

福建沿海风暴潮特征的分析

张文舟^{1,3}, 胡建宇^{1,2,4}, 商少平^{1,2}, 陈美娜³, 余伟明⁴

(1. 厦门大学海洋学系、亚热带海洋研究所, 福建厦门 361005; 2. 厦门大学教育部海洋环境科学重点实验室, 福建厦门 361005; 3. 厦门海洋预报台, 福建 厦门 361002; 4. 日本东北大学理学部, 日本 仙台 980-8578)

摘 要: 通过普查 1960—2001 年正面登陆我国东南沿海的台风, 分析了福建沿海风暴潮的特征及其可能原因。台湾海峡特殊地形对福建沿海风暴潮的时空分布有明显影响, 登陆岸段不同, 台湾海峡对风暴潮的影响作用也不同, 导致福建沿海风暴潮出现明显不同的分布和变化特征。当台风位于台湾海峡时, 其大风区位置和范围不同, 会影响福建沿海各地风暴增水的幅度。台风横穿台湾海峡时, 易使福建沿海台风大风区中心岸段出现双增水峰现象, 第一个增水峰出现在台风离开台湾岛进入台湾海峡后, 第二个增水峰出现在台风登陆福建沿海前后。台风横穿台湾海峡有时会引起台湾海峡北部出现奇异增水现象, 风暴潮与天文潮之间的相互作用可能是其重要原因。奇异增水峰往往出现在天文潮低潮附近, 此时实际潮位并不高。

关键词: 风暴潮; 福建沿海; 台湾海峡

中图分类号: P731.23 文献标识码: A 文章编号: 1001-6392(2004)03-0012-08

福建省位于我国东南沿海, 台湾海峡的西岸, 其海岸线基本呈 NE—SW 向延伸。台湾岛和福建省内的山脉主要走向与台湾海峡大致平行。台湾海峡位于福建与台湾岛之间, 是连接东海和南海的主要通道, 也呈 NE—SW 走向, 长约 380 km, 平均宽约 190 km, 北部较窄, 南部较宽^[1], 狭管地形较为明显 (如图 1 所示)。

福建最主要的海洋灾害是风暴潮, 加上沿海地区人口密集, 经济繁荣, 受风暴潮的影响较为严重, 因此对福建沿海风暴潮特征进行研究, 为风暴潮预报提供参考, 对该沿海地区的风暴潮防灾减灾有重要意义。然而, 由于台湾海峡特殊的地理位置、复杂的地形, 给这方面的工作带来很大困难。以前福建沿海的风暴潮研究大多集中在单站风暴潮和台风个例风暴潮方面, 对分析福建沿海风暴潮特征有一定局限性。近 20 多年来, 风暴潮数值计算^[2,3] 对研究风暴潮时空变化有一定优势, 但对其能否真实反映某特殊地理区域 (如台湾海峡) 风暴潮时空变化特征, 缺乏足够的事实依据, 因此目前还很难用于实际风暴潮预报工作。

本文通过 1960—2001 年的历史台风 (含热带风暴和强热带风暴, 下同) 个例¹⁾, 分析福

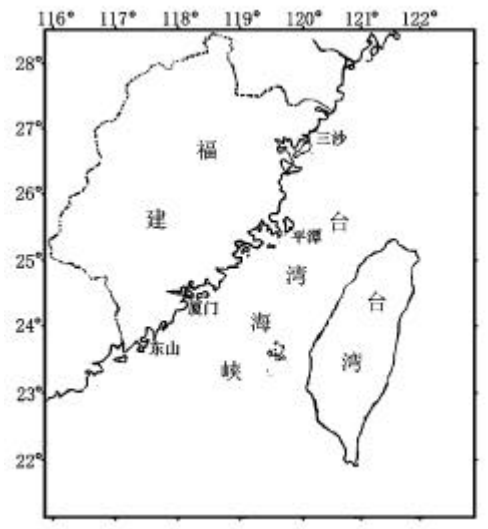


图 1 台湾海峡地理图

Fig.1 Geographical map of the Taiwan Straits

收稿日期: 20030306; 收修改稿日期: 20030615

基金项目: 国家教委《跨世纪优秀人才计划》基金、福建省重点科技项目 (98-Z-179) 和日本平和中岛财团资助

1) 上海台风研究所西北太平洋台风基本资料集 (1949-1980). 北京: 气象出版社, 1984; 中央气象台台风年鉴 (1981-1982); 国家气象局. 台风年鉴 (1983-1988). 北京: 气象出版社; 国家气象局. 热带气旋年鉴 (1989-2000). 北京: 气象出版社.

