

文章编号:1004-9045(2008)04-0320-06

一次河北大暴雨的华北低涡结构和涡度收支分析

田秀霞^{1,2}, 邵爱梅¹

(1.兰州大学大气科学学院,兰州 730000; 2.河北省邯郸市气象局,邯郸 056001)

摘要:利用 Micaps 系统下常规资料、云图资料和 NCEP 全球再分析资料,对 2004 年 7 月 11—12 日发生在河北省中南部的一次局地大暴雨两个例进行了诊断分析。结果表明:200 hPa 西风槽、500 hPa 华北低涡和中低层偏东风,是这场暴雨的直接影响系统,该过程中的华北低涡为低层冷心、高层暖心结构,具有随高度向西北倾斜的特征,涡度场特征明显,暴雨区对应着深厚的正涡度区,散度场结构零乱,非高层辐散、低层辐合的配置,暴雨区上空上升运动较强。冷空气来源于 500 hPa 以下的东北地区,水汽的源地来自渤海,低层偏东风可能是暴雨区所需水汽的主要携带者。水平涡度平流项和水平涡度辐散项作用相反,水平涡度辐散项对总涡度起直接作用且为正贡献,而垂直平流项对总涡度贡献比较小。

关键词:大暴雨;物理量诊断;低涡结构;涡度收支

中图分类号:P458.1*21.1 **文献标识码:**A

1 引言

2004 年 7 月 11—12 日,河北省出现了 2004 年夏季范围最大、强度最强的一次暴雨到大暴雨的降水天气过程^[1],西部山区局部发生了山体崩塌,中南部有 30 个县市过程总雨量 ≥ 50 mm,有 11 个县(市)出现了大暴雨,其中太行山东麓的内邱、临城、高邑、邢台 4 站,日降水量分别为 237.5、216.9、195.5、167.0 mm,均超过本站有观测记录以来的历史同期最大值,邢台站 12 日 02—08 时 6 h 降水量为 128 mm。强降水出现的主要时段在 11 日夜间到 12 日上午。这次大暴雨过程虽不如河北“63·8”、“96·8”暴雨影响大,但在 7 月中旬初出现这样的大暴雨也比较罕见,因此有必要对这次过程进行深入研究。陶诗言^[2]指出,大尺度环流条件不但制约了暴雨和强对流天气及其演变过程,而且还可影响对流系统内部的结构、强度、运动和组织,中尺度对流系统的发生、发展与气象环境场有密切的关系。本文从大尺度环境场出发,针对形成这次大暴雨天气过程的大尺度环流特征和物理机制进行分析和诊断,重点放在剖析华北低涡结构上,以探讨这次大暴雨形成原因。

本文所用分析场资料是 NCEP/NCAR 全球再分析网格资料,以降水发生区域 (37° — 38.5° N、 113.5° — 115.5° E)和暴雨中心 (37.5° N、 114.5° E)为主要研究对象,分为暴雨前期(11 日 08 时)、暴雨初期(11 日 20 时)、暴雨强盛期(12 日 02 时)、暴雨结束期(12 日 14 时)四个阶段进行分析。

2 大尺度环流特征

在对流层高层 200 hPa 上,10 日 08 时,西风槽在河套建立并加深东移,河北省一直处在槽前的偏南气流里;500 hPa 高空图上,10 日 20 时低涡在内蒙形成,11 日 08 时低涡向东南移,低涡中心位于内蒙、山西的交界处,从低涡中心延伸出的暖切变位于河北省的石家庄、衡水一线,11 月 20 日华北低涡迅速南压,低涡中心移到山西中部与河北南部的交界处并略有减弱,这时河北省中部开始降水,夜间影响河北南部。700 hPa 图上,11 日 20 时低涡在山东,与 500 hPa 相比,低涡在同一纬度但偏东,并且在低涡内形成一条东西向切变线,切变线的北部为一致的偏东风,河北西部处于低涡的后部。地面图上,11 日 02 时,河南郑州为低压中心,气压场基本上为北高南低的形势,一直到 11 日 17 时,低压中心几乎沿 35° N 向东缓慢移到山东、江苏的交界处,这时河北处于低压弱倒槽里;11 日 23 时低压中心突然东北移,使得低压后部的倒槽加深,有利于地面流场在河北中南部辐合。

