

“049”川渝暴雨的 Q 矢量与湿位涡分析

段海霞^{1,2,3}, 陆维松³, 毕宝贵⁴

(1 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020; 2 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020;
3 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044; 4 中国气象局 国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 采用 NCEP/NCAR 再分析资料对“049”暴雨过程的准地转 Q 矢量及湿位涡进行诊断分析, 揭示了暴雨期准地转 Q 矢量散度场、涡度场以及锋生函数的分布特征以及暴雨之间的时空配置关系, 指出了 Q 矢量散度与垂直运动有很好的配置关系, 低层 Q 矢量辐合有利于上升运动的发展和维持, Q 矢量对此次暴雨过程具有一定作用; 暴雨区对流层中低层的对流不稳定与条件性对称不稳定对此次暴雨过程起了关键作用, 而且很可能是中尺度对流系统发生发展的重要条件之一。

关键词: Q 矢量; 湿位涡; 对流不稳定; 条件性对称不稳定

中图分类号: P **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007)05-0674-07

Q Vector and Moist Potential Vorticity Analysis for the Heavy Rainfall in September 2004 in Sichuan and Chongqing

DUAN Hai-xia^{1,2,3}, LU Wei-song³, BI Bao-gui⁴

(1 Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 710020, China)

2 Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province Lanzhou 710020 China

3 School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China; 4 National Meteorological Centre, CMA, Beijing 100081, China)

Abstract Using the NCEP/NCAR reanalysis data, the quasi-geostrophic vector Q and moist potential vorticity analyses for the heavy rainstorm in September 2004 in Sichuan and Chongqing are performed and the distributions of quasi-geostrophic Q -vector's divergence, vorticity and the frontogenesis function, as well as their temporal/spatial relations with the heavy rain revealed. It is found out that there are close relationship between Q -vector divergence and vertical motion. The Q -vector convergence in the low level was of benefit to the development and maintenance of vertical motion and the rainstorm's occurrence. Conditional symmetry instability and convective instability in the mid-low level played important role in the rainstorm and therefore are probably one of important conditions to the genesis and development of the mesoscale convective system.

Key words Q vector; moist potential vorticity; convective instability; conditional symmetry instability

0 引言

Q 矢量是 Hoskins 等^[1]于 1978 年提出的用来计算垂直运动的一种非常有用的工具。 Q 矢量的理论研究国内学者已经做过很多^[2-3], 20 世纪 80 年代后期, Q 矢量在实际业务工作中得到广泛的应用并得到很多非常有意义的结论^[4-6], 对于多数天气系统, 利用 Q 矢量不仅能作出简易、准确的定性判断, 而且能提供精确的定量计算, 因而在实际业务工

作中得到了广泛的应用。

湿位涡是综合反映大气动力、热力和水汽作用的物理量, 能更全面、有效地描述暴雨的发生发展。近年来, 湿位涡这一综合物理量在暴雨的诊断分析中倍受关注。Bennetts 等^[8]从 Boussinesq 近似出发, 引入潜热, 导出了湿位涡变化方程。Cao 等^[9]利用位涡概念对大尺度现象研究的过程中, 注意到在外源强迫存在时, 位涡守恒性被破坏, 并因外源的强迫作用而引起位涡的异常。Cui 等^[10]对倾斜位涡发

展理论在上滑运动中的适用性做了研究和验证。吴国雄等^[11]证得绝热无摩擦的饱和湿空气具有湿位涡守恒的特性, 并在此基础上研究了湿斜压过程中涡旋垂直涡度的发展。在实际业务工作中湿位涡也得到了广泛的应用及研究, 并得到很多有意义的结论^[12-15]。寿绍文等^[12]通过江淮地区一次梅雨期暴雨的诊断分析, 指出条件性对称不稳定或等 M 面上的位势不稳定、锋生次级环流以及次天气尺度气旋的发展是形成暴雨的重要因子。高守亭等^[13]从动力上推导了热力、质量强迫下的湿位涡方程, 指出强暴雨系统中湿位涡随时间的变化不仅要受热力的强迫, 而且还受到因强降水造成的质量强迫的影响, 暴雨系统中的湿位涡异常与这两种强迫的共同作用有密切关系。这些工作都表明, 湿位涡这一物理量不仅表征了大气动力、热力属性, 而且考虑了水汽的作用, 所以对湿位涡进行诊断, 可以寻求各热力和动力及水汽条件与降水的关系, 从而揭示降水发生发展的物理机制。湿位涡作为暴雨系统移动和落区的示踪量, 在暴雨诊断和预报工作中有着广阔的前景。

