

# 我国台风风暴潮灾害损失的时空演变特征分析

刘旭<sup>1,2,3</sup>, 王峥<sup>1,3\*</sup>, 梁颖祺<sup>1,3</sup>, 蔡文博<sup>1,3</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 北京林业大学 经济管理学院, 北京 100083; 3. 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:** 综合 Mann-Kendall 趋势分析法、Pettitt 突变检验法、Morlet 小波分析法和标准差椭圆空间分析法等统计学分析方法, 分析得到我国风暴潮灾害损失的时空分布和演变趋势。结果表明: 从时间上来看, 1989—2018 年间, 我国风暴潮灾害频次呈显著上升趋势, 死亡人口和直接经济损失呈下降趋势; 1999 年和 2009 年为人口死亡数量的突变点, 突变点后呈加速下降趋势; 从 2006 年开始直接经济损失呈加速下降趋势, 这与我国防灾减灾政策的不断深化有关。在周期波动方面, 风暴潮灾害损失频次具有 2 a 和 8 a 的显著主周期特征; 死亡人口与频次波动规律相似, 但主周期不具有显著性; 直接经济损失较人口和频次波动更为复杂, 存在 2~8 a 的多重主周期嵌套特征, 2 a 和 8 a 主周期具有显著性, 3~5 a 主周期不显著。从空间上来看, 因风暴潮造成的损失在我国东南沿海地区最为严重, 30 年间风暴潮频次呈现出高发区向西南转移和更为聚集的特征, 人口损失和直接经济损失均呈现出在 1999—2008 年间聚集的现象, 死亡人口整体没有显著的偏移趋势, 直接经济损失呈现出向西南转移的特征。

**关键词:** 风暴潮灾害; 灾害损失; 时空分布; 演变趋势; 减灾措施

**中图分类号:** P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)06-0021-12

## 0 引言

风暴潮灾害居海洋灾害之首, 世界上绝大多数因台风引起的特大海岸灾害(人员伤亡、财产损失)大都是由风暴潮造成的<sup>[1-2]</sup>, 其导致的经济损失占我国全部海洋灾害经济损失的 90% 以上<sup>[3]</sup>。我国政府和学术界对海岸带灾害特别是风暴潮灾害十分重视, 不断完善灾害预警和应急响应体系<sup>[4]</sup>、预防和抵御台风风暴潮造成的灾害损失已成为沿海地区防灾减灾工作中的重要研究课题之一<sup>[5]</sup>。风暴潮灾害经济损失的评估预测较为复杂<sup>[6]</sup>, 其影响机制也尚未清晰<sup>[7]</sup>。通过分析我国风暴潮灾害损失的时空分布特征及其长期变化规律, 有助于提高灾害损失的机制研究和中长期预报能力, 并深入推进防灾减灾能力建设<sup>[4, 8]</sup>。

已有学者针对我国风暴潮灾害的时空分布开展了研究工作, 并根据验潮站历史资料, 分别总结了我国南海区域<sup>[8]</sup>、浙江省<sup>[9]</sup>、福建省<sup>[10]</sup>和广西沿海<sup>[11]</sup>风暴潮增水的时空分布特征。侯京明等<sup>[1]</sup>根据验潮站资料, 统计了我国 1949—2009 年间达到红色预警级别的重大风暴潮过程, 结果表明风暴潮次数呈上升趋势。孙佳等<sup>[12]</sup>对东海沿岸台风的路径、发生频率及风暴潮增水特征进行了系统分析, 结果表明东海潮位有逐年增加的趋势, 登陆型台风的损失最为严重。SHI 等<sup>[13]</sup>根据 49 个验潮站数据, 绘制了我国风暴潮增水风险等级图。这些研究大多基于验潮站风暴潮潮位资料, 反应的是风暴潮灾害损失的危险性的变化状况, 但是尚未对风险暴露程度、脆弱性和抗灾能力等综合因素造成的风暴潮灾害时空分布特征进行分析。

收稿日期: 2023-04-03。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资助项目(2021YFB3900405); 国家自然科学基金(41976221、41576029)。

作者简介: 刘旭(1986-), 女, 工程师, 博士, 主要从事海洋灾害评估及系统分析工作。E-mail: fairyjube@126.com

\*通信作者: 王峥(1989-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事地理信息系统和遥感在海洋预报领域的应用研究工作。E-mail: wz\_eternal@163.com

谢丽等<sup>[4]</sup>分析了近20年来我国沿海地区风暴潮灾害的次数和强度、时空分布及其与灾害损失的相关关系,结果表明风暴潮灾害时空分布具有相对集中性,风暴潮强度与灾害损失有一定的相关关系,但不一定成正比。甘申东等<sup>[5]</sup>系统总结了我国1990—2009年南海风暴潮的灾害特征,结果表明特大风暴潮的发生频率和损失强度均有上升趋势。SHI等<sup>[14]</sup>系统分析出1949—2013年我国风暴潮损失和死亡人口均呈下降趋势。李程等<sup>[15]</sup>分析了福建省2008—2017年风暴潮的时空分布规律、灾害经济损失现状以及灾害特征,结果表明风暴潮灾害在福建省具有发生频次高、影响范围广、灾害损失重的特点。WANG等<sup>[16]</sup>系统梳理了我国1983—2018年172次风暴潮过程的时空分布特征,结果表明1997年后风暴潮损失具有显著下降趋势,广东省、福建省和浙江省风暴潮灾害次数占全国的57%,总损失占全国的80%。以上研究成果虽然对我国风暴潮灾害损失进行了系统分析,但都局限于定性分析,缺乏量化的评判依据。本研究旨在对风暴潮灾害频次、灾害损失和死亡人口等因素进行系统梳理的基础上,采用趋势检验方法、突变点检验法、周期分析方法和空间统计方法等对我国风暴潮灾害损失的趋势、突变点、周期和空间分布进行量化分析研究,以期对风暴潮灾害预防及治理提供更为科学的依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据预处理

风暴潮分台风风暴潮和温带风暴潮,考虑到两者的致灾程度以及与实测资料的统一,本研究的风暴潮均指台风风暴潮<sup>[17]</sup>。根据1989—2018年《中国海洋灾害公报》的统计结果<sup>[18-19]</sup>,系统梳理了我国30年间风暴潮过程的频次、人口和直接经济的损失,采用各年份居民消费价格指数(Consumer Price Index, CPI)将经济损失数据统一折现到2018年<sup>[16-17]</sup>,构建我国1989—2018年风暴潮频次、直接经济损失和死亡(失踪)人口的时间序列数据。

### 1.2 Mann-Kendall趋势分析法

Mann-Kendall趋势分析法对变量不需要分布

假定,是世界气象组织推荐并广泛使用的非参数检验方法。对序列为 $n$ 的样本构造统计量 $Z$ :

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) - 1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)}} \quad (1)$$

