

文章编号: 1004- 4574(2010) 01- 0061- 09

华北暴雨云和降水的中 / 微尺度结构特征 (I)

——一次暴雨的天气背景研究

廖 菲^{1, 2, 3}, 胡娅敏⁴

(1 中国气象局 广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510080; 2 中国科学院 大气物理研究所, 北京 100029;
3 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 4 广东省气象局 气候与农业气象中心, 广东 广州 510080)

摘 要: 为研究华北暴雨形成时的中尺度与微尺度的结构特征, 选取发生于 2005 年 7 月 22- 24 日的一次华北暴雨过程为研究对象, 利用 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 再分析资料和 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的 FY2C 红外 TBB 资料, 对此次暴雨过程发生时的天气形势、水汽输送、大气稳定性、云场特征进行了分析。结果表明: 此次暴雨过程是在登陆台风和西风槽的共同影响下产生的, 高空槽后的西风急流入侵到华北北部, 低层副高西侧的东南急流位于华北东部, 使得华北地区上空形成了有利于触发对流的低层辐合和高层辐散的天气形势。低层印度季风与我国南海夏季风对水汽的北上有重要作用, 还有一部分水汽来自副高西侧的东南风急流输送; 高层水汽主要是由偏东气流经副高西侧向西, 然后转向北输送到华北; 华北地区的低层存在较强的水汽辐合, 高层存在相对较弱的水汽辐散区, 这为暴雨发生提供了必要的水汽条件。

关键词: 暴雨; 中尺度结构; 位涡; 水汽; 华北

中图分类号: P458.1+21.1

文献标识码: A

Meso scale / microscale structural characteristics of cloud and precipitation of rainstorms in North China (I): research into synoptic background of a rainstorm

LIAO Fei^{1, 2, 3}, HU Yamin⁴

(1 Institute of Tropical and Marine Meteorology, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510080, China; 2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4 Climatic and Agrometeorological Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China)

Abstract In order to research mesoscale and microscale structural characteristics of rainstorm in North China, a rainstorm case happening on 22- 24 July 2005 in North China is selected. Characteristics of weather situation, water vapor transport, atmospheric stability and clouds field were analyzed in detail by using $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP reanalysis data and TBB infrared data of FY2C satellite with $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ resolution. The research results show that this rainstorm process is caused by influence of interaction between landing typhoon and westerly trough. Westerly jet flow behind upper trough stretch to the north of North China, and low level south-east jet flow lie in the east of North China, which is favorable to forming of low-level convergence and high-level divergence. Indian monsoon and South China Sea summer monsoon play important role in low-level water vapor northward transport into North China, and south-east jet flow existing in the west of subtropical high also transport water vapor partly. In the high level, water vapor mostly comes from east wind flow and transport northward and westward along the west of subtrop-

收稿日期: 2008- 05- 20 修订日期: 2009- 03- 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40475006)

作者简介: 廖菲 (1979-), 男, 博士研究生, 主要从事云和降水物理研究. E-mail: liaofei_jxg@163.com

ical high. Strong water vapor convergence in the low level and weak divergence in the high level above North China create a good vapor condition for the occurrence of the rain storm.

Key words rain storm; mesoscale structure; potential vorticity; water vapor; North China

中国是一个多暴雨灾害的国家, 每年由暴雨造成的洪水面积达几十万 km², 在 1951-1982 年的 30a 中, 共发生 1601 次洪涝灾害, 平均每年 53 次。最严重的洪水受灾地区是江淮流域、黄河流域和华南地区, 其中极强的或持续性大暴雨造成的灾害最为严重^[1]。

华北是我国东部夏季三大降雨区之一。据统计, 华北地区 6-8 月的降雨量占年降雨量的 50% 以上, 且主要由几场暴雨造成, 一次暴雨的日降水量有时可达月降水量的 50% 以上。华北地区 80% ~ 90% 的暴雨出现在 6-8 月, 并且主要集中在 7 月下旬至 8 月上旬, 即所谓的“七下八上”^[2]。对 20 世纪 50-70 年代华北区的暴雨过程已经进行了大量的研究, 丁一汇等^[3]对 1958-1976 年华北地区的 33 次暴雨过程进行分析, 总结了影响华北夏季暴雨的 5 类天气形势。最近, 孙建华等^[4]对 1990-1999 年 6-8 月华北地区发生的 31 个大暴雨个例也进行了统计分析, 指出这些大暴雨主要受 5 类天气形势影响, 即: 低槽(低涡)远距离相互作用、低涡(登陆台风)与西风槽相互作用、登陆台风北上受高压阻挡停滞、低涡暴雨、暖切变暴雨。

应当指出, 针对华北暴雨的研究工作已经开展了很多, 但华北暴雨的发生往往受不同尺度天气系统的共同影响, 其发生发展具有很大的突发性和局地性, 除了受大尺度动力学过程影响外, 还受云系内部本身特有的云和降水物理过程及特殊地形影响, 要提高对华北暴雨的认识和预报水平, 还应当加强针对于动力学和云微物理学相结合方面的研究工作。作为此项研究工作的开始, 首先选取发生于 2005 年 7 月 22-24 日的一次华北暴雨过程为研究对象, 探讨形成此次华北暴雨的天气背景。在后续的工作中, 将利用中尺度 ARPS 模式对此次暴雨过程进行数值模拟及敏感性试验, 以期了解地形抬升、地面摩擦等外强迫动力过程对云微尺度过程的影响。

