

TOPEX/Poseidon 高度计资料在全球海洋环流模式中的同化及分析

刘娟^{1,2} 王斌¹ 俞永强¹ 刘海龙¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 利用一个新的四维变分海洋资料同化系统 LICOM-3DVM 对 TOPEX/Poseidon 高度计资料进行了同化。该同化系统是在 LASG/IAP 气候海洋模式 LICOM1.0 的基础上建立起来的, 所用的同化方法为三维变分映射资料同化方法 3DVM。高度计观测资料是采取间接的方式进行同化, 即先建立起二维海面高度距平场与三维温度场的统计关系, 并由此通过观测的海面高度距平信息反演出“观测”的三维温度场, 然后利用 LICOM-3DVM 四维变分同化系统将此反演的温度场同化到海洋模式中。作者设计了两组试验并对结果进行了比较分析, 积分时间从 1993 年 1 月至 2001 年 12 月共 9 年时间。结果表明, 由于上混合层相关系数较小, 因此同化后海温没有改进; 而在温跃层以及更深层次, 同化后的海温均有很大程度的改善。从对赤道太平洋地区海温的气候态、季节变化和年际变化以及 Nino 3 区的 Nino 指数的模拟情况来看, 由于同化时将海面高度异常和海温异常之间的相关参数取为常数, 没有考虑其季节和年际变化, 因此, 同化后对于赤道太平洋的年际变化没有改善。对于黑潮地区, 由于模式的分辨率较低, 同化之前没有很好地模拟出温度锋面, 温度和盐度梯度都偏小, 流速也偏弱; 而同化后使得温度锋面和盐度梯度与 WOA01 更加吻合, 流速增强。

关键词 三维变分映射资料同化 高度计资料 LICOM-3DVM 四维变分

文章编号 1006-9585 (2008) 06-0697-11 **中图分类号** P47 **文献标识码** A

Assimilation of TOPEX/Poseidon Data into a Global Ocean Model and Its Analysis

LIU Juan^{1,2}, WANG Bin¹, YU Yong-Qiang¹, and LIU Hai-Long¹

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamic, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract A global oceanic four-dimensional variational data assimilation system called LICOM-3DVM is applied to assimilate TOPEX/Poseidon altimeter data. This system is established using the three-dimensional variational data assimilation of mapped observation (3DVM) and the LASG/IAP Climate Ocean Model, version 1.0 (LICOM1.0). A statistical method is used to convert sea surface height anomalies into synthetic temperature profiles. And then the synthetic temperature profiles are assimilated. Two experiments starting from January 1993 and ending at December 2001 are designed to examine the assimilation skill of synthetic temperature profile, one is the control run (CTRL) and the other is the assimilation (ASSM). The results from ASSM show great improvements in the thermocline and deeper levels while little improvements in the mixed layer since the small correlation coeffi-

收稿日期 2007-10-31 收到, 2008-09-20 收到修定稿

资助项目 中国科学院重要方向项目 KZCX3-SW-230 和中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目

作者简介 刘娟, 女, 1978 年出生, 博士, 主要从事海洋资料同化的研究。E-mail: liujuan@mail.iap.ac.cn

cient there. From the analysis to the climatology, seasonal and interannual variability of the temperature and Niño 3 index in the equatorial Pacific, there is no improvement after assimilation since the correlation factor between variations of the sea surface height and the subsurface temperature is treated as a constant without considering its high seasonal and interannual variability. For the Kuroshio area, the comparison shows that the simulation by the model is not able to reproduce a correct Kuroshio Stream temperature front probably due to the coarse resolution. The gradient of the temperature and salinity are small, and the zonal velocity is weaker. However, the results from ASSM show the coincidence of the temperature front and the salinity gradient with WOA01.

Key words 3DVM, altimetry observation, LICOM-3DVM, 4DVar

1 引言

随着高度计卫星的成功发射,以近乎全球的覆盖面给我们提供了一个观测和研究全球海洋变率的机会。与此同时,在探索同化高度计资料对海洋动力学的研究有何影响,如何才能有效地将高度计资料同化到海洋模式中去,以及同化高度计资料对模拟和预报 ENSO 有何作用等方面,也有了大量的工作。Carton 等^[1]分析了不同的海洋观测系统,如 TOGA-TAO 浮标阵列, XBT 和 TOPEX/Poseidon 高度计资料,在同化过程中分析次表层海洋过程的贡献,发现高度计资料的同化有助于分辨季节循环的主要特征; Weaver 等^[2]在一个线性多层模式中,用四维同化的方法检验了高度计观测能够在多大程度上决定赤道太平洋的次表层流; Wenzel 等^[3]研究了同化 TOPEX/Poseidon 高度计资料对海洋状态的影响; Fischer 等^[4]将同化了高度计资料后得到的 ENSO 预报结果与同化次表层温度得到的结果进行了对比,发现高度计的同化会改进 ENSO 的预测技术; Ji 等^[5]也探讨了高度计同化对 ENSO 预报的影响。

在高度计资料的同化中,大部分的研究都是通过高度计同化来估计温度、盐度或者温盐廓线,如 Vossepoel 等^[6,7]、Maes 等^[8]和 Pinardi 等^[9]从刚盖近似的原始方程入手,分析了海面高度场和全球环流模式中内部流场变量之间的关系,发现由于正压流场的辐合特性,直接将海表面的信息,如卫星高度计资料,插入模式中并不能使得次表层的动力场发生变化。因此,不能直接对卫星高度计资料进行同化,而是需要将其转换成其他变量,如温度和盐度场。Fisher 等^[10]指出,直接订正 SSH (Sea Surface Height) 只能影响正压模

态,并且信息将会在几个时间步之后消失,因此,要同化观测的 SSH 必须将其转化成质量场的订正。那么,怎样将只限于海表面的海面高度场信息投影到次表层,得到次表层的海洋状态呢?方法之一是利用统计关系,如利用高度计资料统计得到温盐^[11~14]或者利用 EOF 方法得到 SSH 与温度的关系^[4]。这些统计关系都依赖于事先计算好的相关系数,然而,在全球海洋的大部分区域,并没有足够的观测资料供我们计算精确的相关系数,因此,只能利用数值模式的结果统计。第二种方法是只在表层同化表层的观测,并利用模式动力学来得到相关次表层的海洋状态^[15,16]。这一方法最大的缺点是在模式调整过程中会引入短暂的虚假波动,甚至有可能阻止模式产生合理的环流场。近年来, Yan 等^[17]提出了基于三维变分的高度计同化方案,用高度计资料直接估计温盐。

