

王蕙莹,周自江,廖捷,等,2021. 面向 CRA 的中国风廓线雷达小时产品质量控制算法与评估[J]. 气象,47(5):573-585. Wang H Y,Zhou Z J,Liao J,et al,2021. A quality control algorithm and evaluation of hourly data of China's wind profilers for CRA [J]. Meteor Mon,47(5):573-585(in Chinese).

# 面向 CRA 的中国风廓线雷达小时产品 质量控制算法与评估\*

王蕙莹 周自江 廖捷 远芳 刘雨佳

国家气象信息中心,北京 100081

**提 要:** 面向中国第一代全球大气/陆面再分析产品(CRA)的应用需求,针对中国风廓线雷达小时产品资料特点,在美国 NCEP 风廓线综合质量控制方法的基础上,提出一套适用于中国风廓线雷达逐小时水平风产品的质量控制方法。通过对比质量控制前后风廓线雷达资料与探空资料的相关系数、平均偏差及均方根误差,证明了质量控制方案的有效性。以 ERA-Interim 资料作为间接参考场,通过比较探空资料与不同型号、不同探测高度范围、不同观测时段、不同垂直层次风廓线雷达资料相对 ERA-Interim 再分析资料的偏差,分析了质量控制前后中国风廓线雷达资料的整体质量。结果表明,经该算法质量控制后,风廓线雷达与探空风场表现出了更好的一致性。不同雷达型号、不同探测高度资料的相关系数从 0.17~0.82 上升至 0.79~0.98。在相对 ERA-Interim 与探空资料的偏差方面,质量控制后,除边界层风廓线雷达的  $u$  风分量在 300 hPa 以上仍有  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右的偏差外,其他型号雷达的  $u$ 、 $v$  风分量在各垂直层的平均偏差均在  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内,证明质量控制算法具有识别高层粗大误差数据的能力,能够使最大探测高度以上的数据得到有效利用。

**关键词:** 风廓线雷达,质量控制,水平风产品,质量评估

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.05.006

## A Quality Control Algorithm and Evaluation of Hourly Data of China's Wind Profilers for CRA

WANG Huiying ZHOU Zijiang LIAO Jie YUAN Fang LIU Yujia

National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

**Abstract:** This paper describes a quality control (QC) algorithm for hourly horizontal wind products of Chinese wind profilers. The QC algorithm is based on the complex QC system of NCEP, is designed for the requirements of CMA global atmospheric/land surface reanalysis product (CRA). The effectiveness of the QC algorithm is checked by comparing the correlation coefficient, average bias and root mean square error of wind profiler data and radiosonde data before and after QC procedures. The deviations from ERA-Interim reanalysis data are calculated for both radiosonde and wind profiler data. Through comparing wind profiler deviations with radiosonde deviations, the overall quality conditions of Chinese wind profiler data before and after QC procedures are analyzed. The results show that the wind profiler data and the radiosonde data show better consistency after the QC by this QC algorithm, and the correlation coefficients of different radar types and different detection altitudes increase from the range 0.17–0.82 to the range

\* 国家重点研发计划(2017YFC1501801)及国家气象科技创新工程(CMAGGTD003-5)共同资助

2020 年 6 月 23 日收稿; 2020 年 12 月 31 日收修定稿

第一作者:王蕙莹,主要从事气象基础资料质量控制与产品研发. E-mail: wanghy@cma.gov.cn

通讯作者:周自江,主要从事气象资料产品研发. E-mail: zzz@cma.gov.cn

0.79—0.98. For different radar types and different vertical layers, all the biases of horizontal profiler wind data from ERA-Interim exhibit a dramatic decrease after the QC procedures and are nearly equivalent to that of radiosonde data, except that the data from boundary layer wind profiler radar still has a deviation of  $u$ -wind component about  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  above 300 hPa. The results prove that the QC algorithm has the ability to identify the high-level gross error data, and can make effective use of the data above the maximum detection height.

**Key words:** wind profiler, quality control (QC), horizontal wind product, quality evaluation

## 引言

再分析产品由于时空分辨率高、资料时间长且融合多种气象观测资料,能够很好地弥补观测资料匮乏和时空不均等问题,在气候变化分析及监测、衡量建模和同化发展能力、评估观测系统变化影响等方面具有广泛应用。国际第一代产品包括 ERA-15 (Gibson et al, 1999)、NCEP/NCAR (Kalnay et al, 1996) 和 NASA/DAO (Data Assimilation Office; Schubert et al, 1995), 第二代产品包括 NCEP/DOE (Department of Energy; Kanamitsu et al, 2002)、ERA-40 (Uppala et al, 2005) 和 JRA-25 (Onogi et al, 2007), 第三代产品包括 ERA-Interim (Dee et al, 2011)、CFSR (climate forecast system reanalysis; Saha et al, 2014)、MERRA (modern era retrospective-analysis for research and applications; Rienecker et al, 2011) 和 JRA-55 (Kobayashi et al, 2015)。目前,国际上发布的最新一代的再分析产品为 ERA5 (Hersbach et al, 2020)。再分析产品研制涉及气象观测资料处理、数值预报模式及同化技术等多个方面。在开展再分析产品研制的过程中,首要任务是研发一套满足再分析应用需求的高质量观测数据集。

风廓线雷达资料时空分辨率较高,探测周期不超过 6 min,垂直分辨率为几十米到几百米,具有反演风场信息准确、数据连续性好等特点,被认为是常规探空之外高空风资料的最直接来源 (Beran and Wilfong, 1998; 董丽萍等, 2014)。另一方面,欧洲、美国、日本、澳大利亚、中国等多个国家和地区的大量研究表明,高分辨率的风廓线雷达资料更精细地刻画了强对流天气过程 (黄钰等, 2020; 黄小彦等, 2020; 王叶红等, 2019; 潘劲松等, 2019; 徐珺等, 2018), 为数值预报系统提供了更加丰富的局地中、小尺度信息的初始场,可明显改善数值天气预报的准确率,尤其对短时临近预报效果具有正贡献 (Kuo et al, 1987; Bouttier,

2001; WMO, 2012; Bronwyn et al, 2016)。

2013 年,国家气象信息中心牵头启动了中国第一代全球大气/陆面再分析产品 (简称 CRA, 1979 年至今) 的研制,其特色之一是尽可能使用国际已发布再分析产品未同化的中国特有观测资料,其中包括中国风廓线雷达资料 (廖捷等, 2018)。近年来,我国不断推进风廓线雷达观测网的建设,并规划建设布局科学、功能先进的风廓线雷达网。目前,完成建设的风廓线雷达近百部,70 余部已投入业务运行,尤其在华北、华东、华南等地区已经初步形成了相对密集的风廓线雷达网,可以获取短波波动等天气系统连续详实的风场变化。但是,一方面,由于我国气象部门早期没有对风廓线雷达资料进行传输及质量考核,缺报漏报、数据格式不符合规范等现象时有发生,加之风廓线雷达型号及生产厂家不尽相同,雷达探测系统参数设计、计算方法不一致,致使不同型号风廓线雷达资料时空代表性差异较大。另一方面,厂家提供的产品级数据简单地将可信度标记为百分之百可信和零可信,处理方式较为笼统,影响数据的使用效果 (朱立娟, 2015)。因此,在将我国风廓线雷达历史资料提供给 CRA 应用之前,最急需解决的就是该资料的质量控制问题。

在面向同化应用的风廓线雷达资料质量控制技术方面,国内学者积累了大量的研究工作。张旭斌等 (2015) 利用经验正交函数法 (EOF) 对广东地区 13 部风廓线雷达资料进行了质量控制,并将其应用于华南区域预报模式,证明了风廓线雷达资料使短期降水预报有明显改善。王丹等 (2019) 从风廓线雷达径向速度资料入手,经两步质量控制方案之后,开展了风廓线雷达资料在台风莲花个例中的同化试验。结果表明,同化风廓线雷达资料能有效地调整台风降水区的动力结构和水汽分布,从而更好地预报降水的位置及强度。余贞寿等 (2018) 采用气候极值检查、一致性检查、垂直稀疏化等算法对中国东部地区 35 部风廓线雷达资料实施质量控制,并基于中尺度模式 (WRF) 和美国俄克拉何马大学风暴分析

