

王金成,王丹,王瑞文,等,2024.往返平飘式探空在 CMA-MESO 三维变分中的同化及对模式预报的影响[J].气象,50(2):159-169. Wang J C, Wang D, Wang R W, et al, 2024. Assimilation of round-trip horizontal drift radiosonde data in CMA-MESO 3DVar and its impact on model forecast[J]. Meteor Mon, 50(2):159-169(in Chinese).

往返平飘式探空在 CMA-MESO 三维变分中的 同化及对模式预报的影响^{*}

王金成^{1,2} 王 丹^{1,2} 王瑞文^{1,2} 谭 娟³ 容 娜⁴

1 中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081

2 灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 中国气象局气象发展与规划院,北京 100081

4 新疆克拉玛依气象局,克拉玛依 834000

提 要:往返平飘式探空通过一次探空气球施放实现“上升段-平飘段-下降段”三段观测,其下降段能实现在 06 时(世界时,下同)和 18 时自动垂直加密观测大气,具备提升区域高分辨率快速同化循环预报系统在 06 时和 18 时的预报技巧潜力。为了实现往返平飘式探空在区域高分辨率模式中的同化,分析其对预报的影响,初步提出了“选取模式层最接近观测”的垂直稀疏化方法来预处理资料,深入分析了稀疏化对同化效果的影响,论证了资料垂直稀疏化对于同化应用的必要性;在此基础上,开展了为期 1 个月的批量同化影响试验,着重分析了往返平飘式探空在长江中下游区域的组网观测对 CMA-MESO 模式预报技巧的影响。稀疏化敏感性试验结果表明,同化不稀疏化的往返平飘式探空相比同化传统业务探空,分析和预报误差显著增加,降水预报评分也显著降低,相反,“选取最接近模式层”数据的垂直稀疏化方案能提高模式的分析和预报技巧,表明往返平飘式探空同化前必须进行垂直稀疏化。批量同化试验结果表明,在冷启动时刻(00 时和 12 时,为常规探空释放时刻),同化往返平飘式探空(上升段)相对同化传统业务探空,分析误差和预报误差变化较小。但在暖启动时刻(03、06、09、15、18、21 时,无常规探空释放时刻),增加往返平飘式探空下降段数据,相比控制试验,分析场精度提高了约 0.4%。此外,0~12 h 累计降水预报的 ETS 评分变化较小,但 12~24 h 累计降水预报在 0.1、1.0、5.0、10.0、25.0 mm 量级降水 ETS 评分提高了约 0.5%,在 50.0 mm 量级的降水 ETS 评分提高了约 2.3%。总体而言,同化往返平飘式探空对于区域高分辨率快速同化循环预报系统在暖启动时刻的降水预报技巧有正贡献。

关键词:往返平飘式探空,CMA-MESO,垂直稀疏化,三维变分,资料同化

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.110501

Assimilation of Round-Trip Horizontal Drift Radiosonde Data in CMA-MESO 3DVar and Its Impact on Model Forecast

WANG Jincheng^{1,2} WANG Dan^{1,2} WANG Ruiwen^{1,2} TAN Juan³ RONG Na⁴

1 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081

3 CMA Institute for Development and Programme Design, Beijing 100081

4 Karamay Meteorological Office of Xinjiang, Karamay 834000

Abstract: The round-trip horizontal drift radiosonde can do the three-stage observation of “ascending-drifting-descending stages” by releasing one sounding balloon at only one time. In particular, in the descending stage the radiosonde can increase the vertical observation of the atmosphere at 06 UTC and 18 UTC

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1506205、2022YFC3004002)共同资助

2023 年 2 月 14 日收稿; 2023 年 9 月 4 日收修定稿

第一作者:王金成,主要从事地球系统数值预报和资料同化研究. E-mail: wangjc@cma.gov.cn

respectively, and it has the potential to significantly improve the prediction skills of the regional high-resolution rapid assimilation cycle prediction system at 06 UTC and 18 UTC. In order to achieve the assimilation of the round-trip horizontal drift sounding in the high-resolution regional model and analyze its impacts on the forecast, one vertical thinning method by “selecting the closest observation according to the model layer” for assimilation is preliminarily proposed, and the influence of this thinning method on model analysis is deeply analyzed. On this basis, a one-month batch assimilation impact experiment was carried out by using the networked observations in the middle and lower reaches of Yangtze River, and the impacts on model forecasts are investigated in detail in this paper. The results of the thinning sensitivity tests show that, compared with the assimilation of traditional operational soundings, the analysis and prediction root mean square errors (RMSE) of the assimilation of non-thinning round-trip horizontal drift radiosonde observations are significantly increased, while the precipitation prediction scores are significantly reduced. On the contrary, the model performances in analysis and prediction fields are improved by assimilating the data after vertical thinning, which indicates that the vertical thinning of round-trip horizontal drift radiosonde observations must be carried out before assimilation. The results of batch experiments show that at the cold start time (00 UTC and 12 UTC, time with conventional radiosonde), the assimilation of round-trip horizontal drift sounding (ascending stage) observations has smaller changes in analysis error and prediction error relative to assimilation of traditional operational radiosonde data. At the warm start time (03 UTC, 06 UTC, 09 UTC, 15 UTC, 18 UTC, 21 UTC, time without conventional radiosonde), however, compared with the control experiment, the accuracy of the analysis field is improved by about 0.4% by assimilating the data of descending section of the horizontal drift sounding. The ETS scores of the 0–12 h accumulated precipitation forecast change less, but the ETS scores of the 12–24 h accumulated precipitation forecast at 0.1, 1.0, 5.0, 10.0, 25.0 mm thresholds increase by about 0.5%. Moreover, the ETS score at 50.0 mm threshold increases by about 2.3%. All above results show that the round-trip horizontal drift sounding must be thinned before assimilation, and the assimilation of the round-trip horizontal drift sounding can improve the precipitation forecast skill of the regional high-resolution rapid assimilation cycle forecast system at the warm start time.

