

20 世纪 50 年代以来登陆中国热带气旋的变化特征分析

张春艳^{1,2,3,4}, 刘昭华¹, 王晓利^{3,4}, 侯西勇^{3,4}

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 重庆市万州区规划设计研究院, 重庆 404000; 3. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 4. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003)

摘要: 基于 1951—2017 年西北太平洋热带气旋路径资料, 利用趋势分析、R/S 分析以及周期分析等方法对近 67 年来登陆中国热带气旋的个数、频次、强度以及登陆位置等热带气旋活动特征进行深入分析, 结果表明: (1) 近 67 年登陆中国热带气旋的个数和频次均呈下降趋势, 下降幅度分别为 0.003 个/a 和 0.008 次/a, 但变化趋势均不显著, 未来一段时期热带气旋登陆个数、频次将呈缓慢增加趋势。(2) 6—10 月是热带气旋发生和登陆的高频期, 其中, 8 月份热带气旋的发生次数和登陆中国的次数均最多。(3) 历年最低中心气压、平均中心气压均呈增加趋势, 且最低中心气压通过了 M-K 显著性检验; 热带气旋登陆强度总体呈减弱趋势, 且未来一段时期将继续呈减弱趋势, 但高强度热带气旋呈显著增加趋势。(4) 广东、台湾、海南、福建和浙江是热带气旋的主要登陆地; 热带气旋的登陆位置呈向东、向北偏移趋势, 且未来时期该偏移趋势仍将持续。利用热带气旋路径数据分析 1951—2017 年登陆中国热带气旋的数量、强度等变化, 旨在深入认识影响中国的热带气旋活动的特征及规律, 为热带气旋的预报、预警及防灾减灾工作等提供科学参考。

关键词: 热带气旋; 登陆个数; 登陆频次; 登陆强度; 登陆位置

中图分类号: P444 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)02-0010-12

DOI: 10.11759/hyxx20190424003

热带气旋(tropical cyclone, TC)是海洋-大气相互作用的产物之一, 其发生频率高、影响范围广、危险性高, 对自然环境保护、社会经济可持续发展乃至人们的生命财产安全等均构成巨大威胁^[1-2]。根据国际自然灾害数据库 ET-DAT 统计, 热带气旋灾害造成全球每年约 2 万~3 万人死亡; 2006—2015 年期间, 全球热带气旋灾害带来的直接经济损失约为 550 亿美元/a, 超过洪水、地震等其他自然灾害所带来的损失量^[3]。西北太平洋是全球主要的热带气旋生成区, 在其海面上生成的热带气旋个数约占全球热带气旋生成总数的 1/3^[4-5]。据统计, 每年在西北太平洋及南海海域约生成热带气旋 27 个, 其中, 约有 16 个热带气旋对中国沿海产生显著影响, 且每年因热带气旋造成的直接经济损失达 90 亿美元, 约占全球热带气旋灾害损失总量的 15%^[6]。

中国位于亚欧大陆东部, 临西北太平洋, 是世界上受热带气旋影响最严重的国家之一。鉴于热带气旋事件层出不穷, 其变化特征、发生原因以及灾害评估和防御等问题越来越受到国内外学者的关注。

例如, Wu 等^[7-8]研究发现西北太平洋的台风强度指数(power dissipation index, PDI)呈上升趋势, 台风路径的明显西移、生成地变化以及热带海温(SST)上升等是台风强度发生变化的重要原因。Bender 等^[9]通过模型进行模拟和预测, 认为气候变暖可能引起强度更大的风暴, 但风暴数量在地区和全球均会减少。Liu 等^[10]研究了厄尔尼诺-南方涛动、印度-太平洋 SST 对南海热带气旋登陆活动的影响, 结果表明 5—

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-06-30

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19060205); 国家自然科学基金国际合作项目(31461143032); 中国科学院烟台海岸带研究所自主部署项目资助(YICY755011031)

[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA19060205; International Cooperation Project of National Natural Science Foundation of China, No. 31461143032; Autonomous Deployment Project funded by Yantai Coastal Zone Research Institute, Chinese Academy of Sciences, No. YICY755011031]

作者简介: 张春艳(1992-), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事自然灾害遥感监测研究, 电话: 17770711492, E-mail: cyz_Elaine@163.com; 侯西勇(1975-), 通信作者, 研究员, 博士生导师, 主要从事海岸带土地利用变化与海岸线变化遥感监测、脆弱性评价及综合管理等方面的研究, 电话: 0535-2109196, E-mail: xyhou@yic.ac.cn

10月是热带气旋登陆较多的时期;厄尔尼诺年热带气旋登陆较少,拉尼娜年登陆较多,且1997年之前有所增强,1997年以后减弱。朱晶晶等^[11]研究表明,2013年西北太平洋热带气旋及影响海南的热带气旋偏多,时间集中在6—10月,副热带高压、夏季风、越赤道气流、海表温度及北半球极涡等环流系统异常是引起热带气旋偏多的原因。曹楚等^[12]对登陆中国热带气旋的频数、强度以及登陆位置的年际变化趋势特征进行研究,结果表明登陆热带气旋的平均强度和极端强度均有减弱趋势,极端强度的减弱趋势尤为明显。任福民等^[13]研究表明,50多年来登陆中国的热带气旋登陆频数呈减少趋势,台湾东部沿海,福建至雷州半岛沿海以及海南东部沿海是热带气旋登陆最频繁的地区;李真真等^[14]利用气旋活动指(cyclone activity index, CAI)分析近20年影响中国台风活动的变化趋势及其原因,发现自1996年以来登陆中国的台风频数显著减少,台风活动的变化与其盛行路径和强度的变化有关。

已有研究显示西北太平洋热带气旋生成及登陆中国的频数、强度、路径等发生了不同程度的变化;厄尔尼诺-南方涛动、太平洋年代际涛动^[15]以及海温等均会对热带气旋的活动产生影响,要对其进行定量研究却仍有一定难度^[16]。研究所使用的数据、方法及得到的结论不尽相同,但Landsea^[17]的研究显示,在分析热带气旋强度变化的过程中,应当以最原始的资料为主,且余晖等^[18]研究表明根据日本数据集(JMA)所得的热带气旋强度预报有最小的均方根误差。鉴于此,针对中国沿海登陆热带气旋的发生频率高,涉及范围广、强度大及灾害影响严重等特点^[19],本文利用日本国立情报学研究所提供的热带气旋路径数据,从统计学角度分析1951—2017年登陆中国热带气旋的频数、强度、登陆位置等的变化特征,并预测其未来时期的发展趋势,以期深入认识影响中国的热带气旋活动的变化特征及规律,进而对热带气旋的预报、预警及防灾减灾工作等提供科学参考。

1 数据源与研究方法

1.1 数据源

热带气旋数据来源于日本数字台风网 (http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/search_date.html.en#id2),该网站提供了自1951年以来西北太平洋最佳热带气旋路径数据集,该数据集以日本气象厅(Japan Mete-

orological Agency, JMA)的观测和分析数据为基础,每一条热带气旋的路径属性参数包括:编号、命名(英文名)、生成日期(世界时)、消亡日期(世界时)、中心位置(经纬度)、中心最低气压(hPa)、中心最大风速(kn)、强风圈半径等,每6h有一组数据,时次分别为每日的00时、06时、12时和18时(世界时)。

