

王莉萍,张湃,崔晓东,等.一次后倾槽型冰雹天气过程演变的诊断分析[J].暴雨灾害,2010,29(3):239-244

一次后倾槽型冰雹天气过程演变的诊断分析

王莉萍¹,张 湃²,崔晓东¹,卢家江³,师素玲⁴

(1.河北省衡水市气象局,衡水 053000;2.河北省饶阳县气象局,饶阳 053900;

3.河北省武强县气象局,武强 053300;4.河北省冀州市气象局,冀州 053200)

摘 要:利用常规观测资料以及雷达产品等非常规资料,对 2008 年 5 月 3 日河北省衡水市一次后倾槽型局地冰雹天气进行了诊断分析。结果表明:这次强对流天气是由完整而深厚的“后倾”槽和低层切变线共同影响造成的;冰雹入侵路径是罕见的偏南路径;降雹前雹区为上干冷、下暖湿的对流不稳定层结,但雹区聚集的不稳定能量较小;衡水市的阜城和故城两地雹灾相对较重,阜城冰雹由孤立发展的对流单体造成,故城冰雹则由大范围降水回波内镶嵌的强对流单体所致;垂直累积液态水含量变化及其大值维持时间与冰雹直径和持续时间有很好的对应关系。

关键词:冰雹;后倾槽;切变线;对流单体

中图分类号:P458.1*21.2 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2010)03-0239-06

1 引言

冰雹是伴随飑线、局地强风暴等强对流出现的一种小概率极端天气,常给国民经济和人民生命财产带来严重危害^[1]。由于冰雹受中小尺度天气系统影响,其生消速度快,短期预报难度较大;同时,由于以往各地对冰雹灾情信息收集能力有限,也制约了冰雹预报的科研和业务进展。随着卫星云图、新一代天气雷达等新型探测资料的应用以及灾情收集制度进一步完善,冰雹天气临近预报能力得到一定程度提高,但要做好冰雹落区及影响时间预报还有较大难度。尽管如此,在雷达产品、卫星云图等新型探测资料投入使用后,对出现在我国各地的冰雹天气,不少气象工作者从诸多方面进行了研究,并取得大量有意义的成果^[2-10]。近年来,冰雹天气也越来越受重视,各地在日常天气预报服务中也相继开展了短时(临近)预报。

冰雹是河北省夏半年主要的灾害性天气之一。如 2008 年 5 月 3 日午后河北衡水出现局地冰雹天气过程,给当地农业生产造成了较大的经济损失。对于此次局地冰雹天气过程,衡水市气象台漏报。为了揭示其漏报原因,本文应用 MICAPS 中的常规气象资料以及雷达产品等非常规资料,对此次过程进行天气学诊断分析,以期今后做好冰雹短时临近预报提供一些有益的启示。

2 天气概况与灾情

2008 年 5 月 3 日午后衡水市出现大范围雷雨天

气,并伴有大风、短时强降水、局部冰雹,最大瞬时风速 $23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,15:30 左右降雹开始,持续约 20 min,地面积雹厚 3 cm,冰雹最大直径 40~50 mm。衡水市故城县饶阳店镇水文站资料显示,14—20 时 6 h 降水量达 111.7 mm。另据衡水市民政局统计资料,这次强对流天气造成全市 5.7 万人、4 659 hm^2 农田受灾,其中西瓜 2 617 hm^2 、棉花 1 756 hm^2 、小麦 268 hm^2 ,农业直接经济损失达 2 亿元。

3 影响系统分析

冷涡、锋面、低槽(包括横槽、切变线)等天气系统均可导致冰雹天气。根据以往河北省 52 次大范围降雹过程当日 08 时(北京时,下同)500 hPa 形势和环流特点,归纳出冷涡、冷涡冷槽、低涡冷锋、横槽四种以中高层冷空气入侵为主的主要降雹系统和西北气流、短波槽两种以低层暖平流为主的影响系统^[1]。图 1 给出雹日(5 月 3 日)08 时地面气压场、500 hPa 高度场以及对流层中低层西风槽位置叠加图。

