



西太平洋Argo

实时海洋调查研究文集

许建平◎主编



海洋出版社

西太平洋 Argo 实时海洋调查 研究文集

许建平 主编

海洋出版社

2017 年 · 北京

内 容 简 介

本文集是国家科技基础性工作专项“西太平洋 Argo 实时海洋调查”重点项目,以及近些年国内涉及 Argo 的部分国家重点基础研究发展计划、国家海洋公益性行业科研专项经费项目、国家科技支撑计划和国家自然科学基金等项目所取得的调查研究成果的汇编。内容涉及区域 Argo 实时海洋观测网建设、Argo 数据质量控制技术、Argo 衍生数据产品研发及其应用、Argo 数据共享管理和剖面浮标技术研制等多个方面。

本文集可供从事海洋事业的科研、教学和管理人员以及研究生阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

西太平洋 Argo 实时海洋调查研究文集/许建平主编. —北京:海洋出版社, 2017.7
ISBN 978-7-5027-9888-8

I. ①西… II. ①许… III. ①西太平洋-海洋监测-文集 IV. ①P715-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 197252 号

责任编辑:朱 林 高 英

责任印制:赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店发行所经销

2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月北京第 1 次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:29.25

字数:630 千字 定价:128.00 元

发行部:010-62132549 邮购部:010-68038093 总编室:010-62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

由国家海洋局第二海洋研究所牵头、国家海洋环境预报中心和浙江大学共同参与申报的2012年度科技部科技基础性工作专项“西太平洋Argo实时海洋调查”重点项目，于2012年4月经科技部组织专家评审，并获得批准，起止时间为2012年5月至2017年5月。这是继2007—2011年国家重点基础研究发展计划项目“基于全球实时海洋观测计划（Argo）的上层海洋结构、变异及预测研究”后，由科技部资助的又一个实施“中国Argo计划”的重大项目。希望通过该项目的实施，能进一步提高我国在国际Argo计划中的显示度，其总体目标是要在西太平洋海域分批布放35个自动剖面浮标，补充和维持我国Argo大洋观测网，使之具备大范围、实时监测深海大洋环境的能力；通过与国际上各国Argo资料中心的网络联接，实现业务化浮标资料采集能力；利用建立的Argo资料海上定标和实验室校正处理系统，以及Argo资料实时/延时处理模式，提高Argo资料的观测精度和可靠性，并有能力自动、快速检验和处理来自全球海洋上3 000多个浮标的观测资料；研制Argo网格化数据产品和其他衍生产品，为国内Argo用户提供种类更多、信息更丰富的基础资料；建成Argo资料管理及其共享服务系统，发布Argo实时/延时数据资料，形成业务化运行能力，为国家相关项目提供高质量、高分辨率和高可信度的现场调查资料，更加快速、方便地为国内外用户（包括海洋、气象业务预报部门和科研单位，以及海洋渔业和海洋运输等从事海洋活动的单位、部门和团体等）提供Argo信息和资料服务。

项目执行期间，按照科技部有关科技基础性工作专项重点项目需成立项目专家组的有关要求，首先成立了以中国科学院海洋研究所胡敦欣院士和国家气候中心丁一汇院士任正、副组长，刘秦玉教授（中国海洋大学）、王彰贵研究员（国家海洋环境预报中心）、朱江研究员（中国科学院大气物理研究所）、齐义泉研究员（中国科学院南海海洋研究所）、张韧教授（解放军理工大学）、韩桂军研究员（国家海洋信息中心）和许建平研究员（国家海洋局第二海洋研究所）等9人组成的项目专家组，并成立了项目管理办公室，以加强与项目专家组和项目组成员之间的联系与沟通；同时还利用“中国Argo实时资料中心网站”和《Argo简讯》等媒介，作为项目主管部门、依托部门和单位领导检查和监督项目进展的“平台”，以及成为密切与其他重大科学计划项目联系的“纽带”和便于广大用户、

