

登陆中国大陆、海南和台湾的热带气旋及其相互关系^{*}

任福民¹ 王小玲¹ 陈联寿² 王咏梅³

REN Fumin¹ WANG Xiaoling¹ CHEN Lianshou² WANG Yongmei³

1. 国家气候中心,北京,100081

2. 中国气象科学研究院,北京,100081

3. 山西省运城市气象局,运城,044000

1. *National Climate Center, Beijing 100081, China*

2. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, CMA, Beijing 100081, China*

3. *Yuncheng Meteorological Bureau, Yuncheng 044000, China*

2006-07-12 收稿,2007-07-03 改回.

Ren Fumin, Wang Xiaoling, Chen Lianshou, Wang Yongmei. 2008. Tropical cyclones landfalling in the mainland, Hainan and Taiwan of China and their interrelations. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(2):224–235

Abstract In consideration of the fact that the position data of landfalling tropical cyclone (TC) in China includes only place names, using the Northwest Pacific TC dataset and landfalling TC dataset during 1951–2004 from Shanghai Typhoon Institute of CMA, a computerization scheme for landfalling TC information is developed. The scheme consists of four aspects: approximation of coastal line, calculation of landfalling position, calculation of other parameters, and error correction. The assessment of the computerized data shows that the result of landfalling information computerization is satisfactory. Based on the above computerized data, climatic characteristics of landfalling TCs in China are investigated with a focus on three sorts of TCs landfalling in the mainland, Hainan and Taiwan and their interrelations. The results include the following six aspects. Firstly, regions most frequently affected by landfalling TCs were the eastern coast of Taiwan, the coastal region from Fujian Province to Leizhou Peninsula and the eastern coast of Hainan. Secondly, the eastern coast of Taiwan and parts of the coastal Zhejiang Province saw the strong landfalling TCs and their average intensity reached the typhoon level, with the strongest landfalling TCs up to the strong typhoon level in the southernmost of Taiwan. Thirdly, the TC landfalling season for China was from May to November, especially between July and September, with the highest frequency in August. Frequent intensity levels of landfalling TCs were mainly between tropical depression and typhoon, with the most frequent ones being strong tropical storm and typhoon. Fourthly, although frequencies of landfall TCs for the mainland, Hainan, Taiwan and the whole China all showed to different extents decreasing trends during the past 54 years, only the decreasing trend of landfalling TCs for Hainan is significant, while no obvious increasing or decreasing trend is found in frequencies of landfalling TCs with an intensity level of tropical storm or above. Fifthly, generally, the mainland had the highest frequency of landfalling TCs, the earliest date of the first-landfall, the latest date of the last-landfall, and thus the longest landfalling season, while Taiwan had the lowest frequency of landfalling TCs, the latest date of the first-landfall, the earliest date of the last-landfall, and thus the shortest landfalling season. Finally, viewing from an angle of the way of landfall, TCs landfalling in one region were the most frequent (79.2%), those in two regions the next (20.6%), and only one TC made landfall in three regions. Among the TCs landfalling in two regions, those with a track from Taiwan to the mainland had the highest frequency and weakened quickest in intensity, those with a track from Hainan to the mainland had the secondary highest frequency and weakened slowly, and those with a track from the mainland to Hainan had the third largest frequency and weakened quicker.

Key words Tropical cyclone, Information computerization, Three sorts of landfalling TCs, Climatic characteristics, Interrelations

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(40775046)、973 项目课题(2006CB403601)和中国气象局 2008 年台风专项。

作者简介:任福民,从事气候与气候变化相关业务工作及研究。E-mail: fmren@163.com

摘 要 首先,针对登陆中国热带气旋的登陆地点资料仅为地名的现状,利用 1951—2004 年西北太平洋热带气旋资料和登陆中国热带气旋资料,研究制定了登陆资料信息化方案。该方案包括海岸线近似、登陆位置计算、其他特征量计算和误差订正 4 个方面。对资料信息化结果的分析表明:信息化登陆资料效果是良好的。在此基础上,对登陆中国热带气旋的基本气候特征进行研究,重点分析了在大陆、海南和台湾登陆的 3 类热带气旋以及它们的相互关系。结果表明:登陆热带气旋频繁的地区为台湾东部沿海、福建至雷州半岛沿海和海南东部沿海;台湾东部沿海和浙江沿海部分地区是登陆热带气旋平均强度最大的地区,平均登陆强度达到台风级别,其中台湾南端的平均登陆强度为最强,达到强台风级别;5—11 月为热带气旋登陆中国季节,集中期为 7—9 月,8 月最多;登陆热带气旋的强度主要集中在热带低压—台风,尤其以强热带风暴和台风最多。对于全部大陆、海南和台湾三地,50 多年来登陆热带气旋频数都存在不同程度的减少趋势,但只有登陆海南热带气旋的减少趋势是显著的;而所有登陆风暴(含以上强度)频数均无明显增多或减少趋势。总体而言,登陆大陆的 TC 最多、初旋最早、终旋最晚、登陆期最长;登陆海南的 TC 居中;而登陆台湾的 TC 最少、初旋最晚、终旋最早、登陆期最短。从登陆方式看,登陆一地的 TC 最多、登陆两地的 TC 次之,分别占总数的 79.2% 和 20.6%,仅有 1 个 TC 登陆三地。在登陆两地的 TC 中,经台湾登陆大陆的 TC 频数最多、强度减弱最快,经海南登陆大陆的 TC 频数次之、强度减弱较慢,经大陆登陆海南的 TC 频数排行第 3、强度减弱较快。

关键词 热带气旋,资料信息化,登陆台风,气候特征,相互关系

中图法分类号 P40.35

1 引 言

热带气旋(Tropical Cyclone,简称 TC)登陆是其生命史中一个重要转折点,近年来,热带气旋登陆问题的研究倍受重视(陈联寿等,2004)。中国是世界上登陆 TC 最多的国家(陈联寿等,1979),海岸线漫长,从北起辽宁丹东,南到广西东兴约 1.8×10^4 km 的海岸线以及沿海岛屿都遭受过 TC 的侵袭。加强对登陆 TC 的研究具有重要的现实意义。

中国学者在登陆中国 TC 的气候特征研究方面取得了丰硕的成果。陈联寿等(1979)指出广东(含海南)是受 TC 影响最严重的省,尤其以珠江口以西和海南岛地区更甚,而台湾省受强台风影响最多。贺海晏等(2003)对 52 a 登陆 TC 的研究表明,广东省是中国登陆 TC 数最多的省份。王继志(1991)分析了中国沿海 30 个城镇 1884 年以来登陆 TC 的若干统计特征。董克勤等(1980)对 40 次经过海南岛 TC 的强度、移速和移向等特性的统计结果表明,强台风受地形的影响明显强于弱台风所受的影响。吴慧(2005)对登陆海南 TC 的时空分布等气候特征做了分析。陈敏等(1999)分析了 1949—1996 年登陆中国 TC 的季节变化和纬带分布特征;余晖(2002)对 1950—1999 年登陆后在中国境内消失 TC 的强度变化进行了统计分析;梁建茵(2003)研究了 1949—1999 年中国 TC 登陆时间的日变化特征,指出登陆频数的日变化分布特征在广东表现得最为明显。李英等(2004)对 1970—2001 年西太平洋 TC 登陆中国的频率、位置、维持、衰减、变性、加强及消亡等进行比较全面的统计分析。王

咏梅(2006)的研究表明,每年西北太平洋(含中国南海)有 33 个 TC 生成,超过半数(17 个)的 TC 影响中国,其中登陆中国 TC 数目达 9 个之多。任福民等(2007)分析了登陆中国初、终热带气旋的变化特征。

可以看出,上述研究存在两个方面的问题:(1)在登陆 TC 的地理分布特征方面,其形式主要表现为分省、按地段或纬带分布的统计特征,而没有沿海岸线的确切地理位置的分布结果;其原因可能主要在于中国现有的登陆地点资料仅为地名,而非信息化的经、纬度。(2)对于登陆中国大陆和登陆两个最大岛屿——台湾岛和海南岛的热带气旋各自的特征以及这 3 类登陆 TC 之间的关系等问题此前还很少有研究工作涉及。