本文利用 Q 矢量与湿位涡理论对 2004 年 9 月 3—7 日四川省重庆市特大暴雨过程进行诊断分析, 试图寻求 Q 矢量和湿位涡与中尺度低涡切变线及其暴雨的关系, 以及低涡暴雨过程中大尺度强迫上升运动的机制。

1 Q 矢量分析

1.1 Q 矢量原理及物理意义

Q 矢量表示^[5]: 作用在位温梯度上的地转速度水平形变的大小, 可以用来诊断大尺度垂直运动, 它

适用于整个对流层, 尤其是斜压性较大的对流层中低层, 它与非地转风有正比关系, 且用 Q 矢量表示的锋生函数在温带天气系统中可以给出有关系统发生发展的信息, 有较好的预报意义。准地转 Q 矢量表达式^[7]:

$$Q = (Q_x, Q_y) = \left[-\frac{\partial v_g}{\partial x} \cdot \left[-\frac{\partial \phi}{\partial y} \right], -\frac{\partial v_g}{\partial y} \cdot \left[-\frac{\partial \phi}{\partial x} \right] \right]. \quad (1)$$

Q 矢量表示了作用在位温梯度上的地转形变的常数倍, 在对流层下层, Q 矢量可近似地表示非地转运动。

本文使用 6 h 一次, $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP/NCAR 再分析资料 (简称 NCEP 资料)、加密自动站降水资料, 通过准地转 Q 矢量理论来分析“049”暴雨过程。

1.2 Q 矢量场与 Q 矢量锋生函数

锋生函数能够表示锋生锋消的程度, 在准静力、绝热和无摩擦条件下, Q 矢量地转锋生函数为^[6]:

$$F_g = \left[\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V}_g \cdot \nabla \right] |\nabla \theta|^2 = 2\mathbf{Q} \cdot \nabla \theta \quad (2)$$

当 $F_g > 0$ 时锋生, 反之为锋消。

分析 850 hPa 层的 Q 矢量与位温分布 (图 1), 发现四川省中部和东部地区 Q 矢量绝对值明显大于其他地方, 说明该处存在较强的非地转气流。整个过程中, 35°N 以南地区基本处于位温高值区, 从 Q 矢量场与位温的配置来看, 在等位温线密集带, Q 矢量绝对值较大, 说明此处非地转气流较强。在等位温线密集区的两侧, Q 矢量场方向相反, 并与等位温线几乎垂直, 这样, 非地转风场就形成一条南北向的辐合线, 较强的非地转风将两侧气流汇集于此, 产生较大的温度梯度和湿度梯度, 产生锋生, 在有利的

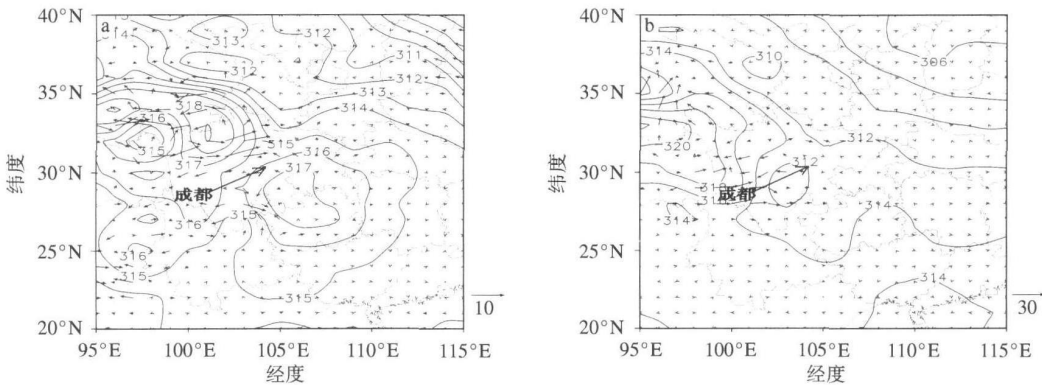


图 1 2004 年 9 月 3 日 08 时 (a) 和 7 日 02 时 (b) 700 hPa 位温 θ (实线, 单位: K) 和 Q 矢量 (箭矢, 单位: $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$) 分布

