

文章编号: 2096-1618(2019)06-0615-10

# 同化卫星高度计观测对 CAS-ESM-C 上层海洋温度模拟的改进

杨海鹏<sup>1,2</sup>, 陈权亮<sup>1</sup>, 林壬萍<sup>2</sup>, 杜梦蛟<sup>2</sup>, 郑 飞<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所 国际气候与环境科学中心, 北京 100029)

**摘要:**为有效改进中国科学院地球系统模式气候分量系统(CAS-ESM-C)对年际海洋变化信号的模拟,利用集合最优插值同化方法(ensemble optimal interpolation, EnOI)将海表高度(sea surface height, SSH)数据同化入CAS-ESM-C。通过对比3种不同来源的平均动力地形(mean dynamic topography, MDT)数据对SSH同化性能的影响,筛选出针对CAS-ESM-C海洋资料同化最优的MDT。在此基础上,实施了1994–2000年的SSH观测同化试验,检验其对CAS-ESM-C海洋状态模拟的改进效果。结果表明,正是由于海洋上层(温跃层以内)的温度变化与SSH有着较强的动力相关性,同化SSH观测可以显著地改进CAS-ESM-C对海洋上层温度变化、海气耦合循环和物理过程的模拟。0~400 m全球平均的均方根误差能控制在1.0℃以内;温跃层深度附近的改进效果最为显著;热带太平洋上层海洋热含量的年际变化以及赤道太平洋地区海温年际异常演变明显优于仅同化海表温度(sea surface temperature, SST)的改进效果。由此可以得到,同化SSH改进了CAS-ESM-C对海洋上层年际变率的模拟,为下一步利用CAS-ESM-C开展短期气候预测奠定了基础。

**关键词:**气象学;卫星高度计资料同化;平均动力地形;上层海洋温度模拟;CAS-ESM-C

**中图分类号:**P456.7

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcu.2019.06.010

## 0 引言

资料同化技术对于地球系统模式的发展起到了非常重要的作用,不仅仅是因为同化方法的日益进步,同样也与多种多样的观测资料被同化到模式中,使得模式初始场更合理,订正了模式的偏差有着密切的联系。随着现代观测技术的不断发展,观测资料的种类也在不断增多,例如卫星观测、海洋浮标观测、船舶观测等;同时因为观测精度不断提高,卫星高度计对海表高度异常的观测可达到厘米级精度。当多种观测资料被合理地同化到模式中,不仅能有效地改进模式模拟的准确性,而且也能在气候预测中更准确地模拟出气候的异常变化。已经有研究表明,对一些边缘海域海表温度的预测,厄尔尼诺–南方涛动(ENSO)的模拟和预测,以及一些海洋预报系统的运行都随着卫星高度计资料的同化而得到了极大的改善<sup>[1-2]</sup>。

SSH是一项重要的海洋观测,卫星高度计所提供的SSH数据具有高精度和高分辨率的特征,是物理海洋学家研究海洋表层环流、中尺度涡等现象的主要数

据来源之一。不仅是因为它与表层的流场有关,而且与下层的温盐结构关系密切,包括主温跃层的深度和次表层的热力结构。研究表明<sup>[3]</sup>在马尾藻海附近,海表动力高度和15℃等温线深度有密切的关系。这一点也在双层约化重力模式中得到了证明,海平面高度变化与温跃层深度变化之间存在一一对应关系<sup>[4-5]</sup>。现阶段,通过同化SSH以提高海洋环流可预测性的潜在应用,也变成了海洋学领域中一项非常活跃的研究<sup>[6]</sup>。对于不同时空尺度的洋流、涡旋运动、次表层热力场,甚至是ENSO的预测,SSH同化都能不同程度地提高模拟的合理性和准确性<sup>[7-8]</sup>。因此,SSH被广泛应用于描述和理解海洋过程,如表面环流、涡旋活动、海平面上升等。

尽管同化SSH可以显著地提高模式对海洋的描述和预测过程,但应该指出的是,海平面高度提供的信息是相对于参考椭球体,而海洋学家主要关注的是动力地形(dynamic topography, DT),即以大地基准面为参考面的测量结果。而DT的长期时间平均称为平均动力地形(MDT)。由于缺乏对地球大地基准面的精准估计,同时为了避免大地基准面带来的观测误差,目前卫星高度计提供的是以海表高度长期平均(MSSH)

为参考面测量的海表高度异常 (sea level anomaly, SLA) 数据。在海洋模式中,大地基准面是一个球体,因此 MDT 可近似等于 MSSH<sup>[9]</sup>。虽然现有的 MDT 可以成功地推断出大规模的环流形势,但它们经常存在时空采样的不均匀或偏差较大的问题,尤其是在水文特征高度可变的区域。近年来,已经有不少研究表明 MDT 的好坏与模式对海表环流以及上层海洋结构的模拟效果有密切的联系。将分别基于观测得到的 MDT 和模式结果构建的 MDT,进行 SSH 同化试验后的结果对比分析<sup>[10]</sup>,认为在热带海域,MDT 对同化 SSH 数据的影响是不可忽视的。基于 HYCOM 模式,闫长香等<sup>[11]</sup>将多种不同来源的 MDT 用于 SSH 同化,发现同化了温盐廓线后得到的 MSSH 能更好地刻画出 MDT,使得 SSH 同化试验结果在温盐的模拟上都有较好的改进;而基于模式自由积分的结果得到的 MDT,同化 SSH 后甚至得到了负效果。

## 1 模式、数据和方法简介

### 1.1 模式简介

CAS-ESM-C 是一个以耦合器为核心,将大气模块、海洋模块、陆面模块和海冰模块 4 个地球物理动力模块结合到一起的,具有模块化结构的耦合模式。其中,大气模块是中国科学院大气物理研究所最新研发的第四代大气模式 IAPAGCM-4 (IAP4),采用  $1.4^\circ \times 1.4^\circ$  的水平分辨率,垂直方向共 26 层;海洋模块采用的是由 LASG/IAP(中国科学院大气物理研究所和地球流体力学数值模拟国家重点实验室)研发的第三代全球大洋环流模式 L30T63<sup>[12]</sup> 改进后的 LICOM 海洋模式,其水平分辨率是  $1^\circ \times 1^\circ$ ,垂直方向共 30 层,该模式涵盖了除北极点以外的全球所有范围;陆面模块是由 NCAR 研发的通用 CLM3 陆面模式<sup>[13-14]</sup>;海冰模块是由 NCAR 研发的 CSM 海冰模式 CISM5<sup>[15]</sup>。耦合器采用 NCAR CCSM3<sup>[16]</sup> 的 CPL6 耦合器<sup>[17-18]</sup>。在耦合模式运行过程中,四个分量模块同时积分,按一定的时间间隔与耦合器交换信息。耦合器从各分量模块接收物理场信息,将有关数据计算、投影、合并后,再将其发送到各分量模块进行数据交换,完成耦合过程。

