

从 GTS 获得的海洋温、盐资料在 BCC 海洋同化系统中的质量控制及同化结果初步分析^{*1}

刘向文 李维京 吴统文 肖贤俊
LIU Xiangwen LI Weijing WU Tongwen XIAO Xianjun

国家气候中心 中国气象局气候研究开放实验室,北京,100081

Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2009-06-29 收稿,2009-07-29 改回.

Liu Xiangwen, Li Weijing, Wu Tongwen, Xiao Xianjun. 2011. A preliminary analysis of the quality control and assimilation of the ocean temperature and salinity data from the GTS in the BCC_GODAS2.0. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(4):672-681

Abstract This paper introduces the application of ocean temperature and salinity observations from the Global Telecommunication System (GTS) in the new ocean data assimilation system of the National Climate Center. Using quality control on temperature and salinity data, we judge the duplicate records, observation depth, topography, extreme value, climate variability, stratification and spatial difference, so that false and trustless observations are effectively filtered. After quality control, the temperature and salinity data are added into the assimilation system, which effectively improves the MOM4's simulation on the distribution features of the multi-year sea surface temperature and salinity in global tropics and subtropics, especially in the Pacific Ocean. In addition, the assimilation also has an obvious improvement to the distribution features of sea surface temperatures in the middle latitudes of both hemispheres. The comparison of the root mean square error (RMSE) between with and without assimilation shows that, after assimilation, the RMSEs of the sea surface temperature and salinity in most ocean regions, especially in tropic regions, have a significant decline with a range of 0.1–1.0, therefore the simulated distribution features of sea surface temperature and salinity are closer to the observations. The further analysis indicates that the assimilation clearly improves the simulation on the time variation features of Nino3 and Nino4 sea surface temperatures. For the Nino3 temperature, its difference with the OISST is decreased after assimilation, always having a small absolute value of difference of about 0.5 °C in first half-year and a large one of about 1 °C in second half-year. For the Nino4 temperature, it is improved obviously and the absolute value of its difference with the OISST is always below 0.5 °C.

Key words BCC_GODAS, Quality control, Sea surface temperature, Sea surface salinity

摘要 介绍了从全球电信系统(GTS)上获得的海洋温度、盐度观测资料在中国国家气候中心(BCC)新一代海洋同化系统中的应用情况。通过资料的质量控制判断温、盐观测的重复记录、观测深度、地形、极端值、气候变率、层结、空间差异,有效地过滤了错误的或不可靠的观测信息。质量控制后,将温、盐观测资料加入同化系统,有效地改进了模块化全球海洋环流模式MOM4中的全球热带、副热带海洋,尤其是太平洋地区的多年平均海表温度、盐度场分布特征;此外,同化温、盐资料对南北半球中纬度地区的海表温度分布特征也有明显的改进。对比同化前后的均方根误差(RMSE)发现,同化后大部分海区,尤其是热带海洋的海表温度/盐度的均方根误差明显降低,降幅通常在0.1—1.0 °C/psu,模拟与观测的海表温、盐分布特征也更为接近。进一步分析指出,同化明显地改善了模式对Nino3、Nino4区海温时间演变特征的模拟,同化后的Nino3海温与最优插值海表面温度的差异减小,但其通常在上半年改进较多(差值绝对值多在0.5 °C左右),而在下半年则改进较少(差值绝对值常达

* 资助项目:国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403606)、财政部行业专项(GYHY200706005)、中国气象局风云气象卫星遥感开发与应用项目(FiDAF-2-05)。

作者简介:刘向文,主要从事资料同化及气候变化研究。E-mail: xwliu@cma.gov.cn

1°C左右);Nino4 区的海温特征则改进明显,其与最优插值海表温度的差值绝对值通常都控制在 0.5°C 以下。

关键词 BCC_GODAS, 质量控制, 海表温度, 海表盐度

中图法分类号 P732.5 P47

1 引言

海洋资料同化通常有着两方面的重要意义。其一,可以将观测数据所包含的有效信息应用于海洋状况的客观分析中,从而弥补海洋动力模型的欠缺,加深对海洋动力过程的认识;其二,可以改进海气耦合模式的初始条件、边界条件,进而能提高分析与预报系统的性能,便于气候预测业务的开展。目前,许多国家都拥有业务化的海洋同化系统,如美国国家环境预测中心(NCEP)的 GODAS,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的海洋分析系统,英国气象局的 FOAM,中国国家海洋环境预报中心的热带海洋资料同化系统等,这些同化系统的发展既在大洋实时预报和气候预测中发挥了重要作用,同时也提供了大量的海洋环流再分析产品,有助于人们更准确地认识海洋环流的演变过程。面对现代社会不断增长的研究和应用需求,各国对海洋同化系统的发展和應用研究也一直没有松懈,从资料的观测收集、质量控制、同化方法的发展,到同化技术的改进都受到了相当的重视。

资料同化有多种方法,如逐步订正法(Bergthorsson, et al, 1955)、最优插值(Gandin, 1963; Lorenc, 1981)、卡尔曼滤波(Kalman, 1960; Kalman, et al, 1961)、变分方法(Sasaki, 1958, 1970),而目前中外一些同化系统较多使用的是后两种方法。卡尔曼滤波以及改进了的卡尔曼光滑、集合卡尔曼滤波(Evensen, 1994),因其无需假设背景场误差协方差是定常的,原理较为先进,但在实际应用中因计算量太大而受到限制。变分法主要包括三维变分和四维变分,四维变分由于额外需要伴随模式和计算扰动发展的切线性模式,计算量较大,目前业务上运用还不多,而三维变分则在业务上相对运用较多。三维变分法的优点在于:可处理观测矩阵非线性的情况,可对资料进行全局同化,可在代价函数中引入物理约束(Parrish, et al, 1992)等。鉴于此,中国国家气候中心(BCC)海洋同化系统的开发一直基于三维变分方案(刘益民等, 2005; 张人禾等,

