

麦莎台风登陆后能量过程与水汽供应的诊断研究

龚晓雪^{1,2} 赵思雄¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 对0509号台风“麦莎(Matsa)”登陆后长时间维持并轻度加强的过程进行了诊断研究, 此过程涉及到多种因素。位涡分析表明, 当中纬度西风槽东移, 该槽底部分裂出的一个较小的正位涡中心与“麦莎”合并使“麦莎”的涡旋动能增强, 而在9日之后“麦莎”与槽主体合并的阶段, 槽区主要的正位涡中心与“麦莎”融合。动能收支分析发现, “麦莎”登陆北移过程中, 高层的无辐散风穿越等高线将位能转换为动能这一过程较“麦莎”的整体加强为早, 而辐散风是低层动能的主要来源。中低层天气尺度系统为积云对流的发展提供动能, 而积云对流释放潜热又为高层动能的维持提供了帮助。将“麦莎”与北美“Agnes”飓风比较后发现, “麦莎”加强程度比“Agnes”较弱的原因之一, 是高层的无辐散风把台风环流内的动能向环境输出, 而“Agnes”飓风则是环境区有大量动能向台风环流区输送。分析水汽来源可知, 在“麦莎”登陆期间及其后副热带和热带的两条水汽通道同时或分别为“麦莎”的积云对流提供了足够的水汽供应。

关键词 热带气旋 维持机制 位涡分析 动能收支

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0437-16 **中图分类号** P445 **文献标识码** A

Diagnosis on Energy Budget and Moisture Supply of Matsa after Landfall

KUNG Hiusuet^{1,2} and ZHAO Si-Xiong¹

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract A diagnostic study has been conducted on the sustaining mechanism of Typhoon Matsa (2005) which traveled northwards after landfall in Zhejiang Province with a Strong Tropical Storm intensity. The Ertel Potential Vorticity (EPV) analysis indicates that a small positive EPV anomaly at the bottom of the approaching mid-latitude trough was an important source of vorticity for the modest re-intensification of Matsa, the main positive EPV area merged with Matsa after 9 August, 2005. The kinetic budget analysis shows that the kinetic energy (KE hereafter) generated by non-divergent wind component was prior to the intensification of Matsa, divergent wind component was the main kinetic energy source in the low-level, and the cumulus (sub-grid scale system) convection is another mechanism of upward kinetic energy transportation other than large scale ascending. The difference of KE transported by non-divergent wind between Matsa and Agnes (1972), which experienced strong re-intensification, may be an important reason why Matsa did not reintensify greatly as Agnes. Traveling on land, there are two moisture channels providing abundant water vapor for the maintenance of Matsa.

Key words landfall tropical cyclone, sustaining mechanism, PV analysis, kinetic energy budget

收稿日期 2007-01-20 收到, 2007-03-10 收到修定稿

资助项目 国家重点基础发展规划项目 2004CB418301、国家自然科学基金资助项目 40405008

作者简介 龚晓雪, 1981年出生, 硕士研究生, 主要从事台风和中尺度天气诊断分析 E-mail: kung_hs@hotmail.com

1 引言

“麦莎 (Matsa)” 台风, 即 2005 年第 9 号台风, 作为一个在长江口以南登陆, 后沿海岸线北上, 进而影响我国华东、华北甚至东北地区的一个台风系统而受到广泛关注。该台风于 8 月 5 日 1940 UTC 在浙江省台州市玉环县干江镇登陆, 登陆时中心气压为 950 hPa。登陆后其强度迅速减弱, 但并未如多数台风那样立刻消失, 而是继续北上, 只是中心最低气压有所减弱, 维持在 996 hPa 左右; 在 7 日 1200 UTC 之后向东北偏北方向移动且穿越山东半岛至渤海附近, 从卫星云图发现此阶段“麦莎”有较明显的增强, 仍然保持着某些热带气旋的特点 (如中高层暖心等), 它与北美 1954 年的 “Hazel”^[1] 和 1972 年的 “Agnes”^[2] 等台风例子不同, 并未强烈变性而转变为温带气旋, 也未出现 “冷心” 的结构, 中心气压并没有明显下降。此后, 9 日 “麦莎” 在减弱为热带低压后, 向东北移动, 并入中高纬西风带系统后减弱消失。

应当指出, “麦莎” 台风强度并非该年登陆我国热带气旋中最强的, 然而由于其维持的时间长 (3 天以上), 影响的范围广, 涉及浙江、江苏、安徽、山东等 9 省, 仍然造成了 280 亿元的经济损失, 占当年中国台风总损失的 1/3 左右。已有的研究表明, 台风登陆期间强风以及风暴潮可造成十分严重的灾害, 如 2006 年的台风 “桑美 (Saomai)”^[3]; 不仅如此, 由于台风长时间维持不消持续带来大量降水所造成的洪涝灾害的损失亦不可低估。其中最典型的例子是 1975 年的 03 号台风 (Nina), 在福建登陆后北移至河南省附近, 其停滞打转带来的强降水引发了 “758” 大洪水, 造成了巨大的人员伤亡^[3-5]。因此气象学者对登陆台风的维持机制及其相关的持续性降水的产生机制等给予了很大的关注。这不但对构造更准确的数值预报模式十分必要, 而且对预报结果的改进也是非常关键的^[6]。近年来国内外对这些方面的研究有所增加。其中陈联寿等研究认为, 潜热释放以及斜压位能释放是登陆台风的主要能量来源, 而动量和涡度收支对其维持也有一定作用^[7]。DiMego 和 Bosart^[8] 发现, 高层无辐散风的涡度输

送, 中层的涡度垂直输送, 以及低层的涡度辐合, 是 “Agnes” 台风维持并强烈变性的主要涡度源。Bosart 和 Lackmann^[9] 研究了台风在弱环境场中维持并再生的情况后, 认为弱的高空扰动前方对流层顶的抬升 (Tropopause lifting) 是 “David” 台风 (1979) 在弱的环境场中再度加强的主要原因。李英等^[10] 对比了登陆长久维持和迅速消亡的台风后认为, 高层的正涡度补充, 低层动能通量的辐合以及高层的动能收入是登陆台风得以长久维持的主要原因。另外 Molinari 和 Vollaro^[11]、Harr 和 Elsberry^[12]、Ritchie 和 Elsberry^[13] 等也在关于环境场 (特别是西风槽) 对热带气旋结构、移动以及变性的影响方面做了许多工作。

由于西太平洋与西大西洋的环境有所不同, 在东亚, 尤其是我国登陆台风多在长江口以南^[13], 能够北上且长时间影响的并不多见 (如 9406 号台风)^[14], 而登陆减弱后入海路径为我国华东地区 (福建诏安至上海) 的台风是较为重要的一类^[5]。另外, 直接在长江口以北登陆影响华北地区的台风也较少 (如 7203 号, 9608 号^[15])

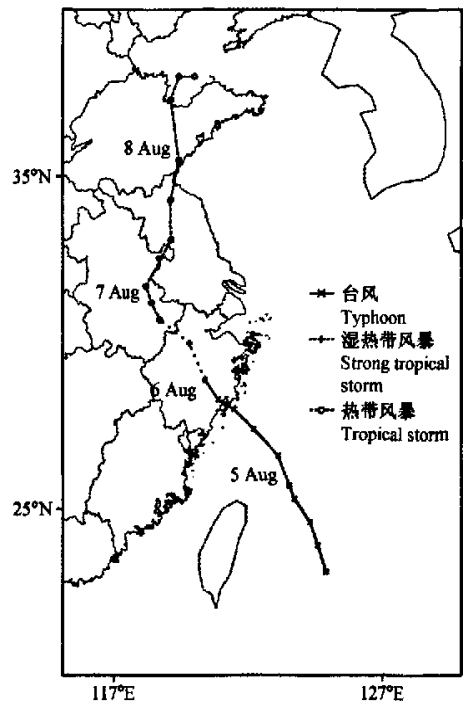


图 1 2005 年 8 月 5 日 0000 UTC~8 月 10 日 0000 UTC “麦莎” 台风路径

Fig. 1 Track (dashed line) of Typhoon Matsa (2005)

等),但是这些台风均引发了强降水。本文所要研究的“麦莎”台风属于在南方登陆后北上台风中较特殊的一个(图1)。为了更好地了解其原因和机理,应对以下问题进行深入的探讨:1)其为何能维持数日不消,并在向北移动沿途产生了强降水;2)登陆后其动力和热力结构的特征及其演变过程;3)其得以维持的动能以及水汽供应来源;4)环境流场尤其是中纬度系统(中纬度西风槽,大陆小高压)对其登陆后的移动路径、强度以及结构演变的影响。

2 资料和分析方法

本文使用关岛联合台风中心(JTWC)的最佳路径资料(Best Track Data)以确定台风中心在海上的位置,在台风登陆该资料停止发报后则以850 hPa的环流中心来作为台风的中心位置。在分析“麦莎”结构以及计算动能、水汽收支时采用NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。降水资料为加密

