

黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等. 2014. 基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析. 气象, 40(2):216-222.

# 基于地基微波辐射计资料对咸宁 两次冰雹天气的观测分析<sup>\* 1</sup>

黄治勇<sup>1,2</sup> 徐桂荣<sup>2</sup> 王晓芳<sup>2</sup> 唐永兰<sup>2</sup>

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

2. 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430074

**提 要:** 利用地基微波辐射计观测资料,对两次冰雹过程进行观测分析。结果表明:中低层暖湿气流输送、中层干冷空气侵入,在 0~10 km 形成“上干、下湿”2 层垂直分布结构。低层的感热和潜热随上升气流向上输送,2~3 km 层明显增温,0、-5 和 -20℃ 层略微上升。同时,低层水汽也随上升气流向上输送,降雹前大气液态水总含量(ILW,下同)和大气水汽总含量(IWV,下同)及过冷水含量快速增长。水汽经过冷层后,冰晶增多增大。当冰晶增大落入 0℃ 以上区融化层时,冰晶融化导致液态水增加,一部分形成冰雹或地面降水,导致降雹之后 ILW、IWV 及 0℃ 以下液态水含量减小。上述结论对冰雹的预警有一定指示意义。

**关键词:** 微波辐射计, 冰雹, 潜势, 监测, 温度, 湿度

**中图分类号:** P414 407

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.009

## Analysis on Two Hailstorm Events in Xianning Based on Observations of Ground-Based Microwave Radiometer

HUANG Zhiyong<sup>1,2</sup> XU Guirong<sup>2</sup> WANG Xiaofang<sup>2</sup> TANG Yonglan<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain,  
China Meteorological Administration, Wuhan 430074

**Abstract:** Using ground-based microwave radiometer observation data, two hailstorm cases that happened in Xianning of Hubei Province on 26 February 2009 and 12 April 2010 are analyzed. The results show that low-level warm air transportation and mid-level dry cold air intrusion contributes to the “upper dry and lower wet” 2-layer vertical structure of 0–10 km relative humidity. The updraft transports upward sensible heat and latent heat of the low level, resulting in the significant warming of 2–3 km layer, and the slight rising of 0, -5 and -20℃ layers. As the low-level moisture is rising up, ILW, IWV and supercooled water grow rapidly before the hail. After the wet vapor goes through the cold layer, the ice crystals increase. When the ice crystals increase and fall into the area above 0℃ melting layer, the ice crystals are melted, leading to an increase in liquid water, and part of the water becomes hails or surface precipitation, so that the ILW, IWV and liquid water content below 0℃ decrease after hails. The above conclusion is of some significance to the early warning of hails.

**Key words:** microwave radiometer, hailstorm, potential, observation, temperature, humidity

\* 国家自然科学基金项目(41205086)、灾害天气国家重点实验室基金(2013LASW-A02)和公益性行业(气象)行业专项(GYHY201306012和 GYHY201306059)共同资助

2012 年 11 月 5 日收稿; 2013 年 9 月 17 日收修定稿

第一作者:黄治勇,从事灾害性天气预报方法研究. Email: hzyqxj@126.com

## 引言

多通道地基微波辐射计具有时间分辨率高、精度高和长时间无人值守工作等优点,能够连续监测地面至 10 km 高度的温度、湿度、水汽等垂直廓线,可以部分弥补常规探空观测时间间隔长和因雷达探测局限性而导致获取大量信息的不足(刘建忠等,2010;NOAA Earth Sciences Research Lab,2009;傅云飞等,2007;刘黎平等,2007;万玉发等,2008)。近年来,国内外学者采用地基微波辐射计观测资料在水汽分析方面开展了大量研究。如 Revercomb 等(2003)综述了美国 ARM (Atmospheric Radiation Measurement) 试验中使用微波辐射计探测有关水汽的研究背景以及前景。Dominique 等(2006)基于 COST720 温度、湿度和云廓线试验,通过使用多种微波辐射计与云雷达、风廓线雷达联合观测来提高反演大气廓线的算法,研究了雾形成、发展以及消散时的物理过程。刘红燕等(2007)采用微波辐射计测量得到的水汽总量,分析了北京地区水汽在 4 个季节中的日变化特征。

