

周志敏,万蓉,崔春光,等.风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用[J].暴雨灾害,2010,29(3):251-256

## 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用

周志敏<sup>1,2</sup>,万蓉<sup>1</sup>,崔春光<sup>1</sup>,郭学良<sup>2</sup>,王晓芳<sup>1</sup>,贺文煌<sup>3</sup>,赵建宇<sup>4</sup>

(1.中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430074;2.中国科学院大气物理研究所,北京 100029;  
3.湖北省咸宁市气象局,咸宁 437100;4.广州区域气象中心,广州 510080)

**摘要:**使用湖北省咸宁市黑山观测站风廓线雷达资料,对该市 2010 年 4 月 12 日降雹过程的水平风和垂直速度进行了分析。结论如下: 1) 对本次降雹过程而言,风廓线雷达早于天气图获知冷空气入侵时间,并能清楚地分析出冷暖平流的分布形势;风向不连续线先随时间增高,然后稳定在一定高度层;风向不连续线附近风速较小,差值也较小。2) 在这次降雹过程的两个阶段,垂直速度随高度的波动均较大,基本上能反映对流强弱。

**关键词:**冰雹;风廓线资料;水平风;垂直速度

**中图分类号:**P412.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-9045(2010)03-0251-06

### 1 引言

风廓线雷达具有连续观测、提供高时空分辨率数据的特征。Angustine 等<sup>[1]</sup>在 1989 年研究发现,风廓线雷达所获风场可用来分析大气水平运动在垂直方向上的细致结构,并可据其时间变化推测观测站上空中尺度和次天气尺度系统的变化。顾映欣等<sup>[2]</sup>利用 1989 年京津冀中尺度试验区的 UHF 风廓线雷达取得的风廓线资料,对局地暴雨、锋面等天气过程进行了分析,认为风廓线雷达资料能揭示天气尺度系统的存在及影响过程。21 世纪后,随着数据质量显著提高,风廓线雷达在局地暴雨、冰雹等强对流天气预报中的应用越来越受重视,风廓线资料在暴雨研究方面应用也越来越广泛,尤其是在暴雨与低空急流之间关系研究<sup>[3-4]</sup>及暴雨过程中风廓线雷达指示意义研究等方面<sup>[5-8]</sup>取得了较多研究成果。随着风廓线探测技术的迅速发展,风廓线资料对强天气预报的重要作用逐渐被相关气象科研业务人员所认识。杨引明等<sup>[9]</sup>讨论了风廓线探测的垂直速度和温度资料在强对流天气预报中的应用。陈红玉等<sup>[10]</sup>、古红萍等<sup>[11]</sup>、张一平等<sup>[12]</sup>和夏文梅等<sup>[13]</sup>分析了高分辨率风廓线雷达资料在强降水预报中的应用。利用风廓线资料,徐桂荣等<sup>[14]</sup>分析了大气边界层温湿风廓线结构及其日变化特征,赵培娟等<sup>[15]</sup>分析了中尺度系统的演变趋势,王珏等<sup>[16]</sup>分析了低层环境风垂直切变与中气旋存在的关系。

以上研究多集中于风廓线雷达资料在暴雨或强

降水预报方面的应用,而利用风廓线资料对冰雹天气的分析研究较少。本文利用湖北省咸宁市黑山观测站风廓线资料,对 2010 年 4 月 12 日咸宁地区冰雹天气过程中的水平风和垂直速度进行了分析,期望得到一些初步结论。

### 2 资料说明、处理方法及可靠性验证

#### 2.1 资料说明及处理方法

本文采用的风廓线雷达实时采样高度上的风场数据来源于咸宁市黑山观测站(29.51°N、114.22°E)。该数据以隔 4 min 或 5 min 输出 1 次;风速测量误差不大于 1.0 m·s<sup>-1</sup>,风向测量误差不大于;垂直探测分辨率分别为 30 m(低模式和中模式)、60 m 和 120 m(不同的高模式);垂直速度表示垂直气流速度与降水粒子下落速度的总和,此资料未经订正,这是目前风廓线雷达共同存在的问题。

本个例属强对流性天气,降水时段主要集中在 2010 年 4 月 12 日 15:00—20:00(北京时,下同),降雹时间在 17:16—17:20 和 19:44—19:46 两个时段。本文选取的实时风场数据的时段为 4 月 12 日 08:00—20:03。风廓线数据的可靠性用置信度表示(取值范围 0~1,1 为可靠性最高),对置信度较低(小于 0.5)的资料,直接剔除。

