

王天驹, 钟中, 王举, 等. 2020. 热带气旋活动对西太平洋副热带高压经向移动的影响及可能机理: 个例研究 [J]. 大气科学, 44(4): 716–725.
WANG Tianju, ZHONG Zhong, WANG Ju, et al. 2020. Influence of Tropical Cyclone Activities on the Meridional Movement of Western Pacific Subtropical High and Its Possible Mechanisms: A Case Study [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(4): 716–725.
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18257

热带气旋活动对西太平洋副热带高压经向移动的影响及可能机理: 个例研究

王天驹¹ 钟中^{1,2} 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

摘 要 本文利用 WRF 模式, 通过开展敏感性试验讨论了单个热带气旋 (Tropical Cyclone, TC) ——“鲇鱼 (Megi)”影响下不同等压面上西太平洋副热带高压脊线的移动特征, 并分析了 Megi 活动影响副高脊线垂直分布的可能机理。结果表明, Megi 活动期间, 副高脊线在 TC 的影响下总体发生了向南移动, 且 TC 活动所导致的脊线南移在高层相对较大, 而在低层相对较小。TC 影响副高脊线垂直分布的可能机理为, 副高脊线的经向运动受其附近纬向风异常的直接驱动, 而 Megi 活动所导致的脊线附近纬向风异常与温度异常总体满足热成风关系, 当 Megi 活动造成副高脊线附近出现温度经向梯度异常时, 纬向风异常会随高度增加而发生切变, 因此会导致副高脊线的垂直分布状况发生改变。另外, 利用温度倾向方程的诊断分析结果表明, TC 活动所激发的脊线附近不同物理过程项的异常在时空剖面上有很大区别, 其中温度水平平流异常和非绝热加热异常的作用主要可使大气温度异常升高, 而温度的垂直输送异常则可使温度降低。总之, TC 的热力效应对西太平洋副热带高压脊线垂直分布的影响十分显著。

关键词 热带气旋 西太平洋副热带高压 垂直结构 数值试验

文章编号 1006-9895(2020)04-0716-10

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18257

Influence of Tropical Cyclone Activities on the Meridional Movement of Western Pacific Subtropical High and Its Possible Mechanisms: A Case Study

WANG Tianju¹, ZHONG Zhong^{1,2}, WANG Ju¹, and SUN Yuan¹

¹ College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

² Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change, Nanjing University, Nanjing 210023

Abstract The characteristics of the meridional movement of western Pacific subtropical high (WPSH) ridge lines at different pressure levels under the influence of a single tropical cyclone (TC), i.e., Megi, and its possible mechanisms are analyzed by conducting sensitivity experiments with WRF. The results show that the WPSH ridge lines shift southward under the influence of TC Megi. Moreover, the higher the ridge lines are, the more southward they move. The possible

收稿日期 2018-11-15; **网络预出版日期** 2019-10-31

作者简介 王天驹, 男, 1990 年出生, 博士研究生, 主要从事热带气旋与大尺度环流相互作用的研究。E-mail: wtj_1129@126.com

通讯作者 钟中, E-mail: zhong_zhong@yeah.net

资助项目 国家自然科学基金项目 41430426

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41430426)

mechanisms are that the shift of WPSH ridge lines is directly affected by the zonal wind anomalies in its vicinity, and the zonal wind and temperature gradient anomalies near the ridge lines caused by TC Megi generally satisfy the thermal wind relationship. Therefore, under the influence of the temperature gradient anomalies near the ridge line caused by TC Megi, the zonal wind anomalies will change with altitude, which will affect the vertical distribution of WPSH ridge lines. In addition, the diagnostic analysis results of the temperature tendency equation show that the different physical processes near the ridge, which are stimulated by TC activities, exhibit quite different temporal and spatial distributions. Moreover, the horizontal advection and nonadiabatic heating anomalies caused by TC Megi mainly lead to the abnormal increase of atmospheric temperature. Meanwhile, the vertical transport anomalies mainly lead to the abnormal decrease of atmospheric temperature. Therefore, the thermal effect of TC activities plays an important role in the process of changing the vertical distribution of WPSH ridge lines.

Keywords Tropical cyclone, Western Pacific subtropical high, Vertical structure, Numerical experiment

1 引言

西太平洋副热带高压(简称副高)是东亚—西太平洋区域重要的大气环流系统,可对我国天气气候状况造成影响,尤其与影响我国的暴雨、旱涝和台风等灾害的联系十分紧密(黄士松, 1979; 卫捷等, 2004),因此一直是我国大气科学研究所关注的重要环流系统之一。副高的移动具有经向和纬向特征,受到多个因素的影响(Rodwell and Hoskins, 2001; Si et al., 2008; Wang et al., 2006; Lu et al., 2008),且在对流层高层和低层有较大差异。黄士松(1979)的研究表明,自冬至夏,副高北移增强,自夏至冬,副高南退减弱,并且副高在高层和低层的南北移动特征并不一致,当副高南退时,脊面随高度的倾斜程度一般变小,而在副高北进过程中,脊面的倾斜程度则往往变大。刘平等(2000)对气候平均的副热带高压三维结构进行研究发现,在对流层中,随高度升高气候平均的副热带高压脊线逐渐向赤道靠近,副高强度逐渐减弱,范围逐渐减小。Wen et al. (2003)利用全型涡度方程和 1958~1997 年的 NCEP/NCAR 资料分析了副高的垂直结构及其移动特征,发现副高北(南)侧的凝结潜热释放可导致副高在低层向南(北)运动而在高层向北(南)运动。Wang et al. (2006)的工作则进一步表明,副高北(南)侧对流降水的潜热释放可在对流层低层和高层分别形成气旋性环流和反气旋性环流,从而使副高在低层的向北(南)运动受到抑制,而在高层的向北(南)运动得到增强。李建平和朱建磊(2008)利用 1979~2006 年的历史资料对副高南撤的气候学特征进行了统计,发现副高在高层的南撤先于低层发生,且副高脊轴倾斜程度的变化与气温经向梯度的变化有关,副高脊轴有向暖

