

# 台风“米克拉”(2006)近海急剧加强的成因分析

陈锦鹏<sup>1,2,3</sup>, 黄奕丹<sup>2,3</sup>, 程晶晶<sup>2,3</sup>, 林辉<sup>2,3</sup>, 庄毅斌<sup>2,3</sup>

(1. 福建省灾害天气重点实验室, 福建 福州 350001; 2. 福建省漳州市气象局, 福建 漳州 363000; 3. 数据科学与统计重点实验室, 福建 漳州 363000)

**摘要:** 应用 NCEP GDAS/FNL 再分析资料及中央气象台台风路径资料, 从环流形势、环境条件与地形作用的角度分析了台风“米克拉”近海急剧加强的成因, 并对其加强前后的湿位涡演变特征进行诊断。结果表明: 南亚高压与西太平洋副热带高压对台风“米克拉”强度突增具有重要作用。稳定的南亚高压提供良好的高空出流, 西伸加强的西太平洋副热带高压引导台风“米克拉”快速北上并在后期向西偏移, 有利于增大气压梯度力和维持水汽输送。西南季风和越赤道气流为台风“米克拉”加强提供水汽和能量。台风“米克拉”水汽通道主要位于东侧, 强水汽辐合集中于南侧, 进入台湾海峡后水汽输送与辐合也随之加强。弱的垂直风切变和较暖的洋面利于台风“米克拉”发展。台湾海峡的狭管效应也具有不可忽视的增幅作用。从湿位涡正压项来看, 台风“米克拉”加强前低层以负值区为主, 成熟后逐渐被正值区替代, 反映了其暖心结构的演变特征。湿位涡斜压项的变化相对复杂, 主要趋势是湿斜压性整体加强, 梯度变化更加剧烈, 且 700 hPa 上斜压项东正西负分布演变为北正南负。

**关键词:** 台风“米克拉”; 急剧加强; 副热带高压; 狭管效应; 湿位涡

**中图分类号:** P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)03-0047-09

## 1 引言

近海台风的强度突变问题是台风预报业务的难点, 也是台风研究的热点。进入我国近海海域的热带气旋通常会逐渐减弱, 然而根据统计, 在 1949—2017 年期间, 西北太平洋海域途径南海的热带气旋共有 1 101 个, 其中在南海地区强度快速加强的台风仍有 108 个, 约占台风总数的 9.8%, 由强热带风暴增强为台风以及由台风增强为强台风的情况最多<sup>[1]</sup>。此类台风给沿海地区带来难以防御的风雨影响和气象灾害, 因此台风近海急剧加强的成因分析具有重要的研究意义和应用价值。

近年来, 关于台风突变问题的研究取得了诸多成果。李江南等<sup>[2]</sup>对南海台风“Vongfong”(2002)登陆前后的内核结构和近海加强原因进行数值模拟研究, 深入探究其热力场和动力场的不对称结构,

得出中纬度中上层冷低压系统和台风的相互作用是台风“Vongfong”近海加强的重要因素。李霞等<sup>[3]</sup>对台风“韦森特”路径突变和近海加强的成因进行分析, 发现了强风区转移、中心重组以及环境条件变化等关键因素对台风突变的显著影响。Chen 等<sup>[4]</sup>研究得出, 弱冷空气入侵和台风内部中小尺度强对流发展等往往造成台风的非对称结构, 有利于台风加强。于玉斌等<sup>[5]</sup>通过比较 1949—2003 年近海突然加强和突然减弱的热带气旋, 证明了小的垂直风切变是热带气旋突然加强的必要条件。闫敬华等<sup>[6]</sup>对台风“黄蜂”进行模拟研究, 得出华南西部地形有助于低层弱冷空气向南侵袭并增强了对流发展, 使得台风“黄蜂”近海快速加强。

本文以 2020 年第 6 号台风“米克拉”为研究对象, 采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)GDAS/FNL 提

收稿日期: 2021-05-17; 修回日期: 2021-07-20。

基金项目: 中国气象局/广东省区域数值天气预报重点实验室开放基金课题(J202005)。

作者简介: 陈锦鹏(1990-), 男, 工程师, 学士, 主要从事模式应用与灾害性天气预报研究。E-mail: chenjp9010@163.com

供的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 逐6 h再分析和预报资料以及中央气象台发布的实时路径和强度资料,针对台风“米克拉”近海急剧加强过程中的影响因子以及动力、热力和水汽条件进行诊断分析,并从湿位涡的角度探究了加强前后性质结构的演变特征,为华南地区的近海加强台风预报提供参考依据。