Fig 1 Potential temperature (solid line, K) and Q -vector (arrow head, $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$) at 700 hPa at (a) 0800 BST 3th and (b) 0200 BST 7th September

垂直运动条件下, 容易产生降水。

从低层 850 hPa Q 矢量锋生函数的分布来看 (图 2), 四川省中部地区 Q 矢量锋生函数场基本为正值区, 随着暴雨的增强, Q 矢量锋生函数场的中心值增大, 到 3 日 20 时中心值大于 $500 \times 10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$, 这个锋生函数大值区表明冷暖空气交汇于四川省中部地区。根据 Q 矢量锋生函数含义, 在 Q 矢量锋生函数场的正值区上升运动很强, 水汽条件有利, 且层结不稳定, 具备了产生暴雨的必要条件。到 6 日 20 时, 四川省西南部地区 Q 矢量锋生函数转为负值。从整个暴雨过程来看, Q 矢量锋生函数正值区较暴雨区落后, 但其中心的强度跟暴雨强度较为接近。

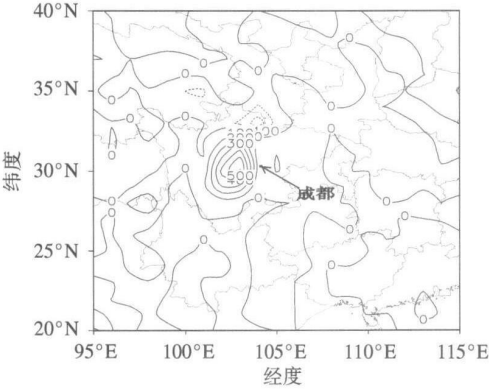


图 2 2004 年 9 月 3 日 20 时 850 hPa Q 矢量锋生函数

(单位: $10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$)

Fig. 2 Q -vector frontogenetical function at 700 hPa at 2000 BST on September 3 2004 (units $10^{-15} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$)

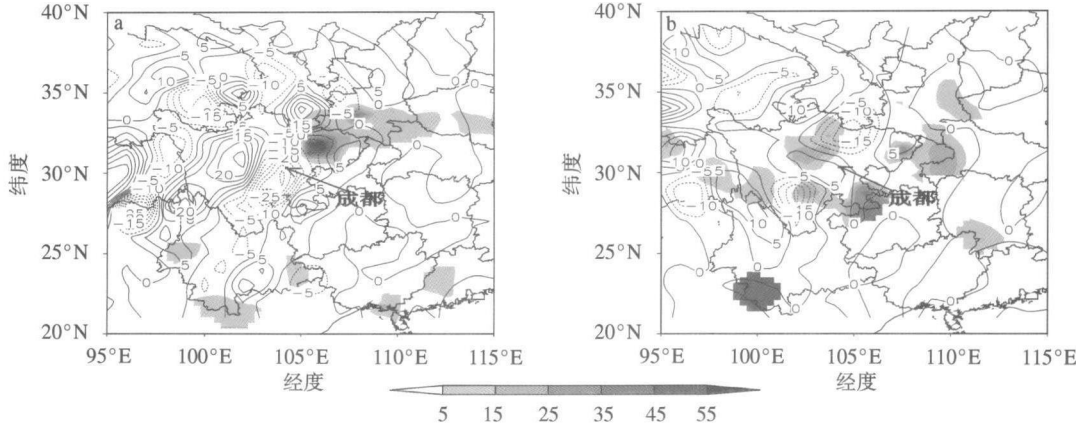


图 3 3 日 14 时 (a) 和 5 日 02 时 (b) 850 hPa Q 矢量散度 (实线; 单位: $10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$) 与 6 h 降水量 (阴影部分; 单位: mm) 分布

Fig. 3 850 hPa Q -vector divergence (solid lines $10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$) and observed 6 h rainfall (shadings mm) at (a) 1400 BST 3th and (b) 0200 BST 5th September

1.3 Q 矢量散度分析

准地转 Q 矢量散度表达式为^[6]:

$$D_Q = \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y}$$

Q 矢量散度表示产生垂直运动的强迫机制的强弱, $\nabla \cdot Q < 0$ 的区域, 准地转上升运动会在一定时间内得以维持, 持续一定强度的上升运动, 为暴雨提供有利的动力条件。