在强对流性天气发生过程中,风场的短时变化相对较大。为了反映风场变化的连续性,对水平风进行分析时,采用以 9 min 为周期的数据图。

收稿日期:2010-07-21;定稿日期:2010-08-29

资助项目:中国气象局武汉暴雨研究所开放基金(IHR2008G07)、中国气象局云雾物理重点实验室开放基金(2009005)及中央级科研院所基本业务费中国气象局武汉暴雨研究所 1006 项目

作者简介:周志敏,男,1979 年生,博士,主要从事云降水物理和大气电学研究。E-mail: zmzhou@mail.iap.ac.cn

## 2.2 资料可靠性初步验证

由于本次个例缺乏合适的探空资料,本文利用 2010 年 7 月探空资料与风廓线数据进行对比分析,以检验黑山观测站风廓线雷达资料的可靠性。对比高度范围为 8 000 m 以下。由于气球在空中会发生漂移,对其进行比较时,将风速及风向误差范围分别增加到  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $20^\circ$ ; 选取 7 月 10—13 日 7 个时刻共 1 000 个例进行风向、风速误差对比,其结果见表 1。

表 1 2010 年 7 月 10—13 日不同时间风廓线与探空的风向误差( $E_d$ )及风速误差( $E_v$ )

时间	个例数	$E_d < 20^\circ$ 的个例百分比/%	$E_v < 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的个例百分比/%
10 日 04:38	114	77.19	71.93
10 日 22:14	153	77.12	65.36
12 日 05:12	140	53.57	47.14
12 日 07:26	155	81.29	63.87
12 日 10:08	153	58.17	71.90
12 日 13:07	130	89.23	59.23
14 日 07:33	155	65.16	65.16

从表 1 中可见,在设定的误差范围内,风向误差小于  $20^\circ$  的个例占 71.3%,风速误差小于  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的个例占 63.5%,风廓线数据与探空数据之间吻合较好。这表明总体上咸宁黑山观测站风廓线雷达数据具有一定的可靠性,其观测数据具有分析价值。

## 3 天气实况与天气背景分析

4 月 12 日,咸宁市两度出现雷暴、大风、冰雹等强

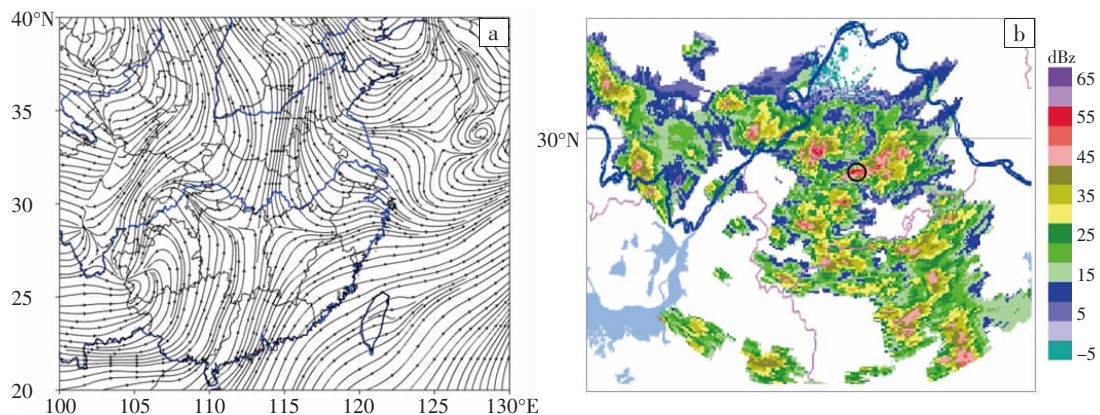


图 1 2010 年 4 月 12 日 14 时 850 hPa 流场图(a)及 17 时 3 km 高度湖北省雷达拼图(b,线圈所示为咸宁市强回波团所在位置)

## 4 风廓线雷达资料分析

黑山观测站 4 月 12 日风廓线雷达资料大体完整,可认为具有分析价值。该站气象记录显示,降水从当日 15:18 开始,20:00 结束;降雹发生在 17:16—17:20 和 19:44—19:46 两个时段,前一时段冰雹最大直径

