

周雪松, 宏观, 夏元彩, 等, 2024. 往返式平漂探空下降段 FY-3D 卫星湿度廓线检验[J]. 气象, 50(11): 1373-1385. Zhou X S, Hong G, Xia Y C, et al, 2024. Verification of FY-3D satellite humidity profiles using descending phase data of round-trip drifting sounding[J]. Meteor Mon, 50(11): 1373-1385 (in Chinese).

往返式平漂探空下降段 FY-3D 卫星湿度廓线检验*

周雪松¹ 宏 观² 夏元彩² 罗皓文² 包伟智³ 田 泓¹

1 内蒙古自治区呼和浩特市气象局, 呼和浩特 010020

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

3 内蒙古自治区气象数据中心, 呼和浩特 010051

提 要: 往返式平漂探空观测(以下简称平漂探空)可实现地面至平流层低层大气温度廓线垂直探测以及平流层低层内持续 4 h 水平温度分布探测。目前, 平漂探空已在长江中下游、广东、内蒙古等多地开展观测试验, 效果良好。利用 2021 年 3—9 月长江中下游平漂探空试验数据完成对卫星反演大气湿度廓线数据的检验, 结果显示: 由平漂探空下降段数据的检验结果可知, 卫星湿度廓线的平均绝对误差约 15%, 均方根误差约 20%。在午间、夜间, 卫星反演的湿度廓线数据质量比清晨、傍晚的湿度廓线相对较好。卫星反演的湿度平均绝对误差和均方根误差随海拔升高而减小, 随湿度增大而增大。在湿度 50% 以下, 卫星反演的湿度偏大; 在湿度 50% 以上, 卫星反演的湿度偏小。

关键词: 平漂探空, 卫星, 湿度廓线, 检验

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2024. 063002

Verification of FY-3D Satellite Humidity Profiles Using Descending Phase Data of Round-Trip Drifting Sounding

ZHOU Xuesong¹ HONG Guan² XIA Yuancai² LUO Haowen² BAO Weizhi³ TIAN Hong¹

1 Hohhot Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Hohhot 010020

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

3 Inner Mongolia Meteorological Data Center, Hohhot 010051

Abstract: The round-trip drifting sounding system (RDSS) can detect the atmospheric temperature profile vertically from ground to the lower stratosphere and the horizontal temperature distribution in the lower stratosphere continuously for 4 hours. Round-trip drifting sounding observation tests have been carried out in the middle and lower reaches of the Yangtze River, Guangdong, Inner Mongolia and other places, and the results are very successful. Based on the data of round-trip drifting sounding tests in the middle and lower reaches of the Yangtze River from March to September 2021, this paper conducts the verification of atmospheric humidity profile data of satellite. The verification results of the descending phase data of the round-trip drifting sounding indicate that the average absolute error of the satellite humidity profile is about 15%, and the root mean square error is approximately 20%. At noon and night, the quality of humidity profile data of satellite is better than that in the morning and evening. The humidity average absolute error of the satellite decreases with increasing altitude and increases with increasing humidity. Below

* 国家重点研发计划(2017YFC1501700)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J066)共同资助

2023 年 5 月 11 日收稿; 2024 年 6 月 23 日收修定稿

第一作者: 周雪松, 主要从事综合气象观测、多源数据对比分析与应用研究. E-mail: 775498436@qq. com

通讯作者: 宏观, 主要从事综合气象观测与大气探测技术应用研究. E-mail: hongguan@cma. gov. cn

the 50% humidity, the satellite-retrieved humidity is relatively large, but for the humidity above 50%, the satellite-retrieved humidity is relatively small.

Key words: round-trip drifting sounding, satellite, humidity profile, verification

引 言

水汽是大气时空变化中最活跃的成分之一,是天气和气候形成的必要基础(段晓梅和曹云昌, 2018)。在气象学中大气中水汽含量通常以相对湿度表示,是描述大气状态的重要的物理量。探测大气湿度的手段有气球探空、GNSS/MET、地基微波辐射计、卫星等(丁虹鑫等, 2018; 郭启云等, 2020)。其中气球探空湿度资料是序列最长、准确性最高的大气湿度廓线资料,是数值天气预报、全球气候变化研究、大气资料再分析最关键的数据来源(王英和熊安元, 2015; 姚雯等, 2017)。近年来,随着遥感技术的发展,探测大气湿度的技术取得了质的飞跃。但目前测量大气湿度廓线最准确的手段仍然是气球探空观测(钱媛等, 2019),其探测技术成熟,观测数据稳定(郭启云等, 2013),垂直探测每分钟的采样可达 50 次。按照 $400\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 的上升速度,气球探空的空间垂直分辨率可达 8 m,其数据分辨率、精度以及可靠性较高(赵静等, 2017),能提供更为密集的大气垂直探测信息,可更好地反映大气层结的细致特征(王瑞文等, 2023)。相比于气球探空观测而言,卫星遥感探测的观测尺度更大,极轨气象卫星可实现对全球的大气湿度分布探测。近年来,气象卫星为我国天气预报、防灾减灾和气候变化监测提供了强有力的支撑,在数值预报、天气分析、灾害性天气监测、气候变化监测、生态和环境监测等方面取得了显著应用成绩(李伟光等, 2020)。风云三号(FY-3)系列卫星是中国第二代太阳同步气象卫星(王素娟等, 2020),其中 FY-3D 于 2017 年 11 月在太原卫星发射中心成功发射(杨天杭等, 2019; 瞿建华等, 2019),是中国自主设计建造的新一代气象卫星,有着极高的空间分辨率和观测能力,具有重要的科学价值和应用价值。该卫星搭载了 10 台/套先进的遥感仪器,包括:中分辨率光谱成像仪 II、微波成像仪、微波温度计 II、微波湿度计 II、红外高光谱大气探测仪、近红外高光谱温室气体监测仪、广角极光成像仪、电离层光度计、空间环境监测器和全球导航卫星掩星探测仪等(朱爱军等, 2018)。微波湿度计(MWHS)

是 FY-3D 卫星上一个重要的有效载荷,可全天时、全天候探测全球大气湿度的垂直分布、水汽含量和降雨量等空间气象资料,在大气探测业务中发挥了重要作用(张瑜等, 2017)。

卫星遥感数据提供了更大尺度的湿度数据(曹广真等, 2023),对于数值天气预报、气象灾害监测预警、气候预测、农业监测等方面具有重要的应用价值(范天锡, 2002; 姬翔和王新, 2014; 王富等, 2021)。但是,由于卫星数据的测量误差,加之不同的反演算法的不确定性,反演结果的准确性可能受到影响。因此,有必要对 FY-3D 卫星反演湿度数据的准确性进行评估,以便指导实际应用。探空观测是对大气要素的直接观测(张旭鹏等, 2021),其湿度数据准确度较高,且具有较高的分辨率,可作为卫星反演的湿度数据的参考标准(雷勇等, 2018; 郭启云等, 2018; 朱元竞等, 1998; 杜明斌等, 2009),从而定量评估 FY-3D 卫星反演湿度数据的准确性。往返式平漂探空观测系统(Round-trip Drifting Sounding System, RDSS)是由中国气象局气象探测中心研发的一种新型探空观测系统,系统主要由外球、内球和降落伞以及地面接收机组成,载荷为探空仪和熔断器。外球为上升阶段提供合适的速度,内球为平漂阶段提供合适的平漂高度,降落伞为下降阶段提供合适的速度。释放时,探空仪、熔断器随双球升空,到达一定高度后外球爆炸,此时内球与探空仪、熔断器进入平漂状态。经过平漂 4 h,熔断器工作使得降落伞、探空仪与内球分离,进入下降段观测,通过一次施放实现了“上升段-平漂段-下降段”三段观测(柳士俊等, 2022)。

往返式平漂探空观测系统已在长江中下游地区开展了外场组网观测试验,试验观测数据的质量控制和偏差订正研究显示,上升段和下降段探空观测资料的质量可靠,能够满足数值预报资料同化的要求(张鑫等, 2023)。试验数据的不确定性分析结果表明往返探空探测精度达到了 WMO(World Meteorological Organization)规定的突破目标,探测资料具有良好的可用性,具备了很好的应用前景(王金成等, 2021)。本文利用长江中下游平漂探空数据检验 FY-3D 卫星反演的大气湿度廓线数据的准确性,可