式中: $i$ 为第 $i$ 个位置, $j$ 为第 $i+1$ 位置; $X_i$ 为第 $i$ 个位置的数, $X_j$ 为第 $j$ 个位置的数; $n$ 为数据量,代表序列长度。 $Z > 0$ 为上升趋势, $Z = 0$ 为无趋势, $Z < 0$ 为下降趋势。 $Z$ 的绝对值越大,说明序列变化趋势越明显,采用 $t$ 检验进行趋势显著性检验<sup>[20]</sup>。

### 1.3 Pettitt突变检验法

Pettitt突变检验法是基于秩的非参数检验法,该方法受异常值影响较小,因此被广泛应用于水文气象领域<sup>[21]</sup>。构造统计量:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_t - x_j) \quad (2)$$

式中: $t$ 为第 $t$ 个位置; $N$ 为序列总长度; $x_t$ 为第 $t$ 个位置的数值, $x_j$ 第 $j$ 个位置的数值。

原假设为数据序列不存在突变点,对统计量 $|U_{t,N}|$ 的最大值采用 $t$ 检验进行显著性检验<sup>[22]</sup>。

### 1.4 Morlet小波分析法

小波分析以傅里叶变换为基础,通过引入可伸缩和平移的小波函数,可将时间序列从时域和频域两个角度进行分解,进而揭示序列的周期波动特征<sup>[23]</sup>。Morlet小波分析法已被用于水文<sup>[21,24]</sup>、气候<sup>[22]</sup>等多个领域,也有学者将其用于海平面周期变化研究<sup>[23]</sup>。Morlet复小波变换基函数可表示为:

$$\varphi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} \exp \left[ -\frac{t^2}{f_b} + (2\pi f_c t) i \right] \quad (3)$$

式中: $f_b$ 为小波带宽; $f_c$ 为小波中心频率。小波能量谱 $|\varphi(\gamma, t)|^2$ 为小波变换幅值的平方,通过小波频谱图可定性进行峰值分析,采用 $t$ 检验法进行峰值显著性分析<sup>[25]</sup>。

### 1.5 标准差椭圆分析法

标准差椭圆分析法是从定性的角度分析要素的空间分布特征,反映要素在空间不同方向上的聚

集分布趋势。标准差椭圆主要由沿长轴的标准差、沿短轴的标准差和方向角构成。长轴表示数据分布的方向,短轴表示数据分布的范围,短半轴越短,表示数据集聚越明显,长短半轴的值差距越大,表示数据的方向性越明显<sup>[26]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 我国风暴潮灾害损失的时间序列变化特征

#### 2.1.1 风暴潮频次

1989—2018年间,《中国海洋灾害公报》共统计了159次风暴潮灾害过程<sup>[18-19]</sup>,年均均为5.3次,其中2013年风暴潮灾害次数最多,为10次,1997年、1998年、1999年、2022年灾害次数最少,均为2次

(见图1a)。采用Mann-Kendall趋势分析法构造的统计量 $Z$ 大于0,经过 $t$ 检验, $p$ 值在95%置信区间内小于0.05,说明我国风暴潮灾害频次具有显著上升趋势(见表1)。Pettitt突变检验法结果表明2005年存在突变点(见图1b),1989—2005年风暴潮年平均频次为4.1次,2006—2018年为6.56次。Morlet小波分析法检验结果表明,1989—2018年的风暴潮灾害存在2~8 a的周期波动特征(见图1c),图中红色区域为通过 $t$ 检验的显著主周期。经检验,1989—2005年和2006—2018年的风暴潮频次时间序列在95%置信区间内无显著的趋势特征和突变点特征,1989—2018年间仅存在一个突变点(见表1),即2005年后上升趋势速度增快,这个突变点与WANG等<sup>[16]</sup>的研究结论一致,较FANG等<sup>[27]</sup>研究出的风暴

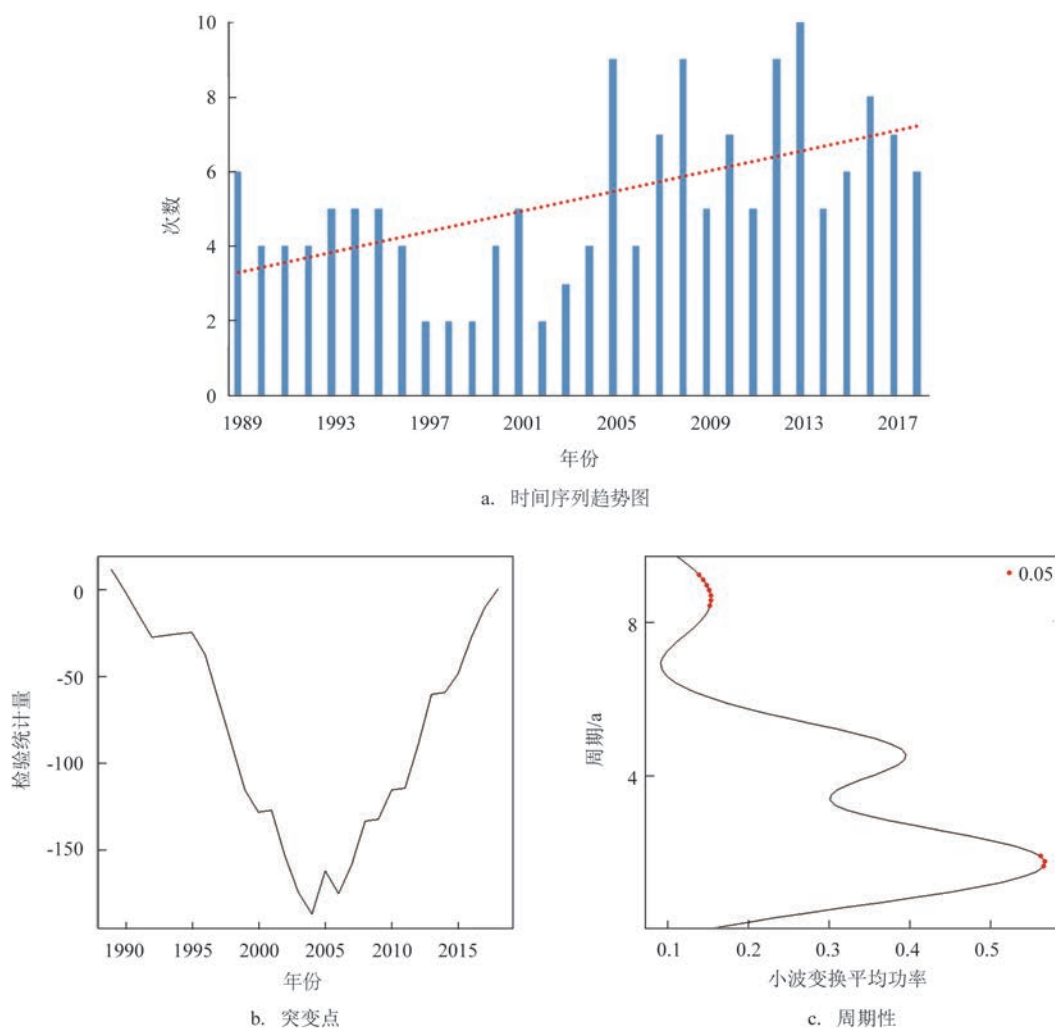


图1 1989—2018年我国风暴潮频次时间序列变化特征

Fig.1 Time series characteristics of storm surge frequency in China from 1989 to 2018

