

董丽萍, 吴蕾, 王令, 等. 2014. 风廓线雷达组网资料初步对比分析. 气象, 40(9):1145-1151.

风廓线雷达组网资料初步对比分析^{*}

董丽萍¹ 吴蕾^{1,2} 王令³ 赵城城¹ 柳云雷¹

1 成都信息工程学院电子工程学院, 成都 610225

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

3 北京市气象台, 北京 100089

提 要: 以 L 波段探空雷达探测到的水平风为标准对全国风廓线雷达探测到的水平风的可信度进行评估, 得到: 风廓线雷达探测到的水平风在 700 hPa 高度以下与 L 波段探空雷达测风有较好的一致性; 并且将风廓线雷达探测到的垂直速度与同址地面自动气象站观测到的 1 h 雨量进行相关性分析, 得出垂直速度大小能很清楚地反映降水的开始、结束以及降水的强度; 最后将全国风廓线雷达探测到的水平风进行组网对比分析, 得出全国风廓线雷达探测得到的水平风在 700 hPa 高度下是可信的, 风向可信度随探测高度的增加而增大, 风速可信度随探测高度的增加而降低。

关键词: 风廓线雷达网, 水平风场, 垂直速度

中图分类号: P468

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.012

Preliminary Comparison Research of the Wind Profile Radar Network Data

DONG Liping¹ WU Lei^{1,2} WANG Ling³ ZHAO Chengcheng¹ LIU Yunlei¹

1 College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

3 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

Abstract: This paper firstly uses the horizontal wind data detected by radiosonde as a standard to assess the credibility of the horizontal wind observed by wind profiler (WPR), finding that the horizontal wind observed by the national wind profiler under 700 hPa height has a good consistency with that of radiosonde. Secondly, the correlation analysis on the vertical speed got by the wind profile and the one hour rainfall observed by the same address ground automatic meteorological station (AMS) reveals that the vertical velocity magnitude can clearly reflect the onset, end and precipitation intensity of a rainfall event. Finally, comparative analysis on horizontal wind data from the national wind profiler network is carried out, and the results show that horizontal wind observed by wind profiler at 700 hPa height is credible, the credibility of the wind direction increases with the increase of probe height, and the wind speed credibility decreases with the increase of probe height.

Key words: wind profile radar network, horizontal wind fields, vertical velocity

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306136)资助

2013 年 9 月 18 日收稿; 2014 年 6 月 13 日收修定稿

第一作者: 董丽萍, 研究方向: 大气探测技术及应用. Email: liping_0927@163.com

通信作者: 吴蕾, 研究方向: 大气探测技术. Email: wlaoc@cma.gov.cn

引言

风廓线雷达主要以晴空大气作为探测对象,利用大气湍流对电磁波的散射作用进行大气风场等要素的探测。风廓线雷达能够提供以风场为主的多种数据产品,其基本数据产品有水平风廓线、垂直风廓线以及反映大气湍流状况的折射率结构常数 Cn^2 廓线等(何平,2006)。风廓线雷达的探测方式为连续的无人值守的遥感方式,其观测资料不但种类多,而且具有很高的时间和空间分辨率。时间分辨率一般为 5~6 min,空间高度分辨率一般为几十米到 100 m 左右,这是其他探测手段很难达到的高时空分辨率。这种探测优势和资料特点为其进入数值预报模式带来极大方便,并对天气发生发展机理的认识、精细化天气预报质量的提高产生明显效果(郭虎等,2010;郑媛媛等,2011;苏德斌等,2012;吴志根,2012;王令等,2012;王海霞等,2013)。目前天气预报使用的高空观测数据主要来自间距 100~200 km、每天两次的常规探空,风廓线雷达资料是除探空资料之外高空风资料最直接的来源,可以弥补高空探测网时空密度上的不足,提供时间和高度分辨率都非常高的水平风垂直廓线和垂直速度廓线,是加强对灾害性天气监测能力的重要手段,是提高数值天气预报模式质量的重要手段。

