

热带气旋“蒲公英”两次登陆过程的灾害与结构特征

齐琳琳^{1,2} 孙建华² 连 樱³ 马环宇⁴

1 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

3 北方计算中心, 北京 100080

4 总参气象中心, 北京 100081

摘 要 2004年7月1~3日, 热带气旋“蒲公英”自生成到影响浙江沿海地区期间, 不仅持续时间长、强度大, 移动路径长、变化较复杂, 而且创下了近3年来台湾风灾损失的最高纪录, 同时也给浙江等沿海地区造成了一定的经济损失。作者主要利用卫星云图资料、NCEP再分析资料, 从宏观上对热带气旋“蒲公英”两次登陆过程中的强度及其引发的风雨灾害进行了分析。结果表明, “蒲公英”登陆台湾期间, 东亚环流形势呈典型的鞍形场分布, 有利于处于两高之间热带气旋“蒲公英”的维持和北上转向。而在其登陆浙江沿海地区后, 浙江沿海地区处于较强的偏东气流中, “蒲公英”中心处于高空槽后, 气流下沉以及缺少水汽和能量充沛供应使得其减弱为热带风暴。无论是其登陆台湾还是浙江沿海地区, 台风垂直方向始终呈深厚气旋性涡柱结构, 但中心附近低层辐散, 中层辐合, 不利于中心附近的对流发展。相反, 台风外围螺旋云带内不仅中低层辐合, 高层辐散, 辐合层较深厚, 且存在高湿和强上升运动, 因而有利于对流云团的发展。对流云团发展强度的不同使得“蒲公英”两次登陆期间引发的风雨灾害明显不同。

关键词 热带气旋 特大暴雨 不对称结构

文章编号 1006-9585 (2006) 04-0499-15 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

The Analysis on the Structures of Typhoon “Mindule” During Its Twice Landing

QI Lin-Lin^{1,2}, SUN Jian-Hua², LIAN Ying³, and MA Huan-Yu⁴

1 *Institute of Aviation Weather, Air force Academy of Arming, Beijing 100085*

2 *Laboratory of Cloud Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *Center of North computation, Beijing 100080*

4 *Center of Weather General Staff, Beijing 100081*

Abstract The structures of a severe landing tropical cyclone “Mindule” from 0000 UTC 1 July 2004 to 0000UTC 4 July 2004 are investigated. By analyzing, it is revealed that: 1) The tropical cyclone (TC) “Mindule”, which landed in Taiwan and Zhejiang, was very favorable for the occurrence of the gale and heavy rainfall. 2) Under the favorable circulation in the middle-upper troposphere, warm core of the TC in the middle and upper troposphere

收稿日期 2005-01-25 收到, 2006-03-02 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418307 和中国科学院大气物理所领域前沿项目

作者简介 齐琳琳, 女, 1973年出生, 博士, 高级工程师, 目前从事中尺度天气分析和数值模拟研究。

E-mail: niceqll@mail.iap.ac.cn

maintain the characteristic of the tropical system. 3) A strong wind coming from the South China Sea and the West Pacific, below 850 hPa accompanying with the TC was not only the favorable condition of the development and maintenance of the TC and embedded convective cloud cluster, but also the moisture source and heat energy transportation belt of the heavy rainfall. The lower-level inflow to the TC enhanced the warm, moist air transportation to the ascending motion area. 4) The structure of TC “Mindule” was asymmetric. The TC was a cyclonic and wettest vortex below 200 hPa and the center of the vortex was almost vertical during its landing in Taiwan. There was a convergence zone and unstable stratification in the lower troposphere and a divergence zone in the upper troposphere near the center of TC. This structure is favorable to the intensification of ascending motion, the formation and development of strong convective systems and heavy rainfall. 5) During the landing of TC “Mindule”, the asymmetric distributions of temperature induce to interaction of the warm advection and cold advection, which was propitious to the occurrence of convection in the TC.

Key words tropical cyclone, heavy rainfall, asymmetric structure

1 引言

热带气旋是发生在热带海洋上的强烈天气系统,我国是世界上受其影响最多、灾害最重的国家之一。登陆十分频繁的热带气旋所引发的大风、暴雨和海潮,往往造成洪涝灾害,致使农田受淹、城市内涝、路毁车阻等,给国民经济和人民生命财产造成严重损失。历史上著名的 1967 年“6718”号台风 Carla 引发的我国台湾省新寮特大暴雨,3 天降雨量就达 2 749 mm;1975 年 8 月在福建登陆后北上维持不消的“7503”号台风,移到河南驻马店后造成破历史纪录的 3 天降雨总量达 1 631 mm 的特大暴雨(即著名的“758”大暴雨),致使水库跨坝,洪水泛滥,数万人丧生;1996 年的“9608”号台风造成河北省石家庄附近大于 400 mm 的强降雨。为减轻灾害,登陆热带气旋及其引发的暴雨洪涝在过去的数十年间一直是人们关注的焦点。

20 世纪 80 年代以来,国内外气象工作者对热带气旋及其登陆后的维持和引发暴雨增幅的天气背景、影响因子、结构特征、能量收支等进行了广泛的研究,取得了一些可喜的成果^[1~4]。国外对飓风的研究开展较早,近年来随着数值模式的发展和观测手段的改进,研究得以更加深入。Farfán 和 Zehnder^[5]用多种资料分析了飓风 Nora(1997 年)登陆时的移动和结构变化以及中尺度对流系统的传播特征;Blackwell^[6]利用多普勒雷达资料详细分析了飓风 Danny(1997 年)登陆过程中眼区和低层风的变化特征;Kaplan 和 Demar-

ia^[7]认为热带气旋登陆新英格兰后风速的减小与垂直风切变和大气斜压性影响有关。国内也开展了许多对台风及其暴雨的研究。蒋尚武等^[8]在分析北上减弱的“7805”台风暴雨过程中指出,中低纬环流的相互作用可导致产生暴雨的系统具有半冷半暖性质。谢义炳等^[9]采用比较完全的 ω 方程对“758”河南特大暴雨的动力过程进行诊断研究,指出凝结潜热在该过程中具有重要的影响,并给出了登陆台风暴雨区的三维运动图像。齐琳琳等^[10~12]利用上海地区尽可能多的常规和非常规观测资料,通过诊断分析和数值模拟对 2001 年 8 月 4~6 日登陆热带低压的演变过程,及其引发的 5~6 日上海破历史纪录的特大暴雨做了较全面的分析研究。这些研究成果从不同角度提高了对热带气旋的结构、强度变化、运动及其登陆后造成的大风和暴雨灾害等方面的认识,为这类天气过程的预报改进提供了极大帮助。

然而,我们也认识到,在热带气旋的登陆和机理研究方面还存在许多亟待解决的问题。不仅对热带气旋内部发生、发展的中小尺度系统结构的探测和分析较为薄弱,而且对热带气旋强度变化及其造成的大风和暴雨的有效预报也有待进一步研究改进。因此,对影响我国的热带气旋的结构特征和登陆过程中的强度变化、维持机制、暴雨非对称分布的深入研究是十分必要的。了解和分析热带气旋登陆过程中对流云带、降水、动力和热力特征的演变等,不仅对于加深热带气旋强度和结构的认识及预报十分必要和有益,而且可以尽可能地减少热带气旋造成的严重损失,满足国家经济建设和国防建设发展的要求。

2004 年 7 月 1~3 日, 第 7 号热带气旋“蒲公英”先后登陆台湾、浙江沿海地区, 不仅创下了近 3 年来台湾风灾损失的最高纪录, 也给浙江沿海地区造成一定的经济损失。为从宏观上对“蒲公英”两次登陆过程中的强度及其引发的风雨灾害有所了解, 本文利用卫星云图资料, 每日 4 个时次 (0000、0600、1200、1800 UTC) 的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ NCEP 资料, 常规观测资料, 对“蒲公英”两次登陆过程中的结构特征和演变以及造成的风雨灾害分布进行了分析。

2 热带气旋“蒲公英”的移动路径和强度演变

图 1 给出了台风“蒲公英”在海上和登陆期间的移动路径、中心气压和最大风速的演变。可以看到, 2004 年 6 月 23 日下午, 热带气旋“蒲公英”在菲律宾吕宋岛以东的西北太平洋洋面上生成, 当时中心附近最大风力 8 级 (摘自 2004 年各地防汛情况通报, 下同)。随后数日, “蒲公英”在我国东南海域以 $10\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右的速度西行, 并逐渐加强为台风。28 日早, 台风中心移到台湾岛东南方 (17.8°N , 126.3°E) 附近的海面上, 中心附近最大风力达 12 级。30 日下午, 台风移动路径突然转向偏北方向, 移近台湾