从 850 hPa Q 矢量散度分布 (图 3) 上可以看出, 3 日 08 时四川省中东部地区基本处于 Q 矢量散度场的辐合区中, 辐合带呈东北—西南走向, 中心值小于 $-20 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$, 3 日 14 时 Q 矢量辐合加强, 中心值增强到 $-30 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$, 辐合区扩大, 辐合中心在威远一带, 此时雨带较 Q 矢量辐合区偏北约 1 个纬度, 但雨带走向与 Q 矢量辐合区走向一致为东北—西南向, 辐合区的西侧为强辐散区。到 4 日 20 时, 辐散、辐合强度再一次增强, 辐散增强更加明显, 中心强度大于 $35 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$, 辐合中心值小于 $-15 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$, 此后辐散、辐合中心强度开始逐渐减弱, 直到 6 日 08 时, 只有四川省南部西昌地区有弱 Q 矢量辐合, 其他地区均为弱辐散区。

从各时刻 850 hPa Q 矢量散度与对应时刻的 6 h 降水量分布来看, “049”暴雨过程中, Q 矢量辐合区走向与雨区走向基本一致, 为东北—西南走向, Q 矢量辐合区较暴雨落区略偏西偏南, 暴雨区基本位于 Q 矢量辐合梯度较大的区域, 但 Q 矢量辐合强度与暴雨强度并没有好的对应关系。由此说明, Q 矢量散度能够较好地预报暴雨落区, 但没有预报暴

雨强度的能力。

为了更好地了解暴雨区 Q 矢量辐散辐合与垂直运动的相互关系, 对 Q 矢量散度和垂直速度做 $106^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$ 平均的纬度—高度剖面 (图 4)。由图可见, 3 日 08 时, $30^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 纬度带上, 700 hPa 层次以下均为 Q 矢量辐合区, 辐合中心在 950 hPa 左右, 中心值小于 $-9\times 10^{-15}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$, 其中上层并没有明显的辐合辐散中心出现。伴随低层的 Q 矢量辐合区, 暴雨区 850 hPa 以上的层次均为垂直上升运动, 随后暴雨区低层一直维持 Q 矢量辐合。到 4 日 02 时, 辐合中心向上发展到 650 hPa 左右高度,

同时上升运动的中心值增大到小于 $-0.7\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, 最强上升运动位于 700 hPa 左右。6 日 02 时, Q 矢量辐合中心强度达到 $-5\times 10^{-15}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$, 辐合中心向上发展到 650 hPa 左右高度, 700 hPa 左右仍为最强上升运动中心, 但上升运动的区域较 Q 矢量辐合区略偏南。此后辐合强度逐渐减弱, 范围逐渐缩小, 直到暴雨区上空的 Q 矢量辐合减弱消失, 垂直上升运动也减弱消失。

由此可见, Q 矢量散度与垂直运动有很好的配置关系, 低层 Q 矢量辐合有利于上升运动的发展和维持。

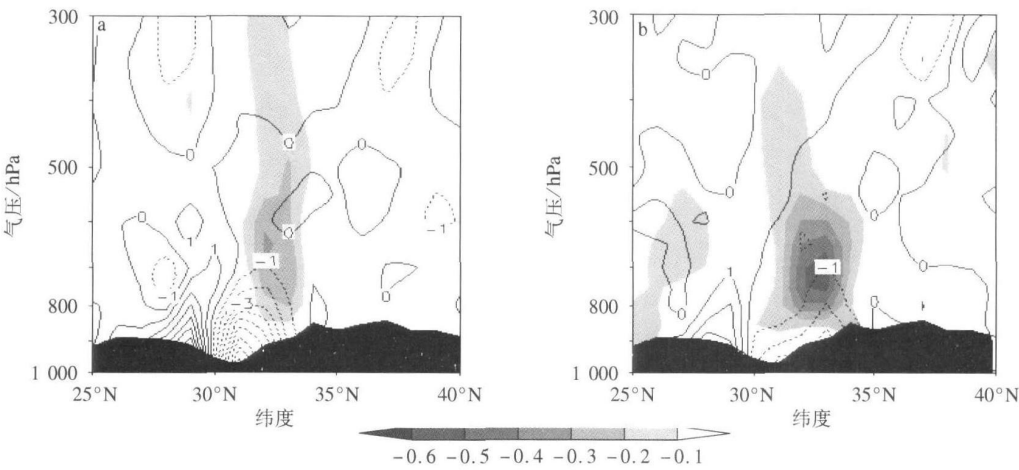


图 4 3 日 08 时 (a) 和 4 日 02 时 (b) Q 矢量散度 (等值线, 单位: $10^{-15}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$) 与垂直速度 (阴影部分; 单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) 沿 $106^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$ 的平均纬度—高度剖面 (单位: $10^{-15}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)

