

河北省一次强对流天气机理分析*

刘建文, 王淑云, 张 唯, 魏秀梅

(沧州市气象局, 河北 沧州 061001)

摘 要:利用常规天气资料、气象自动站加密观测资料及乡镇加密雨量站资料、其它物理量资料及卫星云图资料等,对 2009-06-08 河北省的强降水及强对流天气进行了分析。研究表明,蒙古低涡携带强的正涡度平流和冷空气,为强对流天气提供了良好的动力条件;南风与偏东风急流为大暴雨提供了良好的水汽,同时,低涡底部的西北风急流与 2 支暖风急流汇合,为暴雨、冰雹、大风等强对流的形成提供了条件。暴雨落区处于低层次大值能量场的顶部,能量场剖面具有鞍形场结构,高层、低层具有大值能量,中层为中性结构,为深对流的发展提供了初始热力条件。自动气象站加密风场资料分析表明,长时间的中小尺度风场辐合增强了地面空气的辐合抬升,同时也是造成此次局地大暴雨的中尺度系统和触发条件。

关键词:低涡;强对流;动力条件;热力条件;中尺度风场

中图分类号: P458

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2012)01-0009-08

受冷暖气流共同影响,2009-06-08 白天到夜间,北京、天津及河北省大部分地区出现了雷雨天气。降雨期间,河北省部分县市还出现了短时大风、冰雹和短时暴雨等强对流天气。暴雨区出现在唐山、天津、北京、廊坊、保定、沧州、衡水(图 1),其中,沧州市南皮县的王寺乡、圣佛镇一带降雨量达到 170 mm。此次强对流天气中,雷击造成 1 处民房被烧毁,20 台电脑、电视被击坏;风雹和强降水造成小麦倒伏、农田被淹、果树落果掉叶等现象,以致农田受灾面积达到 8 万余亩,各项经济损失超过亿元。

1 环流背景

500 hPa 低涡从 2009-06-05 开始在蒙古国西部生成后开始东移南压,至 2009-06-08 移动到我国内蒙古(图 2),河北、北京、天津开始受到涡底部的西北风急流影响(08T08:00 急流最大风速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 20:00 为 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),而 2009-06-08 925~850 hPa 有一条来自南海的南风急流生成,08:00 其在长江以南最大风速达到 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,河北区域为 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,20:00 河北省南风风速达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,河北区域为南风的北界,风速辐合明显;北京 925 hPa 为东风,08T08:00 为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,20:00 达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;500 hPa 的西北风急流、925~850 hPa 的南风急流、925 hPa 北京的东风急流,不仅存在风向上的辐合,还有风速的辐合,3 支急流所携带的冷暖空气在此区域交汇,8 日白天到夜间强降水、雷雨大风、冰雹在河北中部发生。2 支低空急流

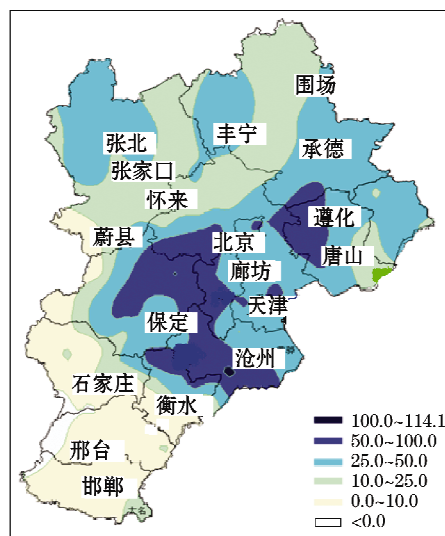


图 1 过程北京、天津及河北省降水量(mm)
Fig. 1 Rainfall in Beijing, Tianjin cities and Hebei Province(mm)

* 收稿日期:2010-10-11

资助项目:河北省气象局地方科研项目——基于数值预报的沧州市夏季暴雨落区(点)预报模型和指标研究(10KY23)