区倾斜的趋势。

热带气旋(Tropical Cyclone, TC)这一强大“扰源”的活动对环境温度场造成的影响十分显著,并且 TC 活动对高层和低层环境温度场的影响也存在差异。Park and Elsberry (2013)对 TC Sinlaku (2008)活动所导致的温度异常进行了研究,发现 Sinlaku 活动对大气的潜热加热主要发生于对流层高层,而 Sinlaku 在流层低层的作用则主要以潜热冷却为主。Sun et al. (2014)通过进行以 TC Megi 为例的敏感性试验解释了 TC 影响环境温度场的可能机理,指出 Megi 向北伸展的云砧内冰晶融化会吸收大量的热,是导致对流层低层大气温度降低的重要原因,而宋攀等(2017)的研究也表明,TC Megi 在 500 hPa 以下水凝物的混合和蒸发作用可导致环境温度场产生负异常。除此之外,Chen et al. (2018)利用敏感性试验对 TC Soudelor (2003)影响下环境温度场的变化情况进行了分析,发现 TC 活动可通过激发遥相关波列和释放潜热造成日本海及其附近区域对流层中高层出现正的温度异常,并可导致相应区域内的温度经向梯度发生改变。

由于 TC 热力效应对环境场的影响十分显著,因此也应引起副高的位置发生改变,但目前针对 TC 活动影响副高经向移动的研究相对较少,TC 活动影响副高经向移动的机理尚不十分明确。本文以 2010 年全球范围内发生的最强台风“鲇鱼(Megi)”为例,利用 WRF 模式开展敏感性试验讨论了单个 TC 影响下副高脊线的垂直分布特征,并分析了 TC 活动影响副高脊线垂直分布的可能机理。

2 数据和方法

本文以 Megi 的活动为背景,利用 WRFV3.3 模式(Skamarock et al., 2008)进行了两个试验,

分别为 Megi 模拟 (Megi-sim) 试验和 Megi 移除 (Megi-rem) 试验, 其中, Megi-sim 试验采用的初始条件和边界条件为 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 提供的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐 6 小时 Final Analysis (FNL) 资料, 模式设置参考了 Sun et al. (2014) 的工作, 模式区域中心位于 $(30^\circ\text{N}, 130^\circ\text{E})$, 东西方向为 240 个格点, 南北方向为 260 个格点, 水平格距为 20 km, 垂直方向分为 36 层, 物理方案主要采用了 WSM 3-class 微物理方案、Mellor-Yamada-Janjić 边界层方案及 Grell- Dévényi 积云对流参数化方案。模式积分从 2010 年 10 月 15 日 00 时 (协调世界时, 下同) 开始, 到 22 日 00 时结束, 共计 168 个小时, 其中 15 日 00 时至 16 日 00 时作为 spin-up 时段。WRF 模式中的 TC bogus 方案可根据给出的 TC 位置等信息对 TC 最大涡度中心附近的涡度和散度进行消除, 并重新计算相应范围内的物理量场, 以将 TC 信息从环境背景场中进行移除 (Fredrick et al., 2009)。本文在进行 Megi-rem 试验时, 首先利用 TC bogus 方案对位于初始场中 $(14.2^\circ\text{N}, 137.2^\circ\text{E})$ 的 Megi 涡旋进行移除, 随后采用与 Megi-sim 试验相同的模式设置进行积分。

本文采用的 Megi 路径观测资料为美国联合风暴预警中心 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC) 发布的逐 6 小时台风最佳路径集资料。

副高脊线平均纬度的变化可以较好地表征副高的南北向运动, 本文在计算不同等压面上的副高脊线时, 首先求出副高在 $110^\circ \sim 150^\circ\text{E}$ 范围内位势高度值最大的点, 并以该点为中心由东向西依次计算得到纬向风 u 同时满足 $u = 0$ 和 $\partial u / \partial y > 0$ 的脊线格点 (Liu and Wu, 2004)。为突出 Megi 影响下副高强度中心附近脊线的南北向运动, 在对副高脊线平均纬度进行计算时, 取距离副高位势高度最大值点 10 个经度以内的脊线格点进行计算。另外, 由于 Megi 活动期间模式区域内副高在 300 hPa 以上并不总是存在, 因此本文主要对 850~300 hPa 范围内的副高脊线移动特征及其影响因子进行了讨论。

3 结果分析

3.1 Megi 活动期间副高脊线的分布及移动特征

模式区域范围和 Megi 的模拟和 JTWC 观测路径如图 1 所示。可以看出, 模式对 Megi 移动路径的模拟总体较为准确, 特别地, 模式较好地模拟出

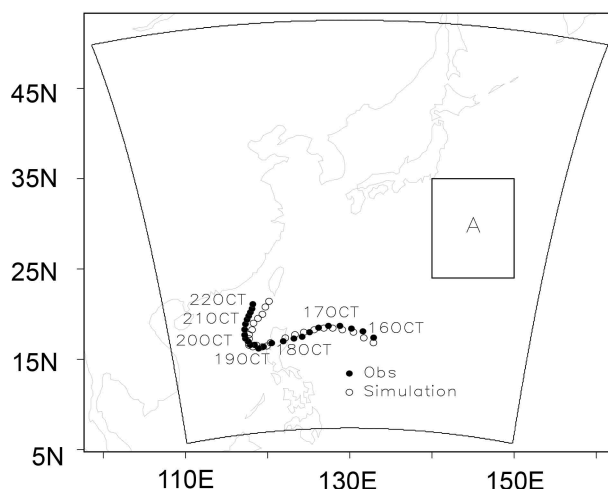


图 1 模式区域范围 (扇形区域) 和 2010 年 10 月 16 日 00 时 (协调世界时, 下同) 至 22 日 00 时台风 “鲑鱼 (Megi)” 的 6 小时间隔观测 (实心点) 和模拟 (空心圈) 路径, 图中黑色实线围成的区域 A 表示西太平洋副热带高压 (简称副高) 中心附近区域

Fig. 1 Model domain (sector) and the observed (dots) and simulated (circles) tracks of tropical cyclone (TC) Megi at 6 h interval from 0000 UTC October 16 to 0000 UTC October 22, 2010. Region A enclosed with black solid lines represents area near the center of western Pacific subtropical high (WPSH)

了 Megi 穿越菲律宾北部进入南海后突然向北转向的路径特征 (Sun et al., 2014)。已有研究表明, Megi 和副高的相互作用是导致 Megi 在进入南海后突然向北转向的重要原因 (Qian et al., 2013), 因此, 由图 1 中模拟得到的 Megi 转向特征与观测较为一致这一结果可知, 模式对 Megi 与副高相互作用过程的模拟也较为准确。

