

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2021.04.013

1984—2019年影响中国东南沿海城市的热带气旋及其经济损失变化特征

谈科¹, 姜彤¹, 王艳君¹, 温姗姗¹, 苏布达¹, 翟建青²

(1. 南京信息工程大学 地理科学学院/灾害风险管理研究院, 江苏 南京 210044;

2. 中国气象局国家气候中心, 北京 10081)

摘要: 东南沿海是中国受热带气旋影响最严重的区域。以人口为标准, 将浙江、福建、广东和海南四省拥有海岸线的地级市及上海在内的38个沿海城市划分为中等及以下(人口 ≤ 100 万)、大型(100万 $<$ 人口 ≤ 500 万)和特大(人口 > 500 万)城市三个等级, 基于1984—2019年影响中国东南沿海的热带气旋频次、强度、路径和经济损失数据, 对登陆特征及经济损失变化特征进行研究, 结果表明: (1) 1984—2019年登陆中国东南沿海特大城市的热带气旋频次最多, 中等及以下城市最少。趋势上, 在中等及以下城市登陆的热带气旋数量呈下降趋势, 大型城市无明显变化, 特大城市呈上升趋势。其中, 广东西部和福建北部及中部的沿海城市登陆气旋频次最多。(2) 强度上, 特大城市登陆气旋强度最强, 中等及以下城市最弱。趋势上, 中等及以下城市登陆气旋强度减小, 大型城市增加, 特大城市先增加后减小, 总体强度增加, 福建、浙江和广东西部沿海城市登陆气旋强度最强。(3) 从气旋登陆位置看, 强热带气旋(STS)以上等级的气旋登陆点有北移趋势。(4) 经济损失上, 特大城市最高, 其次为大型城市和中等及以下城市, 总体变化均呈上升趋势, 从损失占GDP(国内生产总值)比重上看, 大型城市最低, 中等及以下城市最高, 均呈下降趋势。其中, 福建、浙江和广东沿海城市损失高, 占GDP比重低, 海南损失低, 但占GDP比重高。

关键词: 热带气旋; 时空变化; 沿海城市; 经济损失

中图分类号: X43; P429

文献标识码: A

文章编号: 1001-6392(2021)04-0465-08

Characteristics of tropical cyclones impacting on coastal cities of southeast China and their induced losses from 1984 to 2019

TAN Ke¹, JIANG Tong¹, WANG Yanjun¹, WEN Shanshan¹, SU Buda¹, ZHAI Jianqing²

(1. Institute of Disaster Risk Management / School of Geography Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The southeast coast of China is the most affected area by tropical cyclones. Based on population size, the 38 coastal cities that have coastlines are divided into three levels: medium and below (population ≤ 1 million), large (1 million $<$ population ≤ 5 million) and megalopolis (population > 5 million). With the data of frequency, intensity, path and economic losses of tropical cyclones affecting the southeast coastal areas of China from 1984 to 2019, the characteristics of landfall and loss variation of tropical cyclones are studied. The results show that: (1) from 1984 to 2019, the frequency of tropical cyclones landed in the coastal megalopolis of southeast China was the highest, and the frequency of the medium and below cities was the least. On the trend, the number of tropical cyclones landing showed a decline trend in the medium and below cities, no significant changes in large cities, and an upward trend in megalopolis. The landing sites of the tropical cyclones had no obvious changes. Among them, the frequency of landing cyclones was the highest in coastal cities of western Guangdong Province, northern and central Fujian Province. (2) In terms of intensity, the landfall cyclones in megalopolis were the strongest and the

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-03-06

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(42005126); 国家自然科学基金(42071024)

作者简介: 谈科(1996—), 硕士研究生, 研究方向为灾害风险管理。电子邮箱: taamfo@163.com

通讯作者: 姜彤, 教授, 研究方向为灾害风险管理。电子邮箱: jiangtong@nuist.edu.cn

medium and below cities was the weakest. On the trend, the intensity of landfall cyclones declined in the medium and below cities, but increased in the large cities. The intensity of landfall cyclones in megalopolis first increased and then declined. The overall intensity increases and the intensity of landfall cyclones was the strongest in coastal cities of Fujian Province, Zhejiang Province and western Guangdong Province. (3) The landing points of severe tropical cyclones (STS) and above had a northward trend. (4) In terms of economic losses, the megalopolis was the highest, followed by the large and the medium and below cities, and the overall changes showed an upward trend. In terms of the proportion of economic losses in GDP, the large cities were the lowest, while the medium and below cities was the highest, and there's a decline trend. Among them, the coastal cities of Fujian Province, Zhejiang Province and Guangdong Province suffered high losses and low proportion of GDP, while Hainan Province suffered low losses but high proportion of GDP.

