

田华, 李崇银, 杨辉. 2010. 大气季节内振荡对西北太平洋台风路径的影响研究 [J]. 大气科学, 34 (3): 559–579. Tian Hua, Li Chongyin, Yang Hui. 2010. Modulation of typhoon tracks over the western North Pacific by the intraseasonal oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 559–579.

大气季节内振荡对西北太平洋台风路径的影响研究

田华^{1, 3} 李崇银^{1, 2} 杨辉¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

3 中国科学院研究生院 100049

摘 要 台风路径一直是天气预报的难点之一。本文研究了大气季节内振荡 (ISO) 对西北太平洋台风路径的影响, 指出大气 ISO 对台风路径预报有重要参考意义。细化传统台风路径的划分方法, 将台风路径进一步分为 5 种: 西移型、西北移型、日本以西型、日本登陆型、日本以东型。分别对不同路径的台风所对应的低频流场进行超前滞后合成分析, 发现台风生成时 850 hPa 低频气旋的正涡度带走向往往预示着台风的未来走向, 200 hPa 低频环流形势, 意味着上层引导气流的方向, 对台风的路径也有一定的指示作用。低频流场演变特征表明, 大气 ISO 在对流层低层到中层通过低频气旋或低频反气旋的环流形势影响季风槽及副热带高压的位置和强度, 从而影响台风的活动。低频气旋的作用使台风易于沿着低频气旋的正涡度带移动。菲律宾以东热带地区生成的低频气旋的加强有利于季风槽的加强和东伸, 另外, 它的经向北传对副热带高压的位置也有影响。在副热带地区存在大气 ISO 流型以低频波列的形式向西传播, 对副热带高压的季节内时间尺度东西振荡有重要作用。热带与副热带地区大气 ISO 的共同作用, 对台风路径有决定性意义。初步认为, 对于西移路径和西北移路径, 热带大气 ISO 的影响起着更为重要的作用; 对于日本登陆型和日本以东型路径, 副热带大气 ISO 的影响起着更为重要的作用。大气季节内振荡的环流场可以作为台风路径预报的依据之一。

关键词 台风路径 大气季节内振荡 季风槽 副热带高压

文章编号 1006–9895 (2010) 03–0559–21

中图分类号 P461

文献标识码 A

Modulation of Typhoon Tracks over the Western North Pacific by the Intraseasonal Oscillation

TIAN Hua^{1, 3}, LI Chongyin^{1, 2}, and YANG Hui¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The modulation of the intraseasonal oscillation (ISO) on the typhoon tracks over the western North Pacific is studied by observational data analysis. The authors divide the main classes of typhoon tracks into five types based on the traditional methods. The results show that the ISO may affect the tracks of typhoons. The low-frequency cyclone (LFC) or low-frequency anticyclone (LFAC) influences the intensity and position of the monsoon

收稿日期 2009–05–31, 2009–09–22 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2009CB421401, 国家自然科学基金资助项目 U0833602、40875049

作者简介 田华, 女, 1981 年出生, 博士, 主要从事气候变化的研究。E-mail: tianhua@mail. iap. ac. cn

trough and subtropical high in the lower and middle troposphere. The LFC east of the Philippines will strengthen the monsoon trough, and its northward propagation will influence the position of the subtropical high so as to influence the typhoon activity. Afterward, typhoons are more inclined to move along the zone of positive vorticity of the LFC. The ISO westward propagation in the form of wave trains in the subtropics also influences the position of subtropical high. The interaction of tropical and subtropical ISOs performs an important function on the typhoon tracks. The low-frequency circulation at 200 hPa can also have an indicative effect on the typhoon tracks. As a whole, the circulation field of ISO can be used as a basis for forecasting the typhoon tracks.

Key words typhoon track, intraseasonal oscillation, monsoon trough, subtropical high

1 引言

西北太平洋台风的活动、变化及其影响是国内气象工作者十分关注的问题。由于 2005 年美国受到大西洋强飓风极其严重的影响,美国一些科学家更在国际上推进了热带风暴和台风研究的新高潮,他们用近 30 年的资料研究认为,全球变暖使得全球强热带气旋(4~5 级飓风强度)过去 30 年在不同海域都有显著增加(Emanuel, 2005)。随着海表温度的增加,在北太平洋、印度洋和西南太平洋伴随着总气旋数目和发展期的减少,达到 4~5 级强度的强台风不管是在数量还是比例上都大大增加(Webster et al., 2005)。当然,也有科学家的研究认为,全球变暖对热带气旋的影响没有那么明显,尤其是在西太平洋,台风数和强台风数都没有随全球增暖而有明显增多的趋势(Wu et al., 2006; Oouchik et al., 2006; 黄勇等, 2008)。海温变化对西太平洋台风生成的影响与大气动力学条件相比并非主要因素,年代际变化是西太平洋台风活动的主要特征(Chan, 2005)。

除台风频数外,台风移动路径是台风研究和预报服务的另一重要方面,而且难度比较大,从影响台风移动的因素来寻求预报依据一直是预报研究的重点。

大气季节内振荡(Intraseasonal Oscillation, 简称 ISO)是季节内尺度上(30~60 天)大气环流及气候的一种变化,已被视为重要的大气环流系统之一,它的活动及其异常对不少地区的天气和气候都有重大的影响。热带大气 ISO 最先由 Madden and Julian (1971) 在热带大气的风场和气压场中发现,故通常也将热带地区的大气季节内振荡称之为 Madden-Julian Oscillation (简称 MJO)。研究表明,ISO 对亚—澳季风的爆发(Yasunari, 1979; Hendon and Liebmann, 1990a, 1990b; 穆明权和

李崇银, 2000)、东亚夏季风活动及降水异常均有重要影响(Weickmann, 1983; Lau and Chen 1986; Ferranti et al., 1990; Yang and Li, 2003),而且对 ENSO 的发生也有作用(李桂龙和李崇银, 1998; 李崇银和廖清海, 1998; 李崇银和龙振夏, 2001)。Gray (1979) 的研究曾指出,热带气旋(TC)的生成具有一定周期的频发性,活跃期一般为 1~2 周,而两段活跃期之间大约为 2~3 周的非活跃期。热带气旋的这种变化特征引起气象学家对大气 ISO 与热带 TC 关系的广泛注意, Nakazawa (1986) 研究指出,西太平洋多数热带气旋容易发生在 MJO 湿位相中; Liebmann et al. (1994) 提出,在印度洋和西太平洋热带气旋更多生成在湿位相中,但同时指出 MJO 对热带气旋的生成具有一定的影响作用,但不是关键因子。Maloney and Hartmann (2000a) 将 850 hPa 纬向风进行 20~80 d 滤波并对 MJO 不同位相进行划分,指出北太平洋东部生成的飓风的数量和强度都受到 MJO 的影响;对于被命名的热带气旋,生成在 850 hPa 西风距平中的数量是生成在东风距平中的 2 倍,并且强度要强。目前有关大气 ISO 对 TC 生成的调节作用,针对不同地区的 TC 都有一些研究,比如在西北太平洋(Sobel and Maloney, 2000; 祝从文等, 2004)、印度洋(Liebmann et al., 1994; Bessafi and Wheeler, 2006)、澳大利亚附近地区(Hall et al., 2001)、墨西哥湾(Maloney and Hartmann, 2000b)以及东太平洋(Maloney and Hartmann, 2000a),所得到的结论较为一致,都认为 TC 易于生成在 ISO 的湿(活跃)位相中。已有的研究都是针对大气 ISO 不同位相对 TC 生成的影响,有关大气 ISO 对 TC 路径影响的研究则非常少。

还有研究指出,夏季西太平洋热带气旋的发生和发展与热带辐合带之间有密切的关系。丁一汇和莱特(1983)指出 ITCZ 的位置和强度对西太平洋

台风的频率和形成地区有着明显的影响。多台风季 ITCZ 位于 20°N 附近, 而少台风季位于 10°N 附近。蒋乐怡和应明 (2002) 认为热带气旋偏多年, 热带辐合带北抬至 $10^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$, 有利于热带气旋生成; 而热带气旋偏少年的热带辐合带偏南, $10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 间的西太平洋上为明显的对流弱区, 不利于热带气旋的生成。张庆云和彭京备 (2003)、刘舸等 (2007) 的研究进一步指出, ITCZ 的对流活动较强时, 对应热带辐合带上的气旋活动较多, 并有利于其登陆。TC 生成位置与季风槽的东伸与西撤相联系 (Chen et al., 1998)。西太平洋副热带高压对 TC 的生成也有影响, 叶英和董波 (1998) 发现副高面积和强度指数偏低, 则西太平洋热带气旋异常偏多, 而高指数年对应热带气旋异常偏少。

关于 TC 路径的研究也有一些工作。Harr and Elsberry (1991) 的分析表明台风生成的位置能够预测台风的路径, 700 hPa 环流异常表示了季风槽和副热带高压的位置和强度, 影响季风生成位置和路径, 因此台风生成时的 700 hPa 环流能够决定大多数台风的路径。Carr and Elsberry (1995) 根据天气类型和季风槽变化的地区区分了不同的 TC 路径类型, 作为引导气流的天气类型的变化将引起路径类型的变化, 季风涡旋与 TC 的相互作用会引起路径突然北折。另外, 在副热带地区, 西太平洋副高和热带气旋活动的密切关系使许多气象学者着力于这个方面的研究。陈联寿 (1977) 指出, 在影响台风运动的各种复杂因素中, 牵引运动是台风最基本和最重要的运动。而台风常常活动于西太平洋副高的南侧和西侧, 其南侧的偏东气流和西侧的偏南气流直接引导台风向西向北运动, 可以说很大程度上主宰着台风的活动, 副高的面积、强弱、脊线位置、具体形态等特征也对台风路径有极大影响。西太平洋副高的形态和位置的异常对热带气旋的路径、强度变化也有着十分重要的调制作用 (顾润源等, 1993; 胡春梅等, 2005)。

研究表明, 冬半年热带大气 ISO 以向东传播为主, 而北半球夏半年 ISO 比冬半年 ISO 更具复杂性 (Chen and Xie, 1988; 李崇银, 1995; 李崇银和李桂龙, 1998; 杨辉和李崇银, 2005)。北半球夏季热带大气 ISO 存在三种传播形势: (1) 向东传播模; (2) 在印度、西北太平洋季风区的向北传播模; (3) 赤道以外的向西传播模 (Yasunari, 1979; Krsh-

namurti and Subrahmanyamd, 1982; Chen et al., 1988a)。Anderson and Rosen (1983) 在研究纬向平均西风角动量的向北输送时, 指出了中纬度 ISO 的存在。Li (1983)、Chen and Murakami (1988)、何金海和杨松 (1992) 进一步研究了中高纬度 ISO 的特征, 指出北半球中高纬度 ISO 的纬向传播以西传为主, 又同季节、区域有关。西北太平洋是中低纬相互作用的地区, 因此, 在北半球夏季大气 ISO 在这一地区的分布和传播存在明显的地域性和复杂性 (Zhu et al., 1986)。

本文主要研究和揭示大气 ISO 对西太平洋台风移动路径的作用和影响, 热带地区与副热带地区大气 ISO 低频流场对西北太平洋台风路径有怎样的影响, 大气 ISO 的不同传播特征是否对台风路径产生不同的影响, 热带地区和副热带地区大气 ISO 的共同作用如何影响台风路径。

2 资料和方法

本文所用的主要资料主要包括: NCEP-NCAR 的再分析风场资料, 资料年代为 1979~2006 年, 水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 。台风资料取自美国联合台风预警中心 (Joint Typhoon Warning Center, 简称 JTWC) 1979~2006 台风最佳路径资料。该资料为每 6 小时台风 (TY) 中心位置和最大风速, 将 JTWC 发布的热带气旋风速大于或等于 34 m/s (64 kn) 的时间和位置定义为 TY 生成的时间和位置。

为了研究大气季节内振荡对西北太平洋台风路径的影响, 首先将台风路径进行划分, 传统的方法是将台风路径分为三种: 西移路径、西北移路径和转向路径。

西移路径 (图 1a): 台风从菲律宾以东一直向偏西方向移动, 经南海在华南沿海、海南岛或越南一带登陆。沿这条路径移动的台风, 对我国华南沿海地区影响最大。

西北移路径 (图 1b): 台风从菲律宾以东向西北偏西方向移动, 在我国台湾、福建一带登陆; 或从菲律宾以东向西北方向移动, 穿过琉球群岛, 在浙江一带登陆, 然后消失。沿这条路径移动的台风对我国华东地区影响最大。

