

梁生俊, 王培, 高守亭. 2013. 一次陕西初夏暴雨过程的数值模拟及诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (1): 12–22, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10144. Liang Shengjun, Wang Pei, Gao Shouting. 2013. Numerical simulation and diagnostic analysis of rainstorm over Shaanxi Province during early summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 12–22.

一次陕西初夏暴雨过程的数值模拟及诊断分析

梁生俊^{1,2,3} 王培^{2,4} 高守亭²

1 中国科学院大学, 北京 100049

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 陕西省气象台, 西安 710014

4 南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 利用常规观测资料、陕西地面加密观测资料和 NCEP 再分析资料对 2006 年 6 月 2 日 00:00 (协调世界时, 下同) 至 3 日 12:00 陕西中部初夏的一次区域突发性暴雨进行了数值模拟和综合分析。结果表明受 500 hPa 冷涡底部短波槽、700 hPa 切变线和地面偏东风气流的共同作用造成这次突发性区域性暴雨。模式结果与实况降水情况基本一致, 24 h 降水模拟能够很好地体现暴雨过程的中心位置, 暴雨区域的主要范围和暴雨形势的走向。垂直运动场和降水区对应较好。通过对位涡的分析可得到, 此次暴雨过程中有一股很强的干冷空气从对流层顶向下传播, 这种强干侵入的形式有利于强降水的生成。广义位温和对流涡度矢量异常的分布和垂直变化很好地反映了陕西这次暴雨过程的落区及其演变, 并且对本次暴雨的预报有较好的预报指示意义。

关键词 初夏暴雨 数值模拟 对流涡度矢量

文章编号 1006-9585 (2013) 01-0012-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10144

Numerical Simulation and Diagnostic Analysis of Rainstorm over Shaanxi Province during Early Summer

LIANG Shengjun^{1,2,3}, WANG Pei^{2,4}, and GAO Shouting²

1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

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

3 Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710014

4 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract The distribution of annual precipitation, which is affected by mountainous terrain, decreases from south to north in Shaanxi Province. Annual precipitation is 400–600 mm in northern Shaanxi and approximately 500–700 mm in Guanzhong. In the south, however, annual precipitation is 700–900 mm. In the Micang, Daba, and Qinling mountains of southern Shaanxi, as well as in the western mountains areas, annual precipitation reaches 900–1250 mm. In addition, this precipitation exhibits significant seasonal variation. Precipitation is significantly higher in summer than in other seasons, accounting for 39% to 64% of the entire annual precipitation, and is concentrated in northern Shaanxi. In early summer before late June to early July, heavy rainfall gathers in southern Shaanxi. Due to the sudden increase in local precipitation, rainfall prediction is difficult. The case of a heavy rainfall event occurring in southern Shaanxi and Guangdong during 2–3

收稿日期 2010-11-11 收到, 2012-10-15 收到修定稿

资助项目 中国科学院重点部署项目 KZZ-EW-05-01, 国家自然科学基金 40930950

作者简介 梁生俊, 男, 1964 年出生, 高工, 主要从事天气预报理论与方法研究。E-mail: liangsj309@sina.com

通讯作者 王培, E-mail: wangpei6@gmail.com

Jun 2006 is examined. Data was acquired through a variety sources including observation analysis, numerical simulation, and diagnosis analysis.

The effects of a short-wave trough at the bottom of a cold eddy at 500 hPa, a shear line at 700 hPa, and a surface easterly are examined. The main factor triggering this storm was a sudden increase in the southeastward jet at 925 hPa and 850 hPa in the low troposphere. The process of this storm was simulated by the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The results are essentially consistent with the actual precipitation values. The heavy rain area, the center of maximum precipitation, and vertical velocity are consistent with the observations. Moreover, present value potential vorticity analysis indicates that a very strong cold dry air mass propagating from the top of troposphere in this heavy rainfall process promoted the formation of severe precipitation. The change in vertical velocity and the general potential temperature and distribution of the abnormal convective vorticity vector (CVV), which were all obtained through simulation, accurately reproduce the area and changes in heavy rainfall. These three quantities demonstrate accuracy in forecasting the storm. Therefore, the CCV could be applied to forecast rainfall in Shaanxi Province.

Keywords Torrential rain during the early summer, Numerical simulation, Convective vorticity vector

1 引言

我国受亚洲夏季风影响, 每年的降水多少变化很大。夏季风爆发和盛行期间是中国的雨季或汛期, 也是我国的暴雨季节, 极易发生旱涝灾害。如建国以来, 1954、1963、1991、1998 年发生在中国不同区域的特大暴雨给国民经济带来了重大的损失, 造成严重的人口伤亡, 引起世界瞩目。所以暴雨的研究和预报一直受到中国政府和气象部门的高度重视。陶诗言等 (1979)、陶诗言 (1980) 最早全面总结了我国暴雨过程发生的宏观物理条件, 各种天气尺度系统与暴雨的关系以及我国暴雨的分析和预报方法。此后, 气象工作者对暴雨进行大量研究, 取得许多成果 (雷雨顺, 1981; 张丙辰, 1990; 丁一汇等, 1993; 赵思雄, 1998; 张庆云等, 2001; 高守亭等, 2003; 张小玲等, 2004)。

随着中尺度数值模式的发展与模拟结果可靠性的提高, 通过数值模拟方法可以得到更高时空分辨率的模拟资料, 因此数值模拟的方法在中尺度系统研究中得到广泛应用。李琨等 (2005) 通过数值模拟和诊断分析揭示了梅雨锋上 3 类暴雨在结构和形成机制等方面的主要差异。侯建忠等 (2007) 用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式对陕西两次区域性秋季暴雨进行模拟, 指出预报时效可达 36~48 h。隆霄等 (2006) 对 2002 年 6 月的一次梅雨锋暴雨过程进行了模拟研究, 指出区域平均方法得到的中尺度扰动特征可以很好地解释 β 中尺度对流云团的发展和演变。毕宝贵等 (2005) 模拟了 2002 年 6 月 8~9 日大暴雨过程, 揭示了影响陕南地区的中尺度对流系统的发生发展过程。

陕西是北方多暴雨地区之一, 暴雨季节比较长, 3 月下旬至 11 月上旬均有暴雨出现, 而大暴雨出现在 5 月中旬至 10 月下旬, 特大暴雨只出现在 6 月至 9 月 (王川等, 2003)。陕西特殊的地形特征及环流形势, 使陕西暴雨具有强度大、时间短、发生频率高的特点, 且暴雨的成灾率极高。其中, 初夏暴雨出现在 6 月下旬后期到 7 月上旬前期, 在此期间, 暴雨相对集中, 关中、陕南出现洪涝较多。暴雨的突发性和局地性的预报难度较大。

