

非地转湿 Q 矢量在云南冬季 强降水中的分析应用^①

郭荣芬¹ 李 英² 杨向东¹ 周翠芳³

(1. 云南省气象台, 昆明 650034; 2. 中国气象科学研究院; 3. 宁夏石嘴山市气象局)

提 要

应用非地转湿 Q 矢量理论对 2003 年 1 月 5~6 日云南冬季的一次强降水过程进行诊断分析, 结果表明: 500hPa 青藏高原横切变、快速东移的南支槽、低层 700hPa 西南急流、地面强冷锋是此次云南冬季强降水的主要影响系统; 非地转湿 Q 矢量流场的辐合中心(辐合线)与强降水区吻合; 近地面 800hPa 锋生函数场正值区的变化较好地反映了锋面的强度, 锋生函数正值区范围与降雪区域对应较好; 700hPa 非地转湿 Q 矢量散度场辐合区与云南冬季强降水的产生及强度正相关。

关键词: 非地转湿 Q 矢量 冬季 强降水 影响系统

引 言

垂直运动是气象学上一个非常重要的物理量, 它与天气系统的发生、发展以及云雨等天气现象有直接联系, 是导致云和降水等天气现象的重要动力条件。科学文献中, Q 矢量分析方法被誉为业务垂直运动估算的高级方法^[1]。1978 年 Hoskins^[2] 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 强迫机制的强弱, 此后 Hoskins“ Q 矢量分析方法”在天气诊断分析中得到广泛应用。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, 考虑到中尺度天气过程的非地转的特点, 张兴旺^[3] 从“ p ”坐标系出发, 利用坐标变换, 推导出湿 Q 矢量的表达式, 并对华南暴雨过程进行诊断, 指出湿 Q 矢量与次级环流有良好的对应关系, 特别是低纬度地区, 湿 Q 矢量与降水落区存在较好的配置关系, 其分析优于准地转 Q 矢量分析。姚秀萍等^[4] 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 矢量与暴雨落区有更好的关系。岳彩军、寿绍文等^[5] 针对江淮梅雨锋暴雨, 从准地转 Q 矢量、半地转 Q 矢量及湿 Q 矢量的诊断特性进行了定性比较, 发现 700hPa 非地转湿 Q 矢量辐合场与同时刻地面降水的发生有较好的对应关系。文献[6]曾利用湿 Q 矢量理论就云南夏季暴雨天气过程进行过一些诊断分析, 表明非地转湿 Q 矢量辐合区是云南夏季暴雨发生的有利区域。

云南冬季平均每年都有一次全省性的强降水过程(包括大雨、暴雨和大雪), 因其概率低, 对其研究较少。但冬季强降水往往与寒潮冷空气联系在一起, 因而成为云南冬半年的主要灾害性天气之一, 对它研究也十分必要。本文应用非地转湿 Q 矢量理论对云南冬季强降水进行诊断分析, 探讨湿 Q 矢量与冬季强降水在云南低纬高原中的应用关系。

1 非地转湿矢量的表达式

根据文献[4], 定义非地转湿 Q 矢量表

^① 本文由云南省“十五”科技攻关 2001GN43 项目资助

达式为 $Q^* = (Q_x^*, Q_y^*)$, 即

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

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

其中 $h = \frac{R}{P} \left(\frac{P}{1000} \right)^{\frac{R}{C_p}}$, $H = -\frac{L}{C_p} \left(\frac{1000}{P} \right)^{\frac{R}{C_p}} \omega$

$\frac{\partial q_s}{\partial p}$, Q_x^* 和 Q_y^* 分别是 x 和 y 方向非地转湿 Q 矢量的分量, 其它符号为物理量常用符号。

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:

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

$\nabla \cdot Q^*$ 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, 则 ω 与 $\nabla \cdot Q^*$ 成正比, 当 $\nabla \cdot Q^* < 0$, 则 $\omega < 0$, 为上升运动, 反之为下沉运动。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, 必然激发次级环流, 下列公式描述了非地转湿 Q 矢量与次级环流之间的关系, 即:

$$Q_x^* = \frac{1}{2} \left(f^2 \frac{\partial u_a}{\partial p} - \sigma \frac{\partial \omega}{\partial x} \right)$$

$$Q_y^* = \frac{1}{2} \left(f^2 \frac{\partial v_a}{\partial p} - \sigma \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)$$

