

一次典型的大暴雨天气过程诊断分析

高晓梅¹, 王孝卿¹, 陈林祥², 宋晓楠¹, 崔建云¹, 王文波¹

1. 潍坊市气象局, 山东潍坊 261011

2. 诸城市气象局, 山东诸城 262200

摘要 利用常规观测资料对2008年7月18—19日山东潍坊出现的大暴雨天气过程进行诊断分析, 结果表明, 由于副高和贝加尔湖阻高的强大稳定, 西风槽不断引导弱冷空气向东南方向移动, 与沿台风北上的暖湿气流交汇, 使位于副高西侧的潍坊地区发生强降水。此次强降水过程出现在低空辐合、高空辐散的上升运动区中, 辐合层比较深厚。925hPa层是一关键层, 不但提供充沛的水汽, 而且该层较强的水汽辐合为大暴雨的产生提供了充足的水汽供应。正涡度中心区集中的时段, 与强降水最集中时段相对应。大暴雨出现在相当位温陡峭密集区内的略偏北一侧。此次强降水是在对流层低层强对流不稳定($MPV_1 < 0$)的条件下发生的。降水落区与低层正 MPV_2 分布相一致, 低层 MPV_2 的分布对暴雨落区的预报有较好的指示意义。

关键词 大暴雨; 诊断分析; 深厚辐合层; 湿位涡

中图分类号 P458

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.10.005

Diagnostic Analysis of a Heavy Rainstorm Process

GAO Xiaomei¹, WANG Xiaoqing¹, CHEN Linxiang², SONG Xiaonan¹, CUI Jianyun¹, WANG Wenbo¹

1. Weifang Meteorological Bureau, Weifang 261011, Shandong Province, China

2. Zhucheng Meteorological Bureau, Zhucheng 262200, Shandong Province, China

Abstract Based on the routine observational data, a diagnostic analysis is performed of the severe storm on 18—19 July 2008 in Weifang, Shandong Province. It is shown that the heavy storm is caused by the interaction between a weak cool front in the westerlies and the warm and wet air along the path of typhoon owing to the powerfulness and stability of the subtropical high and atmospheric blocking in Baikal. The southeast warm and wet air along the path of typhoon is the main vapour source of the rainstorm. The heavy rain occurs in the powerful updraft condition with convergence at low level and divergence at high level. The convergence layer is thick, which is the cause of heavy rain. The 925hPa layer is an important layer with respect to the event because of its role in supplying plentiful vapour. Concentrated period of time of positive vorticity center corresponds to the period of heavy rain, which is propitious to the development of convection. It occurred in the north of the very stiff and dense section of moist isentropes and in the low troposphere of strong convective instability ($MPV_1 < 0$). The region of positive MPV_2 at low level has a very good correlation with the location of rainstorm. The distribution of MPV_2 at low level may provide a good indicator for the forecast of rainstorm region.

Keywords heavy rainstorm; diagnostic analysis; thick convergence layer; moist potential vorticity

0 引言

暴雨是引发中国自然灾害的主要天气现象之一, 许多暴雨是在特定的大尺度环流背景下, 由各种尺度的系统相互作用而造成的^[1-2]。早在20世纪70年代, 朱乾根等的《天气学原理和方法》^[3]一书就对中国暴雨过程发生的宏微观物理条件, 各种天气尺度系统与暴雨的关系, 以及暴雨的分析和预报方

法进行了全面总结。近十几年来, 随着精细化预报技术的加强和自动化仪器的使用, 在暴雨的发生、发展和移动变化规律等方面取得了令人瞩目的成果。赵宇等^[4]应用湿位涡理论对2003年4月发生在山东境内的一次罕见的暴雨过程进行了诊断分析, 有助于增进对气旋和暴雨的发生发展及演变机制的认识。裴丽丝^[5]对强对流的分析表明, 中低层切变线和地

收稿日期: 2010-08-20; 修回日期: 2011-03-12

作者简介: 高晓梅, 高级工程师, 研究方向为天气与气候预报分析, 电子信箱: wfmeizi@126.com

面低压槽造成的多单体风暴一般是在中到强的垂直风切变情况下发展起来的。李韬等^[6]分析指出,850hPa假相等位温大值区、700hPa强烈的上升运动,以及低空辐合、高空辐散有利于暴雨过程的发生。周丽峰^[7]等对大暴雨天气过程分析发现,两次大暴雨都发生中高纬十分稳定的环流形势下,由于有弱冷空气侵入触发了不稳定能量释放,更有利于暴雨的产生和形成。在实际业务中,对某一地区暴雨发生发展的规律和机制认识仍有许多未解因素,因此加强对本地的暴雨研究有非常重要的意义。