热带气旋在移动过程风场在不断变化,其压强、风速呈连续变化的,对周边的影响程度也在不断变化。为更真实、详尽地描绘登陆热带气旋的移动及影响,本文依据每6h轨迹点中心位置等数据,以1h为统计时长,用线性内插的方法对临近中心位置加密,假设单位观测时次间隔内热带气旋呈直线路径移动,各参数呈线性变化。

1.2 研究方法

1.2.1 登陆的相关定义

本文对热带气旋登陆位置的确定方法^[13]进行了再分析和再处理,具体方法是:在加密路径数据的基础上,认为当某一路径与行政区划相交时,视为该热带气旋登陆,该相交位置即为热带气旋的登陆点,交点所属的行政区划被定义为登陆地。年均登陆点是一年中所有登陆热带气旋登陆位置(经纬度)的算术平均值,该登陆位置通过线性内插计算得出。

热带气旋强度的定义以其登陆点的中心最低气压为基础,认为登陆时中心最低气压越小,在热带气旋涉及范围内气压梯度越大,热带气旋的强度越大,破坏力越强。并在此基础上构建最低中心气压和平均中心气压两个参数。其中最低中心气压指一年中所有登陆热带气旋首个登陆点的中心最低气压的最小值,平均中心气压指一年中所有登陆热带气旋首次登陆点的中心最低气压的算术平均值。

对于首次登陆中国的热带气旋,如再次越过海面在中国另一地点登陆,则该过程称为该热带气旋的第二次登陆,该地点作为第二次登陆点^[20],依次类推。例如,2017年第10号热带气旋“海棠”于2017年7月30日18时登陆中国台湾地区,视为首次登陆,而后穿越台湾海峡,于2017年7月31日03时再次从福建登陆,此过程视为该热带气旋登陆两次。由于一个热带气旋可能分多次登陆,每次均可能会对沿海甚至内陆产生严重影响,因此,有必要明晰热带气旋的登陆频次。

1.2.2 R/S分析方法

英国水文学家Hurst于1951年提出了能够定量表

征时间序列的持续性或长程相关性的 Hurst 指数^[21]。其计算方法有很多,其中通过 R/S 分析方法计算 Hurst 指数属于一种非参数统计方法,不要求时间序列遵从特定分布,能很好地揭示数据的变化趋势,其结果具有较强的稳健性^[22]。其基本原理如下^[23]:

对于 $\{\xi(t)\}$, $t=1, 2, \dots, n$ 是彼此独立且具有有限方差的序列, H E Hurst 和 Feller 证明有以下结果:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = \left(\frac{\pi\tau}{2}\right)^H, \quad (1)$$

式中: 极差 $R(\tau) = \max_{0 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{0 \leq t \leq \tau} X(t, \tau)$, 标准差

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \xi_{\tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \xi_{\tau} \text{ 表示时间序列的均值,}$$

$X(t, \tau)$ 表示累积离差; $H=1/2$ 。

对于 $\{\xi(t)\}$, $t=1, 2, \dots, n$ 不是相互独立的分数布朗运动, 有:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (c\tau)^H, \quad (2)$$

式中 c 为常数。两边同时取对数 $\log(R(\tau)/S(\tau)) = H \log c + H \log \tau$, 式中 H 为 Hurst 指数, 以 $\log \tau$ 为解释变量, $\log(R(\tau)/S(\tau))$ 表示被解释变量绘制散点图, 通过 Least Squares 法则对变量进行线性拟合, 斜率即为 H 。

H 的区间范围为 $[0, 1]$ 。当 $0 < H < 0.5$, 说明未来的整体趋势与过去相反, 即过程具有反持续性; 当 $0.5 < H < 1$, 说明未来的整体趋势与过去相一致, 即过程具有持续性; 当 $H=0.5$, 说明未来具有随机性。

本文采用最小二乘法计算登陆热带气旋时间序列的线性趋势, 分别进行 5 a 滑动平均; 利用谱分析^[24-25]方法对登陆个数及频次进行周期计算; 采用 M-K^[26-27]趋势检验法对各序列变化趋势的显著性进行检验; 并进一步利用 R/S 分析方法预测登陆热带气旋的个数、频次、强度、位置等指标序列的在未来一段时期内的变化趋势。

2 结果与分析

2.1 登陆中国热带气旋个数/频次的变化特征

1951—2017 年, 西北太平洋共生成热带气旋 1 753 个, 平均每年 26.2 个, 最少的是 14 个, 发生在 2010 年, 最多的是 39 个, 发生在 1967 年。近 67 年西北太平洋上生成热带气旋的个数总体呈下降趋势, 下降幅度为 0.07 个/a, 但 M-K 显著性检验表明该下

降趋势不显著。

2.1.1 登陆中国热带气旋的年尺度变化

基于 1951—2017 年的热带气旋路径资料, 分析近 67 年来于西北太平洋登陆中国热带气旋个数及频次的年际和年代际变化特征。

如图 1 所示, 近 67 年共有 490 个热带气旋登陆中国, 平均每年约 7.4 个, 占西北太平洋地区热带气旋发生总数的 27.96%, 其中登陆中国大陆 272 个, 登陆岛屿 218 个, 有着明显的年际变化特征。1971 年登陆中国热带气旋个数最多, 有 12 个, 该年也是登陆岛屿热带气旋个数最多的一年(9 个), 登陆最少的是发生在 1969 年, 仅 3 个热带气旋登陆。1951—2017 年登陆中国的热带气旋个数总体呈下降趋势, 变化幅度为 0.003 个/a, M-K 显著性检验表明该下降趋势不显著。从滑动平均值来看, 1960 年至 1970s 中期, 登陆个数多高于多年平均值, 之后在多年平均值上下波动, 1988—1996 年登陆个数较多, 普遍高于平均值, 之后几年登陆个数多在多年平均值之下, 其中 2001 年以来登陆个数波动幅度较小。

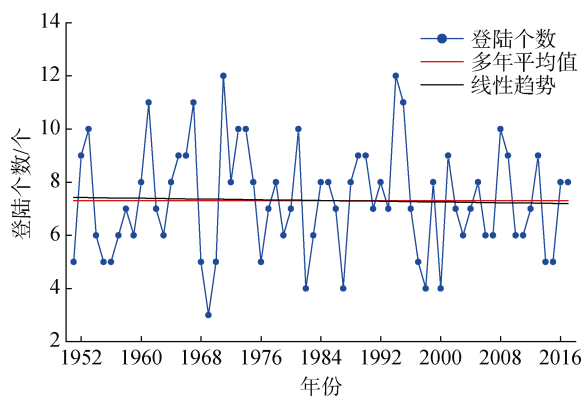


图 1 登陆中国热带气旋登陆个数的年际变化

Fig. 1 Time series of the number of landfalling tropical cyclones (TCs) in China

图 2 表明, 1951—2017 年登陆中国热带气旋的频次共计 663 次, 平均每年约 9.9 次。从年际变化来看, 登陆频次最多的发生在 1961 年, 有 19 次, 1971 年次之, 再次是 1994 年, 最少的有 4 次, 出现在 1969 年。近 67 年登陆热带气旋频次总体呈下降趋势, 其下降幅度大于登陆个数的下降趋势, 变化幅度为 0.008 次/a, 显著性检验表明该下降趋势不显著。从滑动平均值来看, 1962—1986 年热带气旋登陆频次呈下降趋势, 之后呈波动变化, 2000—2008 年登陆频次呈增加趋势, 2009—2012 年呈减少趋势; 2013—2017 年呈

