

李金辉, 田显, 岳治国. 2020. 基于火箭探空资料的冰雹云内部结构个例分析 [J]. 大气科学, 44(4): 748–760. LI Jinhui, TIAN Xian, YUE Zhiguo. 2020. Case Study of Hail Cloud Internal Structure Based on Rocket Sounding Data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(4): 748–760. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1907.19118

基于火箭探空资料的冰雹云内部结构个例分析

李金辉^{1,2} 田显^{1,2} 岳治国^{1,2}

¹ 陕西省人工影响天气办公室, 西安 710015

² 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710016

摘 要 利用探空火箭、新一代天气雷达和气象探测资料对 2015 年 7 月 17 日延安宝塔区冰雹云进行了综合探测, 结果表明: (1) 当日 08:00 (北京时, 下同) 500 hPa 河套低涡分裂东移, 有较强冷平流且移动速度较快, 地面 14:00 升温明显造成了这次降雹。(2) 偏后位置的冰雹云内部温、湿条件以及对流指数 (T_g)、整层比湿积分 (IQ)、总指数 (TT) 均小于外部的自然大气; 层结稳定度指数 (K)、抬升指数 (LI)、沙氏指数 (SI) 冰雹云内部比外部自然大气偏小; 热力参数风暴强度指数 (SSI) 冰雹云内部低于外部自然大气; 冰雹云内部能量参数 (CAPE) 明显低于自然大气; 冰雹云内部 0°C 层高度低于冰雹云外部自然大气。(3) 火箭探测的位置偏冰雹云后部, 冰雹云由低层到高层风向呈逆时针变化, 探空仪摆动明显, -20°C 温度层偏高, 气流较强, 整层偏下沉气流。(4) 冰雹云 0°C 附近, 在温度区间 -1.8~5.0°C、厚度 1.0 km 范围内有最大湿度区, 湿度达 80% 以上, 最大湿度 87.1%, 为冰雹的形成提供了水汽条件。(5) 紧贴 0°C 下正温区, 有最大水平风速为 19 m s⁻¹ 急流, 厚度为 0.022 km。在温度区间 -4.8~5.0°C、厚度 1.6 km 范围内维持 13 m s⁻¹ 以上水平风速, 为冰雹的形成提供了动力场条件。(6) 在温度区间 -8.7~-9.2°C、厚度 0.2 km, 有小于或等于 2 m s⁻¹ 弱风区; 弱风区下方, 在温度区间 -4.6~-8.8°C、厚度 0.889 km 有上升气流, 平均上升速度 1.79 m s⁻¹, 最大上升速度 4 m s⁻¹, 这种配置为冰雹的生长提供了环境场。

关键词 冰雹云 内部结构 气象要素 演变特征

文章编号 1006-9895(2020)04-0748-13

中图分类号 P482

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1907.19118

Case Study of Hail Cloud Internal Structure Based on Rocket Sounding Data

LI Jinhui^{1,2}, TIAN Xian^{1,2}, and YUE Zhiguo^{1,2}

¹ Weather Modification Office of Shaanxi Province, Xi'an 710015

² Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Xi'an 710015

Abstract Using rocket sounding data, a new generation of weather radar data and meteorological data is utilized to comprehensively analyze the hail cloud in Baota District, Yan'an County, on July 17, 2015. The results show the

收稿日期 2019-01-30; 网络预出版日期 2019-09-30

作者简介 李金辉, 男, 1967 年出生, 正研级高工, 主要从事人工影响天气的研究。E-mail: 2888ljh@163.com

通讯作者 田显, E-mail: tion916@163.com

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306060, 国家重点研发计划项目 2016YFA0601704, 西北区域人影科学试验研究项目 RYSY201905, 陕西省重点研发计划项目 2020SF-429

Funded by Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201306060), National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0601704), Scientific Research Projects of Weather Modification in Northwest China (Grant RYSY201905), Key Research and Development Program of Shaanxi Province in China (Grant 2020SF-429)

following aspects. (1) At 0800 BT (Beijing time), low vortex in the Hetao region split eastward, with a strong cold advection; the fast movement and a rising of surface temperature at 1400 BT caused this hail. (2) The hailstorm conditions inside the backward position, such as temperature and humidity, convection index (T_g), whole layer special humidity integral index (IQ), and total totals index (TT), are lower than those in the external natural atmosphere. The stratification stability index (K), lifted index (LI), and Showalter index (SI) show that hail clouds inside are smaller than those outside. The storm severity index (SSI) of the hail cloud, a thermal parameter, is lower than that in the natural atmosphere. The internal energy parameter, i.e., convective available potential energy (CAPE) is considerably lower than those in the natural atmosphere. The height of the 0°C layer inside the hail cloud is lower than the natural atmosphere outside the hail cloud. (3) Location of the rocket detection is opposite to the back of the hail cloud. The wind direction changes counterclockwise from downward to upward in the hail cloud. At the -20°C high-temperature layer, air flow is higher and stronger, and the whole layer has partial sinking airflow. (4) The temperature range that is near the 0°C layer in hail cloud is -1.8°C – 5.0°C . The maximum humidity area is within the depth of 1.0 km, where humidity is over 80% and the maximum humidity is 87.1%. These provide water vapor conditions for hail formation. (5) There is a maximum horizontal wind speed of 19 m s^{-1} rapid flow and a thickness of 0.022 km close to the lower layer of 0°C . The layer also maintains a horizontal wind speed of 13 m s^{-1} or above in the temperature range of -4.8°C – 5.0°C and a thickness within 1.6 km. These provide a dynamic field condition for hail formation. (6) There is a weak wind zone of $\leq 2\text{ m s}^{-1}$ in areas where the temperature range is -8.7°C – 9.2°C and the thickness is within 0.2 km. Below the weak wind zone, where the temperature range is -4.6°C – 8.8°C and the thickness is within 0.889 km, it is the updraft. Here, the average rising speed is 1.79 m s^{-1} , and the maximum rising speed is 4 m s^{-1} . This configuration provides an environmental field for the growth of hail.

Keywords Hail cloud, Internal structure, Meteorological elements, Evolution characteristics

1 引言

冰雹是强对流天气过程的一种产物, 具有突发性、局地性特点, 经常对工农业生产、交通运输以及人民生命财产造成严重危害, 特别是陕西渭北地区冰雹灾害对苹果的生产影响较大, 因此各级政府非常重视人工防雹工作, 经费投入大。在冰雹云结构研究方面, 根据雹云垂直剖面和平面对波及地面实况, 推测出了冰雹云二维结构 (廖远程, 1986, 1990), 冰雹日出现逆温层的概率为 61% (廖远程和李生柏, 1982)。单多普勒雷达反演雹暴水平流场与垂直气流结构可以看出, 垂直剖面上的气流有良好的组织, 表现出强烈的旋转和上升 (葛润生等, 1998), 在冰雹云的识别及提前识别方面, 冰雹云和雷雨云雷达回波特征有明显区别 (肖辉等, 2002), 提出了利用雷达强回波 45 dBZ 高度识别和提前识别冰雹云的方法 (李金辉和樊鹏, 2007), 在冰雹形成及人工防雹机理方面, 主要是采用数值模式的方法进行研究, 建立了三维冰雹分档强对流数值模式和循环增长机制 (郭学良等, 2001a, 2001b), 利用发展的三维弹性冰雹云催化模式模拟研究了冰雹形成机制和催化防雹机制 (洪延超, 1999; 洪延超等, 2002), 利用改进的三维完全弹

性强对流云模式, 模拟研究了强降水云物理过程 (肖辉等, 2004), 利用三维冰雹云模式讨论了过冷雨水低含量条件下冰雹形成和增长机制及碘化银催化效果 (李宏宇等, 2003) 等。在三维完全弹性冰雹云模式的基础上, 把雨滴冻结过程作了进一步改进, 增加了雨滴冻结成霰的过程, 通过模拟部分冰雹中存在过冷雨水累积带, 累积带中的过冷雨水有利于雹块的增长 (周玲等, 2001; 胡朝霞等, 2003)。