2008年7月17—20日,受高空西风槽、低层切变线、0807号台风(海鸥)和地面倒槽的共同影响,山东省出现了一次明显的持续性强降水天气过程,暴雨区主要集中出现在鲁中—半岛一带。从18日下午至19日08:00,潍坊市出现了暴雨局部大暴雨天气过程,全市过程平均降水量为130.8mm,4个县日降大暴雨,其中安丘市12h内降水量达到184.4mm,过程降水量达到240.0mm。此次暴雨过程是2008年潍坊地区最强的一次降水过程,形成的洪涝灾害造成的损失重大。本文将就此次大暴雨天气过程特征和成因进行诊断分析和研究,以期为进一步做好大暴雨预报提供重要的指示依据。

1 环流形势分析

在2008年7月17日08:00 500hPa图(图略)上,欧亚高纬度地区,贝加尔湖阻高和东北冷涡比较稳定。中低纬度地区,在河套地区有一西风槽维持。副热带高压位于日本南部,山东处于副高西北边缘。7号台风位于台湾以东洋面。17日20:00副高位置较稳定,切变线南压,西风槽向东北方向移动,高层水汽接近饱和,西南气流明显加强,济南风速达到20m/s,河北—山东出现风速辐合区。18日08:00 500hPa图(图1(a))上,副热带高压西伸至中国东部沿海,西风槽东移加深,槽前西南风速加大,西南急流加强到达鲁中地区,为潍坊地区暴雨的形成提供了较好的水汽通道。7号台风在台湾海峡附近北上,处在副高和西风槽之间的偏南气流里。18日20:00—19日08:00,7号台风在福建登陆北上,台风外围水汽沿东南急流北上到潍坊地区,为该地暴雨的形成提供了充足的水汽。正是由于副高和贝加尔湖阻高的强大稳定,西风槽不断引导弱冷空气向东南方向移动,与台风北上输送的暖湿气流交汇,使位于副高西侧的潍坊地区发生强降水。

17日08:00 700hPa图(图略),在河套有低槽东移,在半岛北部渤海湾地区有一西南—东北向风向切变线,鲁中和半岛北部地区位于切变线南部西南气流中,有利于弱对流的发生。20:00在河套东侧形成闭合低涡中心,涡前出现 $>12\text{m/s}$ 的西南低空急流,低涡内有切变分别向东北和西南方向伸展。18日08:00(图1(b))切变线东移,低涡在高层引导气流的引导下东移到华北南部和黄淮地区,低涡前部西南急流加强,不断向山东输送暖湿空气,为潍坊地区暴雨的产生提供了良好的水汽条件。

低层850hPa图上,17日08:00在河套以东地区有切变向

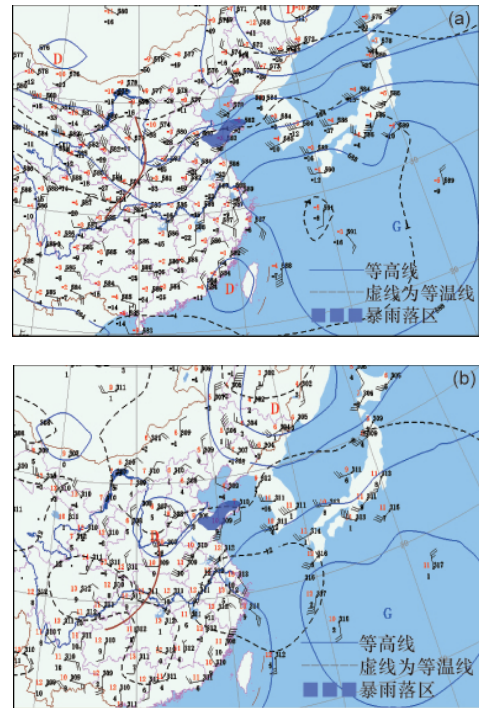


图1 2008年7月18日08:00 500hPa(a)和700hPa(b)高空图

Fig. 1 Upper-air chart at the level of 500hPa (a) and 700hPa (b) at 08:00 on 18 July 2008

东伸展,济南和徐州站吹对头风,有辐合存在,有利于上升运动,高湿区已到达豫皖边境。20:00有明显切变位于鲁中,并引导冷空气从低层侵入,湿度条件较好。18日08:00,低涡已移至鲁西南,涡前切变线在山东与江苏交界附近,受台风影响,切变线北抬东移,强降水主要出现在700hPa与850hPa切变线之间,即鲁中地区至半岛附近。

17日08:00—20:00地面图上,华北西部至河套一带和海上各维持一高压,东北、江南和华南一带都有低压系统存在,山东处在一鞍型场中。23:00地面倒槽形成,向东北方向移动。18日08:00—19日08:00,地面倒槽稳定维持在鲁中一带,这正是潍坊地区降水最集中的时段,暴雨正发生在倒槽顶端辐合区范围内。

