

# 一套全球海洋再分析资料初步结果分析

王东晓<sup>①</sup>, 秦英豪<sup>①②\*</sup>, 肖贤俊<sup>③</sup>, 张祖强<sup>③</sup>, 武丰民<sup>④</sup>

① 中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 国家气候中心, 北京 100081;

④ 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

\* 联系人, E-mail: qinyh@scsio.ac.cn

2012-01-05 收稿, 2012-04-05 接受

国家重点基础研究发展计划(2011CB403504, 2011CB403505)资助

**摘要** 基于全球海洋资料同化系统(BCC\_GODAS2.0)的20年(1990~2009年)再分析资料, 利用 OISST 和 SODA 数据集从整体上进行检验, 分析同化产品误差特征表明, 同化系统能够有效改进海洋温度和盐度的估计, 尤其在赤道东太平洋地区最为显著. 垂向温盐总体 RMSE 相对同化前分别减小 0.53 和 0.28 psu, 相对第一代同化系统 BCC\_GODAS1.0, 温盐各层 RMSE 均有不同程度的减小. 然后利用 HadISST 数据对比分析了热带太平洋海温异常变化特征. 同化结果的 Niño3 指数与 HadISST 的海表温度异常有很好的—致性, 相关系数高达 93.6%; 同化结果很好地模拟出了观测 HadISST 赤道太平洋季节变化特征, 而赤道东太平洋地区逐月 SSTA 标准差季节变化的幅度变化较美国 GODAS 更接近 HadISST; 此外, 同化在热带太平洋 SSTA 年际变率的 EOF 第一主模态所表现的 El Niño 空间结构, 改善了冷舌地区的正异常年际变率强度, 第二模态所表现的 El Niño Modoki 空间结构, 改善了赤道东太平洋负异常局限于狭窄赤道地区的问题, 并且赤道中太平洋海温正异常向南北高纬地区延伸的幅度和强度都得到加强, 与观测 HadISST 比较吻合.

## 关键词

BCC\_GODAS2.0  
温盐  
EOF  
El Niño  
El Niño Modoki

随着海洋卫星遥感技术的发展和—应用, 为海洋研究提供了丰富的海表面资料, 包括卫星高度计资料、卫星海表面温度资料、卫星海表面风场资料等等. 相对于传统的浮标或潜标观测资料, 卫星遥感资料具有高时空分辨率并能及时获取的优点, 一定程度上改善了海洋研究中观测资料严重不足的现状. 然而, 卫星遥感观测只局限于海洋表面的信息, 对海洋状态仍缺乏完整和细致的描述, 使得海洋物理过程的研究受到很大的制约. 海洋资料同化是运用所有可获得的信息, 尽可能的确定海洋的状态<sup>[1]</sup>. 因而, 解决这一问题的途径之一就是改进同化技术, 把各种观测资料与海洋模式最优结合起来, 建立应用于大尺度海洋变化和气候预测研究的海洋资料同化系

统<sup>[2]</sup>, 提供时空分布更加完善的、合理可信的再分析资料.

鉴于计算资源的限制, 现在国外业务化的海洋数据同化系统大多数还是采用三维变分和最优插值的同化方法<sup>[3]</sup>, 例如英国气象局建立的 FOAM 同化系统<sup>[4]</sup>、美国国家环境预测中心(NCEP)的全球海洋资料同化系统 GODAS<sup>[5]</sup>、意大利的地中海预测系统 SOFA<sup>[6]</sup>等等. 在我国, 朱江等人<sup>[7]</sup>于 2006 年建立了基于三维变分的 OVALS 同化系统, Yan 等人<sup>[8]</sup>和 Xiao 等人<sup>[9]</sup>分别将此系统应用于南海和热带太平洋同化研究. 国家气候中心第一代同化系统(BCC\_GODAS1.0)也是采用三维变分方法, 同化了 GTS 线路上的资料以及 ARGO 资料<sup>[10,11]</sup>, 但 BCC\_GODAS1.0

未将盐度资料纳入同化系统,也没有配备针对卫星资料的同化方案.

为了应对新形势下的业务需求和全球气候变化研究<sup>[12]</sup>,更好地满足现代海洋同化发展需求,肖贤俊等人<sup>[13]</sup>着手开发了国家气候中心第二代海洋同化系统(BCC\_GODAS2.0),其同化的观测资料主要包括有卫星遥感的海表温度资料 and 高度计资料、ARGO 温盐廓线资料、GTS 线路上海洋观测资料等.较之于第一代系统,新同化系统增加了卫星遥感资料的同化能力,全面改进技术方案,引进和发展了垂向投影技术<sup>[14]</sup>、递归滤波<sup>[15]</sup>、海表温度和高度计的协调同化、非线性温盐约束<sup>[16-18]</sup>等先进同化技术,建立了一个准实时的海洋资料同化系统.

本文基于肖贤俊等人<sup>[13]</sup>发展的国家气候中心第二代全球海洋资料同化系统(BCC\_GODAS2.0)20年(1990~2009年)再分析资料,对比分析了同化前后对海洋物理状态的估计,并利用独立资料检验了 BCC\_GODAS2.0 同化系统的性能,为进一步改进系统并最终用于业务上的气候预测和研究全球气候变化影响提供了条件.