作者简介:刘建文(1967-),男,工程师,主要从事天气预报及服务方面研究. E-mail: czwsy68@163.com

(杜素兰 编辑)

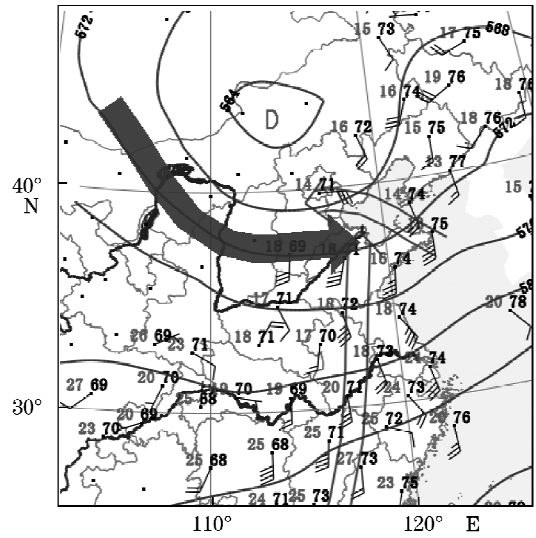
(1支南风或西南风,1支东风或东南风)与1支高空西北风或偏西风急流,在一定的天气背景下,使河北省出现暴雨或大暴雨天气的典型风场结构^[1-3]。

2 诊断分析

2.1 热力条件分析

2009-06-07T20:00—08 河北省中南部 SI 指数为 -2 ~ 0, K 指数为 32 ~ 36 °C, 具备了河北省弱的对流不稳定特征。07T20:00 的 850 hPa θ_w 图上(图略), 110 ~ 120 °N 为 1 个南北向的高能区, 河北省处于 $\theta_w > 56$ °C 高能舌顶部, 与 07T08:00 比较, θ_w 增长了 8 °C, 而河北省东西两侧均为 36 ~ 40 °C 的低能量区, 能量分布呈现 Ω 型分布态势, 此种强度、形状 的分布态势一直维持到 08T20:00, 09T08:00 移到渤海海区, 至此, 河北省降水结束。

分析 2009-06-08T08:00 沿 38.1 °N 方向的 θ_w 剖面图(图 3), 可以看出, 在 114 ~ 116 °E 之间, 850 hPa 以下为 55 °C 的高能区, 600 ~ 300 hPa 之间有一个 55 °C 的高能舌下探, 而其东西两侧均位于 40 ~ 50 °C 的低能区, 在 112 ~ 120 °E 的上空呈现鞍形场结构特征。许焕斌^[4]指出, 在鞍形中心区, 中上部是 θ_w 的深厚等值区, 下部是 θ_w 随高度增高的递减区, 一旦低层有扰动, 上升运动就会发展。由于 $-\frac{\partial \theta_w}{\partial z} < 0$ 的厚度较浅, 上升运动的空气到达中层时其速度并不大, 不会受阻, 可延伸到高层, 容易形成 1 支深厚的、其上升速度受低层辐合量所制约的、上下基本均匀的垂直对流形势, 足以支撑着一个深厚云区, 为暴雨的发展提供优越的条件。另外, 张可苏等^[5]也指出在中高层鞍形场的中心为中性区, 而其周围是稳定区, 这样一个局面, 可以造成周围大气中的快速波动, 在传到鞍形场的中心时逐渐减速, 形成波能的辐合, 这也有利于其中心区的垂直运动发展。由此可见, θ_w 中层鞍形场的出现, 很容易形成深厚的上升气流, 有利于暴雨及强对流天气的出现。



