

河北 2007 年 7 月 18 日局地暴雨成因分析

杨晓亮¹ 李江波¹ 杨 敏²

(1. 河北省气象台, 石家庄 050021; 2. 河北省防雷中心)

提 要: 利用常规观测资料、逐小时自动站资料、 T_{BB} 资料和 NCEP 再分析格点资料, 对 2007 年 7 月 18 日河北省东北部和南部局地暴雨过程进行了诊断分析。结果表明: 在相同的影响系统作用下, 河北省不同区域暴雨的形成机制却不同, 高、低空急流及其耦合条件下急流和暴雨相互作用是上午东北部暴雨的成因, 低空急流直接输送水汽, 在 FY-2C 云图上表现为云顶 $T_{BB} < -70^{\circ}\text{C}$ 近乎圆形的中- α 尺度强对流云; 而下午河北南部强降水是在高温高能、层结不稳定的有利条件下, 地面冷锋及锋前低压形成的强辐合抬升触发不稳定能量释放产生的强对流天气, 对应云图上为最低 T_{BB} 在 -80°C 以下的准东西向带状对流云系。逐小时地面自动站资料分析的流场和计算的地面湿静力能对此类夏季强对流天气的预报具有指示意义。

关键词: 局地暴雨 急流 次级环流 湿静力能

Causality Analysis of "2007. 7. 18" Local Heavy Rain in Hebei Province

Yang Xiaoliang¹ Li Jiangbo¹ Yang Min²

(1. Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021;

2. Hebei Province Lightning Protection Center)

Abstract: A local heavy rainstorm in northeast and southern Hebei on July 18, 2007 is analyzed by using conventional observation data, hourly data of automated weather station, TBB data and NCEP 6 hour re-analysis data. Conclusions are drawn that although in the same synoptic system, the rainstorm formation mechanism is different in different regions. It is revealed that the upper-level and low-level jet streams as well as the interaction between the positive feedback of the jets and rainstorm are the main reasons causing the north-east rainstorm in the morning. The vapor is transported by low-level jet stream. There are round-like meso- α convective cloud clusters with TBB less than -70°C in the image of the FY-2C. The severe event in southern Hebei in the afternoon occurred under the favorable conditions of the high-temperature, high-energy and unstable stratification when instable energy was triggered and released by the cold front and the low

-pressure before the front. In the corresponding images there are quasi-trans-meridian convective cloud clusters with minimum TBB less than -80°C . The streams and surface humid-static energy calculated from automatic weather stations data have significant indication to prediction of this sort of summer strong convection weather.

Key Words: local heavy rainstorm jet streams secondary circulation humid-static energy

引 言

暴雨是我国主要的灾害性天气之一,通常产生在有利的大尺度环流背景下,由中小尺度天气系统发展而成。随着国民经济和城市群的迅速发展,历时短、强度大的局地暴雨给城市带来的气象灾害及城市次生灾害也越来越严重,例如人们记忆犹新的 2004 年北京 7.10 暴雨、上海的 7.30 暴雨、2007 年的 7.18 济南特大暴雨等。对于局地大暴雨,气象工作者从诸多方面进行了研究,毛冬艳等^[1]对 2004 年北京 7.10 暴雨进行了中尺度分析,认为造成强降水的 3 个雨团在时空尺度上具有中- β 尺度系统的特征,不断移入的对流回波是降水的直接制造者,中尺度辐合线和小低压为降水发生提供了有利的触发条件。王迎春等^[2]研究了 2002 年一次引发密云洪水和泥石流的局地短历时特大暴雨过程,认为暴雨由一个中- β 尺度对流系统在北京北部山区停留造成, T_{BB} 图的等值线密集区和上冲云顶对暴雨落区有指示意义,中尺度低压和辐合线是对流的触发系统。李云等^[3]对比分析了暴雨云团和雷暴云团的差异,指出暴雨云团主要与对流层深厚的暖式结构和强烈的水汽辐合有关。长期以来的研究表明,绝大部分的暴雨都有急流相伴,急流在暴雨天气中起着至关重要的作用。张维桓等^[4]通过大暴雨个例数值模拟及理论推导,证明了急流和暴雨之间通过次级环流存在正反馈。刘勇等^[5-6]通过对两次强天气过程分

析说明了高低空急流耦合产生的急流次级环流提供持续强劲的上升运动。朱乾根^[7]通过武汉附近的暴雨过程详细分析了高空、低空、边界层急流的作用,并提出三者上下耦合是对流得以强烈发展形成强暴雨的可能原因。孙继松^[8]也对北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理进行了研究。

