

文章编号: 1000-2022(2002) 02-0259-06

云南一次持续性暴雨过程的非地转湿 Q 矢量分析李 英¹, 张腾飞², 郭荣芬²

(1. 南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044; 2. 云南省气象台, 云南 昆明 650034)

摘 要: 应用非地转湿 Q 矢量(Q^*)理论, 对 2001 年 5 月 31 日至 6 月 2 日发生在云南的持续性暴雨天气过程进行诊断分析。结果表明, 非地转湿 Q 矢量辐合区是暴雨发生的有利区域; 非地转湿 Q 矢量的垂直分布反映了次级环流的方向和强弱, 云南的暴雨落区位于次级环流的上升支附近。

关键词: 暴雨; 非地转湿 Q 矢量; 次级环流

中图分类号: P458.2 **文献标识码:** A

自 1978 年 Hoskins^[1]推导出完全的准地转 ω 方程, 将准地转强迫项表示成 Q 矢量散度, 从而直观地表示 ω 的强迫机制的强弱。Hoskins 的“ Q 矢量分析方法”就得到了广泛的应用^[2-4]。但准地转 Q 矢量是在假设大气是绝热条件下得到的, 为了更真实地反映大气状况, 考虑非绝热加热作用, 姚秀萍等^[5]从包含非绝热效应的 p 坐标系原始方程出发, 通过量级比较, 对方程进行尺度分离后进行简化, 提出非地转湿 Q 矢量的表达式, 推导出非地转湿 Q 矢量散度作为唯一强迫项的非地转非绝热 ω 方程, 并诊断分析了华北一次特大台风暴雨, 指出非地转湿 Q 矢量与暴雨落区有较好的关系。

2001 年 5 月 31 日至 6 月 2 日, 云南发生了连续 3 d 的全省性暴雨天气过程, 累计大雨 124 站次, 暴雨 57 站次, 大暴雨 2 站次, 云南西部和中部地区出现了大范围严重的洪涝灾害。在云南, 持续 3 d 的暴雨过程很少见, 而这次过程又发生在汛期开始之际, 大气环流背景复杂多变, 这使得用常规方法预报它的发生和落区比较困难。本文应用非地转湿 Q 矢量对这次暴雨过程进行分析, 试图从另一角度对云南暴雨的成因和预报进行探讨。

1 非地转湿 Q 矢量的表达式

根据文献[5], 定义非地转湿 Q 矢量表达式为 $Q^* = (Q_x^*, Q_y^*)$, 即

$$Q_x^* = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} \cdot \nabla \theta + \frac{\partial(hH)}{\partial x} \right],$$

$$Q_y^* = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - h \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} \cdot \nabla \theta + \frac{\partial(hH)}{\partial y} \right].$$

收稿日期: 2001-07-24; 改回日期: 2001-11-23

基金项目: 云南省应用基金 2000D0091M 项目; 云南省“十·五”科技攻关项目

第一作者简介: 李 英(1968-), 女, 云南砚山人, 高工, 博士生, 从事中尺度动力学研究。

其中 $h = \frac{R}{P} \left(\frac{P}{1000} \right)^{R/c_p}$, $H = - \frac{L}{c_p} \left(\frac{1000}{P} \right)^{R/c_p} \omega \frac{\partial q_s}{\partial p}$, Q_x^* 和 Q_y^* 分别是 x 和 y 方向非地转湿 Q 矢量的分量, 其它符号为常用物理量符号。

非地转湿 Q 矢量的公式表明, Q^* 取决于风水平和垂直切变的差异效应, 风的水平梯度和温度梯度的乘积及非绝热效应。

非地转湿 Q 矢量表示的 ω 方程为

$$\nabla_h^2(\sigma\omega) + f^2 \frac{\partial \omega}{\partial p^2} = - 2 \nabla \cdot Q^*$$

