

葛国庆 钱婷婷 陶祖钰

(北京大学物理学院大气科学系暴雨监测和预测国家重点实验室,北京 100871)

提 要

对2001年8月19日发生在北京的暴雨通过诊断分析解释了其环流成因。结果表明,这是一次典型的由中纬度斜压系统引起的大尺度暴雨过程,它的发生机制可以用准地转运动理论得到很好的解释。

关键词: 暴雨 准地转 诊断分析 云图

引 言

2001年8月18~19日北京市普降大到暴雨,是两年来范围最广、雨量最大、持续时间最长的一场雨。24小时降水量(从18日20时到19日20时(北京时,下同)),在紫竹院、东直门、官园、海淀、公主坟等遥测站的记录都超过70mm。6小时降水量紫竹院、东直门遥测站的记录超过40mm,其他遥测站记录多为20mm左右。

本文利用GMS卫星云图,常规测站资料报文和北京大学物理学院大气科学系暴雨

监测和预测国家重点实验室研制的“客观诊断分析系统”,诊断了此次暴雨的环流成因。

1 雨量图和云图分析

分析6小时雨量可以看出,雨带发源于河套西南部,并逐渐扩大、东移。18日20时(图1a)发展成西南—东北走向的大尺度雨带。19日02时起(图1b),雨带影响北京,并逐渐分裂成南北两段,雨带的北段造成了北京暴雨。在此过程中,雨带的范围大,持续时间长,显示此次暴雨是大尺度天气系统造成的降雨过程。

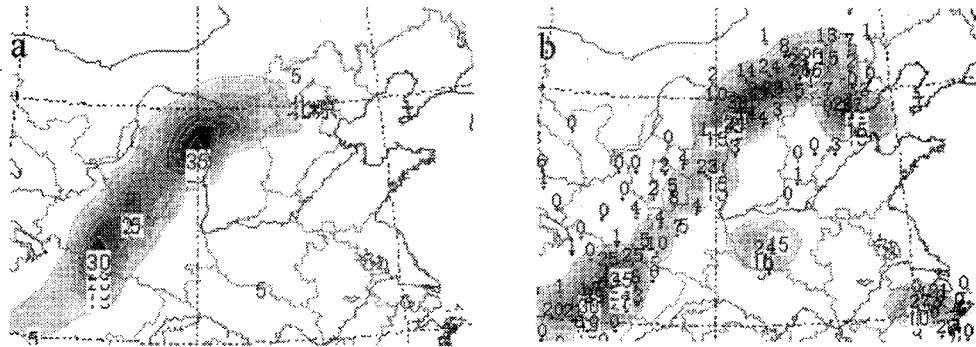


图1 18日20时6小时雨量(灰度越大表示雨量越大)(a)和19日02时6小时雨量(b)

研究指出^[1],中纬度斜压带中的大尺度扰动常在卫星图象中显示出特定的云型,其中一种典型云型是叶状云,其特征为:通常延伸10个经纬距以上,轮廓清晰,冷侧边缘光滑,暖侧可有一个清楚的边界或可与其它云

系融合。分析此次过程的红外云图(见图2)可以看出:18日20时河套地区已经形成大范围的叶状云系,云系西侧边缘光滑,反映斜压扰动有明显的次级环流(东侧上升、西侧下沉),正处于发展阶段;云系南侧许多对流云