1 过程概况

受高空短波槽、低层切变线和地面冷锋共同影响,2007 年 7 月 17 日夜间到 18 日,河北省出现了暴雨天气(图 1a 为过程雨量分布),全省 13 个站降暴雨,4 个站降大暴雨,其中丰润站过程雨量达 181.9mm。局地暴雨出现在 18 日,伴随着地面锋面的自北向南快速移动,上午 6—10 时(北京时,下同)暴雨区位于河北东北部的唐山、秦皇岛,丰润 3 小时雨量达 143mm;中午锋面压至河北中部的保定、石家庄和沧州一线,但仅带来少量降水;下午 15 时锋面南压至河北南部,造成了邢台、邯郸的局地暴雨,邢台 1 小时降雨量达 93.2mm,该系统于 18 日傍晚移至山东,造成了被媒体称为“黑色 3 小时”的济南 7.18 特大暴雨,济南市区 1 小时最大降雨量达到 151.0mm,可见相同的影响系统,给不同地区造成的影响却不尽相同。本文从云图特征、天气形势及其降水过程的热力、水汽和能量等方面进行了分析,重点剖析河北东北部和南部暴雨成因,以加深对此类暴雨的认识,求得此类天气的预报思路。

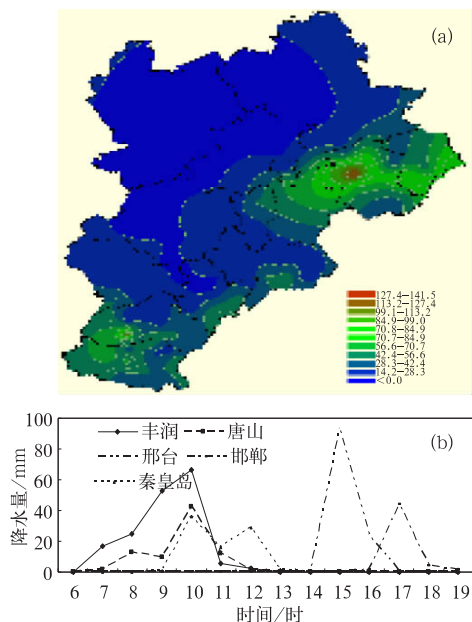


图1 2007年7月18日河北省降雨量
(a) 过程雨量 (b) 东北部和南部5站逐小时雨量
单位:mm

2 云图分析

利用气象卫星云图能够直观地看到各种天气系统下产生的云系及演变情况,同时也可以帮助识别云系对应的天气系统^[9]。从此次过程的FY-2C云图上分析(图2),降水主要由深厚的对流云系造成。17日20时从河北的北部到山西北部有一串中- β 尺度对流云团发展东移,呈东北西南向,云顶 T_{BB} 大都在 -50°C 以下,开始影响河北北部地区。18日06时,对流云团有所加强,云顶 $T_{BB} < -60^{\circ}\text{C}$,覆盖河北中北部地区,可以清楚地看到云团中心仍有一串中- β 尺度云团。18日09时,最南端的中- β 尺度云团发展加强为近圆形的中- α 云团,位于河北东北部地区,中心 $T_{BB} < -70^{\circ}\text{C}$,此时对流发展极其旺盛,云顶发展得更高,河北东北部地面降水最强,降水最大的丰润站09和10时分别出现 $52.9\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $66.4\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水,10时唐山和秦皇岛也分别出现 $42.8\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和

$36\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水。直到12时以后强对流云团东移出河北,唐山、秦皇岛地区强降水结束。18日14时东移出河北的云团后有新的带状对流云生成,经渤海湾伸向河北东南部,同时河北西南部也有新的对流云团生成,并迅速向东发展,强度加强范围加大,两块云于15时在河北南部合并为强对流云带,从辽东半岛的南部到河北南部呈准东西向,宽度在2~3个纬距,河北南部上空云顶 T_{BB} 在 -80°C 以下,给河北南部的邢台地区带来 $93.2\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水过程,18日18时,强云团东移南压,影响河北南部偏东地区和山东北部,18日20时后随着整个对流云系南移,河北强降水结束。

3 环流背景

18日08时,500hPa(图3)贝加尔湖以东 $52^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{N}$ 附近有高空冷涡活动,配合有一 -24°C 的冷中心,涡后有冷空气向南扩散,我国西南地区为宽广的南支槽,槽前西南暖湿气流沿副高外围584dgpm线向北一直输送到河北南部,河北上空为弱短波槽。700hPa山西、陕西交界处存在低涡,低涡前部切变线经河北的北部一直伸到东北平原地区,从华南地区上空发展的西南低空急流一直伸展到黄河以北地区。850hPa切变线分为两段,一段位于辽宁西部至河北东北部,另一段位于河北中西部至山西中部,为西北风和西南风的切变,切变线左侧风向与等温线几乎垂直,冷平流明显,而切变线右侧西南风低空急流强盛,整个河北东部处于西南低空急流出口区左侧,冷暖空气在河北上空交汇。18日20时河北500hPa转为偏西北气流控制,低层700hPa和850hPa切变线南移出,强降水结束。地面图上18日08时,河北南部、山西为闭合低压,低值中心995hPa,地面冷锋横穿河北东北部至河北中西部,18日14时,低压范围扩大,河北南部仍处于低压之内,冷锋南压至 37.5°N 河北南部地区,17时以后冷锋