初夏暴雨对陕西省全年降水有重要影响。据统计结果显示, 如果初夏暴雨发生较早, 对该地区全年多雨有很好的指示性作用。但对于陕西初夏时期的暴雨系统性研究很少, 因此本文选取 2006 年 6 月 2 日 00:00 (协调世界时, 下同) 至 3 日 12:00 首场典型暴雨进行个例分析。这是一次发生在黄土高原的陕西中部出现突发性区域性暴雨过程, 本次暴雨过程陕西省气象台发布了“雷阵雨”的 24 h 天气预报, 与实况出现很大偏差, 特别是正值陕西“三夏”关键期间, 给麦收工作造成严重影响, 也带来了严重的社会负面影响, 因此本次初夏暴雨过程对于陕西的影响非常大, 值得进行深入研究。本文运用各种观测资料及中尺度数值模式对此次暴雨过程进行了模拟及诊断分析, 希望对这类暴雨过程提供一个较清晰的认识, 进一步提高对此类暴雨的预报服务水平。

2 暴雨过程概况和大尺度环流背景

2.1 降水概况

2006 年 6 月 2~3 日, 受 500 hPa 冷涡底部短波槽、700 hPa 切变线和地面偏东风气流共同影响,

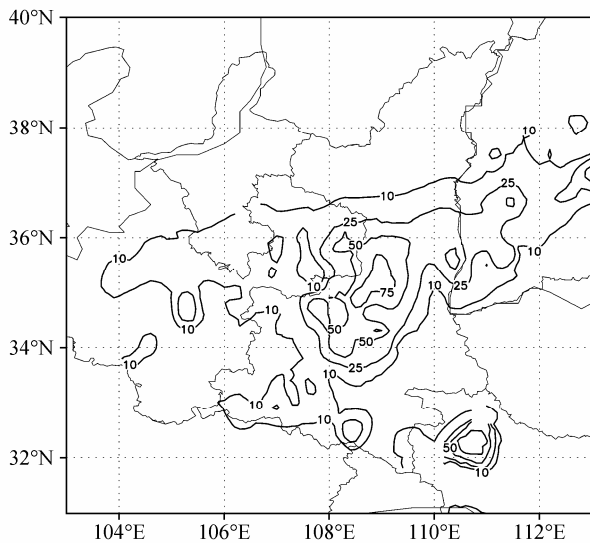


图1 2006年6月2日12:00至3日12:00陕西暴雨过程累计降水量(单位: mm)

Fig. 1 The accumulated precipitation (mm) during the 1200 UTC 2 Jun to 1200 UTC 3 Jun 2006

位于黄土高原的陕西中部出现突发区域性暴雨过程。其中陕北南部有2个台站、关中中部有13站均出现暴雨(图1)。反查陕西1961年以来降水分布, 陕西中北部的黄土高原上仅在2002年6月8日出现过10站以上的区域性暴雨, 因此这次降水过程出现的时间之早、范围之广、突发性之强为历

史同期所罕见。这次强降水从2日12:00开始, 至3日11:00结束。降水集中在2日18:00至21:00, 暴雨区有3个强降水中心, 分别在陕北南部、关中北部的洛川、铜川附近, 关中西部的麟游、扶风一带, 以及关中中部咸阳、西安附近, 其中咸阳1h最大降水量达35 mm, 西安1h最大降水量29 mm。24h降水量铜川83.6 mm, 西安71.6 mm。由于此次暴雨开始急骤、雨强大、雨时短, 引发严重洪涝灾害, 城市交通受到严重的影响, 并导致1人死亡1人受伤。

2.2 环流背景

2006年6月2日12:00 500 hPa 高空图(图略)上, 亚洲中高纬度上空维持两槽一脊型环流。在贝加尔湖附近维持着一个较强的冷涡, 且稳定少动, 其底部为平直西风气流。陕西省位于浅槽前、弱脊后。副热带高压位置偏南。有浅槽东移发展, 华北到东北高压脊已建立形成。但对陕西大降水有明显指示意义的5840 gpm位置偏南, 未北伸到陕西境内, 位于30°N附近。500 hPa上陕西位于槽前, 受西南气流控制, 加上水汽场的配合, 陕北南部和关中中部出现暴雨。之后, 出现平直的东西气流, 3日06:00(图略), 陕西位于脊前, 受西北气流控制, 降水趋于停止。

700 hPa上, 2日00:00(图2a), 陕西省位于

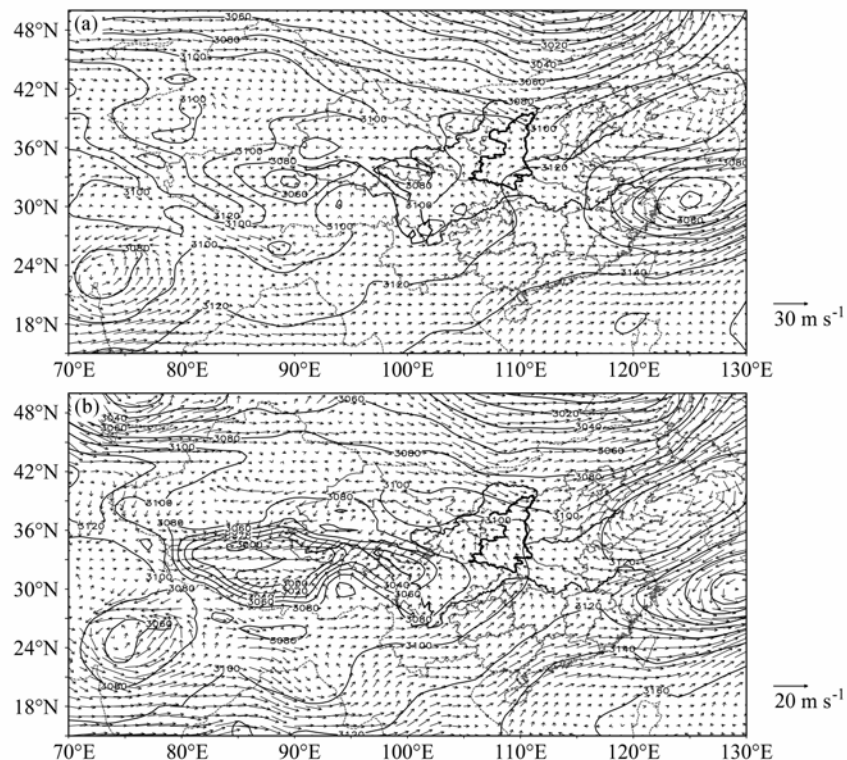


图2 700 hPa 位势高度(单位: gpm)及风矢量场: (a) 6月2日00:00; (b) 6月2日12:00

Fig. 2 The geopotential height (units: gpm) and the wind vector at 700 hPa: (a) 0000 UTC 2 Jun; (b) 0600 UTC 2 Jun

槽后脊前，北部受槽后的西北气流控制，云贵川有西南气流发展北伸，陕西中南部为弱脊后的西南气流控制，2 日 00:00 在河套中部的陕北南部到关中北部有一条东北—西南走向的切变线；2 日 12:00（图 3b），西南风进一步北伸，原在切变南侧的西南风已转向偏南或东南风，且风速突然增强加大。这种风场变化特征在西安以南及汉中、安康非常显著，它使气流辐合加强，水汽进一步向暴雨区输送。850 hPa 至 925 hPa（图略）的风场演变与 700 hPa 十分相似，且风速增幅比率高于 700 hPa，以安康站 850 hPa 为例，风速由 00:00 的 4 m s^{-1} 的东南风

