

云海-2 掩星探测资料在全球数值天气预报模式中的同化效果评估

王业桂 张斌 李娟 蔡其发 兰伟仁 郭贤鹏 王广杰

解放军 61741 部队, 北京 100094

摘要 本文基于 T799L91 全球数值天气预报模式及其四维变分同化系统, 构建了云海-2 掩星探测资料的同化流程, 并以 2019 年 7 月开展了一个月的云海-2 掩星探测资料同化预报试验, 对东亚区、北半球和南半球的同化预报结果评估表明: 在全球数值天气预报模式中, 同化云海-2 掩星探测资料能够有效改善预报场的精度, 随着预报时效的延长和预报日数的增加, 改善幅度逐渐增大; 在更长时效的 72 小时、120 小时、168 小时预报中, 云海-2 掩星探测资料与 GPS 掩星探测资料的同化效果在中前期相当, 在中后期, 同化云海-2 掩星探测资料逐渐优于 GPS 掩星探测资料; 随着预报日数的增加, 联合同化云海-2 掩星探测资料和 GPS 掩星资料探测资料的优势逐步显现。

关键词 云海-2 掩星, GPS, 同化, 全球数值天气预报模式, 均方根误差, 相关系数

文章编号

中图分类号 P456 文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.20197

Evaluation of assimilation effect of Yunhai-2 occultation data in global numerical weather prediction model

WANG Yegui, ZHANG Bin, Li Juan, CAI Qifa, LAN Weiren, Guo Xianpeng, and Wang Guangjie

Unit 61741, PLA, Beijing 100094

Abstract Based on T799L91 global numerical weather forecast model and its four-dimensional variational assimilation system, the assimilation process of Yunhai-2 occultation data is constructed, and one month assimilation-forecast experiment for Yunhai-2 occultation data was carried out in July 2019, and the evaluation of the assimilation forecast results for East Asia, Northern Hemisphere and southern hemisphere shows that : In the global numerical weather forecast model, assimilating Yunhai-2 occultation data can effectively improve the accuracy of the forecast field. With the extension of the forecast time and the increase of the forecast days, the improvement range gradually increases. In the 72 hour, 120 hour and 168 hour forecast with

收稿日期 2020-08-02; 网络预出版日期

作者简介 王业桂, 男, 1963 年出生, 高级工程师, 主要从事数值预报研究。E-mail: wzegui@sohu.com

通讯作者 张斌, E-mail: zhangbinzhib1985@sohu.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41375105

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41375105)

longer time effect, the assimilation effect of Yunhai-2 occultation data and GPS occultation data is similar in the middle and early days, and the assimilation of Yunhai-2 occultation data is gradually better than GPS occultation data in the middle and late days. With the increase of forecast days, the advantage of joint assimilation of Yunhai-2 occultation data and GPS occultation data gradually appears.

Key words Yunhai-2 occultation, GPS, assimilation, global numerical weather forecast model, root mean square error, correlation coefficient

1 引言

近几十年来, 数值天气预报在业务化预报中的基础作用越来越凸显, 随着数值天气预报模式的不断发展和完善, 数值天气预报的初始场精度已成为制约预报准确率的关键因素。为了提高数值天气预报初始场的精度, 有效同化不同种类的卫星遥感探测资料已成为当前主要手段。

无线电掩星大气探测, 利用装载在低轨卫星上的掩星接收机, 接收受大气折射影响的导航卫星信号, 通过对该信号分析处理, 反演得到大气折射率、温度、湿度、气压以及电离层电子密度等垂直分布信息。无线电掩星大气探测不需在轨定标, 可全天候工作, 探测资料全球分布, 具有较高的精度和垂直分辨率, 在对流层垂直分辨率可达 200m-500m, 在平流层接近 1.0km, 其在改善数值天气预报模式的温度、湿度以及其他要素的初始场质量方面发挥了重要作用(朱孟斌等, 2013)。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的观测资料敏感性试验表明掩星观测资料的贡献值仅次于微波温度和红外高光谱, 超过了高空报和飞机报(朱孟斌等, 2013)。

相对于微波温度和红外高光谱资料, 掩星资料具有不受云雨影响的优势, 其次掩星探测仪器长期稳定, 不需要进行误差偏离调整, 另外掩星探测资料的时空分布比较均匀, 是极地和海洋等观测稀少地区的重要资料来源^[3]。因为掩星探测的优势, 国际上许多国家先后实施了掩星探测任务, 如美国的全球定位系统/气象(GPS/Meteorology)、阿根廷的应用科学卫星(Satellite de Applications Cientificas-C, SAC-C)、德国的挑战小卫星负载(Challenging Minisatellite Payload, CHAMP), 这些项目获得了大量的地球中性大气温湿廓线。2006年4月14日, 由我国台湾和美国合作实施的掩星探测项目 COSMIC (Constellation Observing System for Meterology, Ionosphere, and Climate, COSMIC), 发射了6颗低轨卫星, COSMIC 掩星资料纳入 ECMWF 后, 使该系统预报准确度提升 6% (朱孟斌等, 2013)。

鉴于掩星探测资料在数值预报中发挥的重要作用, 国内外十分重视对掩星资料在数值预报模式中的同化应用开展了许多研究工作。ECMWF 于 2006 年在四维变分同化业务系统中实现了弯曲角资料同化, Healy 和 Thepaut 研究表明弯曲角资料有助于提升温度预报的准确度(Healy S B and Thepaut J N, 2006)。Zou et al (1999, 2000) 做了大量关于 GPS 资料同化中观测算子的研究, 促进了弯角资料在同化模式中的应用。马

再忠等（2011）结合美国“大气河”个例，比较掩星探测资料同化中局地和非局地观测算子的优劣，指出非局地观测算子在水平梯度大值区有较好的预报效果。朱孟斌等（2013）设计了一维弯曲角算子在四维变分资料同化系统的实现方法和质量策略，发现同化 GPS 无线电掩星资料之后的观测误差统计结果在全球区域正作用十分明显。成巍等（2012）基于局地和非局地观测算子的 GPS 掩星探测资料后向映射四维变分同化研究结果表明，同化 GPS 掩星探测资料，可以改进 24 小时的降水预报；邹逸航等（2017）在 GRAPES 模式中对掩星资料进行同化，发现同化后可以减小模式预报台风路径误差。

我国自主研发的云海-2 掩星大气星座于 2018 年 12 月底发射，云海-2 掩星大气探测星座系统可以探测获取全球中低纬度大气层温度、湿度、气压等参数的垂直廓线，其能够为数值天气预报提供高垂直分辨率、高精度的探测资料。开展云海-2 掩星资料在数值天气预报模式中的同化应用技术研究，对改善数值预报初始场精度进而提高预报准确率具有重要作用，同时对建立和积累自主卫星资料同化技术也具有重要的意义。本文针对我国自主的云海-2 掩星探测资料，研究建立其在全球数值天气预报模式的同化业务流程，进而考察云海-2 掩星探测资料在数值天气预报中的同化应用效果。

2 云海-2 掩星探测资料前处理

本文对云海-2 掩星探测资料采用直接同化的方式，云海-2 掩星探测资料包括弯曲角和折射率两种资料，在实际计算过程中，考虑到弯曲角同化比折射率同化具有如下的优势：首先弯曲角资料更为原始，其是由原始观测的光学路径长度直接得到，具有相对简单的观测误差特性，资料处理早期就引入先验信息，从而减少了物理假设的误差；其次避免了在折射率廓线计算的 Abel 逆积分过程中，由于 Abel 积分的不适定性导致的弯曲角观测误差在折射率误差上的扩散，以及 Abel 弱奇性核在数值计算离散过程中造成的不必要的误差的问题。因此本文对云海-2 掩星探测资料的弯曲角进行直接同化。相对于数值天气预报模式层，云海-2 掩星探测资料在垂直方向上具有很高的分辨率，为了合理有效的同化云海-2 掩星探测资料，减少资料冗余带来的计算量，本文对云海-2 掩星探测资料在垂直方向上进行稀疏化，为每个模式层匹配一个距离最近的观测。

