

中国沿海40年台风风暴潮特征研究

付翔^{1,2}, 梁森栋¹, 郭洪琳¹, 李明杰¹, 叶琳¹

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 统计分析了1980—2019年间影响我国沿海的400多次台风风暴潮过程, 从增水和超警戒潮位两个方面研究其时空分布特征。结果表明: 我国沿海最大增水2 m以上的大台风风暴潮过程数及其波动幅度有增加的趋势, 近十年增加频次显著, 同时弱台风风暴潮过程也有增加, 并呈现两级分化的态势; 增水年极值整体呈增加趋势; 造成40年台风增水极值的台风有近一半出现在最近十年, 极有可能说明近十年影响我国的强台风有增强的态势; 浙南闽北地区是出现超警过程最多的地区, 但大的台风风暴潮过程数少于珠江口和雷州半岛东岸, 这两个地区也是台风风暴潮危险性最高的地区。

关键词: 台风风暴潮; 增水; 超警; 时空分布

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)06-0001-11

0 引言

风暴潮是指局部水体受到强烈的大气扰动(如强风或气压骤变)而出现的水面异常升高(降低)的现象, 也称风暴增水(减水)^[1-2], 其大小不仅和大气的外力强度有关, 还和沿岸地形以及水深等因素密切相关。根据诱发风暴潮的天气系统特征, 通常可将风暴潮分为热带气旋风暴潮和温带气旋风暴潮两大类, 另外还有寒潮大风引起的风暴潮, 这在我国渤海海域较为常见。风暴潮叠加天文潮以及受到传到近岸的风浪、涌浪的非线性拥水作用会引起沿岸涨水, 当总水位达到或超过一定阈值(即警戒潮位)时, 沿岸出现险情, 会造成一定的灾害损失, 称之为风暴潮灾害^[2-4]。风暴潮灾害是我国最主要的海洋灾害之一, 特别是热带气旋风暴潮(在我国常被称为台风风暴潮)灾害。自1989年有统计数据以来, 风暴潮(含近岸浪)灾害造成的直接经济损失占全部海洋灾害直接经济损失的90%以上, 而严重的台风风暴潮灾害几乎每年都会发生^[5]。

风暴潮致灾危险性体现在风暴潮的强度和频率以及叠加浪、涌的非线性拥水作用和天文潮后引起的高潮位^[6-7]上。在气候变化的大背景下, 海平面上升^[8-9]和台风强度的增加^[10-12]会使得风暴潮强度增强, 高潮位更高, 势必加剧风暴潮灾害^[13-16]。国内外学者对历史极值水位的长期变化研究发现, 全球大部分验潮站包括中国沿海部分验潮站的极值水位呈增加趋势, 大多数验潮站的这种变化显示由海平面变化引起^[17-20], 但也有一些地区的变化与海平面变化不一致^[21], 如厦门和香港的极值水位增加速率远高于海平面上升速率^[19], 美国东西海岸的Astoria站、San Francisco站和Portland站在去除海平面影响后表现出显著的上升趋势, 而Mayport站夏季则表现出显著的负趋势^[22]。与海平面变化无关的极值变化中还呈现显著的多年代际波动^[22]。短期的极端水位受气候因子影响波动强烈, 比长期海平面上升趋势大一个数量级, 且随时间的变化而变化^[20,23]。一些站的极值水位变化由风暴增水主导, 而另一些站则由潮汐变化主导^[21,23], 因此, 评估极端水位变化重

收稿日期: 2023-03-11。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资助项目(2021YFB3900405、2017YFA0604901)。

作者简介: 付翔(1980-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事风暴潮预警研究工作。E-mail: fx@nmefc.cn

要主导原因之一的风暴增水变化趋势,是研究沿海地区气候变化响应趋势的重要内容。FENG等^[18]指出中国沿海极端水位事件主要由台风引发。因此本文统计分析我国沿海40年的台风风暴潮的时空分布特征,为气候变化和风暴潮灾害风险研究提供基础依据。

1 分析方法及数据来源

本文基于“近海海洋综合调查与评价专项”积累的资料数据,并结合近十年我国沿海验潮站的实测水位数据,选用台风风暴潮过程中最高潮位值和最大增水值为统计指标,同时比对各站的警戒潮位值,从发生频次的时间变化和空间分布两个方面分析我国沿海台风风暴潮特征。

当前国际研究中,多用潮汐余水位(Non-Tidal Residual, NTR)表示风暴潮增水,即总水位减去天文潮水位,天文潮水位可通过调和分析即根据通用潮高计算公式获得。根据风暴潮等级划分标准^[24],定义台风登陆我国或近海转向并造成沿岸任一站出现大于50 cm增水的过程为一次台风风暴潮过程。采用验潮站逐时增水数据,每次过程取各站最大增水值进行统计。综合郭洪寿^[25]推荐和国标中的风暴潮强度等级^[24]划分标准,选取1 m和2 m为增水分段统计指标。过程中任一站最大增水值大于1 m定义为一次显著的风暴潮,大于2 m定义为大风暴潮或强风暴潮,小于1 m为一般或小风暴潮。用于比对的警戒潮位值为各站现行的黄色警戒潮位,

现行警戒潮位启用之前的统计时间段采用基于《警戒潮位核定方法(GB/T17839—1999)》核定的各站警戒潮位值。当过程中任一站出现的最高潮位超过该站比对的警戒潮位值则记为一次超警戒潮位过程(简称超警过程,下同)。

台风数据来自中国气象局《台风年鉴》(1980—1988)和《热带气旋年鉴》(1989—2017)以及中国气象局热带气旋资料中心最佳路径数据集(2018—2019)^[26](网址:<http://tcdata.typhoon.org.cn>)。

2 40年台风风暴潮事件及增水概况

统计整理了1980—2019年影响我国沿海的台风风暴潮过程。40年间共发生台风风暴潮418次,其中1/4是由未登陆台风所引起。年平均发生次数为10.45次,最多为1989年的16次,最少为6次,年发生频率最高次数(即高频发生次数)为9次(见图1a)。增水1 m以上(含1 m)过程264次,年平均为6.6次,最多为1989年的12次,高频发生次数为7次(见图1b)。增水2 m以上(含2 m)的大过程59次,占总数的14.1%,年平均为1.5次,最多为4次,高频发生次数为1次(图略)。

与1949—1990年的统计数据相比^[27],增水1 m以上的过程数变化不大(1949—1990年为259次),增水2 m以上的过程数增加了28%(1949—1990年为46次)。在增水2 m以上的过程中,有近1/3(17次)出现在雷州半岛东岸,是出现最多的区域,其次为浙南闽北地区,约占1/5;有4次过程是由未登陆

