

周玲丽, 翟国庆, 王东海, 等. 2011. 0713 号“韦帕”台风暴雨的中尺度数值研究和非对称性结构分析 [J]. 大气科学, 35 (6): 1046-1056.
Zhou Lingli, Zhai Guoqing, Wang Donghai, et al. 2011. Mesoscale numerical study of the rainstorm and asymmetric structure of 0713 typhoon Wipha [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1046-1056.

0713 号“韦帕”台风暴雨的中尺度数值研究 和非对称性结构分析

周玲丽¹ 翟国庆² 王东海³ 王元⁴

1 浙江省气象台, 杭州 310017

2 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

4 南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘要 本文利用美国新一代中尺度数值模式 WRF, 结合多普勒雷达资料、卫星资料以及美国国家环境预报中心 NCEP 的再分析资料对发生在 2007 年 9 月 17 日~19 日由第 13 号超强台风“韦帕”在浙江省引发的暴雨过程进行分析。结果表明, 本次降水过程主要是由台风外围暖湿的东南风急流和中高纬西风槽带来的北方干冷空气交汇造成的, 前者为降水输送水汽和热量, 后者则为对流的发展提供了动力条件和不稳定能量。“韦帕”在登陆期间的降水和环流结构具有明显的不对称特征, 主要的降水和对流活动发生在台风环流的西侧, 台风环流呈现东暖湿西干冷的分布特点。冷暖空气的交汇在浙江沿海地区形成一条很强的能量锋, 这也是对流系统发生最活跃和降水产生最集中的区域。沿着能量锋在对流层低层自北向南排列有多个中小尺度对流云团细胞, 并一起构成了中尺度对流云带。随着台风登陆后向西北移动和北方冷空气的进一步侵入, 对流云带的下风方不断有新的对流云团细胞产生并向下游传播。沿着能量锋上较强的风的垂直切变为对流云团的发展和维持提供了有利的环境场。此外, 北方弱冷空气侵入到低空, 沿着近地面嵌入到暖湿空气的底部, 与有利的地形条件一起对暖湿气团起到了有力的抬升作用, 触发对流性天气的发生。

关键词 中尺度数值模拟 对流云团 冷空气 暖湿气流 能量锋 不对称性

文章编号 1006-9895 (2011) 06-1046-11

中图分类号 P444

文献标识码 A

Mesoscale Numerical Study of the Rainstorm and Asymmetric Structure of 0713 Typhoon Wipha

ZHOU Lingli¹, ZHAI Guoqing², WANG Donghai³, and WANG Yuan⁴

1 Zhejiang Province Meteorological Observatory, Hangzhou 310017

2 Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

4 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract WRF (Advanced Weather Research and Forecasting modeling system) was used to simulate the local

收稿日期 2010-12-06, 2011-03-01 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40975021、40830958, 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室重点项目 2008LASW-A03, 国家公益性行业科研专项 GYHY201006007

作者简介 周玲丽, 女, 1982 年出生, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为中尺度数值模拟。E-mail: zhoulingli231@gmail.com

heavy rainstorm process caused by super typhoon Wipha over the eastern coast of Zhejiang Province from 17 to 19 September 2007. The analysis of the simulation result combined with Doppler radar data, TBB (Temperature of Black Body) data, and NCEP (National Centers for Environmental Prediction) reanalysis data shows that the rainstorm was due to the intrusion of north cold-dry current from the upper-level trough into the typhoon circulation. The warm-moist peripheral southeastern jet from typhoon Wipha brought rich moisture and heat, and the north cold-dry current provided kinetic condition and instability energy for precipitation. The distribution of rainfall and circulation of typhoon Wipha showed clear asymmetric structure during the landing period. The rainfall and convection activity mainly occurred in the west quadrant of typhoon. The east part of typhoon circulation was warm and moist while the west part was cold and dry. The energy front contributed by the convergence of cold and warm air in the coast area of Zhejiang Province was the most active convective region, also the main precipitation zone. There were several small scale convective cloud cells lining from north to south along the energy front in the low troposphere, together forming a mesoscale spiral rainband. As the typhoon moved northwestward, the north cold-dry current further intruded into the warm-moist circulations. There were new-born convective cells at the down edge of the rainband. The strong vertical shear of wind along the energy front offered advantageous environment to the development and maintenance of the convective cells. The cold-dry current invaded into low level and imbedded into the bottom of the warm-moist circulations along the energy front, which, together with the beneficial topography, lifted the warm-moist air up forcefully and triggered convection weather.

Key words mesoscale numerical simulation, convective cells, cold-dry current, warm-moist air, energy front, asymmetric structure

1 引言

台风灾害是世界上最严重的灾害之一, 据统计全球每年发生 80~100 个热带气旋, 平均每年造成 60~70 亿美元的经济损失和 2 万人死亡 (Southern, 1979)。中国是世界上受台风影响最严重的国家之一, 平均每年登陆我国的台风约有 7~8 个 (陈联寿和丁一汇, 1979)。全国约五分之四的省、市、自治区可能受到热带气旋的影响, 尤其是沿海地区, 台风灾害的发生频率和影响程度都居沿海地区各种自然灾害之首 (梁必骥等, 1995)。浙江省地处我国东南沿海, 经济发达, 人口稠密, 受台风灾害的影响程度居全国前列。从 1949~2006 年一共有 38 个热带气旋在浙江省登陆, 平均每年就有 0.66 个; 有 301 个热带气旋影响浙江省, 平均每年 5.3 个 (杨慧娟等, 2007)。根据对建国以来影响浙江省台风的分析, 台风带来的最大单站降雨基本都在 100 mm 以上, 其中有 31 次台风带来最大单站降雨在 500 mm 以上, 有 36 次最大单站降雨在 200~500 mm (吕振平和姚月伟, 2006)。

多年以来, 在台风暴雨、螺旋雨带、台风非对称性结构以及台风的数值模拟等方面都有很多研究, 也取得了不少新的进展。Chen and Luo (2002) 利用准地转正压模式讨论了中小尺度涡旋与台风的

相互作用, 发现 β 效应是造成热带气旋非对称性结构的一个重因素。研究还发现, 垂直上升运动条件、改进的湿 Q 矢量散度强迫、热力条件和地形强迫都有可能造成台风降水的非对称性分布 (冀春晓等, 2007; 寇媛媛等, 2009; 岳彩军, 2009)。袁金南和万齐林 (2003) 分析了台风“玛姬”路径和非对称结构之间的关系, 认为台风非对称结构的转向对台风移动路径的转向具有较好的指示作用。周玲丽等 (2009) 对“海棠”台风暴雨过程进行数值模拟研究, 揭示了中尺度辐合带对降水分布和强度具有重要作用, 这可能也是造成非对称性降水的原因之一。