Key words: round-trip horizontal drift radiosonde, CMA-MESO, vertical thinning scheme, 3DVar, data assimilation

引 言

探空观测是目前全球唯一能够同时直接观测高空大气质量场(气压、温度、湿度)和运动场(风场)的观测系统,并且其资料质量稳定可靠、垂直分辨率高(于晓晶等,2018),因此成为了数值同化应用的基础核心观测资料(Radnóti et al, 2012; 郝民等, 2014; Ingleby et al, 2016)。在资料同化中,探空资料还是卫星辐射率和飞机报温度等资料偏差订正的锚定资料(Cucurull et al, 2014; 王瑞文等, 2017; 吴琼等, 2020)。但受限于人力物力,全球约三分之二的探空仍采用每日定常 00 时和 12 时(世界时,下同)两次的传统观测模式(Choi et al, 2015),其时间分辨率

低,且远不能满足中小尺度灾害天气系统的监测和预测需求。为此,近年来我国在汛期或重大天气过程中启用了 06 时探空加密观测模式,并且实现了探空加密观测在区域高分辨率模式中的同化应用(高笃鸣等, 2018; 王丹等, 2019; 李秋阳等, 2022),显著提高了区域模式在 06 时起报的强降水预报技巧。但是,06 时探空加密观测成本巨大,不能维持长久观测。为了在不显著增加成本的情况下,实现对 06 时和 18 时探空的连续观测,满足数值天气预报对探空观测的需求,提高数值天气预报对中小尺度灾害性天气的预报技巧,中国气象局气象探测中心创新性地提出了往返平飘式探空探测技术和观测模式,即通过一次探空气球施放,获取“上升段 1 h—平飘段 4 h—下降段 1 h”三段观测(曹晓钟等, 2019),实现了

探空观测的间接时空加密,获得的探测垂直廓线数量加倍,同时能获取平流层大气高频次连续观测资料。为了推动往返平飘式探空观测系统的发展,开展了模拟观测系统影响试验(Observing System Simulation Experiments, OSSEs),试验结果表明,往返平飘式探空在全国组网的情况下,其增加的下降段模拟探空观测,能够有效提高 CMA-MESO 在 06 时和 18 时起报的降水预报技巧,不同降水量级的 ETS 评分提高了约 2%~5%(王瑞文等,2023),这一结论夯实了往返平飘式探空观测站网建设的重要性。

自 2018 年以来,中国气象局气象探测中心在长江中下游地区建设了包含 6 个站的往返平飘式探空区域观测网,并于 2018 年、2019 年和 2021 年开展了不同时间长度的区域组网观测试验,获取了大量的观测资料。王丹等(2020)针对往返平飘式探空观测特点,设计了往返平飘式探空质量控制方案,并利用 2018 年试验观测数据评估了质量控制的效果,分析了往返平飘式探空各变量各阶段的不确定性,试验数据的不确定性分析表明往返平飘式探空探测精度达到了世界气象组织规定的突破目标,部分探测要素甚至实现了理想目标,探测资料具有良好的可用性,具备很好的应用前景。以上研究为往返平飘式探空在数值天气预报中的同化应用奠定了基础。

然而,往返平飘式探空获得的高垂直分辨率秒级观测数据的同化技术和实际试验观测数据同化对数值天气预报的影响和效益究竟如何?目前而言,这方面的研究相对较少。张旭鹏等(2021)利用 WRF(weather research and forecast)模式及 WRF-DA(WRF data assimilation)同化系统针对长江中下游一次暴雨个例开展了同化往返平飘式探空下降段数据试验,结果表明同化往返平飘式探空下降段观测数据能够提高暴雨的预报技巧。但该研究仍然采用了传统探空观测数据的稀疏化方案(李庆雷等,2018),并未结合模式本身的垂直分层特点。为了深入认识往返平飘式探空下降段数据对数值预报的影响,并实现往返平飘式探空在数值天气预报中的业务应用,还需要更多的数值试验来评估和验证往返平飘式探空下降段观测数据同化对数值预报技巧的影响,且在同化过程中考虑资料的处理策略,特别是结合模式分层的垂直稀疏化方案。因此,本文首先结合理论分析和数值试验探讨了往返平飘式探空同化前开展垂直稀疏化的必要性,提出了一种“选取模

式层最接近观测”的稀疏化方案。进而,利用 CMA-MESO 快速同化循环预报系统开展了为期 1 个月的批量试验,系统性评估了往返平飘式探空下降段资料同化对区域高分辨率数值天气预报的影响。

1 观测资料与模式介绍

选取 2021 年 7 月 1—31 日的往返平飘式探空试验观测数据,共有 6 个观测站,分别是安庆、长沙、武汉、赣州、南昌和宜昌,其位置分布如图 1 所示。2021 年 7 月,每个站共计开展了 62 次往返平飘式探空观测,共成功开展下降段观测 243 次,平均单站成功实施观测约 41 次。但每次下降段的有效观测数据相对上升段明显偏少,主要原因是在现有区域组网条件下,接收站密度不足,加之山地等因素影响导致了下降段信号丢失的高度比较高,最终导致从地面到对流层中层(500 hPa)的下降段观测较少。

利用 CMA-MESO V5.1 区域快速同化循环预报系统开展往返平飘式探空同化试验,采用的同化方法是三维变分同化技术(3DVar)。该模式目前可同化的观测资料包括常规探空、地面、飞机报、船舶、云导风、雷达径向风、风廓线雷达资料以及 GPS/PW 观测。CMA-MESO V5.1 版本的同化循环间隔为 3 h,空间分辨率为 3 km,垂直层次为 50 层,模式层顶高为 33 000 m。模式积分时间步长设置为 30 s,采用 3 h 循环同化,每 12 h 冷启动一次,冷启动背景场是美国 NCEP GFS (<https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>) 模式提供的 6 h 预报场。模式技术细节可参考黄丽萍等(2022)。

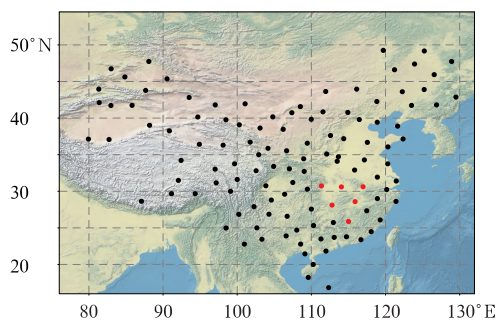


图1 往返平飘式探空组网观测现状分布(红点)与传统业务探空站点分布(黑点和红点)

Fig. 1 Distribution of round-trip horizontal drift radiosonde network (red dots) and operational radiosonde network (both red and black dots)

