

王蕙莹,周自江,张志强,等,2025.毫米波测云仪反射率因子资料质量控制及评估[J].气象,51(11):1535-1546. Wang H Y, Zhou Z J, Zhang Z Q, et al, 2025. Quality control and evaluation for reflectivity factor data of millimeter-wave cloud radar[J]. Meteor Mon, 51(11):1535-1546(in Chinese).

毫米波测云仪反射率因子资料质量控制及评估^{*}

王蕙莹¹ 周自江¹ 张志强¹ 高亮书²

¹ 国家气象信息中心,北京 100081

² 陕西省气象信息中心,西安 710014

提 要: 本文以中国首批业务准入运行的 15 个毫米波测云仪(以下简称测云仪)站点数据为试验样本,提出了适用于不同区域双通道接收的测云仪站点的反射率因子数据质量控制算法。该算法利用测云仪云雨回波与悬浮物杂波之间的分布特征差异,对 2023 年 15 个站的云雨回波及悬浮物杂波样本数据进行分类标识,根据两类回波的频数曲线交点,逐站快速确定反射率因子和线性退极化比的阈值参数,再配合滤波、连续性等检查,可以有效剔除非气象回波。通过对比质量控制前、后测云仪与探空资料计算的云高在不同站点、不同观测时段的相关系数、平均误差及均方根误差,讨论了质量控制方法的有效性。结果表明,经本算法质量控制后的数据,可有效剔除非气象回波数据,尤其可准确剔除低层的悬浮物杂波,与探空识别云底高数据的相关系数由 0.47 上升至 0.91,与云顶高数据的相关系数由 0.80 上升至 0.87。质量控制后的测云仪资料计算的云高更加合理,两类资料表现出更好的一致性特征。

关键词: 毫米波测云仪,质量控制,非气象回波,质量评估

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.070501

Quality Control and Evaluation for Reflectivity Factor Data of Millimeter-Wave Cloud Radar

WANG Huiying¹ ZHOU Zijiang¹ ZHANG Zhiqiang¹ GAO Liangshu²

¹ National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

² Shaanxi Meteorological Information Centre, Xi'an 710014

Abstract: This paper describes a quality control (QC) algorithm for reflectivity factor data of dual-channel millimeter-wave cloud radar (MMCR) in different regions. The data used for test sample are from the 15 MMCR stations which are the first batch of MMCR approved for operational use in China. The algorithm provides a method of automatically identifying the QC threshold parameters of reflectivity factor (Z) and linear depolarization ratio (LDR), combined with filtering check and continuity check, etc., and can effectively eliminate non-meteorological echoes. The method is based on the distribution characteristics between the cloud or rain echoes and suspended matter clutter in the MMCR data. It classifies and labels the cloud or rain echoes and suspended matter clutter samples from the 15 stations in 2023. Based on the intersection points of the frequency curves of the two types of echoes, the QC threshold parameters for Z and LDR at each station can be got rapidly. In addition, this paper compares the correlation coefficient, average deviation and root mean square error of cloud heights calculated from the MMCR data before and after QC

^{*} 国家自然科学基金项目(42090033)、中国气象局重点创新团队(CMA2023ZD01)和国家气象信息中心青年创新团队(NMIC-2024-QN01)共同资助

2025 年 4 月 26 日收稿; 2025 年 7 月 5 日收修定稿

第一作者:王蕙莹,主要从事遥感遥测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: zzzj@cma.gov.cn

and radiosonde data at different stations and during different observation periods, and discusses the effectiveness of the QC method. The results show that non-meteorological echoes in the data can be effectively removed after QC, especially the low-level suspended matter clutter. Its correlation coefficient increases from 0.47 to 0.91 with radiosonde-identified cloud base height, and increases from 0.80 to 0.87 with cloud top height. The calculated cloud heights after QC are more reasonable. So, the data after QC can enhance the consistency of the cloud height data between MMCR and radiosonde.

Key words: millimeter-wave cloud radar (MMCR), quality control (QC), non-meteorological echo, quality evaluation

引 言

云作为大气中的关键组成部分,对地球的水循环、能量平衡以及气候系统具有深远的影响,因此,云的观测在天气和气象数据研究中具有极其重要的意义(尚博等,2012;Zhong et al,2009)。毫米波测云仪(以下简称测云仪)具有穿透性好、持续观测能力强、时空分辨率高、灵敏度高等优点,已逐渐成为云探测的主要设备(郑佳锋等,2021)。一方面,测云仪不仅能够有效地记录云随时间的演变过程,敏锐地捕捉到云滴及冰晶等微小粒子,而且能够提供云降水微物理和动力参数的详细信息,对于理解云的形成、发展和消散过程至关重要(Zong et al,2013;朱怡杰等,2019;张佃国等,2020;胡树贞等,2020;王卫民等,2024);另一方面,美国、欧洲、中国等多个国家和地区的科学试验及研究表明,测云仪资料可为云和降水的监测、数值模式以及人工影响天气(王飞等,2025)等核心业务提供更精确的数据支持,特别是与S、C、X等不同波段双偏振天气雷达资料综合应用,能更好地区分液体和冰等降水相态,为全球气候模式研究提供更准确的云参数化方案(Costa-Surós et al,2014;Görsdorf et al,2015;Frisch et al,1988;陶法等,2020;刘黎平等,2015;Kollias et al,2007;张婷等,2024;张鹏等,2025)。

近年来,我国不断推进地基遥感垂直观测系统建设,已规划建成布局科学、功能先进的测云仪垂直观测网。截至2024年底,全国业务运行的测云仪已达49个。通过发射毫米波脉冲并接收来自云粒子的散射信号以获取云层信息,测云仪可以实现对顶空各类云和弱降水演变过程的连续性探测。但是,由于该设备功率较低、波长较短,在观测过程中易受到杂波信号干扰,例如:受大气中的雾-霾、灰尘、花粉、昆虫等影响,易形成低空悬浮物杂波;由于设备

硬件异常等问题会造成虚假的径向及噪点回波等。这些问题会导致降水监测与预报中对弱降水及云底高度的误判,从而影响强对流天气前期预警及云系演变的监测和发展趋势的决策判断,严重影响资料的应用效果。因此,测云仪观测数据的准确性已成为其在气象核心业务中深度应用的重要因素之一。

为此,国内外学者对测云仪资料质量控制技术方法开展了大量研究。Luke et al(2008)提出采用神经网络方法自动检测云雷达回波中的昆虫杂波技术,有效提高了数据的准确性。Liu et al(2019)、马宁堃等(2025)结合云雷达功率谱数据特征,设定实际参数范围和阈值进行旁瓣及噪声回波的滤除。曾正茂等(2022)利用设备不同观测模式的脉冲压缩比来进行旁瓣回波识别,并采用福建省平和县云雷达观测资料分析了该方法在典型天气过程中的有效性。郑佳锋等(2016)利用功率谱数据对径向速度数据进行速度退模糊,评估表明15个云过程检验的退模糊成功率都达到100%。以上方法均从功率谱资料出发进行质量控制,且部分研究需要不同观测模式拼接前的谱数据信息,这些数据在业务应用中不会上传到用户端,因此,其质量控制方法在业务中的应用存在一定的局限性。而对于基数据的质量控制方法,目前的研究主要集中在可实现双通道接收,即可实现线性退极化比(LDR)要素观测的测云仪反射率因子要素资料,其核心思想为根据非气象回波与气象回波LDR和反射率因子(Z)的双阈值检查来实现杂波的剔除。Görsdorf et al(2015)对35 GHz云雷达系统和数据处理方法进行了详细研究,提出了利用 $Z = -30$ dBz和 $LDR = -20$ dB作为判别阈值去除测云仪回波中悬浮颗粒的干扰方法。肖佩等(2018)通过统计分析北京地区不同季节非云回波分布情况,提出不同季节应设定不同的阈值组合,并验证了其在北京地区无云及有云天气情况下的有效性。曾正茂等(2021)根据福建省毫米波云雷达实际