冰雹具有持续时间短、局地性强等特点,利用新一代天气雷达资料和高分辨率卫星资料对冰雹过程进行分析,发现了冰雹形成过程中动力、热力和水汽等特点,总结了冰雹识别及潜势预警的一些方法(苏德斌等,2011;王秀玲等,2010;王令等,2006;俞小鼎等,2005)。目前,国内在利用地基微波辐射计资料分析冰雹等强对流天气方面刚刚起步。雷恒池等(2011)研究了微波辐射计在探测降雨前水汽和云液水含量的变化特征,探讨了微波辐射计在人工影响

天气中的可能应用。周崑等(2011)基于微波辐射计资料研究了对流降水云内与环境温差。魏东等(2011)、刘志雄等(2009)、廖晓农等(2008)分别利用微波辐射计资料对局地暴雨、强冰雹和雷暴大风个例进行了分析。本文利用中国气象局武汉暴雨所地基微波辐射计观测数据,对 2009 年 2 月 26 日(简称“09.02.26”)和 2010 年 4 月 12 日(简称“10.04.12”)发生在湖北咸宁的两次冰雹过程的温度、相对湿度、垂直水汽总含量、垂直液态水汽含量和不稳定等特征进行分析,为冰雹等强对流天气的监测预警及相关研究提供参考。

## 1 冰雹天气过程概况

2009 年 2 月 26 日 08 时(北京时,下同),500 hPa 中低纬度地区环流平直,850 hPa 在 30°N 附近存在一个暖式切变线,湖北中南部地区处于 500 hPa 低槽前部、850 hPa 暖切变线附近(图 1a)。午后,随着地面弱冷空气的入侵,咸宁出现了一次冰雹强对流天气。冰雹发生在 15 时 06—10 分,冰雹直径约 10 mm,最大为 12 mm。2010 年 4 月 12 日 08 时,500 hPa 低槽主要位于河套地区东部,高原中南部有短波槽东移,850 hPa 在 30°N 附近存在一个暖式切变线(图 1b)。14 时,850 hPa 暖式切变线南压至湖北南部,地面冷空气前沿已经到达湖北南部。傍晚前后,咸宁出现了两次冰雹天气过程:17 时 18—22 分和 19 时 29—30 分,冰雹直径约 10~13 mm,最大达 30 mm,并伴有大风发生。由于第二轮降雹时间短,这里仅分析第一轮降雹。

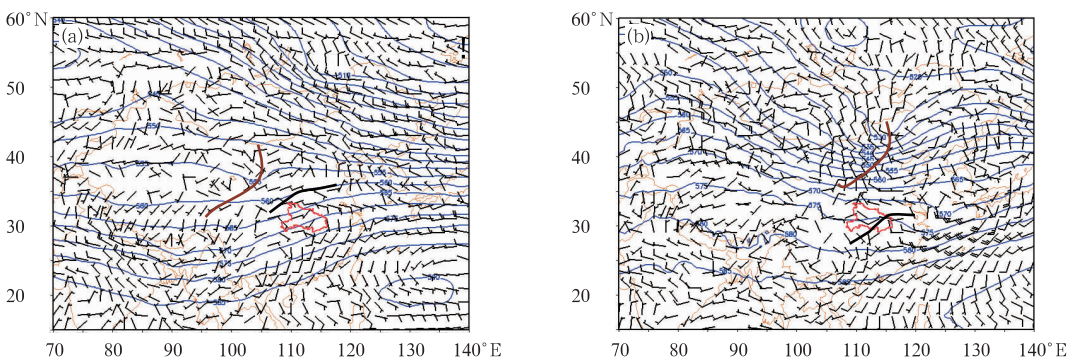


图 1 500 hPa 高度场与 850 hPa 风场叠加图

(棕色曲线为 500 hPa 槽线,黑色曲线为 850 hPa 切变线)

(a) 2009 年 2 月 26 日 08 时, (b) 2010 年 4 月 12 日 08 时

Fig. 1 Stacking chart of 500 hPa height and 850 hPa wind field

(a) 08:00 BT 26 February 2009, (b) 08:00 BT 12 April 2010

(Brown curve indicates for trough of 500 hPa, black curve for shear line of 850 hPa)