### 1.2 观测数据

(1)SLA 数据取用 1994–2000 年全球范围延时卫星高度计数据,水平分辨率为  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ ,时间分辨率

为逐日。该产品用 SL-TAC 多任务高度计数据处理系统处理,主要的数据来自有高度计任务的: Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO, ERS1/2。由 DUACS 进行统一化处理后,经 AVISO 发布<sup>[19]</sup>。经过稀疏化处理后,水平分辨率是  $1^\circ \times 1^\circ$ ,再进行同化试验。

(2)同化的 SST 数据是美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供的高分辨率逐日再分析数据<sup>[20]</sup>。经过稀疏化处理后,水平分辨率是  $1^\circ \times 1^\circ$ ,再进行同化试验。

(3)对比观测数据 EN4 是英国气象局 Hadley 环流中心的全球海温月均客观分析数据<sup>[21]</sup>。水平分辨率是  $1^\circ \times 1^\circ$ ,垂直方向分 30 层与模式网格一致,时间分辨率为逐月。

### 1.3 同化方法简介

使用的资料同化方法是集合最优插值的方法<sup>[22-23]</sup>,这是一种在资料同化研究中常用的方法。EnOI 分析通过求解以下方程得到

$$\Psi^a = \Psi^b + \alpha (C \cdot P) H^T (\alpha H (C \cdot P) H^T + R)^{-1} (\Psi^o - H \Psi^b) \quad (1)$$

其中  $\psi = (h_0, t, s, u, v)$  表示模式的状态向量,  $h_0$  是海表高度,  $t$  是海温,  $s$  是盐度,  $u$  和  $v$  代表流场流速。上标 a, b, o, T 分别代表分析场、背景场、观测和矩阵的转置;  $C$  是一个用来将背景误差协方差局地化的相关函数;  $R$  是观测误差协方差矩阵;  $H$  是观测算子,用于将模式空间映射到观测场;  $\alpha$  是一个标量系数,用来调整背景误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵的相对重要性,这里使用的  $\alpha = 0.3$ ; 背景误差协方差矩阵  $P$  为

$$P = (A \cdot A^T) / (N-1) \quad (2)$$

其中  $N$  是集合样本数 (这里采用 108 个静态样本,即  $N = 108$ )。  $A$  是静态样本,通过长期积分所得,用来估计构建背景误差协方差。

在海洋资料同化研究中,基于 EnOI 方法将 SSH, SST 以及其他观测数据同化到不同的模式中,根据相关关系来调整模式中的变量,使得模式初始场更合理也更接近观测。

## 2 MDT 对 SSH 同化性能的影响

### 2.1 MDT 数据对比

在卫星高度计只能获得 SLA 的情况下,合理的

MDT 对于 SSH 的同化效果是至关重要的。选取 3 种不同来源的 MDT,见表 1。

表 1 3 组试验中采用的 MDT

MDT 简称	MDT 来源	计算方法
MDT_WOA	同化 WOA 气候态数据的分析场	SSH 多年平均
MDT_OBS	AVISO 提供的 SLA 数据的参考面	基于多源统计分析方法构建 <sup>[24]</sup> ,扣除 0.42 m 补偿值
MDT_Model	模式自由积分的结果	SSH 多年平均

图 1 是 3 种 MDT 的水平分布图。从图 1 可以发现,3 种 MDT 刻画的海表高度全球分布的形态基本是一致的:在南北副热带太平洋,呈现西高东低的结构;赤道太平洋比南北两侧低;南印度洋 15°S 附近有一条高值带;黑潮地区存在 SSH 的高值中心。但是 MDT\_

Model 对中小尺度的海洋特征模拟不够准确,尤其是对赤道逆流带海表高度的刻画略微单一,这可能与模式本身的分辨率和模拟性能有关。在 MDT\_WOA 中,整体的海表高度较 MDT\_Model 的结果偏高,尤其是在北印度洋和热带大西洋区域,偏高较为明显。这是由于同化气候态海温之后,海温冷偏差减小,进而使得海表高度增加,与真实情况更为接近。而 MDT\_OBS 的特点在于,真实的观测反映出了更复杂的海表高度分布,但是多源统计分析方法<sup>[24]</sup>导致 MDT\_OBS 整体高度较其他两种 MDT 偏高,因此在实际使用中采用扣除了平均高度差之后的结果。虽然简单的扣除高度差,可能会导致某些区域差异增加,但事实证明消除 3 种 MDT 之间的平均高度差后,基本上不会导致某些区域的模拟结果变差<sup>[11]</sup>。

