王栋成,邱粲,董旭光,等,2019. 济南边界层风廓线雷达与 L 波段雷达大风探空测风对比[J]. 气象,45(8):1169-1180. Wang D C,Qiu C,Dong X G, et al,2019. Comparing strong wind data observed by boundary layer wind profiling radar and L-band radar in Jinan[J]. Meteor Mon,45(8):1169-1180(in Chinese).

济南边界层风廓线雷达与 L 波段雷达 大风探空测风对比*

王栋成1 邱 粲1.2 董旭光1 曹 洁1

1 山东省气候中心,济南 250031
 2 上海师范大学地理系,上海 200234

提要:基于相同站点的济南边界层风廓线雷达(WPR)和L波段雷达大风探空测风(以下简称LW)资料,采用相关、拟合、 廓线分析等方法,系统地对比两者大风(≥10.8 m・s⁻¹)数据的各统计特征、相关性、时空变化规律的异同。结果表明:(1)两 者 u 分量、v 分量、风向、风速的相关系数分别为 0.973、0.965、0.994、0.665,标准偏差分别为 2.04 m・s⁻¹、2.88 m・s⁻¹、 10.82°、2.53 m・s⁻¹,大风数据相关性总体较高,且相关系数风向优于风速的、降水样本优于非降水的,表明 WPR 观测大风数 据可信、降水期间 WPR 水平大风数据可以使用。(2)两者大风风向、风速基本一致,但在低层差异较高层的大,尤其是 340 m 及以下高度层更显著,降水、非降水、全部样本在 2980、1900、2740 m 以下 WPR 风向值均略小于 LW,而在 1300、2740、1660 m 以下 WPR 风速值均略大于 LW。(3)两者资料互补性总体较好,大风风向、风速、v 分量差值随高度变化符合对数律递增或递 减规律,但 u 分量需分段拟合;在进行回归方程求算和资料互补时,应考虑差异随高度等的变化。 关键词:边界层风廓线雷达,L波段雷达,大风,标准偏差法,资料互补

中图分类号: P413 文献标志码: A DOI: 10.7519/j.issn. 1000-0526. 2019. 08. 013

Comparing Strong Wind Data Observed by Boundary Layer Wind Profiling Radar and L-Band Radar in Jinan

WANG Dongcheng¹ QIU Can^{1,2} DONG Xuguang¹ CAO Jie¹

1 Shandong Climate Centre, Jinan 250031

2 Department of Geography, Shanghai Normal University, Shanghai 200234

Abstract: Based on the strong wind ($\geq 10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) data observed by Jinan boundary layer wind profile radar (WPR) and L-band sounding radar (LW) located in the same place, statistical correlation, fitting, and profile analysis were used to systematically compare the similarities and differences between spatial and temporal changes of both of them. The results show that the correlation coefficients of the *u*-component, *v*-component, wind direction, and wind speed are 0.973, 0.965, 0.994, and 0.665 respectively. The standard deviations are 2.04 m \cdot s⁻¹, 2.88 m \cdot s⁻¹, 10.82° and 2.53 m \cdot s⁻¹ respectively. The correlations of the two observed strong wind data are relatively high, with wind direction samples better than speed samples and precipitation period samples better than that of non-precipitation period samples. This indicates that the strong wind data observed by WPR are credible and the WPR horizontal wind data during precipitation period can be used. The strong wind direction and speed of the two observations are basically the same, but the differences at lower levels are bigger, especially at the heights of 340 m and below.

^{*} 山东省气象局气象科学技术重点研究项目(2014sdqxz05)资助

²⁰¹⁸年5月3日收稿; 2019年3月29日收修定稿

第一作者:王栋成,主要从事气候应用与大气环境研究.Email:hjpj2008@163.com

Below the heights of 2980 m, 1900 m, and 2740 m the wind direction samples of WPR during precipitation periods, non-precipitation periods, and the whole periods have slightly lower values than that of LW. However, the wind speeds of WPR below 1300 m, 2740 m, and 1660 m are slightly bigger than that of LW. The overall complementarity of the two data is good, and the differences in wind direction, wind speed, and *v*-component of the two types are in accordance with the e-index law or the law of logarithm increase or decrease, but the *u*-component needs to be fitted by segments. When the regression equation is calculated, variations in height should be taken into account.

Key words: boundary layer wind profile radar, L-band sounding radar, strong wind, standard deviation method, complementary data

引 言

风廓线雷达(WPR)测得的垂直分布的水平风 向和风速廓线尤其是大风剖面具有高时空分辨率的 优点,可在灾害天气监测、短时数值预报、气候可行 性论证等诸多领域广泛应用(胡明宝,2015;何平, 2006;董丽萍等,2014;王栋成等,2018),但因探测能 力限制、易受杂波干扰、受晴雨和温压湿影响,也导 致 WPR 观测数据的稳定性、准确性有待提高。国 内外不少学者进行了 WPR 与 L 波段雷达、小球测 风、多普勒天气雷达、梯度风塔、ERA-Interim 再分 析资料等数据的对比研究。Strauch et al(1987)用 冬季晴空条件下资料、Wuertz et al(1988)用夏季降 水条件下资料分析了 WPR 探测的准确性。Seto et al(2009)用 NCEP 再分析资料、探空资料与 WPR 的 700 hPa 水平风观测数据进行比较,结果表明 WPR 数据促进了资料同化的精度,一致性提高了约 10%。国内早期李晨光等(2003)、王欣等(2005)、孙 旭映等(2008)、董保举等(2011)、万蓉等(2011)也 进行了 WPR 与探空资料的个例或短期观测资料的 对比,认为两者相关度、一致性总体较好。陈添宇等 (2011)检验 WPR 和探空资料变化趋势的一致性和 偏离程度,认为前者探测的风速误差较大,尤其是 1400 m 以下误差更大。王志春等(2013)对比了大 风条件下车载 WPR 与相应高度的气象塔 50 和 100 m 的 15 次实测资料,结果表明两者风速、风向 变化规律比较一致,但风速、风向值有一定的偏差, 前者测得的风速总体比后者的偏小。董丽萍等 (2014)分析了全国 WPR 网络与探空资料一致性, 发现在 700 hPa 以下两者有较好的一致性。董新宁