在对冰雹云探测方面的研究, 目前采用的主要手段是雷达。利用 C 波段双线偏振雷达探测冰雹云, 反射率因子和降雹强度不一定是一一对应关系 (刘黎平, 2002), 在弱天气尺度系统影响下, 天气尺度分析不足以判断强天气发生的潜势条件, 探空资料的中尺度及其综合图分析能够清楚地反映冷暖平流、干线、湿舌、显著流线及切变线的位置, 是强对流天气分析的有效手段 (潘留杰等, 2013), 在降水发生前, 低层大气表现为对流不稳定, 降水发生后, 对流不稳定能量得到释放, 大气趋于稳定 (周围等, 2018)。在新的探测技术研究方面, 利用地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程进行了监测分析, 固、液、气混合相态变化非常复杂, 过冷水滴与冰粒子消耗过程、贝吉隆过程和过冷水滴

与冰晶增长过程交替出现, 产生了相对湿度在 6 km 以下低于 80% 的区域, 从而形成了冰雹生长过程中交替干、湿增长生长环境, 非常有利于冰雹粒子群快速累积以及分层增长 (唐仁茂等, 2012); 对流云单体合并主要发生在低层辐合区内, 合并后上升运动加强, 上升气流范围变大, 闪电活动显著增强, 并主要发生在具有较强垂直风切变的区域, 少部分闪电发生在对流区后部开始出现下沉气流的区域 (徐燕等, 2018), 雨滴谱仪粒子谱特征分析表明: 冰雹数浓度占总降水粒子数浓度的 0.3%, 而冰雹对总降水量的贡献为 37%, 经验公式计算的冰雹末速度平均相对误差为 2.8% (岳治国和梁谷, 2018)。

近年, 探空火箭受到各国的重视, 国内外研制和应用了不同高度和种类的探空火箭, 广泛应用于地球资源勘探、天文观测、高空物理学、微重力条件下的材料加工实验等领域。陕西省人工影响天气办公室和中天火箭股份有限公司合作研制的 TK-2GPS 气象探测火箭 (以下简称探空火箭), 搭载长峰 CF-06-A 型 GPS 探空仪, 该探测火箭具有全天候快速获取 7.0 km 以下高度范围内大气的温度、湿度、压力和风速、风向及经纬度等数据能力, 探测的气象资料除满足人影科学作业需求外还可补充常规气象探空资料, 为中尺度数值预报提供探空资料补充, 发射系统和接收处理设备适应性强, 能够满足野外环境工作需求。本文利用新研制的探空火箭对冰雹云进行了探测, 揭示了冰雹云内部温度、湿度、风场及垂直气流的变化特征, 为更好地了解、认识冰雹云结构, 开展人工防雹作业提供了参考。

2 数据来源及方法

探空火箭布设在冰雹出现较多的延安市富县北道德乡、延安市宝塔区气象站 (图 1)、咸阳市长武县, 三个火箭探空点均为固定点。在强对流天气过境时向对流云中发射探空火箭, 取得探空资料。2015 年 6~8 月共发射 10 枚探空火箭。咸阳市长武县因站点改造没有发射探空火箭外, 其它延安市富县北道德乡成功发射了 8 枚探空火箭, 延安宝塔区气象站成功发射了 2 枚探空火箭, 成功发射火箭探测的 9 天中, 6 天在探空附近出现了降雹天气, 2 次进入了冰雹云内部 (表 1)。

利用 2015 年 7 月 17 日常规天气资料, 14:00



图 1 探空火箭布设的位置示意图。加号表示雷达探测位置, 实心圆表示探空火箭发射位置, 实心三角表示降雹地点

Fig. 1 Map of sounding rocket position. Cross symbol represents the position of radar detection, solid circle represents the position of sounding rocket launched, and solid triangles represent the position of hailstorm

(北京时, 下同) 加密探空气象资料、延安市新一代天气雷达 (5 cm) 及 7 月 16、17 日火箭探空资料, 对比分析了冰雹云外部 (与 14:00 气象加密探空对比) 的对流参数变化特征及冰雹云内部温度、湿度、风速、风向、垂直速度随高度变化特征, 在计算冰雹云垂直气流速度时由于空气密度、气压的变化原因, 火箭下降速度越来越慢, 利用 7 月 16 日同一地点的火箭探空资料校准下降速度, 得出冰雹云内垂直气流的真实速度。

据灾情信息, 2015 年 7 月 17 日 16:00~20:00, 延安市宝塔区遭遇强对流天气袭击, 对流云滞留时间长, 发展旺盛, 此次风雹灾害受灾人口约 2200 人, 直接经济损失达 520 万元。有 6 个乡镇不同程度降雹、4 个乡镇出现暴雨, 姚店镇达到大暴雨, 2 小时降水量达 82.2 mm, 农作物受灾面积 159.3 公顷, 其中葡萄、梨等林果业严重受损 44.6 公顷, 大弓棚受损 87 个, 蔬菜、西瓜、小瓜、红薯等经济作物严重受损 54.6 公顷, 玉米、谷子等农作物严重受损 60 公顷, 直接经济损失 310 余万元。

表 1 2015年探空火箭发射时间、地点

Table 1 The launch time and site of sounding rocket in 2015

序号	火箭发射时间	火箭发射地点	天气情况	降雹区域及时间	备注
1	2015年6月16日20:14	富县北道德乡	晴天	无	无云
2	2015年7月5日16:57	富县北道德乡	雷雨	上游咸阳市长武县21:26	入对流云
3	2015年7月14日14:39	富县北道德乡	雷雨	上游旬邑县13:30、麟游县13:18	没有入云
4	2015年7月15日16:00	富县北道德乡	对流前	咸阳彬县	入云
5	2015年7月16日17:22	延安市宝塔区	雷雨	无	没有入云
6	2015年7月17日18:04	延安市宝塔区	冰雹云	延安市宝塔区16:00~20:00	入云
7	2015年7月20日14:26	富县北道德乡	雷雨	延安市宝塔区14:30	入云
8	2015年7月21日15:41	富县北道德乡	雷雨	延安市富县降雹16:30~17:35	入云
9	2015年7月21日16:25	富县北道德乡	冰雹云	延安市富县降雹16:30~17:35	入云
10	2015年8月9日16:18	富县北道德乡	晴天	无	没有入云

3 火箭探空的方法及探头精度

3.1 火箭探测系统组成及工作原理

探空火箭系统包括探测火箭、地面发射架、地面接收设备以及安装了数据接收处理程序的笔记本电脑等组成。探空火箭发射升空到预定高度后，弹射装置将携带降落伞的仪器舱弹射到大气中，降落伞打开后带着火箭探空仪徐徐下落到地面。在降落过程中，仪器舱中的 GPS 模块通过接收 GPS 卫星信号，经过解算，随时得到火箭探空仪的位置、高度信息和传感器探测的气压、温度、湿度、风向、风速等大气基本物理参数信息，经过微型处理器进行初步处理、调制，变成载有相关信息的无线电波，经发射机发送到地面。接收机收到发射机传来的无线电信号，通过解调得到各种气象信息，送计算机进行处理，供分析使用，表 2 为探空火箭主要技术参数。

3.2 探空仪精度

探空火箭搭载的探空仪为长峰 CF-06-A 型 GPS 探空仪，该探空仪作为中国气象局指定产品参加了 2010 年 7 月在广东阳江由世界气象组织（WMO）举办的第八届国际 GPS 探空仪比对试验。取得了综合得分第四名的成绩，是唯一通过国际竞标拿到 GPS 探空仪国际订单的国内厂家，完全满足全球气候观测系统（GCOS）探空的要求和技术水平。根据 WMO 公布的分析报告，CF-06-A 型 GPS 探空仪在以下几个方面的技术处于世界领先水平：温度传感器的防辐射处理技术领先，在气压为 10 hPa 的高度时，温度修正值仅为 0.6℃，在所有参赛厂家中最低。完成处理后的温度传感器响应

