

华南外场观测试验中北斗探空对台风“苏拉” (2309) 的同化预报影响*

罗嘉美¹ 郭启云² 马旭林¹ 段明铿¹

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: 基于 2023 年夏季华南外场试验数据, 利用中尺度天气研究和预报系统(WRF)及其变分同化系统(WRFDA)的三维变分同化方法, 研究分析了同化广东组网的北斗探空数据对预报台风“苏拉”(2309)所做的贡献, 探讨了新型北斗探空观测系统全面业务化的应用前景。研究发现, 北斗探空与同站 L 波段探空以及 ERA5 再分析资料、FNL 分析场资料具有基本一致的质量, 观测价值较高; 北斗探空资料的有效同化对背景场的温度、湿度和风场均有不同程度的调整, 明显改善了分析场, 对台风的路径、强度以及降水预报也均有相应改善, 其中路径误差相比未同化北斗探空改善了 11.87 %。

关键词: 北斗探空, 台风“苏拉”, 资料同化, 质量评估

Data Assimilation Forecast Impact of Beidou Sounding on Typhoon Saola (2309) Forecast in South China Fields Observation Experiment

LUO Jiamei¹ GUO Qiyun² MA Xulin¹ DUAN Mingkeng¹

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: Based on the data from the South China outfield experiment in summer 2023, the contribution of assimilating Beidou sounding data from the Guangdong network to forecasting Typhoon Saola (2309) was studied and analyzed using the three-dimensional variational assimilation method of the Weather Research and Forecasting Model (WRF) and its Variational Assimilation System (WRFDA). The application prospects of the fully operationalized new Beidou sounding observation system were also explored. The study found that Beidou sounding has basically the same quality as L-band sounding at the

作者简介 罗嘉美, 硕士研究生, 主要从事数值预报资料同化研究。E-mail: nuist_mei@163.com

通信作者 郭启云, 主要从事探空关键技术研究与应用。E-mail: feng_cloudy@163.com

资助课题 国家自然科学基金联合基金项目(重点支持项目)(U2242213、U2442221)、国家自然科学基金(U2442214)、国家重点研发计划(2021YFC3000902)

same station, as well as ERA5 reanalysis data and FNL analysis field data, and has high observational value. The effective assimilation of Beidou sounding data has adjusted the temperature, humidity, and wind fields of the background field to varying degrees, significantly improving the analysis field. It also has corresponding improvements in the forecast of the typhoon's track, intensity, and precipitation, with the track error improving by 11.87% compared to the non-assimilated Beidou sounding.

Keywords: Beidou sounding, Typhoon Saola, Data assimilation, Quality assessment

引言

探空观测是目前唯一能直接获取大气三维信息的观测系统，也是高空观测体系中最为可信的基准资料（Faccani et al, 2009），常作为各类遥感产品的检验评估标准（Kwon et al, 2012; Xu et al, 2015; 马旭林等, 2017; 郭启云等, 2020）。早在 20 世纪 90 年代，国外便已开始了针对高垂直分辨率探空资料的研究（Hamilton and Vincent, 1995），2005 年起美国 NOAA 可获取垂直分辨率为 5 m 的连续秒级数据。我国从 2002 年开始进行从 59 型探空仪到 L 波段雷达的升级改造，并于 2011 年全面完成全国 120 个探空站的更新换代，L 波段探空采样时间为 1.2 s，垂直分辨率约为 8 m，探测高度可达 10 hPa（杨湘婧等, 2011; 郝民等, 2014）。

高垂直分辨率的秒级探空可细致刻画大气结构特征，更准确地揭示大气内部运动规律。如利用高分辨率探空数据分析对流层至平流层的温度层结特征（李刚等, 2014），基于秒级探空数据研究重力波特征（吴泓锟等, 2019），以及通过 L 波段秒级探空分析边界层高度及状态的时空变化（梁智豪等, 2020）。此外，传统常规探空资料在 2 km 以下大气边界层仅能提供 5 层或 6 层信息，而随着数值模式的发展，中尺度模式在边界层的垂直层次通常可达到十几层，同化秒级探空资料更能有效提高分析质量从而改善预报效果（郝民等, 2014; 姚爽等, 2015）。尽管 L 波段秒级探空能获得高垂直分辨率数据，但固定站点的探空频次仅为一日两次，且空间分辨率偏低，仍难以满足中小尺度灾害性天气系统的监测与预报需求。同时，L 波段秒级探空资料垂直分辨率远高于模式分辨率，需要应用合理有效的稀疏化方案，否则直接同化高分辨率的秒级探空资料可能引起资料冗余，从而影响分析质量（郝民等, 2014; 马旭林等, 2019）。另外，对传统常规探空资料进行同化还存在漂移误差。姚爽等（2015）研究指出，我国北方地区（以 35°N 为界）气球经向漂移明显，200 hPa 达到 0.3°，100 hPa 以上超过 0.5°；考虑气球漂移信息的逐点同化方式能有效改善高层风场的预报质量。国外学者运用四维变分将气球时空漂移信息引入数值模式中，试验表明同化时考虑气球漂移对提高模式预报技巧有积极意义（Choi et al, 2015）。下投探空作为一种灵活机动的观测方式，可以针对某些特定天气系统实施加密或加强观测，有效补充传统常规探空观测的不

足。譬如，针对台风的下投式探空观测对改善台风移动路径及强度预报均呈现出明显的价值（曲晓波和 Heming, 2006; 张诚忠等, 2012; Wang et al, 2015）。尽管已有诸多研究表明，时空加密或加强观测可以显著提高数值天气预报技巧（徐同等, 2016; 王丹等, 2019），但由于观测成本巨大，仍难以经常性开展。

当前高分辨率数值预报模式的发展和预报精度的快速提高，对观测资料也提出了更多需求。中国气象局气象探测中心在同球双释放技术和北斗卫星导航定位测风技术的基础上研发了北斗导航探空观测系统（郭启云等, 2018a, b）。该系统在现有业务探空气球上升观测（约 1 小时）的基础上，增加了平漂及下降功能，气球上升达到一定高度后进入约 4-5 小时的平漂阶段，最后控制其降落实现下投探空观测（约 1 小时），即通过一次施放，获取三段高空大气观测，从而以较低的成本实现高空观测时空加密（曹晓钟等, 2019）。自 2018 年以来探测中心在内蒙、长江中下游地区、广东省进行了长时多次的组网试验，获取了大量观测试验资料。王丹等（2020）建立了面向业务化应用的北斗探空资料质量控制方案，并利用模式预报场和同站 L 波段业务探空对质量控制后北斗探空数据的不确定性进行了分析，发现北斗探空的水平风、温度、湿度和气压测量的不确定度基本达到了世界气象组织规定的突破目标，部分观测要素甚至达到了理想目标，验证了数据的可信和可用性。基于长江中下游试验数据集，杨晨义等（2021）和 Zhang et al（2023）对北斗探空的应用展开了研究。周雪松等（2023）利用北斗探空数据对 FY-3D 卫星数据的反演算法进行检验，并实现对卫星反演温度和平流层反演温度数据的检验评估。张旭鹏等（2021）讨论了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，发现导致降水预报技巧提高的可能原因是同化下降段资料后风场出现了较为明显的调整，并且降水场附近的水汽输送预报情况得到改善。张鑫等（2025）进行了资料的预报敏感性研究，进一步揭示了北斗探空观测对同化和预报的改善效果和应用潜力，指出新型北斗探空观测数据对长江中下游目标区的预报具有显著正贡献，且风向和湿度观测对预报质量有明显的改善。

随着北斗探空站在全国的逐步建设，未来其将在中小尺度系统监测、平流层大气分析、数值预报等多方面发挥重要作用。通过多通道地面接收机合理布设，可以实现对一定区域甚至全国的联网连续观测。王瑞文等（2023）和王金成等（2021）基于北斗探空轨迹预测系统，开展了观测系统模拟试验，分析了全国组网情况下同化北斗探空资料对数值预报的影响，对北斗探空的未来组网、布局具有一定指导意义。为实现北斗探空全国组网业务化运行，中国气象局气象探测中心已先行在华南地区开展了一年的北斗探空系统业务试运行，并已于 2024 年 1 月 1 日正式实现业务切换。其中，2023 年 9 月开展的华南外场试验利用广东组网系统获取了台风观测数据集。本文基于该数据集，在评估其上升、下降阶段观测资料质量的基础上，针对台风“苏拉”（2309）开展