本文采用 Mellor 等^[11]和 Ezer 等^[12]介绍的方法,利用 SODA1.2 资料^[18] (Simple Ocean Data Assimilation) 统计了海面高度距平与温度场的关系,并利用 TOPEX/Poseidon 高度计资料得到了各层所谓的“观测”温度场。然后对此温度场进行了同化。本文第二和第三部分介绍了海洋模式及其同化系统,第四部分为结果分析,最后一部分为小结。

2 海洋环流模式简介及观测资料

试验中所采用的海洋模式为中国科学院大气物理研究所 (IAP) 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 的海洋环流模式 LICOM1.0 (LASG/IAP Climate Ocean Model, Version 1.0)^[19], 该模式是在 LASG 第三代大洋环流模式^[20]基础上发展起来的,模式的水平分辨

率可以自由选择, 目前最高可以取为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 本试验采用的是 $1^\circ \times 1^\circ$ 的版本。该版本为全球模式, 其范围为 $90^\circ\text{N} \sim 79^\circ\text{S}$ 。模式的垂直方向分为不等距的 30 层, 其中上面 1 000 m 深度有 20 层^[19]。模式从无运动状态开始积分, spin-up 积分 900 年模式达到稳定。以下所有试验均在第 900 年试验结果的基础上继续积分。

模式的强迫场资料分别为: 风应力采用 NCEP/DOE Reanalysis 2 的月平均资料, 净短波辐射、非短波的热通量、耦合系数采用了由德国马克斯-普朗克气象研究所 (MPI) 整理的海洋模式比较计划 (OMIP) 的月平均强迫场^[21], 用于恢复的月平均海表面温度和海表盐度来自美国国家海洋资料中心 (NODC) 发布的《世界海洋图集》(简称 WOA98)^[22]。

本文用来同化的资料为 TOPEX/Poseidon 卫星高度计资料, 该资料为全球的格点资料, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨率为 5 d。为了去掉大地水准面的误差, 这一资料为相对于 1993~2001 年共 9 年平均的海面高度异常资料^[23]。用于比较的资料为 SODA^[18]、WOA01 气候场资料^[24] 以及 HadISST 资料^[25]。

3 同化系统及同化方案

3.1 观测温度场的构造

由于高度计资料只提供了海洋表层的信息, 因此, 需要将海表面的信息投影到深层来获得三维的海洋变量场。本文采用 Mellor 等^[11] 和 Ezer 等^[12] 的方法, 将观测的 SSH 转化成所谓的“观测”温度场, 然后对此温度场进行同化。这一方案的关键是要预先定义相关系数 $C_T(x, y, z)$ 和相关参数 $F_T(x, y, z)$:

$$C_T = \frac{\langle \delta T \cdot \delta \eta \rangle}{[\langle \delta T^2 \rangle \langle \delta \eta^2 \rangle]^{1/2}}, F_T = \frac{\langle \delta T \cdot \delta \eta \rangle}{\langle \delta \eta^2 \rangle}, \quad (1)$$

其中 $\delta T = \delta T(x, y, z, t)$ 和 $\delta \eta = \delta \eta(x, y, t)$ 分别为温度场和海面高度场减掉它们的时间平均后的距平值。然后, 通过下式就可以将海面高度距平投影到深层, 从而反演出观测的三维海洋温度场:

$$T_{\text{obs}} = \langle T \rangle + F_T \delta \eta_{\text{obs}}, \quad (2)$$

其中 $\delta \eta_{\text{obs}} = \delta \eta_{\text{obs}}(x, y, t)$ 为观测的海面高度距

平资料。本文用 1993 年 1 月 1 日至 2001 年 12 月 31 日的月平均 SODA 资料来统计 C_T 和 F_T , $\langle T \rangle$ 为这 9 年平均的温度场。图 1 为全球、赤道太平洋 ($30^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{S}$, $140^\circ\text{E} \sim 80^\circ\text{W}$) 以及湾流区域 ($25 \sim 45^\circ\text{N}$, $80 \sim 54^\circ\text{W}$) 的相关系数 (C_T), 可以看到, 500 m 深度以内相关系数较大, 最大发生在 200 m 左右, 而上混合层相关系数较小, 赤道太平洋地区相关系数大于湾流地区; 在 500 m 深度以下, 随着深度的增加, 相关系数逐渐减小, 此时湾流区域的相关系数大于赤道太平洋区域。由于海面高度反映了温跃层的厚度, 因此, 在温跃层深度上海面高度与温度的相关系数最大。

3.2 LICOM-3DVM 同化系统

本文采用 LICOM-3DVM 同化系统^[26], 并在此系统上做了少量改动。该同化系统为基于 LASG/IAP 气候海洋模式 LICOM 1.0 的四维变分同化系统, 所用的同化方法为三维变分映射资料同化方法 3DVM (3-dimensional variational data assimilation of mapped observation), 该同化方法和同化系统分别在文献 [27~29] 中有详细介绍, 在此只做简单说明。3DVM 是由 Wang 等^[27] 和王斌等^[28] 提出和发展的一种新的四维变分资料

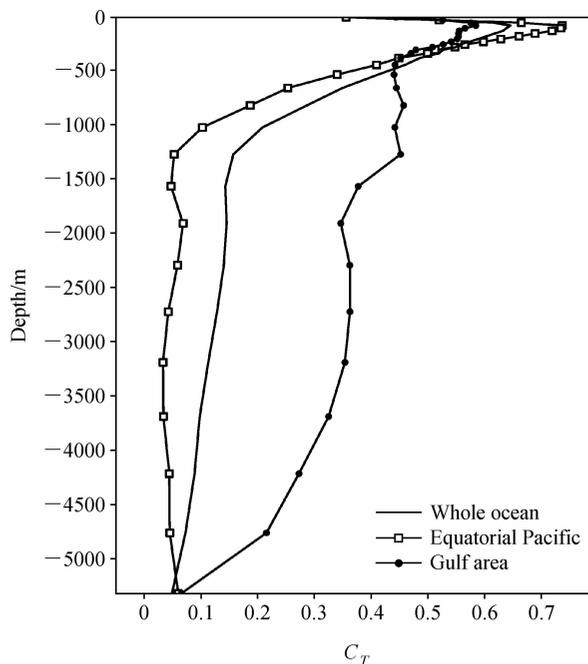


图 1 全球、赤道太平洋以及湾流地区的海面高度与温度的相关系数
Fig. 1 Correlation of the sea surface height anomaly and the temperature in the whole ocean, the equatorial Pacific and the Gulf area