3 弯曲角观测算子

参照朱孟斌等的掩星观测算子设计（2013），假设不考虑无线电经过路径上大气环境的水平变化，并且满足球对称假设，则可以得到一维弯曲角观测算子：

$$\alpha = H_A F_I H_N(T, p, q),$$

其中 $H_N(T, p, q)$ 为利用模式网格点上的温度、压强和湿度计算折射率， F_I 表示将模式面上折射率插值到射线近地面切点位置上， H_A 表示根据近地面切点位置的折射率利用 Abel 变换计算弯曲角。

4 云海-2 掩星探测资料在 T799L91 模式中的同化效果评估

4.1 试验方案

为了考察云海-2 掩星探测资料在全球数值天气模式中的同化应用效果，同时考虑到下一步的直接业务化应用，本文基于在用的 T799L91 谱模式及其四维变分同化系统，构建了云海-2 掩星探测资料同化应用流程。为了考察云海-2 掩星探测资料的同化预报效果，本文选取了灾害性天气发生频率较高的 7 月（2019 年）开展同化预报试验，同化时间窗为 12 小时，设置表 1 所示的 4 套试验。

试验 1(T799)为日常的业务化运行，同化的掩星探测资料为国外 GPS 掩星探测资料，试验 2(T799-GPS)相对于试验 1 不同国外 GPS 掩星探测资料，因此试验 1、2 的结果对比就可以反映同化国外 GPS 掩星探测资料对全球数值天气预报的影响；试验 3 相对于试验 2，加入云海-2 掩星探测资料的同化，因此试验 1、3 的结果就可以对比国外 GPS 掩星探测资料和云海-2 掩星探测资料在全球数值预报中的同化效果，试验 2、3 则可以反映云海-2 掩星探测资料在全球数值天气预报中的同化效果；试验 4 相对于试验 1，加入云海-2 掩星探测资料同化，主要目的是考察在目前业务化流程中加入云海-2 掩星探测资料，能否进一步提升预报效果。

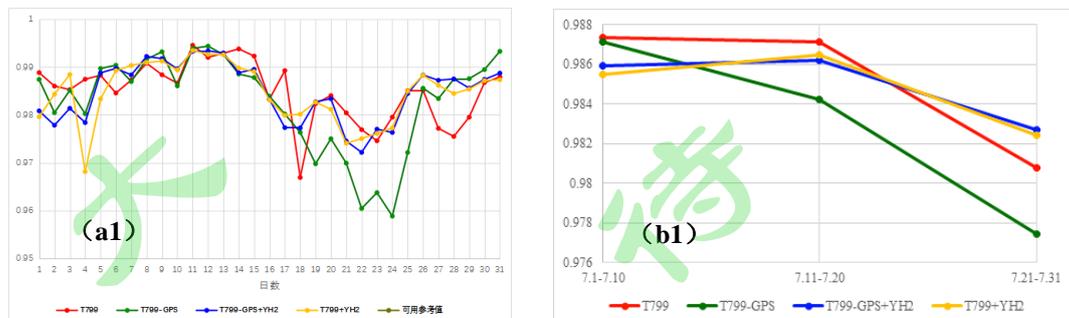
序号	试验名称	试验方案
1	T799	业务流程，同化的掩星探测资料为 GPS 掩星探测资料，进行 10 天预报
2	T799-GPS	相对于试验 1，去除 GPS 资料的同化
3	T799-GPS+YH2	相对于试验 2，加入云海-2 掩星探测资料同化
4	T799+YH2	相对于试验 1，加入云海-2 掩星探测资料同化

表 1 T799L91 谱模式同化预报试验设置

4.2 试验结果

本节基于 ECMWF 的再分析资料对表 1 中各试验的预报结果进行评估，具体评估时划分为东亚区域、北半球和南半球，对 24 小时、72 小时、120 小时、168 小时的预报结果进行统计分析，计算的统计量主要包括 500hPa 的位势高度距平相关系数、850hPa 的风场和温度场的均方根误差。

4.2.1 500hPa 距平相关系数



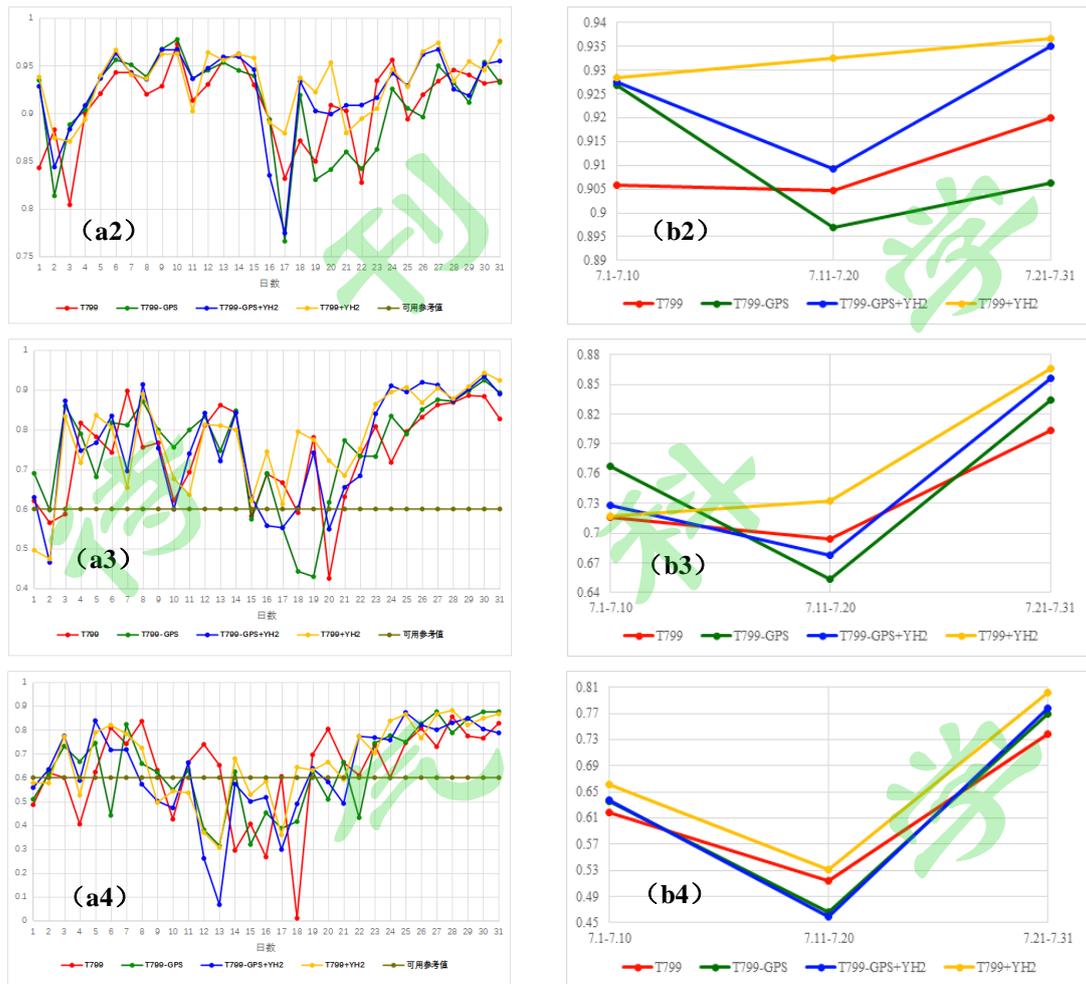
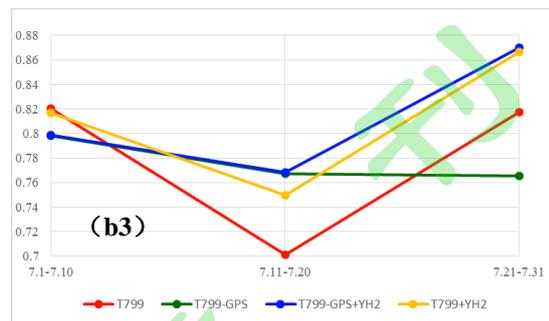
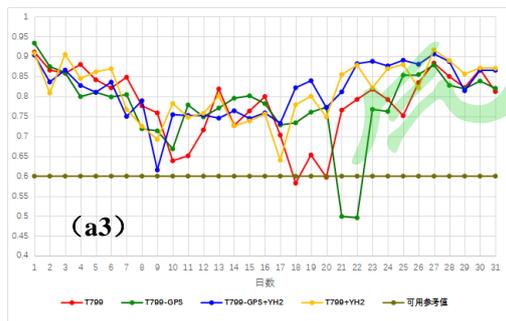
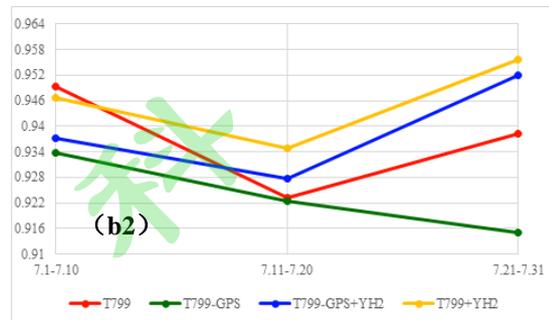
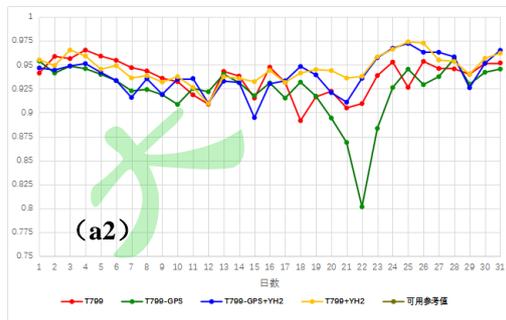
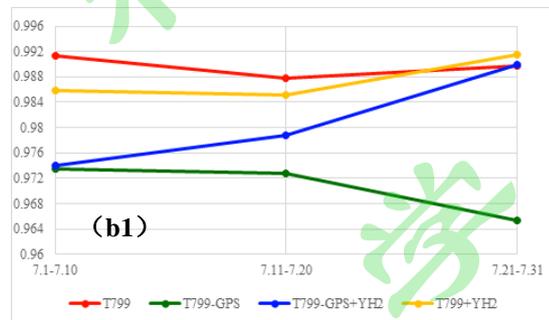
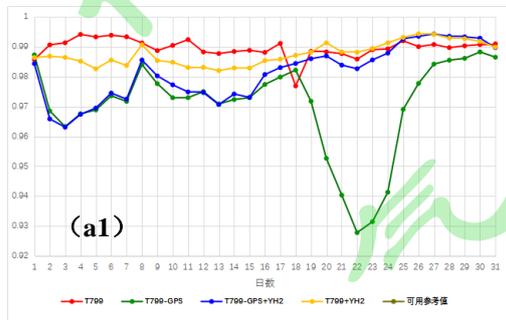