线显示西南气流强劲、水汽充沛,北部辐散状卷云区显示高空有辐散气流;海上强台风北面有东西走向云线,显示海上台风外围存在

偏东风急流,黄海有对流。对云图局部放大(图略),可以看出云系纹理(灰度)均匀,其中无明显的对流边缘。

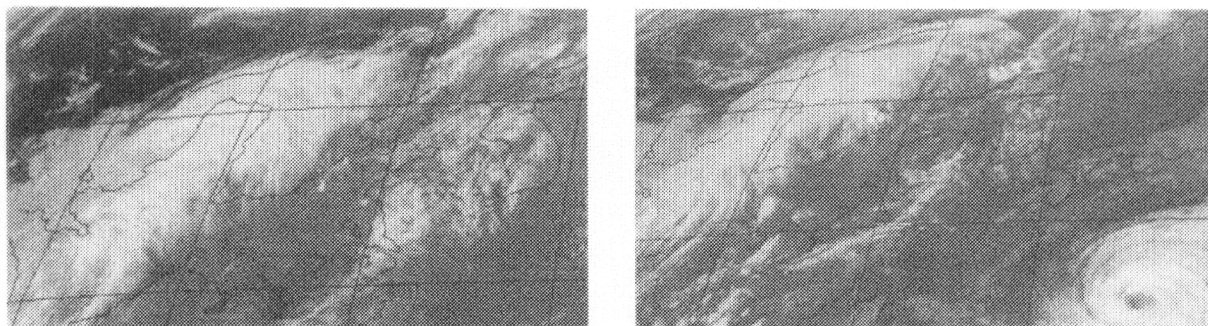


图2 18日20时27分红外云图(a)和19日02时25分红外云图(b)

综上所述,雨区和卫星云图分析呈现明显的大尺度特征,所以可以判断,此次北京暴雨是一次由中纬度西风带斜压扰动带来的大尺度降雨过程。

近年来,暴雨研究都集中于中尺度对流性暴雨,对大尺度斜压系统的暴雨研究很少。此次暴雨的成因可用准地转平衡破坏和适应理论得到很好的解释,从而了解大尺度暴雨过程的机理,是暴雨研究的一个有益补充。

2 准地转理论解释

《天气过程诊断分析原理和实践》^[2]一书中指出:平流过程(涡度平流及水平分布不均匀的温度平流)是使地转平衡破坏的原因。对流层中层的暖平流中心引起高层等压面升高,低层等压面降低,造成高层辐散,低层辐合,从而产生强迫上升运动。而对流层高层正涡度平流和低层负涡度平流所引起的辐合

和辐散则产生动力强迫上升运动。这种因平流导致的次级环流的作用“总是和水平流场的作用相反”^[3],使质量场和运动场恢复地转平衡。但当大气层结不稳定时,平流引起的次级环流并不能起到使地转平衡恢复的作用,因此将导致扰动的不稳定发展。

2.1 高低层环流系统

由18日20时的地面图上的河套冷高压(见图3a)和500hPa图上的高空槽(见图3b)表明,这次降水过程确实是一次大尺度斜压过程。地面冷高压前方有很强的来自西南的倒槽伸向北京,其弯曲和密集的等压线(在2.5个经距内气压差值为8hPa)表明倒槽北端存在很强的正地转涡度和辐合。动力气象理论^[4]指出,边界层顶的垂直运动(ω_B)与地转涡度成正比,公式表达为:

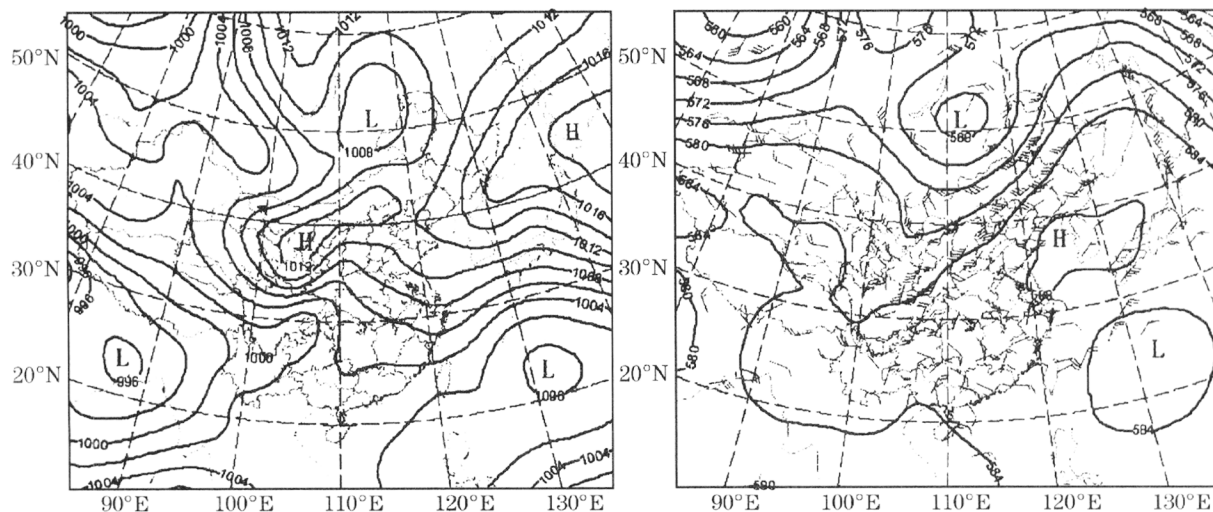


图3 18日20时地面气压场(a)和18日20时500hPa高度(b)

$$\omega_B = \frac{1}{2} h_E \zeta_g$$

式中, h_E 是 Ekman 层顶的标高, ζ_g 是地转风涡度。

根据这种 Ekman 抽吸作用, 倒槽北端, 在行星边界层顶必然存在显著的上升运动, 有利于发生降水。

2.2 中层暖平流和高、低层的涡度平流

根据大尺度准地转运动, 对流层中下层的暖平流是造成大尺度降水的重要热力因

素。18日20时500hPa图上(见图4a), 高空槽前强西南气流中具有很强的暖平流, 槽后西北气流中有很强的冷平流。中心值都达到 $12 \times 10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。暖平流区和图2中云图上叶状云区配合得很好, 表明它是一个伴有明显的次级环流的大尺度斜压扰动。19日08时暖平流继续维持并有所加强。正是这个斜压扰动的热力强迫作用给北京上空带来的低层辐合、高层辐散和大尺度上升运动, 造成了这次暴雨。

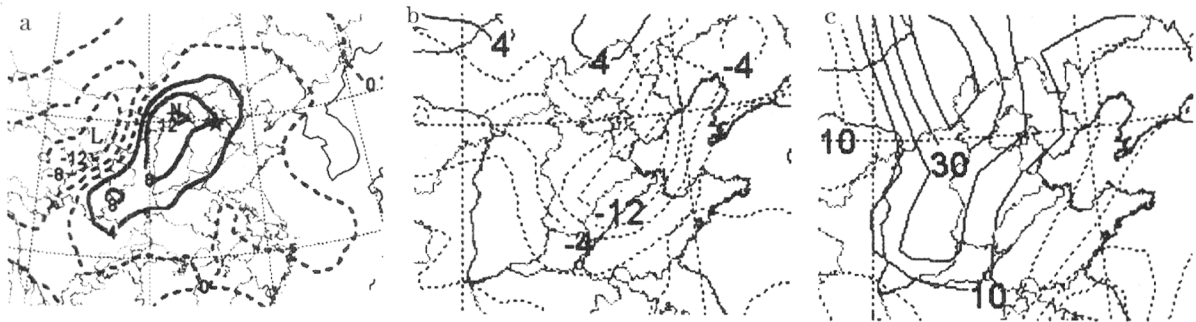


图4 温度平流和涡度平流

(a)18日20时500hPa温度平流(单位 $10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$) (b)19日08时850hPa涡度平流(单位 10^{-10}s^{-2})
(c)19日08时200hPa涡度平流(单位 10^{-10}s^{-2} , 虚线为负值, 实线为正值)