## 2 台风概况及主要特点

2020年第6号台风“米克拉”于8月10日11时(北京时,下同)在南海东部海域生成,随后快速向偏北方向移动,并于11日06时加强为台风级,中心最低气压降至980 hPa,同时出现了半径为20~30 km的10级风圈。11日07时30分左右在福建省漳州市漳浦县沿海登陆,登陆时中心最大风力为12级(33 m/s)。台风“米克拉”进入台湾海峡后台风西移分量逐渐增大,登陆后台风已呈西北向前进,中心经过漳州市的漳浦县、平和县、南靖县和华安县,而后进入龙岩市境内减弱为热带低压(见图1)。

台风“米克拉”具有两个显著特点:一是生命周期短,移动速度快。台风“米克拉”从生成到停编只经历了短短的27 h,这也和台风在强引导气流下一直保持着25 km/h左右的较高移速有很大的关系。二是近海急剧加强。台风“米克拉”的强度演变特点大致可分为3个阶段:正常发展期、稳定移动期和快速加强期(见表1)。前期最大风速变率相对正常,中间连续10 h强度无明显变化,但在进入台湾海峡后强度急剧加强,在11日04—06时内中心最大风力连跳两级,最终以台风级的强度正面登陆漳浦沿海地区。另外,台风“米克拉”在11日05时出现10级风圈的同时7级风圈半径有所缩小。依据于玉斌等<sup>[7]</sup>给出的衡量台风近海急剧加强的标准(6 h最低海平面气压变化 $\Delta p < -7.78$  hPa或12 h风速

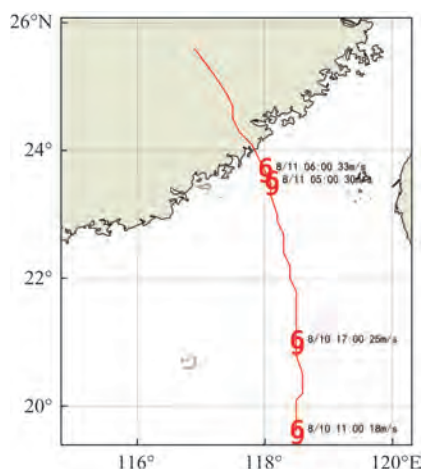


图1 台风“米克拉”路径与强度示意图

Fig.1 Schematic diagram of typhoon "Mekkhala" track and strength

变化 $\Delta V > 7.908\ 64$  m/s),台风“米克拉”符合近海急剧加强台风的特点。

由于上述两个特点,导致台风“米克拉”预报提前量偏小,防御难度极大,给登陆点及周边地区带来了严重的风雨灾害,漳州市直接经济总损失接近11.7亿元,其中农业方面受灾最为严重。

## 3 中高层环流的作用

中高层天气尺度以上的环流调整及其与热带气旋本体环流的互相作用是造成热带气旋路径与强度改变的重要因素之一。西太平洋副热带高压及南亚高压的位置、强度甚至形态对于台风的发展过程有着关键性的作用。

### 3.1 南亚高压

从8月10—11日100 hPa位势的高度场和风场上看,南亚高压呈现相对稳定的西部型,1 684 gpm

表1 台风“米克拉”3个阶段的参数变化

Tab.1 Parameter changes of typhoon "Mekkhala" in three stages

参数	正常发展期	稳定移动期	快速加强期
时间段	10日11—17时	10日17时—11日03时	11日03—06时
最大风速变率/(m/(s·h))	1.17	0	2.67
最大气压变率/(hPa/h)	-2.17	0	-1.67
平均移速/(km/h)	26.3	22.3	26.3

等高线所包围的闭合高压中心主要位于青藏高原上空。从图2a来看(红色符号为台风位置,下同),11日02时台风“米克拉”在对流层高层处于东伸高压脊的东南侧,该区域风速可达20 m/s以上,存在显著出流,且在11日08时东北气流有所加强(图略),表明了高层存在良好的辐散条件。

### 3.2 西太平洋副热带高压

从台风“米克拉”生成到登陆期间,西太平洋副热带高压表现出加强西伸的趋势。从图2b可以看到,台风“米克拉”的路径变化主要受到高压西侧深厚的引导气流的持续影响。前期高压相对稳定,台风“米克拉”路径以北为主;后期高压脊向西扩张,其西行分量也逐渐增大。高压对台风发展也起着重要作用,随着快速加强阶段台风“米克拉”与高压主体距离的进一步缩短,台风东侧的气压梯度力明显增大,有利于辐合流入加强,对应的强风区迅速发展,东北象限风速大于其他象限的非对称结构程度也愈发严重。

### 3.3 西南季风与越赤道气流

观察11日03时和08时的红外云图云顶亮温(Black Body Temperature, TBB)资料可以发现,加强初期(图略),台风“米克拉”尾部跟随着较明显的热带云团,两者联系比较紧密,这表明西南季风和越赤道气流持续汇入台风“米克拉”环流中,成为其主要水汽输送带,源源不断为其提供水汽和不稳定能量,也使得台风“米克拉”近海急剧加强成为可

