

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).

基于“上升-平漂-下降”探空资料的 长江中下游暴雨同化试验*

张旭鹏¹ 郭启云² 杨荣康² 马旭林¹ 曹晓钟²

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

提 要: 为进一步讨论新型“上升-平漂-下降”探空数据在资料同化与数值预报中的应用效果, 基于 WRF (Weather Research and Forecast) 模式及 WRFDA (WRF data assimilation) 同化系统进行同化对比试验。在对新型探空试验数据进行质量评估和稀疏化的基础上, 将下降段资料与常规观测资料组合同化, 并讨论其对于长江中下游地区暴雨预报质量的影响及原因。主要试验结果包括: 通过与 FNL 资料、业务同站探空数据交叉对比验证最新试验数据准确性; 使用特性层与规定层结合的方案对新型探空上升、下降段进行稀疏化处理可以得到较优效果; 同化下降段数据能够在一定程度上提高暴雨预报技巧; 风场及湿度场的调整是暴雨预报技巧有所提高的重要原因之一。

关键词: “上升-平漂-下降”探空系统, 资料同化, 下降段, 暴雨

中图分类号: P412, P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.12.007

Assimilation Experiment of Rainstorm in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Based on “Up-Drift-Down” Sounding Data

ZHANG Xupeng¹ GUO Qiyun² YANG Rongkang² MA Xulin¹ CAO Xiaozhong²

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education,

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

Abstract: In order to further discuss the application effect of a new type of “up-drift-down” sounding data to data assimilation and numerical prediction, assimilation comparisons were carried out based on the WRF (Weather Research and Forecast) model and WRFDA (WRF data assimilation) system. In this paper, based on the quality evaluation and sparseness of the new radiosonde data, the descending data are combined and assimilated with the conventional observation data. The influence and causes of the simulated data on the rainstorm forecast quality in the middle and lower reaches of the Yangtze River are discussed. The main test results include that the accuracy of the latest test data is verified by cross-comparison of the test data with the FNL data and sounding data from the same station. The scheme of combining the characteristic layers with the specific layers can be used to sparse the ascending and descending segments of the

* 国家重点研发计划(2018YFC1506201, 2018YFC1506204)共同资助

2020 年 12 月 14 日收稿; 2021 年 4 月 6 日收修定稿

第一作者: 张旭鹏, 主要从事数值预报与资料同化研究. E-mail: 735586338@qq.com

通讯作者: 郭启云, 主要从事探空关键技术研究及应用. E-mail: feng_cloudy@163.com

new radiosonde, which can get better results. The rainstorm forecasting technique can be improved to some extent by assimilating the data in the descending section. The adjustment of wind field and humidity field is one of the important reasons for the improvement of rainstorm forecasting skills.

Key words: “up-drift-down” sounding system, data assimilation, descending section, rainstorm

引 言

高空探空观测在当代气象观测中具有极其重要的地位,其结果常用作描述大气状态的相对真值。虽然探空站点数量较为有限,但空间分布相对均匀且其数据中包含丰富的大气垂直信息,能够反映大气三维结构,是高空气象观测中最主要的直接观测方式。探空数据不仅可以作为地基微波辐射计(Xu et al, 2015)、毫米波云雷达(赵静等, 2017)、风廓线雷达(吴蕾等, 2014)、COSMIC 掩星(杜明斌等, 2009; 郭启云等, 2020)、及卫星反演(Kwon et al, 2012; 陈源等, 2020)等遥感产品或再分析资料(张思齐等, 2018)的检验评估标准,在中短期天气预报中也有极其重要的作用(Laroche and Sarrazin, 2013),是减小预报误差的重要观测手段之一(Singh et al, 2014)。李佳英等(2006)通过对比探空资料与模式温湿廓线,检验模式对强对流天气的预报能力。当前业务使用的 L 波段秒级探空数据可深入揭示大气内部运动规律,例如应用于高层大气温度结构(李刚等, 2014)或大气重力波(吴泓锟等, 2019)研究中等等。

但固定的常规探空难以满足对移动气象目标跟踪观测的需求。下投探空是指由气球、无人机(肖良华等, 2019)、火箭(李金辉等, 2020)等飞行器携带配有降落伞的探空仪升空,并在一定高度进行投放,从而获得由下投平台至地(洋)面的大气廓线(陈洪滨和朱彦良, 2008)。下投探空可以作为常规探空的补充,弥补特定时刻一些区域内探空资料的空白。目前,下投探空观测已经成为观测台风的主要手段之一,对台风的移动路径及强度预报具有极其重要的意义(曲晓波和 Heming, 2006; 张诚忠等, 2012; 李杨等, 2016)。

探空资料在同化领域有着极为广泛的应用。张利红等(2013)指出同化探空和云迹风资料可以提高我国西南地区降水预报准确率。Yamazaki et al (2015)通过 OSE(observing system experiments)验证探空资料可以改善北极区域对流层上层环流模拟

情况。莫毅等(2008)、宝兴华和杨舒楠(2015)和孟智勇等(2019)分别使用 WRF-3DVar、WRF-EnKF 和 ETKF 方法对探空资料进行同化,证明同化探空资料能够改善暴雨落区及降水强度模拟效果。Choi et al(2015)使用 WRF-4DVar 同化探空资料时加入气球漂移信息,结果表明降水落区预报效果及 QPF (quantitative precipitation forecast)技巧都有所提高。同化探空资料对台风路径及其降水预报也有明显改进作用(董海萍等, 2017; 龚俊强等, 2019)。另外,有多个研究发现:使用加密探空数据可以显著提高数值预报技巧(陈朝平等, 2012; 徐同等, 2016; 高笃鸣等, 2018; 王丹等, 2019),且其正效应能够传播至下游地区(Faccani et al, 2009)。L 波段秒级探空数据通过插值或稀疏化处理引入数值模式能够很好地改善模拟效果:郝民等(2014)通过插值到最近模式层的方式将秒级探空数据引入 GRAPES 模式后,模拟高层系统更为准确且降水预报技巧有所提高;姚爽等(2015)将秒级探空数据从时间上稀疏化为分钟数据并将其加入 WRF 模式,可以改善高空风场模拟效果及大量级降水预报性能。

为拓展现有探空能力和范围,解决探空加密的关键性技术问题,中国气象局气象探测中心在现有同球双释放技术(郭启云等, 2018)和北斗卫星导航定位测风技术基础上研发了新一代探空观测系统,即“上升(1 h)-平漂(4 h)-下降(1 h)”三段式探空观测。该系统在不增加人员投入和经济成本的前提下,实现了探空观测的时空加密,能够显著提升探空观测效益(钱媛, 2019; 曹晓钟等, 2019)。上升段观测与业务探空效果相近;而下降段则可近似看作下投探空,其中包含和上升部分相同的观测要素,且下投地点实时可控,具有很强的机动性,对业务探空有很好的补充作用。当前我国长江中下游地区已建设由六个新型探空试验站点构成的观测网,建立了观测试验数据集,并对其进行了质量控制与偏差订正(包括温度辐射订正、湿度滞后订正、气压平滑等)。曹晓钟等(2019)、钱媛(2019)和王丹等(2020)对试验数据进行质量评估,其结果初步验证了“上升-平漂-下降”探空的可信可用性。杨晨义等(2021)则基

于新型探空资料对下平流层重力波特征进行分析。

“上升-平漂-下降”探空作为一种新型探空观测方式,在原有上升基础上加入平漂和下降段观测能力。其中,下降段资料在同化中的应用效果还需要进一步的研究与验证,目前尚且缺乏这一方面的研究。本文将基于“上升-平漂-下降”探空试验数据进行同化对比试验,并根据试验结果讨论新型探空系统对长江中下游地区暴雨预报的改进潜力。

1 试验数据质量评估

同化新型探空数据之前,需先对其质量进行评估。前人在此方面已有一些研究结果,使人们对“上升-平漂-下降”探空数据质量有了初步了解。但随着试验数据集及质量控制方法不断发展完善,该项