2007 年 9 月 19 日 02:30 (北京时, 下同) 在浙江省苍南县霞关镇登陆的第 13 号台风“韦帕”是当年登陆我国大陆最强的台风, 具有显著的非对称性特征。仅 18~19 日两天就在浙江省沿海地区造成了暴雨到大暴雨, 局部地区特大暴雨以及 8~11 级沿海大风。针对“韦帕”台风, 周海光 (2010) 利用组网雷达拼图数据资料和双雷达风场反演数据对螺旋雨带的三维精细结构进行了分析, 发现低层的强辐合和充足的水汽对雨带内部回波的发展起到了重要作用。朱健和罗律 (2009) 分析了“韦帕”台风暴雨湿位涡, 发现水平湿位涡与暴雨有很好的对应关系。基于对“韦帕”台风已有的研究, 本文将

利用常规观测资料、多普勒雷达资料并结合高分辨率的数值模拟结果对“韦帕”台风在浙江省造成强降水过程进行诊断分析,了解“韦帕”台风非对称性结构的成因、暴雨形成机制以及对暴雨过程中的中尺度现象进行研究。

2 环流形势和天气背景

图 1a 给出了“韦帕”台风登陆前美国国家环境预报中心(NCEP)的 500 hPa 再分析高度场,可以看到整个高度场呈两脊一槽的形势。在日本南部海面为副热带高压中心,我国青藏高原处于大陆高压的控制之下,槽线位于我国中部,从华北北部向南延伸到四川盆地一带。此时副热带高压的势力在不断减弱东退,“韦帕”台风在副高南侧的东南气流引导下向西北方向移动。当“韦帕”登陆进入我国沿海地区后,西风槽后的冷空气侵入到台风环流之中,冷暖空气的交汇非常有利于对流的发展和降水的产生。

从 18 日 11 时的云顶亮温图上可以发现,“韦帕”台风在北侧和东南侧各有一条狭长的云带分别从南、北面延伸向台风主体环流并卷入到台风中心之中,具有明显的不对称结构(图 1b)。台风东南侧的这条云带向西北方向延伸出羽状云砧纤维,可以判断该云带位于海上东南风急流之中,是输送水汽和热量的活跃通道;而且这条云带在台风外围附

近的色调较暗,云顶亮温在 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 左右,应该是位于对流层低层。从图 1b 中仔细分析还可以发现,北侧云带中有多个较小的椭圆形云团镶嵌在其中,纹理较为光滑均匀,色调白亮,云顶较高,对流发展旺盛,属于中小尺度的对流性云团;云带云顶亮温约为 $50\sim 80^{\circ}\text{C}$,是来自北方的弱冷空气。当这支弱冷空气到达 35°N 以南时,便与低层的暖湿东南气流交汇,在浙江省境内引发强烈的对流天气,造成暴雨到大暴雨过程。

3 模拟方案和资料

本文采用的是美国新一代中尺度数值模式 WRF 对“韦帕”台风进行模拟试验。模式采用双向二重嵌套,第一重网格为 121×110 ,格距为 30 km,中心位于 $(28^{\circ}\text{N}, 118^{\circ}\text{E})$;第二层网格为 91×88 ,格距为 10 km;垂直方向为 31 层。模式采用的初始场资料为来自 NCEP 分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的一天四次(00 时、06 时、12 时、18 时)的 FNL 客观分析数据,因为它采用了最完整的观测资料进行订正,是 NCEP 所有资料集中最适合用于模式长期运算的数据。以地面测站达到暴雨标准当日的 08 时为起点,向前推移大约 24 小时作为模拟的初始时刻(2007 年 9 月 17 日 08 时),积分 48 小时。模拟积分过程中采用的微物理方案为 Lin et al 方案(Lin et al., 1983; Rutledge and Hobbs, 1984; Tao et

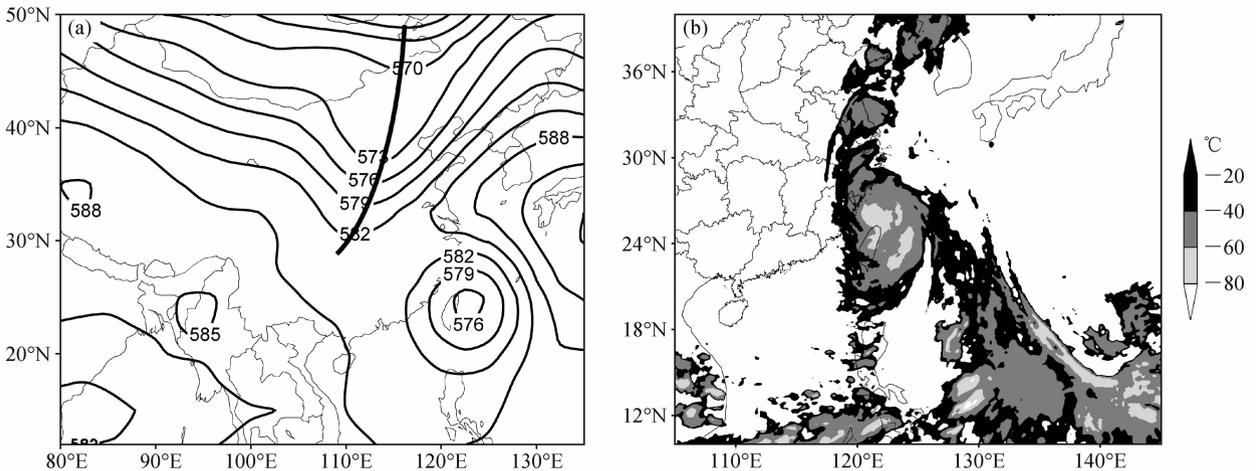


图 1 (a) 2007 年 9 月 18 日 08 时 500 hPa NCEP 的再分析高度场(单位: dagpm, 粗实线: 槽线的位置); (b) 2007 年 9 月 18 日 11 时“韦帕”台风云顶亮温(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 1 (a) 500-hPa geopotential height (dagpm) from NCEP (National Centers for Environmental Prediction) reanalysis data at 0800 LST 18 Sep 2007 (the black bold curve stands for the position of trough line); (b) TBB (Temperature of Black Body) for typhoon Wipha at 1100 LST 18 Sep 2007

al, 1989), 积云对流参数化采用 Betts-Miller-Janjic 方案 (Betts, 1986; Betts and Miller, 1986; Janjić, 1994), 边界层参数为 YSU 方案 (Hong and Dudhia, 2003)。

为了充分利用常规观测资料和沿海多普勒雷达资料, 使模式能够通过多次同化和调整, 达到一个相对稳定的状态以提高模拟效果, 本试验从初始时刻开始每 6 小时一次, 将该时次的雷达反射率、径向速度以及地面和高空观测资料 (06 时和 18 时无高空资料) 通过 WRF 模式数据同化系统 WRFDA 同化到模式中去。除了初始时刻同化所用到的猜值场为来自 WRF 模式前处理系统 WPS 的输出结果以外, 积分第 6、12、18、24、30、36、42 小时进行同化所用到的猜值场均来自模式在该时次之前 6 个小时的积分结果; 同化所用到的背景误差场是对连续一个月的 FNL 资料进行统计计算得到的; 同化中用到的地面和高空实况观测资料每个时次的站点数会有所不同, 地面大约为 4300 个站点, 高空有 11 层约 310 个站点; 同化中用到的雷达资料则是由雷达第二级数据 (基数据) 资料经过预处理得到的。

