

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.06.002

合肥地区风廓线雷达资料评估初探

祝颂, 邓学良*, 沈薇薇, 吴月, 金晓龙

(合肥市气象局, 安徽 合肥 230041)

摘要: 风廓线雷达作为一种新型测风雷达, 能够连续提供大气水平风场、垂直气流、大气折射率结构常数等气象要素随高度的分布, 具有时空分辨率高、连续性好和实时性好等特点, 是进行高空气象探测的重要设备。而雷达数据的质量是决定资料是否能够投入业务使用的基本前提。通过欧洲中期天气预报中心 (ECWMF) 第五代再分析资料 (ERA5) 与气球探空资料比对, 验证了ERA5再分析资料在安徽区域的适用性, 并利用其对没有气球探空资料的合肥和巢湖两地的风廓线雷达资料进行了评估。结果表明: (1) ERA5再分析资料与气球探空资料显著相关, 多项指标均表明ERA5再分析资料可以作为评估基准, 利用其对无气球探空资料区域的风廓线雷达进行评估具有可行性; (2) 大气湍流强度对风廓线雷达最大探测高度影响明显, 依季节划分最大探测高度分别为春季2.7 km、夏季4.5 km、秋季3.6 km、冬季2 km; (3) 经评估, 合肥地区风廓线雷达资料在数据相关性、偏差、均方根误差等方面 u 分量数据质量好于 v 分量。依季节划分, 数据质量由高到低排序依次是冬、夏、春、秋。其中, 春、夏、冬数据质量较好, 可以同化入数值预报模式, 而秋季 v 分量数据需要进行偏差订正以及质量控制后再使用。

关键词: 风廓线雷达; ERA5再分析资料; 探空资料; 评估方法

中图分类号: P413.2; P415.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)06-516-016

Preliminary research on evaluation of wind profile radar data in Hefei area

ZHU Song, DENG Xueliang*, SHEN Weiwei, WU Yue, JIN Xiaolong

(Hefei Meteorological Bureau, Hefei 230041, China)

Abstract: As a new type of wind measurement radar, wind profile radar can continuously provide the distribution of meteorological elements such as horizontal wind field, vertical airflow, and atmospheric refractive index structure constant with altitude. Moreover, it has the characteristics of high spatiotemporal resolution, good continuity, and real-time performance, making it an important equipment for high-altitude meteorological detection. The quality of radar data is a fundamental prerequisite for the operational use of the data. This article compares the fifth generation reanalysis data (ERA5) of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECWMF) with balloon sounding data to verify the applicability of ERA5 reanalysis data in the Anhui region, and then uses it to evaluate the wind profile radar data of Hefei and Chaohu, China, where no balloon sounding data is available. The results show that: (1) ERA5 reanalysis data is significantly correlated with balloon sounding data, and multiple indicators indicate that

基金项目: 安徽省气象局创新发展专项面上项目 (CXM202205), 安徽省气象局创新发展专项博士项目 (CXB202202)

作者简介: 祝颂 (1986-), 安徽合肥人, 硕士, 工程师, 主要从事气象装备与数据方面的研究。E-mail: zephyrsong@aliyun.com

收稿日期: 2023-02-06; 修改日期: 2023-04-11

*通信作者。E-mail: dengxueliang9989@aliyun.com

ERA5 reanalysis data can be used as an evaluation benchmark, and is feasible for evaluating wind profile radar data in areas without balloon sounding data. (2) The intensity of atmospheric turbulence has a significant impact on the maximum detection height of wind profile radar. According to seasons, the maximum detection heights are 2.7 km in spring, 4.5 km in summer, 3.6 km in autumn, and 2 km in winter. (3) The quality of the u component wind profile radar data in Hefei area is better than that of the v component in terms of data correlation, average deviation and root mean square error. Seasonally, the data quality is ranked as winter, summer, spring, and autumn in descending order. Among them, the data of spring, summer and winter are of good quality and can be assimilated into the numerical forecast model, while the autumn v component data needs to undergo deviation correction and quality control before application.

Key words: wind profile radar; ERA5 reanalysis data; sounding data; evaluation method

0 引言

近年来,在全球气候变化大背景下,局地性、突发性气象灾害呈现多发频发的趋势,具有难预防的特点,造成巨大的灾害损失,越来越受到社会各界的关注^[1]。合肥地处安徽中部江淮分水岭地区,海拔在100~300 m之间,年均降水量900~1000 mm,雨量相对充沛;受冷暖空气频繁交汇的影响,降水时空分布不均,年内与年际变化很大,旱涝等气候灾害频繁^[2-5]。当前,合肥市已发展成为人口超900万,地区生产总值超万亿的特大城市。城市规模的不断扩大对城市安全运行保障工作提出了更高的要求^[6-9]。气象部门一直致力于通过提高预报准确率和预警时效来降低气象灾害以及次生灾害造成的损失,而高效、精密的综合观测网络是做好这一工作的前提。中国气象局在《综合气象观测业务发展“十四五”规划》中提出要完善立体精密的天气观测网,以支撑大气圈观测的核心业务能力稳步提升,而风廓线雷达则是构成这一精密观测网络的重要探测设备之一。目前,我国共建成百余部风廓线雷达,风廓线雷达技术已趋于成熟并已初步建成风廓线雷达示范站网,但站点布设少、局部东密西疏等问题突出,所以未来还将在天气预报敏感区、灾害性天气频发区新建风廓线雷达,提升站网布局密度。

风廓线雷达作为一种能够实时、连续监测大气三维风场信息的高空大气探测设备,在探测精度、垂直分辨率和探测时间间隔等方面具有常规大气探测设备所无法比拟的优势。在气象业务、气象研究以及紧急突发事件保障、防灾减灾等方面都可以发挥重要作用。特别是随着风廓线雷达组网技术的发展,雷达对天气系统的探测能力不断增强,风廓线雷达资料也更多地被应用到预报业务中^[10,11],如金巍等^[12]借助风廓线雷达资料研究了一次大暴雨过程中低空急流演变与强降水的关系,张舒婷等^[13]利用风廓线雷达资料对北京地区边界层日变化特征进行了分析研究。已有的研究表明同化质量较好的雷达资料融入数值模式,才能发挥更有效的作用。为更好地在预报业务中应用风廓线雷达探测资料,雷达原始数据质量的评估十分必要,高质量的风廓线雷达资料对于资料分析、同化应用等十分重要^[14,15]。何婧等^[16]对2012年以来南京市江宁区边界层风廓线雷达每6 min的风场资料质量进行了评估,并对其在暴雨、大雾以及风切变等灾害性天气监测的应用进行了探讨。董保举等^[17]利用大理国家气候观象台风廓线雷达对青藏高原东南缘复杂地形下风廓线雷达的探测能力及风廓线雷达资料进行了评估,并研究分析了风场结构特征、变化规律及其在暴雨天气监测

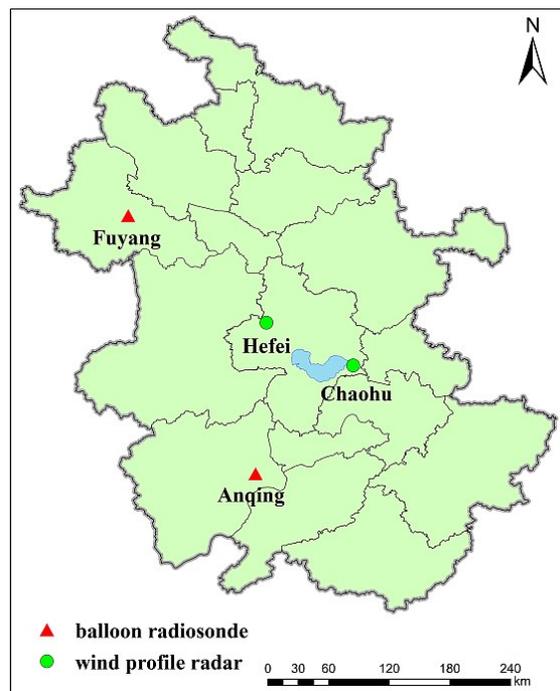
中的应用。

总体而言,已有研究多基于风廓线与气球探空的对比验证分析^[18-21],而对于无气球探空资料且受空域限制无法开展无人机观测的风廓线雷达站点如何验证研究并不充分,目前还缺乏有效的评估方法。而我省现已建成风廓线雷达站的合肥、芜湖、铜陵以及亳州等地,均面临这一问题,如何评估这些站点风廓线雷达的数据质量,是使用这些雷达资料前需要解决的首要问题。本文从选取适用范围更广的评估基准资料角度出发,对比分析了气球探空资料与欧洲中期天气预报中心第5代再分析资料(ERA5),探究ERA5资料在安徽地区的适用性,得出适合无气球探空资料风廓线雷达站点的数据评估方法,以便为其他类型气象垂直探测装备数据质量评估提供参考。