其中 $\nabla \cdot Q^*$ 为非地转湿 Q 矢量散度, 假设大气的垂直运动是一种波动形式, 由于 $\nabla_h^2(\sigma\omega)$ 与 $-\omega$ 成正比, 则 ω 与 $\nabla \cdot Q^*$ 成正比。当 $\nabla \cdot Q^* < 0$ 时, $\omega < 0$, 为上升运动, 反之则为下沉运动。上式表明 Q^* 矢量散度场实际上是非地转上升运动的强迫机制, 它必然激发次级环流, 非地转湿 Q 矢量与次级环流之间的关系^[5]为

$$Q_x^* = \frac{1}{2} (f^2 \frac{\partial \omega}{\partial p} - \sigma \frac{\partial \omega}{\partial x}), \quad Q_y^* = \frac{1}{2} (f^2 \frac{\partial \omega}{\partial p} - \sigma \frac{\partial \omega}{\partial y})$$

由此可知, 纬向、经向的垂直环流分别由非地转湿 Q 矢量的纬向和经向分量决定, Q_x^* 和 Q_y^* 总指向气流上升区, 而背向气流下沉区。

本文计算资料取 2001-05-30T08—2001-06-02T08(北京时, 下同) 的探空报文, 经中国气象局 MICAPS 系统客观分析为 1×1 的格点资料, 范围为(95 ~ 115 E, 15 ~ 45 N), 非标准层的资料采用拉格朗日插值方法求得。非地转湿 Q 矢量散度中的非绝热加热率的拉普拉斯项, 即 $\nabla_h^2(hH)$ 的计算参照文献[5]。

2 暴雨过程的天气形势

2001 年 5 月底 6 月初, 云南的大雨、暴雨过程非常频繁, 从 500 hPa 高空形势(图略) 可知, 这主要与云南上游地区青藏高原上活跃的冷空气活动有关。5 月 25 日至 28 日, 青藏高原维持一低压横切变, 并以小槽不断快速东移的形式引导小股冷空气影响云南, 而云南处在来自孟加拉湾暖湿西南气流控制下, 水汽十分充沛, 故此间滇西地区大雨不断, 5 月 29 日, 青藏高原横切变转竖东移出滇, 大雨过程结束。5 月 30 日, 云南为槽后的弱脊区控制, 但此时青藏高原上 30°N 附近又有一低压横切变生成(图 1a), 31 日至 6 月 2 日, 这一横切变南压并逐渐转竖东移, 云南上空又转为强劲的西南暖湿气流控制, 在 700 hPa 低压的配合下, 云南发生了持续 3 d 的暴雨过程。500 hPa 上主要天气系统动态和逐日暴雨区位置如图 1b 所示, 可知, 云南这次持续性暴雨过程发生在 3 次大雨过程之后, 且发生前云南处于 500 hPa 脊区, 在此情况下作预报就十分困难, 很容易出现强降水漏报的情况, 故应用非地转湿 Q 矢量理论进行诊断分析。

3 诊断分析结果

3.1 非地转湿 Q 矢量的水平流场和散度场

与暴雨等强对流天气相联系的次天气尺度系统具有很强的非地转特性, Q^* 矢量散度作为非地转上升运动的强迫机制, 对次天气系统的活动有所体现。图 2 是 5 月 30 日 08 时和 6 月 1 日 08 时 700 hPa 的 Q^* 流场与 $\nabla \cdot Q^*$ 分布。图中可见, Q^* 的流场主要表现为“风向”上的辐散和辐合中心(或线), 这些 Q^* 矢量的辐散和辐合中心(或线)的水平尺度大约在 300 ~ 400 km 左右, 具有次天气系统的特征。