同化预报的对比试验，探讨同化北斗探空资料对台风路径、强度以及降水预报的影响，为全面、充分了解北斗探空资料的特性和观测质量以及将来大范围实际业务应用奠定科学基础。

1 资料与试验方案

1.1 台风概况及北斗探空资料

2023年8月24日00时（世界时，下同），台风“苏拉”（2309）生成于菲律宾以东洋面，随后向北偏西移动并逐渐增强；25日18时，“苏拉”升级为台风并向南移动；26日06时升级为强台风，此时台风中心位于（18°N、123.2°E），中心最大风力达到15级。9月1日19时在广东珠海登陆，中心气压为950 hPa；2日06时以强热带风暴级在广东阳江再次登陆；3日06时消亡。“苏拉”生存期间，强度猛烈，路径诡异复杂，对中国华南地区产生强风雨影响。登陆期间的24 h累计降水情况如图1所示，随着台风向西移动，9月1—3日的雨带也不断西移，强降水中心分别位于广东南部及广东和广西交界处，累计降水量达到100 mm以上。

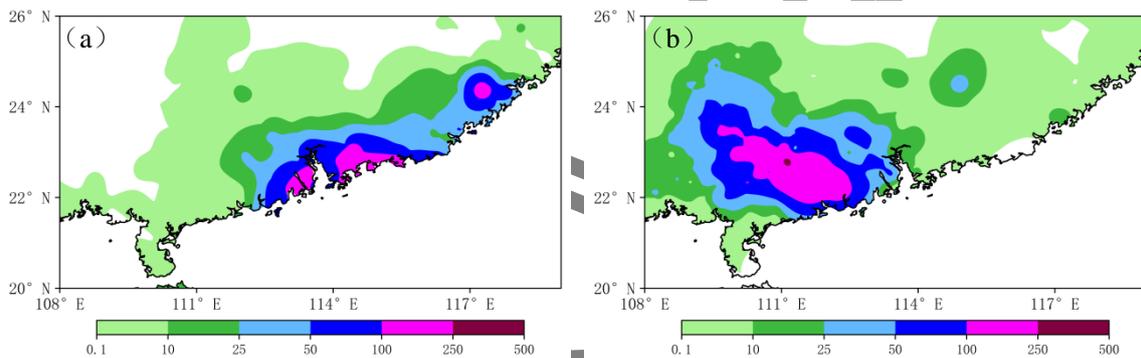


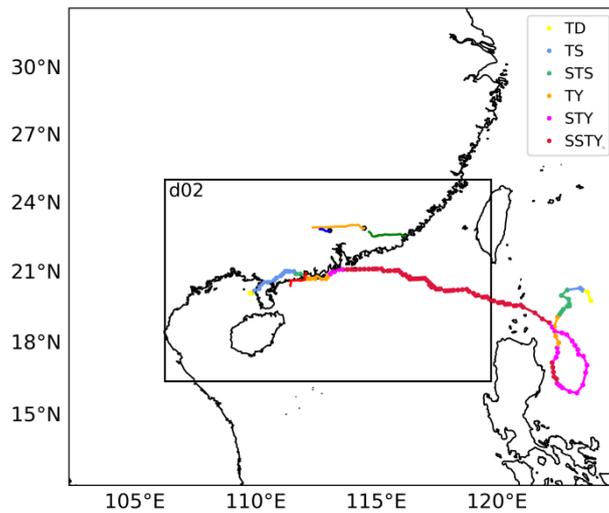
图1 2023年9月（a）1日00时至2日00时，（b）2日00时至3日00时台风“苏拉”（2309）24 h累计降水量（单位：mm）

Fig.1 24-hour cumulative precipitation of Typhoon Saola (2309) (unit: mm) (a) from 0000 UTC 1 to 0000 UTC 2 September 2023, (b) from 0000 UTC 2 to 0000 UTC 3 September 2023

针对此次台风过程，中国气象局气象探测中心联合中国气象局地球系统数值预报中心、广东省气象局开展了北斗探空的外场观测试验，使得高空气象观测单站的空间覆盖范围从业务探空的数十千米延伸至100千米~400千米。另外北斗探空采用北斗实时定位，具备实时追踪气球漂移轨迹的能力，可以提供资料每秒准确的定位信息，同时其垂直分辨率较高；而常规探空仅记录测站的站点经（纬）度，并不提供气球实时位置信息，因此同化常规探空时采用传统的廓线同化，而对北斗探空资料进行逐点同化（张旭鹏等，2021）。此次试验的观测时段为2023年8月31日00时至9月6日00时，每日两次观测，分别为00时和12时，其中9月2日有06时观测，共计使用55个站次的观测资料。

1.2 试验方案

为了研究华南外场观测试验中北斗探空观测对台风“苏拉”的路径、强度及其引发的强降水预报质量的贡献，开展同化预报试验。同化的观测资料包括常规观测资料（自动站、业务探空、云导风资料）和针对南海台风实施的外场观测试验资料，即北斗探空资料。降水实况资料为中国自动观测站逐小时降水资料。试验基于 WRF v3.9 模式与 WRFDA v3.9 三维变分同化系统，模拟区域中心为（23°N、113°E），采用双层嵌套，水平分辨率分别为 9 km 和 3 km，垂直方向为 41 层。试验模拟区域、北斗探空系统在广东组网的空间分布及台风路径如图 2 所示。



注：红色、蓝色、黄色、绿色实线分别表示阳江、清远、河源、汕头站施放的气球运行轨迹；点线为台风移动路径，不同颜色表示台风强度等级；d02 方框为试验嵌套模拟区域

图 2 模拟区域、北斗探空资料分布及台风路径

Fig.2 Simulated area, distribution of Beidou sounding data, and typhoon path

同化背景场和预报模式的侧边界条件为相应时间的 GFS 12 h 预报场，其水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间间隔为 6 h。物理参数化方案分别为微物理参数化方案 WSM5、积云对流方案 Betts-Miller-Janjic、长波辐射方案 RRTM、短波辐射方案 Dudhia、行星边界层方案 YSU 和近地面层方案 Monin-Obukhov。设计控制试验（CTL）和北斗探空试验（BDS），CTL 只同化常规观测资料；BDS 在 CTL 基础上增加了北斗探空上升段资料，但剔除与北斗探空同站的广东 4 个探空站（阳江、清远、河源、汕头站）的常规探空资料，以研究同化北斗探空后对同化分析和台风预报的改善效果。具体同化试验方案见表 1。

表 1 同化试验方案

Table 1 Assimilation Test scheme

试验名称	同化资料	同化时刻 (UTC)	预报时段 (UTC)
------	------	------------	------------

CTL

常规观测

常规观测（剔除广东 4 个站探空资料）

2023 年 9 月 2 日 00 时

2023 年 9 月 2 日 00 时至 4 日 00 时

BDS

+北斗探空上升段资料

2 北斗探空质量评估与稀疏化

2.1 质量评估

观测资料的质量直接影响同化分析和预报效果。因此，为了更有效地同化华南外场观测试验的北斗探空资料，需要先评估资料质量。尽管已有学者利用高分辨率分析场或再分析资料（张旭鹏等, 2021）、同球比对（郭启云等, 2018a; 2018b）等方法对之前的北斗探空数据进行了评估，对该新型探空资料的质量有了初步认识。但为期一周的华南外场观测试验采用了广东省区域组网系统，并利用该组网系统对登陆台风“苏拉”“海葵”进行了针对性的台风观测试验。因此，可对台风试验数据集进行更详细的质量评估。

选取 FNL 分析场、ERA5 再分析资料以及同站 L 波段秒级探空对北斗探空资料进行评估，以检验北斗探空资料的质量，并认识北斗探空资料在数值预报中的应用价值。此外，针对北斗探空下降段，没有对应时次的常规探空数据可做对比，若用观测时间差异较大的数据进行评估，会给时空均快速变化的华南中小尺度天气系统引入较大误差，从而影响评估可信度。因此评估下降段时，仅利用 ERA5 及 FNL 资料作为参考。评估的气象要素包括温度、相对湿度、风向和风速，由于大气中的水汽主要集中在对流层低层，因此评估相对湿度时只选取 200 hPa 以下的数据。

