

王成鑫, 高守亭, 梁莉, 等. 2013. 动力因子对地形影响下的四川暴雨落区的诊断分析 [J]. 大气科学, 37 (5): 1099–1110, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12112. Wang Chengxin, Gao Shouting, Liang Li, et al. 2013. Diagnostic analysis of dynamical parameters for Sichuan rainstorm influenced by terrain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1099–1110.

动力因子对地形影响下的四川暴雨落区的诊断分析

王成鑫^{1,2} 高守亭¹ 梁莉^{3,4} 马严枝⁵

1 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

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

4 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

5 山西省气象台, 太原 030006

摘 要 本文分析了 2010 年 7 月 16~18 日地形作用下四川盆地的一次持续性暴雨过程, 指出此次暴雨过程是在高低层系统配置较好的情况下发生的。并以 NCEP 资料为初值场对此次暴雨过程进行了数值模拟, 结合实况对模拟结果进行对比分析。分析表明: 模式对本次四川暴雨过程的模拟较为成功, 能很好地再现此次暴雨的降水落区以及强降水中心。运用广义湿位温、广义对流涡度矢量垂直分量的垂直积分和质量垂直螺旋度对受大巴山脉影响的四川东北部的暴雨落区进行了诊断分析。分析指出, 广义湿位温纬向平均的垂直剖面图上, 等湿位温线的倒 Ω 区域与四川东北部的强降水落区吻合较好, 等湿位温线的倾斜程度以及湿位温异常的高度可以定性地指示降水的强弱; 对广义湿位温从 800 hPa 到 500 hPa 垂直积分, 用得到的湿位温的水平分布来指示东北部的暴雨落区效果较好; 用改进垂直积分区间后的广义对流涡度矢量垂直分量比用传统的对流涡度矢量垂直分量来示踪四川东北部的暴雨落区效果更好; 质量垂直螺旋度能有效刻画出四川东北部地区强降水系统的典型动力场垂直结构, 因此与四川东北部的地面强降水具有很好的对应关系。

关键词 四川暴雨 地形影响 数值试验 动力因子

文章编号 1006-9895(2013)05-1099-12

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12112

Diagnostic Analysis of Dynamical Parameters for Sichuan Rainstorm Influenced by Terrain

WANG Chengxin^{1,2}, GAO Shouting¹, LIANG Li^{3,4}, and MA Yanzhi⁵

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Public Weather Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

5 Shanxi Provincial Meteorological Observatory, Taiyuan 030006

Abstract A continual rainstorm process influenced by the terrain in Sichuan Province that occurred during July 16–18, 2010, is analyzed. Results show that the process took place under a good high–low system configuration. In addition, a numerical simulation performed with National Centers for Environmental Prediction (NCEP) data used for the initial field accurately simulated this rainfall process. The numerical simulation can not only indicate where the rainfall region is but also the center of storm. Generalized moist potential temperature, the vertical integral of the vertical component of

收稿日期 2012-07-19, 2012-10-29收修定稿

资助项目 中国科学院重点部署项目课题KZZD-EW-05-01, 国家自然科学基金项目41075043、40965004

作者简介 王成鑫, 男, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事中尺度天气动力学研究。E-mail: 13429670011@163.com

generalized convective vorticity vector and quality vertical helicity are chosen to perform diagnostic analysis for the rainfall region, which lies in northeast Sichuan and is influenced by Daba Mountain. The results show that the inverse Ω shape areas of the moist potential temperature isolines in the vertical sections coincide well with the heavy rainfall region, and the steepness of the isolines and the abnormal height of the moist potential temperature can qualitatively indicate the rainfall intensity. The vertical integral of the moist potential temperature from 800 hPa to 500 hPa can more accurately trace the heavy rainfall region in the northeast by using the improved vertical integral rather than the traditional vertical integral. Because the vertical helicity quality can effectively describe the vertical structure of the typical dynamical field of the heavy rainfall system over northeast Sichuan, it strongly correlates with the heavy rainfall region in the same location.

Keywords Sichuan rainstorm, Effect of the terrain, Numerical test, Dynamical parameters

1 引言

对暴雨过程中暴雨落区的预报一直是气象工作者关注的焦点,而地形影响下的暴雨落区的预报又是其中的重点和难点。四川盆地位于青藏高原的东侧,地势西高东低,由西北向东南倾斜,地形复杂多样。以龙门山——大凉山一线为界,东部为四川盆地及盆缘山地,西部为川西高原及川西南山地(<http://www.57uu.com/sc/sichuaninfo> [2006-05-24]),再加上北部有秦岭和大巴山脉的天然屏障,使得地形在四川暴雨的发生发展中起到了很重要的作用,相关的研究都证明了这一点(葛晶晶等, 2008; 崔春光等, 2000; 陈志昆和张书余, 2010)。地形暴雨易造成严重的次生灾害,因此作好四川地区的地形暴雨落区的预报尤为重要。

气象学家在暴雨落区的预报方面开展了大量的研究工作,先后建立了多个物理意义明确且能够表征暴雨动热力过程的宏观物理量,并将其运用于暴雨落区的诊断中。相关的研究表明,螺旋度(李耀东等, 2005; 冉令坤等, 2009; Yang et al., 2010)、 Q 矢量(刘运成, 2006, 2011; Yue and Shou, 2008)、广义位温(符长锋等, 2006; Gao and Cao, 2007; 周玉淑和朱科峰, 2008)、对流涡度矢量(Gao et al., 2004a, 2004b, 2005, 2007)、波作用密度(冉令坤等, 2011; 骆凯等, 2010)等宏观物理量作为动力诊断因子对地面降水具有较好的指示作用。但是,这些研究基本上是对无地形或弱地形影响下的暴雨落区进行的诊断分析,而对四川暴雨落区的诊断研究较少。四川地区受地形影响显著,高大的山脉必然影响到山脉附近空间要素场的分布,进而导致各宏观物理量的分布也会较无地形或弱地形的地区不同,从而影响暴雨落区的诊断。故这些动力诊断因子是否还能较好地表征四川地形暴雨的落

区还需要作进一步的研究。基于这个目的,本文利用 WRF 模式对 2010 年 7 月 16~18 日地形作用下四川盆地的一次暴雨过程进行数值模拟,利用实况观测资料与模拟结果进行对比验证,并用广义对流涡度矢量垂直分量(CVV_z^*)、广义湿位温(θ^*)和质量垂直螺旋度(H^*)等动力因子对受大巴山脉影响的四川东北部的降水过程进行诊断分析,检验这些因子对地形影响下的四川暴雨落区是否具有诊断和预报意义。

2 动力因子

2.1 广义湿位温

Gao and Cao (2007) 在相当位温的定义式中引入一个权重函数 $(q/q_s)^k$, 得到了广义湿位温的概念。由于广义湿位温在干、湿绝热过程中都具有守恒性,所以用其来表征实际大气更为恰当。其表达式为:

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

其中, θ 为位温, L 为相变潜热, c_p 为定压比容, q 为比湿, q_s 为饱和比湿, T 为凝结温度, k 为经验常数, 本文取值为 45。

2.2 广义对流涡度矢量垂直分量

鉴于深对流系统中湿等熵面与垂直涡度夹角较小,甚至几乎平行,导致位涡信号较弱,于是 Gao et al. (2004a, 2007) 引入对流涡度矢量来描述深对流系统的发生发展,再加上广义湿位温在研究实际大气中的优越性,在对流涡度矢量中引入 θ^* , 得到广义对流涡度矢量的概念,即 $CVV^* = \zeta_a \times \nabla \theta^* / \rho$, ζ_a 为绝对涡度。由于垂直速度的水平梯度在数值上远小于水平速度的垂直切变,故略去小项,得到等压坐标系下 CVV^* 的垂直分量形式为:

$$CVV_z^* = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial v}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial x} \right), \quad (2)$$

其中, u , v 分别为等压坐标系中纬向、经向速度, ρ 为大气密度。由于水汽主要集中在对流层中低层, 气象工作者为了能够更直观地分析对流涡度矢量与降水落区的关系, 往往对 CVV_z^* 从 850 hPa 至 500 hPa 垂直积分, 得到:

$$CVV_{sumz}^* = - \int_{850 \text{ hPa}}^{500 \text{ hPa}} CVV_z^* dp. \quad (3)$$