2 物理量场分析

2.1 水汽条件分析

产生大暴雨的条件是大气中必须具备充分的水汽通量和充足的水汽供应^[8]。水汽通量的水平分布能揭示暴雨的水汽来源和主要水汽通道^[9]。从18日20:00水汽通量图可知,850hPa(图2(a))有两支水汽输送带,一支来自南海的沿台风北上的东南暖湿气流;另一支则来自孟加拉湾地区的西南气流。西南—东北向的水汽通量值区从四川一直延伸至山东,暴雨区水汽通量值为 $12\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。700hPa与其类似。925hPa(图2(b))的水汽主要来自南海的东南气流,暴雨区水汽通量值达 $22\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,充沛的水汽自南海、孟加拉湾

输送到潍坊地区,为暴雨产生提供了有利条件。从 18 日 20:00 各层水汽通量(图 2(c))看,水汽通量主要在 500hPa 以下,大值中心集中在 900—950hPa,即来自南海沿台风北上的东南

暖湿气流是此次暴雨最主要的水汽输送带。由于这个水汽通量大值是向西北方向输送,使潍坊上空的水汽通量不断加大,为强暴雨提供了充沛的水汽。

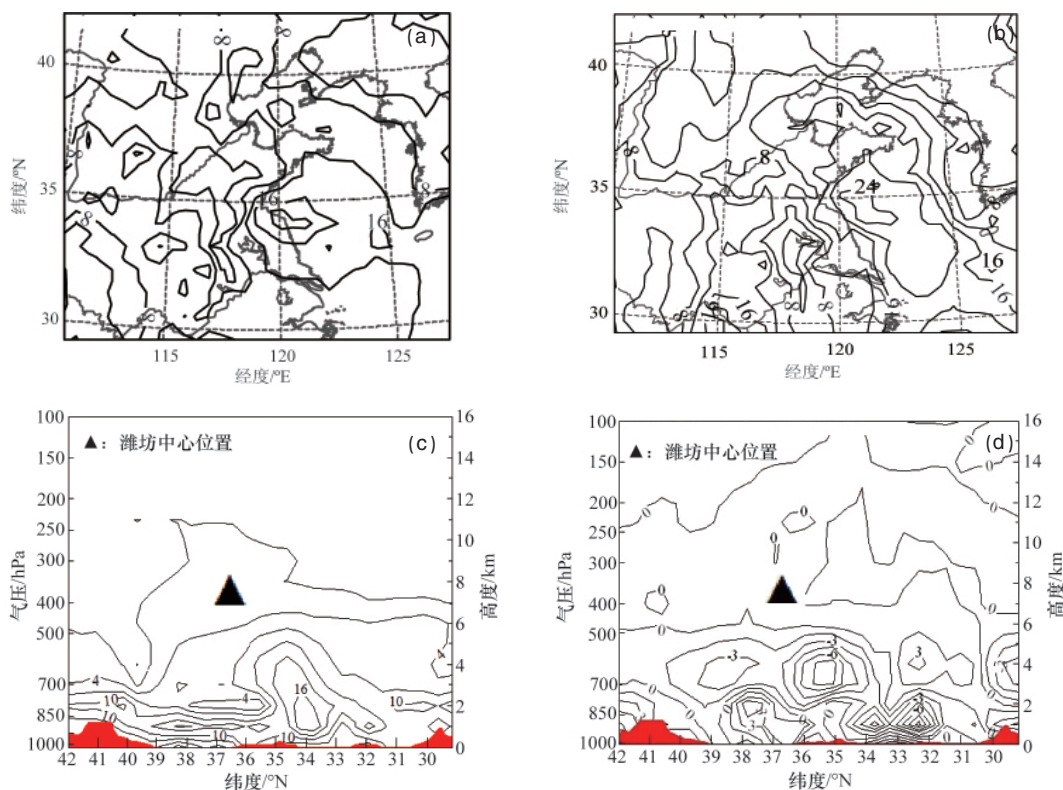


图 2 2008 年 7 月 18 日 20:00 水汽通量(a,b),水汽通量剖面(c,单位: $10^{-7}g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)和 19 日 08:00 沿 119°E 水汽通量散度(d,单位: $10^{-7}g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)剖面图

Fig. 2 Vapour flux (a, b) and cross-section of vapour flux (c, unit: $10^{-7}g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$) at 20:00 and cross-section of vapour flux divergence (d, unit: $10^{-7}g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$) at 08:00 along 119°E on 18 July 2008