台风试验数据集包含 2023 年 8 月 31 日 00 时至 9 月 6 日 00 时为期一周的每日两次（00 时和 12 时）北斗探空观测资料，记为观测值；相同时段的 FNL 分析场、ERA5 资料以及 L 波段探空作为参考值。以 FNL 和 ERA5 作为参考值时，首先将两种资料各等压面上的数据插值到广东 4 个站，其次分别根据两种资料的等压面层次，提取相应的北斗探空等压面数据；以 L 波段为参考时，则将两类探空廓线从 1 hPa~1000 hPa 进行插值，间隔为 1 hPa。最后分别在 00 时和 12 时对北斗探空观测进行上升段评估，06 时和 18 时资料作为北斗探空下降段参考值。由于 L 波段没有 06 时和 18 时资料，则在评估北斗探空下降段资料时，仅利用 06 时和 18 时的 FNL 和 ERA5 资料。

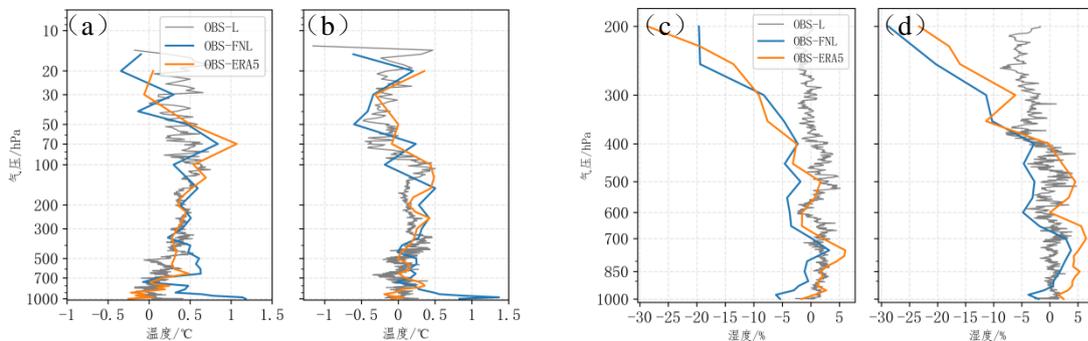
由于风向是 $0 \sim 360^\circ$ 的循环量，当风向取值为 1° 和 359° 时，两者均表示偏北风，但是偏差却达到 358° ，将对风向评估结果造成巨大影响，因此对风向的偏差（Dev）做如下处理（渠鸿宇等, 2022; 郑一等, 2024）：

$$\text{Dev} = \begin{cases} 0 - B, & |O - B| \leq 180^\circ \\ (O - B) \left(1 - \frac{360}{|O - B|}\right), & |O - B| > 180^\circ \end{cases}$$

式中： O 为风向观测值， B 为风向参考值。

由图 3a 和图 3b 可见，北斗探空上升段与三种资料温度的平均偏差基本上在 $-0.5^\circ\text{C} \sim 1^\circ\text{C}$ ，00 时基本为正偏差，其中北斗探空与 L 波段的偏差在 $0^\circ\text{C} \sim 0.5^\circ\text{C}$ ，对流层低层偏差较小，随着高度增加，到平流层偏差在 $0^\circ\text{C} \sim 0.5^\circ\text{C}$ 波动；与 ERA5 的偏差随着高度增加，在 70 hPa 达到极值，随后减小；与 FNL 的偏差则是在 1000 hPa 达到最大，之后减小再增大，在 0.5°C 附近波动，与 ERA5 一样在 70 hPa 达到极大值后减小。12 时在 100 hPa 以下基本为正偏差，以上转为负偏差，除了与 FNL 的偏差在边界层达 1°C 以外，与其余资料的偏差在对流层内在 $0^\circ\text{C} \sim 0.5^\circ\text{C}$ 的范围内波动，与三种资料的偏差都在 100 hPa 附近达到极大值，随后向负值转折。北斗探空上升段与 L 波段相对湿度的平均偏差较小（图 3c，3d），基本在 0 % 附近波动，与 FNL 和 ERA5 的偏差随高度增大，00 时表现为干偏差，12 时与 ERA5 的偏差在 400 hPa 以下为湿偏差。

北斗探空上升段与三种资料风速的偏差主要在 $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ （图 3e，3f），在 1000 hPa 风速偏差较大，北斗探空风速相比 FNL 平均偏小 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，比 ERA5 平均偏小 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；00 时与 FNL 的偏差表现为负偏差，与 ERA5 表现为正偏差，说明北斗探空风速相比 FNL 要偏小，相比 ERA5 则偏大，与 L 波段的偏差在 150 hPa 以下表现为负偏差，以上表现出较大的波动；12 时同样如此，但 300 hPa 以下与三种资料的偏差都更为靠近 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，偏差比 00 时更小。上升段风向的平均偏差（图 3g，3h），与 ERA5 及 FNL 的偏差在对流层低层大于对流层高层，而与 L 波段的偏差则是在对流层高层更大，可能是因为对于对流层低层的小尺度风场来说，ERA5 及 FNL 的分辨率太粗，而在对流层高层，由于气球的漂移，L 波段与北斗探空虽然在同一个气压层，但水平上存在一定距离。



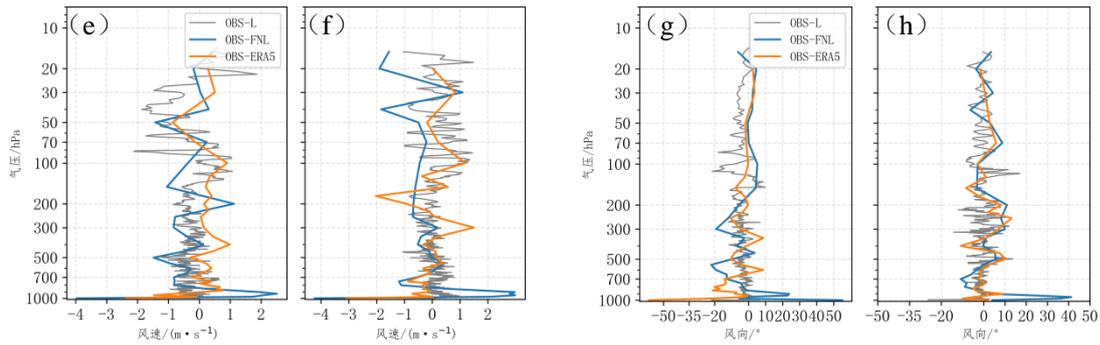
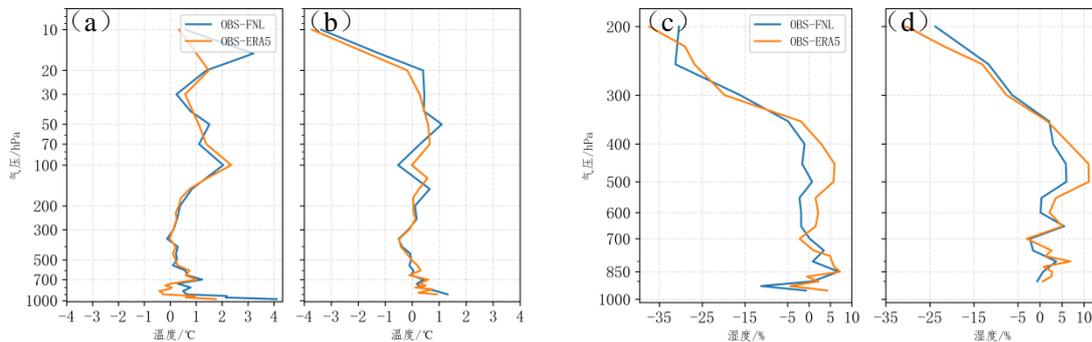


图3 北斗探空上升段在 (a, c, e, g) 00 时和 (b, d, f, h) 12 时与三种资料各要素的平均偏差 (a, b) 温度, (c, d) 相对湿度, (e, f) 风速, (g, h) 风向

Fig.3 The average deviations of various elements from three types of data during the ascending segment of Beidou sounding (a, c, e, g) at 0000 UTC and (b, d, f, h) 1200 UTC include (a, b) temperature, (c, d) relative humidity, (e, f) wind speed, and (g, h) wind direction

北斗探空下降段与三种资料 00 时温度的平均偏差基本在 $0^{\circ}\text{C}\sim 2^{\circ}\text{C}$ (图 4a), 12 时基本在 $-1^{\circ}\text{C}\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。类似于上升段观测质量, 偏差在对流层也较小, 平流层波动振幅较大。另外, 00 时下降段偏差基本为正偏差, 而 12 时偏差基本在 0°C 附近波动 (图 4b)。下降段中相对湿度偏差在 350 hPa 以下, 与 ERA5 及 FNL 的偏差在 $-5\%\sim 5\%$, 以上则随着高度不断增加, 表现为明显干偏差 (图 4c, 4d)。

