

西太平洋副热带高压影响下北京区域性暴雨的个例分析

刘还珠 王维国 邵明轩 王秀荣

国家气象中心, 北京 100081

摘 要 北京地区大降水 (≥ 25 mm/d) 天气有 72% 出现在 7~8 月份, 其中直接受西太平洋副热带高压 (副高) 影响的大降水占 46%, 它们主要产生在西风槽与副高相互作用的天气形势下。通过对该类暴雨的典型个例分析表明, 由于受副高的影响, 对流层低层副高南面的偏东气流将海上充沛的水汽输送到大陆, 并折向北与偏北气流相遇, 汇集在北京附近。同时, 副高西北边缘与西风槽之间形成较强的能量锋区, 该锋区南面的高温高湿气团蕴藏了较深厚的湿有效位能, 在湿位涡的斜压项作用下转化为动能, 倾斜垂直涡度发展激发了强烈的上升运动。在斜压扰动作用下, 对流层中层差动涡度平流和副高西侧的暖平流破坏了北京及邻近区域的准地转平衡, 动力强迫和热力强迫共同作用激发了次级环流, 该处的上升运动得到加强。暴雨就是产生在强的能量锋附近低层气旋性涡度发展、高层辐散显著的地方。此外, 副高西侧低层的暖湿气流北上, 较强的差动假相当位温平流促使大气层结向对流不稳定发展, 这对于暴雨局地的再增强是不可忽视的因素。由此, 形成对该类暴雨天气预报的着眼点。

关键词 副高 北京 暴雨 能量锋 湿有效位能 差动 假相当位温 平流

文章编号 1006-9895 (2007) 04-0727-08

中图分类号 P426.6

文献标识码 A

A Case Study of the Influence of the Western Pacific Subtropical High on the Torrential Rainfall in Beijing Area

LIU Huan-Zhu, WANG Wei-Guo, SHAO Ming-Xuan, and WANG Xiu-Rong

National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract Summer is a pluvial season in Beijing area. There is high correlation between the total amount of precipitation and the number of days when there are heavy rain events during the rainy season. 72 percent of heavy rain events appear in July and August, and 46 percent among them are affected directly by the Western Pacific Subtropical High (WPSH) when it interacts with westerly trough. Furthermore, the precipitation in the Beijing area during summer is related to the strength, the area and the location of the ridge of the WPSH. In order to further reveal the impacts of the WPSH on the moisture transfer and the circulation situation under which heavy rain occurs, based on dynamic and thermodynamic diagnosis, a case study is performed by employing a 6-hourly and $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data achieved at standard pressure levels for the period of 18-20 August 2001. Results show that during the heavy rain period in the lower troposphere, abundant water vapor over ocean is transferred towards continent by the easterlies along the south of the WPSH. The water vapor fluxes are then turned northward and converged with northerlies in the Beijing area. A strong energy front is formed between the westerly trough and the WPSH. The thick layer of moist available potential energy is found to the south of the front, which is then transformed to kinetic energy by the strong ascending motion associated with slantwise vorticity development. In the middle troposphere, the vertically differential vor-

ticity advection and the warm advection to the west of the WPSH destroy the quasi-geostrophic balance in the Beijing area and its neighborhood, the secondary circulation is therefore forced both dynamically and thermodynamically in association with baroclinic perturbations, and in the area the vertical ascent is intensified. Torrential rain then occurs along such a strong energy front with strong low-level cyclonic vorticity development and high-level divergence. Furthermore, along the northward transfer of warm and moist current over the western flank of the WP-SH, the stronger vertically differential advection of pseudo-equivalent potential temperature results in the development of convective instability, and is in favor of the intensification of rainfall. All these contribute to the occurrence of torrential rain in the Beijing area, and should be taken into consideration for predicting this kind of heavy rain events.

Key words subtropical high, Beijing, torrential rain, energy front, moist available potential energy, vertically differential, pseudo-equivalent potential temperature, advection

1 引言

夏季是北京地区降水集中的季节, 吴正华^[1]根据近百年资料对北京地区降水特征分析认为: 北京地区汛期降水量与汛期的相当暴雨日有着十分高的相关关系。近期, 作者对 1975~2004 年北京地区降水资料的分析得到类似的结论, 分析中指出: 北京地区有 72% 的大降水 (3 站及以上 ≥ 25 mm/d 的降水) 出现在 7~8 月份, 其中直接受副高影响的大降水占 46%, 它们主要产生在西风槽与西北太平洋副热带高压 (简称副高) 相互作用的天气形势下。另外, 北京地区夏季降水与副高的强度、面积、脊线位置等均成正相关, 与副高西伸脊点位置成反相关。北京地区夏季降水同样与东亚季风有密切的关系, 孙继松等^[2, 3]分析了华北暴雨与季风系统扰动的相互作用, 得到河套气旋、切变线引起的暴雨是与南海季风和副热带高压外侧东南季风的扰动有关。樊增全等^[4]计算了华北地区上空的水汽输送特征, 表明华北地区的水汽输送方向、季节变化、垂直结构和水汽源地等。近期, 孙继松^[5]还

