

登封 2007 年春季大到暴雨的特征分析

李慧芳¹, 赵海青², 周幸福¹, 李湘慧¹, 李社宗²

(1. 登封市气象局, 河南 登封 452470; 2. 郑州市气象局, 郑州 450005)

摘要: 利用 NCEP 提供的再分析资料(Global Final Analyses), 对 2007 年 3 月 3 日登封市大到暴雨天气过程从动力和热力条件、水汽输送、湿 Q 矢量等方面进行分析, 结果表明: 这次降水过程的两个主要降水时段都出现在次级环流的垂直运动上升区内; 暴雨过程中登封上空低层维持一高能区; 温度平流值陡降, 导致这次降水过程结束和强降温天气的发生; 整个暴雨过程登封维持着通畅的水汽通道和较强的水汽辐合, 水汽辐合中心区对应降水集中时段。

关键词: 大到暴雨; 湿 Q 矢量; 温度平流; 假相当位温 θ_{e} ; 水汽通量

中图分类号: P458.1*21.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-7148(2008)03-0061-05

引言

登封地处郑州市西部山区, 春季尤其是初春大到暴雨天气比较少见, 而且该地区春季大型降水往往与寒潮、大风或强降温相关联^[1], 对农业生产有直接的影响, 所以做好春季强降水天气的预报, 对农业生产具有重要意义。

本文利用 NCEP 提供的最终分析资料(Global Final Analyses), 对 2007 年登封 3 月初的大到暴雨天气过程从动力和热力条件、水汽输送、湿 Q 矢量等方面进行分析, 为做好春季强降水的预报服务提供一些有益的经验和方法。

1 过程概况及天气环流背景分析

2007 年 3 月 2—3 日, 受冷空气和西南暖湿气流共同影响, 登封市出现了一次大到暴雨天气过程, 过程降水量普遍在 40 mm 以上, 整个降水过程有两次比较明显的降水集中时段, 时间分别在 2 日 20 时至 3 日 02 时和 3 日 14 时, 雨量演变见图 1。

2007 年 2 月下旬末, 整个亚欧大陆呈稳定的两槽一脊阻塞形势。乌拉尔山以东是一长波槽, 白令海峡附近为东亚大槽, 贝加尔湖东部为脊区。2 月 28 日 08 时 500 hPa 上, 乌拉尔山附近是一横槽, 新地岛以东有一个很强的极涡, 位置偏南, 中高纬环流

场正处于调整状态, 前期稳定的阻塞形势正在逐步减弱。受乌拉尔山槽后弱高压脊前偏北气流推动, 原来的横槽开始转竖, 环流经向度加大, 并引导新地岛附近的冷空气东移南下, 2 月 28 日 20 时, 地面锋面已经进入新疆北部。由于受阿尔泰山脉和天山山脉的阻挡, 加之副热带高压势力比较强, 588 gpm 线在 110—130°E 形成一闭合圈, 副高脊线在 20°N 附近, 因此冷空气移动缓慢, 不断堆积加强。至 3 月 2 日 08 时, 随着横槽转竖, 冷空气迅速南下, 与南面的暖湿气流交汇形成气旋波, 造成登封暴雨天气及以后的强降温。

本次过程正是中高纬环流由两槽一脊向两脊一槽调整时的能量释放过程。3 月 5 日中高纬环流场基本完成了本次调整过程, 原乌拉尔地区的槽变为脊区, 登封上空转为西北气流控制, 冷空气影响基本结束。

