

张人禾, 朱江, 许建平, 等. 2013. Argo 大洋观测资料的同化及其在短期气候预测和海洋分析中的应用 [J]. 大气科学, 37 (2): 411–424, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12308. Zhang Renhe, Zhu Jiang, Xu Jianping, et al. 2013. Argo global ocean data assimilation and its applications in short-term climate prediction and oceanic analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 411–424.

# Argo 大洋观测资料的同化及其在短期气候预测和海洋分析中的应用

张人禾<sup>1</sup> 朱江<sup>2</sup> 许建平<sup>3</sup> 刘益民<sup>1</sup> 李清泉<sup>4</sup> 牛涛<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> 国家海洋局第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012

<sup>4</sup> 国家气候中心, 北京 100081

**摘 要** 国际 Argo (Array for Real-time Geostrophic Oceanography) 计划的实施, 提供了前所未有的全球深海大洋 0~2000 m 水深范围内的海水温度和盐度观测资料, 在大气和海洋科研业务中应用这一全新的资料, 是深入认识大气和海洋变异、提高我国气候预测、海洋监测分析和预报能力的一个关键所在。通过开发非线性温—盐协调同化方案和利用同化高度计资料来调整模式的温度和盐度场, 建立了可同化包括 Argo 等多种海洋观测资料的全球海洋资料变分同化系统, 提高了对全球海洋的监测分析能力。实现了海洋资料同化系统与全球海气耦合模式的耦合, 显著提高了短期气候预测水平。利用 Argo 资料改进了海洋动力模式中的物理过程参数化方案, 有效提高了海洋模式对真实大洋的模拟能力和对厄尔尼诺/拉尼娜的预测能力。开发了利用 Argo 浮标漂流轨迹推算全球海洋表层和中层流的方法, 提高了推算的全球表层流、中层流资料质量, 有效弥补了洋流观测的匮乏。

**关键词** Argo 大洋观测资料 资料同化 短期气候预测 海洋物理过程参数化 海流估算

**文章编号** 1006-9895(2013)02-0411-14

**中图分类号** P466

**文献标识码** A

**doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12308

## Argo Global Ocean Data Assimilation and Its Applications in Short-Term Climate Prediction and Oceanic Analysis

ZHANG Renhe<sup>1</sup>, ZHU Jiang<sup>2</sup>, XU Jianping<sup>3</sup>, LIU Yimin<sup>1</sup>, Li Qingquan<sup>4</sup>, and NIU Tao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Severe Weather (LaSW), Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

<sup>2</sup> International Center for Climate and Environment Sciences (ICCES), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

<sup>3</sup> State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics (SOED), the Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012

<sup>4</sup> National Climate Center, Beijing 100081

**Abstract** The implementation of the international Array for Real-time Geostrophic Oceanography (Argo) Project facilitates unprecedented global ocean observations of sea-water temperature and salinity from the sea surface to a depth of 2000 m. Application of these new oceanic data in atmospheric and oceanic research and operation is essential for understanding the atmospheric and oceanic variability and increasing the accuracy of climate prediction and oceanic monitoring and analysis. The global ocean data assimilation systems are set up by developing a nonlinear temperature–

**收稿日期** 2012-10-09, 2012-11-05 收修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB417404, 国家科技基础性工作专项 2012FY112300, 国家自然科学基金项目 41221064、41075064

**作者简介** 张人禾, 男, 1962 年出生, 研究员, 从事季风和气候动力学研究。E-mail: renhe@cma.cma.gov.cn

salinity coordinated assimilation scheme and adjusting the temperature and salinity on the basis of altimetry data, which enhances the monitoring and analyzing capability for the global ocean. The global ocean data assimilation systems are integrated with coupled atmosphere-ocean models, which increases the forecast skills for short-term climate prediction. Argo data are applied for improving physical parameterization schemes in oceanic models, and the model capability of describing the real oceans and forecasting El Niño/Southern Oscillation is increased. A novel method has been developed for estimating surface and mid-layer ocean currents on the basis of the trajectories of Argo float drifting, which improves the accuracy of estimation of global surface and mid-layer ocean currents and makes up the insufficiency in observed ocean currents.

**Keywords** Argo global ocean observations, Data assimilation, Short-term climate prediction, Physical ocean process parameterization, Ocean-current estimation

## 1 引言

近年来与全球气候变暖相伴随的极端气候事件频发,给国民经济和社会发展带来重大影响。海洋是气候系统中的一个重要成员,对气候异常的产生具有重要的作用。中国气候异常与海洋热状况的变异具有密切的联系,已有的研究表明,各大洋的海温异常均会对中国气候产生影响,如厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)(Huang and Wu, 1989; Zhang et al., 1999)、热带西太平洋暖池(Nitta, 1987; Huang and Sun, 1992)、热带印度洋(Li and Mu, 2001; Li et al., 2008; Hu et al., 2011)、大西洋(Lu et al., 2006; 容新尧等, 2010)。因此,深入了解全球海洋的变异特征,是认识中国气候变异的一个重要基础,对于中国的气候预测具有重要的作用。

海洋观测数据的匮乏,特别是大尺度、实时、深海观测资料的空缺,一直是制约大气和海洋科学发展的瓶颈。为了提高海洋的监测能力,从1998年起,国际上开始筹建Argo(Array for Real-time Geostrophic Oceanography)全球实时海洋观测网。该计划利用先进的自持式剖面自动循环探测技术,在全球海洋上形成一个由3000个以上卫星跟踪浮标组成的海洋观测阵列,即全球Argo实时海洋观测网,对0~2000 m水深内的海水温度和盐度实施长期、高分辨率和大范围的实时监测(许建平, 2002)。自Argo计划实施以来,到目前由布放在全球海洋中的8500多个Argo浮标,已观测到88万余条剖面资料,并以每年10万条剖面的速度持续增长。Argo大洋观测网是目前唯一能够立体观测全球大洋的实时观测系统,为研究大气和海洋提供了前所未有的深广视角。它的建立是海洋观测的一场划时代革命,填补了实时监测大洋物理海洋环境的空白。截至2012年10月1日,布放在全球海洋中仍处于工作状态的Argo剖面浮标已达3564个,图1给出了Argo浮标目前在全球大洋中的分布状况。

中国对Argo计划的参与始于黄荣辉院士主持的“国家重点基础研究发展规划项目”(973项目)“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”(1998~2003)。该项目于2000年5月派出了以巢纪平院士为代表团团长的“ENSO监测、预测考察团”,访问了美国国家海洋大气局(NOAA)、Woods Hole海洋研究所、太平洋海洋环境实验室(PMEL)以及Scripps海洋研究所等,对Argo浮标技术、资料质量控制方法以及浮标布放、Argo大洋观测网建立等相关情况进行了深入细致的学习考察。经我国海洋和大气等科学领域的专家学者的积极推动和共同努力,我国于2001年10月经国务院批准加入国际Argo计划,计划在西太平洋和东印度洋布放100~150个Argo剖面浮标,构成我国的Argo大洋观测网,并参与全球Argo实时海洋观测网建设(许建平, 2006; 许建平和刘增宏, 2007)。2002年,中国在印度洋海域投放了第一个Argo剖面浮标,并被正式接纳为国际Argo计划成员国。到目前为止,中国已累计投放了140多个Argo剖面浮标,建成了中国Argo大洋观测网,建立了Argo剖面浮标检测规程、资料实时接收程序、资料处理和资料质量控制方法等,能快速接收和处理由我国Argo计划布放的全部浮标观测资料,并能按国际Argo计划的要求对观测资料实施质量控制,确保了测量数据的准确和可靠(许建平, 2006, 2010; 刘增宏等, 2006; 许建平和刘增宏, 2007)。同时,还能及时将全球海洋中的Argo资料提供给广大用户免费共享,使得我国海洋和大气等领域的科研和业务部门能与国际同步获取广阔海洋上的丰富数据源,并展开相关前沿研究和业务应用。我国已成为世界上9个(美国、英国、法国、日本、韩国、印度、澳大利亚、加拿大和中国)有能力向全球Argo资料中心实时上传Argo资料的国家之一。图2给出了中国Argo大洋观测网从浮标布放、资料接收、质量控制、到提供给用户的结构图。中国加入国际Argo计划,

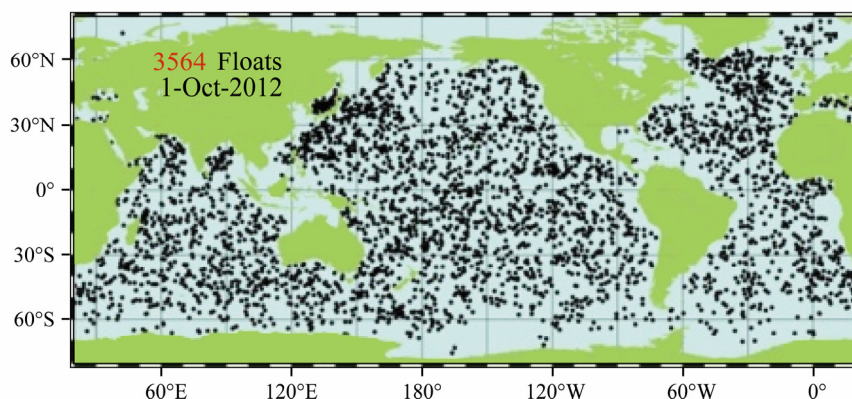


图1 全球海洋中目前处于工作状态的 3564 个 Argo 剖面浮标分布 (截至 2012 年 10 月 1 日, 引自 <http://www.argo.net/> [2012-10-03])

