

# 太行山东麓一次强对流冰雹云结构的观测分析<sup>\*</sup>

范皓<sup>1,2</sup> 杨永胜<sup>1,2</sup> 段英<sup>2,3</sup> 许焕斌<sup>4</sup> 刘黎平<sup>5</sup> 耿飞<sup>1,2</sup>  
FAN Hao<sup>1,2</sup> YANG Yongsheng<sup>1,2</sup> DUAN Ying<sup>2,3</sup> XU Huanbin<sup>4</sup> LIU Liping<sup>5</sup> GENG Fei<sup>1,2</sup>

1. 邢台市气象局,邢台,054000
2. 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄,050021
3. 河北省人工影响天气办公室,石家庄,050021
4. 北京应用气象研究所,北京,100082
5. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

1. *Xingtai Meteorological Bureau, Xingtai 054000, China*
2. *Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China*
3. *Hebei Province Weather Modification Office, Shijiazhuang 050021, China*
4. *Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100082, China*
5. *State Key Laboratory of Disaster Weather, China Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2019-01-30 收稿,2019-07-07 改回。

范皓,杨永胜,段英,许焕斌,刘黎平,耿飞. 2019. 太行山东麓一次强对流冰雹云结构的观测分析. 气象学报, 77(5):823-834

**Fan Hao, Yang Yongsheng, Duan Ying, Xu Huanbin, Liu Liping, Geng Fei. 2019. An observational analysis of the cloud structure of a severe convective hailstorm over the eastern foothill of Taihang Mountain. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(5):823-834**

**Abstract** In the afternoon of 12 May 2018, a severe convective cell and hailstorm suddenly occurred in the eastern foothill of Taihang Mountain. In order to explore the mechanism for hail formation, comprehensive observations obtained from the "Artificial Rain Enhancement and Hail Control Experiment in the Eastern Foothill of Taihang Mountain" project are analyzed from perspectives of weather background, hail characteristics, echo evolution characteristics, formation mechanism of large hail and cloud dynamic structure. The results show that the favorable thermal condition, the convergence disturbance of the wind field in lower levels and the invasion of cold airmass in middle levels are the trigger factors for this strong convective hailstorm. The comprehensive analysis of radar echoes reveals an ultra-long "overhanging echo" feature during the hailstorm period, which, combined with the corresponding large hail formation characteristics, indicates that zero lines (zero area) existed in the upper, middle and lower levels of clouds. The main updraft recurved counterclockwise twice, increasing the opportunity for the embryos to re-enter the main updraft and continue to grow. The schematic diagram of the main updraft in clouds and the formation of large hail shows that the hailstorm can develop in multiple formats.

**Key words** Severe hailstorm clouds, Overhanging echo, Formation mechanism of large hail, Dynamic structure model, Eastern foothill of Taihang Mountain

**摘要** 利用“太行山东麓人工增雨防雹作业技术试验示范”项目在冰雹发生区获取的综合观测资料,从强对流单体出现的天气背景、降雹特征、雷达回波演变、大冰雹的形成机制及动力结构等方面对2018年5月12日下午发生于太行山东麓的一次强对流单体降雹天气过程进行了分析。结果显示,午后不稳定能量的增大形成了有利的热力条件,低层风场的辐合扰动以及中层的冷空气侵入是产生本次强冰雹过程的触发因素。通过对雹云降雹时段雷达回波具有超长“悬挂回波”和对应大雹形成

<sup>\*</sup> 资助课题:国家重点研发计划(2017YFB0504002)、河北省“十三五”气象重点项目(hbrywscy-2017-06)。

作者简介:范皓,主要从事人工影响天气研究。E-mail: fh121@126.com

通信作者:杨永胜,主要从事人工影响天气与天气预报研究。E-mail: 55808126@qq.com

特征分析表明,云中存在着上、中、下相互衔接的0线(域),主上升气流2次逆时针转弯增加了雹胚再入主上升气流区继续长成大雹的机会,据此勾画出了云体主上升气流框架及大冰雹的形成机制,表明冰雹在雹云中的生长有多种模式。

**关键词** 强雹云,悬挂回波,大冰雹形成机制,动力结构模型,太行山东麓

**中图法分类号** P458.3

## 1 引言

雹云是强对流云,其形成、结构及其演变特征复杂。众多学者经过长期、多途径的观测研究表明,认识雹云形成的宏微观场的配合和相互作用机制,可以勾画出反映和表征其结构特征的物理概念模型。Сулаквелидзе(1967)研究建立了一维冰雹云模型,其模型的功能可以描述云中上升气流随高度的分布特征,以及云中形成冰雹的过冷水含量累积带。Browning等(1976)结合雷达等观测事实,构建了具有典型雹云单体结构的二维冰雹云中粒子增长运行概念模型,该模型可以比较准确地描述云中的流场、冰雹的增长轨迹与形成区域及对应的雷达回波结构。在此基础上,Foote等(1982,1983)、Doswell III(2001)进一步指出大冰雹增长可能存在的“循环”和动力机制。俞小鼎等(2006,2012)、罗琪等(2019)采用多普勒雷达开展了对强风暴结构的观测与应用研究。

中国地域广阔,冰雹频发,雹灾对国民经济发展及人民生活安全造成严重威胁。因此,长期以来,中国气象科学工作者持续开展了相关研究,并取得了很大进展。20世纪70年代在综合观测能力有限的条件下,在山西昔阳县连续开展了10年防雹观测试验,总结出了冰雹云发生、发展和消亡三个阶段的演变特征,并初步勾画出单体、超级单体和多单体雹云对应的概念模型(黄美元等,1980)。伴随着业务性防雹作业需求的不断提升,陆续开展了大量的观测研究(黄美元等,2000)。在河北省“十五”重大科技攻关等项目的支持下,对雹云结构和人工防雹技术也进行了系列研究(段英等,1998;许焕斌等,1999,2000,2001,2002,2005,2008;范皓等,2004;田利庆等,2005;Kang, et al, 2007)。

随着双偏振雷达、毫米波雷达及微波辐射计等探测技术在中国的不断应用,新设备对识别雹云的研究取得了新进展(刘黎平等,1992,1993,1996,2015)。但是,在太行山东麓,由于偏振雷达等新探测技术的应用刚刚开始,还没有与常规业务雷达联

合探测开展典型强对流雹云结构和大雹增长机制的研究。

本研究利用河北省“十三五”气象重点项目——“太行山东麓人工增雨防雹作业技术试验示范”项目中所布设的常规气象站观测资料,结合多普勒雷达、X波段双偏振雷达(与遥感设备综合)等探测资料,对本地发生的降雹天气背景、降雹分布、回波演变、动力结构等进行综合分析,旨在探讨及认识本地雹云的动力框架结构和大雹增长机制(实例模型)。

## 2 资料来源

所用资料来源于气象部门业务布网的石家庄(新乐)多普勒天气雷达、(鹿泉)风廓线雷达、邢台(皇寺)中国国家地面站和探空站(53798)以及“太行山东麓人工增雨防雹作业技术试验示范”项目在中国气象局邢台大气环境野外试验基地皇寺站布设的云雷达、微雨雷达、微波辐射计和内丘柳林站布设的X波段双偏振雷达等综合探测设备(图1)。所用雷达探测资料均经过速度退模糊、衰减订正等质量控制;地面气象站分析数据也经过质量控制。

