

ERA5高空数据在贵阳机场冬季运行中的适用性分析

张亚男, 罗浩, 刘贵萍, 李鲸, 张媛

中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年4月25日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

为评估ERA5再分析数据在贵阳机场高空气象要素方面的适用性, 本文将ERA5数据与贵阳机场的实际观测数据进行了比较分析, 深入探讨了其在温度、湿度、气压以及风场等常规气象要素上的具体表现。研究结果显示, ERA5数据与贵阳机场实际观测数据基本一致, 其中ERA5的温度资料与微波辐射计的温度在低层的一致性较高, ERA5的值比微波辐射计测得的值偏大, 总的平均偏差为1.9°C; ERA5的温度资料与微波辐射计的相对湿度随着高度的增加差异越大, 均方根误差和平均偏差平均值分别为13%和10%; ERA5的风速资料比风廓线雷达的风速偏小, 均方根误差和平均偏差的平均值分别为3.1 m/s和1.3 m/s, 相关性高达0.93; ERA5的风向资料与风廓线雷达的风向越到高层差异越小, 反应的主要方位角基本一致。

关键词

ERA5再分析数据, 贵阳机场, 微波辐射计, 风廓线雷达

Applicability Analysis of ERA5 Upper-Air Data in Winter Operations at Guiyang Airport

Yanan Zhang, Hao Luo, Guiping Liu, Jing Li, Yuan Zhang

Guizhou Branch, Southwest Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 25th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

To assess the applicability of ERA5 reanalysis data in upper air meteorological elements at Guiyang

文章引用: 张亚男, 罗浩, 刘贵萍, 李鲸, 张媛. ERA5 高空数据在贵阳机场冬季运行中的适用性分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(3): 495-503. DOI: 10.12677/ccrl.2025.143050

Airport, this paper compares ERA5 data with the actual observational data of Guiyang Airport and explores its performance in conventional meteorological elements such as temperature, humidity, air pressure, and wind field. The results show that ERA5 data is generally consistent with the actual observational data of Guiyang Airport. The temperature data of ERA5 is highly consistent with the temperature measured by microwave radiometer in the lower layer, but the values of ERA5 are larger than those measured by microwave radiometer, with an average deviation of 1.9°C. The relative humidity data of ERA5 and the relative humidity measured by microwave radiometer have greater differences as the height increases, with the average values of root-mean-square error and average deviation being 13% and 10% respectively. The wind speed data of ERA5 is smaller than that measured by wind profiler radar, with the average values of root-mean-square error and average deviation being 3.1 m/s and 1.3 m/s respectively, and the correlation is as high as 0.93. The difference between the wind direction data of ERA5 and the wind direction measured by wind profiler radar becomes smaller in the upper layer, and the main azimuth angles they reflect are basically the same.

Keywords

ERA5 Reanalysis Data, Guiyang Airport, Microwave Radiometer, Wind Profiler Radar

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当前全球气候变化和区域天气模式日趋复杂的背景下, 准确的气象数据已成为天气预报、气候研究以及新兴的神经网络和深度学习等前沿技术领域不可或缺的基础。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)生产的第五代全球气候再分析数据集 ERA5, 与前一代 ERA-Interim 相比, ERA5 在数值模式、同化系统和观测数据处理方面进行了改进, 减少了系统性偏差, 提高了数据的准确性和可靠性, 更以其高时空分辨率和丰富的气象变量受到广泛关注[1]-[3]。已有研究指出, 各家再分析资料在高原地区的适用性均不及平原地区, 而对于不同的气象要素和物理量, 不同资料在青藏高原的适用性也各有优劣。刘佳等[4]指出, 在中国西南复杂地形区, ERA5 再分析数据对地面各要素(2 m 气温、降水、10 m 风速、10 m 风向)的适用性均优于 ERA-Interim; 温婷婷等[5]利用 1979~2017 年青藏高原 131 个气象台站实测降水资料, 评估了 CRU、ERA5 和 CMFD 三种再分析降水资料在青藏高原的适用性, 结果显示 ERA5 数据对青藏高原年降水的模拟能力较强, 与观测值的相关系数均超过了 0.9; 麦哲宁等[6]在对高原低涡客观识别方法的研究中也是基于 ERA5 高分辨率资料。

高空气象要素, 包括风场、温度、湿度和气压场等, 对于气象研究和预报尤为重要。对于地处低纬高原的贵阳机场, 由于地理位置、地形地貌等因素的复杂性, 全球再分析数据在山地地区的适用性可能会受到一定的影响。因此, 对 ERA5 再分析数据在贵阳机场高空气象要素的适用性进行深入分析, 对于提高机场气象服务的准确性和可靠性具有重要意义, 亦能为今后人工智能在贵阳机场气象预报模型中的应用提供坚实的数据基础。

2. 资料介绍

本文使用的数据包括: (1) 来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA5 提供的再分析数据; (2) 贵阳机场 Airda-HGT4 型微波辐射计资料; (3) 贵阳机场 CFL-03 型大气边界层风廓线雷达资料。