为后续实际应用提供参考。文中分别利用平漂探空的上升段、下降段数据,重点对比分析 FY-3D 卫星反演湿度数据与探空测量湿度数据的差异,以及这些差异是否受到不同地区环境因子的影响,从而揭示 FY-3D 卫星反演湿度廓线数据的准确性,为卫星反演的大气湿度廓线产品应用提供依据。

1 资料与方法

利用平漂探空的上升段和下降段的湿度数据作为标准,检验卫星反演的大气湿度廓线的准确性。在垂直方向上,根据卫星气压数据,在平漂探空上升段、下降段廓线选取气压最接近的探空秒数据(或通过气压插值计算)作为标准数据。根据探空秒数据的时间、经度、纬度数据,从卫星的当前层次选取与其时空匹配度最佳的数据点作为被检验数据。

1.1 平漂探空资料

平漂探空资料采用 2021 年长江中下游的安庆、武汉、南昌、赣州、长沙和宜昌 6 个探空站的平漂探空试验数据。此次观测试验自 3 月开展,每日施放时间为 07:30、19:30(北京时,下同),为期 7 个月。由于平漂段的平均高度是约为 28 000 m 的平流层,此高度水汽含量很低,因此只选取上升段和下降段观测数据进行检验,平漂段不做讨论。

平漂探空采用卫星导航体制的北斗探空仪,其湿度传感器采用高分子聚合物湿敏电容,解决了传统湿敏电阻不能反复使用、响应速度慢、滞后误差大等问题,测湿准确度大幅提升(周雪松和田泓,2022),达到国际先进水平(王丹等,2020)。北斗探空仪信号由地面组网的北斗卫星导航接收机接收、解码、编码,并将数据实时传输至中心站平台。观测要素包含:温度、相对湿度、气压、经度、纬度、高度等。北斗探空仪每秒观测一次,由中心站平台质量控制处理后,将多个地面卫星导航接收机的接收数据合成一个完整的平漂探测数据文件。

1.2 卫星资料

卫星数据采用 FY-3D 卫星的 L2 级大气温湿度廓线(AVP)产品,湿度数据采用其 DATA 数据集下大气温湿度廓线数据(TSHS_AHProf;数据来源:<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Data/Satellite.aspx>)。FY-3D 卫星每天凌晨和下午各过

境一次(唐飞等,2021),其大气湿度廓线产品垂直方向上包含 43 个规定气压层,气压范围为 1013.25~0.1 hPa。水平方向包含 1212 条扫描线,每条扫描线 90 个像元,水平分辨率为 25 km,数据格式为 HDF5 格式。

1.3 比湿转换

平漂探空观测的湿度数据为相对湿度,而卫星的湿度廓线产品为比湿,文中将数据统一为相对湿度计算。大气为水汽和干空气的混合体,比湿表示湿空气中水汽质量与湿空气质量之比,在计算上通常用式(1)表示:

$$q = \frac{m_v}{m_d + m_v} \quad (1)$$

式中: q 为比湿,单位为 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 m_v 为湿空气中水汽质量, m_d 为干空气质量。经查阅资料(盛裴轩等,2013),比湿可以用式(2)表示:

$$q = \frac{\varepsilon e}{p - 0.378e} \quad (2)$$

式中: ε 为常数(取值 0.622), e 为水汽压, p 为气压。经过变形可得到水汽压的公式:

$$e = \frac{pq}{0.622 + 0.378q} \quad (3)$$

采用 Tetens 公式计算饱和水汽压,通常分为冰面和水面两种情况:

$$E_s = 6.1078 \exp \left[\frac{17.2693882(T - 273.16)}{T - 35.86} \right] \quad (4)$$

$$E_{si} = 6.1078 \exp \left[\frac{21.874558(T - 273.16)}{T - 7.66} \right] \quad (5)$$

式中: E_s 为水面饱和水汽压, E_{si} 为冰面饱和水汽压, T 为温度(单位:K)。水的三相点温度是 273.16 K,在文中计算饱和水汽压时,当 $T \geq 273.16$ K 时,饱和水汽压为 E_s ;当 $T < 273.16$ K 时,饱和水汽压为 E_{si} 。

相对湿度表示空气中实际水汽压与同温度下的饱和水汽压之比,用百分数表示。相对湿度可用下式表示:

$$\text{RH} = \frac{e}{E} \quad (6)$$

式中:RH 为相对湿度, e 为当前水汽压, E 为当前温度下的饱和水汽压。因此,在已知比湿 q 、温度 T 、气压 p 时,可根据以上公式计算出当前水汽压和饱和水汽压,从而计算出大气相对湿度。

1.4 平漂数据的质量控制

平漂探空上升段观测探空仪信号较好,经过 4 h 平漂段观测,水平漂移的距离可达 400 km。受平漂观测试验的北斗卫星导航接收机布设密度、探空仪电池压降、地形遮挡等因素影响,导致部分下降段的近地面探测数据质量较差。

在检验过程中,发现部分探空数据湿度异常,如湿度保持 100% 不变、跳变、超出临界值、数据缺测等,因此需要对平漂探空观测湿度数据进行质量控制处理。国内探空业务中,探空湿度数据的质量控制方法主要有格式检查、基本逻辑检查、气球移速检查、阈值检查、空间一致性检查、时间一致性检查等(钱媛,2019)。在本研究中的质量控制方法包括质量控制码检查、阈值检查、格式检查、基本逻辑检查,对错误数据、缺测数据进行剔除处理,具体规则如下:

- (1)剔除质量控制码包含异常的数据,仅保留质量控制码为 AZ、CZ 的数据;
- (2)剔除气压异常的数据;
- (3)剔除湿度超出阈值的数据;
- (4)剔除气压 50 hPa 高度以上湿度大于 90% 的观测数据;
- (5)剔除受降水影响,导致长时间湿度为 100% 的数据;
- (6)剔除因信号或传感器等原因造成的孤立跳变数据;
- (7)剔除湿度变化趋势异常的数据;
- (8)剔除相邻探空秒数据差值大于 50% 的数据,即湿度每秒变化率大于 50%;

(9)如某时次平漂探空和卫星数据的匹配数据少于 6 组,取消本次计算。

经以上质量控制算法处理后,剔除了湿度廓线中的异常数据,质量控制前后对比如图 1 所示。图 1a 为质量控制前平漂探空湿度曲线,存在较多错误数据,经质量控制算法处理后,明显剔除了曲线中的跳变、拉直线等错误数据,如图 1b 所示。利用质量控制后的平漂探空数据进行检验,使得检验结果质量明显提升,其中上升段平均绝对误差减小 0.7%,平均均方根误差减小 1.2%,相关系数增大 0.05;下降段平均绝对误差减小 0.6%,平均均方根误差减小 1.6%,相关系数增大 0.03。

1.5 数据匹配方法

为保证检验结果的准确性,算法中设定了标准数据和被检验数据的时空匹配条件。时空匹配算法基于卫星数据和平漂探空数据的距离、时间差匹配,时间匹配条件为时间差小于 3 h(周雪松等,2023),距离匹配条件为空间距离小于 150 km。时间匹配即从平漂探空和卫星数据中筛选出时间差小于 3 h 的数据。空间匹配即根据平漂探空上升或下降段的运动轨迹,在卫星的 43 个规定气压层中选取满足时间、空间匹配要求,且距离最近的数据点。时间匹配很容易理解,下面着重介绍空间匹配方法。

平漂探空数据包含上升、平漂和下降段数据,根据其气压、高度变化规律,将数据分为 3 段。上升段和下降段为分辨率的大气廓线数据,而卫星数据垂直方向分辨率较低,仅包含 43 个规定气压层。因此,需要将平漂探空的上升和下降段数据做内插处理,再根据数据的时间、气压、经度、纬度等信息与