从图 1 中可见,本次冰雹过程冷涡中心位于 50°N 、 112°E 附近,500 hPa 槽后为 $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 西北风大风带(图 1b),500、700、850 hPa 锋区均较明显,地面气压梯度大(图 1a),冷锋移速快;从 5 月 2 日、3 日槽线(或切变线)所处位置看出(图略),500 hPa 槽移动速度要比 700、850 hPa 切变线快。以上特征与上述低涡冷锋型降雹系统的特征基本吻合^[1]。

一般情况下,强对流天气多发生在西风槽呈“前倾”的高低层配置下。从此次过程 500、700、850 hPa 三

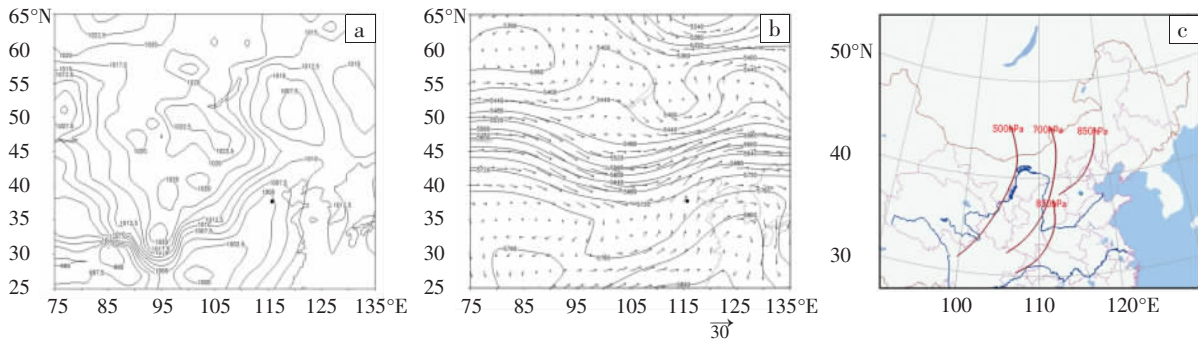


图 1 2008 年 5 月 3 日 08 时地面气压场(a, 单位: hPa, 圆点所示为衡水), 500 hPa 高度场(单位: gpm)与风矢(b)以及对流层三层西风槽位置叠加图(c)

层槽线(或切变线)所处位置可见, 西风槽呈“后倾”状态(图 1c), 这在实际预报中不易引起预报员重视, 这是造成这次冰雹漏报的主要原因。另外, 衡水历年冰雹影响路径统计结果表明, 冰雹多从偏北方向向南移动, 而这次冰雹入侵路径却是从南部向偏北方向移动, 这是造成此次冰雹漏报的又一重要原因。

在河北省低涡冷锋型冰雹天气过程中, 降雹多发生在地面冷锋前 200~400 km 处或高层(300—200 hPa)锋区入侵时, 个别发生在地面冷锋过后。从图 1a 中可见, 3 日 08:00, 有一条近似南北向的冷锋位于山西中西部, 衡水处于降雹范围内。按常规外推地面冷锋系统的移动速度, 此系统由太原到衡水的移动时间约 5 h。由此可知, 此系统影响衡水的时间应在当日午后。进一步分析当日 14:00 地面形势场发现(图略), 此次降雹属锋前降雹。

根据积云动力学理论, 急流主要起动力抽风作用, 有利对流发展, 对冰雹云顶进一步发展起动力作用^[4]。高空急流的存在使高层动量逐渐下传, 动量下传又使得下层扰动加强, 有利于产生上升运动; 同时, 又引导干冷空气进入, 导致不稳定层结形成和触发不稳定能量释放。分析高空风场发现, 300 hPa 以上存在风速大于 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的急流带(图略)。

4 降雹的基本物理条件分析

4.1 不稳定条件分析

4.1.1 大范围层结稳定度

大范围层结不稳定是大范围雹暴发生的重要背景。本文选用沙瓦特指数(SI)分布来表示大范围大气层结稳定度状况。图 2 给出 5 月 2—3 日不同时刻 SI 指数水平分布。