台站的24 h降水量。此外,还使用了韩国气象厅每3 h一次的地面图。

由于“麦莎”台风具有明显的移动性,本文在计算时使用了准Lagrange坐标下的动能收支和水汽收支方程,具体方程及计算方法见第4、5节。为了考虑“麦莎”结构上的非对称性,我们还分别计算了台风系统4个象限的涡度、动能收支以及水汽收支。

3 环流背景和降水量的分布

3.1 环流背景

“麦莎”登陆前对流层上层(200 hPa)东亚地区为一深槽控制,“麦莎”登陆过程中该槽减弱、东移,因而在这一阶段大尺度背景环流的影响较弱,这可能是“麦莎”登陆之后强度增幅较弱的原因之一。“麦莎”登陆后向北移动过程中,对流层中上层中高纬度地区乌拉尔山以东 80°E 附近的低压槽有所加强(图2a、b),至7日1200

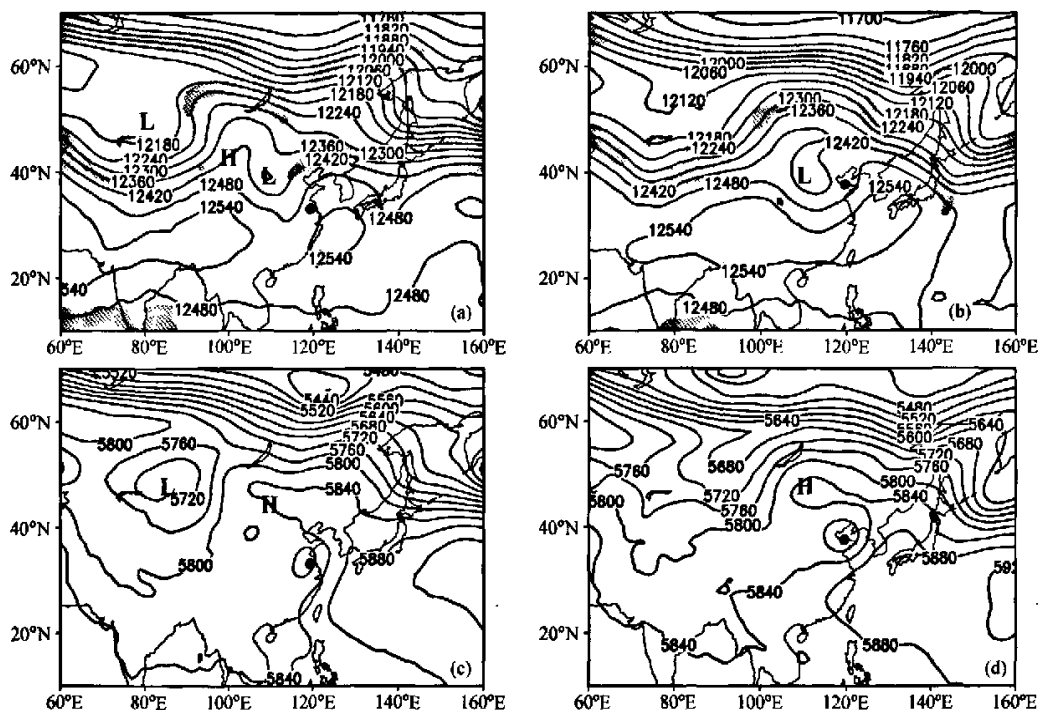


图2 2005年8月(a)7日1200 UTC和(b)8日1200 UTC的200 hPa位势高度(单位: gpm)以及(c)7日1200 UTC和(d)8日1200 UTC的500 hPa位势高度(单位: gpm)。阴影为风速大于 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域,黑点为“麦莎”所在位置
Fig. 2 Geopotential height (isoline, units: gpm) from 7–8 Aug 2005; (a) 1200 UTC 7, (b) 1200 UTC 8 Aug, at 500 hPa; (c) 1200 UTC 7, (d) 1200 UTC 8 Aug, at 200 hPa. Shaded shows areas where wind speed exceeds $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, black spot shows the position of Matsa

UTC 500 hPa 高度场上可以看见其移至 110°E , 加强并切断成冷涡, 这有利于形势的稳定维持。而在 500 hPa 上, 110°E 附近的大陆高压与西太平洋副热带高压 (以下简称西太副高) 的北部连接, 形成一个高压坝, 在一定程度上阻碍了 45°N 附近的低压系统东移 (图 2c)。这一高压坝呈带状分布, 其西北方高压势力强盛, 这对此后“麦莎”的移向无疑会有影响。在“麦莎”北移过程中, 中纬地区的经向度逐渐加大, “麦莎”沿西太平洋副热带高压西缘北上, 8 日 1200 UTC “麦莎”中心位于山东半岛, 其东南侧的西太平洋副热带高压加强西伸 (西脊点位于 115°E 附近) (图 2d), 这对于维持“麦莎”南部动能可能有一定作用。

3.2 24 h 降水量分析

“麦莎”登陆后强度减弱较快, 然而其强降水

依然维持: 7 日以前主要的降水区位于浙江省, 在长江口以南地区出现了一个 24 h 降水大于 100 mm 的中心 (图 3b、c), 定海和镇海的日降水量超过 280 mm。对比卫星云图可见, 此阶段“麦莎”的主要云系已经失去其登陆前的对称结构, 主要的云系位于“麦莎”的东部, 即“麦莎”环流的海上部分 (图略)。7 日以后随着“麦莎”北移至渤海地区 (图 4), 可以看出 1200 UTC 以后“麦莎”有比较明显的增强, 且主要的云系位于“麦莎”的北部, 与之相关, 在山东半岛 7 日 0000 UTC 至 8 日 0000 UTC 的降水量达到 100 mm (图 3d)。

3.3 “麦莎”登陆后的动力及热力结构的演变

“麦莎”登陆后整体强度迅速减弱, 这在水平风速、垂直速度、涡度散度以及高层暖心结构等

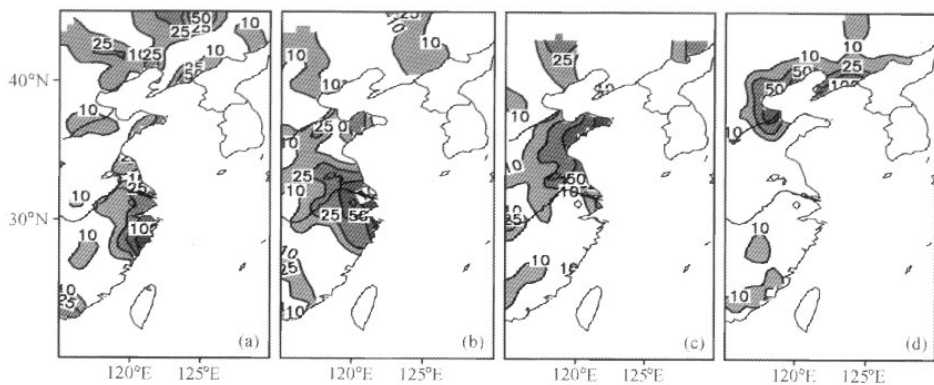


图 3 2005 年 8 月 5 日 0000 UTC~9 日 0000 UTC 的每 24 h 降水量: (a) 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC; (b) 6 日 0000 UTC~7 日 0000 UTC; (c) 7 日 0000 UTC~8 日 0000 UTC; (d) 8 日 0000 UTC~9 日 0000 UTC

Fig. 3 24-hour precipitation amount from 0000 UTC 5—0000 UTC 9 Aug 2005; (a) 0000 UTC 5—0000 UTC 6; (b) 0000 UTC 6—0000 UTC 7; (c) 0000 UTC 7—0000 UTC 8; (d) 0000 UTC 8—0000 UTC 9

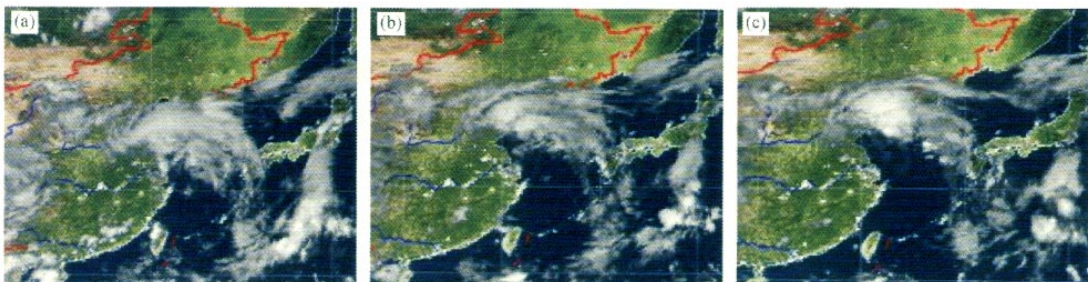


图 4 2005 年 8 月 7 日 (a) 0900 UTC、(b) 1200 UTC 和 (c) 1500 UTC 的风云二 C 卫星红外云图

Fig. 4 FY-2C infrared satellite image at (a) 0900 UTC, (b) 1200 UTC, and (c) 1500 UTC 7 Aug 2005