建沿海（即台湾海峡西岸）风暴潮的某些变化特征及其可能原因。为了充分反映福建沿海特殊地理位置风暴潮的特征，本文尽可能选择正面登陆（台风移动路径与岸线基本垂直）我国东南沿海的“典型”台风，尽量避免由于台风本身路径不同造成的影响。

天文潮采用国家海洋环境预报中心的天文潮计算程序计算，台风增水采用通用的方法即用实测潮位减天文潮位得到。

1 福建沿海风暴潮的时空分布

在理想开阔海域正面登陆的台风，在时间分布上，一般在登陆前后增水达到最大；在空间分布上，北半球一般台风右侧增水较大，最大大风半径附近增水最大，再往右逐渐减小；台风左侧增水较小，往左增水急剧减小，甚至出现负增水（即风暴减水）^[4-6]。

在我国东南沿海正面登陆的台风，由于登陆岸段不同引起福建沿海增水的情况各异，可分为如下 4 种类型讨论（各类型的台风路径如图 2 所示，台风增水曲线如图 3 所示）。

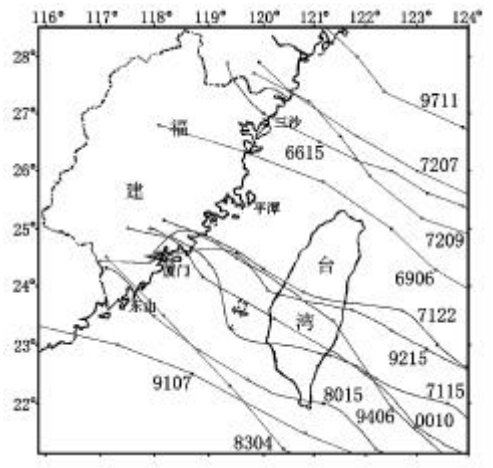


图 2 台风路径图

Fig.2 The tracks of Typhoons

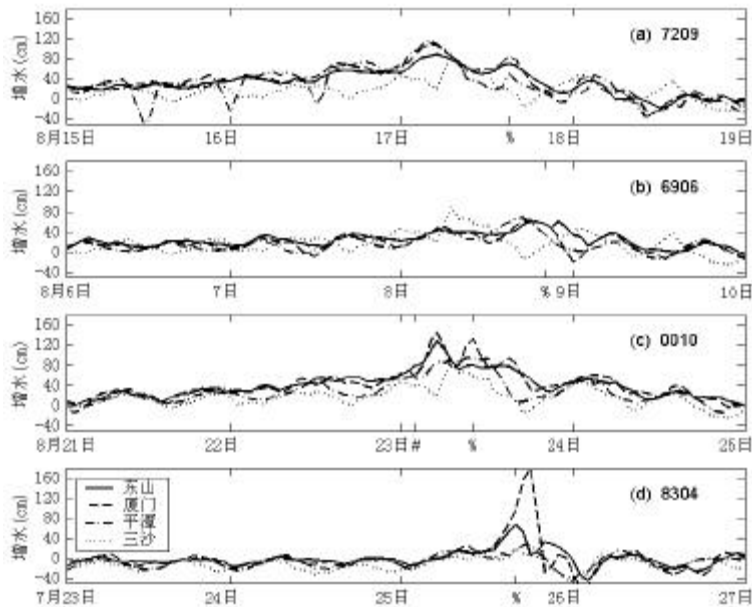


图 3 台风增水曲线图（“#”表示台风离开台湾岛的时间，“%”表示台风登陆福建的时间）

Fig.3 Curves of storm surges

第一种类型是经过台湾岛以北正面登陆福建东北部至浙江南部沿海的台风，如 7207 (Winnie)、7209 (Betty)、9711 (Winnie) 号台风。这类台风一般引起福建沿海增水较大（图 3a）。当台风位于台湾岛东北方或北方时，福建沿海增水达到最大，当台风接近沿海和登陆

