

贵州 02.6 大暴雨的模拟与诊断分析

张润琼^{1,2} 沈桐立¹

(1. 南京信息工程大学大气科学系, 210044; 2. 贵州六盘水市气象局)

提 要: 利用 MM5 中尺度模式对贵州 2002 年 6 月 18 日 00 时~19 日 00 时的暴雨天气过程进行了数值模拟, 首先利用模式输出的基本物理量分析了相当位温、垂直速度, 并计算垂直螺旋度以及湿位涡正压、斜压项, 诊断分析发现: 暴雨中心位于最大垂直速度中心附近; 南北两支闭合经向垂直环流对于暴雨区的低空入流和高空出流具有非常重要的作用。螺旋度的变化对暴雨的强度变化有很好的指示性, 暴雨区位于螺旋度等值线密集区靠正螺旋度区一侧; 贵州大暴雨与 500hPa “漏斗”形 MPV1 高值区同位相变化, 高低层 MPV1 “正负值区垂直叠加”的配置是暴雨发生、发展的有利形势。500hPa 上 MPV2 正值区与对流性降水区对应很好, 而且强度变化也一致。

关键词: 大暴雨 数值模拟 螺旋度 湿位涡 诊断分析

Simulation and Diagnostic Analysis of “02.6” Heavy Rain Event in Guizhou Province

Zhang Runqiong^{1,2} Shen Tongli¹

(1. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;
2. Liupanshui Meteorological Office, Guizhou Province)

Abstract: A heavy rain event in Guizhou on June 18: 00—19: 00 (UTC), 2002, is simulated with meso-scale numerical model (MM5). With the basic physical parameters from the model output, the potential equivalent temperature and vertical velocity are analyzed, and calculation of the helicity and the barotropic and baroclinic moist potential vorticity (MPV)

资助项目: 国家自然科学基金项目 (40075023) 资助

收稿日期: 2005 年 2 月 4 日; 修定稿日期: 2005 年 6 月 17 日

are made. The diagnosis results are as follows. The center of the rainfall is adjacent to the maximum vertical velocity. The southern and northern meridional-vertical circulations are significant to the in- and out-flow on the lower and upper level, respectively. The change of the helicity is a good indicator for the evolution of the rainfall intensity. The heavy rainfall area lie in the dense part of helicity isograms. The occurrence, intensification and decay of the event is corresponding to that of the funnel-like MPV1 high value area. Moreover, the overlapping of the positive MPV1 at the upper-level and negative MPV1 at the low-level is advantageous to the appearance and development of the event. The positive MPV2 area at 500hPa is well corresponding to the convective rainfall area, and they have in phase changes.

Key Words: heavy rainfall numerical simulation helicity moist potential vorticity

引 言

贵州地处乌蒙山脉南端,云贵高原北部,下垫面性质复杂,地形地貌特征多样化。由于其特殊的地理位置和大气环流等因素影响,形成了贵州独有的天气气候特征,由持续性暴雨引发的洪涝和由突发性局地暴雨引发的泥石流等山地灾害常有发生,对这一地区暴雨的研究显得十分重要。近几年,运用 MM5 中尺度模式对暴雨过程进行数值模拟并用模式输出的基本物理量对暴雨过程的成因进行诊断分析,各国的气象工作者进行了大量的研究,得出了一些有益的结论^[1~3]。然而运用数值模式来讨论贵州暴雨的研究尚少。这里用 MM5 中尺度数值模式,从一次大暴雨实例出发,对其进行模拟和诊断分析研究,试图通过模拟和诊断分析找出影响贵州大暴雨发生发展的因子,从而对贵州大暴雨过程产生的原因作一些探讨。

1 贵州 02.6 大暴雨天气过程概况

1.1 降水的时空分布

受高原东移小槽、低涡切变和地面静止锋的共同影响,2002年6月17~19日,贵

州省中部、北部及贵州、重庆、湖南三省交界地区出现了一次连续性暴雨—大暴雨天气过程。过程强降水时段主要出现在18日傍晚到夜间,强降水区呈东北西南向,两个强降水中心分别位于贵州中部的开阳和湘西的大庸附近,24小时最大降水量分别为186mm、203mm。这次过程持续4天,共出现了10站次大暴雨,28站次暴雨,52站次大雨,贵州的遵义、绥阳、遵义县、务川、福泉、息烽、开阳过程降雨量均超过150mm,开阳过程降雨量为237mm,大庸过程降雨量达362mm。由于暴雨来势猛、强度大,范围大,造成山洪爆发,河水上涨并诱发了滑坡、泥石流灾害。

