

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).

往返平飘式探空观测系统对 CMA-MESO 的影响研究*

王瑞文^{1,2} 王金成^{1,2} 王丹^{1,2} 陶亦为³ 田伟红^{1,2}

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 国家气象中心,北京 100081

提 要: 往返平飘式探空观测是我国研发的一种新型高空观测技术,除了具备与传统探空观测一致的上升段大气垂直廓线观测能力,同时还增加了平飘段和下降段的大气探测,自动实现了探测廓线的时空加密。利用 ERA5 再分析资料作为“真值”,利用往返平飘式探空模拟仿真系统构造了往返式探空模拟观测,基于 CMA-MESO 区域模式和 3D-Var 同化系统进行了观测系统模拟试验(Observing System Simulation Experiments, OSSEs)。数值试验结果表明:相比传统单次上升段探空观测,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 的降水预报技巧,不同降水量级的 ETS 评分提高约 2%~5%,同时改进要素场(温、湿场和风场)的预报,改进率约为 2%~5%。此外,典型天气个例分析结果表明,增加往返平飘式探空观测能够改善模式初值偏差,从而更准确地模拟降水分布。该文的研究结论为往返平飘式探空的未来科学布局和应用提供了理论支撑。

关键词: 往返平飘式探空,观测系统模拟试验,资料同化,数值预报

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032601

Study on the Influence of Return Sounding Observation System Based on CMA-MESO

WANG Ruiwen^{1,2} WANG Jincheng^{1,2} WANG Dan^{1,2} TAO Yiwei³ TIAN Weihong^{1,2}

1 Center for Earth System Modeling and Prediction of CMA, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081

3 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The return sounding observation is a new high-altitude observation technique developed by China. In addition to the observation of vertical profile in the ascending stage, at the same time, the atmospheric sounding in the period of floating and falling is added to this technique and the space-time densification of the sounding profile is realized automatically. In this paper, with the ERA5 reanalysis data as the “true value”, the return sounding simulation system is used to construct the return sounding simulation observation. Besides, Observing System Simulation Experiments (OSSEs) are conducted based on CMA-MESO regional model and 3D-Var assimilation system. The results of numerical experiments show that compared

* 国家重点研发计划(2018YFC1506205、2018YFC1506202)、中国气象局数值预报发展专项(GRAPES-FZZX-2021)共同资助

2021 年 7 月 27 日收稿; 2022 年 4 月 13 日收修定稿

第一作者:王瑞文,主要从事资料同化和观测资料质量控制研究. E-mail: wangrw@cma.gov.cn

通讯作者:王金成,主要从事资料同化研究. E-mail: wangjc@cma.gov.cn

with the traditional single-rise sounding observation, the simulated sounding observation of the descending section of the return sounding can effectively improve the precipitation forecasting skills of CMA-MESO in the circumstances with national network, and the ETs scores for different precipitation grades can be improved by about 2%–5%. At the same time, the forecast of factor field (temperature, humidity and wind field) is improved, with improvement rate about 2%–5%. In addition, the analysis results of typical weather cases suggest that the increase of return sounding observations can improve the initial model deviation, thus more accurate simulation of precipitation distribution. Generally, the research results of this paper would provide a theoretical support for the future scientific layout and application of the return sounding.

Key words: return sounding observation, observing system simulation experiment, data assimilation, numerical prediction

引 言

数值天气预报是基于数学物理方法客观定量计算未来天气演变的科学,正经历了一场“静悄悄的革命”(Bauer et al, 2015),在天气预报中处于决定性位置。数值预报实际上是一个初值问题(Bjerknes, 1904),初值的准确程度高度影响预报结果。资料同化是为数值天气模式提供初值的理论技术,而观测资料是对大气真实状态的测量,是资料同化重要信息源。作为综合气象观测系统的重要组成部分,探空观测能够提供完整的三维大气的温度、气压、湿度、风等信息,是高空观测体系中最为可信的基准资料(Faccani et al, 2009),被广泛应用于天气预报(叶笃正, 1977a; 1977b; 王笑芳和丁一汇, 1994; 刘晓璐等, 2014; 刘超等, 2017)、数值天气预报领域(Radnóti et al, 2012; 郝民等, 2014; Privé et al, 2014; Ingleby et al, 2016)。其质量稳定可靠、垂直层数多,常常作为同化分析中的基础资料(于晓晶等, 2018),也是卫星辐射率和飞机报温度等资料进行偏差订正的锚定资料(Eyre, 2016; Cucurull et al, 2014; 王瑞文等, 2017; 吴琼等, 2020),在模式场检验、分析中也具有重要作用。另有研究表明,探空资料时间观测频次加倍,将显著提高数值天气预报的预报技巧(Privé et al, 2014; 王丹等, 2019)。但是由于受观测成本的限制,目前我国只在 00 时和 12 时(世界时)开展观测,然而,每天两次的观测频次并不能满足中小尺度灾害性天气的预测和预警要求(陈敏等, 2011)。2011 年起,我国探空系统也全面进行更新换代,由 59 型探空系统逐步升级为 L