ERA5 再分析数据时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 选取的高空气象要素有风向、风速(风向和风速由纬向风和经向风计算得出)、温度、相对湿度, 选用 23 个标准层(1000, 975, 950, 925, 900, 875, 850, 825, 800, 775, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 225, 200 hPa), 时间为 2022 年 1 月~2023 年 2 月。

对于传统探空资料, 其主要依赖于每天两次(08 时和 20 时左右)定时释放的探空气球来获取大气的温度、湿度、风向和风速等参数, 这种探测方式在时间分辨率上存在一定的不足, 两次探测之间存在较长的数据空白期, 无法连续捕捉大气中天气要素快速变化的过程, 进而导致对大气状况的把握和预报的准确性出现偏差。因此本文选用的实况温度和湿度数据由贵阳机场微波辐射计提供, 风向和风速资料由风廓线提供, 它们能提供逐时的数据, 实现对大气状况的连续监测。

贵阳机场安装的 Airda-HGT4 型微波辐射计和 CFL-03 边界层风廓线雷达均安装在机场跑道南端入口处(106.79°E , 26.54°N , 海拔 1150m), 全天 24 h 不间断连续运行。其中微波辐射计配置了两个探测频段, 14 个信号通道, 7 个通道滤波器用来获取湿度廓线, 频率范围在 22~31 GHz, 7 个通道滤波器用来获取温度廓线, 频率范围在 51~58 GHz, 获得的亮温数据可反演得到的大气温度、水汽密度、相对湿度和液态水密度廓线等多种物理量, 垂直探测高度为 10,000 m。风廓线雷达采集数据的频率为 6 分钟一次, 最小探测高度小于 60 米, 最大探测高度为 3000~6000 米; 有两种观测模式, 1500 米以下采用低模式探测, 垂直分辨率为 60 米, 1500 米采用高模式探测, 垂直分辨率为 120 米。

对于贵阳机场微波辐射计和风廓线雷达的可用性, 已有学者将其与探空资料进行过对比分析[7]。通过对比 2022 年 6~8 月每日 08 时和 20 时贵阳站探空和贵阳机场微波辐射计对应的温度和露点资料, 可得两种资料温度和露点的相关系数分别高达 0.997 和 0.972, 气温差值基本在 1.5°C 以下, 而露点差值多在 5.0°C 以下; 对于风廓线资料, 通过读取 2019 年 1 月~2022 年 6 月每日 08 时和 20 时 850 hPa、700 hPa、500 hPa 贵阳站探空风资料及对应的贵阳机场风廓线风向、风速资料, 计算两种资料对应时次和高度上的风向和风速差, 可知贵阳机场风廓线资料与探空资料的风向差基本小于 20° , 而风速差基本小于 2 m/s 。总的来看, 贵阳机场风廓线资料和微波辐射计资料具有较高的可信度。

3. 方法

选取样本数据的时间段为 2021 年 12 月~2023 年 2 月, ERA5 选择距离贵阳机场微波辐射计和风廓线雷达位置最近的格点(106.5°E , 26.5°N)。对于微波辐射计资料, 先挑选出对应时间段内的整点数据, 再对数据进行质控处理, 具体方式参照赵美艳等[8]: 对温度廓线做逐层极值检查, 若有 1 层及以上的数据超过 40°C , 则剔除该时次; 湿度廓线则剔除整层湿度变化极小($<1\%$)和相邻高度层湿度变化极大($>85\%$)的廓线。对于风廓线资料, 其资料本身包含每日逐小时产品数据 OOB5 文件, 无需挑选, 但同样需要进行质控处理, 首先对各个高度超过气象值最大限度的极端值剔除[9], 如低于 1500 米时风速超过 46.3 m/s 、1500~3000 m 超过 61.73 m/s 等, 将这些高度层中超过阈值的风速数据点剔除, 再对风场数据进行垂直性的一致性检验, 如果某高度层的垂直变化值同时大于其上下 2 层的垂直变化值的 3 倍, 则视为异常值并剔除。

时间匹配上, ERA5 数据完整, 而微波辐射计和风廓线资料存在不同程度的缺测或异常, 因此以微波辐射计和风廓线资料的可用时次为准, 用 ERA5 资料分别与之统一; 高度匹配上, 以 ERA5 资料的高度层为基准, 将微波辐射计资料和风廓线资料使用线性插值的方式将数据插值到 ERA5 的高度层上, 其中, 微波辐射计的探测高度为 0~10,000 m, 仪器安装高度为 1150 m, 因此可以插值到 18 个标准层(875~200 hPa); 风廓线雷达的探测高度受降水、大气湿度的影响, 500 hPa 以上的数据缺测较多, 因此插值到 11 个标准层(875~500 hPa)。

