王天驹,钟中,王举,等,2019. 位涡倾向分布与台风 Megi(2010)移动的关系及其影响因子[J]. 气象,45(6):791-798. Wang T J, Zhong Z, Wang J, et al,2019. Correlation between PVT distribution and movement of Typhoon Megi (2010) and the impact factors[J]. Meteor Mon,45(6):791-798(in Chinese).

# 位涡倾向分布与台风 Megi(2010)移动 的关系及其影响因子\*

王天驹1 钟 中<sup>1,2</sup> 王 举1 孙 源1

1 国防科技大学气象海洋学院,南京 211101
 2 南京大学气候变化协同创新中心,南京 210023

提要:结合数值试验结果对台风 Megi(2010)不同半径内的位涡倾向(potential vorticity tendency, PVT)质心位置变化与 台风移动的关系进行了探讨,并对 PVT 方程中不同因子影响 PVT 质心位置的作用范围进行了研究。结果表明,较小台风半 径内的正 PVT 质心位置变化与台风移动具有较好对应关系,可指示"Megi"转向,较大台风半径内的 PVT 分布变化虽不直接 指示"Megi"转向,但可反映对应区域内大气动力、热力状况发生了有利于"Megi"转向的调整。PVT 质心移动受位涡水平平流 项的影响较大,受垂直平流项和非绝热加热项的影响相对较小,PVT 方程中与台风内部对流活动有关的垂直平流项和非绝热 加热项可对"Megi"中心附近 PVT 分布产生影响,而与台风水平环流有关的水平平流项除可对较小台风半径内 PVT 分布造 成影响外,还可将台风位涡向外输送,是导致不同半径内 PVT 质心位置差异的主要原因。

关键词: 位涡倾向方程,台风移动,数值模拟,诊断分析

中图分类号: P456 文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.005

# Correlation Between PVT Distribution and Movement of Typhoon Megi (2010) and the Impact Factors

WANG Tianju<sup>1</sup> ZHONG Zhong<sup>1,2</sup> WANG Ju<sup>1</sup> SUN Yuan<sup>1</sup>

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101
 Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change, Nanjing University, Nanjing 210023

Abstract: Relationship between changes of (potential vorticity tendency, PVT) centroid positions in different radii and the movement of Typhoon Megi was analyzed by numerical experiment, and the impact radius of PVT equation factors on PVT centroids positions was also discussed. The results show that within smaller radius, changes of the positive PVT centroid position are in accordance with Megi's movement and are able to indicate the recurving of Megi. However, within larger radius, though the positive PVT centroid does not indicate the movement and turning of Megi directly, it reflects that the adjustment of atmospheric dynamical and thermal conditions in the corresponding area are favorable for Megi's steering. PVT centroid movement is mainly affected by the horizontal advection, and is less affected by vertical advection and diabatic heating. The influences of vertical advection and diabatic heating related to thermal convection of Megi on PVT distribution are mainly concentrated near typhoon center. However, horizontal advection related

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41430426)资助

<sup>2018</sup>年7月29日收稿; 2018年12月9日收修定稿

第一作者:王天驹,主要从事热带气旋数值模拟.Email:wtj\_1129@126.com

通信作者:钟中,主要从事热带气旋活动研究.Email. zhong\_zhong@yeah.net

to typhoon horizontal circulation can not only affect the PVT distribution within small radius, but also transport typhoon potential vorticity to farther area along northeast direction, which is the main reason for the difference of positive PVT centroid positions within different radii.