2.3 质量垂直螺旋度

等压坐标系下局地螺旋度定义为:

$$H = \iiint V \cdot (\nabla \times V) d\tau = \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \right) \cdot u + \left(\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) \cdot v + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \cdot \omega, \quad (4)$$

其中, u , v , ω 分别为等压坐标系中纬向、经向及垂直方向的速度, p 为大气压强。式 (4) 右方三项分别称为 i 螺旋度, j 螺旋度, k 螺旋度, 其中 k 方向的螺旋度就是垂直螺旋度。本文将垂直螺旋度中引入权重因子——密度 ρ , 得到质量垂直螺旋度的表达式:

$$H^* = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \cdot \omega. \quad (5)$$

由于密度 ρ 的值随着高度的增加而减小, 故点乘之后垂直螺旋度在高低层的差异更加明显, 其作用在本质上是强化对流层低层的传统垂直螺旋度, 而弱化高层的传统垂直螺旋度。

3 本次降水过程概况及环流背景介绍

2010 年 7 月 16~18 日, 四川盆地自西向东出现了该年入汛以来范围最广、强度最大的强降雨天气过程, 造成四川省内多条河流出现超警戒水位, 川东北地区普降暴雨到大暴雨, 局部特大暴雨, 渠江广安老城区更是出现了“163 年一遇”的大洪水, 淹没了近三分之二的城区 (<http://news.qq.com/a/20100720/000337.htm> [2010-07-20])。其中川东北地区大巴山脉南端的巴中市 (31.2°~32.8°N, 106.3°~107.8°E) 16~18 日全境普降暴雨, 部分地方降特大暴雨。全市所有 75 个站点中, 有 34 个站点降雨量达到 200 毫米以上, 10 个站点降雨量达到 300 毫米以上, 通江麻石、至诚和平昌望京 3 个站点降雨量达到 400 毫米以上。全市因暴雨造成基础设施严重损毁, 192 万人受灾, 9 人死亡、4 人失踪, 直接经济损失达 9.1 亿元 (王茂书和张勇, 2011)。

此次暴雨过程是发生在欧亚中高纬度两脊一

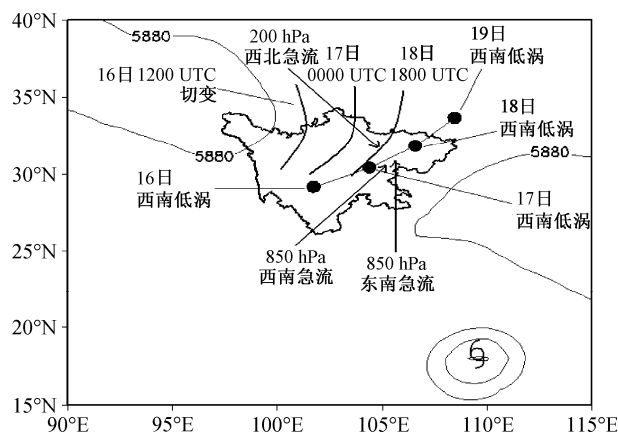


图 1 不同高度的天气系统叠加图

Fig. 1 The superposition of synoptic systems at different heights

槽相对稳定的环流背景下。过程期间系统从低层到高层有较好的配置 (如图 1): 低层西南低涡为本次暴雨过程提供了动力支持; 低空西南急流和台风“康森”东北侧的东南急流为本次暴雨过程提供了水汽支持, 且从低空风场及水汽通量图中 (图 2) 可以看出, 东南急流在此次暴雨过程中起主要作用; 高层 500 hPa 高度上, 由于台风“康森”的阻塞作用, 副高和青藏高原在过程期间相对稳定少动, 高空切变恰好在四川盆地上方; 200 hPa 青藏高原东北侧的西北急流, 与来自南边的气流交汇于四川盆地。以上这些系统共同造成了此次四川盆地持续性暴雨天气过程。

4 试验设计

本文利用 WRF 模式对 2010 年 7 月 16~18 日发生在四川盆地的持续性暴雨过程进行数值模拟, 模拟时段为 2010 年 7 月 15 日 1200 UTC 至 19 日 0000 UTC。模拟初始场和边界条件由 NCEP/NCAR 提供的 1°×1°格点资料 (间隔 6 小时) 形成, 模拟区域中心为 (31°N, 104°E), 采用两层双向嵌套, 由外到内各区域格点数分别为 300×300、277×265, 水平分辨率分别为 18 km、6 km, 垂直方向为 35 个 σ 层, 时间步长为 120 s。模拟区域的外层和中层采用 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案, 外层和中层都采用 WSM-3 微物理方案; 同时采用 YSU 边界层方案。数值模拟区域如图 3。

5 模拟结果验证及分析

5.1 降水对比

图 4 为 16 日 0000 UTC 到 17 日 0000 UTC 的

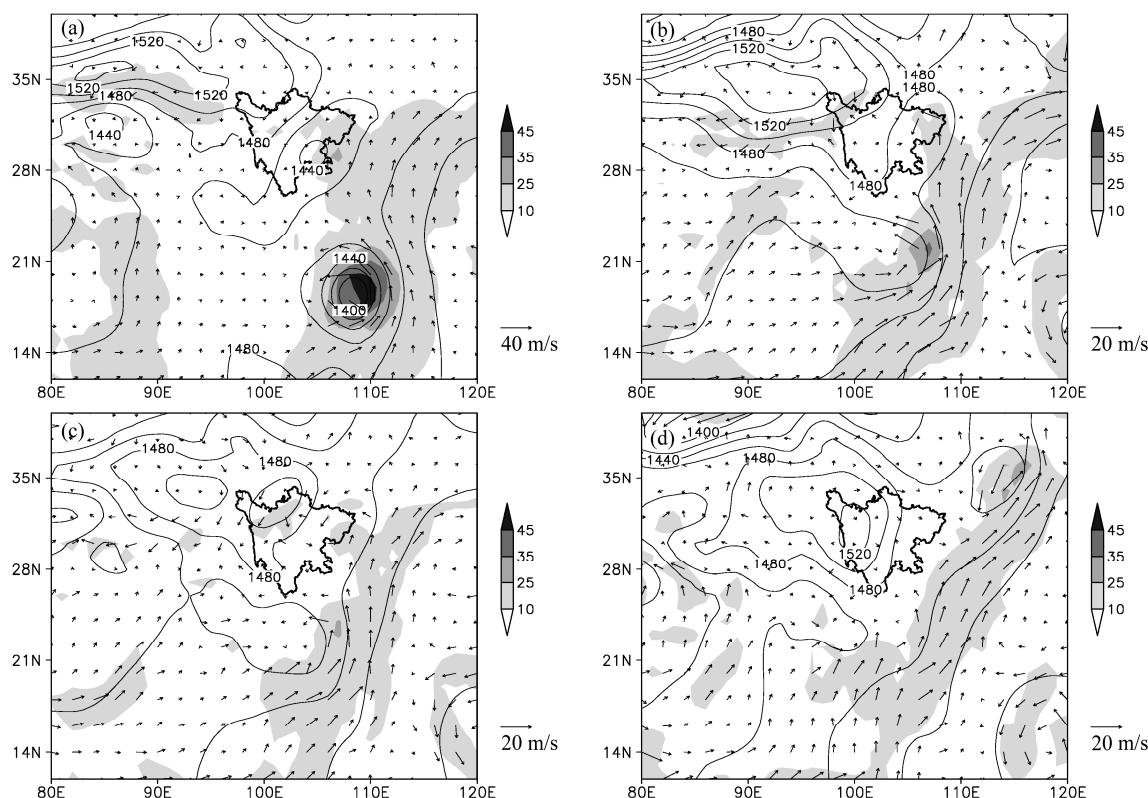


图2 850 hPa 位势高度场 (实线, 单位: gpm)、风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 及水汽通量值 (阴影, 单位: $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{hPa}^{-1}$): (a) 7月16日; (b) 7月17日; (c) 7月18日; (d) 7月19日

Fig. 2 The geopotential height field (solid contour, unit: gpm), winds (vector, unit: m s^{-1}), and water vapor fluxes (shaded, unit: $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) at 850 hPa: (a) 16 Jul; (b) 17 Jul; (c) 18 Jul; (d) 19 Jul

