

文章编号: 1004-4965(2008)05-0533-06

非地转湿 Q 矢量在北上台风“桃芝”造成 山东大暴雨中的应用

高留喜^{1,2}, 丛春华², 李本亮³

(1. 山东省气象科学研究所, 山东 济南 250031; 2. 山东省气象台, 山东 济南 250031;
3. 济南市气象台, 山东 济南 250000)

摘 要: 利用非地转湿 Q 矢量方法诊断分析了北上台风“桃芝”减弱后的低压造成的山东半岛 2001 年 8 月 1 日的大暴雨过程。结果表明: 非地转湿 Q 矢量散度负值区与暴雨落区有很好的对应关系, 低层 925 hPa 非地转湿 Q 矢量散度对未来 6~12 h 的强降水有较好的指示意义, 明显优于常用的诊断物理量散度、水汽通量散度。925 hPa 层次增温、增湿明显, 可能是非地转湿 Q 矢量在这次台风暴雨中 925 hPa 层次比 850 hPa 具有指示意义的部分原因。可见非地转湿 Q 矢量是预报山东暴雨的一种有效工具, 在山东暴雨、大暴雨天气过程预报分析中具有较高的应用价值, 为山东的暴雨预报提供了一个新的思路。

关键词: 非地转湿 Q 矢量; 台风“桃芝”; 暴雨; 散度
中图分类号: P426.62 **文献标识码:** A

1 引 言

大尺度垂直运动的分布决定了大范围天气现象的分布, 大气中发生的热量和动量的垂直输送以及位能与动能之间的相互转换等, 都与垂直运动有密切的关系。垂直运动常被视为天气系统发生和发展的一个重要指标, 因此垂直运动的分析判断在天气分析预报中有着特殊重要的作用。但是垂直运动至今无法测量, 一些诊断方法就显得非常必要。

准地转理论是近代动力气象学的基础, 它为理解温带天气系统提供了重要的理论框架。应用准地转理论, 从位势高度场和温度场诊断垂直运动的 ω 方程得到了广泛应用。但是传统形式的 ω 方程在定量计算及定性应用上有一定的困难, 具有很大的局限性, 仅适用于斜压较小的对流层中层。Hoskins 等^[1] 推导出了完全的准地转 ω 方程, 保留了准地转方程组能描述所有过程的作用, 不仅避免了传统 ω 方程的缺点, 同时把准地转强迫项表示成一个“ Q 矢量散度”, 从而更直观地表示 ω 的大小及分布, 避免了准地转 ω 方程右边强迫项之间的相互抵消,

还能避免直接求解 ω 方程的大量计算。Hoskins 的这一发展被称为“ Q 矢量分析方法”, 具有物理意义明确, 计算简单, 且能适用于整个对流层。“ Q 矢量分析”能表示出产生 ω 的强迫机制的强弱, 还可以预报锋生和锋消, 能在描述中小尺度系统时提供更多的信息。Durrant 等^[2] 认为 Q 矢量是当时用来计算垂直速度最好的一种工具。以后, 准地转 Q 矢量得到广泛的发展和应用^[3-5]。张兴旺^[6] 通过对一次华南暴雨过程诊断分析认为湿 Q 矢量与次级环流有良好的对应关系, 还与降水落区有良好的配置关系。姚秀萍等^[7] 在对华北一次特大台风暴雨诊断分析中指出非地转湿 Q 矢量与降水落区存在最佳的对应关系, 是一种十分有效的暴雨天气系统诊断和预报的工具。文献^[6-7] 认为引入“湿”过程的 Q 矢量散度比“干”过程的 Q 矢量散度在暴雨落区的确定中具有更大的意义。杨晓霞等^[8] 指出非地转湿 Q 矢量在诊断暴雨上升运动中有很高的实用价值。

2001 年 8 月 1 日山东半岛地区受减弱的台风低压环流影响, 在很短时间内出现大面积的暴雨、大暴雨和局地特大暴雨 (5 个站超过 200 mm, 其中崂山北九水最大

收稿日期: 2007-03-23; 修订日期: 2007-10-18

基金项目: 山东省气象局课题(2006sdqxj10)项目; 国家自然科学基金(40705017)项目; 登陆热带气旋三维结构及其演变规律研究(2006STA01-8)项目共同资助