基于上述考虑,本文首先对登陆中国热带气旋的登陆地点进行信息化研究和处理,形成信息化的登陆资料;在此基础上,对登陆中国 TC 的基本气候特征进行研究,重点讨论和分析 3 类登陆 TC 及其相互关系。

2 资料和方法

所用资料包括两套:(1)中国气象局整编的 1951—2004 年西北太平洋 TC 资料。资料为北京时 02、08、14、20 时 4 个时次的 TC 中心位置、中心最低气压和中心附近最大风速。(2)中国气象局整编的 1951—2004 年登陆中国 TC 资料。资料含 TC 多次登陆地的地名、登陆时刻、登陆时刻的 TC 中心附近最大风速(仅 1973—2004)和中心最低气压。

TC 等级划分主要参照最新国家标准(2006)。

另外,现有记录中包含少量低于热带低压的 TC,任福民等(2007)指出此类登陆 TC 同样可以对中国带来很大影响。因此,还增加一个新的级别——热带弱低压(中心附近最大风速 $<10.8 \text{ m/s}$)。因此,一共包括 7 个级别:热带弱低压(WTD)、热带低压(TD)、热带风暴(TS)、强热带风暴(STS)、台风(TY)、强台风(STY)和超强台风(SuperTY)。

另外,还利用小波变换对登陆 TC 频数做了分析,关于小波变换原理可参考魏凤英的文章(1999)。

3 登陆资料信息化

3.1 信息化方案

登陆资料信息化是指将登陆中国 TC 资料中的非数字化资料(如登陆地点为地名和缺漏 1973 年以

前的 TC 中心附近最大风速)转化为数字化资料(如经、纬度等)的过程。登陆资料信息化技术分为以下几个部分:

(1) 海岸线近似

海岸线近似是利用由网格格点所组成的折线来替代海岸线的过程。本研究选用的网格为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 经纬网格,从中选取距离实际海岸线最近的多个格点所组成的折线近似表示实际海岸线。图 1 为本文所采用的中国海岸线近似方案,图中散点即为组成近似海岸线的格点。

在信息化过程中对不同网格方案做了对比分析。结果发现,分辨率太粗会严重影响登陆地点信息化结果,而分辨率很高时,也会产生较大误差。本文所采用的网格方案为最佳者。

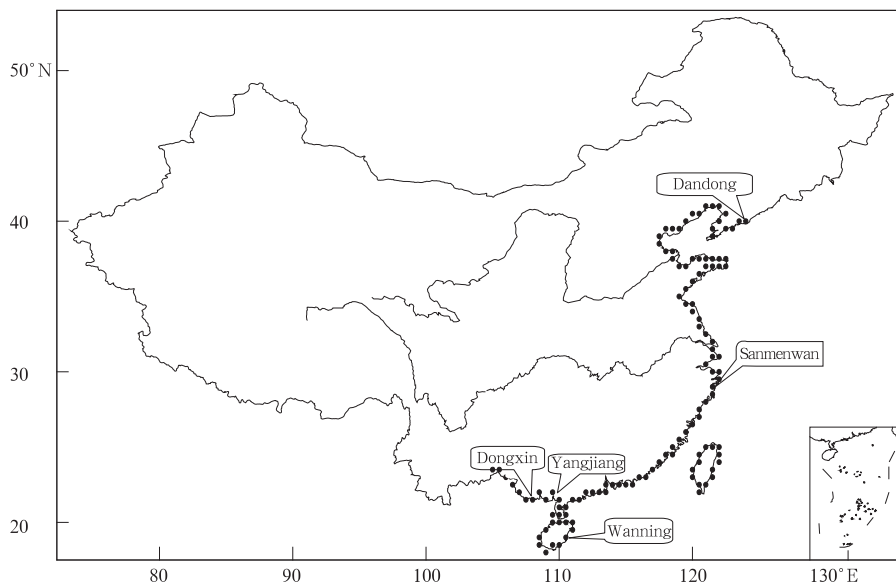


图 1 中国海岸线近似方案

Fig. 1 Approximation for the coastline of China

(2) 登陆位置计算

图 2 给出登陆地点示意图。图中线段 AB 为近似海岸线中的任一线段(图 1 海岸线近似中任意相邻的两格点),线段 PQ 为某一 TC 在任意相邻两时段间 TC 中心的路径。容易理解,在平面上由线段 AB 和 PQ 分别所在的两条不平行直线(延伸虚线)之间总存在一个交点 M。假设 x 和 y 分别代表经度和纬度, A、B、P 和 Q 4 点的位置分别为 (x_a, y_a) 、 (x_b, y_b) 、 (x_p, y_p) 和 (x_q, y_q) , 则 M 的位置 (x_m, y_m) 可按两步求出:

第 1 步,按两点式公式得出直线 AB 和直线 PQ

的方程

$$y = y_a + k_{ab}(x - x_a) \quad (1)$$

$$y = y_p + k_{pq}(x - x_p) \quad (2)$$

其中 $k_{ab} = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a}$, $k_{pq} = \frac{y_q - y_p}{x_q - x_p}$ 。

第 2 步,求两条直线(1)和(2)的交点 M 的位置 (x_m, y_m)

$$x_m = \frac{y_p - y_a + x_a k_{ab} - x_p k_{pq}}{k_{ab} - k_{pq}} \quad (3)$$

$$y_m = y_a + k_{ab} \frac{y_p - y_a + x_a k_{pq} - x_p k_{pq}}{k_{ab} - k_{pq}} \quad (4)$$

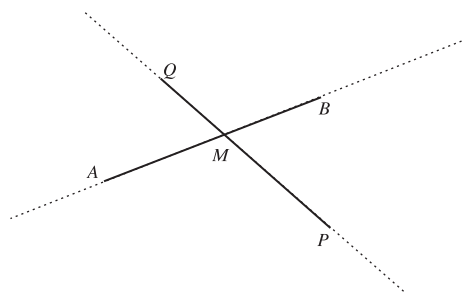


图2 登陆地点示意图

(线段 AB(实线)为海岸线;线段 PQ
(实线)为 TC 路径)

Fig. 2 Sketch map for the landfall point

(AB (solid line) is the coastline, while PQ
(solid line) is the track of a TC)

不难理解,当点 M 同时位于线段 AB 和 PQ 上, M 即为登陆地点。即要求 (x_m, y_m) 满足

$$\max(\min(y_a, y_b), \min(y_p, y_q)) \leq y_m \leq \min(\max(y_a, y_b), \max(y_p, y_q)) \quad (5)$$

和

$$\max(\min(x_a, x_b), \min(x_p, x_q)) \leq x_m \leq \min(\max(x_a, x_b), \max(x_p, x_q)) \quad (6)$$

其中,函数 $\max(s, t)$, $\min(s, t)$ 分别表示 s 和 t 两者中的大值和小值。

历史上,一次 TC 过程在大陆、台湾和海南 3 个区域均出现过多次登陆的情形。在信息化过程中,对于在同一区域出现 2 次或以上登陆的 TC,则其第 2 次(含)以后的登陆不再给予考虑,即对于一次 TC 过程,它在大陆、台湾和海南三地分别只允许最多出现一次登陆。

(3) 其他特征量计算

当计算得出登陆地点 M 的位置 (x_m, y_m) 后,首先,分别求出线段 PM 和 MQ ($PQ = PM + MQ$) 的距离;然后,进行登陆时刻、中心最低气压和中心附近最大风速三者的计算,根据 P 、 Q 两点所对应之数值,可按照线性插值方法(计算公式略)求出点 M 所对应之值。

(4) 误差订正

对于信息化初始结果中的所有特征量,在数值的选取上遵循了下述原则:完全接受登陆地点的经、纬度信息,接受原始登陆资料中缺漏的其他特征量(主要为 1973 年以前的 TC 中心附近最大风速)信息,保留信息化的登陆时刻(精确到小时)供效果评

估时使用。

信息化初始结果与原始登陆资料之间可能存在较大误差,因而有必要通过对比分析,了解误差状况并对明显的误差进行订正。误差订正分为两个阶段:登陆次数误差订正和登陆时间误差订正。