等(2017)对重庆 WPR 和多普勒天气雷达获取的 2013年9个月的风廓线资料研究发现,两者探测的 风向和风速的相关系数分别为 0.90 和 0.75,且两 者的一致性随高度不断增强。张寅等(2017)对 2014-2015年陕西泾河站L波段雷达探空数据和 ERA-Interim 再分析资料与同期长安站 WPR 数据 进行对比发现,三者整体上相关性较好,相关系数随 高度的增高而增大并在 1500~2500 m 达到显著相 关。此外, 王烨芳等(2007)、万蓉等(2011)、邓闯等 (2012)对比研究认为,WPR水平风速和风向测量值 一般都比气球轨迹法的结果偏大,分别偏大1.5~ 3.0 m · s⁻¹和 10~20°。吴志根等(2013)得出两台 TWP3型WPR与宝山L波段雷达探空风速的误差 均为 $2\sim4$ m · s⁻¹,曲巧娜等(2016)发现济南站晴 天1.5 km 以上及雨天 0.64 km 以上大多高度层, WPR 的水平风速比探空偏小约 2 m \cdot s⁻¹,青岛站 6.48 km 以下则比探空偏小 2~4 m • s⁻¹。Weber and Wuertz(1990)得出水平风 u、v 分量标准偏差均 为 2.5 m • s⁻¹。吴蕾等(2014)对北京南郊大气探 测试验基地 2006-2008 年的 WPR 观测资料与探空 资料进行了对比,发现两者测风 u、v 分量均有较好的 一致性,平均水平风速的标准差在2.3 m · s⁻¹左右。

综上所述,这些研究大都是针对平均风的对比, 仅个别关注了大风条件下的对比;较多关注水平风 u、v分量的对比,较少回答大风风向、风速的对比; 较多关注晴空或非降水条件下的个例对比,较少回 答长序列的降水/非降水综合对比。本文基于相同 站点 WPR 和 L 波段雷达大风探空测风(以下简称 LW)的 2014 年全年逐次测风资料,进行两者大风 相关性、互补性分析,以期更全面系统反映两者大风 数据的异同,为极端灾害性天气气候业务及应用提 供参考。

1 资料来源和对比方法

1.1 资料来源

本文所用距地面 100~2980 m 高度的大风数 据(≥10.8 m・s⁻¹),来自济南(章丘)CLC-11-D 型 固定式边界层 WPR 站(36°41′N、117°33′E,海拔 121.8 m)2014 年每日实时产品数据 ROBS 文件,雷 达主要技术指标为:时间分辨率≪6 min,最低与最 高探测高度分别为≪100 m、≥3 km,输出产品数据 高度分辨率为 60、120、240 m 三种,风速与风向测 量精度分别为≪1.5 m・s⁻¹、≪10°。本次采用该站 经质量控制后业务上传的产品数据,并根据风场的 变化是具有连续性的这一气象原理进行进一步的数 据质量控制(周雯嫣等,2011),在各高度上进行上下 层、在时间上进行前后 3 个时次的风向、风速数据奇 异点判断,剔除异常数据并用前后或上下点平均来 替代该点的数据,然后筛选每一高度层全年逐次大 风数据。

所采用相同站点的 LW 数据为 2014 年每日 07:15、19:15、13:15(北京时,下同;6、7、8 月加密观 测),来自济南(章丘)GFE(L)1 型二次测风雷达 L 探空站(36°41′N、117°33′E,海拔 122.59 m)记录文 件,测量精度风向 $\leq 2.5^{\circ}$ (风速 $> 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、风速 $\leq 10\%$ (风速 $> 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、风速 $\leq 10\%$ (风速 $> 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、数据均经业务质量控 制,符合《常规高空气象探测规范》(中国气象局, 2010)。

LW 秒级和分钟级数据的高度分辨率分别为6 ~7 m、400 m,考虑 LW 整点后 15 min 开始探测, 气球按照每分钟 400 m 的速度上升,10 min 的高度 足以涵盖 WPR 探测每 6 min、2980 m 的高度范围, 因此本研究采用 WPR 整点后 24 min 的 ROBS 数 据与 LW 数据的时间可以匹配。与 ROBS 数据相 同时段、相同高度层的 LW 数据利用 L 波段高空气 象探测系统数据处理软件内插获取(李伟等,2008), 从而使对比数据时空匹配一致。因设备故障、系统 维护等导致 WPR 数据有缺测,LW 资料也有个别 缺测,全年共获得 768 条对比廓线,每条廓线应至少 有 27 个高度层的对比数据,但因有时信噪比较低无 法获得可信的水平大风数据,有些高度层的 ROBS 数据也有一些缺失。

1.2 对比方法

边界层 WPR 和 LW 数据的统计对比以多种方 式进行。首先,不分条件将所有大风数据进行对比 (吴蕾等,2014);其次,将所有大风数据中偏差较大 的离群值剔除后进行对比,按降水/非降水、高度、风 速和风向、最大风速及月份等分组,分析 WPR 和 LW 两者相关性、一致性和资料互补性。

考虑风向角度变化具有周期性,在对两者风向 相关性分析时进行了一定处理,即:当两者风向相 差绝对值大于 180°时,风向角度小者加上 360°(董 新宁等,2017;王烨芳等,2008)。

汇总 WPR 和 LW 数据对比中离群值的偏差阈 值确定方法主要有三类。本文将方法一称为统计阈 值法:根据两者观测风向、风速的长期样本差值的统 计误差设定,如夏文梅等(2008)、万蓉等(2011)、曲 巧娜等(2016)将水平风速差≤3 m·s⁻¹、风向差≤ 20°(≤15°; 贺文煌等, 2017) 定义为有效样本。将方 法二称为测量阈值法:根据 WPR、LW 的测量误差 综合确定误差阈值(胡明宝和张鹏,2011;姚雯和马 颖,2009),风向误差阈值25°,风速误差阈值随风速 增大。将方法三称为标准偏差法:根据 WPR、LW 数据u,v分量的标准偏差(σ)的三倍值确定为偏差 阈值(Weber and Wuertz, 1990; 吴蕾等, 2014; 朱立 娟,2015)。各方法确定大风数据有效样本的结果对 比见表 1, 三种方法的离群数据剔除率分别为 29.04%、10.70%、4.03%,三种方法的样本相关系 数(R)均较高且风向的远高于风速的,无论风向、风 速,设定的偏差阈值越小则 R 越高、回归方程系数 越接近1.0、截距越小、σ越小。但方法一的偏差阈 值过小导致数据剔除率过高,且对大风样本类比引 用适用性差;方法二的数据剔除率偏高,且只关注了 测量误差,对系统误差与随机误差等未全面考虑;方 法三的 u,v 分量 σ 较小,分别为 2.04 m • s⁻¹、 2.88 m • s⁻¹, R 较高, 分别为 0.973、0.965, 有效样 本率较高(95.97%),可使保留的原始观测大风数据 足够多、更具代表性,因此本文基于方法三进行 WPR 和 LW 大风数据对比有效样本的确定。