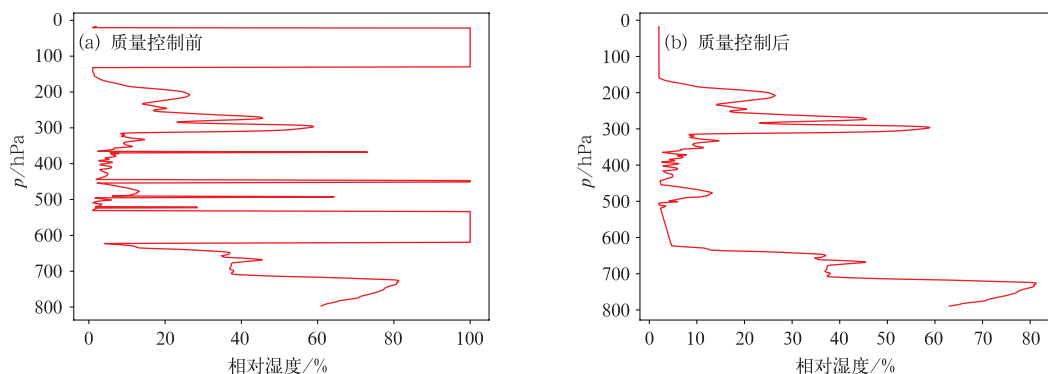


图 1 2021 年 3 月 14 日 07:30 长沙站平漂探空相对湿度曲线
Fig.1 Round-trip drifting sounding relative humidity curve at
Changsha Station at 07:30 BT 14 March 2021

卫星数据做时空匹配。

平漂探空的上升和下降阶段数据从地面至高空约 10 hPa 高度,探空仪每秒进行一次观测,垂直分辨率达 6~8 m,因此使用气压内插方法来计算插值点湿度的误差也相对较小,可以满足对卫星数据的验证要求。湿度插值公式如式(7)所示:

$$Q = Q_0 + \frac{Q_1 - Q_0}{\ln p_1 - \ln p_0} (\ln p - \ln p_0) \quad (7)$$

式中: Q 和 p 分别表示插值点的湿度和气压, Q_0 和 p_0 表示下层的湿度和气压, Q_1 和 p_1 表示上层的湿度和气压。根据平漂探空的上升和下降阶段的廓线轨迹,由式(7)可以从卫星数据中提取与之匹配的湿度廓线数据,具体步骤如下:

(1)根据平漂探空上升或下降段数据的气压范围,筛选包含的卫星规定气压层次。

(2)利用式(7)插值算法,计算出探空廓线中与卫星规定气压层(高度)对应的数据,包括时间、湿度、温度,以及该数据点的经度和纬度。

(3)在卫星数据中,根据探空和卫星数据的经/纬度、时间,计算出符合时空匹配条件的卫星数据。符合匹配条件的数据通常不止一个,文中选取符合时间匹配条件且距离最近的数据点,作为被检验的卫星数据。利用数据的经/纬度、数据质量标志和数据时间,在卫星数据的每个规定气压层中获得匹配数据,即完成卫星廓线数据的提取。

(4)利用比湿转换公式,将卫星的比湿转换为相对湿度。

经过以上计算,即可从卫星数据的每一组规定气压层数据中,筛选出与探空数据时间差小于 3 h 且距离最近的数据。将获取的平漂探空、卫星数据按照气压排序,即完成匹配数据获取。

1.6 数据评估方法

文中利用平漂探空数据对卫星数据的评估方法主要包括:平均绝对误差、均方根误差和相关系数,具体公式如下:

(1)平均绝对误差(MAE):表示评估对象与参考标准的绝对误差的平均值。MAE 的值越小,表示观测值与实际观测值之间的差异越小,观测数据的准确性越高。MAE 是用来衡量观测值与实际观测值之间差异的常用统计指标。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|O_i - B_i|) \quad (8)$$

(2)均方根误差(RMSE):用来衡量观测数据偏离参考标准数据的程度,将观测值与标准值之间的平方差的均值的平方根作为误差的度量。RMSE 的值越小,表示观测值与标准值之间的差异越小,观测值越接近标准值。RMSE 用于衡量测量或观测结果与已知标准值之间的一致性 or 准确性。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - B_i)^2} \quad (9)$$

(3)相关系数(R):相关系数表征观测数据与标准数据线性相关程度。 R 的大小表示观测值与标准值之间的线性关系的强度和方向, R 越大,表示观测数据与标准数据趋势的一致性较好,观测数据质量越高。

$$R(O_i, B_i) = \frac{\text{Cov}(O_i, B_i)}{\sqrt{\text{Var}(O_i) \text{Var}(B_i)}} \quad (10)$$

式中: O_i 为第 i 个观测数据, B_i 为对应的标准数据,Cov 为协方差,Var 为方差。

通过统计时空匹配后的卫星数据与平漂探空数据的 MAE、RMSE 和 R ,分析卫星反演大气湿度廓线数据的准确性。

2 检验结果分析

本次检验选取了 2021 年 3—9 月长江中下游 6 个站点的平漂探空试验数据,共计 2798 个样本,以及该时段中国区域 FY-3D 卫星湿度数据,共计 1110 个样本。经质量控制算法处理,剔除了 227 个气压、湿度(相对湿度简称“湿度”,下同)、温度数据异常的平漂探空文件。利用平漂探空数据对卫星数据进行匹配分析的检验结果如表 1 所示。

由表 1 中检验结果统计数据可知,由平漂探空上升和下降段观测数据对卫星反演的大气湿度廓线数据一致性相对较好,且下降段的检验结果中 MAE 和 RMSE 均更小。其中,上升段的 MAE 为 18.6%,RMSE 为 24.0%, R 为 0.71;下降段的 MAE 为 15.1%,RMSE 为 20.0%, R 为 0.70。

往返式平漂探空观测实现了一次施放两次对流层垂直探测,其下降段观测为卫星反演资料评估提供了更加丰富的直接探测数据。相比传统探空(仅上升段),平漂探空下降段与卫星的观测时间更加匹配。经统计,利用上升段数据检验的结果中平均匹配时差为 2.9 h,而下降段的平均匹配时差为 1.1 h。因此,利用平漂探空下降段观测数据进行卫星反演

表 1 2021 年 3—9 月卫星湿度廓线检验结果

Table 1 Verification results of satellite humidity profile from March to September 2021				
平漂探空数据段	MAE/%	RMSE/%	R	匹配数量/个
上升段	18.6	24.0	0.71	408
下降段	15.1	20.0	0.70	812

数据检验,具有明显的时间匹配优势。下降段在对流层低层(600 hPa 以下)因接收机覆盖问题造成了部分数据缺失,进而下降段评估了 FY-3D 的对流层高层的湿度产品,因此利用下降段数据的检验结果的误差较小。上升段和下降段的检验结果散点图如图 2 所示。

由图 2 可知,平漂探空上升和下降段数据对卫星反演湿度数据的检验结果散点图分布相似,但下降段包含了更多的匹配数据。在上升、下降段的检验结果中,卫星湿度偏小的数据较多。在湿度 50% 以下,卫星湿度偏大;湿度 50% 以上,卫星湿度偏小。

2.1 上升段检验结果分析

上升段探空每日两次探测,施放时间为 07:30、

19:30,分别为清晨和傍晚的大气湿度廓线数据。清晨和傍晚的大气环境复杂,不同的地形对湿度影响较大,此外上升段的平均匹配时间差为 2.9 h,大部分匹配数据的时差接近最大匹配时间 3 h,因此上升段的检验结果与数据匹配时间有较大关系,具体检验评估统计数据如表 2 所示。

由表 2 数据可知,07:30 上升段检验结果的 MAE 为 17.5%,RMSE 为 22.7%,R 为 0.73;19:30 上升段检验结果的 MAE 为 19.9%,RMSE 为 25.5%,R 为 0.69。与 07:30 上升段检验结果相比,19:30 上升段检验结果误差略大,MAE 偏大 2.4%,RMSE 偏大约 2.8%,R 减小 0.04。上升段检验结果的散点图如 3 所示。