## 1 同化系统方案及资料说明

### 1.1 BCC\_GODAS2.0 同化系统简介

BCC\_GODAS2.0 同化系统采用的海洋模式是美国国家海洋和大气管理局地球流体力学实验室(NOAA/GFDL)模块化全球海洋环流模式 MOM4<sup>[19]</sup>,使用了全球 Tripolar 格点,就是在全局范围内存在极点,南极点位置不变,北极点分为 2 个,位置一般定义在欧亚大陆和北美大陆上,因此在北冰洋中没有了极点的存在,彻底解决了海洋中存在奇点的一系列问题.纬向分辨率约为 1°,经向分辨率在 29.5°S~29.5°N 之间的区域较密,从赤道地区(1/3)°渐变至 1°,其他区域的分辨率为 1°.模式的垂向分为 50 层,其中在 225 m 以上的分辨率为 10 m,225 m 以下的层次呈不等距分布,深度越深,间隔越大,变幅从 11 m 增至 366 m.模式海洋地形数据集采用的是 72°S~72°N 之间的区域卫星数据<sup>[20]</sup>([http://topex.ucsd.edu/marine\\_topo/mar\\_topo.html](http://topex.ucsd.edu/marine_topo/mar_topo.html))、美国 NOAA 的 5'全球地形数据<sup>[21]</sup>(ETOP05, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo5.html>)以及北冰洋世界海底地形图<sup>[22]</sup>(IBCAO, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/arctic.html>)三者的综合数据资料,模式的深度最大能达到 5500 m.同化试验和控制试验中用于模式积分的表面通量外强迫,即动力学和热力学条件分别采用美国国家环境预报中心(NCEP)月平均再分析资料和大气的海温驱动资料<sup>[23]</sup>,积分过程中海表温度(SST)和盐度(SSS)分别向 Levitus 气候态 SST 和 SSS 恢复.

html)三者的综合数据资料,模式的深度最大能达到 5500 m.同化试验和控制试验中用于模式积分的表面通量外强迫,即动力学和热力学条件分别采用美国国家环境预报中心(NCEP)月平均再分析资料和大气的海温驱动资料<sup>[23]</sup>,积分过程中海表温度(SST)和盐度(SSS)分别向 Levitus 气候态 SST 和 SSS 恢复.

### 1.2 同化方案

BCC\_GODAS2.0 同化系统采用三维变分同化方法,控制变量为温度和盐度场(即同化时,调整温度和盐度).同化分析过程分为两步:

第一步是垂向同化,即在沿着卫星高度计轨道的剖面上,同化高度计和 SST 观测资料.高度计观测垂向投影采用下面动力高度约束关系<sup>[24]</sup>,即

$$h(T, S) = -\int_0^{Z_m} \frac{\rho(T, S, p) - \rho_0(p)}{\rho_0(p)} dz, \quad (1)$$

其中  $\rho(T, S, p)$  为海水密度,  $\rho_0(p) = \rho(0, 35, p)$ ,  $Z_m$  是参考深度,取为 1000 m.海表温度只在混合层中投影,根据混合层中温度沿深度相关性构建投影算子,在海表,观测 SST 与模式温度相关性为 1,相关性按深度递减,在混合层底部相关性为 0. SST 和海表高度如果分别作为独立资料进入代价函数,需要定义各自的观测误差协方差矩阵,定义不合适常常会引入额外的误差.因此,我们用 SST 垂向投影得到的温度计算动力高度,作为一个约束项进入动力高度观测项.代价函数如下:

$$J = (T - T_b)^T B_T^{-1} (T - T_b) + (S - S_b)^T B_S^{-1} (S - S_b) + (h(T, S) + h_c(T_s, S(T_b)) - h_m - h_0)^T O^{-1} (h(T, S) + h_c(T_s, S(T_b)) - h_m - h_0), \quad (2)$$

其中,  $T$  和  $S$  分别温度和盐度分析场,  $T_b, S_b$  分别是由模式得到的温度、盐度背景场,  $B_T, B_S$  分别是垂直方向上温盐背景误差协方差矩阵.  $h_m$  是由模式得到的平均海表高度,  $h_0$  是卫星高度计资料得到的海表高度异常,  $h_c$  为卫星遥感海表温度投影计算得到的动力高度约束.  $T_s$  是观测海表温度.

第二步水平同化,在模式水平层上利用 3D-VAR 方法,通过对于每个模式水平层求下面代价函数的极小值,得到数值模式所需要的分析场,即

$$J = (T - T_b)^T E_T^{-1} (T - T_b) + (S - S_b)^T E_S^{-1} (S - S_b) + (HT - T_0)^T O_T^{-1} (HT - T_0) + (HS - S_0)^T O_S^{-1} (HS - S_0), \quad (3)$$

其中,  $T$  和  $S$  分别是一水平层上温度和盐度分析场,  $T_b$ ,  $S_b$  分别是模式得到的一水平层上的温度和盐度背景场.  $E_T$ ,  $E_S$  分别是该水平层上温度和盐度背景误差协方差,  $O_T$ ,  $O_S$  分别是该水平层上温度和盐度观测误差协方差.  $H$  为双线性插值观测算子.

背景误差协方差矩阵采用高斯型, 形式如下:

$$B = A \exp \left( -\frac{\Delta x^2}{L_x^2} - \frac{\Delta y^2}{L_y^2} \right), \quad (4)$$

其中,  $A$  为背景误差方差, 对应温度取 2.0, 盐度取 0.15,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  分别为两水平点在  $x$  和  $y$  方向上距离,  $L_x$ ,  $L_y$  表示不相关尺度, 对于温度  $L_x=450$  km,  $L_y=650$  km, 对于盐度  $L_x=420$  km,  $L_y=510$  km, 温度和盐度观测误差分别取为 0.1 和 0.05, 关于这个同化方案的说明以及显著特点可参考肖贤俊等人文<sup>[13]</sup>.

### 1.3 资料说明

同化试验中同化资料包含中国气象局 GTS 线路上温盐观测资料及 ARGO 浮标观测的温盐资料, FY3-A 卫星海表温度资料, NOAA 系列极轨卫星的高分辨率辐射计海温观测资料(AVHRR, <http://podaac.jpl.nasa.gov/>), 卫星高度计资料 Altimeter Ocean Pathfinder TOPEX/Poseidon9.2 版.