从各层的水汽通量散度来看,17 日 08:00 潍坊暴雨区基本无水汽通量辐合,20:00 600hPa 以上有水汽通量辐合,但量值不大。18 日 08:00(图 2(d))潍坊暴雨区 700hPa 以下水汽通量散度为正值,700—500hPa 为负值,辐合中心在 600hPa,量值为 $-3 \times 10^{-7}g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$,水汽强辐合中心在暴雨区的西侧。18 日 20:00 925hPa 为水汽通量散度辐合中心,量值仍为 $-3 \times 10^{-7}g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$,与潍坊暴雨区对应。925hPa 水汽强辐合表明超低空偏东南气流带来的 7 号台风外围的水汽是潍坊大暴雨的贡献者,但 700hPa 以上基本无水汽辐合,即中高层对此次暴雨贡献不大。19 日 08:00 600hPa 以下为水汽通量辐合中心,水汽强辐合中心在潍坊暴雨区东侧,即辐合中心东移,850hPa 为强辐合中心,量值为 $-6 \times 10^{-7}g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ 。这与潍坊暴雨主要集中时段相对应。由此可以看出,925hPa 层是一关键层,不但为强暴雨提供了充沛的水汽,而且其较强的水汽辐合为大暴雨的产生提供了充足的水汽供应。

2.2 涡度场和散度场分析

从高空各层涡度场可以看出,17 日 08:00—20:00,济南以西 500hPa 以下为正涡度区控制,500hPa 以上为负涡度区。潍坊地区为负涡度区。18 日 08:00,正涡度区中心略有东移,

500hPa 以下潍坊地区在零值附近,500hPa 以上为负涡度区,到 18 日 20:00(图 3(a)),潍坊地区上空 300hPa 以下为正涡度中心区,在 800hPa 量值最大,为 $5 \times 10^{-5}s^{-1}$ 。19 日 08:00(图 3(b)),潍坊地区 300hPa 以下依然为正涡度区,涡度中心值加大,最大量值在 850hPa,为 $(6-7) \times 10^{-5}s^{-1}$ 。正涡度中心区集中在 18 日 20:00—19 日 08:00,正是潍坊降水最集中的时段,而且正涡度值上升到 300hPa 高度,有利于对流的发展。

17 日 08:00 潍坊地区 850hPa 以下为辐合区,最强辐合在近地层,400hPa 以上为辐散层,中间层辐合辐散较弱。20:00 时,高空各层辐合辐散都较弱。18 日 08:00(图略),潍坊暴雨区上空 850—400hPa 为辐合区,最强辐合在 700hPa 层,量值为 $-25 \times 10^{-5}s^{-1}$,400hPa 以上为辐散区,强辐散中心在 200hPa,量值为 $55 \times 10^{-5}s^{-1}$ 。18 日 20:00(图 3(c)),高低层分布依然与 08:00 一致,但辐合辐散中心值有所减小。19 日 08:00(图 3(d)),500hPa 以下为辐合区,潍坊暴雨区为强辐合区,最强辐合在 925hPa 层,量值为 $(-28-30) \times 10^{-5}s^{-1}$,500hPa 以上为辐散区,强辐散中心在 250hPa,量值为 $32 \times 10^{-5}s^{-1}$,比 18 日 20:00 有所增大,可见,低层辐合高层辐散在 18 日 20:00—19 日 08:00 时段是不断增强的,而且此次天气过程辐合层上升到 500hPa

高度,说明辐合层较深厚,这也是此次降水出现大暴雨的原因之一。文献[6]指出,要有强而持续的上升运动,单有低层的辐合流场是不够的,还必须在高层有一个辐散流场,而且其辐散量大于或等于低层的辐合量(由图可见,本次天气过程

高空辐散强于低空辐合)。可见高层大气的辐散是维持和加强低层辐合上升运动不可缺少的条件。从此次散度场的变化可看出,这次强降水过程是出现在低空辐合、高空辐散的深厚上升运动区中。