通讯作者: 高留喜, 男, 山东省人, 硕士, 高级工程师, 从事天气气候研究工作。E-mail: glx1000@sohu.com

为387 mm)的重大灾害性天气。由于前期降水偏多,这次暴雨过程致使部分河流出现了500年一遇的罕见洪水,给人民生命财产造成重大损失。据不完全统计此次强降水造成15人死亡,300余人受伤,直接经济损失达人民币27.5亿元。本文用非地转湿 Q 矢量分析方法来诊断这次暴雨过程,试图发现对暴雨落区确定和对未来降水强度预报的有效信号,从而揭示非地转湿 Q 矢量及其散度在山东暴雨、大暴雨天气过程分析中的应用价值,为山东的暴雨预报提供一个新的思路,从而最大限度地减少暴雨造成的灾害损失。

2 非地转湿 Q 矢量的表达式及其物理意义

根据文献[7],定义非地转湿 Q 矢量(记为 \vec{Q}^*)在 P 坐标系中的表达式为

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

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

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

其中 $h = \frac{R}{p} \left(\frac{p}{1000} \right)^{\frac{R}{C_p}}$, $H = -\frac{l}{C_p} \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \omega \frac{\partial qs}{\partial p}$

式(1)中 Q_x^* 、 Q_y^* 分别为 x 方向、 y 方向的非地转湿 Q

矢量分量, qs 为饱和比湿, $\vec{V}(u, v)$ 代表水平风场,其它符号为气象学中通用的物理量。由式(1)可知非地转湿 Q 矢量取决于风的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。

根据文献[6],以非地转湿 Q 矢量散度为唯一强迫项的非地转非绝热 ω 方程为

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

如果大气垂直运动是一种波动形式,根据任何波动形式物理量的拉普拉斯与该物理量本身负值成正比的关系,有 ω 正比于 $\nabla \cdot \vec{Q}^*$ 。式(2)这一简洁形式的方程表明:当湿 Q 矢量场辐合时, $\omega < 0$ 为上升运动;反之, $\omega > 0$,即为下沉运动。非地转湿 Q 矢量散度场实际上是而非地转上升运动的强迫机制。

姚秀萍等[7]指出:非地转湿 Q 矢量的辐散、辐合强迫了大气垂直运动的发展,非地转湿 Q 矢量的方向总是指向气流上升区,而背向气流下沉区。任意方向垂直剖面上垂直环流完全由 Q_x^* 、 Q_y^* 决定。非地转湿 Q 矢量使得流场和温度场的热成风关系发生变化,总是起到破坏热成风平衡的作用,必然激发次级环流,使得大尺度大气进行调整,重新达到新的热成风平衡。

3 暴雨过程天气形势和降水实况

这次暴雨过程发生在典型的有利于台风登陆北上的、稳定的大气环流形势背景下(图略),海上有稳定强大的高压,中国大陆西部有另一稳定性较强的大陆高压,两者之间的华北地区是稳定的槽区。08号台风“桃芝”于2001年7月31日02时在福建登陆,登陆后很快减弱,于31日上午减弱成热带低压,此后在高空槽前和海上高压西侧偏南气流的引导下继续北上。8月1日02时低压在(30.7°N, 120.0°E)处与西风槽结合,冷空气从中低层侵入低压环流内部使其原来的暖心结构被破坏,变性为温带气旋,于8月1日08时在江苏省燕尾港南部入海,14时中心位于(35.0°N, 120.9°E)处的海上,继续向偏北方向移动。从云图(图略)上看:16时温带气旋中心还在海上,其云系云顶亮温(TBB)最小值低于-76,位于青岛上空,比温带气旋入海前07时的TBB最小值-62降低明显,TBB小于等于-52的云体面积显著增大,说明气旋入海后由于得到海洋能量补充及摩擦减弱等原因强度再次得到明显加强。温带气旋擦着崂山东面海面而过,大约在8月1日20时左右在崂山东北面的即墨登陆,然后向北穿越山东半岛于1日23时左右进入渤海。受这个变性的温带气旋影响,8月1日山东半岛和鲁东南的日照地区出现了暴雨、大暴雨天气和局地特大暴雨的天气过程。山东8月1日暴雨、大暴雨分布如图1所示,最强降水出现在青岛附近,青岛崂山北九水最大为387 mm,最强降水时段出现在1日15~19时,其中胶州1小时最大降水量为106 mm。从6小时间隔的地面图(图略)来看,温带气旋移向的前方降水增强,尤其是左前方降水较大,后方降水减弱明显,气旋中心经过的区域附近降水较大。