由于本研究的重点是雹云的动力结构和对应时段的大雹增长机制,因此,准确利用不同位置的天气雷达与X波段双偏振雷达同时观测到的雹云回波结构特征的有效资料是关键,重点选取第二次降大雹前12 min的两种雷达探测资料,分析雹云的动力结构与大雹增长机制。

## 3 天气形势及降雹特征

### 3.1 天气形势

2018年5月12日08时(北京时,下同)500 hPa(图2)上内蒙古河套一带有一短波槽(北槽),与位于山西到四川一带的后倾先兆槽(南槽)构成南北走向阶梯槽形势,河北中南部高层受先兆槽前偏西气流控制,中低层受槽后西北气流控制,地面从东北到内蒙古一带有一锋面,河北省处于冷锋前部暖气团内。邢台08时探空(图3a)显示,0—6 km风垂直切变为13 m/s,0℃层高度为3412 m, -20℃层高

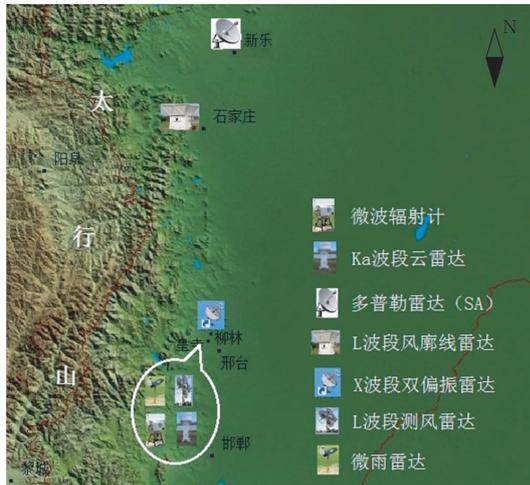


图1 2018年5月12日冰雹天气过程综合观测设备布局

Fig.1 Layout of comprehensive observation equipment for the hail weather process on 12 May 2018

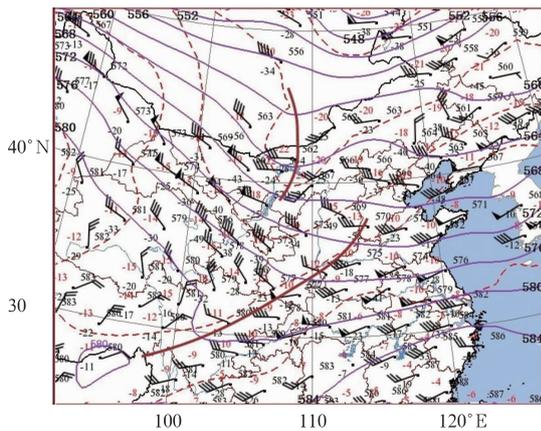


图2 2018年5月12日08时500 hPa形势 (棕色曲线为槽线)

Fig.2 500 hPa synoptic analysis at 08:00 BT 12 May 2018 (troughs are marked by brown lines)

度 6869 m,两个特征高度适宜冰雹发生,但对流有效位能为 13.1 J/kg,沙氏指数 3.58,K 指数 11,抬升指数 0.42,明显低于河北南部 5 月强对流天气对流参数平均值(王丛梅等,2013),并且,对流抑制能量为 185.7 J/kg,表明受后倾先兆槽影响,5 月 12 日早晨河北中南部地区不稳定能量较小、对流抑制能量较大。先兆槽移过之后,天空转晴,近地面层因辐射加热升温,用 11、14 和 17 时地面温度和露点温

度进行探空订正,得到订正后对流有效位能分别为 1404.1、1072.9 和 2.5 J/kg(图 3),降水开始前对流抑制能量已全部消失,不稳定条件不断增强。另外,由图 3b、c 还可以发现,在  $-20^{\circ}\text{C}$  层以上的对流有效位能占总对流有效位能的 1/3 左右,表明在  $-20^{\circ}\text{C}$  层以上存在大量的潜在不稳定能量,一旦有对流发生,该部分潜在不稳定能量将有利于形成旺盛的垂直运动,对大冰雹的循环增长有很强的托举作用(戴建华等,2012)。同时,河北中南部地区地面整体受东南气流控制,风力不断增强,受太行山地形影响有助于抬升运动,且太行山区存在的地面风场辐合区整体动力条件逐步增强。卫星云图(图略)的演变表明,随着高空槽东移,触发了不稳定能量的释放,造成本次强对流天气过程。

### 3.2 降雹特征

此次冰雹天气过程影响到邢台、石家庄等多地,从生成、发展到消亡持续时间超过 4 h,文中仅对发生在邢台境内的冰雹过程进行分析。邢台降雹过程雷达回波显示,冰雹云生成后回波主体自西向东移动,并且在移动过程中回波发生了多次合并,而回波强中心始终位于云体移向的右后侧,强回波中心移动呈西北—东南向。冰雹天气过程造成邢台市区以及内丘、邢台、南和等县、市的 18 个乡镇出现冰雹、大风、短时强降水等强对流天气(图 4),观测到的冰雹直径最大 3.5 cm(17 时 16—24 分邢台市气象局院内),最大瞬时风速达 31 m/s(邢台皇寺观测站),过程最大降水量 29.4 mm。

图 5 给出了对流的云经过内丘柳林和邢台皇寺两个国家地面观测站时地面温、压、湿和风速、风向的变化,可以看出,对流云团强中心经过的邢台站的各项数据变化程度远比相对边缘的内丘站剧烈。从 16 时 30 分开始,邢台观测站的地面气压、温度、湿度和瞬时最大风速开始发生变化,气压降至 980.3 hPa,地表温度降至  $27.7^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 51%,平均风速约为 10 m/s;16 时 49 分降水开始,此时气压升高到 981.8 hPa,地表温度降低到  $22.1^{\circ}\text{C}$ 、湿度增大到 72%,瞬时最大风速达到 22 m/s;16 时 54 分当最大分钟降雨量出现时,地表温度比降水开始时下降  $6.4^{\circ}\text{C}$ ,湿度上升 16 个百分点,气压上升 0.3 hPa,瞬时最大风速达到 31 m/s,风向由原来的偏东南风转为偏北风。可见本次强对流天气以冰雹、大风为主。