工作仍有进一步进行的必要。目前对“上升-平漂-下降”探空数据质量的评估方法大致分为两种:一种是利用现有同站业务探空资料对新型探空数据质量进行评估;另一种则是基于高分辨率模式分析场或再分析资料进行质量评估。考虑到业务探空资料的时空分辨率问题,第一种方法可用于上升、下降段评估,但对平漂段评估能力较弱。而第二种方法则可以相对更合理地评估全部三段探空资料,其缺点是由于不同模式资料在分辨率和质量上存在差异,故参考不同资料得到的评估结果可能有所差异。本文在前人研究基础上,选择时间分辨率为 6 h、空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 FNL 分析资料以及同站秒级探空资料,对 2019 年最新试验数据集质量进行评估。

如图 1 中所示,上升段和下降段温度在日间和夜间都与 FNL 资料具有较好的一致性,偏差基本在

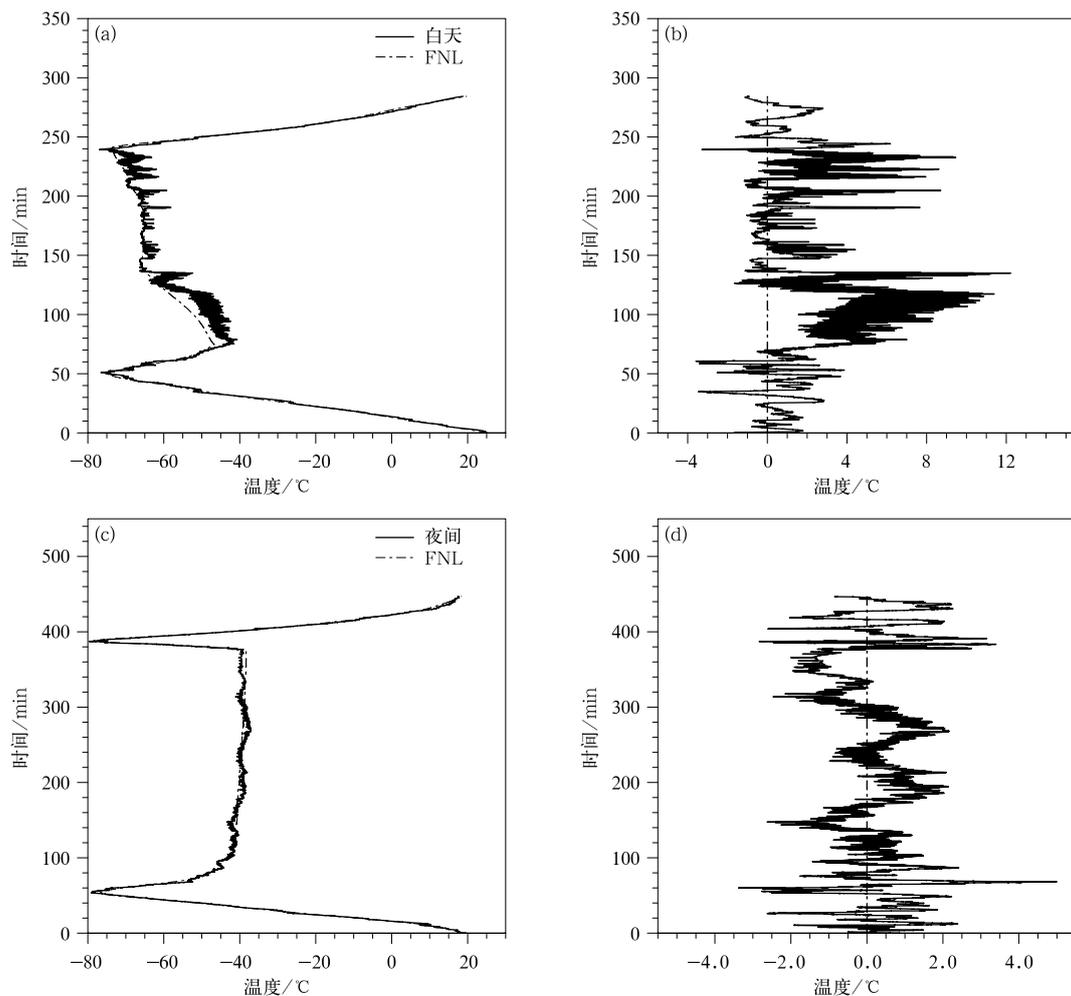


图 1 基于 FNL 资料的武汉站新型探空温度评估
2019 年 5 月 12 日 (a, b) 日间和 (c, d) 夜间 (a, c) 温度一致性以及 (b, d) 温度偏差
Fig. 1 New sounding temperature evaluation of Wuhan Station based on FNL data:
(a, c) temperature consistency and (b, d) temperature deviation during
(a, b) daytime and (c, d) nighttime on 12 May 2019

±2℃。日间平漂段温度经过初步辐射订正后在平漂开始和结束阶段仍存有较明显的正偏差,达到+12℃;夜间没有太阳辐射干扰的情况下,平漂段温度质量相对较好,偏差基本与上升段和下降段相当,能够达到±2℃。目前,气象探测中心已初步设计出测量日间平漂段温度“真值”的方案,相信未来日间平漂温度辐射偏差能够得到有效的订正处理。

基于 2019 年最新试验数据,选取同站业务秒级探空及 FNL 资料与之进行交叉对比,结果如图 2。上升段湿度廓线与 FNL 资料一致性较差,但偏差在整体上小于同站业务探空,证明新型探空仪具有更强的湿度探测能力,下降段湿度偏差整体上大于上升段。两类探空数据相对分析资料整体上较为偏干,一般在 10 km 附近湿度偏差最为明显。上升和下降段测得的气压廓线与 FNL 资料、同站探空的一致性较高,气压偏差整体在±4 hPa。10 km 以下新型探空资料的气压偏差略小于业务探空数据偏差。

2 “上升-平漂-下降”探空数据稀疏化方案

新型探空观测系统中秒级数据分辨率远超当前

模式分辨率,产生的冗余效应会在同化过程中造成负效果(郭欢,2017;马旭林等,2019)。故在同化试验前需先进行稀疏化处理。本文将规定层数据与特性层数据相结合的稀疏化方案(李庆雷等,2018)应用于新型探空系统上升段和下降段中。为避免试验数据集气压与规定层气压在数值上不完全一致而造成规定层遗漏,试验选取规定层一定小阈值内的探空数据。文中设置的上升段与下降段温度特性层阈值为 2℃。稀疏化对比效果如图 3 所示,使用稀疏化方案条件下得到的上升、下降段温度廓线,相比只提取规定层邻近数据的温度廓线更能够反映原始秒级数据中温度廓线的变化特征。