Keywords: tropical cyclones; spatial-temporal variation; coastal cities; economic losses

在全球变暖的背景下,气候变化引起的极端灾害事件频发。热带气旋是目前造成全球经济损失最严重的极端事件之一(Klotzbath et al, 2006)。热带气旋指发生在热带或副热带洋面上的低压涡旋、中尺度或天气尺度的暖性气旋(Knutson et al, 2010),主要生成于西太平洋及临近海域、大西洋、东北太平洋以及印度洋和南太平洋(Murakami et al, 2010; 赖芬芬等, 2012)。德国慕尼黑再保险公司发布的全球自然灾害数据显示:1980年以来,与热带气旋有关的天气灾害对全球造成平均每年约538亿美元的损失,占自然灾害总损失的44.6%(Yoshida et al, 2017)。中国是受热带气旋灾害影响最严重的国家之一,因此造成的经济损失仅2019年就达到了84亿美元,占全球总损失的10.2%,占中国气象灾害总损失的26.4%(谢伏瞻等, 2020)。

围绕热带气旋的频次、强度和经济损失等特征,国内外学者开展了大量的研究。目前的研究表明:全球每年约有80个左右的热带气旋在太平洋、印度洋和大西洋热带区域生成(Elsner et al, 2008)。1980年以来,全球生成气旋的频次呈现减少的趋势,登陆气旋频次没有明显的变化趋势,但强度有明显的增强(Emanuel, 2005; Mendelsohn et al, 2017; Rodgers et al, 2001; Webster et al, 2005),等级较高的热带气旋数量呈增加趋势,特别是在北大西洋和南印度洋等海域(Chia et al, 2002; Choi et al, 2013; Wu et al, 2017; Ying et al, 2014)。国内学者围绕热带气旋的研究主要集中于台风的动力学机制、数值模拟以及特征等方面(刘秋兴等, 2014; 原楠等, 2019; 张志伟, 2019; 朱男男等, 2020)。结果表明:近年来,登陆中国气旋的频次总体变化不明显,但高于台风等

级的热带气旋数量呈现增加趋势(陆逸等, 2016)。风雨是造成损失的主要致灾因子,登陆中国的热带气旋年平均强度增强(孙志林等, 2019),经济损失显著上升,伴随的风险也显著上升(王胜等, 2012)。中国学者对热带气旋造成的财产损失、人员伤亡、房屋坍塌及农作物减产等方面也做了大量研究。产业上,中国的农业是受热带气旋影响最严重的行业,经济损失的比重占到了37%,其次为工业和商业,经济损失的比重分别占29%和20%(Wen et al, 2017)。地理位置上,浙江、福建和广东是最易受热带气旋侵袭的地区,也是中国热带气旋损失最高的3个省份,比重占每年中国热带气旋总损失的一半以上(陈雪等, 2018)。目前,关于热带气旋对城市影响的研究相对较少。

本文选择中国受热带气旋影响最严重的东南地区沿海城市作为研究区域,根据《中国城市统计年鉴》中市区总人口数据,将浙江、福建、广东和海南四省及上海市在内的38个沿海城市划分为三个等级,同时结合登陆热带气旋的频次、强度、路径和损失数据,对1984—2019年登陆中国东南沿海城市的热带气旋及影响气旋损失的变化特征进行研究。这些城市大多数经济和交通比较发达、人口密集,研究结果将有助于我们更加有效地提高城市的灾害抵御能力和防范意识,建立更加完善的灾害预警系统,为相关的政策提供科学依据,对沿海城市的发展具有重大且深远的意义。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

根据《中国海洋统计年鉴》,沿海城市指的是

有海岸线（大陆岸线和岛屿岸线）的直辖市和地级市（包括其下属的全部区、县和县级市），中国共有 55 个沿海城市（国家统计局，2017）。本文选择了位于东南沿海的 38 个城市作为研究区域，具体如表 1 所示。这些城市大部分经济较为发达，人口密集，仅 2019 年的 GDP（国民生产总值）总量就已达到了 19 万亿元，占中国总 GDP 的 20.6%，市区常住人口约 2 亿人，占中国人口总量的 14.3%。

表 1 中国东南沿海省份（直辖市）和城市

省份(直辖市)	沿海城市
浙江	宁波、嘉兴、台州、温州、舟山
福建	福州、宁德、莆田、泉州、厦门、漳州
广东	潮州、东莞、广州、惠州、江门、揭阳、茂名、汕头、汕尾、深圳、阳江、湛江、中山、珠海
海南	儋州、海口、万宁、三亚、文昌、琼海、临高、澄迈、东方、陵水、乐东、昌江
上海	上海市辖区