性能特点,利用近两年的长时间连续观测数据对云雨回波和非云回波进行人工判识筛选,提出了改进非云回波识别的质量控制方案。郑佳锋等(2021)通过统计西藏那曲地区非云回波特征,设定了 $Z=0$ dBz 和 $LDR=-16$ dB 的双阈值判定条件。万霞等(2020)采用郑佳锋等的研究成果,利用其参数对青藏高原东侧甘孜地区云雷达基数据进行质量控制,证明参数有一定的适用性。

以上研究表明,受大气环境等地域差异影响,双阈值参数的适用性在不同地区差异显著,此外,以上研究设备主要来源于科研项目建设,且以单站或小范围区域的站网个例试验研究为主,而全国不同地区业务建设的测云仪在性能上存在实际差异,如何将该方法在不同地域范围内进行广泛应用仍需探索。因此,本文利用 2024 年全国首批通过业务准入的 15 个可实现双通道接收的测云仪基数据资料,提出一套适用于不同区域的测云仪基数据反射率因子要素的质量控制方法,通过分析 LDR 及 Z 双阈值特征,给出统计后的质量控制参数阈值,为各省业务应用提供参考,并通过与全天空成像仪资料、探空资料的对比评估,分析质量控制方法的有效性。

1 数 据

本研究使用测云仪基数据作为分析样本,同时利用同址观测的探空数据及全天空成像仪数据分别进行定性、定量评估,检验质量控制效果。

1.1 测云仪基数据

2024 年 1 月 1 日,全国首批 17 个测云仪站点实现业务准入运行,测云仪均为 Ka 波段(35 GHz)全固态发射体制,采用垂直指向探测方式,探测距离可达 15 km,垂直距离分辨率为 30 m,时间分辨率为 1 min。其中,除贵阳站及都兰站外,其他 15 个站均为双通道接收的测云仪设备,即可实现 LDR 要素的观测。为保证资料序列的完整性及观测资料质量,本文选取该 15 个站的基数据资料作为分析样本,时间序列为 2023 年 1 月至 2024 年 12 月。其中,2023 年的数据主要用作质量控制参数的研制,2024 年的数据主要作为质量控制方法的评估验证,站点分布情况如图 1 所示。资料来源于台站原始上传的测云仪基数据,通过国家气象信息中心气象大数据云平台提供服务。

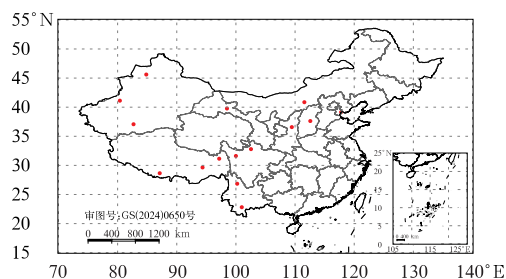


图 1 15 个测云仪站点分布

Fig. 1 Distribution of 15 cloud radar stations

1.2 全天空成像仪资料

利用全自动、全色彩天空成像系统实时显示天空真实状态,提供全天空的持续自动监测图像,该资料为每小时一次观测。通过对比全天空成像仪与测云仪观测的有、无云情况,特别是对于低层悬浮物杂波的判断,可定性检验质量控制方法的正确性。数据来源于国家气象信息中心。

1.3 L 波段秒级探空资料

利用探空仪在入云和出云时的湿度变化特征,可以有效区分云与大气。因此,利用探空与测云仪资料分别计算云高并进行一致性分析,是检验资料质量控制效果的常用手段。本文使用的 L 波段秒级探空资料来源于国家气象信息中心“中国 L 波段雷达探空秒级数据集(V2.0)”。该数据集提供了全国所有探空站每日 00 时、12 时(世界时,下同)定时观测的质量控制后探空廓线数据,并对质量控制结果进行了人工核查,可信度较高(Yuan et al, 2021)。在评估过程中,利用数据集中质量控制码为正确的温湿廓线数据进行云高计算,并作为参考场,与测云仪反射率因子质量控制前、后计算的云高数据进行对比,验证质量控制的效果。

2 质量控制方法

测云仪受仪器硬件、探测原理限制以及不同天气环境条件影响,观测数据的主要错误类型分为两类,即器件信号杂波与悬浮物杂波(万霞等, 2020)。其中,器件信号杂波具有随机性,主要包括超出探测精度范围的错误数据、径向干扰回波、异常噪点等。悬浮物杂波主要是由探测原理与波长敏感性限制,导致低层大气中的悬浮物(霾、灰尘、昆虫、花粉等)

散射雷达电磁波造成。针对以上典型错误数据类型,本文对可实现 LDR 观测的测云仪设备,提出一套适用于反射率因子要素的质量控制方法,主要包括有效值范围检查、双阈值检查、滤波检查、连续性检查、径向干扰检查等 5 个步骤。其中,有效值范围检查、滤波检查、径向干扰检查主要剔除第一类错误类型数据,双阈值检查、连续性检查主要剔除第二类错误类型数据,质量控制算法主要流程如图 2 所示。

2.1 有效值范围检查

该检查主要为了剔除由于仪器故障等情况引起的超出仪器探测范围的数据。Clothiaux et al (1995)统计了卷云、薄层云以及降水云的观测数据,认为云雷达 Z 的动态范围应界定为 $-50 \sim 20$ dBZ。然而,在实际数据应用过程中发现,当较强降水发生时,测云仪观测的 Z 会出现大于 30 dBZ 以上的情况。参考全固态测云仪技术规格定义,本文使用 $-40 \sim 40$ dBZ 有效范围对 Z 进行了筛选。

2.2 双阈值检查

固态粒子(如冰晶、雪)与同体积的液态云粒子相比,通常因介电常数较低而散射能力更弱,表现为较弱的回波强度(若尺寸相近),同时因其非球形特

征, LDR 较强。因此,常通过这一特征识别出现在低层的悬浮物杂波。但由于不同地域的悬浮物水含量和成分有所区别,使得参数受不同地域及环境条件影响较大。因此,在统计阈值时常先通过人工判断,主观区分一定量的杂波及云雨回波,再通过统计二者的分布特征进行阈值判定。本文采用 2023 年 1—12 月各站所有时段的云雨回波及悬浮物杂波进行人工分类标识,并分别对两个要素的参数阈值进行统计。样本选择需符合以下三点原则:(1)整根廓线为悬浮物杂波或云雨回波,且连续时间在 1 小时以上;(2)样本尽量平均分布于各个季节,保证样本的时间代表性;(3)在特征统计时云雨回波与悬浮物杂波样本数必须保持相同的数据量级,且每类样本至少在 1000 个以上。需要注意的是,在筛选样本时,需关注 LDR 要素的正确性,并进行基本的人工核查,避免由于其本身存在偏差而影响参数统计效果。在确定阈值时,以往研究中通常采用人为主观判断(曾正茂等, 2021; 郑佳锋等, 2021),这对多站点批量判断具有一定的局限性。为了准确地获得每个站的双阈值参数,对人工筛选样本分别统计云雨回波与悬浮物杂波的频数分布曲线,并自动判识两类回波曲线的交点值,并将该值作为该站的双阈值检查质量控制参数阈值。以太原站为例,筛选的历史人工标记云雨回波和悬浮物杂波分布特征与其对应的频数曲线分布如图 3 所示。由图 3a 可以看出,悬浮物杂波分布在图形的左上部分,云雨回波分布在右下部分,可以用 Z 和 LDR 阈值进行较好的分离,经统计云雨回波样本数量为 40 000 个、悬浮物杂波样本数量为 39 145 个。由图 3b 可以看出,悬浮物杂波与云雨回波 Z 与 LDR 曲线的交汇点分别为 -5.3 dBZ 和 -17.9 dB。由此,将其作为该站的双阈值检查参数。通过以上方法得到的 15 个站双阈值检查参数列于表 1。依据表 1 对大于 LDR 阈值且小于 Z 阈值的数据进行剔除。