2004)。近些年来,为了更好地满足现代气象业务的需求,BCC 着手发展新一代海洋同化系统,以期在气候预测时能够得到更为准确的海洋下边界条件,这对气候预测水平的提高以及海洋科学研究的发展都是一个促进,而针对新同化系统的发展、检验、评估等都是目前亟待展开的工作。

资料同化的一个重要前提是对资料的收集,而伴随着现代科学的发展,海洋观测的手段不断丰富,其提供的海洋资料也越来越多。海洋观测主要包括海岸水文站观测、浮标观测、卫星遥感观测、船舶观测等,此外,还包括一些地波雷达观测以及飞机航测,这些丰富的观测手段为海洋研究及预测业务提供了足够的观测数据,如 ARGO 浮标的铺设有利于实时观测全球海洋上层的温度、盐度结构,TOGA/TAO 浮标阵列提供了热带太平洋海区的温、盐信息;Topex/Poseidon、Jason 等卫星提供海洋高度异常的观测;NOAA/AVHRR 遥感数据提供了较高分辨率的海表温度信息。庞大的观测数据既为海洋资料同化提供了丰富的数据来源,也对同化技术提出了挑战,在改进同化方案的基础上,有必要发展各种资料协调同化的技术,以最大限度利用各种资料的可靠信息并合理评估其对同化效果的影响。要将这些不同类型的资料协调同化到同化系统中,首先要了解每种资料的特点,加以严格的质量控制,并针对同化系统的特点对资料进行预处理。

基于 BCC 业务海洋同化系统发展的需求,本文针对全球电信系统(GTS)报文中的深海温、盐观测资料,将其严格质量控制后加入 BCC 海洋同化系统,然后对资料的同化效果进行考查分析,以期能够推动同化系统性能评估以及后续的业务运行等工作的开展。

2 同化系统及资料

本文所用的同化系统是 BCC 正在研发的新一代全球海洋同化系统(BCC_GODAS2.0),采用的海洋模式是美国地球物理流体实验室的模块化全球海洋环流模式 MOM4 (Modular Ocean Model 4)。

经过起转后,模式从 1959 年 1 月启动,采用 NCEP 再分析资料中的风应力、气温等变量场作为外强迫场,积分到 2001 年 12 月,然后从 2002 年 1 月 1 日开始同化试验。

同化系统采用三维变分方案,Zhu 等(2006)最初将该方案主要运用于同化格点化的卫星高度计资料,Xiao 等(2008)在同化卫星沿轨高度计资料时对方案做了改进——对动力高度的同化由原来反演一维温盐廓线改进为反演二维的温盐剖面;系统中引入递归滤波对变量进行预调节处理,避免了背景误差协方差矩阵的求逆。近两年,肖贤俊等将同化方案继续改进并引入到全球海洋环流模式 MOM4 中,以期构建 BCC 新一代全球海洋同化系统(BCC_GODAS2.0),使其更好地服务于中国国家气候中心(BCC)短期气候预测的业务需求。新系统的同化窗宽度为 10 d,同化过程分为垂直同化和水平同化两个阶段,在方案的设计上保留或增加了一特色,如同化分析采用递归滤波方案(Hayden, et al, 1988, 1995)、目标函数构造引入温盐非线性关系(Troccoli, et al, 1999; Yan, et al, 2004; Zhu, et al, 2006)和海表温度约束项、使用有限记忆的准牛顿迭代法(Nocedal, 1980)以及共轭梯度法(Fujii, et al, 2003)寻求最优解、计算上实现模块并行化等。目前,BCC_GODAS2.0 初步构建成功,其在海洋环流的模拟、同化方面显示出一定的优越性;根据目标计划及业务需求,该系统同化的资料主要包括卫星高度计资料、卫星反演的海表温度资料、从 GTS 得到的海洋观测资料、ARGO 资料等。

本文所用观测资料来源于从 GTS 获得的海洋资料以及中国参与国际交换的海洋资料,原始数据文件采用国际标准电码格式编报,经中国国家气象信息中心解码后提供给客户使用。目前,本文同化试验使用了 GTS 海洋数据库中 SS、SO 报文的深海温、盐观测资料,资料长度是 2002 年 1 月到 2007 年 12 月。

此外,本文使用的对比资料包括:(1)美国 NCEP 的最优插值海表温度(OISST)资料(Reynolds, et al, 2002),该资料是最优插值海表温度场,分辨率是 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;(2)美国马里兰大学的 SODA 逐月资料(Carton, et al, 2000)。该资料的水平分辨

率为 0.5° ,垂直方向从 5—5374 m 分为 40 层,采用 POP 海洋模式,同化了 TAO 锚定阵列、ARGO 浮标、COADS 海上船舶观测等资料的同化产品;(3) WOA05 温、盐数据提供逐月温度、盐度的气候态及标准差信息,资料分辨率是 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直方向从 0—1500 m 分为 24 层。

3 观测资料的质量控制

从 GTS 获得的温、盐资料虽然在解码时过滤了一些错误信息(如部分重复发报、空报、错报),但仍或多或少地存在质量问题,例如,观测点位置错误、观测深度非单调递增、观测值存在明显异常、观测出现不合理逆温等。针对这些问题,对资料首先进行严格的质量控制,第一步是对数据的基本控制(QC1),第二步是结合同化系统特点所采取的进一步控制(QC2)。