图1 表1中各试验在东亚区的500hPa高度场距平相关系数(0.6为可用预报参考值,图a1-a4为24小时、72小时、120小时和168小时的逐日统计结果,图b1-b4为24小时、72小时、120小时和168小时的每隔10天的平均统计结果,图2、3相同)

Fig. 1 The anomaly correlation coefficient of 500hPa height field in East Asia for each experiment in Table 1 (0.6 is the reference value of available forecast, and figures a1-a4 are the statistical results of 24-hours, 72-hours, 120-hours and 168-hours forecasts respectively, figures b1-b4 are the average statistical results every 10 days for 24 hours, 72 hours, 120 hours and 168 hours respectively, and figures 2 and 3 are the same)

图1为各试验在东亚区的500hPa高度场距平相关系数,图a1-a4为24小时、72小时、120小时和168小时的逐日统计结果,为了更为清晰地展示整体的变化趋势,图b1-b4给出了24小时、72小时、120小时和168小时相应的每隔10天的平均统计结果,其中前10天代表前期,中间10天代表中期、最后11天代表后期(图1之后的图均如此)。对比图a1-a4、b1-b4,可以看出相对于试验1(红色线条,下同),试验2(绿色线条,下同)在前期的各个时效的预报的距平相关系数没有明显增大或者降低趋势,在中后期距平相关系数整体上则呈降低的趋势,尤其是从图b1、b2中24小时和72小时时效的预报可以清晰地看出,这表明随着预报日数的增加,同化GPS掩星探测资料对东亚区的预报效果逐渐有一定的改进作用。加入云海

-2 掩星探测资料同化后，相对于试验 2，试验 3（蓝色线条，下同）在 24 小时、72 小时、120 小时的预报中距平相关系数整体上有所提高（图 a1-a3），这从图 b1-b3 的平均统计结果可以更清楚的看出，尤其是在中后期表现更为明显，而 168 小时的预报，除了个别日数有明显提高（图 a4），整体上试验 2、3 的预报效果相当（图 b4），这表明同化云海-2 掩星探测资料能够进一步有效的改善预报结果。相对于试验 1，试验 3 在中前期距平相关系数没有表现出明显的优势，但在中后期整体上高于试验 1，这表明东亚区同化云海-2 掩星探测资料优于 GPS 掩星探测资料。相对于试验 1，试验 4 加入了云海-2 掩星探测资料同化，试验 4（橙色线条，下同）在所有试验中距平相关系数震荡最小，预报效果最好，这表明现有业务系统中加入云海-2 掩星探测资料同化，能够进一步有效的改善东亚区的预报效果，也说明了联合同化云海-2 掩星探测资料和 GPS 掩星探测资料的有效性。



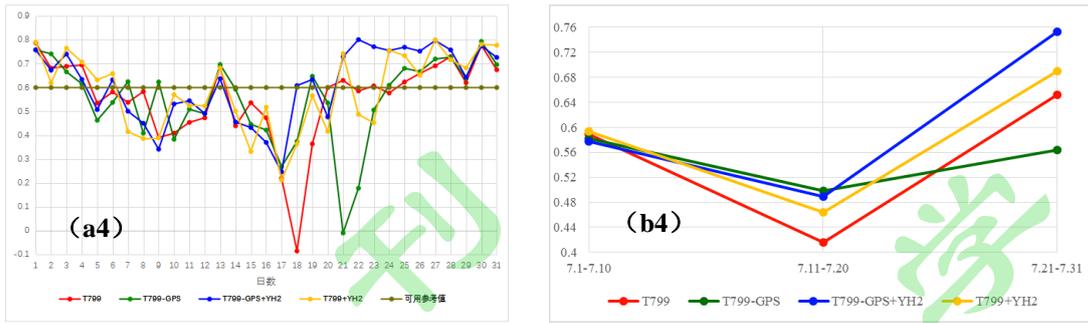
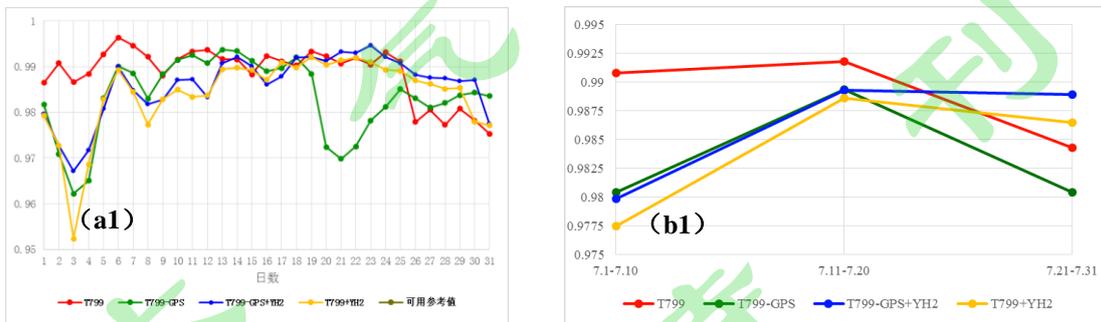


图2 表1中各试验在北半球的500hPa高度场距平相关系数

Fig.2 The anomaly correlation coefficient of 500hPa height field in northern hemisphere for each experiment in Table 1

图2为各试验在北半球的500hPa高度场距平相关系数结果。相对于试验1，试验2的距平相关系数整体上有所降低，特别是在中后期表现最为明显，这与持续不同化GPS掩星探测资料直接相关，表明了同化GPS掩星探测资料在北半球预报中起到的正效应。相对于试验2，试验3在4个预报时效距平相关系数均增大，尤其在中后期提高更为明显，这表明同化云海-2掩星资料能够有效的改善北半球的预报，且改善效果随着日数的增加不断增强。对比试验1和试验3，在中前期，24小时和72小时预报中试验3均偏低，120小时和168小时预报中两者则相当；在中后期中，试验3则要优于试验1，这表明随着日数的增加，同化云海-2掩星探测资料的正效果逐步增大，后期超过GPS掩星探测资料，这从图b2-b4的平均统计结果可以更为清晰地反映出来。类似图1，试验4在所有试验中距平相关系数震荡最小，24小时和72小时预报在中前期虽不如试验1，但在中后期整体上要优于试验1和试验3，这可能源于GPS和云海-2掩星探测资料的联合同化，相互融合需要一定的适应时间，才能体现联合同化的效果。在120小时和168小时的预报中，前期试验4相对于试验3效果略优，而中后期试验3则优于试验4，这进一步表明云海-2掩星探测资料在更长时效的预报中发挥的作用更大。