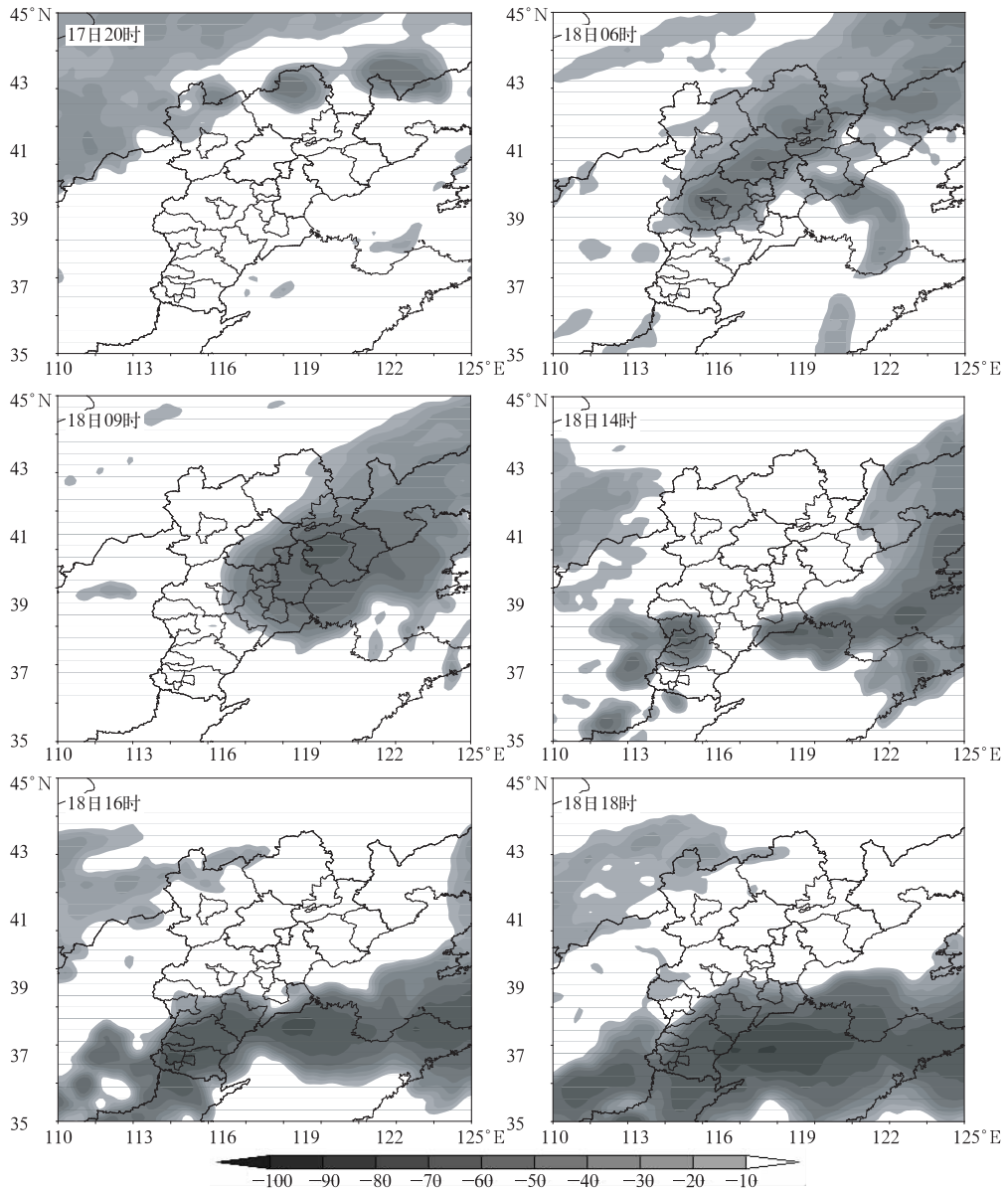


图 2 2007 年 7 月 17—18 日 T_{BB} 图(单位: $^{\circ}\text{C}$)

移出河北。

4 物理量分析

4.1 水汽条件

从 850hPa 水汽通量水平分布图看出,17 日 20 时(图略),来自华南地区上空的暖湿空

气沿西南低空急流源源不断地输送到整个河北,河北地区水汽通量都在 $8\sim 14\text{g}\cdot(\text{hPa}\cdot\text{cm}\cdot\text{s})^{-1}$,低层增暖增湿明显。18 日 08 时(图 4a),沿西南低空急流存在一条水汽通量大值区,中心最大值位于贵州、湖南两省,中心数值达 $24\text{g}\cdot(\text{hPa}\cdot\text{cm}\cdot\text{s})^{-1}$ 以上,一直到河北东北部都存在 $12\text{g}\cdot(\text{hPa}\cdot\text{cm}\cdot\text{s})^{-1}$ 以上的大值水汽通道。从同时次 850hPa 水汽通