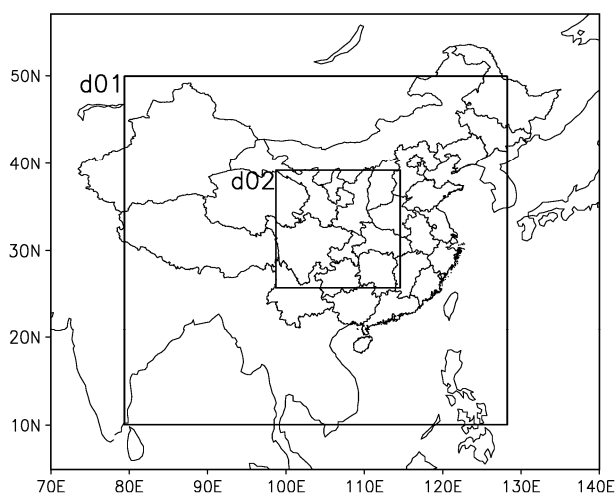


图3 数值模拟区域示意图

Fig. 3 The illustration of numerical simulation domains

24 小时累积降水实况与模拟结果对比。在实况降水图上, 四川盆地主要有三个降水区, 主雨区中心位于四川省东北部 (32°N , 107.8°E) 附近 (记为区域 A), 雨区呈近似圆形分布, 中心雨量值为 240 mm;

次雨区中心位于 (29°N , 103.5°E) 附近 (记为区域 B), 雨区范围略小, 中心雨量值为 150 mm; 较小的雨区中心位于 (28°N , 102°E) 附近 (记为区域 C), 呈椭圆形分布, 中心雨量值为 120 mm。从模拟的降水图 (图 4b) 上不难发现, 模式成功地模拟出了这三个降水区。在 A 主雨带区, 模拟的降水比实况降水范围略偏小, 雨区整体略偏西, 且降水中心略偏北, 其降水中心值为 180 mm 左右, 比实况值偏小; B 区域模拟的降水区域与实况基本一致, 其降水中心比实况略偏大, 中心雨量值为 180 mm, 比实况值略偏大; C 区域模拟的雨带范围比实况略偏小, 中心降水值为 90 mm, 比实况略偏小。

图 5 为 18 日 0000 UTC 到 19 日 0000 UTC 的 24 小时累积降水实况与模拟结果对比。实况图中四川盆地只有一个降水密集区, 分布在四川省东北部, 雨带呈东北—西南走向, 且近似扁椭圆形带状分布, 中心雨量最大值为 120 mm 左右。模式较好地模拟出了该日的降水情况 (图 5b), 模拟的降水区域与实况基本一致, 且走向也基本相同, 另外降水

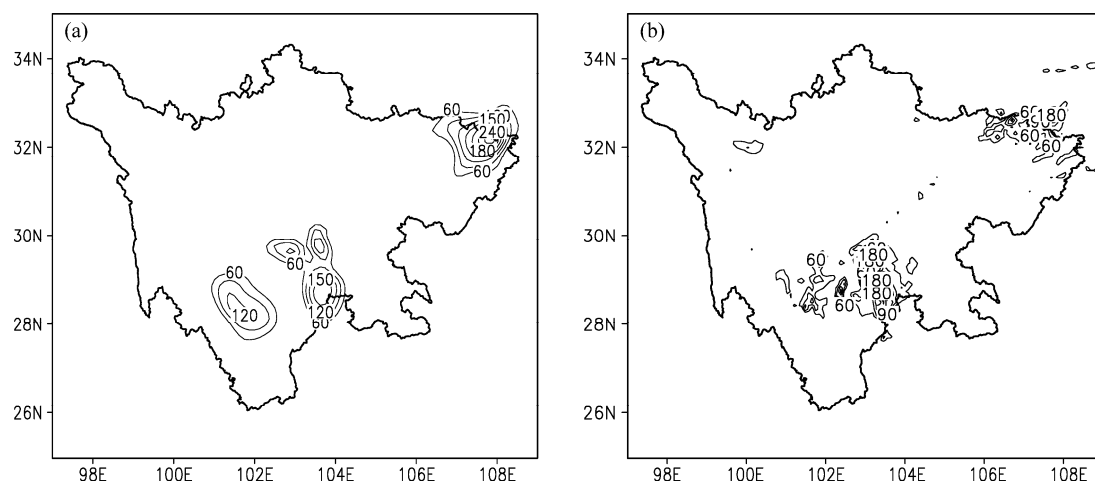


图4 2010年7月17日0000 UTC的24 h累积降水实况(a)与模式模拟结果(b)(单位: mm)

Fig. 4 The (a) observed and (b) simulated 24-h accumulated rainfall (unit: mm) at 0000 UTC 17 Jul 2010

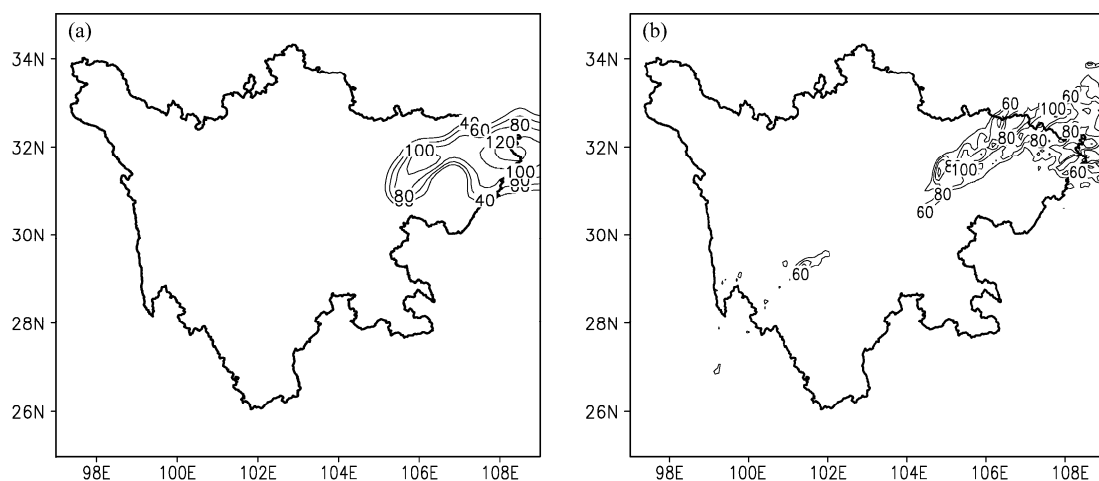


图5 2010年7月19日0000 UTC的24 h累积降水实况(a)与模式模拟结果(b)(单位: mm)

Fig. 5 The (a) observed and (b) simulated 24-h accumulated rainfall (unit: mm) at 0000 UTC 19 Jul 2010

值与实况也相当接近。总体而言,此次模拟比较成功,模式能很好地再现本次暴雨过程的降水落区及强降水中心。

5.2 暴雨落区的动力学诊断

四川东北部地区由于受到大巴山脉客观存在的影响,地形作用显著,因此本次暴雨过程中的雨量较其他地区大。另外,大巴山脉的存在必然影响到其附近空间要素场的分布,导致各诊断量的分布也会较无地形或弱地形的地区不同,从而影响暴雨落区的诊断。本文主要运用广义对流涡度矢量垂直分量 CVV_z^* 、广义湿位温 θ^* 以及质量垂直螺旋度 H^* 等三个动力因子对四川东北部地区的暴雨落区进行动力学诊断分析。

5.2.1 广义对流涡度矢量垂直分量

对广义对流涡度矢量垂直分量 CVV_z^* 从 850

hPa 至 500 hPa 垂直积分得到的 CVV_{sumz}^* 在地形作用不是很明显的地区确实与暴雨落区具有很好的对应关系 (Gao et al., 2004a; 赵宇和高守亭, 2008; Zhao and Cui, 2009)。然而在地形影响显著的地方,比如受大巴山脉影响下的四川东北部地区,空间要素场的分布往往要比无地形或弱地形的地区偏高 (图 6)。16 日 0600 UTC,在降水区上空有两个 CVV_z^* 中心,分别对应地面两个降水区,其等值线越密集,中心值越大,对应于地面降水强度也越大。 CVV_z^* 值主要集中在 800 hPa 到 550 hPa 之间,800 hPa 以下值很小。另外,在 $32.5^\circ\text{N} \sim 33.5^\circ\text{N}$ 大巴山脉所在的区域, CVV_z^* 的分布更高,主要在 750 hPa 高度以上,可见地形对 CVV_z^* 分布的影响。故此时再用传统的 CVV_{sumz}^* 来示踪四川东北部的暴雨落区显然并不合理 (图 7a、