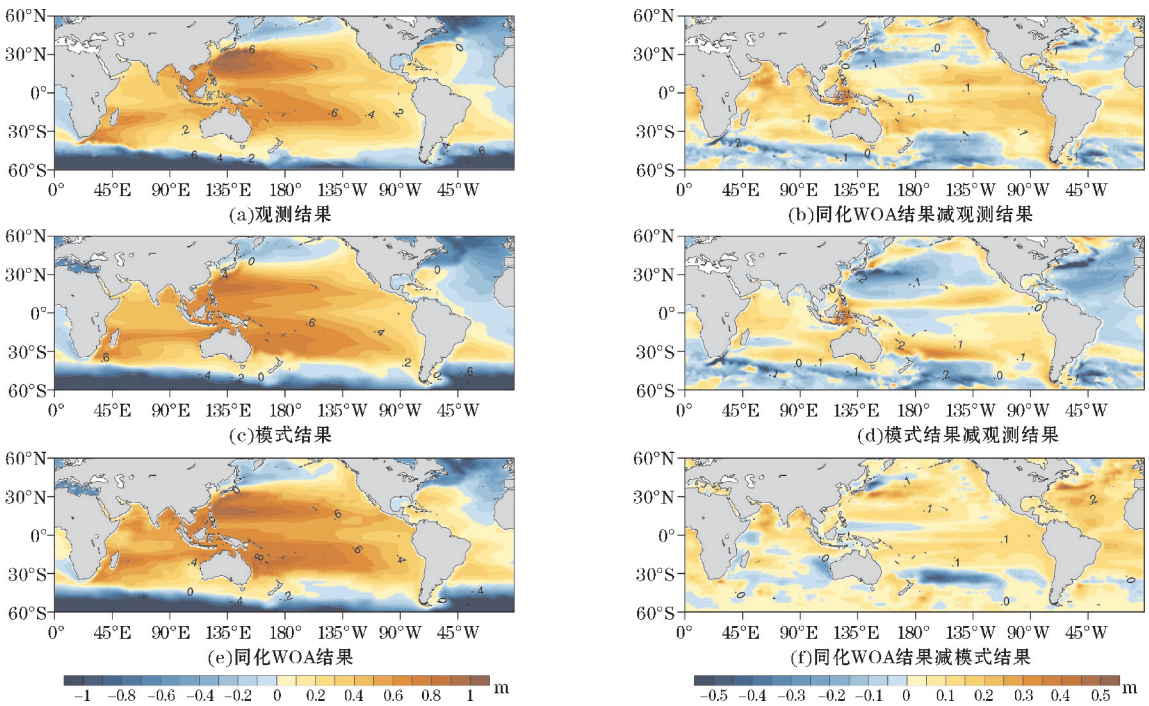


图 1 3 种 MDT 及高度差的全球分布图

2.2 SSH 同化试验对比

分别基于 3 种 MDT 结合 1994 年的 SLA 观测数据进行 SSH 短期同化试验,每 7 d 进行一次同化。目的是检验在该模式及 EnOI 同化方法下,用不同 MDT 同化 SSH 对模式上层海温的改进情况,以便找到最优的 MDT 进行更长时间的 SSH 同化试验。该试验一共对 4 组试验结果进行对比分析,在同化 SSH 的 3 组试验中,唯一的变量是采用不同的 MDT,因此各组试验分别取用各自的 MDT 名称作为标识,第四组试验是对照试验(Control),是没有做任何同化的模式自由积分的结果。

图 2 是各海域及全球海温在垂直方向上的均方根误差 (root mean square errors, RMSE),为检验不同 MDT 对于不同海域的影响,大致将太平洋,大西洋,分成南大洋,热带大洋,北大洋三部分,印度洋因为范围较小,将其分成南北两部分分析。由于海洋上层海温,受到太阳辐射的日变化、年变化以及海气相互作用、海陆分布和洋流涡旋等多种因素的影响,变化复杂,因此模式在模拟时,海温偏差主要集中在海洋的上层,尤其是温跃层附近。且模式本身海表高度和整层温度的相关性受热力和动力作用的限制,因此主要分析同化 SSH 后对 400 m 以上海温偏差的改进情况。