2 质量控制、观测误差和垂直稀疏化

2.1 质量控制

往返探空的质量控制方案包含两部分:一是采用王丹等(2020)研发的面向往返平飘式探空资料本身的质量控制方法,目的是在观测资料端对试验资料进行严格的质量控制,剔除异常数据和不能满足同化要求的数据;二是在同化系统内采用背景场检查方案对质量做进一步约束,具体方案如下:

$$[y - H(x_b)]^2 \geq \alpha(\sigma_a^2 + \sigma_b^2)$$

式中: y 是观测变量,在本文中为温度、气压、湿度和风; x_b 是分析变量的背景值; H 是观测算子,表示模式格点向观测点的水平和垂直插值算法; σ_a 是观测误差均方根; σ_b 是观测变量的背景误差均方根; α 表

示阈值参数。 $[y - H(x_b)]$ 称为新息增量,一般也用 OMB 表示。当前,CMA-MESO V5.1 3DVar 中的背景检查质量控制中没有考虑 σ_b 的影响,其中,风场的阈值参数 $\alpha = 4.0$,温度的阈值参数 $\alpha = 2.5$,湿度的阈值参数 $\alpha = 3.5$ 。

2.2 观测误差设置

观测误差是变分资料同化中的核心关键参数之一,观测误差设置对模式分析场的精度具有很大的影响。由于目前往返平飘式探空只有 6 个站的区域组网观测资料,尚无法采用精度较高的 H-L 方法(王金成等,2015)估计其观测误差,但已有研究表明往返平飘式探空上升段和下降段各变量的不确定性与传统探空资料相当(王丹等,2020)。因此本研究仍然采用 CMA-MESO 3DVar 系统中业务探空资料的观测误差设置,观测误差如图 2 所示。

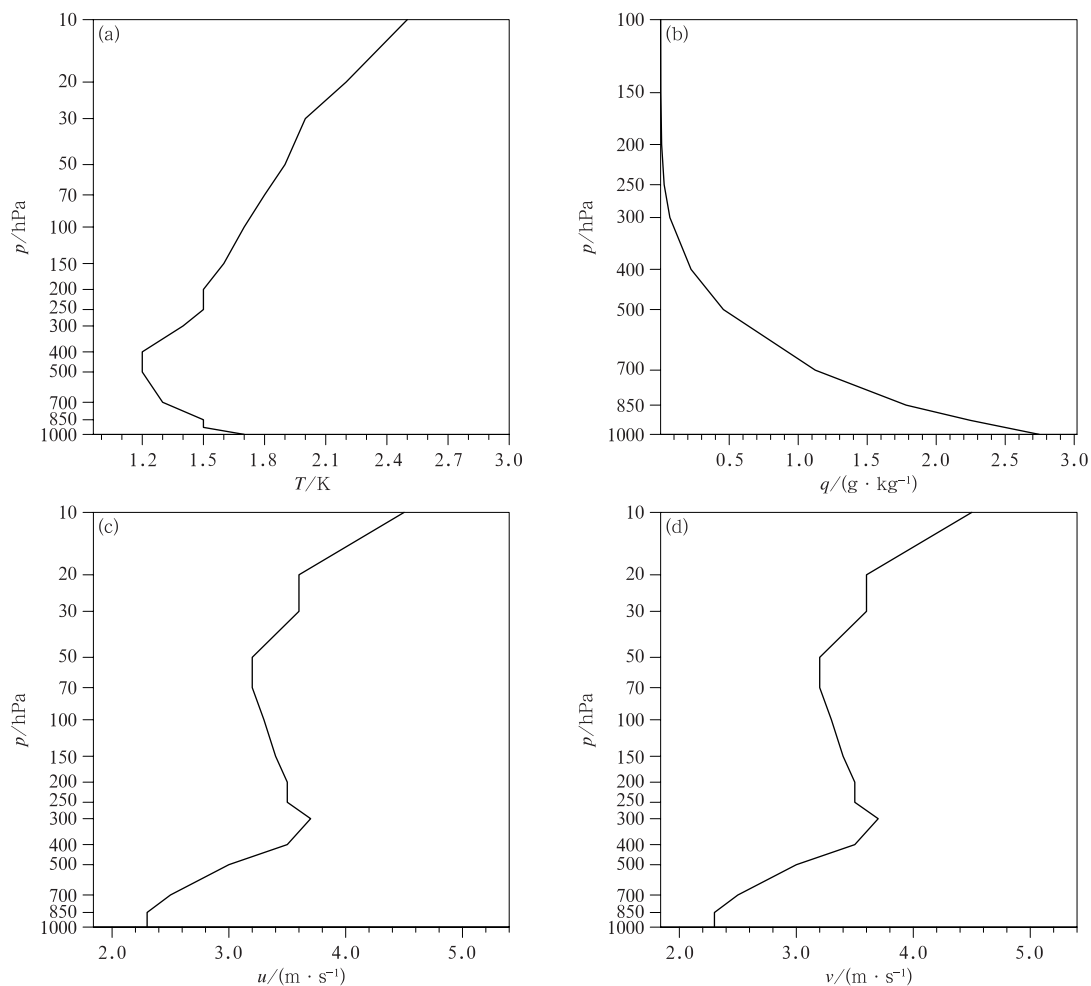


图 2 CMA-MESO V5.1 3DVar 同化系统中探空观测资料的观测误差
(a) 温度, (b) 湿度, (c) u 风, (d) v 风

Fig. 2 Observation error of radiosonde in 3DVar of CMA-MESO V5.1
(a) temperature, (b) humidity, (c) u , (d) v

2.3 垂直稀疏化

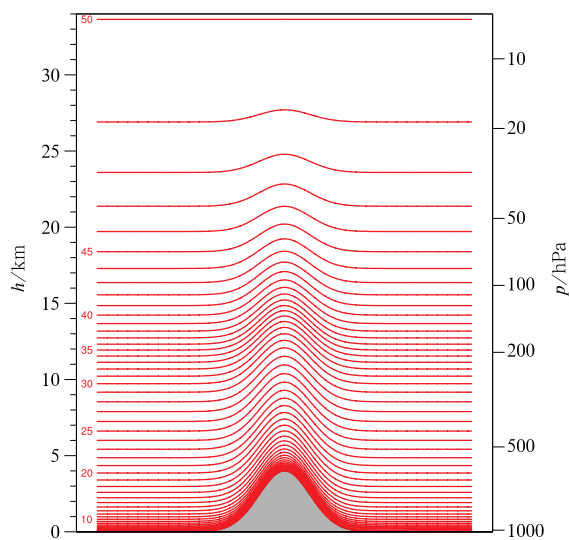
往返平飘式探空同化前需要进行垂直稀疏化。一方面,往返平飘式探空垂直分辨率与模式分辨率差异较大。往返平飘式探空采用卫星导航定位系统(北斗+GPS)定位探空所在空间位置,其位置观测精度大幅度提高,可以提供秒级的探空定位和观测数据,其上升段和下降段垂直分辨率平均约为 15 m。目前而言,数值模式垂直分辨率相对较低,以 CMA-MESO V5.1 版本为例,其垂直共有 50 层,模式层顶高度为 33 000 m,模式层厚度从地面向高空逐渐增大(如图 3 所示),近地面垂直层厚度约为 50~100 m,模式层顶附近模式层厚度增大到 6.7 km 附近。然而,往返平飘式探空观测的垂直分辨率(~ 15 m)明显高于模式的垂直分辨率,二者相差两个数量级。如果不对观测进行垂直稀疏化,观测中相对较高分辨率的垂直信息在模式中将被视为噪音,与模式不协调,造成模式变量间的不协调,影响预报效果,也可能引起模式积分不稳定。另一方面,往返平飘式探空高垂直分辨率观测的观测误差存在明显垂直相关性,而当前主流业务同化系统中并未考虑观测误差垂直相关的影响。因此如果往返平飘式探空不进行垂直稀疏化,将在同化系统中过