波段探空系统,它的采样时间间隔为 1.2 s,垂直间隔约为 8 m,能提供更为密集的大气垂直探测信息(郝民等, 2014)。高分辨率的秒级探空资料可以更好地反映大气层结的细致特征,有助于预报员进行更为精细的天气学分析(Allen and Vincent, 1995; Wang and Geller, 2003; 王丽吉和杨程, 2018),提高天气预报的定性分析结果。在定量应用研究方面,为了满足数值预报的精细化需求,中国气象局气象探测中心近期提出了创新型的往返平飘式探空观测技术,即通过一次探空施放,同时实现“上升段-平飘段-下降段”三段观测(曹晓钟等, 2019; 钱媛, 2019; 王丹等, 2020)。这个观测手段不仅填补了平流层的资料空缺,同时通过平飘完成后的下降爆破阶段进行大气状态的再次测量,自动实现了大气垂直探测的频次加密。这种新型观测技术还处于研发初期,目前实现了小范围组网布局(江淮区域),在大规模业务布网前,给出定性和定量的布局影响评估十分必要。该观测技术的资料对于天气预报尤其是数值天气预报的影响如何? 是否能被数值模式的同化系统更好应用? 这些科学问题都有待评估和验证。而观测系统模拟试验(Observing System Simulation Experiments, OSSEs)是全面评估新型观测资料对数值天气预报潜在影响的一种重要手段。

OSSEs 方法是最先被用在气象领域来评估前瞻性观测(当前不可大量获得)对改进数值预报潜在的影响(Lord et al, 1997; Atlas et al, 2003),同时还可以用来指导观测站网的设计布局,测试新型观测系统(Riishojgaard et al, 2012),从而优化对资料同化和预报系统的使用,改善天气预报,最终产生最大的社会和经济效益(Arnold and Dey, 1986)。国内

在探空观测的 OSSEs 方面也有一些尝试,张宇等(2016)认为通过增加同化青藏高原上构造的探空伪观测,能够减少高原地区的初值不确定性,从而减小对下游预报的影响;王丹等(2019)就 14 时(北京时)探空是否需要加密的观测系统模拟试验对探空频次加密的潜在意义进行讨论,结果表明 14 时(北京时)加密探空对数值预报具有显著改进作用。由于往返平飘式探空是一种新的观测技术,以后大规模的业务化应用是否可行,对中国数值预报的影响如何,这急需一个客观定量的评估。

本文利用 ERA5 再分析资料和往返平飘式轨迹预测系统(王金成等, 2021),构造往返平飘式探空的模拟观测,基于 CMA-MESO,开展了往返平飘式探空的观测系统模拟试验,研究结果揭示了新型观测资料对数值预报的影响,对往返平飘式探空的未来组网、布局具有一定指导意义。

1 往返平飘式探空模拟观测资料构造

采用 OSSEs 来分析评估往返平飘式探空在我国组网观测情境下对数值天气预报的影响。OSSEs 通常包含 3 个部分:替代“真实”大气的“自然”场;由“自然”场生成的人造观测,也叫伪观测;用于评价“人造观测”的资料同化和数值预报系统。由于 ERA5 再分析资料比较接近真实大气状态,本文用 ERA5 再分析资料作为“自然”场,试验时间段是 2019 年 6 月 1 日 06 时至 29 日 18 时(世界时,下同)。模拟观测的构造过程是:(1)将 ERA5 再分析资料插值到往返平飘式探空下降阶段的经纬度位置;(2)将该处构造的观测加上随机误差,随机误差是由探空资料该层的观测误差和由蒙特卡罗方法生成的随机数相乘得到;(3)在 OSSEs 中,同化观测资料的数值预报系统要和生成“自然”场的模式系统不同,这是为了避免“双生”效应(identical twin)造成资料影响被过高估计(Halem and Dlouhy, 1984),因此,本文选取中国气象局自主研发的区域高分辨率数值天气预报系统 CMA-MESO V5.0 作为评价系统。

由于往返平飘式探空从传统探空站释放观测气球,平飘一段时间(约 4 h)后,其下降阶段的观测在空间位置上发生了变化,因此和传统的探空相比,在

垂向观测上相当于空间加密(和原观测站位置较远)和时间加密(00 时释放气球后 5 h 开始下降,相当于 06 时)。下降阶段的观测位置在下降轨迹上,由轨迹预测系统得到(王金成等, 2021),图 1 是模拟的往返平飘式探空的三维轨迹。从图中可以发现:平飘探空明显分为上升、平飘和下降三个阶段,形成三个不同位置的观测,和传统探空相比,增加了平飘和下降阶段的观测,观测空间得到加密。图 2a、2b 分别是 2019 年 6—7 月和 11—12 月轨迹预测系统模拟的往返平飘式探空下降点位置平均分布。在夏季,探空气球在上升和下降阶段会受到一定的西风带影响,向东飘移,但是当气球继续上升到平流层,主要受到风速较大的平流层东风带的影响,经过平流层和对流层的不同风带的综合影响,最后探空气球的降落位置会在释放的传统探空气球位置偏西。而在冬季,平流层有从西向东的西风带,最后模拟平飘探空降落的位置在传统探空站以东。从图 2 可知,下降段探空起到了全网站点自动加密的作用。图 3 给出了 2019 年 6—7 月构造的模拟平飘探空观测上升段和实际传统探空的温度、相对湿度、 U 风和 V 风的偏差和标准差,从对比结果可知,构造的温度模拟观测和实际探空观测的偏差在 0.5 K 以内,标准差在 2 K 以内,相对湿度由于实际的观测误差比较大,因而构造的模拟观测和实际探空的相对湿度的偏差最大约为 20%,而标准差约为 12%, U 风和 V 风的偏差在 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内,标准差在 $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本文在传统探空观测资料的基础上,研究观测在时空加密的情况下对数值预报的影响。

2 数值试验

2.1 方案设计

我国自主研发的 GRAPES 是具有完全知识产权的数值天气预报系统(薛纪善和陈德辉, 2008),本文采用的 GRAPES 区域高分辨率(CMA-MESO V5.0)于 2020 年 6 月实现了业务化。CMA-MESO V5.0 水平分辨率是 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$,模式覆盖区域范围是 $10^\circ \sim 60^\circ \text{N}$ 、 $70^\circ \sim 145^\circ \text{E}$,垂直层次为 49 层,模式层顶高为 35 000 m。积分时间步长为 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