以上分析可以看出,这次过程的低涡很深厚,且低涡随高度向西倾斜。11 日 20 时到 12 日 08 时,低涡一直在 36° — 37° N 徘徊,从低层到 500 hPa,河北省受低涡后部偏东气流控制。东北—西南向的低空急流将南海水汽输送到渤海后,又通过低涡后部的偏东风将渤海水汽输送到华北,这为降水的维持提供了丰富的水汽;高空低涡及切变的位置和低层偏东风

收稿日期:2008-03-10;定稿日期:2008-04-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划 973 子专题(2004CB418305)资助

作者简介:田秀霞,女,1971 年生,硕士,主要从事天气预报和灾害性天气研究。Email: txrk@163.com

的建立决定了这场降雨出现在河北中南部,又由于太行山地形的阻挡作用,使京广铁路沿线及以西成为这次降雨过程的中心,低层偏东风可能是这次暴雨的触发条件。

3 云图分析

过程开始时,层状云在山西中部到河北石家庄、保定一带,云型比较松散,此次过程是以层云为主,层、积混合的混合性降水,实况是11日20时前石家庄观测到降水29 mm/6h;11日20时至12日04时云系基本呈准静止状态,只在原地加强、扩大,云体结构也变得比较紧密(图略),这与太行山东麓的邢台、内邱、高邑等地出现大暴雨相对应,同时也验证了丁一汇^[9]的观点:迎风坡存在准静止云系,大量的降水是从这个云层中落下来;12日06—08时,云系西移、南压,西移原因可能与低层偏东风有关;10时后云系减弱东移消失,降水也逐渐减弱。总之,云图上显示为太行山地形阻挡,使得中小尺度云团长时间维持,造成太行山东麓出现大暴雨。

4 低涡结构分析

4.1 动力结构

4.1.1 低涡所在区域的平均动力状况

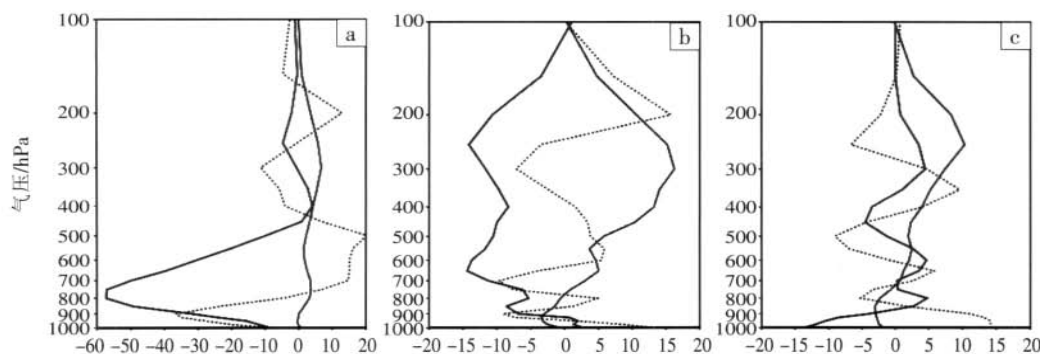


图1 暴雨区涡度、散度和垂直速度的区域平均垂直廓线图

(a 暴雨前期;b 暴雨强盛期;c 暴雨结束时,图中实线为垂直速度,单位: 10^{-2} hPa \cdot s $^{-1}$,虚线为涡度,单位: 10^{-5} s $^{-1}$,点线为散度,单位: 10^{-6} s $^{-1}$)

综上所述,低压所在区域的平均动力状况反映,整个低涡在暴雨发生过程中几乎均为正涡度,涡度的最大值大约在300 hPa左右。散度场具有其特殊性,不同于一般的低层辐合高层辐散的特点,而是辐合辐散相间排列方式;而垂直运动分布上暴雨强盛期整层几乎是处于上升运动状态。