4 模拟结果验证

图 2 为“韦帕”台风的实况和模拟路径对比, 实况路径显示台风是在我国浙闽沿海地区登陆, 其移动方向为西北方向。对比模拟路径可见, 模拟台风中心位置基本和实况接近, 在积分前半段的模拟路径比实况略向西南偏离了 10~15 km, 但登陆的时间和地点都基本与实况吻合, 登陆之后也和实况一样继续向西北方向移动。模式对路径的模拟效果比较理想。

从海平面中心气压值变化可以说明“韦帕”台风强度的演变情况。图 3 显示实况台风在尚未登陆的初始时刻 17 日 08 时中心气压值约为 970 hPa, 随着台风在海上向西北方向移动, 其强度也在不断地发展, 18 日 02 时达到最强的 935 hPa; 随后台风在向我国东南沿海靠近的过程中, 受下垫面摩擦力影响, 强度开始减弱, 最后中心气压上升到了 990 hPa。对比图 3 中模拟台风中心气压可见, 模拟台风的强度比实况要弱, 但模拟台风强度的演变趋势和实况则是基本一致的, 即由于台风在模拟前大部分时间都位于海上, 登陆后仅有 6 个小时位于陆地上, 因此中心气压是先增强, 再减弱。

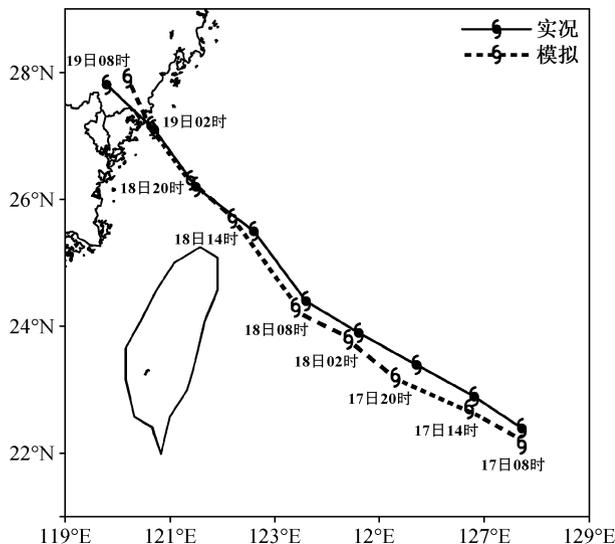


图 2 “韦帕”台风实况和模拟路径对比。实线: 根据 CWB (台湾中央气象局) 最佳路径集数据作的实况路径; 虚线: WRF 模拟路径

Fig. 2 Observed and simulated tracks of typhoon Wipha. The solid line represents the observed track from the best track of CWB (Central Weather Bureau of Taiwan), and the dotted line represents the simulated track from WRF (Weather Research and Forecasting modeling system)

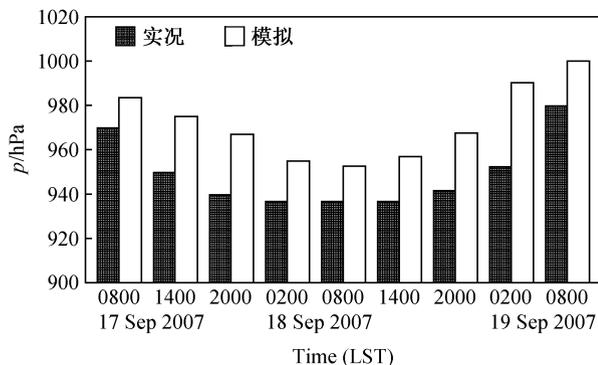


图 3 “韦帕”台风实况和模拟的中心气压强度对比 (单位: hPa)。黑色直方: 根据 CWB 最佳路径集数据做的实况台风中心气压值; 白色直方: WRF 模拟的台风中心气压值

Fig. 3 Observed and simulated central air pressure of typhoon Wipha (hPa). The black columns stand for the observed central air pressure from CWB, the white columns represent the simulated central air pressure from WRF

受台风“韦帕”影响浙江省东部沿海大部都出现了暴雨到大暴雨, 雨带自北向南覆盖了半个浙江省; 24 小时最大降水中心有两个, 分别出现在台州和绍兴南部地区, 雨量中心值分别达到了 300 mm 和 250 mm (图 4a)。对比模拟 24 小时降水发现模

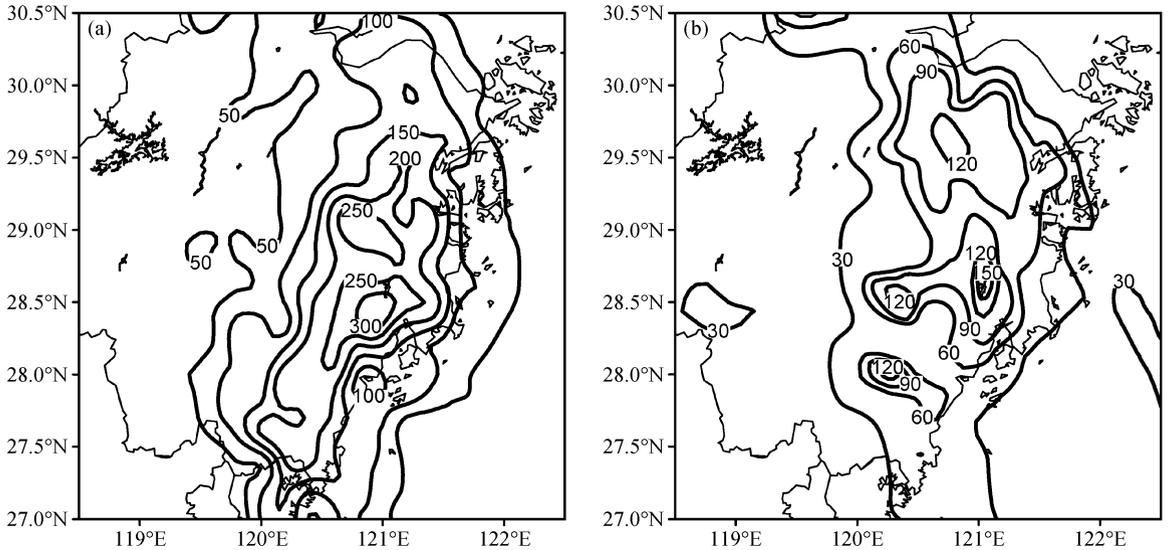


图4 “韦帕”台风实况和模拟24小时降水对比(单位: mm): (a) 2007年9月18日08时~19日08时自动站累积实况降水; (b) 积分第24~48小时模拟降水