由于平漂段中气象要素变化一般较为平缓,规定层结合特性层的稀疏化方法尚不适用于平漂段数据。当前平漂段数据多采用从时间维度上进行稀疏的方法。

3 暴雨个例

2018 年 7 月 4—7 日,受低空切变线和低空急流影响,湖北中东部、湖南南部大部出现大暴雨,江西局部出现特大暴雨。天气图显示(图略),6 日 00 UTC

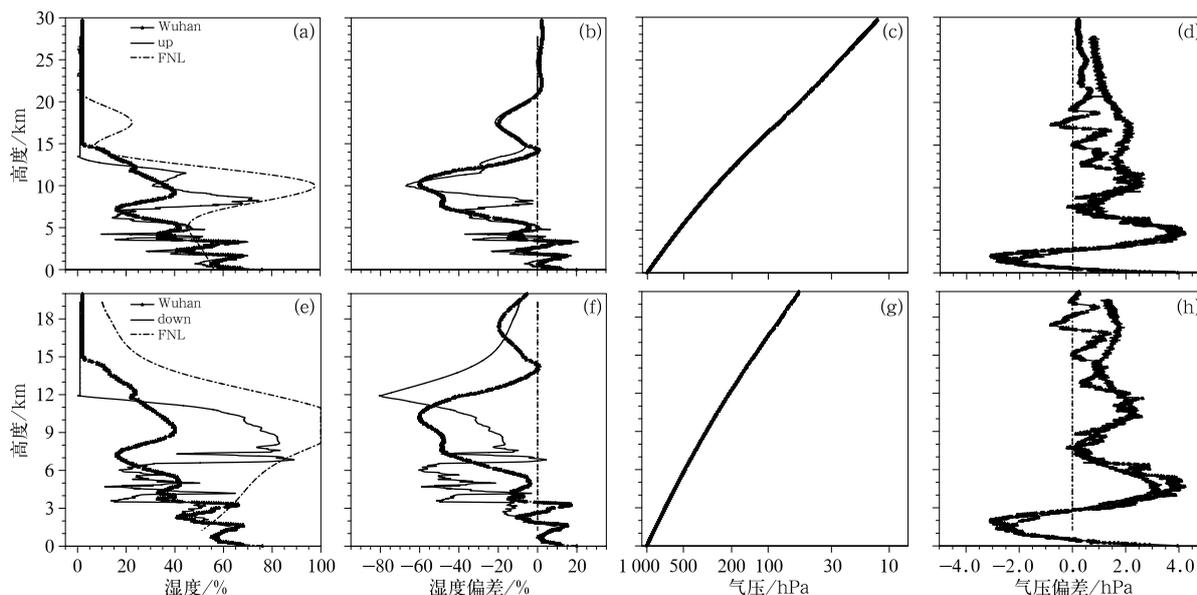


图 2 基于 FNL 资料和业务探空资料对 2019 年 5 月 12 日 00 UTC 武汉站 (a~d)上升段和(e~h)下降段的数据评估:(a,e)湿度一致性与(b,f)湿度偏差;(c,g)气压一致性与(d,h)气压偏差
 Fig. 2 Data evaluation of (a—d) ascending section and (e—h) descending section of the sounding at Wuhan Station at 00 UTC 12 May 2019 based on FNL data and operational sounding data: (a, e) humidity consistency and (b, f) humidity deviation, (c, g) pressure consistency and (d, h) pressure deviation

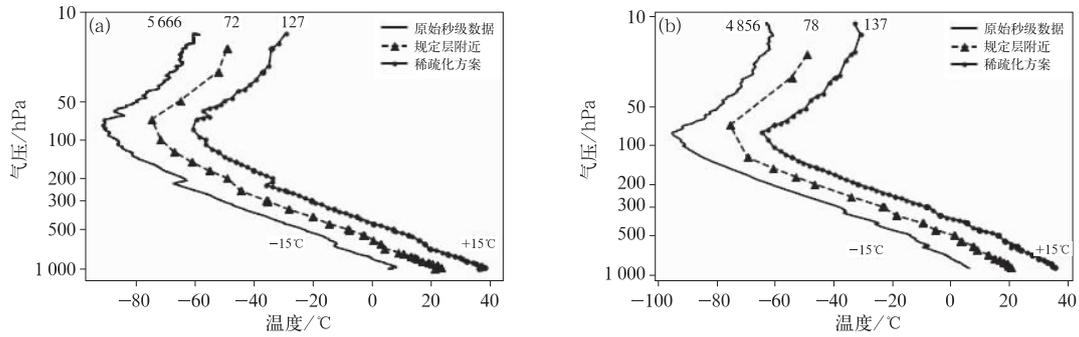


图 3 两种稀疏化方法得到的(a)上升段、(b)下降段温度廓线对比

Fig. 3 Comparison of temperature profiles in (a) ascending section, (b) descending section obtained by two thinning methods

500 hPa 上中高纬度呈现“两槽一脊”的形式,东侧槽南伸至长江中下游地区,利于引导冷空气南下;850 hPa 上长江中下游地区受低压带控制,存在低空风切变,有利于暴雨的产生。其中,6 日 18 UTC 至 7 日 18 UTC 的 24 h 降水实况如图 4。雨带整体呈东北—西南向走势,主要包括三个强降水中心,分别位于江西南部地区、湖南南部和广西北部地区。强降水中心 24 h 累计雨量能够达到 100 mm 以上。

4 资料与试验方案

本文同化的观测资料包括业务常规观测资料(Global Telecommunication System, GTS)和长江中下游六个站点(安庆、南昌、长沙、赣州、宜昌和武汉)的新型探空试验资料。常规观测资料中包括:自动站资料、业务探空资料、云迹风资料和飞机报资料。降水实况资料采用中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)提供的中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水网格数据集(1.0 版)。分析过程中使用欧洲中期预报中心(ECMWF)提供的分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的再分析数据集 ERA5 作为参考。

试验采用 WRF V3.9 模式与 WRFDA V3.9 同化系统,模拟区域中心为(28°N 、 113°E)。模式采

用两层嵌套,水平分辨率分别为 9 km 和 3 km,垂直方向 38 层,网格设置如图 5。使用 FNL 资料提供初始场和边界条件。物理参数化方案分别为:微物理参数化方案 WSM5, Grell 三维集成积云方案,长波辐射方案 RRTM,短波辐射方案 Dudhia,行星边界层方案 YSU,近地面层方案 MM5。

本文设计控制试验 CTL 和敏感试验 Down,以研究原有常规资料基础上加入下降段资料后对暴雨预报的改善效果,具体试验方案如表 1。同化方法采用 WRF 3D-Var(three-dimensional variational)。由于新型探空气球释放前后经纬度差异较大,本文使用逐点同化的方式来消除气球位置漂移造成的影响。同化要素包括温度、气压、湿度、位势高度、风速风向。Down 试验中同化的观测资料分布情况如图 6 所示。

5 试验结果

5.1 24 h 降水预报

控制试验与敏感试验模拟的 24 h 累计降水分布如图 7。可见 CTL 与 Down 两组试验对实况中的东北—西南向雨带都具有一定模拟能力,都模拟出

表 1 试验方案

Table 1 Test scheme

方案名称	模拟时段	同化资料	同化时刻
CTL 试验	2018 年 7 月 6 日 18 UTC 至 7 日 18 UTC	常规观测	2018 年 7 月 6 日 18 UTC
Down 试验	2018 年 7 月 6 日 18 UTC 至 7 日 18 UTC	常规观测+下降段观测 (武汉站、安庆站、南昌站)	2018 年 7 月 6 日 18 UTC

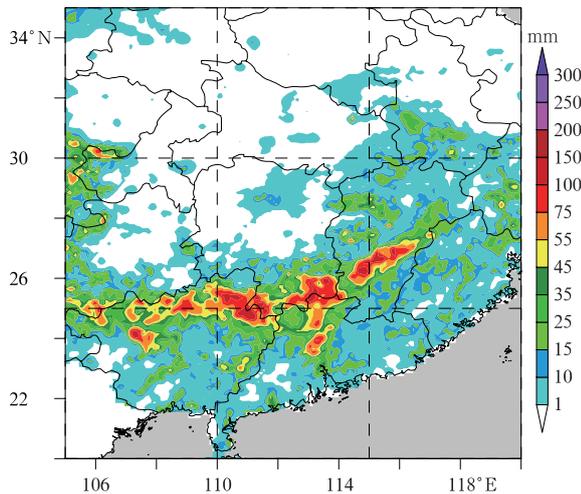


图 4 2018 年 7 月 6 日 18 UTC 至 7 日 18 UTC 24 h 降水实况

Fig. 4 The observed precipitation in 24 hours from 18 UTC 6 to 18 UTC 7 July 2018

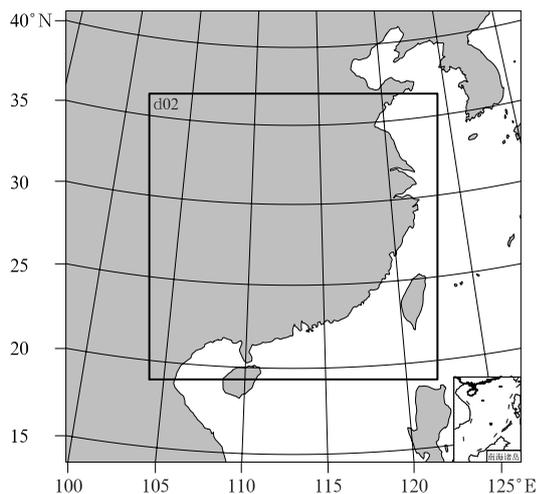


图 5 WRF 模拟区域设计

Fig. 5 Design of the WRF simulation area

了江西、湖南南部的强降水区域。但在控制试验中,江西南部区域出现了较为明显的 200 mm 以上虚假强降水中心,且湖南西南部也存在较大范围的降水误报,与实况不符。在敏感试验中,江西南部、湖南西南部的虚假强降水区域在范围和强度上都有一定程度减小,降水落区分布相对更加接近于实况。