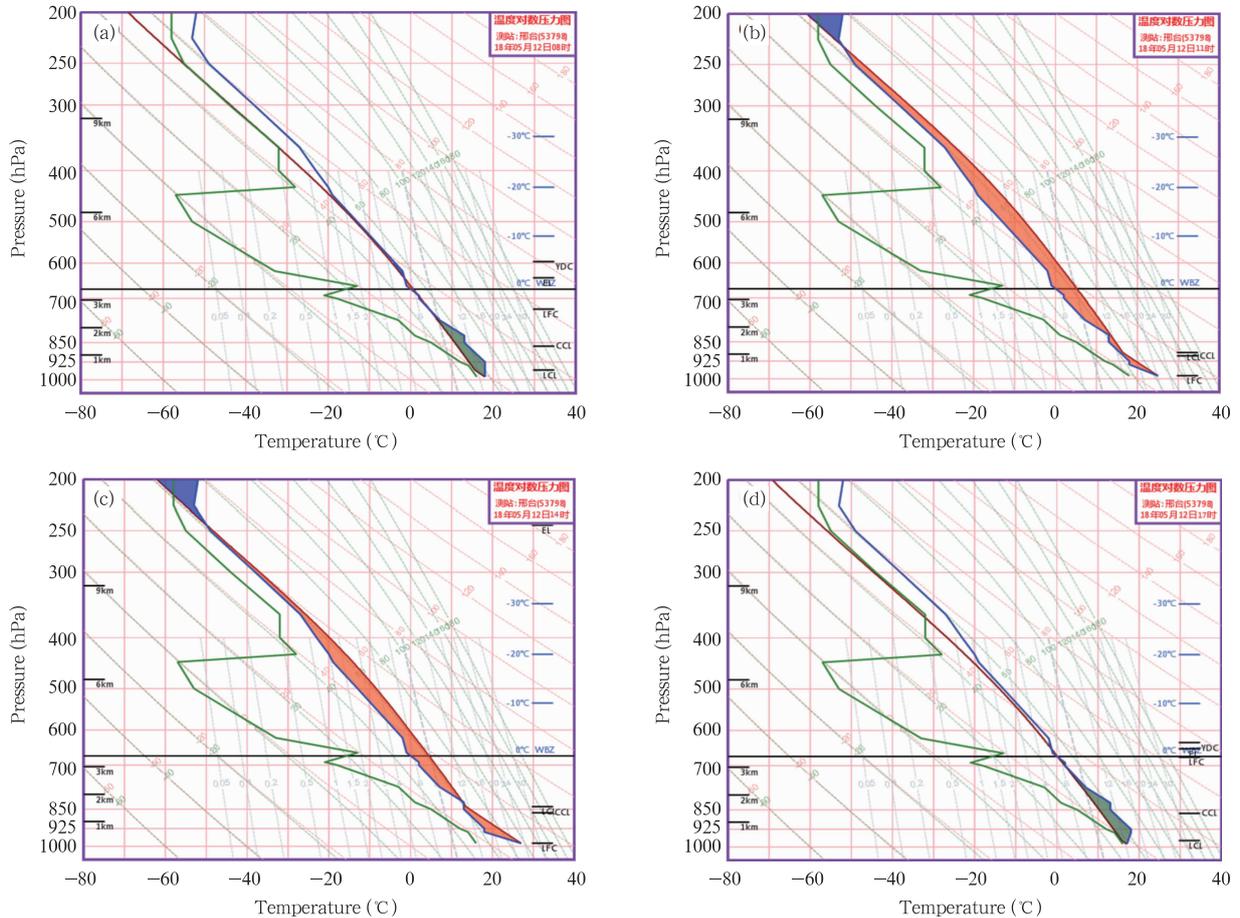


图3 2018年5月12日08时邢台站探空分析(a)和11时(b)、14时(c)、17时(d)订正后的探空分析

Fig. 3 Skew  $T$ - $lgp$  sounding diagram at Xingtai station at 08:00 BT (a) and corrected diagrams at 11:00 (b), 14:00 (c), and 17:00 (d) BT 12 May 2018

## 4 冰雹云演变特征

### 4.1 多普勒雷达冰雹云回波演变特征

图6给出了整个冰雹天气过程各阶段雷达回波强度、回波高度、45 dBz 高度及垂直积分液态水含量(VIL),可以发现冰雹云初生阶段回波强中心在 $0^{\circ}\text{C}$ 层以上开始生成并逐渐发展、增强,当回波进入 $-20^{\circ}\text{C}$ 层高度后,垂直积分液态水含量从 $5\text{ kg/m}^2$ 增至 $20\text{ kg/m}^2$ ,回波中心强度40 dBz。跃增阶段垂直积分液态水含量继续增至 $30\text{ kg/m}^2$ ,回波强中心不断增强并开始向下延伸,跃增阶段结束时45 dBz高度已超过 $-20^{\circ}\text{C}$ 层高度达到7.5 km左右,强回波(45 dBz)中心负温区厚度约4.1 km,强回波(45 dBz)中心与 $-20^{\circ}\text{C}$ 层厚度约0.6 km。满足冰雹形成的温度、过冷水含量要求,回波迅速增强和升高也标志着上升气流速度也满足成雹动力条件(许

焕斌,2012)。孕育阶段回波强中心稳定少动,强回波中心强度增至65 dBz,高度达到6 km,强回波面积也不断增大,垂直积分液态水含量增至 $45\text{ kg/m}^2$ ,随着冰雹云的移动降雹过程随之开始。降雹分为三个时段:第一降雹时段为16时06—42分,发生在山区;第二时段降雹与前一时段相隔30 min,发生在平原地区,该时段降雹回波的特点是强度较前一降雹时段有所减弱,但垂直积分液态水含量中心值增至 $45\text{ kg/m}^2$ ,表现出非常显著的“悬挂”状强回波,同时地面出现了直径3.5 cm的大冰雹,随着第二时段降雹的结束,雷达回波强度、强回波高度和垂直积分液态水含量均有较大幅度下降;第三时段的降雹发生在回波强度、高度以及垂直积分液态水含量都下降阶段,产生的冰雹很小,密度也不大。鉴于第二时段17时邢台降雹区处于两部雷达的合适观测位置,所以本研究着重分析进入这一时间-空间

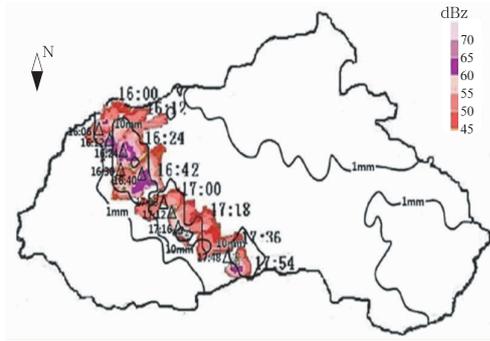


图4 2018年5月12日邢台地区冰雹天气过程多普勒雷达回波移向、降雹时段及降水量分布(细实线为雨量等值线(从外到里3层,分别为1、10和25 mm),黑△是降雹地点,雷达回波间隔12—18 min,回波强度变化范围45—65 dBz)

Fig. 4 Moving direction of Doppler radar echo, hail occurrence time and precipitation distribution during the hail weather process in

Xingtai on 12 May 2018

(Thick black line is the boundary line of Xingtai city, the fine black lines are rainfall isolines of 1, 10 and 25 mm from outside to inside, black triangles denote places where hail occurred, radar echo interval is 12 - 18 min and the echo intensity range is 45 - 65 dBz)

的雹云结构。

#### 4.2 双偏振雷达冰雹云特征

对经过速度退模糊、衰减订正的双偏振雷达产品、多普勒天气雷达相近高度平面位置显示(PPI)(图7a、b)和相同剖面距离-高度显示(RHI)(图7c、d)进行比较,发现回波强度及结构特征分布大体相似,但是双偏振雷达探测到的强回波(>45 dBz)面积小于天气雷达,而且回波密集度较天气雷达小。