增强为 8 m s^{-1} ，增幅达到一倍。

此次突发性暴雨过程，虽然 500 hPa 环流反映不明显，但在对流层中低层的 700 hPa 以下和对流层更高的 200 hPa 上风场变化明显，说明与以往的暴雨过程相比高层的辐散层高度较高，且高层的抽吸作用和低层的辐合作用非常强烈。这一点在诊断分析时得到了验证。在 2 日 12:00，850 hPa 上陕西东部区域出现迅速增强的偏东南急流，且 200 hPa 上暴雨区有强的负涡度中心存在，这种上下层配置结构非常利于强降水的出现。

3 数值试验及模拟结果检验

3.1 模式简介及方案设计

本文采用 WRF 模式，对 2006 年 6 月 2~3 日陕西一次初夏暴雨过程进行数值模拟。WRF 模式采用完全可压非静力模式，控制方程组都为通量形式，网格形式采用 Arakawa C 格点。利用 NCEP 时间间隔为 6 h 分辨率为 1° （纬度） $\times 1^\circ$ （经度）的再分析资料通过 WRF 模式的前处理程序 WPS 模块得到模式初始场，然后用 WRF (V3.0 版本) 对 2006 年 6 月 2 日 12:00 至 3 日 12:00 的陕西初夏暴雨进行模拟。模拟过程中边界条件由 NCEP 资料提供，模拟时段为 2006 年 6 月 2 日 00:00 至 3 日 12:00。模式模拟中心区域位置为 $(35^\circ\text{N}, 108^\circ\text{E})$ ，采用兰勃托投影方式，三重嵌套网格，水平网格距分别为 54、18、6 km，水平网格点数为 110×80 、 51×52 、 80×135 ，垂直层数为 28 层。模拟区域范围图和第 3 层 D3 的地形模拟结果见图 3b。模式选用的物理过程中微物理过程为 Ferrier (New Eta) 参数化方案，边界层为 YSU 方案，积云参数化方案为 Kain-Fritsch (new Eta) 方案，长波辐射和短波辐射方案分别为 Rrtm 方案和 Duhia 方案。

3.2 数值模拟结果检验

本次降水过程主要发生在 2006 年 6 月 2 日 12:00 至 3 日 12:00 这 24 h 之内。为了消除模拟初始时的不稳定性，模式从 2006 年 6 月 2 日 00:00 开始模拟。首先对模式模拟的 24 h 降水量和降水中心与实况站点资料降水量进行比较。图 4 为模式模拟的 6 月 2 日 00:00 至 3 日 00:00 陕西初夏降水过程。通过对比可以看到，24 h 模拟能够清晰地将暴雨过程的中心位置，暴雨区域的主要范围和暴雨形势的走向体现出来，并与实际降水情况基本一致。

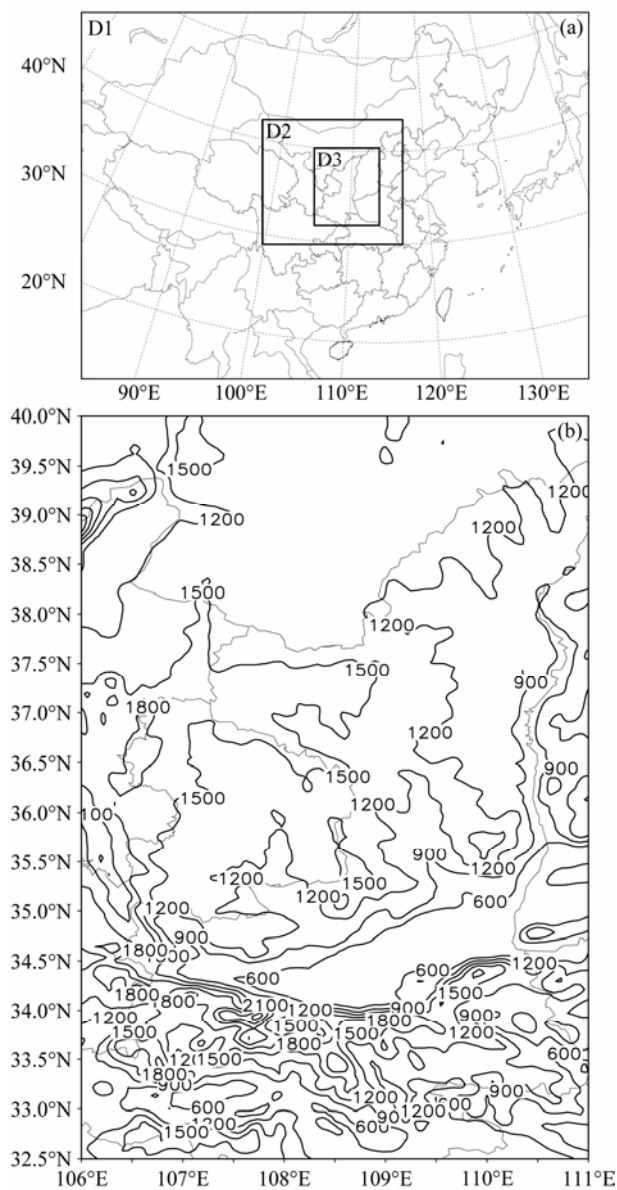


图 3 (a) 三重嵌套网格模拟区域和 (b) 第 3 层网格区域 D3 的地形高度 (单位: m)

Fig. 3 (a) The three nests of modeling areas and (b) the terrain (m) of D3

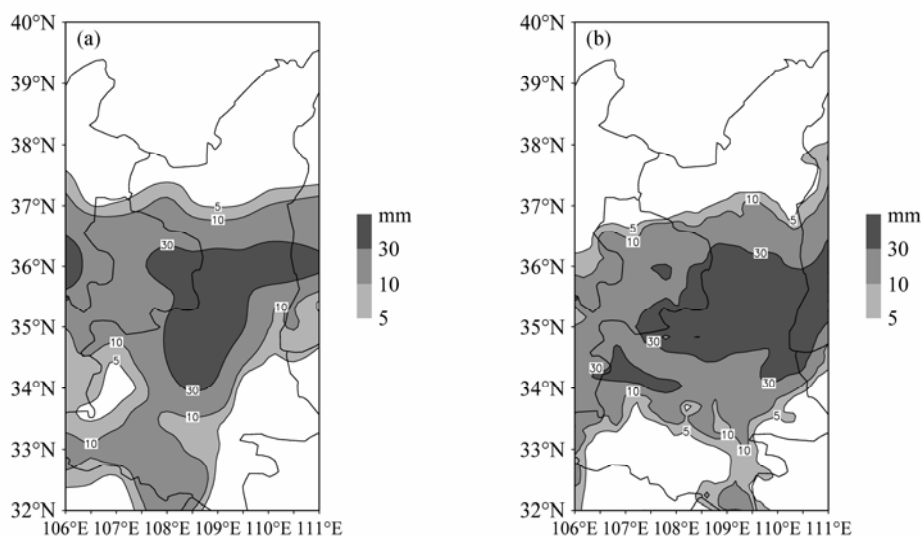


图 4 6 月 2 日 00:00 至 3 日 00:00 (a) 24 h 降水实况与 (b) 模拟降水量

Fig. 4 The accumulated 24-h rainfall (mm) from 0000 UTC 2 to 0000 UTC 3 Jun 2006: (a) Observation; (b) simulation

