

河北平原一次春季强对流天气分析

李江波¹ 闫巨盛¹ 马凤莲²

(1. 河北省气象台, 石家庄 050021; 2. 河北省承德市气象局)

提 要: 利用 NCEP 6 小时一次 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、常规高空地面资料和自动站、FY-2C 卫星云图及石家庄 CINRAD/SA 型多普勒雷达等资料, 从天气形势、物理机制、雷达回波和云图演变特征、地形作用等方面入手, 分析了河北平原一次春季强对流天气的演变和成因。结果表明: 这次强对流天气过程发生在高空槽由垂直结构向前倾结构转变的过程中, 中高层干冷平流、低层暖湿平流的大气层结增强了对流不稳定的发展, 飑线是此次强对流天气的直接影响系统; 太行山地形和平原南部的中尺度辐合线, 对飑线系统的触发、组织、移动具有重要作用, 强对流区发生在地面中尺度辐合线南侧的偏南气流里。分析还发现, 低层 θ_{se} 高能区、水汽通量大值区、强的辐合上升区和 CAPE 的高值区等物理量场都与强对流天气区有较好的对应关系。

关键词: 春季强对流 NCEP 资料 物理量分析 飑线

Analysis of a Severe Convection Event in Plain of Hebei in Late Spring

Li Jiangbo¹ Yan Jusheng¹ Ma fenglian²

(1. Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021; 2. Chengde Meteorological Office, Hebei Province)

Abstract: A severe convection event in the plain of Hebei on May 10, 2005 is investigated from such aspects as synoptic situation, physical mechanism, radar echo and satellite image evolution, and the Taihang Mountain forcing, etc. by using the NCEP reanalysis data, conventional observations and the data from automatic weather stations, Doppler radar, Fengyun-2C satellite images. The result shows that the severe convection weather arise in the transition from verticality to forward slant of the upper trough, so there was a different advection between the mid-(cold and dry) and lower-(warm and wet) troposphere, which was quite important to the formation and development of convective instability. The event was triggered by the surface low and meso-scale convergence line, and the squall line was direct influencing system. It is also found that the severe convection

area had a better corresponding relation to the high potential pseudo-equivalent temperature (θ_{se}) at lower level, large water vapor flux, strong convergence and upward current, and high convective available potential energy (CAPE) during this event.

Key Words: severe convection NCEP reanalysis data physical quantity analysis squall line

引言

强对流天气是各种天气尺度系统相互作用而产生的中小尺度现象,往往是雷雨、大风、冰雹等灾害性天气同时发生。这种天气虽然影响范围小、持续时间短,但因其具有突发性、强度大、局地性等特点,常造成较为严重的灾害,是天气预报工作的重点和难点。以往的研究主要着眼于夏季强对流^[1-4],对于春季强对流天气,我国南方出现的概率较大,李英等分别从中尺度扰动特征^[5]、螺旋度^[6]入手研究了春季滇南冰雹大风天气;叶爱芬等^[7]利用常规观测资料及新一代天气雷达资料对2004年3月30日发生在广东的强冰雹过程进行了详细分析;朱艳萍等^[8]通过物理量诊断分析得出了福建春季降雹的环境场特征。然而,在我国北方地区,春季强对流天气为小概率事件,研究相对较少,实际预报工作中很容易忽视和漏报。对于这类天气,也有部分气象工作者作过研究,如杨晓霞等^[9]对2006年4月28日山东省一次飑线天气过程进行了诊断分析,并应用湿位涡守恒理论研究了飑线的发展机制;李江波等^[10]研究了一次早春发生在京津冀地区的强对流天气,分析了早春强对流发生的气象条件和预报着眼点。

2005年5月10日下午河北平原中南部出现了雷雨、冰雹、强风、扬沙、沙尘暴等灾害性天气,是一次典型的北方春季强对流天气过程。本文从天气背景、热力条件、稳定性、水汽条件、触发机制、地形等多个方面,对此

次过程的演变、成因进行了细致的分析,以加深对北方春季强对流天气过程的认识,为提高此类天气的预报准确率提供一些参考依据。在分析中除了应用新一代天气雷达、卫星云图、自动站等常规和非常规气象资料外,还使用了NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。

1 天气概述和形势演变

2005年5月10日,受高空槽东移影响,河北中南部出现了一次强对流天气,全省有108站降了雷雨,保定、邢台、邯郸等3市的区域内有5县(市)出现了冰雹(邯郸的冰雹最大直径达20mm),同时,河北平原南部的邢台、邯郸的部分地区还出现了强风(27站,其中广平站的最大风速达到 $27\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、扬沙(23站)、沙尘暴(6站)、强沙尘暴(3站)(图1)。