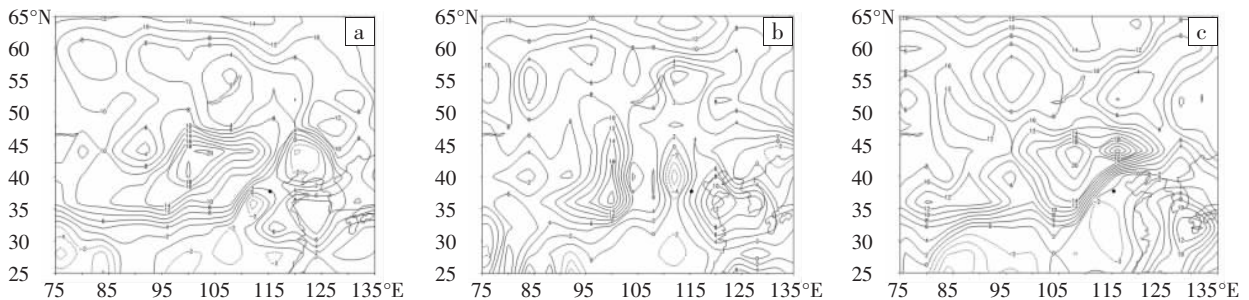


图 2 2008 年 5 月 2 日 08:00 (a)、20:00 (b)以及 3 日 08:00 (c) SI 指数水平分布图

从图 2 中可见, 5 月 2 日 08:00(图 2a), 衡水地区处于 $SI > 0$ °C 区, 说明衡水上空大气层结处于稳定状态; SI 负值区位于山西南部, 其中心值为 -4 °C。2 日 20:00(图 2b), 衡水地区 SI 值减小, 山西南部 SI 负值区北移, 其中心值为 -6 °C, 说明衡水上空大气不稳定度开始增加。到 3 日 08:00(图 2c), SI 负值区东移, 整个河北中南部均处在负值区内, 中心值为 -2 °C, 说明该地区大气层结呈不稳定状态。

4.1.2 局地层结稳定度

冰雹爆发前, 雹区低层一般都有一个潜在不稳定能量累积的过程。在外部动力条件具备的情形下, 大

气潜在不稳定能量就会释放而触发强对流天气。图 3 给出 5 月 2—3 日不同时刻距离衡水站 130 km(南北距离 75 km)的邢台探空曲线图。

从图 3 中可见, 5 月 2 日 08:00(图 3a), 950—1000 hPa 存在浅薄湿层, 890—950 hPa 为等温层和逆温层, 但湿度明显减小, 即为“干暖盖”。干暖盖可抑制边界层小尺度热力对流发展, 使边界层内不稳定能量不致过早零散释放, 直到有某种机制足以使阻挡层破坏、消失和小尺度热对流泡强烈发展^[1]。2 日 20:00(图 3b), 750 hPa 以上不稳定能量骤增, SI 指数由 1.0 °C 降至 -3.6 °C, 大气层结变为不稳定, K 指数也由 16 °C

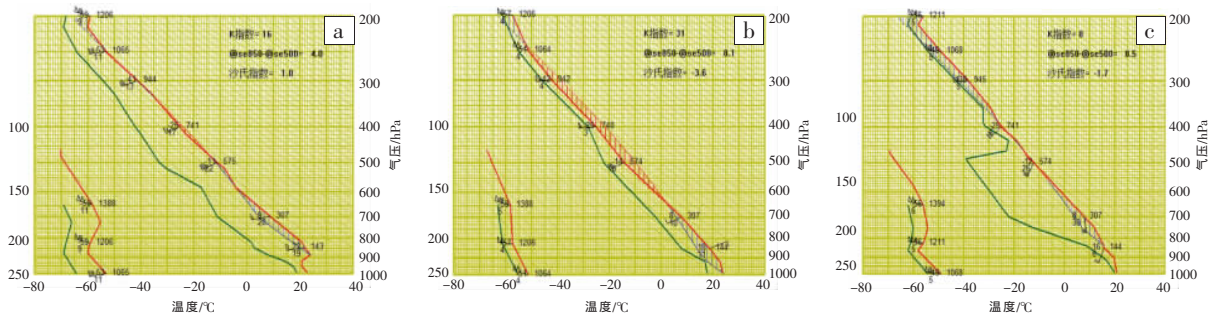


图 3 2008 年 5 月 2 日 08:00 (a)、20:00 (b) 以及 3 日 08:00 (c) 邢台探空曲线图

增至 31 °C,说明从 08:00 到 20:00 有一个能量快速积累的过程。到 3 日 08:00(图 3c),低层逆温层已破坏,K 指数由 2 日 20:00 的 31 °C 降至 8 °C,SI 由 -3.6 °C 增至 -1.7 °C,不稳定能量与 2 日 20:00 相比明显减小,但高层干冷、低层暖湿的不稳定层结仍存在。