北斗探空下降段与三种资料风速的平均偏差 00 时较 12 时大 (图 4e, 4f), 在 00 时, 200 hPa 以下偏差随高度逐渐减小, 以上则在 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 附近波动, 范围为 $-3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对流层低层偏差较大, 可达 $-8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 12 时范围为 $-2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 与 FNL 的偏差在 20 hPa 以上达到 $-5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。下降段风向的平均偏差 (图 4g, 4h), 100 hPa 以上均接近 0° ; 但 100 hPa 以下, 00 时比 12 时偏大, 其中与 FNL 的偏差在 $-50^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 而 12 时偏差在 $-20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。



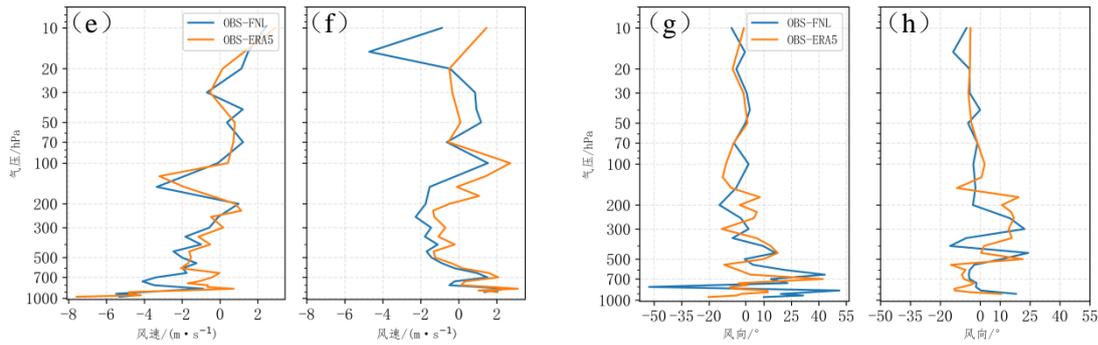


图 4 北斗探空下降段在 (a, c, e, g) 00 时和 (b, d, f, h) 12 时与三种资料各要素的平均偏差 (a, b) 温度, (c, d) 相对湿度, (e, f) 风速, (g, h) 风向

Fig.4 The average deviations of various elements from three types of data during the descending segment of Beidou sounding (a, c, e, g) at 0000 UTC and (b, d, f, h) 1200 UTC include (a, b) temperature, (c, d) relative humidity, (e, f) wind speed, and (g, h) wind direction

北斗探空与三种资料温度的平均偏差上升段要小于下降段,且偏差基本均小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$; 相对湿度的偏差基本在 20% 以内; 风速的偏差同样是上升段小于下降段, 00 时下降段的偏差在对流层较大。由于对流层中低层的天气尺度相对对流层高层较小, 风场变化快, 且北斗探空的垂直分辨率较高, 与参考值进行比较时存在插值误差, 导致风速的平均偏差在对流层中下层大于对流层高层, 在风向的平均偏差中也有体现。总体而言, 华南外场观测试验中获取的北斗探空资料各观测要素的质量均相对较高, 与 L 波段业务探空质量较为相近, 符合资料同化的需求。

2.2 垂直稀疏化

北斗探空数据垂直分辨率为秒级, 远超当前模式分辨率, 直接同化过多的高分辨率观测通常易产生资料冗余而在同化过程中造成负效果 (马旭林等, 2019), 故在同化前应先对高分辨率的秒级数据作稀疏化处理, 稀疏化过程采用将规定层与特性层数据相结合的方案 (李庆雷等, 2018)。由于规定层气压为特定的数值 (如 850 hPa、700 hPa), 而观测气压在数值上与规定层气压并不完全一致。因此, 在选取规定层数据时, 将距离规定层气压最近层次上的数据作为该规定层数据。

由于各气象要素在不同的探空高度变化规律差异较大, 气象要素的稀疏化选取阈值也需要随高度而变化, 本文以 200 hPa 作为分界线, 将对流层分为上层和下层。以 2023 年 9 月 2 日 00 时河源站上升段廓线为例, 上层温度阈值取为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度阈值为 5%, 风速阈值为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向阈值为 10 ° ; 下层温度阈值为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度阈值为 2%, 风速阈值为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向阈值为 4 ° ; 共得到特性层 311 层。稀疏化廓线能够用相对较少的数据量最大程度地反映原始秒级数据中要素廓线随高度的变化特征 (图 5), 但各气象要素阈值的设定, 仍需考虑数值预报模式的垂直层数, 及对秒级探空资料的同化应用能力。

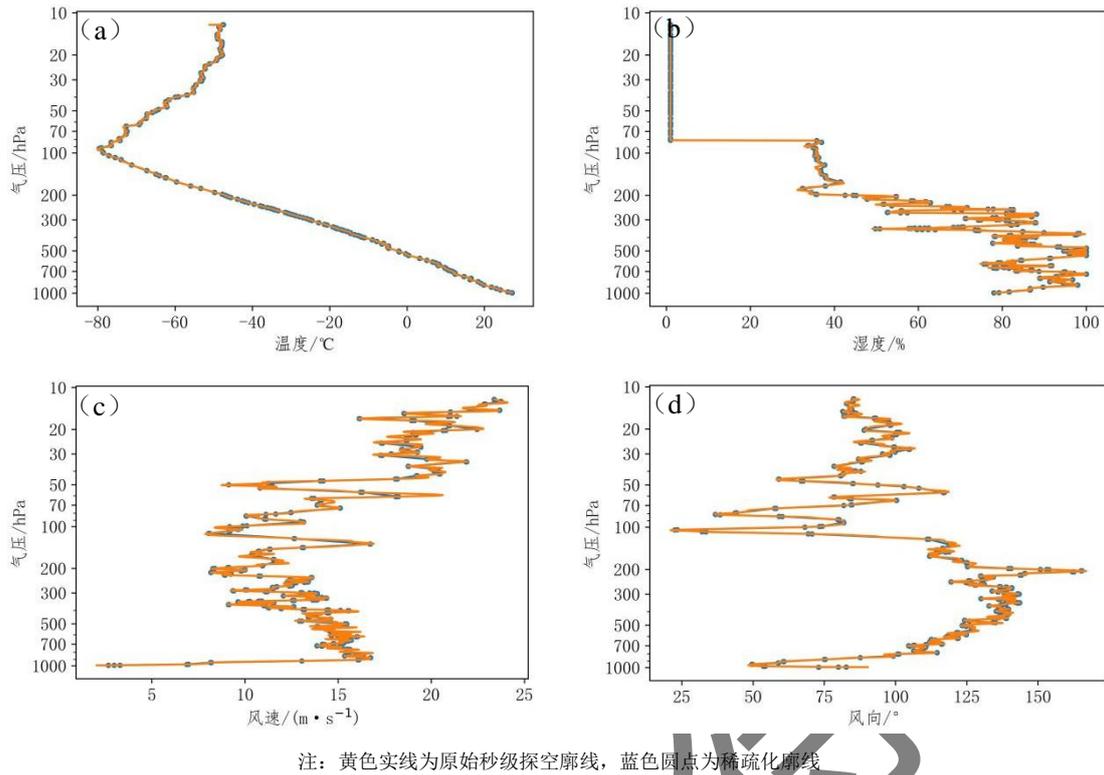


图5 2023年9月2日00时河源站上升段 (a) 温度、(b) 相对湿度、(c) 风速、(d) 风向原始及稀疏化廓线

Fig.5 Original and thinned profiles of (a) temperature, (b) relative humidity, (c) wind speed, and (d) wind direction at the ascending segment of Heyuan station at 0000 UTC 2 September 2023

3 试验结果分析

3.1 台风预报结果

3.1.1 路径预报

图6为观测与同化试验预报的台风路径以及路径预报误差。观测实况显示,9月2日00时“苏拉”位于广东中部以南海域,并随着时间不断西移,随后向西南方向移动,出海后消亡(图6a)。两组同化试验模拟的台风中心初始位置较实况略偏西北,预报过程前期两者都向西南移动,与实况位置逐渐接近,之后二者均向南移动并逐渐远离观测,但相对而言,BDS相较CTL更接近实况。图6b显示,起报后的12h预报中两试验路径误差相差不大,约为40km左右,二者路径预报误差均在2日12时达到最大,随后减小且BDS预报误差下降更快。