5.2 ETS 降水评分

ETS(equitable threat score)客观检验评分相比 TS(threat score)评分,增加了对降水空报、漏报进行惩罚的部分,使得评分相对更加公平,其具体计算公式如下:

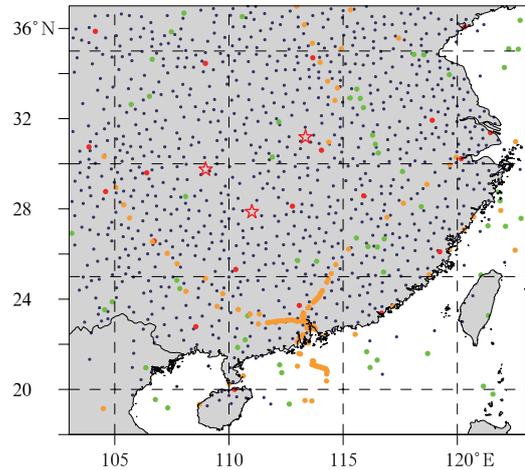


图 6 Down 试验模拟区域内的资料分布 (蓝色圆点:自动站资料,绿色圆点:云迹风资料,橙色圆点:飞机报资料,红色圆点:业务探空资料,☆:下降段资料)

Fig. 6 Data distribution map of down test in the simulation area

(blue dots: automatic station data, green dots: cloud trace wind data, orange dots: aircraft report data, red dots: operational sounding data, ☆: descending section data)

$$ETS = \frac{N_A - R_a}{N_A + N_B + N_C - R_a} \quad (1)$$

$$R_a = \frac{(N_A + N_B)(N_A + N_C)}{N_A + N_B + N_C + N_D} \quad (2)$$

式中: N_A 为预报正确的格点(次)数, N_B 为空报格点(次)数, N_C 为漏报格点(次)数, N_D 为预报与实况均未达到指定阈值的正确格点(次)数。根据 24 h 降水量,划分为小雨(0.1~9.99 mm),中雨(10~24.99 mm),大雨(25~49.99 mm),暴雨(50~99.99 mm)和大暴雨(>100 mm),共五个量级。

CTL 和 Down 试验在主要强降水区域(24°~28°N、108°~118°E)内的 ETS 评分如图 8 所示。可以看出,除了中雨量级上敏感试验预报效果略弱于控制试验外,其他降水量级上敏感试验的预报技巧上相比控制试验中皆有所提高,尤其对小雨、大雨和大暴雨的预报效果改进较为明显。Down 试验中大暴雨 ETS 评分由 CTL 中的 0.006 增长至 0.012,大雨和暴雨的 ETS 评分增幅达到 29.0%和 9.2%。

总体来看,加入下降段数据后有利于降水预报技巧的提高,尤其对于大雨量级以上的强降水预报技巧改进较为明显。

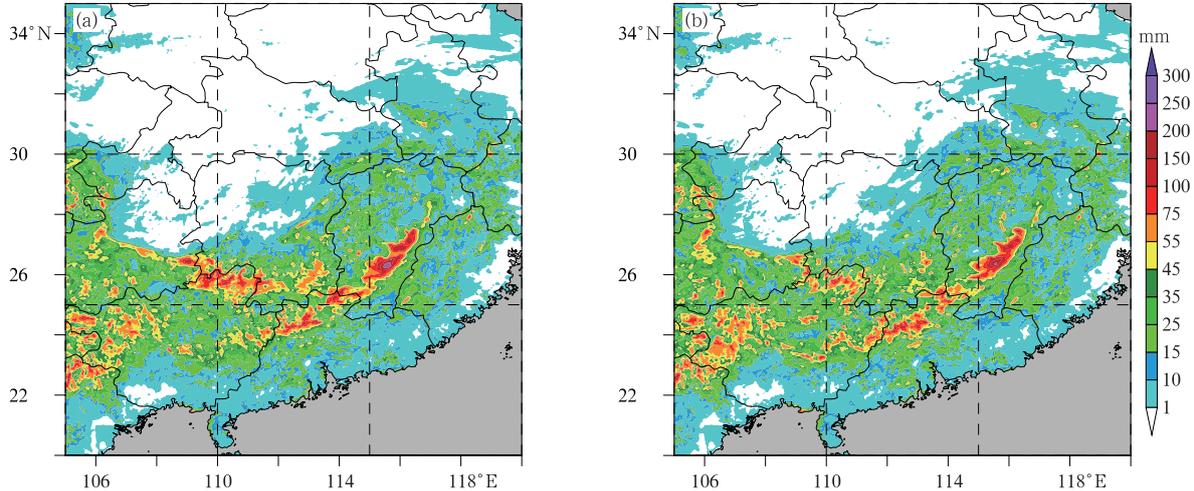


图 7 试验预报的 2018 年 7 月 6 日 18 UTC 至 7 日 18 UTC 24 h 累计降水

(a)CTL 试验,(b)Down 试验

Fig. 7 The simulated 24 h accumulated precipitation from 18 UTC 6 to 18 UTC 7 July 2018

(a) CTL test, (b) Down test

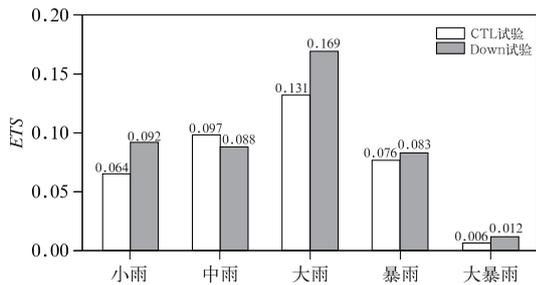


图 8 24 h 降水预报 ETS 评分

Fig. 8 The 24 h precipitation forecast ETS

5.3 分析增量分布

分析增量虽不能直接反映同化效果的好坏,但可以体现加入观测资料后对背景场的调整情况。以下给出同化下降段资料前后 850、500、200 hPa 上高度场、温度场、湿度场分析增量分布特征。

5.3.1 高度场分析增量

控制试验与敏感试验高度场分析增量如图 9。850 hPa 低层,两组试验正负增量中心都达到 2 m 和 -5 m,差异较小,敏感试验中负增量略大;500 hPa 中层,敏感试验在湖北西北部的 -5 m 负增量中心相比控制试验中有所增强,且湖南广西一带 -2 m 负增量区范围有所增大;200 hPa 高层,敏感试验中湖北西部负增量中心范围增大,且在广西北部增加了 -5 m 负增量中心。从垂直方向上来看,同化下降段资料对高层高度场调整较为明显,对低层高度场调整相对较小。

5.3.2 温度场分析增量

温度分析增量如图 10 所示。850 hPa 上,控制试验中,湖北、湖南、广西一带 0.1℃ 正增量区域在敏感试验中明显减小;500 hPa,敏感试验中,湖南南部 -0.5℃ 负增量中心较控制试验中略有增强;200 hPa 控制试验和敏感试验都以正温度分析增量为主,敏感试验中 0.3℃ 正增量范围有所增大。在本次个例中,同化下降段资料对低层和高层温度场改变较为明显,中层温度场变化相对较小。

5.3.3 相对湿度场分析增量

相对湿度分析增量分布情况如图 11。850 hPa 上,控制试验在湖北、湖南、广西一带的负增量在敏感试验中有所减小;500 hPa 上,敏感试验中安徽南部、江西北部地区的正增量较控制试验增加了 1%~2%;200 hPa 上,控制试验和敏感试验都以负相对湿度分析增量为主,二者差异较小。从垂直角度来看,同化下降段资料对中低层相对湿度调整相对明显,对 200 hPa 高层湿度场调整不明显,这可能与传感器在高层(约 12 km)测量湿度质量相对较差有关。