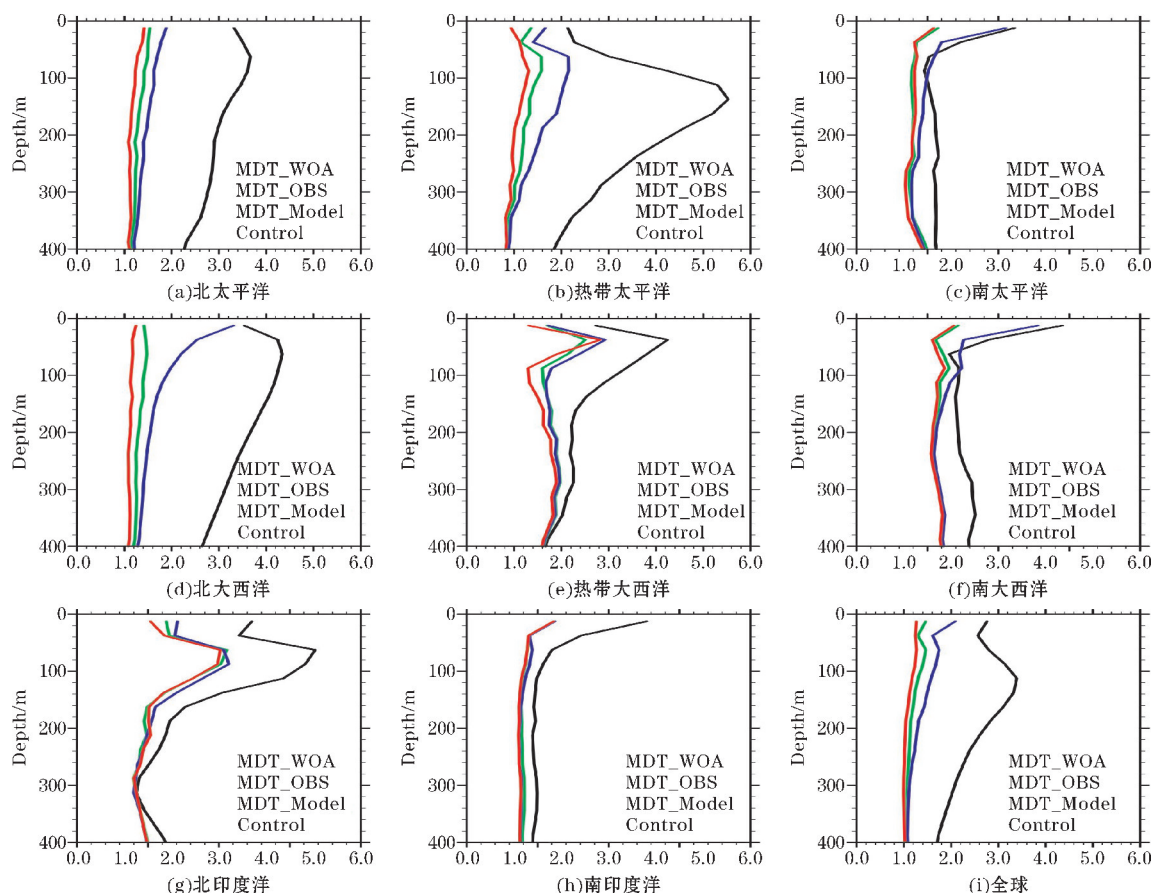


图2 各海域及全球海温 RMSE 的垂直分布

从图2中可以看到,同化SSH对海洋上层温度有明显的改进,且使用不同MDT对同化后的改进效果也不同。模式偏差订正较大的海域,主要是北太平洋、热带太平洋以及北大西洋,改进效果甚至可以影响到400 m以下深度,说明在这些海域SSH与海温的动力相关性较好,且模式本身在未同化观测资料的情况下,在这些区域,尤其是在温跃层附近,模拟的偏差较大,所以同化SSH对海温偏差的改进最为明显。而在其他海域,如南太平洋、南大西洋以及南印度洋,同化后在50 m以上有较好的改进效果。可以看到,模式本身在大洋南侧的模拟,除了表层偏差较大,次表层以下模拟的效果相对其他海域要好得多,并且受到整层变量之间相关性的限制,同化SSH后的改进效果相对其他海域要小一些。热带大西洋和北印度洋,同化后温度调整主要在上300 m,且在温跃层附近,即使同化了SSH后,相较于其他层结,还是有明显较大的偏差,说明静态样本中,SSH和这些海域上层海温的相关关系并不合理。

从不同MDT的结果看,MDT\_WOA在绝大多数海域都能取得更好的效果。而MDT\_Model整体上效果

仅次于MDT\_WOA,但是由于模式本身存在不同海域模拟的优劣,因此模拟出的SSH在各区域存在不同程度的偏差,因此在这些本身偏差较大的区域用MDT\_Model同化SSH的效果就不如MDT\_WOA好。而MDT\_OBS一方面因为卫星高度计数据和现场观测数据整合时会有一定的偏移量;另一方面即使扣除了偏移量,仍可能存在不同区域扣除过多或过少的情况,造成与模式结果之间的不匹配,因此MDT\_OBS的同化效果不如其他两个好。

图3是基于不同MDT同化SSH,各层海温RMSE的水平分布情况。因为模式本身在海洋各深度以及不同海域模拟偏差有所不同,为了更好地分析和检验不同MDT的作用,将上400 m的海温分成3层进行分析:首先是0~50 m,因为接近表面,受到太阳辐射年际变化的影响,模式偏差有很强的周期性;其次是50~200 m,包含了温跃层在内的模式偏差大值区,且SSH与该层海温有较高的相关性,能较好地反映同化SSH对模式模拟的改进效果;最后是200~400 m,SSH与下层海温的相关性越来越小,且从图2中可以看出,3种MDT对温度改进的差异最深能到达400 m。

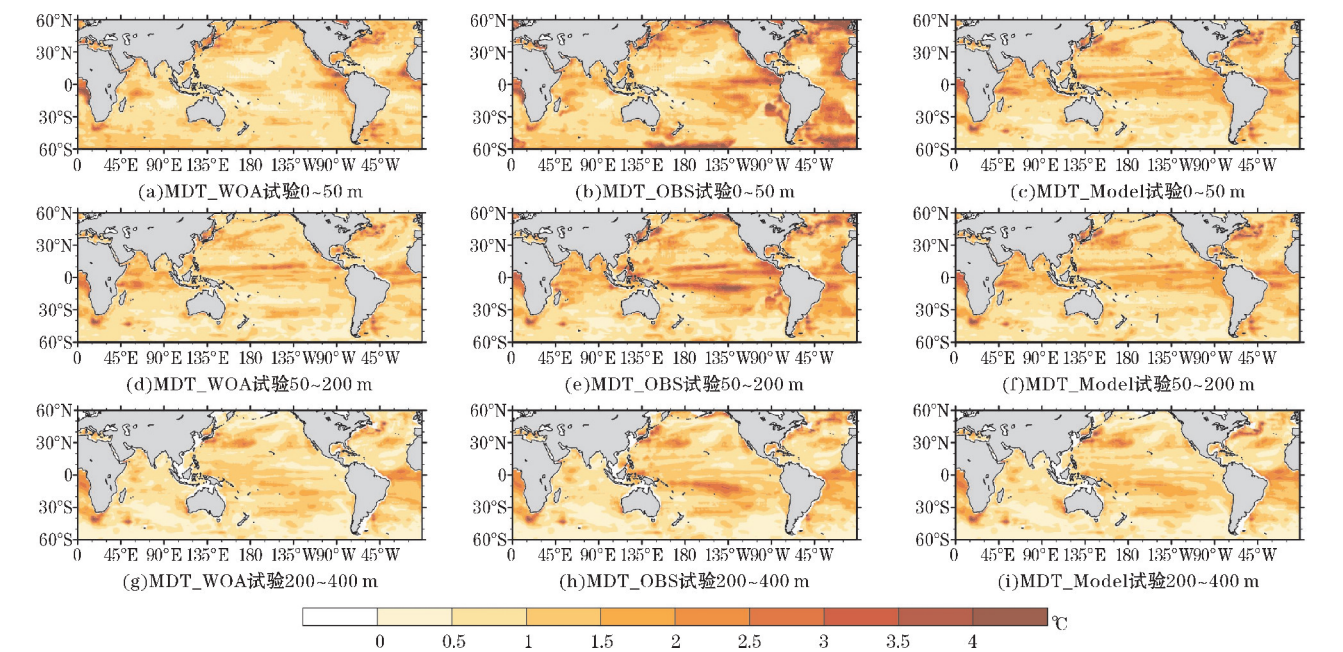


图 3 基于不同 MDT 同化 SSH 各层海温的 RMSE 水平分布

0 ~ 50 m的结果表明,同化 SSH 后,MDT\_OBS 的改进效果要差于其他两种 MDT,尤其是在北大西洋和南大西洋,海温的 RMSE 仍然很高。整体上,除了热带大洋东岸(如几内亚湾等)会出现的 RMSE 高值区,MDT\_WOA 的 RMSE 是最小的;在赤道太平洋区域,MDT\_WOA 明显好于 MDT\_Model,这对于改进模式对 ENSO 事件的模拟及预测能力至关重要。