基于方法三有效样本得到的大风风向、风速的 R 分别为 0.994、0.663, σ 分别为 10.82°、 2.53 m • s⁻¹,并初步得到 WPR 与 LW 大风风向、 风速的相互订正回归方程:

$\theta_{\rm LW} = 0.986\theta_{\rm WPR} + 6.66$	(1)
$V_{\rm LW} = 0.788 V_{\rm WPR} + 2.06$	(1)

式中, θ_{LW} 和 θ_{WPR} 分别为 LW 和 WPR 的风向, V_{LW} 和 V_{WPR}分别为 LW 和 WPR 的风速。

Table 1 Comparison of the results of three deviation threshold determination methods											
偏差阈值	大风要素	样本数/对	样本数 占比/%	R	方程系数	截距	σ				
方法一	风向/ °	1220	70.06	0.997	1.000	3.98	7.26°				
(统计阈值法)	风速/m・s ⁻¹	1339	70.90	0.865	0.923	0.67	1.46 m $\cdot s^{-1}$				
方法二	风向/ °	1695	80.20	0.996	0.996	4.82	8.64°				
(测量阈值法)	风速/m・s ⁻¹	1085	89.30	0.746	0.835	1.67	2.11 m \cdot s ⁻¹				
	u分量/m・s ⁻¹			0.973	0.973	-0.88	2.04 m \cdot s ⁻¹				
方法三 (标准偏差法)	v分量/m・s ⁻¹ 风向/°	1011	05 07	0.965	0.869	0.37	2.88 m \cdot s ⁻¹				
		1011	95.97	0.994	0.986	6.66	10.82°				
	风速/m・s ⁻¹			0.663	0.788	2.06	2.53 m \cdot s ⁻¹				

三种偏差阈值确定方法结果对比 表 1

2 所有大风数据对比

2.1 未剔除较大偏差所有大风数据对比

未剔除较大偏差的 WPR 和 LW 大风对比的所 有样本数为1887对, u分量、v分量、风向、风速对比 的散点图见图 1。若两者结果相同则所有点应分布 在从左下角到右上角的对角线上(吴蕾等,2014),虽 有不少离群值但 WPR 和 LW 两者之间总体有较好 的相关性,且风向的相关性和一致性均优于风速的。 两者 u、v 分量的 R 分别为 0.958、0.957, σ 分别为 2.54、3.21 m • s⁻¹(图 1a、1b);两者风向、风速 R 分 别为 0.936、0.614, σ分别为 36.9°、2.77 m • s⁻¹(图 1c、1d)。造成两者差异的原因包括测量原理、测量 误差、WPR 杂波干扰、降雨干扰以及 LW 观测误 差、LW资料在各高度层之间的整体连续性不足等 (吴蕾等,2014;孙旭映等,2008)。

2.2 剔除偏差较大的大风数据对比

采用方法三剔除偏差较大的数据后,共得到大 风有效样本 1811 对, WPR 与 LW 的 u 分量、v 分 量、风向、风速的差值频率分布形态(图略)皆符合平 均值为0的随机正态分布,对比数据的散点图 (图 2)反映了两者大风 u 分量、v 分量、风向、风速的 相关性,两者的 R 分别为 0.973、0.965、0.994、0. 665,σ分别为 2.04 m • s⁻¹、2.88 m • s⁻¹、10.82°、 $2.53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与未剔除较大偏差的全部样本结果 相比,R 增大、σ 减小,两者总体有较好的相关性目 风向的相关性和一致性均优于风速的。两者的相关 性较好,主要是因为相同站点的 WPR 和 LW 对比 数据时空匹配一致;而风向、u分量、v分量的相关 性和一致性均优于风速的,则说明 WPR 和 LW 两 者对风场矢量的测量准确性、一致性均较好,而对于



(a) u-component, (b) v-component, (c) wind direction, (d) wind speed



Fig. 2 Same as Fig. 1, but with removing large-deviation data

流场速度的测量准确性、一致性则存在一定的差异。

3 降水与非降水对比

基于地面气象站逐小时降水资料和 WPR 实时 ROBS 文件的垂直速度简明判定降水与非降水样 本。若地面记录某时刻有降水,则将 WPR 观测的 本次大风记录归类为降水样本;若地面气象站记录 无降水,但 WPR 观测的垂直速度(向下为正,向上 为负)连续多层大于 1.0 m · s⁻¹(胡明宝,2015;何 平等,2009;杨馨蕊等,2010;吴志根,2012;王令等, 2014;邱粲等,2017;张培昌等,2001),则也将该大风 记录归类为降水样本;除此之外的大风记录则归类 为非降水样本。

3.1 总体样本对比

降水/非降水的 WPR 与 LW 大风,风向的 R 均 较高,均为0.994(表2、图3),差值(Δθ,WPR数据

表 2 2014 年按降水、非降水样本分组的 WPR 与 LW 大风数据对比 Table 2 Comparison of strong wind data observed by WPR and LW grouped by



图 3 2014 年按降水(a₁,b₁,c₁,d₁)与非降水(a₂,b₂,c₂,d₂)样本分组的 WPR 与 LW 大风数据对比 (a)u 分量,(b)v 分量,(c)风向,(d)风速

Fig. 3 Comparison of strong wind data observed by WPR and LW grouped by precipitation (a_1, b_1, c_1, d_1) and non-precipitation (a_2, b_2, c_2, d_2) period samples in 2014

(a) u-component, (b) v-component, (c) wind direction, (d) wind speed

减去 LW 数据,下同)是降水的略大(-6.17°), σ 是 非降水的略大(11.57°);风速的 R 是降水的较非降 水的高($0.822 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),差值(ΔV)、 σ 均是降水的 小(分别为 0.61、 $1.96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、非降水的略大(\mathcal{O} 别为 0.94、 $2.73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);u、v 分量的 R 均较高,差 值 Δu 、 Δv 均是降水的略大, σ 则是降水的略小。