4.1.2 风场分布

分析11日20时200、500、700、850 hPa上的流场和等风速线图,可以看到,系统比较深厚,200 hPa上表现为低槽较深,对应槽区的位置有一个全风速低值区,河北处于槽前的偏南气流及全风速的锋区里,

图1为暴雨发生前后低涡所在区域的涡度、散度和垂直速度的区域平均垂直廓线。从区域平均涡度可见:暴雨前期,从低层1000 hPa到高层100 hPa为正值,且涡度值较小,仅为 5×10^{-5} s $^{-1}$;暴雨强盛期,高层的涡度急剧增大,在300 hPa达到最大值 16×10^{-5} s $^{-1}$,而低层800 hPa以下出现负涡度;暴雨结束后,高层的正涡度减小。就区域平均散度而言,暴雨前期,1000—800 hPa、450—250 hPa、150 hPa以上为负值,极值分别在900 hPa、300 hPa,其他层的平均散度为正值,因此散度配置从低层到高层遵循辐合、辐散、辐合、辐散、辐合的分布,且底层的辐合层厚度小于800—450 hPa的辐散层;暴雨强盛期,散度的配置上依然是辐合、辐散相间,且辐散面积大于辐合面积,“抽吸”作用导致上升运动较强;暴雨发生后,800 hPa以下低层散度为正值,处于辐散状态,不利于产生上升运动;从低层到高层散度依然遵循辐散、辐合的相间分布。从区域平均垂直速度来看,暴雨前期500 hPa以下 ω 为负值,已经处于上升运动,石家庄山区已有降水出现。暴雨强盛期,垂直速度的分布有了明显变化,几乎整层都是 $\omega < 0$ 的上升状态,在650 hPa达到极值 -15×10^{-2} hPa \cdot s $^{-1}$,整层上升运动明显;暴雨结束时,垂直速度上升的趋势在减弱,900—500 hPa和400 hPa以上出现 ω 的正值,大气基本处于下沉的稳定状态。

高空急流不明显,对这次强降水的作用不大;对流层中低层气旋性环流明显,500 hPa上11日20时(图2a)低涡完整,导致降水的低涡中心在(113°E、37.8°N),对应 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的全风速,这时石家庄出现降水;12日02时(图2b)低涡减弱,偏东风加强,在石家庄、邢台之间形成偏东风与西南风的切变,东北—西南向切变上的辐合加强并维持,导致邢台出现128 mm/6h的降水出现;700 hPa(图2c)低层切变线近似东西向,在(114°E、38°N)有 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的全风速中心,说明这里既有风向切变又有风速辐合,给低层空气的抬升提供动力;850 hPa上低涡的位置在山东,河北中部处于低涡

后部的偏东风气流里,对应气流的全风速最大强度达到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 分析 12 日 02 时、12 日 08 时的 700 hPa、850 hPa 全风速可知,这两层上偏东风都在加大,偏东风急流形成,急流核的最大风速达到 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,正是这