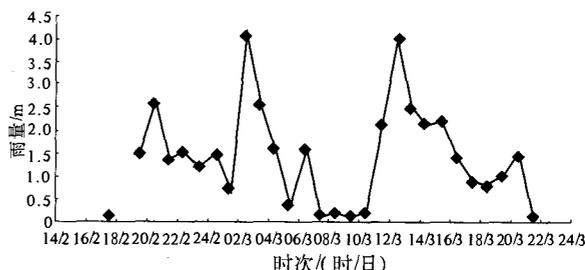


图 1 登封 2007 年 3 月 2—3 日大到暴雨过程降水演变图

2 大到暴雨过程的热力及水汽条件分析

2.1 温度平流

从温度平流垂直剖面时序图(图 2)可以看出:3月2日14时开始登封上空从低层到高层均为较强暖平流区;3日08时850 hPa为一大于 2×10^{-4} K/s 的暖平流中心,14时250 hPa为一大于 6×10^{-4} K/s 的暖平流中心。根据 ω 方程^[1],暖平流区为上升运动,有利于形成较强降水。

2.2 假相当位温 θ_{se}

对流层中 θ_{se} 的高值区代表的是高温高湿区,即高能区。从登封单点 θ_{se} 平流垂直剖面时序图(图 3)可以看出,2日08时到3日20时, θ_{se} 平流在1000—650 hPa 随着时间逐渐增大(中心轴线位于800 hPa 下部),由2日14时的 20×10^{-5} K/s 增大到3日14时的最大值 80×10^{-5} K/s。同时,3日14—20时在850 hPa 存在一负的 θ_{se} 平流陡降区,说明登封上空有较强冷空气侵入,为登封地区在此次降水过程后的强降温提供了有利条件。

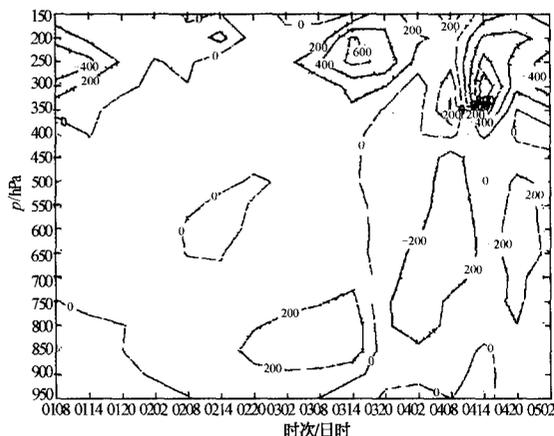


图 2 郑州单点温度平流场垂直剖面时序图

单位: 10^{-4} K/s

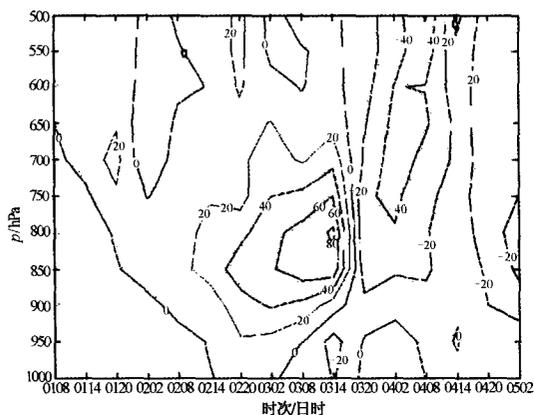


图 3 郑州单点假相当位温场垂直剖面时序图

单位: 10^{-5} K/s

2.3 水汽输送特点分析

由水平水汽通量分布图(以700 hPa 为例,图略)可以看出,2日08时,登封西南有一西南—东北向水汽输送带,有两个中心,分别位于 108°E 、 26°N 和 110°E 、 30°N , 中心值分别为 100×10^{-4} $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$ 和 80×10^{-4} $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$, 登封上空的水平水汽通量为 45×10^{-4} $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$ 。此后西南气流水汽输送带东北移。到2日20时,水汽输送带东北移至登封;3日02时,水汽输送带东北移至登封以北,登封上空为一 80×10^{-4} $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$ 的中心;3日14时,登封上空水平水汽通量增大到 100×10^{-4} $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$, 此时,登封进入降水相对集中时段;3日20日之后,水汽输送带逐渐东移出登封,降水结束。