3.2 按高度变化对比

3.2.1 相关系数对比

降水、非降水、全部样本的 WPR 与 LW 两者风 向的 R 在各高度层均较高且随高度变化基本一致 (图 4a),差异主要在 340 m 及以下高度层,降水样 本的 R 较非降水的偏大 0.006~0.038,表明 WPR 在低空受杂波干扰、探测波束没有完全形成等因素 导致且非降水时更显著;其余高度层的差异则很小 (一0.002~0.003)。两者风速的 R 随高度变化差 异显著,除 100、220 m 层外,其余各高度层降水的 R 均显著高于非降水的(图 4b),其中以 1060~2020 m 高度段和 340 m 层更显著。

按降水/非降水、高度变化等不同分类对比,均 表明 WPR 与 LW 的大风数据具有较高的一致性, 说明 WPR 观测的大风数据可信。尤其是降水期间 的一致性比非降水的高,表明降水条件下 WPR 观 测的大风水平风向、风速数据虽可能存在一定的误 差,但足以反映当地的风场随高度变化的基本规律, 降水期间 WPR 水平大风数据可以使用。这一结果 与国内外学者(Wuertz et al, 1988;何平等, 2009;万 蓉等,2011;高祝宇等,2016;阮征等,2017;贺文煌 等,2017;董新宁等,2017;黄书荣等,2017)的研究基 本一致。降水过程空中水汽含量增加导致降水粒子 Ravleigh 散射信号增强,可使 WPR 探测降水时的 返回信号增强,得到的原始产品数据信号增强且稳 定,同时使 WPR 观测的高度、观测数据获取率也较 无降水时大幅度提高,可能是降水样本的相关性优 于非降水的主要原因。

3.2.2 风向差、风速差的对比

降水、非降水、全部样本的 27 个高度层 WPR 与 LW 的大风风向差($\Delta \theta$)、风速差(ΔV)、u 分量差 (Δu)、v 分量差(Δv)的廓线见图 5,分析可知:

(1) $\Delta\theta, \Delta V, \Delta u, \Delta v$ 总体均较小且随高度变化 规律基本一致, WPR 与 LW 的相关性、资料互补性 总体较好。表明济南 WPR 和 LW 为相同站点且下 垫面、海拔高度、风场均一致, WPR 观测到的水平风 资料可靠性接近 LW。

(2) $\Delta\theta, \Delta V, \Delta u, \Delta v$ 绝对值均是低层较大、高层 较小,且在低层 WPR 风向值小于 LW,降水、非降 水、全部样本的 $\Delta\theta$ 由负向正转换高度分别在 2980、 1900、2740 m;在低层 WPR 风速值大于 LW,降水、 非降水、全部样本 ΔV 由正向负转换高度分别在 1300、2740、1660 m;在低层 WPR 的 v分量小于 LW,降水、非降水、全部样本 ΔV 由负向正转换高度 分别在1540、940、940 m;在各高度层 WPR的u分 量均大于LW,降水、非降水、全部样本的 Δu 转折高 度分别出现在 1780、640、820 m。这一结论与刘梦 娟和刘舜(2016)、张寅等(2017)的研究基本一致。

(3) $\Delta\theta$, ΔV , Δv 随高度的变化均符合对数律递 增或递减规律,拟合回归方程见表 3,拟合曲线图 略。降水、非降水、全部样本 $\Delta \theta$ 拟合的 R 分别为 0.851、0.978、0.984, *ΔV* 拟合的 *R* 分别为 0.922、 0.914、0.941, Δv 拟合的 R 分别为 0.844、0.854、 0.904。但 Δu 随高度的变化不能以一个回归方程 表达,分段拟合则效果不错(表 3),低层段拟合的 R 分别为 0.869、0.870、0.949, 高层段拟合的 R 分别 为 0. 879、0. 661、0. 713。 拟合的相关系数均较高, 表明可以用 WPR 数据的高时空分辨率弥补 LW 时 空分辨率的不足。但是,对于降水、非降水和全部样 本、不同高度段等,这些差值随高度的变化规律并不 完全一致,在进行 WPR 与 LW 风廓线的风向、风速 等回归方程求算和资料互补时,应注意差值随高度、 不同天气系统的变化规律(杨梅等,2006;王烨芳等, 2007),以全部样本不考虑高度等变化得到的回归方 程式(1)并不具有全面的适用性。

4 按高度段、风速风向、月份对比

4.1 按高度段对比

与 3.2.2 中分析一致,各高度段风向的 R 均较 高(0.988~0.996)(表 4), $\Delta\theta$ 绝对值随高度增加呈 减小趋势,在 2500 m 以下 WPR 小于 LW,其上则 相反; σ 则随高度增加而增大。各高度段的风速的 R 较高(0.488~0.783), ΔV 绝对值随高度增加呈 减小趋势,在 2500 m 以下 WPR 大于 LW,其上则 相反; σ 随高度增加先增大后减小。各高度段的u,v分量的 R 均较高,差值和 σ 随高度的差异变化较 小。



图 4 2014 年按降水、非降水样本分组的 WPR 与 LW 大风数据相关系数随高度的变化 (a)风向,(b)风速

Fig. 4 Correlation coefficient of strong wind data measured by WPR and LW changing with height grouped by precipitation and non-precipitation period samples in 2014(a) wind direction, (b) wind speed





Fig. 5 The average difference of the strong wind by WPR and LW changing with

height grouped by precipitation and non-precipitation period samples in 2014

(a) wind direction, (b) wind speed, (c) u-component, (d) v-component

表 3	2014 年 WPR 与 L	Ν的大风 Δθ、ΔV、Δu、Δι	v随高度变化拟合公式
-----	----------------	------------------	------------

