

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, doi:10.12284/hyxb2021080
Lu Ying, Zhao Haikun, Zhao Dan, et al. Spatial-temporal characteristic of tropical cyclone disasters in China during 1984–2017[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(6): 45–61, doi:10.12284/hyxb2021080

1984–2017 年影响中国热带气旋灾害的时空特征分析

卢莹¹, 赵海坤^{1*}, 赵丹², 李青青¹

(1. 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/太平洋台风研究中心, 江苏南京 210044; 2. 中国人民解放军 93117 部队, 江苏南京 210018)

摘要: 本文基于 1984–2017 年热带气旋灾情资料和中国气象局上海台风研究所整编的热带气旋最佳路径资料, 分析了中国热带气旋灾害的时空特征, 比较了不同盛行路径下热带气旋灾害的差异, 探讨了盛行路径下热带气旋陆上持续时间变化及灾害潜在风险。结果表明: (1) 1984–2017 年, 直接经济损失呈现上升趋势, 但该损失在国民生产总值中占比和死亡人数则呈下降趋势。(2) 3 类盛行路径热带气旋直接经济损失具有区域性差别。近海转向热带气旋登陆中国的数目少、灾害轻, 西行和西北行的热带气旋登陆中国的数目多、范围广、灾害重。其中西行热带气旋主要影响广东、广西和海南, 西北行热带气旋主要影响广东、福建和浙江。(3) 台风潜在风险影响因子——热带气旋陆上平均持续时间, 近几十年来增加趋势显著, 但不同盛行路径陆上平均持续时间增加原因不一。近海转向的热带气旋陆上平均持续时间增加与陆上平均移速减小有关, 西行和西北行的热带气旋陆上平均持续时间增加主要由陆上平均移动距离增加所致。

关键词: 热带气旋; 灾害; 路径变化; 陆上持续时间; 时空分布

中图分类号: P429

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2021)06–0045–17

1 引言

西北太平洋是世界上热带气旋(Tropical Cyclone, TC)活动最频繁的区域, TC 造成的狂风、暴雨、风暴潮^[1]及其引发的次生灾害^[2]对中国沿海地区社会财产和人民生命安全造成严重威胁^[3]。研究表明, TC 对中国造成的直接经济损失除了与 TC 预报水平和防台减灾措施有关, 还受通货膨胀、人口密度、地区经济水平差异等影响。温姗姗等^[4]指出, 广东、福建和浙江受 TC 影响造成的直接经济损失在中国各省(自治区、直辖市)中损失较大。Wang 等^[5]指出, 少数极具破坏性的 TC 导致了绝大部分的经济损失, 2005–2016 年造成中国直接经济损失、死亡人数和房屋倒塌间

数最多的前 10 个 TC 就占总数的 48%、71% 和 66%。Zhang 等^[6]发现, 自 1983 年以来, TC 直接经济损失的增长与中国经济快速发展有关。

目前, 许多针对中国 TC 灾害评估的工作通常分析 TC 活动特征, 如强度、频数、移动路径等及其引起的天气现象与 TC 灾害的联系, 构建风险评估指标模型评估 TC 灾害^[7–8]。顾小丽等^[9]将模糊算法和层次分析法应用于 TC 风险评估模型, 估计即将登陆 TC 可能造成的经济损失。陈佩燕等^[10]根据 TC 强度、路径、大风、暴雨等致害因子与灾害的联系构建 TC 灾情预估模型, 并证明该模型具有较好的预估能力。为了减少模型对 TC 经济损失评估误差, 林江毫和阳爱民^[11]提出了反向传播神经网络和空间向量模型相结

收稿日期: 2020–05–17; 修订日期: 2020–11–19。

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1510201); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20181412); 国家自然科学基金优秀青年项目(41922033)。

作者简介: 卢莹(1996—), 女, 广西省梧州市人, 主要研究方向为台风气候学及台风灾害评估。E-mail: 20191201013@nuist.edu.cn

* 通信作者: 赵海坤, 教授, 主要从事台风气候动力学研究和台风预测技术研制。E-mail: haikunzhao@nuist.edu.cn

合的综合评估模型。上述 TC 灾害模型评估工作多侧重于 TC 灾害自身的分析,很少与影响 TC 活动(如 TC 路径、登陆地点和陆上持续时间等)的大尺度环境场相联系。

TC 活动会受到不同时间尺度气候变率调制的影响^[12]。陈晓捷等^[13]指出,太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)处于暖相位时,西太平洋副高强度偏强、中心向西向南移动,导致 TC 在中国登陆位置偏南;PDO 处于冷相位时,TC 登陆位置偏北。黄荣辉和王磊^[14]发现,夏季东亚-太平洋指数偏高时,厦门以北登陆的 TC 偏多;东亚-太平洋指数偏低,华南沿海登陆的 TC 偏多。Wu 等^[15]认为,1965–2003 年登陆海南和广东 TC 数目的减少、登陆福建和浙江 TC 数目的增加与 TC 盛行路径变化有关,并进一步指出该 TC 盛行路径的变化与全球变暖紧密相关。全球变暖为当前全球气候变化主要特征^[16]。在全球变暖背景下,研究表明^[17],全球 TC 活动发生了变化。Yamaguchi 等^[18]通过模拟全球 TC 移动速度发现,全球变暖将使 30°~40°N 之间 TC 移动速度减小。Mendelsohn 等^[19]根据气候模式预测西北太平洋地区强台风数目将增加,沿岸地区强台风灾害发生的可能性加大。Webster 等^[20]在 2005 年发现,除大西洋外,过去 30 年间全球 TC 强度增加趋势明显。虽然每年登陆中国的 TC 频数和强度基本保持稳定^[21],但杨玉华等^[22]发现,1982 年以后,广西和华东沿海地区登陆 TC 频数增加,其他地区 TC 登陆频数减少。国内外关于中国 TC 灾害的研究主要集中在 TC 活动特征及其造成的社会影响两方面,但 TC 移动路径的不同,登陆位置、强度对各省份造成的影响不同。联系以往研究,全球变暖可能会使影响中国的 TC 盛行路径发生变化,为了更好地理解全球变暖对中国 TC 灾害的影响,研究不同 TC 盛行路径下影响中国的 TC 灾害时空分布特征,对各地区灾情预警和防台减灾工作的部署具有重要意义。

本文将在考察中国大陆及海南岛的 TC 灾害特征基础上,将 TC 路径划分为近海转向、西行和西北行 3 类盛行路径,重点分析不同盛行路径下中国的 TC 灾害特征及差异,并探讨 TC 陆上持续时间变化及灾害的潜在风险。

2 资料与方法

TC 路径资料来源于中国气象局上海台风研究所(Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, CMA-STI)整编的 1984–2017 年“CMA 热

带气旋最佳路径数据集”(https://www.typhoon.org.cn),包含 TC 中心 6 h 次的位置和强度信息(2017 年起登陆中国的台风在登陆前 24 h 内,最佳路径时间频次加密为 3 h/次),分析时只保留热带风暴级以上(近中心风速 ≥ 17.2 m/s)的 TC 资料。目前,海上 TC 的位置和强度等信息主要依靠气象卫星和雷达进行估计,由于不同预报中心 TC 强度资料存在差异^[23],对 TC 风速的分析还参考美国联合飓风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)1984–2017 年“热带气旋最佳路径资料”(https://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html)。

中国热带气旋灾情资料(不包含港澳台)包括登陆 TC 编号、登陆时间、登陆地点以及各省(自治区、直辖市)因 TC 导致的死亡人数、失踪人数、农作物受灾面积、倒塌房屋间数和直接经济损失等信息,本文仅对其中的直接经济损失和死亡人数资料进行分析。1984–1999 年 TC 灾情资料来源于“中国热带气旋灾害数据集”(详见 http://data.cma.cn),2000–2003 年资料来源于《中国气象年鉴》,2004–2017 年资料来源于《中国气象灾害年鉴》。

居民消费价格指数(Consumer Price Index, CPI)是观察通货膨胀程度的重要指标之一,将原始经济损失换算至同一年货币水平,能更好地比较不同年份经济损失的差异。由于各省份 CPI 值存在差异,本文用各省逐年 CPI 值将各年份经济损失调整至 2017 年人民币水平。公式为

$$\text{Losses}_{\text{CPI}}(t) = \text{Losses}(t) \frac{\text{CPI}_{2017}}{\text{CPI}_t}, \quad (1)$$

式中, $\text{Losses}_{\text{CPI}}$ 和 Losses 分别表示标准化的经济损失值和原始经济损失值; t 表示灾害发生的年份($t=1984, 1985, \dots, 2017$)。此外,为排除经济快速发展对损失评估的影响,将“TC 造成的直接经济损失与国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)之比”作为衡量经济损失相对大小的指标^[24]。CPI 和 GDP 资料均可从中华人民共和国国家统计局网站上(www.stats.gov.cn)获得。

本文采用曼-肯德尔(Mann-Kendall, M-K)分析方法对资料序列的趋势显著性进行检验。TC 移动路径划分参考 Gaffney^[25]提出的气旋聚类分析方法。

3 结果分析

3.1 TC 造成直接经济损失和死亡人数总体特征

3.1.1 时间特征

图 1a 和图 1b 表示 1984–2017 年 TC 灾害中死亡人数和直接经济损失逐年变化情况。TC 平均每年导

致 375 人死亡, 368.0 亿元直接经济损失, 1994 年死亡人数最多 (1 815 人), 2013 年直接经济损失最大 (1 259.4 亿元), 死亡人数下降趋势显著, 而经济损失则呈显著上升趋势。与原始经济损失序列相比, CPI 标准化年均经济损失增至 496.7 亿元 (2017 年人民币水平), 直接经济损失上升趋势略有减小但依旧显著, 最高值出现在 1996 年 (1 397.9 亿元), 超过 2013 年的 1 356.0 亿元。需指出的是, 个别年份极大值的出现与当年的极端事件有关, 如 1996 年仅台风“赫伯 (Herb)”就造成 779 人死亡和 652.7 亿元直接经济损失, 死亡人数与经济损失分别占当年 TC 灾害总数的 54% 和 68%。改革开放后中国经济快速增长, GDP 随之增加^[26]。1984-2017 年, TC 原始直接经济损失在 GDP 中平均占比为 0.3%, 损失在 GDP 中占比随时间减小 (图 1c), 与直接经济损失趋势相反。中国经济的快速发展以及城市化率的不断提高让更多的社会财产暴露在 TC 灾害下, 这可能是 1984 年以来 TC 直接经济损失显著增加的主要原因。