指出北京地区局地强降水与边界层急流之间存在明显的正反馈现象。此外, 副高对产生大暴雨的作用在近几年研究中得到进一步深化, 赵兵科等^[6]强调副高西北侧西南气流增强了局地上升运动, 为江淮流域的暴雨形成创造了大尺度背景流场。

为了探讨副高对北京地区暴雨产生的影响以及产生暴雨天气的水汽来源, 本文从受副高边缘影响的典型区域性暴雨个例分析入手, 研究暴雨产生的环流形势、水汽来源和动力、热力条件, 以便取得这类暴雨的预报着眼点。

本文使用美国国家环境预报中心 (NOAA/NCAR) 2001 年 8 月 18~20 日逐日每 6 小时标准等压面的再分析资料 (分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$) 和北京地区 20 个站逐日每 6 小时降水量资料。

2 2001 年 8 月 18~19 日暴雨天气及环流形势分析

2001 年 8 月 18~19 日北京出现一次区域性暴雨过程。过程雨量如图 1 所示, 这次降水从 18 日 20 时 (北京时, 下同) 后开始, 直到 19 日 20 时结

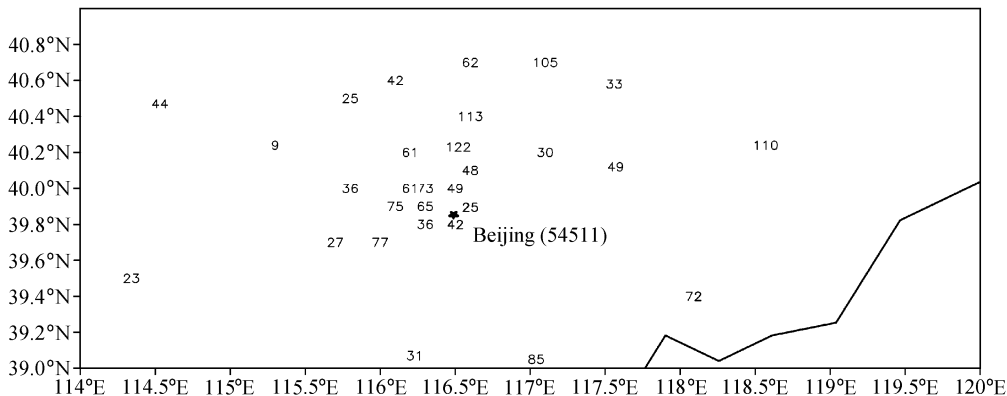


图 1 2001 年 8 月 18~19 日北京及周围地区过程降水量的分布 (单位: mm)

Fig. 1 The precipitation (mm) distribution in Beijing area from 18 to 19 Aug 2001

束,期间出现两次降水集中时段,分别是 18 日 20 时~19 日 01 时和 19 日 07~13 时。降水分布较广,雨带位于 500 hPa 高空槽前的四川、陕西、山西、河北、北京、天津及内蒙古东部一线,大降水集中在川东和北京两处。北京地区的东北部怀柔、密云和古北口日降水量超过 100 mm,位于其南面、年降水较大的平谷反而仅有不足 30 mm,再往西逐渐减少。可见,这是一场区域性带状分布的、强度不均匀的降水过程。

该过程是发生在蒙古高空冷涡(涡槽)东移与西北太平洋副热带高压北抬西进相互作用的过程

中。8 月 16 日 20 时高空冷涡在蒙古东部生成并向东北移动,至 18 日 08 时冷涡移至贝加尔湖东南侧。与此同时,0111 号台风 Pabuk 于 8 月 14 日在西北太平洋洋面上生成后,以中转向(在 125°E~140°E 之间转向)的移动路径向西北方向前进,并且,其强度逐渐加强。副高在台风北进的过程中不断北抬,18 日 08 时副高中心到达朝鲜半岛,随着台风的加强,副高及其副高南侧与台风之间的偏东气流也随之发展。北京的暴雨就是发生在高空冷涡(槽)和副高之间相汇合的有利天气形势下。