Fig. 4 Accumulated 24 h precipitation (mm) for typhoon Wipha; (a) Accumulated precipitation from AWS (Automatic Weather Station) from 0800 LST 18 to 0800 LST 19 Sept 2007; (b) simulated precipitation from the 24th to 48th hours

拟雨带的位置、走向与实况基本一致,但是最大降水中心稍向北偏离了几公里,并且雨量强度也要比实况要弱一些,这可能是由于模拟台风的强度比实况偏弱导致的,不过模式仍明显地模拟出了位于浙东南沿海和浙中东部的两个降水中心(图4b)。

从路径、强度变化和24小时降水的对比验证可见,模式对“韦帕”台风的模拟效果较理想,基本可以反映台风登陆前后的移动发展过程以及对浙江沿海地区造成的影响。因此,本文将采用本次模拟结果作为补充,弥补常规观测资料在时空分辨率上的局限性,对“韦帕”台风暴雨过程中的中尺度现象和不对称结构进行分析和研究。

5 暴雨过程的中尺度对流系统

有很多研究都表明,中尺度对流系统是造成台风特大暴雨的主要因素(Chen, 1995; Chen and Luo, 1995; Meng et al., 1996),并且此类系统产生的降水往往比台风本身环流的降水要大得多,直接影响到台风暴雨的强度和分布(程正泉等, 2005)。

图5给出的温州多普勒雷达CAPPI图像显示,在暴雨最为集中的几个时次,对流层低层有较强的中小尺度系统活动。台风登陆前几个小时,沿着台风外、中、内三个层次的环流分别有三条对流云带

A、B和C形成发展起来,这些云带中嵌有多个更小尺度的对流云团细胞,并随着台风环流呈气旋式弯曲,最后沿着浙江省东南沿海的海岸线汇合成一条(图5a)。1个小时后,随着台风的北抬西进,三条对流云带逐渐由东一西向逆时针竖转成东北一西南向,其中外圈和中圈的两条对流云带A和B不断地向外围发展并相互靠近合并成一条更强的对流云带D(图5b)。之后,对流云带C也开始不断地伴随台风的西北移动而向外围转移,并最终在19日00时与云带D合并成一条新的、更强的对流云带E(图5c)。与此同时,海上的一些零星的小对流云团细胞还在不断地补充扩大进来,使得对流云带E得到了很大的发展和加强,在它的下方开始发展出一些新生的对流云团(如图5d中黑色圆圈所示),这些云团沿着台风环流继续向下游方向传播,使得对流云带E随台风向西北抬升的同时仍能对南部造成持续的影响(图5d)。在这段时间内,浙东南沿海地区的对流活动一直非常活跃并且维持较强的状态,累积降水最终达到了暴雨到大暴雨的级别。

6 水汽和能量场

图6给出了“韦帕”台风登陆前925 hPa高度上的模拟流场和水汽混合比的叠加场,显示了环流

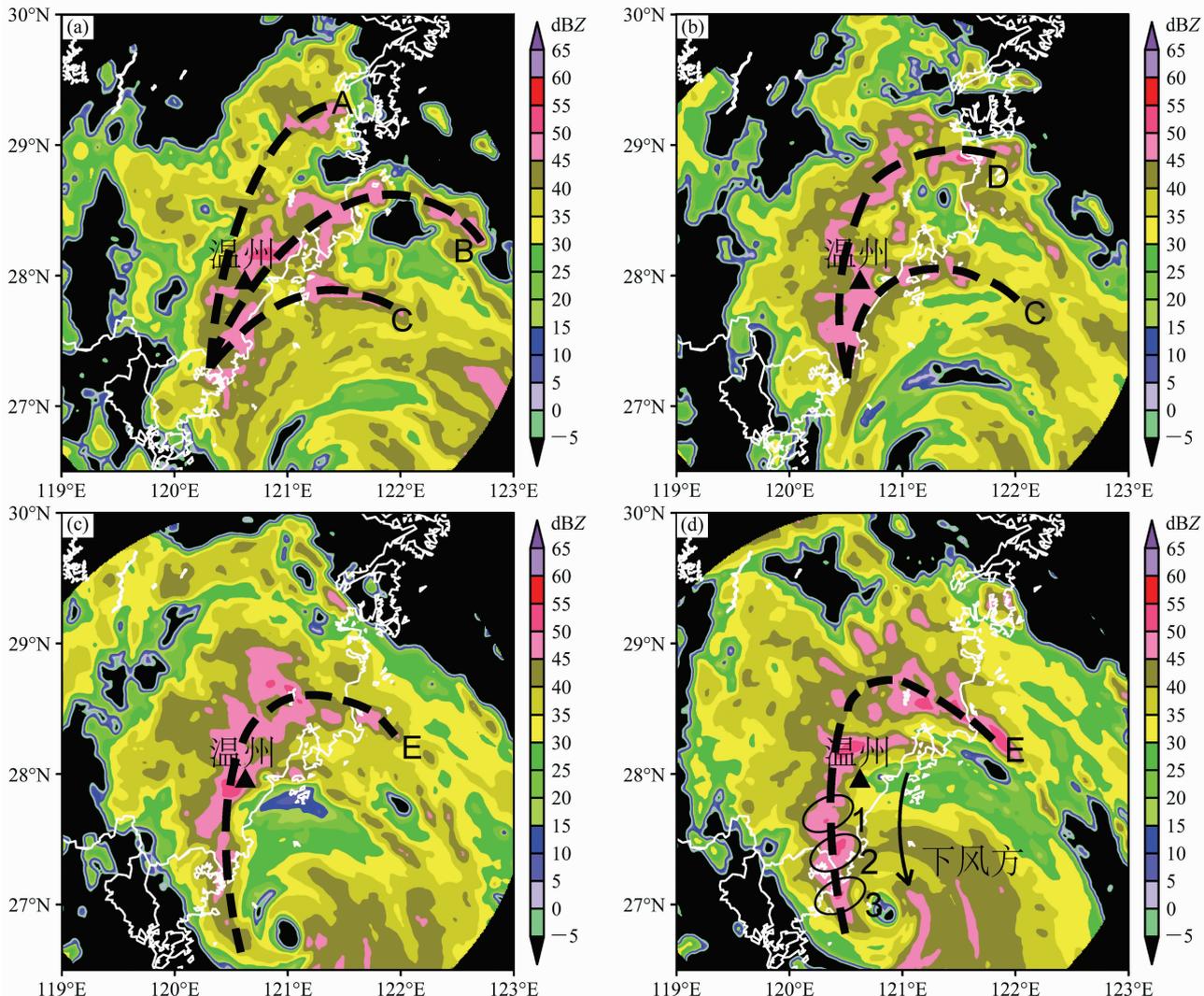


图5 2007年9月温州0.5 km高度上的实况CAPPI雷达回波(单位: dBZ): (a) 18日21时; (b) 18日22时; (c) 19日00时; (d) 19日01时。黑三角形: 温州雷达的位置; 粗虚线: 对流云带的位置; 黑色圆圈及数字: 新生对流云团的位置
Fig. 5 Observed CAPPI echo of Wenzhou Dopplerradar at a height of 0.5 km at (a) 2100 LST 18 Sep, (b) 2200 LST 18 Sep, (c) 0000 LST 19 Sep, (d) 0100 LST 19 Sep 2007. Black triangle: position of Wenzhou Doppler radar; black dashed lines: positions of convective rainbands; black circles and corresponding numbers in (d): positions of new-born mesoscale convective cells