## 2 资料与方法

年4月12日湖北咸宁地基微波辐射计逐日观测资料,以及相应时段的地面降水资料。

咸宁地基微波辐射计为美国 Radiometrics 公司生产的 35 通道 MP-3000A 型,每 3 min 一次全天

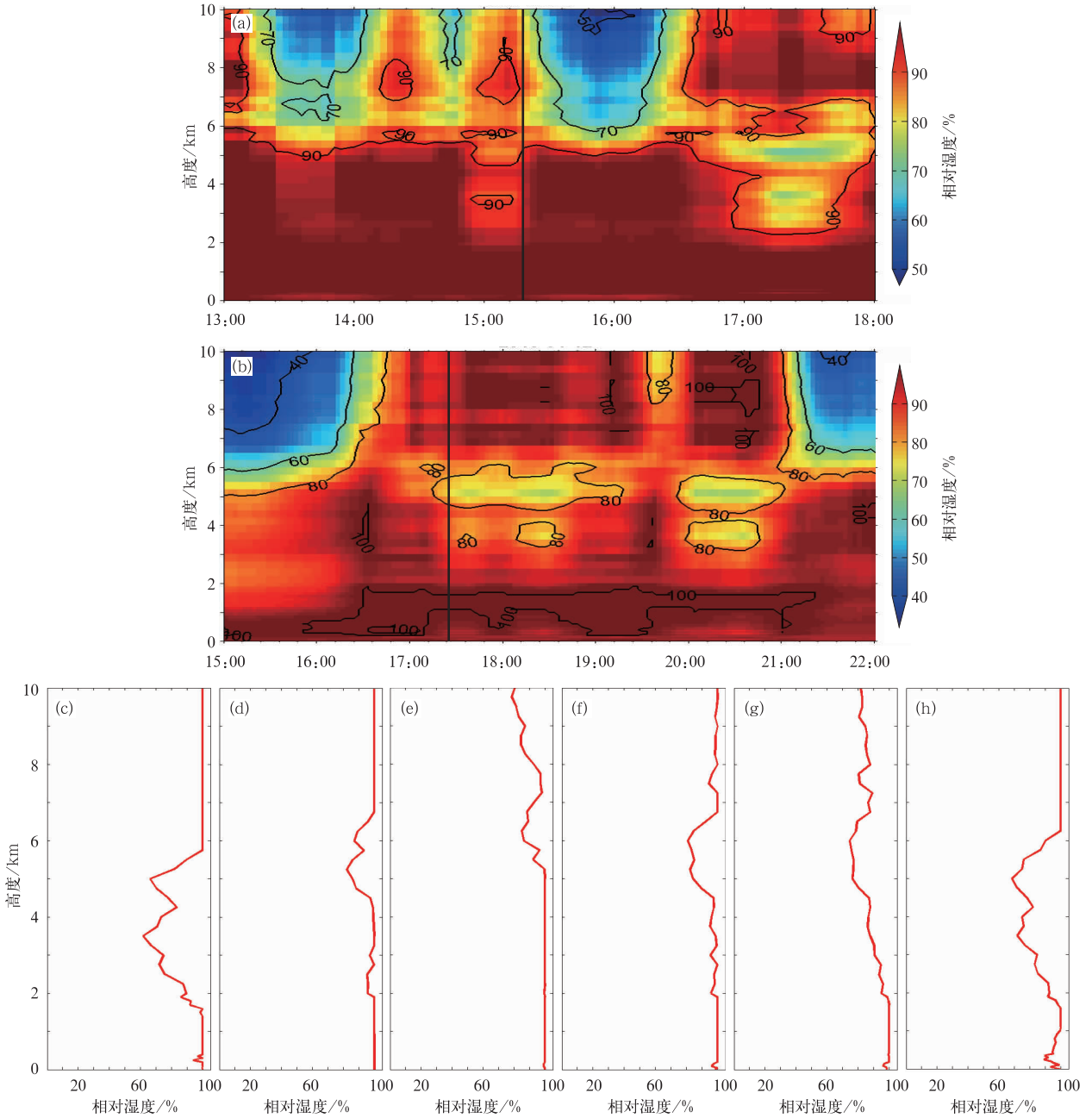


图2 湖北咸宁相对湿度垂直廓线

(a、b中黑竖线对应冰雹开始发生时间)

(a) 2009年2月26日13—18时, (b) 2010年4月12日15—22时; (c、d、e) 2009年2月26日15时02、09、18分, (f、g、h) 2010年4月12日17时09、20、26分

Fig. 2 Relative humidity profiles in Xianning

(a) 13:00—18:00 BT 26 February 2009, (b) 15:00—22:00 BT 12 April 2010; (c) 15:02 BT 26 February 2009, (d) 15:09 BT 26 February 2009, (e) 15:18 BT 26 February 2009, (f) 17:09 BT 12 April 2010,

(g) 17:20 BT 12 April 2010, and (h) 17:26 BT 12 April 2010

(The black lines in a and b, which are the beginning time of hails)

