

一次大暴雨过程中急流次级环流的 激发及作用*

张维桓

董佩明

(中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(中国人民解放军空军第七研究所, 北京 100085)

沈桐立

(南京气象学院, 南京 210044)

摘 要 使用双向嵌套数值模式 MM4 对 1992 年 7 月 23 日发生在副高北侧京津冀地区的一次大暴雨过程进行了成功的数值模拟。利用模拟得到的高时空分辨率资料, 对伴随高、低空急流的次级环流进行了诊断, 结果表明: 激发次级环流的主要因子和台风、夏季江淮气旋有明显不同; 总的次级环流在降水前, 有利于天气区不稳定能量的积累, 而在降水过程中提供了持续稳定的上升运动条件; 急流和暴雨之间通过次级环流存在着正反馈相互作用。

关键词: 大暴雨过程; 急流; 次级环流; 相互作用

1 引言

大气运动中次级环流的研究有重要意义, 它不仅关系到基本环流的动力学, 而且由于其上升支往往伴随着坏天气而有明显的天气学意义。在我国夏季, 次级环流的上升支往往伴随着暴雨强对流天气, 而暴雨强对流释放的大量凝结潜热以及它对热量、动量的垂直输送又将强迫出新的次级环流, 因此, 研究这种情形下次级环流、基本环流以及暴雨过程三者之间的相互联系、相互作用将是非常有意义的。文献[1~3]分别研究了台风、夏季江淮气旋中次级环流的激发及作用, 本文则讨论我国北方产生大暴雨的高、低空急流耦合形势下次级环流的激发以及它与暴雨、急流之间的相互作用, 并与台风、夏季江淮气旋的某些结果进行了比较。

文中首先使用 MM4 对 1992 年 7 月 23 日发生在副高北侧京津冀地区的一次大暴雨过程进行了数值模拟, 模拟成功地再现了高低空急流耦合的形势以及大暴雨过程; 在随后的诊断分析中, 利用模拟所得的高时空分辨率资料, 得到了伴随急流的次级环流及其演变, 并讨论了激发次级环流诸因子的贡献以及次级环流、暴雨和急流的相互作用。

2 对 1992 年 7 月 23 日京津冀大暴雨过程的数值模拟

这里所使用的模式是中国气象科学研究院中尺度研究所移植、调试的 PSU/NCAR

模式版本 MM4, 其详述可参见文献[4]及有关介绍。本工作采用整体边界层方案, 降水物理考虑大尺度凝结以及 Kuo-Anthes 积云对流参数化方案。为提高暴雨中尺度系统的水平分辨率同时又不致计算量过大, 采用了嵌套网格, 粗、细网格距及对应时间步长之比为 3:1。粗网格模式水平区域中心位置在 39.3°N 、 115°E , 有效计算范围包括 23×19 个格点, 水平格距 150 km (图 1c)。细网格计算范围包括 13×13 个格点, 水平

