

基于 1950-2003 年中国近海历史风暴潮增水时空特征分析

楚栋栋^{1,2}, 覃悦³, 李梦雨^{1,2}, 王敏^{1,2}, 曾鑫^{1,2}, 元媛^{1,2}, 车助镁⁴, 张继才⁵

(1. 长江科学院 河流研究所, 武汉 430010; 2. 长江科学院 水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室, 武汉 430010; 3. 浙江大学 物理海洋与遥感研究所, 浙江 舟山 316000; 4. 浙江省自然资源厅海洋监测预报中心, 杭州 310000; 5. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 风暴潮是中国沿海最严重的自然灾害之一。本文基于 1950 年到 2003 年中国沿海 67 个站点的风暴潮增水数据进行了统计和分析, 得到了中国沿海风暴潮增水的时空分布。研究发现, 无论在频次还是在强度上, 东南沿海都是中国沿海风暴潮灾害最严重的区域, 风暴潮强度集中在 III 级、IV 级和 V 级, 其中长江口和杭州湾风暴潮增水值较大。此外, 风场路径和天文潮潮汛对风暴潮增水的影响显著; 以定海站点为例, 在 125°E 以西转向的热带气旋对该站点风暴潮增水影响最大, 风暴潮增水的极值时刻绝大多数在大潮时刻, 潮汐时刻多在天文低潮前后。研究结果可为风暴潮风险评估和防灾减灾提供参考。

关键词: 风暴潮; 中国近海; 时空分布; 天文潮

中图分类号: P751 **文献标识码:** A

Spatio-temporal characteristics of storm surges along the coast of China based on historical data from 1950 to 2003

CHU Dong-dong^{1,2}, QIN Yue³, LI Meng-yu^{1,2}, WANG Min^{1,2}, ZENG Xin^{1,2}, YUAN Yuan^{1,2}, CHE Zhu-mei⁴, ZHANG Ji-cai⁵

(1. River Research Department of Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Water Resources on River & Lake Regulation and Flood Control in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Institute of Physical Oceanography and Remote Sensing, Zhejiang University, Zhoushan 316000, China; 4. Department of Natural Resources of Zhejiang Province, Hangzhou 310000, China; 5. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Storm surge is one of the most serious natural disasters along the coast of China. Based on the statistics and analysis of the storm surge data of 67 stations along the coast of China from 1950 to 2003, the temporal and spatial distribution of storm surges. The study found that no matter in terms of frequency or intensity, the southeast coast of China is the region with the most serious storm surge disasters along the coastal areas, and the intensity of storm surges is concentrated in III, IV, and IV levels. Besides, the amplitudes of the storm surge in the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay are relatively large in the study area. Moreover, the path of the wind field and the

收稿日期: 2023-06-21 ; **修回日期:** 2023-09-12

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作专项”(2022YFE0117500); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CKSF2023293/HL, CKSF2023321/HL, CKSF2023294/HL, CKSF2023328/HL)

作者简介: 楚栋栋(1992—), 男, 安徽亳州人, 工程师, 博士, 研究方向为风暴潮数值模拟。E-mail: chudd@mail.crsri.cn

通信作者: 张继才(1981—), 男, 山东莱芜人, 研究员, 博士, 研究方向为近海动力。E-mail: jicai_zhang@163.com

astronomical tide have a significant impact on the surge levels. Taking the Dinghai station located at the southeast coast of China as an example, the paths of the tropical cyclone turning to the west of 125°E have the most significant impact on the storm surge and most of the occurrence time of peak surge level is around spring tide and before and after the astronomical low tide. The results can provide a reference for storm surge risk assessment, disaster prevention, and mitigation.

Key words: storm surge; coast of China; temporal and spatial distribution; astronomical tide

1 研究背景

风暴潮对极端天气条件下海洋动量、能量、热量和物质传输起重要作用,它是于强烈的大气扰动(如强风和气压骤变)导致的海平面异常升降的现象^[1]。根据诱发风暴潮的大气扰动类型可以将风暴潮分为台风风暴潮、温带风暴潮和寒潮风暴潮,随着海平面上升与沿岸人口的不断增多,沿海地区面临风暴潮灾害风险日趋增加。

