

王令, 王国荣, 古月, 等. 2014. 风廓线雷达垂直径向速度应用初探. 气象, 40(3): 290-296.

风廓线雷达垂直径向速度应用初探^{* 1}

王 令¹ 王国荣¹ 古 月¹ 李宏宇² 马 莉³ 郭金兰¹ 乔 林¹

1 北京市气象台, 北京 100089

2 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

3 北京市海淀区气象局, 北京 100080

提 要: 利用北京风廓线雷达五波束探测中的垂直波束资料, 进行了垂直速度在预报中的应用研究。通过对垂直速度的分级显示, 配合地面气象记录, 对不同的天气个例进行分析, 结果表明: 平稳晴空的天气风廓线雷达所测量的垂直速度很小, 基本上在 $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内; 而有降水时, 风廓线雷达所测得边界层的垂直速度基本上都是朝向地面的, 不同相态降水粒子的垂直下落速度有明显的差别。分析表明风廓线雷达垂直速度的探测对研究晴空大气的垂直运动、判断降水粒子相态和降水预报有应用价值。

关键词: 风廓线雷达, 垂直速度, 降水相态

中图分类号: P412

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 03. 004

Application of Wind Profiler Radar Vertical Radial Velocity

WANG Ling¹ WANG Guorong¹ GU Yue¹ LI Hongyu² MA Li³ GUO Jinlan¹ QIAO Lin¹

1 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

2 Weather Modification Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Haidian District Meteorological Office, Beijing 100080

Abstract: Applications of vertical velocity in forecast are studied by analyzing the vertical beam data of Beijing wind profiler radar (WPR) data. The different weather cases are analyzed via vertical velocity classification display and surface meteorological records. The results show that the vertical velocity measured by WPR is small in clear sky between $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. But in precipitation days, boundary vertical velocity is mainly toward to the ground with different speeds between precipitations in different phases. The results indicate that vertical velocity probed by WPR has application values in researching vertical velocity in clear sky, judging the precipitation phases and forecasting precipitation.

Key words: wind profiler radar, vertical velocity, precipitation phase

引 言

风廓线雷达又被称为风廓线仪, 是利用大气湍流对电磁波的散射作用进行大气风场等物理量探测的遥感设备。从硬件系统技术体制上它应当属于脉冲多普勒雷达的一种, 其基本功能是测风, 该设备的

命名也由此而来。风廓线雷达的观测资料具有很高的时间和空间分辨率, 时间分辨率可以短到几分钟, 空间高度分辨率一般在几十米到百米左右的量级, 因此, 可以认为风廓线雷达对大气的观测是连续的(张培昌等, 2001; 何平, 2006)。风廓线雷达提供的产品数据有: 水平风向、水平风速、垂直速度、大气折射率结构常数 C_n^2 。

* 公益性行业(气象)科研专项(201306136)和国家自然科学基金项目(41105024)共同资助

2013 年 5 月 2 日收稿; 2013 年 10 月 11 日收修定稿

第一作者: 王令, 主要从事气象雷达应用和短时预报工作. Email: wling54@126.com

目前风廓线雷达资料的预报应用主要集中在水平风方面(郭虎等,2010;段丽等,2011;王令等,2012;杨成芳等,2012),对垂直速度应用较少。而大气的垂直运动速度是大气的一项基本参数,是气象学研究和业务应用中一个非常重要的物理量,很难直接测量(朱乾根等,2000;张玉玲,1999)。风廓线雷达的出现,为直接测量大气的垂直速度提供了一个新途径。本文中垂直速度的导出使用风廓线雷达五波束天线中的垂直波束资料。

1 风廓线雷达对垂直速度的探测

风廓线雷达以晴空大气作为探测对象,利用湍流大气对电磁波的散射(布拉格散射)和分层大气对电磁波的镜式反射(菲涅尔反射)机制进行大气风场等要素的探测(张培昌等,2001)。大部分风廓线雷达采用五波束天线。五个波束指向一般是:一个垂直指向波束,四个倾斜指向波束。利用风廓线雷达垂直指向波束获取的多普勒径向速度,能直接得到探测位置上空垂直速度随高度的分布。该产品弥补了常规探测无法直接获取垂直速度信息的不足。