为了判断云体是不是含有冰雹,即空中是否已有冰雹生成,使用双偏振雷达17时03分中、高空部分产品(图8)进行了分析。

从图8可以看到,4.8 km高度(10.0°)处回波强度为30—50 dBz,差分反射率为-1.5—3.5 dB,差分相移率为0°—10.0°/km,相关系数小于0.9。表明该区域是处于冰雹湿增长状态(刘黎平等,1996);6.5 km处(14°)回波强度为45—50 dBz,差分反射率小于1.0 dB,差分相移率小于2.5°/km,相关系数小于0.85,是小冰雹存在区或冰雹干生长区(刘黎平等,1993)。从这些相关参数来判断,此时此地的空中云体已含有冰雹。

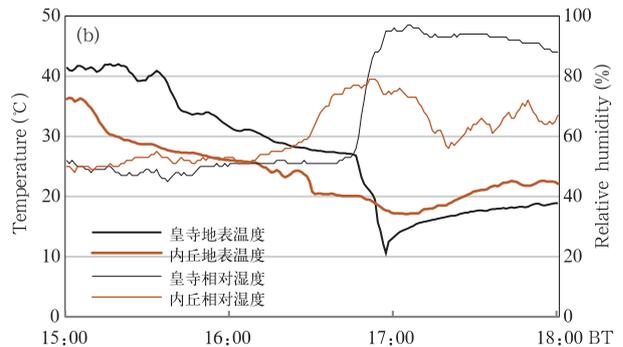
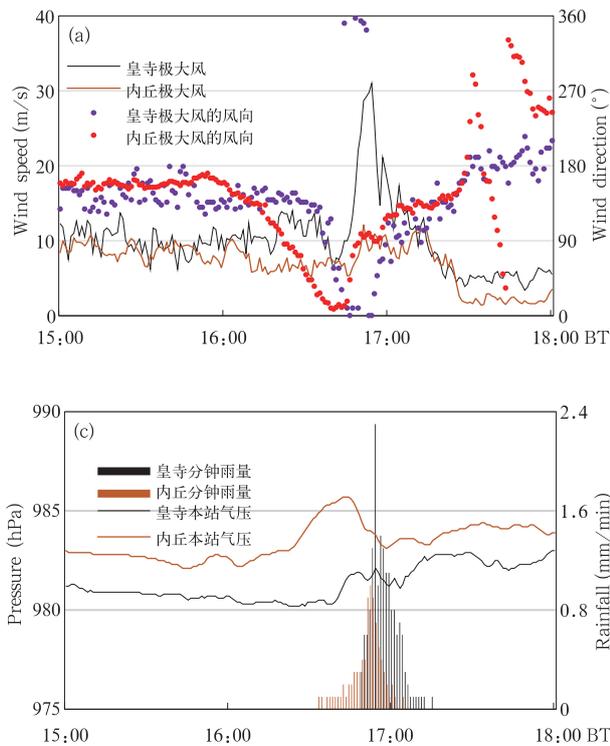


图5 2018年5月12日邢台皇寺和内丘地面站15—18时地面气象要素变化

(a. 瞬时最大风速、风向, b. 相对湿度、地表温度, c. 气压、分钟雨量)

Fig. 5 Variations of surface meteorological elements in Xingtai and Neiqiu ground stations during 15:00 - 18:00 BT 12 May 2018

(a. instantaneous maximum wind speed and wind direction, b. relative humidity and surface temperature, c. pressure and one-minute rainfall)

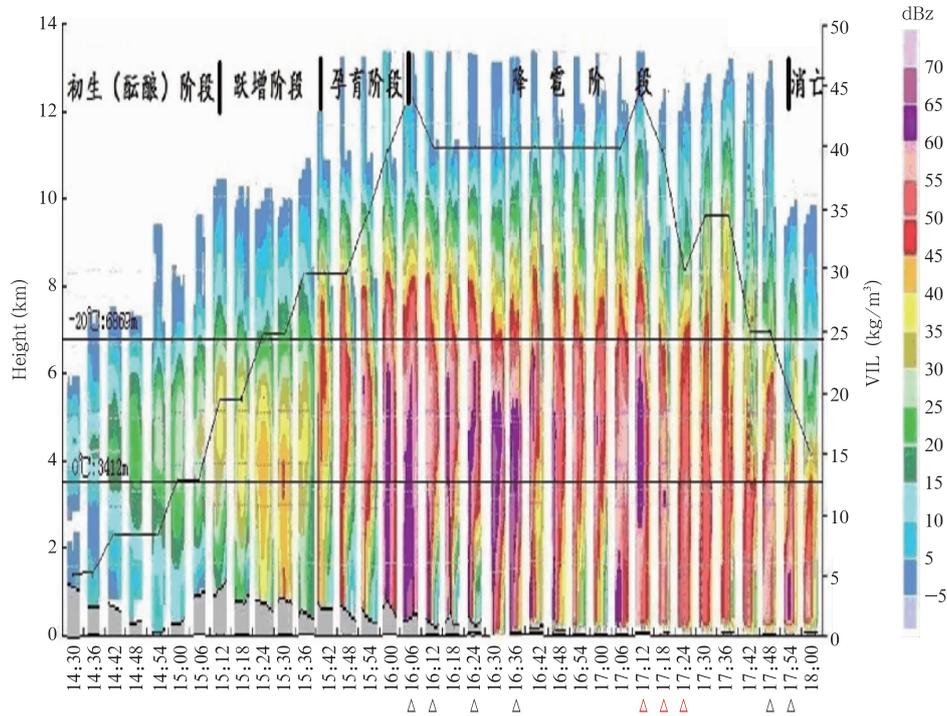


图6 冰雹过程各观测时段雷达回波强中心处回波强度、垂直积分液态水含量、回波高度变化

(图中△为降雹时间,黑色直线分别表示08时邢台皇寺探空0℃、-20℃层高度,黑色折线为垂直积分液态水含量变化)

Fig. 6 Changes in echo intensity, VIL and echo height corresponding to major hail occurrence time in different stages of the hailstorm process

(black and red triangles are for hail occurrence time, black lines indicate the altitude of 0℃ and -20℃ in Xingtai at 08:00 BT, black curve shows the VIL value)

## 5 雹云结构及大雹增长机制

雹云中冰雹要降落到地面,雹块在云中直径必须大于1 cm、落速大于15 m/s。雹云中必有一个功能区,上升气流能托住雹或雹胚粒子群在云中低温区维持6—10 min。何以有这种功能,是不是这类云中有什么特殊结构?又何以能形成这种结构?即使能形成这种结构,它能在看似多变的强对流云中维持多久呢?这是雹云物理研究的核心问题。要逐步弄清这些问题单靠传统的探测—天气—动力学难以深入,必须跳出背景形势静态诊断的框架,深入到雹云结构的动态形成过程的探讨中。在强对流云的观测分析中,雷达取得的高分辨率资料可以看出一些结构特征和演变信息,具有非常关键的作用(许焕斌,2012)。由于雹云是深对流云,所以其垂直结构非常重要;又由于雹云结构经常是3维非对称的,不