另外,分析上述 3 个时次 850 hPa 与 500 hPa 假相当位温差 $\Delta\theta_{se(850-500)}$ 发现, $\Delta\theta_{se(850-500)}$ 一直呈增大趋势,表明对流不稳定度呈增加趋势;而不稳定能量到 3 日 08:00 仍是减小的。3 日 08:00 不稳定能量减小也是造成冰雹漏报的原因之一。

4.2 触发机制

雹暴发生除必须具备不稳定条件之外,还需有一定的触发机制才能使潜在不稳定能量释放并产生强对流。冷锋、冷涡、低槽、切变线、中空急流、能量锋、低

层气流辐合线、地形强迫抬升、下垫面不均匀加热形成的局地上升运动等都可能成为其触发机制。此次降雹的触发机制并不是单一的,地面冷锋、切变线、低槽、中层急流都对触发能量释放起到很大作用。地面冷锋锋前暖空气被强迫抬升,切变线附近辐合和低槽槽前正涡度平流使上升运动加强,造成不稳定能量释放,促使对流发展。从 3 日 08 时不同高度垂直速度场上可见,925 hPa 以上山西到河北均处于上升运动区内,500 hPa 山西北部有一个 -53 hPa·h⁻¹ 的上升运动中心,400 hPa 山西北部垂直速度中心达 -58 hPa·h⁻¹,500 hPa 雹区附近垂直速度在 -28~-44 hPa·h⁻¹ 之间,随系统东移,上升运动中心向雹区移动(图略)。

图 4 为 2008 年 5 月 3 日不同时次河北省中尺度加密自动站风矢量图。

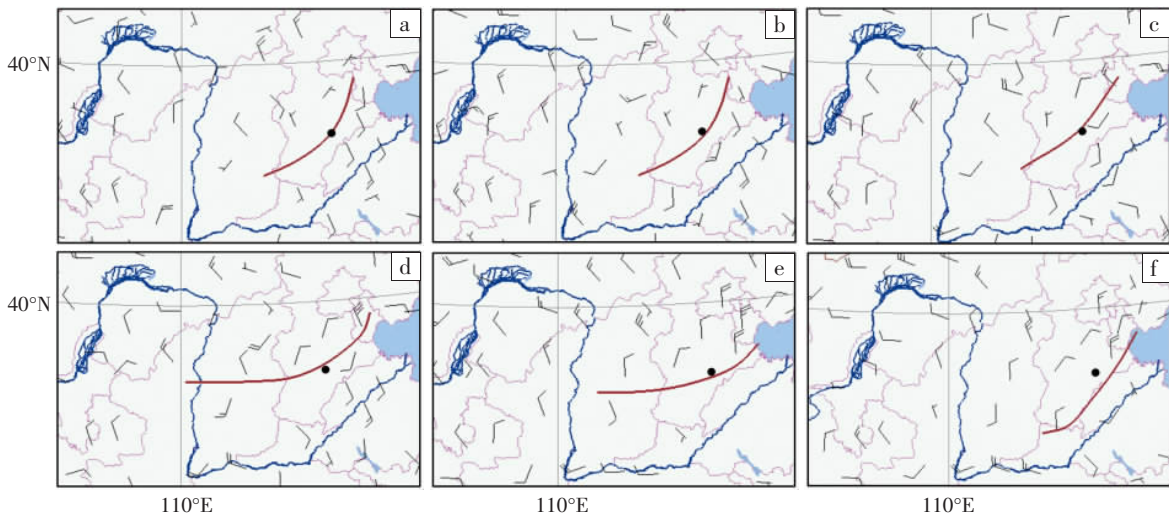


图 4 2008 年 5 月 3 日 08:00 (a)、11:00 (b)、13:00 (c)、14:00 (d)、15:00 (e)、16:00 (f) 河北省中尺度加密自动站风矢量图(红色粗实线为辐合线,圆点所示为衡水)