空扫描观测,输出天顶方向地面至 10 km 高度共 58 层的温度、湿度、水汽和液态水含量的廓线数据,其廓线空间垂直分辨率在 500 m 以下为 50 m,在 500 m 至 2 km 为 100 m,在 2 km 之上为 250 m。徐桂荣等(2010)对比分析了咸宁站相同时间观测的 GPS 无线电探空、GPS/MET 和微波辐射计资料发现,在无降水发生时,微波辐射计资料与 GPS 无线电探空、GPS/MET 资料有很好的正相关,随着降水的发生,这种相关性明显减小,并认为咸宁微波辐射计资料能在一定程度上反映降水前天顶上空大气的温度和湿度状况。

### 3 微波辐射计资料监测分析

#### 3.1 相对湿度和大气水汽含量演变特征

低层适当水汽供应是降雹的重要条件之一。“09.02.26”冰雹过程发生前约 3 h(图 2a),相对湿度垂直廓线大体呈 5~10 km 层小、0~5 km 层大的“上干、下湿”2 层结构。冰雹临近时,上下两层相对

湿度增大,其中 0~5 km 层变为饱和状态,7~10 km 层相对湿度超过 90%,6~7 km 层相对湿度 <80%,0~10 km 整层为“上下湿、中间干”的 3 层结构(图 2c)。降雹时,这种 3 层结构总体上维持(图 2d)。降雹后,相对湿度垂直分布又恢复到“上干、下湿”2 层结构(图 2e)。中低层西南气流发展为冰雹发生提供了水汽条件,相对湿度“上干、下湿”垂直结构分布有利于不稳定层结的维持。“10.04.12”第一轮降雹前 3 h(图 2b),相对湿度垂直廓线也为“上干、下湿”2 层结构。降雹临近至结束,0~10 km 整层一直维持“上下湿、中间干”的 3 层结构(图 2f、2g 和 2h),这种 3 层结构为下次冰雹的产生提供了水汽基础条件。

大气水汽总含量(*IWV*,下同)和大气液态水总含量(*ILW*,下同)可以在一定程度上反映水汽的变化。这两次冰雹过程,*IWV* 和 *ILW* 均经历了降雹前迅速增长、降雹时迅速下降的演变过程,冰雹发生在 *IWV* 和 *ILW* 快速增长的波峰上。“09.02.26”降雹前约 1 h,*IWV* 呈波动状态迅速上升,最大波峰出现在降雹前 15 min 临近时,最大峰值达 64.54 mm,

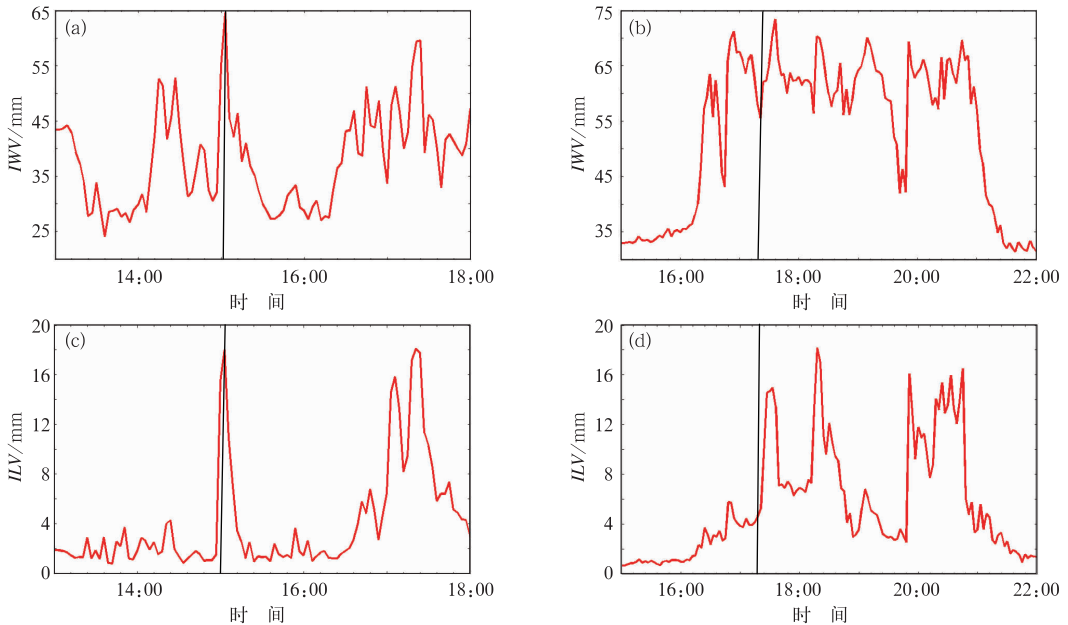


图 3 大气水汽总含量(*IWV*)和大气液态水总含量(*ILW*)随时间变化  
(图中黑竖线为冰雹开始发生时间)