同化方法,该方法不仅在台风的初始化中取得明显的省时增效作用^[29],而且在海洋资料同化中也成功地将 SST 观测资料同化到海洋模式中,并取得了好的效果^[26]。

在本试验中,由于所用的高度计资料为 5 d 平均的资料,因此将同化窗口取为 5 d。为了简单起见,初步的同化试验假设同化窗口内有 6 次观测(包括同化窗的端点),每天一次,每次都是同一个温度场,记为 $T_{0,obs}$ 。通过模式积分将这 6 次观测分别映射到同化窗口的末端,得到映射观测温度场 $T_{i,mo}$ ($i=0, 1, 2, \dots, 5$)。根据文献^[27~29],该同化系统在同化窗口末端的最优分析值为

$$\begin{aligned} T_a &= (\mathbf{B}^{-1} + 6\mathbf{O}^{-1})^{-1} (\mathbf{B}^{-1} T_b + \mathbf{O}^{-1} \sum_{i=0}^5 T_{i,mo}) \\ &= (\mathbf{B}^{-1} + 6\mathbf{O}^{-1})^{-1} [(\mathbf{B}^{-1} T_b + \mathbf{O}^{-1} (5T_6 + T_{0,obs}))], \end{aligned} \quad (3)$$

其中, T_b 为窗口末端的背景场, \mathbf{B} 和 \mathbf{O} 分别为背景误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵, $T_{i,mo}$ 为将观测的温度场映射到窗口末端以后的映射观测温度。

在 LICOM-3DVM 中,为了简化起见,背景误差协方差矩阵和观测误差的协方差矩阵均取为对角阵,其中背景误差的协方差矩阵用下面的公式来统计^[30]:

$$\mathbf{B}(x, y, z) \sim a_v \frac{(dT/dz)^{1/2}}{[(dT/dz)^{1/2}]_{\max}}, \quad (4)$$

其中 a_v 取 1.3。观测温度场的方差可以写为^[14]

$$\mathbf{O}(x, y, z) \sim F_T \frac{(1-C_T^2)}{C_T} \langle \delta\eta_{obs}^2 \rangle + \epsilon_{ssh}, \quad (5)$$

其中, ϵ_{ssh} 为将观测的海面高度信息投影到温度场后估计的误差方差。

3.3 试验设计

针对上述同化系统和观测资料,设计了两个试验方案,一是不同化任何观测资料的参照试验(CTRL),另一是同化了高度计资料的同化试验(ASSM)。积分时间为 1993 年 1 月至 2001 年 12 月,共 9 年。

4 同化结果及分析

本文将两组试验的结果分别与独立观测以及

再分析资料做了比较,下面将从以下几个方面进行分析。

4.1 多年平均结果分析及其与气候平均态的比较

首先,将两组试验从 1993 年 1 月至 2001 年 12 月共 9 年平均的结果近似作为气候态,与 WOA01 的结果进行了比较分析。

图 2 为全球以及太平洋、印度洋和大西洋海温纬向平均的深度-纬度剖面。可以看到,在大西洋的赤道地区,同化前的 CTRL 试验与 WOA01 相差较大,而同化后的 ASSM 试验则减小了这个误差,尤其是对 180 m 以下深度,误差从 2.5 °C 减小到了 0.5 °C;类似地,在印度洋的赤道地区,同化后误差明显减小,尤其是在 20~30°N 之间,同化前的 CTRL 试验与 WOA01 相差最大达到了 6.5 °C,而同化后虽然仍有较大误差,但已经减小到了 4 °C;对于太平洋来说,同化后的改进不仅发生在低纬度,在北半球的高纬度也有很大改善。

下面重点分析赤道太平洋以及湾流地区的情况。

4.1.1 赤道太平洋地区

图 3 为赤道上海温的深度-经度剖面。与 WOA01 相比,未同化的 CTRL 试验对温跃层的模拟误差较大,在赤道西太平洋 150 m 左右达到了一 3.5 °C,在赤道东太平洋表层则超过 4.5 °C。由于海洋模式中的垂直混合方案较为粗糙,并且模式的外强迫也不够准确,因此,模式对赤道地区温跃层的模拟仍存在较大的误差,而同化后这一问题得到了改善。这是因为根据图 1,相关系数最大的地方发生在温跃层深度,因此在此深度上反演出的观测温度场误差最小,相应地,同化后在此深度上的改进也比较明显。

4.1.2 西边界流区

对于西边界流的模拟是很有挑战性的,如黑潮和湾流,因为它需要相当高分辨率的模式才能分辨出真实的西边界强化作用及其在流轴附近的中尺度涡。那么,通过高度计资料的同化能否在 1°×1° 的模式中再现中纬度的这些小尺度特征呢?下面比较分析了两种试验对于黑潮地区的温度场、盐度场以及流速场的模拟情况。