对流天气。咸宁市气象观测站实况表明,当日 17:18 左右,咸宁市区开始降雹,持续约 2 min,冰雹最大直径 3 cm 左右;同时,该市所辖赤壁的神山和汀泗、嘉鱼的高铁和向阳湖镇、崇阳的路口、通山的南林桥等地遭受冰雹袭击。19:30 之后,咸宁市区、金沙等地再次遭受冰雹袭击。咸宁市民政局统计资料显示,此次冰雹过程造成所辖赤壁市 21 个村、8.3 万人受灾,直接经济损失 1 220 万元;造成咸安区 4.6 万人受灾,农作物受灾 2 461  $\text{hm}^2$ 、成灾 2 150  $\text{hm}^2$ ,绝收 311  $\text{hm}^2$ ,直接经济损失 526 万元;同时给崇阳县造成直接经济损失 230 万元。

从 12 日 08 时对流层中低层天气图上可见(图略),500 hPa,东亚中高纬地区有短波槽东移,引导冷空气南下。850 hPa,暖湿气流输送带位于广西、广东、湖南、湖北、江西到福建的广大区域,咸宁市处于约  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的西南气流中。850 hPa 武汉站温度为  $9^\circ\text{C}$ ,且武汉地区在 850 hPa 附近有逆温层,层结较为稳定。700 hPa 以上温度露点差在  $6^\circ\text{C}$  以上,而 850 hPa 以下温度露点差不足  $2^\circ\text{C}$ ,接近饱和,形成上层干冷、下层暖湿的潜势不稳定层结。到 12 日 14 时,850 hPa 图上(图 1a),江西、湖南北部处于鞍形场切变线中,咸宁处于该切变线边缘。此时地面图上(图略),西北路强冷空气已侵入咸宁市,地面气温急剧下降,冷空气前锋移过该市,受锋面抬升作用,潜势不稳定能量得到释放,造成咸宁市强对流天气。从当日 17:00 时十堰、宜昌、武汉、恩施及随州的雷达回波拼图(下同,简称雷达回波图)上可见(图 1b),咸宁上空存在强回波团,该回波团自西向东移动。

8 mm 左右,后一时段冰雹最大直径 5 mm 左右。对风廓线雷达给出的水平风、垂直速度变化分别讨论如下。

### 4.1 水平风的变化

选取黑山观测站 4 月 12 日 08—20 时风羽图进行分析,将 08—20 时风羽图按时间分段考虑,即:08—11 时(图 2a),11—14 时(图 2b),14—17 时(图 2c),17—