为定量地评估 ERA5 再分析资料在贵阳机场的适用性, 选用相关系数、均方根误差、平均偏差以及标准差来检验再分析资料对实际探测资料的偏离程度, 计算公式如下:

$$\text{相关系数 } R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{ERA5},i} - \bar{X}_{\text{ERA5}})(X_{\text{obs},i} - \bar{X}_{\text{obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{\text{ERA5},i} - \bar{X}_{\text{ERA5}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{\text{obs},i} - \bar{X}_{\text{obs}})^2}} \quad (1)$$

$$\text{均方根误差 RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{ERA5},i} - X_{\text{obs},i})^2}{N}} \quad (2)$$

$$\text{平均偏差 ME} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{\text{ERA5},i} - X_{\text{obs},i}}{N} \quad (3)$$

$$\text{标准差 SD} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

其中, 式(1)~(3)中 N 为样本数量, i 为每一个样本, X_{ERA5} 为 ERA5 再分析资料, X_{obs} 为微波辐射计或风廓线探测资料; 式(4)中 N 为样本数量, i 为每一个样本, X_i 为第 i 个样本的值, \bar{X} 为样本值的平均值。

4. 适用性分析

4.1. 微波辐射计与 ERA5 误差分析

选取 850 hPa、700 hPa、500 hPa 三个标准层, 分别绘制微波辐射计和 ERA5 对应温度和相对湿度的散点图, 见图 1, 对于温度(图 1(a)~(c)), 850 hPa 上两种资料的相关系数高达 0.94, 散点分布比较集中, 说明两种温度资料差异较小; 700 hPa 上的散点分布则比较分散, 数据的一致性较差, 相关系数为 0.80; 500hPa 上微波辐射计和 ERA5 的温度散点较为集中, 且截距为负值, 说明 ERA5 的温度相较微波辐射计测得的温度偏低, 两者相关系数为 0.85。

对于相对湿度(图 1(d)~(f)), 850 hPa 上两种资料的相对湿度多分布在 80%以上, 散点分布相较 700 hPa 和 500 hPa 集中, 相关系数达 0.87; 700 hPa 和 500 hPa 上的散点分布则比较散乱, 相关系数分别为 0.77 和 0.72, 其中 700 hPa 上相对湿度在 70%以上的点分布相对集中, 而 500 hPa 上则是小于 20%的值集中, 三个标准层上 ERA5 的相对湿度比微波辐射计测得的值偏大, 甚至出现了大于 100%和小于 0%的相对湿度值, 说明在使用 ERA5 的相对湿度资料进行其他物理量的计算前需要先订正超过 100%和小于 0%的资料。总的来看, 微波辐射计和 ERA5 对应的温度资料和相对湿度资料在低层 850 hPa 上的一致性较高, ERA5 的值比微波辐射计测得的值偏大。

计算 875~500 hPa 上微波辐射计和 ERA5 对应温度和相对湿度的均方根误差、平均偏差和误差的标准差, 如图 2 所示, 其中均方根误差是一个衡量两种资料偏差的统计指标, 它通过平方误差的平均值的平方根来量化误差的大小, 其值越小表示两种资料的吻合度越高; 平均偏差提供了数据离散程度的直观度量, 其值越小, 表示数据点越紧密地围绕平均值分布; 误差的标准差是评估数据一致性和可靠性的重要指标, 它提供了数据点偏离平均值的波动范围, 较小的误差标准差意味着两种资料更加一致。从图 2(a)可见, 两种资料对应温度的均方根误差、平均偏差和误差的标准差均呈现先减小后增加再减小的趋势, 均方根误差和平均偏差拐点出现在 750 hPa 和 550 hPa 的高度层上, 而误差的标准差拐点为 825 hPa 和 650 hPa。温度均方根误差范围在 1.8℃~3.2℃, 差异最大的高度层出现 875 hPa, 差异最小出现 775 hPa 上, 850~650 hPa 均方根误差较小, 均值为 2.0℃, 说明微波辐射计和 ERA5 的温度资料吻合度较高; 平均偏差的分布特征与均方根误差类似, 均值为 1.9℃, 最小值为 1.5℃, 而 850~650 hPa 平均偏差在 1.6℃左右; 误差的标准差显示, 在 750 hPa 及以下的高度层上, 微波辐射计和 ERA5 的温度资料一致性较强,