图 4 和图 5 分别为黑潮区域 112.5 m 处(模式第 5 层)的温度和盐度水平分布。由于模式分

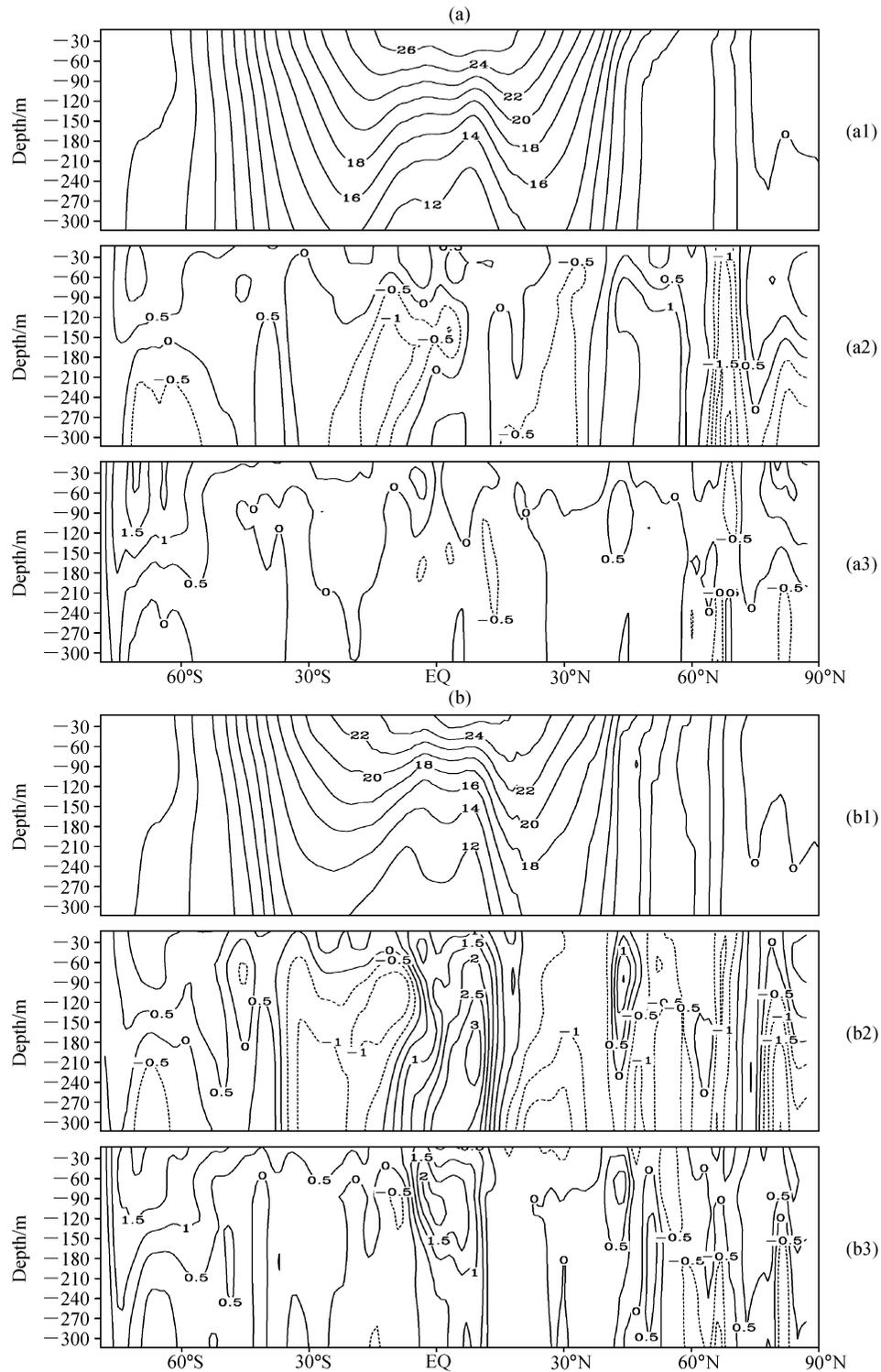


图2 (a) 全球、(b) 大西洋、(c) 太平洋和 (d) 印度洋的海温纬向平均的深度-纬度剖面。等值线间隔 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。(a1)、(b1)、(c1)、(d1): WOA01; (a2)、(b2)、(c2)、(d2): CTRL-WOA01; (a3)、(b3)、(c3)、(d3): ASSM-WOA01
Fig.2 The zonal averaged temperature profile in (a) the whole ocean, (b) the Atlantic ocean, (c) the Pacific Ocean and (d) the Indian Ocean. The contour interval is $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a1), (b1), (c1), (d1): WOA01; (a2), (b2), (c2), (d2): CTRL-WOA01; (a3), (b3), (c3), (d3): ASSM-WOA01

