

毕鑫鑫, 陈光华, 周伟灿. 2018. 超强台风“天鹅”(2015)路径突变过程机理研究 [J]. 大气科学, 42 (1): 227–238. Bi Xinxin, Chen Guanghua, Zhou Weican. 2018. A mechanism study on the sudden track change of super typhoon Goni (2015) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 227–238, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1708.16280.

# 超强台风“天鹅”(2015)路径突变过程机理研究

毕鑫鑫<sup>1,2</sup> 陈光华<sup>2</sup> 周伟灿<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

**摘 要** 本文采用中国气象局的最佳台风路径数据和美国国家环境预报中心  $1^\circ \times 1^\circ$  每 6 h 再分析资料作为研究工作的基本场, 运用了分部位涡反演方法探讨影响 2015 年第 15 号超强台风“天鹅”路径突变的物理机制, 得到以下结论: (1) 就天气系统而言, “天鹅”整个移动过程中都受到周围环境场及引导气流的影响, 主要的影响系统包括西北太平洋副热带高压、季风涡旋、邻近台风“艾莎尼”及台风外围反气旋; (2) 定量分析了与各影响系统扰动位涡相关的引导气流矢量, 发现整个过程中超强台风“天鹅”的移动始终受西北太平洋副热带高压的影响, 其次是来自季风涡旋及台风外围反气旋的贡献, 而当“天鹅”有向北转向趋势时, 与外围反气旋相关的东北向引导气流导致了台风的路径北折; (3) 进一步定量分析了总扰动位涡在不同高度层上相关引导气流的贡献, 结果表明在垂直方向上对流层中层系统的引导气流矢量与“天鹅”的移动最为吻合, 而形成于低层系统的偏南风气流与“天鹅”向北突然转向有着密切的联系, 并在转向后逐渐向中高层发展增强。

**关键词** 台风 位涡反演 路径突变 引导气流

文章编号 1006-989(2018)01-0227-12

中图分类号 P447

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1708.16280

## A Mechanism Study on the Sudden Track Change of Super Typhoon Goni (2015)

BI Xinxin<sup>1,2</sup>, CHEN Guanghua<sup>2</sup>, and ZHOU Weican<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

**Abstract** Based on the best track data from China Meteorological Agency and 6-h reanalysis data with a resolution of  $1^\circ \times 1^\circ$  from National Centers for Environmental Prediction, this study conducts the piecewise potential vorticity inversion to reveal the dynamic mechanism by which the 15th super typhoon Goni in 2015 suddenly changed its track. The results are as follows. (1) From the perspective of synoptic system, Goni was affected by the large-scale background

收稿日期 2016-12-05; 网络预出版日期 2017-08-30

作者简介 毕鑫鑫, 女, 1993 年出生, 博士研究生, 主要从事热带气旋活动研究. E-mail: bixinxin@mail.iap.ac.cn

通讯作者 陈光华, E-mail: cgh@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41475074、41275001、41475091, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB953902, 气象灾害教育部重点实验室 (南京信息工程大学) 开放课题 KLME1604

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 41475074, 41275001, 41475091), National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2014CB953902), Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (NUIST) Open Project (Grant KLME1604)

system and the steering flows including the Northwest Pacific subtropical high, the monsoon gyre, the typhoon Atsani and the peripheral anticyclone of Atsani during the whole lifetime of Goni. (2) On the basis of quantitative analysis of the steering flow inverted from potential vorticity perturbation associated with the four components, we find that the steering flow vector of Goni was always affected by the Northwest Pacific subtropical high, while the monsoon gyre and peripheral anticyclone played a secondary role. At the time when Goni turned northward suddenly, the steering flow associated with the peripheral anticyclone acted as a major factor that resulted in the abrupt northward turning. (3) The contribution of the total potential vorticity perturbation to the relevant steering flow at different altitudes is further analyzed quantitatively. Results show that the steering flow vector in the middle troposphere is in good agreement with the movement of Goni, and the southerly flow formed in the low-level system is closely related to Goni's abrupt northward turning and its subsequent enhancement in the upper troposphere after the abrupt turning.

**Keywords** Typhoon, Potential vorticity inversion, Sudden track change, Steering flow

## 1 引言

台风是影响中国的主要灾害性天气系统之一, 每年平均有 7~8 个台风登陆沿海地区, 此外, 其他一些过路台风的外圈环流也会给沿海地区带来灾害天气, 对人民生命和财产安全造成巨大的威胁(张娇艳等, 2011; 段晶晶等, 2014)。近年来, 虽然台风的业务预报能力有了显著的改善, 但对异常转向路径的预报准确率仍然不理想(陈联寿和孟智勇, 2001; 倪钟萍等, 2013)。其中原因之一是导致台风路径突变的物理机制仍不太明确。

目前针对这一问题, 国内外学者进行了大量的研究及讨论(Wu et al., 2003; 禹梁玉和方娟, 2013; 许雯等, 2015)。一方面, 台风的路径变化很大程度上受大尺度背景环境场的影响, 并且深层厚度内平均的大型流场方向对台风运动方向有很好的指示作用(Chan and Gray, 1982; Holland, 1983; Lee et al., 1989)。Chan and Gray (1982) 对西北太平洋、西大西洋和澳大利亚南太平洋地区 43 个台风进行了统计分析, 其结果显示大尺度环境流场与台风运动具有很好的相关性。另一方面, 在西北太平洋同时出现两个台风时, 有可能会激发“藤原效应”, 即: 两个台风靠近时, 它们将绕着相连的轴线成环状, 且互相作逆时针方向旋转, 旋转中心与位置依两个台风相对质量及台风环流的强度来决定。但是, 藤原效应并不一定是两股台风绕着共同中心旋转, 它可以是其中一股台风完全支配另一股的移动方向, 或两股台风互相排斥, 或一股跟随另一股移动, 甚至它们之间不发生藤原效应。Wu et al. (2003) 揭示了热带风暴 Bopha (2000) 路径异常南折的原因: Bopha 与同时存在的超强台风 Saomai 产生藤原效应, 在 Saomai 环流影响下, 从而产生了 Bopha 向南的异常路径。此外, Carr and Elsberry (1995)

首次通过实际资料分析及无辐散正压模式模拟发现, 台风在路径突变前西行的减速和向北的突然加速都可以用台风与季风涡旋(Monsoon Gyre, 简称 MG) 的相互作用来解释。在突然转向前, 台风会与 MG 合并, 大的但相对较弱的 MG 经过 Rossby 波能量频散在合并涡旋的东部或东南部产生反气旋性环流, 气旋与反气旋之间梯度的增加使得西南风得到加强, 从而促使气旋向北或东北偏折。

自 20 世纪 80 年代 Hoskins et al. (1985) 提出位涡观点以来, 科学家们用位涡反演技术验证了热带气旋(Tropical Cyclone, 简称 TC) 运动与其周围深层平均环流流向具有一致性, 并且指出热带气旋周围位涡的特性对其短期路径预报具有重要意义(周毅等, 1998; 费建芳等, 2011)。Shapiro and Franklin (1995) 较早以位涡观点来研究实际个例, 通过分析位涡的分布和演变来诊断 1985 年飓风 Gloria 的结构特征和变化机制。Wu and Emanuel (1995a, 1995b) 也以位涡的观点分析 TC 引导气流并利用位涡反演诊断方法, 分别定量评估了飓风 Bob (1991)、Andrew (1992) 以及热带风暴 Ana (1991) 移动过程中大尺度环境气流的影响作用。最终发现, 由扰动位涡反演计算得到的平衡引导气流与 TC 的实际运动近似, 并且 TC 有朝着周围高层负位涡扰动最大的区域移动的趋势。

本文选取的研究个例为 2015 年第 15 号超强台风“天鹅”, 具有强度变化大、路径复杂两大显著特点。其中, “天鹅”的路径变化共经历了“西北—偏西—打转—偏北—东北”五个阶段(图 1), 同时全球业务数值模式对台风“天鹅”突然北折路径的预报也出现一定偏差。倪钟萍等(2013) 针对 2005~2010 年的 TC 突变路径进行误差分析, 北折路径从临近突变时刻至突变后预报误差明显增大, 且移向预报针对向北偏转的角度明显估计不足, 突