1 降水实况分析

2005 年 7 月 22 日 08 时(北京时, 下同)至 24 日 08 时, 我国华北大部份地区出现了大范围的强降水天气。22 日 08 时至 23 日 08 时, 雨带主要位于河南大部、山东的西部、山西东部、河北北京大部分地区, 雨带约占 400km × 1000km 的范围。降水另一个特点是大暴雨中心出现范围小, 导致了局部小范围产生洪涝, 大暴雨区中心位于河南、山东、河北 3 省交界处, 河南省东北部南乐县的 24h 降水量达 212.6mm。另外, 荥阳、清丰、濮阳的 24h 降水量也超过了 180mm, 分别为 210.8mm, 191.8mm, 182.5mm(图 1(a))。23 日 08 时至 24 日 08 时, 雨带明显向东偏移约 200km, 但雨区南北范围缩小, 降水主要集中在河北中南部和山东西部、北地区, 大暴雨中心在河北和山东各出现一个, 其中河北定州的 24h 雨量达 222.8mm, 山东省最北部的无棣县的 24h 雨量也高达 192.6mm(图 1(b))。到了 5 日 08 时, 雨带迅速退缩, 华北基本无明显降水。

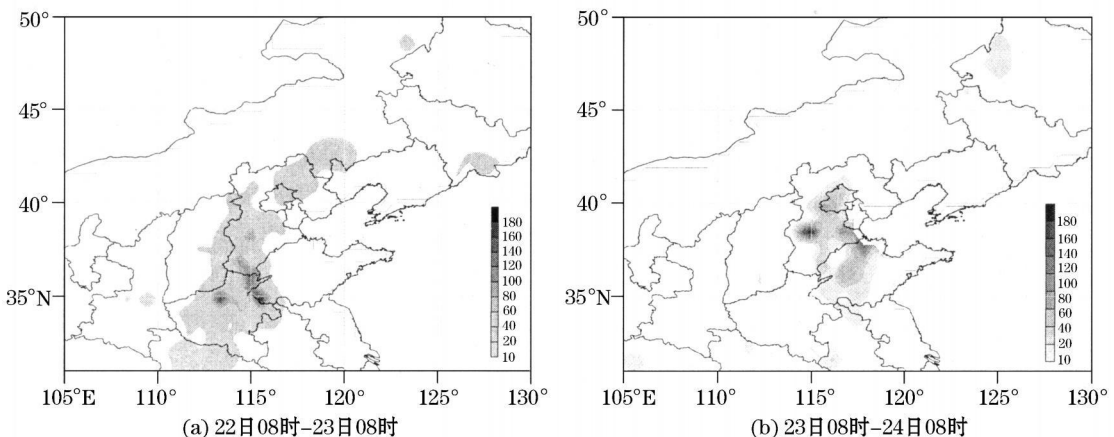


图 1 地面 24h 累积降水量实况分布 (单位: mm, a 23 日 0800BST, b 24 日 0800BST)

Fig 1 Real distribution of 24h accumulative precipitation on ground (units: mm)

2 大尺度环流形势

22日 08时, 贝加尔湖以西的新西伯利亚有一较强的低压中心, 并从低压中心东南方伸出一槽线, 此槽一直延伸到我国的河南西北部, 对应于槽后的高空 200hPa 处有一明显的高空急流, 高空西风急流一直延伸到内蒙古中部地区, 降水雨区主要位于高空急流南侧辐散区和 500hPa 槽前 (图 2(a)), 高层辐散加强了对流发展, 这有利于暴雨产生。在 22日 20时 (图略), 副高 (586线) 西伸至 100°E , 新西伯利亚槽线转横, 此时我国华北地区受南北两个槽线控制, 北面是一低压中心在贝加尔湖以东的一条短波槽, 该槽较 12h 前位置变化不大, 但强度加强, 槽前高空 200hPa 也有与 500hPa 一致的西南风急流; 南面受台风和副高两者交界处引起的倒槽所控制。23日 08时之后, 副高虽有减弱, 但 586线范围继续扩大, 使得华北雨带北移, 此时雨带主要受低压中心位于 (125°E , 60°N) 的东北—西南向槽线控制。23日 20时之前, 副高西侧 588线一直稳定在 120°E , 24日 02时, 副高东退减弱。