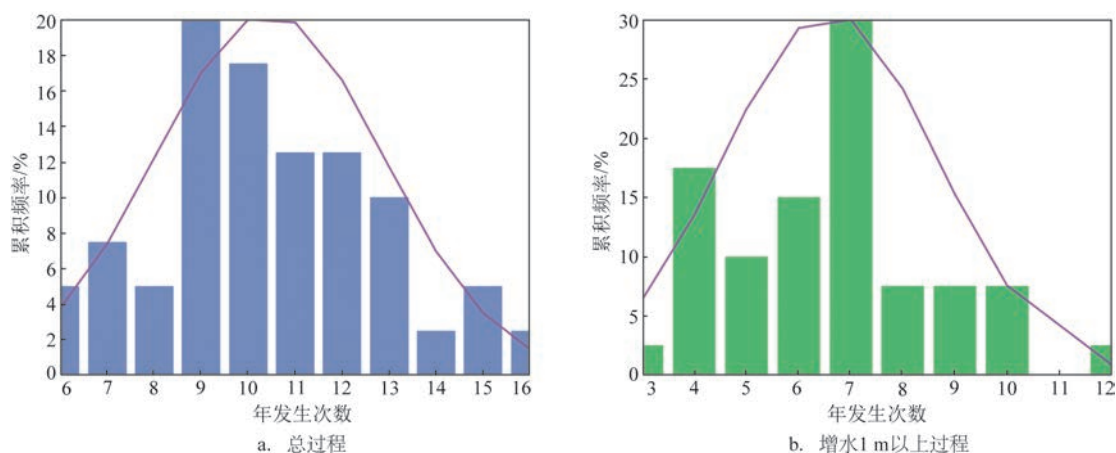


图1 台风风暴潮发生次数频率直方图及概率密度

Fig1 Frequency histogram and probability density function of tropical storm surges

台风所引起,占总数的6.8%,均出现在东海海域,2次出现在杭州湾,1次出现在台湾海峡南部,1次出现在江苏沿海。

1980—2019年全国沿海台风风暴潮年增水极值范围出现最多的为2.0~2.5 m(见图2),其次为

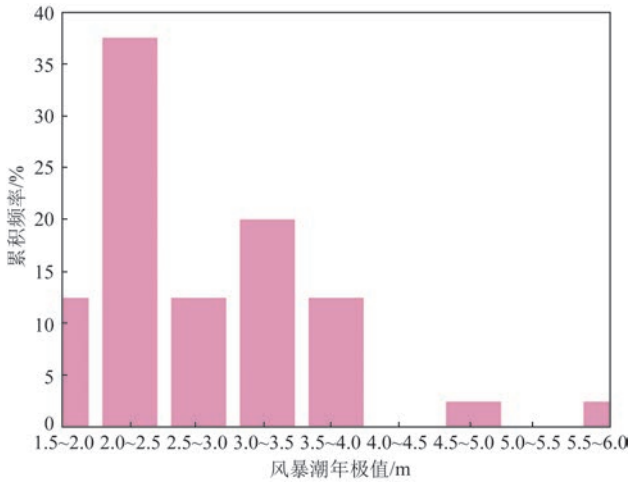


图2 台风风暴潮年极值频率直方图

Fig.2 Frequency histogram of annual extreme tropical storm surges

3.0~3.5 m。这其中有5年的年极值增水由未登陆台风所引起,同样均出现在东海海域。广东南渡站为我国有验潮记录以来风暴增水最大值的发生地^[28],在40年间贡献了17.5%的全国增水年极值。

3 台风风暴潮时间变化特征

3.1 年际和年代际变化

从年际变化看(见图3),20世纪80年代末和2010年前后是我国台风风暴潮高发期,20世纪90年代中后期为低发期,期间5 a滑动平均值持续高于和低于40年的均值;其中1985—1990年的高值期和1992—1998年、1996—1999年的低值期满足显著性为0.1的Wilcoxon秩和检验。增水1 m以上和超警戒潮位的过程在20世纪80年代末—90年代初也出现高发期,其中增水1 m以上过程次数在1989—1995年处于高值期,超警过程次数在1989—1993年的高值期满足显著性为0.1的Wilcoxon秩和检验。增水2 m以上的大过程发生次数在近10年明显增多,2011—2019年的高值期满足显著性为0.05的