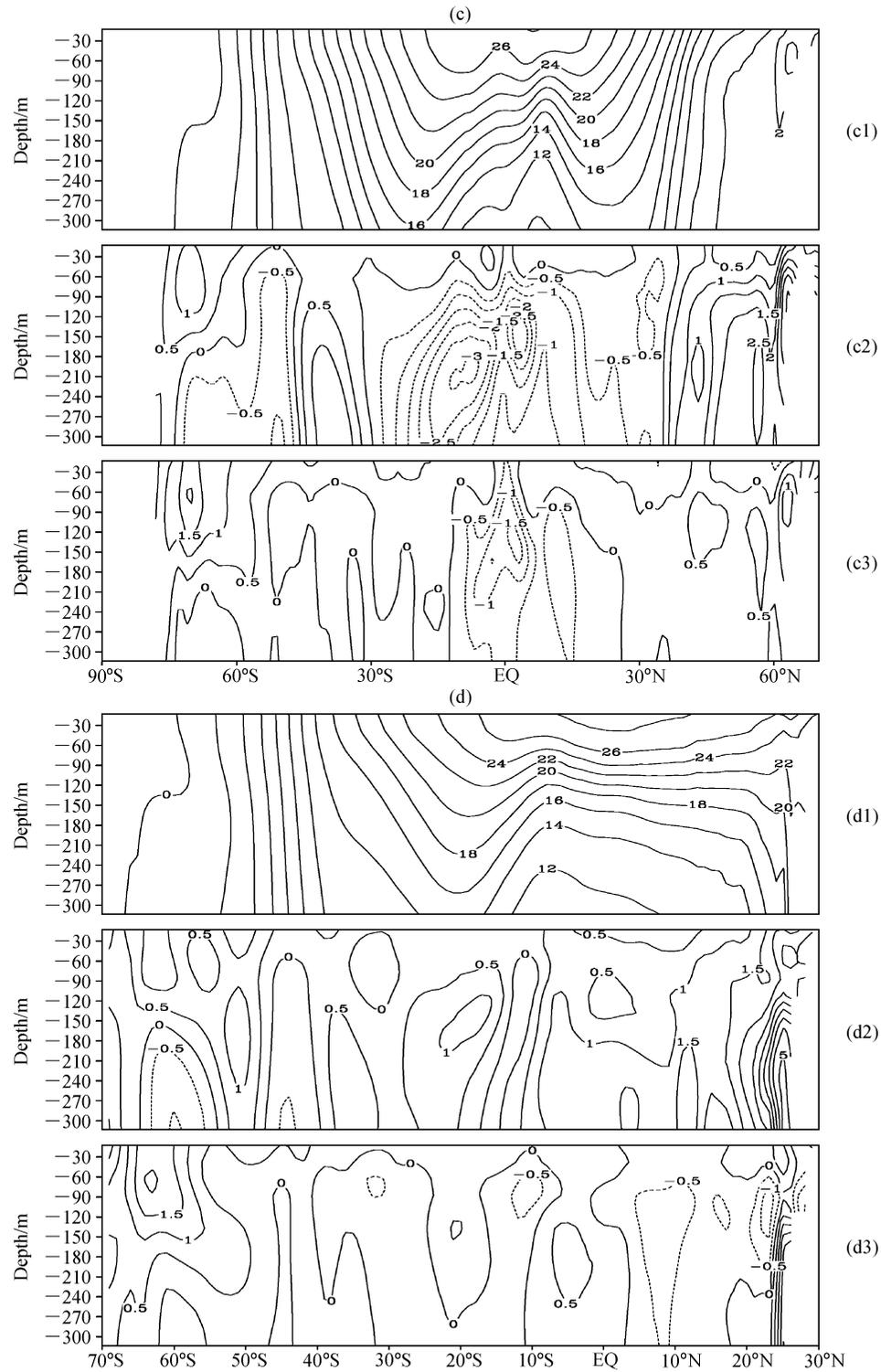
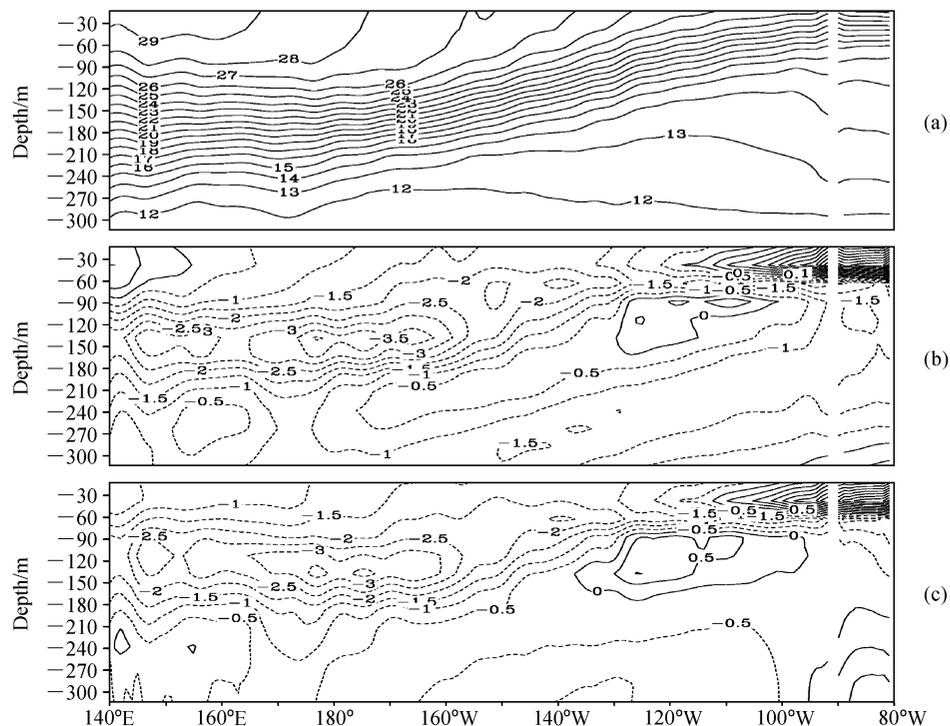


图2 (续)

Fig. 2 (Continued)

分辨率较低, 同化之前的 CTRL 试验并没有很好地模拟出黑潮地区的温度锋面, 模拟的温度梯度较小, 等温线比较松散, 且黑潮延续段的弯曲方向

偏向东南。而同化之后温度梯度加大, 等温线的分布更加密集, 并且其弯曲方向与 WOA1 更接近。由此可见, 同化了观测温度以后能够在很



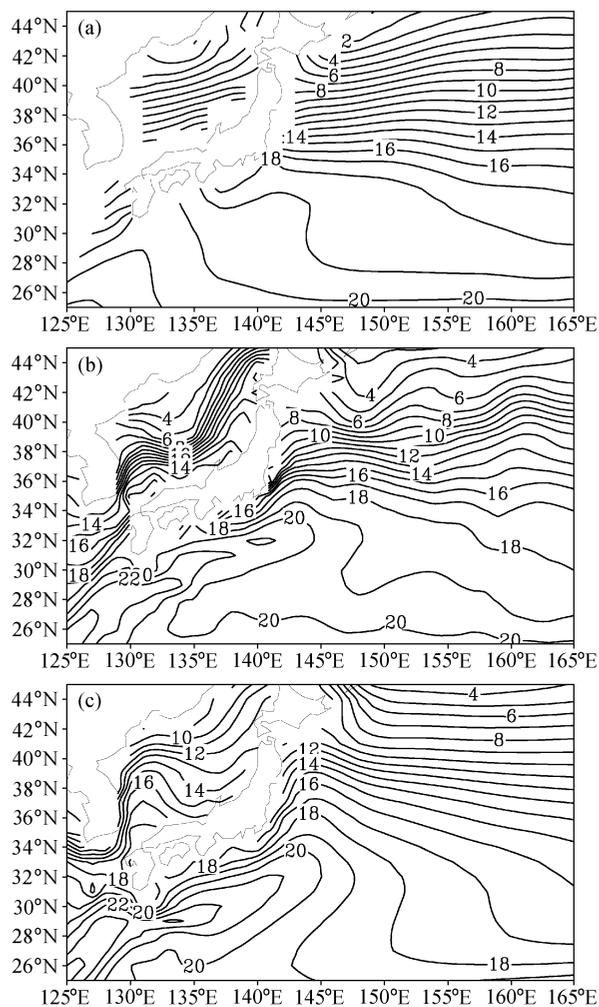


图4 黑潮区域 112.5 m 处的温度水平分布 (等值线间隔 1 °C): (a) WOA01; (b) ASSM; (c) CTRL

Fig. 4 The horizontal distributions of the temperature at 112.5 m in the Kuroshio area (contour interval is 1 °C): (a) WOA01; (b) ASSM; (c) CTRL