Fig. 4 Q -vector divergence (isoline; $10^{-15}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$) and vertical velocity (shading; $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) along $106^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$ at (a) 0800 BST on September 3 and (b) 0200 BST on September 4

2 湿位涡 (MPV) 分析

2.1 湿位涡基本理论^[7]

p 坐标下湿位涡表达式:

$$\zeta_{MPV} = -g(f\mathbf{k} + \nabla_p \times \mathbf{V}) \cdot \nabla_p \theta_e = -g\zeta_p \frac{\partial \theta_e}{\partial p} - g\mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p} \cdot \nabla_p \theta_e,$$

湿位涡包含水汽的变化, 也可以分为湿正压项 (ζ_{MPV1}) 和湿斜压项 (ζ_{MPV2}):

$$\begin{aligned} \zeta_{MPV1} &= -g\zeta_p \frac{\partial \theta_e}{\partial p} = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p}, \\ \zeta_{MPV2} &= -g\mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p} \cdot \nabla_p \theta_e = -g \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} + g \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x}, \\ \zeta_{MPV} &= \zeta_{MPV1} + \zeta_{MPV2} \end{aligned}$$

其中 ζ_{MPV1} 为湿位涡的垂直分量。一般来说, 由于绝对涡度为正值 (北半球), 当大气是对流不稳定时, $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$, $\zeta_{MPV1} < 0$; 若大气是对流稳定的, 则 $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} < 0$, $\zeta_{MPV1} > 0$ 。 ζ_{MPV2} 是湿位涡的水平分量, 为湿斜压项。 $\zeta_{MPV2} < 0$ 时, 大气是条件性对称不稳定的, 反之, 大气是条件性对称稳定的^[16-17]。

2.2 ζ_{MPV} 的水平结构

通过以上理论可知, ζ_{MPV1} 负值区为对流不稳定区, ζ_{MPV2} 负值区为条件性对称不稳定区, 所以可以通过分析 850 hPa ζ_{MPV1} 、 ζ_{MPV2} 的分布来考察暴雨区不稳定状况。

从 850 hPa ζ_{MPV1} 与 6 h 降水量图 (图 5) 可见, 3 日 08 时, 四川省东北部有弱 ζ_{MPV1} 正值区, 四川省与重庆市其他大部地区均为 ζ_{MPV1} 负值大值区, 负值中

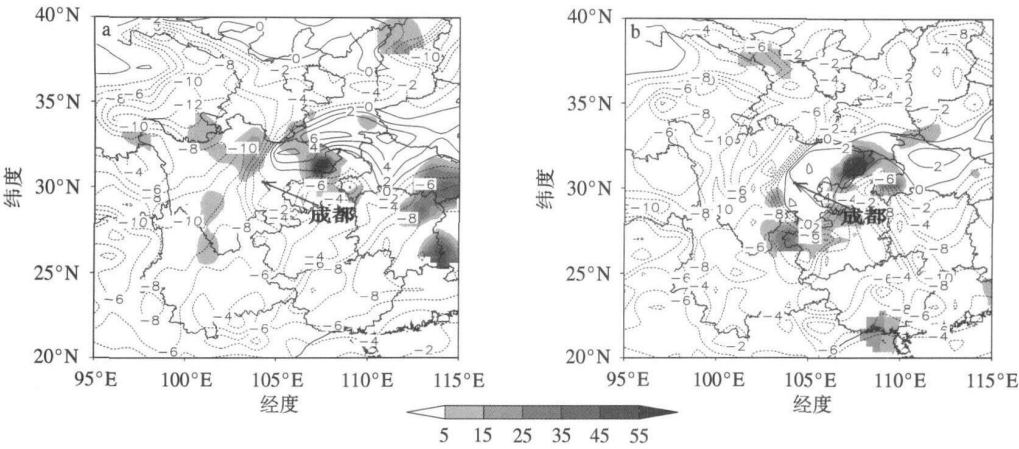


图 5 4日 20时 (a)和 5日 14时 (b) 850 hPa ζ_{MPV1} (单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) 与 6 h 降水量 (阴影部分; 单位: mm) 分布