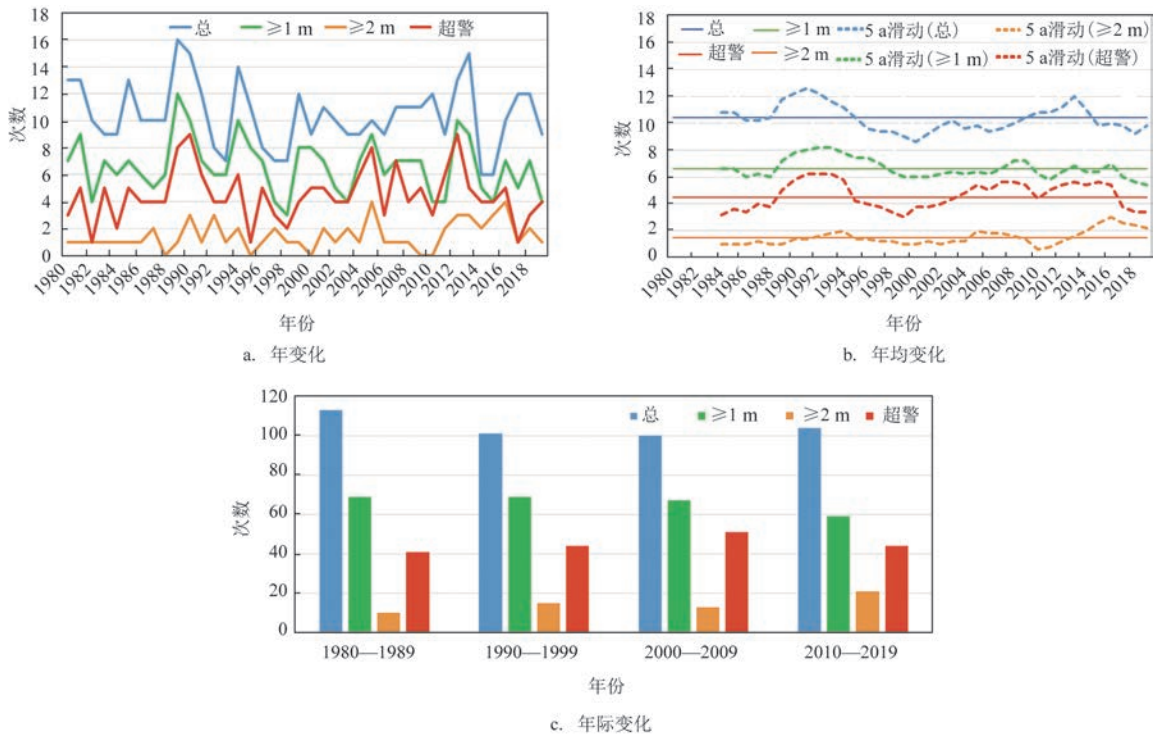


图3 台风风暴潮发生次数变化

Fig.3 Changes in number of tropical storm surges

Wilcoxon 秩和检验。我国沿海潮位站建设成效显著,站点从2005年的50多个激增到2019年的120多个,排查2 m以上过程中增水达到2 m的测站,每个过程均包含有40年以上历史的长期站,因此可排除是由于测站密度增加才捕捉到更多大增水过程的原因。从年代际变化看,总的台风风暴潮过程在20世纪80年代最多,年均达到11.3次,1 m以上的显著增水过程在近10年最少,但增水2 m以上的大过程在近10年最多。从累积百分比看(见图4),20世纪90年代中前期增水1 m以上的过程占比较高,而2006—2011年间增水1 m以下的一般过程占比较高。增水大于2 m的过程由前3个10 a的年均约1.3次增加到最后10 a的年均约2次,而1 m以上风暴潮过程每10 a均为6~7次,变化不大。最近10 a增水大于2 m和小于1 m的风暴潮过程次数占比都明显增加,说明台风风暴潮有向强弱两级分化的态势。

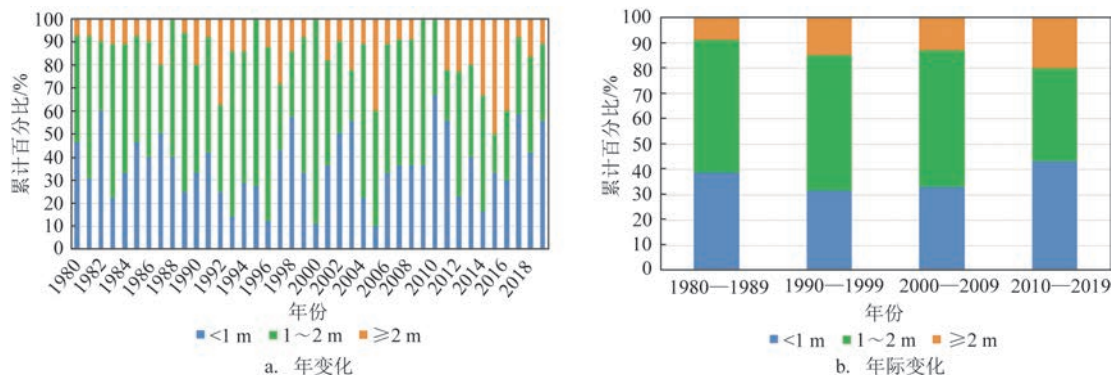


图4 增水次数累积百分比变化

Fig.4 Changes in cumulative percentage of tropical storm surge

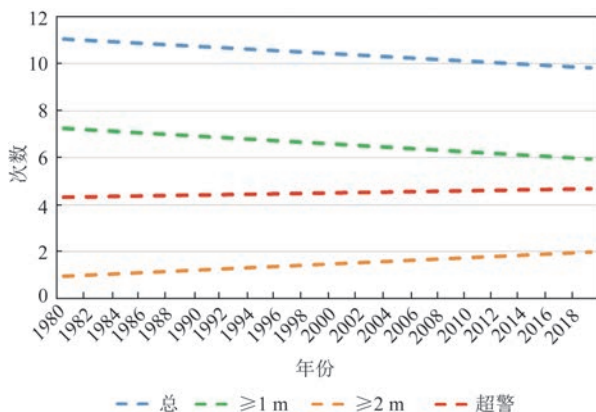


图5 台风风暴潮发生趋势

Fig.5 Trends of tropical storm surges

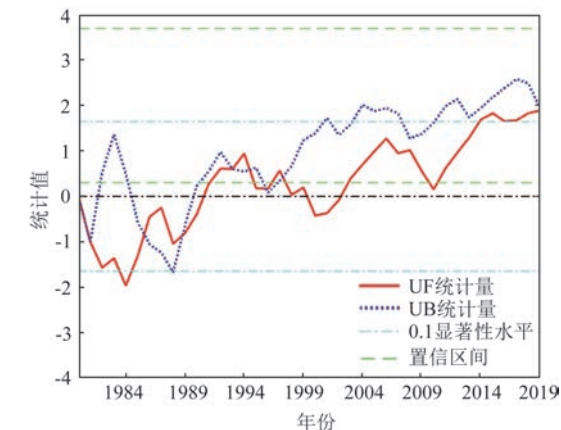


图6 年增水极值的Mann-Kendall统计量

Fig.6 Mann-Kendall statistic of annual extreme tropical storm surge

3.2 趋势和周期分析

Mann-Kendall趋势检验未检测出4类台风风暴潮40年发生次数的显著变化趋势。一元线性回归显示(见图5),总的台风风暴潮发生次数及增水1 m以上的台风风暴潮次数在1980—2019年间呈减少趋势,倾向率分别为 -0.31 次/10 a和 -0.33 次/10 a,但并未通过显著性检验;增水2 m以上的台风风暴潮次数呈增加趋势,倾向率为 0.26 次/10 a,通过显著性水平为0.1的 F 检验;超警过程基本无显著变化。

Mann-Kendall检验显示,全国沿海台风风暴潮增水年极值在1980—2019年间整体呈上升趋势,自2002年后为持续上升趋势(其 UF 统计量自2002年后均为正值,见图6),最后5 a的上升趋势满足显著性水平为0.1的 Z 检验。年增水极值的一元线性回归也显示整体呈上升趋势(见图7),倾向率为