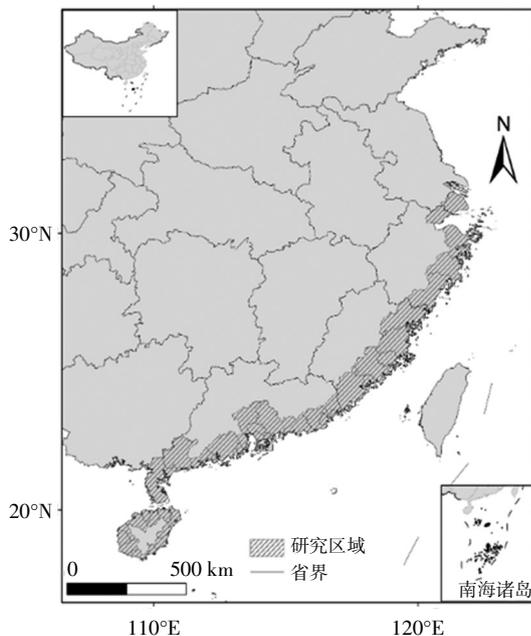


图 1 研究区概况

(审图号:GS(2016)2923 号)

1.2 数据

本文的研究数据主要分为三个部分，分别为热带气旋频次和强度、热带气旋灾害损失以及社会经济数据。

热带气旋的频次和强度数据来自中国气象局热带气旋资料中心编制的“西北太平洋热带气旋路径数据集”，包括 1984—2019 年热带气旋中心每隔 6h 的位置（经纬度）、中心最低气压、平均近中心

最大风速和热带气旋等级信息等。根据中国气象局资料、中国《热带气旋等级》国家标准（GB/T19201—2006），热带气旋按中心附近地面最大风速可划分为六个等级，分别为热带低压（TD：10.8~17.1 m/s）、热带风暴（TS：7.2~24.4 m/s）、强热带风暴（STS：24.5~32.6 m/s）、台风（TY：32.7~41.4 m/s）、强台风（STY：41.5~50.9 m/s）和超强台风（Super TY：≥51.0 m/s），文中将热带气旋分为 TY 以下的热带气旋（风速 < 32.7 m/s）和 STS 以上的热带气旋（风速 ≥ 32.7 m/s）等两大类。

热带气旋灾害损失数据源于中国气象局国家气候中心编制的《中国气象灾害年鉴》，内容包括了 1984—2019 年逐年热带气旋灾害直接经济损失数据。

社会经济数据和城市等级划分标准均来自《中国城市统计年鉴》，包括历年中国各城市的城区常住人口以及地区生产总值（GDP）等数据，划分标准根据常住人口数量将中国城市划分为五类七档（国家统计局，2020）。本文根据 2019 年末城市城区常住人口数将所选研究城市分为三大类，分别为中等及以下城市（人口 ≤ 100 万）、大型城市（100 万 < 人口 ≤ 500 万）和特大型城市（人口 > 500 万）。划分后，中等以下城市个数为 12 个，大型城市和特大城市均为 13 个，具体结果如表 2 所示。

表 2 城市等级划分结果

城市规模	城市名称
中等及以下城市	舟山、儋州、万宁、三亚、文昌、东方、琼海、临高、澄迈、陵水、乐东、昌江
大型城市	宁德、莆田、厦门、潮州、东莞、惠州、江门、汕尾、深圳、阳江、中山、珠海、海口
特大型城市	上海、宁波、台州、温州、嘉兴、福州、泉州、漳州、广州、揭阳、茂名、湛江、汕头

2 研究方法

2.1 统计分析

采用线性回归方程分析登陆中国东南沿海城市的热带气旋基本特征和经济损失的时间变化特征。

2.2 空间分析

空间分析是指从空间数据中获取相关地理对象的空间位置、分布、形态、形成和演变等信息的方法。本文利用地统计学线性插值中的克里金法

(Kriging)对文中的台风频次、强度和经济损失进行插值。克里金法又称空间局部插值法,是依据协方差函数对随机过程或者随机场进行空间建模和预测(插值)的回归算法,理论基础主要分为区域化变量和变异分析,区域化变量是描述某一变量的空间分布,反映了区域内某种特征或者现象。变异分析主要通过变异函数和协方差函数来反映。克里金插值的实质是根据区域化变量的原始数据特点和变异函数的结构特点,对未进行采样的区域进行线性无偏最优估计(孔令娜等,2012)。

2.3 经济损失标准化

居民消费价格指数(Consumer Price Index, CPI)是一种观察通货膨胀的重要指标,它反映了经济运作过程中物价的变动情况。为获得具有可比性的热带气旋经济损失时间序列,本文以2019年作为基准年,对经济损失数据进行CPI标准化处理,计算公式如下所示:

$$CPI_{EL} = EL \times \frac{CPI_s}{CPI_t}$$

其中, EL 为当年的直接经济损失, CPI 为居民消费者物价指数, s 表示基准年, t 表示当年。

3 结果

3.1 热带气旋时空变化特征

3.1.1 时间特征

1984—2019年西北太平洋生成和登陆热带气

旋频次变化如图2所示,1984—2019年西北太平洋共生成热带气旋916次,其中,登陆中国的有294次,在东南沿海城市登录的热带气旋有208个,占生成气旋总数的22.7%,占登陆气旋总数的70.7%,平均每年生成热带气旋25次,登陆中国8次,登陆东南沿海城市6次。1994年生成气旋最多,达到了37次,1998年和2010年最少,仅14次;中国总登陆气旋在2013年最多,达到了13次,在1986年最少,仅3次;东南沿海城市在1992年、1994年、2001年、2013年和2018年最多,均为8次,1986年最少,为3次。从总体变化趋势上看,1984—2019年西北太平洋生成的热带气旋呈下降趋势,速率为1.3次/10a,登陆中国和东南沿海城市的气旋变化不明显。从城市等级上看,1984—2019年登陆东南沿海城市气旋频次最多的为特大型城市,达到了89次,其次为大型城市,为79次,中等及以下城市最少,为40次。趋势上,中等及以下城市登陆气旋频次呈现下降趋势,大型城市无明显变化,特大城市呈上升趋势。