由登封单点水汽通量散度的垂直剖面时序图(图略)可以看出,降水前期,登封上空为弱的水汽辐散区,2日08时开始,低层750 hPa 以下转为水汽辐合区;2日20时至次日02时,水汽辐合区上升到650 hPa 以下,850 hPa 附近有一 $< -25 \times 10^{-9}$ $\text{kg}/\text{hPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$ 的水汽辐合中心,与登封这次降水过程中第一次降水集中时段对应;3日14时,水汽辐合区上升到650 hPa 以上,850 hPa 附近的水汽辐合中心加强,中心值 $< -35 \times 10^{-9}$ $\text{kg}/\text{hPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$, 与登封这次降水过程中第二次降水集中时段对应,且降水强度较第一次明显增强;3日20日以后,登封上空水汽通量散度转为辐散区,过程降水结束。

3 湿 Q 矢量分析

近年来, Q 矢量方法被作为一种诊断工具用于短期天气预报业务。这种方法不仅避免了传统 ω 方程的缺点,而且物理意义清楚、计算简单,适用于整个对流层。考虑了大气中水汽凝结非绝热作用的湿 Q 矢量,不仅全部为实际风,同时包含了凝结潜热加热项,这是与其他 Q 矢量明显不同的特征,充分体现出其更接近实际大气的状况。

3.1 湿 Q 矢量的表达式

考虑了大气中水汽凝结潜热释放作用并把它作为非绝热的原始方程组,推导出非地转的湿 Q 矢量 Q^* ^[2-9], 其表达式为

$$\vec{Q}^* = (Q_x^*, Q_y^*)$$

$$= \left\{ \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} \cdot \nabla \theta - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{LR\omega}{C_p P} \frac{\partial q_s}{\partial p} \right) \right] \right\}$$

$$\cdot \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - h \frac{\partial V}{\partial y} \cdot \nabla \theta - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{LR\omega}{C_p P} \frac{\partial q_s}{\partial p} \right) \right] \quad (1)$$

式中, Q_x^* 和 Q_y^* 分别为 x 方向和 y 方向的湿 Q 矢量的分量。

纬向和径向的垂直环流可分别由 Q_x^* 和 Q_y^* 决定:

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

$$2Q_y^* = f^2 \frac{\partial v_a}{\partial p} - \sigma \frac{\partial \omega}{\partial y} \quad (3)$$

上两式表明, 纬向和经向的垂直环流分别由 Q_x^* 和 Q_y^* 决定, 因而任一方向垂直剖面上的次级环流, 完全由该方向的 Q_x^* 分量(或 Q_y^* 分量)所决定。他们描述了湿 Q 矢量与次级环流之间的方向关系, 即湿 Q 矢量方向总是指向气流上升区、背向气流下沉区。

以湿 Q 矢量散度为强迫项的非地转 ω 方程为

$$\nabla^2(\sigma\omega) + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = -2 \nabla \cdot Q^* \quad (4)$$

显然, 当 ω 具有波状特征时, 上式左边与 $-\omega$ 成正比, 由此可知

$$\nabla \cdot Q^* \propto \omega \quad (5)$$

当 $\nabla \cdot Q^* < 0$ 时, 则 $\omega < 0$ (上升运动); 当 $\nabla \cdot Q^* > 0$ 时, 则 $\omega > 0$ (下沉运动)。因此, (5) 式可以用来判断垂直运动。(4) 式描述了湿 Q 矢量与次级环流的关系: 由于湿 Q 矢量散度存在, 必然要激发次级环流, 以抵消热成风效应。随着次级环流的增长, 最后使(2)和(3)式等号两边达到了平衡状态, 也就是大尺度运动建立了新的热成风平衡。大气就是在热成风平衡不断被破坏, 湿 Q 矢量激发次级环流, 使大尺度运动进行调整, 重新建立新热成风平衡的反复过程。在此过程中, 湿 Q 矢量散度起着重要的作用。这就是以湿 Q 矢量散度为强迫项的非地转 ω 方程所描绘的物理图像。