Fig 5 850 hPa ζ_{MPV1} (isolines $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) and observed 6 h rainfall (shadings mm) at (a) 2000 BST 4th and (b) 1400 BST 5th September

心小于 $-10 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, 6 h 降水中心位于广元市一带, 这个区域正好对应与 ζ_{MPV1} 正负值交界的等值线密集带。随后 ζ_{MPV1} 负值区范围逐渐扩大, 中心强度也逐渐加强, 四川省东北部的 ζ_{MPV1} 正值区向东北方向收缩, 向西南方向延伸; 5日 02时, 四川省东部地区均处于 ζ_{MPV1} 正值控制, 此时主要有 3 个 6 h 降水区, 分别在理县、四川省与贵州省交界处、重庆市东北部与湖南省交界处, 这 3 个降水区基本位于 ζ_{MPV1} 正负值交界处。到 5日 14时, 四川省东部的 ζ_{MPV1} 正值强度有所减弱, 6 h 降水主要发生的达州地区处于 ζ_{MPV1} 正负值交界的区域。此后, 四川省东部 ζ_{MPV1} 正值强度继续加强, 范围也继续扩大, 四川省重庆地区的对流不稳定能量基本释放, 降水过程基本结束。

通过以上分析可见, 此次暴雨过程中, 强降水落区基本位于 ζ_{MPV1} 正负值交界的等值线密集带, ζ_{MPV1} 负值区内仅有较弱的降水发生。

从 850 hPa ζ_{MPV2} 的分布 (图略) 可见, ζ_{MPV2} 比 ζ_{MPV1} 小一个量级左右。3日 08—14时, 850 hPa 暴雨区基本处于弱的 ζ_{MPV2} 正值区, 到 3日 20时后开始出现 ζ_{MPV2} 负值区, 负值范围较小, 到 4日 20时, ζ_{MPV2} 负值范围加大, 四川省地区均为 ζ_{MPV2} 负值区, 负值中心小于 $-1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。5日 08时, ζ_{MPV2} 负值强度加强到小于 $-1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, 重庆市地区基本为较强的 ζ_{MPV2} 正值区。

整个过程中, 降水区 ζ_{MPV2} 有正有负, 但在夜间主要为 ζ_{MPV2} 负值控制, 降水区东部基本为强 ζ_{MPV2}

正值区。这主要是由于低空急流一般位于 700 hPa, 故 $\frac{\partial \omega}{\partial p} < 0$ 斜压性为 ζ_{MPV2} 提供了负值, 而 ζ_{MPV2} 加强主要归因于斜压性的增强。此次暴雨过程中, 夜间是低空急流出现并加强的时段 (图略), 使得暴雨区风速的垂直切变加大, 斜压性增强从而夜间 ζ_{MPV2} 为负。暴雨区一般位于低空急流出口区, 暴雨区前方风速减小, 风的垂直切变减小, 斜压性也减弱, 使得 ζ_{MPV2} 转为正值。

2.3 ζ_{MPV} 的垂直结构

为了揭示干冷空气的侵入在暴雨和气旋形成中的作用, 分析了湿位涡的垂直分布情况。

首先分析 ζ_{MPV1} 过暴雨中心的垂直分布图。由图 6 可见, 3日 08时 400 hPa 以下的大部分地区均为 ζ_{MPV1} 负值区, 仅在 850 hPa 左右, 31°N 上出现弱的 ζ_{MPV1} 正值中心。随后暴雨区上空的近地面一直存在 ζ_{MPV1} 负值区, 850 hPa 左右 ζ_{MPV1} 正负值交替出现, 中层基本维持较强的 ζ_{MPV1} 负值区, 暴雨区近地面及中低层基本为大的负值区。在暴雨发生过程中, ζ_{MPV1} 一直维持较强的水平。到 6日 02时, ζ_{MPV1} 负值区域较 3日 08时向南移动, 低层 850 hPa 左右的 ζ_{MPV1} 正值强度加强, 且正值区从北向南延伸。从 ζ_{MPV1} 的经度—高度剖面上可见, 3日 08时, 400 hPa 以下暴雨区均处于 ζ_{MPV1} 负值区, 青藏高原地区上空的 ζ_{MPV1} 负值向上延伸的层次较其他地区的层次高, 强度也较强, 暴雨区上空在 750 hPa 左右 ζ_{MPV1} 负值强度最大, 中心小于 $-4 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随后的降水过程中, 暴雨区上空低层及中层一直维