特别是陕中地区从延安南部到西安的大部分暴雨落区与观测资料对应较好, 模拟出的暴雨中心最大降水量为 80 mm 与实际观测的 75 mm 也非常吻合。模拟的陕西东侧 (36.1°N, 110.2°E) 一带的降水中心比实况偏大, 但降水位置与实况大体一致。陕西中部偏南的地区降水略偏西约 50 km, 但降水强度与实况接近。在陕西西侧模拟结果出现一个 40 mm 的降水中心, 这比实际观测偏大约 20 mm。但是在咸阳附近 (34.5°N, 108.2°E) 的降水没有模拟出来, 可能是由于模式的 spin-up 时间所致; 而且陕西地区地形复杂, 也可能是由于中尺度地形对于降水模拟的影响作用使得模式模拟能力有限所致。综上, 模式对于本次降水过程的模拟在陕西中部效果较好, 降水强度和位置也与实况有较好对应, 但在咸阳南部等降水大值区的南部效果略差。

为进一步检验模式结果的可靠性, 将模结果与地面加密自动站 6 h 实况降水资料对比, 图 5 中给出模式模拟的 6 h 累积降水与实况 6 h 降水。通过对 6 h 降水的模拟, 模式模拟基本重现了这次强降水过程, 并且降水位置和强度与实况都较为接近。由 6 h 降水的模拟结果, 可以看出此次陕西初夏强降水过程是自西向东, 自北向南。对比 2 日 18:00 累计 6 h 降水, 模拟结果在延安南部和渭南北部 (35.7°N, 109.8°E) 的区域比实际观测结果大 15 mm; 而在模拟结果中较好地体现出实际观测到的位于宝鸡与咸阳交接处的暴雨中心区位置, 只是中心降水量比观测略小 10 mm, 整体 6 h 降水的区域范围与实际观测基本一致。对比 3 日 0000 累计 6 h

降水图, 可以看到实况降水中心位于延安南部, 模拟结果在此区域有较好的降水中心对应, 其位置和强度都与实况对应较好; 但位于咸阳与铜川的暴雨中心并没有得到较好的模拟结果, 可能是由于陕西复杂的地形作用影响的。3 日 06:00 和 3 日 12:00 模拟结果与实况降水对应位置较好。总之, 模式模拟的降水发生发展过程及降水大值区位置都与实况降水比较接近, 模拟结果基本能够抓住此次初夏暴雨各个时间段系统演变的情况, 能清楚的反映出中尺度雨团的活动情况。

4 暴雨过程的动力学诊断分析

本节利用 WRF 中尺度数值模式模拟结果, 得到时间分辨率和空间分辨率较高的数据, 对 2006 年 6 月 2 日至 3 日的陕西初夏典型暴雨进行诊断分析。首先选取基本诊断量包括垂直运动场和广义位温场, 并进一步诊断湿位涡和对流涡度矢量场, 下面将对诊断结果做具体分析。

4.1 垂直运动

本次暴雨过程中垂直运动的变化如图 6。降水开始阶段, 关中地区至陕西南部 (32°N~37°N) 为大片的上升气流区, 最大上升速度位于 800~650 hPa 其中上升运动最强的区域位于 108°E, 绝对值达到 0.7 Pa s^{-1} 。在 109°E~110°E 之间出现第二个极大上升区, 位于 700~400 hPa, 这两个上升区与地面降水区对应很好。108.5°E~110°E 附近区域的低层是下沉运动。2 日 18:00 上升运动区向东移动,

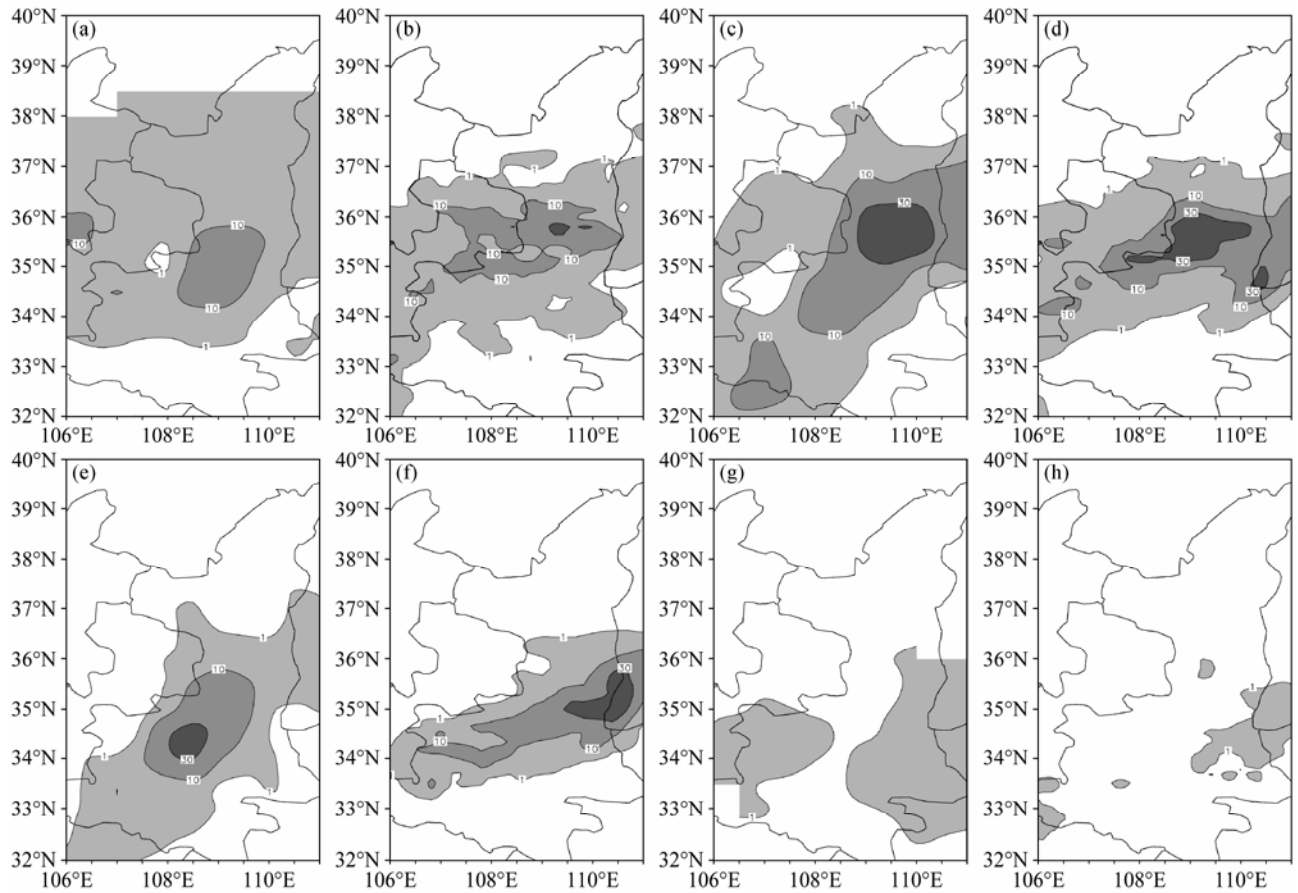


图5 6月(a、e)2日18:00、(b、f)3日00:00、(c、g)3日06:00和(d、h)3日12:00累计6h降水(单位: mm): (a、b、c、d) 实况; (e、f、g、h) 模拟