3.2 湿 Q 矢量分析

分析 700 hPa Q_x^* 分量分布(图4)发现, 降水开始前登封为弱 Q_x^* 正值区; 2日20时, 在登封南侧有一对东西向的正负值中心, 正中心位于 111°E 、 33°N , 中心值为 $20 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$, 负值中心位于 114°E 、 34°N , 中心值为 $-20 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$; 次日02时, Q_x^* 正负中心轴线发生了扭转, 西侧的正值中心位置及强度维持不变, 东侧的负值中心东北移至

116°E 、 35.5°N , 且强度加强为 $-30 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$, 登封处在轴线上较强的上升气流区, 进入第一次降水集中时段; 3日08时, 因正值区北侧发展过盛, 在原负值中心区位置处发展出一正 $20 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$ 中心, 登封处在弱 Q_x^* 正值区, 降水减弱; 3日14时, 原正值区略有北抬, 且中心强度增强为 $50 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$, 原中心位于 116°E 、 30.5°N 的另一负值区西北部发展增强, 在 115°E 、 34°N 发展出一负中心, 中心值为 $-30 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$, 从而在该中心与原正值中心间形成 Q_x^* 线密集带, 登封处在其间较强的上升气流中, 进入第二次降水集中时段且降雨强度较第一次明显加强; 3日20时以后, 东侧的 Q_x^* 负值区消失, 正值区南北贯通且东移, 登封处正值区后0线附近, 降水过程结束。

分析 600 hPa Q_y^* 场分布(图5)发现, 降水前, 登封处在 Q_y^* 弱值区; 2日20时, 登封西侧有一南北向 Q_y^* 正负中心, 正值中心位于 111.5°E 、 33°N , 中心值为 $50 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$, 负值中心位于 111°E 、 35.5°N , 中心值为 $-30 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$; 3日02时, 正负中心东北移, 正值中心移至 114°E 、 33.5°N , 中心值为 $30 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$, 负值中心位于 113°E 、 36°N , 中心值 $< -20 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$, 登封处在 Q_y^* 正负中心轴线的较强上升运动区, 进入第一次降水集中时段; 3日08时, 登封东北发展出一 Q_y^* 正值中心, 西南方发展出一负值中心, 登封处在过渡带中的下沉气流区, 降水明显减弱; 3日14时, 在登封南边发展出大片 Q_y^* 正值区, 中心强度 $> 40 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$, 在登封北边发展出一个 $-20 \times 10^{-9} \text{ m/hPa} \cdot \text{s}^3$ 的闭合区, 在登封形成了强烈的上升区, 登封进入第二次降水集中时段且降雨强度较第一次明显加强; 3日20时以后, 登封东侧发展出一正值中心, 其他方向均为零值区, 登封为下沉运动区, 降水过程结束。

由以上分析可以看出, Q_x^* 和 Q_y^* 有着相似的分布, 这次降水的两个集中降水时段在 Q_x^* 和 Q_y^* 分布上均有体现, 经纬向均有次级垂直环流, 大的降水出现在垂直环流的上升运动区内。

3.3 湿 Q 矢量散度分析

从登封单点湿 Q 矢量散度和垂直速度的垂直剖面时序图(图6-7)可以看出, 降水前期, 登封上空的湿 Q 矢量散度为0, 3月2日14-20时700-350 hPa 为湿 Q 矢量辐散区, 中心位于550 hPa, 中心值为 $20 \times 10^{-14} / \text{hPa} \cdot \text{s}^3$, 垂直速度由非常弱的下沉向弱上升

