

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.

风廓线雷达与天气雷达风廓线数据的融合及应用^{*}

阮 征¹ 高祝宇² 李 丰¹ 葛润生¹

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 浙江省气象局信息网络中心,杭州 310008

提 要: 风廓线雷达与多普勒天气雷达风廓线产品均可以获取高时间分辨率的高空风信息,但两种遥感测风的探测原理及时空代表性不同。在对风廓线雷达进行质量控制处理、剔除降水粒子空间不均匀分布对数据可信度影响之后,根据风廓线雷达与天气雷达风廓线数据探测原理差异,进行不同时间代表性的风廓线数据的空间匹配试验,确定与天气雷达风廓线数据进行融合的风廓线雷达数据最优时间分辨率,结果为 1 h。利用 2015 年 7 月北京南郊观象台的探空、风廓线雷达、天气雷达测风数据进行三种高空风的一致性比对,结果表明三种测风数据具有较好的一致性,均方根误差分别为 2.3 和 2.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;60、30 以及 6 min 不同时间代表性风廓线雷达数据与天气雷达风廓线数据之间的均方根误差分别为 2.6、2.8 及 3.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,60 min 数据的融合效果最佳,低空尤其明显。利用广东省 2014 年 5 月的风廓线雷达观测网以及天气雷达网风廓线数据进行了高空风场的融合分析试验,融合分析场提供了更为丰富的高空中尺度水平风场信息,低空的涡旋更加明显。

关键词: 风廓线雷达,多普勒天气雷达风廓线,高空风比对,高空风融合

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.005

Integration and Application of Wind Profiles for Wind-Profiling Radar and Weather Radar

RUAN Zheng¹ GAO Zhuyu² LI Feng¹ GE Runsheng¹

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

2 Information Network Center of Zhejiang Meteorological Service, Hangzhou 310008

Abstract: Upper-level wind data can be derived from wind-profiling radar (WPR) network and Doppler radar network. In order to apply upper-level wind data comprehensively to make full use of radar network in the field of weather analysis and numerical forecast, comparison and integration analysis of wind profiles for WPR and weather radar are conducted. After evaluating the utility and feasibility of WPR data and VAD wind profiles (VWP) by comparing with vertical profiles of horizontal winds provided from rawinsonde located in the southern suburbs of Beijing in July 2015, this paper analyzes differences of temporal and spatial representation of the two upper-level wind data. Furthermore, different periods of WPR data are compared with VWP data to decide the optimal time resolution for integration analysis of the two kinds of wind data. Then, integration analysis is conducted by merging wind component measurements for WPR network and Doppler radar network of Guangdong Province in May 2014. The results indicate that WPR and rawinsonde data are in good agreement with root mean square error (RMSE) 2.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, and VWP

^{*} 国家自然科学基金项目(41475029)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306004)和中国气象局数值预报(GRAPES)发展专项(2016)共同资助

2016 年 1 月 29 日收稿; 2017 年 5 月 6 日收修定稿

第一作者:阮征,主要从事垂直探测雷达研究, Email:ruanz@cma.gov.cn

data coincides with RMSE $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. RMSE of 60 min averaged WPR data and VWP data is the lowest by comparing with that of 30 min averaged data and 6 min averaged data, and the optimal time scale for integration analysis is 60 min. Objective integration analysis field of wind data derived from WPR network and Doppler radar network can enrich the mesoscale wind field information, especially at low level.

Key words: wind-profiling radar (WPR), wind profiles of Doppler weather radar, high-level wind comparison, high-level wind integration

引言

随着雷达遥感技术的不断发展,高空风的探测不再局限于常规探空系统(radiosonde, RS)、风廓线雷达(wind profiling radar, WPR)和多普勒天气雷达利用脉冲多普勒技术均可以获取对流层高度范围内的风场信息,且具有更高的时间分辨率和更优的自动化水平(刘黎平和葛润生, 2006; 董丽萍等, 2014; Adachi et al, 2005)。我国从 1998 年开始建设新一代天气雷达(CINRAD)观测网(许小峰, 2003), 目前已有近 180 部天气雷达投入业务运行, 极大提高了灾害性天气的监测和预警能力(李柏等, 2013; 刁秀广等, 2014; 刘维成等, 2015), 同时发展了多种风场反演技术, 丰富了高空风的获取方式, 其中基于 VAD 技术反演的 VWP 垂直风廓线可以提供降水期间雷达测站上空风随高度的变化(周海光和张沛源, 2000; 刘婷婷等, 2014; 郎需兴等, 2001; 肖艳姣等, 2015)。近年来我国风廓线雷达建设发展迅速, 目前已有 70 余部风廓线雷达投入业务运行, 尤其在华北、华东、华南等地区已经初步形成了相对密集的风廓线雷达站网, 可以获取高空风的连续变化。风廓线雷达网和天气雷达网的建设弥补了常规探空网空间布局的不足, 综合利用所获取的风廓线数据可以提供高空风的快速演变信息, 充分发挥地基雷达站网在天气监测预测中的作用。Benjamin et al (2004)利用三维变分同化技术将美国中部地区的风廓线雷达站网数据、天气雷达网 VWP 数据等融合进入了 RUC 模式, 提高了风场预报的准确率; St-James and Laroche(2005)将美国 NOAA 风廓线雷达网(NOAA Profiler Network, NPN)数据融合进入加拿大气象中心数值分析系统改善了 6 h 预报结果; 杨艳蓉等(2004)阐述了天气雷达数据的四维变分融合方法; 李华宏等(2007)利用 GRAPES-Meso 模式的三维变分同化系统对 VWP 数据进行同化, 改善了风场的初始场并且提高了 6 h 降水预报准确

率。

风廓线雷达探测波长较长, 在无降水、稳定性降水时可以获取可信度较高的水平风垂直廓线, 但在强对流降水发生时, 降水粒子落速空间分布的不均匀性造成测风数据存在较大离差。扫描天气雷达利用降水粒子为示踪物反演水平风廓线, 由于波束仰角($0.5^{\circ} \sim 19.2^{\circ}$)远小于风廓线雷达的波束仰角(75° 左右), 降水粒子落速空间分布不均匀对水平风探测的影响较小, 但无降水发生时天气雷达探测能力弱, 很难提供晴空水平风数据。融合天气雷达和风廓线雷达的垂直风廓线数据有利于丰富现有的高空风场信息, 在对两类数据的融合处理时, 需要考虑两种雷达系统测风原理及风数据取样空间的差异。