5.4 物理量场分析

2018 年 7 月 6 日暴雨过程的主要影响系统包括低空急流和与低空切变线。如图 12 所示,ERA5 资料、CTL 与 Down 试验都模拟出湖北、湖南地区上空的低空急流。虽然敏感试验中只加入了三段下降段资料,但由于同化时刻研究区域内原有探空资料偏少,且下降段资料的位置位于关键区域附近,故 Down 试验中预报的低空急流较 CTL 试验中有较

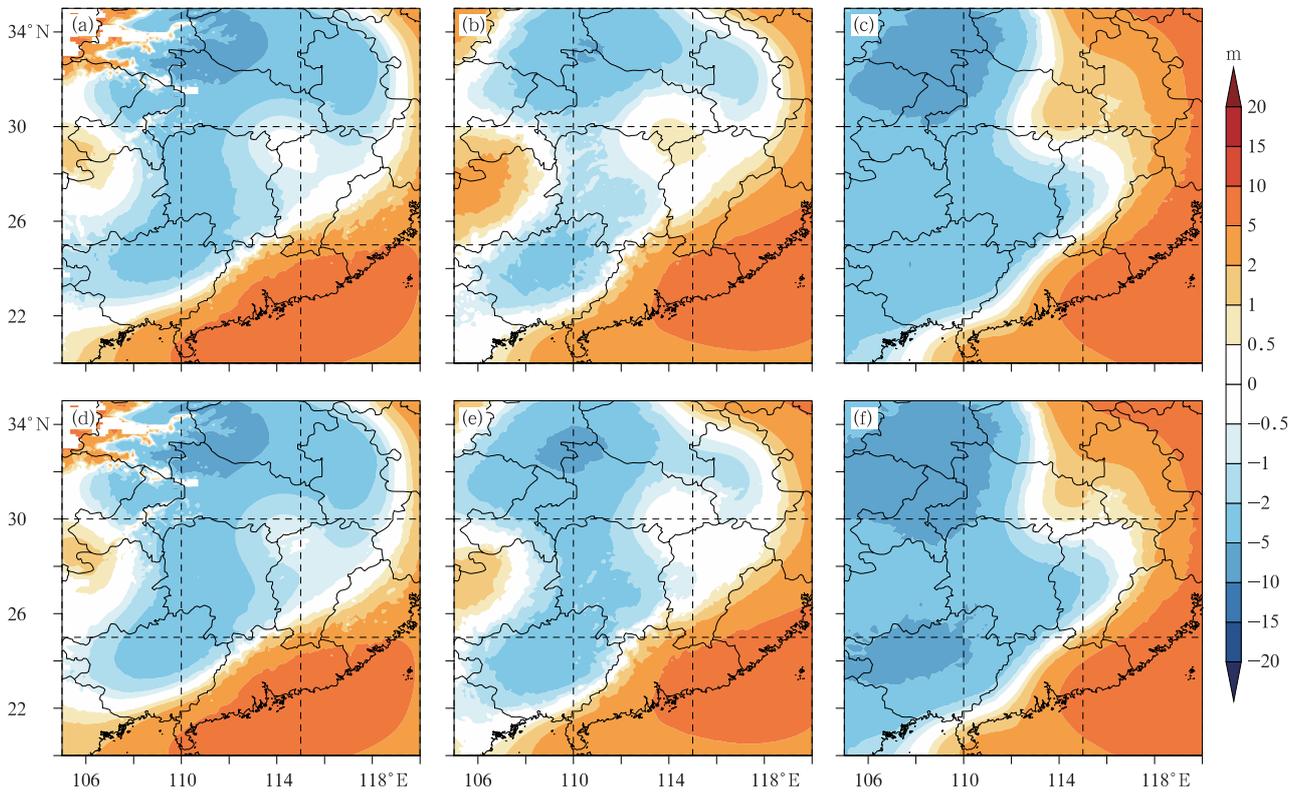


图 9 (a,b,c)CTL 试验和(d,e,f)Down 试验在(a,d)850 hPa,(b,e)500 hPa,(c,f)200 hPa 的高度场分析增量
Fig. 9 The height field analysis increment of (a, b, c) CTL test and (d, e, f) Down test at (a, d) 850 hPa (b, e) 500 hPa, (c, f) 200 hPa

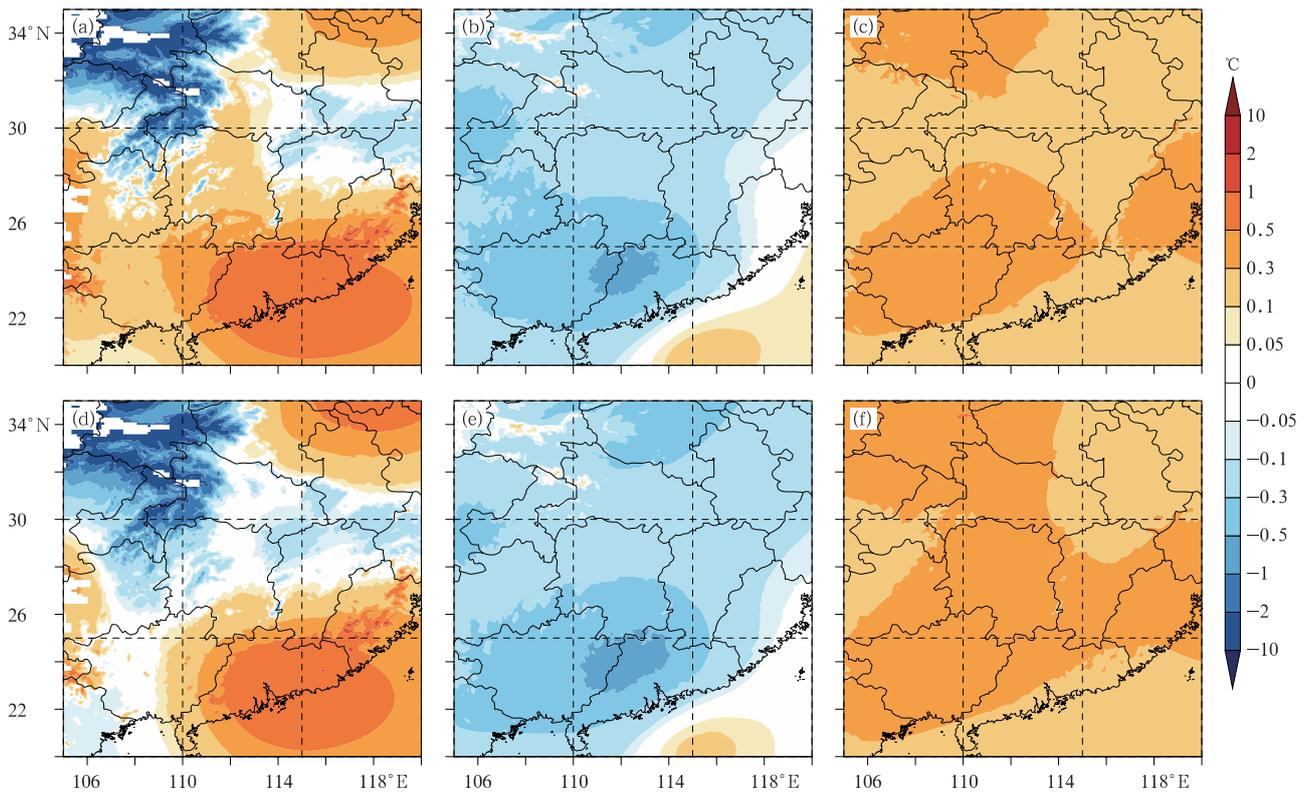


图 10 同图 9, 但为温度场分析增量
Fig. 10 Same as Fig. 9, but for the temperature field analysis increment