条偏东风急流的形成及维持,将渤海的水汽源源不断的输送到河北,加上山脉的阻挡和切变线的动力作用,致使水汽在太行山东麓聚集,因此偏东风在降水过程中起着重要作用。

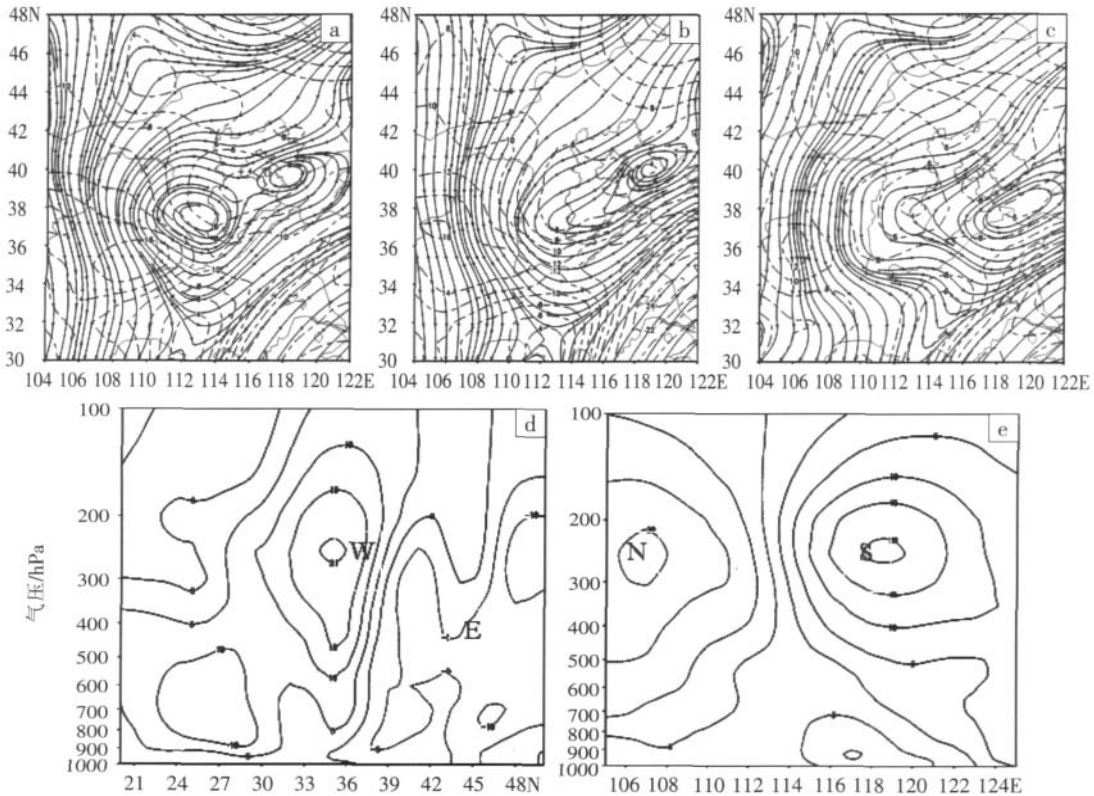


图 2 11 日 20 时 500 hPa(a)、12 日 02 时 500 hPa(b)、12 日 02 时 700 hPa(c) 的流场(实线)和全风速线(虚线)以及 12 日 02 时沿 114.5°E 纬向风(d)和 12 日 02 时沿 37.5°N 的经向风(e)垂直剖面图 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 虚线为东风和北风, 实线为西风 and 南风)

沿 114.5°E 的纬向风垂直剖面(图 2d)显示,12 日 02 时,纬向西风随高度向北倾斜,且风速随之加大,到 250 hPa 达到峰值 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,东西风带的过渡层约为 200 hPa,此层也标志着低涡的垂直伸展范围。低涡的北部,东风最大风速位于 700 hPa,风速为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,比南部西风最大值偏小一倍。12 日 08 时,低层东风加强南扩, $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东风急流出现,而西风在逐渐减小,这正好与降水最大时段对应;次后,东西风都逐渐减弱,降水也趋于结束,说明此降水过程中东风所起的作用。沿低涡所在位置的经向风垂直剖面(图 2e)显示,南北风均在 250 hPa 左右达到峰值,说明动量输送主要在高层,且高层南北输送动量相当;另外,低涡的低层存在 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的北风,表明低层也有向南的动量输送。经纬向风垂直剖面(图 2d、e)中的零线代表了低涡的轴线,纬向风垂直剖面(图 2d)显示零线随高度向北倾斜,经向风垂直剖面(图 2e)显示零线随高度向西倾斜,这反映了低涡随高度向西北倾斜的特点,这与实况中 500 hPa 低涡比 700 hPa、850 hPa 低涡偏西、偏北相应。

4.2 热力结构分析

4.2.1 温度场分布

沿暴雨中心所在纬度(37°N)的温度离差(即距平,取纬向平均)垂直剖面图显示(图 3),低涡上空对流层上层 250 hPa 以上为暖心结构,250 hPa 以下为深厚的冷区,并且随低涡冷暖心绝对值增强而暴雨增幅,冷暖心绝对值减小而暴雨强度减弱,低涡的温度离差