第 1 阶段,对登陆次数做对比分析,并进行登陆次数误差订正。

表 1 给出了信息化初始结果与原始登陆资料之间登陆次数误差的统计结果及订正处理情况。将登陆次数误差划分为 6 种情形。结果显示,TC 在同一区域多次登陆但信息化初始结果仅为一次登陆(I 类,表 1)的情形出现情况最多,为 39 次;按照“登陆位置计算”中的考虑, I 类结果被全部接受。对于 II 类,即对 TC 在某一区域是否登陆反映有误的情形(共有 18 次),则按真实情况进行订正,即对照原始登陆资料中的记录对信息化初始结果进行增加或删除相应的登陆记录。原资料集中有少数专门针对 TC 副中心的记录,信息化过程中产生了多余的副中心登陆信息(III 类),对此情形将 TC 副中心的登陆信息并入原 TC 使用。出现了 7 次将非登陆 TC 误判为登陆 TC(IV 类)的情形,对此则将所有记录从信息化初始结果中删除。发现原始登陆资料存在错误(V 类)的情形,对此在接受信息化初始结果的同时也对原始登陆资料中的相应记录进行修正,6 次记录具体分别为:1965 年序号 11 的 TC(漏该 TC)、1973 年序号 22 的 TC(漏登陆广西)、1982 年序号 10 的 TC(漏登陆福建)、1986 年序号 15 的 TC(漏登陆广西)、1992 年序号 4 的 TC(漏登陆广西)和 2004 年序号 20 的 TC(与同年序号 21 相互错用序号)。历史上出现了两次 TC 发现点在陆地(IV 类)的情形,两次 TC 分别为 1996 年序号 13 的 TC(在广西首先被发现并移出越南沿海)和 1996 年序号 21 的 TC(在海南首先被发现并移出海),由于它们又分别同属于 IV 类和 II 类,已按相应类别进行误差订正。

第 2 阶段,在完成登陆次数误差订正基础上,从登陆时间上做对比分析,并进行时间误差订正。

对登陆时间误差较大的记录统计结果表明,登陆时间误差等于或大于 5 h 的记录数为 27 次。对于这些时间误差较大的记录,采用人工订正的方法对其登陆位置、时刻、中心最低气压和中心附近最大风速进行订正,使其与原始登陆资料保持一致。

表 1 登陆次数误差分类统计结果及订正处理简表

Table 1 Landfall frequency error and correction

	类型 I	类型 II	类型 III	类型 IV	类型 V	类型 VI
	同一区域多次 登陆, 初始结果 仅一次登陆	TC 在某一区域是 否登陆, 信息有误	多余的副中心 登陆信息	非登陆 TC 被误 判为登陆 TC	原始登陆资料 存在错误	TC 源地在陆地
TC 次数	39	18	2	7	6	2
订正处理	接受	按真实情况做订正	并入原 TC 使用	删除	接受并修正原始资料	II 和 IV 各 1 次

3.2 信息化效果评估

经过技术处理后得到了信息化登陆资料。统计表明, 1951—2004 年共有 490 个 TC 593 次登陆中国。从登陆时间误差的统计分布(图略)可以看出, 与实况相比, 593 次登陆记录中登陆时间误差为 0 (即与原始资料一致)、1、2、3 和 4 h 的记录数分别为 184、259、97、48 和 5 次, 分别占总数的 31%、44%、16%、8%和 1%; 登陆时间的最大误差和平均误差分别为 4 h 和 1.04 h。以 TC 的平均移动速度 25 km/h 计, 可得出登陆地点的最大误差和平均误差分别约为 100 km 和 26 km。雷小途(2001)指出, 与美国 NOAA 整编的西北太平洋 TC 的定位资料相比, 中国气象局整编《台风年鉴》的“最佳位置”存在明显的“最佳定位误差”, 其最大值和平均值分别为 197.9 km 和 54.4 km(比一般意义上的业务定位误差 20—30 km 偏大)。由此看来, 信息化登陆地点的误差明显小于热带气旋中心的“最佳定位误差”, 这意味着该信息化登陆资料效果是令人满意的。

4 登陆中国 TC 基本气候特征分析

4.1 地理分布

为便于结果的直观, 将信息化登陆位置按海岸线近似格点进行统计。统计原则为就近统计, 即按登陆位置与同一区域(大陆、台湾或海南)所有海岸线近似格点中距离最近者进行统计。

从 1951—2004 年登陆 TC 频数的格点统计分布(图 3)可见, 受登陆 TC 影响严重的地区为台湾东部沿海、福建至雷州半岛沿海和海南东部沿海。除台湾岛东南沿海、厦门至汕头和澳门至阳江沿海外, 上述地区的登陆频数均在 10 次以上, 其中登陆 TC 最多地区为海南东部和广东阳江至雷州半岛一带, 最大登陆频数出现在海南万宁地区, 达 40 次之多。此结论与陈联寿等(1979)的结果吻合, 只是登陆 TC 最频繁地区的范围更加明确和缩小。浙江三门湾至福建最北部沿海登陆频数为 5—9 次; 其余沿

海地区登陆频数均不足 5 次; 其中, 广西东兴以西为中越边境线, “登陆”TC 其实为自越南入境的 TC; 而渤海沿岸、江苏东台至山东日照沿海以及海南西北部沿海未有直接登陆的台风。

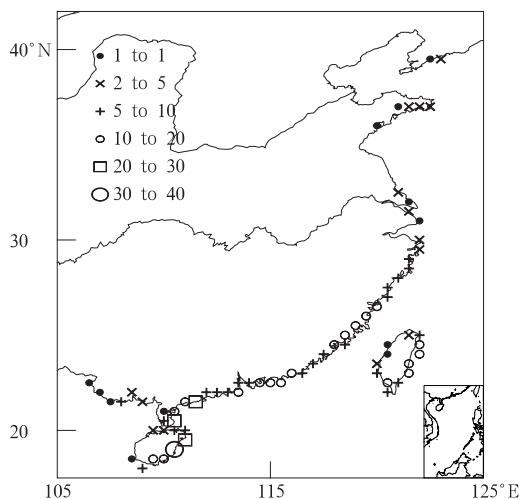


图 3 1951—2004 年登陆 TC 频数的格点分布

Fig. 3 Grid statistics for landfalling TC frequencies during 1951–2004

TC 等级划分主要参照最新国家标准(2006), 并增设一个新的级别——热带弱低压(中心附近最大风速 <10.8 m/s)。台湾东部沿海和浙江沿海部分地区是登陆 TC 平均强度最大的地区(图 4a), 平均登陆强度达到台风级别, 其中台湾南端的平均登陆强度为最强, 达到强台风级别。平均登陆强度较弱的地区集中在北海沿岸、台湾西部沿海和渤海沿岸, 一般为热带低压和热带风暴。历史上台湾东部沿海、海南万宁地区和浙江三门湾均出现过超强台风登陆(图 4b), 登陆时 TC 中心附近平均最大风速分别达到 78.1 m/s、60.0 m/s 和 54.8 m/s。不过, 2006 年超强台风“桑美”以 60.0 m/s 的最大风速刷新了登陆大陆 TC 的强度记录, 与登陆海南 TC 的强度记录持平。

