

一次特大暴雨天气的 Q^* 矢量分析

杨晓霞 谭志华 华 岩

(山东省气象台, 济南 250031)

提 要

应用修正的 Q^* 矢量对 1999 年 8 月 11 ~ 13 日山东特大暴雨天气过程进行了诊断分析, 分析结果表明, 中低层 Q^* 矢量指向大暴雨区; 850 ~ 700hPa 的 Q^* 矢量辐合区与上升运动区和大暴雨区有较好的对应关系; 暴雨产生在 850hPa 和 500hPa Q^* 矢量湿锋生区的暖空气一侧。

关键词: 特大暴雨 Q^* 矢量 诊断分析

前 言

Hoskins 的 Q 矢量分析理论^[1]表明, 在对流层低层 Q 矢量与非地转速度成正比, 用 Q 矢量可表示低层的非地转速度场。 Q 矢量散度表示产生 ω 的强迫机制的强弱; Q 矢量还可以将锋生函数表示成物理意义清楚、表达式简单的形式。近年来 Q 矢量理论在强对流和暴雨天气的诊断分析中得到广泛应用^[2~4]。准地转 Q 矢量受到准地转近似的限制, 不宜用于研究次天气尺度运动。张兴旺^[5]对 Q 矢量的表达式进行了修正, 并且指出, 修正的 Q 矢量与次级环流有良好的对应关系, 适用于研究次天气尺度运动。本文应用 HLAFS 分析场资料, 在 32 ~ 42°N、113 ~ 127°E 范围内, 0.5° × 0.5° 网格点上计算修正的 Q^* 矢量, 对 1999 年 8 月 11 ~ 13 日山东特大暴雨天气过程进行了诊断分析。

1 Q^* 矢量的计算

根据文献 [5], 修改的 Q^* 矢量表达式为:

$$Q_x^* = \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial P} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \nabla \theta \right] \quad (1)$$

$$Q_y^* = \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial P} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - h \frac{\partial V}{\partial y} \cdot \nabla \theta \right] \quad (2)$$

$$h = \frac{R}{P} \left(\frac{P}{1000} \right)^{R/C_p}$$

修正的 Q^* 矢量与次级环流之间的方向关系是: Q^* 矢量总指向气流上升区、背向下沉区。 Q^* 矢量散度为非地转 ω 方程的强迫项。

$$\nabla^2(\sigma\omega) + f^2 \frac{\partial \omega}{\partial P} = -2\nabla \cdot Q^* \quad (3)$$

当 ω 场具有波状特征时, 式(3)

$$\nabla \cdot \vec{Q}^* \propto \omega$$

若 $\nabla \cdot Q^* < 0$, 则 $\omega < 0$, 为上升运动; 若 $\nabla \cdot Q^* > 0$, 则 $\omega > 0$, 为下沉运动。

在准静力、绝热和无摩擦条件下, Q^* 矢量锋生函数为:

$$F = \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \cdot \nabla \right) |\nabla_h \theta^2| = 2Q^* \cdot \nabla \theta$$

应用 θ_{se} 代替 θ , 计算湿锋生函数。 Q^* 矢量湿锋生函数是一个能反映锋区加强或减弱的物理量^[6]。它与假相当位温梯度项、风的水平切变项及南北汇合项有关。当 $Q^* \cdot \nabla \theta_{se} > 0$ 时, 表示 Q^* 指向暖空气, 气团锋生。当 $Q^* \cdot \nabla \theta_{se} < 0$ 时, 表示 Q^* 指向冷空气, 气团锋消。

2 暴雨过程概述、影响系统及大气温湿条件

2.1 暴雨过程概述

1999 年 8 月 11 日 06 时 ~ 13 日 06 时, 鲁东南和鲁北地区出现了一次罕见的特大暴雨天气, 37 个县过程雨量在 50mm 以上, 其中 18 个县出现了大暴雨 (100 ~ 250mm), 2 个县出现了特大暴雨 (雨量 > 250mm)。有两