(a) 2009 年 2 月 26 日 13—18 时 *IWV*, (b) 2010 年 4 月 12 日 15—22 时 *IWV*,  
(c) 2009 年 2 月 26 日 13—18 时 *ILW*, (d) 2010 年 4 月 12 日 15—22 时 *ILW*

Fig. 3 Variations of integrated water vapor (*IWV*) and integrated liquid water (*ILW*) in Xianning  
(a) *IWV* in 13:00—18:00 BT 26 February 2009, (b) *IWV* in 15:00—22:00 BT 12 April 2010,  
(c) *ILW* in 13:00—18:00 BT 26 February 2009, (d) *ILW* in 15:00—22:00 BT 12 April 2010  
(Black verticle line is the beginning time of hails)

冰雹发生在  $IWV$  波峰上,随着冰雹发生  $IWV$  迅速减小(图 3a)。“10.04.12”第一次降雹过程  $IWV$  体现出同样演变特征,但是在降雹结束后,  $IWV$  很快又上升(图 3b),这为第二轮降雹提供了条件。从图 3c 可知,“09.02.26”临近降雹时,  $ILW$  从 1.541 mm 急增至 18.002 mm,增长速率达到 27.435 mm $\cdot$ h $^{-1}$ ,冰雹发生时  $ILW$  迅速下降,冰雹发生在  $ILW$  波峰上的最大峰值上。“10.04.12”第一次降雹时(图 3d),  $ILW$  具有相同演变特征。

### 3.2 0℃以下液态水含量演变特征

过冷水的含量是否充分是决定雹胎能否长大成冰雹必备条件之一。从垂直液态水含量的演变上

看,这两次冰雹过程中大气垂直液态水含量廓线均体现出“上下层小、中间层大”的特征。“09.02.26”降雹前(图 4a),0~7 km 液态水含量均超过 0.5 g $\cdot$ m $^{-3}$ ,最大值出现在 7 km 高度上,随着降雹和降水发生大气液态水含量迅速减小(图 4b 和 4c)。“10.04.12”第一轮降雹前(图 4d),大气液态水含量最大值出现在 4 km 高度上,降雹时液态水含量基本没有变化(图 4e);降雹后,0~7 km 液态水含量再次明显增加(图 4f)。

计算并分析 -12~0℃层、-20~0℃层累计液态水总含量和 -20℃层液态水含量的演变特征发现,这两次冰雹与垂直方向上 0℃以下累计大气垂直液态水含量的峰值相对应。“09.02.26”降雹过程