对比两组试验的路径误差可以看出,CTL与BDS路径误差均在60km以下,其中CTL路径预报的平均误差(均方根误差)为35.41km(37.31km),而BDS则为30.11km(32.88km),相比CTL减少了5.30km(4.43km),约为14.97%(11.87%)。这充分说明同化华南外场观测试验的北斗探空观测能够有效减小台风路径预报误差。

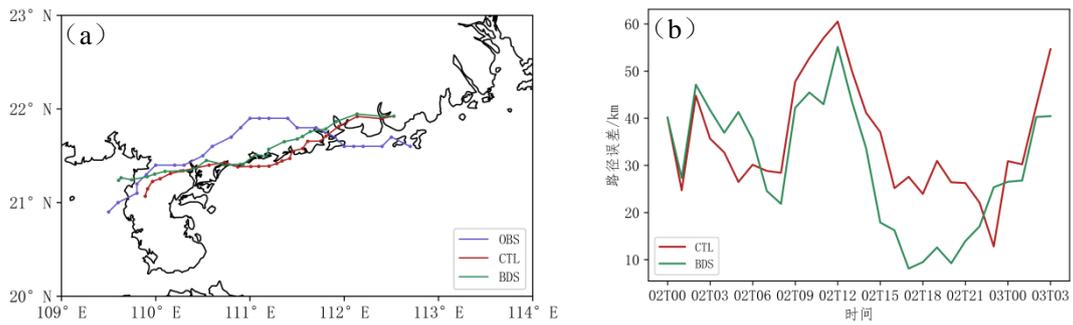


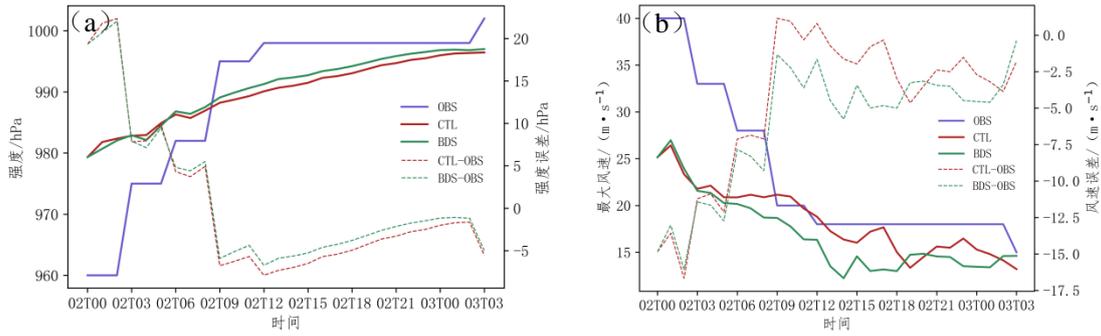
图6 (a) 观测和模拟的台风路径, (b) 9月2日00时起报的两组同化试验的27h台风路径预报误差

Fig.6 (a) Observed and simulated typhoon tracks, (b) Forecast errors of 27-hour typhoon tracks for two sets of assimilation experiments initiated at 0000 UTC 2 September

3.1.2 强度预报

台风中心附近海平面最低气压和最大风速能有效表征台风强度,也是检验强度预报准确度的重要指标。图7为观测与模式模拟的台风中心附近海平面最低气压和最大风速变化及其预报误差。结合图6可知,9月2日00时“苏拉”即将登陆,海平面气压由960 hPa开始不断升高,最大风速逐渐减小,台风强度开始减弱。两组试验都模拟出中心海平面气压升高的趋势(图7a),BDS模拟的海平面气压在9h~24h预报时效内与实况较CTL更为接近,其误差更小。由于强度误差存在负值,因此计算其平均绝对误差。BDS海平面最低气压预报的平均误差为6.16 hPa,比CTL的6.89 hPa减少了0.73 hPa;BDS预报的海平面最低气压的均方根误差为8.22 hPa,比CTL的8.73 hPa改善了5.84%。

由图7b可见,台风“苏拉”最大风速由 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小到 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,两组试验模拟的最大风速从 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 开始减小,BDS模拟的最大风速在同化后的14h内迅速减小,随后的13h内在 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近波动,而CTL预报的最大风速在减小的过程中略有增加。由于BDS最大风速减小速度比控制试验更快,与实况的偏差较大。因此,与实况间的误差也较CTL更大,风速预报的平均误差为 $6.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,比CTL的 $4.94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大 $1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;均方根误差为 $7.49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,同样比CTL的 $6.88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大,说明同化北斗探空后对台风的最大风速预报有负贡献。



注：实线为强度预报，虚线为预报误差

图 7 台风强度观测及 9 月 2 日 00 时起报的两试验 27 h 预报时效的预报 (a) 台风中心附近海平面最低气压及其误差, (b) 最大风速及其误差

Fig.7 Typhoon intensity observation and 27 hour forecast time for two experiments reported from 0000 UTC 2 September (a) minimum sea level pressure and its error near the typhoon center, (b) maximum wind speed and its error

3.1.3 降水预报及其评分

观测与模拟的 24 h 累计降水量显示, 观测降水落区在广东和广西交界处呈现西北—东南走向 (图 8)。两组试验对实况中的强降水落区都具有一定的模拟能力, 都较好地模拟出了强降水落区和降水强度, 且模拟出了台风螺旋雨带结构。降水主要出现在台风东北侧, 实况降水由于采用地面自动站降水进行插值, 分辨率较低, 无法显示出台风的螺旋雨带特征。两组模拟试验中强降水强度偏强、范围偏大, 在广东和广西交界处存在大片降水超过 250 mm 的区域, 但在观测实况中仅小部分区域量级达到特大暴雨。此外, CTL 在广东和广西交界处北部存在空报, 总体而言, BDS 对降水的预报更准确。

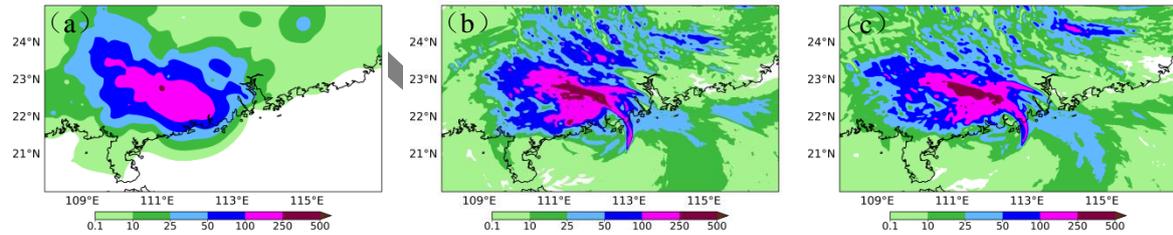


图 8 2023 年 9 月 2 日 00 时至 3 日 00 时台风“苏拉” (a) 观测, 以及 (b) CTL 和 (c) BDS 预报的 24 h 累计降水量 (单位: mm)

Fig.8 (a) 24-hour cumulative precipitation (unit: mm) of Typhoon Saola observed from 0000 UTC 2 to 0000 UTC 3 September 2023, as well as (b) CTL and (c) BDS forecasts

TS 评分是一种评估降水预报效果的指标, 主要用于定量降水预报 (QPF) 的评估, 通过比较预报降水量与实际观测的降水量来衡量预报的准确性; ETS 评分在 TS 评分基础上对空报和漏报增加了相同的惩罚, 不仅能评估预报的准确性, 还充分考虑预报的公平性; Bias 评分则是用来衡量降水预报偏差的一种方法, 主要用于评估预报降水频率与观测降水频率之间的一致性, Bias 评

分越接近于 1 越好，当评分大于 1 时表示空报，小于 1 时则表示漏报。

根据 24 h 累计降水量划分六个等级，分别为小雨 (0.1,10]，中雨 (10,25]，大雨 (25,50]，暴雨 (50,100]，大暴雨 (100,250]和特大暴雨 (250,+∞)。从 TS 和 ETS 评分可以看到 (图 9a, 9b)，除大暴雨量级 BDS 评分略低于 CTL 外，BDS 其余量级降水评分高于 CTL，说明同化北斗探空对降水预报具有改善作用。另外，BDS 特大暴雨评分显著高于 CTL，这一结果进一步印证了同化北斗探空资料在提升降水预报技巧方面的显著成效。Bias 评分 (图 9c) 显示，小雨、大雨和暴雨量级降水，BDS 均更接近 1，较好地改善了 CTL 的漏报问题，但 BDS 中雨量级的空报和大暴雨量级的漏报均略有增加。在特大暴雨量级，CTL 评分为 3，严重偏离 1，存在较多的空报，而 BDS 在一定程度上改善了空报问题。总体来看，BDS 的 24 h 累计降水落区及强度较 CTL 更为接近实况，整体降水预报效果更优，降水评分更高，尤其是对特大暴雨预报技巧的提升更为明显。