时, 增水反而不大。这可能与风场变化有关, 台风位于台湾岛东北方或北方时, 其右前方为偏东北风, 将开阔外海大量海水带到海峡, 最有利于海峡增水; 台风接近沿海和登陆时, 其右前方主要在陆地上, 不利于福建沿海增水。

第二种类型是穿过或靠近台湾海峡北部, 在福建霞浦至福清一带正面登陆的台风, 如 6615 (Cora)、6906 (Betty) 号台风。这类台风引起海峡西岸最大增水出现在登陆前几小时至十几小时(图 3b)。台风登陆前台湾海峡北部及台湾岛以北海域主要吹东北东风、东北风和偏北风, 驱使海水进入海峡; 登陆以后风发生转向, 主要吹西南风、偏南风, 使进入海峡的海水明显减少。整个增水过程变化较缓, 主振不是很明显, 有较明显的周期性, 周期约为 12 h。各站最大增水由北向南略推迟出现, 增水幅度均不大(60 cm 左右), 北部增水比南部略大。

第三种类型是穿过台湾海峡中部, 在闽中、闽南登陆的台风, 如 9406 (Tim)、0010 (Bilis) 号台风。不管是在台风右边, 还是在左边, 福建沿海各站最大增水一般出现在台风离开台湾岛之后, 登陆福建之前, 如图 3c 所示。这与开阔海域的情况有所不同, 可见台湾海峡地形对福建沿海最大增水出现时间是有明显影响的。在这类台风影响下, 福建沿海各站最大增水出现一般南部比北部略早。在登陆福建前, 北部增水波动较明显, 其波动周期约为 12 h, 即半日周期。

第四种类型是穿过台湾海峡南部或台湾海峡以南在广东东部至福建漳浦一带正面登陆的台风, 如 8015 (Percy)、8304 (Wayne)、9107 (Amy) 号台风。福建沿海最大增水出现在台风登陆前后几小时(图 3d), 各地出现时间相差不大(一般相差不大于 3 h); 最大增水空间分布类似于开阔海域, 最大的增水出现于台风登陆点右侧台风最大风速半径附近位置, 往北逐渐减小。

对于第一、第二和第三种类型的台风, 台湾海峡北部增水都会出现周期约为 12 h 即半日周期的波动。文献[7]认为梅花、平潭等站风暴潮具有明显的潮振动周期可能是风暴潮与天文潮相互作用的结果, 但不排除含有潮汐预报误差。

2 台风大风区位置对台湾海峡西岸台风增水幅度的影响

台风位于台湾海峡时, 其大风范围大小、大风覆盖台湾海峡位置不同(如图 4), 导致台湾海峡西岸增水幅度也不同。

以 10 级大风范围来看, 若 10 级风区覆盖整个台湾海峡北部, 即台风 10 级大风范围足

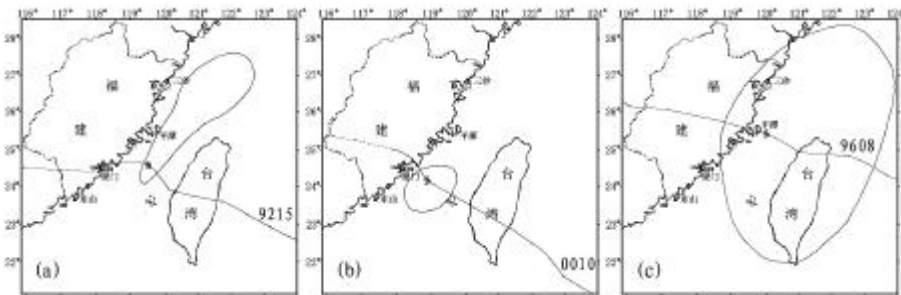


图 4 台风 10 级大风区分布图(图中闭合曲线表示台风在台风符号所示位置处台风的 10 级大风范围)

Fig.4 Distributions of the typhoon's wind belt with the wind scale greater than 10

