

面向资料同化的风廓线雷达风场特征分析及其质控方法

王叶红^{1,2} 张伟¹ 赵玉春¹

1 厦门市气象局, 海峡气象开放实验室, 厦门 361012

2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都, 610072

摘要 以美国国家环境预报中心全球预报系统(National Centers for Environmental Prediction/Global Forecast System, NCEP/GFS) $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分析场作为数值预报背景场, 结合地面降水资料, 面向资料同化分析了2017年1-12月逐日00、06、12、18 UTC福建12部L波段风廓线雷达(其中CFL-03系列3部、CFL-06系列9部)水平风产品质量特征, 并初步探讨了不同质量控制方案的影响差异。结果表明:(1) CFL-06系列雷达在水平风的最大探测高度、有效数据获取率和低层水平风质量等方面明显优于CFL-03系列。(2) 相同系列的不同风廓线雷达探测水平风的数据获取率、有效探测高度、标准差、相关系数及偏差的垂直分布特征等存在极大差异, 该差异与风廓线雷达所处的地理位置(沿海或内陆)、海拔高度等并无直接关系。(3) 各雷达站探测 u 风速相对背景场存在明显系统性负偏差, 小于背景场, 不满足资料同化对背景场的无偏需求, 资料同化时需进行偏差订正; v 风则相对较好。(4) 降水对风廓线雷达探测影响较大, 有降水时数据获取率在中低层有所减小, 但在中高层则大幅提高; u 、 v 风标准差在中低层有所增加, 而在中高层 v 风标准差有所增加, u 风标准差则大幅降低。(5) 针对不同风廓线雷达, 提出了不同高可信度区间和不同有效探测高度两种质量控制方案, 并与固定有效探测高度方案进行了对比, 结果表明, 这两种质量控制方案皆具有明显优势。不同高可信度区间方案的质量控制效果更为显著, 不同雷达站水平测风数据得到更加充分和有效识别, 既减少了雷达资料不必要损失, 又可将质量差的数据进一步剔除; 该方案在有降水情形下也有较好效果。

关键词: 风廓线雷达; 水平风产品; 特征分析; 质量控制

文章编号 2019216C **中图分类号** P435 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19216

Wind Characteristics Analysis of Wind Profiler Radar and Its Quality Control Method for Data Assimilation

WANG Yehong^{1,2} ZHANG Wei¹ ZHAO Yuchun¹

1 Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

2 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

Abstract: With $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ analysis fields of National Centers for Environmental Prediction/Global Forecast System (NCEP/GFS) as numerical forecast background and using surface precipitation data, quality characteristics of wind products from twelve L-band wind profiler radars in Fujian Province, including three CFL-03 radars and nine CFL-06 radars, were analyzed firstly at 00, 06, 12, and 18 UTC in a day from January to December 2017 aiming at data assimilation. Then different quality control (QC) schemes and their effects were preliminary discussed. The results indicate that: (1) Winds detected by CFL-06 radars are obviously better than those from CFL-03 radars in the

收稿日期 2019-09-19; 网络预出版日期

作者简介: 王叶红, 女, 正研, 主要从事资料同化和中尺度数值模拟研究。E-mail: 278403168@qq.com

资助项目: 国家自然科学基金(41405106, 41675047); 厦门市科技惠民计划项目(3502Z20174052); 福建省气象局开放式课题研究基金项目(2020K08); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目(SZKT201803)

Founded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41405106, 41675047), People-Benefited Scientific and Technological Program of Xiamen City (Grants 3502Z20174052), Open Research Programme of Fujian Meteorological Bureau (2020K08); Open Research Programme of Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province (SZKT201803)

aspects of maximum detection height, effective data availability and horizontal wind quality in low levels. (2) Great differences exist in horizontal winds detected by different wind profiler radars with same model regarding its data availability, effective detection height, and vertical distribution of standard deviation, correlation coefficient and bias. These differences have no direct relationship with geographical location of wind profiler radars, i.e. coastal area or inland, and height above sea level. (3) The wind profiler radar products have obviously systematic negative bias relative to GFS u -wind field, that is, the u -winds detected by wind profiler radars are lower than GFS background field. This doesn't meet the no-bias requirement for data assimilation. So bias corrections are necessary in data assimilation. Whereas v winds are relatively better than u wind. (4) Precipitation impacts greatly wind profiler radar detection. In precipitation days, the data availability reduces in middle-low levels but greatly enhances in middle-high levels. The standard deviations of u and v winds both increase in middle-low levels, whereas the standard deviations of v -winds increase and those of u -winds greatly reduce in middle-high levels. (5) Two QC schemes, i.e. different high-confidence range scheme and different effective detection-height scheme, are advanced up for different wind profiler radars to compare with fixed effective detection-height scheme. The results show that the two QC schemes both have obvious advantages. The QC effect of different high-confidence range scheme is much more obvious, with horizontal wind data of different radars more fully and effectively identified. The scheme does not only reduce unnecessary loss of radar data, but also further eliminates poor quality data. It also achieves good results in precipitation condition.

Key words: wind profiler radar, horizontal wind product, characteristic analysis, quality control

1 引言

风廓线雷达利用湍流大气对雷达电磁波的散射作用, 探测空气运动的多普勒效应信号, 可以反演出测站上空探测高度范围内时间(数分钟)与空间分辨率(几十米间距)均较高的大气水平风速、风向、垂直速度、大气折射率结构常数等气象要素的垂直廓线资料, 可极大弥补常规探空观测时空密度不足的缺陷。此外, 与多普勒天气雷达以降水粒子为示踪物, 对于无降水粒子的大气测不出大气流场的局限性相比, 风廓线雷达是以大气折射指数(湍流块)为示踪物, 可以测量出边界层到中层大气的流场, 其探测的主要对象是晴空或多云大气, 对降水天气也有一定的探测能力。美国国家海洋大气局(NOAA)评估结果表明, 风廓线雷达的时间和空间分辨率较高, 可以展示出大气波动等天气系统的连续详实变化过程(Benjamin et al., 2004b)。风廓线雷达无人值守、可全天候和全天时工作的特点, 以及可获得连续、客观、定量监测的优势, 使其越来越多地受到世界各国的重视, 并被广泛应用于各个领域(Bluestein and Spehger, 1995; Muschinski et al., 1999; Bouttier, 2001; 何平, 2006; Zhang et al., 2016; 廖菲等, 2017)。

从20世纪80年代美国建立风廓线雷达网以来(Strauch et al., 1984; Frisch et al., 1986), 日本、欧洲相继建立了自己的风廓线雷达网。我国也从20世纪80年代开始陆续开展风廓线雷达组网建设(马大安等, 1989; 顾映欣和陶祖钰, 1991, 1993), 截止2016年底, 我国已投入业务使用的有83部, 目前中国气象局规划到2025年将组建一个覆盖我国全境的225部风廓线雷达网(张小雯等, 2017)。风廓线雷达在大气风场观测(王志春和植石群, 2014)、大气湍流结构研究(Muschinski et al., 1999; 阮征等, 2008)、中尺度天气结构研究(Bluestein and Spehger, 1995; Trexler and Koch, 2000)、中小尺度天气系统监测和预警(何平, 2006; 古红萍等, 2008; 周志敏等, 2010; 董保举等, 2012)以及灾害性气象服务(何平等, 2009; 汪学渊等, 2013)等方面发挥越来越重要的作用。

风廓线雷达在数值天气预报中的作用也受到世界各国的广泛关注, 并已在欧洲中期天气预报中心(ECMWF)(Bouttier, 2001)、美国国家环境预报中心(NCEP)快速更新循环预报系统(RUC)(Benjamin et al., 2004a)、日本气象厅(JMA)(Ishihara et al., 2006; Kuo et al., 1987)、加拿大气象中心(CMC)等国外主要全球数值预报业务系统先后实现了风廓线雷达资料在模式中的业务同化, 并对模式预报性能的提高有正面影响。我国也在近年逐步开展了风廓线雷达资料的同化应用研究(张胜军等, 2004; 李妙英等, 2013; 余贞寿等, 2018), 取得了一定进展。张旭斌等(2015)针对广东地区13部风廓线雷达水平风产品,

采用经验正交函数（EOF）分析方法进行质量控制研究，并将质控后的资料同化到 GRAPES_3DVAR 同化系统中，使短期降水预报得到了明显改善。谭晓伟等（2016）通过观测系统模拟试验（OSSEs）对我国拟建风廓线雷达观测网内的不同类型风廓线雷达观测资料在 GRAPES_MESO 数值预报系统中的可能影响进行了研究，提出了选型建议。

总的来说，目前我国对风廓线雷达资料的同化研究还很不充分，特别是与其密切相关的资料质量分析和质量控制研究。朱立娟（2015）对 2015 年 5 月实时上传至国家气象信息中心国家级气象资料存储检索系统（MDSS）的 28 部风廓线雷达产品按照 P 波段对流层风廓线雷达 PA 和 PB 型号、L 波段边界层风廓线雷达 LC 型号分别进行了面向资料同化的水平风产品质量分析，指出不同型号雷达水平测风质量相差较大，其中 LC 边界层风廓线雷达质量最差。李红莉等（2013）将未经质量控制的 LC 边界层风廓线雷达资料进行同化，增加了初始风场的误差；张旭斌等（2015）同化质控后的 LC 边界层风廓线雷达风场资料进行，明显改善了短期降水预报。可见风廓线雷达产品质量分析和质量控制是实现其在数值模式中有效应用的关键。风廓线雷达探测水平风质量不仅与雷达型号有关，还受到径向速度观测值准确程度与均匀风假设条件等诸多因素的影响，同一型号雷达是否会由于选址不同而受到电磁干扰、地物回波等客观因素影响以及受不同天气系统影响而使不同雷达站水平测风质量产生较大差异值得关注。针对小范围组网的每一部雷达详细开展水平测风在不同高度上的、有无降水等不同天气条件下的质量分析，一方面可为业务应用提供参考依据，另一方面，也可制定差异化的风廓线雷达水平测风质控方案提供参考依据。

截止 2018 年 8 月福建省已建成并业务使用 15 部 L 波段风廓线雷达，在弥补常规高空探测网时空密度上的不足、加强对天气系统的识别和中小尺度灾害性天气的监测等方面发挥了重要作用（汪学渊等，2015；曾瑾瑜等，2017）。然而，如何充分有效地发挥福建风廓线雷达资料在数值预报模式中的同化应用，开展面向资料同化的质量分析和质量控制研究至关重要，鉴于此，本文对福建风廓线雷达水平风产品进行详细的质量分析，为科学合理的质量控制方案及业务同化应用提供科学依据，并为后期同化研究打下一定基础。

2 资料与方法

2.1 风廓线雷达资料

截止 2018 年，福建共有 15 部 L 波段风廓线雷达投入业务使用，其中 3 部（福鼎、晋江、秀屿）于 2017 年 11 月之后才陆续建成投入使用。本文对 2017 年全年数据完整的 12 部风廓线雷达（武夷山、永安、福清、建瓯、罗源、武平、建宁、连城、德化、平潭、平和、翔安，其中福清为移动风廓线雷达）进行面向资料同化的水平风场质量分析（图 1）。这 12 部雷达时间分辨率均为 6 min。武夷山、永安、福清为 L 波段 CFL-03 系列边界层风廓线雷达，起始和终止探测高度分别为 60 m 和 7080 m，武夷山和永安在 600 m 高度以下以 60 m 垂直分辨率进行观测（低模），之上则以 120 m 垂直分辨率进行观测（高模）；福清站低模和高模探测的衔接高度则为 840 m。其余 9 部雷达为 L 波段 CFL-06 系列低对流层风廓线雷达，起始和终止探测高度分别为 150 m 和 10110 m，在 4110 m 高度以下均以 120 m 垂直分辨率进行观测，之上则以 240 m 垂直分辨率进行观测。为便于比较，将福清在 600 m—840 m 间比武夷山和永安多的 660 m 和 780 m 两层数据忽略，即在后续统计中，武夷山、永安、福清探测高度完全一致，其余 9 站探测高度完全一致。需要说明的是，这 12 部雷达均为频率在 1300 MHz 左右的 L 波段雷达，为了达到更高的探测高度，CFL-06 系列的 9 部雷达在探测中进行了功率加强，其探测高度通常可以达到 6—8 km，强降水等天气条件下可以在 10 km 高度获得数据，达到了低对流层雷达的最大探测高度。为区别于 P 波段低对流层风廓线雷达（频率在 440—450 MHz、最大探测高度 8 km），这里将通过加强功率增加探测高度的 CFL-06 系列的 9 部雷达称为 L 波段低对流层风廓线雷达。

按照资料采样收集频率，风廓线雷达资料可分为实时采样数据、半小时平均数据和小时平均数据，朱立娟（2015）研究发现，小时平均数据的平均偏差和离散度都要小于实时采样数据，前者在小时平均处理过程中滤除了大气湍流瞬时的波动，而该部分信息恰好是资料同化中无法反映的代表性误差，因此，针对资料同化应用，采用小时平均采样数据相对更为恰当。本文分析的水平风产品为厂家可信度标识达到 100 % 的小时平均采样风数据，该数据为前一小时资料的平均。

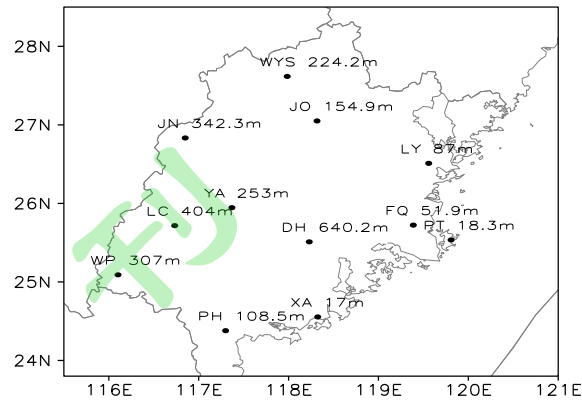


图1 福建省风廓线雷达站点分布 (WYS、YA、FQ、JO、LY、WP、JN、LC、DH、PT、PH、XA 分别代表武夷山、永安、福清、建瓯、罗源、武平、建宁、连城、德化、平潭、平和、翔安, 数字为各风廓线雷达站海拔高度)

Fig.1 The locations of wind profiler radars in Fujian province (WYS、YA、FQ、JO、LY、WP、JN、LC、DH、PT、PH and XA illustrate wind profiler radars in Wuyishan, Yongan, Fuqing, Jianou, Luoyuan, Wuping, Jianning, Liancheng, Dehua, Pingtan, Pinghe and Xiangnan, respectively. Numbers indicate altitude)

2.2 数值天气预报背景场资料

采用的数值天气预报背景场资料为美国国家环境预报中心全球预报系统 (National Centers for Environmental Prediction/Global Forecast System, NCEP/GFS) 一日 4 次 (00、06、12、18 UTC) $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分析资料, 垂直方向从 1000 hPa 至 10 hPa 共 26 个等压面层。为了与 GFS 背景场资料时间相匹配, 选用相同时刻 (00、06、12、18 UTC) 的风廓线雷达小时平均风数据。另外, 因为风廓线雷达资料为站点等高度面资料, 而 GFS 资料为格点等压面资料, 因此, 需进行空间一致性匹配, 将 GFS 资料空间插值到风廓线雷达水平风所在位置 (其中垂直位置为风廓线雷达站海拔高度加上各探测高度), 包括水平方向插值和垂直方向插值, 其中水平方向采用双线性插值, 垂直方向上首先将 GFS 资料各等压面层上的位势高度转换为几何高度, 然后线性插值到风廓线雷达资料所在高度上。鉴于每部风廓线雷达站海拔高度不同, 因而尽管相同系列雷达的探测高度一致, 但探测水平风所在实际高度并不相同, 为绘图和分析方便起见, 后文所指高度均为各雷达站探测高度, 而非水平风所在实际高度。

3 风廓线雷达水平风资料获取率分析

数据获取率是定量评估风廓线雷达探测能力的一项重要指标, 其定义为: 各高度上, 实际获取的有效数据量与应获得的数据总量之比 (胡明宝等, 2008)。福建 12 部风廓线雷达水平风 2017 年全年平均的数据获取率如图 2 所示, 可见同一部雷达资料获取率在不同探测高度上不尽相同, 总体趋势为获取率在边界层和对流层低层较高, 接近 1, 而在其上随高度增加而逐渐减小; 另外, 不同系列雷达间、相同系列不同雷达间数据获取率也存在较大差异。