近年来,气象装备组网研究受到广泛关注,未来地基大气遥感也将向综合集成方向发展。目前,我国已建成 42 部(截至 2013 年 12 月)固定式风廓线雷达,未来将规划建设上百部风廓线雷达,组成风廓线雷达网。本文主要对全国风廓线雷达探测到的水平风场信息和垂直速度大小的可信度进行分析,根据预报员使用习惯,在不同时刻分别取 925、850、700 和 500 hPa 高度附近的资料进行组网分析,并用 08 和 20 时(北京时,下同)高空风与之对比,测试风廓线雷达组网观测资料的可靠性及其实用意义。

1 资料来源

使用 2012—2013 年全国业务上传的风廓线雷达资料和同时段常规探空组网资料进行对比。

对单站风廓线雷达水平风进行可信度分析时,选取了有探空站与风廓线雷达同址的新疆乌鲁木齐和江苏南京的资料分季节进行分析。乌鲁木齐取

2012 年 12 月至 2013 年 11 月一年的风廓线雷达 1 h 平均数据和与其同址的 L 波段探空雷达在 850、700 和 500 hPa 高度的探测资料(乌鲁木齐风廓线站点海拔高度为 935 m,无 925 hPa 观测资料),江苏南京取同时段的风廓线雷达 1 h 平均数据和与其同址的 L 波段探空雷达在 925、850、700 和 500 hPa 高度的探测资料。

由于没有乌鲁木齐和南京的降水资料,所以本文在作垂直速度可信度分析时,站址选取北京、上海和广东等风廓线雷达比较密集的地方,采用 2013 年的 10 次降水过程中垂直速度 1 h 平均数据和同址地面自动气象站观测的小时雨量进行对比。

在风廓线雷达组网对比分析中,将风廓线雷达产品数据转换成 MICAPS 探空数据格式,使其能通过 MICAPS 与 L 波段探空资料同时显示。为了增加风廓线雷达与 L 波段探空雷达资料的可比性,在对全国风廓线雷达组网观测资料进行对比分析时,选取 2013 年 3 和 4 月局地天气较少的这两个月的风廓线雷达水平风 1 h 平均和这两个月 L 波段探空雷达在 925~500 hPa 高度之间 08 和 20 时的观测资料做分析。

2 对比分析

考虑到风廓线雷达探测高度限制和预报使用习惯,本文在风廓线雷达组网对比分析时,选取风廓线雷达在 925 hPa(取高度为 700~900 m)、850 hPa(取高度为 1400~1600 m)、700 hPa(取高度为 2900~3100 m)和 500 hPa(取高度为 5400~5600 m)的水平风信息和垂直速度信息,时间密度为 1 h,并将数据转化成 MICAPS 探空数据格式,可以很方便地用 MICAPS 软件将两种探测资料同时打开。

2.1 单站分析

2.1.1 水平风场可信度

风廓线雷达探测是加强对灾害性天气监测能力和提高短时数值预报模式质量的重要手段,为了满足数值预报和业务天气预报业务对风廓线雷达网的需求,充分了解和析风廓线雷达探测资料的可信度是非常重要的,国外在很早就开展过相关的研究。Strauch 等(1987)利用冬天风廓线雷达观测的资料分析了晴空大气条件下风廓线雷达探测的准确性。Wuertz 等(1988)使用风廓线雷达在夏季观测的资

料分析了风廓线雷达在降水条件下探测的准确性。Weber等(1990)利用1984年1月至1985年10月近两年的风廓线雷达观测资料与常规探空进行对比分析,得出水平风 u 、 v 分量标准偏差为 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。近几年,国内也有很多人对风廓线雷达和L波段探空雷达测得的数据进行了对比。孙旭映等(2008)利用风廓线雷达和气球同步探测风场资料对比,分析了风廓线雷达探测风场资料的可靠性,提出对于稳定天气,由于风廓线雷达的探测盲区和地物杂波的影响,自地面至高空200 m范围内,风廓线雷达探测的风向、风速与气球探测的风向、风速值有一定偏差,200 m高度以上风廓线雷达和气球探空所测得的风廓线具有很好的相关性。董保举等(2011)利用云南大理风廓线雷达资料与云南5部探空雷达资料对比发现,风廓线雷达资料与丽江探空雷达资料最为接近,利用风廓线雷达与丽江探空逐日 u 风、 v 风资料对比分析发现在700 hPa以上基本一致,说明风廓线雷达资料是可信的。万蓉等(2011)对咸宁市黑山观测站风廓线雷达资料与加密探空资料进行了对比,提出由于风廓线雷达只能探测单站上空天顶方向数据,而探空气球存在漂移,无法严格对两者的数据进行比较,只能设定一个误差范围,当两者差值在此范围内认为数据比较可靠。吴志根等(2013)利用上海3部不同风廓线雷达探测