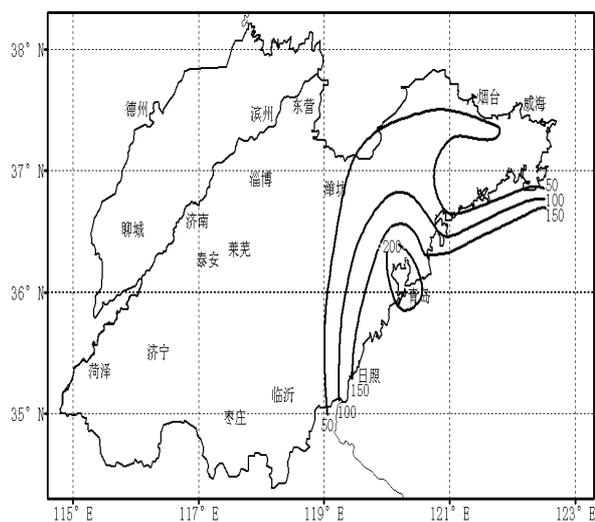


图1 山东8月1日暴雨、大暴雨分布 单位: mm。

4 非地转湿 Q 矢量对暴雨过程的诊断

对山东半岛暴雨、大暴雨过程 8 月 1 日前后 0000 UTC 和 1200 UTC 的常规探测资料,采用北京大学大气科学系中尺度气象与科学视算组研制开发的“客观分析诊断图形系统”对常规资料进行客观分析,从而形成水平网格距为 50 km,垂直为 1 000、925、850、700、500、400、300、250、200、150、100 hPa 的 11 层网格点资料,资料中心(11,11)的网格点位于(36.0°N,120.5°E),本次暴雨过程降水的中心青岛崂山(36.17°N,120.42°E)位于此网格点附近,比此网格点稍偏北偏西。利用姚秀萍编写的非地转湿 Q 矢量程序对这次暴雨过程进行了诊断分析。计算时只考虑饱和和稳定大气动力上升的情况。

4.1 非地转湿 Q 矢量与降水落区之间关系

图 2 为 8 月 1 日 08 时 925 hPa 非地转湿 Q 矢量散度和流场的叠加分布。从图 2 看出 1 日 08 时,低层 925 hPa 存在明显辐合中心即“桃芝”台风变性形成温带气旋后的气旋低压所在处,在其北侧 2 个纬距(36.0°N,120.5°E)处存在非地转湿 Q 矢量散度的负值中心,附近有一个中心强度为 $-23.05 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 的辐合中心,正好对应于此后 6 小时和 12 小时的降水中心。图 1 的 50 mm 以上暴雨区与图 2 的非地转湿 Q 矢量散度 $-11 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 的负值中心区位置、形状比较吻合。图 1 的 100 mm 以上暴雨区与图 2 的非地转湿 Q 矢量散度 $-15 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 的负值中心区位置、形状也都吻合。图 1 的 200 mm 以上暴雨区与图 2 的非地转湿 Q 矢量散度 $-21 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 的负值中心区位置、形状也基本吻合。可见非地转湿 Q 矢量散度与这次暴雨落区有很好的对应关系。姚秀萍对华北一次台风特大暴雨的研究^[7]指出非地转湿 Q 矢量散度的负值区能很好预报出未

来 6 小时的强降水落区。颜琼丹等^[9]对台风“云娜”的暴雨过程研究中就指出非地转湿 Q 矢量散度的负值区与未来 12 小时的强降水落区有较好的对应关系。这说明非地转湿 Q 矢量散度可能对台风暴雨有较好的指示意义。