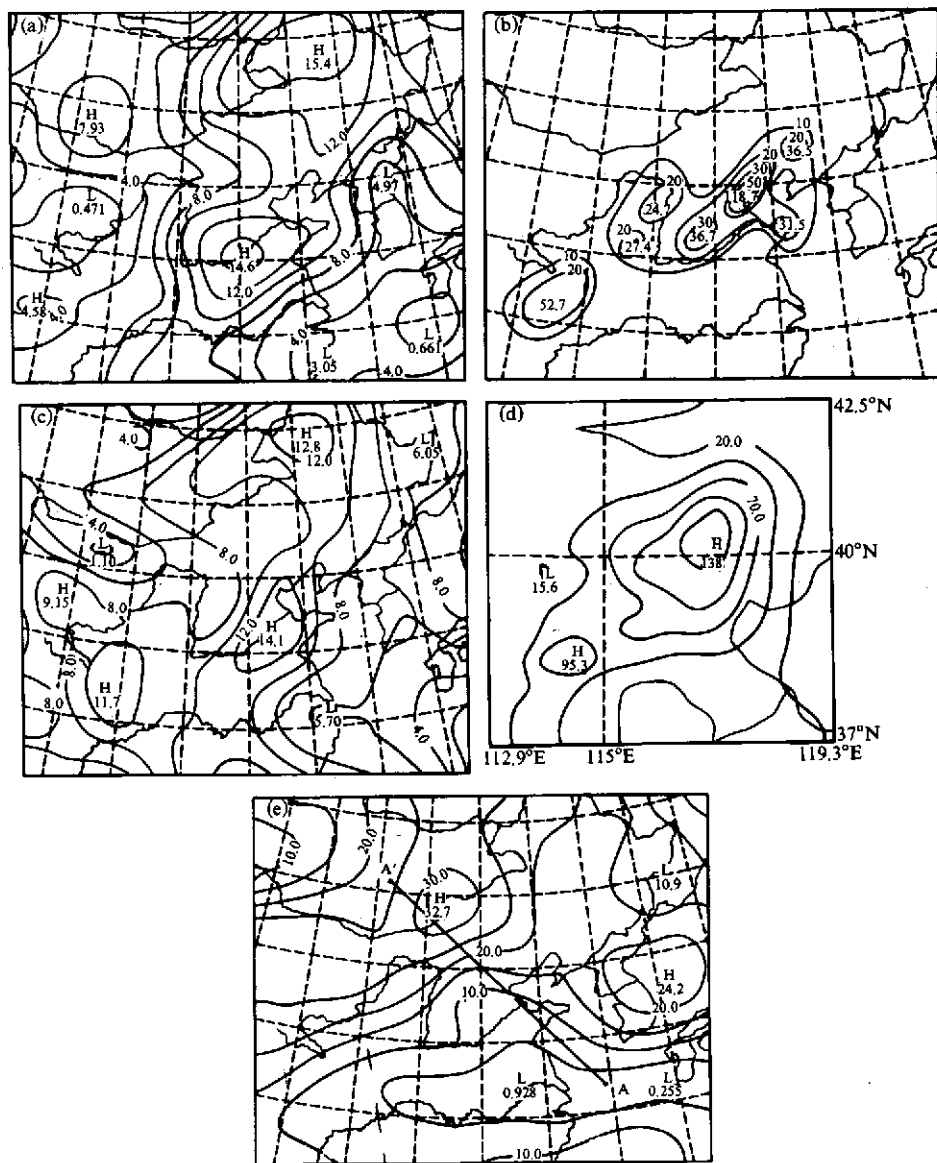


图 1 1992 年 7 月 23 日部分实况场及 MM4 预报场

- (a) 23 日 20 时 850 hPa 实况风速场 (单位: m/s); (b) 23 日 08 时~24 日 08 时累计降水量实况 (单位: mm); (c) 850 hPa 12 h 预报风速场 (单位: m/s); (d) 细网格 24 h 累计预报降水量 (单位: mm); (e) 300 hPa 12 h 预报风速场 (单位: m/s)

格距 50 km (图 1d)。模式由常规地面、探空及测风资料提供初值。

1992 年 7 月下旬, 西太平洋副热带高压经历了北跳西伸加强—稳定维持—东撤减弱三个阶段, 暴雨过程就发生在副高稳定维持阶段。7 月 23 日 08 时 500 hPa 实况形势场上, 中心在 30°N 、 125°E , 强度达 594 位势什米的西太副高偏西偏北稳定维持, 京津冀地区处于副高西北缘 588 线外围西南气流控制下, 50°N 一带西风平直, 有弱的短波扰动东传。700 hPa、850 hPa、地面亦为副高外围稳定的偏西南气流控制。08 时诊断分析表明: 自华南到京津冀一带, 850 hPa 上有近南北走向的西南风大风带 (尚未达急流标准), 暴雨区正处于温度、湿度、层结不稳定的 $(\theta_{se})_{500-850} < 0$ 大值区的下风方向, 这样西南大风带显然是一支伸向暴雨区的热量、水汽和不稳定能量的输送带; 同时对流层下层的暖湿气流相当深厚, 为暴雨区提供了足够的水汽条件。

这里着重指出的是, 随着天气的发展, 伴随 50°N 一带高空西风小槽东移, 受西伸西太副高的阻挡, 河套以北出现高空急流大风核。同时 850 hPa 的大风带中也有急流大风速中心产生 (图 1a)。京津冀一带正处于高空大风核入口区右侧, 低空大风核出口区左侧, 这种形势在低层有充足的暖湿气流和不稳定能量输送的条件下, 无疑对暴雨的产生是非常有利的环境背景场。

降水开始于 23 日, 14~20 时具有一定强度, 23 日 20 时~24 日 02 时强度及累计降水量最大, 24 日 02~08 时降水维持但强度减弱, 24 h 总雨量如图 1b 所示, 大暴雨中心在北京地区附近, 雨量达 118.7 mm。

模拟从 23 日 08 时始, 积分 24 h, 每 6 h 输出一一次预报结果。所预报的形势场与实况基本一致, 不再赘述。这里特别看一下高低空急流的模拟。在初始 850 hPa 场上没有急流大风核的情况下, 积分 6 h 即 23 日 14 时, 在西南气流大风带里天气区的上游于 35°N 、 114°E 附近出现了 12.2 m/s 的大风核 (图略), 随着时间的推移大风核沿大风带向北传播, 积分 12 h (至 23 日 20 时) 大风速中心增强到 14.1 m/s, 如图 1c 所示 (由于细网格区域较小, 为了对天气形势有一个完整的印象, 所给出的是粗网格的预报。图 1e 同), 其位置、最大风速值均与图 1a 的实况相近。同时在 300 hPa 层上, 模式也预报出了高空急流大风核, 见图 1e, 从而构成了高低空急流耦合的形势。