预测中心的资料同化系统开展了风廓线雷达资料的同化试验。分析显示同化风廓线雷达资料后,浙江地区小雨和大雨的 TS 评分分别提高了 0.06 和 0.07,降水预报漏报率和空报率分别降低了 0.04 和 0.05。但是,以上工作多为小范围区域的站网个例试验,针对全国站网及早期历史资料的质量控制技术几乎空白。

在国外,面向再分析产品应用的质量控制技术早已业务应用,并发展成熟。日本在研制 JRA-25 及 JRA-55 再分析产品时,采用的风廓线资料的质量控制算法主要包括气候检查、粗大误差检查、空间一致性检查以及黑名单。其中,粗大误差检查及空间一致性检查采用动态阈值参数,该参数的大小取决于局部水平梯度和背景场的变化趋势。整套算法与日本气象局业务使用的算法基本一致(Onogi et al,2007)。美国 CFSR 在同化应用前采用 NCEP 观测数据质量控制软件对多类常规资料进行质量控制(Saha et al,2014)。其中,风廓线雷达资料采用的是综合质量控制算法(NCEP CQC)。该算法的核心思想是通过比较观测值与背景场的差异来判断风场变化的一致性,从而进行错误数据的识别。主要包括增量检查、时间一致性检查、垂直一致性检查及中值检查等四步基本检查,最后通过四步检查得到的残差综合判断风场的可信性,并给出质量控制码(Dennis,2003)。

同样是面向再分析的应用需求,同样是对风廓线资料进行质量控制,能否利用 NCEP CQC 算法对我国的风廓线雷达资料进行质量控制?该算法能否全部覆盖中国风廓线资料的错误类型?算法能否满足 CRA 的同化应用需求?为了回答这些问题,本文面向 CRA 的同化应用需求,以重点解决中国风廓线雷达资料的质量控制为目的,针对中国风廓线雷达资料的错误类型,在 NCEP CQC 算法的基础上,提出了一套适用于中国风廓线雷达逐小时水平风产品的质量控方法,并通过评估与探空资料的相关系数、平均偏差、均方根误差等,分析了该质量控制算法的效果。此外,以 ERA-Interim 资料为间接参考场,通过比较探空资料与不同型号、不同探测高度、不同时段风廓线雷达资料相对 ERA-Interim 资料的偏差,讨论了质量控制前、后中国风廓线雷达资料的整体质量水平。

## 1 数据

若将时间分辨率较高、包含高频脉动变化的风

场资料直接接入同化系统,很可能造成较大的分析误差。NCEP、ECMWF 等机构在业务中均同化一小时分辨率的风廓线雷达水平风。因此,本文也采用一小时平均采样高度上的产品文件作为输入源。数据来源于国家气象信息中心,时间序列长度为 2007 年 8 月至 2018 年 12 月。在该时段内,收到观测数据的台站共计 112 个,包括边界层风廓线雷达(简称 LC 型)106 个,对流层 I 型风廓线雷达(简称 PA 型)3 个,对流层 II 型风廓线雷达(简称 PB 型)3 个,台站空间分布如图 1 所示。在数据收集整理过程中发现,2016 年以前,尤其在 2009—2013 年,多站出现了一小时内上传多个冗余文件的现象。在数据选用时,只选用离整点时间最近的一次文件。

## 2 质量控制方法

首先,利用中国风廓线雷达资料对 NCEP CQC 算法的适用性进行评估。在算法实施过程中,用于辅助算法综合决策的背景场选用 NCEP FNL 资料(NCEP,1999)。该资料分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,时间间隔为 6 h,共有 26 个标准等压层(1000~10 hPa)、地表边界层和对流层顶的信息,文件频率为每 6 小时(00、06、12、18 UTC)一次。在数据时空匹配处理时,利用双线性插值法进行插值。评估中发现,NCEP CQC 算法不能完全覆盖中国风廓线雷达资料的所有错误类型,尤其对两类错误数据的识别能力欠缺。第一类是在时间或空间上连续出现的异常值。第二类是由于个别站点在某时段内因仪器故障、失灵、定标不准等而导致持续出现的系统性错误数据。因此,在 NCEP CQC 算法之前增加允许值检

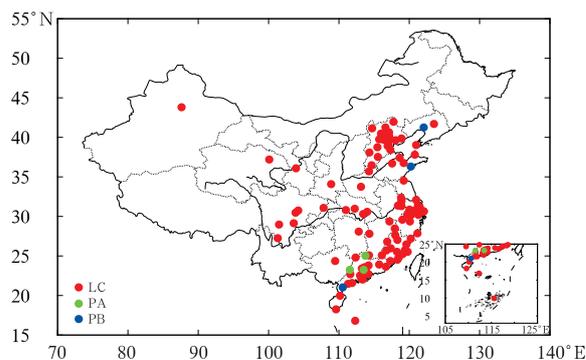


图 1 2007 年 8 月至 2017 年 12 月  
中国风廓线雷达站点分布  
(红色:LC 型;绿色:PA 型;蓝色:PB 型)

Fig. 1 Distribution of wind profiler stations in China  
from August 2007 to December 2017  
(red: LC type; green: PA type; blue: PB type)

查、台站气候学界限值检查来识别第一类错误数据，在其后增加黑名单检查来识别第二类错误数据。改进后的算法被称为“国家气象信息中心质量控制算法”(简称 NMIC QC)，流程如图 2 所示。

NMIC QC 的风速允许值范围来自国家气象信息中心业务应用的全球高空天气报质量控制方案，根据观测位置的拔海高度，将风速的允许值范围分为五个等级(表 1)。风向的允许值范围均为 0°~360°。

台站气候学界限值检查主要判别的是超出气候学有效值范围的风场数据。由于我国开始风廓线雷达观测的时间不长，大部分台站数据的时间序列长度还不能满足统计分析气候学界限值的条件。因此，采用距待检风廓线雷达站 200 km 以内最近的 L 波段秒级探空台站的气候学界限值参数作为该站的

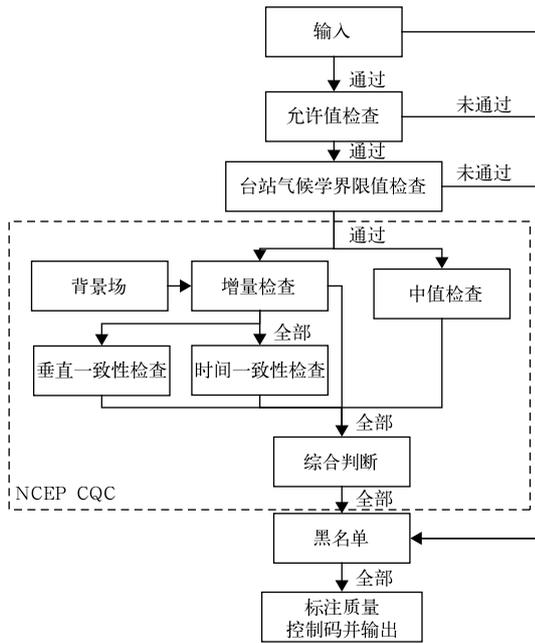


图 2 改进后的质量控制算法(NMIC QC)流程  
Fig. 2 Flow chart of the improved quality control algorithm (NMIC QC)

表 1 风速允许值范围

观测位置的拔海高度/m	风速允许值/(m·s <sup>-1</sup> )
-600 ≤ H < 3000	0~100
3000 ≤ H < 5500	0~120
5500 ≤ H < 7000	0~150
7000 ≤ H < 14000	0~180
14000 ≤ H < 22000	0~170