由图 3 可知,07:30、19:30 检验结果的相对湿度散点图分布相似,从趋势来看,平漂探空上升段检

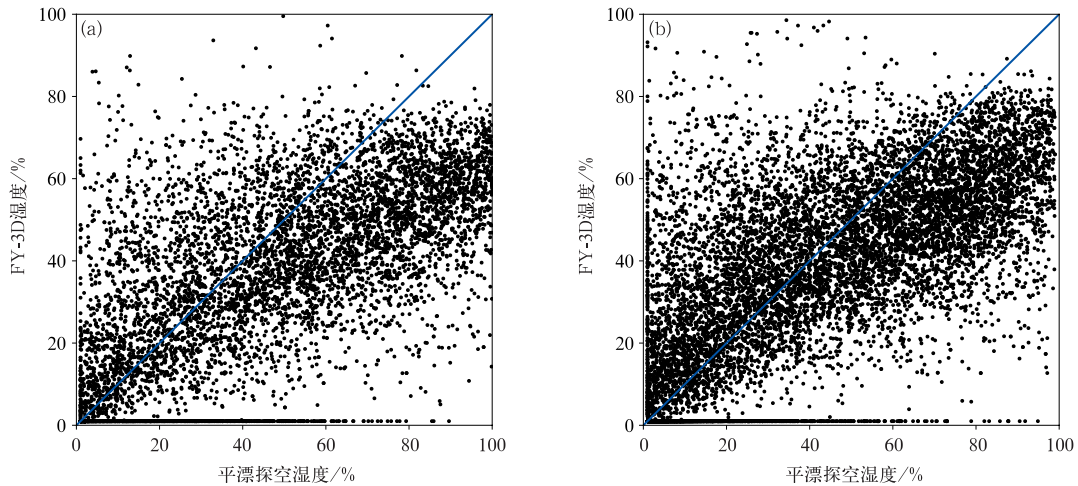


图 2 2021 年 3—9 月卫星反演与平漂探空(a)上升段,(b)下降段湿度散点图

Fig. 2 Scatter plots of humidity from satellite retrievals versus round-trip drifting sounding from March to September 2021
(a) ascending phase, (b) descending phase

表 2 2021 年 3—9 月卫星湿度廓线检验结果(上升段)

Table 2 Verification results of satellite humidity profile from March to September 2021 (ascending phase)

时间/BT	MAE/%	RMSE/%	R	匹配数量/个
07:30	17.5	22.7	0.73	213
19:30	19.9	25.5	0.69	195

验结果中卫星的平均湿度总体偏小,湿度误差集中在 $\pm 40\%$ 以内。在湿度 50% 以上,平漂探空湿度明显大于卫星反演湿度,卫星反演湿度偏小约 20% ;

当湿度大于 70% ,卫星的反演湿度均小于平漂探空湿度。在检验结果中挑选了 07:30、19:30 具有代表性的湿度廓线进行分析,如图 4 所示。

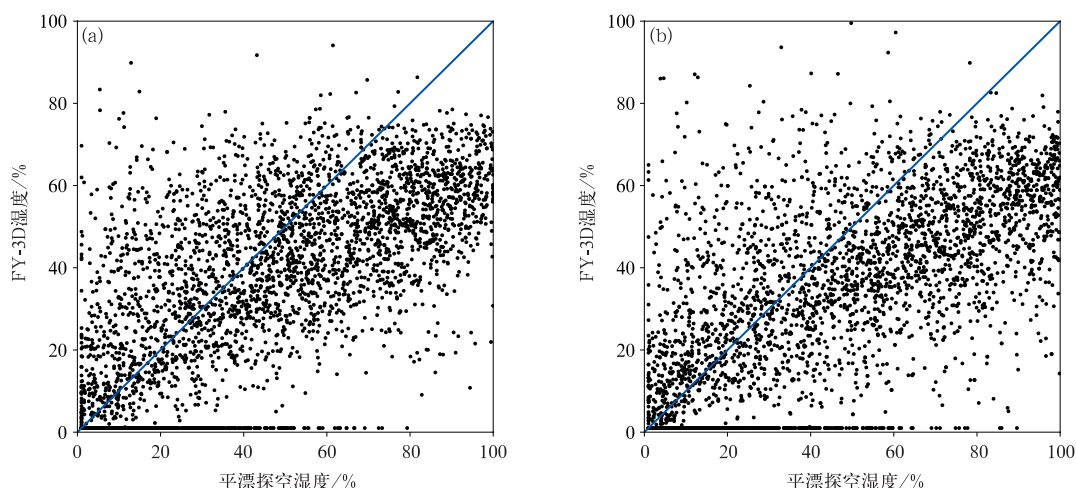


图 3 2021 年 3—9 月 (a)07:30、(b)19:30 卫星反演与平漂探空湿度散点图

Fig. 3 Scatter plots of humidity from satellite retrievals versus round-trip drifting sounding at (a) 07:30 BT, (b) 19:30 BT from March to September 2021