和水汽结构从对称性转变为非对称性的过程。如图6a所见, 18日01时台风“韦帕”环流结构紧密呈圆形, 近台风中心为一圈高水汽区, 并且在台风的南北两侧分别有外围东北和西南风气流向台风中心输送水汽。18日06时随着台风向西北方向靠近我国台湾岛东北部沿海, 在地形摩擦和阻断作用双重影响下, 台风南侧的西南风水汽输送受到了制约, 水汽高值区开始向北转移并逐渐呈现出了南北不对称的特征(图6b)。到了18日14时, 台风进入我国大陆近海区, 受大陆沿海地形和北方大陆冷空气

的作用, 台风“韦帕”西侧的水汽条件明显变差, 仅剩东北象限和近中心仍处于高水汽状态, 台风环流结构也从圆形逐渐变为南北轴向的椭圆形(图6c)。18日23时, 台风登陆前4个小时, 地形和冷空气进一步影响台风环流, 外围东南气流中的水汽输送也不断减弱, 只有近台风中心的偏南气流仍保持较充沛的水汽, 此时的台风环流以过台风中心的南北轴线为界呈“西干冷东暖湿”的分布(图6d)。

进一步分析18日23时925 hPa高度上的模拟

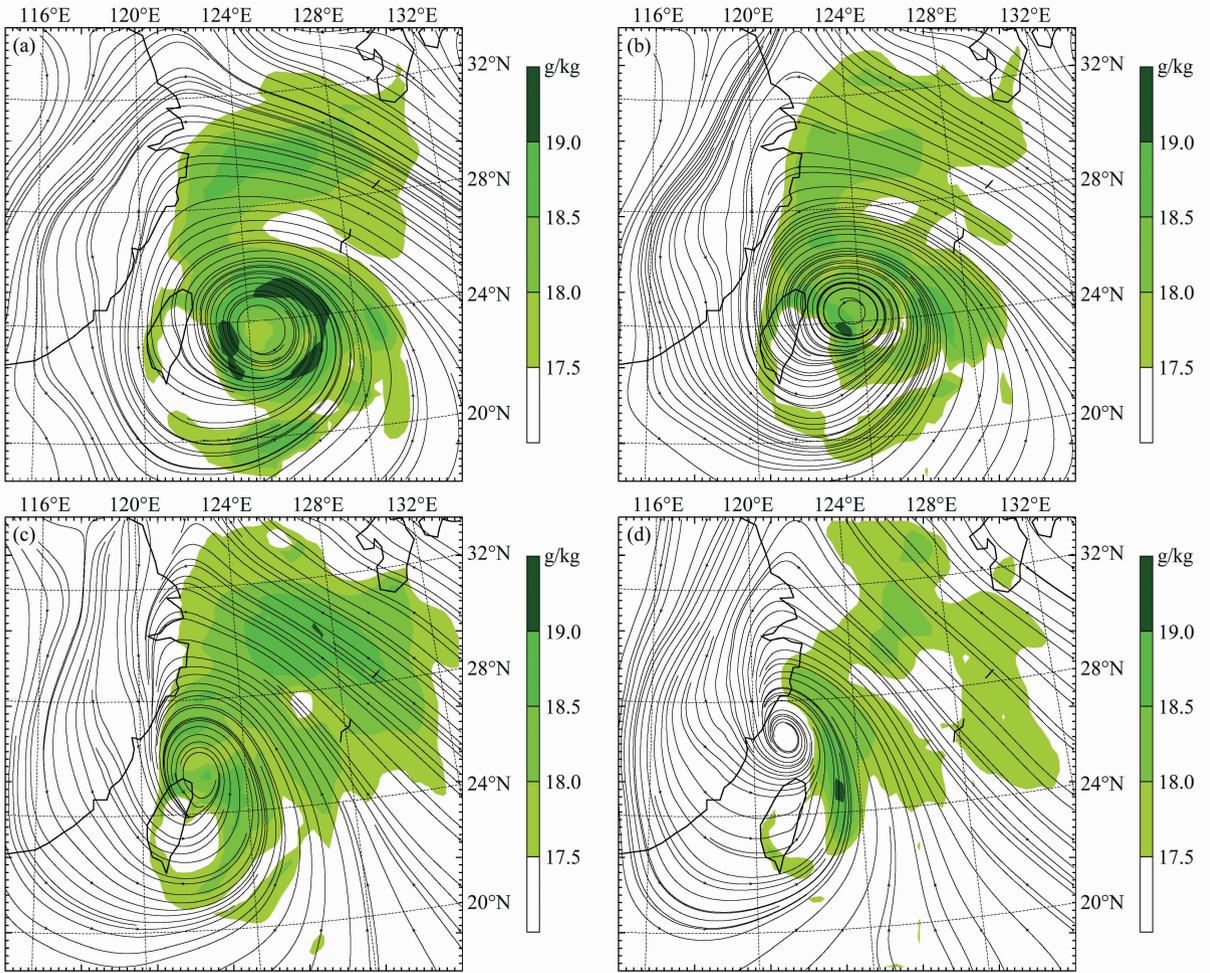


图6 2007年9月18日模拟的925 hPa流场和大于17.5 g/kg水汽混合比(阴影): (a) 01时; (b) 06时; (c) 14时; (d) 23时
Fig. 6 Simulated streamline field at 925 hPa with water vapor mixing ratio larger than 17.5 g/kg (shading) at (a) 0100 LST, (b) 0600 LST, (c) 1400 LST, (d) 2300 LST on 18 Sep 2007

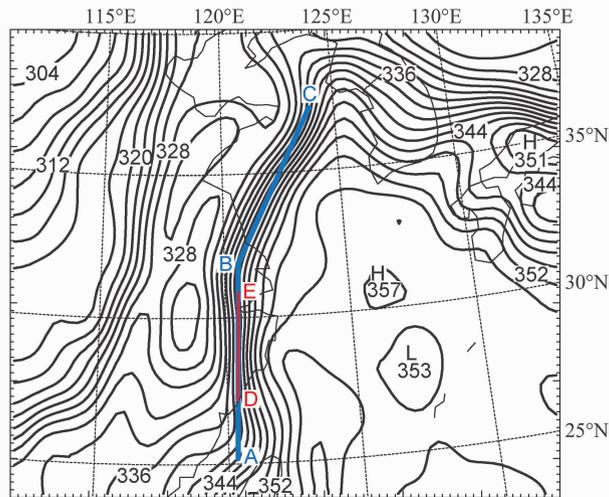


图7 模拟的2007年9月18日23时925 hPa相当位温场(单位: K)。蓝线A-B-C; 图8的剖面; 红线D-E; 图9的剖面
Fig. 7 Equivalent potential temperature (K) at 925 hPa at 2300 LST 18 Sep 2007. Blue line A-B-C; cross line in Fig. 8; red line C-D; cross line in Fig. 9