(—) 为 500 hPa 急流, (→) 为 925 hPa 急流
图 2 500 hPa 位势高度场、925 hPa 风场
和高高空急流

Fig. 2 The 500 hPa geopotential height and 925 hPa wind field and jet

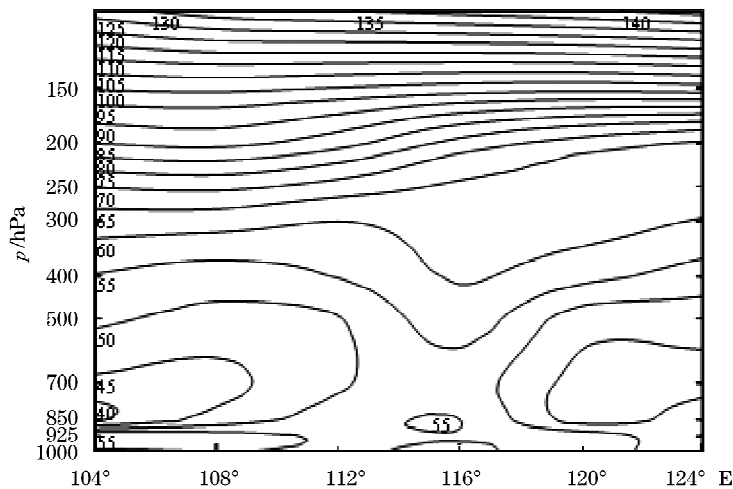


图 3 沿 38.1°N 的 θ_w 纬向剖面图

Fig. 3 Cross-section along 38.1°N

2.2 水汽条件分析

本次降水天气过程的水汽积累从 2009-06-07 夜间开始,2009-06-08T08:00 的 925 hPa 风场上(图 4),从广东到湖南、江西一带有 1 个中心值达到 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的南风急流带,浙江沿海有 1 个 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的南风大风区,山东有 1 个中心值达到 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的南风急流带,此 3 条急流带对应同时次的 925 hPa 水汽通量图上(图 4),有 3 个水汽通量大值中心, $16 \sim 18 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ 的 2 个水汽通量大值中心,1 个位于湖南,1 个位于东海;山东附近有 1 个以 $14 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ 为中心的大值区。可以看出,河北省的降水水汽来源有三个,其为南海、东海和黄渤海。到 08T20:00,伴随着上面所分析的南风急流、偏东风急流的爆发,来自孟加拉湾的水汽通量中心值增大到 $22 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$,东海的水汽通量减小到 $8 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$,黄渤海的水汽通量中心增加到 $16 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$,水汽来源形成 2 个明显的通道,1 个来自孟加拉湾,1 个来自黄渤海。从 850 hPa 水汽通量散度图上可以看出,2009-06-08T08:00 河北省中南部有 1 个 $-12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐合中心(图 5),到 20:00 增大到 $-15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,辐合中心位置没有变化,强降水发生在辐合中心的北部。从经过河北中南部的纬向剖面图看出(图略),08T08:00—20:00,河北省 90% 区域的相对湿度达到了 500 hPa,湿层很深厚,而丁一汇^[6]指出,湿层厚度达到 700 hPa 就有利于暴雨的产生。

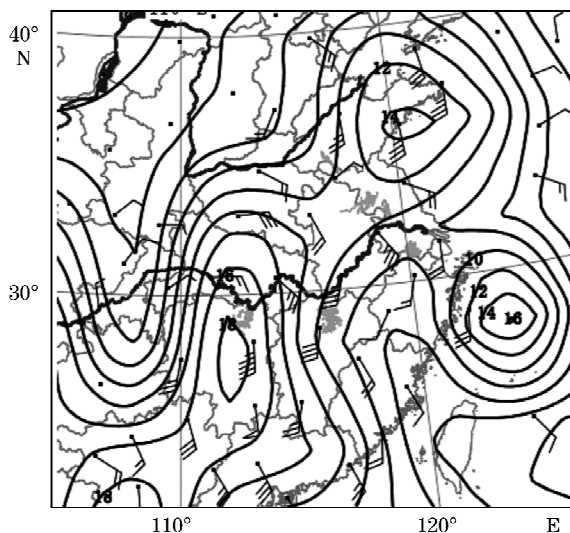


图 4 925 hPa 风场和水汽通量场
($\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$)

