

王磊, 陈光华, 黄荣辉. 2009. 影响登陆我国不同区域热带气旋活动的大尺度环流定量分析 [J]. 大气科学, 33 (5): 916–922. Wang Lei, Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2009. Quantitative analysis on large scale circulation system modulating landfalling tropical cyclone activities in the diverse Chinese regions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 916–922.

影响登陆我国不同区域热带气旋活动的大尺度环流定量分析

王磊 陈光华 黄荣辉

中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

摘 要 利用日本的 JRA-25 (Japanese 25-year Reanalysis) 逐日再分析风场资料以及美国联合台风预报中心的热带气旋 (TC) 数据, 以厦门为分界点, 分别对影响登陆我国厦门以北和厦门以南 TC 的西北太平洋副热带高压和季风槽作了相关的环流分析。通过定义副热带高压的西伸脊点和南北脊线指数, 以及季风槽的倾斜和强度指数, 定量研究它们与登陆我国不同区域 TC 的关系。研究结果表明, 所定义的指数对西北太平洋地区 TC 的生成位置、能量及登陆我国的路径有很好的指示作用。西北太平洋副高位置东西以及南北位置的偏移对登陆我国厦门以北 TC 的路径有很大影响; 西北太平洋季风槽线斜率对登陆我国厦门以南 TC 的路径有一定影响, 且倾斜程度与西北太平洋地区 TC 平均生成地的南北向偏移有密切的关系, 并且, 西北太平洋季风槽线的平均涡度对于西北太平洋地区 TC 生成时的能量也有很大影响。

关键词 热带气旋 副热带高压 季风槽 定量分析

文章编号 1006–9895 (2009) 05–0916–07

中图分类号 P447

文献标识码 A

Quantitative Analysis on Large Scale Circulation System Modulating Landfalling Tropical Cyclone Activities in the Diverse Chinese Regions

WANG Lei, CHEN Guanghua, and HUANG Ronghui

Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

Abstract The circulation patterns associated with the subtropical high and the monsoon trough over the western North Pacific, which respectively modulate landfalling tropical cyclones (TCs) to the north and south of Xiamen, are systematically explored using the Japanese 25-year Reanalysis (JRA-25) daily wind field and tropical cyclone (TC) dataset derived from the Joint Typhoon Warning Center, USA. Furthermore, the relationships between landfalling TCs and large scale circulations is examined quantitatively by defining the indices of westward-extension and south-northward shift of the subtropical high ridges, as well as those of the monsoon trough slope and intensity. The results reveal that these indices act as key indicators of TC genesis locations, intensity and tracks. The location of subtropical high is responsible for tracks of landfalling TCs to the north of Xiamen. The slope of monsoon trough line impacts the tracks of landfalling TCs to the south of Xiamen, and modulates north-southward shift of TC genesis locations over the western North Pacific. Moreover, the average vorticity of monsoon trough line influences the

收稿日期 2008–11–21, 2009–05–21 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2009CB421505、公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200806009, 国家自然科学基金资助项目 40730952

作者简介 王磊, 男, 1974 年出生, 在职研究生, 工程师, 主要从事台风方面的研究。E-mail: wl@mail.iap.ac.cn

energy of TC genesis.

Key words tropical cyclone, subtropical high, monsoon trough, quantitative analysis

1 引言

西北太平洋是全球热带气旋(TC)和台风生成的主要源地之一,全球每年约30个左右的热带气旋在此海域形成。由于受东风带、西太平洋副热带高压和季风槽的影响,平均每年有8个TC登陆中国,给我国造成巨大的经济损失和重大人员伤亡。特别是近几年登陆我国TC的强度不断增大,由此造成的损失也越来越大。因此,有必要对影响登陆我国台风的大尺度环流系统(包括西太平洋副热带高压和季风槽)进行定量分析,通过量化的指标为登陆台风预报提供理论参考,并进一步加深对登陆我国台风活动规律的认识。