首先来看 CFL-03 系列的武夷山、永安、福清 3 部雷达。3 部雷达均表现为从底层至某一高度层 (武夷山、永安和福清分别为 1800 m、2520 m 和 1920 m) 数据获取率保持在 0.95 以上, 随高度变化不明显; 而在此高度之上, 数据获取率则随高度增加而逐步减小至最低的 0.2 左右。在 1800 m 高度以上, 三者数据获取率逐渐出现显著差异, 其中永安最高, 福清次之, 武夷山最低; 其差异在 3840 m 处达到最大, 永安和武夷山的数据获取率分别为 0.78 和 0.32, 两者相差 0.46。

接下来考察 CFL-06 系列的建瓯、罗源、武平、建宁、连城、德化、平潭、平和及翔安 9 部雷达, 发现数据获取率具有如下特征: (1) 与 CFL-03 系列的 3 部雷达类似, CFL-06 系列的 9 部雷达也表现出从底层至某一高度层数据获取率保持在 0.95 以上, 随高度变化不明显; 而在此高度之上, 数据获取率则随高度增加而逐步减小至最低的 0.2 左右。这一高度在 2910 m (德化) 至 3630 m (翔安) 之间, 普遍高于 CFL-03 系列雷达。(2) 这 9 部雷达数据获取率随高度减小这一趋势均在低模与高模探测衔接高度 4110 m 处出现中断, 也即该高度层数据获取率较其紧邻的 3990 m 高度层上的数值平均偏大 0.08 左右。该现象在图 2 中表现

为数据获取率廓线在 3990 m 与 4110 m 之间折向左侧的尖角，这与风廓线雷达在 3990 m 以下采用短脉冲发射（低模式）发射能量小、在 4110 m 及其上采用长脉冲发射（高模式）发射能量大这两种工作模式有关。同时注意到，在 CFL-03 系列的 3 部雷达中，数据获取率廓线在低模向高模转换的高度层并未出现“折角”现象，这与其低、高模两种探测模式衔接高度（武夷山和永安为 600 m、福清为 840 m）远较 CFL-06 系列的 4110 m 低、因而风廓线雷达回波信号在 600 m(840 m)高度减弱不明显有关。(3)4110 m 高度之上 CFL-06 系列的 9 部雷达再次呈现数据获取率随高度增加而减小的特征，并在 9390 m 高度以上减小趋势变缓。(4) CFL-06 系列不同雷达间数据获取率相差也很大，德化明显低于其余 8 部雷达，在 4110 m 高度以下及以上翔安和平潭则分别略有优势。总体上，CFL-06 系列雷达数据获取率的差异（最大相差 0.2）远小于 CFL-03 系列雷达间的差异（最大相差 0.46）。

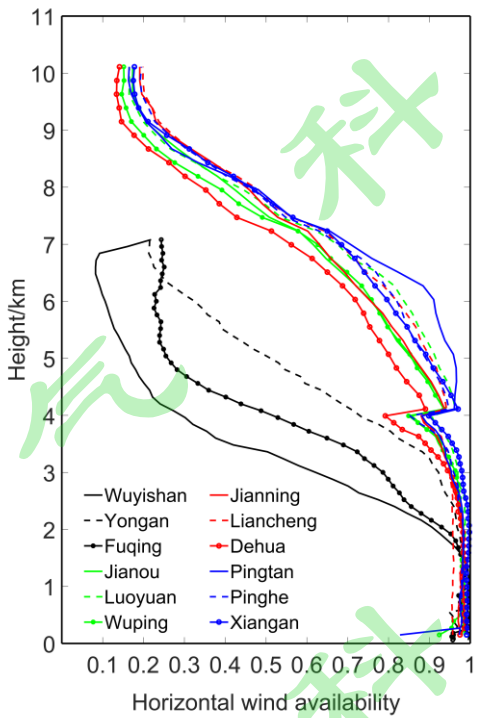


图 2 福建风廓线雷达水平风数据获取率

Fig.2 The availability of horizontal winds detected by wind profiler radars in Fujian province

可见，与 CFL-03 系列雷达相比，CFL-06 系列雷达不仅探测高度更高，而且除 1.8 km 高度以下两者数据获取率相差不大外，在 1.8 km 以上的相同高度层，其数据获取率显著高于前者。

按照有效数据获取率 0.8 对应的高度为风廓线雷达有效探测高度（何平等，2009），各雷达站有效探测高度不尽相同（表 1），其中武夷山、福清最低，分别为 2400 m 和 2760 m；永安次之，为 3720 km；其余 9 站有效探测高度在 5070—6510 m，德化最低，平潭最高。

表 1 基于水平风数据获取率阈值（0.8）的福建风廓线雷达有效探测高度

Table.1 The effective detection altitude of Fujian wind profiler radars based on the threshold (0.8) of horizontal wind availability

雷达站/型号	有效探测高度 (m)	雷达站/型号	有效探测高度 (m)	雷达站/型号	有效探测高度 (m)
武夷山/CFL-03	2400	永安/CFL-03	3720	福清/CFL-03	2760
建瓯/CFL-06	5550	罗源/CFL-03	6270	武平/CFL-03	5310
建宁/CFL-03	5550	连城/CFL-03	6030	德化/CFL-03	5070
平潭/CFL-03	6510	平和/CFL-03	6030	翔安/CFL-03	5790

4 风廓线雷达水平风质量分析

4.1 风廓线雷达水平风误差特征

4.1.1 散点分布特征

不考虑有效探测高度、有无降水影响等因素，分别考察福建 12 部风廓线雷达水平风产品相对 GFS 背景场的误差分布特征。图 3 所示为 2017 年风廓线雷达探测水平 u 风（记为 u_0 ）相对于 GFS 背景场（记为 u_b ）的散点分布，可见 12 部雷达 u 风误差特征主要表现为：（1）散点分布的最基本特征为沿对角线成棒槌型分布；（2）各站均存在偏离对角线严重的点，分布特征不尽相同。总体而言，翔安、永安、武平水平 u 风误差相对较小，散点基本沿对角线分布，偏离对角线严重的点明显少于其他站；而福清、建瓯、罗源、建宁、连城、德化、平潭、平和在 $u_0=0 \text{ m s}^{-1}$ 附近存在明显“污染带”现象，表现为 u_b 为较强西风，而 u_0 却在 0 m s^{-1} 附近；武夷山则在 $u_b=0 \text{ m s}^{-1}$ 附近出现了较多异常偏差点。福清资料最差，棒槌型分布特征最不明显，“零污染带”现象最为显著，异常偏差点明显偏多；（3）棒槌型散点沿对角线分布并不完全对称，普遍偏向于 u_b 一侧，说明对于 u 风速而言， u_b 大于 u_0 的情况明显多于其小于 u_0 的情况，因此，风廓线雷达水平 u 风相对背景场存在明显系统性负偏差，小于背景场，不满足资料同化对背景场的无偏需求，资料同化时需进行偏差订正。可将各风廓线雷达站 u 风速均值作为偏差订正值，各测站原始数据减去各自的偏差订正值即可。

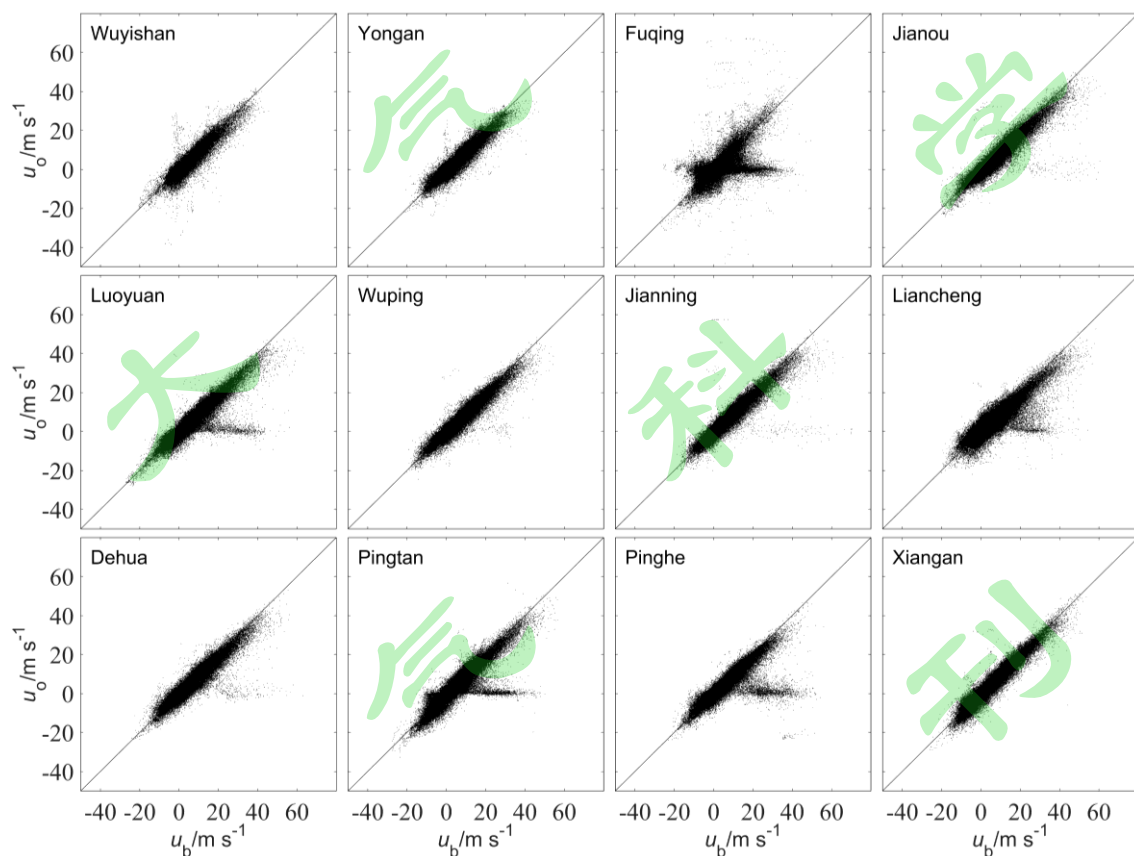


图 3 风廓线雷达水平 u 风速 (u_0) 与 GFS 背景场 (u_b) 散点分布

Fig.3 The scatterplots of u -wind speed detected by wind profiler radars (u_0) and GFS background winds (u_b)

图 4 所示为 2017 年风廓线雷达探测 v 风分量（记为 v_0 ）相对于 GFS 背景场（记为 v_b ）的散点分布，可见 v 风误差的主要特征也表现为散点基本沿对角线分布，各站也有明显偏离对角线的点，但数量和偏离程度都远小于 u 风分量，其中福清和武夷山在 $v_b=0 \text{ m s}^{-1}$ 附近出现了“污染带”现象，但不显著。综合而言， v 风质量优于 u 风。朱立娟（2015）在研究中指出风廓线雷达探测 u 风和 v 风与数值预报背景场相比在 0 风速附近都出现了较多异常偏差点，本文进一步研究发现， u 风“零污染带”现象明显甚于 v 风，且该现象不

是在每部雷达中均出现，如翔安和永安等探测质量较好的雷达站，在 u 、 v 风的 0 风速附近均未出现较集中的异常偏差点。

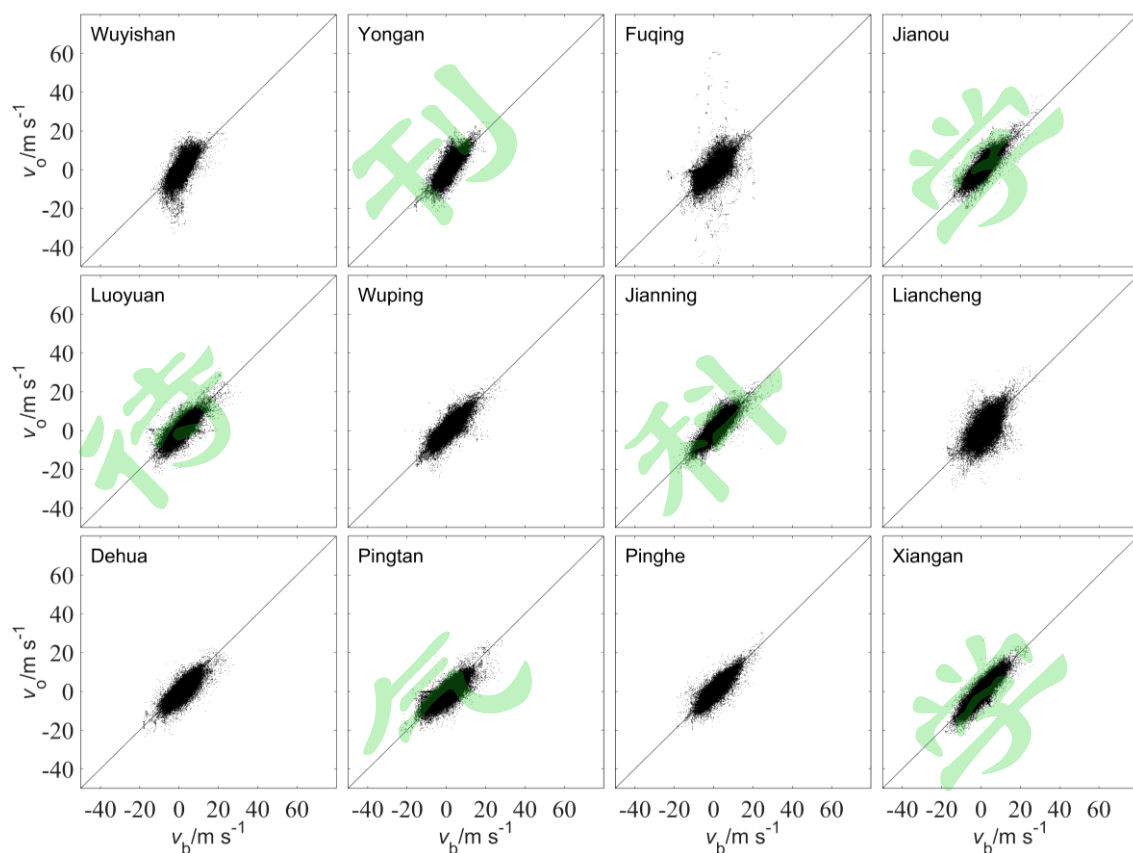


图 4 风廓线雷达水平 v 风速 (v_o) 与 GFS 背景场 (v_b) 散点分布

Fig.4 The scatterplots of v -wind speed detected by wind profiler radars (v_o) and GFS background winds (v_b)

定量统计各雷达站探测 u 、 v 风相对 GFS 背景场的标准差，可见各雷达站测风质量存在极大差异。CFL-03 系列的 3 部风廓线雷达中，永安风廓线雷达探测水平风场质量相对最优， u (v) 风标准差为 2.72 m s^{-1} (2.95 m s^{-1})；武夷山次之， u (v) 风标准差为 3.69 m s^{-1} (3.70 m s^{-1})；福清最差， u (v) 风标准差高达 7.34 m s^{-1} (5.13 m s^{-1})。CFL-06 系列的 9 部风廓线雷达中，翔安风廓线雷达探测水平风场质量相对最优， u (v) 风标准差为 2.73 m s^{-1} (2.58 m s^{-1})；武平次之， u (v) 风标准差为 2.86 m s^{-1} (2.78 m s^{-1})；建瓯、建宁、德化、罗源、平潭、平和、连城依次再次之， u 风标准差范围为 3.36 m s^{-1} — 5.42 m s^{-1} ， v 风标准差范围为 2.76 m s^{-1} — 4.66 m s^{-1} 。因此，综合而言，翔安和永安风廓线雷达测风质量相对最优，武平次之，建瓯、建宁、德化、罗源、平潭、平和、连城依次再次之，福清最差。福清风廓线雷达测风质量远差于其他雷达站，可能与其是移动式风廓线雷达，雷达性能参数不同有关，其中雷达探测五波束方向与其他雷达极大不同：其余雷达均为垂直方向波束指向天顶方向，即垂直方向波束与铅垂线夹角为 0° ，东西、南北方向波束与铅垂线的夹角对称；而福清雷达垂直方向波束则偏离天顶方向，因而其垂直方向波束与铅垂线夹角不为 0° ，东西、南北方向波束与铅垂线的夹角并不对称，东西向不对称程度甚于南北向。此外，对各时次风廓线雷达探测和 GFS 背景场水平风的垂直廓线及其在不同等高压面上的水平分布进一步考察后发现，风廓线雷达探测水平风存在较大偏差的时次，往往大气在风廓线雷达探测的水平范围内是不均匀的，此时已不符合风廓线雷达计算水平风的均匀的假设条件，因此改进非均匀水平风条件下的风廓线雷达水平风产品的反演算法，可能是提高风廓线雷达水平风产品质量的关键环节。