象

Key words: potential vorticity tendency equation, typhoon movement, numerical simulation, diagnostic analysis

## 引 言

热带气旋(typhoon cyclone, TC)会引起大风、 暴雨和风暴潮等灾害,对人们的生产生活造成严重 影响,一直都是人们研究的重点。TC移动不仅受 其自身结构的影响,也受大气环流和海洋状况的调 制,尤其是在TC路径比较复杂时,参与作用的因子 更多,作用的机制更加复杂,是TC研究的难点之一 (毕鑫鑫等,2018;陈联寿和孟智勇,2001)。

在影响 TC 移动的因子中,环境引导气流、β 效 应、非绝热加热、台风的非对称结构和地形是较为重 要的因素(罗哲贤和陈联寿,1995;Carr and Elsberry, 1995; Torn and Davis, 2012; Shi et al, 2014; Dong and Neumann, 1983)。刘科成(1989)采用动 力诊断方法对 1983 年台风 Abby 的观测路径资料 进行了分析,发现当台风处于转向阶段时,β效应的 贡献为负,对台风转向的阻碍作用最为明显。陈联 寿等(1997)在利用数值试验结果对 TC 外区热力不 稳定非对称结构进行研究时,发现 TC 运动对其外 区热力不稳定结构的分布较为敏感,不同的外区热 力非对称结构可导致 TC 轨迹出现差异,从而出现 各类复杂的 TC 运动路径。陈涛和毕宝贵(2004)通 过设计一个准三维斜压模式研究了非绝热加热对 TC 移动的影响,结果表明 TC 在环境热源的加热作 用下有向热源中心移动的趋势。王雨星等(2017)对 不同初始强度 TC 影响副热带高压(以下简称副高) 的敏感性数值试验结果表明,TC 活动导致的副高 异常减弱,是副高主导的引导气流发生改变并最终 导致台风转向的重要原因。

位涡(potential vorticity, PV)可以综合表征大 气的热力和动力特征,是一种重要的诊断工具,它既 能描述气块轨迹,又能显示大尺度环境场的动力和 热力学性质,因此受到人们的广泛关注(寿绍文, 2010;费建芳等,2011;陶祖钰和郑永光,2012; Kunz et al, 2015; Archambault et al, 2015),并有 众多学者将位涡理论应用到台风研究当中(何丽华 等,2007;邵颖斌等,2014;黎惠金等,2016)。Shapiro and Franklin(1995)首次对台风的 PV 分布特 征进行了研究,并提出对流层中高层的 PV 非对称 分布与台风的移动方向密切相关,在此基础之上, Wu and Wang(2000)利用位涡趋势法对 TC 移动的 研究进一步表明,TC 有向着正位涡倾向(potential vorticity tendency,PVT)一波大值区移动的趋势。 Chan et al(2002)利用 1991—1996 年的 Met Office 业务分析资料对西北太平洋区域的 TC 活动进行了 研究,结果表明 PVT 一波分布主要为位涡平流和 非绝热加热的结果,TC 有向着 PVT 一波正值区移 动的趋势。袁敏等(2018)在利用 PVT 方程对 2011 年台风 Muifa 的两次路径转折进行研究时,发现台风 路径的第一次转折主要受位涡平流项的影响,第二次 转折受位涡平流项和非绝热加热项的共同作用。

已有研究对位涡分布影响台风移动的讨论较 多,但并未考虑位涡在不同台风半径内的分布差异。 Frank(1977)指出,在距离台风中心 0~4°(经纬度) 的范围内布满了典型的盾状密卷云层,是对流存在 的主要区域,而在距离台风中心 6°以外的区域,虽 然对流活动已接近平均干热带状况,但环境风场还 受台风影响,加在平均环境场上的涡旋扰动可从风 暴中心向外扩展至 1000 km,故台风对流活动主要 集中在较小的半径范围内,而台风水平环流的作用 范围则要大很多。目前结合位涡趋势法开展的研究 并没有对不同范围内 PVT 分布与 TC 移动的关系 进行讨论,也没有给出不同范围内 PVT 方程中各 因子与 PVT 总体分布的关系,因此本文以发生在 2010年10月的台风 Megi 为例,结合质心计算方法 和数值试验结果对不同台风半径内 PVT 质心位置 与"Megi"移动的关系进行了讨论,并对 PVT 方程 中各因子在不同范围内对 PVT 分布的影响进行了 分析。