从图 4c 看出, 历史上登陆台湾南端和杭州湾

TC 的强度至少分别为台风级别和强热带风暴;而台湾东北部沿海、海南沿海大部、广东和广西沿海大

部都出现过弱低压登陆。

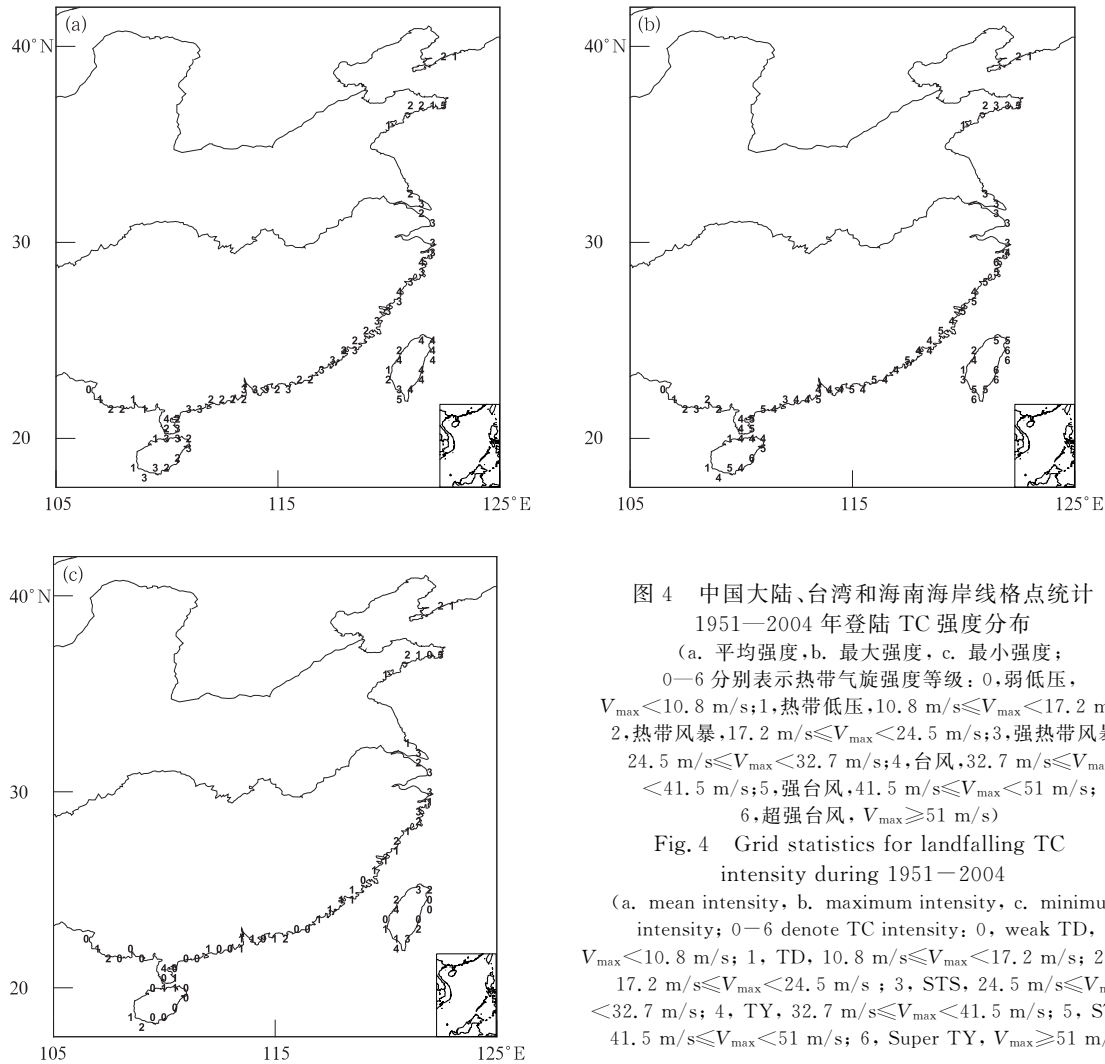


图 4 中国大陆、台湾和海南海岸线格点统计 1951—2004 年登陆 TC 强度分布

(a. 平均强度, b. 最大强度, c. 最小强度;
0—6 分别表示热带气旋强度等级: 0, 弱低压, $V_{\max} < 10.8 \text{ m/s}$; 1, 热带低压, $10.8 \text{ m/s} \leq V_{\max} < 17.2 \text{ m/s}$; 2, 热带风暴, $17.2 \text{ m/s} \leq V_{\max} < 24.5 \text{ m/s}$; 3, 强热带风暴, $24.5 \text{ m/s} \leq V_{\max} < 32.7 \text{ m/s}$; 4, 台风, $32.7 \text{ m/s} \leq V_{\max} < 41.5 \text{ m/s}$; 5, 强台风, $41.5 \text{ m/s} \leq V_{\max} < 51 \text{ m/s}$; 6, 超强台风, $V_{\max} \geq 51 \text{ m/s}$)

Fig. 4 Grid statistics for landfalling TC intensity during 1951–2004

(a. mean intensity, b. maximum intensity, c. minimum intensity; 0–6 denote TC intensity: 0, weak TD, $V_{\max} < 10.8 \text{ m/s}$; 1, TD, $10.8 \text{ m/s} \leq V_{\max} < 17.2 \text{ m/s}$; 2, TS, $17.2 \text{ m/s} \leq V_{\max} < 24.5 \text{ m/s}$; 3, STS, $24.5 \text{ m/s} \leq V_{\max} < 32.7 \text{ m/s}$; 4, TY, $32.7 \text{ m/s} \leq V_{\max} < 41.5 \text{ m/s}$; 5, STY, $41.5 \text{ m/s} \leq V_{\max} < 51 \text{ m/s}$; 6, Super TY, $V_{\max} \geq 51 \text{ m/s}$)

4.2 季节变化与强度分布

1951—2004 年登陆中国 TC 频数季节统计结果(表 2)表明,1951—2004 年共有 490 个 TC 登陆中国;5—11 月为 TC 登陆季节,4 月和 12 月分别只出现 1 个和 2 个登陆 TC,而 1—3 月无 TC 登陆;登陆集中期为 7—9 月,约 76.7% 的登陆 TC(376 个)发生在这一时段,其中尤以 8 月最多,占 28.8%。登陆风暴频数的季节分布总体上表现出与登陆 TC 相似的特点,不同之处是 4 月无登陆风暴,而且在登陆集中期 7—9 月登陆风暴无明显的月际差异。30 a (1971—2000 年)平均值的统计显示,平均每年登陆 TC 频数和风暴频数分别为 8.8 个和 7 个,平均登陆 TC 的季节分布与前述特征十分相似,而平

表 2 登陆中国 TC 频数季节统计表

Table 2 Monthly statistics for frequencies of TCs landfalling in China

	1951—2004 年累计		1971—2000 年平均	
	TC	TS 及以上	TC	TS 及以上
4 月	1	0	0.03	0.00
5 月	15	9	0.27	0.13
6 月	51	32	1.07	0.70
7 月	118	97	2.17	1.90
8 月	141	98	2.53	1.87
9 月	117	96	1.83	1.63
10 月	31	26	0.73	0.60
11 月	14	11	0.17	0.13
12 月	2	2	0.03	0.03
总计	490	371	8.80	7.00

均登陆风暴在登陆集中期的月际差异有所不同,7、8月十分接近。

从登陆 TC 的强度-频数分布来看(图略),登陆 TC 的强度主要集中在热带低压—台风,其中尤其以强热带风暴和台风最多,54 年里分别出现了 124 和 122 次,占年登陆 TC 的 25.3%和 24.9%;较少出现的热带弱低压和强台风分别有 34 次和 36 次,占 6.9%和 7.3%;最少出现的级别为超强台风,历史上曾出现过 15 次,仅占 3.1%。

4.3 年际与年代际变化

计算表明 1951—2004 年登陆 TC 和登陆风暴频数的相关系数为 0.81,通过了显著水平为 0.001 的相关性检验,表明两者在变化上存在很好的一致性。两者的历史演变如图 5a 所示。长期趋势分析表明,54 年间登陆 TC 表现出逐渐减少的趋势,每 10 年减少 0.4 个,但未通过 90%的显著性检验;而登陆风暴则无明显增加或减少趋势。从年频数的变化看,历史上出现过 5 年(1971、1982、1996、2003 和 2004 年)登陆 TC 与登陆风暴频数相同的情形,即所有登陆 TC 的强度均达到风暴或以上强度。登陆

TC 频数的变化幅度在 4—15 个,1952 和 1961 年为登陆 TC 最多的两年,分别有 15 和 14 个 TC 登陆中国,而 1982 和 1997 年为登陆 TC 最少的两年,分别只有 4 和 5 个 TC 登陆中国。登陆风暴的变化幅度在 3—12 个,1971 年为登陆风暴最多年份,有 12 个登陆风暴,而 1961、1974、1989 和 1994 年为登陆风暴次多年份,有 11 个登陆风暴;登陆风暴最少年份为 1951 年,只有 3 个登陆风暴,次少年份为 1955、1982、1997 和 1998 年,各有 4 个登陆风暴。