本文将“中国热带气旋灾情资料”中造成直接经济损失和人员死亡的 TC 称为影响气旋。影响气旋包括登陆气旋和未登陆气旋, 未登陆气旋伴随的狂风、暴雨、风暴潮等仍会给中国沿海地区造成影响, 如 2013 年台风“蝴蝶 (Wutip)”虽未登陆中国, 但仍造成海南 14 人遇难, 2 000 万元直接经济损失。TC 灾害与影响 TC 频数、强度密切相关。1984-2017 年, 西北太平洋地区共有 270 个 TC 影响中国 (图 2a), 其中 227 个为登陆 TC, 影响和登陆的 TC 数目均无明显变化趋势。在登陆强度上, CMA-STI 资料显示, TC 平均登陆风速为 28.5 m/s, JTWC 资料显示的登陆风速为 30.5 m/s (图 2b)。风速的差异与数据集有关, CMA-STI 资料中心最大平均风速为 2 min 平均, 平均 JTWC 资料的最大平均风速为 1 min 平均。两套资料均表明, TC 登陆风速具有上升趋势, 且 CMA-STI 资料中登陆风速的上升趋势显著 (通过 95% 显著性检验)。此外, TC 登陆时的中心气压 (基于 CMA-STI 资料计算) 具有下降趋势 (图 2c)。由此可知, 在过去 34 年间, 虽然登陆中国的 TC 数目无明显变化, 但 TC 登陆强度存在上升趋势。相关研究表明^[17], 1949 年以后影响和登陆中国的 TC 频数呈弱的减少趋势, 而 TC 登陆平均强度显著增加且与强台风登陆的比例增加有关。然而, 20 世纪 60 年代以前, 由于缺少卫星的监测, TC 资料可能出现缺漏; 目前, 卫星估计的 TC 强度与飞机探测强度之间偏差较大, 1986 年以后, 西北太平洋地区飞机对台风探测的停止又加大了

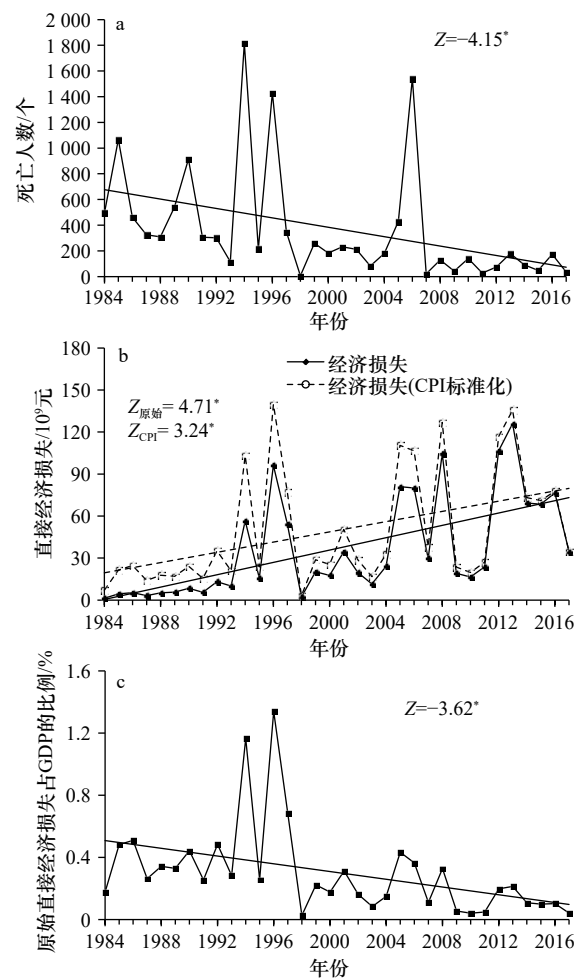


图 1 1984-2017 年因 TC 导致的死亡人数 (a)、直接经济损失 (b) 和原始直接经济损失在 GDP 中百分比 (c)
Fig. 1 Time series of deaths (a), direct economic losses (b) and original direct economic losses proportion to GDP (c) caused by affecting TCs during 1984-2017

直线表示线性趋势, “Z”为 M-K 检验统计量, *表示趋势线通过 95% 显著性检验

The straight line indicates the linear trend, Z is M-K trend test score, the Z-value with symbol “*” indicates the linear trend is significant at a 95% significance test

资料的不确定性^[23]。因此, 由于不同时间 TC 强度资料的不一致性, 尚不能明确登陆中国的 TC 强度是否发生显著变化。

各年代影响和登陆中国的平均 TC 数及其造成的灾害情况如表 1 所示。各年代影响中国的 TC 数平均为 7~9 个、登陆中国的 TC 数平均为 6~7 个, 年代际影响和登陆中国的年平均 TC 数目变化较小。1984-1990 年 TC 平均造成的死亡人数最多, 平均直接经济损失和 CPI 标准化的经济损失最少。1990 年后, 平均死亡人数明显减少, 但直接经济损失则明显增加。原始经济损失在 1991-2000 年平均占比最高 (0.49%),

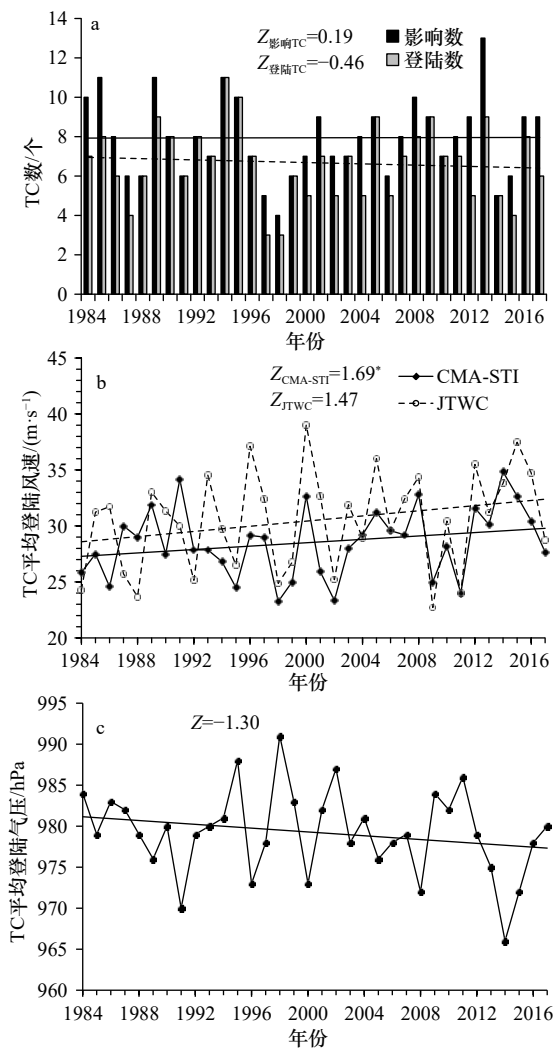


图2 1984–2017年影响和登陆中国的TC数目(a)、TC平均登陆风速(b)和TC平均登陆气压(c)

Fig. 2 The number of affecting and landfalling TCs (a), average landing wind speed (b) and landing pressure (c) of landfalling TCs from 1984 to 2017

a 中实线和虚线分别代表影响和登陆TC的线性趋势；b和c中直线表示相应序列线性趋势；“Z”为M-K检验统计量；*表示趋势线通过95%显著性检验

The solid dotted line in a represent the linear trend of affecting and landfalling TCs, respectively; the lines in b and c indicate the linear trend of the corresponding sequences Z is M-K trend test score; the Z-value with symbol “*” indicates the linear trend is significant at a 95% significance test

表1 1984–2017年影响和登陆中国的TC数目与灾害的年代变化

Table 1 Decadal change in mean of TC numbers and the associated disaster in China from 1984 to 2017

时间	TC影响平均数 (个·a ⁻¹)	TC登陆平均数 (个·a ⁻¹)	死亡人数 (个·a ⁻¹)	直接经济 损失/(亿元·a ⁻¹)	平均CPI标准化经济 损失/(亿元·a ⁻¹)	原始直接经济损失占 GDP的比例/%
1984–1990年	8.6	6.9	588	47.6	197.9	0.36
1991–2000年	7.1	6.6	498	292.0	472.8	0.49
2001–2010年	8.0	6.9	301	420.6	553.9	0.20
2011–2017年	8.4	6.3	90	721.7	765.7	0.12

2000年以后,直接经济损失在GDP中占比逐渐减小。

TC灾害的年际和年代际变化特征表明,在影响和登陆中国的TC数目保持稳定而登陆强度有所增加的情况下,虽然TC造成的直接经济损失明显上升,但考虑通货膨胀及中国经济发展等因素后,直接经济损失在GDP中占比减小,且年累计死亡人数同样呈下降趋势。TC灾害的减小得益于中国台风路径预报水平的显著提升^[27]以及台风监测站网建设的不断完善^[28],给各级政府防台减灾工作部署提供及时有效的建议。

3.1.2 空间分布特征

据1984–2017年TC灾情资料统计显示,中国9个沿海省(自治区、直辖市)曾有TC登陆记录,浙江以南TC登陆数多,浙江以北TC登陆数少(图3a)。广东是TC登陆次数最多的省份,34年间TC累计登陆99次;海南和福建次之,TC平均每年登陆1~2次;纬度偏北的辽宁、山东、江苏、和上海等地则鲜有TC直接登陆。登陆TC影响范围广,中国有24个省(自治区、直辖市)曾受TC影响,各省(自治区、直辖市)TC影响频次呈现由东南沿海向内陆减小的特征(图3b)。广东、福建、浙江、广西和海南受TC影响较为频繁,34年间TC累计影响次数分别为138次、106次、91次、78次和77次,同时上述省份也是TC登陆次数较多的地方。

图4显示1984–2017年中国各省(自治区、直辖市)TC年均灾害情况。浙江、广东、福建和广西是受TC影响直接经济损失较大的地区,4省(自治区)年均直接经济损失分别为86亿元、85亿元、48亿元和42亿元,CPI标准化4省(自治区)损失值均在50亿元以上,浙江和广东更是增至100亿元以上(图4a,图4b)。海南、河北和山东年均经济损失10亿~30亿元,CPI标准化损失分别增至33亿元、25亿元和20亿元。其他省份受TC影响造成的直接经济损失较小。在死亡人数上(图4c),浙江、广东和福建是因TC导致死亡人数较多的省份,年均死亡人数分别为109人、69人和65人,远高于其他地区。需指出

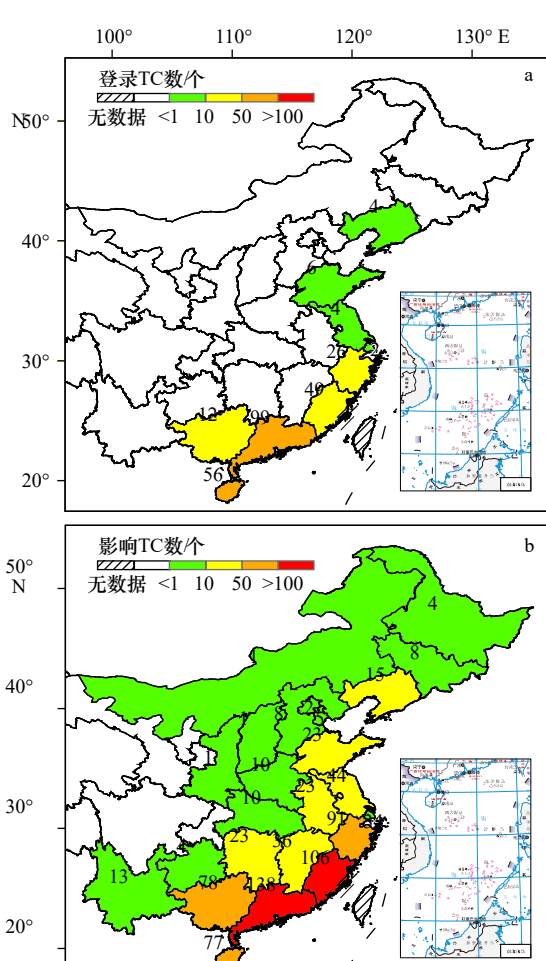


图3 1984-2017年中国各省(自治区、直辖市)累计登陆TC数(a)和影响TC数(b)