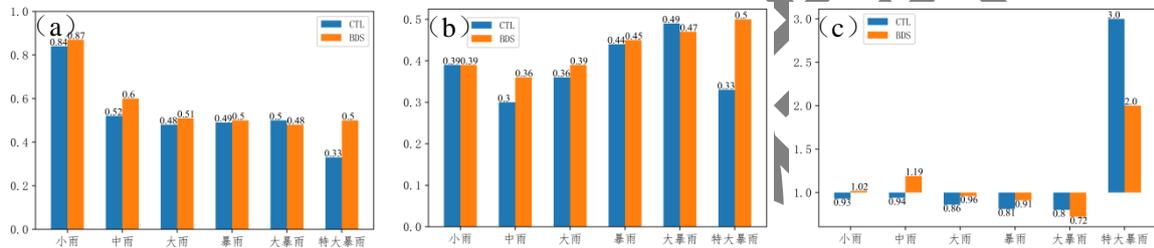


图 9 2023 年 9 月 2 日 00 时至 3 日 00 时台风“苏拉”CTL 和 BDS 预报的 24 h 不同等级累计降水量的 (a) TS 评分，(b) ETS 评分和 (c) Bias 评分

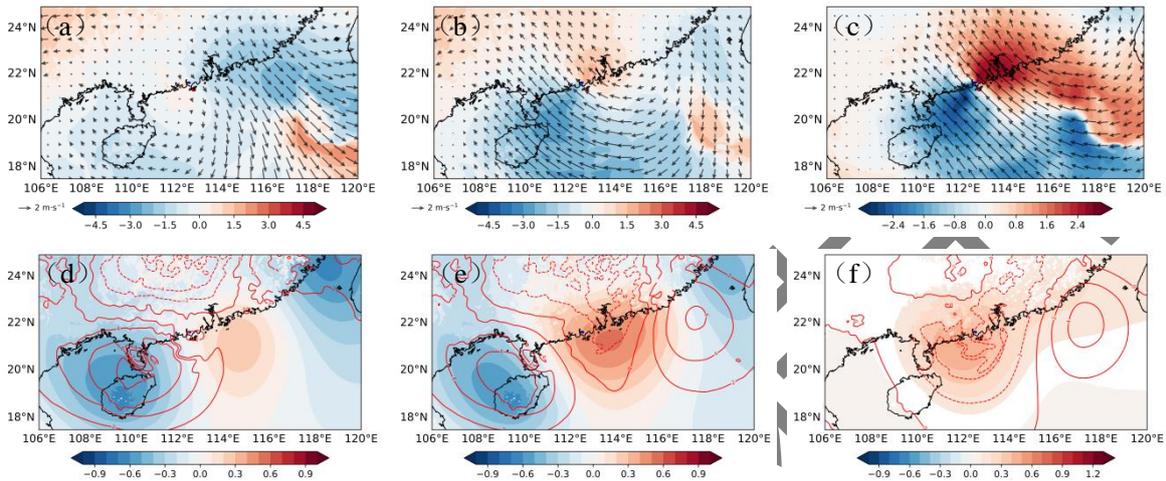
Fig.9 The (a) TS score, (b) ETS score, and (c) Bias score of the 24-hour cumulative precipitation forecast for Typhoon Saola CTL and BDS from 0000 UTC 2 to 0000 UTC 3 September 2023

3.2 观测对分析的贡献

分析增量是分析场与背景场的差值，可以直观看到经过同化后观测资料对背景场的调整，体现观测资料的作用，而两个试验分析增量的差值则体现了同化北斗探空资料的作用。在 500 hPa 风场中 (图 10a, 10b)，同化北斗探空后相对背景场的改变较 CTL 更明显，CTL 中仅台风东侧改变较大，相对背景场为西北风；同化北斗探空后，分析场相对背景场调整为东南风，台风北侧风速略微增大，南侧减小。显然，同化北斗探空相对未同化北斗探空风场表现为东南风，促使台风向西北移动，在台风东北侧 BDS 风速比 CTL 大，西南侧小 (图 10c)。在 200 hPa，BDS 相对 CTL 同样表现为东南风 (图略)，500 hPa 风场作为台风的引导气流，对台风的路径具有一定的影响。因此，同化北斗探空资料后形成的东南风使得 BDS 的台风路径较 CTL 更偏北，从而更接近观测，使路径误差减小 (图 6)。

CTL 和 BDS 中 700 hPa 温度的分析增量形势相近 (图 10d, 10e)，台风处于温度正增量中心，其东西两侧为负增量，且负正负中心呈现东北—西南走向，BDS 在台风中心的正增量比 CTL 大，

有利于构成台风的低层暖心结构，增强台风的强度。700 hPa 上 CTL 湿度正增量中心位于海南北部海域，负增量中心位于广东西北部，台风中心处于正增量区中；而 BDS 负增量区域更大，一直延伸到广东南部，台风中心正处于该延伸区的底部，在台风中心东侧为一个正增量中心，BDS 的台风区域更干（图 10f）。同化北斗探空后台风东侧 500 hPa 相对湿度更低（图略），结合 500 hPa 的东南风增量，形成了干平流，从而有利于改善 CTL 在广东和广西交界处北边的降水空报（图 8b, 8c）。



注：蓝色圆点为 CTL 台风位置，红色圆点为观测台风位置；图 a 和 b 中的箭矢表示纬向风与经向风分析增量的合成风场，填色表示风速大小的分析增量。

图 10 (a, d) CTL 和 (b, e) BDS 的分析增量以及 (c, f) BDS 与 CTL 分析增量之差 (a, b, c) 500 hPa 风场 (矢量, 填色, 单位: $m \cdot s^{-1}$), (d, e, f) 700 hPa 温度 (填色, 单位: $^{\circ}C$) 和相对湿度 (红色等值线, 单位: %)

Fig.10 (a, d) Analysis increments of CTL and (b, e) BDS, as well as (c, f) Difference between BDS and CTL analysis increments (a, b, c) 500 hPa wind field (vector, colored, unit: $m \cdot s^{-1}$), (d, e, f) 700 hPa temperature (colored, unit: $^{\circ}C$) and relative humidity (red contour lines, unit: %)

3.3 水汽及对流预报

暴雨的发生发展，除了降水发生地需要充足的水汽含量外，源源不断的水汽输送对暴雨的维持也至关重要。水汽通量和水汽通量散度能够展现水汽的来源以及水汽的聚散地，有助于了解形成暴雨的水汽条件。由图 11a 和图 11b 可见，9 月 2 日 12 时台风“苏拉”的西北侧有一条水汽通道，副热带高压底部的偏东气流源源不断地将海洋上的水汽向台风输送，在台风北侧及广东西北部形成辐合。比较 BDS 与 CTL 的水汽通量散度可以发现，由于台风中心位置预报的差异，其形成的螺旋雨带及水汽输送所处位置也不尽相同。水汽通量散度的正负值中心呈带状交替出现在台风中心附近（图 11c），BDS 的水汽通量在台风北侧比 CTL 更强，相应地出现了多个水汽通量散度正值中心，而水汽通量的辐合强度在一定程度上可以代表降水强度，因此更弱的水汽辐合有助于改善广东和广西交界处北部的降水空报。2 日 18 时，随着台风西移及强度减弱，水汽通量位置

发生变化，且强度减弱，CLT 中水汽通量及水汽通量散度大值区位于台风西北侧，BDS 中则位于台风北侧，两者水汽通量散度的差值同样呈现螺旋式带状，在台风外围 BDS 的水汽通量更强，而在台风内部 CTL 的水汽通量更强。台风的强度可以在一定程度上由水汽通量的强度变化进行解释，充沛的水汽释放潜热为台风的维持提供能量，导致 CTL 台风比 BDS 更强（图 7a）。