1 资料和方法

1.1 风廓线雷达资料

进行水平风场数据质量评估的两部风廓线雷达分别位于合肥(117°3' E, 31°57' N)与巢湖(117°49' E, 31°34' N),安徽省两个国家级高空观测站分别位于安庆(116°58' E, 30°37' N)和阜阳(115°50' E, 32°54' N)。这四个地点的分布情况见图1。合肥与巢湖的2部风廓线雷达均为四创电子股份有限公司生产的L波段对流层风廓线雷达,型号为WP6000-LT,雷达基本性能信息见表1。时间分辨率为6 min,高度分辨率为60 m/120 m,风速分辨率0.2 m/s,风向分辨率0.5°。



注:此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图[审图号:GS(2019)3333号]绘制,底图无修改

图1 气球探空站与风廓线雷达站点分布

Fig. 1 Distribution of balloon radiosondes and wind profile radar stations

朱立娟^[22]的工作指出风廓线雷达小时平均数据能够滤除大气湍流瞬时的波动,而这部分信息也恰恰是资料同化中无法反映的代表性误差,数据质量评估选取小时平均采样数据相对更加恰当,所以本研究选取

2020—2021 年的小时平均数据进行质量评估。

表 1 风廓线雷达性能指标

Table 1 Wind profile radar performance index

Main indicators	Parameters
Frequency/MHz	1280 ± 0.5
Detection distance (MAX)/km	≥ 6
Detection distance (MIN)/m	≤ 150
Horizontal wind direction/(°)	0~360
Horizontal wind speed/(m·s ⁻¹)	0~60
Vertical speed/(m·s ⁻¹)	-20~+20
Height resolution/m	60/120 (Low mode) 120/240 (Pulse compression)
Temporal resolution/min	6
Wind speed resolution/(m·s ⁻¹)	0.2
Wind direction resolution/(°)	0.5
Sensitivity/dBm	-150

1.2 ERA5 再分析资料

关于区域尺度上再分析资料的适用性, 李爱莲等^[23]通过对多种再分析资料的比较, 发现 ERA5 的适用性总体上要优于其他再分析资料, 尤其地面和对流层低层的相对湿度、风场提高更为明显。所以, ERA5 作为评估风廓线雷达数据质量的基准资料是合适的。

ERA5 是欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 对从 1950 年 1 月至今全球气候的第五代大气再分析数据集, 数据集特性见表 2。它将模型数据与来自世界各地的观测数据结合起来, 形成一个全球完整的、一致的数据集, 其水平分辨率为 0.25° × 0.25°, 观测频率为 1 h^[24-26]。ERA5 再分析资料按等压层分组共可分为 37 组, 本文选取其中与风廓线雷达探测高度最接近的 14 个等压层小时数据进行匹配及对比, 分别为 550、600、650、700、750、775、800、825、850、875、900、925、950、975 hPa, 高度匹配误差在 5 m 以内。数据时间段选取 2018—2021 年, 共计 4 年。

表 2 ERA5 再分析资料数据简介

Table 2 Description of ERA5 reanalysis data

Main indicators	Parameters
Data type	Gridded
Projection mode	Regular latitude-longitude grid
Horizontal coverage	Global
Horizontal resolution/(°)	0.25 × 0.25
Vertical coverage/hPa	1000~1
Vertical resolution	37 pressure levels
Temporal coverage	1959 to present
Temporal resolution	Hourly

1.3 探空资料

探空资料是一种直接探测资料,适合作为基准资料用以评估ERA5再分析资料在垂直方向上的数据质量。探空资料由气球携带L波段探空雷达升空探测获取,主要探测要素包括高空风向、风速、温度、气压、湿度等。具有自动化程度高、探测精度高、采样速度快、抗干扰能力强、能耗少、体积小等特点^[27-29]。探空气球每天释放两次,分别在北京时间07:15和19:15。阜阳站与安庆站是我省仅有的两个探空站,探空资料选取这两个气球探空站2018—2021年共计4年的秒级数据,所有资料均经过质控。为方便比较,通过“L波段数据处理软件”处理为50 m等间隔高度层数据。

1.4 方法

为方便比较,需要将风廓线雷达资料、ERA5再分析资料以及探空资料进行数据一致性处理^[30]。首先是时间一致性处理,因为风廓线雷达资料和探空资料都采用北京时,所以将ERA5再分析资料的世界时转换为北京时比较方便。其次是空间一致性处理,因为国家级探空站和风廓线雷达站都不在ERA5再分析资料的网格点上,所以不能直接用网格值进行评估,需要采用双线性插值法计算出对应经纬度的数值。最后是高度一致性处理,先将距海平面高度转换为距地高度,然后在垂直方向线性插值到风廓线雷达资料各个高度层上。另外ERA5再分析资料风场数据为矢量数据,用 u 、 v 分量表示,所以探空数据的风向风速也需要转换为 u 、 v 分量进行比较。

完成资料一致性处理后,先计算分析ERA5再分析资料与气球探空资料 u 分量、 v 分量的相关系数、偏差和均方根误差^[31-33],确认ERA5再分析资料的适用性后,再计算风廓线雷达资料与ERA5再分析资料的 u 、 v 分量的相关系数、偏差和均方根误差来评估数据质量,其流程如图2所示。

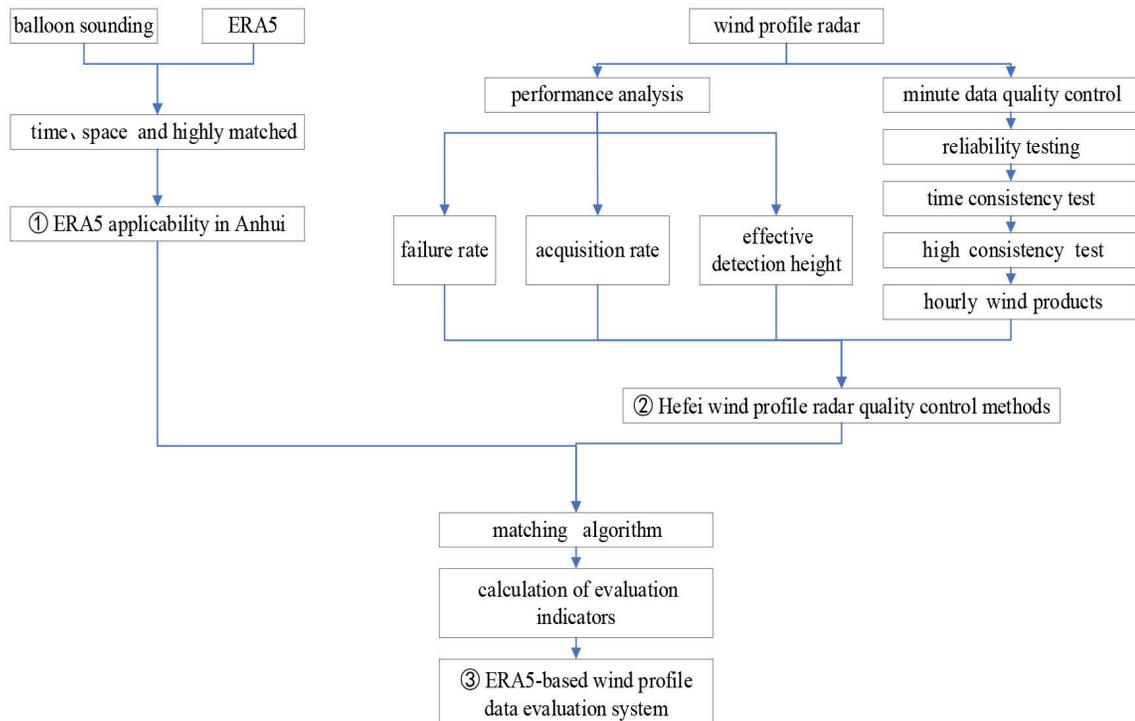


图2 雷达资料评估流程图

Fig. 2 Flowchart for radar data evaluation

为量化评估结果,采用相关系数 R 、偏差 S_{Bia} 和均方根误差 E_{RMS} 等指标进行定量评价和分析。相关系数 R 越接近1或-1,变量相关程度越强。偏差 S_{Bia} 正值代表高估,负值代表低估。均方根误差 E_{RMS} 可以表明样本的离散程度。具体计算公式分别为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{wpr}} - \overline{X_{\text{wpr}}})(X_{\text{re}} - \overline{X_{\text{re}}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{\text{wpr}} - \overline{X_{\text{wpr}}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{\text{re}} - \overline{X_{\text{re}}})^2}}, \quad (1)$$

$$S_{\text{Bia}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{wpr}} - X_{\text{re}}), \quad (2)$$

$$E_{\text{RMS}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{wpr}} - X_{\text{re}})^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