王晶等^[2]通过对 1950—2009 年 60 年间 270 次台风风暴潮过程中最高潮位和最大增水数据进行统计和分析,得到了浙江沿海地区风暴潮增水和高潮位的时空分布特征。谢丽和张振克^[3]分析了近 20 年中国沿海风暴潮强度、时空分布与灾害损失,他们发现,在全球变暖背景下,我国风暴潮灾害的次数和强度呈增加的趋势、风暴潮灾害时空分布具有相对集中性。基于浙江沿海 60 余年平均气温和潮位观测资料,卢美^[4]首次系统分析了气候变化对浙江省风暴潮的影响,研究表明平均气温变化与风暴潮强度具有明显的正相关关系,台风登陆个数、较大风暴潮增水出现频率、超警戒风暴潮频率和年极值高潮位与平均气温变化趋势相似,均呈现出波动上升的趋势。董剑希等^[5]分析了 20 世纪 50 年代以来福建省 7 个有代表性验潮站风暴潮的时空分布特征开展研究,研究发现,1954—2008 年间,风暴潮发生次数总体呈现上升趋势;风暴潮灾害呈较明显的上升趋势。黄子眉等^[6]根据根据 1965—2016 年间影响广西沿海的热带气旋资料 and 风暴增水资料,分析研究广西沿海风暴增水特征,结果表明广西沿海风暴增水过程呈现不同路径热带气旋影响下,各观测站风暴增水均是先减水,后增水,最后逐渐回落至正常状态且观测站距离热带气旋登陆地点越近,其最大增水值越高的规律;反之,其最大增水值越低。褚芹芹等^[7]以 2013 年河北省政府发布的风暴潮警戒潮位值为标准,统计了 2008—2017 年河北省沿海的风暴潮过程,研究发现,河北省沿海风暴潮受岸线和风向影响显著。罗志发等

^[8]基于 1970—2018 年珠江口潮位站历史潮位资料,结合风暴潮数值模拟结果,统计分析了粤港澳大湾区风暴潮的时空分布特征并探讨了风暴潮增水影响机理,研究发现,影响粤港澳大湾区的强台风以上级别的台风频次增加趋势明显,各站点历年最高潮位呈增加趋势。在全球变暖及海平面逐年上升的条件下,台风灾害已位居海洋灾害之首,其引发的风暴潮灾害风险日益增加,风暴潮灾害已成为制约我国沿海社会经济高质量发展的突出问题^[9];基于长期的和具有空间代表性的风暴潮增水观测数据开展系统分析和统计研究,对于明确中国近海风暴潮增水的时空变异,具有重要的意义。而由于观测数据的缺乏,目前此类工作极少,导致相关研究多局限于某区域,因此有必要对中国沿海的风暴潮增水时空特征进行全面的。

本文基于 1950 年到 2003 年中国沿海 67 个站点风暴潮过程的风暴潮增水数据进行了统计和分析,分析了中国沿海风暴潮增水的时空分布;以定海站点为例,统计分析了风场路径和天文潮潮汛对该站点风暴潮水位的影响,为风暴潮风险评估和防灾减灾工作提供参考。

2 数据

风暴潮历史增水数据来自浙江省海洋监测预报中心,该数据集已经过质量控制,可用于本文的数据分析^[2]。该数据集记录了每个风暴潮事件连续四天的增水过程(每小时记录一个风暴潮增水数据,包含总水位值,天文潮预报潮位值,风暴潮增水位值,其中,风暴潮增水位值是通过总水位减去天文潮预报潮位得到)。时间跨度从 1950 年到 2003 年;空间上,覆盖中国沿海 67 个验潮站站点(见图 1)。每个验潮站站点时间跨度各不相同,上述时间跨度是 67 个站点记录风暴潮数据时间跨度的合集。需要注意的是,因中国近海风暴潮历史数据不易获取,该数据集记录的风暴潮增水事件仅代表较强的风暴潮增水过程,不代表各站点记录的所有增水过程。

