

卫星遥感资料初始场对厄尔尼诺-南方涛动动力预测误差影响研究

姜华^{1,2}, 宋春阳^{1,2}, 张守文^{3*}, 袁智⁴, 穆博⁵, 向亮⁶, 谭晶^{1,2}, 黄勇勇^{1,2}, 何越^{1,2}

(1. 卫星海洋环境监测预警全国重点实验室(国家海洋环境预报中心), 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082; 4. 中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100086; 5. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 6. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 在国家海洋环境预报中心全球气候预测系统(NMEFC_CESM)中分别同化海洋二号B卫星(HY-2B)和多源卫星融合两类海温资料建立初始场, 构建天基厄尔尼诺/拉尼娜集合预测系统。为探讨卫星遥感资料初始场对厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)预测误差的影响, 通过改变同化数据源, 设计了3类敏感性数值试验: 第一类为同化海表温度和重构三维海温的对比试验; 第二类试验是对同化所用的重构三维海温, 设置经过和未经过海表高度订正的两组对比试验; 第三类试验是将卫星资料初始场误差减半, 测试其对ENSO预测误差的影响。试验结果表明: 同化多源卫星融合海温资料构建的预测初始场精度高于HY-2B单星海温初始场, ENSO预测结果更稳定且更接近观测; 仅同化表层海温、不同化次表层海温时, ENSO预测效果较差, 即使降低初始场误差, 也不会产生实质性的提升, 表明次表层同化对于ENSO预测非常重要; 采用经过海表高度订正的重构三维海温作为同化数据源, 预测结果明显最优, 表明开展海表面高度订正对于次表层海温重构具有关键作用; 当初始场误差减小50%时, Niño3.4区域的12个月预测平均绝对误差降至0.5℃以下, 预测准确率有效提升, 针对预测误差较大的海温事件优化作用更为明显。

关键词: 厄尔尼诺-南方涛动预测误差; 卫星资料初始场; 动力试验; 多源卫星融合; 重构三维海温
中图分类号: P732.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)04-0001-15

0 引言

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是全球气候系统最重要的可预报性来源, 一直以来都是短期气候预测的核心^[1-3]。ENSO作为热带太平洋海气系统的最强年际变化信号, 其演变过程会受到跨海盆信号的强烈影响^[4-6]。因此, 开展客观的ENSO预测, 需要建立完善的海气耦合全球气候预测系统。

在月季尺度的气候预测中, 初始场质量是影响预测准确性的关键因素之一。目前, 国内尚未有成

熟的业务化运行的实时自主三维温盐场融合预测数据。国家海洋环境预报中心全球气候预测系统(NMEFC_CESM)^[7-10], 其同化的海洋数据源是美国的全球海洋数据同化系统(Global Ocean Data Assimilation System, GODAS)数据集。因此在厄尔尼诺/拉尼娜预测系统的初始场建立阶段, 需要寻求更多的资料源和技术方法, 减少对单一资料源的依赖。以卫星遥感数据作为同化资料源, 构建天基厄尔尼诺/拉尼娜集合预测系统, 是一个很好的尝试。

为评估季节预测系统的性能, 需开展时长不少于30年的历史回报实验, 以此获得系统的气候态场

收稿日期: 2026-01-20。

基金项目: 国家民用航天计划(D040305)。

作者简介: 姜华(1975-), 女, 研究员, 博士, 主要从事海洋气候预测研究。E-mail: hjia@nmefc.cn

*通信作者: 张守文(1987-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事数值预测和人工智能预报研究。E-mail: zhangshouwen@sml-zhuhai.cn

和预测异常场。例如参与北美多模式集合预测系统计划的多个季节预测系统^[11],都选择逐月同化1982—2010年的海温、盐度等数据。将异常场与观测结果进行对比,使用多种评估指标和方法比较预报系统的性能。未经系统性评估和检验的预测系统,无法投入业务实践。

但是由于自主卫星数据时间序列较短,无法获得有效的长期气候态资料,因而不能独立作为同化数据源开展长时间的历史回报试验。为此,本文尝试基于NMEFC_CESM的长期历史回报试验数据构建气候态,以多源卫星资料作为预测试验的同化数据源,研究卫星遥感资料初始场对ENSO预测误差的影响。

在回报实验的设计上,以GODAS数据集作为NMEFC_CESM的同化数据源,同化时间段为1982—2024年,用以获得整个预测系统的气候态;然后,将2022—2024年的卫星遥感资料作为数据源同化到全球气候季节预测系统中,逐月起报,开展未来12个月的预测试验。

受卫星运行轨道、观测刈幅的限制,卫星遥感数据各轨道间观测间隔较大且重访周期较长,这种不规则的观测模式导致全球海洋遥感产品在时空分布上具有不规则的稀疏特性,且不同卫星生成的产品精度也存在差异。这些遥感产品自身的特性极大地限制了多源卫星遥感数据在海洋研究中的联合应用。海洋表面具有动态变化的特征,单星遥感数据难以精确刻画海洋动力过程;随着在轨同类遥感卫星的增多,多星数据的联合应用已经成为各类海洋学研究的常态。Reynolds等^[12]将最优插值方法应用于融合卫星红外和微波传感器反演的海表温度(Sea Surface Temperature, SST)以及实测数据,制作了高时空分辨率的全球SST产品。随着我国海洋和风云系列观测卫星的发射以及多类型业务化保障系统的建设需求,推动国产自主卫星SST数据也逐渐发展成熟^[13],未来应用水平和数据利用率都会逐步提升。

因此,本文除采用HY-2B卫星单星数据作为预测系统同化数据源外,也基于国内海洋、风云系列卫星多源产品,采用融合技术构建特定时间分辨率的格点化SST融合数据,作为预测系统的初始场,驱动系统开展预测试验。

厄尔尼诺/拉尼娜事件是典型的三维海温异常事件,海温的最大异常振幅位于温跃层附近。海洋次表层海温结构的演变是ENSO监测预测的基础。卫星遥感可通过红外和微波遥感技术获得海面温度数据,但是无法直接反映海洋内部次表层的温度结构。基于统计学方法利用海面观测数据重构高精度三维温度场,已取得较好的研究成果,例如可利用观测数据的空间自相关性对数据缺失区域进行外推等^[14-16]。机器学习方法能够从大量数据中学习复杂映射关系,提高温度场重构的预测精度^[17-19]。

因此,本文基于Stacking集成学习方法,由海面观测数据重构得到海洋三维温度场,以此作为动力预测系统的初始场,通过评估同化卫星SST和重构三维温度场两类初始场构建方案的差异,研究其对ENSO预测误差的影响。

1 数据与ENSO实时预测系统

1.1 模型同化数据源和评估数据

本文多源卫星遥感融合数据(2022—2024年)采用的数据源来自HY-1C/D/E卫星水色水温扫描仪、HY-2B卫星扫描微波辐射计、FY-3D/F/G卫星微波成像仪等,其中HY-1C/D/E卫星、HY-2B卫星资料由国家卫星海洋应用中心提供,FY-3D/F/G卫星资料由国家卫星气象中心提供。

本文充分分析多源卫星遥感数据的误差特性和尺度特性,考虑大气和下垫面海洋要素的时空协调性,基于动态二维变分融合、多尺度最优插值等融合技术,采用偏差订正消除不同数据源的基准偏差,依托背景场数据补充原始遥感数据的观测空白,构建具有特定时间分辨率、规则格点时空特性的SST多源卫星遥感融合数据集。本研究将该数据集与HY-2B单星数据作为对照,记为ALLsat。

基于该多源卫星遥感融合数据,应用Stacking集成学习重构方法,通过融合多源海面观测数据与历史温盐观测数据,获得重构的日尺度海洋三维温度场^[15]。利用卫星高度计可获取全球海面高度异常数据,该类数据与海洋内部动力过程密切相关,能够为三维温度场的重构提供宝贵信息。本文将经过海表高度(Sea Surface Height, SSH)订正后的模型重构三维海温数据记为ALLsatnew,未经过SSH

订正的记为 ALLsatold。

针对 HY-2B 卫星扫描微波辐射计反演的 SST 数据,其对应的三维海温重构结果记为 HY;其中,未经 SSH 订正的重构三维海温数据为 HYold,经 SSH 订正后的重构数据为 HYnew。

本文研究所用卫星资料同化数据源为 2022—2024 年的 HY 和 ALLsat 数据及其重构的三维海温数据。首先对上述资料进行月平均处理,分别将 SST 插值到 GODAS 数据第一层,将次表层海温数据插值到 GODAS 数据对应的上层 1 000 m 水深范围。