本文分析了风廓线雷达数据与天气雷达 VWP 产品的时空代表性差异, 利用 2015 年 7 月北京南郊观象台(54511 测站)探空测风数据分别与相同站点的两种雷达遥感测风数据进行比对, 通过分析比对, 确定了与 VWP 数据融合时风廓线雷达输出数据的最佳时间代表长度, 对 2014 年 5 月广东一次降水过程, 使用广东全省天气雷达站网与风廓线雷达站网质量控制处理数据进行了高空风场数据融合应用试验。

1 WPR 与 VWP 数据分析

1.1 WPR 与 VWP 产品探测原理差异

WPR 与 CINRAD 均采用脉冲多普勒技术进行探测, WPR 采用多个固定指向的垂直探测模式, 获取测站上空风随高度的连续分布, 天气雷达采用多仰角水平扫描方式对降水云进行三维结构探测。WPR 主要采用波长较长的 P 波段、L 波段, 利用大气湍流对电磁波的散射获取风随高度分布的连续变化去获取大气风场信息; CINRAD 探测散射目标物主要是降水粒子, 主要使用探测波长相对较短的 S 波段、C 波段, 大气条件合适时, 也能在边界层附近

探测到晴空回波。两种雷达获取水平风场信息的探测方式和原理不同。

图 1 给出 WPR 与业务天气雷达 VWP 数据采样原理图。WPR 通过多个固定指向(正东、正南、正西、正北、垂直)波束扫描获取径向速度信息反演水平风垂直廓线,由径向速度合成为水平风 U 和 V 分量再输出风速和风向;天气雷达以多个固定仰角进行方位扫描,使用 VAD 技术对不同方向的径向速度反演水平风垂直廓线,水平风的计算以风向、风速的方式直接给出,不同的探测方式及反演计算方法使得两种风廓线数据具有不同的时空代表性。

WPR 系统包含 5 个固定指向的波束,一个为指向天顶方向的垂直波束,倾斜波束与天顶方向夹角在 $14^\circ \sim 17^\circ$,一个探测周期内对 5 个波束依次进行采样,采用相干积累、FFT 变换、谱平均等信号处理方法提高对弱信号的探测能力,每个波束采样停留时间相对较长,获取一组完整的 5 波束径向数据需要 4~10 min。CINRAD 在 VCP21 体扫模式下依次以 9 个固定仰角进行方位扫描,仰角取值分别为 0.50, 1.45, 2.40, 3.35, 4.30, 6.00, 9.90, 14.60, 19.50, 完成一次体扫需要 6 min。WPR 与 VWP 数据的时间代表性非常接近。

WPR 水平风垂直廓线所代表的空间范围与探测高度有关:

$$D_{wpr} = 2 \times h \times \tan 14.2^\circ = 0.506 \times h \quad (1)$$

式中 h 为 WPR 探测高度,北京南郊观象台风廓线雷达(CFL-06 型)探测高度范围为 0.15~9 km,倾斜波束的水平距离范围为 0.08~4.56 km,随高度增加而增大,在均匀风场假定条件下获取三维风随高度分布。

与 WPR 固定波束指向探测方式不同,CINRAD

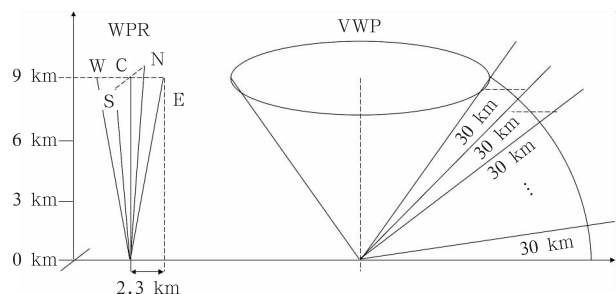


图 1 WPR 与 VWP 业务数据采样原理图

Fig. 1 Chart of sampling principle of WPR and VWP data

的 VWP 数据产品是多个仰角进行方位扫描探测降水云体(图 1),由单个仰角、某距离单元方位扫描数据进行最优化正弦波拟合求出该距离单元对应高度上的水平风向、风速,多个仰角数据构成 VWP 风廓线数据产品。拟合时所使用的方位扫描数据不少于 25 个,拟合均方根误差(RMSE)不超过 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、对称性不超过 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

天气雷达反演的垂直风廓线 VWP 产品是不同高度一定距离范围处水平风的平均拟合结果,实质是空间上的水平风平均状态,VWP 数据所代表的空间范围最大直径 D_{VWP} 接近 60 km。

我国 WPR 风输出产品与 CINRAD 的 VWP 产品时间分辨率接近,但两者空间代表性相差较大,当风局地性较强时,空间代表性差异直接影响雷达遥感测风数据的一致性,图 2 给出 2015 年 7 月 16 日 00 时(UTC,下同)北京南郊观象台 WPR 风廓线与 VWP 数据比对结果,水平风 U 分量在 1 km 高度之下的一致性较低,2 km 高度附近也存在较大偏差,超过 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,水平风 V 分量在 7 km 高度附近一致性同样较低,当 WPR 风廓线和 VWP 数据质量可靠时,这些偏差与 WPR 风廓线和 VWP 数据的代表性差异有关,7 月 16 日 00 时北京南郊观象台附近低层风场局地变化较强,虽然 WPR 与 VWP 数据在时间代表性上接近,但是随高度分布呈倒锥形的 WPR 与呈锥形分布的 VWP 反演得到的风廓线数据空间代表性上相差较大。

1.2 WPR 与 VWP 数据质量控制处理

从 WPR 与 VWP 各自的探测原理带来的测风误差对数据质量进行控制处理。WPR 与 VWP 测风数据均由径向速度反演得到,各自水平风计算过程中存在一定的误差,当波束探测空间内满足风场水平局部均匀分布时,使用垂直波束上的径向速度代表倾斜波束中的垂直速度;而实际大气尤其是降水情况下此条件难以满足 (Strauch et al, 1987; Wuertz et al, 1988; Goodrich et al, 2002; Schafer et al, 2007; Rao et al, 2008)。CINRAD 在拟合速度方位显示曲线时存在着拟合 RMSE 等影响。WPR 和 VWP 数据采样的时空代表性差异也影响彼此的一致性表达,在数据融合之前,有必要对 WPR 和 VWP 数据分别进行质量控制处理。