Fig. 4 The 925 hPa wind field and water vapor flux
($\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$)

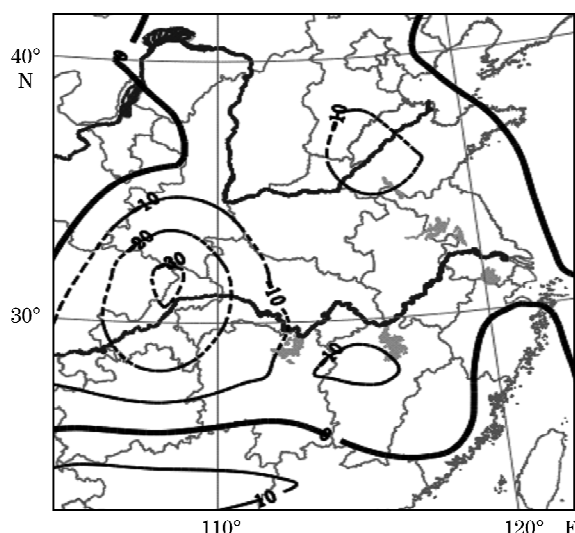


图 5 850 hPa 水汽通量散度
($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Divergences of 850 hPa water vapor flux
($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.3 低涡西北风急流所提供的动力条件分析

从 2009-06-07T20:00 开始,低涡正涡度区域从蒙古向我国的内蒙古、山西、河北传递,08T08:00(图略),河北省上空被正涡度覆盖,大的正涡度中心在低涡位置($108 \sim 112^\circ \text{E}$, $42 \sim 44^\circ \text{N}$)的东部、250~300 hPa 高度层上,中心值为 $60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,500~850 hPa 为 $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的相对大值区;08 T 20:00(图略),正涡度继续向低层传播,低层涡旋性增强, $112 \sim 120^\circ \text{E}$ 范围内,河北省 1 000~700 hPa 涡度值达到 $28 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。08:00 经过河北省中南部的涡度平流纬向剖面图表明(图 6),500 hPa 以上层次 114°E 以西为负的涡度平流,以东为正的涡度平流,大的正涡度平流中心在 $118 \sim 120^\circ \text{E}$ 上空 250 hPa,中心最大值为 $45 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$,涡度平流具有向低层的脊状分布,脊的底部直到 850 hPa。20:00 大的正涡度平流中心依然在 $118 \sim 120^\circ \text{E}$

上空 250 hPa 位置,中心最大值为 $36 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$,500 hPa 以下层的正涡度平流减弱,接近于 0,可见 08:00、20:00 在 250 hPa 以下正涡度平流随高度明显增大,在高层强烈的正涡度平流作用下,高层辐散抽吸作用使低层辐合产生上升运动,触发低层对流发展,并促发地面低压的发展和维持^[7]。

2009-06-08T08:00 河北省上空 400 hPa 以上为正散度区,散度中心处于 250 hPa 高度,中心值达到 $52 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,400 hPa 以下为负散度区,散度中心处于 700 hPa 高度,中心值达到 $-24 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,低层辐合、高空辐散强盛,高空辐散抽吸强于低层辐合;20:00,河北省上空 400 hPa 以上为正散度区,400 hPa 以下为负散度区,正负中心高度没有变化,范围略有缩减,强度有所减小,分别为 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, $-12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,低层辐合、高空辐散依然强盛,低层强辐合、高空强辐散非常有利于上升运动的发展。

