

张桂莲, 刘林春, 赵斐, 等. 前倾槽背景下河套地区一次强冰雹天气成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(4): 1-8.  
doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2019.04.001

# 前倾槽背景下河套地区一次强冰雹天气成因分析

张桂莲<sup>1</sup>, 刘林春<sup>1</sup>, 赵斐<sup>1</sup>, 于碧馨<sup>2</sup>, 马素艳<sup>1</sup>, 荀学义<sup>3</sup>

(1. 内蒙古自治区气象台, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 新疆维吾尔自治区气象台, 新疆 乌鲁木齐 830002;  
3. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

**摘要:** 利用常规观测资料、多普勒雷达资料以及 NECP(1°×1°)逐 6 h 再分析资料, 对 2016 年 9 月 22 日内蒙古河套地区强冰雹天气成因进行分析, 结果表明: 在前倾槽有利的天气尺度环流背景下, 中高层干冷空气叠加在低层暖湿空气上形成了对流不稳定层结条件。较大的对流有效位能(CAPE)、假相当位温 $\theta_{se}$ 高能区、0~6 km 中等强度的垂直风切变有利于强冰雹的形成。反射率因子有“钩状回波”、前侧入流缺口、后侧入流缺口; 前侧入流缺口表明有上升气流, 强盛的上升气流有利于空中大冰雹的增长, 后侧入流缺口表明有下沉气流, 有可能引起破坏性大风。基本径向速度剖面有明显的中气旋特征, 强烈的辐合有利于对流风暴上升运动的进一步发展; 对流风暴后侧有辐散下沉气流降落到地面, 辐散风出流促使对流风暴前沿的暖湿气流强迫抬升, 从而使上升运动得到进一步的加强。反射率因子剖面有弱回波区、回波悬垂且 55 dBZ 以上的强回波核心位置超过-20℃层等温线高度以上; 弱回波区左侧的回波强度高达 55~60 dBZ 且已经接地, 表明有大冰雹降落到地面。

**关键词:** 冰雹; 中气旋; “钩状回波”; 入流缺口; 回波悬垂

**中图分类号:** P458.121.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1002-0799(2019)04-0001-08

强对流天气尤其是冰雹是内蒙古夏秋季节一种严重的灾害性天气, 具有局地性强、持续时间短、破坏力大等特点, 给当地农牧业生产造成严重的损失, 因此做好冰雹天气的预报预警服务, 对指导防震减灾具有重要的现实意义。对不同季节<sup>[1-2]</sup>、不同地域<sup>[3-5]</sup>冰雹天气发生发展的研究一直是我国气象工作者关注的重点和难点, 并取得了不少的研究成果。金米娜<sup>[6]</sup>等对 2013 年 3 月 19 日江西省冰雹天气成因分析指出, 地面辐合线和温度锋区以及边界层 $\theta_{se}$ 能量锋区为暖区中非“高架雷暴”类对流的触发提供了启动机制。王晓玲等<sup>[7]</sup>对湖北一次春季冰雹过程的成因分析指出, 冰雹落区主要位于对流层低层及地面高能区重合区域, 且易发生在靠近

露点及温度的不连续线一侧。王秀明<sup>[8]</sup>等研究认为一般雷暴(相对孤立的、持续时间短的弱雷暴)与强对流(产生灾害性天气的持续较长时间的雷暴)的区别认为: 强烈的上升运动、强烈的下沉运动或强烈的旋转, 其对环境的要求为环境正、负热浮力大, 环境风垂直切变大等。蒋瑛<sup>[9]</sup>等对冰雹云微物理过程进行数值模拟认为: 各种水成物有利的空间分布是雹粒增长的物质基础, 且上升气流与水汽相变之间存在一个正反馈效应, 冰雹粒子主要以霰粒子为胚胎进行增长, 增长方式以霰自动转化成雹为主。张桂莲<sup>[10-13]</sup>等对强降雹超级单体研究认为: 超级单体风暴呈现出钩状回波、弱回波区、回波悬垂、回波墙、反射率因子从低到高向低层入流一侧倾斜且回波强度梯度大、中气旋等超级单体风暴雷达回波特征; 风暴内中层维持较深厚的气旋性辐合, 风暴顶则表现出明显的气旋性辐散特征, 标志大冰雹的三体散射长钉特征回波。张云惠<sup>[14-15]</sup>等对两次强冰雹进行了对比分析认为: 层结不稳定在午后有强烈发展, 对流层中下层温度递减率更大; 冰雹出现在低层辐合线及切

收稿日期: 2018-12-13; 修回日期: 2019-05-20

基金项目: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-019)、内蒙古气象局科技创新项目(nmqkjc201903)、内蒙古气象局暴雨创新团队项目(无项目编号)共同资助。