Fig. 1 Distribution of 3564 active Argo profiling floats in global oceans (up to October 1, 2012; from <http://www.argo.net/> [2012-10-03])

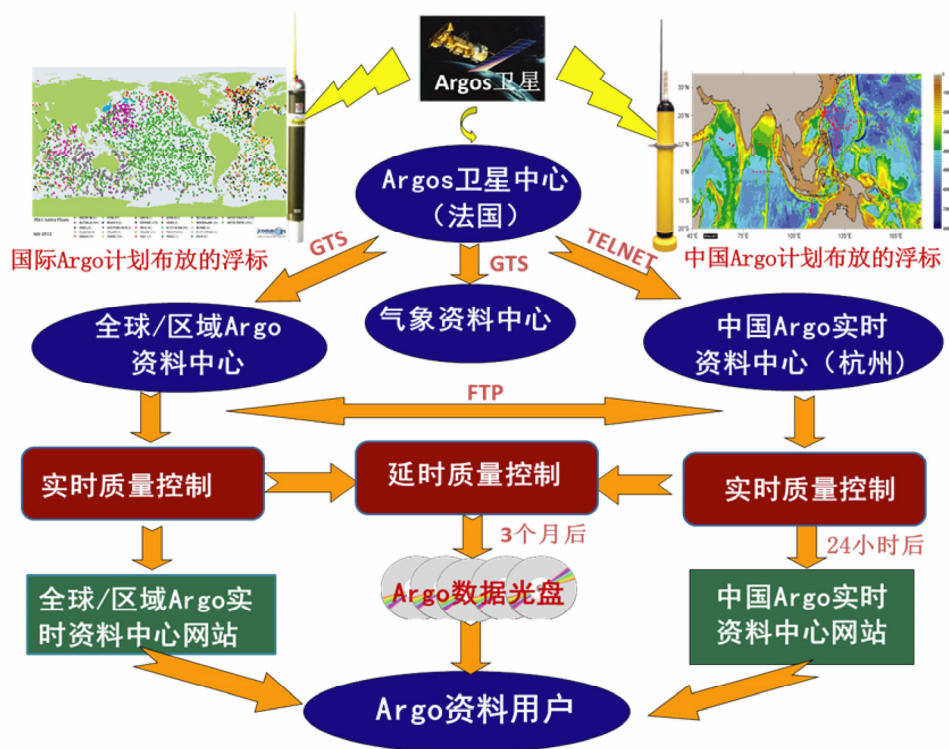


图2 中国 Argo 大洋观测网从浮标布放、资料接收、质量控制到提供给用户的结构图

Fig. 2 A schematic diagram of float deploying, data receiving, quality control, and user providing in Chinese Argo observing network

为我国科学家了解和掌握 Argo 剖面浮标的性能和特点, 以及利用这些全新的观测资料开展海洋和大气科学研究提供了基础条件。

国际 Argo 计划及其全球实时海洋观测网的成功实施, 取得了过去利用常规观测仪器设备测量而无法得到的全球海洋信息, 极大地提高了对海洋的监测水平 (许建平, 2008; 刘仁清和许建平, 2009)。由于海洋在气候变异中的重要作用, 在气象和海洋科研业务中应用这一全新的资料, 是深入认识气候变异、提高我国气候预测、海洋监测分析

和预报能力的一个关键所在。利用 Argo 大洋观测资料, 开展海洋资料同化、海洋模式改进的研究, 并应用于海洋分析和气候预测研究, 是提高我国短期气候预测业务水平以及海洋监测分析业务能力的重要研究内容。本文针对这些问题, 对我国开展的 Argo 资料质量控制、利用 Argo 资料开展的有关海洋资料同化、短期气候预测、海洋模式改进、海洋表层流、温盐变化特征、厄尔尼诺/拉尼娜等 (El Niño/La Niña) 方面的研究进行了综述。这些研究实现了我国对 Argo 大洋监测资料的充分应用, 研

究成果也成功应用到国家级业务中心,有效地提高了我国气候预测、海洋监测分析和预报能力。

## 2 Argo 资料质量控制

Argo 剖面浮标自由漂移的特点决定了其一旦被投放就难以回收,即无法对传感器进行实验室标定。而浮标上装载的温盐深仪(CTD)传感器,尤其是电导率传感器容易受到海洋生物污染、生物杀伤剂泄漏等因素的影响,导致传感器产生漂移,会使观测值产生较大的偏差(Freeland, 1997; Oka and Ando, 2004)。国际 Argo 计划预期的剖面浮标观测精度为压力(深度) $\pm 5$  dbar, 温度 $\pm 0.005^{\circ}\text{C}$  和盐度 $\pm 0.01$  (Argo Science Team, 2000)。温度和压力传感器的测量精度目标在 Argo 计划实施前就已经能实现,但盐度观测资料的精度正面临挑战。利用传统船载 CTD 仪进行测量时,可以通过采水样来对盐度观测值进行实验室校正,而 Argo 剖面浮标无法获得这种“真实”的盐度资料。Oka (2005) 利用 JAMSTEC (日本海洋科技中心) 回收的 3 个 Argo 浮标,对传感器进行了实验室后校正,但这样的回收由于费用极其昂贵而无法推广(Oka et al., 2002)。Wong et al. (2003) 利用历史水文观测资料,开发了一种校正 Argo 浮标盐度资料的技术(称 WJO 方法),并被国际 Argo 资料管理组确定为 Argo 延时模式质量控制的标准方法(Argo Data Management Team, 2002); Böhme (2003) 则在 WJO 方法的基础上,对历史资料的选取方法进行了改进,并考虑了正压行星涡度,在北大西洋亚极地海区取得了较好的校正结果。然而, WJO 方法十分依赖于历史水文观测资料的数量和质量,在一些历史观测资料稀少的海区(如南大洋)将无法取得理想的校正结果,而历史资料质量的高低或观测时间的长短等因素,都有可能影响校正的效果,甚至可能会把真实的水团性质变化误认为传感器的漂移,对 Argo 资料的质量控制始终不尽如人意(Kobayashi and Shinya, 2005)。

中国 Argo 实时资料中心在国际上率先提出了利用误差消除法对浮标盐度观测资料进行校正(童明荣等, 2003; 许建平和刘增宏, 2007), 即采用在浮标活动海域的船载 CTD 仪观测或者采用布放新浮标的办法来校正老浮标观测的资料。该方法主要以现场 CTD 资料或假设浮标的第一条观测剖面没有偏差为前提, 尽管具有一定的局限性, 但对历

史观测资料稀少或缺乏的海区, 无疑是一种简便而有效的方法。刘增宏等(2010) 进一步引入位势电导比的概念, 利用浮标附近的现场、历史 CTD 资料, 以及邻近浮标的观测资料来检验浮标电导率传感器的漂移, 尽可能降低对浮标长期观测资料的误判, 并利用现场 CTD 资料对出现漂移误差的盐度资料进行校正。他们利用该方法对一个在海上观测长达 4 年的 5900019 号浮标的电导率传感器性能进行了检验, 并通过与邻近浮标、CTD 仪观测资料及历史水文观测资料的比较, 较好地分辨出了 5900019 号浮标电导率传感器产生的漂移故障, 并利用浮标附近的现场 CTD 资料及误差消除法对该浮标的盐度观测资料进行了校正, 并取得了较好的校正效果(刘增宏等, 2010)。

在进行资料同化时, 针对 Argo 观测资料, 从资料的绝对大小和梯度两个方面对 Argo 资料也进行了初步质量控制(张人禾等, 2004)。剔除了 Argo 观测资料值中温度高于  $35^{\circ}\text{C}$  和小于  $-5^{\circ}\text{C}$  明显不合理的剖面资料; 同时要求与历史观测资料 Levitus94 (Levitus et al., 1994) 在相应格点的差的绝对值, 不能大于随深度的增加而减少的判据(从  $8^{\circ}\text{C}$  到  $4^{\circ}\text{C}$ ); 另外, 剔除了梯度超过历史观测资料 (Levitus94) 在相应格点梯度的 2.5 倍的剖面。

## 3 可同化包括 Argo 等多种海洋观测资料的全球海洋变分同化系统

国家气候中心全球海洋资料四维变分同化系统(NCC-GODAS) (刘益民等, 2005) 是在“太平洋和印度洋资料同化系统”(PIODAS) (刘益民等, 2000) 的基础上建立的。NCC-GODAS 包含观测资料预处理系统、插值分析系统和所应用的动力模式。插值分析系统采用四维同化技术方案, 在时间上设置一个 4 周的窗口, 将此窗口之内的观测资料以一定的权重插入插值分析系统, 在空间上采用三维变分方案。在未与大气模式耦合前, NCC-GODAS 还附带一个海表风应力计算子系统, 该系统是基于最优插值(OI) 分析的观测海表大气风场和海洋模式流场。NCC-GODAS 同化的观测资料包括海表气温、海表气压、海表大气风场和抛弃式深水温度计(XBT) 的海温垂直廓线的报文、船舶 XBT 观测资料、热带太平洋大气海洋观测阵列(TOGA/TAO) 和日本浮标的观测资料(MOORING)。随着国际 Argo 计划的实施, Argo 的全球温盐观测资料也被