Fig. 5 The accumulated 6-h rainfall (mm) from (a, e) 1200 UTC to 1800 UTC 2 Jun, (b, f) 1800 UTC 2 to 0000 UTC 3 Jun, (c, g) 0000 UTC to 0600 UTC 3 Jun, and (d, h) 0600 UTC to 1200 UTC 3 Jun; (a, b, c, d) Observation; (e, f, g, h) simulation

两个上升极大中心分别位于 108.5°E 和 110°E 上空的 500 hPa 附近, 西侧上升运动极值中心减弱, 东侧的极大值中心大大增强, 上升速度达到 0.9 Pa s^{-1} , 范围也较上个时次向东向上扩展, 对应着降水中心向东移动。3日00:00, 存在3个上升运动区, 分别位于 106.5°E 上空的 600 hPa 附近, 107.5°E 上空的 500 hPa 附近以及关中东部地区上空。 110°E 附近的低层有弱的下沉运动, 其东侧的大片上升运动区从地面一直延伸到 200 hPa 以上。对应陕西南部到关中地区的6h累积降水量超过 45 mm 。3日06:00图上, 上升运动区东移且强度减弱。西侧的上升区被下沉区代替, 下沉气流速度达到 0.3 Pa s^{-1} , 东侧上升区主要存在于 $300\sim 400\text{ hPa}$ 之间, 上升速度减弱为 0.5 Pa s^{-1} , 其低层也几乎全部为下沉区。6h累积降水量也较前一个时次大大减少, 降水过程趋于结束。到3日12:00, 上升运动极强中心消失, 降水过程结束。

4.2 位涡(PV)

位涡(PV)表达式为

$$\text{PV} = \frac{(\nabla \times \mathbf{V}) \cdot \nabla \theta}{\rho},$$

其中, $\mathbf{V}$ 表示三位速度矢量, θ 表示位势, ρ 表示密度, PV 为常数, 并满足著名的 Ertel 位涡守恒定律。

利用模拟结果计算降水过程中位涡剖面图(图7)可见, 在2006年6月2日18:00, PV 大值区位于 $108^{\circ}\text{E} \sim 109^{\circ}\text{E}$ 左右, 此时6h降水量的大值区与PV 高值区相对应, 在 109.5°E 其大值区延伸至 $750 \sim 800\text{ hPa}$ 之间, 因此可见这里为一个明显的从对流层顶向下传输的干冷空气过程。同时, PV 的大值区的东西两侧都为强烈的上升运动, 因此可以为降水提供动力条件。至2006年6月3日00:00, PV 大值区维持在 108°E 左右, 此时6h降水量大值区也在此处继续维持, 同时, PV 明显增强, PV 大值区向下延伸至 $800 \sim 850\text{ hPa}$ 之间, 此时6h降水