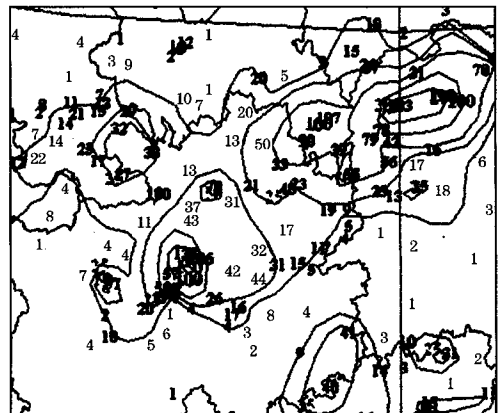


图 1 2002年6月18日00时~19日00时
24小时降水量实况(单位:mm)

1.2 环流形势特征

2002 年 6 月 16~18 日 200hPa 有两支高空急流 (图略), 偏西急流和东北急流, 850hPa 是风速高达 $16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南偏南急流, 从东南沿海直达贵州北部; 同时副高有所减弱, 脊线呈 NE-SW 走向, 贵州位于高空东北急流右后方的入口处, 低空西南急流左前方的出口处, 这种高低空急流的配置非常有利于暴雨区垂直上升运动的产生。500hPa 亚洲中高纬地区为两槽两脊型, 西风带多短波槽活动, 17 日 12 时有一深槽位于陕西略阳、四川成都、自贡到贵州威宁附近, 18 日此槽北段东移, 南段在川南到贵州西部维持 (图略)。700hPa 17 日在巴塘以西的低涡 18 日移到巴塘附近, 形成低涡切变并维持。

2 模式简介与数值模拟结果分析

利用 2002 年 6 月 18 日 00 时至 20 日 00 时 (世界时, 下同) 每 6 小时的 NCEP 再分析资料 (水平分辨率 $1^\circ\times 1^\circ$) 和同时时间的探空、地面资料, 采用 MM5V3 模式对这次暴雨天气过程进行数值模拟, 从 2002 年 6 月 18 日 00 时起积分 48h。格点结构采用双重嵌套网格, 区域中心为 28°N 、 107.5°E , 粗网格格距 60km, 细网格格距 20km, 粗细嵌套网格格点数均为 61×61 , 模式顶气压 10hPa, 积分步长 90s, 每小时输出一次模拟结果。动力学过程采用流体非静力平衡方案, 模式粗网格采用 Grell 积云对流参数化方案, 细网格采用 Anthes-Kuo 积云对流参数化方案, 两重网格采用 Blackadar 的边界层参数化方案以及时变海绵侧边界条件等, 模式地形采用 NCAR (30m) 地形资料, 经过中尺度客观分析和平滑, 插值到 60km 网格点上。

图 2 为模式输出的 18 日 00 时~19 日 00 时 24 小时雨量场, 与实际雨量相比较, 6 月 18 日 00 时~6 月 19 日 00 时的 24 小时降水区的东西两个强降水中心均被模拟了出来, 雨区呈 SW-NE 向, 西部雨区中心值为 200mm, 东部雨区中心值为 150mm; 模拟结果与实况降水场比, 大范围降水区的分布、降水的强度和降雨中心位置基本一致, 可以认为 MM5 对此次暴雨过程有较强的模拟能力, 用模式输出的细网格动力协调资料进行暴雨的诊断研究, 能够反映暴雨及其系统的发展演变及形成机制, 得到比较可靠的结论。

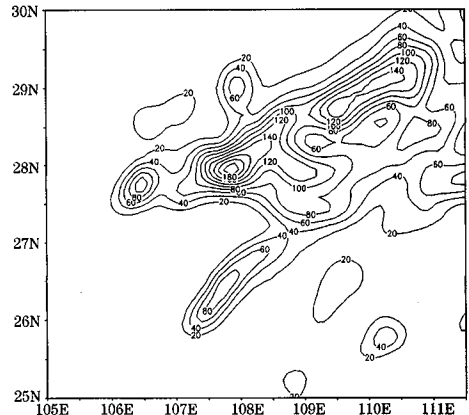


图 2 2002 年 6 月 18 日 00 时~19 日 00 时模式输出 24 小时降水量 (单位: mm)