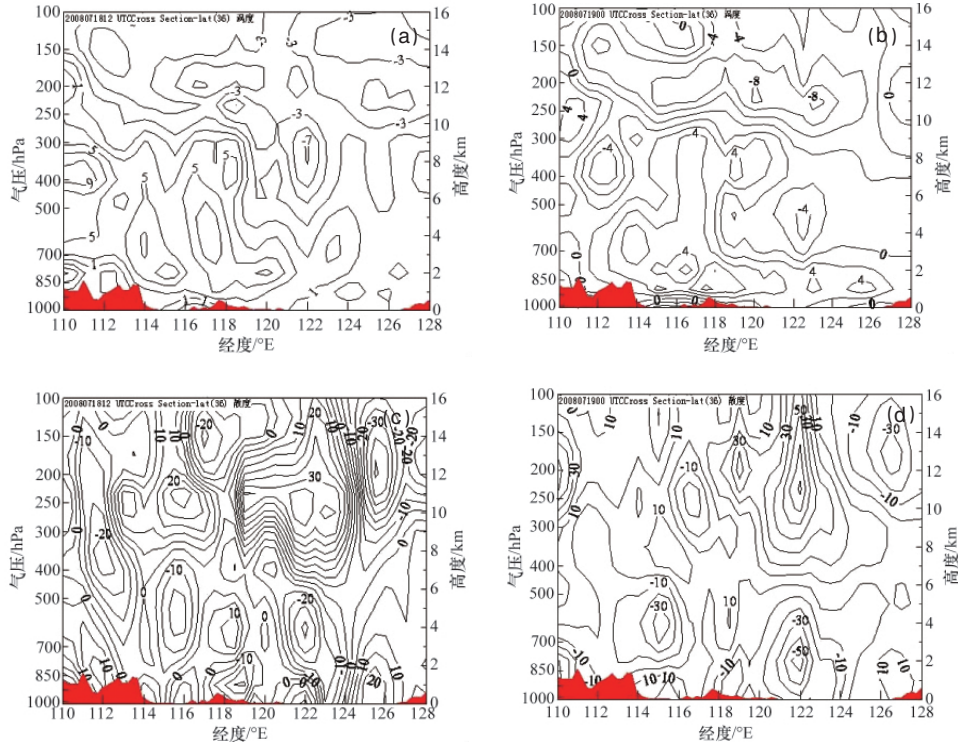


图3 2008年7月18日20:00、19日08:00沿36°N的涡度(a、b,单位:10⁻⁵s⁻¹)和散度(c、d,单位:10⁻⁵s⁻¹)剖面图
Fig. 3 Cross-sections of vorticity (a and b, unit: 10⁻⁵s⁻¹) and the divergence (c and d, unit: 10⁻⁵s⁻¹) at 20:00 and 08:00 along 36°N on 18—19 July 2008

2.3 上升运动分析

从高空各层垂直速度可以看出,7月17日08:00—20:00潍坊地区上空500hPa以下上升运动速度为正值,这种下沉运动有利于强降水发生前对流不稳定层结能量的积累。18日08:00(图略),暴雨区上空上升速度转变为负值,上升运动主要发生在850—150hPa,最大速度位于400—500hPa,量值为-28×10⁻³hPa·s⁻¹。18日20:00潍坊地区上空普遍为上升气流,最大速度位于400hPa,量值为-16×10⁻³hPa·s⁻¹。19日08:00时,该上空仍为一致的上升气流,但强度明显减弱。通过对垂直速度的分析可以看出,此次强降水过程发生前上升运动较强烈,并以400—500hPa上升的速度最大。

2.4 湿位涡诊断分析

湿位涡综合反映了大气的热力和动力特征,分析湿位的变化可以了解形成暴雨的热力和动力条件及低层垂直涡度的发展机制,能更有效地显示暴雨天气系统的一些特点,广泛应用于暴雨和其他天气系统的诊断^[9]。在p坐标系中,忽略垂直速度的水平变化,引进静力近似,湿位涡表达式^[10]为

$$MPV = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta_e}{\partial y}$$

其中, ζ 为p坐标系垂直涡度, f 为地转涡度, p 为压力, g 为重

力加速度, θ_e 为相当位温, u, v 分别为x轴和y轴方向的速度。第一项为湿正压项 MPV_1 ,表示惯性稳定性和对流稳定性的作用,负值表示对流不稳定;第二项为湿斜压项 MPV_2 :包含了湿斜压性(θ_e 水平梯度)和水平风垂直切变(水平涡度)的贡献。湿位涡单位为PVU,1PVU=10⁻⁶m²·K·s⁻¹·kg⁻¹。

2.4.1 相当位温分析

图4为此次暴雨过程沿119°E(过潍坊)所作的 θ_e 的经向垂直剖面。可以看出,暴雨落区在36°N—37°N,暴雨产生前的18日08:00(图4(a)),暴雨区南侧的暖湿空气与北侧的干冷空气在暴雨区的北部形成了等 θ_e 线密集区,此密集区随高度向南倾斜,等 θ_e 线比较陡立,暴雨区925hPa以下为对流稳定区,925—500hPa之间为对流不稳定区。18日20:00(图4(b)),700—925hPa有一浅薄冷舌侵入对流不稳定区,造成大气位势不稳定,产生对流性降水,同时等 θ_e 线密集区东移南压,925—500hPa等 θ_e 线变得十分陡立,几乎与等压面垂直,说明对流层低层的对流稳定度变得很小, $\partial \theta_e / \partial p \approx 0$ 。当等熵面与等压面近似平行时,湿位涡的正压项是湿位涡的主要部分,为保持湿位涡的守恒^[11],低层对流稳定度的减小会导致对流层低层气旋性涡度的显著增长,而925hPa以下为对流稳定区,超低空浅薄对流稳定区的存在有利于低层大气的增暖,