引入了 NCC-GODAS (张人禾等, 2004; Liu et al., 2005)。通过考虑将温盐之间的弱相关性引入其垂直相关, NCC-GODAS 可以同时同化温盐资料。

图 3 和图 4 分别给出了 NCC-GODAS 全球海洋资料同化系统中包含和不包含 Argo 资料时, 与 OISST-V2 海洋表面温度 (Reynolds et al., 2002) 之间的均方根误差 (rmse) 的全球分布情况。从 rmse 的全球经圈平均 (图 3) 来看, 除了  $0^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{E}$  的区域外, 同化 Argo 资料后的 rmse 明显减小, 表明在 NCC-GODAS 中同化 Argo 资料, 使得海洋表面温度与 OISST-V2 之间的差异明显变小, 更接近于 OISST-V2 的分析场。对于 rmse 的全球纬圈平均 (图 4), 除了南半球热带外区域和北半球大约  $80^{\circ}\text{N}$  以

北的区域外, 包含 Argo 资料后同化的海洋表面温度有明显的改善。事实上, 在同化时段内, 南半球热带外以及北极极区附近的 Argo 浮标很少, 导致了同化效果不明显。另外, 图 3 中  $0^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{E}$  的范围主要位于南大洋的中高纬度区域, 这与图 4 中给出的结果是一致的。

建立了基于三维变分方法的通用海洋资料同化系统 OVALS (Ocean Variational Analysis System) (朱江等, 2007)。该系统利用了不同海洋观测系统的实时观测数据, 是目前国内能够同时同化地基和空基海洋观测资料种类最多的同化系统。此系统是一个具有广泛适应性的实用、先进的海洋资料同化系统, 能够同化 Argo 浮标、TAO 浮标、XBT, 船

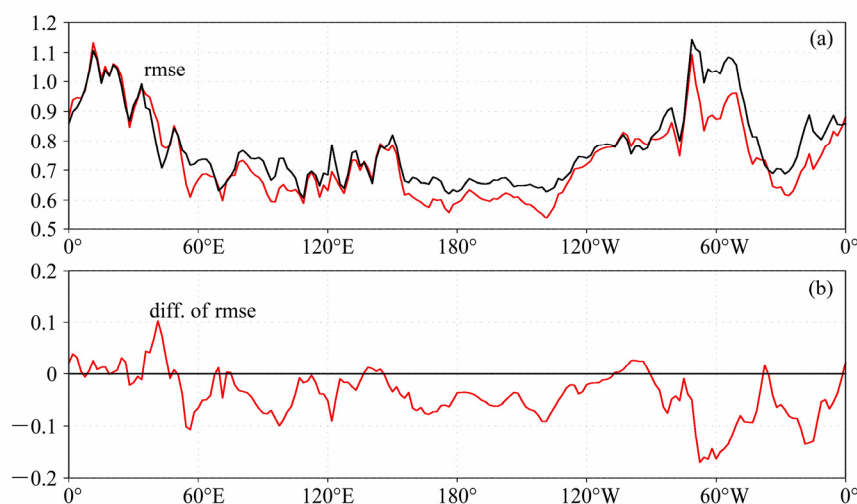


图 3 NCC-GODAS 全球海洋资料同化系统中, 全球海面温度与 OISST-V2 之间的均方根误差 (rmse) 的经圈平均 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ): (a) 中红线和黑线分别为同化和不同化 Argo 资料的结果, (b) 为二者之差。同化时段为 2001 年 1 月至 2003 年 8 月。(引自 Liu et al., 2005)

Fig. 3 Root-mean-square error (rmse) of SST between OISST-V 2 and NCC-GODAS (time from January 2001 to August 2003, averaged in meridional direction). (a) Red line is NCC-GODAS with Argo and the black without Argo. (b) The difference between NCC-GODAS with Argo and NCC-GODAS without Argo. (From Liu et al., 2005)

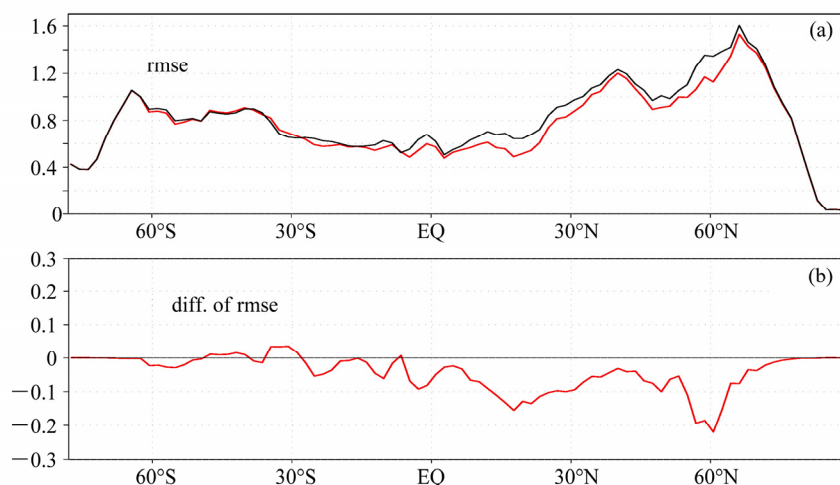


图 4 同图 3, 但为全球海面温度均方根误差 (rmse) 的纬圈平均。(引自 Liu et al., 2005)

Fig. 4 Same as Fig. 3 but averaged in zonal direction. (From Liu et al., 2005)



舶报和高度计海面高度异常资料。而能够同化这些资料是目前国际上衡量一个海洋资料同化系统是否完整的主要标志。在 OVALS 同化系统中, 采用了温盐协调同化方案。盐度调整方案不仅考虑了平均温盐关系, 也考虑了温盐关系的方差 (Han et al., 2004); 在海面高度计资料同化中同时考虑了温盐背景误差和非线性温盐关系的垂直相关, 通过同化高度计资料来直接调整模式的温度和盐度场 (Yan et al., 2004)。图 5 给出了这种温盐协调同化方案对盐度的影响, 可以看出在海洋表层的 10 m 深处, 温盐协调同化方案的效果不明显; 但在 50 m 和 100 m 深处, 不经调整时盐度几乎不变, 与实际观测不符, 引入协调同化方案之后, 盐度与实际观测有很好的符合。

与国际上变分同化系统相比, 美国 NCEP 的同化系统 (Behringer, 2006) 是通过温盐关系由温度观测获得相应的盐度, 但这种方法在无温度观测的区域, 盐度也无法得到修正。高度计观测几乎覆盖全球, 通过非线性温盐关系, 可以从海面高度信息中获取次表层的温盐信息, 这在一定程度上弥补了盐度观测稀少或缺乏造成的无法修正盐度场的问题。Usui et al. (2006) 和 Kamachi et al. (2008)

的同化系统使用了温盐垂直 EOF 模态, EOF 模态是通过大量的观测资料分析得到的, 工作量非常大, 且没有观测的区域误差较大, 非线性温—盐关系的引入克服了这一问题, 使该同化系统不依赖于观测的数量, 既能够同化现场观测也能同化遥感资料, 无论是近海还是大洋都有广泛的适用性。OVALS 同化系统在太平洋的同化结果与独立观测的比较表明 (Xie and Zhu, 2010), 总体上温度的误差不超过  $1.5^{\circ}\text{C}$ , 盐度不超过 0.2 psu。国外最新的澳大利亚 BLUELINK 同化系统 (Oke et al., 2008) 的结果在太平洋与独立观测的比较, 其温度同化结果均方根误差最大值也在 1.5 度左右, 而其盐度结果均方根误差的最大值在 0.2~0.3 psu, 即其盐度同化结果稍逊于本系统的盐度同化结果。

## 4 短期气候预测

利用国家气候中心全球海气耦合模式 (NCC-CGCM) (李清泉等, 2004), 实现了 NCC-GODAS 海洋资料同化系统与全球海气耦合模式的耦合 (张人禾等, 2006)。多年 (1998~2003 年) 夏季平均的模式回报中国降水距平百分率与观测值的相关系数分布如图 6 所示。多年回报试验结果表明, 当