图 3 为暴雨中心附近(36.0°N,120.5°E)处的非地转湿 Q 矢量散度的时空剖面图。可以看出,7 月 31 日在 750 hPa 以下有弱的上升运动,而到 8 月 1 日 08 时在 450 hPa 以下 Q 矢量散度基本为负值区,即上升运动基本发展到 450 hPa 高度,在 850 hPa 以下非地转湿 Q 矢量散度负值增大明显,在 925 hPa 有明显的大值中心 $-22.63 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,上升运动处于最强阶段,(36.0°N,120.5°E)附近的青岛在此后的 6 小时内出现 46 mm,12 小时内出现 206 mm 的强降水。8 月 1 日 20 时 975 hPa 以下出现正值,即出现下沉运动,400 hPa 以下 975 hPa 以上为较小的负值,即上升运动区底部明显抬高,上升运动明显减弱,1 日 20 时以后 6 小时降水 0.5 mm,降水减弱明显,基本趋于停止。可见低层特别是 925 hPa 非地转湿 Q 矢量散度对未来 6~12 小时的强降水有较好的指示意义。低层非地转湿 Q 矢量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强迫机制的强弱,非地转湿 Q 矢量散度小于 0 的区域,非地转上升运动会在一定时间内得以维持,非地转湿 Q 矢量散度负值越大,越有利于非地转上升运动。持续一定强度的上升运动会为暴雨提供有利的动力条件。由于温带气旋经过海上能量的补充,加上其前侧东南低空急流的水汽输送提供了有利的热力条件。青岛 8 月 1 日 02 时、08 时过去 6 小时降水分别为 0.9 mm、12.0 mm,这基本是弱的对流性降水。辐合区有利于不稳定能量的

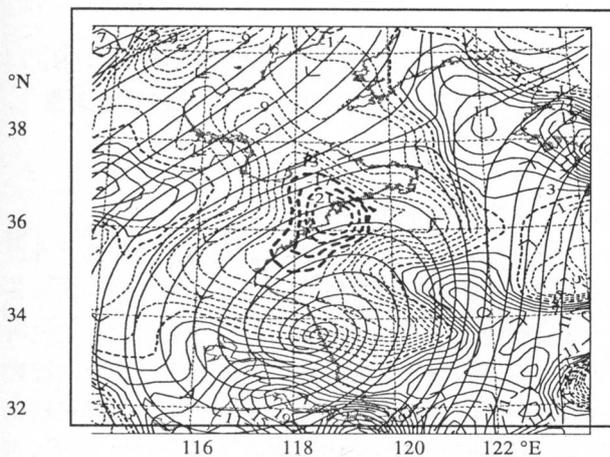


图 2 8 月 1 日 08 时 925 hPa 非地转湿 Q 矢量散度和流场的叠加分布 单位: $10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 。

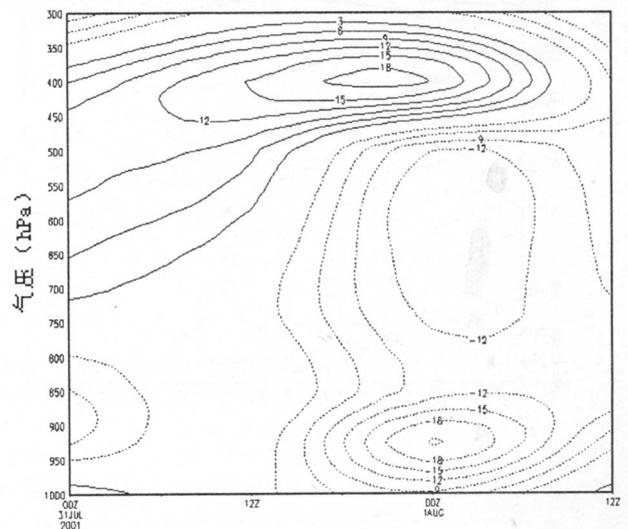


图 3 (36.0°N,120.5°E)处非地转湿 Q 矢量散度的时空剖面图 时间:世界时,单位: $10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 。

释放,促使对流性降水产生,降水释放的凝结潜热又加深了上升运动,有利于暴雨的产生和发展。这与姚秀萍等^[7]的研究基本一致,只不过对未来强降水具有指示意义的层次比文献^[7]所述的低层850 hPa层次更低。

非地转湿 Q 矢量取决于风的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。在这次暴雨过程中,925 hPa、850 hPa两个层次在8月1日08时风的水平和垂直切变无明显差异,风的水平和垂直切变的差异效应在925 hPa、850 hPa这两个层次上非地转湿 Q 矢量的效果表现基本一样。不考虑非绝热加热项,再来看第2项风的水平梯度和温度梯度的乘积。

