

利用位涡趋势法诊断台风“莫拉克”(2009)的移动^{* 1}

吴玉琴^{1,2} 吴立广¹ 梁佳¹
WU Yuqin^{1,2} WU Liguang¹ LIANG Jia¹

1. 南京信息工程大学太平洋台风研究中心, 南京, 210044

2. 中国卫星海上测控部, 江阴, 214431

1. *Nanjing University of Information Science & Technology, Pacific Typhoon Research Center, Nanjing 210044, China*

2. *China Satellite Maritime Tracking & Controlling Department, Jiangyin 214431, China*

2014-03-10 收稿, 2014-11-06 改回.

吴玉琴, 吴立广, 梁佳. 2015. 利用位涡趋势法诊断台风“莫拉克”(2009)的移动. *气象学报*, 73(2):236-246

Wu Yuqin, Wu Liguang, Liang Jia. 2015. Diagnosis of the movement of Typhoon Morakot (2009) using the potential vorticity tendency approach. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(2):236-246

Abstract The potential vorticity tendency (PVT) approach can quantitatively estimate the direct contribution of diabatic heating and other physical processes (the non-steering effect) to tropical cyclone (TC) movement. Through the numerical simulation of Typhoon Morakot (2009), the original PVT diagnostic method is improved by including the development of TC asymmetric circulation, and then first uses the approach in the high resolution numerical model results to analyze the impact of different physical processes on the movement of Morakot (2009). The results reveal that although diabatic heating mainly plays a role in maintaining the vertical structure of Morakot, its non-steering effect is important to the short-term oscillations of the movement of Morakot.

Key words Potential vorticity tendency, Typhoon movement, Steering flow, Diabatic heating

摘要 位涡趋势(PVT)法可以计算非绝热加热等物理过程对台风移动的直接影响(非引导效应)。在成功模拟2009年第8号台风“莫拉克”移动路径和近地面最大风速的基础上,进一步考虑了台风不对称环流发展的影响,对原有的位涡趋势诊断法进行了改进,并首次将该方法应用于高分辨率数值模式模拟结果中,诊断不同物理过程对“莫拉克”移动的影响。分析表明,虽然非绝热加热等物理过程主要作用于维持台风“莫拉克”的垂直结构,但非绝热加热等物理过程引起的非引导效应也对“莫拉克”移动的短时振荡有重要作用。

关键词 位涡倾向, 台风移动, 引导气流, 非绝热加热

中图法分类号 P435 P458.1⁺24

1 引言

近几十年,中外学者对台风移动进行了大量的研究。早期研究认为,台风移动主要受大尺度环境气流的引导(Adem, et al, 1960; George, et al, 1976; Neumann, 1979; Brand, et al, 1981; Chan,

et al, 1982)。20世纪80年代提出的 β 漂移理论,即在行星涡度梯度的影响下台风在北半球有向西向北的移动趋势,已经得到大量观测分析和数值模拟的证实(Holland, 1983; Fiorino, et al, 1989; Ulrich, et al, 1991; DeMaria, 1985; Peng, et al, 1990; Williams, et al, 1994; Li, et al, 1996; Wang

* 资助课题:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB430103)、国家自然科学基金项目(41275093)。

作者简介:吴玉琴,主要从事热带气旋方面的研究。E-mail: wuyuqinww@126.com

通信作者:吴立广,主要从事热带气旋方面的研究。E-mail: liguang@nuist.edu.cn

B, et al, 1995, 1997; Wang Y Q, et al, 1996a, 1996b, 1996c; 王斌等, 1998)。

虽然已有研究表明台风移动主要受环境引导气流和 β 漂移的影响,但是 Wu 等(2000)在理论上指出,台风移动除了受到环境引导气流和台风与环境相互作用产生的次级引导气流的影响外,还受到非引导气流效应的影响。在非引导气流效应的理论基础, Wu 等(2000)提出了一种新的诊断台风移动的方法,将台风看作具有较强正位涡(PV)距平(与环境相比)的系统,台风的移动实质上是正位涡距平的传播,台风移动可以通过位涡变化趋势方程来诊断,这种诊断方法称为位涡趋势法(PVT)。位涡趋势法不仅考虑了传统的引导气流与 β 漂移对台风移动的贡献,还包含了垂直切变、对流加热、摩擦等因子对台风移动的直接影响(非引导气流效应)。Wu 等(2001a, 2001b)用位涡趋势法进一步分析了非绝热加热与绝热加热对台风移动的影响,非绝热加热可以通过产生非对称气流,引起台风对称位涡分量的输送改变位涡的变化趋势(引导分量)和直接引起位涡变化趋势的变化(非引导分量)两种方式影响台风移动,并通过理想试验估算出非对称加热对台风移动的影响大小。Chan 等(2002)用不同的观测资料验证了位涡趋势法在实际台风路径分析中的适用性,并计算了实际个例中非绝热加热项对台风移动的贡献,发现非绝热加热项在移速缓慢的台风中作用更为重要。以上研究结果表明在台风移动过程中,除了需要考虑传统的引导气流作用外,其他物理过程(例如非绝热加热)的贡献同样不可忽视。但是, Wu 等(2000)的位涡趋势诊断法并没有考虑台风在移动过程中自身结构的发展,其认为局地位涡变化的一波分量主要用于驱动台风移动。

登陆台风会给登陆地区人民的生命财产造成巨大的损失(Zhang, et al, 2009; 张娇艳等 2011)。2009年第8号台风“莫拉克”8月7日晚在中国台湾登陆,在台湾地区滞留52 h,给台湾地区造成了破纪录的强降水,在全中国24 h累积降水记录中,排行第3位(Chen, et al, 2010)。“莫拉克”造成的灾害严重,引起了广泛的关注,并已对其做了很多的研究,主要认为“莫拉克”与季风环流、多种尺度系统的相互作用及台湾地区地形的作用是导致“莫拉克”造

成极端降水的主要原因(Ge, et al, 2010; Hong, et al, 2010; Liang, et al, 2011; Fang, et al, 2011; Chen, et al, 2010)。Chien 等(2011)通过观测分析指出相对台风强度,台风移速缓慢更容易带来强降水。Wu 等(2011)指出,“莫拉克”在台湾地区移速变慢可能是造成此次极端降水的直接原因。Wang C C 等(2012)通过数值试验发现,不同试验中水汽含量差别(100%, 25%)较大时造成的“莫拉克”移速之差与控制实验中引导气流与台风移速的偏差相当,因此,认为“莫拉克”中心附近非对称加热是其移速变慢的主要原因,但是这种敏感性试验方法只能间接证明非对称加热对“莫拉克”移动的作用。