是任何一个垂直剖面皆可反映它的成雹结构特征。雹云在地面的降雹区远小于雨区及降雹带的线状分布和不连续的跳点现象,反映出成雹结构只占云体的一小部分且具有一定的走向,时间上也不是总能维持。所以需逐地逐时地去寻找特征剖面。

本次观测的17时雷达资料中所显示的单体回波高梯度区在右侧,应该是由南向北的云体入流区,而且回波移动方向近似于自北向南,这与雷达的190°的径向夹角小,径向垂直剖面与主上升入流基本平行,有利于用单多普勒雷达资料来定性了解风与回波的联系。鉴于本例发生第二时段(邢台)降雹时,雹云处于石家庄多普勒雷达和内丘柳林多普勒双偏振雷达有效探测范围内,且皆在两部雷达的右侧,所以选择邢台降雹前6—12 min的17时石家庄雷达和内丘雷达17时03分的观测资料来进行定性分析。

第一步,依据内丘偏振雷达的观测资料判断雹云中是否已有冰雹生成。在4.2节对5月12日17时03分偏振雷达观测资料的分析结果已指出,此时空中云体已有冰雹存在。

第二步,分析石家庄多普勒雷达观测资料。先看回波强度、径向风的各层分布(PPI),再寻找回波强度和径向风的特征垂直剖面(RHI)。

从石家庄雷达观测到的回波演变(图9)可以看出,强对流系统是自北西北向东南移动的,回波强中心位于回波移动方向的右后侧;在雷达测站191°附近沿雷达径向做的回波强度和速度的垂直剖面

(图9a)上可以看到,回波强度伴有深厚的超长悬挂回波(胚胎帘)、有界弱回波区及回波墙。图9b由于径向垂直剖面基本与主上升气流平行,所以沿此剖面的径向速度图上可反映气流的辐合、辐散及对应的垂直运动,还看到在低层4 km以下有偏南入流的辐合及上升运动区存在,8—12 km有辐散区存在,而且在径向速度(图9b)上呈现出上、中、下三重“0线”(白色线)。做此时穿过此地的切向(垂直于径向)径向速度的垂直剖面(图9c),可发现径向速度在地面和空中存在着交替分布,表明云中水平气流在旋转,出现了偏南偏北两次转向。从云体低层

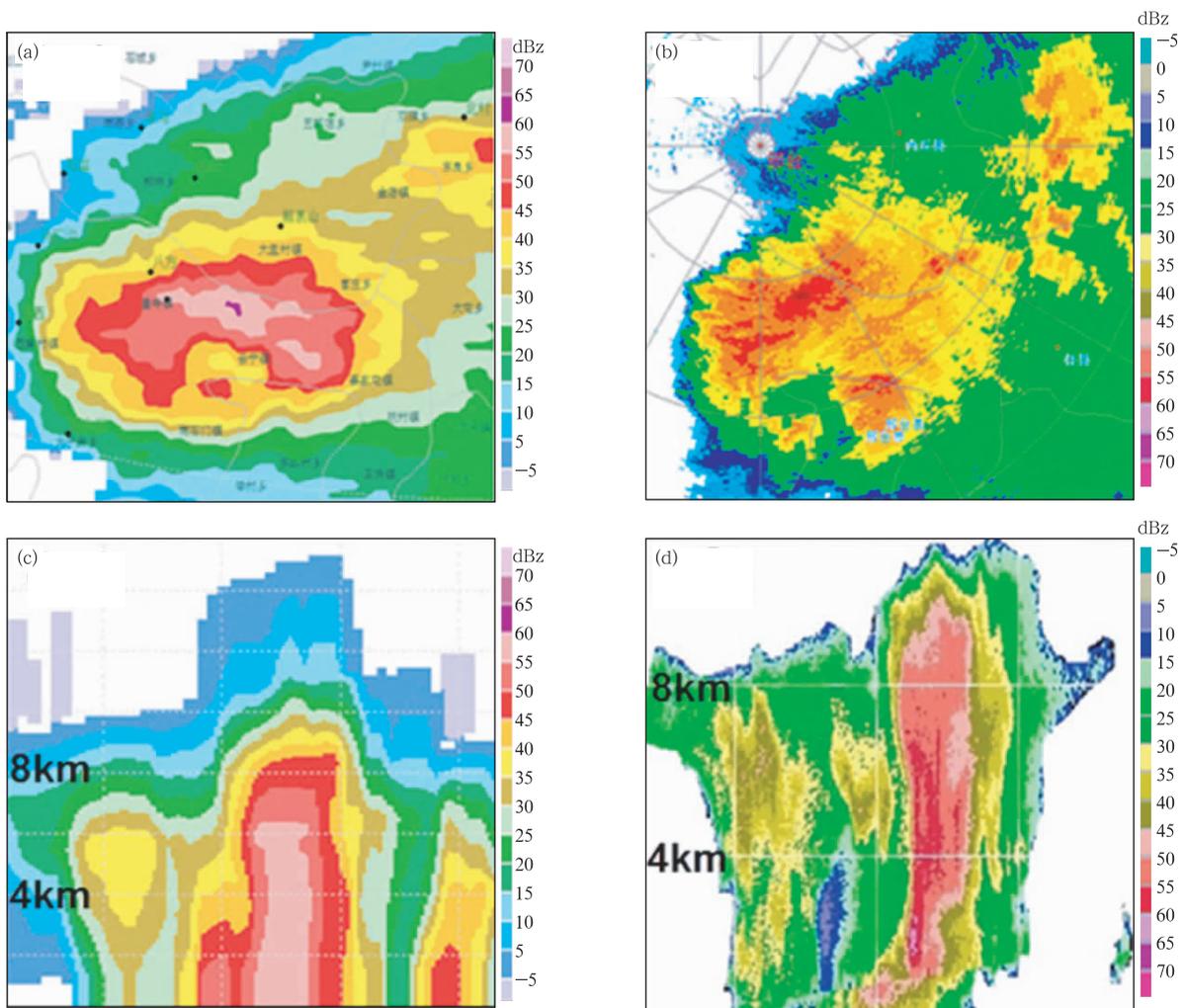


图7 2018年5月12日双偏振雷达与多普勒天气雷达回波对比

(a、b. 17时多普勒雷达、双偏振雷达同高度回波强度, c. 17时25分以双偏振雷达位置为基点沿159.8°做多普勒雷达RHI, d. 17时25分双偏振雷达沿159.8°的RHI)

Fig. 7 Comparison of dual-polarized radar and Doppler radar echoes on 12 May 2018

(a, b. echo intensity at the same height at 17:00 BT, c. RHI of the Doppler radar echo at 17:25 BT along 159.8°, which is determined based on the position of the dual polarization radar, d. dual polarization radar RHI along 159.8°)