气候学界限值。该界限值利用近 10 年的质量控制后的 L 波段秒级资料统计而来。在风廓线雷达有效探测范围内，按照 42 个垂直厚度层提供参数。其中，700 hPa 以下每 20 hPa 为一层；700~300 hPa 每 40 hPa 为一层；300~100 hPa 每 20 hPa 为一层；100~50 hPa 每 10 hPa 为一层。由于风廓线雷达与 L 波段秒级探空资料的垂直坐标单位不同，为了便于匹配，采用 WMO 推荐使用的标准大气公式(ISO, 1975)将风廓线雷达的观测高度转换为气压。具体算法如下：

$$\begin{cases}
 p = 1013.25[1 - (2.25 \times 10^{-5} H)]^{g/1.86} & H \leq 11000 \\
 p = \frac{226.32}{\exp[(H - 11000)/(1.32/g)]} & 11000 < H \leq 20000 \\
 p = 54.75[1 + 4.61 \times 10^{-5} (H - 20000)]^{-g/0.287} & H > 20000
 \end{cases}
 \quad (1)$$

式中： $p$  为气压，单位为 hPa； $H$  为采样层的海拔高度，单位为 m； $g$  为重力加速度，为 9.80665 m·s<sup>-2</sup>。

由于统计学的质量控制算法很难全部覆盖第二类错误数据，ECMWF 在业务系统中使用黑名单来解决此问题，并采用质量控制后的错误率作为站点是否加入黑名单的判断依据。本文沿用此方法，将每月单站错误率大于 20% 的站点加入黑名单。

### 3 质量控制效果评估

#### 3.1 按雷达型号与最大探测高度范围评估

国家气象信息中心研制的全球高空定时值数据集(V3.0)整合了全球多个数据来源的探空报文数据，其中包含了 1950 年以来中国近 260 个综合探空站、单测风站、科学试验站等的规定等压面风、特性层风及规定高度层风资料。数据经过了允许值检查、台站气候学界限值检查、风向风速间一致性检查以及风切变检查等多个步骤的质量控制(Liao et al, 2014)，并对质量控制结果进行了人工核查，可信度较高。本文采用数据集中质量控制码为正确的规定高度层风数据作为“真值”，来检验上述质量控制算法的有效性。考虑到两种资料在观测时间、地点、垂直分辨率等方面的差异，本文只选取探空与风廓线雷达的同址观测站，且将时间 00、12 UTC(个别包

含探空 06、18 UTC 加密观测)的资料作为评估样本,并采用双线性插值法将探空资料垂直插值到风廓线雷达探测高度。早期,探空与风廓线雷达的同址观测站只有 2~5 个。2016 年,两类观测的同址观测站增至 9 个,分别为乌鲁木齐、北京大兴、沈阳、济南、青岛、武汉、南京、海口及三沙,其地理位置可覆盖全国大部分地区,具有较好的代表性。在风廓线雷达型号的基础上,结合考虑雷达的最大探测高度(中国气象局,2020;吴蕾等,2013),将以上台站分为 PB 型、增强 LC 型及 LC 型三类。其中,PB 型的台站为青岛,最大探测高度为 8 km。LC 型的台站为乌鲁木齐、济南及南京,最大探测高度为 3 km。

其他 5 个台站均为增强 LC 型,最大探测高度为 8 km。由于没有匹配到与 PA 型风廓线雷达同址观测的探空站,因此,本节中暂不讨论 PA 型雷达的质量控制效果。

图 3 给出了 2016 年质量控制前、经 NCEP CQC 以及 NMIC QC 质量控制后的三类中国风廓线雷达资料与探空资料的  $u$ 、 $v$  风分量散点分布。其中,图 3a~3f、3g~3l、3m~3r 分别对应 PB 型、增强 LC 型及 LC 型风廓线雷达。蓝色、黑色散点分别表示超出和未超出最大探测高度的数据。由图 6 可以看出,质量控制前的资料散点分布较为散乱,有明显的离群资料,在零风速附近存在不少偏差较大的点

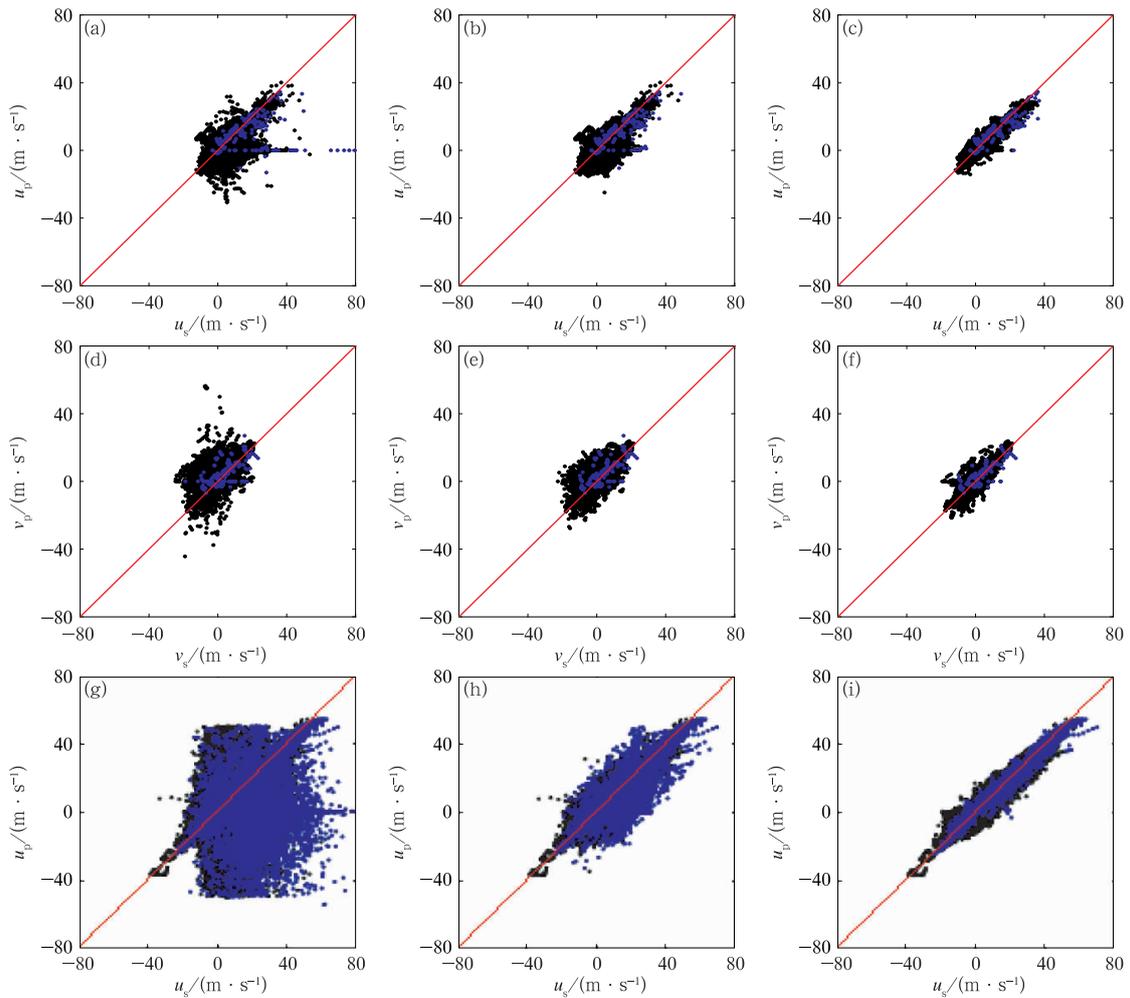
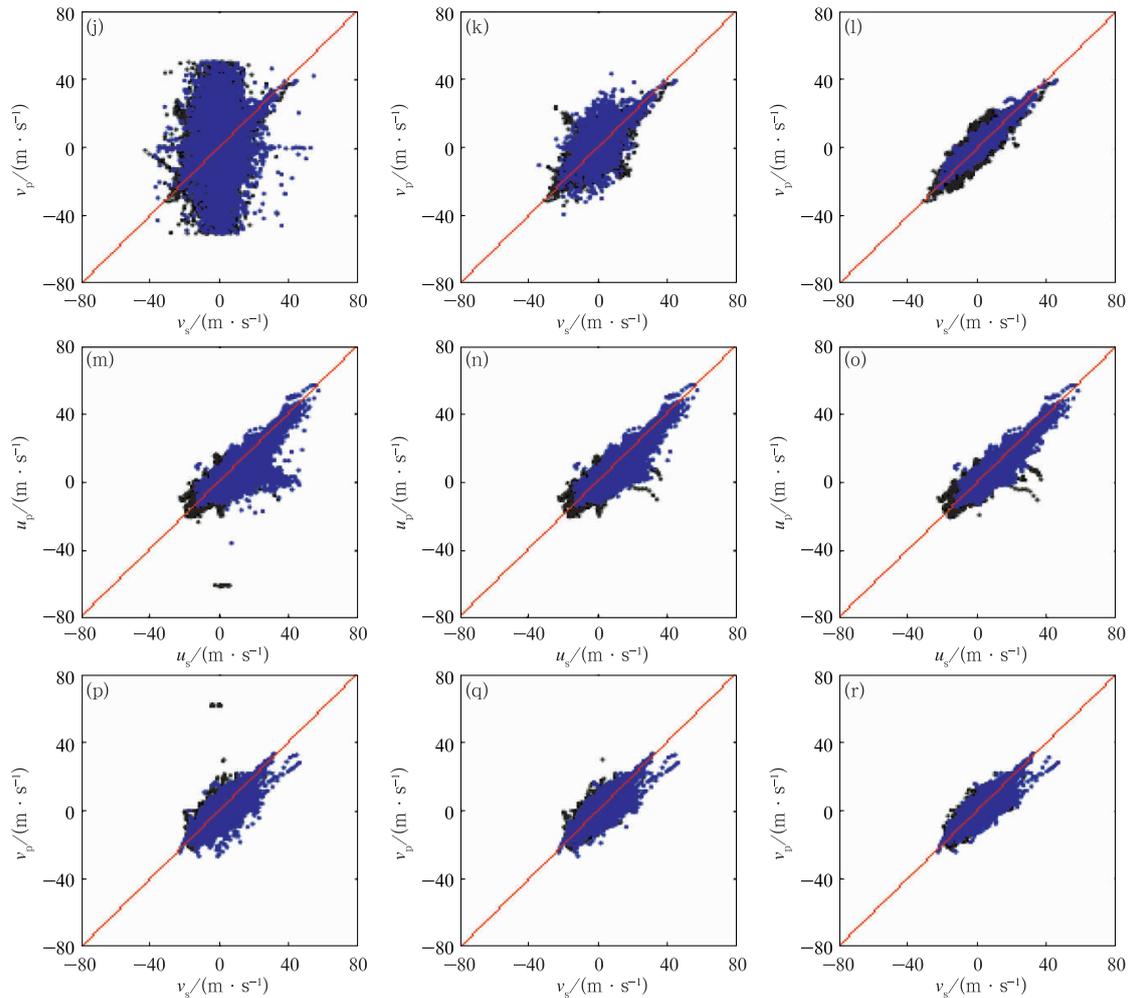