岛, 并于 7 月 1 日晚 1430 UTC 左右在台湾花莲县附近沿海登陆, 登陆时台风中心附近最大风力达 11 级。登陆后台风在岛上向北偏西方向移动, 2 日上午, 台风中心仍位于台湾省北部地区, 中心最低气压和最大风力分别维持在 980 hPa 和 11 级左右。7 月 2 日午后, 移出台湾岛的台风“蒲公英”减弱为强热带风暴, 并以 $15\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右的速度在福建中北部到浙江东部一带沿海北上, 中心气压约为 985 hPa。7 月 3 日 0130 UTC 左右, 强热带风暴“蒲公英”在浙江省乐清黄华镇再次登陆。登陆后的风暴中心强度和移动速度基本维持, 中心气压基本维持在 987 hPa, 但方向转为北偏东。此后, 风暴中心气压一直维持, 直至进入舟山群岛才又有所加强, 但移出舟山群岛后北上减弱。

由此可见, 热带气旋“蒲公英”自生成到移出舟山群岛北上共维持了 12 天之久, 不仅持续时间长、强度大, 移动路径长、变化较复杂, 而且在其登陆我国台湾地区过程中, 创下了近 3 年来台湾风灾损失的最高纪录。另外, 在其登陆浙江沿海地区后也给当地的经济和人民生命财产造成了一定损失。因此, 本文的重点是从宏观上对热带气旋“蒲公英”登陆台湾和浙江沿海地区过程中的结构、强度及造成的风雨灾害进行分析。

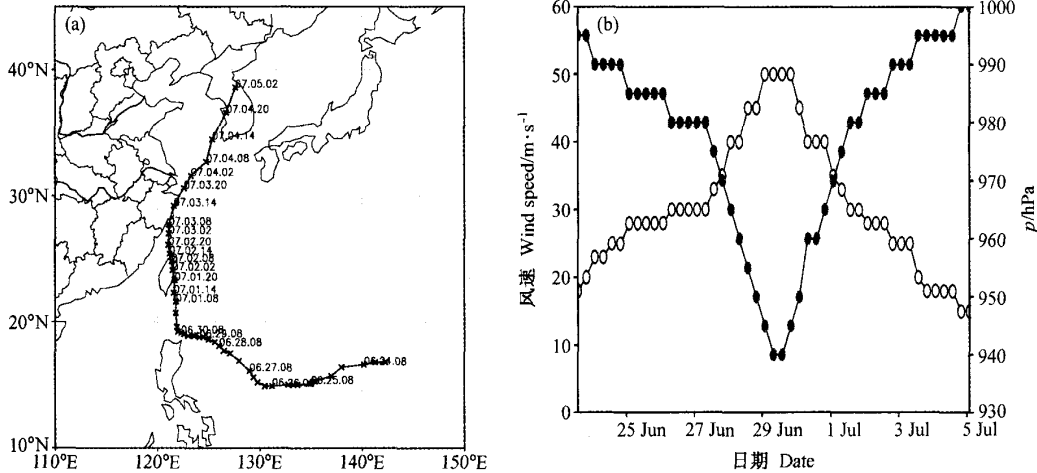


图 1 2004 年 6 月 23 日~7 月 5 日台风“蒲公英”(a) 移动路径和 (b) 中心气压 (实心圆, 右侧坐标)、最大风速演变 (空心圆, 左侧坐标)

Fig. 1 (a) Moving path, (b) central surface pressure (closed circle, right coordinate) and maximal winds speed (open circle, left coordinate) of typhoon Mindule from 23 June to 5 July 2004

3 热带气旋“蒲公英”两次登陆过程引发的风雨灾害特征

指出,受台风“蒲公英”暴风圈的影响,从7月1日上午起,台湾东部地区不仅开始出现间歇性大雨,而且平均风力达到7、8级,瞬间风力更达到12级。沿海的富冈、成功海堤外时而掀起的滔天巨浪几乎要将15 m高的灯塔吞噬,声势异常惊人。7月1日晚,台风“蒲公英”(台湾称为“敏督利”)从台湾的台东登陆,虽然7月2日午后台风就逐渐离开台湾,但降雨直到3日中午才逐渐变小。台风带来的罕见强劲西南气流,使台湾各地的降雨量普遍超过200 mm,台东一带降雨超过400 mm,嘉义阿里山、奋起湖地区甚至分别降下超过1 000 mm和900 mm的暴雨。暴雨引发泥石流、溪水暴涨、海水倒灌,沿海地区严重积水。尽管如此,处于台风中心附近的台中地区却出现与台东、台南大风暴雨截然不同的天气,39.9℃的高温创下当地近百年来7月的最高温纪录。据报道,“蒲公英”台风中心附近的高温热浪

和外围环流的暴雨如注,给台湾地区人民生命和经济造成了严重损失。截至7月4日下午,台湾各地农业部门估计的灾害损失金额达新台币23亿多,超越2003年“杜鹃”(14.17亿新台币)和2001年“利奇马”(5.49亿新台币)台风造成的损失,创下近3年来风灾损失的最高纪录。另外,除农业损失惨重外,台湾的畜禽、林产和渔产损失也非常严重,泥石流和洪灾对台湾的旅游业也造成重创,特别是台湾中部地区的旅游业,估计损失约过100亿元台币。由此可见,热带气旋“蒲公英”不仅重创了台湾的经济,而且给人民生命财产也造成极大危害。7月3日0130 UTC左右,移出台湾并已减弱成热带风暴的“蒲公英”在浙江乐清黄华镇再次登陆。受其影响,浙江省东南沿海地区出现暴雨天气,并伴有9~11级大风。7月2日0000 UTC~3日0000 UTC,温州、台州沿海普降中到大雨,温州平均雨量在50 mm,其中温州苍南的吴家园降雨量达144 mm,台州也超过了30 mm(图2a)。此外,浙江沿海地区和杭嘉湖地区出现了8~10级大风,个别地区阵风达11~12级,湖州出现的大风暴雨造成了太湖水域

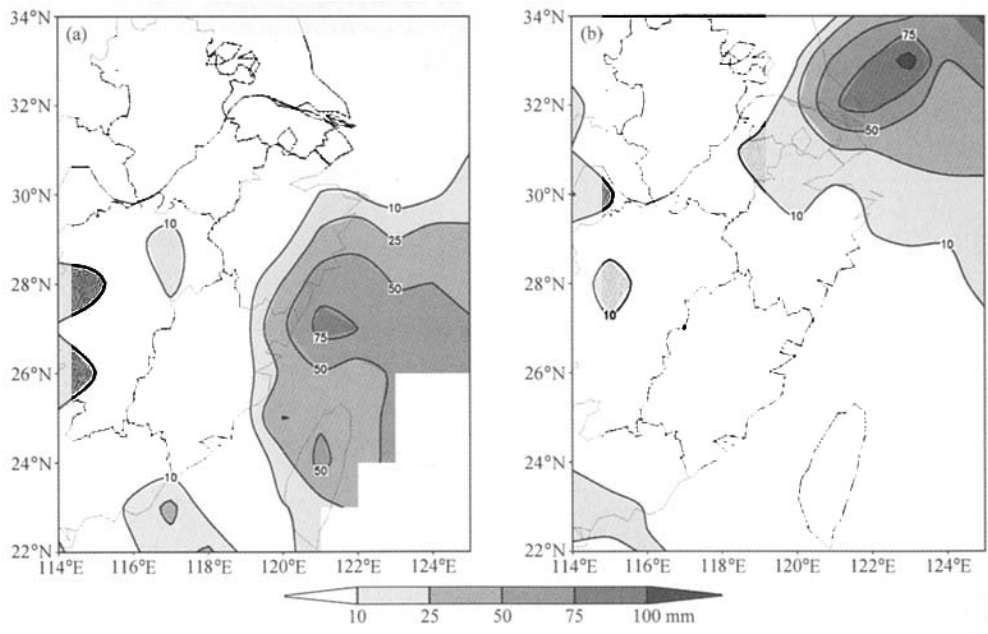


图2 2004年7月2日0000 UTC~4日0000 UTC 实况降雨量分布:(a)7月2日0000 UTC~3日0000 UTC,(b)7月3日0000 UTC~4日0000 UTC

Fig. 2 The observational precipitation from 0000 UTC 2 July to 0000 UTC 4 July 2004: (a) 0000 UTC 2 July to 0000 UTC 3 July, (b) 0000 UTC 3 July to 0000 UTC 4 July