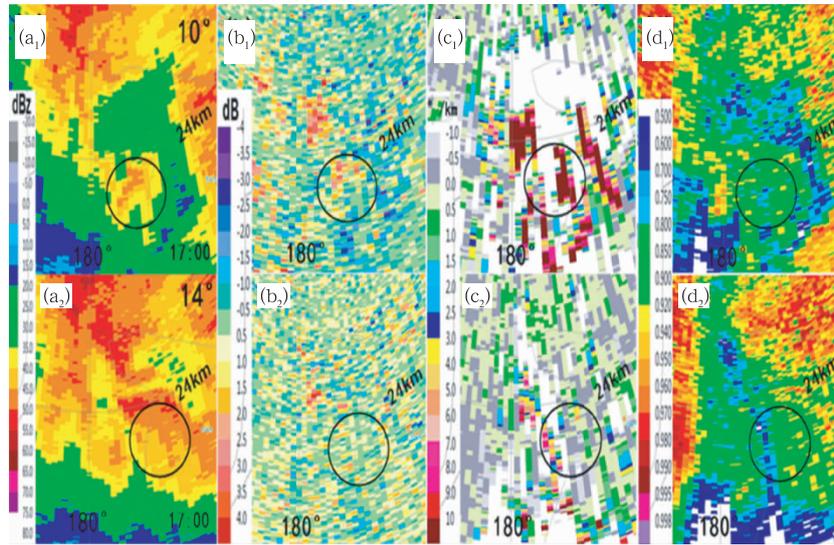


图8 2018年5月12日17时03分双偏振雷达仰角 $10^{\circ}$ 、 $14^{\circ}$ 的回波强度( $a_1$ 、 $a_2$ )、差分反射率( $b_1$ 、 $b_2$ )、差分相移率( $c_1$ 、 $c_2$ )和相关系数( $d_1$ 、 $d_2$ )

Fig. 8 Echo intensity ( $a_1$ ,  $a_2$ ), differential reflectivity ( $b_1$ ,  $b_2$ ), differential phase shift rate ( $c_1$ ,  $c_2$ ), and correlation coefficient ( $d_1$ ,  $d_2$ ) of dual polarization radar observations at  $10^{\circ}$ ,  $14^{\circ}$  elevation (at 17:03 BT 12 May 2018)

径向速度 PPI(图 9d)可以看出低层有偏南入流进入云体。依据对图 9 的分析,可定性地去勾画出雹云主上升气流的框架。

从柱液态水含量分布(图 10 右上)看,上层风速大于回波移速,风向西南西,强回波在西南南侧,梯度大,云的新生区在右侧后端(非正后端),云体类似 ps(对流单体背生、对流云体积-层分布平行)型。从观测到大冰雹样品可以看出其具有里、外 2 层的粗分层结构(图 10 左上小图)。经过综合分析,看出该雹云在降雹时段的雷达回波结构具有超长的“悬挂回波”特征(图 9a)，“悬挂回波”是流场与粒子场运行增长相互作用的产物,正是能在这里托住冰雹的反映,也是冰雹增长运行轨迹的集中地,导致回波强,而且是悬在最强回波区边侧,所以它的存在有利于阵性降雹发生;能够形成这样特征的成因是它所对应的云体水平气流的 0 线(域)是上、中、下相互悬接着的(图 9b),而且中层水平气流 0 线的走向是垂直的,这是直立上升气流的表现,0 线间的接力必然导致悬挂回波超长;主上升气流的 2 次逆时针转弯(图 9c),这比只观测到一次逆时针转弯的通常结构多了一次,由于主上升气流的逆时针转弯时下方是主上升气流,能掉下去的冰雹就可以被下面的上升气流再次托住,所以 2 次转弯可增加雹或雹胚在转

弯下落中再入主上升气流区继续长成大雹的机会;同时在低层回波南侧有连续不断的暖湿气流补充能量(图 9d)。综合上述分析,以图 9a 回波为背景,定性勾画出了云体主上升气流框架(图 10)。依据图 10 给出的雹云主上升气流结构框架,可进一步勾画出大雹运行增长轨迹。

此次观测到的最大冰雹直径约 3.5 cm,于 17 时 16 分落到了邢台气象局院内。依据图 10 给出的雹云实例结构模型,试着勾画出了这个大雹运行增长的轨迹(图 10 中紫实线),线旁的黑点或圆圈的大小是为了定性表示冰雹或雹胚在云体中增长变大的情景。一些小粒子沿图 10 中带箭头的紫实线随主上升气流入云,一边运行一边增长。当它们运行到云上层时,其中长大了的粒子拥有较大的落速,它未被气流吹走,掉到处于云体上层、走向微上翘的 0 线附近,在这里受水平气流和上升运动的双重带动,可进行 3 维空间中的循环增长;当它长到当地上升气流托不住时,又掉到中层的 0 线附近,这里的 0 线是接近直立的,意味着水平气流速度近于 0,即这里水平气流是辐合的,粒子不会被水平气流吹离,但又是上升气流的中心,有上升气流托着,使它继续在这里长大,增长方式是上升气流与雹块落速的平衡,雹块边增长边下落,是直立的轨迹,没有明显的水平运

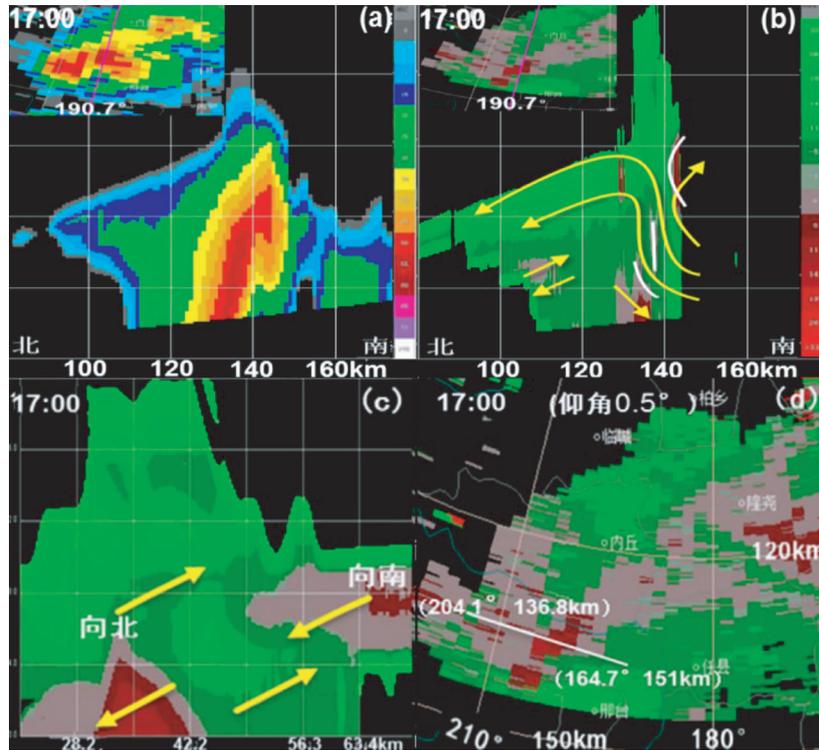


图9 2018年5月12日17时石家庄多普勒雷达0.5°仰角的回波强度、径向速度PPI及其垂直剖面

(a. 回波强度沿191.3°径向垂直剖面, b. 径向速度沿191.3°径向垂直剖面(图中白色线为0线, 黄色线为流线), c. 沿(204.1°、136.8 km)至(164.7°、151 km)做的径向速度切向垂直剖面, d. 径向速度PPI)