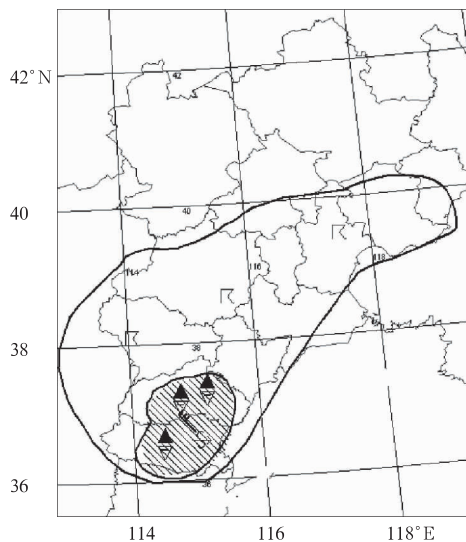


图1 2005年5月10日河北平原中南部强对流天气实况
粗实线包围的区域为雷暴区,阴影区表示冰雹、强风、沙尘暴区

10 日 08 时(北京时,下同),500hPa 高空图上,蒙古国大部到我国北方为西北气流控制,贝加尔湖西北部有一冷涡,低涡南部的冷空气沿西北气流向东南方向下滑;在内蒙古中部有一浅槽,该浅槽为西北气流里的弱波动,而河北整个区域为偏西气流控制。700hPa 和 850hPa 高空图上,在二连浩特附近有低涡生成,其南部为高空槽,700hPa、850hPa 槽线位于山西与陕西一带。14 时(图 2),500hPa 高空槽东移接近河北西北部,且槽前呈疏散结构,相对应的冷温槽落后于高度槽,有冷平流向河北平原输送,850hPa

低涡东移并有所发展,槽线位于山西与河北交界处,河北省大部分地区受槽前西南气流控制,暖平流明显;850hPa 槽线与 700hPa 槽线近似垂直。20 时,高空槽快速东移,500hPa 槽明显超前于 850hPa 槽。由于本次影响河北的过程正好发生在 14—20 时之间,说明强对流天气出现在高空槽由垂直结构向前倾结构转变的过程中,期间中高层冷干平流叠加于低层暖湿平流之上,有利于位势不稳定的发展^[11]。

地面上,9 日 08 时生成于内蒙古西部的低压在东移过程中发展为气旋,10 日 08 时,气旋中心位于包头。10 日上午,受高空槽影响,河北省西北部地区开始出现阵雨。而平原南部地区上午仍处于晴空区,气温回升,到 14 时,该区域气温已升至 24~25℃,同时,来自于渤海的东北气流和平原南部的偏南气流在河北南部形成了一条中尺度辐合线,在邯郸附近,还有一中心为 997hPa 的热低压,这些都有利于底层不稳定能量的积蓄和触发。

从卫星云图的演变来看,14 时,保定、石家庄西北部到山西中部有一东北—西南向的云线生成,其越过太行山后,迅速向东南方向移动并加强,发展成为飑线。16 时,该飑线自西向东扫过邢台、邯郸两市,造成上述地区的冰雹、大风、扬沙、沙尘暴等强对流天气(图略)。

2 雷达回波的演变和自动站资料分析

分析石家庄新一代雷达回波演变(图 3,见彩页)可见,10 日上午 11:58 在距雷达站西北约 150km 处有东北—西南向的带状回波出现,该回波长约 200km,宽约 30km,以约 40km·h⁻¹的速度向东南方向移动,强度缓慢增强。

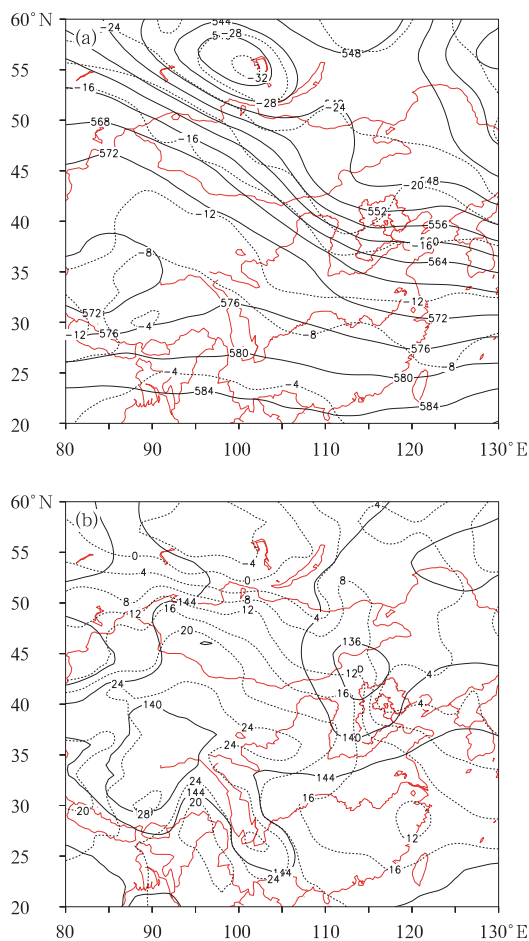


图 2 2005 年 5 月 10 日 14 时 NCEP 再分析资料 500hPa(a)和 850hPa(b)天气形势
实线为等高线(单位:dagpm),点线为等温线(单位:℃)