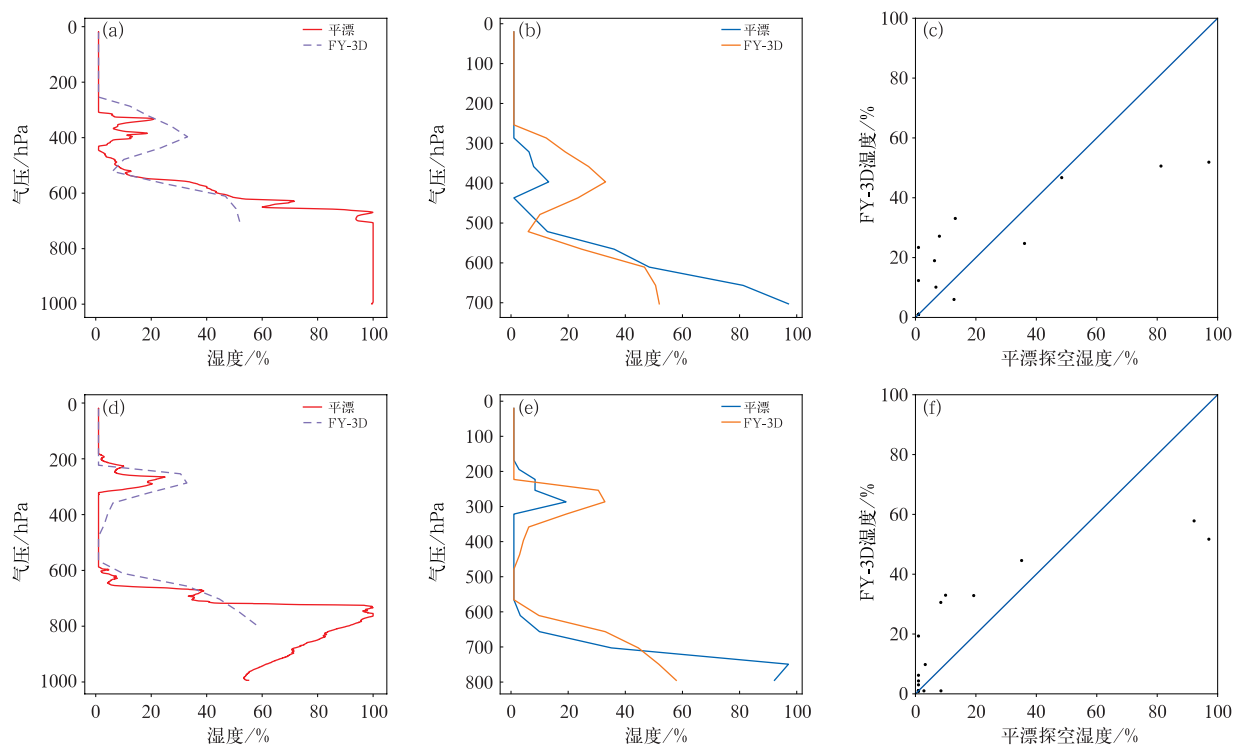


图 4 2021 年 (a~c)长沙站 4 月 21 日 07:30、(d~f)赣州站 3 月 18 日 19:30 检验结果

(a, d) 原始廓线, (b, e) 匹配廓线, (c, f) 湿度散点图

Fig. 4 Verification results for (a-c) Changsha Station at 07:30 BT 21 April,

(d-f) Ganzhou Station at 19:30 BT 18 March 2021

(a, d) original profiles, (b, e) matched profiles, (c, f) humidity scatter plots

2021 年 4 月 21 日长沙站 07:30 廓线检验结果的 MAE 为 13.5%, RMSE 为 21.2%, R 为 0.90(表略)。由图 4a 和 4b 湿度对比曲线可知,平漂探空与卫星湿度的趋势一致性较好,仅在 800~650 hPa 附近误差偏大。从图 4c 相对湿度散点图来看,在湿度低于 50% 时,卫星湿度大于平漂探空湿度,且误差较小,均在 20% 以内;在湿度大于 50% 时,卫星湿度偏小,湿度误差增大。2021 年 3 月 18 日赣州站 19:30 廓线检验结果的 MAE 为 10.2%, RMSE 为 16.5%, R 为 0.84(表略)。由图 4d 和 4e 可知,平漂探空与卫星湿度廓线趋势基本一致,在湿度 10%~50% 时,卫星湿度偏大;湿度大于 50% 时,卫星湿度偏小。在湿度低于 50% 时,卫星反演湿度数据误差在 20% 以内;在湿度大于 50% 时,误差明显偏大。在气压 800 hPa 左右,探空湿度有明显的入云特征,湿度超过 90%,但卫星反演的湿度未超过 60% (图 4d)。在 300 hPa 附近,卫星反演的湿度明显大于探空湿度,卫星湿度偏大约 20% (图 4e)。

2.2 下降段检验结果分析

平漂段结束,熔断器切割气球连接线,探空仪随降落伞下落,开始下降段观测。由于探空仪在降落伞以下,因此在下降段观测时,传感器先接触到待探测大气。与上升段相比,可从源头避免气球尾流对不同湿度层的扰动以及气球摩擦对温、湿度测量的影响,因此下降段探空观测更具有客观条件优势。

平漂探空每日 07:30 和 19:30 施放,下降段观测与上升段观测时间间隔约为 6 h。07:30 施放,则下降段时间约为 13:30,代表了探测气球下落点午后的大气湿度廓线数据;19:30 施放,则下降段时间为次日 01:30 左右,代表了探测气球下落点夜间的大气湿度廓线数据。07:30、13:30、19:30 和 01:30 分别代表了清晨、正午、傍晚、夜间的大气环境。对 4 个时次的探测廓线分别分析,更能准确反映卫星反演的大气湿度在不同外部环境下的准确性。下降段观测受平漂距离和接收机布设密度影响,平均终止气压为 800 hPa 左右,部分数据质量较差,需要经过严格质量控制方可使用。利用下降段数据对卫星湿度廓线的检验结果如表 3 所示。

表 3 2021 年 3—9 月卫星湿度廓线检验结果(下降段)

Table 3 Verification results of satellite humidity profile from March to September 2021 (descending phase)

时间/BT	MAE/%	RMSE/%	R	匹配数量/个
13:30	14.5	19.6	0.70	487
01:30	16.0	20.6	0.70	325

由表 3 数据可知,13:30 和 01:30 的探空数据检验结果差异较小,01:30 夜间观测数据的 MAE 和 RMSE 略大,MAE 偏大 1.5%, RMSE 偏大 1.0% 左右,但两个时次检验结果均比 07:30 和 19:30 有明显提高。由图 5 可知,13:30 和 01:30 的卫星湿度廓线散点图分布基本一致,误差主要

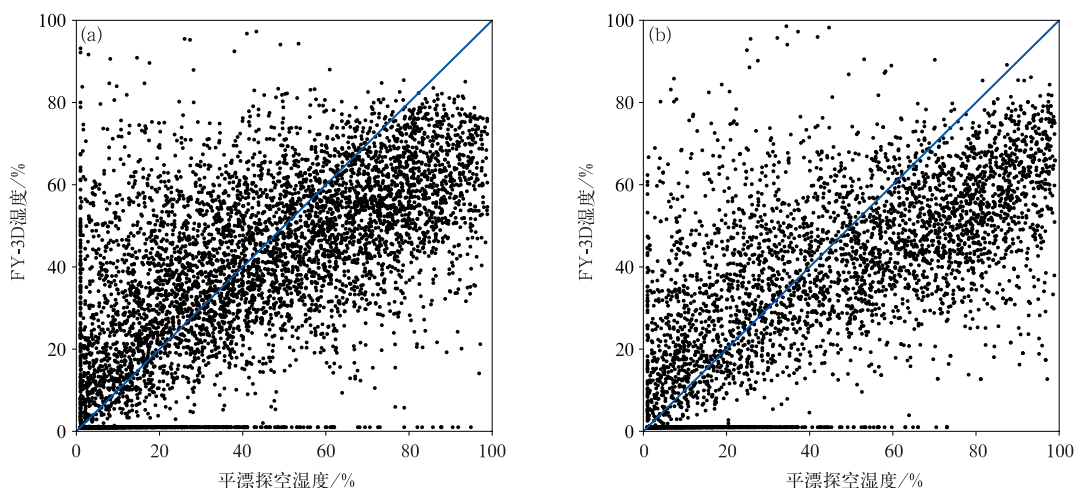


图 5 2021 年 3—9 月(a)13:30,(b)01:30 卫星反演与平漂探空湿度散点图

Fig. 5 Scatter plots of humidity from satellite retrievals versus round-trip drifting sounding at (a) 13:30 BT, (b) 01:30 BT from March to September 2021

集中在 $\pm 40\%$ 以内。在低湿环境,卫星湿度数据偏大;在高湿环境,卫星湿度数据偏小。

2021 年 9 月 26 日南昌站 13:30 平漂探空廓线检验结果的 MAE 为 8.5% , RMSE 为 13.4% , R 为 0.88 (表略)。由图 6a 和 6b 可知,在 $500\sim 250$ hPa, 卫星湿度偏大, 500 hPa 高度以下卫星湿度偏小。从湿度散点图可以发现,在湿度小于 50% 时,卫星湿度偏大;湿度大于 50% 时,卫星湿度偏小。2021 年 4 月 9 日武汉站 01:30 平漂探空廓线检验结果的 MAE 为 8.2% , RMSE 为 13.5% , R 为 0.91 (表略)。由图 6d 和 6e 可知,平漂探空与卫星湿度廓线趋势一致性较好,但在 250 hPa、 $700\sim 500$ hPa 附近误差较大,在 700 hPa 附近卫星湿度偏小约 40% ,在 250 hPa 附近卫星湿度偏大约 30% 。从散点图来看,在湿度大于 50% 时,卫星湿度偏小;湿度小于 50% 时,卫星湿度偏大,误差主要集中在湿度 10% 以内。

2.3 不同高度的检验结果分析

大气中水汽含量随高度呈递减趋势, 500 hPa

以下水汽占总量的 90% 以上。长江中下游的 6 个探空站分布在 $25^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ 的中低纬度地区,对流层顶高度通常在 17 km 以下。为分析在不同高度下的检验结果,分别对地面至 500 hPa、 $500\sim 100$ hPa、 $100\sim 5$ hPa(平漂探空外球为 650 g 气球,上升段终止气压通常在 10 hPa 左右)高度的检验结果分析。

由表 4 中检验结果数据可知,卫星反演的湿度误差在不同高度差异较大,总体呈随高度增加而减小的趋势。在地面至 500 hPa 高度的检验结果误差较大,上升、下降段的 MAE 分别为 25.3% 、 20.6% , RMSE 分别为 28.1% 、 23.2% ;在 $500\sim 100$ hPa,上升、下降段的 MAE 分别为 20.3% 、 16.7% , RMSE 分别为 24.3% 、 21.0% ;在 $100\sim 5$ hPa,上升、下降段的 MAE 分别为 3.8% 、 3.6% , RMSE 分别为 4.4% 、 4.1% 。