Fig. 9 Echo intensity, radial velocity PPI and its vertical profile at 0.5° elevation angle at 17:00 BT 12 May 2018 observed by the Doppler radar deployed at Shijiazhuang

(a. Vertical profile of basic reflectivity along 191.3° radial direction, b. vertical profile of radial velocity along 191.3° (the white line in the figure is zero line, the yellow lines are streamlines), c. tangential vertical cross section of radial velocity from (204.1°, 136.8 km) to (164.7°, 151 km), d. radial speed PPI)

行,因而沿0线不会出现循环运行增长那样的轨迹;随着它尺度变大及落速加快,离开了中层0线区,再次落到下层的上翘0线区,在这里又可以进行2次循环增长,直到翻越过主上升气流后落下,大冰雹降至地面。由于大冰雹有2次循环增长阶段,故而收集到的这个大雹块具有明显的内、外分层(图10左上方冰雹照片)。

虽然这样的雹云结构仅存在2—3个体扫时段,即12 min,鉴于冰雹云中具有充足的凝结水供应和低温环境,12 min是能够产生阵性降雹的。

文中分析结果和勾画出的图虽然是定性的,但

其物理内涵是这时的雹云结构具有兜雹成雹、可汇集大粒子、能循环运行增长的功能,显示出与理想或典型雹云模型不同的特征结构及成雹途径。

## 6 结论与讨论

(1) 本次冰雹天气形成于冀中南太行山东麓,除了有复杂的地形影响外,还与不稳定能量区的梯度密集度和流场辐合区配置相关,受近地面高温、高湿的东南气流和山区抬升作用的影响,有大量的不稳定能量聚集,而短波槽的入侵扰动触发了对流天气的发生。

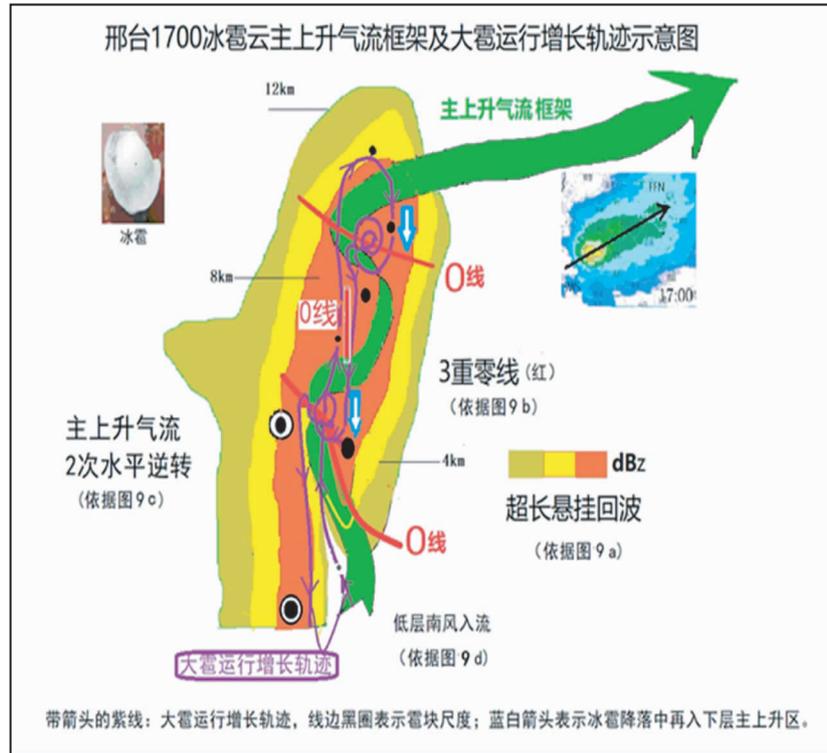


图 10 2018 年 5 月 12 日 17 时邢台冰雹云主上升气流框架及大冰雹运行增长轨迹示意

Fig. 10 Schematic diagram of main ascending airflow in hailstorm clouds and the growth trajectory of large hailstone in Xingtai at 17:00 BT 12 May

(2) 冰雹云的移动路径是由不稳定能量的梯度密集区向不稳定能量的强中心区移动的。在冰雹云移动过程中,探测到雷达回波有多次合并或变形。山区降雹阶段(16 时 06—42 分)回波合并或变形间隔时间短、频次快,由于不断有新回波并入,所以云体降雹后消耗的能量能够马上得到补充,降雹阶段的垂直积分液态水含量一直保持高值。当雹云进入平原后,回波合并或变形时间间隔变长、频次变慢,降雹后垂直积分液态水含量快速下降。

(3) 通过对云体各要素的径向和切向垂直剖面综合分析,可以看出在主上升气流伴有辐合、辐散及旋转的情况下,水平气流速度的“0”线(0 域:即 0 线附近的区域)的存在和其内上升气流分布与回波配置所组成的结构是具有兜雹成雹功能的。据此,从观测分析的结果中,可以归纳出两条新的认识:直立

0 线是穿过主上升气流中心和悬空(它非接地,不是与降雹对应的强回波墙)强回波中线,斜升 0 线是穿过悬挂回波中线<sup>①</sup>,这种结构可称为“0 线”结构,具有的兜雹成雹功能,可称为“0 线”效应。该个例雹云中存在着上、中、下三段 0 线,而且是相互衔接的,这使“0 线结构”的垂直尺度加长,伸到了更低的温度区,从而强化了“0 线效应”,为冰雹的快速长大提供了优越的时、空环境条件。

只靠理想或典型概念模型是难以做好实际防雹工作的,有意识、有设计地去了解实例雹云成雹的多种结构和方式很必要,也有助于逐步克服人工防雹和对流云增雨作业中的盲目性。冰雹物理学家李斯特(Roland List)曾在第 10 届 WMO 人工影响天气科学会议(Bali, Indonesia, 4—7 October 2011)上提醒不要忘记人工影响天气的科学目标是“理解所

<sup>①</sup> 最典型的个例图见 Fleming 雹暴云的特征垂直剖面。只需沿悬挂回波中线加一条曲线,这条曲线就是水平气流流向拐点的连线,即这条线上的水平气流速度近于 0,因而就是 0 线。而且还可以看出,0 线不仅穿过悬挂回波中线,而且可达到雹云有界弱回波区(BWER)穹窿顶点上方的最强回波处(Browning, et al, 1976, figure 11)。

有形式的降水物理学”。换句话说,不是只了解理想的或典型形式的降水物理学就能做好人工影响天气工作。这意味着,了解实例雹云成雹的多种结构和方式是做好防雹工作必须的基础! 利用新型技术装备对不同类型雹云进行综合观测,资料是多样、丰富的,可用来做各方面的研究,也是不断深入研究雹云结构和形成机制的主要资料来源。但本研究关注的是雹云云体动力框架和大雹增长机制,而非强对流云系中单体群组合演化特征;在综合探测资料选取中,重点是冰雹形成问题,冰雹过程是降水过程的进一步发展,或者说降水过程是冰雹过程的前期准备,所以对降水过程不作细述,观测得到的资料也难以支持去进行细述;对多普勒雷达、双偏振雷达等资料只针对问题做了相关分析。