关于西北太平洋热带气旋活动年际变化与季风环流系统之间的关系,国内外已经有过不少研究。王斌等(1998)指出,从涡度动力学的角度来看,热带气旋的运动主要取决于大尺度环流对热带气旋的相对涡度的平流,就像一个半径为几百公里的涡旋被尺度为数千公里以上的环境气流“引导”一样。Chan(2000)与Chen等(1998)的研究表明,ENSO循环中的季风槽加强东伸或是减弱西退显著影响TC的形成位置。并且,季风槽又与西太平洋副热带高压的演变紧密相关(Wang and Wu, 1997),当副高从南海撤到菲律宾附近海域时,季风槽南侧西风东进,这有利于TC在西北太平洋东侧的生成,西太平洋副热带高压(WPSH)脊线的向南(北)移动也使得TC形成位置偏南(北)(Chia and Ropelewski, 2002),副高还可以通过引导气流的作用影响到TC路径的变化(Ho et al., 2004)。陈光华和黄荣辉(2006)分析了热带西太平洋TC活动与西太平洋暖池次表层热状态和季风槽的关系,研究结果表明:当西太平洋暖池次表层偏暖,季风槽位置偏西北,TC易在西北太平洋的偏西位置(即 150°E 以西)生成,这种状况下TC易往西北方向移动,因而造成登陆我国的台风增多;相反,当热带西太平洋暖池次表层处于冷状态、季风槽位置偏东南,TC易在 150°E 以东生成,这造成西北太平洋TC移动路径易于在 130°E 附近向东北方向转向,这样登陆我国台风偏少。高建芸

等(2008)将季风槽分为5种主要形态,发现不同季风槽形态可以使得TC生成的热力条件、动力条件和环境条件的不同,致使生成于西北太平洋季风槽的热带气旋(MTTC)生成位置、频数、路径以及在我国登陆点有着显著差异。王慧等(2006)指出当西北太平洋季风槽增强并向东扩展使季风加强时,西北太平洋的风速垂直切变、高低空辐散风、湿度和海温等都对台风的生成产生有利的影响,台风数明显比季风槽弱时多。而且对台风生成的位置也有很大的影响,即季风槽强时,台风的生成位置偏东,季风槽弱时台风的位置偏西。此外,张庆云和彭京备(2003)指出中层(500 hPa)西太平洋副热带高压脊线位置偏北(南),低层(850 hPa)东亚夏季风环流偏强(弱),登陆中国台风数偏多(少)。

以往的研究虽然定性揭示了大尺度环流系统对于西北太平洋台风生成以及登陆我国台风活动的影响。然而,关于登陆我国南北不同区域TC活动与大尺度季风环流系统之间的定量研究还不多见。因此,本文主要通过对影响TC移动和生成的西北太平洋副高与季风槽系统指数的定义,定量研究西北太平洋副热带高压和季风槽环流与登陆我国南北区域TC活动的相互联系。

2 研究数据及方法

本文所用数据为日本25年再分析(JRA-25)逐日风场及高度场资料(分辨率为 $1.25^{\circ}\times 1.25^{\circ}$)以及美国联合台风预报中心的TC数据(对其中登陆我国TC的信息进行了筛选,整编得到包含TC登陆地点、登陆时间、移动路径和风速的资料)。近30年TC资料统计发现,登陆我国的TC主要在每年的7~9月生成,平均占全年总登陆个数的82%左右,故本文主要应用JRA-25逐日资料的850 hPa、500 hPa风场及500 hPa高度场对在1979~2007年7~9月生成的登陆我国的TC进行统计和分析。并且,为了突出西北太平洋副热带高压和季风槽对登陆我国的具有一定强度TC的影响,本文只考虑热带风暴(18 m/s)及其以上强度的气旋。