持 ζ_{MPV1} 负值区。暴雨区 ζ_{MPV2} 在中低层均为弱的 ζ_{MPV2} 负值区 (图 7), 中层在 550 hPa 和 650 hPa 左右也有 ζ_{MPV2} 负值区存在, 最强中心在 550 hPa 左右。

综上所述, 暴雨区在对流层低层及中层为对流不稳定层结, 近地面层为条件性对称不稳定层结, 中层有弱的条件不稳定层结存在。说明在此次暴雨过

程中对流不稳定与条件性对称不稳定均对暴雨起着重要的作用。在暴雨过程中 $|\zeta_{MPV1}| > |\zeta_{MPV2}|$, 说明暴雨的发生发展主要来自于对流不稳定层结的贡献, 但是条件性对称不稳定层结的作用也不容忽视^[18-19]。

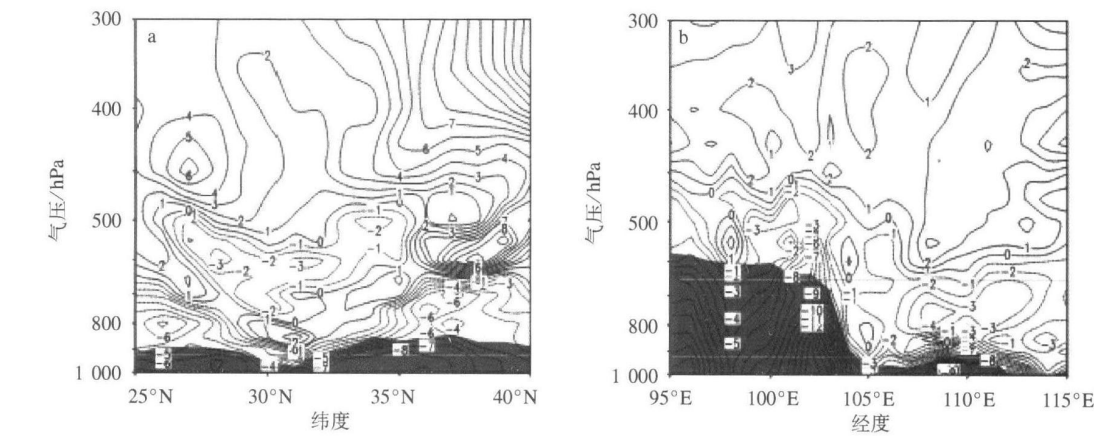


图 6 3 日 08 时 ζ_{MPV1} 沿 106.58°E (a) 和沿 30.56°N (b) 的垂直剖面
(单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig 6 Vertical sections of ζ_{MPV1} at 0800 BST on September 3
along (a) 106.58°E and (b) 30.56°N (units $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

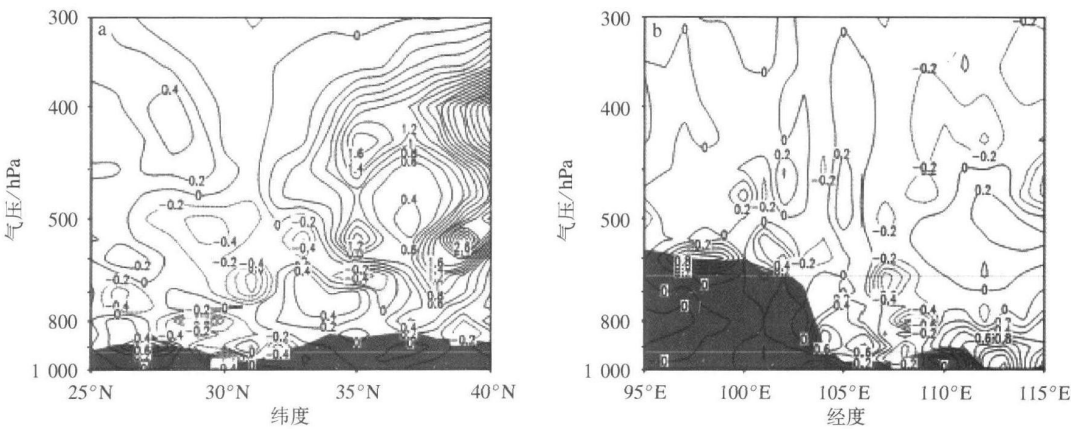


图 7 3 日 08 时 ζ_{MPV2} 沿 106.58°E (a) 和沿 30.56°N (b) 的垂直剖面 (单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig 7 Vertical sections of ζ_{MPV2} at 0800 BST on September 3
along (a) 106.58°E and (b) 30.56°N (units $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