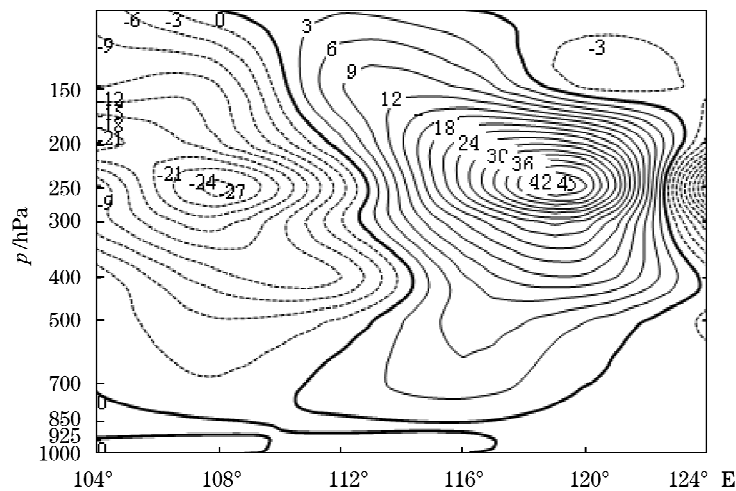


图 6 38.1°N 的涡度平流纬向剖面图(10^{-10} s^{-2})

Fig. 6 Cross-section of vorticity advection along 38°N (10^{-10} s^{-2})

上述涡度、散度场的配置有利于上升运动的维持。08T08:00 及 20:00 河北省上空整层维持强的上升运动,08:00 最大上升速度在 300~500 hPa,中心最大值为 $-51 \times 10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,700 hPa 有 1 个相对大值中心,为 $-20 \times 10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,20:00,400 和 700 hPa 分别出现 2 个 $-17 \times 10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度中心,速度值略有减小。

3 冷空气的影响

低层暖湿、高层干冷是发生冰雹的指标之一。由河北省境内与周边的探空图上可知,由于受高空低涡东南部西南气流的影响,2009-06-08T08:00,500 hPa 以上高层温度露点差较小,其下低层反而较大;08T20:00,随着低涡的东移南压,600~400 hPa 出现明显干区,低层随着低空急流的发展,600 hPa 以下湿度增大,以山东省章丘探空为例(图略),08T20:00,600~400 hPa 干区的温度露点差最大达到 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$,600 hPa 以下温度露点差小于 $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,600~500 hPa 有对流不稳定区域,CAPE 值 $114 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,下层暖湿,高层干冷,此种湿度配置有利于强对流天气的发展。

从北京探空的时间剖面图上(图 7)可看出,08T08:00,850~200 hPa 为一致的西南风,850~700 hPa 风向随高度增加顺时针旋转趋势明显,有暖平流,上部随高度增大风向变化不明显,但风速切变较大。与 07T20:00 相比,500~400 hPa 风速明显增大 $6 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在边界层由 07T20:00 的速度为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南风转变为速度为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东风,东风气流来自渤海,温度较低,边界层弱冷空气的侵入,抬升暖湿气流,致使降水发生。08T20:00,边界层内东风增大到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,500 hPa 西风风速增大到 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,500

hPa 以下风向随高度增加顺时针旋转,暖平流明显,500~400 hPa 风向随高度逆时针旋转,有冷平流,与 08T08:00 相比,500~200 hPa 风速均有 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的增大,低层暖平流明显,高层冷平流明显,又有增大的垂直风切变,可使暖湿气流源源不断地输送到上升气流中,并促使其发展,有利于低空上升气流与高空下沉气流长时间共存,保证了有组织的强对流发生,为河北省强降水及强对流的发生提供了有利的热力及动力条件^[8]。09T08:00,除边界层外,北京高空为一致的西北气流代替,冷暖平流不再明显,河北省的降水基本结束。