图4是过暴雨中心(36.0°N, 120.5°E)的位温的经向垂直剖面图和纬向垂直剖面图。从图4看出,在(36.0°N, 120.5°E)处位温梯度在经向上925 hPa层次与850 hPa基本相当,在纬向上925 hPa层次比850 hPa明显偏大(在925 hPa位温等值线更密集)。由于两个层次的风的水平切变基本相同,根据前面公式(1)右面第2项,可知925 hPa层次比850 hPa影响湿 Q 矢量更明显。赵宇在一次山东春季暴雨分析及变性台风造成“99.8”山东特大暴雨分析中^[10-11]发现,925 hPa处相当位温等值线比较密集,认为有利于暴雨发展产生。山东在暴雨发生前925 hPa层次增温、增湿比850 hPa可能更明显。山东省气象台的预报员在暴雨预报中也意识到925 hPa超低空急流对暴雨可能有较大作用^[11]。925 hPa层次增温、增湿明显,可能是非地转湿 Q 矢量在这次台风暴雨中925 hPa层次比850 hPa具有指示意义的部分原因。

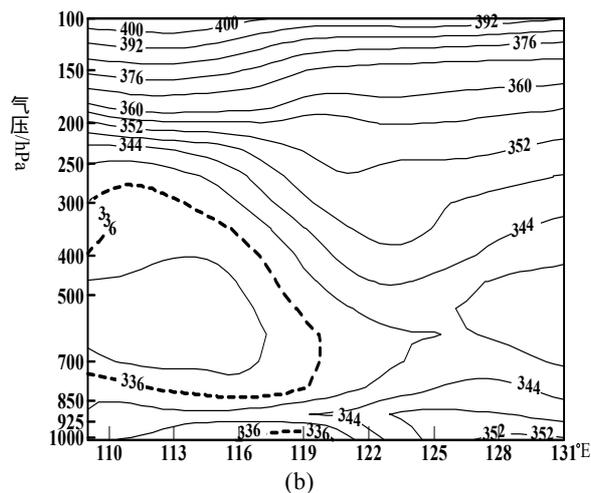
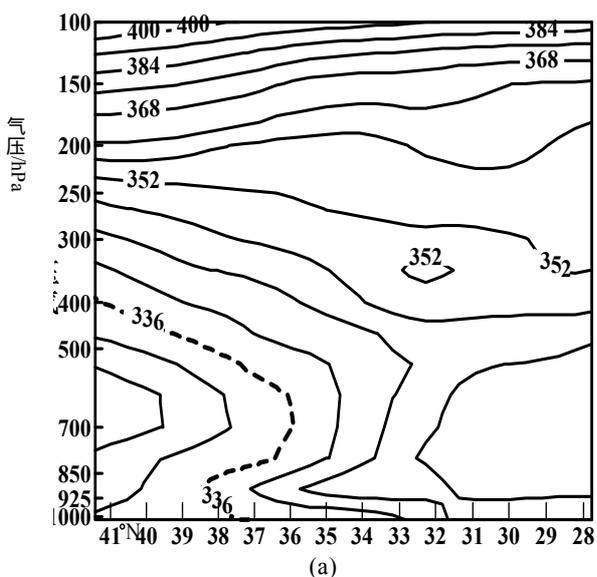


图4 8月1日08时过36.0°N, 120.5°E位温的经向垂直剖面(a)和纬向垂直剖面(b) 单位:K。

4.2 非地转湿 Q 矢量散度与未来降水的关系

从图5可以看出本次暴雨中心(青岛)降水与(36.0°N, 120.5°E)处925 hPa非地转湿 Q 矢量散度有着明显滞后12小时的相关关系,都基本呈现单峰型。非地转湿 Q 矢量散度的数值大小影响着其后12小时内的降水,当其数值增大,其后12小时内降水增强,反之,降水减弱。可见非地转湿 Q 矢量散度对12小时内降水强度的预报具有明显的指导意义。