10 余艘运输船遇险。

4 热带气旋“蒲公英”两次登陆期间环流形势的演变

热带气旋生成后, 无论是在海上还是在摩擦系数较大的陆上, 始终要有充足的水汽和能量输送才能得以维持发展。早前的研究曾指出, 登陆阶段热带气旋能较长时间地得以维持发展, 除其内部对流活动形成的第 2 类条件不稳定 (CISK) 机制作用外, 天气尺度环流背景场的影响也相当重要。因此, 分析中首先针对热带气旋“蒲公英”登陆台湾和浙江沿海地区过程中的环流背景演变特征予以说明。

从 7 月 1 ~ 3 日 500 hPa 环流形势演变 (图 3) 可以发现, 7 月 1 日 0000 UTC, “蒲公英”北面东亚环流形势呈鞍形场分布。大陆高压中心在长沙附近, 而亚洲中高纬度地区为多移动性槽脊活动的较平环流分布, 日本海为高压脊, 蒙古、华北一带处于低压槽控制中。副高西脊点与日本海高压脊的迭加有利于副高加强北抬, “蒲公英”处于两高之间, 环流形势有利于其北上转向。7 月 1 日 1200 UTC 之后, “蒲公英”登陆台湾期间, 500 hPa 上的西风带强烈发展, 经向度明显增大, 中高纬度西风带上蒙古和华北处于低压槽控制区内, 槽底已伸至长江下游 32°N 以北地区。此外, 西伸的西太平洋副热带高压脊点约位于 129°E , 其北部地区日本海高压脊的迭加有利于副高的加强北抬。再加上大陆长江中游地区基本处于大陆高压控制区内, 这样就使得“蒲公英”登陆台湾期间东亚的环流形势呈典型的鞍形场分布, 有利于处于两高之间的热带气旋“蒲公英”维持和北上转向。另外, 此时的对流层高层 300 hPa 以上 (图略), 虽然中高纬度地区始终存在西风槽, 但长江以南地区基本处于高压控制区内, 台风环流正位于高压环流外围的辐散气流控制区内, 有利于台风环流的维持。7 月 2 日 0000 UTC, 高原地区有一低槽东移, 2 日 1200 UTC 到达太原、西安、成都一线。同时西太平洋副热带高压继续西伸北抬, 从而使得“蒲公英”在登陆台湾后向北—西北方向移动, 并于 7 月 3 日在浙江温州附近再次登陆。在此之前, 浙江沿海地

区处于较强的偏东气流中, 水汽在偏东气流作用下不断进入中南部沿海地区。3 日 0000 UTC, 风暴中心从低到高产生了由西向东的倾斜, “蒲公英”中心处于高空槽后, 下沉气流使得低层辐合减弱, 地面气压上升。之后, 随着“蒲公英”逐渐越过了副高脊线, 并与西风槽相接, 进而转向北到东北移动。另外, 虽然, 西太平洋副热带高压的持续西伸北抬仍可以不断将充沛的暖湿空气输送到“蒲公英”中心东侧外围环流, 有利于其维持。但进入浙江沿海陆地地区的“蒲公英”相对其在台湾期间还是缺少了水汽和能量的充沛供应, 因此不仅登陆后减弱为热带风暴, 而且造成的沿海地区降雨也明显减小。

5 热带气旋“蒲公英”两次登陆过程的结构特征及演变

综上所述, 持续时间长、强度大且两次登陆的热带气旋“蒲公英”是在有利的环流背景条件下维持发展的。但考虑到其两次登陆引发的暴风雨灾害分布和强度存在一定差异, 而这种差异势必与其结构特征及演变密切相关, 因此, 下面将集中分析“蒲公英”两次登陆过程中的结构特征及演变, 这也是分析其内暴雨中尺度系统发生发展的必要条件。

5.1 气旋性涡旋

分析“蒲公英”两次登陆期间涡度沿气旋中心的垂直分布 (图 4) 可以发现, 7 月 1 日 1200 UTC 之前, 尚未登陆台湾的台风位于西太平洋上, 台风中心所在处几乎整个对流层内均呈气旋性涡旋结构, 涡旋水平范围约为 400 km 左右, 且发展异常强烈。位于 850 hPa 的正涡度中心, 强度约为 $50 \times 10^{-5} \sim 54 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。随着台风西北向移动登陆台湾, 台风强度虽有所减弱, 但始终维持水平范围约为 400 km 左右的气旋性涡旋结构, 且涡旋中心伸展至对流层上层。登陆后台风强度有所减弱, 初期台风内正涡度中心位于 850 hPa, 约为 $35 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。7 月 2 日 0000 UTC, 位于 850 hPa 上的正涡度中心仅为 $22 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。但值得注意的是, 除位于 850 hPa 上的正涡度中心外, 此时的气旋性涡柱内在 500 hPa 上还存在着一个独立的正涡度中心, 强度约为 $22 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

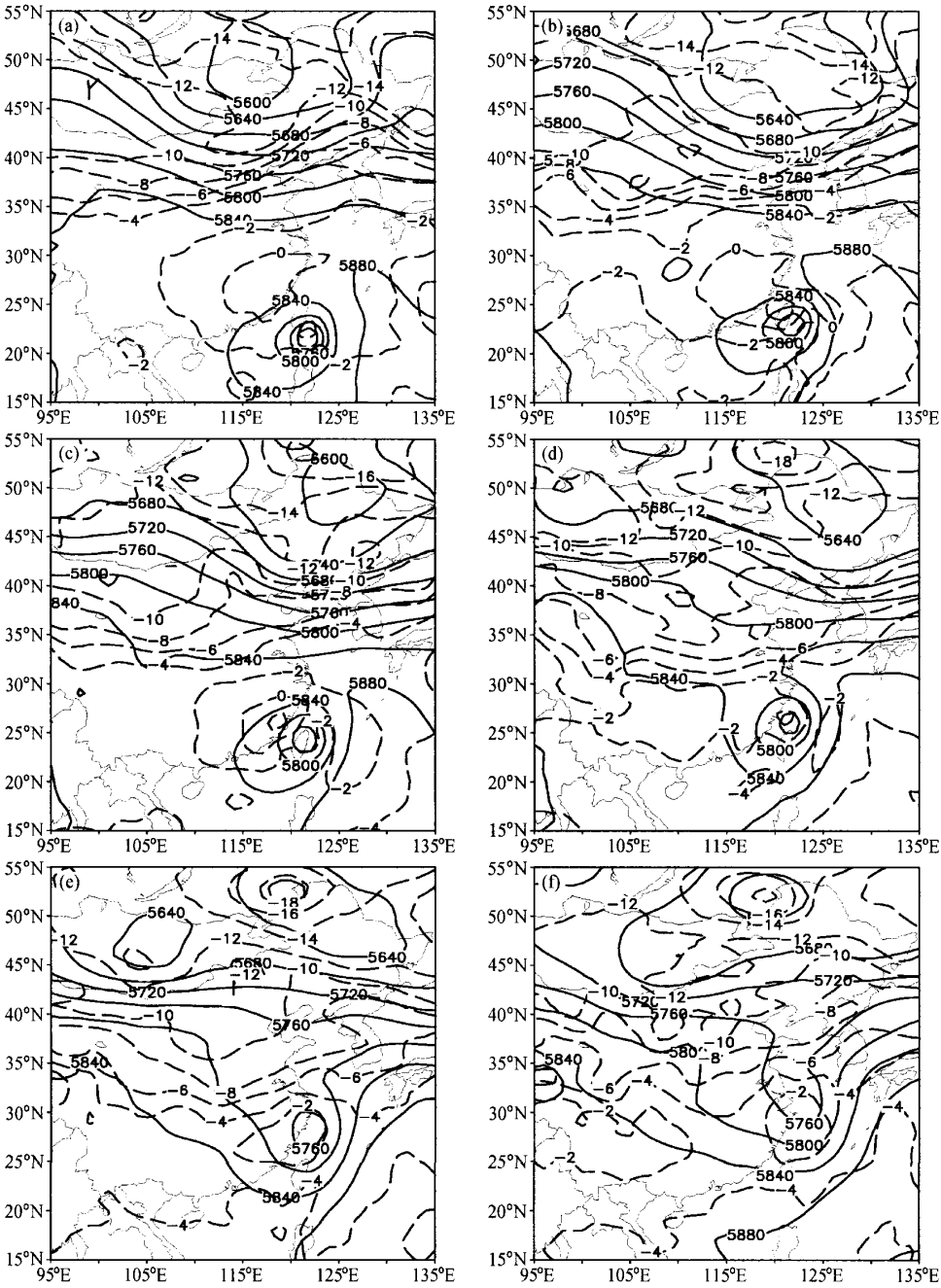


图 3 2004 年 7 月 1~3 日台风“蒲公英”两次登陆期间 500 hPa 位势高度 (实线, 单位: gpm) 和温度 (虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 7 月 1 日 0000 UTC; (b) 7 月 1 日 1200 UTC; (c) 7 月 2 日 0000 UTC; (d) 7 月 2 日 1200 UTC; (e) 7 月 3 日 0000 UTC; (f) 7 月 3 日 1200 UTC