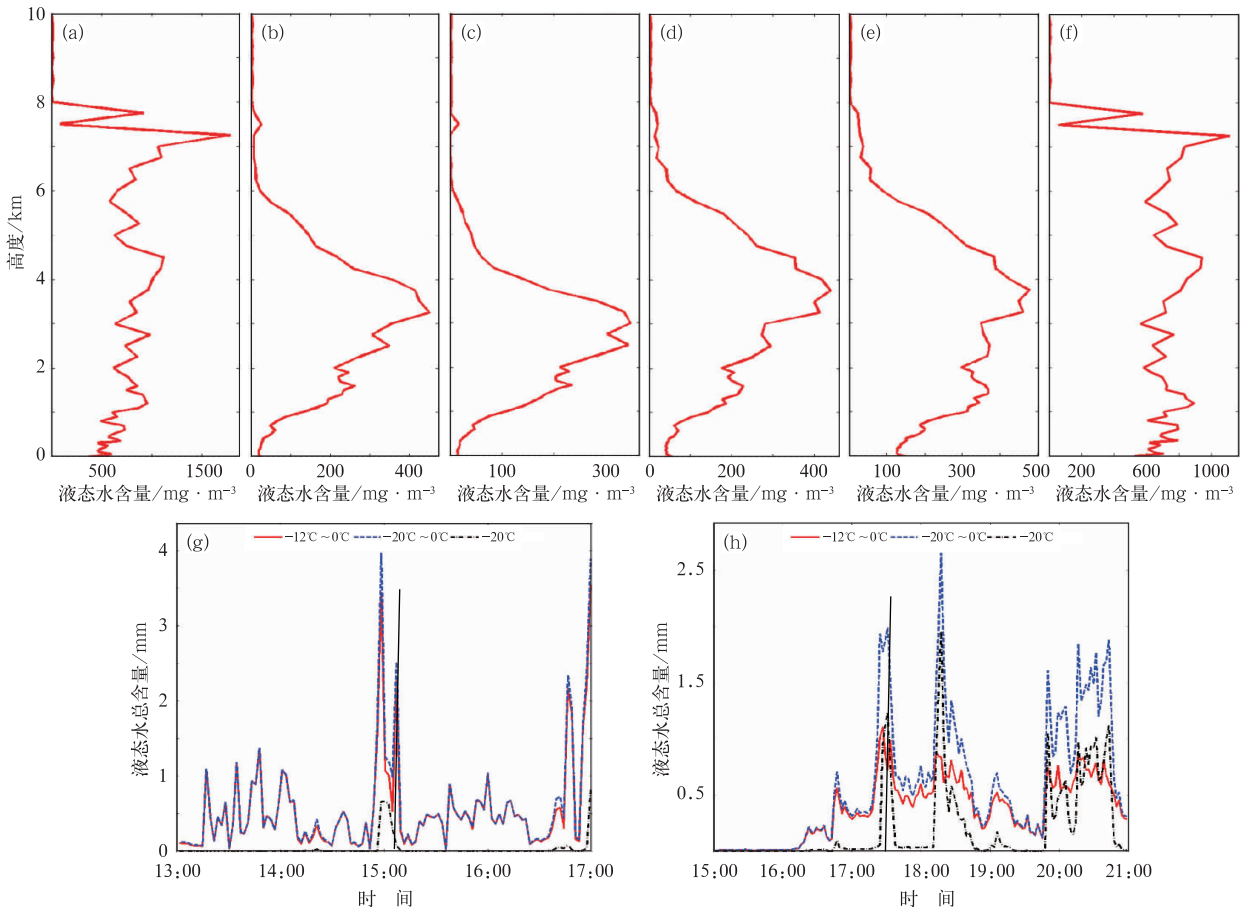


图4 液态水含量垂直廓线(a~f)及0℃以下液态水含量(g,h)的演变  
(图中黑竖线为冰雹开始发生时间)

(a,b,c) 2009年02月26日15时02、09、18分, (d,e,f) 2010年4月12日17时09、20、26分,  
(g) 2009年2月26日13—17时, (h) 2010年4月12日15—21时

Fig. 4 Variations of liquid water profile (LWP) and integrated liquid water (ILW) below 0°C in Xianning  
(a) LWP at 15:02 BT 26 February 2009, (b) LWP at 15:09 BT 26 February 2009, (c) LWP  
at 15:18 BT 26 February 2009, (d) LWP at 17:09 BT 12 April 2010, (e) LWP at 17:20 BT  
12 April 2010, (f) LWP at 17:26 BT 12 April 2010, (g) ILW in 13:00—17:00 BT 26 February 2009,  
and (h) ILW in 15:00—21:00 BT 12 April 2010  
(Black vertical lines are the beginning time of hail)

-12~0℃层、-20~0℃层累计 0℃以下液态水总含量的数值大小基本相当,而且变化趋势也一致(图 4g)。在降雹前约 20 min,0℃以下液态水含量急剧增长,由约 0.1 mm 增长至 4 mm,冰雹发生后迅速减小。“10.04.12”降雹过程-12~0℃层与-20~0℃层的变化趋势也基本一致(图 4h)。

### 3.3 不稳定特征

在 3.1 节和 3.2 节中分析了降雹前后水汽含量的变化及水汽垂直分布特征,这些演变与大气的不稳定程度有关。从温度演变曲线可知,这两次冰雹过程发生前约 1 h(图 5a 和 5b),3 km 以下层均出现了明显增温过程,增温幅度超过 10℃,0、-5 和 -20℃层也有上升。比较温度与 ILW、IWV 的廓线,发现 2~4 km 层温度的增高与 ILW、IWV 的增长基本一致。说明雹云中较强的上升气流将低层的

感热和潜热向上传输导致 2~3 km 层明显增温,引起 0、-5 和 -20℃层的微略上升。同时,低层水汽被上升气流向上传输,导致降雹之前 ILW、IWV 及过冷水含量的快速增长、相对湿度的增大。