4.1.2 资料偏差随高度分布特征

为进一步分析风廓线雷达水平风产品相对数值预报背景场的偏差在垂直方向上的分布特征，考察了 12 部风廓线雷达探测 u 风相对于 GFS 背景场的偏差分布散点图 (图 5)，发现不同雷达站 u 风偏差随高度的

分布特征具有极大差异。

武夷山、永安和福清为同一系列雷达，但 u 风偏差随高度的分布却差异极大。永安 u 风偏差值在各高度分布比较均匀，偏差绝对值大于 10 m s^{-1} 的异常点相对较少，并主要集中在 600 m 以下的边界层。武夷山站偏差较大的点则相对永安有所增加，特别是在 600 m 以下低层和 6720 m 以上的高层，后者偏差值异常大，极大值超过 60 m s^{-1} 。因此可以确定图 3 中武夷山站偏离对角线的点主要位于这两个高度层。图 3 中福清站偏离对角线的散点相对较多，从图 5 偏差随高度分布可见这些异常点分布于各高度，其极大值达 $\pm 70 \text{ m s}^{-1}$ 左右。此外，永安和武夷山站 u 风偏差相对集中于 $\pm 10 \text{ m s}^{-1}$ 范围内，而福清站偏差则集中于 $-20 \sim 40 \text{ m s}^{-1}$ 范围内。由此可见，尽管上述 3 个雷达站系列相同，但测风质量却相差很大，相较而言，永安质量最佳，武夷山次之，而福清最差。

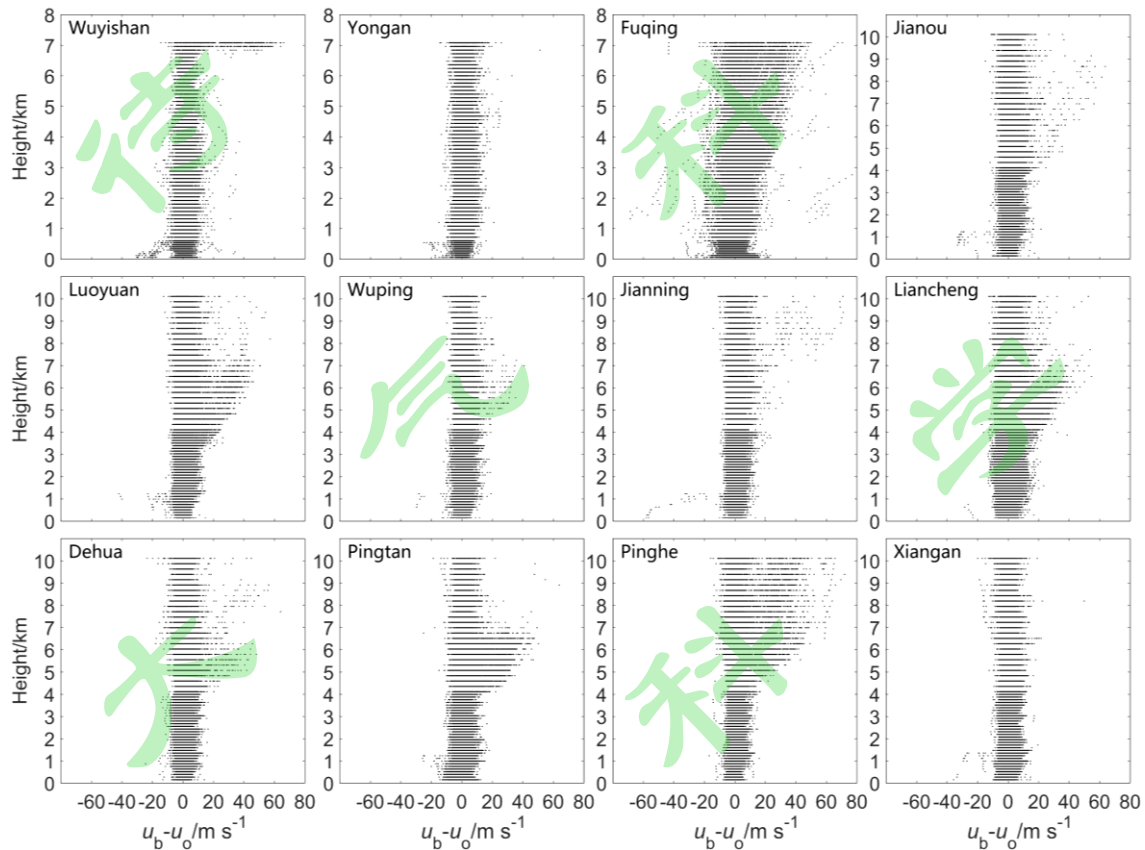


图 5 风廓线雷达水平 u 风速 (u_o) 与 GFS 背景场 (u_b) 偏差垂直分布

Fig.5 The vertical distribution of u -wind speed bias of wind profiler radar products (u_o) against GFS background winds (u_b)

建瓯、罗源、武平、建宁、连城、德化、平潭、平和及翔安同为 L 波段 CFL-06 系列雷达，同样的，其 u 风质量也相差很大。与图 3 所示的翔安站 u 风散点基本沿对角线分布特征一致，其偏差随高度分布相对均匀，异常点较少（图 5），主要分布于 1.5 km 以下及 $7 \sim 9 \text{ km}$ ，异常程度比其他测站小得多，在这 9 部雷达中测风质量最优。武平次之，其偏差异常点主要集中在 $5 \sim 7.5 \text{ km}$ 高度上，主要为正异常偏差，正是该范围内的正异常偏差点造成了图 3 武平站 u_o 风在 0 风速附近的“污染带”现象。德化与武平比较类似，但异常点有所增多，集中分布在 $5 \sim 9 \text{ km}$ 高度上，也主要为正异常偏差，这些正异常偏差点引起了图 3 中德化站 u_o 风在 0 风速附近的“污染带”现象。而建宁、建瓯、罗源、平潭、连城、平和站 u 风异常偏差点则依次增加得更多，导致其 u_o 风在 0 值附近“污染带”现象的异常偏差点则依次分布在 $4.5 \sim 10 \text{ km}$ 、 $4 \sim 10 \text{ km}$ 、 $3.5 \sim 10 \text{ km}$ 、 $4 \sim 7.5 \text{ km}$ 、 $4 \sim 10 \text{ km}$ 及 $4 \sim 10 \text{ km}$ 高度上。其中平和站是该系列 9 部雷达中测风质量最差的，其异常偏差点最多，值相对较大，可达 70 m s^{-1} 的正偏差。此外，建宁、建瓯、罗源和平潭均在 1.5 km 高度以下存在相对集中的负偏差异常点，而这些异常点则对应于图 3 中各雷达站对角线上方偏离对角线的那些点。

总体而言，除翔安、永安各层 u 风偏差相差不大，未出现比较集中的偏差异常点之外，其余 10 个站均有不同程度的偏差异常点，其分布高度、偏差异常程度不尽相同，并且高层偏差普遍大于低层的。

同样的，对 v 风偏差随高度的分布特征也进行了考察（图 6），发现各雷达站探测的 v 风分量出现较大偏差的资料数明显少于 u 风分量，且未呈现高层偏差显著大于低层的特点，也即整体而言风廓线雷达探测的 v 风与模式背景场的偏差要明显小于 u 风的。对不同雷达站而言，则有所差异。与 u 风类似，在相同系列的武夷山、永安和福清雷达中，永安雷达测风质量相对最优，偏差异常点明显少于其他 2 部雷达，福清依然为最差，并可判断其在图 4 中偏离对角线的点主要分布在 3—4 km，极大值可达 $\pm 60 \text{ m s}^{-1}$ 。而在另外 9 部系列相同的雷达中，翔安雷达探测 v 风质量最优，偏差范围窄，集中分布在 $-10—10 \text{ m s}^{-1}$ ；而连城雷达偏差分布范围较广，异常偏差点多，且高层偏差程度甚于低层。

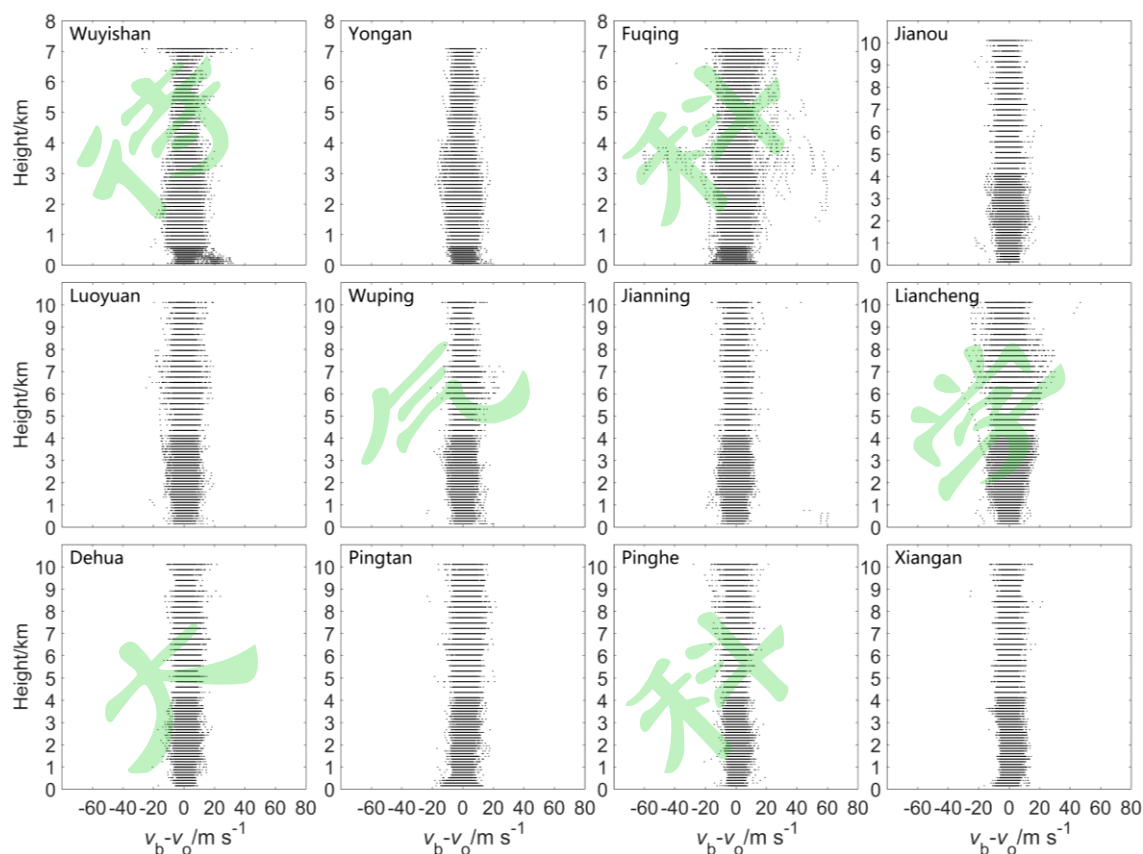


图 6 风廓线雷达水平 v 风速 (v_o) 与 GFS 背景场 (v_b) 偏差垂直分布

Fig.6 The vertical distribution of v -wind speed bias of wind profiler radar products (v_o) against GFS background winds (v_b)

4.1.3 资料偏差概率密度分布

图 7 给出了 12 部风廓线雷达 u 风与 GFS 背景场在所有高度层上差值的概率密度分布，可见各雷达 u 风偏差概率密度分布均呈钟型，中间高，两端逐渐下降，左右不完全对称，右侧直方柱在其底部明显高于左侧。差值大部分集中在 0 m s^{-1} 附近，其中永安、建宁、武平、平和 4 部雷达 u 风差值在 0 m s^{-1} 附近的概率密度相对较大，其值在 18.18%至 17.95%；翔安、建瓯、武夷山、罗源 4 部雷达相对次之，其值在 17.41%至 17.02%；德化雷达再次之，占 16.08%，上述 9 部雷达 u 风差值概率密度分布呈现出钟型分布高耸的特征，其绝对值大于 4 m s^{-1} 的差值相对较少，约占 9.09%（翔安）—13.11%（罗源）。而平潭、连城和福清雷达 u 风差值在 0 m s^{-1} 附近的概率密度仅为 13.19%、11.36%和 8.64%，钟型分布较永安等 9 部雷达依次变得更加低矮、宽平，其绝对值大于 4 m s^{-1} 的差值概率密度则依次增加到 18.84%、23.42%和 39.38%。

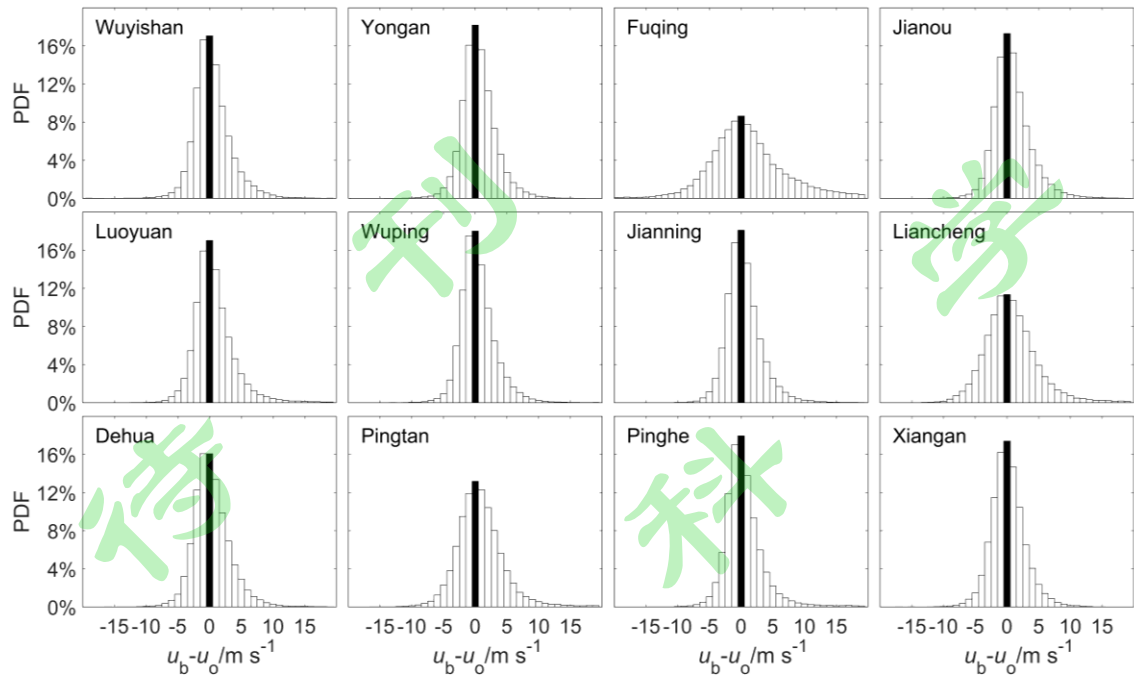


图 7 风廓线雷达水平 u 风速 (u_o) 与 GFS 背景场 (u_b) 差值的概率密度分布

Fig.7 The probability density distribution of differences between u -wind speed detected by wind profiler radars (u_o) and GFS background winds (u_b)

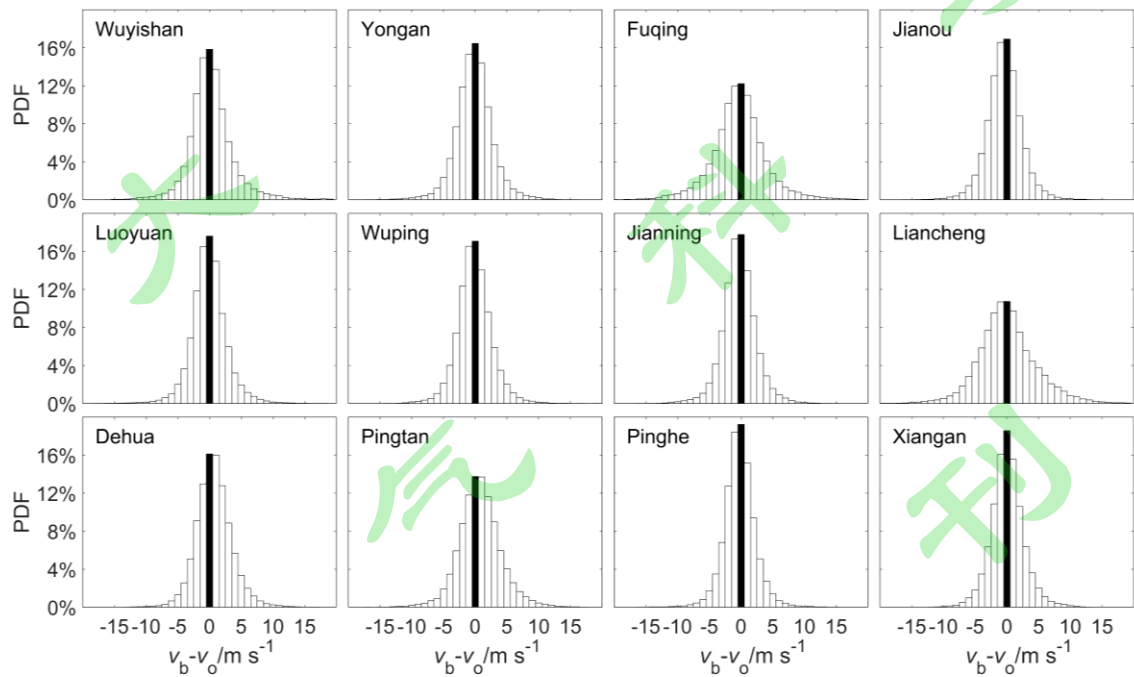


图 8 风廓线雷达水平 v 风速 (v_o) 与 GFS 背景场 (v_b) 差值的概率密度分布

Fig.8 The probability density distribution of differences between v -wind speed detected by wind profiler radars (v_o) and GFS background winds (v_b)