高估计往返平飘式探空的作用,相当于显著减小观测误差,这将导致背景误差与实际观测误差不协调,分析增量中观测权重过高,引起分析误差增大,也会加重分析场与模式不协调,引起预报误差显著增加。

图 4 是宜昌、武汉和长沙站稀疏化后业务探空资料(黑线)、原始往返平飘式探空(红线)和稀疏化后往返平飘式探空(蓝线)温度与模式背景差(OMB)的垂直廓线。从图中可发现,往返平飘式探空原始资料的 OMB 相比业务探空和稀疏化后的往返平飘式探空 OMB,高频噪音明显较大,特别是高层;此外,往返平飘式探空原始资料 OMB 在对流层内有模式不可分辨的信号,如图 4c 中 700~500 hPa,未进行稀疏化的资料(红线)明显存在很多高频信号,这些信号并不是观测噪音,而是观测中存在模式背景场无法分辨的高频信号。无论是从模式的理论特征分析,还是结合实际分析,结论均认为同化往返平飘式探空前必须进行垂直稀疏化。湿度和风场情况与温度相同(图略)。

为了更深入地理解垂直稀疏化的必要性和对预报的影响,采用数值试验方法来进一步定量验证垂直稀疏化的重要作用。在模式物理过程和其他参数不变的情况下,初始场的精度和协调性对降水预报具有决定性作用,因此,稀疏化作用可以通过分析场误差和降水预报技巧来体现。为此设计了三组个例试验,具体试验方案如表 1 所示。本文借鉴掩星观测(GNSS RO)资料垂直稀疏化的常用方法,即根据模式层高度,“选取最接近每个模式层”的往返平飘式观测数据,因为该稀疏化方法能避免模式层间观测资料高频信息对模式初始场造成的不协调问题,因此,在 GNSS RO 折射率和弯角同化中得到广泛采用(Liu and Xue, 2014; Wang et al, 2020)。

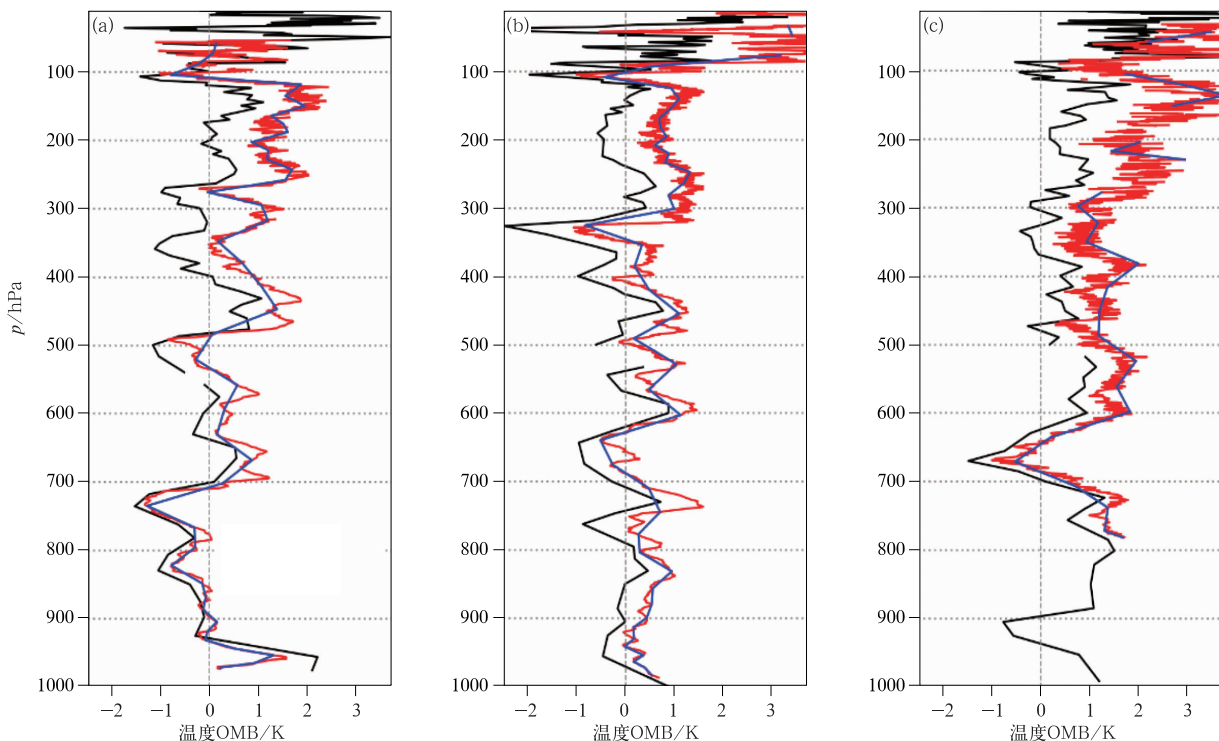
利用欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析资料作为参考,计算三组试验在往返平飘式探空的组网周边区域($20^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$)的分析场的均方根误差,比较三组试验分析误差的差异。图 5 是 2021 年 7 月 2 日 00 时所选区域内,试验 ALL 与 THIN 的温度分析场的均方根误差与试验 CTRL 的相对差异。从图 5 中可以发现,试验 ALL 温度分析误差在 750~450 hPa 和 250 hPa 以上明显大于试验 CTRL,相对增大 2% 左右,而试验 THIN 温度分析误差与控制试验 CTRL 的分析基本相当。结果表明,同化原始高垂直分辨率的往返