3 θ_{se} 场分布

图 3 为 6 月 18 日 00 时 700hPa θ_{se} 分布图, 图中可清楚看到这次暴雨天气过程中低层系统的相互作用, 在 $95\sim 100^\circ\text{E}$ 低涡切变处有一东北西南向的 72°C 高值带, 中心值达 78°C , 低空急流对应的高值区向东北伸展到贵州北部及湖南西部, 贵州中部偏北有 80°C 的高值中心, 表明对流层低层是高温高湿区, 它不但是产生暴雨所必需的水汽输送

带,也是造成暴雨强对流所必需的位势不稳定能量的输送者。贵州东北侧低能区是倒灌回流的东路冷空气,有阻挡暖湿气流向东扩散,使低层辐合加强的作用。这股冷空气同时也是下沉气流,对暴雨的出现有重要作用,在冷平流侵入下,辐合区内的上升运动加剧,这有利于对流不稳定能量和潜热的大量释放,造成强降水。

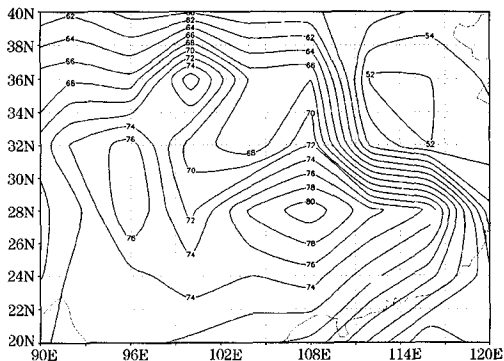


图3 2002年6月18日00时700hPa θ_e 分布图(单位:°C)

4 垂直运动及垂直环流分析

从18日00时~19日00时200hPa、500hPa、700hPa各层的垂直速度分布图看(图略),暴雨开始前,贵州为弱上升区,暴雨开始时,500hPa、700hPa 27.5°N、107°E附近垂直上升运动增强,在整个暴雨时段,垂直速度的强烈上升区均处在暴雨区附近。18日15时,200hPa、500hPa、700hPa在暴雨区的垂直上升速度都达到最大,在26.5°N、107.5°E和28.5°N、109.5°E各层均出现两个最大垂直速度中心,中心值分别达 $0.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,与之相应的两个暴雨中心(27.5°N、107.5°E和29.5°N、109.5°E)位于最大垂直速度中心附近。

分析18日00时到19日00时沿107.5°

E垂直速度的纬度-高度剖面图(图略)。在整个暴雨时段,暴雨区所在区域27~30°N之间为强烈柱状上升运动区,上升运动强中心随雨势的增强而加强并向上抬升,18日15时上升运动最强(图4),上升运动强中心位于26~28°N、107.5°E附近的350~300hPa之间,并形成柱状上升运动区,在强烈上升运动区的南北两侧为下沉区,在22~27°N和27~31°N形成南北两支闭合经向垂直环流(图5)。南支经向垂直环流的气流在22~27°N的副热带高压控制地区下沉,至低层后转向北,在26~28°N之间上升,至高空后转向南;北支经向垂直环流的气流在西南涡北部(29~31°N)下沉,至

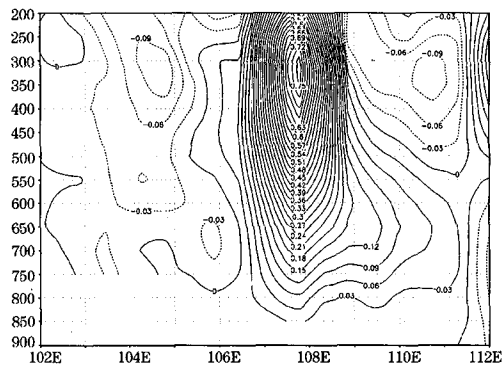


图4 2002年6月18日15时27.5°N垂直速度的经向剖面图(单位: $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$)