图 2 给出了主要暴雨发生时对流层低、中、高

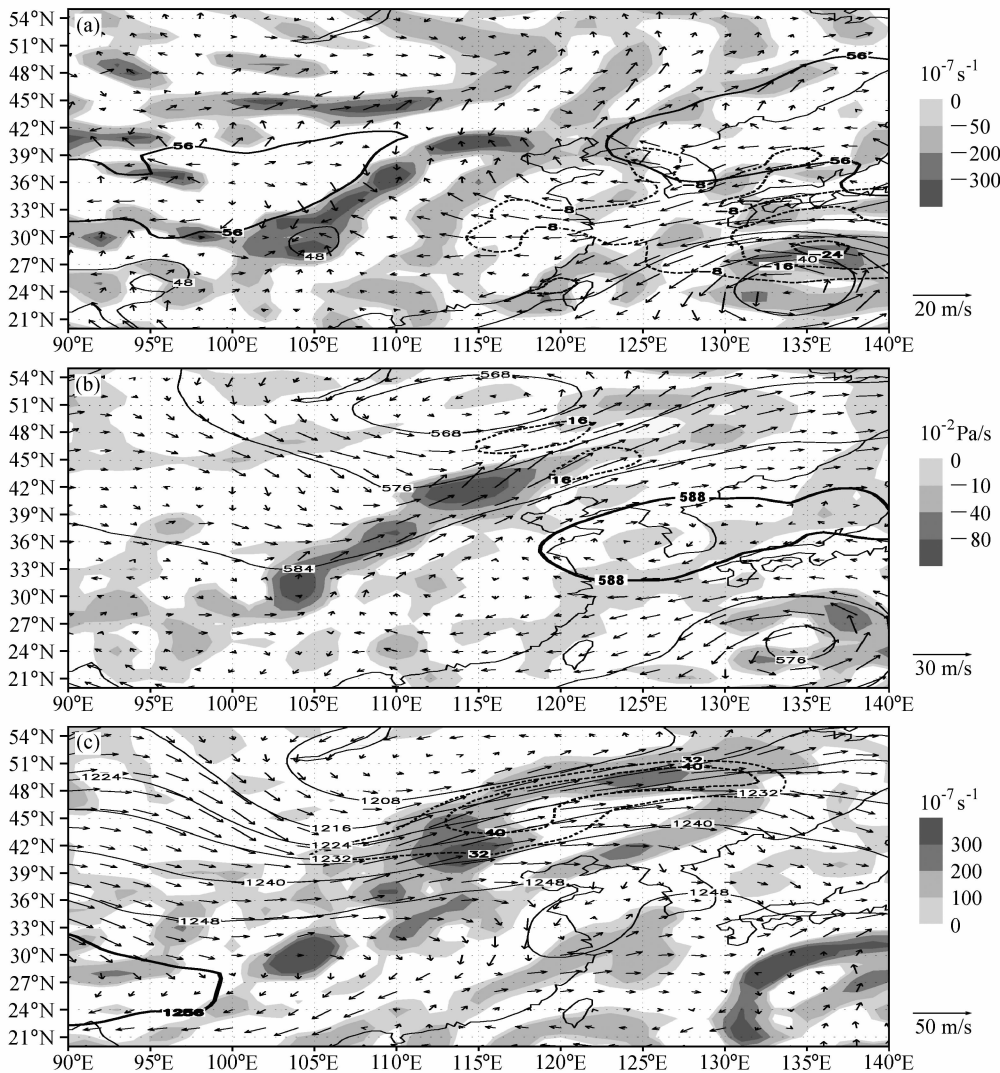


图 2 2001 年 8 月 19 日 02 时高度场(实线,单位: dagpm)、风场(矢量)和风速(u , 虚线): (a) 950 hPa, $u \leq -8$ m/s, 散度 $D \leq 0$ (阴影); (b) 500 hPa, $u \geq 16$ m/s, 上升运动 $\omega \leq 0$ (阴影); (c) 200 hPa, $u \geq 32$ m/s, $D \geq 0$ (阴影)

Fig. 2 The geopotential height (solid curve, units: dagpm), wind (vector) and zonal wind velocity (u , dashed curve) at 0200 LST 19 Aug 2001: (a) 950 hPa, $u \leq -8$ m/s, horizontal divergence $D \leq 0$ (shading); (b) 500 hPa, $u \geq 16$ m/s, vertical velocity $\omega \leq 0$ (shading); (c) 200 hPa, $u \geq 32$ m/s, $D \geq 0$ (shading)

层的高度场、风场形势,由图可见,在 950 hPa 有一近东西向的偏南风与偏北风的切变线,北京及邻近地区处于该切变的辐合区,500 hPa 上蒙古气旋以南低压槽前,以及高层(200 hPa)西风急流入口区右后侧偏西南风与偏西风之间强辐散的区域。这样的垂直动力条件对上升运动强烈发展、暴雨发生十分有利。

3 能量锋及倾斜垂直涡度发展

湿-比有效位能 (A_1) [7] 能把反映天气变化的信号放大,而把不反映天气变化的信号减弱,具有对非局地暴雨信号的选择放大作用。本节从湿-比有效位能定义出发,具体考查在这次降水过程中湿有效能量的反映及其变化。

设第 j 个有限区域面积为 σ_j , 则全球面积 $\Omega = \sum_j \sigma_j$, 全球湿有效能量为

$$(A)_\Omega = \sum_j (A)_j. \tag{1}$$

有限区域湿有效能量的近似式为

$$(A)_j = \frac{c_p}{g} \int_{\sigma_j} \int_0^{p_s} T_e \left[1 - \left(\frac{p_r}{p} \right)^{R/c_p} \right] dp d\sigma \tag{2}$$