表 2 探空火箭主要技术参数

Table 2 The key technical indexes of sounding rocket

参数名称	单位	参数数值
弹径	mm	81
弹长	m	1.56
全弹质量	kg	8.6
发射最大高度	km	≥8(射角75°)
仪器舱降落速度	m s ⁻¹	≤7
残骸降落速度	m s ⁻¹	≤10
数据采集频率	Hz	1
气压测量范围	hPa	10~1100(±0.5)
气温测量范围	℃	-50~+60(±0.2)
湿度测量范围	百分率	0~100%(±2%)
风速测量范围	m s ⁻¹	0~25(±0.3)
风向测量范围	(°)	0~360°(±3°)
工作时间	h	>1

时间最快；在气压为 10 hPa 的高度，相对响应时间为 4 s。高度、气压与风场的探测与计算，处于领先地位。

长峰 CF-06-A 型 GPS 探空仪（李伟等，2011）整体相对系统温度偏差在 0.4℃ 之内，30 km 高度以下温度系统偏差在 0.2℃ 之内，表现比较稳定；湿度探测结果除距地面 2~5 km 外基本呈偏干状态，14 km 高度以下湿度系统偏差在 4% 之内；风速最大系统偏差为 0.4 m s⁻¹，长峰探空仪则整体波动稍大，为 0.2~1 m s⁻¹。对于东西风分量，均在 0.2 m s⁻¹ 之内。

3.3 火箭探空与气象探空比较

火箭探空与气象探空所用的探测仪器均为探空仪，两种探测方式不同，火箭探空是由高空到地面取得气象数据，而气象探空由地面到高空取得气象

数据;获取气象数据的方式不同,火箭探空的位置信息依赖于全球卫星定位系统(GPS),在地面接收数据,气象探空的数据靠探空站L波段探空雷达系统接收;获取气象数据的高度不同,火箭探空发射高度小于8 km,气象探空可以探测到30 km以上。

两种探空仪同步对比试验。2011年5月24日23:00,在西安泾河探空站(当日天气晴好,地面风速 1.1 m s^{-1} ,海拔高度411 m)利用L波段探空系统施放气球中,搭载火箭探空仪和气象探空仪。火箭探空与气象探空的温度、气压、湿度、风向、风速两种探测手段的探空曲线有较好的一致性,火箭探空温度1000 m高度上可以看见较明显的逆温,火箭探空温度数值略高,大约 4°C 左右,火箭探空湿度平均误差8%。

两种探空对比试验。2011年4月14日气象探空在西安泾河探空站施放,探测时间07:15,火箭探空在西安市临潼区新市镇(海拔高度361 m位于泾河探空站东北方向大约23.79 km)采用移动火箭车方式发射,发射时间07:26,火箭探空与气象探空温度、气压、湿度、风向、风速曲线等趋势有较好的一致性,火箭探空与气象探空在2500 m以下温度误差 1.0°C 之内,湿度误差在3%~16%之间。

2013年改用精度较高的长峰CF-06-A型GPS探空仪。2014年10月9日~11月5日,四川宜宾市人工影响天气中心工作人员陆续发射了10枚探

空火箭,火箭探空与气象探空对比分析表明(张元等,2016):探空火箭仪能够比较好地描述温度、湿度、露点、风向、风速等气象要素的变化特征,探空火箭仪温度廓线与L波段探测数据非常一致,且可以清楚地描述大气中存在的逆温特征。湿度、露点等廓线存在一定的偏差,误差来源于探测方式、时间、位置不同,本文使用的探空火箭为同一批次的火箭。

4 冰雹云火箭探测

4.1 降雹日天气形势

2015年7月17日08:00 500 hPa天气图显示(图2),蒙古低窝前部有冷空气下滑,延安宝塔区上游有最低温度 -12.0°C 的冷平流闭合区域,槽线位于河套、延安、渭南一线,槽线南北分布,槽后有风速 $\geq 14\text{ m s}^{-1}$ 西北气流大风区域,18:00卫星云图显示为涡旋云系后部对流云团,降雹区域的延安宝塔区08:00~14:00地面升温明显,达 10°C 。降雹区位于槽线或700 hPa切变线曲率最大处。雷达显示:对流云10:17开始在宝塔区上游西北方向160 km的定边、鄂托克旗出现,云顶高度12:23达到11 km,15:16达到14 km,移动方向为由东南到西北,最后变为西北到东南向,延安市宝塔区、宜川、富县、铜川王益16:00~20:00陆续降雹。另外08:00延安宝塔区上游银川探空资料显示(图

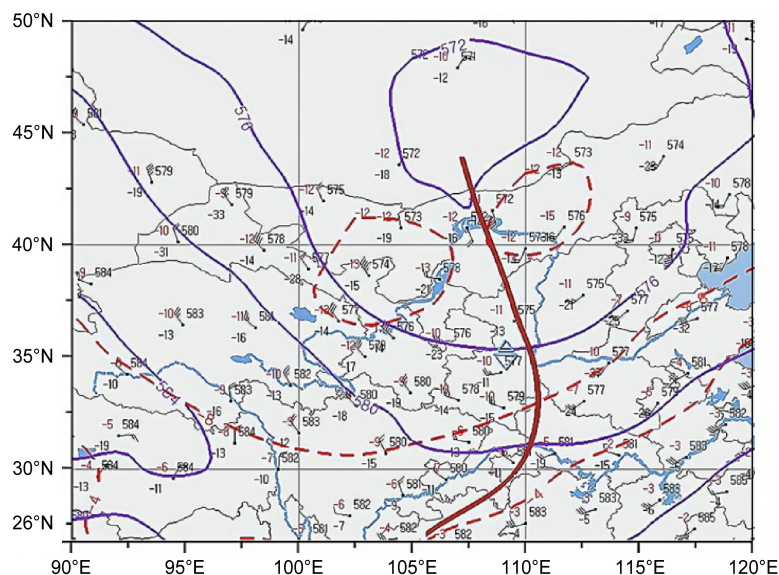


图2 2015年7月17日08:00(北京时,下同)500 hPa天气图。紫色实线为等高线,红色虚线为等温线,棕色实线为槽线。

Fig. 2 The 500 hPa weather map in Shaanxi Province at 0800 BT (Beijing time) on 17 July, 2015. The purple solid line is the contour line, the red dotted line is the isotherm, and Brown solid line is groove line

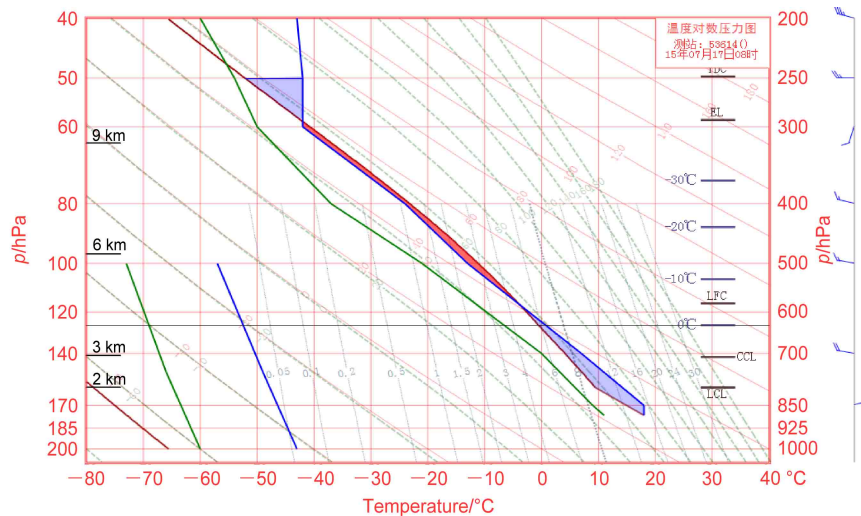


图3 2015年07月17日08:00银川探空站温度对数压力图。蓝色粗实线为温度层结曲线，绿色粗实线为露点温度层结曲线，棕色粗实线为状态曲线，状态曲线与温度层结曲线之间的红色区域为不稳定能量区，黑色长直线为0°C层高度