变时刻的 24 h 路径预报误差达到 145.6 km, 比中央气象台的平均预报误差增加了 29.3%。鉴于至今西北太平洋 TC 的突变路径和强度预报仍是相对困难的问题, 而“天鹅”正是一个路径特殊的典型个例, 值得进一步深入探究。不同于以往的传统动力学分析与数值模式模拟研究, 本文将采用分部位涡反演的方法, 首先从位涡动力学角度对与“天鹅”相互作用的周围环流系统进行定量化的诊断研究, 其次再分别探究了垂直方向上不同高度层环流系统对“天鹅”路径突变的作用, 进而深入地了解“天鹅”路径出现突然北折的影响机理, 希望能够为改进台风实时路径预报能力提供部分科学根据。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料

本文所用的台风数据（台风中心位置、中心气压、最大风速）来自于中国气象局（China Meteorological Administration, 简称 CMA）上海台风研究所（Shanghai Typhoon Institute）提供的最佳路径（Best Track, 简称 BT）数据, 时间分辨率为 6 h, 其他气象数据（位势高度场、温度场、风场）

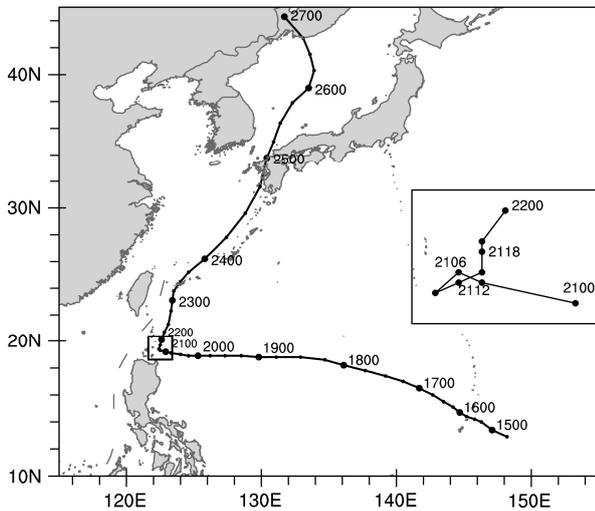


图 1 超强台风“天鹅”的路径, 来自中国气象局每 6 h 的最佳路径数据, 时间为 2015 年 8 月 14 日 18:00(协调世界时, 下同)至 27 日 00:00, 其中小图为 21 日 00:00 至 22 日 00:00 来自中央气象台的每 3 h 实时观测数据

Fig. 1 The track of super typhoon Goni based on the best track data from CMA (China Meteorological Administration) at 6-h interval during the period from 1800 UTC 14 to 0000 UTC 27 August 2015. The small picture shows the amplified track based on the real-time observation data of National Meteorological Center at 3-h interval during the period from 0000 UTC 21 to 0000 UTC 22 August 2015

来自于美国国家环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction, 简称 NCEP）的 FNL 全球分析资料（Final Operational Global Analysis）, 时间分辨率为 6 h, 水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 垂直方向上从 1000 hPa 到 70 hPa 共 12 层, 经、纬度范围选取  $(0^\circ \sim 40^\circ \text{N}, 100^\circ \text{E} \sim 160^\circ \text{E})$ 。

### 2.2 位涡反演方法介绍

本文采用 Davis and Emanuel (1991)、Davis (1992a, 1992b) 以及 Wu and Emanuel (1995a, 1995b) 等提出的位涡反演方法, 该方法主要是利用 Ertel 位涡可克服 Rossby 数的约束并提升反演结果的准确性这一优势发展而来。首先, 位势高度场和流函数场的平衡条件选取 Charney (1955) 提出的非线性平衡方程, 即

$$\nabla^2 \phi = \nabla \cdot (f \nabla \psi) + \frac{2}{a^4 \cos^2 \varphi} \frac{\partial(\partial \psi / \partial \lambda, \partial \psi / \partial \varphi)}{\partial(\lambda, \varphi)}, \quad (1)$$

其中,  $\phi$  为位势高度,  $\psi$  为非辐散流函数 ( $\mathbf{V}_\psi = \mathbf{k} \times \nabla \psi$ ),  $f$  为科氏参数,  $a$  为地球半径,  $\lambda$  为经度,  $\varphi$  为纬度。

其次, 对于大尺度运动而言, Ertel 位涡在球坐标系中可近似定义为

$$q = -\frac{g\kappa\pi}{p} \left[ \eta \frac{\partial \theta}{\partial \pi} - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \pi} \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial u}{\partial \pi} \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right], \quad (2)$$

其中,  $\kappa = R_d / C_p$ ,  $p$  为气压,  $\theta$  为位温,  $\pi = C_p(p/p_0)^\alpha$  为垂直坐标,  $\eta$  为绝对涡度的垂直分量。

假设静力平衡  $\partial \phi / \partial \pi = -\theta$ , 以及假设水平风用非辐散风代替, 则 Ertel 位涡的定义式近似为

$$q = \frac{g\kappa\pi}{p} \left[ (f + \nabla^2 \psi) \frac{\partial^2 \phi}{\partial \pi^2} - \frac{1}{a^2 \cos^2 \varphi} \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial \lambda \partial \pi} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \lambda \partial \pi} \right) - \frac{1}{a^2} \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi \partial \pi} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varphi \partial \pi} \right) \right]. \quad (3)$$

因此, 由公式 (1) 和 (3) 式组成的偏微分方程组, 在给定 Ertel 位涡分布的条件下, 则是包含  $\phi$ 、 $\psi$  两个未知数的封闭椭圆微分方程组, 只需给定边界条件即可运用连续超松弛数值方法 (Successive overrelaxation, 简称 SOR) 解出唯一解析解。

水平上、下边界采用静力稳定条件  $\partial \phi / \partial \pi = f_0, \partial \psi / \partial \pi = -\theta$  (即 Neumann condition),  $\phi$  的侧边界条件取实际观测的位势高度场 (即 Dirichlet condition),  $\psi$  的侧边界条件则假设为实际观测风场在侧边界无辐散, 因此侧边界上的  $\psi$  可由边界上风场积分得到:  $\partial \psi / \partial \mathbf{s} = -\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} + \int \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dl / \int dl$ ; 其中,  $\mathbf{n}$  为垂直边界的单位向量 (向外为正),  $\mathbf{s}$  为水平边界

的单位向量（逆时针为正），积分时由边界上任一点开始，给定  $\Psi = \phi$ ，沿边界积分一圈后回到原点。

此外，Davis and Emanuel (1991) 指出，分部位涡反演是位涡反演方法重要的应用，通过分部位涡反演，可诊断各部分系统的位涡扰动对研究系统的影响。由于位涡反演的偏微分方程组 (1) 和 (3) 都包含非线性项，因此在使用分部位涡反演时，必须处理方程组线性化的问题，经过线性化处理之后，上述方程组转换为

$$\nabla^2 \phi_n = \nabla \cdot (f \nabla \psi_n) + \frac{2}{a^4 \cos^2 \varphi} \times \left( \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial \lambda^2} \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial \varphi^2} \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial \lambda^2} - 2 \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial \lambda \partial \varphi} \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial \lambda \partial \varphi} \right), \quad (4)$$

$$q_n = \frac{g \kappa \pi}{p} \left[ (f + \nabla^2 \psi^*) \frac{\partial^2 \phi_n}{\partial \pi^2} + \frac{\partial^2 \phi^*}{\partial \pi^2} \nabla^2 \psi_n - \frac{1}{a^2 \cos^2 \varphi} \left( \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial \lambda \partial \pi} \frac{\partial^2 \phi_n}{\partial \lambda \partial \pi} + \frac{\partial^2 \phi^*}{\partial \lambda \partial \pi} \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial \lambda \partial \pi} \right) \right] - \frac{g \kappa \pi}{p} \frac{1}{a^2} \left( \frac{\partial^2 \psi^*}{\partial \varphi \partial \pi} \frac{\partial^2 \phi_n}{\partial \varphi \partial \pi} + \frac{\partial^2 \phi^*}{\partial \varphi \partial \pi} \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial \varphi \partial \pi} \right) \quad (5)$$