本研究拟在已有研究基础上加入台风自身非对称环流的发展项改进原有位涡趋势法,并在成功模拟2009年第8号台风“莫拉克”移动路径和近地面最大风速的基础上,应用改进后的方法诊断多种物理过程对“莫拉克”移速的贡献。

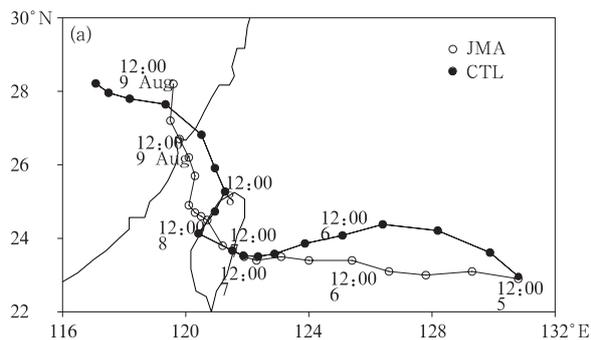
2 数值试验设计

数值试验设计与 Liang 等(2011)一致。利用中尺度非静力数值模式 WRF-ARW V3.0.1,采用3层网格双向嵌套,水平分辨率分别为27、9和3 km,对应格点数分别为 201×201 、 301×301 和 181×181 。第1和第2层模拟区域分别为($0.8^\circ\text{S} - 46.4^\circ\text{N}$, $98.3^\circ - 151.7^\circ\text{E}$)和($12.4^\circ - 36.4^\circ\text{N}$, $111.6^\circ - 138.4^\circ\text{E}$),第3层采用移动网格,网格中心随台风中心移动,垂直方向上28层,模式顶气压为50 hPa。最外层网格微物理过程采用WSM-3简单冰方案,细网格采用WSM-5方案,边界层采用Yonsei University方案,积云参数化采用Kain-Fritsch对流方案,长波采用RRTM方案,短波采用Duhia方案,积云对流参数化选取浅对流Kain-Fritsch方案(仅最外层网格使用)。积分时间为2009年8月5日12时(世界时,下同)—10日00时,共计108 h。

模式初始条件和边界条件由水平分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 的美国国家环境预测中心(NCEP)6 h一次Final Operational Global Analysis(FNL)资料处理得到,其中,海温每6 h更新一次。采用日本气象厅(JMA)提供的6 h一次最佳路径集资料与模式模拟路径进行对比。

3 模拟结果

模拟的台风中心定义为 700 hPa 最大方位角平均的切向风所对应的中心(Wu, et al, 2006)。可以看出,模式较好地模拟出“莫拉克”在 2009 年 8 月 5 日 12 时—10 日 00 时的移动路径及近地面最大风速变化特征(图 1),7 日 12 时模拟与观测台风中心重合,经过台湾地区时两者路径基本一致,8 日 00 时许台风在台湾海峡附近开始北折,但模拟路径向北偏转



角度大于观测,虽然模拟与观测存在一些差异,但是模式很好地模拟了台风登陆时间、位置及在登陆之后进入台湾海峡路径的北折。可以看出,模拟的台风在 7 日 06 时达到其最大强度,最大风速约为 42 m/s,比观测强 4 m/s(图 1b),模拟的台风在登陆中国台湾地区和二次登陆大陆之后风速迅速减小,这与观测结果一致。本研究将在数值试验的基础上应用位涡趋势法诊断多种物理过程对“莫拉克”登陆后移速的贡献,研究时段为 8 月 7 日 12 时—9 日 12 时。

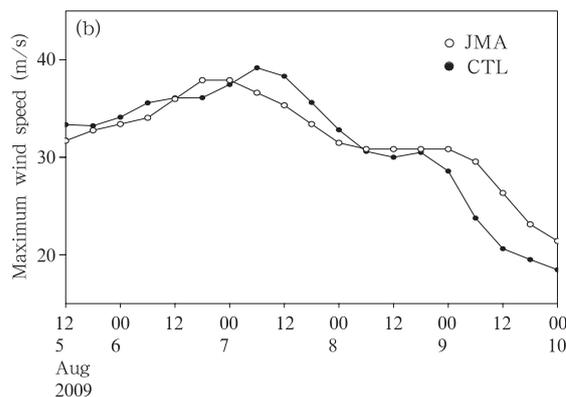


图 1 2009 年 8 月 5 日 12 时—10 日 00 时观测和模拟的台风“莫拉克”(a)路径和(b)最大风速

Fig. 1 Observed and simulated (a) track and (b) maximum wind speed of Typhoon Morakot from 12: 00 UTC 5 Aug to 00: 00 UTC 10 Aug 2009

4 方法介绍及改进

Shapiro 等(1995)指出对流层中低层热带气旋(TC)是一个强的局地位涡异常区。在 p 坐标系里,位涡定义为

$$P = -g(kf + \nabla_p \times \mathbf{V}) \cdot \nabla_p \theta \quad (1)$$

式中, P 为位涡; $\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$, $\nabla_p = \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial p}\mathbf{k}$

在随台风中心移动的移动坐标系中,位涡的变化由位涡的局地变化和平流两部分组成

$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_m = \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_f + \mathbf{c} \cdot \nabla P \quad (2)$$

式中,下标 m, f 分别表示移动坐标系和固定坐标系, \mathbf{c} 为台风移动速度。

在沿着热带气旋中心移动的柱坐标系中,速度 \mathbf{c} 仅与位涡一波分量有关,因此,式(2)可写为

$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_{1m} = \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_{1f} + \mathbf{c} \cdot \nabla P_s \quad (3)$$

式中, P_s 表示位涡对称分量, $\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_{1m}$ 表示移动坐标

系中位涡一波分量的变化。

Wu 等(2000)假定在移动坐标系中台风自身位涡分量变化很小,可以忽略不计。正如引言中所提到,台风在移动过程中自身的不对称位涡也会发展,为了衡量这一过程对台风移动的影响,在此考虑台风在移动过程中自身位涡的发展,即保留右边第一项

$$-\mathbf{c} \cdot \nabla P_s = \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_{1f} - \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_{1m} \quad (4)$$

结合大气运动基本方程组,推导 p 坐标系下位涡倾向方程为如下形式(具体推导见 Wu 等(2000)附录 B)

$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_{1f} = \Lambda_1 \left\{ -\mathbf{V} \cdot \nabla P - \omega \frac{\partial P}{\partial p} - \frac{g}{P_s} \nabla_3 \cdot \left(-\frac{Q}{c_p \pi} \mathbf{q} + \nabla \theta \times \mathbf{F} \right) \right\} \quad (5)$$