温、盐资料的 QC1 过程包括:(1)判断、整合重复记录,包括数据中是否仍有重复发报、同一记录中是否存在重复层次、单日内一个观测点是否存在多次发报;(2)根据观测发报的特点,保证观测记录中测量深度是依次递增的;(3)与地形资料比较,去掉处于陆地或浅水区(以水深 200 m 作为标准)的测量点;去掉观测层次不合理的点,比如观测深度大于实际水深的情况;(4)使海温为 0—35℃,盐度为 30—40 psu,此范围以外的温、盐观测作为极端异常值予以剔除;(5)与 WOA05 温、盐数据比较,如果观测值与气候态的差值绝对值大于 5 倍标准差,则将其作为异常观测而予以剔除;(6)在 60°S — 60°N 范围内对温度数据进行层结判断,去除不合理逆温。

分析温、盐观测在 QC1 前后的观测记录情况可知:(1)温、盐观测的记录量在 2002—2004 年相对偏少,原始记录在每年 10 万条左右,从 2005 年起开始大幅度增加,到 2006、2007 年每年的原始资料量可达 20 多万条。从逐月的情况来看,资料的突然增加发生在 2005 年 8 月,该月后单月的资料量比以前增加了一倍左右。(2)质量控制后,温度观测记录在 2002—2004 年减少将近 10%,2005—2007 年的减少量在百分之十几到百分之二十;盐度观测记录在 2002 年极少(控制后仅保留了不到 10%),2003、2004 年约减少 40%,2005、2006 年减少 30%左右。

盐度资料减少较多,很大原因是因为解码后的资料针对每次观测都同时给出温、盐信息,许多抛弃式深水温度计(XBT)观测不存在盐度信息,其对应的盐度观测记录往往以缺测形式给出,而这部分缺测记录在 QC1 过程中被去除了。

质量控制后的温、盐数据需要加入同化系统,考虑到 BCC_GODAS2.0 的同化窗口宽度为 10 d,因此,每次同化分析要将 10 d 内的温、盐资料整合利用。虽然经过基本质量控制后的观测记录数量依然可观,但不少记录中仅在部分层次上有观测,而且观测层次与模式垂直层次也不一致,鉴于这种情况,将 QC1 后的温、盐观测资料垂直线性插值到模式层次上。

在 QC1 过程中,观测值仅和气候态数据作了量值比较,并没有和邻近观测值进行比较,因此,经过 QC1 后的数据中难免会存在个别观测值和邻近观测值差异较大的情况,这样的资料进入同化系统后会使得观测场局部出现较大梯度,反映的信息无法被模式准确分辨,从而可能导致分析场在局部区域的不合理。

考虑到 QC1 过程的不足,对垂直插值后的温、盐资料作了进一步的质量控制 QC2:在每个水平层上,把距观测点 2° 以内的范围作为局部区域考察,如果该区域内极值与其他观测平均值的差值绝对值大于 2 倍标准差,则将极值作为异常观测而剔除;重复筛选过程,保证局部区域内不存在异常观测。QC2 过程可以将导致温、盐场空间差异较大的异常

观测点去除,大多数情况下,这种筛选过程只需一次即可达到要求,个别情况下需要两次筛选过程。

图 1 以 2003 年 7 月的 3 个同化窗(6 月 30 日到 7 月 9 日、7 月 10—19 日、7 月 20—29 日)为例,给出各层次上温度、盐度观测在 QC2 前后的减少量。可以看出,QC2 过程中,温度观测在温跃层附近削减较多,超过 20%,在表层、深层削减较少,通常不到 10%;盐度观测的上层削减量要比下层略多,但相比温度观测而言,其总体上削减较少。

为了检验质量控制的效果,将其与 SODA 同化资料作对比。针对某同化窗内各层次上的观测点,将同月的 SODA 分析值水平双线性、垂直线性插值到观测点上,然后加以比较。图 2 以 2003 年 7 月内的一个同化窗(7 月 10—19 日)为例,给出 15、155 m 两个层次上温度观测在质量控制前后与 SODA 的对比情况。该同化窗内,15 m 深度上,未控制前温度观测点有 2476 个,两步质量控制后剩 1610 个;155 m 深度上,未控制前温度观测点有 2656 个,控制后剩 1504 个。从图 2a、b 可以看出,经过 QC1 和 QC2 后,观测资料质量明显改善,与 SODA 值相对趋于接近。此外,155 m 深度处,资料在经过 QC1 控制后仍有许多异常观测值与 SODA 分析值相差较大,经过 QC2 后这部分异常观测值明显减少,而 15 m 深度处 QC2 过程对异常观测的过滤则较少,这与图 1 揭示的特征吻合,由此可见,QC2 过程对观测资料(尤其是温跃层的观测)质量控制的重要性。