近地面至 100 hPa 高度是水汽主要集中范围,是影响天气系统发生发展的重要因素。因此,此高度范围的卫星检验数据更能代表数据的真实情况。在近地面至 500 hPa 范围内湿度较大,且随天气系统变化较快。匹配时间和匹配距离都易对检验结果

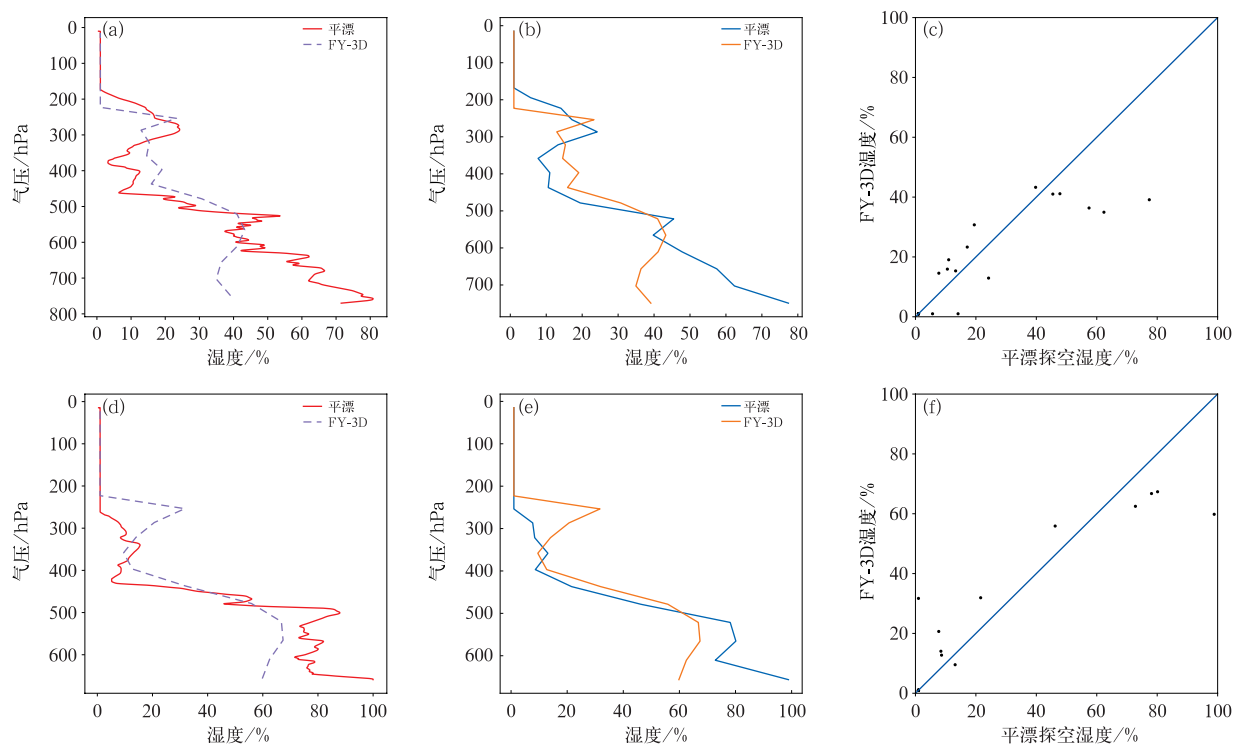


图 6 2021 年(a~c)南昌站 9 月 26 日 13:30, (d~f)武汉站 4 月 9 日 01:30 检验结果

(a, d) 原始廓线, (b, e) 匹配廓线, (c, f) 湿度散点图

Fig. 6 Verification results for (a~c) Nanchang Station at 13:30 BT 26 September,

(d~f) Wuhan Station at 01:30 BT 9 April 2021

(a, d) original profiles, (b, e) matched profiles, (c, f) humidity scatter plots

表 4 2021 年 3—9 月不同高度上的卫星数据检验结果

高度/hPa	平漂探空数据段	MAE/%	RMSE/%	匹配数量/个
地面至 500	上升段	25.3	28.1	386
	下降段	20.6	23.2	457
500~100	上升段	20.3	24.3	406
	下降段	16.7	21.0	806
100~5	上升段	3.8	4.4	328
	下降段	3.6	4.1	475

造成误差,特别是近地面出现降水时,易导致卫星在近地面至 500 hPa 范围内的反演湿度误差偏大。500~100 hPa 的检验结果中,下降段比上升段检验结果的误差偏小,主要是因为下降段的数据匹配时间差较小。100 hPa 以上,大气中水汽含量相对较少,湿度较低(余君等,2016)。由于 100 hPa 以上大气湿度环境稳定,湿度随时间和空间变化不大,因此上升和下降段的 MAE 和 RMSE 均较小。

2.4 不同湿度检验结果分析

在对卫星湿度廓线分析时发现:卫星湿度在 0%~50%、50%~100% 环境误差的正负不一致。

此外,云对卫星微波湿度计反演的大气湿度廓线准确性也有一定影响。从理论上讲,湿度达到 100% 时会形成云,但由于凝结核等多种原因,湿度达到 85% 时,则认为有云(车云飞等,2015)。为获得卫星反演的大气湿度数据在不同湿度环境下的准确性,分别取平漂探空数据中湿度为 0%~40%、40%~85%、85%~100% 的 3 个范围数据进行分析。湿度为 0%~40%、40%~85%,分别代表低湿环境、高湿环境下的检验结果。湿度在 85%~100% 的数据,代表高湿环境且受云影响的检验结果。检验结果如表 5 所示。

表 5 2021 年 3—9 月不同湿度的卫星数据检验结果

Table 5 Verification results of satellite data of different humidities from March to September 2021

湿度/%	平漂探空数据段	MAE/%	RMSE/%	匹配数量/个
0~40	上升	12.1	16.7	396
	下降	11.6	16.2	783
40~85	上升	23.2	26.5	338
	下降	19.5	22.3	547
85~100	上升	37.6	38.6	97
	下降	32.1	33.6	83

由表 5 中数据可知,卫星反演的结果误差随湿度升高而增大。在湿度 0%~40% 时,上升和下降段检验结果的 MAE 和 RMSE 均较小,MAE 为 12% 左右, RMSE 为 16.5% 左右。在湿度 40%~85% 时,上升和下降段的检验结果差异较大,上升段 MAE 和 RMSE 较下降段均偏大约 4%。在湿度 85%~100% 时,上升段检验结果的 MAE 高达 37.6%, RMSE 达 38.6%,下降段检验结果的 MAE 和 RMSE 分别为 32.1%、33.6%,比上升段分别减小 5.5%、5.0%。在高湿环境,特别是降水天气,探空仪湿度传感器因降雨污染、水汽凝结等原因造成湿度偏大。中小尺度天气系统对局地湿度影响较大,3 h 的匹配时差和 150 km 的距离差异易造成卫星

与平漂探空匹配数据的大气环境不同,因此在云层内和近地面误差偏大。

2.5 温度对检验结果的影响

为了进一步了解大气温度对卫星反演大气湿度数据的影响,分别统计了在不同温度范围的检验结果,具体如表 6 所示。

由表 6 中检验结果可知,20℃ 以上时,卫星湿度的检验结果误差较小,但由于匹配数据较少,在本研究中不做讨论。当温度低于 20℃,卫星湿度的 MAE 和 RMSE 随温度降低而减小,且下降段检验结果优于上升段。在温度 0~20℃ 时,检验结果误差最大,上升段 MAE 为 25.5%, RMSE 为 28.0%,

表 6 2021 年 3—9 月温度对卫星数据检验结果的影响

Table 6 Influence of the verification results of temperature on satellite data from March to September 2021

温度/℃	数据段	MAE/%	RMSE/%	匹配数量/个
$T \geq 20$	上升段	18.3	20.9	10
	下降段	15.2	19.2	5
$20 > T \geq 0$	上升段	25.5	28.0	341
	下降段	20.5	22.9	314
$0 > T \geq -20$	上升段	20.4	23.1	383
	下降段	17.6	20.1	620
$-20 > T \geq -40$	上升段	18.8	21.6	147
	下降段	16.3	19.0	274
$T < -40$	上升段	13.0	18.6	317
	下降段	11.3	16.5	602