5 月 30 日 08 时(暴雨过程开始前), 尽管云南上空 500 hPa 为脊区控制, 但低层 700 hPa

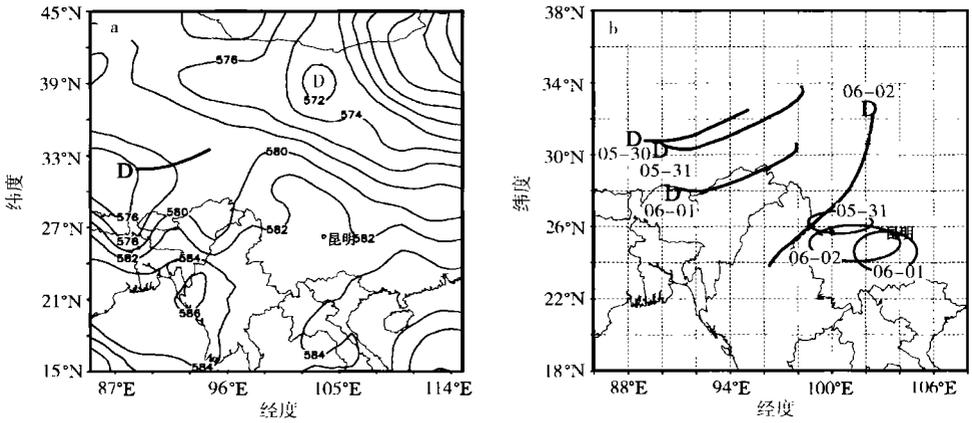


图 1 2001-05-30T08 500 hPa 的高度场(a) 和暴雨天气过程的主要系统动态(b) (粗实线为 500 hPa 切变线, 椭圆区域为暴雨落区)

Fig. 1 Distributions of 500 hPa height (a) and evolution of the main weather systems and the rain storm areas (b) at 08:00 BST, May 30, 2001 (thick lines: 500 hPa shear lines, thick elliptic: rain storm areas)

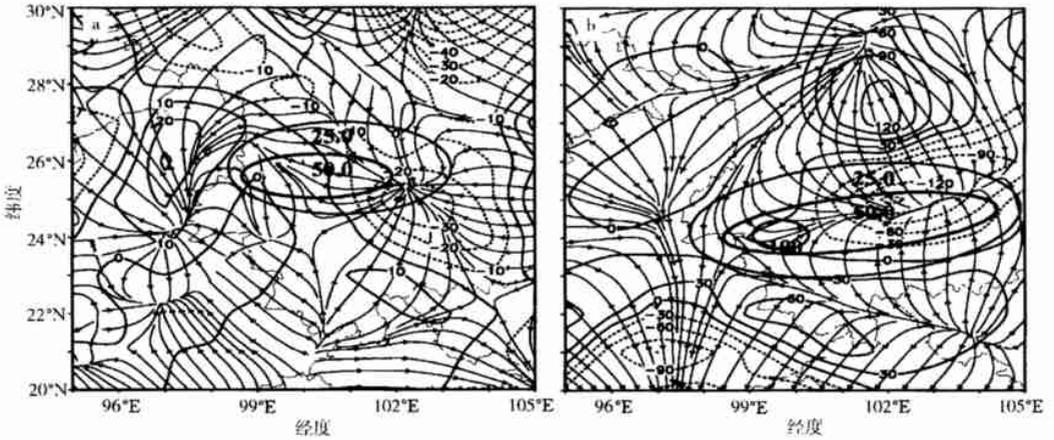


图 2 2001-05-30T08 (a) 和 2001-06-01T08 (b) 700 hPa 的 Q^* 矢量流场与 $\nabla \cdot Q^*$ 分布 (单位: $10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$) (椭圆区域及其中心数值示意未来 12 h 后的大雨、暴雨落区和雨量)

Fig. 2 700 hPa Q^* vector streamline and Q^* vector divergence at a. 08:00 BST, May 30, 2001; b. 08:00 BST, June 1, 2001 (units: $10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$)

(thick elliptic and its central digit denotes the rain storm areas and rainfall amount after 12 hours)