根据风廓线雷达探测原理,在晴空状态时垂直径向速度反映的是大气的垂直运动速度。当有云或降水时,雨滴或云滴也会产生雷达回波信号。在雷达站上空有云或降水的状况下,风廓线雷达探测的垂直速度反映了云中粒子或降水粒子与大气的垂直运动速度之和(阮征等,2008;何平等,2009;杨馨蕊等,2010)。

本文使用北京延庆和海淀的风廓线雷达资料。延庆风廓线雷达是中国航天科工集团二院23所研制的对流层风廓线仪II型(CFL-08),空间垂直分辨率为120 m/240 m,探测高度150~8000 m左右,每6 min获得一组廓线资料;海淀风廓线雷达为CFL-03B型L波段边界层探测雷达,探测高度120~3500 m左右,每6 min获得一组廓线资料,空间垂直分辨率为60 m/120 m。

1.1 垂直速度图像设计及约定

风廓线探测的垂直速度为相对于雷达垂直方向波束的多普勒径向速度,正的径向速度代表朝向风廓线雷达的运动,负的径向速度代表离开风廓线雷达的运动。为了表述问题的方便,并符合预报使用习惯,在北京市气象台短时预报使用的风廓线产品

设计中,用垂直速度代替垂直方向波束的多普勒径向速度,负的垂直速度为上升运动,用暖色调表示,正的垂直速度为下沉运动,用冷色调表示,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对垂直速度时间-高度剖面图图形显示作以下约定:图形横坐标为时间,自右往左时间递增,纵坐标为高度,单位m,高度值为风廓线探测资料高度与雷达天线的海拔高度之和。产品设计时,考虑了晴空大气垂直运动速度和降水粒子的下落速度特征量,并根据降水粒子下落末速度的不同,采取了不等间距的色标来凸显降水的特点,使晴空或降水的垂直速度图更易于区别。图1是本文中风廓线雷达垂直速度图使用的色标,图中标出了上升运动、下沉运动和不同降水粒子的下落速度的可能特征值。

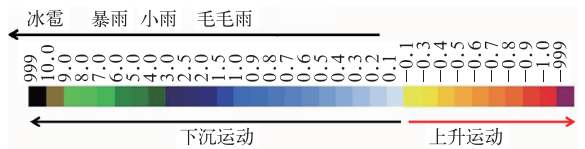


图1 风廓线雷达垂直速度色标

Fig. 1 Vertical velocity color code of wind profiler radar

1.2 垂直速度的一般图像特征

一般来说大气的垂直运动由四种原因造成:对流、系统性垂直运动、大气波动、大气乱流。由不同尺度的天气系统造成垂直运动,在风廓线雷达6 min时间间隔,近于连续观测的资料中都可以表现出来,因此应用垂直速度时间-高度剖面图,可以分辨出多种尺度的大气垂直速度。

由于降水粒子对电磁波的散射远远大于晴空大气对电磁波的散射,降水时风廓线雷达探测的垂直速度受降水粒子的下落速度影响。有研究表明,风廓线雷达探测的垂直速度可以反映降雨的开始、结束以及降雨的强度。在降水的情况下,风廓线雷达探测到小于 $-4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (向下为负)的垂直速度时,反映了降雨的开始,且由于降水强度与降水粒子的大小、下落末速度有关,因此可以认为向下的垂直速度越大降水越强(章国材等,2007)。图2a是2012年7月21日12:18—15:54降雨阶段延庆对流层II型风廓线雷达垂直速度时间-高度图,由于垂直速度的贡献主要来自于降水粒子,在4600 m及以下测到了 $-8 \sim -6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的垂直速度;晴空时,风廓线雷达测定大气的垂直运动速度,在稳定的天气系统

控制下,一般有较长时间尺度的弱的上升或下沉运动,符合天气尺度大气运动方程计算的垂直运动速度量级。如图 2b 是 2013 年 1 月 4 日 13:00 至 5 日 08:00 延庆晴朗天气的风廓线雷达垂直速度时间-高

度图,大气的垂直速度很小,介于 $-1 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,但是在较长时间序列的上升速度区中还有一些小尺度的下沉速度,反映了大气的多尺度垂直运动和次级环流对上升运动的抑制作用(何平等,2010)。