从 50 ~ 200 m的结果看,整体上 RMSE 的大值区都集中在热带大洋,尤其是赤道地区。同化 SSH 能将 RMSE 控制在1.2 °C 左右,改进效果显著。但模式本身在模拟温跃层附近的海温时就有很大的偏差,即使 SSH 与该层温度具有较好的相关性,同化后的改善程度也是有限的。总体来说,MDT\_WOA 的整体效果要好于其他两组试验。温跃层偏差的改进,对于模拟例如 ENSO 这类高海气相互作用下的气候异常事件的发生和发展的过程意义重大。

200 ~ 400 m的结果中,3 种 MDT 的同化结果差别不大,MDT\_WOA 在太平洋南赤道暖流区以及北大西洋暖流区结果略好。主要原因是 SSH 与 200m 以下的海温相关性要小于200 m以上,且温跃层以下的区域受大洋表层的季节变化以及海气相互作用的影响不大。

经过一年的 SSH 同化试验,将 3 种 MDT 的同化结果进行了 RMSE 垂直廓线分海域和水平分层的对比。基于这 3 种 MDT 同化 SSH 后,无论是垂直方向还是水平分布上,MDT\_WOA 对模式海温的改进效果都要优于其他两种,尤其是对温跃层附近海温的改进,使得温跃层深度的模拟更准确。因为 MDT\_WOA 是长期同化海温气候态数据的结果,能反映出海温与海表高度更合理的关系,不仅更真实,而且与模式本身变量间的关系更契合,因此用它同化 SSH 后取得的效果是最好的。可以认为 MDT\_WOA 为长期 SSH 同化奠定了良好的基础,也能更合理地模拟出以 ENSO 为主的气候异常信号,进而提升模式的年际气候预测能力。

3 SSH 长期同化试验

对基于 3 种 MDT 的短期 SSH 同化结果进行评估后,选取 MDT\_WOA 进行了长期 SSH 同化试验和对比试验,见表 2。检验了 SSH 同化试验对模式偏差的改进情况。同时,通过对 1997–1998 年发生的厄尔尼诺极端年际气候异常事件的模拟情况进行分析,评估了同化 SSH 对年际气候异常信号的模拟能力。

表 2 基于 WOA\_MDT 对 SSH 进行长期同化试验及对比试验

试验名称	试验简称	同化数据及时间窗口	试验时长
同化 SLA 卫星高度计资料试验	Assim_SSH	SSH 7d 同化一次	1994–2000 年
同化 OISST 观测资料试验	Assim_SST	OISST 7d 同化一次	1994–2000 年
模式自由积分试验	Control	不同化	积分 30 a,截取最后 7 a



3.1 对海洋上层温度状态模拟的改进

如前所述,SSH 同化对各层的海温改进是不同的,尤其是对温跃层附近的海温模拟结果差异明显。如图 4 所示,同样将上层400 m海温分 3 层进行分析。从对照试验的结果可以看到,上50 m海温偏差主要是来自北太平洋黑潮区和北大西洋。这些地区受到复杂洋流的影响,海温的垂直梯度大,而模式模拟的整体海温偏低,使得温跃层偏浅,所以在这些地区存在较大偏差。50 ~ 200 m深度的偏差集中在热带太平洋地区,同样是

由于模式在该区域模拟的温跃层过浅导致的,这可能与大气模块中高云、低云和降水的模拟误差,经过海气耦合的反馈作用放大有关<sup>[25]</sup>;也有可能是受到海表风应力和模式中垂直混合强度随深度衰减过快,使得不能有效地平衡涌升的冷却作用<sup>[26]</sup>。与太平洋暖池有类似结构的热带大西洋、热带印度洋以及北大西洋也存在同样的偏差;而30 °S以南的大洋,由于本身温跃层较浅,因此模式模拟的偏差较小。

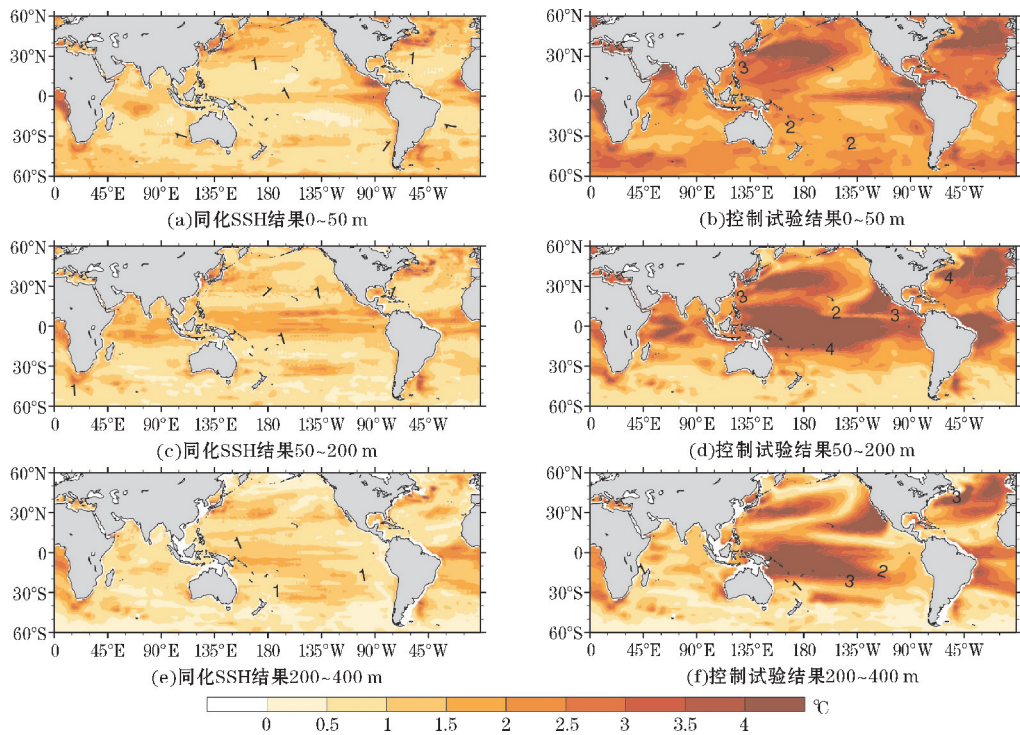


图4 长期同化 SSH 试验与对照试验的海温 RMSE

同化 SSH 后,海温偏差得到了明显的减小,尤其是在太平洋暖池区,黑潮区以及北大西洋地区。说明 SSH 同化能有效地改进模式海温模拟,调整了温跃层的深度。但是对大西洋热带地区(如几内亚湾)的偏差调整并不明显,尤其是在200 m以下深度的海洋,可能是由于该区域 SSH 与整层海温的相关性不好所导致的。