图 3 2016 年中国风廓线雷达资料(下标 p)与探空资料(下标 s)的散点分布  
 (a,d,g,j,m,p)质量控制前,(b,e,h,k,n,q)NCEP CQC,(c,f,i,l,o,r)NMIC QC  
 (a~f)PB 型,(g~l)增强 LC 型,(m~r)LC 型  
 (蓝色:超出最大探测高度数据,黑色:最大探测高度范围内数据)

Fig. 3 Scatter distribution of wind profiler data (subscript p) and radiosonde data (subscript s) in China in 2016  
 (a, d, g, j, m, p) before QC, (b, e, h, k, n, q) NCEP CQC, (c, f, i, l, o, r) NMIC QC  
 (a–f) PB type, (g–l) enhanced LC type, (m–r) LC type  
 (blue: data beyond the maximum detection altitude range, black: data within the maximum detection altitude range)



续图 3

(continued Fig. 3)

(图 3a、3g、3j、3m), 且分布在对角线以下的  $u$  风分量散点数量偏多(图 3a、3g、3m)。经过 NCEP CQC 质量控制后, 数据主要集中在对角线两侧, 但仍有一些离群点存在。经 NMIC QC 质量控制后, 资料更集中于对角线分布, 纺锤形特征明显, 整体质量显著提高。

进一步计算两类观测资料的相关系数、平均偏差及均方根误差, 可以看出(表 2), 质量控制前, 不同探测高度范围的增强 LC 型雷达的  $u$ 、 $v$  风分量与探空资料的相关系数为 0.17~0.53, 平均偏差为  $-15.64 \sim -0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 均方根误差为  $26.58 \sim 8.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经 NCEP CQC 质量控制后, 相关系数提升至 0.68~0.88, 平均偏差范围缩小为  $-4.45 \sim -0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 均方根误差减小为  $10.26 \sim 4.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经 NMIC QC 质量控制后相关系数进一

步提升为 0.92~0.98, 平均偏差范围进一步缩小为  $-1.03 \sim 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 均方根误差也减小为  $3.29 \sim 2.51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。PB 型及普通 LC 型雷达资料的结果类似。这一结果与国内其他学者的研究结论一致(王栋成等, 2019; 吴蕾等, 2014), 证明了上述算法的有效性。

根据风廓线雷达探测原理, 接收到的信号通常随高度的增加而衰减, 导致高层资料的误差较大。因此, 超出雷达最大探测范围的数据可用性尤其值得关注。以  $u$  风分量为例, 质量控制前, 超出 PB 型和增强 LC 型雷达最大探测范围的数据与探空资料的相关系数仅为 0.18 和 0.17, 平均偏差为  $-8.01$  和  $-15.64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 均方根误差为 17.75 和  $26.58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经 NMIC QC 质量控制后, 相关系数上升至 0.88 和 0.98, 平均偏差减小为  $-3.13$  和  $-4.45$

$m \cdot s^{-1}$ , 均方根误差也减小为 4.94 和  $3.29 m \cdot s^{-1}$ 。其中, PB 型雷达资料质量控制后的结果欠佳, 与该型号样本总量偏小有关。以上数据表明, 采用 NMIC QC 算法, 超出最大探测范围数据的与探空虽有一定偏差, 但制定合理的观测误差后, 仍可提供

用户使用。从质量控制前后的数据量变化可以看出, NMIC QC 比 NCEP CQC 方法的数据剔除比例高, 这主要是因为在不同的统计时段, 三类雷达均有相应的站点被加入了黑名单。

表 2 2016 年三类中国风廓线雷达相对探空测风的相关系数、平均偏差及均方根误差  
Table 2 Correlation coefficient, bias and root mean square error of three types of China's wind profilers data relative to radiosonde data in 2016

类型	数据量			相关系数			平均偏差/( $m \cdot s^{-1}$ )			均方根误差/( $m \cdot s^{-1}$ )		
	QC 前	NCEP CQC	NMIC QC	QC 前	NCEP CQC	NMIC QC	QC 前	NCEP CQC	NMIC QC	QC 前	NCEP CQC	NMIC QC
PB- <i>u</i>	15 981	14 923	8 806	0.62	0.75	0.91	-2.38	-1.64	-0.58	6.53	4.88	2.64
PB- <i>u</i> *	203	176	152	0.18	0.73	0.88	-8.01	-3.13	-1.59	17.75	7.69	4.94
PB- <i>v</i>	15 981	14 923	8 806	0.51	0.64	0.84	2.14	1.54	0.31	6.65	5.18	3.10
PB- <i>v</i> *	203	176	152	0.63	0.70	0.82	1.05	1.45	0.99	6.32	5.75	4.46
增强 LC- <i>u</i>	126 788	109 412	82 251	0.53	0.88	0.96	-2.50	-1.01	-0.67	9.74	4.29	2.60
增强 LC- <i>u</i> *	9 454	5 851	3 008	0.17	0.78	0.98	-15.64	-4.45	-1.03	26.58	10.26	3.29
增强 LC- <i>v</i>	126 788	109 412	82 251	0.44	0.78	0.92	-0.05	-0.07	-0.17	8.03	4.11	2.51
增强 LC- <i>v</i> *	9 454	5 851	3 008	0.22	0.68	0.95	-0.40	0.25	0.15	13.96	6.58	2.80
普通 LC- <i>u</i>	41 481	41 384	38 831	0.71	0.76	0.79	-0.76	-0.71	-0.61	3.69	3.32	3.06
普通 LC- <i>u</i> *	27 340	26 754	24 778	0.82	0.89	0.93	-2.49	-2.06	-1.49	5.54	4.38	3.40
普通 LC- <i>v</i>	41 481	41 384	38 831	0.78	0.82	0.83	-0.33	-0.37	-0.28	3.20	2.85	2.70
普通 LC- <i>v</i> *	27 340	26 754	24 778	0.82	0.84	0.86	-1.56	-1.40	-1.17	4.00	3.70	3.42

注:无 \* 代表最大探测高度以内数据的统计结果; \* 代表最大探测高度以外数据的统计结果。

Note: No \* represents the results of the data within the range of maximum detection altitude, \* represents that above the maximum detection altitude.