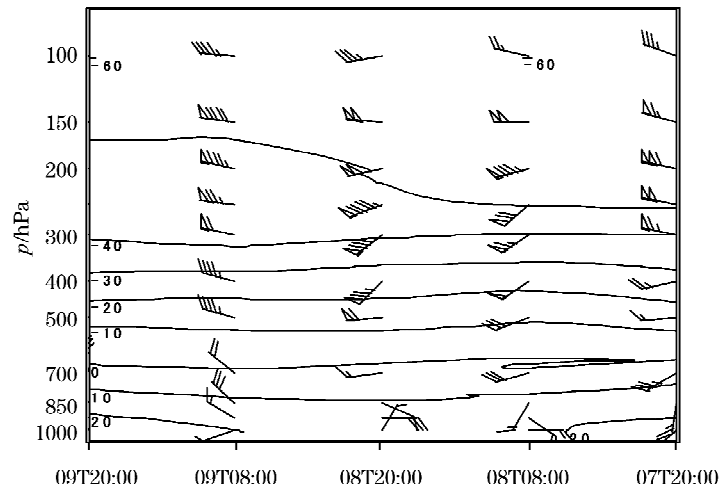


图 7 2009-06-07—09 北京探空时间剖面图

Fig. 7 Cross-section of tlnp of Beijing from 6 to 9 June 2009

4 卫星云图和加密气象资料应用

2009-06-08 白天到夜间,河北区域有 3 次云系影响:09:00—11:00 的强降水云团,主要影响秦皇岛、唐山市,持续时间短;16:00—20:00 的强对流云团,主要影响廊坊、衡水、沧州,雨强大,部分乡镇出现雷电、冰雹、大风强对流天气;09T01:00—07:00 的强降水云系,主要影响衡水、沧州,以强降雨为主,最强降水区在沧州的南皮县南部的 10 余个乡镇,这 6 个小时内降水均超过 100 mm。研究河北省气象自动站逐时加密风场的变化,可以发现加密风场上中小尺度切变线、小尺度气旋性闭合环流的生成和维持,促进了气流的辐合上升,导致了强降水和强对流天气的发生。

2009-06-08T01:00 河北省自动站为南风或东南风,03:00(图 8)河北省西北部开始转为东北风,与南部的南风、东部的东南风形成中尺度辐合线,降水切变线西北部的冷区开始。之后,东北风区域向西南方向扩展,至 07:00,在河北省中南部形成明显的东南西北向的辐合线,其北段在 38.5°N 附近,此复合线稳定少动,直至 17:00。18:00 辐合线突然南压到 38.2°N ,风场发生变化,辐合中心变为 2 个,1 个在衡水区域,1 个在沧州区域,短时强降雨、雷电、大风、冰雹等强对流灾害天气开始出现,此种风场配置直至 23:00;自 09T00:00—02:00,衡水、沧州区域分别出现 2 个气旋性闭合环流,降水开始增大,03:00 衡水的风场难以为继,北风向南压,衡水降水趋于结束,而沧州的闭合环流演变为切变线,继续维持至 09T09:00,强降水从 02:00 持续到 08:00,之后降水开始减小。