2.3 滤波检查

由于双阈值检查只能剔除主要的悬浮物杂波,通过在时间上设定的 5 个连续时次与在垂直空间上 5 个连续数据库组成的 5×5 滑动窗口,对剩余的悬浮物杂波及噪声回波进行滤除。以窗口中心作为判断目标,统计 25 个距离库内有效值个数(N)。若 $N < 7$,则窗口中有效值均被判定为杂波,予以剔除。

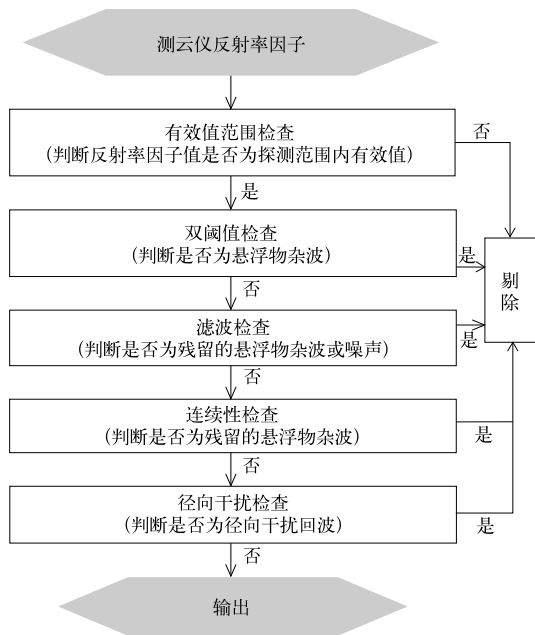


图 2 测云仪反射率因子要素质量控制算法流程
Fig. 2 Flowchart of the quality control method for reflectivity factor of cloud radar

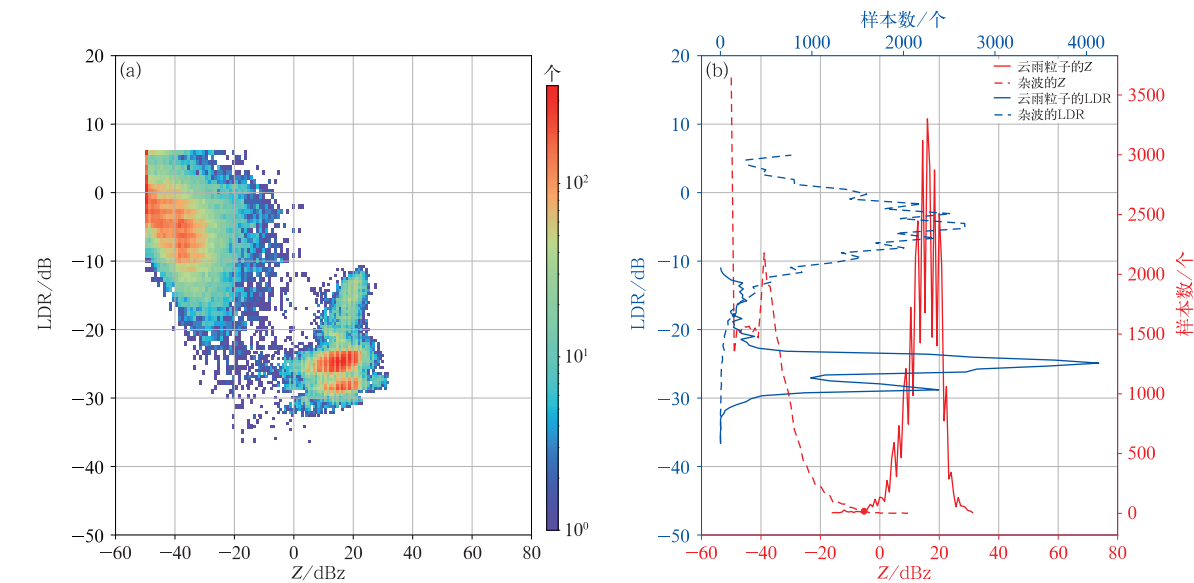


图 3 2023 年 1—12 月太原站测云仪人工标记云雨回波、杂波的 Z 和 LDR 特征

(a) 散点图, (b) 频数分布

Fig. 3 Characteristics of Z and LDR for manually classified cloud, rainfall echoes and clutter observed by the cloud radar at Taiyuan Station from January to December in 2023

(a) scatter plot, (b) frequency distribution

表 1 双阈值检查参数

Table 1 Dual-threshold checking parameters

省份	站名	Z 阈值/dBz	LDR 阈值/dB	样本数/个
新疆	克拉玛依	-15.3	-23.6	21 339
新疆	阿克苏	-16.3	-18.7	8979
新疆	民丰	-12.2	-25.9	14 572
甘肃	酒泉	-15.4	-19.9	21 006
内蒙古	呼和浩特	-9.3	-20.6	34 038
山西	太原	-5.3	-17.9	79 145
陕西	延安	-10.4	-19.7	8089
天津	塘沽	-10.6	-20.3	6628
西藏	定日	-14.4	-27.8	23 141
西藏	林芝	-12.8	-25.3	4325
西藏	昌都	-10.1	-25.6	8256
四川	甘孜	-14.3	-21.4	26 164
四川	红原	-9.4	-21.2	16 585
云南	丽江	-11.6	-26.4	20 415
云南	思茅	-9.8	-28.5	23 664

2.4 连续性检查

以待检库位置为中心,统计其垂直上下及临近时间前后方向,即“十字”方向检查其上下左右有效且连续的 Z 阈值个数,如果在时间及空间上有一个方向不满足连续性大于某阈值,且在连续的方向上满足 Z 为双阈值检查条件,但 LDR 要素为缺测,则将整个“十字”上的 Z 数据剔除。在本研究中国值

取 10。

2.5 径向干扰检查

测云仪数据中表现的径向杂波为从地面到高空的孤立的 Z 竖线,可参考天气雷达剔除径向回波的方法,通过检测相邻径向回波的相关性进行滤除。对每根径向及其前后邻近径向的 Z 有效数据段数及库数进行记录,根据式(1),若待检径向库数最多

的有效数据段所对应的库数记为 R_i , 且 R_i 大于 60 (即径向距离大于 1800 m), 在其前后邻近径向同等高度位置对应的 Z 的有效库数值为 R_j , 若两者比值 R_D 在前后径向中均小于 10%, 则将待检径向该数据段的值均赋为空值。

$$R_D = \frac{R_j}{R_i} \times 100\% \quad j = i-1 \text{ 或 } j = i+1 \quad (1)$$

3 质量效果评估

3.1 典型个例评估

3.1.1 无降水时质量控制效果

图 4 为 2024 年 7 月 3 日太原站质量控制前、后测云仪 Z 时序图。可以看出, 该站在 2024 年 7 月 3 日 00—24 时, 在 2 km 以下高度持续出现 Z 小于 -30 dBz 的回波, 质量控制后低层悬浮物杂波被有效剔除。此外, 在 09—15 时、18—20 时云的下层都出现了由于旁瓣而产生的弱回波, 且呈现“毛刺”状, 但质量控制后旁瓣有效缓解或剔除, 特别是 18—20 时的旁瓣回波均已剔除, 结合全天空成像仪可以看出, 3 日 04 时天空出现了中高云, 测云仪也在 9~10 km 处观测到相应的云, 但全天空成像仪并没有在低层观测到薄云, 说明质量控制前近地面的杂波应为悬浮物杂波。质量控制后, 悬浮物杂波被剔除, 两类观测表现出更好的一致性。