从图 4a-e 中可看到,08:00—15:00 雹区一直存在中尺度辐合线,这对上升运动的形成和发展、触发不稳定能量释放起到重要作用。14:00(图 4d),辐合线北侧的偏北风和南侧的偏南风均有所增大,使得地面辐合加强。15:00(图 4e),辐合线北侧的偏北风风速进一步增大且南压,其北侧冷空气随之向雹区侵入,同时由于地面辐合加强,冷空气强迫暖空气抬升,触发低层不稳定能量释放,从而引起强对流天气。16:00(图

4f),辐合线继续南压,强对流天气也向南压。到 17:00 (图略),辐合线移出河北省,强对流天气基本结束,雹区由不稳定降水转为稳定性降水。以上分析表明,地面辐合加强和冷空气入侵后的强迫抬升,使产生强对流天气所需的上升运动得到加强,进而导致冰雹天气。

分析 3 日 08 时涡度平流场发现,在沿 38°N 的纬向剖面图上,从东到西 300 hPa 以下为正涡度平流区(图 5a),而在 116°E 的经向剖面图上,从北到南 300 hPa

以下也是正涡度平流区(图 5b), 这表明雹区上空 300 hPa 以下为大范围正涡度平流区。同时发现, 500 hPa 以下正涡度平流较小, 涡度平流随高度增加。由 ω 方

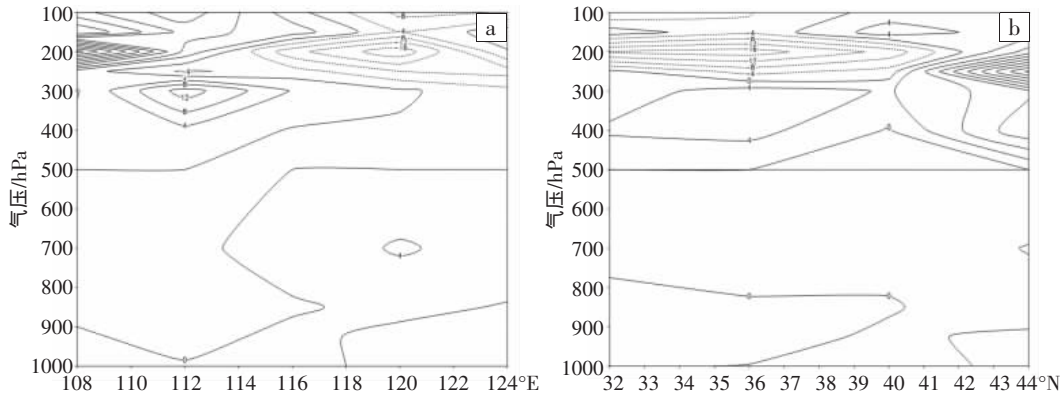


图 5 2008 年 5 月 3 日 08 时沿 38°N (a)、116°E (b) 经衡水雹区附近的涡度平流垂直剖面图

4.3 水汽条件

水汽是成云成雹必不可少的“原料”, 水汽垂直分布与温度一样, 都是影响气层稳定度的重要原因, 雹区需有适当的水汽含量和水汽相对集中区。雹云形成之前, 衡水雹区对流层低层(700 hPa 以下)存在浅薄湿层, 850 hPa 等压面上表现为一狭长湿舌。分析 5 月 3 日 08 时 850 hPa 比湿场可知, 衡水上空存在一东北—西南向湿舌, 雹区比湿 $8\sim 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据衡水本地预报经验, 比湿达到 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 即可产生暴雨。另外, 分析 3 日 08 时 850 hPa 水汽通量散度场发现(图略), 山西北部有 $-23\times 10^{-8}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的辐合中心, 雹区和强降水区处于明显的水汽通量辐合带内, 水汽通量散度值为 $(-15\sim -22)\times 10^{-8}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同时, 低层存在的浅薄湿层从探空图也可清楚看到。