3 小结与讨论

通过对 2004 年 9 月 3—6 日川渝暴雨进行 Q 矢量与湿位涡的诊断分析, 得到如下结论:

(1) 四川省中部和东部地区 Q 矢量绝对值明显大于其他地方, 这说明该处存在较强的非地转气流, 较强的非地转风将两侧气流汇集于此, 产生较大的

温度梯度和湿度梯度, 产生锋生, 在有利的垂直运动条件下, 容易产生降水。

(2) 暴雨区基本位于 Q 矢量辐合梯度较大的区域, 但 Q 矢量辐合强度与暴雨强度并没有较好的对应关系。 Q 矢量锋生函数正值区较暴雨区落后, 但其中心的强度跟暴雨强度较为接近。

(3) 湿位涡分析表明: 此次暴雨过程中, 强降水

落区基本位于 $\zeta_{M\ PV1}$ 正负值交界的等值线密集带, 夜间由于低空急流的加强, 暴雨区斜压性增强使得暴雨区为 $\zeta_{M\ PV2}$ 负值控制。

(4) 对不稳定条件的分析表明, 四川重庆地区对流层中低层一直处于对流不稳定区与条件性对称不稳定区, 不稳定层延伸到 700 hPa 以上, 这种不稳定层很可能也是中尺度对流系统发生发展的重要条件之一。

参考文献:

[1] Hoskins B J Pedder M. The diagnosis of middle latitude synoptic development[J]. Q J R Meteor Soc, 1980, 106(450): 707-719

[2] 岳彩军. Q 矢量及其在天气诊断分析中应用研究的进展 [J]. 气象, 1999, 25(11): 3-8.

[3] 岳彩军, 寿亦萱, 姚秀萍, 等. 中国 Q 矢量分析方法的应用与研究 [J]. 高原气象, 2005, 24(3): 450-455.

[4] 郁淑华. 一次高空槽在青藏高原上诱发切变线的 Q 矢量分析 [J]. 应用气象学报, 1994, 5(1): 109-113.

[5] 杨小艳, 曹希孝. 准地转 Q 矢量诊断场与暴雨关系的分析 [J]. 气象, 1995, 21(11): 17-21.

[6] 董安祥, 郭蕙, 贾建颖, 等. 青藏高原东部一次大雪过程的 Q 矢量分析 [J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(3): 406-409

[7] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2003 298-300

[8] Bennetts D A, Hoskins B J. Conditional symmetric instability—A possible explanation for frontal rainbands[J]. Q J R Meteor Soc, 1979, 105: 945-962.

[9] Cao Z, Cho H. Generation of moist potential vorticity in extratropical cyclones[J]. J Atmos Sci, 1996, 52: 3263-3281.

[10] Cui Xiaopeng, Gao Shouting, Wu Guoxiong. Moist potential vorticity and up-sliding slantwise vorticity development[J]. Chin Phys Lett, 2003, 20(1): 167-169.

[11] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓青. 湿位涡和倾斜位涡发展 [J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-404.

[12] 寿绍文, 励申申, 彭广, 等. 条件性对称不稳定与梅雨锋暴雨 [J]. 南京气象学院学报, 1993, 16(3): 363-367.

[13] 高守亭, 雷霆, 周玉淑. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(6): 662-670.

[14] 张端禹, 丁治英, 王丛梅. 2003 年一次梅雨大暴雨成因的动力学研究 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(6): 827-832.

[15] 张端禹, 丁治英, 张兴强, 等. 2003 年江淮梅雨暴雨与湿位涡的关系 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(4): 526-532.

[16] Emanuel K A. The Lagrangian parcel dynamics of moist symmetric instability[J]. J Atmos Sci, 1983, 40: 2368-2376.

[17] 毕宝贵, 鲍媛媛, 李泽椿. “ 02. 6 ” 陕南大暴雨的结构及成因分析 [J]. 高原气象, 2006, 25(1): 34-44.

[18] 蒙伟光, 王安宇, 李江南, 等. 华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析 [J]. 大气科学, 2004, 28(3): 330-341.

[19] 李耀辉, 寿绍文. 一次江淮暴雨的 MPV 及对称不稳定研究 [J]. 气象科学, 2000, 20(2): 171-178.