3.1.2 有降水时质量控制效果

图 5 为 2023 年 7 月 30 日塘沽站质量控制前、后的测云仪 Z 时序图。可以看出, 该站在 7 月 30 日 07 时前回波接地, 08—19 时降水停止。但在此期间, 由于地面湿度较高, 质量控制前在 3 km 以下低层存在不连续的悬浮物杂波, 回波强度低于 -20 dBz, 质量控制后该部分杂波已被有效剔除。这

说明质量控制方法可以有效区分低层的雨回波与悬浮物杂波, 不会对数据造成误剔。

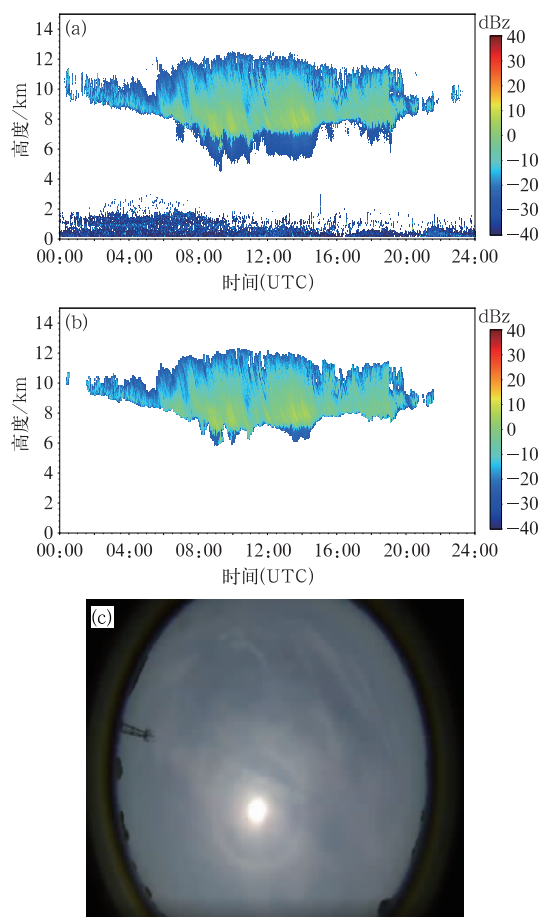


图 4 2024 年 7 月 3 日 00—24 时太原站质量控制 (a) 前、(b) 后测云仪 Z 时序图, 及 (c) 04 时太原站全天空成像仪观测实景

Fig. 4 Reflectivity factor of cloud radar (a) before and (b) after quality control from 00:00 UTC to 24:00 UTC, and (c) the observed all sky image at

Taiyuan Station at 04:00 UTC 3 July 2024

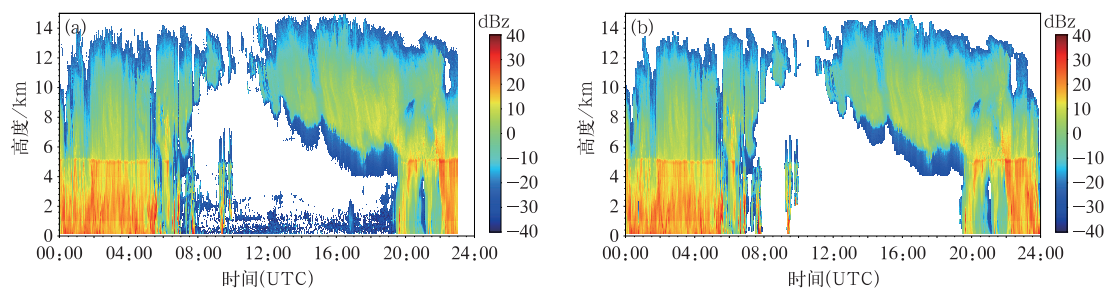


图 5 2023 年 7 月 30 日 00—24 时塘沽站质量控制 (a) 前、(b) 后测云仪 Z 时序图

Fig. 5 Reflectivity factor of cloud radar (a) before and (b) after quality control at Tanggu Station from 00:00 UTC to 24:00 UTC 30 July 2023

3.2 与探空数据的对比评估

通过探空观测的温湿廓线可计算得到云的垂直结构,若利用同样的云边界识别方法来计算质量控制前、后的云高,并与探空计算的云高进行定量对比分析,可以用来间接检验测云仪 Z 质量控制效果的正确性。

探空判定云高有多种方法,主要包括温度露点差阈值法(PWR95)(Poore et al,1995)、相对湿度阈值法(WR95)(Wang and Rossow,1995)、温湿度二阶导数法(CE96)(Chernykh and Eskridge,1996)以及 ZHA10 法(Zhang et al,2010)等。Costa-Surós et al (2014)对多种判定方法进行了对比,认为 ZHA10 法更有优势,并在此基础上进一步改进得到了 ZHA10i 法。王喆等(2016)在开展测云仪与探空云高一致性的评估分析中也证实了 ZHA10i 方法的合理性。因此本文采用 ZHA10i 方法来识别探空探测的云垂直结构。

测云仪判定云高的方法常采用云边界识别法进行判断。将每根雷达径向的连续有效回波中的最底层作为云底高度,最顶层作为云顶高度,并依此类推,判断多层云。但由于测云仪观测时间分辨率很高,对于一些结构相对松散的云来说,会误判为多层云。因此,利用找到的云边界计算各云层的厚度和相邻云层的间隔距离,对于小于一定厚度 N_1 的云层进行进一步判断,若其与上下库的间隔大于某阈值 N_2 ,则删除这层云;否则将其与前后较邻近的云层合并。王喆等(2016)在研究中分别选取 N_1 为 10, N_2 为 24。因此,本文借鉴该阈值对测云仪识别的云层进行处理。

测云仪观测的数据为该时该地的瞬时云高信息,而探空则由于气球的上升而具有时间过程,入云与出云时刻不同。对于局地来说,云的变化非常快,因此时间差异对二者云高观测一致性判定的影响是显著的。当两类观测进行匹配时,确定如下匹配规则:(1)由于云空间分布不均匀,随时间变化很快,确定探空放球前 10 min 测云仪连续观测到有云为匹配前提;(2)假设风对探空气球和云的影响是一致的,取探空放球前 10 min 测云仪最底(顶)层高度均值作为探空对应时次云底(顶)的匹配值;(3)探空为多层云时,取与测云仪云底(顶)之差最小的云底(云顶)作为匹配对象;(4)考虑当发生降水时测云仪会对云底造成误判,因此,云底高接地且云顶高大于

2.5 km 时,测云仪识别的云底高结果不参与匹配;(5)由于测云仪的有效采样高度范围为 0.15 ~ 15 km,因此,探空计算的云底、云顶样本超出此范围的数据不参与匹配。在本文选用的 15 个站中,除塘沽站外,其他 14 个站均存在对应的同址探空观测站,因此,采用这 14 个站探空资料计算的云高对 2024 年 1—12 月质量控制前、后测云仪 Z 的质量控制效果进行定量检验。

3.2.1 整体评估结果

质量控制前、后测云仪 Z 与探空资料分别计算的云底高、云顶高的散点分布情况如图 6 所示。由于云顶高样本包含降雨的情况,而云底高不包含,因此,云顶高的匹配数量多于云底高。从图 6a,6c 可以看出,在质量控制前,由于悬浮物杂波的存在,造成测云仪与探空计算的云高在低层误差较大。测云仪反演的云底高在 500 m 以下存在大量的虚假数据,云底高相关系数仅为 0.47。云顶高在 4 km 以下也存在较多的偏离对角线的异常飞点。但由于低层云数量较少,且高云的云顶识别受错误数据影响较小,因此,质量控制前,测云仪与探空的云顶高相关系数仍可达到 0.80。