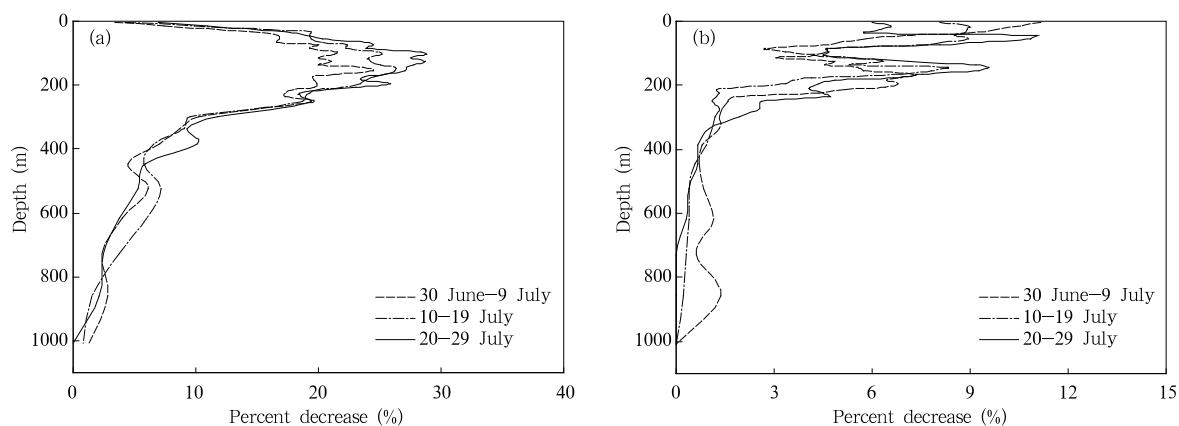


图 1 2003 年 7 月的 3 个同化窗(6 月 30 日到 7 月 9 日、7 月 10—19 日、7 月 20—29 日)

中(a)水温、(b)盐度观测在 QC2 过程中的减少百分比

Fig. 1 Reductions of (a) temperature and (b) salinity observational records during the QC2 process in the three assimilation windows in July 2003

(from 30 June to 9 July, from 10 July to 19 July, and from 20 July to 29 July, respectively)

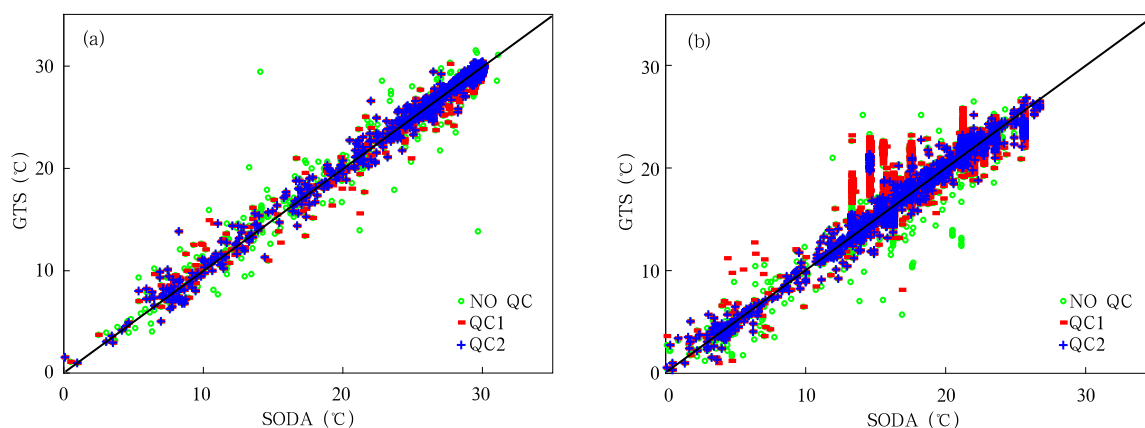


图2 (a)15 m、(b)155 m 水温观测在质量控制前后与 SODA 分析值的对比
(同化窗口时间取 2003 年 7 月 10—19 日)

Fig. 2 Comparison between the SODA analysis value and the uncontrolled/controlled temperature value on the depth (a) 15 m and (b)155 m in the assimilation window from 10 July to 19 July 2003

完成 QC1、QC2 后,一般情况下,一个同化窗口内,对海温观测而言,在资料较少时每层的资料进入量约为 1000 个观测点,而资料较多时每层资料进入量约为 3000 个观测点;盐度观测在 2005—2007 年与温度观测基本相当,而在 2002—2004 年则明显偏少,一般只有几百个。通常情况下,这些温、盐观测主要集中在两半球的热带、副热带海区,而在中高纬度海区的分布则较为稀疏。经过上述两步质量控制后,从 GTS 得到的温、盐度观测资料将进入同化系统,需要补充的是,在同化分析时,个别观测值与模式背景场相差较大,这部分观测也予以剔除。

4 同化结果的初步分析

同化试验分为两步:第 1 步将同化系统的动力模式 MOM4 从 2002 年 1 月 1 日积分到 2007 年 12 月 31 日,不加入任何观测资料;第 2 步将同化系统 BCC_GODAS2.0 进行相同时段的积分,但过程中每 10 d 加入一次海洋温、盐度资料。在得到 6 a 的模拟和同化结果后,将其处理为月平均资料,然后进行比较分析。为了检验同化的效果,本文将 NCEP 的最优插值海表温度资料以及马里兰大学的 SODA 分析资料作为比较对象,并在比较前对这两套资料作了预处理,将它们水平双线性、垂直线性插值到 MOM4 模式的格点上,并对分析变量的单位作了统一。

图 3 是 MOM4 模式和同化系统 BCC_GODAS 积分得到的 6 a 平均的 1 和 7 月海表温度分布,并比较了其最优插值海表温度的差异。可以看出,1 月,模式模拟的海表温度分布场上,赤道西太平洋地区的暖舌范围较大,中心温度较高,30°C 线由印尼群岛一直伸展到了赤道中太平洋,而同化结果中暖舌范围较小,中心温度也较低;7 月,暖舌从赤道以南移到了赤道以北,模式模拟的暖舌分布仍然是范围较大、中心强度较高,而同化结果则明显地改善了这种状况。进一步分析模拟得到的海表温度与最优插值海表温度的差值可以发现,同化 GTS 中温、盐资料明显改善了模式对热带、副热带海表温度分布的模拟状况:1 月,同化前,热带太平洋、印度洋大部分地区的海表温度与最优插值海表温度的差值绝对值在 0.5°C 以上,而同化后降低到 0.5°C 以下;7 月,同化前,与最优插值海表温度差异较小的海温区主要位于热带中太平洋地区,而同化后其范围明显向东、西及北太平洋地区扩展;此外,同化前后南、北半球中纬度海洋的海表温度与最优插值海表温度的差异也有所减小。