式中 X_{wpr} 为风廓线雷达观测值, $\overline{X_{\text{wpr}}}$ 为风廓线雷达观测样本平均值, X_{re} 为探空观测ERA5再分析资料值, $\overline{X_{\text{re}}}$ 为探空观测ERA5分析资料平均值, N 为样本数。

2 ERA5再分析资料适用性验证

首先,探空观测频度低、时间短,探空站每天仅进行2次常规探测,而风廓线雷达可以24 h连续观测,两种资料的时间匹配度非常低。其次,探空站的数量过于稀少,覆盖范围有限,整个安徽省仅有2处探空观测站。从图1中可以看到,探空站和此次评估的两部风廓线雷达所在站点间的直线距离都超过了150 km,若风廓线雷达资料与不同址的探空观测资料进行对比,干扰因素太多,探空资料的数据已经无法代表风廓线雷达站上空的大气状况,所以直接使用探空观测资料与风廓线雷达资料进行对比是不妥的。探空资料适用范围的局限使得远离探空站的多部风廓线雷达资料质量都无法进行评估。而ERA5再分析资料覆盖范围广、时空分辨率高,适合作为质量评估的基准资料^[34]。

为了验证ERA5再分析资料的适用性,首先需要完成ERA5再分析资料与探空资料的对比。通过双线性插值法计算出ERA5再分析资料在安庆和阜阳两个国家级探空站所在位置的数据再与探空资料的数据进行对比即可得出结论。图3为阜阳站和安庆站探空资料与ERA5再分析资料对比时各项指标的垂直廓线分布。从图3(a)和图3(b)可以看出,两套数据的 u 、 v 分量在两站均表现出较好的一致性,样本总体相关系数基本都达到了0.9以上,大部分高度甚至达到了0.95以上。除了安庆站925 hPa以下的区段外,其他大部分区段的 u 分量的相关系数都高于 v 分量,说明纬向风的相关性好于经向风。两站的相关系数基本上随高度升高而逐渐增大,说明ERA5再分析资料在低层所受干扰较多,中高层资料的适用性更佳。总体而言,ERA5再分析资料与气球探空资料相关性极好。从图3(c)和图3(d)来看,阜阳站风场的 u 分量偏差值在 ± 0.2 m/s以内; v 分量在850 hPa以下为正偏差,850 hPa以上为负偏差,且随着高度升高,偏差逐渐增大,在550 hPa时达到最大负偏差值-0.42 m/s。以上说明阜阳站ERA5再分析资料的 u 分量数据质量较好, v 分量风速相比气球探空偏小。安庆站风场的 u 分量情况与阜阳类似,偏差值在正、负值区均有分布,偏差值在 ± 0.25 m/s以内。 v 分量偏差随高度增加逐渐减小并趋近于0。从图中可以看出,安庆、阜阳两站 v 分量变化趋势从825 hPa高度开始呈现差异性。根据涂治招等^[35]的研究成果,空气温度、湿度对湍流散射回波信号的强弱有直接影响, v 分量是经向风,而经向风对温度、湿度的影响比纬向风要大。所以据此推测, v 分量的变

化趋势不同应该与两地气候差异有关。从图 3 (e) 和图 3 (f) 来看, 高度在 900 hPa 以下时, 阜阳、安庆两个站的 u 、 v 分量的均方根误差均有变小的趋势, 其中安庆的变幅较阜阳更大, 达到约 0.6 m/s。900 hPa 以上高度时, u 、 v 分量的均方差均呈现出一致性增大的趋势, 当高度达到 550 hPa 时均方差也达到最大, 分别为阜阳站的 1.77 m/s (u)、1.86 m/s (v) 和安庆站的 1.87 m/s (u)、1.82 m/s (v)。

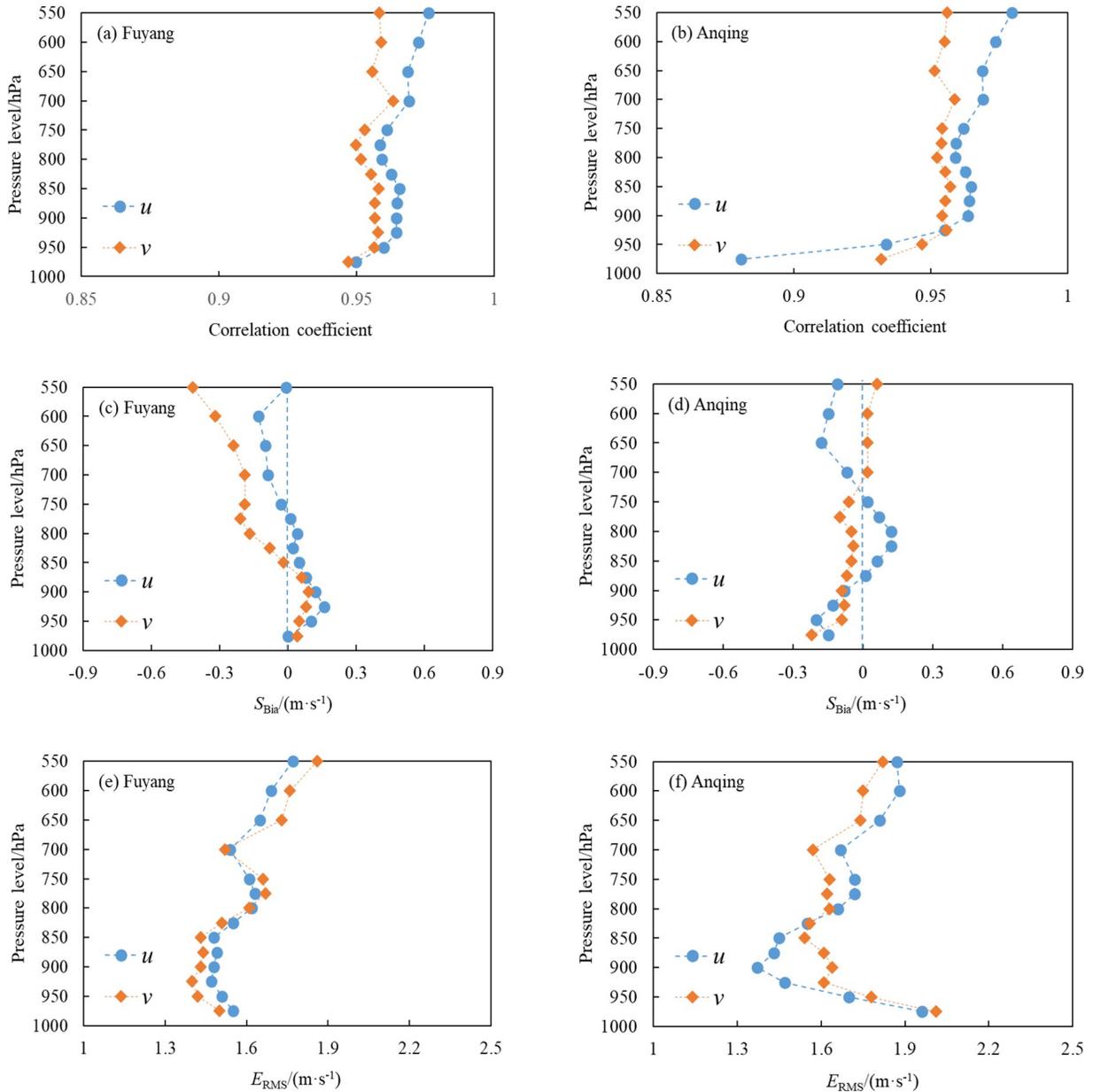


图 3 阜阳、安庆气球探空和 ERA5 再分析资料垂直廓线分布图对比。(a)、(b) 相关系数; (c)、(d) 偏差; (e)、(f) 均方根误差

Fig. 3 Comparison of vertical profile distribution of Fuyang and Anqing balloon soundings and ERA5 data.