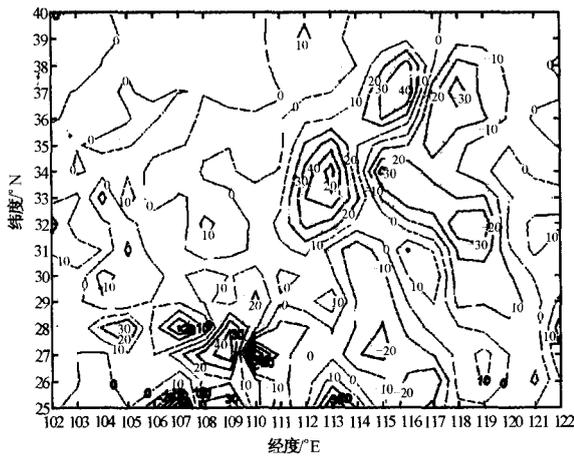


图4 3月3日14时700 hPa Q_x 分布图
单位: $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$

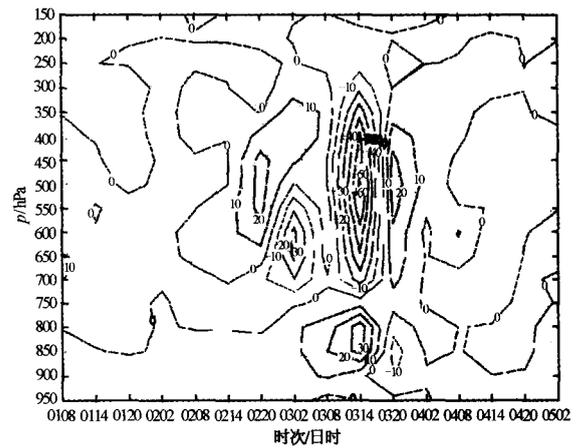


图6 登封单点湿 Q 矢量散度场垂直剖面时序图
单位: $10^{-14} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$

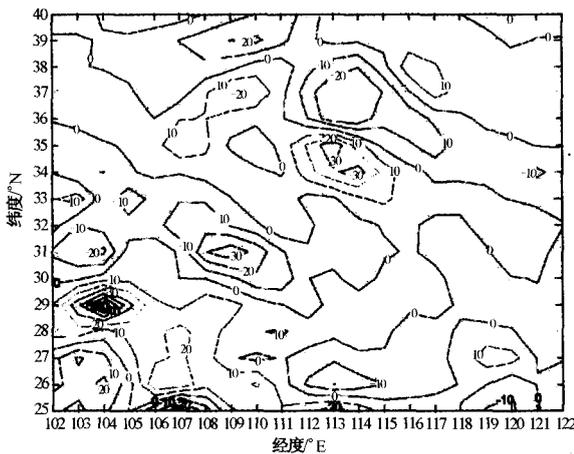


图5 3月3日14时600 hPa Q_x 分布图
单位: $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$