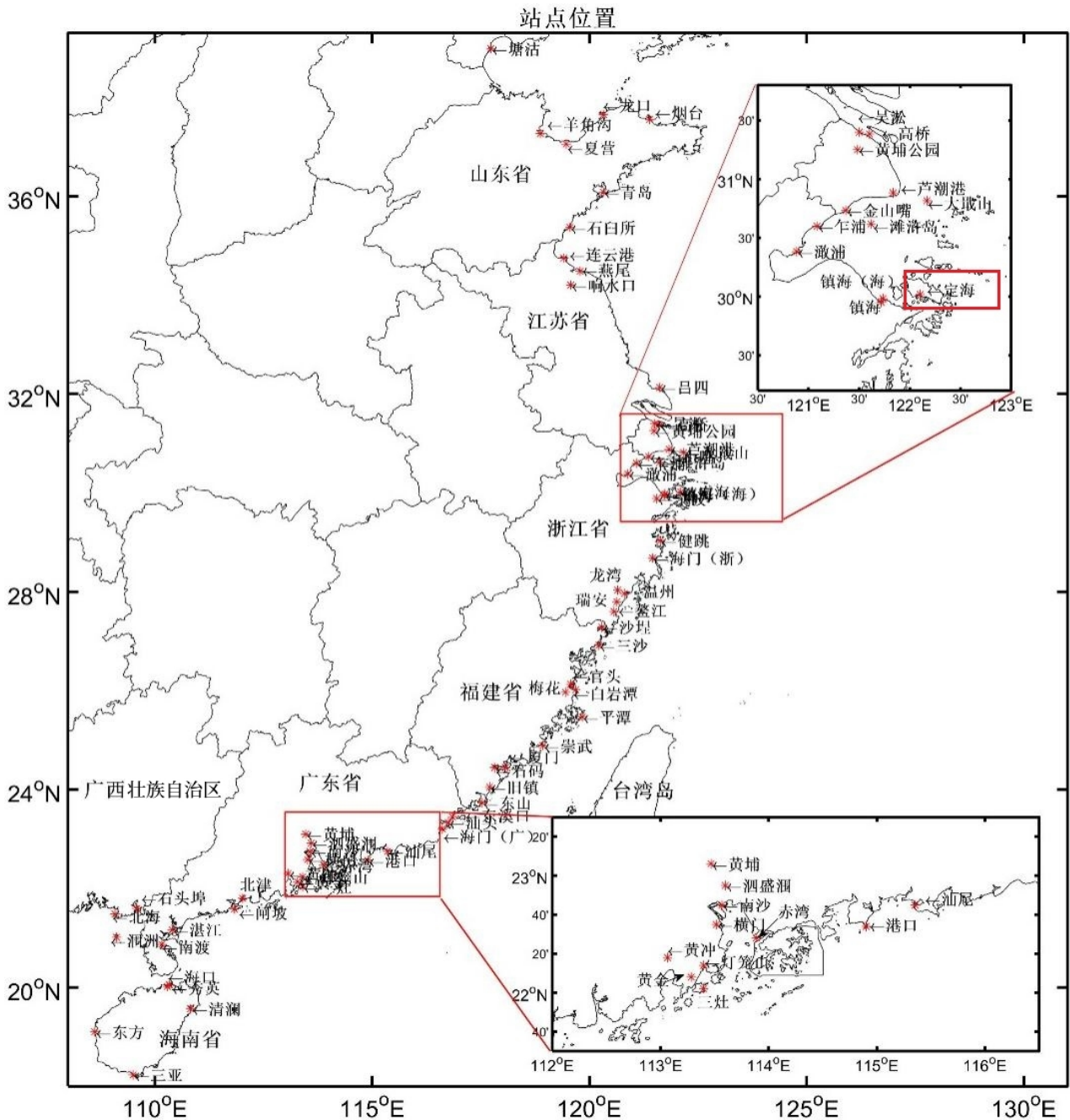


图 1 验潮站点空间分布

Fig.1 The distribution of tidal gauge stations

3 风暴潮时空分布特征

为方便分析,对中国沿海 67 个站点分为三个研究区域,分别是渤海、东海和南海,具体划分范围为:渤海、黄海,以吕四为界(不包含吕四),纬度高于吕四的站点,共 10 个站点;东海,以厦门和吕四之间为界(不包含厦门),纬度处于这两个站点之间的站点,共 27 个站点;南海,纬度低于厦门的站点(包含厦门),共 30 个站点。

3.1 中国沿海各站点记录风暴潮累积数量分布和年

平均数量分布

中国沿海各站点记录风暴潮累积数量分布和年平均数量分布见图 2。经统计,渤、黄海风暴潮累积数量分布在 5~184 个,平均 51 个,最大记录台风数量发生在山东省羊角沟站;东海,15~210 个,平均 95 个,最大记录台风数量发生在福建省梅花站;南海,11~214 个,平均 87 个,最大记录台风数量发生在广东省湛江站。渤、黄海记录的台风风暴潮数量最少,主要是因为该海域风暴潮事件大多由温带气旋引起,台风风暴潮相对较少。纬度方