### 3.2 按观测时间范围评估

由于风廓线雷达与探空资料的匹配站点有限, 为了解质量控制后的中国风廓线雷达资料的整体质量水平, 避免质量较差的观测数据对再分析同化应用造成负面影响, 同时也为同化期间观测误差的设定提供依据, 需要一套时间序列长、高质量、高分辨率的资料进行评估。再分析资料并不是观测值, 与观测存在一定的偏差, 但能够反映长时间尺度上大气的平均状态, 可以作为间接参考场。如果同一套再分析资料与同一区域的探空资料、风廓线雷达资料的偏差相当, 可以间接证明风廓线雷达与探空资料的偏差很小, 质量可信。如果再分析资料与探空资料的偏差很小, 但与风廓线雷达资料的偏差很大, 可以反映出再分析资料相对可信, 但风廓线雷达资料的质量存在一定问题。李庆雷等(2018)、张寅等(2017)和傲雪等(2018)研究表明, ERA-Interim 再分析资料与中国风场观测资料的相关性较好, 因此, 本文选用该资料作为间接参考场, 评估了中国探空资料和质量控制前后的风廓线雷达资料相对

ERA-Interim 再分析资料的逐月平均偏差及均方根误差(图 4)。为了便于对比, 利用 GSI V3.6 版同化系统(GSI, 2017)将所有数据统一插值到模式层进行分析。

从图 4a 可以看出, 中国探空资料与 ERA-Interim 资料的 *u* 风分量月平均偏差一直稳定在  $0 m \cdot s^{-1}$  附近, 均方根误差为  $3 m \cdot s^{-1}$  左右。2014 年以后质量控制前的风廓线雷达资料与 ERA-Interim 资料的平均偏差及均方根误差曲线平稳, 峰值出现在 2016 年 2 月及 2017 年 1 月, 平均偏差为  $-2 m \cdot s^{-1}$ , 与探空资料相差  $2 m \cdot s^{-1}$ , 均方根误差为  $8 m \cdot s^{-1}$ , 与探空资料相差  $5 m \cdot s^{-1}$ 。经 NMIC QC 质量控制后, 两次平均偏差高峰均降低至  $-1 \sim 0 m \cdot s^{-1}$  范围内, 均方根误差降至  $4 m \cdot s^{-1}$  以下。而 2014 年以前, 质量控制前的风廓线雷达资料与 ERA-Interim 资料差异较大, 平均偏差及均方根误差数值存在较大波动, 峰值出现在 2010 年 12 月, 平均偏差达到  $-13 m \cdot s^{-1}$ , 与探空资料相差  $13 m \cdot s^{-1}$ , 均方根误差达到  $32 m \cdot s^{-1}$ , 与探空资料相差  $30 m \cdot s^{-1}$ 。经 NMIC QC 质量控制后, 2009

年 2 月、2010 年 12 月以及 2012 年 2 月的 3 次平均偏差高峰均缩减至  $\pm 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内,均方根误差降至  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,与 2014 年以后的质量水平相

当,与探空资料的平均偏差及均方根误差曲线更加接近。从数据量方面来看,相比 2014 年以后,2014 年以前 NMIC QC 算法的剔除数据量更大。造成中

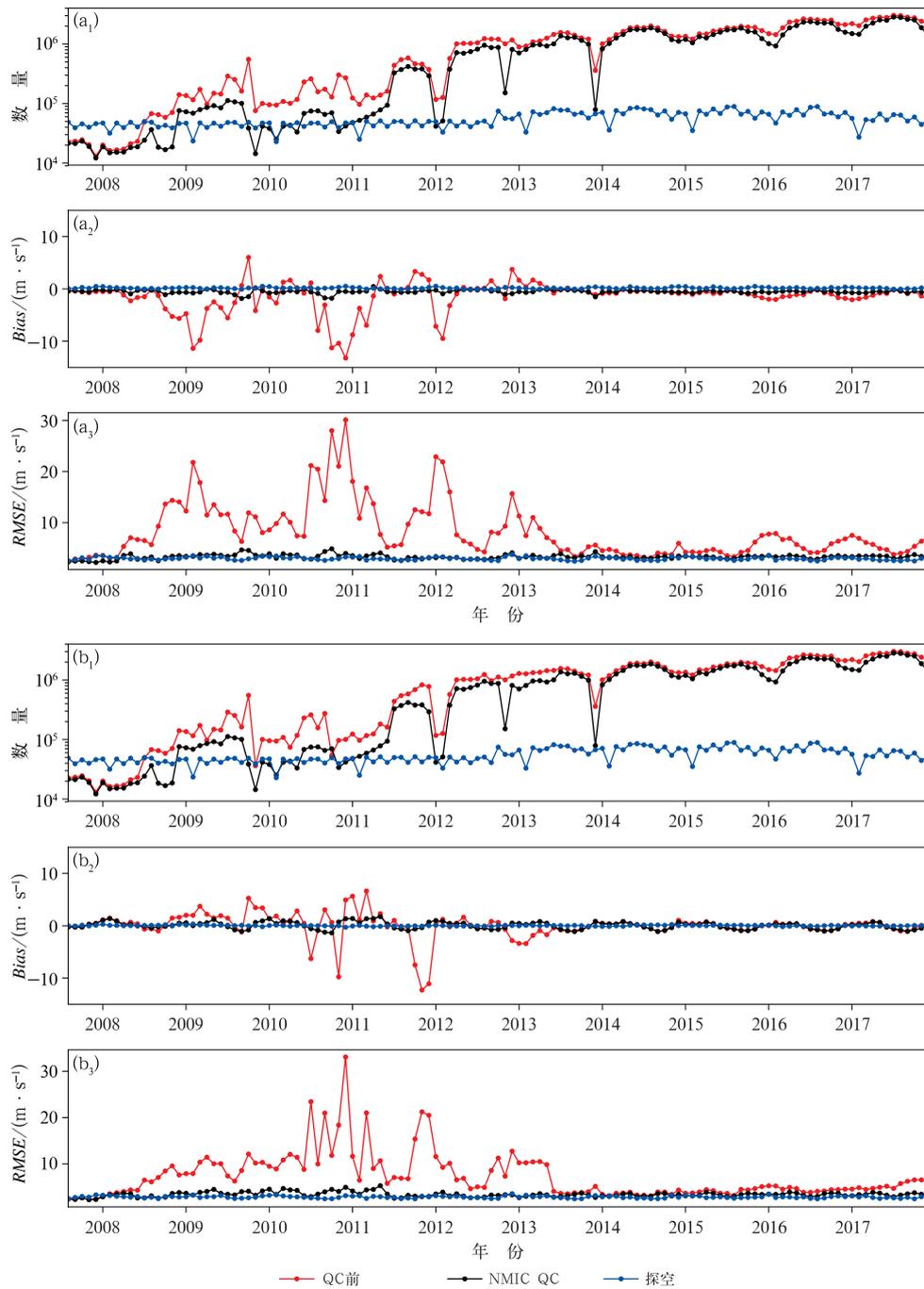


图 4 2007—2017 年中国探空资料和经 NMIC QC 质量控制前后的中国风廓线资料的数量变化(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>) 及相对于 ERA-Interim 的月平均偏差(Bias, 下同; a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>)及均方根误差(RMSE, 下同; a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>) (a) u 风分量, (b) v 风分量

Fig. 4 Monthly counts (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>), bias (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>) and root mean square error (a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>) of radiosonde (blue) and wind profiler data in China relative to ERA-Interim before QC (red) and after the NMIC QC (black) from 2007 to 2017