质量控制后,云底高、云顶高大部分散点紧密聚集于对角线附近,呈现出良好的对称性分布(图 6b,6d)。测云仪在低层的虚假云底及云顶均有效剔除,且由于测云仪计算出的云高结果更加合理,质量控制后云底高、云顶高与探空的匹配样本较质量控制前均有所增加,其中,云底高样本数由质量控制前的 1372 个增加为 1911 个,云顶高样本数由质量控制前的 2070 个增加为 2316 个。质量控制后,二者的一致性也有所提升,特别是云底高的相关系数由质量控制前的 0.47 提升至 0.91,且平均误差也由 -1.38 km 下降至 -0.25 km,均方根误差由 2.63 km 下降至 0.99 km,证明了质量控制方法对低层悬浮物杂波的识别率较为准确。从云顶高来看,二者的相关系数也由 0.80 提升至 0.87,平均误差及均方根误差也有所降低。值得注意的是,图 6c,6d 中的大部分散点位于对角线以下,表明测云仪所测得的云顶高度相较于探空整体偏低。这主要是由于探空通过湿度数据进行云高判定,探空气球上携带的湿度传感器较测云仪对云的 Z 观测更为敏感,因此,造成了二者在云高探测上存在一定的误差。该结论与前人研究结果一致(王喆等,2016;王瑾等,2022)。尽管如此,测云仪质量控制后与探空数据的云底高

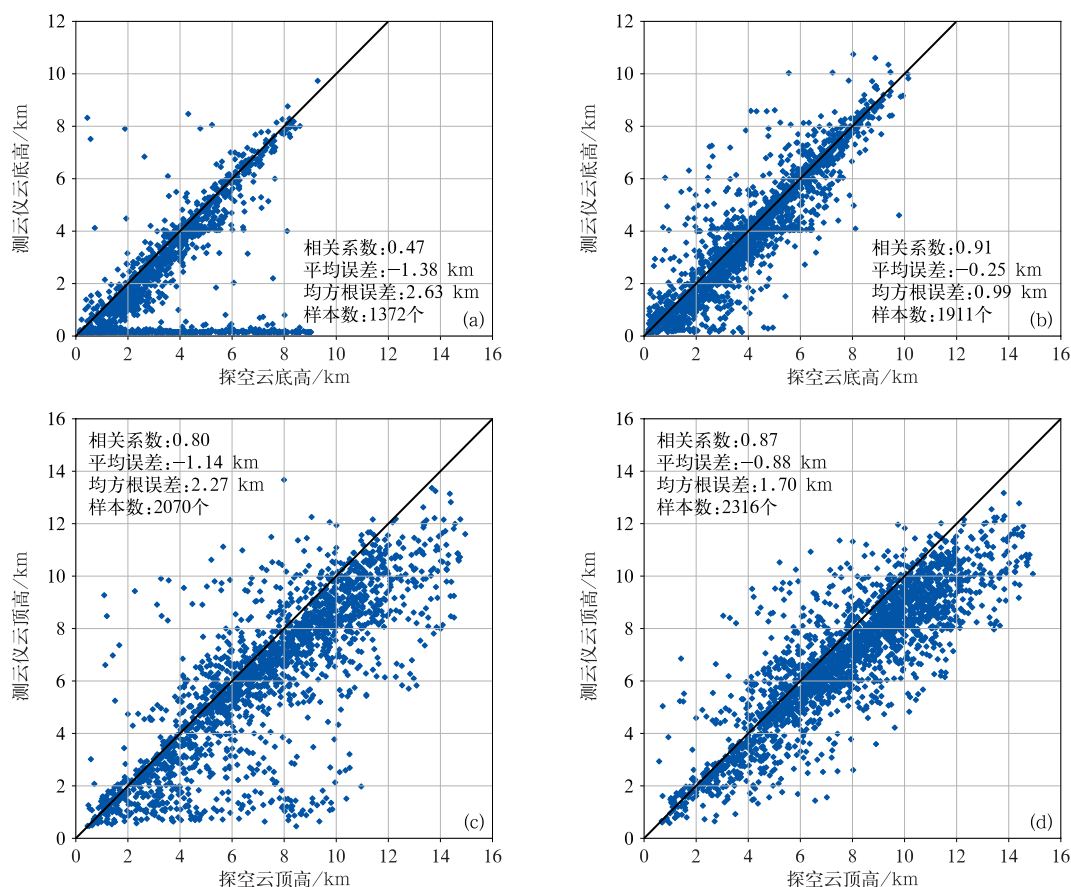


图 6 测云仪 Z 质量控制(a,c)前、(b,d)后与探空计算的(a,b)云底高、(c,d)云顶高散点图

Fig. 6 Scatter plots of (a, b) cloud base height and (c, d) cloud top height calculated by radiosonde (a, c) before and (b, d) after quality control of cloud radar reflectivity factor

及云顶高相关系数分别高达 0.91、0.87,说明测云仪与探空资料在云高识别上具有较好的一致性和相关性。

3.2.2 逐月评估结果

肖佩等(2018)研究表明,测云仪杂波的出现与季节有关。春季,杂波来源基本为雷达本身硬件的旁瓣杂波干扰、噪点及雾-霾。夏季,雾-霾天气较少,空气湿度较大,杂波来源还包含底层大气中部分水汽影响;秋季,污染来源主要为雾-霾、昆虫和水汽影响;冬季,主要受雾-霾天气影响以及雷达本身硬件问题干扰。因此,从时间尺度分析测云仪质量控制前、后的云高变化很有必要。

图 7 为测云仪 Z 质量控制前、后与探空反演云底高、云顶高的样本数、平均误差、均方根误差及相关系数逐月对比时序图。整体来看,除 2 月、12 月的云顶高在质量控制后匹配样本数较质量控制前有所减少外,其他各月,质量控制后的云底高和云顶高匹配样本数均较质量控制前有所提升。其中,夏季

质量控制后匹配样本数增加最多,春、秋季其次,冬季最少。无论是云底高还是云顶高,各月的平均误差和均方根误差在质量控制后均有所降低,相关系数有所提高。夏季的质量控制效果最明显,云底高和云顶高在质量控制后改善程度最大,冬季质量控制后改善程度最弱。具体来看,在冬季(12 月、1—2 月),测云仪质量控制前、后的云底高和云顶高样本数、平均误差、均方根误差及相关系数等 4 个指标的变化均不大,且在质量控制前,测云仪与探空数据的云底高相关系数均已达到 0.8 以上,说明冬季受雾-霾天气影响以及雷达本身硬件问题干扰造成的数据错误较少。与其相反,在夏季(6—8 月),由于受水汽影响,空气湿度较大,低层悬浮物杂波容易出现,因此,质量控制前,云底高的相关系数均在 0.3 以下,其中,6 月的相关系数最低为 0.07。6—8 月,二者的平均误差和均方根误差也较其他季节明显偏低,其中平均误差基本为 -3 km 左右,均方根误差为 4 km 左右。质量控制后,6—8 月的云底高相关