图 8 是 v 风差值的概率密度分布, 可见与 u 风类似, 各雷达 v 风差值概率密度分布也均呈钟型, 中间高, 两端逐渐下降, 但与 u 风差值概率密度分布右侧直方柱在其底部明显高于左侧不同, v 风差值概率密度分布左右大致对称。 v 风差值也大部分集中在 0 m s^{-1} 附近, 除福清站 v 风差值在 0 m s^{-1} 附近的概率为 12.22% , 较其 u 风差值概率的 8.64% 相比有较明显提高外, 其余雷达站 v 风差值在 0 m s^{-1} 附近的概率与其 u 风差异

不大。

综合福建 12 部风廓线雷达 u 、 v 风差值概率密度分布可见，各雷达站 u 风偏差不完全满足资料同化所需的正态分布需求，而 v 风则相对较好。因此，做好各雷达站水平风资料的质量控制，使其满足正态分布必须加以考虑。

4.1.4 相关系数与标准差

图 9 给出了福建 12 部风廓线雷达探测的 u 风速与 GFS 背景场的相关系数和标准差随高度的分布，可以更加直观和定量地反映各雷达站在不同高度上的水平测风质量，由图可见不同雷达站 u 风相关系数和标准差廓线分布差异很大，具体表现为如下特征：

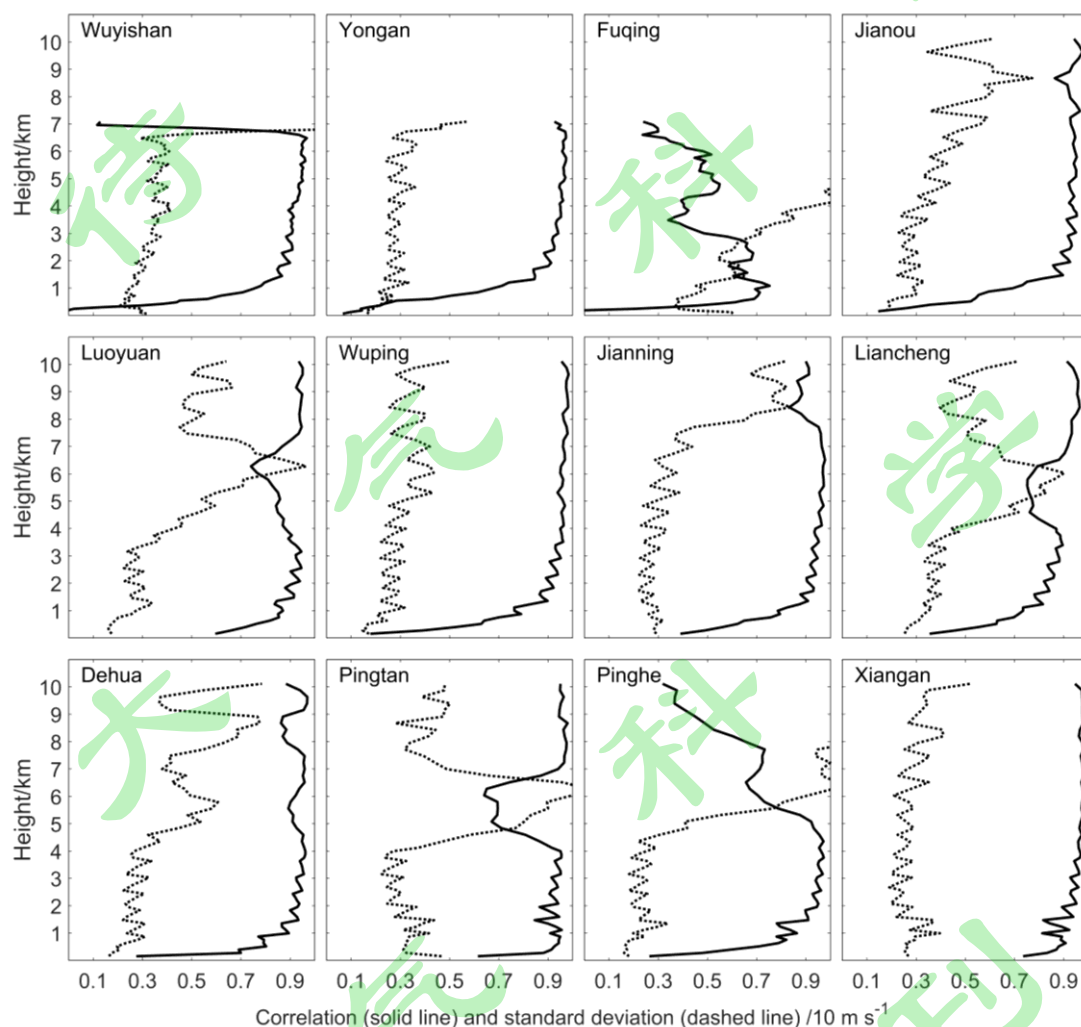


图 9 风廓线雷达水平 u 风速与 GFS 背景场相关系数（实线）与标准差（虚线，单位： 10 m s^{-1} ）的垂直分布

Fig.9 The vertical distribution of standard deviations and correlations between u -wind speed detected by wind profiler radars and GFS background winds

武夷山站最低层—6600 m 高度 u 风标准差在 $2.1\text{--}4.3 \text{ m s}^{-1}$ ，而在 6720 m 以上的 4 个高度层，其标准差从 6.88 m s^{-1} 迅速增加到 19.835 m s^{-1} ，可见，武夷山站 u 风偏差异常主要位于 6720 m 高度以上。武夷山 720 m 高度以下标准差虽然不大（最大 3.171 m s^{-1} ），但相关系数相对较小（其值范围为 $-0.04\text{--}0.62$ ），而且越接近地面其值越小，说明该范围内风廓线雷达探测的 u 风风向与背景场可能存在不协调，而之所以在标准差上没有明显表现则可能因为低层风速小，即使出现风向的反向也不会带来较大的风速误差。为验证这一推断，普查了武夷山站风廓线雷达探测水平风与 GFS 背景场的分布，发现在 720 m 高度以下的边界层，确实较常出现两者风向不协调甚至反向的情况，而此时两者的风速都相对较小，因此风速误差并不大。通常在进行资料同化时，一般会将观测背景差绝对值大于 3—5 倍观测误差（往往以观测资料的标准差作为观测误

差)的数据作为“坏”数据剔除掉(仲跻芹等, 2017),而对于此类数据,虽然其风向反向但风速较小,其观测背景差往往并未超出3—5倍观测误差的范围,因而无法将其剔除。但结合相关系数的统计,则可以将该高度范围列为不可靠数据高度而予以剔除。在840—6600 m高度上,武夷山站相关系数较高,标准差较小, u 风数据可信度较高;而在6720 m以上相关系数小、标准差大, u 风数据可信度较低。

翔安站测风数据质量最优,除最低层 u 风相关系数小于0.8(其值为0.735)外,其余各层相关系数在0.81—0.99,除最高层10110 m标准差为 5.21 m s^{-1} 相对较大外,其余层次 u 风的标准差在 $1.91\text{—}4.1\text{ m s}^{-1}$,表明翔安站整层数据的可信度相对较高。而福清站测风数据质量相对最差, u 风的相关系数范围为 $-0.02\text{—}0.75$,标准差范围为 $3.71\text{—}14.99\text{ m s}^{-1}$ 。因此,福清站整层数据的可信度均较差,而这些数据均是通过了厂家质检达到可信度100%的数据,很显然,在未经过进一步质量控制的情况下,该站数据质量并不理想,应谨慎使用。

相对而言,永安风廓线雷达探测的水平 u 风相对较好,其标准差从最低层到6720 m取值范围为 $1.64\text{—}3.60\text{ m s}^{-1}$,仅在6840 m及其上3个高度层标准差略大,分别为 4.73 、 4.57 、 5.69 m s^{-1} ;永安站960 m高度以下相关系数较低(其值范围为 $0.07\text{—}0.66$),在其上相关系数相对较大(其值范围为 $0.71\text{—}0.97$)。武平雷达探测 u 风的相关系数和标准差的廓线分布与永安较为类似,其标准差除在最高层10110 m达 4.99 m s^{-1} 相对较大外,其余各层 u 风的标准差在 $1.47\text{—}4.35\text{ m s}^{-1}$;类似地,武平站 u 风相关系数也在低层较低,630 m高度以下相关系数较小(取值范围为 $0.178\text{—}0.641$),在其上相关系数较大(其值范围为 $0.70\text{—}0.98$)。

建瓯、罗源、建宁、连城、德化、平潭、平和各站 u 风相关系数和标准差的廓线分布各不相同,但总体特征为:低层标准差不大,但相关系数却较小;在其上一定高度范围内标准差相对较小、相关系数相对较大(大于0.8);而在超过这一高度层后,标准差急剧加大、相关系数迅速减小。标准差相对较小而相关系数相对较大的高度范围在不同雷达站不尽相同。如果以相关系数大于0.7和标准差小于 4.5 m s^{-1} 作为 u 风探测资料可信度较高的层次,那么建瓯、罗源、建宁、连城、德化、平潭、平和各雷达站所在的层次分别为1110 m—6030 m、390 m—3990 m、750 m—7710 m、870 m—3750 m、510 m—4830 m、270 m—4110 m、510 m—5070 m。

特别注意到,12部风廓线雷达探测的1 km以下边界层内水平风与背景场的相关系数均明显低于其他层次,并在最低层达到极小值。这不难理解,一方面,因为越靠近地面,风的不均匀性越强,并且受地面遮挡物的影响更大,乱流现象也更为突出;另一方面,GFS的模式地形可能对低层风场特别是边界层风有较大影响,因而风廓线雷达探测水平风与模式背景场的相关系数相对差于高层。为了探究不同雷达对低层风的探测能力的差异,表2给出了福建12部风廓线雷达探测的最低层水平风与模式背景场的相关系数分布(鉴于CFL-03系列雷达探测最低层高度为60 m,低于CFL-06系列雷达的150 m,为便于对比,同时给出了相近高度层180 m处的结果),可以发现如下特点:

表2 福建风廓线雷达探测最低层水平风与GFS背景场的相关系数分布

Table.2 The correlations of horizontal winds in the lowest level detected by Fujian wind profiler radars with GFS background

winds					
雷达站	雷达系列	海拔高度 (m)	探测高度 (m)	u 风相关系数	v 风相关系数
武夷山	CFL-03	224.2	60/180	-0.002/-0.005	0.077/0.116
永安	CFL-03	253.0	60/180	0.066/0.144	0.463/0.571
福清	CFL-03	51.9	60/180	-0.022/-0.023	0.401/0.648
建瓯	CFL-06	154.9	150	0.146	0.408
罗源	CFL-06	87.0	150	0.596	0.494
武平	CFL-06	307.0	150	0.178	0.289
建宁	CFL-06	342.3	150	0.390	0.583
连城	CFL-06	404.0	150	0.355	0.801
德化	CFL-06	640.2	150	0.275	0.424
平潭	CFL-06	18.3	150	0.615	0.418

平和	CFL-06	108.5	150	0.264	0.352
翔安	CFL-06	17.0	150	0.735	0.847

(1) CFL-06 系列雷达探测的低层 u 风相关系数明显大于 CFL-03 系列雷达, 前者 9 部雷达探测 150 m 高度 u 风的相关系数范围为 0.146—0.735, 而后者探测 60 m 高度 u 风的相关系数仅为 -0.022—0.066, 将探测高度增加到 180 m 其相关系数也仅为 -0.023—0.144。CFL-03 系列的 3 部雷达中既有海拔超过 200 m 的测站 (武夷山、永安), 也有 51.9 m 海拔较低的雷达站 (福清), 而 CFL-06 系列中也均有与之海拔接近的雷达站, 因此该结果的得出已考虑了海拔的影响。不同雷达对低层 v 风探测能力相对 u 风而言差异减小。因此, 总体而言, CFL-03 系列雷达低层测风能力不及 CFL-06 系列雷达。

(2) 翔安风廓线雷达探测低层风与模式背景场的相关 (u 、 v 风相关系数分别为 0.735 和 0.847, 均为最高) 明显优于其他雷达站, 这一方面得益于翔安站位于我国东南沿海, 低层风向风速较内陆地区变化更为均匀, 而另一方面, 则因其雷达良好的性能。注意到, 平潭站亦为海岛站, 其地理位置、海拔高度与翔安接近, 且雷达系列相同, 但无论低层风场的相关系数、整层数据的标准差和相关系数、散点分布特征, 平潭站都远不及翔安站。

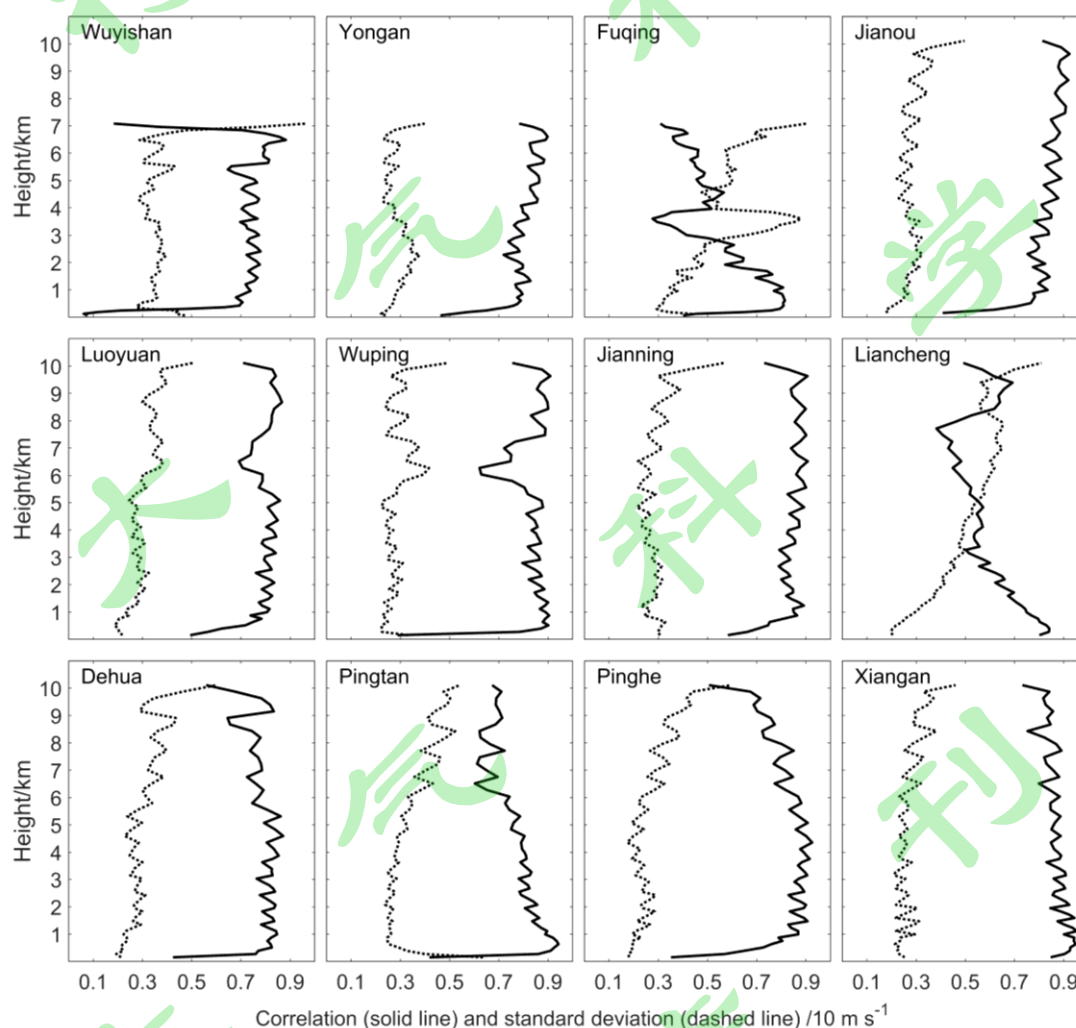


图 10 风廓线雷达水平 v 风速与 GFS 背景场相关系数 (实线) 与标准差 (虚线, 单位: 10 m s^{-1}) 的垂直分布

Fig.10 The vertical distribution of standard deviations and correlations between v -wind speed detected by wind profiler radars and GFS background winds