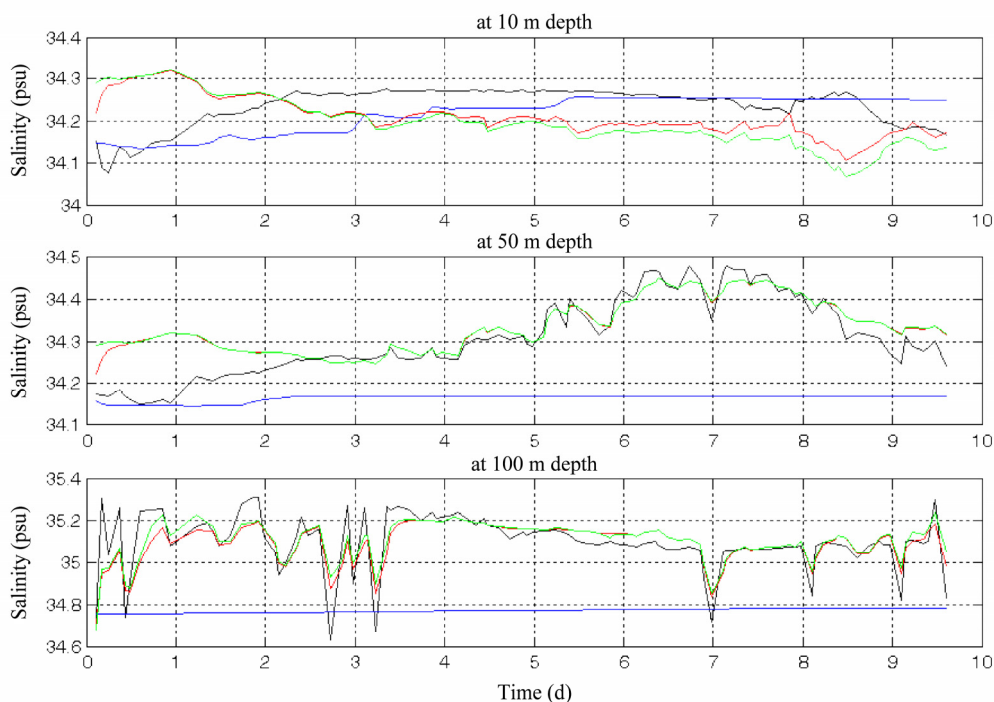


图 5 温盐协调同化方案对盐度的影响 (单位: psu)。黑线为盐度观测值, 蓝线为不调整时的值, 绿线和红线分别为利用不同方案调整后的盐度。上、中、下图分别为深度 10 m、50 m、100 m, 横坐标为时间 (单位: d)。(引自 Han et al., 2004)

Fig. 5 Effects of the temperature-salinity coordinated assimilation scheme on salinity (unit: psu). Black and blue lines are observations and assimilated salinity without using the coordinated assimilation scheme, respectively. Green and red lines are those using different coordinated assimilation schemes. Upper, middle, and lower panels are for the depth of 10 m, 50 m, and 100 m, respectively. The unit for the abscissa is d. (From Han et al., 2004)

初始场中不包含 Argo 资料时(图 6a), 回报的夏季中国降水与观测值之间的正相关区域(图中填色区)主要出现在我国东部黄河下游以北和 115°E 以东的黄河和长江下游之间、长江中游以南和以北地区以及西北偏西部等区域。当初始场中包含 Argo 资料时(图 6b), 回报的夏季中国降水与观测值之间的正相关区域明显扩大, 除了初始场中不包含 Argo 资料时的正相关区域外, 在长江以南、黄河下游和淮河流域以及西北的大范围地区出现了正相关区域, 原来在华北、黄淮、江淮、长江以南地区以及新疆东部的负相关区大部分都变为正相关。采

用 Argo 资料后除了长江中下游附近的显著正相关区域明显变大外, 在西北和华东地区也出现了显著正相关区域。实际计算表明, 模式回报的降水距平与观测降水距平的相关为正的格点数占到了总格点数的 51.88%, 比未采用 Argo 资料时的正相关格点数(42.50%)增加了 9.38%。

图 7 给出了以 NCC-GODAS 海洋同化资料为初始场, NCC-CGCM 全球海—气耦合模式自每年 4 月起报, 预报的热带太平洋厄尔尼诺/拉尼娜关键海区 Nino3.4 (5°S~5°N, 120°W~170°W) 的海面温度距平与实况的比较。自 2005 年起采用同化了

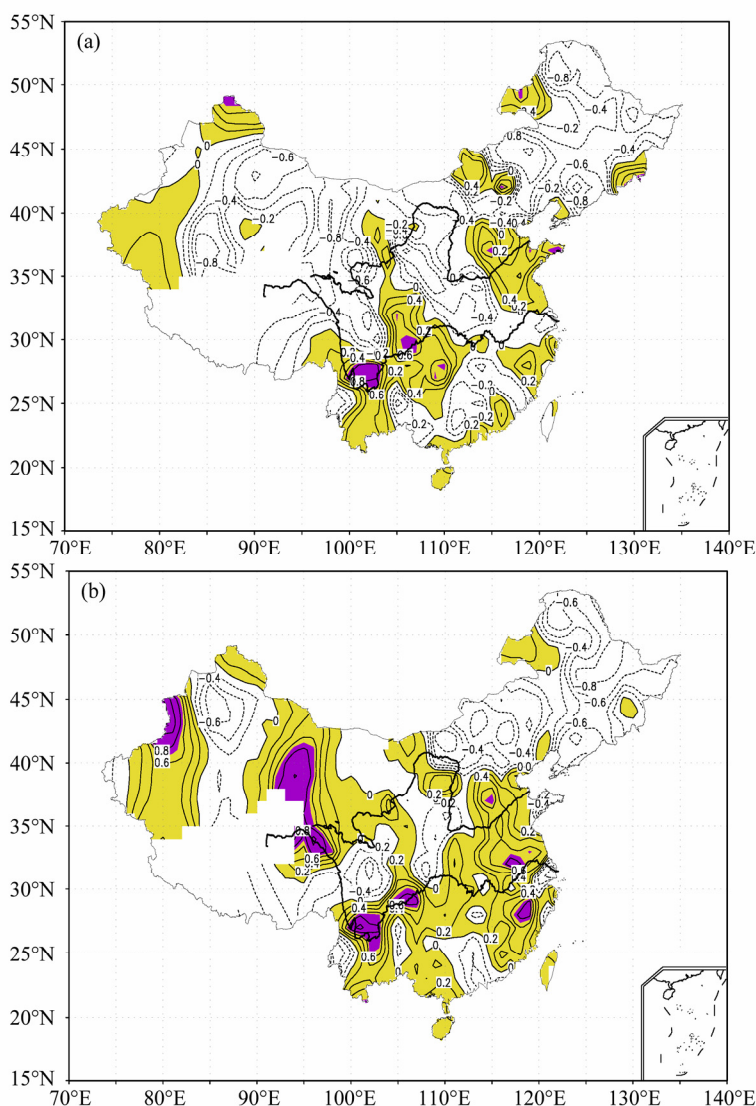


图 6 利用 NCC 全球海气耦合模式对 1998~2003 年回报与观测的中国夏季(6~8 月)降水距平百分率相关系数分布:(a) 不包含 Argo 观测资料的同化资料作为初始场;(b) 包含 Argo 观测资料的同化资料作为初始场。实线和虚线分别为正相关和负相关, 黄色阴影区为正相关区域, 紫色区域为显著正相关区域。(引自张人禾等, 2006)

Fig. 6 Correlation coefficients of the summer rainfall anomalies in 1998–2003 between observations and hindcasts of the coupled global climate model of National Climate Center (NCC-CGCM) (a) without and (b) with Argo data being assimilated. Real and dotted lines represent positive and negative correlations, respectively. Yellow and purple colored areas are positive correlation ones without and with statistical significance, respectively. (From Zhang et al., 2006)

Argo 资料的 NCC-GODAS 后, NCC-CGCM 预报系统预报的热带太平洋 Nino3.4 区海面温度距平与观测值的相关系数达到 0.5 左右。利用一个热带太平洋—全球大气海气耦合模式(周广庆等, 1998), 进行了 Argo 资料对 ENSO 预测改进效果的试验。图 8 给出了该海气耦合模式在海洋资料同化系统中同化和不同化 Argo 资料对 Nino3 区( $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$ )海温异常回报结果的影响。可看出同化 Argo 资料后, 回报效果得到明显的改进。从 1 个月到 8 个月的回报结果来看, 观测和回报的 Nino3 区海温异常之间的平均相关系数提高了 0.1 以上。

对于取相关系数超过 0.6 的预报技巧, 在不同化 Argo 资料时, 只有 5 个月左右; 同化 Argo 资料后, 预报技巧明显提高, 超过了 8 个月。

## 5 海洋动力模式物理过程参数化方案的改进

在 NCC-GODAS 全球海洋同化系统中, 海洋动力模式为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(LASG)的 L30T63 OGCM1.0 模式(金向泽等, 2000)。该模式采用了两种垂直混合参数化方案, 在  $30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$