## 1 资料和方法

本文使用的数值模式为 WRF V3.3 模式,初始

条件和边界条件为 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)提供的逐 6 h FNL(Final Operational Global Analysis)资料,资料水平分辨 率为1°×1°。模式区域中心点位于(22°N、122°E), 东西方向为180个格点,南北方向为160个格点,水 平格距为20 km,垂直方向分为36 层。参考 Sun et al(2014)的设置,模式物理方案主要采用了 WSM3 简单冰方案(Hong et al, 2004), MYJ 边界层方案 (Mellor and Yamada, 1982; Janjić, 2001)及GD 积 云对流参数化方案(Grell and Dévényi, 2002)。模 式积分从2010年10月14日00 UTC开始,到23 日00 UTC 结束,共计240 h,涵盖了"Megi"的整个 生命过程,其中14—16 日为 spin-up 阶段。

台风路径资料为联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)提供的台风最佳路 径资料。

P坐标系下的位涡表达式为:

 $PV = -g[(f+\zeta)\frac{\partial\theta}{\partial p} + \frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta}{\partial x}] (1)$ 式中,  $\zeta$  为相对涡度, f 为地转涡度, g 为重力加速 度,  $\theta$  表示位温, u, v 分别表示水平经向和纬向风速。 位涡倾向方程可写为:

$$\frac{\partial PV}{\partial t} = \left(-u \frac{\partial PV}{\partial x} - v \frac{\partial PV}{\partial y}\right) + \left(-\omega \frac{\partial PV}{\partial p}\right) - g\left[\left(\zeta + f\right) \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{d\theta}{dt}\right) + \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{d\theta}{dt}\right) - \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{d\theta}{dt}\right)\right] - g\left[\left(\frac{\partial F_x}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y}\right) \frac{\partial\theta}{\partial p} + \frac{\partial F_x}{\partial p} \frac{\partial\theta}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial p} \frac{\partial\theta}{\partial x}\right] (2)$$

式甲等号石端四项依次为水平平流项(FA)、垂重 平流项(VA)、非绝热加热(DH)和摩擦项(FR)。

在对 VA 进行计算时,垂直速度 ω 可由

$$\omega = \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_z + u\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_z + v\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)_z + w\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) (3)$$

计算得到,其中p,u,v,w分别表示z坐标系下的气 压、纬向和经向速度以及垂直速度。另外,热力学方 程表明,位温 $\theta$ 对时间的导数与非绝热加热率及温 度有关,而非绝热加热率 Q 可由 Q = Q<sub>MP</sub> + Q<sub>CP</sub> + Q<sub>RA</sub> + Q<sub>BL</sub> 计算得到(Sun et al, 2015),其中等号右 端四项可由模式输出,分别表示微物理参数化方案 (MP)、积云对流参数化方案(CP)、辐射参数化方案 (RA)和边界层参数化方案(BL)对应的非绝热加热 率,因此 DH 项也可计算得到。

由于台风在海面上活动,摩擦项很小(袁敏等, 2018),因此本文在进行诊断分析时主要分析了其他 三项(HA, VA, DH)对 PVT 造成的影响。考虑到 已有研究多采用 PVT 的垂直积分结果讨论 PVT 分布与 TC 移动的关系,且深层平均风场常被作为 TC 引导气流,故大气的深层热力、动力分布状况对 TC 移动的影响更大,因此本文主要对 HA,VA 和 DH 在 700~200 hPa 的垂直积分结果展开讨论。 参考前文所述 Frank(1977)对台风结构和能量分布 的研究结果,本文对距离台风中心 5°和 10°(经纬 度)范围内的 PVT 质心位置进行了计算。所用质 心计算公式为

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}$$

$$\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}$$
(4)