增加趋势。

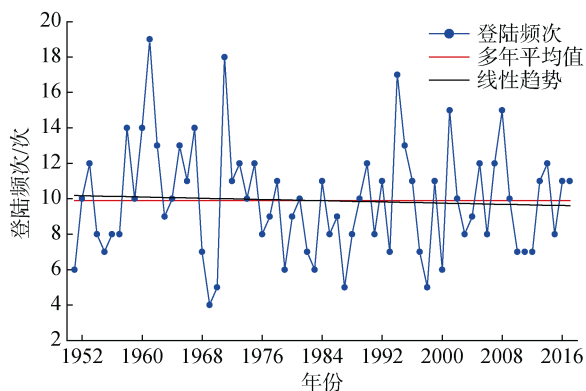


图2 登陆中国热带气旋登陆频次的年际变化

Fig. 2 Time series of the frequencies of landfalling TCs in China

对登陆我国的热带气旋个数、频次作谱估计计算,如图3所示,存在一个最高峰(第一大谱密度),其频率为0.29/a,对应周期为3.46 a,即在1951—2017年存在一个显著的3.46 a的主周期波动变化。除此以外,还有4.13 a左右的第二周期。由图4可知,存在一个最高峰,其频率为0.17/a,对应周期为5.82 a,即在1951—2017年有一个5.82 a的显著主周期波动变化。除此以外,还存在6.40 a左右的第二周期。

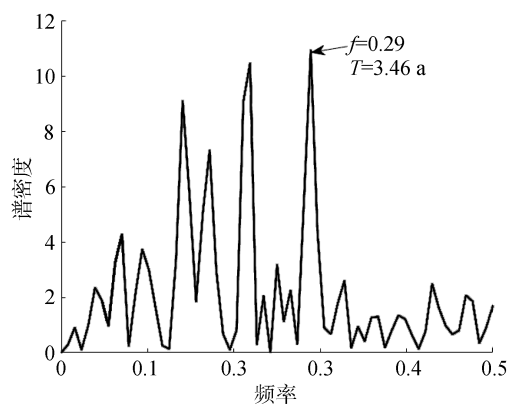


图3 登陆个数的谱估计

Fig. 3 Spectral estimation of the frequency

就年代际而言(图5),各年代登陆中国热带气旋个数约70个,其中,1970s有79个,是登陆热带气旋个数最多的年代,占历年登陆热带气旋的15.74%,2010—2017年热带气旋登陆个数最少,为54个,占比仅为10.76%。各年代登陆中国热带气旋频次约为94.8次,其中,1960s热带气旋登陆频次最多,为114次,占登陆热带气旋总频次的17.19%。

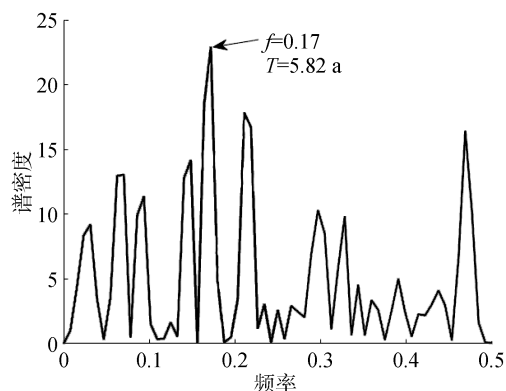


图4 登陆频次的谱估计

Fig. 4 Spectral estimation of the number

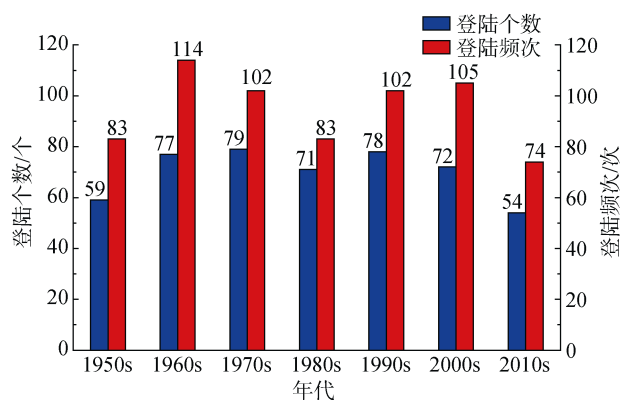


图5 登陆热带气旋年代际尺度统计

Fig. 5 The number and frequencies of landfalling TCs during various decades

对热带气旋登陆个数及频次的变化趋势进行持续性预测,经过计算,得到两者的 H 分别为0.495和0.497,说明未来热带气旋登陆个数和频次与历史变化趋势相反,即,未来登陆中国的热带气旋个数和频次将呈增加趋势,但增加幅度较平缓。这与王建^[28]、Holland^[29]、Emanuel^[30]、张颖^[31]、王一新^[32]、黄昌兴^[33]等的研究结果相一致,即随着全球气候变暖、气温升高,热带气旋的个数会增加,从而登陆及影响中国的热带气旋也会增多。

2.1.2 登陆中国热带气旋个数的月尺度变化

1951—2017年登陆中国热带气旋个数的月尺度变化特征如图6所示。登陆热带气旋最早发生在4月(200801号热带气旋NEOGURI),最晚是12月(分别是197430号IRMA和200427号NANMADOL);1—3月无热带气旋登陆,6—10月是热带气旋的登陆频发期,平均每年约6.9个热带气旋在该时段登陆,占全年登陆总个数的94.29%,其中7—9月尤为集中,8月最多。

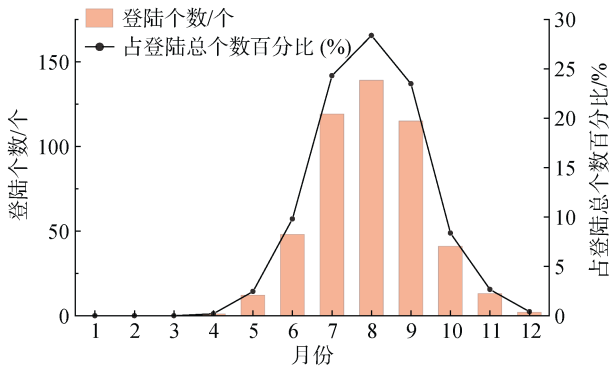


图6 登陆中国热带气旋个数的月尺度变化

Fig. 6 Monthly variation of the number of landfalling China typhoons

对热带气旋登陆高频时段内(6—10月)各月份历年热带气旋个数的变化趋势进行分析,如图7所示,结果表明:6月,登陆热带气旋个数变化趋势不明显,整体呈弱上升趋势,最多的出现在1980s,2000—2009年最少,1990s初到2000s末有较大的年际变化率。7月的登陆热带气旋个数整体呈增加趋势,最大值出现在2001年,在1980s登陆个数最多,1950s登

