

# 热带气旋影响福建沿海风暴潮特征分析

夏丽花<sup>1</sup>, 邬惠明<sup>2</sup>, 刘铭<sup>1</sup>, 冷典颂<sup>1</sup>, 李婷婷<sup>1</sup>

1. 福建省气象台, 福建 福州 350001;

2. 国家海洋局东海分局, 上海 200137

**摘要:** 文中利用 1990~2008 年气象要素资料、热带气旋路径资料和福建沿海 9 个验潮站资料, 从热带气旋登陆、路径以及福建沿海地理特征等方面, 分析研究福建沿海热带气旋风暴潮特征。结果表明: 每年平均约有 5.58 个热带气旋登陆或影响福建, 风暴潮发生率为 81.1%, 福建沿海风暴潮主要出现在 5~10 月, 风暴潮过程最多的是 8~9 月, 平均每年有 4.53 次风暴潮过程。正面登陆福建的热带气旋和登陆浙南的影响热带气旋, 最容易引发福建省沿海热带气旋风暴潮过程, 且风暴增水最强, 最大增水可达 200cm 以上, 其次是登陆广东的影响热带气旋。由于闽江口的喇叭口地形作用, 位于闽江入海处的闽江口岸段在全省 4 个岸段中风暴增水最强。

**关键词:** 风暴潮; 热带气旋; 福建沿海; 地形作用

中图分类号: P732.33 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2014)03-0040-06

## Characteristic analysis of storm surges along Fujian coast associated with tropical cyclones

XIA Li-hua<sup>1</sup>, WU Hui-ming<sup>2</sup>, LIU Ming<sup>1</sup>, LENG Dian-song<sup>1</sup>, LI Ting-ting<sup>1</sup>

1. Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001, China;

2. East China Sea Branch of State Oceanic Administration, Shanghai 200137, China

**Abstract:** Based on the data from 1990 to 2008, which includes meteorological elements, tropical cyclone tracks and data at nine tidal stations along the Fujian coast, the characteristics of storm surges caused by tropical cyclones along the Fujian coast were analyzed. The aspect of tropical cyclone tracks and geographical features of the Fujian coast were considered in the study. The results show that there were on average 5.58 tropical cyclones that make landfall or affect Fujian province every year. The incidence of storm surge was 81.1%. The storm surges along the Fujian coast mainly occurred from May to October, and most frequently in August and September. On average, 4.53 storm surges occurred along the Fujian coast every year. The tropical cyclones that entered Fujian province or made landfall in southern Zhejiang province initiated storm surges most easily. In these situations, the storm surge would be the strongest and the maximum water increment would exceed 200 cm. The tropical cyclones that landed in Guangdong province could also cause storm surges along the Fujian coast. Due to the trumpet-shaped topography, the Minjiang Estuary segment, which is located at the mouth of the Minjiang River, became the place where the storm surges were the strongest.

**Key words:** storm surge; tropical cyclone; Fujian coast; topographic effect

在西太平洋沿岸国家中, 我国是受热带气旋袭击最多的国家, 风暴潮灾害也居西太平洋沿岸国家之首(王喜年, 1993)。热带气旋引起的风暴增水给沿

海地区人们的生产生活造成严重的影响。福建省位于中国东南部, 东临太平洋, 南临南海, 是受热带气旋影响最频繁的省份之一, 热带气旋引发的风暴

收稿日期: 2013-05-25; 修订日期: 2013-10-12。殷波编辑

基金项目: 中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2011-023); 福建省气象局开放式基金项目(2013K06); 福建省科技计划社会发展重点项目(2012Y0008)