小波分析结果显示(图 5b,5c),登陆 TC 在 1975 年以前年代际变化信号微弱,而 1975 年以后则表现出明显的 12—18 a 的年代际变化,并呈现较强的阶段性:1975—1984 年为登陆 TC 偏少阶段,1985—1995 年为登陆 TC 偏多阶段,1996 年之后又进入登陆 TC 偏少阶段;在整个研究期间,3 年左右的年际变化信号一直较明显,特别是 20 世纪 50 年代初和 80 年代。对于登陆风暴,1975 年以前年代际变化信号较登陆 TC 明显,后期反映出与登陆 TC 相似的年代际变化特点;在整个研究期间,3 年左右的年际变化信号表现较为清楚,但总体来看较登陆 TC 弱。

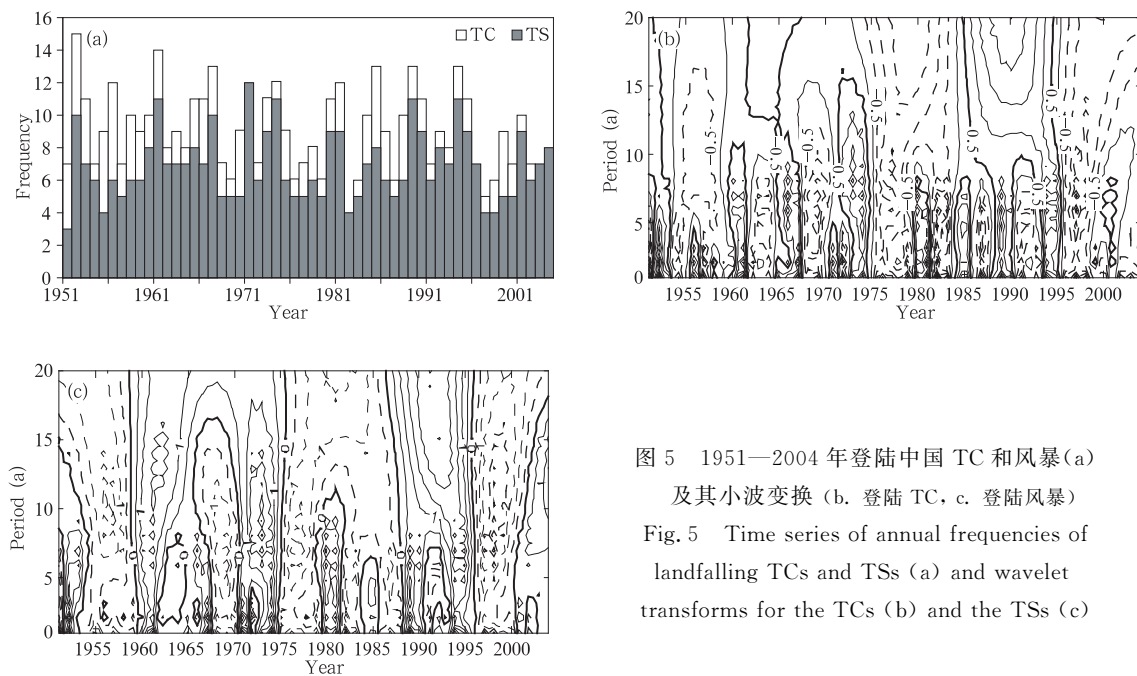


图 5 1951—2004 年登陆中国 TC 和风暴(a)及其小波变换 (b. 登陆 TC, c. 登陆风暴)

Fig. 5 Time series of annual frequencies of landfalling TCs and TSs (a) and wavelet transforms for the TCs (b) and the TSs (c)

5 3 类登陆 TC 及其相互关系

5.1 频数

按地理区域的不同进行划分,登陆中国的 TC

可分为登陆大陆、海南和台湾 3 类。对 1951—2004 年期间登陆 TC 频数的统计结果(表 3)表明,大陆的登陆 TC 频数遥遥领先(360 次),海南次之(126 次),台湾的登陆 TC 最少(107 次),分别占总数的

60.7%,21.3%和18.0%。图6为3类登陆TC和登陆风暴频数演变。长期趋势分析表明,54年中,只有登陆海南TC表现出明显的减少趋势,达到95%的显著性水平;登陆大陆和台湾的TC虽具有减少趋势,但并不显著;而3类登陆风暴均无明显增多或减少趋势。图中还反映出3地的登陆风暴所占比例存在较大差异,登陆大陆、海南和台湾的风暴比例分别为77.3%、61.1%和86.8%,说明从强度来看,台湾的登陆TC强度普遍偏强。

任福民等(2007)指出低等级登陆TC同样可以给中国带来很大影响,因此,后面的分析将主要针对

登陆TC来进行。

表3 1951—2004年不同方式登陆中国TC频数统计表
Table 3 Frequency statistics for landfalling TCs with different tracks 1951—2004

路径	登陆	首先登陆	登陆		
			一地	两地	三地
大陆→海南	360(6.6)*	262	258	4	1
大陆→台湾				0	
海南→大陆	126(2.3)*	121	97	24	1
海南→台湾				0	
台湾→大陆	107(1.6)*	107	33	73	1
台湾→海南				0	
总计	490(8.8)*		388	101	1

* 括号内数值为1971—2000年平均值。

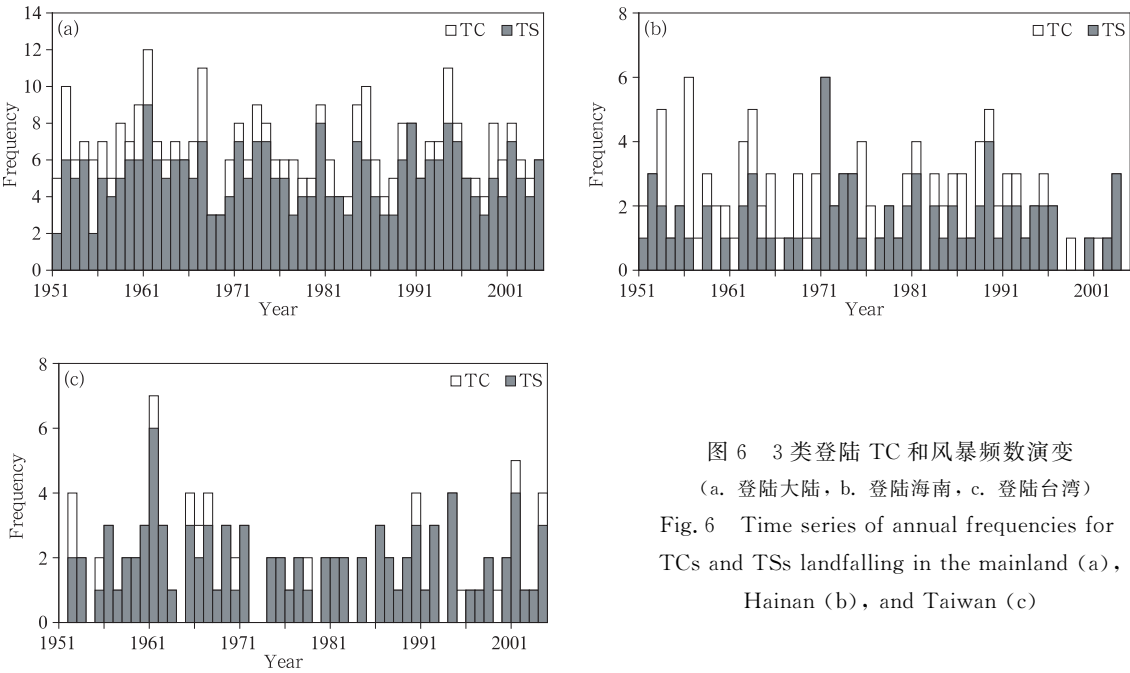


图6 3类登陆TC和风暴频数演变
(a. 登陆大陆, b. 登陆海南, c. 登陆台湾)
Fig. 6 Time series of annual frequencies for TCs and TSs landfalling in the mainland (a), Hainan (b), and Taiwan (c)

图6还显示,从年际变化来看,每年都会有TC登陆大陆,年登陆频数为3—12,1967和1968年最少,均只出现3次登陆TC,而1961年多达12次;在海南,最多时一年可有6次TC登陆,如1956和1971年,但有4年出现过无登陆TC(或称空旋)的情形,即1982、1997、1999和2004年;在台湾,最多的1961年有7次登陆TC,而54年中竟有9年出现空旋,这些年份是1951、1964、1972、1973、1979、1983、1985和1993年。