12:54,回波南部范围明显扩大,中心强度达到44dBz。之后,回波北段移速加快同时强度增强,13:56回波的中北部已接近石家庄西部,整个带状回波近乎呈准东西向,中心强度达到53dBz。14:58,中心位于石家庄附近,随着其东移,强度继续增强,越过太行山后,在下坡地形作用下,移速明显加快,以约 $80\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度向东南方向移动。16时回波变得密实,边缘清晰,大于40dBz的范围扩大,中心强度超过53dBz,回波的强中心连接成线,形成飏线。16:25(图3a,见彩页)在飏线的南部邢台附近有一对流单体,中心强度为63dBz,回波顶高达12km,在径向速度图上(图3b,见彩页)相应位置有一逆风区,表明该处为辐合区,对流发展强烈。同时,在飏线的南端邯郸西北部20km处有一对流单体发展。16:43(图3c,见彩页)该单体随飏线东南移至邯郸附近,中心强度加强到63dBz,回波顶高达14km,相应速度图上(图3d,见彩页)有逆风区。正是由于上述飏线南部强烈发展的两个对流单体,造成了邢台、邯郸的冰雹、大风、沙尘暴等强对流天气。

由邢台自动站逐时气象要素的变化曲线可见(图4),气压14—15时涌升,升幅达4.0hPa,16—17时又陡降4.0hPa,呈现一个明显的“雷暴鼻”;气温15—16时骤降 6.6°C ;风向风速变化也很剧烈,由15时平均风速 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东北风急转为16时平均风速 $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北风。地面气象要素的这些变化特点与典型的飏线过境时的情形一致^[11]。

3 热力和不稳定条件分析

3.1 假相当位温 θ_{se}

10日08时,从各层假相当位温 θ_{se} 场可以看出(图略),925~300hPa都有西南—东

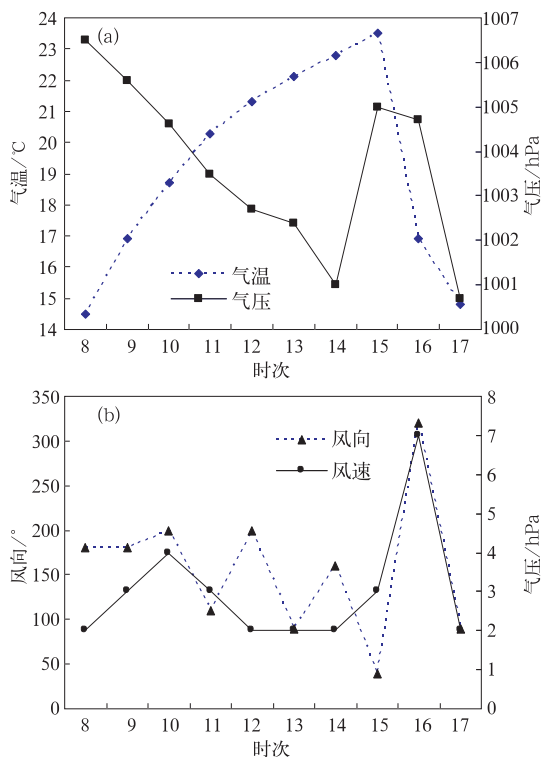


图4 2005年5月10日8—17时邢台自动站气温、气压(a)和风向、风速(b)逐时变化曲线

北向的高能舌自河南伸向河北,在低层,河北平原南部为 θ_{se} 线密集区。14时,850hPa θ_{se} 的高能舌(图5a)继续朝东北方向伸展,河北平原南部的高能区明显加强,高能轴线位于山西河北交界。20时(图5b),高能舌移至河北山东交界,最大值达到322K。表明低层的 θ_{se} 高能区在14时以后经过河北平原,飏线产生在低层 θ_{se} 高能舌内的对流强烈不稳定区域内。

3.2 不稳定指标

表1给出了邢台探空站10日08和20时部分层结的热力参数。可见,从08时到20时,SI从 1.0°C 急剧下降为 -4.5°C ,K指数从 25°C 增加到 34°C ,850hPa和500hPa两层的假相当位温之差从 -1.4°C 大幅度攀升