用作比较资料有 NCEP 的海表温度再分析资料 OISST\_V2(简称 OISST)<sup>[25]</sup>; 美国马里兰大学的 Simple Ocean Data Assimilation(SODA)海洋再分析数据集<sup>[26,27]</sup>; 英国气象局哈德莱中心(Hadley Center)提供的全球海冰及海表温度数据 HadISST<sup>[28]</sup>, 分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 序列长度从 1870 年 1 月至今; NCEP 全球海洋资料同化系统(GODAS)产品<sup>[5]</sup>, 在热带地区分辨率为  $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ , 垂向为 40 层, 表层附近分辨率为 10 m. 本文所取用 OISST, HadISST 和 GODAS 资料都是从 1990 年 1 月至 2009 年 12 月, 因 SODA 资料只发布到 2008 年, 取用从 1990 年 1 月至 2008 年 12 月.

## 2 结果分析

海水温度、盐度是海洋学研究的基本内容, 是描述海水性质的最重要的物理量. 从物理海洋学的观点来看, 温盐与海水的其他物理性质, 都有着密切的关系. 因此, 验证一个同化系统能够改善温盐的预报无疑是非常重要的. 本文将从全球整体误差特征和局部海域热带太平洋海温变化特征两个方面分析同

化对温盐的改善.

### 2.1 同化产品误差特征分析

为了从整体上检验 BCC\_GODAS2.0 再分析资料的同化效果, 首先分析了多年平均海表温度(SST)与 OISST 以及海表盐度(SSS)与 SODA 的偏差分布(图 1). 对于温度而言, 未同化观测资料之前(控制试验 CTL), 在东太平洋沿岸地区最大偏差高于 OISST 达  $4^\circ\text{C}$  以上, 而西北大西洋地区低于 OISST 约  $3^\circ\text{C}$  以上(图 1(a)), 通过同化观测资料, 很好克服了这一问题, 使得同化结果和观测 OISST 比较接近, 尤其是赤道东太平洋地区改善最为显著, 除局部沿岸地区以外, 全球海温与 OISST 偏差基本在  $1^\circ$  以内(图 1(b)). 对于盐度, 控制试验与 SODA 在东太平洋沿岸、中太平洋地区、大西洋以及西印度洋偏差较大, 最大偏差可达  $\pm 2$  psu 以上, 同化后极大改善了这些区域的盐度场, 使得偏差基本控制在  $\pm 0.5$  psu 以内. 但同化也有不足之处, 对于温度, 同化之后 SST 在中纬度西边界改善不大, 可能是卫星遥感资料在这些地方缺测较多或者质量不好. 受潮汐的影响, 高度计资料在近岸效果也不好, 因此同化结果在中纬度西边界地区改善有限. 对于盐度, 在北冰洋的新西伯利亚群岛附近, 同化后偏差依然较大, 可能是由于模式模拟盐度偏差本身较大以及在高纬度地区缺少观测资料的缘故, 未能有效改善盐度偏差. 在同化中没有同化观测盐度资料, 而是通过统计的非线性温盐关系反演盐度, 未能代表真实的海洋状态, 存在一定的误差. 另外, 模式采用气候态河流径流数据以及并没有考虑淡水通量强迫等都会造成盐度存在一定的偏差.

为进一步分析同化系统的多时间尺度变化特征, 图 2 给出了表面温度和盐度的标准差分布, 反映了年际尺度上的变率特点. 对于温度而言, 标准差高值区主要分布在西边界的黑潮和湾流地区、赤道东太平洋地区以及南半球  $30^\circ\text{S}$  纬度带上(图 2(a),(c),(e)), 同化试验在赤道东太平洋表现出的变率幅度明显强于控制试验, 更接近 OISST 变率强度. 盐度的年际变率较弱, 高值区主要位于北冰洋地区, 而控制试验在北冰洋变率强度较弱, 在热带太平洋以及印度洋地区较强, 与 SODA 偏差较大, 经过同化之后, 很好地改善了这些地区盐度变率特征(图 2(b),(d),(f)).