(a), (b) Correlation coefficient; (c), (d) deviation (S_{Bia}); (e), (f) root mean square error (E_{RMS})

根据表 3 统计结果可以看出, 阜阳站 u 分量偏差好于 v 分量, 安庆站 u 分量均方根误差略好于 v 分量。

表 3 阜阳、安庆探空站与 ERA5 再分析资料统计值对比

Table 3 Comparison of statistical values between Fuyang and Anqing sounding stations and ERA5 reanalysis data

Component	Fuyang			Anqing		
	R	$S_{Bias}/(m \cdot s^{-1})$	$E_{RMS}/(m \cdot s^{-1})$	R	$S_{Bias}/(m \cdot s^{-1})$	$E_{RMS}/(m \cdot s^{-1})$
u	0.96	0.02	1.57	0.96	-0.05	1.66
v	0.96	-0.11	1.57	0.95	-0.05	1.68

总体看来, 两种资料在各个高度廓线上均呈现比较一致的走势, 数据相关性很好, 数据样本偏差非常小且离散度小。因此使用 ERA5 再分析资料对风廓线雷达资料进行质量评估是可行的, 这为没有气球探空资料的风廓线站点开展资料质量评估提供了一种方法。

3 风廓线雷达资料质量评估

3.1 水平风资料获取率

风廓线雷达的数据获取率是雷达探测性能的重要指标之一。数据获取率定义为雷达在每一层高度上获得的通过置信度检验的数据量与应采集到的全部数据量的比值^[36]。两部雷达探测资料在 2020 年和 2021 年的平均获取率按月份垂直分布如图 4 所示。从图中可以看出, 两部雷达的探测性能基本一致。整体上获

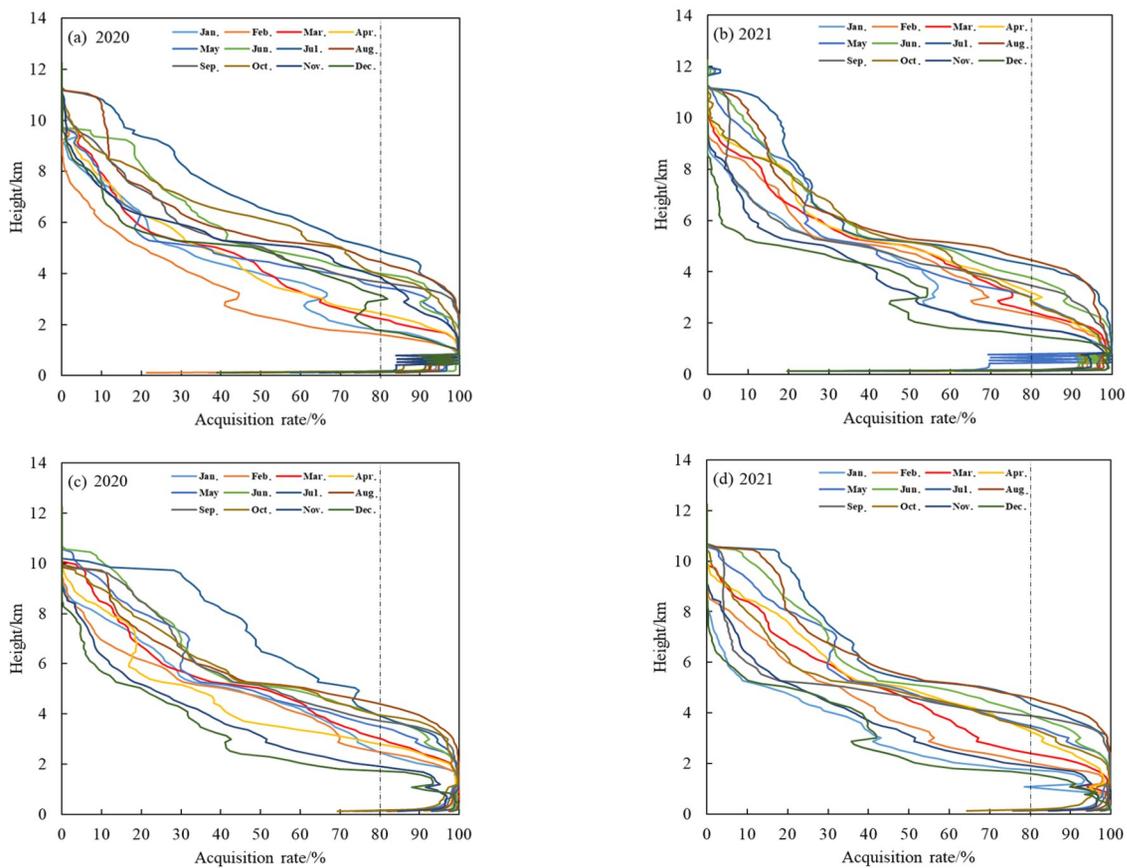


图 4 风廓线雷达水平风数据获取率随高度分布图。(a)、(b) 合肥站; (c)、(d) 巢湖站;

Fig. 4 Distribution of wind profile radar horizontal wind data acquisition rate with height.

(a), (b) Hefei station; (c), (d) Chaohu station

率在0~3 km为大值区,获取率普遍接近1;随着高度增加,探测能力逐渐减弱,获取率慢慢减小。雷达水平资料平均获取率在3 km以下保持在0.8以上,3 km以后迅速降低。根据何平等^[37]相关研究,数据获取率高于0.8的高度层所获得的资料相对可信。因此,数据获取率在0.8以上的高度为有效探测高度。

两部雷达有效探测高度按月分布情况如图5所示。从季节上来看,夏季(6、7、8月)有效探测高度最高,获取率保持在0.8以上的高度能达到4.5 km。而冬季(1、2、12月)的有效探测高度最低,获取率保持在0.8以上的高度只有2 km左右。春季(3、4、5月)和秋季(9、10、11月)最大有效探测高度介于冬季和夏季之间,分别为2.7 km和3.6 km。根据刘晨等^[38]以及康雪等^[39]的研究,造成这一现象的原因是由于大气折射率结构常数 C_n^2 随高度分布存在明显的季节变化。夏季温度较高,天气过程频发,大气湍流强盛,高层水汽含量较多,湿度较大,为雷达波提供了较多的反射物, C_n^2 较大。冬季温度低,大气层结较为均一稳定,气候干燥,湿度较小, C_n^2 较小。 C_n^2 与湍流散射回波信号的强弱成正比,而回波信号强弱与雷达探测能力直接相关,所以风廓线雷达的有效探测高度会随季节变化。