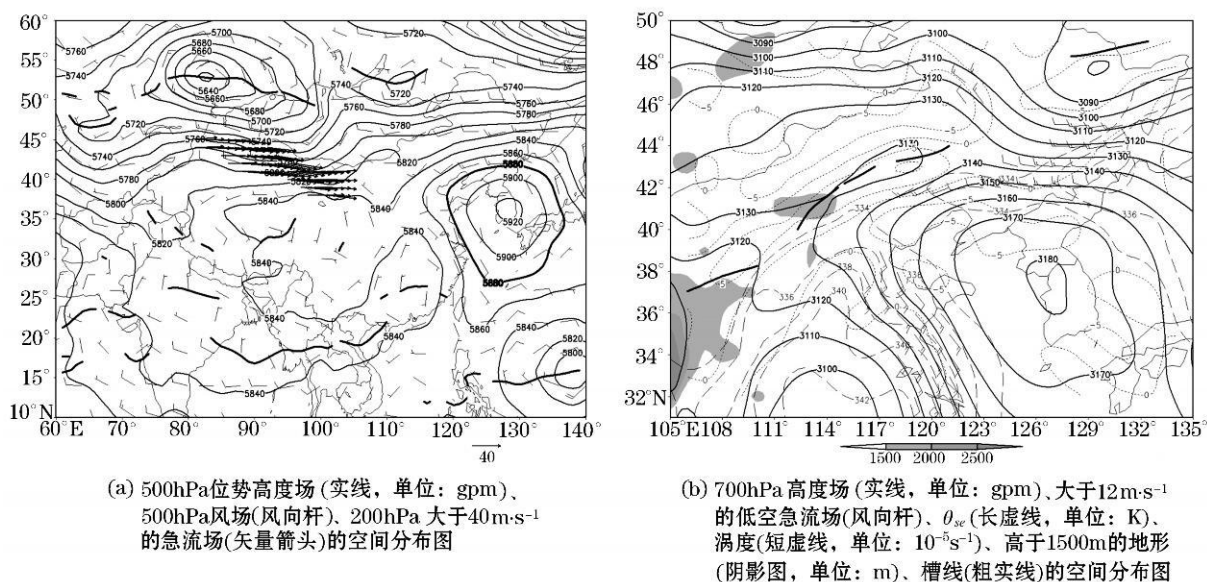


图 2 22日 08时天气形势图

Fig 2 Synoptic chart at 0800BST 22 July

700hPa 环流形势 (图 2b) 是: 22日 08时, 0505 号台风“海棠”减弱产生的低压中心位于湖南省北部, 东面是中心位于朝鲜半岛的副高, 在这两个天气系统交汇处的我国东部出现了宽度达 300km 的东南风低空急流, 急流最北端深入到北京地区, 低空急流左侧产生了大范围的辐合区 (正涡度区); 低压倒槽向北发展至太行山区, 有明显的风向和风速的辐合, 河北、河南交界处还出现了东南风、东北风的辐合线; 南部一暖舌伸向华北地区, 340K 等值线的北端在石家庄附近; 这些都促使了华北地区暴雨发生。之后, 随着副高东移和南部低压减弱, 华北雨区范围缩小。24日 08时, 西北方高压区向南推进, 低压中心入海, 强辐合区向东北方向移动, 此次华北降水过程结束。

3 水汽条件

由已有的分析我们知道, 此次降水主要是低层有水汽的辐合, 对应上空有深厚的对流区, 这些导致了强降水发生的可能^[5]。然而, 大暴雨的产生需要有大范围的水汽输送和水汽持续性辐合。因而, 分析暴雨发生时低层、高层、整层的水汽输送特征还是有必要的。为此, 利用丁一汇^[6]、周玉淑等^[7]的方法求解水汽通量流函数、势函数以及对应的水汽输送旋转 (非辐散) 分量和非旋转 (辐散) 分量, 并以此来讨论水汽收支问题。

水汽势函数对应的辐散水汽通量反映的是水汽通量穿过等压线输送的部分, 在全球水汽输送过程中是一个小量, 但是它对水汽输送的源和汇具有重要指示作用。从低层 (图 3(a))、高层 (图 3(b)) 和整层 (图

略)的水汽势函数分布来看(正值表示水汽辐散, 负值则为水汽辐合), 22日 08时开始, 在华北地区, 低层 850hPa高度上出现一明显的水汽极大辐合区, 而对应其上方的 500hPa高空则是相对较弱的水汽辐散区, 在这种有利于对流发展的条件下, 整层水汽的总体趋势以辐合为主, 辐合区极值中心在河南省。这种低层水汽辐合、高层水汽辐散的垂直分布特征一直稳定存在于整个降水过程期间, 这对降水的维持十分有利。

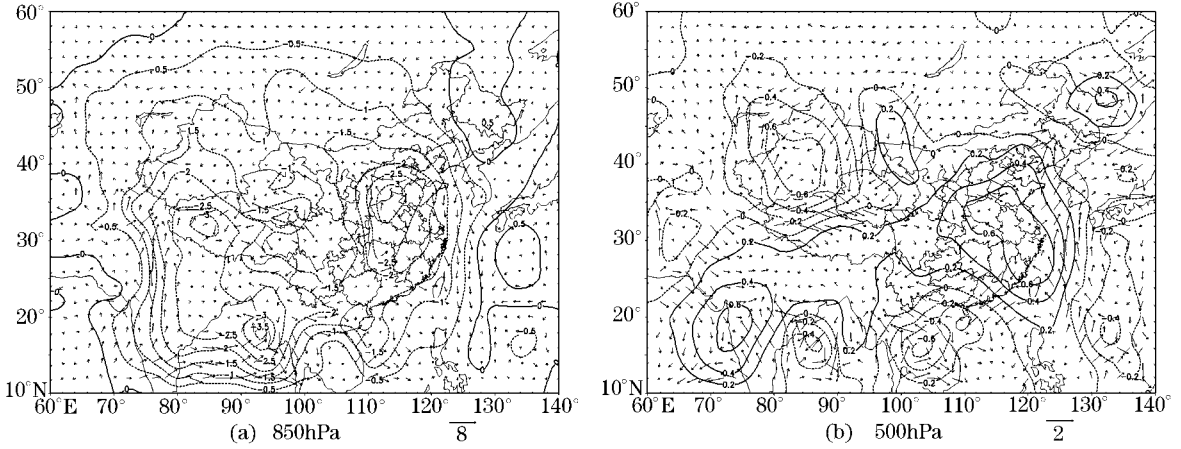


图 3 水汽势函数值(实线, 单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)及其辐散分量(矢量箭头)分布图