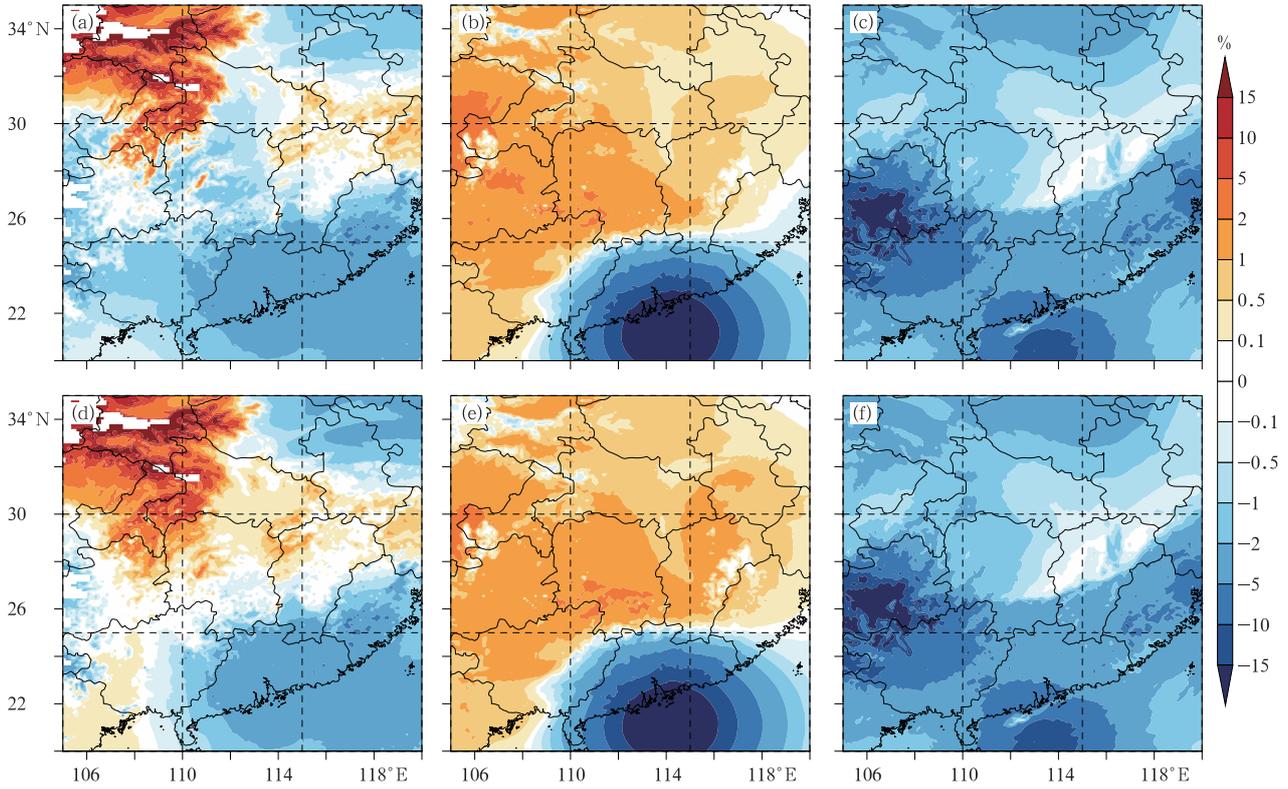


图 11 同图 9, 但为湿度场分析增量

Fig. 11 Same as Fig. 9, but for the humidity field analysis increment

明显的区别。CTL 试验预报的低空急流分为南北两支。在 Down 试验中, 低空急流虽南部风速较 CTL 试验中有所偏强, 但北部急流在空间范围和风速上较 CTL 试验中都有明显减小, 使其在空间范围上整体更接近于 ERA5 再分析结果。

水汽通量可以反映降水过程中水汽的来源和输送情况。CTL 与 Down 试验对水汽通量的模拟效

果如图 13。可以看出本次降水过程的水汽输送情况很大程度上受到江淮气旋的影响, 气旋携带南部洋面的水汽, 再将其由北向南输送。Down 试验中预报的江西地区水汽通量与 CTL 试验中相差较小, Down 试验中略强。但 Down 试验在安徽、河南、湖北一带向南输送的水汽通量以及广西地区向北输送

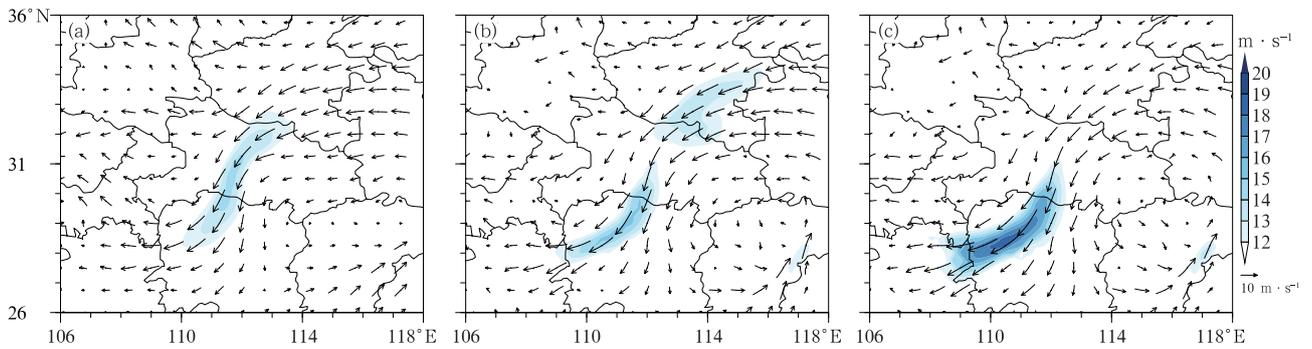


图 12 2018 年 7 月 6 日 18 UTC 850 hPa 低空急流和风速(填色)、风向(矢量箭头)

(a)ERA5 资料, (b)CTL 试验, (c)Down 试验

Fig. 12 The 850 hPa low-level jet, wind speed (colored) and wind direction (vector arrow) at 18 UTC 6 July 2018

(a) ERA5 data, (b) CTL test, (c) Down test

的水汽通量都较 CTL 试验有所减弱,削弱了强降水所需的水汽持续供应,从而有利于减弱湖南西南部的虚假强降水。

通过比较试验预报的整层大气可降水量,可以进一步验证以上结论。如图 14 所示,控制试验与敏感试验预报的长江中下游地区大气可降水量分布情况整体较为相似,但 Down 试验预报的湖南西南部大气可降水量较 CTL 试验预报结果有明显减小,其中负值中心达到-3.5 mm,且湖北南部及湖南北部区域的大气可降水量也有一定程度的减小,与水汽

通量中的表现相一致,有利于削弱该地区的虚假强降水。

控制试验与敏感试验预报的对流有效位能(CAPE)也具有一定差异。如图 15a、15b 所示,两组试验在同化时刻的 CAPE 值总体分布较为相近,但由图 15c 可以看出,Down 试验预报的湖南西南部以及江西南部地区 CAPE 值小于 CTL 试验中的预报结果,一定程度抑制了 CTL 试验中虚假强降水的发生发展,有利于强降水预报技巧的提高。

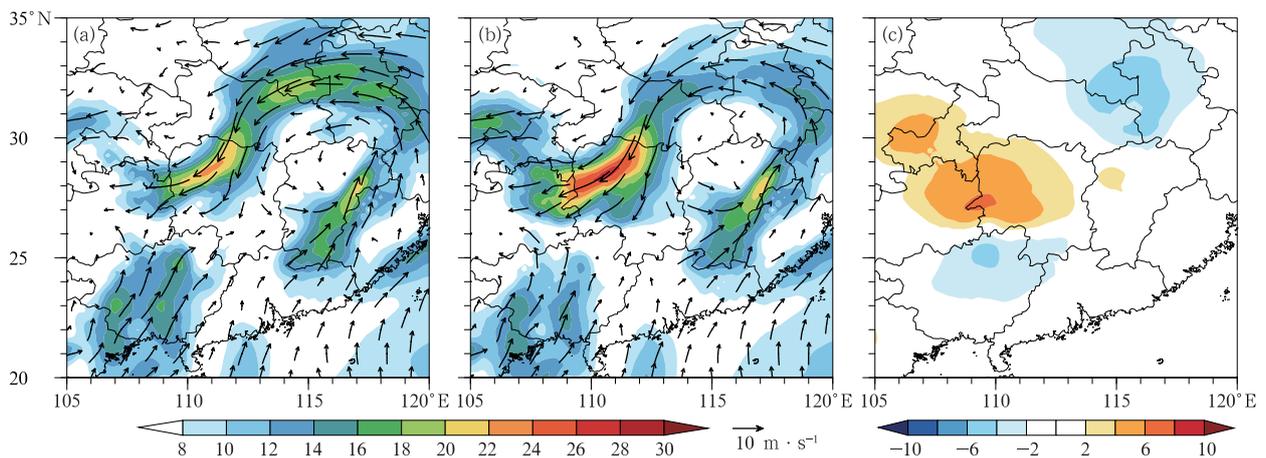


图 13 2018 年 7 月 6 日 18 UTC 850 hPa 水汽通量(填色,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)和风向、风速(矢量箭头)