由 NCEP GFS (<https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>) 的 6 h 预报场提供。

本文采用 CMA-MESO V5.0 的三维变分(3D-Var)同化系统,同化的资料有常规探空、地面报、船舶、飞机报等常规资料,还有 GPS/PW(global position system/precipitable water)大气可降水量、雷达 VAD(velocity azimuth display)风和 GNSS/RO(global navigation satellite system/radio occultation)折射率等观测信息。同化时间窗口为 3 h,每天 00 时和 12 时冷启动,每 3 h 更新循环同化,由于新增的模拟观测在 06 时和 18 时,所以将在 06 时和 18 时做 36 h 预报,试验时段是 2019 年 6 月 1 日 06 时至 29 日 18 时。

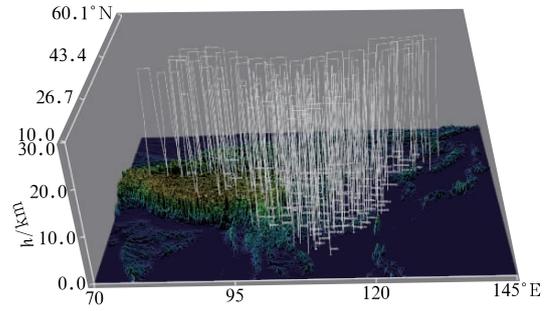


图 1 模拟平飘探空三维轨迹图
(灰白色代表轨迹,彩色阴影是地形高度)
Fig. 1 A three-dimensional trajectory map of simulated return sounding
(gray and white: trajectory, colored shadow: height of terrain)

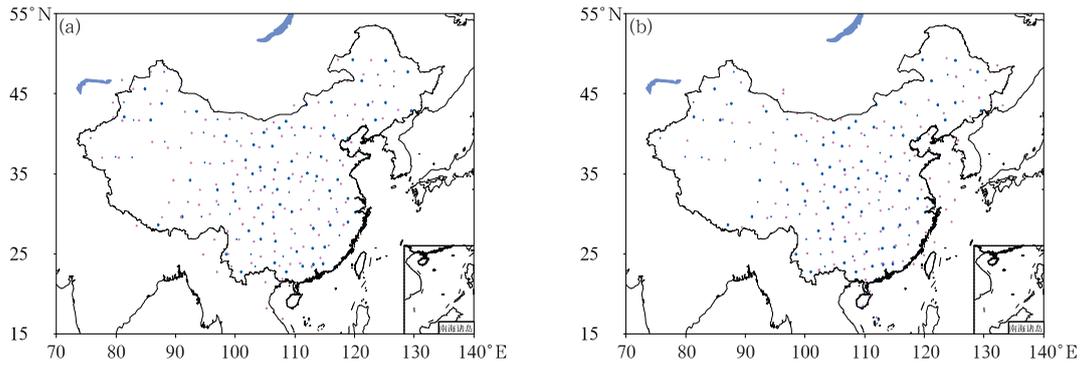


图 2 2019 年(a)夏季(6—7 月)和(b)冬季(11—12 月)00 时传统探空(蓝色)和 06 时往返平飘式探空下降段平均位置(粉色)分布
Fig. 2 Distributions of classical radiosonde location (blue) at 00 UTC and return radiosonde descending location (pink) at 06 UTC in (a) summer (June—July) and (b) winter (November—December) of 2019

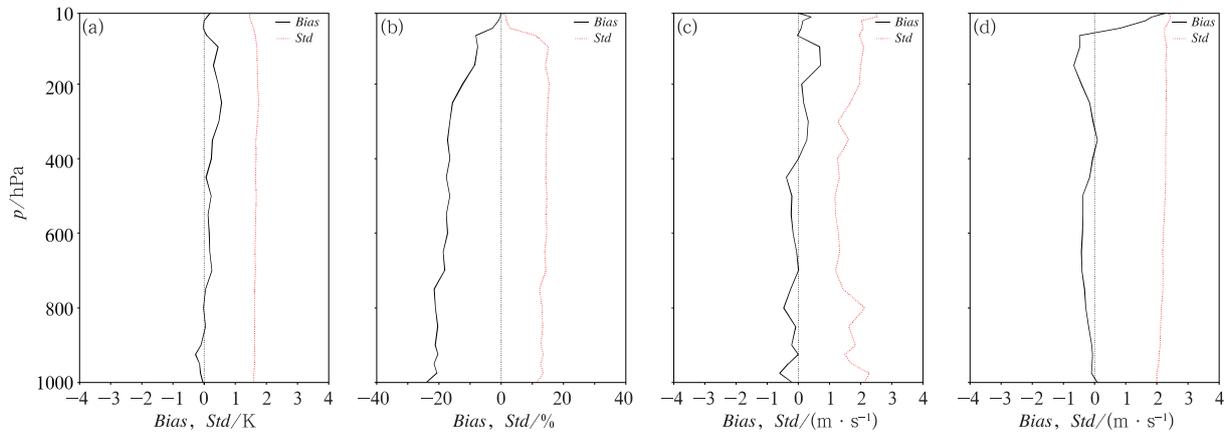


图 3 2019 年 6—7 月模拟观测和实际传统探空观测的偏差(Bias)和标准差(Std)
(a)温度,(b)相对湿度,(c)U 风,(d)V 风

Fig. 3 Bias and standard deviations (Std) of the simulated and actual classic sounding observations from June to July of 2019
(a) temperature, (b) relative humidity, (c) U wind, (d) V wind