WPR 与 VWP 风廓线数据融合首先要解决风廓线雷达数据在降水期间的可用性问题。降水期间

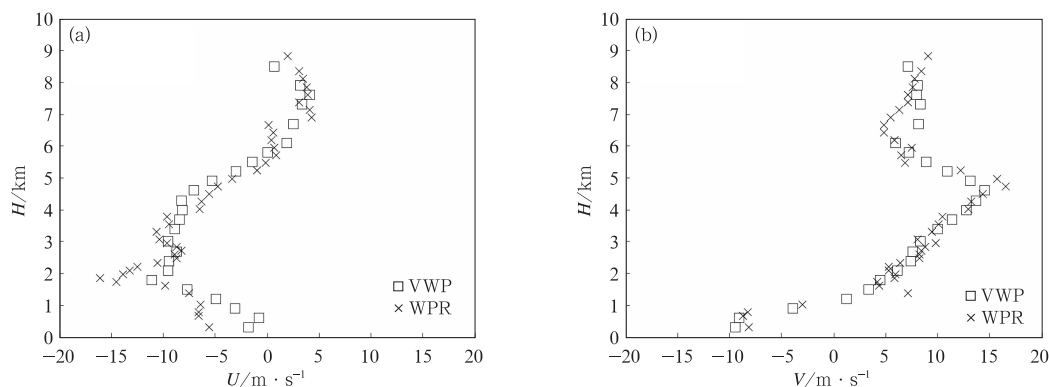


图 2 2015 年 7 月 16 日 00 时北京南郊观象台 WPR、天气雷达风廓线

(a)U 分量,(b)V 分量

Fig. 2 Vertical profile of wind component measurements for WPR (fork's) and CINRAD (square's) located in southern Beijing at 00:00 UTC 16 July 2015

(a) component U , (b) component V

风廓线雷达探测降水粒子运动,被气流化的降水粒子水平运动可以反映环境风的水平运动速度,垂直波束探测径向速度反映了降水粒子垂直运动,在五波束计算水平风时,垂直速度对水平风质量主要影响来自降水粒子垂直速度空间不均匀分布,并非是垂直速度大小的直接影响。

WPR 数据质量控制处理使用中国气象科学研究院发展的基于风廓线雷达二级 RAD 谱参数质量控制算法(高祝宇等,2016),风廓线雷达数据质量控制处理软件系统旨在剔除影响 WPR 数据质量的各种因子,特别是提降水期间 WPR 数据的可使用性和并保证数据的可信度。质量控制软件内容包括:(1)WW 算法(Lambert and Taylor,1998);(2)中值滤波;(3)空间均匀性检验;(4)时间一致性处理。其中 WW 算法和中值滤波处理对风廓线雷达数据的连续性进行检验,主要解决由于探测数据中的飞点干扰影响,空间均匀性检验对不满足均匀风场假定条件的数据给出标识,对较大的空间不均匀分布数据进行剔除,有效剔除降水粒子的空间不均匀分布和局地大气不均匀扰动对风廓线雷达数据可用性造成的影响。

多普勒天气雷达 VAD 技术反演风廓线时进行如下质量控制:(1)每个高度层数据量不得低于 25 个;(2)拟合 RMSE 不超过 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;(3)对称性不超过 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。考虑到层状云降水时返回信号速度谱宽小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、对流降水时返回信号速度谱宽一般在 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,强对流降水时返回信号速度谱宽超过 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,为减少 VWP 处理技术造成

风向、风速的不确定性,在使用 VWP 产品数据时拟合 RMSE 阈值限制在 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

我国业务风廓线雷达风产品时间分辨率与风的时间代表性相一致,包括 6、30 和 60 min 时间长度内的平均风。以下使用的 WPR、VWP 数据均为质量控制处理后数据,WPR 质量控制利用原始径向数据采用滑动处理方式,与 VWP 产品 6 min 时间分辨率相匹配,输出时间代表性分别为 6、30 和 60 min 的风廓线产品。

1.3 WPR、VWP 与探空风数据对比

图 2 给出相同时刻 VPR 与 VWP 的比对结果,两者在部分高度出现较大误差,为分析遥感测风雷达系统各自的不确定影响,应用 2015 年 6 月 9 日至 7 月 31 日北京南郊观象台的 L 波段探空测风数据分别与相同地点的 WPR 和 VWP 数据进行对比。

比对期间的 L 波段探空 1 日观测 3 次,分别在 00、06 和 12 时(UTC,下同),探空测风数据包含秒级数据和分钟级数据,秒级风廓线高度分辨率为 $4 \sim 6 \text{ m}$,分钟级风廓线高度分辨率为 300 m 左右,该站点 WPR 风廓线时间分辨率为 4 min,低模式观测时高度分辨率为 120 m ,高模式观测时高度分辨率为 240 m ,探测高度范围为 150 m 至 9 km 。CINRAD 业务 VWP 数据时间分辨率为 6 min,高度分辨率为 300 m ,探测高度范围为 300 m 至 15.2 km 。

WPR、VWP 与探空风的数据相关性分析需要考虑数据彼此之间的时空匹配,选取与探空时次最接近的 WPR、VWP 与探空测风数据进行对比,利

用秒级探空测风数据分别选取与 WPR、VWP 输出高度最为接近的高度进行数据对比。图 3 给出 2015 年 6、7 月 WPR、VWP 与 154 次探空测风数据时空相符的对比散点图及统计结果,其中图 3a、3b 为 WPR 与探空测风数据对比结果,图 3c、3d 为 VWP 与探空测风数据对比结果。WPR 与探空测风数据 U 、 V 分量的平均偏差分别为 -0.86 和 $-0.28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, VWP 与探空测风数据 U 、 V 分量平均偏差分别为 -0.43 和 $-0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明这两种雷达测风结果与常规探空风数据都具有很好的一致性。WPR、VWP 与探空风数据的 RMSE 分别为 2.3 和 2.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,国内外相关研究也给出相近的结果(Weber and Wuertz, 1990; May, 1993; 裴丽丝和邱崇践, 2013)。

从 WPR、VWP 与探空风数据的对比分析统计结果来看, WPR 和 VWP 数据具有一定的准确性,降水期间经过质量控制处理后的 WPR 数据可以与

VWP 进行融合处理, WPR 与 VWP 数据的差异主要来自两种雷达测风空间代表性的不一致。

2 WPR 与 VWP 数据匹配处理

CINRAD 的 VWP 数据产品反映了距雷达站 30 km 斜距内、不同高度的水平风,而 WPR 数据产品反映了东、西、南、北 15° 倾角范围内不同高度上的平均风,在 5 km 高度上的倾斜波束与天顶方向水平距离小于 1.5 km, WPR 与 VWP 数据空间代表性的差异较大,导致风速数据存在较大离差。WPR 与 VWP 的融合分析实际上是通过延长 WPR 数据的时间代表性,通过时空转换分析不同时间代表性的 WPR 与 VWP 数据离差大小,寻找两者最小离差确认 WPR 时间代表性,采用时间一致性处理方案计算平均风(高祝宇等, 2016)。WPR 数据采样空间、采样半径和探测周期内的采样过程均有所