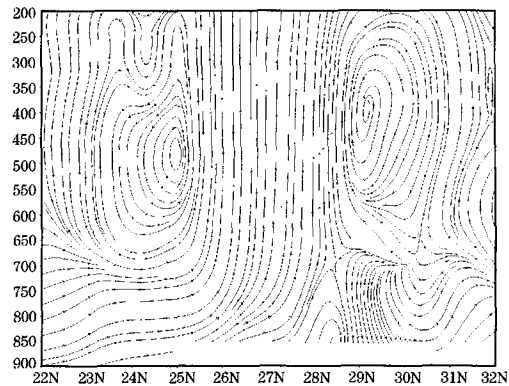


图5 2002年6月18日15时沿107.5°E垂直环流

低层后转向南，在 26~28°N 之间上升，至高空后转向北，这两支南北闭合经向垂直环流对于暴雨区的低空入流和高空出流具有非常重要的作用。18 日 18 时以后，随着柱状上升运动区南北两支闭合经向垂直环流减弱消失，降水过程逐渐减弱结束。

通过以上分析发现，在整个暴雨时段，暴雨区为强烈上升运动区，随上升运动强中心的加强并向上抬升强降水也增强，暴雨中心位于最大垂直速度中心附近，贵州强降水随垂直上升运动的增强而增强、减弱而减弱。南北两支闭合经向垂直环流对于暴雨区的低空入流和高空出流具有非常重要的作用。

5 螺旋度分析

螺旋度是一个描述环境风场气流沿运动方向的旋转程度和运动强弱的物理参数，它反映了大气的动力场特征，能够很好地描述大气运动的性质和特点，研究表明^[4,5]，它对强对流及大暴雨天气的预报具有一定的指示意义。

从 18 日 00 时~19 日 00 时的逐时螺旋度分析分布图（图略）可见，暴雨开始前，贵州为弱正螺旋度区，暴雨开始时，在 26~28°N、105~111°E 范围螺旋度等值线开始密集，北面螺旋度值迅速减小，南面螺旋度值迅速增大；到 18 日 15 时（图 6），暴雨最集中的阶段，26~28°N、105~111°E 附近螺旋度等值线密集区北面的负螺旋度中心值迅速减小到 -150hPa·s⁻²，南面的正螺旋度中心值均迅速扩大到 550hPa·s⁻²，暴雨区位于螺旋度等值线密集处靠正螺旋度区一侧。随后螺旋度锋区逐渐东移减弱，贵州强降水减弱结束。

分析 18 日 00 时至 19 日 00 时 107.5°E 垂直螺旋度的纬度-时间剖面图（图 7）。可

清楚地看到贵州大暴雨开始—增强—集中—减弱所伴随的螺旋度变化。暴雨开始前，贵州为正螺旋度区，暴雨开始时，贵州螺旋度等值线开始密集，暴雨最集中的阶段，贵州螺旋度等值线最为密集，螺旋度锋区达到最强，随后逐渐减小，大暴雨也减弱。

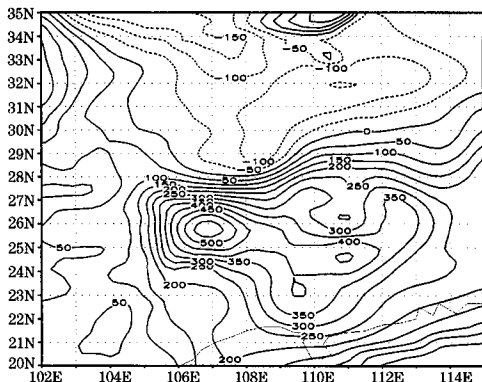


图 6 2002 年 6 月 18 日 15 时螺旋度分布
(单位: hPa·s⁻²)

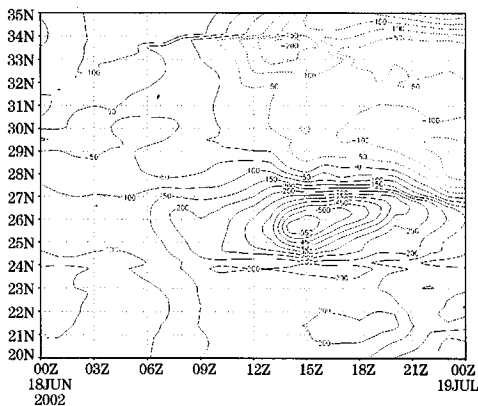


图 7 沿 107.5°E 螺旋度的纬度-时间剖面图
(单位: hPa·s⁻²)