细网格 24 h 降水量预报如图 1d 所示, 它报出了细网格范围内所有两个雨量中心。北京东部的大暴雨中心报得很好, 区域西南部雨量中心报得偏大、位置稍偏北。需要指出的是, 大暴雨过程中, 雨量的局地性强, 而我们这里搜集的实况雨量仅是部分气象台站的, 没有包括气候站和水文站的雨量记录, 它难以真实反映暴雨中心的位置及强度; 另外所用细网格格距为 50 km, 所报雨量中心位置亦可有 30 余公里的分辨误差。考虑到这两个因素, 该大暴雨个例的雨区、雨量预报还是相当成功的。

所模拟的降水中心每 3 h 雨量的演变也和实况相近。在累计降水中, 大尺度降水份额很小, 说明暴雨过程中对流降水是主要的。

综上所述, MM4 对这次暴雨过程的模拟, 无论就形势场, 还是高低空急流大风核的模拟, 以及降水的预报, 都是相当成功的。它所提供的这次过程的高时空分辨率资料, 为下面进一步的分析工作奠定了基础。

3 高低空急流所伴随的次级环流

尺度分析表明, 沿急流—锋面的风是准地转的, 而正交于锋和急流的风是非地转的。这时可引入地转动量近似, 再取 f 平面近似、Boussinesq 近似, 如果取 x 轴与急流轴、锋面平行, y 轴与之正交并指向冷区, 垂直方向取 p 坐标, 可推得考虑非绝热过程和次网格尺度过程的 Sawyer-Eliassen 急流—锋次级环流方程^[5]:

$$\begin{aligned} & -\gamma \frac{\partial \theta}{\partial p} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial m}{\partial p} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial p} - \frac{\partial m}{\partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial p^2} \\ & = -2J_{yp}(u_g, v_g) - \frac{\partial^2 \overline{u'_g \omega'}}{\partial p^2} + \gamma \frac{\partial^2 \overline{\theta' \omega'}}{\partial y \partial p} - \gamma \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\theta Q}{c_p T} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 ψ 是 $y-p$ 垂直剖面上的非地转流函数, y 方向的非地转风 $v_a = -\partial \psi / \partial p$, 垂直运动 $\omega = \partial \psi / \partial y$, 两者构成与急流或锋正交的 $y-p$ 剖面中的次级环流。 $\gamma = \frac{R}{f p_0} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{c_p / c_p}$, $p_0 = 1000$ hPa, $m = u_g - f y$ 称为地转绝对动量。Jacobi 算子

$$J_{yp}(A, B) = \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial p} - \frac{\partial B}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial p}. \text{ 其他符号均为气象上常用意义。}$$

(1) 式右端强迫项第一项为地转变形项。它通常又分为地转伸长变形项 $(-2\gamma \frac{\partial u_g}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y})$ 和地转切变变形项 $(2\gamma \frac{\partial u_g}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x})$ 。

(1) 式右端第二、三项分别为次网格尺度动量和热量混和项。在实际应用中, 晴好天气下它反映晴空湍流的作用, 对流天气下它反映积云对流的作用。本工作中因是暴雨个例而选后者, 并将积云垂直扰动输送表示为

$$\begin{cases} -\overline{u'_g \omega'} = M_c(u_c - u_g), \\ -\overline{\theta' \omega'} = M_c(\theta_c - \theta), \end{cases} \quad (2)$$

其中 u_g 、 θ 为环境的 (即格点的) 风分量和位温, u_c 、 θ_c 为积云内相应的量。计算中考虑到云内空气垂直速度很大, 在上升过程中来不及改变自己的速度和位温, 因此可取为云底层如 900 hPa 格点上相应的量。 M_c 是积云垂直质量通量, 本工作取 Lindzen 方案^[6]

$$M_c = (M_c)_{\max} \cdot f(p), \quad (3)$$

其中

$$(M_c)_{\max} = \frac{L \cdot p_r}{\int f(p) c_p \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R/c_p} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial p} dp}, \quad (4)$$

而

$$f(p) = \left\{ \exp \left[- \left(\frac{p-550}{250} \right)^2 \right] - \exp \left[- \left(\frac{450}{250} \right)^2 \right] \right\} / \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{450}{250} \right)^2 \right] \right\}. \quad (5)$$

显见, $f(p)$ 在 550 hPa 取最大值 1, 而在 1000、100 hPa 取 0, 相应 M_c 在 550 hPa 取最大值 $(M_c)_{\max}$, 而在 1000、100 hPa 取 0 值。 L 为水汽凝结潜热, p_y 为降水率, 取自模式格点上的对流降水率。

(1) 式右端第四项为非绝热加热不均匀项。考虑辐射及感热非绝热加热作用较小, 只计算潜热的影响。潜热加热率取自模式格点上的大尺度凝结加热率和对流凝结加热率之和。

通常大气是层结稳定和惯性稳定的, 这时方程满足椭圆型条件 $\Delta = ac - b^2 = \gamma \cdot J_{yp}(m, \theta) = \gamma \cdot P > 0$, 其中 P 是 Ertel 位涡, 可设计一定的差分格式按超松弛迭代法求解出各强迫项及总的次级环流。