能;登陆前后,南海热带云团保持少动而台风“米克拉”继续北上,两者逐渐分离和孤立,意味着台风“米克拉”与西南季风及越赤道气流的联结明显减弱,水汽输送条件相对不利,这也是06时后台风“米克拉”基本停止加强的原因之一。

## 4 环境因素的作用

### 4.1 水汽输送与辐合

对流层低层的水汽供给是影响热带气旋发展的重要因素<sup>[8]</sup>。近海迅速增强台风与减弱台风的主要不同是前者有较强的水汽输送通道,水汽输送对热带气旋的维持起到至关重要的作用<sup>[9]</sup>。当对流层低层提供充沛的水汽并伴随上升运动时,上升的暖湿空气通过释放凝结潜热,经由第二类条件不稳定(Conditional Instability of the Second Kind, CISK)机制为大尺度扰动的增强提供较大的能量。

分析台风“米克拉”登陆前后时刻的850 hPa水汽通量可以看出(见图3a),其主要水汽输送通道来自于南海东部的强偏南气流,且集中在台风“米克拉”偏东一侧。经过对比不同时次的850 hPa水汽通量可以看出(图略),在台风北上的过程中,随着西太平洋副热带高压的加强西伸,水汽输送也不断加强。

从台风中心附近区域的850 hPa水汽通量散度可以看出(见图3b),台风“米克拉”附近及西南象限区域内存在显著的水汽净流入,最大可达 $350 \sim 400 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm}^2)$ ,该区域是西北气流和西南气流构成的强切变区,并与台风“米克拉”偏南一侧

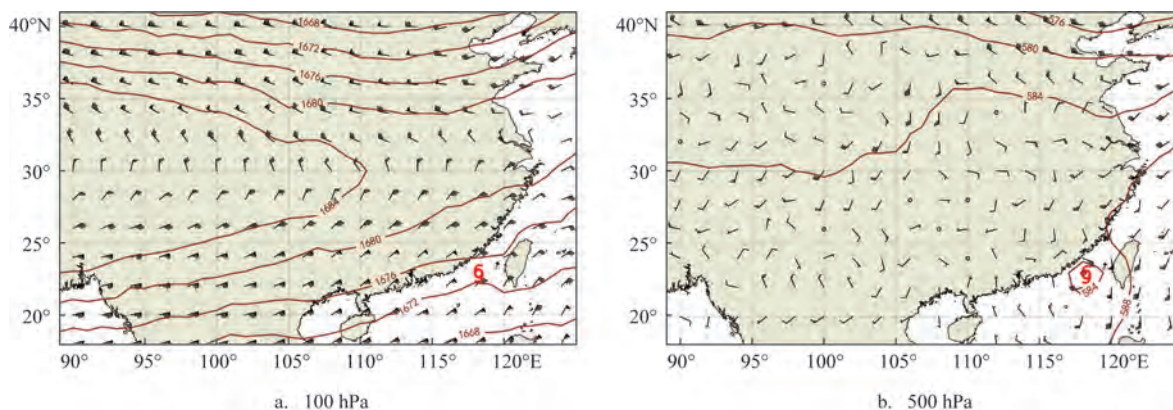


图2 2020年8月11日02时位势高度场与风场

Fig.2 Geopotential height and wind field at 02:00 on 11 August 2020



的主体对流云系有着较好的对应关系。以上分析表明,在台风“米克拉”近海急剧加强过程中,伴随着低层东侧水汽输送和南侧水汽辐合的增强,系统内水汽收入和凝结潜热释放增多,导致暖心结构继续发展,气旋继续加深。

#### 4.2 垂直风切变

垂直风切变是影响台风强度突变的主要环境条件之一。统计研究得出,在西北太平洋使热带气旋加强或削弱的风切变阈值约为  $10 \text{ m/s}$ ,当垂直风切变小于  $10 \text{ m/s}$  时,有利于热带气旋强度的加强,反之则往往会使台风强度削弱<sup>[10]</sup>。研究发现,热带气旋要发展成台风级别,垂直风切变必须小于  $7 \text{ m/s}$ <sup>[11]</sup>。

另外,垂直风切变对热带气旋的影响有一定的滞后性,总体来说大概为  $12 \sim 36 \text{ h}$ <sup>[12]</sup>。

选取台风“米克拉”快速加强前约  $12 \text{ h}$  的垂直风切变场进行分析。从图 4a 可以看出,在台风“米克拉”还处于南海北部的稳定移动阶段时,台湾海峡内尤其是漳州近海区域存在较大范围的小于  $10 \text{ m/s}$  的弱垂直风切变区,甚至有小范围区域小于  $5 \text{ m/s}$ 。当台风“米克拉”移入海峡靠近漳州沿海时,弱的垂直风切变分布有利于提高凝结潜热加热效率,使台风“米克拉”迅速加强。