5.2 初、终热带气旋

对初、终热带气旋^①的分析结果显示,1971—

2000年平均登陆大陆的初、终旋时间分别为7月9日和9月30日,平均登陆海南的初、终旋时间分别为7月17日和9月25日,平均登陆台湾的初、终旋时间分别为7月20日和8月19日;可见,大陆的平均初旋最早、平均终旋最晚、平均登陆期最长,而台湾的平均初旋最晚、平均终旋最早、平均登陆期最短。登陆大陆的最早初旋为1999年5月2日登陆广东惠东的9902号台风“Leo”,登陆时强度为热带低压(中心附近最大平均风速 $V_{max}=15.0\text{ m/s}$);最晚终旋为1974年12月2日登陆广东台山的7427号强台风“Irma”,登陆时强度为热带风暴($V_{max}=$

① 初、终热带气旋:本文中初、终热带气旋是指每年初次或末次登陆中国的热带气旋,简称初、终旋或初、终台。
空旋:无热带气旋登陆,简称空旋。

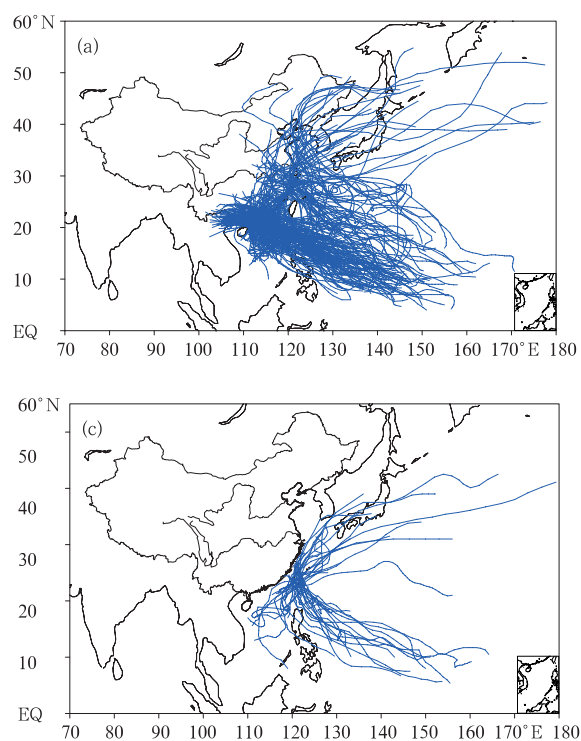
22.0 m/s)。登陆海南的最早初旋为 1991 年 4 月 28 日登陆海南万宁的 9103 号热带风暴“Vanessa”, 登陆时强度为热带低压($V_{\max}=15.0$ m/s); 最晚终旋为 1981 年 11 月 22 日登陆海南陵水的 8120 号强台风“Hazen”, 登陆时强度为热带风暴($V_{\max}=22.0$ m/s)。登陆台湾的最早初旋为 1990 年 5 月 19 日登陆台湾台南的 9003 号台风“Marian”, 登陆时强度为热带低压($V_{\max}=15.0$ m/s); 最晚终旋为 2004 年 12 月 4 日登陆台湾屏东的 0428 号强台风“Nanmadol”, 登陆时强度为强热带风暴($V_{\max}=28.0$ m/s)。

表 4 3 类登陆 TC 初、终旋统计表

Table 4 Statistics of the first- and last-landfall date for the mainland, Hainan, and Taiwan

	初旋		终旋	
	最早	平均*	最早	平均*
大陆	5 月 2 日	7 月 9 日	9 月 30 日	12 月 2 日
海南	4 月 28 日	7 月 17 日	9 月 25 日	11 月 22 日
台湾	5 月 19 日	7 月 20 日	8 月 19 日	12 月 4 日

* 平均值时段为 1971—2000 年。



5.3 路 径

在 3 类登陆 TC 中, 某些 TC 可能登陆两地甚至三地。1951—2004 年不同方式登陆中国 TC 频数的统计结果表明, 490 个登陆 TC 中, 登陆一地 and 两地的 TC 为 388 和 101 个, 分别占总数的 79.2% 和 20.6%, 仅有 1 个 TC 登陆三地。在登陆一地的 TC 中, 登陆大陆、海南和台湾的 TC 依次为 258、97 和 33 个, 比例分别为 66.5%、25.0% 和 8.5%, 路径分布见图 7。在登陆两地的 TC 中, 从台湾到大陆的登陆 TC 频数最多(73 个), 从海南到大陆次之(24 个), 从大陆到海南排行第 3(4 个), 比例分别为 72.2%、23.8% 和 4.0%, 路径分布见图 8a—8c; 而未出现过从大陆到台湾、从海南到台湾和从台湾到海南的登陆 TC。登陆三地的 TC 见图 8d, 此为具有两度绕圈奇异路径的 8616 号强台风“Tip”, 1986 年 8 月 22 日首先登陆台湾, 再于 9 月 5 日依次登陆海南和广东, “Tip”在三地登陆时强度均为台风($V_{\max}=38.0$ m/s)。

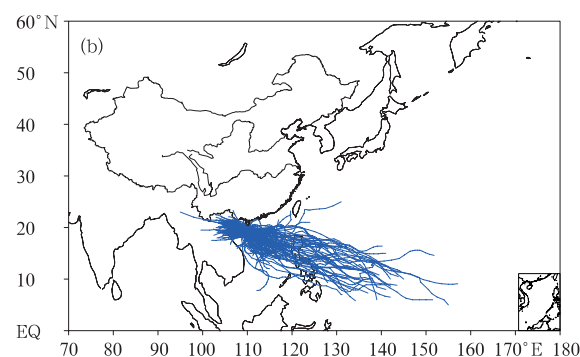


图 7 登陆一地的 TC 路径

(a. 登陆大陆, b. 登陆海南, c. 登陆台湾)

Fig. 7 Tracks of TCs landfalling only in one region

(a. the mainland, b. Hainan, c. Taiwan)

综合上面的分析可知, 1951—2004 年, 登陆台湾的 107 个 TC 全部为首先登陆该地的, 其中有 73 个(占 68.2%)穿越台湾海峡登陆大陆, 并主要沿 3 条路径进一步影响中国(图 8a): (1) 沿华东地区北上, (2) 沿西北向进入华中地区, (3) 沿华南沿海

西行; 有 33 个(占 30.8%)沿东北向移入东海(图 7c); 另有 1 个沿奇异路径登陆海南和广东(图 8d)。登陆海南的 126 个 TC 中有 5 个(占 4.0%)为经大陆和台湾二次登陆的, 而绝大多数(121 个, 占 96.0%)为首先登陆该地的, 其中有 97 个(占 80.2%)西行

移入北部湾(图 7b); 其余 24 个(占 19.8%)向北登陆两广(图 8b), 此类 TC 多在两广境内消失, 仅出现两例沿东北向进入东南沿海地区, 甚至再沿长江口移入东海。登陆大陆的 360 个 TC 中有 98 个(占

27.2%)为经台湾和海南二次登陆的, 而大多数有(262 个, 占 72.8%)为首先登陆该地的, 其中仅有 4 个(占 1.5%)沿奇异路径登陆海南(图 8c), 其余 258 个(占 98.5%)以多种路径进入中国大陆(图 7a)。