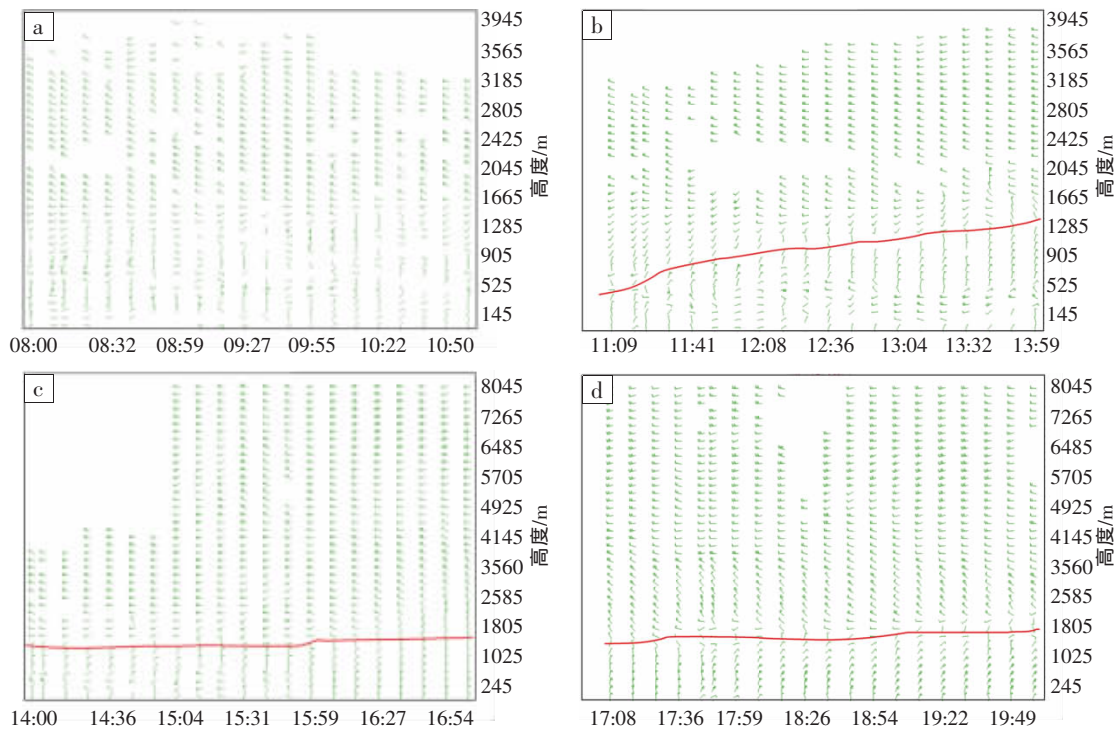


图2 咸宁黑山观测站2010年4月12日08—11时(a)、11—14时(b)、14—17时(c)、17—20时(d)风羽图  
纵轴为高度(单位: m),横轴为时间。a、b高度周期为95 m,c、d高度周期为195 m

20时(图2d)。

从图2a中可见,4月12日08时,1200 m高度以下水平风场比较紊乱;该高度以上,风向顺时针变化,表明该高度层以上存在暖平流。08:41,1200 m高度以上,风向顺转,但到约2000 m高度以上,风向开始逆转,说明此时该高度层以上叠加了冷平流。09:55,1200 m高度层以上,风向先顺转后逆转,说明该时刻风场分布与08:41的类似,都是暖平流上叠加冷平流。10:59,低层风向转北,结合之后时刻的风羽图可知,该时刻已明显有冷空气入侵,这与14时地面天气图所示冷空气入侵比较,提前约3 h。因此,风廓线雷达能更早获知冷空气到达观测站的时间。而11:00地面天气图上,咸宁站资料缺失,与咸宁站相距不到120 km的黄石站和阳新站地面温差仅0.3℃;由于本次冷空气较弱,所以从11:00地面天气图上难以看到冷空气入侵迹象。

从图2b中可见,11—14时,1400 m高度以下出现风向不连续线(图中用红色实线标出),且不连续线所在高度随时间增高。11:09,不连续线位于830 m高度附近;到13:59,位于1422 m高度附近。随着风向不连续线高度增加,偏北风所在高度也随时间延伸到较高位置。11:09—11:59,风向不连续线高度以上,风向基本上先顺转后逆转,这表明有冷平流叠加在暖平流上,不稳定能量开始累积。总的来说,在风向不连续线所在高度逐渐增高过程中,不连续线两侧(即不连

续线的上层和下层)风速相对较小,且差值也较小。

从图2c中可见,14—17时,风向不连续线基本维持在1300~1500 m高度,不连续线附近风速依然较小,差值不大。该高度层以下,风向逐渐从紊乱转为有规则,即从16:04—16:59,风向不连续线高度以下,基本上整层均为北风;而风向不连续线以上高度,从14:08—15:54,风向在垂直方向上先顺转后逆转,即15:54以前垂直方向上基本都是冷平流叠加在暖平流上。这种分布形势有利于不稳定能量积累。从16:04开始,风向在垂直方向上基本都是呈逆转分布,说明此时冷平流在4751 m高度范围已完全控制观测站。从风向不连续线高度稳定开始至降雨发生,即从14:00至15:18,约1小时20分。若该时段风向不连续线变化趋势能成为强对流天气预警的一个指标,将对临近预报具有较大意义。

从图2d中可见,风向不连续线高度有所抬升,但基本稳定在1400~2000 m。在此过程中,发生降水和降雹。风向不连续线附近风速基本在 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右变化,差值也很小。

以上分析表明,对本次降雹过程而言,风廓线雷达早于天气图获知冷空气入侵时间,并能清楚分析出冷暖平流的分布形势。在此过程中,风向不连续线先随时间增高,再稳定在一定高度层。风向不连续线附近风速相对较小,差值也较小。

#### 4.2 垂直速度的变化

降水发生前,风廓线雷达在观测站上空没有探测

到明显上升或下沉气流(图略),大部分垂直速度数据置信度不到 0.5,本文不予考虑。降水发生时,数据置信度明显提高,认为具有分析价值。本次过程属阵性降水,尽管雨量不大(15:00—20:00 总降雨量为 12.5 mm),但其时间分布很不均匀。本节主要分析两次降雹过程中垂直速度的变化。

#### 4.2.1 第一次降雹过程

第一次降雹发生在 17:16—17:20,降雹发生期间,降雨停止。降雹过程中,风廓线雷达获取到如图 3 所示的 4 月 12 日 17:17 垂直速度( $w$ )分布。