此处， $[ \ ]^* = [ \ ] + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N [ \ ]_n$ 。由公式 (4) 和 (5) 式组成分部位涡反演的线性平衡方程组，其水平上下边界条件取： $[\partial \phi_n / \partial \pi, f_0 \partial \psi_n / \partial \pi] = -\theta_n$ ，侧边界上的位势高度场及流函数场给定为 0，即可最终解出伴随任何一部分扰动位涡的流函数及位势高度场。

### 2.3 引导气流计算

以往的大量研究都认为，TC 移动路径主要受到大尺度环境场的引导气流影响，然而针对不同个例的引导气流定义也有所不同。Chan and Gray (1982) 发现对流层中层 (500~700 hPa) TC 中心  $5^\circ \sim 7^\circ$  区域内的平均风场与 TC 移动最为一致。Wu et al. (2003) 利用风暴中心 3 个纬度半径内，925~400 hPa 的深层平均风场作为引导气流矢量，结合分部位涡反演方法较好地表征了热带风暴 Bopha 和超强台风 Saomai 之间的藤原作用。Wu et al. (2001) 发现台风中心四个纬距范围内、850~300 hPa 之间质量权重的整层平均风场与 Morakot (2009) 的移动速度有相当高的一致性。本文对引导层和中心半径范围的选取进行了多次测试比较之后，将引导气流场 ( $V_{steer}$ ) 定义为距离台风中心 3~5 个纬度半径内 925~300 hPa 的平均风，即：

$$V_{steer} = \frac{\int_{925 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} V_s(p) dp}{\int_{925 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} dp}, \quad (6)$$

其中，

$$V_s(p) = \frac{\int_{3^\circ}^{5^\circ} \int_0^{2\pi} v dr d\theta}{\int_{3^\circ}^{5^\circ} \int_0^{2\pi} r dr d\theta}. \quad (7)$$

## 3 影响台风路径变化的因素分析

### 3.1 环流形势分析

2015 年第 15 号超强台风“天鹅”，影响波及我国东部沿海、日本东南部沿海等地区，均出现了大风及短时强降水过程，根据中国气象局上海台风研究所给出的数据显示最大瞬时风速达  $55 \text{ m s}^{-1}$ ，中心最低气压为 930 hPa，并具有强度变化大、路径复杂两大显著特点。其中“天鹅”的路径变化共经历了“西北—偏西—打转—偏北—东北”五个阶段。15 日“天鹅”在低纬的  $150^\circ\text{E}$  以西洋面生成后稳定向西北向移动，18 日到达菲律宾群岛东侧洋面后继续西行，21 日“天鹅”在台湾东侧洋面出现明显减速，表现为少动、打转，12 h 之后突然转为偏北向，转向角度约  $90^\circ$ ，23 日后又转向东北向移动，随后于 24 日 21:00 (协调世界时，下同) 在日本荒尾市附近登陆。

图 2 给出了路径突变前后 NCEP 分析资料的 500 hPa 位势高度场及风场分布，18~20 日“天鹅”基本上保持匀速偏西行状态，通过图 2a、b、c 可知，期间“天鹅”北侧始终由环流系统强大的西北太平洋副热带高压（以下简称副高）占据，副高的西伸脊点最远位于  $120^\circ\text{E}$  左右，因此“天鹅”的西行过程主要受副高西南侧气流的影响；此后 20~21 日，“天鹅”逐渐靠近菲律宾群岛及台湾岛，开始减速并表现出停滞及原地打转等状态，从图 2c、d 中可以看出此刻副高受到中纬度东移西风槽的抑制而有所减弱，同时距“天鹅”东侧大约 20 个经度的另一个台风“艾莎尼”强度达到超强台风等级，并向北移动在  $145^\circ\text{E}$  切断副高主体，使得位势高度大于 5880 gpm 的副高主体东撤至  $150^\circ\text{E}$  以东，在副高开始东撤初期，中纬度西风槽仍未占据副高原来的位置，“天鹅”恰好移至副热带高压脊的西南侧后进入鞍型场，导致“天鹅”失去一部分西北行的引导

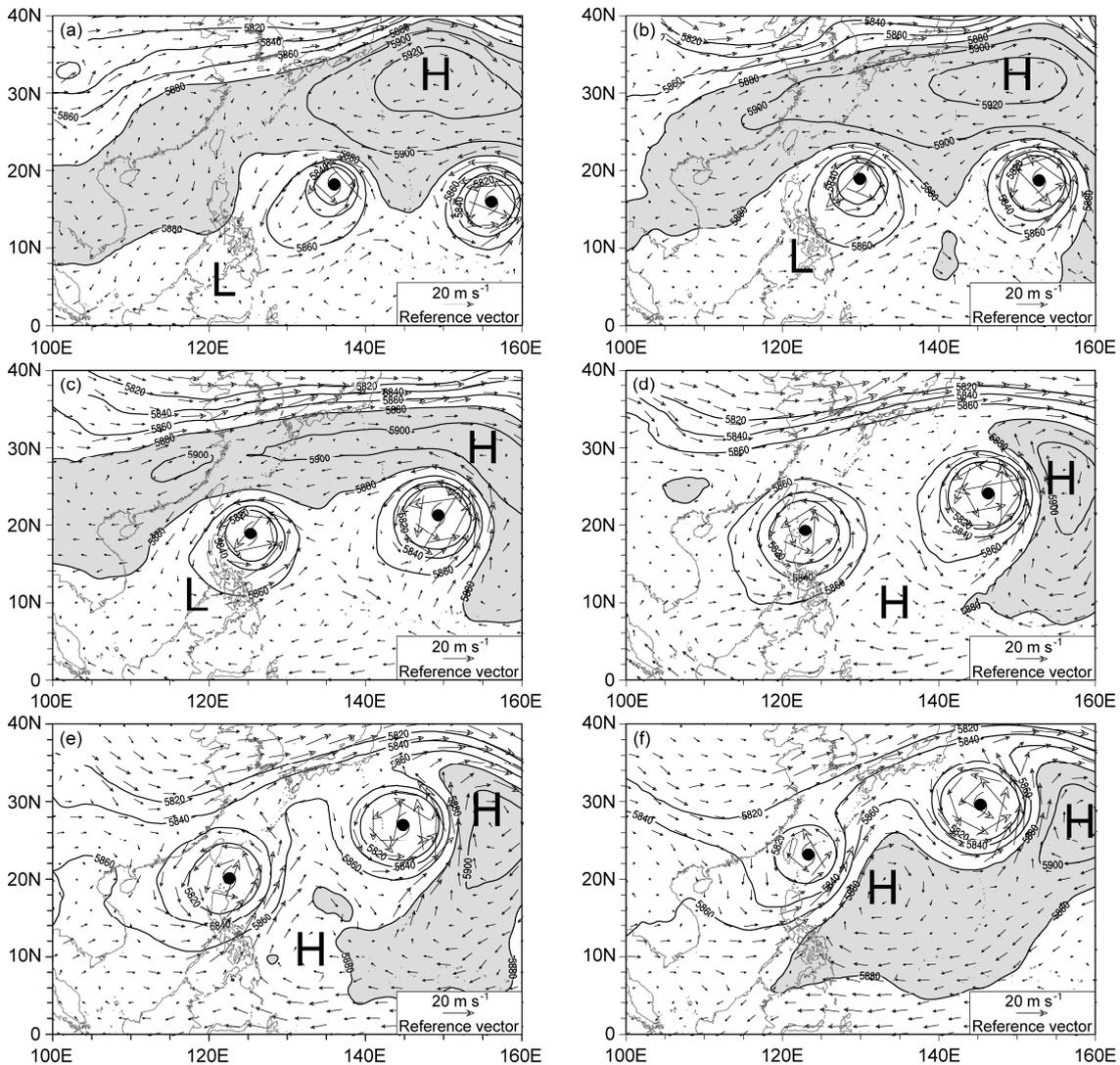


图 2 台风“天鹅”生命史中 500 hPa 位势高度场（等值线，单位：gpm）及风场（单位： $m s^{-1}$ ）的演变：(a) 18 日 00:00；(b) 19 日 00:00；(c) 20 日 00:00；(d) 21 日 00:00；(e) 22 日 00:00；(f) 23 日 00:00。阴影区域为大于 5880 gpm，位于东、西两侧的台风标志分别为对应时刻台风“艾莎尼”及“天鹅”的中心位置，“L”标注低压系统，“H”标注高压系统