与福建 12 部风廓线雷达探测 u 风与模式背景场的相关系数和标准差廓线分布所呈现出的多种分布形态不同, v 风相关系数和标准差的廓线分布特征则相对简单 (图 10), 各雷达站相关系数和标准差的垂直廓线除边界层低层外, 呈现出明显的近似对称特征, 即当相关系数较小 (大) 时, 标准差则相对较大 (小)。

在边界层低层，与 u 风一样，也表现为标准差较小、而相关系数相对较小的特征。翔安站则例外，从低层到高层， v 风相关系数和标准差的变化幅度相对较小，在低层相关系数也较大，达 0.732。福清和连城对 v 风的探测在 12 部雷达中依然最差，标准差从低层到高层增加明显，而其他雷达从低层到高层 v 风标准差变化的趋势明显小得多。整体而言， v 风探测质量优于 u 风。

4.2 有、无降水风廓线雷达水平风特征

4.2.1 资料获取率

风廓线雷达的探测高度除了和雷达技术指标有关之外，受天气状况的影响很大。当有天气系统过境、高空水汽增加时，伴有探测高度明显增加现象（李晨光等，2003；汪学渊等，2013），降水期间风廓线雷达水平风平均探测高度可以增高 2 km 以上（何平等，2009），而强降水的强度与最大探测高度和增幅呈现出正相关的特征（陈红玉等，2016）。

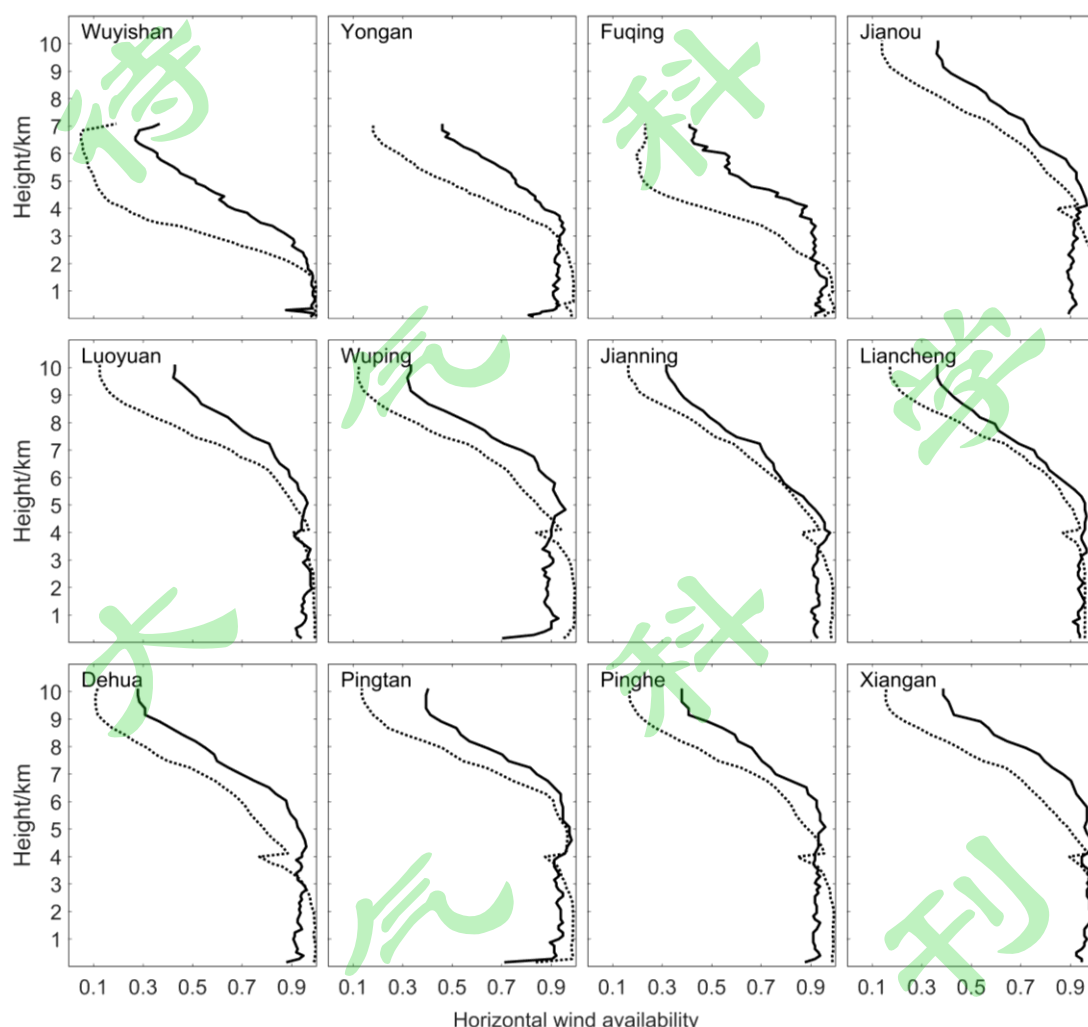


图 11 风廓线雷达有（实线）、无降水（虚线）情形下水平风数据获取率

Fig.11 The availability of horizontal winds detected by wind profiler radars under the condition with (solid line) and without (dashed line) precipitation

为了进一步确定福建 12 部风廓线雷达在有、无降水不同大气条件下的探测能力，对两种大气条件下的风廓线雷达水平测风分别进行统计分析，其中有降水定义为：在统计时刻的前（后）3 h 之间地面观测有降水；其余样本则为无降水。图 11 为有、无降水不同大气条件下分别统计的各站资料获取率，可见：福建 12 部风廓线雷达均表现为从最底层至某一高度层有降水时的数据获取率小于无降水时，而在此高度之上，有降水时的资料获取率则显著大于无降水时。各雷达有、无降水时数据获取率相对大小发生转变的这一高度层不尽相同，差异较大，CFL-03 系列的 3 部雷达武夷山、永安、福清分别为 1500 m、2700 m 和 2200 m，

而 CFL-06 系列的 9 部雷达在 3100 m（连城）至 4500 m（罗源）之间。进一步分析发现，有降水时风廓线雷达探测高度明显增加，在相同数据获取率下，有降水时探测高度一般会增加 2—3 km，这与何平等（2009）研究结果一致。何平等（2009）解释了降水天气下风廓线雷达探测水平风产品高度明显增加的两个可能原因：一是降水天气来临时，高层水汽含量增加，使得折射率结构常数加大，从而导致探测高度增加；另外，降水天气来临时，高层出现冰晶等粒子，易于产生有效的粒子散射信号，从而被雷达检测到。

4.2.2 标准差

图 12 给出了福建 12 部风廓线雷达与模式背景场的水平 u 风速在有、无降水条件下以及所有样本下的标准差随高度的分布情况，可见：对永安、武平和翔安站而言，有、无降水 u 风速标准差廓线有差异，但相对其余 9 部雷达而言小得多，差异一般在 $\pm 1.5 \text{ m s}^{-1}$ 范围内，在多数层次表现为有降水时的标准差略大于无降水时。而基于所有样本统计的标准差廓线则介于有降水和无降水两者之间，并更接近于无降水时的廓线分布。这不难理解，因为 12 部雷达有降水的样本数在总样本数中占比仅为 6.5%—14.8%，远低于无降水的。

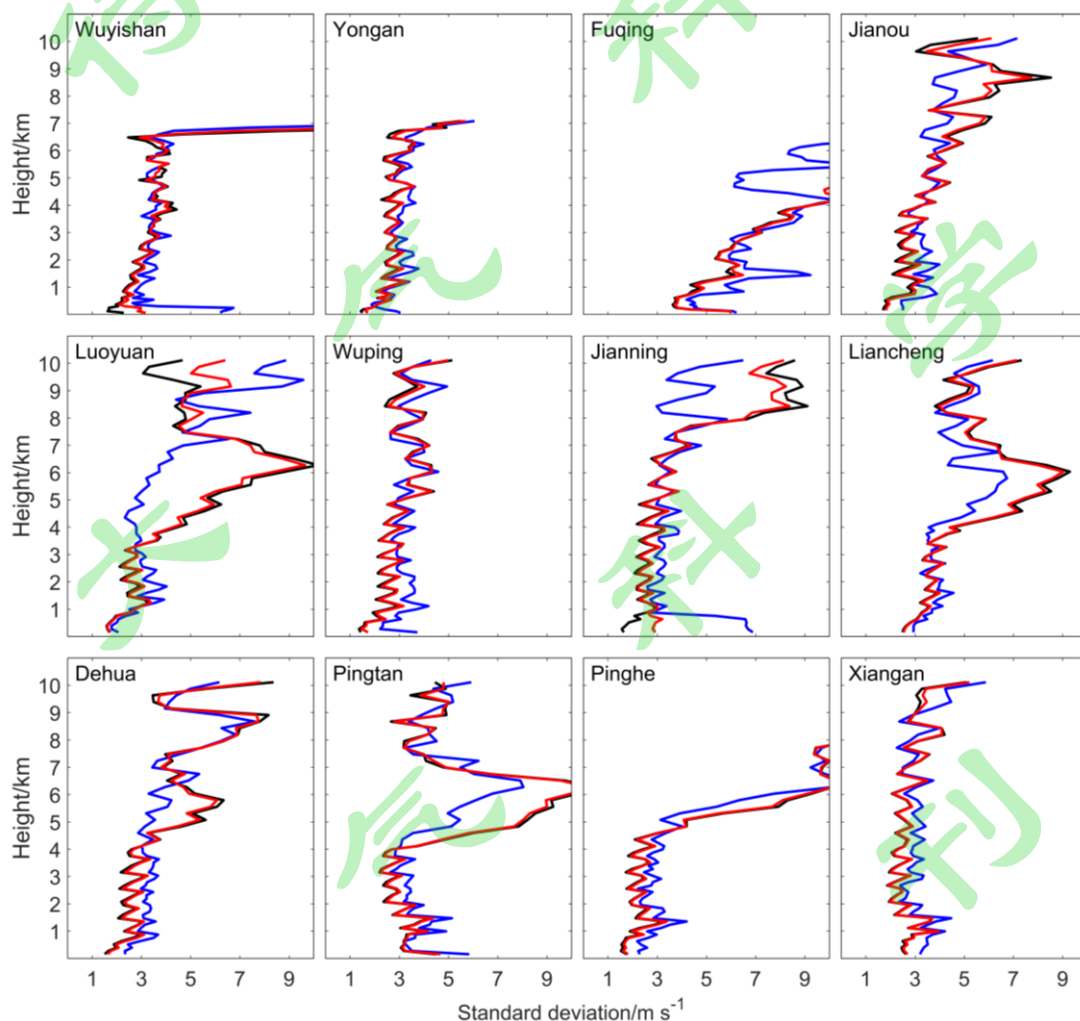


图 12 风廓线雷达水平 u 风速与 GFS 背景场标准差分布（蓝线：有降水；黑线：无降水；红线：所有样本）

Fig.12 The u -wind speed standard deviation of wind profiler radar products relative to GFS background winds (Blue line denotes samples with precipitation, black line indicates samples without precipitation, and red line shows all samples)

有、无降水对其余 9 部雷达 u 风质量的影响则不同，一般在 3—5 km 以下的中低层，有降水使 u 风的标准差增加，而在中高层，特别是每部雷达 u 风标准差明显偏大的层次，有降水则使 u 风的标准差大大降低，如罗源在 3390 m—7470 m 21 个连续垂直层上，有降水时的标准差较无降水时降低了 $0.15—6.48 \text{ m s}^{-1}$ ，标准差减小的幅度很大；武夷山、福清、建瓯、建宁、连城、德化、平潭、平和均表现出类似特征。可见，

上述 9 部雷达 u 风标准异常偏大的层次，无降水情形下误差偏大明显甚于有降水情形。

有、无降水对各雷达站 v 风标准差的影响与 u 风不同，各雷达站在大多数高度上有降水情形下的标准差都偏大于无降水的情形，其中翔安雷达站差异最不明显（图略）。

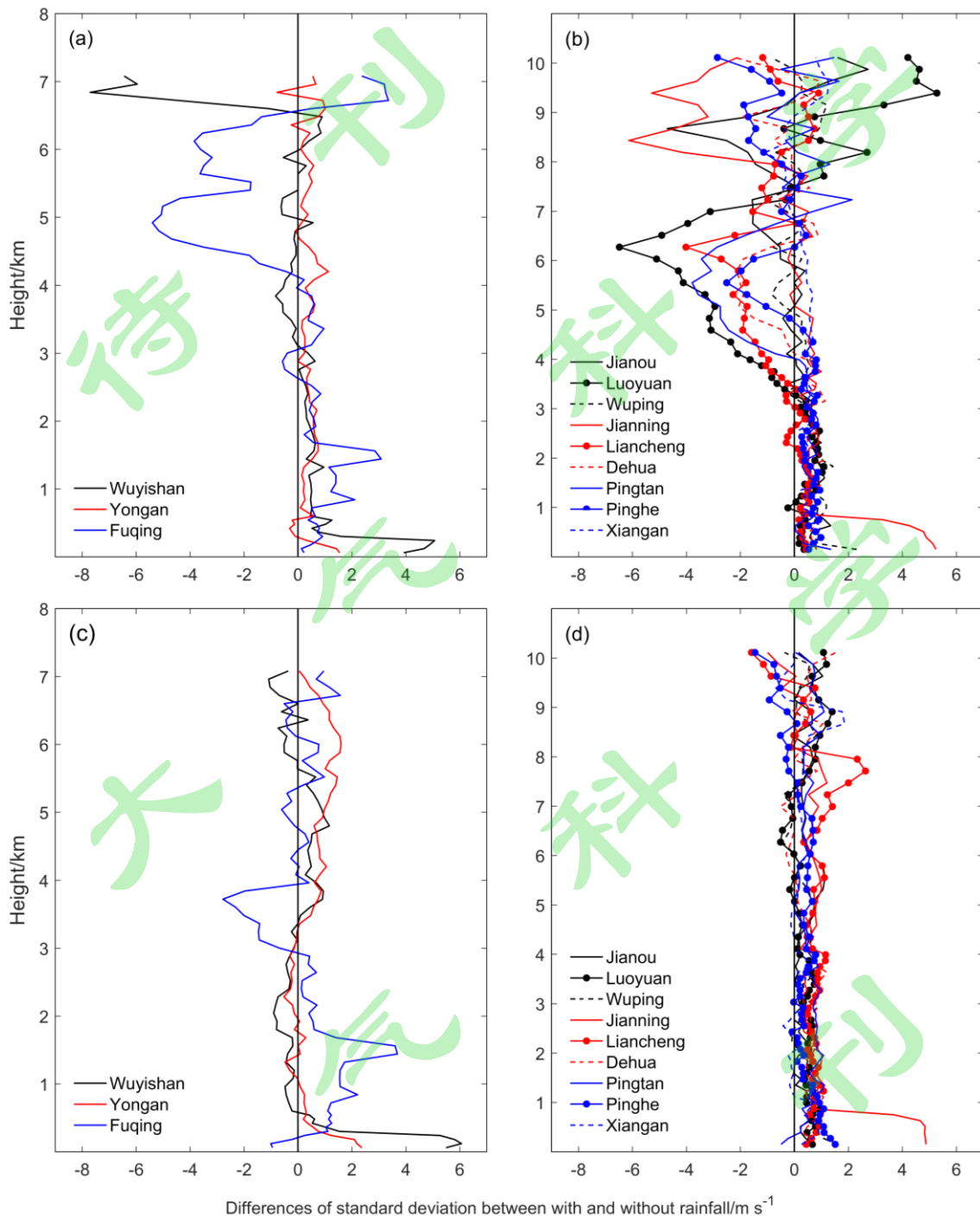


图 13 有降水减无降水情形下风廓线雷达 u 风速 (a,b)、 v 风速 (c,d) 相对 GFS 背景场的标准差差值的垂直分布
Fig.13 The vertical distribution of differences of standard deviation of u -wind speed (a,b) and v -wind speed (c,d) detected by wind profiler radars against GFS background winds under the conditions with and without precipitation