陆个数最少,1950s至1980s中期呈增加趋势,此后至1990s末呈下降趋势。8月的登陆热带气旋个数无明显变化趋势,总体呈上下波动,最大值分别出现在1994、1995、1997和2001年,且在1980s热带气旋登陆个数最多,1970s中期至1990s显著减少。9月的登陆热带气旋个数总体呈下降趋势,最多的出现在1950s,自1960s中期起呈波动下降趋势,此后呈上下波动状态。10月的登陆热带气旋个数总体呈弱上升趋势,最大值出现在1975年;1970s登陆个数最多,1950s最少,1950s至1970s中期呈增加趋势,之后呈波动变化。6—10月登陆中国热带气旋个数总体呈增加趋势。

从各季节而言,1951—2017年,春季(3—5月)有13个热带气旋登陆,共计登陆频次19次;夏季(6—8月)有306个热带气旋登陆,登陆频次422次;秋季(9—11月)登陆热带气旋169个,登陆频次220次;冬季(12月—次年2月)有2个热带气旋登陆,登陆频次为2次。可见,夏季是热带气旋登陆中国最频繁的季节,秋季次之,冬季最少。

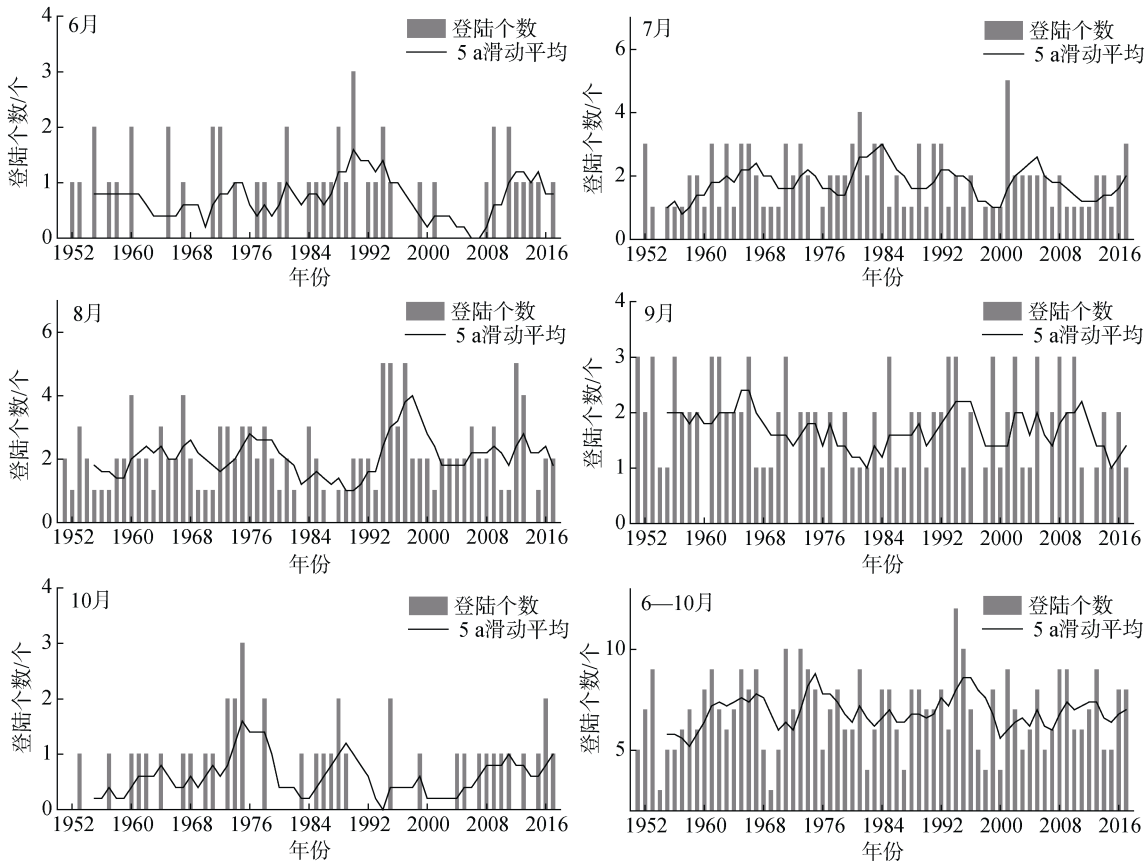


图7 6—10月热带气旋登陆个数的年际变化

Fig. 7 Time series of the number of landfalling TCs

2.2 登陆中国热带气旋的强度变化特征

2.2.1 登陆热带气旋的强度特征

基于对 1951—2017 年登陆中国热带气旋强度(中心最低气压)进行统计分析,以期通过计算极值、平均值指标获得登陆热带气旋强度的变化过程及趋势,如图 8、图 9 所示。

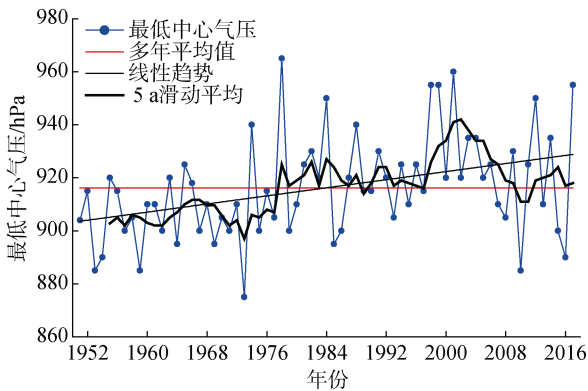


图 8 1951—2017 年登陆热带气旋最低中心气压年际变化
Fig. 8 Time series of the minimum central pressures of landfalling TCs from 1951 to 2017

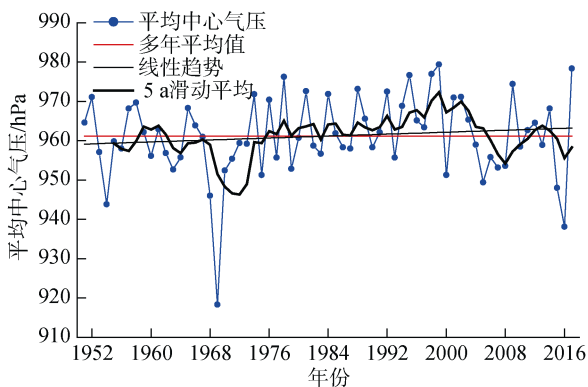


图 9 1951—2017 年登陆热带气旋平均中心气压年际变化
Fig. 9 Time series of the average central pressures of landfalling TCs from 1951 to 2017

1951—2017 年 490 个登陆中国热带气旋的最低中心气压平均值为 916.2 hPa, 总体呈增加趋势,且通过了 M-K 显著性检验,递增幅度为 0.38 hPa/a(图 8),其中最小值为 875 hPa,强度最大,发生在 1973 年;最大值为 965 hPa,出现在 1978 年。平均中心气压(平均登陆强度)平均值为 980.5 hPa,总体呈上升趋势,但增加幅度小于最低中心气压,为 0.07 hPa/a(图 9)。除 1969 年之外,各年份的平均中心气压变化较为均匀,最小值出现在 1969 年,为 918 hPa,最大值出现在 1999 年,为 980 hPa, M-K 显著性检验结果表明其