方面均有明显体现。高层东北部的高空急流(图 2a)在 7 日 1200 UTC 有明显的加强, 之后低层水平风速、中低层垂直运动亦先后加强; 而高层的暖心加强较晚且强度较弱(图 10)。

由“麦莎”中心的相对涡度随时间的变化(图 5)可见, 在 6 日登陆后, 其涡度值一直减弱, 而在 8 日 0000 UTC 后, “麦莎”出现再次增强阶段, 此时高、低层分别存在一个正涡度中心, 以

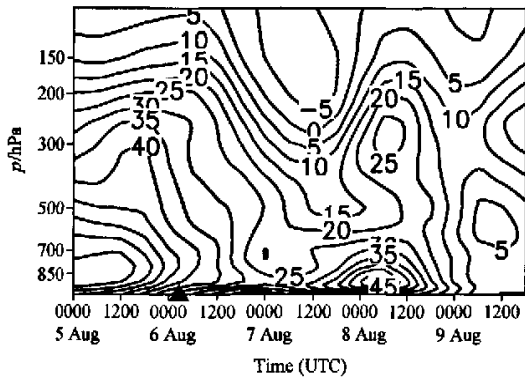


图 5 2005 年 8 月 5 日 0000 UTC~9 日 1800 UTC “麦莎”中心相对涡度的时间-高度剖面(单位: 10^{-5} s^{-1})
Fig. 5 Time-height cross section of relative vorticity at the center of Matsa from 0000 UTC 5 to 1800 UTC 9 Aug 2005 (units: 10^{-5} s^{-1})

低层涡度的增加更明显, 而中层的相对涡度量值变化不大。这种再次增强的原因将在后面分析。

为了更好地了解“麦莎”的变化和水平分布状况, 我们又分析了 2005 年 8 月 7 日 1500 UTC 的地面天气图(图 6), 这相当于“麦莎”台风低压再次轻度加强的初始时刻。可以看到“麦莎”的强度已减弱为热带低压(TD), 地面中心气压为 997 hPa, 但在其东侧, 尤其是东北部, 积云对流发展旺盛, 且为 3 h 变压的负值区, 甚至在我国辽东半岛的北部有 1 009 hPa 的低压区, 而在“麦莎”台风低压的北面 and 西北面, 有明显的高压坝存在, 且伴有大量的 3 h 变压的正值区。这也许不利于台风低压的向北移动。另外, 从一个跟随“麦莎”移动的区域涡度水平分布图上看到, 在“麦莎”登陆初期北部的负涡度较南部强(图 7), 且其增强的时间较中心附近的正涡度增强时间略早, 说明北部的高压系统增强对“麦莎”的增强也有一定的作用。7 日之后在“麦莎”西部的高层有一正涡度中心移近“麦莎”的环流, 这可能是“麦莎”涡度增强和维持的另一个来源(图 2a、b)。

散度分布与垂直速度均有明显的南北差异。北部(尤其是东北部)的高层有一条与高空急流对应的辐散带, 7 日 0600 UTC 与 8 日 0000 UTC

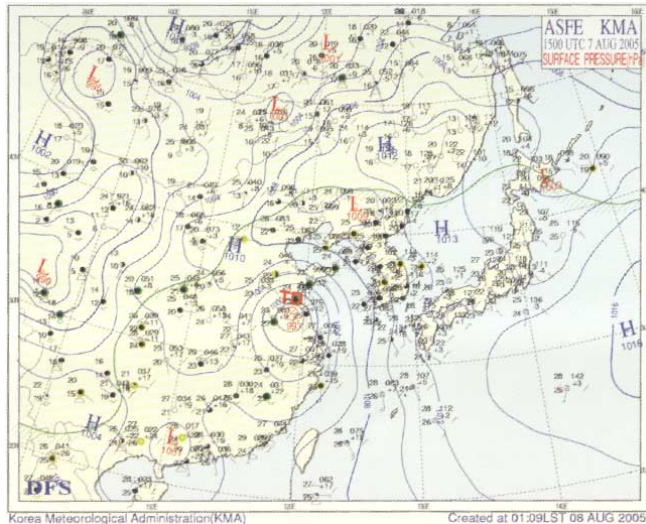


图 6 2005 年 8 月 7 日 1500 UTC 地面天气图
Fig. 6 Surface weather map at 1500 UTC 7 Aug 2005

分别出现了两个明显的辐散中心(图 8),但与高空急流的加强时间有所不同。南部的辐合辐散较弱,登陆的初期,由于受到地形(武夷山)的影响,西南部的低层辐合急剧减小,而高层亦没有见到高空流出气流,相应的高空辐散也较北部小很多。由此可见中纬度西风带系统在“麦莎”增强过程中起着重要的作用。

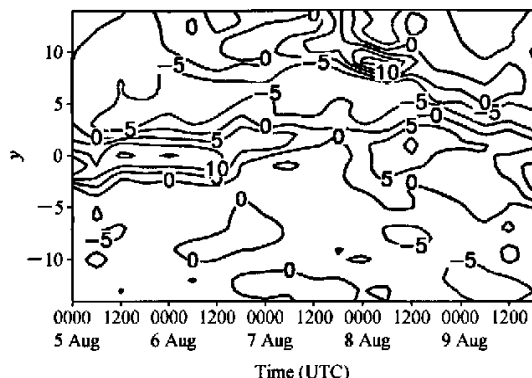


图 7 2005 年 8 月 5 日 0000 UTC~9 日 1800 UTC 过“麦莎”中心的 200 hPa 上相对涡度(单位: 10^{-5} s^{-1})的经向-时间剖面(纵坐标为距离中心的纬度,坐标值 0 表示“麦莎”中心,正(负)值为中心以北(南))

Fig. 7 Meridional time cross section of relative vorticity at the center of Matsa from 0000 UTC 5 to 1800 UTC 9 Aug (units: 10^{-5} s^{-1}), y-axis shows the distance (latitude) to the center, 0 represents center of Matsa, negative (positive) value means south (north) to the center

与风场结构一样,“麦莎”的热力结构亦从登陆初期的较为对称的暖性系统(图 9a)转为非对称。105°E 附近的西风槽在 6 日以后向南方输送冷空气,使得 7 日 0000 UTC 以后 110°E 附近的温度槽加深,又加之“麦莎”北部的偏北气流将大陆较冷的气流卷入,这二者共同的作用,使 7 日 1200 UTC 中低层“麦莎”西部出现明显的冷舌,339 K 线明显南伸(图 9b),使得“麦莎”热力结构呈非对称性分布。8 日 1200 UTC 500 hPa 上冷舌基本上已经侵入台风内部,339 K 线从“麦莎”

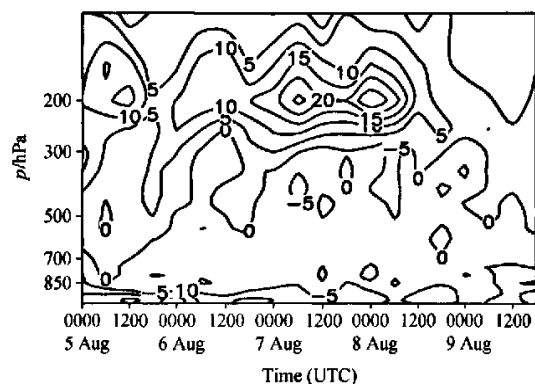


图 8 2005 年 8 月 5 日 0000 UTC~9 日 1800 UTC “麦莎”北部的区域平均散度(单位: 10^{-6} s^{-1})的时间-高度剖面

Fig. 8 Time-height cross section of area-averaged divergence of the northern portion of Matsa from 0000 UTC 5 to 1800 UTC 9 Aug (units: 10^{-6} s^{-1})

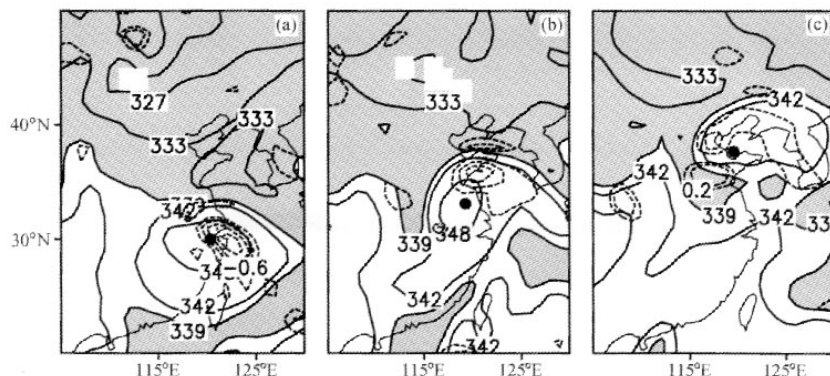


图 9 2005 年 8 月 (a) 6 日 1200 UTC, (b) 7 日 1200 UTC, (c) 8 日 1200 UTC 的 500 hPa 假相当位温 θ_w (单位: K) 分布及垂直运动(虚线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)。阴影部分为 $\theta_w \leq 339 \text{ K}$ 的区域,黑点为“麦莎”所在位置