资料分别在冬季和夏季与探空雷达测风数据进行对比分析,得出在该次研究中两台TWP3型风廓线雷达的探测精度明显优于LAP3000型风廓线雷达。吴蕾等(2014)通过北京南郊观象台2006—2008年3年的观测资料与L波段雷达探空测风数据的对比,得出两者测风结果有较好的一致性,水平风 u 、 v 分量的标准偏差在 $2.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,这个偏差代表了风廓线雷达和L波段雷达探空共同的测量误差及不同采样空间和时间的水平风的差异。

在已业务上传数据的42部风廓线雷达中只有两个与L波段探空雷达同址的站点,分别是新疆乌鲁木齐站和江苏南京站,下面对这两个站分别进行分析。

(1) 新疆乌鲁木齐站

新疆乌鲁木齐站从2012年11月开始上传数据,按照季节即春(3、4、5月)、夏(6、7、8月)、秋(9、10、11月)和冬(12、1、2月)对2012年12月至2013年11月一年的资料进行分析,分别取风廓线雷达1 h平均产品的水平风 u 、 v 分量与L波段探空雷达测得的水平风的 u 、 v 分量进行对比,其中9月22日至10月25日缺探空资料,分析时舍弃这段时间的资料。对 u 、 v 分量进行统计分析,计算相关系数、平均偏差和标准偏差,结果如表1所示。

表1 新疆乌鲁木齐风廓线雷达与同址探空雷达测风 u 、 v 分量对比

Table 1 The comparison of u , v components between WPR and sounding radar in Urumqi, Xinjiang

季节	时次	高度/hPa	u 分量			v 分量		
			相关系数	平均偏差	标准偏差	相关系数	平均偏差	标准偏差
春	08时	850	0.89	-0.28	1.53	0.87	-0.79	2.13
		700	0.89	0.76	1.85	0.94	-0.85	1.82
	20时	850	0.85	-0.31	1.61	0.84	-1.66	1.77
		700	0.89	1.07	2.05	0.94	-1.1	1.8
夏	08时	850	0.62	-0.11	1.98	0.82	-1.19	1.76
		700	0.89	0.78	1.53	0.93	-0.52	1.54
	20时	850	0.86	-0.3	1.49	0.86	-0.85	1.69
		700	0.92	0.42	1.55	0.92	-0.49	1.81
秋	08时	850	0.88	-0.54	1.59	0.82	-0.61	2.07
		700	0.93	1.09	1.89	0.95	-0.92	1.79
	20时	850	0.85	-0.73	1.37	0.9	-0.55	1.45
		700	0.91	0.59	1.97	0.92	-0.46	1.85
冬	08时	850	0.91	-0.4	1.62	0.89	0	2.26
		700	0.97	0.74	1.6	0.97	-0.55	1.64
	20时	850	0.86	-1.29	1.79	0.89	-0.08	2.35
		700	0.92	1.29	1.86	0.97	-0.66	1.69

(2) 江苏南京站

与乌鲁木齐站一样,江苏南京站也对2012年

12月至2013年11月一年的资料(缺9月22日至10月25日探空资料,舍弃这段时间的数据)分季节

进行分析,分别取风廓线雷达 1 h 平均产品的水平风 u 、 v 分量与 L 波段探空雷达测得的水平风的 u 、 v

分量进行对比,分别计算出 u 、 v 分量的相关系数、平均偏差和标准偏差如表 2 所示。

表 2 江苏南京风廓线雷达与同址探空雷达测风 u 、 v 分量对比

Table 2 The comparison of u , v components between WPR and sounding radar in Nanjing, Jiangsu