Fig. 2 Evolution of 500-hPa geopotential height (units: gpm) and wind field (units:  $m s^{-1}$ ) during the life span of typhoon Goni at (a) 0000 UTC 18 August, (b) 0000 UTC 19 August, (c) 0000 UTC 20 August, (d) 0000 UTC 21 August, (e) 0000 UTC 22 August, and (f) 0000 UTC 23 August 2015. Shaded areas indicate geopotential height greater than 5880 gpm. The typhoon symbols in the east and west indicate the center locations of typhoons Asani and Goni, respectively. The letters “L” and “H” represent the low-pressure and high-pressure systems, respectively

气流而减速，同时受西南侧季风涡旋及东侧台风“艾莎尼”的外围气流影响而开始打转。22~23 日期间，“天鹅”在经历了向北转向之后，重新开始沿偏东北行路径加速，在图 2e、f 中副高在“艾莎尼”北上的情况下表现出低纬西伸状态，并与“天鹅”东南侧的外围反气旋合并使得环流系统进一步增强，为“天鹅”提供了足够的东北向引导气流。

虽然“天鹅”与东侧的“艾莎尼”相距较远，但是从图 2 中仍然能观察到两者的相对位置及移动

过程存在着一定的联系，图 2a 显示 18 日“天鹅”位于“艾莎尼”的西北侧，而之后图 2b-c 中“艾莎尼”向北移动较快，两者的相对位置发生了变化，天鹅逐渐位于“艾莎尼”的西南侧，两个台风中心相对位置发生了变化，同时位于其北侧的副热带高压也因此东撤，从而导致了“天鹅”所处的环流背景场出现了大范围结构调整，与“天鹅”之后的移动变化密切相关。

从图 2a-d 中还可以发现在 18~21 日“天鹅”

的偏西行阶段中,其西南侧还受到西南季风的影响,以往研究(Yang et al., 2008)表明西南季风为台风输送水汽使其维持强度,并将这类台风所处环境下的尺度环流定义为季风涡旋,可提供台风逆时针旋转运动的分量,因此在后面章节的讨论中我们也考虑了季风涡旋对台风“天鹅”路径突变的影响。

图 2d 显示 20 日开始“天鹅”的东南侧出现逐渐增强的反气旋环流,此时处于减速状态的“天鹅”受该反气旋提供的西南风气流影响,之后从图 2d-f 中看出该反气旋与低纬西伸的副高系统在“天鹅”和“艾莎尼”的南侧逐渐合并,形成了强大的高压带继续影响“天鹅”向北移动。由于反气旋出现的时刻恰好与副高的东撤及“天鹅”突然转向时刻吻合,并在“天鹅”东南侧加强了西南风气流,因此可猜测“天鹅”外围东南侧出现的反气旋环流对其突然北折或许发挥着关键性作用,本文将在后面章节通过分部位涡反演方法进一步讨论。

近期研究也发现,台风发生路径突变的时刻及位置都与其东南侧出现的反气旋有很大联系。Shi et al. (2014) 针对 Megi (2010) 的突然转向事件进行研究并发现,位于台风东南侧的低纬小反气旋虽然提供的引导作用较小,但对转向的时间点和地点有重要影响。同时进行了改变初始扰动的数值模拟试验,进一步表明该反气旋对 Megi 的转向有重要影响,并进一步指出该反气旋的发展与 TC 能量耗散和东风波活动有关。Liang and Wu (2015) 在 Carr and Elsberry (1995) 正压模式模拟基础上,运用 WRF 模式针对伴随着季风涡旋的 TC 的移动路径变化进行多组数值试验,发现 TC 突然北折路径主要因为 TC 中心与 MG 中心靠近及合并,使得对称环流向东南侧的能量频散增强,产生的负相对涡度将增强 TC 东侧外围的南风分量,从而改变了引导气流。所以,针对“天鹅”外围反气旋的出现原因,包含如下两方面:一是受 TC 与 MG 相互作用的影响导致 TC 向东南侧的能量频散;二是随着“艾莎尼”与“天鹅”的环流系统相互接近,“天鹅”东南侧的西南气流和“艾莎尼”西南侧的西北气流在两台风之间产生反气旋涡度,进一步加强了“天鹅”东南侧的反气旋式环流(图 2d-f)。

综上所述,在“天鹅”包括突然北折在内的整个生命周期中,从环流形势来看“天鹅”的移动过程受到了多个系统的综合影响,因此,为了详细探

讨“天鹅”路径突变的动力机制,分析研究与每个影响系统相关的引导气流的贡献尤为重要,而分部位涡反演方法为此提供了有效的手段。

### 3.2 引导气流分析

为检验定义的引导气流变量是否对台风“天鹅”的运动具有较好地指示性,图 3a、b 分别给出了分析场引导气流和台风移速的纬向及经向分量。从图中可看出在台风“天鹅”整个移动过程中,虽然两者在数值大小方面存在些微偏差,但就变化趋势而言基本一致,尤其在路径突变时刻附近更为明显,证明了台风“天鹅”的移动及转向与引导气流的变化有着密切的联系。图 3a 的纬向分量表明台风经历了由西行向东行的转变,自 16 日开始“天鹅”表现为向西的加速,19 日之后向西行速度逐渐减弱并且台风的移速与引导气流矢量逐渐一致,21 日 12:00 “天鹅”向东北转向,东西向移动速度变为正值,开始向东加速移动;从图 3b 的经向方向来看,21 日之前“天鹅”一直保持偏西行路径,因此起初经向移动速度并不显著,约  $0\sim 3\text{ m s}^{-1}$ ;但在 21 日之后,经向速度突然显著增大,表现为向北的加速,移速达到  $5\text{ m s}^{-1}$ ,这也与台风的北折路径相吻合。综合来看,该引导气流场能够较好地表现台风在路径突变期间移速的变化特征,一定程度上保证了后续在分部位涡反演方法中使用引导气流这一指标来考察不同系统对台风异常移动的作用的可信度。

## 4 分部扰动位涡反演分析

分部位涡反演方法从位涡动力学理论出发,结合天气学分析方法,定义深层平均风作为影响台风移动的引导气流,将分部位涡反演得到的伴随各系统位涡扰动的三维无辐散风场进行定量计算,分别求出台风周围各个天气系统影响台风运动的引导气流分量,进而探讨各系统在台风运动中所扮演的角色,从而加深对台风移动特别是异常路径的理解和把握(费建芳等, 2011)。为进一步量化各系统的引导气流分量与实际台风移动矢量的相关程度, Wu et al. (2003) 定义了一个沿台风路径的投影比值(Along-track, 以下用物理量  $A$  表示)来表征,即

$$A(q') = \frac{\mathbf{V}_{\text{steer}}(q') \cdot \mathbf{V}_{\text{BT}}}{|\mathbf{V}_{\text{BT}}|^2}, \quad (8)$$

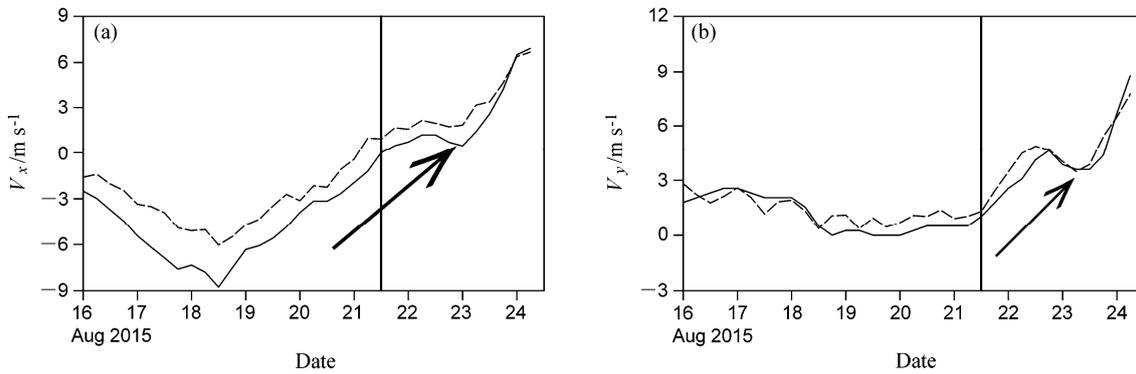


图3 “天鹅”北折前后台风移速(实线)与深层平均(925~300hPa)引导气流(虚线)的(a)纬向分量和(b)经向分量,黑色竖直线指示转向时刻,箭头给出转向前后大致趋势