式中(x,y)表示计算得到的质心经纬度坐标, $x_i$ 和  $y_i$ 分别表示所用格点的经度和纬度, $m_i$ 表示所用格 点的 PVT 值。

## 2 结果分析

#### 2.1 PVT 质心位置变化与"Megi"移动的关系

图 1 为模式区域范围和"Megi"的模拟和观测 路径。从图中可以看出,模拟时段内模式的模拟路 径与观测较为一致,模式较好地体现出了"Megi"在



经过菲律宾后向北转向的特征,模拟路径逐 6 h 的 平均误差仅为 32 km,表明模拟结果的准确度较高。

图 2 为 TC 转向前后(18 日 18 UTC 至 20 日 00 UTC)逐 6 h 的 PVT 垂直积分结果和垂直平均 风场分布。从图 2 可以看出,19 日 18 UTC 之前 (图 2a~2d),绿色点均位于台风符号以西,表示 "Megi"沿西行路径移动,19 日 18 UTC 之后(图 2e ~2f),绿色点移至台风符号以北,表示"Megi"发生 转向,由西行转为北上。在"Megi"西行阶段,PVT 在"Megi"前进方向前正后负的分布非常明显,"Megi"向着 PVT 正值区方向移动,这与前人的研究结 论十分一致(Wu and Wang, 2000; 袁敏等, 2018)。 在"Megi"转向阶段,绿色点和台风符号之间的距离 有所减小,表明"Megi"移速降低。另外,19日18 UTC 至 20 日 00 UTC "Megi" 后部的气流分为两 支,一支绕"Megi"气旋式向西传播,一支沿东北方 向传播,其中向东北方向传播的气流将台风位涡向 外输送,并逐渐形成了一条西南一东北向的位涡输 送带(图 2b~2d)。

"Megi"活动主要时段(17 日 00 UTC 至 22 日

00 UTC)r<5°和r<10°范围内正 PVT 质心位置以 及台风中心位置随时间的变化如图 3 所示。r<5° 范围内正 PVT 质心在 17 日 00 UTC 至 18 日 00 UTC 逐渐从台风中心的北侧移至台风中心的南侧移至台 风中心的北侧。20 日 12 UTC 前,r<5°范围内正 PVT 质心始终位于台风中心以西,20 日 12 UTC 后,正 PVT 质心逐渐移至台风中心以东,r<5°范围 内正 PVT 质心位置总位于"Megi"前部,因此 PVT 质心位置变化对"Megi"移动具有指示作用,可较好 地反映台风即将发生的移动和转向。

在 r<10°范围内计算得到的正 PVT 质心位置 如图 3 中红线所示。r<10°范围内的正 PVT 质心 在 17 日 00 UTC 至 18 日 00 UTC 有一次明显的南 移,在 18 日 12 UTC 之后又逐渐向北移动。另外,r <10°范围内的正 PVT 质心在 18 日 18 UTC 之前 位于台风中心以西,18 日 18 UTC 之后逐渐移至台 风中心以东。需要注意的是,虽然 r<10°范围内的 正 PVT 质心位置也发生了北移,但其时间与"Megi" 向北转向的时间存在差异,故该区域内的PVT质



averaged vertical wind (vector, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) from 1800 UTC 18 to

0000 UTC 20 October 2010 with 6 h interval

(Black dot represent position of Megi center prior to 6 h, typhoon mark represents current position of Megi,

and green dot represents position of Megi center after 6 h)



0000 UTC 17 to 0000 UTC 22 October 2010

心北移对台风转向的直接指示效果虽然较弱,但反 映出这一区域内的大气动力、热力状况发生了调整, 为之后"Megi"转向创造了有利环境条件。

另外, $r < 5^{\circ}$ 和  $r < 10^{\circ}$ 范围内正 PVT 质心的纬 度和经度差异主要出现于 18 日 18 UTC 至 20 日 00 UTC,这也是台风后部西南一东北向分布的位涡输 送带逐渐发展的时段(图 2)。由式(4)可知, $5^{\circ} < r <$ 10°的 PVT 分布改变不会对  $r < 5^{\circ}$ 范围内质心位置 造成影响,但会造成  $r < 10^{\circ}$ 范围内质心位置的变化, 因此台风后部向东北方向的位涡输送尤其可以改变  $r < 10^{\circ}$ 范围内正 PVT 质心位置,使  $r < 10^{\circ}$ 范围内的 正 PVT 质心向东北方向移动(图 3)。