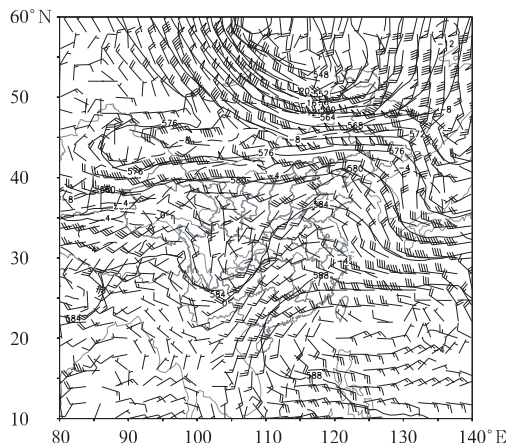


图3 2007年7月18日08时500hPa高度(dgpm)和风场(矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

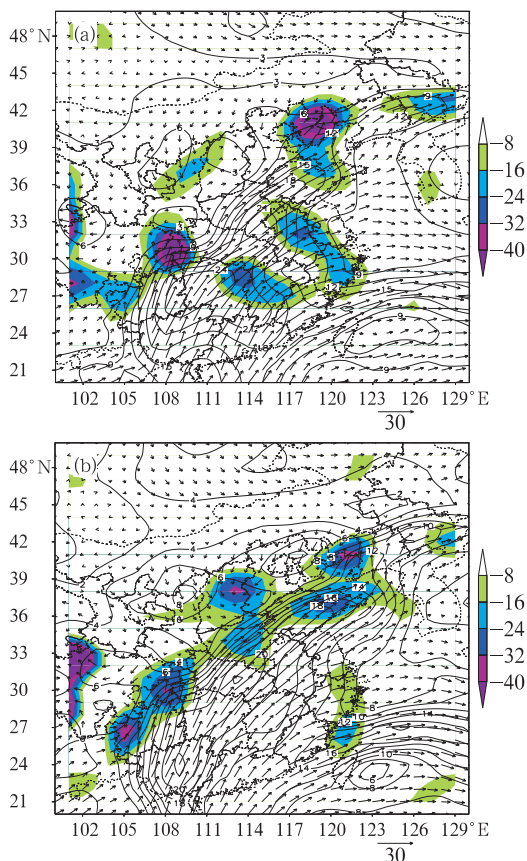


图4 2007年7月18日08时(a)和14时(b)850hPa水汽通量矢量及等值线(单位: $\text{g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$)和水汽通量散度(阴影为水汽通量散度小于零的区域,单位: $\text{g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$)

量散度分布看,河北东北部存在 $-40 \times 10^{-6} \text{g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 以上的强辐合中心,这是低空急流出口区左侧风速辐合和切变线两侧风向辐合共同作用的结果^[10]。18日14时,水汽通量大值区向东输送至辽东半岛,河北大部水汽通量在 $6 \sim 8 \text{g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$,此时,低空急流对河北水汽输送的贡献已不大。对应水汽通量散度,河北东北部强水汽辐合中心东移到辽宁西部,强度略减弱,晋、冀交界南部出现 $-32 \times 10^{-6} \text{g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 以上的辐合中心,主要由风场气旋式辐合引起水汽辐合,为18日下午河北南部地区的强降水提供了充足的水汽条件。

4.2 热力及不稳定条件分析

从17日20时850hPa(图略)假相当位温水平分布来看,低空西南急流左侧存在一条假相当位温高能舌,中心数值364K,河北南部为360K的高能舌所覆盖,同时河北南部存在 $\theta_{\text{se}850} - \theta_{\text{se}500}$ 差值中心,最大差值达到28K以上,说明此处为强的对流不稳定区域,河北其他地区假相当位温在344K以上, $\theta_{\text{se}850} - \theta_{\text{se}500}$ 都在12K以上。18日08时(图5a)随着低空急流轴东移, θ_{se} 高值略东移,河北东北部为352K等值线控制, $\theta_{\text{se}850} - \theta_{\text{se}500}$ 在8~12K之间,14时(图5b),河北南部360K θ_{se} 高值略北抬, $\theta_{\text{se}850} - \theta_{\text{se}500}$ 差值在16K左右。对比而言,14时河北南部较08时东北部热力及不稳定条件都有利对流发生。

经以上分析发现,此次过程强降水主要集中在河北省东北部和南部。据统计,河北省暴雨主要发生在傍晚前后,其次是在午后,上午是一个较少的时段^[11],而从丰润、唐山、秦皇岛逐小时雨量发现,东北部降水最强时段为18日9—10时,此时地面气温在23~25℃之间,不具备地面高温高湿条件,低层的热力和不稳定条件较下午河北南部暴雨时期明显不利,那么究竟是什么原因造成东北部的暴雨呢?下面将进一步分析。