预测模型的长时间序列同化数据源采用全球海洋数据同化系统 GODAS 温度数据集。GODAS 由美国国家海洋环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)开发,数据起始于 1980 年 1 月,时间分辨率包含 5 日均值和月均值两类,常作为全球气候预测系统的海洋初始数据源,在海洋气候监测、气候变异研究等领域应用广泛^[20-21]。

评估模型所用观测资料主要包括:Argo(Array for Real-time Geostrophic Oceanography)资料、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的第五代全球大气再分析资料(ECMWF fifth-generation global atmospheric reanalysis, ERA5)和 NCEP 气候预报中心(Climatic Prediction Center, CPC)海表面温度数据集 OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)^[22-23]。

1.2 ENSO 实时预测系统

国家海洋环境预报中心现有的全球气候耦合预测系统 NMEFC_CESM,采用牛顿松弛逼近法(Nudging)对 5~1 000 m 三维海温开展同化。利用 20 世纪气候态初始场完成 100 年模式积分,待大气和上层海洋基本达到平衡状态后,利用 Nudging 同化方案将 GODAS 海温数据同化到海洋模式中,同化时段为 1982—2020 年。通过前 1 年资料同化可获得当月同化场,并以此作为初始场开展时效 1 年的 ENSO 预测,完成回报试验^[8-11]。

在 NMEFC_CESM 回报数据的基础上,分别同化 2022—2024 年 HY 卫星和多源卫星融合 ALLsat 两类海温资料以建立初始场,构建天基厄尔尼诺/拉

尼娜集合预测系统。预测系统初始场仅同化实时自主卫星遥感数据,可有效降低对非自主数据源的依赖性,同时提高模型计算效率。

1.3 试验设计

为探讨卫星遥感资料初始场对 ENSO 预测误差的影响,通过改变初始场同化资料源,设计 3 类敏感性数值试验:

第一类为同化表层海温、同化重构三维海温两组对比试验,命名为表层-重构三维海温试验;

第二类试验针对同化所用重构三维海温,设置经过和未经过 SSH 订正两组对比试验,命名为重构三维海温订正-未订正试验;

第三类试验将卫星资料初始场误差减半,测试该操作对 ENSO 预测误差的影响,命名为减半初始场误差的敏感性试验。

2 卫星数据产品的初步评估

以 GODAS、Argo 和 ERA5 等数据集作为参照,针对 2022—2024 年单星 HY 产品和多星融合 ALLsat 数据,选择赤道垂直剖面 and Nino3.4 区域平均海温开展评估。

基于 HY 卫星反演 SST 重构得到的三维海温数据记为 HY,其中 HYold 为未经过 SSH 订正的重构结果, HYnew 为经过 SSH 订正的重构结果。多源卫星融合 SST 产品标记为 ALLsat,其重构三维海温数据 ALLsatold 未经过 SSH 订正, ALLsatnew 经过 SSH 订正。

针对 SST 数据,单星 HY 和多星融合 ALLsat 数据同 GODAS 和 ERA5 一致性整体较好,仅在黑潮延伸体、南大洋、湾流等强流区存在明显偏差(图略);多星融合 ALLsat 数据整体质量优于单星 HY 数据。

对于三维重构海温,本文将经过 SSH 订正和未订正的两种数据分别与再分析资料和观测资料做对比,检验两类资料的数据质量。

图 1 为 2022—2024 年平均态下未经过 SSH 订正的重构次表层海温,及其与 GODAS 差值的赤道垂直剖面。可以发现,在 0~400 m 海温垂直剖面上,卫星数据和 GODAS 数据的整体表现较为一致,但温跃层深度附近差值较大,最高超过 2℃;多星融

合重构三维海温 ALLsatold 与 GODAS 数据的差值略小于单星重构结果 HYold, 说明 ALLsatold 的结果更接近 GODAS; 在暖池区域, HYold 与 GODAS 的差值较为显著。

GODAS 属于再分析资料, 与真实观测数据仍存在一定偏差; Argo 为观测资料, 更接近物理事实。图 2 为 2022—2024 年平均态下经过 SSH 订正的三维海温, 及其与 GODAS 和 Argo 数据差值结果的赤道垂直剖面。结果显示, 经 SSH 订正后的次表

层海温 HYnew 和 ALLsatnew 与 GODAS 的差值明显小于未订正的次表层海温 (见图 1); 差值较大的区域位于中东太平洋次表层和东太平洋上层海域。HYnew、ALLsatnew 与 Argo 数据在 0~400 m 海温垂直剖面上的整体结构较为一致, 其中 ALLsatnew 与 Argo 数据更接近, 数据质量更好。

由图 2b 可以看出, 在中东太平洋次表层和东太平洋上层区域, GODAS 资料和 Argo 观测资料的差异较大, 说明 GODAS 资料在次表层海温刻画方面

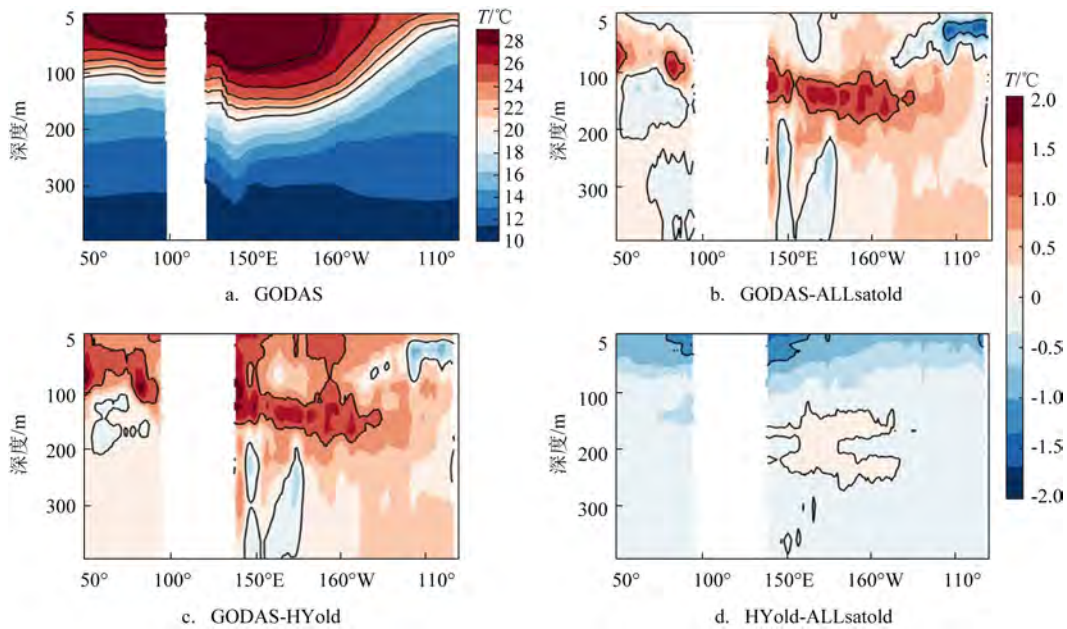


图 1 2022—2024 年平均海温的赤道垂直剖面

Fig.1 The equatorial vertical section of the average sea surface temperature from 2022 to 2024

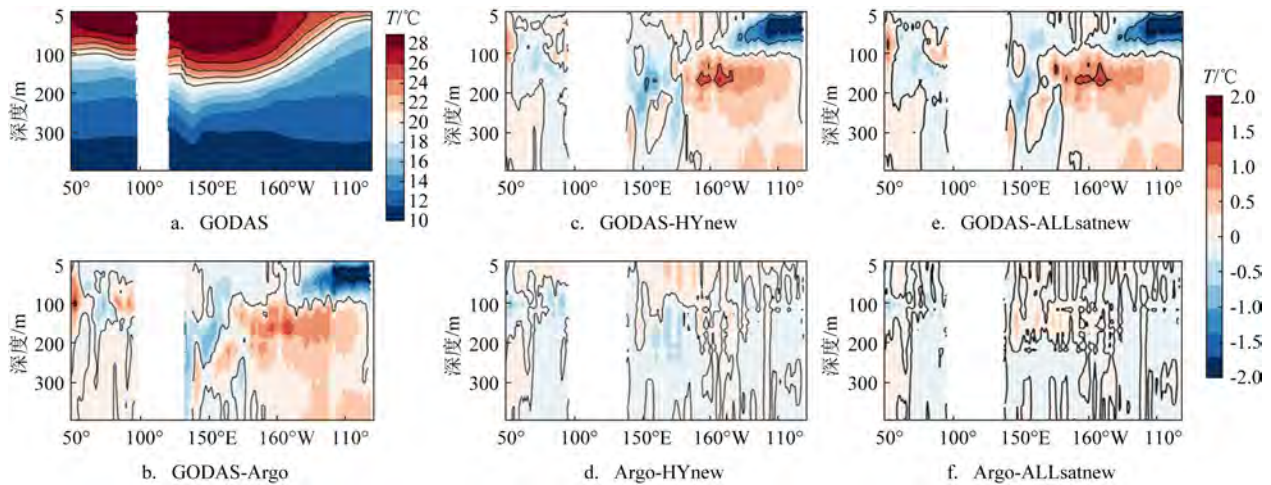


图 2 2022—2024 年平均海温的赤道垂直剖面

Fig.2 The equatorial vertical profiles of the average sea surface temperature from 2022 to 2024