误差的标准差 1.5°C 左右, 700 hPa 及以上误差的标准差相对较高, 均值为 2.3°C , 最大达 2.3°C 。

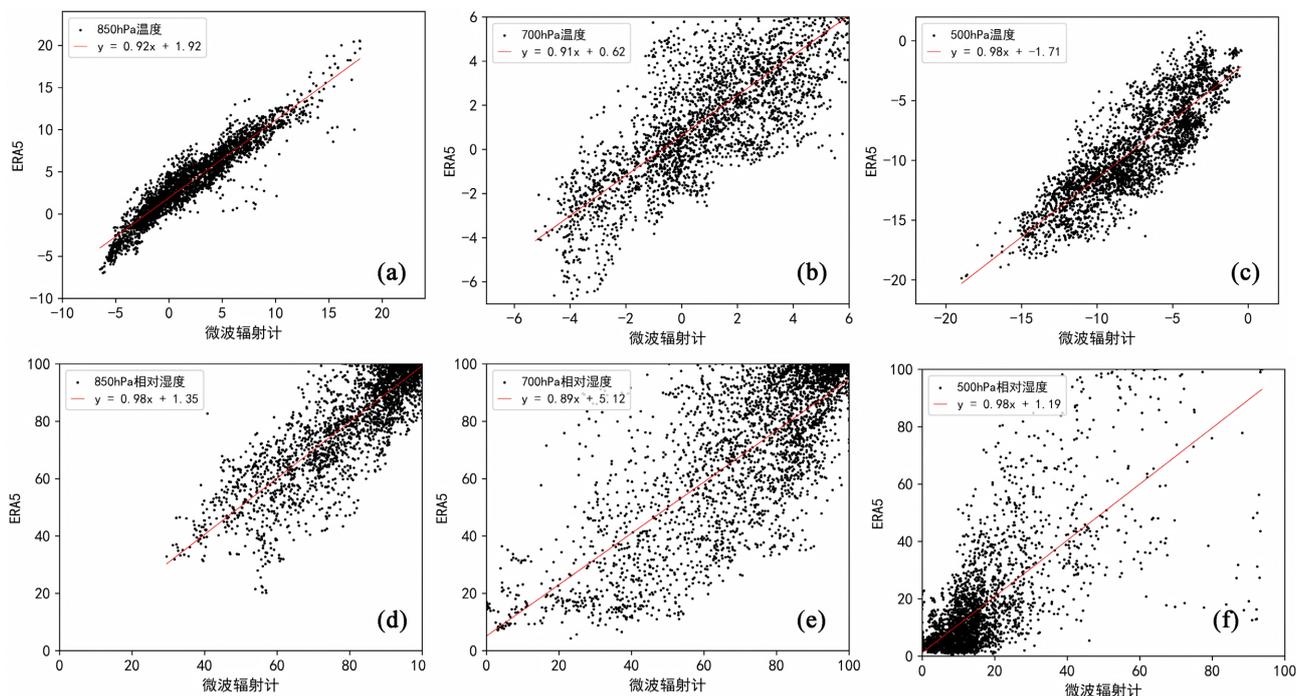


Figure 1. Scatter plots of temperature (a)~(c) and relative humidity (d)~(f) from microwave radiometer and ERA5 at 850 hPa, 700 hPa, and 500 hPa (red lines are the fitting lines)

图 1. 850 hPa、700 hPa、500 hPa 上微波辐射计和 ERA5 温度(a)~(c)、相对湿度散点图(d)~(f) (红线为拟合线)

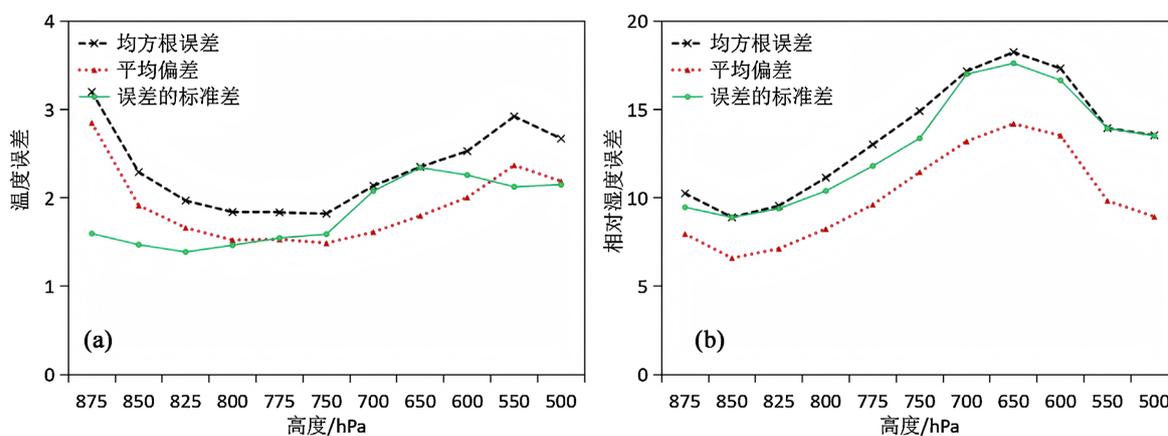


Figure 2. Error distribution of temperature (a) and relative humidity (b) between the microwave radiometer and ERA5 at different height levels