上滇中地区已出现了 Q^* 矢量辐合中心, 这个辐合中心的范围、强度迅速发展。到 6 月 1 日(图 2b), 辐合中心已演变为一 条准东西向的辐合线, 其 $\nabla \cdot Q^*$ 值从 $-30 \times 10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 增强到 $-120 \times 10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$, 未来 12 h 后的强降水出现在辐合线附近。虽然强降水区域与 Q^* 辐合区(线) 有较好的关系, 但最强降水中心并不与辐合中心一一对应, 而是偏于其西侧, 这可能有几个原因: 1) 只有在假定 ω 是一个具有波状特征的函数时, 才能得到 ω 与 $\nabla \cdot Q^*$ 成正比的关系, 因此, 实际大气中最大的垂直运动不一定与最强的 Q^* 辐合区对应; 2) 基于预报角度, 本文 Q^* 矢量的诊断场时间与暴雨的发生时间不同期, 而是超前其 12 h; 另外, 云南复杂地形也

是原因之一。但可以认为, Q^* 辐合区是强降水发生的有利区域, $\nabla \cdot Q^*$ 负值的迅速增强预示着大范围强降水的出现。

3.2 非地转湿 Q 矢量散度的垂直分布

通过暴雨区的 $\nabla \cdot Q^*$ 垂直剖面图(图 3)可以看出, 暴雨区上空具有一个较强 $\nabla \cdot Q^*$ 负值区, 最强的辐合区位于 600 hPa 与 400 hPa 之间对流层的中低层。 Q^* 辐合区将强迫出非地转上升运动, 即次级环流的上升支, 同时在负值区南北两侧大约 4 个纬距处存在 $\nabla \cdot Q^*$ 正值辐散区, 对应非地转下沉运动。这说明暴雨的出现不仅与非地转上升运动有关, 非地转下沉运动的作用也十分重要, 它有利于次级环流的形成。从图 3b 看出, 暴雨日强降水区附近的辐散远比暴雨开始前(图 3a)强得多, 这可能与持续暴雨造成的下沉气流有关。

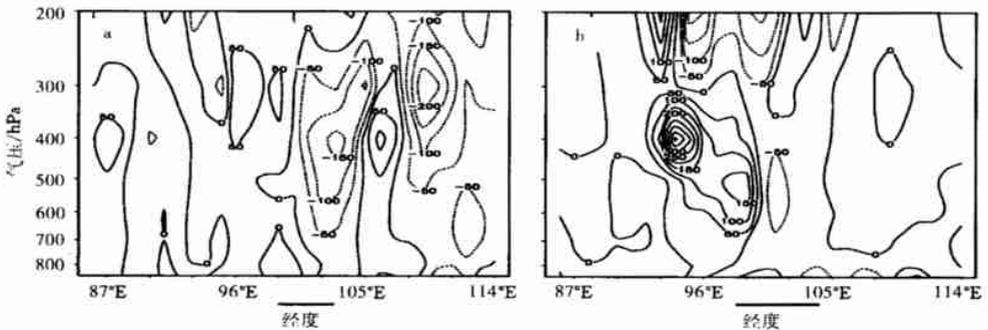


图 3 通过暴雨区 $\nabla \cdot Q^*$ 的经度—高度剖面
a. 2001-05-30T 08 沿 25°N; b. 2001-06-01T 08 沿 24°N
(图下粗实线指示未来 12 h 后的强降水落区)

Fig. 3 Longitude-height cross section of Q^* vector divergence passing the storm area
a. along 25°N at 08:00 BST, May 30, 2001; b. along 24°N at 08:00 BST, June 1, 2001
(The thick lines below the figure indicate the position of heavy rain after 12 hours)