强度上,根据表3可知,1984—2019年台风以下等级热带气旋共登陆中国东南沿海城市120次,强热带风暴(STS)以上级别为88次,分别占比57.7%和42.3%。其中,中等及以下城市在2011—2019年登陆的TY以下级别热带气旋最多,为8次,在1984—1992年登陆STS以上级别最多,为7次,总体强度呈下降趋势;而大型城市则相反,在1984—1992年登陆的台风(TY)以下级别

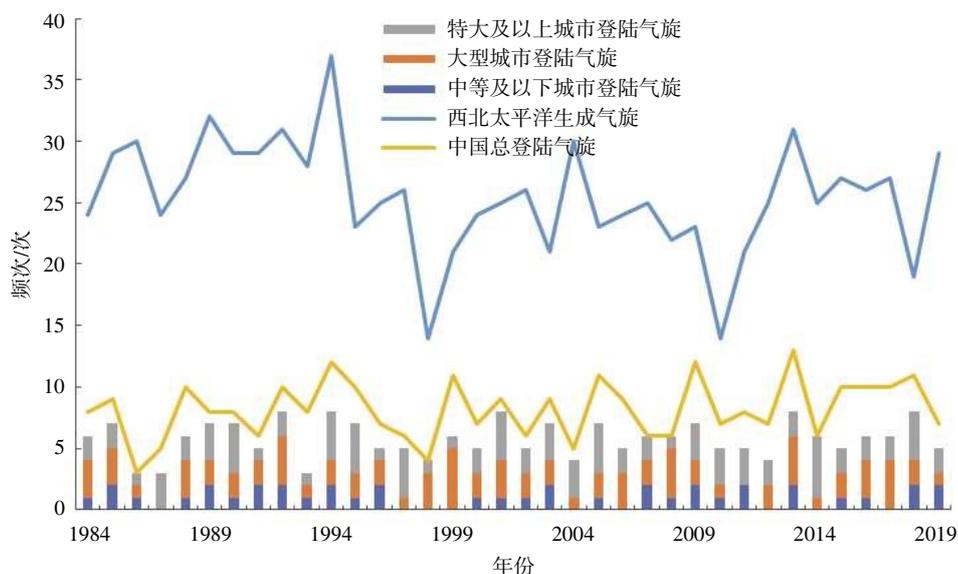


图2 1984—2019年生成气旋、登陆气旋频次变化

最多, 为 16 次, 在 2011—2019 年登陆的 STS 以上级别最多, 为 12 次, 总体强度增强; 特大城市 2011—2019 年登陆的 TY 以下级别最多, 为 15 次, 2002—2010 年登陆的 STS 以上级别最多, 为 12 次, 强度呈现先增加后减少的趋势。总体上, 东南沿海城市登陆的热带气旋强度呈上升趋势。

表 3 1984—2019 年东南沿海城市不同强度登陆气旋频次变化

时间段	中等及以下城市		大型城市		特大城市	
	TY 以下	STS 以上	TY 以下	STS 以上	TY 以下	STS 以上
1984—1992 年	5	7	16	4	11	9
1993—2001 年	7	1	14	7	11	11
2002—2010 年	7	3	8	11	11	12
2011—2019 年	8	2	7	12	15	9

3.1.2 空间特征

1984—2019 年, 登陆气旋最多的东南沿海城市主要位于广东西部和福建北部及中部, 超过 3 次/10a, 其次为海南和浙江沿海城市及上海, 大部为 1 次/10a~3 次/10a, 登陆在广东东部的热带气旋最少, 低于 1 次/10a。即热带气旋在广东呈现明显的西多东少特征, 福建中部和北部多于南部, 浙江和海南分布相对均匀 (图 3a)。强度上, 根据图 3b, STS 以上的高强度热带气旋主要登陆在福建、浙江以及广东西部沿海城市一带, 在海南、广东东部及上海登陆的相对较少。福建和浙江沿海城市登陆气旋的强度总体最高, 广东同样呈现西高东低的特征, 海南和上海最低。

3.1.3 登陆位置特征

1984—2019 年在东南沿海城市登陆的热带气旋和 STS 以上级别的热带气旋的纬度统计结果如图 4 所示。根据图 4a, 总体上, 登陆位置无明显变化, 但从图 4b 看, STS 以上的热带气旋纬度有明显的上升趋势, 增速为 $0.7^{\circ}/10\text{a}$, 即高强度的热带气旋登陆位置出现北移趋势。