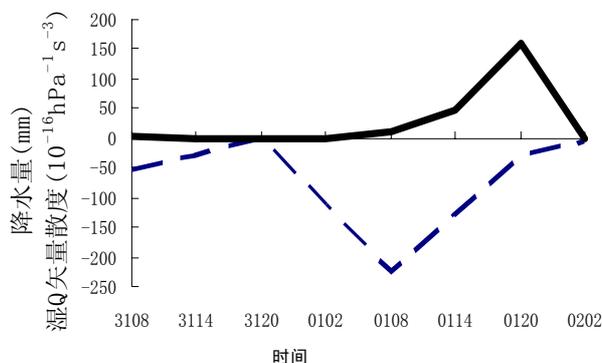


图5 青岛6小时雨量分布曲线(实线)与36.0°N, 120.5°E处各时次低层925 hPa非地转湿 Q 矢量散度值(虚线)随时间变化曲线

4.3 散度场的特征

暴雨通常发生在低空辐合、高空辐散的深厚上升运动区里。散度场低层强的辐合、高层强的辐散必然导致大气有强的上升运动,散度场从一个侧面能定性地说明确大气的垂直运动情况。暴雨一方面与水汽汇合的程度(或者说水汽输送程度)有关系,另一方面与上升运动相联系,散度场能定性地说明确与暴雨有关上述两方面的问题,所以在暴雨天气分析中经常用到诊断物理量散度

场。图 6 为 8 月 1 日 08 时低层 925 hPa 散度图(其它层次散度图略)。暴雨中心(指未来 6~12 小时暴雨中心,下同)上空散度场在 8 月 1 日 08 时出现低层辐合,高层辐散的特征:600 hPa 以上为辐散,600 hPa 以下为辐合;低层 925 hPa 辐合最强,温带气旋中心附近为辐合最强区,中心值达到 $-30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。暴雨中心的散度值大于 $-22 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,处于辐合区的边缘地带,远离辐合中心,比辐合最强区值明显偏高,且等值线疏松。一般分析认为辐合中心与暴雨区相一致。当然,未来随着温带气旋的北上,散度场的辐合中心也会随着北移。但是根据图 6 很难准确预报未来 12 小时内暴雨落区。结合前面分析可知,非地转湿 Q 矢量散度在预报未来暴雨落区方面明显优于散度场。

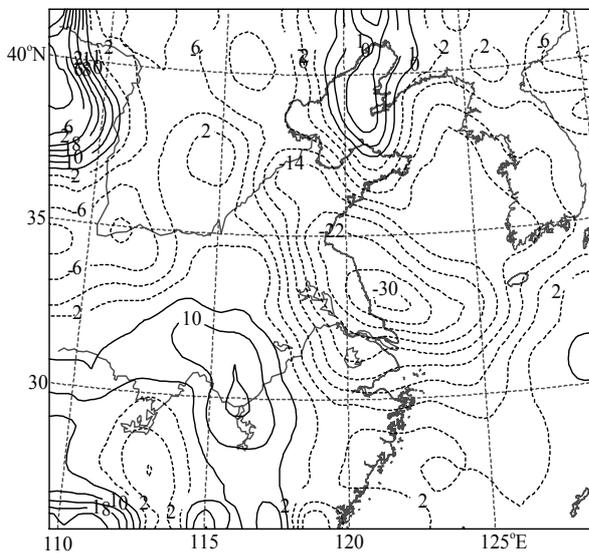


图 6 2001 年 8 月 1 日 08 时 925 hPa 散度场
单位: 10^{-6} s^{-1} 。

4.4 水汽通量散度场的特征

充足的水汽供应是暴雨产生的一个重要条件。水汽通量散度场能很好地说明水汽供应情况。从 8 月 1 日 08 时 925 hPa 水汽通量散度场(图略)看出,暴雨中心(指未来 6~12 小时暴雨中心)位于水汽辐合区的边缘,水汽通量散度值比较小为 $-1 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{hPa} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})$,远离辐合中心,且山东半岛东北部的水汽通量散度值为正值。从这个时刻的水汽通量散度场来看,不太有利于青岛附近大暴雨的出现。8 月 1 日 08 时 925 hPa 水汽通量散度在山东及其附近的分布同图 6 散度场的分布非常类似,未来随着温带气旋的北上,预报员可以推断半岛地区的水汽条件会有明显改善,但也很难准确作出未来 6~12 小时暴雨预报落区。可见,在这次暴雨过程中非地转湿 Q 矢量散度在预报未来暴雨落区方面明显优于水汽通量散度场。