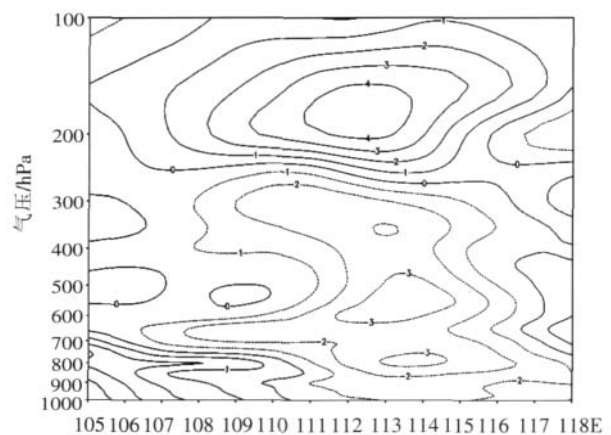


图 3 12 日 02 时沿 37°N 温度离差的垂直剖面图

的大小变化与暴雨的强弱有较好的对应关系。分析高层200 hPa 和中低层 700 hPa 的温度离差图(图略)表明,从河北中南部到山西温度离差为正值,即低涡所在的高层为暖心结构,中低层的温度离差为负值,具有冷心结构;低涡在温度场上表现为低层冷心、高层暖心的垂直结构,这可能是东北冷空气的入侵和降水的蒸发冷却,致使低层降温形成冷心的缘故。

4.2.2 假相当位温

假相当位温 θ_{sc} 是一个重要的温湿特征参数,在干绝热过程和湿绝热过程中都具有守恒性^[4],它既与空气质块的温度有关,又与质块的湿度有关,它能很好

的反映一个地区的热力学性质。 θ_{sc} 随高度的分布能反映出气层对流性稳定的情况。当 $\partial\theta_{sc}/\partial z > 0$ 气层上湿下干,呈对流性稳定, $\partial\theta_{sc}/\partial z < 0$ 气层上干下湿,呈对流性不稳定;分析图 4a 可知:11 日 20 时西北-东南向的高湿舌经邯郸、邢台伸展到陕西,和低涡移动位置相对应,河北的东北部有一个 330 K 的干冷中心,东北冷空气的侵入使强降水开始产生。从图 4b 可以看到:700 hPa 上从北向南伸出一条冷舌。在冷涡 38°N 处 700 hPa 以上假相当位温随高度的升高而升高,为对流性稳定;700 hPa 以下为对流性不稳定层结,降水主要发生在 700 hPa 以下的中低层。

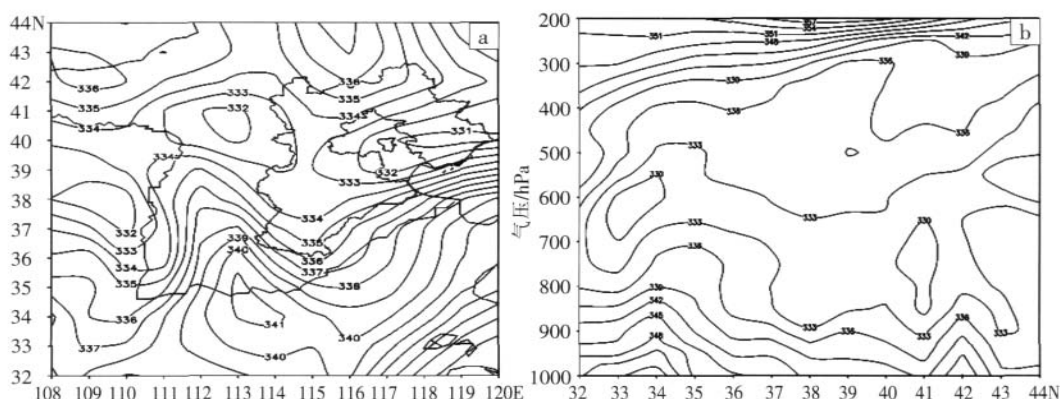


图 4 11 日 20 时 850 hPa θ_{sc} (单位:K) 水平分布(a)和沿 114°E 的垂直剖面图(b)