图 4 是 MOM4 模式和 BCC_GODAS 积分得到的 6 a 平均的 1 和 7 月海表盐度分布,并比较了其最优插值海表盐度的差异。可以看出,1 和 7 月,模式模拟的南、北半球副热带太平洋的高盐度区的范围都较大,而同化后其范围缩小,中心强度降低。从模拟海表盐度与 SODA 的差值分布可以发现,1 和 7

月,同化前,太平洋上热带、副热带的大部分海区的海表盐度与 SODA 的差值绝对值较大,而同化后太平洋上大部分海区的盐度与 SODA 的差值绝对值

都降低到 0.2 或 0.4 psu 以下;此外,同化后,印度洋、大西洋的海表盐度与 SODA 值的差异也明显减小。

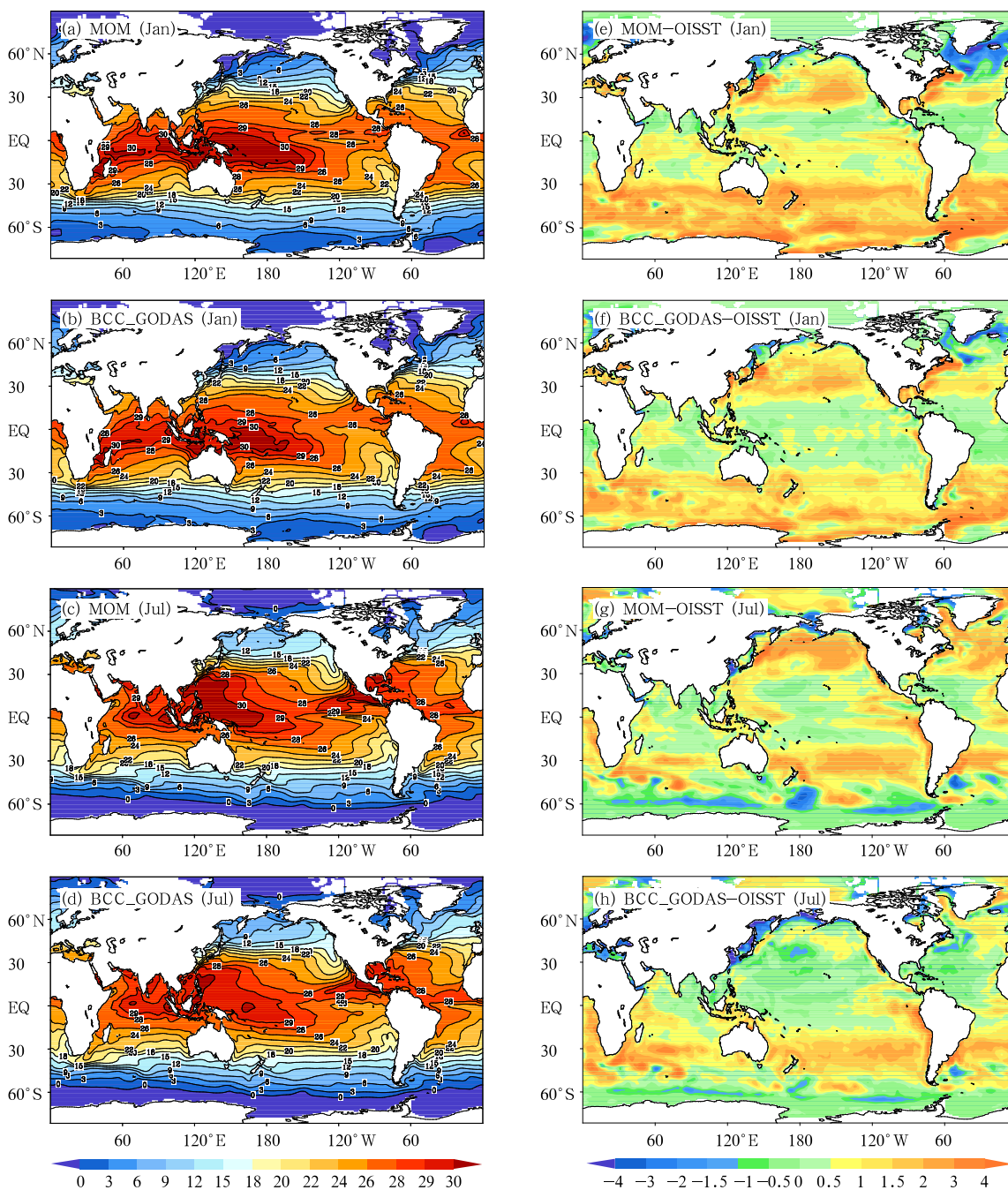


图3 2002—2007年平均的1、7月海表温度分布(a—d,单位:°C)及其与最优插值海表温度的差值(e—h),(a)、(c)、(e)、(g)为MOM4模拟;(b)、(d)、(f)、(h)为BCC-GODAS2.0同化GTS数据后的模拟

Fig. 3 Averaged sea surface temperatures (a—d, unit: °C) and their difference with the OISST (e—h) in January (a, b, e and f) and July (c, d, g and h) during 2002—2007: (a), (c), (e) and (g) are simulated by the MOM4; (b), (d), (f) and (h) are simulated by the BCC-GODAS2.0 assimilated with the GTS data