图 2. 各层高度微波辐射计和 ERA5 温度(a)、相对湿度(b)的误差分布

从相对湿度对应的统计误差来看(图 2(b)), 两种资料相对湿度的均方根误差、平均偏差和误差的标准差随高度的变化趋势基本一致, 主要呈单峰型分布, 峰值出现在 650 hPa, 与温度差异出现拐点的高度层相同, 但是总体上看, 随着高度的增加相对湿度的差异越大, 其中三种误差的最小值均出现在 850 hPa 上。其中相对湿度的均方根误差分布在 9%~18%, 平均值为 13%, 775 hPa 以下的差异较小, 均方根误差在 10%左右, 750~600 hPa 相对湿度相对较大, 均方根误差均值达 17%; 平均偏差均值为 10%, 750 hPa 以

下的偏差均在 10%以下, 说明两种资料的相对湿度值在低层差异较小; 误差的标准差在各层的值与对应的均方根误差值比较相近, 只是略微偏低, 但平均仅偏低 0.5%。

相关系数可以用来量化两个变量之间线性关系强度和方向, 取值范围为 $-1\sim 1$, 其中 1 表示完全正相关, -1 表示完全负相关, 越接近 0 则表示相关性越小, 从表 1 可见, 微波辐射计和 ERA5 对应的温度数据相比相对湿度数据有更好的相关性, 并且两种数据在低层的相关性高于高层。其中温度在 700 hPa 及以下的相关系数均在 0.90 以上, 平均值为 0.93, 最高达 0.94, 700 hPa 以上的相关系数则在 0.84 左右; 相对湿度的相关系数平均值为 0.80, 最大值出现在 850 hPa, 为 0.87, 最小值仅有 0.72。

Table 1. Correlation coefficients of temperature and relative humidity between the microwave radiometer and ERA5 at different height levels

表 1. 各层高度微波辐射计和 ERA5 温度、相对湿度的相关系数

气压/hPa	875	850	825	800	775	750	700	650	600	550	500
温度	0.93	0.94	0.94	0.93	0.92	0.90	0.80	0.79	0.84	0.86	0.85
相对湿度	0.84	0.87	0.84	0.81	0.78	0.77	0.77	0.81	0.79	0.78	0.72

箱线图可以展示一组数据的统计特征及其异常值, 从图 3 可以看到, 温度差整体上看在 $0.9^{\circ}\text{C}\sim 2.7^{\circ}\text{C}$ 左右, 中位数平均值为 1.7°C , 中低层的温度差分布的集中程度高于高层, 825~750 hPa 的温度差相对较小, 在 $0.7^{\circ}\text{C}\sim 2.2^{\circ}\text{C}$ 左右, 而 650~500 hPa 的温度差相对较大, 为 $0.8^{\circ}\text{C}\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 左右; 从中位数的大小来看, 750 hPa 和 700 hPa 温度差异较小, 均为 1.3°C 。从相对湿度的差异来看, 取值范围主要分布在 4%~14%, 其中 750~600 hPa 的相对湿度差值分布范围较广, 最高为 21%, 最低为 5%, 其余层次相对集中, 其中 850 hPa 最为集中, 范围为 2%~9%。

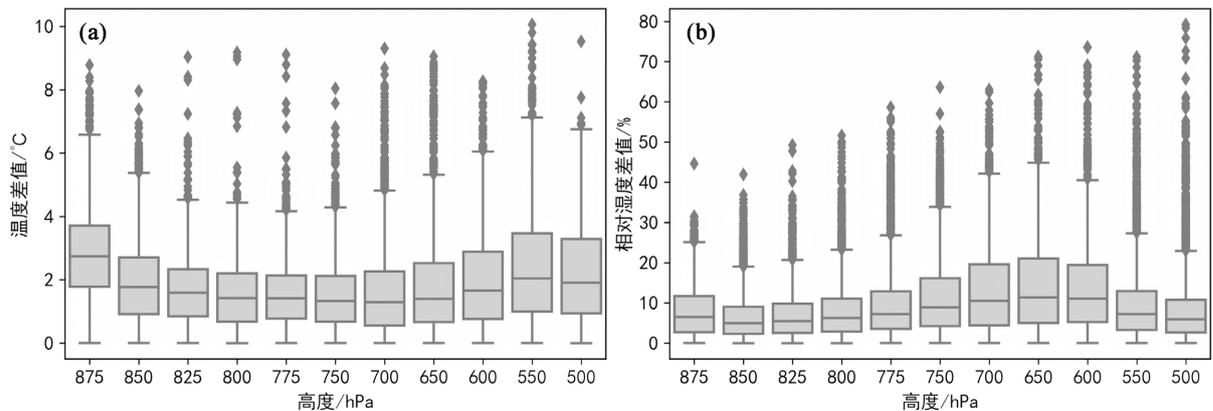


Figure 3. Box plots of the differences in temperature (a) and relative humidity (b) between the microwave radiometer and ERA5 at different height levels