使用上面模拟中得到的粗网格资料进行次级环流的诊断分析。

如前所述, 我国东半部从南到北、从低空到高空的气流为偏西南向, 高低空急流亦是如此, 因之我们选如图 1e 所示的东南—西北向剖面 AA', 经过它作垂直剖面, 使用方程 (1) 讨论高低空急流在此剖面中激发的次级环流。剖面上的水平格点自 31.0°N, 124.9°E 至 45.3°N, 106.5°E 均匀排列, 共计 16 个格点, 格距为 150 km; 垂直方向自 900 hPa 至 250 hPa 等距取 14 层, 层距为 $\Delta p = 50$ hPa。剖面格点上的物理量, 通过在垂直方向使用对数压力线性插值、水平方向在以剖面格点为圆心的扫描圆内依加权平均由模式格点物理量获取。

选取模式积分 6、12、18 h (分别对应降水前期、降水初期和降水旺盛期) 所诊断的次级环流进行讨论。

模式积分 6 h, 即对应于 23 日 14 时, 由于此时基本上无降水发生, 所以次级环流方程的强迫项中只包括地转变形项。图 2a、b 给出了剖面上总次级环流状况和对应的垂直运动场。可见此时次级环流为单一的正环流圈 (暖空气上升, 冷空气下沉), 流函

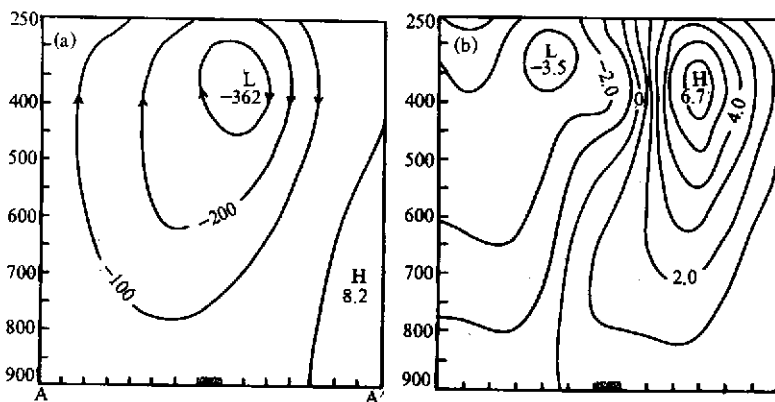


图 2 23 日 14 时剖面上次级环流及相应垂直运动

(a) 次级环流 (单位: $\text{hPa} \cdot \text{m/s}$); (b) 垂直运动 (单位: 10^{-3} hPa/s)

横坐标上阴影区为 23 日暴雨区位置

数中心值为-362个单位,位于400 hPa附近。其所对应的最大上升运动中心值为-3.54个单位,偏在上层约350 hPa。此时天气区上空处于弱下沉运动控制,这种形势对未来天气过程的爆发起着积累能量的作用。

分别计算地转形变中的两项,可得地转伸长变形和地转切变变形项所激发的次级环流及垂直运动(图略)。可以发现,地转切变变形项的强迫作用,无论是流函数形式,还是垂直运动场,都与总环流的基本相似,中心数值也相近。而地转伸长变形项,流函数中心分布零乱,数值要小1-2个量级。因此切变变形项的作用明显大于伸长变形项,这与该天气个例中急流明显因而地转风切变明显要大以及沿西南气流方向暖平流明显是一致的。

积分12 h,即23日20时的总次级环流和上升运动见图3a、b,此时降水已经发生且具有一定强度,所以强迫项包括了方程(1)右端的所有四项。次级环流已不再是14时那种单一的环流圈,而出现了两个明显的正、逆环流圈,南侧为一完整的逆环流(环流中心值为138个单位,位于600 hPa附近),北侧为一完整的正环流(中心值为-480单位,位于400 hPa附近),正逆环流圈间伴随有强烈的上升运动,其最大值为-10.1个单位,位于450 hPa附近。我们注意到这一强烈上升运动区正好对应于降水大值区,地转形变项所激发的次级环流和垂直运动如图3c、d所示,它主要提供了较高层的上升运动,上升速度已较14时明显增大。积云对动量和热量的垂直混合作用(图3e)在中低层产生了两个环流圈,南侧为逆环流,北侧为正环流,中心值较地转形变项要小一个量级,但其结合处明显增强了暴雨区低层的辐合上升运动(达-1.1个单位,图略)。图3f是积云对热量的垂直混合作用所激发的环流圈,显见它构成了图3e的绝大部分,因此积云对热量的混合在激发次级环流方面明显大于积云对动量的混合作用。潜热释放作用所产生的次级环流与垂直运动由图3g、h给出,其典型的特征是出现了明显的双环流,和前两个强迫项(注意,我们将积云对动量和热量的垂直混合作用视作一项)相比,它激发的环流中心与最大上升运动在中层约500 hPa附近,其环流强度亦界于两者之间,比地转形变项稍小。可见,被凝结加热增暖的气柱会形成很明显的近轴对称的正逆双环流,对中、低层的上升运动起主导作用,这无疑对降水增幅以及降水过程的持续有着正反馈作用。