(a) *u*-component, (b) *v*-component

国风廓线雷达资料质量在 2014 年前后的差异原因是早期历史数据没有进行业务传输考核,质量控制算法识别的错误类型在该段时间发生的概率较大,2014 年以后,观测业务逐步完善,错误数据量明显减少,这也与我国风廓线雷达观测网的发展历史相吻合。

### 3.3 按垂直层次评估

以 2014 年为例,进一步对比探空资料与不同型号的风廓线雷达资料在不同垂直层次上相对 ERA-Interim 的平均偏差(图 5)及均方根误差(图 6)。从

图 5a~5d 可以看出,探空资料与 ERA-Interim 资料在各垂直层的偏差均在  $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  附近。质量控制以前,各类型风廓线雷达相对探空的  $u$  风分量整体呈负偏差,最大探测高度以上层次的平均偏差普遍大于最大探测高度以下层次。如:LC 型雷达在 200 hPa 以上层次的平均偏差明显变大,100 hPa 高度层的平均偏差达  $-31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经 NMIC QC 质量控制以后,各型号雷达在各层的平均偏差均不同程度的减少,与探空资料的垂直偏差曲线更加接近。其中,PA 型雷达 100 hPa 以下及 PB 型、增强 LC 型雷达各层的平均偏差均缩减为  $-2 \sim 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且曲线

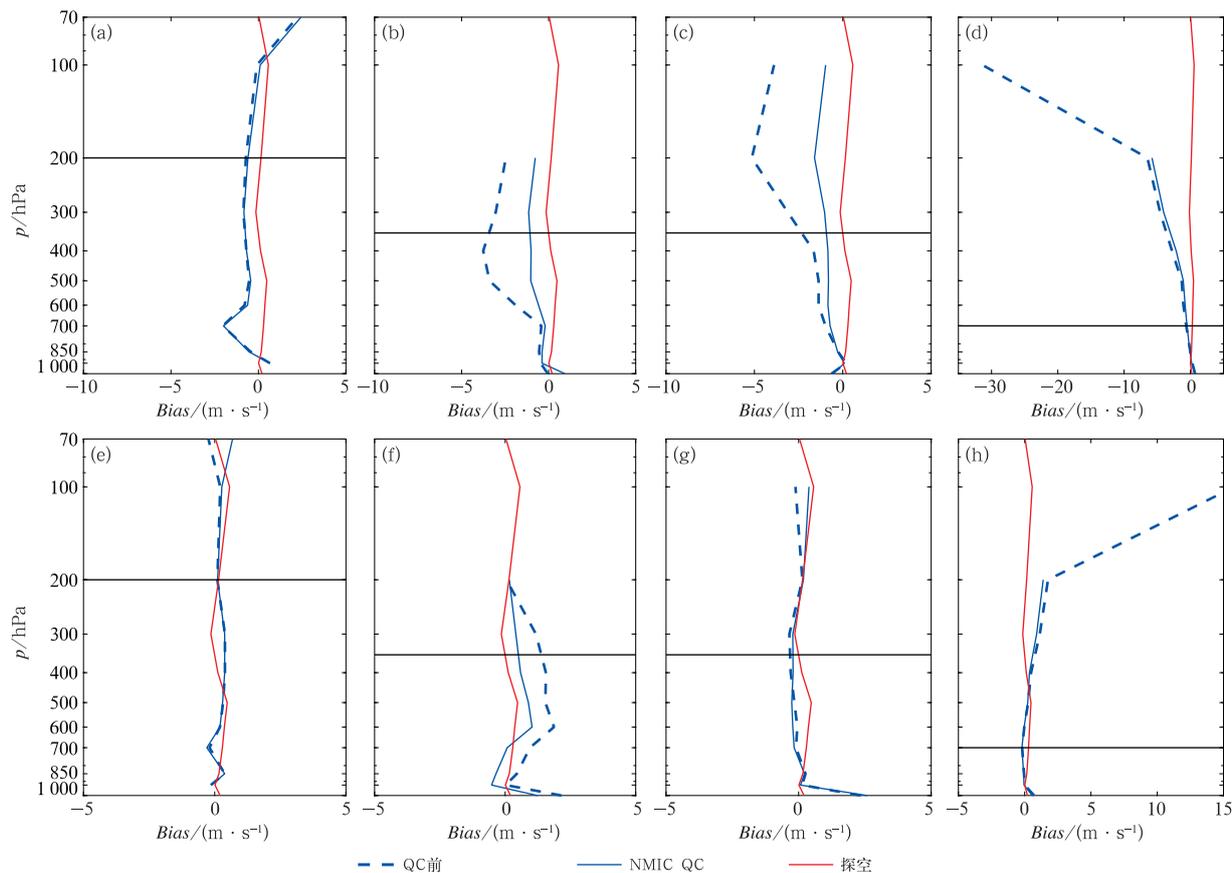


图 5 2014 年质量控制前(蓝色虚线)与 NMIC QC 后(蓝色实线)的不同型号风廓线雷达资料与探空资料(红线)相对 ERA-Interim 的平均偏差垂直空间分布  
(a~d)  $u$  风分量, (e~h)  $v$  风分量  
(a, e) PA 型, (b, f) PB 型, (c, g) 增强 LC 型, (d, h) LC 型  
(黑线为最大探测高度)

Fig. 5 Vertical spatial distribution of mean bias for different types of wind profiler data and radiosonde data (red solid line) relative to ERA-Interim before QC (blue dashed line) and after NMIC QC (blue solid line) in 2014  
(a—d)  $u$ -component, (e—h)  $v$ -component  
(a, e) PA type, (b, f) PB type, (c, g) enhanced LC type, (d, h) LC type  
(Black line is the maximum detection altitude)

在最大探测高度以上及以下层次不再有较大波动。虽然,经质量控制以后,LC 型雷达在 300 hPa 以上的平均偏差仍小于  $-5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但 200 hPa 以上的偏差较大数据已被全部剔除。从图 5e~5h 可以看出,质量控制以前,PA 型和增强 LC 型雷达  $v$  风分量的平均偏差在最大探测高度上、下差异不明显,均在  $-1 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内。PB 型雷达在 700~300 hPa 高度范围与探空资料有  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右的偏差。LC 型雷达在 200 hPa 以上层偏差较大,100 hPa 的平均偏差已达到  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经质量控制以后,PB 型雷达在 925~300 hPa 层次的偏差均减小约  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与探空资料的偏差曲线更加接近。LC 型雷达 200 hPa 以上的偏差较大的数据已被全部剔除。总体上看,质量控制以后的中国风廓线雷达资料相对 ERA-Interim 资料在各层的平均偏差与探空资料的偏差曲线更加接近,最大探测高度以上及以下的资料偏差差异减小。

从图 6 可以看出,均方根误差曲线与相对偏差曲线的分布特征相似。探空的  $u$  风分量相对 ERA-Interim 的均方根误差为  $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。质量控制以前,PA 型雷达 100 hPa 以下各层的均方根误差较探空资料相差  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内。在最大探测高度以下,LC 型雷达资料的均方根误差与探空资料相差在  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内,但 200 hPa 以上的均方根误差突然增大,在 100 hPa 层, $u$  风分量的均方根误差达到  $38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。PB 型和增强 LC 型雷达在最大探测高度附近的均方根误差也分别达到 9、 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经质量控制以后,各型号雷达在各层的均方根误差均有所减小,特别是最大探测高度以上层次。如:增强 LC 型雷达 200 hPa 层的均方根误差从  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  缩小至  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,LC 型雷达 200 hPa 以上层的粗大误差数据被剔除。经质量控制后,PB 型、增强 LC 型与 LC 型雷达的均方根误差曲线与探空更为接近。 $v$  风分量的情况类似。