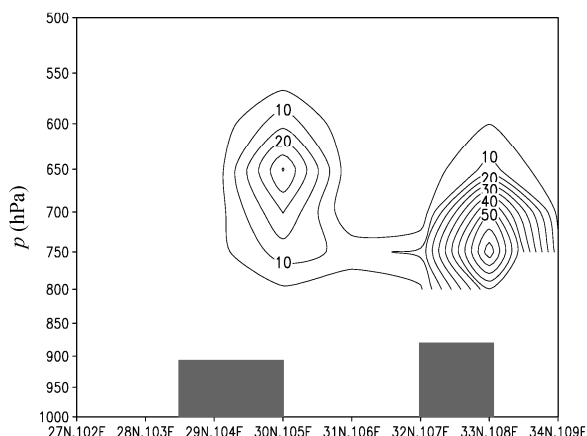


图 6 16 日 0600 UTC 模拟的沿暴雨中心直线 (从 (27°N, 102°E) 到 (34°N, 109°E)) 所作剖面上的 6 小时平均 CVV_z^* (单位: $10^{-8} (\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{K kg}^{-1})$) 和实况降水区 (灰色矩形)

Fig. 6 Simulated 6-h average CVV_z^* on the cross section along the line (from (27°N, 102°E) to (34°N, 109°E)) at 0600 UTC 16 Jul 2010 (unit: $10^{-8} (\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{K kg}^{-1})$) and observed rainfall range (gray rectangle)

c、e)。根据 CVV_z^* 的垂直分布, 本文对 CVV_z^* 从 750 hPa 至 650 hPa 垂直积分, 得到区别于传统 CVV_{sumz}^* 的改进后的广义对流涡度矢量垂直分量的垂直积分 $MCVV_{\text{sumz}}^*$, 并用 $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 来示踪暴雨落区。其表达式为:

$$MCVV_{\text{sumz}}^* = - \int_{750 \text{ hPa}}^{650 \text{ hPa}} CVV_z^* dp = - \int_{750 \text{ hPa}}^{650 \text{ hPa}} \frac{1}{\rho} \left(- \frac{\partial v}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial x} \right) dp \quad (6)$$

对 CVV_z^* 从 850 hPa 至 500 hPa 垂直积分, 用得到的 CVV_{sumz}^* 来示踪地形影响下的四川东北部的暴雨落区效果较差。图 7a、c、e 中, 四川东北部大巴山脉地区降水量较大, 然而 CVV_{sumz}^* 值的量级却比其他地区小, 以致于在用等值线显示 CVV_{sumz}^* 时, 该地区的 CVV_{sumz}^* 并不能正常显示出来, 造成了 CVV_{sumz}^* 在大巴山脉地区的“真空带”。该地区由于受到山脉的影响, 使得低层 (如图 6, 主要是 850 hPa 到 750 hPa) 的 CVV_z^* 值比相同高度的其他地区明显偏小, 当对 CVV_z^* 从 850 hPa 至 500 hPa 垂直积分时, 无山脉影响下的 30°N~32°N 地区受到低层 CVV_z^* 的贡献使得 CVV_{sumz}^* 值比大巴山脉地区大很多, 故造成感观上大巴山脉地区 CVV_{sumz}^* 的“真空带”。因此此时的 CVV_{sumz}^* 根本不能判断大巴山脉地区是否有降水。用改进后的 $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 来示踪大巴山脉影响下的暴雨落区效果明显变好 (图 7b、d、f)。因为从 750 hPa 至

650 hPa 垂直积分, 不同的地区都避免了低层 CVV_z^* 的影响, $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 的分布更为连续, 大巴山脉地区的“真空带”已经被连续的等 $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 线所替代。图 7b 中, $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 的分布与暴雨落区对应的较好, 等 $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 线基本覆盖暴雨落区, 且 $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 走向和暴雨落区较一致。图 7d、f 中, $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 的分布与暴雨落区的对应效果更好, $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 走向和暴雨落区的走向非常一致, 且等 $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 线的大值中心与降水中心也有较好的对应。可见, $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 对四川东北部的暴雨落区具有较好的指示作用。

综上所述, 由于山脉影响了低层 CVV_z^* 的分布, 用传统的 CVV_{sumz}^* 来示踪四川东北部的暴雨落区效果较差, 改用从 750 hPa 至 650 hPa 垂直积分后, $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 的分布与地面降水具有较好的对应关系。因此用 $MCVV_{\text{sumz}}^*$ 代替传统的 CVV_{sumz}^* 来示踪地形影响下的四川暴雨落区效果更好。

5.2.2 广义湿位温

根据 7 月 16~18 日 0600 UTC 的 6 小时累积降水实况分布 (图 8a、c、e), 分别对降水集中的经向带区域 105.7°E~107.8°E、106°E~107.8°E 和 104.3°E~107°E 作纬向平均的 θ^* 垂直剖面图 (图 8b、d、f), 其中 θ^* 值为 6 小时的平均值。16 日 0600 UTC, 模拟的降水区主要位于 32°N 到 33°N, 相应的 θ^* 纬向平均垂直剖面图上 (图 8b), 该区域上空等 θ^* 线呈现近似倒 Ω 分布, 从 850 hPa 到 400 hPa 均有明显的强信号。850 hPa 附近等 θ^* 线分布密集, 800 hPa 到 400 hPa 等 θ^* 线倾斜程度较大, 近乎垂直, 可见该区域的 θ^* 水平和垂直梯度都很大, 冷暖对比显著, 伴有强烈的上升运动, 因此降水强度较大。而在倒 Ω 周边区域, 等 θ^* 线倾斜程度相对较小, 且 θ^* 异常的上限高度在 500 hPa 附近, 信号异常高度不及倒 Ω 区, 对应的降水强度也偏弱。17 日和 18 日的 θ^* 纬向平均垂直剖面图上也是相同的情况, 倒 Ω 区域对应着降水的大值区, 而降水偏弱的地区等 θ^* 线倾斜程度以及 θ^* 异常的高度明显不及强降水区。可见等 θ^* 线的倒 Ω 区域与四川东北部的强降水落区吻合较好, 等 θ^* 线的倾斜程度以及 θ^* 异常的高度可以定性地指示降水的强弱。因此, θ^* 能够对地形影响下的降水落区提供一定的指示作用, 可以作为预报地形暴雨落区以及比较区域间降水强弱的有效工具。