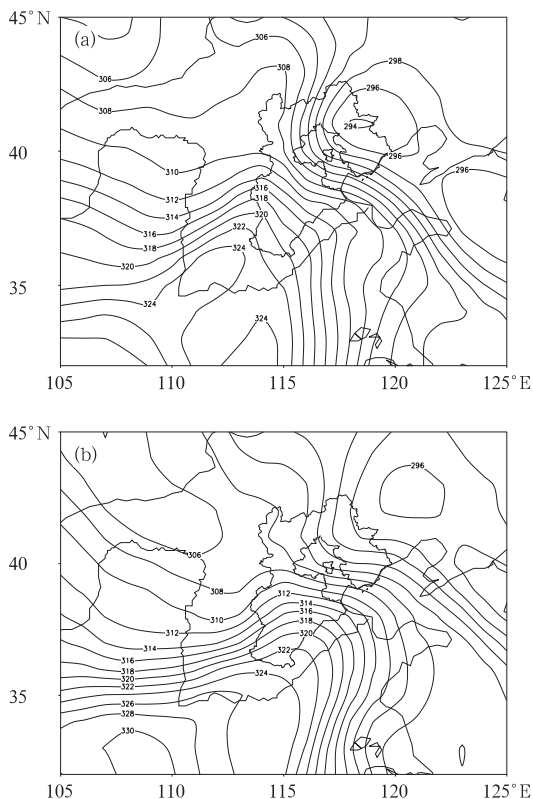


图 5 2005 年 5 月 10 日 14 时(a)
和 20 时(b)850hPa θ_{se} 分布
单位:K

表 1 2005 年 5 月 10 日邢台站(53798)大气层结热力参数

时次	SI/℃	K/℃	$(\theta_{se850} - \theta_{se500})/℃$	$(T_{850} - T_{500})/℃$	0℃层高度/hPa	-20℃层高度/hPa
08	1.0	25	-1.4	28	650	450
20	-4.5	34	8.2	35	650	470

4 动力条件分析

图 7 为散度沿 37°N 的垂直剖面图,08 时(图 7a),在强对流发生区 115°E 附近,800hPa 以下为辐合区,近地层辐合中心值为 $-20 \times 10^{-6} s^{-1}$,400~800hPa 之间为辐散区,辐散中心值为 $10 \times 10^{-6} s^{-1}$,可见低层辐合和中高层辐散都比较弱。对比同时次垂直速度沿 37°N 的垂直剖面图(图 8a),700hPa 以下有弱的上

升到 8.2℃,这些明显的变化表明大气层结从相对稳定状态向强烈不稳定状态发展。同时,从温度和湿度的变化看,低层增温、增湿,高层降温、降温明显,极易触发强对流天气。研究^[12]发现,零度(0℃)层和-20℃层高度与降雹有关。经验表明,适宜降雹的零度(0℃)层高度一般在 600hPa 上下,而-20℃层高度在 400hPa 附近有利于成雹,由表可知,该日 08 时和 20 时这两项指标均达到发生强对流的有利条件。

3.3 对流有效位能(CAPE)

维持深对流需要在很厚的大气层内有正的浮力,而这取决于低层空气的性质及气块上升经过的高层空气的性质,对流有效位能(CAPE)正是一个同时包含低层、高层空气特性的参数,能更好地描述大气不稳定性。该参量在近年的强对流天气分析中得到广泛的应用^[13-14]。强对流发生的当天,有一 CAPE 的高值区自西向东经过河北平原南部,数值达到 $300 J \cdot kg^{-1}$ 以上(图 6),说明不稳定能量条件有利于强对流的发生。

升运动,上升速度为 $-1 \times 10^{-3} hPa \cdot s^{-1}$,自 300~700hPa 之间为下沉运动,下沉速度 $2 \times 10^{-3} hPa \cdot s^{-1}$,对应于中高层的干冷空气。中上层的下沉运动略强于低层的上升运动,干冷空气下沉增温有利于低层的热量和不稳定能量的积累。从 10 日 08 时散度和垂直速度的剖面图还可以看到,在对流区上游的 110°E 的高空槽附近,中低层辐合和中高层辐散都较强,整层大气为一致的上升气流,对流发展较为旺盛。