Fig. 9 θ_w (units: K) and vertical velocity (dash line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 500 hPa at (a) 1200 UTC 6, (b) 1200 UTC 7, and (c) 1200 UTC 8 Aug 2005. Shaded shows the area where $\theta_w \leq 339 \text{ K}$, the black spot shows the position of Matsa

西部绕行至其南侧,“麦莎”中层的暖心结构基本被破坏(图 9c);而低层由于在东南侧距中心 5~6 个经纬距附近存在较强的暖空气,冷舌卷入的程度较中层弱,使得“麦莎”低层的温度分布为东暖西冷。配合垂直运动的分布可见,在登陆过程中东北部的暖区有较大的上升运动,而西部的冷区则是在 8 日 1200 UTC 之后才出现相对较强的下沉运动($\omega \geq 0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)。在此阶段冷空气对“麦莎”的增强作用不是很明显。

4 Ertel 位涡分析

由于“麦莎”北移至较高的纬度时,其西北方向上有中纬度西风槽移近,为此将分析一下该西风带系统对于“麦莎”的维持及再次的轻度加强是否有一定的作用。Hoskins^[16]强调,位势涡度由于在给定平衡条件下具有守恒性,且结合考虑了动力以及热力过程,因而其在解释温带气旋的生成时具有了传统物理变量(如绝对涡度、位温等)所缺乏的简洁。Bosart 和 Lackmann^[9]发现,位涡分析相对于位势高度场的分析对于中纬度天气系统能给出更详细的描述。而 Ertel 位涡(EPV)由于在绝热、无摩擦的条件下不需要任何平衡条件,为分析提供了一个相对比较简洁的物理量^[16]。1991 年, Davis 和 Emanuel^[17]进一步将位涡的思想从仅用于中纬度系统扩展到了研究中纬度系统以及热带系统的相互作用。

基于上述考虑,本文将采用 EPV (V_E) 来分析西风槽对“麦莎”的维持过程中的影响,而计算方案与 Bosart 和 Lackman 在文献 [8] 中给出的公式 (4) 相同:

$$V_E = -g \frac{\partial \theta}{\partial p} \left(f + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right). \quad (1)$$

首先分析 200 hPa 的 EPV 分布(图 10)以考虑“麦莎”登陆后中纬度系统对其的影响。6 日 1200 UTC 之前,在中高纬地区 105°E 附近存在一与西风槽相对应的正 EPV 高值区,而此时与“麦莎”相关的 EPV 较登陆前明显减弱,在南部幅度减弱最大(图 10a)。7 日 1200 UTC 之前中高纬系统经向度加大,正 EPV 区域范围扩大,量值增强,其下游出现一负 EPV 区域,表明大陆高压系统强度增强;然而由于与“麦莎”的距离较远,此时中高纬低槽对“麦莎”并无明显的作用迹象,“麦莎”强度进一步减弱(图 10b)。其后,由于 40~45°E 附近的较强的高压系统阻挡,低槽的主体部分稳定在 110°E 附近,未能直接影响“麦莎”,而槽底则由于有 EPV 的平流输送,分裂出一个较小的正 EPV 中心,此 EPV 高值区逐渐东移与“麦莎”接近,使得“麦莎”的 EPV 增强(图 10c)。8 日 1200 UTC 之后,西风槽主体对应的 EPV 区域与“麦莎”逐渐接近,9 日之后“麦莎”与西风槽系统合并。

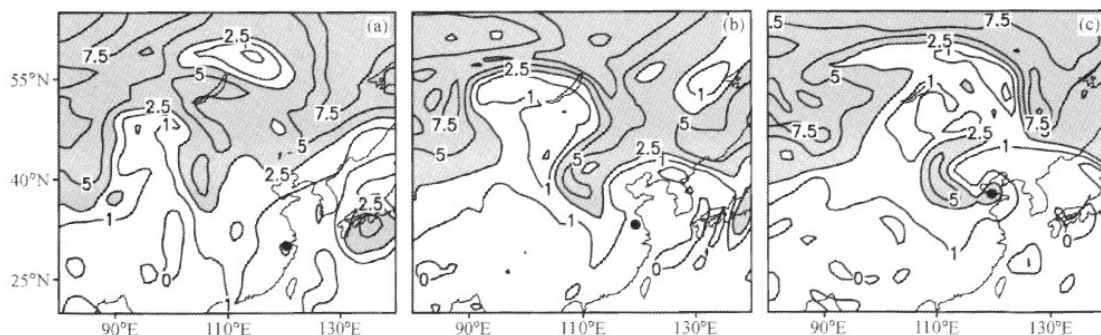


图 10 2005 年 8 月 (a) 6 日 1200 UTC, (b) 7 日 1200 UTC 和 (c) 8 日 1200 UTC 200 hPa 上的 EPV (位涡单位, PVU) 分布 (阴影部分为 EPV 大于 2.5 PVU 的区域 (1 PVU = $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}$))

Fig. 10 Ertel Potential Vorticity (EPV, units: PVU) at 200 hPa at (a) 1200 UTC 6 Aug, (b) 1200 UTC 7 Aug, (c) 1200 UTC 8 Aug, 2005. Shaded shows the area where EPV is larger than 2.5 PVU

又通过分析“麦莎”中心的 EPV 垂直剖面的变化可以更清楚地看出中高纬度系统高层 EPV 高值的向下发展过程以及它对中低层 EPV 变化的影响。“麦莎”的 EPV 高值区主要位于低层和高层,登陆早期(6 日 1200 UTC)中低层的 EPV 与高层的中心仍有所联系(1PVU 等值线)且结构较为垂直(图 11a、12a);12 h 后,随着“麦莎”的减弱两者已基本分离(图 11b)。从纬向剖面可以看到在此时台风低层的 EPV 中心与之前的高层 EPV 高值区分离的同时,西部有一新的且更为强大的 EPV 高值区开始向下伸展与台风的 EPV 高值区相连(图 12b)。相对来说北部类似的过程较西部延迟 12~24 h 左右,直到 8 日 1200 UTC 台

风中低层的 EPV 高值区才与高层的高值区相连(图 11c),这在一定程度上表明由于高压坝的存在使得西风槽主要从西部而不是从北部开始影响“麦莎”。

5 动能收支分析

在“麦莎”登陆维持并再次轻度加强的阶段,其结构演变呈非对称化,由以上的分析可见,中纬度系统在这个过程中有一定的作用。以下通过分析“麦莎”环流的动能收支,从另一角度来进一步分析“麦莎”维持的过程中中纬度系统以及其他影响因素的作用。

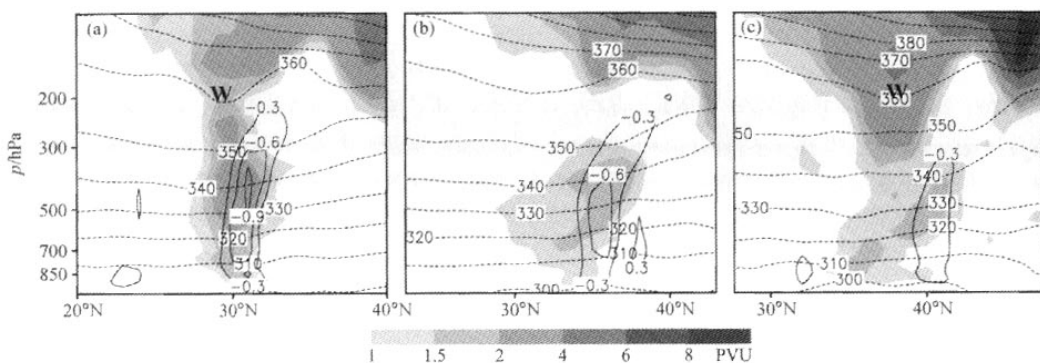


图 11 2005 年 8 月 (a) 6 日 1200 UTC、(b) 7 日 1200 UTC 和 (c) 8 日 1200 UTC 通过“麦莎”中心的 EPV (阴影)、垂直上升速度 (实线, 单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) 和位温 (虚线, 单位: K) 的经向垂直剖面, W 为高空暖心位置

Fig. 11 Meridional vertical cross sections of EPV (shaded), vertical velocity (solid lines, unit: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$), and potential temperature (dashed lines, units: K) across the center of Matsa at (a) 1200 UTC 6 Aug, (b) 1200 UTC 7 Aug, (c) 1200 UTC 8 Aug 2005, W means the warm core at upper-level