个暴雨中心,一个在鲁东南的诸城(635.8mm)和高密(322.7mm),另一个在鲁北的高青(194.9mm)和博兴(186.1mm)。该次暴雨过程范围不大,但雨量大、降水时段集中。强降水出现在11日下午至夜间,11日06时~12日06时高密雨量为314.8mm,诸城雨量达503.4mm。

2.2 影响系统特征

这次大暴雨天气是由9907号热带风暴减弱后形成的低压环流与西风槽相结合而产生的。11日08时,从地面~700hPa山东东部为低压倒槽控制,槽线位于120°E;500hPa上有一西风槽与低层倒槽相叠置,西风槽南部与倒槽相结合。在流场上反映更清楚,500hPa上的两个气旋性环流中心在山东上

空打通,形成西北-东南向的鞍型辐合场。700hPa以下东南风与东北风的辐合线位于120°E。11日下午在辐合线附近开始出现成片的暴雨。11日20时,700hPa以下的流场辐合线西移,500hPa上北部的气旋性环流中心南移到鲁西北地区(图1a)。11日夜間,在低层辐合线附近,鲁东南和鲁北地区出现了暴雨,鲁东南局部出现了特大暴雨,鲁北局部出现了大暴雨。12日08时,低层形成气旋性环流中心,850hPa环流中心在鲁南(图1b),中心北部流场辐合线位于117°E。500hPa鞍形场消失,暴雨明显减弱。12日20时,低层流场辐合线西移到山东以西。12日夜間~13日凌晨,大暴雨天气结束。

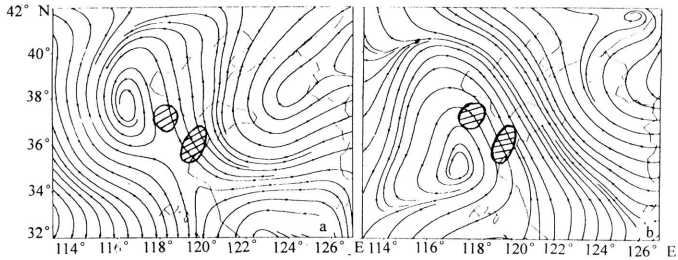


图1 1999年8月11日20时500hPa流场(a)12日08时850hPa流场(b)

阴影区为11日06时~13日06时>100mm的暴雨区

2.3 大气湿温条件

分析暴雨期间的湿温场特征发现,暴雨产生在850~700hPa高温、高湿和有水汽辐合的区域。大气中低层对流不稳定,并且在500hPa有较强的能量锋区。

11日20时~12日08时,850~700hPa山东为水汽通量辐合区。暴雨产生前11日08时,暴雨区上空700hPa以下大气处于近饱和状态,相对湿度在80%以上;黄河以东地区为 $\theta_{se} > 68^\circ\text{C}$ 的高能舌区,500hPa上,鲁中为一很强的南北向的 θ_{se} 的锋区。850~700hPa θ_{se} 随高度变化较小,700~500hPa θ_{se} 随高度增高而迅速减小,在暴雨区上空 $\Delta\theta_{se(500-700)} < -8.0^\circ\text{C}$,大气对流不稳定。11

日20时,500hPa上有一低能舌从西北伸向鲁中,使能量锋区加强。700hPa以下湿度加大能量增高,鲁北相对湿度在90%以上,鲁中 $\theta_{se} > 72^\circ\text{C}$, $\Delta\theta_{se(500-700)}$ 中心值达到 -15.2°C 。11日夜間,大暴雨产生在低层高温、高湿中心及500hPa能量锋区附近。12日08时,500hPa鲁中的能量锋区转成西北-东南向,暴雨区上空变成了对流稳定区,暴雨明显减弱,12日夜間大暴雨结束。