存在一定误差。

经过 SSH 订正后重构得到的三维海温 HYnew 和 ALLsatnew 与 Argo 观测值的差值较小,明显小于 GODAS 与 Argo 的差值,说明经过卫星海表资料重构的三维海温产品,在次表层海洋环境表征上的数据质量优于再分析数据 GODAS。

图 3 为 2022—2024 年 Nino3.4 区域 0~300 m 平均温度变化时间序列,其中 GODAS、ALLsatnew、ALLsatold、HYnew 和 HYold 与 Argo 的相关系数分别为 0.98、0.98、0.92、0.97 和 0.92。

综合 2022—2024 年全部评估结果可得出结论:无论从次表层海温结构还是时间序列变化趋势来看,多星融合 ALLsat 数据质量优于单星 HY 数据;经过 SSH 订正的重构三维海温结果明显优于未经过 SSH 订正的重构结果,说明 SSH 在次表层海温重构中具有重要作用;基于多源卫星融合数据重构的三维海温场 ALLsatnew 与 Argo 数据更接近,质量优于再分析资料 GODAS。

3 卫星资料初始场对 ENSO 预测误差影响的动力试验结果

同化卫星遥感 SST 和重构三维海温两类数据构建初始场,驱动地球系统模式,再次构建天基厄尔尼诺/拉尼娜预测模型,进一步比较经过和未经过 SSH 订正的重构三维海温两类初始场差别,研究卫星资料初始场对 ENSO 预测误差的影响。

卫星高度计能够获取全球海面高度异常数据,

而海面温度数据则可通过红外和微波遥感技术获得。尽管这些海面观测数据无法直接反映海洋内部温度结构,但它们与海洋内部动力过程密切相关,能够为三维温度场的重构提供宝贵信息^[24-25]。从图 2 可知,经过 SSH 订正的次表层海温场结果与 Argo 观测数据更接近。

3.1 表层-重构三维海温试验

厄尔尼诺/拉尼娜事件最重要的信号集中于海洋次表层。无论是事件前期预测信号、发生发展过程中的演变特征,还是事件结束后对全球和区域的气候影响,均需要透过海洋表层,实时监测次表层海温结构的演变情况。

本小节通过同化 SST 数据和同化未经过 SSH 订正的重构三维温度场,构建两组初始场并运行预测试验,比较同化 SST 和次表层海温对 2022—2024 年 Nino3.4 指数预测的差异(见图 4)。时间序列对比图展示了不同初始条件下 Niño3.4 的动力预测结果与观测值(OBS)的演变曲线。其中:OBS 为 CPC 提供的基于 OISST 数据集计算的指数;ctrl 是基于 NMEFC_CESM 预测系统同化 GODAS 海温得到的控制实验结果;ALLsub 为同化 ALLsat 次表层重构数据;ALLsur 为同化 ALLsat 表层海温数据;HYsub 为同化 HY 次表层重构数据;HYsur 为同化 HY 表层海温数据。

不同初始起报时间下,曲线的起点和演变趋势差异明显。例如,202302 试验和 202307 试验的初始距平为负(拉尼娜状态),随后逐渐转正并转入厄尔

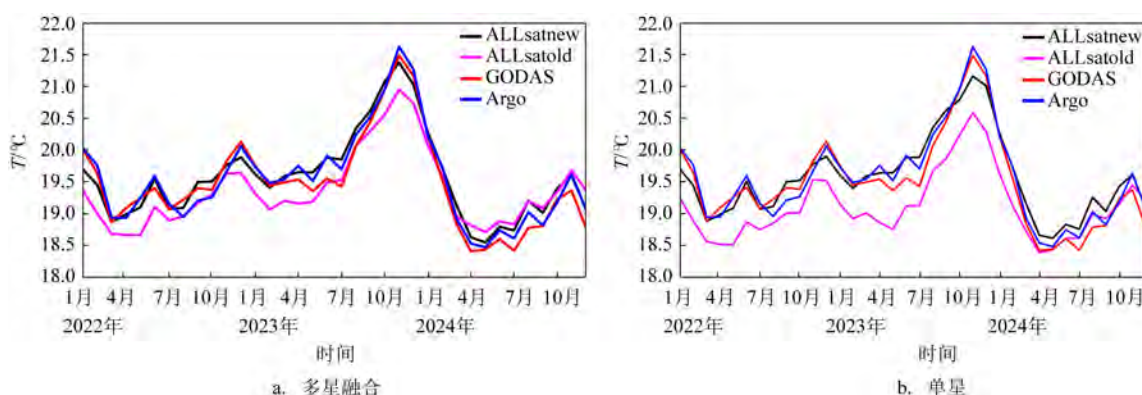


图 3 经过和未经过海表高度订正的重构三维海温在 0~300 m Nino3.4 区域平均温度变化

Fig.3 The average temperature changes in the 0~300 meter Nino3.4 region of the reconstructed three-dimensional sea surface temperature with and without sea surface height correction

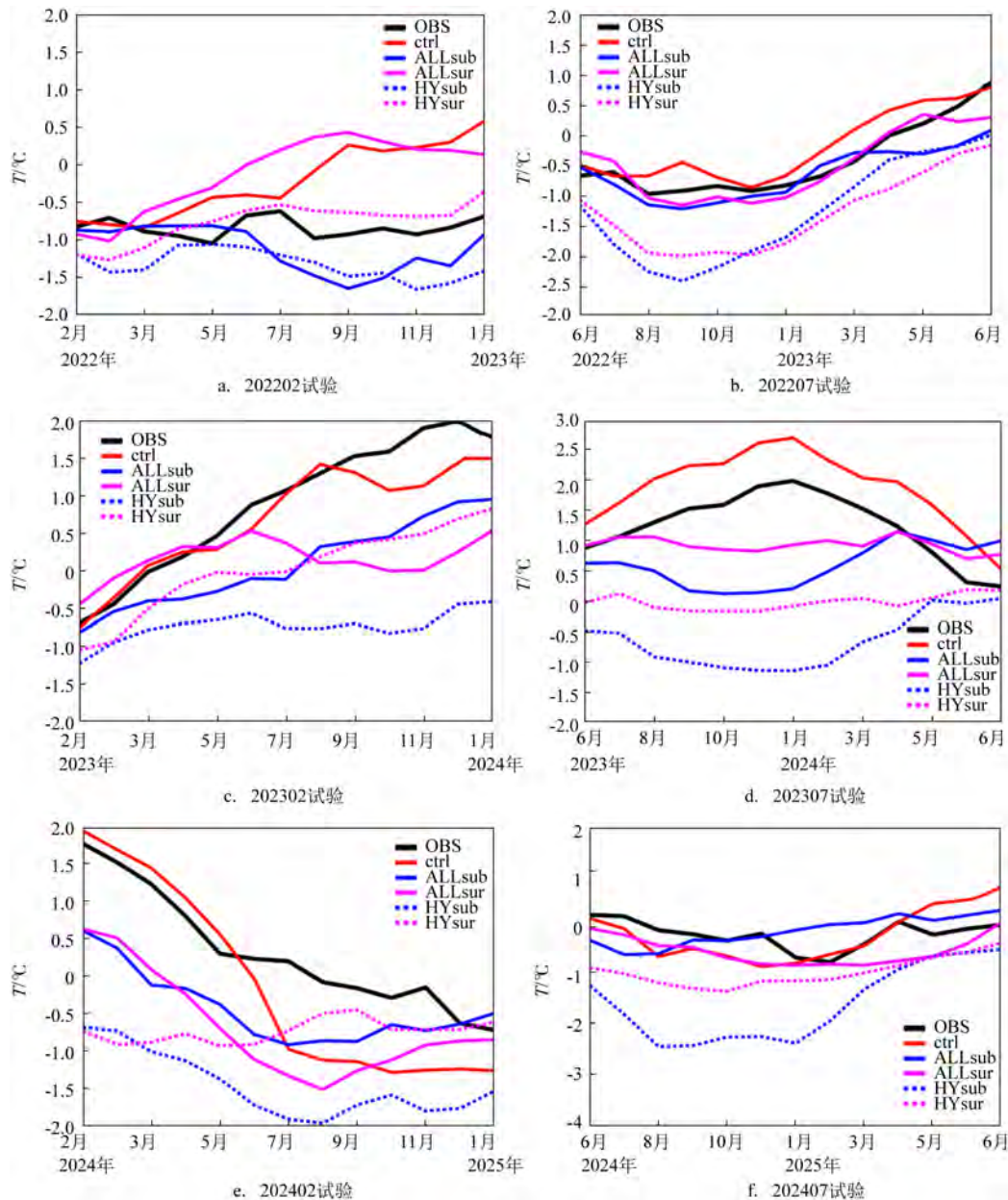


图4 2022—2024年同化海表温度和同化未经过海表高度订正的重构三维海温预测的Niño3.4指数

Fig.4 The prediction of the Niño3.4 index using the assimilated sea surface temperature and the assimilated reconstructed three-dimensional sea temperature without sea surface height correction from 2022 to 2024