Fig 3 Distribution of water vapor potential function(solid line, units $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergent component

从水汽输送来看, 22日 08时起, 低层 850hPa上一股较强的暖湿气流从西南方输送印度洋, 然后转向东经孟加拉湾, 与我国南海夏季风汇合, 这对于水汽的北上有重要作用, 而山东东部的东南风急流使得水汽转向西北方输送, 汇集到华北地区的作用也不可忽略(图 4(a))。500hPa高度上北上的水汽沿湖南东部的低压中心外围先折向河南西北部, 然后受山东东部的高压影响, 向东北方向输送(图 4(b))。23日 08时之后, 水汽输送略有不同, 在 850hPa高度上, 我国华北地区的水汽仍然主要是由南海直接北上, 而 500hPa高度上由于朝鲜半岛上的高压加强西伸, 南海的暖湿气流向北输送到湖北省后就转为向西输送, 华北大部份地区的水汽主要是来自东海的偏东气流先输送到安徽, 然后沿高压西侧向北输送(图略)。

从水汽势函数的时间演变情况来看, 华北地区基本以低层水汽辐合、高层水汽辐散为主要特征, 整层大气表现为水汽净辐合。然而, 地面降水中心与水汽势函数中心并不完全一致, 这就说明在大尺度水汽条件较好的情况下, 局地较小范围内强降水的发生还与其它条件有关, 为此, 我们进一步分析此次华北暴雨的动力稳定性。

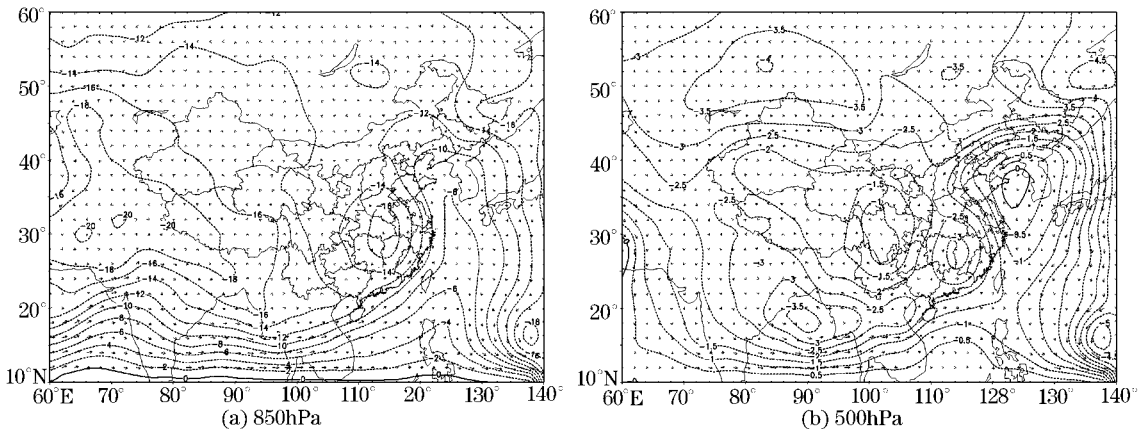


图 4 22日 08时水汽流函数值(实线, 单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)及其辐散分量(矢量箭头)分布图

Fig 4 Distribution of water vapor stream function(solid line, units $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergent component at 0800BST 22 July

4 位涡分析

位涡作为一个同时体现涡度与水汽的物理量, 被广泛的用来研究有关于干侵入的问题, 因为干侵入对于此天气尺度不稳定^[8]、中气旋的发生^[9]都有促进作用。因而, 本文也利用位涡分析方法, 探讨此次华北暴雨过程中引起局地强对流不稳定的可能机制。干位涡的计算公式为^[10]:

$$PV = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right).$$

22日 08 时起(图 5(a)), 42°N 以北的大气整层几乎都是干区, 高层的干区呈漏斗状伸向 600hPa 与南面的高湿区形成对峙, 并在 42°N 上空形成等湿度线密集带。在 30~40°N 以下都是 $\partial \theta / \partial p > 0$ 的对流不稳定