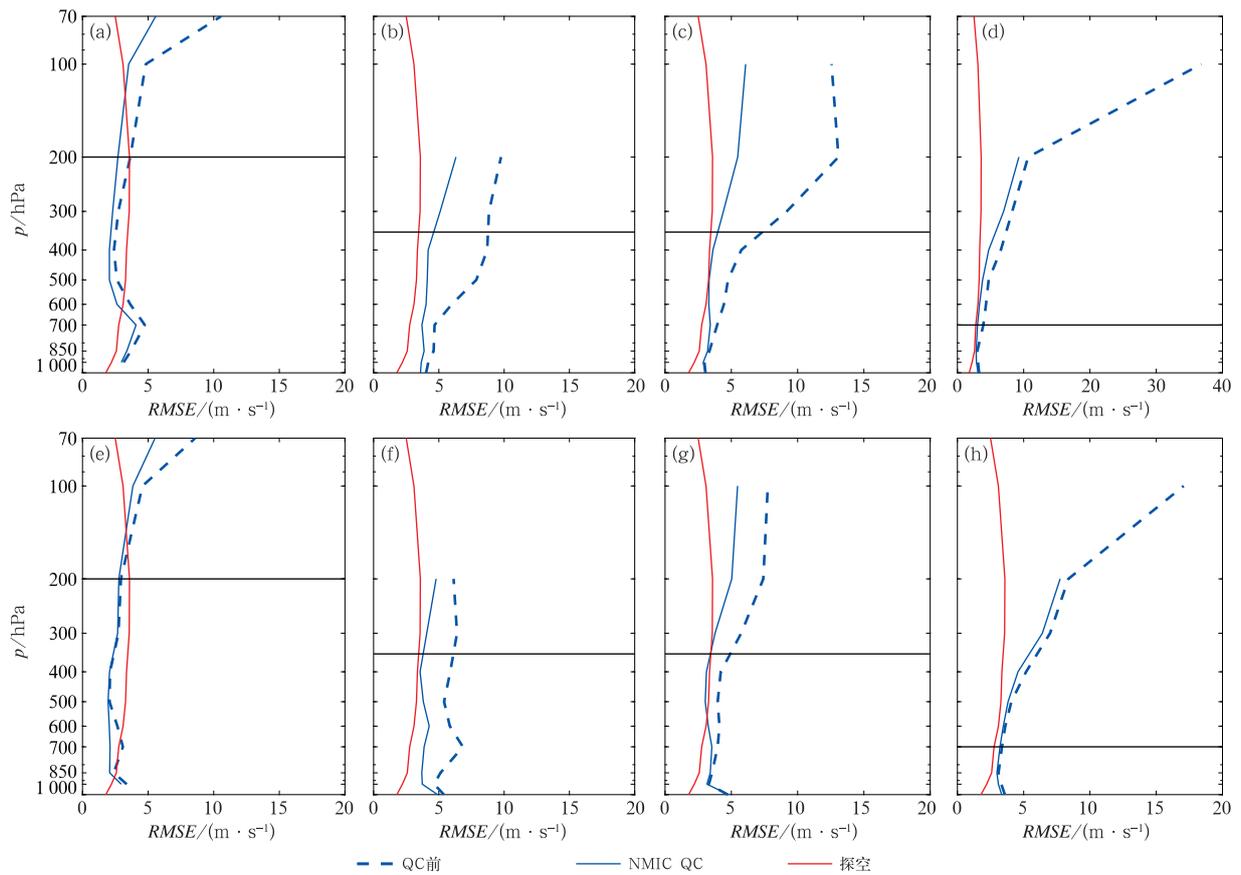


图 6 同图 5,但为均方根误差的垂直空间分布

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the vertical spatial distribution of root mean square error

## 4 应用情况

经 NMIC QC 质量控制后的 2007—2018 年中国风廓线雷达资料已提供 CRA 同化应用,其中历史数据的黑名单单独提供。表 3 为 2007—2018 年中国和美国风廓线雷达资料进入再分析系统的数据量和同化率。其中,美国资料来源于 CFSR 再分析产品同化输入的观测资料,数据截止时间为 2014 年。从表 3 可以看出,中国资料同化率较低的时段为 2008—2010 年,这是由于这段时间加入黑名单的站点较多,与本文 3.2 节所述结论一致。整体上看,中国资料的同化率在 88.10%~97.21%,说明质量控制后的中国资料可基本满足再分析同化应用的需求,美国资料的同化率在 91.37%~95.49%,与中国资料的同化率在同一数值范围,可间接证明质量控制后的中国风廓线雷达资料与美国资料的质量相当。

表 3 2007—2014 年中国和美国风廓线雷达资料进入再分析系统的数据量和同化率  
Table 3 Data volume and assimilation rate of Chinese and American wind profiler data input in the reanalysis system

年份	同化数据量/个		同化率/%	
	美国	中国	美国	中国
2007	13 698 689	99 333	95.10	97.21
2008	12 068 650	437 937	95.55	91.56
2009	12 041 531	1 351 867	95.49	89.47
2010	10 696 376	1 023 275	94.88	88.10
2011	9 161 795	3 398 592	93.66	93.71
2012	6 131 402	9 231 908	93.82	94.79
2013	3 301 981	13 046 923	93.37	93.97
2014	1 676 202	17 116 580	91.37	95.05
2015	—	19 316 474	—	93.66
2016	—	24 483 577	—	93.04
2017	—	27 862 121	—	94.19

## 5 结 论

面向再分析的同化应用需求,本文针对中国风廓线雷达资料特点,在 NCEP CQC 算法的基础上,提出一套适用于中国风廓线雷达逐小时水平风产品的质量控制系统。通过对比质量控制前后中国风廓线雷达资料与探空资料的相关系数、平均偏差及均方根误差,讨论了质量控制方案的有效性。此外,以 2007 年 8 月至 2017 年 12 月的风廓线雷达资料作为样本,以 ERA-Interim 资料作为间接参考场,通

过比较探空资料与不同型号、不同探测高度范围、不同观测时段、不同垂直层次风廓线雷达资料相对 ERA-Interim 资料的偏差,分析了质量控制前后中国风廓线雷达资料质量。主要结论如下:

(1)通过统计分析中国风廓线雷达与探空数据质量控制前后的相关系数、平均偏差及均方根误差表明,质量控制以前,不同探测高度范围各类风廓线雷达资料与探空资料均有较大偏差,经 NCEP CQC 质量控制后,可去除明显的离群资料,经 NMIC QC 后,可进一步剔除数据中的粗大误差、系统性故障等错误数据,不同雷达型号、不同探测高度资料的相关系数从 0.17~0.82 上升至 0.79~0.98,两类观测资料表现出更好的一致性特征。

(2)经 NMIC QC 质量控制后,中国风廓线雷达资料与 ERA-Interim 再分析资料的平均偏差及均方根误差曲线与探空资料相对该资料的偏差曲线更为接近,这能够反映质量控制算法使风廓线雷达资料的质量有所提升。从观测时段看,2014 年以后的中国风廓线雷达资料质量明显优于 2014 年以前,这与我国风廓线雷达观测网的发展历史及业务管理紧密相关。从垂直分布来看,最大探测高度范围以外数据的平均偏差较大,但经质量控制以后,除 LC 型雷达的  $u$  风分量在 300 hPa 以上仍有  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右的偏差外,其他型号雷达的  $u$ 、 $v$  风分量在各垂直层的平均偏差均在  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内,这也证明质量控制算法具有识别高层粗大误差数据的能力,使最大探测高度以外的数据得到有效利用。

(3)通过比较中国、美国风廓线资料进入 CRA 再分析同化系统的同化率,证明了质量控制后的中国风廓线雷达资料与美国风廓线资料质量基本相当。

本文的研究工作为以后开展风廓线雷达资料的业务应用积累了经验。但是由于风廓线雷达资料的误差来源广泛,随机性较强,该工作仍需进一步完善,包括:深入了解我国风廓线雷达观测端的数据问题,尝试从信号污染及反演算法等角度,解决高层误差较大的问题,进一步完善质量控制算法流程;选取不同时段、不同区域的个例,开展风廓线雷达资料在 CRA 再分析产品的应用效果分析,进一步评估风廓线雷达资料对同化应用的贡献。

**致 谢:**文中与 ERA-Interim 资料的对比工作是利用常规与卫星资料质量预评估系统完成的,该软件的开发人员姜立鹏、张涛等人在该工作开展期间给予了很多指导与帮助,在

此致谢!