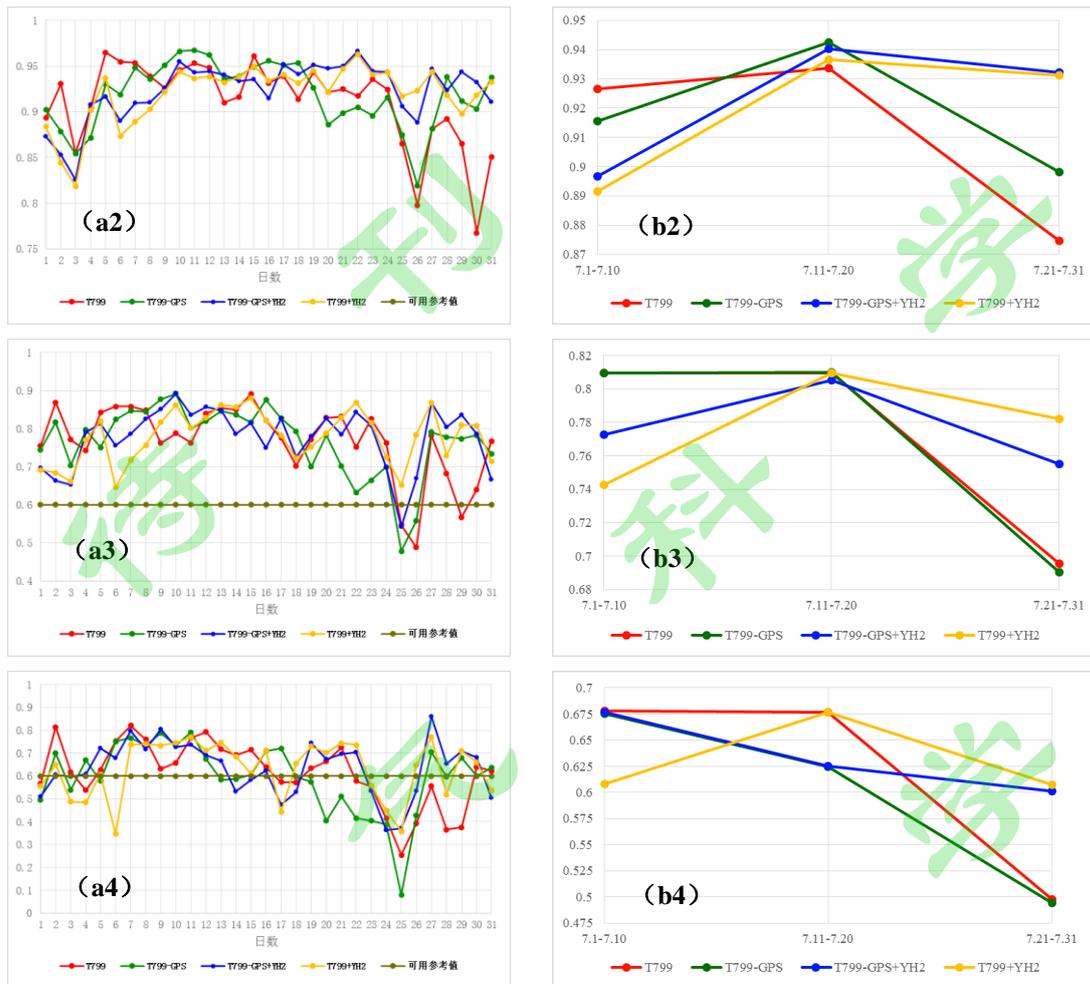


图3 表1中各试验在南半球的500hPa高度场距平相关系数

Fig.3 The anomaly correlation coefficient of 500hPa height field in southern hemisphere for each experiment in Table 1

图3为表1中各试验在南半球的500hPa高度场距平相关系数。从试验1和试验2结果对比可以看出，同化GPS掩星探测资料在南半球整体发挥了较为明显的正作用。试验1、2和试验3的对比结果表明，云海-2掩星探测资料在中前期同化应用效果不佳，随着日数增加，同化正效果逐步增强，后期优于GPS掩星探测资料；试验1、试验3和试验4的结果对比表明，GPS和云海-2掩星探测资料在南半球的联合同化效果在较长时效的120小时、168小时的中后期较为明显。

4.2.2 850hPa风场均方根误差

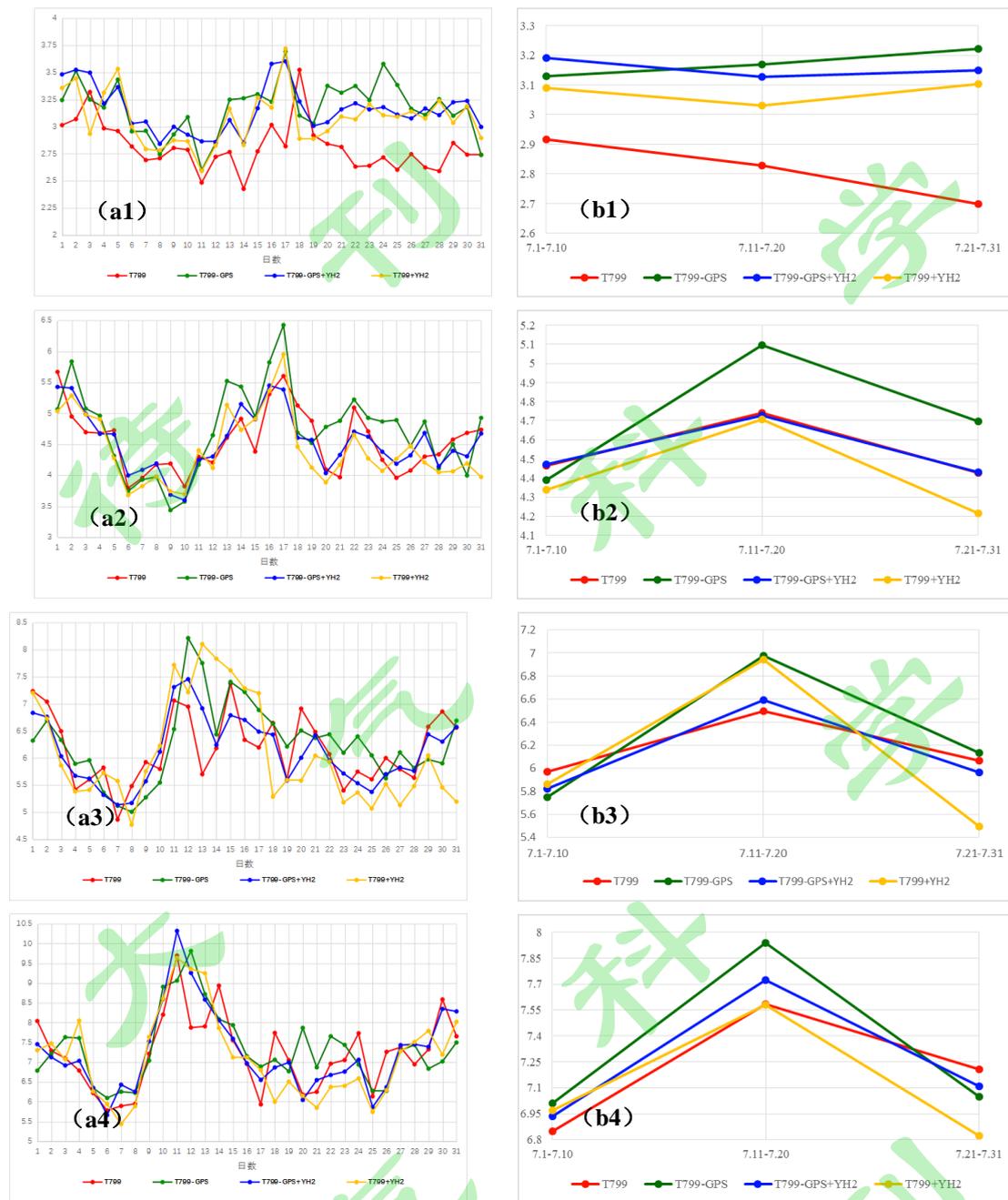


图4 表1中各试验在东亚区的850hPa风场均方根误差(单位: m s^{-1} , 图a1-a4分别为24小时、72小时、120小时和168小时的统计结果, 图b1-b4为24小时、72小时、120小时和168小时的每隔10天的平均统计结果, 图5、6相同)