以TC登陆时刻最大风速的平方作为登陆TC能量的衡量,图1a为登陆我国TC年平均能量的时

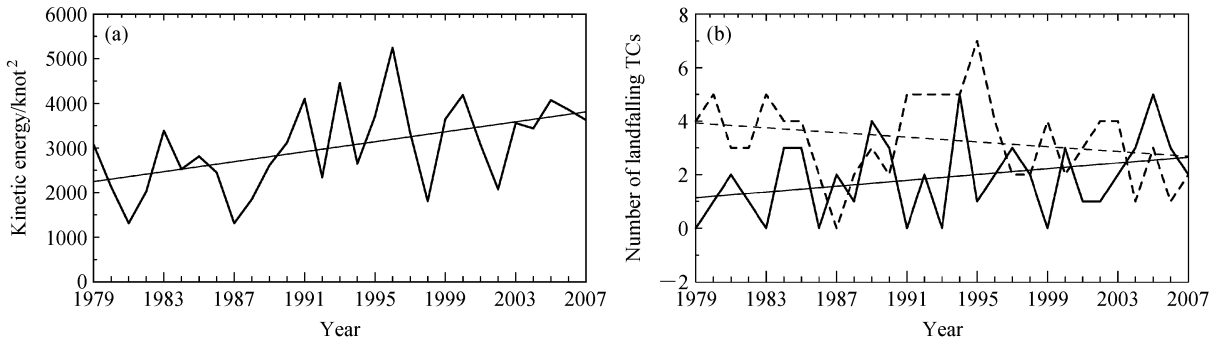


图1 1979~2007年(a) 1~12月TC登陆我国大陆时刻的平均动能以及(b)在7~9月生成的登陆厦门以北(实线)和以南(虚线)TC个数的年际变化

Fig. 1 The interannual variations of (a) the average kinetic energy at the time of TC (tropical cyclones) landfalling in China between Jan and Dec during 1979–2007 and (b) the numbers of landfalling TCs to the north of Xiamen (solid line) and to the south of Xiamen (dashed line) between Jul and Sep during 1979–2007

间序列, 图中显示了登陆我国 TC 的能量呈线性增加的趋势, 由 1980 年代初的 2000 knot^2 ($1 \text{ knot} = 0.514 \text{ m/s}$) 增加到 2007 年的 3500 knot^2 (如图 1a)。此外, 根据研究的需要, 将我国以厦门为分界点划分为南北区域。统计近 30 年资料发现, 在厦门以北登陆的台风数量有增多的趋势; 而在厦门以南登陆的台风呈现减少的趋势 (如图 1b 所示)。登陆我国不同区域 TC 活动的年际变化在很大程度上受到了西北太平洋大尺度环流系统的控制, 其中西北太平洋副热带高压和热带季风槽系统是最为重要的环流系统, 下文主要针对两个环流系统定义相应的指标, 分别考察它们对登陆我国不同区域台风的影响。

3 西北太平洋副热带高压对于登陆中国大陆厦门以北热带气旋路径的影响

以往的研究 (钟元等, 2006) 表明: 当西北太平洋副热带高压迅速加强西伸, 下沉辐散作用将促使低层低压环流迅速减弱, 登陆热带气旋仅维持很短的路径便消亡; 当西北太平洋副热带高压减弱东退, 西风槽南压, 辐合上升运动将使低层低压环流加强或长时间维持, 登陆热带气旋可维持较长的移动路径。并且, 热带气旋的移动受环境气流的引导, 而对流层中层的引导作用尤为重要 (Hope and Neumann, 1970; Kutzbach, 1979; Chan and Gray, 1982; McBride, 1995)。

西北太平洋副热带高压一般处于 ($20^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$,

$120^\circ\text{E} \sim 180^\circ$) 范围内, 它的地理位置直接影响到西北太平洋西岸地区的风场。由于此地区的中层风场对登陆我国的 TC 移动路径产生显著的引导作用, 所以西北太平洋副热带高压位置的偏移对登陆中国厦门以北的 TC 活动具有很大的影响。分别挑选 6 个登陆厦门以北台风个数多的年份 (1985、1989、1994、1997、2000、2005) 和少的年份 (1979、1983、1986、1991、1993、1999), 通过对 7~9 月 500 hPa 距平风场的合成分析可以发现, 登陆厦门以北的 TC 数量偏多时 (图 2a), 我国华东及其沿海地区为东风距平所控制, 这种环境场有利于位置偏北的 TC 登陆; 反之, 登陆厦门以北的 TC 数量偏少时 (图 2b), 相同区域则表现为西风距平, 这种环境场不利于引导 TC 在厦门以北地区登陆。

由上述的 500 hPa 风场分析可知, 西北太平洋副高的环流场对登陆我国 TC 有很大影响, 需要对副高的地理位置变化作进一步的分析。为此, 对登陆厦门以北 TC 个数的多年和寡年的 7~9 月进行了 500 hPa 的高度场合成分析。在多年的合成分析中 (图 2a), 副高位置 (以 5888 gpm 线为衡量标准) 偏东 (约为 142°E), 且副高中心位置略偏北, 这使得副高南侧的引导气流更偏北, 有利于西北太平洋生成的 TC 在我国厦门以北登陆。反之, 寡年的合成分析表明 (图 2b), 副高中心位置南压西伸 (约 133°E), 副高南侧的引导气流不利于西北太平洋生成的 TC 朝西北方向移动, 在我国厦门以北地区登陆。