(a)CTL 试验,(b)Down 试验,(c)Down 试验与 CTL 试验的水汽通量之差

Fig. 13 The 850 hPa water vapor flux (colored, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$), wind direction and wind speed (vector arrow) at 18 UTC on 6 July 2018

(a) CTL test, (b) Down test, (c) difference of water vapor flux between Down test and CTL test

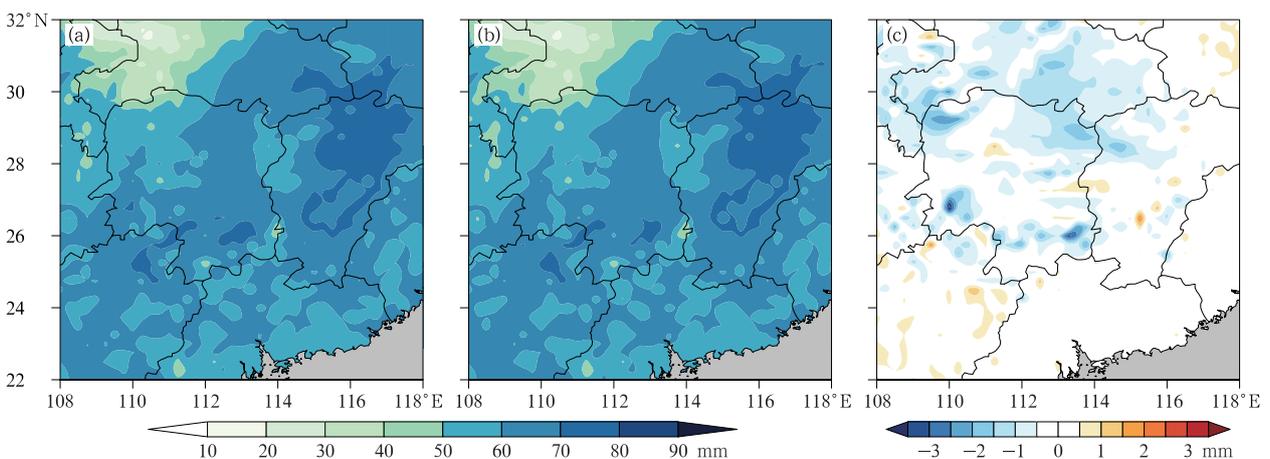


图 14 2018 年 7 月 6 日 20 UTC 大气可降水量

(a)CTL 试验,(b)Down 试验,(c)CTL-Down

Fig. 14 Atmospheric precipitable water at 20 UTC 6 July 2018

(a) CTL test, (b) Down test, (c) CTL-Down

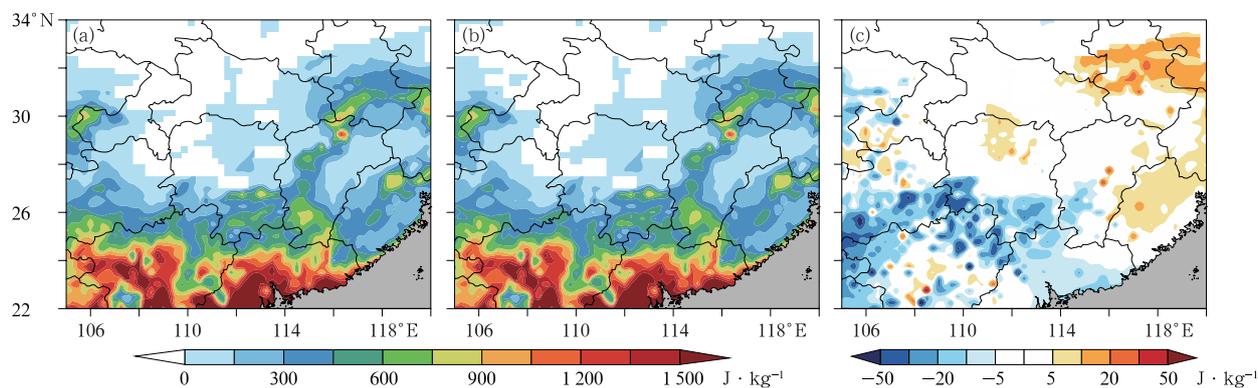


图 15 同图 14, 但为 7 月 6 日 18 UTC 对流有效位能

Fig. 15 Same as Fig. 14, but for CAPE at 18 UTC 6 July 2018

6 结论与讨论

本文基于长江中下游新型“上升-平漂-下降”探空观测数据集设计了同化对比试验。在对新型探空数据进行质量评估和稀疏化处理的基础上,将下降段资料与常规观测资料结合并进行同化对比试验,根据试验结果讨论新型探空系统在长江中下游暴雨预报中的应用效果及前景。主要结论有:

(1) 通过将“上升-平漂-下降”探空试验数据与 FNL 资料以及同站业务秒级探空数据进行交叉对比,检验了最新试验探空数据质量。

(2) 使用规定层结合特性层的稀疏化方案能够对“上升-平漂-下降”探空系统中上升段、下降段数据进行有效的稀疏化处理。

(3) 本文试验中,同化新型探空下降段数据后,能够改善控制试验中出现的降水高估、误报等问题,提高强降水预报技巧。其中大暴雨 ETS 评分由控制试验中的 0.006 增长至 0.012,大雨和暴雨的 ETS 评分增幅分别达到 29.0% 和 9.2%。

(4) 同化下降段观测资料能够对多个高度上的高度场、温度场和相对湿度场产生一定的调整作用。

(5) 在原有常规观测资料基础上加入下降资料并同化后,风场出现了较为明显的调整,进而改善了水汽输送情况,这可能是导致降水预报技巧提高的重要原因之一。

本文试验结果证明“上升-平漂-下降”探空系统在同化方面有很好的应用前景。但由于目前新型探空系统尚未业务化运行,可用于同化试验的数据有限,所得结论尚不具广泛代表性,随着日后数据集的完善,可做更多试验验证当前结论。未来工作中可