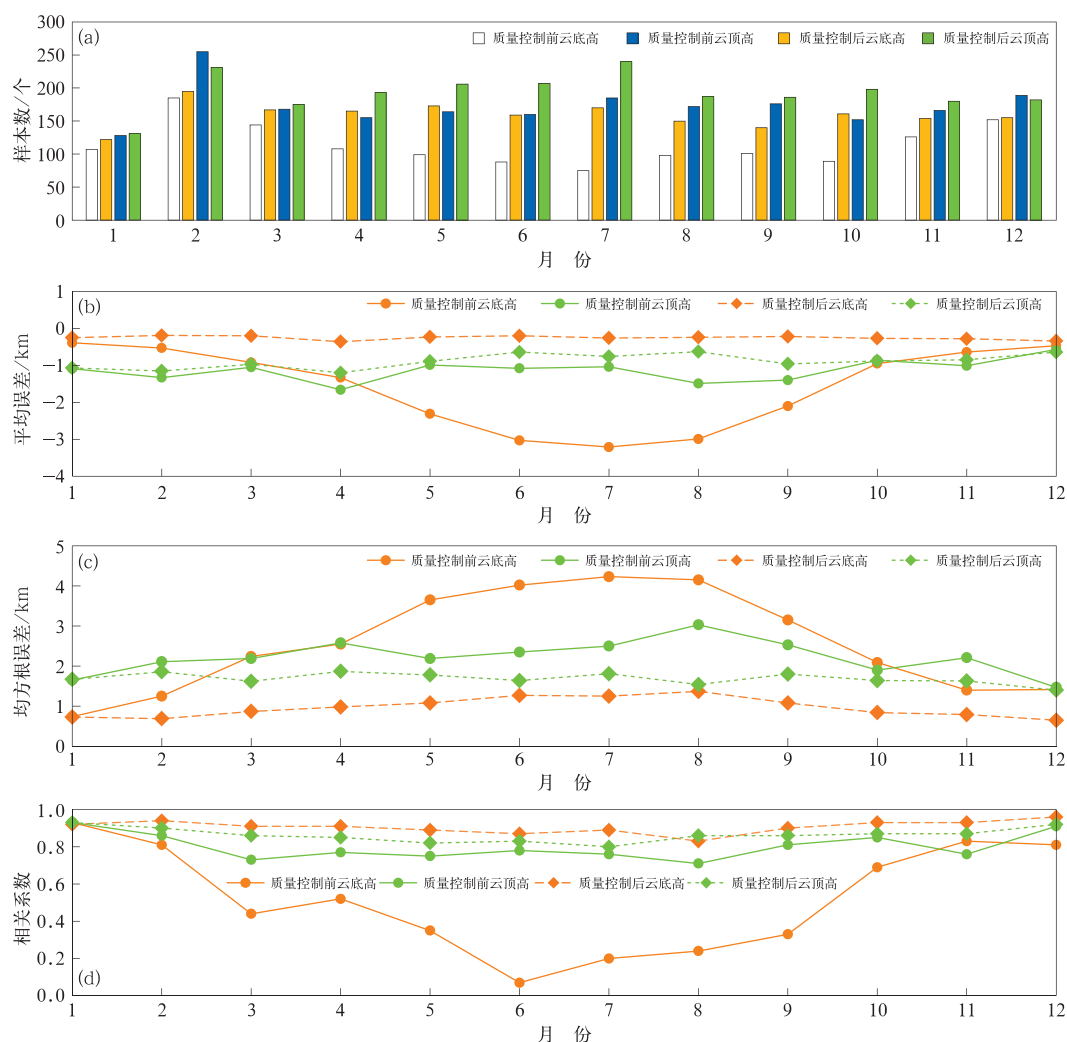


图 7 测云仪 Z 质量控制前、后与探空反演云底高、云顶高的逐月对比时序图

(a) 样本数, (b) 平均误差, (c) 均方根误差, (d) 相关系数

Fig. 7 Time series of cloud base height and cloud top height of reflectivity factor from cloud radar before and after quality control relative to the radiosonde calculated data

(a) sample number, (b) mean error, (c) root mean square error, (d) correlation coefficient

系数均提高至 0.8 以上, 平均误差下降至 -0.3 km, 均方根误差降至 1.5 km 以下。云顶高度与云底高度变化趋势类似, 各项指标均有所提升。这说明, 夏季高温高湿环境容易造成悬浮物杂波, 这类错误是测云仪反射率因子要素的主要错误数据。春、秋两季, 二者质量控制前、后与探空的差异变化相似, 质量控制算法对春、秋两季数据质量均有改善, 其改善幅度在冬、夏两季之间。其中质量控制前云底高的相关系数、平均误差、均方根误差分别在 $0.3 \sim 0.8$ 、 $-3.2 \sim 0$ km、 $1 \sim 4$ km, 质量控制后相关系数均提升至 0.9 以上, 平均误差范围缩小至 $-0.4 \sim 0$ km, 均方根误差均在 1.5 km 以下, 云顶高也有类似结论。总的来说, 云底高质量控制后改善效果优于云顶高, 这与 3.2.1 节的分析结论一致。

3.2.3 各站评估结果

针对 14 个测云仪站质量控制前、后与同址探空观测计算的云底高进行逐站统计对比(表 2)。总体上来看, 14 个站测云仪质量控制后云底高的平均误差、均方根误差均较质量控制前有所降低, 相关系数均有所增加。除思茅站质量控制后样本数有所减少外, 其他站质量控制后可匹配的样本数均有所增加。质量控制前, 14 个站的平均误差范围为 $-3.48 \sim -0.42$ km, 质量控制后平均误差范围为 $-0.59 \sim 0.60$ km, 除思茅站外, 其他站平均误差均减小。质量控制前, 均方根误差最大值为 4.65 km(思茅站), 质量控制后该站的均方根误差虽然仍然为 14 个站中的最大值, 但已下降至 1.54 km。从相关系数来看, 14 个站质量控制前的相关系数范围为 $-0.14 \sim$

0.83,质量控制后已总体提升至 0.84~0.94。其中,质量控制前相关系数较低的呼和浩特站、太原站以及延安站在质量控制后均提升至 0.9 以上。

从测云仪 Z 质量控制前、后云顶高与探空的一致性来看(表 3),14 个站点测云仪质量控制后云顶高的平均误差、均方根误差均较质量控制前有所降

表 2 测云仪 Z 质量控制前、后与探空计算的云底高对比结果
Table 2 Comparison results of cloud base heights between reflectivity factor of cloud radar before and after quality control relative to the radiosonde calculated data

站名	平均误差/km		均方根误差/km		相关系数		样本数/个	
	质量控制前	质量控制后	质量控制前	质量控制后	质量控制前	质量控制后	质量控制前	质量控制后
克拉玛依	-1.00	-0.36	1.90	1.13	0.74	0.88	89	160
阿克苏	-1.73	-0.55	3.07	1.09	0.46	0.90	109	171
民丰	-1.10	-0.36	2.21	0.86	0.59	0.91	123	201
酒泉	-0.73	-0.39	2.19	0.89	0.59	0.93	112	187
呼和浩特	-2.38	-0.60	3.54	1.09	0.29	0.91	76	103
太原	-2.59	-0.25	3.87	0.94	0.36	0.93	119	128
延安	-2.60	-0.45	3.73	0.91	0.32	0.94	133	155
定日	-0.42	-0.02	1.08	0.91	0.77	0.90	55	63
昌都	-0.65	0.07	1.74	1.00	0.58	0.85	121	167
甘孜	-0.68	-0.15	1.29	0.84	0.73	0.91	113	178
红原	-0.56	-0.11	1.34	0.83	0.75	0.92	120	151
林芝	-0.60	-0.28	0.88	1.06	0.83	0.86	92	122
丽江	-1.09	0.26	1.96	1.28	0.59	0.88	49	85
思茅	-3.48	0.59	4.65	1.54	-0.14	0.84	61	40