作者简介: 张桂莲(1966—), 女, 高级工程师, 主要从事暴雨和强对流天气预报研究。E-mail: 2561750566@qq.com

变线附近,并沿 500 hPa 引导气流方向移动;张南<sup>[16]</sup>等研究冰雹和正闪之间的关系认为:冰雹出现时正闪比例增加,其空间分布与雷达回波和冰雹路径对应,对冰雹短临精细化预警具有较好的指示意义。蓝渝<sup>[17]</sup>等分析了华北区域冰雹天气分型及云系特征认为:90%以上的冰雹过程发生在对流云团的快速发展阶段中,降雹集中出现于准圆形或椭圆形对流云团边缘或带状对流云系的传播前沿区域,对应于云顶亮温梯度的大值区。吴迎旭<sup>[18-19]</sup>等对短时强降水和冰雹中小尺度特征进行了对比分析:短时降水和冰雹均是低空急流上不断生成的中尺度系统造成的,其中雹云生命史更短,移速更快,云内上升气流异常强盛,其温度和水汽密度廓线陡升较短时降水期间更加剧烈。苏永玲<sup>[20-21]</sup>等对高空冷涡和副高背景下青海冰雹特征对比分析认为冷涡背景下动力强迫为主,副高背景下热力强迫为主产生冰雹,较大冰雹尺寸需要更高的水汽条件和热力条件,且高的强天气威胁指数与较大尺寸冰雹有较好的对应关系。

2016年9月22日15:00—18:00(北京时/BT,下同),内蒙古中西部地区出现了一次强对流天气过程,其中东胜、武川、呼和浩特、丰镇、凉城、集宁等地先后出现了雷暴、雷雨大风、冰雹等强对流天气,呼和浩特市自北向南出现雷暴、雷雨大风、冰雹天气;乌云密布、电闪雷鸣、狂风夹杂着冰雹、阵雨;国家气象站观测记录中冰雹直径最大为9 mm,出现在呼和浩特市郊区站,并伴随17 m/s大风,据全国灾情直报系统记录:呼和浩特市新城塔利村16:40—17:00出现冰雹,冰雹持续时间20 min,冰雹最大直径为5 cm;强风雹过后,呼和浩特市市区北部路面被冰雹覆盖了厚厚一层。这次强对流天气由于发生在早秋季节,导致大田果树、豆类、玉米和蔬菜等秋作物受灾严重,部分蔬菜大棚、车辆受损。

本文利用常规观测资料、多普勒雷达资料以及NECP(1°×1°)逐6h再分析资料对2016年9月22日河套地区冰雹的温湿风垂直结构、中尺度对流系统的环境条件及多普勒雷达资料特征分析,希望为这一类冰雹天气的临近预警提供有价值的思路。

### 1 天气系统特征分析

对9月22日08:00的500~850 hPa高空综合配置图(图1)分析,在110°~115°E、40°~45°N 500 hPa上有一西风槽,而在105°~110°E、40°~45°N 850 hPa上也有一西风槽,低层850 hPa西风槽随高度落后于500 hPa西风槽,850~500 hPa西风槽随高

度明显前倾,属于“前倾槽”结构。500 hPa内蒙古西部河套地区处于槽后西北气流控制之中,不断有干冷空气输送到河套地区。850 hPa河套地区处于西风槽前的西南暖湿气流控制当中,850 hPa上152 dagpm正好位于河套地区南侧,有西南暖湿水汽源源不断地输送到河套地区;中层干冷空气沿槽后西北气流侵入,中层干冷空气叠加在低层暖湿空气,这种“前倾槽”结构属于不稳定层结,非常有利于强对流发展。

500~850 hPa在105°~115°E、35°~45°N有明显的大范围湿区,由于受“前倾槽”的影响500 hPa的湿区范围明显小于850 hPa的湿区范围,中低层有干湿不稳定层结;但500~850 hPa的湿区中心恰好均位于呼和浩特市,呼和浩特市500~850 hPa 08:00的温度露点差均≤4℃,分别为2.0、0.7、2℃,500~850 hPa湿区西侧均有明显的干区以及干线的维持,500~850 hPa每一层均有干冷空气侵入,使大气的中低层干湿不稳定进一步加大,诱发深对流发展,从而导致暴雹天气的发生。