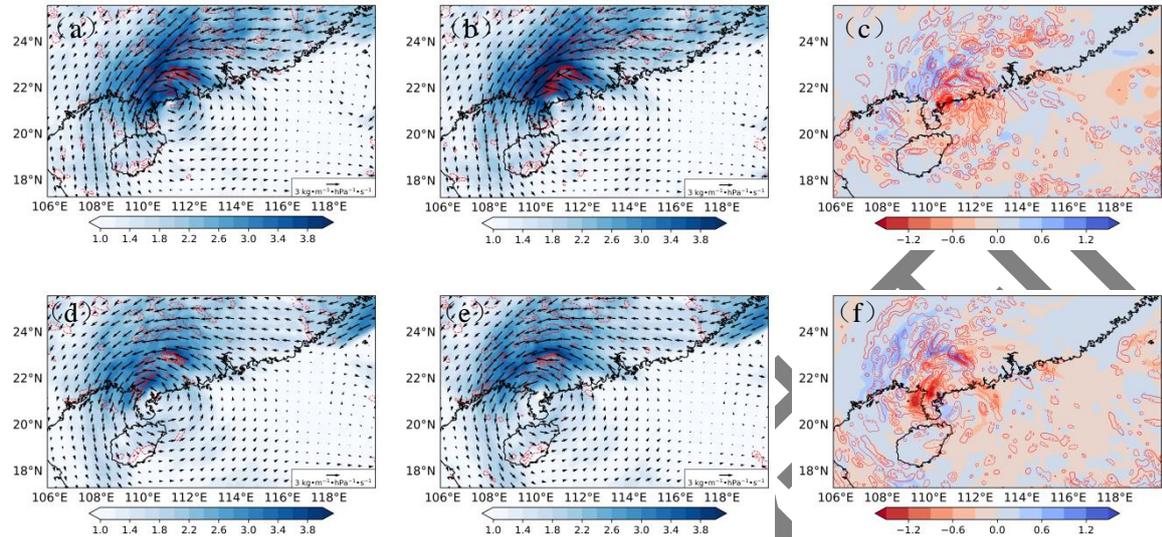
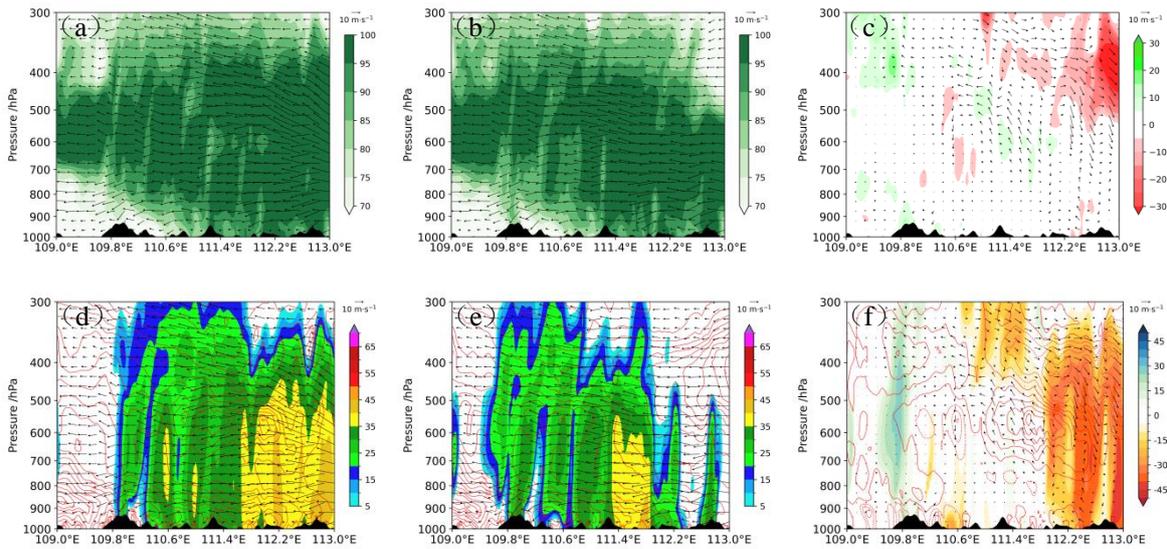


图 11 2023 年 9 月 2 日 (a-c) 12 时和 (d-f) 18 时 (a, d) CTL, (b, e) BDS 以及 (c, f) BDS 和 CTL 之差的 850 hPa 水汽通量 (矢量, 填色, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 及水汽通量散度 (红色等值线, 单位: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.11 The 850 hPa water vapor flux (vector, colored, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (red contour line, unit: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) of (a, d) CTL, (b, e) BDS, and (c, f) the difference between BDS and CTL at (a-e) 1200 UTC 2 and (d-f) 18:00 UTC 2 September 2023

垂直速度直接反映了大气垂直运动情况，上升运动通常与云的形成和降水有关，下沉运动则可能抑制降水的发生发展。相对湿度可以反映大气中水汽的饱和程度，高相对湿度结合上升运动，有利于降水的发展。对 CTL 空报区作垂直剖面，通过比较两个试验在该处的降水发展条件，可以分析 CTL 产生空报的原因。图 12 和图 13 为沿着 23.75°N 所作的相对湿度、垂直速度、相当位温及雷达反射率垂直剖面。由图 12d 和 13d 可见，降水系统自东向西移动。在 9 月 2 日 06 时 112°~113°E 区域内，CTL 中有倾斜上升运动，95% 以上的相对湿度伸展到 400 hPa，形成深厚的湿层，相当位温达到 350 K 以上，整层形成了高温高湿大气，使得对流发展旺盛。而在 BDS 中，相对湿度 95% 以上区域仅伸展到 500 hPa，垂直速度相对较小，在 450 hPa 形成了相当位温低值区，BDS 相较 CTL，空气更为干冷、对流更弱（图 12f），不利于降水的发生，从而改善了由于未同化北斗探空而在此处出现的降水空报现象。2 日 12 时，强降水系统边缘西移至 110°E 附近（图 13d, 13e），回波强度可达 40 dBz 以上。111°E 以东，在 500 hPa 高度上存在相对湿度小于 70% 的相对干区，对应着相当位温的低值区，在 500 hPa 以下相当位温等值线密集且随着高度减小，大气层结不稳定，伴随着高湿大气的上升运动，存在着小型对流系统的发展。在 111.5°E 附近，

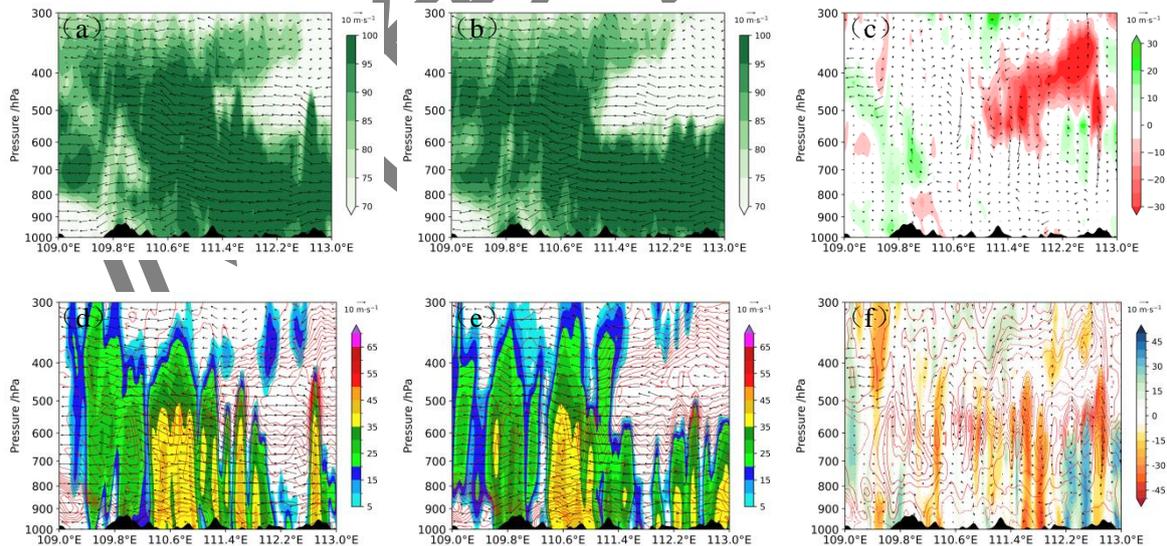
CTL 水汽更充沛、湿层深厚、上升运动更强，有利于降水发展（图 13f）。



注：风矢为水平风场和垂直速度合成，其中垂直速度放大 10 倍。

图 12 2023 年 9 月 2 日 06 时沿 23.75°N 的 (a, d) CTL、(b, e) BDS 及 (c, f) BDS 与 CTL 之差的 (a~c) 相对湿度 (填色, 单位: %) 和风场 (风矢, 单位: $m \cdot s^{-1}$), 以及 (d~f) 雷达反射率 (填色, 单位: dBz)、相当位温 (红色等值线, 单位: K) 和风场 (风矢, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 的垂直剖面