对于垂向温盐的改善情况, 图 3 给出了控制试验和同化关于 SODA 的全球多年平均均方根误差

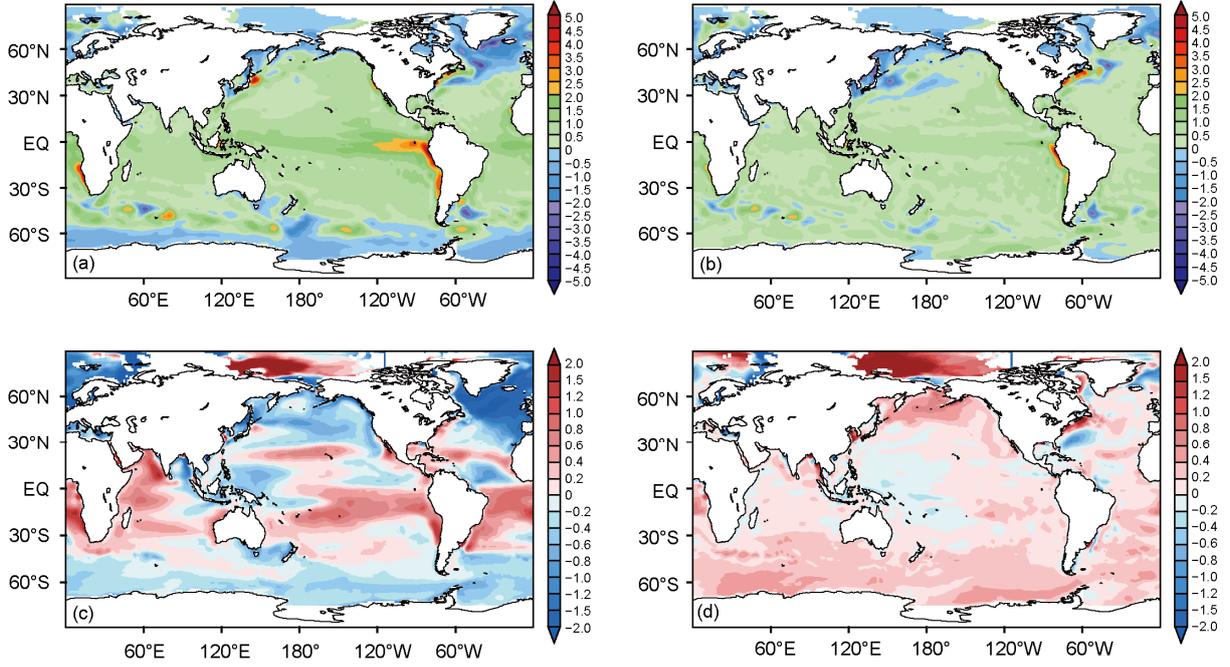


图 1 年平均海表温度(°C)、海表盐度(‰)偏差分布图

(a) CTL 温度与 OISST; (b) BCC\_GODAS2.0 温度与 OISST; (c) CTL 盐度与 SODA 盐度; (d) BCC\_GODAS2.0 盐度与 SODA 盐度

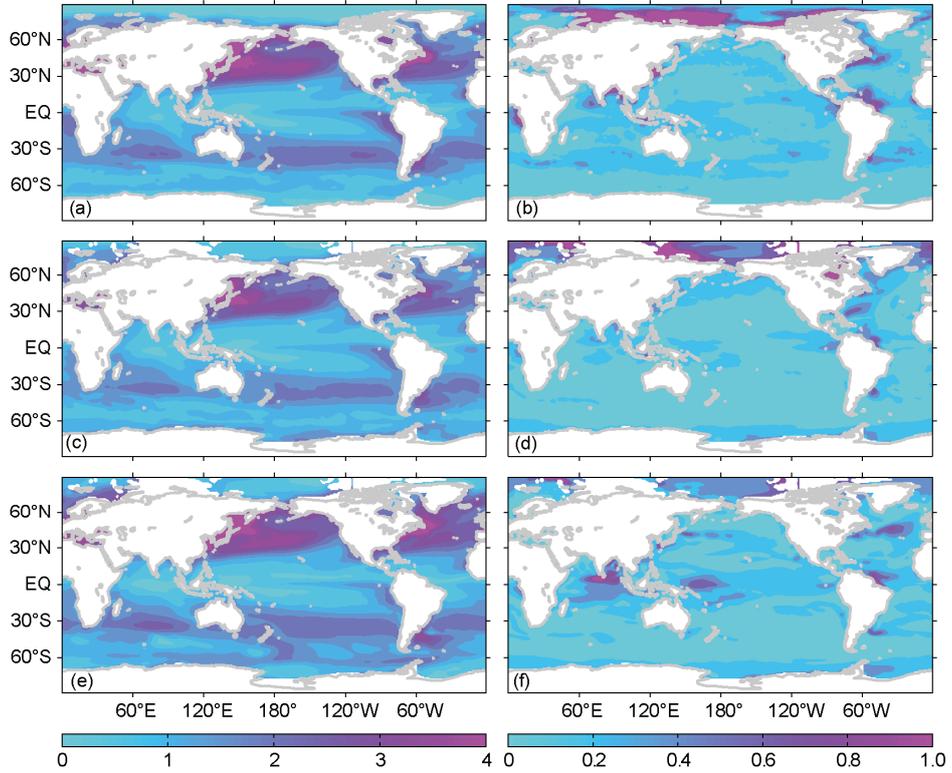


图 2 海表温度 SST((a), (c), (e), 间隔 0.5°C)和盐度 SSS((b), (d), (f), 间隔 0.2 psu)标准差分布  
(a) OISST, (b) SODA, (c)-(d) BCC\_GODAS2.0, (e)-(f) CTL