Fig. 3 Distribution of total landfalling (a) and affecting (b) TC numbers in China during 1984-2017

统计结果不包含港澳台

The statistical results do not include the data of Hong Kong, Macao and Taiwan

的是,河北在34年间仅受TC影响8次,但年均死亡15人、直接经济损失18亿元,全国排名第6,经CPI标准化高达25亿元,TC灾害远高于周围省市。河北TC影响少、灾情重的原因在于1996年台风“赫伯(Herb)”和2012年台风“达维(Damrey)”两个极端事件。“赫伯(Herb)”影响期间造成河北423人死亡、456.3亿元直接经济损失,“达维(Damrey)”造成3人死亡、143.8亿元直接经济损失,研究时段内仅这两个台风在河北造成的死亡人数和直接经济损失就占总数的85.5%和97.1%。

对比图3和图4发现,各省(自治区、直辖市)TC灾害严重程度与登陆和影响TC数目有关。除个别省份因极端事件影响外(如河北),TC灾情严重的地区,如浙江、福建、广东、广西和海南等同时也是

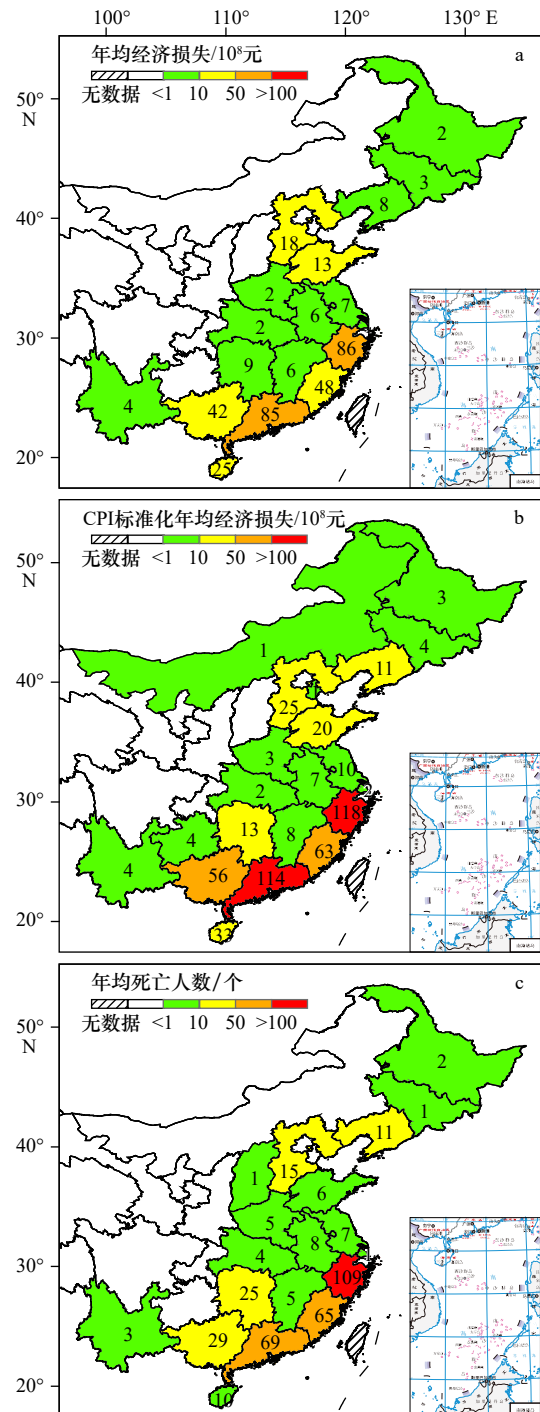


图4 1984-2017年中国各省(自治区、直辖市)因TC造成的年均直接经济损失(a)、CPI标准化年均经济损失(2017 RMB)(b)和年均死亡人数(c)

Fig. 4 Distribution of annual mean direct economic losses (a), CPI normalized economic losses (2017 RMB) (b) and deaths (c) caused by TCs in China during 1984-2017

统计结果不包含港澳台

The statistical results do not include the data of Hong Kong, Macao and Taiwan

TC登陆和影响频数较多的地区。TC登陆时除了狂风、暴雨、洪涝等灾害外,台风风暴潮灾同样对人民

生命财产构成巨大威胁^[1]。据《中国海洋灾害公报》统计,2010年以来,中国沿海地区平均每年因台风风暴潮灾导致约80亿元直接经济损失,这也是沿海地区TC灾情严重的重要原因之一。

3.2 3类盛行路径下TC灾害特征

3.2.1 TC盛行路径划分

根据Wu和Wang^[29]提出的TC盛行路径分析方法,通过计算1984–2017年影响中国的TC在空间网格点($2.5^\circ \times 2.5^\circ$)上平均出现频次,可绘制出影响

TC主要活动区域(图5a)。由影响TC生成位置(TC中心风速第1次超过 17.2 m/s 时的位置)可知,影响TC多形成于南海北部和菲律宾以东的洋面(图5e)。TC活动路径决定影响区域,是造成TC灾害的重要因素之一。为分析不同盛行路径下TC灾害的差异,利用Gaffney^[25]提出的气旋聚类分析方法将图5a中影响TC划分为以下3种类型(图5b至图5d):一是在南海北部或菲律宾东部附近海域生成,生成地平均位置偏北、偏西(图5f),在海上移动路径多变,北行或西

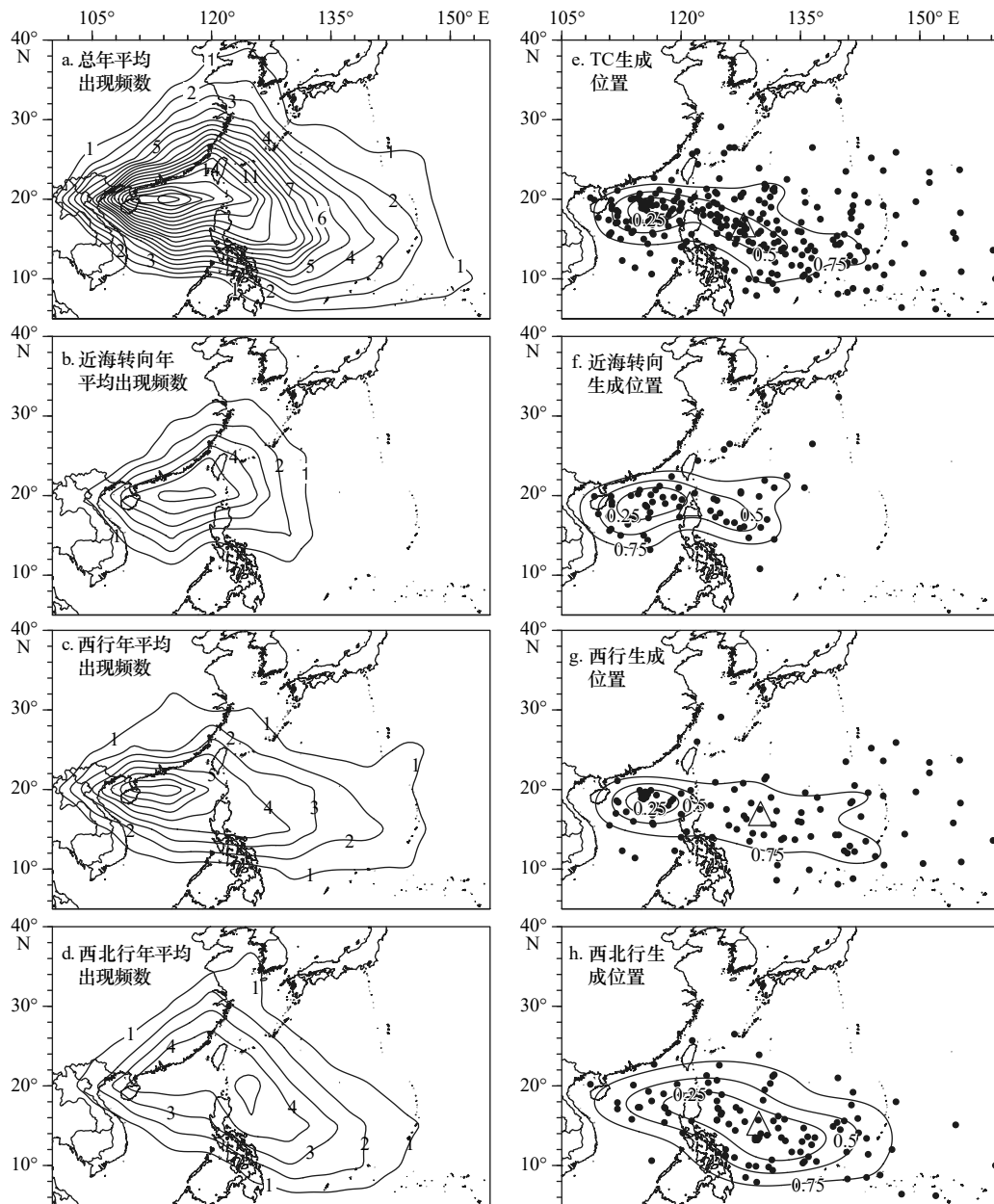


图5 1984–2017年影响TC年平均出现频数分布(a–d)和TC生成位置(e–h)

Fig. 5 Distribution of annual mean frequency (a–d) and genesis locations (e–h) of the affecting TCs during 1984–2017

e–h 中黑色点表示所有影响TC的生成位置,曲线表示生成位置的25%、50%和75%概率密度分布,三角形表示TC平均生成位置

The affecting TC genesis points are shown in black dots and its kernel density estimation in 25%, 50%, and 75% contours along with the averaged genesis location of these affecting TCs in triangle in e–h

北行登陆后常在内陆消散或向东北转向移出大陆,以下简称近海转向 TC;二是在南海北部(主)或菲律宾以东(次)的洋面生成(图 5g),西行登陆后常在内陆消散,以下简称西行 TC;三是在南海北部或菲律宾以东的洋面生成(图 5h)后西北行或西行,登陆后常在内陆消散或向东北转向移出,移动路径多呈抛物线型,以下简称西北行 TC。