Fig. 3 Time series of (a) the zonal component (units:  $m s^{-1}$ ) and (b) the meridional component (units:  $m s^{-1}$ ) of the translation speed of typhoon Goni (solid) and the steering flow averaging from 925 to 300hPa (dashed). The vertical lines indicate the deflection time and the arrows show the trends in the translation speed and steering flow

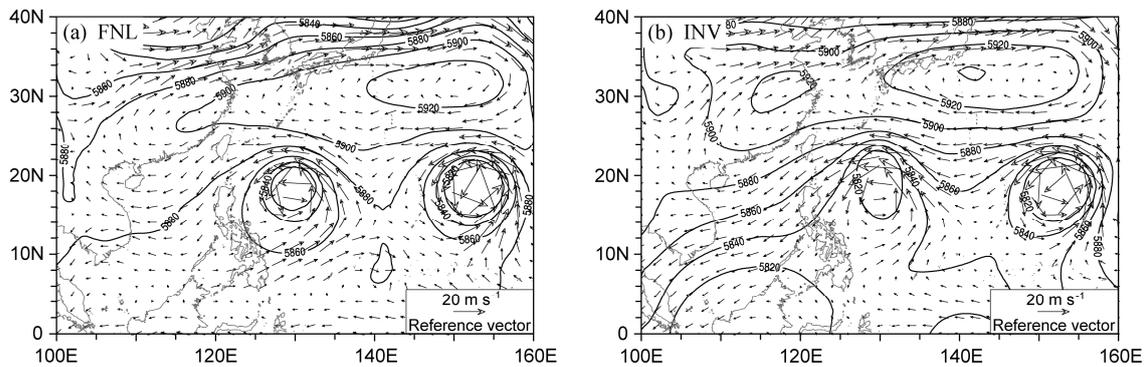


图4 2015年8月19日00:00 500 hPa (a) 实际观测(FNL)的位势高度场和风场、(b)位涡反演分析(INV)得到的位势高度场和风场。位势高度单位为gpm, 风场单位为 $m s^{-1}$

Fig. 4 500-hPa geopotential height (units: gpm) and wind field (units:  $m s^{-1}$ ) at 0000 UTC 19 August 2015 from (a) the FNL data and (b) the potential vorticity inversion analysis

其中,  $q'$  代表每个部分扰动位涡,  $V_{BT}$  代表由最佳路径数据计算得到的台风移动矢量,  $A(q')$  值越接近 1 时表示该扰动位涡相关的引导气流矢量与实际台风移动矢量越吻合,  $A(q')$  值等于 1 则表示两矢量完全重合。

#### 4.1 位涡反演可信度检验

本章节针对台风“天鹅”偏西行(18日00:00)突然转向至偏北行(23日00:00)期间进行位涡反演分析,在运用该反演方法进行台风动力学研究前,首先对反演结果进行可信性检验。选取2015年8月19日00:00的NCEP FNL数据作为客观分析场,并与同时刻全位涡反演的结果进行对比。

图4给出了19日00:00 500 hPa高空客观分析场与反演场。由图中可以清楚看到,位涡反演结果

能够基本反映出客观分析场的形势特征。从风场的对比来看,整个反演区域内反演得到的风向结果与实际情况对应的非常好,风速在局部地区有一定差异,如台风“天鹅”南侧风场偏弱,但对整体环流结构影响不大,体现出了台风周围风场南北不对称的特点。对比位势高度场来看,台风的低压中心位置及西北太平洋副热带高压的范围与全球分析数据保持一致,仅在系统强度上有略微差别,反演场相对较强一些,大部分等高线走向也基本吻合。因此,位涡反演分析方法得出的结果能真实展现副热带高压、气旋、中纬度西风槽等天气系统的位置及流场特征。

#### 4.2 平均场选取及片段划分

针对分部位涡反演,根据所讨论的问题选取适

当的平均场是很重要的。Davis and Emanuel (1991)、Davis (1992a, 1992b) 运用分部位涡诊断温带气旋生成的研究时, 选取了气旋生命史周期的平均场作为基本场, Wu and Emanuel (1995a, 1995b) 将分部位涡诊断方法应用于台风问题时, 考虑以台风生命史周期平均为基本场会残留台风讯息, 从而采用了气候尺度平均(季平均)为基本场。然而, 若选取时间平均为基本场时, 台风本身仍是扰动场的一部分, 因此在探讨台风运动路径时, 势必会增加研究的复杂度。Shapiro and Franklin (1995) 提出将台风轴对称分量视为基本场, 除去台风轴对称后的环境场视为扰动场, 则能够清晰了解环境扰动场与台风之间的相互作用。基于类似的研究目的, 本文也选取台风“天鹅”的轴对称平均分量作为平均场, 剩余的环境场视为总扰动场。

除此之外, 为深入了解超强台风“天鹅”路径突变的影响机制, 本文针对在“天鹅”突变时刻前后有显著影响的不同系统的特点, 将总扰动位涡场分割成四个部分, 包括副热带高压扰动(SH)、季风涡旋扰动(MG)、东侧的台风“艾莎尼”扰动(AS), 及外围反气旋扰动(SA)。图5给出了以21日00:00作为参考时刻的扰动位涡场及具体区域划分结果。

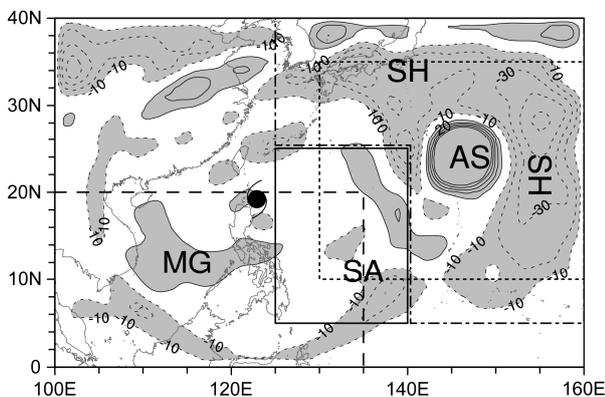


图5 8月21日00:00主要影响系统的反演区域及500 hPa高度总扰动位涡场分布。位涡单位:  $10^{-2}$  PVU, 阴影区表示扰动位涡绝对值大于0.1 PVU ( $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ ), 黑色台风标志为对应时刻台风中心位置, “MG”表示季风涡旋, “SH”表示西北太平洋副热带高压, “SA”表示外围反气旋, “AS”表示台风“艾莎尼”

Fig. 5 The inversion area of the key impacting systems and total potential vorticity (PV) perturbations at 500 hPa at 0000 UTC 21 August 2015 (units:  $10^{-2}$  PVU;  $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ ). The areas with PV perturbation absolute values greater than 0.1 PVU are shaded. The typhoon symbol indicates the center location of typhoon Goni; “MG” represents the monsoon gyre system; “SH” represents the Northwest Pacific subtropical high system; “SA” represents the peripheral anticyclone system; “AS” represents typhoon Atsani.