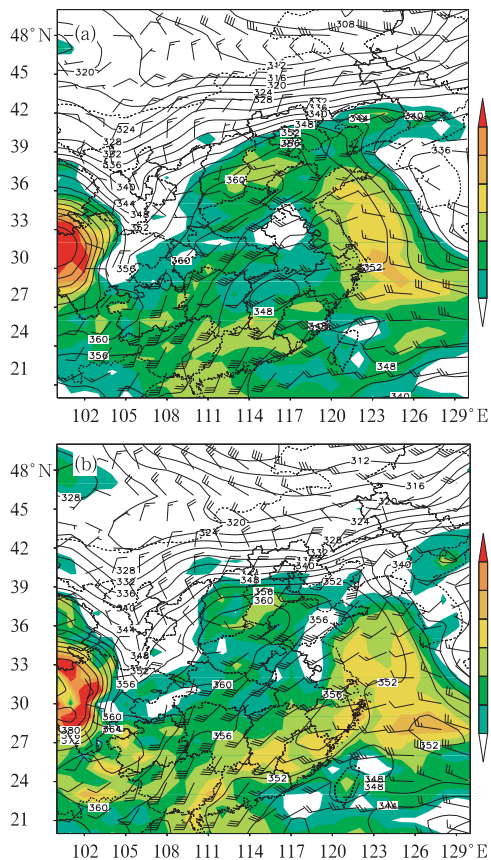


图5 2007年7月18日08时(a)和14时(b) 850hPa 假相当位温(等值线,单位:K)水平分布、风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 850hPa 与 500hPa 假相当位温差(阴影为 $\theta_{\text{se}850} - \theta_{\text{se}500} > 0$ 的区域,单位:K)

5 东北部暴雨成因分析

5.1 高空急流

从17日20时200hPa高空风场(图略)看,沿 40°N 左右从新疆的东部到内蒙古的东北部为一条准东西向强劲的西风急流,最大风速在 $50\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,急流核分别位于新疆的东北部和内蒙古的东北部,河北处在急流的右侧、南亚高压东北侧辐散区。到18日08时(图6a)高空急流东传、明显南压,在河北北部上空断裂,河北的西部地区处于新疆

东部—河套地区急流出口区的右前侧,高空辐合抑制低层对流发展,而河北的东部处于我国东北地区上空急流入口的右后侧,此处强的高空辐散更有利于低层对流发展,云图上对应河北东北部850hPa切变线的东段对流发展最旺盛。

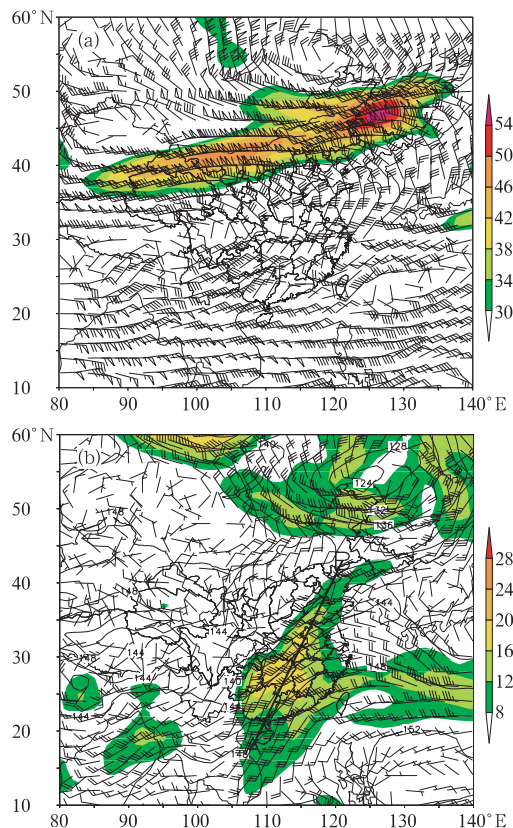


图6 200hPa风场(a,阴影区 $V \geq 30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 850hPa风场(b,阴影区 $V \geq 8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

5.2 低空急流

从850hPa风场看,17日20时, $12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的风速区基本上在长江以南,最大风速在 $14 \sim 16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,到18日08时(图6b),急流迅速北抬到山东北部、黄河沿线,为一致的西南风急流,最大风速在 $20\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,同时次925hPa从广西的北部到山东的中部形成强盛的偏南风超低空急流,位置和850hPa急流位置基本一致,急流中心风

速在 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,这两支急流把南方暖湿气流向华北输送,华北地区增温增湿迅速。而河北省风速在 $2 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,配合河北北部的切变线,在低空急流出口区左侧河北的东北部形成了强的辐合。低空急流一方面向暴雨区输送暖湿空气,造成暴雨区的对流不稳定层结,一方面在暴雨区产生辐合,触发不稳定能量释放产生暴雨,可以说西南风低空急流对东北部暴雨的形成起了关键性作用^[12]。