表 3 测云仪 Z 质量控制前、后与探空计算的云顶高对比结果
Table 3 Comparison results of cloud top heights between reflectivity factor of cloud radar before and after quality control relative to the radiosonde calculated data

站名	平均误差/km		均方根误差/km		相关系数		样本数/个	
	质量控制前	质量控制后	质量控制前	质量控制后	质量控制前	质量控制后	质量控制前	质量控制后
克拉玛依	-1.02	-0.89	2.15	1.94	0.89	0.89	143	191
阿克苏	-1.04	-0.87	2.34	1.65	0.78	0.87	131	198
民丰	-0.81	-0.60	1.97	1.58	0.73	0.81	135	211
酒泉	-0.86	-0.85	2.02	1.71	0.72	0.79	144	206
呼和浩特	-1.54	-0.83	2.94	1.70	0.68	0.89	123	141
太原	-1.19	-0.85	2.43	1.83	0.81	0.85	155	154
延安	-0.85	-0.75	2.09	1.52	0.86	0.91	197	215
定日	-1.10	-0.94	2.09	1.91	0.77	0.77	88	65
昌都	-1.07	-1.18	1.80	1.72	0.87	0.88	170	187
甘孜	-0.89	-0.85	1.81	1.66	0.84	0.87	193	240
红原	-0.98	-0.90	2.02	1.57	0.76	0.87	210	212
林芝	-1.51	-1.22	2.41	1.82	0.75	0.89	173	148
丽江	-1.19	-0.99	1.98	1.53	0.87	0.94	96	104
思茅	-2.34	-0.78	3.64	2.15	0.73	0.74	112	44

低,相关系数相等或有所增加。质量控制后对云顶高的改进效果没有云底高明显,这是由于质量控制算法识别的错误数据类型对云底高识别影响更大。质量控制前,14 个站的测云仪与探空的云顶高相关系数最小值为 0.68,质量控制后相关系数最小值提升为 0.74。质量控制前,平均误差与均方根误差最大值均为思茅站,分别为-2.34 km、3.64 km,质量控制后均已降低至-0.78 km、2.15 km。质量控制后,云顶高的平均误差范围为-1.22~-0.60 km,均方根误差

范围为 1.52~2.15 km,较质量控制前均有所降低。从样本数量来看,除思茅站、太原站、定日站和林芝站在质量控制后样本数较质量控制前有所降低以外,其他站点的匹配数量均有所增加。

4 结论与展望

本文利用中国首批业务准入运行的 15 个测云仪站点数据,提出了适用于不同区域双通道接收的

测云仪站点的反射率因子数据质量控制算法。以 2024 年资料作为样本,通过对比质量控制前、后测云仪与探空资料计算云高的相关系数、平均误差、均方根误差及样本量等 4 个指标,讨论了质量控制方法的有效性,得到结论如下。

(1)利用测云仪云雨回波与悬浮物杂波在 Z 和 LDR 要素之间的分布特征差异,对 2023 年 15 个站的云雨回波及悬浮物杂波样本数据进行分类标识。根据逐站定位两类回波的频数曲线交点,可以快速准确地确定 Z 和 LDR 的阈值参数,从而有效剔除悬浮物杂波,该方法适用于不同区域测云仪的双阈值检查参数确定。

(2)通过分析测云仪 Z 质量控制前、后与探空数据计算云高的相关系数、平均误差及均方根误差表明,质量控制前,受低层悬浮物杂波影响,测云仪反演的云底高、云顶高数据在低层均有较大偏差,且在不同高度上均存在异常飞点。经本算法质量控制后,可去除明显的离群资料,剔除数据中非气象回波数据,从而使计算的云高值更加合理,二者可匹配的样本数增多。与探空数据相比,云底高数据相关系数由 0.47 上升至 0.91,云顶高数据相关系数由 0.80 上升至 0.87,两类资料表现出更好的一致性特征。

(3)由于测云仪观测数据受气候条件和地理环境影响较大,受夏季低层水汽较为充沛影响,测云仪反射率因子低层悬浮物错误数据在夏季出现较多,而在冬季出现最少。因此,质量控制前,测云仪与探空计算云高的相关系数在 1—12 月呈现出先减小后增大的趋势,二者的云底高相关系数在 6 月最低,仅为 0.07。质量控制后,各月的相关系数均稳定在 0.9 以上,平均误差范围缩小至 $-0.4\sim 0$ km,均方根误差均下降至 1.5 km 以下。这也证明质量控制算法对不同季节的错误数据均有较好的甄别能力。

本文的研究工作为以后开展测云仪资料的质量控制及业务应用积累了经验。但是由于测云仪资料的误差来源广泛,随机性较强,该工作仍需进一步完善。比如:本算法中最核心的质量控制步骤为利用双阈值检查剔除低层悬浮物杂波,但我国仍有部分测云仪没有双通道接收功能,无法利用 LDR 要素进行质量控制,这是测云仪基数据质量控制算法需进一步完善的方向。此外,本文以探空识别云高数据作为基准进行质量控制检验,但由于测云仪及探空资料计算云高的方法以及二者匹配方法不同,也会对评估结果产生一定影响,因此,后续可引入激光云高仪、卫星等多源观测资料,开展多源观测的系统性

交叉验证分析,进一步评估质量控制算法的有效性 & 质量控制后产品质量。

致谢: 特别感谢曹丽娟、黄凌江、朱智等在测云仪资料质量控制算法研发及评估等方面的指导与帮助。

参考文献

- 胡树贞,曹晓钟,陶法,等,2020. 船载毫米波云雷达观测西太平洋云宏观特征对比分析[J]. 气象,46(6):745-752. Hu S Z, Cao X Z, Tao F, et al, 2020. Comparative analysis of cloud macro characteristics from two shipborne millimeter wave cloud radars in the West Pacific[J]. Meteor Mon, 46(6):745-752(in Chinese).
- 刘黎平,郑佳锋,阮征,等,2015. 2014 年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果[J]. 气象学报,73(4):635-647. Liu L P, Zheng J F, Ruan Z, et al, 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars[J]. Acta Meteor Sin, 73(4):635-647(in Chinese).
- 马宁堃,王飞,贾作,等,2025. 云雷达功率谱去噪新方法研究及其云物理反演应用[J]. 气象,51(5):542-551. Ma N K, Wang F, Jia Z, et al, 2025. A new method of cloud radar Doppler spectrum denoising and its application in cloud physics retrievals[J]. Meteor Mon, 51(5):542-551(in Chinese).
- 尚博,周毓荃,刘建明,等,2012. 基于 Cloudsat 的降水云和非降水云垂直特征[J]. 应用气象学报,23(1):1-9. Shang B, Zhou Y Q, Liu J M, et al, 2012. Comparing vertical structure of precipitation cloud and non-precipitation cloud using Cloudsat[J]. J Appl Meteor Sci, 23(1):1-9(in Chinese).
- 陶法,官莉,张雪芬,等,2020. Ka 波段云雷达晴空回波垂直结构及变化特征[J]. 应用气象学报,31(6):719-728. Tao F, Guan L, Zhang X F, et al, 2020. Variation and vertical structure of clear-air echo by Ka-band cloud radar[J]. J Appl Meteor Sci, 31(6):719-728(in Chinese).
- 万霞,徐桂荣,万蓉,等,2020. 青藏高原东侧甘孜云雷达观测的非降水云垂直结构特征分析[J]. 暴雨灾害,39(5):442-450. Wan X, Xu G R, Wan R, et al, 2020. Vertical structure of non-precipitation cloud obtained from cloud radar observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Torr Rain Dis, 39(5):442-450(in Chinese).
- 王飞,王思瀚,乌日罕,等,2025. 人工影响天气作业效益评价研究综述[J]. 气象,51(11):1547-1558. Wang F, Wang S H, Wu R H, et al, 2025. Advances in studies on benefit evaluation of weather modification[J]. Meteor Mon, 51(11):1547-1558(in Chinese).
- 王瑾,张镭,杜韬,等,2022. 探空和毫米波云雷达探测云高一致性的时空匹配原则研究[J]. 高原气象,41(5):1348-1366. Wang J, Zhang L, Du T, et al, 2022. A study on the principle of space-time matching for the detection of cloud height consistency by radiosonde and millimeter-wave cloud radar[J]. Plateau Meteor, 41(5):1348-1366(in Chinese).
- 王卫民,徐八林,雷勇,等,2024. Ka 波段毫米波云雷达对青藏高原东南缘降水回波的分析[J]. 气象,50(3):291-302. Wang W M, Xu B L, Lei Y, et al, 2024. Analysis of precipitation echoes from Ka-band millimeter wave cloud radar on the southeast margin of the Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 50(3):291-302(in Chinese).