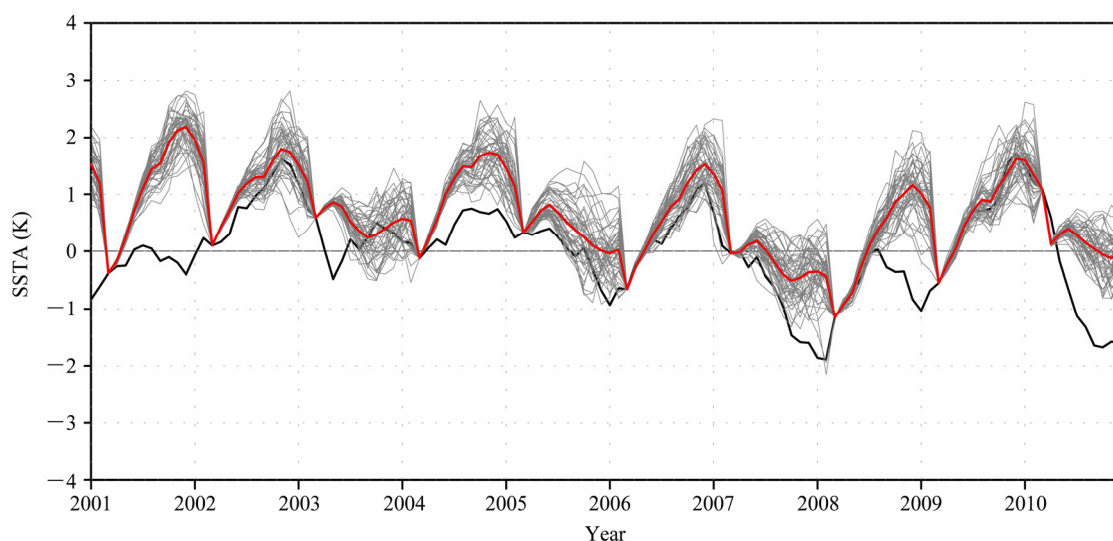


图 7 全球海气耦合模式 NCC-CGCM 自每年 4 月起报的热带太平洋 Nino3.4 区( $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $120^{\circ}\text{W}\sim 170^{\circ}\text{W}$ )海面温度距平(红线)与实况(粗黑线)  
Fig. 7 Forecasts of the sea surface temperature anomalies (SSTAs) in Niño3.4 region ( $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $120^{\circ}\text{W}\sim 170^{\circ}\text{W}$ ) in the tropical Pacific from April by NCC-CGCM (red line) and observations (thick black line)

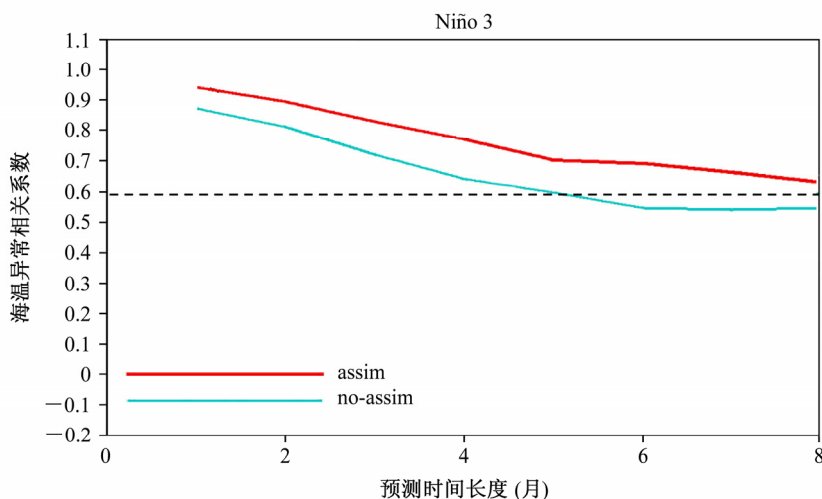


图 8 中国科学院大气物理研究所海气耦合模式 ENSO 预测系统(IAP-NCP)对热带太平洋 Nino3 区( $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$ )海面温度距平的预报技巧(基于 12 年回报试验)。红线和蓝线分别为同化和不同化 Argo 资料的结果

Fig. 8 Forecast skill for SSTAs in the Niño3 region ( $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$ ) in the tropical Pacific based on the 12-year hindcasts of the ENSO prediction system of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP-NCP). Red and blue lines stand for the results with and without Argo data being assimilated, respectively



采用了基于 Richardson 数的参数化方案,而在其他区域采用了等密度混合方案。由于采用不同的垂直混合参数化方案,夏季海面温度在过渡带上出现了与观测不符的不连续现象 (Liu et al., 2005)。利用海水状态方程以及 Argo 浮标的观测结果,考虑到等密度混合方案中的稳定度临界值依赖于密度梯度,在过渡带上将其重新定义为空间的函数而不是一个常数 (Liu et al., 2005)。模式结果表明,利用 Argo 观测资料对垂直混合参数化方案的修正,改进了过渡带区域夏季海面温度的模拟结果,与观测有更好的一致性。在 NCC-GODAS 全球海洋同化系统中,采用了改进后的 L30T63 OGCM1.0 海洋动力模式。

Zebiak-Cane 海洋模式 (Zebiak and Cane, 1987) 是在科研和 ENSO 预测业务中广泛应用的一个中间复杂程度的海洋模式,模式中次表层温度距平和海洋混合层深度的关系由经验关系给出,与观测资料的比较表明,此经验关系对赤道中东太平洋有较好的描述,而在赤道西太平洋与观测值之间存在着较大差异 (张人禾等, 2004)。根据 Argo 观测资料,对 Zebiak-Cane 海洋模式中次表层温度距平和海洋混合层深度的参数化方案进行了改进。图 9 给出了按原方案和改进后的新方案计算的热带西太平洋次表层温度距平和海洋混合层深度的关系与实况的对比,由图可看出,观测到的实况表明随着温跃层距平的增加,次表层温度距平也随之增大;原参数化方案并没有显示出这种特征,随着温跃层距平的增加次表层温度距平几乎没有变化;改进后的参数化方案则显示了与观测到的实况具有一致的变化特征。由于原方案在热带西太平洋不能反映出实际观测到的次表层温度距平随混合层深度的变化关系,使得 Zebiak-Cane 海洋模式对热带西太平洋海温的模拟与观测之间存在着较大的差异,而改进后的新方案显著提高了模式对热带西太平洋海温变异的模拟能力,模拟结果与观测之间有了较好的一致性 (张人禾等, 2004)。

对 Zebiak-Cane 海洋模式中次表层温度距平和海洋混合层深度参数化方案的改进,提高了该模式对热带西太平洋海温变异的模拟能力,改进了 Zebiak-Cane 海洋模式对 ENSO 的预测能力。将改进后的方案应用于 Zebiak-Cane 海洋模式,并将其与一个简单地考虑了海温和风应力关系的统计大气模式耦合;将此动力海洋—统计大气热带海气耦

合模式进行了 24 年 (1981~2005 年) 的长期积分,开展了 ENSO 的回报试验 (张人禾等, 2006)。图 10 给出了分别利用改进后和原次表层温度距平和海洋混合层深度参数化方案、由动力海洋—统计大气热带海气耦合模式提前 6 个月回报的热带太平洋海面温度与观测之间的相关系数分布,可看出新参数化方案的预报技巧显著高于原参数化方案。对于采用原参数化的回报结果 (图 10 右图),相关系数大于 0.6 的区域只出现在美洲沿岸  $5^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{N}$  之间的小范围区域内,而在采用新方案的回报结果 (图 10 右图) 中,相关系数大于 0.6 的区域向西延伸到大约  $170^{\circ}\text{E}$  并几乎覆盖了  $10^{\circ}\text{S}$  到  $10^{\circ}\text{N}$  之间的区域,在整个热带太平洋区域回报与观测的海面温度之间的相关系数明显提高,特别是在原模式几乎没有预测能力的热带西太平洋区域,预测能力得到明显的改善。模式回报结果显示与观测一致的年际变化特征,并且年际变化的振幅也与观测非常一致,基本上回报出了赤道太平洋区域海面温度异常的演变特征,对厄尔尼诺和拉尼娜都能够给出较准确的回报 (张人禾等, 2006)。

海洋模式对热带西太平洋海温模拟的改善,显著提高了模式对 ENSO 的预报技巧,其原因主要在于热带西太平洋的海洋和大气异常与 ENSO 循环有重要的内在联系。已有研究表明,与发生在中东太平洋的厄尔尼诺和拉尼娜事件相联系的大气异常风场,首先在热带西太平洋区域出现,当热带西太平洋对流层低层出现西风异常时,赤道东太平洋海面温度开始升高,出现东风异常时赤道东太平洋海面温度从最高点开始下降 (张人禾和黄荣辉, 1998; 严邦良等, 2001; 黄荣辉等, 2001)。对于与厄尔尼诺事件相联系的热带太平洋次表层海温正异常,也是首先出现在热带西太平洋,随后向东传播,次表层海温正异常到达赤道东太平洋后发生厄尔尼诺事件 (李崇银和穆明权, 1999; 巢清尘和巢纪平, 2001)。因此,海洋模式对热带西太平洋海温的成功模拟,必然会提高海气耦合模式对 ENSO 的预报技巧。另外,海洋模式对西太平洋海温的合理描述,也是利用海气耦合模式研究热带海洋对中国以及东亚气候的影响、预测中国气候变异的一个重要基础。这是因为热带西太平洋的热状况对中国以及东亚气候有重要的影响 (Nitta, 1987; Huang and Sun, 1992); 厄尔尼诺对中国以及东亚气候的影响,也是通过与厄尔尼诺相联系的热带西太平洋上空的