向上,中国东南沿海省份(浙江省、福建省和广东省)站点记录的风暴潮频次明显高于其他沿海省份记录的风暴潮数量。

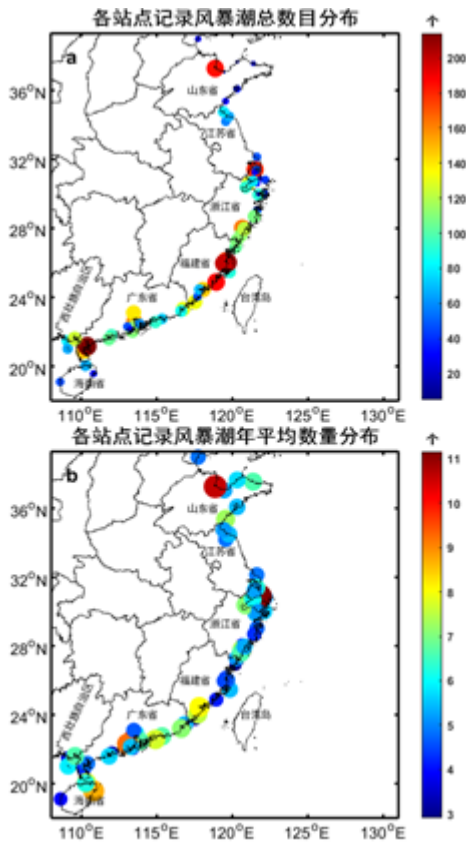


图2 中国沿海验潮站各站点: (a) 记录风暴潮数量分布
(b) 年平均数量分布

Fig. 2 The distribution of each station along the coast of China: (a) total number (b) annual average number

3.2 中国沿海各站点总水位极值分布和风暴潮增水极值水位分布

中国沿海各站点总水位极值分布和风暴潮增水极值水位分布见图3。渤、黄海总水位极值分布在329~645 cm, 平均494 cm, 最大水位极值发生在江苏省连云港站; 东海, 455~1119 cm, 平均695 cm, 最大水位极值发生在福建省沙埕站; 南海, 173~895 cm, 平均437 cm, 最大水位极值发生在广西壮族自治区石头埠站; 对整个中国沿岸海域来说, 总水位极值较大值主要分布在24°N—30°N, 即中国东南沿海海域。风暴潮增水极值水位分布方面: 渤、黄海, 111~389 cm, 平均211 cm, 最大风暴潮增水发生在山东省羊角沟站; 东海, 141~532 cm, 平均264 cm, 最大风暴潮增水发生在浙江省澉浦站; 南海, 68~586 cm,

平均238 cm, 最大风暴潮增水发生在广东省南渡站。可以看到, 东海海域风暴潮增水值在三个海域中最大, 风暴潮增水极值较大值发生在长江口区域和杭州湾湾口。

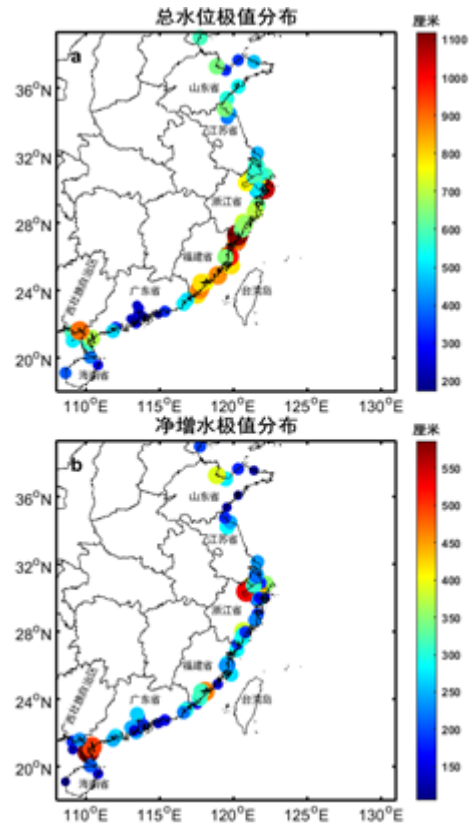


图3 中国沿海验潮站各站点: (a) 总水位极值分布 (b) 风暴潮增水极值分布

Fig.3 The distribution of each station along the coast of China: (a) peak of water level (b) peak of storm surge