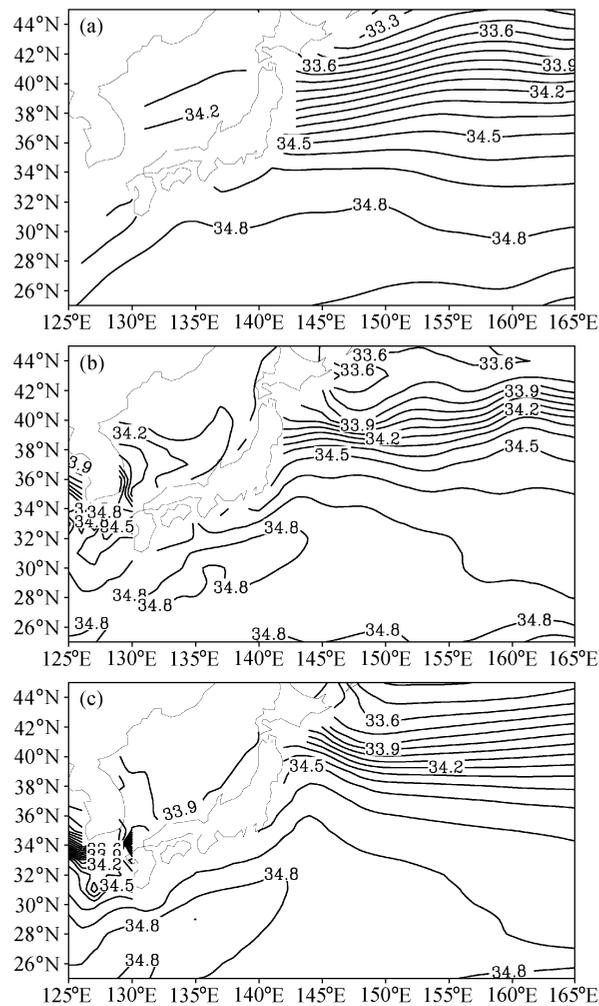


图5 黑潮区域 112.5 m 处盐度的水平分布 (等值线间隔 0.1 psu): (a) WOA01; (b) ASSM; (c) CTRL

Fig. 5 The horizontal distributions of the annual mean salinity at 112.5 m in the Kuroshio area (contour interval is 0.1 psu): (a) WOA01; (b) ASSM; (c) CTRL

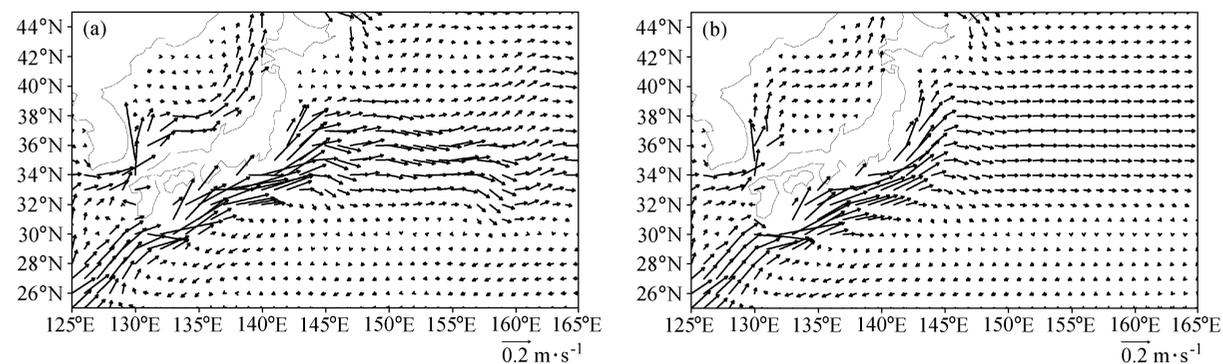


图6 黑潮区域 112.5 m 处流速的水平分布: (a) ASSM; (b) CTRL

Fig. 6 The horizontal distributions of the annual mean velocity at 112.5 m in the Kuroshio area: (a) ASSM; (b) CTRL

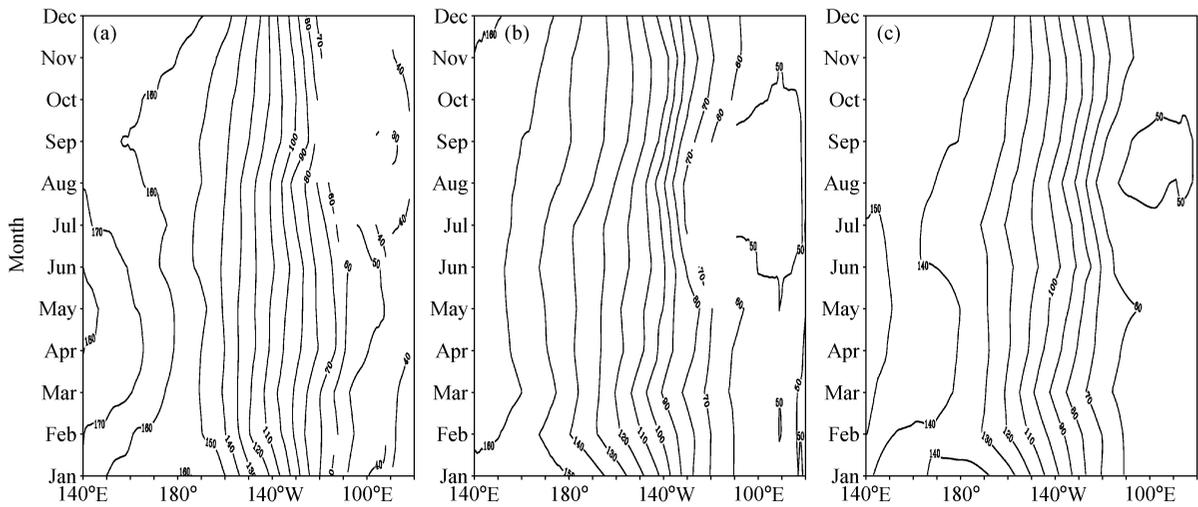


图7 赤道太平洋地区 20 °C 等温线深度的季节变化 (等值线间隔 10 m): (a) SODA; (b) ASSM; (c) CTRL
Fig. 7 The seasonal cycle of the 20 °C depth along the equatorial Pacific Ocean (contour interval is 10 m): (a) SODA; (b) ASSM; (c) CTRL