转向路径: 台风从菲律宾以东向西北方向移动, 到达我国东部海面或在我国沿海地区登陆, 然后转向东北方向移动, 路径呈抛物线状。我们参考

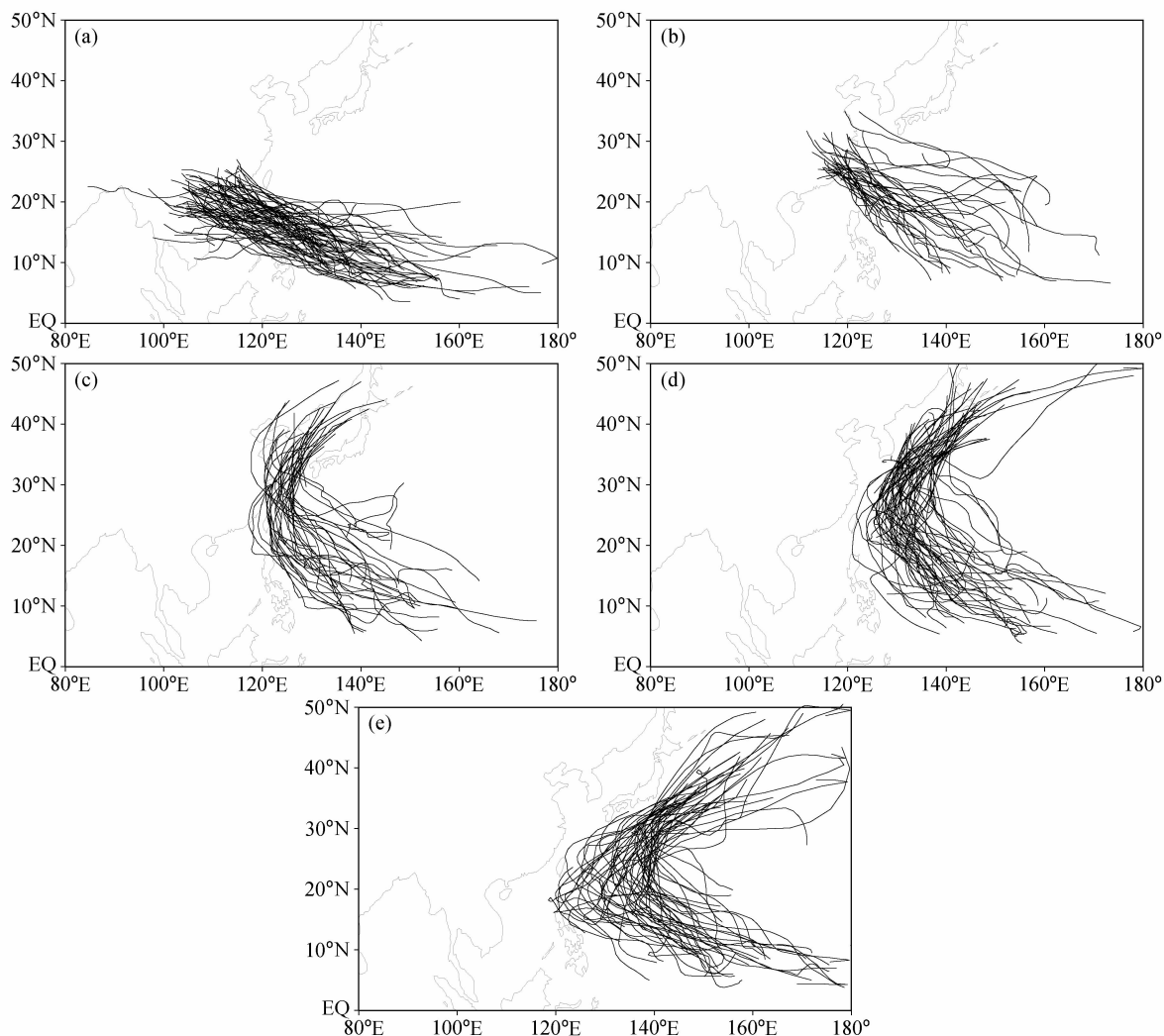


图1 各类型的台风路径: (a) 西移路径; (b) 西北移路径; (c) 日本以西型; (d) 日本登陆型; (e) 日本以东型

Fig. 1 Different types of typhoon tracks: (a) Straight west-moving typhoons; (b) northwest-moving typhoons; (c) typhoons recurving to the west of Japan; (d) typhoons landing in Japan; (e) typhoons recurving to the east of Japan

传统的划分方法, 将其中的转向路径按照其转向后的移动方向进行进一步划分, 分为: 日本以西型 (转向后向日本以西地区移动)、日本登陆型、日本以东型 (转向后向日本以东移动)。具体划分方法是: 如果台风在近海转向或在我国沿海地区登陆后转向, 转向后的移动方向在日本的西部就划为日本以西型 (图 1c); 如果台风转向后袭击日本, 则将其归为日本登陆型 (图 1d); 如果台风转向后向日本以东移动, 则归为日本以东型 (图 1e)。其中在划分时将一些台风进行了剔除, 剔除的台风包括热带低压系统从达到热带低压强度到消失的时间内活动范围始终在南海地区或者 140°E 以东地区的台风, 以及特殊路径的台风。

通过台风路径的月分布 (表 1) 可以看出 8 月

表 1 6~10 月 (台风季) 各类型路径台风的个数统计 (1979~2006)

Table 1 Statistics of typhoons for different types of tracks from Jun to Oct (1979 - 2006)

	西移型	西北移型	日本以西型	日本登陆型	日本以东型	总数
6 月	6	0	6	6	4	22
7 月	21	9	9	10	5	54
8 月	14	21	15	18	5	73
9 月	15	7	5	16	16	59
10 月	18	0	3	7	27	55
总数	74	37	38	57	57	263

台风生成数最多, 6 月最少。而整个台风季西移型路径的台风最多, 其次为日本登陆型和日本以东型。另外, 台风移动路径随月份有所不同, 西移路

径在 7 月最多；西北移型、日本以西型和日本登陆型的台风多发生在 8 月份，其中西北移动型的台风有半数以上生成在 8 月，并且 6 月和 10 月都没有此类型路径的台风；日本以东型的台风则主要生成在 10 月份，10 月份生成的数量占本类型总台风数的 47.4%。我们将表 1 中所列的不同路径台风分别进行合成分析，以揭示其对应的环流的普遍特征。合成时将台风生成的时间记为 0 天，之前的时间定为负，之后的时间定为正。

3 大尺度环流形势

在西北太平洋区域，由南半球东南信风越过赤道后转向而成的西南风与副热带高压脊南侧的东南气流交汇形成的季风槽（辐合带 ITCZ）区存在明显的气旋性涡度，它为台风的形成提供了有利的初始扰动场。很多研究表明（Ding and Reiter, 1984；刘舸等，2007），夏季西北太平洋台风的发生、发展

与热带辐合带之间有密切的关系。此外，叶英和董波（1998）指出热带气旋的活动与西太平洋副热带高压有着很好的关系。台风的活动路径也受西太平洋副热带高压南侧或西侧气流的牵引（陈联寿，1977；顾润源等，1993；胡春梅等，2005）。为了更清楚地比较不同路径台风的环流差异，我们分别给出了台风生成时对应的 850 hPa 风场和 500 hPa 高度场的合成结果。从不同路径合成场上可以看到，季风槽和副热带高压的位置和强度都对台风的生成以及路径有重要的作用。

西移路径（图 2a），在南海北部有闭合的气旋性环流，ITCZ 从南海北部向东南延伸到（5°N，150°E）附近，ITCZ 的西段基本是呈东西走向。西移路径的 500 hPa 位势高度场上（图 3a），西太平洋副热带高压呈带状分布，脊线位于 25°N 附近，西脊点伸到 120°E。0 天西风带气流比较平直（图略），未来 5 天（图略），这种大尺度环流背景基本

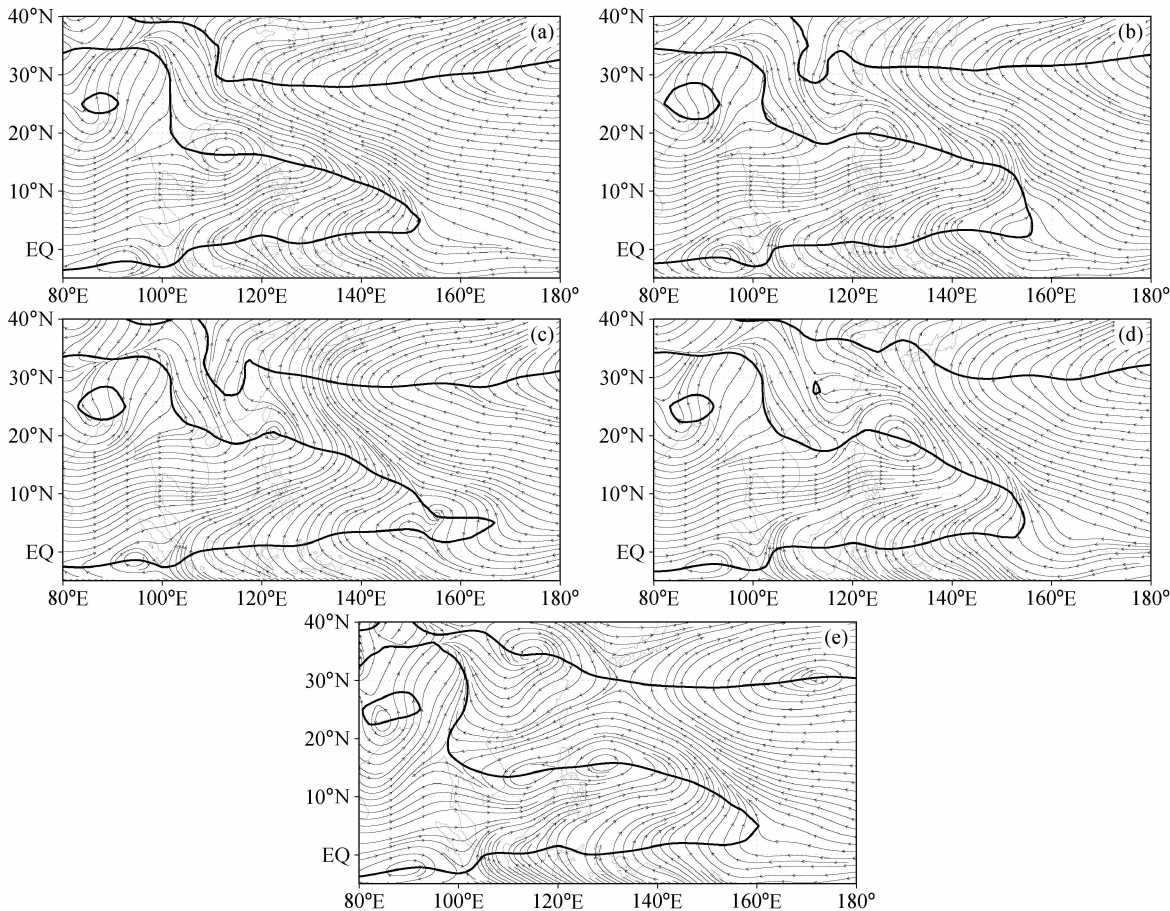


图 2 各路径台风生成时 850 hPa 合成风场（等值线表示纬向风 $U=0$ ），其余同图 1

Fig. 2 The composite streamline fields at 850-hPa when typhoons for different types of tracks formed. The contour is the line of zonal wind $U=0$. Other descriptions are the same as Fig. 1

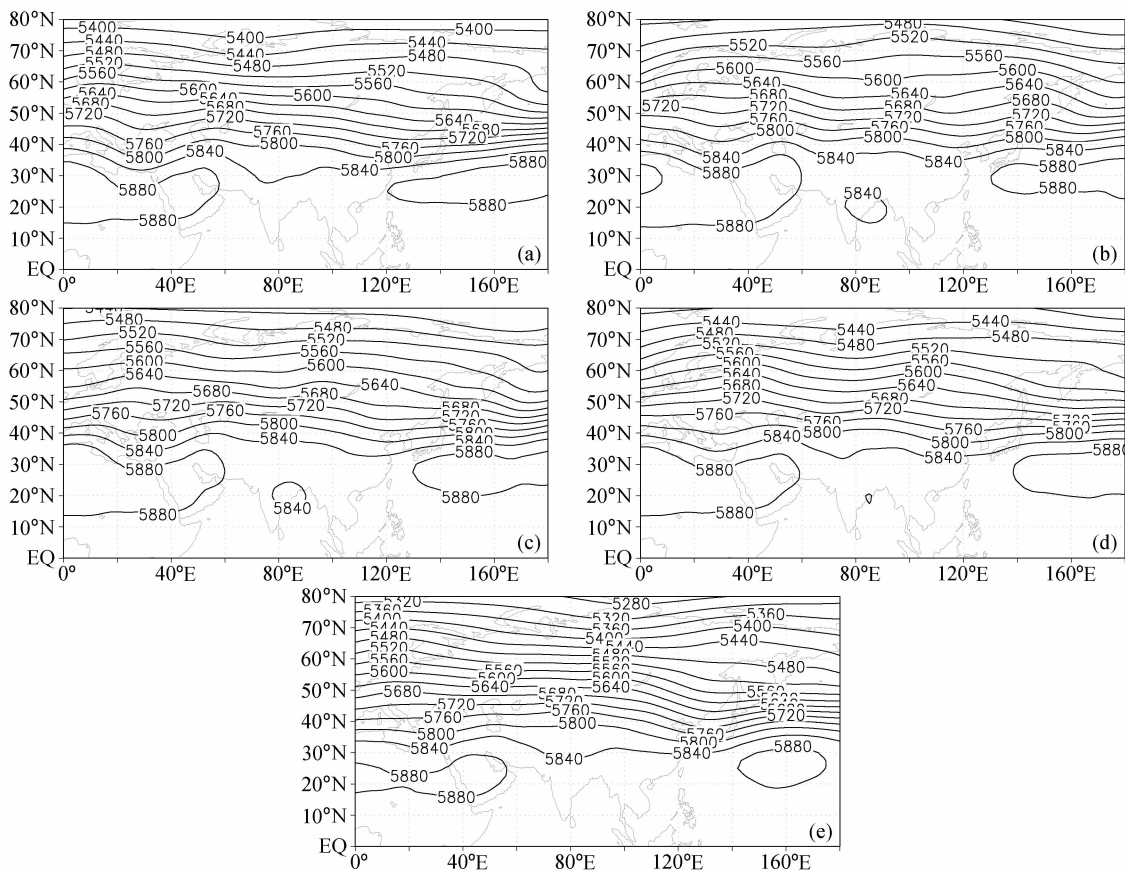


图 3 各路径台风生成时 500 hPa 位势高度合成图, 其余同图 2

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the composite geopotential height at 500 hPa