Fig. 3 T - $\ln p$ chart in Yinchuan at 0800 BT on 17 July, 2015. The blue thick solid line is the temperature profile, the green thick solid line is the dew point temperature profile, the brown thick solid line is the equivalent potential temperature profile, the red area between the equivalent potential temperature and the temperature profile is the unstable energy area, and the long black line is the 0°C layer height

3): SI 指数为 -2.39°C , K 指数为 33°C , 对流不稳定。

4.2 降雹日火箭探空分析

4.2.1 冰雹云的识别

根据“九五”国家科技攻关成果，陕西旬邑县冰雹云识别指标：冰雹云初期回波和强回波都出现在 0°C 层到 -5°C 之间，强冰雹云 45 dBZ 回波顶高大于 8 km ，弱冰雹云 45 dBZ 回波顶高为 $7\sim 8\text{ km}$ ；另外结合渭北地区冰雹云雷达识别指标：7月份 45 dBZ 回波高度 $\geq 7261\text{ m}$ 属冰雹云的酝酿阶段。

2015年7月17日延安雷达组合反射率显示，17:20对流云团呈西南—东北分布，并向东南方向移动（图4a）。16:52在雷达站西南方向高显显示（图4c），三块多单体对流云 45 dBZ 雷达强回波高度达到 8 km 以上，回波顶高度在 10 km 以上；17:20（图4d）在雷达站东北方向 45 dBZ 雷达强回波高度也达到 8 km 以上，云顶高度达到 11 km ，均为冰雹云。另外通过过测站的雷达回波强度垂直剖面显示（图4b），冰雹云在17:14已经形成， 45 dBZ 雷达强回波高度达到 8 km 以上，因扫描模式的原因云顶高度不能精确判断，但属于冰雹云回波，与图4c和d得出的对流云团属于冰雹云团结论一致。

4.2.2 火箭探空冰雹云内外的对流参数比较

4.2.2.1 探空火箭的飞行轨迹

探空火箭发射时间为2017年7月17日18:04，

发射探空火箭时，进行了时间校对。结合新一代天气雷达图，火箭探空的位置偏冰雹云的后部（图5a），雷达中心偏西南 5 km 处的宝塔区气象局为火箭探空发射的位置，火箭发射方向为西北方向，火箭升空到 7800.2 m 后，打开降落伞，探空仪出仓，9秒后达到 8353 m ，随后探空仪向东北方向漂移，18:12:15探空仪下降到 4209.0 m ，探空仪移动方向为偏东南方向，18:17:49探空仪下降到 3145.0 m 向西南方向移动图5b，探空仪降落到地面用时23分02秒。

4.2.2.2 降雹前后对流参数的比较

为了了解冰雹云内外对流参数的变化，探空资料选取延安宝塔区降雹上游的银川站08:00、延安站08:00、14:00、20:00以及火箭探空的对流参数（表3）。温湿条件参数选 T_g （对流指数）、IQ（整层比湿积分）、TT（总指数），层结稳定度参数SI（沙氏指数）、K（大气稳定度指数）和LI（抬升指数），热力参数选择SSI（风暴强度指数），能量参数选CAPE（对流有效位能），特殊层选 H_0 （零度层高度）、 H_{-20} （ -20°C 层高度）、LCL（抬升凝结高度）。

通过对比可以看出：温湿条件方面火箭探空的冰雹云内部 T_g 为 21.2°C ，IQ为 2376.0 g kg^{-1} ，TT为 43.0°C ，均小于冰雹云外部的自然大气，说明周围环境大气更有利于发生对流，由于火箭探空位置

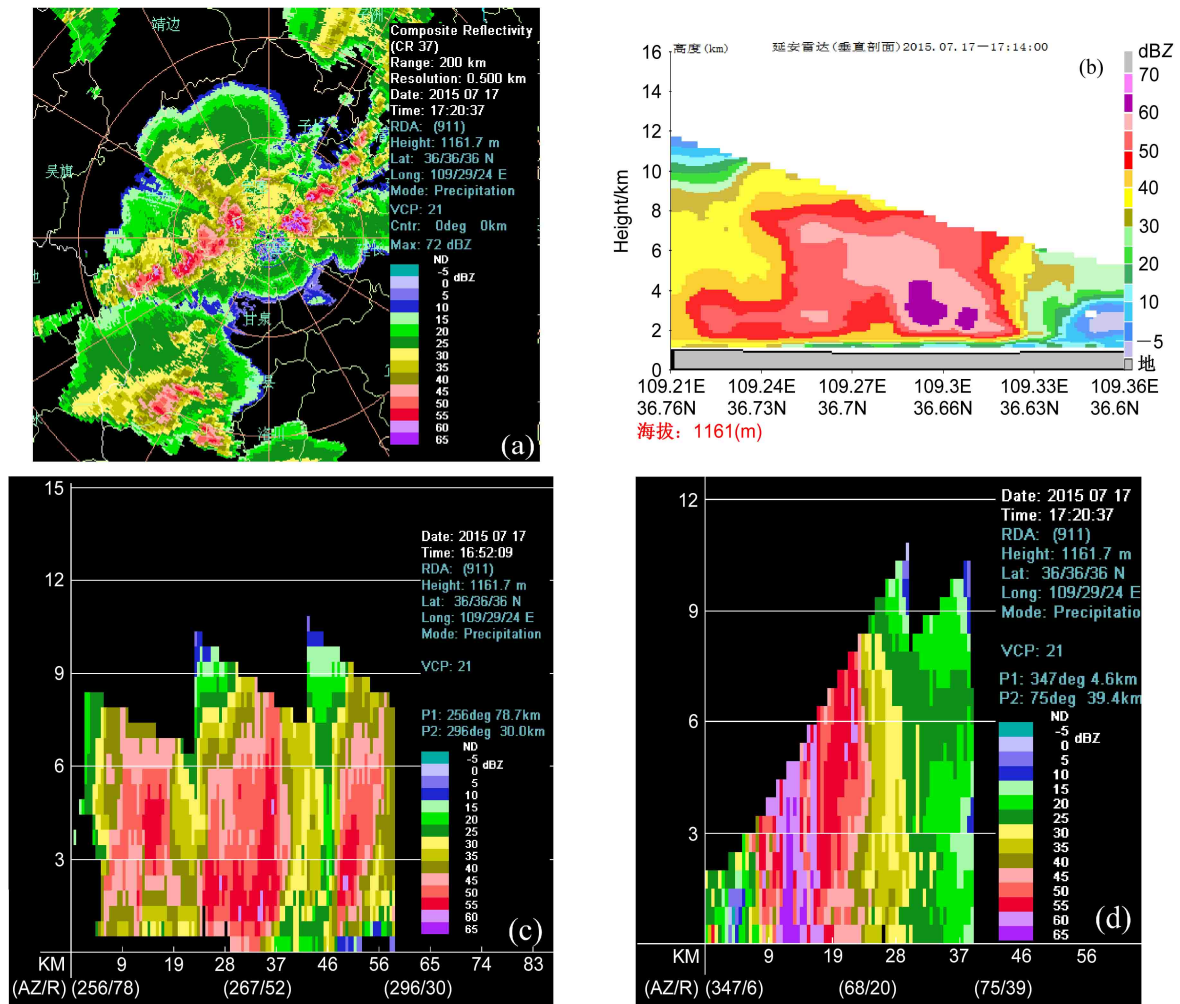


图4 2015年7月17日延安雷达站 (a) 17:20 组合反射率图以及 (b) 17:14、(c) 16:52、(d) 17:20 回波强度垂直剖面

Fig. 4 (a) The diagram plane of radar composite reflectivity at 1720 BT, vertical cross sections of radar composite reflectivity, at (b) 1714 BT, (c) 1652 BT, and (d) 1720 BT on July 17, 2015 at Yan'an station