作者简介: 夏丽花(1962~), 女, 福建省福州市人, 学士, 主要从事天气预报和应用气象研究。E-mail: xcity2004@126.com

潮是福建省主要的海洋灾害之一。已有许多学者对福建沿海风暴潮做了分析研究, 张文舟等(2004)分析了一些西北行台风正面登陆我国东南沿海时, 福建沿海风暴潮的特征及其可能原因; 谢燕双等(2009)建立了福建沿岸台风风暴潮数值模型, 并对 31 个历史台风引起的福建沿岸风暴潮进行了后报模拟; 王培涛等(2010)建立了福建沿海区域的精细化台风风暴潮数值预报模式, 并利用该模式对影响台湾海峡及福建沿海的 8 次台风风暴潮个例进行了模拟; 王莹辉和谭亚(2008)对 7~8 月 5 个正面登陆福建和 1 个登陆浙江的风暴潮进行了实测潮位调和分析和潮位预报, 分析结果表明, 台风大风区的范围越大, 台风引起的增水越大; 台风强度越大或台风与站点距离越近, 台风引起的增水越大; 位于台风右侧的站点比左侧的站点增水大; 夏丽花等(2009)分析了 0709 号台风“圣帕”风暴增水特征, 结果表明, 风暴增水最大峰值出现在台风位于台湾海峡时, 次峰值分别出现在台风登陆台湾岛前 1~2h 和台风登陆福建沿海前 4h; 陈美娜和林选跃(2010)对比分析了 0513 号和 0519 号这 2 个台风的风暴潮差异巨大的原因, 阐述了福建海域风暴潮预报须考虑的因子及如何利用实测资料修正台风预报误差带来的风暴潮预报误差; 吴元锋(2011)分析了 0908 号台风“莫拉克”的风暴增水特征, 过程最大增水基本都出现在台风离岛前后的 2~3h 内。对热带气旋风暴潮的个例分析表明, 不同热带气旋引发的风暴潮特征存在明显差异, 风暴潮的产生不仅与热带气旋本身有关, 还与沿海的地理条件(李未等, 2007)密切相关。地形对基本气流和台风流场的影响(Bender, et al, 1987), 不仅改变台风的强度和路径, 同时对沿岸风暴潮增水也有明显影响。文中利用 1990~2008 年 19 年的资料, 从热带气旋移动路径、登陆地点以及福建沿海特殊的地理特征等方面入手, 分析总结福建沿海风暴潮活动特征, 增进对福建风暴潮的认识, 为提高福建沿海风暴潮的预报水平、为防灾减灾工作提供参考依据。

## 1 规定和资料处理

热带气旋风暴潮是指由热带气旋影响产生的、强烈大气扰动(强风和气压骤变)引起的海面异常升高现象。风暴增水是指受热带气旋影响, 实测潮位偏离天文潮(正常潮位)的部分。实测潮位采用国家海洋局验潮站的观测资料, 天文潮位采用国家海洋环境预报中心的天文潮计算程序计算结果, 风暴增

水采用通用的方法即用实测潮位减天文潮位得到。

所用资料是 1990~2008 年共 19 年福建沿海 9 个验潮站(即三沙、沙埕、梅花、白岩潭、瑯头、平潭、崇武、厦门、东山)实测潮位、天文潮位资料, 以及对应时段福建省 68 个气象站的气象要素资料和国家气象中心提供的热带气旋路径资料。

根据福建沿海行政区划和地理特征把福建沿海划分为 4 个岸段(如图 1 所示): 闽东岸段, 包括宁德市沿海, 代表站有三沙和沙埕; 闽江口岸段, 包括福州市中北部沿海, 代表站有梅花、白岩潭和瑯头; 闽中岸段, 包括福州市南部、莆田市和泉州市沿海, 代表站有平潭和崇武; 闽南岸段包括厦门市和漳州市沿海, 代表站有厦门和东山。

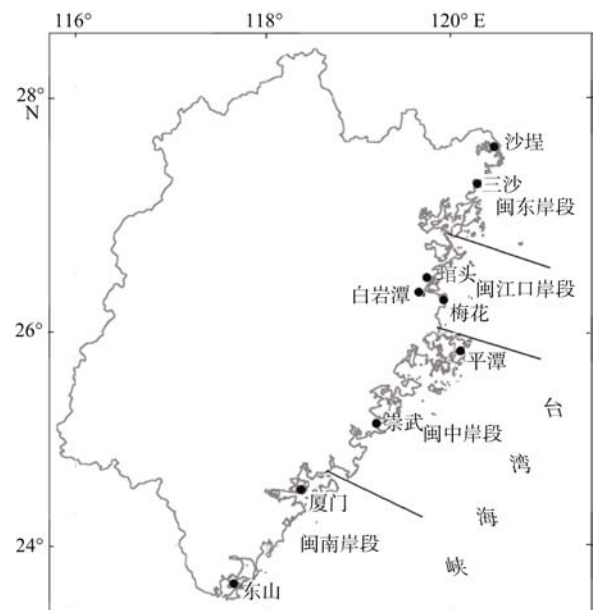


图 1 福建沿海四个岸段及代表性验潮站示意图分布

图中黑点表示各个验潮站所在的位置; 名称为站名

Fig. 1 Map showing the four coastal segments and the representative tidal stations along the Fujian coast