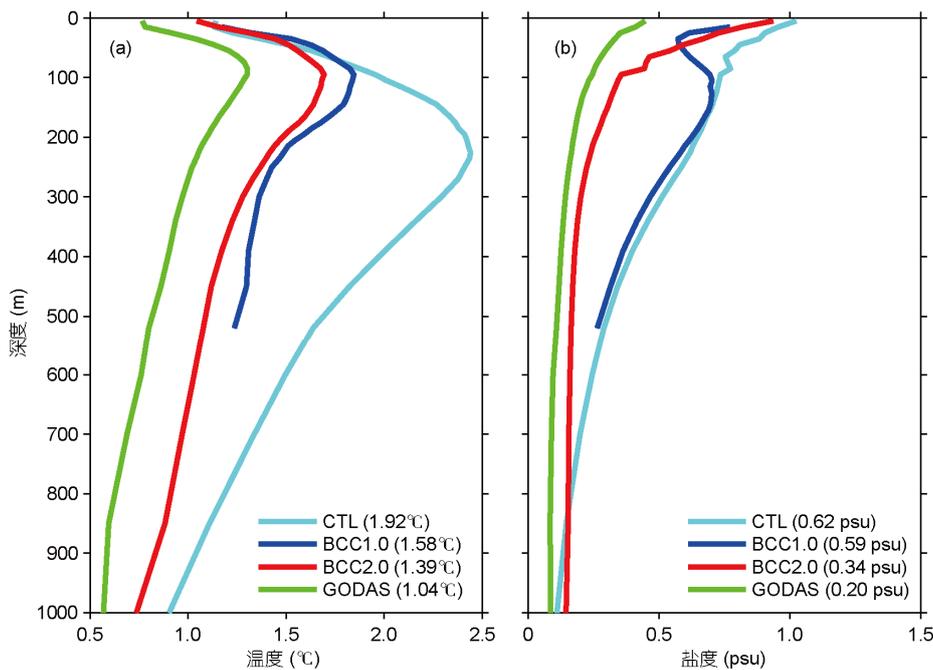


图3 年平均全球海洋温度(a)和盐度(b)的均方根误差垂直分布  
括号中数字表示总的 RMSE

RMSE 垂直分布, 在这里表层海温用 OISST 作为观测数据, 第二层开始用 SODA 作为对比数据. 从总体来看, 同化对温度和盐度的改善都是非常显著的. 对于温度而言(图 3(a)), 同化试验在次表层改善比较显著, 最大可改进 1.05°C, 总体 RMSE 相对 CTL 来说减小了 0.53°C; 对于盐度(图 3(b)), 同化 RMSE 也有不同程度的改善, 在次表层最大可改善 0.40 psu, 总体 RMSE 减小 0.28 psu. 和第一代同化系统 BCC\_GODAS1.0 相比, 温盐各层 RMSE 均有不同程度的减小, 这与肖贤俊等人<sup>[13]</sup>单独对卫星遥感资料进行变分同化试验结果比较一致, 说明通过对卫星遥感资料的同化能够有效改进对海洋温度和盐度的估计. 相对美国 GODAS 各层 RMSE 略大, 温度和盐度总体 RMSE 分别偏大 0.35°C 和 0.14 psu.

## 2.2 热带太平洋海温变化特征分析

全球多年均方根误差特征仅从整体上揭示了同化对温盐的改进程度, 无法对局部空间特征进行具体分析, 考虑到热带太平洋海域存在最为显著的年际变异信号(ENSO), 该海域具有强烈海气相互作用, 对全球气候变化起到相当大的作用, 是海洋和大气研究的热点海域. 下面我们就针对热带太平洋海温异

常变化特征进行分析, 进一步检验 BCC\_GODAS2.0 同化效果.

因季节变化是赤道太平洋气候变化的显著特征, 是 ENSO 动力学重要控制因素<sup>[29]</sup>, 所以给出了赤道太平洋地区(2°S~2°N)海表温度季节变化(图 4). 从图中可以看出, 同化结果很好地模拟出了观测 HadISST 赤道太平洋季节变化, 赤道西太平洋海温季节变化较弱, 在赤道东太平洋和中太平洋地区季节变化较强, 暖位相出现在春季 3~4 月份, 冷位相出现在秋季 9~10 月份, 且位相向西移动, 相比较而言, 同化暖中心 2.49°C 低于 HadISST 暖中心 2.75°C, 同化冷中心(-2.30°C)比 HadISST 冷中心(-1.94°C)偏冷. 研究 SSTa 标准差的季节变化可以反映出不同季节 SSTa 的年际变化幅度的大小. 图 4 继续给出了逐月 SSTa 标准差随季节变化, 由图可知, 同化产品在赤道东太平洋地区(140°~100°W)SSTA 年际变化的标准差有很大的季节变化, 最大出现在秋季和早冬时期, 最小出现在春季, 这就解释了 El Niño 季节锁相特征以及 ENSO 动力预报模型的预报水平在北半球春季急剧减小的原因<sup>[30]</sup>. 值得注意的是, 同化相对于美国 GODAS 标准差的季节幅度变化更接近观测 HadISST.

图 5 给出了赤道太平洋海温随经度和水深的垂

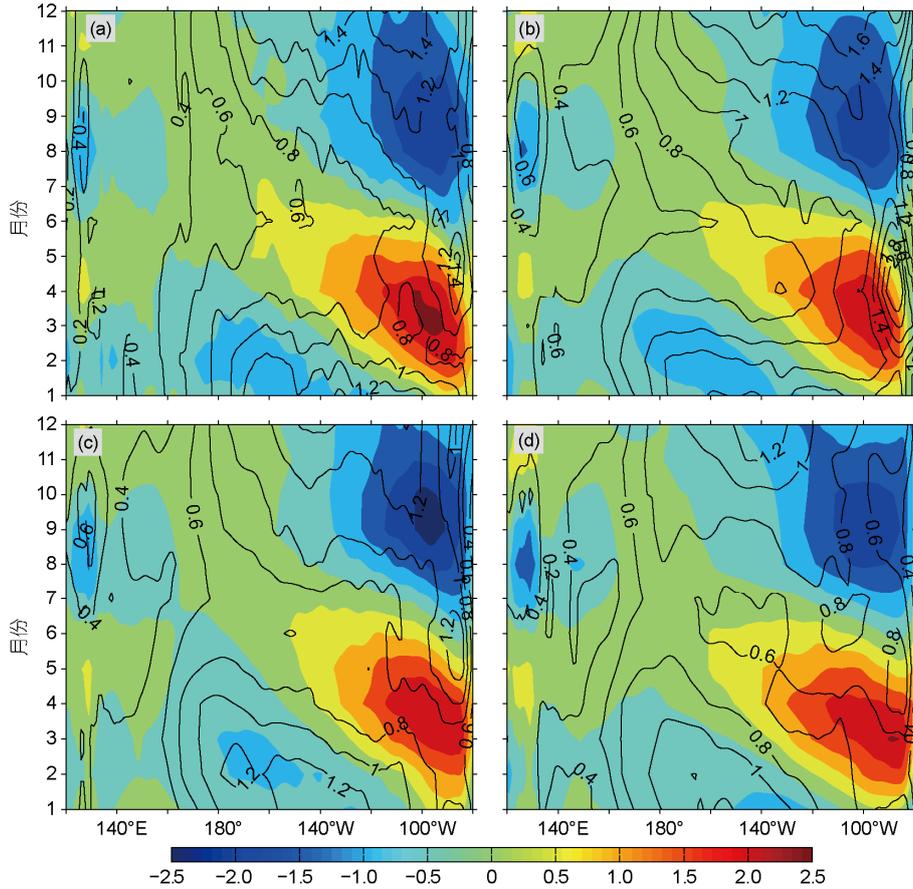


图 4 赤道地区(2°S-2°N)海表温度异常(阴影, 间隔 0.5℃)以及标准差(等值线, 间隔 0.2℃)季节变化  
(a) HadISST; (b) NCEP GODAS; (c) BCC\_GODAS2.0; (d) CTL