接下来分析垂直积分的广义湿位温与模拟的 6

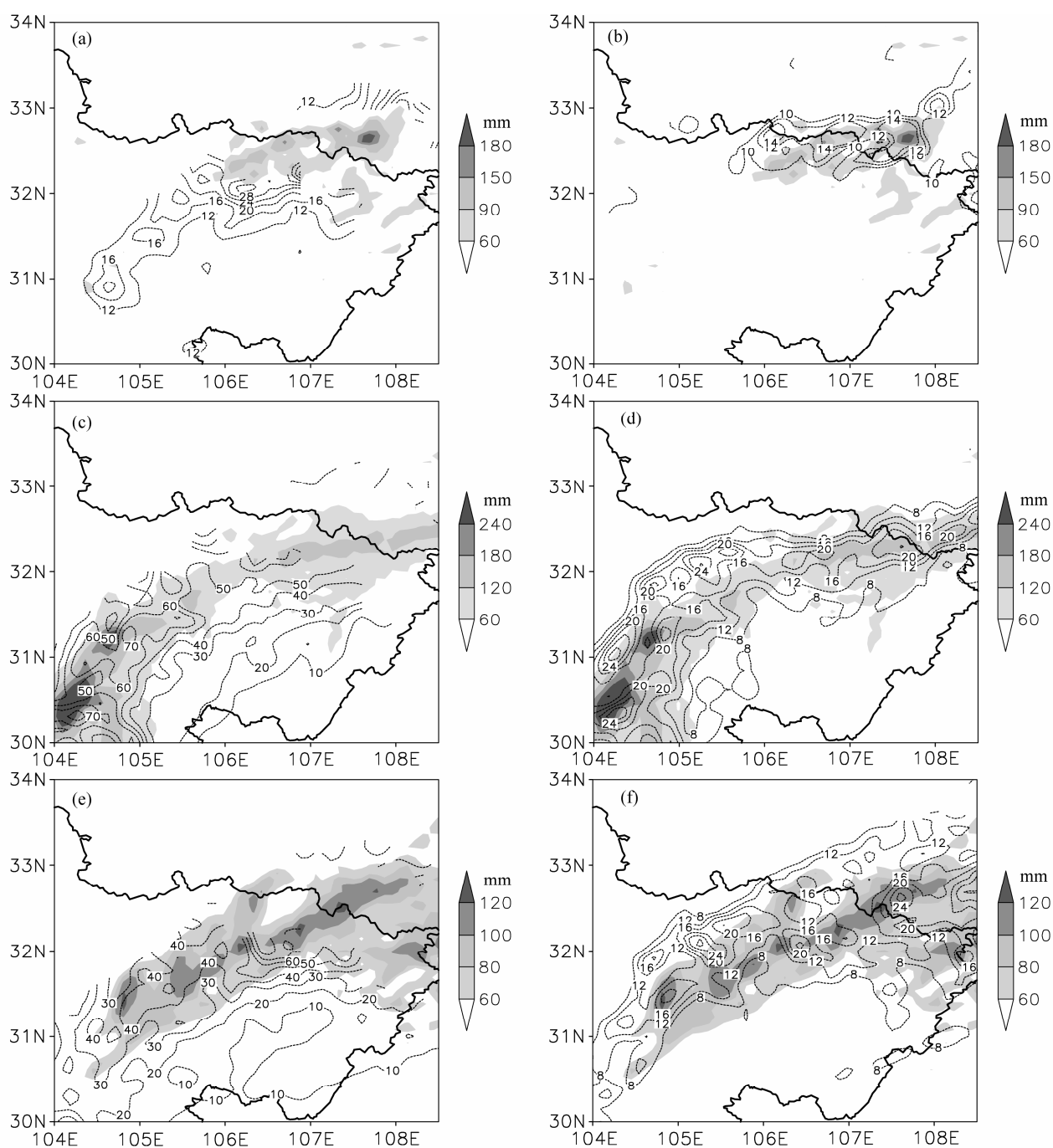


图7 模拟的24小时平均 CVV^*_{sumz} (a, c, e) 和 $MCVV^*_{sumz}$ (b, d, f) (黑色短虚线, 单位: $10^{-6} (m^2 s^{-1} K kg^{-1})$) 及24小时累积降水 (阴影区, 单位: mm): (a, b) 17日 0000 UTC; (c, d) 18日 0000 UTC; (e, f) 19日 0000 UTC

Fig. 7 Simulated 24-h average (a, c, e) CVV^*_{sumz} and (b, d, f) $MCVV^*_{sumz}$ (black dashed contour, unit: $10^{-6} (m^2 s^{-1} K kg^{-1})$) and simulated 24-h accumulated precipitation (shaded, unit: mm): (a, b) 0000 UTC 17 Jul; (c, d) 0000 UTC 18 Jul; (e, f) 0000 UTC 19 Jul

小时累积地面降水之间的关系。与 CVV^*_{sumz} 水平分布的情况类似, 当对 θ^* 从 850 hPa 到 500 hPa 垂直积分时, 受大巴山脉影响的地区同样出现了 θ^* 的“真空带”, 而受地形影响较小的地区, θ^* 的分布仍然能较好地指示降水落区 (图 9a、c、e), 这与大巴山脉地区 θ^* 的垂直分布高度基本在 850 hPa 高

度以上有关 (图 8b、d、f), 可见用 850 hPa 到 500 hPa 垂直积分的 θ^* 来示踪弱地形地区的暴雨落区效果较好, 而在指示地形影响地区的暴雨落区时存在困难。基于大巴山脉地区 θ^* 在 800 hPa 以上都有分布, 选取对 θ^* 从 800 hPa 到 500 hPa 垂直积分 (图 9b、d、f)。用改进后的 θ^* 水平分布图来示踪大巴

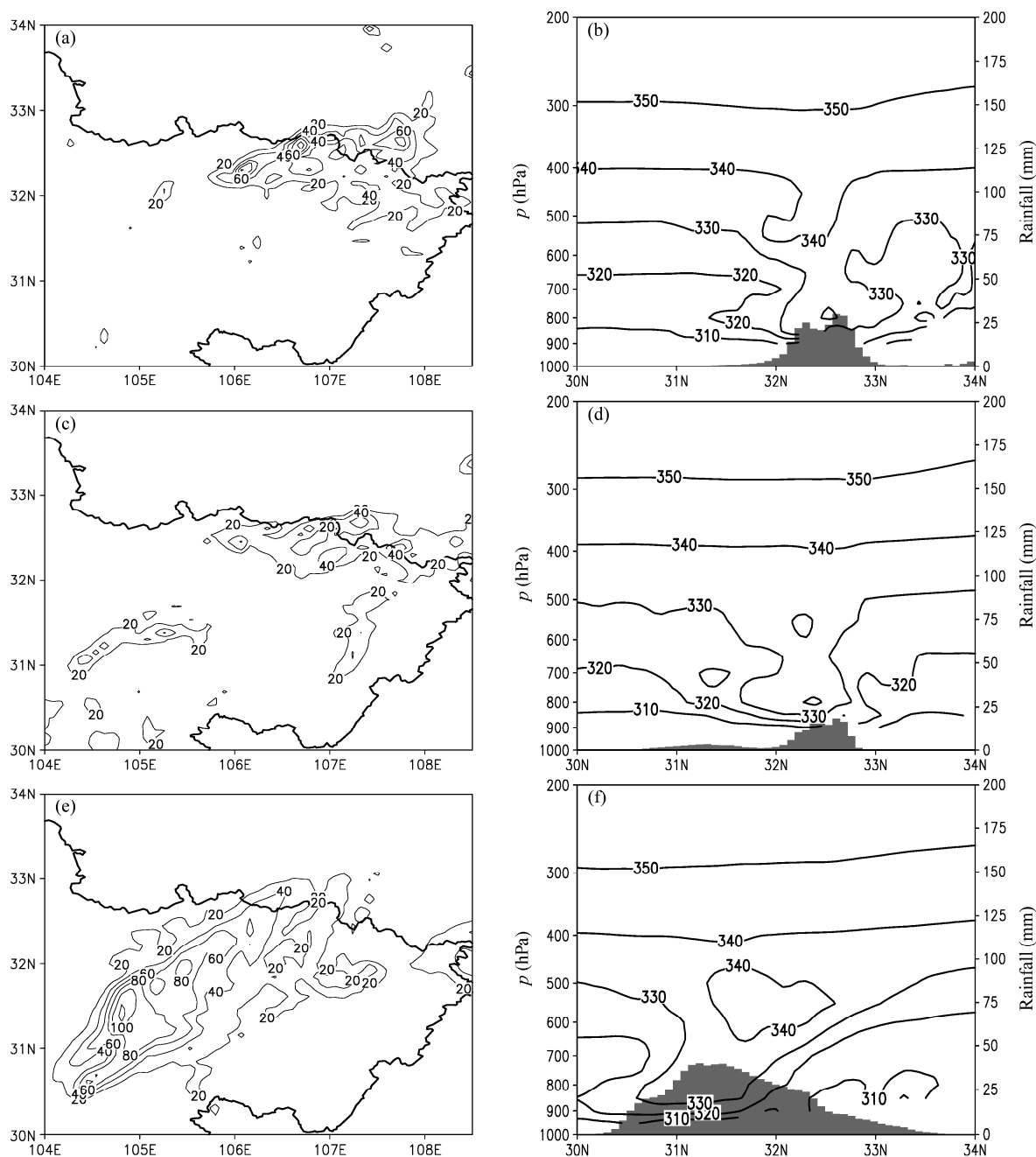


图8 模拟的6小时累计降水 (a. 16日0600 UTC; c. 17日0600 UTC; e. 18日0600 UTC) (单位: mm) 和纬向平均的 θ^* 的经向—垂直剖面 (b. 16日, 105.7°E~107.8°E; d. 17日, 106°E~107.8°E; f. 18日, 104.3°E~107°E) (等值线, 单位: K), 阴影为模拟的6小时累积降水剖面 (单位: mm)