3.3 风暴潮年际和月度变化

风暴潮年际和月度变化见图4。年际变化方面, 整体呈现出先增加后减小的趋势, 1950-2003年间风暴潮个数年平均15个, 其中风暴潮高发期在1981-1995年间。月度变化方面, 风暴潮过程一般在1-12月份都有发生, 主要集中在6-10月份, 其中7、8和9月份风暴潮发生频繁, 8月份发生次数最多, 9月份次之, 7月再次之。1-3月份的增水主要是由于温带气旋或者寒潮入侵导致的。

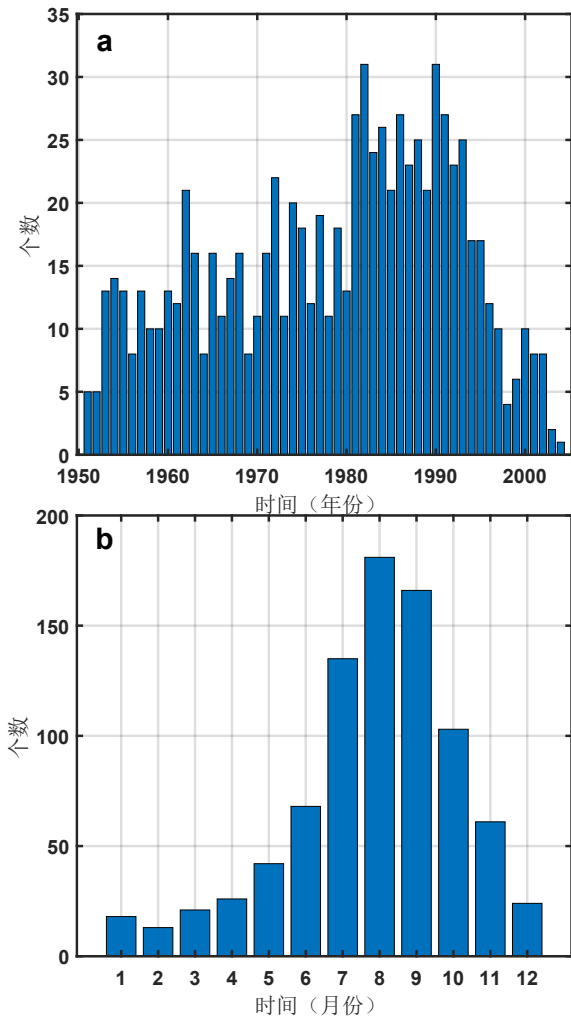


图 4 1950-2003 年记录风暴潮个数: (a) 年际变化;
(b) 月度变化

Fig.4 The recorded number of storm surges from 1950 to 2003: (a) Interannual variation; (b) Monthly variation

3.4 风暴潮增水等级分布

以风暴潮增水量值的大小来表征风暴潮强度,依据增水大小分为:特大、大、较大、中等和一般 5 个等级,分别对应 I、II、III、IV、V 级^[10],具体划分为增水值 ≥ 251 cm (I 级), 201-250 cm (II 级), 151-200 cm (III 级), 101-150 cm (IV 级) 和 50-100 cm (V 级)。图 5(a)为 1950-2003 年各年间验潮站记录的各级风暴潮增水数目统计结果。可以看到,风暴潮强度集中在 III 级、IV 级和 V 级。

渤、黄海区域(图 5(b)),羊角沟站记录的风暴潮数量最多,其风暴潮强度集中在 III 级和 IV 级,分别占其记录总数的 35% 和 48%,I 级和 II 级占其记录总数的 10%,说明该站点风暴潮发生频繁且增水幅度较大,防灾减灾在该海域所有站点中压力最大。整个海域风暴潮强度集中在 IV 级和 V 级,其中 V 级强度在塘沽、烟台、青岛、石臼所、连

云港、燕尾和响水口发生频次比例均超过了 50%。另外,该海域南部的站点风暴潮发生频次相对高于北部站点。

在东海区域(图 5(c)),同样可以看到,该海域南部的站点风暴潮发生频次和强度相对高于北部海域。东海海域风暴潮强度集中在 III 级、IV 级和 V 级,其发生频次比例分别为 66%、21% 和 7%。另外,在金山嘴和温州站 I 级和 II 级发生次数最多,分别为 28 (16) 次和 16 (13) 次,其发生频次分别占该站点总记录数的 59% 和 66%。此外,该海域内多个站点(包括吴淞、乍浦、温州、龙湾、鳌江、沙埭、官头、梅花、白岩潭和崇武)风暴潮发生频次均超过 100 次,表明该海域受风暴潮影响显著,是海洋防灾减灾重点关注的区域。