直分布, 可以看出, 由于信风驱动海水向西输送, 引起暖水在西边界附近堆积, 造成赤道西太平洋地区温跃层(20℃等温线深度)加深, 使得温跃层从赤道西太平洋地区向赤道东太平洋地区逐渐抬升, 赤道潜流最大流速所在深度也沿着温跃层自西向东逐渐抬升<sup>[31]</sup>. 4 月份, 美国 GODAS 赤道潜流在 140°W 附近最强, 最大流速约为 77 cm/s, 而在 10 月份由于纬向压力梯度减弱, 最大流速降至 48 cm/s 左右(图 5(a), (d)). 同化结果再现了等温线从赤道西太平洋到东太平洋逐渐抬升的走向, 温跃层深度的东西方向坡度较为平缓, 赤道潜流相对于美国 GODAS 来说强度较弱, 最大流速在 4 月份约为 45.5 cm/s, 到 10 月份降至 37.8 cm/s 左右(图 5(b),(e)).

下面分析热带太平洋年际变化特征. 图 6 是根据 El Niño3 区(5°N~5°S, 150°~90°W)海表温度异常(SSTA)计算的 Niño3 指数, 图中清楚表明, 同化结果 Niño3 指数与 HadISST 的海表温度异常有很好的—

性, 相关系数从 CTL 的 91.7% 提高到 93.6%, 相应的 RMSE 从 CTL 的 0.41 减小到 0.36. 利用经验正交函数 EOF 分析 1990~2009 年热带太平洋(30°N~30°S, 120°E~80°W)海表温度异常(SSTA)年际变率的第一、第二主要模态. 图 7(a)显示的是 HadISST 第一主模态的空间分布, 解释了总方差的 51.3%, 该模态表现了传统 El Niño 空间结构<sup>[32]</sup>, 其海表温度正异常中心位于赤道东太平洋, 并延伸到赤道中太平洋地区, 西太平洋地区为负异常的反相分布特征. 对于同化 BCC\_GODAS2.0 第一模态而言(图 7(c)), 解释了总方差的 41.6%, 海温正异常变率在东太平洋沿岸地区较控制试验而言提高 0.3℃ 之多, 说明同化很好改善了气候态冷舌地区, 但强度较观测 HadISST 仍然偏弱. HadISST 第二主模态(图 7(b)), 解释了总方差的 15.2%, 表现出马鞍形的 El Niño Modoki 空间结构<sup>[33]</sup>, 海表温度正异常出现在赤道中太平洋, 在南北半球高纬地区海温正异常分别向东扩展, 而海表温度负

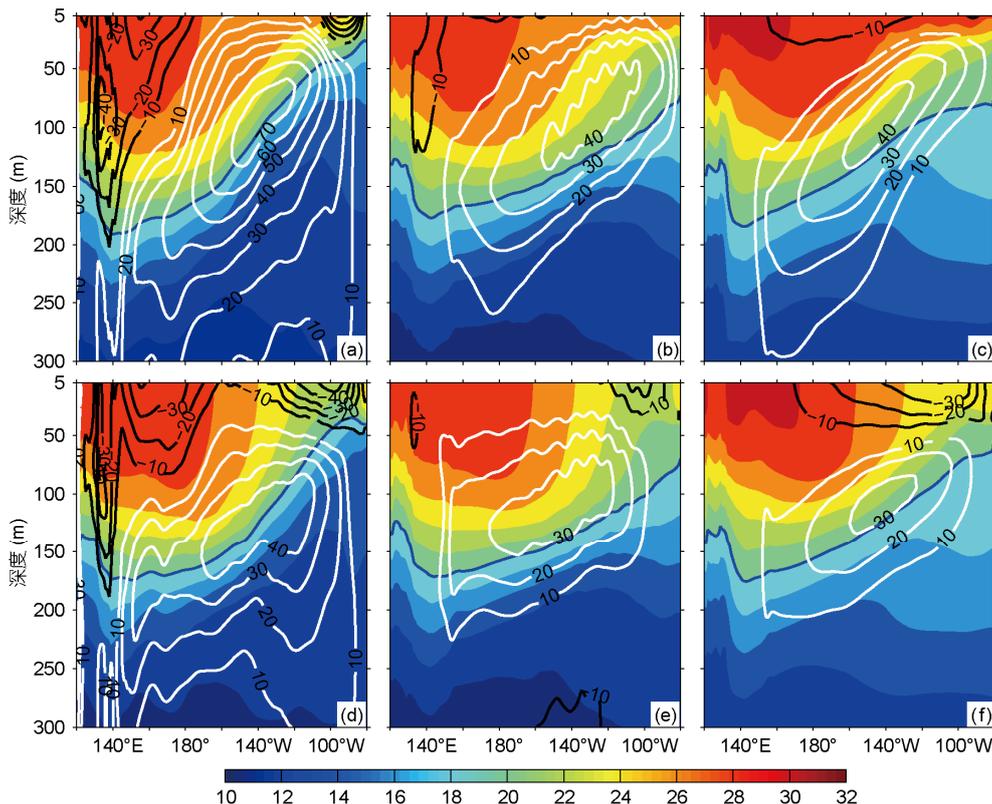


图5 赤道太平洋(2°S~2°N)温度(阴影, 间隔 2.0°C)和纬向流速(等值线, 间隔 10 cm/s)分别在 4 月((a)~(c))和 10 月((d)~(f))垂直分布

20°C等温线用蓝线标出, 白线代表东向流, 黑色为西向流. (a), (d) NCEP GODAS; (b), (e) BCC\_GODAS2.0; (c), (f) CTL