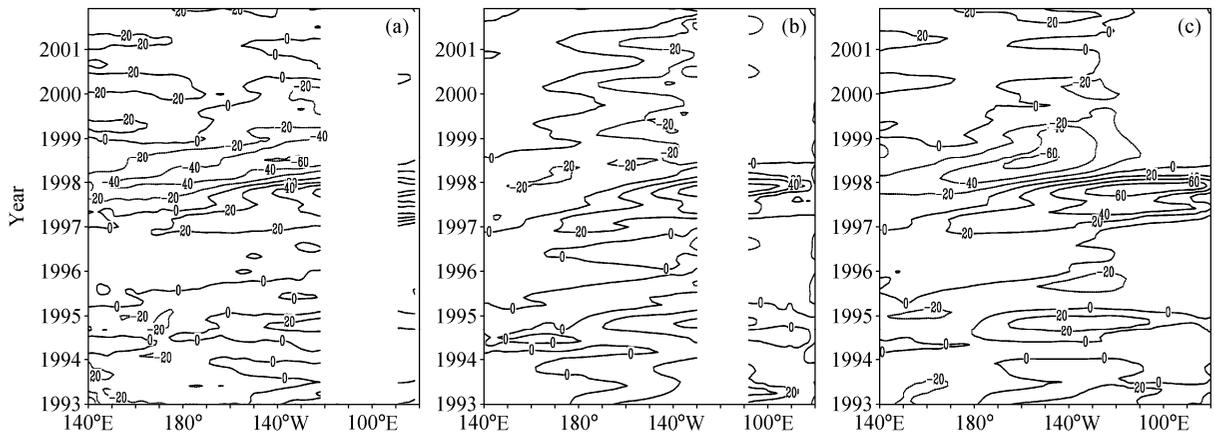


图8 同图7, 但为等温线深度异常的年际变化 (等值线间隔 20 m)
Fig. 8 Same as Fig. 7, but for interannual variability of the 20 °C depth anomaly along the equatorial Pacific Ocean (contour interval is 20 m)

下面两组试验分别对混合层深度 (MLD) 进行模拟。图9为沿赤道的MLD季节循环。同化后ASSM试验对MLD的模拟并没有比未同化的CTRL试验好。其原因可以从图1中看出, 表层的海面高度与海温相关系数比较小, 因此通过二者之间的相关关系得到的上混合层温度的误差就较大, 从而得到的MLD误差也较大。

图10为Niño 3区Niño指数随时间的演变情况, 可以看到, 与CTRL试验相比, 同化后对Niño指数的模拟并没有改善, 对于1997~1998年的El Niño现象, 两组试验模拟的强度都偏弱;

而对于其他年份, 同化后反而不如同化前的CTRL试验。可能的原因是由于没有考虑相关参数 F_T 的年际变化, 因此同化后对年际变率的模拟误差较大。

5 结论

本文采用统计的方法, 将观测的SSH投影到深层, 反演出“观测”的三维温度场, 然后利用LICOM-3DVM同化系统将此温度场进行了同化。从海面高度与海温的相关关系中可以看到, 上混

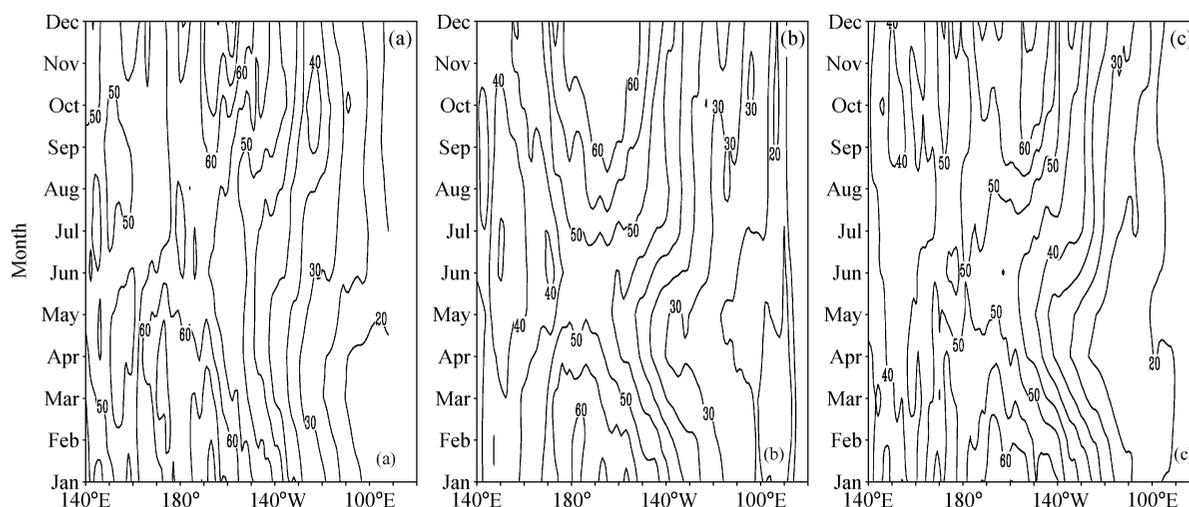


图9 同图7, 但为MLD(等值线间隔5 m)

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for mixed layer depth (contour interval is 5 m)

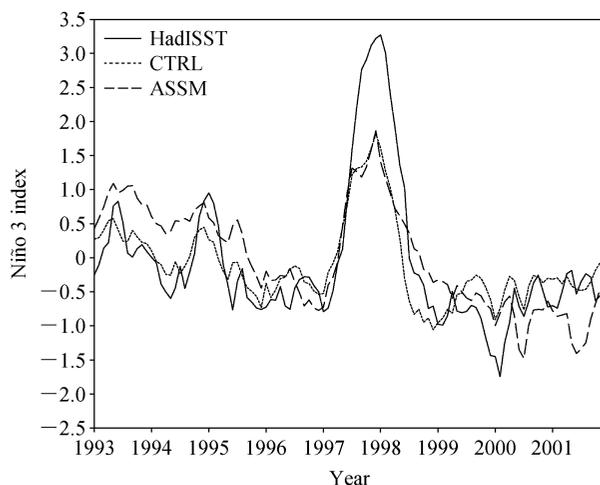


图10 Niño 3区 Niño 指数随时间的演变

Fig. 10 The time serial of Niño 3 index

合层相关系数较小, 因此同化后海温没有改进; 而在温跃层以及更深层次同化后的海温均有很大程度的改善。

对于赤道太平洋地区, 对比了海温的气候态, 季节变化和年际变化以及 Niño 3 区的 Niño 指数。由于在同化时将海面高度异常和温度场的相关参数 F_T 取为常数, 没有考虑其季节和年际变化, 因此, 同化之后对于赤道太平洋的年际变化没有改善。