在南海海域(图 5(d)),风暴潮发生频次在南北区域相对多于中部区域。风暴潮强度集中在 III 级、IV 级和 V 级,其发生频次比例分别为 75%、17% 和 5%。另外,湛江和南渡站 I 级和 II 级增水频次较其他站点明显偏多,其发生频次分别为 5 (5) 次和 6 (11) 次,发生频次占总记录数的 23% 和 57%,因此这两个站点是南海海域风暴潮防灾减灾的重点。

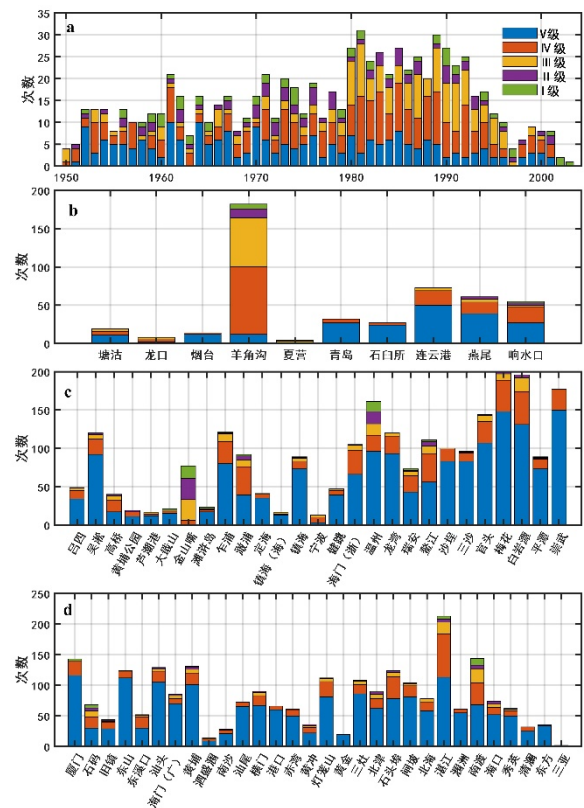


图 5 (a) 1950-2003 年记录各级风暴潮增水数目; (b) 渤、黄海各站点风暴潮增水级别; (c) 东海各站点风暴潮增水级别; (d) 南海各站点风暴潮增水级别

Fig. 5 (a) The number of storm surge levels from 1950 to

2003; (b)surge level at each station in the Bohai Sea and Yellow Sea; (c) surge level at each station in the East China Sea; (d)surge level at each station in the South China Sea

4 定海站风暴潮增水特征

鉴于中国东南沿海风暴潮灾害较严重, 且该海域定海站记录了较完整的风暴潮增水记录, 可用于不同路径、不同强度台风、不同潮汐条件下风暴潮增水分析, 本文选取定海站进一步分析风暴潮增水特征。风暴潮增水大致分为以下三类: 标准型、波动型和混合型。标准型增水形态分为初振(先兆波)、主振和余振阶段^[11]。初振初期阶段, 台风远离测站, 水位缓慢抬升, 此后当台风移动的强制孤立波抵达大陆架时, 水位因水深骤减而升高, 加之海底地形和沿海岸型的反射影响, 岸边水位急剧上升, 形成单峰状的增水曲线, 峰值过后水位很快下降, 并有振幅较小的余振产生。以定海站为例(站点位置见图1), 选取了20个对该站点影响较大的台风风暴潮事件, 收集了逐时水位资料, 绘制了该站点三种风暴潮增水类型下的曲线图(图6), 风暴潮增水是通过实测水位减去天文潮预报潮位的方法得到。可以看到, 9711号台风增水曲线为标准型增水(图6(a)), 经历了初振、主振和余振阶段; 9912号台风增水曲线为波动型增水(图6(b)), 该类型增水曲线有明显的波动过程, 波动周期大概为12 h, 呈现出半日潮波动特征, 并具有多个相似的峰值; 9608号台风增水曲线为混合型增水(图6(c)), 该类型增水曲线介于标准型增水和波动型增水形态之间, 与标准型增水形态的区别在于, 混合型增水曲线有较明显的小幅波动, 如9608号台风增水曲线初振阶段较为平缓, 主振阶段具有明显的小幅振动且无突出峰值。