Fig. 3 The geopotential height (gpm) and temperature ($^{\circ}\text{C}$) at 500 hPa from 0000 UTC 1 to 0000 UTC 3 July 2004; (a) 0000 UTC 1 Jul; (b) 1200 UTC 1 Jul; (c) 0000 UTC 2 Jul; (d) 1200 UTC 2 Jul; (e) 0000 UTC 3 Jul; (f) 1200 UTC 3 Jul

双气旋性涡柱中心表明, 虽然台风强度在低层有所减弱, 但其在垂直向上是有一定发展的, 可伸

展到 500 hPa 附近的正涡柱对于台湾东部地区的特大台风暴雨具有有利的动力机制。之后, 台风

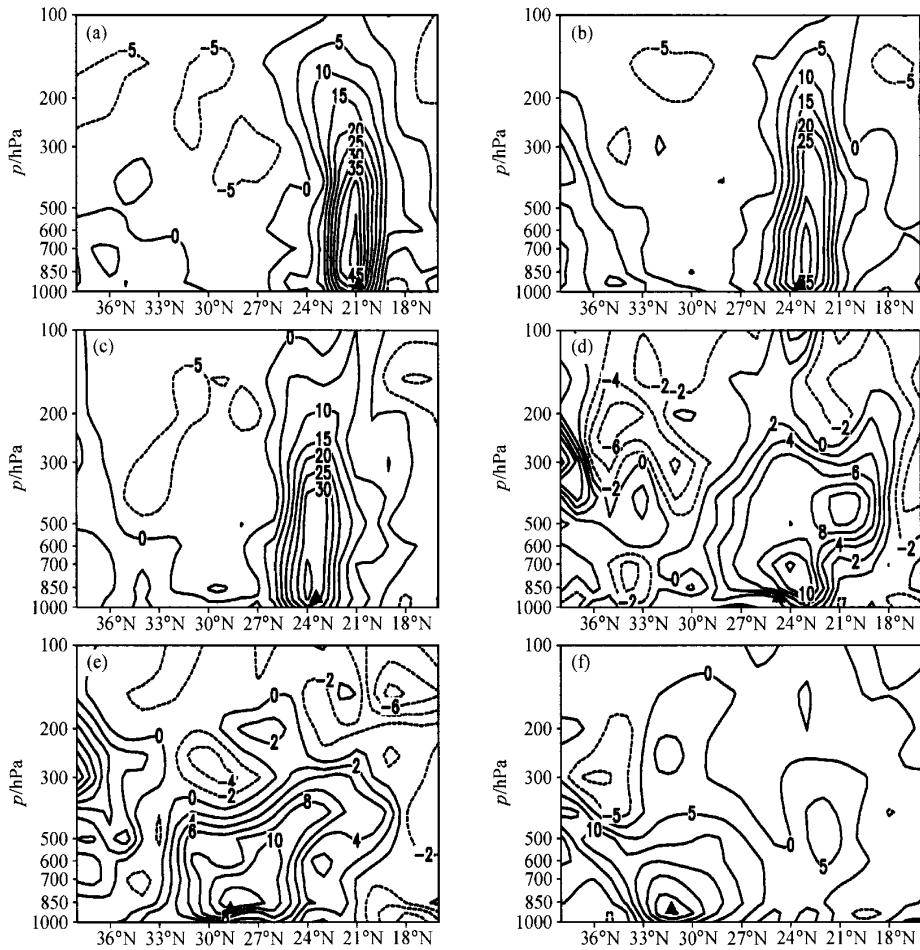


图4 2004年7月1~3日涡度沿热带气旋中心的垂直分布(单位: 10^{-5}s^{-1} , ▲为台风中心所在处): (a) 7月1日0000 UTC; (b) 7月1日1200 UTC; (c) 7月1日1800 UTC; (d) 7月2日1200 UTC; (e) 7月3日0000 UTC; (f) 7月3日1200 UTC

Fig. 4 The vertical cross section of vorticity (units: 10^{-5}s^{-1}) along cyclonic center from 0000UTC 1 July to 0000UTC 3 July 2004 (▲ denotes the location of typhoon center): (a) 0000 UTC 1 Jul; (b) 1200 UTC 1 Jul; (c) 1800 UTC 1 Jul; (d) 1200 UTC 2 Jul; (e) 0000 UTC 3 Jul; (f) 1200 UTC 3 Jul

继续在岛内向偏北方向移动, 气旋性涡柱的水平范围明显加大, 且垂直伸展高度明显降低, 涡柱顶端位于250~300 hPa。登陆台湾岛后的台风“蒲公英”在西北向移动期间, 涡柱内位于850 hPa附近的正涡度中心约为 $10 \times 10^{-5} \sim 14 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, 强度明显减弱。由此可见, “蒲公英”登陆台湾前的强烈发展和登陆后在垂直向上的变化, 再加上与其相伴的西南暖湿气流携带的充沛水汽和能量, 使其造成了台湾地区特大暴雨的发生。热带风暴“蒲公英”登陆浙江沿海地区后, 尽管垂直向上仍具有气旋性涡柱结构, 但涡柱内位于850~925 hPa间的正涡度区水平范围明显增大,

约为600~800 km左右, 中心强度约为 $10 \times 10^{-5} \sim 12 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 。由此可见, “蒲公英”在登陆浙江沿海地区后无论是水平结构还是强度变化均明显减弱, 因此造成的风雨灾害相对弱了许多。

考虑到卫星云图能直观地反映台风云系的结构变化, 因此下面将通过分析台风“蒲公英”两次登陆期间云系特征的变化来揭示其发展变化特征。从7月2~3日“蒲公英”两次登陆期间的云图演变可以看到, 台风眼附近云系已明显松散, 中心无云区不断扩大, 而台风的强云系主要分布在台风的南侧和东侧, 基本上呈中心东侧和南侧云系强, 西北侧云系弱的分布特征。这种明显的

非对称结构一直持续到 7 月 3 日台风登陆浙江乐清。另外, 台风“蒲公英”从形成到登陆有两次明显的云团分裂过程。“蒲公英”位于台湾期间, 台风眼及螺旋云带特征还较为清晰, 但在台风登陆台湾后穿越北上的过程中, 云系出现第 1 次分裂。位于台风中心左侧的云团与台风主体分裂, 并向偏西方向移动 (图 5a)。之后台风中心向浙江沿海地区移近, 而在此期间, 云系结构逐渐趋于松散, 并出现云团的第 2 次分裂。7 月 3 日 0230 UTC, 从台风主体中分裂出来位于台风中心南侧的云团移动速度明显落后于台风主体 (图 5b)。直至台风中心登陆浙江北上的过程中 (图 5c), 从台风主体中分裂出来的云团移动速度始终落后于台风主体。由于台风主体经过明显的云团分离后,

能量会被削减, 因此台风中心登陆浙江北上之后, 看不到完整的台风眼。另外, 由于云图分析采用的是分辨率较粗的红外云图像, 因此上述分析仅从云团的宏观变化进行了描述。

5.2 强不对称性水汽和能量输送

考虑到台风的风场结构特征与其维持发展所需的水汽和能量输送密切相关, 而不同强度的急流和急流中心位置对水汽的输送具有极大影响, 因此, 对“蒲公英”两次登陆期间的风场特征和急流中心的强度及位置进行了分析。水平风速沿“蒲公英”中心附近的经、纬向垂直剖面分析显示 (图略), “蒲公英”东西剖面上风速的不对称性始终强于南北方向, 且在对流层中下层表现明显。6 月 30 日 0000 UTC~7 月 3 日 1200 UTC 期间, 环