对于湾流地区, 由于模式的分辨率较低, 同化之前没有很好地模拟出温度锋面, 温度和盐度梯度都偏小, 流速也偏弱。而同化后不仅使得温度锋面和盐度梯度与 WOA01 更加吻合, 流速增

强, 还模拟出了部分中尺度涡。虽然仅对温度场进行了同化, 但是盐度场和流速场也都得到了改善, 这是因为同化方法中含有模式的约束, 通过模式调整使得其他变量场得到了相应的调整。

本文的结果进一步验证了 3DVM 在海洋资料同化中的应用是成功的, 但仍存在不足之处, 即观测误差协方差矩阵和背景误差协方差矩阵在现阶段都取为对角阵。在下一步的工作中, 我们将尝试对利用高度计资料统计反演出的盐度资料进行同化, 并与本文的结果进行对比分析, 以便不断改进和完善对高度计资料的同化方案。

参考文献 (References)

- [1] Carton J A, Giese B S, Cao X, et al. Impact of altimeter, thermistor, and expendable bathythermograph data on retrospective analyses of the tropical Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101** (C6): 14147~14159
- [2] Weaver A T, Anderson D L T. Variational assimilation of altimeter data in a multilayer model of the tropical Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 1997, **27**: 664~682
- [3] Wenzel M, Schr ter J. Assimilation of TOPEX/Poseidon data in a global ocean model: Differences in 1995-1996. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, **27**: 1433~1437
- [4] Fischer M, Latif M, Flugel M, et al. The impact of data assimilation on ENSO simulations and predictions. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 819~829
- [5] Ji M, Reynolds R W, Behringer D W. Use of TOPEX/Po-

- seidon sea level data for ocean analyses and ENSO prediction: Some early results. *J. Climate*, 2000, **13**: 216~231
- [6] Vossepoel F C, Reynolds R W, Miller L. Use of sea level observations to estimate salinity variability in the tropical Pacific. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1999, **16**: 1401~1415
- [7] Vossepoel F C, Behringer D W. Impact of sea level assimilation on salinity variability in the western equatorial Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 2000, **30**: 1706~1721
- [8] Maes C, Behringer D. Using satellite-derived sea level and temperature profiles for determining the salinity variability: A new approach. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105** (C4): 8537~8547
- [9] Pinardi N, Rosati A, Pacanowski R. The sea surface pressure formulation of rigid lid models. Implications for altimetric data assimilation studies. *J. Mar. Syst.*, 1995, **6**: 109~119
- [10] Fisher M, Latif M. Assimilation of temperature and sea level observations into a primitive equation model of the tropical Pacific. *J. Mar. Syst.*, 1995, **6**: 31~46
- [11] Mellor G L, Ezer T. A Gulf Stream model and an altimetry assimilation scheme. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96** (C5): 8779~8795
- [12] Ezer T, Mellor G L. Continuous assimilation of Geosat altimeter data into a three-dimensional primitive equation Gulf Stream model. *J. Phys. Oceanogr.*, 1994, **24**: 832~847
- [13] Ezer T, Mellor G L. Data assimilation experiments in the Gulf Stream region: How useful are satellite-derived surface data for nowcasting the subsurface fields? *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1997, **14**: 1379~1391
- [14] Masina S, Pinardi N, Navarra A. A global ocean temperature and altimeter data assimilation system for studies of climate variability. *Climate Dyn.*, 2001, **17**: 687~700
- [15] Cooper M, Haines K. Altimetric assimilation with water property conservation. *J. Geophys. Res.*, 1996, **10** (C1): 1059~1077
- [16] Alves J O S, Haines K, Anderson D L T. Sea level assimilation experiments in the tropical Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 2001, **31**: 305~323
- [17] Yan C X, Zhu J, Li R F, et al. 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.*, 2004, **109**: 1~18
- [18] Carton J A, Chepurin G, Cao X. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950 - 95. Part I: Methodology. *J. Phys. Oceanogr.*, 2000, **30**: 294~309
- [19] 刘海龙, 俞永强, 李薇, 等. LASG/IAP 气候系统海洋模式 (LICOM1.0) 参考手册. 北京: 科学出版社, 2004
- Liu Hailong, Yu Yongqiang, Li Wei, et al. *Manual for LASG/IAP Climate System Ocean Model* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2004
- [20] 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. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16**: 197~215
- [21] Frank R. An atlas of surface fluxes based on the ECMWF re-analysis-a climatological dataset to force global ocean general circulation models. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie. 2001, Report No 323, 1~31
- [22] Levitus S, Boyer T P, Conkright M E, et al. NOAA Atlas NESDIS 18, World Ocean Database 1998: Volume 1: Introduction. Wash., D. C.: U. S. Gov. Printing Office. 1998, 346
- [23] Chelton D B. WOCE/NASA Altimeter Algorithm Workshop, U. S. WOCE Technical Report No. 2, 70 pp., U. S. Planning Office for WOCE, College Station, TX 1988
- [24] Conkright M E, Locarnini R A, Garcia H E, et al. World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation, National Oceanographic Data Center, Silver Spring, 2002, MD, 17
- [25] 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** (D14): 4407, doi: 10.1029/2002JD002670
- [26] Liu J, Wang B, Liu H L, et al. A new global four-dimensional variational ocean data assimilation system and its application. *Adv. Atmos. Sci.*, 2008, **25** (4): 680~691
- [27] Wang B, Zhao Y. A new approach to data assimilation. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, **20** (3): 275~282
- [28] 王斌, 赵颖. 一种新的资料同化方法. *气象学报*, 2005, **63**: 1~8
- Wang Bin, Zhao Ying. A new approach to data assimilation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63**: 1~8
- [29] Zhao Y, Wang B, Wang Y Q. Initialization and simulation of a landfalling typhoon using a variational bogus mapped data assimilation (BMDA). *Meteor. Atmos. Phys.*, 2007, **98** (3-4): 269~282
- [30] 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. Wea. Rev.*, 1998, **126**: 1013~1021
- [31] Rosati A, Gudgel R, Miyakoda K. Decadal analysis produced from an ocean data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**: 2206~2228