4.3 水汽分析

分析 700 hPa 的相对湿度的演变分布图可以看到:西南低空急流将水汽输送到山东到渤海一带,然后偏东风将水汽输送到太行山一带。12 日 02 时 850 hPa 的相对湿度分布图上更清楚的看到,河北中南部处于 90% 以上的高湿区里,水汽源地来自渤海。中、低

层水汽已经十分充沛。沿低涡中心所在纬度(38°N)的相对湿度及垂直速度垂直剖面图(图 5a)显示,低涡区及其东部对应相对湿度为 80% 以上的高湿区,这与垂直速度的上升运动相对应,850 hPa 以下低涡东侧 $\geq 90%$ 的高湿区向西伸展,这为未来暴雨的发生提供了水汽条件。

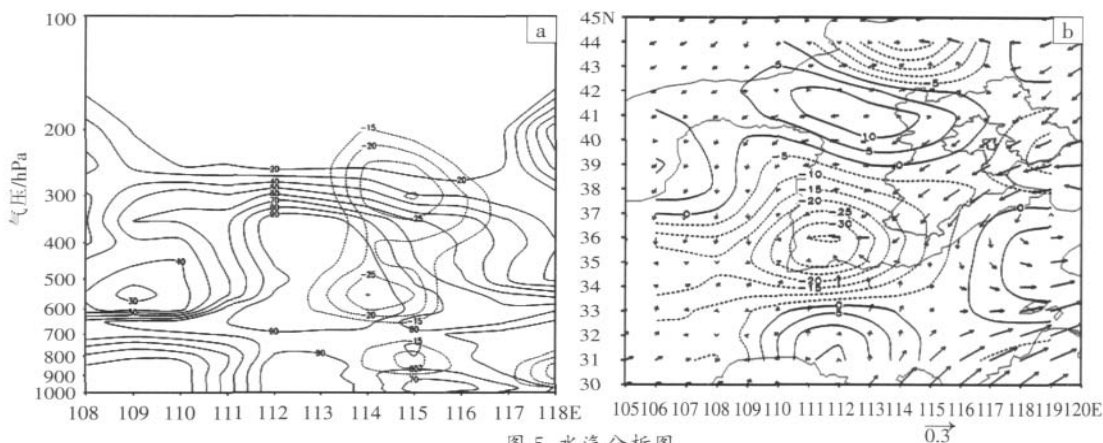


图 5 水汽分析图
(a)11 日 20 时沿 38°N 相对湿度(实线,%)及垂直速度(虚线 $< -10 \times 10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)垂直剖面;(b)11 日 20 时 900 hPa 水汽通量矢量(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 图下方的箭头为图中矢量大小的比例尺)及水汽通量散度(虚线,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)图

从 900 hPa 的水汽通量及其散度图中看到:从 11 日 08 时起,华北为大片的水汽辐合区,可以看出这是低层急流带来的水汽,但是并没有降水出现,可能与

高层低涡偏北、低层冷空气的加入偏晚有关。11 日 20 时(图 5b)时水汽辐合区有两个中心,从水汽通量矢量场可知,低空急流所带来的水汽在海上辐合;而低层偏

东风所引起的水汽辐合在山西南部形成一个辐合中心,它与河北的降水密切相关。12 日 02—08 时河北南部仍处于偏东风引起的水汽辐合区里。12 日 14 时水汽辐合中心也减弱东移南压,整个华北处于水汽辐散区,这次降水也趋于结束。从以上可看到,水汽辐合的演变与低空偏东风的运动演变相一致,因此可以说,低层偏东风可能是暴雨区所需水汽的主要携带者,同时也可看到,引起这次河北强降水的水汽源地可能主要是渤海湾,水汽随偏东风输送到太行山附近,形成水汽辐合中心,沿太行山东麓上升,加之降水持续时间比较长,大量水汽向上输送,造成了强地形降水。

5 涡度收支

涡度收支方程^[9]为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = A + B + C + D + E \quad (1)$$

$$A = - \left[u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \left(\beta + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \right]$$

$$B = -\omega \frac{\partial \zeta}{\partial p}$$

$$C = -(f + \beta) \nabla \cdot V$$

$$D = - \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} \right)$$

A 为水平平流项, B 为垂直平流项, C 为水平辐合辐散项, D 为扭转项, E 为摩擦项 (在讨论中忽略摩擦的影响,因此不考虑 E 项), u 是纬向水平风速, v 是经