对应24日02时,图4a、b为各强迫项总的次级环流与垂直运动,可以看出,这时仍是双圈环流,强上升运动依然维持在暴雨区,只是环流中心和上升运动中心高度降低,分别在450、550 hPa附近,强度加强,这与该时刻降水强度增强的趋势是一致的。图4c、d、e是各强迫因子激发的次级环流,其形式类似于23日20时,各因子作用的相对大小仍是地转形变项最大,非绝热加热项与之量级相同,但要小些,积云混合项比前两者小一个量级,但强度均加强。积云混合项强迫的低层正环流圈高度进一步降低,这对总的上升运动中心高度的降低有明显的贡献。各因子对上升运动的贡献依然是:地转形变项主要在高层,非绝热加热项主要在中层,而积云混合项则主要在下层。

上述伴随急流的次级环流诊断表明,在降水发生前,高空急流大风核偏西,低空急流刚刚形成,位置偏南,天气区受高空大风核右前方下沉运动控制,这对未来天气的爆发积蓄能量;而在降水初期及盛期,高、低空急流耦合,天气区刚好位于高空急流入口区右侧、低空急流出口区左侧的上升气流里,对于对流降水的持续是非常有利的。这是

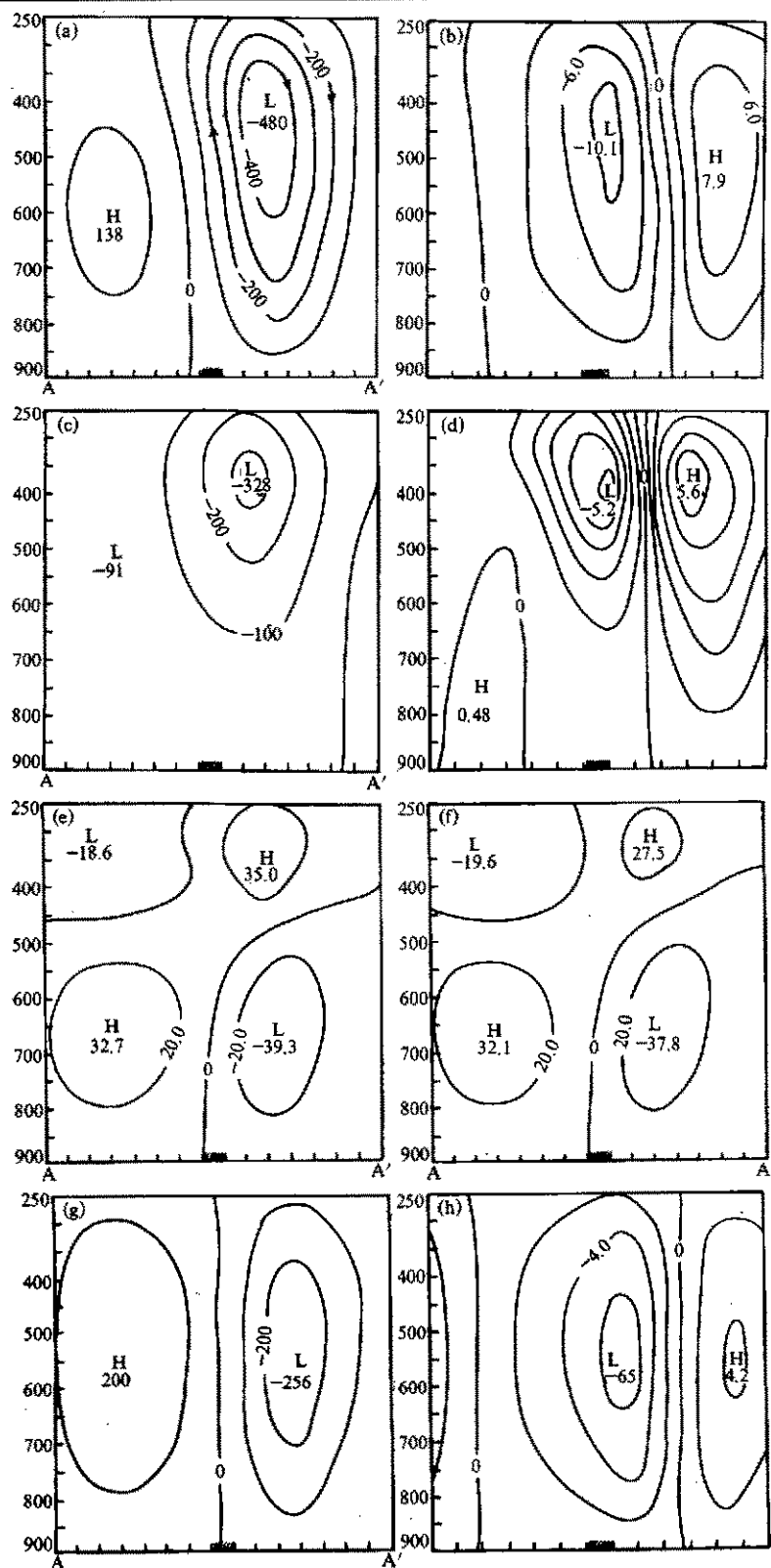


图3 23日20时总的以及
各因子激发的次级环流