#### 4.3 海洋热力条件

海洋作为台风的主要能量来源,是其生成和维

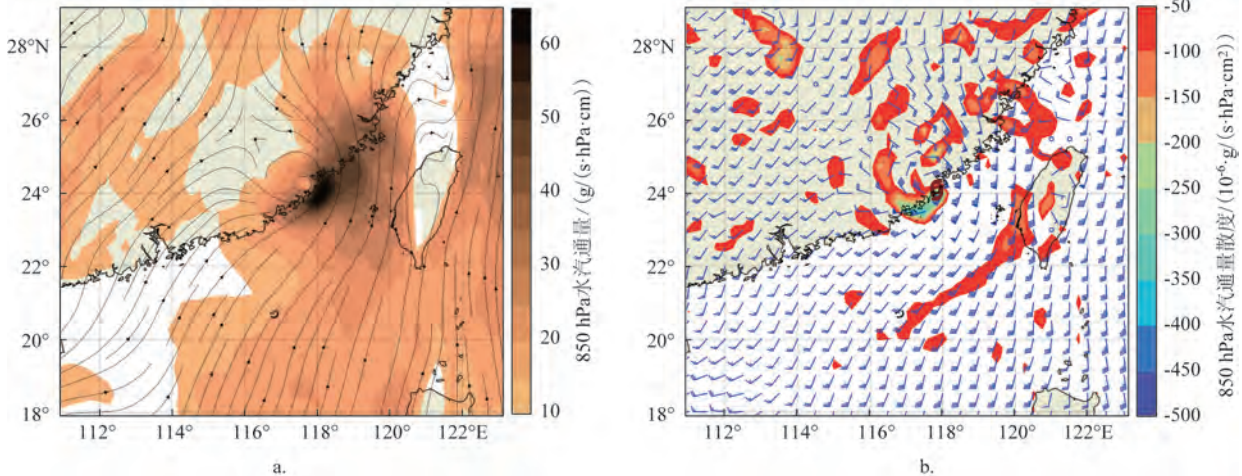


图3 8月11日08时850 hPa水汽通量(a)和水汽通量散度(b)

Fig.3 Vapor flux (a) and vapor flux (b) divergence in 850 hPa at 08:00 on 11 August 2020

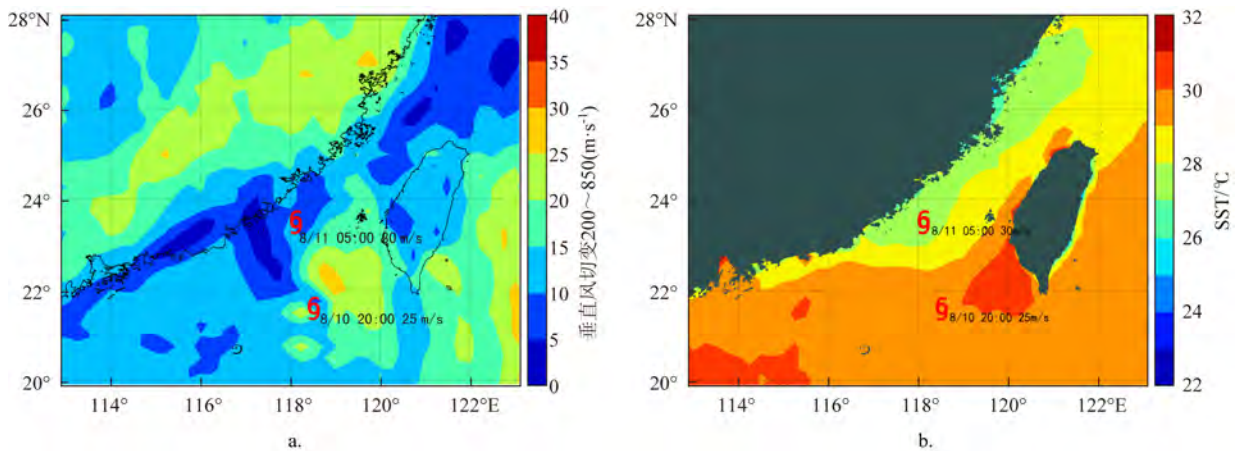


图4 8月10日20时垂直风切变(a)和海表温度(b)

Fig.4 Vertical wind shear (a) and SST (b) at 20:00 on 10 August 2020

持的关键,判断近海台风能否在海洋上生成并增强的一个重要参考依据是海表温度是否达到 $27^{\circ}\text{C}$ 。通过分析10日20时台风“米克拉”周边海域的海表温度(见图4b)发现,南海北部到海峡入口之间存在大范围的 $29^{\circ}\text{C}$ 以上高值区,尤其是靠近台湾岛西南侧有 $30^{\circ}\text{C}$ 以上的暖中心,显著高于台风生成所需的海温水平,有利于台风暖心结构的发展与环流强度的加强。