14.25 cm/10 a,但并未通过显著性检验。增水极值的年际距平也由前30年的平均负距平转为后10年的平均正距平。

对风暴潮发生次数进行Morlet复小波分解,方差图显示(见图8)总的台风风暴潮发生次数有28 a、

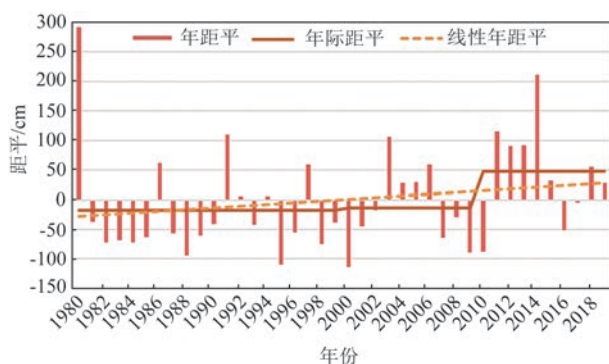
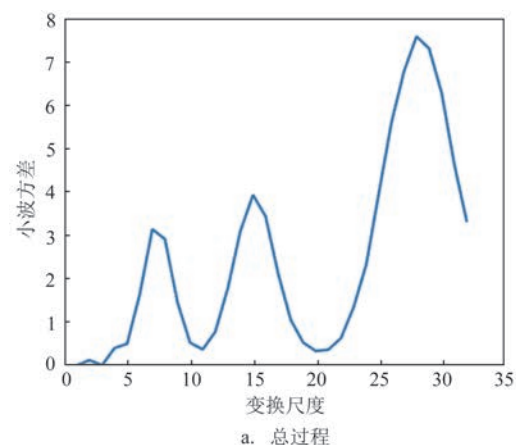
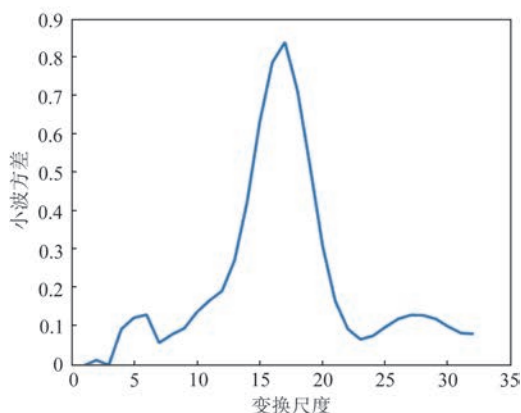


图7 年增水极值的距平序列和变化趋势

Fig.7 Time series and trends of annual extreme tropical storm surges



a. 总过程



b. 增水2 m以上过程

图8 风暴潮发生次数的小波方差图

Fig.8 Wavelet variance of tropical storm surges

15 a和6 a的周期,与影响中国沿海的热带气旋综合强度频数指标的变化周期一致^[29];2 m以上的大风暴潮次数有16~17 a的显著周期,对应经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)第四本征模函数(Intrinsic Mode Function 4, IMF4)的波动周期(见图9)。从小波系数实部等值线图可看出(见图10),2000年后该周期的波动强度明显增大,与EMD分解的第二本征模函数(IMF2)和第三本征模

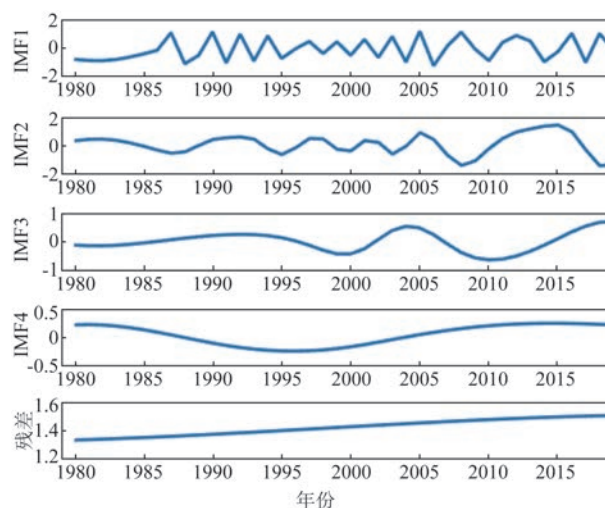


图9 2 m以上台风风暴潮时间序列的经验模态分解

Fig.9 Empirical Mode Decomposition of tropical storm surges with maximum residual value exceeding 2 meters

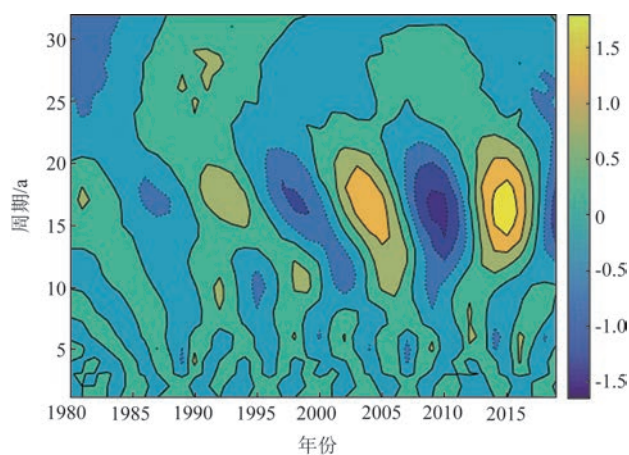


图10 2 m以上台风风暴潮时间序列的小波系数实部等值线图

Fig.10 The real part distribution of wavelet coefficients of tropical storm surges with maximum residual value exceeding 2 meters

函数(IMF3)也在2000年后振幅加大一致(见图9),说明2 m以上大台风风暴潮发生次数不仅总量增加(见图5中一元线性回归结果和图9中EMD分解的残差项),其波动幅度也有所增加,发生次数有极端化的态势。

3.3 月际变化

从月际变化看,增水1 m以上的台风风暴潮最早发生在4月,而增水2 m以上的台风风暴潮最早发生在6月,40年间分别都仅发生过一次。自6月起,台风风暴潮过程数明显增加,7—10月为多发期,也是超警台风风暴潮(风暴潮灾)的多发期,其中9月最多,增水1 m以上和超警过程分别占全年总数的29%和33%,即平均每年有近2次增水1 m以上的台风风暴潮和1.5次超警戒的台风风暴潮发生在9月;2 m以上的大风暴潮8月最多。这说明风暴潮灾并不取决于风暴潮的大小,天文大潮对风暴潮灾的发生起着不可忽视的作用^[30],天文高潮位叠加普通的风暴潮即能引起超警戒的风暴潮灾,而9月正是我国渤海、黄海和东海潮位普遍最高的时期。

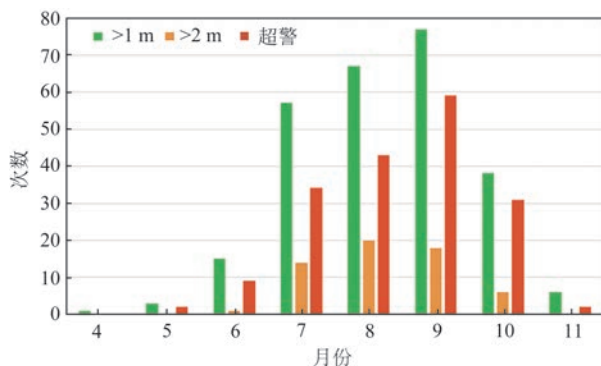


图11 增水1 m和2 m以上风暴潮和超警过程次数月际变化
Fig.11 Monthly variation of tropical storm surges with maximum residual value exceeding 1 meters, 2 meters, and warning threshold