3.3 非地转湿 Q 矢量次级环流

强对流天气与次级环流关系密切, 云南暴雨落区上空存在的非地转上升和下沉运动, 正是次级环流圈的反应, 现用 Q^* 矢量分量作进一步分析(图 4)。

从 5 月 30 日 08 时, 也就是暴雨过程开始前沿 25°N 的垂直分布(图 4a、b)来看, Q^* 的正负值在纬向上相间排列, 暴雨区位于两个 Q^* 负值中心之间, 其上空对应着一个较强的 Q^* 正值中心, 即暴雨区上空 Q^* 为正指向东, 因此在暴雨区东侧 Q^* 正负值的交汇处存在次级环流的上升支, 而在暴雨区西侧 Q^* 正负值的交汇处存在次级环流的下沉支, 这样便在暴雨区上空形成一个逆时针的纬向次级环流, 这正是 Q^* 矢量散度场所表现的次级环流。

6 月 1 日 08 时暴雨日(图 4c), 考虑到其 $\nabla \cdot Q^*$ 正负值中心呈经向排列的特点, 沿 102°E 穿过暴雨区制作 Q^* 的经向剖面来考察其次级环流的情况。从图中可以看出, 云南暴雨区上空中低层也存在一个经向次级环流圈, 其气流在 24°N 附近上升, 29°N 附近下沉, 未来 12 h 后的暴雨落区位于次级环流上升支一侧, 这与 Q^* 描述的情况是相似的。

用纬向(经向)风和垂直速度制作的纬向(经向)垂直流场的剖面图(图 4d)中, 这些次级环流却没有体现出来, 而被宽广的上升气流区所替代, 对应次级环流下沉支的地方均是上升气流。这是因为次级环流所反映的是次天气系统的非地转特性, 故它常常被大尺度天气系统所掩盖。

综上所述, Q_x^* 和 Q_y^* 的分布揭示了次级环流的方向和强弱, 由于 Q^* 矢量散度表示的是产生垂直运动的强迫机制, 这将使次级环流将在一定时间内得以维持, 有利于不稳定能量的释放和强降水的持续发生。因此, 在预报暴雨的发生及其落区时, 次级环流的分析是十分必要的, 非地转湿 Q 矢量分析可为云南的暴雨天气过程的预报提供新的思路。