依据 GB/T17839-1999(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 1999)核定风暴潮警戒潮位增水资料, 把风暴增水( $H$ )划分为 5 个等级:  $H < 50\text{cm}$ ,  $50\text{cm} \leq H < 100\text{cm}$ ,  $100\text{cm} \leq H < 150\text{cm}$ ,  $150\text{cm} \leq H < 200\text{cm}$ ,  $H \geq 200\text{cm}$ 。每个岸段只要有一个代表站出现增水, 则认为该岸段有增水现象。

## 2 风暴潮特征

### 2.1 登陆或影响热带气旋概况

1) 登陆热带气旋: 中心风力达 8 级或以上的热带气旋, 中心进入福建;

2) 影响热带气旋: 当热带气旋进入 48 小时警报区[(15°N, 115°E)、(20°N, 125°E)、(25°N, 130°E)3 点连线的 15°N 以北和 130°E 以西区域], 出现下列情况之一者, 定为影响热带气旋;

a. 受热带气旋影响, 福建沿海至少有一站阵风 8 级;

b. 受热带气旋影响, 福建至少有一站日雨量 50mm。

统计分析热带气旋路径资料和气象要素资料, 1990~2008 年登陆或影响福建的热带气旋共有 106 个, 平均每年约有 5.58 个热带气旋影响或登陆福建, 其中年均有 1.53 个热带气旋登陆福建。各月分布情况(图 2)显示, 4~11 月都有热带气旋影响或登陆福建, 7~9 月是福建台风季, 是登陆或影响热带气旋最多的季节, 其中 8 月最多, 共有 30 个, 4 月最少, 只有 1 个。

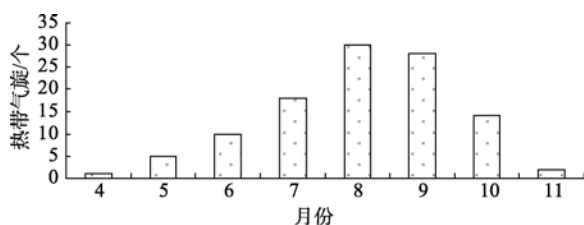


图 2 1990~2008 年登陆或影响福建热带气旋个数月分布图  
Fig. 2 Monthly distribution of the numbers of tropical cyclones that landed or affected the Fujian coast

## 2.2 风暴潮时空分布特征

在热带气旋影响过程中, 只要有一个验潮站风暴增水 50cm, 就认为该热带气旋引起了风暴潮, 计为一次风暴潮过程。统计登陆或影响福建的 106 个热带气旋, 共造成 86 次风暴潮过程, 即平均每年有 4.53 次风暴潮过程, 风暴潮发生率为 81.1%。

风暴潮过程的月际分布图(图 3)显示, 福建沿海风暴潮主要出现在 5~10 月, 8 月份风暴潮过程最多, 其次是 9 月份, 2 个月合计次数占总次数一半以上, 第三是 7 月份。7~9 月是福建台风季, 登陆或影响热带气旋最多, 因此风暴潮过程也多。5 月份最少, 闽

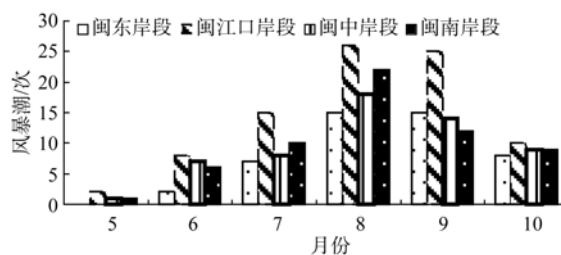


图 3 1990~2008 年福建沿海各岸段风暴潮过程月分布图  
Fig. 3 Monthly distribution of the storm surge processes occurred in each coastal segment along the Fujian coast

东岸段 5 月没有风暴潮过程。闽江口岸段风暴潮出现次数在每个月都居各岸段之首。11 月到次年 4 月福建沿海都没有热带气旋风暴潮过程, 因为 12 月到次年 3 月无热带气旋影响或登陆福建。4 月份只有 9902 号热带气旋在 1999 年 4 月 30 日影响福建, 强度弱, 没有引发风暴潮。11 月份影响热带气旋少, 强度弱, 没有出现大于 50cm 的风暴增水现象。