综合以上分析，可以发现，在此次大暴雨过程中，螺旋度的变化对暴雨的强度变化有很好的指示性，暴雨区位于螺旋度等值线密集处靠正螺旋度区一侧；暴雨开始前，贵州为正螺旋度区，暴雨开始时，贵州螺旋度

等值线开始密集，暴雨最集中的阶段，贵州螺旋度等值线最为密集，螺旋度锋区达到最强，随着螺旋度锋区东移减弱，贵州强降水减弱结束。

6 湿位涡分析

湿位涡作为热力学与动力学相结合的物理量，更能有效地显示出暴雨天气系统的一些特点，被广泛用于暴雨和其它天气系统的诊断^[6,7]。在 p 坐标下忽略 ω 的水平变化，有：

$$MPV = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_w}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_w}{\partial y} \right) = \text{const}$$

将其写成分量形式，有：

$$MPV1 = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_w}{\partial p}$$

$$MPV2 = \frac{\partial \theta_w}{\partial x} g \frac{\partial \theta_w}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_w}{\partial y}$$

其中 $MPV1$ 为湿位涡的垂直分量（正压项），其值取决于空气块绝对涡度的垂直分量和相当位温垂直梯度的乘积（ ζ_p 是垂直方向涡度， f 是地转涡度， θ_w 是相当位温）。因为绝对涡度是正值，当大气为对流不稳定时， $\frac{\partial \theta_w}{\partial p} > 0$ ，所以 $MPV1 < 0$ ；若大气为对流稳定时，则 $\frac{\partial \theta_w}{\partial p} < 0$ ， $MPV1 > 0$ 。 $MPV2$ 是湿位涡的水平分量（斜压项），它的数值由风的垂直切变（水平涡度）和 θ_w 的水平梯度决定，表征大气的湿斜压性。湿位涡单位（PVU）是 $10^{-6} \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

6.1 正压位涡（MPV1）分析

从 2002 年 6 月 18 日 500hPa 正压位涡（ $MPV1$ ）逐时分布图（图略）中可以看到，

强降水开始前 18 日 00 时贵州为 0.2PVU 负值区， 34°N 、 105°E 处有一个 0.3PVU 的正值中心与 500hPa 高度上的高空槽携带的冷空气相对应。强降水开始加强的 18 日 09 时，高空槽对应的 $MPV1$ 正值区东移到 107°E 附近并向南延伸到 27°N ，形成一“漏斗”形高值区，贵州有一个 0.2PVU 的正值中心，此后此形势维持，到 18 日 15 时正值中心达到最强，强降水也达到最强，18 日 18 时以后，“漏斗”形高值区分裂，北段高值区北退，南段东移，贵州强降水减弱。

图 8 是沿暴雨中心（ 27.5°N 、 107.5°E ） $MPV1$ 高度-时间剖面图。从中发现，强降水开始时，对流层高层 350hPa 以上 $MPV1$ 为正值区，对流层中部 $MPV1$ 呈波状分布，对流层中低层 500hPa 以下为负值区，随着对流层高层正值带增强，对流层低层负值带也在增强。对流层高层正的大值区对应着对流层低层负值中心区，表明低层的不稳定能量将会大量释放，对流不稳定迅速发展起来，降雨增强。 $MPV1$ “正负值区垂直叠加”的配置是暴雨发生、发展的有利形势。对流层高层正值带减弱，对流层低层负值带也减弱，降雨减弱。

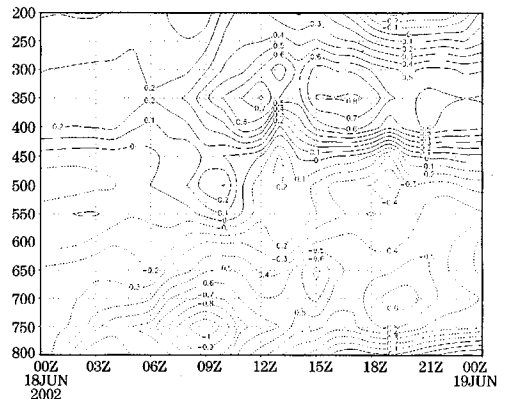


图 8 沿 27.5°N 、 107.5°E $MPV1$ 高度时间剖面 (单位: PVU)