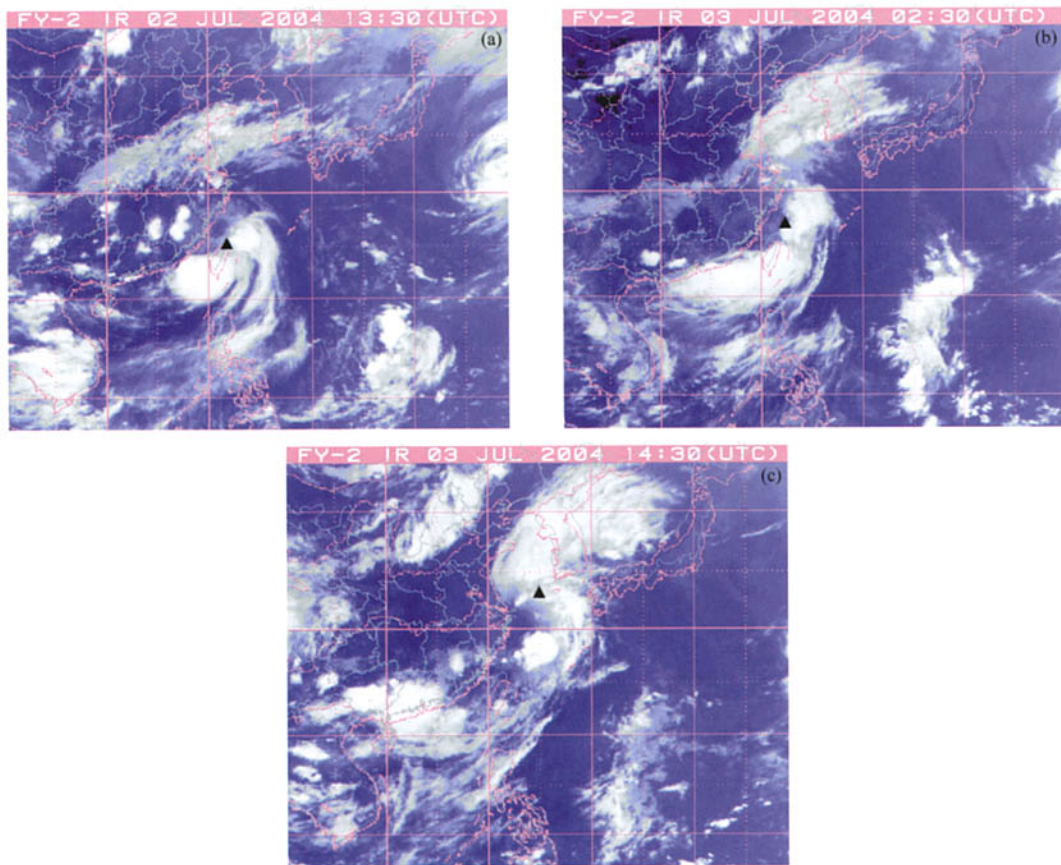


图 5 2004 年 7 月 2~3 日红外云图上云系的演变 (▲为台风中心): (a) 7 月 2 日 1330 UTC; (b) 7 月 3 日 0230 UTC; (c) 7 月 3 日 1430 UTC

Fig. 5 The infrared satellite images from 2 July to 3 July 2004 (▲ denotes the location of typhoon center): (a) 1330 UTC 2 Jul; (b) 0230 UTC 3 Jul; (c) 1430 UTC 3 Jul

流中心东侧风速不仅比西侧的强，而且强风速区范围也较广。在其登陆台湾前后，环流中心东侧的强风速约为 $30\sim35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而在其登陆浙江期间，东侧强风速有所减弱，约为 $25\sim30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。特别值得指出的是，“蒲公英”在登陆台湾和浙江地区时，急流中心位置的明显变化直接影响到水汽和能量的输送，从而使得“蒲公英”的强度及其引发的风雨灾害程度明显不同。在“蒲公英”登陆台湾期间，850 hPa 流场上台风右侧存在一支偏南气流，可以将来自洋面上的暖湿空气输送给“蒲公英”，为其维持提供充沛的水汽能量。再加上气旋东侧的西太平洋副热带高压与低压环流间增强了气压梯度力，所形成的梯度风对于台湾东和东南部地区的风场具有加强作用，这样就使得 850 hPa 上来自南海南部和西太平洋上的大于 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强风速带一直位于台风东和东南侧的外围环流内。另外，850 hPa 上与急流核位置一致，位于台风东侧外围环流的水汽通量中心强度约为 $40\sim50\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ ，但是水汽聚集不仅在水汽输送带上，而且强聚集中心主要位于水汽输送大值中心的南部，它的强度约为 1×10^{-7}

$\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 。这表明台风周围不仅有持续输送来的充沛水汽相伴随，而且水汽还在台风中心以东和以南地区聚集，与台风登陆造成的强风雨灾害分布相对应（图 6）。7 月 3 日 0000 UTC “蒲公英”登陆浙江沿海地区后（图 7），850 hPa 上中心强度约为 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强风速带仍位于台风东和东南侧的外围环流内，但西南向水汽输送带主体位于海上，风暴中心与之脱离，使得位于陆上的台风部分没有水汽补充，因而不利于中心附近云系的发展。此时尽管北方南下的弱冷空气与台风外围东北气流相交汇于台风北侧，造成该地区出现对流天气，但由于输送来的水汽较台风登陆台湾期间明显减弱，而且水汽在浙江沿海地区的聚集能力也相对很弱，因此台风登陆浙江沿海地区后，台风中心东侧的强水汽输送虽仍有利于其维持，但其引发的风雨灾害相对减弱了许多。

5.3 不对称性高湿强上升区

“蒲公英”两次登陆过程中沿其中心的散度、相对湿度和垂直速度经向垂直剖面显示（图 8），“蒲公英”影响台湾期间，位于气旋偏东、东南一侧相对湿度为 90% 左右的高湿区几乎覆盖了整个

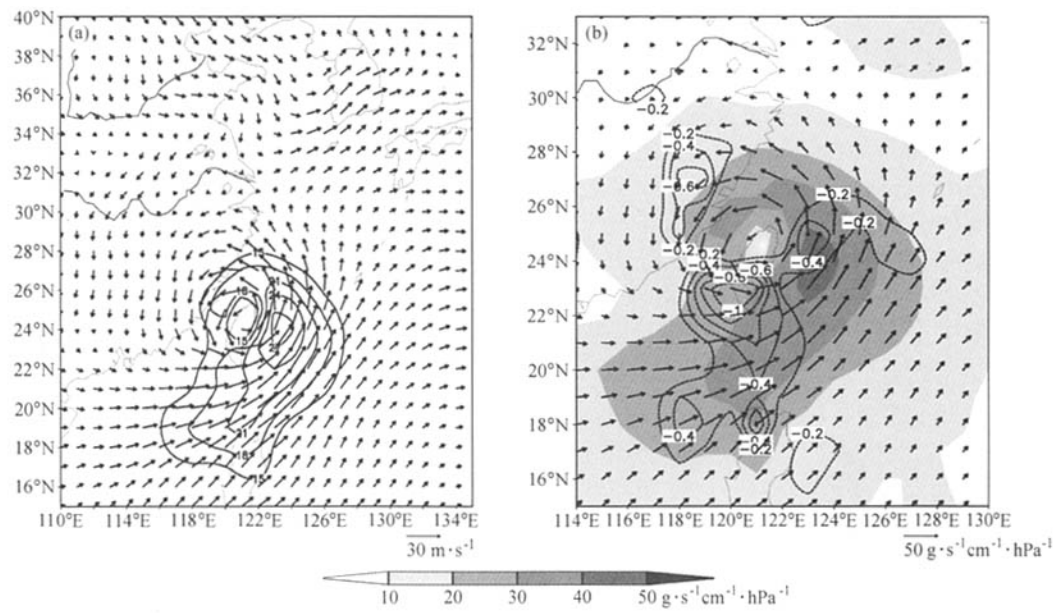


图 6 2004 年 7 月 2 日 0000 UTC 850 hPa (a) 水平风速 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 (b) 水汽通量 (箭头及阴影) 及其散度 (虚线, 单位: $10^{-7}\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$) 分布

Fig. 6 (a) Wind field (units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and (b) moisture flux (vector and shading), convergence of moisture flux (dashed, units: $10^{-7}\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$) at 850 hPa at 0000 UTC 2 July 2004