稳定少变, 此类台风沿着 ITCZ 北侧的东南气流在华南沿海登陆。

对应西北移路径的台风, 在菲律宾东北洋面上有一个气旋性环流, ITCZ 从菲律宾以北一直延伸到 155°E 附近, 季风槽的位置偏东, 主体位于 10°N ~ 20°N 之间 (图 2b), 同时副热带高压呈带状分布, 脊线位于 31°N 附近, 西脊点伸到 130°E 左右, 西风带气流比较平直 (图 3b), 未来 5 天 (图略), 副热带高压向西伸展, 在第 5 天西脊点伸到 124°E 左右, 此类台风随着副高的西伸在东南沿海登陆。

在日本西部型转向路径的台风合成的低层流场上 (图 2c), 菲律宾北面为一个闭合的气旋性环流, 但这个闭合性环流相对较弱, 季风槽从菲律宾北面延伸到 (5°N, 150°E) 附近, 季风槽西北东南向的倾斜加大。副热带高压的位置和强度与西北移路径的台风的形势相似, 西脊点位于 130°E, 但脊线偏南, 位于 27°N 左右。西风带经向度加大, 我国东部长波槽明显 (图 3c)。这种大尺度环流背景稳定少变

(图略), 此类路径台风受偏东的副热带高压西南侧引导气流的影响转向并向日本西部地区移动。

对于日本登陆型台风, 以 (20°N, 130°E) 为中心的菲律宾以东洋面为一个闭合的气旋性环流, 并且强度较强, 季风槽从这个气旋性环流向东南方向延伸到 (5°N, 155°E) 附近, 其西北东南向的倾斜最大, 而西太平洋副热带高压的位置偏东, 西脊点位于 (27°N, 138°E) 附近, 西风带形势与日本西部型类似 (图 3d), 在这种大尺度环流形势下, 台风在季风槽区或其北侧东南气流中生成后沿着东南偏南的引导气流向日本地区移动。

对于日本东部转向型, 副热带高压位于 140°E 以东, 强度较弱, 脊线位于 25°N 附近, 西风带东亚大槽明显, 贝加尔湖是一长波脊 (图 3e), 对应低层我国东部有一个闭合的反气旋中心, 在 12°N 附近的南海及菲律宾东部分别有闭合气旋性环流, 季风槽在 130°E 以西呈西南东北走向, 在 130°E 以东呈西北东南向倾斜, 并向东一直延伸到 (3°N, 160°E)

附近 (图 2e), 台风生成后朝副热带高压和大陆高压之间的鞍型区域移动, 然后沿着副热带高压西北侧的西北气流移动, 也就是日本东部地区移动。

可以说季风槽的位置和形态、副热带高压的位置和强度在很大程度上主宰了台风的活动。而且台风生成时的季风槽和副热带高压的形势往往将持续, 从而影响台风的移动。已有研究表明, 副热带高压具有低频变化特征, 大气低频振荡影响副热带高压的活动 (Yang and Li, 2003), 从而影响台风的路径。下面, 将对大气 ISO 的低频环流形势及其演变过程进行分析, 揭示大气 ISO 对西北太平洋台风路径的影响。

4 低频环流形势

将不同路径的台风按其生成日期进行大气环流

的合成分析, 用来分析不同台风路径的低频环流形势。

在合成图上, 与西移型台风对应的 850 hPa 低频环流形势 (图 4a) 主要表现为, 在南海及菲律宾海上空为一个异常的低频气旋性环流, 其北侧为一个异常的低频反气旋。在 10°N 附近从 80°E 向东到 155°E 都为异常的低频纬向东风, 而在 20°N~25°N 附近都为纬向的低频东风异常, 这两个大的风速带形成大范围的气旋性切变, 这种环流形势对季风槽有加强的作用, 从而有利于台风的生成。而低频气旋北侧的低频反气旋是副热带高压位置偏东的重要原因。因此, ISO 对西北太平洋台风活动存在调节作用。这种低频环流形势不仅有利于台风生成, 并且我国南海上空的低频气旋向东和向西分别延伸到菲律宾海和孟加拉湾, 台风生成后易于沿着这条正

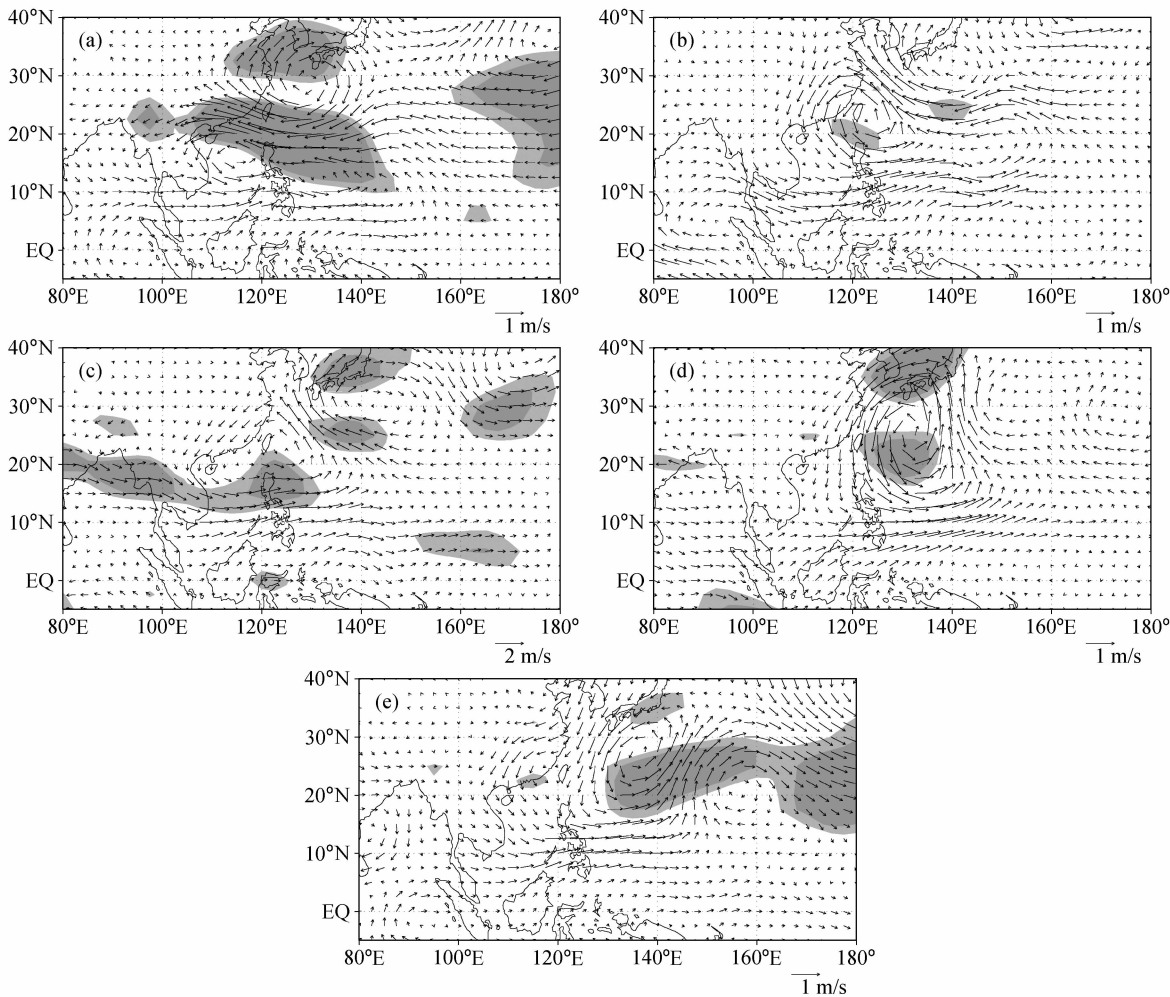


图 4 同图 2, 但为 850 hPa 低频流场合成图。浅、深阴影: 通过 95%、99% 信度检验的区域
Fig. 4 Same as Fig. 2, except for the composites of 30 - 60-day bandpass-filtered wind vectors at 850 hPa. Areas with 95% (99%) confidence level are light (darkly) shaded

涡度带向西移动,最终穿过南海在我国华南、海南或者越南一带登陆。

在西北移型台风合成的低频流场上(图 4b),在台湾岛及东海附近为一个低频气旋,低频气旋性涡度向东一直延伸到 160°E 附近,季风槽受这种低频环流形势的影响加强西伸,而低频气旋的东北侧为一个异常的低频反气旋。与在西行路径中南海到菲律宾海的低频气旋呈东—西走向不同,西北移型路径中低频气旋则成西北—东南走向,台风在加强的季风槽中生成后容易沿着这条西北—东南向的低频正涡度带移动,在我国东部沿海、台湾福建一带登陆。

日本以西型台风生成时(图 4c),我国东海地区是一个低频气旋,同时在黄海上空也存在一个较弱的低频气旋环流,另外,在 30°N 附近从 $130^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 为一个较大范围的低频反气旋。东海地区的低频气旋同样对季风槽有加强的作用,有利于台风的生成,同时东海北部及黄海上空的低频气旋环流使副热带高压在 $120^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 附近减弱,副高西脊主要影响到 130°E 附近,在这种低频环流形势下台风转向后向北沿着 130°E 以西的正的涡度区移动,其活动范围在日本以西地区。

对应日本登陆型台风生成时的 850 hPa 低频流场(图 4d),日本及其南侧($10^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{E}$) 范围内为一个大范围南北走向的低频气旋,它控制了从菲律宾海向北一直到日本的广大地区。大范围的低频气旋在菲律宾海地区的作用是使季风槽加强,另外,在副热带 145°E 以西地区的副高被明显减弱。因此,台风生成后向北沿着这个正的低频涡度区移动,最终在日本登陆。

日本以东移动型台风生成时(图 4e),日本东南侧的海上为低频气旋,并且呈东北—西南走向,其东侧沿 20°N 从 150°E 到 165°E 为一低频反气旋。台风生成转向后易于沿西北太平洋上这个东北—西南走向的低频正涡度区移动,形成日本以东移动型路径的台风。

总之,不管对于哪类路径的台风,其生成时在赤道附近从印度洋到 150°E 附近都为低频的西风异常,因此热带大气 ISO 的西风位相有利于台风的生成,这与目前已得到的结论相一致。另外,大气 ISO 将以低频气旋(低频反气旋)的形势影响台风的活动,低频气旋(低频反气旋)有利于(不利于)

台风活动。低频气旋位置及强度会改变季风槽的强度和影响范围,另外还可能会影响到副热带高压的位置和形态,从而对台风活动产生影响。尤其低频气旋上的正涡度是影响台风活动的重要因素,台风生成后会沿着这个低频的正涡度区移动,低频气旋性涡度极值线对台风路径有极好的预报作用。

另外,500 hPa 上也就是对流层中层低频环流形势和 850 hPa 相似(图略),都表现为不同的低频反气旋和低频气旋的位置关系,对台风的路径产生影响,低频的正涡度极值线对台风路径有很好的预报作用。

除此之外,通过对 200 hPa 低频流场进行分析,我们发现 200 hPa 的低频环流形势对台风的路径也有很好的指示作用。图 5 为各路径台风生成时 200 hPa 低频风场的合成图。

对于西移型路径的台风生成时(图 5a),在东亚大陆及其东侧沿海为一个大范围的低频反气旋,这个低频反气旋的南侧 20°N 附近为低频东风异常,从 130°E 向西一直延伸到 90°E 附近,因此,台风生成后会受到这个低频偏东气流的引导一直向西移动,形成西移路径台风。

西北移动型路径的台风生成时,200 hPa 低频风场上(图 5b)显著的环流形势是在我国的东海黄海上空为一个南北走向较狭长的低频反气旋,其西南侧为低频的东南风,我国台湾福建一带上空都受其控制,因此,台风生成后会受到这个低频东南气流的引导向西北方向移动,在我国台湾福建沿海一带登陆。

转向后向日本以西移动的台风(图 5c),生成时在西北太平洋上同样存在一个低频反气旋,只是位置更加偏东,其中心位置位于(35°N , 135°E) 附近,它西边的大陆上是一个较大的低频气旋。低频反气旋和低频气旋之间($120^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 为平直的偏南气流。因此,台风受这个偏南气流引导,形成日本以西移动型的台风。

日本登陆型台风生成时(图 5d),在副热带地区从东亚大陆到西北太平洋上空为低频反气旋—低频气旋—低频反气旋的低频波列形式,其中西北太平洋上的低频反气旋位于日本西南侧,呈西北东南走向。因此,台风受这个低频反气旋西侧偏南气流的引导,向偏北方向移动最终在日本登陆。