及垂直运动

(a) 总次级环流; (b) 总次级环流所对应的垂直运动; (c) 地形变形项激发的次级环流; (d) 对应(c)的垂直运动; (e) 积云对动量、热量的垂直混合作用; (f) 积云对热量的垂直混合作用; (g) 潜热释放作用; (h) 对应(g)的垂直运动(单位、图注见图2)

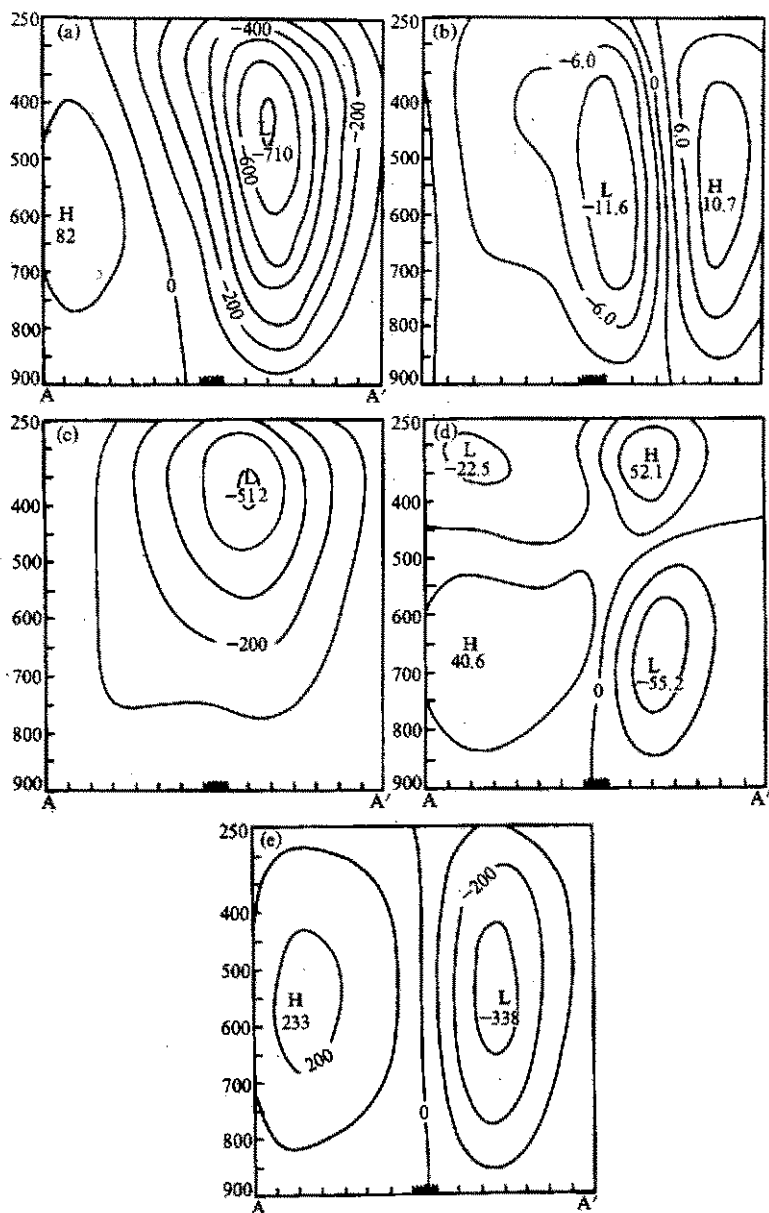


图 4 24 日 02 时的次级环流和垂直运动

(a) 总的次级环流; (b) 相应于 (a) 的垂直运动; (c) 地形变形项; (d) 积云混合项; (e) 潜热释放项

问题的一面, 它表明了急流对暴雨的作用。另一方面从图 3g 和图 4e, 我们也看到暴雨区释放的凝结潜热激发出的双环流圈, 其西北部热力直接环流圈的上方支气流, 在科里奥利力作用下必然加强高空偏西南气流, 有利于高空急流的加强与维持; 同时东南部间接环流圈的下方支气流在科里奥利力作用下亦将增强低空的西南急流。另从图 3e 和图 4d 看, 积云对热量、动量的垂直混合项在对流层底部激发的间接环流圈的下支气流, 在科里奥利力作用下亦有加强低空急流的作用, 只不过和潜热项相比作用较小而已。这