设把大气分为 s_k 层, 则式 (1) 可写为

$$(A)_\Omega = \sum_j \sum_{k=1}^{s_k} \overline{(A_1)_k} \Delta p_k \sigma_j, \tag{3}$$

其中, $j=1, 2, \dots, m$ 为区域数, $k=1, 2, \dots, s$ 为层次数,

$$A_1 = \frac{c_p}{g} \left[\left(1 - \frac{p_r}{p} \right)^{R/c_p} \right] T_e, \tag{4}$$

相当温度:

$$T_e = T + \frac{L}{c_p} q, \tag{5}$$

位相当温度:

$$\theta_e^* = T_e \left(\frac{1000}{p} \right)^{R/c_p}, \tag{6}$$

式中, p_r 为大气在参考状态下的气压 (简称参考气压), p_r 的计算是在位相当温度 (θ_e^*) 守恒与质量守恒的制约下, 将大气微团按以下顺序进行两次调整可近似得到: (1) 第一次调整, 使本气柱中 θ_e^* 自下而上呈递增排列; (2) 第二次调整, 使 θ_e^* 、 θ 水分含量呈水平均一。表示大气在参考状态下湿有效能量达到最小值, 这时不可能再有位能向动能的转换; T_e 为考虑了大气在当时温湿条件下的相当温

度。 A_1 为湿-比有效位能, 表示单位截面、单位厚度气块对全球湿有效能量的贡献。 A_1 值可正可负, 为单位体积气块调整到参考状态后湿焔 ($c_p T_e/g$) 的减少量 (A_1 为正) 或增加量 (A_1 为负)。从上式可知, 湿-比有效能量可以表示大气在当时温湿状况下潜在的可以转换为动能的能量部分, 由于将不可能转换为动能的无效能量部分除去, 因而, 可以认为 A_1 可使有关的天气信号具有放大作用。在一定的动力扰动下 (如锋或切变), 能量将会被释放出来。

由图 3 可见, 位于我国东部有 NE-SW 向的 A_1 能量等值线密集带, 与文献[7] 能量锋类似, 甚至锋区表现得更为明显。锋区两侧的特征更加分明, 该密集带亦可称为能量锋。在锋区以西、以北为负湿-比有效位能区, 而其东南部分为正湿-比有效位能区, 处于正能量区 850 hPa 有一中心值为 $20 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 的能量舌, 沿着能量锋从我国西南向华北伸展, 19 日 02 时北京附近达 $12 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。说明该地区潜在的湿有效位能达到了较高的程度。

与此同时, 在 ($39^\circ\text{N} \sim 41^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E} \sim 117^\circ\text{E}$) 附近, 对流层低层有一近东西向的偏东南风和偏东北风之间的切变线 (见图 2a) 缓慢北抬。北京及其邻近地区面临着冷暖空气交绥、高能量区一触即发的势态。由 116°E θ_{se} 和相对涡度垂直剖面图 (图 4) 可看到, 由于能量锋附近的湿等熵面的倾斜, 加上

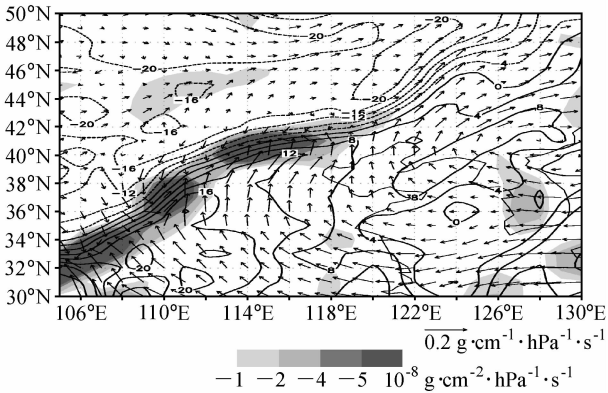


图 3 2001 年 8 月 19 日 02 时 850 hPa 湿-比有效能量 A_1 (等值线, 单位: $10^4 \text{ J} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)、水汽通量 (矢量) 和水汽通量散度 (阴影)
Fig. 3 The moist specific available potential energy A_1 (contour, units: $10^4 \text{ J} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), moisture flux (vector) and moisture flux divergence (shading) at 850 hPa at 0200 LST 19 Aug 2001

