.
- [10] Kossin J P, Emanuel K A, Camargo S J. Past and projected changes in western North Pacific tropical cyclone exposure[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(16): 5725–5739.
- [11] Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, et al. Future flood losses in major coastal cities[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 802–806.
- [12] 自然资源部.2018年中国海平面公报[EB/OL]. [2019–04–28]. http://gi.mnr.gov.cn/201905/t20190510_2411195.html. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2019 report on China's sea level[EB/OL]. [2019–04–28]. http://gi.mnr.gov.cn/201905/t20190510_2411195.html.
- [13] 自然资源部.2019年中国海平面公报[EB/OL]. [2020–04–30]. http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510978.html. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2019 report on China's sea level[EB/OL]. [2020–04–30]. http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510978.html.
- [14] Hartfield G, Blunden J, Arndt D S. State of the climate in 2017[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(8): S1–S310.
- [15] Dieng H B, Cazenave A, Meyssignac B, et al. New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach[J]. *Geo-*

- physical Research Letters, 2017, 44(8): 3744–3751.
- [16] 袁方超, 张文舟, 杨金湘, 等. 福建近海海平面变化研究[J]. 应用海洋学学报, 2016, 35(1): 23–35.
Yuan Fangchao, Zhang Wenzhou, Yang Jinxiang, et al. Study on sea level variability in off shore Fujian[J]. Journal of Applied Oceanography, 2016, 35(1): 23–35.
- [17] 陈特固, 黄博津, 汤超莲, 等. 广东省海平面变化的过去和未来[J]. 广东气象, 2013, 35(2): 8–13.
Chen Tegu, Huang Bojin, Tang Chaolian, et al. The past and future of sea level variations in Guangdong Province[J]. Guangdong Meteorology, 2013, 35(2): 8–13.
- [18] 潘玉萍, 张晓强, 赵曼. 近六十年东南沿海地区热带气旋的周期特征分析及气象保障对策研究[C]//第28届中国气象学会年会. 厦门: 中国气象学会, 2011.
Pan Yuping, Zhang Xiaoqiang, Zhao Man. Southeast coastal area for nearly 60 years cycle analysis of the characteristics of tropical cyclones and weather protection countermeasures[C]// Proceedings of the 28th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Xiamen: China Meteorological Society, 2011.
- [19] 殷克东, 孙文娟. 风暴潮灾害经济损失评估指标体系研究[J]. 中国渔业经济, 2011, 29(3): 87–90.
Yin Kedong, Sun Wenjuan. Research on the index system of the storm surge disaster economic loss assessment[J]. Chinese Fisheries Economics, 2011, 29(3): 87–90.
- [20] 丁骏, 江海东, 应岳. 舟山市沿海海平面上升预测和淹没分析[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2013, 12(4): 373–378.
Ding Jun, Jiang Haidong, Ying Yue. Sea level rise prediction and submerging analysis of Zhoushan coastal area[J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Sciences Edition), 2013, 12(4): 373–378.
- [21] Kopp R E, Horton R M, Little C M, et al. Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites[J]. Earth's Future, 2014, 2(8): 383–406.
- [22] 米伟亚. Excel在水文皮尔逊Ⅲ型分布多样本参数估计中的应用研究[J]. 农业与技术, 2005, 25(5): 93–95, 112.
Mi Weiya. Study on the application of excel to Pearson type III distribution multi-samples parameter estimation in hydrology[J]. Agriculture & Technology, 2005, 25(5): 93–95, 112.
- [23] 喻国良, 李艳红, 庞红犁, 等. 海岸工程水文学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2009: 68–79.
Yu Guoliang, Li Yanhong, Pang Hongli, et al. Hydrology of Coastal Engineering[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2009: 68–79.
- [24] Kendall M G. A new measure of rank correlation[J]. Biometrika, 1938, 30(1/2): 81–93.
- [25] Xu Lilai, He Yuanrong, Huang Wei, et al. A multi-dimensional integrated approach to assess flood risks on a coastal city, induced by sea-level rise and storm tides[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(1): 014001.
- [26] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2017)[M]. 北京: 气象出版社, 2018.
China Meteorological Administration. Yearbook of Meteorological Disasters in China (2017)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2018.
- [27] Wahl T, Jain S, Bender J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(12): 1093–1097.
- [28] 王蓉, 姚小娟, 肖瑜璋, 等. 1208号台风“韦森特”特征分析[J]. 海洋预报, 2013, 30(6): 13–20.
Wang Rong, Yao Xiaojuan, Xiao Yuzhang, et al. Analysis of the characteristic of typhoon “Vicente” (1208)[J]. Marine Forecasts, 2013, 30(6): 13–20.
- [29] 林翩然, 温生辉, 汤军健. 厦门海域二维潮流数值计算[J]. 应用海洋学学报, 2008, 27(4): 526–532.
Lin Pianran, Wen Shenghui, Tang Junjian. Numerical simulation of two-dimensional tidal current filed in Xiamen waters[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2008, 27(4): 526–532.
- [30] 杨顺良, 欧寿铭. 9914号台风对厦门岛东南部岸滩的环境效应[J]. 台湾海峡, 2001, 20(1): 115–122.
Yang Shunliang, Ou Shouming. Environmental impact southeastern coast and beach of Xiamen Island during typhoon No.9914[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2001, 20(1): 115–122.
- [31] 张延廷, 王以娇. 渤海风暴潮与天文潮耦合作用的数值模拟[J]. 海洋学报, 1990, 12(4): 426–431.
Zhang Yanting, Wang Yijiao. Coupled numerical simulation on wave and storm surge in Bohai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1990, 12(4): 426–431.
- [32] 林双毅, 周锦业, 秦一芳, 等. 莫兰蒂台风对厦门市主要道路绿化树种的影响[J]. 中国园林, 2018, 34(5): 83–87.
Lin Shuangyi, Zhou Jinye, Qin Yifang, et al. The influence of typhoon Meranti on the greening tree species for urban road in Xiamen[J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34(5): 83–87.
- [33] Wang Meiya, Xu Hanqiu. Remote sensing-based assessment of vegetation damage by a strong typhoon (Meranti) in Xiamen Island, China[J]. Natural Hazards, 2018, 93(3): 1231–1249.
- [34] Emanuel K. Will global warming make hurricane forecasting more difficult?[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(3): 495–501.
- [35] Kossin J P. A global slowdown of tropical-cyclone translation speed[J]. Nature, 2018, 558(7708): 104–107.