根据王喜年(2001)建立的计算登陆热带气旋引起最大增水的诺模图和表, 过程最大风暴增水值(SS):

$$SS = S_p \times F_m \times F_d$$

式中,  $S_p$  为最大风暴增水初估值(cm), 由热带气旋中心气压强度和热带气旋最大半径确定;  $F_m$  为矢量风暴运动订正因子, 由热带气旋移动速度和方向确定;  $F_d$  是根据验潮站海底地形查得的修正因子。由此可见, 热带气旋风暴潮增水不仅与热带气旋本身有关, 还与沿岸地形有关。因此, 在福建沿海受热带气旋影响时, 不同岸段的增水强度不同。

统计 86 次风暴潮过程中, 福建沿海 4 个岸段的风暴增水等级, 每次过程各岸段只取风暴增水最大等级进行统计, 结果如表 1 所示。闽江口岸段不仅出现风暴潮过程次数最多, 而且风暴增水强度最强, 风暴增水 200cm 的风暴潮过程有 8 次, 有 50% 的风暴潮过程增水幅度 100cm, 这与闽江口岸段特殊的地理特征有密切的关系。闽江口岸段的 3 个代表站(梅花、白岩潭、琯头)分布在闽江入海口处的喇叭口地形中(图 1), 该喇叭口南岸呈东西方向伸入

表 1 福建沿海各岸段风暴增水等级统计(单位: 次)

Tab. 1 The statistics of the grade of storm surge water increment in each coastal segment along the Fujian coast (units: times)

各岸段	50cm 增水<100cm	100cm 增水<150cm	150cm 增水<200cm	增水 200cm	合计
闽东岸段总计	34	7	0	2	43
闽江口岸段总计	42	27	15	8	85
闽中岸段总计	45	11	0	0	56
闽南岸段合计	38	19	0	0	57

台湾海峡，来自台湾海峡北部的偏北或东北风与海岸近似垂直相交，有利于海水向沿岸和喇叭口内部堆积，增强风暴增水。而梅花站正好位于该喇叭口南岸，因此，梅花站又是闽江口岸段风暴增水最强的验潮站。闽南岸段和闽中岸段风暴潮过程次数较多，但每次风暴增水幅度均 < 150cm。风暴潮最少的是闽东岸段，但有 2 次风暴增水 200cm，即 9219 号热带气旋和 0608 号热带气旋，登陆浙江时恰逢天文大期，造成闽东岸段特大风暴潮。统计各岸段的平均增水强度，闽江口岸段为 108.7cm、闽南岸段为 66.1cm、闽中岸段为 63.5cm、闽东岸段为 59.6cm。由此可见，闽江口岸段风暴增水强度最强，其次是闽南岸段，最弱的是闽东岸段。

2.3 不同路径热带气旋风暴增水特征

热带气旋风暴增水主要是由于热带气旋中心的低气压和周围的强风应力引起的。当热带气旋在太平洋或南海的深海区域时，热带气旋低气压和深层海水辐合形成的海面异状隆起，形成孤立波，并随着热带气旋的移动而传播。在孤立波形成的同时，也形成了一系列由热带气旋中心向四周传播的自由长波，自由波以长波速度(14~200m·s<sup>-1</sup>)向前传播，其传播速度远远领先于热带气旋移动速度(何洪钜, 1988)，所以当热带气旋离海岸还相当远的时候，就已经有由于长波引起的增水现象(Slørødal, et al, 1994)。

福建沿海常出现双峰型风暴增水曲线(邓兆青和袁方超, 2011)，即在热带气旋登陆台湾岛前，福建沿海就出现一个增水峰值，此时，风暴增水除了受热带气旋中心向四周传播的自由长波作用外，还与福建沿海地形特殊有关。当热带气旋位于台湾岛以东时，台湾海峡位于热带气旋西北侧，盛行东北风，强风作用将东海大量海水带到海峡，由于台湾海峡的“狭管效应”(图 4a)，使向岸平流增大，有利于福建沿海增水(李毅能 等, 2011)；当热带气旋进入台湾海峡时(图 4b)，大风区覆盖台湾海峡，热带气旋中心低气压和强风应力作用引起风暴增水，又出现另一个更强的峰值。