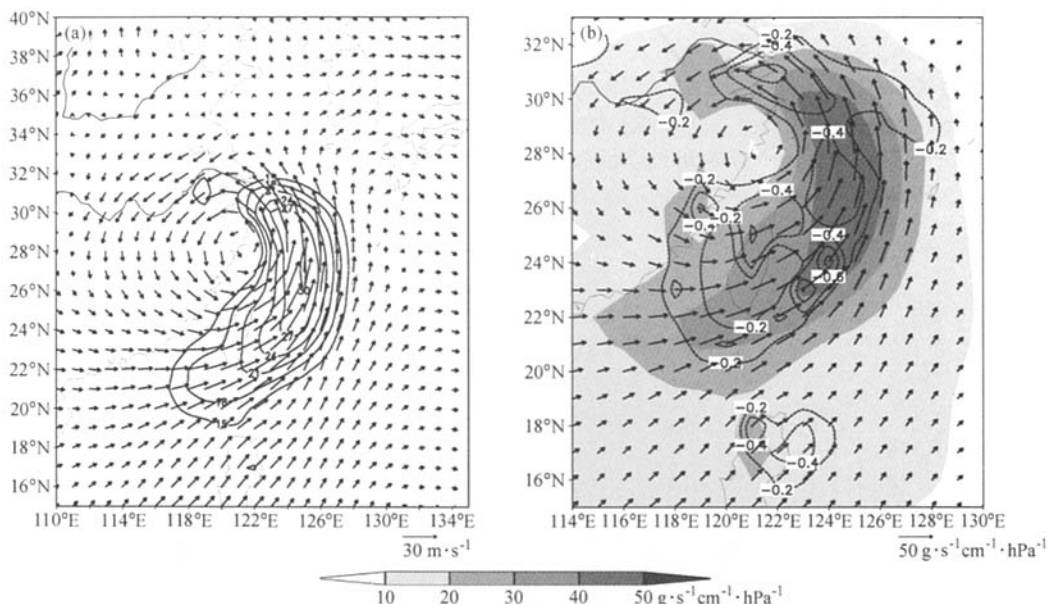


图 7 2004 年 7 月 3 日 0000 UTC 850 hPa (a) 水平风速 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 (b) 水汽通量 (箭头及阴影) 及其散度 (虚线, 单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$) 分布

Fig. 6 (a) Wind field (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (b) moisture flux (vector and shading), convergence of moisture flux (dashed, units: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$) at 850 hPa at 0000 UTC 3 July 2004

对流层, 其与气旋中心及其偏北侧的东风区内相对低湿区形成的等湿度线, 不仅非常密集, 而且对流层中层附近几乎垂直的等湿度线明显向南突起, 说明中层有干空气向台风中心偏南一侧入侵。与此同时, 台风环流内 300 hPa 以下气流呈气旋式辐合, 而 300 hPa 以上气流则呈反气旋式辐散, 高空辐散的抽吸作用有利于加强热带气旋“蒲公英”内部的垂直运动和低空辐合运动, 从而使得气旋性环流得以维持。气旋性环流内位于偏西风一侧的垂直上升运动区, 约为 $-10.0 \times 10^{-3} \sim -18.0 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强上升运动中心位于 500~700 hPa 附近。7 月 3 日 0000 UTC 热带气旋“蒲公英”登陆浙江沿海地区后, 气旋中心随高度明显向北倾斜, 300 hPa 以下相对湿度在 90% 的高湿区位于风暴偏北一侧, 而中心及其以南环流区内由于西南水汽输送带的间断而呈相对湿度低值区。散度场上, 对流层低层 850 hPa 上风暴中心附近处于辐散区内, 辐合区则位于风暴北部和东部的螺旋云带区内, 因而不利于近中心附近地区对流运动发展。加上风暴登陆后与下垫面摩擦的共同作用, 因此登陆后的“蒲公英”明

显减弱。相比来看, 风暴北部的螺旋雨带处于低层辐合, 中高层辐散的配置下, 有利于对流云团的发展。风暴中心北侧的辐合上升运动区位于 500~600 hPa 的等湿度线密集区附近, 即干湿空气交界处, 最大可达 $-12.0 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3 日 1200 UTC 当热带风暴“蒲公英”穿过舟山海域后, 黄海和舟山东部沿海地区低层辐合, 高层辐散, 且辐散明显大于辐合的环境场分布是风暴得以迅速加强的一个重要因素。

上述高低空辐散场的分析有助于了解“蒲公英”台风的辐散、辐合机制。无论是其登陆台湾还是浙江沿海地区, 台风中心附近低层辐散、中层辐合的配置与台风发展所需要的低层辐合、高层辐散的条件刚好相反, 所以台风中心附近的对流得不到发展。台风位于台湾期间, 其东部和南部的螺旋云带上中低层辐合, 高层辐散, 且辐合层较深厚, 因而有利于对流云团的发展, 强降雨出现在台风中心东和南部的螺旋云带中。而台风登陆浙江沿海地区后, 台风中心以东位于海上的螺旋云带上中低层辐合, 高层辐散, 同样有利于对流云团的发展。与此同时, 位于台风北部的螺

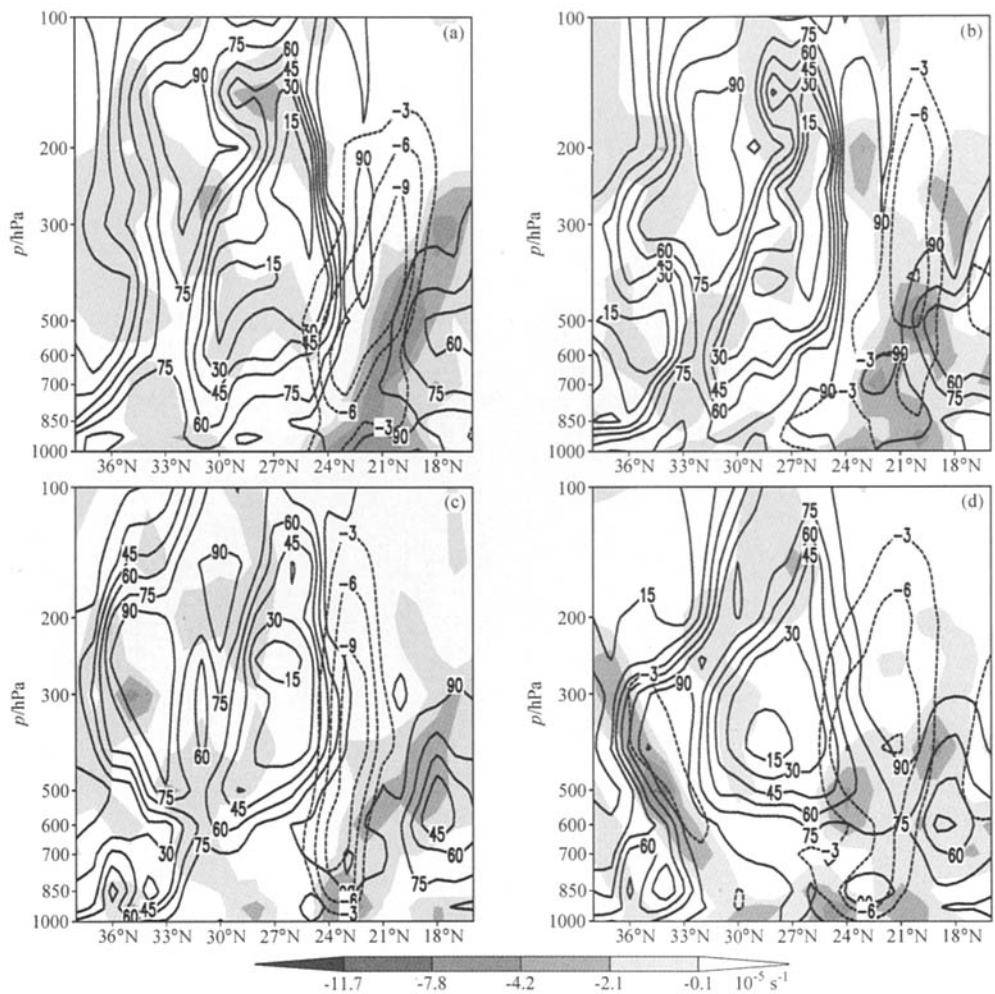


图8 2004年7月1~3日“蒲公英”两次登陆期间沿气旋中心的散度(阴影)、相对湿度(实线,单位:%)、垂直速度(虚线,单位: $10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) 经向垂直剖面: (a) 7月1日1200 UTC; (b) 7月1日1800 UTC; (c) 7月2日1200 UTC; (d) 7月3日0000 UTC
Fig. 8 The vertical cross section of divergence (shaded), relative humidity (solid line, units: %) and vertical velocity (dashed line, units: $10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$) along cyclonic center from 0000 UTC 1 July to 0000 UTC 3 July, 2004: (a) 1200 UTC 1 Jul; (b) 1800 UTC 1 Jul; (c) 1200 UTC 2 Jul; (d) 0000 UTC 3 Jul