式中, ω 为 p 坐标系下垂直速度, \mathbf{q} 为三维绝对涡度矢量, Λ_1 为一波算子, ∇_3 为 p 坐标系下三维梯度算子, Q 和 \mathbf{F} 为加热项和摩擦项。右端 4 项分别为

位涡水平平流项、位涡垂直平流项、加热项、摩擦项。
在 p 坐标系下式(5)展开为

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_1 = \Lambda_1 \left\{ -u \frac{\partial P}{\partial x} - v \frac{\partial P}{\partial y} - w \frac{\partial P}{\partial p} - \right. \\ \left. g \left[\left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \frac{\partial \theta}{\partial p} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial F_x}{\partial p} - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial F_y}{\partial p} \right] + g \left[- (f + \xi) \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{Q}{c_p \pi} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q}{c_p \pi} \right) + \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{c_p \pi} \right) \right] \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

位涡趋势诊断法具体由以下 7 步实现:

- (1) 根据式(1)计算出位涡,并找出不同垂直层上台风中心;
- (2) 根据式(6)计算出总的位涡趋势以及位涡趋势方程右侧 4 项;
- (3) 将前 2 步的结果插值到沿台风中心运动的柱坐标系中;
- (4) 分离位涡对称分量及一波分量;
- (5) 将第 4 步的结果转换回直角坐标系中;
- (6) 计算位涡对称分量的水平梯度,并利用式(4)在每个格点上建立线性方程组

$$\begin{aligned} -c_x \left(\frac{\partial P_s}{\partial x} \right)_i - c_y \left(\frac{\partial P_s}{\partial y} \right)_i \\ = \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right)_{1fi} - \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right)_{1mi} \quad (7) \end{aligned}$$

(7)在台风中心附近挑选一定的区域(将台风包含在内),用最小二乘法计算位涡趋势估算速度

$$\min \left\{ \sum_{i \leq N} \left[c_x \left(\frac{\partial P_s}{\partial x} \right)_i + c_y \left(\frac{\partial P_s}{\partial y} \right)_i + \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right)_{1fi} - \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right)_{1mi} \right]^2 \right\}$$

其中, N 表示区域内格点总数。

5 位涡趋势法改进评估

为了检验对位涡趋势法的改进效果,分别比较了改进前、后的位涡趋势估算速度与模拟台风移动速度(图 2)。考虑到台风中心轴线的倾斜,每层位涡趋势估算速度是在以台风中心为中心 $540 \text{ km} \times 540 \text{ km}$ 区域内计算,然后得到 $700-300 \text{ hPa}$ 多层平均的位涡趋势估算速度,热带气旋移速是根据逐时台风中心位置,利用前后 2 h 位置差计算得出的,即 2 h 平均移动速度。为便于比较,对位涡趋势速度

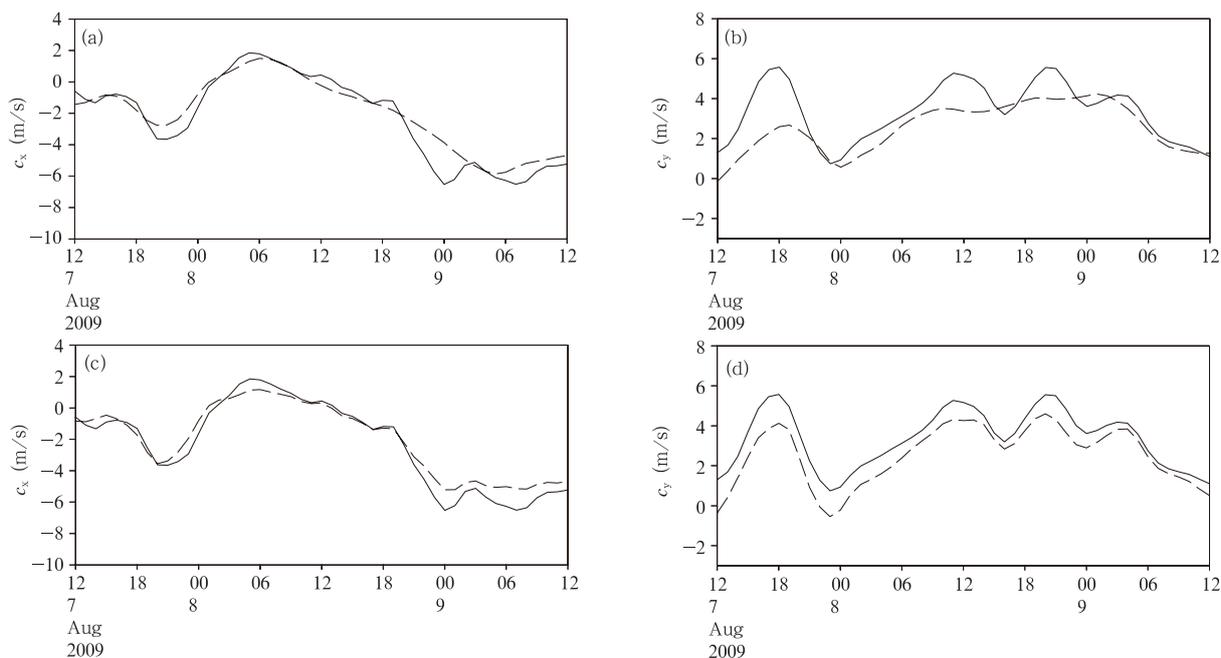


图 2 “莫拉克”登陆后模拟台风移速(实线)与未考虑位涡自身发展分量位涡趋势估算速度(虚线)的
(a) 纬向分量, (b) 经向分量, 及模拟台风移速(实线)与考虑位涡自身发展分量
位涡趋势估算速度(虚线)的 (c) 纬向分量, (d) 经向分量

Fig. 2 Comparisons of the zonal (a, c) and meridional (b, d) velocities of Morakot center positions between the estimated speed (dashed) using the original PVT method (a, b) and the one (solid) using the improved PVT method (c, d) during the landfall periods

进行了相应的平滑。可以看出,改进后的位涡趋势估算速度较改进前更接近热带气旋移速,特别是在台风突然加速、减速时刻,且经向速度的改进较纬向更为显著。值得注意的是,台风移动速度的经向分量在8日12时—9日00时出现振荡,在这12 h内台风移速变化区间为2.9—5.7 m/s,相应的位涡趋势估算速度变化区间改进前为3.6—4.0 m/s,改进后为2.6—4.8 m/s,改进后的位涡趋势法可以更准确地表征台风移速的短时振荡特征。这说明中心移动速度上的振荡与台风不对称环流的发展有密切关系,这属于非引导气流效应。