相当位温场(图 7)还可以发现,台风西侧干冷区相当位温中心值为 304 K 以下,东侧暖湿区的相当位温中心则高达 356 K。同时对比图 1b 的云顶亮温可知,台风北侧云带为来自北方的弱干冷空气,侵入到台风暖湿环流之中;台风东南侧云带为台风外围的暖湿气流,为台风输送水汽和能量。这两个高、低相当位温中心之间仅隔了 150 km 左右,但中心值却差了 52 K,这在台风中心附近造成了很强的相当位温梯度,由此形成了一条过台风中心并南北向延伸的能量锋(图 7)。

对比图 5 和图 7 可知,沿着低层干冷和暖湿气流交汇构成的能量锋区不断有中小尺度对流系统生成、合并发展和传播,从而导致沿着该锋区所在的浙东沿海出现强降水。

7 能量锋的垂直结构

为了进一步了解能量锋的垂直结构和发展过程,沿着能量锋所在位置作垂直剖面。图 8 中能量锋垂直剖面为分别沿图 7 中 A-B 和 B-C 两段剖面所做剖面的合成图。17 日 20 时(图 8a),台风“韦帕”位于台湾以东洋面,其外围环流尚未影响到我国大陆沿海地区,此时北方干冷空气位置偏西北,相当位温低值区位于对流层中层 500~600 hPa 之间,中心值约为 326 K 左右。到了 18 日 04 时(图 8b),随着台风向西北方向移动,干冷空气逐渐自对流层中层向低层渗透,相当位温最低中心位于 800 hPa,约为 333 K。18 日 12 时(图 8c),干冷中心继续下降到近地面,其前部的弱干冷空气开始向南扩散。相当位温低值中心在 18 日 20 时已经到达剖线的南半段,此时台风中心已经靠近我国东部沿海,即将在浙江登陆,其外围的暖湿气流与这支下降到近地面的弱干冷空气交汇,在 800~900 hPa 之间形成一条近似水平分布的能量锋(图 8d)。

由此可知,北方干冷空气首先是从对流层中高层发展起来,随后干冷中心前部的弱冷空气向中低层渗透并自北向南扩散而来。当弱干冷空气到达近地面后与近海即将登陆的“韦帕”台风暖湿气流交汇形成了低空能量锋。同时,弱冷空气沿着近地面从下方嵌入到暖湿气团底部,促使斜压性发展,也很有利于气旋性涡旋的发展和维持(朱健和罗律,2009)。

8 动力条件分析

为了进一步了解中尺度暴雨发生发展的原因和动力条件,本文沿着能量锋区和雨带所在位置作垂直剖面。图 9a 的相对涡度垂直剖面显示,沿着能量锋在对流层低层 800 hPa 以下有 5~7 个正涡度中心自北向南紧密排列,涡度中心最大值在 $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上。这些正涡度中心的尺度在 20~30 km 左右,属于 β 中尺度,正是图 5 雷达反射率所显示的中尺度对流云团细胞。从图 9b 的反射率高度可知,沿着能量锋生产的对流云带的发展高度仅局限在对流层低层之中,并且总是出现在地面的迎风坡一侧。从图 9c 的垂直速度剖面可以看出,在对流云团细胞发展之处对应应有较活跃上升运动,而且上升气流集中出现在云团细胞范围所在的 20~30 km 之内,表现出很强的局地性。从以上分析中可知,地形抬升对对流云团细胞的发展所起的作用不可忽视,弱冷空气和高低起伏的地形一起对暖湿气团起到了强烈的抬升作用,有利于触发对流的发展。此外在对流云团的北侧,也就是云团后部在垂直方向上有若干次级反环流,反环流的上升支能够进一步促进加强上升运动,有利于云团的发展和向下游方向传播。图 9d 中平行于剖面的风速还显示,沿着能量锋在近地面有一支偏北风急流存在,这支急流中心风速在 15 m/s 左右;而在对流层中高层则为风速在 8~10 m/s 的偏南气流,由此在能量锋上形成了很强的风的垂直切变。这非常有利于螺旋云带的维持和发展(Barnes et al., 1983)。

9 结论

本文利用 NCEP 再分析资料、卫星资料、常规观测资料、雷达反射率资料并结合美国新一代中尺度数值模式 WRF 的高分辨率输出资料对 2007 年第 13 号台风“韦帕”登陆期间对浙江造成的一次强降水过程进行了分析。结果发现:

(1)“韦帕”台风登陆期间的降水和环流结构具有明显的不对称性,主要的降水和对流活动发生在台风环流的西侧。台风环流呈现“东暖湿西干冷”的特征。

(2)本次降水过程主要是由于台风外围暖湿的东南风急流和中高纬西风槽后部北方弱干冷空气交汇造成的。前者为降水输送水汽和热量,后者则为

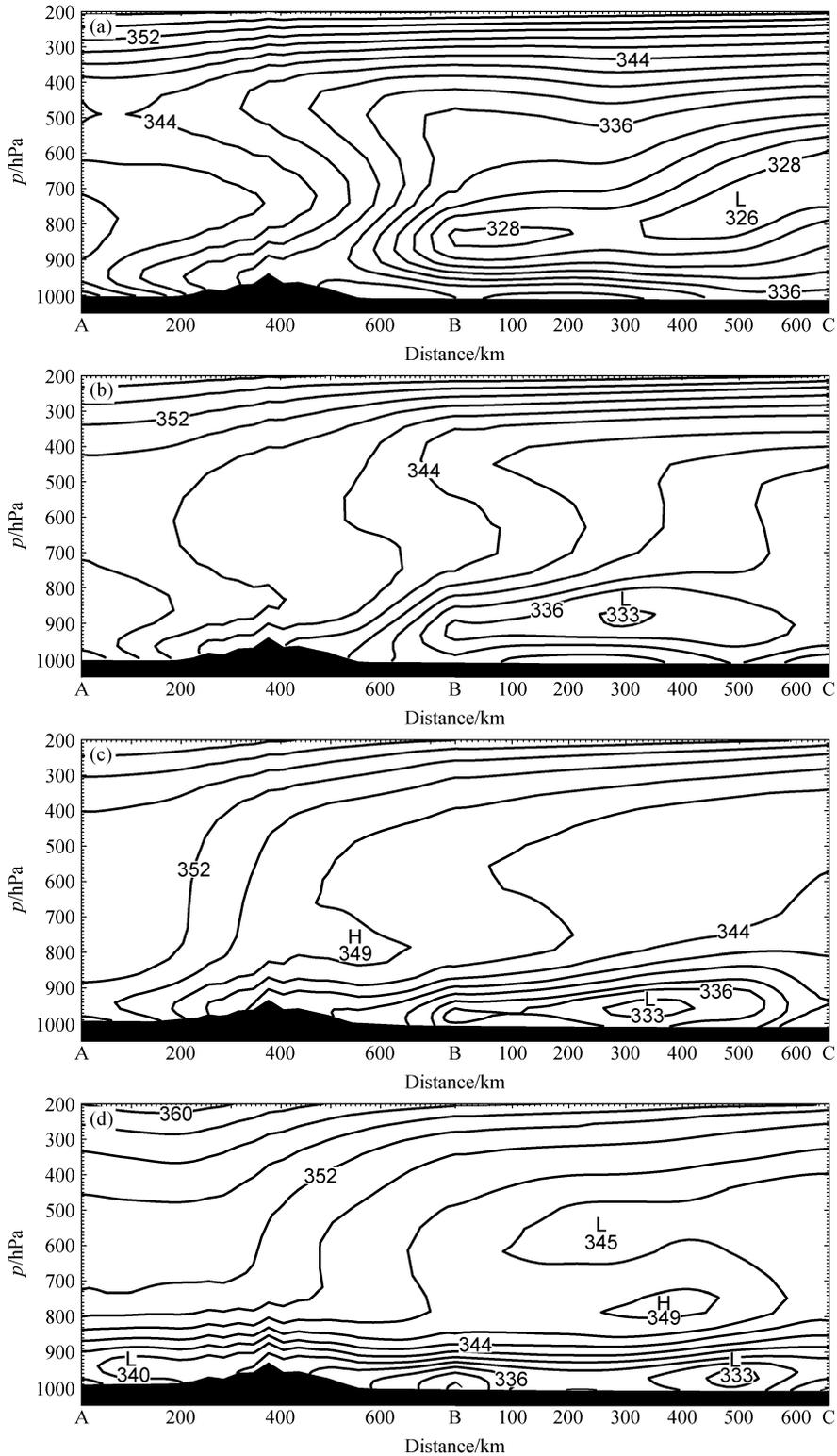


图 8 2007 年 9 月沿着能量锋的相当位温 (单位: K) 垂直剖面 (剖面位置如图 7 中 A-B-C 所示): (a) 17 日 20 时; (b) 18 日 04 时; (c) 18 日 12 时; (d) 18 日 20 时

Fig. 8 The cross sections of equivalent potential temperature (K) along energy front at (a) 2000 LST 17 Sep, (b) 0400 LST 18 Sep, (c) 1200 LST 18 Sep, (d) 2000 LST 18 Sep 2007. The position of cross line A - B - C could be seen in Fig. 7

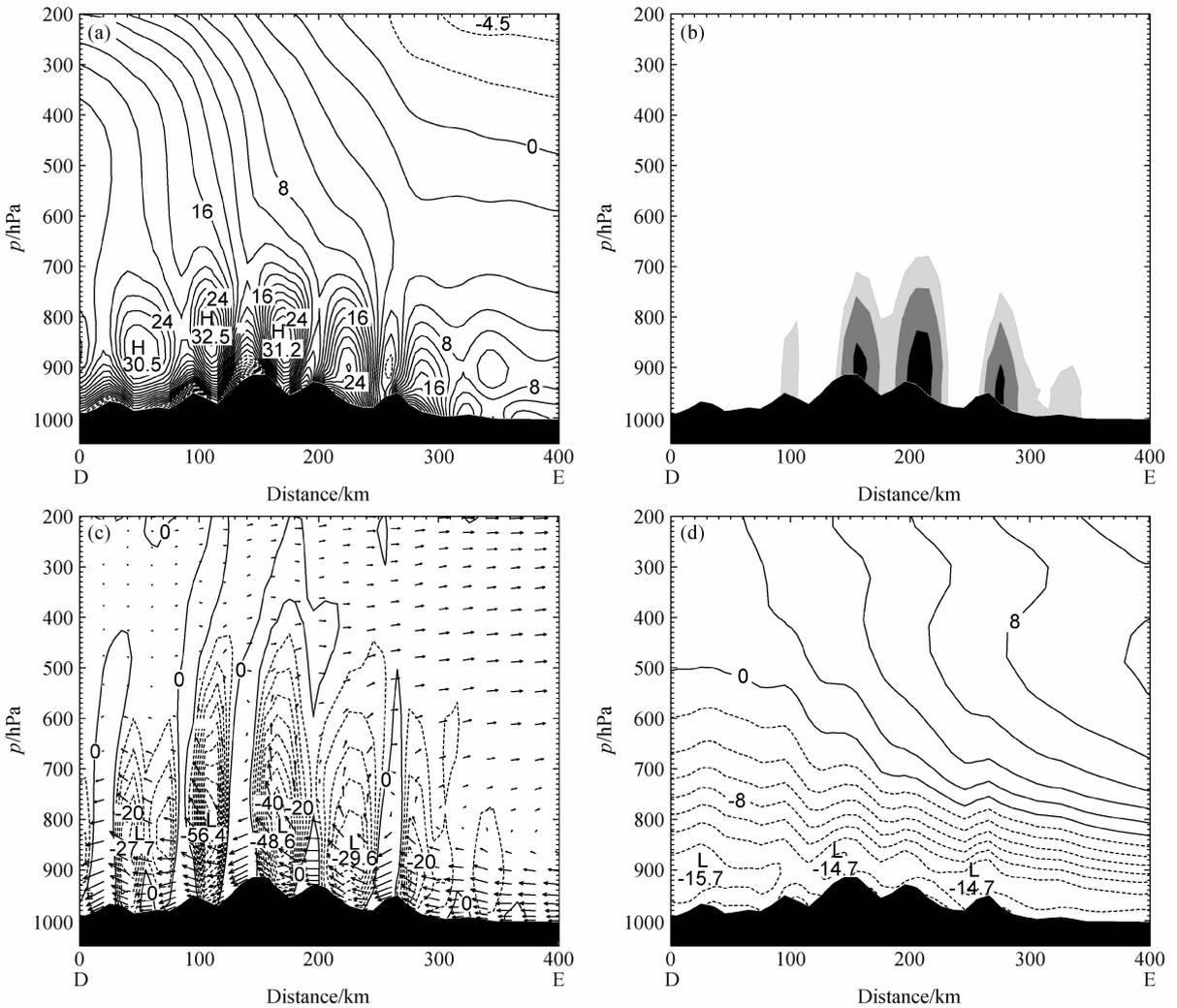


图9 2007年9月18日23时沿着能量锋在浙江沿海地区的垂直剖面(剖面位置如图7中D-E所示): (a) 相对涡度(单位: 10^{-5} s^{-1}); (b) 反射率(单位: dBZ); (c) 垂直速度(单位: 10^{-3} hPa/s); (d) 平行于剖面的风速(单位: m/s)
Fig. 9 Cross sections along energy front in the coastland of Zhejiang Province at 2300 LST 18 Sep 2007: (a) Simulated vorticity (10^{-5} s^{-1}); (b) simulated reflectivity (dBZ); (c) simulated vertical velocity (10^{-3} hPa/s); (d) wind speed parallel to the cross section (m/s). The position of cross line D-E could be seen in Fig. 7