K 指数是表示大气稳定度的物理量, $K = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})$ ,K 指数越大,大气层结越不稳定。Chan(2009)、李德俊等(2011)利用微波辐射计资料计算的 K 指数对雷电、大风等强对流天气有很好的指示作用。“09.02.26”降雹过程(图 5c),K 指数在降雹前 1 h 达到 35℃以上,大气处于不稳定状态;在临近降雹时又明显增长,降雹结束后 K 指数迅速下降到 35℃以下,大气层结趋于稳定。“10.04.12”降雹前(图 5d),K 指数均超过了 35℃,说明大气处于不稳定状态,而且在降雹时及降雹之后仍然维持在 35℃以上,为第二轮冰雹的产生提供了有利的不稳定条件。

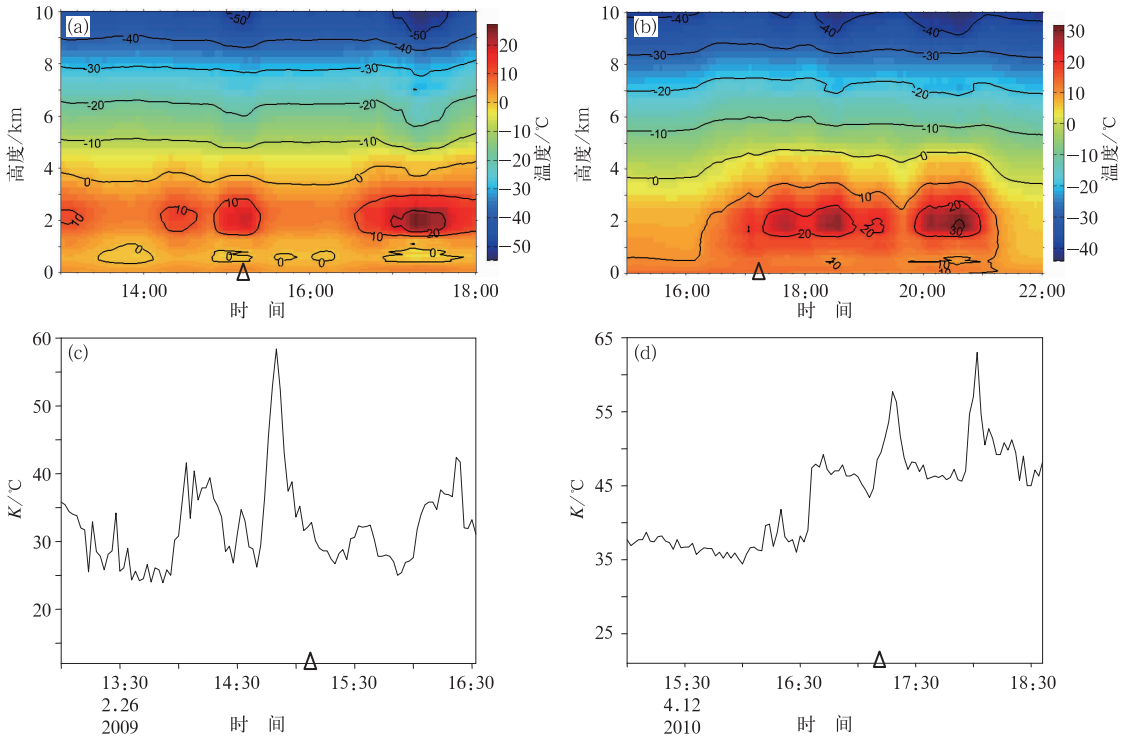


图 5 温度垂直廓线(a,b)及 K 指数(c,d)的演变  
(图中△为冰雹发生时间)

(a) 2009 年 2 月 26 日 13—18 时, (b) 2010 年 4 月 12 日 15—22 时,  
(c) 2009 年 2 月 26 日 13—16 时, (d) 2010 年 4 月 12 日 15—18 时

Fig. 5 Variations of temperature profile (TP), K indices in Xianning

(a) TP in 13:00—18:00 BT 26 February 2009, (b) TP in 15:00—22:00 BT 12 April 2010,

(c) K indices in 13:00—16:00 BT 26 February 2009, (d) K indices in 15:00—18:00 BT 12 April 2010

(△ indicates the beginning time of hails)

## 4 结论和讨论

利用地基微波辐射计观测资料反演出的相对湿度、大气水汽总含量( $ILW$ )、大气液态水汽含量( $IWV$ )、 $0^{\circ}\text{C}$ 以下液态水含量和对流参数,分析了2009年2月26日和2010年4月12日发生在湖北咸宁的两次冰雹过程的特征,主要结论有:

(1) 低层暖湿气流的输送、中层干冷空气的侵入而形成的相对湿度“上干、下湿”2层垂直分布结构有利于冰雹形成,而“上下湿、中间干”3层结构有利于冰雹的发生与维持。

(2) 低层水汽被上升气流向上传输,导致降雹之前 $ILW$ 、 $IWV$ 及过冷水含量的快速增长,冰雹发生在 $IWV$ 和 $ILW$ 的最大波峰中。水汽被带至过冷层后,冰晶增多增大。冰晶融化有一部分形成冰雹或地面降水,导致降雹之后 $ILW$ 、 $IWV$ 及 $0^{\circ}\text{C}$ 以下液态水含量减小。

(3) 这两次冰雹过程均发生在液态水含量约 $0.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的背景下。降雹前约20 min, $0^{\circ}\text{C}$ 以下液态水含量急剧增长,在降雹开始前快速减小,这是因为雹胎在长大过程之中消耗了一部分 $0^{\circ}\text{C}$ 以下液态水。

(4) 这两次冰雹发生都发生在2~3 km层增温过程中, $K$ 指数能反映冰雹过程的大气层结稳定度状态。

今后将针对更多降雹个例,结合雷达、卫星等资料进行综合分析,总结提取更好的强对流天气分析的指标,提高强对流天气预警能力。

## 参考文献

傅云飞,刘栋,王雨,等.2007.热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征.气象学报,65(3):316-328.

雷恒池,魏重,沈志来,等.2011.微波辐射计探测降雨前水汽和云液水.应用气象学报,12(增刊):73-79.

李德俊,唐仁茂,熊守权,等.2011.强冰雹和短时强降水天气雷达特

征及临近预警.气象,37(4):474-480.

廖晓农,俞小鼎,王迎春.2008.北京地区一次罕见的雷暴大风过程特征分析.高原气象,27(6):1350-1360.

刘红燕,李炬,曹晓彦,等.2007.遥感大气结构的地基12通道微波辐射计的测量结果分析.遥感技术与应用,2(22):222-228.

刘建忠,张蕾.2010.微波辐射计反演产品评价.气象科技,38(3):325-330.

刘黎平,吴林林,杨引明.2007.基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析.气象学报,65(2):252-260.

刘志雄,戴泽军,彭菊香,等.2009.基于LAPS的一次局地强冰雹过程分析.暴雨灾害,28(4):313-320.

马建立,苏德斌,金永利,等.2012.X波段双线性偏振雷达电磁波衰减对冰雹识别的影响.高原气象,31(3):825-835.

苏德斌,马建立,张蕾,等.2011.X波段双线偏振雷达冰雹识别初步研究.气象,37(10):1228-1232.

王玉发,吴翠红,金鸿祥.2008.基于准雨团样本概念雷达和雨量计的实时同步结合方法.气象学报,66(2):262-273.

王令,郑国光,康玉霞,等.2006.多普勒天气雷达径向速度图L的雹云特征.应用气象学报,17(3):281-287.

王秀玲,郭丽霞,高硅芹,等.2012.唐山地区冰雹气候特征与雷达回波分析.气象,38(3):344-348.

魏东,孙继松,雷蕾,等.2011.用微波辐射计和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析.气候与环境研究,16(6):697-706.

徐桂荣,孙振添,李武阶,等.2010.地基微波辐射计与GPS无线电探空和GPS/MET的观测对比分析.暴雨灾害,29(4):315-321.

俞小鼎,王迎春,陈明轩,等.2005.新一代天气雷达与强对流天气预警.高原气象,24(3):456-464.

周崑,吴宏议,田海军.2011.基于微波辐射计资料浅析对流降水云内与环境温差.干旱气象,29(1):10-16.

Chan P W. 2009. Performance and application of a multiwavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather. Meteor Zeits,18(3):253-265.

Dominique R, Nash J, Jeannet P, et al. 2006. The COST720 temperature, humidity, and cloud profiling campaign: TUC. Meteor Zeits,1:5-10.

NOAA Eaah Sciences Research Lab. 2009. Continuous upper air profiling for improved local weather prediction. 1-35, 66(2):262-273.

Revercomb H E, Turner D C, Tobin D D, et al. 2003. The ARM program's water vapor intensive observation periods: Overview, initial accomplishments, and future challenges. Bull Airier Meteor Soc,84:217-236.