在选定的研究时间段内, 季风涡旋和“艾莎尼”系统均表现为正位涡扰动, 反演区域范围分别选取 ( $0^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ ,  $100^{\circ} \sim 135^{\circ} \text{E}$ ) 和 ( $10^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ ,  $130^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{E}$ ); 副热带高压表现为负位涡扰动, 反演区域由两部分组成, 范围为 ( $5^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$ ,  $140^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{E}$ ) 及 ( $25^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$ ,  $125^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{E}$ ); 此外, 从20日12:00开始“天鹅”外围反气旋逐渐形成, 并表现为负位涡扰动, 反演区域选取为 ( $5^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$ ,  $125^{\circ} \sim 140^{\circ} \text{E}$ )。

### 4.3 反演场引导气流诊断分析

#### 4.3.1 分部扰动位涡反演的引导气流时间分布

图6a和b分别给出了各部分扰动位涡所产生的深层平均引导气流随时间的变化, 以及对应的引导气流矢量沿台风运动方向的投影比值随时间的变化情况。其中从图6a可以发现台风“天鹅”的最佳路径运动矢量  $\mathbf{V}_{(\text{BT})}$ , 全球分析场的引导气流矢量  $\mathbf{V}_{(\text{FNL})}$  与总扰动位涡造成的引导气流矢量  $\mathbf{V}_{q(\text{TOTAL})}$  三者 in 风速及风向方面都相当吻合, 仅在数值上  $\mathbf{V}_{q(\text{TOTAL})}$  略微大一些, 伴随总扰动位涡的引导气流矢量的投影分量比值基本上维持在0.9左右(图6b), 这些表明台风“天鹅”的运动可以利用位涡反演的深层平均引导气流矢量表征。其次, 为了进一步了解周围天气系统对台风“天鹅”的影响作用, 依照前一小节将总扰动位涡  $q_{(\text{TOTAL})}$  分割成包括邻近台风“艾莎尼”  $q_{(\text{AS})}$ 、季风涡旋  $q_{(\text{MG})}$ 、副热带高压  $q_{(\text{SH})}$  及外围反气旋  $q_{(\text{SA})}$  在内的主要扰动位涡块。

通过比较各部分扰动位涡反演的引导气流发现(图6a), 东侧的台风“艾莎尼”在整个时间序列中的贡献均为偏北风气流, 起初以大小约为  $3 \text{ m s}^{-1}$  的速度为“天鹅”提供向南的移动分量, 自19日开始增大, 20日00:00达到最大, 约为  $5 \text{ m s}^{-1}$ , “艾莎尼”增大的向南分量可以解释其在台湾东侧洋面附近出现短时的停滞少动、打转现象。此外, 由于“天鹅”与“艾莎尼”的相对位置变化, “艾莎尼”加速北移横穿过副高主体部分造成了副高断裂东撤, 从而导致副高提供的引导气流东风分量变小, “天鹅”移速减慢。根据图6b可知, 在“天鹅”偏西行阶段, 与“艾莎尼”相关的偏北风引导气流在台风移动方向上的投影比值几乎可以忽略, 之后在转向时刻附近, “天鹅”受到“艾莎尼”产生的引导气流的影响而移速减缓并发生打转, 该时刻的投影比值约为-1.5, “天鹅”转向后向偏北向移动过程中依旧受到“艾莎尼”的抑制, 相应地引导气

流矢量沿台风路径方向的投影比值约为-0.8。

季风涡旋造成台风“天鹅”运动的引导气流在 18 日 00:00 至 23 日 00:00 期间大致保持在  $3 \text{ m s}^{-1}$  左右的偏东风（图 6a），这一结果显示在“天鹅”偏西行阶段，季风涡旋一直提供一部分的向西运动引导气流，由图 6b 分析可知该部分在台风移动矢量的投影比值约为 0.4，而在 20~21 日台风转向前，由于副高东撤“天鹅”几乎完全受季风涡旋提供的偏东风引导气流影响，期间的投影比值有所增加，最高达到 1.5，“天鹅”转向后，该系统一直提供较弱的西北向引导气流，对加速向东北移动的台风影响并不显著。

图 6a 显示副高系统始终提供西北向的引导气流，大小维持在  $5\sim 6 \text{ m s}^{-1}$ ，方向上存在微小的顺时针变化，沿台风移动方向上的投影比值也均达到在 0.6 以上。这表明副热带高压无论在“天鹅”初期的西北行阶段还是在转向后的偏东北行阶段，都占主导作用，尤其是提供了大部分的南风分量。但是，副高在转向阶段并没有贡献西风分量，虽然从天气形势上来看副热带高压有东撤至低纬的特征，然而由于“艾莎尼”一直占据在“天鹅”东侧，因此副热带高压势力无法直接导致“天鹅”的突然转向。

位于“天鹅”东南侧的反气旋环流在 21 日之

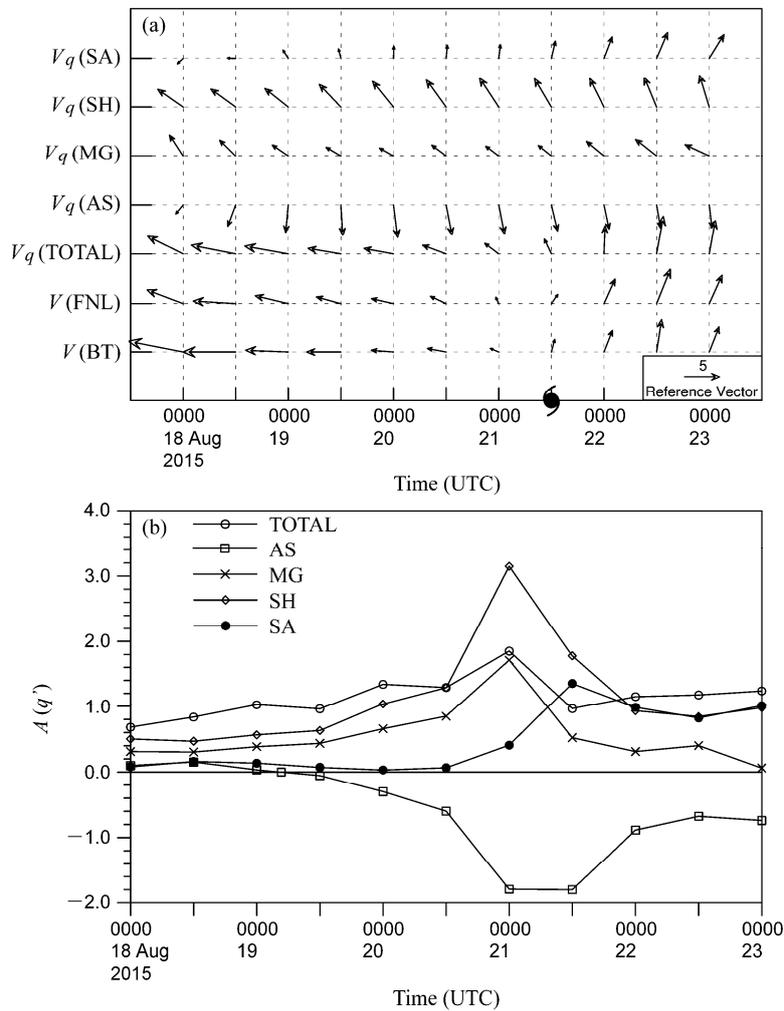


图 6 (a) 台风“天鹅”北折前后的移速与分析场移动矢量、总扰动位涡、AS、MG、SH、SA 扰动位涡反演的深层平均（925~300 hPa）引导气流分布状况（单位： $\text{m s}^{-1}$ ）台风标志表示转折时刻。(b) 伴随总扰动位涡、AS、MG、SH、SA 扰动位涡的引导气流矢量沿台风路径的投影比值变化情况

Fig. 6 (a) Time series of Goni's movement from the best-track data [ $V_{\text{BT}}$ ], Goni's movement from the final operational global analysis data [ $V_{\text{FNL}}$ ], the steering flows averaging from 925 to 300 hPa associated with the total potential vorticity perturbation [ $V_{q(\text{total})}$ ] and AS [ $V_{q(\text{AS})}$ ], MG [ $V_{q(\text{MG})}$ ], SH [ $V_{q(\text{SH})}$ ], and SA [ $V_{q(\text{SA})}$ ] potential vorticity perturbations (units:  $\text{m s}^{-1}$ ). The typhoon symbol denotes the turning-time. (b) Time series of the along-track component ratios of the steering flows associated with the total potential vorticity perturbation [ $V_{q(\text{total})}$ ] and AS [ $V_{q(\text{AS})}$ ], MG [ $V_{q(\text{MG})}$ ], SH [ $V_{q(\text{SH})}$ ], and SA [ $V_{q(\text{SA})}$ ] potential vorticity perturbations