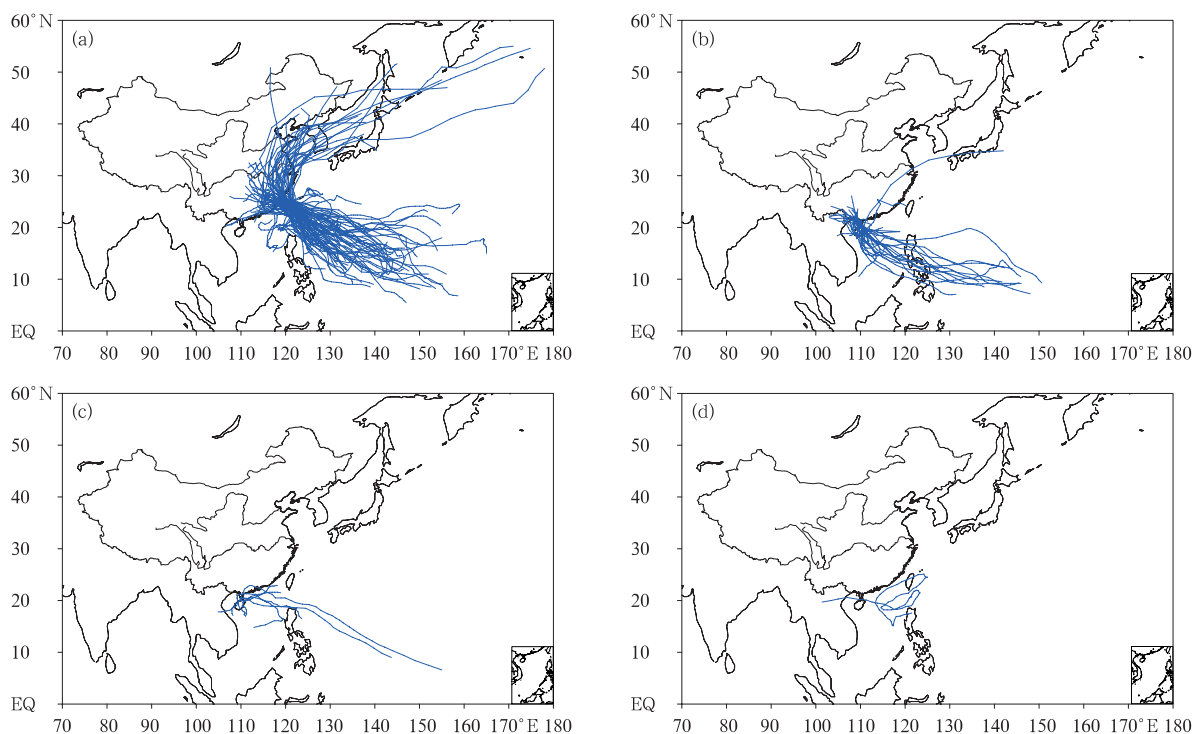


图 8 至少登陆两地的 TC 路径

(a. 台湾→大陆, b. 海南→大陆, c. 大陆→海南, d. 登陆三地)

Fig.8 Tracks of TCs landfalling in at least two regions

(a. Taiwan to the mainland, b. Hainan to the mainland, c. the mainland to Hainan, d. three regions)

5.4 登陆两地 TC 的强度变化

为考查两地登陆 TC 的强度变化, 计算了两次登陆时刻之间的最大风速之差(图 9)。对于 73 次先登陆台湾再登陆大陆的 TC, 平均强度变化为 -14.7 m/s , 即第 2 次登陆时刻最大风速较第 1 次登陆时刻最大风速平均减小了 14.7 m/s ; 其中仅有 3 次出现了强度增强, 3 次为强度不变, 而其余 67 次(约占总数的 91.8%)则表现为强度减小; 强度减弱最大值竟达到 -46.9 m/s , 为 1959 年的 5904 号超强台风“Joan”, 8 月 29 日登陆台湾台东时强度为超强台风($V_{\max}=78.1 \text{ m/s}$), 8 月 30 日登陆福建惠安时迅速减弱为强热带风暴($V_{\max}=31.2 \text{ m/s}$); 强度增强最大值为 3 m/s , 为 2004 年的 0421 号热带风暴“Haima”, 9 月 11 日登陆台湾高雄时强度为热带低压($V_{\max}=15 \text{ m/s}$), 9 月 13 日登陆浙江温州时强

度增强为热带风暴($V_{\max}=18 \text{ m/s}$)。

对于 24 次先登陆海南再登陆大陆的 TC, 平均强度变化为 -5.3 m/s , 即第 2 次登陆时刻最大风速较第 1 次登陆时刻最大风速平均减小了 5.3 m/s ; 其中仅有两次出现了强度增强, 6 次为强度不变, 而其余 16 次(约占总数的 66.7%)则表现为强度减小; 强度减弱最大值达到 -28.6 m/s , 为 1970 年的 7013 号超强台风“Joan”, 10 月 17 日凌晨登陆海南琼海时强度为强台风($V_{\max}=50 \text{ m/s}$), 当日下午登陆广东徐闻时迅速减弱为热带风暴($V_{\max}=21.4 \text{ m/s}$); 强度增强最大值为 5 m/s , 为 2001 年的 0114 号热带风暴“Fitow”, 8 月 29 日登陆海南文昌时强度为热带低压($V_{\max}=15 \text{ m/s}$), 以奇异路径于 8 月 31 日登陆广西北海时强度增强为热带风暴($V_{\max}=20 \text{ m/s}$)。

对于 4 次先登陆大陆再登陆海南的 TC, 平均强度变化为 -12.5 m/s , 即第 2 次登陆时刻最大风速较第 1 次登陆时刻最大风速平均减小了 12.5 m/s ; 其中有 1 次为强度不变, 而其余 3 次 (约占总数的 75%) 则

表现为强度减弱; 强度减弱最大值达到 -30 m/s , 为 1962 年的 6213 号强台风“Wanda”, 9 月 1 日登陆香港时强度为台风 ($V_{\max} = 39 \text{ m/s}$), 9 月 4 日下午登陆海南临高时减弱为热带弱低压 ($V_{\max} = 9 \text{ m/s}$)。

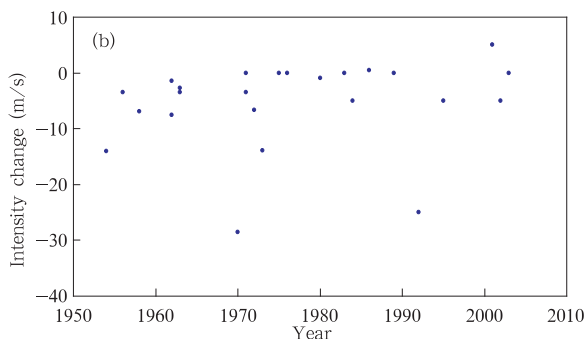
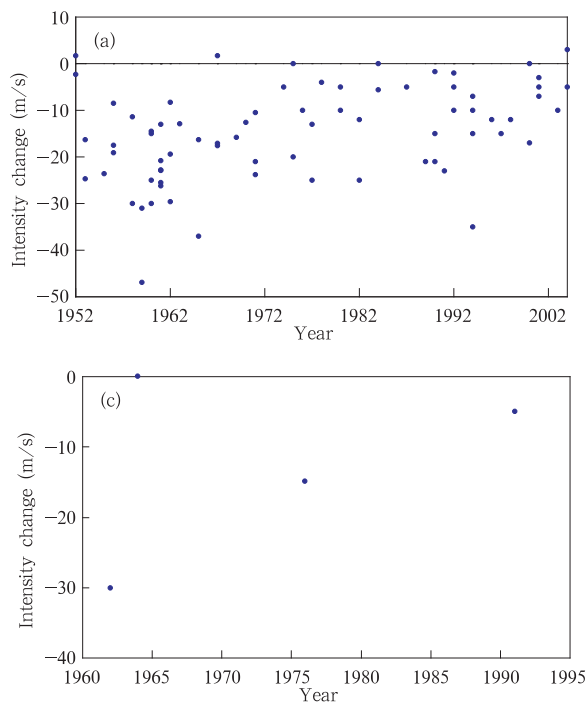


图 9 登陆两地 TC 的强度变化
(两次登陆时刻最大风速之差)
(a. 台湾→大陆, b. 海南→大陆, c. 大陆→海南)
Fig. 9 Intensity changes for TC
landfalling in two regions
(differences of the sustained maximum wind
speeds at the two landfall times; a. Taiwan
to the mainland, b. Hainan to the mainland,
c. the mainland to Hainan)

6 结 语

(1) 登陆时间的最大误差和平均误差分别为 4 h 和 1.04 h, 登陆地点的最大误差和平均误差分别约为 100 km 和 26 km。信息化登陆地点的误差明显小于热带气旋中心的“最佳定位误差”, 这说明信息化登陆资料效果是令人满意的。

(2) 中国受登陆 TC 影响严重的地区为台湾东部沿海、福建至雷州半岛沿海和海南东部沿海。其中登陆 TC 最多地区为海南东部和广东阳江至雷州半岛一带, 最大登陆频数出现在海南万宁地区。而渤海沿岸、江苏东台至山东日照沿海以及海南西北部沿海没有直接登陆的台风。台湾东部沿海和浙江沿海部分地区是登陆 TC 平均强度最大的地区, 平均登陆强度达到台风级别, 其中台湾南端的平均登陆强度为最强, 达到强台风级别。平均登陆强度较弱的地区集中在北海沿岸、台湾西部沿海和渤海沿岸, 一般为热带低压和热带风暴。