热带气旋路径和登陆地点不同，对福建的影响也不同。按照路径特征和登陆地点不同，将登陆或影响福建的 106 个热带气旋分为 4 大类：正面登陆福建，登陆浙南，登陆广东，不登陆(即不登陆转向或近海减弱消失)。文中分析了不同路径热带气旋影响时福建沿海风暴增水特征。

正面登陆福建省的热带气旋共有 29 个，并以登陆广东的影响热带气旋为最多，其次是不登陆的，最少是登陆浙南的(表 2)。106 个热带气旋中有 81.1% 引发了福建沿海风暴潮(即风暴增水 ≥ 50cm)，其中正面登陆福建沿海的登陆热带气旋和登陆浙南部的影响热带气旋，全部引发了福建省沿海风暴潮过程；

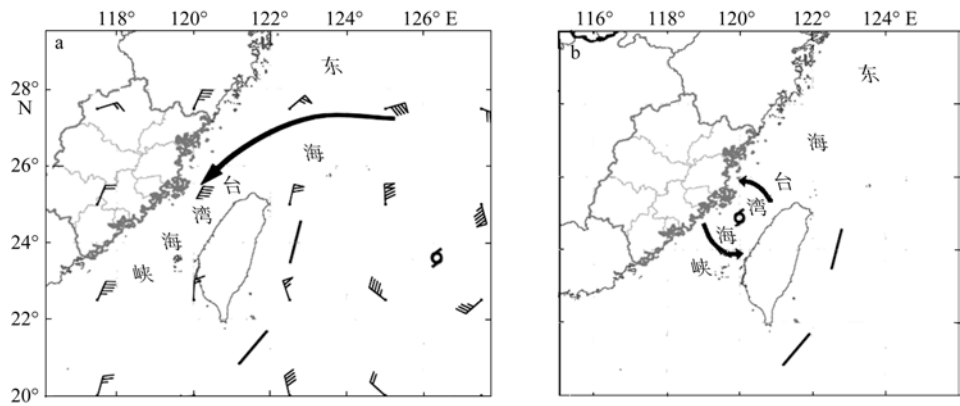


图 4 热带气旋位于台湾岛以东时(a)和热带气旋进入台湾海峡时(b)

图中 ○ 为热带气旋中心位置，风羽标志表示单点的风向风速，黑色箭头表示气流方向

Fig. 4 The case when the tropical cyclone was located to the east of Taiwan (a); The case when the tropical cyclone passed through the Taiwan Strait (b)

表 2 各类型热带气旋及其风暴潮个数统计

Tab. 2 The statistics of the numbers of tropical cyclone and storm surge of all types

路径	登陆福建	登陆浙南	登陆广东	不登陆	合计
热带气旋个数 $N$ /个	29	13	38	26	106
风暴潮个数 $n$ /个	29	13	28	16	86
$n/N$ / %	100.0	100.0	73.7	61.5	81.1

登陆广东的影响热带气旋, 福建沿海出现风暴潮的概率为 73.7%; 不登陆类的影响热带气旋, 福建沿海出现风暴潮的概率最小为 61.5%。各类路径热带气旋引起的风暴潮风暴增水等级分布图(图 5)显示, 正面登陆福建沿海的登陆热带气旋和登陆浙南、广东的影响热带气旋, 福建沿海风暴增水明显, 都出现了 200cm 的风暴增水过程, 其中正面登陆福建沿海和登陆浙南的热带气旋对福建沿海增水最明显, 其次是登陆广东的影响热带气旋, 不登陆的影响热带气旋福建沿海风暴增水最弱, 没有出现增水 150cm 的风暴潮过程。

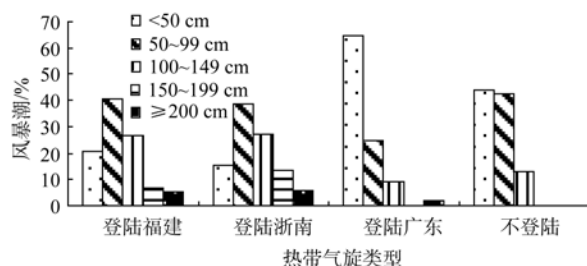


图 5 1990~2008 年不同类型热带气旋引起的风暴增水等级百分比

Fig. 5 The percentage of the grade of storm surge water increment which caused by various tropical cyclones