#### 2.2 PVT 质心位置分布差异的诊断分析

为进一步明确不同范围内 PVT 质心位置出现 差异的原因,结合 PVT 方程进行诊断分析。图 4 为 台风转向期(19日00-18 UTC)不同时刻 HA, VA 和 DH 的垂直积分结果。从图中可以看出, VA 和 DH的大值主要集中在距离台风中心较近的区域 内,这表明与台风对流活动紧密相关的 VA 和 DH 对位涡变化的作用范围相对较小。而 HA 除在台 风中心附近强度较大外,还可在台风后部形成西 南一东北分布的平流带,对位涡变化的作用范围相 对较大。图 4 中 HA 平流带与图 2b~2d 中位涡输 送带的产生时间和分布特征十分一致,因此是构成 位涡输送带的主要因子,也是台风位涡向外输送的 主要途径。已有研究指出,菲律宾附近的 TC 活动 可激发北传至日本附近的静止 Rossby 波 (Kawamura and Ogasawara, 2006; Yamada and Kawamura, 2007),因此图 4 中位涡输送带的产生 可能与 TC 激发波动有关。

图 5 为 HA, VA, DH 以及 PVT 垂直积分正值 区质心位置随时间的演变。从图中可以看出, r<5° 与 r<10°内 VA 和 DH 的质心位置差别相对较小, 而不同范围内的 HA 质心位置差异则相对较大, 且 在 18 日 00 UTC 至 20 日 00 UTC 差别最为显著。 具体来说, r<5°与 r<10°范围内 HA 质心的纬度差 值均方根为 0.36°, 经度差值均方根为 0.61°, VA 质 心的纬度差值均方根为 0.1°, 经度差值均方根为 0.14°, DH 质心的纬度差值均方根为 0.26°, 经度差 值均方根为 0.24°。

结合图 4 可以发现,VA 和 DH 对 PVT 分布的 影响主要集中在台风中心附近,而对较远区域 PVT 分布的影响较小,这也是图 5 中 VA 和 DH 正值区 质心位置在 r<5°和 r<10°范围内差异较小的原因。 HA 除可对台风中心附近 PVT 产生影响以外,还可 通过形成位涡平流带对较远区域的 PVT 分布产生 影响,因此图 5 中 r<5°和 r<10°范围内 HA 的正值 质心位置差异较大。另外,无论是在 r<5°还是在 r <10°, 正 HA 质心位置与正 PVT 质心位置的相关 系数总是最大,且可以通过 0.01 显著性水平检验, 这表明 PVT 质心移动受 HA 的影响较大,受其他 两项的影响相对较小。

## 3 结论与讨论

本文对"Megi"不同半径内正 PVT 质心位置变 化与"Megi"移动的关系进行了探讨,并分析了 PVT 方程中各因子对 PVT 总体分布的作用范围,得出 以下结论:



 图 4 2010年10月19日(a,b,c)00 UTC,(d,e,f)06 UTC,(g,h,i)12 UTC"Megi"转向期 HA(a,d,g), VA(b,e,h)和 DH(c,f,i)的垂直积分分布(阴影,单位: 10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>・Pa・K・s<sup>-2</sup>・kg<sup>-1</sup>) (台风符号表示"Megi"当前位置)



(a, b, c) 0000 UTC, (d, e, f) 0600 UTC, (g, h, i) 1200 UTC 19 October 2010
 (Typhoon symbol represents the current position of Megi)



图 5 r<5°(虚线)和 r<10°(实线)范围内 HA(红线),VA(蓝线),DH(绿线)和 PVT(黑线)的垂直积分结果正值质心纬度(a)和经度(b)随时间的变化</li>
Fig. 5 Time series of vertical integral centroid latitudes (a) and longitudes (b) of positive HA (red), VA (blue), DH (green) and PVT (black) within r<5° (dash line) and r<10° (solid line)</li>

(1) r<5°范围内正 PVT 质心位置变化所反映的 PVT 分布改变与台风移动有较好的对应关系,

正 PVT 质心位置对台风移动具有指示作用,可指 示台风转向;r<10°范围内正 PVT 质心的位置虽不 直接指示"Megi"移动和转向,但反映出对应区域内 大气的动力、热力状况发生了有利于"Megi"转向的 调整。