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。

引入完全非地转湿 Q 矢量锋生函数^[9] $F_{Q^*} = 2Q^* \cdot \nabla \theta_s$, 以反映锋区的加强或减弱。当 $F_{Q^*} > 0$ 时, 表示湿 Q 矢量指向冷空气, 锋生; 当 $F_{Q^*} < 0$ 时, 表示湿 Q 矢量指向暖空气, 锋消。

本文选取 2003 年 1 月 5~6 日云南一次全省性强降水、降雪的寒潮天气过程进行分析, 计算资料取自 MICAPS 系统客观分析的

$1^\circ \times 1^\circ$ 的格点资料, 非标准层的资料采用拉格朗日插值方法求得。

2 云南冬季强降水个例概况

2003 年 1 月 5~6 日云南共出现 36 站次的中~大雪, 降雪区集中在滇中的昆明、玉溪, 滇东的昭通、曲靖、文山、红河北部。滇中及以东大部地区积雪深度为 5~29cm, 其中 4 日 20 时~5 日 20 时(北京时, 下同)为全省性大雨过程(5 个站暴雨, 37 个站大雨), 5 日 08 时~6 日 08 时全省大雨 35 站次, 暴雨 12 站次, 暴雨区集中在滇南的红河、玉溪南部(见图 1), 成为 1950 年以来云南最强的一次冬季暴雨过程。

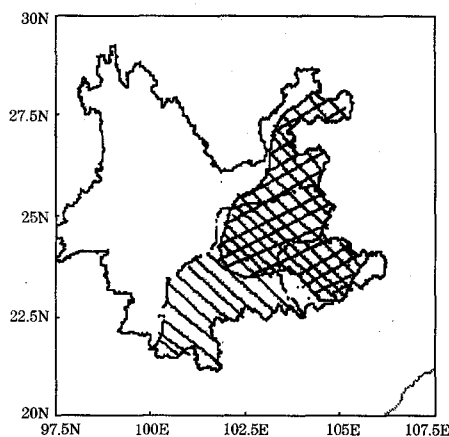


图 1 1999 年 1 月 4 日 20 时~5 日 20 时云南降水量分布

单位: 0.1mm, 图中斜线部分为降雪区, 点虚线区域为大到暴雨区

3 天气形势

2003 年 1 月 4 日 08 时高空 500hPa 形势, 中高纬度为两槽一脊型, 云南为弱脊前的西北气流控制, 南支槽位于 25°N 、 85°E , 附近有 -10°C 的冷中心, 副高位置偏南; 700hPa 川滇间有切变, 切变北部高压加强, 格尔木高度为 3140gpm, 昆明高度为 3110gpm, 呈明显的北高南低之势; 08 时地面图上, 冷锋在秦岭附近, 14 时锋面南移到武都、汉口一线。受南支槽影响, 云南由晴天转为降雨天气, 滇西南及滇南普降中到大雨。5 日 500hPa 南支槽加强东移到 90°E 附近, 温度槽冷中心增强到 -20°C ; 冷平流促使高原东南侧形成横切变, 后部偏北风较强; 对应 700hPa 高原东

南侧至孟加拉湾北部形成 3080gpm 低压环流,云南转为槽前西南风低空急流区,风速达 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,川滇间 24 小时降温达 $7\sim 8^\circ\text{C}$;地面冷锋加强并很快东南移至滇中昆明到滇东南的广南一线,冷暖空气结合使滇东曲靖全区开始降雪,滇中滇南普降大雨,14 时后昆明转为小雪天气。6 日南支槽和切变线东移出云南,云南转为槽后西北气流;地面 08 时减弱的冷锋移至哀牢山附近,14 时锋消,云南已无降雨降雪,本次过程结束。