3.2 经济损失时空特征

3.2.1 时间特征

对 1984—2019 年热带气旋造成的经济损失进行标准化处理 (以 2019 年市值计算), 结果如图 5 所示。经校正后, 1984—2019 年中国东南沿海城

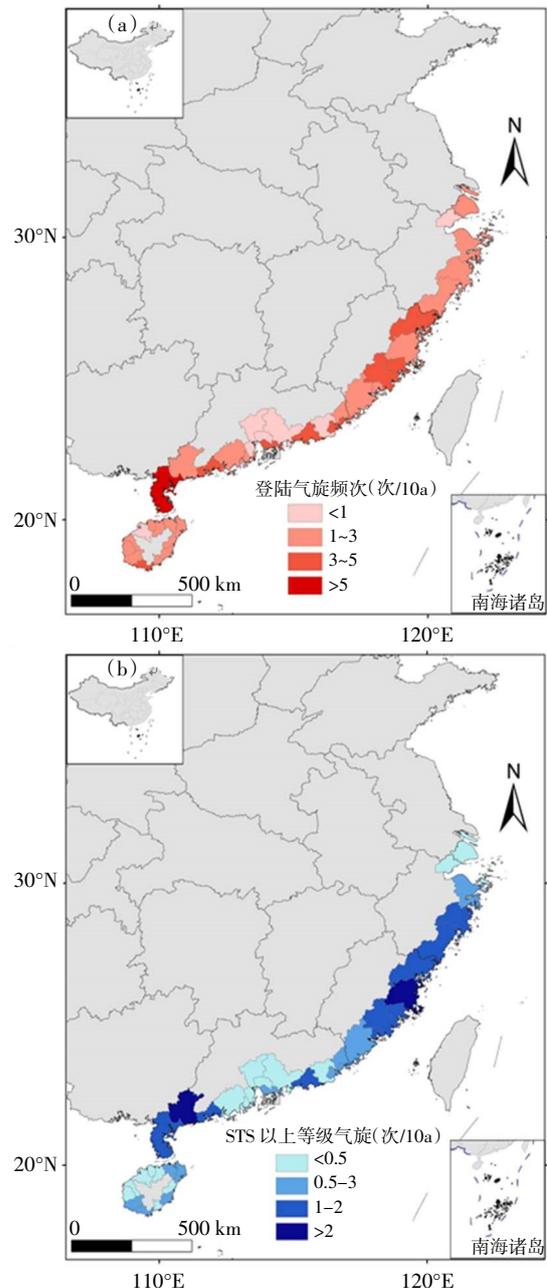


图 3 1984—2019 年热带气旋总登陆频次和 STS 以上级别热带气旋登陆频次 (a: 总频次, b: STS 以上)

(审图号:GS(2016)2923 号)

市热带气旋多年平均损失为 400 亿元, 其中, 特大城市损失最高, 达到了 293 亿元, 占比 73.3%, 大型城市和中等及以下城市分别为 77 亿和 30 亿元, 分别占 19.2%和 7.5%。2013 年是特大城市损失最高的年份, 达到了 1 245.3 亿元, 2017 年最低, 仅 25.2 亿元, 大型城市和中等及以下城市损失最高的年份分别为 1993 年和 2000 年, 为 211.2 亿元和 186.6 亿元, 最低的年份均为 1984 年, 为 0.3 和