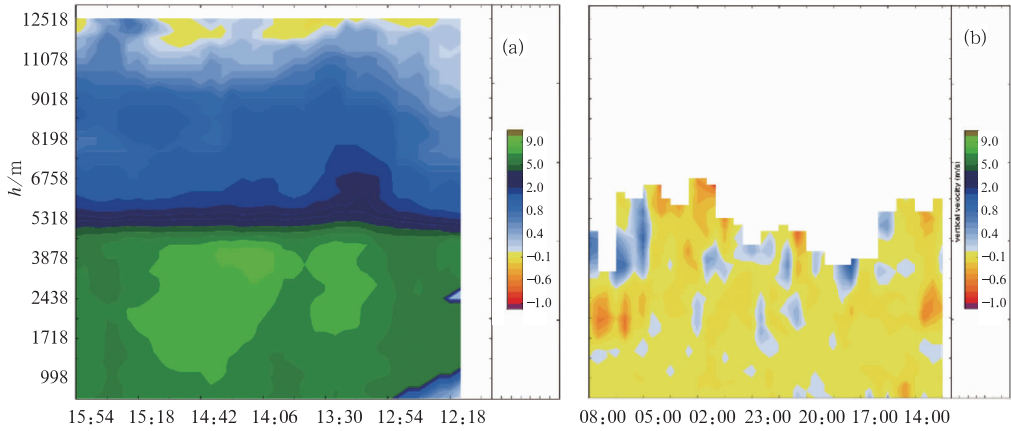


图 2 垂直速度时间-高度图

- (a)降水时的垂直速度时间-高度图(2012年7月21日12:18—15:54资料,时间间隔6min),
 (b)晴空时的垂直速度时间-高度图(2013年1月4日13:00至5日08:00资料,时间间隔30min)
 (X轴为时间;Y轴为高度,单位:m,色斑表示垂直速度)

Fig. 2 Time-height figure for vertical velocity

- (a)The figure for precipitation case (12:18—15:54 BT 21 July 2012, 6 minutes interval),
 (b)the figure for clear sky case (13:00 BT 4 to 08:00 BT 5 January 2013, 30 minutes interval)
 (The X axis is time series,the Y axis is height, unit: m. Mottling represents vertical velocity)

2 风廓线雷达垂直速度判别雨雪相态的应用

2.1 静止大气中降水粒子的下落末速度

由云降水物理可知,微滴的下落速度受重力、浮力和空气阻力的作用决定。降水粒子在受重力的作用下降时,重力和阻力很快达到平衡,使粒子按匀速下降,此时的下降速度称为“下落末速度”。对于密度为 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的圆球形水滴,通过 Stokes(斯托克斯)定律得出水滴下落速度与尺度的关系(杨军等,2011)。如图 3a 所示。

对冰相粒子而言,其下落末速度不仅与形状有关,而且与冰晶的密度、表面状态等有关(杨军等,2011)。由于冰晶的各种复杂结构和形状,影响它的流体动力学特性,因此讨论冰晶的下降比水滴更困难,如图 3b 所示。比较图 3a、3b,通常降水粒子的下落末速度比降雪粒子的下落末速度大。因此使用风廓线雷达探测的近地面垂直速度可以用于粗略估

计降水粒子下落末速度,进一步判断降水相态。

2.2 降雨时的垂直速度

在降雨情况下,风廓线雷达探测到的垂直速度代表了空气的垂直运动和降水粒子的下沉运动的总和。有分析发现,风廓线雷达探测到的垂直速度与降水强度的对应关系是由于降水时降水粒子的下落速度所造成的,它反映了降水粒子的密度(章国材等,2007)。层状云降水多为锋面云系,低层大气受低压、冷涡、切变线等系统影响而发生辐合抬升,进而产生大范围的层状云降水;对流云降水多由不稳定层结下的对流运动产生,因此两种降水的动力结构不同,造成雨滴的下落速度、数浓度存在一定的差异(牛生杰,2012)。

选取 2012 年 7 月 21 日和 2012 年 9 月 1 日北京(分简称为 721 和 901)两次暴雨过程的风廓线雷达垂直速度资料,与同址地面自动站降雨量资料进行了对比分析,得出在有量降水发生前,低空先于降水出现正的垂直速度(朝向地面为正速度)。如图 4 所示,分别计算海拔高度 2、3 和 4 km 的垂直速度