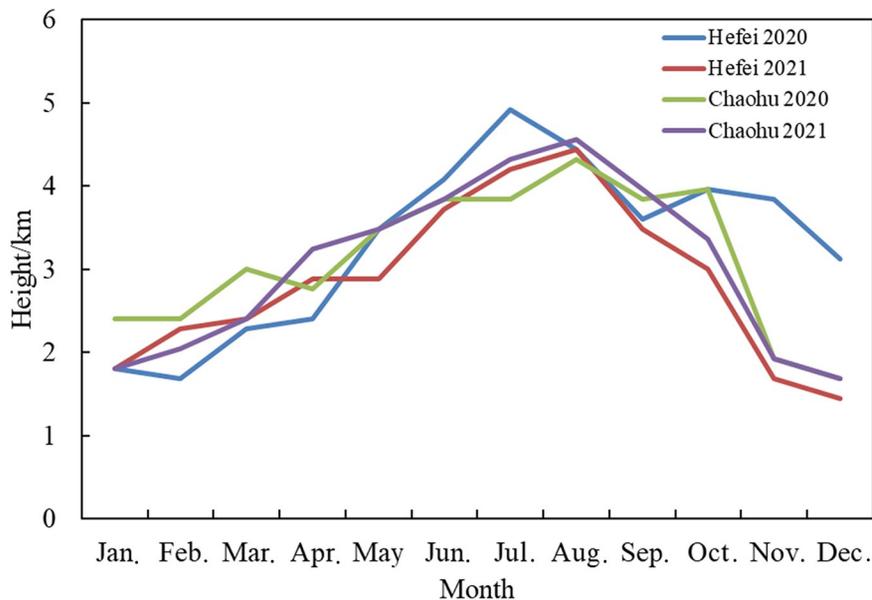


图5 有效探测高度按月分布

Fig. 5 Distribution of effective detection altitude by month

3.2 基于ERA5再分析资料的风廓线水平风误差特征

3.2.1 相关系数

由图6可以看出,1000 hPa高度时,风廓线雷达因受近地干扰的影响,风场 u 、 v 分量相关系数均相对偏小,当高度达到975 hPa后,近地干扰影响消除,相关系数迅速提升^[39]。春季,不同高度的合肥风场 u 、 v 分量相关系数差别不大,750~975 hPa高度时相关系数随高度变化在0.8~0.9之间波动。巢湖风场 u 分量相关系数在900~975 hPa高度时是0.90~0.95,750~900 hPa高度时为0.80~0.88;风场 v 分量相关系数在900~975 hPa高度时是0.80~0.82,750~900 hPa高度时为0.77~0.79。夏季,合肥风场 u 、 v 分量情况与春季类似,保持在0.8~0.9之间波动。巢湖风场 u 、 v 分量相关系数在夏季差别较大。 u 分量相关系数在除近地面高度外的各高度层次均大于0.9,而 v 分量相关系数在0.74~0.79之间。秋季,合肥风场 u 、 v 分量相关系数先随

高度升高而逐渐减小, u 分量相关系数在 900 hPa 高度时达到最小值 0.77, v 分量相关系数在 850 hPa 高度时达到最小值 0.70。之后 u 、 v 分量相关系数又随高度升高逐渐增大。巢湖风场 u 分量相关系数随高度升高从 0.93 缓慢减小至 0.87。 v 分量相关系数在 875~975 hPa 高度区间随高度升高从 0.84 显著减小至 0.71, 随后减小幅度放缓, 最终维持在 750 hPa 高度达到最小值 0.67。冬季, 合肥风场 u 、 v 分量和巢湖风场 u 分量相关系数在除近地面高度的各高度层次均能达到 0.9 以上。巢湖风场 v 分量相关系数在 800~1000 hPa 高度时随高度上升逐渐增大至 0.93 而后又逐渐减小至 0.90。

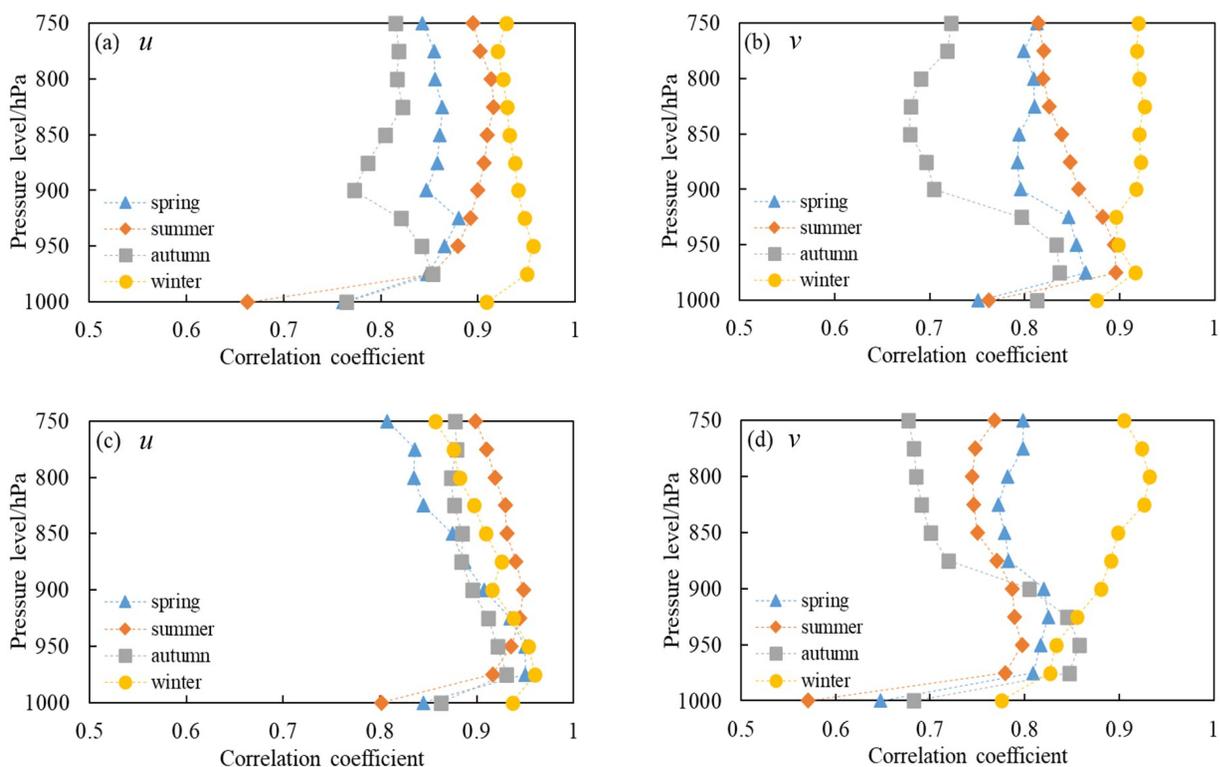


图 6 风廓线雷达资料与 ERA5 再分析资料相关系数随气压高度分布图。(a)、(b) 合肥站; (c)、(d) 巢湖站

Fig. 6 Distribution of correlation coefficients between wind profile radar measurements and reanalysis data with pressure level in different seasons. (a), (b) Hefei station; (c), (d) Chaohu station

3.2.2 偏差

图 7 (a) 和图 7 (c) 为合肥与巢湖两站不同季节风场 u 分量与 ERA5 再分析资料偏差随高度的分布。春、夏两季, 两站风廓线雷达资料相较于 ERA5 再分析资料在各高度层基本都呈现正偏差。高度在 975 hPa 及以上时, 偏差值在 0~1 m/s 之间。高度在 975 hPa 高度及以下时, 合肥雷达资料春季偏差值增长明显, 达到 2.06 m/s。秋季时, 两部风廓线雷达资料与 ERA5 再分析资料的偏差值随高度增加均呈现从正偏差向负偏差转变的趋势, 合肥风廓线雷达偏差最大值出现在 800 hPa 高度, 为 -1.14 m/s, 巢湖风廓线雷达的偏差最大值出现在 775 hPa 高度, 为 -1.70 m/s。冬季时, 合肥、巢湖风廓线雷达的偏差值均围绕 0 波动, 幅度在 ± 1 m/s。

图 7 (b) 和图 7 (d) 为合肥与巢湖两站不同季节风场 v 分量偏差随高度的分布。两部风廓线雷达与 ERA5 再分析资料偏差值在各季节变化趋势基本一致。春季均为正偏差, 合肥 850 hPa 高度以下偏差值随高度逐

渐增大, 850 hPa 高度以上又逐渐减小, 最大偏差为 1.48 m/s; 巢湖偏差值变化趋势与合肥相似, 最大偏差在 825 hPa 高度, 为 1.62 m/s。夏季两站的 v 分量偏差大部分为负偏差, 且随着高度增高逐渐增大, 最大偏差值均在 750 hPa, 合肥为 -0.94 m/s, 巢湖为 -1.10 m/s。秋季同样为负偏差, 且随着高度增高逐渐增大, 750 hPa 高度时合肥偏差值为 -3.0 m/s, 巢湖偏差值为 -3.5 m/s。冬季, 两部风廓线雷达偏差值随高度增加逐渐从正偏差向负偏差变化, 变幅在 ± 1 m/s。

两部风廓线雷达资料相对于 ERA5 再分析资料在春、夏、冬三季的偏差大部分控制在 ± 1 m/s 以内, 数据质量比较好。秋季表现出相对较大的负偏差, 尤其是 v 分量。通过对比同地同期微波辐射计湿度廓线数据, 发现秋季大气相对湿度最低, 750 hPa 高度大气相对湿度约为 10%; 而数据质量最好的冬季, 750 hPa 高度大气相对湿度约为 48%。所以秋季数据偏差较大的原因可能源于气候条件的影响。因此在秋季使用风廓线雷达资料时应先进行修正, 再进行同化效果会更好。另外从图中可以看出, 春、秋两季偏差分布在正、负两个区间, 推测可能与春、秋季大气颗粒物类别不同有关。受经向风的影响, 合肥市春季易受到来自北方的沙尘侵袭, 沙尘颗粒为粗颗粒物, 而秋季以细颗粒物为主。这两类颗粒物对电磁波反射率的影响不同。