Table 3 Ftting formula for strong wind direction difference (WPR-LW), speed difference,

u-component difference and v-component difference with height in 2014

差值(WPR-LW)	降水	非降水	所有样本			
$\Delta \theta / \circ$	$\Delta\theta = 4.33 \ln H - 35.47$	$\Delta\theta = 4.55 \ln H - 34.48$	$\Delta\theta = 4.18 \ln H - 32.73$			
$\Delta V/\mathrm{m}$ • s^{-1}	$\Delta V = 9.45 - 1.31 \ln H$	$\Delta V = 8.04 - 1.03 \ln H$	$\Delta V = 7.92 - 1.04 \ln H$			
$\Delta u/\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	$\Delta u = 3.94 \ln H - 29.63 \geqslant 1780 \text{ m}$	$\Delta u = 1.13 \ln H - 7.32 \ge 640 \text{ m}$	$\Delta u = 0.89 \ln H - 5.69 \ge 820 \text{ m}$			
	$\Delta u = 8.0 - 1.1 \ln H \leq 1780 \mathrm{m}$	$\Delta u = 7.11 - 1.1 \ln H \leq 640 m$	$\Delta u = 6.69 - 0.97 \ln H \leq 820 m$			
$\Delta v/m \cdot s^{-1}$	$\Delta v = 1.14 \ln H - 8.27$	$\Delta v = 1.19 \ln H - 8.62$	$\Delta v = 1.02 \ln H - 7.44$			

4.2 按风速、风向对比

4.2.1 按风速分组对比

按 WPR 大风风速将对比样本分为 3 组(表 5)。

在各风速段 WPR 与 LW 两者风向的 R 均较高 (0.992~0.995),风向的相关性与风速大小无明显 关联,但随风速增大两者的风向差绝对值呈增大趋势,σ则呈减小趋势。在各风速段两者风速的 R 相 对较高(0.373~0.585),20 m·s⁻¹以上组的远高于 其余两组,呈现风速越大相关性越好趋势;在各风速 段两者 u,v分量的R 均较高,且与风速大小无明显 关联, *u*分量的差值均为正值, *v*分量的差值均为负值, *u*、*v*分量σ均呈现随风速增大趋势。

表 4 2014 年按高度段分组的 WPR 与 LW 大风数据对比 Table 4 Comparison of strong wind data measured by WPR and LW grouped by height in 2014

象

	1X + *	风向				风速			<i>u</i> 分量			v 分量		
高度层/m	件本数 /☆	D	Δ <i>θ</i> /°	- / °	D	$\Delta V/$	$\sigma/$	D	$\Delta u/$	$\sigma/$	D	$\Delta v/$	$\sigma/$	
	/ //]	A	$\Delta 0/$	0/	K	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	К	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	A	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	
100~500	376	0.988	-8.81	9.14	0.739	1.9	1.92	0.968	1.13	1.81	0.954	-1.53	2.78	
$500 \sim 1000$	515	0.995	-5.3	8.72	0.783	1.18	1.94	0.981	0.47	1.87	0.973	-0.92	2.46	
$1000 \!\sim\! 1500$	284	0.996	-3.33	9.90	0.563	0.63	2.68	0.974	0.74	2.05	0.962	0.16	2.86	
$1500\!\sim\!2000$	237	0.995	-1.76	11.71	0.488	0.17	3.31	0.967	0.86	2.37	0.937	-0.14	3.35	
$2000 \sim 2500$	215	0.995	-0.41	12.41	0.715	0.04	2.67	0.969	0.93	2.12	0.958	0.35	2.92	
2500~3000	184	0.994	0.49	13.00	0.737	-0.09	2.57	0.962	1.32	2.18	0.957	0.13	2.76	

表 5 2014 年按风速分组的 WPR 与 LW 大风数据对比

Table 5 Comparison of strong wind data measured by WPR and LW grouped by wind velocity in 2014

风速 \hbar $/{ m m} \cdot { m s}^{-1}$	1-1- x4	风向			风速			<i>u</i> 分量			v 分量		
	作 平 奴	D	A 0 /°	$\sigma/^{\circ}$	R	$\Delta V/$	$\sigma/$	n	$\Delta u/$	$\sigma/$	D	$\Delta v/$	$\sigma/$
	/ //]	κ Δσ	$\Delta 0/$			$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	K	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	К	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$
10~15	1284	0.995	-4.1	10.9	0.354	0.62	2.26	0.975	0.76	1.87	0.963	-0.42	2.57
$15\!\sim\!20$	411	0.995	-3.75	9.99	0.373	1.81	2.95	0.973	1.06	2.26	0.968	-0.77	3.62
>20	60	0.992	-7.23	8.24	0.585	1.04	2.52	0.972	1.53	2.43	0.961	-1.03	3.68

4.2.2 风向频率、最大风速对比

统计 WPR 与 LW 的各风向下大风出现频率、 平均风速、最大风速(图 6),两者的 R 分别为0.909、 0.496、0.587,均通过 0.05 显著性水平检验。两者 的大风频率一致且与当地常年结果相同,均以 SSW 风为主,仅在 NW、N—NE、S、SW 方位略有差异 (图 6a);两者的各风向下平均风速一致,差值略大 的是—1.12 m·s⁻¹(NW)、1.8 m·s⁻¹(SSW),除 W、WNW、NW风向外其余均是WPR大于LW
(图 6b);两者的各风向下最大风速基本一致,差值
略大的是-9.3 m・s⁻¹(WNW)、5.6 m・s⁻¹(NE)
(图 6c)。

4.2.3 年最大风速风向对比

WPR 与 LW 两者 27 个高度层的年最大风速、 对应风向的 *R* 分别为 0.650、0.990,σ 分别为 2.83 m・s⁻¹、5.78°,两者最大风速、对应风向随高度的变



图 6 2014 年 WPR 与 LW 大风频率(a,单位:%)、平均风速(b,单位:m・s⁻¹)、 最大风速(c,单位:m・s⁻¹)对比

Fig. 6 Comparison of strong wind frequency (a, unit: %), average speed (b, unit: m • s⁻¹) and maximum wind speed (c, unit: m • s⁻¹) of WPR and LW in 2014 化基本一致且风向的一致性更好(图 7a、7b)。最大 风速在 340 m 及以下高度层 WPR 显著大于 LW, 差异最大为 100 m 层(6.7 m · s⁻¹),主要是 WPR 观测受低层杂波干扰较大、两者测量原理不同、时空 代表性差异等原因造成,而 1540 m 层 LW 最大风 速的小值则显示其探测大风能力尚有不足。各高度 层风向均是 WPR 较 LW 略偏小(0.6°~21.6°),但 差值均在一个风向范围(22.5°)内。