向水平风速, ω 是垂直速度, ζ 为涡度, f 为科里奥利参数, β = ∂f/∂y。

暴雨前期(图 6a),总涡度项在 200 hPa 附近是负值外,其他层上都是正值,最大正涡度为 6×10⁻⁹ s⁻²;水平涡度平流项(A)和水平涡度辐散项(C)在不同高度上对总涡度的贡献基本相反,其中 A 在 700 hPa 以下使得总涡度增加,700 hPa 以上使得总涡度减少,而 C 从低层到高层都使得总涡度增加,对总涡度的贡献较大;同时,对流层中低层到高层,垂直平流项(B)对总涡度的贡献是先正,后负,量值不大,峰值在 650 hPa 左右,说明垂直平流项对总涡度由中低层到高层的输送也有一定的贡献;扭转项(D)在低层和高层对总涡度是负贡献,中间层是正贡献。暴雨初期(图 6b),与暴雨前期相比明显的变化是总涡度项和水平涡度辐散项(C)明显增加,总涡度项在 300 hPa 达到最大,其最大值为 20×10⁹ s², C 使总涡度增加,对总涡度是正的贡献,相反,水平涡度平流项(A)使总涡度减少,对总涡度是负的贡献;垂直平流项(B)和扭转项(D)的等值线都在零线附近摆动,对总涡度的贡献都不大。暴雨强盛期(图 6c),无论总涡度、水平涡度辐散项和水平涡度平流项,它们的分布形状同暴雨初期的形状,但绝对值都在减小,预示未来降水将逐渐减小。暴雨结束期(图 6d),总涡度项和水平涡度辐散项(C)发生了明显变化,总涡度由正值变为负值,水平涡度辐散项(C)也是负值,对总涡度是负贡献,其他三项变化不大。

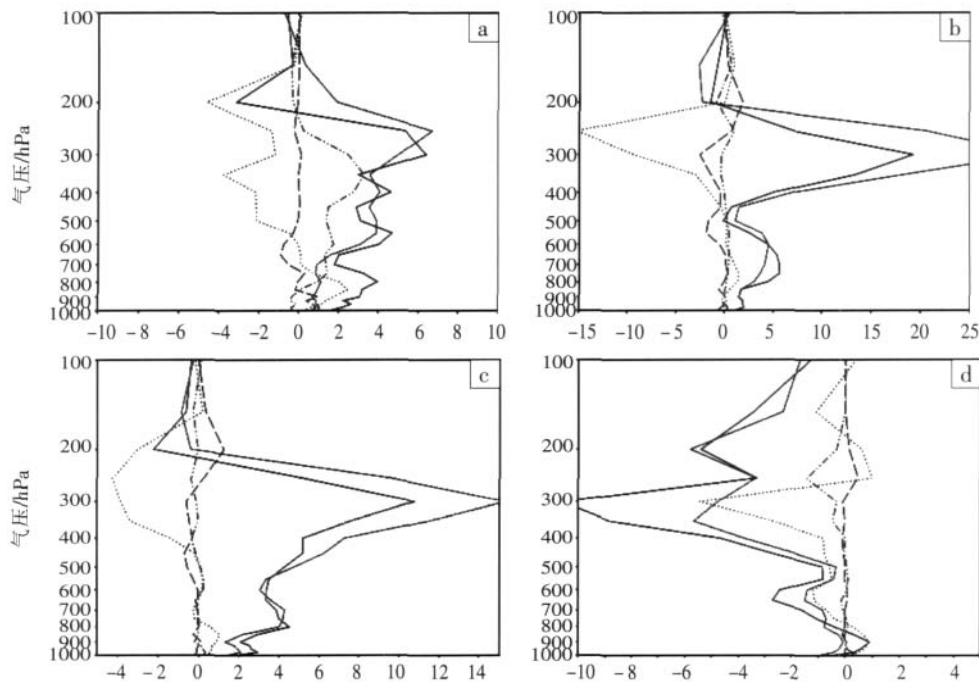


图 6 低涡区内各项及总涡度收支(10⁻⁹ s⁻²)的区域平均的垂直分布图
(点线为水平平流项;长虚线为垂直平流项;短虚线为水平辐散项;点点划线为扭转项;实线为总涡度)
(a)暴雨前期;(b)暴雨初期;(c)暴雨强盛期;(d)暴雨结束期