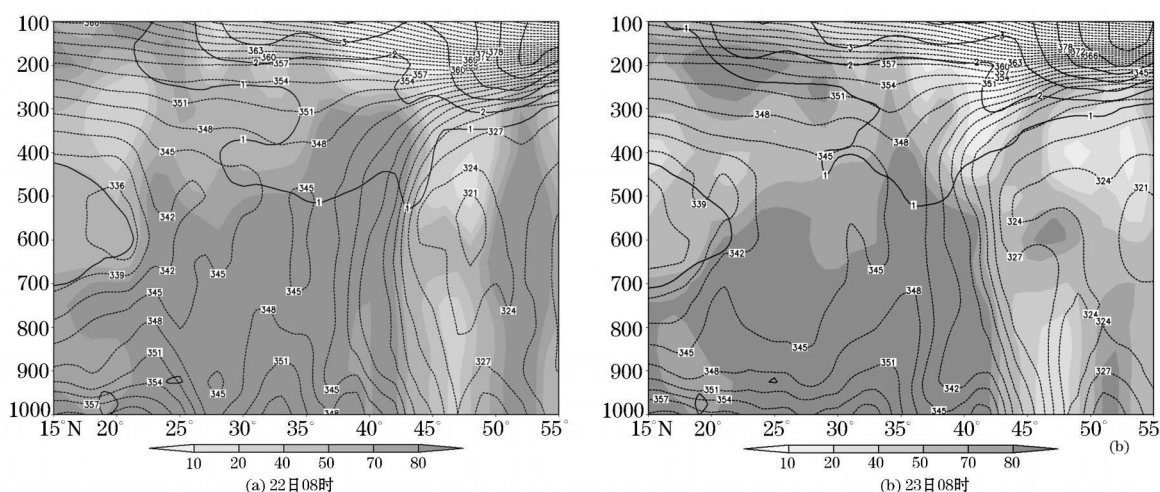


图 5 位涡(实线, 单位: $1PVU = 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1} \cdot K^{-1} \cdot Kg^{-1}$)、假相当位温(虚线, 单位: K)、相对湿度(阴影图, 单位: %) 沿 115°E 的垂直剖面图

Fig 5 Vertical section of potential vorticity(solid line, units: $1PVU = 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1} \cdot K^{-1} \cdot Kg^{-1}$), potential pseudo-equivalent temperature(dash line, units: K) and relative humidity(shaded, units: %) along 115°E.

层结, 而 800~400hPa 是中性层结, 并且 42°N 以南还存在等假相当位温密集带。55°N 的高层 200hPa 以上有一个干位涡高值区, 1PVU 的等值线沿着等 θ_{sc} 密集带向下向南传递到 500hPa。23日 08 时(图 5(b)), 高层干区向南移动, 进入 42°N 以南湿区的高层, 使得低层的湿区厚度和南北宽度都减小。高层干位涡仍然只入侵到 500hPa 但入侵的南北宽度也有所减小。另外, 低层的对流不稳定性也减弱, 并随着时间推移, 低层高湿区和对流不稳定厚度均减小, 等 θ_{sc} 密集带由原来的向北倾斜转为向南倾斜, 阻碍了干位涡的继续向下传播。

将干位涡分解为 $-g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}$ 与 $g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)$ 两项, 由于后者带有风速随高度的变化相因而称为斜压项, 相应的前者称为正压项^[11]。从图 6 中可以知道, 正压部分相对于斜压部分是大项, 因而位涡的分布主要取决于正压部分。在此次华北暴雨降水过程中, 华北地区处于弱正压区, 24h 降水达暴雨强度的地方主要是强斜压所在的位置, 斜压的大小与正压的大小相近, 而且这种位涡的分布形势在整个降水过程中变化不大, 这些说明暴雨过程产生时, 干侵入会引起正压的减弱, 同时加强斜压不稳定。

为了考察水汽在不稳定产生过程中的作用, 我们进一步来研究湿位涡与降水的对应关系, 其计算公式与干位涡类似, 只是将位温用假相当位温来代替。根据王建中等^[10]的方法, 这里也给出牵连湿位涡 ($MPV_{wm} = -g f \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p}$) 和相对湿位涡 ($MPV_{re} = -g \zeta \frac{\partial \theta}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial y} \right)$) 的分布(图 7)。根据牵连湿位涡的定义, 整

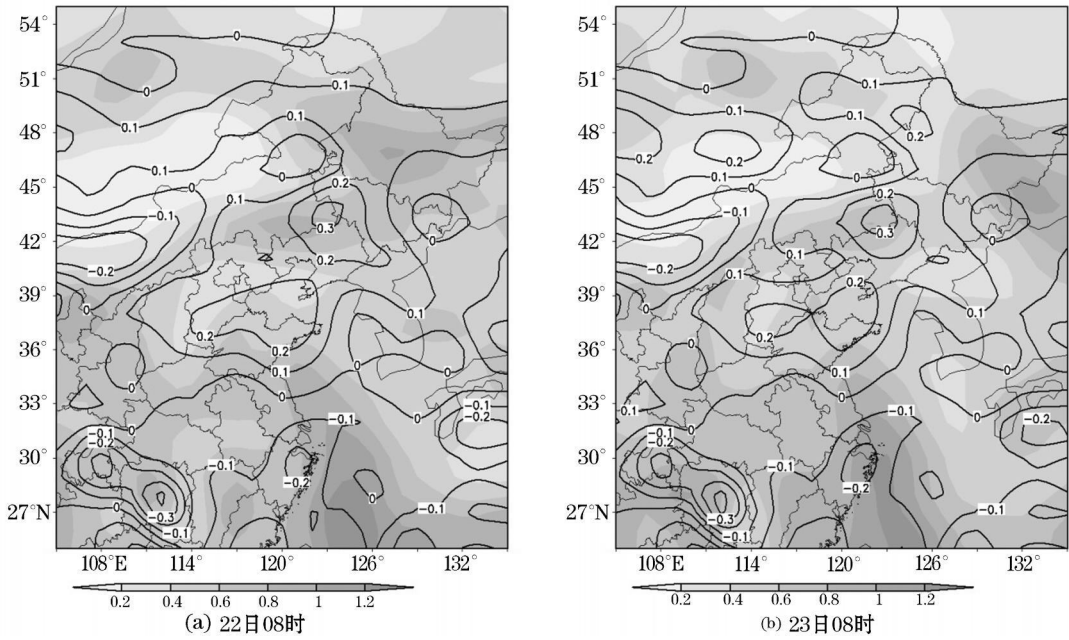


图 6 700hPa干位涡正压分量(阴影图)和斜压分量(实线)的空间分布图

Fig 6 Distribution of barotropic component(shaded) and baroclinic component(solid line) of potential vorticity at 700hPa level