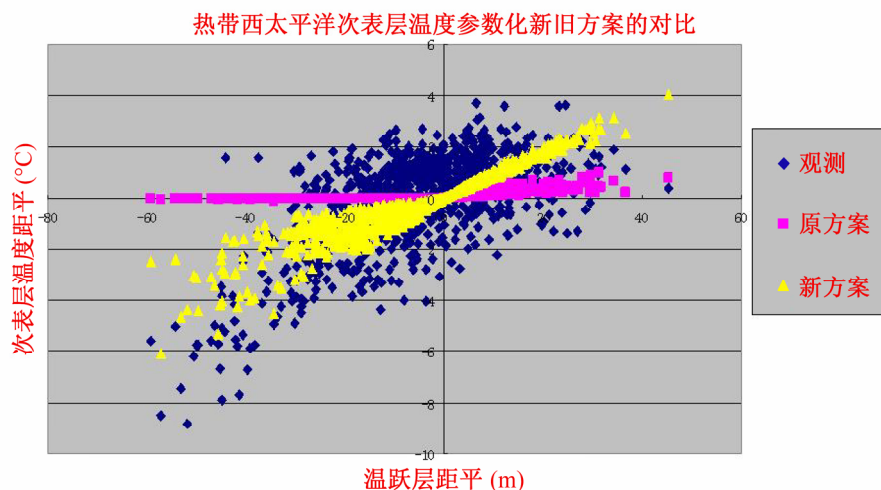


图9 由 Zebiak-Cane 海洋模式中的次表层温度距平和海洋混合层深度参数化方案, 计算得到的热带西太平洋次表层温度距平与海洋混合层深度的关系及其与实况的对比。深蓝色为实况, 粉红色和黄色分别为原参数化方案和利用 Argo 资料改进后方案的计算结果。

Fig. 9 Comparison of observed relationship between subsurface temperature anomaly and mixed-layer depth in the tropical western Pacific with that calculated by the parameterization scheme in Zebiak-Cane oceanic model. Blue color stands for observations. Pink and yellow colors represent original parameterization scheme and improved one by Argo data, respectively

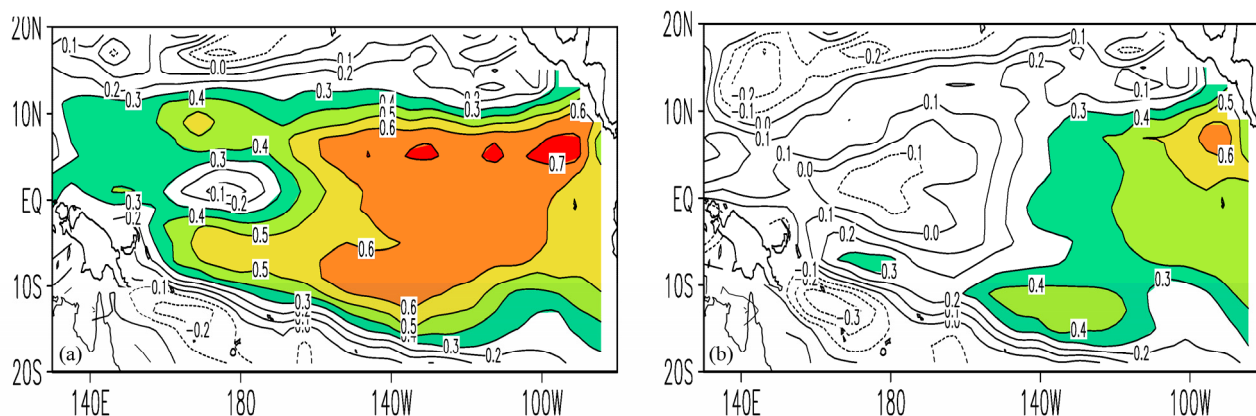


图10 由动力海洋—统计大气热带海气耦合模式提前6个月回报的热带太平洋海面温度与观测之间的相关系数分布。(a)和(b)为分别采用改进后和原 Zebiak-Cane 海洋模式中次表层温度距平和海洋混合层深度参数化方案的结果。(引自张人禾等, 2006)

Fig. 10 Correlation coefficients of SSTAs in the tropical Pacific between observations and hindcasts with a dynamical ocean–statistical atmospheric coupled model by leading 6 months. Left and right panels are results with original parameterization scheme of subsurface temperature anomaly and mixed-layer depth in Zebiak-Cane oceanic model and improved one by Argo data, respectively. (From Zhang et al., 2006)

对流异常, 导致热带西太平洋上空的大气热源变化, 激发出的大气 Rossby 波引起西北太平洋上空的反气旋异常, 进而对东亚和中国气候产生影响 (Zhang et al., 1996, 1999)。

## 6 利用 Argo 浮标漂流轨迹推算海洋流场

覆盖全球大洋的 Argo 浮标除了观测 2000 m 以上海洋的温度和盐度外, 也提供了 Argo 浮标在海洋表面的漂移轨迹, 这些轨迹资料可用于推断海洋表面和海洋中层洋流。但是, 由于浮标在海面漂流的时间短、定位精度相对较低以及在一条轨迹中的

样本少, 使得利用卫星定位直接估计的表面流场精度较低。使用浮标轨迹定位点序列直接推断出的表层和中层海流, 由于定位点自身的误差从 150 m 至 1000 m 不等, 使得所估计出的流速不确定性较大。另外, 表层漂流和海流垂直切变等的不确定性也对中层流的估计产生影响。针对 Argo 浮标表面漂流轨迹定位点少且定位误差较大, 可能使表层流估计包含较大误差这一缺陷, 提出和发展了一个新的方法可以显著减少由 Argo 浮标表面漂流轨迹及推断表层流的误差。考虑到 Argo 浮标在海面自由漂流的轨迹主要受线性平均运动和惯性运动控制, 忽略风应力与潮汐等小噪声, 针对 Argo 浮标在海面的

定位点序列, 提出了基于 Kalman 滤波思想的最优化分析方法 (Xie and Zhu, 2008)。该方法可利用 Argo 浮标的表面轨迹, 实时估计全球海洋表面流场和海洋中层流。

图 11 给出了利用该方法, 采用 2001 年 11 月至 2004 年 10 月太平洋海域 Argo 浮标轨迹估计出的平均表层流场。从图 11 可看出, 由 Argo 浮标轨迹估计出的平均表层流场反映出了太平洋表层环流的基本特征。东太平洋的南赤道洋流 (SEC) 出现在  $20^{\circ}\text{S}$  到赤道之间,  $6^{\circ}\text{N}$  附近为北赤道逆流 (NECC),  $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$  之间为北赤道洋流 (NEC)。北赤道洋流在西太平洋  $130^{\circ}\text{E}$  附近, 可看出明显的南北分叉。在其他区域, 也可以清楚地看出  $60^{\circ}\text{S}$  附近的南极绕极流 (ACC)、台湾岛以东的黑潮, 以及  $130^{\circ}\text{W}$  附近从  $40^{\circ}\text{N}$  向南流到  $20^{\circ}\text{N}$  的加利福尼亚海流。经过上述最优化分析所估计的表层海流误差能由滤波前的  $5.3\text{ cm/s}$  减少至  $4.4\text{ cm/s}$ , 从而达到与表面漂流浮标估计流速相当的精度; 此外, 该方法还可以通过考虑流速垂直切变影响, 提高中层流估计的质量, 与不考虑海流垂直切变的估算相比, 中层流的估计误差减少到  $0.21\text{ cm/s}$  (Xie and Zhu, 2008), 与国际上其他分析方法所得精度相当 (如 Park 等,

2005)。

## 7 结束语

本文回顾了我国利用深海大洋上的 Argo 剖面浮标观测资料, 在质量控制、资料同化、短期气候预测、海洋模式物理参数化方案改进、海洋流场估计等方面的研究, 研究成果不仅对大气和海洋变异的深入认识具有重要的作用, 也在国家气象和海洋业务中得到了充分的应用, 对提高我国气候预测、海洋监测分析和预报能力发挥了重要作用。

NCC-GODAS 全球海洋同化资料被美国哥伦比亚大学国际气候预测研究所 (IRI) 的气候资料库吸纳, 在其网页公开发布, 是当时 (2005 年) 国际上公开发布的三类海洋同化资料之一。NCC-GODAS 于 2005 年 12 月通过中国气象局审批正式业务化, 海洋同化资料作为业务产品在国家气候中心的网站上发布。海洋资料同化系统 OVALS 在国家海洋环境预报中心得到业务应用, 目前其业务化厄尔尼诺实时监测分析系统是在 OVALS 基础上开发的, 在国家海洋监测分析中发挥了重要作用。在 OVALS 基础上, 发展了一个南海高度计资料同化系统, 较好地改进了盐度的估计 (肖贤俊等, 2007)。