变化趋势不显著。

从最低中心气压和平均中心气压均可看出,热带气旋登陆强度长期呈现减弱趋势,尤其是最低中心气压数值变化趋势最为明显。通过计算登陆热带气旋的最低中心气压和平均中心气压的 Hurst 指数,结果分别为 0.527 和 0.529,表明热带气旋的最低中心气压和年平均中心气压在未来的变化趋势与过去的趋势相一致,即,未来登陆中国热带气旋强度将继续呈现减弱趋势,但减弱幅度相对平缓。

2.2.2 不同强度登陆热带气旋的变化特征

为了解不同强度热带气旋的变化特征,如表 1 所示,根据登陆强度定义统计不同强度等级的登陆个数,其中 136 个热带风暴(TS)占比最高,达到 27.76%,超强台风(Super TY)数量最少,为 13 个,占登陆个数的 2.65%,热带低压(TD)52 个,强热带风暴(STS)122 个,台风(TY)112 个,强台风(STY)55 个;仅 TS、STS、TY 三类强度占登陆台风的 75.51%。

表 1 1951—2017 年不同等级热带气旋登陆个数统计
Tab. 1 The number of landfalling TCs of different grades from 1951 to 2017

等级	登陆个数/个	占登陆台风总个数的百分比/%
TD	52	10.61
TS	136	27.76
STS	122	24.90
TY	112	22.86
STY	55	11.22
Super TY	13	2.65
总数	490	100

整体上,登陆的 TD 个数呈下降趋势,多年平均值为 0.8 个(图 10a),最大值为 3 个,分别发生在 1981、1986 和 1995 年。就年代际而言,1950s 和 1980s TD 登陆个数最多,为 11 个,最小值为 4 个,均发生在 21 世纪以后。5 a 滑动平均值在多年平均值上下波动且幅度较小,波动周期为 8~11 a,尤其 2007 年后,5 a 滑动平均偏离平均值较多。

登陆的 TS 个数总体呈减少趋势,多年平均值为 2.1 个(图 10b)。最大值为 6 个,分别出现在 1967、1994 和 2009 年。各年代中,TS 登陆个数最多的发生在 1960s,共有 27 个;相对于多年平均值,TS 的 5 a 滑动平均值波动较大,波动周期为 9~12 a。其中 1950s 中期—1960s 初、1980s 初—1990s 中期、1990s 末—21 世纪初,5 a 滑动平均值均低于多年平均值,1960s 中期到 1980s 初以及 1990s 中后期则相反。

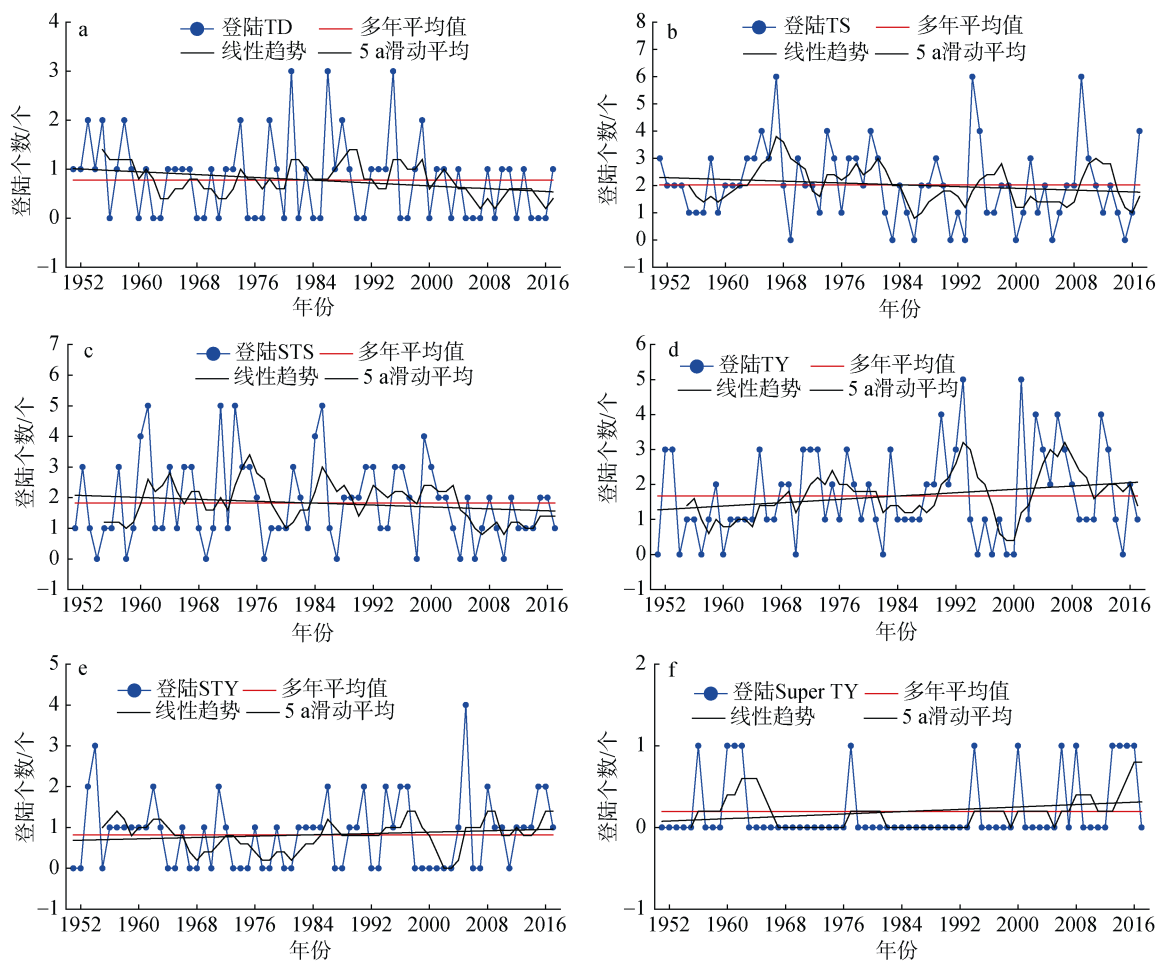


图 10 1951—2017 年不同等级登陆热带气旋个数的年际变化特征

Fig. 10 Time series of the number of landfalling TCs of different grades from 1951 to 2017

a: 登陆 TD; b: 登陆 TS; c: 登陆 STS; d: 登陆 TY; e: 登陆 STY; f: 登陆 Super TY

STS 总体变化呈弱下降趋势，多年平均值为 1.9 个(图 10c)。登陆 STS 最大值为 5 个，分别发生在 1961、1971、1973 和 1985 年。登陆 STS 偏少时期较为集中，主要有 1953—1956 年、1976—1980 年，尤其自 2001 年之后，STS 登陆年平均个数减少至 1.2 个。就年代际而言，登陆 STS 呈先增后减趋势，1960s—1990s 较多，分别为 22、22、21 和 22 个，1950s 及进入 21 世纪后，登陆个数较少，分别为 11、14 和 10 个。与 TS 相似，STS 的 5 a 滑动平均有相对较大的波动变化，周期为 5~14 a。

TY 登陆个数呈显著增加趋势，多年平均值为 1.7 个(图 10d)。其登陆最大值为 5 个，分别出现在生在 1993 年和 2001 年。就年代际而言，21 世纪初的十年最多，有 25 个，其次是 1970s，有 19 个，最少的出现在 1950s，该年代为 11 个。1992—2009 年的 5 a 滑动平均波动幅度较大，偏离多年平均值较多，2010 年