Megi-sim 和 Megi-rem 试验对应的初始 500 hPa 位势高度场和两个试验初始 500 hPa 位势高度场的差值如图 2 所示。

从 Megi-sim 试验对应的 500 hPa 位势高度初始场 (图 2a) 可以清楚地看到, $(15^\circ\text{N}, 137^\circ\text{E})$ 附近存在的 Megi 这一位势高度低值系统, 而在利用 TC bogus 方案移除 TC 后的 Megi-rem 试验 500 hPa 位势高度初始场中 (图 2b), 该低值系统已不存在, 这表明 Megi 涡旋已被移除, 相同位置处取而代之的是一个水平尺度很小的位势高度高值扰动, 这一高值扰动出现的原因可能与 TC bogus 方案在移除 TC 涡旋时所采用的计算方法有关。由于移除了 Megi 涡旋, 两个试验位势高度初始场差值 (图 2c) 在 Megi 位置处出现了负位势高度异常。

Megi-sim 和 Megi-rem 试验模拟的不同等压面

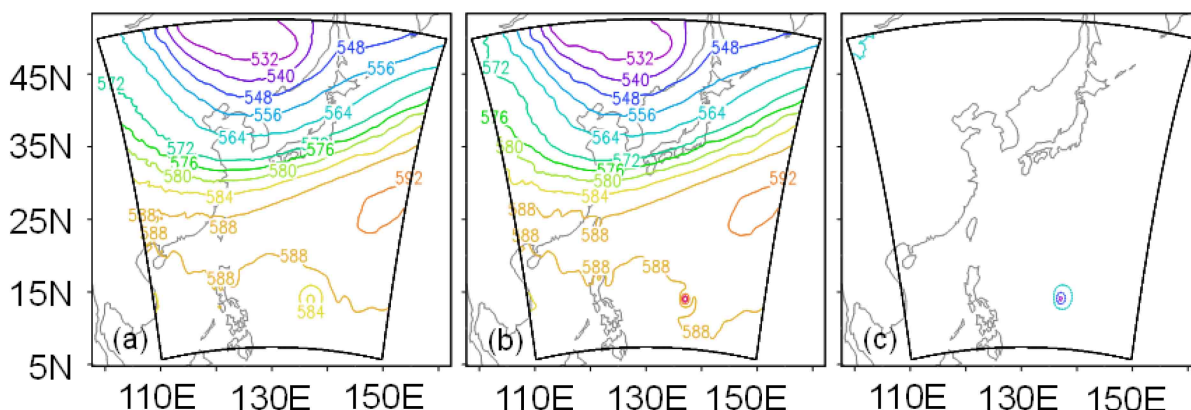


图2 (a) Megi-sim 试验和 (b) Megi-rem 试验对应初始 500 hPa 位势高度场和 (c) 两个试验初始 500 hPa 位势高度场的差值 (单位: dagpm)

Fig. 2 Initial fields of 500 hPa geopotential height from experiments (a) Megi-sim and (b) Megi-rem, as well as (c) initial fields of 500 hPa geopotential height differences between Megi-sim and Megi-rem (units: dagpm)

上副高脊线平均纬度随时间的演变如图 3 所示。可以看出, 两个试验模拟的副高脊线位置在高层和低层并不重合, 两个试验模拟得到的高层和低层脊线纬度存在显著差异的时间段主要集中在 17 日 18 时至 21 日 18 时, 脊线位置在高层偏南而在低层偏北, 这表明 Megi 活动期间垂直方向上由不同高度处副高脊线构成的副高脊面随高度增加逐渐向赤道倾斜, 并且 Megi 对副高脊线位置的影响最早出现在高层, 随后才逐渐从上向下显现出来。而在 17 日 18 时之前和 21 日 18 时之后, 两个试验模拟得到的副高中心附近高层和低层脊线平均纬度的差异均较小, 脊面从下往上向赤道方向稍有倾斜。

表 1 是 Megi-sim 和 Megi-rem 试验在与图 3 相同时段内模拟得到不同等压面上副高脊线纬度的平均值和两个试验模拟脊线纬度差的平均值。统计结果表明, 两个试验模拟得到的副高脊线的平均纬度由低层至高层均依次降低, 表明副高脊面总体随高度增加向南倾斜, 高层脊线与低层脊线平均纬度的差值均超过 5 纬度。另外, 两个试验模拟的不同等压面上副高脊线纬度差的平均值均为负值, 这表明副高脊线在 Megi 影响下总体发生了向南的移动, 并且 TC 活动所导致的脊线移动程度在高层相对较大, 而在低层相对较小。

为直观体现 Megi 活动期间不同等压面上副高脊线移动的差异, 选取副高脊线在对流层高层和低层的移动差异均较为明显的 20 日 06 时进行讨论, 其时不同等压面上异常位势高度场、异常环流以及副高脊线位置的分布如图 4 所示。

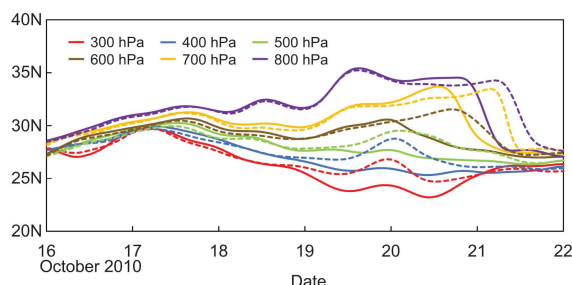


图3 Megi-sim 和 Megi-rem 试验模拟的 2010 年 10 月 16 日 00 时至 10 月 22 日 00 时期间不同等压面副高脊线平均纬度随时间的演变。实线对应 Megi-sim 模拟结果, 虚线对应 Megi-rem 模拟结果

Fig. 3 Temporal evolutions of the WPSH ridge line latitudes simulated by experiments Megi-sim (solid) and Megi-rem (dashed) at different pressure levels from 0000 UTC October 16 to 0000 UTC October 22, 2010

表 1 2010 年 10 月 16 日 00 时至 10 月 22 日 00 时 (协调世界时, 下同) 不同等压面上模拟的西太平洋副热带高压脊线平均纬度和脊线纬度差的平均值

Table 1 Simulated latitudes of the western Pacific subtropical high ridge line and the ridge line latitude differences at different pressure levels averaged over 0000 UTC October 16 to 0000 UTC October 22 2010