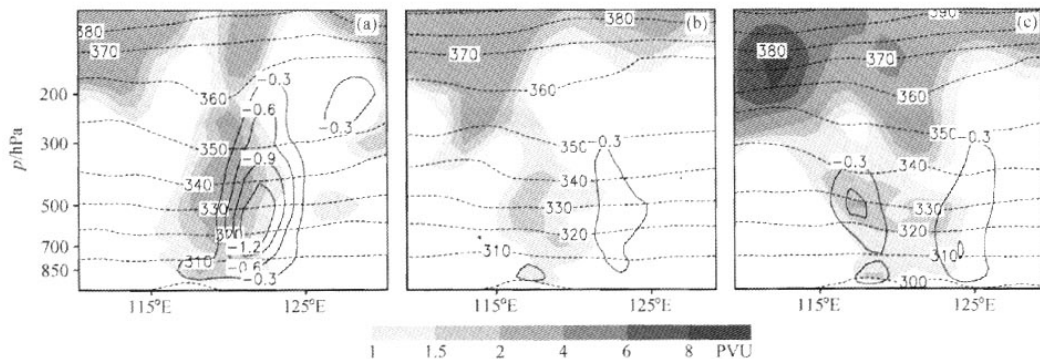


图 12 同图 11, 但为纬向垂直剖面

Fig. 12 As in Fig. 11, except for zonal vertical cross sections

5.1 计算方案

“麦莎”台风作为一个热带的正压系统移动到中纬度斜压环境中, 需要考虑正压与斜压两种过程不同的作用, Pearce^[18]指出无辐散风和辐散风的影响可理解为分别与正压过程以及斜压过程有关。为此, 我们将水平风场分解为无辐散风分量和辐散风分量来讨论。考虑到热带气旋是移动的系统, 故采用准 Lagrangian 坐标下动能方程的区域平均形式^[8]来做研究:

$$\frac{\partial \bar{k}}{\partial t} = -\overline{J(\psi, k)} + \overline{C \cdot \nabla k} - \frac{l_j}{A_j} \hat{k} v_n - \frac{\partial \bar{\omega k}}{\partial p} - \overline{J(\psi, \varphi)} + \overline{\nabla \chi \cdot \nabla \varphi} + \overline{\mathbf{V} \cdot \mathbf{F}}, \quad (2)$$

对某一气层积分后得到:

$$\frac{\partial K_i}{\partial t} = \frac{1}{g} \int_{p_i}^{p_0} \left[\underbrace{-\overline{J(\psi, k)}}_{\text{NFC}} + \underbrace{\overline{C \cdot \nabla k}}_{\text{SFC}} - \frac{l_j}{A_j} \hat{k} v_n - \underbrace{\frac{\partial \bar{\omega k}}{\partial p}}_{\text{VFC}} - \underbrace{\overline{J(\psi, \varphi)}}_{\text{NG}} + \underbrace{\overline{\nabla \chi \cdot \nabla \varphi}}_{\text{DG}} + \underbrace{R}_{\text{RES}} \right] dp, \quad (3)$$

其中,

$$K_i = \frac{1}{g A_j} \int_{p_i}^{p_0} \int_{A_j} k dA_j dp$$

是区域平均动能的积分形式; OB 是动能随时间的变化项; NFC (DFC) 是无辐散风 (辐散风) 所造成的水平动能输送; VFC 是动能的垂直输送项; SFC 是由于系统移动所造成的水平动能输送; NG (DG) 是由于无辐散风 (辐散风) 穿越等压线将位能转换为动能的项; RES 是余项, 一般认为该项与观测误差、计算误差、表面应力以及次网格尺度系统与网格尺度系统之间的动能转换有关。边界层余项为负表示摩擦消耗; 自由大气中余项为负表示有由网格尺度向次网格尺度的动能转换, 余项为正则表示有从次网格尺度向网格尺度的动能转换, 即积云对流所释放的潜热为天气尺度系统的维持提供能量。

5.2 动能收支分析

总体而言, “麦莎”在登陆后各层的动能均有减小, 在 7 日 1200 UTC 后高层开始有动能加强 (图 13a), 中层的动能在整个北上过程中并无明显的增强。登陆北上期间, 东部的动能 (图 13a₂、a₃) 较西部 (图 13a₄、a₅) 略大。以下就动能收

支中的各项对“麦莎”动能的加强以及在非对称结构演变过程中的作用做一讨论。

当无辐散风或辐散风穿越等压线时, 有位能和动能之间的转换过程, 其制造或消耗动能; Pearce^[18]指出, 此过程可以分别看作是正压和斜压过程中动能的制造, 文献 [8] 亦指出, 前者可看作台风外部的动能源, 而后者可看作内部的动能源。

在 7 日 0000 UTC 至 8 日 0000 UTC, 随着高层西风槽的加深以及“麦莎”北移接近槽区, 高层无辐散风从登陆早期的消耗动能转变为制造动能 (图 13b), 此过程较动能达到最大值的时间早 6~12 h。可见, 对于“麦莎”来说, 西风槽东移使气压梯度加强, 从而使动能增强, 是“麦莎”动能总体开始增强的一个重要原因。在整个登陆阶段, 300 hPa 以下基本为正压过程制造动能, 虽然对于整个台风环流平均来说强度并不大, 但各个象限的量值, 特别是中低层还是比较大的, 且东西的差异也比较大。东部中低层由于无辐散风穿越等高线, 从高压吹向台风低压制造动能 (图 13b₂、b₃), 而西部则是从低压吹向高压消耗动能 (图 13b₄、b₅), 这是东部动能大于西部的原因之一。南部由于受到西太副高西伸加强的影响 (图 13b₂、b₅), 在登陆阶段, 其中低层由于无辐散风制造的动能较北部 (图 13b₃、b₄) 更大, 是南部动能得以维持的重要因素。

由于辐散风分量较无辐散风分量小, 此项在各个象限的量值相对来说较无辐散风的动能制造项小 (图 13c)。总体来说, 通过辐散风穿越等压线制造的动能主要集中于低层, 这是“麦莎”低层获得动能的主要来源之一; 中高层 (700 hPa 以上) 基本是消耗动能。另外, 由于低层辐合的非对称分布, DG 的分布也呈现比较明显的非对称性, 在“麦莎”维持阶段北部低层的正 DG 量值较大 (图 13c₃、c₄), 而南部尤其是西南部的正 DG 层则较薄 (图 13c₂、c₅)。在 7 日 1800 UTC 以后, 北部低层的 DG 可能由于冷空气的原因, 正的 DG 层有比较大的抬升 (至 500 hPa), 但强度无大变化。在与西风槽合并的阶段, 南部高层出现正的 DG, 后期高空的斜压扰动过程对于合并阶段台风的加强有重要的作用, 与之前的再次轻度加强不完全相同。当考虑范围较大至可以包括