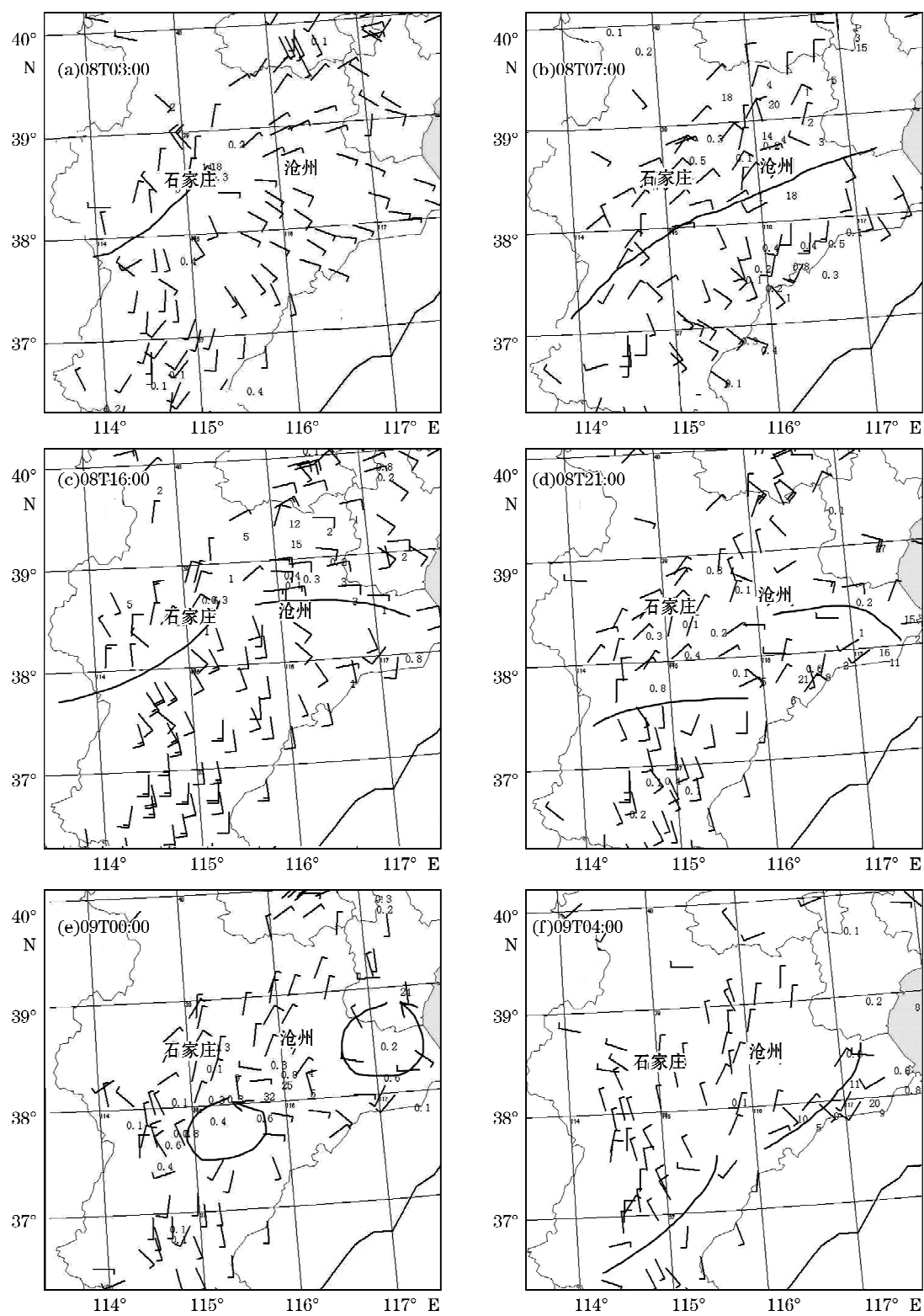


图 8 2009-06-08—09 河北省气象自动站加密风场

Fig. 8 Wind field of automatic weather station of Hebei province from 8 to 9 June 2009

5 结 论

综合上述可知:

1)本次大暴雨及强对流天气是由蒙古低涡、暖湿气流和冷空气的共同影响产生的。3支不同高度、不同风向、不同速度的急流使冷暖空气交汇,形成了大暴雨和强对流天气。

2)强对流天气发生前期,能量积聚明显,使得天气区出现深厚的湿中性层结区,为深厚对流的发展提供了条件。

3)来自孟加拉湾、东海、黄渤海的水汽向河北省输送,使得湿层厚度深厚,为暴雨提供了良好的水汽条件。

4)边界层冷空气的侵入为暴雨提供了初始触发动力,低涡使得河北省上空维持强的正涡度平流,高层维持强辐散,低层维持强辐合,上升运动持续发展。低涡冷空气的不断入侵使得强对流持续。

5)在低涡和低层暖湿气流的共同控制下,具备了强降水、强对流的初始条件,但是降水的发生并不均匀,最小降水 10 mm 左右,最大降水 170 mm,大风、冰雹等强对流天气只在部分乡镇发生,这也正是位置及降雨强度预报的难点。

6)从自动气象站加密风场资料上可以发现,中小尺度切变线、小尺度气旋性闭合环流的生成和维持促进了气流的辐合上升,为强降水、强对流的生成和维持提供了良好的中小尺度辐合动力,参考逐时自动站风场、降水资料,可以较准确的预报强对流天气的大致落区,一定程度上提高预报准确率,确保决策和公共服务产品的可信性。