	Megi-sim试验模拟 脊线平均纬度	Megi-rem试验模拟 脊线平均纬度	脊线平均 纬度差值
300 hPa	26.29°N	26.72°N	-0.43°
400 hPa	27.13°N	27.60°N	-0.47°
500 hPa	28.01°N	28.36°N	-0.35°
600 hPa	29.03°N	29.37°N	-0.34°
700 hPa	30.30°N	30.53°N	-0.23°
800 hPa	31.62°N	31.92°N	-0.30°
平均	28.73°N	29.08°N	-0.35°

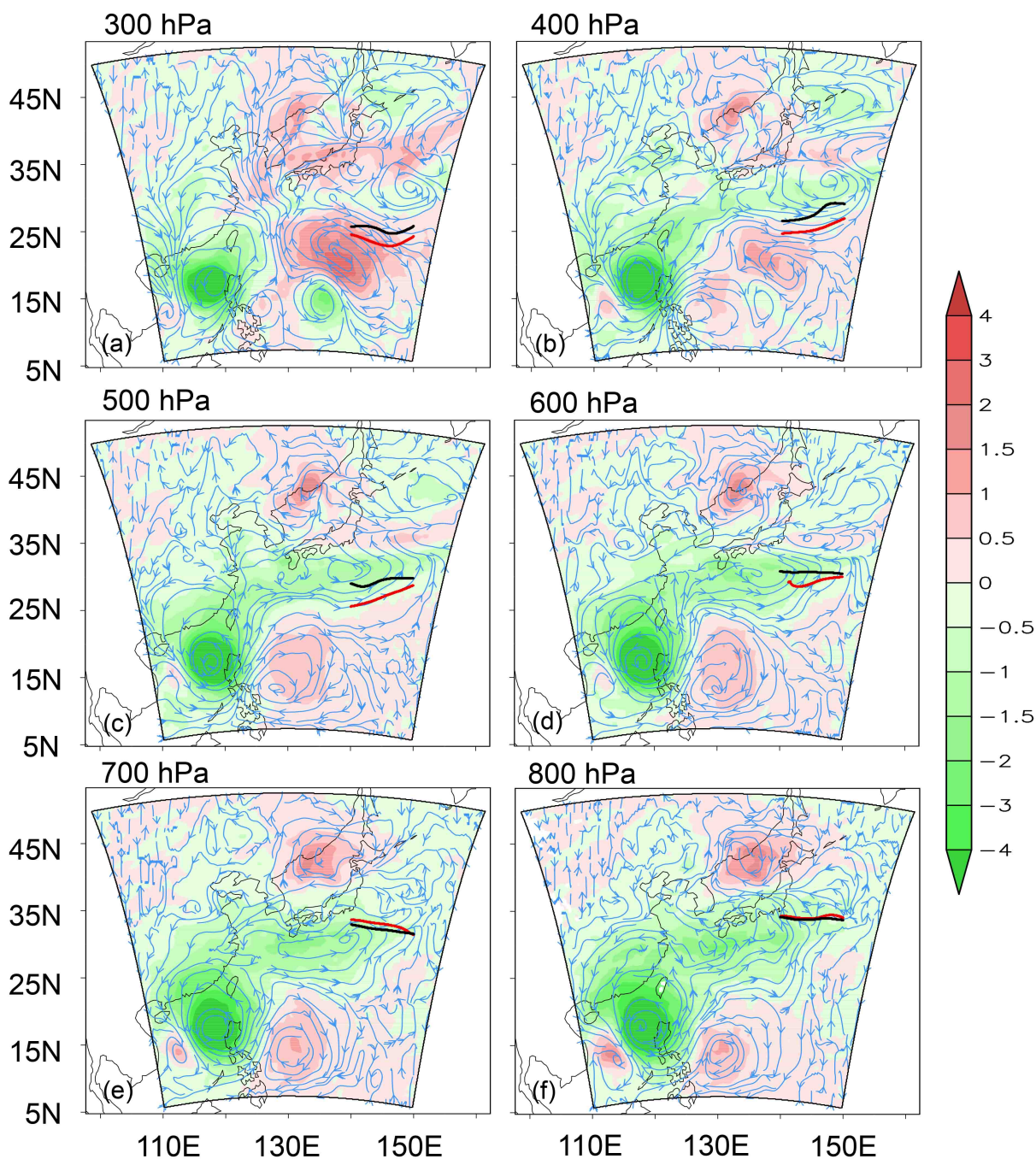


图4 模拟得到的2010年10月20日06时 Megi-sim 和 Megi-rem 试验不同等压面上异常位势高度场(阴影, 单位: dagpm)和异常环流(流线)。红(黑)色粗实线为 Megi-sim 试验(Megi-rem 试验)模拟的副高脊线, (a-f) 分别对应 300~800 hPa 等压面

Fig. 4 Simulated geopotential height anomalies (shaded, units: dagpm) and circulation anomalies (streamline) between Megi-sim and Megi-rem, and the WPSH ridge lines in Megi-sim (bold red line) and Megi-rem (bold black line) at 0600 UTC 20 October, 2010. (a-f) 300~800 hPa pressure levels

从图4可以看出, 在20日06时, Megi位于南海上空, 相对于Megi-rem试验, 南海整个对流层都由对应位势高度负异常的气旋性异常环流控制, 而菲律宾以东洋面上对流层中低层为对应位势高度正异常的反气旋环流, 此外, 和南海异常负位势高度连为一体, 从我国东南部至日本南部以东洋面上

存在一条准纬向的异常负位势高度带, 且在中高纬度, 对流层整层对Megi的响应分布型基本一致。Megi-sim和Megi-rem试验模拟的脊线位置均在高层偏南而在低层偏北, 并且同一等压面上两个试验模拟的副高脊线的相对位置也不相同。在300~600 hPa, Megi-sim试验模拟的副高脊线位于Megi-

rem 试验模拟脊线以南, 且二者位置的差异较为明显; 而在 700~800 hPa, Megi-sim 试验模拟的副高脊线却位于 Megi-rem 试验模拟脊线以北, 但二者位置的差异很小。总体来说, 虽然 Megi 活动在高层和低层所导致的异常位势高度和异常环流分布都呈现出从低纬度指向高纬度的波列特征, 但 Megi 通过频散作用 (罗哲贤, 2001) 和激发准静止 Rossby 波 (Nitta, 1987; Kawamura and Ogasawara, 2006; Yamada and Kawamura, 2007) 所造成的不同等压面上异常位势高度场和异常环流的强度和位置依然存在一定的差异。