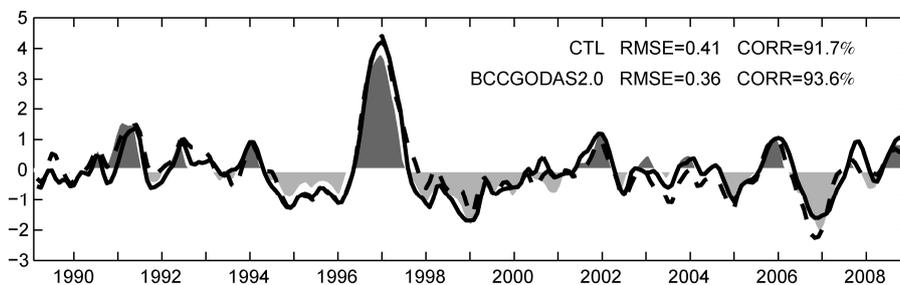


图6 Niño 3 区域海温异常随着时间的变化

RMSE 和 CORR 分别表示均方根误差和相关系数, 阴影为 HadISST, 虚线为控制试验 CTL, 实线为同化 BCC\_GODAS2.0

异常位于赤道西太平洋和东太平洋地区, 且东太平洋 SSTA 变率强度和太平洋几乎相当. 与 HadISST 对比分析可以看出, 控制试验第二模态特征向量分布中(图 7(f)), 东太平洋沿岸负异常主要位于狭窄的赤道地区, 经过同化之后, 很好地改善了这一缺陷, 使得东太平洋负异常变率的强度和幅度都与观测 HadISST 比较一致. 此外, 同化在赤道中太平洋海温正异常向北高纬地区延伸幅度比控制试验强, 但向

南高纬地区延伸的趋势并不是太明显(图 7(d)).

### 3 结论

本文基于肖贤俊等人<sup>[13]</sup>发展的全球海洋资料同化系统(BCC\_GODAS2.0)再分析产品(1990~2009年), 利用 OISST, SODA 和 HadISST 数据集进行检验证明, 初步分析得到以下主要结论:

- (1) 从整体上, 利用 OISST 和 SODA 进行验证,

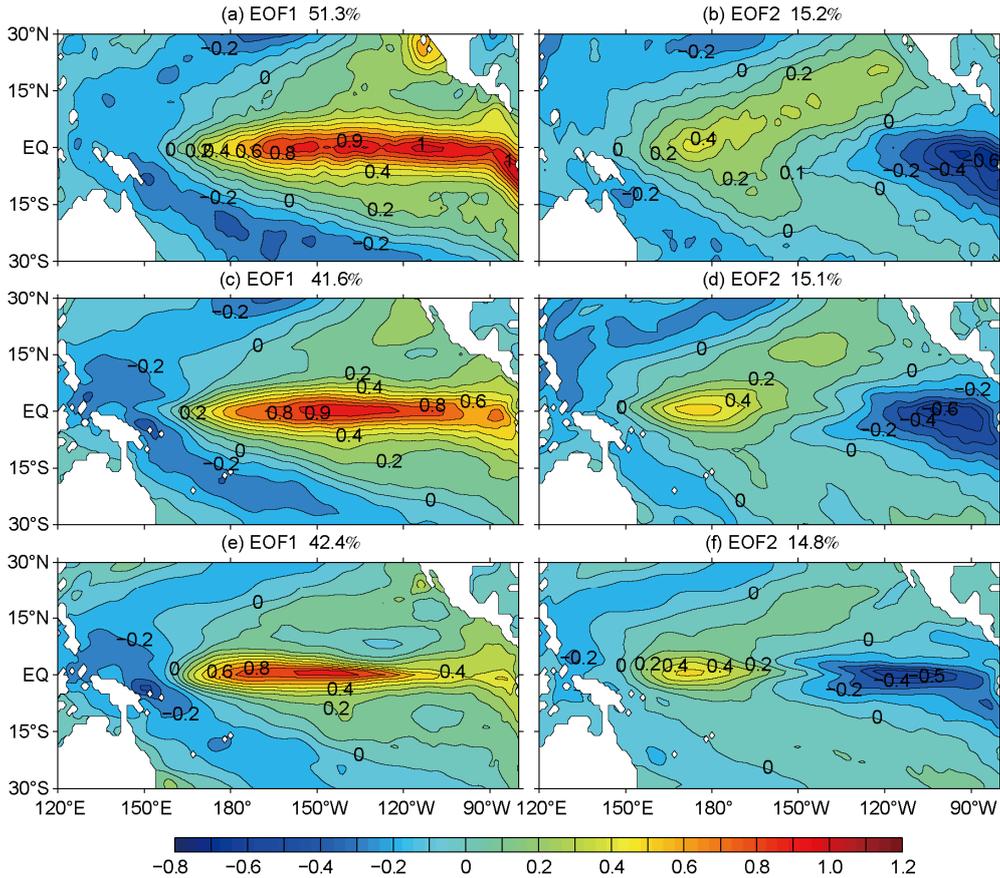


图 7 热带太平洋 SSTA(1990~2009 年)EOF 分析第一((a), (c), (e))和第二((b), (d), (f))特征向量的空间分布

图中特征向量分别已乘以对应标准化主成分的标准差, 等值线间隔 0.1°C. (a), (b) HadISST; (c), (d) BCC\_GODAS2.0; (e), (f) CTL

相对控制试验而言, 同化能够有效改善海洋温度和盐度的估计; 垂向温盐总体 RMSE 分别减小了 0.53°C 和 0.28 psu, 和第一代同化系统 BCC\_GODAS1.0 相比, 温盐各层 RMSE 均有不同程度的减小; 而相对美国 GODAS 温度和盐度总体 RMSE 分别偏大 0.35°C 和 0.14 psu.

(2) 就热带太平洋海域而言, 同化所表现出的季节变化在赤道西太平洋较弱, 赤道东太平洋和中太平洋地区季节变化较强, 其最大值出现在春季, 最小值出现在秋季, 位相向西移动, 而赤道东太平洋地区逐月 SSTA 标准差季节变化最大出现在秋季和早冬时期, 最小出现在春季, 同化结果的标准差幅度变化较美国 GODAS 更接近观测 HadISST. 同化结果定性地再现了赤道潜流的季节变化, 强度相对于美国

GODAS 较弱. 此外, 同化在热带太平洋 SSTA 年际变率第一模态与 CTL 相比, 海温正异常变率在东太平洋沿岸地区提高 0.3°C 之多, 改善了气候态冷舌区域; 第二模态改善了赤道东太平洋负异常局限于狭窄赤道地区的问题, 使得东太平洋负异常变率的强度和幅度都与观测 HadISST 比较一致.