而日本以东型台风生成时(图 5e),最显著的

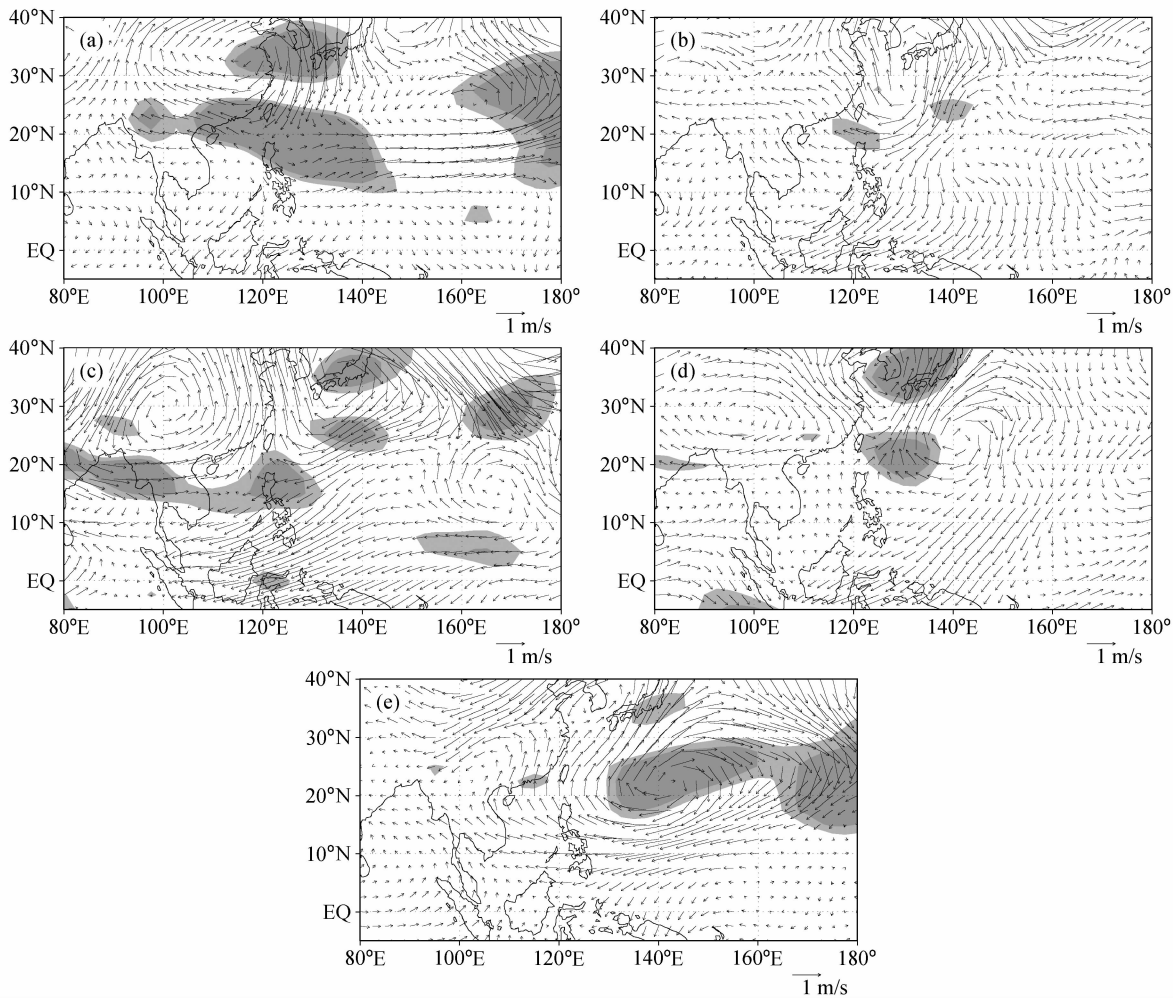


图5 同图4, 但为200 hPa低频流场合成图

Fig. 5 As in Fig. 4, except for composites of 30–60-day bandpass-filtered wind vectors at 200 hPa

低频形势是西北太平洋上空为大范围的低频反气旋, 其影响范围包含了从 $110^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ 的经度范围, 主要呈西西南东东北走向, 其西北侧是西南风异常并且主要位于日本以东地区, 因此台风生成后首先沿着西北太平洋上低频反气旋南侧偏东气流的影响, 偏东气流在 $130^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 附近开始转向, 转向为西南气流一直吹向日本以东的海域, 台风生成后也会受到这种气流的引导转向朝日本以东地区移动。

因此, 对于不同路径的台风, 200 hPa上都能看到一个显著的低频反气旋, 低频反气旋南侧和西侧的气流对台风的路径有一定的引导作用。而低频反气旋的位置、形态的差别会使得它南侧和西侧气流的方向以及影响范围有所不同, 从而对台风生成后的移动路径有不同的引导作用。

5 低频风场的演变过程

5.1 850 hPa 低频风场的演变过程

将不同路径的台风按其生成日期进行超前滞后回归, 用来分析不同台风路径低频环流形势的演变过程和大气ISO的传播特征。

对于西移型台风(图6), 超前15天南海和菲律宾海上空为东—西走向的低频反气旋, 它的北部是一个低频气旋, 随后此低频反气旋随时间开始减弱。超前10天菲律宾以东的赤道地区出现低频西风异常, 低频西风异常的北侧为一低频气旋。随着低频西风异常不断加强并向西偏北方向传播, 低频气旋也不断加强并且向西偏北方向移动。0天时低频西风异常向西传播到 80°E 附近, 此时低频气旋也向西控制了南海及菲律宾海上空的广大地区, 强

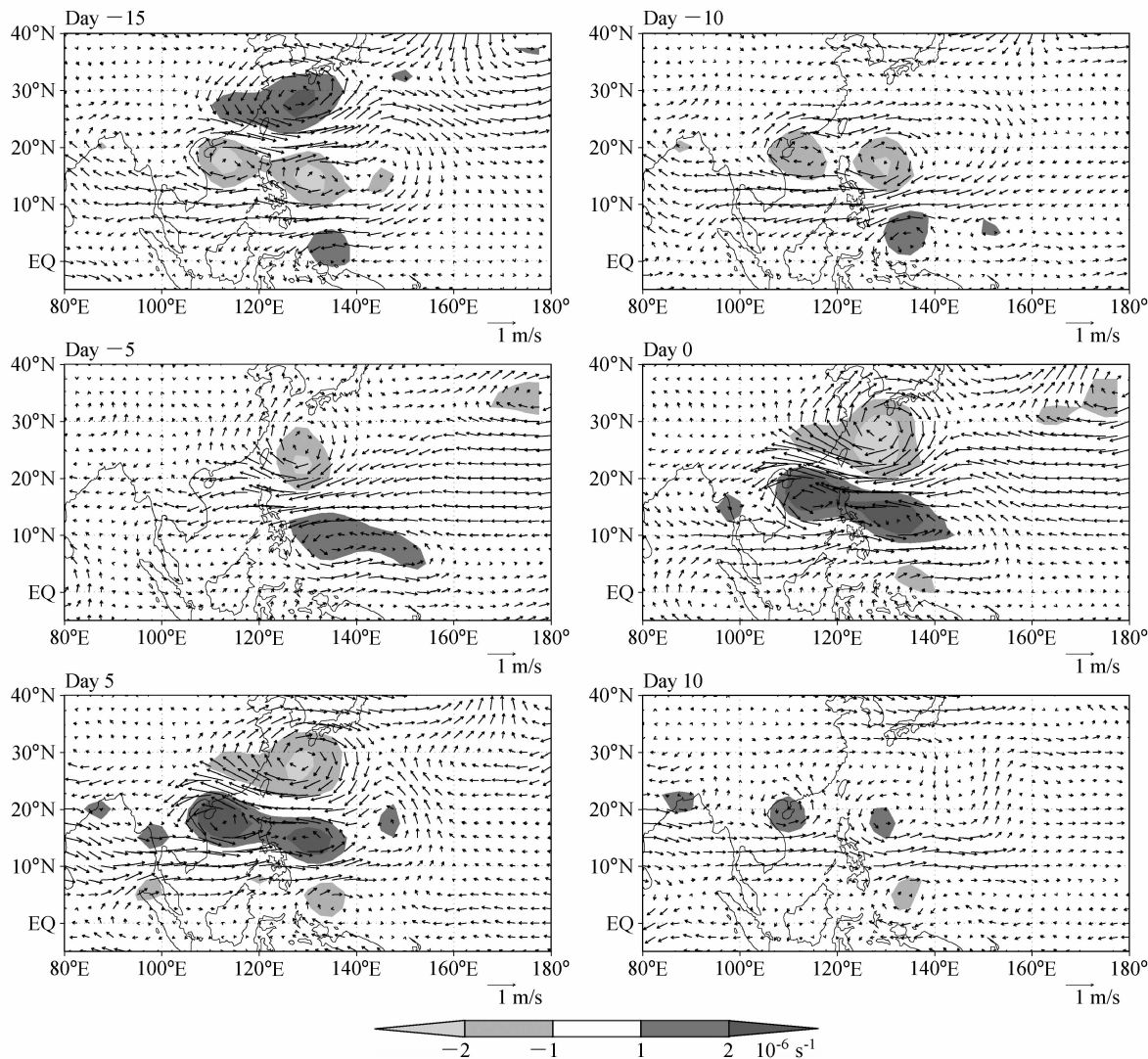


图6 西移型路径 850 hPa 低频风场超前滞后合成。阴影：低频涡度大于 $1\times10^{-6}\text{ s}^{-1}$ 或小于 $-1\times10^{-6}\text{ s}^{-1}$ 的区域
Fig. 6 The evolution of composites of bandpass-filtered 850-hPa wind anomalies and low-frequency vorticity (shading) for straight west-moving typhoons from day -15 (the 15th day before the typhoons formed) to day 10 (the 10th day after the typhoons formed) with 5 days interval. The regions that the low-frequency vorticity equals and is greater (less) than $1\times10^{-6}\text{ s}^{-1}$ ($-1\times10^{-6}\text{ s}^{-1}$) are shaded

度达到最强并呈东—西走向。低频气旋北侧的低频反气旋也向北移动到 30°N 附近。0 天和超前 15 天的低频形势几乎完全相反，大概为半个周期的过程。滞后 10 天，赤道以北新生成的低频反气旋开始加强向西偏北方向传播，而其北侧的低频气旋则减弱分裂为几个小的低频气旋。因此，与西移路径相对应的低频流场表现为热带大气 ISO 在菲律宾以东生成后向西偏北方向移动。

对于西北移路径的台风(图 7)，超前 15 天，低频西风异常首先在 $(5^{\circ}\text{N}, 140^{\circ}\text{E}\sim160^{\circ}\text{E})$ 附近生成，逐渐加强向西北方向传播，0 天时低频西风异

常和其北侧低频气旋均达到最强。该低频气旋呈西北—东南走向，控制我国福建、台湾地区，台风生成后沿这个西北—东南走向的正涡度带朝西北方向移动，多在台湾福建一带登陆我国。另外值得注意的是，在副热带地区存在大气 ISO 以波列形势的向西传播。超前 15 天时，西北太平洋副热带地区自西向东为低频气旋—低频反气旋—低频气旋的形势，其中低频反气旋位于 150°E 附近，这个低频波列逐渐向西传播，0 天时低频反气旋向西移动到 140°E 附近，刚好位于热带地区向北传播的低频气旋的北侧，也就是说热带 ISO 与副热带 ISO 的位相

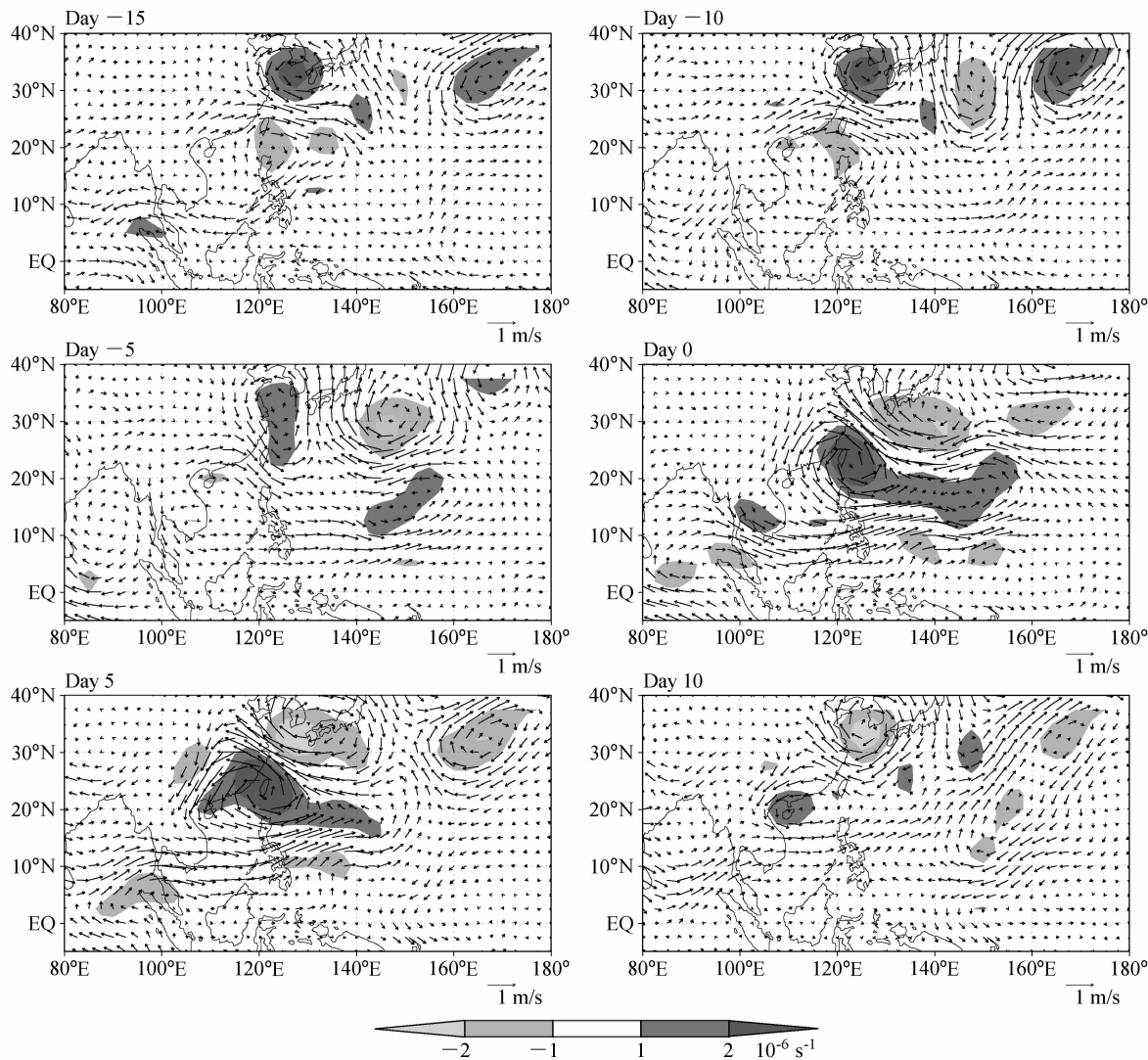


图 7 同图 6，但为西北移型
Fig. 7 As in Fig. 6, except for northwest-moving typhoons

相反，副热带地区西传过来的低频反气旋抑制了热带地区向北的低频气旋的继续北传，使其形成西北—东南走向，从而对台风的移动路径产生影响。滞后 5 天低频东风异常开始在 (5°N, 140°E~160°E) 附近生成，逐渐向西北方向传播。因此对于西北移路径的台风，热带与副热带地区的大气 ISO 的共同作用对台风路径产生影响。热带大气 ISO 在纬向上有西传分量，经向上表现为北传的特征，同时副热带大气 ISO 也以波列的形势向西传播，但是热带和副热带大气 ISO 的位相相反，因此北传的分量受到抑制，在这种作用下的低频环流形势使得台风生成后易于朝西北方向移动，最终在我国台湾、福建一带登陆。