3.2.2 3类盛行路径下 TC 灾害的时间特征

TC 灾害与 TC 活动特征密切相关,频数、强度和陆上持续时间等可作为表征影响 TC 活动的指数。本文中 TC 持续时间指中心最大风速从第 1 次至最后 1 次超过 17.2 m/s 的时间,陆上持续时间指从登陆时刻开始至中心风速最后 1 次超过 17.2 m/s 的时间。对于登陆中国大陆及海南省后又重新入海且中心最大风速超过 17.2 m/s 的 TC,陆上持续时间指从登陆时刻开始至重新入海的时间。TC 强度和持续时间的分析基于 1984–2017 年 CMA-STI 资料。从表 2 可知,影响 TC 平均持续时间为 120.3 h,平均最大强度为 39.9 m/s(台风级),平均登陆强度 28.6 m/s(强热带风暴级),登陆后陆上平均持续 15 h。3 类 TC 陆上平均持续 14~16 h,时间差异较小。与西行和西北行的 TC 相比,近海转向 TC 影响和登陆中国的数目少、平均强度小,34 年间仅有 62 个近海转向 TC 影响中国,约占总数的 23.0%,影响和登陆 TC 数目虽有减少趋势但并不显著(图 6a)。西行 TC 影响和登陆中国的数目较多,34 年间有 104 个西行 TC 影响中国,其中 93 个 TC 直接登陆,约占总数的 38.5% 和 41.0%,是平均生命史最长且强度最大的 TC,影响和登陆 TC 数均呈上升趋势,但未通过 95% 显著性检验(图 6b)。西北行 TC 也是影响和登陆中国数目较多的一类,34 年间西北行 TC 累计影响中国 104 次、累计登陆 85 次,TC 数目年际变化趋势不显著(图 6c),虽然平均生命

表 2 1984–2017 年盛行路径下影响 TC 活动特征

Table 2 Characteristics of all affecting TCs and of affecting TCs for three prevailing tracks during 1984–2017

盛行路径	总路径	近海转向	西行	西北行
TC 影响数/个	270	62	104	104
TC 登陆数/个	227	49	93	85
平均最大风速/(m·s ⁻¹)	39.9	35.8	43.3	40.3
平均登陆风速/(m·s ⁻¹)	28.6	26.7	30.3	28
平均持续时间/h	120.3	123	136.7	108.1
陆上平均持续时间/h	15	14.8	14.5	15.7

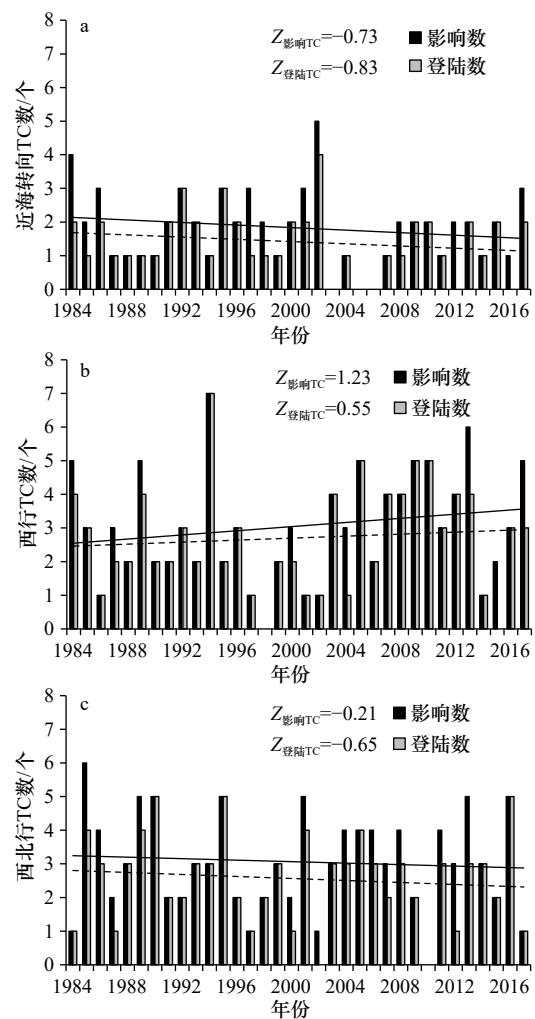


图 6 1984–2017 年影响和登陆中国的近海转向(a)、西行(b)和西北行(c) TC 个数

Fig. 6 The number of affecting and landing TCs in China on the tracks of recurve (a), westward (b) and northwestward (c) during 1984–2017

实线表示影响 TC 的线性趋势,虚线表示登陆 TC 线性趋势,“Z”为 M-K 检验统计量,趋势线均未通过 95% 显著性检验
The solid/dotted line represents the linear trend of affecting/landfalling TCs, Z is the M-K trend test score, the Z-value with the symbol “*” indicates the linear trend is significant at a 95% significance test

史最短,但平均强度仅次于西行 TC。

1984–2017 年,3 类盛行路径下 TC 灾害情况如图 7 所示。从死亡人数上看(图 7a 至图 7c),西北行 TC 年均死亡人数(177 人)最多,西行 TC(141 人)次之,近海转向 TC(58 人)最少,3 类 TC 造成的死亡人数均有明显减少。从经济损失绝对值来看(图 7d 至图 7f),近海转向、西行和西北行的 TC 年均直接经济损失分别为 30.7 亿元、178.8 亿元和 158.6 亿元,西行和西北行的 TC 经济损失上升趋势明显,而近海转向的 TC 经济损失则无明显变化。经 CPI 标准化,近海

转向、西行和西北行的 TC 年均经济损失分别增至 49.9 亿元、233.3 亿元和 213.5 亿元,西行和西北行的 TC 经济损失上升趋势依然显著。从经济损失相对值来看(图 7g 至图 7i),西行和西北行的 TC 经济损失在 GDP 中占比为 0.127% 和 0.129%,约为近海转向 TC(0.046%) 的 3 倍。3 类 TC 直接经济损失在 GDP 中占比显著减少,说明损失绝对值的增加与经济发展有关。

此外,个别极具破坏性 TC 的出现是某些年份直接经济损失异常偏高的原因之一。根据直接经济损失大小选出的 10 个 TC 中(表 3),死亡人数从 6 人至 863 人不等,但直接经济损失均在 300 亿元以上,且损失在当年的总 TC 经济损失中占比超过 35%,个别 TC 超过 70%,如 0814 号台风“黑格比(Hagupit)”和 9711 号台风“温妮(Winnie)”。虽然极具破坏力的

TC 登陆强度(热带风暴级到超强台风级)和陆上持续时间(1 d 以内至 3 d 以内)差异较大,但其移动路径多为西行和西北行路径(5 个为西行路径、5 个为西北行路径)。由此可见,中国 TC 灾害主要由西行和西北行的 TC 造成,极具破坏力的 TC 在这两种路径下更容易产生。

3 类 TC 各年代灾害情况如图 8 所示。在 TC 数目上(图 8a),3 类 TC 年代内平均影响 TC 频数无明显变化,但灾害年代际差异较大。在死亡人数上(图 8b),2000 年以前平均死亡人数较多,近海转向、西行和西北行的 TC 在 1984–1990 年平均死亡人数分别为 113 人、189 人和 286 人,1991–2000 年分别为 97 人、239 人和 163 人。2000 年以后近海转向和西行的 TC 平均死亡人数骤减,2001–2010 年平均死亡人数分别减少至 22 人和 74 人,2011–2017 年分别减少

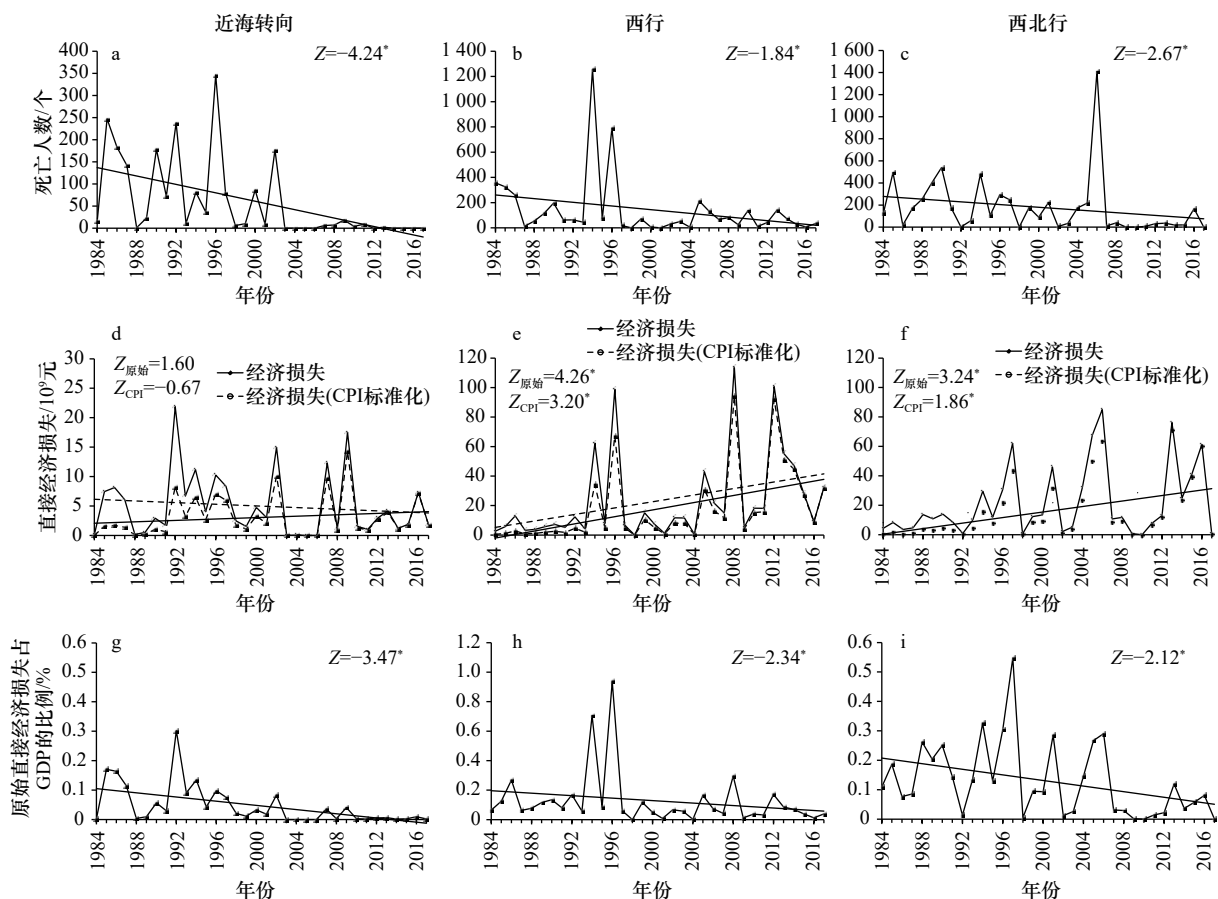


图 7 1984–2017 年 3 类盛行路径下因 TC 导致的死亡人数(a–c)、直接经济损失(d–f)和原始直接经济损失在 GDP 中占比(g–i)