Fig. 8 The simulated 6-h accumulated rainfall (a. 0600 UTC 16 Jul 2010; c. 0600 UTC 17 Jul 2010; e. 0600 UTC 18 Jul 2010) (unit: mm) and the meridional-vertical cross section of the zonal mean of θ^* (contour, unit: K) and 6-h accumulated rainfall (shaded, unit: mm) at 0600 UTC (b. 16 Jul, 105.7°E~107.8°E; d. 17 Jul, 106°E~107.8°E; f. 18 Jul, 104.3°E~107°E)

山脉影响下的暴雨落区效果明显得到改善。从 800 hPa 至 500 hPa 垂直积分后, 不同地区都避免了低层 θ^* 的影响, θ^* 的水平分布更为连续。图 9b、d、f 中, θ^* 已经能够较好地指示出地形区域的暴雨落区: 等 θ^* 线基本覆盖暴雨落区, θ^* 的走向和暴雨落区也较一致, 且 θ^* 的大值区和降水中心也基本上相对应。

对比这两种积分区间积分得到的 θ^* 水平分布图还可以看出, 在地形影响较小的地区 (32.5°N 以南), 积分区间的改变并没有使 θ^* 的水平分布发生变化, 其变化主要体现在受大巴山脉影响的地区, 改进后的 θ^* 的水平分布能够较改进前更好地指示出受大巴山脉影响地区的暴雨落区。因此用改进后的 θ^* 的水平

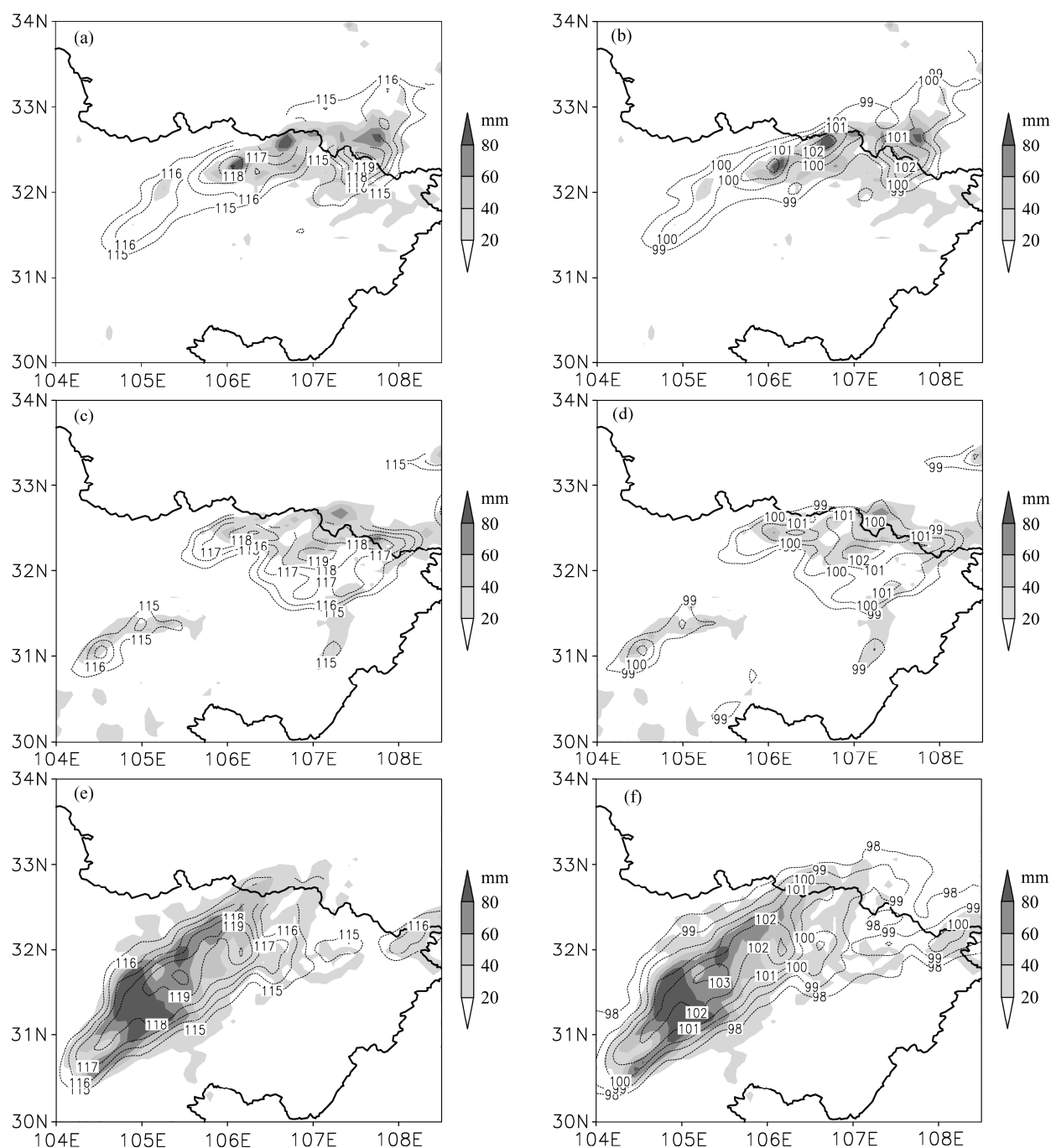


图9 模拟的6小时平均 θ^* 在(a, c, e) 850~500 hPa和(b, d, f) 800~500 hPa的垂直积分(黑色短虚线, 单位: 10^3 K)和6小时累积降水(阴影区, 单位: mm): (a, b) 16日0600 UTC; (c, d) 17日0600 UTC; (e, f) 18日0600 UTC

Fig. 9 The vertical integral of simulated 6-h average θ^* during (a, c, e) 850~500 hPa and (b, d, f) 800~500 hPa (black dashed contour, unit: 10^3 K) and simulated 6-h accumulated precipitation (shaded, unit: mm): (a, b) 0600 UTC 16 Jul; (c, d) 0600 UTC 17 Jul; (e, f) 0600 UTC 18 Jul.

分布来示踪地形影响下的四川暴雨落区效果更好。

5.2.3 质量垂直螺旋度

对降水集中的经向带区域作纬向平均的质量垂直螺旋度 H^* 的经向垂直剖面图(图10), 其中 H^* 值为6小时的平均值。如图10a所示, 16日0600 UTC模拟的6小时累积降水区主要位于32°N到

33°N之间, 雨区上空的质量垂直螺旋度很显著, H^* 的异常区主要集中在800 hPa至500 hPa之间, H^* 异常区的范围与雨区范围基本一致, H^* 的大值中心与地面雨区的降水中心相对应, 且 H^* 的中心值越大, 对应的地面降水也越强。而 H^* 值等于零的地方, 其对应的地面降水值较弱或者没有地面降