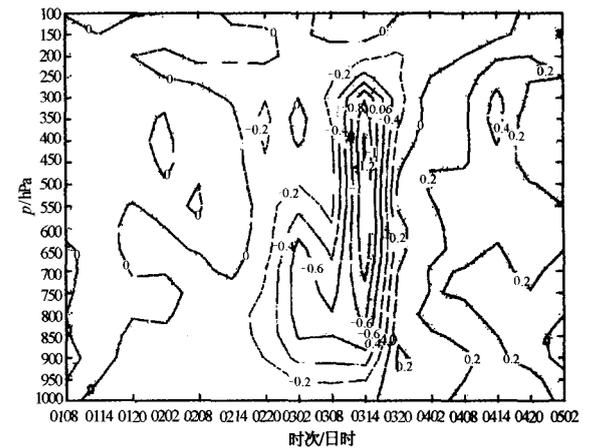


图7 登封单点垂直速度场垂直剖面时序图
单位: $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$

气流转换;3日02时,750—500 hPa 之间转为湿 Q 矢量辐合区,中心位于650—600 hPa 之间,中心值为 $-30 \times 10^{-14} / \text{hPa} \cdot \text{s}^3$,垂直速度1000—500 hPa 均为上升运动,最大中心位于700 hPa,中心垂直速度为 $-0.6 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$,登封进入第一次降水集中时段;3日08时,低层950—750 hPa 为湿 Q 矢量辐散区,750 hPa 以上为0湿 Q 矢量散度区,降水减弱;3日14时,750—200 hPa 发展出一较为深厚的湿 Q 矢量辐合区,中心位于550—500 hPa 之间,中心值为 $-60 \times 10^{-14} / \text{hPa} \cdot \text{s}^3$,1000—250 hPa 登封上空为一较强且较深厚的上升运动区,中心位于500—400 hPa 之间,中心垂直速度为 $-1.2 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$,登封进入第二次降水集中时段且降雨强度较第一次明显加强;3日20时以后,登封上空基本转入0湿 Q 矢量散度区,垂直运动转为下沉运动区,登封降水结束。

4 结 语

通过对2007年3月初登封市出现的大到暴雨天气过程的动力、热力、水汽条件及 Q 矢量的分析,可以得出如下结论:

①这次降水过程的两个主要降水时段都出现在次级环流的垂直运动上升区内,这说明湿 Q 矢量能够反映出影响系统的次级环流状况;这次降水过程的两个主要降水时段均与中层湿 Q 矢量散度的辐合区对应,尤其是第二次最强降水集中时段, Q 矢量辐合区一直从750 hPa 发展到300 hPa,说明湿 Q 矢量散度能很好地指示降水的落区和强度。

②此次大到暴雨过程中,登封中低层维持一高能区,在3月3日14时达到最大,与该次降水过程最强的降水集中时段对应。3月14—20时 $\theta_{e,c}$ 平流值陡降,导致这次降水过程结束和强降温天气的发生。

③这次大到暴雨天气过程,登封市维持着通畅的水汽通道和较强的水汽辐合,为大到暴雨的发生提供了充足的水汽。登封上空的水汽辐合高值区对应着这次暴雨过程中的两次降水集中时段,3月3日14时出现水汽辐合最大值,此时也是这次降水过程最强的降水集中时段。

参考文献

- [1]朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社,2002:266-400.
- [2]寿绍文,励申申,姚秀萍,等.中尺度气象学[M].北京:气象出版社,2003:153-165;276-285.
- [3]姚秀萍,于玉斌.完全 Q 矢量的引入及其诊断分析[J].高原气象,2005,20(2):208-213.
- [4]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.
- [5]赵桂香,程麟生.2001年7月山西中部一次罕见暴雨过程的诊断分析[J].高原气象,2006,25(6):1083-1091.
- [6]郁淑华,骆红.川东北涡暴雨的环境场及 Q 矢量分析[J].高原气象,1991,10(1):70-76.
- [7]郁淑华.一次高原北侧槽个例的 Q 矢量分析[J].高原气象,1993,12(4):438-441.
- [8]孙力,廉毅.东北地区一次突发性暴雨分析[J].高原气象,1995,14(4):486-494.
- [9]黄海波,徐海容.新疆一次秋季暴雪天气的诊断分析[J].高原气象,2007,26(3):624-629.

Characteristic Analysis of the Rainstorm over Dengfeng in 2007 Spring

Li Huifang¹, Zhao Haiqing², Zhou Xingfu¹, Li Xianghui¹, Li Shezong²

(1. Dengfeng Meteorological Office, Dengfeng 452470, China;

2. Zhengzhou Meteorological Office, Zhengzhou 450005, China)

Abstract: Based on the final analysis data of NCEP, the rainstorm occurred in Dengfeng on March 3, 2007 is analyzed from the following aspects: dynamic and thermal energy conditions, water-vapor transportation, wet Q vector and so on. The result shows: two of the main precipitation time interval both appear in the vertical rising area of the secondary circulation; a high energy region maintains in low-altitude layers; the end of precipitation process and occurrence of strong temperature decreasing are caused by sudden drop of temperature advection; unobstructed water vapor channel and strong water vapor convergence maintain over Dengfeng in the whole process, and water vapor convergence central area is corresponding to the main precipitation time interval.

Key words: rainstorm; wet Q vector; temperature advection; potential pseudo equivalent temperature θ_{se} ; water vapor flux