3 Q* 矢量诊断分析

这次大暴雨天气的暴雨范围小、雨强大、时间较集中,具有中小尺度天气特征。中小尺度天气系统具有很强的非地转性。准地转Q*矢量受到准地转近似的限制,不能较好地

反映非地转风特征,应用它进行诊断分析有可能忽略掉中小尺度系统。诊断分析结果也表明,准地转 Q^* 矢量流场的汇区和其散度场的辐合区并不与大暴雨区相对应,而是在鲁东南大暴雨区的东南部2~3个经纬度的海区(图略)。而 Q^* 矢量辐合区与大暴雨区有较好的对应关系,并且 Q^* 矢量和次级环流也有良好的对应关系, Q^* 矢量指向气流上升区、背向气流下沉区,因此分析 Q^* 矢量场特征,可以了解产生大暴雨天气的次级环流特征。

3.1 Q^* 矢量场特征

分析 Q^* 矢量的分布发现,11日08时850~500hPa上其绝对值都较小,11日20时,绝对值明显增大,850hPa上鲁东南暴雨区为 Q^* 矢量流场的汇区,鲁中的长箭头指向大暴雨区(图2a),此区在500hPa有较强的上升运动(图2b);700hPa上 Q^* 矢量流场的汇区在山东半岛的北部,但 Q^* 矢量的长箭

头指向鲁东南大暴雨区;500hPa上的汇区在渤海湾的西部, Q^* 矢量长箭头指向鲁北的大暴雨区(图略)。分析 Q^* 矢量的绝对值分布发现,850hPa上在鲁中为 $100 \times 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 的高值中心(图2a),700hPa上在山东有两个中心,一个在鲁西南,另一个在鲁中北部,此中心与鲁北大暴雨区相对应,中心值为 $55.9 \times 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,长轴走向与大暴雨区相一致,500hPa上 Q^* 矢量的绝对值较大,两个中心分别位于鲁西北和鲁中地区,中心值分别为 $141 \times 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 和 $116 \times 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 。说明850~500hPa非地转风分量都较大,暴雨产生在 Q^* 矢量绝对值梯度较大处,即非地转风梯度较大处。12日08时,850hPa鲁中地区的 Q^* 矢量长箭头指向鲁东南的特大暴雨区,700hPa上长箭头分别指向两个大暴雨中心(图略)。12日20时850~500hPa的 Q^* 矢量流场已明显减弱,13日凌晨大暴雨结束。

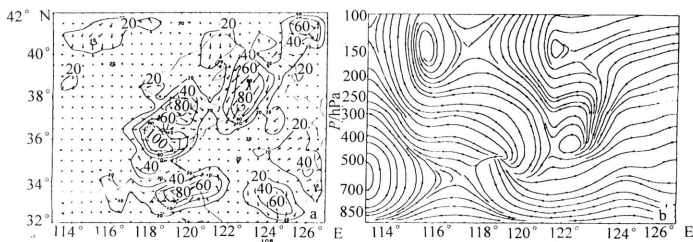


图2 1999年8月11日20时850hPa上 Q^* 矢量和绝对值(单位: $\times 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$)分布(a)和同一时间穿过大暴雨区(36°N)的 $u-w$ 流场垂直剖面(b)

3.2 Q^* 矢量散度

研究表明^[6], Q^* 矢量散度激发次级环流,而其辐合区对应着次级环流的上升运动区。分析发现,暴雨期间850~700hPa的 Q^* 矢量辐合区与暴雨区对应关系较好。11日08时山东上空850~700hPa基本上为 Q^* 矢量辐散区。11日20时,850hPa上在山东境内118°E以东转为 Q^* 矢量辐合,中心在37°N、119°E,中心值为 $-78.8 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,特大暴雨产生在辐合中心附近。700hPa上两个辐合中心分别与两个大暴雨区相对应,强