尝试由高低层风场相互作用及能量输送的角度入手,将更多数据引入到天气、气候模式中,从而更好地体现新型探空系统在资料同化与数值预报领域的价值。

参考文献

- 宝兴华,杨舒楠,2015. WRF-EnKF 系统对中国南方一次暴雨过程确定性预报的试验[J]. 气象,41(5):566-576. Bao X H, Yang S N, 2015. Deterministic-prediction experiment of one torrential rainfall event in southern China using a WRF-EnKF system[J]. Meteor Mon,41(5):566-576(in Chinese).
- 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).
- 陈朝平,龙柯吉,张利红,2012. 加密探空资料在 GRAPES 同化系统中的试验结果分析[J]. 高原山地气象研究,32(4):14-20. Chen C P, Long K J, Zhang L H, 2012. Result analysis of intensive sounding data assimilation in GRAPES system[J]. Plateau Mt Meteor Res,32(4):14-20(in Chinese).
- 陈洪滨,朱彦良,2008. 大气下投探空技术的发展与应用[J]. 地球科学进展,23(4):337-341. Chen H B, Zhu Y L, 2008. A review on the development and application of the atmospheric dropsonde technique[J]. Adv Earth Sci,23(4):337-341(in Chinese).
- 陈源,刘海磊,段民征,等,2020. 利用探空资料验证北京地区 OMPS 卫星臭氧产品[J]. 遥感技术与应用,35(3):723-730. Chen Y, Liu H L, Duan M Z, et al, 2020. Validation of ozone product by satellite OMPS with sounding measurements over Beijing[J]. Remote Sens Technol Appl,35(3):723-730(in Chinese).
- 董海萍,袁炳,罗雨,2017. 多源资料循环同化在台风“潭美”预报中的应用[J]. 热带气象学报,33(4):433-441. Dong H P, Yuan B, Luo Y, 2017. The study of multi-source data cycling assimilation using GSI-3DVar in Trami typhoon forecast[J]. J Trop Meteor, 33(4):433-441(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).
- 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).
- 龚俊强, 刘朝顺, 刘延安, 等, 2019. 探空和飞机观测资料联合同化对台风“苏迪罗”(2015)数值模拟的影响研究[J]. 热带气象学报, 35(1):99-112. Gong J Q, Liu C S, Liu Y A, et al, 2019. The impact of joint assimilation of radiosonde and aircraft observations on numerical simulation of Typhoon “Soudelor” (2015) [J]. J Trop Meteor, 35(1):99-112(in Chinese).
- 郭欢, 2017. GPS掩星资料垂直稀疏化方案及其同化研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Guo H, 2017. Research on the vertical thinning scheme and assimilation of GPS occultation data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(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 rdiosonde rising and parachute carrying radiosonde descending[J]. Meteor Mon, 44(8): 1094-1103(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).
- 李刚, 王颢樾, 柴素盈, 等, 2014. 利用探空资料对对流层-平流层热力结构的分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 36(3):384-391. Li G, Wang H Y, Chai S Y, et al, 2014. An analysis on troposphere and stratosphere thermal structure by radiosonde data [J]. J Yunnan Univ, 36(3):384-391(in Chinese).
- 李佳英, 俞小鼎, 王迎春, 2006. 用探空资料检验中尺度数值模式对强对流天气的诊断分析能力[J]. 气象, 32(7):13-17. Li J Y, Yu X D, Wang Y C, 2006. Evaluation of convective parameters derived from mesoscale numerical model by sounding data[J]. Meteor Mon, 32(7):13-17(in Chinese).
- 李金辉, 田显, 岳治国, 2020. 基于火箭探空资料的冰雹云内部结构个例分析[J]. 大气科学, 44(4):748-760. Li J H, Tian X, Yue Z G, 2020. Case study of hail cloud internal structure based on rocket sounding data[J]. Chin J Atmos Sci, 44(4):748-760 (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).
- 李杨, 马舒庆, 官福顺, 2016. 飞机下投探空在台风探测中的应用[J]. 气象科技, 44(5):710-714. Li Y, Ma S Q, Guan F S, 2016. Application of dropsondes in typhoon observation[J]. Meteor Sci Technol, 44(5):710-714(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).
- 孟智勇, 唐晓静, 岳健, 等, 2019. 地面和探空资料的 EnKF 同化对北京 7·21 极端暴雨模拟的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 55(2):237-245. Meng Z Y, Tang X J, Yue J, et al, 2019. Impact of EnKF surface and rawinsonde data assimilation of the simulation of the extremely heavy rainfall in Beijing on July 21, 2012[J]. Acta Sci Nat Univ Peking, 55(2):237-245 (in Chinese).
- 莫毅, 潘晓滨, 臧增亮, 等, 2008. 资料同化对一次华南暴雨影响的数值试验研究[J]. 暴雨灾害, 27(4):289-294. Mo Y, Pan X B, Zang Z L, et al, 2008. Effect of data assimilation on a numerical simulation of a heavy rain in South China[J]. Torr Rain Disaster, 27(4):289-294(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).
- 曲晓波, Heming J, 2006. 下投式探空资料对数值预报初始场影响的个例分析[J]. 气象与环境学报, 22(2):34-37. Qu X B, Heming J, 2006. A case study of the impact of Dropsonde data on the NWP initial fields[J]. J Meteor Environ, 22(2):34-37 (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).
- 吴泓锟, 陈起英, 华维, 等, 2019. 基于秒级探空资料分析四川重力波统计特征[J]. 应用气象学报, 30(4):491-501. Wu H K, Chen Q Y, Hua W, et al, 2019. A statistical study of gravity wave with

- second-level radiosonde data in Sichuan[J]. *J Appl Meteor Sci*, 30(4):491-501(in Chinese).
- 吴蕾,陈洪滨,康雪,2014. 风廓线雷达与 L 波段雷达探空测风对比分析[J]. *气象科技*, 42(2):225-230. Wu L, Chen H B, Kang X, 2014. Comparison between wind profiler and L band upper-air meteorological sounding system[J]. *Meteor Sci Technol*, 42(2): 225-230(in Chinese).
- 肖良华,闫林明,曹世坤,等,2019. 无人机下投探空仪投放过程数值模拟[J]. *无人系统技术*, 2(6):46-52. Xiao L H, Yan L M, Cao S K, et al, 2019. Numerical simulation of the release of dropsonde from UAV[J]. *Unmanned Syst Technol*, 2(6):46-52(in Chinese).
- 徐同,王晓峰,张蕾,等,2016. 加密探空资料在华东区域业务模式中的应用试验[J]. *暴雨灾害*, 35(4):306-314. Xu T, Wang X F, Zhang L, et al, 2016. The application test of intensive radiosonde observations in the East China regional numerical model system [J]. *Torr Rain Dis*, 35(4):306-314(in Chinese).
- 杨晨义,郭启云,曹晓钟,等,2021. 基于新型往返式探空观测的下平流层重力波特征分析[J]. *气象学报*, 79(1):150-167. Yang C Y, Guo Q Y, Cao X Z, et al, 2021. Analysis of gravity wave characteristics in the lower stratosphere based on new round-trip radiosonde[J]. *Acta Meteor Sin*, 79(1):150-167(in Chinese).
- 姚爽,陈敏,王建捷,2015. L 波段分钟数据在 WRF 模式中的变分同化应用试验[J]. *气象*, 41(6):695-706. Yao S, Chen M, Wang J J, 2015. Variational assimilation experiment of L-band minute-level sounding data with WRF model[J]. *Meteor Mon*, 41(6): 695-706(in Chinese).
- 张诚忠,万齐林,丁伟钰,等,2012. 下投探空资料在台风莫拉克路径预报的应用试验[J]. *气象学报*, 70(1):30-38. Zhang C Z, Wan Q L, Ding W Y, et al, 2012. An experiment in application of the dropsonde data to forecasting the track of Typhoon Morakot [J]. *Acta Meteor Sin*, 70(1):30-38(in Chinese).
- 张利红,何光碧,屠妮妮,等,2013. 不同观测资料在西南地区数值预报中的应用[J]. *高原山地气象研究*, 33(3):23-30. Zhang L H, He G B, Tu N N, et al, 2013. Application of different observations in numerical weather prediction of Southwest China[J]. *Plateau Mountain Meteor Res*, 33(3):23-30(in Chinese).
- 张思齐,郭艳君,王国复,2018. 中国探空观测与第 3 代再分析大气湿度资料的对比研究[J]. *气象学报*, 76(2):289-303. Zhang S Q, Guo Y J, Wang G F, 2018. A comparative study of atmospheric humidity over China between radiosonde and the third generation reanalysis datasets[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(2):289-303(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).
- 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.
- 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.
- Kwon E H, Sohn B J, Smith W L, et al, 2012. Validating IASI temperature and moisture sounding retrievals over East Asia using radiosonde observations[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 29(9): 1250-1262.
- Laroche S, Sarrazin R, 2013. Impact of radiosonde balloon drift on numerical weather prediction and verification[J]. *Wea Forecasting*, 28(3):772-782.
- Singh R, Ojha S P, Kishtawal C M, et al, 2014. Impact of various observing systems on weather analysis and forecast over the Indian region[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 119(17):10232-10246.
- Xu G R, Xi B K, Zhang W G, et al, 2015. Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 120(19):10313-10323.
- Yamazaki A, Inoue J, Dethloff K, et al, 2015. Impact of radiosonde observations on forecasting summertime Arctic cyclone formation[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 120(8):3249-3273.