为了定量评估往返平飘式探空观测对数值天气预报的影响,设计两组试验:控制试验(Ctrl),同化上述观测资料;往返平飘式探空观测影响试验

(Effect),除了上述资料外,还加入了构造的往返平飘式探空模拟观测资料(表 1)。

表 1 试验方案

Table 1 Experiment schemes

试验	同化资料
控制试验(Ctrl)	常规探空、飞机报、地面报、船舶、云导风、 雷达 VAD 风、GPS/PW、GNSS/RO 折射率
往返平飘式探空模拟观测系统 同化影响试验(Effect)	Ctrl 试验同化的资料+往返平飘式 探空下降段资料(06 UTC 和 18 UTC)

2.2 对降水的影响分析

本文用 ETS(equitable treat score)评分方法对区域降水预报技巧进行评价。图 4 给出了 06 时起报的全月平均的逐 6 h 累计降水预报 ETS 评分,小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨的降水阈值分别是 0.1、4.0、13.0、25.0 和 60.0 mm,黄色代表影响试验结果,紫色代表没有同化平飘探空的控制试验结果。图中方框代表着两个试验 ETS 评分差异的显著性水平范围,如果两个数的差在方框之外,就说明通过了显著性检验。从图中可以看出,同化构造的往返平飘式探空下降段观测(06 时)对于 CMA-MESO 模式降水的预报评分无论是小雨、中雨、大雨和暴雨

都有提高,正效果可维持全预报时段(0~36 h 预报)。其中,小雨量级的 ETS 降水评分提高较大的是在 6~12 h 和 24~30 h 预报时段,分别提高约 4%和 5%,中雨和大雨预报 ETS 评分提高较大的在 18~24 h 预报时段,分别提高约 8%和 10%,暴雨预报 ETS 评分提高较大的在 12~18 h 预报时段,提高约 20%。图 5 给出了 18 时起报的全月平均的逐 6 h 累计降水预报 ETS 评分。从图中结果可知,18 时起报的影响试验的降水预报在各个降水量级的 ETS 评分上也均为正效果,其中,小雨量级预报降水 ETS 评分较大的在 30~36 h 预报时段,提高约 8%。中雨量级 ETS 评分提高较大的在 12~18 h 和 30~36 h 预报时段,提高约 10%。暴雨

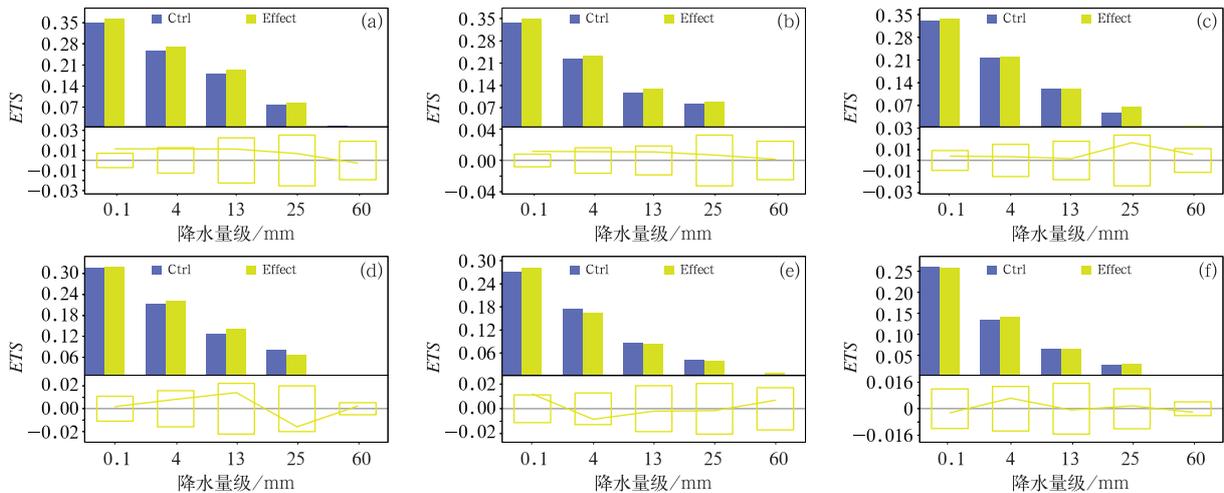


图 4 2019 年 6 月 1—29 日两组试验 06 时起报的逐 6 h 累计降水预报月平均 ETS 评分

(a)0~6 h, (b)6~12 h, (c)12~18 h, (d)18~24 h, (e)24~30 h, (f)30~36 h

(紫色:控制试验 Ctrl,黄色:影响试验 Effect)

Fig. 4 Monthly average ETS scores of 6 h accumulated precipitation forecasts started at 06 UTC by the two experiments from 1 to 29 June 2019

(a) 0—6 h, (b) 6—12 h, (c) 12—18 h, (d) 18—24 h, (e) 24—30 h and (f) 30—36 h

(purple: control experiment, yellow: impact experiment)