925hPa 以上的对流不稳定区有利于湿空气在不稳定层上升绝热冷却,有利于上升运动发展,从而有利于暴雨的产生,实况强降水产生在 θ_e 线陡峭密集区内略偏北一侧。19 日 08:00 (图略), 等 θ_e 线密集区南压到 36°N 以南, 潍坊地区降水结

束。可见,潍坊地区此次暴雨出现在 θ_e 陡峭密集区内的略偏北一侧, θ_e 陡峭密集区是西风槽引导东移南下的冷空气与台风北上的暖湿对流不稳定空气交汇形成的, θ_e 陡峭密集区附近易导致湿斜压涡度发展。

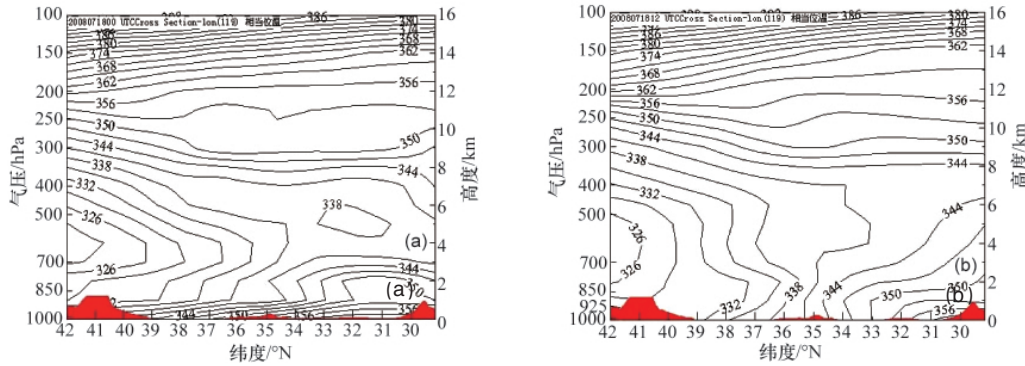


图 4 2008 年 7 月 18 日 08:00(a)和 20:00(b)沿 119°E 的 θ_e 垂直剖面图(单位:K)

Fig. 4 Cross-sections of θ_e along 119°E at 08:00 (a) and 20:00 (b) on 18 July 2008 (unit: K)

2.4.2 湿正压项和湿斜压项分析

图 5 是沿 36°N 的此次暴雨的 MPV_1 纬向垂直剖面图,暴雨落区为 119°E—120°E。暴雨发生前 17 日 20:00(图略), 对流层中高层为 MPV_1 正值区,即为对流稳定区,说明高层有冷空气的活动,对应的是西风槽。高值正 MPV_1 区呈漏斗形向下伸展至暴雨区西侧,850hPa 以下为弱 MPV_1 负值区,即处于弱的对流不稳定状态。此次暴雨发生前 6h,18 日 08:00 (图 5 (a)), 在 700—850hPa 有正 MPV_1 中心,即对流层中层有一小

股非常浅薄的相对较干冷的空气(0.4PVU)向东南方向移动, 850hPa 层以下暴雨区对流不稳定度明显增强, 转为较强的 MPV_1 负值(-1.0PVU)区控制,中心在鲁西,为-1.2PVU,中层弱冷空气与低层负值 MPV_1 相互作用, 弱冷空气通过降低低层稳定性和在低层形成冷垫强迫较暖空气抬升,导致对流不稳定能量及潜热能的释放,有利于暴雨产生。18 日 20:00(图 5 (b)),暴雨区负值 MPV_1 强度减弱,为-0.2PVU,潍坊强降水出现在 18 日 20:00 以后, 即对流层低层出现 MPV_1 峰区时段与