#### 4.4 海峡狭管效应

台湾中央山脉纵贯台湾岛,几乎呈南北走向,最高峰海拔为3 825 m,台风靠近或穿越时对中低层流场影响巨大。台风“米克拉”快速加强发生在进入台湾海峡之后,这与台湾海峡产生的狭管效应也有着紧密的联系。11日02时前后台风“米克拉”开始进入台湾海峡,此时台风东侧的强风区半径略小于其中心至中央山脉的距离,强风区内主要为偏南风向,基本平行于中央山脉走向。因此台风“米克拉”的核心环流不仅没有受到大地形的削弱和分流作用,反而在显著的狭管效应下,环流结构收紧,7级最大风圈半径受到压缩减小了30 km左右。由于角动量守恒的缘故,台风环流的切向速度有所加快,东侧低空急流进一步增强,产生10级风圈(见图5),水汽和热量的输送更加集中,潜热释放与对流活动之间的反馈作用更加显著。

## 5 湿位涡的演变特征

由于台风过程的形成与加强机制相对复杂,简单的物理量(如垂直速度、水汽通量和水汽通量散度等)难以全面诊断台风快速加强的成因。在综合性物理量方面,湿位涡不仅能够表征大气动力和热力属性,而且还将水汽作用考虑进去<sup>[13]</sup>。吴国雄等<sup>[14]</sup>证明了在绝热无摩擦的饱和湿空气中湿位涡具有严格守恒性,因此对湿位涡进行诊断能更全面更有效地描述天气系统的发生发展过程。本文试图从湿位涡的角度出发探究台风加强前后各方面的性质差异。

### 5.1 湿位涡正压项的演变

10日20时,处于稳定移动期的台风“米克拉”在850 hPa和700 hPa上均表现出以负湿位涡正压项(Moist Potential Vorticity Barotropic Term, MPV1)为主的特点,尤其是在东侧及东北侧形成负值中心,最高可达 $3.2\sim 3.6$  PVU(位涡单位, $1\text{ PVU}=10^{-6}\text{ m}^2\cdot\text{K}/(\text{s}\cdot\text{kg})$ ),而仅在偏西侧存在小范围的正MPV1区域。总体来看,700 hPa上的MPV1绝对值要略大于850 hPa。图6a和图6c表明台风“米克拉”在快速加强前低层有显著的正涡度和对流不稳定。

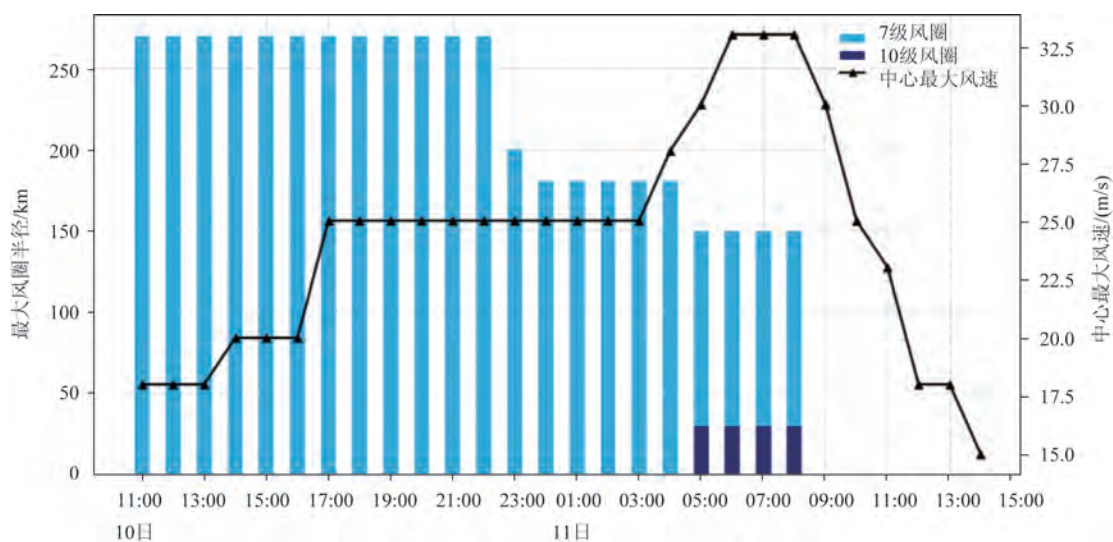


图5 台风中心最大风速与最大风圈半径的变化

Fig.5 Change of maximum wind speed in typhoon center and maximum wind circle radius



11日08时,负的MPV1区域范围有所缩小,甚至在850 hPa上基本转变为正的MPV1,这反映了低层原本的正 $\partial\theta/\partial p$ 已转变为负。700 hPa上则是北侧保留负值区,南部与主体对流云系对应的位置转变为正值区,主要原因是此时台风“米克拉”的暖心结构更加成熟,其高度也更高,眼区逆温层更加明显。