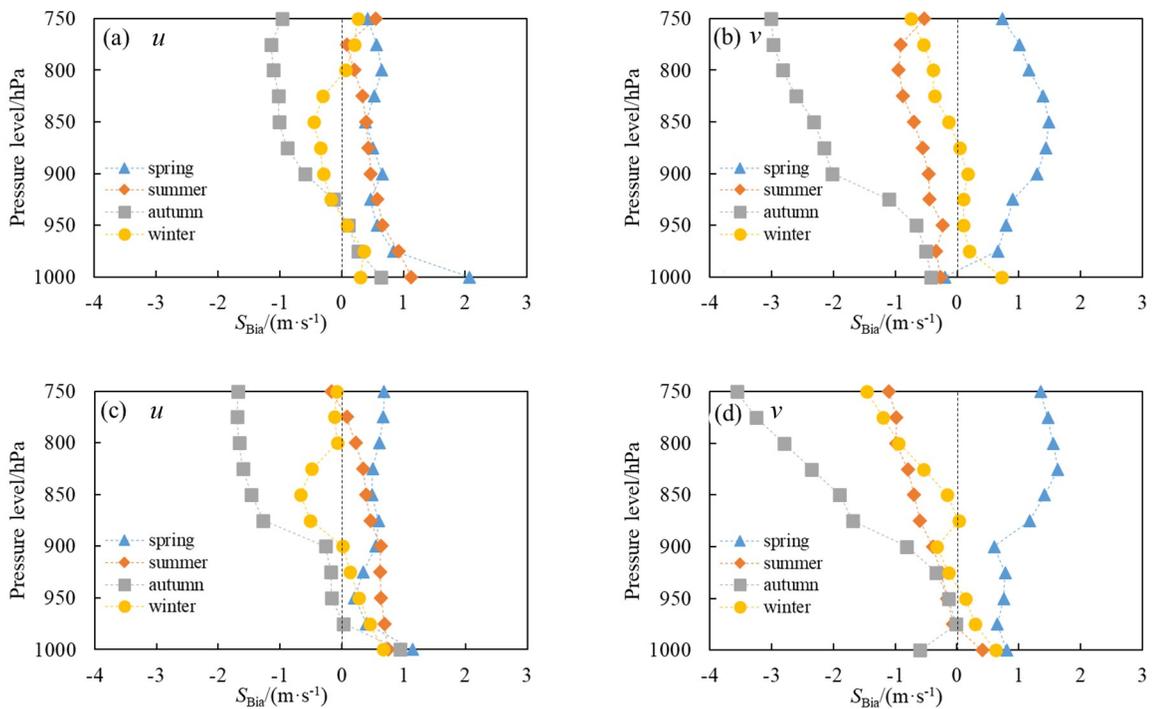


图 7 风廓线雷达测风资料与再分析资料分季节偏差随气压高度的分布。(a)、(b) 合肥站; (c)、(d) 巢湖站

Fig. 7 Distribution of S_{Bia} between wind profile radar measurements and reanalysis data with pressure level in different seasons.

(a), (b) Hefei station; (c), (d) Chaohu station

3.2.3 均方根误差

图 8 给出了合肥和巢湖两部风廓线雷达相对于 ERA5 分析资料在不同季节的均方根误差随高度的分布。总体看来, 975 hPa 高度以下, u 、 v 分量均方根误差随着高度增加而逐渐减小, 这是因为雷达探测低空时易受干扰。当高度到 975 hPa 左右时, 低空干扰的影响逐渐消退, 之后 u 、 v 均方根误差基本都表现出随高度增高而逐渐增大的趋势。在此高度区间, u 、 v 分量均方根误差在春、秋两季明显大于夏、冬两季。合肥夏、冬两季

u 分量均方根误差变化较小, 冬季均方根误差值为 1.59~1.81 m/s, 夏季均方根误差值为 2.24~2.40 m/s。春、秋两季变化比较明显, 秋季均方根误差值在 2.13~2.91 m/s, 春季均方根误差值在 2.35~3.06 m/s。合肥 v 分量均方根误差依旧是冬季最小, 其值为 1.72~1.87 m/s。夏季仅次于冬季, 但相比 u 分量, 夏季的图形有显著变化, 均方根误差值为 1.76~2.86 m/s。秋、冬季 v 分量均方根误差相较于 u 分量都明显增大, 秋季为 2.17~4.77 m/s。冬季为 2.31~3.67 m/s。巢湖 u 分量夏、冬两季与春、秋两季分为两组, 均方根误差两两非常接近。巢湖 v 分量跟合肥 v 分量的变化趋势基本一致, 但秋季均方根误差更大, 最大值达到了 5.12 m/s。由此可知, 整体上 u 分量的数据离散度要好于 v 分量。从季节上看, 冬季无论 u 分量还是 v 分量数据离散度都是最低, 质量最好, 然后依次是夏、春、秋三季。阮征等^[40]的研究表明, 空气温度、相对湿度对大气折射率结构常数 C_n^2 影响明显, 温度较高、湿度较大, 则 C_n^2 大, C_n^2 与湍流散射回波信号的强弱成正比。夏季由于温度较高、湿度较大, C_n^2 在垂直方向上的分布比秋、冬高出一个数量级。但因此次评估选取的资料时间范围内冬季的大气相对湿度也较大, 接近夏季的水平。所以导致了冬、夏两季的数据质量好于春、秋两季。所以夏、冬两季数据均方根误差较小, 而春、秋季数据均方根误差较大。

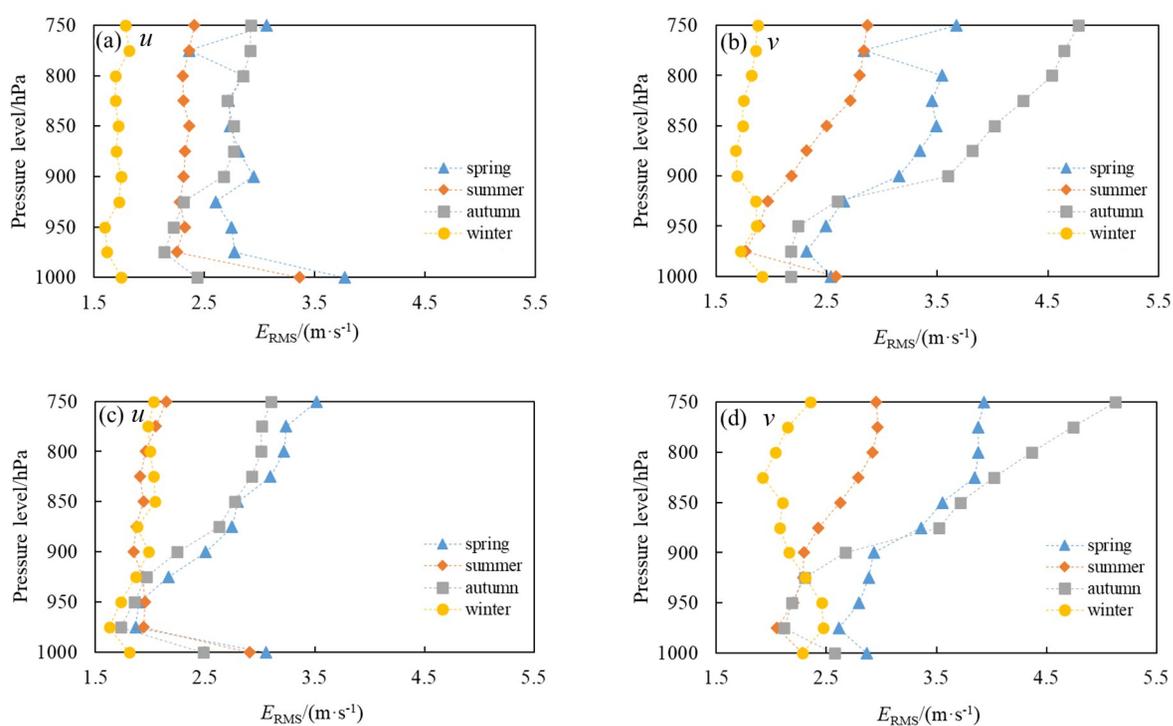


图 8 风廓线雷达测风资料与 ERA5 再分析资料分季节对比统计的均方根误差随气压高度的分布。

(a)、(b) 合肥站; (c)、(d) 巢湖站

Fig. 8 Distribution of E_{RMS} between wind profile radar measurements and reanalysis data with pressure level in different seasons.