总体来讲, BCC\_GODAS2.0 同化结果相对控制试验有显著的改进, 表明该系统具有较好的同化能力. 同化系统也存在不足, 在中纬度西边界改善有限, 高纬地区盐度偏差较大, 如何提高这些地方同化效果是今后工作重点考虑问题. 对于该系统同化结果表现 El Niño 和 El Niño Modoki 能力以及它们发生、发展的控制机理, 将在另文中进行分析.

参考文献

1 Talagrand O. Assimilation of observations, an introduction. J Meteor Soc Jpn, 1997, 75: 191-209

- 2 游小宝, 周广庆, 朱江, 等. 中国及周边海海温资料同化系统. 科学通报, 2003, 48(增刊 II): 5–10
- 3 Shu Y Q, Wang D X, Zhu J, et al. The 4-D structure of upwelling and Pearl River plume in the northern South China Sea during summer 2008 revealed by a data assimilation model. *Ocean Modell*, 2011, 36: 228–241, doi: 10.1016/j.ocemod.2011.01.002
- 4 Bell M J, Forbes R M, Hines A. Assessment of the FOAM global data assimilation system for real-time operational ocean forecasting. *J Mar Syst*, 2000, 25: 1–22
- 5 Behringer D W, Ji M, Leetmaa A. An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization. Part I: The ocean data assimilation system. *Mon Weather Rev*, 1998, 126: 1013–1021
- 6 De Mey P, Benkiran M. A multivariate reduced-order optimal interpolation method and its application to the Mediterranean basin-scale circulation, In: Pinardi N, Woods J, eds. *Ocean Forecasting, Conceptual Basis and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2002
- 7 朱江, 周广庆, 闫长香. 一个三维变分海洋资料同化系统的设计和初步应用. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 261–271
- 8 Yan C X, Zhu J, Zhou G Q. Impacts of XBT, TAO, altimetry, and ARGO observations on the tropic Pacific Ocean data assimilation. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24: 383–398
- 9 Xiao X J, Wang D X, Yan C X, et al. Evaluation of a 3dVAR system for the South China Sea. *Prog Nat Sci*, 2008, 18: 547–554
- 10 Liu Y M, Zhang R H, Yin Y H, et al. The application of ARGO data to the global ocean data assimilation operational system of NCC. *Acta Meteor Sin*, 2005, 29: 355–365
- 11 刘益民, 李维京, 张培群. 国家气候中心全球海洋资料四维同化系统及其在热带太平洋的初步结果分析. *海洋学报*, 2005, 27: 27–35
- 12 李向应, 秦大河, 效存德, 等. 近期气候变化研究的一些最新进展. *科学通报*, 2011, 56: 3029–3040
- 13 肖贤俊, 何娜, 张祖强, 等. 卫星遥感海表温度资料 and 高度计资料的变分同化. *热带海洋学报*, 2011, 30: 1–8
- 14 Haines K. A direct method for assimilating sea surface height data into ocean models with adjustments to the deep circulation. *J Phys Oceanogr*, 1991, 21: 843–868
- 15 Hayden C M, Purser R J. Recursive filter objective analysis of meteorological fields: Applications to NESDIS operational processing. *J Appl Meteor*, 1995, 34: 3–15
- 16 Troccoli A, Haines K. Use of the temperature-salinity relation in a data assimilation context. *J Atmos Oceanic Technol*, 1999, 16: 2011–2025
- 17 Yan C X, Zhu J, Li R, et al. Roles of vertical correlation of the background error and T-S relation in estimation temperature and salinity profiles from sea surface dynamic height. *J Geophys Res*, 2004, 109: C08010, doi: 10.1029/2003JC002224
- 18 朱江, 闫长香. 三维变分资料同化中的非线性平衡约束. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 49: 331–336
- 19 Griffies S, Harrison M J, Pacanowski R C, et al. *A Technical Guide to MOM4*, 2003. 295
- 20 Smith W H F, Sandwell D T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 1997, 277: 1957–1962
- 21 Edwards M O. *Global Gridded Elevation and Bathymetry (ETOPO5), Digital Raster Data on a 5-Minute Geographic (Lat/Lon) 2160\*4320 (Centroid-Registered) Grid*. Boulder: NOAA Natl Geophys Data Cent, Colo, 1989
- 22 Jakobsson M, Macnab R, Mayer L, et al. An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L07602, doi: 10.1029/2008GL033520
- 23 Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. NCEP-DOE AMIP- II reanalysis (R-2). *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83: 1631–1643
- 24 Gill A E, Niiler P P. The theory of the seasonal variability in the ocean. *Deep-Sea Res*, 1973, 20: 141–177
- 25 Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J Clim*, 2002, 15: 1609–1625
- 26 Carton J A, Chepurin G, Cao X, et al. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950–95. Part I: Methodology. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 294–309
- 27 Carton J A, Chepurin G, Cao X, et al. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950–95. Part II: Results. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 311–326
- 28 Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4407, doi: 10.1029/2002JD002670
- 29 Xie S P. Interaction between the annual and interannual variations in the equatorial Pacific. *J Phys Oceanogr*, 1995, 25: 1930–1941
- 30 Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1992, 118: 877–926
- 31 Wyrtki K. Water displacements in the Pacific and the genesis of El Niño cycles. *J Geophys Res*, 1985, 90: 7129–7132
- 32 Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon Weather Rev*, 1982, 110: 354–384
- 33 Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J Geophys Res*, 2007, 112: C11007, doi: 10.1029/2006JC003798