上述分析表明了西北太平洋副热带高压对登陆

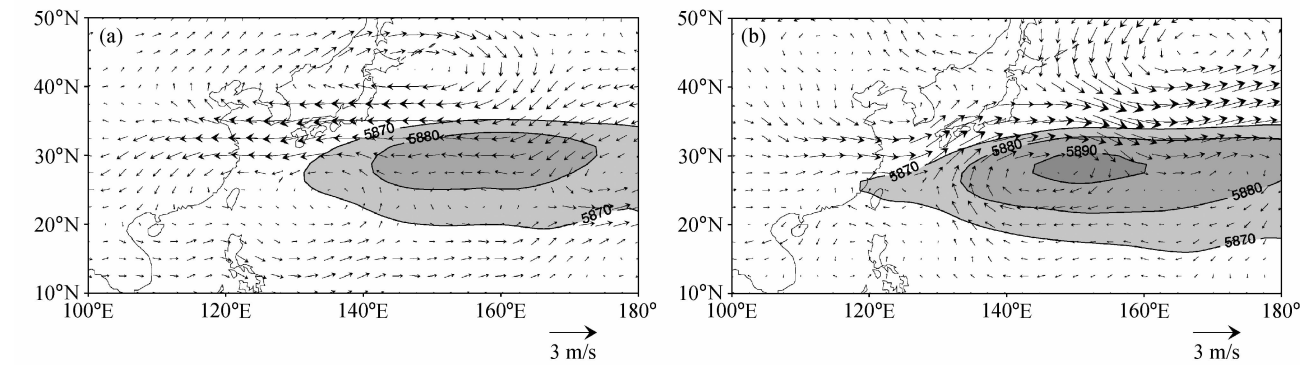


图 2 7~9 月登陆厦门以北热带气旋 (a) 多年和 (b) 寡年合成的 500hPa 高度场 (等值线, 单位: gpm) 和异常风场
Fig. 2 The composites of geopotential heights (isoline, units: gpm) and wind anomalies at 500 hPa for the years with (a) more and (b) less landfalling TCs to the north of Xiamen between Jul and Sep

我国厦门以北的 TC 具有显著的影响。为此, 在 1979~2007 年 (7~9 月平均) 对西北太平洋副高西伸脊点指数和南北脊线指数进行定义, 它们分别表征了西北太平洋副高东西以及南北位置的偏移。副高西伸脊点指数定义为 (20°N~40°N, 120°E~180°) 范围内 500 hPa 高度场上 5880 gpm 等值线最西位置所在的经度; 副高南北脊线指数定义为 120°E~160°E 范围内 500 hPa 高度层 34 条经线 (网格分辨率 1.25°) 上位势高度最大值 $H_{\max}$ ($H_{\max} \geq 5865$ gpm) 所在平均的纬度。通过西北太平洋副高指数与登陆我国厦门以北 TC 个数的相关分析表明: 西北太平洋副高西伸脊点指数与在 7~9 月生成的登陆厦门以北 TC 个数的相关系数约为 0.40 (超过了 95% 的信度检验), 即副高位置偏东时, 西北太平洋副高西南侧的东南气流有利于引导 TC 登陆厦门以北区域; 反之, 副高脊点偏西导致副高西北侧表现为西风异常, 从而使得登陆厦门以北的 TC 个数偏少。此外, 西北太平洋副高南北脊线指数与在 7~9 月生成的登陆厦门以北 TC 个数的相关系数为 0.41 (超过了 95% 的信度检验), 即副高位置偏北, 受其南侧引导气流的影响登陆厦门以北的 TC 个数偏多, 反之, 副高偏南则登陆厦门以北的 TC 个数偏少。相关统计分析表明, 西北太平洋副高指数与登陆厦门以南 TC 活动之间没有显著的相关, 下节将主要考察登陆厦门以南 TC 与西北太平洋热带季风槽系统之间的关联。