厄尔尼诺状态,而202402的初始距平为正(厄尔尼诺状态),后续距平开始回落。多组试验均清晰呈现从拉尼娜向厄尔尼诺转换,或是厄尔尼诺向中性/拉尼娜转换的过程,例如图4c和4d中,各曲线从负距平逐渐上升至正距平,较好反映了2023—2024年厄尔尼诺事件的发展过程,试验效果良好。

总体来看,同时同化表层和次表层数据的预测

方案,整体结果更贴近观测值,尤其在捕捉距平峰值与谷值时优势突出。仅同化海洋表层数据的方案(HYsur)预测偏差最大,说明引入多源次表层数据同化对提升预测精度具有关键作用。

通过2022—2024年6次预测试验的初始场差异,可对比不同数据源的同化质量。以单星HY数据构建的同化初始场,海温异常明显偏低;以多星融

合ALLsat数据构建的初始场,与观测结果更加接近。

针对202202试验,前6个月ALLsub、HYsur预测结果较好;202207试验可较好预判拉尼娜快速发展趋势,海温异常预测整体趋势贴合实况,但是HY试验振幅偏差较大(见图4);202302试验整体演变趋势较好,起报6个月后预测结果离散程度增大,其中采用重构三维海温的ALLsat更接近观测;202307试验中两类卫星资料构建的初始场偏差显著,时间序列演变趋势与观测偏离程度较高;202402和202407两组试验的初始场误差均较大,但其对整体发展趋势的预测较好,多星融合数据试验结果仍优于单星数据试验。

由于本组试验所用的重构三维海温数据未经过SSH订正,本身误差较大,因此多组预测试验无法直观区分仅同化SST和同化重构三维海温两种方案的优劣。

平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)是定量衡量预测值与真实值之间偏差的物理量。计算每个试验12个月的MAE均值后发现(见表1):同化多星融合数据能够获得较好的预测试验结果,MAE较小;控制试验(同化GODAS)整体预测结果均较好,仅202202试验MAE较大,其预报后期偏差较大,其余时段MAE均较小,说明GODAS作为同化数据源具备稳定性。

综合来看,采用ALLsatold作为同化数据源的预测结果明显优于HYold同化方案;ALLsatold在一定条件下可作为GODAS数据源的备用,但其在准确性方面无法完全取代GODAS数据源。

本组试验直观对比了不同数据同化方案和初始条件对厄尔尼诺动力预测结果的影响,清晰展示同化多源卫星遥感和观测数据可显著提升预测精度,

为厄尔尼诺动力预测系统性能评估提供关键依据。

3.2 重构三维海温订正-未订正试验

三维温盐场动力学重构方法,即通过数值模型或一定的动力约束条件,将SST和SSH等海表观测数据转化为动力模型控制变量,实现海面观测要素向水下温盐结构的映射^[14]。

经SSH订正的重构三维海温场具备明显优势。以多星融合重构三维海温数据为例,分别将经过SSH订正的ALLsatnew与未经过SSH订正的ALLsatold作为初始场,驱动天基厄尔尼诺/拉尼娜预测模型开展Niño3.4指数预测试验,进一步研究卫星资料初始场对ENSO预测误差的影响。

分别将重构三维海温ALLsatnew与ALLsatold作为同化数据源开展预测对比,结果发现二者构建的预测初始场在2022年和2023年精度相当;2024年ALLsatnew误差明显更小,和观测OISST更加接近(见图5)。

将6组试验模拟结果与2022—2024年观测值(OBS)时间序列曲线(见图5)进行对比可见,同化订正后重构三维海温构建的初始场,对事件发展趋势的预测与观测吻合度更高,订正后整体模拟效果均优于未订正数据。单星HY相关试验可得到类似结论,采用订正后同化数据源开展次表层模拟的效果优于未订正数据源。

计算各组试验12个月的MAE平均值可知(见表2),同化订正后重构三维海温ALLsatnew的MAE较小,预测结果较好。6组试验中有3组的ALLsatnew方案12个月的平均MAE最小。从整体MAE平均值看,ALLsatnew方案预测效果明显优于同化GODAS的控制实验。

表1 表层-重构三维海温试验中12个月的试验预测值与观测值的MAE

Tab.1 Surface- reconstruction experiments of the mean absolute error of the predicted values versus the observed values in the 12-month prediction experiments

试验	202202 试验	202207 试验	202302 试验	202307 试验	202402 试验	202407 试验
GODAS(ctrl)	0.68	0.26	0.27	0.64	0.63	0.36
ALLsub	0.37	0.31	0.86	0.94	0.74	0.35
ALLsur	0.85	0.19	0.91	0.52	0.96	0.34
HYsub	0.51	0.88	1.71	1.94	1.70	1.40
HYsur	0.24	0.91	0.91	1.29	0.94	0.73