Fig. 7 Time series of deaths (a–c), direct economic losses (d–f) and original direct economic losses proportion to GDP (g–i) caused by affecting TCs for the three prevailing tracks during 1984–2017

直线表示相应序列的线性趋势,“Z”为 M-K 检验统计量,*表示趋势线通过 95% 显著性检验

The straight line indicates the linear trend, Z is the M-K trend test score, the Z-value with the symbol “*” indicates the linear trend is significant at a 95% significance test

表3 1984–2017年造成中国直接经济损失最大的10个TC

Table 3 Top 10 TCs with the greatest direct economic losses in China during 1984–2017

年份	编号	命名	盛行路径	登陆风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	陆上持续 时间/h	经济损失/ 亿元	单个TC经济损失占 总TC经济损失的比例/%	死亡人数
2008	0814	黑格比(Hagupit)	西行	48	18	801.7	76.7	35
1996	9608	赫伯(Herb)	西行	40	30	652.7	67.9	779
2013	1323	菲特(Fitow)	西北行	42	12	631.4	50.1	11
2012	1210	达维(Damrey)	西行	35	18	455.6	42.8	20
2014	1409	威马逊(Rammasun)	西行	60	36	446.5	64.4	73
1997	9711	温妮(Winnie)	西北行	40	66	436.3	80.1	248
2006	0604	碧利斯(Bilis)	西北行	30	24	383.1	47.9	863
2012	1211	海葵(Haikui)	西行	42	36	375.9	35.3	6
2016	1614	莫兰蒂(Meranti)	西北行	50	18	316.4	41.3	38
2015	1522	彩虹(Mujia)	西北行	52	24	300.1	43.9	20

至2人和48人。2006年0604号强热带风暴“碧利斯(Bilis)”造成863人死亡,是2001–2010年造成死亡人数最多的TC,而西北行TC在2001–2010年年均死亡人数仍高达211人正是由于“碧利斯(Bilis)”影响。在经济损失上(图8c,图8d),近海转向TC在90年代年均经济损失最大(40亿元)且损失在GDP中占比最高(0.08%),2000年以后损失逐渐减小,损失在GDP中

占比下降更加明显。西行和西北行的TC经济损失自1984年以来不断增加,2011–2017年平均经济损失最高,而损失在GDP中占比在90年代最大,2000年后占比明显减小。

总体来看,中国主要受西行和西北行的TC影响,在3类盛行路径下TC造成的死亡人数和直接经济损失在GDP中占比均有减小。西行和西北行的TC平

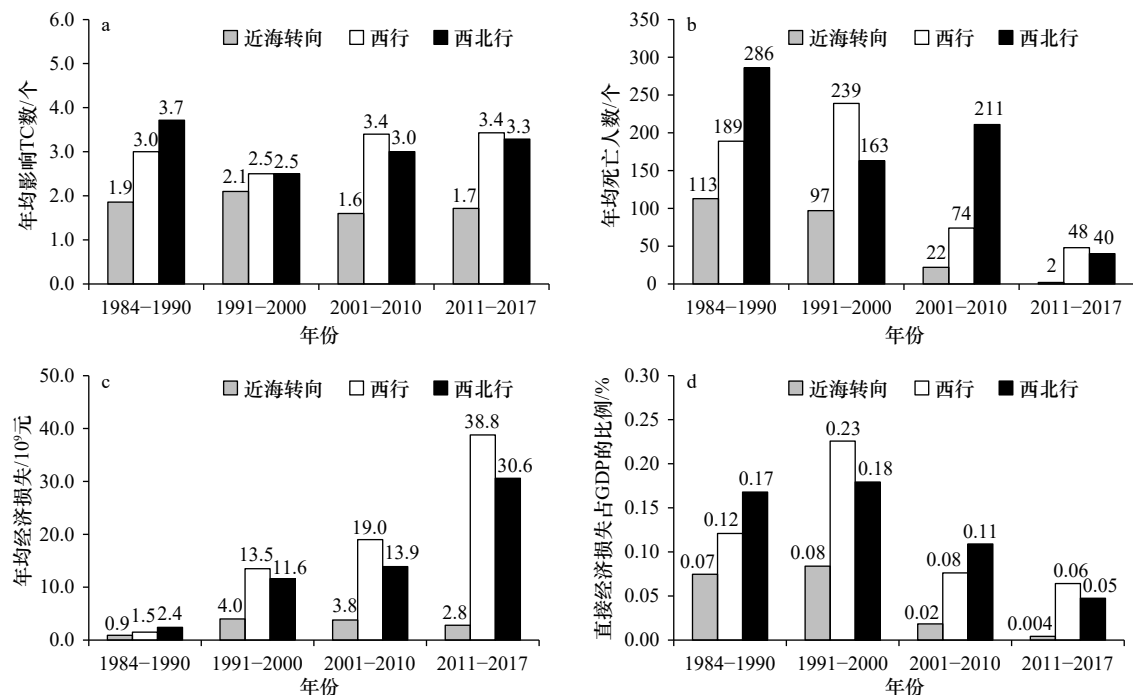


图8 1984–2017年3类盛行路径下各年代平均的影响TC频数(a)、死亡人数(b)、直接经济损失(c)和直接经济损失在GDP中百分比(d)

Fig. 8 Decadal changes in the mean of affecting TC numbers (a), deaths (b), direct economic losses (c) and the percentage of direct economic losses to GDP (d) for the three prevailing tracks during 1984–2017

均每年影响和登陆中国的 TC 数目多、强度大,且容易产生极具破坏力的 TC,因而累计灾害情况严重。近海转向的 TC 由于影响和登陆中国的数目少、强度小,因而造成的经济损失和死亡人数明显少于西行和西北行的 TC。

3.2.3 3类盛行路径下 TC 灾害的空间分布

图 9 显示 1984–2017 年 3 类路径下 TC 累计登陆和影响中国各省(自治区、直辖市)的次数。与总体灾害特征类似,3 类 TC 影响和登陆中国大陆及海南岛的频繁程度呈现从东南沿海向内陆减小的特征。与西行和西北行的 TC 相比,近海转向 TC 登陆次数少、影响范围小。西行 TC 对中国影响范围广,TC 在广东、海南和福建登陆频繁,累计登陆次数分别为 38 次、33 次和 19 次,而累计影响次数较多的省(自治区)分别为广东(57 次)、海南(48 次)和广西(41 次),福建(29 次)排名第 4。西北行路径也是对中国影响范围广的 TC 盛行路径之一,TC 主要登陆和影响广东、福建、浙江,三省累计登陆次数分别为 39 次、23 次、12 次,累计影响次数分别为 53 次、51 次、43 次。可见,各省受 TC 影响频繁程度与 TC 移动路径密切相关,如海南、广西和云南受西行 TC 影响次数

明显高于其他两类,近海转向或西北行的 TC 在较高纬度地区活动时,其外围环流和远距离降水对内蒙古、吉林和黑龙江也能产生一定灾害。

各省(自治区、直辖市)3 类 TC 灾害情况如图 10 所示。与西行和西北行的 TC 相比,各省(自治区、直辖市)因近海转向 TC 导致的年均经济损失少、死亡人数低,灾情主要出现在受 TC 影响频繁的沿海地区,如广东、福建和浙江。近海转向 TC 对内陆的湖南、江西及纬度较高的吉林、黑龙江也有一定的影响,同时也有像河北、河南、安徽等虽有 TC 经过但未造成经济损失或人员伤亡的情况。

西行 TC 虽然对广东、海南和广西影响较频繁(图 9e),但平均每年 TC 经济损失较严重的省(自治区、直辖市)为广东、广西和浙江(图 10b, 图 10e),死亡人数较多的省(自治区、直辖市)为浙江、广东和福建(图 10h)。值得注意的是,1984–2017 年仅有 3 个西行 TC 影响河北,但河北年均死亡人数和经济损失远高于其他两类盛行路径,是由于 1996 年台风“赫伯(Herb)”和 2012 年台风“达维(Damrey)”两个极端事件。“赫伯(Herb)”影响中国时恰逢天文大潮期,受风暴潮灾和强降水共同影响,造成河北 423 人遇难、

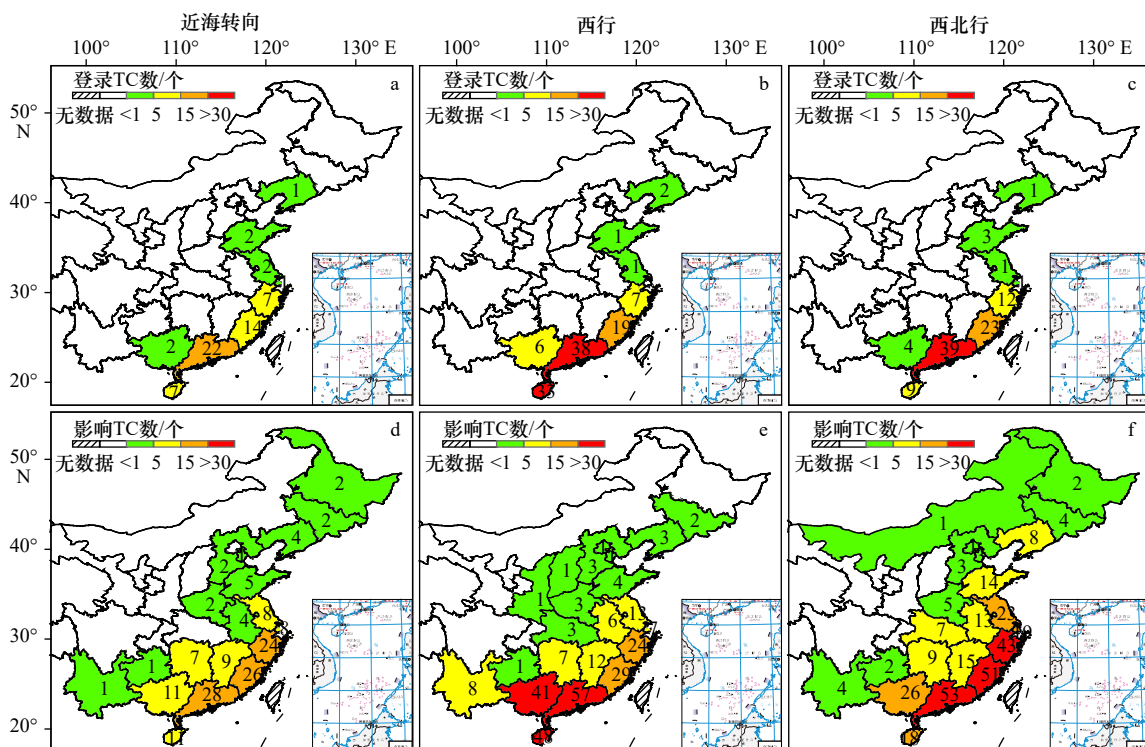


图 9 1984–2017 年 3 类路径下中国各省(自治区、直辖市)累计登陆 TC 数(a–c)和影响 TC 数(d–f)

Fig. 9 Distribution of landfalling (a–c) and affecting (d–f) TC numbers in China for the three prevailing tracks during 1984–2017