够大或台风 10 级大风区主要位于台湾海峡北部，整个台湾海峡西岸最大增水一般都较小，如 9215 (Omar) 号台风，东山、厦门、平潭、三沙站最大增水仅有 60 cm 左右 (如表 1)。这可能与大风结构和台湾海峡北窄南宽的狭管地形有关。台风位于台湾海峡时，台湾海峡北部主要为东北、东北东风，风驱动海水从海峡北部进入海峡，由于大风区主要位于海峡北部，由风驱动海峡南部进入海峡的海水相对较少，这样由风导致的增水主要由海峡北部进入。由于海峡北窄南宽，限制了海峡增水的幅度，因此整个海峡增水不是很大。若台风 10 级大风范围较小，风区主要位于台湾海峡南部，台湾海峡南部增水较大，如 0010 号台风，东山、厦门最大增水达 1 m 多，平潭、三沙最大增水接近 1 m (如表 1)。10 级大风区位于海峡南部，台风后部为西南或偏南风，大风驱使大量海水从海峡南部进入海峡，海峡北部为较小的东北、偏东风，使小部分海水从海峡北部进入，加上海峡北窄南宽，使海水在海峡中堆积，从而海峡西岸的最大增水较大。

当然，当台风强度太强、范围很大、移速较快时，台湾海峡的局部差异已不重要，台湾海峡便以整个海峡响应台风，此时整个海峡增水都较大。如 9608 号台风，其 10 级大风范围包围整个台湾岛及台湾海峡，移速约 21 km/h，福建沿海从南至北最大增水都在 1 m 左右，各站之间相差不大，北部略大 (如表 1)。

3 双增水峰现象

台风横穿台湾海峡正面登陆福建时，福建沿海部分站点容易出现双增水峰现象，即增水曲线图中，在最大增水前后较短的时间 (一般在 24 h 内) 出现另一较大增水峰，两个增水峰幅度相差不大。如 9406 号、0010 号台风的厦门站，9215 号台风的平潭站都出现了双增水峰现象，只是双增水峰出现的岸段不同。在福建沿海台风增水时间-空间分布图 (如图 5) 中，双增水峰岸段一般位于大风区中心区域 (可参见图 4a, b)，随台风大风区北移，双增水峰岸段也向北移。一般第一个增水峰出现在台风离开台湾岛进入台湾海峡后，第二个增水峰出现在台风登陆福建前后。

厦门港经常出现双增水峰现象，但双增水峰不是厦门港特有的现象，福建沿海其它岸段 (如平潭) 同样会出现双增水峰现象，由此可见这种现象并不完全是厦门港湾地形引起的，而与整个台湾海峡地形有关。

普查在台湾海峡以北、以南正面登陆的台风，福建沿海各站过程增水曲线中并未出现双增水峰现象。这说明仅有台湾海峡特殊地形还不足以产生双增水峰现象，只有当台风大风区中心区域经过台湾海峡才容易引起中心区域岸段出现双增水峰现象。

4 台湾海峡北部奇异增水现象

平潭站位于台湾海峡北部较窄的地方，当台风穿过台湾海峡中南部时，在一般情况下，其增水曲线变化幅度相对厦门、东山等站较小。可是，7115 (Nadine)、7122 (Agnes) 号台风引起平潭站出现异常的增水峰现象——奇异增水现象，增水曲线表现为在较短时间内急剧上