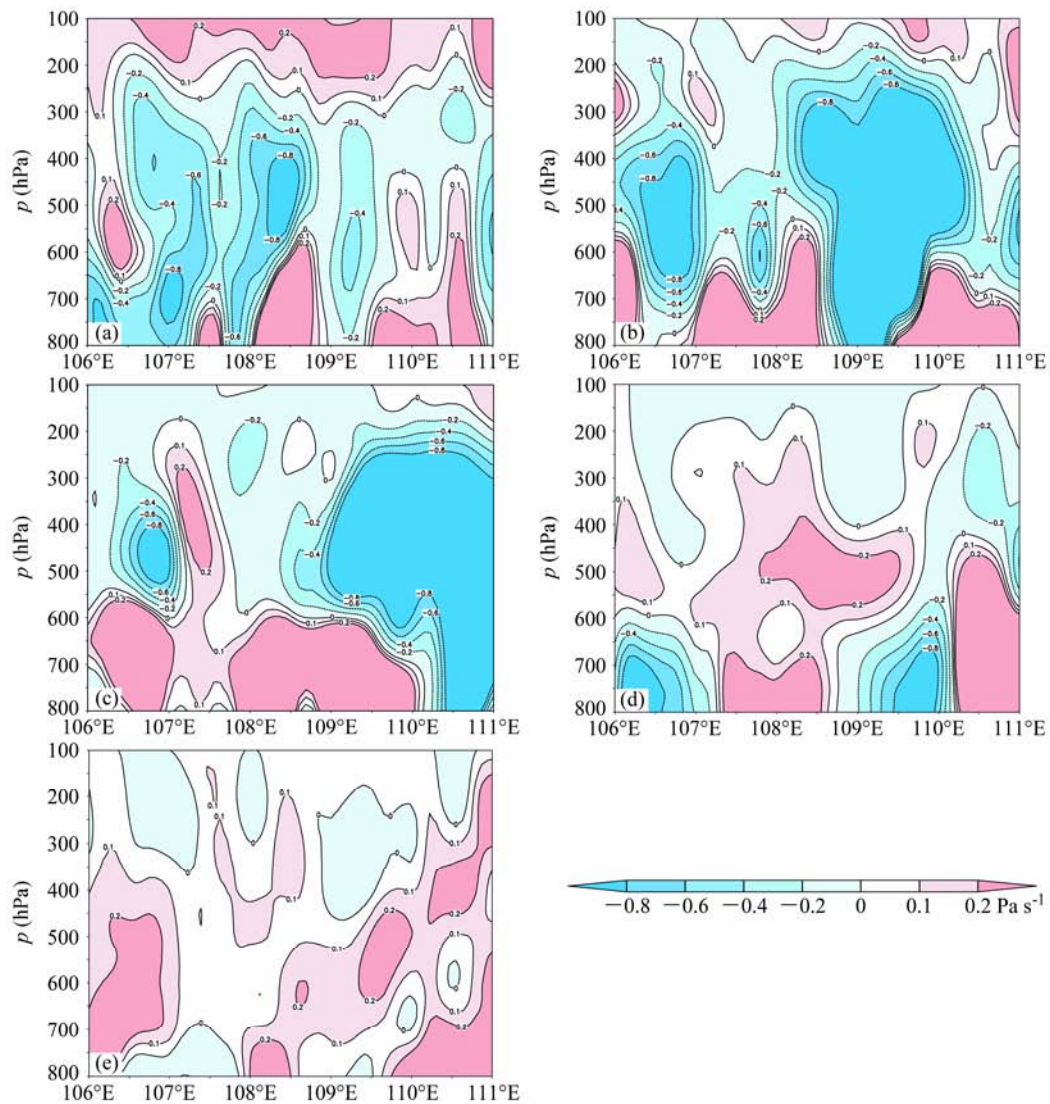


图6 垂直运动沿 35°N (32°N~37°N 区域平均) 的经度—高度剖面图: (a) 2 日 12:00; (b) 2 日 18:00; (c) 3 日 00:00; (d) 3 日 06:00; (e) 3 日 12:00
Fig. 6 The cross sections of averaged vertical velocity along 35°N (32°N~37°N average): (a) 1200 UTC 2 Jun; (b) 1800 UTC 2 Jun; (c) 0000 UTC 3 Jun; (d) 0600 UTC 3 Jun; (e) 1200 UTC 3 Jun

量也明显增强, 陕北南部 6 h 降水量由 20 mm 左右增加至 40 mm 左右。6 月 3 日 03:00, PV 在 300 hPa 附近存在两个大值中心, 分别位于 108.5°E 和 109.5°E, 说明有的冷空气从对流层顶向对流层中下层补充输送的干侵入现象, 有利于此次降水发生。6 月 3 日 06:00, 300 hPa 的 PV 大值区东移至 110.5°E, 继续向对流层中下层输送冷空气, 在 109.5°E 上空 500 hPa 附近 PV 较大, 此处也是降水的主要落区; 但是此时 PV 大值区的强度有所减弱, 只向下延伸至 800 hPa 高度, 因此 6 h 降水区的降水量也随之减少, 由 40 mm 减少至 20 mm 左右。可见, 此次降水受到从对流层上层向下输送的干冷空气的影响比较大, 此干冷空气的存在与源源不断的向对流

层输送, 为这次陕西初夏暴雨过程的形成产生有利条件, 同时 6 h 降水的位置和降水量都与之有关。

4.3 广义位温和对流涡度矢量 (CVV)

广义位温是在相当位温中引一个权重函数 $(q/q_s)^k$, 得到广义位温 (Gao et al., 2004b) 的表达式为:

$$\theta^* = \theta \exp \left[\frac{L}{c_p} \frac{q_s}{T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \right], \quad (1)$$

其中, q 和 q_s 分别为比湿和饱和比湿。

当大气为完全饱和时, $q = q_s$, 此时 $\theta^* = \theta \exp[(L \cdot q_s)/(c_p \cdot T)]$, 即为 θ_e (θ_e 为相当位温); 当为干大气时, $q = 0$, 此时 $\theta^* = \theta$, 这是两种

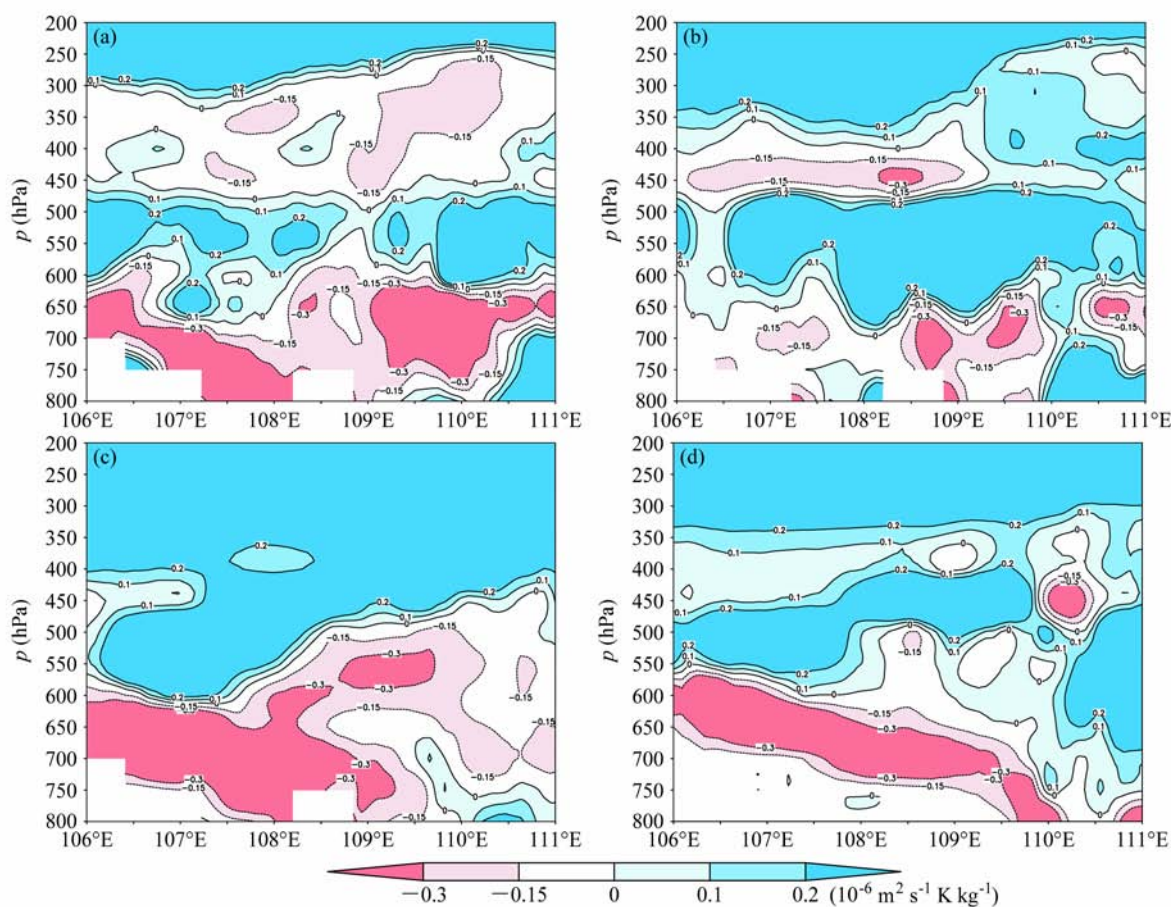


图7 PV沿暴雨中心纬度35°N的高度—经度剖面图：(a) 2日18:00；(b) 3日00:00；(c) 3日03:00；(d) 3日06:00

Fig. 7 The cross sections of potential vorticity (PV) along 35°N: (a) 1800 UTC 2 Jun; (b) 0000 UTC 3 Jun; (c) 0300 UTC 3 Jun; (d) 0600 UTC 3 Jun

大气的极端情况。由于实际大气多是处于绝对干和完全饱和之间的状态，因此用广义位温能更好的将实际大气中的温度和湿度体现出来。图8给出了这次陕西大暴雨过程的广义位温在35°N的经度—高度剖面图，从图中可以看到，在暴雨发生的主要时段（2日18:00和3日00:00），暴雨区上空广义位温有很大的斜压性。而在3日06:00降水逐渐减少，则广义位温的梯度变化逐渐减少，最后到3日12:00广义位温几乎完全恢复平直，而这时降水过程也已经结束。