总的来说,水平涡度平流项和水平涡度辐散项作用相反,水平涡度平流项对总涡度是负贡献,水平涡度辐散项对总涡度是正贡献;且水平涡度辐散项对涡度贡献起直接作用;垂直平流项和扭转项对总涡度的贡献不大。

6 结论

(1) 200 hPa 上西风槽发展东移、500 hPa 低涡及其伴随的切变和中低层的偏东风非常有利于河北中南部降水的发展和维持。高低空形势的配置、低涡位置及低层偏东风决定了降水出现在河北中南部,又由于太行山地形的阻挡作用,使京广铁路沿线以西成为这次降雨过程的中心,同时在有利于暴雨形成的大尺度环流背景下,低涡后部低层偏东风在这次降水中起着重要作用。这次降水的对流性不是很强,从云图上显示主要为层积混合型降水,这次降水是系统稳定少动、持续时间长的结果。

(2) 涡度场特征明显,暴雨区对应深厚的正涡度区;散度场结构并不是严格的遵循高层辐散、低层辐合的配置;暴雨区整层大气都为垂直速度上升区,上升运动十分剧烈。风场分析表明这次华北低涡比较深

厚,具有低涡随高度向西北倾斜的特征。

(3) 低涡在温度场上表现为低层冷心、高层暖心的垂直稳定结构,冷空气来源于 500 hPa 以下的东北地区;700 hPa 以下为对流性不稳定层结,因此对流性不太强。

(4) 水汽分析表明,水汽来自于渤海,低层偏东风可能是暴雨区所需水汽的主要携带者,加上南北向太行山的阻挡抬升作用,是这次降水的有利因素。

(5) 涡度收支分析表明水平涡度平流项和水平涡度辐散项作用相反;暴雨发生发展阶段,水平涡度辐散项起直接作用,对总涡度是正贡献;垂直平流项在任何阶段对总涡度贡献都比较小。

参考文献:

- [1] 李江波.2004 年夏季(6-8 月)天气述评[J].河北气象,2004(4):45.
- [2] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980.
- [3] 丁一汇.高等天气学[M].北京:气象出版社,1993.
- [4] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁.湿位涡和倾斜涡度发展[J].气象学报,1995,53(4):387-404.
- [5] 孔期,Ghulam Rasul,赵思雄.一次引发南亚大暴雨的季风低压结构、涡度与水汽收支分析[J].气候与环境研究,2005,10(4):526-542.

Study of the Vortex Structure and Vorticity Budget on a Heavy Rain in North China

TIAN Xiu-xia^{1,2}, SHAO Ai-mei¹

(1.College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 73000;

2.Handan Meteorological Bureau, Handan 056001)

Abstract: Based on routine observations, satellite data in Micaps system and NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ re-analysis data, a local severe heavy rain occurred in Hebei Province on July 11-12, 2004 was analyzed. The westerly trough at 200 hPa, low eddy in North China at 500 hPa, and easterly wind in middle and lower levels were the direct influence system of the rainfall. The low eddy in North China was a very deep baroclinic system. The three dimensional structure was that the curve of temperature was sunken in the lower level and protuberant in the higher level with the obvious vorticity field characteristics. The rainfall was corresponded with the deep positive vorticity. The disconvergence field was disorder and the upward motion was strong in rainstorm area. The cold air came form northeast area below 500 hPa; the height of convection was lower; the source of vapor was from Bohai Sea and the easterly winds in the lower levels may be the main carrier in transporting the water vapor. In the vorticity budget equation, the horizontal vorticity advection is opposite to the horizontal vorticity diversion which played the main role in the total vorticity field.

Key words: Heavy rain; Physics diagnostic; Low eddy structure; Vorticity budget