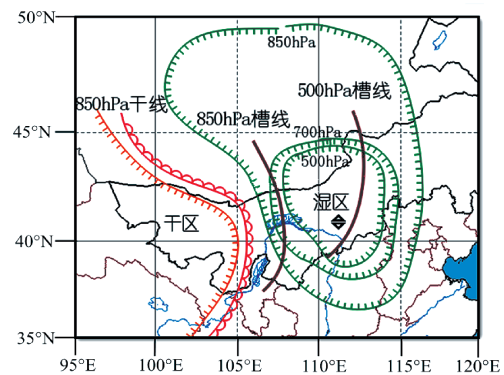


图1 9月22日08:00高空综合配置

### 2 中尺度环境场条件分析

对于雷暴(深厚湿对流)生成预报,有3个构成要素:大气不稳定、低层水汽和抬升触发机制。这3个要素是雷暴生成的充分必要条件(假定微物理条件自动满足)<sup>[22-23]</sup>;下面从这3个方面分析冰雹发生、发展的环境条件。

#### 2.1 大气不稳定条件

利用NECP(1°×1°)逐6h再分析资料(图2~4)对22日14:00(图2a)内蒙古河套地区的850 hPa与500 hPa温度差 $T_{850-500}$ 进行分析,由于河套地区处于“前倾槽”作用之下,500 hPa受槽后冷平流的影响,气温下降,而在850 hPa受槽前暖平流的影响,气温上升,850 hPa与500 hPa温度差 $T_{850-500}$ 加大,热力

不稳定加强。37°~43°N, 106°~115°E 区域内 850 hPa 与 500 hPa 温度差  $T_{850-500}$  在 32~36 °C 之间, 其中呼和浩特市 850 hPa 与 500 hPa 温度差  $T_{850-500}$  也高达 32 °C, 850 hPa 与 500 hPa 温度差表示对流层中低层环境温度随高度的垂直递减率, 850 hPa 与 500 hPa 差值越大, 表示上干下暖湿垂直配置越强, 大气层结不稳定, 越有利于强对流特别是冰雹、雷暴大风天气的产生。

对 16 日 14:00 内蒙古河套地区 850 hPa 假相当位温  $\theta_{se}$  (图 2b) 进行分析, 河套地区有自西南向东北的  $\theta_{se}$  高能舌维持,  $\theta_{se}$  高能舌中心值为 330 K, 在  $\theta_{se}$  高能舌北侧有  $\theta_{se}$  高能锋区存在, 呼和浩特市就位于  $\theta_{se}$  高能舌最大值中心处靠近  $\theta_{se}$  高能锋区处; 假相当位温  $\theta_{se}$  高能锋区的动力强迫有利于低层能量和水汽向上输送, 强冰雹天气就发生在假相当位温高能锋区上。

## 2.2 低层充沛水汽

22 日 14:00 河套地区 850 hPa 比湿 (图 3a) 显示, 39°~41°N, 109°~115°E 区域内有高湿区维持, 呼和浩特市就位于比湿大值中心, 中心值为 8 g/kg, 这

在 9 月下旬的内蒙古西部干旱半干旱地区还是比较高; 22 日 14:00 (图 3b) 河套地区 850 hPa 温度露点差在呼和浩特市为 3~4 °C, 低层水汽仍处于饱和状态。水汽是雷暴的燃料, 当水汽随云底上升气流进入雷暴云, 在凝结成云滴或冰晶时, 潜热释放出来, 驱动了雷暴的上升气流。

## 2.3 抬升触发机制

在对流不稳定条件下, 需要一定的抬升条件对流才能发生; 触发或加强对流的抬升条件有中尺度系统提供<sup>[24]</sup>, 如锋面、干线、地面辐合线等<sup>[25]</sup>。

22 日 08:00, 2 m 露点温度 (图 4a) 显示, 河套地区处于 2 m 露点温度大值区范围内, 呼和浩特市位于 2 m 露点温度大值中心, 中心值为 18 °C; 在呼和浩特市西侧和北侧均有等露点温度线密集带—露点锋即干线维持, 干线西侧和北侧为干区, 西侧和北侧干区中心值只有 6、10 °C, 表明西部和北部分别有干冷空气的侵入, 但露点锋区范围比较大且比较松散, 说明 08:00 冷空气势力不是特别强。22 日 14:00 (图 4b) 呼和浩特市仍位于 2 m 露点温度大值中心, 中心值为 16 °C, 但其西侧和北侧的干区明显东进和南