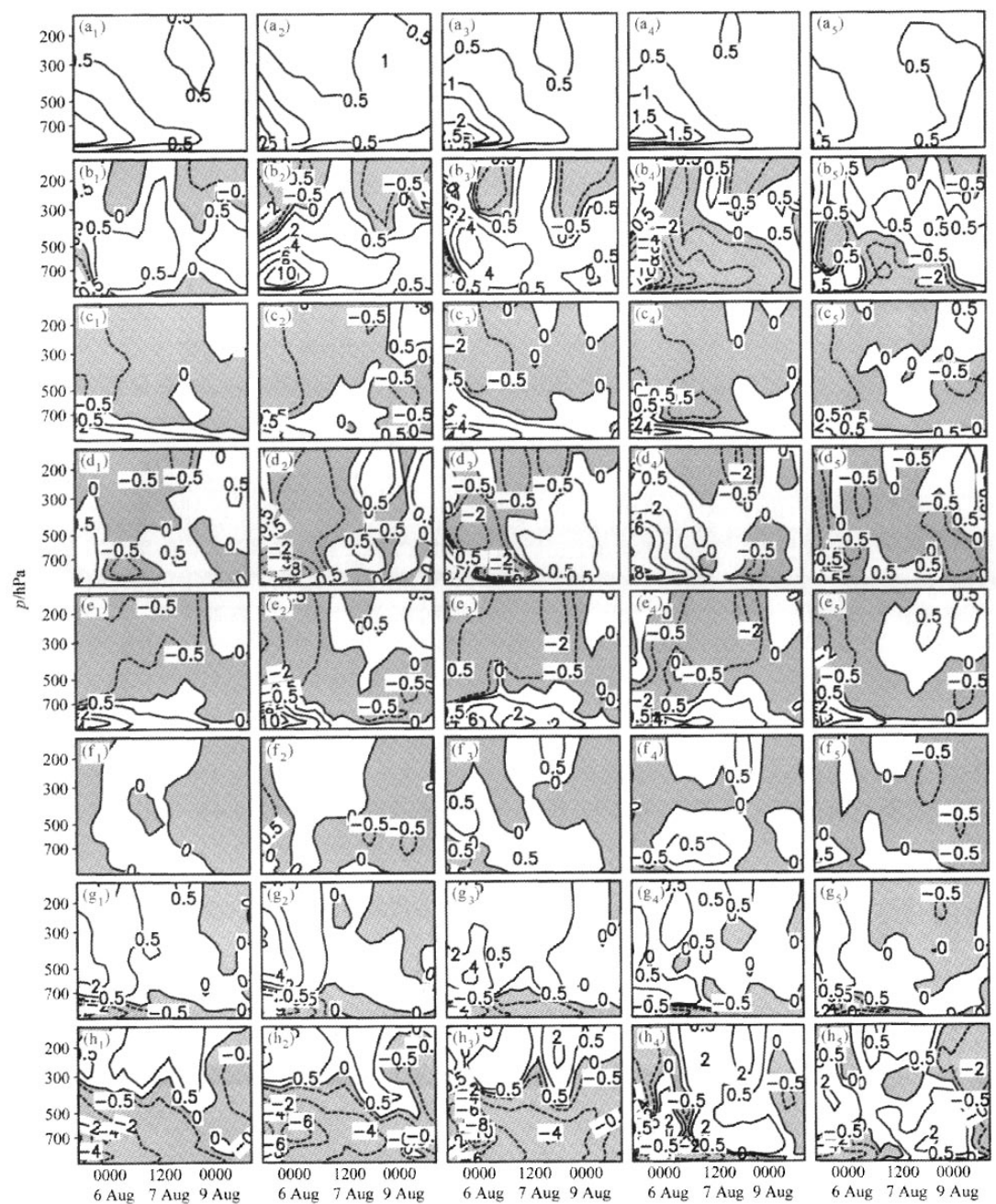


图 13 $3^{\circ}\times 3^{\circ}$ 区域内动能收支中各项的时间-高度剖面 (第 1 列为 4 个象限的平均值, 第 2~5 列分别为东南、东北、西北、西南象限; (a) KE; (b) NG; (c) DG; (d) NFC; (e) DFC; (f) SFC; (g) VFC; (h) RES, 动能单位为 $10^5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, 间隔为 0.5 个单位, 其余各项的单位均为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 间隔为两个单位; 阴影为负值区域)

Fig. 13 Time-height cross sections of area-averaged components of KE budget at $3^{\circ}\times 3^{\circ}$ region. The first column represents the average of 4 quadrants, second to fifth represent SE, NE, NW, SW quadrant respectively. Each row represents: (a) KE, (b) NG, (c) DG, (d) NFC, (e) DFC, (f) SFC, (g) VFC, and (h) R respectively. Units of KE are $10^5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ contoured every 0.5 units. Others are in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ contoured every 2 units while 0.5 and -0.5 are outlined. Shaded represent the negative value

“麦莎”北部的高压系统时(图略), 由于北部的大陆高压以及海洋上的暖高压, 在“麦莎”登陆维持的过程中维持并有所加强, 导致气压梯度加强, 辐散风穿越等高线制造动能, 使得“麦莎”的高层动能得以维持。

动能(KE)的水平输送由无辐散风的动能输送(NFC)、辐散风的动能输送(DFC)和系统移动造成的动能输送(SFC)三项组成。总体来说, 在热带气旋的再次轻度加强阶段, 中低层无辐散风从环境向台风环流输送动能, 在一定程度上使TC的强度得以维持; 而高层则是从台风环流向外输出动能(图13d), 这与北美地区强烈变性的“Agnes”飓风在加强阶段高层由于无辐散风输送获得大量的动能^[6]有很大的区别, 可推论“麦莎”的加强程度不大的一个重要原因可能是高空的无辐散风动能输送不强的缘故。在其后与西风槽合并的阶段, 高层出现正的动能输送, 轻度的加强和合并阶段的加强具有一些不同的影响因素, 这可以在一定程度上说明, 第一次轻度加强的性质与温带系统的加强不完全相同。辐散风的动能输送(图13e)的总体变化趋势与辐散风动能制造项(图13c)类似, 亦是中低层动能辐合, 700 hPa以上动能辐散, 在合并阶段高层亦出现动能辐合层。然而相对来说, 辐散风的动能输送对于“麦莎”的强度以及动能输送层的厚度均较辐散风穿越等压线的动能制造项大, 因此辐散风对“麦莎”低层动能维持的作用主要在于将环境动能输送至台风环流。“麦莎”登陆后系统不断北移, 与其北部的高空急流距离接近, 因此高层获得动能的主要是北部, 在7日0000 UTC之后东北象限和西北象限有较强的动能收入(图13f₃、f₄); 由此可见, SFC在“麦莎”高层动能的维持方面也有一定的作用。

大尺度的垂直运动以及积云对流亦能影响高低层之间动能的垂直分布。在“麦莎”的整个登陆过程中, 低层(700 hPa以下)由于大尺度垂直运动失去动能, 而中高层则获得动能(图13g), 即低层较大的动能通过垂直运动向上输送至中高层。在经历了登陆早期的显著减小之后, 在7日0000 UTC至1200 UTC低层的动能输送有所增强。在各象限之中东北象限的垂直动能输送为最强, 在8日之前一直维持着较强的动能输送(图

13 g₃)。由余项看出, 积云对流是另外一个将低层通过斜压过程获得的动能向上输送的途径, 在“麦莎”的动能收支中, 余项的量值(图13h)与无辐散风的动能制造项(图13b)相当, 是“麦莎”登陆后高层动能的主要收入之一。“麦莎”登陆后, 高层余项为正而低层为负, 即低层环境流场为积云发展提供动能, 而在中高层, 积云中凝结潜热的释放又反过来支持台风系统的维持。另外, 余项的非对称分布同样十分明显, 在高层(图13h₃、h₄)北部的余项量值明显较南部(图13h₂、h₅)大, 与卫星云图上所表现的“麦莎”北部的云系较南部明显有较好的对应关系。

总体而言, 在“麦莎”登陆初期的热带气旋减弱阶段, 低层的动能由于摩擦损耗以及无辐散风向外输送动能而减小, 中低层无辐散风的动能制造成为主要的动能维持来源。随着高空西风槽的移近, 高层无辐散风的动能制造从早期的负值转为正值, 使得高空动能有所增强, “麦莎”开始进入一个轻度的再加强的阶段。高层无辐散风的动能制造以及积云对流提供的次网格动能是“麦莎”此阶段增强的主要动能来源; 低层的动能则由于辐散风的动能制造以及动能辐合得以维持; 在低层产生的动能有一部分通过大尺度垂直运动以及积云对流从低层传向中高层。与北美强烈变性加强的“Agnes”飓风差别较大的是“麦莎”高层无辐散风在此阶段向环境输出动能, 使得高层损失动能, 而“Agnes”飓风的高层无辐散风是动能辐合的一个重要因素, 两者的区别从一定程度上可以解释“麦莎”的加强没有“Agnes”飓风强的原因。之后与西风带系统合并的阶段, 高层无辐散风以及辐散风的动能输送成为主要的动能来源, 且大尺度环流向积云对流输送动能, 与之前的轻度再加强的动能来源有所区别。

6 水汽条件分析

6.1 水汽通量分析

由于“麦莎”沿海岸线北移, 其东部的环流一直处于海上, 从卫星云图上可以看见其主要云系亦基本上位于“麦莎”的海上部分, 加之前述的动能分析表明, 积云对流有重要作用, 而水汽对维持积云对流十分重要, 因此, 下面分析在

“麦莎”维持过程中水汽条件的演变和影响。首先,通过计算对流层低层(850 hPa)的水汽通量来分析“麦莎”的主要水汽来源。一般热带气旋登陆后,其海上的水汽通道有可能被截断,失去水汽供应往往成为登陆热带气旋消亡的主要原因。然而“麦莎”登陆后,其东部一直存在着较强的水汽输送带,早期该输送带主要是从南海进入西太平洋的西南气流以及西太平洋副热带高压西缘的东南气流(图 14a)。随着“麦莎”的北上,西南急流的水汽输送随之减弱。而副高西侧的东南水汽输送仍维持(图 14b、c)。这两支水汽通道同时或先后成为“麦莎”登陆维持的重要水汽供应源。

6.2 水汽辐合量分析

除水汽供应外,水汽的辐合辐散与降水、潜热释放的关系更为直接,因此以下将分析“麦莎”登陆过程中“麦莎”环流内的水汽辐合量。水汽收支的方程为^[8]:

$$P = \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_1} \left\{ \underbrace{-\frac{\partial q}{\partial t}}_{\text{OB}} - \underbrace{J(\psi, q)}_{\text{NFC}} + \underbrace{\nabla \chi \cdot \nabla q}_{\text{DF1}} + \underbrace{q \nabla^2 \chi}_{\text{DF2}} + \underbrace{C \cdot \nabla q}_{\text{SFC}} - \underbrace{\frac{\partial \omega q}{\partial p}}_{\text{VFC}} \right\} dp, \quad (4)$$

其中, P 是降水率; OB 是比湿随时间的变化; NFC 是无辐散风造成的水汽辐合; $DF1$ 和 $DF2$ 为辐散风造成的水汽辐合的两个不同组成部分; SFC 是由于系统移动所造成的水汽辐合; VFC 是垂直的水汽辐合量。