朱业等^[12]研究发现, 影响中国东南沿海的热带气旋大致分为四类: ①型为西转向热带气旋, 即在125°E以西转向的热带气旋; ②型为中转向的热带气旋, 即在125°E以东140°E以西转向的热带气旋; ③型为在福建省着陆或在台湾海峡消失的热带气旋; ④型是在江苏、浙江省登陆或在近海消失的热带气旋。以定海站为例, 表1统计了影响该站点较大的20次台风信息及风暴潮增水信息。可以看到, 该站点波动型增水占一半左右。四次风暴潮增水超过100 cm的案例中, ①型台风有三次, ③型

和④型台风各有一次, ①型台风路径对定海站风暴潮增水影响最大。同时, 据表1统计可知, 风暴潮最大净增水时刻潮汛集中在大潮期间, 潮汐时刻多在天文低潮前后。另外, 天文潮相位和风暴潮增水有明显的负相关关系, 即: 天文潮相位处于高潮位时, 风暴潮处于减水阶段, 而天文潮相位处于低潮位时, 风暴潮处于增水阶段; 此现象可根据

Pugh^[13]提出的理想情况下水位梯度($\partial\eta/\partial x$)和

风应力项($C_d U_{10}/\rho D$)平衡关系式解释, 其表达式如下:

$$\partial\eta/\partial x = C_d U_{10}/\rho D \quad (1)$$

其中, η 是潮位, C_d 是风应力系数, U_{10} 为海面10 m高度风速, ρ 是海水密度, $D=H+\eta$ 为总水深, H 为平均海面高度, 由此公式可知, 同样外因条件下, 风应力在浅水海域可引发更大的增水, 尤其在天文潮低潮位时刻可引起更强的增水。

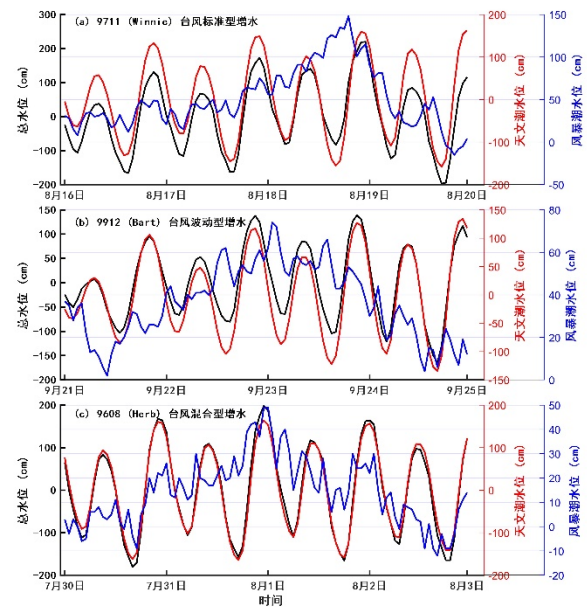


图6 定海站3种风暴潮增水曲线, 其中黑线为总水位, 红线为天文潮水位, 蓝线为风暴潮水位

Fig.6 Three types of surge curves at Dinghai station, the black line is the total water elevation, the red line is the astronomical tide elevation, and the blue line is the storm surge elevation

表 1 影响定海站 20 次台风信息及风暴潮增水信息

Table 1 Information of 20 typhoon-induced storm surges affecting Dinghai station

台风名称中文 (英文)	CMA 编号	台风类型	增水形态	风暴潮增水 (cm)	最大增水时刻日期/潮汛/潮汐时刻
伊文 (Irving)	7909	①型	波动	56	08-16/大潮/天文低潮前 1 h
茱迪 (Judy)	7910	①型	波动	105	08-24/大潮/天文低潮前 1 h
欧文 (Owen)	7915	②型	混合	53	09-28/大潮/涨潮后 2 h
泰培 (Tip)	7919	②型	标准	87	10-18/大潮/天文低潮前 2 h
云茵 (Wynne)	8019	②型	波动	54	10-13/大潮/天文低潮前 1 h
福雷斯特 (Forrest)	8310	①型	标准	159	09-27/大潮/天文低潮前 1 h
比尔 (Bill)	8807	④型	标准	76	08-08/中潮/天文低潮前 2 h
奥菲莉亚 (Ofelia)	9005	④型	波动	54	06-24/中潮/涨潮后 2 h
艾贝 (Abe)	9015	④型	标准型	65	08-31/大潮/天文低潮前 1 h
密瑞儿 (Mireille)	9120	②型	标准	64	09-27/大潮/天文低潮前 2 h
玻莉 (Polly)	9216	③型	波动	67	08-30/大潮/天文低潮前 2 h
泰德 (Ted)	9219	④型	混合	76	08-31/中潮/落潮后 2 h
弗雷德 (Fred)	9417	④型	波动	64	08-21/中潮/涨潮后 3 h
塞思 (Seth)	9430	①型	波动	72	10-11/天文低潮前 1 h
贺伯 (Herb)	9608	③型	混合	49	08-01/中潮/天文高潮时
赞恩 (Zane)	9620	②型	波动	69	09-30/大潮/天文低潮前 2 h
温妮 (Winnie)	9711	④型	标准	148	08-18/大潮/涨潮后 3 h
巴特 (Bart)	9912	②型	波动	74	09-23/中潮/天文低潮前 2 h
派比安 (Prapiroon)	0012	①型	波动	79	08-31/大潮/天文高潮时
桑美 (Saomai)	0014	①型	混合	140	09-14/大潮/落潮后 4 h