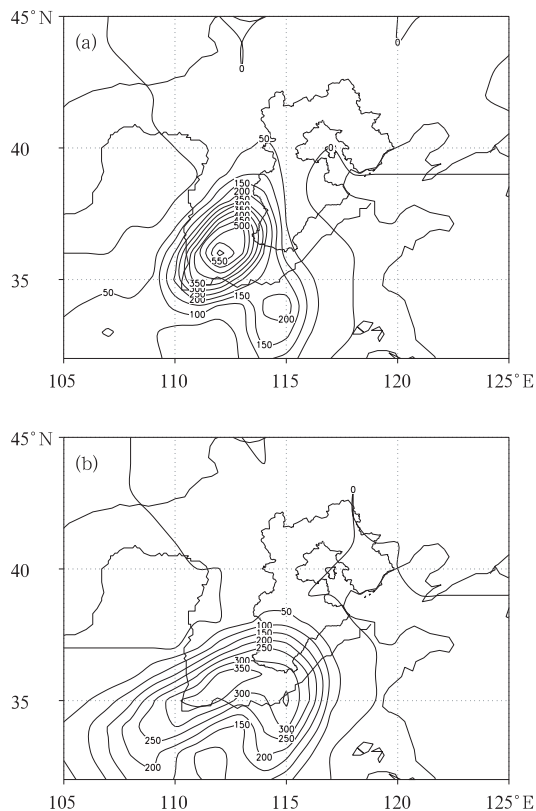


图6 2005年5月10日14时(a)和20时(b) CAPE分布(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

14时,随着500hPa高空槽快速东移,高层冷平流和低层暖平流均在加强,同时风的垂直切变增大,加之午后地面热力条件较好,低层辐合和高层辐散明显加强。从图7b可以看出,115°E附近,低层辐合高度从08时的850hPa抬升至650hPa,辐合最大值明显升高,为 $-50 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,650hPa以上为辐散区,辐散中心数值为 $30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,位于500hPa附近。分析14时高空图,500hPa、700hPa西北气流里存在一急流轴(图略),对流区位于急流轴出口区,和该辐散区相对应。在14时相应的垂直速度剖面图(图8b)上,115°E附近的强对流区上空为上升气流控制,上升速度明显增大,最大值为 $-8 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,强中心位于700~500hPa高度。

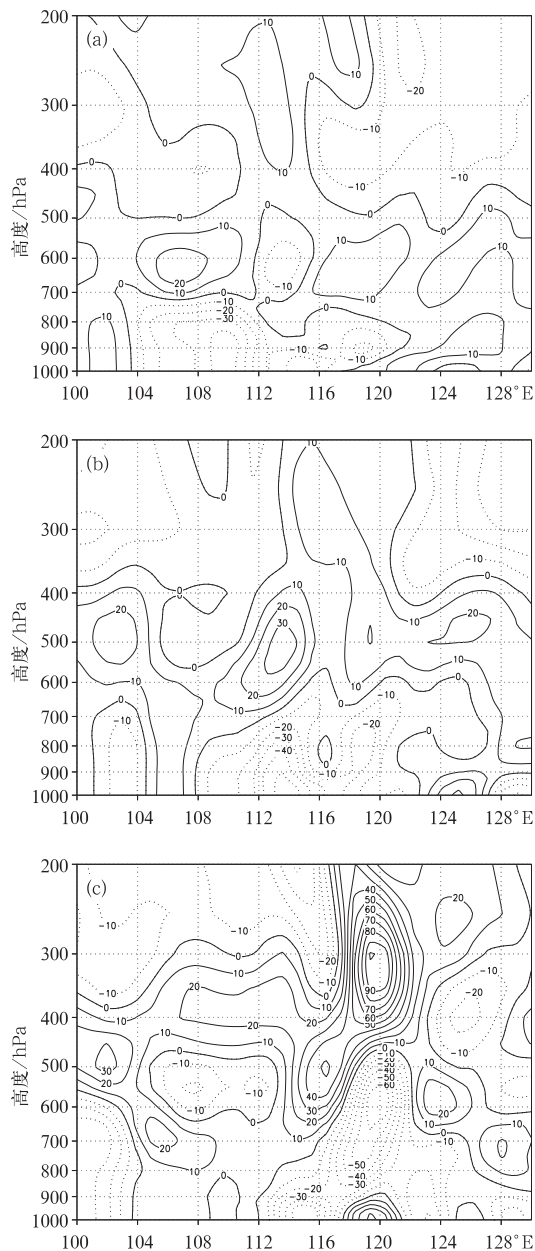


图7 2005年5月10日散度沿37°N的垂直剖面(单位: $10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a)08时;(b)14时;(c)20时