对流的发展提供了动力条件和不稳定能量。

(3) 冷暖空气交汇在浙江沿海所产生的能量锋是对流系统发生最活跃的区域,也是主要降水区。沿着能量锋在对流层低层自北向南排列有多个中小尺度对流云团细胞,并一起构成了中尺度对流云带。随着台风登陆后向西北移动和北方弱冷空气的进一步侵入,对流云带的前部不断有新的对流云团细胞产生并向下游传播。

(4) 沿着能量锋上较强的风的垂直切变为对流云团的发展和维持提供了有利的环境场。同时北方弱冷空气侵入到低空,沿着近地面嵌入到暖湿空气的

底部,与有利的地形条件一起对暖湿气团起到了有力的抬升作用,触发了对流性天气的发生。

参考文献 (References)

Barnes G M, Zipser E J, Jorgensen D, et al. 1983. Mesoscale and convective structure of a hurricane rainband [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40: 2125-2137.
Betts A K. 1986. A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112: 677-691.
Betts A K, Miller M J. 1986. A new convective adjustment scheme.

- Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air - mass data Sets [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112: 693 - 709.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 491pp. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. An Introduction to Western Pacific Typhoons (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 491pp.
- Chen L S. 1995. An overview on tropical cyclones structure and structure change [C]. Proc. of WMO Second International Workshop on Tropical Cyclones, Geneva, Switzerland, WMO, No. 361, 52 - 62.
- Chen L S, Luo Z X. 1995. Effect of the interaction of different scale vortices on the structure and motion of typhoons [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 12: 207 - 214.
- 程正泉, 陈联寿, 徐祥德, 等. 2005. 近 10 年中国台风暴雨研究进展 [J]. *气象*, 31 (12): 3 - 9. Cheng Zhengquan, Chen Lianshou, Xu Xiangde, et al. 2005. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 31 (12): 3 - 9.
- Hong S Y, Dudhia J. 2003. Testing of a new nonlocal boundary layer vertical diffusion scheme in numerical weather prediction applications [C]. 20th conf. on Weather Analysis and Forecasting/16th conf. on Numerical Weather Prediction, Seattle, WA, Amer., Amer. Meteor. Soc.
- Janjić Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122: 927 - 945.
- 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 2007. 台风 Rananim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验 [J]. *大气科学*, 31 (2): 233 - 244. Ji Chunxiao, Xue Genyuan, Zhao Fang, et al. 2007. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of typhoon Rananim during landfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (2): 233 - 244.
- 寇媛媛, 沈桐立, 徐海明. 2009. 台风“卡努”的数值模拟与非对称结构的分析 [J]. *气象科学*, 29 (5): 606 - 610. Kou Yuanyuan, Shen Tongli, Xu Haiming. 2009. The numerical simulation of typhoon “Khanun” and analysis of non-symmetric structure [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 29 (5): 606 - 610.
- 梁必骥, 梁经萍, 温之平. 1995. 中国台风灾害及其影响的研究 [J]. *自然灾害学报*, 4 (1): 84 - 91. Liang Biji, Liang Jingping, Wen Zhiping. 1995. Study of typhoon disasters and its affects in China [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 4 (1): 84 - 91.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22: 1065 - 1092.
- Chen L S, Luo Z X. 2002. The impact of the eastward shifting of dipole systems over large-scale terrain on tropical cyclone tracks [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (6): 1069 - 1078
- 吕振平, 姚月伟. 2006. 浙江省台风灾害及应急机制建设 [J]. *灾害学*, 21 (3): 69 - 71. Lü Zhenping, Yao Yuewei. 2006. Typhoon disasters in Zhejiang province and the establishment of emergency responses mechanism [J]. *Journal of Catastrophology (in Chinese)*, 21 (3): 69 - 71.
- Meng Z Y, Nagata M, Chen L S. 1996. A numerical study on the formation and development of island-induced cyclone and its impact on typhoon structure change and motion [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 10: 430 - 443.
- Rutledge S A, Hobbs P V. 1984. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rainbands [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41: 2949 - 2972.
- Southern R L. 1979. The global socio-economic impact of tropical cyclones [J]. *Australian Meteorological Magazine*, 27: 175 - 195.
- Tao W K, Simpson J, McCumber M. 1989. An ice-water saturation adjustment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 231 - 235.
- 杨慧娟, 李宁, 雷飏. 2007. 我国沿海地区近 54a 台风灾害风险特征分析 [J]. *气象科学*, 27 (4): 413 - 418. Yang Huijuan, Li Ning, Lei Yang. 2007. Features of typhoon in southeast coastal regions of China in the recent 54 years [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 27: 413 - 418.
- 袁金南, 万齐林. 2003. 台风“玛姬”(9903)数值模拟试验 [J]. *热带气象学报*, 19 (3): 317 - 322. Yuan Jinnan, Wan Qilin. 2003. Numerical simulation experiments of the typhoon Maggie (9903) [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 19 (3): 317 - 322.
- 岳彩军. 2009. “海棠”台风降水非对称性分布特征成因的定量分析 [J]. *大气科学*, 33 (1): 51 - 70. Yue Caijun. 2009. A quantitative study of asymmetric characteristic genesis of precipitation associated with typhoon Haitang [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (1): 51 - 70.
- 周海光. 2010. 超强台风韦帕 (0713) 螺旋雨带中尺度结构双多普勒雷达研究 [J]. *大气科学学报*, 33 (3): 271 - 284. Zhou Haiguang. 2010. Mesoscale spiral rainband structure of super typhoon Wipha (0713) observed by dual-Doppler radar (in Chinese) [J]. *Trans. Atmos. Sci.*, 33 (3): 271 - 284.
- 周玲丽, 翟国庆, 王东法, 等. 2009. 0505 号“海棠”台风暴雨数值模拟试验和分析 [J]. *大气科学*, 33 (3): 83 - 94. Zhou Lingli, Zhai Guoqing, Wang Dongfa, et al. 2009. Numerical simulation and analysis of typhoon Haitang (0505) heavy rainfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (3): 83 - 94.
- 朱健, 罗律. 2009. 超强台风“韦帕”的暴雨机制及湿位涡分析 [J]. *气象科学*, 29 (6): 742 - 748. Zhu Jian, Luo Lü. 2009. The rainstorm mechanism and moist potential vorticity of typhoon Wipha [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 29 (6): 742 - 748.