注:模式垂直坐标为高度地形追随坐标。

图 3 CMA-MESO V5.1 垂直层次分布示意图(共 50 层)

Fig. 3 Vertical layers of CMA-MESO V5.1 Model (totally 50 layers) with height-based terrain-following coordinate



注:黑线为业务探空资料,红线为往返平飘式探空原始观测资料,蓝线为往返平飘式探空稀疏化后得的资料。

图 4 探空资料温度观测与模式背景场温度的 OMB 垂直廓线
(a)宜昌,(b)武汉,(c)长沙

Fig. 4 Vertical distribution of OMB between radiosonde and model background
(a) Yichang Station, (b) Wuhan Station, (c) Changsha Station

表 1 数值试验方案设计

Table 1 Numerical test schemes

试验名称	试验说明
CTRL	CMA-MESO V5.1 业务中同化的资料,含业务探空资料
ALL	将往返平飘式探空上升段原始资料替换相应站点的业务探空资料
THIN	将稀疏化后的往返平飘式探空上升段资料替换相应站点的业务探空资料

平飘式探空,分析误差会有不同程度的增大;然而,对往返平飘式探空进行稀疏化后,温度分析误差会有明显减小。其他变量结果与温度变量结果相同,在此不再赘述。上述结果进一步说明往返平飘式探空高垂直分辨率资料同化前需要进行垂直稀疏化。

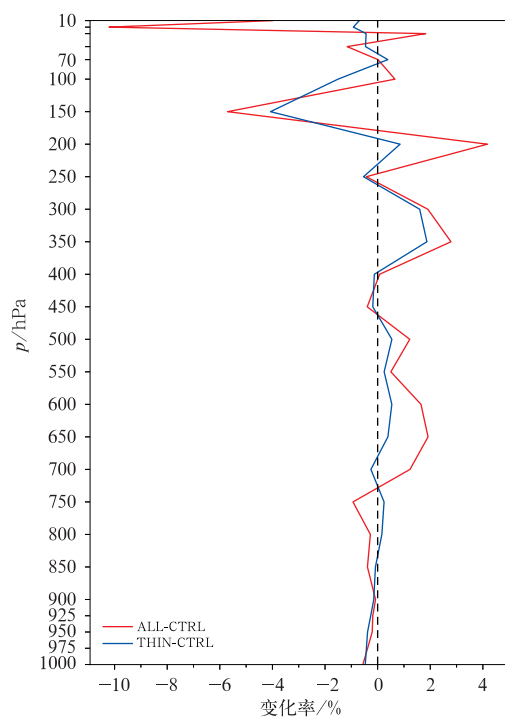
采用全国 10 796 个国家级自动观测站的降水观测数据,对上述三组试验进行降水评分检验,降水检验区域与误差分析的区域相同。图 6 是三组试验在 2021 年 7 月 2 日 00 时起报的 24 h 累计降水 ETS 评分。从图中可以发现,试验 ALL 预报的 24 h 累计降水 ETS 评分明显低于试验 CTRL 和 THIN,而试验 THIN 与 CTRL 预报的 24 h 累计降水 ETS 评分基本相当。该结果表明,往返平飘式探空不进行垂直稀疏化会明显降低模式降水评分,进

一步佐证了理论分析结果,说明往返平飘式探空这类高垂直分辨率观测资料同化前需要进行垂直稀疏化。

此外,“选取与模式层接近”的往返平飘式探空观测资料用于同化的稀疏化方案效果明显,可以用于往返平飘式探空上升段和下降段资料同化。基于此,在 CMA-MESO V5.1 3DVar 同化系统中采用该稀疏化方案,对往返平飘式探空开展批量同化试验,评估往返平飘式探空下降段资料对数值天气预报的影响,为实现其在业务中的应用提供量化支撑。

3 批量试验结果分析

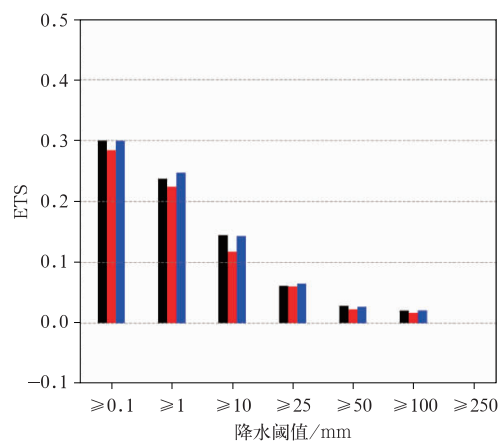
为了明确往返探空资料同化为数值天气预报带来的效益,采用第 2 节中的质量控制、稀疏化和观测



注:黑色虚线是零参考线。

图5 在区域(20°~37°N,105°~125°E)内,试验 ALL(红)和 THIN(蓝)相对于试验 CTRL 的温度分析场均方根误差变化率的垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of improvement rate of root mean square error (RMSE) of temperature analysis field for ALL test (red) and THIN test (blue) against CTRL test in the domain of (20°–37°N, 105°–125°E)



注:模式起报时间为2021年7月2日00时。

图6 CTRL(黑)、ALL(红)与 THIN(蓝)三组试验的24 h累计降水 ETS 评分

Fig. 6 ETS scores of the 24 h accumulated precipitation of CTRL (black), ALL (red) and THIN (blue) tests with the model forecast at 00 UTC 2 July 2021

误差,利用 CMA-MESO V5.1 快速循环同化预报系统,进行了2021年7月1—31日为期1个月的批量试验。具体试验设计分别为表1中的控制试验 CTRL 和影响试验 THIN。

对比分析00时和12时,同化往返平飘式探空和同化业务探空的分析和预报结果非常接近,两者差异在0.1%以内,这从侧面表明往返平飘式探空上升段资料(00时和12时对应上升段观测)的观测精度和业务探空相当。由于往返平飘式探空相比业务探空增加了下降段廓线观测,因此本研究中着重分析下降段往返平飘式探空对分析和预报的影响。

图7是CMA-MESO V5.1 暖启动时刻(03、06、09、15、18、21时)同化的往返式探空观测数据量,分别对应3 h 同化时间窗内往返平飘式探空下降段数据量。从图7中可以发现,经过稀疏化和质量控制后,能够同化的往返平飘段下降段数据十分有限,每3 h 平均同化数据量仅有64个数据,也即相比业务探空,每天增加的数据量平均为384个数据,基本相当于2条完整探空站的同化观测数量。经过分析,这是由两个方面原因造成的:一是7月观测试验中6个站成功下降的观测仅有243次,也就是成功下降观测的比率为65.3%,二是下降段观测的数据结束高度较高,平均仅到500 hPa 附近高度。目前