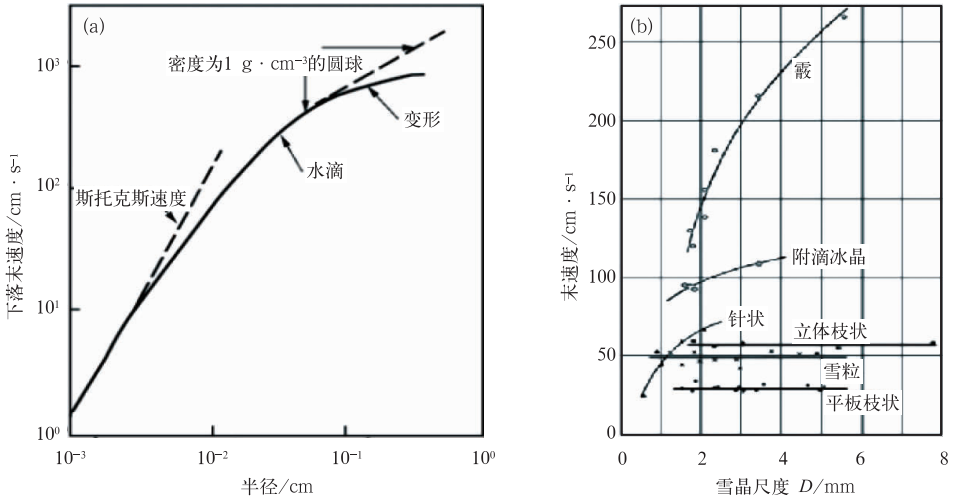


图 3 (a)水滴下落末速度与尺度的关系,(b) 雪晶末速度与尺度的关系(Nakaya et al, 1935)

Fig. 3 (a) The relation between water drop final speed and scale, (b) the relation between snow crystal final speed and scale

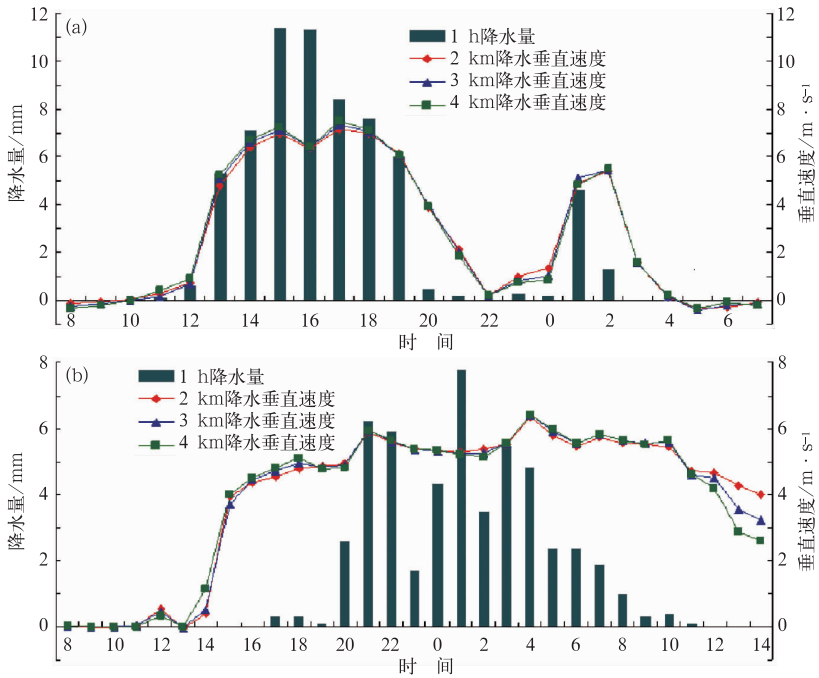


图 4 延庆小时雨量(单位:mm)与 2,3 和 4 km 高度风廓线的平均垂直速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)比较

(a)2012 年 7 月 21 日 08 时至 22 日 06 时;(b)2012 年 9 月 1 日 08 时至 2 日 14 时

Fig. 4 Contrasts between hourly rainfall (unit: mm) and 2 km, 3 km and 4 km height mean vertical speed (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) probed by wind profiler radar in Yanqing