旋云带对应的也为低层辐合,中高层辐散配置,因此对流云团在浙江偏北地区有所发展。由此可以说,“蒲公英”台风两次登陆期间散度场的配置与通常台风情形有所不同,这对于解释“蒲公英”台风引发的中心附近风小雨小,而外围螺旋云带风强降雨大现象具有一定意义。

5.4 速度平流散度与强降雨团的局地性

水平散度、水汽通量及其散度的分析中均指出,热带气旋“蒲公英”造成的强降雨区基

本一直处于风场和水汽辐合区,但这仅仅表明暴雨的发生与气旋内气流的辐合有关,并不能揭示“蒲公英”的内部结构与台湾、浙江等地局地特大暴雨间的关系。这里采用散度方程对局地强降雨团的出现与台风环流结构的具体关系作进一步分析。

散度方程可以写成如下形式:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial y} - \omega \frac{\partial D}{\partial p} - \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial p} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial p} \right) - f\xi - \beta u,$$

等式右边第 1、2 项称为速度平流散度项, 有利于辐合增加或维持, 因而与暴雨的出现密切相关。若定义

$$F = \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right),$$

则可知, 当对流层低层 $F < 0$ 会造成 $\partial D / \partial t > 0$, 即辐合随时间加强。

我们知道, 通常降雨所在区域的低层气流具有明显辐合特征, 而辐合逐渐加强的区域预示着该地区低层的气流可以源源不断向上输送, 从而

有利于降雨的增强。考虑到速度平流散度的分布演变特征可以很好地揭示出局地辐合变化趋势, 便于预测局地强降雨, 因此, 下面分析“蒲公英”台风两次登陆期间的速度平流散度分布, 及其与局地强降雨之间的关系。

“蒲公英”台风两次登陆期间沿气旋中心散度及速度平流散度的分布 (图 9) 表明, 台风“蒲公英”登陆台湾期间, 速度平流散度在垂直向上呈狭长分布, 大值中心位于 850 hPa 附近, 最强可达 $-6 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ 。登陆台湾初期的台风内部虽然气流辐合较强, 但速度平流散度与气流辐合中心

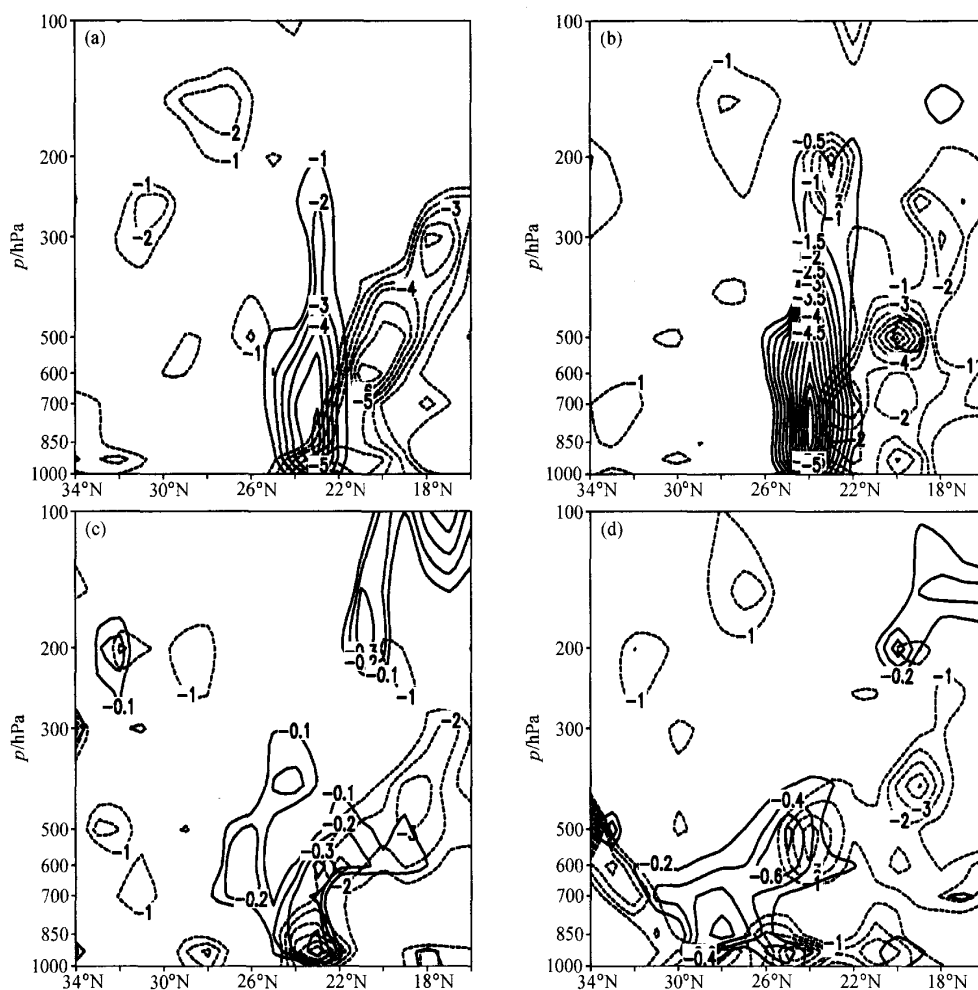


图 9 2004 年 7 月 1~3 日沿气旋中心散度 (虚线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 及速度平流散度 (实线, 单位: 10^{-8} s^{-2}) 的分布: (a) 7 月 1 日 1200 UTC; (b) 7 月 1 日 1800 UTC; (c) 7 月 2 日 1200 UTC; (d) 7 月 3 日 0000 UTC

Fig. 9 The vertical cross section of divergence (dashed line, units: 10^{-5} s^{-1}) and divergence of velocity advection (solid line, units: 10^{-8} s^{-2}) along cyclonic center from 0000 UTC 1 July to 0000 UTC 3 July 2004; (a) 1200 UTC 1 Jul; (b) 1800 UTC 1 Jul; (c) 1200 UTC 2 Jul; (d) 0000 UTC 3 Jul

并不重合，而是位于辐合气流偏北侧低层。当台风减弱将移出台湾地区时，速度平流散度与台风内部的气流辐合均明显减弱，尤其是速度平流散度，虽然中心仍位于气流辐合中心的 850 hPa 附近，但强度仅为 $-0.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ，表明台风及其附近地区已不再有利于气流辐合的加强，低层的气流虽然仍存在辐合上升运动，但强度的明显减

弱已不利于强暴雨的出现。之后，当台风登陆浙江沿海地区时，速度平流散度及台风内部气流辐合的分布和强度变化不大。结合这段时期内 850 hPa 散度、速度平流散度及流场分布（图 10）来看，台风两次登陆期间，速度平流散度始终位于台风中心略偏东的辐合气流中心北侧，局地强降雨基本出现在辐合区域有所加强处。台风位于台