4.4 特征层高度

合适的过冷却层厚度 ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层与 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层间的厚度)对冰雹形成和增长有利, 不太高的融冰厚度 ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层到冰雹降落地点之间的高度差)可使冰雹降落过程中不至于被完全融化^[11]。 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层位置太高不利于形成大的冰雹^[4], 一般认为, 600 hPa 上下为宜; $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层在 400 hPa 附近及以下有利于成雹, 在这种条件下可保证云体发展较高, 利于冰雹形成; 同时, 当雹块长大后下落时不至于因暖层较厚而被融化成水滴。分析 3 日 08:00 邢台探空曲线发现(图 3c), $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度均符合上述条件, 850 hPa 与 500 hPa 温差达 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$, 上下层大气温差较大, 利于强对流生成和发展, 冰雹形成。

4.5 风的垂直切变

有关统计分析表明, 垂直风切变的大小往往和形成风暴的强弱密切相关^[12]。在一定的热力不稳定条件下, 垂直风切变的增强将有利于风暴的生成、加强和发展。垂直风切变是指水平风(包括大小和方向)随高

程可知, 当涡度平流随高度增加时, 将产生上升运动, 高层较大正涡度平流促使雹区垂直上升运动产生和加强, 有利强对流天气发生。

度的变化, 强的垂直风切变出现高度太低, 对不稳定条件下发展的积云、浓积云、积雨云起阻碍作用; 出现高度在 5~12 km 对强位势不稳定条件下发展起来的体积庞大的积雨云起维持和增强作用^[1]。分析 5 月 3 日 08 时邢台探空图发现(图 3c), 强的风垂直切变位于 400—300 hPa 之间, 即最大切变出现在 7~9 km, 切变大小约为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。5 月 2 日 20 时(图 3b), 200 hPa 风速为 $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 700 hPa 为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 两层风速差为 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 3 日 08 时, 200 hPa 风速为 $48\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 700 hPa 为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 两层风速差达 $36\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由此可知, 从 2 日 20 时到 3 日 08 时, 风速切变明显增加, 利于上升运动维持和强对流发展。

5 雷达回波特征分析

由于冰雹云是发展迅速的中小尺度系统影响所致, 短期预报中对其具体影响时间和准确落区很难把握。因此, 做好冰雹临近预警预报是预防或降低雹灾最为有效的方法和手段。近年来, 随着新一代天气雷达投入业务使用, 强对流天气临近预警预报能力有了很大程度提高。对这次强对流天气过程的雷达回波特征分析如下。

5.1 基本反射率因子

这次强对流天气过程中有 3 县部分乡镇出现冰雹和局地强降水, 但其基本反射率因子特征不尽相同(图 6)。3 日 14:36(图 6a), 冀州、枣强、故城、武邑的西南部有分散弱回波出现, 这些回波在向东北方向移动过程中发展加强; 15:24(图 6b), 上述回波逐渐连成一片, 在成片回波中存在强回波带, 而武邑西南部回波发展成孤立的强对流单体, E1、E2 回波中的最大回波强度均达 50 dBz 以上; 直到 15:54(图 6c), 阜城受强对流单体影响, 最大回波强度达 63 dBz, 故城西南部有一条东