(a)from 08:00 BT 21 to 06:00 BT 22 July 2012, (b) from 08:00 BT 1 to 14:00 BT 2 September 2012

平均值,在降水时段,3 条曲线的差距不大。垂直速度增大有降水增大的趋势,但是在降水峰值阶段垂直速度并没有出现最大值,两次过程中均出现这一现象,因此分析得到降雨量不是简单的仅与垂直速度相关。

从图 5 中可见,降水的出现与下沉速度相对应,有量降水前有弱的下沉速度;大于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的下沉速度出现在 5000 m 附近,表明这两次暴雨过程都在较为深厚的天气系统中发生。在 5000 m 附近有一个明显的垂直速度大梯度区,对比探空可知,该区

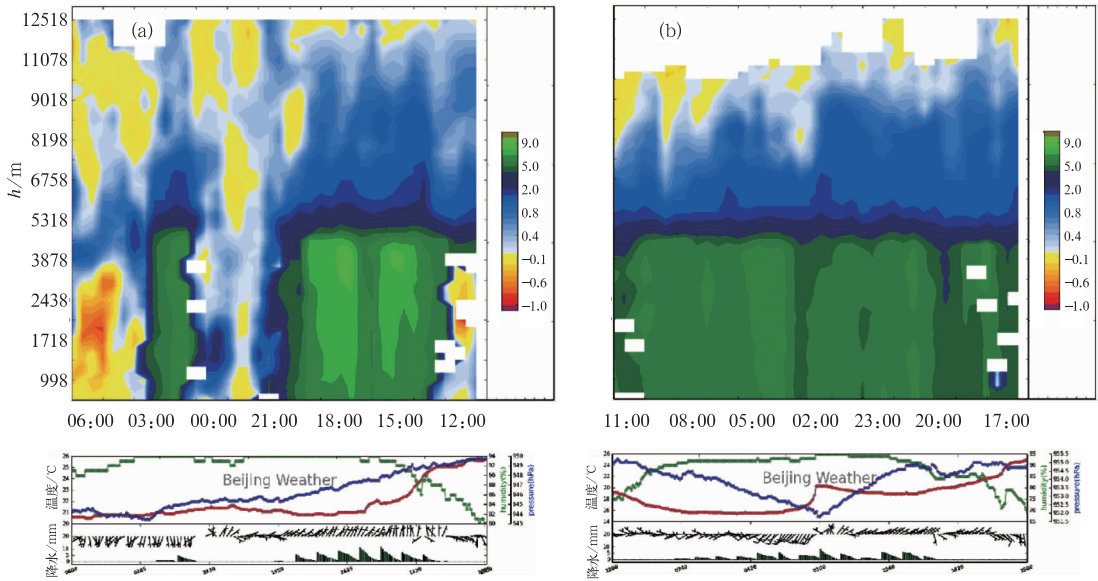


图5 延庆自动站温度(红色)、气压(蓝色)、相对湿度(绿色)、10 m风(风羽)、5 min间隔的1 h累积雨量(单位:mm)资料与风廓线30 min间隔的垂直速度比较,(a)2012年7月21日10:30至22日06时,(b)2012年9月1日15:30至2日11时
Fig. 5 Contrasts between temperature (red), pressure (blue), relative humidity (green), 10 m wind speed (wind bars), 1 h accumulated rainfall (unit; mm) data with 5 min interval and vertical speed with 30 min interval probed by wind profiler radar in Yanqing
(a) from 10:30 BT 21 to 06:00 BT 22 July 2012, (b) from 15:30 BT 1 to 11:00 BT 2 September 2012

域是 0°C 层的高度(721 18:00北京探空 08时 0°C 层的高度为4926 m,901北京探空 08时 0°C 层的高度为5009 m)。比较图5中的两次暴雨过程实况,721是夏季强对流天气过程,901是秋季稳定性降水过程。721的垂直速度在5000 m以下随高度有较大的变化,强降水阶段,先在4000 m左右达到最大值,向下逐渐又转小,可能与雨滴的变化有关:如雨滴变形、破碎等,影响了雨滴的下落速度,到近地面时雨滴下落末速度在 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右;而901的垂直速度在垂直方向的变化较721平稳很多,没有明显的大值区,可能与秋季降水较为平稳有关。