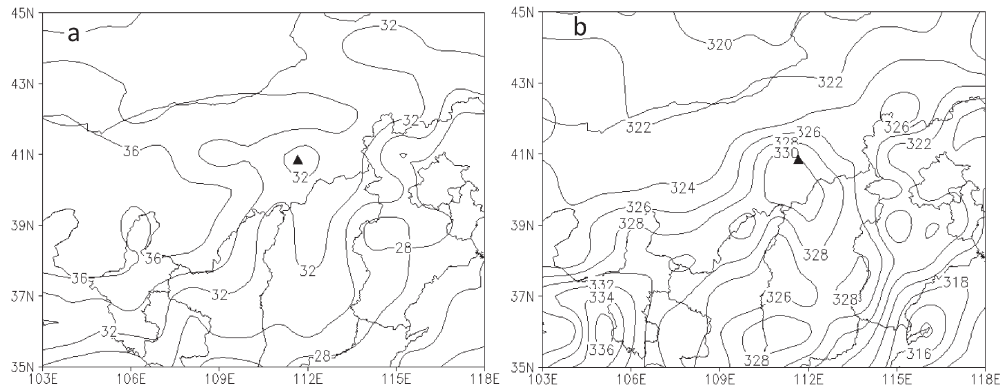


图 2 9 月 22 日 14 时 850 hPa 与 500 hPa 温度差  $T_{850-500}$  (a, 单位: °C) 及 850 hPa 假相当位温  $\theta_{se}$  (b, 单位: K) (▲为呼和浩特市位置, 下同)

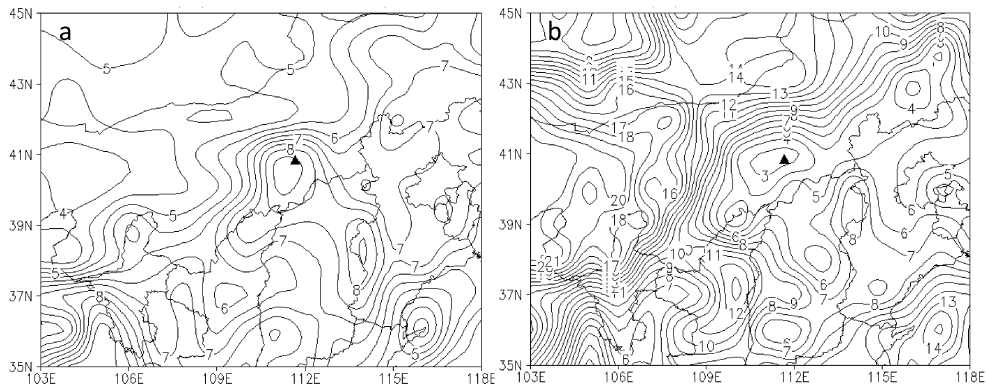


图 3 9 月 22 日 14 时 850 hPa 比湿 (a, 单位: g/kg) 和温度露点差 (b, 单位: °C)

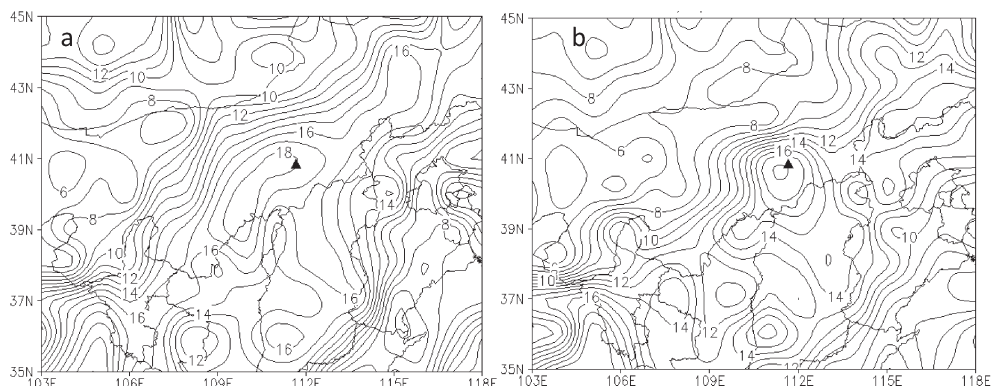


图4 9月22日08:00(a)和14:00(b)2 m露点温度(单位:°C)

压,呼和浩特市被其西侧和北侧的露点锋区所包围,露点锋区也较08:00更加密集,说明14:00冷空气势力逐渐加强,干冷空气从西侧和北侧不断侵入呼和浩特地区,使该地区不稳定得到进一步发展,有利于午后强对流天气的产生。

### 3 温湿风垂直结构分析

为了判定22日14:00以后的最大对流潜势,通过上海探空显示软件用呼和浩特14:00,2 m干球温度和露点温度对08:00呼和浩特探空图进行订正,分析呼和浩特市22日08:00和14:00的探空数据(表1),08:00探空数据显示K指数比较高,为35℃,沙氏指数SI和抬升指数LI比较低,分别为-0.1℃和1.2℃,表明对流不稳定较为明显;抬升凝结高度LCL和对流凝结高度CCL均很低,分别为833 hPa、803 hPa,几乎重合。14:00探空数据显示K指数加大为40℃,SI和LI指数进一步减小,分别为-3.2、-4.3℃,说明对流不稳定进一步加强;强天气威胁指数(SWEAT)也从08:00的156℃升高到14:00的262℃,SWEAT指数在250~300,表明有强雷暴出现的可能性。