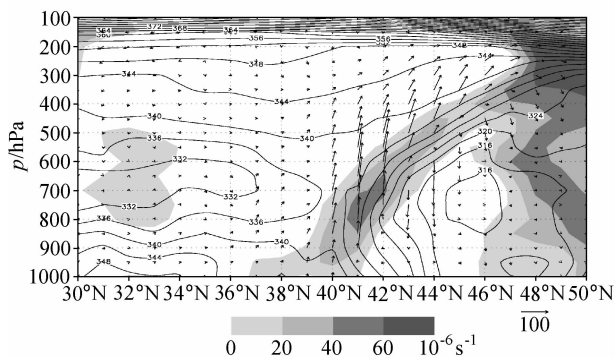


图 4 2001 年 8 月 19 日 02 时沿 116°E 假相当位温 (实线, 单位: K)、相对涡度 (阴影) 和经圈环流 [矢量 ($v, -\omega$), 单位: m/s , ω 单位: $10^{-2} Pa \cdot s^{-1}$] 的纬度-高度剖面图

Fig. 4 The latitude-height cross-sections of the pseudo-equivalent potential temperature (solid curve, units: K), relative vorticity (shading) and the meridional circulation [vector ($v, -\omega$), units of v : m/s , units of ω : $10^{-2} Pa \cdot s^{-1}$] along 116°E at 0200 LST 19 Aug 2001

风的垂直切变和湿斜压性增加, 湿位涡斜压项

$$M = -g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x}$$

在这里负值很大 (图略), 导致了这里的倾斜垂直涡度显著发展^[8, 9]。潜在的湿有效位能因而在 18 日 20 时~19 日 02 时得到释放, 此时北京地区发生全区域的降水, 有 9 个站 6 小时降水超过 20 mm 以上, 其中怀柔 72.8 mm、密云 69.8 mm。

4 水汽来源及水汽通量辐合

暴雨的产生除了需要必要的动力条件外, 水汽是不可缺少的因素。图 2a 显示了大气低层的流场情况, 图 3 可以更清楚地展示出对流层低层水汽通量及水汽通量散度在暴雨发生时的分布情况, 由以上两图不难发现, 副高南侧的东风气流是这次降水过程水汽的主要输送带, 偏东气流在副高西侧转为南风, 并与能量锋西北侧的偏北风相遇。北京及其邻近地区处在南北风切变最强、水汽通量散度辐合中心附近, 其辐合中心的量级达到 $-5 \times 10^{-8} g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ 以上。比南方梅雨期间和盛夏登陆台风影响产生的暴雨的量级要小^[10, 11], 可能与水汽通过的路径较长, 到达北京附近水汽已被损失了一部分的缘故。

由上可知, 这次暴雨过程是来自于黄海的暖湿气流, 由于副高偏北偏西, 可以将海上充沛的水汽

源源不断地向北京地区输送, 至少 18 个小时水汽辐合的强中心维持在北京及邻近地区。暴雨过程是以副高东退、水汽输送中断、能量锋区东南压、北京地区湿-比有效能量由正值转为负值而告以结束。

5 差动涡度平流及动力强迫作用

Hoskins 等^[12] 在准地转矢量的基础上导出以准地转 Q 矢量散度为唯一强迫项的 ω 方程, 指出垂直运动是由动力强迫项和热力强迫项两部分组成。

$$\left(\sigma \nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \omega = f_0 \frac{\partial}{\partial p} \left[\mathbf{V}_g \cdot \nabla \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 \phi + f \right) \right] + \nabla^2 \left[\mathbf{V}_g \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \phi}{\partial p} \right) \right], \quad (7)$$

式中 $\sigma = RT \ln \theta / \partial p$, f_0 、 $\mathbf{V}_g$ 和 ϕ 分别表示地转参数、地转风、和位势高度。右边第一项表示由于地转涡度平流的垂直差异、动力强迫作用而引起垂直运动 (本节给予具体讨论), 第二项为温度平流的拉普拉斯项 (将在下一节讨论)。

如果涡度平流随高度增加, 那么 (7) 式右边第一项

$$f_0 \frac{\partial}{\partial p} \left[\mathbf{V}_g \cdot \nabla \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 \phi + f \right) \right] > 0,$$

则 (6) 式左边因

$$\left(\sigma \nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \omega \propto -\omega$$

可产生上升运动, 这是由于为恢复平衡地转关系而激发的次级环流, 产生上升运动。

图 5 给出从 19 日 02~20 时 500 hPa 减去 850 hPa 的涡度平流 (即差动涡度平流), 18 日 20 时在北京的西南有 $+24 \times 10^{-10} s^{-2}$ 差动涡度平流中心, 19 日 02 时该中心向东北移到北京上空, 由图 5 容易看出, 此后北京及临近地区始终维持着正的差动涡度平流, 正如葛国庆等^[13] 分析该过程认为“用准地转理论能得到很好的解释”。由于差动涡度平流破坏了该处的准地转平衡, 动力强迫作用激发的次级环流导致垂直上升运动发展。

6 热力强迫作用及差动假相当位温平流

纵观暴雨发生的前后, 发现自 18 日 20 时起, 从对流层低层直到 300 hPa, 在能量锋东南侧均存在着较强的正温度平流 (图略), 这与正的高能舌沿着能量锋向东北方伸展的现象是一致的。由上节