Impacts of sea level rise, strong typhoon and storm surge on extreme sea level in coastal waters of Xiamen and hazards estimation

Xu Weihong¹, Cai Rongshuo¹

(1. *Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China*)

Abstract: Sea level rise, strong typhoon and storm surge have increasingly serious impacts on coastal flood disasters in the southeastern China in the context of climate change. To address the climate change and estimate the hazard of extreme sea level in the future, based on the multiple data of oceanographic and atmospheric observation and methods of mathematical statistics, the impact of historical strong typhoon No.9914 (Dan) and No.1614 (Meranti) on the extreme sea level in coastal waters of Xiamen and estimates the changes and return of extreme sea level at scenarios of future sea level rise under RCP4.5 and RCP8.5 was analyzed in this paper. The results show that: (1) astronomical tide, storm surges and heavy precipitation induced the extreme sea level event (732 cm) during the period of strong typhoon No.9914; (2) the combined impacts of multiple hazards such as wind (ashore gale), rainfall (heavy precipitation), waves (giant waves), tides (high tide) and current (torrents) is an important cause of serious disasters in coastland of Xiamen; (3) under the medium and high greenhouse gas emission scenarios (RCP4.5 and RCP8.5), by 2050 and 2100, recent 1-in-100-year extreme sea level event will become 1-in-30-year (1-in-2-year) and 1-in-25-year (1-in-less than 1-year). It shows that the hazards of extreme sea level on coastland of Xiamen will increase significantly, and high adaptation measures in Xiamen should be taken to reduce the risk on coastal flood hazards in the future.

Key words: sea level rise; typhoon; storm surge; extreme sea level; hazards