(2) PVT 质心移动受 HA 的影响较大,受 DH 和 VA 项的影响相对较小,且 PVT 方程中各项对 PVT 总体分布的作用范围不同。与"Megi"内部对 流活动有关的 DH 和 VA 项对 PVT 分布的影响主 要集中在较小台风半径内,而与台风水平环流有关的 HA 项除在较小台风半径内可对 PVT 分布造成 影响以外,还可通过位涡水平向外输送影响较大范 围内的 PVT 分布,是造成不同半径内 PVT 质心分 布差异的主要原因。

虽然本文的试验结果表明 PVT 质心位置与台 风移动存在对应关系,但本文的研究并未讨论 PVT 方程各项发生变化的物理机制,也未对 PVT 方程 中各因子在不同高度的作用差异进行分析,因此需 要在下一步的工作中进行明确。另外,PVT 分布对 台风移动的指示究竟是台风固有移动趋势的一种反 映,还是如引导气流一般可对台风移动进行引导,也 需要在今后的工作中继续进行研究。

#### 参考文献

- 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 X X,Chen G H, Zhou W C,2018. A mechanism study on the sudden track change of super Typhoon Goni (2015)[J]. Chin J Atmos Sci,42 (1):227-238(in Chinese).
- 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 L S, Meng Z Y,2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. Chin J Atmos Sci,25(3):420-432(in Chinese).
- 陈联寿,徐祥德,解以扬,等,1997.台风异常运动及其外区热力不稳 定非对称结构的影响效应[J].大气科学,21(1):83-90. Chen L S,Xu X D,Xie Y Y, et al, 1997. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion[J]. Sci Atmos Sin,21(1):83-90(in Chinese).
- 陈涛,毕宝贵,2004. 环境气流及非绝热加热对热带气旋结构和移动 的影响[J]. 热带气象学报,20(5):530-536. Chen T,Bi B G, 2004. The impact of basic flow and diabatic heating on motion and structure of tropical cyclone[J]. J Trop Meteor,20(5):530-536(in Chinese).
- 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 J F,Li B, Huang X G, et al,2011. Advances in application of potential vorticity inversion theory in typhoon research[J]. Trans Atmos Sci,34(5):621-626(in Chinese).

何丽华,孔凡超,李江波,等,2007.影响河北两次相似路径台风的湿

位涡对比分析[J]. 气象,33(4):65-70. He L H,Kong F C,Li J B,et al,2007. Analysis of wet potential vorticity of two similar typhoons affecting Hebei Province[J]. Meteor Mon,33(4):65-70(in Chinese).