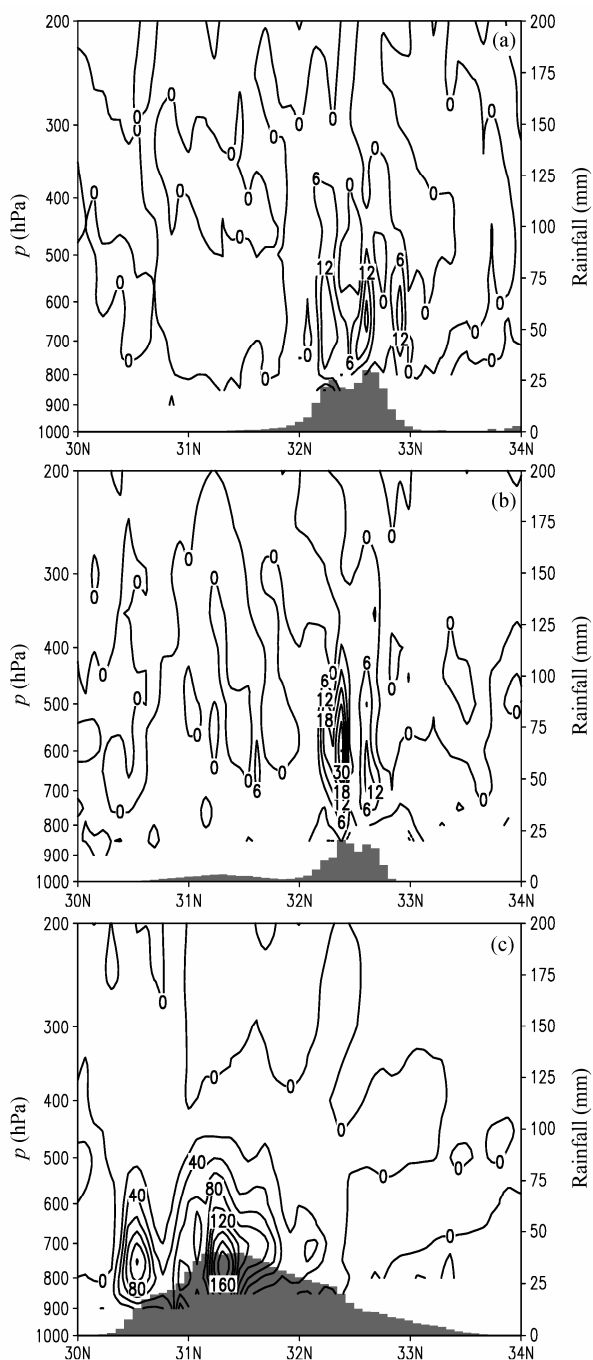


图 10 纬向平均的质量垂直螺旋度的经向—垂直剖面: (a) 16 日 0600 UTC, 105.7°E~107.8°E; (b) 17 日 0600 UTC, 106°E~107.8°E; (c) 18 日 0600 UTC, 104.3°E~107°E (等值线, 单位: $10^{-6} (\text{kg m}^{-3} \text{Pa s}^{-2})$)。阴影为模拟的 6 小时累积降水剖面图 (单位: mm)

Fig. 10 The meridional-vertical cross section of the zonal mean of H^* (contour, unit: $(10^{-6} (\text{kg m}^{-3} \text{Pa s}^{-2}))$) and simulated 6-h accumulated rainfall (shaded, unit: mm) at 0600 UTC: (a) 0600 UTC 16 Jul, 105.7°E–107.8°E; (b) 0600 UTC 17 Jul, 106°E–107.8°E; (c) 0600 UTC 18 Jul, 104.3°E–107°E

水。图 10b、c 的情况基本和图 10a 一致, H^* 密集的区域和地面强降水对应的较好, 而在降水较弱的地区, 相应地其上空的质量垂直螺旋度也较小, 可见

质量垂直螺旋度的分布和地面强降水具有很好的对应关系。另外, 图 10a、b、c 各自的降水区域上空, 400 hPa 高度以上 H^* 的值很小, 近似为零, 与 400 hPa 高度以下的 H^* 值相差很大, 这正是密度 ρ 对传统垂直螺旋度低层强化高层弱化的结果。垂直螺旋度反映的是大气的旋转上升状况, 这过程主要体现在中低层, 通过引入密度 ρ , 可以有效地过滤掉高层的夹杂信息, 突出中低层的有用信息, 从而刻画出降水系统的典型动力场垂直结构。

接着分析垂直积分的质量垂直螺旋度与模拟的 6 小时累积地面降水之间的关系。由于地形的影响, 对 H^* 从 850 hPa 至 500 hPa 垂直积分, 用得到的水平分布的 H^* 来示踪大巴山脉影响下的暴雨落区效果同样不理想 (图略)。根据 H^* 的垂直分布, 选取垂直积分区间为 800 hPa 至 500 hPa。从垂直积分的 H^* 的水平分布来看 (图 11), H^* 已经能较好地指示出大巴山脉附近地区的暴雨落区。16 日 0600 UTC, 四川东北部的降水落区大致呈东北—西南走向, 共有三个降水中心, 中心雨量值都超过 80 mm。质量垂直螺旋度的分布基本呈带状, 在位置和走向上与雨带基本上相对应, 覆盖着雨区, 但总的范围比雨区偏小。其一共有四个大值中心, 其中靠近北边的三个大值中心分别与三个降水中心相对应, 另外一个中心则与次降水中心相对应。不过 H^* 并没有指示出雨区东南方的一块弱降水区域。类似的情况也发生在 17 日和 18 日的降水过程中, 水平分布的 H^* 与强降水中心对应较好, 但却不能有效指示出弱降水区域。可见 H^* 在指示强降水时效果比较理想, 然而在示踪弱降水区时效果并不是很好。这表明质量垂直螺旋度表征的是强降水过程中的动力场垂直结构, 对强降水雨区具有一定的指示意义。

总的来说, 质量垂直螺旋度能刻画出四川东北部地区强降水系统的典型动力场垂直结构。而这种典型的垂直结构与地面降水紧密相连, 因而质量垂直螺旋度与地面强降水具有很好的对应关系, 可以作为预报地形影响下的四川暴雨落区的有效工具。

6 小结

本文首先对地形作用下四川盆地的一次暴雨过程进行了天气系统分析, 并运用中尺度非静力模式 WRF 对此次强降水过程进行了数值模拟, 利用实况观测资料与模拟结果进行了对比验证, 然后运用广义对流涡度矢量垂直分量 CVV_z^* 、广义湿位温

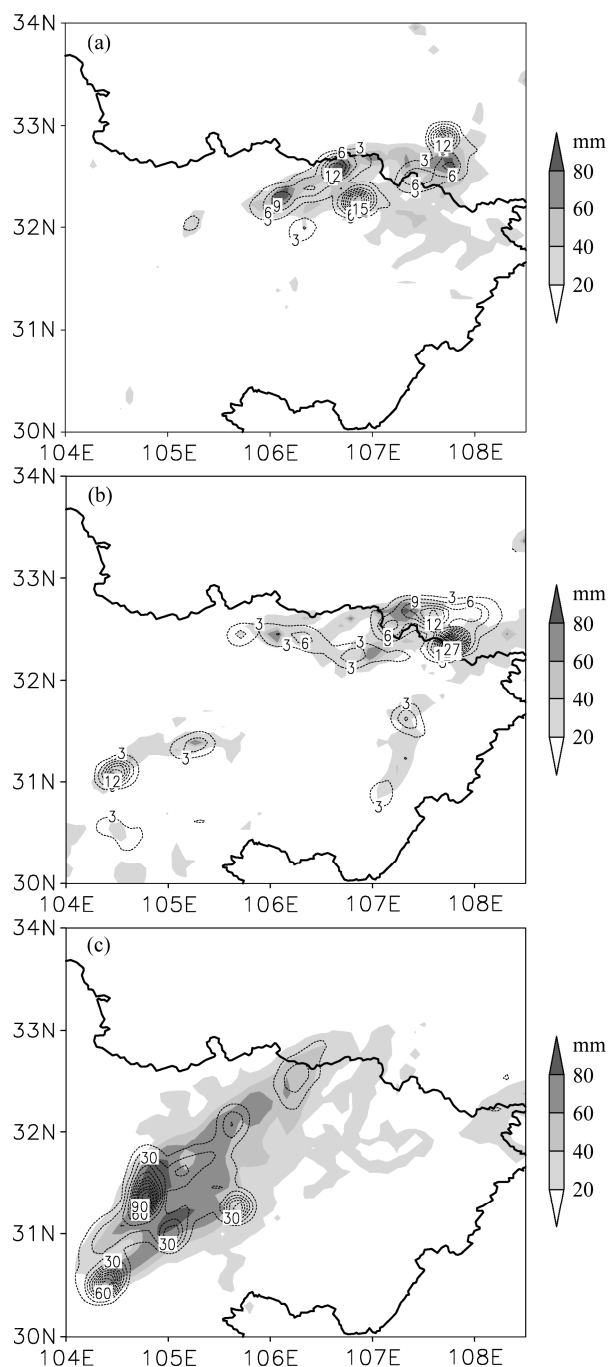


图 11 6 小时平均的 H^* 从 750 hPa 至 500 hPa 的垂直积分 (黑色点线, 单位: $10^{-3} (\text{kg m}^{-3} \text{Pa s}^{-2})$) 和模拟的 6 小时累积降水 (阴影区, 单位: mm): (a) 16 日 0600 UTC; (b) 17 日 0600 UTC; (c) 18 日 0600 UTC