对流有效位能CAPE值从08:00的2.5 J/kg跃增为14:00的1316 J/kg;一般来说,对流有效位能CAPE值越大,雷暴发生后其内部的上升气流也就越强;上升气流足够强、持续时间足够长从而使雹块

可以增长到较大尺寸是大冰雹出现的一个必要条件<sup>[26]</sup>,因此出现大冰雹的可能性随着浮力即CAPE值的增加而增大。08:00的对流抑制能量CIN为163.7 J/kg,表明对流层低层存在一个稳定层,这个稳定层有利于能量的积聚,但同时抑制了对流的发展起到了抑制作用;14:00的对流抑制能量CIN减小为0 J/kg,表明对流层低层的稳定层消失,这是由于地面增温以及低层暖平流的增强等原因使边界层升温,近地面的温度达到对流温度,当有抬升触发条件时气块受到正浮力的作用而加速上升。

对22日14:00呼和浩特站订正的探空图(图5)进行分析,925~700 hPa风向由西南风转为西北风,风向随高度显著顺转有暖平流,700 hPa以上层结风向一致为西北风,且风速逐渐增大,由700 hPa的10 m/s增大至200 hPa的24 m/s,有明显的冷平流,850(20℃)~500 hPa(-14℃)的温度差 $T_{850-500}$ 高达34℃,这种“上冷下暖”强的不稳定层结分布,有利于对流风暴的强烈发展。对14:00呼和浩特市探空站干球温度和露点温度曲线分布进行分析,600 hPa以下为湿层,而400~500 hPa层结湿度迅速减小,形成中层干低层湿“上干下湿”向上开口的近似倒“喇叭口”型结构。对流层中层的干层会使降水导致下沉气流中的冰粒、雨滴等强烈蒸发、融化、升华从而使下沉气流显著降温,产生比较大的负浮力,有利于地面雷暴大风的发生<sup>[27]</sup>。

表1 呼和浩特市主要环境参数

时间	K/°C	SI/°C	LI/°C	SWEAT/°C	CAPE/(J/kg)	CIN/(J/kg)	$T_{850-500}/°C$	0℃层高度/m	-20℃层高度/m	LFC/hPa
08:00	35	-0.1	1.2	156	2.5	163.7	34	3500	6500	595
14:00	40	-3.2	-4.3	262	1316	0	-	-	-	887

注:-表示无14:00订正数据。

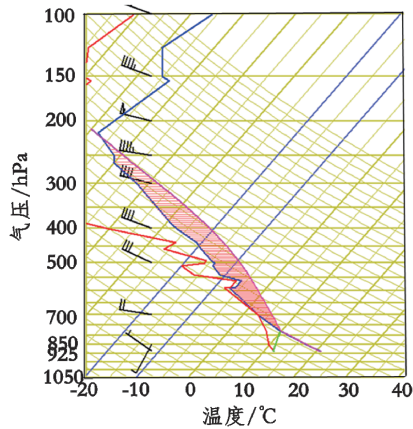


图5 9月22日呼和浩特14:00 T-logP订正图

强冰雹的产生还需要适宜的0℃层和-20℃层高度,呼和浩特站0℃和-20℃层的高度分别为3.5、6.5 km,有利于冰雹的产生;同时对流层中上层的冷平流有利于0℃、-20℃等特性层高度迅速降低,为雹胚的生长提供了良好的形成环境<sup>[28]</sup>;融化效应也是决定的冰雹大小的因素之一,较低的0℃层高度使冰雹在空中降落时融化过程越短,有利于大冰雹的形成。自由对流高度(LFC)也从08:00的595 hPa降低到14:00的887 hPa,表明对流更容易发生;从风的垂直切变上来看,呼和浩特站0~6 km垂直风矢量差为14 m/s属于中等强度的垂直风切变,这为强对流风暴的气流有组织性和长时间维持提供了有利条件。

#### 4 雷达回波特征

##### 4.1 反射率因子特征

对22日午后呼和浩特多普勒雷达反射率进行跟踪分析,15:42组合反射率因子图上(图6a)有“钩状回波”存在,“钩状回波”结构密实、强度很强,最强

反射率因子核心强度 $\geq 65$  dBZ,“钩状回波”表明强降水包裹着中气旋。有两个非常明显的前侧入流缺口,一个不是特别明显后侧入流缺口。前侧入流缺口回波表明强的上升气流,强盛的上升气流也有利于空中大冰雹的增长,后侧入流缺口回波表明下沉气流,并有可能引起破坏性大风。