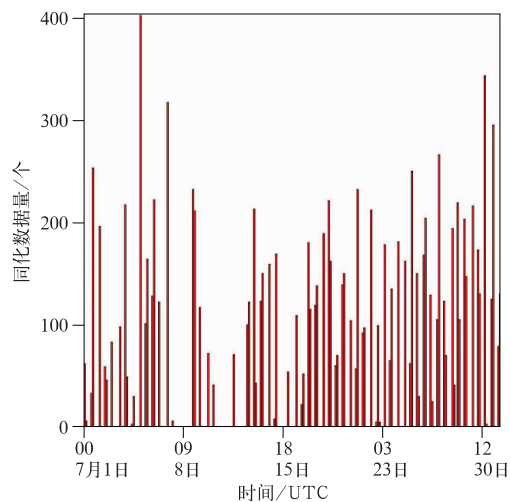


图7 暖启动时刻(03、06、09、15、18、21时)

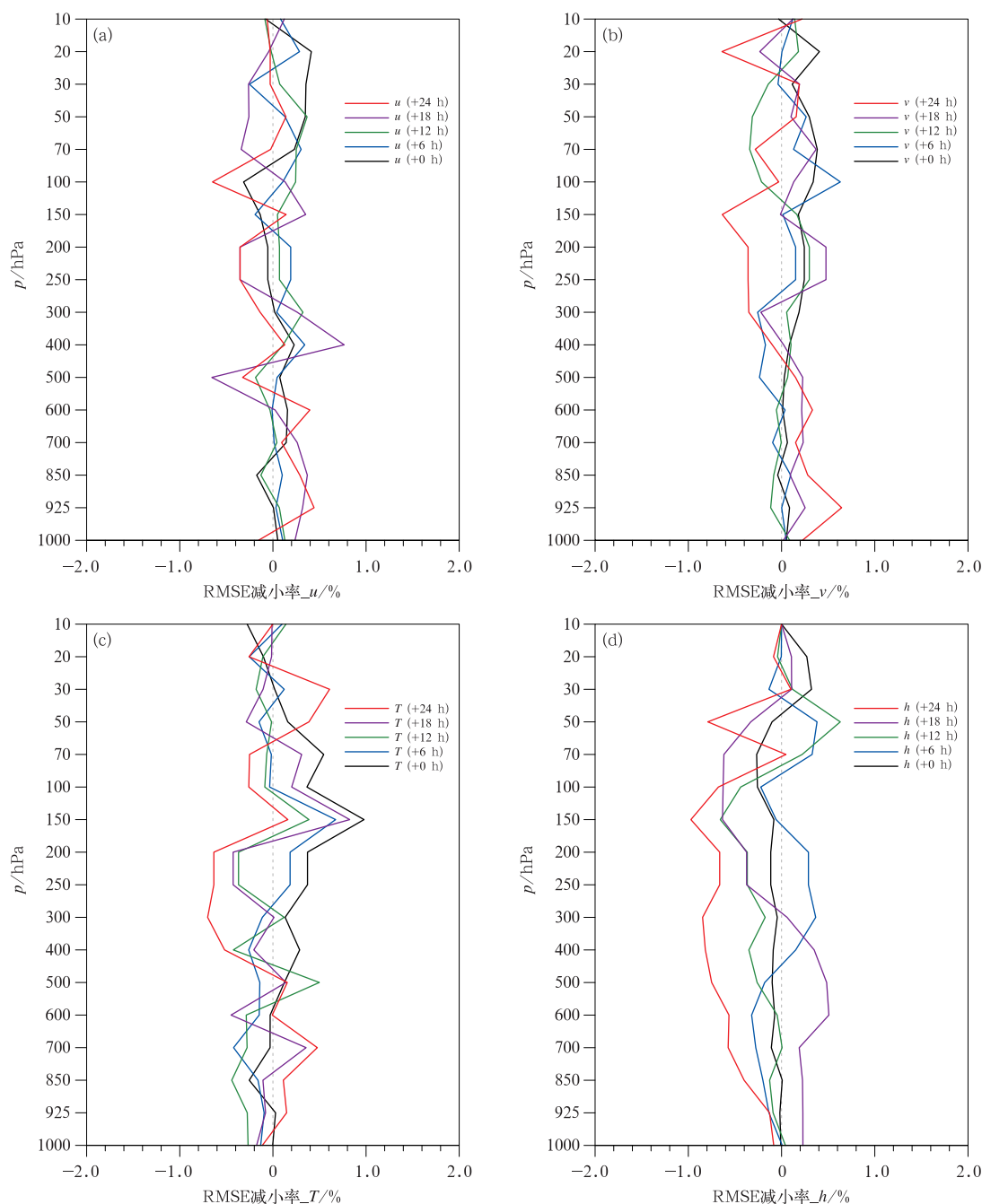
每3 h 同化的往返平飘式探空数据量
(包括温度、湿度、 u 风和 v 风)

Fig. 7 Assimilated observation number of round-trip horizontal drift sounding data (temperature, humidity, u and v) every 3 hours in 3DVar at warm start time (03 UTC, 06 UTC, 09 UTC, 15 UTC, 18 UTC, 21 UTC)

CMA-MESO V5.1 的模式垂直层次设计呈现“低层密集、高层稀疏”的特点,低层探测数据不足加上稀疏化策略的影响,最终导致经过稀疏化后的观测数据量就变得十分有限。

3.1 往返平飘式探空同化对高空预报的影响

图 8 是 06 时试验 THIN 高空场分析和预报均方根误差相对试验 CTRL 的分析和预报均方根误差



注:负值表示误差减小,正值表示误差增大,黑线是分析时刻,彩线代表不同预报时次,此处为 06 时起报结果。

图 8 THIN 试验相对于 CTRL 试验的高空分析场和预报场的均方根误差减小率的垂直分布

(a) u 风, (b) v 风, (c) 温度, (d) 位势高度

Fig. 8 Vertical distribution of reduction rate of RMSE at analysis field and prediction field of THIN test against CTRL test