图 3. 各层高度微波辐射计和 ERA5 温度差值(a)、相对湿度差值(b)箱线图

4.2. 风廓线雷达与 ERA5 误差分析

从风廓线雷达和 ERA5 对应风向和风速的散点图可以看到, 见图 4, 风速在各层的散点分布相比风向更加集中, 从风速分布上看, 850 hPa 上风廓线雷达对应的风速多在 7.5 m/s 以下, 而 ERA5 的风速数据在 7.5~12 m/s 区间内还有较多散点分布; 700 hPa 上的散点分布更加集中, 数据的一致性较好, 两种资料的风速散点均在 0~25 m/s 广泛分布; 500 hPa 上风速散点分布也比较集中, 并且总体上看, ERA5 的风速比风廓线雷达的测风偏小。从风向上看(图 4(d)~(f)), 850 hPa 上风廓线雷达的风向主要分布在 $0\sim 200^{\circ}$,

多集中在 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$ (东北风), 而 ERA5 风向资料则主要分布在 $25^{\circ}\sim 150^{\circ}$, 而 $25^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 的风向偏多(东北至偏东风), 两种资料的风向度数虽有差异, 但主要的风向基本是一致的: 700 hPa 上风廓线雷达风向主要集中在 $200^{\circ}\sim 300^{\circ}$, 以西南风为主, 而 ERA5 的风向则以 $180^{\circ}\sim 280^{\circ}$ 的西南风和 $300^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的西北风为主; 500 hPa 上两种资料的风向一致性则较好, 散点分布比较集中。

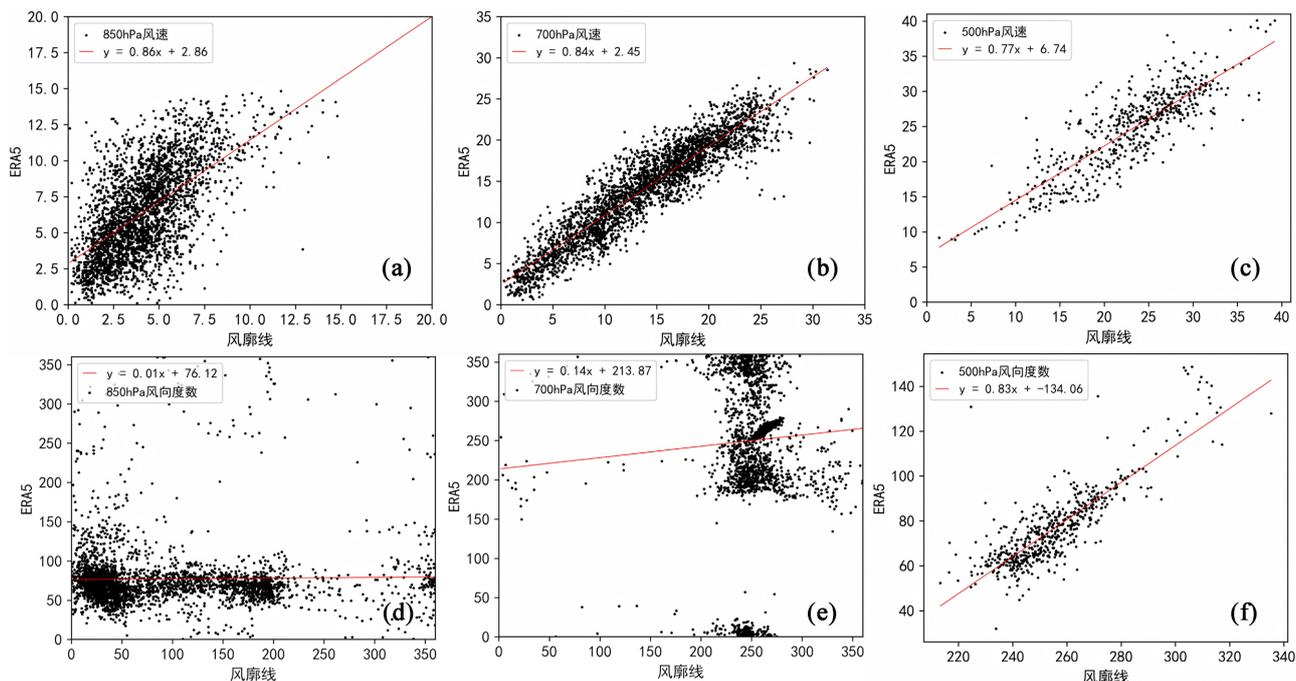


Figure 4. Scatter plots of wind speed (a)~(c) and wind direction (d)~(f) between the wind profiler radar and ERA5 at 850 hPa, 700 hPa, and 500 hPa (red lines are the fitting lines)

图 4. 850 hPa、700 hPa、500 hPa 上风廓线雷达和 ERA5 风速(a)~(c)、风向散点图(d)~(f)(红线为拟合线)