台风“莫拉克”登陆后路径的北折对应着纬向风速的迅速减小和经向风速的迅速增大,因此,对经向风速的改进在本研究中更为重要。改进后纬向风速的相关系数由0.95提升至0.99,平均误差由0.67 m/s降至0.53 m/s;经向速度相关系数由0.76提升至0.96,平均误差由0.95 m/s降至0.82 m/s。这些结果均表明改进后的位涡趋势估算速度在变化趋势及量值上都较改进前更接近台风移速。

此外,对于改进较明显的时刻,从台风自身位涡一波分量(图3)上亦可看出,确实存在短时间内位涡一波的波形、波峰及波谷量值上的快速变化,这说

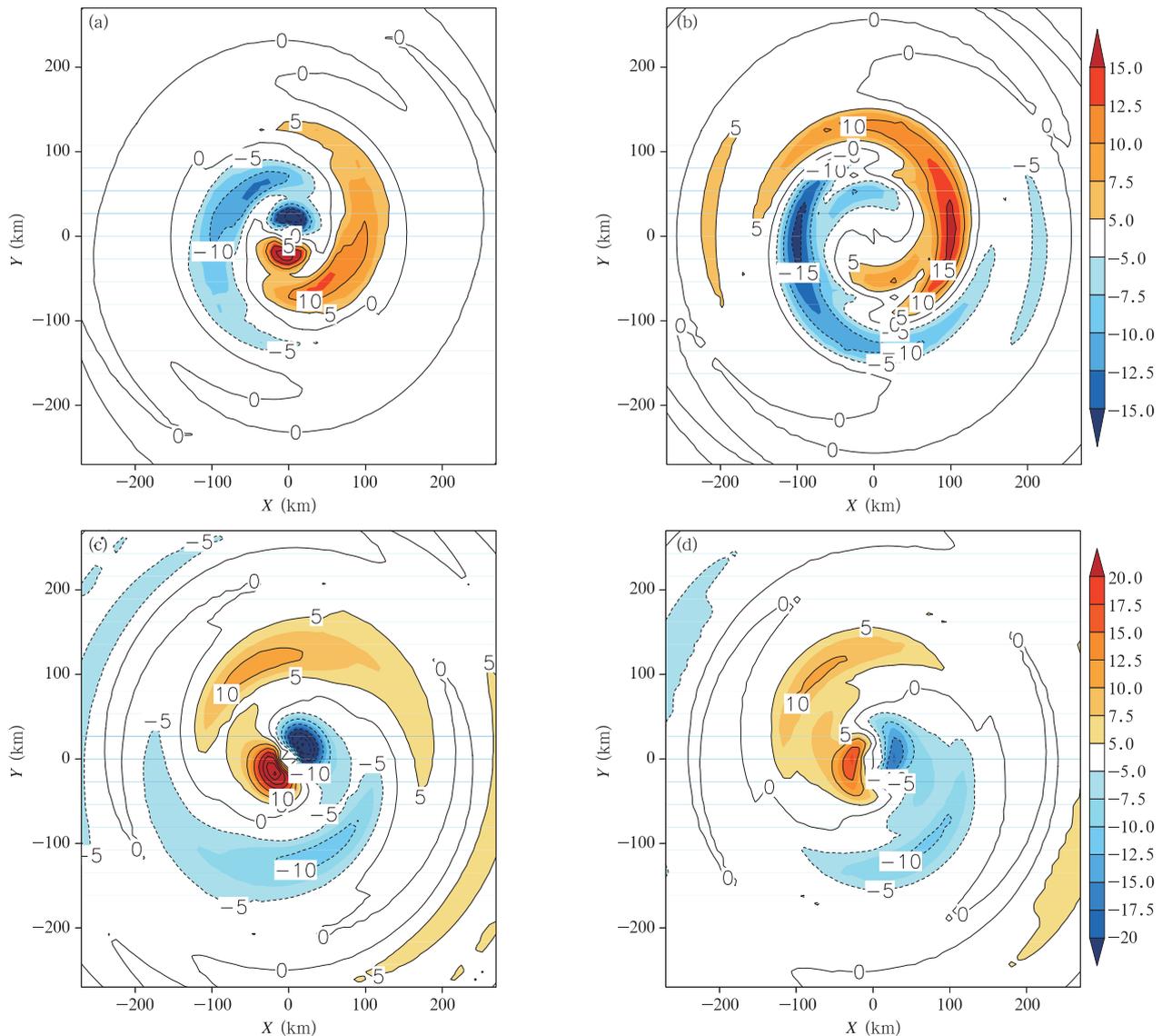


图3 振荡较大点处台风自身位涡一波分析(单位: $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$) (a. 8月7日16时, b. 17时, c. 8日02时, d. 03时)
Fig.3 Wavenumber one component of TC Potential Vorticity ($10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$) on the moment of large speed oscillation of (a) 16: 00 UTC 7 Aug, (b) 17: 00 UTC 7 Aug, (c) 02: 00 UTC 8 Aug and (d) 03: 00 UTC 8 Aug

明台风自身非对称环流存在短期内的快速发展,这也验证了本研究的改进。

综上所述,应用位涡趋势法诊断“莫拉克”登陆后的移动时,由台风自身不对称环流发展引起的非引导效应不可忽视,特别是台风移速出现短时振荡期间。改进的结果表明,台风在运动过程中局地位涡变化的一波分量不仅用于驱动台风移动,还用于台风不对称环流的发展。

Wu 等(2000)指出,应用最小二乘法计算位涡趋势估算速度对选取的计算区域并不敏感(选取区域仅需将台风范围包含在内)。本研究利用改进后的位涡趋势法分别计算以台风中心为中心边长 360、540 和 720 km 正方形区域内 700—300 hPa 多层平均估算速度与相同区域内的引导气流进行对比

(图 4),结果表明位涡趋势估算速度对计算区域不敏感,而不同区域内引导气流差别较大,这是位涡趋势法的优势之一。

此外,位涡趋势估算速度能够很好地表征经向速度分量在 8 日 12 时—9 日 00 时出现的振荡特征,而根据不同区域计算的引导气流则均无法表征这种特征。这主要是由于位涡趋势法不仅考虑了引导气流的作用,还考虑了多种物理过程产生的非引导气流对台风移动的作用,这进一步说明要准确地表征台风移动不仅要考虑引导气流作用,还必须考虑非引导气流分量的作用,特别是在台风移速振荡期间,非引导效应不可忽略,这是位涡趋势法的另一优势。