## 5.2 湿位涡斜压项的演变

一般情况下,湿位涡斜压项(Moist Potential

Vorticity Baroclinic Term, MPV2)要比MPV1小一个数量级。但从图7可以看到,对于台风而言斜压作用与正压作用均十分重要,图7d中台风中心附近斜压项绝对值最高可达2.0~2.2 PVU。850 hPa上,11日08时的MPV2整体上比10日20时更加突出,层次也更加分明,尤其是主体对流云系内的MPV2梯度变化十分剧烈,在东南象限存在一块显著的MPV2负值区域,表明此处的湿斜压性非常显著。MPV2在700 hPa上的主要变化是其绝对值大幅增

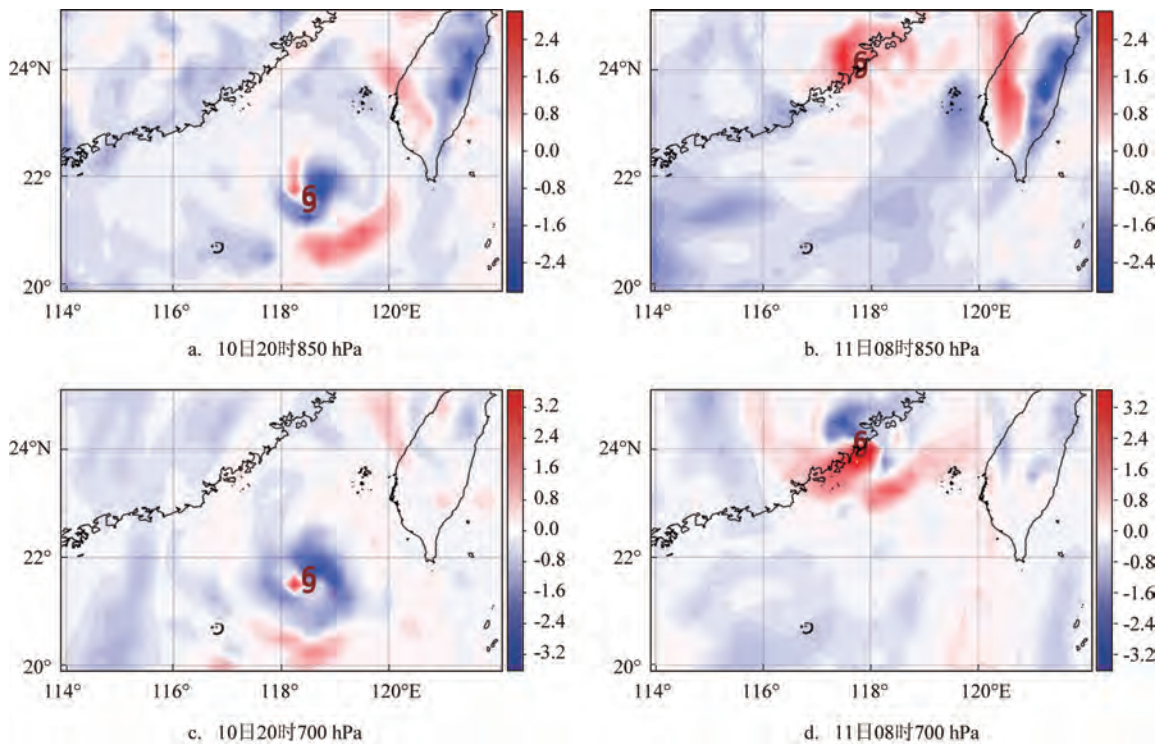


图6 台风“米克拉”湿位涡正压项分布

Fig.6 Distribution of MPV1 of typhoon "Mekkhala"

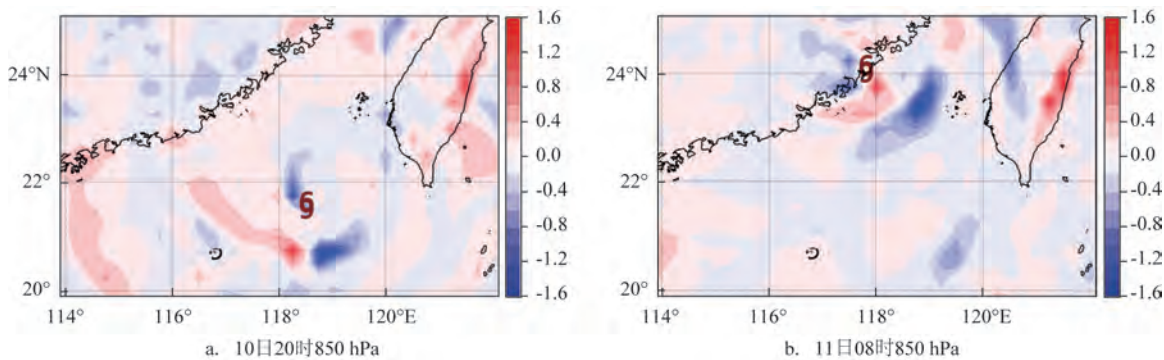


图7 台风“米克拉”湿位涡斜压项分布

Fig.7 Distribution of MPV2 of typhoon "Mekkhala"