表 1 福建沿海各站台风过程最大增水/cm

Tab.1 Peaks of storm surges at the tidal stations along Fujian coast

台风号	东山站	厦门站	平潭站	三沙站
9215	49	58	67	56
0010	127	144	94	90
9608	99	95	127	128

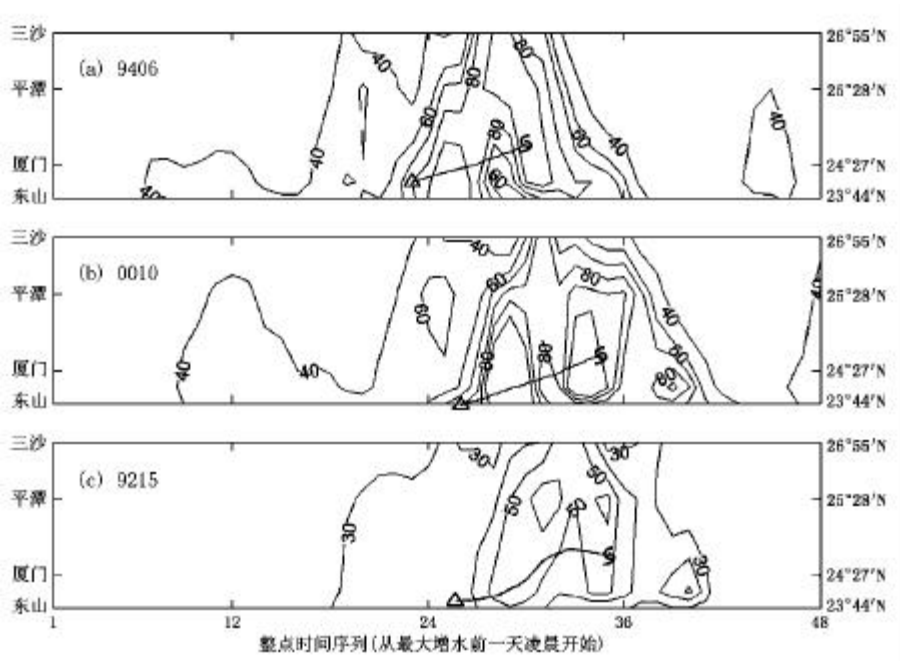


图5 台风增水的时间-空间分布图(三角符号表示台风离开台湾岛进入台湾海峡的时间和纬度位置,台风符号表示台风登陆福建的时间和纬度位置)

Fig.5 Temporal-spatial distributions of storm surges

升、下降,表明最大增水前后增水变化速率较大,且增水幅度较大。例如在 7115 号台风过程中,平潭站在 26 日 18 00 时至 20 00 时两个小时内增水相差达 2 m 多,随后增水很快下降,恢复正常,增水峰前 2 h 增水上升平均速率达 1.18 m/h,增水峰后 3 h 增水下降平均速率达 0.63 m/h,而其它站增水曲线变化相对较平缓(如图 6 所示)。

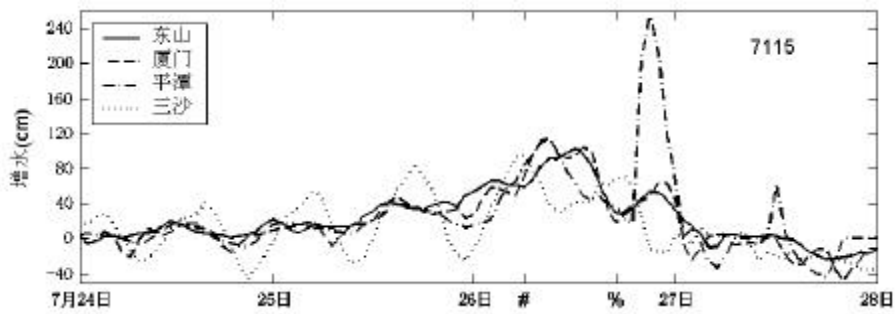


图6 台风奇异增水曲线图

Fig.6 The curves of abnormal storm surges

文献[7]认为 7115 号台风使平潭站出现异常尖陡的风暴潮最高记录是台风的风场结构引起的。作者认为,除台风风场结构引起海峡北部增水发生显著变化外,在较短的时间内,增水急剧地变化,风暴潮与天文潮之间的相互作用可能是其重要原因。分析 7115 号和 7122 号台风过程,这两次台风在台湾海峡停留时间都较长,达 10 多个小时,穿过台湾海峡南部,正面登陆福建中部,登陆时间正处于平潭站低潮前几个小时,而这两次台风引起平潭站奇异

增水都出现在台风登陆后紧接的低潮之后 1~2 h。分析台风过程中实测潮和天文潮的高低潮潮时发现，平潭海洋站低潮时明显提前，落潮时间明显缩短。从表 2 可看出，7115 号台风过程中平潭站 7 月 26 日 17 00 56 的实测低潮潮时比天文潮提前 89 min，随后于 20 00 时出现 2.54 m 的奇异增水峰，此时潮位处于涨潮半潮阶段。该台风过程中其它高低潮潮时与天文潮潮时相对较吻合，说明奇异增水并非是天文潮计算误差引起的。7122 号台风过程也出现类似情况(表略)，但不如 7115 号台风过程的情况明显，因而其奇异增水过程也不如 7115 号台风明显。这两次台风过程中平潭站奇异增水峰前和峰后增水变化速率较大正是与其低潮潮时相对天文潮低潮潮时明显提前(即实际潮位相偏离天文潮位相)有着直接关系。可见，台风在台湾海峡停留时间较长，引起的风暴潮与天文潮相互作用时间也较长，其结果使实际潮周期缩短，实际潮位相偏离预报的天文潮位相，加上其它方面的作用，致使由实测潮位减天文潮位得到的风暴潮在较短时间内急剧变化形成奇异增水峰。