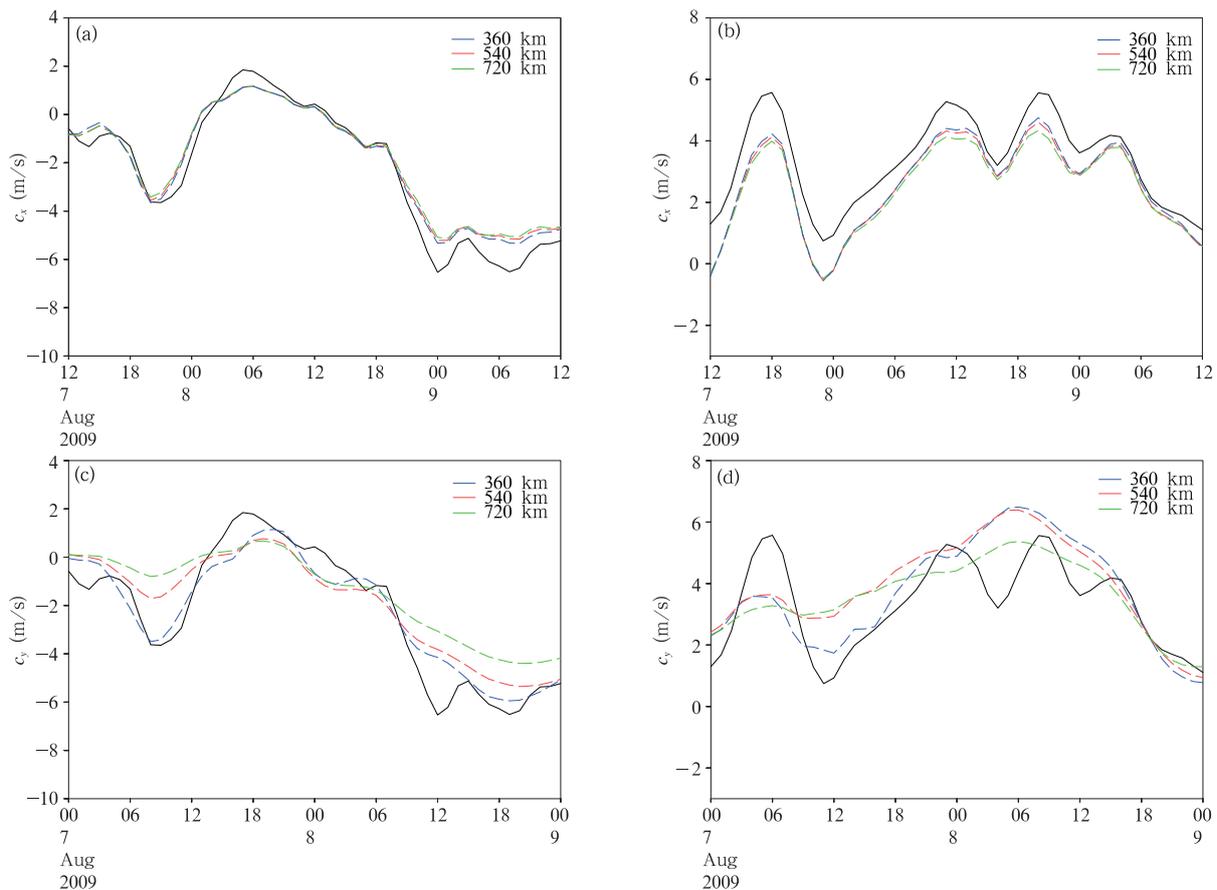


图 4 “莫拉克”登陆后多层(700—300 hPa)平均台风移速(黑色实线)与不同计算区域内位涡趋势估算速度的

(a) 纬向分量、(b) 经向分量及不同区域内的引导气流的(c) 纬向分量、(d) 经向分量(彩色虚线)

Fig. 4 Comparisons of TC's zonal (a, c) and meridional (b, d) multilayer average (700—300 hPa) velocities (black line) with the each layer average PVT estimated speed (a, b) and steering flow (c, d) (color dotted line) over the different areas

6 多种物理过程对台风移动的贡献

Wu 等(2001a)进一步将位涡水平平流项分为两部分

$$\Lambda_1(-\mathbf{V} \cdot \nabla P) \approx -\mathbf{V}_1 \cdot \nabla P_s - \mathbf{V}_s \cdot \nabla P_1 \quad (8)$$

式中,下标 s 和 1 分别表示对称分量 and 一波分量,右端第 1 项为非对称气流引起的对称位涡分量的平流,包含大尺度引导气流和通风流对台风移动的影响,与一波风场的区域平均引导气流对应较好;右端第 2 项为对称气流引起的非对称位涡分量的平流,包含了 β 涡对、垂直切变及非对称加热产生的非对称气流等物理过程对台风移动的作用。

Wu 等(2011)指出,台风“莫拉克”在中国台湾地区移速降低是其造成台湾地区强降水的主要原因。为了详细分析台风“莫拉克”在台湾地区移速变慢的原因,依据台风“莫拉克”所在位置将登陆后 48 h 分为 3 个时段:7 日 12 时—8 日 00 时台风刚开始登陆台湾地区时段(a_1 时段),8 日 00 时—9 日 00 时为台风“莫拉克”造成台湾地区单日降水量最大时段(a_2 时段),及 9 日 00—12 时“莫拉克”位于台湾西海岸时段(a_3 时段)。分别计算 3 个时段 700—300 hPa 多层平均的位涡趋势估算移速、位涡水平平流项估算移速、位涡垂直平流项估算移速、加热项估算移速、摩擦项估算移速,及位涡水平平流项中引导气流及对称气流引起的非对称位涡分量的平流项估算移速(图 5,表 1)。从图 5 和表 1 可以看出,不同时段内台风“莫拉克”的移动主要由水平平流项决定,该项的差异是不同时段内台风“莫拉克”移速差异的主要原因,这一项包括了引导气流和 β 漂移对台风移动的影响,这与已有的研究结果一致。值得注意的是,垂直平流、非对称加热及摩擦等因子对台风移动也起到了一定的作用, a_1 和 a_3 时段加热项估算速度分别为 1.7 和 2.8 m/s,但与其他项的作用相互抵消,最终“莫拉克”的移动主要由水平平流项决定。水平平流项基本由引导气流决定,对称气流引起的非对称位涡分量的平流项对台风移动贡献很小(图 5d—f)。因此,“莫拉克”的移动主要由引导气流决定。