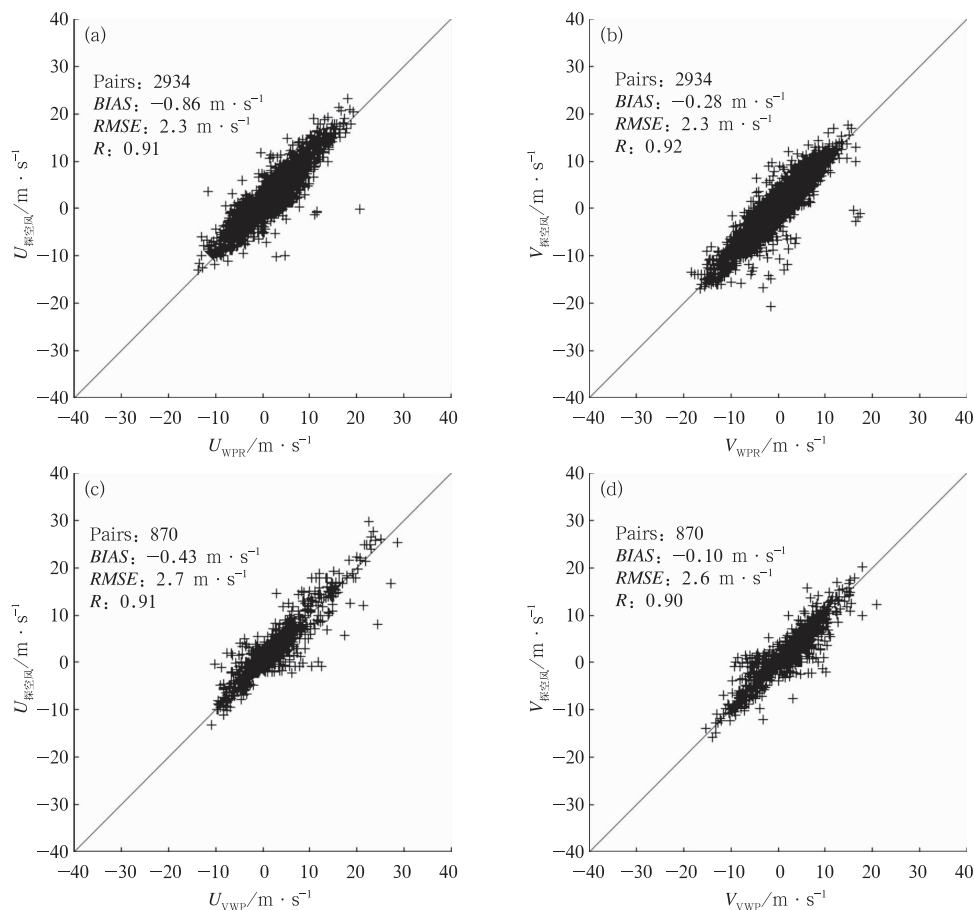


图 3 WPR(a, b)、VWP(c, d)数据与探空风数据 U (a, c)、 V (b, d)分量对比散点图

Fig. 3 Scatter diagrams of U -component (a, c) and V -component (b, d) measurements for WPR (a, b), VWP (c, d) and rawinsonde data

不同,实际上高、低空水平风的变化周期也存在差异,通过比较试验确定最佳的匹配时间以实现空间的一致性匹配,这是一种基于数据比对分析的融合方法。

使用北京南郊观象台 2015 年 6、7 月 6、30 和 60 min 一致性平均的 WPR 数据分别与 VWP 数据进行对比分析,并进行了各个距离高度数据比对以及全程高度的数据比对。

图 4 给出不同时间分辨率的 WPR 与 VWP 数据 U 、 V 分量 RMSE 随高度变化分布。从图中可以看出,6 min 的 WPR 与 VWP 数据 RMSE 随高度分布基本在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近,30 和 60 min 平均的 WPR 与 VWP 数据 RMSE 随高度增加而增大,从随高度分布情况来看,60 min 时间代表性的 WPR 与 VWP 数据 RMSE 整体上小于 6 和 30 min 的 WPR 数据,30 与 60 min 时间代表性 WPR 数据随高度分布变化趋势较为接近。低空 2 km 以下,经过 60 min 一致性平均处理的 RMSE 小于 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 4 km 高度以上时间一致性平均的改进效果相对不明显,低空 RMSE 小于高空 RMSE,一方面可能与低空风速小于高空风速有关,且低空受下垫面影响风速不如高空稳定,局地扰动强于高层;另一方面 WPR 数据低空采样空间小,与 VWP 空间采样差异最大,改变了时间长度处理后的 WPR 与 VWP 数据的空间代表性更为接近。

图 5 给出北京南郊观象台 2015 年 7 月全程高度 VWP 数据与不同时间一致性平均 WPR 数据 U 、 V 分量的散点分布以及统计结果,图 5a 与 5b、图 5c 与 5d、图 5e 与 5f 分别为 6、30 和 60 min 一致性平

均的 WPR 与 VWP 数据的对比结果,从图 5 中可以看出 U 、 V 分量 60 min 时间分辨率 WPR 与 VWP 数据的分布最为集中。图 5 中的统计结果表明两种数据的偏差都在 $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,相关系数均达到 0.85 以上,随着时间代表性增大,RMSE 依次减小,分别为 3.2、2.8 和 $2.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明 60 min 时间代表性的 WPR 与 VWP 数据一致性最为接近,可以认为 WPR 与 VWP 雷达高空风数据融合时, WPR 数据输出的最优时间长度为 60 min。

3 融合数据应用

选择天气雷达与风廓线雷达站网布局密度较大的广东省进行数据融合试验,其中包括 10 部 WPR 与 9 部 CINRAD,使用 2014 年 5 月一次降水天气过程的雷达资料进行了数据融合处理。