表1 时间序列趋势及突变点检验结果

Tab.1 Time series trend and mutation point test results

类别	风暴潮频次	死亡(失踪)人口	直接经济损失
趋势性	$Z=2.81, p=0.005$	$Z=-2.59, p=0.009$	$Z=-2.64, p=0.008$
突变点	2005年: $ U =228, p=0.004$	1999年: $ U =162, p=0.02$	1997年: $ U =34, p=0.52$
	1996年: $ U =38, p=0.37$	2009年: $ U =97, p=0.01$	2006年: $ U =138, p=0.04$
	2012年: $ U =45, p=0.12$		2015年: $ U =61, p=0.42$

潮频次趋势突变点为2000年偏晚。

根据《中国海洋灾害公报》的统计结果,风暴潮发生频次存在2~8 a的周期波动,该规律与TORRENCE等<sup>[28]</sup>采用Niño3海表面温度分析得到的厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)指数存在2~7 a的周期波动较为接近。台风风暴潮发生频次与登陆我国沿海地区的热带气旋密切相关<sup>[8,29]</sup>,我国受ENSO影响的台风在厄尔尼诺年频数较少,在拉尼娜年偏多<sup>[30]</sup>,尤其是南海地区台风活动频数与ENSO周期变化具有较好的相关性<sup>[31]</sup>。台风强度与ENSO指数也存在周期性变化<sup>[32-33]</sup>。HSU等<sup>[34]</sup>以台风能量周期变化为研究对象,得出台风能量与ENSO的相关系数为0.79。刘颖婧等<sup>[35]</sup>采用气旋能量(Accumulated Cyclone Energy, ACE)指数研究了台风强度与Niño3.4的相关性,结果表明厄尔尼诺年的ACE值与Niño3.4有较强的正相关,反之,拉尼娜年存在较强的负相关,其原因可能与ENSO事件年海气要素的异常变化有关。目前,主要研究集中于ENSO和热带气旋频次及强度的相关性,但对我国风暴潮与ENSO相关性的研究较少<sup>[36-37]</sup>,且尚未得出明确结论。风暴潮过程除受台风影响外,还耦合了更多的影响因素<sup>[13]</sup>,因此还需更加深入的探讨。

#### 2.1.2 死亡(含失踪)人口

1989—2018年间,我国风暴潮导致的死亡(含失踪)人口数量有显著下降趋势(见表1、图2a),30年间死亡(含失踪)共计4 440人,平均年死亡(含失踪)133人。1994年死亡(含失踪)人口数量最多,为1 240人,占总死亡(含失踪)人口的28%;1996年和1990年为次大值,分别为523人和462人。30年间存在2个突变点,分别为1999年和2009年(见图2b),说明2000年后风暴潮灾害死亡(含失踪)人口数量较1989—1999年下降速度增快,2010—2018年

较2000—2009年的下降速度进一步增快。1989—1999年间死亡(含失踪)共计3 681人,约占总人口损失的83%;2000—2010年间死亡(含失踪)共计686人,约占总人口损失的15%;2011—2018年间死亡(含失踪)共计33人,占总人口损失不到1%。从周期波动看,主周期规律与频次波动规律较为一致,但在95%置信区间内不存在显著性(见图2c)。

通过Mann-Kendall趋势分析法、Pettitt突变检验法对我国风暴潮导致的人口损失进行统计检验,结果表明1989—2018年间人口损失数量具有显著的下降趋势,在1999年和2009年存在突变点。2000—2009年人口损失数量减缓较1989—1999年更为明显,推测与2000年后大力开展防潮固堤等基础设施有关。在9417号台风“弗雷德”造成我国历史上人员伤亡最大的风暴潮灾害后,浙江省提出了“建千里海塘,保千万生灵”的迫切需求,2000年基本完成了标准海塘的建设工作<sup>[16]</sup>,有效降低了人员伤亡<sup>[16,18]</sup>。2009年前后,经过持续不断的海岸线工程防护建设,我国海塘长度与海岸线长度比达到60%以上<sup>[29]</sup>,广东省甚至高达90%以上<sup>[38]</sup>,进一步巩固了人民安全防线<sup>[16,18]</sup>。随着基础设施的不断完善,我国还不断推进了风暴潮预警报及基准潮位核定工作,2011年发布的《警戒潮位核定方法技术规范(GB/T 17839—2011)》采用了4色警戒潮位核定方法,更符合海洋预警报及应急需求,为进一步实施应急减灾措施以降低风暴潮导致的人员损失提供了有效的决策辅助支撑<sup>[18]</sup>。

#### 2.1.3 直接经济损失

Mann-Kendall趋势分析法的结果表明,我国风暴潮导致的直接经济损失在1989—2018年间显著下降(见图3a、表1)。30年间直接经济损失共计5 083亿元,平均年损失为154亿元。1996年、1997年和2005年受风暴潮导致的直接经济损失最严重,