从图 3 中可见,此时垂直速度随高度波动明显,从地面到高空,垂直速度最大差值约为  $19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。根据杨引明等<sup>[9]</sup>的推测,这种波动可能反映了热交换的强度,因而它有可能成为判断对流发展强弱的一个重要指标。这说明 17:17 对流发展比较旺盛。事实上,该时刻垂直速度在不同高度的最大差值在本次天气过程中也是最大的。

为了分析降雹前后的对流发展,图 4 给出降雹前后不同时刻的垂直速度廓线图。从中可见,第一次降雹前后,垂直速度随高度波动均较大。在 16:59(图 4a)、17:03(图 4b),垂直速度在 4 000 m 以下高度层还出现负值,出现负值的地方说明上升气流相对降水粒子下落速度较强<sup>[8]</sup>。17:08(图 4c),垂直速度波动区域主要位于 4 000 m 高度以下,说明该区域的动力和热力交换比较剧烈<sup>[9]</sup>。17:13(图 4d),4 000 m 高度以下及其以

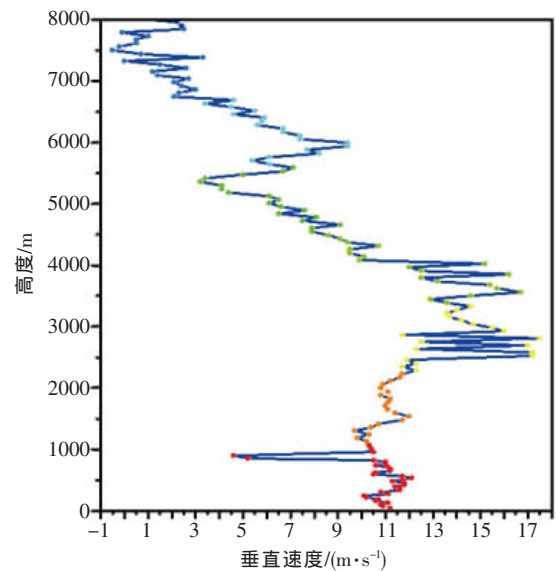


图 3 2010 年 4 月 12 日 17:17 黑山观测站风廓线雷达探测的垂直速度随高度分布

上,垂直速度波动也较大,速度最大与最小值之间差值约  $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从雷达回波(图略)上看,观测站仍处于强回波区,说明对流云中存在适合冰雹生长的环境,同时也说明垂直速度所指示的对流发展程度与雷达回波是吻合的。

从黑山观测站第一次降雹结束后垂直速度的高度变化图上可见(图 4e、f、g、h),其波动依然较强。17:26(图 4f),垂直速度在不同高度上的差值约达到  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,6 000 m 高度以上还出现较强上升气流区,说明此时