(a) u , (b) v , (c) temperature, (d) geopotential height

的减小率,负值表示 THIN 的均方根误差相比 CTRL 减小,正值表示 THIN 的均方根误差相比 CTRL 增大。从图中可以看出,试验 THIN 各变量分析和预报误差与试验 CTRL 相比差异非常小,差异仅在 $-0.5\% \sim 0.5\%$ 。并且试验 THIN 相比 CTRL 分析和预报误差差异较大的层次在 600 hPa 以上,这和往返平飘式探空下降段数据主要在 500 hPa 以上有关。其他时刻结果与 06 时的结果十分相似,此处图略。结果表明,往返平飘式探空下降段对 CMA-MESO 高空场分析和预报的影响相对较小,整体误差减小率仅为 0.1% 。

3.2 往返平飘式探空同化对降水预报的影响

图 9 是暖启动时刻(03、06、09、15、18、21 时)起报的结果,计算了试验 THIN 预报的 12 h 累计降水 ETS 评分相比试验 CTRL 的改进率,正值表示 THIN 相比 CTRL 试验降水预报技巧有提高,负值则为降低。从图 9a 中可以发现,暖启动时刻起报的 0~12 h 累计降水,试验 THIN 在量级为 0.1、1.0、50.0 mm 的降水预报 ETS 评分虽有改善,但是变化幅度平均小于 0.04% ,在 5.0、10.0、25.0 mm 的降水预报 ETS 评分则略有降低,变化幅度仅为 0.07% 。总体而言,同化往返平飘式探空 6 个站的试验数据对 0~12 h 的降水预报影响非常小。查看暖启动时刻起报的 12~24 h 累计降水评分结果,从

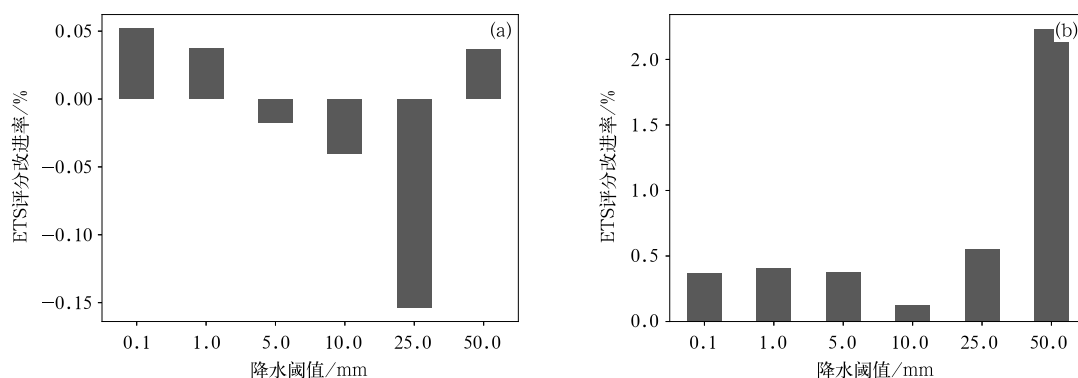
图 9b 结果来看:同化往返平飘式探空 6 个站的试验数据对 12~24 h 累计降水预报在所有量级降水预报 ETS 评分有所增加,ETS 评分平均提高了 0.7% ,特别是在 50.0 mm 降水量级,12~24 h 降水的 ETS 评分提高了 2.2% 。整体而言,往返探空资料同化的正贡献在模式暖启动的 12~24 h 预报时段更为明显。

4 结论与讨论

通过理论分析和个例试验,本文论证了往返平飘式探空同化前必须进行垂直稀疏化,并初步提出了“选取模式层最近观测数据”的稀疏化方法。利用 CMA-MESO V5.1 快速循环同化预报系统,开展了 2021 年 7 月 1—31 日为 1 个月的同化预报影响试验,重点分析了同化 2021 年 7 月长江中下游 6 个试验站网的下降段观测数据对 CMA-MESO V5.1 暖启动时刻分析和预报的影响。主要结论如下:

(1) 无论从理论分析还是实际同化角度,往返平飘式探空同化前均需要进行垂直稀疏化。“选取距离模式层最接近的观测”是一种相对简洁、有效的稀疏化方案。

(2) 由于试验数据在下降段相对较少,同化增加的观测数量相对有限。具体表现为:2021 年 7 月长江中下游地区往返平飘式探空试验观测数据下降段



注:正值表示降水预报技巧有提高,负值则为降低。

图 9 模式暖启动时刻(03、06、09、15、18、21 时)起报的试验 THIN 预报的 12 h 累计降水 ETS 评分相比试验 CTRL 的改进率
(a) 0~12 h 累计降水, (b) 12~24 h 累计降水

Fig. 9 Improvement rate of ETS score of 12 h accumulated precipitation forecasted in THIN test against CTRL test with the model start at warm time (03 UTC, 06 UTC, 09 UTC, 15 UTC, 18 UTC, 21 UTC)

(a) 0—12 h accumulated precipitation, (b) 12—24 h accumulated precipitation

成功观测率约为 65%，下降段观测的结束高度较高，经过稀疏化和质量控制，相比业务探空，平均每天同化数据量增加 384 个数据，仅相当于 2 条上升段廓线数量。

(3)在同化往返平飘式探空资料量相对稀少的下降段观测数据条件下，对暖启动时刻高空场的分析和预报影响相对较小，误差变化率在 $-0.5\% \sim 0.5\%$ 。

(4)在同化往返平飘式探空资料量相对稀少的下降段观测数据条件下，暖启动时刻 0~12 h 累计降水 ETS 评分变化较小(略减小 0.07%)，12~24 h 不同量级累计降水 ETS 评分均有提高，平均提高了 0.7%，50.0 mm 以上降水 ETS 评分提高了 2.2%。

上述研究结果表明，在目前观测试验下降段资料量有限和当前稀疏化策略下，尽管同化往返平飘式探空的下降段观测数据量有限，但是还能在一定程度上提高高分辨率区域模式的降水预报技巧。结合往返平飘式探空观测系统模拟试验(OSSEs)结果(王瑞文等, 2023)，一旦实现往返平飘式探空组网观测，CMA-MESO 快速循环同化预报系统暖启动时刻的降水预报技巧还能更为进步。

目前而言，往返平飘式探空还未完全发挥在数值天气预报方面的效益，在观测和同化技术角度还有很多方面需要改进，主要包括三个方面：

(1) 提高往返平飘式探空下降段观测成功率，布设更为完备的信号接收网，尽可能地接收到下降段探空从高空到地面完整的廓线观测数据。

(2) 研发更优的垂直稀疏化方案，最大限度地提高同化往返平飘式数据量，从而同化更多的下降段数据。在导航卫星掩星观测同化中，已有学者提出了较好的稀疏化方案，这为往返平飘式探空稀疏化提供了很多参考，如马旭林等(2019)针对 GPS 掩星反演资料同化提出了一种适应数值模式垂直坐标的稀疏化方案，取得了很好的效果，后续将在往返平飘式探空同化中尝试该方法并分析评估该方法的效果。