4 西北太平洋季风槽对于登陆中国大陆热带气旋的影响

季风槽区是西南季风与东南信风的汇合区, 它

经常产生在夏季和初秋, 具有典型的低层正涡度气旋式环流、高层负涡度反气旋式环流的特征, 且垂直风切变的零值区恰好经过季风槽区位置, 使得暖湿空气释放的热量容易集中于这一有限区域。这也正是大约有 75% 的 TC 形成于季风槽区域的主要原因 (McBride, 1995)。研究表明 (Chia and Ropelewski, 2002): 季风槽不仅提供了风场的纬向和经向切变, 为低层气旋性环流的发展提供有利的动力条件, 而且季风槽强烈的辐合所形成的强烈上升运动和对流活动为 TC 发展提供了有利的动力和热力条件。以往研究 (王慧等, 2006) 着重于季风槽位置对 TC 平均生成位置东西偏移的影响, 还缺乏量化研究来考察季风槽线的倾斜程度, 以及它与登陆我国 TC 和西北太平洋生成 TC 平均位置南北偏移的关系。

4.1 西北太平洋季风槽对于登陆中国大陆厦门以南热带气旋路径的影响

西北太平洋季风槽一般处于 (0°~25°N, 100°E~180°) 范围内, 它与北面西北太平洋副高位置不同的配置情况对登陆中国厦门以南的 TC 路径具有很大影响。为此, 对每年 7~9 月生成的登陆厦门以南 TC 个数的多年 (1979、1991、1992、1993、1999) 和寡年 (1986、1989、2000、2004、2005) 在 (0°~25°N, 125°E~180°) 区域的 850 hPa 等压面上进行了风场和季风槽线以及 500 hPa 高度场的合成分析。西北太平洋季风槽线定义为 (0°~25°N, 125°E~180°) 区域内 7~9 月平均的东西风交界线 (即不同纬度上, 7~9 月平均纬向风零点的连线); 季风槽线的倾斜指数通过对槽线上一组经纬度利用最小二乘法得到的线性系数来确定。图 3 显示了登

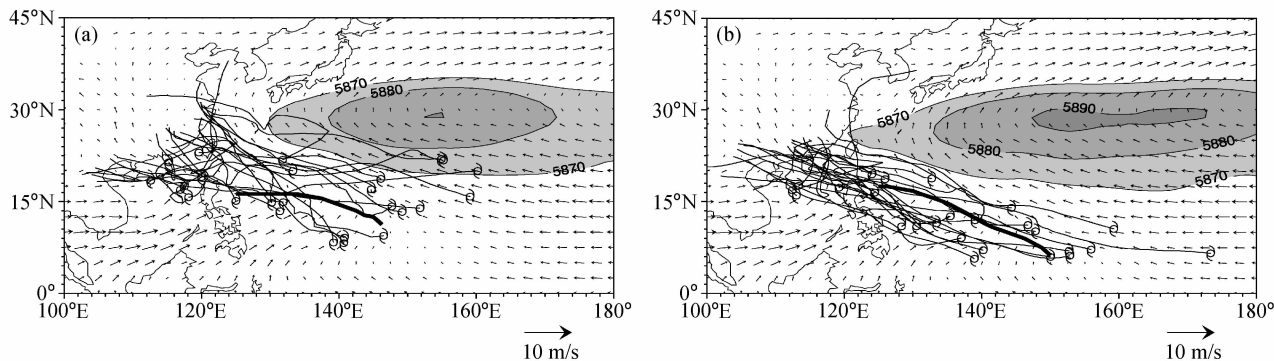


图3 7~9月登陆厦门以南 TC (a) 多年和 (b) 寡年合成的 850 hPa 风矢量和季风槽线(粗线)以及 500 hPa 位势高度场(等值线,单位: gpm)。台风符号和细线代表台风生成位置和移动路径

Fig. 3 The composites of monsoon trough lines (thick lines) and wind vectors at 850 hPa and geopotential heights (isoline, units: gpm) at 500 hPa for the years with (a) more and (b) less landfalling TCs to the south of Xiamen between Jul and Sep. The typhoon symbols and thin lines denote the TC genesis locations and tracks, respectively