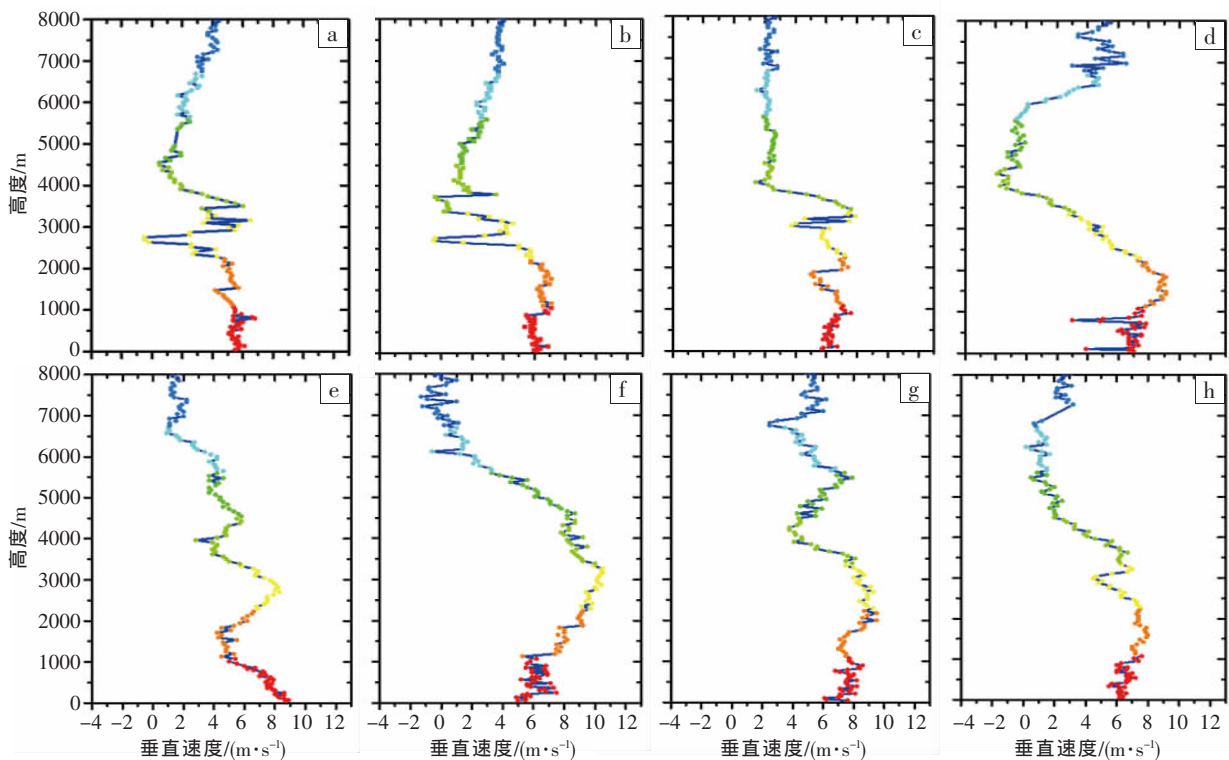


图 4 2010 年 4 月 12 日黑山观测站第一次降雹前后风廓线雷达探测到的垂直速度的高度变化  
降雹前: (a)16:59, (b)17:03, (c)17:08, (d)17:13; 降雹后: (e)17:22, (f)17:26, (g)17:31, (h)17:36

对流云仍处于较强不稳定状态。雷达回波图上显示,降雹结束后,本站上空及上游仍存在较强回波区,为之后降水提供了较好环境。

4.2.2 第二次降雹

黑山观测站第二次降雹发生在 19:44—19:46,强度有所减小,雹粒最大直径为 5 mm。风廓线雷达在 19:45 时产生如图 5 所示的探测数据。

第二次降雹发生时,垂直速度极值不到  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,几乎为第一次降雹发生时垂直速度极值的一半,且垂直速度在整个高度层上的差值最大约为  $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,说明此时对流发展不如第一次降雹时旺盛。

图 6 给出第二次降雹前后不同时刻垂直速度廓线图。从中可见,第二次降雹前后,垂直速度随高度波动依然强烈。19:26 (图 6a),垂直速度最大差值约  $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,比第一次降雹前还大,说明此时本站上空对流发展依然很旺盛。虽然 19:31(图 6b)垂直速度极值差仅  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,但其波动非常明显。19:35(图 6c)和 19:40

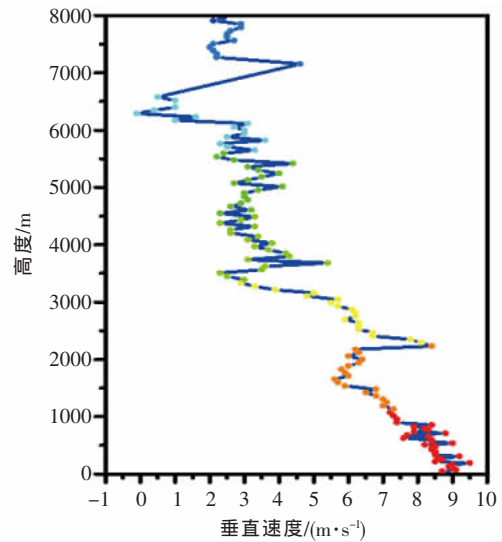


图 5 2010 年 4 月 12 日 19:45(第二次冰雹发生期间)黑山观测站风廓线雷达探测的垂直速度随高度变化(图 6d),垂直速度极值差约  $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,其波动也较剧烈。