之后逐渐趋于线性拟合。

STY 总体呈上升趋势，多年平均值为 0.9 个(图 10e)。登陆个数最大值为 4 个，发生在 2005 年。各年代中，1990s 的 STY 登陆数最多，为 10 个，其次是 1950s，有 9 个，最少的出现在 1970s，为 5 个。

Super TY 登陆个数总体呈上升趋势，多年平均值为 0.2 个(图 10f)。最大值为 1 个。就年代际而言，2010 之后登陆超强台风最多，为 4 个，其次是 1960s 和 21 世纪初，各有 3 个，1980s 为 0 个。其中 1967—1976 年、1982—1993 年 2 个时间段的 5 a 滑动平均值低于多年平均值，其余时期的均高于多年平均值。

综上，在过去的 67 年中 TD、TS、STS 的登陆个数有所减少，TY、STY、Super TY 登陆个数有所增加，即高强度的热带气旋台风及以上强度热带气旋显著增加。其中登陆的 TS 个数的减少趋势最为明显，TY 个数的增加趋势最明显，但 M-K 显著性表明二者

的变化趋势均不显著。

2.3 登陆热带气旋的空间分布特征

2.3.1 热带气旋登陆地的分布特征

热带气旋历年登陆地的统计结果表明,热带气旋登陆地主要分布在广东、福建、浙江等沿海省区及台湾岛和海南岛。

由图 11、图 12 可以看出,1951—2017 年登陆广东的热带气旋有 176 个,占登陆中国热带气旋总数的 35.92%,其中登陆强度最多的是 TS 占比 40.54%,STS 次之,占比 27.03%;共计登陆频次为 216 次,占热带气旋登陆频次总数的 32.58%。其次是台湾岛,近 67 年共有 120 个热带气旋登陆台湾,占登陆中国热带气旋总数的 24.49%,强度最频繁的是 TY, 占比 33.33%, STY 次之,占比 25.83%,同时也是 Super TY 最多的地域;频次共计 125 次,占热带气旋登陆频次总数的 18.85%,以热带气旋以上热带气旋级别为主。

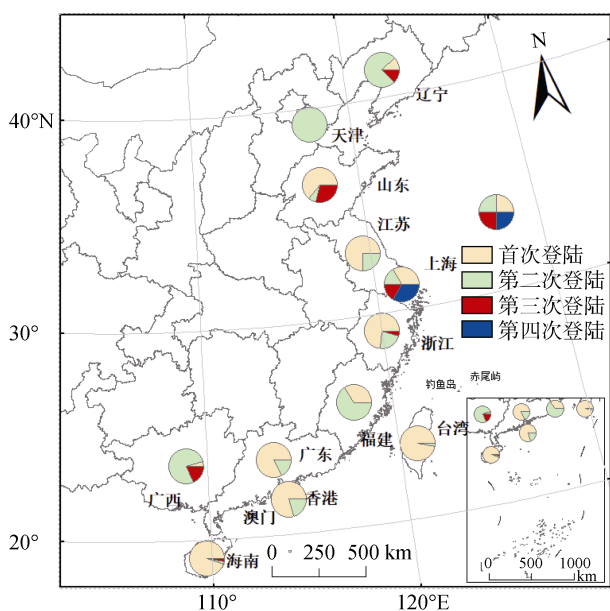


图 11 1951—2017 年热带气旋登陆地登陆频次空间分布图
Fig. 11 Spatial distribution of landfalling frequencies of TCs from 1951 to 2017

海南和福建登陆的热带气旋个数及频次分别居第三和第四,个数分别为 98 个(108 次)和 37 个(103 次),分别占登陆中国热带气旋总数的 20.00% (16.29%)和 7.55%(15.54%)。其余登陆地登陆情况分别为登陆浙江个数为 30 个,登陆频次为 41 次;登陆香港有 12 个,登陆频次为 15 次;登陆山东的有 9 个,登陆频次为 14 次;登陆江苏的有 3 个,登陆频次为 4 次;登陆上

海、广西的各有 2 个,登陆频次分别为 6 次和 22 次;登陆辽宁的有 1 个,共计登陆频次为 8 次。其中登陆频次最少的地区是天津,仅有 1 次热带气旋登陆,为 1972 年的 07 号(RITA)热带气旋,周期 19 d,该热带气旋由山东登陆,经渤海于 7 月 27 日早晨 8 时由天津塘沽登陆。

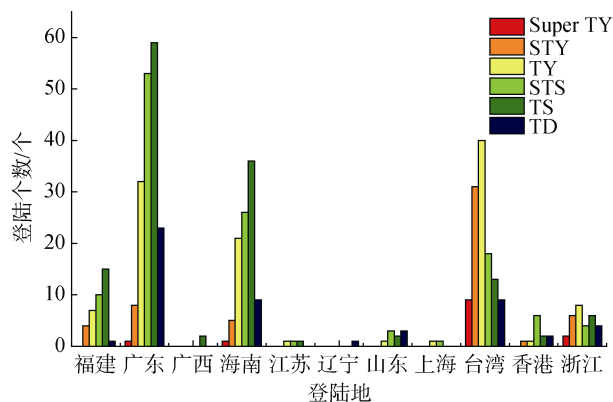


图 12 1951—2017 年沿海各地区不同强度登陆热带气旋的个数分布

Fig. 12 The number of landfalling TCs in the coastal areas from 1951 to 2017

2.3.2 热带气旋登陆位置变化特征

热带气旋生成时所属海域的热力环境以及海-气相互作用状况等均会导致热带气旋在中国登陆位置的变化^[34]。因此本文在对热带气旋登陆地研究的基础上,进一步对近 67 年热带气旋登陆点(经度、纬度)的际年变化进行统计,如图 13、图 14 所示。

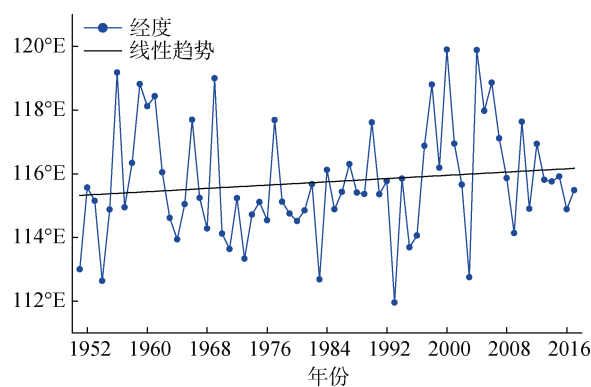


图 13 1951—2017 年热带气旋登陆点平均经度际年变化
Fig. 13 Time series of the mean longitude of the locations of landfalling TCs from 1951 to 2017

1951—2017 年热带气旋在中国的登陆位置有明显的际年变化,但纬向的变化没有经度方向变化显著。近 67 年来热带气旋登陆位置的年平均经度总体呈

增加趋势(图 13), 即热带气旋在中国的登陆点有明显向东偏移的趋势, 但该趋势未通过 M-K 显著性检验。登陆位置经度的最小值为 1993 年的 111.96°E, 最大值为 119.9°E, 发生在 2000 年, 其中 2000 年的平均经度与多年平均值相比向东偏移了约 4°。