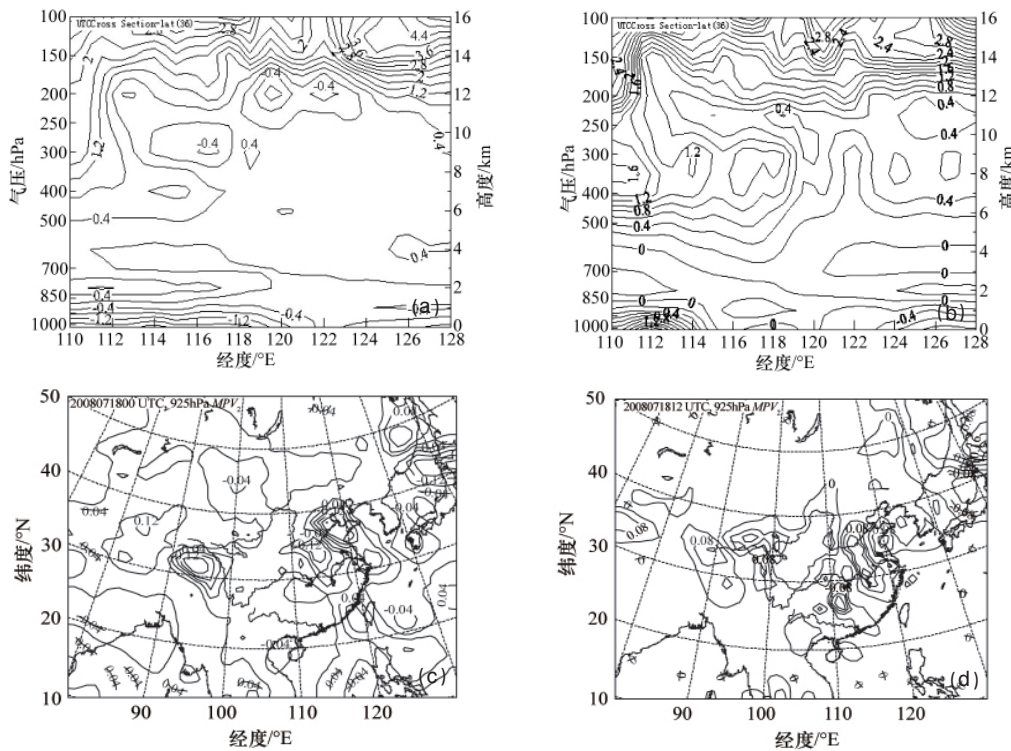


图 5 2008 年 7 月 18 日 08:00、20:00 沿 36°N 的湿正压项 MPV_1 (a、b)的垂直剖面图和 925hPa MPV_2 分布(c、d,单位:PVU)

Fig. 5 Cross-sections of MPV_1 (a, b) along 36°N and the distribution of MPV_2 (c and d, unit: PVU) at the level of 925hPa at 08:00 and 20:00 on 18 July 2008

地面降水的强盛期不太对应,地面降水的强盛期要滞后些。这主要因为大范围的冷空气是从对流层中低层进入对流不稳定区的,冷空气的持续入侵使得低层 MPV_1 的绝对值剧减,导致地面降水的强盛期滞后。其次由于降水的产生,不稳定能量的释放,使得负值 MPV_1 强度减弱。19日 08:00, MPV_1 负值区东移到半岛地区(图略),潍坊地区暴雨结束。可见,此次暴雨是在对流层低层强对流不稳定($MPV_1 < 0$)的条件下发生的。暴雨前期 850hPa 以下 $MPV_1 < 0$ 的演变,反映了暴雨区对流不稳定的增强。

从 925hPa MPV_2 的演变可以看出,7月17日 20:00 鲁中地区为负值 MPV_2 控制,数值约 $-0.05PVU$ 。18日 08:00(图 5(c)),全省都转为正值 MPV_2 控制,东南—西北向的 MPV_2 正值区从东南沿海经江苏东部直伸向山东境内,反映了超低空东南急流的形成过程。因为 18日 08:00 925hPa 已经形成了较强的东南风急流,这说明随着台风的逐渐靠近,台风外围暖湿空气输送强劲,垂直风切变加大($\partial u/\partial p < 0, \partial v/\partial p < 0$),同时西风槽后的冷空气与台风两个不同热力性质系统间的靠近使得 $\partial \theta_e/\partial y < 0, \partial \theta_e/\partial x > 0$, 并且 $|\partial \theta_e/\partial y| > |\partial \theta_e/\partial x|, \partial \theta_e/\partial y$ 占据主导地位,致使 $MPV_2 > 0$, 山东开始有较强的正 MPV_2 带维持,中心在鲁西北,为 $0.16PVU$ 。18日 20:00(图 5(d)), MPV_2 正值区继续向山东输送,鲁中及鲁东南形成 MPV_2 密集区,随着台风的登陆北上,鲁中地区在超低空 925hPa 上形成 MPV_2 为 $0.10PVU$ 的中心,说明超低空有明显的暖湿气流活动,持续的暖湿气流的输送使得湿斜压不稳定能量猛增,为暴雨的产生提供了必要条件,降水强度最大的落点就发生在台风西北侧的鲁中及鲁东南地区。19日 08:00,随着冷空气的东移南下,台风登陆后低层暖湿气流不断减弱, MPV_2 减小为弱的正值,降水减弱明显。降水落区与低层正 MPV_2 分布相一致,这与文献[12]—[13]的分析结果一致,即低层 MPV_2 的分布对暴雨落区的预报有较好的指示意义。

3 结论

针对 2008 年 7 月 17—20 日,受高空西风槽、低层切变线、0807 号台风和地面倒槽共同影响,山东省的一次明显持续性强降水天气过程,本文就其大暴雨天气过程特征和成因进行诊断分析和研究,得到结果如下。