日本以西型 (图 8) 台风生成前 15 天，低频西风异常在 (5°N, 80°E) 附近及菲律宾以东 130°E~140°E 附近同时生成，两个区域的低频西风异常分别向东和向西传播，在超前 5 天汇合于 120°E 附近，使西风异常得到显著加强并向北传播。另外，西北太平洋上副热带地区大气 ISO 也以波列的形势向西传播。副热带地区的低频反气旋从超前 15 天时位于 170°E 附近，到超前 5 天时已经向西移动到 140°E 附近。可以看出副热带大气 ISO 与热带大气 ISO 的位相也是相反的，但由于热带地区的大气 ISO 是由赤道印度洋地区和菲律宾以东地区汇合向北，其向北传播的强度较强，副热带地区西传的低频反气旋的抑制作用有限，纬向西风异常最北

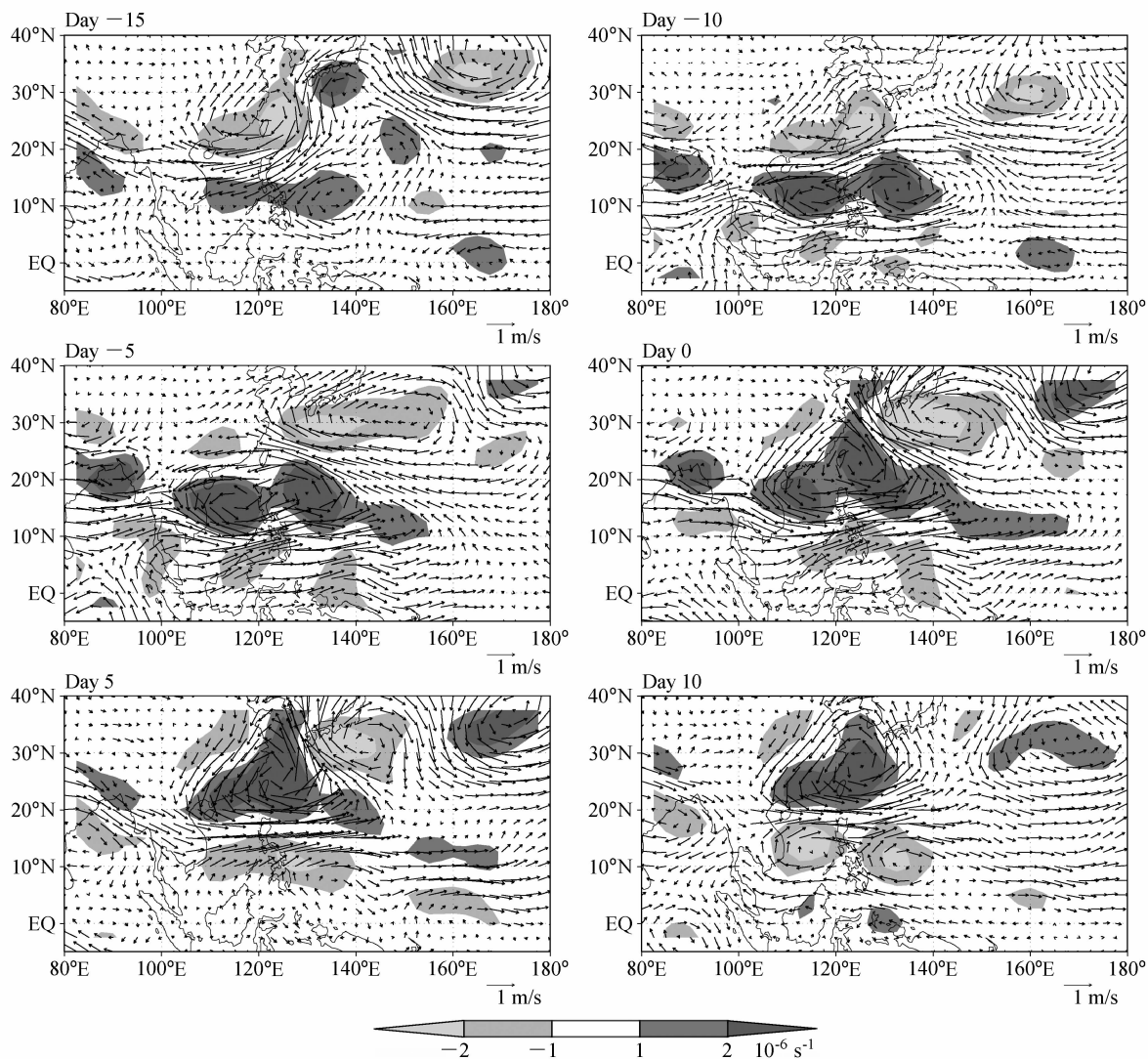


图 8 同图 6, 但为日本以西型

Fig. 8 As in Fig. 6, except for typhoons recurring to the west of Japan

可以影响到 20°N 附近, 我国东部地区都处在低频气旋的控制下, 台风登陆后转向, 或者在沿海地区转向, 最后在朝鲜半岛登陆。超前 10 天和滞后 10 天的环流形势相反。因此, 对于日本以西型台风路径, 热带地区源于印度洋及菲律宾东部的大气 ISO 以及副热带地区大气 ISO 都有重要贡献, 热带地区源于东西两个方向的低频西风异常的汇合使得北传加强, 副热带地区大气 ISO 对北传的抑制作用有限, 使得低频气旋在我国东海及南海上空存在, 对台风的路径产生影响。

对于日本登陆型台风 (图 9), 超前 15 天的低频西风异常首先在菲律宾以东的赤道附近生成, 之后逐渐向西向北传播, 超前 5 天时向西传播到 80°E

附近。菲律宾低频西风异常北侧的低频气旋不断加强向北移动。同时, 副热带地区大气 ISO 也以低频波列的形势向西传播。副热带地区西传 ISO 和热带地区北传 ISO 的位相相同, 0 天时热带向北的低频气旋和副热带的低频气旋合并为一个强度强、影响范围大的低频气旋, 控制着日本以南的大范围海上地区, 使得台风沿着这个大的正涡度异常区向北登陆日本。滞后 5 天低频东风异常开始在 140°E 附近的赤道地区生成。因此, 与日本登陆型台风相联系的大气 ISO 传播形势表征为热带地区的纬向西传和经向北传, 在副热带地区为大气 ISO 的向西传播, 并且热带地区的经向北传与副热带地区的纬向西传位相相同, 在日本南部形成大范围的低频气

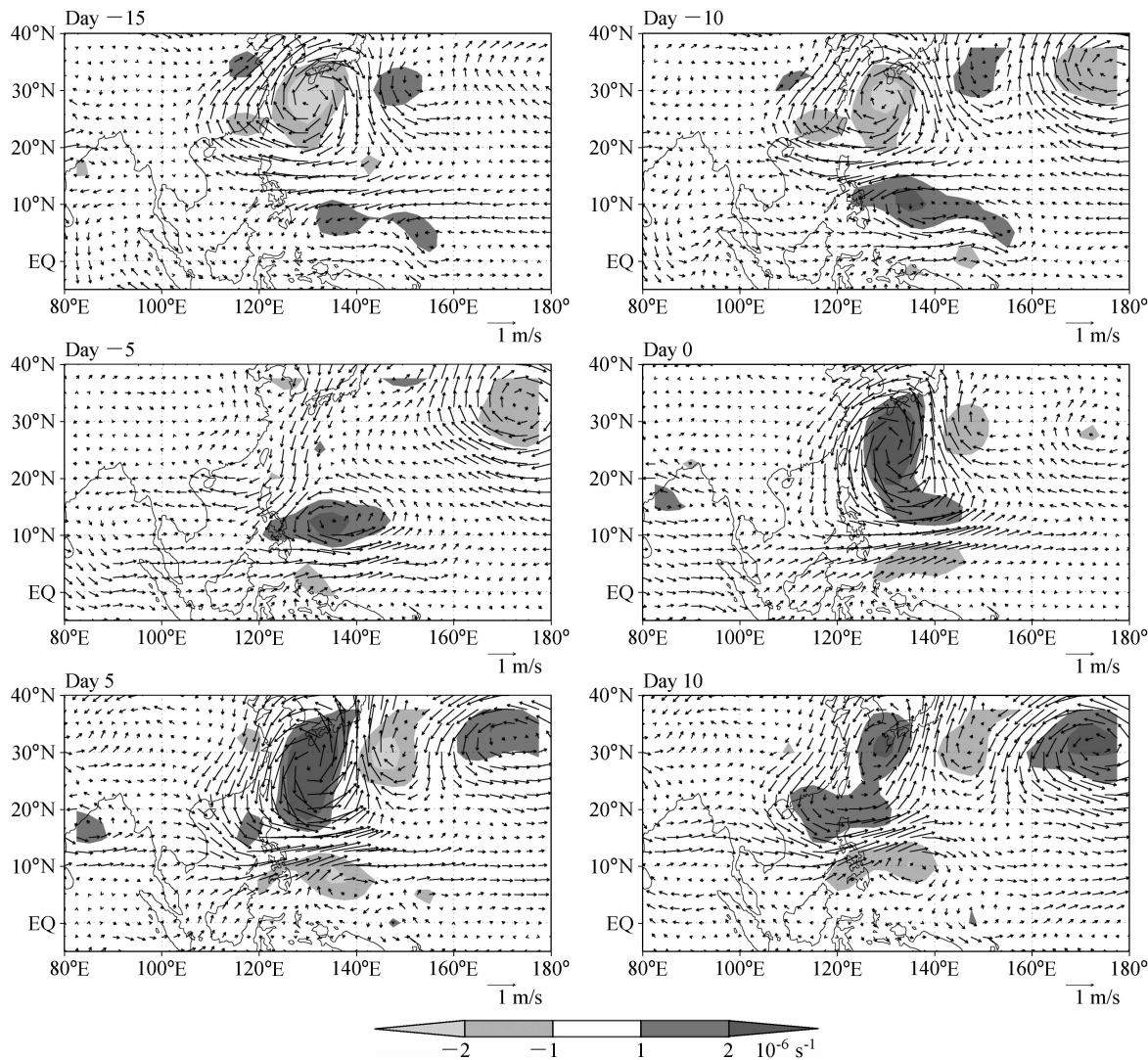


图 9 同图 6，但为日本登陆型
Fig. 9 As in Fig. 6, except for typhoons landing in Japan

旋，影响台风的移动。与前面的台风路径类型相比，对日本登陆型台风副热带大气 ISO 似乎起着更为重要的作用。

与日本以东型台风路径相关的低频流场的演变形势表明（图 10），大气 ISO 的传播以东传为主要特征。低频西风异常首先在 80°E 附近生成，沿 10°N 向东传播，超前 10 天左右向东传播到菲律宾以东地区，并在该地区低频西风异常的北侧形成一个低频气旋。随后低频西风异常持续加强并向东传播，伴随着其北侧的低频气旋也不断加强东移。在 0 天时低频气旋位于日本东侧，强度达到最强并存在东北—西南向的倾斜，滞后 5 天时倾斜更加明显，在日本东侧形成东北—西南走向的正涡度带，使得台

风转向后易于朝这个正涡度带也就是日本东侧移动。因此对应于热带大气 ISO 的纬向东传，台风生成转向后容易朝日本以东移动。对于日本以东型台风路径来讲，副热带大气 ISO 的影响也起着更为重要的作用。

因此，大气 ISO 的不同传播形势对台风的路径有着重要的作用。首先，菲律宾以东地区的低频西风异常北侧为低频气旋，低频气旋的正涡度异常对季风槽有加强的作用，另外，低频气旋的影响范围和强度不仅对季风槽的强度形态有作用，还会对副高的形态位置有影响，从而对台风的路径产生影响。而低频气旋的影响范围和强度则取决于热带 ISO 的经向北传的强度和向北影响的范围。对于菲