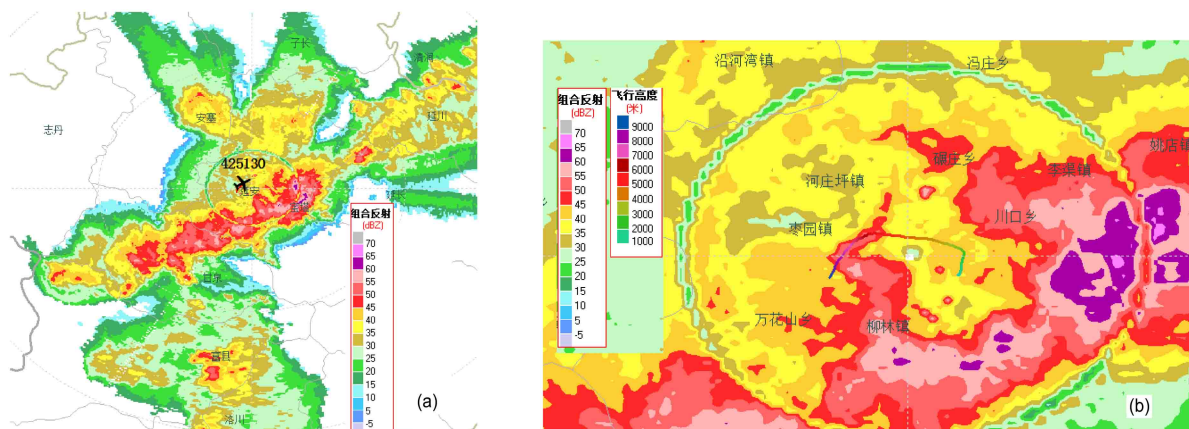


图5 2015年7月17日火箭探空雷达回波及位置: (a) 开始时间 18:06 (飞机的位置为开始位置); (b) 结束时间 18:28。曲线为火箭探空轨迹

Fig. 5 Radar echo and sounding rocket position on July 17, 2015: (a) Start working time at 1806 BT; (b) after working time at 1828 BT. The curve is rocket sounding trajectory

表 3 降雹前后探空对流参数比较
Table 3 Comparison of convection parameters before and after hail shooting

探空时刻	探空地点	对流参数										
		$T_g/^{\circ}\text{C}$	$IQ/\text{g kg}^{-1}$	$TT/^{\circ}\text{C}$	$SI/^{\circ}\text{C}$	$K/^{\circ}\text{C}$	$LI/^{\circ}\text{C}$	SSI	$CAPE/\text{J kg}^{-1}$	H_0/m	H_{-20}/m	LCL/hPa
2015年7月17日08:00	银川	25.8	2043.3	53	-2.39	33	-1.86	251.9	241.8	3994.5	6792.7	794.6
	延安	23.7	2489.7	49	-0.63	35	2.76	195.7	0.0	4022.4	7010.0	851.9
2015年7月17日14:00	延安	33.6	2992.2	50	-2.6	34	-4.9	262.0	1407.5	4361.2	7338.3	816.3
2015年7月17日20:00	延安	25.9	2611.0	45	0.32	29	1.61	261.2	24.0	4326.5	7582.4	850.1

偏冰雹云后部，整层湿度条件不是很好；层结稳定度方面降雹前 14:00 的 K 、 LI 、 SI 分别为 34°C 、 -4.9°C 、 -2.6°C ，冰雹云内部为 30.0°C 、 3.0°C 、 2.8°C ， K 值表明冰雹云内外易发生对流，对流出出现前大气发生雷暴的概率更大，可能有分散雷暴和成片雷暴产生， LI 、 SI 说明发生对流前大气层结更加不稳定；热力参数 SSI 为 256.2，低于冰雹云外部自然大气；能量参数 $CAPE$ 冰雹云内部为 0.1 J kg^{-1} ，而降雹前的 14:00 延安探空 $CAPE$ 为 1407.5 J kg^{-1} ，降雹前大气中的能量较强；冰雹云内部零度层高度 3800 m 与 14:00 时探空相比明显偏低，偏低了 561.2 m，而冰雹云内部 -20°C 层高度比降雹前偏高，可能是低层有冷空气，高层空气抬升对流混合所致。

4.2.2.3 冰雹云内部湿度、温度场分布特征

探空仪开伞后，迅速适应环境，经过 25 s 达到最大海拔高度 8364 m，冰雹云从 7824.8 m 到地面，相对湿度在 60% 以上，最大相对湿度为 80% 以上的高度在 4028.2~3028.7 m，厚度大约 1 km，温度为 -1.82°C ~ 4.87°C 左右，说明零度层附近的相对湿度最大，为冰雹的形成提供了水汽条件（图 6）。温度变化由高到低递减，探空仪出仓

10 s，温度达到 -20.5°C ，25 s 达到 -24.91°C ，为探空的最低温度，随后随着探空仪下降，温度缓慢增加，在 6 分 10 秒至 6 分 24 秒，5567.1~5466.1 m 高度，厚度 101 m 内有平均温度误差为 0.34°C 的逆温层，温度递减率 $0.34^{\circ}\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$ ，在 14 分 42 秒至 15 分 24 秒，2790.4~2598.5 m 高度，191.9 m 厚度内有最大温度误差为 0.34°C 的逆温层，温度递减率 $0.18^{\circ}\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$ （图 7）。

温度探测表明这次冰雹云有两个逆温层，低层的逆温较弱，高层逆温较强。逆温层是稳定的层结，它的存在阻碍了对流层中上部对流扰动的发展，限制了浓积云、积雨云发展，从温度层结来看，它是不利于对流发展，然而考虑湿度层结对稳定的影响，高层逆温层存在着有利于对流发展的一面，高层逆温层阻碍着中低层水汽向高层的输送，向上传输的水汽只能集中在逆温层之下，最大相对湿度为 80% 以上的高度在 4028.2~3028.7 m，逆温层主要起到了暖盖聚能作用，它阻碍了湿空气向上穿透，有利于中低层增暖、增湿，使潜在的不稳定能量增加，在天气系统配合下，大量的不稳定能量得以释放，造成暖湿气流强烈的辐合上升，对流引起更加强烈的对流，突破高层逆温，快速形成冰雹，导致

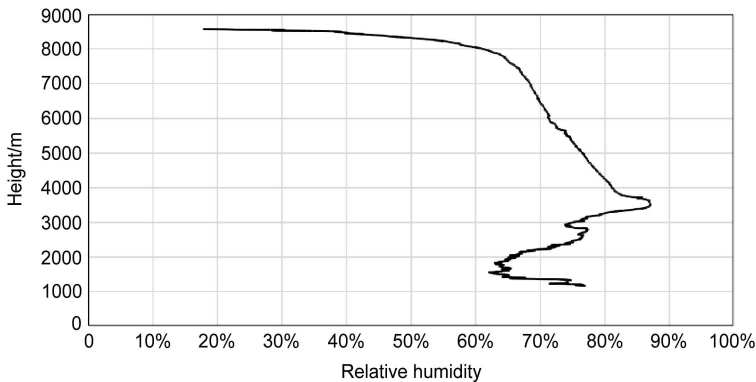


图 6 2015 年 7 月 17 日 18:04~18:28 火箭探空湿度变化
Fig. 6 Changes in humidity detected by sounding rocket during 1804 BT–1828 BT on July 17, 2015