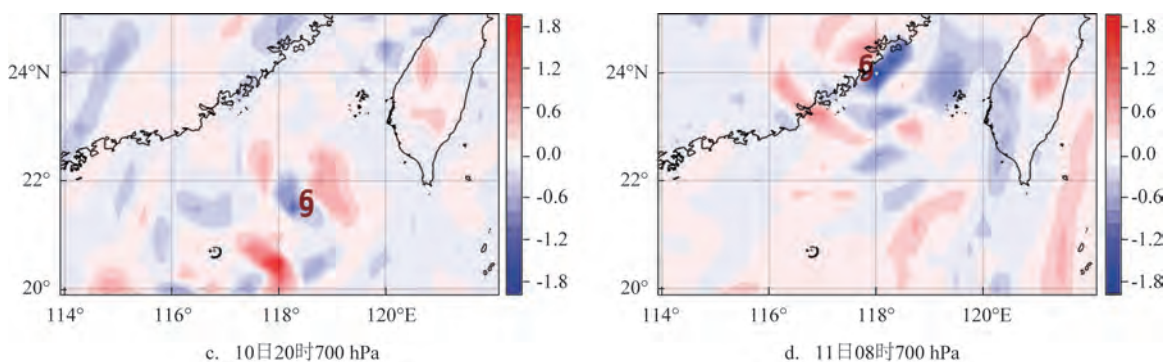


图7 (续)

Fig.7 (Continued)

加,同时从东正西负分布结构演变为北正南负,且南部出现了多个较弱的、分散的和类圆弧形极值区。

## 6 结论

本文从环流形势、环境条件以及地形作用的角度较全面地分析了台风“米克拉”近海急剧加强的成因,并揭示了其加强过程中湿位涡正压项和斜压项的演变特征。主要结论如下:

(1)南亚高压、西太平洋副热带高压和西南季风及越赤道气流对台风“米克拉”强度突增有着至关重要的作用。稳定的南亚高压提供了良好的高层辐散条件;而西伸的西太平洋副热带高压引导“米克拉”快速北上并在后期向西偏移,同时通过增大气压梯度力和维持水汽输送使台风“米克拉”强度加强;西南季风和越赤道气流为台风“米克拉”提供大量水汽和不稳定能量,是其近海加强的重要条件。

(2)从环境条件的角度看,台风“米克拉”的水汽通道位于东侧,强水汽辐合集中于南侧,近海加强的同时也伴随着水汽输送与辐合的加强。弱的垂直风切变和较暖的洋面进一步提升了凝结潜热加热效率,促进台风的继续发展。另外,台湾海峡的狭管效应主要通过压缩台风外围环流加快了台风核心旋转,具有不可忽视的增幅作用。

(3)从湿位涡正压项来看,台风“米克拉”加强前以负值区0为主,低层呈对流不稳定状态;发展成熟后逐渐被正值区替代,反映了其暖心结构的演变

特征。而湿位涡斜压项的变化相对复杂,主要趋势是湿斜压性整体加强,梯度变化更加剧烈,同时700 hPa上东正西负的分布演变为北正南负。

## 参考文献:

- [1] 廖菲,李文婷,张子然,等. 1949-2017年南海海域热带气旋强度和路径快速变化统计特征[J]. 海洋学报, 2019, 41(9): 126-135.  
Liao F, Li W T, Zhang Z R, et al. Analysis of rapid changes of tropical cyclones over the South China Sea for 1949-2017[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(9): 126-135.
- [2] 李江南,吴国强,王刚,等. 南海台风Vongfong(2002)登陆前后内核结构和近海加强原因的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 2008, 24(5): 441-448.  
Li J N, Wu G Q, Wang G, et al. Numerical study of the inner-core structures and the mechanism for inshore strengthening during the landfalling of typhoon Vongfong(2002) in the South China Sea[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2008, 24(5): 441-448.
- [3] 李霞,何如意,段朝霞,等. 台风“韦森特”路径突变和近海加强的成因分析[J]. 热带气象学报, 2014, 30(3): 533-541.  
Li X, He R Y, Duan Z X, et al. Analysis on the unusual track and intensification of typhoon “Vicente” [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(3): 533-541.
- [4] Chen L S, Luo Z X. Interaction of typhoon and mesoscale vortex [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(4): 515-528.
- [5] 于玉斌,杨昌贤,姚秀萍. 近海热带气旋强度突变的垂直结构特征分析[J]. 大气科学, 2007, 31(5): 876-886.  
Yu Y B, Yang C X, Yao X P. The vertical structure characteristics analysis on abrupt intensity change of tropical cyclone over the offshore of China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(5): 876-886.
- [6] 闫敬华,徐建平,丁伟钰,等. 地形对登陆热带气旋“黄蜂”(2002)强度影响的模拟研究[J]. 大气科学, 2005, 29(2): 205-212.  
Yan J H, Xu J P, Ding W Y, et al. A modeling study of the impact