对流涡度矢量是在Ertel位涡（用 P_E 表示， $P_E = \omega_a \cdot \nabla \theta / \rho$ ， ω_a 为绝对涡度）基础上得到的。由于大尺度天气系统等位温面的分布是准水平的（锋区除外），并且通常位温（ θ ）随高度而增加，因此位温梯度 $\nabla \theta$ 的方向主要呈垂直向上方向；而大尺度运动是准水平运动，由牵连涡度和相对涡度构成的绝对涡度也主要是在垂直方向上，因此 P_E 是大尺度系统中的较为显著的物理量。但是在暴雨等中尺度深对流系统中，等位温面的分布近于垂直，因此位温梯度 $\nabla \theta$ 的主要是呈水平方向，在这种情况下

下 P_E 的指示作用减弱。相反地，对流涡度矢量(CVV)（定义为： $C = \omega_a \times \nabla \theta / \rho$ ）(Gao et al., 2004a)来描述中尺度深对流系统的发生发展。由于广义位温更能较好的反映出实际大气的情况，因此用广义位温代替位温，来计算此次典型暴雨过程中的对流涡度矢量的垂直分量。图8是在这次暴雨过程期间，沿35°N的广义位温和CVV垂直分量的垂直分布图。从图中可以看出，在2日18:00，沿35°N，在107°E~110°E间的地区（陕西关中地区）低层出现了广义位温密集中心区，并出现了CVV垂直分量的显著异常，到3日00:00，广义位温高值区往下延伸至109°E附近（西安附近）加强，同时CVV垂直分量异常明显加强向低层延伸至109°E附近，3日06:00，广义位温线逐渐恢复平直，CVV垂直分量异常基本消失，只在108°E附近低层出现小范围的异常，3日12:00广义位温线基本平直，CVV垂直分量异常完全消失。从对应时次的实况6h累积降水分布来看，从2日18:00至3日12:00雨区从西向东移进陕西关中地区，而后南移消散。通过

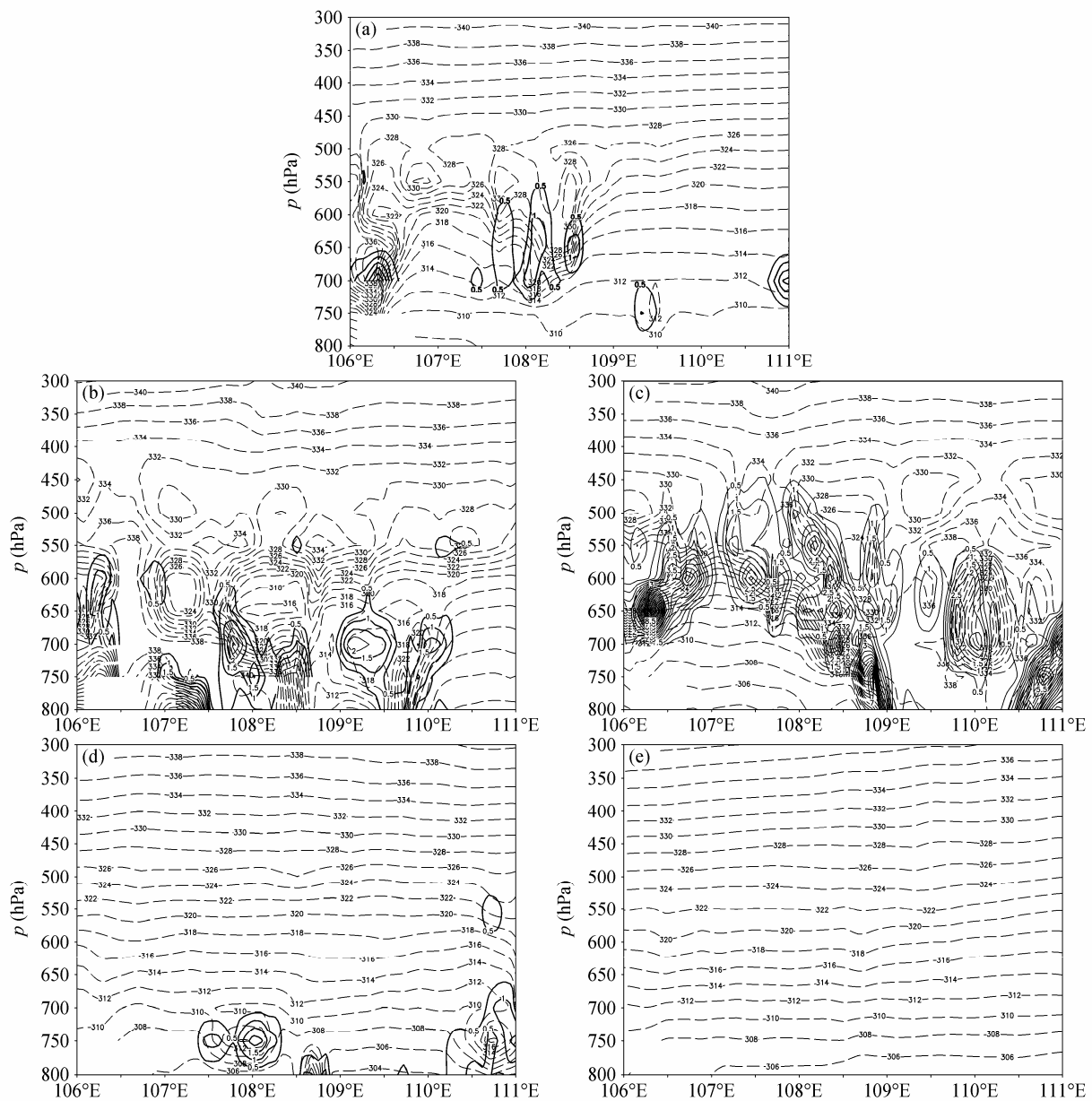


图 8 广义位温 (虚线, 单位: K) 和对流涡度矢量的垂直分量 (实线, 单位: $10^{-4} \text{ s}^{-1} \text{ K}$) 沿 35°N 的经度—高度剖面图: (a) 2 日 12:00; (b) 2 日 18:00; (c) 3 日 00:00; (d) 3 日 06:00; (e) 3 日 12:00

Fig. 8 The cross sections of generalized moist potential temperature (K) and vertical component of convective vorticity vector ($10^{-4} \text{ s}^{-1} \text{ K}$) along 35°N : (a) 1200 UTC 2 Jun; (b) 1800 UTC 2 Jun; (c) 0000 UTC 3 Jun; (d) 0600 UTC 3 Jun; (e) 1200 UTC 3 Jun