统计结果不包含港澳台

The statistical results do not include the data of Hong Kong, Macao and Taiwan

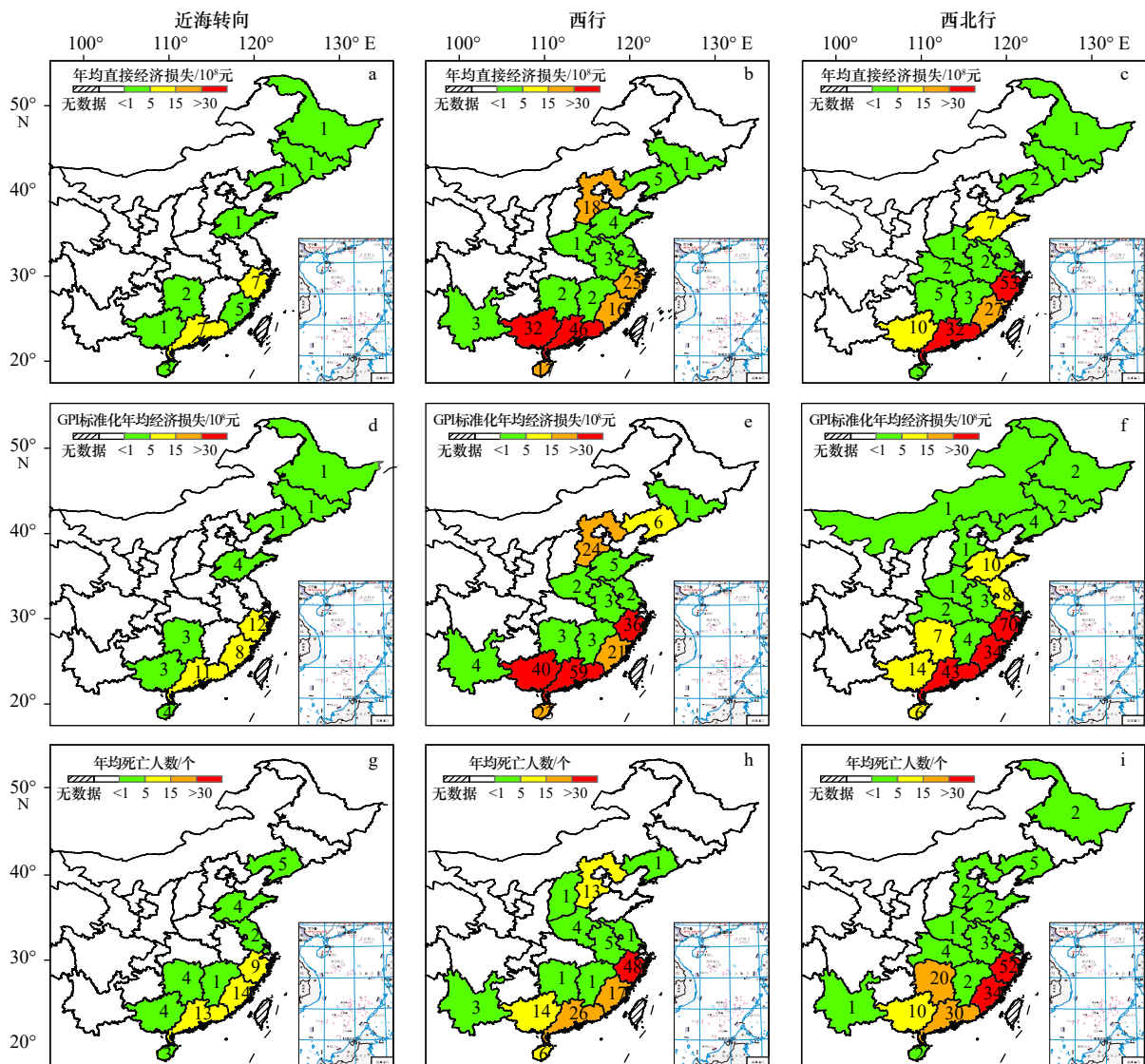


图 10 1984-2017年3类路径下中国各省(自治区、直辖市)因TC造成的年均直接经济损失(a-c)、CPI标准化年均经济损失(2017人民币水平)(d-f)和年均死亡人数(g-i)

Fig. 10 Distribution of annual mean direct economic losses (a-c), CPI normalized economic losses (2017 RMB) (d-f) and deaths (g-i) caused by TCs in China for the three prevailing tracks during 1984-2017

统计结果不包含港澳台

The statistical results do not include the data of Hong Kong, Macao and Taiwan

456.3亿元直接经济损失。“达维(Damrey)”生成时亦恰逢天文大潮期,尺度小但强度大,在高纬度生成后西行进入黄海登陆中国,同时与南面的“苏拉(Saola)”形成双台风效应,在风雨潮作用下造成河北3人遇难、143.8亿元直接经济损失。

西北行TC在广东、浙江、福建造成的灾情最严重,仅3省的年均死亡人数在全国占比就高达66%,年均经济损失占71%,经CPI标准化占69%。其中,浙江年均死亡人数最多(52人)、经济损失最高(53亿元),经CPI标准化年均损失高达70亿。广东虽然登陆和影响的TC数目最多,但年平均直接经济损失

32亿元,CPI标准化增至43亿元,全国排名第2,年均死亡人数(30人)全国排名第3。福建年均直接经济损失27亿元,全国排名第3,年均死亡34人,仅次于浙江。湖南、江苏和山东等地TC灾害以西北行路径为主,西行和近海转向路径的TC次之。

由上述可见,在3类盛行路径中,中国各省(自治区、直辖市)受西行和西北行的TC影响更多、灾情更为严重。此外,沿海的浙江和广东由于经济发展水平高、人口密度大,虽然近年来中国台风路径预报能力不断提高、TC预警预报工作不断完善,但很多城市防洪排涝设施的建设落后于经济建设^[30],当TC引起

的极端暴雨发生时容易造成严重的城市内涝,而且在丘陵区(如广东),TC暴雨还容易引发山洪、滑坡和泥石流等次生灾害^[31],给当地造成不利的影响,因而浙江和广东的TC灾情在3条盛行路径下明显大于其他地区。

3.3 TC灾害与其陆上持续时间关系

TC灾害与TC活动特征相关。影响中国的TC数目在过去34年间无明显变化(图2),直接经济损失较为严重的10个TC中(表3),有3个TC登陆时为台风级(风速为32.7~41.4 m/s),1个TC登陆时为强热带风暴级(风速为24.5~32.6 m/s),这表明,即使TC登陆强度小,也可能造成巨大经济损失。除登陆频数和登陆强度外,TC灾害也与TC陆上持续时间有关,TC在陆上持续时间越长,对途经地区造成严重影响的可能性越大。Chen等^[32]发现,1976年后TC在中国平均持续时间增加,这与1976年后热带海表面温度升高的变化一致^[33]。海温对大尺度环流有何影响尚待研究,但Chen等^[32]认为,TC陆上持续时间增加与大尺度引导气流变化一致。与引导气流变化相比,TC地形摩擦耗散率相对稳定,在非绝热条件下,TC登陆强度越大衰减速度越慢,在陆上可能持续的时间越长^[34]。由于TC强度资料的不确定性,尚未明确陆上时间增加是否与登陆强度增大有关。因此,本文将探讨大尺度引导气流变化下3类TC陆上持续时间的变化,引导气流的计算基于美国国家环境预报中心(NOAA National Centers for Environmental Predictions, NCEP)再分析数据集2的月平均风场资料。为减小时间序列过短对要素变化趋势的影响,将研究时段从1984–2017年拓展为1979–2018年。

1979–2018年,登陆中国大陆及海南岛的TC陆上持续时间具有显著上升趋势(图11a),这一结果与Chen等^[32]一致。登陆TC陆上平均移动距离约为220.8 km,陆上平均移速约为5.04 m/s,陆上移动距离增加趋势显著,而陆上移动速度则无明显变化(图11b,图11c)。由此推断,持续时间增加可能与距离增加有关。TC运动受引导气流影响^[35],Wu和Wang^[29]将7–9月850~300 hPa加权平均气流定义为TC引导气流,引导气流变化趋势通过计算纬向和经向气流的线性趋势获得。从图11d可知,1979–2018年,中国东部的引导气流出现反气旋性变化,TC登陆频繁的东南沿海地区出现东北风/东风异常,东部沿海地区有偏南风异常。引导气流的变化使登陆TC向西速度分量显著增加、向北速度分量显著减小(图11e,图11f),由于东风异常大于北风异常,因而TC陆上移动速度总

体呈弱的上升趋势(未通过95%显著性检验)。

3类TC陆上持续时间同样具有显著上升趋势(图12a至图12c)。近海转向的TC陆上持续时间增加与移速减小有关,而西行和西北行的TC陆上持续时间增加主要与移动距离增加有关(图12d至图12i)。受大尺度引导气流异常影响,近海转向的TC陆上移速减小主要表现为经向移动速度减小。虽然西行的TC向西移动分量显著增加和向北移动分量显著减小,以及西北行的TC经向和纬向速度分量变化趋势均不显著(图12j至图12o),但由于这两条盛行路径陆上的东风异常大于北风异常,因此它们陆上总体移动速度呈弱的上升趋势。由此可知,对于近海转向TC,在移动距离不变时,移动速度减小意味着TC将对途经地区影响时间更长、造成严重灾害的可能性越大;对于西行和西北行的TC,在移速变化较小情况下,距离增加意味着TC将影响的地区更多、范围更广。如果陆上持续时间增加趋势加剧,灾害风险的增加将加大中国防台减灾工作压力,受TC影响频繁的地区,如浙江、广东、福建等地需引起重视。

4 结果与讨论

本文基于1984–2017年中国热带气旋灾情资料(不包括港澳台)和热带气旋最佳路径资料,分析因TC导致的直接经济损失和死亡人数两类灾害的时空特征。根据移动路径的差异将TC划分成近海转向、西行和西北行3类TC盛行路径,分别讨论3类盛行路径下TC灾害的时空差异,并从TC陆上持续时间演变趋势角度探讨3类盛行路径下TC灾害的潜在风险。

(1) 1984–2017年,西北太平洋共有270个TC(平均每年约7.9个TC)影响中国大陆及海南岛,其中229个TC(平均每年6.6个TC)直接登陆,影响范围涉及中国24个省(自治区、直辖市),年际、年代际影响和登陆TC数目无明显变化。平均每年TC造成375人死亡和368亿元直接经济损失,经CPI标准化损失增至496.7亿元(2017年人民币水平),原始直接经济损失在GDP中占比约0.3%。TC导致的死亡人数下降趋势明显,虽然CPI调整至2017年人民币水平前后的经济损失均具有显著上升趋势,但损失在GDP中占比下降趋势明显(特别是2000年后),表明改革开放后,经济快速发展使更多的财富暴露在灾害中,因而导致经济损失增加。TC灾害与TC影响频繁程度密切相关,TC灾情分布与影响频数分布均呈现东南沿海向内陆减小特征,广东、浙江、福建受TC影