图 5 是长期 SSH 同化试验与对照试验的海温 RMSE 垂直剖面的对比图。由图 4 中 RMSE 的水平分布可知,模式较大的偏差主要集中在热带地区,因此单独分析热带地区400 m以上 RMSE 垂直剖面,用热带范围内多年平均的20 °C 等温线代表温跃层中心深度,并与之对比。

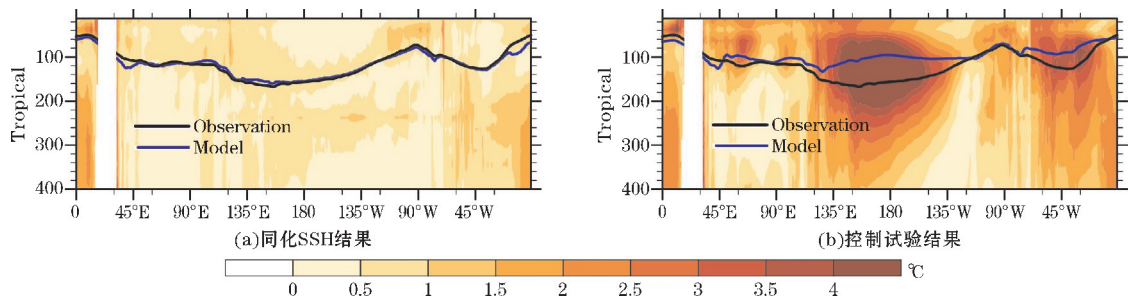


图5 SSH 长期同化试验与对照试验的热带海温 RMSE 及 20 °C 等温线深度

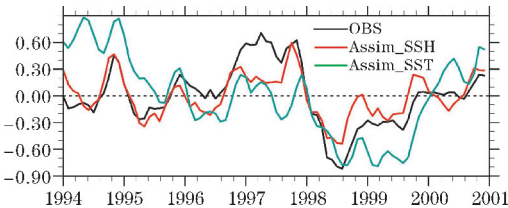
从图 5(b) 可以看到,模式在太平洋暖池地区 ( $130^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{W}$ ,  $50\text{ m} \sim 200\text{ m}$ ) 有偏差的大值中心。在热带西大西洋 ( $30^{\circ}\text{W} \sim 60^{\circ}\text{W}$ ) 也有一个范围略小的大值中心。在暖池位置温跃层深度偏浅,太平洋暖池最大偏差可达近  $80\text{ m}$ ,大西洋西部最大也有  $40\text{ m}$  的偏差。

在同化了 SSH 以后,图 5(a) 中海温偏差得到了极大的改善,尤其在太平洋暖池中心以及大西洋西侧的大值区,温跃层的海温与观测较为一致,也使得模式温跃层深度与观测较为一致。与图 4 的结果相似,在热带大西洋  $200\text{ m}$  以下的海温改进并不明显,甚至在  $0 \sim 20^{\circ}\text{W}$  的温跃层深度,比之前有更大的偏差,可能是 SSH 与大西洋地区下层海温的相关性不好,导致无法对下层的海温做进一步的调整。整体上,SSH 同化对温跃层海温的调整,已经有了很大的改善,对温跃层深度有了更准确的模拟。

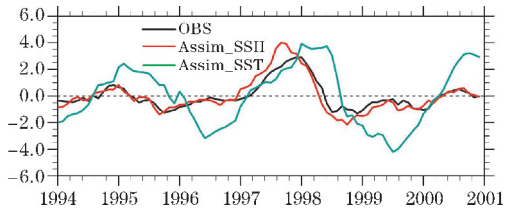
3.2 对 ENSO 模拟的改进

图 6 的时间序列中涵盖了 1997–1998 年极端厄尔尼诺事件,用于分析同化 SSH,对极端气候事件模拟的改进。图 6(a) 是近赤道太平洋上  $400\text{ m}$  海洋热含量异常的时间序列,从观测可以看到在 1997 年发生厄尔尼诺的前夕,由于太平洋暖池暖水东传,导致赤道太平洋海洋热含量出现正异常,1998 年赤道东传的暖水在太平洋东岸分别由赤道附近南北两侧回传,导致赤道太平洋海洋热含量出现负异常。在 SST 同化试验中,同化 SST 不能对表层以下的海温有明显的调整,所以没有模拟出 1997 年近赤道太平洋整层热含量的正异常,甚至在 1994 年出现了与观测相反的异常变化;但是同化 SSH 对上  $400\text{ m}$  整层海温进行了调整,不仅修正了热含量变化的趋势,也使得异常场更接近观测。值得注意的是,在 1997 年前几个月,正异常值没有增长趋势,可能与暖池附近冷的误差有关。图 6(b) 是 Nino3.4

指数的时间序列,可以看到 SST 同化试验虽然相对于对照试验缩短了 Nino3.4 指数的变化周期,但是对于模拟振幅偏强的属性没有很好地抑制;同化了 SSH 以后 Nino3.4 指数与观测保持一致,尤其在 1997–1998 年极端厄尔尼诺事件中的模拟较好。但是模拟的 Nino3.4 指数在此次厄尔尼诺事件中的最大值要比观测高,且比观测提前了几个月,可能是同化 SSH 后,在异常气候事件中,模式对某些区域的海温变化约束力不够导致的。



(a) 热含量异常



(b) Nino3.4 指数

图 6 近赤道太平洋上  $400\text{ m}$  海洋热含量异常及 Nino3.4 指数的时间序列

图 7 分别将同化了 SSH 和 SST 的 ( $0 \sim 400\text{ m}$ ,  $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$ ) 海温异常时间演化与观测对比。可以看到,SSH 的同化结果能更准确地模拟出整层海温的异常变化,尤其是对 1997–1998 年超强厄尔尼诺事件的模拟。从 1996 年 12 月开始,暖池出现异常增温,然后向东传播;在 1997 年 12 月,东太平洋海温暖异常,暖池发生冷异常,能够很好地模拟传播的方向和中心强度。但是模式结果对冷异常的模拟显然要比观测更强,暖