Fig.4 The root mean square error of 850hPa wind field in East Asia for each experiment in Table 1 (unit: m s^{-1} ; figures a1-a4 are the statistical results of 24-hour, 72-hour, 120-hour and 168-hour forecasts respectively, figures b1-b4 are the average statistical results every 10 days for 24 hours, 72 hours, 120 hours and 168 hours respectively, Figures 5 and 6 are the same)

图4为表1中各试验在东亚区的850hPa风场均方根误差。对比试验1和试验2的结果, 可以看出同

化 GPS 掩星探测资料能够有效降低 850hPa 风场预报均方根误差。试验 2 和试验 3 的结果对比表明，同化云海-2 掩星探测资料能够有效降低 850hPa 风场预报均方根误差，提高风场的预报精度；对比试验 1 和试验 3，同化云海-2 掩星探测资料在 24 小时预报中对 850hPa 风场的改善幅度小于 GPS 掩星探测资料，72 小时、同化 GPS 掩星探测资料和云海-2 掩星资料对 850hPa 风场的改善幅度相当，120 小时和 168 小时预报中，同化云海-2 掩星探测资料略优于 GPS 掩星探测资料。对试验 1、3 和 4 的结果进行分析，可以看出对于 GPS 掩星探测资料和云海-2 掩星资料的联合同化，除了 24 小时预报中联合同化效果不太理想，72 小时、120 小时和 168 小时预报中联合同化的风场均方根误差整体最小，同化效果最好，尤其是在后期体现最为明显。

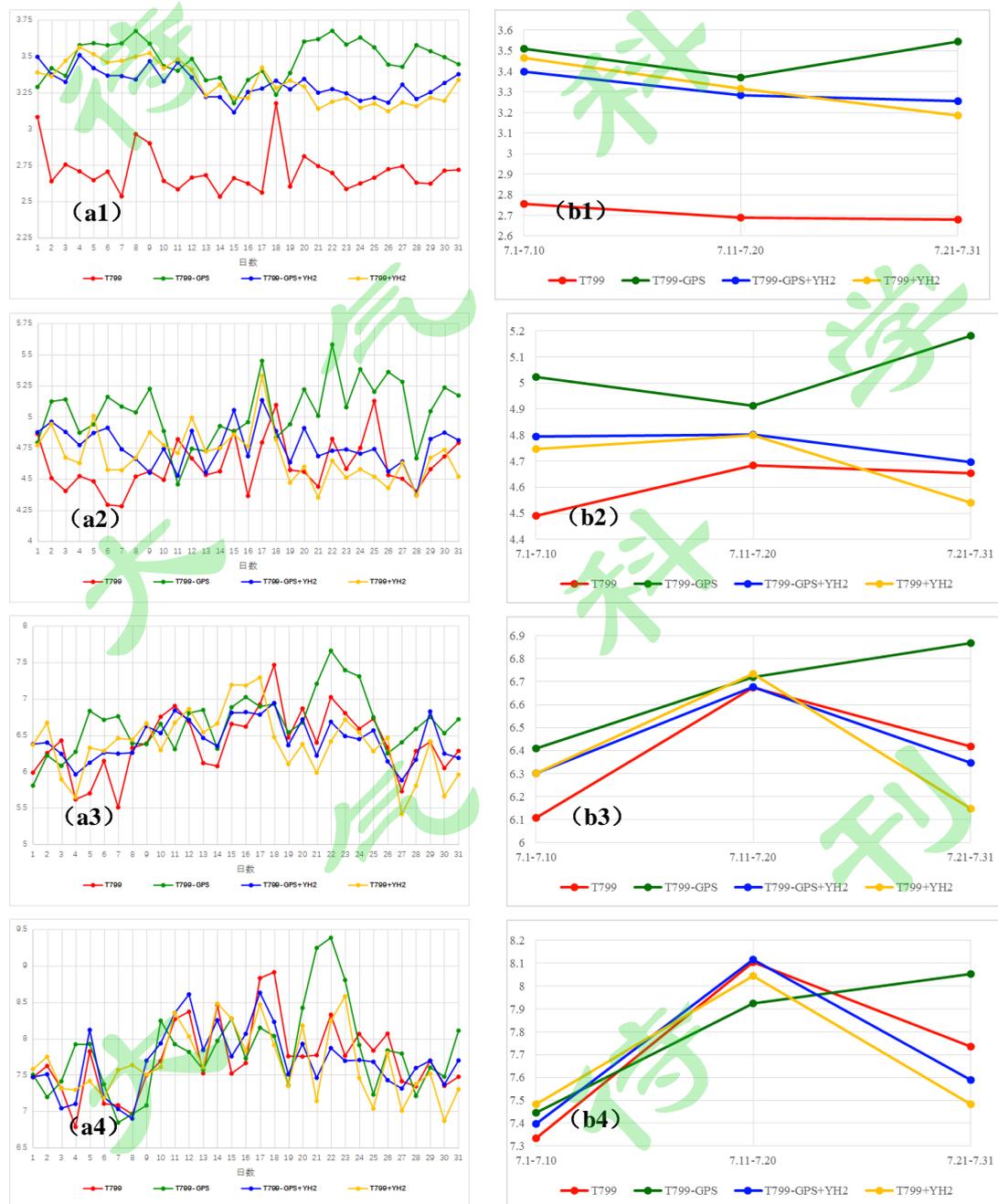
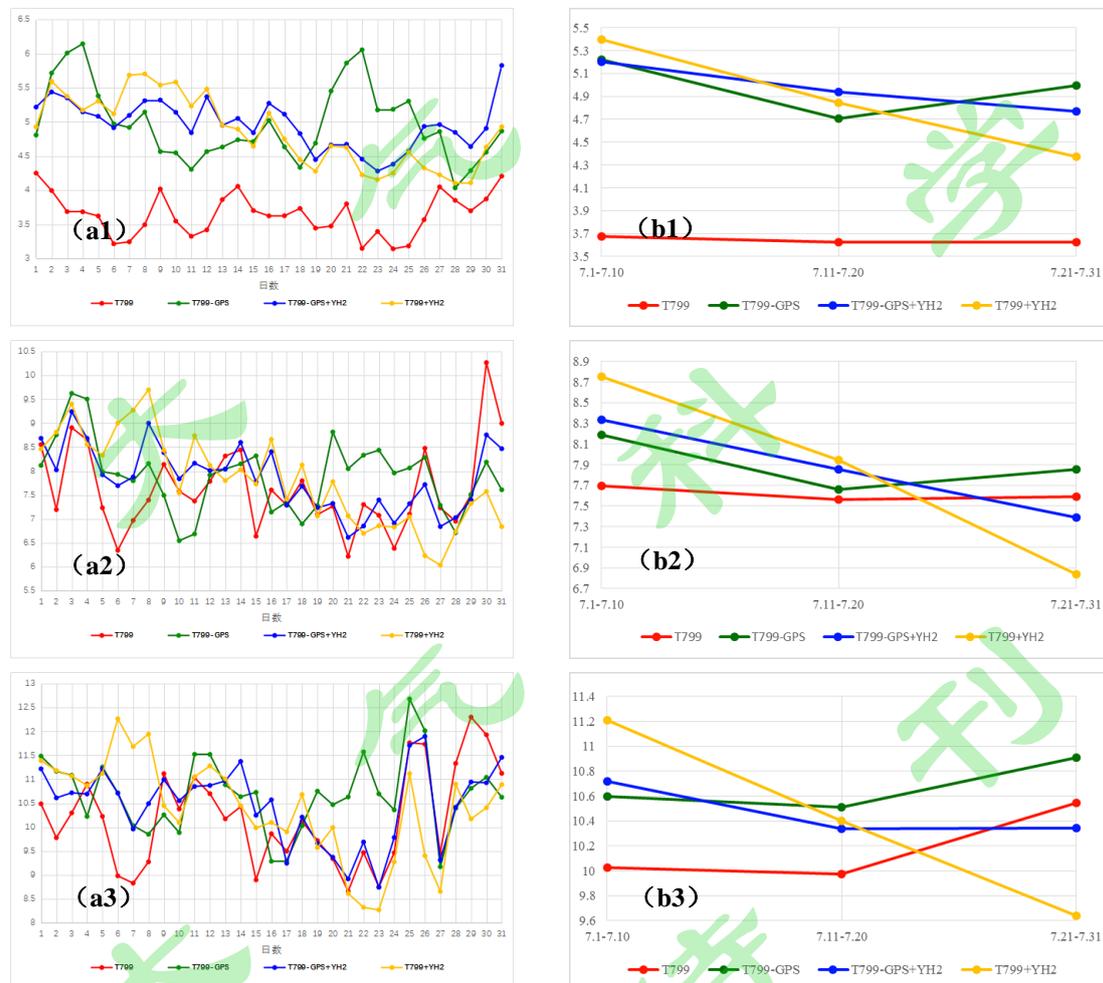