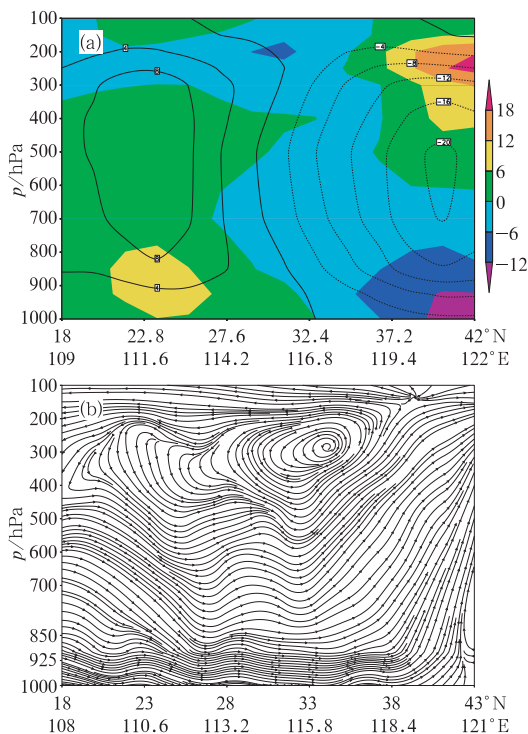
5.3 高、低空散度及垂直速度

沿18日08时850hPa低空急流的走向(图6b中直线AB),做出了散度及垂直速度的剖面图。从散度剖面图发现(图7a阴影), $40 \sim 42^\circ \text{N}$ 之间,低空600hPa以下为辐合区,强的辐合中心位于850hPa以下,中心值为 $-12 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,对应850hPa、925hPa低空急流的左前侧,400hPa以上为辐散区,最强辐散中心位于200hPa,中心值为 $18 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,对应高空急流的右后侧,而且高空辐散强于低空辐合,高空辐散产生的强抽吸起主要作用。同时发现, $20 \sim 25^\circ \text{N}$ 附近的低层对应低空急流的后侧为弱的辐合,高空200hPa为弱的辐散,对比垂直速度场分析(图7a等值线), 40°N 附近为强的上升速度区, 23°N 附近以下沉运动为主,也就是沿着低空急流轴方向,急流前部对应强的上升运动区,急流后部对应下沉区。

5.4 次级垂直环流

图7b是应用NCEP再分析资料,沿18日08时低空急流方向(图6b中直线AB)做出的三维风场的矢量合成图,图中可以清楚地看到气流沿低空850~925hPa偏西南风急流向北输送,到低空急流的出口区辐合上升,气流到高层200hPa以后沿南亚高压的前侧东北气流向南,而到华南地区后又沿着

弱下沉气流流入低空急流,从而在沿着急流轴的垂直方向形成了垂直反环流圈。一方面次级环流为暴雨提供持续稳定的上升运动条件;同时暴雨中凝结加热以及积云对流垂直混合有利于高、低空急流的加强和维持,这种暴雨与急流的耦合是导致大暴雨的重要因素^[4]。



7 2007年7月18日08时沿850hPa急流方向散度(a中阴影,单位: 10^{-6} s^{-1})、垂直速度(a中等值线,单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)和三维流场剖面图(b)

6 南部暴雨成因分析

6.1 邢台探空资料分析

17日20时,邢台上空400hPa以下转为一一致的西南风, K 指数为35(表1),沙氏指数-1.5,此时邢台上空大气已经处于不稳定状态。18日08时, K 指数增大到39,沙氏指数减小为-3,此时大气的的不稳定状态加剧,14时 K 指数依然维持在39,沙氏指数-3,说明

邢台上空大气一直处于高度的不稳定状态。大气对流是对流有效位能(CAPE)向对流运动动能的转化,而对流抑制能量(CIN)的强弱则反映了对流层低层的气块参与对流的难易程度^[13]。计算发现 17 日 20 时,邢台上空 CAPE 值已经达到了 $3158\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CIN 为 $284\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时的高 CAPE 可能与低空急流暖湿输送有关,18 日 08 时随着低空急流东偏,CAPE 值减小为 $2462\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,但此时 CIN 能量增大到 $310\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,十分有利于不稳定能量积累,14 时 CAPE 剧增至 $3656\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CIN 减小为 $188\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明此时大气不仅处于高度不稳定状态,且不稳定能量有了较高的积累,随着对流抑制能量减小,一旦有扰动产生,低层大气很容易打破抑制能

量的束缚而爆发强对流天气。

表 1 邢台探空站资料计算的不稳定能量指数

	17 日 20 时	18 日 08 时	18 日 14 时
K 指数	35	39	39
SI 指数	-1.5	-3	-3
CAPE	$3158\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$2462\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$3656\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
CIN	$284\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$310\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$188\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

6.2 地面流场分析

地面 7 要素自动站资料每小时一次,观测要素为温、压、露点、风向、风速、6 小时降水量及 3 小时变压,相比常规地面观测资料,在时间分辨率、时效性和时间连续性上有独特优势。图 8 为利用地面自动站资料分析的流场,随着冷锋的南压,地面风场出现清楚的辐合。18 日 12 时在 37°N 、 113°E 和 38°N 、 117.5°E