季节	时次	高度/hPa	u 分量			v 分量		
			相关系数	平均偏差	标准偏差	相关系数	平均偏差	标准偏差
春	08 时	925	0.92	-0.53	2.72	0.91	-0.81	2.28
		850	0.93	0.53	2.16	0.94	-0.69	2.21
		700	0.89	0.99	3.04	0.8	0.25	3.39
	20 时	925	0.84	-2.6	3.75	0.86	-1.82	2.95
		850	0.86	-1.12	3	0.73	-2.28	3.93
		700	0.67	0.23	4.7	0.61	-1.19	4.75
夏	08 时	925	0.97	-0.4	2.15	0.85	0.83	2.68
		850	0.97	-0.18	1.96	0.83	1.53	2.8
		700	0.94	0.27	2.41	0.83	1.67	2.56
	20 时	925	0.97	-0.42	1.67	0.88	0.55	2.23
		850	0.97	-0.09	1.79	0.89	0.8	2
		700	0.96	0.37	2.09	0.85	0.63	2.25
秋	08 时	925	0.82	1.42	2.37	0.92	1.1	1.75
		850	0.96	0.91	1.43	0.92	1.16	1.59
		700	0.93	2.08	2.45	0.88	2.77	1.83
	20 时	925	0.64	0.65	3.33	0.86	1.7	2.15
		850	0.55	1.9	3.69	0.84	2.41	2.33
		700	0.77	4.38	3.96	0.81	3.96	2.95
冬	08 时	925	0.92	-0.09	3.12	0.95	-0.62	2.26
		850	0.9	1.52	2.62	0.93	-0.37	2.35
		700	0.82	4.24	3.81	0.94	1.94	2.42
	20 时	925	0.92	-0.7	2.86	0.93	0.51	2.44
		850	0.89	1.6	3.27	0.93	0.18	2.81
		700	0.93	1.35	2.54	0.88	1.85	3.37

由表 1 和表 2 可以看出,这两部风廓线雷达在 700 hPa 高度以下与 L 波段探空雷达有很好的一致性, u 、 v 分量的平均偏差大都在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内,小于 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,属于有效数据,并且 u 、 v 分量的相关系数基本都达到 0.8 以上,部分季节和时次达到 0.9 以上,风廓线雷达探测的水平 u 、 v 分量与 L 波段探空雷达探测到的水平风 u 、 v 分量高度相关,说明风廓线雷达探测到的水平风是可信的。由于这两部风廓线雷达都是边界层风廓线雷达,在 500 hPa 高度(5500 m 左右)上,探测资料都非常少,故只取 700 hPa 以下资料作对比。

2.1.2 垂直速度可信度

风廓线雷达能直接得到探测站点上空垂直速度随高度的分布。由风廓线雷达的探测原理可知:在大气为晴空状态时垂直速度反映的是大气的垂直运动速度,当有云或降水时垂直速度反映的是云中粒子或降水粒子的垂直运动速度。由于降水粒子对电磁波的散射强度远大于晴空大气的散射强度,垂直

速度可以反映降雨的开始、结束以及降雨的强度。有研究表明,在降水的情况下,风廓线雷达探测到大于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (定义垂直速度向下为正)的垂直速度时,反映了降水的开始,且由于降水强度与降水粒子的大小、下落末速度有关,因此可以认为垂直速度越大降水越强(董保举等,2009)。

本文通过分析北京、上海、广东等地在 2013 年的 10 次降水过程,得出风廓线雷达探测到的垂直速度与自动气象站 1 h 雨量有很好的对应关系,能清楚地反映降水发生的开始和结束时间。下面以北京海淀 2013 年 7 月 1 日的一次降水过程和广州从化 2013 年 3 月 28 日的一次降水过程为例分析。

图 1 是 2013 年 7 月 1—2 日北京降水海淀风廓线雷达在 925~700 hPa 高度之间所测垂直速度(700 hPa 高度上只有部分时次有数据,500 hPa 高度上无数据)与海淀自动气象站 1 h 雨量的关系图,从 1 h 雨量可以看出降水从 1 日 20:30 开始,2 日 02:00 结束,在此过程中,风廓线雷达在不同高度测

得的垂直速度均大于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且 1 h 雨量最大值对应的风廓线雷达测得的垂直速度也最大, 符合上述结论, 说明垂直速度可信。