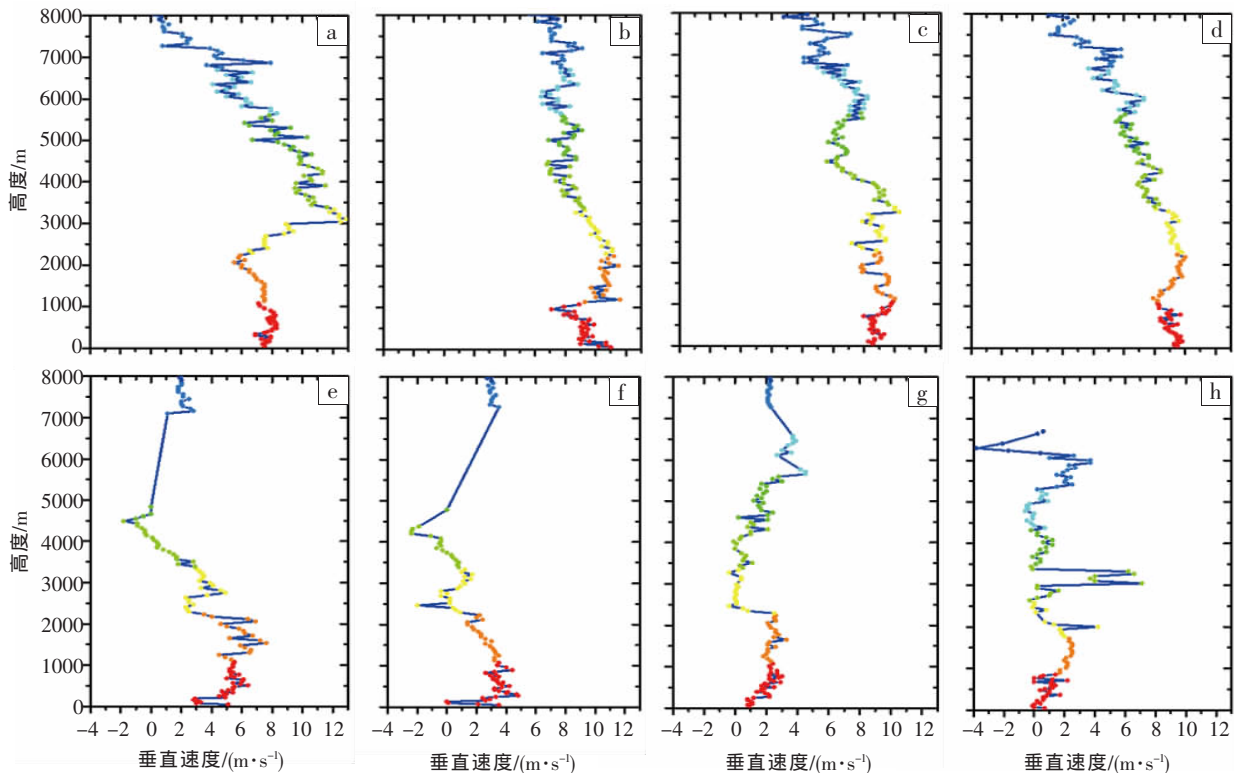


图 6 2010 年 4 月 12 日黑山观测站第二次降雹前后风廓线雷达探测到的垂直速度的高度变化  
降雹前: (a) 19:26, (b) 19:31, (c) 19:35, (d) 19:40; 降雹后: (e) 19:49, (f) 19:54, (g) 19:58, (h) 20:03

第二次降雹发生后,垂直速度波动程度虽不如降雹前强烈,但其强度仍较大,且 19:49—20:03(图 6e、f、g、h)均存在上升气流相对较强区,但该高度区间较窄。从雷达回波图上可见,19:49—20:03 强回波区已向东移过观测站。事实上,在 20:03 之后,垂直速度的明显波动时间维持并不长(图略),由于云中水成物环境的限制,并没有再发生降雹,只产生较小强度的降水。

杨引明等<sup>[9]</sup>认为,风廓线探测到的垂直速度大小随高度波动较大时,说明在大气不同层次之间热力或动力差异较大,预示此对流风暴可能伴随有诸如龙卷或冰雹等强对流天气。事实上,降水发生前的垂直速度廓线显示,垂直速度在不同高度层上的波动较小(图略);对两次降雹过程分析表明,垂直速度在两次过程中随高度波动均较大,基本上能反映对流强弱。

## 5 结论和讨论

本文通过对咸宁市 2010 年 4 月 12 日发生的一次降雹过程的风廓线资料进行分析,得出以下结论:

(1)对本次降雹过程而言,风廓线雷达早于天气图获知冷空气入侵时间,并能清楚地分析出冷暖平流的分布形势;风向不连续线先随时间增高,然后稳定在一定高度层;风向不连续线附近风速较小,差值也较小。

(2)分析两次降雹过程发现,垂直速度在两次过程中随高度波动均较大,基本上能够反映对流强弱。

对本次个例,风廓线雷达相对于地面天气图能更早获知冷空气入侵时间,主要是因为天气图资料时间间隔太长,风廓线雷达获取资料的周期短;另外,地面天气图中资料存在缺失,影响了对系统到达本站准确时间的判断,风廓线雷达数据对此也有弥补作用。然而,获知冷空气入侵时间的提前量只是定性讨论。如果能结合其他探测(如双偏振雷达)技术,从垂直速度中分离出粒子的下落速度得到真正的垂直气流速度,该数据对强对流天气机理研究的意义则更大。