陆厦门以南多年和寡年 TC 的生成源地和移动路径,箭头为 850 hPa 的风场,阴影区表示为 500 hPa 位势高度场。如图 3a 所示,当登陆厦门以南 TC 数偏多时,季风槽线的斜率达到 -0.46 (即槽线相对倾斜)。此时,季风槽低部偏向东南,登陆我国的 TC 很大比例生成于 15°N 以南季风槽区,且其北侧副高主体强度增加,且位置南压西伸,使得中层引导气流偏南偏西,从而有利于 TC 在我国厦门以南登陆;如图 3b 所示,当登陆厦门以南 TC 数偏少时,季风槽线的斜率达到 -0.21 (即槽线相对水平)。此时,当季风槽低部偏北,登陆我国的 TC 有很多在 15°N 以北的副高南侧生成,且副高强度减弱,位置北抬东撤,使得中层导流风场更偏向西北,而有利于 TC 在我国厦门以北登陆。

上述分析表明:西北太平洋季风槽线的斜率对登陆我国厦门以南的 TC 数量有密切的关系。为此,将 1979~2007 年(7~9 月平均)逐年西北太平洋季风槽倾斜指数与在 7~9 月生成的登陆我国厦门以南 TC 个数进行相关分析,结果表明:西北太平洋季风槽斜率指数与在我国厦门以南登陆 TC 个数的相关系数约为 -0.37 ,超过了 90%的信度检验,即季风槽斜率指数大(槽线平直)则登陆厦门以南的 TC 个数偏少,反之,季风槽斜率指数小(槽线倾斜)则登陆厦门以南的 TC 个数偏多。

4.2 西北太平洋季风槽对于西北太平洋地区热带气旋生成地的影响

西北太平洋季风槽与北侧副热带高压的不同配置不仅对 TC 的路径有很大影响,而且对 TC 的生

成地也有显著的影响。季风槽内部存在着气流的动力不稳定机制,在适当条件下为内部扰动发展提供能量支持,使得初始扰动可以得到发展(Ferreira and Schubert, 1997)。此外,TC 的部分初始扰动也可来自于季风槽以外的地区,热带地区西传的天气尺度波动进入季风槽区域后,在一定条件下又可以为 TC 的形成提供有利的初始动力扰动(Takayabu and Nitta, 1993)。

除了以往研究的季风槽东伸西退对 TC 生成纬向位置有显著的影响,其倾斜程度也会对 TC 平均生成的南北位置产生明显的调制作用。为此,对西北太平洋地区 1979~2007 年 7~9 月生成的 TC 平均生成地偏北年(1986、1989、2000、2001、2004)和偏南年(1990、1991、1993、1995、2003)在($0^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$)区域进行了季风槽线合成分析。如图 4a 所示,西北太平洋地区 TC 平均生成地偏南时(12.6°N),季风槽线的斜率为 -0.41 ,季风槽偏南,这有利于 TC 在此区域生成,造成大多数 TC 的生成位置偏南。反之,如图 4b 所示,西北太平洋地区 TC 平均生成地偏北时(16.4°N),季风槽线的斜率为 -0.20 ,这使得大多数 TC 的生成位置偏北。

上述分析表明:西北太平洋季风槽斜率指数对西北太平洋地区 TC 生成位置的南北偏移存在密切联系。为此,对 1979~2007 年(7~9 月平均)西北太平洋季风槽倾斜指数与西北太平洋区域 7~9 月生成 TC 的平均纬度进行相关分析,结果表明:西北太平洋季风槽斜率指数与西北太平洋区域 7~