图 2 是 2013 年 3 月 28 日广州从化的降水过程, 观测时间取的是 2013 年 3 月 27 日 08:00 至 29 日 07:00。同样, 在 925~700 hPa 高度层上, 风廓线雷达所测得的垂直速度很好地反映了降水的开始和结束时间。27 日 11:00—12:30 有一次强度较小的降水, 28 日 03:00—23:00 有持续性降水, 但在 28 日 14:00—15:00 和 18:00—20:00 降雨量为 0, 这两段时间风廓线雷达所测垂直速度小于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 与结论相符, 说明垂直速度可信。在 500 hPa 高度上, 风廓线雷达所测得的垂直速度的变化趋势与低层的相同, 但是要比低层小得多, 这是因为在融化层以上冰晶粒子还没有融化, 冰晶落入融化层开始融化, 密度变大, 下降速度增大; 而冰晶粒子经过融化层之后, 完全融为水滴, 下降速

度增大到一定范围便趋于稳定(黄钰等, 2013)。

通过 10 次降水过程定性分析得出: 风廓线雷达探测到的垂直速度能比较清楚地反映出降水的开始、结束以及降水的强度, 与自动气象站观测到的 1 h 雨量累计值有很好的相关关系。

2.2 全国风廓线雷达资料组网对比分析

通过以上分析可以看到, 在 500 hPa 高度以下, 新疆乌鲁木齐和江苏南京的风廓线雷达探测到的水平风与同址的 L 波段探空雷达探测到的水平风的一致性都很好。现已投入业务使用的风廓线雷达中只有 6 部对流层风廓线雷达, 大部分风廓线雷达探测高度都有限, 在 6000 m 高度以上基本无数据, 所以本文在进行风场组网时只取 925、850、700 和 500 hPa 这 4 个高度。风廓线雷达高时空分辨率资料可以弥补常规探空资料时空分辨率不高的缺点, 为了弥补高空探测时间密度上的不足, 本文在风廓线雷达组网风场对比分析时, 时间上采取 1 h 一次组网, 并且加入了垂直速度信息, 这是探空资料无法获得的。

对单站的风廓线雷达水平风的可信度进行分析之后, 对全国风廓线雷达探测的水平风组网可信度做一个定性的分析。取已转换成 MICAPS 格式的两个月的(2013 年 3 和 4 月)全国风廓线雷达探测到的水平风 1 h 平均资料, 分别在不同高度(925、850、700 和 500 hPa)上与 L 波段探空雷达 08 和 20 时探测到的资料进行对比, 可以发现两种探测资料在相同时间、相同高度上的风场基本一致。

图 3 是 2013 年 3 月 21 日 08 时 700 hPa 高度上全国风廓线雷达与 L 波段探空雷达所测水平风(红色风羽为风廓线雷达所测水平风, 黑色风羽为 L 波段探空雷达所测水平风)用 MICAPS 软件显示的对比图, 很直观地看出这两种雷达探测到的水平风的大小和方向都很一致。

为了对组网风场有一个定量分析, 分别取与各个风廓线雷达站点最近的 L 波段探空雷达站(两站之间的距离均在 200 km 以内)的资料, 对 2013 年 3 和 4 月 08 和 20 时水平风风向和风速的偏差做统计分析。根据吴蕾等(2013)所做的研究, 取风向偏差在 20° 以内的为有效值, 风速偏差在 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内的为有效值, 统计结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出, 在 925~500 hPa 高度范围内, 风向和风速偏差的有效值所占比例均在 0.6 以

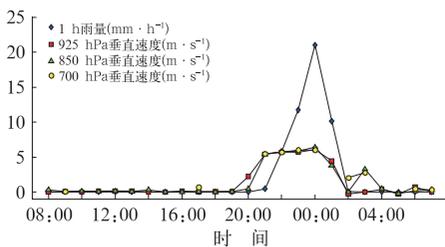


图 1 2013 年 7 月 1—2 日北京降水海淀风廓线雷达所测垂直速度与同址自动站 1 h 雨量关系图

Fig. 1 The graph of vertical velocity observed by WPR and 1 hour rainfall observed by the same address AMS in Haidian, Beijing from 1 to 2 July 2013