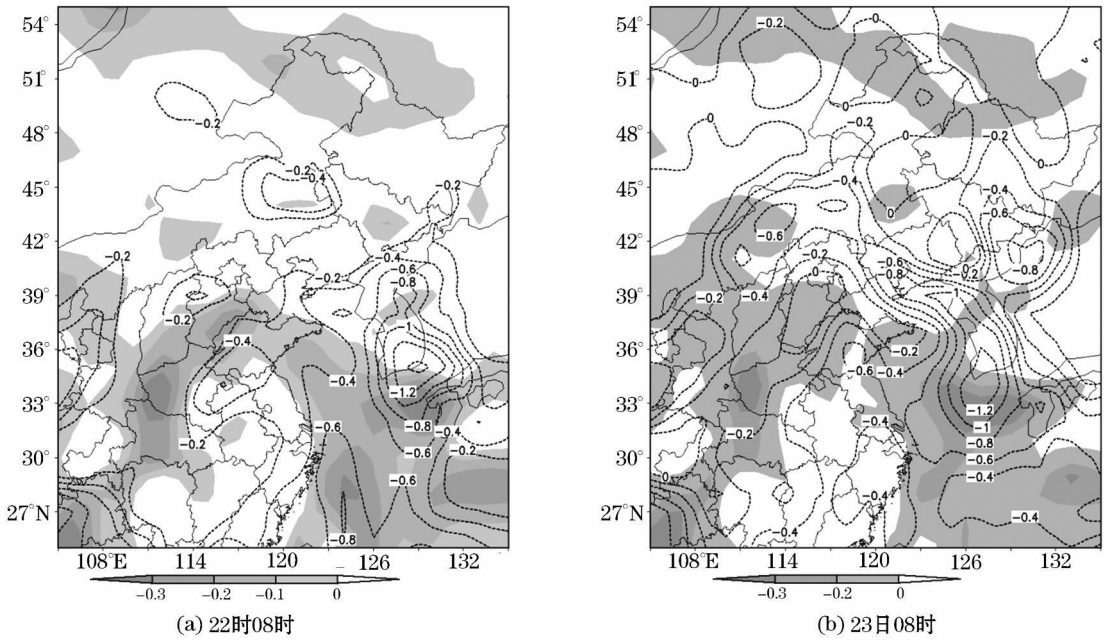


图 7 850hPa相对湿位涡(阴影图)和牵连湿位涡(虚线)分布图

Fig 7 Distribution of relative MPV(shaded) and implicative MPV(dash line) at 850hPa level

个降水期间,我国华北部份地区开始出现 MPV_{an} 负值区,对于北半球,地转参数 f 是正数,这说明我国华北上空 850hPa 处于 $\partial\theta_{se}/\partial p > 0$ 的对流不稳定区。此时,对应上空的相对湿位涡在 700hPa 还是负值,负值区包含了华北大部份地区。一般情况下,正压项要大于斜压项,因而在 $MPV_{an} < Q MPV_{re} < 0$ 时,就要求涡度 $\zeta > Q$ 。在这种状态下,湿位涡的下传至低层使得低层出现了正涡度的产生,并引起了低层对流不稳定,这十分有利于局地气旋式涡旋的加强。并且,此时华北大部的大尺度基本垂直运动场是上升运动,这就有利于低层不稳定能量的释放,导致局地强对流的发生。

5 卫星云图中尺度特征

TBB 资料以其高时空分辨率能够很好地反映强天气系统的发生、发展和消亡, 尤其能定量指示对流云的发展高度, 亮温愈低对暴雨的产生愈有很好的指示作用, 强对流的面积和层次的变化对暴雨也有很好的指示作用^[12]。

图 8 给出了 FY2C 卫星 $0.05'' \times 0.05''$ 高分辨率的红外 TBB 分布。显然, 此次降水过程是由华北上空的东北—西南带状云系所造成, 云系中存在 $TBB < -50^{\circ}\text{C}$ 的中尺度云团。22 日 08 时起, 河南北部有一中尺度云团 A 生成, 并在局地维持; 22 日 14 时, 云团 A 面积减弱到最小, 但云顶亮温仍小于 -50°C ; 22 日 17 时, 云团 A 在局地再次迅速发展, 并缓慢向东北方向移动。22 日 23 时, 在云团 A 向东北方向移动发展时, 云团 B 在河南、安徽交界地生成; 23 日 02 时, 在云团 B 不断发展强大时, 其北部的云团 A 逐渐开始消亡, 到了 23 日 05 时, 云团 B 将消散中的云团 A 合并; 在 23 日 14 时之前, 云团 B 基本稳定在河南、山东两省交界处经历了从旺盛到减弱的阶段; 23 日 17 时, 云团 B 在江苏西北部再次获得发展, 其生命期持续到 23 日 23 时。24 日 02 时, 在济南上空又发展出一个强对流云团 C, 该云团东移发展十分迅速, 08 时已基本覆盖山东中东部地区。