水汽的水平辐合量由辐散风 ($DF1+DF2$)、无辐散风 (NFC) 造成的水汽辐合以及由于系统移动造成的水汽辐合 (SFC) 组成,其中由于辐散风引起的水平通量辐合 ($DF2$) 量值最大,从水汽方面说明辐散风在“麦莎”维持过程中,至少是在提供水汽的过程中具有重要作用;无辐散风造成的水汽辐合辐散的作用次之,其量值为 $DF2$ 的 $1/3$ 左右。由于水汽分布的不均匀所造成的水汽辐合 ($DF1$) 量值较 $DF2$ 小 $1\sim 2$ 个量级,可以忽略(图略)。而基本上 SFC 的量值也很小(图略),仅较 $DF1$ 大;其中北部在 8 日 12 时之前基本上为负值,即台风从相对湿区移动到相对干区;由于“麦莎”北部较南部湿润,因此当“麦莎”北移时,南部基本由系统移动获得水汽。以下对 $DF2$ 以及 NFC 两个较大的项做一具体分析。

$DF2$: 整体来说,低层(700 hPa 以下)为十分强的水汽辐合区域(东北象限的 DFC 可以达到 $0.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),中高层为较弱的水汽辐

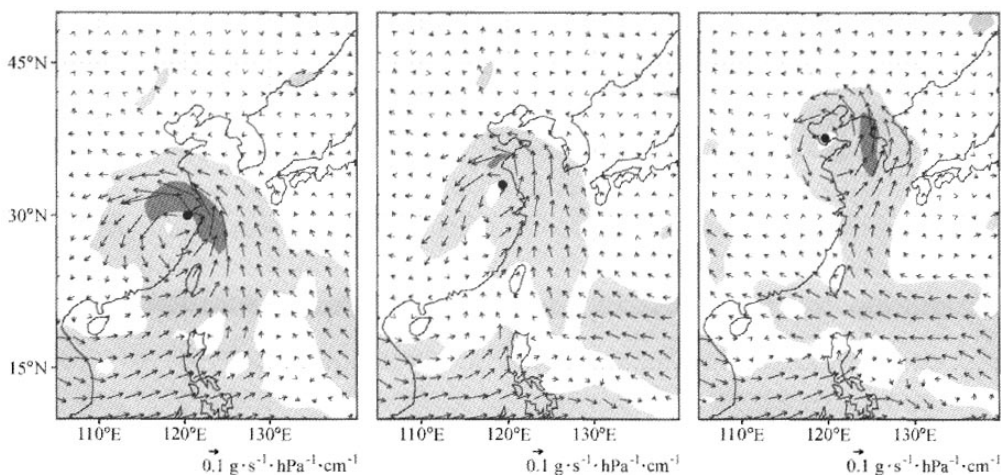


图 14 (a) 6 日 1200 UTC、(b) 7 日 1200 UTC 和 (c) 8 日 1200 UTC 850 hPa 上的水汽通量矢量(单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, 浅(深)色阴影部分为水平通量值大于 10 (30) $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的区域)

Fig. 14 Moisture flux vector (units: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) at 850 hPa at (a) 1200 UTC 6, (b) 1200 UTC 7, and (c) 1200 UTC 8 Aug 2005. Light (Dark) shaded area represents the region where moisture flux is larger than 10 (30) $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

散区域；在7日0000 UTC之后低层的辐合层有较强的抬升，较“麦莎”之后的轻度再增强至少早12 h（图15a），为其后的增长提供了必要的水汽条件。北部（图15a₃、a₄）低层的水汽辐合层较南部（图15a₂、a₅）厚，量值亦较南部大（东北象限的量值最大），与动能收支中辐散风相关项（图13c、e）较为相似。7日0000 UTC之后北部低层的水汽辐合有所加强而南部的水汽辐合层则不断降低，西南象限中低层的水汽辐散量（900~700 hPa）比较大（图15a₅）。南部低层的辐合减小是造成“麦莎”登陆后期南干北湿的主要原因，也是南部对流发展较北部弱的影响因素。

NFC：与辐散风造成台风环流内部水汽分布的不对称有所不同，无辐散风将水汽从水汽来源较为均匀地输送至台风环流的各个部位。总体的演变趋势与DF2类似，低层水汽辐合，高层水汽辐散（图15b）；而东南象限低层的NFC为负值（图15b₂），即无辐散风将东南象限低层的水汽输送至“麦莎”的其他部位。

垂直水汽辐合（VFC）是水汽收支各项中低层水汽辐散最大的项，基本上低层（850 hPa以下）为十分强的水汽辐散层，其上为十分弱的水

汽辐合层（图15c），表明垂直运动使得低层由于辐散风、无辐散风辐合而获得的水汽向上输送至较高的层次。由于西南象限低层仅有很弱的上升气流，而中高层为下沉气流，垂直运动使得此象限主要的水汽辐合区位于中层；而后期由于冷空气出现下沉运动，使得水汽辐合层进一步下降（图15c₅）。西北象限在“麦莎”的维持阶段低层的水汽辐散层略有抬升（图15c₄），而东南象限则有明显的下降（图15c₂），说明东南象限由于垂直运动的减弱使得低层的水汽向上输送减弱，这样将在一定程度上导致之后积云对流的减弱；而西北象限的情况则与之相反。

7 “麦莎”台风演变期间主要影响因子的概念模型

由上述分析，可知“麦莎”演变过程，尤其是登陆后得以较长时期维持，主要是存在必要的能量供应和水汽来源。另外，积云对流的作用亦不可忽视。在前述研究的基础上提出了“麦莎”台风再次增强期间各影响系统及因子的概念模型图（见图16）。对此概念模型图的说明，请见该图中的简要文字叙述，此处不再重复。

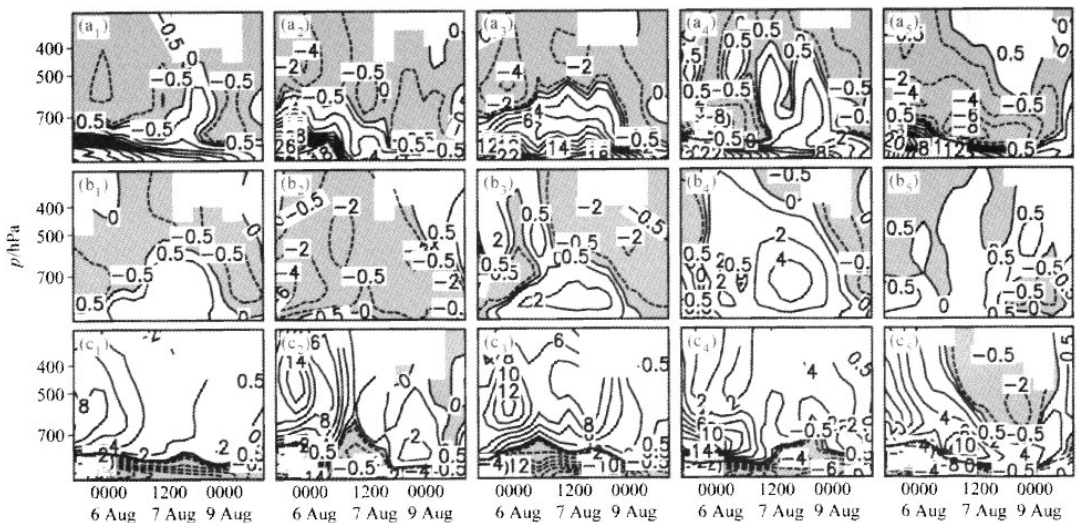


图15 $3^{\circ}\times 3^{\circ}$ 区域内水汽收支中(a)DF2、(b)NFC和(c)VFC项的时间-高度剖面；(第1列为4个象限的平均值，第1~5列分别为东南、东北、西北、西南象限；各项单位为 $10^{-4}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，阴影为负值区域)

Fig. 15 Time-altitude cross sections of (a) DF2, (b) NFC and (c) VFC in moisture budget at $3^{\circ}\times 3^{\circ}$ region. Units are $10^{-4}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. The first column represents the average of 4 quadrants, second to fifth represent SE, NE, NW, SW quadrant, respectively

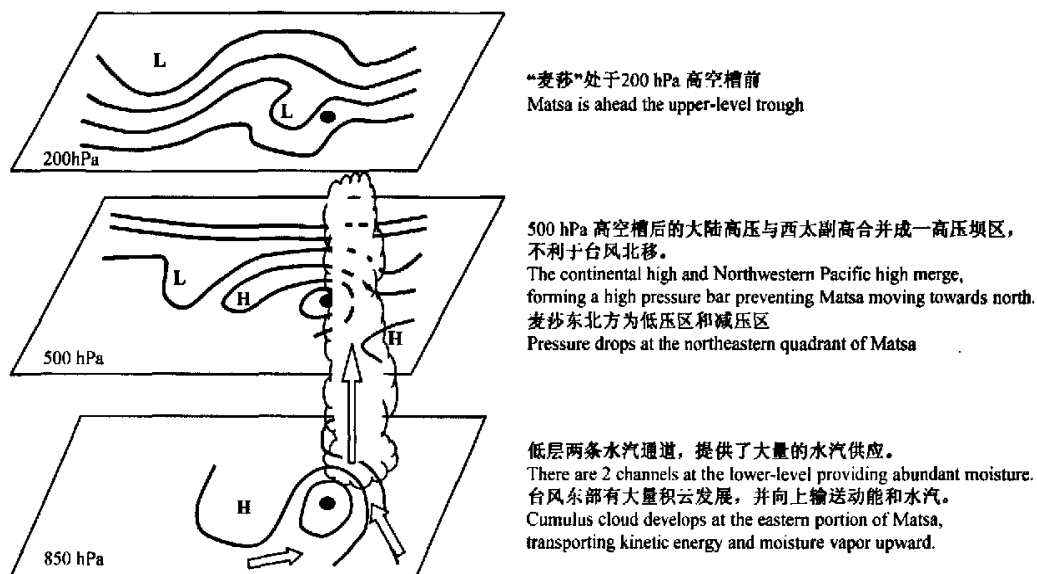


图 16 “麦莎”台风再次增强期间各影响系统及因子的概念模型

Fig. 16 The conceptual model of influencing systems and factors in reintensification of Typhoon Matsa (0509)