4 空间特征分析

4.1 潮位站及极值分布

筛选建站时间较长、数据较为完整、位置分布合理、能代表一定范围内风暴潮特点的39个测站(见图12),统计分析40年间中国沿海台风风暴潮的

空间分布。从各站极值台风风暴潮的分布可看出(见图13),渤海湾、莱州湾、上海、浙江—闽北沿海

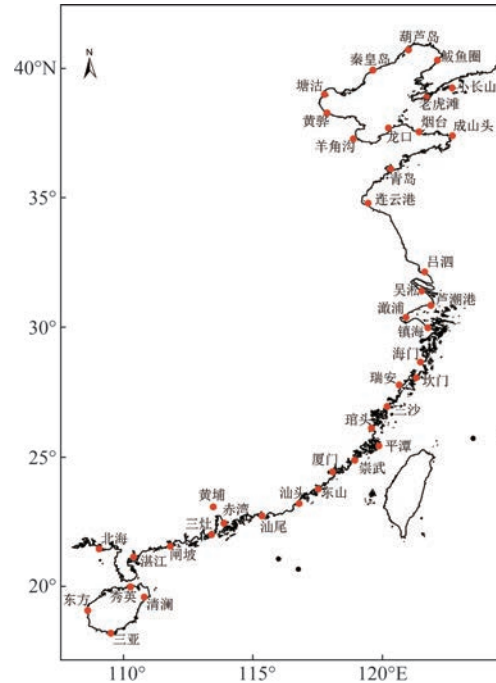


图12 统计测站位置分布

Fig.12 Distribution of statistical stations

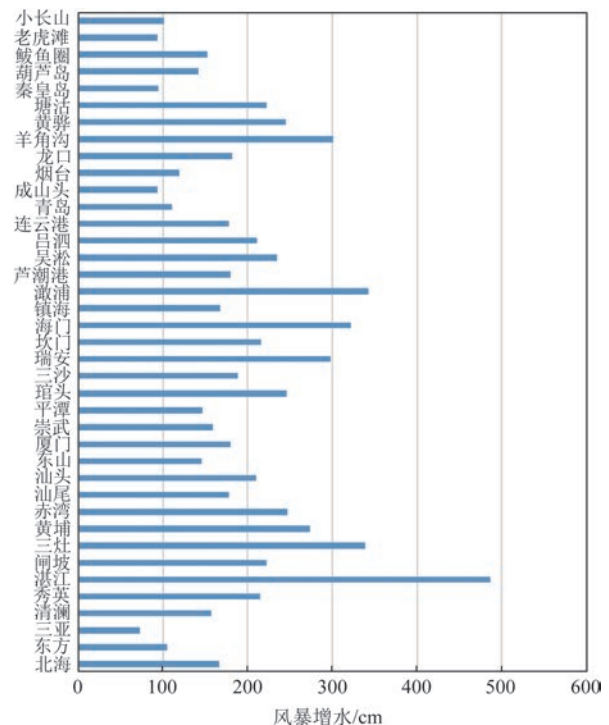


图13 40年间各站极值风暴增水

Fig.13 The extreme surges at each station in the past 40 years

以及珠江口—雷州半岛东岸附近台风风暴潮的增水极值较大,其中渤海湾、莱州湾和雷州半岛东岸的地形有利于增水,上海、浙江—闽北沿海则因为容易遭受较强台风的正面袭击而引起较大的风暴潮。

统计了各站台风风暴潮极值出现时对应的台风强度(见图14),发现台风的影响强度自北向南明显增加,这与台风北上强度减弱有关。但在渤海湾和莱州湾,由热带风暴所引起的极值增水能够达到与浙江沿海由台风、强台风所引起的极值增水相同的量级,一方面由于渤海半封闭的浅海地形作用,少量水体堆积即能产生较大增水;另一方面则因为北上台风变性后,由于斜压发展或冷空气入侵产生梯度风,近地表大风圈出现非对称水平扩展^[31-33],海上大风裹挟大量

黄海水体进入渤海,造成渤海内较大的风暴潮。

经统计,引起各站最大风暴潮的台风过程共有23次,39%出现在8月,这与8月增水2 m以上过程最多一致,是由台风强度发展的季节性决定的,其中9711号台风“Winnie”和1822号台风“Mangkhut”的影响范围最大,分别引起了6个站和4个站40年的增水极值。在这些台风中,出现在近10年的台风占总数的47%(见图15),极有可能说明近10年严重影响我国沿海的台风有增强的态势,进而可引起更大的风暴潮。