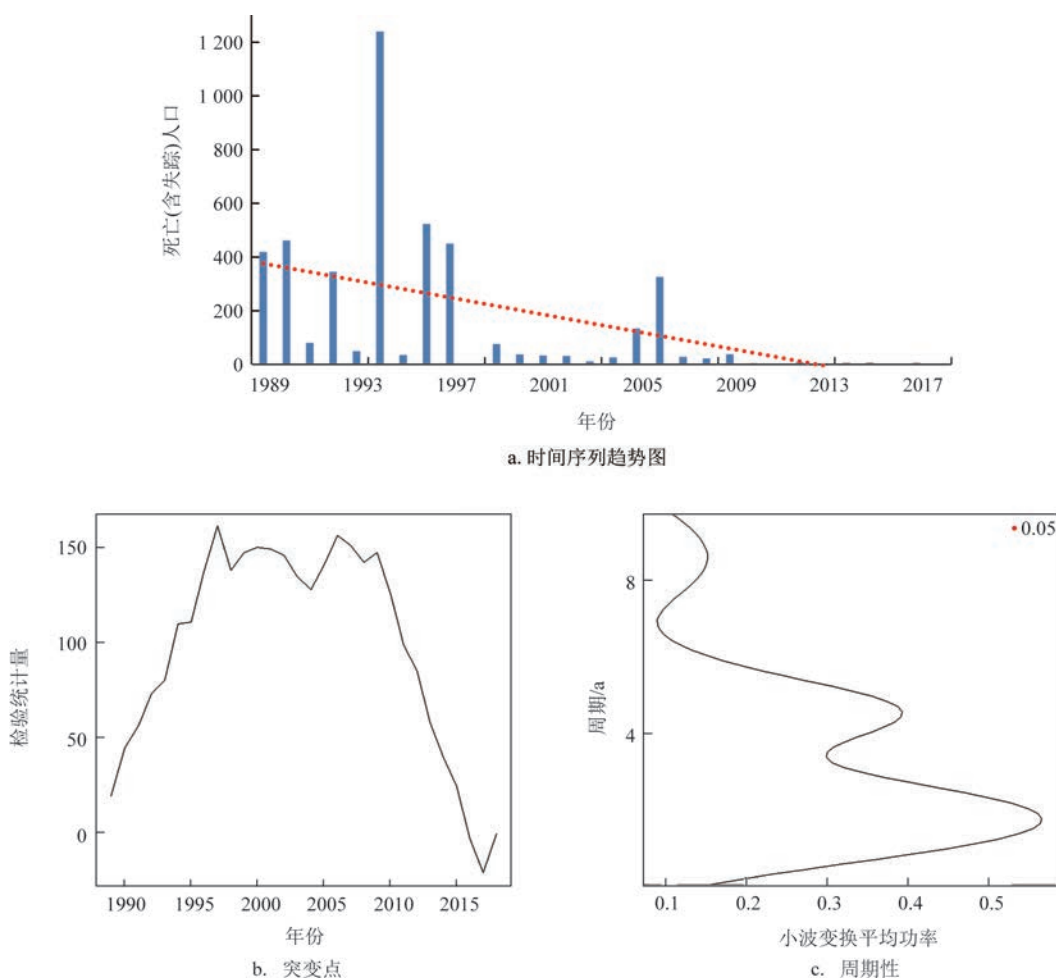


图2 1989—2018年我国风暴潮导致的死亡(失踪)人口时间序列变化特征

Fig.2 Time series of fatalities caused by storm surge in China from 1989 to 2018

依次为452亿元、466亿元和474亿元,合计占总经济损失的27%。1996年发生了两次红色警报级别的风暴潮灾害,分别为9608号台风“贺伯”和9615号台风“莎莉”引发的特大风暴潮灾害,两次台风过程造成直接经济损失452亿元。9711号台风“温妮”单次过程造成直接经济损失435亿元,是1989—2018年间造成直接经济损失最大的风暴潮过程。2005年共计发生9次风暴潮过程,包括1次红色警报和6次橙色警报过程,其中0518号台风“达维”和0519号台风“龙王”造成的直接经济损失均超过百亿元。

Pettitt突变检验法结果表明,2006年具有显著突变特征(见图3b、表1),说明2006年后由风暴潮造成的直接经济损失的下降速度更为明显。1989—2006年间直接经济损失为3701亿元,占总损失的73%,年均损失为206亿元;2007—2018年间直接经

济损失为1373亿元,占总损失的27%,年均损失为124亿元。从波动周期看,直接经济损失存在2~8a的显著周期振荡(见图3c),较图1c和图2c的波动规律更为复杂,还嵌套了3~5a的波动规律,说明风暴潮灾害直接经济损失较频次波动和人口损失波动更具有不确定性<sup>[27]</sup>。

我国风暴潮灾害直接经济损失突变点为2006年,这与中国全面加强风暴潮预警报工作的时间一致<sup>[16,18]</sup>,说明预警报水平的提升对灾害损失有缓解作用。2006年我国发布了《海洋观测预报工作方案》,是全面提升海洋观测预报服务水平的开端。2009年,国家海洋环境预报中心开发和改进了风暴潮灾害数值预报系统,经过10年的发展,预警的准确率稳步提升,预警时间从24h提高至72h以上,为防御风暴潮灾害争取了更加充足的时间;构建了

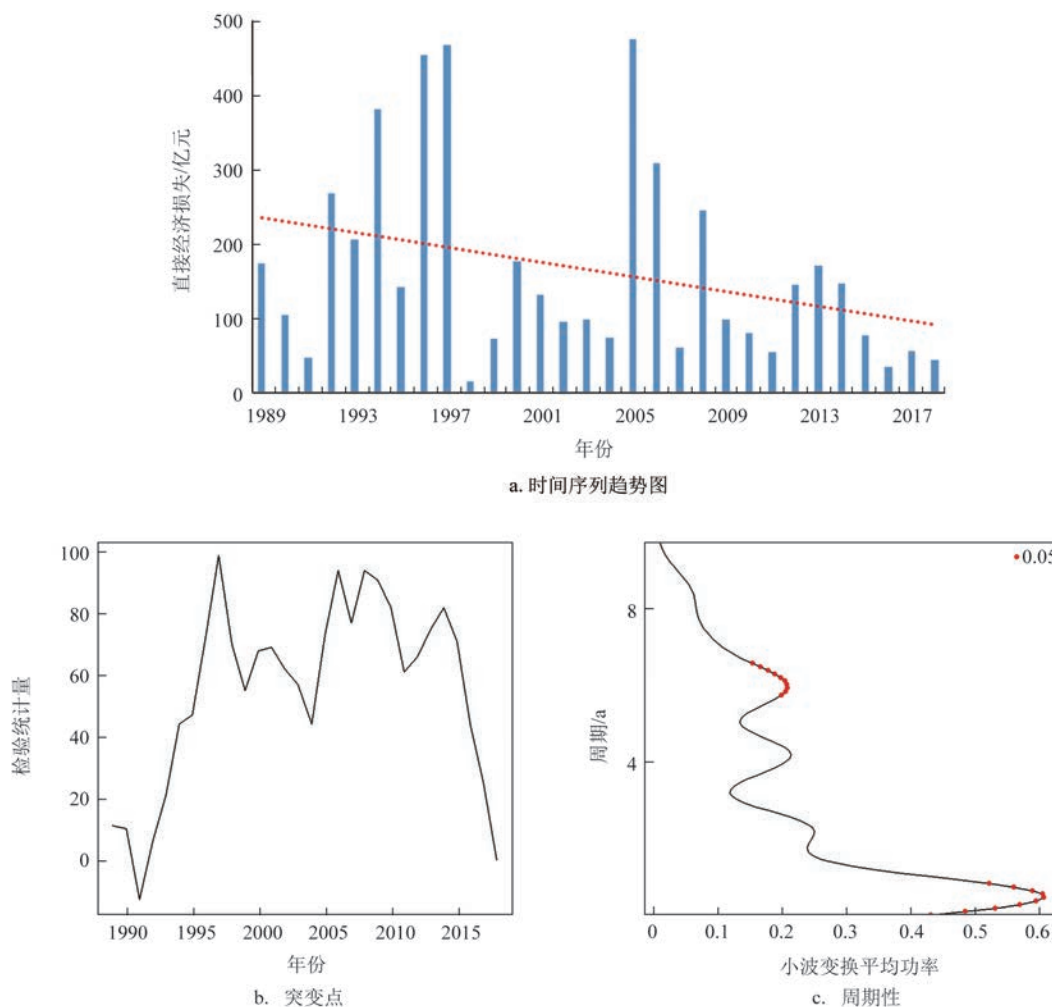


图3 1989—2018年我国风暴潮导致的直接经济损失时间序列变化特征

Fig.3 Time series of direct economic losses caused by storm surge in China from 1989 to 2018