下降段 MAE 为 20.5%, RMSE 为 22.9%。温度 0~20℃ 时,包含了近地面以及云层内的高湿数据,匹配时差、距离差对检验结果影响较大,因此气温 0~20℃ 的检验结果 MAE 和 RMSE 偏大。

2.6 各站点的检验结果对比

平漂探空观测在安庆、南昌、赣州、武汉、长沙、宜昌 6 个探空站开展试验,这 6 个探空站在长江中下游呈三角形分布。其中,安庆、武汉、宜昌在长江流域边缘,赣州在最南侧,距离长江较远,长沙、南昌在赣州与长江之间,南昌在东、长沙在西。由于各个站点之间的距离较远,且站点环境的不同,对近地面数据的检验结果影响较大。平漂探空经上升、平漂段观测,气球和探空仪距离施放站点的距离较远,通常大于 400 km。因此,此部分仅对 6 个站点的平漂探空上升段的检验结果(表 7)进行分析。

表 7 2021 年 3—9 月各站点的卫星数据检验结果

Table 7 Verification results of satellite data from various sounding stations from March to September 2021

站点	MAE/%	RMSE/%	R	匹配数量/个
宜昌	17.64	22.81	0.71	46
武汉	17.57	22.62	0.73	69
安庆	18.73	24.32	0.73	81
南昌	19.36	24.79	0.71	77
长沙	19.12	24.78	0.74	43
赣州	18.89	24.35	0.71	92

由表 7 可知,6 个站点的检验结果差异不大,但宜昌、武汉的检验结果相对较好,安庆次之,南昌、长沙、赣州的数据检验结果误差最大。由前面的检验结果可知,当近地面的湿度较大时,检验结果的 MAE 和 RMSE 越大。从地理位置来看,宜昌、武汉、安庆的纬度最高,但安庆东侧沿海最近。因此宜

昌、武汉的检验结果相对较好,安庆受来自东部沿海的暖湿气流影响,湿度偏大,造成检验结果略差。南昌、长沙、赣州 3 个站点纬度较低,因此近地面气温相对较高,造成对流层高度相对较高,故此 3 个站点的平均湿度较大,且在垂直方向上高湿范围比中高纬度地区大。因此,利用南昌、长沙、赣州的上升段数据对卫星大气湿度廓线的检验结果误差偏大。

3 结 论

本研究利用平漂探空上升、下降段观测数据对 FY-3D 的大气湿度廓线数据进行检验,对比分析了不同时段、高度、湿度、温度、地理位置等条件下的平漂探空数据与卫星数据的 MAE、RMSE、R,主要结论如下:

- (1) 利用平漂探空数据对卫星反演的湿度廓线检验,相比于上升段,下降段的检验结果误差较小;
- (2) 由平漂探空下降段数据的检验结果可知,卫星湿度廓线的 MAE 约为 15%,RMSE 约为 20%;
- (3) 相较于清晨、傍晚,在午间、夜间卫星反演的湿度廓线误差较小;
- (4) 卫星反演湿度的 MAE 和 RMSE 随海拔升高而减小,随湿度增大而增大;
- (5) 在湿度 50% 以下,卫星反演的湿度偏大,在湿度 50% 以上,卫星反演的湿度偏小;
- (6) 当温度低于 20℃,卫星湿度检验结果的误差随气温降低而减小。

由于平漂探空施放时间与卫星过境时间的限制,本次检验的匹配时间设置为小于 3 h。此外此次平漂探空观测试验仅在长江中下游区域开展,为了获得足够匹配样本,匹配距离设置为 150 km,以

上匹配条件对卫星湿度反演的结果有一定影响。后续,随着平漂探空技术在全国范围的应用开展,可利用更多时空匹配度较高的探空资料进行深入研究。

参考文献

- 曹广真,周芳成,郑照军,等,2023.静止和极轨卫星陆表温度产品的改进方法[J].气象,49(3):318-326. Cao G Z, Zhou F C, Zheng Z J, et al, 2023. Improvement method of land surface temperature remotely sensed by geostationary and polar orbiting meteorological satellites[J]. Meteor Mon, 49(3): 318-326 (in Chinese).
- 车云飞,马舒庆,杨玲,等,2015.云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响[J].应用气象学报,26(2):193-202. Che Y F, Ma S Q, Yang L, et al, 2015. Cloud influence on atmospheric humidity profile retrieval by ground-based microwave radiometer[J]. J Appl Meteor Sci, 26(2): 193-202 (in Chinese).
- 丁虹鑫,马舒庆,杨玲,等,2018.云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J].气象,44(12):1604-1611. Ding H X, Ma Q S, Yang L, et al, 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 44(12): 1604-1611 (in Chinese).
- 杜明斌,杨引明,丁金才,2009. COSMIC 反演精度和有关特性的检验[J].应用气象学报,20(5):586-593. Du M B, Yang Y M, Ding J C, 2009. Evaluation for retrieving precision and some merits of COSMIC data[J]. J Appl Meteor Sci, 20(5): 586-593 (in Chinese).
- 段晓梅,曹云昌,2018.北斗和GPS反演大气可降水量的对比分析[J].气象,44(12):1575-1582. Duan X M, Cao Y C, 2018. Comparison of atmospheric precipitable water vapor retrieved by Beidou and GPS[J]. Meteor Mon, 44(12): 1575-1582 (in Chinese).
- 范天锡,2002.风云三号气象卫星的特点和作用[J].气象科技,30(6):321-327. Fan T X, 2002. Characteristics and roles of the Fengyun-3 meteorological satellite[J]. Meteor Sci Technol, 30(6): 321-327 (in Chinese).
- 郭启云,李伟,张玉存,2013.基于第8届国际探空比对试验对GTS1-2型探空仪技术改进与对比分析[J].气象科技,41(3):453-458, 505. Guo Q Y, Li W, Zhang Y C, 2013. Comparison of improved GTS1-2 radiosonde with international radiosonde comparison test data[J]. Meteor Sci Technol, 41(3): 453-458, 505 (in Chinese).
- 郭启云,杨荣康,程凯琪,等,2020.基于探空观测的多源掩星折射率质量控制及对比[J].应用气象学报,31(1):13-26. Guo Q Y, Yang R K, Cheng K Q, et al, 2020. Refractive index quality control and comparative analysis of multi-source occultation based on sounding observation[J]. J Appl Meteor Sci, 31(1): 13-26 (in Chinese).
- 郭启云,杨荣康,钱媛,等,2018.气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的全程探空对比分析[J].气象,44(8):1094-1103. Guo Q Y, Yang R K, Qian Y, et al, 2018. Full-range sounding comparison analysis of balloon borne radiosonde rising and parachute carrying radiosonde descending[J]. Meteor Mon, 44(8): 1094-1103 (in Chinese).
- 姬翔,王新,2014.风云卫星高时空分辨率资料在热带气旋监测预报中的应用[J].气象科技,42(4):647-651, 656. Ji X, Wang X, 2014. Application of high resolution satellite data in tropical cyclone monitoring[J]. Meteor Sci Technol, 42(4): 647-651, 656 (in Chinese).
- 雷勇,郭启云,钱媛,等,2018. L波段雷达探空高度评估及其质量标识[J].应用气象学报,29(6):710-723. Lei Y, Guo Q Y, Qian Y, et al, 2018. Evaluation and quality mark of radiosonde geopotential height of L-band radar[J]. J Appl Meteor Sci, 29(6): 710-723 (in Chinese).
- 李伟光,刘少军,李勋,等,2020.卫星遥感在海南气象服务中的应用进展[J].气象科技进展,10(4):114-119. Li W G, Li S J, Li X, et al, 2020. Application progress of satellite remote sensing in Hainan meteorological service[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(4): 114-119 (in Chinese).
- 柳士俊,杨荣康,曹晓钟,等,2022.对流层平流层往返式平漂探空气球系统的动力热力过程理论分析与数值试验[J].大气科学,46(4):788-804. Liu S J, Yang R K, Cao X Z, et al, 2022. Analysis and numerical experiment of the horizontal drift round-trip sounding balloon's dynamic and thermal process in the adjacent space[J]. Chin J Atmos Sci, 46(4): 788-804 (in Chinese).
- 钱媛,2019.往返平漂式探空数据的质量控制及评估研究[D].南京:南京信息工程大学. Qian Y, 2019. Quality control and evaluation of round-trip flat drift sounding data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).
- 钱媛,马旭林,郭启云,等,2019.基于FNL和GRAPES分析场的探空温度数据的误差分析[J].气象,45(10):1464-1475. Qian Y, Ma X L, Guo Q Y, et al, 2019. Error analysis of sounding temperature data based on the FNL and GRAPES analysis fields[J]. Meteor Mon, 45(10): 1464-1475 (in Chinese).
- 瞿建华,鄢俊洁,王燕婷,2019.基于FY-3D的MERSI全球晴空数据合成技术[J].气象科技,47(4):539-545. Qu J H, Yan J J, Wang Y T, 2019. Global clear-sky data synthesis technology based on FY-3D MERSI-II instrument[J]. Meteor Sci Technol, 47(4): 539-545 (in Chinese).
- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等,2013.大气物理学:第2版[M].北京:北京大学出版社. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al, 2013. Atmospheric Physics[M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press (in Chinese).
- 唐飞,陈凤娇,诸葛小勇,等,2021.利用卫星遥感资料分析台风“烟花”(202106)的影响过程[J].大气科学学报,44(5):703-716. Tang F, Chen F J, Zhuge X Y, et al, 2021. Analysis of influence process of Typhoon In-fa (202106) based on satellite remote sensing data[J]. Trans Atmos Sci, 44(5): 703-716 (in Chinese).
- 王丹,王金成,田伟红,等,2020.往返式探空观测资料的质量控制及不确定性分析[J].大气科学,44(4):865-884. Wang D, Wang J C, Tian W H, et al, 2020. Quality control and uncertainty analysis of return radiosonde data[J]. Chin J Atmos Sci, 44(4): 865-884 (in Chinese).