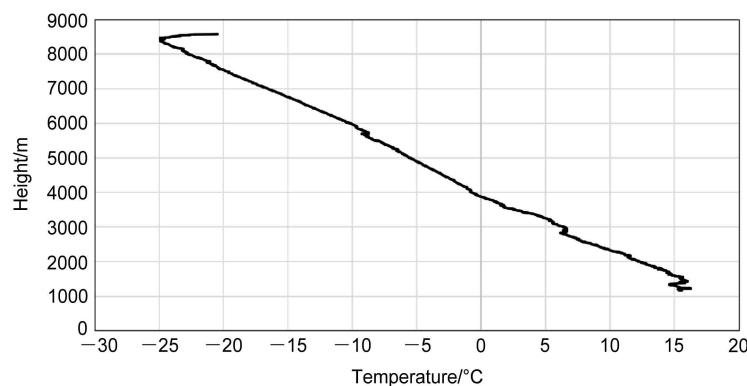


图7 2015年7月17日18:04~18:28火箭探空温度(单位: °C)变化

Fig. 7 Changes in temperature (units: °C) detected by sounding rocket during 1804 BT–1828 BT on July 17, 2015

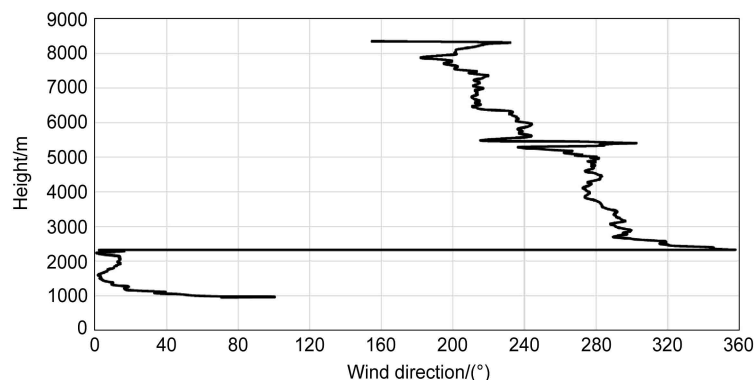


图8 2015年7月17日18:04~18:28火箭探空风向变化

Fig. 8 Changes in wind directions detected by sounding rocket during 1804 BT–1828 BT on July 17, 2015

冰雹天气的发生发展。

4.2.2.4 冰雹云内部风速风向变化特征

冰雹云内部的风向变化由低层到高层,呈逆时针变化,探空仪有摆动,说明云层对流较强(图8)。水平风速在5742.2 m高度以上 $\geq 10 \text{ m s}^{-1}$,在5361.1~5461 m之间100 m厚度有水平风速 $\leq 2 \text{ m s}^{-1}$ 弱风区,对应的温度在 $-9.24^\circ\text{C} \sim -8.72^\circ\text{C}$ 之间,在3001.5~4645.5 m,厚度1644 m,有水平风速 $\geq 13 \text{ m s}^{-1}$ 的大风区,与大风区对应的湿度较大,区间湿度为77.1%~87.1%,在3455.3~3477.3 m,厚度22 m,有最大水平风速 19 m s^{-1} 急流,对应的温度为 1.3°C ,即在零度层下面有厚度为22 m,水平风速 19 m s^{-1} 急流,在零度层上面 -9°C 左右有厚度为100 m水平风速 $\leq 2 \text{ m s}^{-1}$ 弱风区,这些流场结构为冰雹的形成提供了动力条件和环境场条件(图9)。

4.2.2.5 冰雹云内部垂直速度变化特征

探空仪一秒读取一个数据,除有温度、湿度、

风向、风速等气象要素外,还有海拔高度,用后一时次减去前一时次海拔高度,可以推算出火箭的下降速度,利用冰雹云内火箭下降速度与没有对流的探空火箭下降速度比较,可以推算出冰雹云内部垂直气流速度。

探空火箭探空仪的下降速度受初始下降速度和气压及空气密度的影响。正常情况下探空火箭有降落伞,下降速度应该匀速,但是受气压及空气密度影响,探空仪下降过程中速度越来越小,平均降落速度从7 km以上到地面大约减少 2 m s^{-1} 左右。如延安市富县2015年6月16日19:47~20:11探空仪下落过程中,海拔高度7 km以上平均降落速度比2 km以下平均降落速度快 2.13 m s^{-1} ,2015年8月9日15:49~16:10,探空仪海拔高度7 km以上平均降落速度比2 km以下平均降落速度快 2 m s^{-1} ,延安市宝塔区2015年7月16日17:22~17:48火箭探空仪平均降落速度海拔高度7 km以上比2 km以下快 1.96 m s^{-1} ,受气压及空气密度影响,每千米

高度平均减小下落速度 0.28 m s^{-1} 。另外统计四次探空火箭 7~8 km 高度初始平均降落速度为 6.62 m s^{-1} , 2015 年 7 月 17 日 18:04, 7~8 km 高度平均降落速度为 7.12 m s^{-1} , 初始降落速度误差在 1 m s^{-1} 之内。

为了准确得到冰雹内部垂直速度, 利用延安市宝塔区气象站探空前一天试发的一枚探空火箭的下

降速度为参考, 校准 2015 年 7 月 17 日 18:04~18:28 冰雹云内部火箭下降速度, 如果冰雹云内部同高度火箭下降速度大于试射火箭下降速度, 则说明有下降气流, 反之冰雹云内部有上升气流。图 10 给出了延安宝塔区 2015 年 7 月 16 日 17:22~17:48 火箭探空仪下降速度随海拔高度变化, 图 11 给出了 2015 年 7 月 17 日 18:04~18:28 冰雹云内探空仪

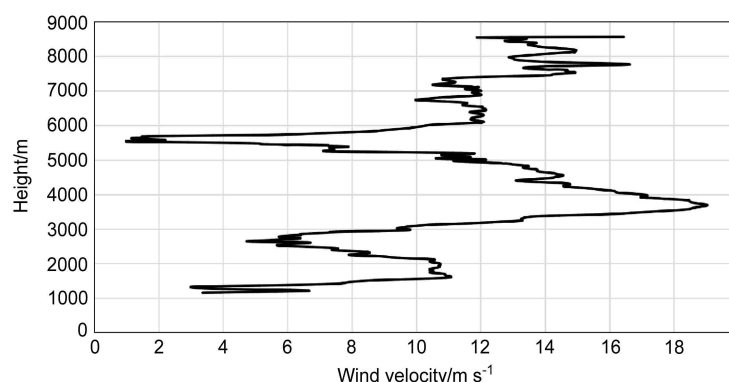


图 9 2015 年 7 月 17 日 18:04~18:28 火箭探空风速变化 (单位: m s^{-1})

Fig. 9 Changes in wind velocity detected (units: m s^{-1}) by sounding rocket during 1804 BT–1828 BT on July 17, 2015

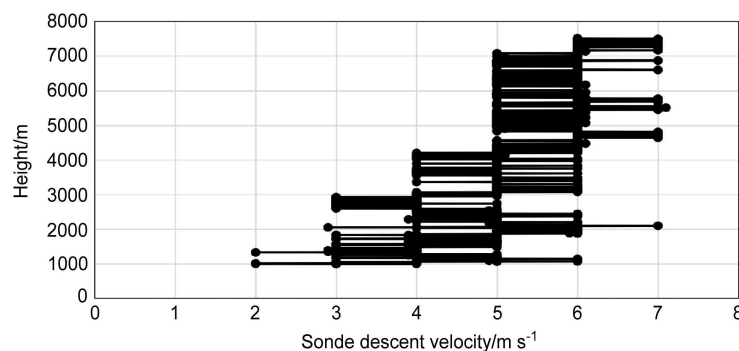


图 10 2015 年 7 月 16 日 17:22~17:48 火箭探空仪下降速度变化 (单位: m s^{-1})

Fig. 10 Changes in decline velocity (units: m s^{-1}) of sounding rocket instrument during 1722 BT–1748 BT on July 17, 2015