## 参考文献

- 戴建华,陶岚,丁杨等. 2012. 一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析. 气象学报, 70(4): 609-627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al. 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line. Acta Meteor Sinica, 70(4): 609-627 (in Chinese)
- 段英,刘静波. 1998. 超级单体多单体雹云及其成雹特点的数值模拟研究. 气象学报, 56(5): 529-539. Duan Y, Liu J B. 1998. A numerical simulation about the hailstone growing processes in super cell, multi cell and single-cell hail storm. Acta Meteor Sinica, 56(5): 529-539 (in Chinese)
- 范皓,吴正华,段英. 2004. 一次右移传播的强对流风暴研究. 应用气象学报, 15(4): 445-455. Fan H, Wu Z H, Duan Y. 2004. Investigation on a severe convective storm moving right. J Appl Meteor Sci, 15(4): 445-455 (in Chinese)
- 黄美元,王昂生. 1980. 人工防雹导论. 北京: 科学出版社, 204pp. Huang M Y, Wang A S. 1980. Introduction to Artificial Hail Suppression. Beijing: Science Press, 204pp (in Chinese)
- 黄美元,徐华英,周玲. 2000. 中国人工防雹四十年. 气候与环境研究, 5(3): 318-328. Huang M Y, Xu H Y, Zhou L. 2000. 40 year's hail suppression in China. Climate Environ Res, 5(3): 318-328 (in Chinese)
- 刘黎平,徐宝祥,王致君等. 1992. 用C波段双线偏振雷达研究冰雹云. 大气科学, 16(3): 370-376. Liu L P, Xu B X, Wang Z J, et al. 1992. Study of Hail with C-B and dual linear polarization radar. Sci Atmos Sinica, 16(3): 370-376 (in Chinese)
- 刘黎平,张鸿发,王致君等. 1993. 利用双线偏振雷达识别冰雹区方法初探. 高原气象, 12(3): 333-337. Liu L P, Zhang H F, Wang Z J, et al. 1993. Preliminary research for method of hail detection with C band dual linear polarization radar. Plateau Meteor, 12(3): 333-337 (in Chinese)
- 刘黎平,钱永甫,王致君. 1996. 用双线偏振雷达研究云内粒子相态及尺度的空间分布. 气象学报, 54(5): 590-599. Liu L P, Qian Y F, Wang Z J. 1996. The study of spacial distribution of phase and size of hydrometeors in cloud by dual linear polarization radar. Acta Meteor Sinica, 54(5): 590-599 (in Chinese)
- 刘黎平,郑佳锋,阮征等. 2015. 2014年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果. 气象学报, 73(4): 635-647. Liu L P, Zheng J F, Ruan Z, et al. 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars. Acta Meteor Sinica, 73(4): 635-647 (in Chinese)
- 罗琪,郑永光,陈敏. 2019. 2017年北京北部一次罕见强弓状飑线过程演变和机理. 气象学报, 77(3): 371-386. Luo Q, Zheng Y G, Chen M. 2019. Evolution and development mechanisms of a rare strong arc-shaped squall line that occurred in Northern Beijing in 2017. Acta Meteor Sinica, 77(3): 371-386 (in Chinese)
- 田利庆,许焕斌,王昂生. 2005. 雹云机理新见解的观测验证和复现. 高原气象, 24(1): 77-83. Tian L Q, Xu H B, Wang A S. 2005. Verification and reproduction of the new understanding for mechanism of hail cloud. Plateau Meteor, 24(1): 77-83 (in Chinese)
- 王丛梅,李国翠,田秀霞等. 2013. 河北省南部强对流天气的时空分布及对流参数统计特征. 气候变化研究快报, 2(1): 39-45. Wang C M, Li G C, Tian X X, et al. 2013. Spatial and temporal distributions of severe convective events and statistical characteristics of convection parameters over the southern part of Hebei province. Climate Change Res Lett, 2(1): 39-45 (in Chinese)
- 许焕斌,段英. 1999. 云粒子谱演化研究中的一些问题. 气象学报, 57(4): 450-460. Xu H B, Duan Y. 1999. Some questions in studying the evolution of size-distribution spectrum of hydrometeor particles. Acta Meteor Sinica, 57(4): 450-460 (in Chinese)
- 许焕斌,段英,吴志会. 2000. 防雹现状回顾和新防雹概念模型. 气象科技, 28(4): 1-12. Xu H B, Duan Y, Wu Z H. 2000. Review of hail suppression status and new hail suppression conceptual model. Meteor Sci Technol, 28(4): 1-12 (in Chinese)
- 许焕斌,段英. 2001. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的“利益竞争”防雹假说. 大气科学, 25(2): 277-288. Xu H B, Duan Y. 2001. The mechanism of hailstone's formation and the hail-suppression hypothesis: "Beneficial competition". Chinese J Atmos Sci, 25(2): 277-288 (in Chinese)
- 许焕斌,段英. 2002. 强对流(冰雹)云中水凝物的积累和云水的消耗. 气象学报, 60(5): 575-584. Xu H B, Duan Y. 2002. The accumulation of hydrometeor and depletion of cloud water in strongly convective cloud (hailstorm). Acta Meteor Sinica, 60(5): 575-584 (in Chinese)
- 许焕斌,田利庆,段英. 2005. 关于积云增雨和实施方案的探讨. 气象科技, 33(S1): 1-6. Xu H B, Tian L Q, Duan Y. 2005. Cumulus cloud rain enhancement and design of operation scheme.

- Meteor Sci Technol, 33(S1): 1-6 (in Chinese)
- 许焕斌, 田利庆. 2008. 强对流云中“穴道”的物理含义和应用. 应用气象学报, 19(3): 372-379. Xu H B, Tian L Q. 2008. Physical meanings of "cave channel" in strong convective storm with its application. J Appl Meteor Sci, 19(3): 372-379 (in Chinese)
- 许焕斌. 2012. 强对流云物理及其应用. 北京: 气象出版社. Xu H B. 2012. The Physics of Severe Convective Storms and Its Application. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社. 314pp. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006. Principle and Application of Doppler Weather Radar. Beijing: China Meteorological Press, 314pp(in Chinese)
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection. Acta Meteor Sinica, 70(3): 311-337 (in Chinese)
- Browning K A, Foote G B. 1976. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. Quart J Roy Meteor Soc, 102(433): 499-533
- Doswell III C A. 2001. Severe Convective Storms: Hailstorm. Boston, M H: American Meteorological Society, 223-253
- Foote G B, Wade C G. 1982. Case study of a hailstorm in Colorado. Part I: Radar echo structure and evolution. J Atmos Sci, 39(12): 2828-2846
- Foote G B, Frank H W. 1983. Case Study of a hailstorm in Colorado. Part III: Airflow from triple-Doppler measurements. J Atmos Sci, 40(3): 686-707
- Kang F Q, Zhang Q, Lu S H. 2007. Validation and development of a new hailstone formation theory: Numerical simulations of a strong hailstorm occurring over the Qinghai-Tibetan plateau. J Geophys Res: Atmos, 112(D2): D0227
- Сулаквелидзе Г К. 1967. Ливневые осадки и град. Гидрометеоздат Л, 412-413