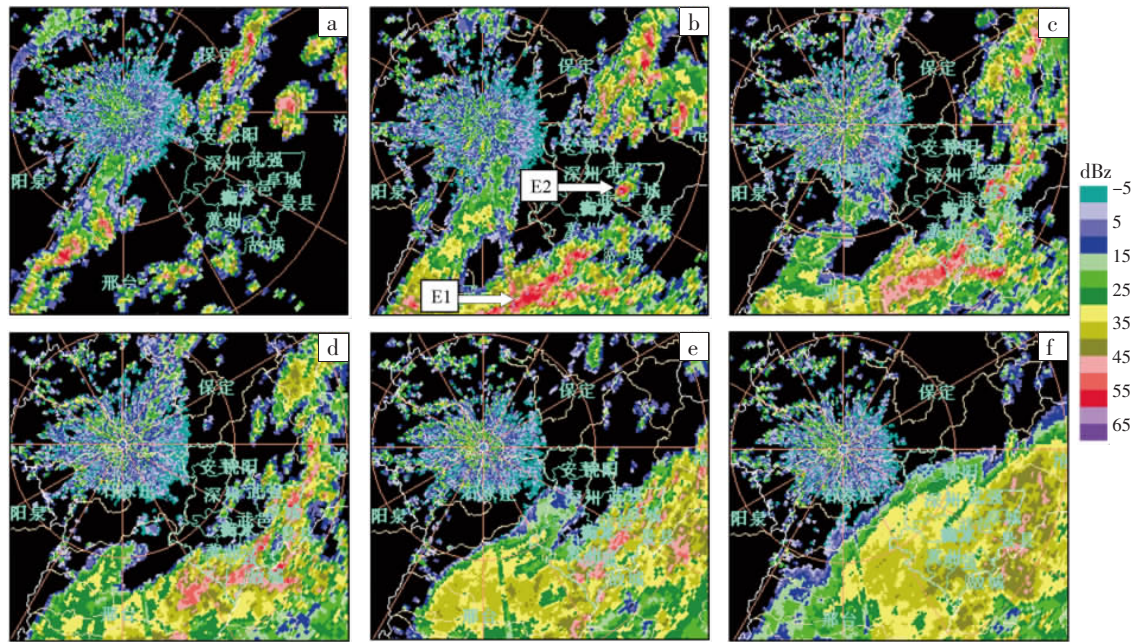


图 6 2008 年 5 月 3 日不同时刻雷达基本反射率因子图(0.5°仰角)
(a) 14:36; (b) 15:24; (c) 15:54; (d) 16:12; (e) 17:00; (f) 17:48

北—西南向和一东西向强回波带东移北抬;16:12(图 6d),影响阜城的对流单体迅速减弱,而故城开始受强回波带影响;17:00(图 6e),强回波带趋于消失;17:48(图 6f),衡水中南部县市被较均匀的大范围回波覆盖并转为稳定性降水。以上回波演变分析结果表明,阜城冰雹天气由孤立发展的对流单体造成,故城冰雹天气则由大范围降水回波内强对流单体所致。15:30 左右开始降雹,结合基本反射率因子演变可看出,降雹发生在回波强烈发展阶段,而不是回波达到最强时。

5.2 垂直累积液态水含量

分析 5 月 3 日不同时刻垂直累积液态水含量(VIL)发现(图 7),15:00(图 7a),阜城境内 VIL 最大值为 23 kg·m⁻²,故城 VIL 为 5~8 kg·m⁻²,到 15:24 两地骤增到 45~48 kg·m⁻²;15:36(图 7b),故城 VIL 继续增至 53 kg·m⁻²,且维持到下一个体扫,结合实况可知,VIL 值骤增和大值维持阶段与降雹时间有非常好的对应关系;15:42(图 7c),故城西部降雹区 VIL 值最大为 48 kg·m⁻²,也达到降雹指标值,但高 VIL 值维持时间较短,到 15:48(图 7d),VIL 值降至 30 kg·m⁻² 以下。

综上所述,VIL 值变化及其大值维持时间与冰雹直径以及降雹持续时间有很好的对应关系。

6 结论

(1)这次强对流天气是由高空低槽和低层切变线共同影响造成的。地面冷锋、高空低槽、切变线是强对流发生的触发机制。

(2)此次降雹过程中高层低槽呈“后倾”状态,这在

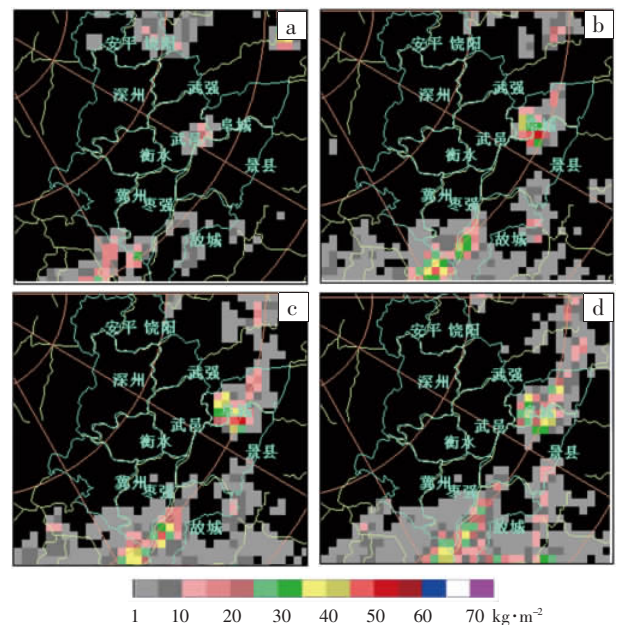


图 7 2008 年 5 月 3 日 15:00 (a)、15:36 (b)、15:42 (c)、15:48 (d) 垂直累积液态水含量图

实际预报中不易引起预报员重视,是造成此次冰雹天气过程漏报的主要原因。另外,衡水历年冰雹影响路径统计结果表明,其多从偏北方向向南移动,而这次冰雹入侵路径为罕见的偏南路径,是冰雹漏报的又一原因。