(3) 研究往返平飘式探空观测误差高精度估计方法，提高往返平飘式探空同化中的观测误差的精度，进一步提高资料的同化效果。

参考文献

曹晓钟, 郭启云, 杨荣康, 2019. 基于长时平漂间隔的上下二次探空研究[J]. 仪器仪表学报, 40(2): 198-204. Cao X Z, Guo Q Y, Yang

- R K, 2019. Research of rising and falling twice sounding based on long-time interval of flat-floating[J]. Chin J Sci Instrum, 40(2): 198-204(in Chinese).
- 高笃鸣, 李跃清, 程晓龙, 2018. 基于西南涡加密探空资料同化的一次奇异路径耦合低涡大暴雨数值模拟研究[J]. 气象学报, 76(3): 343-360. Gao D M, Li Y Q, Cheng X L, 2018. A numerical study on a heavy rainfall caused by an abnormal-path coupling vortex with the assimilation of southwest China vortex scientific experiment data[J]. Acta Meteor Sin, 76(3): 343-360(in Chinese).
- 郝民, 田伟红, 龚建东, 2014. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究[J]. 气象, 40(2): 158-165. Hao M, Tian W H, Gong J D, 2014. Study of L-band second-level radiosonde data applied in GRAPES assimilation system[J]. Meteor Mon, 40(2): 158-165(in Chinese).
- 黄丽萍, 邓莲堂, 王瑞春, 等, 2022. CMA-MESO 关键技术集成及应用[J]. 应用气象学报, 33(6): 641-654. Huang L P, Deng L T, Wang R C, et al, 2022. Key technologies of CMA-MESO and application to operational forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 33(6): 641-654(in Chinese).
- 李庆雷, 远芳, 杨贵, 等, 2018. L 波段探空秒级资料稀疏化方案及检验方法[J]. 气象科技进展, 8(1): 127-132. Li Q L, Yuan F, Yang G, et al, 2018. A sparsification scheme and evaluation of the L-band radiosonde high-resolution data[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(1): 127-132(in Chinese).
- 李秋阳, 王成刚, 王旻燕, 2022. 加密探空资料同化对北京地区边界层数值模拟的影响[J]. 气象, 48(5): 580-594. Li Q Y, Wang C G, Wang M Y, 2022. Influence of densely-observed radiosonde data assimilation on numerical simulation of atmospheric boundary layer in Beijing Area[J]. Meteor Mon, 48(5): 580-594(in Chinese).
- 马旭林, 郭欢, 和杰, 等, 2019. 适应数值模式垂直坐标的 GPS 掩星反演资料稀疏化方案[J]. 大气科学学报, 42(3): 380-389. Ma X L, Guo H, He J, et al, 2019. A new thinning scheme of GPS occultation retrieved data for the vertical coordinates of a numerical model[J]. Trans Atmos Sci, 42(3): 380-389(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).
- 王丹, 徐枝芳, 王瑞文, 等, 2019. 14:00 加密探空对区域数值预报系统的影响研究[J]. 高原气象, 38(4): 872-886. Wang D, Xu Z F, Wang R W, et al, 2019. Intensive radiosonde observations at 14:00 in China mainland and their impact study on mesoscale numerical weather prediction[J]. Plateau Meteorol, 38(4): 872-886(in Chinese).
- 王金成, 龚建东, 赵滨, 2015. 一种新的 COSMIC 大气折射率资料观测误差估计方法及在 GRAPES 全球三维变分同化中的应用[J]. 气象学报, 73(1): 142-158. Wang J C, Gong J D, Zhao B,

2015. A new method for estimating observation error of the COSMIC refractivity data and its impacts on GRAPES-GFS model weather forecasts[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(1):142-158(in Chinese).
- 王瑞文, 龚建东, 韩威, 等, 2017. AMDAR 温度资料的偏差订正及对 GRAPES 系统的影响[J]. *高原气象*, 36(5):1346-1356. Wang R W, Gong J D, Han W, et al, 2017. Bias correction of AMDAR temperature data and its impact on GRAPES system[J]. *Plateau Meteor*, 36(5):1346-1356(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).
- 吴琼, 窦芳丽, 郭杨, 等, 2020. FY-3C 微波成像仪海上大气可降水产品质量检验[J]. *气象*, 46(1):73-79. Wu Q, Dou F L, Guo Y, et al, 2020. Validation of FY-3C MWRI total precipitable water products[J]. *Meteor Mon*, 46(1):73-79(in Chinese).
- 于晓晶, 杜娟, 王敏仲, 等, 2018. 青藏高原新增探空资料同化对南疆夏季降水预报的影响[J]. *高原气象*, 37(1):13-27. Yu X J, Du J, Wang M Z, et al, 2018. Impact of assimilating the new radiosonde data on Qinghai-Tibetan Plateau on summer rainfall forecast over Southern Xinjiang[J]. *Plateau Meteor*, 37(1):13-27(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).
- Choi Y, Ha J C, Lim G H, 2015. Investigation of the effects of considering balloon drift information on radiosonde data assimilation using the four-dimensional variational method[J]. *Wea Forecasting*, 30(3):809-826.
- Cucurull L, Anthes R A, Tsao L L, 2014. Radio occultation observations as Anchor observations in numerical weather prediction models and associated reduction of bias corrections in microwave and infrared satellite observations[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 31(1):20-32.
- Ingleby B, Rodwell M J, Isaksen L, 2016. Global radiosonde network under pressure[R]. ECMWF Newsletter, (149):25-30.
- Liu Y, Xue J S, 2014. Assimilation of global navigation satellite radio occultation observations in GRAPES: operational implementation[J]. *J Meteor Res*, 28(6):1061-1074.
- Radnóti G, Bauer P, McNally A, et al, 2012. ECMWF study to quantify the interaction between terrestrial and space-based observing systems on numerical weather prediction skill[R]. ECMWF Technical Memorandum No. 679. doi:10.21957/yvf1ceq7i.
- Wang J C, Gong J D, Han W, 2020. The impact of assimilating FY-3C GNOS GPS radio occultation observations on GRAPES forecasts[J]. *J Trop Meteor*, 26(4):390-401.

(本文责编:俞卫平)