4.2 风暴潮频次分布

从各站大于1 m、大于2 m的增水和超警情况来

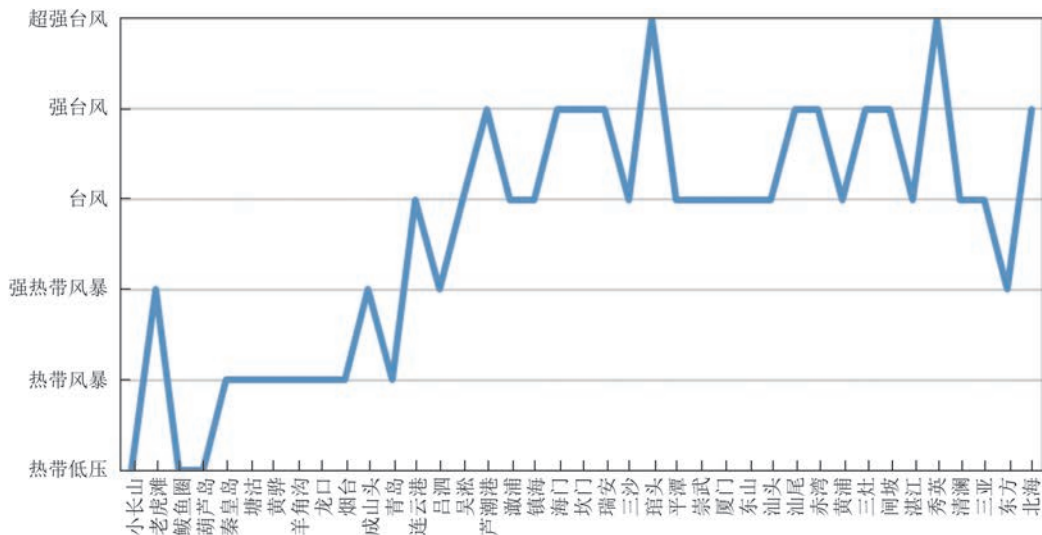


图14 造成最大台风风暴潮的台风强度

Fig.14 Typhoon intensity with respect to extreme surges at each station

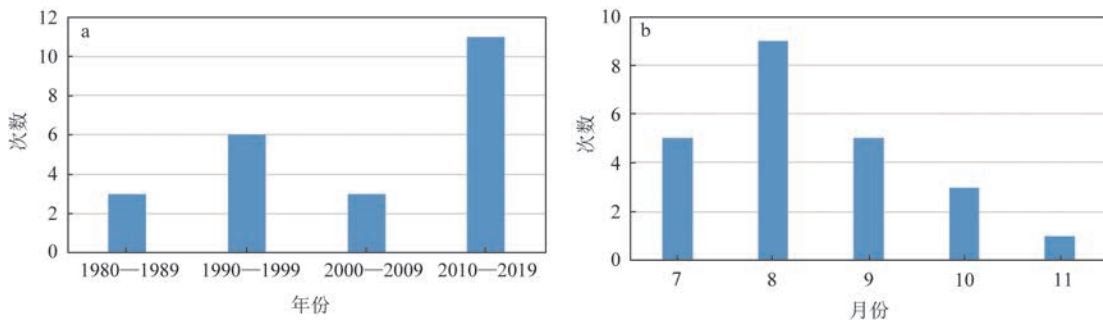


图15 造成最大台风风暴潮的台风个数年代际变化(a)及月分布(b)

Fig.15 Decadal and monthly distribution of typhoons causing the extreme surge

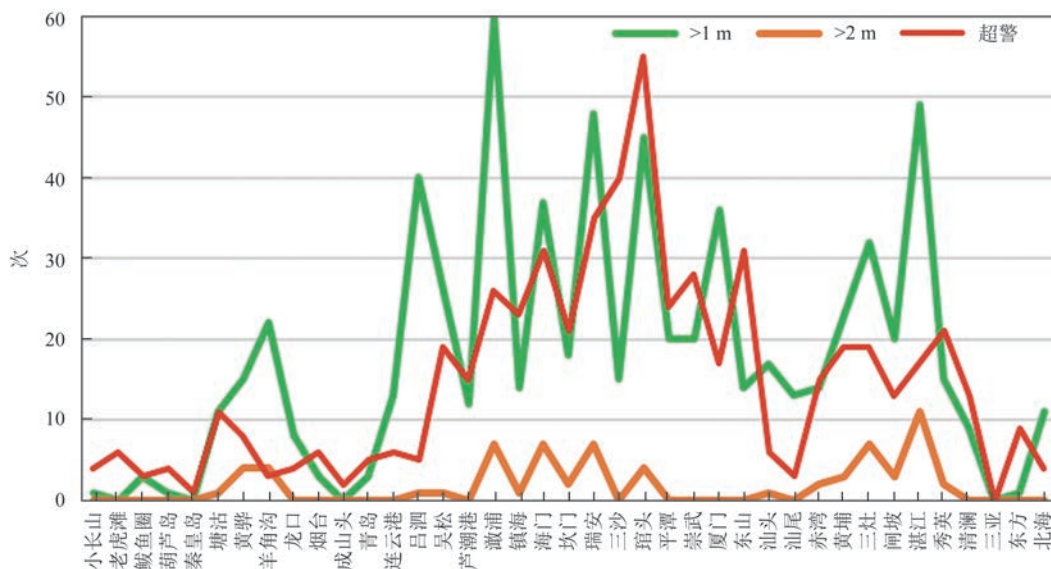


图 16 各站台风增水次数及超警次数分布

Fig.16 Numbers of tropical storm surges and over-warning-threshold surges at each station

看,莱州湾、浙江沿海以及珠江口—雷州半岛东岸出现大台风风暴潮的频率较大,苏南和闽南沿海台风风暴潮的出现频率也较多,但大风暴增水情况较少。自长江口、杭州湾一直到福建省,特别是浙南闽北一带出现超警的情况较多,一方面是由于大风暴潮和极端风暴潮都较多,另一方面是该沿岸属典型半日潮区,潮差大,高潮位高,大增水叠加较高潮位的概率大,极易造成超警戒的高水位;其次,珠江口—雷州半岛东岸以及海南岛东北部也有较多超警戒的风暴潮过程,说明这一带区域的风暴潮灾害的危险性也比较高。

4.3 风暴潮增水重现期分布

风暴潮增水重现期是评估风暴潮灾害危险性的重要方法之一^[6]。概率统计方法多采用理论频率曲线拟合一定规律的极值分布来进行外延计算,通常以年极值序列为样本。由于台风影响具有随机性,并非所有统计站每年都能记录到台风风暴潮,因此统计了东海和南海共 11 个易受台风影响的统计站的逐年台风最大风暴潮序列,用极值 I 型分布(Gumbel 分布)曲线拟合计算重现期增水值,结果见图 17。由图可见,三沙、厦门和汕尾 3 个站重现期增水值的间隔很小,不足 1 m,说明其遭受特强风暴潮的概率较小,其分别与台湾岛的屏障作用和开阔陆架的地形因素有关,这 3 个区域不易出现特别极端

的台风风暴潮;而珠江口和雷州半岛东岸沿海 50 年一遇~500 年一遇增水值的增加幅度很大,说明这些地区对台风风暴潮变化敏感,易出现强的风暴增水,危险性较大。

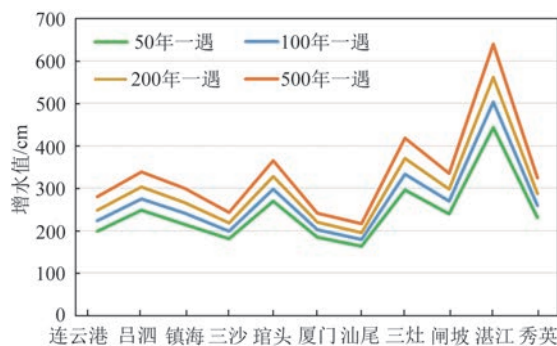


图 17 各站台风风暴潮不同重现期值

Fig.17 Return values of tropical storm surges at each stations

5 结论和讨论

基于 1980—2019 年影响我国沿海的台风风暴潮的过程高潮位和最大增水值,统计分析了我我国沿海台风风暴潮时空分布特征。结果表明:

①我国沿海台风风暴潮过程频数在 40 年间呈略下降的趋势,但并未通过显著性检验,对应台风研究也表明,1980 年以来西北太平洋热带气旋频数呈下降趋势^[34-35],但登陆频数变化不大^[36],此处登陆