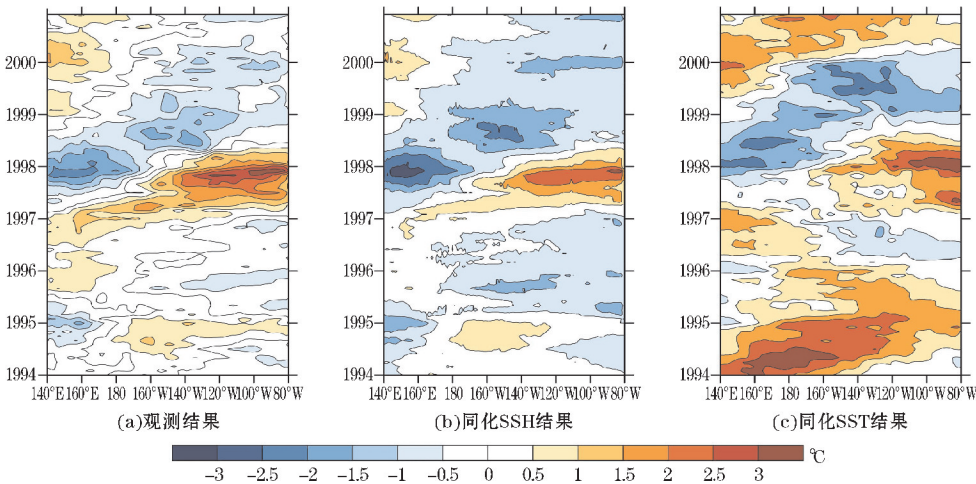


图 7 近赤道太平洋上  $400\text{ m}$  海温异常的时间演化图



异常的模拟略微偏弱,这是模式本身模拟性能偏冷导致的。再与同化 SST 的试验结果对比,SST 的同化结果虽然能够看到一些海温异常东传的周期性变化,但是对于厄尔尼诺事件的模拟不够准确。在整层的结果中,模式本身的周期性变化依然占据主导作用。因为 SST 仅仅与表层的海温相关性较强,SST 同化并不能对更深层次的海温产生影响,同时也说明了 SSH 同化对整层海温的调整更有效。

## 4 结论与讨论

通过同化试验,对比 3 种 MDT 对 SSH 同化性能的影响,筛选出针对 CAS-ESM-C 海洋资料同化最优的 MDT 进行长期 SSH 同化试验;检验 SSH 同化对海洋温度偏差,海温的年际变化以及 ENSO 信号模拟的改进情况。

首先,分析了不同 MDT 对同化 SSH 重要性的对比。从 3 组试验的 RMSE 廓线结果看,同化 SSH 对海温的改进能够影响到 400 m 深度,但是不同的 MDT 同化效果却不同。虽然在南半球结果相差并不明显,但是在热带及热带以北的大洋,MDT\_WOA 要好于 MDT\_Model;MDT\_OBS 同化的结果表现最差,其中在南太平洋和南大西洋在上 50 m 对海温几乎没有改进。从各层海温 RMSE 水平分布也能看到,MDT\_WOA 在各层的同化效果,都要好于其他两种 MDT,尤其在热带太平洋地区。因为 3 种 MDT 中,MDT\_WOA 由于同化了气候态数据,高度相比于 MDT\_Model 要略高一些,且本身模式模拟的海温偏冷,因此更高的 SSH 对于海温调整更有利,同时长期气候态的结果对 SSH 的描述更接近真实状态;而 MDT\_OBS 虽然是观测数据,但是多源数据经过整合以后,导致整体海域 MDT 过高,即使剔除了补偿值之后,也不能使所有海域都达到合理的高度,所以会出现在部分海域和部分深度的同化效果好,有些海域(如大西洋)的同化效果就不如其他两种 MDT。

然后,正是由于海洋上层(温跃层以内)的温度变化与 SSH 有着较强的动力相关性,基于 MDT\_WOA 的 SSH 同化试验对海温的调整是显著的。在太平洋暖池,黑潮区以及北大西洋的 RMSE 大值区能改进 4℃ 以上。尤其是 50~200 m 温跃层深度,本身模式在太平洋暖池区,热带大西洋西岸的温跃层深度有偏差的大值中心,经过 SSH 同化后,温度偏差也得到显著改善,且在整层海温中改进最为明显,因此也使得温跃层深

度与观测更接近。SSH 的同化只是通过动力相关性改进了海温的偏差,但是模式本身的模拟误差并不能有效地改进,这跟海洋和其他模块的耦合作用有关。

最后,检验了 SSH 同化后对 ENSO 信号的模拟,发现同化 SSH 后,近赤道太平洋上层海洋热含量的年际变化以及 Nino3.4 指数的年际异常演变都能较好地与观测贴合,符合异常事件的发展趋势。在上 400 m 海温异常中,能准确地模拟出海温异常的正负中心区域及传播方向;而 SST 同化不能做到这一点,说明 SSH 的同化效果能够向深层传递,同化 SSH 比同化 SST 观测更进一步地修正了 CAS-ESM-C 海洋上层海温的模拟偏差,改进了模式对海气耦合循环和物理过程的模拟,同化 SSH 观测也进一步地改进了海气耦合模式对海洋上层年际变率的模拟,为下一步利用 CAS-ESM-C 开展短期气候预测奠定了基础。

需要说明的是,模式系统性的异常中心位置偏差以及季节性偏差,不是仅仅同化 SSH 就能明显改善的。一方面需要模式自身的动力框架和参数化过程进行改进,另一方面需要在今后同化更多的观测资料来弥补单独 SSH 同化的不足。且本文仅仅分析了 SSH 同化对模拟海温的改进,对于海洋中的其他变量也需要做相关的检验。同时,作为耦合模式,海洋偏差的订正对其他模式分量的影响,尤其是大气中各变量的影响,也需要在进一步的工作中进行系统的评估。