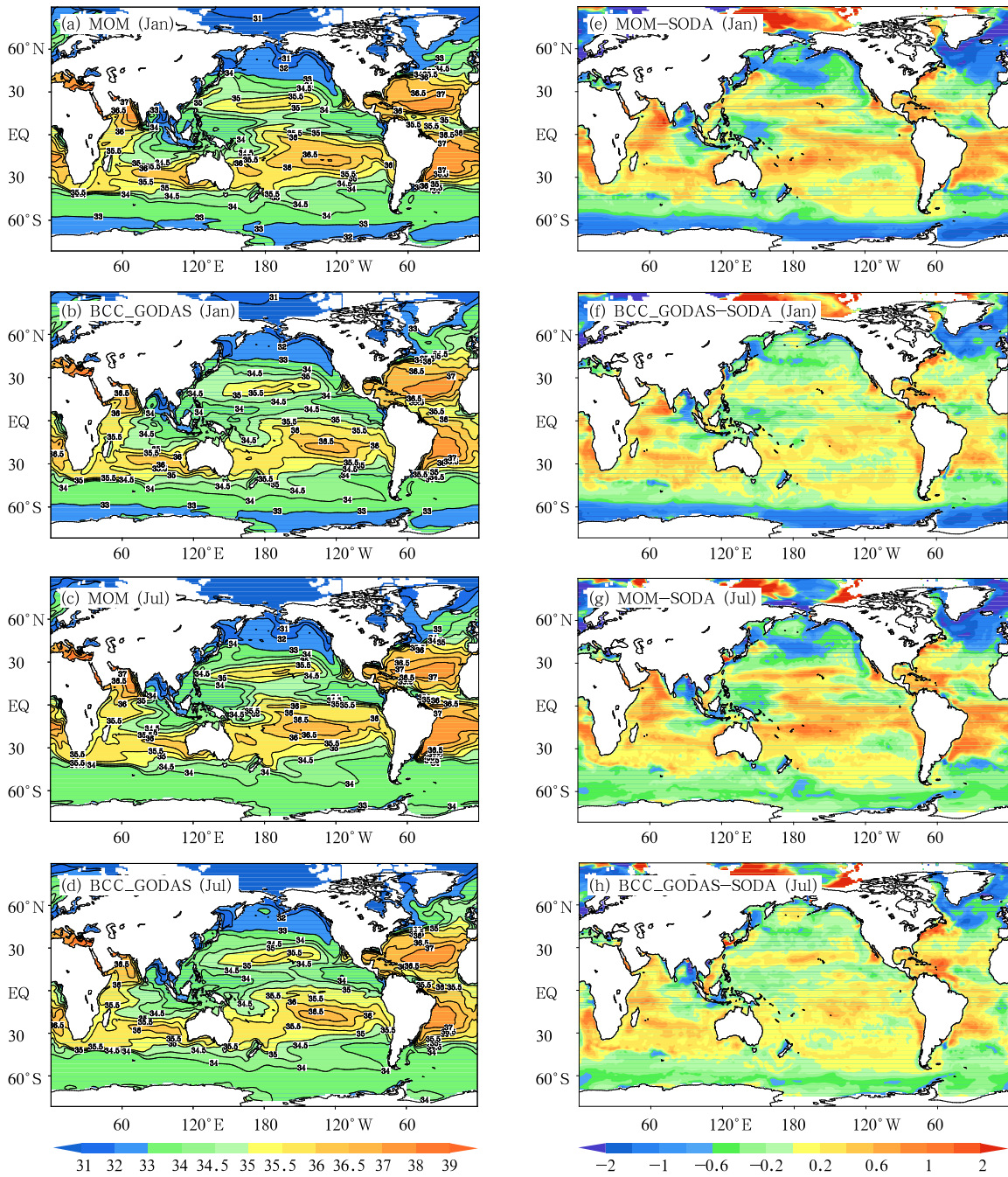


图 4 同图 3, 但针对海表盐度(单位: psu)及其与 SODA 的差值分布

Fig. 4 As in Fig. 3 but for the sea surface salinity (unit: psu) and its difference with the SODA

为了进一步分析同化前后温、盐场的改进程度, 针对模式和同化系统输出的 2002—2007 年共 72 个月的逐月结果, 计算了海表温度、盐度的均方根误差(温度与 OISST 值比较, 盐度与 SODA 值比较), 图 5 给出了二者的分布特征。对海表温度(图 5a、c)而言, GTS 中温度资料的同化明显改进了热带海洋状况的模拟, 同化后, 除了赤道东太平洋附近外, 30°

S—30°N 内的大部分海区的均方根误差都控制在 0.5 °C 左右; 此外, 两半球副热带外海区虽然在同化后与 OISST 的差异仍然较大, 但其均方根误差相比同化前已经明显降低, 降幅通常在 0.1—1.0 °C。对海表盐度(图 5b、d)而言, 同化前后, 北半球热带东太平洋地区、南半球副热带外海区的均方根误差无明显变化, 而太平洋上其他大部分海区的均方根误

差则存在不同程度的降低,降幅通常在 0.1—1.0 psu;此外,热带大西洋、印度洋的均方根误差在同化后也有一定程度的降低,降幅 0.1—0.6 psu。

根据上述结果可知,仅从海表温度、盐度的特征来看,从 GTS 得到的温、盐度观测资料的同化对 MOM4 中海表温度、盐度状况的模拟有明显改善,而且这种改善尤以在热带太平洋、大西洋地区最为