图 13 给出了有降水减无降水情形下风廓线雷达 u 、 v 风相对 GFS 背景场的标准差差值垂直分布，可以更加直观地看到有、无降水对风廓线雷达水平风标准差的影响，可见：有降水对风廓线雷达水平测风有较明显的影响，特别是对 u 风的影响更为显著。总体而言，有降水使各雷达站各垂直层次上的 v 风标准差以增大为主，增幅绝大多数位于 1 m s^{-1} 以内；对 u 风而言，有降水使各雷达站 3 km 以下层次的 u 风标准差以

增大为主,增幅绝大多数位于 1 m s^{-1} 以内,但对 3 km 以上层次的 u 风标准差则以减小为主,且减小幅度大幅提高。因此,对 3 km 以下的中低层风廓线雷达水平测风而言,降水使其整体质量有所降低,但对 3 km 以上的中高层风廓线雷达水平测风而言,降水对其影响较为复杂,一方面增加了 v 风的误差,但另一方面又极大地降低了 u 风的误差。

从整层数据平均来看,仅除罗源、连城和平潭的 u 风标准差在有降水情形下小于无降水情形之外,其余雷达 u (v) 风标准差均大于无降水时。有降水情形下,各雷达站测量水平风质量仍与雷达性能密切相关,也即在无降水情形下测风质量较好的翔安、永安、武平站,在有降水情形下,测风质量仍是其中较好的。

5 风廓线雷达水平风质量控制分析

5.1 风廓线雷达水平风高可信度高区间的确定

对福建 12 部风廓线雷达水平风产品的数据获取率(图 2)、相对于模式背景风场的散点分布(图 3—图 4)及其偏差随高度的分布特征(图 5—图 6)等进行综合分析,发现:

(1) 同为 L 波段 LC 型号风廓线雷达, CFL-06 和 CFL-03 系列雷达间差异明显,前者在水平风的最大探测高度、有效数据获取率和探测低层水平风的质量等方面明显优于后者。

(2) 在同一系列雷达中,探测水平风质量也存在巨大差异。如武夷山和永安均为 CFL-03 系列雷达,其测风模式、测风起始和终止高度、低模和高模衔接层次等完全一致,且海拔高度相近,均为我国内陆东南山地风廓线雷达站,但两者测风能力相差较大,永安明显优于武夷山,表现在:永安水平风数据获取率明显高于武夷山站;永安水平风偏差值在各高度分布均匀,异常点较少,而武夷山站在 600 m 以下低层和 6720 m 以上的高层有较多异常偏差值,极大偏差值超过 60 m s^{-1} ;永安各层标准差和相关系数均优于武夷山,特别是 6720 m 以上的高层。福清与武夷山、永安雷达低、高模衔接高度略有不同,但其测风质量却明显差于永安和武夷山,其水平风偏差异常点多,异常程度高,并在各高度层均有分布,在风廓线雷达水平 0 风速附近存在明显的“零污染带”现象。

(3) CFL-06 系列的 9 部雷达中,探测水平风质量也存在巨大差异。如翔安和平潭测风模式完全一致,且海拔高度相近,均为我国东南沿海风廓线雷达站,但两者测风能力相差较大,翔安明显优于平潭,表现在:翔安水平风场散点分布基本沿对角线分布,偏差在各层分布均匀,异常点较少;而平潭在风廓线雷达水平 0 风速附近存在明显的“零污染带”现象,异常偏差点主要分布在 $4\text{—}7.5\text{ km}$ 高度,翔安各层标准差和相关系数均优于平潭。其他雷达站间差异也非常大。

以上分析可见,福建 12 部雷达同为 L 波段 LC 型号风廓线雷达,但测风质量相差很大,其有效探测高度、偏差异常所在的高度、数据可信度高的层次各不相同。朱立娟(2015)对 20 部 LC 边界层风廓线雷达一个月的数据进行整体分析后,发现水平风标准差在 3 km 高度以上开始明显递增,因此将 3 km 设定为该型号雷达的有效探测高度,从而将 u 、 v 风的标准偏差分别由 5.19 m s^{-1} 和 3.95 m s^{-1} 减小为 2.51 m s^{-1} 和 2.59 m s^{-1} ,极大地降低了 LC 型号风廓线雷达进入模式的数据的标准差。王丹等(2019)则结合吴蕾等(2013)、朱立娟(2015)已有研究经验将 LC 边界层风廓线雷达的有效探测高度设定为 4 km 进行质量控制。这里分析表明,基于所有风廓线雷达水平风资料分析得到的整体误差特征,会掩盖不同雷达误差特征的差异性和多样性。如以 u 风标准差大于 4.5 m s^{-1} 所在的最低高度为例,福清站仅为 840 m ,而与其同系列的永安和武夷山站则分别可以达到 6840 m 和 6720 m ;而在另一系列的 9 部雷达中,最差的连城站为 3870 m ,最优的翔安和武平站则能达到 10110 m 。因此,设定统一的高度作为 LC 型号风廓线雷达的有效探测高度来进行质量控制,一方面可能无法将某些质量较差的测风数据剔除,另一方面更为重要的是,可能会丢掉许多“好”的数据,从而无法最大限度地发挥探测资料的价值。因此,为了最大限度地使用探测资料,针对各风廓线雷达站分别开展水平测风质量分析,制定差异化的质量控制方案显得尤为必要。

基于前文分析的各雷达站 u 、 v 风误差随高度的分布特征,以标准差不大于 4.5 m s^{-1} 作为阈值来选取各雷达站水平风可信度高的范围,表 3 列出了各站 u 、 v 风标准差小于 4.5 m s^{-1} 的区间范围,基于连续性考虑,一旦某高度层标准差大于阈值,即视为终止高度,其上再出现的标准差小于阈值的高度层将不被采信。由表 3 可见各雷达站 u 、 v 风可信度高的区间范围各不相同,差异很大,如 u 风在福清站的可信度高的区间终

止高度为 720 m，而翔安站和武平站可达 9870 m，其余 9 站则在 3750 m—7710 m 不等； v 风可信度高的区间终止高度差异也极大，从 1680 m—9870 m 不等。 u 、 v 风可信度高的范围并不完全一致，两者重合的范围即作为该雷达站水平风可信度高的区间范围（表 3）。

表 3 福建风廓线雷达水平风标准差小于 4.5 m s^{-1} 的高度

Table.3 The heights with the standard deviation of horizontal winds detected by Fujian wind profiler radars less than 4.5 m s^{-1}

雷达站	$u_{\text{std}} < 4.5\text{ m s}^{-1}$ 高度 (m)	$v_{\text{std}} < 4.5\text{ m s}^{-1}$ 高度 (m)	u_{std} 和 v_{std} 均小于 4.5 m s^{-1} 高度 (m)
武夷山	60—6600	120—6720	120—6600
永安	60—6720	60—7080	60—6720
福清	180—720	60—1680	180—720
建瓯	150—6030	150—9870	150—6030
罗源	150—3990	150—9870	150—3990
武平	150—9870	150—9870	150—9870
建宁	150—7710	150—9870	150—7710
连城	150—3750	150—2550	150—2550
德化	150—4830	150—9630	150—4830
平潭	270—4110	270—6990	270—4110
平和	150—5070	150—9870	150—5070
翔安	150—9870	150—9870	150—9870

5.2 不同质量控制方案的对比分析

朱立娟 (2015)、王丹等 (2019) 采用固定有效探测高度的方法对 LC 边界层风廓线雷达进行质量控制，取得了较好效果，那么如果根据每部雷达特点制定差异化的质量控制方案其效果又会如何呢？本文统计分析得到的福建 12 部风廓线雷达不同的有效探测高度（表 1）及不同的水平风高可信度区间（表 3），是否可以作为制定差异化质量控制方案的依据？与 3 km 固定有效探测高度方案相比，其质量控制效果如何？为回答上述问题，本文针对福建 12 部风廓线雷达开展以下三种质量控制方案的对比分析。

方案 1：固定有效探测高度（3 km）质量控制方案，也即各雷达 3 km 高度以上的数据将被剔除。

方案 2：不同有效探测高度质量控制方案，也即各雷达采用表 1 所对应的有效探测高度，其上高度的数据将被剔除。

方案 3：不同高可信度区间质量控制方案，也即各雷达根据表 3 将不在高可信度区间范围之内的数据予以剔除。

图 14a-c 分别给出了采用上述三种方案质量控制前后的水平风标准差、平均误差及剔除数据比例的统计结果，图中 0 代表原始数据；1 代表剔除了 3 km 以上高度的数据；2 代表剔除了数据获取率小于 80% 所在高度层的数据；3 代表剔除了 u 、 v 风标准差 $\geq 4.5\text{ m s}^{-1}$ 所在高度层的数据。由原始数据的误差统计结果可见，各雷达站 u 风标准差差异很大，永安和翔安站最小，分别为 2.72 m s^{-1} 和 2.73 m s^{-1} ，福清站最大，为 7.34 m s^{-1} 。除永安、翔安和武平 u 风标准差在 3 m s^{-1} 以下外，其余 9 站均大于 3.36 m s^{-1} ，5 站大于 4.34 m s^{-1} 。 v 风标准差仅除武夷山和永安略大于 u 风标准差外，其余 10 站均小于 u 风标准差。 u 风平均误差在 0.67 m s^{-1} （翔安）— 2.35 m s^{-1} （福清）间，均为正偏差，仅除翔安（ 0.67 m s^{-1} ）和德化（ 0.96 m s^{-1} ）小于 1 m s^{-1} 外，其余均大于 1 m s^{-1} ，正误差较大。 v 风平均误差小于 u 风，数值在 0.06 m s^{-1} — 1.22 m s^{-1} 间，仅德化和平潭超过 1 m s^{-1} 。

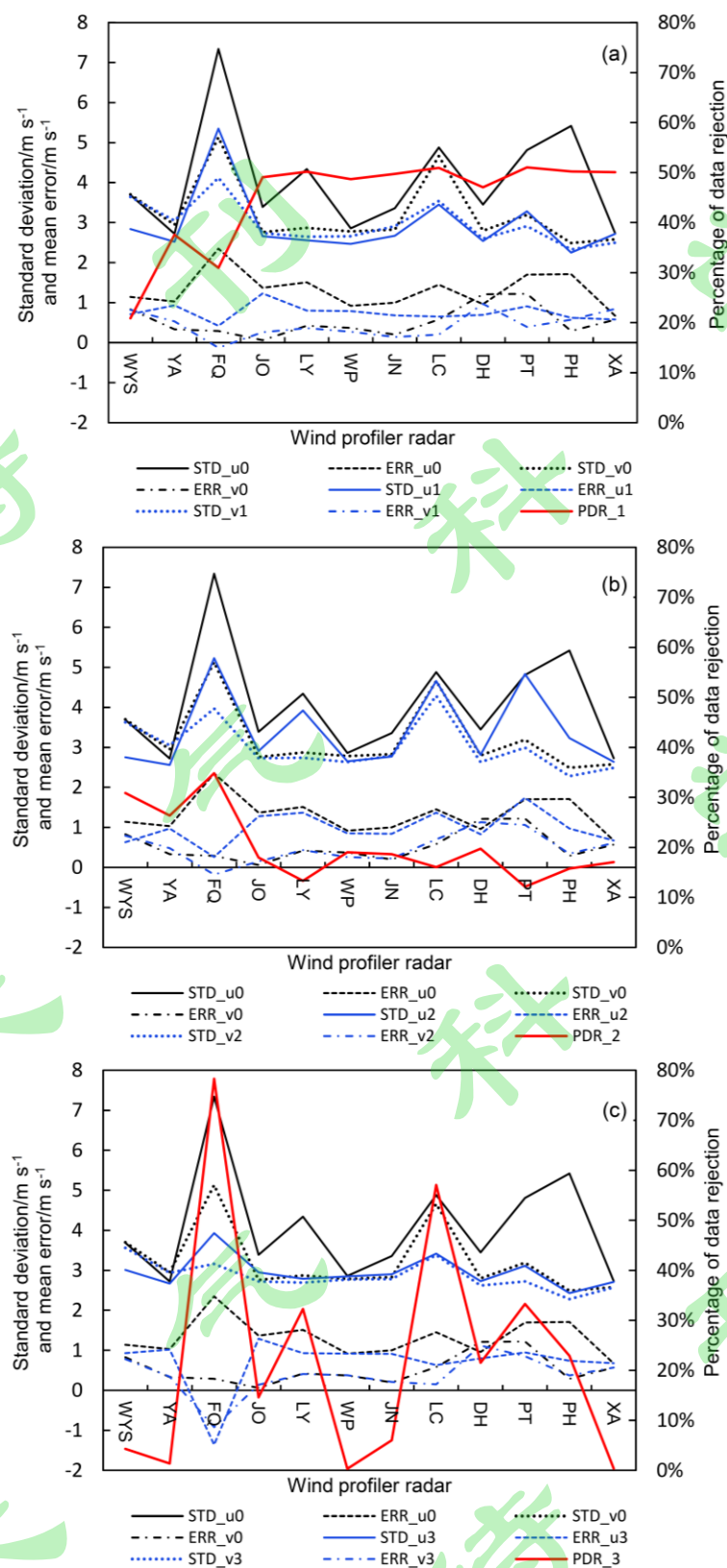


图 14 方案 1 (a)、方案 2 (b) 及方案 3 (c) 质量控制前后福建 12 部风廓线雷达水平风与 GFS 背景场的标准差 (STD)、平均误差 (ERR) 及数据剔除率 (PDR) (0 代表无质量控制, 1、2、3 分别代表方案 1、方案 2 和方案 3)

Fig.14 The standard deviations (STD) and mean errors (ERR) of horizontal winds detected by 12 profiler radars in Fujian province against GFS background winds and their percentage of data rejection (PDR) before and after QC with schemes 1 (a), 2 (b) and 3 (c), respectively (0 illustrates no QC. 1, 2 and 3 denote QC with schemes 1, 2 and 3, respectively)

采用方案 1 的统计结果（图 14a）可见，除翔安和永安原始数据统计的标准差本来就不大，因而剔除 3 km 高度以上数据后误差无明显变化外，大多数雷达站 u 、 v 风标准差明显减小，由原始数据的 u 风标准差 2.72 m s^{-1} — 7.34 m s^{-1} 减小到 2.25 m s^{-1} — 5.35 m s^{-1} ， v 风标准差则由 2.49 m s^{-1} — 5.13 m s^{-1} 减小到 2.33 m s^{-1} — 4.12 m s^{-1} ， u 风平均误差由 0.67 m s^{-1} — 2.35 m s^{-1} 减小到 0.58 m s^{-1} — 1.23 m s^{-1} ， v 风平均误差由 0.06 m s^{-1} — 1.22 m s^{-1} 减小到 -0.13 m s^{-1} — 0.97 m s^{-1} ， u 、 v 风均值偏离 0 m s^{-1} 的程度总体上有所减小，偏差值基本在 0 m s^{-1} 附近。因此，将 3 km 作为各雷达站的有效探测高度，剔除 3 km 高度以上的数据后，确实极大地降低了风廓线雷达水平风的标准差和平均误差，但福清雷达 u 、 v 风标准差（ 5.35 m s^{-1} 和 4.12 m s^{-1} ）仍显著偏大。同时注意到，各雷达站被剔除的数据占原始数据的比例为 20.87%—51.04%，其中 CFL-06 系列的 9 部雷达数据剔除率均在 50% 左右。

采用方案 2 的统计结果（图 14b）发现，该差异化的质量控制方案，也能够在原始数据基础上降低水平风误差， u 风标准差减小到 2.56 m s^{-1} — 5.23 m s^{-1} ， v 风标准差减小到 2.28 m s^{-1} — 4.29 m s^{-1} ， u 风平均误差减小到 0.26 m s^{-1} — 1.74 m s^{-1} ， v 风平均误差减小到 -0.18 m s^{-1} — 1.13 m s^{-1} ，各雷达站被剔除的数据占原始数据的比例为 12.13%—34.83%，说明采用不同有效探测高度的差异化质量控制方案方法也能够在原始数据基础上降低水平风的误差，且剔除的数据相对较少，其中 CFL-06 系列的 9 部雷达数据剔除率降至 12%—19%。同时注意到，尽管水平风误差与原始数据相比有所减小，但福清、罗源、连城、平潭等站误差依然较大。