我们还注意到“麦莎”及其减弱后的热带低压与中纬度系统存在着相互作用，但此类作用，由于低槽较弱，未能像北美的飓风“Agnes”那样，发生了质的变化，由热带气旋变为了温带气旋，这也许是东亚地区的一个重要特点。

8 结论与讨论

“麦莎”台风作为一个在东南沿海登陆，而后又沿海岸线北上影响长江口南北、华北和东北地区的台风具有其特殊性。“麦莎”台风登陆后，维持数日，且一度有再加强现象，它的整个过程涉及到较多的因素。

动能制造和水汽供应的维持机制：通过动能以及位涡的分析发现，在“麦莎”登陆北移过程中，西风槽的移近使得中纬环流的经向度加强，高层的无辐散风穿越等高线将位能转换为动能使得“麦莎”经历了一段轻度的加强，且与西风槽有关的正位涡异常中心的移近使得“麦莎”的位涡有所增强。而在整个登陆维持的阶段，中低层（尤其是东部）天气尺度为积云对流的发展提供动能，而高层（尤其是北部）积云对流释放潜热以维持高层的动能。水汽条件的分析可知，由于

“麦莎”东部环流一直位于海上，且在登陆的后期，虽然来自热带的水汽输送量减少，但来自副热带的水汽通道为“麦莎”的积云对流提供了必要的水汽条件。辐散风不仅是低层动能的主要来源，而且亦是低层水汽辐合最主要的作用项，无辐散风则使得“麦莎”环流内的水汽趋于均匀分布。

中低纬度系统间的相互作用：应当强调，虽然由于中低纬系统间的相互作用使“麦莎”得以维持并加强，但由于加强程度不够，所以它并未像北美地区北上的“Agnes”飓风那样由于中低纬系统间的相互作用而强烈变性加强为温带气旋。通过动能收支发现，对“麦莎”而言，高层的无辐散风将台风环流内的动能向环境输出，与“Agnes”飓风由环境向台风环流输入大量动能不同；从位涡的分析也可见，由于大陆高压系统的阻挡，在加强阶段，只是从低槽槽底部分分裂出一个较小的正位涡中心与“麦莎”合并增强“麦莎”的涡旋动能，而槽区主要的正位涡中心则没有直接影响“麦莎”。这表明就中低纬系统相互作用而言，东亚也许东半球^[19]的情况与北美之间可能存在某些明显的差异。

明显的非对称结构：在登陆北上过程中，

“麦莎”的动力以及热力结构的非对称性逐渐加大。早期由于受地形影响使得南部低层辐合减弱, 导致对流减弱, 使得南部的动能收入比北部小, 从而加大了“麦莎”对流以及散度场的非对称性。而登陆后台风北部的偏北环流将较冷的环境空气卷入台风内部, 使得“麦莎”中低层温度呈现东暖西冷的分布。但由于冷空气的强度还不十分强, 因此对斜压过程制造动能的作用不是很明显。

大陆北方小高压的作用: 在分析中可明显地看见我国华北尤其是内蒙一带受大陆小高压的影响。该小高压处于减弱的“麦莎”台风低压的西北方向, 这对于“麦莎”西北象限的正涡度区的维持和加强很不利, 甚至对台风的动向也有一定影响。这个大陆小高压与海上暖性高压组成的高压坝使得台风高层北部的气压梯度增加, 通过无辐散风将此增加的位能转换为动能, 又在一定程度上增加了“麦莎”台风高层的动能。这类中纬度的高压系统或高压坝, 对 7203 台风^[5]和 7503 台风^[6]等北上产生重大灾害的台风均有明显影响, 给预报带来不少的困难, 但其具体如何影响台风的结构、路径以及强度方面的机制研究并不多, 今后对此应给予更多的关注。

讨论: 由于结构上的非对称性, 使得辐散风以及无辐散风对“麦莎”台风各部分的动能收支影响亦呈非对称性, 这反过来又会影响结构、强度甚至是台风的路径, 而由于这类相互作用过程的复杂性, 需要使用诊断分析以外的手段, 包括数值模拟以及理论分析等去深入研究。又, 余项是动能收支中重要的一项, 体现了积云对流过程在“麦莎”演变中的重要。然而, 由于资料分辨率较低, 更缺乏海上观测资料和具体的积云过程细节, 难于准确计算其在“麦莎”维持中所占有的比重, 这需要今后有更精细的观测, 以及更深入地开展对次网格尺度系统和天气尺度系统相互作用机制的研究。

应当指出, “麦莎”台风有其特殊性, 这类登陆后沿海岸线北上的台风并不多见。因此, 本文的结果是初步的, 尤其对于“麦莎”台风低压接近北京, 而又偏向东北方向移去, 大陆小高压有无作用以及有何作用等, 有待更深入地研究。

参考文献 (References)

- [1] Palmen E. Vertical circulation and release of kinetic energy during the development of hurricane Hazel into an extratropical cyclone. *Tellus*, 1958, 10: 1~23
- [2] DiMego G J, Bosart L F. The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical cyclone. Part I: The observed fields and vertical motion computations. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, 110: 385~411
- [3] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 225pp
Tao Shiyan. *Heavy rainfall of China* (in Chinese). Beijing: Scientific Press, 1980
- [4] 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 等. 热带气旋动力学引论. 北京: 气象出版社, 2002. 317pp
Chen Lianshou, Xu Xiangde, Luo Zhexion, et al. *Introduction to Tropical Cyclone Dynamics* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002
- [5] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979. 491pp
Chen Lianshou, Ding Yihui. *Introduction to Typhoons on Western Pacific* (in Chinese). Beijing: Scientific Press, 1979
- [6] 赵思雄, 周晓平. 风场在预报暴雨发生中的作用——1975年8月上旬特大暴雨的数值实验. *大气科学*, 1984, 8 (1), 1~6
Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping. The effect of wind field disturbances on the forecast of rainstorm formation. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1984, 8 (1): 1~6
- [7] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展. 2004, *气象学报*, 62 (5): 541~549
Chen Lianshou, Luo Zhexion, Li Ying. Research advances on tropical cyclone landfall process. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, 62 (5): 541~549
- [8] DiMego G J, Bosart L F. The transformation of tropical storm Agnes into an extratropical cyclone. Part II: Moisture, vorticity and kinetic energy budgets. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, 110: 412~433
- [9] Bosart L F, Lackmann G M. Postlandfall tropical cyclone reintensification in a weakly baroclinic environment: A case study of Hurricane David (September 1979). *Mon. Wea. Rev.*, 1995, 123: 3268~3291
- [10] 李英, 陈联寿, 王继志. 热带气旋登陆维持和迅速消亡的诊断研究. *大气科学*, 2005, 29 (3): 482~490
Li Y, Chen L S, Wang J Z. Diagnostic study of the sustaining and decaying of tropical cyclones after landfall. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 2005, 29: 482~289
- [11] Molinari J, Vollaro D. External influences on hurricane in-

- tensity. Part I: Outflow layer eddy angular momentum fluxes. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**: 1093~1105
- [12] Harr P A, Elsberry R L. Extratropical transition of tropical cyclones over the Western North Pacific. Part I: Evolution of structural characteristics during the transition process. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 2613~2633
- [13] Ritchie E A, Elsberry R L. Simulations of the extratropical transition of tropical cyclones: Contributions by the midlatitude upper-level trough to reintensification. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 2112~2128.
- [14] 孙建华, 赵思雄. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究. *大气科学*, 2000, **24** (2): 223~237
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Diagnoses and simulations of Typhoon (Tim) landing and producing heavy rainfall in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (2): 223~237
- [15] 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究. *气象学报*, 2006, **64** (1): 57~71
Sun Jianhua, Qi Linlin, Zhao Sixiong. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by “9608” Typhoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (1): 57~71
- [16] Hoskins B J, McIntyre M E and Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1985, **111**: 877~941
- [17] Davis C A, Emanuel K A. Potential Vorticity diagnostics of cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 1929~1953
- [18] Pearce R P. The design and interpretation of diagnostic studies of synoptic-scale atmospheric systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1974, **100**: 265~285
- [19] Zhao Sixiong, Mills G A. A study of a monsoon depression bringing record rainfall over Australia, Part II: Synoptic-diagnostic description. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 2074~2094