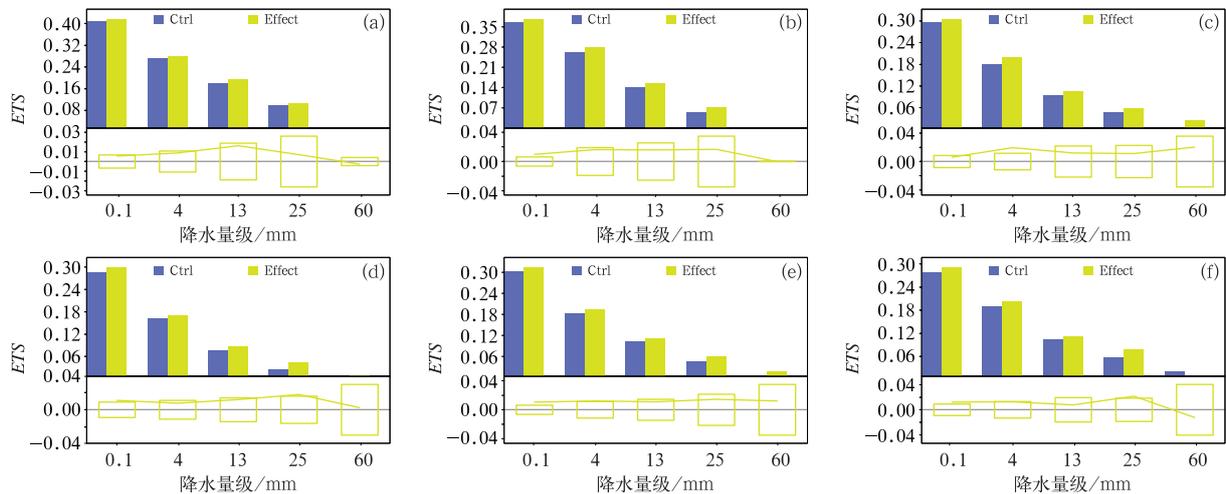


图 5 同图 4, 但为 18 时起报的逐 6 h 累计降水预报 ETS 评分

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for ETS scores of 6 h accumulated precipitation started at 18 UTC

量级的 ETS 评分提高较明显的是在 18~24 h 和 30~36 h 预报时段, 提高约 50%。综合上述结果可知, 增加 06 时和 18 时的往返平飘式探空下降阶段的观测, 能够使得降水预报的 ETS 评分有明显提高。06 时和 18 时比较而言, 18 时降水预报的 ETS 评分比 06 时更大, 并且对于降水量级较大的暴雨的 ETS 评分提高较大。原因主要是在中国区域 18 时的观测资料比 06 时减少较多, 尤其是飞机资料减少较多, 在资料相对少的情况下, 加入平飘探空资料更能凸显观测的作用。

2.3 对要素场预报的影响

为了评估增加 06 时和 18 时的模拟往返探空观测对要素预报的影响, 本文选取 1000、850、500 和 250 hPa 四个典型层次, 计算控制试验和影响试验中温度、湿度和风场观测的 0~36 h 预报与参考场 (ERA5 再分析) 的均方根误差, 利用改进率 (薛谌彬等, 2013) 来评估数值试验预报结果, 其中改进率 I 的计算如下:

$$I_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} \frac{E_i - e_i}{E_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: t 为预报时效, n_t 为样本数量, E_i 和 e_i 分别对应控制试验和影响试验的均方根误差。当控制试验的均方根误差大于影响试验的均方根误差时, $I_t > 0$, 此时说明影响试验比控制试验有改进; 反之, 说明有负效果。图 6 分别是在 1000、850、500 和 250 hPa 的 U 风逐 6 h 预报的改进率, 蓝色代表 06 时起报, 红色代表 18 时起报。从结果可知, 改进率均是正

值, 这说明同化 06 时和 18 时构造的模拟观测的 U 风预报相比控制试验有所改进, 并且在 250 hPa 要比其他层次要更明显, 最高达 2%。图 7 是 V 风场的改进率, 和图 6 类似, 影响试验的预报也有提高, 改进幅度最高达 2.5%。图 8 是温度场的改进率, 其改进率整体上也是正值, 并且在 250 hPa 改进明显, 改进率最高达 5%, 但在模式低层 850 hPa, 18 时起报之后的 18~30 h, 改进率出现负值, 约为 -0.2%, 整体负贡献较小。比湿的改进率和温度场表现类同, 在此不加以赘述。

2.4 典型个例预报影响分析

为了进一步评估往返平飘式探空模拟观测对数值预报的影响, 选取一个实况天气过程个例来具体比较影响试验和控制试验。2019 年 6 月 4—5 日, 受低涡切变系统影响, 西北地区东部、四川盆地中东部、山西南部等地出现大到暴雨, 四川盆地东部局地出现大暴雨。图 9 为 2019 年 6 月 4 日 06 时起报的 24 h 累计降水预报和累计降水实况观测。从实况来看主要降水为三个区域, 分别为西北地区东部和四川盆地、华南、华北和东北地区, 其中西北地区东部和四川盆地降水最强, 出现成片的暴雨, 华南地区出现分散性暴雨。对比控制试验和影响试验, 两种试验对于西南涡东移影响造成的西北地区东部至四川盆地一带的强降水都有较好的体现, 但对于暴雨雨带的位置和强度预报存在一定的偏差, 整体来看对于四川盆地的暴雨雨带的位置预报偏西北, 对于甘肃南部至山西中部的暴雨雨带位置预报偏西