本文在应用垂直速度论述冰雹前后的变化特点时,由于冰雹云不是确定的,会造成降雹前后风廓线所在点并不完全对应同一块对流云,导致分析结果存在误差;如果能同时用雷达探测资料和 GPS 探空资料与之相互印证,就能降低分析结果之误差;由于相关雷达资料正在收集之中,此项工作将留待下一步进行。

参考文献:

[1] Augustine J A, Zipser E J. 风廓线雷达在中尺度试验中的应用[J].

气象科技,1989,2:18-23.

[2] 顾映新,陶祖钰.UHF 多普勒风廓线雷达资料的初步分析和应用[J]. 气象,1991,17(1):29-33.

[3] 刘淑媛,郑永光,陶祖钰.利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J].热带气象学报,2003,19(3):285-290.

[4] 朱敏华,姜有山,周红根.两次暴雨过程的多普勒天气雷达资料对比分析[J].气象科学,2005,25(1):71-78.

[5] 张京英,漆梁波,王庆华.用风廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系[J].气象,2005,31(12):41-45.

[6] 魏东,杨波,孙继松.北京地区深秋季节一次对流性暴雨天气中尺度分析[J].暴雨灾害,2009,28(4):289-294.

[7] 张信华,郑琳,徐跃勤,等.多普勒雷达资料在闽北持续性暴雨预报中的应用[J].气象科技,2007,35:74-78.

[8] 董保举,刘劲松,高月忠.基于风廓线雷达资料的暴雨天气过程分析[J].气象科技,2009, 37(4):411-414.

[9] 杨引明,陶祖钰.上海 LAP\_3000 边界层风廓线雷达在强对流天气预报中的应用初探[J].成都信息工程学院院报,2003,18(2):155-160.

[10] 陈红玉,钟爱华,李建美,等.风廓线雷达资料在强降水预报中的应用[J].云南地理环境研究, 2009,21(5):63-68.

[11] 古红萍,马舒庆,王迎春,等.边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用[J].气象科技, 2008, 36(3):300-305.

[12] 张一平,王国安,牛淑贞,等.新一代天气雷达对一次暴雨的监测[J].气象与环境科学,2008,31(S1):95-98.

[13] 夏文梅,陈楠,程婷,等.降水过程中多普勒天气雷达风廓线产品特征[J].气象,2008, 34(10):20-26.

[14] 徐桂荣,崔春光,徐海富,等.宜昌冬季两次降水过程大气边界层的观测分析[J].暴雨灾害,2008,27(4):334-340.

[15] 赵培娟,张霞,吴蓁,等.7·13 郑州大暴雨成因与可预报性分析[J].气象与环境科学,2009,32(4):1-7.

[16] 王珏,张家国,王佑兵,等.鄂东地区雷雨大风多普勒天气雷达回波特征[J].暴雨灾害,2009,28(2):143-146.

## Application of Wind Profiler Radar Data in a Hailfall Process

ZHOU Zhi-min<sup>1,2</sup>, WAN Rong<sup>1</sup>, CUI Chun-guang<sup>1</sup>, GUO Xue-liang<sup>2</sup>,  
WANG Xiao-fang<sup>1</sup>, HE Wen-huang<sup>3</sup>, ZHAO Jian-yu<sup>4</sup>

(1.Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074; 2.Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 3.Xianning Meteorological Bureau of Hubei Province, Xianning 437100; 4.Guangzhou Regional Meteorological Center, Guangzhou 510071)

**Abstract:** The horizontal wind and vertical velocity of a hailing process near Xianning on 12th April 2010 were analyzed by using the wind profiler radar data at Heishan observation station in Xianning, Hubei province. The results show that the arrival of the cold air for this hailing process was earlier forecasted with wind profiler radar data than with surface map, and the distribution of cold advection and warm advection in this case were clearly analyzed with the wind profilers. The discontinuous line of wind direction rose as time passed and is stable at a certain height. Both the wind velocity near discontinuous line of wind direction and the difference among the wind velocities were relatively smaller. After analyzing the two stages of the hailing process, it is indicated that the fluctuating range of the vertical velocity is of great extent along with height changed, which represents the intensity of convection on the whole.

**Key words:** Hail; Wind profiler radar data; Horizontal wind; Vertical velocity