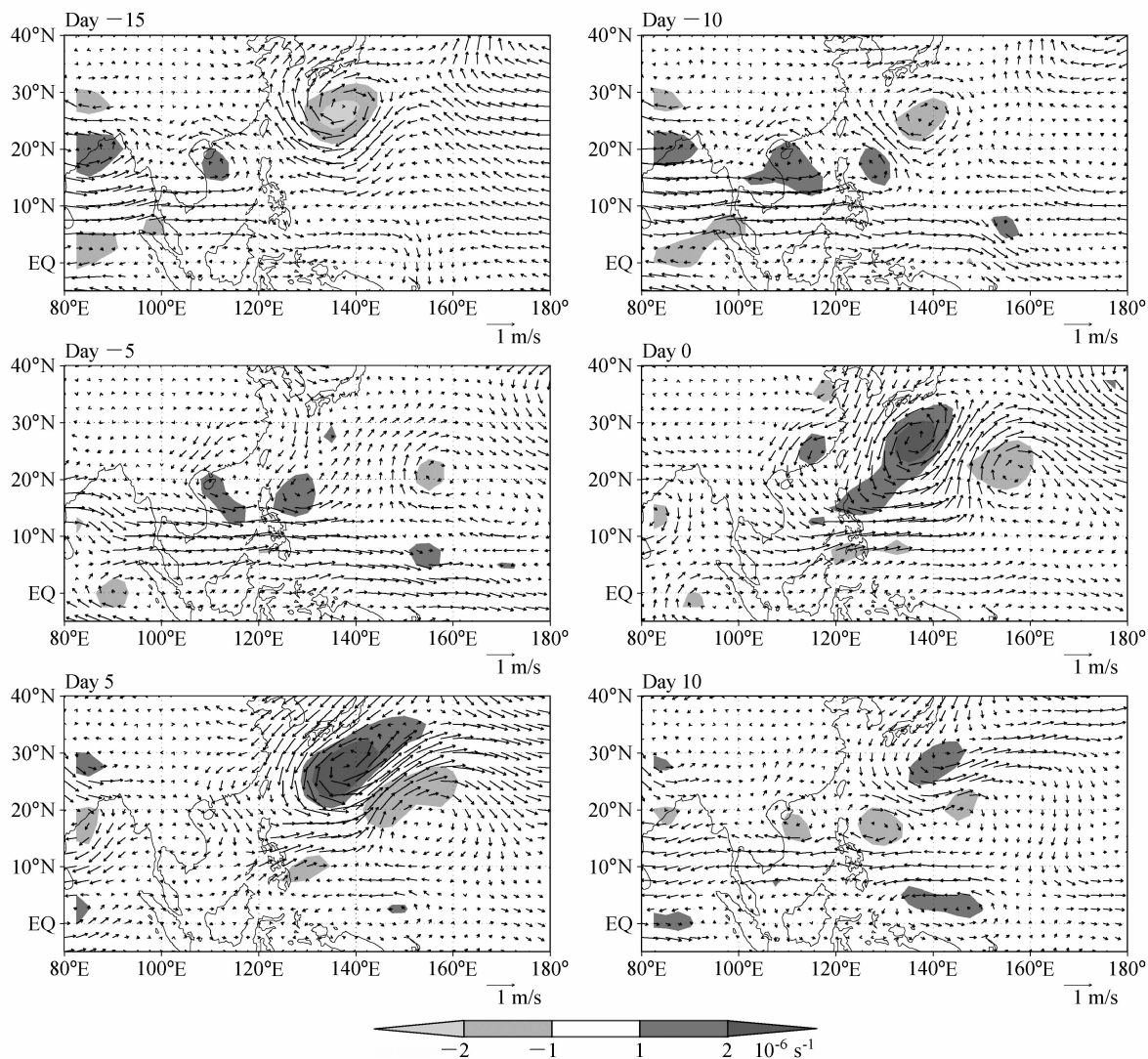


图 10 同图 6, 但为日本以东型

Fig. 10 As in Fig. 6, except for typhoons recurving to the east of Japan

律宾以东生成的大气 ISO 向西偏北方向传播时, 台风易于沿西移路径移动; 而源于印度季风区向东传播的大气 ISO, 会使台风易于转向, 并且转向朝日本以东移动。如果热带大气 ISO 向北传播时副热带也存在低频波列的西传, 那么, 台风的路径就受热带和副热带大气 ISO 的共同作用: 当它们位相反时, 热带 ISO 的低频气旋北传受到抑制, 如果热带北传 ISO 较强 (源自赤道印度洋向东传播的 ISO 和菲律宾以东向西传播汇合向北), 副热带的 ISO 对热带 ISO 北传的抑制作用有限, 台风易于在登陆后转向, 或者在沿海地区转向, 最后在朝鲜半岛登陆, 否则台风更易于沿西北移动型路径移动。另外, 当热带北传 ISO 与副热带地区西传 ISO 位相相同时,

低频气旋会合并加强, 使台风易于在日本登陆。

对比大气 ISO 活动影响不同台风路径型的情况, 似乎有这样的结果: 对于西移路径和西北移路径, 热带大气 ISO 的影响起着更为重要的作用, 而对于日本登陆型和日本以东型路径, 副热带大气 ISO 的影响起着更为重要的作用。

500 hPa 低频环流的演变过程及传播特征与 850 hPa 情况类似 (图略)。

5.2 200 hPa 低频风场的演变过程

通过前面的分析我们已经知道 200 hPa 的低频流场对台风的移动有一定的指示作用。西移路径台风的移动是受到东亚地区上空的 LFCA 南侧气流的影响, 从图 11 上可以发现此低频反气旋首先出

现在超前 15 天的 80°E 附近，随着时间不断向东移动并加强，0 天时中心位置向东移动到 110°E~120°E，35°N 附近，之后位置较为稳定但强度逐渐加强，到滞后 5 天时强度达到最大，随后逐渐减弱。

西北移动型台风（图 12）同样也受到 200 hPa 上低频反气旋西侧和南侧低频气流的引导。在超前 15 天的时候，在副热带地区主要有 2 个低频反气旋，两个低频反气旋之间是一个低频气旋，随着时间的变化，这两个低频反气旋分别向东和向西南移动，在 0 天时合并在一起并且强度达到最大，位置大概在我国东海和黄海上空，台风生成后则受这个低频反气旋西南侧的东南气流的影响，使其在我国台湾、福建、浙江一带登陆。之后这个低频反气旋逐渐减弱，其两侧的低频气旋分别向东向西移动，

滞后 10 天的低频流场形势与超前 15 天相反，之间大概为半个周期的过程。

日本以西移动型台风（图 13）生成前 15 天在 30°N~40°N 附近的 80°E~180°存在低频波列的形式，从西到东分别为低频气旋、低频反气旋、低频气旋、低频反气旋。随后，位于日本上空的低频气旋减弱消失，而其东侧和西侧的低频反气旋则分别向西和向东移动，在 0 天时合并在一起，控制着从 120°E 到 170°E 的广大地区，而台风则受到其西南侧转向气流的影响，转向后向日本以西及以西地区移动。因此，与日本以西型台风相联系的 200 hPa 的低频活动表现为副热带地区东西方向低频反气旋的合并加强。

日本登陆型台风（图 14）在其生成前 15 天时，

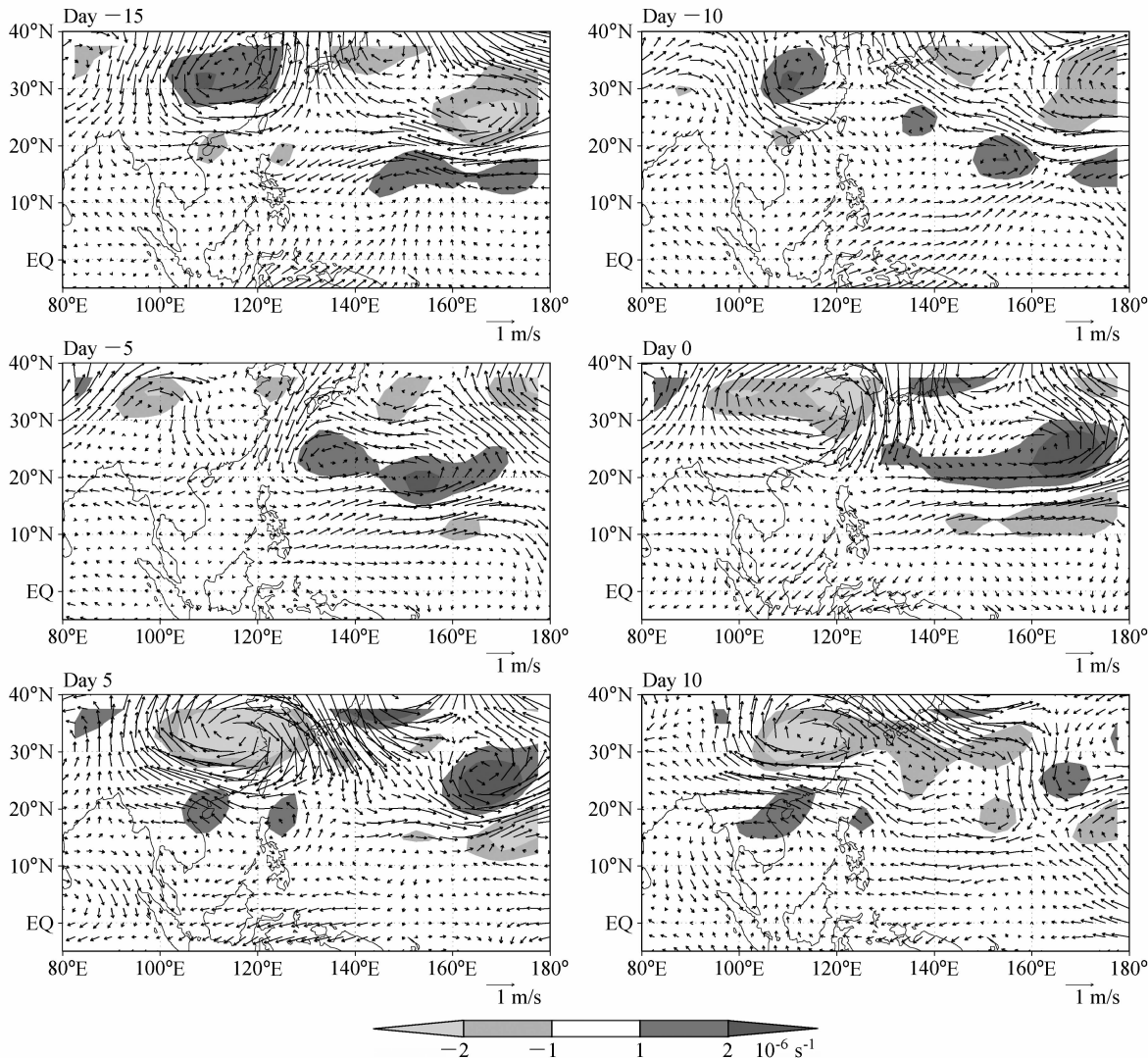


图 11 同图 6，但为 200 hPa 低频风场
Fig. 11 As in Fig. 6, except for 200 hPa

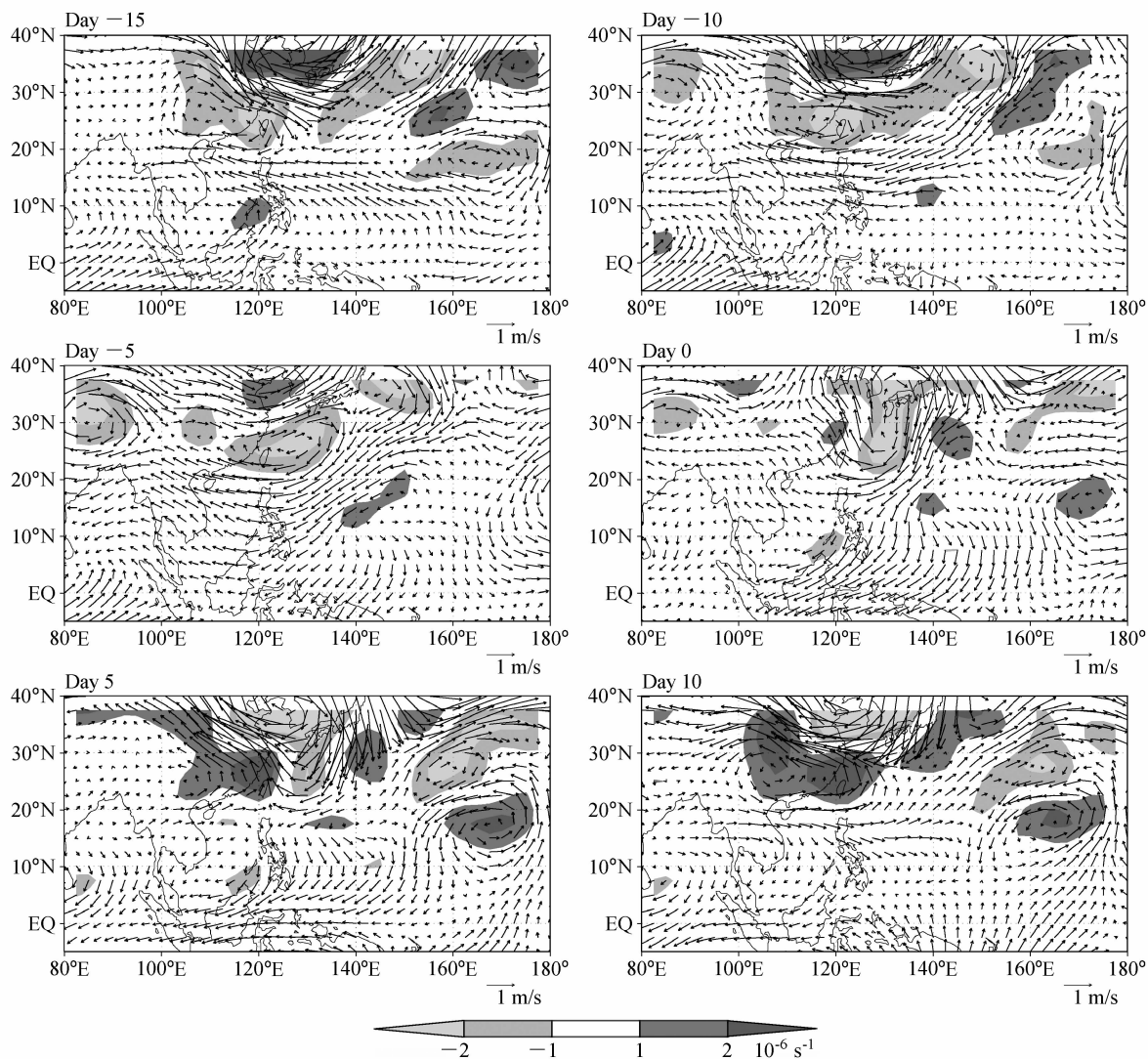


图 12 同图 7, 但为 200 hPa 低频风场

Fig. 12 As in Fig. 7, except for 200 hPa

在 25°N 以北的副热带地区从西到东为低频气旋、低频反气旋、低频气旋的波列的形式, 而 ($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $160^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 则为一个低频反气旋区, 副热带地区的低频波列随时间逐渐减弱, 同时热带西太平洋上的低频反气旋不断加强并向西北方向移动, 在 0 天时向西北移动到日本岛南侧, 因此台风沿着其西侧的西南气流移动最终在日本登陆。滞后 5 天的低频环流形势和超前 15 天相反, 大概为半个周期, 这个周期为 40 天左右。