17:16的1.5°仰角基本反射率因子图上(图6b)雷达东南方向仍有强回波,且有一个低层入流“V”形缺口(箭头指向),箭头前方是构成风暴的入流缺口的一部分低层弱回波区,顶点指向强回波,强回波中心的反射率因子强度高达50~55 dBZ,由于呼和浩特多普勒雷达是C波段雷达(CD型),低层入流“V”形缺口可能是由于强冰雹对雷达回波的强烈衰减所导致的。通过对反射率进行跟踪分析,一直有强回波在河套地区生成,说明对流风暴的强度比较强。

产生大冰雹的强对流风暴最显著特征体现在反射率因子高值区向上扩展到较高高度,如果-20℃等温线对应的高度之上有超过50 dBZ的反射率因子,则有可能产生大冰雹;且反射率因子越强,高度越高,产生大冰雹的可能性和严重程度越大<sup>[29-30]</sup>。

图7为22日17:16沿着雷达径向通过最强反射率因子核心(图6b)1.5°仰角红线位置所做的垂直剖面,垂直剖面显示有相对宽阔的弱回波区,弱回波区是强上升运动的一种表现;弱回波区上有回波悬垂,回波悬垂强度在45~55 dBZ之间,回波悬垂上的55 dBZ以上的强回波核心位置一直向上延伸至8 km,通过呼和浩特市探空资料可知-20℃层高度为6.5 km,强回波核心位置超过-20℃层等温线高度以上,表明有大冰雹产生;而弱回波区左侧的强回波区域对应大冰雹的下降通道,回波强度高达55~60 dBZ,而且强回波已经接地,表明有大冰雹降落到地面。

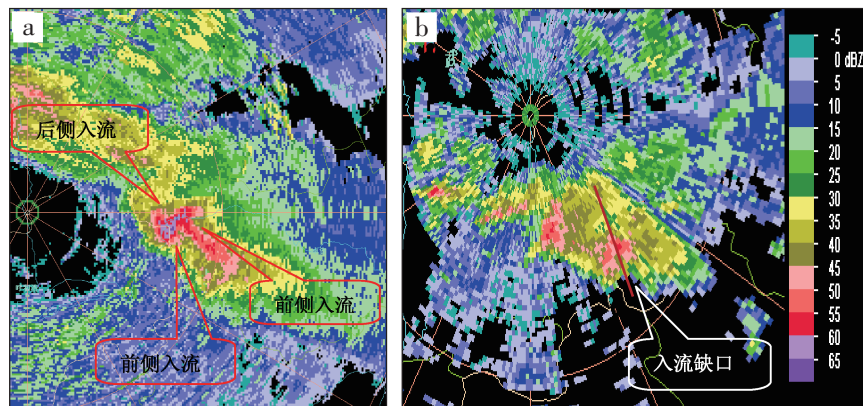


图6 9月22日呼和浩特多普勒雷达15:42组合反射率(a)及17:16 1.5°仰角基本反射率(b)(单位:dBZ)

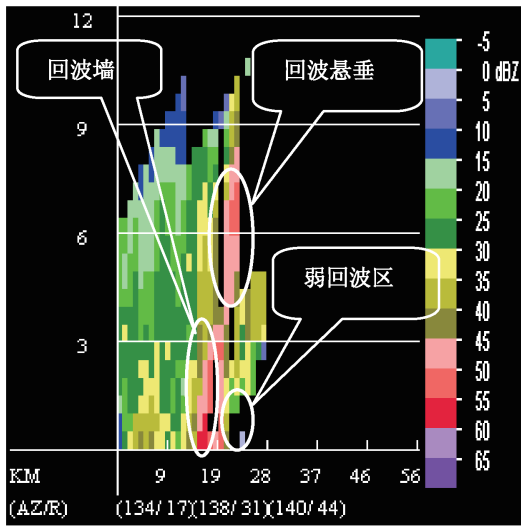


图7 9月22日17:16呼和浩特多普勒雷达1.5°仰角反射率因子剖面(单位:dBZ)

#### 4.2 基本径向速度特征

在22日17:02呼和浩特多普勒雷达2.4°仰角产品(图8a)中有气旋式切变速度对,出流速度出现了速度模糊,退模糊后最大出流速度和最大入流速度为±25 m/s,有明显的旋转特征,核区直径也基本<10 km,而速度对距离雷达为52.7 km,且体扫维持两个以上,满足中气旋的判据,说明此风暴为超级单体风暴。在雷达东南方向有大范围径向速度为20 m/s以上的出流,同时出现逆风区,说明近地面层附近有强风出现。

对22日17:02呼和浩特市2.4°仰角径向速度垂直剖面图(图8b)进行分析,暖色代表离开雷达向着画面的速度,冷色代表离开画面向着雷达的速度,3 km以下低层具有明显的径向速度辐合特征,而低层径向速度辐合区上方3~6 km处仍有径向速度辐合区,强烈的辐合有利于对流风暴上升运动的强烈发展。对流风暴后侧有辐散下沉气流降落到地面,近地面的辐散风高达15~20 m/s,强的辐散风出流使对