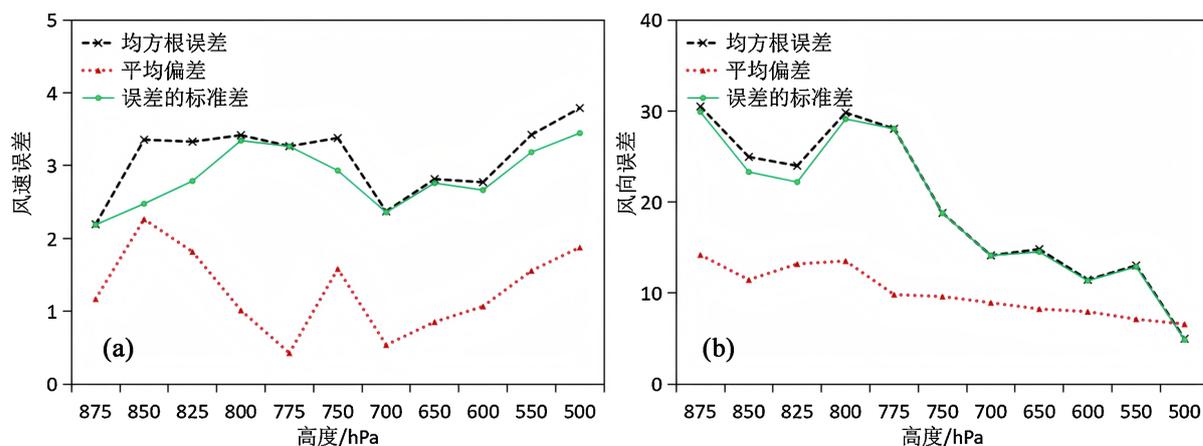


Figure 5. Error distribution of wind speed (a) and wind direction (b) between the wind profiler radar and ERA5 at different height levels

图 5. 各层高度风廓线雷达和 ERA5 风速(a)、风向(b)的误差分布

从各层高度风廓线雷达和 ERA5 风速、风向的误差分布来看, 见图 5, 风速的均方根误差、平均偏差和误差的标准差呈现先增后减再增的趋势, 其中风速均方根误差范围在 $2.2\sim 3.8$ m/s, 均值为 3.1 m/s; 各层平均偏差的平均值为 1.3 m/s, 775 hPa 和 700 hPa 上的平均偏差较小, 分别为 0.4 m/s 和 0.5 m/s, 850

hPa 上的差异较大, 达 2.3 m/s; 误差的标准差分布在 2.2~3.2 m/s 之间, 总体分布在 2.8 m/s 左右。对于风向, 三种误差随着高度总体呈减小的趋势, 说明越到高层两种资料的风向数据越一致, 其中风向的均方根误差和误差的标准差在各层的数值接近, 在 775 hPa 及以下两者的平均值分别为 27°和 26°, 而 775 hPa 以上的均值则都减小至 20°; 风向的平均偏差整体上差异较小, 范围为 7°~14°, 平均值为 10°, 尤其是 775 hPa 及以上高度的平均偏差变化在 3°以内。

从表 2 给出的相关系数来看, 微波辐射计和 ERA5 的风速数据比风向数据的相关性更高, 并且两种数据在高层的相关性更好。其中两种资料的风向数据在 750 hPa 及以下的相关系数均在 0.80 以下, 最大值也仅有 0.84, 出现在 500 hPa; 风速在各层的相关系数均大于风向, 平均值高达 0.93, 750 hPa 及以上的相关系数均在 0.90 以上, 最高值为 0.99, 而风速相关系数的最小值 0.86 也大于风向的最大值。

Table 2. Correlation coefficients of wind speed and wind direction between the wind profiler radar and ERA5 at different height levels

表 2. 各层高度风廓线雷达和 ERA5 风速、风向的相关系数

气压/hPa	875	850	825	800	775	750	700	650	600	550	500
风向	0.59	0.61	0.71	0.71	0.72	0.77	0.83	0.80	0.82	0.81	0.84
风速	0.86	0.89	0.89	0.87	0.88	0.92	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99

从各层高度风廓线雷达和 ERA5 风速差值和方向差值的箱线图可以看到, 见图 6, 风速差的变化范围整体上看小于风向差, 风向差在低层的差异明显大于高层。对于风速差值, 每层高度上的风速差中位数在 0~2 m/s 之间, 风速差分布的集中区域由低层到高层依次为 -1.1~1.6 m/s、0.6~3.8 m/s、-0.1~3.7 m/s、-1.1~2.6 m/s、-1.5~2.0 m/s、-0.1~3.7 m/s、-1.2~1.7 m/s、-1.1~2.2 m/s、-1.0~2.6 m/s、-0.9~3.3 m/s、-0.6~3.7 m/s。对于风向差值, 750 hPa 及以下差值的集中程度明显低于 750 hPa 以上的高度层, 中位数平均值为 49°, 875 hPa 和 800 hPa 风向差的差异较大, 主要分布在 18°~50°和 22°~53°, 700 hPa 及以上的风向差比较集中, 主要分布在 47°~58°。