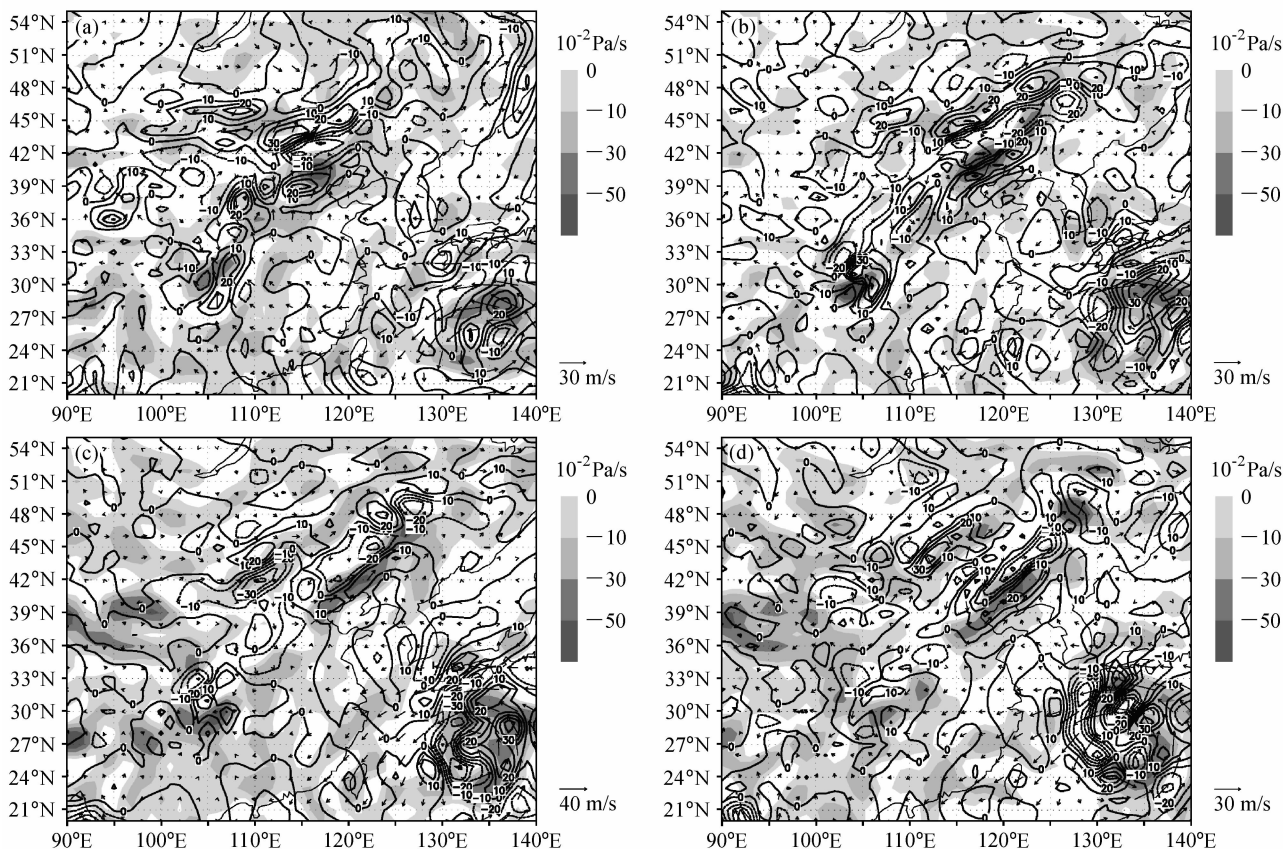


图5 2001年8月19日500 hPa减850 hPa的差动涡度平流(等值线, 单位: 10^{-10}s^{-2})及850 hPa风场(矢量)和上升运动 ω (阴影): (a) 02时; (b) 08时; (c) 14时; (d) 20时

Fig. 5 The differential advection of vorticity between 500 hPa and 850 hPa (contour, units: 10^{-10}s^{-2}), wind (vector) and vertical velocity ω (shading) at 850 hPa on 19 Aug 2001: (a) 0200 LST; (b) 0800 LST; (c) 1400 LST; (d) 2000 LST

所述, 垂直运动由动力强迫项和热力强迫项两部分组成, (7) 式右边第二项与温度平流有关,

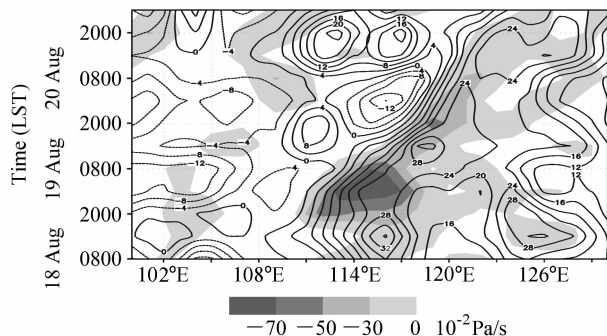
$$\nabla^2 \left[\mathbf{v}_g \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \phi}{\partial p} \right) \right] > 0$$