流风暴前沿的暖湿气流强迫抬升,使上升运动得到进一步的发展。

#### 5 结论

利用常规观测资料、多普勒雷达资料以及NECP(1°×1°)逐6 h再分析资料,对2016年9月22日内蒙古河套地区强冰雹天气成因进行分析。结果表明:

(1)在前倾槽有利的天气尺度环流背景下,中高层干冷空气叠加在低层暖湿空气上形成了对流不稳定层结条件。低层充沛的水汽输送,在上升运动中凝结潜热释放,驱动了雷暴的上升。

(2)地面干线是冰雹的主要触发机制;较大的对流有效位能(CAPE)、K指数及 $\theta_{se}$ 高能区,0~6 km中等强度的垂直风切变,为冰雹的形成、增长提供了比较有利的中尺度环境条件。

(3)反射率因子有“钩状回波”,两个非常明显的前侧入流缺口,一个后侧入流缺口。“钩状回波”表明强降水包裹着中气旋,前侧入流缺口回波表明有上升气流,强盛的上升气流有利于空中大冰雹的增长,后侧入流缺口回波表明有下沉气流。

(4)反射率因子剖面有弱回波区、回波悬垂且回波悬垂上的55 dBZ以上的强回波核心位置超过-20℃层等温线高度以上,表明有大冰雹产生;弱回波区左侧的强回波强度高达55~60 dBZ且强回波已经接地,该区域对应大冰雹的下降通道,表明有大冰雹降落到地面。

(5)基本径向速度具有明显的中气旋特征,3 km以下低层具有明显的径向速度辐合特征,而低层径向速度辐合区上方3~6 km处仍有径向速度辐合区,强烈的辐合有利于对流风暴上升运动的进一步发展。对流风暴后侧有辐散下沉气流降落到地面,辐散风出流促使对流风暴前沿的暖湿气流强迫抬升,从而使上升运动得到进一步的加强。

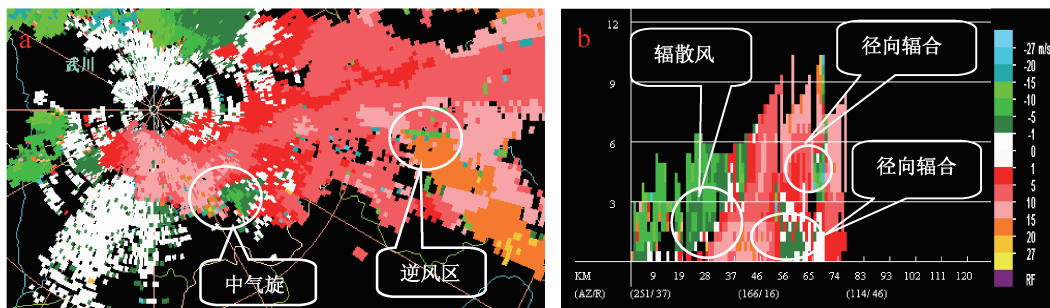


图8 9月22日17:02呼和浩特市多普勒雷达2.4°仰角径向速度(a)和径向速度剖面(b)(单位:m/s)