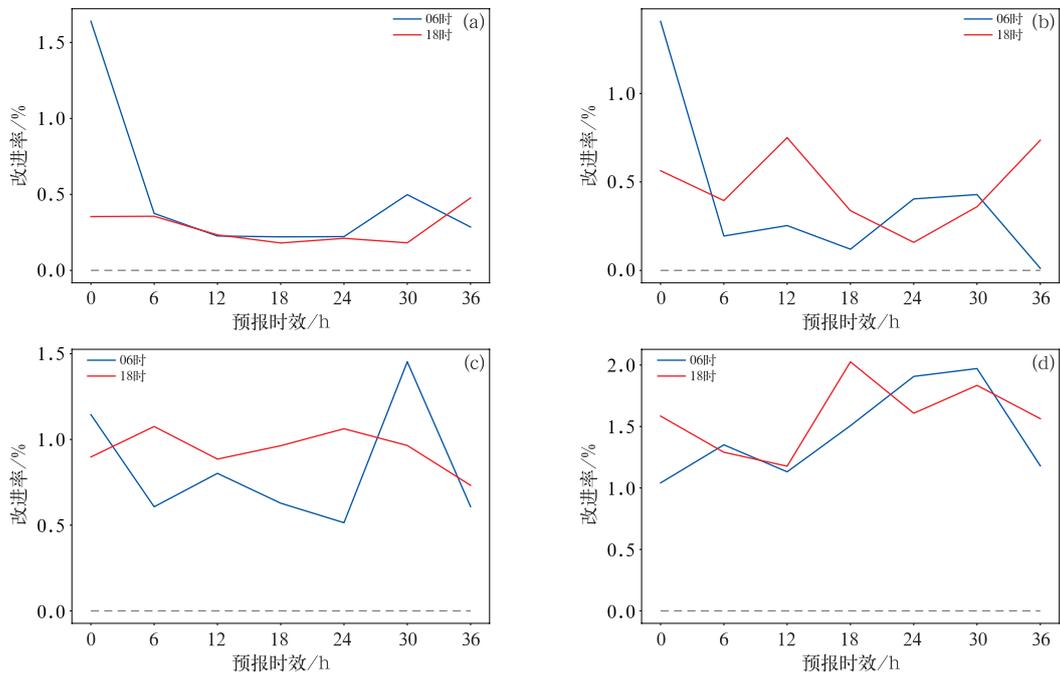


图 6 2019 年 6 月 1—29 日同化模拟平飘探空观测的 U 风场预报改进率
 (a)1000 hPa, (b)850 hPa, (c)500 hPa, (d)250 hPa
 (蓝色是 06 时起报, 红色是 18 时起报)

Fig. 6 The forecast improvement rate of U wind field with assimilation of simulated observation of the return sounding from 1 to 29 June 2019
 (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa, (d) 250 hPa
 (Blue, red lines are beginning forecast times at 06 UTC and 18 UTC, respectively)