图5 表1中各试验在北半球的850hPa风场均方根误差(单位: $m s^{-1}$)

Fig.5 The root mean square error of 850hPa wind field in northern hemisphere for each experiment in Table 1 (unit: $m s^{-1}$)

图 5 为表 1 中各试验在北半球的 850hPa 风场均方根误差。类似图 4，可以看出同化 GPS 掩星探测资料对 850hPa 风场预报的调整基本为正效应，同化云海-2 掩星探测资料能够有效降低风场均方根误差，提高风场的预报精度。24 小时、72 小时预报中，同化 GPS 掩星探测资料优于云海-2 掩星探测资料，在更长预报时效的 120 小时和 168 小时中，同化云海-2 掩星探测资料和 GPS 掩星探测资料对风场调整的整体效果相当，但在后期，同化云海-2 掩星探测资料相对于 GPS 掩星探测资料呈现一定的优势，从图 5 中的 b3 和 b4 可以清晰地反映出来；联合同化 GPS 掩星探测资料和云海-2 掩星探测资料在 24 小时预报中表现不理想，但在更长预报时效的 72 小时、120 小时和 168 小时中的后期联合同化表现出较好的效果。

图 6 为表 1 中各试验在南半球的 850hPa 风场均方根误差，试验结果类似北半球，这里不再赘述。



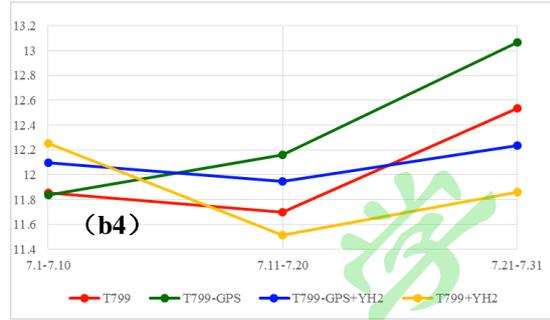
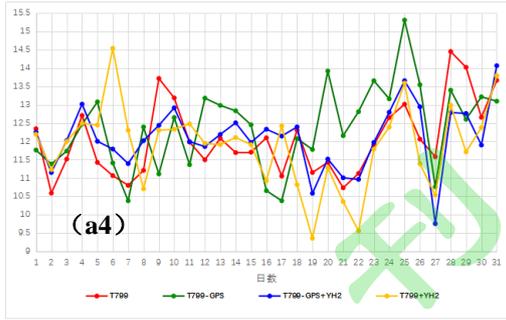
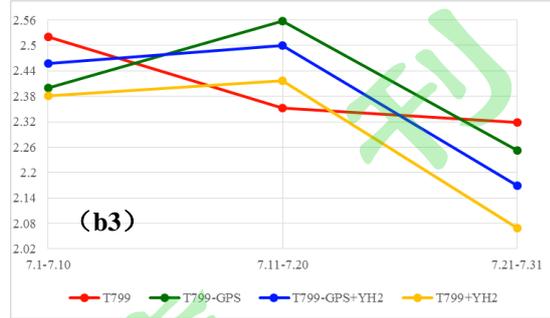
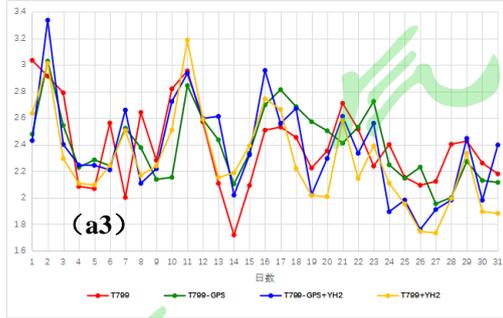
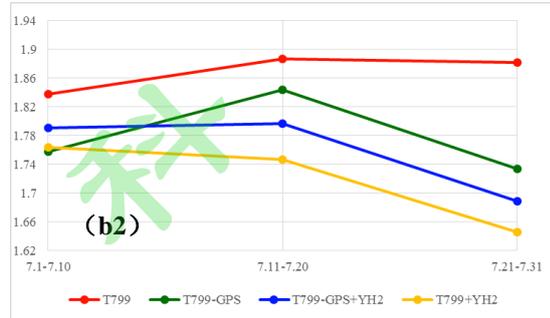
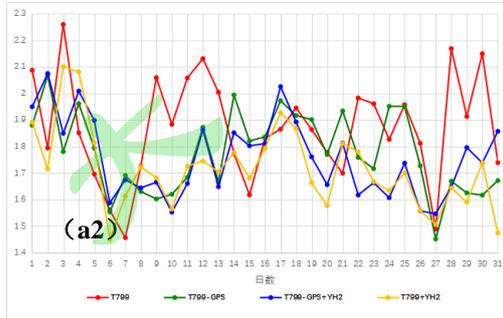
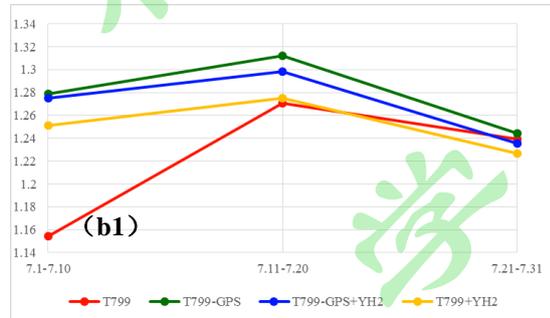
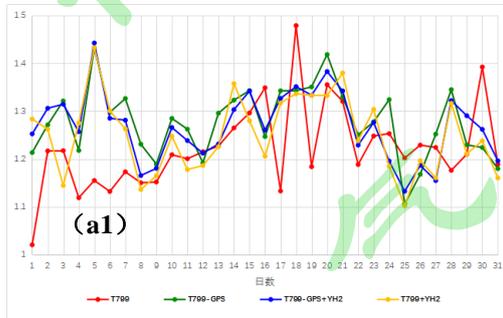


图6 表1中各试验在南半球的850hPa风场均方根误差(单位: m s^{-1})

Fig.6 The root mean square error of 850hPa wind field in southern hemisphere for each experiment in Table 1 (unit: m s^{-1})

4.2.3 850hPa 温度场均方根误差



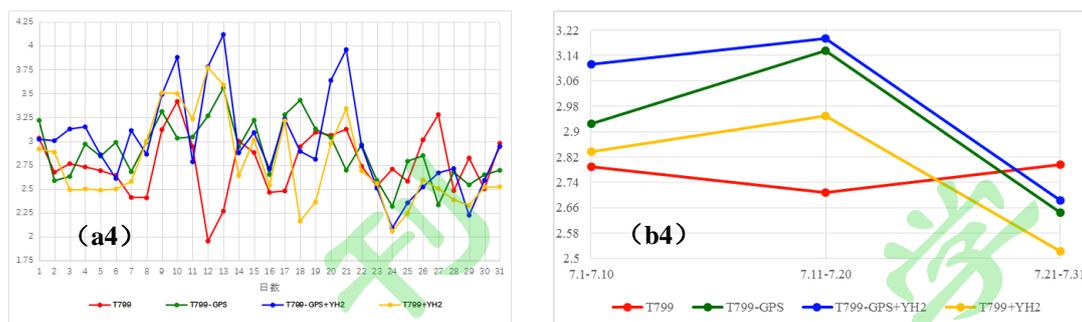


图7 表1中各试验在东亚区的850hPa温度均方根误差(单位:K,图a1-a4分别为24小时、72小时、120小时和168小时的统计结果,图b1-b4为24小时、72小时、120小时和168小时的每隔10天的平均统计结果,图8、9相同)