(1) 副高和贝加尔湖阻高的强大稳定,西风槽东移不断引导弱冷空气向东南方向移动,与台风北上输送的暖湿气流交汇,使位于副高西侧的潍坊地区发生强降水。低涡前部有较强西南急流出现,不断向鲁中输送暖湿空气,为潍坊地区暴雨的产生提供了良好的水汽条件。

(2) 水汽通量大值中心集中在 900—950hPa,即沿台风北上的东南暖湿气流是此次暴雨的最主要水汽来源。925hPa 层是一关键层,不但为此次暴雨提供了充沛的水汽,而且该层较强的水汽辐合为大暴雨的产生提供了充足的水汽供应。

(3) 正涡度中心区集中的时段,正是潍坊降水最集中的时段,且正涡度值上升到 300hPa 高度,有利于对流的发展。辐合层较深厚,是出现大暴雨的原因之一。此次强降水过程

出现在低空辐合、高空辐散的深厚上升运动区中。

(4) 大暴雨出现在 θ_e 陡峭密集区内的略偏北一侧, θ_e 陡峭密集区附近易导致湿斜压涡度发展。此次暴雨是在对流层低层强对流不稳定 ($MPV_1 < 0$) 的条件下发生的。暴雨前期 850hPa 以下 $MPV_1 < 0$ 的演变,反映了暴雨区对流不稳定的增强。降水落区与低层正 MPV_2 分布相一致,低层 MPV_2 的分布对暴雨落区的预报有较好的指示意义。

参考文献 (References)

- [1] 杜青文,任荣彩,康锡言,等. “96.8”河北特大暴雨地面中尺度系统分析[J]. 气象, 1999, 25(7): 25-29.
Du Qingwen, Ren Rongcai, Kang Xiyan, et al. *Meteorological Monthly*, 1999, 25(7): 25-29.
- [2] 王川,寿绍文. 一次青藏高原东侧大暴雨过程的诊断分析 [J]. 气象, 2003, 29(7): 7-12.
Wang Chuan, Shou Shaowen. *Meteorological Monthly*, 2003, 29(7): 7-12.
- [3] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理与方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2000: 320-321.
Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. *Principles and methods of weather* [M]. Beijing: Chinese Meteorology Press, 2000: 320-321.
- [4] 赵宇,张兴强,杨晓霞. 山东春季一次罕见暴雨天气的湿位涡分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(6): 836-843.
Zhao Yu, Zhang Xingqiang, Yang Xiaoxia. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2004, 27(6): 836-843.
- [5] 裴丽丝. 一次多单体风暴和弓形回波过程的多普勒雷达探测特征研究[J]. 科技导报, 2006, 24(9): 13-15.
Pei Lisi. *Science & Technology Review*, 2006, 24(9): 13-15.
- [6] 李韬,周淑玲,刘澈,等. 黄河下游春季一次大暴雨过程的结构特征及落区分析[J]. 科技导报, 2006, 24(9): 21-24.
Li Tao, Zhou Shuling, Liu Che, et al. *Science & Technology Review*, 2006, 24(9): 21-24.
- [7] 周丽峰. 0604 号强热带风暴“碧丽斯”演变特征及灾害成因初步研究 [J]. 科技导报, 2006, 24(9): 16-20.
Zhou Lifeng. *Science & Technology Review*, 2006, 24(9): 16-20.
- [8] 曹钢锋,张善君,朱官忠,等. 山东天气分析与预报 [M]. 北京: 气象出版社, 1988: 161-163.
Cao Gangfeng, Zhang Shanjun, Zhu Guanzhong, et al. *Weather analysis and forecast in Shandong Province* [M]. Beijing: Chinese Meteorology Press, 1988: 161-163.
- [9] 杨晓霞,万丰,刘还珠,等. 山东春秋暴雨天气的环流特征和形成机制初探[J]. 应用气象学报, 2006, 17(2): 183-191.
Yang Xiaoxia, Wan Feng, Liu Huanzhu, et al. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(2): 183-191.
- [10] 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): 387-404.
Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 53(4): 387-404.
- [11] 谷文龙,王咏清,李春虎. 台风碧丽斯的位涡场分析 [J]. 山东气象, 2007, 27(4): 1-5.
Gu Wenlong, Wang Yongqing, Li Chunhu. *Journal of Shandong Meteorology*, 2007, 27(4): 1-5.
- [12] 赵宇,杨晓霞,孙兴池. 影响山东的台风暴雨天气的湿位涡诊断分析 [J]. 气象, 2004, 30(4): 15-20.
Zhao Yu, Yang Xiaoxia, Sun Xingchi. *Meteorological Monthly*, 2004, 30(4): 15-20.
- [13] 刘还珠,张绍晴. 湿位涡与锋面强降水天气的三维结构[J]. 应用气象学报, 1996, 7(3): 275-286.
Liu Huanzhu, Zhang Shaoqing. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1996, 7(3): 275-286.

(责任编辑 朱宇)