- of terrain on the intensity of landfalling tropical cyclone Vongfong (2002)[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(2): 205-212.
- [7] 于玉斌, 陈联寿, 杨昌贤. 超强台风“桑美”(2006)近海急剧增强特征及机理分析[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 405-416.
- Yu Y B, Chen L S, Yang C X. The features and mechanism analysis on rapid intensity change of super typhoon Saomai (2006) over the offshore of China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(2): 405-416.
- [8] 刘赛赛, 张立凤, 张晓慧. 台风“彩虹”(1522)近海急剧加强的特征分析[J]. 气象科学, 2017, 37(4): 487-496.
- Liu S S, Zhang L F, Zhang X H. Characteristics analysis on rapid intensification of typhoon Mujigae (1522) over the offshore area of China[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(4): 487-496.
- [9] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 541-549.
- Chen L S, Luo Z X, Li Y. Research advances on tropical cyclone landfall process[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(5): 541-549.
- [10] 白莉娜, 王元. 环境风速垂直切变对西北太平洋热带气旋强度变化的影响[J]. 热带气象学报, 2013, 29(6): 955-962.
- Bai L N, Wang Y. Effect of vertical wind shear on tropical cyclone intensity change[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2013, 29(6): 955-962.
- [11] Zhao B, Duan Y H, Yu H, et al. A statistical analysis on the effect of vertical wind shear on tropical cyclone development[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 20(3): 383-388.
- [12] Paterson L A, Hanstrum B N, Davidson N E, et al. Influence of environmental vertical wind shear on the intensity of hurricane-strength tropical cyclones in the Australian region[J]. Monthly Weather Review, 2005, 133(12): 3644-3660.
- [13] 李慧芹, 李江南, 于艳, 等. 一次海南秋季台风暴雨的特征和成因分析[J]. 热带气象学报, 2018, 34(1): 133-144.
- Li H Q, Li J N, Yu Y, et al. Analysis of the characteristics and causes of an autumn typhoon rainstorm in Hainan[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(1): 133-144.
- [14] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-405.
- Wu G X, Cai Y P, Tang X J. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995, 53(4): 387-405.

## Analysis on the causes of rapid intensification of typhoon "Mekkhala" (2006) in nearshore waters

CHEN Jinpeng<sup>1,2,3</sup>, HUANG Yidan<sup>2,3</sup>, CHENG Jingjing<sup>2,3</sup>, LIN Hui<sup>2,3</sup>, ZHUANG Yibin<sup>2,3</sup>

(1. Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001 China; 2. Zhangzhou Meteorological Bureau, Zhangzhou 363000 China; 3. Fujian Key Laboratory of Data Science and Statistics, Zhangzhou 363000 China)

**Abstract:** Based on the NCEP GDAS/FNL reanalysis data and CMA tropical cyclone track data, this paper analyzes the cause of rapid intensification of typhoon "Mekkhala" (2006) in nearshore waters from the perspective of circulation patterns, environmental conditions and topographic effects, and diagnoses the evolution features of moist potential vorticity (MPV) before and after the intensification. The results show that the South Asia high and West Pacific subtropical high play an important role in the rapid intensification of typhoon "Mekkhala". The stable South Asia high provides a favorable upper-level outflow, and the westward extended and intensified West Pacific subtropical high lead typhoon "Mekkhala" to move northward quickly and to move westward in the later stage, which is favorable for increasing the pressure gradient force and maintaining the water vapor transport. The southwest monsoon and cross-equatorial flow bring abundant vapor and energy to typhoon "Mekkhala". The water vapor channel of typhoon "Mekkhala" is mainly located in the east side, while the strong water vapor convergence is concentrated on the south side. The vapor transport and convergence is strengthened after typhoon "Mekkhala" entering the Taiwan Strait. The weak vertical wind shear and warmer sea surface is favorable for the development of typhoon "Mekkhala", and the narrow pipe effect of the Taiwan Strait



is also unneglectable in its enhancement. In terms of the barotropic term of the moist potential vorticity, the lower layer of typhoon "Mekkhala" is dominated by negative areas before strengthening, and is gradually replaced by positive areas after it is mature reflecting the evolution characteristics of its warm core structure. The baroclinic term of the moist potential vorticity varies relatively more complicated with the main trend of overall strengthened baroclinicity and more intensified gradient variation. Moreover, the distribution of the baroclinic term of the moist potential vorticity above 700 hPa changes from positive to the east and negative to the west to positive to the north and negative to the south.

**Key words:** typhoon "Mekkhala"; rapid intensification; subtropical high; narrow pipe effect; moist potential vorticity