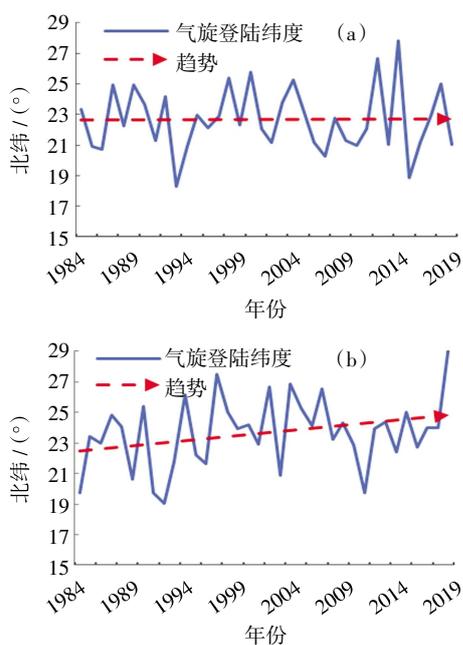


图4 1984—2019年总热带气旋 (a) 和 STS 以上级别热带气旋 (b) 登陆位置

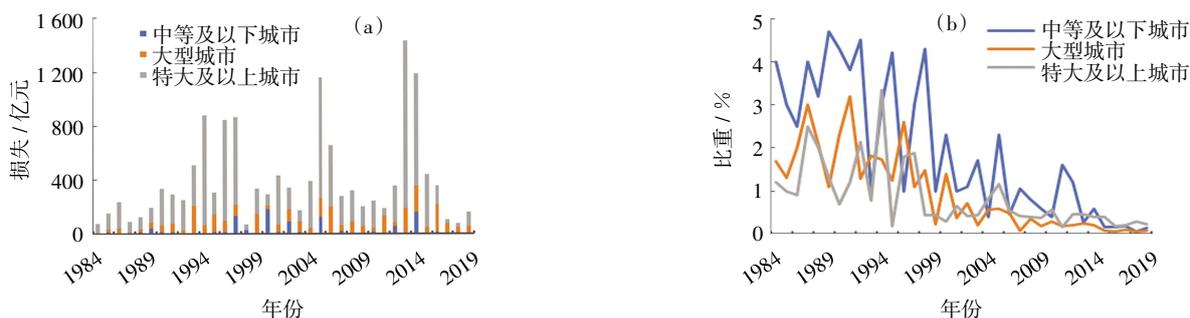


图5 1984—2019年登陆东南沿海城市热带气旋经济损失及占GDP比重时间特征

海城市主要分布于广东西部、福建北部和浙江省一带,部分城市平均损失超过了5亿元,福建南部、广东东部和海南省相对较低,大部分沿海城市损失小于1亿元。但从损失占GDP的比重看(图6b),海南省和广东部分城市损失超过了1%,超过了其他省份沿海城市,浙江大部分在0.05%~1%之间,福建则小于0.5%,相对较低。

根据东南沿海城市的热带气旋特征变化和经济损失及占GDP的比重结果,进入21世纪后,城市经济损失占GDP的比重有了显著的下降,说明沿海城市灾害防御总体水平有了明显的提升。其中,在大型城市登陆的热带气旋强度在上升,但造成的经济损失占GDP比重仍然最低,说明灾害防御水平相对较高,其次为特大城市,中等及以下城市较弱(图5)。空间上,海南和广东西部的沿海城市

0.2亿元。趋势上,三个等级的城市经济损失均呈上升趋势,特大城市增速最快,为3.8亿元/年,大型城市和中等城市分别为2.1亿元/年和0.3亿元/年(图5a)。

根据图5b,经济损失占GDP比重最高的为中等及以下城市,1984—2019年平均为1.9%,其次为特大城市和大型城市,分别为0.8%和1.0%。其中,中等及以下城市在1990年损失的比重达到了4.7%,超过其他年份,在2018年最低,为0.07%,而大型城市和特大城市在1991年和1994年最高,分别为3.2%和3.3%,在2016年和2011年最小,分别为0.06%和0.1%。三种城市在趋势上均呈下降趋势,其中中等及以下城市减速最快,为0.1%/年,大型城市和特大城市分别为0.04%/年和0.07%/年。

3.2.2 空间特征

从空间上看,根据图6a,经济损失较高的沿

灾害防御水平较弱,浙江、福建和广东东部相对较强(图6)。

4 结论

本文针对1984—2019年登陆中国东南沿海城市的热带气旋基本特征进行了分析,主要从热带气旋的频次、强度、登陆点变化和造成的经济损失等方面展开研究,主要得出以下结论:

(1) 频次上,1984—2019年西北太平洋生成气旋呈现下降趋势,登陆东南沿海城市的气旋无明显变化。从城市等级上看,特大城市登陆气旋频次最多,中等及以下城市最少;趋势上,中等及以下城市登陆气旋频次下降,大型城市无明显变化,特大城市上升;空间上,登陆热带气旋频次最多沿海城