3.1 数据预处理

表 1 给出参加试验的 10 部 WPR 参数,其中 8 部边界层 WPR 分别位于珠海、潮州、从化、连州、龙门、罗定、新会、增城,对流层 II 型风廓线雷达位于湛江,对流层 I 型风廓线雷达位于萝岗。9 部 CINRAD 分别位于广州、河源、梅州、汕头、汕尾、韶关、深圳、阳江、湛江。在对 10 部 WPR 雷达数据、9 部 CINRAD 雷达的 VWP 产品进行了质量控制处理后,将两种雷达风廓线数据的不同距离高度处理到相同海拔高度上,使得 WPR 与 VWP 数据具备协同处理基础。

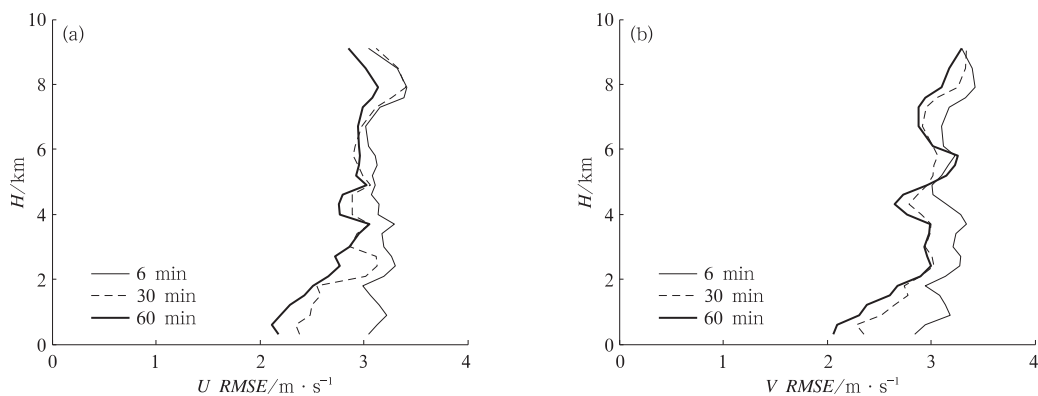


图 4 WPR 与 VWP 水平风 U (a)、 V (b)分量 RMSE 随高度变化

Fig. 4 RMSE of U -component (a) and V -component (b) measurements for WPR and VWP along with height

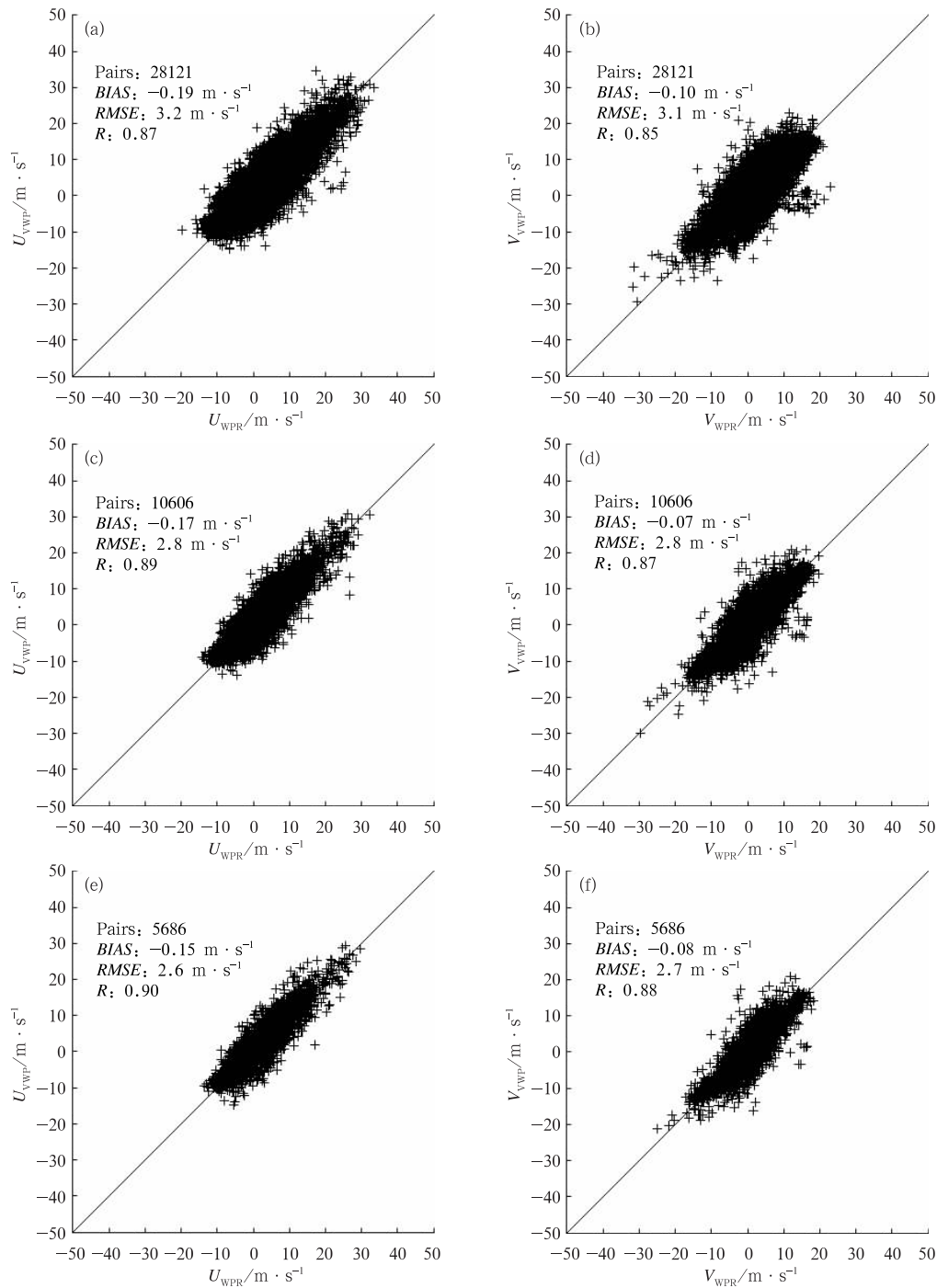


图 5 VWP 数据与不同时间平均的 WPR 数据对比结果

(a, b) 6 min, (c, d) 30 min, (e, f) 60 min

Fig. 5 Comparison of different time averaged U-component and V-component measurements for WPR and VWP data

(a, b) 6 min, (c, d) 30 min, (e, f) 60 min

3.2 融合个例

晴空时广东 WPR 站网至少有 10 测站的高空水平风数据,降水过程期间,WPR 与 VWP 联合最

多可以提供 19 个测站的水平风垂直廓线数据,将 1 h 滑动平均的 WPR 数据按照与 VWP 数据产品时间、库长相一致。融合后的 WPR 与 VWP 数据采用反距离权重插值方法形成时间分辨率为 6 min、