准地转平衡破坏的另一重要因素是高低层的涡度平流配置。诊断分析结果显示(见图4b和图4c), 19日08时低层为明显的负涡度平流, 北京附近数值为 $-4 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$; 高层为较强的正涡度平流, 北京附近的数值为 $20 \times 10^{-10} \sim 30 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$ 。这种典型的

高低层涡度平流垂直配置是造成大尺度暴雨的非常有利的动力强迫作用。

2.3 次级环流

诊断分析具体揭示出地转平衡破坏所产生的次级环流, 即高低空的散度分布和中层的垂直速度分布。图5a和图5b给出了计算

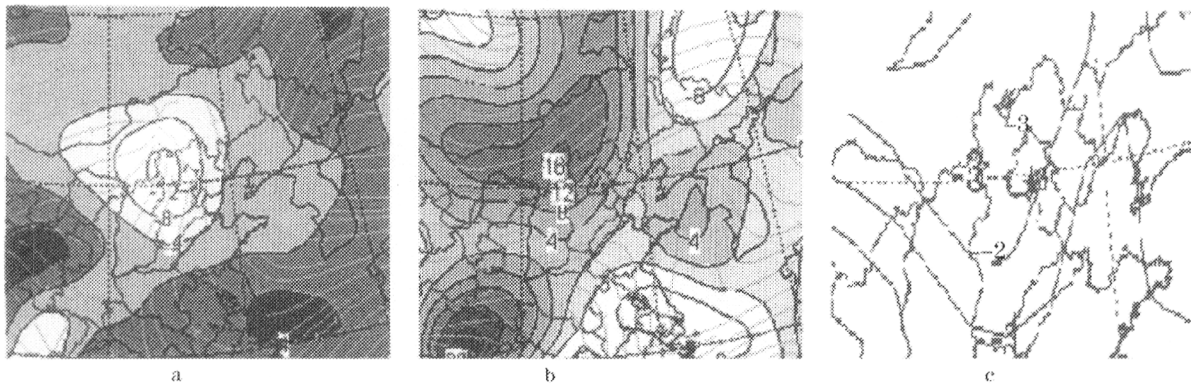


图5 次级环流

(a)19日08时850hPa散度场(白亮区域为负值中心, 单位 10^{-6}s^{-1})和流线(灰色)
(b)19日08时200hPa散度场(灰色越大值越大, 单位 10^{-6}s^{-1})和流线(灰色)
(c)19日08时500hPa垂直速度 ω (单位 $0.1 \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

出的高低层散度分布和流线图。其中, 对流层低层850hPa北京处于辐合中心, 散度值在

$-12 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ 左右, 流线更是直观表明北京低层有强烈辐合; 对流层高层200hPa北京则

处于辐散中心,散度值在 $8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 左右,槽前脊后辐散的流线和云图中辐散状的卷云区相配合。高空辐散与 200hPa 来自槽前的正涡度平流有关,低空辐合和 850hPa 来自东部高压的负涡度平流有关。分析表明这种高低层的散度场运动,正是上述的涡度平流强迫而成。

与高低空辐散和辐合相配合的是中层 500hPa 的大尺度上升运动。如图 5c 所示,北京处于这个大尺度上升运动区,数值达到 $0.2 \text{ Pa} \cdot \text{ s}^{-1}$ 。这就是大尺度斜压扰动的准地转过程中所伴随的次级环流。它一方面使斜压扰动自身得到维持和发展,同时,如果有足够的水汽供应,并且还有不稳定的大气层结环境,就会导致暴雨。