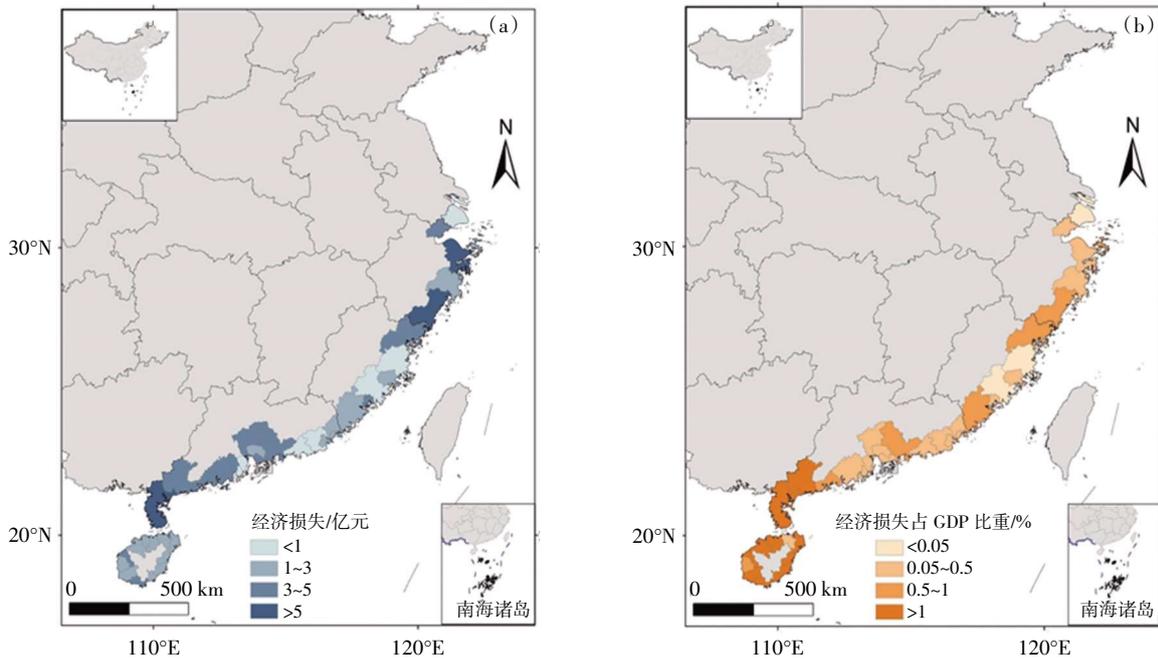


图 6 1984—2019 年登陆东南沿海城市热带气旋经济损失及占 GDP 比重空间特征

(审图号:GS(2016)2923 号)

市主要位于广东和海南。

(2) 强度上, 登陆东南沿海城市的热带气旋强度总体增强。从城市等级上看, 特大城市强度最强, 中等及以下城市最弱; 趋势上, 中等及以下城市强度减弱, 大型城市强度增强, 特大城市强度在 2010 年前增强, 随后减弱; 空间上, 福建、浙江和广东西部一带登陆的热带气旋强度最强。

(3) 路径上, 热带气旋总体登陆点无明显变化, 但台风及以上级别的高强度的热带气旋登陆点的纬度有北移趋势, 速率为 $0.7^{\circ}/10 \text{ a}$ 。

(4) 经济损失上, 特大城市损失最严重, 其次为大型城市和中等及以下城市。趋势上, 沿海城市热带气旋经济损失均呈上升趋势, 增速最快的为特大城市, 其次为大型城市和中等及以下城市; 从占 GDP 的比重看, 占比最低的为大型城市, 其次为特大城市和中等及以下城市。从空间分布上看, 浙江、福建和广东的沿海城市虽然经济损失高, 但占 GDP 比重低, 灾害防御水平相对较高, 而海南则损失低, 占 GDP 比重高, 灾害防御水平较低。

5 讨论与建议

热带气旋是全球四大自然灾害之一, 常常造成

巨大的财产损失和人员伤亡, 还会使交通瘫痪、城市内涝、作物减产等。中国地处欧亚大陆东部, 太平洋西岸, 极易受到来自西北太平洋热带气旋的侵袭, 东南沿海大多数城市经济发达, 人口密集。本文将沿海城市分为三个不同等级, 分别对其受到的热带气旋特征和经济损失展开研究, 根据研究结果和结论, 主要提出以下几点建议:

(1) 提高中等及以下城市的灾害防御水平, 特别是海南省。该地区沿海城市登陆的热带气旋强度和损失虽然较低, 但损失占 GDP 的比重相对较高, 超过其他城市。热带气旋对其带来的影响更大。

(2) 加强极端气候灾害的防范能力。随科学技术的不断发展以及在气候变化领域的深入研究, 中国的防灾减灾能力和抵御风险的意识得到了有效的提高, 但在极端气候灾害方面的防范能力仍然相对薄弱。例如, 强台风和超强台风的登陆仍然会造成较高经济损失和人员伤亡, 2014 年的第 9 号超强台风“威马逊”登陆文昌, 造成海南、广东共 742.3 万人、4 685 km^2 农作物受灾, 经济损失达到 265 亿元, 成为新中成立以来登陆中国的最强热带气旋。随着气候变化的影响, 极端气候灾害事件出现的频次上升明显, 因此, 在未来应当重点加强对极端事件的应对能力。

(3) 加强台风灾害预警能力建设。为了能更有

效地降低和减轻热带气旋灾害损失和社会影响,需要充分考虑热带气旋灾害的特点,加强跨学科研究,跨部门联动,共同建设完善的抵御防范体系,制定有效的相关措施。

本文主要利用观测数据对中国东南沿海城市的热带气旋特征和经济损失进行了研究。今后可以将热带气旋的风速、降水和经济损失结合起来进行更深入的研究,通过致灾因子,构建损失模型,预测未来热带气旋可能会带来的经济影响。同时,也可以针对暴露在热带气旋下的经济体进行灾害暴露度以及脆弱性的相关研究。热带气旋对内地城市的影响也不容小觑,随着热带气旋强度的逐渐增强,内地城市也开始逐渐受到严重影响,而内地城市的热带气旋灾害抵御能力相对较弱,易造成巨大损失和伤亡,例如:1975年发生在河南的“驻马店溃坝事件”正是由于热带气旋的影响造成了严重的人员伤亡和财产损失。自然灾害已经成为目前全球亟须关注的问题之一,各国政府和机构应当加强合作,携起手来共同应对,建立一个更加安全和美好的生存环境。