Fig.7 The root mean square error of 850hPa temperature field in East Asia for each experiment in Table 1 (unit: K; figures a1-a4 are the statistical results of 24-hour, 72-hour, 120-hour and 168-hour forecasts respectively, figures b1-b4 are the average statistical results every 10 days for 24 hours, 72 hours, 120 hours and 168 hours respectively, Figures 8 and 9 are the same)

图7为表1中各试验在东亚区的850hPa温度均方根误差。相对于试验1,除72小时预报外,试验2在其它时效的预报中均方根误差整体呈增大趋势,即同化GPS掩星探测资料对温度场整体的调整基本为正效应。相对于试验2,除了168小时外,试验3的温度场均方根误差在24小时、72小时和120小时预报中均有所降低,整体而言同化云海-2掩星探测资料对于温度场预报具有明显的改善效应。对比试验1和试验3的结果,中前期同化GPS掩星探测资料在各时效的预报中整体要好于云海-2掩星探测资料,但随着日数的增加,后期云海-2掩星探测资料的改善效果不断增大,逐渐优于GPS掩星探测资料。与试验1和试验3对比,从试验4的结果可以看出,联合同化云海-2掩星探测资料和GPS掩星探测资料在整体均方根误差震荡最小,随着日数的增加,联合同化优势逐渐增强,尤其在中后期。

图8为表1中各试验在北半球的850hPa温度均方根误差。类似图7,对比试验1和试验2,可以看到同化GPS掩星探测资料对温度场整体的改善作用,对比试验2和试验3,同样可以看到同化云海-2掩星资料对温度场整体也为改善效应。进一步对比试验1和试验3,可以看到同化GPS掩星探测资料在24小时预报中改善效果要优于云海-2掩星探测资料,而在72小时、120小时和168小时预报中,随着预报时效的延长和日数的增加,同化云海-2掩星探测资料相对于GPS掩星探测资料的优势逐渐显现,类似图7,这种优势主要体现在更长预报时效和中后期。对比试验1、试验3和试验4,可以看到联合同化两种掩星探测资料的优势也主要体现在更长预报时效的后期。

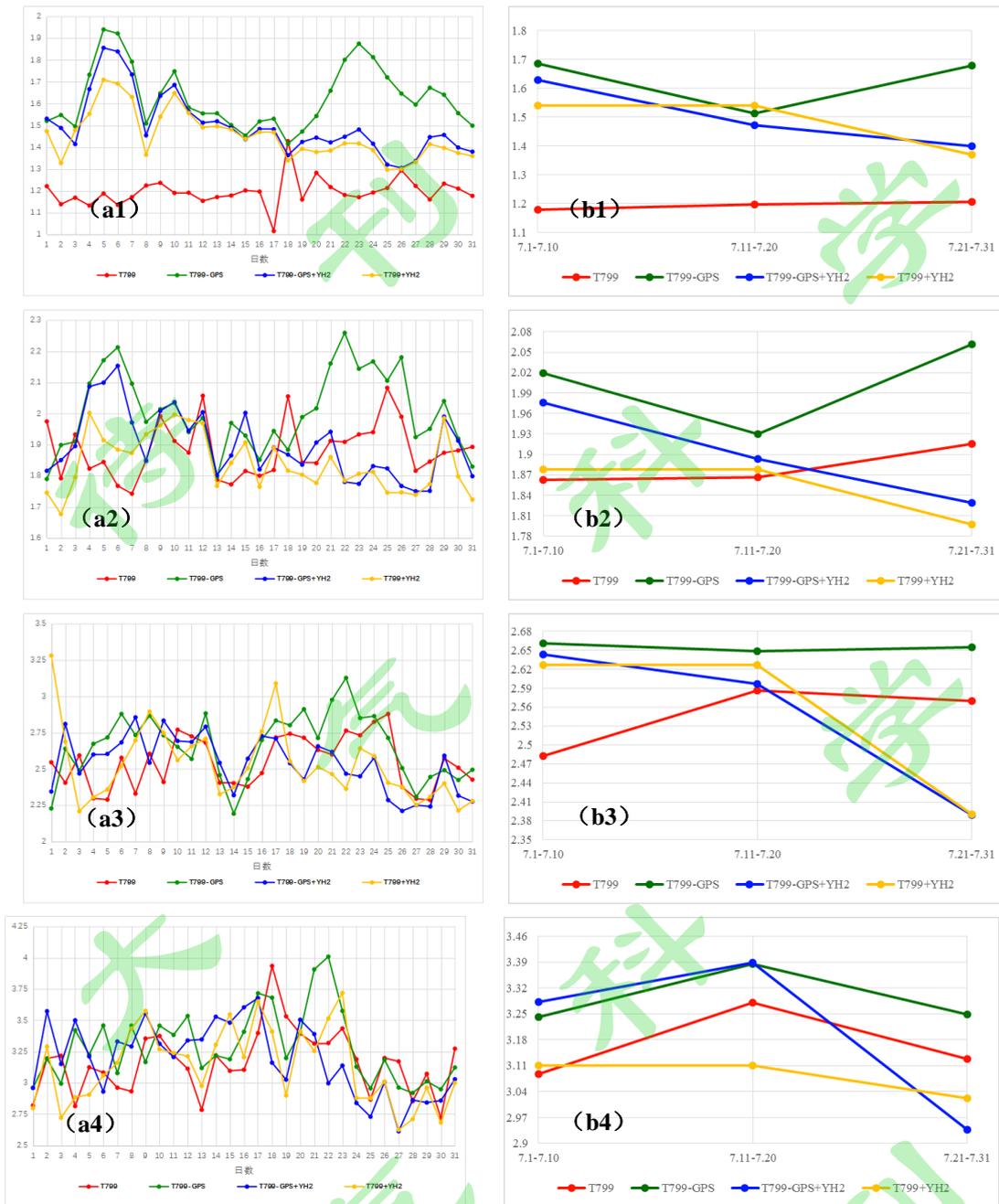


图 8 表 1 中各试验在北半球的 850hPa 温度均方根误差 (单位: K)

Fig.8 The root mean square error of 850hPa temperature field in northern hemisphere for each experiment in Table 1 (unit: K)

图 9 为表 1 中各试验在南半球的 850hPa 温度均方根误差, 类似北半球, 同化云海-2 掩星探测资料对南半球温度场的调整基本为正效应; 24 小时预报中, 同化 GPS 掩星探测资料优于同化云海-2 掩星探测资料, 而 72 小时、120 小时和 168 小时预报中, 中前期同化 GPS 掩星探测资料相对于云海-2 掩星探测资料仍然占据优势, 但随着日数的增加, 同化云海-2 掩星探测资料逐渐优于 GPS 掩星探测资料, 尤其是在后期; 在 72 小时、120 小时和 168 小时的预报中, 联合同化 GPS 和云海-2 掩星探测资料的优势主要体现在中后