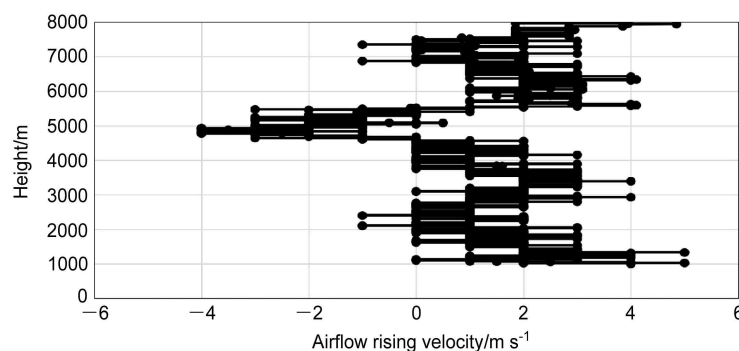


图 11 2015 年 7 月 17 日 18:04~18:28 火箭探空冰雹云内部气流上升速度变化 (单位: m s^{-1})

Fig. 11 Changes in airflow rising velocity (units: m s^{-1}) detected by sounding rocket in hail cloud during 1804 BT–1828 BT on July 17, 2015

下降速度减去同高度 7 月 16 日 17:22~17:48 火箭探空仪下降速度后,垂直气流速度随高度变化情况,可见:在 4601~5490 m 高度之间 ($-4.6^{\circ}\text{C}\sim-8.8^{\circ}\text{C}$) 有上升气流,平均上升速度 1.79 m s^{-1} ,最大上升速度 4 m s^{-1} ,其它层均为下沉气流。

5 总结与讨论

综合火箭探测冰雹云得到的水平风速、垂直风速、湿度、温度等气象参数随高度变化特征,可以看出冰雹云偏后位置的基本流场结构特征: 0°C 附近 3028.7 m (4.98°C) 至 4028.2 m (-1.82°C) 1 km 范围内有最大湿度区,空气湿度达 80% 以上,最大湿度 87.1%,为冰雹的形成提供了充沛的水汽条件;水平风速的变化在 0°C 以下有两股水平急流,接近地面的 1363.5~1941.3 m 的厚度 577.8 m 范围内有 $10\sim11\text{ m s}^{-1}$ 水平急流,紧贴 0°C 下高度 3455.3 m (0.8°C) 至 3477.3 m (1.3°C),厚度 22 m 范围内有 19 m s^{-1} 水平急流,另外在 3028.7 m (5°C) 至 4645.5 m (-4.8°C) 的厚度 1616 m 范围维持 $\geq 13\text{ m s}^{-1}$ 水平风速,在 4361 m (-8.7°C) 至 5461 m (-9.2°C),有水平风速 $\leq 2\text{ m s}^{-1}$ 弱风区,弱风区附近 4601~5490 m 有上升气流,平均上升气流速度 1.79 m s^{-1} ,最大上升气流速度 4 m s^{-1} ,可能是冰雹的生长区(图 12)。

从探空仪穿过雹云温度脉动看,冰雹云有两个

逆温层,5567.1~5466.1 m 高度,厚度 101 m,温度递减率 $0.34^{\circ}\text{C}(100\text{ m})^{-1}$,较强,低层 2790.4~2598.5 m 高度,厚度 191.9 m,温度递减率 $0.18^{\circ}\text{C}(100\text{ m})^{-1}$,比较弱,两层之间湿度最大,有利于水汽的凝聚,在高层逆温层附近的 4601~5490 m 之间有强的上升气流,平均上升速度 1.79 m s^{-1} ,最大上升速度 4 m s^{-1} ,一方面高层的逆温层抑制对流发展,另一方面逆温层附近有强的上升气流,这种配置对大粒子冰雹的生长十分有利。

利用对比方法校准计算冰雹云垂直速度变化,因火箭下降速度受初始下降速度和气压、空气密度、气流的变化影响较大,不同探空仪初始下降速度有误差,相对误差在 1 m s^{-1} 之内,受气压及空气密度影响,探空仪下降过程中速度越来越小,平均降落速度从 7 km 以上到地面大约减少 2 m s^{-1} 左右,校准后计算冰雹云内垂直气流速度变化可能存在偏差,但是趋势是有价值的。

冰雹云内部与外部温湿条件、层结稳定度、热力参数、能量参数及特性层存在明显的区别。冰雹云内的湿度条件不是很好,有两个逆温层,热力参数 SSI 低于冰雹云外部自然大气,能量参数 CAPE 小于降雹前 14:00 延安市宝塔区自然大气,降雹前大气中的能量较强。冰雹云内部零度层高度与 14:00 自然大气相比明显偏低,而冰雹云内部 -20°C 层高度比降雹前偏高,可能是对流混合所致。

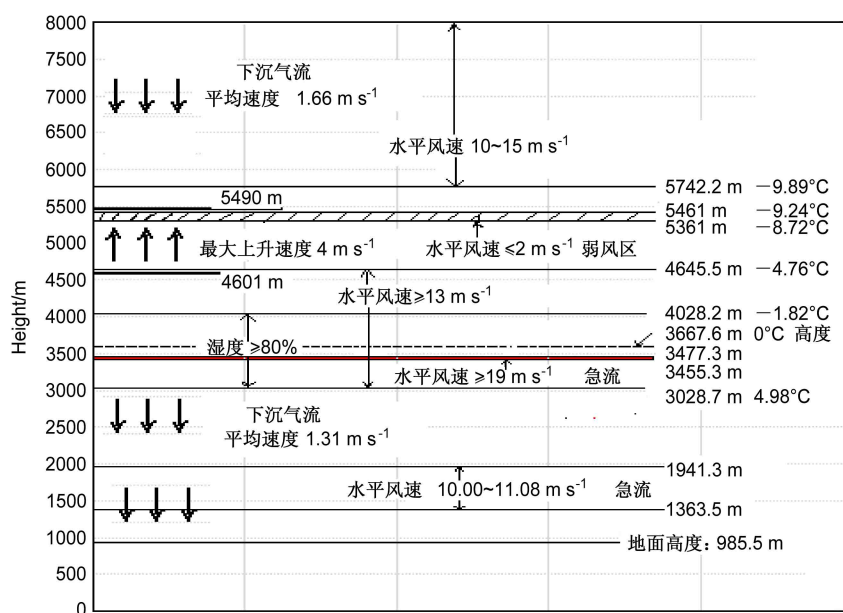


图 12 火箭探空冰雹云内部结构示意图

Fig. 12 Schematic of interior structure of hail cloud detected by sounding rocket

这次冰雹云天气过程为飢线过境的单带多单体回波, 属于较强的冰雹云体。14:06, 在延安宝塔区西北方向有西北到东南带状回波向东北方向移动, 15:15 之后, 整个云团呈逆时针缓慢旋转, 16:00 形成西南到东北方向带状回波, 同时在延安宝塔区东北方向 30 km 处, 有新生单体生成, 稳定少动, 与原带状回波形成两条平行带状回波, 17:48 两个带状回波合并, 形成一条带状回波, 继续向东南方向移动, 17:48 带状回波继续南下东移, 21:46 云层整体减弱东移。可见这次冰雹的形成是对流云逆时针方向缓慢旋转, 对流云团在生消过程中移动方向发生变化, 并与前面的带状回波发生合并形成降水。

由径向速度垂直剖面 (VCS) 可以看出 (图略): 两个带状回波合并前的 17:26, 雷达的西南方向带状回波为多单体, 流场结构复杂, 强回波区域主要为下沉气流, 在延安宝塔区东北方向新生单体的为多单体, 低空 3 km 以下有向雷达的径向速度, 高层有远离雷达的径向速度, 18:00 冰雹云前部显示有悬挂回波, 有高度为 5 km 左右的向雷达的楔形上升气流, 可以看到旋转。18:17 冰雹云东北方向前部显示有悬挂回波, 维持 5 km 左右的向雷达的楔形上升气流, 最大径向速度达到 10 m s^{-1} 。

虽然这次火箭探测, 探测位置偏于冰雹云的后部, 由于雷达的观测位置与探空火箭发射位置相差 5 km 左右, 不能很好地反映探测火箭在冰雹云内部的相对高度位置及当时的雷达回波强度等参数, 但仍然看到了冰雹云中湿度最大区域与水平风速, 上升气流区配置合理, 为冰雹的生长提供了适宜的动力场和环境场。综合分析, 冰雹云内部流场结构复杂, 冰雹云移动方向的前部有与冰雹云移动方向相反的低层气流, 冰雹生成阶段悬挂回波明显, 楔形上升气流高度可达到 5 km, 冰雹云后部主要为下沉气流。

参考文献 (References)

葛润生, 姜海燕, 彭红. 1998. 北京地区雹暴气流结构的研究 [J]. 应用气象学报, 9(1): 1-7. Ge Runsheng, Jiang Haiyan, Peng Hong. 1998. Flow structure of hailstorm in Beijing area [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9(1): 1-7.