2.3 降雪时的垂直速度

对于降雪的下落末速度,由图3b可见其问题的复杂性。在近两年来的风廓线雷达对降雪的探测中可以发现,冬季单纯降雪时的垂直速度介于 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。图5是今年冬季4次单纯降雪过程,用延庆风廓线雷达探测的垂直速度与同址称重雨量站的有量降雪比较,在降雪量较大的过程中,如图6中6b、6c和6d的3次过程,可以看出从高空5000 m以上开始出现垂直向下的速度。在较弱的降雪

过程中,如图6a中,从高空2000 m以下出现垂直向下的速度。说明即使雪花从高空落下,降落速度变化也不大。

2.4 判断地面降水粒子的相态

冬季降水相态的预报是一个难题,特别是在深秋和春季,由于空中温度低于 0°C ,而地面温度高于 0°C ,降水粒子的相态在近地面会发生变化,落到地面时什么相态,直接影响交通运输等公众关注的焦点问题(廖晓农等,2013)。从上述单一雨或雪的分析可知,降雨时垂直速度较降雪时大很多。在同一次降水过程中,雨雪转换时将会发生什么变化,用风廓线雷达的观测事实可以验证。

2013年3月19—20日北京出现了一次全市性的雨雪天气过程。北京北部山区以降雪为主,以延庆为例,降雪时风廓线的垂直速度,在 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,与图6中的6b、6c和6d的过程相似,不再讨论。北京城区主要降水从17时左右开始,由于地面气温在 4°C 上下,为雨。入夜后地面气温下降,逐渐转为雪。在雨转雪的过程中有一段时间为雨夹雪。以海淀降水人工观测为例:16:55—21:00为雨;