显著,同化后这些海域的均方根误差降低较多(温度均方根误差降幅在部分地区可超过 1.0 °C,盐度均方根误差降幅在部分地区可超过 0.8 psu),这可能与观测资料在热带地区分布相对稠密有关;同化后,热带大部分地区的海表温度均方根误差在 0.1—0.8 °C,海表盐度均方根误差为 0.15—0.45 psu。

上述分析仅从海表温、盐的平均态及均方根误差

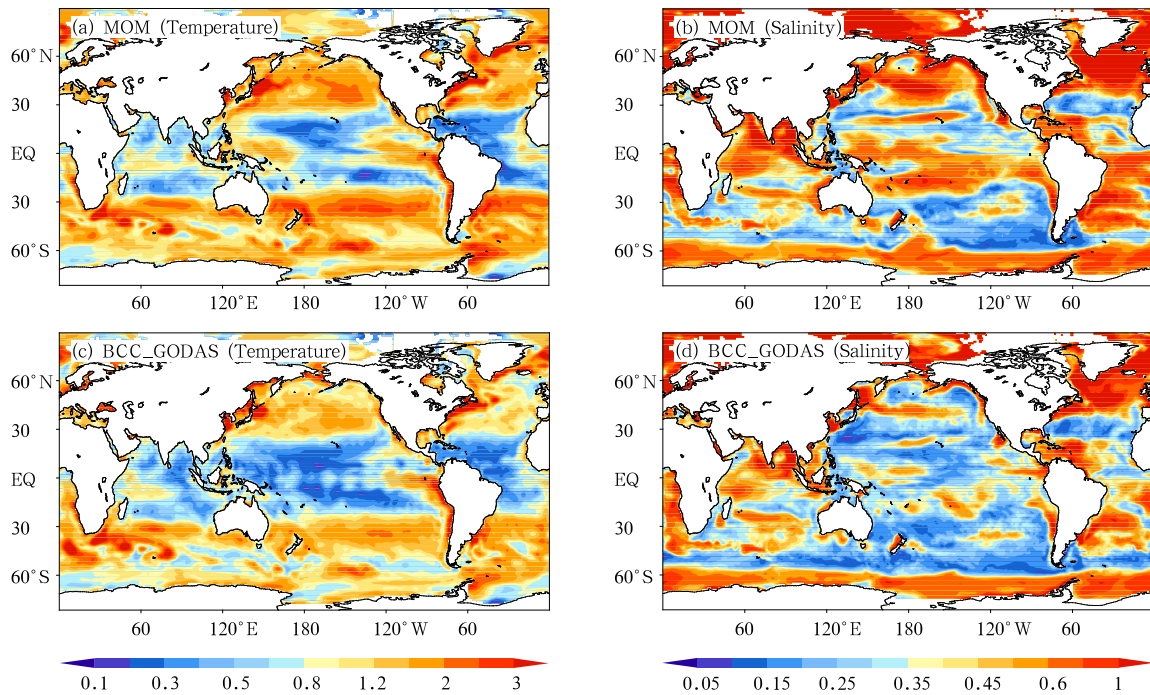


图 5 2002—2007 年的海表温度(a,c,单位: °C)、海表盐度(b,d,单位: psu)

均方根误差分布:(a)、(b)是 MOM4 模拟,(c)、(d)是 BCC-GODAS2.0 模拟

Fig. 5 Root mean square errors of the sea surface temperature (a, c, unit: °C) and the salinity (b, d, unit: psu) during 2002—2007: (a) and (b) are simulated by the MOM4, (c) and (d) are simulated by the BCC-GODAS2.0

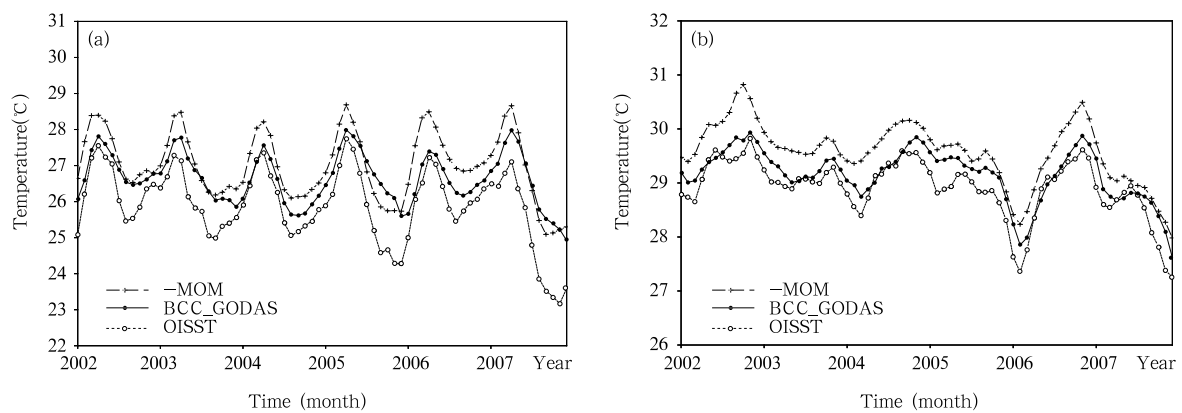


图 6 (a)Nino3、(b)Nino4 海表温度(单位: °C)的逐月变化

Fig. 6 Monthly variations of (a) the Nino3 and (b) Nino4 sea surface temperatures (unit: °C)