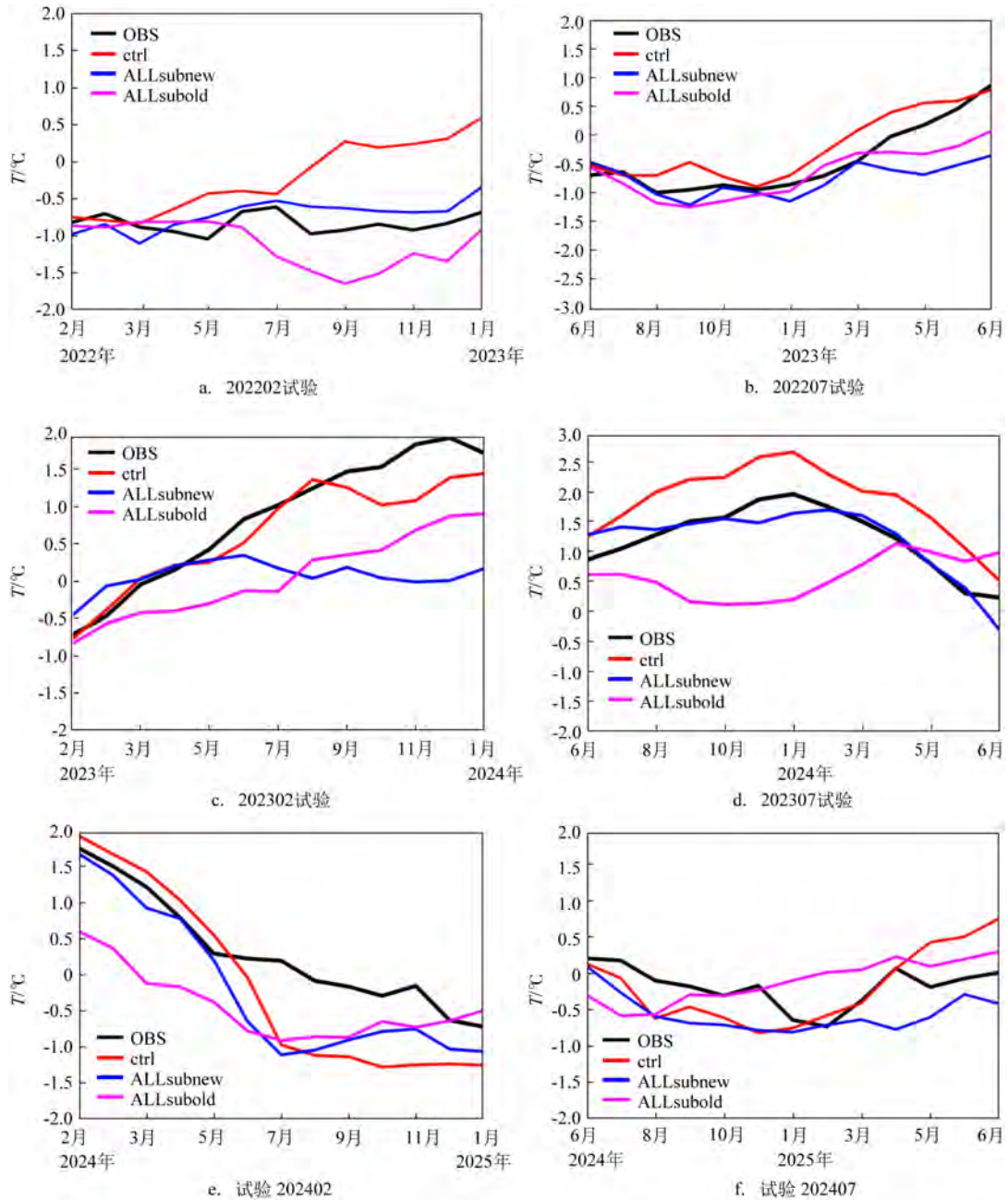


图5 2022—2024年未经过和经过海表高度订正的重构三维海温的预测的Niño3.4指数

Fig.5 The prediction of the Niño3.4 index using the assimilated reconstructed three-dimensional sea temperature without and without sea surface height correction from 2022 to 2024

综合结果表明,以ALLsatnew作为次表层同化数据源的预测结果明显优于ALLsatold方案,表明海表面高度订正对次表层海温重构的重要性,也表明多星数据融合的应用价值。ALLsatnew作为次表层同化数据源的误差更小,预报效果略优于GODAS,可作为GODAS同化数据源的备选方案。

4 初始场误差减半的敏感性试验

4.1 未订正的三维海温试验

以未经过SSH订正的多星融合重构三维海温ALLsatold为同化数据源构建初始场,研究预测初

表2 三维海温订正和未订正试验中12个月的试验预测值与观测值的MAE

Tab.2 Three-dimensional reconstruction corrected and uncorrected experiments of the mean absolute error of the predicted values versus the observed values in the 12-month prediction experiments

试验	202202 试验	202207 试验	202302 试验	202307 试验	202402 试验	202407 试验	平均
GODAS(ctrl)	0.683 3	0.262 0	0.268 6	0.644 3	0.632 5	0.358 2	0.474 8
ALLsubnew	0.205 7*	0.374 5	0.956 8	0.174 5	0.523 0	0.406 1	0.440 1
ALLsuold	0.3707	0.308 1	0.906 6	0.524 1	0.962 4	0.341 3	0.568 8
HYsubnew	—	0.202 3	0.562 3	0.796 5	0.627 5	0.407 1	0.519 1
HYsubold	—	0.883 4	1.707 7	1.938 2	1.707 3	1.390 6	1.525 4

*:MAE最小值

始场对 ENSO 预测误差的影响。若将 GODAS 视为观测场,同化 ALLsatold 和同化 GODAS 得到的海温初始场差值即可定义为初始场误差。通过改变初

始场误差,评估预测系统输出的 ENSO 预测结果,研究初始场误差大小对 ENSO 预测误差的影响。

图 6 为将同化 ALLsatold 所得初始场与同化

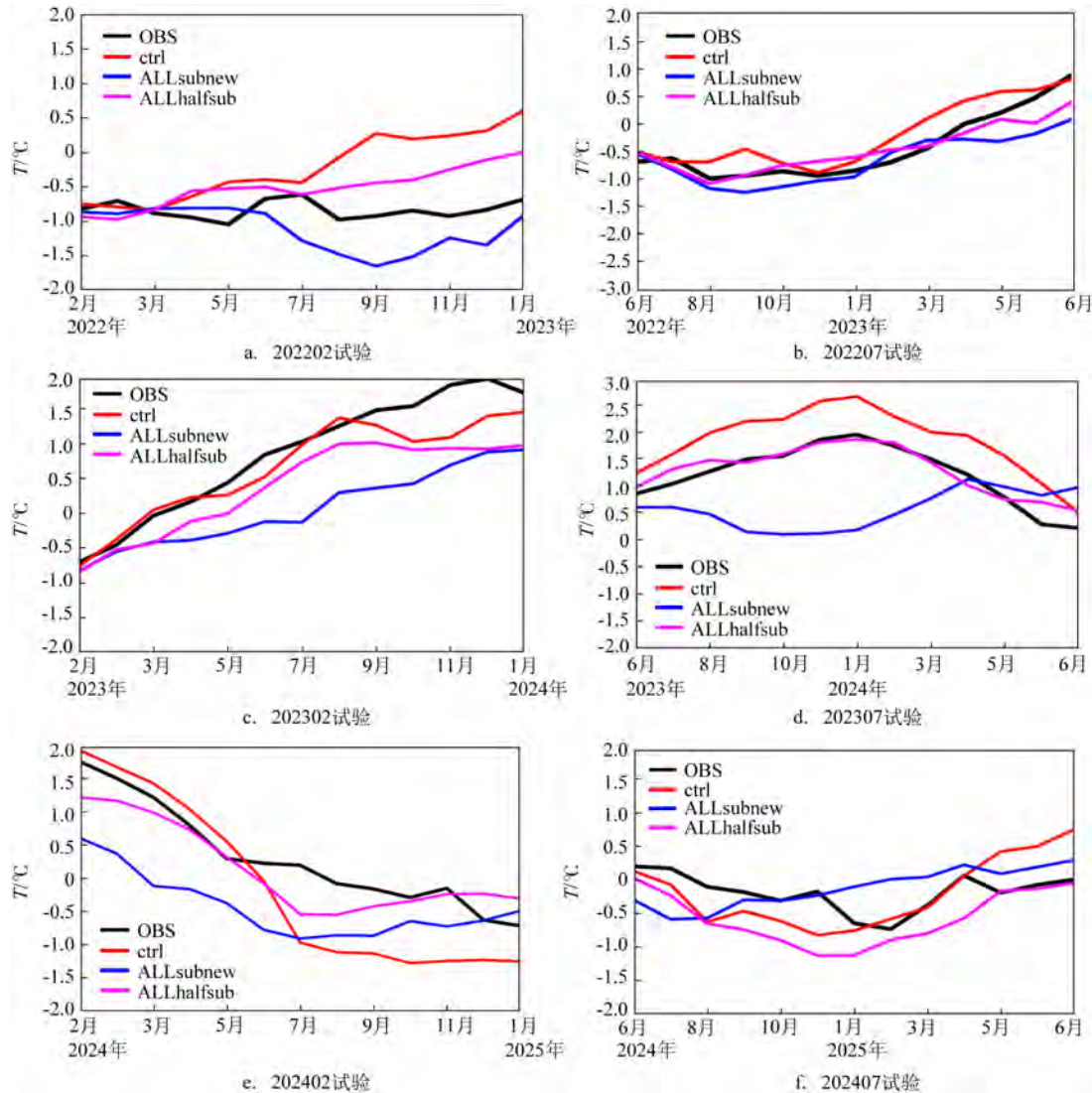


图 6 2022—2024 年未经过海表高度订正的重构三维海温构建初始场误差减半试验中预测的同化 Niño3.4 指数

Fig.6 The assimilated Niño3.4 index predicted in the experiment of halving the error of the initial field of the reconstructed three-dimensional sea surface temperature without sea surface height correction from 2022 to 2024

GODAS所得初始场的差值缩减 50% 后,运行预测系统得到的 2022—2024 年 6 组预测个例结果。其中,4 组试验预测表现整体提升;从时间序列变化趋势目视分析来看,202202 和 202407 两组试验优化效果不明显。

针对 202202 和 202407 两组试验进一步计算 MAE。统计单组实验 1—12 个月 MAE 均值后发现(见表 3):误差减半后,202202 试验前 6 个月预测效果较好,202407 试验后 6 个月预测效果提升。整体计算结果表明:无论是否调整初始场误差,两类方案不同预报时段的平均预测误差差距不大;但相较于同化 GODAS 控制实验,误差调整后的预报结果与之持平或有所提升。

从图 6 预测结果可以看出,将未订正重构三维海温同化初始场与 GODAS 同化初始场的差值缩小 50% 后,动力预测系统对 ENSO 的预测准确性有显著提升,试验结果是有效的。