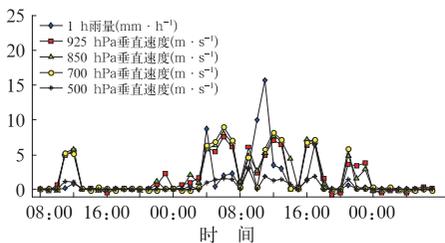


图 2 2013 年 3 月 27—29 日广州从化降水的风廓线雷达所测垂直速度与同址自动站 1 h 雨量关系图

Fig. 2 The graph of vertical velocity observed by WPR and 1 hour rainfall observed by the same address AMS in Conghua, Guangzhou from 27 to 29 March 2013

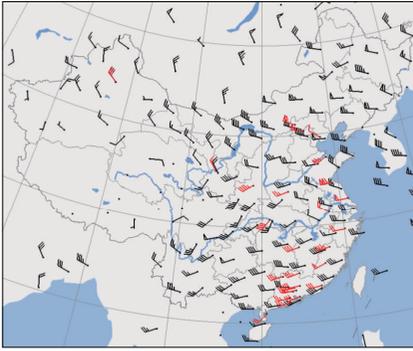


图 3 2013 年 3 月 21 日 08 时 700 hPa 全国风廓线雷达与 L 波段探空雷达所测水平风 (风廓线雷达所测: 红色风羽; L 波段探空雷达所测: 黑色风羽)

Fig. 3 The horizontal wind observed by national WPR and L-band sounding radar at 700 hPa height at 08:00 BT 21 March 2013 (observed by WPR: red wind barb; observed by L-band sounding radar: black wind barb)

上, 风向偏差有效值所占比例随高度的增加而增大, 在 500 hPa 高度上达到 0.848; 而风速偏差有效值所占比例随高度的增加而降低, 在 500 hPa 高度上只有 0.487, 说明在 500 hPa 高度上时水平风风速不可信。图 4 是上述风廓线雷达与 L 波段探空雷达所测风向和风速的偏差分布情况, 在 925~700 hPa 高度, 风向、风速偏差在有效值范围之内所占的比例很大, 在 500 hPa 高度上风向偏差为有效值所占的比例较大, 但风速偏差为有效值所占的比例较小, 再次说明在 500 hPa 高度上时水平风风速不可信。原因可能是本文中用于组网对比分析的 42 部风廓线雷达中只有 6 部是对流层, 其他都是边界层风廓线雷达, 最高探测高度在 3~5 km, 在 500 hPa 高度(本文取 5400~5600 m)上探测资料很少, 且在该高度层上边界层风廓线雷达获得的信号较弱, 因此其水平风风速可信度较低。

表 3 2013 年 3—4 月风向、风速偏差统计结果

Table 3 The deviations of wind direction and wind speed between March and April in 2013

高度/hPa	风向偏差			风速偏差		
	所有数据	有效值	有效值所占比例	所有数据	有效值	有效值所占比例
925	2763	1713	0.620	3188	1949	0.611
850	3053	1988	0.651	3411	2201	0.645
700	2669	1991	0.746	2710	1641	0.606
500	942	799	0.848	825	402	0.487
925~500	9427	6491	0.689	10134	6193	0.611