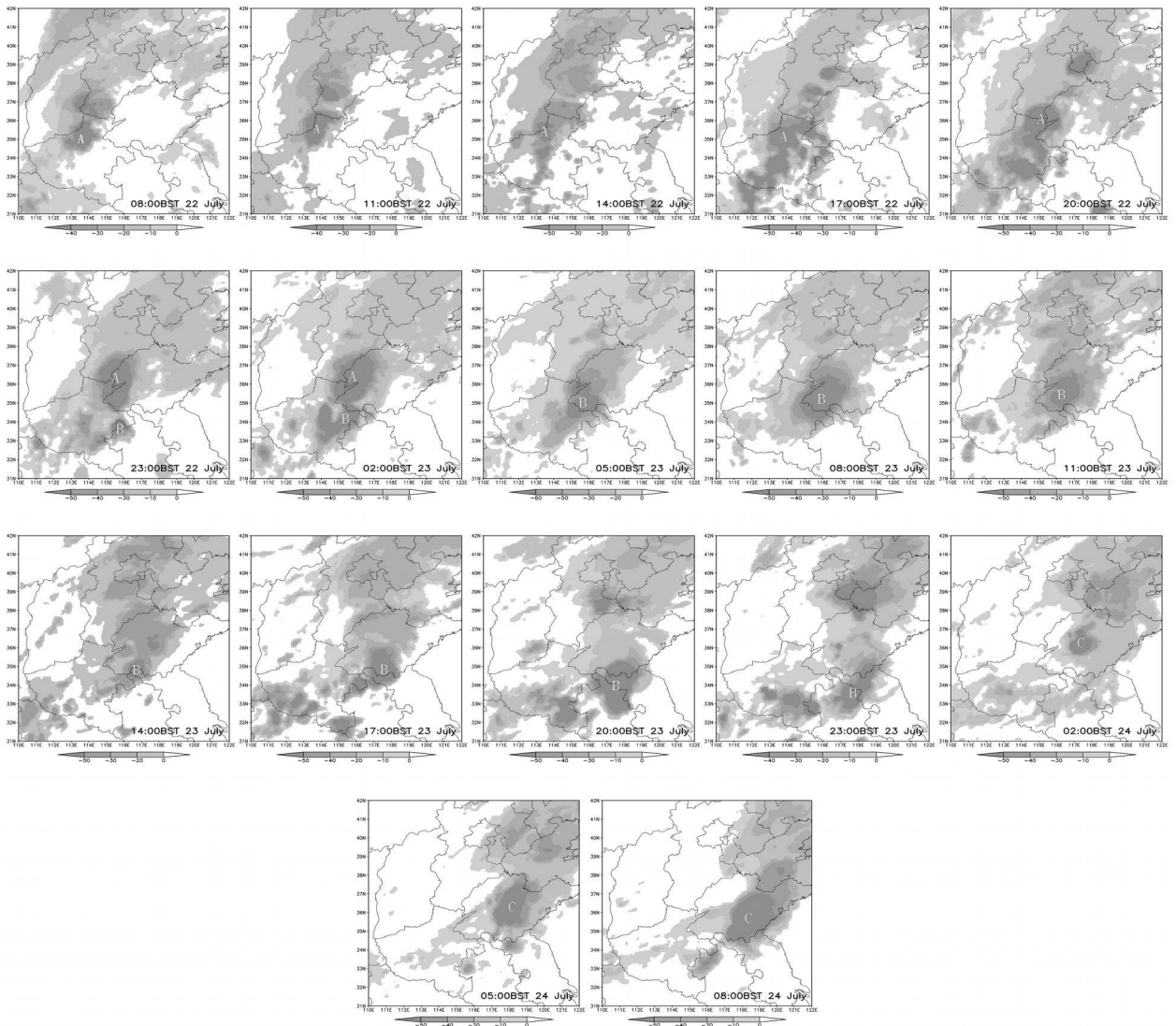


图 8 3h 一次的 TBB 的分布图 (阴影图, 单位: K)

Fig. 8 Distribution chart of TBB once 3h (shaded, units K)

此次华北暴雨过程中主要出现了 3 个中尺度对流云团, 3 个中尺度云团都发展比较旺盛, 云顶亮温都低于 -50°C (剖面图分析显示, 某些部位的亮温低至 -63°C), 云系厚度、水平范围都很大, 且云团生命史长 (云团 A 达 18h 云团 B 达 21h)、移动缓慢, 云团 A、B 还有合并现象, 因而造成了局地 (尤其是河南东北部) 强降水。另外, 云团中 $-40\sim -50^{\circ}\text{C}$ 之间的水平梯度很大, 说明中尺度云团是典型的中尺度对流系统 (MCS) 所造成, 并且是在深对流条件下发展起来的。