综合垂直速度和散度沿37°N的垂直剖面图(图7、图8),可以看出,08时,与500hPa高空槽对应的强对流区位于110°E,14时东

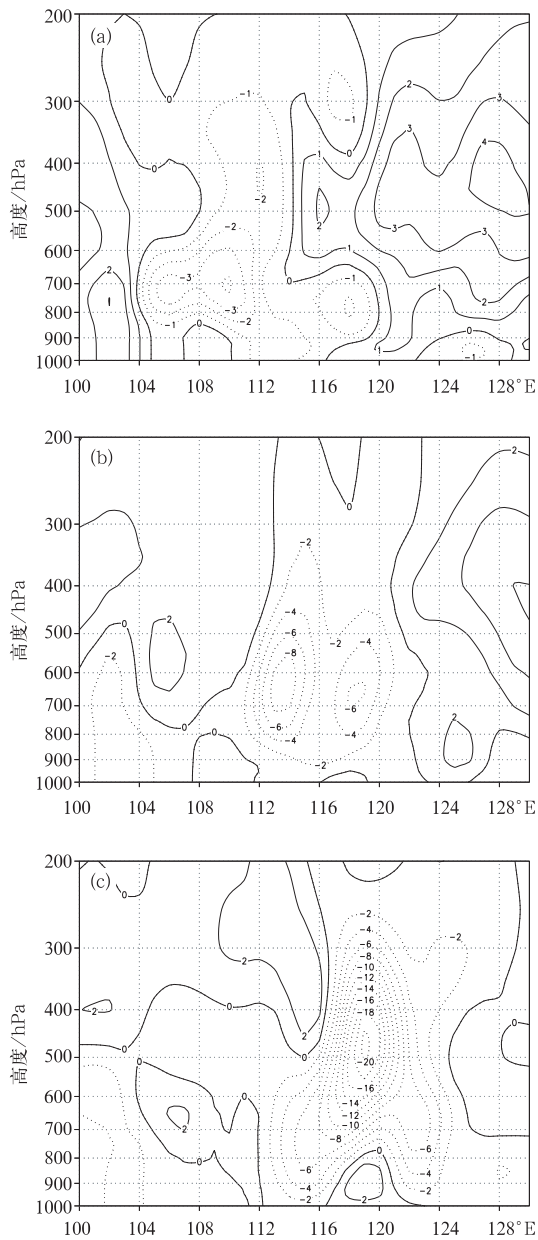


图8 2005年5月10日垂直速度沿37°N的垂直剖面(单位: $10^3 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a)08时;(b)14时;(c)20时

移至114°E,20时移动到118°E,可以推断,16时前后经过河北平原南部的高能区,形成飚线。飚线产生在低层辐合、高层辐散及上

升气流发展较强盛的过程中。

5 水汽条件分析

从10日08时到20时各层的水汽通量看,水汽输送主要集中在700hPa以下,08时水汽通量的高值区位于河南西部到山西,14时高值区东移至冀豫鲁交界一带,其中700hPa水汽增加明显,在河北南部到山东北部有大于 $12 \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高值中心(图略)。

图9给出了水汽通量沿37°N的垂直剖面图。08时(图9a),在107~116°E之间,400hPa以下有一水汽集中带,在800hPa上下为一高值中心,中心值达到 $9 \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,在1000

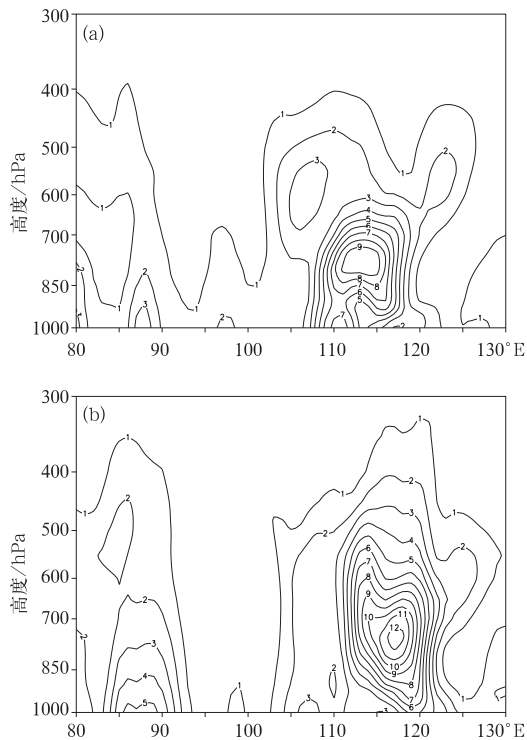


图9 2005年5月10日08时(a)、14时(b)水汽通量沿37°N的垂直剖面(单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

~ 600hPa 的垂直范围内为大于 $3\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域。14 时(图 9b), 水汽通量高值区向东移动, 移至 $110 \sim 120^\circ\text{E}$, 中心数值增大, 超过 $12\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 大于 $3\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的垂直区域伸展到 500hPa 以上, 表明河北南部对流层中下部整层都在增湿, 与低层 θ_{se} 的高值区相配合, 在对流层下层储存了高温高湿的不稳定能量, 而且不稳定层次也很深厚, 一旦有触发机制, 极易产生强对流。