致谢:感谢国家气候中心和中国科学院新疆生态与地理科学研究提供的数据支持以及南京信息工程大学讲师黄金龙对本论文提出的修改建议。

参 考 文 献

- 陈雪,王艳君,温姗姗,等,2018. 1984–2015年中国东南沿海致灾气旋及其直接经济损失变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 27(3): 1004–8227.
- 国家海洋局,2017. 中国海洋统计年鉴[M]. 北京:海洋出版社, P40.
- 国家统计局,2020. 中国城市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, P135.
- 孔令娜,向南平,2012. 基于 ArcGIS 的降水量空间插值方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 35(3):123–126.
- 赖芬芬,江静,2012. 西北太平洋热带气旋强度的年际变化特征及其大气环流背景场分析[J]. 气象学报, (5):609–620.
- 刘秋兴,董剑希,于福江,等,2014. 覆盖中国沿海地区的精细化台风风暴潮模型的研究及适用[J]. 海洋学报, 36(11):30–37.
- 陆逸,朱伟军,任福民,等,2016. 1986–2014年中国台风大风和台风极端大风的变化[J]. 气候变化研究进展, 12(5):413–421.
- 毛卿任,张庆河,陈同庆,2020. 大气–海洋–海浪耦合同化模式在台风过程模拟中的应用[J]. 海洋通报, (3):309–315.
- 孙志林,王辰,钟汕虹,等,2019. 浪潮耦合的舟山渔港台风暴潮数值模拟[J]. 海洋通报, (2):150–158.
- 王胜,田红,谢五三,2012. 基于 GIS 技术的台风灾害风险区划研究—

- 以安徽省为例[J]. 中国农业大学学报, 17(1):161–166.
- 原楠,陈新平,陈学恩,等,2019. 罗源湾海域台风风暴潮数值模拟研究[J]. 海洋通报, (1):20–30.
- 张志伟,2019. 西北太平洋上层海洋对台风响应的个例研究 [J]. 海洋通报, (5):562–568.
- 谢伏瞻,刘雅鸣,2020. 中国气象灾害年鉴[M]. 北京:气象出版社, P335.
- 朱男男,王彦,苏杭,等,2020. 台风“摩羯”(1814)残涡经渤海突然增强成因分析[J]. 海洋通报, (4):1001–6392.
- CHIA H H, ROPELEWSKI C F, 2002. The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the northwest Pacific [J]. *Journal of Climate*, 15(20):2934–2944.
- CHOI M, JACOBS J M, ANDERSON M C, et al, 2013. Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables [J]. *Journal of Hydrology*, (476):265–273.
- EISNER J B, KOSSIN J P, JAGGER T H, 2008. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones [J]. *Nature*, 455(7209):92–95.
- EMANUEL K, 2005. Genesis and maintenance of "Mediterranean hurricanes" [J]. *Advances in Geosciences*, 2(2):217–220.
- KLOTZBATH P J, 2006. Trends in global tropical cyclone activity over the past twenty years (1986 – 2005) [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(331):3477–3495.
- KNUTSON T, MCBRIDE J L, CHAN J, et al, 2010. Tropical cyclones and climate change [J]. *Nature Geoscience*, 3(3):157–163.
- MENDELSON R, EMANUEL K, CHONABAYASHI S, et al, 2012. The impact of climate change on global tropical cyclone damage [J]. *Nature Climate Change*, (2):205–209.
- MURAKAMI H, VECCHI G A, UNDERWOOD S, 2017. Increasing frequency of extremely severe cyclonic storms over the Arabian Sea [J]. *Nature Climate Change*, 7(12):885–889.
- RODGERS E B, ADLER R F, PIERCE H F, 2001. Contribution of tropical cyclones to the North Atlantic climatological rainfall as observed from satellites [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 40 (11):1785–1800.
- WEBSTER P J, HOLLAND G J, CURRY J A, et al, 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment [J]. *Science*, 309(5742):1844–1846.
- WEN SS, CHEN X, JIANG T, et al, 2017. Sector Economic Loss Assessment of Influential Tropical Cyclones and Associated Rainfall and Wind Factors Analysis in China [J]. *Global and Planetary Change*, 4 (3):1654–1670.
- WU M C, YEUNG K H, CHANG W L, 2006. Trends in western North Pacific tropical cyclone intensity [J]. *Transactions American Geophysical Union*, 87(48):537–538.
- YING M, W ZHANG, H YU, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. [J]. *Atmos. Oceanic Technol.* (31):287–301.
- YOSHIDA K, SUGI M, MIZUTA R, et al, 2017. Future Changes in Tropical Cyclone Activity in High Resolution Large–Ensemble Simulations [J]. *Geophysical Research Letters*, 44(19):9910–9917.

(本文编辑:王少朋)