表 1 风廓线雷达参数
Table 1 Parameters of wind-profiling radars

型号	边界层		对流层 II		对流层 I		
波长/mm	232		674		674		
探测模式	低	高	低	高	低	中	高
探测起始高度/m	100	1050	150	2070	150	3030	4950
探测终止高度/m	2740	5970	3630	10470	3750	6630	16950
距离库数	45	83	30	36	31	16	26
距离库长/m	60	60	120	240	120	240	480

高度间隔 300 m 不同高度的中尺度水平风场,最高高度为 5000 m。

2014 年 5 月 8—11 日广东省有 31 个县(市)出现暴雨以上降雨,其中 11 个站点出现 100 mm 以上大暴雨,局部出现特大暴雨。图 6a~6d 分别为 5 月 8 日 07—10 时 3 km 高度全省雷达回波强度拼图,降水系统从西北向东南方向移动影响广东。

图 7 给出了 2014 年 5 月 8 日 07 时 1、3 和 5 km 高度 WPR、VWP、WPR&VWP 融合风场,黑色框内为融合 WPR 与 VWP 数据的广东区域高空 中尺度风场,范围为 21°~25°N、110°~117°E,输出的融合风场网格距为 20 km、时间分辨率最高可达 6 min。

整体来看,降水系统低层为偏南风、高层为西南风,风随高度顺转,有利于强降水的发生。对比图 7a 与 7c,1 km 高度客观融合分析场中的中尺度风场信息比 VWP 客观分析场丰富,VWP 客观分析场在强降水区附近为一致的南风,而融合风场中强降水区附近风场明显逆转,与中尺度强降水系统中心配合较好;3 和 5 km 融合分析场与 VWP 分析场水平风的分布结构相近,可能是高空风场较为稳定;对比图 7g 和 7i,图 7g 中 VWP 数据集中在东部,而图 7h 中 WPR 站点的风场数据恰好弥补了图 7g 中西部风场信息的不足,融合两种风场数据能够较为全面地反映整个广东省的风场信息。

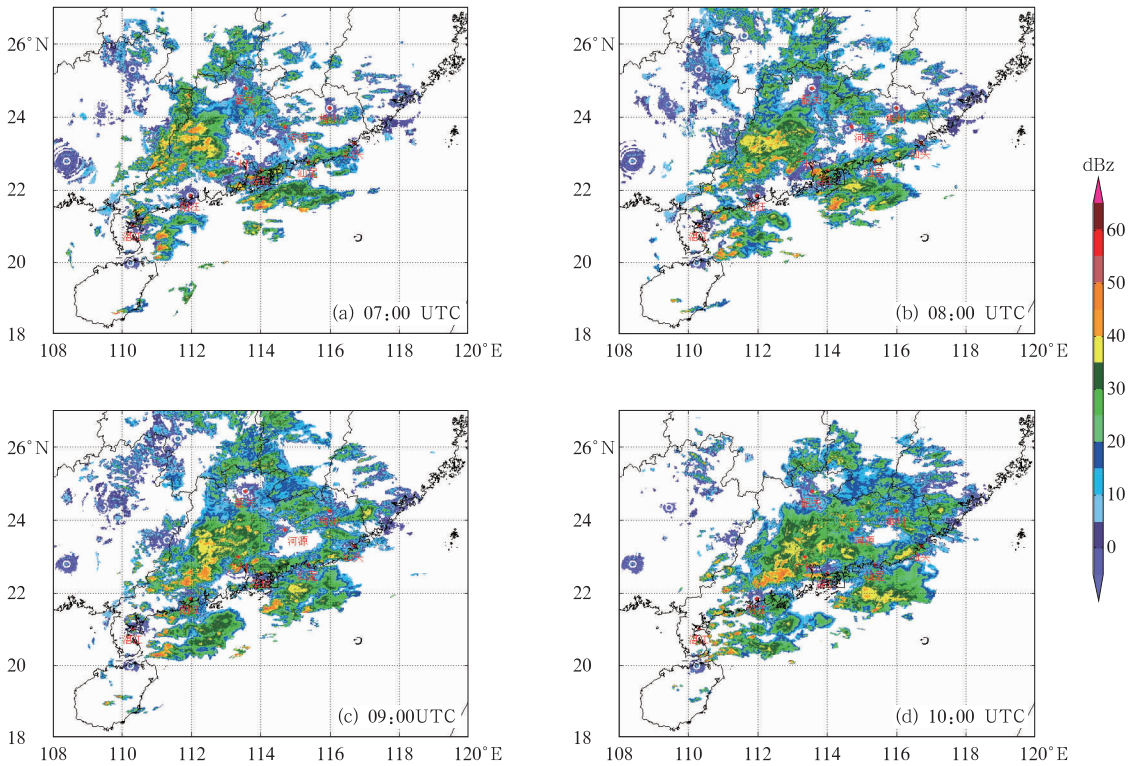


图 6 2014 年 5 月 8 日 07—10 时 3 km 高度层的广东省天气雷达反射率因子组网拼图
Fig. 6 Radar reflectivity factor mosaic for Guangdong radar network at the height of 3 km from 07:00 UTC to 10:00 UTC 8 May 2014