3 水汽供应和大气层结稳定度

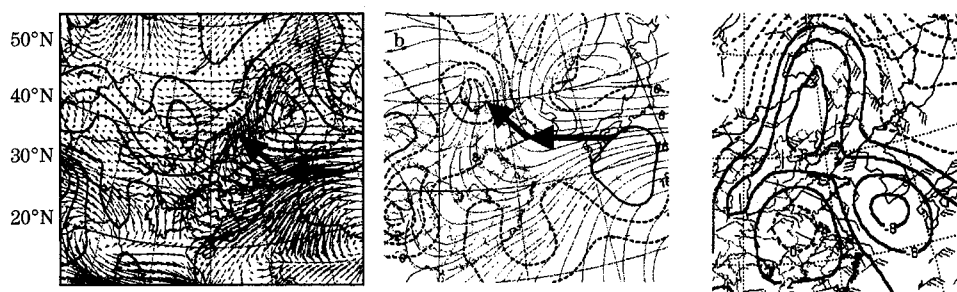


图6 (a)19日08时850hPa比湿(粗线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和水汽通矢量图(细线)
(b)19日08时850hPa水汽通散度(黑实线为正值,黑虚线为负值,单位: $10^{-6} \text{ s} = 10^{-7} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm}^2)$)和水汽通流线图(细线)
(c)18日20时位势稳定度分布,等值线值为 $\theta_{e500} - \theta_{e850}$, 单位:K

4 结束语

此次北京暴雨过程,从雨带的尺度,红外云图的特征,高低空系统的配置都可以判断是一次大尺度过程。基于准地转运动理论,通过对温度平流、涡度平流以及由此强迫而生的次级环流的诊断很好地解释了暴雨的环流成因。

分析结果表明,暴雨发生前北京处于位势不稳定层结中;暴雨过程中,中层暖平流,高层正涡度平流、低层负涡度平流维持有利的大尺度热力和动力强迫条件,使得低空辐合,高空辐散,形成强烈上升运动,加上从东面和长江中下游有充沛的水汽供应,从而造

成了此次北京暴雨。水汽场的诊断分析结果表明,8月18日20时到8月19日20时北京附近有充足的水汽供应。图6a和图6b给出了19日08时的比湿和水汽通量的分布图,分别从大的范围和北京的局部范围观察水汽通量走向和比湿分布。结果显示,华北地区处于湿舌中,存在水汽通量中心以及水汽辐合中心,表明从东部海上和长江中下游源源不断有水汽向北京输送。来自东面的水汽从流程图可初步判断与东海上的台风有关。

图6c则表明暴雨前,华北地区大气为对流性不稳定的层结,北京附近500hPa和850hPa的 θ_e 之差达到 -6K 以上。这种不稳定的层结加强了大尺度的上升运动,有利于降水进一步增强。

成了此次北京暴雨。

致谢:本文在研究过程中得到有关同志的大力帮助,其中郑永光提供并安装“客观诊断分析系统”,刘淑媛提供卫星云图,邵明轩提供了北京遥测站逐小时雨量资料,等等,在此一并致谢。

参考文献

- 1 M J 巴德等编,许健民等译校. 卫星与雷达图象在天气预报中的应用. 北京:科学出版社,1998.
- 2 陶祖钰,谢安编著. 天气过程诊断分析原理和实践. 北京:北京大学出版社,1989.
- 3 刘式适,刘式达编著. 大气动力学(上册). 北京:北京大学出版社,1991.
- 4 Holton, J R. An introduction to dynamic meteorology. Academic Press Inc. 1972.
- 5 华北暴雨编写组. 华北暴雨. 北京:气象出版社,1992.

Analysis of Circulation Cause for a Case of Heavy Rainfall in Beijing

Ge Guoqing Qian Tingting Tao Zuyu

(Laboratory for Severe Storm Research, College of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

The circulation cause of heavy rainfall of Beijing on 19 August, 2001 is given through diagnostic analysis. The results show that it is a typical large scale heavy rainfall which is related to the middle latitude baroclinic disturbance. The mechanism of the heavy rainfall could be revealed by the quasi-geostrophic theory. This study is a complement to the heavy rainfall research which was concentrated on mesoscale convective system nowadays.

Key Words: heavy rainfall quasi-geostrophy diagnostic analysis cloud picture