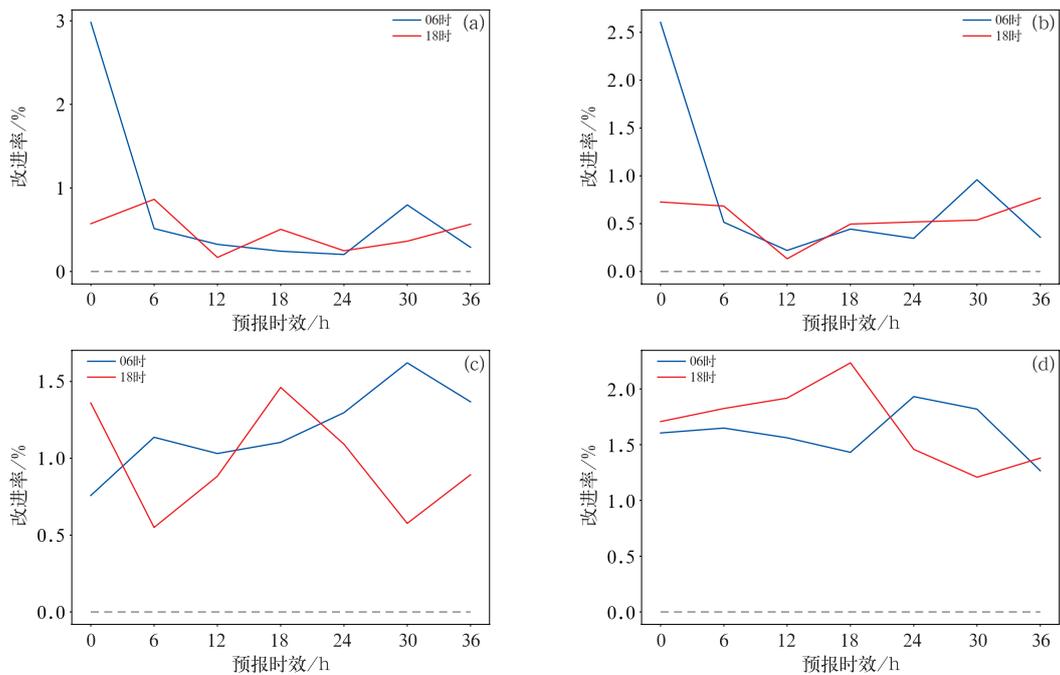


图 7 同图 6, 但为 V 风场

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for V wind field

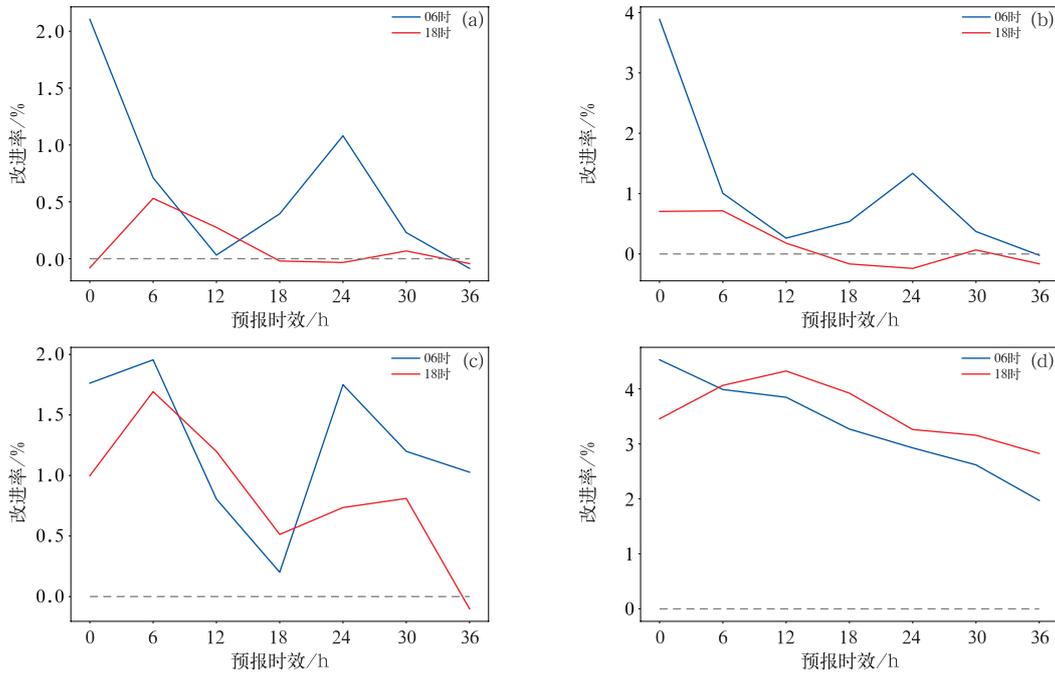


图 8 同图 6, 但为温度场

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for temperature field

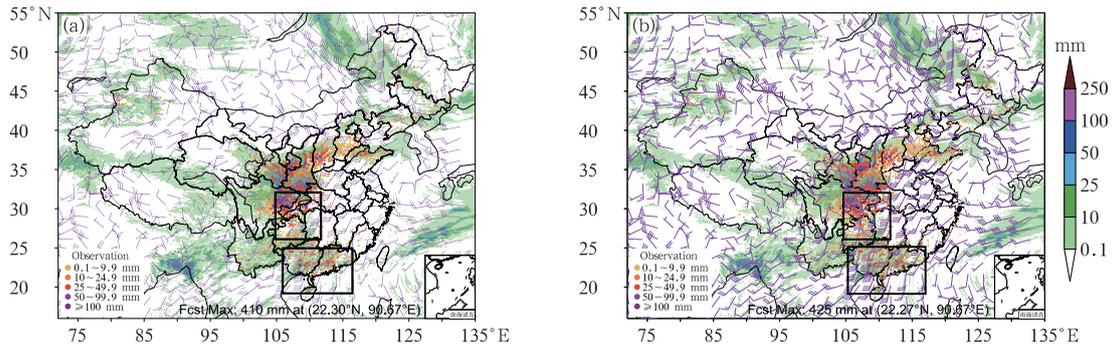


图 9 2019 年 6 月 4 日 06 时起报 24 h 累计降水预报(填色)与实况(圆点)的比较(风场为 6 月 4 日 18 UTC)

(a)控制试验, (b)影响试验

(黑色方框代表 850 hPa 风场的偏南急流区域)

Fig. 9 Comparison of the 24 h accumulated precipitation forecast (colored) starting at 06 UTC 4 June 2019 with observation data (dot) (wind field: 18 UTC 4 June)

(a) control experiment, (b) impact experiment

(Black square represents the southerly jet stream zone of the 850 hPa wind field)

南,从 850 hPa 风场来看影响试验(图 9b)黑框内的偏南急流较控制试验偏弱一些,与实况更为接近,同时也可以看到,影响试验较控制试验对于陕西南部的暴雨雨带预报略偏南,这也与实况雨带更为接近,而控制试验急流偏强也造成暴雨雨带略偏北。另外,对于华南的降水(暖区性质降水),广西南部 and 广东中部出现分散性大到暴雨,两种试验都有一定的体现,但影响试验对于华南沿海的偏南气流较控制

试验偏强 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (黑框内),风场的预报与实况更为一致,影响试验对于广西南部 and 广东中部大到暴雨的降水预报范围略大于控制试验,位置和强度与实况更为接近。

3 结论与讨论

本文利用往返平飘式探空观测系统的轨迹模拟

系统,结合 ERA5 再分析资料构造往返探空下降段模拟观测,基于 CMA-MESO V5.0 高分辨率数值预报系统进行了一个月的观测系统模拟试验,研究了往返平飘式探空在全国组网观测情况下对数值预报的影响,本文主要结论如下:

(1)同化往返平飘式探空模拟观测能提高模式降水预报技巧,表现为在各个降水量级上的 ETS 评分上有所提高,小雨、中雨和大雨的提高率在 2%~5%,对暴雨的提高率更为明显,最高可达 50%。

(2)在要素场的预报上,影响试验也比控制试验的预报有所改进,风场、温度场和比湿场基本上都是正效果,风场和温度场的整体改进率分别为 2%、5%,比湿的整体改进率接近 2%,其中在 250 hPa 的风场和温度场的改进较其他层次更为明显。

(3)从定性分析来看,增加平飘探空下降阶段的模拟观测,能够更准确地捕捉降水的动力条件,提高雨带分布的预报准确度。

本文通过观测系统模拟试验论证了增加探空观测频次(06 时、18 时)、观测位置对数值预报的正面影响,表明新型往返平飘式探空大规模组网具备业务价值。文中控制试验的设置是包含常规资料和非常规资料的观测,影响试验中仅对 06 时和 18 时的探空位置进行模拟观测的构造,受全资料观测的权重影响,因而导致要素场预报的改进效果不是太明显。此外,本文实况观测的预报检验仅是个例研究,对于本文的结论是否合理还需要结合更多的天气过程进行佐证,此外还需依靠将来的实际平飘探空的观测数值试验来进行综合论证。

致谢:中国气象局地球系统数值预报中心邓莲堂、张进在绘图方面给予的帮助。

参考文献

曹晓钟,郭启云,杨荣康,2019. 基于长时平飘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 Instr, 40(2): 198-204(in Chinese).