为了直观分析非引导分量对台风“莫拉克”移动的影响,图 5g—i 给出了不同时段内去除引导气流后位涡趋势各分项的结果,可以清楚看到不同时段内去除引导气流后其他物理过程造成的非引导分量

抵消了一部分引导气流的作用。同时亦可看出 a_2 时段非引导分量对台风移动的作用最大(图 5j),可见该时段内速度的振荡与非引导气流关系密切,这与上述结论一致。由此可知,台风“莫拉克”登陆后的移动主要由引导气流决定,其他物理过程产生的非引导气流对“莫拉克”移速的作用相互抵消,贡献较小,但在移速出现振荡时段,非引导分量的作用不可忽略。

考虑到台风在移动过程中垂直结构的变化,分别诊断了台风高、中、低层位涡趋势各分项对台风移动的贡献(图 6)。结果表明,各分项在高、中、低层对台风移动的作用不同,中层 500 hPa 上,各分量的估算速度相对高、低层较小(图 6d—f)。值得注意的是,不同时段内加热项在高、低层差异较大,低层加热项对台风移动起到了明显的抑制作用,抵消了一部分水平平流项的引导作用,这可能对台风移速减小有一定的贡献,该结论与 Wang 等(2012)通过敏感性试验得到的结论一致。

此外,“莫拉克”并没有因各垂直层上的引导气流在大小和方向上的明显差异(图 6)而无法维持较完整的垂直结构,这说明非绝热加热等物理过程对台风垂直方向上结构的维持起到了重要作用。Wu 等(2001b)指出,台风可以通过非绝热加热项的迅速调整来维持自身结构的完整。这就引申出一个新的问题:台风自身通过何种物理机制来调整自身结构抵消不同物理过程在垂直方向上的不同作用?这将在以后的工作中进一步研究。

7 结 论

2009 年第 8 号台风“莫拉克”8 月 7 日晚在中国台湾登陆,登陆后移速减小,给台湾地区带来了 50 年来最大的降水。本研究通过考虑台风非对称环流发展的影响,对原有的位涡趋势诊断法进行了改进,并利用中尺度数值模式(WRF-ARW)模拟了 2009 年 8 月 5 日 12 时—10 日 00 时台风“莫拉克”的活动。在成功模拟出台风“莫拉克”的近地面最大风速变化及移动路径突变等特征的基础上,利用改进后的位涡趋势法诊断不同物理过程对“莫拉克”移速的影响。

通过对比改进前、后的位涡趋势估算速度与台风移速发现,无论在变化趋势还是量值上,改进后的位涡趋势估算速度都更接近于台风实际移速,且经

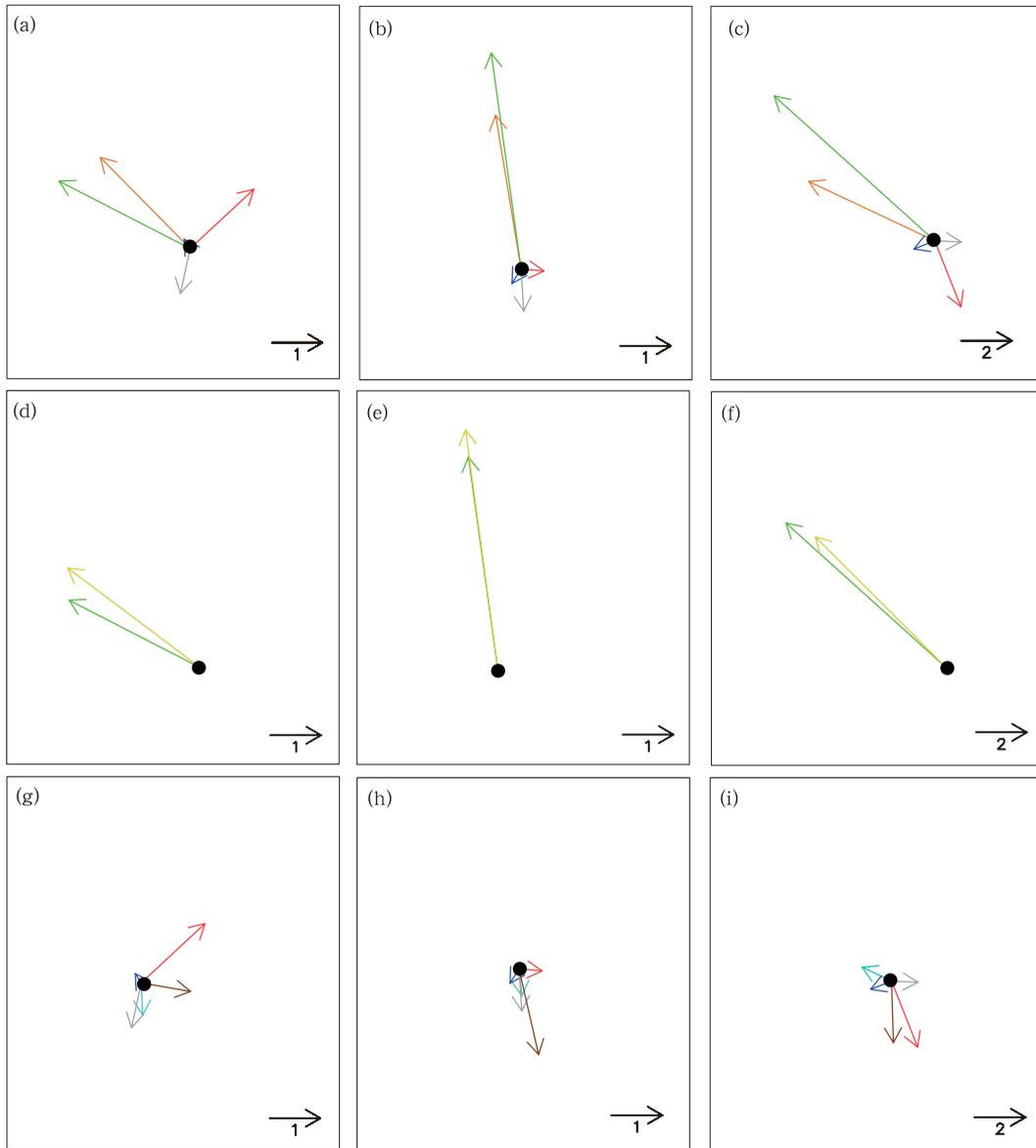


图5 “莫拉克”多层(700—300 hPa)平均位涡趋势各项估算移速(a. a_1 时段, b. a_2 时段, c. a_3 时段), 水平平流项估算移速、引导气流(d. a_1 时段, e. a_2 时段, f. a_3 时段), 去除引导气流后的位涡趋势各项估算移速(g. a_1 时段, h. a_2 时段, i. a_3 时段)(位涡趋势估算移速(橙色), 位涡水平平流估算移速(绿色), 垂直项估算移速(蓝色), 加热项估算移速(红色), 摩擦项估算移速(灰色), 引导气流(黄色), 对称气流引起的非对称位涡分量的平流项估算移速(青色), 去除一波引导气流各项矢量和(棕色); 单位均为: m/s)