差分布上揭示了 GTS 中温、盐度观测资料对模式模拟结果的改善,并没有考察温、盐的时间演变特征,因此图 6 进一步给出了 Nino3、Nino4 区海表温度的逐月变化情况。从图 6 可知,一般情况下,同化后的 Nino3 海温与 OISST 的差异减小,但其通常在上半年改进较多(与 OISST 的差值绝对值多在 0.5°C 左右),而在下半年则改进较少(与 OISST 的差值绝对值常达 1°C 左右);Nino4 区的海温特征则在同化后得到明显改进,其与 OISST 的差值绝对值通常都控制在 0.5°C 以下。可见同化明显改进了模式对 Nino3、Nino4 区海温变化特征的模拟,但与观测情况仍然存在一定程度的偏差。

5 结 论

本文初步分析了从 GTS 得到的温度、盐度观测资料在 BCC 新一代海洋同化系统(BCC_GODAS2.0)中的应用情况,结果主要归纳如下:

(1) 温、盐观测资料的质量控制步骤包含:资料重复记录的判断整合、观测层次的顺序判断、地形判断、极端值的去除、与气候态的比较、温度层结的判断、空间差异的判断。质量控制后,错误的或是不合理的观测得到了有效地剔除。

(2) GTS 中温度、盐度资料的同化明显地改善了模式对全球海表温度、盐度分布特征的模拟。同化了温、盐观测资料后,大部分海区,尤其是热带、副热带太平洋地区的海表温度、盐度的均方根误差得到了明显降低,从而使得海表温度、盐度的模拟特征与观测情况更为接近。

(3) 同化后,模式对 Nino3、Nino4 区的海温变化特征的刻画能力明显提高,尤其是在 Nino4 区,同化后的海温与 OISST 的差值绝对值通常都控制在 0.5°C 以下。

虽然同化系统对温、盐度特征的模拟比动力模式改进了很多,但在中高纬度海洋、沿海岸线区域、热带东太平洋等地区模拟的海表温度、盐度场与观测场的差异仍然较大,而对热带海洋的模拟效果也有待进一步改进。鉴于本文仅侧重于从 GTS 获得的温、盐度资料的同化情况,该资料的信息量相对较少,且观测多集中于热带、副热带海区,因此,其对同化效果的改进是有限的,但随着其他相对密集的观

测资料(如卫星高度计观测、ARGO 观测等)的加入,以及同化系统性能的提高,上述不足有望得到克服。此外,文中对温度、盐度资料同化效果的评估仅侧重分析了海表的特征,并没有详细地考查海洋温、盐场的三维空间特征,而且比较工作也没有采用诸如 ARGO、TAO 之类的实时观测资料,因此,有必要进一步探讨。

参考文献

- 刘益民,李维京,张培群. 2005. 国家气候中心全球海洋资料四维同化系统在热带太平洋的结果初步分析. 海洋学报, 27(1): 27-35
- 张人禾,刘益民,殷永红等. 2004. 利用 ARGO 资料改进海洋资料同化和海洋模式中的物理过程. 气象学报, 62(5): 613-622
- Bergthorsson P, Doos B. 1955. Numerical weather map analysis. *Tellus*, 7(3): 329-340
- Carton J A, Chepurin G, Cao X, et al. 2000. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950—1995, Part 1: methodology. *J Phys Oceanogr*, 30: 294-309
- Evensen G. 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasigeostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J Geophys Res*, 99(5): 10143-10612
- Fujii Y, Kamachi M. 2003. Nonlinear preconditioned descent methods without inversion of a first-guess covariational analyses. *Tellus*, 55(A): 522-543
- Gandin L S. 1963. Objective Analysis of Meteorological Fields. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 242 pp
- Hayden C M, Purser R J. 1988. Three-dimensional recursive filter objective analysis of meteorological fields // Preprint, Eighth Conf. On Numerical Weather Prediction. Baltimore, MD, Amer Meteor Soc, 185-190
- Hayden C M, Purser R J. 1995. Recursive filter objective analysis of meteorological field: application to NESDIS operational processing. *J Appl Meteor*, 34(1): 3-15
- Kalman R E. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transaction of the AMSE-J Basic Engineering*, 82(D): 35-45
- Kalman R, Bucy R. 1961. New results in linear filtering and prediction theory. *Transaction of the AMSE-J Basic Engineering*, 83(D): 95-108
- Lorenz A. 1981. A global three-dimensional multivariate statistical interpolation scheme. *Mon Wea Rev*, 109(4): 701-721
- Nocedal J. 1980. Updating quasi-Newton matrices with limited storage. *Math Comput*, 35(151): 773-782
- Parrish D, Derber J. 1992. The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Mon Wea*

- Rev, 120(8): 1747-1763
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J Climate*, 15 (13):1609-1625
- Sasaki Y. 1958. An objective analysis based on the variational method. *J Meteor Soc Japan*, 136 (1): 77-88
- Sasaki Y. 1970. Some basic formalisms in numerical variational analysis. *Mon Wea Rev*, 98 (12): 875-883
- Troccoli A, Haines K. 1999. Use of temperature-salinity relation in a data assimilation context. *J Atmos Oceanic Technol*, 16(12): 2011-2025
- Xiao Xianjun, Wang Dongxiao, Yan Changxiang, et al. 2008. Evaluation of a 3d VAR system for the South China Sea. *Progress Natur Sci*, 18(5): 547-554
- Yan C, Zhu J, Li R, et al. 2004. Roles of vertical correlations of background error and T-S relations in estimation of temperature and salinity profiles from sea surface dynamic height. *J Geophys Res*, 109: C08010, doi: 10.1029/2003JC002224
- Zhu J, Yan C X. 2006. Nonlinear balance constraints in 3DVAR data assimilation. *Sci China (D)*, 49(3): 331-336
- Zhu J, Zhou G Q, Yan C X, et al. 2006. A three-dimensional variational ocean data assimilation system: Scheme and preliminary results. *Sci China (D)*, 49 (12): 1212-1222