参考文献(References):

- [1] TIAN X X, SHAO A M. Study of the vortex structure and vorticity budget on a heavy rain in North China[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2008, 27(4): 320-325. 田秀霞,邵爱梅. 一次河北大暴雨的华北低涡结构和涡度收支分析[J]. *暴雨灾害*, 2008, 27(4): 320-325.
- [2] HU X, XU G Q, SU H. The numerical simulation experiments of the jets effects on torrential rain over the Southern Haihe River basin during August 1996[J]. *Meteorological Monthly*, 2007, 27(4): 7-11. 胡欣,徐国强,苏华. 急流对海河南系一次特大暴雨影响的数值试验[J]. *气象*, 2007, 27(4): 7-11.
- [3] WANG S Y, SHOU S W, LIU Y C. Analysis of autumn rainfall event of Cangzhou, Hebei province in 2003[J]. *Meteorological Monthly*, 2005, 31(4): 69-72. 王淑云,寿绍文,刘艳钗. 2003年10月河北省沧州秋季暴雨成因分析[J]. *气象*, 2005, 31(4): 69-72.
- [4] XU H B. Precipitation physical problems of strong storm rainfall[M]//The weather professional committee of Chinese Meteorological Society. *Progress of modern weatherology*. Beijing: China Meteorological Press, 1986: 222-231. 许焕斌. 暴雨强风暴的降水物理问题[M]//中国气象学会天气专业委员会. *近代天气学进展*. 北京:气象出版社, 1986: 222-231.
- [5] ZHANG K S, ZHOU X P. Characteristics of spectrum, structure and transmission of Gravity Wave in a non-hydrostatic equilibrium model[C]//The second national numerical prediction meeting essays, Beijing: Science Publishing House, 1986: 196-206. 张可苏,周晓平. 非静力平衡模式中重力惯性波的波谱、结构和传播特征[C]//第二次全国数值预报会议文集. 北京:科学出版社, 1986: 196-206.
- [6] DING Y H. *Advanced Synoptic Meteorology*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 560. 丁一汇. *高等天气学*[M]. 北京:气象出版社, 1991: 560.
- [7] ZHU Q G, LIN J R, SHOU S W. *Synoptic meteorology principles and methods*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1981: 92-94. 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, 1981: 92-94.
- [8] YU X D, YAO X P, XIONG T N, et al. *Doppler weather radar principle and adhibition*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 93-129. 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. *多普勒天气雷达原理与业务应用*[M]. 北京:气象出版社, 2006: 93-129.

Mechanism Analysis of a Strong Convective Weather in Hebei Province

LIU Jian-wen, WANG Shu-yun, ZHANG Wei, WEI Xiu-mei
(Cangzhou Meteorological bureau of Hebei Province, Cangzhou 061001, China)

Abstract: An analysis for the heavy rain and strong convective weather at night on 8 June 2009 in Hebei Province was performed using conventional data, surface intensified observational data, rainfall of automatic weather stations, physical quantity and satellite image, etc. Results indicated that the vast vorticity advection and cold air of the Mongolian vortex provided dynamical condition for the strong convection; Southerly and easterly jet stream provided rich water vapour, while the confluence of northwesterly jet stream of the low vortex with two warm jet streams facilitated the formation of the torrential rain, hailstone and gale. Strong rain districts were all located in the top part of lower-level energy field, the profile of energy field had a col structure, which had large energy in upper and lower layers, neutral in middle-level, which provided an initial thermal condition for the deep convection. Intensified observational data of wind field showed that the extended meso-microscale wind field convergence enhanced the lifting convergence of surface air, resulting in this mesoscale system and triggered condition of the local torrential rain.

Key words: low vortex; strong convective; dynamical condition; thermal condition; mesoscale wind field

Received: October 11, 2010