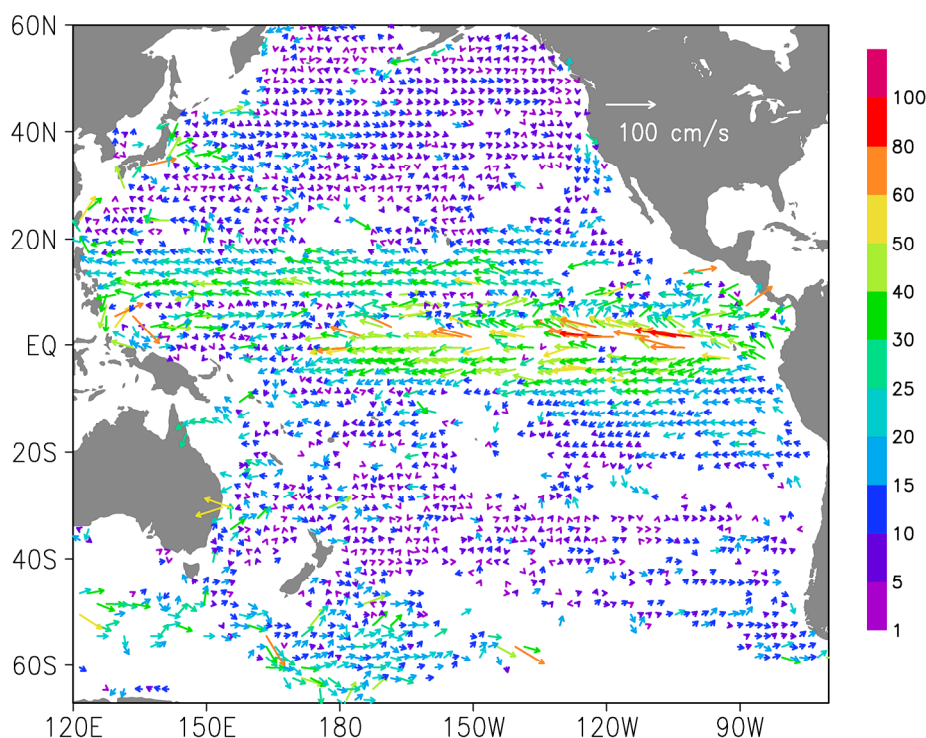


图 11 利用 2001 年 11 月至 2004 年 10 月太平洋海域 Argo 浮标轨迹估计出的平均表层流场。颜色表示流速大小。(引自 Xie and Zhu, 2008)

Fig. 11 Averaged ocean currents in November 2001–October 2004 at the surface layer of the Pacific estimated by trajectories of Argo floats. Colors represent values of the current speed. (From Xie and Zhu, 2008)

另外,也在 OVALS 的基础上进行了海洋中尺度涡的同化研究,结果表明利用 OVALS 将高度计资料同化到海洋模式中,可以很大程度上改进中尺度涡的模拟(高山等,2007)。利用 Kalman 滤波的最优化分析方法(Xie and Zhu, 2008),形成了基于 Argo 浮标表面轨迹观测的全球表层流资料集,有效填补了洋流资料的匮乏,该资料集已在网上公开发布,供国内外有关研究和业务使用。

全球海洋资料同化系统的开发,不仅提高了国家海洋监测分析能力,也为海—气耦合模式进行季节和跨季度气候预测提供更好的海洋初始场,从而改善模式的短期气候预测能力。包含了 Argo 资料的同化结果为海—气耦合模式进行季节气候预测提供了更真实的海洋初始场资料,对预测水平的提高起到了重要作用。NCC-GODAS 系统自 2005 年 12 月在国家气候中心正式投入业务运行以来,为国家气候中心全球海—气耦合模式进行季节气候预测业务提供了更好的海洋初始场资料,在全球海—气耦合业务气候预测模式 NCC-CGCM 对我国气候和 ENSO 的预测中发挥了重要作用。另外,预报模式系统的整体能力不仅依赖于同化系统,而且依赖于模式本身。由于以前海洋观测资料很少,海洋模式物理过程参数化方案中参数的选取往往是基于非常有限的观测资料,在很大程度上是一种物理推断,存在着很大的随意性和不确定性。因此在建立同化系统的同时,还利用 Argo 浮标资料对模式中的物理参数化方案进行改进,提高了模式对真实海洋的描述能力。

观测资料是大气和海洋科学发展的基础,也是开展预报和预测业务的必要条件。观测手段的创新所产生的新的大气和海洋观测资料,往往带来大气和海洋科学的重大进展,并进一步推动大气和海洋业务的发展。卫星跟踪的 Argo 剖面浮标技术的应用,被誉为“海洋观测手段的一场革命”。类似于大气中的无线电探空观测,国际 Argo 计划的成功实施,实现了由 3000 多个 Argo 剖面浮标进行快速、准确、大范围地探测全球海洋 0~2000 m 水深内的海水温度、盐度和浮标在海面的漂移轨迹,获得了大量来自海洋内部的观测资料,在很大程度上解决了海洋观测资料匮乏这一长期制约大气和海洋科学和业务发展的瓶颈,给海洋和大气科学以及业务的发展带来了难得的机遇和挑战。这些资料的获取及其在科研和业务中的应用,将会大大促进对大气

和海洋变异的深入了解和认识,提高大气和海洋的预测和监测能力,在有效防御和减轻全球日益严重的大气和海洋灾害方面具有重要的意义。

## 参考文献 (References)

- Argo Data Management Team. 2002. Report of Argo Data Management Meeting [C]. Proc. Argo Data Management 3rd Meeting, Marine Environmental Data Service, Ottawa, ON, Canada, 42pp.
- Argo Science Team. 2000. Report of the Argo Science Team 2nd Meeting [C]. The Argo Science Team 2nd Meeting, Southampton Oceanography Centre, Southampton, U. K., 35pp.
- Behringer D W. 2006. The global ocean data assimilation system (GODAS) at NCEP [C]// Proceedings NOAA 31st Ann. Climate Diagnostics Prediction Workshop. Boulder, USA.
- Böhme L. 2003. Quality control of profiling float data in the subpolar North Atlantic [D]. Ph. D. dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel, 79pp.
- 巢清尘, 巢纪平. 2001. 热带西太平洋和东印度洋对 ENSO 发展的影响 [J]. 自然科学进展, 11 (12): 1293–1300. Chao Qingchen, Chao Jiping. 2001. The influence of tropical western Pacific and eastern Indian Ocean on the ENSO development [J]. Progress in Natural Sciences (in Chinese), 11 (12): 1293–1300.
- Freeland H. 1997. Calibration of the conductivity cells on P-ALACE floats [R]. U. S. WOCE Implementation Report No. 9, 37–38.
- 高山, 王凡, 李明悝, 等. 2007. 中尺度涡的高度计资料同化模拟 [J]. 中国科学 (D 辑), 37 (12): 1669–1678. Gao Shan, Wang Fan, Li Mingkui, et al. 2008. Application of altimetry data assimilation on mesoscale eddies simulation [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 51 (1): 142–151.
- Han G, Zhu J, Zhou G. 2004. Salinity estimation using T-S relation in the context of variational data assimilation [J]. J. Geophys. Res., 109: C03018.
- Hu K M, Huang G, Huang R H. 2011. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. J. Climate, 24(20): 5365–5377.
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 6 (1): 21–32.
- Huang R H, Sun F. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 70 (1): 243–256.
- 黄荣辉, 张人禾, 严邦良. 2001. 热带西太平洋纬向风异常对 ENSO 循环的动力作用 [J]. 中国科学 (D 辑), 31 (8): 697–704. Huang Ronghui, Zhang Renhe, Yan Bangliang. 2001. Dynamical effect of the zonal wind anomalies over the tropical western Pacific on ENSO cycles [J]. Science in China (Series D), 44 (12): 1089–1098.
- 金向泽, 俞永强, 张学洪, 等. 2000. L30T63 海洋模式模拟的热盐环流和风生环流 [C]//短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 170–182. Jin Xiangze, Yu Yongqiang, Zhang Xuehong, et al. 2000. The thermal and salt general circulation in L30T63 ocean model [C]// The Study on Short-term Climate Prediction Model (in Chinese). Beijing:



- China Meteorological Press, 170–182.
- Kamachi M, Matsumoto S, Nakano T, et al. 2008. Ocean reanalysis and its application to water mass analyses in the Pacific [C]// Proceedings the Third WCRP International Conference on Reanalysis Conference. Tokyo, Japan, .
- Kobayashi T, Shinya M. 2005. Importance of reference dataset improvements for Argo delayed-mode quality control [J]. *Journal of Oceanography*, 61: 995–1009.
- Levitus S, Boyer T P, Antonov J. 1994. World Ocean Atlas, Vol. 5: Interannual variability of upper thermal structure [R]. NOAA Atlas NESDIS 5, Washington D. C: U. S. Government Printing Office.
- 李崇银, 穆明权. 1999. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常 [J]. *大气科学*, 23 (5): 513–521. Li Chongyin, Mu Mingquan. 1999. El Niño occurrence and sub-surface ocean temperature anomalies in the Pacific warm pool [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (5): 513–521.
- Li C Y, Mu M Q. 2001. The influence of the Indian ocean dipole on atmospheric circulation and climate [J]. *Advance Atmospheric Sciences*, 18 (5): 831–843.
- 李清泉, 丁一汇, 张培群. 2004. 一个全球海气耦合模式跨季度汛期预测能力的初步检验和评估 [J]. *气象学报*, 62 (6): 740–751. Li Qingquan, Ding Yihui, Zhang Peiqun, 2004. Primary verification and assessment on the extra-seasonally predictive capability of a global atmosphere–oceanic coupled model in raining season [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (6): 740–751.
- Li S L, Lu J, Huang G, et al. 2008. Tropical Indian Ocean basin warming and East Asian summer monsoon: A multiple AGCM study [J]. *J. Climate*, 21 (22): 6080–6088.
- 刘仁清, 许建平. 2009. Argo: 成功的十年 [J]. *中国基础科学*, 11 (4): 15–21. Liu Renqing, Xu Jianping. 2009. Argo: Ten years of success [J]. *China Basic Science (in Chinese)*, 11 (4): 15–21.
- 刘益民, 周江兴, 马强. 2000. 太平洋印度洋四维海洋同化系统 [C]//短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 401–407. Liu Yimin, Zhou Jiangxing, Ma Qiang, 2000. Study on the Pacific and the Indian Oceanic data assimilation system [C]// Studies on Operational Short-Term Climate Prediction System in China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 401–407.
- 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 [J]. *海洋学报*, 27 (1): 27–35. Liu Yimin, Li Weijing, Zhang Peiqun. 2005. A global 4-dimensional ocean data assimilation system and the studies on its results in the tropic Pacific [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 27 (1): 27–25.
- Liu Y M, Zhang R H, Yin Y H, et al. 2005. The application of ARGO data to the global ocean data assimilation operational system of NCC [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 19 (3): 355–365.
- 刘增宏, 许建平, 孙朝辉. 2010. Argo 浮标电导率漂移误差检测及其校正方法探讨 [C]// 许建平. 西太平洋 Argo 剖面浮标观测及其应用研究论文集. 北京: 海洋出版社, 250–259. Liu Zenghong, Xu Jianping, Sun Chaohui. 2010. Examination of the conductivity drift error of Argo floats and its correction method [C]// Xu Jianping. A Collection of Papers on the Observation and Application of Argo Profiling Floats in the West Pacific Ocean (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 250–259.
- 刘增宏, 许建平, 修义瑞, 等. 2006. 参考数据集对 Argo 剖面浮标盐度观测资料校正的影响 [J]. *海洋预报*, 23 (4): 1–12. Liu Zenghong, Xu Jianping, Xiu Yirui, et al. 2006. The effect of reference dataset on calibration of Argo profiling float salinity data [J]. *Marine Forecast (in Chinese)*, 23 (4): 1–12.
- Lu R Y, Dong B W, Ding H. 2006. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (24): L24701.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 373–390.
- Oka E. 2005. Long-term sensor drift found in recovered Argo profiling floats [J]. *Journal of Oceanography*, 61 (4): 775–781.
- Oka E, Ando K. 2004. Stability of temperature and conductivity sensors of Argo profiling floats [J]. *Journal of Oceanography*, 60 (2): 253–258.
- Oka E, Izawa K, Inoue A, et al. 2002. Is retrieve of Argo floats possible? [J]. Report of Japan Marine Science and Technology Center, 46: 147–155.
- Oke P R, Brassington G B, Griffin D A, et al. 2008. The Bluelink ocean data assimilation system (BODAS) [J]. *Ocean Modelling*, 21 (1–2): 46–70.
- Park J J, Kim H, King B A, et al. 2005. An advanced method to estimate deep currents from profiling floats [J]. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 22 (8): 1294–1304.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. *J. Climate*, 15: 1609–1625.
- 容新尧, 张人禾, Li T. 2010. 大西洋海温异常在 ENSO 影响印度—东亚夏季风中的作用 [J]. *科学通报*, 55 (14): 1397–1408. Rong Xinyao, Zhang Renhe, Li Tim. 2010. Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo–East Asian summer monsoon–ENSO relationship [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55 (22): 2458–2468.
- 童明荣, 刘增宏, 孙朝辉, 等. 2003. Argo 剖面浮标数据质量控制过程剖析 [J]. *海洋技术*, 22 (4): 79–84. Tong Mingrong, Liu Zenghong, Sun Chaohui, et al. 2003. Analysis of the quality control process of the ARGO profiling float Data [J]. *Ocean Technology (in Chinese)*, 22 (4): 79–84.
- Usui N, Ishizaki S, Fujii Y, et al. 2006. Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results [J]. *Advances in Space Research*, 37 (4): 806–822.
- Wong A P S, Johnson G C, Owens W B. 2003. Delayed-mode calibration of autonomous CTD profiling float salinity data by  $\theta$ -S climatology [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20: 308–318.
- 肖贤俊, 王东晓, 闫长香, 等. 2007. 南海三维变分海洋同化模式及其验证 [J]. *自然科学进展*, 17 (3): 353–361. Xiao Xianjun, Wang Dongxiao, Yan Changxiang, et al. 2007. A three-dimensional variational ocean data assimilation model in South China Sea and its verification [J]. *Progress in Natural Sciences (in Chinese)*, 17 (3): 353–361.
- 许建平. 2002. 阿尔戈全球海洋观测大探秘 [M]. 北京: 海洋出版社, 115 pp. Xu Jianping. 2002. An Exploration of the Argo Global Ocean Observation [M] (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 115 pp.
- 许建平. 2006. Argo 应用研究论文集 [M]. 北京: 海洋出版社, 240 pp. Xu Jianping. 2006. The Collection of Argo Application Papers [M] (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 240 pp.
- 许建平. 2010. 西太平洋 Argo 剖面浮标观测及其应用研究论文集 [M]. 北京: 海洋出版社, 344 pp. Xu Jianping. 2010. A Collection of Papers

- on the Observation and Application of Argo Profiling Floats in the West Pacific Ocean [M] (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 344 pp.
- 许建平, 刘增宏. 2007. 中国 Argo 大洋观测网试验 [M]. 北京: 气象出版社, 174 pp. Xu Jianping, Liu Zenghong. 2007. The Experiment of China Argo Ocean Observation Network [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 174 pp.
- Xie J P, Zhu J. 2008. Estimation of the surface and mid-depth currents from ARGO floats and error analysis in Pacific [J]. *J. Mar. Syst.* 73 (1–2): 61–75.
- Xie J P, Zhu J. 2010. Optimal ensemble interpolation schemes for assimilation of Argo profiles into HYCOM [J]. *Ocean Modelling*, 33: 283–298.
- 许建平, 刘增宏, 孙朝辉, 等. 2008. 全球 Argo 实时海洋观测网全面建成 [J]. *海洋技术*, 27 (1): 68–70. Xu Jianping, Liu Zenghong, Sun Chaohui, et al. 2008. The global Argo real-time observation network accomplished [M]. *Marine Technology (in Chinese)*, 27 (1): 68–70.
- 严邦良, 黄荣辉, 张人禾. 2001. El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 II. 模式结果分析 [J]. *大气科学*, 25 (2): 160–172. Yan Bangliang, Huang Ronghui, Zhang Renhe. 2001. Dynamical role of zonal wind stresses over the tropical Pacific in the occurring and vanishing of El Niño. Part II: Analyses of modeling results [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (2): 160–172.
- Yan C X, Zhu J, Li R F, et al. 2004. The roles of vertical correlation of the background covariance and  $T$ - $S$  relation in estimation temperature and salinity profiles from surface dynamic height [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: C08010.
- Zebiak S E, Cane M A. 1987. A model El Niño-Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 2262–2278.
- Zhang R H, Sumi A, kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asia Monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74: 49–62.
- 张人禾, 黄荣辉. 1998. El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I. 资料诊断和理论分析 [J]. *大气科学*, 22 (4): 597–609. Zhang Renhe, Huang Ronghui. 1998. Dynamical roles of zonal wind stresses over the tropical Pacific on the occurring and vanishing of El Niño. Part I: Diagnostic and theoretical analysis [J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 22 (4): 587–599.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 16 (2): 229–241.
- 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 [J]. *气象学报*, 62 (5): 613–622. Zhang Renhe, Liu Yimin, Yin Yonghong, et al. 2004. Utilizing ARGO data to improve the ocean data assimilation and the relative physical processes in ZC ocean model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 613–622.
- 张人禾, 殷永红, 李清泉, 等. 2006. 利用 ARGO 资料改进 ENSO 和我国夏季降水气候预测 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 538–547. Zhang Renhe, Yin Yonghong, Li Qingquan, et al. 2006. Utilizing ARGO data to improve the prediction of ENSO and short-term climate prediction of summer rainfall in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17 (5): 538–547.
- 周广庆, 李旭, 曾庆存. 1998. 一个可供 ENSO 预测的海气耦合环流模式及 1997/1998 ENSO 的预测 [J]. *气候与环境研究*, 3 (4): 349–357. Zhou Guangqing, Li Xu, Zeng Qingcun. 1998. A coupled ocean-atmosphere general circulation model for ENSO prediction and 1997/1998 ENSO forecast [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3 (4): 349–357.
- 朱江, 周广庆, 闫长香, 等. 2007. 一个三维变分海洋资料同化系统的设计和初步应用 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 37 (2): 261–271. Zhu Jiang, Zhou Guangqing, Yan Changxiang, et al. 2006. A three-dimensional variational ocean data assimilation system: Scheme and preliminary results [J]. *Science in China (Series D)*, 49 (12): 1212–1222.