(a), (b) Hefei station; (c), (d) Chaohu station

根据相关系数、偏差和均方根误差随高度的变化呈现的特征分布, 风廓线雷达数据质量最好的高度区间应为具有较高的相关度以及较小的偏差和均方根误差的区间。结合相关系数 (≥ 0.8)、偏差 (± 1 m/s 以内) 以及均方根误差 (≤ 3 m/s) 等指标, 本次评估的两部风廓线雷达数据质量最好的高度区间为 900~975 hPa。

4 结 论

风廓线雷达作为一种可以连续运行、自动观测的先进探测设备,是未来气象观测网络建设计划的重点。了解现有风廓线雷达的探测性能,确定一套行之有效的数据质量评估方法,对雷达设备选型、布设选址都具有重要意义。本文利用ERA5再分析资料,结合探空资料对合肥、巢湖两处型号为WP6000-LT的风廓线雷达 u 、 v 分量产品进行了质量评估,得出如下结论:

1) 为了确保ERA5再分析资料的适用性,利用安庆和阜阳两地气球探空资料分别与对应位置的ERA5再分析资料进行比较。结果表明:气球探空资料与ERA5再分析资料在风的 u 、 v 两个分量上均呈现出极高的相关性、较小的偏差和均方根误差;从高度层次上看,ERA5再分析资料在低层所受干扰较多,中高层资料的适用性更佳,但总体走势相对一致,ERA5再分析资料在安徽地区的适用性得以验证。因此使用ERA5再分析资料的风场资料对风廓线雷达资料进行质量评估是可行的,其结果可以一定程度上反映风廓线雷达资料的真实质量,从而解决了没有气球探空资料的区域缺少评估基准的问题。

2) 两部雷达的探测能力基本相同,说明站址周边探测环境基本一致,设备安装调试保持了同样水准。雷达的有效探测高度在不同季节差别有明显区别,春季(3、4、5月)2.7 km,夏季(6、7、8月)4.5 km,秋季(9、10、11月)3.6 km,冬季(1、2、12月)2 km。造成这一现象的原因是大气折射率结构常数 C_n^2 随高度分布存在明显的季节变化。夏季因为温度较高、天气过程频发,大气湍流强盛,高层水汽含量较多,湿度较大,为雷达波提供了较多的反射物, C_n^2 较大。冬季温度低,大气层节较为均一稳定,气候干燥,湿度较小, C_n^2 较小。 C_n^2 与湍流散射回波信号的强弱成正比,而回波信号强弱与雷达探测能力直接相关。

3) 从高度层次上看,975 hPa及以下高度,近地面干扰对风廓线雷达数据质量影响较大,风廓线资料与ERA5再分析资料的相关系数偏低,偏差值较大,数据离散度较高。975 hPa以上高度区间,数据质量总体保持随高度升高而逐渐下降的趋势。从季节上看,风廓线雷达数据质量由高到低排列依次是冬、夏、春、秋。两站偏差与均方根误差最大值均出现在秋季的 v 分量,分别是合肥的 -3.01 m/s (S_{Bia})、 4.77 m/s (E_{RMS})和巢湖的 -3.56 m/s (S_{Bia})、 5.12 m/s (E_{RMS})。两站偏差与均方根误差最小值均为冬季的 u 分量,分别是合肥的 -0.05 m/s (S_{Bia})、 1.59 m/s (E_{RMS})和巢湖的 -0.08 m/s (S_{Bia})、 1.62 m/s (E_{RMS})。无论合肥还是巢湖, u 分量数据质量均好于 v 分量数据质量。总体而言,经过ERA5资料评估,两个风廓线站点春、夏、冬数据质量较好,可以同化入数值预报模式,秋季 v 分量数据需要进行偏差订正以及质量控制后再使用。

以上结论表明ERA5再分析资料可用于无探空资料站点风廓线雷达的数据质量评估。后续还将就如何开展数据质控。提高资料可用率以及降低降水类天气对雷达资料质量的影响等方面开展相应的研究,并将研究结果应用到规划中的雷达建设以及建成评估工作中。

参考文献:

- [1] Zhang H, Huang Y, Liu H J. Spatial characteristics of climate changes in Anhui Province during the past 30 years [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(12): 1935-1942.

- 张红,黄勇,刘慧娟.安徽省近30年气候变化的空间特征[J].生态环境学报,2012,21(12):1935-1942.
- [2] Huang S Q, Gu X P, Xiao Z P, *et al.* Some thoughts on emergency management of urban extreme meteorological disasters [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2022, 43(3): 120-124.
黄思琦,顾雄萍,肖志鹏,等.城市突发极端气象灾害应急管理的若干思考[J].气象研究与应用,2022,43(3):120-124.
- [3] Yao F M, Yang T M, Cao Q, *et al.* Dynamic change trend of climate extremes and agroclimatic indices in Hefei region over past 55 years [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(5): 227-237.
姚凤梅,杨太明,曹倩,等.合肥地区近55年气候极值与农业气候指标动态变化趋势[J].自然灾害学报,2013,22(5):227-237.
- [4] Sun Y D, Deng B, Wei C X, *et al.* Effects of the urbanization process on the climate in Hefei City [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(26): 11484-11486.
孙亚东,邓斌,魏春璇,等.合肥城市化进程对气候的影响[J].安徽农业科学,2008,36(26):11484-11486.
- [5] Chen C A. The affect of city expand on climate in Hefei [J]. *Meteorology Journal of Henan*, 2002, 25(4): 28-29.
陈长安.合肥城市发展对气候的影响[J].河南气象,2002,25(4):28-29.
- [6] Zheng W W. Main meteorological disasters faced by cities and their preventive measures [J]. *Xiandai Nongcun Keji*, 2022, (10): 100-101.
郑文文.城市面临的主要气象灾害及其防御措施[J].现代农村科技,2022,(10):100-101.
- [7] Yang H F, Zhai G F. Spatial assessment and driving mechanism of urban safety from the perspective of disaster risk: A case study of Chuzhou central city [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(9): 2368-2381.
杨海峰,翟国方.灾害风险视角下的城市安全评估及其驱动机制分析—以滁州市中心城区为例[J].自然资源学报,2021,36(9):2368-2381.
- [8] Li Y C. Study on the distribution pattern of urban residents' living space in the old urban area of Hefei [J]. *Architecture & Culture*, 2017, (6): 138-140.
李元琛.合肥老城区居民生活空间分布格局研究[J].建筑与文化,2017,(6):138-140.
- [9] Ma M, Wu S Y, Jiang S M. Study on the zoning of population functional zones in Hefei economic circle [J]. *Research on Development*, 2016, (5): 79-84.
马芒,吴石英,江胜名.合肥经济圈人口功能区分区研究[J].开发研究,2016,(5):79-84.
- [10] Zhang X W, Zheng Y G, Wu L, *et al.* Review on application of wind profiler radar in weather monitoring and forecasting [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2017, 45(2): 285-297.
张小雯,郑永光,吴蕾,等.风廓线雷达资料在天气业务中的应用现状与展望[J].气象科技,2017,45(2):285-297.
- [11] Guo J P, Liu B M, Guo X R, *et al.* Research progress on new application of wind profiler radar network observation [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2021, 11(2): 5-12.
郭建平,刘博铭,郭晓冉,等.风廓线雷达组网观测新型应用研究进展[J].气象科技进展,2021,11(2):5-12.
- [12] Jin W, Qu Y, Yao X P, *et al.* Mesoscale structure and evolution of the low-level jet and its relationship with the heavy rainfall during a torrential rain process [J]. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(12): 31-38.
金巍,曲岩,姚秀萍,等.一次大暴雨过程中低空急流演变与强降水的关系[J].气象,2007,33(12):31-38.
- [13] Zhang S T, Su D B, Xu W J, *et al.* Analysis of daily variation characteristics of boundary layer in Beijing area by wind profile radar data [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2017, 12(1): 1-7.
张舒婷,苏德斌,徐文静,等.利用风廓线雷达资料对北京地区边界层日变化特征的分析研究[J].大气与环境光学学报,2017,12(1):1-7.
- [14] Wang Y H, Zhang W, Zhao Y C. Analysis of wind characteristics of wind-profiler radars and their quality control methods for data assimilation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 45(1): 123-147.
王叶红,张伟,赵玉春.面向资料同化的风廓线雷达风场特征分析及其质控方法[J].大气科学,2021,45(1):123-147.