- 王喆,王振会,曹晓钟,2016.毫米波雷达与无线电探空对云垂直结构探测的一致性分析[J].气象学报,74(5):815-826. Wang Z, Wang Z H, Cao X Z, 2016. Consistency analysis for cloud vertical structure derived from millimeter cloud radar and radiosonde profiles[J]. Acta Meteor Sin, 74(5):815-826(in Chinese).
- 肖佩,霍娟,毕永恒,2018.地基 Ka 波段云雷达数据质量控制方法研究分析[J].成都信息工程大学学报,33(2):129-136. Xiao P, Huo J, Bi Y H, 2018. Ground-based Ka band cloud radar data quality control[J]. J Chengdu Univ Inform Technol, 33(2):129-136(in Chinese).
- 曾正茂,郑佳锋,吕巧谊,等,2022.毫米波云雷达距离旁瓣回波质量控制及效果评估[J].气象,48(6):760-772. Zeng Z M, Zheng J F, Lyu Q Y, et al, 2022. Quality control and effect evaluation of range sidelobe echo of millimeter wave cloud radar[J]. Meteor Mon, 48(6):760-772(in Chinese).
- 曾正茂,郑佳锋,杨晖,等,2021. Ka 波段云雷达非云回波质量控制及效果评估[J].应用气象学报,32(3):347-357. Zeng Z M, Zheng J F, Yang H, et al, 2021. Quality control and evaluation on non-cloud echo of Ka-band cloud radar[J]. J Appl Meteor Sci, 32(3):347-357(in Chinese).
- 张佃国,王烁,郭学良,等,2020.基于机载 Ka 波段云雷达和粒子测量系统同步观测的积层混合云对流泡特征[J].大气科学,44(5):1042-1057. Zhang D G, Wang S, Guo X L, et al, 2020. The properties of convective generating cells embedded in the stratiform cloud on basis of airborne Ka-band precipitation cloud radar and droplet measurement technologies[J]. Chin J Atmos Sci, 44(5):1042-1057(in Chinese).
- 张鹏,陈玉宝,商建,等,2025.我国天气雷达网和风云三号降水卫星的发展与数据融合应用初探[J].气象,51(11):1367-1382. Zhang P, Chen Y B, Shang J, et al, 2025. Preliminary study on the development and data fusion application of China's weather radar network and FY-3G precipitation satellite[J]. Meteor Mon, 51(11):1367-1382(in Chinese).
- 张婷,胡树贞,陶法,等,2024.地基云雷达与 FY-4A 卫星云顶高度联合反演方法[J].气象,50(7):859-867. Zhang T, Hu S Z, Tao F, et al, 2024. Joint inversion of cloud top height based on ground-based millimeter-wave cloud radar and FY-4A satellite[J]. Meteor Mon, 50(7):859-867(in Chinese).
- 郑佳锋,刘黎平,曾正茂,等,2016. Ka 波段毫米波云雷达数据质量控制方法[J].红外与毫米波学报,35(6):748-757. Zheng J F, Liu L P, Zeng Z M, et al, 2016. Ka-band millimeter wave cloud radar data quality control[J]. J Infrared Millim Waves, 35(6):748-757(in Chinese).
- 郑佳锋,杨华,曾正茂,等,2021.那曲夏季云宏观特征的毫米波雷达资料研究[J].红外与毫米波学报,40(4):471-482. Zheng J F, Yang H, Zeng Z M, et al, 2021. Cloud macro-physical characteristics over Nagqu in summer observed by a millimeter-wave radar[J]. J Infrared Millim Waves, 40(4):471-482(in Chinese).
- 朱怡杰,邱玉琚,陆春松,2019.青藏高原那曲夏季云中水成物分布特征的毫米波雷达观测[J].气象,45(7):945-957. Zhu Y J, Qiu Y J, Lu C S, 2019. Millimeter wave radar observation of hydrometeor distribution characteristics of cloud in summer in Nagqu, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Meteor Mon, 45(7):945-957(in Chinese).
- Chernykh I V, Eskridge R E, 1996. Determination of cloud amount and level from radiosonde soundings[J]. J Appl Meteor Climatol, 35(8):1362-1369.
- Clothiaux E E, Miller M A, Albrecht B A, et al, 1995. An evaluation of a 94-GHz radar for remote sensing of cloud properties[J]. J Atmos Ocean Technol, 12(2):201-229.
- Costa-Surós M, Calbó J, González J A, et al, 2014. Comparing the cloud vertical structure derived from several methods based on radiosonde profiles and ground-based remote sensing measurements[J]. Atmos Meas Tech, 7(8):2757-2773.
- Frisch A S, Feingold G, Fairall C W, et al, 1988. On cloud radar and microwave radiometer measurements of stratus cloud liquid water profiles[J]. J Geophys Res, 103(D18):23195-23197.
- Görsdorf U, Lehmann V, Bauer-Pfundstein M, et al, 2015. A 35-GHz polarimetric Doppler radar for long-term observation of cloud parameters-description of system and data processing[J]. J Atmos Ocean Technol, 32(4):675-690.
- Kollias P, Clothiaux E E, Miller M A, et al, 2007. Millimeter-wave-length radars; new frontier in atmospheric cloud and precipitation research[J]. Bull Amer Meteor Soc, 88(10):1608-1624.
- Liu L P, Ding H, Dong X B, et al, 2019. Applications of QC and merged Doppler spectral density data from Ka-band cloud radar to microphysics retrieval and comparison with airplane in situ observation[J]. Remote Sens, 11(13):1595.
- Luke E P, Pavlous K, Johnson K L, et al, 2008. A technique for the automatic detection of insect clutter in cloud radar returns[J]. J Atmos Ocean Technol, 25(9):1498-1513.
- Poore K D, Wang J H, Rossow W B, 1995. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations[J]. J Climate, 8(3):550-568.
- Wang J H, Rossow W B, 1995. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations[J]. J Appl Meteor Climatol, 34(10):2243-2258.
- Yuan F, Zhou Z J, Liao J, et al, 2021. A quality control method for high-resolution radiosonde temperature and wind data[J]. Atmos Ocean Sci Lett, 14(2):100029.
- Zhang J Q, Chen H B, Li Z Q, et al, 2010. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar[J]. J Geophys Res, 115(D7):D00K30.
- Zhong L Z, Liu L P, Ge R S, et al, 2009. Evaluation of a 35-GHz radar for cloud and precipitation research in SCHEREX-experiment[C]//Proceedings of the 2008 International Workshop on Education Technology and Training & 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing. Shanghai: IEEE: 103-106.
- Zong R, Liu L P, Yin Y, 2013. Relationship between cloud characteristics and radar reflectivity based on aircraft and cloud radar co-observations[J]. Adv Atmos Sci, 30(5):1275-1286.