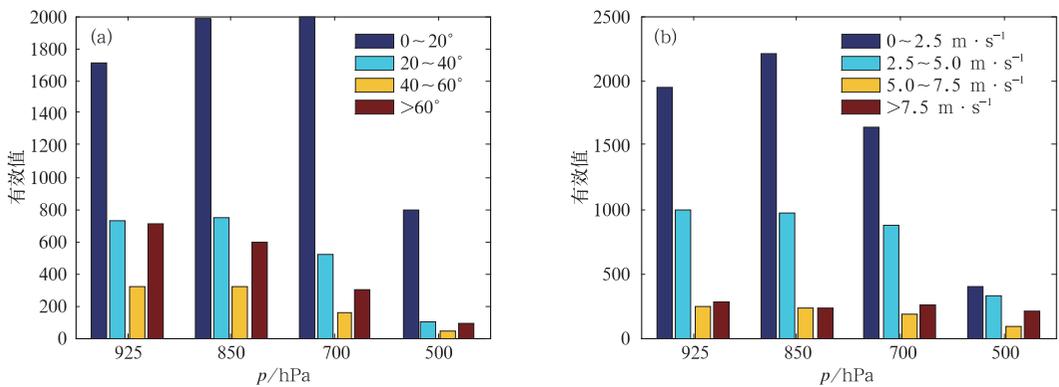


图 4 风廓线雷达与 L 波段探空雷达所测风向、风速的偏差分布情况

Fig. 4 The deviations of wind direction and wind speed observed by national WPR and L-band sounding radar

3 结论和讨论

本文以 L 波段探空雷达探测到的水平风为标准对全国风廓线雷达探测到的水平风的可信度进行

评估, 得到以下结论:

(1) 风廓线雷达探测到的水平风在 700 hPa 高度以下与 L 波段探空雷达有较好的一致性; 并且将风廓线雷达探测到的垂直速度与同址地面自动气象站观测到的 1 h 雨量进行相关性分析, 得出垂直速

度大小能很清楚地反映降水的开始、结束以及降水的强度。

(2) 将全国风廓线雷达探测到的水平风进行组网对比分析,得出风廓线雷达组网探测得到的水平风在 700 hPa 高度下是可信的,风向可信度随探测高度的增加而增大,风速可信度随探测高度的增加而降低,为评估风廓线雷达布网提供了参考依据。

(3) 为了适应业务不同的需求,在进行风廓线雷达组网时可以在空间和时间上进行加密处理,比如空间上,在每隔 200 m 或更密的高度分辨率上进行组网;时间上,根据需要可以取 6 min 间隔的实时数据或 6 min 以上的平均数据进行组网观测。

另外,本文中只对风廓线雷达探测到的水平风组网应用进行了分析,为了更好地将风廓线雷达组网观测资料应用于业务预报中,还需开发新的组网产品,有待于进一步的研究。

参考文献

董保举,刘劲松,高月忠. 2009. 基于风廓线雷达资料的暴雨天气过程分析. 气象科技,37(4):411-415.

董保举,张晔,李建,等. 2011. 风廓线雷达测风和气球测风资料对比分析. 云南大学学报(自然科学版),33:18-25.

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,42-62.

黄钰,阮征,葛润生,等. 2013. 2010 年夏季北京零度层亮带特征统

计. 气象,39(6):704-709.

苏德斌,焦热光,吕达仁. 2012. 一次带有雷电现象的冬季雪暴中尺度探测分析. 气象,38(2):204-209.

孙旭映,韩晖,段海霞,等. 2008. 风廓线仪与气球测风资料的对比分析. 干旱气象,26(3):48-52.

万蓉,周志敏,崔春光,等. 2011. 风廓线雷达资料与探空资料的对比分析. 暴雨灾害,30(2):130-136.

王海霞,张宏升,李云峰,等. 2013. 上海浦东国际机场低层大气垂直风场特征研究. 气象,39(11):1500-1506.

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.

吴蕾,陈洪滨,高玉春,等. 2013. 国产风廓线雷达对比试验初步分析. 现代雷达,35(6):24-28.

吴蕾,陈洪滨,康雪. 2014. 风廓线雷达与 L 波段雷达探空测风对比分析. 气象科技,42(2):187-192.

吴志根. 2012. 边界层风廓线雷达在降水时段中的在线分析应用研究. 气象,38(7):758-763.

吴志根,徐同,丁若洋,等. 2013. 上海组网边界层风廓线雷达与宝山二次雷达测风数据比较分析. 气象,39(3):370-376.

郑媛媛,姚晨,郝莹,等. 2011. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究. 气象,37(7):795-801.

Strauch R G, Weber B L, Frisch A S, et al. 1987. The precision and relative accuracy of profiler wind measurements. Atmos Oceanic Technol, 4:563-571.

Weber B L, Wuertz D B. 1990. Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements. Atmos Oceanic Technol, 7:157-174.

Wuertz D B, Weber B L, Strauch R G, et al. 1988. Effects of precipitation on UHF wind profiler measurements. Atmos Oceanic Technol, 5:450-465.