(3) 1951—2004 年共有 490 个 TC 登陆中国。5—11 月为 TC 登陆中国季节, 集中期为 7—9 月, 约 76.7% 的登陆 TC 发生在这一时段, 尤其以 8 月

为最多 (占 28.8%), 4 月和 12 月极少出现登陆 TC, 而 1—3 月无 TC 登陆。登陆 TC 的强度主要集中在热带低压—台风, 尤其以强热带风暴和台风最多, 分别占 25.3% 和 24.9%; 超强台风出现的机率最少, 仅占 3.1%。

(4) 对于大陆、海南和台湾三地, 过去 50 余年登陆 TC 频数都存在不同程度的减少趋势, 但只有登陆海南 TC 的减少趋势是显著的, 而所有登陆风暴均无明显增多或减少趋势。

(5) 3 类登陆 TC 比较而言, 总体上登陆大陆的 TC 最多、初旋最早、终旋最晚、登陆期最长; 登陆海南的 TC 居中; 而登陆台湾的 TC 最少、初旋最晚、终旋最早、登陆期最短。每年都会有 TC 登陆大陆, 年登陆频数在 3—12 次; 海南年登陆频数最多为 6 次, 偶尔会出现空旋; 台湾年登陆频数最多 7 次, 容易出现空旋。

(6) 从登陆方式看, 登陆一地的 TC 最多、登陆两地的 TC 次之, 分别占总数的 79.2% 和 20.6%, 仅有 1 个 TC 登陆三地。在登陆两地的 TC 中, 经台湾登陆大陆的 TC 最多、经海南登陆大陆的 TC 次之、经大陆登陆海南的 TC 排行第 3, 分别占

72.2%、23.8%和4.0%;而未出现过从大陆到台湾、从海南到台湾和从台湾到海南的登陆 TC。

(7) 登陆台湾 TC 全部为首先登陆该地的,多数(占68.2%)穿越台湾海峡登陆大陆,少数(占30.8%)沿东北向移入东海,经台湾再登陆海南的情形十分罕见。登陆海南 TC 中绝大部分(96.0%)为首先登陆该地的,其中有八成西行移入北部湾,两成向北登陆两广。登陆大陆 TC 中有七成多为首先登陆该地的,其中极少数(占1.5%)沿奇异路径登陆海南,绝大部分(占98.5%)则以多种路径进入中国大陆。

(8) 登陆两地 TC 在两次登陆的强度变化上表现出明显的减弱,尤其以先登陆台湾再登陆大陆的 TC 强度减弱的程度最大, $V_{\max}$ 平均减小 14.7 m/s;先登陆海南再登陆大陆的 TC 强度减弱的程度相对较小, $V_{\max}$ 平均减小 5.3 m/s;先登陆大陆再登陆海南的 TC $V_{\max}$ 平均减小 12.5 m/s。

致谢:研究过程中作者与何敏研究员、张培群博士和李英博士进行过有益的探讨并得到很好的建议和启示。在此表示感谢。

References

- Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. An Introduction to Tropical Cyclones in the Western North Pacific(in Chinese). Beijing: Science Press, 22-26
- Chen Lianshou, Luo Zhexiong, Li Ying. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process(in Chinese). *Acta Meteor Sinica*, 62(5): 541-549
- Chen Min, Zheng Yongguang, Tao Zuyu. 1999. An analysis on tropical cyclones' climatic feature in the western North Pacific for 1949—1996(in Chinese). *J Tropical Meteor*, 15(1):10-16
- Dong Keqin, Li Zengzhong. 1980. A study on the topography effect of Hainan island on landfall typhoons(in Chinese). *Chinese J Atmos Sci*, 4(3):288-292
- He Haiyan, Jian Maoqiu, Song Lili, et al. 2003. Some climatic features of the tropical cyclones landed onto Guangdong province during the recent 50 years(in Chinese). *Scientia Meteor Sinica*, 23(4):401-409
- Lei Xiaotu. 2001. The precision analysis of the best positioning on WNP TC(in Chinese). *J Tropical Meteor*, 17(1):65-70
- Li Ying, Chen Lianshou, Wang Jizhi. 2004a. The diagnostics analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after it's landfall(in Chinese). *Acta Meteor Sinica*, 62(2):167-179
- Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. 2004b. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China(in Chinese). *J Tropical Meteor*, 20(1):14-23
- Liang Jianyin. 2003. Study of diurnal variations of tropical cyclone landfall time in China(in Chinese). *J Tropical Meteor*, 19(suppl):160-165
- Ren Fumin, Wang Xiaoling, Dong Wenjie, et al. 2007. Changes in the first-landfall and last-landfall tropical cyclones in China(in Chinese). *Adv Climate Change Res*, 3(4): 224-228
- Standardization Administration of the People's Republic of China. 2006. Tropical Cyclone Gradation Standardization GB/T19201-2006(in Chinese)
- Wang Jizhi. 1991. Typhoon Activity in Western North Pacific for the Last Hundred years (in Chinese). Beijing: Chinese Ocean Press, 57-95
- Wang Yongmei. 2006. Research on climatic characteristics affecting typhoons and typhoon rainfall in China [D] (in Chinese). Beijing: School of Physics at Peking University
- Wei Fengying. 1999. Modern Statistics, Diagnostics and Prediction Techniques for Climate(in Chinese). Beijing: Meteorological Press
- Wu Hui. 2005. Climatic features of tropical cyclone in Hainan Island and its relationship with ENSO(in Chinese). *Meteorological Monthly*, 31(12):61-64
- Yu Hui, Duan Yihong. 2002a. A statistical analysis on intensity change of tropical cyclone over northwestern Pacific(in Chinese). *Acta Meteor Sinica*, 60(6):680-687
- Yu Hui. 2002b. Climatic analyses on intensity change of tropical cyclone making landfall on China coast//Extended Abstract Collected of the 12th Session of National Workshop on Tropical Cyclones (in Chinese). Beijing:33-35

附中文参考文献

- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 22-26
- 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展. *气象学报*, 62(5): 541-549
- 陈敏, 郑永光, 陶祖钰. 1999. 近 50 年(1949—1996) 西北太平洋热带气旋气候特征的再分析. *热带气象学报*, 15(1):10-16
- 董克勤, 李曾中. 1980. 海南岛地形对过岛台风影响的初步研究. *大气科学*, 4(3):288-292
- 贺海晏, 简茂球, 宋丽莉等. 2003. 近 50 a 广东登陆热带气旋的若干气候特征. *气象科学*, 23(4):401-409
- 雷小途. 2001. 西北太平洋热带气旋最佳定位的精度分析. *热带气象学报*, 17(1):65-70
- 李英, 陈联寿, 王继志. 2004. 登陆热带气旋长久维持的迅速消亡的大尺度环流特征. *气象学报*, 62(2):167-179
- 李英, 陈联寿, 张胜军. 2004. 登陆我国热带气旋的统计特征. *热带气象学报*, 20(1):14-23
- 梁建茵. 2003. 我国热带气旋登陆时间日变化特征分析. *热带气象学报*, 19(增刊):160-165
- 任福民, 王小玲, 董文杰等. 2007. 登陆中国初、终热带气旋的变化特征. *气候变化研究进展*, 3(4):224-228
- 国家标准委员会. 2006.《热带气旋等级》国家标准 GB/T19201-2006
- 王继志. 1991. 近百年西北太平洋台风活动. 北京: 海洋出版社, 57-95
- 王咏梅. 2006. 影响中国台风及台风降水气候特征研究[D]. 北京: 北京大学物理学院
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 280pp
- 吴慧. 2005. 影响海南的热带气旋气候特征及其与 ENSO 的关系. *气象*, 31(12):61-64
- 余晖, 端义宏. 2002. 西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征. *气象学报*, 60(6):680-687
- 余晖. 2002. 热带气旋登陆后强度变化的气候特征分析: 登陆后消失热带气旋//第 12 届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集. 北京:33-35