前尚不明显,因此贡献值可忽略不计(图 6b),而图 6a 中从 21 日开始该系统贡献的向北引导气流逐渐增强,并在转向时刻发展为偏东北向气流,大约为  $2\sim 3\text{ m s}^{-1}$ ,为“天鹅”提供了关键性的北折条件,从而使得引导“天鹅”的环境气流由偏东风转变为偏南风,导致“天鹅”在台湾东南部洋面发生近  $90^\circ$  的直角转向,在转向后“天鹅”东南侧的反气旋环流与副高的低纬西伸环流逐渐合并形成一个强大的高压带,进一步加强了引导“天鹅”移动的偏南风气流。从图 6b 可以清楚看出,与外围反气旋系统相关的引导气流矢量在台风移动方向的投影比值自 21 日突然增大,并于 21 日 12 时达到 1.2 左右,此后一直保持在 0.6~0.8 附近。

整体而言,主要引导台风“天鹅”移动的气流矢量分别来自于副热带高压、季风涡旋及外围反气旋环流,其中在“天鹅”偏西行阶段,季风涡旋和副热带高压共同提供西行的移动分量,两者的贡献比例约为 4:6;在转向前,由于副高东撤“天鹅”移速减慢,主要受季风涡旋提供的偏东风引导气流控制,同时台风“艾莎尼”产生的偏北风引导气流增强,“天鹅”出现打转现象,21 日开始外围反气旋产生的偏东南风引导气流增强对“天鹅”的突然北折发挥了关键性的作用;转向后“天鹅”进入偏北行阶段,外围反气旋与副热带高压共同贡献偏北行的移动分量。

#### 4.3.2 分部扰动位涡反演的引导气流垂直分布

上一章节的研究工作集中研究主要天气系统对台风“天鹅”路径突变前后的相对作用,通过各部分影响系统所产生的引导气流对“天鹅”突然北折路径进行分析解释。但是由于台风本身垂直结构与周围环境之间存在一定的不一致,因此在针对突变路径研究中,还需要考察不同垂直层次对台风“天鹅”路径引导的作用及所占比例。图 7a、b 即给出了总扰动位涡场在不同高度层上造成的台风“天鹅”引导气流和沿台风移动方向的投影比值的时间变化序列。

结合图 7a、b 来看,在 20 日之前“天鹅”处于偏西行阶段,各高度层的引导气流分量基本都与实际台风移动分量保持一致,投影比值均大于 0.6,其中对流层中层(500 hPa 和 400 hPa)贡献最大,这与该阶段“天鹅”受季风涡旋和副热带高压共同影响的结论保持一致。然而 20 日之后,图 7a 显示在“天鹅”转向前偏南风引导气流于对流层低层开

始建立;转向后,伴随台风外围反气旋与副高的合并增强,对流层高层的偏东风气流逐渐衰退,偏南风引导气流逐渐向中高层发展,其中,  $V_{q(500)}$  与台风“天鹅”的移动过程最为吻合,这表明提供了台风转向关键性的偏南风气流的系统是由对流层低层建立并向中高层扩展的。考虑到有季风涡旋存在的热带气旋可能会由于季风涡旋与热带气旋相互作用导致能量频散,从而在热带气旋东南侧形成外围反气旋,并最终导致南风分量的增强和热带气旋路径突变(Liang and Wu, 2015)。因此在转折时刻附近形成的外围反气旋系统与“天鹅”的转向有重要的联系,并且该反气旋的成因可能与对流层低层系统(季风涡旋)有关。

## 5 结论与讨论

2015 年第 15 号超强台风“天鹅”的路径变化经历了“西北—偏西—打转—偏北—东北”这五个阶段,给亚洲许多地区都造成了相当严重的影响。本文采用 NCEP FNL 的全球分析资料对“天鹅”的突然北折过程进行了分析,从天气学角度来看,影响“天鹅”路径变化的主要系统包括副热带高压、季风涡旋、临近台风“艾莎尼”以及“天鹅”外围反气旋。在此基础上,为了进一步探究台风“天鹅”路径突变的影响机制,运用了分部位涡反演方法,分别对与各天气系统及不同高度层有关的引导气流矢量进行定量诊断分析,得到如下结果:

(1) 整个过程中,西太平洋副热带高压扰动相关的引导气流矢量始终维持西北向,大小约  $5\sim 6\text{ m s}^{-1}$ ,在台风移动方向上的投影向量值也均保持在 0.6 以上,贡献了大部分的移动分量。但是引导气流矢量方向始终未改变,因此对“天鹅”的路径突然转向东北无直接影响。

(2) 在“天鹅”偏西行阶段,季风涡旋一直提供一部分的向西运动引导气流,该部分在台风移动矢量中的投影向量值约为 0.4,20~21 日台风转向前,由于副高东撤因此“天鹅”几乎完全受季风涡旋提供的偏东风引导气流影响,期间的投影向量值有所增加,最高达到 1.5,“天鹅”转向后影响并不显著。

(3) 东侧的台风“艾莎尼”在“天鹅”移动过程中始终贡献偏北风气流造成“天鹅”向南移动,且在转向时刻附近向南的分量达到最大,导致台风移速减缓并发生打转。此外,由于“艾莎尼”路径

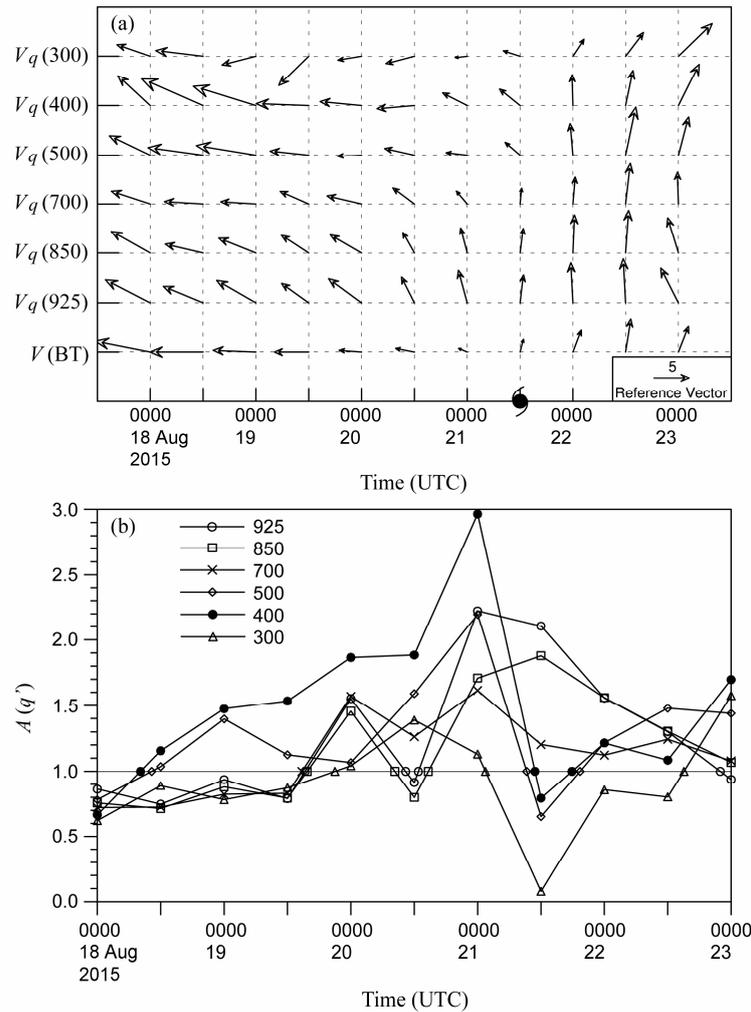


图 7 (a) 台风“天鹅”北折前后的移速与总扰动位涡反演的引导气流在 925 hPa、850 hPa、700 hPa、500 hPa、400 hPa 及 300 hPa 高度层分布状况 (单位:  $m s^{-1}$ ) 台风标志表示转折时刻。(b) 伴随总扰动位涡的引导气流矢量分别在 925 hPa、850 hPa、700 hPa、500 hPa、400 hPa 及 300 hPa 高度层分量沿台风路径的投影比值变化情况

Fig. 7 (a) Time series of Goni's movement  $[V_{(BT)}]$  and the steering flows associated with total PV perturbation at 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa, 400 hPa, and 300 hPa (units:  $m s^{-1}$ ). The typhoon symbol denotes the turning-time. (b) Time series of the along-track component ratios of the steering flows associated with total PV perturbation at 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa, 400 hPa, and 300 hPa