不同类型热带气旋影响时各岸段风暴增水等级分布见图 6。图 6a 显示, 闽东岸段风暴增水最强的是登陆浙南的影响热带气旋, 该类热带气旋影响闽东岸段出现 100cm 以上增水的概率大于其他各路径的热带气旋, 风暴增水 200cm 的风暴潮过程都是由该类型热带气旋引起的; 登陆浙南的热带气旋主要是西太平洋西行或西北行热带气旋, 当热带气旋向沿海靠近时, 沿海位于热带气旋西北侧的为东北气流, 东北气流引导东海水进入海峡时, 由于海域缩小, 有利于海水堆积, 闽东岸段增水加强。例如 0608 号热带气旋“桑美”, 强度强, 2006 年 8 月 9 日 18:00 加强为超强台风, 中心气压最低达到 915hPa, 中心风速最大  $60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (17 级), 9 日 22:08“桑美”距离沙埕约 10 个纬距时, 沙埕增水已经达到 206cm。其次, 正面登陆福建沿海的热带气旋都有可能出现 100cm 的风暴增水; 登陆广东和不登陆的影响热带气旋, 闽东岸段增水较弱, 没有出现 100cm 的风暴增水。

闽江口岸段是福建沿海风暴增水强度最强的岸段(图 6b)。正面登陆福建的登陆热带气旋和登陆浙南、广东的影响热带气旋都出现了 200cm 的风暴增水; 即使是福建沿海风暴增水最弱的不登陆类的热带气旋影响, 在该岸段也有出现 100cm 的风暴

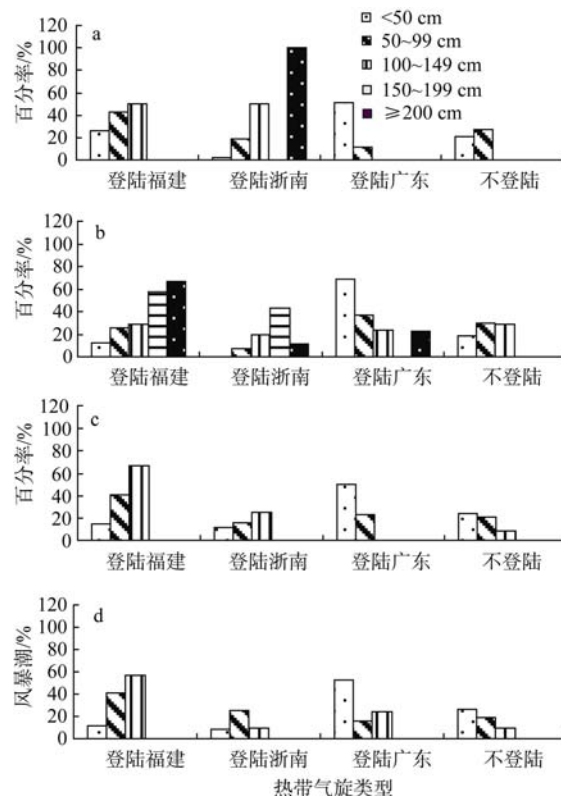


图 6 1990~2008 年不同类型热带气旋影响时福建沿海各岸段风暴增水等级百分比

a. 闽东岸段; b. 闽江口岸段; c. 闽中岸段; d. 闽南岸段

Fig. 6 The percentage of the grade of storm surge water increment caused by various tropical cyclones in each segment along the Fujian coast. (a) eastern Fujian segment; (b) Minjiang Estuary segment; (c) central Fujian segment; (d) southern Fujian segment

增水过程。闽中岸段风暴增水最强的是正面登陆福建的热带气旋(图 6c), 增水 100cm 的风暴过程有 66.7%是由正面登陆福建的热带气旋引起的, 25.0%是由登陆浙南的影响热带气旋引起的, 其余路径风暴增水较弱。4 类路径的热带气旋影响时, 闽南岸段都出现了 50~149cm 的风暴增水(图 6d), 其中风暴增水最强的是正面登陆福建的登陆热带气旋, 其次是登陆广东的影响热带气旋。

### 3 结论

根据登陆或影响热带气旋路径特征及福建沿海地理特征, 将热带气旋分为 4 类, 并将福建沿岸划分为 4 个岸段, 分析了福建沿海风暴潮特征:

1) 每年 4~11 月均有热带气旋登陆或影响福建, 年平均 5.58 个登陆或影响热带气旋, 其中正面登陆福建沿海的热带气旋有 1.53 个; 81.1%的登陆或影响热带气旋会引起福建沿海风暴潮过程(即风暴增水 50cm); 福建沿海风暴潮主要出现在 5~10 月, 风

风暴过程最多的是 8~9 月, 平均每年有 4.53 次风暴潮过程。

2) 正面登陆福建沿海的登陆热带气旋和登陆浙南的影响热带气旋, 最容易引发福建省沿海风暴潮过程, 而且风暴增水最强, 最大可以达到 200cm 以上; 其次是登陆广东的影响热带气旋, 再次是不登陆的影响热带气旋; 登陆广东的影响热带气旋闽江口岸段和闽南岸段风暴增水较强, 闽江口岸段风暴增水可达 200cm 以上。

3) 由于福建沿海特殊地形, 位于闽江入海口处的闽江口岸段是全省 4 个岸段中风暴增水最强的岸段, 正面登陆福建的热带气旋和登陆浙南、广东

的影响热带气旋, 该岸段最大风暴增水均可以达到 200cm 以上。闽中岸段和闽南岸段风暴增水都小于 150cm, 闽中岸段以正面登陆福建的热带气旋和登陆浙南的影响热带气旋风暴增水最明显, 闽南岸段以正面登陆福建的热带气旋和登陆广东的影响热带气旋风暴增水最明显。在 4 个岸段中闽东岸段风暴增水强度最弱, 但是, 有个别登陆浙南的影响热带气旋, 当登陆时适逢天文大潮, 也会造成闽东岸段最大增水超过 200cm。

4) 受福建沿海验潮站点不多及站点分布的影响, 分析结果是否具有普遍性还需进一步的分析研究检验。

## 参考文献

- 陈美娜, 林选跃. 2010. 0513 号和 0519 号台风风暴潮特征对比分析[J]. 海洋预报, 27(4): 13-19.
- 邓兆青, 袁方超. 2011. 0908 号台风“莫拉克”风暴潮影响分析[J]. 海洋预报, 28(1): 48-52.
- 何洪钜. 1988. 广东—海南沿海的台风风暴潮[J]. 热带海洋学报, 2: 37-44.
- 李未, 张长宽, 王如云. 2007. 基于无结构网格有限体积法的风暴潮数值预报模式[J]. 热带海洋学报, 26(2): 9-13.
- 李毅能, 彭世球, 舒业强, 等. 2011. 四维变分资料同化在风暴潮模拟中的平流作用分析[J]. 热带海洋学报, 30(5): 19-26.
- 王培涛, 于福江, 刘秋兴, 等. 2010. 福建沿海精细化台风风暴潮集合数值预报技术研究及应用[J]. 海洋预报, 27(5): 7-15.
- 王喜年. 1993. 全球海洋的风暴潮灾害概况[J]. 海洋预报, 10(1): 30-36.
- 王喜年. 2001. 风暴潮预报知识讲座[J]. 海洋预报, 18(4): 63-69.
- 王莹辉, 谭亚. 2008. 近 17 年福建沿海台风及风暴增水特性统计分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 36(3): 284-289.
- 吴元锋. 2011. 0908 号台风“莫拉克”特征及风暴增水分析[J]. 海洋预报, 28(4): 6-12.
- 夏丽花, 陈德花, 刘铭, 等. 2009. 台风“圣帕”登陆福建前后的风暴潮特征分析[J]. 海洋通报, 28(3): 10-15.
- 谢燕双, 商少平, 王代锋. 2009. 福建沿岸台风风暴潮数值实验[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 48(5): 714-718.
- 张文舟, 胡建宇, 商少平, 等. 2004. 福建沿海风暴潮特征的分析[J]. 海洋通报, 23(3): 12-19.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 1999. GB/T17839-1999 警戒潮位核定方法[S]. 北京: 中国标准出版社: 1-24.
- BENDER M A, TULEYA R E, KURIHARA Y. 1987. A numerical study of the effect of island terrain on tropical cyclones[J]. Monthly Weather Review, 115(1): 130-155.
- SLØRDAL L H, MARTINSEN E A, BLUMBERG A F. 1994. Modeling the response of an idealized coastal ocean to a traveling storm and to flow over bottom topography[J]. Journal of Physical Oceanography, 24(8): 1689-1705.