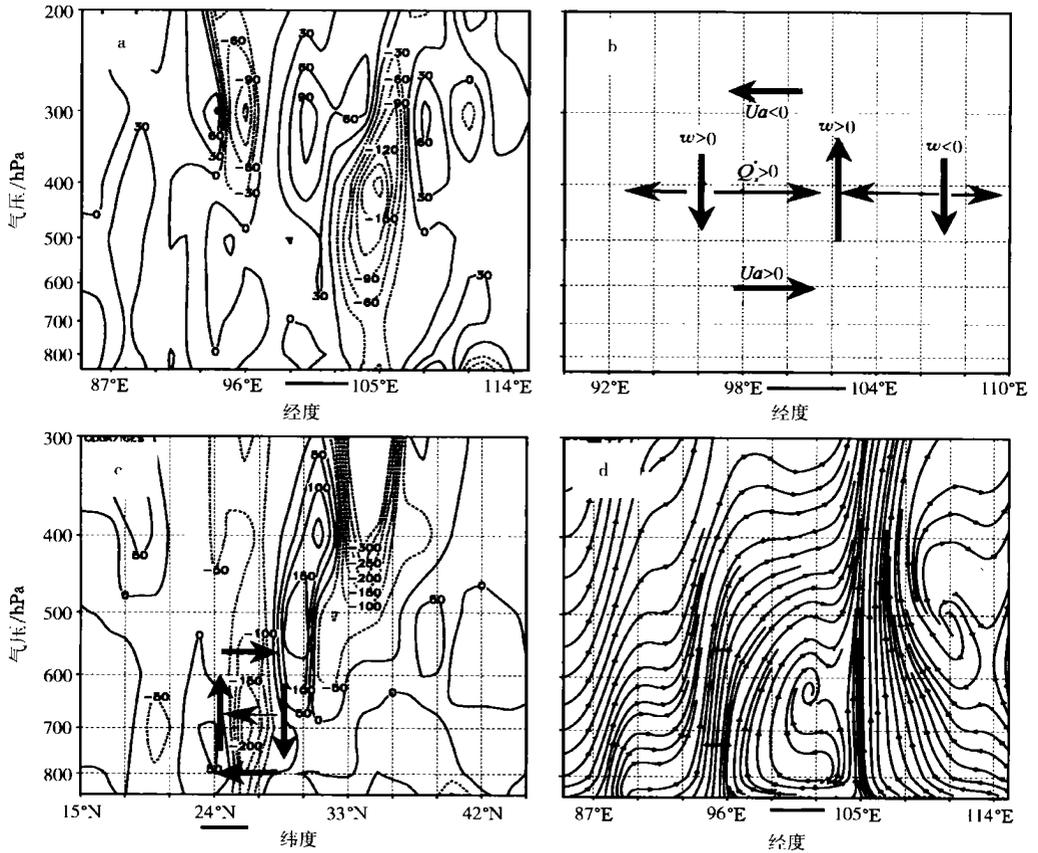


图4 2001-05-30T08 Q_x^* 沿 25°N 的垂直剖面(a)和纬向次级环流(b); 2001-06-01T08 Q_y^* 沿 102°E 的垂直剖面及经向次级环流(c); 2001-05-30T08 沿 25°N 的纬向垂直环流(d)
(细箭头指示 Q_x^* 、 Q_y^* 正负方向, 粗箭头示意次级环流,
图下粗实线指示未来 12 h 后的强降水落区)

Fig. 4 Cross section (a) and secondary circulation (b) of Q_x^* along 25°N at 08:00 BST, May 30, 2001; cross section and secondary circulation of Q_y^* along 102°E at 08:00 BST, June 1, 2001 (c); cross section of perpendicular circulation along 25°N at 08:00 BST, May 30, 2001 (d) (slim arrows and thick arrows indicate directions of Q_x^* or Q_y^* and secondary circulation respectively. The thick lines below the figure indicate the position of heavy rain after 12 hours)

4 结 论

- (1) 矢量辐合区是发生强降水的有利区域, 负值的迅速增强预示着大范围强降水的出现;
- (2) 矢量的垂直分布揭示了次级环流的方向和强弱, 暴雨落区位于次级环流的上升支附近;
- (3) 矢量对次级环流的分析可提供预报云南暴雨及其落区的一个新线索。

参考文献:

- [1] Hoskins, Draghici I, Davies H C. A new look at the ω -equation[J]. Quart J Roy Meter Soc, 1978, 104: 31-38.
- [2] 白乐生. 准地转 Q 矢量分析及其在短期天气预报中的应用[J]. 气象, 1988, 14(8): 25-30.
- [3] 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.
- [4] 李 英, 段 旭, 潘里娜. 昆明准静止锋的 Q 矢量分析[J]. 气象, 1999, 25(8): 6-10.
- [5] 姚秀萍, 于玉斌. 非地转湿 Q 矢量及其在华北特大台风暴雨中的应用[J]. 气象学报, 2000, 58(4): 436-446.

Ageostrophic Wet Q -Vector Analysis of a Persistent Rainstorm Process in Yunnan

LI Ying¹, ZHANG Teng-fei², GUO Rong-fen²

(1. Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044, China;

2. Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034, China)

Abstract: The ageostrophic wet Q -vector (Q^*) method is applied to investigate a persistent rain storm process, which occurred in Yunnan from May 31 to June 2, 2001. The results show that rain storm is most likely happen in a Q^* convergent area and it locates near the ascending branch of a secondary circulation, whose intensity and direction can be indicated by vertical distribution of Q^* .

Key words: rain storm; ageostrophic wet Q -vector; secondary circulation