4.2 订正的三维海温试验

以经过 SSH 订正的多星融合重构三维海温 ALLsatnew 作为同化数据源构建初始场,分析初始场对 ENSO 预测误差的影响。选择 Argo 资料作为观测场,同化 ALLsatnew 得到的海温初始场与 Argo 资料的差值作为初始场误差;将该初始场误差进行减半处理,评估预测系统输出的 ENSO 预测结果,分析初始场误差改变对 ENSO 预测误差的影响。

在 3.2 节重构三维海温订正-未订正试验中,ALLsatnew 同化方案下有两组试验 12 个月的 MAE 均值较高,分别为 202302 试验的 0.96 °C、202402 试验的 0.52 °C。针对这两组试验,将同化 ALLsatnew 生成的初始场与 Argo 资料的差值缩减 50% 构建新初始场,重新运行预测系统得到 202302 和 202402 两组典型个例结果,并与 ALLsatnew 同化结果对比(见图 7)。

表 3 未订正的不同时段三维海温初始场误差减半试验和 GODAS 控制试验的 MAE 对比

Tab.3 The comparison of MAE data at different time periods in the experiments of halving the errors of the uncorrected 3D sea surface temperature initial fields and the GODAS control experiment

试验	202202 试验 (1—12月)	202202 试验 (1—6月)	202202 试验 (7—12月)	202407 试验 (1—12月)	202407 试验 (1—6月)	202407 试验 (7—12月)
GODAS(ctrl)	0.68	0.25	1.11	0.36	0.36	0.36
ALLsub	0.37	0.25	0.49	0.35	0.33	0.37
ALLhalfsub	0.40	0.23	0.57	0.41	0.60	0.23

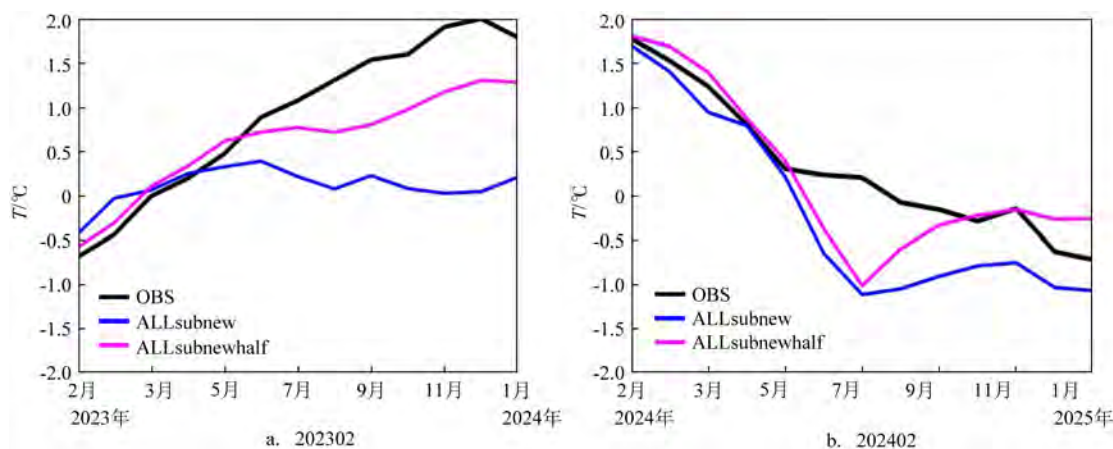


图 7 同化经过海表高度订正的重构三维海温初始场误差减半个例试验

Fig.7 Experiments to halve the initial field error of the reconstructed three-dimensional sea surface temperature ALLsatnew after sea surface height correction for assimilation

结果显示,初始场误差减半后两组试验预测结果整体显著优化,时间序列变化趋势更接近观测结果。202302试验12个月的MAE均值从0.96℃降至0.41℃,202402试验从0.52℃降至0.32℃,优化后的MAE均低于0.5℃,证明了该优化方式的有效性。

将ALLsatnew同化初始场相对Argo的误差减小50%,可进一步降低预测系统的初始误差,预测效果明显提升。由此可见,缩减次表层海温初始场误差能够有效降低ENSO预测误差,特别是针对预测误差偏大的事件。

4.3 SST试验

以多星融合数据ALLsat作为同化数据源,仅同化SST数据形成初始场,与该初始场相对GODAS的误差降低50%,驱动预测系统开展预测试验,结果见图8。从预测效果来看,仅同化表层海温的预测效果较差,即使对初始场误差进行减半处理,预

报结果也不会产生实质性提升。试验结果再次表明,仅优化SST初始场质量对ENSO预报能力的提升作用有限,而次表层海温初始场质量对ENSO预测误差的影响更大。

4.4 误差分析

对比图1和图2可见,重构三维海温相对Argo资料的差值主要集中于次表层区域,经SSH订正后整体误差显著减小。对比仅同化表层和次表层数据的试验(见图4)结果可知,二者的海温模拟结果相差不大。但对比图4和图5可以发现,经过SSH订正后的重构三维海温次表层误差明显减小,同化初始场误差更小,预测结果明显改善。对比图6和图7可见,将重构三维海温初始场误差再次减半,预测效果改善更加明显。但仅同化SST时(见图8),即使减半初始场误差,预报效果也无明显改进。以上结果说明:在预测系统初始场变量中,次表层海

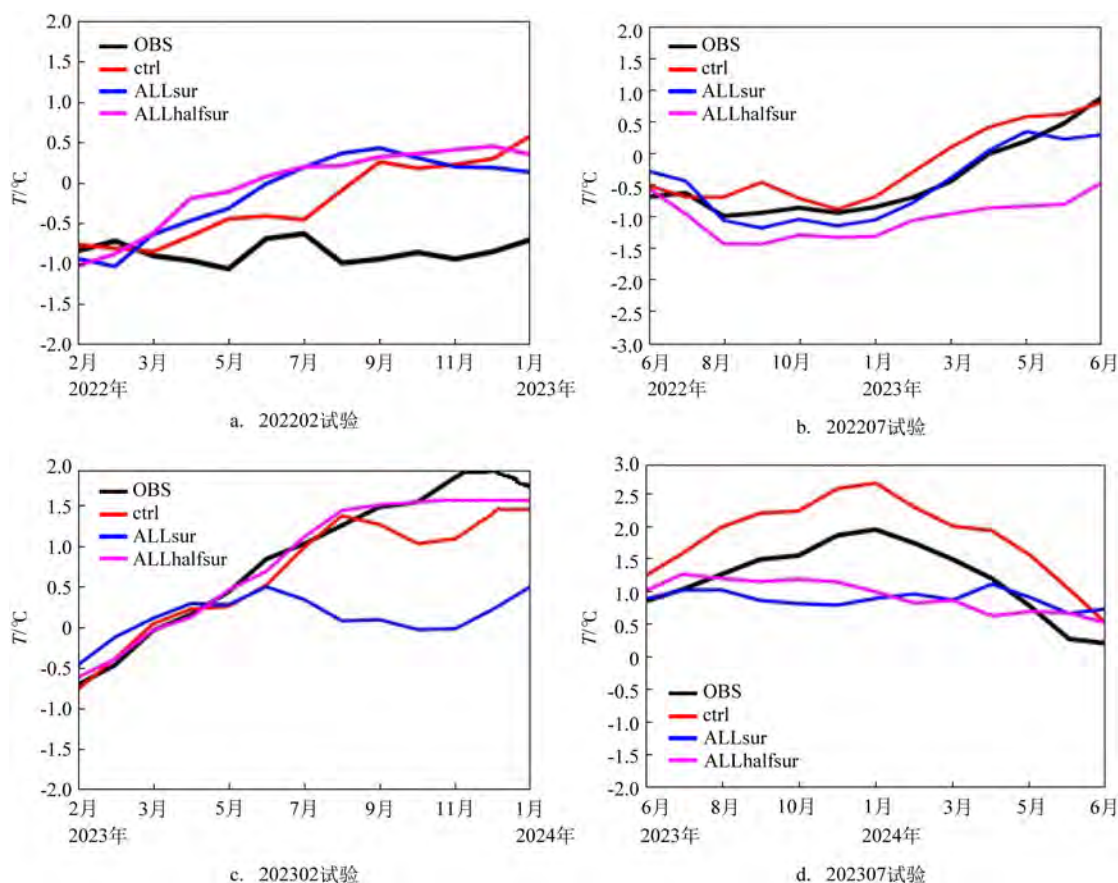


图8 仅同化多星融合数据的海表温度形成的初始场误差减半试验

Fig.8 Experiment on halving the initial field error by only assimilating multi-satellite merged SST data