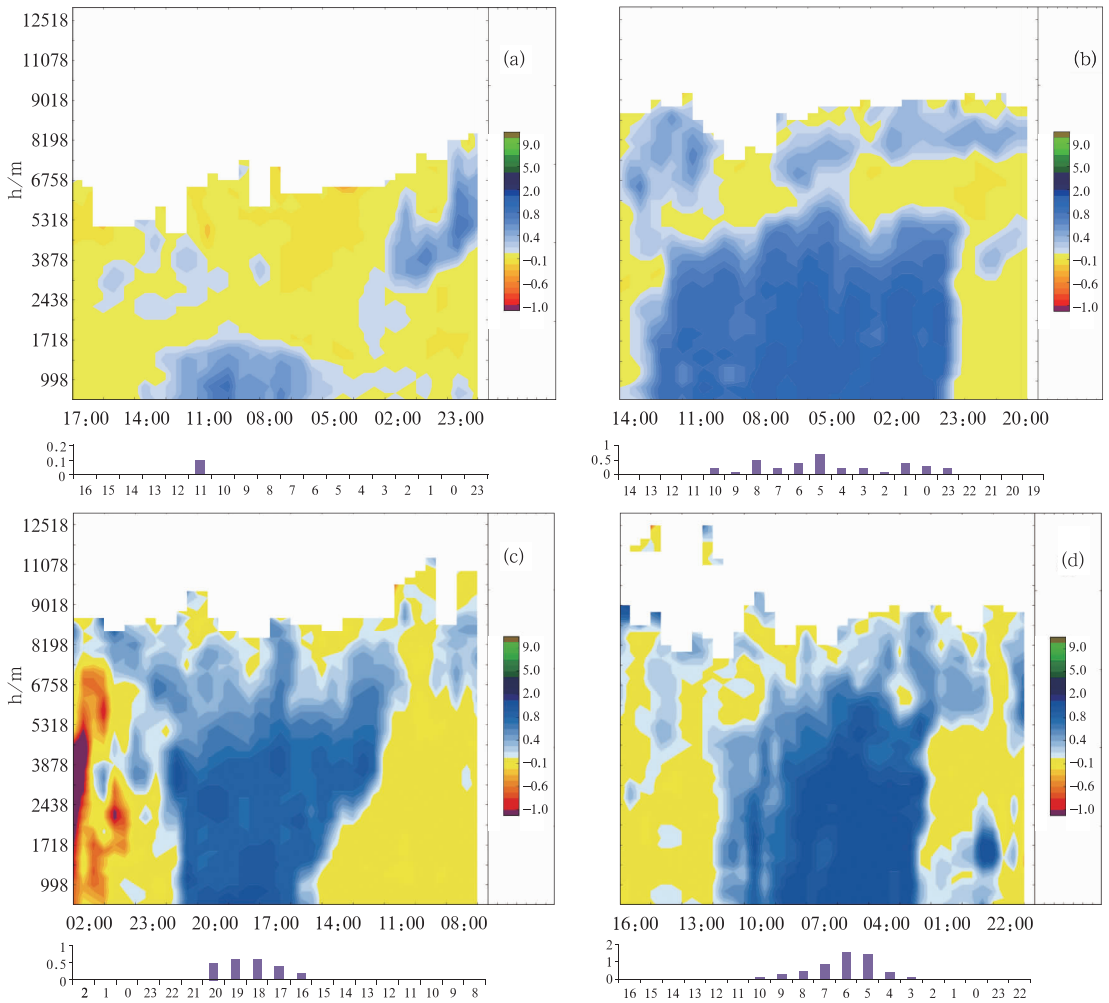


图 6 延庆 30 min 间隔风廓线雷达垂直速度图与同址称重雨量计小时降雪量比较，速度图下方的紫色柱状高度代表 1 h 降水量(单位:mm)

(a) 2012 年 12 月 11 日 21 时到 12 日 17 时风廓线垂直速度图与 12 月 10—11 时降水量;(b) 2012 年 12 月 13 日 18:30 到 14 日 14 时风廓线垂直速度图与 13 日 22 时至 14 日 10 时降水量;(c) 2012 年 12 月 28 日 06:30 到 29 日 02 时风廓线垂直速度图与 28 日 15—20 时降水量;(d) 2013 年 1 月 19 日 20:30 到 20 日 16 时风廓线垂直速度图与 20 日 02—10 时降水量

Fig. 6 Contrasts between hourly snowfall (unit: mm) observed by weighing rain gauge and vertical speed with 30 min interval probed by wind profiler radar in Yanqing. The height of purple columnar represents 1 h rainfall (a) The vertical velocity probed by wind profiler radar from 21:00 BT 11 to 17:00 BT 12 December 2012 and the rainfall from 10:00 to 11:00 12 December 2012; (b) the vertical velocity probed by wind profiler radar from 18:30 BT 13 to 14:00 BT 14 December 2012 and the rainfall from 22:00 BT 13 to 10:00 BT 14 December 2012; (c) the vertical velocity probed by wind profiler radar from 06:30 BT 28 to 02:00 BT 29 December 2012 and the rainfall from 15:00 to 20:00 BT 28 December 2012; (d) the vertical velocity probed by wind profiler radar from 20:30 BT 19 to 16:00 BT 20 January 2013 and the rainfall from 02:00 to 10:00 BT 20 January 2013

21:00—22:15 雨夹雪;22:15 以后为雪。

通过 2013 年 3 月 19 日 10:30 至 20 日 06:00 海淀边界层风廓线 30 min 垂直速度图结合人工观测降水相态变化,可以看出雨雪的下落速度明显不

同(图 7)。风廓线探测到,在降水时段近地面的垂直速度为 $3.6 \sim 2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;雨夹雪时的垂直速度在 $1.6 \sim 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间;降雪时的垂直速度在 $1.0 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。从海淀自动站监测地面气温变

化可见:降水阶段为 $4\sim 2^{\circ}\text{C}$,雨夹雪阶段为 $1\sim 0^{\circ}\text{C}$,降雪阶段都在 0°C 以下。

从图7中的垂直速度随高度的变化还可以看到,降水时700 m以下垂直速度加大,在1000 m以上垂直速度都在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,说明近地面的温度影响了这次降水相态的变化。雨雪天气转换时与夏季降水时的垂直速度随高度的变化比较,有明显不同。但是,垂直速度的突变都与融化层相关。