6.2 斜压位涡 (MPV2) 分析

从2002年6月18日500hPa斜压位涡(MPV2)逐时分布图(图略)中可以看到,强降水开始前贵州为0值区。18日09时,27~28°N、106°E有一正值区,正值中心为0.1PVU(图略),表示此处有对流云团在生成。正值中心12时增强东移到107°E,范围有所扩大,同时在28°N、109~110°E又有一新的MPV2正值中心生成,随后107°E处正值区维持,109~110°E正值区增强北上到29°N附近,18时西部正值中心维持,东部正值中心减弱,18日21时,西部正值中心减弱,东部消失,预示着对流云团在逐渐减弱消亡,配合3小时的降雨量图(图略),500hPa上MPV2正值区与对流性降水区对应很好,而且强度变化也一致。

从以上湿位涡的正压项(MPV1)和斜压项(MPV2)分析可见,500hPa正压位涡(MPV1)正值区反映了高空槽携带的冷空气活动,贵州强降水与500hPa“漏斗”形MPV1高值区同位相变化。强降水开始时,对流层高层350hPa以上MPV1为正值区,对流层中低层500hPa以下为负值区,对流层高层正的大值区对应着对流层低层负值中心区,MPV1“正负值区垂直叠加”的配置是暴雨发生、发展的有利形势。对流层高层正值区减弱,对流层低层负值区也减弱,贵州强降水减弱。500hPa上MPV2正值区与对流性降水区对应很好,而且强度变化也十分一致。

7 小结与讨论

(1) MM5 对此次暴雨过程有较强的模拟能力,模式成功地模拟了贵州02.6大暴雨降水区的分布、降水的强度和中心位置。

(2) 贵州02.6大暴雨天气过程发生在高温高湿区,倒灌回流的东路冷空气,阻挡暖湿气流向东扩散、使低涡切变与静止锋增强,在冷平流侵入下,辐合区内的上升运动加剧,对流不稳定能量和潜热大量释放,造成大暴雨。

(3) 在整个暴雨时段,暴雨区为强烈上升运动区,随着上升运动强中心的加强并向上抬升强降水增强,暴雨中心位于最大垂直速度中心附近;南北两支闭合经向垂直环流对于暴雨区的低空入流和高空流出具有非常重要的作用。

(4) 螺旋度的变化对暴雨的强度变化有很好的指示性,暴雨区位于螺旋度等值线密集处靠正螺旋度区一侧。

(5) 500hPa MPV1 正值区反映了高空槽携带的冷空气活动,贵州大暴雨与500hPa“漏斗”形MPV1高值区同位相变化,高低层MPV1“正负值区垂直叠加”的配置是暴雨发生、发展的有利形势。500hPa上MPV2正值区与对流性降水区对应很好,而且强度变化也一致。

参考文献

- 1 郭建侠,杜继稳,郑有飞. MM5V3.5模式对陕北地区中尺度系统的模拟能力试验. 气象, 2003, 29(9): 13~17.
- 2 齐艳军,程明虎,仪清菊. 98.7湖北特大暴雨的天气分析与降水模拟. 气象, 2004, 30(3): 12~16.
- 3 陈力强,周小珊,杨森. 一次强风暴的垂直环境特征数值模拟分析. 气象, 2004, 30(9): 3~8.
- 4 章东华. 螺旋度-预报强风暴的风场参数. 气象, 1993, 19(8): 46~48.
- 5 谭志华,杨晓霞. “99.8”山东特大暴雨的螺旋度分析. 气象, 2000, 26(9): 7~11.
- 6 Zhang, D-L, Cheng, WYY, Gyakum, JR. The impact of various potential-vorticity anomalies on multiple frontal cyclogenesis events. Q. J. R. Meteorol. Soc., 2002, 128(584): 1847~1877.
- 7 王川,寿绍文. 一次青藏高原东侧大暴雨过程的诊断分析. 气象, 2003, 29(7): 7~12.