诊断可以看出, 广义位温和 CVV 异常的分布和垂直变化能很好地反映陕西这次暴雨过程的落区及其演变。而在 2 日 12:00 的 CVV 已有显示出可以产生暴雨的条件, 因此 CVV 可以作为一个预报因子, 对陕西地区暴雨的发生发展有很好的指示作用, 在以后的暴雨预报过程中可以得到很好的应用。

5 总结

2006 年 6 月 2~3 日陕北南部和关中地区的暴

雨过程是典型的突发性暴雨过程, 本次陕西地区初夏典型降水过程能够用 WRF 中尺度数值模式很好的模拟出来, 其模拟结果有较好的可信度, 对暴雨位置和中心强度的模拟与实际降水基本一致, 并运用不同的诊断量诊断了此次暴雨过程, 得到以下结论:

(1) 运用 WRF 中尺度数值模式对此次陕西初夏典型暴雨过程进行了数值模拟。通过对比 24 h 实况降水资料和模式模拟降水, 表明 24 h 降水模拟能够很好地体现暴雨过程的中心位置, 暴雨区域的主

要范围和暴雨形势的走向。模式结果与实况降水情况基本一致,特别是模拟的陕中地区从延安南部到西安的大部分暴雨落区与观测资料对应较好,暴雨中心最大降水量为 80 mm 与实际观测的 75 mm 也非常吻合。但是在咸阳附近(34.5°N, 108.2°E)的降水没有模拟出来,可能是陕西地区地形复杂,也可能是由于中尺度地形对于降水模拟的影响作用使得模式模拟能力有限所致。对于 6 h 降水模拟,可以看出此次陕西初夏强降水过程是自西向东,自北向南。模式基本重现了这次强降水过程,降水位置和强度与实况较为接近,模拟结果中的降水中心的位置和降水量,都与实况降水比较接近。模拟结果基本能够抓住此次初夏暴雨各个时间段系统演变的情况,能清楚的反映出中尺度雨团的活动情况。

(2) 通过分析大尺度环流背景场表明,本次初夏暴雨受 500 hPa 冷涡底部短波槽、700 hPa 切变线和地面偏东风气流的共同作用;并且对流层低层 850 hPa 和 925 hPa 突然加大的偏东南急流对本次暴雨发生有影响作用。

(3) 利用上述模拟结果对本次暴雨过程进行诊断分析,垂直运动场和降水区对应较好,由于模式模拟资料分辨率较高,因此计算得到的垂直运动的上升下沉区与雨区对应较好。运用 PV 进行诊断,发现它能反映降水区的移向以及总的降水变化情况,且从 PV 的垂直剖面图中,可以看到此次暴雨过程中有一股很强的干冷空气从对流层顶向下传播,最深达到 850 hPa,这种强干侵入有利于强降水的生成。

(4) 通过模拟结果计算得到的广义位温和 CVV 异常的分布变化,很好地反映了陕西这次暴雨过程的落区及其演变,并且对本次暴雨的预报有较好的指示作用,因此对流涡度矢量可以应用于以后对陕西暴雨预报中。

本文通过对一次陕西初夏暴雨过程的分析,对陕西初夏暴雨的成因有了初步的认识,同时提出对流涡度矢量对于其初夏暴雨的预报有一定的帮助。但由于一次降水过程还有局限性,下一步会对更多次陕西初夏暴雨进行研究,以找到其更主要的共性及普适的预报方法。

参考文献 (References)

毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿. 2005. 2002 年 6 月 8~9 日陕南大暴雨数值模

- 拟研究 [J]. 大气科学, 29 (5): 814–826. Bi Baogui, Liu Yuewei, Li Zechun. 2005. Numerical simulations of extremely heavy rain in the southern Shaanxi Province during 89 June 2002 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (5): 814–826.
- 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究 [M]. 北京: 气象出版社, 255pp. Ding Yihui. 1993. The Study on Exceedingly Heavy Rain over Changjiang Huaihe River Basin in 1991 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 255pp.
- Gao S T, Ping F, Li X F, et al. 2004a. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study [J]. J. Geophys. Res., 109: D14106, doi: 10.1029/2004JD004807.
- Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. 2004b. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophys. Res. Lett., 31: L12113.
- 高守亭, 赵思雄, 周晓平, 等. 2003. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 618–627. Gao Shouting, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al. 2003. Progress of research on sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 618–627.
- 侯建忠, 宁志谦, 谢双亭, 等. 2007. 基于 WRF 模式的陕西两次区域性秋季暴雨的数值模拟 [J]. 成都信息工程学院学报, 22 (5): 648–653. Hou Jianzhong, Ning Zhiqian, Xie Shuangting, et al. 2007. Simulation and analysis of two regional autumn rainstorms in Shaanxi based on WRF model [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 22 (5): 648–653.
- 雷雨顺. 1981. 经向型持续性特大暴雨的合成分析 [J]. 气象学报, 39 (2): 168–181. Lei Yushun. 1981. The compositive analysis of the meridional type persistent severe rainstorms [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 39 (2): 168–181.
- 李琨, 徐幼平, 宇如聪, 等. 2005. 梅雨锋上三类暴雨特征的数值模拟比较研究 [J]. 大气科学, 29 (2): 236–247. Li Kun, Xu Youping, Yu Rucong, et al. 2005. Comparative studies of three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front by numerical simulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 236–247.
- 隆霄, 程麟生, 文莉娟. 2006. “02.6” 梅雨期一次暴雨 β 中尺度系统结构和演化的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 30 (2): 327–340. Long Xiao, Cheng Linsheng, Wen Lijuan. 2006. A numerical study of the structure and evolution of meso- β scale system during “02.6” Meiyu [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 327–340.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 255pp. Tao Shiyan. 1980. Rainstorm of China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 255pp.
- 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 1979. 暴雨和强对流天气的研究 [J]. 大气科学, 3 (3): 227–238. Tao Shiyan, Ding Yihui, Zhou Xiaoping. 1979. Study of rainstorm and severe convection weather [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 3 (3): 227–238.
- 王川, 刘勇, 张宏. 2003. 陕西省地质灾害预报预警研究 [J]. 陕西气象, (6): 10–12. Wang Chuan, Liu Yong, Zhang Hong. 2003. Research on prediction and alarm of geological disasters in Shaanxi Province [J]. Journal of Shaanxi Meteorology, (6): 10–12.

- 张丙辰. 1990. 长江中下游梅雨锋暴雨的研究 [M]. 北京: 气象出版社, 269pp. Zhang Bingchen, 1990. Study of Meiyu Front Torrential Rain over Yangtzi River Basin (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 269pp.
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2001. 1998 年嫩江、松花江流域持续性暴雨的环流条件 [J]. 大气科学, 25 (4): 567–576. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2001. A study of excessively heavy rainfall in the Songhuajiang-Nenjiang River valley in 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 567–576.
- 张小玲, 陶诗言, 张顺利. 2004. 梅雨锋上的三类暴雨 [J]. 大气科学, 28 (2): 187–205. Zhang Xiaoling, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2004. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (2): 187–205.
- 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 1998. 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 368–381. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. 1998. Study of heavy rainfall in the Changjiang River during July 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (4): 368–381.