较为完整的国家-海区-省-市四级海洋灾害预警业务体系,各级海洋预报机构上下联动,向社会公众和防汛部门提供预警信息,有效降低了灾害损失<sup>[18]</sup>;另外,全社会海洋灾害风险防范意识的提高也对有效降低经济损失有重要意义<sup>[39]</sup>。贾宁等<sup>[40]</sup>对比了台风“天鸽”(1713)和台风“山竹”(1822)两次风暴潮灾害对珠海造成的海水淹没和载体受损情况,在两次台风登陆点、强度、海岸工程设施、淹没区域高度相似的情况下,由于群众防灾减灾意识的进一步加强,使得因台风“山竹”风暴潮造成的损失远小于台风“天鸽”。

## 2.2 我国风暴潮灾害损失的空间变化特征

基于 ArcGIS10.5 平台的自然间断点分级方

法<sup>[41]</sup>,对 1989—2018 年间我国沿海 11 个省市的风暴潮灾害的发生频次、死亡人口、直接经济损失进行了分级,进一步采用标准差椭圆空间分析法,以每 10 a 为时间尺度,分析了我国 30 年间风暴潮灾害频次及损失的重心移动轨迹,结合标准差椭圆空间分析法分析了风暴潮灾害频次及损失的空间分布特征。

### 2.2.1 频次

采用自然间断点将我国沿海 11 个省市受风暴潮影响频次分成 3 个等级(见图 4),从重心分布范围来看,我国风暴潮灾害高发期的重心分布较为集中,东南沿海地区为风暴潮高发地区<sup>[8-10]</sup>。浙江省、福建省和广东省 30 年间风暴潮的发生频次占全国各省市合计频次的一半以上,其中广东省占沿海省

市总频次的21%<sup>[17]</sup>;广西壮族自治区、海南省、江苏省和上海市灾害发生频次处于第二等级,总计占比36%;北部沿海4个省市风暴潮发生频次共计占比10%。

1989—1998年、1999—2008年、2009—2018年3个阶段的风暴潮发生频次的空间分布方向基本一致,均为东北—西南方向,1989—1998年频次分布较为分散,另外两个阶段的方向角较1989—1998年向东南方向偏移10°左右。1999—2008年的椭圆中心点比1989—1998年向西南移动约80 km,2009—2018年的椭圆中心点比1999—2008年向西北方向移动了约52 km。1999—2008年和2009—2018年风暴潮发生频次总体呈现出空间分布更集中、发生地点向南方偏移的趋势(见图4)。

我国沿海各省市风暴潮的发生频次与台风登陆次数有直接关系,推测发生频次更为集中表征了台风登陆位置更加集中,该结论与TORRENCE等<sup>[28]</sup>采用1958—2017年联合台风预警中心和日本气象厅的台风最佳路径资料,分析得出的西北太平洋台风生成和登陆频次的变化规律的结论保持一致。陆晓婕等<sup>[29]</sup>对1951—2015年间登陆我国的台风的时空变化特征进行了分析,认为登陆位置具有周期性波动特征,1977—2000年台风登陆点有明显北移的趋势,2000—2010年台风登陆点开始向南偏移,也与本文研究结果较为一致。台风登陆位置与气候变化的关系是气候学领域的研究热点,台风登陆位置的影响因素较多,目前尚未形成统一论<sup>[26,42]</sup>。

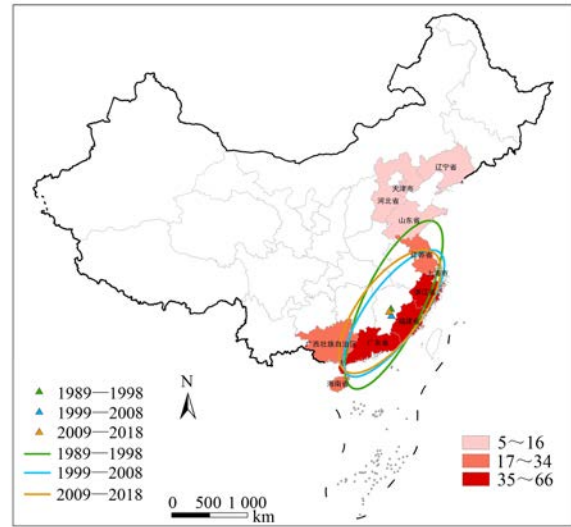


图4 1989—2018年我国台风风暴潮灾害发生频次空间分布  
Fig.4 Spatial distribution of typhoon storm surge disaster frequency in China during 1989—2018

在气候变化的影响下,如何对我国风暴潮灾害及其造成的损失进行分析,有待于进一步探讨。

#### 2.2.2 死亡(失踪)人口

采用自然间断点将我国沿海11个省市风暴潮灾害的死亡(含失踪)人口数量分成5个等级。1989—2018年间,浙江省人口损失最为严重(见图5),总计为2 351人,仅1994年9417号台风“弗雷德”就造成了1 240人死亡(含失踪),占30年间浙江省总人口损失的53%;浙江省、福建省和广东省的人口损失分别占全国人口损失的53%、20%、11%,合计占全

表2 1989—2018年我国台风风暴潮灾害标准差椭圆参数

Tab.2 Elliptic parameters of standard deviation of typhoon storm surge disasters in China from 1989 to 2018

灾害指标	时间段	中心经度	中心纬度	长半轴/m	短半轴/m	方向角/(°)
频次	1989—1998年	116.06°E	27.43°N	1 089 979.66	348 307.71	29.30
	1999—2008年	116.11°E	26.69°N	905 016.21	318 870.65	39.54
	2009—2018年	115.62°E	26.86°N	874 213.11	365 022.46	40.54
死亡人口	1989—1998年	115.37°E	24.01°N	909 205.66	203 497.89	47.32
	1999—2008年	115.33°E	23.33°N	811 158.61	106 610.19	50.96
	2009—2018年	115.54°E	24.04°N	821 265.83	209 877.59	46.51
直接经济损失	1989—1998年	117.37°E	25.37°N	816 563.49	208 586.84	50.92
	1999—2008年	116.22°E	24.30°N	797 924.37	117 133.88	50.99
	2009—2018年	115.08°E	23.87°N	834 172.43	221 935.21	45.49

国总人口损失的84%。30年间山东省风暴潮灾害造成的人口死亡(含失踪)共计318人,占总人口损失的7%,主要由9216号台风“玻莉”和9711号台风“温妮”造成,两次台风过程分别登陆福建长乐和浙江温岭,造成了全国范围内“六省二市”的特大风暴潮灾害<sup>[3]</sup>。山东省地处我国北部海域,受台风影响频次较低(见图4),台风强度也较弱,但由风暴潮灾害造成的人口损失却高于广西壮族自治区和海南省,与广东省持平。在以上两次特大风暴潮灾害过程中,台风“玻莉”造成福建省人口损失13人,台风“温妮”造成浙江省人口损失236人,山东省的人口损失数值远高于福建省,仅次于浙江省,推测这与山东省较东南沿海地区抗灾能力弱有直接关系<sup>[14]</sup>。