27 个高度层的年最大风速 26.9 m • s⁻¹出现在 2980 m 层(2014 年 5 月 10 日 20 时),该时段地面雨 强为 6.1 mm • h⁻¹,WPR 观测的垂直速度(W)在 4 ~6 m · s⁻¹(图 8a)。WPR 与 LW 两者最大风速、 对应风向的 R 分别为 0.951、0.984, σ 分别为 1.91 m · s⁻¹、5.98°。两者最大风速、对应风向随高 度的变化—致(图 8), ΔV 为-4.0~3.3 m · s⁻¹, $\Delta \theta$ 为-0.5°~-23.8°, 均较小,表明 WPR 在极大风 速、降水条件下观测的数据可用。

4.3 按月份分组对比

对比结果见表 6,两者各月风向的 R 均较高且 变幅小,11、12 月最低,而 6、7 月最高,分析其原因 可能与WPR数据受温压湿影响有关(何平等,









表 6 2014 年按月份分组的 WPR 与 LW 大风风向、风速及 u、v 分量对比

Table 6 Comparison of monthly strong wind direction, speed and u, v components

measured by WPR and LW grouped in 2014

					-								
			风向			风速		<i>u</i> 分量			<i>v</i> 分量		
月	样本数/对	R	$\Delta \theta / \circ$	$\sigma/^{\circ}$	R	$\Delta V/$ m • s ⁻¹	$\sigma/m \cdot s^{-1}$	R	$\Delta u/$ m • s ⁻¹	$\sigma/m \cdot s^{-1}$	R	$\Delta v/$ m • s ⁻¹	$\sigma/m \cdot s^{-1}$
1	0.2	0.006	1 0.0	6 00	0 777	0 56	1 04	0.097	0 54	1 55	0.074	-0.61	1 64
1	90	0.990	1.08	0.02	0.777	0.00	1.04	0.907	0.34	1.00	0.974	-0.01	1.04
2	59	0.997	0.34	6.59	0.793	0.53	1.68	0.972	0.36	1.43	0.930	0.22	1.64
3	169	0.994	-4.37	9.17	0.623	0.63	2.30	0.963	0.35	2.04	0.978	-1.22	2.04
4	147	0.995	-4.82	9.1	0.258	0.69	2.71	0.960	0.13	1.96	0.968	-1.16	2.75
5	468	0.992	-7.94	8.33	0.817	0.53	2.35	0.971	1.09	1.97	0.972	-1.88	2.28
6	167	0.998	-1.85	7.03	0.715	0.30	1.67	0.984	-0.09	1.58	0.984	-0.15	1.61
7	104	0.998	-4.21	6.36	0.616	1.01	1.91	0.983	-0.26	1.67	0.979	-0.48	2.08
8	43	0.997	-1.98	12.25	0.460	2.10	1.59	0.954	0.72	1.62	0.818	2.35	2.03
9	67	0.995	0.99	17.5	0.313	2.02	2.90	0.919	0.25	2.32	0.804	2.88	2.77
10	249	0.993	-2.06	14.72	0.561	2.50	2.81	0.971	1.92	2.03	0.966	1.56	3.75
11	153	0.990	-5.11	13.93	0.421	0.26	3.08	0.954	1.48	2.12	0.948	-0.92	3.28
12	92	0.990	-3.08	10.28	0.669	-0.5	2.31	0.887	1.64	2.04	0.983	-1.14	2.13
年	1811	0.994	-4.08	10.82	0.663	0.85	2.53	0.973	0.84	2.04	0.965	-0.52	2.88

2009;董新宁等,2017)。冬季探测高度低、数据获取 率低,且低层更易受干扰导致数据质量略差,夏季探 测高度高、数据获取率高,数据质量好;均差($\Delta\theta$)较 小($-7.94^{\circ}\sim1.08^{\circ}$), σ 相对较小($6.36^{\circ}\sim17.50^{\circ}$)。 两者各月风速的 R 变化幅度略大,4、9 月最低但均 通过 0.01 显著性水平检验, ΔV 较小($-0.50\sim$ 2.50 m·s⁻¹), σ 为1.59~3.08 m·s⁻¹。两者各月 u分量R 较高, Δu 较小($-0.26\sim1.92$ m·s⁻¹), σ 较小($1.43\sim2.32$ m·s⁻¹)。各月 v分量 R 较高, Δv 较小($-1.88\sim2.88$ m·s⁻¹), σ 为 1.61~ 3.75 m·s⁻¹。

可见,各月两者风向、风速及 u、v 分量的一致性 均较好,WPR 的风向、v 分量总体略小于 LW,WPR 的风速、u 分量总体上略大于 LW,这一差异的原因 同 2.2 和 3.2.2 节所述。

5 结 论

(1) 与统计阈值法、测量阈值法相比,标准偏差 法的 u、v 分量标准偏差均较小,相关系数均较高,有 效样本率 95.97%可使保留的 WPR 原始观测大风 数据足够多、更具代表性。

(2) 剔除较大偏差数据后,WPR和LW大风数据的 u分量、v分量、风向、风速的相关系数分别为0.973、0.965、0.994、0.665,标准偏差分别为2.04m・s⁻¹、2.88m・s⁻¹、10.82°、2.53m・s⁻¹; 大风风向的相关性、一致性好于风速的。 (3) WPR 与 LW 的大风风向、风速基本一致, 表明 WPR 观测的水平风资料可靠性接近 LW。但 在低层差异较高层的大,尤其是 340 m 及以下高度 层更显著,降水、非降水、全部样本分别在 2980、 1900、2740 m 以下 WPR 风向值略小于 LW,在 1300、2740、1660 m 以下 WPR 风速值略大于 LW。

(4) 按降水/非降水、高度变化等不同分类对 比,WPR与LW大风数据均具有较高的一致性,尤 其是降水期间的一致性比非降水的高,表明WPR 观测数据可信、降水期间WPR水平大风数据可以 使用。

(5) WPR 与 LW 大风的相关性、资料互补性总体较好,可以用 WPR 数据的高时空分辨率弥补 LW 时空分辨率的不足。降水、非降水、全部样本的 WPR 与 LW 风向、风速、v 分量差值随高度变化均符合 e 指数或对数律递增或递减规律,但 u 分量差值不符合,需分高度段拟合;在进行 WPR 与 LW 风廓线的风向、风速等回归方程求算和资料互补时,应注意以全部样本未考虑随高度等的变化得到的单一回归方程并不具普遍适用性。

参考文献

陈添宇,陈跃,陈乾,2011. 风廓线雷达资料的误差及对祁连山地形云 风场监测的初步分析[J].干旱气象,29(3):416-422. Chen T Y, Chen Y, Chen Q,2011. Error analysis of wind profiler radar data and the primary results from the Qilian Mountain orographic cloud and wind field observation[J]. J Arid Meteor,29(3):416-422(in Chinese).