(3)降雹当日虽存在上干冷、下暖湿的对流不稳定层结,但雹区聚集的不稳定能量不大,甚至降雹临近前不稳定能量有所减小,这也是此次冰雹漏报的原因之一。

(4)降雹单体不尽相同。阜城冰雹由孤立发展的对

流单体造成,故城冰雹则由大范围降水回波内强对流单体所致。垂直累积液态水含量变化及其大值维持时间与冰雹直径以及降雹持续时间有很好的对应关系。

参考文献:

- [1] 河北省气象局.河北省天气预报手册[M].北京:气象出版社,1987:210.
- [2] 王伟,贾惠珍.用雷达垂直累积液态水含量资料预测冰雹[J].气象,2002,28(1):47-48.
- [3] 罗剑琴,熊传辉,付晓辉,等.鄂西南两次典型冰雹天气特征的对比分析[J].湖北气象,2004,23(1):3-6.
- [4] 张天峰,王位泰,吴爱敏,等.庆阳一次强暴雨天气过程雷达回波特征[J].干旱气象,2005,23(3):61-65.
- [5] 田秀霞,胡燕平,张敏,等.一次罕见冰雹天气的多普勒雷达回波分析[J].河南气象,2006,29(2):23-25.
- [6] 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.
- [7] 张一平.2006年6月28日河南省强对流天气过程分析[J].气象与环境科学,2007,30(2):35-37.
- [8] 王建国,汪应琼.CINRAD/SA 雷达产品在冰雹预警中的适用性分析[J].暴雨灾害,2008,27(3):268-272.
- [9] 陈红霞,吕作俊,姬鸿丽,等.豫西地区一次冰雹天气多普勒雷达资料分析[J].气象与环境科学,2007,30(3):65-70.
- [10] 石燕,冯晋勤,闵爱荣,等.一次冰雹过程的多普勒雷达资料的风场反演与分析.暴雨灾害,2009,28(3):255-260.
- [11] 刘兵,戴泽军,胡振菊,等.张家界多个例降雹过程对比分析[J].气象,2009,35(7):23-32.
- [12] 俞小鼎,姚绣萍,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,2006:90-150.

Diagnostic Analysis for the Development of a Hail Event Caused by Backward-tilting Trough

WANG Li-ping¹, ZHANG Pai², CUI Xiao-dong¹, LU Jia-jiang³, SHI Su-ling

(1.Hengshui Meteorological Bureau of Hebei Province, Hengshui 053000; 2.Raoyang Meteorological Station of Hebei Province, Raoyang 053900; 3.Wuqiang Meteorological Station of Hebei Province, Wuqiang 053300; 4.Jizhou Meteorological Station of Hebei Province, Jizhou 053200)

Abstract: With the conventional observation data and non-conventional observation data, such as radar echo data, diagnostic analysis on a hail event caused by backward-tilting trough on 3 May, 2008 in Hengshui was performed. The results show that the severe convective event is caused jointly by the complete and thick backward-tilting trough in upper level and shear line in low level. The hail region intrudes along the rare slanting south route. Before the hail happens there was an unstable convective stratification with the dry and cold air in upper level and warm and humid air in lower level in the hail area. However the unstable energy gathered in the hail area was less. The hail disasters in Fucheng and Gucheng of Hengshui city are relatively more serious. The hail disaster in Fucheng is resulted from the separate convective cells, and the hail disaster in Gucheng is resulted from the severe convective cells inlaid in a wide range of precipitation echo. The variation and continuance time of extreme value of vertically integrated liquid are better corresponded to the diameter and lasting time of hail.

Key words: Hail; Backward-tilting trough; Shear line; Convective cells