分析1989—1998年、1999—2008年、2009—2018年3个阶段台风风暴潮灾害造成的人口死亡(含失踪)数量的空间分布规律。结果表明,3个阶段死亡(含失踪)人口数量的空间分布方向基本一致,均为东北—西南方向。1989—1998年和2009—2018年椭圆中心点的变化不明显,1999—2008年的椭圆中心点较前两个阶段向南偏移75 km。在3个阶段中,1999—2008年椭圆的短轴明显缩短,说明死亡(含失踪)人口数量出现了集聚现象。3个阶段的方向角变化不明显,死亡(含失踪)人口数量的空

间分布方向没有显著偏移。1999—2008年间,福建省遭遇的9914号台风“丹恩”、0519号台风“龙王”和0608号台风“桑美”分别造成72人、67人和324人死亡(含失踪),推测是造成这一时间段人口损失集聚的主要原因。人口损失除与台风和风暴潮强度的自然属性有关外,还主要受灾前人口是否转移和渔船是否及时回港等灾前预警和应急管理等因素影响,随着防灾减灾水平的提高,我国沿海省市呈现出人口损失显著下降的特征(见图2)。

### 2.2.3 直接经济损失

采用自然间断点将我国沿海11个省市由风暴潮灾害造成的直接经济损失分成4个等级。浙江省、福建省和广东省的经济损失合计占全国总损失的74%(见图6),广东省经济损失占比最高,为30%,浙江省为24%,福建省为23%,海南省为9%。山东省较江苏省的直接经济损失略高,两者分别占比5%和3%。直接经济损失与风暴潮频次和强度、沿海地区地形等自然属性有关<sup>[4]</sup>,还与经济发达水平和抗灾能力有密切关系<sup>[16]</sup>。东南沿海三省风暴潮最为频发(见图4),也是我国人口数量和经济水平最高的区域,风暴潮灾害导致的直接经济损失最为严重。随着沿海地区对灾害管理的高度重视,通过防潮设施、风暴潮预警报系统、应急管理水平等方

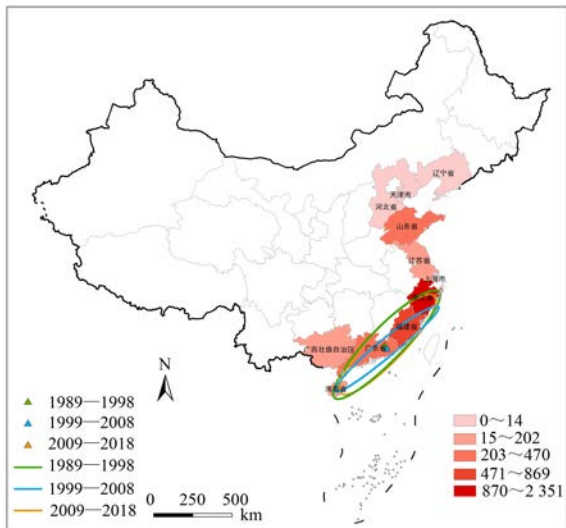


图5 1989—2018年我国台风风暴潮灾害死亡人口(含失踪)数量空间分布

Fig.5 Spatial distribution of typhoon storm surge disaster fatalities in China during 1989—2018

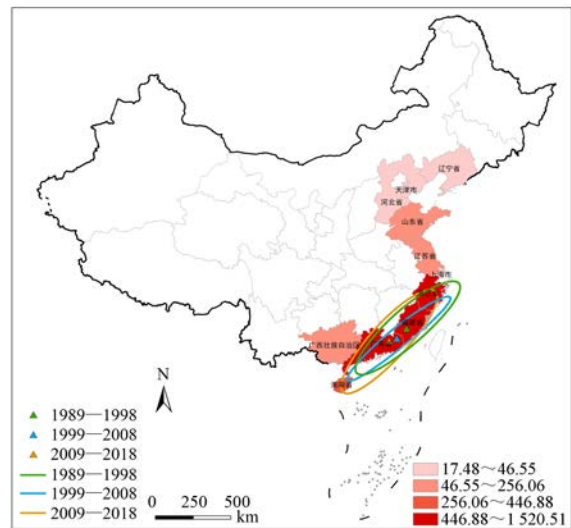


图6 1989—2018年我国台风风暴潮灾害直接经济损失空间分布

Fig.6 Spatial distribution of direct economic losses caused by typhoon storm surge disasters in China during 1989—2018

面防灾减灾水平的不断提升,基本形成了较为完善的应急管理机制,在一定程度上减少了灾害造成的损失<sup>[2,14]</sup>。

按照 1989—1998 年、1999—2008 年、2009—2018 年 3 个阶段分析风暴潮造成的直接经济损失的空间转移规律。结果表明,3 个阶段直接经济损失的空间分布方向基本一致,均为东北—西南方向(见图 6),中心点逐渐向西南方向移动,1999—2008 年的中心点比 1989—1998 年向西南方移动约 150 km,2009—2018 年比 1989—1998 年向西南方移动约 130 km;风暴潮灾害给福建省、广东省和海南省造成的直接经济损失与其他地区相比越来越明显,转移趋势与图 4 中风暴潮频次的空间转移趋势具有一致性,表现为向西南方向转移的特征。在 3 个阶段中,1999—2008 年间椭圆长轴和短轴明显减小,说明此阶段直接经济损失向福建省、广东省的南部城市集聚。在此期间,共发生了 3 次直接经济损失超百亿元的特大风暴潮过程,分别为 0519 号台风“龙王”、0608 号台风“桑美”和 0814 号台风“黑格比”,造成的直接经济损失分别为 199 亿元、339 亿元和 117 亿元,推测这是灾害损失集聚的主要原因。2009—2018 年间方向角较另外两个阶段向东北方向偏移约 5°,推测与 1409 号台风“威马逊”造成海南省直接经济损失占全国总损失的比例增大有关。

### 3 结论与展望

本文基于 1989—2018 年《中国海洋灾害公报》中风暴潮灾害的统计数据,对我国风暴潮灾害频次、死亡(含失踪)人口及直接经济损失的时空分布及演变特征进行了研究。主要结论如下:

①从时间分布特征来看,我国风暴潮灾害频次具有显著上升的趋势,2005 年后上升趋势尤为明显,风暴潮灾害导致的人口损失和直接经济损失具有显著下降趋势,死亡(含失踪)人口数量分别在 1999 年和 2009 年出现趋势突变点,直接经济损失突变点为 2006 年。从周期上来看,风暴潮灾害频次具有 2 a 和 8 a 的显著主周期特征,风暴潮灾害导致的死亡(含失踪)人口数量不存在显著的周期波动特征。直接经济损失耦合了多重周期波动特征,具有 2~8 a 的显著周期振荡和 3~5 a 的波动规律,说明