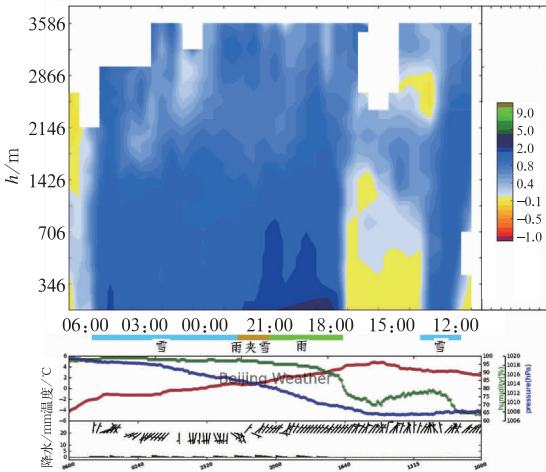


图7 2013年3月19日10:30至20日06:00海淀边界层风廓线雷达垂直速度图(间隔30 min)和同时时间海淀地面自动站5 min温度(红色)、气压(蓝色)、相对湿度(绿色)、10 m风矢量(风羽)和5 min降水1 h累积雨量(单位:mm)记录,垂直速度图下的横条表示雨、雨夹雪、雪的转换时段

Fig 7 The temperature (red), pressure (blue), relative humidity (green), 10 m wind speed (wind barbs) and 1 h accumulated rainfall (unit: mm) data with 5 min interval of Haidian automatic station and boundary vertical speed with 30 min interval probed by wind profiler radar in Haidian from 10:30 BT 21 July 2012 to 06:00 BT 22 July 2012

(The bars under vertical velocity figure represent the transfer between rain, sleet and snow)

3 结论

(1) 通过风廓线雷达可以直接探测大气的垂直速度,对大气中这一重要的物理量的直接探测是一个重要的突破,它可以使过去根据大气运动方程组计算得到的物理量得到观测证实。

(2) 降雨时风廓线雷达探测的垂直速度,与雨滴的下落末速度有关,与降水强度有关,但不是线性关系。

(3) 夏季降雨与冬季降雪时的垂直速度相比有较大的区别,在垂直速度的大小上有明显不同。有量降雨时的垂直速度在 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,降雪时的垂直速度都小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (这里不包括毛毛雨的情况)。

(4) 在雨雪相态转换时,近地面的垂直速度会出现明显的变化,随着雨—雨夹雪—雪的相态转化,近地面层的垂直速度逐渐变小。

大气中还有许多跟垂直运动速度有关的天气还没有进行探讨,如冷空气的下沉运动、暖湿空气的抬升运动、云粒子的下落速度等,希望以后继续深入开展对风廓线雷达探测的垂直速度应用研究。

参考文献

- 段丽,张琳娜,王国荣,等. 2011. 2009年深秋北京大雪过程的成因分析. 气象, 37(11):1343-1351.
- 郭虎,王令,时少英,等. 2010. 国庆60周年演练中一次降水过程的短时预报服务. 气象, 36(10):21-28.
- 何平. 2006. 相控阵风廓线雷达. 北京:气象出版社,3:10.
- 何平,朱小燕,阮征,等. 2009. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究. 应用气象学报, 20(4):465-470.
- 何平,马颖,阮征,等. 2010. 晴空热对流泡的风廓线雷达探测研究. 气象学报, 68(20):264-269.
- 廖晓农,张琳娜,何娜,等. 2013. 2012年3月17日北京降水相态转变的机制讨论. 气象, 39(1):28-38.
- 牛生杰. 2012. 云降水物理研究. 北京:气象出版社,38-40.
- 阮征,葛润生,吴志根. 2008. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究. 应用气象学报, 19(3):265-275.
- 王令,王国荣,孙秀忠,等. 2012. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水. 气象, 38(3):281-290.
- 杨成芳,阎丽凤,周雪松. 2012. 利用加密探测资料分析冷式切变线类大暴雨的动力结构. 气象, 38(7):819-827.
- 杨军,陈宝军,银燕,等. 2011. 云降水物理学. 北京:气象出版社, 100-110.
- 杨馨蕊,马舒庆,吴蕾. 2010. UHF风廓线雷达降水数据判别方法的比较与评价. 大气科学学报, 33(5):576-581.
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 2001. 雷达气象学. 北京:气象出版社,30-32.
- 张玉玲. 1999. 中尺度大气动力学引论. 北京:气象出版社,10-20.
- 章国材,矫海燕,李延香,等. 2007. 现代天气预报技术和方法. 北京:气象出版社,89-99.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2000. 天气学原理和方法. 北京:气象出版社,619-620.