Fig. 11 The vertical integral of simulated 6-h average H^* from 750 hPa to 500 hPa (black dashed contour, unit: $10^{-6} (\text{kg m}^{-3} \text{Pa s}^{-2})$) and simulated 6-h accumulated precipitation (shaded, unit: mm): (a) 0600 UTC 16 Jul; (b) 0600 UTC 17 Jul; (c) 0600 UTC 18 Jul

θ^* 和质量垂直螺旋度 H^* 三个动力因子对受大巴山脉影响的四川东北部地区的地形暴雨进行了诊断分析, 得到以下结论:

(1) 西南低涡为此次暴雨过程提供动力支持;

低空西南急流和东南急流提供水汽支持, 且东南急流在此次暴雨过程中起主要作用; 副高和青藏高原在过程期间稳定少动, 高空切变恰好在四川盆地上方; 高空西北急流与来自南边的暖湿气流交汇于四川盆地, 以上这些系统共同造成了此次四川盆地持续性暴雨天气过程。

(2) 模式对本次四川地形暴雨过程的模拟比较成功, 能很好地再现本次强降水的落区以及强降水中心。

(3) 大巴山脉影响低层 CVV_z^* 的分布, 用传统的对 CVV_z^* 从 850 hPa 至 500 hPa 垂直积分得到的 CVV_{sumz}^* 来示踪四川东北部的暴雨落区效果较差; 根据 CVV_z^* 的垂直分布, 改用从 750 hPa 至 650 hPa 垂直积分得到的 $MCVV_{sumz}^*$ 来示踪东北部的暴雨落区效果明显变好, $MCVV_{sumz}^*$ 与地面强降水具有较好的对应关系。

(4) θ^* 纬向平均的垂直剖面图上, 等 θ^* 线的倒 Ω 区域与四川东北部的强降水落区吻合较好, 等 θ^* 线的倾斜程度以及 θ^* 异常的高度可以定性地指示降水的强弱。对 θ^* 从 800 hPa 到 500 hPa 垂直积分, 用得到的 θ^* 的水平分布来指示受大巴山脉影响地区的暴雨落区效果较好。

(5) 质量垂直螺旋度强化了对流层低层的传统垂直螺旋度, 弱化了对流层高层的传统垂直螺旋度, 能有效刻画出强降水系统的典型动力场垂直结构, 与四川东北部的地面强降水具有很好的对应关系, 对四川地形暴雨落区具有一定的指示意义。

未来将对更多的地形影响下的暴雨个例展开类似研究, 检验不同的动力因子是否对暴雨落区都具有诊断和预报意义。同时, 在不同的地形影响下, 动力因子的垂直积分的最优积分区间并不是完全相同的, 需要做进一步的研究。

参考文献 (References)

- 陈志昆, 张书余. 2010. 地形在降水天气系统中的作用研究回顾与展望 [J]. 干旱气象, 28 (4): 460–466. Chen Zhikun, Zhang Shuyu. 2010. Review and outlook of landform influences on rainfall weather systems [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 28 (4): 460–466.
- 崔春光, 房春花, 胡伯威, 等. 2000. 地形对低涡大暴雨影响的数值模拟试验 [J]. 气象, 26 (8): 14–18. Cui Chunguang, Fang Chunhua, Hu Bowei. 2000. Numerical simulation of the topographic effects on torrential rain with Southwest China vortex [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 26 (8): 14–18.
- 符长锋, 李任承, 赵振东, 等. 2006. 广义相当位温及其扩展应用 [J]. 气象, 32 (3): 11–17. Fu Changfeng, Li Rencheng, Zhao Zhendong, et al.

2006. Generalized potential equivalent temperature and its extended application [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 32 (3): 11–17.
- Gao S T, Cao J. 2007. Physical basis of generalized potential temperature and its application to cyclone tracks in nonuniformly saturated atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D18101, doi: 10.1029/2007JD008701.
- 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 (12): L12113, doi: 10.1029/2003GL019152.
- Gao S T, Cui X P, Zhou Y S, et al. 2005. A modeling study of moist and dynamic vorticity vectors associated with 2D tropical convection [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D17104, doi: 10.1029/2004JD005675.
- Gao S T, Li X F, Tao W K, et al. 2007. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical oceanic convection: A three-dimensional cloud-resolving model simulation [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D01105, doi: 10.1029/2006JD007179.
- 葛晶晶, 钟玮, 杜楠, 等. 2008. 地形影响下四川暴雨的数值模拟分析 [J]. *气象科学*, 28 (2): 176–183. Ge Jingjing, Zhong Wei, Du Nan, et al. 2008. Numerical simulation and analysis of Sichuan rainstorm under terrain influence [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 28 (2): 176–183.
- 李耀东, 刘健文, 高守亭. 2005. 螺旋度在对流天气预报中的应用研究进展 [J]. *气象科技*, 33 (1): 7–11. Li Yaodong, Liu Jianwen, Gao Shouting. 2005. Progress in researches on application of helicity to convective weather prediction [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 33 (1): 7–11.
- 刘运成. 2006. 青藏高原东侧一次连续大暴雨过程湿 Q 矢量分析 [J]. *气象*, 32 (12): 43–49. Liu Yuncheng. 2006. Wet Q -vector analysis of a continued heavy rain process over the eastern Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 32 (12): 43–49.
- 刘运成. 2011. 一次连续暴雨的非地转湿 Q 矢量分解分析 [J]. *气象科技*, 39 (6): 796–802. Liu Yuncheng. 2011. Application of improved wet Q vector partitioning method to diagnosis of a continued heavy rain [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 39 (6): 796–802.
- 骆凯, 李耀东, 章亦涛. 2010. 广义波作用量密度在一次华北暴雨模拟诊断中的应用研究 [J]. *高原气象*, 30 (1): 74–82. Luo Kai, Li Yaodong, Zhang Yitao. 2010. Study and application of general wave activity density to the numerical simulation and diagnostic analysis of a rainstorm in North China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (1): 74–82.
- 冉令坤, 楚艳丽. 2009. 强降水过程中垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的诊断分析 [J]. *物理学报*, 58 (11): 8094–8106. Ran Lingkun, Chu Yanli. 2009. Diagnosis of vertical helicity, divergence flux and their extensions in heavy-rainfall events [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 58 (11): 8094–8106.
- 冉令坤, 周玉淑, 杨文霞. 2011. 强对流降水过程动力因子分析和预报研究 [J]. *物理学报*, 60 (9): 1–11. Ran Lingkun, Zhou Yushu, Yang Wenxia. 2011. Analysis and forecasting of heavy-rainfall event by strong convection [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 60 (9): 1–11.
- Yang Qun, Mao Jianqiang, Zhou Changzhi, et al. 2010. Vertical helicity analysis of first rainstorm at the beginning of Meiyu in Hubei in 2009 [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 1 (8): 41–45.
- Yue Caijun, Shou Shaowen. 2008. A modified moist ageostrophic Q vector [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25 (6): 1053–1061.
- 王茂书, 张勇. 2011. 2010 年 7 月 16~18 日巴中市持续性暴雨天气诊断分析 [J]. *高原山地气象研究*, 31 (3): 43–48. Wang Maoshu, Zhang Yong. 2011. Diagnostic analysis on continual rainstorm from July 16 to July 18, 2010 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 31 (3): 43–48.
- 赵宇, 高守亭. 2008. 对流涡度矢量在暴雨诊断分析中的应用研究 [J]. *大气科学*, 32 (3): 444–456. Zhao Yu, Gao Shouting. 2008. Application of the convective vorticity vector to the analysis of a rainstorm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (3): 444–456.
- Zhao Yu, Cui Xiaopeng. 2009. Application of convective and moist vorticity vectors in the analysis of a heavy rainfall event [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 67 (4): 540–548.
- 周玉淑, 朱科峰. 2008. 湿大气的广义位温与干大气位温及饱和湿大气相当位温的比较 [J]. *气象学报*, 68 (5): 612–616. Zhou Yushu, Zhu Kefeng. 2008. Comparisons between the generalized potential temperature in the moist atmosphere and the potential temperature in the dry atmosphere and the equivalent potential temperature in the saturated moist atmosphere [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 68 (5): 612–616.