Fig. 5 Morakot's multilayer (700 – 300 hPa) average speed estimated by the different physical processes using the improved PVT methods during the landfall periods of a_1 (a), a_2 (b), and a_3 (c); the multilayer average speed estimated by the PV horizontal advection and steering flow during landfall periods of a_1 (d), a_2 (e), and a_3 (f); the multilayer average speed estimated without steering flow during landfall periods of a_1 (g), a_2 (h), and a_3 (i) (a_1 : 12: 00 – 23: 00 UTC 7 Aug, a_2 : 00: 00 – 23: 00 UTC 8 Aug, a_3 : 00: 00 – 12: 00 UTC 9 Aug; PVT estimated speed (orange), PV horizontal advection estimated speed (green), PV vertical advection estimated speed (blue), diabatic heating estimated speed (red), friction estimated speed (gray), steering flow (yellow), Advection of the asymmetric PV Component by the symmetric flow estimated speed (cyan), total vector estimated speed without steering flow (brown) (m/s))

表 1 不同时段内多层(700—300 hPa)平均位涡趋势各项估算速度(m/s)

Table 1 Morakot's multilayer (700 – 300 hPa) average speed estimated by the different physical processes using the improved PVT methods for the different periods of landfall (m/s)

速度(m/s)	a ₁ 时段	a ₂ 时段	a ₃ 时段	整个时段
位涡趋势估算速度	2.5	3.1	5.5	3.2
位涡平流项速度	2.9	4.3	8.5	4.7
位涡垂直项速度	0.2	0.3	0.9	0.4
加热项速度	1.7	0.5	2.8	0.9
残余项速度	0.9	0.8	1.0	0.7
引导气流速度	3.3	4.8	7.3	4.8

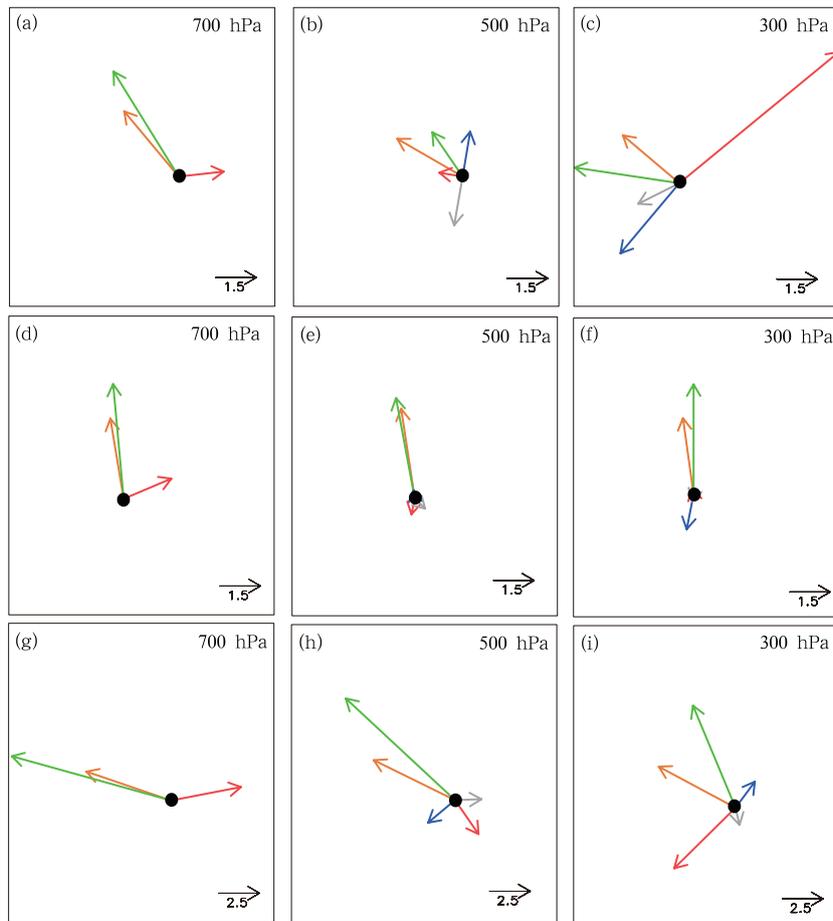


图 6 台风“莫拉克”登陆后各层位涡趋势各项估算移速

(a, b, c. a₁ 时段 300, 500, 700 hPa, d, e, f. a₂ 时段 300, 500, 700 hPa, g, h, i. a₃ 时段 300, 500, 700 hPa;

位涡趋势估算移速(橙色), 水平平流估算移速(绿色), 垂直项估算移速(蓝色),

加热项估算移速(红色), 残余项估算移速(灰色), 单位均为: m/s)

Fig. 6 Estimated speed by the different physical process using the improved

PVT methods during the Morakot's landfall periods (During the periods of

a₁ at (a) 300 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 700 hPa; during the periods of a₂ at (d) 300 hPa, (e) 500 hPa,

(f) 700 hPa; during the periods of a₃ at (g) 300 hPa, (h) 500 hPa, and (i) 700 hPa; (a₁: 12: 00 – 23: 00 UTC 7 Aug ,

a₂: 00: 00 – 23: 00 UTC 8 Aug; a₃: 00: 00 – 12: 00 UTC 9 Aug; PVT estimated speed (orange),

PV horizontal advection estimated speed (green), PV vertical advection estimate speed (blue),

diabatic heating estimated speed (red), friction estimated speed (gray)(units:m/s))

向速度上的改进比纬向更为明显,特别在经向速度分量出现振荡期间,改进后的位涡趋势法能更准确表征速度的短时振荡特征。这说明台风“莫拉克”中心移动速度上的短时振荡与台风不对称环流的发展有密切关系,这属于非引导气流效应。

相比于传统引导气流法,位涡趋势法具有以下两个优势:(1)位涡趋势法对计算区域不敏感;(2)位涡趋势法包含非引导分量对台风移动的作用,可以很好地表征台风移速的短时振荡特征。这也进一步说明台风“莫拉克”中心移速的短时振荡与非引导气流效应密不可分。