另外, 从图 4 还可以看出, TC 活动所导致的脊线移动与异常环流分布之间存在一定对应关系。在对流层中高层 (500~300 hPa), Megi-rem 试验模拟脊线主要位于 Megi 东侧位势高度正异常区以北和日本以南洋面上位势高度负异常区以南, 在脊线北侧有气旋性环流异常, 南侧有反气旋性环流异常, 脊线附近主要为西风异常, 脊线发生了向南的移动; 在中低层 (800~600 hPa), Megi-rem 试验模拟脊线主要位于日本以南洋面位势高度负异常区以北, 脊线南侧有气旋性环流异常, 脊线附近主要为东风异常, 脊线发生了向北的移动。这样的异常环流分布状况与脊线移动的对应关系与已有研究 (Wang et al., 2006) 所得到的结论一致, 表明由 TC 活动所引起的异常环流同样可以导致副高脊线发生经向移动。

3.2 副高脊线位置垂直分布变化的原因分析

吴国雄等 (2004) 的研究表明, 副高脊线的移动状况与脊线附近的纬向风异常密切相关, 当脊线附近主要为西/东风异常时, 对应副高脊线向南/北移动, 并指出脊线的垂直分布可由热成风关系进行推定, 即当脊线附近的温度呈南高北低分布时, 则由热成风关系可知, 跨越副高脊线向上将有西风性切变, 副高脊面会随高度增加向南倾斜, 反之, 如果脊线附近的温度呈南低北高分布时, 则跨越副高脊线向上将有东风性切变, 副高脊面会随高度增加向北倾斜。上述结果在建立副高脊线移动与其附近纬向风异常之间关系的基础之上, 进一步阐明了副高脊线附近温度异常对副高脊线经向位置的影响, 为研究 TC 热力作用影响副高脊线垂直分布提供了思路。

在讨论 TC 活动导致的纬向风异常随高度变化与温度经向梯度异常之间关系之前, 有必要先揭示

脊线附近不同范围内平均纬向风异常和脊线移动的对对应关系, 从而确定能够反映副高脊线移动状况的纬向风异常分布范围。图 5 为在脊线南北不同纬度范围内计算得到的两个试验平均纬向风异常随时间的演变。

由图 5 可知, 不同范围计算出的平均纬向风异常的强度和持续时间也不同, 计算范围越小则纬向

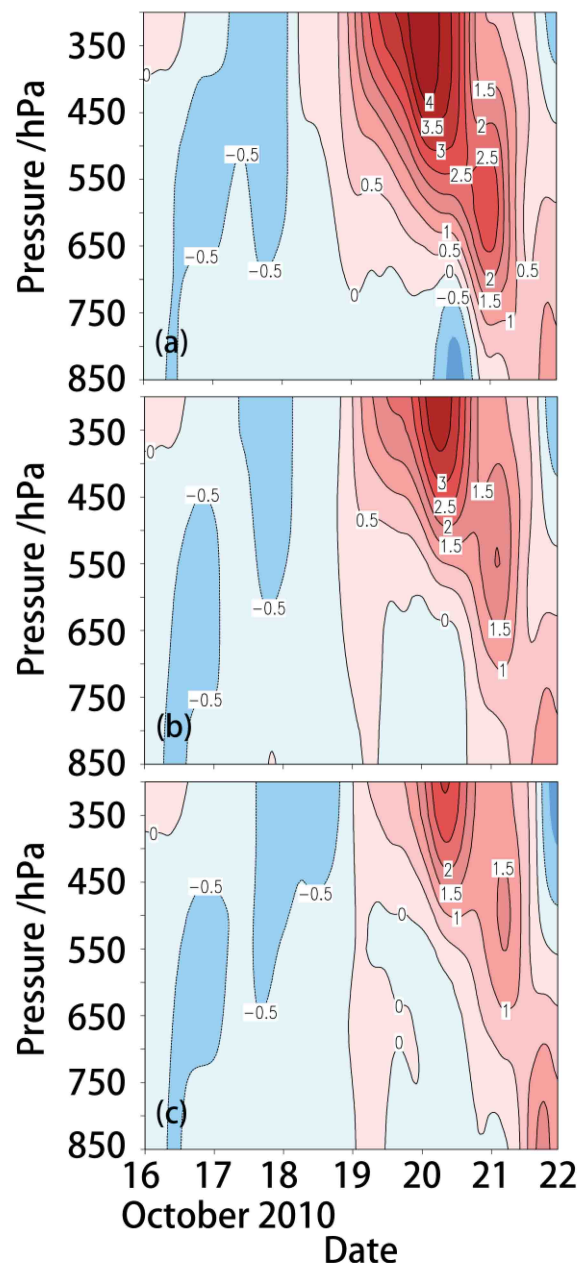


图 5 副高脊线南北 (a) 2 个纬度、(b) 4 个纬度和 (c) 6 个纬度范围内平均纬向风异常 (单位: m s^{-1}) 的高度—时间剖面
Fig. 5 Height-time cross sections of the averaged zonal wind anomalies (units: m s^{-1}) within the ranges of (a) 2° , (b) 4° , and (c) 6° latitudes southward and northward from the WPSH ridge line

风差异越大、高层纬向风差异最大值出现时间越早,并且纬向风差异存在明显的从高层向低层传播的特点,即相对于 Megi-rem 试验而言, Megi 向北转向以后首先在副高中心处脊线附近的高层出现纬向风异常,随后该异常扰动随时间向下传播。结合图 3 可以发现,不同范围内的平均纬向风异常对副高脊线移动的指示效果也不相同,在距离脊线 2 个纬度和 4 个纬度范围内求得的平均纬向风异常(图 5a、b)与副高脊线移动(图 3)的对应关系较好,即当脊线附近主要为西/东风异常时,对应有副高脊线的向南/北移动(吴国雄等, 2004; Wang et al., 2006)。而当平均纬向风异常的计算范围扩大到距离脊线 6 个纬度时(图 5c),平均纬向风异常对副高脊线移动的指示效果则有很大程度的减弱。例如,20 日前后在距离脊线 6 纬度范围内求得的平均东风异常可向上伸展至 500 hPa,但同一时段内 Megi-sim 试验模拟的 500 hPa 等压面上副高脊线非但没有发生向北移动(图 3),反而发生了向南移动。因此,在副高脊线附近区域计算的平均纬向风差异对副高脊线移动的指示效果更好。