6 太行山地形作用和地面中尺度辐合线

6.1 太行山地形作用

从前面的分析可以看出, 河北平原中南部处在锋前暖区、低层 θ_{se} 高能区、对流有效位能(CAPE)高值区、低层辐合、高层辐散区以及对流不稳定区域, 但为什么仅在邢台、邯郸等地产生冰雹、强风、沙尘暴等强对流天气? 下面从地形角度作初步探讨。

华北平原西靠太行山, 东临渤海, 北倚燕山, 特殊的地形在平原强对流天气发展中具有重要作用。研究表明^[15], 太行山地形引起的边界层风场的变化, 包括下坡气流和边界层中尺度辐合线对风暴的触发、组织、移动发挥着重要作用。另一方面, 山脉背风波动和地形产生的不平衡气流, 有利于中尺度重力波的产生和维持, 并对下游地区强对流天气的发展产生重要影响。

太行山系呈东北—西南走向, 南北长约 600km, 东西宽约 180km, 海拔高度在 2000m 以上的高山很多, 太行山东坡为陡峭的阶梯状下沉地形。朱民等^[16]认为, 一定强度的气流越过山脊后可形成准静止背风波和下坡风, 山脉越高、背风坡度越大、低层大气越稳定, 则产生的下坡风越强。实际工作中, 预报

员发现, 雷达回波图上, 由于山脉阻挡作用, 采用高仰角才可以观测到山上一些对流回波, 强度不强, 回波移动速度也较慢, 常常被预报员所忽视。当回波移过山脉后, 强度会迅速加强, 移动速度也大大增加, 快速影响河北平原中南部地区, 常常让预报员措手不及。在本次过程中, 对流云团在下山前移动速度为 $40\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, 下山后, 移动速度超过 $80\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, 从 15:15 到 16:43, 带状回波移动了近 100km, 造成邢台、邯郸等地的强对流天气。

6.2 地面中尺度辐合线

张群等^[17]认为, 在飑线形成过程中, 中尺度辐合线通过提供带状辐合上升运动起着胚胎和组织积云对流的作用。10 日 08 时, 地面冷锋位于陕西境内, 山西到内蒙古中部为一低压, 河北处于该低压前部, 在 39°N 因气旋性弯曲形成一条东西向的辐合线, 辐合线北侧为来自渤海的偏东气流, 南侧为东南气流。随着高层冷空气的东移南下, 地面辐合线南压, 14 时移至 37.5°N , 辐合线北侧的偏东北气流向西移动过程中受太行山阻挡, 在太行山东部转为偏北气流, 此时沿山脉的偏南气流与偏北气流形成的中尺度辐合线有利于水汽和热量在低层集中和积累, 加强了低层的辐合, 为飑线的形成和发展创造了有利条件。当西部冷空气越过太行山, 在重力波的作用下快速东移, 与中尺度辐合线交汇时, 促进辐合线南侧强对流天气的发展。

7 小结和讨论

(1) 本次强对流天气发生在高空槽东移, 由垂直结构转变为前倾结构的过程中, 中高层干冷气团叠加在低层暖湿气团之上, 促

使对流强烈发展。

(2) 地面飏线是本次强对流天气的直接影响系统。在有利的环流背景下,华北平原飏线通常产生于锋前的暖区、低层 θ_{se} 高能区或等值线密集区、对流有效位能(CAPE)高值区。

(3) 太行山地形和平原南部的中尺度辐合线,对飏线系统的触发、组织、移动具有重要作用,强对流区发生在地面中尺度辐合线南侧的偏南气流里。

(4) 河北平原春末夏初发生的强对流,不仅可以产生雷雨、大风、冰雹、短时暴雨天气,还常常产生沙尘天气,而平原南部和东南部为沙尘天气多发区,这是预报中经常忽视的问题,应予以足够重视。