- 黎惠金,黄明策,覃昌柳,2016. 台风"尤特"的等熵位涡分析[J]. 高原 气象,35(3):777-787. Li H J, Huang M C, Qin C L,2016. Isentropic potential vorticity analysis of typhoon "Utor"[J]. Plateau Meteor,35(3):777-787(in Chinese).
- 刘科成,1989. Abby(8305)台风路径的动力诊断分析[J]. 大气科学, 13(1):108-112. Liu K C,1989. A dynamical diagnosis and analysis of Typhoon Abby's movement[J]. Sci Atmos Sin,13(1): 108-112(in Chinese).
- 罗哲贤,陈联寿,1995. 台湾岛地形对台风移动路径的作用[J]. 大气 科学,19(6):701-706. Luo Z X, Chen L S, 1995. Effect of the orography of Taiwan Island on typhoon tracks[J]. Sci Atmos Sin,19(6):701-706(in Chinese).
- 邵颖斌,沈新勇,刘佳,等. 2014. 台风"鲇鱼"路径突变前后等熵位涡 非对称结构的对比分析[J]. 热带气象学报,30(2):261-269. Shao Y B,Shen X Y,Liu J,et al,2014. Contrastive research on the asymmetric isentropic potential vorticity structure before and after the sudden track change of Typhoon Megi[J]. J Trop Meteor,30(2):261-269(in Chinese).
- 寿绍文,2010. 位涡理论及其应用[J]. 气象,36(3):9-18. Shou S W, 2010. Theory and application of potential vorticity[J]. Meteor Mon,36(3):9-18(in Chinese).
- 陶祖钰,郑永光,2012. 位温、等熵位涡与锋和对流层顶的分析方法 [J]. 气象,38(1):17-27. Tao Z Y, Zheng Y G, 2012. Analysis methods on potential temperature, isentropic potential vorticity, front and tropopause[J]. Meteor Mon, 38(1):17-27(in Chinese).
- 王雨星,钟中,孙源,等,2017.两种边界层参数化方案模拟热带气旋
  Megi (2010)路径差异的机理分析[J].地球物理学报,60(7):
  2545-2555.Wang Y X,Zhong Z,Sun Y,et al,2017. The mechanism analysis of the track deviation of tropical cyclone Megi (2010) simulated with two planetary boundary layer schemes
  [J].Chin J Geophys,60(7):2545-2555(in Chinese).
- 袁敏,平凡,李国平,2018. 位涡倾向在 Muifa 台风路径转折中的应用 [J]. 大气科学,42(2):281-291. Yuan M,Ping F,Li G P,2018. Application of potential vorticity tendency in track recurvature study of Typhoon Muifa[J]. Chin J Atmos Sci,42(2):281-291 (in Chinese).
- Archambault H M, Keyser D, Bosart L F, et al, 2015. A composite perspective of the extratropical flow response to recurving western North Pacific tropical cyclones[J]. Mon Wea Rev, 143(4): 1122-1141.
- Carr L E III, Elsberry R L, 1995. Monsoonal interactions leading to sudden tropical cyclone track changes[J]. Mon Wea Rev, 123 (2):265-289.
- Chan J C L,Ko F M F,Lei Y M,2002. Relationship between potential vorticity tendency and tropical cyclone motion[J]. J Atmos Sci,59(8):1317-1336.

- Dong K Q, Neumann C J, 1983. On the relative motion of binary tropical cyclones[J]. Mon Wea Rev, 111(5):945-953.
- Frank W M, 1977. The structure and energetics of the tropical cyclone I. storm structure[J]. Mon Wea Rev, 105(9):1119-1135.
- Grell G A, Dévényi D, 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques[J]. Geophys Res Lett, 29(14):1693-1696.
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H, 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation[J]. Mon Wea Rev, 132(1):103-120.
- Janjić Z I, 2001. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso Model[Z]. NCEP Office Note No. 437.
- Kawamura R,Ogasawara T,2006. On the role of typhoons in generating PJ teleconnection patterns over the Western North Pacific in late summer[J]. Sola,2:37-40.
- Kunz A, Sprenger M, Wernli H, 2015. Climatology of potential vorticity streamers and associated isentropic transport pathways across PV gradient barriers[J]. J Geophys Res, 120(9): 3802-3821.
- Mellor G L, Yamada T, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Rev Geophys, 20(4): 851-875.

- Shapiro L J,Franklin J L,1995. Potential vorticity in hurricane Gloria[J]. Mon Wea Rev,123(5):1465-1475.
- 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.
- Sun Y,Zhong Z, Lu W, et al, 2014. Why are tropical cyclone tracks over the Western North Pacific sensitive to the cumulus parameterization scheme in regional climate modeling? A case study for Megi (2010)[J]. Mon Wea Rev, 142(3): 1240-1249.
- Sun Y,Zhong Z,Lu W,2015. Sensitivity of tropical cyclone feedback on the intensity of the Western Pacific subtropical high to microphysics schemes[J]. J Atmos Sci,72(4):1346-1368.
- Torn R D, Davis C A, 2012. The influence of shallow convection on tropical cyclone track forecasts [J]. Mon Wea Rev, 140(7): 2188-2197.
- Wu L G, Wang B, 2000. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion[J]. Mon Wea Rev, 128(6): 1899-1911.
- Yamada K,Kawamura R,2007. Dynamical link between typhoon activity and the PJ teleconnection pattern from early summer to autumn as revealed by the JRA-25 reanalysis[J]. SOLA,3:65-68.