4 诊断结果

4.1 非地转湿 Q 矢量场的流线分析

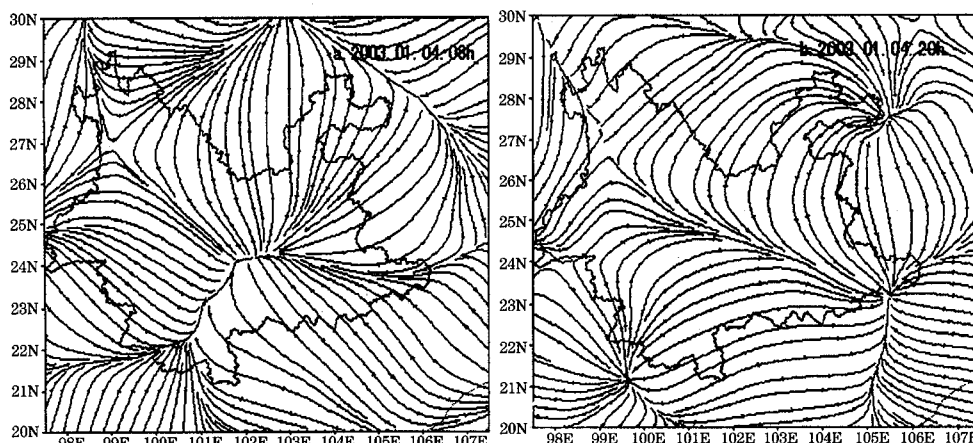


图2 2003年1月4日08时(a)和20时(b)700hPa非地转湿 Q 矢量场的流场

4.2 非地转湿 Q 矢量锋生函数的分析

锋生函数能够表示锋生锋消的程度。文献[9]指出,就非地转湿 Q 矢量锋生函数 F_Q 场的含义而言,在 F_Q 场的正值区上升运动很强,水汽条件有利,且层结不稳定,是产生强降水的必要条件。从低层 800hPa 非地转湿 Q 矢量锋生函数的分布来看(图3),5 日 08 时弱的锋生函数正值区在滇东南,由于冷空气南下补充及南支槽前西南风低空急流在锋面南侧建立,强烈的气流汇合使静止锋生加强,降水逐渐增大,滇东曲靖开始降雪,滇中出现成片大雨。20 时随着锋面加强,锋生函数正值区向北向东扩展,数值增大,最强锋生区位于冷锋锋后的冷气团中,中心值达 $16 \times 10^{-13} \text{K}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$,锋生函数正负交界处与地面冷锋、低层切变对应,正值区

图2为2003年1月4日700hPa的非地转湿 Q 矢量场的流场,08时(图2a)在 $22.5\sim 24^\circ\text{N}$ 、 $101\sim 103.5^\circ\text{E}$ 存在很明显的非地转湿 Q 矢量流场的辐合中心,该中心与未来12小时滇南的强降水区对应。20时(图2b)辐合中心(辐合线)移到滇中到滇东南,12小时后此处也出现暴雨区。6日08时辐合线东移到滇东到贵州西部(图略),与滇东的暴雪区域吻合。由此可以认为非地转湿 Q 矢量流场的辐合中心(辐合线)是大气垂直运动发展较强的定性指标,对云南冬季强降水的预报具有一定的指示意义。

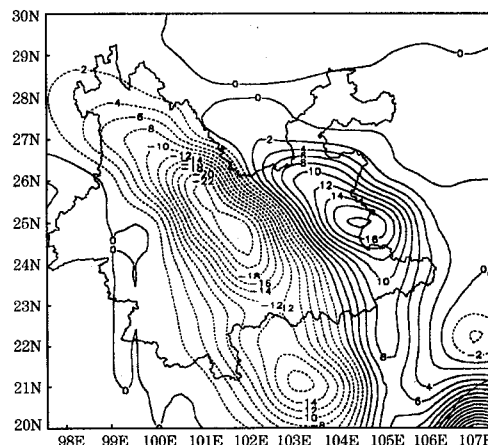


图3 2003年5月20日非地转湿 Q 矢量锋生函数分布(单位: $10^{-13} \text{K}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)

范围正是降雪区域,且强中心区与滇东暴雪区对应,曲靖的马龙降雪深度 29cm,师宗 25cm。另外分析发现,本次大~暴雨集中地

滇西南、滇南(24°N以南、103°E以西)的非地转湿 Q 矢量锋生函数 F_{Q^*} 场为负值。可见,此次冬季强降水过程中,近地面 800hPa 锋生函数的变化较好地反映了锋面的强弱,锋生函数正值区范围与降雪区域对应较好,对大一暴雨区域反映较差。