## 参考文献:

- [1] Zheng F, Zhu J, Zhang R H. Impact of altimetry data on ENSO ensemble initializations and predictions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(13).
- [2] Fu W, Zhu J, Yan C, et al. Toward a global ocean data assimilation system based on ensemble optimum interpolation: altimetry data assimilation experiment [J]. *Ocean Dynamics*, 2009, 59(4): 587-602.
- [3] Cheney RE. Comparison data for SEASAT altimetry in the western North Atlantic [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1982, 87(C5): 3247-3253.
- [4] Hurlburt, Harley E. The potential for ocean prediction and the role of altimeter data [J]. *Marine Geodesy*, 1984, 8(1-4): 17-66.
- [5] Carnes MR, Mitchell J L, Witt P W D. Synthetic temperature profiles derived from Geosat altimetry: Comparison with air-dropped expendable bathy-



- thermograph profiles [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1990, 95(C10).
- [6] Oschlies A, Jansen Willebrand. Assimilation of Geosat altimeter data into an eddy-resolving primitive equation model of the North Atlantic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1996, 101(C6): 14175–14190.
- [7] White WB, Tai C K, Holland W R. Continuous assimilation of simulated Geosat altimetric sea level into an eddy-resolving numerical ocean model: 2. Referenced sea level differences [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1990, 95(C3): 3235–3251.
- [8] Xu D, Zhu J, Qi Y, et al. The impact of mean dynamic topography on a sea-level anomaly assimilation in the South China Sea based on an eddy-resolving model [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 31(5): 11–25.
- [9] Vidard A, Balmaseda M, Anderson D. Assimilation of altimeter data in the ECMWF ocean analysis system 3. in "Monthly Weather Review [J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 137(4): 1393–1408.
- [10] Storto A, Dobricic S, Masina S, et al. Assimilating Along-Track Altimetric Observations through Local Hydrostatic Adjustment in a Global Ocean Variational Assimilation System [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(3): 738–754.
- [11] Yan C, Zhu J, Tanajura C A S. Impacts of mean dynamic topography on a regional ocean assimilation system [J]. *Ocean Science*, 2015, 11(5).
- [12] Jin X Z, Zhang X H, Zhou T J. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1999, 16: 197–215.
- [13] Oleson K, Dai Y, Bonan G, et al. Technical description of the Community Land Model (CLM) [M]. 2004.
- [14] Dickinson R E, Oleson K W, Bonan G, et al. JOURNAL OF CLIMATE VOLUME 19 The Community Land Model and Its Climate Statistics as a Component of the Community Climate System Model [J]. *Journal of Climate*, 2005, 19(11): 2302–2324.
- [15] Briegleb B P, Bitz C M, Hunke E C, et al. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model [M]. 2004.
- [16] Blackmon M, Boville B, Bryan F, et al. The Community Climate System Model [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2357–2376.
- [17] Craig, A P. The New Extensible, High Performance Parallel Coupler for the Community, Climate System Model [J]. *International Journal of High Performance Computing Applications*, 2005, 19(3): 309–327.
- [18] Drake JB, Jones P W, Carr G R. Overview of the software design of the CCSM [J]. *International Journal of High Performance Computing Applications*, 2005, 19.
- [19] SSALTO/DUACS User Handbook: MSLA and (M) ADT Near-Real Time and Delayed Time Products [EB/OL]. <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/product-information/updates-and-reprocessing/ssaltoduacs-product-changes-and-updates.html#c10930>.
- [20] Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature [J]. *Journal of Climate*, 2010, 20(22): 5473–5496.
- [21] Good SA, Martin M J, Rayner N A. EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(12): 6704–6716.
- [22] Evensen G. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation [J]. *Ocean Dynamics*, 2003, 53(4): 343–367.
- [23] Oke, P R, G B Brassington, D A Griffin, et al. The Bluelink Ocean Data Assimilation System (BODAS) [J]. *Ocean Modelling*, 2007, 21(1–2): 46–70.
- [24] Rio, M H, Schaeffer, P., Moreaux, G., Lemoine, J M, Bronner, E. A new Mean Dynamic Topography computed over the global ocean from GRACE data, altimetry and insitu measurements [DB/OL]. Poster communication at OceanObs09 symposium, 2009.

[25] 杜梦蛟,陈权亮,林壬萍,等.同化 Argo 海洋廓线观测对 CAS-ESM-C 的上层海洋温度模拟的改进[J].成都信息工程学院学报,2017,32(3):289-296.

[26] 张学洪,俞永强,宇如聪,等.一个大洋环流模式和相应的海气耦合模式的评估I.热带太平洋年平均状态[J].大气科学,2003,27(6):949-970.

## Satellite Altimetry Data Assimilation in CAS-ESM-C: Benefits for Improving the Simulations of Upper Ocean Temperature

YANG Haipeng<sup>1,2</sup>, CHEN Quanliang<sup>1</sup>, LIN Renping<sup>2</sup>, DU Mengjiao<sup>2</sup>, ZHENG Fei<sup>2</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Key Laboratory of Sichuan Province of Plateau Atmosphere and Environment, Chengdu 610225, China; 2. Center for International Climate and Environmental Sciences, the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** With the motivation to improve the simulation of oceanic interannual variations effectively, the sea surface height (SSH) satellite altimetry data was assimilated into CAS-ESM-C by using Ensemble Optimal Interpolation (EnOI). In this study, the best MDT was selected firstly based on its influences on simulation performance. Using the selected MDT, a SSH assimilation experiment was conducted from 1994 to 2000, comparing with a SST assimilation experiment. Comparing with SST assimilation, the SSH assimilation during 0–400 m subsurface temperature showed better performance, the global mean RMSE was lower than 1.0 °C. The most improvement region was located at the depth around thermocline. The reason was that SSH showed better correlations with the subsurface temperature than SST. Meanwhile, the simulated interannual variations of upper oceanic heat content and Tropical Pacific SST anomalies were largely improved in SSH assimilation, which means that the simulated air-sea coupling and physical process were improved in SSH assimilation. This study showed that the oceanic interannual variability could be largely improved by assimilating SSH rather than SST. This study implied that the SSH assimilation should be considered in short-term climate prediction.

**Keywords:** meteorology; satellite altimetry data assimilation; mean dynamic topography; upper ocean temperature simulations; CAS-ESM-C