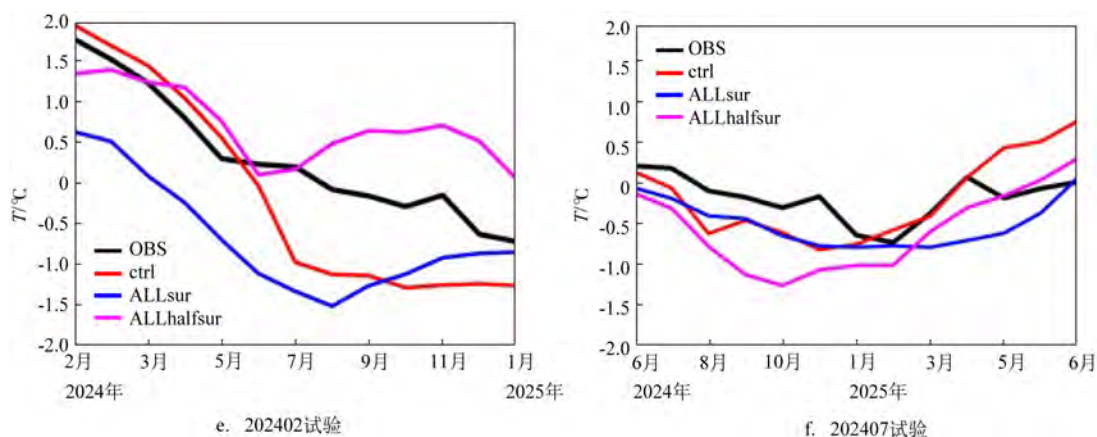


图8 (续)

Fig.8 (Continued)

温误差对整体预报误差起决定性作用,表层海温误差的影响相对有限。

从各项评估结果和多组预测试验结果看,采用多星融合数据、并经过SSH订正的多星融合重构三维海温 ALLsatnew 作为同化数据源时的预测效果最好,明显优于其他试验。该结果表明SSH订正对于次表层海温重构的重要性,以及多源卫星融合的应用价值。ALLsatnew 试验的预报误差更低,整体表现略优于同化GODAS的试验。

ALLsatnew 相对 ERA5 的偏差区间为 $-0.4 \sim 0.3$ °C; GODAS 整体相对 ERA5 明显偏低,最大负偏差达到 -0.5 °C; HYnew 相对 ERA5 偏差处于 $-0.6 \sim 0.3$ °C。ALLsatnew 主要偏差出现在湾流、黑潮延伸体、南大洋等强流区域以及赤道东太平洋区域(图略)。若将 ALLsatnew 相对 ERA5 的偏差再缩减 50%(即 0.2 °C),同时将 HYnew 偏差提升 0.3 °C,将能够有效提升该类数据集对关键气候因子的表征能力,增强其作为同化数据源的有效性(见图9)。

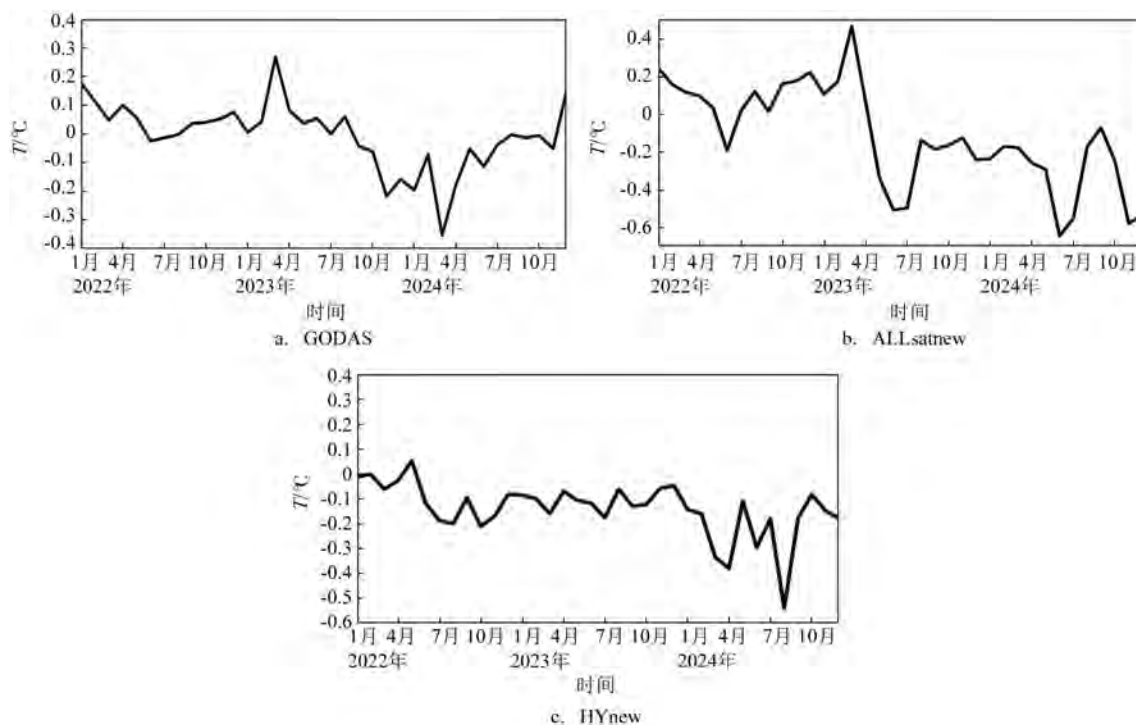


图9 不同试验预测与ERA5数据的Niño3.4指数偏差

Fig.9 The different predictions show deviations from the ERA5 data's Niño3.4 index

5 结论

本文在国家海洋环境预报中心全球气候预测系统 NMEFC_CESM 的基础上,分别同化 2022—2024 年 HY 卫星海温资料和多源卫星融合两类海温资料建立初始场,构建天基厄尔尼诺/拉尼娜集合预测系统,研究了卫星资料初始场对 ENSO 预测误差的影响。

多源卫星融合方法基于偏差订正消除不同数据源之间的基准偏差,有效降低了数据的不确定性。评估结果显示,从次表层海温结构和时间序列变化趋势上看,多星融合 ALLsat 数据质量均优于单星 HY 数据。随着卫星数据应用水平和利用率的逐步提升,未来多星数据的联合应用将是重要趋势。

次表层海温结构随时间变化是厄尔尼诺/拉尼娜事件演化过程的重要表征。基于多源卫星融合的重构三维海温场 ALLsatnew 与 Argo 数据更接近,在次表层的表达上更好,部分精度指标高于 GODAS 再分析资料,可作为 ENSO 预测系统的备选同化数据源。

为探究卫星资料初始场对 ENSO 预测误差的影响,通过改变同化数据源生成初始场,设计了多类数值试验:单星-多星融合、表层-重构三维海温、重构三维海温经过 SSH 订正和未订正实验,以及将初始场误差减半的预测试验。试验结果显示,同化多星融合资料构建的初始场明显优于单星资料构建结果,初始场精度更好,ENSO 预测结果更稳定且更接近观测;仅同化 SST 和同化未订正的重构三维海温,二者的模拟预测优劣差异较小,但同化经过 SSH 订正的重构三维海温后,所得初始场误差较小,预测结果有明显改善;将订正后的重构三维海温构建的初始场误差减小 50%,预测效果改善更显著;但仅同化 SST 时,即使减半初始场误差,预测效果的改进也不明显。

综合数据评估和数值试验结果可以发现,多星融合数据的质量明显优于单星数据,构建的多星融合初始场对于降低 ENSO 预测误差非常有效;在预测系统初始场的构建中,降低次表层海温误差对于改善 ENSO 预测误差效果非常显著,而表层海温的误差影响相对次要。

本研究通过构建天基厄尔尼诺/拉尼娜集合预

测系统,开展了多组预测试验。从试验结果看,虽然目前卫星资料仍然存在一定的误差,但若将初始场误差减半,使 ALLsatnew 和 HYnew 相对 ERA5 的偏差分别缩减 50%,即分别优化 0.2 °C 和 0.3 °C,则 Niño3.4 的 12 个月预测 MAE 能够降至 0.5 °C 以内,可有效提高其作为同化资料源的有效性。这对卫星遥感观测提出了新的需求,为进一步提升卫星遥感资料质量提供了依据。

参考文献:

- [1] Chen Dake, Zebiak S E, Busalacchi A J, et al. An improved procedure for El Niño forecasting: Implications for predictability [J]. *Science*, 1995, 269(5231): 1699-1702.
- [2] McPhaden M J. Genesis and evolution of the 1997-98 El Niño[J]. *Science*, 1999, 283(5404): 950-954.
- [3] Ham Y G, Kim J H, Luo J J. Deep learning for multi-year ENSO forecasts[J]. *Nature*, 2019, 573(7775): 568-572, doi: 10.1038/s41586-019-1559-7.
- [4] Zhang Shouwen, Wang Jing, Jiang Hua, et al. Effects of Indian Ocean Dipole initialization on the forecasting of La Niña 1 year in advance[J]. *Climate Dynamics*, 2023, 61(9/10): 4661-4677, doi: 10.1007/s00382-023-06816-5.
- [5] Wang Jing, Zhang Shouwen, Jiang Hua, et al. Effects of 2019 subsurface Indian Ocean initialization on the forecast of the 2020/2021 La Niña event[J]. *Climate Dynamics*, 2023, 60(7/8): 2419-2435, doi: 10.1007/s00382-022-06442-7.
- [6] Wen Jinhui, Zhang Shouwen, Jiang Hua, et al. Interplay of Indo-Pacific precursors in La Niña forecasting: IOD-ENSO phase coupling and thermodynamic drivers[J]. *Atmospheric Research*, 2026, 327: 108359, doi: 10.1016/j.atmosres.2025.108359.
- [7] 李煜,陈幸荣,谭晶,等. 基于 CESM 气候模式的 ENSO 后报试验[J]. *海洋学报*, 2015, 37(9): 39-50.
Li Yi, Chen Xingrong, Tan Jing, et al. An ENSO hindcast experiment using CESM[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(9): 39-50.
- [8] 张守文,宋春阳,王辉,等. 基于 CESM 预测系统对全球关键海区海温主要模态后报能力评估[J]. *海洋学报*, 2018, 40(9): 18-30.
Zhang Shouwen, Song Chunyang, Wang Hui, et al. Evaluation of the hindcasting main SSTA modes of the global key regions based on the CESM forecasting system[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(9): 18-30.
- [9] Zhang Shouwen, Jiang Hua, Wang Hui. Assessment of the sea surface temperature predictability based on multimodel hindcasts [J]. *Weather and Forecasting*, 2019, 34(6): 1965-1977.
- [10] Zhang Shouwen, Wang Hui, Jiang Hua, et al. Evaluation of ENSO prediction skill changes since 2000 based on multimodel hindcasts [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(3): 365.
- [11] Kirtman B P, Min D, Infanti J M, et al. The north American

- multimodel ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(4): 585-601, doi: 10.1175/BAMS-D-12-00050.1.
- [12] Reynolds R W, Smith T M, Liu Chunying, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(22): 5473-5496.
- [13] 苗春生, 程远, 王坚红, 等. 中国风云卫星与海洋卫星近海 SST 资料融合技术及应用研究[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(10): 1127-1143.
- Miao Chunsheng, Cheng Yuan, Wang Jianhong, et al. Data fusion of offshore SST from China FY and HY2 satellites and its application [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(10): 1127-1143.
- [14] 张明琪, 徐永生, 张庆君, 等. 基于变分法评估卫星海面信息对重构三维温盐及声场特性的影响[J]. *海洋学报*, 2023, 45(12): 133-144, doi: 10.12284/hyxb2023163.
- Zhang Mingqi, Xu Yongsheng, Zhang Qingjun, et al. Variational method of ocean three-dimensional thermohaline structure and its acoustic performance evaluation[J]. *Haiyang Xuebao*, 2023, 45(12): 133-144, doi: 10.12284/hyxb2023163.
- [15] 吴宇豪, 徐永生, 袁智, 等. 基于 Stacking 集成学习的日尺度海洋三维温度场重构[J]. *海洋预报*, 2026, 43(2): 1-10.
- Wu Yuhao, Xu Yongsheng, Yuan Zhi, et al. Reconstruction of daily-scale three-dimensional ocean temperature field based on Stacking integrated learning[J]. *Marine Forecasts*, 2026, 43(2): 1-10.
- [16] 王喜冬, 韩桂军, 李威, 等. 利用卫星观测海面信息反演三维温度场[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(6): 10-17.
- Wang Xidong, Han Guijun, Li Wei, et al. Reconstruction of ocean temperature profile using satellite observations[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(6): 10-17.
- [17] Su Hua, Huang Linjin, Li Wene, et al. Retrieving ocean subsurface temperature using a satellite-based geographically weighted regression model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(8): 5180-5193.
- [18] 黎文娥, 苏华, 汪小钦, 等. 多源卫星观测的全球海洋次表层温度异常信息提取[J]. *遥感学报*, 2017, 21(6): 881-891.
- Li Wene, Su Hua, Wang Xiaoqin, et al. Estimation of global subsurface temperature anomaly based on multisource satellite observations[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(6): 881-891.
- [19] Su Hua, Zhang Feiyan, Teng Jianchen, et al. Reconstructing high-resolution subsurface temperature of the global ocean using deep forest with combined remote sensing and in situ observations[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 218: 389-404.
- [20] Zhu Jieshun, Kim J, Vernieres G, et al. Next Generation Global Ocean Data Assimilation System (NG-GODAS): A new 40-year reanalysis and OSSE applications[C]//*Proceedings of the 46th Climate Diagnostics and Prediction Workshop*. College Park: NOAA/NCEP/CPC, 2022.
- [21] Behringer D W. The global ocean data assimilation system (GODAS) at NCEP[C]//*Proceedings of the 11th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans and Land Surface*. San Antonio: American Meteorological Society, 2007.
- [22] Huang Boyin, Liu Chunying, Banzon V F, et al. NOAA 0.25-degree daily optimum interpolation sea surface temperature (OISST), version 2.1[DS/OL]. (2020-03-20). https://catalog.data.gov/dataset/noaa-0-25-degree-daily-optimum-interpolation-sea-surface-temperature-oisst-version-2-1?from_hint=eyJxIjoITk9BQSAxLzRcdTAwYjAgRGFpbHkgT3B0aW11bSBjb3RlcnBvbGZ0aW9uIFNIYSBTdXJmYWNIIFRlbXBleF0dXJlICkPSVNTVCkifQ%3D%3D.
- [23] Huang Boyin, Liu Chunying, Banzon V, et al. Improvements of the daily optimum interpolation sea surface temperature (DOISST) version 2.1[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(8): 2923-2939.
- [24] Xiang Liang, Xu Yongsheng, Sun Haiwei, et al. Reconstruction of interior velocity in the southern pacific ocean using satellite and Argo data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2025, 22: 1500405.
- [25] Yue Weihao, Xu Yongsheng, Xiang Liang, et al. Prediction of 3-D ocean temperature based on self-attention and predictive RNN[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 21: 1501305.

The influence of satellite remote sensing data initial field on the error of El Niño-Southern Oscillation dynamical prediction

JIANG Hua^{1,2}, SONG Chunyang^{1,2}, ZHANG Shouwen^{3*}, YUAN Zhi⁴, MU Bo⁵, XIANG Liang⁶, TAN Jing^{1,2},
HUANG Yongyong^{1,2}, HE Yue^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 4. Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 5. National Satellite Ocean Application Service, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 6. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the global climate prediction system NMEFC_CESM of the National Marine Environmental Forecasting Center, this paper assimilates the HY-2B satellite and multi-source satellite remote sensing fusion types of sea surface temperature data to establish the initial field, and constructs a satellite-based El Niño/La Niña ensemble prediction system. To explore the influence of satellite remote sensing data initial field on the ENSO prediction error, three types of sensitivity numerical experiments were designed by changing the initial field: The first type includes the assimilation of sea surface temperature and the comparison experiment of assimilating reconstructed three-dimensional sea surface temperature; The second type is the assimilation of reconstructed three-dimensional sea surface temperature, with two groups of comparison experiments before and after sea surface height correction; The third type is to reduce the initial field error of satellite data by half, and test its impact on the ENSO prediction error. The experimental results show that the prediction initial field constructed by assimilating multi-source satellite fusion is more accurate than that constructed by the single-star sea surface temperature data of HY-2B, and the ENSO prediction results are more stable and closer to the observation; Only assimilating the surface sea temperature and differentiating the subsurface sea temperature, the effect of ENSO prediction is poor, even if the initial field error is reduced, it will not produce a substantive improvement, indicating the importance of subsurface assimilation for ENSO prediction; The prediction results using the reconstructed three-dimensional sea surface temperature corrected by sea surface height as the assimilation data source are significantly the best, indicating the importance of sea surface height correction for subsurface sea surface temperature reconstruction; When the initial field error is reduced by 50%, the 12-month average absolute error of Niño3.4 drops below 0.5 °C, and the prediction accuracy significantly improves, especially for events with relatively large prediction errors..

Key words: ENSO prediction error; initial field of satellite data; dynamic experiment; multi-source satellite fusion; reconstruction of three-dimensional sea surface temperature