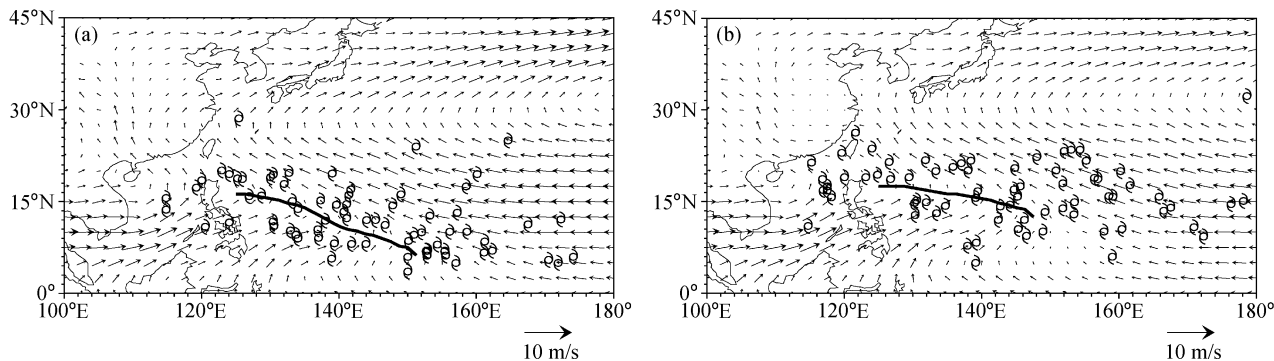


图 4 对 7~9 月 TC 平均生成位置 (a) 偏北年和 (b) 偏南年进行 850 hPa 季风槽线(粗线)和风场合成。台风符号代表台风生成位置

Fig. 4 The composites of monsoon trough lines (thick lines) and wind vectors at 850 hPa for the years in which the mean TC genesis locations are (a) more northward and (b) more southward. The typhoon symbols denote the TC genesis locations

9 月生成的 TC 的平均纬度的相关系数约为 0.40, 超过了 95% 的信度检验, 即季风槽斜率指数大, 则在西北太平洋区域生成的 TC 平均位置偏北, 反之, 季风槽斜率指数小, 则在西北太平洋区域生成的 TC 平均位置偏南。

4.3 西北太平洋季风槽对于西北太平洋生成热带气旋能量的影响

TC 强度和结构的变化受到诸多复杂物理过程的影响, 这些过程决定了内核区的结构, 以及 TC 和海洋、大气环境之间的相互作用(陈光华和裘国庆, 2005)。最近, 于玉斌等的研究(2008)进一步指出: 台风中心附近正涡度的增大和正涡度柱向对流层中上层伸展导致“桑美”台风急剧增强, 对流层中层涡度的增大、高低层均出现正涡度中心与台风的减弱密切相关。西北太平洋季风槽作为 TC 生成、移动和发展过程中有利的大尺度环境系统, 它所提供的环境涡度强度也会对生成发展于季风槽内部的 TC 的强度起到调制作用。为此, 定义西北太平洋季风槽强度指数为 850 hPa 等压面上 ($0^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 范围内季风槽线上每网格点的涡度平均。对 1979~2007 年 (7~9 月平均) 季风槽强度指数与西北太平洋地区 7~9 月平均每个 TC 的能量 (TC 生命史过程中风速的平方累积) 进行相关分析, 结果表明: 西北太平洋季风槽强度指数与西北太平洋地区 7~9 月生成 TC 的平均能量相关系数约为 0.39, 超过了 95% 的信度检验, 即季风槽涡度指数大则西北太平洋地区生成的 TC 能量较大, 反之, 季风槽涡度指数小则西北太平洋地区生成的 TC 能量较小。这也说明了 TC 生成后在季风

槽内部移动过程中, 若受到有利的大环境气旋式涡度场的影响, 可以逐渐累积能量, 使得强度得以增加。

5 小结

本文定义了西北太平洋副热带高压西伸脊点和脊线指数, 以此定量分析西北太平洋副热带高压对于登陆我国厦门以北 TC 路径的影响。研究结果表明: 西北太平洋副高西伸脊点指数与在我国厦门以北登陆 TC 个数存在显著的相关, 当副高偏东时, 受其西南侧东南引导气流的影响, 登陆厦门以北的 TC 个数偏多, 反之, 副高偏西则登陆厦门以北的 TC 个数偏少。并且, 西北太平洋副高脊线指数与在我国厦门以北登陆 TC 个数也存在显著的相关, 使得副高偏北则登陆厦门以北的 TC 个数偏多, 反之, 副高偏南则登陆厦门以北的 TC 个数偏少。

此外, 本文还定义了西北太平洋季风槽斜率和强度指数, 分析了西北太平洋季风槽对于登陆我国厦门以南 TC 路径的影响以及与西北太平洋地区 TC 生成的位置和能量的关系。研究表明: 季风槽与其北侧的副高的不同配置对于在季风槽内生成的 TC 路径具有一定的影响, 季风槽斜率指数大则登陆厦门以南的 TC 个数偏少, 反之, 季风槽斜率指数小则登陆厦门以南的 TC 个数偏多。季风槽的倾斜状况对于 TC 平均生成地的南北偏移具有很大的影响。季风槽斜率指数大, 表现为季风槽倾斜相对平直, 则在西北太平洋区域生成的 TC 平均位置偏北, 反之, 季风槽斜率指数小则在西北太平洋区域生成的 TC 平均位置偏南。西北太平洋季风槽强度