就是暴雨强对流对高、低空急流的反作用。正是暴雨和急流的这种相互作用, 有利于降水的发展与维持, 对这次大暴雨过程的形成有一定的贡献。当然, 正如暴雨过程的形成是由于高、低空急流耦合形势的建立一样, 暴雨过程结束最终取决于高、低空急流核传播速度矢量的不同而导致的急流耦合形势的破坏。这里所指的暴雨和急流的相互作用只能发生在高低空急流耦合的形势下。

这种暴雨强对流对高、低空急流的反作用在我国夏半年伴有高、低空急流的大暴雨过程中具有其普遍性。陶诗言等在文献[7]中概括了我国三类高、低空急流位置与大暴雨的关系, 强调了高、低空急流耦合对暴雨的作用, 给出了图 4-15, 我们把它改绘于图 5 中。根据上面的讨论暴雨强对流释放的凝结潜热将在暴雨区附近(我们有理由按下面的方式把上面垂直剖面上的轴对称正、逆双环流推广到暴雨区周围的空间)激发出次级环流, 暴雨区是强上升运动, 在低层, 受次级环流下方支的趋使, 空气由四周向暴雨区辐合, 在科里奥利力作用下这势必产生如我们在图中所加的细虚线所示意的气旋性环流, 这种环流对图 5 中 a、b、c 三类无一例外地加强低空急流, 起到正反馈作用。与此同时在高层受次级环流上方支的驱使, 空气由暴雨区向外辐散, 受科里奥利力作用将产生由我们标在图中的点划线所示意的反气旋环流, 除图 c 中暴雨区南部的副热带急流外, 其余的高空急流都得到了加强。无疑, 这种暴雨强对流对高、低空急流的正反馈作用, 对于暴雨过程的持续以致于酿成大暴雨过程是非常有意义的。

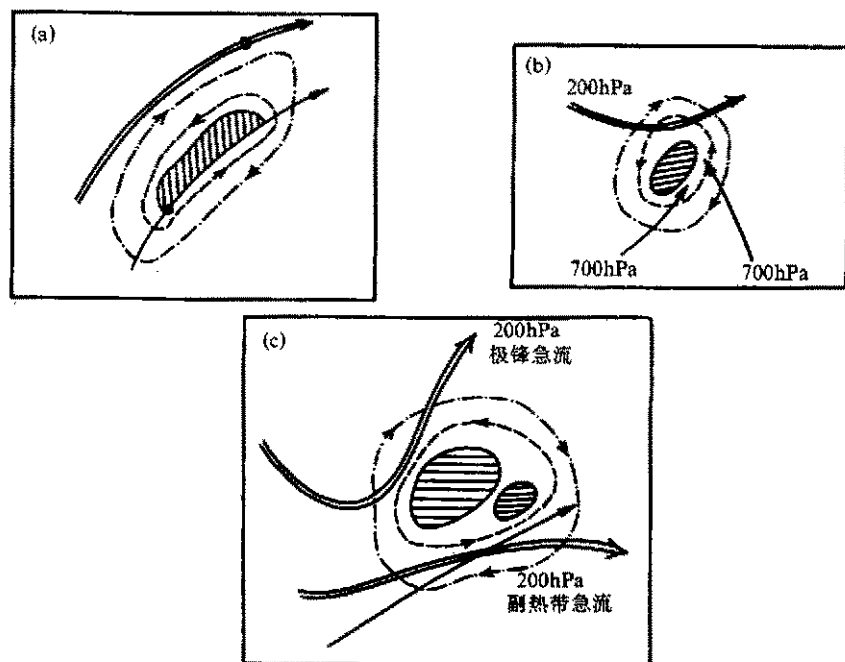


图 5 急流与暴雨的相互关系

(a) 高、低空急流平行的情况; (b) 高、低空急流交叉的情况;

(c) 低空急流位于两支高空急流形成的气流散开区南侧

→ 低空急流, ● 急流中心, ⇨ 高空急流, 斜线区为大于 $25 \text{ mm} / 12 \text{ h}$ 的雨区,

— — — 低空气旋性环流, - · - · - 高空反气旋性环流

在应用次级环流方程(1)时,它要求沿急流一锋的风是地转风。在本次天气过程中,有弱的短波槽东移影响天气区,这时垂直于所取剖面的西南气流,就有一定的曲率涡度。一般而言对这时的气流,梯度风平衡比地转平衡更精确,因而气流是非地转的。根据文献[8]的数值模拟工作,这时沿气流方向产生非地转环流,在短波槽前是上升运动,而在短波槽后是下沉运动。因此,考虑到实际沿急流一锋方向风的非地转性,当剖面处于空中短波槽前影响时,由于沿急流方向的和横向的非地转环流上升支的叠加,天气区的上升运动比这里计算的要强;而当剖面处于短波槽后时,则因沿急流方向的非地转环流转为下沉支,必将削弱这里所计算的天气区的上升运动。这也必将是降水过程由盛转衰的因素之一。这里还要指出,由地转形变项所激发的次级环流,降水产生前在天气区一带是下沉运动,降水初期其上升支又主要在高层,因此这不足以说明大暴雨过程的触发启动机制。在文献[9]中所进行的数值诊断表明,此次大暴雨过程的触发机制是京津冀地区下垫面对低层大气的动力和热力强迫作用。