利用改进后的位涡趋势法诊断多种物理过程对“莫拉克”登陆后移动的贡献,结果表明,台风“莫拉克”登陆后的移动主要由引导气流决定,其他各项相互抵消,贡献较小,但在移速出现振荡期其他各项产生的非引导分量不可忽视。此外,各物理过程对台风移动的作用在高、低层差异较大,其中低层加热项对台风移动起明显的抑制作用,可能对台风移速减小有一定的贡献。

致谢:感谢南京信息工程大学陈小宇在调试程序期间给予的帮助。

参考文献

- 王斌, Russell L E, 王玉清等. 1998. 热带气旋运动的动力学研究进展. *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. *Chinese J Atmos Sci*, 22(4): 535-547 (in Chinese)
- 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. *热带气象学报*, 27(4): 442-454. Zhang J Y, Wu L G, Zhang Q. Tropical cyclone damages in China under the background of global warming. *J Trop Meteor*, 27(4): 442-454 (in Chinese)
- Adem J, Lezama P. 1960. On the motion of a cyclone embedded in a uniform flow. *Tellus*, 12(3): 255-258
- Brand S, Buenafe C A, Hamilton H D. 1981. Comparison of tropical cyclone motion and environmental steering. *Mon Wea Rev*, 109(4): 908-909
- Chan J C L, Gray W M. 1982. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships. *Mon Wea Rev*, 110(10): 1354-1374
- Chan J C L, Ko F M F, Lei Y M. 2002. Relationship between potential vorticity tendency and tropical cyclone motion. *J Atmos Sci*, 59(8): 1317-1336
- Chen T C, Coauthors. 2010. The characteristics of radar observed mesoscale rainbands of Typhoon Morakot // Hsu H H, et al. Scientific Report on Typhoon Morakot (2009). National Science Council, 53-81
- Chien F C, Kuo H C. 2011. On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009). *J Geophys Res*, 116(D5): D05104, doi: 10.1029/2010JD015092
- DeMaria M. 1985. Tropical cyclone motion in a nondivergent barotropic model. *Mon Wea Rev*, 113(7): 1199-1210
- Fang X Q, Kuo Y H, Wang A Y. 2011. The impact of Taiwan topography on the predictability of Typhoon Morakot's record breaking rainfall: A high-resolution ensemble simulation. *Wea Forecasting*, 26(5): 613-633
- Fiorino M J, Elsberry R L. 1989. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J Atmos Sci*, 46(7): 975-990
- Ge X Y, Li T, Zhang S J, et al. 2010. What causes the extremely heavy rainfall in Taiwan during Typhoon Morakot (2009)? *Atmos Sci Lett*, 11(1): 46-50
- George J E, Gray W M. 1976. Tropical cyclone motion and surrounding parameter relationships. *J Appl Meteor*, 15(12): 1252-1264
- Holland G J. 1983. Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a beta effect. *J Atmos Sci*, 40(2): 328-342
- Hong C C, Lee M Y, Hsu H H, et al. 2010. Role of submonthly disturbance and 40 - 50 day ISO on the extreme rainfall event associated with Typhoon Morakot (2009) in southern Taiwan. *Geophys Res Lett*, 37(8): L08805, doi: 10.1029/2010GL042761
- Li X, Wang B. 1996. Acceleration of hurricane beta drift by the shear strain rate of environmental flows. *J Atmos Sci*, 53(2): 327-334
- Liang J, Wu L G, Ge X Y, et al. 2011. Monsoonal influence on Typhoon Morakot (2009). Part II: Numerical study. *J Atmos Sci*, 68(10): 2222-2235
- Neumann C J. 1979. A guide to Atlantic and Eastern Pacific models for the prediction of tropical cyclone motion. NOAA Tech. Memo. NWS NHC-11, 26 pp
- Peng M S, William R T. 1990. Dynamics of vortex asymmetries and their influence on vortex motion on a β -plane. *J Atmos Sci*, 47(16): 1987-2003
- Shapiro L J, Franklin J L. 1995. Potential vorticity in Hurricane Gloria. *Mon Wea Rev*, 123(5): 1465-1475
- Ulrich W, Smith R K. 1991. A numerical study of tropical cyclone motion using a barotropic model. II: Motion in spatially-varying large-scale flows. *Quart J Roy Meteor Soc*, 117: 107-124
- Wang B, Li X F. 1995. Propagation of a tropical cyclone in a meridionally varying zonal flow: An energetics analysis. *J Atmos Sci*, 52(9): 1421-1433
- Wang B, Li X F, Wu L G. 1997. Direction of hurricane beta drift in horizontally sheared flows. *J Atmos Sci*, 54(11): 1462-1471
- Wang C C, Kuo H C, Chen Y H, et al. 2012. Effects of asymmetric latent heating on typhoon movement crossing Taiwan: The case

- of Morakot (2009) with extreme rainfall. *J Atmos Sci*, 69(11): 3172-3196
- Wang Y Q, Holland G J. 1996a. The beta drift of baroclinic vortices. Part I: Adiabatic vortices. *J Atmos Sci*, 53(3): 411-427
- Wang Y Q, Holland G J. 1996b. The beta drift of baroclinic vortices. Part II: Diabatic vortices. *J Atmos Sci*, 53(24): 3737-3756
- Wang Y Q, Holland G J. 1996c. Tropical cyclone motion and evolution in vertical shear. *J Atmos Sci*, 53(22): 3313-3332
- Williams R T, Chan J C L. 1994. Numerical studies of the beta effect in tropical cyclone motion. Part II: Zonal mean flow effects. *J Atmos Sci*, 51(8): 1065-1076
- Wu L G, Wang B. 2000. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion. *Mon Wea Rev*, 128(6): 1899-1911
- Wu L G, Wang B. 2001a. Movement and vertical coupling of adiabatic baroclinic tropical cyclones. *J Atmos Sci*, 58(13): 1801-1814
- Wu L G, Wang B. 2001b. Effects of convective heating on movement and vertical coupling of tropical cyclones: A numerical study. *J Atmos Sci*, 58(23): 3639-3649
- Wu L G, Braun S A, Halverson J, et al. 2006. A numerical study of Hurricane Erin (2001). Part I: Model verification and storm evolution. *J Atmos Sci*, 63(1): 65-86
- Wu L G, Liang J, Wu C C. 2011. Monsoonal influence on Typhoon Morakot (2009). Part I: Observational analysis. *J Atmos Sci*, 68(10): 2208-2221
- Zhang Q, Liu Q F, Wu L G. 2009. Tropical cyclone damages in China 1983-2006. *Bull Amer Meteor Soc*, 90(4): 485-495