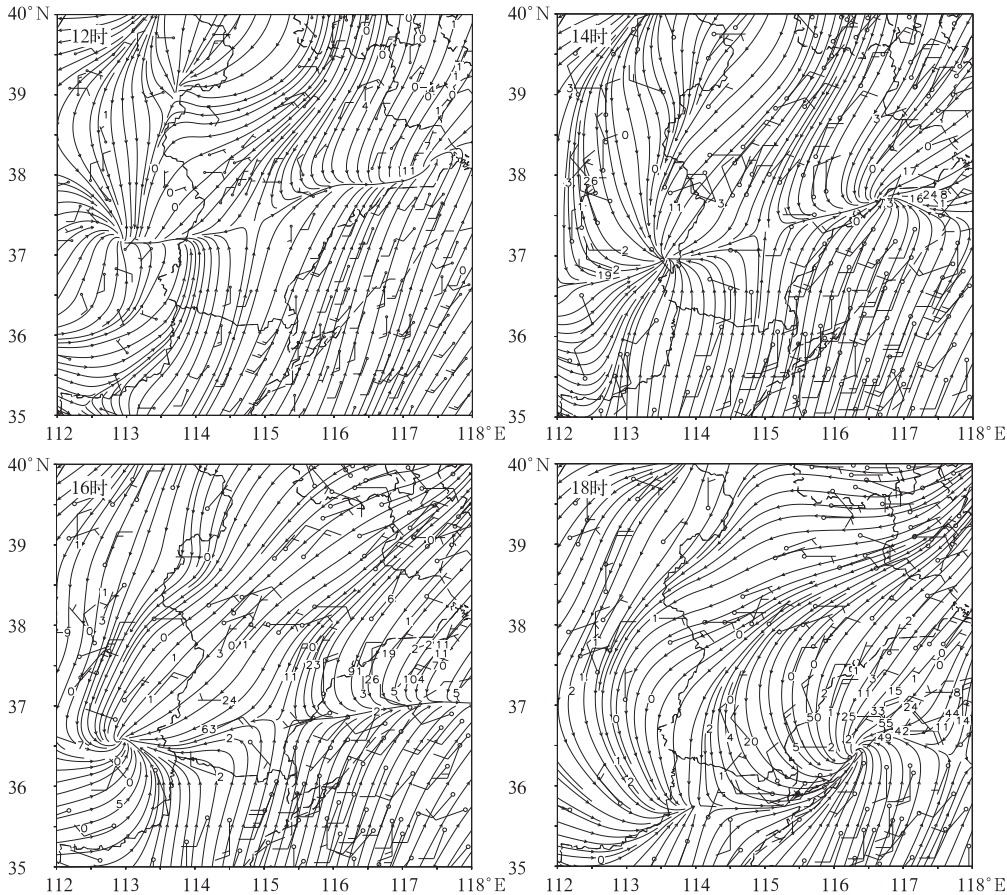


图 8 2007 年 7 月 18 日 12—18 时地面风场($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、流场

地区存在两个辐合中心,东部辐合中心后部有降水,河北南部 $37^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$ 存在偏北风和偏南风的辐合。到14时两个辐合中心都有所南压,西部辐合中心略东移,山西境内出现降水,东部辐合中心南侧偏南风明显加大降水随之增强。16时西部辐合中心东侧偏东气流加大,地面冷暖空气在此交汇,造成15时邢台强降水,而东部辐合中心南移到山东北部,辐合加强、降水加大,18时两个辐合中心分别移到河南、山东北部,山东北部气旋式辐合加剧,山东强降水开始。19时后河北强降水随着地面辐合的移出而结束。正是冷锋南压造成地面风场的辐合抬升,触发不稳定能量造成了河北南部及山东的暴雨,强降水基本位于辐合中心的后部。

6.3 地面能量场分析

单位质量空气块总能量: $E_t = c_p T + Lq + gZ + \frac{V^2}{2}$, 其中等号右侧各项分别为显热能、感热能、位能和动能。为计算方便,常对上式遍除 c_p 得出与总能量对应的总温度

$$T_t = \frac{E_t}{c_p} = \left(c_p T + Lq + gZ + \frac{V^2}{2} \right) / c_p$$

而动能项数值很小常忽略,取 $T_\sigma = (c_p T + Lq + gZ) / c_p \approx T_t$, T_σ 即为湿静力温度,一般用 T_σ 代表地面总能量^[14]。

利用逐小时的地面自动站资料计算了此次过程的地面湿静力温度。18日08时(图9) T_σ 高值向京津唐地区伸展,说明地面有很强的能量积累,同时等 T_σ 线非常密集,冷暖空气在能量锋(等 T_σ 线密集带)处交汇,能量锋和地面冷锋位置相一致。14时河北南部 T_σ 最大达到 90°C , 近地面具备强对流发生的能量条件,地面能量锋随着地面冷锋南压移到 37.5°N 附近,冷暖空气在此处交汇,地面风场存在辐合。可见,地面 T_σ 除了可以判断地面发生强对流天气的能量储备,能