中心对应于特大暴雨区,中心值为 $-68.2 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,鲁北大暴雨区对应于 $-20.0 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 的弱中心(图略)。12日08时,850hPa辐合明显减弱,中心移到莱州湾,此时降水也明显减弱,而在黄河东部鲁中生成南北向的强辐散中心,此区无暴雨。700hPa上两个辐合中心分别与两个大暴雨中心相对应,鲁北辐合中心稍偏北,中心强度为 $72.7 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,鲁东南辐合中心与大暴雨中心相叠置,中心强度为 $72.7 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ (图略)。12日20时,

500hPa 在鲁北和鲁中形成两个辐合中心,中心强度分别为 67.5×10^{-17} 和 $54.4 \times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,而在 700hPa 上 120°E 以西转为辐散。13 日凌晨大暴雨结束。从大暴雨区上空 Q^* 矢量散度的时空分布图(图略)中可以看出,11 日 20 时~12 日 08 时 850~700hPa 为较强的辐合。 Q^* 矢量散度在低层表现明显,这就是利用低层 Q^* 矢量散度诊断暴雨区的真正原因所在。

分析垂直速度场发现,11 日 08 时暴雨区上空为下沉气流,11 日 20 时,500hPa 及以下转为上升运动,700hPa 上升运动最强。从穿过暴雨区的垂直剖面图上可见,鲁东南特大暴雨区上空,500~400hPa 之间形成顺时针旋转的垂直环流中心(图 2b),在环流中心的下部和西部为一股斜升的东南风气流。这股斜升气流与 Q^* 矢量辐合区相对应。12 日 08 时环流中心下降到 850~700hPa 之间,鲁东南暴雨区斜升气流明显减弱,在其西部鲁北暴雨区的上升气流明显加强,这股上升气流与 700hPa 上的 Q^* 矢量辐合中心相对应。12 日 20 时垂直环流中心西移到鲁北,850~700hPa 上升运动区与 850hPa 上的 Q^* 矢量辐合中心相对应。

从以上分析可见,850~700hPa 的 Q^* 矢量辐合与上升运动和大暴雨区有较好的对应关系,说明在暴雨区有非地转风辐合产生

的次天气尺度的上升运动,也就是次级环流的上升支。

3.3 Q^* 矢量锋生函数

用 θ_w 代替 θ 计算湿锋生函数分析大暴雨期间锋生场的变化可见,11 日 08 时,700hPa 沿黄河为一较强的锋生带,中心在黄河口,500hPa 锋生带偏东,在鲁中为锋生中心,中心值为 $27.9 \times 10^{-16} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 。11 日 20 时,850hPa 上在黄河东部 θ_w 高值舌的西部生成一很强的东北-西南向的锋生带,两个锋生中心分别在鲁中和莱州湾,中心值分别为 30.0×10^{-16} 和 $42.2 \times 10^{-16} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ (图 3a);而 700hPa 锋生中心移到鲁西南地区,鲁东南特大暴雨区上空为弱的锋消区(图 3b);500hPa 上在鲁中的锋生带转为西北-东南向,中心在鲁中,其值为 $20.0 \times 10^{-16} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ (图略)。11 日夜间大暴雨产生在 850hPa 和 500hPa 的强锋生带区(鲁北暴雨)和其东南部暖区一侧,700hPa 有锋消的区域(鲁东南暴雨区)。12 日 08 时,鲁东南暴雨区上空 700hPa 以下层全转为锋消,700hPa 以上锋生加强,鲁北暴雨区上空全转为锋消,700hPa 为较强的锋消中心(图略)。12 日白天暴雨明显减弱,12 日 20 时山东上空 850~500hPa 全为锋消区,13 日凌晨大暴雨天气结束。由此可见, Q^* 矢量锋生函数对暴雨预报有一定的指示意义。