- 王富,陆其峰,于天雷,2021. 气象卫星应用效益评估方法及其应用[J]. 气象科技,49(3):348-354. Wang F, Lu Q F, Yu T L, 2021. Methods for benefit evaluation of meteorological satellite application[J]. Meteor Sci Technol, 49(3):348-354(in Chinese).
- 王金成,王丹,杨荣康,等,2021. 基于高分辨率数值天气模式的往返平飘式探空轨迹预测方法及初步评估[J]. 大气科学,45(3):651-663. Wang J C, Wang D, Yang R K, et al, 2021. A return radiosonde trajectory forecast method and its preliminary evaluation based on high resolution numerical weather prediction model[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3):651-663(in Chinese).
- 王瑞文,王金成,王丹,等,2023. 往返平飘式探空观测系统对 CMA-MESO 的影响研究[J]. 气象,49(1):52-61. Wang R W, Wang J C, Wang D, et al, 2023. Study on the influence of return sounding observation system based on CMA-MESO[J]. Meteor Mon, 49(1):52-61(in Chinese).
- 王素娟,崔鹏,张鹏,等,2020. FY-3C/VIRR 海表温度产品及质量检验[J]. 应用气象学报,31(6):729-739. Wang S J, Cui P, Zhang P, et al, 2020. FY-3C/VIRR sea surface temperature products and quality validation[J]. J Appl Meteor Sci, 31(6):729-739(in Chinese).
- 王英,熊安元,2015. L 波段探空仪器换型对高空湿度资料的影响[J]. 应用气象学报,26(1):76-86. Wang Y, Xiong A Y, 2015. Effects of radiosonde system changing to L-band radar digital radiosonde on humidity measurements in China[J]. J Appl Meteor Sci, 26(1):76-86(in Chinese).
- 杨天杭,胡秀清,徐寒列,等,2019. 基于交叉比对的风云三号 D 星红外高光谱大气探测仪辐射定标性能评估[J]. 光学学报,39(11):377-387. Yang T H, Hu X Q, Xu H L, et al, 2019. Radiation calibration accuracy assessment of FY-3D hyperspectral infrared atmospheric sounder based on inter-comparison[J]. Acta Optica Sin, 39(11):377-387(in Chinese).
- 姚雯,马颖,高丽娜,2017. L 波段与 59-701 探空系统相对湿度对比分析[J]. 应用气象学报,28(2):218-226. Yao W, Ma Y, Gao L N, 2017. Comparison of relative humidity data between L-band and 59-701 sounding system[J]. J Appl Meteor Sci, 28(2):218-226(in Chinese).
- 余君,李庆祥,廖捷,等,2016. 中国区域高空三种气温、湿度资料交叉对比[J]. 气象,42(6):743-755. Yu J, Li Q X, Liao J, et al, 2016. Cross comparison of three kinds of upper air temperature and humidity data over China[J]. Meteor Mon, 42(6):743-755(in Chinese).
- 张旭鹏,郭启云,杨荣康,等,2021. 基于“上升-平漂-下降”探空资料的长江中下游暴雨同化试验[J]. 气象,47(12):1512-1524. Zhang X P, Guo Q Y, Yang R K, et al, 2021. Assimilation experiment of rainstorm in the middle and lower reaches of the Yangtze River based on “up-drift-down” sounding data[J]. Meteor Mon, 47(12):1512-1524(in Chinese).
- 张鑫,王秋萍,马旭林,等,2023. 新型往返平漂式探空资料对长江中下游数值预报质量影响的研究[J/OL]. 2023-06-10. 大气科学. <http://www.iapjournals.ac.cn/dqkx/cn/article/doi/10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22224>. Zhang X, Wang Q P, Ma X L, et al, 2023. Study of the forecast sensitivity to new Round-trip flat drift sounding observations in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J/OL]. 2023-06-10. Chin J Atmos Sci. <http://www.iapjournals.ac.cn/dqkx/cn/article/doi/10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22224>(in Chinese).
- 张瑜,张升伟,王振占,等,2017. FY-3 卫星大气湿度微波探测技术发展[J]. 上海航天,34(4):52-61. Zhang Y, Zhang S W, Wang Z Z, et al, 2017. Technology development of atmospheric humidity sounding of FY-3 satellite[J]. Aeros Shanghai, 34(4):52-61(in Chinese).
- 赵静,曹晓钟,代桃高,等,2017. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J]. 气象,43(1):101-107. Zhao J, Cao X Z, Dai T G, et al, 2017. Comparative analysis of cloud observed by millimeter wave cloud radar and sounding[J]. Meteor Mon, 43(1):101-107(in Chinese).
- 周雪松,郭启云,夏元彩,等,2023. 基于往返式平漂探空的 FY-3D 卫星反演温度检验[J]. 应用气象学报,34(1):52-64. Zhou X S, Guo Q Y, Xia Y C, et al, 2023. Inspection of FY-3D satellite temperature data based on horizontal drift round-trip sounding data[J]. J Appl Meteor Sci, 34(1):52-64(in Chinese).
- 周雪松,田泓,2022. 三种新型探空仪的性能对比与分析[J]. 内蒙古气象,(6):44-48. Zhou X S, Tian H, 2022. Performance comparison and analysis of three new types of sonde[J]. Meteor J Inner Mongolia, (6):44-48(in Chinese).
- 朱爱军,胡秀清,林曼筠,等,2018. 风云三号 D 气象卫星全球数据获取方法及数据分发[J]. 海洋气象学报,38(3):1-10. Zhu A J, Hu X Q, Lin M Y, et al, 2018. Global data acquisition methods and data distribution for FY-3D meteorological satellite[J]. J Shandong Meteor, 38(3):1-10(in Chinese).
- 朱元竞,李万彪,陈勇,1998. GMS-5 估计可降水量的研究[J]. 应用气象学报,9(1):8-14. Zhu Y J, Li W B, Chen Y, 1998. Study of total precipitable water by GMS-5[J]. Quart J Appl Meteor, 9(1):8-14(in Chinese).

(本文责编:俞卫平)