假定 Megi-sim 和 Megi-rem 试验模拟的平均经向温度梯度和平均纬向风垂直切变均满足热成风关系,则两个试验模拟的平均经向温度梯度差异和平均纬向风垂直切变差异也应满足热成风关系(Chen et al., 2018)。在副高中心附近区域(图 1 区域 A, $24^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)对两个试验在模拟时段内(2010 年 10 月 16 日 00 时至 10 月 22 日 00 时)的纬向风异常、纬向风垂直切变异常和温度经向梯度异常求时间平均,其沿 145°E 经线的高度—纬度剖面如图 6 所示。

从图 6a 可以看出,异常纬向风为正的区随高度增加逐渐向南倾斜,差异大值中心分别在对流层低层(约 800 hPa)和高层(约 300 hPa),在其北侧为异常纬向风为负的区域,大值中心位于对流层中层 500 hPa 附近。结合图 6a 和表 1 可以看出, Megi-rem 试验模拟得到的各等压面上副高脊线的平均位置基本都位于异常纬向风为正的区域内,且低层脊线位于大值中心北侧,高层脊线位于大值中心南侧,表明 Megi-sim 试验脊线附近西风比 Megi-rem 试验的风速强。需要说明的是,虽然两个试验模拟的脊线均位于平均纬向风异常正值区内,但 Megi-sim 试验高层脊线北侧西风异常的增强程度更大,而低层脊线南侧西风异常和北侧东风异常对

脊线移动的作用存在相互抵消,所以高层 Megi-sim 比 Megi-rem 模拟的脊线位置更偏南,而低层两者模拟的脊线位置更趋于接近。

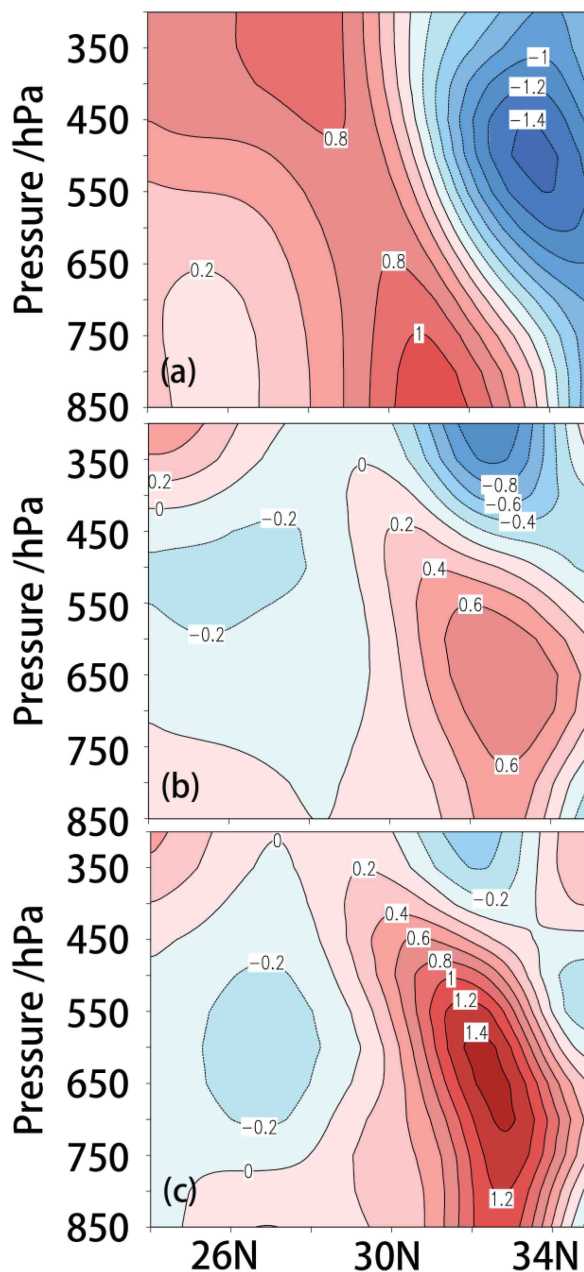


图 6 2010 年 10 月 16 日 00 时至 10 月 22 日 00 时期间副高中心附近(区域 A 中)时间平均的 (a) 异常纬向风(单位: m s^{-1})、(b) 纬向风垂直切变异常(单位: $10^{-4} \text{ m s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)和 (c) 温度经向梯度异常(单位: $10^{-3} \text{ K km}^{-1}$) 沿 145°E 经线的高度—纬度剖面
Fig. 6 Height-latitude cross sections of the (a) zonal wind anomalies (units: m s^{-1}), (b) zonal wind vertical shear anomalies (units: $10^{-4} \text{ m s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$), and (c) temperature meridional gradient anomalies (units: $10^{-3} \text{ K km}^{-1}$) averaged over 0000 UTC October 16 to 0000 UTC October 22, 2010 along 145°E in area near the WPSH center (region A)

而结合图 6b、c 可以看出, 模拟得到的异常纬向风垂直切变和异常经向温度梯度的分布较为一致。在 29°N 以南区域, 异常纬向风垂直切变和异常温度经向梯度总体为负, 并且二者的大值中心均位于对流层中层 (550 hPa) 附近; 而在 29°N 以北区域, 异常纬向风垂直切变和异常温度经向梯度除在中高层 30°N 以北的有限域内为负外, 在其他区域均为正值, 并且二者的大值中心所在位置也较为一致。这表明, 副高脊线活动主要区域 (区域 A) 中的异常纬向风垂直切变与异常温度经向梯度成正比, 二者基本满足热成风关系, 因此 Megi 活动所造成的温度水平分布变化是导致异常纬向风随高度发生变化的主要原因, 并最终导致了副高脊线垂直分布改变。

为进一步明确 Megi 活动造成副高中心附近区域 (区域 A) 温度异常的物理机制, 利用以下温度倾向方程进行诊断分析。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla T - \omega \left(\frac{\partial T}{\partial p} - \frac{1}{c_p \rho} \right) + \frac{\dot{Q}}{c_p} \quad (1)$$