日本以东型台风 (图 15) 同样是受到一个低频反气旋的影响, 而此低频反气旋是源于超前 15 天的赤道印度洋, 低频反气旋首先在赤道以北的赤道印度洋附近生成, 逐渐向东移动, 在超前 5 天时已

经向东移动到南海和菲律宾海上空, 之后继续向东移动并且强度迅速加强, 在 0 天时达到最强, 并且位置偏南偏东, 之后继续向东移动, 但强度开始减弱。于是, 台风生成后受这个低频反气旋影响转向后向日本东侧移去。

总的来讲, 台风的路径还受到 200 hPa 低频流场的影响。而 200 hPa 上低频流场的传播方向和 850 hPa 的情况既有相同的地方又有差别。与西移路径型台风相联系的 200 hPa 低频活动的传播方向主要表现为中纬度地区 80°E 附近的低频反气旋的向东传播。与西北移动型台风相联系的 200 hPa 低频活动是在 $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 存在东、西两个低频反气旋的合并, 而日本以西型也是东、西两个低频反气

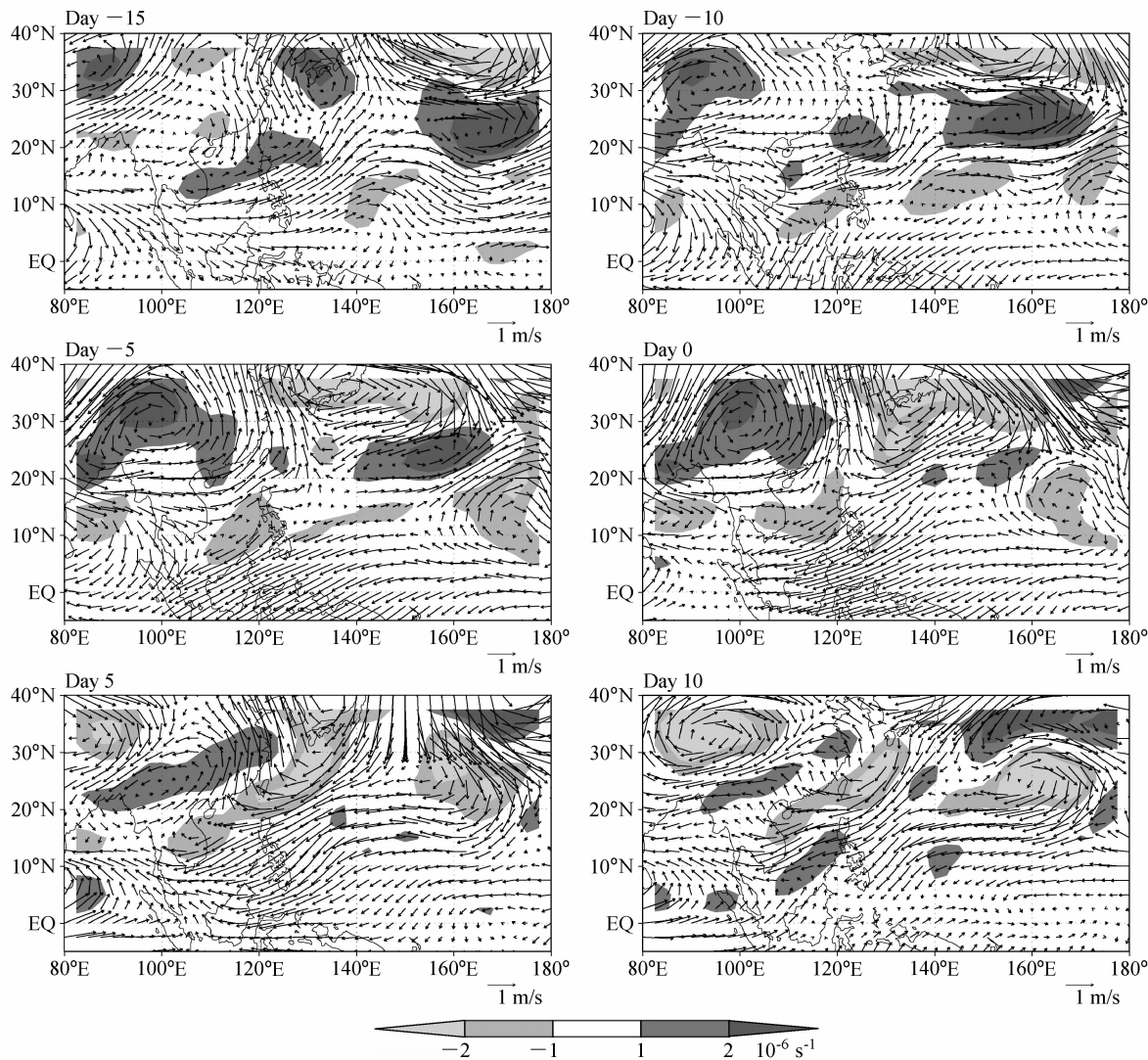


图 13 同图 8，但为 200 hPa 低频风场
Fig. 13 As in Fig. 8, except for 200 hPa

旋的合并，但其位置偏北位于 30°E~40°E 之间。对于日本登陆型台风，200 hPa 副热带的低频波列活动较弱，热带地区 140°E 以东低频反气旋的向西北方向移动起重要作用。对于日本以东型路径，主要是受到源自赤道印度洋向东传播的大气低频反气旋的影响。

6 总结和讨论

本文研究了大气季节内振荡低频环流形势及其演变过程对台风路径的影响。按照台风移动路径将其划分为 5 种类型，并用合成分析的方法分析了不同台风路径时低频流场的形势及其演变过程，指出大气 ISO 不同传播形势对台风路径有重要影响。

分析表明，大气 ISO 在对流层低层到中层以低频气旋或低频反气旋的形式影响台风活动，低频气旋上的气旋性涡度的极值线对台风路径有很好的预报意义。低频气旋（相对于 ISO 西风异常即正位相）由于其正涡度异常会在热带地区使季风槽东伸，并对副热带地区的副热带高压也有影响，会使副高减弱东退，因此有利于台风活动，相反低频反气旋则不利于台风活动。低频气旋不仅有利于台风的生成，其上的正涡度带走向往往预示着台风的未来走向。低频气旋的位置和强度除与热带大气 ISO 的传播有关外，副热带大气 ISO 也有重要作用，从而对台风的移动路径产生影响。具体表现为：热带大气 ISO 从菲律宾东部生成后向西北偏西方向移

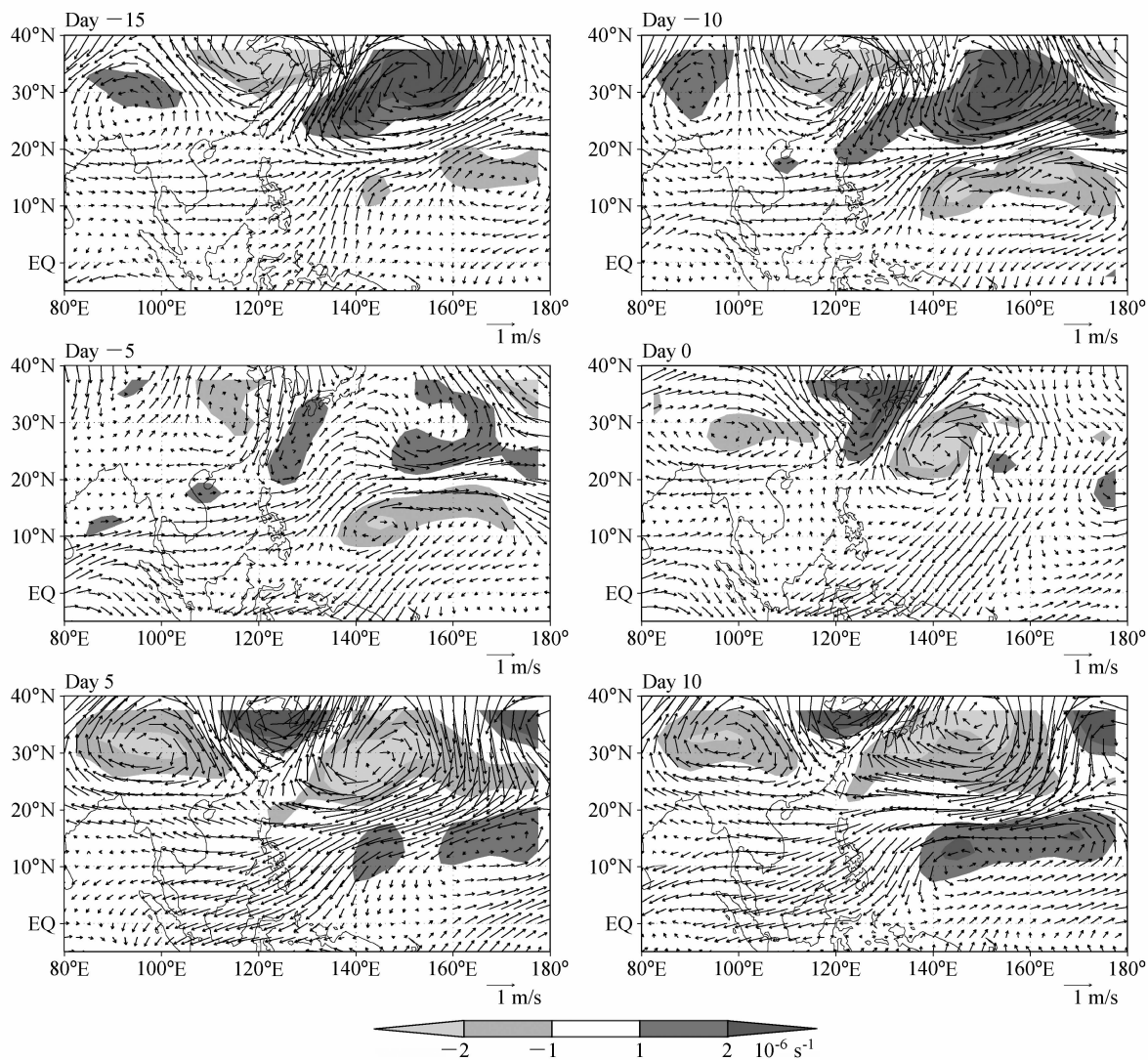


图 14 同图 9, 但为 200 hPa 低频风场
Fig. 14 As in Fig. 9, except for 200 hPa

动, 在南海及菲律宾海上空形成一个东—西走向的低频气旋, 使得台风生成后容易向西移动, 最终在我国华南地区、海南或越南一带登陆。热带大气 ISO 从菲律宾东部生成后向西北方向移动, 如果此时副热带大气 ISO 以波列形势向西传播, 并且其位相与热带 ISO 北传位相相反, 则低频气旋的北传受到抑制, 影响范围在我国东海地区, 台风易于沿西北型路径移动。如果热带大气 ISO 除由菲律宾向西移动外还存在从印度洋附近的向东传播, 那么来自两个方向的大气 ISO 在菲律宾附近汇合, 北传得到加强, 虽然副热带地区 ISO 位相相反, 但对低频气旋北传的抑制有限, 低频气旋向北可以影响到黄海地区, 在此种形势下台风易于取日本以西型路径

移动。另外, 当热带地区北传 ISO 与副热带向西传播 ISO 位相相同时, 低频气旋在日本南部汇合加强, 台风易于在日本登陆; 如果热带大气 ISO 从赤道印度洋附近生成后向东移动, 当纬向西风异常传播到菲律宾附近会生成一个低频气旋, 低频气旋继续向东加强移动会在日本东南部地区呈东北—西南向倾斜, 使得台风容易朝日本以东移动。对比大气 ISO 活动影响不同台风路径型的情况, 可以初步认为对于西移路径和西北移路径, 热带大气 ISO 的影响起着更为重要的作用; 对于日本登陆型和日本以东型路径, 副热带大气 ISO 的影响起着更为重要的作用。何金海和杨松 (1992) 发现东亚 120°E~140°E 地区是一个纬向传播的转换带, 这种转换带