暖平流产生上升运动,

$$\nabla^2 \left[\mathbf{v}_g \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \phi}{\partial p} \right) \right] < 0$$

冷平流产生下沉运动。锋前暖平流的北上, 加强了北京及邻近地区的垂直上升运动。图6为 40°N 、750 hPa 18日~20日垂直速度和湿-比有效能量的时间剖面图, 可见, 19日14时以前在北京及邻近地区一直维持着上升运动, 并且它与垂直累积湿-比有效能量相对高值带相重合, 而且, 这一特点在对流层中下层普遍存在。可见, 北京地区的上升运动主要是大尺度系统动力强迫和热力强迫共同作用的结果。

另一方面, 上下层的假相当位温平流差异(这



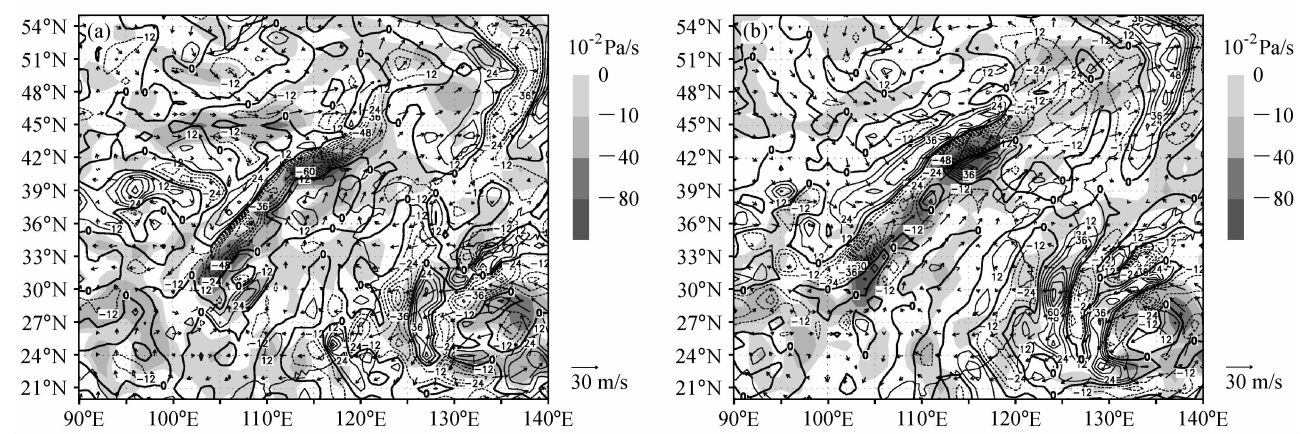


图 7 2001 年 8 月 19 日 02 时差动假相当位温平流（等值线，单位： 10^{-5}K/s ）及风场（矢量）和上升运动 ω （阴影）：（a）850 hPa 减 700 hPa 的差动及 700 hPa 上的风和上升运动；（b）700 hPa 减 500 hPa 的差动及 500 hPa 上的风和上升运动

Fig. 7 The differential advection of pseudo-equivalent potential temperature (contour, units: 10^{-5}K/s), wind (vector) and vertical velocity ω (shading) at 0200 LST 19 Aug 2001: (a) The differential advection between 850 hPa and 700 hPa, wind and vertical velocity at 700 hPa; (b) the differential advection between 700 hPa and 500 hPa, wind and vertical velocity at 500 hPa

处 700 hPa 和 500 hPa 之间发展出一大于 $32\times10^{-5}\text{K/s}$ 的差动假相当位温平流中心，在偏南气流引导下向东北偏东方向移动，19 日 02 时在北京及邻近地区达到 $48\times10^{-5}\text{K/s}$ （见图 7），19 日 14 时及以后随着上下层正的假相当位温平流趋于减弱，过程接近结束。自 18 日 02 时到 19 日 08 时连续几个时次中，正的差动平流中心始终位于上升运动中心附近，随着差动平流的发展，上升运动中心也在逐渐增强。正差动假相当位温平流意味者低层暖湿空气的平流大于高层，加剧了层结向对流性不稳定发展，进而增强了上升运动，暴雨因而得到了加强。

这次降水过程从开始到结束，尽管主要呈现区域性大降水特点，但是由于层结对流性不稳定发展，在接近副高西侧、降水云带的南边界出现多处对流云线（见文献[13]），使得降水分布不够均匀，特别是在 19 日 08~16 时，降水表现为对流性阵雨的特点。

7 结论

通过对西风槽（涡）与副高相互作用天气形势下的典型暴雨个例分析，表明副高对北京地区的暴雨有如下影响：

- （1）对流层低层副高南面的偏东气流将海上充沛的水汽输送到大陆，并折向北汇合在北京附近；
- （2）副高与西风槽之间形成较强的能量锋区，在湿位涡的斜压扰动作用下转化为动能，导致倾斜