式中, p 表示气压, t 表示时间, T 为温度, $\mathbf{V}$ 表示水平风矢量, ω 为 p 坐标系下的垂直速度, c_p 表示干空气定压比热容, ρ 为空气密度, $\dot{Q}/c_p$ 表示非绝热加热率。等式右侧第一项为温度水平平流项 (HT), 第二项为温度的垂直输送项 (VT), 第三项为非绝热加热项 (DH)。在区域 A 中计算得到的两个试验模拟的 HT、VT、DH 以及 HT+VT+DH 异常的区域平均值的高度—时间剖面如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 两个试验模拟的区域 A 中不同物理过程项的异常在时空剖面上的分布有很大区别。在 21 日 00 时之前, HT 在时空剖面上总体为正, 表明 Megi 活动造成了副高主体区域内水平暖平流输送的增大, 且在 Megi 向北转向前后 (20 日 00 时), 对流层中上层的水平暖平流增大最为

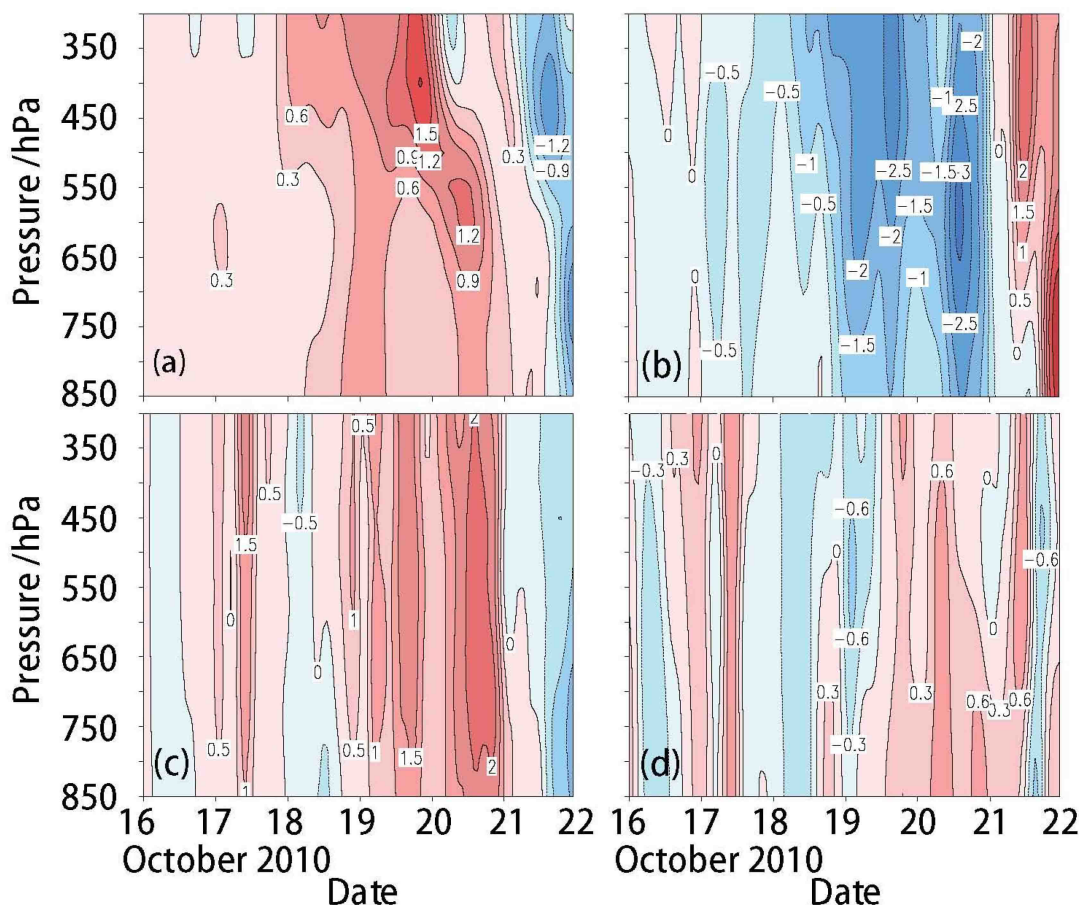


图 7 WPSH 中心附近 (区域 A) (a) HT、(b) VT、(c) DH 和 (d) HT+VT+DH 异常的区域平均值的高度—时间剖面 (单位: K d^{-1})

Fig. 7 Height-time cross sections of the area-averaged (a) HT, (b) VT, (c) DH, and (d) HT+VT+DH anomalies near the center of WPSH (region A) (units: K d^{-1})

显著, 而 21 日 00 时之后, Megi 则主要使副高主体中心区域水平暖平流减弱 (图 7a); VT 异常的位相和 HT 异常几乎完全相反, 在 21 日 00 时之前, VT 异常在时空剖面上基本上都是负值, 表明 Megi 造成副高主体区域的垂直暖平流输送减小, 对副高主体中心区域对流层起到降温作用, 且 Megi 向北转向以后这种降温作用在对流层中层最显著, 而 21 日 00 时之后, 受 Megi 影响的 VT 异常又使得副高中心附近区域升温 (图 7b), 但 VT 异常和 HT 异常在不同位相的量值存在差异, 两者的作用不会完全相互抵消; DH 异常的平均值在大部分时段内为正值 (图 7c), 表明 Megi 导致的副高中心附近区域非绝热加热异常增大可使大气温度升高, 而 18 日 12 时以后, 在时空剖面图上 DH 异常和 VT 异常几乎完全反位相, 表明两者有相互抵消作用。另外, 结合 HT+VT+DH 异常的时空分布 (图 7d) 可以看出, 不同时段内 Megi 影响副高中心区域温度倾向异常的物理过程也不相同, 在 17 日 12 时之前, HT+VT+DH 异常与 DH 异常的时空分布更为相似, 表明该时段内 DH 异常对温度倾向异常的影响更大, 而 17 日 12 时至 19 日 12 时, HT+VT+DH 异常与 VT 异常的符号和量级更为一致, 因此该时段内 VT 异常的作用更为显著, 到 19 日 12 时之后, 虽然 HT+VT+DH 异常的符号也会发生变化, 但其时空分布特征总体与 DH 异常更为相似, 说明非绝热加热异常对副高的形成和变异也具有重要影响 (刘屹岷等, 1999)。