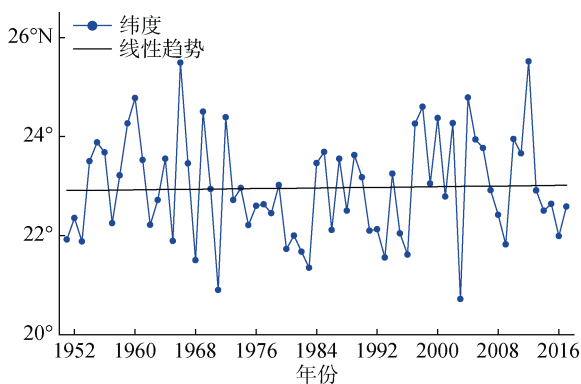


图 14 1951—2017 年热带气旋登陆点平均纬度年际变化
Fig. 14 Time series of the mean latitude of the locations of the landfalling TCs from 1951 to 2017

登陆位置的平均纬度总体呈增加趋势(图 14), 即热带气旋登陆中国的登陆点有向北移动的趋势, 但 M-K 显著性检验结果表明该趋势不显著。登陆位置纬度的最小值为 20.72°N, 出现在 2003 年, 最大值为 25.51°N, 发生在 2012 年, 其中 2012 年的平均纬度与多年平均值相比向北偏移了 2.5°。并且有研究表明^[35]热带气旋登陆点纬度具有 2~3 a 振荡周期, 主要是由于西北太平洋西部的热力状态存在明显的 2 a 振荡周期, 这种周期振荡与登陆中国的热带气旋生成源有关, 对热带气旋登陆位置有一定影响。

对热带气旋登陆点的平均经度和平均纬度序列进行变化趋势预测, 经过计算, 其 Hurst 指数分别为 0.599 和 0.567, 表明热带气旋登陆点的平均经度和平均纬度在未来的变化趋势与过去的趋势相一致, 即, 未来热带气旋在中国的登陆位置有继续向东、向北偏移的趋势。

3 结论

本文通过对 1951—2017 年西北太平洋登陆中国的热带气旋活动进行综合分析, 得出以下主要结论:

1) 1951—2017 年西北太平洋地区登陆中国的热带气旋个数为 490 个, 登陆频次共计 663 次; 1971 年和 1994 年热带气旋登陆个数最多, 均为 12 个, 1969 年最少, 为 3 个; 就年代际而言, 1970s 热带气旋登陆个数最多, 1960s 热带气旋登陆频次最多; 6—10 月是热

带气旋发生和登陆的高频期, 7—9 月尤为显著, 8 月最多, 占总登陆个数的 28.37%。近 67 年登陆中国的热带气旋个数、频次总体均呈下降趋势, 下降幅度分别为 0.003 个/a 和 0.008 次/a; 趋势预测结果表明登陆中国的热带气旋个数、频次未来均呈反持续性, 即将呈现缓慢增加趋势。

2) 从登陆热带气旋的强度来看, 最低中心气压和平均中心气压参数均表明近 67 年登陆强度总体呈减弱趋势, 但高强度(台风及以上级别)热带气旋数量有显著增加; 且未来一段时期登陆中国的热带气旋强度未来将呈持续性趋势, 即呈现缓慢减弱趋势。

3) 热带气旋在中国主要分布于广东、台湾、海南、福建、浙江等地, 且迂回重新登陆的可能性不大; 首次登陆地主要是广东、台湾及海南, 尤其从台湾、海南登陆后的热带气旋, 从广东、福建再次登陆的可能性较大。登陆位置有向东、向北偏移的趋势, 且未来一段时期热带气旋在中国的登陆位置有继续向东、向北偏移的趋势。

本文仅从统计学角度分析了登陆中国热带气旋的个数、频次、强度以及登陆位置的变化特征及趋势, 未涉及对热带气旋的形成机理及影响因素等内容, 在今后的研究中将结合环境因子及物理因素等, 对热带气旋登陆位置的空间分布及热带气旋登陆后当地受热带气旋影响程度的特征等内容进行分析讨论。

参考文献:

- [1] 尹宜舟, 肖风劲, 罗勇, 等. 我国热带气旋潜在影响力指数分析[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 367-375.
Yin Yizhou, Xiao Fengjin, Luo Yong, et al. Study on tropical cyclone potential impact index in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66 (3): 367-375.
- [2] Peduzzi P, Chatenoux B, Dao H, et al. Global trends in tropical cyclone risk[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(4): 289-294.
- [3] 陈文方, 端义宏, 陆逸, 等. 热带气旋灾害风险评估现状综述[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 146-152.
Chen Wenfang, Duan Yihong, Lu Yi, et al. Review on tropical cyclone risk assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32 (4): 146-152.
- [4] Yumoto M, Matsuura T. Interdecadal variability of tropical cyclone activity in the Western North Pacific[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2002, 79(1): 23-35.
- [5] Matsuura T, Yumoto M, Iizuka S. A mechanism of interdecadal variability of tropical cyclone activity over