表 2 7115 号台风过程中平潭站的高、低潮潮时
Tab.2 High tides and low tides at the Pingtan tidal station during Typhoon 7115

		7 月 24 日潮时		7 月 25 日潮时		7 月 26 日潮时		7 月 27 日潮时	
高潮	实 测	00:01	11:50	00:35	12:40	01:28	13:10	01:15	13:30
	天文潮	00:03	11:55	00:36	12:32	01:07	13:09	01:40	13:48
	差/min	-2	-5	-1	8	21	1	-25	-18
低潮	实 测	06:15	18:19	06:42	18:53	06:59	17:56		
	天文潮	06:08	18:15	06:42	18:50	07:15	19:25		
	差/min	7	4	0	3	-16	-89		

奇异增水峰值往往出现在天文潮低潮附近，这可通过三角函数理论得到初步解释。假设实际潮和天文潮都为正弦曲线，台风只引起实际潮位相偏离天文潮位相，不改变其振幅和频率，即实际潮曲线与天文潮曲线振幅和频率仍相同。设实际潮和天文潮潮位分别为 h_1 和 h_2 ，则根据以上假设可分别用下面的式子描叙实际潮和天文潮变化：

$$h_1 = H_0 + H \sin(\omega t + \Delta)$$

$$h_2 = H_0 + H \sin(\omega t)$$

其中 H_0, H, ω, t 和 Δ 分别代表平均海平面、振幅、圆频率、时间和位相差。实际中实际潮与天文潮位相差绝对值一般不会超过 (对半日潮而言相当于高低潮潮时提前或滞后约 6 h)，因此这里两者位相差绝对值取值不超过 Δ ，即 $-\Delta < \Delta < \Delta$ 。则其增水可表示为：

$$z = h_1 - h_2 = 2H \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\Delta}{2}\right)$$

当实际潮相对天文潮超前时， $0 < \Delta < \Delta$ ，则其增水可改写为：

$$z = 2H \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\Delta}{2} + \frac{p}{2}\right), \frac{p}{2} < \left|\frac{\Delta}{2} + \frac{p}{2}\right| < p$$

当实际潮相对天文潮滞后时， $-\Delta < \Delta < 0$ ，则其增水可改写为：

$$z = 2H \sin\left(-\frac{\Delta}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\Delta}{2} - \frac{p}{2}\right), \frac{p}{2} < \left|\frac{\Delta}{2} - \frac{p}{2}\right| < p$$

由上可知，无论实际潮是超前或者是滞后于天文潮，其增水与天文潮的位相差绝对值都在 0.5 与 Δ 之间，因而增水峰值位于天文潮低潮附近。同样可看出，当实际潮超前于天

文潮时, 增水峰位于实际潮涨潮阶段; 当实际潮滞后于天文潮时, 增水峰位于实际潮落潮阶段。实际潮与天文潮的位相差绝对值($|\Delta t|$)越大, 增水曲线的振幅就越大, 峰值也越大, 其峰就越陡峭, 同时也越靠近天文潮曲线谷底(即低潮)。因而在天文潮低潮附近最有利于这种奇异增水现象出现。7115号和7122号台风过程中平潭站的奇异增水正印证了这一现象。当然, 以上只是就理想情况从数学方面作出的分析, 但实际中风暴潮与天文潮的相互作用是很复杂的, 不仅可以改变潮汐曲线的位相, 也可改变其振幅和频率, 不排除奇异增水出现在天文潮其它阶段的可能性, 但通过以上分析可知这种可能性相对较小, 即使发生其强度也相对较弱。因此, 实际发生奇异增水现象时, 实际潮位往往并不高。