频数包含了所有西北太平洋的登陆台风,而1949年以来登陆我国的热带气旋数量也呈下降趋势^[37]。

②近10年来,台风风暴潮的增水强度向强弱两级分化,增水年极值在40年间呈上升趋势;增水2 m以上的大台风风暴潮过程频数在近10年显著增加,且波动幅度也增大,40年间整体呈略上升的趋势,通过显著性为0.1的 F 检验,这可能与西北太平洋西部强热带气旋频数^[35]及登陆台风强度^[36,38-39]增加相关。

③增水1 m以上及超警的台风风暴潮过程在9月最多,但增水2 m以上的大台风风暴潮过程8月略多于9月,这不仅与8月登陆我国的热带气旋数量最多相对应^[37],也可能与台风尺度在8月达到峰值有关^[40]。

④浙江—福建北部沿海以及珠江口和雷州半岛沿海是我国大台风风暴潮过程的频发地区,也是台风风暴增水极值较高的地区,风暴潮超警过程在浙闽北沿海出现频数最多。

⑤统计了近40年中造成我国沿海验潮站台风风暴潮极值的台风,其中有接近一半出现在近10年,极有可能说明近10年影响我国沿海的强台风有增强的态势。

由于资料限制,本文仅对40年的台风风暴潮特征做了浅显分析。台风风暴潮是影响我国沿海的主要风暴潮类型,在气候变化大背景下,台风风暴潮的变化情况及其对气候变化的响应情况、其危险性是否增加、增加程度如何等都需要更多完整和长时间序列的数据支持以及更深入的归因检测分析。但从另一方面来看,由于台风风暴潮是台风直接影响的结果,其演变特征在一定程度上也反应了台风近岸的变化特征,在台风观测资料以及不同机构数据不一致所导致的台风研究结果不确定^[35,39]的情况下,可作为气候变化下台风研究结果的佐证。例如,台风风暴潮增水强度向强弱两级分化,若结合过程对应的台风强度分析,有可能间接印证北太平洋西部台风强度向两级化增加的趋势^[41]。

参考文献:

- [1] 冯士掣. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
FENG S Z. Introduction to storm surge[M]. Beijing: China Science Press, 1982.
- [2] 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. GB/T 19721.1-2017 海洋预报和警报发布 第1部分: 风暴潮警报发布[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 19721.1-2017 The issue of marine forecasts and warnings—Part 1: The issue of storm surge warnings[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [3] 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. GB/T 17839-2011 警戒潮位核定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 17839-2011 Specification for warning water level determination[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [4] 国家海洋局. 风暴潮灾害风险评估和区划技术导则[S]. 北京: State Oceanic Administration. Guideline for risk assessment and zoning of storm surge disaster[S]. Beijing.
- [5] 自然资源部/国家海洋局. 中国海洋灾害公报[EB/OL]. 1989-2019 [2020-07-10]. <http://www.nmdis.org.cn/hygb/zghyzhgb/>.
Ministry of Natural Resources / State Oceanic Administration. Bulletin of China Marine Disaster[EB/OL]. 1989-2019[2020-07-10]. <http://www.nmdis.org.cn/hygb/zghyzhgb/>.
- [6] 冯爱青, 高江波, 吴绍洪, 等. 气候变化背景下中国风暴潮灾害风险及适应对策研究进展[J]. 地理科学进展, 2016, 35(11): 1411-1419.
FENG A Q, GAO J B, WU S H, et al. A review of storm surge disaster risk research and adaptation in China under climate change [J]. Progress in Geography, 2016, 35(11): 1411-1419.
- [7] 张月霞, 王辉. 台风风暴潮灾害风险评估研究综述[J]. 海洋预报, 2016, 33(2): 81-88.
ZHANG Y X, WANG H. Review of risk assessment of typhoon storm surge disaster[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(2): 81-88.
- [8] 王慧, 刘秋林, 李欢, 等. 海平面变化研究进展[J]. 海洋信息, 2018, 33(3): 19-25.
WANG H, LIU Q L, LI H, et al. Latest research and progress on sea level change[J]. Marine Information, 2018, 33(3): 19-25.
- [9] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 全球变暖和海平面上升[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(6): 700-703.
ZHAO Z C, LUO Y, HUANG J B. Global warming and sea level rising[J]. Climate Change Research, 2019, 15(6): 700-703.
- [10] WU L G, ZHAO H K. Dynamically derived tropical cyclone intensity changes over the Western North Pacific[J]. Journal of Climate, 2012, 25(1): 89-98.
- [11] 赵宗慈, 江滢. 热带气旋与台风气候变化研究进展[J]. 科技导报, 2010, 28(15): 88-96.
ZHAO Z C, JIANG Y. Review on climate changes of tropical cyclones and typhoons[J]. Science & Technology Review, 2010,