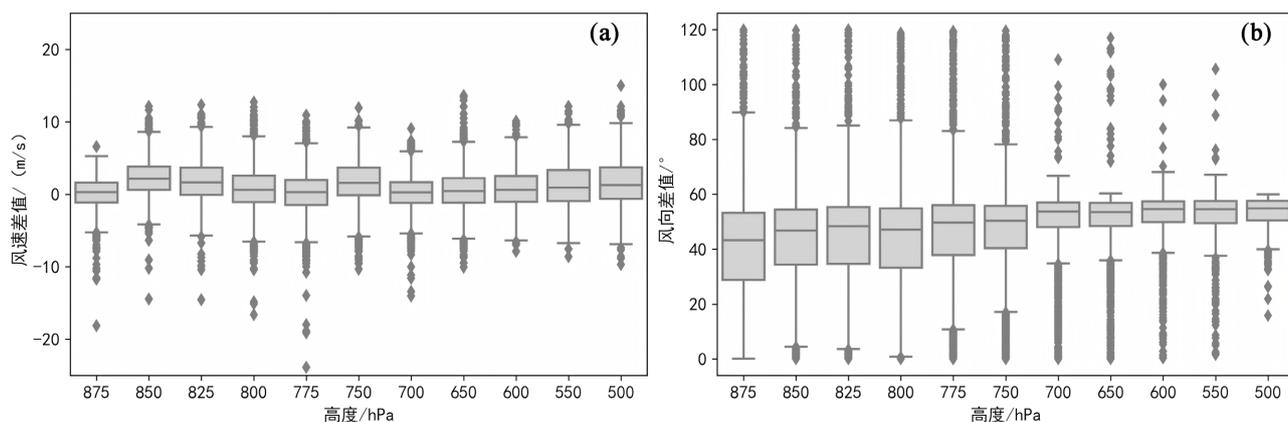


Figure 6. Box plots of the differences in wind speed (a) and wind direction (b) between the wind profiler radar and ERA5 at different height levels

图 6. 各层高度风廓线雷达和 ERA5 风速差值(a)、方向差值(b)箱线图

5. 结论

(1) ERA5 的温度资料与微波辐射计的温度在低层的一致性较高, ERA5 的值比微波辐射计测得的值偏大, 在 750 hPa 及以下的高度层上两者误差的标准差为 1.5°C 左右, 总的平均偏差为 1.9°C, 相关系数

均值达 0.88;

(2) ERA5 的温度资料与微波辐射计的相对湿度随着高度的增加差异越大, 均方根误差和平均偏差平均值分别为 13%和 10%, 相关系数均值为 0.79;

(3) ERA5 的风速资料比风廓线雷达的风速偏小, 在各层的差异较小, 均方根误差和平均偏差的平均值分别为 3.1m/s 和 1.3 m/s, 相关性高达 0.93;

(4) ERA5 的风向资料与风廓线雷达的风向越到高层差异越小, 相关系数均值为 0.75, 虽然风向度数存在差异(中位数平均值为 49°)但反应的主要方位角(东、南、西、北)基本一致。

参考文献

- [1] Albergel, C., Dutra, E., Bonan, B., Zheng, Y., Munier, S., Balsamo, G., *et al.* (2019) Monitoring and Forecasting the Impact of the 2018 Summer Heatwave on Vegetation. *Remote Sensing*, **11**, Article 520. <https://doi.org/10.3390/rs11050520>
- [2] Urraca, R., Huld, T., Gracia-Amillo, A., Martinez-de-Pison, F.J., Kaspar, F. and Sanz-Garcia, A. (2018) Evaluation of Global Horizontal Irradiance Estimates from ERA5 and COSMO-REA6 Reanalyses Using Ground and Satellite-Based Data. *Solar Energy*, **164**, 339-354. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.059>
- [3] Liu, J., Hagan, D.F.T. and Liu, Y. (2020) Global Land Surface Temperature Change (2003-2017) and Its Relationship with Climate Drivers: AIRS, MODIS, and ERA5-Land Based Analysis. *Remote Sensing*, **13**, Article 44. <https://doi.org/10.3390/rs13010044>
- [4] 刘佳, 陈艳, 王曼, 等. ERA-Interim 及 ERA5 在中国西南复杂地形区的适用性对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(1): 95-103.
- [5] 温婷婷, 郭英香, 董少睿, 等. 1979-2017 年 CRU, ERA5, CMFD 格点降水数据在青藏高原适用性评估[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 684-697.
- [6] 麦哲宁, 许东蓓, 孙继松, 等. 基于 ERA-5 高分辨率资料的高原低涡客观识别方法研究[J]. 大气科学, 2022, 48(5): 1991-2003.
- [7] 张亚男, 罗浩. 风廓线雷达产品在贵州降雪冻雨天气中的特征分析[J]. 气象科技, 2024, 52(2): 252-264.
- [8] 赵美艳, 余君 蒋镇. 重庆微波辐射计资料的评估和探测特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(5): 118-126.
- [9] 左泉, 鲍艳松, 董焱, 许丹, 吴莹. 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.