## 参考文献:

- [1] 孙伟,曹舒娅,解小寒,等.苏南一次深秋局地强对流的多源资料分析[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(3):56-63.
- [2] 鲁德金,陈钟荣,袁野,等.安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J].气象,2015,41(9):1104-1110.
- [3] 敖泽建,傅朝,蒋友严,等.甘南高原“4·15”冰雹天气的多普勒雷达特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(2):27-33.
- [4] 姚静,井宇,赵强,等.黄土高原一次连续性强对流天气分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(3):55-64.
- [5] 黄晓龙,高丽.2014年3.19台州冰雹过程中尺度分析[J].气象,2016,42(6):696-708.
- [6] 金米娜,陈云辉,许爱华,等.2013年3月19日江西省冰雹天气成因分析[J].暴雨灾害,2013,32(2):158-166.
- [7] 王晓玲,龙利民,王珊珊.一次春季冰雹过程的成因分析[J].暴雨灾害.2010,29(2):160-165.
- [8] 王秀明,俞小鼎,周小刚.雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J].气象,2014,40(4):389-399.
- [9] 蒋瑛,朱克云,张杰.贵州地区冰雹云微物理过程及发展机制数值模拟研究[J].气象,2016,42(8):920-933.
- [10] 张桂莲,常欣,黄晓璐,等.东北冷涡背景下超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J].高原气象,2018,37(5):1364-1374.
- [11] 张桂莲,赵艳丽,黄晓璐,等.“9.24”内蒙古东南部致灾飑线过程成因分析[J].暴雨灾害,2019,38(1):41-47.
- [12] 胡胜,罗聪,张羽,等.广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征[J].应用气象学报,2015,26(1):57-65.
- [13] 徐芬,郑媛媛,肖卉,等.江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析[J].气象,2016,42(5):567-577.
- [14] 张云惠,谭艳梅,于碧馨,等.中亚低涡背景下新疆西部两次强冰雹环境场对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(4):10-16.
- [15] 陈关清,杨群,李伟栋,等.贵州铜仁连续两次冰雹天气过程的对比分析[J].干旱气象,2016,34(1):163-172.
- [16] 张南,曹晓冲,闫雪瑾,等.冀中南地区一次冰雹天气的中小尺度特征[J].干旱气象,2016,34(4):693-699.
- [17] 蓝渝,郑永光,毛冬艳,等.华北区域冰雹天气分型及云系特征[J].应用气象学报,2014,25(5):538-549.
- [18] 吴迎旭,张慧君,周一,等.黑龙江省非典型天气系统下短时强降水和冰雹特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(6):59-67.
- [19] 刘晶,于碧馨,赵克明,等.乌鲁木齐“4.24”短时降水和冰雹中小尺度特征对比分析[J].暴雨灾害,2018,37(4):347-355.
- [20] 苏永玲,马秀梅,马元仓,等.高空冷涡和副高背景下青海冰雹特征对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(4):22-29.
- [21] 张一平,俞小鼎,孙景兰,等.一次槽后型大暴雨伴冰雹的形成机制和雷达观测分析[J].高原气象,2014,33(4):1093-1104.
- [22] Doswell C A, Harold E B, Robert A M. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. Wea Forecasting,1996,11(4):560-581.
- [23] 俞小鼎. 基于构成要素的预报方法—配料法 [J]. 气象,2011,37(8):913-918.
- [24] Doswell C A.The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection:A case study example[J].Wea Forecasting,1987,2(1):3-16.
- [25] 俞小鼎,熊延南,周小刚,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006,92-149.
- [26] Johns R H, Doswell C A.Severe local storms forecasting [J].Wea.Forecasting,1992(7):588-612.
- [27] 郑永光,陶祖钰,俞小鼎.强对流天气预报的一些基本问题[J].气象,2017,43(6):641-652.
- [28] 孙继松,陶祖钰.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].气象,2012,38(2):164-173.
- [29] Waldvogel A ,Federer B, Grimm P. Criteria for the detection of hail cells [J].J.Appl.Meteor.,1979,18:1521-1525.
- [30] Witt A,Eilts M D,Stumpf G J,et al. An enhanced hail detection algorithm for the the WSR -88D [J].Wea. Forecasting, 1988,13:286-303.

## Weather Causes for a Heavy Hail under the Background of the Forward Trough in Hetao Area

ZHANG Guilian<sup>1</sup>, LIU Linchun<sup>1</sup>, ZHAO Fei<sup>1</sup>, YU Bixin<sup>2</sup>, MA Suyan<sup>1</sup>, XUN Xueyi<sup>3</sup>

(1.Inner Mongolian Meteorological Observatory, Hohhot 010051, China;

2.Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China;

3.School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

**Abstract** The weather causes for a heavy hail in Hetao area of Inner Mongolia on 22th September 2016 was analyzed, based on the conventional observational data, Doppler radar data and NCEP ( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ) every six hours reanalysis data. The main conclusions are as follows: Under the favorable large-scale circulation background of the forward trough, the instability energy of atmosphere accumulated caused by dry cold air in middle-high layer superimposed on warm moist air of lower layer. The larger CAPE, high energy region of  $\theta_{se}$  and medium intensity of 0–6 km vertical wind shear favor to form heavy hail. The features of reflectivity factor can be found that such as the hook echo, the front of inflow notch and the behind of inflow notch. The front of inflow notch indicated that there is updraft which favor to form the growth of large hail. The behind of inflow notch indicated that there is downdraft which may cause destructive strong wind. The basic radial velocity profile has obviously mesocyclone characteristics, strong convergence is contribute to the develop for updraft of convective storm. There is downdraft that behind the convective storm arrived the ground. Outflow of divergent wind makes warm moist air of convective storm front forced uplifting, which makes further developing of updraft. The features of reflectivity factor profile could be found, such as the weak echo region, overhang echo and the core of reflectivity above 55 dBZ extends above 20 °C. The echo intensity of left weak echo region up to 55–60 dBZ and already reached the ground, which indicates that heavy hail dropped.

**Key words** hail; mesocyclone; hook echo; inflow notch; overhang echo