4.3 非地转湿 Q 矢量散度辐合与降水的关系

低层非地转湿 Q 矢量散度辐合区通常是上升运动激发区,非地转湿 Q 矢量散度表示的是产生垂直运动的强迫机制的强弱, $\nabla \cdot Q^* < 0$ 的区域,非地转上升运动将在一定时间尺度内得以维持^[4]。为此我们分析 700hPa 非地转湿 Q 矢量和湿 Q 矢量散度合成图后发现,4日 08时(图4)滇中及滇南为湿 Q 矢量辐合区、湿 Q 矢量散度负值区,中心辐合强度达 $-56 \times 10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,未来 12 小时的滇南大一暴雨区强降水区就位于该强辐合中心偏南约 1 个纬度附近,降雪区昭通南部、曲靖的湿 Q 矢量散度负值在 $-8 \times 10^{-17} \sim -40 \times 10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 。随后湿 Q 矢量散度负值区东南移,辐合强度逐渐增大。4日 20日滇东南辐合中心值增大到 $-80 \times 10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 以上,降雪区随之向东南方向扩展,而最强降雪区则出现在滇东湿 Q 矢量散度正值区交界附近的负值区一侧,说明暴雪区附近的上升气流和下沉气流间可能存

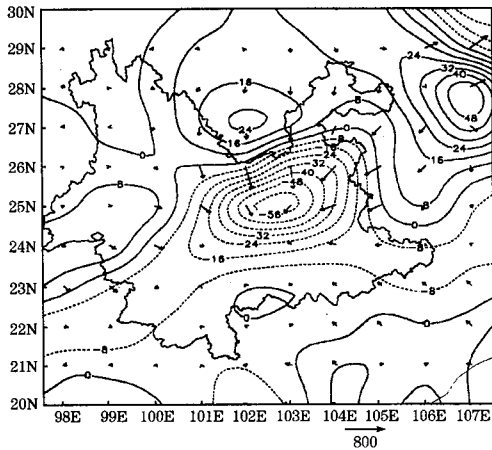


图4 2003年1月4日08时700hPa非地转湿 Q 矢量和湿 Q 矢量散度(单位: $10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$) 在次级环流的扰动,利于不稳定能量的释放。

同时次的垂直速度 ω 沿 103.75°E 的垂直剖面图(图5)也反映出,强降水区 23~27°N 从低层到高层为一致的 ω 负值区,且 ω 负值上升区略向北倾斜,表明大气强烈的辐合上升运动导致了强降水的产生。

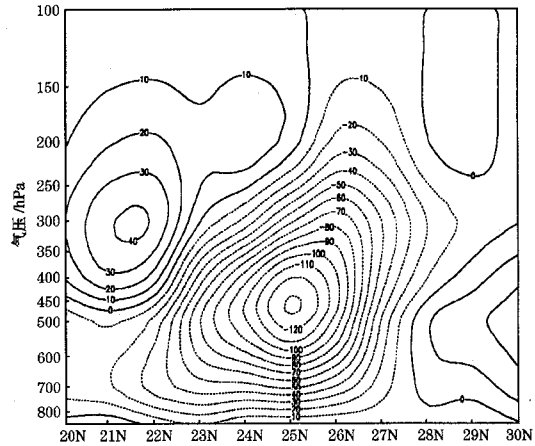


图5 2003年1月4日08时垂直速度沿 103.75°E 的垂直剖面(单位: $10^{-4} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

对比同时刻的垂直速度 ω 场演变情况(图略),可以看到 ω 负值区与非地转湿 Q 矢量散度辐合负值区中心位置及移动路径基本相同;不同点在于:非地转湿 Q 矢量散度负值区的范围小于 ω 负值区范围,前者与此次冬季强降水落区较为吻合。

4.4 非地转湿 Q 矢量散度的时间演变

为进一步说明云南冬季强降水与非地转湿 Q 矢量散度发展变化的关系,我们对暴雨区所在区域(23~24°N、101.7~104°E)进行平均,制作通过暴雨区非地转湿 Q 矢量散度随时间演变的垂直剖面图(图6)。可以看出,3日 20时在低层 800hPa 开始出现湿 Q 矢量散度负值区,20时后 Q 矢量散度负值区数值逐渐增大,辐合增强,辐合区逐渐由低层向高层伸展,范围也不断扩大,相应滇东、滇南开始有降水。4日 20日暴雨区上空湿 Q 矢量散度负值区由低层 800hPa 一直向上伸展到 400hPa 附近,最强的辐合区位于 550 与 450hPa 之间对流层的中低层,未来 12 小时强降水就出现在该时段。