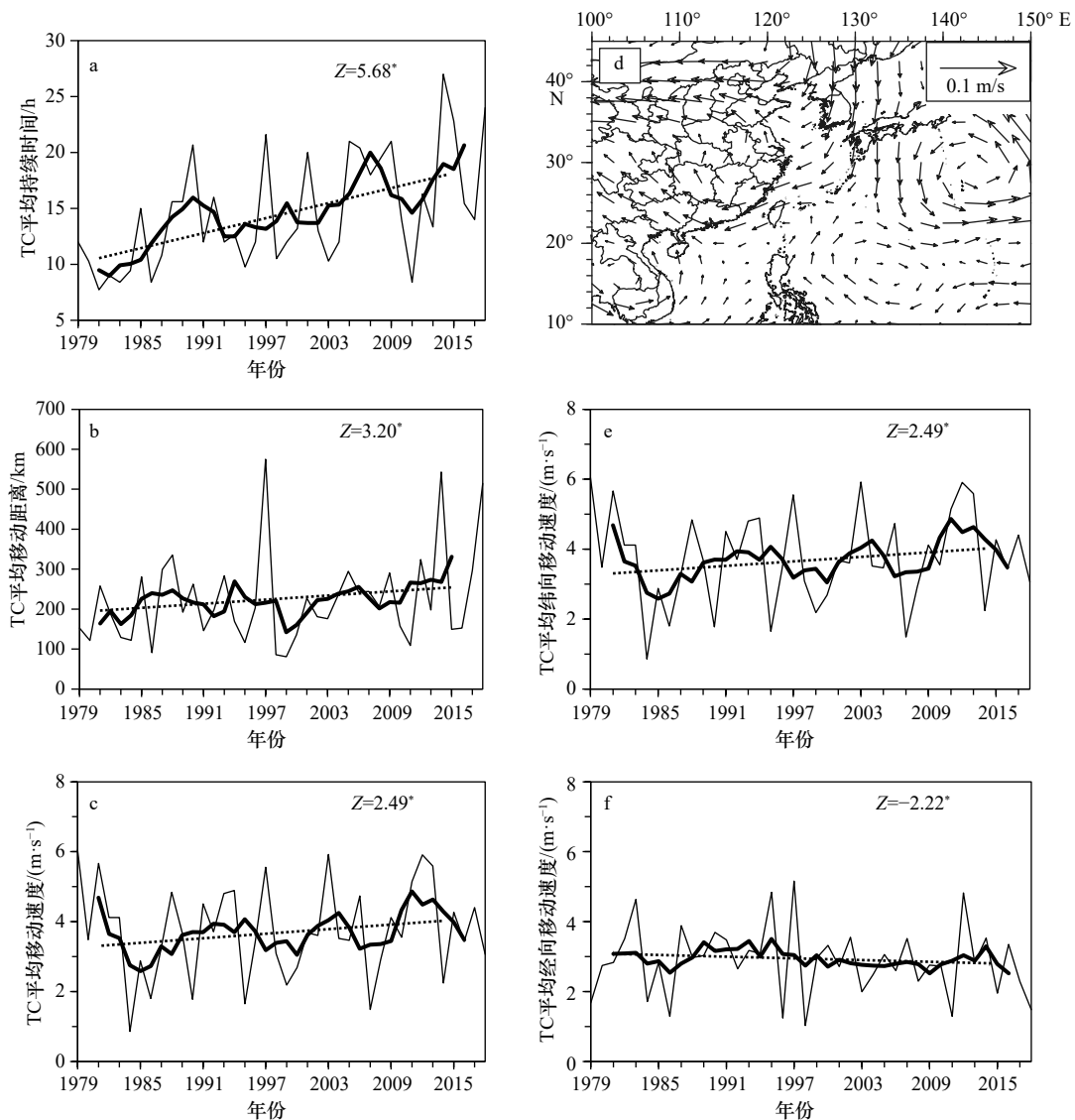


图 11 1979–2018 年在中国大陆上的 TC 平均持续时间(a)、平均移动距离(b)、平均移动速度(c)、引导气流线性变化趋势(d)、TC 平均纬向移动速度(e)和平均经向移动速度(f)

Fig. 11 Time series of annual mean overland duration (a), distance (b) and translation speed (c) of TCs in China, the trends in large scale steering flows (d), and the zonal (e) and meridional (f) TC translation speed during 1979–2018

粗线表示 5 年滑动平均, 虚线表示滑动平均序列的线性趋势, “Z”为 M-K 检验统计量, *表示趋势线通过 95% 显著性检验

Thick lines are the 5-years running average along its linear trend in dashed lines. Z is the M-K trend test score, the Z-value with the symbol “*” indicates the linear trend is significant at a 95% significance test

响频数较多, 也是中国 TC 灾情严重的地区(统计结果不包含港澳台)。

(2) 3 类盛行路径 TC 中, 中国受西行和西北行的 TC 影响更多、灾情更为严重。近海转向 TC 影响和登陆中国的数目少、强度弱、影响范围小、灾情轻, 灾情主要发生在广东、福建和浙江等受 TC 影响频繁地区。西行 TC 影响和登陆中国频数多、平均强度大, 其影响范围广、造成的灾害损失严重, 直接经济损失排名前 5 的 TC 中有 4 个为西行路径。西行 TC 对广东、海南和广西影响频繁, 但广东、广西和浙江

是受 TC 影响造成年平均直接经济损失较大的省(自治区、直辖市), 浙江、广东和福建是年均死亡人数较多的省(自治区、直辖市)。西北行 TC 平均强度略小于西行 TC, 也是影响范围较广、造成灾害损失大的 TC 盛行路径之一。西北行 TC 对广东、福建和浙江影响较大, 年均经济损失和死亡人数远高于其他省(自治区、直辖市)。3 类 TC 影响和登陆中国的数目无明显年际和年代际变化, 直接经济损失均呈上升趋势, 但死亡人数和损失在 GDP 中占比下降, 灾害空间分布均呈现东南沿海向内陆减小的特征。

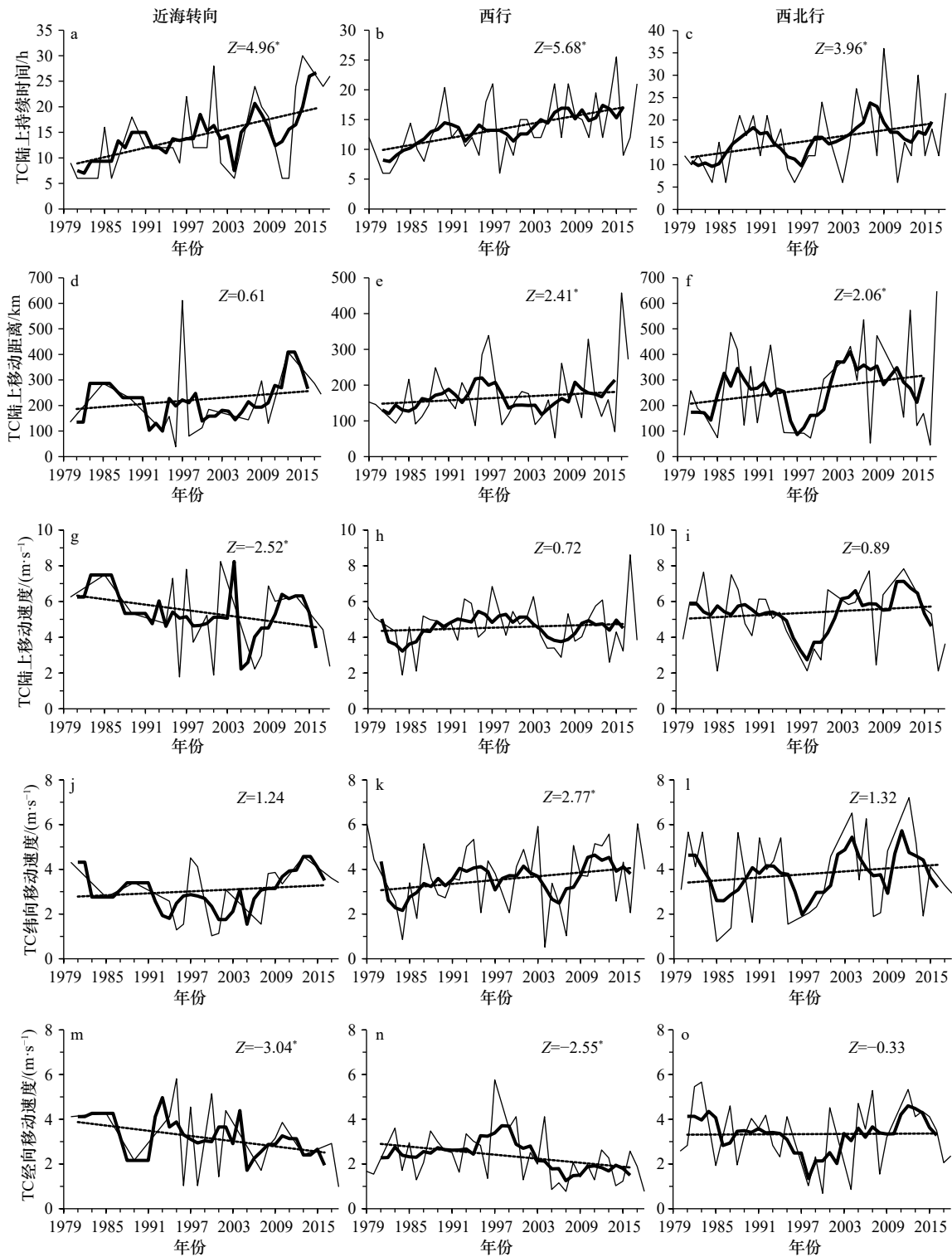


图 12 1979–2018 年 3 类移动路径下平均每个 TC 在中国陆上的持续时间(a–c)、移动距离(d–f)、移动速度(g–i)、纬向移动速度(j–l)和经向移动速度(m–o)

Fig. 12 Time series of annual mean overland duration (a–c), distance (d–f), translation speed (g–i), and the zonal (j–l) and meridional (m–o) TC translation speed in China for the three prevailing tracks during 1979–2018

粗线表示 5 年滑动平均, 虚线表示滑动平均序列的线性趋势, “Z” 为 M-K 检验统计量, * 表示趋势线通过 95% 显著性检验

Thick lines are the 5-years running average, the straight line indicates the linear trend, Z is the M-K trend test score, the Z-value with the symbol “*” indicates that the linear trend is significant at a 95% significance test

(3)大尺度引导气流的变化导致 TC 陆上持续时间增加。近海转向 TC 陆上持续时间增加与陆上移速显著减小有关,意味着 TC 对途经地区造成严重灾害的可能性增加。西行和西北行的 TC 陆上移动距离增加导致持续时间增加,意味着 TC 可能影响的地区更多、范围更大。研究表明^[18,20],该陆上持续时间增加和移速减缓与全球变暖密切相关。如果当前全球变暖趋势持续,将进一步增强影响中国的 TC 灾害风险^[36]。