文献[3]和文献[1、2]分别对夏季江淮气旋个例、台风进行了次级环流的诊断分析,他们所使用的积云对流对动量、热量的垂直输送方案和本文所用全是 Lindzen 方案,具有可比性。文献[3]得到凝结加热(尤其是积云对流加热)是次级环流最主要的强迫因子,其次是积云对热量的垂直混合作用,再次是地转形变项;文献[1、2]对台风的计算结果与江淮气旋类似,非绝热加热(文献[1、2]中考虑了辐射加热,但因其较小,主要还是凝结加热,对台风而言,也就是积云对流加热)明显超过其他因子,积云对热量的垂直混合项居次,再次是积云动量垂直混合项及其他动力强迫项。而本工作中:地转形变项是次级环流激发的主要因素,凝结加热(其中积云对流加热占绝对优势)激发的次级环流虽与前者同量级,但数值偏小,积云对热量的垂直混合项则较前两者小一个量级。这一结果和夏季江淮气旋、热带气旋明显不同,这与本暴雨个例处于中纬地区、影响系统(急流等)具有较强的斜压性有关。这从一个侧面说明了它们动力性质的不同。由此,我们或许可以说,夏季江淮气旋在其动力性质上是更接近于热带系统的天气系统。

4 结论

使用成功的数值模拟所得到的高时空分辨率资料,对1992年7月23日京津冀大暴雨个例中伴随高、低空急流的次级环流进行了诊断,主要结果是:

(1) 伴随急流的次级环流在降水前有利于天气区不稳定能量的积累,而在降水过程中则为暴雨提供了持续稳定的上升运动条件;同时暴雨中的凝结加热以及积云对流垂直混合也对急流有正反馈作用。可以说这种暴雨(或说积云对流)与急流的相互作用是导致大暴雨过程的重要因素。同时指出,暴雨强对流对高、低空急流的反作用在我国夏半年伴有高、低空急流的大暴雨过程中具有普遍性。

(2) 急流次级环流的强迫因子中,地转形变项是第一位的,其次是凝结加热项,积云对流垂直混合项明显要小。这和以往关于台风、夏季江淮气旋的诊断结果不同。

应该说明,这主要是一个个例诊断的结果,是否具有普遍意义,还需要对大量的个例进行计算、分析。

参 考 文 献

- 1 刘月贞、丁一汇、陶诗言, 热力强迫对台风次级环流的作用, 气象学报, 1988, 46, 432~444.
- 2 孙子平、丁一汇, 动力强迫对台风次级环流的作用, 大气科学, 1990, 14, 293~305.
- 3 江敦春, 长江中下游一次气旋过程中的次级环流, 大气科学研究与应用, 1993, 第1期, 41~49.
- 4 Anthes, R. A. et al, Description of the Penn state / NCAR mesoscale model version 4(MM4), NCAR Tech. Note, NCAR / TN-282-STR, 1987.
- 5 Shapiro, M. A., Frontogenesis and geostrophically forced secondary circulation in the vicinity of jet stream-frontal zone systems, *J. Atmos. Sci.*, 1981, 38, 954~973.
- 6 Lindzen, R. S., Clouds in climate modeling and satellite observational studies, Report of Workshop Held at NASA Gaddard Institute for Space Studies, New York, October 29~31, 1981.
- 7 陶诗言等, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 1980, 43~44.
- 8 Newton, C. W. and A. Trevisan, Clinogenesis and frontogenesis in jet-stream waves, Part II: Channel model numerical experiments, *J. Atmos. Sci.*, 1984, 41, 2735~2755.
- 9 董佩明、张维桓、沈桐立, 下垫面强迫对京津冀大暴雨作用的数值研究, 应用气象学报, 1999, 10(4), 436~444.

Triggering and Effects of the Secondary Circulation Associated with Upper and Low-Level Jets in a Heavy Rainfall Process

Zhang Weihuan

(College of Meteorology, Science and Engineering University of PLA, Nanjing 211101)

Dong Peiming

(The Seventh Institute of Air Force, Beijing 100085)

Shen Tongli

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract The heavy rainfall process of July 23, 1992 in Beijing-Tianjin-Hebei region is successfully simulated by using the meso-scale model MM4 with two-way nested grid. By employing the model products with high temporal and spatial resolutions, the secondary circulation associated with upper and low-level jets is diagnosed. The results show that the major factors forcing secondary circulation are different from those of typhoons and those of summer cyclones in Changjiang Huaihe river basin. The overall secondary circulation is favorable for the accumulation of instability energy before the precipitation and provides a persistent ascending motion in the precipitation process. There exists a positive feedback interaction between the heavy rainfall and jets.

Key words: heavy rainfall process; jet; secondary circulation; interaction