可见,非地转湿 Q 矢量散度负值区的存在及强度的增强与云南冬季未来 12 小时降

水的产生及强度密切正相关。

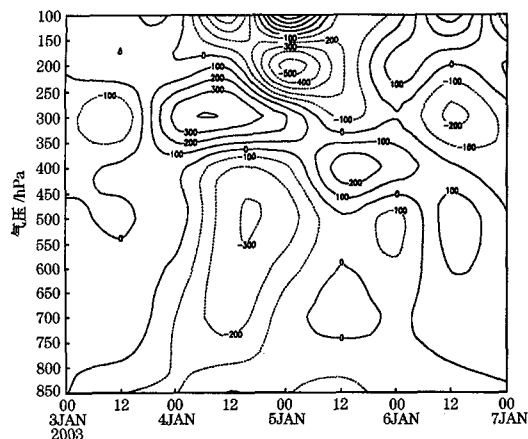


图6 暴雨区非地转湿 Q 矢量散度随时间演变的垂直剖面图(单位: $10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$)

5 结论

通过对2003年1月5~6日云南冬季的一次强降水过程分析,我们得到如下结论:

(1)环流形势上,500hPa 青藏高原横切变、快速东移的南支槽,低层700hPa 滇南西南急流是滇南地区大范围强降水的主要原因,当地面冷锋加强并在滇中以东与暖湿气流结合,滇东出现强降雪。

(2)非地转湿 Q 矢量流场的辐合中心,与未来12小时滇南强降水区对应,东移到滇东的辐合线与暴雪区域吻合。可以认为非地转湿 Q 矢量流场的辐合中心(辐合线)对云

南冬季强降水的预报具有一定的指示意义。

(3)近地面800hPa 锋生函数的变化较好地反映了锋面的强弱,锋生函数正值区范围与降雪区域对应较好,对大一暴雨区域反映较差。

(4)湿 Q 矢量散度分析表明,湿 Q 矢量散度负值区的移向及辐合强度的变化与本次云南冬季强降水发生区域及降水强弱对应,最强降雪区出现在正负值交界附近的负值区上升支一侧。

(5)通过对比分析发现,非地转湿 Q 矢量散度负值区的范围小于 ω 负值区范围,前者与此次冬季强降水落区较为吻合。

参考文献

- 1 Lawrence B Dunn. Evaluation of Vertical Motion: Past, Present, and Future. Wea. Forecasting, 1991, 6(1): 65—73.
- 2 Hoskins, Draghici I, Davies H C. A New Look at the ω equation. Quart J Roy Meter Soc, 1978, 104: 31—38.
- 3 张兴旺. 湿 Q 矢量表达式及其应用. 气象, 1998, 24(8): 3—7.
- 4 姚秀萍, 于玉斌. 非地转湿 Q 矢量及其在华北特大暴雨中的应用. 气象学报, 2000, 58(4): 436—443.
- 5 岳彩军, 寿绍文等. 梅雨锋暴雨的 Q 矢量定性分析. 气象科学, 2003, 22(1): 55—62.
- 6 李英, 张腾飞, 郭荣芬. 云南一次持续性暴雨过程的非地转湿 Q 矢量分析. 南京气象学院学报. 2002, 25(4): 259—264.
- 7 姚秀萍, 于玉斌. 完全 Q 矢量的引入及其诊断分析. 高原气象. 2001, 20(2): 209—213.

Non-geostrophic Wet Q -vector Analysis and Application of Heavy Precipitation in Winter in Yunnan

Guo Rongfen¹ Li Ying² Yang Xiangdong¹ Zhou Cuifang³

(1. Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034; 2. Chinese Academy of Meteorological Science; 3. Shizuishan Meteorological Office, Ningxia)

Abstract

A diagnosis of a heavy rainfall from Jan. 5 to Jan. 6, 2003 is made with the Non-geostrophic Wet Q -vector (Q^*) theory. The results show that the transverse shear line over the Qingzang Plateau and the trough eastward at the 500hPa, southwesterly jet at the 700hPa, and heavy cold front on the surface are the important influencing systems. The region of heavy rainfall has a good relation with Q^* divergence center or line. The changes of Q^* frontogenesis function at the 800hPa reflect the intensity of front, and the region-magnitudes of Q^* frontogenesis function could be used to locate the snowfall area. Q^* divergence at the 700hPa has positive correlation with the development and the intensity of heavy precipitation in winter in Yunnan.

Key Words: non-geostrophic Q -vector heavy precipitation influencing system