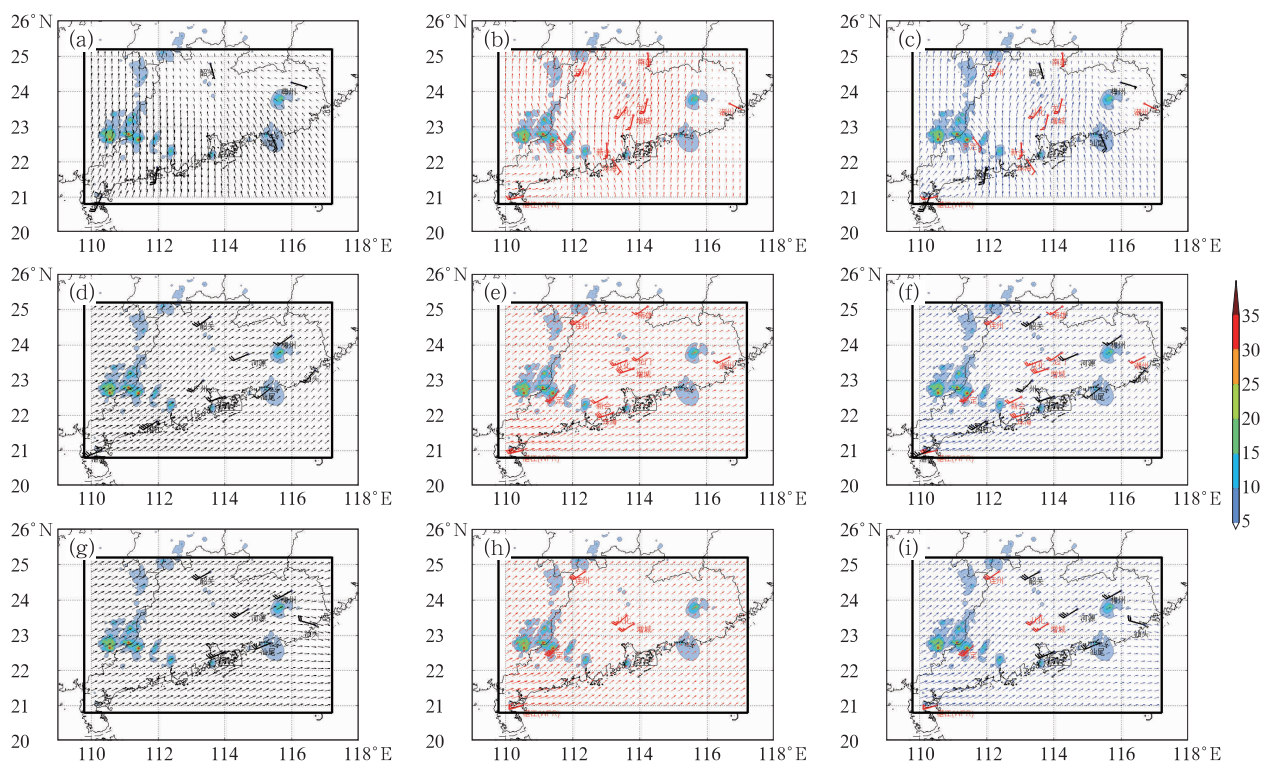


图 7 2014 年 5 月 8 日 07 时(a, b, c)1 km,(d, e, f)3 km,(g, h, i)5 km 高度风场与地面小时降水量叠加图
(a, d, g)VWP 风场,(b, e, h)WPR 风场,(c, f, i)WPR 和 VWP 融合风场
(填色为雨强,单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 7 VWP wind field (a, d, g), WPR wind field (b, e, h) and integrated wind field (c, f, i) at the height of 1 km (a, b, c), 3 km (d, e, f) and 5 km (g, h, i) with 1 h accumulated rainfall on the ground at 07:00 UTC 8 May 2014
(Shaded area is rain intensity, unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

图 8 为 2014 年 5 月 8 日 08、09 和 10 时 1.5 km 高度 VWP、WPR 数据分析场及 WPR&VWP 数据融合分析场,填色为地面 1 h 降水量,图中地面自西向东移动过程中强降水区中心雨量不断增强,最大达到 40 mm 以上。从 08、09 和 10 时 1.5 km 高度层上的风场配置上来看,VWP 数据分析场在强降水区附近以大范围偏南风为主,而 WPR&VWP 数据的融合分析场在强降水区存在明显弱的由西南风向东南风的气旋性偏转,且随强降水区的移动而移动,融合风场与强降水区的移动配合较好。

WPR&VWP 数据的客观融合分析场能够丰富中尺度风场信息,尤其在中低空最为明显。

4 结 论

本文使用 2015 年 6 和 7 月北京南郊观象台的

探空测风数据对同一地点的风廓线雷达以及天气雷达 VWP 数据进行评估对比,提出了风廓线雷达与天气雷达垂直风廓线数据的融合处理方法,利用 2014 年 5 月广东省风廓线雷达站网数据以及天气雷达站网进行了客观场的融合试验,结论如下:

(1) 风廓线雷达、天气雷达、探空高空风数据具有较好的一致性,彼此的相关性均达到 0.9 以上,风廓线雷达与探空 RMSE 为 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,天气雷达 VWP 数据与探空 RMSE 为 $2.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,风廓线雷达、天气雷达与探空测风具有良好的相关性。