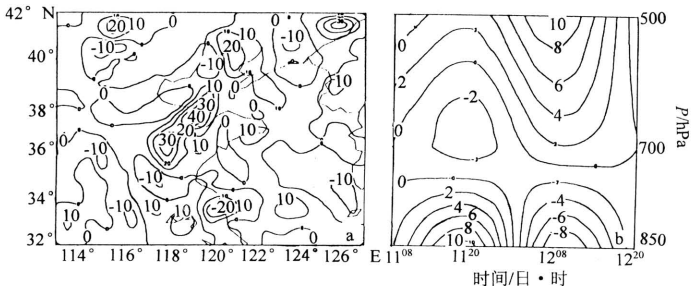


图 3 (a) 1999 年 8 月 11 日 20 时 850hPa 锋生函数 单位: $\times 10^{-16} \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ (b) 11 日 00 时~12 日 12 时(世界时)特大暴雨区(36°N 、 119.5°E)上空 Q^* 矢量锋生函数随时间演变图

(下转封三)

(上接第 47 页)

由此可见,暴雨产生在 850hPa 和 500hPa 湿锋生区的东侧,说明此处有干冷空气从西部南下,850hPa 上 θ_w 高值舌西部的锋区东移,鲁中地区有湿锋锋生,500hPa 鲁中的能量锋区加强。而在 700hPa 上有锋消,说明 700hPa 上的 Q^* 矢量指向冷空气,有非地转风向暴雨区输送暖湿空气,使得 700~500hPa 层对流不稳定加剧,不稳定能量增高。850~700hPa 的 Q^* 矢量辐合强迫的上升运动促使低层近饱和的暖湿空气上升,触发 700~500hPa 中的对流不稳定能量释放,产生大暴雨天气。12 日 08 时,850~500hPa 转为湿锋锋消,说明干冷空气在南下的过程中已减弱变性,后部无新鲜的干冷空气补充,不稳定能量已释放,大气已变成稳定层结,暴雨将逐渐减弱,实况也是如此。由此可知,把中低层 Q^* 矢量锋生函数和 Q^* 矢量散度以及水汽条件相结合,可以预报暴雨的落区、强度和维持时间。

4 结语

(1) 这次特大暴雨天气是由低层热带低压环流与 500hPa 西风槽相结合产生的。暴雨产

生在高温、高湿和对流不稳定的区域。

(2) Q^* 矢量指向大暴雨区,850~500hPa Q^* 矢量绝对值梯度大值区与暴雨区相对应。

(3) 暴雨区与 850~700hPa 的 Q^* 矢量辐合区有较好的对应关系, Q^* 矢量辐合激发次级环流产生上升运动,触发对流不稳定能量释放,产生大暴雨。

(4) 大暴雨产生在 850hPa 和 500hPa 湿锋生区的暖空气一侧,且在 700hPa 上有锋消,700~500hPa 有对流不稳定能量储存的地区。

参考文献

- 1 白乐生. 准地转 Q 矢量分析及其在短期天气预报中的应用. 气象, 1998, 14(8): 25~30.
- 2 杨小艳, 曹希孝. 准地转 Q 矢量诊断场与暴雨关系的分析. 气象, 1995, 21(11): 17~21.
- 3 汪克付, 叶金印. 江淮梅雨锋暴雨过程 Q 矢量分析及落区预报. 气象, 1995, 21(3): 40~43.
- 4 李英, 段旭, 潘里娜. 昆明准静止锋的准地转 Q 矢量分析. 气象, 1999, 25(8): 6~10.
- 5 张兴旺. 修改的 Q 矢量表达式及其应用. 热带气象学报, 1999, 15(2): 162~167.
- 6 省气象台短期预报岗位培训教材. 北京: 气象出版社, 1998: 117~120.

A Q^* -Vector Analysis of a Torrential Rain in Shandong Province

Yang Xiaoxia Tan Zhihua Hua Yan

(Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031)

Abstract

The modified Q -vector method was applied to diagnose the torrential rain in Shandong during 11—13 August, 1999. The results show that the Q^* -Vector towards the torrential rain are and the position of the Q^* -vector convergence at 850 and 700hPa is correlated well to the ascending motion and torrential rain area. It is found that storm rainfall occurred in the warm air side of the Q^* -Vector moist frontogenesis zone at 850 and 500hPa.

Key Words: torrential rain Q^* -Vector diagnose analysis