4 结论

本文进行了以 TC Megi 活动为背景的敏感性试验, 并结合试验结果讨论了 Megi 活动期间不同等压面上副高脊线的移动特征, 分析了 Megi 活动导致副高脊线移动的可能机理, 得出以下结论:

(1) Megi 活动期间, 副高脊线总体发生了向南的移动, 且高层脊线向南移动的程度相对较大, 低层脊线向南移动的程度相对较小。

(2) 副高脊线移动受其附近 Megi 引发纬向风异常的直接影 响, 而 Megi 激发的副高脊线附近纬向风异常与温度异常总体满足热成风关系, 当 Megi 活动导致副高脊线附近的温度经向梯度出现异常时, 会导致纬向风异常随高度发生切变, 最终造成副高脊线的垂直分布状况发生改变。

(3) 结合温度倾向方程的诊断分析结果表明,

在不同阶段, 影响温度倾向异常的主要因子也不相同, 但总体来说, Megi 活动所导致的温度水平平流异常和非绝热加热异常主要对大气起加热作用, 而温度的垂直输送异常则主要导致了大气温度的降低。

但是, 本文的仅以 Megi 的活动为例开展了研究, 所得结论具有一定的局限性。在以后的工作中, 还应继续开展系统性数值试验研究, 以验证本文结论, 并进一步对不同 TC 影响下副高脊线的垂直分布差异进行讨论。

参考文献 (References)

- Chen X, Zhong Z, Lu W. 2018. Mechanism study of tropical cyclone impact on East Asian subtropical upper-level jet: A numerical case investigation [J]. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 54(4): 575–585. doi:10.1007/s13143-018-0087-y
- Fredrick S, Davis C, Gill D, et al. 2009. Bogussing of Tropical Cyclones in WRF Version 3.1 [M]. Vol. 6, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- 黄士松. 1979. 西太平洋高压的一些研究 [J]. *气象*, 10: 1–3. Huang S S. 1979. Studies on the western Pacific subtropical high [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 10: 1–3. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1979.03.001
- 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. doi:10.2151/sola.2006-010
- 李建平, 朱建磊. 2008. 晚春初夏西太平洋副热带高压南撤过程的气候学特征 [J]. *气象学报*, 66(6): 926–939. Li J P, Zhu J L. 2008. Climatological features of the western Pacific subtropical high southward retreat process in later-spring and early-summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66(6): 926–939. doi:10.3321/j.issn.0577-6619.2008.06.008
- 刘平, 吴国雄, 李伟平, 等. 2000. 副热带高压带的三维结构特征 [J]. *大气科学*, 24(5): 577–584. Liu P, Wu G X, Li W P, et al. 2000. The three-dimensional structure of subtropical high belt [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24(5): 577–584. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.01
- 刘屹岷, 吴国雄, 刘辉, 等. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 III——凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高 [J]. *气象学报*, 57(5): 525–538. Liu Y M, Wu G X, Liu H, et al. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high. Part III: Condensation heating and south Asia high and western Pacific subtropical high [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57(5): 525–538.
- Liu Y M, Wu G X. 2004. Progress in the study on the formation of the summertime subtropical anticyclone [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21: 322–342. doi:10.1007/bf02915562
- Lu R Y, Li Y, Ryu C S. 2008. Relationship between the zonal displacement of the western Pacific subtropical high and the

- dominant modes of low-tropospheric circulation in summer [J]. *Prog. Nat. Sci.*, 18: 161–165. doi:10.1016/j.pnsc.2007.07.009
- 罗哲贤. 2001. 热带气旋对副热带高压短期时间尺度变化的影响 [J]. *气象学报*, 59(5): 549–559. Luo Z X. 2001. Effects of tropical cyclone on the short time scale evolution of subtropical high [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 59(5): 549–559.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65(3): 373–389. doi:10.2151/jmsj1965.65.3_373
- Park M S, Elsberry R L. 2013. Latent heating and cooling rates in development and nondeveloping tropical disturbances during TCS-08: TRMM PR versus ELDORA retrievals [J]. *J. Atmos. Sci.*, 70: 15–35. doi:10.1175/jas-d-12-083.1
- Qian C H, Zhang F Q, Green B W, et al. 2013. Probabilistic evaluation of the dynamics and prediction of supertyphoon Megi (2010) [J]. *Wea. Forecasting*, 28: 1562–1577. doi:10.1175/waf-d-12-00121.1
- Rodwell M J, Hoskins B J. 2001. Subtropical anticyclones and summer monsoons [J]. *J. Climate*, 14: 3192–3211. doi:10.1175/1520-0442(2001)014<3192:saasm>2.0.co;2
- Si D, Xu H M, Wen M, et al. 2008. Analysis of the westward extension of western Pacific subtropical high during a heavy rain period over southern China in June 2005 [J]. *J. Trop Meteorol.*, 14(2): 93–96.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113pp
- 宋攀, 钟中, 齐琳琳, 等. 2017. 局地海表温度异常影响热带气旋路径的模拟研究 [J]. *气象科学*, 37(6): 735–741. Song P, Zhong Z, Qi L L, et al. 2017. A numerical study on the influence of abnormal local sea surface temperature on the track of tropical cyclone [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 37(6): 735–741.
- 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: 1240–1249. doi:10.1175/mwr-d-13-00232.1
- Wang L J, Guan Z Y, He J H. 2006. The position variation of the West Pacific subtropical high and its possible mechanism [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 12(2): 113–120.
- 卫捷, 杨辉, 孙淑清. 2004. 西太平洋副热带高压东西位置异常与华北夏季酷暑 [J]. *气象学报*, 62(3): 308–316. Wei J, Yang H, Sun S Q. 2004. Relationship between the anomaly longitudinal position of subtropical high in the western Pacific and severe hot weather in North China in summer [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62(3): 308–316.
- Wen M, He J H, Tan Y K. 2003. Movement of the ridge line of summer west Pacific subtropical high and its possible mechanism [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 17(1): 37–51.
- 吴国雄, 刘屹岷, 任荣彩, 等. 2004. 定常态副热带高压与垂直运动的关系 [J]. *气象学报*, 62(5): 587–597. Wu G X, Liu Y M, Ren R C, et al. 2004. Relation between subtropical anticyclone and vertical motion in steady state [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62(5): 587–597.
- 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. doi:10.2151/sola.2007-017