5 结论

综上所述, 福建沿海风暴潮具有以下几个重要特征:

a) 台风正面登陆我国东南沿海不同岸段, 台湾海峡地形对福建沿海台风风暴潮的影响不同, 所引起的福建沿海风暴潮时空分布也不同。

b) 对穿过台湾海峡的台风, 当台风大风区主要位于台湾海峡北部时, 福建沿海增水都不大; 当台风大风区主要位于台湾海峡南部时, 福建沿海南部增水较大; 若台风大风区覆盖整个台湾海峡, 福建沿海南北增水都较大。在作福建沿海风暴潮预报时, 除考虑台风移动路径、登陆岸段外, 其大风区所在位置也是不可忽略的要素, 尤其在台风大风区中心与台风中心不重合时更需注意大风区在台湾海峡的位置。

c) 台风经过台湾海峡易引起福建沿海台风中心区岸段出现双增水峰现象, 第一个增水峰出现在台风离开台湾岛进入台湾海峡后, 第二个增水峰出现在台风登陆福建前后。了解这一特征, 对预报、预防第二个增水峰有重要现实意义。

d) 台湾海峡北部的奇异增水峰值一般较大, 但往往出现在天文潮低潮附近, 此时实际潮位并不高。在利用历史增水资料作高潮极值对型预报时较大的增水极值容易误导预报员, 使高潮潮位预报值偏大。理解奇异增水出现的特殊情况, 对避免出现这种误报, 提高预报质量具有积极意义。

福建沿海风暴潮分布变化特征受台湾海峡狭管地形影响较明显, 尤其对横穿台湾海峡登陆福建的台风。了解台湾海峡的特殊地形, 清楚认识福建沿海风暴潮分布、变化特征及其原因, 对该海域风暴潮预报无疑有重要的参考意义。此外能否模拟出这些分布变化特征, 也是检验该海域风暴潮数值预报模式好坏的一种依据。对于双增水峰的形成机制以及风暴潮与天文潮的相互作用等还有待于今后更为深入的研究。

在本文的完成过程中得到厦门大学商少凌副研究员的大力支持和帮助, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 福建海洋研究所. 台湾海峡中、北部海洋综合调查研究报告[R]. 北京: 科学出版社, 1988, 5-7.
- [2] 陈金泉, 胡建宇, 林克, 陈光. 福建海岸台风风暴潮数值预报方法的初步研究[J]. 厦门大学学报, 1984, 23(4): 485-496.
- [3] 吴培木, 许永水, 李燕初等. 台湾海峡台风风暴潮非线性数值计算[J]. 海洋学报, 1981, 3(1): 28-43.
- [4] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982, 4-9.
- [5] Leiv H. Svendsen, Eivind A. Martinsen, Alan F. Blumberg. Modeling the Response of an Idealized Coastal Ocean to a Traveling Storm and to Flow over Bottom Topography[J]. Journal of Physical Oceanography, 1994, 24(8): 1689-1705.

- [6] 王喜年. 开阔海风暴潮的数值计算[J]. 海洋通报, 1989, 8(3): 11-20.
[7] 王喜年, 刘凤树. 闽粤沿海台风潮的初步研究[J]. 海洋科学集刊, 1986, (27): 33-43.

作者简介：张文舟(1973—)，男，在职硕士生，工程师。主要从事物理海洋学和海洋气象学等方面的研究，发表论文 3 篇。

On the Characteristics of Storm Surges along Fujian Coast

ZHANG Wenzhou^{1,3}, HU Jianyu^{1,2,4}, SHANG Shaoping^{1,2}, CHEN Meina³, SHE Weiming⁴

(1. Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 2. Marine Environmental Laboratory of the Ministry of Education of China, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 3. Xiamen Marine Forecasting Center, Xiamen 361002, Fujian, China; 4. Faculty of Science, Tohoku University, Sendai 980-8578 Japan)

Abstract : The characteristics and possible mechanisms of storm surges along Fujian coast have been analyzed after investigating the typhoons which passed perpendicularly across the southeastern coastline of China during the period from 1960 to 2001. The specific topography of the Taiwan Straits obviously affects the distributions and variations of storm surges along Fujian coast. The influence of the Taiwan Straits on storm surges depends on the landing place of typhoon. Typhoon moving in the Taiwan Straits, the strength of storm surges is affected by the location and the scope of strong wind. When typhoon moves across the Taiwan Straits, it tends to induce double peaks of storm surges along the coast near the center of strong wind. The first peak appears after it leaves Taiwan island and the second appears before or after it lands on Fujian coast. It sometimes induces abnormal storm surges along the northern Fujian coast and the interaction between storm surges and astronomical tides may be the important reason. The peak of the abnormal storm surges often appears at the time near the low tide of the astronomical tide and at this time the actual tide level is not very high.

Key words : storm surges; along Fujian coast; Taiwan Straits