1179

- 邓闯,阮征,魏鸣,等,2012.风廓线雷达测风精度评估[J].应用气象 学报,23(5):523-533. Deng C,Ruan Z,Wei M,et al,2012. The evaluation of wind measurement accuracy by wind profile radar [J]. J Appl Meteor Sci,23(5):523-533(in Chinese).
- 董保举,张晔,徐安伦,等,2011. 风廓线雷达测风和气球测风资料对 比分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),33(S1):18-25. Dong B J,Zhang Y,Xu A L, et al,2011. Comparative analysis on wind data from wind profiler radar and balloon sounding[J]. J Yunnan Univ (Nat Sci Ed),33(S1):18-25(in Chinese).
- 董丽萍,吴蕾,王令,等,2014. 风廓线雷达组网资料初步对比分析 [J]. 气象,40(9):1145-1151. Dong L P, Wu L, Wang L, et al, 2014. Preliminary comparison research of the wind profile radar network data[J]. Meteor Mon,40(9):1145-1151(in Chinese).
- 董新宁,方德贤,周国兵,等,2017.两种垂直风廓线的对比及应用 I: 一致性分析[J]. 高原气象,36(3):788-800. Dong X N, Fang D X, Zhou G B, et al, 2017. Comparison and application of two kinds vertical wind profile data Part I: consistency analysis[J]. Plateau Meteor, 36(3):788-800(in Chinese).
- 高祝宇,阮征,魏鸣,等,2016. 风廓线雷达数据质量影响因子及处理 算法. 应用气象学报,27(2):148-159. Gao Z Y, Ruan Z, Wei M, et al, 2016. Quality factors and processing algorithm for wind profiling radar data[J]. J Appl Meteor Sci, 27(2):148-159(in Chinese).
- 何平,2006. 相控阵风廓线雷达[M]. 北京:气象出版社:1-85. He P, 2006. Phased Array Wind Profile Radar[M]. Beijing:China Meteorological Press:1-85(in Chinese).
- 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 [J]. 应用气象学报,20(4):465-470. He P, Zhu X Y, Ruan Z, et al,2009. Preliminary study on precipitation process detection using wind profiler radar[J]. J Appl Meteor Sci,20(4):465-470 (in Chinese).
- 贺文煌,周登,马超,等,2017. 对流层风廓线雷达资料质量分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),17(6):552-557. He W H, Zhou D, Ma C, et al,2017. Quality analysis of troposphere wind profile radar data[J]. J PLA Univ Sci Technol (Nat Sci Ed),17 (6):552-557(in Chinese).
- 胡明宝,2015. 风廓线雷达探测与应用[M]. 北京: 气象出版社: 1-196. Hu M B,2015. Application and Dectation of Wind Profile Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press: 1-196(in Chinese).
- 胡明宝,张鹏,2011. 风廓线雷达测量性能分析[J]. 气象科技,39(3): 315-319. Hu M B,Zhang P,2011. Measuring performance analysis of wind profiling radar[J]. Meteor Sci Technol,39(3):315-319(in Chinese).
- 黄书荣,吴蕾,马舒庆,等,2017.结合毫米波雷达提取降水条件下风 廓线雷达大气垂直速度的研究[J]. 气象学报,75(5):823-834. Huang S R,Wu L,Ma S Q,et al,2017. Extraction of atmospheric vertical velocity from observations of WPR combined with millimeter-wavelength radar during precipitation[J]. Acta Meteor Sin,75(5):823-834(in Chinese).
- 李晨光,刘淑媛,陶祖钰,2003.华南暴雨试验期间香港风廓线雷达资

料的评估[J]. 热带气象学报,19(3):269-276. Li C G, Liu S Y, Tao Z Y, 2003. Review of wind profiler data of Hongkong during IOP of HUAMEX and SCSMEX[J]. J Trop Meteor,19 (3):269-276(in Chinese).

- 李伟,刘凤琴,徐伟,等,2008. L 波段高空气象探测系统软件[J]. 气 象科技,36(2):237-239. Li W, Liu F Q, Xu W, et al,2008. Lband upper-air meteorological sounding system[J]. Meteor Sci Technol,36(2):237-239(in Chinese).
- 刘梦娟,刘舜,2016.上海组网风廓线雷达数据质量评估[J]. 气象,42 (8):962-970. Liu M J, Liu S,2016. Evaluation of wind profiler network data in Shanghai[J]. Meteor Mon,42(8):962-970(in Chinese).
- 邱粲,王栋成,李娟,等,2017. 风廓线雷达垂直速度与地面降雨关系 研究:以济南为例[J]. 海洋气象学报,37(4):91-100. Qiu C, Wang D C, Li J, et al,2017. Study on the relationship between vertical velocity of wind profiler and rainfall:a case in Jinan[J]. J Mar Meteor,37(4):91-100(in Chinese).
- 曲巧娜,盛春岩,孙青,等,2016. 风廓线雷达与 L 波段探空雷达测风 资料的对比[J]. 干旱气象,34(6):1078-1086. Qu Q N,Sheng C Y,Sun Q, et al,2016. Comparison of horizontal wind between wind profile radar and L band sounding radar [J]. J Arid Meteor,34(6):1078-1086(in Chinese).
- 阮征,高祝宇,李丰,等,2017.风廓线雷达与天气雷达风廓线数据的融合及应用[J]. 气象,43(10):1213-1223. Ruan Z,Gao Z Y,Li F,et al,2017. Integration and application of wind profiles for wind-profiling radar and weather radar[J]. Meteor Mon,43 (10):1213-1223(in Chinese).
- 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[J].干旱气象,26(3):48-52. Sun X Y, Han H, Duan H X, et al,2008. Comparative analysis on wind data from atmospheric wind profiler and balloon sounding[J]. Arid Meteor,26(3):48-52(in Chinese).
- 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[J]. 暴雨灾害,30(2):130-136. Wan R,Zhou Z M,Cui C G,et al,2011. Comparing wind profiler data with radiosonde data and analyzing[J]. Torrent Rain Dis,30(2):130-136(in Chinese).
- 王栋成,董旭光,邱粲,等,2018. 山东省境内边界层风廓线雷达观测 最大风速随高度变化研究[J]. 建筑结构学报,39(2):130-137. Wang D C, Dong X G, Qiu C, et al, 2018. Study on maximum wind speed change with height of boundary wind profile radar in Shandong[J]. J Build Struct,39(2):130-137(in Chinese).
- 王令,王国荣,古月,等,2014. 风廓线雷达垂直径向速度应用初探
 [J]. 气象,40(3):290-296. Wang L, Wang G R, Gu Y, et al, 2014. Application of wind profiler radar vertical radial velocity
 [J]. Meteor Mon,40(3):290-296(in Chinese).
- 王欣,卞林根,彭浩,等,2005. 风廓线仪系统探测试验与应用[J]. 应 用气象学报,16(5):693-698. Wang X,Bian L G,Peng H,et al, 2005. The atmospheric wind profiler and radio acoustic sounding system with its applications[J]. J Appl Meteor Sci,16(5):693-698(in Chinese).