风暴潮灾害直接经济损失较频次波动和人口损失波动更具有不确定性。

②从空间分布特征来看,我国风暴潮灾害主要集中在浙江省、福建省和广东省,这 3 个省的风暴潮灾害频次占 30 年间全国总频次的 58%,死亡(含失踪)人口占比为 84%,直接经济损失占比为 74%。风暴潮灾害损失除与台风强度有关外,还与我国防灾抗灾能力有关。从空间演变趋势上看,1989—1998 年、1999—2008 年、2009—2018 年 3 个阶段的频次分布格局整体上呈现出空间分布更集中、发生地点向西南方偏移的趋势;由风暴潮灾害造成死亡(含失踪)人口数量在 1999—2008 年出现了聚集现象,整体上没有显著的偏移趋势;灾害经济损失也在 1999—2008 年出现了聚集现象,整体上呈现出向西南逐渐转移的趋势。

本文采用统计分析方法对风暴潮灾害损失的时空特征进行了系统的归纳分析,针对趋势和突变点的变化特征定性地与防灾减灾措施进行了关联性分析。在下一步工作中,亟需解决的首要问题是基于统计分析或复杂系统等方法深入分析风暴潮灾害损失的暴露性、脆弱性和抗灾能力等指标的适应性和敏感性,深入研究风暴潮灾害影响要素的响应机制,以便更全面准确地阐释风暴潮灾害损失的演变规律,进而在防灾减灾政策中补齐短板,为提升政府防灾减灾管理效能提供技术支撑。另外,台风活动频次、登陆位置、登陆强度的年际变化是国际台风气候学领域的重要科学问题之一,如何对风暴潮发生频次和致灾强度与气候变化进行定量化的关联性分析,也将是后续工作研究重点。

#### 参考文献:

- [1] 侯京明,于福江,原野,等. 影响我国的重大台风风暴潮时空分布[J]. 海洋通报, 2011, 30(5): 535-539.  
HOU J M, YU F J, YUAN Y, et al. Spatial and temporal distribution of red tropical storm surge disasters in China[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(5): 535-539.
- [2] WEINKLE J, LANDSEA C, COLLINS D, et al. Normalized hurricane damage in the continental United States 1900-2017[J]. Nature Sustainability, 2018, 1(12): 808-813.
- [3] 于福江,董剑希,李涛,等. 风暴潮对我国沿海影响评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2015: 2-5.  
YU F J, DONG J X, LI T, et al. Assessment of the impact of storm surge on coastal areas in China[M]. Beijing: China Ocean Press,

- 2015: 2-5.
- [4] 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.
- XIE L, ZHANG Z K. Study on the relationship between intensity, spatial-temporal distribution of storm surges and disaster losses along the coast of China in past 20 years[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(6): 690-696.
- [5] 甘申东, 章卫胜, 宗虎城, 等. 我国南海沿海台风风暴潮灾害分析及减灾对策[J]. 水利水运工程学报, 2012(6): 51-58.
- GAN S D, ZHANG W S, ZONG H C, et al. Analysis of typhoon storm surge disasters along the South China coast and disaster prevention measures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(6): 51-58.
- [6] 杨雪雪, 刘强. 基于 KPCA-RBF 模型的风暴潮灾害经济损失预测[J]. 海洋科学, 2021, 45(10): 32-39.
- YANG X X, LIU Q. Economic loss assessment of storm-surge disasters based on the KPCA-RBF model[J]. Marine Sciences, 2021, 45(10): 32-39.
- [7] 郭腾蛟, 李国胜. 风暴潮灾害经济损失灾前预评估研究进展[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 164-168.
- GUO T J, LI G S. Research progress on pre-assessment of economic losses before storm surge disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 164-168.
- [8] 张海燕. 南海区台风风暴潮时空分布特征[J]. 海洋预报, 2019, 36(6): 1-8.
- ZHANG H Y. Spatio-temporal distribution of typhoon storm surge along the South China Sea coast[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(6): 1-8.
- [9] 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.
- WANG J, LU M, DING J. Analysis of the spatial and temporal distribution of characteristics of typhoon storm surge in Zhejiang coastal waters[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(3): 16-22.
- [10] 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.
- DONG J X, LI T, HOU J M. Analysis on the spatial and temporal distribution characteristics of the storm surge of Fujian Province[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(3): 331-339.
- [11] 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.
- HUANG Z M, LI X W, JIANG S C, et al. The characteristics of storm surge along the coast of Guangxi[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(6): 29-36.
- [12] 孙佳, 左军成, 黄琳, 等. 东海沿岸台风及风暴潮灾害特征及成因[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 461-465.
- SUN J, ZUO J C, HUANG L, et al. Characteristics and causes of typhoon and storm surge along coast of East China Sea[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(5): 461-465.
- [13] SHI X W, HAN Z Q, FANG J Y, et al. Assessment and zonation of storm surge hazards in the coastal areas of China[J]. Natural Hazards, 2020, 100(1): 39-48.
- [14] SHI X W, LIU S, YANG S N, et al. Spatial-temporal distribution of storm surge damage in the coastal areas of China[J]. Natural Hazards, 2015, 79(1): 237-247.
- [15] 李程, 王慧, 李响, 等. 近 10 年福建省风暴潮灾害特征分析及社会经济影响[J]. 海洋经济, 2019, 9(1): 43-46.
- LI C, WANG H, LI X, et al. Characteristics of storm surge disasters along Fujian coast in recent 10 Years[J]. Marine Economy, 2019, 9(1): 43-46.
- [16] WANG K, YANG Y S, RENIERS G, et al. A study into the spatiotemporal distribution of typhoon storm surge disasters in China[J]. Natural Hazards, 2021, 108(1): 1237-1256.
- [17] 刘旭, 付翔, 王峥, 等. 我国风暴潮灾害直接经济损失分布与风险可保性研究[J]. 海洋预报, 2022, 39(6): 90-101.
- LIU X, FU X, WANG Z, et al. The direct economic Loss distribution and risk insurability of typhoon storm surge disaster in China[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(6): 90-101.
- [18] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报[R]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 1989-2017.
- State Oceanic Administration. Bulletin of China marine disaster [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 1989-2017.
- [19] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报[R]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2018.
- State Oceanic Administration. Bulletin of China marine disaster [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2018.
- [20] 周婷, 于福亮, 李传哲, 等. 湄公河清盛站水文情势变化分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 15-18, 209.
- ZHOU T, YU F L, LI C Z, et al. Analysis of hydrological regime changes of Chiang Saen Station in Mekong River[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 15-18, 209.
- [21] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 53-60.
- ZHOU L, XIA J, ZHANG Y, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 53-60.
- [22] 王晓利. 中国沿海极端气候变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2017.
- WANG X L. Variation of extreme climate and its impact on NDVI in the coastal area of China[D]. Yantai: University of Chinese Academy of Sciences (Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [23] 王淋淋. 珠江口海平面的变化机制及对沿岸淹没风险研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- WANG L L. The mechanism of sea level changes in Pearl River