郭学良, 黄美元, 洪延超, 等. 2001a. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 I. 模式建立及冰雹的循环增长机制 [J]. 大气科学, 25(5): 707-720. Guo Xueliang, Huang Meiyuan, Hong Yanchao, et al. 2001a. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model. Part I: Model description and the mechanism of hail recirculation

growth [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25(5): 707-720.

郭学良, 黄美元, 洪延超, 等. 2001b. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 II. 冰雹粒子的分布特征 [J]. 大气科学, 25(6): 856-864.

Guo Xueliang, Huang Meiyuan, Hong Yanchao, et al. 2001b. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model. Part II: Characteristics of hail-category size distribution [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25(6): 856-864. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.06.13

洪延超. 1999. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究 [J]. 气象学报, 57(1): 31-45. Hong Yanchao. 1999. Study on mechanism of hail formation and hail suppression with seeding [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57(1): 31-45. doi:10.11676/qxxb1999.003

洪延超, 肖辉, 李宏宇, 等. 2002. 冰雹云中微物理过程研究 [J]. 大气科学, 26(3): 421-432. Hong Yanchao, Xiao Hui, Li Hongyu, et al. 2002. Studies on microphysical processes in hail cloud [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26(3): 421-432. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.03.13

胡朝霞, 李宏宇, 肖辉, 等. 2003. 旬邑冰雹云的数值模拟及累积带特征 [J]. 气候与环境研究, 8(2): 196-208. Hu Zhaoxia, Li Hongyu, Xiao Hui, et al. 2003. Numerical simulation of hailstorms and the characteristics of accumulation zone of supercooled raindrops [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8(2): 196-208. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2003.02.07

李金辉, 樊鹏. 2007. 冰雹云提前识别及预警的研究 [J]. 南京气象学院学报, 30(1): 114-119. Li Jinhui, Fan Peng. 2007. Investigation on early identification and warning of hail clouds [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30(1): 114-119. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2007.01.016

李宏宇, 胡朝霞, 肖辉, 等. 2003. 人工防雹实用催化方法数值研究 [J]. 大气科学, 27(2): 212-222. Li Hongyu, Hu Zhaoxia, Xiao Hui, et al. 2003. Numerical studies of the practical seeding methods in hail suppression [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(2): 212-222. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.02.08

李伟, 赵培涛, 郭启云, 等. 2011. 国产 GPS 探空仪国际比对试验结果 [J]. 应用气象学报, 22(4): 453-462. Li Wei, Zhao Peitao, Guo Qiyun, et al. 2011. The international radiosonde intercomparison results for China-made GPS radiosonde [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 22(4): 453-462. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2011.04.008

廖远程. 1986. 雹暴逆温层特性分析 [J]. 高原气象, 5(2): 172-179.

Liao Yuancheng. 1986. The analysis of inversion layer feature of hailstorms [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 5(2): 172-179.

廖远程. 1990. 甘肃冰雹云结构研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1-99.

Liao Yuancheng. 1990. The Structure of Hailstorm Research in Gansu Area (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-99.

廖远程, 李生柏. 1982. 冰雹云气流和温度结构分析 [J]. 大气科学, 6(1): 103-108. Liao Yuancheng, Li Shengbai. 1982. An analysis of air current and temperature structure in hailcloud [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 6(1): 103-108. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1982.01.15

- 刘黎平. 2002. 双线偏振多普勒天气雷达估测混合区降雨和降雹方法的理论研究 [J]. *大气科学*, 26(6): 761–772. Liu Liping. 2002. A theoretical study of estimations of rain and hail rates in mixed-phase areas with dual linear polarization radar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26(6): 761–772. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.06.05
- 潘留杰, 张宏芳, 王楠, 等. 2013. 陕西一次强对流天气过程的中尺度及雷达观测分析 [J]. *高原气象*, 32(1): 278–289. Pan Liujie, Zhang Hongfang, Wang Nan, et al. 2013. Mesoscale and Doppler radar observation analyses on a severe convective weather process in middle Shaanxi Province in September 2010 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32(1): 278–289. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00027
- 唐仁茂, 李德俊, 向玉春, 等. 2012. 地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析 [J]. *气象学报*, 70(4): 806–813. Tang Renmao, Li Dejun, Xiang Yuchun, et al. 2012. Analysis of a hailstorm event in the middle Yangtze River basin using ground microwave radiometers [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70(4): 806–813. doi:10.11676/qxxb2012.066
- 肖辉, 吴玉霞, 胡朝霞, 等. 2002. 旬邑地区冰雹云的早期识别及数值模拟 [J]. *高原气象*, 21(2): 159–166. Xiao Hui, Wu Yuxia, Hu Zhaoxia, et al. 2002. Earlier identification and numerical simulation of hail storms occurring in Xunyi region [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21(2): 159–166. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.02.008
- 肖辉, 王孝波, 周非非, 等. 2004. 强降水云物理过程的三维数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 28(3): 385–404. Xiao Hui, Wang Xiaobo, Zhou Feifei, et al. 2004. A three-dimensional numerical simulation on microphysical processes of torrential rainstorms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28(3): 385–404. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.03.06
- 徐燕, 孙竹玲, 周筠珺, 等. 2018. 一次具有对流合并现象的强飚线系统的闪电活动特征及其与动力场的关系 [J]. *大气科学*, 42(6): 1393–1406. Xu Yan, Sun Zhuling, Zhou Yunjun, et al. 2018. Lightning activity of a severe squall line with cell merging process and its relationships with dynamic fields [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(6): 1393–1406. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17220
- 岳治国, 梁谷. 2018. 陕西渭北一次降雹过程的粒子谱特征分析 [J]. *高原气象*, 37(6): 1716–1724. Yue Zhiguo, Liang Gu. 2018. Characteristics of precipitation particles in a hailstorm process in Weibei area of Shaanxi Province [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 37(6): 1716–1724. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00023
- 张元, 刘东升, 王维佳, 等. 2016. TK-2GPS 人影火箭探空数据与 L 波段探空数据对比分析 [J]. *高原山地气象研究*, 36(1): 91–95. Zhang Yuan, Liu Dongsheng, Wang Weijia, et al. 2016. Comparative analysis of up-air sounding data between L-Band radar with TK-2GPS weather modification rocket [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese)*, 36(1): 91–95.
- 周玲, 陈宝君, 李子华, 等. 2001. 冰雹云中累积区与冰雹的形成的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 25(4): 536–550. Zhou Ling, Chen Baojun, Li Zihua, et al. 2001. A numerical simulation of hailstorm accumulation zone and hail formation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25(4): 536–550. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.04.10
- 周围, 包云轩, 冉令坤, 等. 2018. 一次飚线过程对流稳定性演变的诊断分析 [J]. *大气科学*, 42(2): 339–356. Zhou Wei, Bao Yunxuan, Ran Lingkun, et al. 2018. Diagnostic analysis of convective stability evolution during a squall line process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(2): 339–356. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17126