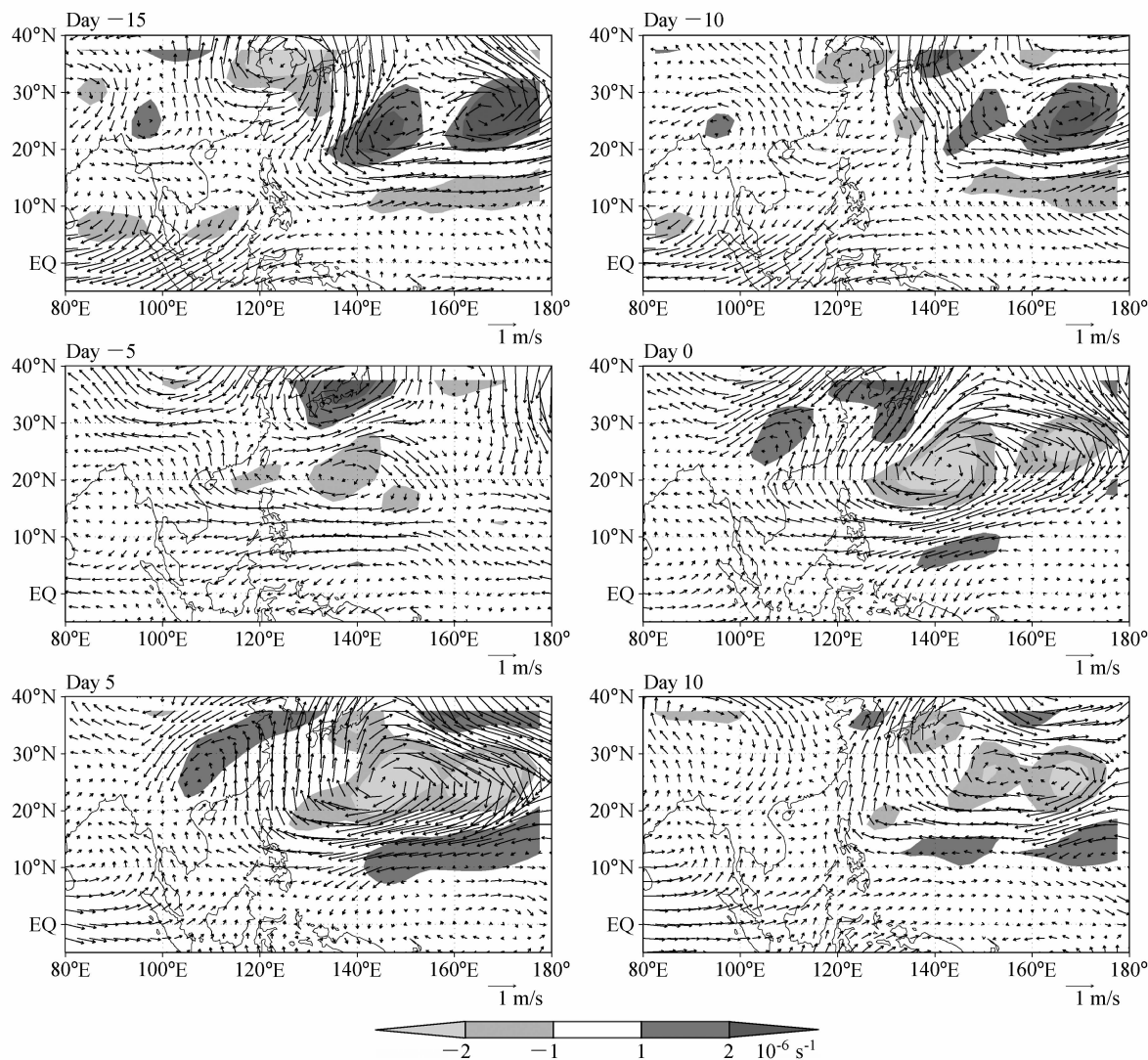


图 15 同图 10，但为 200 hPa 低频风场
Fig. 15 As in Fig. 10, except for 200 hPa

是经向传播或中低纬相互作用的通道。因此，热带和副热带大气季节内振荡在 120°E~140°E 的相互作用是存在的。

另外，对流层上层 200 hPa 的低频环流形势对台风的路径也有一定的指示作用。在台风生成时，200 hPa 在我国大陆或沿海或西北太平洋上空有一个低频反气旋，它的位置意味着上层引导气流的方向，对台风的路径也有一定的指示作用。如果低频反气旋的位置偏西位于我国大陆上空，台风则一直沿其南侧的偏东气流向西移动成为西移路径型台风；如果低频反气旋位于我国东海上空台风则易于沿着其西南侧的东南气流向西北移动成为西北移型台风；而如果低频反气旋的中心位置位于日本岛上

空，因此日本以西地区为较平直的偏南气流，台风则更倾向于转向后超日本以西及以西移动；如果低频反气旋的位置更偏东一些，其西侧偏南气流直接吹向日本岛，受其影响台风更易于日本登陆；如果低频反气旋主体都位于日本以东，则台风转向后易于超日本以东地区移动。除此之外，200 hPa 低频的传播也表现出复杂的形式，在中纬度副热带地区可能存在 80°E 附近低频活动向西传播和北太平洋上的向东传播。另外，在热带地区也可能有低频活动在北太平洋上向西北方向的传播，或者源于赤道印度洋的低频活动向东传播。

大气 ISO 的环流场对台风路径起着重要作用，我们可以将大气 ISO 的环流场作为台风路径预报

依据之一。

参考文献 (References)

- Anderson J R, Rosen R D. 1983. The latitude-height structure of 40–50 day variation in atmospheric angular momentum [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40 (6): 1584–1591.
- Bessafi M, Wheeler M C. 2006. Modulation of south Indian Ocean tropical cyclones by the Madden-Julian oscillation and convectively coupled equatorial waves [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134: 638–656.
- Carr L E III, Elsberry R L. 1995. Monsoonal interactions leading to sudden tropical cyclone track changes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (2): 265–290.
- Chan J C L. 2005. Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 89: 143–152.
- 陈联寿. 1977. 台风研究和预报问题的评述 [J]. *大气科学*, 1 (2): 138–148. Chen Lianshou. 1977. A review of the present status of the research and forecasts of typhoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1 (2): 138–148.
- Chen L X, Xie A. 1988. Westward propagation low frequency oscillation and its teleconnections in the eastern hemisphere [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 2 (3): 300–312.
- Chen T C, Murakami M. 1988. The 30–50 day variation of convective activity over the western Pacific Ocean with the emphasis on the northwestern region [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116 (4): 892–906.
- Chen T C, Weng Shuping, Yamazaki N, et al. 1998. Interannual variation in the tropical cyclone formation over the western north Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126: 1080–1090.
- 丁一汇, 莱特 E R. 1983. 影响西太平洋台风形成的大尺度环流条件 [J]. *海洋学报*, 5 (5): 561–574. Ding Yihui, Wright E R. 1983. The large scale circulation condition for the western Pacific typhoon genesis [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 5 (5): 561–574.
- Ding Yihui, Reiter E R. 1984. Large-scale circulation conditions affecting the typhoon formation over the Northwest Pacific [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 3 (3): 327–338.
- Emanuel K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years [J]. *Nature*, 436: 686–688.
- Ferranti L, Palmer T N, Molteni F, et al. 1990. Tropical-extratropical interaction associated with the 30–60 day oscillation and its impact on medium and extended range prediction [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 2177–2199.
- Gray W M. 1979. Hurricanes: Their formation, structure, and likely role in the tropical circulation [M]// Shaw D B. *Meteorology over the Tropical Oceans*, Royal Meteorological Society, 155–218.
- 顾润源, 朱官忠, 李振海, 等. 1993. 影响我国的不同路径台风的对比分析 [J]. *山东气象*, 2: 4–8. Gu Runyuan, Zhu Guanzhong, Li Zhenhai, et al. 1993. Comparative analysis of different typhoon tracks influencing China [J]. *Journal of Shandong Meteorology* (in Chinese), 2: 4–8.
- Hall J D, Matthews A J, Karoly D J. 2001. The modulation of tropical cyclone activity in the Australian region by the Madden-Julian oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (12): 2970–2982.
- Harr P A, Elsberry R L. 1991. Tropical cyclone track characteristics as a function of large-scale circulation anomalies [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 1448–1468.
- 何金海, 杨松. 1992. 东亚地区低频振荡的经向传播及中纬度的低频波动 [J]. *气象学报*, 56 (2): 190–198. He Jinhai, Yang Song. 1992. Meridional propagation of East Asian low-frequency mode and midlatitude low-frequency waves [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 56 (2): 190–198.
- Hendon H H, Liebmann B. 1990a. A composite study of onset of the Australian summer monsoon [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 2227–2240.
- Hendon H H, Liebmann B. 1990b. The intraseasonal (30–50 day) oscillation of the Australian summer monsoon [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 2909–2924.
- 胡春梅, 端义宏, 余晖, 等. 2005. 华南地区热带气旋登陆前强度突变的大尺度环境诊断分析 [J]. *热带气象学报*, 21 (4): 377–382. Hu Chunmei, Duan Yihong, Yu Hui, et al. 2005. The diagnostic analysis of the rapid change in tropical cyclones intensity before landfall in South China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 21 (4): 377–382.
- 黄勇, 李崇银, 王颖. 2008. 2006 年西北太平洋热带气旋生成频数和源地异常的成因分析 [J]. *热带气象学报*, 24 (6): 590–598.
- Huang Yong, Li Chongyin, Wang Ying. 2008. Study on the causation of anomaly of cyclogenesis frequency and location of tropical cyclones over the western North Pacific in 2006 [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 24 (6): 590–598.
- 蒋乐贻, 应明. 2002. 华东地区热带气旋年频数异常的分析 [J]. *应用气象学报*, 13 (1): 88–95. Jiang Leyi, Ying Ming. 2002. Analysis of anomalous frequency of tropical cyclone in East China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 13 (1): 88–95.
- Krishnamurti T N, Subrahmanyam D. 1982. The 30–50 day mode at 850 mb during MONEX [J]. *J. Atmos. Sci.*, 39 (9): 2088–2095.
- Lau K M, Chan P H. 1986. Aspects of the 40–50 day oscillation during the northern summer as inferred from outgoing longwave radiation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114 (7): 1354–1367.
- 李崇银. 1995. 热带大气季节内振荡的几个基本问题 [J]. *热带气象学报*, 11 (3): 276–288. Li Chongyin. 1995. Some fundamental problems of intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 11 (3): 276–288.

- 李崇银, 廖清海. 1998. 热带大气季节内振荡激发 El Niño 的机制 [J]. 热带气象学报, 14 (2): 97–105. Li Chongyin, Liao Qinghai. 1998. Exciting mechanism of tropical intraseasonal oscillation for El Niño event [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 14 (2): 97–105.
- 李崇银, 李桂龙. 1998. 热带大气季节内振荡的进一步分析 [J]. 气候与环境研究, 3 (1): 27–37. Li Chongyin, Li Guilong. 1998. A further analysis on intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 3 (1): 27–37.
- 李崇银, 龙振夏. 2001. 热带大气季节内振荡的异常与 1997 年 El Niño 事件的发生 [J]. 大气科学, 25 (5): 589–595. Li Chongyin, Long Zhenxia. 2001. Intraseasonal oscillation anomalies in the tropical atmosphere and the 1997 El Niño occurrence [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (5): 589–595.
- 李桂龙, 李崇银. 1998. 大气季节内振荡的活动与 El Niño [J]. 热带气象学报, 14 (1): 54–62. Li Guilong, Li Chongyin. 1998. Activity of atmospheric intraseasonal oscillation and El Niño [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 14 (1): 54–62.
- Liebmann B, Hendon H H, Glick J D. 1994. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian Oceans and the Madden-Julian oscillation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 72 (3): 401–412.
- 刘炯, 张庆云, 孙淑清. 2007. 2005 年夏季中国登陆台风的环流特征 [J]. 大气科学, 31 (5): 909–918. Liu Ge, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 2007. The circulation characteristics of frequent activities of typhoons over eastern China during the summer of 2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 909–918.
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. J. Atmos. Sci., 28: 702–708.
- Maloney E D, Hartmann D L. 2000a. Modulation of eastern North Pacific hurricanes by the Madden-Julian oscillation [J]. J. Climate, 13 (9): 1451.
- Maloney E D, Hartmann D L. 2000b. Modulation of hurricane activity in the gulf of Mexico by the Madden-Julian oscillation [J]. Science, 287: 2002–2004.
- 穆明权, 李崇银. 2000. 1998 年南海夏季风的爆发与大气季节内振荡的活动 [J]. 气候与环境研究, 5 (4): 375–387. Mu Mingquan, Li Chongyin. 2000. On the outbreak of South China Sea summer monsoon in 1998 and activity of atmospheric intraseasonal oscillation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (4): 374–387.
- Nakazawa T. 1986. Intraseasonal variations of OLR in the tropics during the FGGE year [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 64 (1): 17–34.
- Oouchik, Yoshumara J, Yoshimara H, et al. 2006. Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 84: 259–276.
- Sobel A H, Maloney E D. 2000. Effect of ENSO and the MJO on western North Pacific tropical cyclones [J]. Geophys. Res. Lett., 27 (12): 1739–1742.
- Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment [J]. Science, 309: 1844–1846.
- Weickmann K M. 1983. Intraseasonal circulation and outgoing long-wave radiation modes during Northern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 111: 1838–1858.
- Wu M C, Yeung K H, Chang W L. 2006. Trends in western North Pacific tropical cyclone intensity [J]. Eos, Trans. AGU, 87: 537–538.
- Yang Hui, Li Chongyin. 2003. The relation between atmospheric intraseasonal oscillation and summer severe flood and drought in the Changjiang–Huaihe River basin [J]. Adv. Atmos. Sci., 20 (4): 540–553.
- 杨辉, 李崇银. 2005. 热带大气季节内振荡的传播及影响因子研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (2): 145–156. Yang Hui, Li Chongyin. 2005. A study of propagation of tropical intraseasonal oscillation and its influence mechanism [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 145–156.
- Yasunari T. 1979. Cloudiness fluctuations associated with the Northern Hemisphere summer monsoon [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 58: 225–229.
- 叶英, 董波. 1998. 西北太平洋强热带气旋活动的年代际变化 [J]. 气象, 24 (7): 29–34. Ye Ying, Dong Bo. 1998. Interdecadal change of the severe tropical cyclone activities over the northwest Pacific [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 24 (7): 29–34.
- 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 Qingyun, Peng Jingbei. 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.
- 祝从文, Nakazawa T, 李建平. 2004. 大气季节内振荡对印度洋—西太平洋地区热带低压/气旋生成的影响 [J]. 气象学报, 62 (1): 42–50. Zhu Congwen, Nakazawa T, Li Jianping. 2004. Modulation of tropical depression/cyclone over the Indian–western Pacific oceans by Madden–Julian oscillation [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 62 (1): 42–50.
- Zhu Q G, He J H, Wang P X. 1986. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction [J]. Adv. Atmos. Sci., 3 (4): 466–477.