- the western North Pacific[J]. *Climate Dynamics*, 2003, 21(2): 105-117.
- [6] 樊琦, 梁必骥. 热带气旋灾害经济损失的模糊数学评测[J]. *气象科学*, 2000, 21(3): 360-366.
Fan Qi, Liang Biji. A fuzzy mathematics evaluation of disastrous economic losses caused by tropical cyclones[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2000, 21(3): 360-366.
- [7] Wu Liguang, Wang Bin, Geng Shuqin. Growing typhoon influence on east Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(18): 109-127.
- [8] Wu Liguang, Wang Bin, Braun S A. Implications of tropical cyclone power dissipation index[J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 28(6): 727-731.
- [9] Bender M A, Knutson T R, Tuleya R E, et al. Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes[J]. *Science*, 2010, 327(5964): 454-458.
- [10] Liu K S, Chan J C L. Changing relationship between La Niña and tropical cyclone landfalling activity in South China (La Niña and TC landfalling activity in South China) [J]. *International Journal Climatology*, 2018, 38(3): 1270-1284.
- [11] 朱晶晶, 赵小平, 吴慧, 等. 2013 年影响海南热带气旋异常偏多成因分析[J]. *气象科学*, 2016, 36(2): 262-268.
Zhu Jingjing, Zhao Xiaoping, Wu Hui, et al. Abnormal abundant causes of tropical cyclone in Hainan Island in 2013[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2016, 36 (2): 262-268.
- [12] 曹楚, 彭加毅, 余锦华. 全球气候变暖背景下登陆我国台风特征的分析[J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(4): 455-461.
Cao Chu, Peng Jiayi, Yu Jinhua. An analysis on the characteristics of landfalling typhoons in China under global climate warming[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29(4): 455-461.
- [13] 任福民, 王小玲, 陈联寿, 等. 登陆中国大陆、海南和台湾的热带气旋及其相互关系[J]. *气象学报*, 2008, 66(2): 224-235.
Ren Fumin, Wang Xiaoling, Chen Lianshou, et al. Tropical cyclones landfalling in the mainland, Hainan and Taiwan of China and their interrelations[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(2): 224- 235.
- [14] 李真真, 吴立广, 刘青元. 近 20a 影响我国台风活动变化趋势[J]. *气象科学*, 2016, 36(6): 752-759.
Li Zhenzhen, Wu Liguang, Liu Qingyuan. Variation trend of typhoon activity influencing China during the past 20 years[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2016, 36 (6): 752-759.
- [15] 刘超, 徐永生. 1950~2010 年 PDO 对北太平洋地区海平面变化影响的量化与评估[J]. *海洋科学*, 2017, 41(4): 88-97.
Liu Chao, Xu Yongsheng. Quantification and evaluation of PDO influence on north Pacific SLR during 1950-2010[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(4): 88-97.
- [16] Mei Wei, Xie Shangping. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 753-757.
- [17] Landsea C W. Meteorology: Hurricanes and global warming[J]. *Nature*, 2005, 438(7071): E11-E13.
- [18] 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.
- [19] 王凌, 罗勇, 徐良炎, 等. 近 35 年登陆我国台风的年际变化特征及灾害特点[J]. *科技导报*, 2006, 24(11): 23-25.
Wang Ling, Luo Yong, Xu Liangyan, et al. Review of typhoon and its related natural disasters over the past 35 years in China[J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24 (11): 23-25.
- [20] 中国气象局. 台风业务和服务规定[M]. 北京: 气象出版社, 2012.
China Meteorological Administration. Typhoon Operation and Service Regulations[M]. Beijing: Meteorological Press, 2012.
- [21] Hurst H, Black R, Simaika Y. Long-Term Storage: An Experimental Study[M]. London: Constable, 1965.
- [22] 张鑫, 蔡焕杰, 尹晓楠. 应用重标度极差分析法(R/S)分析无定河流域水沙变化[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊 2): 212-217.
Zhang Xin, Cai Huanjie, Yin Xiaonan. Variation trends analysis of runoff and sediment time series based on R/S method in Wuding River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (Sup.2): 212-217.
- [23] 王孝礼, 胡宝清, 夏军. 水文时序趋势与变异点的 R/S 分析法[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2002, 35(2): 10-12.
Wang Xiaoli, Hu Baoqing, Xia Jun. R/S analysis method of trends and aberrance point on hydrological time series[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2002, 35(2): 10-12.
- [24] 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 56-98.
Hu Guangshu. Digital Signal Processing-Theory, Algorithm and Implementation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 56-98.
- [25] 叶英, 董波. 美国东部近岸海流观测资料的初步分析[J]. *海洋预报*, 2005, 22(1): 22-30.

- Ye Ying, Dong Bo. Preliminary analysis of the sea-current data observed at the sea near East Coast of the United States[J]. *Marine Forecasts*, 2005, 22(1): 22-30.
- [26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 63-66.
Wei Fengying. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology*[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 63-66.
- [27] 曹洁萍, 迟道才, 武力强, 等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. *农业科技与装备*, 2008(5): 35-36.
Cao Jieping, Chi Daocai, Wu Liqiang, et al. Mann-Kendall examination and application in the analysis of precipitation trend[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2008 (5): 35-36.
- [28] 王建, 刘泽纯. 全球变暖后西北太平洋台风频率的可能变化[J]. *第四纪研究*, 1991, 11(3): 277-281.
Wang Jian, Liu Zechun. The possible response of hurricane frequency in Northwest Pacific to global warming[J]. *Quaternary Studies*, 1991, 11(3): 277-281.
- [29] Holland G J. The maximum potential intensity of tropical cyclones[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54(21): 2519-2541.
- [30] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 686-688.
- [31] 张颖, 王会军. 全球变暖情景下西北太平洋地区台风活动背景场气候变化的预估[J]. *气象学报*, 2010, 68(4): 539-549.
Zhang Ying, Wang Huijun. A projection of future climate change over the Western North Pacific related to typhoon activity[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 68(4): 539-549.
- [32] 王一新, 苑希民, 杨敏. 1949 年以来登陆我国台风的主要特征分析[J]. *水利水电技术*, 2013, 44(6): 135-138.
Wang Yixin, Yuan Ximin, Yang Min. Analysis on main characteristics of typhoons landed in china since 1949[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, 44(6): 135-138.
- [33] 黄昌兴, 周国良, 郑磊, 等. 登陆我国台风的时空分布特征及其影响[J]. *水文*, 2014, 34(6): 81-85.
Huang Changxing, Zhou Guoliang, Zheng Lei, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of landing typhoons in China and their influence[J]. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(6): 81-85.
- [34] 黄荣辉, 陈光华. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及其机理研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 683-694.
Huang Ronghui, Chen Guanghua. Research on interannual variations of tracks of tropical cyclones over Northwest Pacific and their physical mechanism[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(5): 683-694.
- [35] 王磊, 陈光华, 黄荣辉. 近 30a 登陆我国的西北太平洋热带气旋活动的时空变化特征[J]. *南京气象学院学报*, 2009, 32(2): 182-188.
Wang Lei, Chen Guanghua, Huang Ronghui. Spatio-temporal distributive characteristics of tropical cyclone activities over the Northwest Pacific in 1979-2006[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2009, 32(2): 182-188.

Variations of landfalling tropical cyclones in China since the 1950s

ZHANG Chun-yan^{1, 2, 3, 4}, LIU Zhao-hua¹, WANG Xiao-li^{3, 4}, HOU Xi-yong^{3, 4}

(1. College of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Chongqing Wanzhou District Planning and Design Institute, Chongqing 404000, China; 3. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 4. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Received: Apr. 24, 2019

Key words: tropical cyclone; landfalling number; landfalling frequency; landfalling intensity; landfalling location

Abstract: Based on track data of tropical cyclones in the Northwest Pacific from 1951 to 2017, the characteristics of landfalling tropical cyclones (TCs) in China over the last 67 years, such as number, frequency, intensity, and landfalling location, were statistically analyzed using trend analysis, run-test analysis, and periodic analysis. The results showed that there were slight declines in the number and frequencies of landfalling TCs from 1951 to 2017, the dropping magnitude were 0.003 a^{-1} and 0.008 a^{-1} respectively, however, this decreasing trend was not significant in the test of M-K significance. In the future, the number of landfalling TCs is expected to slowly increase. The period in which landfalling TCs frequently occurred was from June to October, and this was especially observed in August. The lowest and mean central pressures showed an increasing trend in previous years, and the lowest central pressure passed the M-K significance test. The landfalling intensity of TCs generally showed a decreasing trend and they would continue to show a decreasing trend in the near future; however, high-intensity landfalling TCs showed a considerably increasing trend. The locations of landfalling TCs were mainly in Guangdong, Taiwan, Fujian, Hainan, and Zhejiang. The landfalling locations of TCs display a trend of eastward and northward shift, and this tendency will continue in the future. In this paper, the number and intensity of landfalling TCs in China from 1951 to 2017 were analyzed using direct track data of tropical cyclones. The purpose was to gain an in-depth understanding of the characteristics and frequencies of tropical cyclones affecting China and to provide scientific references for the prediction, early warning, disaster prevention, and mitigation of TCs.

(本文编辑: 刘珊珊)

勘 误 说 明

因工作疏忽, 在 2020 年第 44 卷第 1 期《海洋科学》目录处, 主编姓名有误, 应为: 杨红生。封底 Chief Editor 处姓名有误, 应为: YANG Hong-sheng。

特此说明, 并向李铁刚、杨红生先生致歉!