- 28(15): 88-96.
- [12] 顾成林, 康建成, 闫国东, 等. 全球变暖背景下西北太平洋热带气旋活动的时空变化特征及潜在风险分析[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 89-96.
- GU C L, KANG J C, YAN G D, et al. Spatial and temporal variation characteristics and potential risk analysis of tropical cyclone activities in the Northwest Pacific ocean under the background of global warming[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 89-96.
- [13] 李杰, 杜凌, 张守文, 等. A1B 气候情景下海平面变化对东中国海风暴潮的影响[J]. 海洋预报, 2014, 31(5): 20-29.
- LI J, DU L, ZHANG S W, et al. Impact of sea level Variations on storm surge under SRES A1B scenario in the East China Sea[J]. Marine Forecasts, 2014, 31(5): 20-29.
- [14] 仇天宇, 于福江, 董剑希, 等. 海平面上升对河北黄骅台风风暴潮漫滩影响的数值研究[J]. 海洋通报, 2010, 29(5): 499-503.
- ZHANG T Y, YU F J, DONG J X, et al. Numerical research on effects of mean sea level on storm surge inundation in Huanghua [J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(5): 499-503.
- [15] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 23-30.
- YANG G S. Historical change and future trends of storm surge disaster in China's coastal area[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(3): 23-30.
- [16] 蔡榕硕. 气候变暖加剧我国沿海地区全球变化综合风险[J]. 科技纵览, 2020(1): 73-75.
- CAI R S. Global warming exacerbates the comprehensive risk of global change in China's coastal areas[J]. IEEE Spectrum, 2020 (1): 73-75.
- [17] 方佳毅, 史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2019, 38(5): 625-636.
- FANG J Y, SHI P J. A review of coastal flood risk research under global climate change[J]. Progress in Geography, 2019, 38(5): 625-636.
- [18] FENG X B, TSIMPLIS M N. Sea level extremes at the coasts of China[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(3): 1593-1608.
- [19] FENG J L, VON STORCH H, JIANG W S, et al. Assessing changes in extreme sea levels along the coast of China[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(12): 8039-8051.
- [20] MENÉNDEZ M, WOODWORTH P L. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C10): C10011.
- [21] WOODWORTH P L, MENÉNDEZ M, GEHRELS W R. Evidence for century-timescale acceleration in mean sea levels and for recent changes in extreme sea levels[J]. Surveys in Geophysics, 2011, 32(4-5): 603-618.
- [22] WAHL T, CHAMBERS D P. Evidence for multidecadal variability in US extreme sea level records[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(3): 1527-1544.
- [23] ABEYSIRIGUNAWARDENA D S, WALKER I J. Sea level responses to climatic variability and change in northern British Columbia[J]. Atmosphere-Ocean, 2008, 46(3): 277-296.
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 39418-2020 风暴潮等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. GB / T 39418-2020 Grades of storm surge[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [25] 郭洪寿. 我国潮灾灾度评估初探[J]. 南京大学学报, 1991(5): 18-22.
- GUO H S. Preliminary study of storm surge disaster assessment in China[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 1991(5): 18-22.
- [26] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [27] 王喜年. 风暴潮预报知识讲座[J]. 海洋预报, 2001, 18(1): 73-78.
- WANG X N. Lectures on storm surge forecasting[J]. Marine Forecasts, 2001, 18(1): 73-78.
- [28] 王喜年. 风暴潮预报知识讲座[J]. 海洋预报, 2001, 18(2): 67-69.
- WANG X N. Lectures on storm surge forecasting[J]. Marine Forecasts, 2001, 18(2): 67-69.
- [29] 于茜倩, 谢冬梅, 陈永平, 等. 1979-2019 年影响中国沿海的热带气旋与 ENSO 变化关系初探[J]. 海洋通报, 2022, 41(1): 29-38.
- YU Q Q, XIE D M, CHEN Y P, et al. A preliminary study on the relationship between tropical cyclones affecting the coastal areas of China and ENSO during 1979-2019[J]. Marine Science Bulletin, 2022, 41(1): 29-38.
- [30] 叶琳, 于福江. 我国风暴潮灾的长期变化与预测[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 89-96.
- YE L, YU F J. The long-range change and forecast of storm surge disasters in China[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(1): 89-96.
- [31] 朱先德. 登陆后不同路径再入海台风的观测分析与数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- ZHU X D. An observational investigation and numerical study on entering back to ocean typhoon with different track after landfalling[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [32] 曹美兰, 邱洪芳. 台风远离后舟山海域突发强风的诊断分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2006, 25(2): 170-175.
- CAO M L, QIU H F. Diagnoses of a sudden gale in the Zhoushan sea area after the typhoon leaving away[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2006, 25(2): 170-175.
- [33] 朱佩君, 郑永光, 陶祖钰. 台风变性再度发展的动能收支分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(1): 93-103.
- ZHU P J, ZHENG Y G, TAO Z Y. Kinetic energy buget of typhoon during extratropical transition[J]. Acta Scientiarum

- Naturalum Universitatis Pekinesis, 2005, 41(1): 93-103.
- [34] 张冬娜, 张翰, 程旭华, 等. 3套资料中西北太平洋热带气旋活动特征的比较分析[J]. 海洋学研究, 2020, 38(3): 48-57.
- ZHANG D N, ZHANG H, CHENG X H, et al. Comparative analysis on the characteristics of tropical-cyclone activities over the western North Pacific in three datasets[J]. Journal of Marine Sciences, 2020, 38(3): 48-57.
- [35] 吴泽铭, 张冬娜, 胡春迪, 等. 西北太平洋热带气旋频数及生成位置的气候变化研究进展[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(4): 1-10.
- WU Z M, ZHANG D N, HU C D, et al. Research progress on climate changes in frequency and genesis location of western North Pacific tropical cyclone[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(4): 1-10.
- [36] 季倩倩. 近40年西北太平洋登陆热带气旋强度变化特征研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2020.
- JI Q Q. Study on the changes of land-falling tropical cyclone intensity in the western North Pacific over the past 40 years[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2020.
- [37] 宿海良, 袁雷武, 王猛, 等. 1949-2019年登陆中国的热带气旋特征及致灾分析[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(3): 382-387.
- SU H L, YUAN L W, WANG M, et al. Characteristics and disaster analysis of tropical cyclones landing in China in 1949-2019[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(3): 382-387.
- [38] MEI W, XIE S P. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(10): 753-757.
- [39] 卢莹, 赵海坤, 赵丹, 等. 1984-2017年影响中国热带气旋灾害的时空特征分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(6): 45-61.
- LU Y, ZHAO H K, ZHAO D, et al. Spatial-temporal characteristic of tropical cyclone disasters in China during 1984-2017[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(6): 45-61.
- [40] 梁梅, 梁沛乐, 范伶俐, 等. 1980-2016年西北太平洋热带气旋尺度与强度关系[J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(3): 45-52.
- LIANG M, LIANG P L, FAN L L, et al. Relationship between tropical cyclone scale and intensity over the Northwest Pacific from 1980 to 2016[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2022, 42(3): 45-52.
- [41] SONG J J, KLOTZBACH P J, TANG J P, et al. The increasing variability of tropical cyclone lifetime maximum intensity[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 16641.

Characteristic analysis of tropical storm surges affecting the coastal area of China in the past 40 years

FU Xiang^{1,2}, LIANG Sendong¹, GUO Honglin¹, LI Mingjie¹, YE Lin¹

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: Statistical analysis of temporal and spatial characteristics of tropical storm surges (TSS) has been conducted for more than 400 events affecting the coastal area of China in 1980—2019. It is shown that the number and variation amplitude of severe TSS event with maximum residual value exceeding 2 meters have an increasing trend during the past 40 years, especially in the past decade. Meanwhile, the number of weak TSS event has increased. The annual extreme TSS also increased in the past 40 years. In the past 40 years, nearly 50% of the typhoons which cause extreme surges appeared in the last decade, which is likely to indicate that the strong typhoons affecting the coastal area of China are increasing. Over-warning-threshold TSS events occurred in the southern Zhejiang and northern Fujian Province, but number of extreme surges in these two regions is smaller than that in the Pearl River Estuary and the East Bank of Leizhou Peninsula, where own the highest risk of TSS hazard.

Key words: tropical storm surge; surge value; over-warning-threshold; temporal and spatial distribution