垂直涡度发展，激发为强烈的上升运动；

（3）西风槽前正的差动涡度平流和副高西侧偏南气流引导的暖平流破坏了北京及邻近地区准地转平衡，动力强迫作用和热力强迫作用激发的次级环流，进一步加强了北京地区垂直运动的发展。

（4）副高西侧低层的暖湿气流北上，假相当位温平流强于高层，加剧了对流性不稳定层结的发展，对北京地区暴雨的增强也起了不可忽视的作用。

夏季，当副热带高压偏强、位置偏北时，对于副高南侧偏东气流的走向、是否转向并与偏北气流汇合在所关注的预报区域，这是大降水必备的物质条件。当温湿条件具备后，若没有动力因素，尽管北京附近的湿-比有效能量 18 日 08 时已经相当大（见图 6），仍然不会有强天气发生。另一方面，虽然盛夏冷空气势力不强，但是由于冷暖气团性质不同，在副热带系统与西风带系统的交界处，能量锋表现得十分清楚。当锋区的强度达到一定程度，会产生明显的湿斜压扰动，促使蕴藏的能量大量释放而产生强烈的天气。此外，差动涡度平流和差动假相当位温平流对于次级环流的发展、层结的不稳定也会起着重要的作用。以上是这类天气预报着重考虑的要点。

参考文献（References）

- [1] 吴正华，李海盛，储锁龙. 汛期相当暴雨日数与总降水量的定量关系. 气象, 1998, 24 (12): 13~17

- Wu Zhenghua, Li Haisheng, Chu Suolong. The quantitative relation between the equivalent torrential rain day and the total rainfall at the flood period. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1998, **24** (12): 13~17
- [2] 孙继松, 李晓艳, 丁德平. 华北地区的季节变化特征与季风. 大气科学, 1999, **23** (4): 487~496
Sun Jisong, Li Xiaoyan and Ding Deping. Relationship between the seasonal change characteristics in North China and the monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (4): 487~496
- [3] 孙继松. 暴雨落区预报实用方法. 北京: 气象出版社, 2000. 66~87
Sun Jisong. *The Research in Prediction Methods of Heavy Rain Area* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 66~87
- [4] 樊增全, 刘春蓁. 1980~1987 年华北地区上空水汽输送特征. 大气科学, 1992, **16** (5): 548~555
Fan Zengquan, Liu Chunzhen. Analysis on the processed of water vapor transfer over North China during 1980~1987. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1992, **16** (5): 548~555
- [5] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究. 大气科学, 2005, **29** (3): 445~452
Sun Jisong. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 195~204
- [6] 赵兵科, 姚秀萍, 吴国雄. 2003 年夏季淮河流域梅雨期西太平洋副高结构和活动特征及动力机制分析. 大气科学, 2005, **29** (5): 771~779
Zhao Bingke, Yao Xiuping, Wu Guoxiong. The structure and activity characteristics of the western Pacific subtropical anticyclone and its dynamical mechanism during the Meiyu period over the Huaihe River basin in 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (5): 771~779
- [7] 刘健文, 郭虎, 李耀东, 等. 天气分析预报物理量计算基础. 北京: 气象出版社, 2005. 102~113, 221~224
Liu Jianwen, Guo Hu, Li Yaodong, et al. *The Base of Diagnosis Calculation in Weather Analysis and Prediction*. Beijing: China Meteorological Press, 2005. 102~113, 221~224
- [8] 刘还珠, 张绍晴. 湿位涡与锋面强降水天气的三维结构. 应用气象学报, 1996, **7** (3): 275~284
Liu Huanzhu, Zhang Shaoqing. Moist potential vorticity and the three dimensional structure of a cold front with heavy rainfall. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1996, **7** (3): 275~284
- [9] Wu G X, Liu H Z. Vertical vorticity development owing to down-sliding at slantwise isentropic surface. *Dyn. Atmos. Oceans*, 1998, **27**: 715~743
- [10] 丁治英, 陈久康. 台风暴雨与环境水汽场的数值试验. 南京气象学院学报, 1995, **18** (1): 33~38
Ding Zhiying, Chen Jiukang. Numerical simulation of the typhoon rainstorm in relation to its environmental vapor regime. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1995, **18** (1): 33~38
- [11] 周玉淑, 高守亭, 邓国. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析. 大气科学, 2005, **29** (2): 195~204
Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 195~204
- [12] Hoskins B J, Draghici I, Davies H C. A new look at the ω equation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1978, **104**: 31~38
- [13] 葛国庆, 钱婷婷, 陶祖钰. 一次北京暴雨的环流成因分析. 气象, 2002, **28** (9): 77~82
Ge Guoqing, Qian Tingting, Tao Zuyu. Analysis of circulatory cause for a case of heavy rainfall in Beijing. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2002, **28** (9): 77~82