对 TC 生命史过程中的能量有很大影响。季风槽强度指数大则西北太平洋地区生成的 TC 能量较大, 反之, 季风槽强度指数小则西北太平洋地区生成的 TC 能量较小。

参考文献 (References)

- Chan J C L, Gray W M. 1982. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (10): 1354–1374.
- Chan J C L. 2000. Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events [J]. *J. Climate*, 13: 2960–2972.
- 陈光华, 裴国庆. 2005. 热带气旋强度与结构研究新进展 [J]. *气象科技*, 33 (1), 1–6. Chen G H, Qiu G Q. 2005. Progress in researches on tropical cyclone intensity and structure [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 33 (1): 1–6.
- 陈光华, 黄荣辉. 2006. 西北太平洋暖池热状态对热带气旋活动的影响 [J]. *热带气象学报*, 22 (6): 527–532. Chen G H, Huang R H. 2006. The effect of warm pool thermal states on tropical cyclone in western North Pacific [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 22 (6): 527–532.
- Chen T C, Weng S P, Yamazaki N, et al. 1998. Interannual variation in the tropical cyclone formation over the western North Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126: 1080–1090.
- Chia H H, Ropelewski C F. 2002. The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the northwest Pacific [J]. *J. Climate*, 15: 2934–2944.
- 高建芸, 张秀芝, 江志红, 等. 2008. 西北太平洋季风槽异常与热带气旋活动 [J]. *海洋学报*, 30 (3): 35–47. Gao J Y, Zhang X Z, Jiang Z H. 2008. Anomalous western North Pacific monsoon trough and tropical cyclone activities [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 30 (3): 35–47.
- Ho C H, Baik J J, Kim J H, et al. 2004. Interdecadal changes in summertime typhoon tracks [J]. *J. Climate*, 17: 1767–1776.
- Hope J R, Neumann C J. 1970. An operational technique for relating the movement of existing tropical cyclones to past tracks [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 98 (12): 925–933.
- Kutzbach G. 1979. *The Thermal Theory of Cyclones* [M]. Boston: Amer. Meteor. Soc., 255pp.
- McBride J L. 1995. Tropical cyclone formation [C]// *Global Perspectives on Tropical Cyclones*, WMO/TD-No. 693, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 63–105.
- Ferreira R N, Schubert W H. 1997. Barotropic aspects of ITCZ breakdown [J]. *J. Atmos. Sci.*, 54: 251–285.
- Takayabu Y N, Nitta T. 1993. 3–5 day-period disturbances coupled with convection over the tropical Pacific Ocean [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71 (2): 221–246.
- 王斌, Elsberry R L, 王玉清, 等. 1998. 热带气旋运动的动力学研究进展 [J]. *大气科学*, 22 (4): 535–547. Wang B, Elsberry R L, Wang Y Q, et al. 1998. Dynamics in tropical cyclone motion: A review [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22 (4): 535–547.
- Wang B, Wu R. 1997. Peculiar temporal structure of the South China Sea summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 14: 177–194.
- 王慧, 丁一汇, 何金海. 2006. 西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响 [J]. *气象学报*, 64 (3): 335–356. Wang H, Ding Y H, He J H. 2006. Influence of western North Pacific summer monsoon changes on typhoon genesis [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (3): 335–356.
- 于玉斌, 陈联寿, 杨昌贤. 2008. 超强台风“桑美”(2006) 近海急剧增强特征及机理分析 [J]. *大气科学*, 32 (2): 405–416. Yu Y B, Chen L S, Yang C X. 2008. The features and mechanism analysis on rapid intensity change of super typhoon Saomai (2006) over the offshore of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 405–416.
- 张庆云, 彭京备. 2003. 夏季东亚环流年际和年代际变化对登陆中国台风的影响 [J]. *大气科学*, 27 (1): 97–106. Zhang Q Y, Peng J B. 2003. The interannual and interdecadal variations of East Asian summer circulation and its impact on the landing typhoon frequency over China during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (1): 97–106.
- 钟元, 余晖, 王东法. 2006. 环境场对东海登陆热带气旋陆地路径的影响 [J]. *热带气象学报*, 22 (4): 313–320. Zhong Y, Yu H, Wang D F. 2006. Effect of environmental field on tropical cyclone track after landfall from East China Sea [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 22 (4): 313–320.