Fig.12 Vertical profiles of (a-c) relative humidity (colored, unit:%) and wind field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$), as well as (d-f) radar reflectivity (colored, unit: dBz), equivalent potential temperature (red contour line, unit: K) and wind field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) along the 23.75°N (a, d) CTL, (b, e) BDS, and (c, f) the difference between BDS and CTL at 0600 UTC 2 September 2023



注：风矢为水平风场和垂直速度合成，其中垂直速度放大 10 倍。

图 13 2023 年 9 月 2 日 12 时沿 23.75°N 的 (a, d) CTL、(b, e) BDS 及 (c, f) BDS 与 CTL 之差的 (a~c) 相对湿度 (填色, 单位: %) 和风场 (风矢, 单位: $m \cdot s^{-1}$), 以及 (d~f) 雷达反射率 (填色, 单位: dBz)、相当位温 (红色等值线, 单位: K) 和风场 (风矢, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 的垂直剖面

Fig.13 Vertical profiles of (a-c) relative humidity (colored, unit:%) and wind field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$), as well as (d-f)

radar reflectivity (colored, unit: dBz) , equivalent potential temperature (red contour line, unit: K) and wind field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) along the 23.75° N (a, d) CTL, (b, e) BDS, and (c, f) the difference between BDS and CTL at 1200 UTC 2

September 2023

北斗探空与 L 波段探空的观测仪器相同，理论上其观测质量也应该差异较小。上文资料评估也印证了这个结果，表明北斗探空资料具有较可靠的观测质量。相对于仅包含测站位置信息的常规观测，北斗探空的实时定位功能可以为每个观测资料提供准确位置，能够减小常规探空观测同化时存在的漂移误差。这是改善同化分析和预报质量的一个原因，也是北斗探空系统对现有常规探空观测的优势之一。综上所述，北斗探空质量与常规 L 波段探空资料的质量相当，由于前者具有更高的垂直分辨率和更准确的定位信息，使得北斗探空资料的分析增量与常规探空存在差异，同时其同化分析和预报质量也相对更优。

4 结论与讨论

基于中尺度数值天气预报系统 WRF 及其变分同化系统 WRFDA 的三维变分同化模块，针对华南外场试验数据集设计了台风“苏拉”（2309）的同化预报试验。在对试验数据集进行质量评估及稀疏化处理的基础上，将北斗探空上升段资料以及常规观测资料进行同化，从同化后台风路径、强度、降水预报等方面评估预报效果，并从分析增量、水汽及对流发展角度解释了北斗探空对分析和预报的改善，显示了北斗探空对台风预报的应用价值。主要结论如下：

华南外场观测试验的北斗探空资料各气象要素的上升段偏差小于下降段，温度偏差基本在 1 °C 以内，相对湿度偏差基本在 20 % 以内，由于对流层中低层内天气尺度较对流层高层小，天气形势变化较快，风场偏差在对流层中低层大于高层。总体而言，北斗探空资料具有较高的观测质量，可用于资料同化。

北斗探空资料的同化对台风路径、强度、降水预报均有所改善，路径误差相比控制试验改善了 11.87 %；海平面最低气压改善了 5.84 %；北斗试验的 24 h 累计降水落区及强度较控制试验更为接近实况，TS 和 ETS 评分总体有提高，尤其是特大暴雨评分的提升较为显著，同化北斗探空后降水预报技巧有所提升，能够有效改善降水预报的空报、漏报问题。

同化北斗探空后对温度、湿度以及风场均有不同程度的调整，从而可获得更好的分析场，改善台风预报效果。对温度场的调整有利于构成台风的暖心结构，增强台风强度，对风场的调整则促进了台风向西北移动，减小路径误差。进一步分析降水预报改善的原因可以发现，同化北斗探空后，减少了控制试验降水空报地区上空的水汽含量，削弱了上升运动，使得整层大气更加干冷，相当位温减小，从而制约了对流的发展，减少了降水空报现象的发生。

新型北斗探空相对于传统常规探空的优势在于释放一次气球能获取上升、平漂和下降三段数据, 以较小的成本有效实现时空加密。在检验数据质量时, 仅对华南外场试验数据集的上升及下降段进行了评估, 并未对平漂段数据进行分析, 且受北斗探空资料的限制, 仅对台风“苏拉”个例进行了同化预报研究。为充分验证北斗探空资料对台风预报的应用价值, 未来将开展更多台风个例的同化预报试验。另外, 进一步利用快速同化系统或四维变分同化系统针对下降段观测资料开展同化研究也是未来的研究重点。

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).
- 郭启云, 杨加春, 杨荣康, 等, 2018a. 球载式下投国产北斗探空仪测风性能评估[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 10(5): 629-640. Guo Q Y, Yang J C, Yang R K, et al, 2018a. Evaluation of wind performance of domestic Beidou dropsonde of ball-loading[J]. J Nanjing Univ Inform Sci Technol (Nat Sci Ed), 10(5): 629-640 (in Chinese).
- 郭启云, 杨荣康, 钱媛, 等, 2018b. 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, 2018b. Full-range sounding comparison analysis of balloon borne radiosonde rising and parachute carrying radiosonde descending[J]. Meteor Mon, 44(8): 1094-1103 (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).
- 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, 王颖樾, 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 (Nat Sci Ed), 36(3): 384-391 (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).
- 梁智豪, 王东海, 梁剑明, 2020. 探空观测的边界层高度时空变化特征[J]. 应用气象学报, 31(4): 447-459. Liang Z H, Wang D H, Liang Z M, 2020. Spatio-temporal characteristics of boundary layer height derived from soundings[J]. J Appl Meteor Sci, 31(4): 447-459 (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).
- 马旭林, 姜胜, 于月明, 等, 2017. COSMIC掩星反演大气温湿资料的质量特征分析[J]. 大气科学学报, 40(6): 841-849. Ma X L, Jiang S, Yu Y M, et al, 2017. Analyzing the quality of data for temperature and humidity using COSMIC radio occultation observations[J]. Trans Atmos Sci, 40(6): 841-849 (in Chinese).
- 渠鸿宇, 黄彬, 赵伟, 等, 2022. HRCLDAS-V1.0和ERA5海面风场对比评估分析[J]. 热带气象学报, 38(4): 569-579. Qu H Y, Huang B, Zhao W, et al, 2022. Comparison and evaluation of HRCLDAS-V1.0 AND ERA5 sea-surface wind fields[J]. J Trop Meteor, 38(4): 569-579 (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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 杨湘婧, 徐祥德, 陈宏尧, 等, 2011. L 波段探空高分辨率廓线中近地层信息分析及相关模型[J]. *气象*, 37(12): 1504-1510. Yang X J, Xu X D, Chen H Y, et al, 2011. The analysis and correlation model of the surface layer information in L-band radiosonde high resolution profile[J]. *Meteor Mon*, 37(12): 1504-1510 (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).
- 张鑫, 王秋萍, 马旭林, 等, 2025. 新型往返平漂式探空资料对长江中下游数值预报质量的影响[J]. *大气科学*, 49(1): 245-256. Zhang X, Wang Q P, Ma X L, et al, 2025. The influence of new round-trip drifting sounding observation on the quality of numerical prediction in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Chin J Atmos Sci*, 49(1): 245-256 (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).
- 郑一, 赵兵科, 陈勇航, 等, 2024. 台风条件下火箭探测气象数据与ERA5再分析资料的对比分析[J]. *热带气象学报*, 40(3): 526-536. Zheng Y, Zhao B K, Chen Y H, et al, 2024. Comparative analysis of sounding rocket data and ERA5 reanalysis data under typhoon conditions[J]. *J Trop Meteor*, 40(3): 526-536 (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).
- 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.
- Hamilton K, Vincent R A, 1995. High-resolution radiosonde data offer new prospects for research[J]. *Eos Trans AGU*, 76(49): 497-506.
- 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 Ocean Technol*, 29(9): 1250-1262.

- Wang J H, Kate Y, Hock T, et al, 2015. A long-term, high-quality, high-vertical-resolution GPS dropsonde dataset for hurricane and other studies[J]. Bull Amer Meteor Soc, 96(6): 961-973.
- 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, 120(19): 10313-10323.
- Zhang X P, Sun L, Ma X L, et al, 2023. Can the assimilation of the ascending and descending sections' data from round-trip drifting soundings improve the forecasting of rainstorms in eastern China?[J]. Atmosphere, 14(7): 1127.

气象学报