- [15] Zhang X B, Wan Q L, Xue J S, *et al.* Quality control of wind profile radar data and its application to assimilation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(1): 159-176.
张旭斌, 万齐林, 薛纪善, 等. 风廓线雷达资料质量控制及其同化应用 [J]. 气象学报, 2015, 73(1): 159-176.
- [16] He J, Lu C H, Xie S Q, *et al.* Assessing the performance of wind profile radar in Nanjing and its application [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2018, 38(3): 406-415.
何婧, 卢楚翰, 谢韶青, 等. 南京风廓线雷达测量性能评估及应用初探 [J]. 气象科学, 2018, 38(3): 406-415.
- [17] Dong B J, Li J, Sun J H, *et al.* Vertical structure and variation characteristics of wind field in low-level atmosphere in the southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(3): 597-607.
董保举, 李建, 孙绩华, 等. 青藏高原东南缘低层风场垂直结构与变化特征 [J]. 高原气象, 2016, 35(3): 597-607.
- [18] Liu S J, Lu P, Liu J Q, *et al.* Comparative analysis of sounding data and wind profile radar data at Mingshan Station [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2021, 41(3): 127-135.
刘思佳, 卢萍, 刘金卿, 等. 名山站探空资料与风廓线雷达资料的对比分析 [J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(3): 127-135.
- [19] Zhou C Q, Chen L, Zhou H, *et al.* Comparative analysis of wind profile radar and L-band sounding radar for wind measurement in Changsha [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(S1): 122-125.
周长青, 陈龙, 周慧, 等. 长沙风廓线雷达与L波段探空雷达测风对比分析 [J]. 湖北农业科学, 2021, 60(S1): 122-125.
- [20] Kang X, Xu C, Li Y. Accuracy estimation of wind profile radar by L-band radar [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2021, 36(3): 293-299.
康雪, 许晨, 李愉. 用L波段探空测风雷达评估风廓线雷达测风准确性 [J]. 成都信息工程大学学报, 2021, 36(3): 293-299.
- [21] Wang D C, Tang Z D, Qiu C, *et al.* Comparison study of wind profile radar C_n^2 data and L sounding data to determine the height of summer boundary layer in Ji'nan [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2021, 44(2): 96-105.
王栋成, 汤子东, 邱粲, 等. 风廓线雷达 C_n^2 资料和L探空资料确定济南夏季边界层高度的对比研究 [J]. 气象与环境科学, 2021, 44(2): 96-105.
- [22] Zhu L J. Preliminary analysis on wind product of wind profiler for data assimilation [J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(12): 1494-1502.
朱立娟. 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, 2015, 41(12): 1494-1502.
- [23] Li A L, Liu Z, Hong X, *et al.* Applicability of the ERA5 reanalysis data to China adjacent sea under typhoon condition [J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(10): 71-80.
李爱莲, 刘泽, 洪新, 等. 台风条件下ERA5再分析数据对中国近海适用性评估 [J]. 海洋科学, 2021, 45(10): 71-80.
- [24] Liu H B, Dong L, Yan R J, *et al.* Evaluation of near-surface wind speed climatology and long-term trend over China's mainland region based on ERA5 reanalysis [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2021, 26(3): 299-311.
刘鸿波, 董理, 严若婧, 等. ERA5再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估 [J]. 气候与环境研究, 2021, 26(3): 299-311.
- [25] Li J X, Hu Y Z. Assessment of typhoons in ERA-interim and ERA-5 reanalysis datasets [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021, (1): 62-69.
李江夏, 胡玉植. ERA-Interim和ERA-5再分析资料中台风模拟精度评估 [J]. 水利水运工程学报, 2021, (1): 62-69.
- [26] Zhang Y L, Cai C S. Method and accuracy assessment of zenith tropospheric delay derived from ERA5 re-analysis data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(1): 62-65.
张永林, 蔡昌盛. 基于再分析资料ERA5的对流层延迟估计方法及精度评估 [J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(1): 62-65.
- [27] Xiang S G, Zhang C Y, Fan W Z, *et al.* 探空观测中雷达或仪器发生故障时解决方法 [J]. *Qinghai Science and Technology*, 2019, 26(1): 75-82.

- 相守贵,张成毅,樊万珍,等.探空观测中雷达或仪器发生故障时解决方法[J].青海科技,2019,26(1):75-82.
- [28] Jia L. Cause analysis and countermeasures of high altitude detection L-band radar losing ball [J]. *Technology Wind*, 2020, (17): 114.
- 贾陆.高空探测L波段雷达丢球原因分析与应对思考[J].科技风,2020,(17):114.
- [29] Ma L. Research on L-band radar testing technology [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2019, 36(1): 18-22.
- 马良.L波段雷达测试技术探究[J].气象水文海洋仪器,2019,36(1):18-22.
- [30] Qian Y, Ma X L, Guo Q Y, et al. Error analysis of sounding temperature data based on the FNL and GRAPES analysis fields [J]. *Meteorological Monthly*, 2019, 45(10): 1464-1475.
- 钱媛,马旭林,郭启云,等.基于FNL和GRAPES分析场的探空温度数据的误差分析[J].气象,2019,45(10):1464-1475.
- [31] Wang X Y, Lin Y J, Liu D Q, et al. Comparative analysis of two data quality control methods for wind profile radar to numerical assimilation [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2022, 42(4): 495-505.
- 汪学渊,林银杰,刘德强,等.两种面向数值同化的风廓线雷达资料质量控制方法比较分析[J].气象科学,2022,42(4):495-505.
- [32] Chen X, Wang H J, Wu L, et al. A synthetic quality control method of wind profile radar data [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2021, 36(5): 485-492.
- 陈夏,王海江,吴蕾,等.一种综合的风廓线雷达数据质量控制方法[J].成都信息工程大学学报,2021,36(5):485-492.
- [33] Zuo Q, Bao Y S, Dong Y, et al. Accuracy evaluation and quality control of wind profile radar data [J]. *Remote Sensing Information*, 2020, 35(5): 37-44.
- 左泉,鲍艳松,董焱,等.风廓线雷达数据精度评价与质量控制方法[J].遥感信息,2020,35(5):37-44.
- [34] Meng X G, Guo J J, Han Y Q. Preliminary assessment of ERA5 reanalysis data [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2018, 38(1): 91-99.
- 孟宪贵,郭俊建,韩永清.ERA5再分析数据适用性初步评估[J].海洋气象学报,2018,38(1):91-99.
- [35] Tu Z Z, Wang X Y, Jiang C Y, et al. Analysis on precision of wind profiler measurements in different seasonal weather conditions [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2020, 43(2): 100-108.
- 涂治招,汪学渊,江彩英,等.不同季节天气条件下风廓线雷达测风精度分析[J].气象与环境科学,2020,43(2):100-108.
- [36] Chen Z Y, Du B, Liu K. Quality control of wind profiler radar horizontal wind data [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2020, 48(6): 801-807.
- 陈中钰,杜冰,刘康.风廓线雷达水平风数据质量控制[J].气象科技,2020,48(6):801-807.
- [37] He P, Zhu X Y, Ruan Z, et al. Preliminary study on precipitation process detection using wind profiler radar [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(4): 465-470.
- 何平,朱小燕,阮征,等.风廓线雷达探测降水过程的初步研究[J].应用气象学报,2009,20(4):465-470.
- [38] Liu C, Mao W Q, Fan X, et al. Assessment of detection performance of ST wind profile radar in mountainous and hilly area [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, 36(2): 326-330.
- 刘晨,毛文茜,樊旭,等.山地丘陵地区ST风廓线雷达的探测性能评估[J].干旱气象,2018,36(2):326-330.
- [39] Kang X, Xu C, Li Y. Accuracy estimation of wind profile radar by L-band radar [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2021, 36(3): 293-299.
- 康雪,许晨,李愉.用L波段探空测风雷达评估风廓线雷达测风准确性[J].成都信息工程大学学报,2021,36(3):293-299.
- [40] Ruan Z, He P, Ge R S. Determination of refractive index structure constant with wind profile radar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(1): 133-140.
- 阮征,何平,葛润生.风廓线雷达对大气折射率结构常数的探测研究[J].大气科学,2008,32(1):133-140.