而采用方案 3 的误差对比（图 14c）分析表明，各雷达站剔除不同高可信度区间范围之外的资料后，也能够在原始数据基础上降低水平风误差，各雷达站 u 风标准差减小到了 2.43 m s^{-1} — 3.93 m s^{-1} ， v 风标准差减小到了 2.28 m s^{-1} — 3.56 m s^{-1} ， u 风平均误差为 0.63 m s^{-1} — 1.36 m s^{-1} ， v 风平均误差为 0.14 m s^{-1} — 1.12 m s^{-1} ，较原始数据误差均明显降低，各雷达站被剔除的数据占原始数据的比例为 0.36%—78.3%，说明采用不同高可信度区间的差异化质量控制方案方法也能够在原始数据基础上降低水平风的误差，但剔除数据在不同雷达间存在明显差异。

以上分析表明，采用 3 km 固定有效探测高度、不同有效探测高度及不同高可信度区间等三种质量控制方案，均能够在原始数据基础上降低水平风误差，但各方案误差减小幅度不同，剔除数据比例亦不同。为进一步了解三种质量控制方案的特点和差异，下面对比分析三种不同质量控制方案对每一个雷达站的影响（图 15），发现了以下特征：

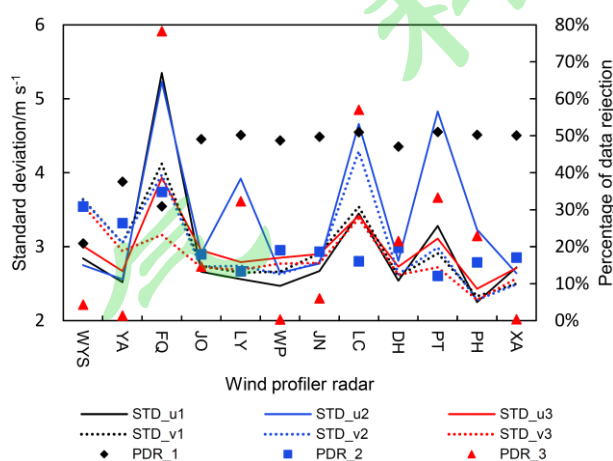


图 15 三种不同质量控制方案下风廓线雷达水平风与 GFS 背景场的标准差及数据剔除率（STD 代表标准差；PDR 代表数据剔除率；数字代表相应的质量控制方案）

Fig.15 The standard deviations of horizontal winds detected by wind profiler radars against GFS background winds and their percentages of data rejection with three different QC schemes (STD denotes standard deviation. PDR indicates percentages of data rejection. Number shows the corresponding QC scheme)

（1）对翔安、永安、武平、武夷山、建瓯、建宁、德化等原始数据水平风误差相对较小的雷达站，三种质控方案误差差异不大，但两种差异化质量控制方案极大地降低了固定有效探测高度方案对“好”数据的剔

除, 尤其是不同高可信度区间方案, 效果更为显著。

具体而言, 翔安风廓线雷达原始数据 u (v) 风标准差为 2.73 m s^{-1} (2.58 m s^{-1}), 采用方案 1、方案 2 及方案 3 等三种不同质控方案后 u (v) 风标准差分别减小为 2.72 m s^{-1} (2.50 m s^{-1})、 2.64 m s^{-1} (2.49 m s^{-1}) 和 2.71 m s^{-1} (2.57 m s^{-1}), 三种方案误差差异不大, 但数据剔除率却相差极大, 方案 1 高达 50.09%, 方案 2 降低为 17.08%, 方案 3 则进一步降低, 仅为 0.36%。也即采用方案 1 翔安有一半的数据被剔除掉, 而这些数据质量并不差; 采用方案 2 和方案 3 仅剔除 17.08% 和 0.36% 的数据即达到了与方案 1 剔除了 50.09% 的数据相当的效果。类似的还有永安站, 原始数据 u (v) 风标准差为 2.72 m s^{-1} (2.95 m s^{-1}), 采用方案 1、方案 2 及方案 3 进行质控后 u (v) 风标准差分别为 2.52 m s^{-1} (3.05 m s^{-1})、 2.56 m s^{-1} (3.05 m s^{-1}) 和 2.67 m s^{-1} (2.94 m s^{-1}), u 风标准差均有所下降, v 风标准差除了方案 3 有所下降外, 其余两个方案略有上升。同样的, 三种方案误差差异不大, 但数据剔除率却相差极大, 方案 1 高达 37.56%, 方案 2 降低为 26.38%, 而方案 3 则仅为 1.38%。武平站原始数据、采用方案 1、方案 2 以及方案 3 后 u 风标准差分别为 2.86 m s^{-1} 、 2.47 m s^{-1} 、 2.65 m s^{-1} 和 2.85 m s^{-1} ; v 风标准差分别为 2.78 m s^{-1} 、 2.66 m s^{-1} 、 2.63 m s^{-1} 和 2.77 m s^{-1} , 三种质控方案下水平风的标准差均有所降低, 其中方案 3 误差减小的最少。三种方案标准差都小于 3 m s^{-1} , 均在可以接受的范围之内, 但方案 1 却以剔除了 48.71% 的数据为代价, 方案 2 将该比例降低为 19.04%, 而方案 3 则进一步降低为 0.32%。因此, 对于翔安、永安和武平风廓线雷达站而言, 三种质控方案水平风误差相差不大, 但数据剔除率差异巨大: 方案 1 数据剔除率在 37.56%—50.09%, 方案 2 为 17.08%—26.38%, 方案 3 则为 0.32%—1.38%。

武夷山、建瓯、建宁、德化站, 采用方案 2 和方案 3 的 u 风标准差高于 (方案 2 下武夷山除外)、 v 风标准差低于 (武夷山、建瓯、建宁) 或接近于 (德化) 方案 1 的标准差, 三种方案 u 、 v 风标准差差值绝对值范围在 0.01 m s^{-1} — 0.29 m s^{-1} , 相对而言相差不大, 并且除武夷山站 v 风标准差仍然大于 3 m s^{-1} 外, 其余均小于 3 m s^{-1} , 但方案 2 和方案 3 的资料剔除率相较方案 1 明显减少, 其中方案 2 下武夷山、建瓯、建宁、德化站的资料剔除率分别减少了 -9.98%、31.11%、31% 和 27.36%; 方案 3 则分别减少了 16.57%、34.44%、43.69% 和 25.55%, 除方案 2 武夷山站资料剔除率略有增长外, 其余均减小, 且方案 3 较方案 2 资料剔除率减小的幅度更大 (德化除外)。注意到, 尽管武夷山站方案 2 较方案 1 数据剔除率增加了 9.98%, 但方案 2 的 u 、 v 风标准差较方案 1 均有所减少; 而德化站方案 3 较方案 2 资料剔除率增加了 1.81%, 但方案 3 的 u 、 v 风标准差较方案 2 均有所降低。

以上分析表明, 对于翔安、永安、武平、武夷山、建瓯、建宁、德化而言, 不同高可信度区间方案最优, 不同有效探测高度方案次之, 3 km 固定有效探测高度方案再次之。

(2) 对福清等原始数据水平风误差相对极大的雷达站, 采用固定有效探测高度方案后误差依然较大, 但两种差异化质控方案可进一步剔除“坏”数据, 使误差进一步有所下降, 尤其是不同高可信度区间方案, 效果更为显著。具体而言, 福清站原始数据 u (v) 风标准差为 7.34 m s^{-1} (5.13 m s^{-1}), 采用方案 1 后 u (v) 风标准差降至 5.35 m s^{-1} (4.12 m s^{-1}), 误差仍然非常大; 采用方案 2 后 u (v) 风标准差进一步降至 5.23 m s^{-1} (3.97 m s^{-1}), 但仍较大; 采用方案 3 后 u (v) 风标准差降至 3.93 m s^{-1} (3.16 m s^{-1}), 误差较前两种方案明显降低。方案 1 数据剔除率为 30.93%, 方案 2 增加为 34.83%, 而方案 3 则进一步增加为 78.3%, 说明不同高可信度区间方案有效地实现了差异化的质量控制目标, 效果非常显著。以上分析表明, 对福清站而言, 不同高可信度区间方案最优, 不同有效探测高度方案次之, 3 km 固定有效探测高度方案再次之。

(3) 对罗源、连城、平潭、平和等原始数据水平风误差相对较大的雷达站, 不同高可信度区间方案最优, 3 km 固定有效探测高度方案次之, 不同有效探测高度方案再次之。具体而言, 罗源、连城、平潭、平和站, u 风标准差在 4.34 m s^{-1} (罗源站)— 5.42 m s^{-1} (平和站), 如图 15 所示可见方案 1 与方案 3 分别将罗源、平和站的 u 风标准差降到了 2.79 m s^{-1} 和 2.43 m s^{-1} 以下, 其中方案 3 较方案 1 的资料剔除率分别降低了 17.93% 和 27.35%; 而方案 2 则不同, 虽然其较方案 1 的资料剔除率降低幅度更大 (分别为 36.87% 和 34.48%), 但其 u 风标准差分别为 3.92 m s^{-1} 和 3.23 m s^{-1} , 仍然较大。对连城站而言, 原始数据 u (v) 风标准差为 4.88 m s^{-1} (4.66 m s^{-1}), 采用方案 1 后数据剔除率为 50.96%, 标准差降至 3.45 m s^{-1} (3.54 m s^{-1}), 误差仍较大; 采用方案 3 后数据剔除率提高为 57.07%, 标准差则进一步降至 3.42 m s^{-1} (3.38 m s^{-1}), 进一步

说明了不同高可信度区间质量控制方案的优越性。对平潭站而言，原始数据 $u(v)$ 风标准差为 4.81 m s^{-1} (3.19 m s^{-1})，方案 1 将标准差降至 3.28 m s^{-1} (2.91 m s^{-1})，资料剔除率 51.04%；方案 3 则进一步将标准差降至 3.11 m s^{-1} (2.72 m s^{-1})，误差明显降低，但数据剔除率却降低为 33.29%，表明对平潭站而言，相较于不同高可信度区间的质控方案，固定有效探测高度方案剔除了更多的资料，误差却不降反升，表明许多“好”数据被剔除了。对连城和平潭站而言，方案 2 数据剔除率低于另外两种方案，但其未将误差降至合理区间，标准差仍然高达 4.66 m s^{-1} 和 4.83 m s^{-1} ，说明不同有效探测高度方案对连城和平潭站质控效果不好。

综上所述，对福建 12 部风廓线雷达而言，均是不同高可信度区间方案最优；其中翔安、永安、武平、福清、武夷山、建瓯、建宁、德化等 8 部雷达而言，不同有效探测高度方案优于 3 km 固定有效探测高度方案；而对罗源、连城、平潭、平和等 4 部雷达而言，则反之。以上分析表明，采用差异化的质量控制方案，特别是不同高可信度区间方案，不同雷达站的水平测风数据得到更加充分和有效的识别，一方面减少了不必要的资料损失，另一方面则可将质量不好的数据进一步加以剔除。

5.3 有降水时水平风场质量控制方案

基于 4.2.2 节统计的各雷达站在有降水情形下 $u、v$ 风标准差随高度的分布特征，同样以标准差不大于 4.5 m s^{-1} 作为阈值得到了各雷达站水平风可信度高的连续区间范围（表 4），与不区分有无降水所有样本统计得到的高可信度区间范围（表 3）相比，可见永安、建瓯、罗源、德化、平潭和平和站在有降水情形下的高可信度区间范围更大，翔安站范围相同，而武夷山、福清、武平、建宁和连城站范围则略有减小。

表 4 有雨情形下福建风廓线雷达水平风标准差小于 4.5 m s^{-1} 的高度

Table.4 The heights with the standard deviation of horizontal winds detected by Fujian wind profiler radars less than 4.5 m s^{-1} under precipitation condition

雷达站	$u_{\text{std}} < 4.5\text{ m s}^{-1}$ 高度 (m)	$v_{\text{std}} < 4.5\text{ m s}^{-1}$ 高度 (m)	u_{std} 和 v_{std} 均小于 4.5 m s^{-1} 高度 (m)
武夷山	300—6720	300—5400	300—5400
永安	60—6840	60—7080	60—6840
福清	480—600	60—720	480—600
建瓯	150—6990	150—9870	150—6990
罗源	150—6750	150—9870	150—6750
武平	150—8910	270—9870	150—8910
建宁	870—6750	870—9870	870—6750
连城	150—4110	150—1590	150—1590
德化	150—6270	150—7470	150—6270
平潭	1590—4590	270—6270	1590—4590
平和	150—5310	150—9870	150—5310
翔安	150—9870	150—9870	150—9870

依照高可信度区间方案对有降水情形下的各风廓线雷达水平测风数据进行初步的质量控制，也即在有降水情形下，各雷达按照表 4 将高可信度区间范围之外的数据予以剔除。图 16 给出了有降水情形下各雷达站质量控制前后的水平风标准差分布，可见，有降水情形下原始数据统计的各雷达站水平风标准差差异很大， u 风标准差为 3.12 m s^{-1} — 7.88 m s^{-1} ， v 风标准差为 2.83 m s^{-1} — 5.54 m s^{-1} ，经初步质量控制后， u 风标准差减小为 2.93 m s^{-1} — 4.33 m s^{-1} ， v 风标准差减小为 2.71 m s^{-1} — 4.20 m s^{-1} ，各雷达站 $u、v$ 风标准差经质量控制后均有所减小，其中翔安、武平、永安等 3 部水平风质量较好的雷达在质量控制后 $u、v$ 风标准差降低幅度较小，其余 9 部雷达质控后 $u、v$ 风标准差均有较大幅度的减小，特别是福清、罗源、连城、平潭、平和等站，水平风标准差减小幅度最高达到了 51%。

以上分析可见，基于有降水情形风廓线雷达数据统计得到的不同高可信度区间的质量控制方案也对有降水情形下水平风数据的质量控制取得了较好的效果。

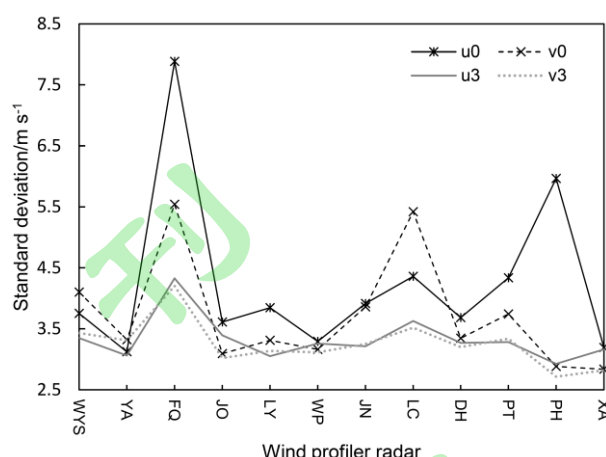


图 16 有降水情形下不同高可信度区间方案质量控制前后风廓线雷达水平风与 GFS 背景场的标准差 (0 代表有降水样本; 3 代表有降水样本中剔除了 u 、 v 风标准差 $\geq 4.5 \text{ m s}^{-1}$ 所在高度层的数据)

Fig.16 The standard deviation of horizontal winds detected by wind profiler radars against GFS background winds before and after the quality control with schemes of different high confidence ranges under precipitation condition (0 denotes all samples with precipitation, and 3 denotes samples whose data at heights with standard deviation of u and v greater than 4.5 m s^{-1} are rejected under precipitation condition)

6 结论与讨论

以 2017 年 1-12 月逐日四个时次 (00、06、12、18 UTC) GFS 全球预报分析场作为数值预报背景场, 结合地面降水资料, 面向资料同化分析了福建 12 部 L 波段 LC 型号边界层和低对流层风廓线雷达水平测风产品的质量特征, 并初步探讨了三种质量控制方案的影响差异, 结果表明:

(1) L 波段风廓线雷达 CFL-06 系列和 CFL-03 系列差异明显, 前者在水平风的最大探测高度、有效数据获取率和探测低层水平风的质量等方面明显优于后者。

(2) 福建相同系列的不同风廓线雷达站探测水平风的数据获取率、有效探测高度、标准差、相关系数及偏差的垂直分布特征等存在极大差异, 该差异的原因与地理位置 (沿海或内陆)、海拔高度等并无直接关系。地物杂波、间歇性干扰、降水干扰、地磁干扰、雷达性能参数、雷达仪器灵敏度、均匀风的假定、雷达的信噪比等均是影响风廓线雷达测风精度的因素, 然而究竟是哪些因素在福建 12 部雷达探测水平风的数据获取率、有效探测高度、标准差、相关系数及偏差垂直分布特征的差异性中起到了关键性作用, 值得进一步开展研究。