5 结论与讨论

(1) 低层 925 hPa 非地转湿 Q 矢量散度与山东这次大暴雨落区有很好的对应关系,明显优于常用的诊断物理量散度、水汽通量散度。925 hPa 非地转湿 Q 矢量散度与降水有着明显滞后 12 小时的相关关系。925 hPa 非地转湿 Q 矢量散度负值明显减小时,未来 12 小时内降水明显增强,反之减弱,具有一定的预报意义。

(2) 925 hPa 层次增温、增湿明显,这可能是非地转湿 Q 矢量在这次台风暴雨中 925 hPa 层次比 850 hPa 具有指示意义的部分原因。

很多研究表明非地转湿 Q 矢量散度在台风暴雨、暴雨预报中有较高的使用价值,所以在以后的预报业务实践中,可以尝试加强非地转湿 Q 矢量散度在山东大降水中的预报应用研究。

参 考 文 献:

- [1] HOSKINS, DRAGHICI I, DAVIES H C. A new look at the ω -equation[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1978, 104(1): 31-38.
- [2] DURRAN D R, SNELLMAN L W. The diagnosis of synoptic scale vertical motion in an operational environment[J]. Weather Forecasting, 1987, 2(1): 17-31.
- [3] 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.
- [4] 李柏, 李国杰. 半地转 Q 矢量及其在梅雨暴雨研究中的应用[J]. 大气科学研究与应用(十二), 1997, 12(1): 31-38.
- [5] 岳彩军, 寿亦萱, 寿绍文, 等. Q 矢量的改进与完善[J]. 热带气象学报, 2003, 19(3): 308-316.
- [6] 张兴旺. 湿 Q 矢量表达式及其应用[J]. 气象, 1998, 24(24): 3-7.
- [7] 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.

- [8] 杨晓霞, 沈桐立, 刘还珠, 等. 非地转湿 Q 矢量分解在暴雨分析中的应用[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 464-475.
- [9] 颜琼丹, 蔡亲波. 非地转湿 Q 矢量在台风“云娜”暴雨过程中的分析应用[J]. 热带气象学报, 2006, 22(5): 505-509.
- [10] 赵宇, 张兴强, 杨晓霞. 山东春季一次罕见暴雨的湿位涡分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(6): 836-843.
- [11] 赵宇, 龚佃利, 刘诗军, 等. “99.8”山东特大暴雨形成机制的数值模拟分析[J]. 高原气象, 2006, 25(1): 95-104.

APPLICATION OF AGEOSTROPHIC WET Q -VECTOR IN TORRENTIAL RAINFALL OF TYPHOON “TORAJI” IN SHANDONG PROVINCE

GAO Liu-xi^{1,2}, CONG Chun-hua², LI Ben-liang³

- (1. Meteorology Institute of Shandong, Ji'nan 250031, China;
2. Shandong Meteorological Observatory, Ji'nan 250031, China;
3. Ji'nan Meteorological Observatory, Ji'nan 250000, China)

Abstract: The ageostrophic wet Q -vector method is applied to diagnose a torrential rainfall process in Shandong Peninsula on August 1, 2001, which is caused by a temperate cyclone transformed from typhoon “Toraji” moving northward. The results show that there is a good relation between the area of torrential rainfall and the negative area of divergence of ageostrophic wet Q -vector. By advance of 6~12 hours, the divergence of ageostrophic wet Q -vector at 925 hPa makes a good index to heavy rain in Shandong Province. The ageostrophic wet Q -vector method is a good tool for forecasting the heavy rain in the province. It can give a strong signal about the torrential rainfall area in advance, and using it to forecast torrential rain area is much better than using the field of divergence and the divergence of water vapor flux. It serves as a new good way to forecast torrential rainfall in the province. The increase of temperature and humidity is more obvious at 925 hPa than at 850 hPa, which may be partly one of the reasons why the divergence of ageostrophic wet Q -vector at 925 hPa is a good index in this torrential rainfall process.

Key words: ageostrophic wet Q -vector; Typhoon Toraji; torrential rainfall; divergence