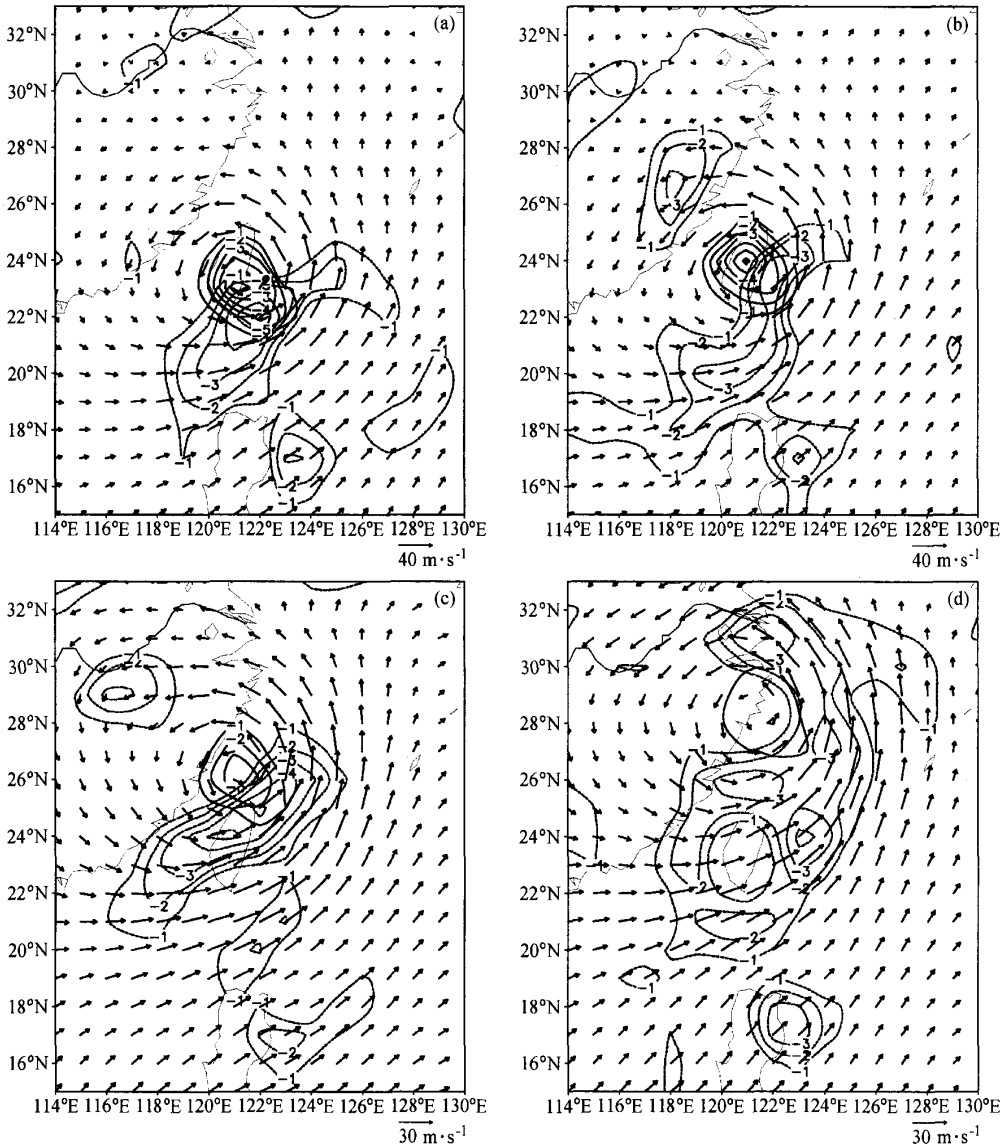


图 10 2004 年 7 月 1~3 日 850 hPa 散度（虚线，单位： 10^{-5} s^{-1} ）、速度平流散度（实线，单位： 10^{-8} s^{-2} ）、流场分布：（a）7 月 1 日 1200 UTC；（b）7 月 1 日 1800 UTC；（c）7 月 2 日 1200 UTC；（d）7 月 3 日 0000 UTC

Fig. 10 The distribution of divergence (dashed line, units: 10^{-5} s^{-1}), divergence of velocity advection (solid line, units: 10^{-8} s^{-2}) and wind field from 0000 UTC 1 July to 0000 UTC 3 July 2004: (a) 1200 UTC 1 Jul; (b) 1800 UTC 1 Jul; (c) 1200 UTC 2 Jul; (d) 0000 UTC 3 Jul

湾期间, 气流的辐合及加强趋势均明显大于其登陆浙江沿海地区, 尤其是登陆浙江沿海地区, 台风中心仅位于海岸附近, 而气流辐合及其加强大部分位于台风中心东侧, 低层气流辐合的相对较弱使得浙江地区降雨也相对明显少。以上分析可以知道, 速度平流散度可以较好地描述出局地强降雨与该地区气流辐合及加强趋势演变间的关系, 在揭示局地大暴雨落区的可能性上具有一定意义。

6 结论和讨论

本文利用 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ NCEP 再分析资料和云图等资料对热带气旋“蒲公英”登陆台湾和大陆沿海地区期间的移动、强度和造成风雨灾害的分布、结构特征及演变进行了分析, 研究表明:

(1) 创下了近 3 年来台湾风灾损失最高纪录的“蒲公英”不仅持续时间长、强度大, 而且两次登陆过程中造成的风雨灾害分布及强度明显不同。

(2) “蒲公英”登陆台湾前, 位于大陆高压和西太平洋副热带高压之间, 环流形势有利于其北上转向。“蒲公英”登陆台湾期间, 东亚的环流形势呈典型的鞍形场分布, 有利于处于两高之间热带气旋“蒲公英”的维持和北上转向。而在其登陆浙江沿海地区后, 浙江沿海地区处于较强的偏东气流中, “蒲公英”中心处于高空槽后, 由于气流下沉以及缺少水汽和能量充沛供应, 因此减弱为热带风暴。

(3) 热带气旋“蒲公英”登陆台湾和浙江期间, 虽然垂直向上始终呈气旋性涡柱结构, 而且高湿、强上升运动区基本位于其外围螺旋云带内。水汽输送以及水汽聚集强度和位置的不同, 使得“蒲公英”两次登陆的强度和造成的雨带分布明显不同。

(4) 无论是其登陆台湾还是浙江沿海地区, “蒲公英”台风中心附近低层辐散, 中层辐合, 不利于中心附近的对流的发展。台风位于台湾期间, 其东部、南部的螺旋云带上中低层辐合, 高层辐散, 且辐合层较深厚, 有利于对流云团的发展。而台风登陆浙江沿海地区后, 台风中心以东、以北的螺旋云带对应的也为低层辐合, 中高层辐散置, 因此对流云团在浙江偏北地区有所发展。

(5) 速度平流散度对于揭示“蒲公英”两次登陆期间局地强暴雨的分布具有较好的指示意义。强暴雨出现区域不仅具备气流低层辐合特征, 而且还是气流辐合的加强区。

参考文献 (References)

- [1] 陈联寿, 罗哲贤. 影响热带气旋结构和运动的两类因子的数值研究. 气象学报, 1996, **54** (4): 409~416
Chen Lianshou, Luo Zhexian. Numerical study on the impact of two kinds of factors on tropical cyclone's structure and motion of typhoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1996, **54** (4): 409~416
- [2] 徐祥德, 陈联寿, 解以扬, 等. 环境大尺度锋面系统与变性台风结构特征及其暴雨特征. 大气科学, 1998, **22** (5): 744~752
Xu Xiangde, Chen Lianshou, Xie Yiyang, et al. Typhoon transition and its impact on heavy rain. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22** (5): 744~752
- [3] 陈联寿, 徐德祥, 谢以扬, 等. 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. 大气科学, 1997, **21** (1): 83~90
Chen Lianshou, Xu Xiangde, Xie Yiyang, et al. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1997, **21** (1): 83~90
- [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. 5~100
Chen Lianshou, Xu Xiangde, Luo Zhexian, et al. *Introduction to Tropical Cyclone Dynamics*. Beijing: China Meteorological Press, 2002. 5~100
- [5] Farfán L M, Zehnder J A. An analysis of the landfall of hurricane Nora (1997). *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129** (8): 2073~2088
- [6] Blackwell K G. The evolution of hurricane Danny (1997) at landfall; Doppler-observed eyewall replacement, vortex contraction/intensification, and low-level wind maxima. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128** (12): 4002~4016
- [7] Kaplan J, Demaria M. On the decay of tropical cyclone winds after Landfall in the new England area. *J. Appl. Meteor.*, 2001, **40** (2): 280~286
- [8] 蒋尚武, 张谭, 周鸣盛, 等. 登陆北上减弱所导致的暴雨——半热带系统暴雨. 气象学报, 1981, **39** (1): 18~27
Jiang Shangwu, Zhang Tan, Zhou Mingsheng, et al. The hard rainstorms in North China introduced by a landed northward moving and decaying typhoon—hard rainstorms of semi-tropical systems. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1981, **39** (1): 18~27

- [9] 谢义炳, 谢安, 张骅, 等. “75.8” 河南特大暴雨的动力学分析. 气象学报, 1979, **37** (4): 45~55
Xie Yibing, Xie An, Zhang Tan, et al. A diagnostic analysis about the “75.8” heavy rain in Henan. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 1979, **37** (4): 45~55
- [10] Qi Linlin, Zhao Sixiong. Mesoscale analysis and simulation of heavy rainfall in Shanghai urban area by using non-conventional data. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (Suppl.): 36~43
- [11] 齐琳琳, 赵思雄. 利用非常规观测资料对上海特大暴雨过程的模拟研究. 气候与环境研究, 2003, **8** (4): 417~435
Qi Linlin, Zhao Sixiong. A numerical simulation of the heavy rainfall in Shanghai Using Nonconventional observation data. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (4): 417~435
- [12] 齐琳琳, 赵思雄. 一次热带低压引发上海特大暴雨过程的中尺度系统分析. 大气科学, 2004, **28** (2): 254~268
Qi Linlin, Zhao Sixiong. An analysis of mesoscale features of heavy rainfall in Shanghai on 5--6 August 2001. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (2): 254~268