## 参考文献

- 傲雪,翟晴飞,崔妍,等,2018.三种风场再分析资料在辽宁省海岸带的比较与评估[J].高原气象,37(1):275-285. Ao X,Zhai Q F,Cui Y,et al,2018. Comparison and evaluation of three types of wind field reanalysis data in coastal zone of Liaoning Province [J]. Plateau Meteor,37(1):275-285(in Chinese).
- 董丽萍,吴蕾,王令,等,2014.风廓线雷达组网资料初步对比分析[J].气象,40(9):1145-1151. Dong L P,Wu L,Wang L,et al,2014. Preliminary comparison research of the wind profile radar network data[J]. Meteor Mon,40(9):1145-1151(in Chinese).
- 黄小彦,孙继松,刘文婷,2020.地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用[J].气象学报,78(4):551-567. Huang X Y,Sun J S,Liu W T,2020. The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect[J]. Acta Meteor Sin,78(4):551-567(in Chinese).
- 黄钰,郭学良,毕凯,等,2020.北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究[J].大气科学,44(2):356-370. Huang Y,Guo X L,Bi K,et al,2020. Vertical observation and numerical simulation of the clouds physical characteristics of snow-producing over Yanqing Mountain Area in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci,44(2):356-370(in Chinese).
- 李庆雷,远芳,廖捷,等,2018.基于 ERA-Interim 的 L 波段探空秒级风速算法检验[J].气象科技,46(5):855-885. Li Q L,Yuan F,Liao J,et al,2018. Evaluation of a L-band wind speed calculation algorithm based on ERA-Interim[J]. Meteor Sci Technol,46(5):855-885(in Chinese).
- 廖捷,胡开喜,江慧,等,2018.全球大气再分析常规气象观测资料的预处理与同化应用[J].气象科技进展,8(1):133-142. Liao J,Hu K X,Jiang H,et al,2018. Pre-process and data selection for assimilation of conventional observations in the CMA global atmospheric reanalysis[J]. Adv Meteor Sci Technol,8(1):133-142(in Chinese).
- 潘劲松,周玲丽,陆玮,等,2019.两个相似路径台风残余造成局地特大暴雨的成因机制和能量收支对比分析[J].大气科学,43(6):1399-1412. Pan J S,Zhou L L,Lu W,et al,2019. Comparative analyses of mechanisms and energy budgets of local extreme rainfall events caused by remnant clouds of two typhoons with similar tracks[J]. Chin J Atmos Sci,43(6):1399-1412(in Chinese).
- 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 D,Ruan Z,Wang G L,et al,2019. A study on assimilation of wind profiling radar data in GRAPES-Meso model[J]. Chin J Atmos Sci,43(3):634-654(in Chinese).
- 王栋成,邱黎,董旭光,等,2019.济南边界层风廓线雷达与 L 波段雷达大风探测对比[J].气象,45(8):1169-1180. Wang D C,Qiu C,Dong X G,et al,2019. Comparing strong wind data observed by boundary layer wind profiling radar and L-band radar in Jinan[J]. Meteor Mon,45(8):1169-1180(in Chinese).
- 王叶红,赵玉春,罗昌荣,等,2019.双雷达风场反演拼图在登陆台风“莫兰蒂”(1614)强降水精细预报中的同化应用试验[J].气象学报,77(4):617-644. Wang Y H,Zhao Y C,Luo C R,et al,2019. Assimilation experiments for the application of dual-radar retrieval wind mosaics in detailed heavy precipitation forecast produced by landfall typhoon “Meranti”(1614)[J]. Acta Meteor Sin,77(4):617-644(in Chinese).
- 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 L,Chen H B,Gao Y C,et al,2013. Primary analysis of the comparison test of domestic wind profilers[J]. Mod Rad,35(6):24-28(in Chinese).
- 吴蕾,陈洪滨,康雪,2014.风廓线雷达与 L 波段雷达探测测风对比分析[J].气象科技,42(2):225-230. Wu L,Chen H B,Kang X,2014. Comparison between wind profiler and L band upper-air meteorological sounding system[J]. Meteor Sci Technol,42(2):225-230(in Chinese).
- 徐珺,毕宝贵,谌芸,等,2018.“5.7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J].气象学报,76(4):511-524. Xu J,Bi B G,Chen Y,et al,2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin,76(4):511-524(in Chinese).
- 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 Z S, Ji C X, Yang C, et al,2018. Impacts of assimilating wind profiler radar observations on precipitation prediction in Zhejiang Province [J]. J Appl Meteor Sci,29(1):97-110(in Chinese).
- 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 X B,Wan Q L,Xue J S,et al,2015. Quality control of wind profile radar data and its application to assimilation[J]. Acta Meteor Sin,73(1):159-176(in Chinese).
- 张寅,樊超,赵娜,等,2017.长安风廓线雷达测风资料的可靠性验证[J].干旱气象,35(3):507-515. Zhang Y,Fan C,Zhao N,et al,2017. Reliability validation of horizontal wind data derived from wind profile radar at Chang'an Station of Shaanxi[J]. J Arid Meteor,35(3):507-515(in Chinese).
- 中国气象局,2020.综合气象观测业务质量考核信息表[R].气测函[2020]3号文附件3. China Meteorological Administration,2020. Information table of comprehensive meteorological observation service quality assessment[R]. Appendix III of 2020 No. 3 Letter from Meteorological Forecast and Network Department (in Chinese).
- 朱立娟,2015.面向资料同化风廓线雷达水平风产品质量初步分析[J].气象,41(12):1494-1502. Zhu L J,2015. Preliminary analysis on wind product of wind profiler for data assimilation[J]. Meteor Mon,41(12):1494-1502(in Chinese).
- Beran D W,Wilfong T L,1998. U. S. wind profilers;a review[R]. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research (OFCM) Rep. FCM-R14-1998:56.
- Bouttier F,2001. The use of profiler data at ECMWF[J]. Meteor Z,

- 10(6):497-510.
- Bronwyn D, Lain R, Chris T, et al, 2016. The Australian wind profiler network[R]. Madrid:TECO-2016.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(656):553-597.
- Dennis K, 2003. Redesign of the NOAA/NCEP wind profiler quality control module[EB/OL]. [http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/\\_data\\_processing/prepbufu.doc/PROFCQC\\_Redesign.htm](http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/_data_processing/prepbufu.doc/PROFCQC_Redesign.htm).
- Gibson J K, Kallberg P, Uppala S, et al, 1999. ECMWF Re-analysis Project Report Series, No. 1. ERA-15 description[R]. UK: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- GSI, 2017. Gridpoint statistical interpolation (GSI) download[EB/OL]. <http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/downloads/index.php>.
- Hersbach H, Bill B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(730):1999-2049.
- ISO, 1975. Standard atmosphere; ISO 2533-1975[S]. Geneva: International Organization for Standardization; 1-5.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3):437-472.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woolen J, et al, 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2)[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 11(83):1631-1644.
- Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al, 2015. The JRA-55 reanalysis; general specifications and basic characteristics[J]. *J Meteor Soc Japan*, 93(1):5-48.
- Kuo Y H, Donall E G, Shapiro M A, 1987. Feasibility of short-range numerical weather prediction using observations from a network of profilers[J]. *Mon Wea Rev*, 115(10):2402-2427.
- Liao J, Wang B, Li Q X, 2014. A new method for quality control of Chinese rawinsonde wind observations[J]. *Adv Atmos Sci*, 31(6):1293-1304.
- NCEP, 1999. NCEP FNL operational model global tropospheric analyses, continuing from July 1999[EB/OL]. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#!>.
- Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al, 2007. The JRA-25 reanalysis[J]. *J Meteor Soc Japan*, 85(3):369-432.
- Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, et al, 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications [J]. *J Climate*, 24(14):3624-3648.
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al, 2014. The NCEP climate forecast system version 2[J]. *J Climate*, 27(6):2185-2208.
- Schubert S D, Park C K, Wu C Y, et al, 1995. A multi-year assimilation with the GEOS-1 systems; overview and results[R]. NASA Technical Memorandum.
- Uppala S M, Kållberg P W, Simmons A J, et al, 2005. The ERA-40 re-analysis[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(612):2961-3012.
- WMO, 2012. Experience of the JMA with the operation of wind profilers[R]. Instrument and observing methods report No. 110. Geneva; WMO.