(2) 对风廓线雷达数据进行质量控制处理后,降水期间风廓线雷达数据与质量控制后 VWP 数据方可进行高空风数据融合分析。

(3) 风廓线雷达与天气雷达 VWP 数据的协同处理需要考虑两者探测原理不同带来的数据时空代表性差异,6、30 和 60 min 分辨率处理后的 WPR 数

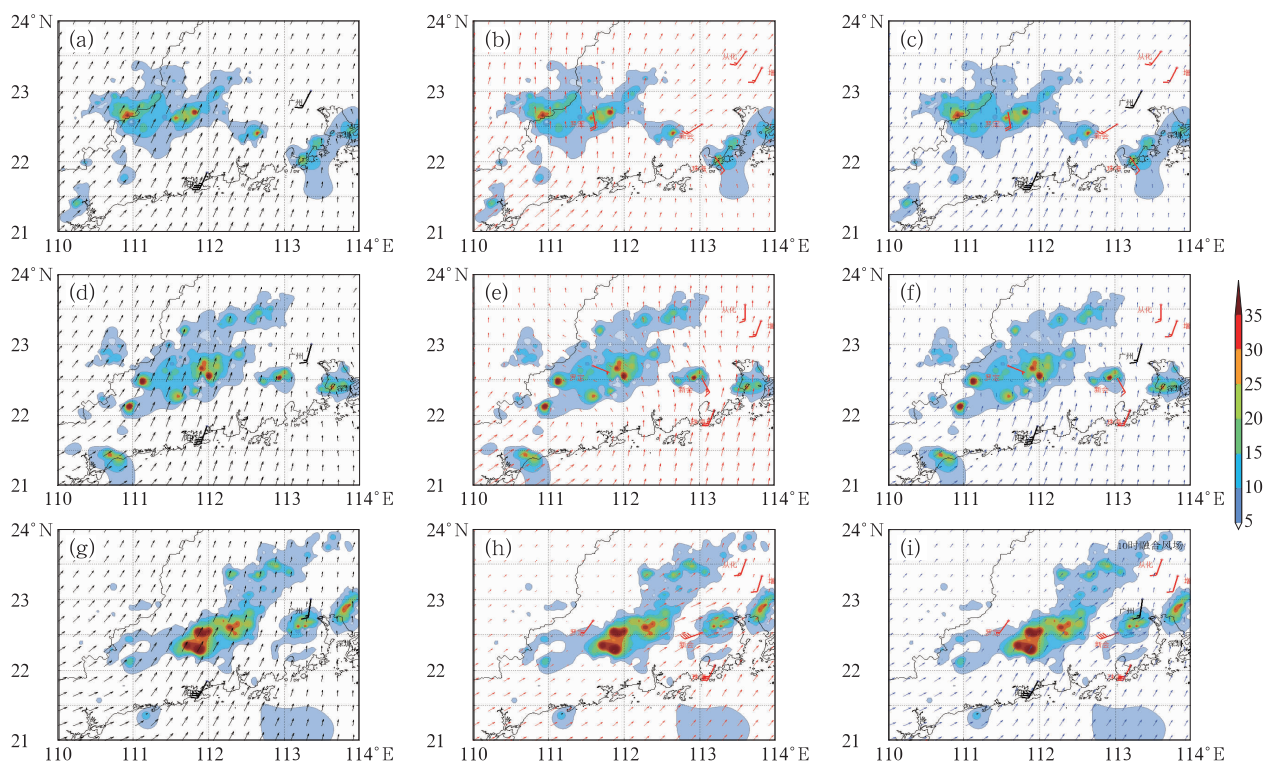


图 8 2014 年 5 月 8 日 (a, b, c) 08 时, (d, e, f) 09 时, (g, h, i) 10 时 1.5 km 高度风场与地面小时降水量叠加图
(a, d, g) VWP 风场, (b, e, h) WPR 风场, (c, f, i) WPR 和 VWP 融合风场
(填色为雨强, 单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 8 VWP wind field (a, d, g), WPR wind field (b, e, h) and integrated wind field (c, f, i)
at the height of 1.5 km with 1 h accumulated rainfall on the ground at (a, b, c) 08:00 UTC,
(d, e, f) 09:00 UTC and (g, h, i) 10:00 UTC 8 May 2014
(Shaded area is rain intensity, unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

据与 VWP 数据的 RMSE 分别为 3.2、2.8 和 2.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, WPR 与 VWP 融合处理的最优时间尺度可以选择为 60 min。

(4) 使用广东风廓线雷达站网数据以及 CIN-RAD 站网 VWP 数据进行了高空风融合分析试验, 融合算法处理后两种雷达系统水平风具有较好的时空一致性, 融合分析后高空风场对中尺度系统的描述更为清晰, 可以提升降水及强对流的短临预警能力。

(5) 风廓线雷达与天气雷达的融合分析是以天气雷达空间尺度代表性为基础的, 没有充分利用风廓线雷达信息, 风廓线雷达能够提供 4~6 min 分辨率的风廓线信息, 可以单独使用风廓线雷达网站数据监测更小尺度的风场变化。

参考文献

- 刁秀广, 万明波, 高留喜, 等, 2014. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警[J]. 气象, 40(6): 668-677.
- 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.
- 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[J]. 应用气象学报, 27(2): 148-159.
- 郎需兴, 魏鸣, 葛文忠, 等, 2001. 一种新的多普勒雷达风场反演方法[J]. 气象科学, 21(4): 417-424.
- 李柏, 古庆同, 李瑞义, 等, 2013. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J]. 气象, 39(3): 265-280.
- 李华宏, 薛纪善, 王曼, 等, 2007. 多普勒雷达风廓线的反演及变分同化试验[J]. 应用气象学报, 18(1): 50-57.
- 刘黎平, 葛润生, 2006. 中国气象科学研究院雷达气象研究 50 年[J]. 应用气象学报, 17(6): 682-689.
- 刘婷婷, 苗春生, 张亚萍, 等, 2014. 多普勒雷达风场反演技术在西南涡暴雨过程中的应用[J]. 气象, 40(12): 1530-1538.
- 刘维成, 苟尚, 傅朝, 2015. 雷达资料在高原东北侧雷电预警中的应用[J]. 气象, 41(10): 1253-1259.
- 裴丽丝, 邱崇践, 2013. 多普勒雷达 VAD 风廓线资料的质量评估[J]. 热带气象学报, 29(4): 597-606.
- 肖艳姣, 万玉发, 吴涛, 等, 2015. 基于多普勒天气雷达的两种垂直风廓线反演方法的对比分析[J]. 高原气象, 34(1): 288-297.
- 许小峰, 2003. 中国新一代多普勒天气雷达网的建设与技术应用[J]. 中国工程科学, 5(6): 7-14.

- 杨艳蓉,李柏,张沛源,2004. 多普勒雷达资料四维变分同化[J]. 应用气象学报,15(1):95-110.
- 周海光,张沛源,2000. 多种单多普勒雷达风场反演方法对比试验[J]. 气象,26(5):13-16.
- Adachi A, Kobayashi T, Gage K S, et al, 2005. Evaluation of three-beam and four-beam profiler wind measurement techniques using a five-beam wind profiler and collocated meteorological tower[J]. J Atmos Oceanic Technol, 22(8):1167-1180.
- Benjamin S G, Schwartz B E, Koch S E, et al, 2004. The value of wind profiler data in U. S. weather forecasting[J]. Bull Amer Meteor Soc, 85(12):1871-1886.
- Goodrich R K, Morse C S, Cornman L B, et al, 2002. A horizontal wind and wind confidence algorithm for Doppler wind profilers[J]. J Atmos Oceanic Technol, 19(3):257-273.
- Lambert W C, Taylor G E, 1998. Data quality assessment methods for the eastern range 915 MHz wind profiler network[R]. NASA Contractor Report NASA/CR-1998-207906. Cocoa Beach, FL: ENSCO, Inc, 49.
- May P T, 1993. Comparison of wind-profiler and radiosonde measurements in the tropics[J]. J Atmos Oceanic Technol, 10(1):122-127.
- Rao I S, Anandan V K, Reddy P N, 2008. Evaluation of DBS wind measurement technique in different beam configurations for a VHF wind profiler[J]. J Atmos Oceanic Technol, 25(12):2304-2312.
- Schafer R, Avery S K, Gage K S, et al, 2007. Wind profiler observations over the central equatorial pacific: optimizing processing to improve quality and height coverage[J]. J Atmos Oceanic Technol, 24(10):1710-1725.
- St-James J S, Laroche S, 2005. Assimilation of wind profiler data in the Canadian meteorological Centre's analysis systems[J]. J Atmos Oceanic Technol, 22(8):1181-1194.
- 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, Strauh R G, et al, 1988. Effects of precipitation on UHF wind profiler measurements[J]. J Atmos Oceanic Technol, 5(3):450-465.