陈敏,范水勇,郑祚芳,等,2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探[J]. 气象学报,69(1): 181-194. Chen M, Fan S Y, Zheng Z F, et al, 2011. The performance of the proximity sounding based on the BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential forecast[J]. Acta Meteor Sin, 69(1): 181-194(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).

刘超,花丛,张恒德,等,2017. L 波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用[J]. 气象,43(5): 591-597. Liu C, Hua C, Zhang H D, et al, 2017. Application of L-band radar sounding data in analyzing polluted weather boundary layer[J]. Meteor Mon, 43(5): 591-597(in Chinese).

刘晓璐,刘建西,张世林,等,2014. 基于探空资料因子组合分析方法的冰雹预报[J]. 应用气象学报,25(2): 168-175. Liu X L, Liu J X, Zhang S L, et al, 2014. Hail forecast based on factor combination analysis method and sounding data[J]. J Appl Meteor Sci, 25(2): 168-175(in Chinese).

钱媛,2019. 往返平飘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 & Technology(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 Meteor, 38(4): 872-886(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).

王丽吉,杨程,2018. 热带平流层多尺度波动分离方案的研究:多站点高分辨率无线电探空联合分析[J]. 气象学报,76(1): 62-77. Wang L J, Yang C, 2018. Separation of planetary and gravity waves in the tropical stratosphere with multi-station radiosonde data[J]. Acta Meteor Sin, 76(1): 62-77(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).

王笑芳,丁一汇,1994. 北京地区强对流天气短时预报方法的研究[J]. 大气科学,18(2): 173-183. Wang X F, Ding Y H, 1994. Study on method of short-range forecast of severe convective weather in Beijing Area[J]. Sci Atmos Sin, 18(2): 173-183(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).
- 薛湛彬, 龚建东, 何财福, 等, 2013. 静止卫星云导风的质量控制及在同化中的应用[J]. 应用气象学报, 24(3): 356-364. Xue C B, Gong J D, He C F, et al, 2013. Quality control of cloud derived wind vectors from geostationary meteorological satellites with its application to data assimilation system[J]. J Appl Meteor Sci, 24(3): 356-364(in Chinese).
- 叶笃正, 1977a. 探空资料的应用(一)[J]. 气象, 3(11): 5-7. Ye D Z, 1977a. Applications of radiosonde observations I[J]. Meteor Mon, 3(11): 5-7(in Chinese).
- 叶笃正, 1977b. 探空资料的应用(二)[J]. 气象, 3(12): 21-23. Ye D Z, 1977b. Applications of radiosonde observations II[J]. Meteor Mon, 3(12): 21-23(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).
- 张宇, 陈德辉, 仲跻芹, 2016. 数值预报在青藏高原的不确定性对其下游预报的影响[J]. 高原气象, 35(6): 1430-1440. Zhang Y, Chen D H, Zhong J Q, 2016. The numerical prediction uncertainties of the Tibetan Plateau impacting the forecasts of its downstream region[J]. Plateau Meteor, 35(6): 1430-1440(in Chinese).
- Allen S J, Vincent R A, 1995. Gravity wave activity in the lower atmosphere: seasonal and latitudinal variations [J]. J Geophys Res, 100(D1): 1327-1350.
- Arnold C P Jr, Dey C H, 1986. Observing-systems simulation experiments: past, present, and future[J]. Bull Amer Meteor Soc, 67(6): 687-695.
- Atlas E L, Ridley B A, Cantrell C A, 2003. The Tropospheric Ozone Production about the Spring Equinox (TOPSE) experiment: introduction[J]. J Geophys Res, 108(D4): 8353.
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G, 2015. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature, 525(7567): 47-55.
- Bjerknes V, 1904. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik[J]. Meteor Zeits, 21: 1-7.
- 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.
- Eyre J R, 2016. Observation bias correction schemes in data assimilation systems: a theoretical study of some of their properties[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 142(699): 2284-2291.
- Faccani C, Rabier F, Fourrié N, et al, 2009. The impacts of AMMA radiosonde data on the French global assimilation and forecast system[J]. Wea Forecasting, 24(5): 1268-1286.
- Halem R, Dlouhy R, 1984. Observing system simulation experiments related to space-borne lidar wind profiling. Part 1: forecast impact of highly idealized observing systems[C]// Proceedings of Conference on Satellite Meteorology/Remote Sensing and Applications. Clearwater, FL: American Meteorological Society: 272-279.
- Ingleby B, Rodwell M, Isaksen L, 2016. Global radiosonde network under pressure[R]. Reading: ECMWF.
- Lord J, Egan J, Clifford T, et al, 1997. Larger seeds in tropical floras: consistent patterns independent of growth form and dispersal mode[J]. J Biogeogr, 24(2): 205-211.
- Privé N C, Errico R M, Tai K S, 2014. The impact of increased frequency of rawinsonde observations on forecast skill investigated with an observing system simulation experiment[J]. Mon Wea Rev, 142(5): 1823-1834.
- 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]. Reading: ECMWF.
- Riishojgaard L P, Ma Z, Masutani M, 2012. Observation system simulation experiments for a global wind observing sounder[J]. Geophys Res Lett, 39(17): L17805.
- Wang L, Geller M A, 2003. Morphology of gravity-wave energy as observed from 4 years (1998-2001) of high vertical resolution U. S. radiosonde data[J]. J Geophys Res, 108(D16): 4489.

(本文责编:俞卫平)