- estuary and the assessment of coastal flooding risk[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [24] 冯禹昊, 朱江玲. 基于 Morlet 小波的辽河径流量变化及其成因分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 208-215.
- FENG Y H, ZHU J L. Analysis on runoff change and the driving force of the Liaohe River Basin based on Morlet Wavelet[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 208-215.
- [25] 冯博, 韩延本. 太阳活动对黄帝陵 500 年侧柏年轮变化的可能影响[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39(5): 776-784.
- FENG B, HAN Y B. Possible effect of solar activity on variation of the tree-rings of a 500 a *Platycladus orientalis* at the Mausoleum of Emperor Huang[J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 2009, 39(5): 776-784.
- [26] 吴金汝, 陈芳, 陈晓玲. 1900~2018 年全球自然灾害时空演变特征与相关性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(4): 976-991.
- WU J R, CHEN F, CHEN X L. Temporal and spatial features and correlation studies of global natural disasters from 1900 to 2018 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(4): 976-991.
- [27] FANG J Y, LIU W, YANG S N, et al. Spatial-temporal changes of coastal and marine disasters risks and impacts in Mainland China [J]. Ocean & Coastal Management, 2017, 139: 125-140.
- [28] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [29] 陆晓婕, 董昌明, 李刚. 1951-2015 年进入东海的台风频数及登陆点的变化[J]. 大气科学学报, 2018, 41(4): 433-440.
- LU X J, DONG C M, LI G. Variations of typhoon frequency and landfall position in East China Sea from 1951 to 2015[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(4): 433-440.
- [30] 张玉芳. 台风频数变化特征及其统计分布[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- ZHANG Y F. Variation characteristics of typhoon frequency and its statistical distribution[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [31] 张小龙. 南海热带气旋生成发展过程对 ENSO 事件的响应分析 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2020.
- ZHANG X L. Response analysis of the formation and development of tropical cyclone to ENSO events in the SCS[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2020.
- [32] 季倩倩, 徐峰, 张羽. 近 50a ENSO 时频特征及其与南海台风的相关性[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(2): 71-79.
- JI Q Q, XU F, ZHANG Y. Study on ENSO time-frequency characteristics in recent 50 years and its correlation with typhoon in the South China sea[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2018, 38(2): 71-79.
- [33] PATRICOLA C M, CAMARGO S J, KLOTZBACH P J, et al. The influence of ENSO flavors on western North Pacific tropical cyclone activity[J]. Journal of Climate, 2018, 31(14): 5395-5416.
- [34] HSU P C, HO C R, LIANG S J, et al. Impacts of two types of El Niño and La Niña events on typhoon activity[J]. Advances in Meteorology, 2013, 2013: 632470.
- [35] 刘颖婧, 陈永平, 甘敏, 等. 1951-2016 年影响我国热带气旋的强度变化特征及其与 ENSO 的关系[J]. 应用海洋学报, 2018, 37(3): 301-312.
- LIU Y J, CHEN Y P, GAN M, et al. Characteristics of intensity variation of tropical cyclones influenced China with relations of ENSO from 1951 to 2016[J]. Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(3): 301-312.
- [36] 谢建斌, 万纬祺, 冯兴如, 等. 北印度洋风暴潮特征及其对气候信号的响应研究[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(5): 1045-1053.
- XIE J B, WAN W Q, FENG X R, et al. Characteristics of storm surge in the northern Indian Ocean and its response to climate signals[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022, 53(5): 1045-1053.
- [37] 司月君, 李保生, 王丰年, 等. 广西北部湾海岸风沙记录的千年来风暴潮演化的阶段性[J]. 地理学报, 2022, 77(5): 1181-1194.
- SI Y J, LI B S, WANG F N, et al. Evolution stages of storm surges over the past millennia recorded by aeolian sands along the coast of Beibu Gulf, Guangxi[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(5): 1181-1194.
- [38] 隋意, 石洪源, 钟超, 等. 我国台风风暴潮灾害研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020(3): 39-44.
- SUI Y, SHI H Y, ZHONG C, et al. Research on typhoon storm surge disaster in China[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(3): 39-44.
- [39] MA Z J, MELVILLE D S, LIU J G, et al. Rethinking China's new great wall[J]. Science, 2014, 346(6212): 912-914.
- [40] 贾宁, 刘强, 石先武, 等. 基于现场调查的台风“天鸽”(1713)和台风“山竹”(1822)风暴潮灾害影响和致灾对比分析[J]. 海洋预报, 2022, 39(5): 94-99.
- JIA N, LIU Q, SHI X W, et al. Comparative analysis of the impact of typhoon storm surge disaster and the disaster-causing difference between typhoon "Hato"(1713) and "Mangkhut"(1822) based on field survey[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(5): 94-99.
- [41] 李乃强, 徐贵阳. 基于自然间断点分级法的土地利用数据网格化分析[J]. 测绘通报, 2020(4): 106-110.
- LI N Q, XU G Y. Grid analysis of land use based on natural breaks (jenks) classification[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(4): 106-110.
- [42] 吴敏敏. 西北太平洋夏季风与 ENSO 和台风之间关系在最近年代的增强[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2020.
- WU M M. The strengthened relationship among the western North Pacific summer monsoon, ENSO and tropical cyclone genesis in recent decades[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2020.

## Spatial-temporal characteristics of the typhoon storm surge damages in China

LIU Xu<sup>1,2,3</sup>, WANG Zheng<sup>1,3\*</sup>, LIANG Yingqi<sup>1,3</sup>, CAI Wenbo<sup>1,3</sup>

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. School of Economics & Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The Mann-Kendall trend test, Pettitt mutation test, Morlet wavelet analysis and standard deviation elliptic spatial statistics were used to analyze the spatial-temporal distribution and evolution trend of storm surge disaster damages in China. The results show that during 1989 and 2018, the frequency of storm surge disasters increased while the fatalities and direct economic losses decreased. The mutation points of death population are 1999 and 2009, thereafter the death population shows an accelerating descending. The direct economic losses show an accelerating descending since 2006, relating to the developing of the national disaster prevention and reduction policy. The frequency of storm surge disaster damages shows significant periodic fluctuation of 2 years and 8 years. The frequency of death population is similar to that of storm surge disaster damages, but the main periodic fluctuation is not significant. Direct economic losses are more complex than fatalities and frequency fluctuations, with nested characteristics of multiple main periods between 2 and 8 years, which are significant for 2 and 8 years and insignificant for 3 to 5 years. The damages caused by storm surge and frequency are the most serious in the southeast coastal areas of China. In the past 30 years, areas with high storm surge frequency has shifted to the southwest and become more concentrated. Both the death (missing) population and the direct economic losses show aggregation phenomenon during 1999—2008. There is no significant shift in fatalities overall, and the direct economic losses show southwest transformation.

**Key words:** storm surge disaster; direct economic losses and fatalities; spatial-temporal distribution; evolutionary trend; disaster mitigation