注: CMA (China Meteorological Administration), 指中国气象局。

5 结 论

本文主要研究了两方面的内容, 一方面, 基于中国沿海验潮站风暴潮增水数据, 统计分析了中国沿海风暴潮增水时空分布特征; 另一方面, 以定海站为例, 统计分析了该站点风暴潮增水特征。总结如下:

(1) 风暴潮增水数据的时空分布特征方面, 研究发现风暴潮强度集中在Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级。中国东南沿海省份(浙江省、福建省和广东省)站点记录的风暴潮频次明显高于其他沿海省份记录的风暴潮数量。其中, 金山嘴、温州、湛江和南渡站Ⅰ级增水频次明显高于其他站点, 是海洋防灾减灾的重点。综合三个海域可以得到, 长江口和杭州湾风暴潮增水量较大。

(2) 定海站点风暴潮增水特征方面, 本文发现, 该站点波动型增水占了所有增水类型的一半。另外, ①型台风路径对该站点风暴潮增水影响最大, 风暴潮增水极值时刻绝大多数在大潮时刻, 潮汐时刻多在天文低潮前后。

通过对风暴潮历史增水数据的分析, 可以看到, 无论在频次还是在强度上, 中国东南沿海都受风暴潮灾害最严重的区域, 并且风场路径和天文潮潮汛对风暴潮水位影响显著。相关研究成果可为风暴潮灾害和防灾减灾提供一定参考。

参考文献(References):

- [1] 冯士筴. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [2] 王晶, 卢美, 丁骏. 浙江沿海台风风暴潮时空分布特征分析[J]. 海洋预报, 2010, 27(3): 16-22.
- [3] 谢丽, 张振克. 近 20 年中国沿海风暴潮强度, 时空分布与灾害损失[J]. 海洋通报, 2010, 29(6): 690-696.
- [4] 卢美. 浙江海岸台风风暴潮漫堤风险评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [5] 董剑希, 李涛, 侯京明. 福建省风暴潮时空分布特征分析[J]. 海洋通报, 2016, 35(3): 331-339.
- [6] 黄子眉, 李小维, 姜绍材, 等. 广西沿海风暴增水特征分析[J]. 海洋预报, 2019, 36(6): 29-36.
- [7] 褚芹芹, 张万磊, 洪新, 等. 河北省沿海风暴潮特征及成因分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(1): 10.

- [8] 罗志发, 黄本胜, 邱静, 等. 粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 72-79.
- [9] Huang M, Wang Q, Liu M, et al. Increasing typhoon impact and economic losses due to anthropogenic warming in Southeast China[J]. Scientific reports, 2022, 12(1): 1-14.
- [10] 孙志林, 卢美, 聂会, 等. 气候变化对浙江沿海风暴潮的影响[J]. 浙江大学学报 (理学版). 2014, 41(1): 90-94.
- [11] 杨昀, 王惠群, 管卫兵, 等. 舟山海域风暴潮特征及数值模拟研究[J]. 海洋学研究, 2015, 33(3):10.
- [12] 朱业, 丁骏, 卢美, 等. 1949-2009 年登陆和影响浙江的热带气旋分析[J]. 海洋预报, 2012, 29 (2) : 8-14
- [13] Pugh D T. Tides, surges and mean sea-level: a handbook for engineers and scientists[M]. Hoboken: Wiley, 1987:472-474.

说明：该文为经编委会审查通过的录用文章，由于尚未确定具体刊出日期，其内容可能与最后的发表版本稍有差异，请以最后发表为准。