量锋区的位置还能较好判断地面冷暖空气及冷锋的位置,进而判断强对流天气的可能移动方向。

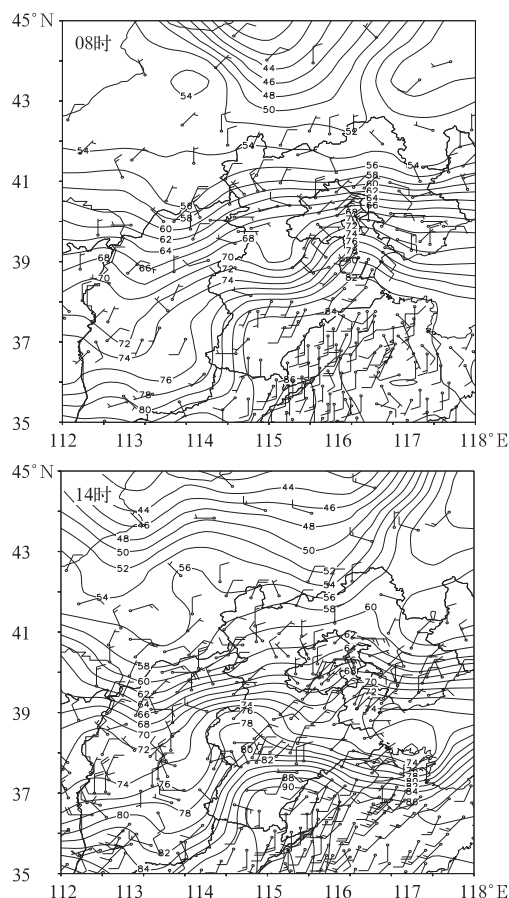


图9 2007年7月18日地面湿静力温度(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)和风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

7 结论与讨论

(1) 此次强降水过程的主要影响系统是500hPa短波槽、700hPa与850hPa切变线和地面冷锋。造成18日上午河北东北部暴雨的为近乎圆形的中- α 尺度强对流云系,云顶 T_{BB} 在 -70°C 以下,下午对应低层切变的东系带状对流云给河北南部地区带来强降水,云顶 T_{BB} 在 -80°C 以下。

(2) 从水汽条件分析,沿低空急流的水

汽通道为上午东北部暴雨直接输送暖湿空气,水汽辐合中心由急流出口区左侧风速辐合和切变线两侧的风向辐合造成,低空急流对下午南部暴雨水汽的直接贡献不大,南部水汽辐合来源于风场气旋式辐合。热力及不稳定条件 14 时南部暴雨区较 08 时东北部暴雨区更有利对流发生。

(3) 18 日上午河北东北部强降水以动力作用为主,暴雨发生在高空 200hPa 急流入口区右后侧,850hPa 低空急流出口区左侧,沿低空急流方向存在垂直反环流,暴雨和急流相耦合。

(4) 18 日下午河北南部强降水发生时,高低空急流的耦合已破坏,但此时不稳定层结加剧、能量增长,地面冷锋南压及锋前低压形成强的辐合抬升触发不稳定能量引起强对流天气。逐小时地面湿静力能可以及时分析地面能量的分布和积累程度,能量锋可以较好判断地面冷暖空气和冷锋位置,进而推断强对流可能发生的区域。

值得注意的是,在对本次过程的预报中,考虑暴雨的范围为河北东北部和中南部,实况表明,河北中部仅有少量降水,该区域暴雨空报。因此,需要思考的问题是:地面冷锋经过同样处于高能区的河北中部的保定、石家庄、沧州等地时,为什么仅造成少量降水,其原因有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 毛冬艳,乔林,陈涛,等. 2004 年 7 月 10 日北京暴雨的中尺度分析[J]. 气象,2005,31(5):42-46.
- [2] 王迎春,钱婷婷,郑永光,等. 对引发密云泥石流的局地暴雨的分析和诊断[J]. 应用气象学报,2003,14(3):277-286.
- [3] 李云,缪启龙,江吉喜. 2005 年 8 月 16 日天津大雨成因分析[J]. 气象,2007,33(5):83-88.
- [4] 张维桓,董佩明,沈桐立. 一次大暴雨过程中急流次级环流的激发及作用[J]. 大气科学,2002,24(1):48-56.
- [5] 刘勇,王楠,李平. 急流次级环流对陕南一次特大暴雨过程的作用[J]. 干旱气象,2006,24(4):26-29.
- [6] 刘勇. 急流次级环流对局地持续强风暴天气的作用[J]. 气象科技,2005,33(3):215-217.
- [7] 朱乾根,周伟灿,张海霞. 高低空急流耦合对长江中游强暴雨形成的机理研究[J]. 南京气象学院学报,2001,24(3):308-313.
- [8] 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[J]. 大气科学,2005,29(3):445-451.
- [9] 吕江津,王庆元,杨晓君. 海河流域一次大到暴雨天气过程的预报分析[J]. 气象,2007,33(10):52-60.
- [10] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2000:396-400.
- [11] 河北省气象局编著. 河北省天气预报手册[M]. 北京:气象出版社,1986:115.
- [12] 杨晓霞,赵宇,高留喜. 山东省春季大暴雨天气的形成机制个例分析[J]. 气象科技,2005,33(1):46-67.
- [13] 王华,孙继松,李津. 2005 年北京地区两次强冰雹天气的对比分析[J]. 气象,2007,33(2):49-56.
- [14] 刘健文,郭虎,李耀东,等. 天气分析预报物理量计算方法基础[M]. 北京:气象出版社,2005:39-42.