期。

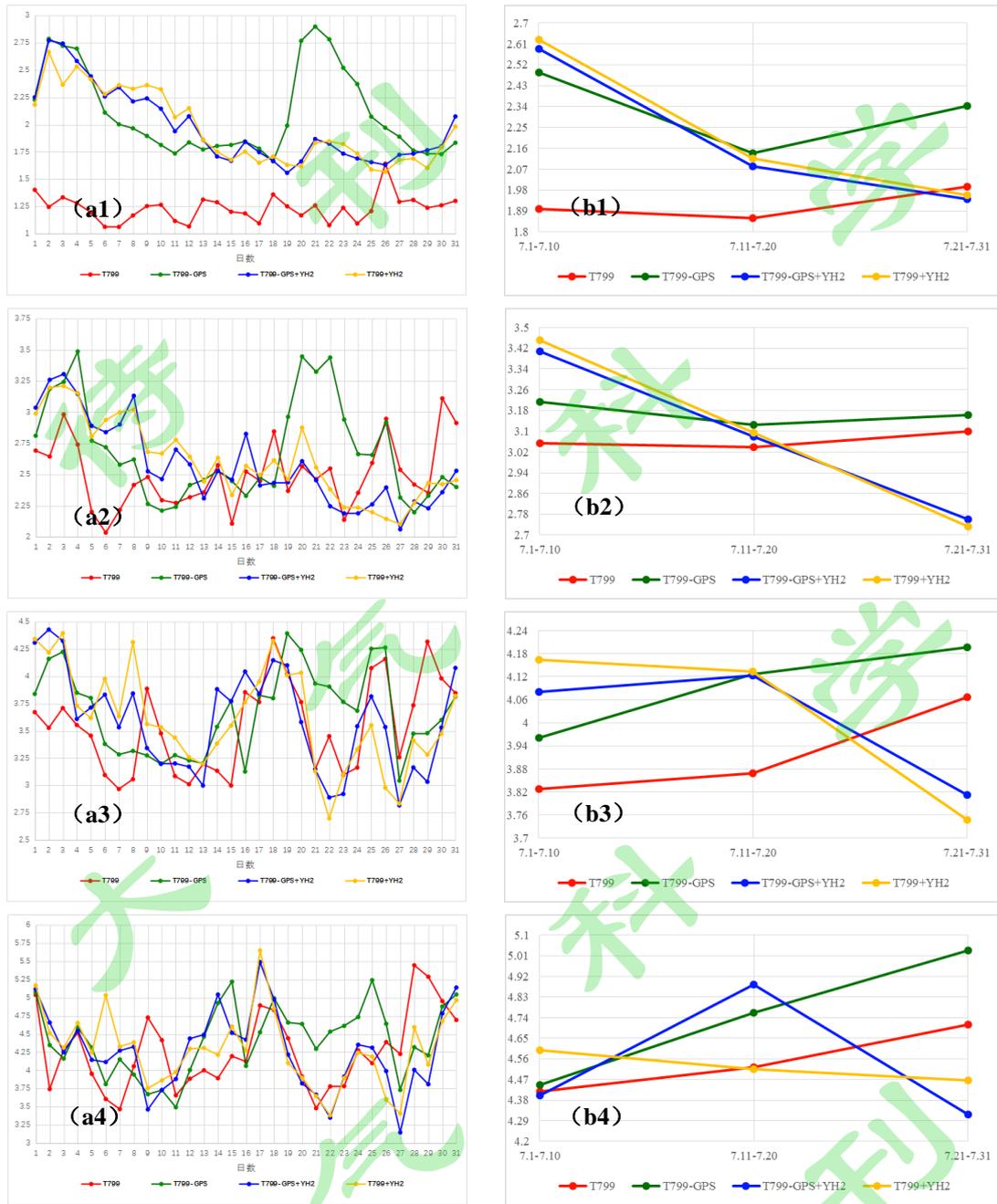


图9 表1中各试验在南半球的850hPa温度均方根误差(单位: K)

Fig.9 The root mean square error of 850hPa temperature field in southern hemisphere for each experiment in Table 1 (unit: K)

6 总结

本文基于全球数值天气预报模式 T799L91 及其四维变分同化系统, 构建了针对中国自主的云海-2 掩星探测资料的同化流程, 并以 2019 年 7 月整月开展了云海-2 掩星探测资料的整月同化预报试验, 考察云海-2 掩星探测资料的同化效果, 试验结果表明:

1, 对于 500hPa 高度场而言, 同化云海-2 掩星探测资料在东亚区能够改善预报场精度, 联合同化云海-2 和 GPS 掩星探测资料能够进一步提升预报精度; 北半球的预报中, 同化云海-2 掩星探测资料相对于 GPS 掩星探测资料的优势、联合同化云海-2 掩星探测资料和 GPS 掩星探测资料的效果均主要体现在较长的预报时效和中后期; 南半球的预报中同化云海-2 掩星探测资料的正效果主要体现在较长的预报时效和中后期, 但是联合同化效果不理想。

2, 对于 850hPa 风场而言, 东亚区、北半球和南半球的预报中, 同化云海-2 掩星探测资料均能够有效改善预报精度, 24 小时预报中, 同化云海-2 掩星探测资料的改善幅度小于 GPS 掩星探测资料, 72 小时、120 小时和 168 小时的预报中, 云海-2 掩星探测资料和 GPS 掩星探测资料对预报的改善效果相当, 但在中后期云海-2 掩星探测资料呈现一定的优势; 联合同化云海-2 掩星探测资料和 GPS 掩星探测资料的优势主要体现在更长时效的 72 小时、120 小时和 168 小时预报中, 同样的预报时效中, 联合同化优势在中后期更为明显。

3, 对于 850hPa 温度场而言, 同化云海-2 掩星探测资料能有效改善预报精度; 在较短时效的 24 小时预报中, 同化 GPS 掩星探测资料优于同化云海-2 掩星探测资料, 而在较长时效的 72 小时、120 小时和 168 小时预报中, 随着日数的增加, 同化云海-2 掩星探测资料逐渐优于 GPS 掩星探测资料, 尤其是在中后期; 联合同化两种掩星探测资料的优势也主要体现在更长预报时效的中后期。

本文初步构建了云海-2 掩星探测资料在全球数值天气预报模式中的同化流程, 试验结果表明了云海-2 掩星探测资料在改善预报准确度方面的有效性, 然而同化云海-2 掩星探测资料在一些区域和预报时刻内的改善效果还并不理想, 这可能均源于云海-2 掩星探测资料作为一种新观测资料, 对模式预报场的改善需要一定的调整适应时间, 其次目前对云海-2 掩星探测资料的同化参数尚未优化调整, 同时本文仅是基于 2019 年 7 月开展云海-2 掩星探测资料的同化应用研究, 试验结果存在一定的局限性, 下一步将进行更长时间序列的试验。

参考文献 (References)

- 朱孟斌, 张卫民, 曹小群. 2013. GPS 掩星一维弯曲角算子在四维变分资料同化系统中的实现方法研究[J]. 物理学报, 18:189203-189203. Zhu Mengbin, Zhang Weimin, Cao Xiaoqun. 2013. Research on the implementation of GPS radio occultation one-dimensional bending angle operator in four-dimensional variational data assimilation system [J]. Acta Physica Sinica, 18:189203-189203
- 余江林, 寇正, 项杰, 等. 掩星弯角资料同化在一次暴雨过程中的应用[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(002):181-186. YU Jianglin, KOU Zheng, XIANG Jie, et al. 2014. Application of GPS bending angle data assimilation in a rainstorm event [J]. Torrential Rain and Disasters (In Chinese), 33(2): 181-186
- Healy S B, Thepaut J N 2006. Assimilation experiments with CHAMP GPS radio occultation measurements [J]. Q. J. R. Meteor. Soc. 132: 605-623.
- Zou X, Vandenberghe F, Wang B, et al. 1999. A ray-tracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements[J]. Geophys Res., 104(D18):22301-22318.
- Zou X, Wang B, Liu H, et al. Use of GPS/MET refraction angles in three-dimensional variational analysis [J]. Q J R Meteorol Soc, 2000,126: 3013-3040
- 马再忠, 郭英华, 王斌. 2011. GPS 掩星观测的发展及其在气象业务中的应用现状[J]. 气象学报, 01:208-218. Ma Zaizhong, Guo Yinghua, Wang BIN. 2011. The GPS radio occultation data and its current operational applications to the numerical weather prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica (In Chinese), 01:208-218
- 成巍, 王斌, 徐幼平. 2012. 基于局地和非局地观测算子的 GPS 掩星资料后向映射四维变分同化研究[J]. 中国科学:数学, 42(5):377-387. Cheng Wei, Wang Bin, Xu Youping. 2012. Assimilation of GPS radio occultation data with the local and non-local operators using Backward-4DVar approach [J]. SCIENTIA SINICA Mathematica. 42(5):377-387.
- 邹逸航, 马旭林, 姜胜, 等. 2017. COSMIC 掩星资料同化对台风"天兔"预报影响的试验[J]. 海洋学研究, 035(003):9-19. Zou Yihang, Ma Xulin, Jiang Sheng, et al. 2017. Effect of COSMIC occultation data assimilation on prediction of typhoon Usagi [J]. Journal of Marine Sciences. 035(003):9-19.