参考文献

- [1] 雷雨顺,吴宝俊,吴正华. 冰雹概论[M]. 北京:科学出版社,1978:56-110.
- [2] 江吉喜. 华北两类灾害性云图的对比研究[J]. 应用气象学报,1999,10(2):199-206.
- [3] 段英,李云川,赵亚民. 华北平原对流风暴的个例分析[J]. 气象,1999,25(11):25-28.
- [4] 张芳华,张涛,周庆亮,等. 2004 年 7 月 12 日上海飏线天气过程分析[J]. 气象,2005,31(5):47-51.
- [5] 李英,舒智. 云南春季冰雹、大风天气的中尺度扰动特征[J]. 气象,2000,26(12):16-19.
- [6] 李英. 春季滇南冰雹大风天气的螺旋度分析[J]. 南京气象学院学报,1999,22(12):164-169.
- [7] 叶爱芬,伍志方,程元慧,等. 一次春季强冰雹天气过程分析[J]. 气象科技,2006,34(5):583-586.
- [8] 朱艳萍,刘爱鸣,李白良. 福建春季冰雹天气物理量诊断分析[J]. 气象科技,2006,34(1):73-77.
- [9] 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等. 山东省 2006 年 4 月 28 日飏线天气过程分析[J]. 气象,2007,33(1):74-80.
- [10] 李江波,张迎新,胡新. 京津冀一次早春强对流天气分析,全国预报技术论文集[M]. 北京:气象出版社,2003:57-62.
- [11] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2000:428,406-407,409,452.
- [12] 河北省气象局. 河北省天气预报手册[M]. 北京:气象出版社,1987:144-145.
- [13] 李耀东. 埃玛图微机制作及对流有效位能的计算[J]. 气象,1998,24(5):24-28.
- [14] 赵秀英,彭治班,吴宝俊,等. 下沉对流有效位能[J]. 气象,2000,26(6):1,66.
- [15] 龚佃利,吴增茂,傅刚. 2001 年 8 月 23 日华北强风暴动力机制的数值研究[J]. 气象学报,2005,63(4):504-515.
- [16] 朱民,余志豪,陆汉城. 中尺度地形背风波的作用及其应用[J]. 气象学报,1999,57(6):705-714.
- [17] 张群,张维桓,姜勇强. 边界层辐合线发展成飏线的数值试验[J]. 气象科学,2001,21(3):308-315.

李江波等：河北平原一次春季强对流天气分析

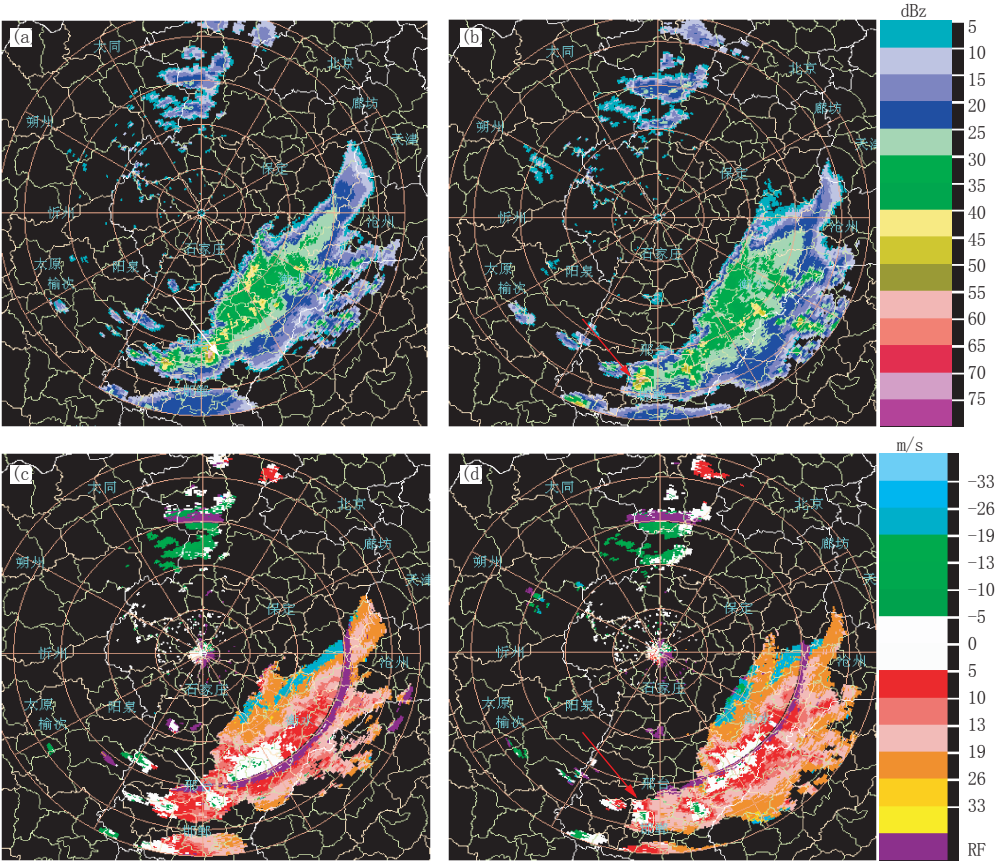


图3 2005年5月10日16-17时石家庄新一代雷达1.5° 仰角基本反射率、径向速度PPI图
(a. 基本反射率16:25 b. 基本反射率16:43 c. 径向速度16:25 d. 径向速度16:43)