相关研究表明,若全球变暖趋势持续,影响中国的 TC 数目将增加^[19],海平面上升亦将导致沿海各地出现更高的台风风暴潮^[4],若恰逢天文大潮期,可能会给沿海地区造成极其严重的灾害损失。此外,虽然台风路径预报水平在 20 世纪 90 年代以后显著提升^[27],

但对于台风突变路径预报,如北折突变路径预报仍存在较大的距离误差^[37]。由于资料的缺漏和时间序列过短,本文只对部分 TC 灾害及可能造成灾害的原因进行分析,TC 灾害对农业、生态、社会生活的影响,灾害成因分析和灾情预警预报等问题尚待进一步研究。虽然 TC 灾害造成的相对经济损失和死亡人数减少,但社会的发展使得更多的生命财产暴露在自然灾害中,灾害增加的风险依然存在,中国 TC 灾害防御工作仍面临巨大挑战。

致谢:衷心感谢两位匿名审稿人的宝贵意见和建议,进一步提高了论文质量。本论文的数值计算得到了南京信息工程大学高性能计算机中心的计算支持和帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 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 Guishan. Historical change and future trends of storm surge disaster in China's coastal area[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(3): 23-30.
- [2] 王星, 鲁胜力, 周乐群. 滑坡泥石流灾害及其防治策略探讨[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 138-145.
Wang Xing, Lu Shengli, Zhou Lequn. The preliminary research of slope-slide and mud-rock flow disaster and its control strategy[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 138-145.
- [3] 梁必琪, 梁经萍, 温之平. 中国台风灾害及其影响的研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(1): 84-91.
Liang Biqi, Liang Jingping, Wen Zhiping. Study of typhoon disasters and its affects in China[J]. Journal of Natural Disasters, 1995, 4(1): 84-91.
- [4] 温姗姗, 翟建青, Fischer T, 等. 1984—2014年影响中国热带气旋的经济损失标准化及其变化特征[J]. 热带气象学报, 2017, 33(4): 478-487.
Wen Shanshan, Zhai Jianqing, Fischer T, et al. Variation of normalized economic losses from influential tropical cyclones in China for 1984-2014[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(4): 478-487.
- [5] Wang Hong, Xu Min, Onyejuruwa A, et al. Tropical cyclone damages in Mainland China over 2005-2016: losses analysis and implications[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2019, 21(6): 3077-3092.
- [6] Zhang Qiang, Wu Liguang, Liu Qiufeng. Tropical cyclone damages in China 1983-2006[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(4): 489-496.
- [7] 丁燕, 史培军. 台风灾害的模糊风险评估模型[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 34-43.
Ding Yan, Shi Peijun. Fuzzy risk assessment model of typhoon hazard[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(1): 34-43.
- [8] 陈香. 福建省台风灾害风险评估与区划[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 961-966.
Chen Xiang. Risk assessment and zonation of typhoon disasters in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(6): 961-966.
- [9] 顾小丽, 陈有利, 钱燕珍, 等. 宁波市台风灾情评估和基于层次分析法的风险评估[J]. 热带气象学报, 2018, 34(4): 489-498.
Gu Xiaoli, Chen Youli, Qian Yanzhen, et al. Evaluation of typhoon disaster in Ningbo and risk assessment based on analytical hierarchy process[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(4): 489-498.
- [10] 陈佩燕, 杨玉华, 雷小途, 等. 我国台风灾害成因分析及灾情预估[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 64-73.
Chen Peiyan, Yang Yuhua, Lei Xiaotu, et al. Cause analysis and preliminary hazard estimate of typhoon disaster in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(1): 64-73.
- [11] 林江豪, 阳爱民. 基于BP神经网络和VSM的台风灾害经济损失评估[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 22-26.
Lin Jianghao, Yang Aimin. Economic loss assessment of typhoon based on BP neural network and VSM[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 22-26.
- [12] 冯涛, 黄荣辉, 陈光华, 等. 近年来关于西北太平洋热带气旋和台风活动的气候学研究进展[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 364-382.
Feng Tao, Huang Ronghui, Chen Guanghua, et al. Progress in recent climatological research on tropical cyclone activity over the Western North Pacific[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(2): 364-382.
- [13] 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 Xiaojie, Dong Changming, Li Gang. 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.
- [14] 黄荣辉, 王磊. 台风在我国登陆地点的年际变化及其与夏季东亚/太平洋型遥相关的关系[J]. 大气科学, 2010, 34(5): 853–864.
Huang Ronghui, Wang Lei. Interannual variation of the landfalling locations of typhoons in China and its association with the summer East Asia/Pacific pattern teleconnection[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(5): 853–864.
- [15] Wu Liguang, Wang Bin, Geng Shuqin. Growing typhoon influence on East Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(18): L18703.
- [16] 沈永平, 王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068–1076.
Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1068–1076.
- [17] 雷小途, 徐明, 任福民. 全球变暖对台风活动影响的研究进展[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 679–688.
Lei Xiaotu, Xu Ming, Ren Fumin. A review on the impacts of global warming on tropical cyclone activities[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 67(5): 679–688.
- [18] Yamaguchi M, Chan J C L, Moon I J, et al. Global warming changes tropical cyclone translation speed[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 47.
- [19] Mendelsohn R, Emanuel K, Chonabayashi S, et al. The impact of climate change on global tropical cyclone damage[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3): 205–209.
- [20] Webster P, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. *Science*, 2005, 309(5742): 1844–1846.
- [21] 张娇艳, 吴立广, 张强. 全球变暖背景下我国热带气旋灾害趋势分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(4): 442–454.
Zhang Jiaoyan, Wu Liguang, Zhang Qiang. Tropical cyclone damages in China under the background of global warming[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(4): 442–454.
- [22] 杨玉华, 应明, 陈葆德. 近58年来登陆中国热带气旋气候变化特征[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 689–696.
Yang Yuhua, Ying Ming, Chen Baode. The climatic changes of landfall tropical cyclones in China over the past 58 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 67(5): 689–696.
- [23] 余晖, 胡春梅, 蒋乐怡. 热带气旋强度资料的差异性分析[J]. 气象学报, 2006, 64(3): 357–363.
Yu Hui, Hu Chunmei, Jiang Leyi. Comparison of three tropical cyclone strength datasets[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(3): 357–363.
- [24] Pielke R A Jr, Gratz J, Landsea C W, et al. Normalized hurricane damage in the United States: 1900–2005[J]. *Natural Hazards Review*, 2008, 9(1): 29–42.
- [25] Gaffney S J. Probabilistic curve-aligned clustering and prediction with regression mixture models[D]. Irvine: University of California, 2004.
- [26] 王桂新, 陈冠春. 中国人口变动与经济增长[J]. 人口学刊, 2010(3): 3–9.
Wang Guixin, Chen Guanchun. China's population changes and economic growth[J]. Population Journal, 2010(3): 3–9.
- [27] 许映龙, 张玲, 高拴柱. 我国台风预报业务的现状及思考[J]. 气象, 2010, 36(7): 43–49.
Xu Yinglong, Zhang Ling, Gao Shuanzhu. The advances and discussions on china operational typhoon forecasting[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 43–49.
- [28] 雷小途. 中国台风科研业务百年发展历程概述[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 63(3): 362–383.
Lei Xiaotu. Overview of the development history of China's typhoon research and operational work in the past century[J]. *Science China (Terrae)*, 2020, 63(3): 362–383.
- [29] Wu Liguang, Wang Bin. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(8): 1686–1698.
- [30] 汉京超, 俞士静, 陈秀成. 沿海平原河网城市排水防涝典型问题及对策分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(4): 30–34.
Han Jingchao, Yu Shijing, Chen Xiucheng. Analysis of typical problems and countermeasures of drainage and waterlogging prevention in coastal plain river network city[J]. China Water and Wastewater, 2020, 36(4): 30–34.
- [31] 帅嘉冰, 徐伟, 史培军. 长三角地区台风灾害链特征分析[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3): 36–42.
Shuai Jiabing, Xu Wei, Shi Peijun. Characteristic analysis of typhoon disaster chains in the Yangtze River Delta region of China[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(3): 36–42.
- [32] Chen Xiaoyu, Wu Liguang, Zhang Jiaoyan. Increasing duration of tropical cyclones over China[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(2): L02708.
- [33] Kumar A, Yang Fanglin, Goddard L, et al. Differing trends in the tropical surface temperatures and precipitation over land and oceans[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(3): 653–664.
- [34] 袁金南, 黄燕燕, 刘春霞, 等. 陆地摩擦对登陆热带气旋路径和强度影响的模拟研究[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6): 531–537.
Yuan Jinnan, Huang Yanyan, Liu Chunxia, et al. A simulation study of the influence of land friction on landfall tropical cyclone track and intensity[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(6): 531–537.
- [35] Holland G J. Tropical cyclone motion: environmental interaction plus a beta effect[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(2): 328–342.
- [36] Knutson T R, Tuleya R E. Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: sensitivity to the choice of

climate model and convective parameterization[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(18): 3477–3495.

[37] 倪钟萍, 吴立广, 张玲. 2005–2010年台风突变路径的预报误差及其环流背景[J]. *气象*, 2013, 39(6): 719–727.

Ni Zhongping, Wu Liguang, Zhang Ling. Analysis on forecasting errors and associated circulations of sudden typhoon track changes during 2005–2010[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, 39(6): 719–727.

Spatial-temporal characteristic of tropical cyclone disasters in China during 1984–2017

Lu Ying¹, Zhao Haikun¹, Zhao Dan², Li Qingqing¹

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Pacific Typhoon Research Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Army 93117 of PLA, Nanjing 210018, China)

Abstract: Based on tropical cyclone (TC) disaster data and the best-track database from Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration (CMA-STI) during 1984 to 2017, this study analyzed the spatial-temporal characteristics of TC disaster in China and their differences for the three prevailing tracks, along with the discussion of the overland duration and its potential risk. Main results of this study were summarized as follows: (1) There was a significant upward trend with direct TC-associated economic losses, while the proportion of losses to Gross Domestic Product (GDP) and the deaths showed a downward trend. (2) TC-associated economic losses accompanied with the three prevailing TC tracks showed a substantial difference. The recurving TCs tended to be less and lower impact, while westward and west-northward TCs appeared to be more and higher impact in China. Particularly, more frequent TCs with westward movement affected the Guangdong, Guangxi and Hainan provinces. TCs tending to west-northward tracks mainly caused a serious TC-associated disaster in Guangdong, Fujian, and Zhejiang provinces. (3) The average overland duration, as a potential index for TC-associated disaster, showed an upward trend. Note that the reasons on the changes of TC overland duration for the three prevailing tracks appeared to be different. The increased average overland duration for recurving TCs were likely to relate to the decreased in TC average overland translation speed. In contrast, the increased average overland duration of westward and west-northward moving TCs were possibly due to the increased average distance that TCs traveled over land.

Key words: tropical cyclone; disasters; changes in prevailing tracks; overland duration; spatial-temporal distribution