(3) 相同系列的不同风廓线雷达探测水平风质量存在极大差异。CFL-03 系列的 3 部风廓线雷达中, 永安风廓线雷达探测水平风场质量相对最优, u (v) 风标准差为 2.72 m s^{-1} (2.95 m s^{-1}); 武夷山次之, u (v) 风标准差为 3.69 m s^{-1} (3.70 m s^{-1}); 福清最差, u (v) 风标准差高达 7.34 m s^{-1} (5.13 m s^{-1})。CFL-06 系列的 9 部风廓线雷达中, 翔安风廓线雷达探测水平风场质量相对最优, u (v) 风标准差为 2.73 m s^{-1} (2.58 m s^{-1}); 武平次之, u (v) 风标准差为 2.86 m s^{-1} (2.78 m s^{-1}); 建瓯、建宁、德化、罗源、平潭、平和、连城依次再次之, u 风标准差范围为 3.36 m s^{-1} — 5.42 m s^{-1} , v 风标准差范围为 2.76 m s^{-1} — 4.66 m s^{-1} 。

(4) 福清、建瓯、罗源、建宁、连城、德化、平潭和平和站均在风廓线雷达水平 u 风 0 风速附近出现较多异常偏差点, 其背景风往往为较强西风, 异常偏差点所在高度相对集中, 但不同雷达站不尽相同。其中福清异常偏差点明显多于其他站, 各高度层均有分布。

(5) 各风廓线雷达站探测 u 风速相对背景场存在明显系统性负偏差, 小于背景场, 不满足资料同化对背景场无偏的需求, 在资料同化中需经过偏差订正去除该系统偏差; 而 v 风则相对较好。

(6) 不同风廓线雷达站探测水平风的能力相差很大, 因而针对不同雷达制定差异化的质量控制方案十分必要。本文提出了不同高可信度区间和不同有效探测高度两种差异化质量控制方案, 并与固定有效探测高度方案进行了对比, 结果表明, 本文提出的两种差异化质量控制方案具有明显优势, 特别是不同高可信

度区间方案,表现出很大的优越性:差异化质量控制效果显著,不同雷达站的水平测风数据得到更加充分和有效的识别,一方面减少了雷达资料不必要的损失,另一方面可将质量差的数据进一步剔除。

(7) 降水对风廓线雷达水平风产品的数据获取率和测风质量均有较明显的影响。有降水使数据获取率在中低层有所减小,在中高层则大幅提高。对 3 km 以下的中低层风廓线雷达水平测风而言,降水使其整体质量有所降低,但对 3 km 以上的中高层而言,降水对其影响较为复杂,一方面增加了 v 风的误差,但另一方面又极大地降低了 u 风的误差。根据有降水情形下各雷达站水平风标准差垂直分布特征确定的不同雷达站高可信度区间的质量控制方案,在有降水情形下也得到了较好的效果。

翔安风廓线雷达站水平测风质量明显优于其他测站,是什么原因导致相同型号相同系列不同雷达站水平测风质量出现极大差异?翔安、平潭风廓线雷达均位于沿海,且均为 L 波段低对流层风廓线雷达 CFL-06 系列,两者的低模和高模工作模态也完全一致,但两者测量水平风能力差异较大,与 GFS 全球背景风场相比,翔安明显优于平潭,特别是在 4—7.5 km 高度上,是什么原因引起的两者在该高度上水平测风能力的极大差异尚不清楚,需要进一步探讨。翔安风廓线雷达站在建设中是否有什么经验使得其数据质量更优?在后续建设雷达站时是否可以借鉴其经验?这些都需要进一步深入分析。

另外,总体而言,福建风廓线雷达探测 u 风标准差明显大于 v 风,并且 u 风偏差明显大于 v 风偏差的点几乎全部集中于高模探测高度上,是什么原因导致的该现象尚不清楚,而统计分析风廓线雷达探测高度上水平风场不均匀性的总体特征、并详细了解风廓线雷达站各种探测模式的雷达技术指标,可能有助于理解 u 、 v 风探测质量的差异。

需要指出的是,本文对有降水情形下的风廓线雷达水平测风数据采用不同高可信度区间质量控制方案取得了较理想的效果,但由于本文定义的有降水情形为统计时刻前(后)3 h 之间地面观测有降水,因此实时应用该方案时,对统计时刻及之前 3 h 地面观测无降水、但统计时刻后 3 h 地面观测出现降水的情形无法准确判别为有降水情形。

不同风廓线雷达水平测风质量相差极大,针对每一部风廓线雷达开展详尽的质量分析,寻找其误差分布特征,进而制定差异化的质量控制方案是最大最优化利用好风廓线雷达水平测风数据的有效途径。本文提出的不同高可信度区间质量控制方案在风廓线雷达水平测风数据资料同化中的应用效果如何,需开展数值试验研究,将另文讨论。

参考文献 (References)

- Benjamin S G, Dezső D, Stephen S, et al. 2004a. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132(2): 495-518. doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<0495:ahactr>2.0.co;2
- Benjamin S G, Schwartz B E, Koch S E, et al. 2004b. The value of wind profiler data in U. S. weather forecasting [J]. *Bulletin of the American meteorological society*, 85(12): 1871-1886. doi:10.1175/BAMS-85-12-Benjamin
- Bluestein H B, Speheger D A. 1995. The dynamics of an upper-level trough in the baroclinic westerlies: Analysis based upon data from a wind profiler network [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123(8): 2369-2383. doi:10.1175/1520-0493(1995)123<2369:tdoaul>2.0.co;2
- Bouttier F. 2001. The use of profiler data at ECMWF [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 10(6): 497-510. doi:10.1127/0941-2948/2001/0010-0497
- 陈红玉, 高月忠, 尹丽云, 等. 2016. 强降水过程风廓线雷达资料的极值特征 [J]. *气象科技*, 44(1): 87-94. Chen Hongyu, Gao Yuezhong, Yin Liyun, et al. 2016. Characteristics of extremes in WPR data during severe convective rainfall [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 44(1): 87-94. doi: 10.3969/j.issn.1671-6345.2016.01.014
- 董保举, 付志嘉, 李明, 等. 2012. 风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用 [J]. *气象科技*, 40(1): 74-78. Dong Baoju, Fu Zhijia, Li Ming, et al. 2012. Feature analysis of a rain storm with wind profile radar data [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 40(1): 74-78. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2012.01.015
- Frisch A S, Weber B L, Strauch R G, et al. 1986. The altitude coverage of the Colorado wind profilers at 50, 405 and 915 MHz [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3(5): 680-692. doi:10.1175/1520-0426(1986)0032.0.CO;2
- 古红萍, 马舒庆, 王迎春, 等. 2008. 边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用 [J]. *气象科技*, 36(3):

- 300-304. Gu Hongping, Ma Shuqing, Wang Yingchun, et al. 2008. Application of Airda 3000 boundary wind profile radar in analyzing summer heavy rainfall in Beijing [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 36(3): 300-304. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2008.03.009
- 顾映欣, 陶祖钰. 1991. UHF 多普勒风廓线雷达资料的初步分析和应用 [J]. *气象*, 17(1): 29-34. Gu Yingxin, Tao Zuyu. 1991. Preliminary analysis and application of UHF wind profile radar data [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 17(1): 29-34. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1991.01.006
- 顾映欣, 陶祖钰. 1993. 1989—1990 年 UHF 风廓线雷达资料的分析和应用 [C]. *中尺度气象文集*. 北京: 气象出版社, 194-201. Gu Yingxin, Tao Zuyu. 1993. Analysis and application of UHF wind profile radar data during 1989-1990 [C]. *Mesoscale meteorological anthology (in Chinese)*, Beijing: China Meteorological Press, 194-201.
- 何平. 2006. 相控阵风廓线雷达 [M]. 北京: 气象出版社, P96. He Ping. 2006. Phased-array wind profile radar (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, P96.
- 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 Ping, Zhu Xiaoyan, Ruan Zheng, et al. 2009. Preliminary study on precipitation process detection using wind profiler radar [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20(4): 465-470. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2009.04.011
- 胡明宝, 郑国光, 肖文建. 2008. 风廓线雷达数据获取率的统计分析 [J]. *现代雷达*, 30(10): 14-16. Hu Mingbao, Zheng Guoguang, Xiao Wenjian. 2008. The statistical analysis of wind profiler radar data availability [J]. *Modern Radar (in Chinese)*, 30(10): 14-16. doi:10.3969/j.issn.1004-7859.2008.10.004
- Ishihara M, Kato Y, Abo T, et al. 2006. Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84(6): 1085-1096.
- Kuo Y H, Donall E G, Shapiro M A. 1987. Feasibility of short-range numerical weather prediction using observation from a network of profilers [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115(10): 2402-2427. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<2402>2
- 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 Chenguang, Liu Shuyuan, Tao Zuyu. 2003. Review of wind profiler data of Hongkong during IOP of HUAMEX and SCSMEX [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 19(3): 269-276. doi:1004-4965(2003)03-0269-08
- 李红莉, 赖安伟, 周志敏. 2013. 风廓线雷达资料同化在中尺度数值预报中的应用研究 [C]. 第 30 届中国气象学会年会, 中国南京. Li Hongli, Lai Anwei, Zhou Zhimin. 2013. Assimilation of wind profile radar data and its application to mesoscale numerical forecast (in Chinese) [C]. 30th annual meeting of Chinese meteorological society, Nanjing China.
- 李妙英, 杨璐, 周志敏, 等. 2013. 风廓线雷达资料在降水数值预报中的应用探讨 [J]. *成都信息工程学院学报*, 28(3): 284-290. Li Miaoying, Yang Lu, Zhou Zhimin, et al. 2013. Application research of wind profile radar data in the numerical prediction of rainfall [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese)*, 28(3): 284-290. doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2013.03.013
- 廖菲, 邓华, 李旭. 2017. 基于风廓线雷达的广东登陆台风边界层高度特征研究 [J]. *大气科学*, 41(5): 949-959. Liao Fei, Deng Hua, Li Xu. 2017. A study on boundary layer height characteristics of landing typhoons by wind profilers in Guangdong Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(5): 949-959. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16208
- 马大安, 田文斌, 丁渭兴, 等. 1989. 对流层风廓线仪的研制 [A]. 京津冀中尺度气象试验基地文集 [M]. 中国气象科学研究院中尺度气象研究所. Ma Daan, Tian Wenbin, Ding Weixing, et al. 1989. Development of tropospheric wind profiler (in Chinese) [A]. Documents of mesoscale meteorological experiment base in Beijing, Tianjin and Hebei, Institute of mesoscale meteorology (in Chinese) [M]. Chinese academy of meteorological sciences.
- Muschinski A, Sullivan P P, Wuertz D B, et al. 1999. First synthesis of wind-profiler signals on the basis of large-eddy simulation data [J]. *Radio Sci.*, 34(6): 1437-1459. doi:10.1029/1999RS900090.
- 阮征, 何平, 葛润生. 2008. 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*, 32(1): 133-140. Ruan Zheng, He Ping, Ge Runsheng. 2008. Determination of refractive index structure constant with wind profile radar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(1): 133-140. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.12
- Strauch R G, Merritt D A, Moran K P, et al. 1984. The Colorado wind-profiling network [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic*

Technology, 1(1): 37-49. doi:10.1175/1520-0426(1984)0012.0.CO;2

- 谭晓伟, 徐枝芳, 龚建东. 2016. 风廓线雷达资料对 GRAPES_MESO 数值预报系统影响的初步研究 [J]. 气象, 42(1): 26-33.
- Tan Xiaowei, Xu Zhifang, Gong Jiandong. 2016. Impact of wind profiling radar data assimilation on GRAPES_MESO model system [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 42(1): 26-33. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.01.003
- Trexler C M, Koch S E. 2000. The life cycle of a mesoscale gravity wave as observed by a network of Doppler with profilers [J]. Mon. Wea. Rev., 128(7): 2423-2446. doi:10.1175/1520-0493(2000)1282.0.CO;2
- 王丹, 阮征, 王改利, 等. 2019. 风廓线雷达资料在 GRAPES-Meso 模式中的同化应用研究 [J]. 大气科学, 43(3): 634-654.
- Wang Dan, Ruan Zheng, Wang Gaili, et al. 2019. A study on sssimilation of wind profiling radar data in GRAPES-Meso model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 634-654. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18125
- 汪学渊, 李栋, 任雍, 等. 2013. 风廓线雷达资料在台风苏拉登陆过程中的应用初探 [J]. 气象, 39(11): 1431-1436. Wang Xueyuan, Li Dong, Ren Yong, et al. 2013. Preliminary analyses on application of wind profiler radar data to the landing process of typhoon Saola [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 39(11): 1431-1436. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.11.006
- 汪学渊, 汪波, 文明章, 等. 2015. 丘陵地区边界层风廓线雷达数据统计特性分析 [J]. 气象科学, 35(3): 328-333. Wang Xueyuan, Wang Bo, Wen Mingzhang, et al. 2015. Statistical characteristics analysis on the boundary wind profile radar data in Fujian hilly areas [J]. Journal of the Meteorological Sciences(in Chinese), 35(3): 328-333. doi:10.3969/2014jms.0011
- 王志春, 植石群. 2014. 登陆台风启德近地层强风特性观测研究 [J]. 气象科技, 42(4): 678-681. Wang Zhichun, Zhi Shiqun. 2014. Observational study of strong wind characteristics of typhoon Kaitak with automotive wind profiler radar [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 42(4): 678-681. doi:10.19517/j.1671-6345.2014.04.026
- 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 [J]. 现代雷达, 35(6): 24-28. Wu Lei, Chen Hongbin, Gao Yuchun, et al. 2013. Primary analysis of the comparison test of domestic wind profilers [J]. Modern Radar (in Chinese), 35(6): 24-28. doi:10.3969/j.issn.1004-7859.2013.06.007
- 余贞寿, 冀春晓, 杨程, 等. 2018. 同化风廓线雷达资料对浙江降水预报改进评估 [J]. 应用气象学报, 29(1): 97-110. Yu Zhenshou, Ji Chunxiao, Yang Cheng, et al. 2018. Impacts of assimilating wind profiler radar observations on precipitation prediction in Zhejiang province [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 29(1): 97-110. doi:10.11898/1001-7313.20180109
- 曾瑾瑜, 汪学渊, 潘宁. 2017. 风廓线雷达资料在福建省气象局的业务应用现状与展望 [J]. 海峡科学, (12): 61-68. Zeng Jinyu, Wang Xueyuan, Pan Ning. 2017. The application status and prospect of wind profile radar data in Fujian meteorological bureau [J]. Channel Science (in Chinese), (12): 61-68.
- 张胜军, 徐祥德, 吴庆梅, 等. 2004. “中国登陆台风外场科学试验”风廓线仪探测资料在四维同化中的初步应用研究 [J]. 应用气象学报, 15(增刊): 101-108. Zhang Shengjun, Xu Xiangde, Wu Qingmei, et al. 2004. Researches on atmospheric profile observations of “CLATEX” in four-dimensional data assimilation [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 15(suppl): 101-108. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2004.z1.014
- 张小雯, 郑永光, 吴蕾, 等. 2017. 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, 45(2): 285-297. Zhang Xiaowen, Zheng Yongguang, Wu Lei, et al. 2017. Review on application of wind profiler radar in weather monitoring and forecasting [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 45(2): 285-297.
- 张旭斌, 万齐林, 薛纪善, 等. 2015. 风廓线雷达资料质量控制及其同化应用 [J]. 气象学报, 73(1): 159-176. Zhang Xubin, Wan Qilin, Xue Jishan, et al. 2015. Quality control of wind profile radar data and its application to assimilation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(1): 159-176. doi:10.11676/qxb2015.015
- Zhang X, Luo Y, Wan Q, et al. 2016. Impact of assimilating wind profiling radar observations on convection-permitting quantitative precipitation forecasts during SCMREX [J]. Weather and Forecasting, 31(4): 1271-1292. doi:10.1175/WAF-D-15-0156.1
- 周志敏, 万蓉, 崔春光, 等. 2010. 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用 [J]. 暴雨灾害, 29(3): 251-256. Zhou Zhimin, Wan Rong, Cui Chunguang, et al. 2010. Application of wind profiler radar data in a hailfall process [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 29(3): 251-256. doi:1004-9045(2010)03-0251-06
- 仲跻芹, Guo Y R, 张京江. 2017. 华北地区地基 GPS 天顶总延迟观测的质量控制和同化应用研究 [J]. 气象学报, 75(1):

147-164. Zhong Jiqin, Guo Y R, Zhang Jingjiang. 2017. A study of quality control and assimilation of ground-based GPS ZTD in North China [J]. [Acta Meteorologica Sinica \(in Chinese\)](#), 75(1): 147-164. doi:10.11676/qxxb2017.010

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 Lijuan. 2015. Preliminary analysis on wind product of wind profiler for data assimilation [J]. [Meteor. Mon. \(in Chinese\)](#), 41(12): 1494-1502. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.12.007