根据水汽守恒定律, 假设水汽辐合量等于降水量, 那么单位面积上的降水量应该等于风场向单位面积上气柱内的水汽辐合量。因而, $R = \int_{p_s}^{p_t} (-\frac{1}{g}qV) dp$, 若不考虑比湿的水平分布不均匀性, 那么 $R = \frac{1}{g}q\omega_{500}$, q 是整层大气的平均比湿^[13]。其中, R 取 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, q 取 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, g 取 $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。对于 22 日 20 时, 最大 6h 降水发生在 (115.73°E , 38.23°N), 6h 降水量为 132mm, 根据 NCEP 的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料, 计算得到格点 (116°E , 38°N) 上空的整层大气平均比湿为 $6.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 因而估算得到 $\omega_{500} = -97.5 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 相当于 $1.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这只是利用 6h 降水量估算出的平均垂直速度, 事实上, 强降水往往是短时间内发生的, 因而最大瞬时雨强应该远大于此时利用 6h 雨量计算得到的平均雨强, 所以, 瞬时平均速度也应该远大于 $1.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 由此可知, 造成大暴雨时云内垂直气流至少是在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的量级, 这也是对流系统的典型量级。可见, 此次 $\text{TBB} < -50^{\circ}\text{C}$ 的云团不仅具备 MCS 云图特征, 而且是强对流云团所组成, 因而带来了局地强降水。

从上面可以看出, 此次华北暴雨主要是带状云系中产生的若干个中尺度对流单体所造成, 暴雨区的位置与 $\text{TBB} < -50^{\circ}\text{C}$ 的中尺度云团位置一致。值得指出的是, 24 日 08 时, 河北中部定州的 24h 雨量也达到大暴雨, 且强降水区范围很小, 但该处 TBB 并没有出现 -50°C , 而是在 $-10\sim -20^{\circ}\text{C}$ 之间, 且没有 TBB 强中心, 说明此处大暴雨的出现更主要的是受局地其它条件 (如地形) 的影响。

6 结论

通过以上的分析, 形成此次华北暴雨的天气背景可归纳如下:

(1) 天气形势: 此次降水过程是受登陆台风和高空槽线的共同相互影响, 使得华北地区处于高空急流南侧和低压急流左侧, 容易形成低层辐合、高层辐散的有利于对流发展的天气形势。

(2) 水汽输送: 华北地区低层 850hPa 为水汽极大辐合区, 其上方 500hPa 高空则是相对较弱的水汽辐散区, 但整层水汽的总体趋势还是辐合为主, 极大辐合区位于河南省。低层印度季风与我国南海夏季风对于水汽的北上有重要作用, 而山东东部的东南风急流使得水汽转向西北方输送, 这对低层水汽汇集到华北地区的作用也不可忽略。500hPa 高度上由于朝鲜半岛上的高压西伸加强, 南海的暖湿气流向北输送到湖北省后就转为向西输送, 华北地区大部份水汽主要是来自偏东气流。

(3) 位涡分析: 华北地区 800hPa 以下都是 $\partial\theta/\partial p > 0$ 的对流不稳定层结, 而 800~400hPa 是中性层结, 华北北部高层的干侵入容易使得低层不稳定能量释放。24h 降水达暴雨强度的地方主要是强斜压所在的位置, 斜压的大小与正压的大小相近, 说明暴雨过程产生时, 干侵入会引起正压的减弱, 同时加强斜压不稳定。湿位涡的下传至低层使得低层出现了正涡度的产生, 并引起了低层对流不稳定, 这十分有利于局地气旋式涡旋的加强。

(4) TBB 分析: 造成此次华北暴雨的中尺度对流云团具有发展迅速、生命史长、移动缓慢的特点。对流云团的云顶亮温低于 -50°C , 加上 $-40\sim -50^{\circ}\text{C}$ 之间的水平梯度很大, 说明中尺度云团是典型的中尺度对流系统 (MCS) 所造成, 利用 6h 雨量可以估算出 500hPa 平均垂直上升速度至少是在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的量级, 这也是对流系统的典型量级。可见, 此次 $\text{TBB} < -50^{\circ}\text{C}$ 的云团不仅具备 MCS 云图特征, 而且是强对流云团所组成, 因而带来了局地强降水。

参考文献:

- [1] 周秀骥, 吴国雄, 郑国光, 等. 中国气象事业发展战略研究重大科学技术问题卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [2] 陶诗言. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [3] 丁一汇, 李吉顺, 孙淑清, 等. 影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析 [C] / 中国科学院大气物理研究所集刊 (第 9 号) 暴雨及强对流天气的研究. 北京: 科学出版社, 1980.

- [4] 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 492- 506.
- [5] 侯瑞钦, 景华, 张迎新, 等. 05. 7. 23 河北暴雨中尺度分析 [J]. 气象, 2006, 32(7): 88- 94
- [6] 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [7] 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 [J]. 大气科学, 2005, 29(2): 195- 204
- [8] 戴廷仁, 寿绍文, 陈艳秋, 等. 辽宁地区一次暴雨过程成因的位涡诊断分析 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(3): 31- 36.
- [9] 于玉斌, 姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展 [J]. 气象学报, 2003, 61(6): 769- 778
- [10] 王建中, 马淑芬, 丁一汇. 位涡在暴雨成因分析中的应用 [J]. 应用气象学报, 1996, 7(1): 19- 27
- [11] 范可, 琚建华, 寿绍文. 位涡守恒原理在中尺度低涡降水中的应用研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2001, 23(5): 374- 378.
- [12] 傅昺珊, 岳艳霞, 李国翠. TBB 资料的处理及应用 [J]. 气象, 2006, 32(2): 40- 45
- [13] 陶祖钰, 葛国庆, 郑永光, 等. 2004 年 7 月北京和上海两次重大气象事件的异同及其科学问题 [J]. 气象学报, 2004, 62(6): 882- 887