- 王烨芳,齐久成,王威,2008. 高空气象探测测风计算方法[J]. 气象水 文海洋仪器,(3):26-28. Wang Y F,Qi J C,Wang W,2008. Computational method of anemography of upper air meteorology survey[J]. Meteor, Hydrol Mar Instrum,(3):26-28(in Chinese).
- 王烨芳,薛云朝,李清,2007. 气球轨迹法测风和风廓线雷达测风的对 比分析[J]. 气象水文海洋仪器,(3):30-34. Wang Y F, Xue Y Z,Li Q,2007. The contradistinctive analysis of the method of anemography of balloon contrail and aeolian contour line radar [J]. Meteor, Hydrol Mar Instrum,(3):30-34(in Chinese).
- 王志春,植石群,丁凌云,等,2013. 华南沿海地区车载风廓线雷达资料的分析与应用[J]. 气候与环境研究,18(2):195-202. Wang Z C,Zhi S Q,Ding L Y, et al,2013. Analysis and application of data obtained by wind profiler radar on the coast of South China [J]. Clim Environ Res,18(2):195-202(in Chinese).
- 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[J]. 气象科技,42(2):225-230. Wu L,Chen H B,Kang X, 2014. Comparison between wind profiler and L band upper-air meteorological sounding system[J]. Meteor Sci Technol,42(2): 225-230(in Chinese).
- 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
 [J]. 气象,38(6):758-763. Wu Z G,2012. Online analyses and studies of boundary wind profilers during the precipitation period[J]. Meteor Mon,38(6):758-763(in Chinese).
- 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[J]. 气象,39(3):370-376. Wu Z G,Xu T,Ding R Y,et al,2013. Comparison of wind data measured by Shanghai network wind profilers and Baoshan GFE (L)-1 sounding radar[J]. Meteor Mon,39(3):370-376(in Chinese).
- 夏文梅,陈楠,程婷,等,2008. 降水过程中多普勒天气雷达风廓线产 品特征[J]. 气象,34(10):20-26. Xia W M, Chen N, Cheng T, et al,2008. Analysis on characteristics of VWP wind product of Doppler weather radar during rainfall process[J]. Meteor Mon, 34(10):20-26(in Chinese).
- 杨梅,李玉林,单九生,等,2006. 新一代雷达风廓线与探空风廓线资 料相关分析[J]. 气象,32(6):20-24. Yang M,Li Y L,Shan J S, et al,2006. Correlation analysis between new generation radar wind profile data and sounding data[J]. Meteor Mon,32(6):20-24(in Chinese).
- 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[J]. 大气科学学报,33(5):576-581. Yang X R, Ma

S Q, Wu L, 2010. Comparison and evaluation of analysis methods of UHF wind profiler data contaminated by precipitation [J]. Trans Atmos Sci, 33(5):576-581(in Chinese).

- 姚雯,马颖,2009. 用 GPS 定位数据研究 L 波段雷达-数字探空仪系 统的测高误差[J]. 气象,35(2):88-93. Yao W, Ma Y,2009. Comparison analysis of height measurement errors of L-band radar-digital radiosonde system with GPS data[J]. Meteor Mon, 35(2):88-93(in Chinese).
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2001. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社:
 30-32. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2001. Radar Meteorology
 [M]. Beijing: China Meteorological Press: 30-32(in Chinese).
- 张寅,樊超,赵娜,等,2017.长安风廓线雷达测风资料的可靠性验证 [J]. 干旱气象,35(3):507-515. Zhang Y,Fan C,Zhao N, et al, 2017. Reliability validation of horizontal wind data derived from wind profile radar at Chang'an Station of Shaanxi[J]. J Arid Meteor,35(3):507-515(in Chinese).
- 中国气象局,2010.常规高空气象观测业务规范[M].北京:气象出版 社. China Meteorological Administration, 2010. Operational Specification for Conventional High Altitude Meteorological Observation[M]. Beijing; China Meteorological Press(in Chinese).
- 周雯嫣,王凌震,胡帆,等,2011. 干扰对边界层风廓线的影响及对策 [J]. 气象水文海洋仪器,28(2):90-95. Zhou W Y, Wang L Z, Hu F, et al,2011. Effect and countermeasures of interference on boundary layer wind-profiling[J]. Meteor, Hydrol Mar Instrume,28(2):90-95(in Chinese).
- 朱立娟,2015. 面向资料同化风廓线雷达水平风产品质量初步分析 [J]. 气象,41(12):1494-1502. Zhu L J,2015. Preliminary analysis on wind product of wind profiler for data assimilation[J]. Meteor Mon,41(12):1494-1502(in Chinese).
- Seto T H, Tabata Y, Yamamoto M K, et al, 2009. Comparison study of lower-tropospheric horizontal wind over Sumatra, Indonesia using NCEP/NCAR reanalysis, operational radiosonde, and the equatorial atmosphere radar[J]. SOLA, 5:21-24.
- Strauch R G, Weber B L, Frisch A S, et al, 1987. The precision and relative accuracy of profiler wind measurements [J]. J Atmos Oceanic Technol, 4(4):563-571.
- Weber B L, Wuertz D B, 1990. Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements [J]. J Atmos Oceanic Technol, 7 (1):157-174.
- Wuertz D B, Weber B L, Strauch R G, et al, 1988. Effects of Precipitation on UHF wind profiler measurements[J]. J Atmos Oceanic Technol, 5(3): 450-465.