的北移，截断副高主体导致太平洋副高的东撤及低纬西伸，对台风周围环流场结构调整有着间接影响。

(4) 位于“天鹅”东南侧的反气旋环流在 21 日之前由于环流结构尚未形成因此贡献值可忽略不计，从 21 日开始该系统贡献的向北引导气流逐渐增强，并在转向时刻发展为偏东北向气流，大约为  $2\sim 3 m s^{-1}$ ，该时刻的投影向量值达到 1.2 左右，较好地引导了“天鹅”突然北折。在转向后与低纬西伸的太平洋副高系统合并加强，共同引导“天鹅”朝东北向移动。

(5) 进一步分析了总扰动位涡在不同高度层上

对“天鹅”路径突变造成的影响，在“天鹅”偏西行阶段，各高度层的引导气流分量基本都与实际台风移动分量保持一致，投影向量值均大于 0.6，这与该阶段“天鹅”受季风涡旋和副热带高压共同影响的结论保持一致。此外，偏南风的引导矢量在“天鹅”转折前一直存在于对流层低层，转向后逐渐向中高层发展增强。

不难看出，分部位涡反演方法在探究影响台风路径变化的因素方面有着不错的效果，能够较好的了解主导台风移动的天气系统以及台风与各天气系统之间的相互作用。当然，今后还需要通过更多的典型个案来验证本文的主要结论，并引入数值模

拟实验, 不仅仅从观测分析场考虑, 也可以应用模式输出场进行敏感性分析和结果比较, 深入探究各天气系统影响台风路径突变的物理机制。

### 参考文献 (References)

- Carr L E, Elsberry R L. 1995. Monsoonal interactions leading to sudden tropical cyclone track changes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (2): 265–289, doi:10.1175/1520-0493(1995)123<0265:MILTST>2.0.CO;2.
- Chan J C L, Gray W M. 1982. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (10): 1354–1374, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<1354:TCMASF>2.0.CO;2.
- Charney J. 1955. The use of the primitive equations of motion in numerical prediction [J]. *Tellus*, 7(1): 22–26, doi:10.1111/j.2153-3490.1955.tb01138.x.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. *大气科学*, 25 (3): 420–432. Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 420–432, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.11.
- Davis C A, Emanuel K A. 1991. Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119 (8): 1929–1953, doi:10.1175/1520-0493(1991)119<1929:PVDOC>2.0.CO;2.
- Davis C A. 1992a. A potential vorticity diagnosis of the importance of initial structure and condensational heating in observed extratropical cyclogenesis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120 (11): 2409–2428, doi:10.1175/1520-0493(1992)120<2409:APVDOT>2.0.CO;2.
- Davis C A. 1992b. Piecewise potential vorticity inversion [J]. *J. Atmos. Sci.*, 49 (16): 1397–1411, doi:10.1175/1520-0469(1992)049<1397:PPVI>2.0.CO;2.
- 段晶晶, 吴立广, 倪钟萍. 2014. 2004 年台风“艾利”与“米雷”路径异常变化分析 [J]. *气象学报*, 72 (1): 1–11. Duan Jingjing, Wu Liguang, Ni Zhongping. 2014. Analysis of unusual changes in typhoon Aere (2004) and Meari (2004) [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (1): 1–11, doi:10.11676/qjxb2014.004.
- 费建芳, 李波, 黄小刚, 等. 2011. 位涡反演理论在台风领域中的应用研究进展 [J]. *大气科学学报*, 34 (5): 621–626. Fei Jianfang, Li Bo, Huang Xiaogang, et al. 2011. Advances in application of potential vorticity inversion theory in typhoon research [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34 (5): 621–626, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.05.013.
- Holland G J. 1983. Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a Beta effect [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40 (2): 328–342, doi:10.1175/1520-0469(1983)040<0328:TCMEIP>2.0.CO;2.
- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111 (470): 877–946, doi:10.1002/qj.49711147002.
- Lee C S, Edson R, Gray W M. 1989. Some large-scale characteristics associated with tropical cyclone development in the North Indian Ocean during FGGE [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117 (2): 407–426, doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0407:SLSCAW>2.0.CO;2.
- Liang J, Wu L G. 2015. Sudden Track changes of tropical cyclones in monsoon gyres: Full-physics, idealized numerical experiments [J]. *J. Atmos. Sci.*, 72 (4): 1307–1322, doi:10.1175/JAS-D-13-0393.1.
- 倪钟萍, 吴立广, 张玲. 2013. 2005~2010 年台风突变路径的预报误差及其环流背景 [J]. *气象*, 39 (6): 719–727. Ni Zhongping, Wu Liguang, Zhong Ling. 2013. Analysis on forecasting errors and associated circulations of sudden typhoon track changes during 2005–2010 [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 39 (6): 719–727, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.06.008.
- Shapiro L J, Franklin J L. 1995. Potential vorticity in hurricane Gloria [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (5): 1465–1475, doi:10.1175/1520-0493(1995)123<1465:PVIHG>2.0.CO;2.
- Shi W L, Fei J F, Huang X G, et al. 2014. A numerical study on the combined effect of midlatitude and low-latitude systems on the abrupt track deflection of typhoon Megi (2010) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (7): 2483–2501, doi:10.1175/MWR-D-13-00283.1.
- Wu C C, Emanuel K A. 1995a. Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part I: A case study of hurricane Bob (1991) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (1): 69–92, doi:10.1175/1520-0493(1995)123<0069:PVDOHM>2.0.CO;2.
- Wu C C, Emanuel K A. 1995b. Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part II: Tropical storm Ana (1991) and hurricane Andrew (1992) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (1): 93–109, doi:10.1175/1520-0493(1995)123<0093:PVDOHM>2.0.CO;2.
- Wu C C, Huang T S, Huang W P, et al. 2003. A new look at the binary interaction: Potential vorticity diagnosis of the unusual southward movement of tropical storm Bopha (2000) and its interaction with supertyphoon Saomai (2000) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131 (7): 1289–1300, doi:10.1175/1520-0493(2003)131<1289:ANLATB>2.0.CO;2.
- Wu L G, Liang J, Wu C C. 2011. Monsoonal influence on typhoon Morakot (2009). Part I: Observational analysis [J]. *J. Atmos. Sci.*, 68 (10): 2208–2221, doi:10.1175/2011JAS3730.1.
- 许变, 崔晓鹏, 高守亭, 等. 2015. 台风“鲇鱼”(1013)路径突变过程的成因分析 [J]. *大气科学学报*, 38 (5): 658–669. Xu Luan, Cui Xiaopeng, Gao Shouting, et al. 2015. Cause analysis of sudden track change of typhoon Megi (1013) [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 38 (5): 658–669, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130301001.
- Yang C C, Wu C C, Chou K H, et al. 2008. Binary interaction between typhoons Fengshen (2002) and Fungwong (2002) based on the potential vorticity diagnosis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (12): 4593–4611, doi:10.1175/2008MWR2496.1.
- 禹梁玉, 方娟. 2013. 台风“鲇鱼”(2010)过程影响系统分析 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 49 (3): 285–299. Yu Liangyu, Fang Juan. 2013. An analysis on the impact system of typhoon MEGI (2010) [J]. *J. Nanjing Univ. (Nat. Sci.) (in Chinese)*, 49 (3): 285–299, doi:10.13232/j.cnki.jnju.2013.03.008.
- 张娇艳, 吴立广, 张强. 2011. 全球变暖背景下我国热带气旋灾害趋势分析 [J]. *热带气象学报*, 27 (4): 442–454. Zhang Jiaoyan, Wu Liguang, Zhang Qiang. 2011. Tropical cyclone damages in China under the background of global warming [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 27 (4): 442–454, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.04.002.
- 周毅, 寇正, 王云峰. 1998. 气旋生成机制的位涡反演诊断 [J]. *气象科学*, 18 (2): 121–127. Zhou Yi, Kou Zheng, Wang Yunfeng. 1998. Potential vorticity invertibility diagnostic of cyclogenesis mechanism [J]. *Sci. Meteor. Sinica (in Chinese)*, 18 (2): 121–127.