公众了解 Argo 的“窗口”。该项目自从 2012 年 9 月在杭州启动至今, 分别于 2013 年 11 月在舟山、2015 年 1 月在北京和 2016 年 3 月在杭州举行了 4 次项目专家会议, 每次年会项目主管部门、依托部门和单位都委派主管领导莅临会议进行现场监督指导, 专家组对项目组提供的项目年度工作进展报告进行认真审议, 并对项目的工作进度和下一年度工作计划等, 提出指导性意见和建议; 同时, 还对项目遇到的重大问题及解决措施以项目专家组名义向项目主管部门、依托部门和单位提交书面建议报告。如针对年度科研经费拨款迟缓, 提出了“有关加强科技基础性工作专项西太平洋 Argo 实时海洋调查重点项目支持力度”的建议; 针对由我国布放的自动剖面浮标观测资料需借道法国上传全球通讯系统 (GTS) 的问题, 提出了“积极争取国家气象管理部门的支持, 早日将我国的浮标观测资料通过北京的 GTS 接口与世界气象组织 (WMO) 成员国及时共享, 进一步提升我国在国际合作计划中的地位和显示度”的建议, 以及针对国际 Argo 计划的发展态势和南海 Argo 区域海洋观测网建设现状, 提出“将还未采购的 12 个浮标 (应以国产北斗剖面浮标为主) 布放在西太平洋的典型边缘海——南海海域”的建议, 并呼吁国家科技和海洋主管部门给予中国 Argo 计划持续支持, 不断提高自动剖面浮标观测资料的质量及扩大应用研究的范围, 尽快研究制定涉及中国 Argo 实时海洋观测网建设及资料质量控制与应用的相关标准等意见建议。

近五年来, 在项目主管部门、依托部门和单位的重视和支持, 以及项目专家组全程监督、指导和全体项目组成员的共同努力下, 已经按计划任务书的要求和考核指标完成全部外业调查和内业研究工作。期间, 中国 Argo 计划在太平洋、印度洋、地中海和南海等海域累计布放了 234 个 (包括本项目 36 个) 自动剖面浮标, 共获得了约 4 万条温、盐度剖面; 收集的其他 Argo 成员国布放在全球海洋上的 4 521 个浮标观测的剖面约 62 万条。自 2012 年以来, 项目组已连续发布了五版“全球海洋 Argo 网格资料集 (BOA_Argo)”。2015 年 10 月, 由项目组开发的“Argo 资料共享服务平台”也已安装在中国 Argo 实时资料中心网站 (<http://101.71.255.4:8090/flexArgo/out/argo.html>) 上, 正式向用户提供全球海洋 Argo 数据查询、浏览、可视化显示、统计分析和下载等服务, 并于 2016 年实现业务化运行。随着全球 Argo 资料集版本的更新, 观测参数由早先的 3 个 (温度、盐度和深度) 增为 5 个 (温度、盐度、溶解氧、叶绿素和深度), 目前则为 6 个 (温度、盐度、溶解氧、叶绿素、硝酸盐和深度), 同时还增加了国产北斗剖面浮标的观测资料, 资料集版本由 1.0 升级为 2.0, 目前则已经升级到 2.1 版本。为此, 项目组及时对 Argo 资料分布式数据库进行了扩展与完善, 并对数据管理系统进行优化与升级, 适时将新版本数据和北斗剖面浮标资料入库与更新, 以确保国内用户能

获得最新版本的 Argo 资料集。与此同时,项目组还通过科技部国家遥感中心的国家综合地球观测数据共享平台 (http://www.chinageoss.org/dsp/sciencedata/sciencedata_list.action),发布由项目收集的历史 Argo 数据和制作的 Argo 网格数据集及其衍生数据产品。

在中国气象局气象信息中心和浙江省气象局的支持、协助下,项目组开启了与浙江省气象局的 FTP 通道,并于 2015 年 10 月实现了中国布放的自动剖面浮标观测资料通过 WMO 的北京 GTS 节点上传、且与 WMO 成员国共享的目标。这些数据也已获得日本气象厅(JMA) 专业技术人员的验证,并可通过 JMA 网站 (<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/argo/data/bfrdata/repBeijing.html>) 查阅。

在国际 Argo 信息中心和中国船舶重工集团公司第 710 研究所的技术支持下,项目组在杭州建成“北斗剖面浮标数据服务中心”,并于 2015 年 10 月完成北斗卫星接收设备安装调试、剖面浮标观测资料接收与解码软件联机测试等准备工作,开始接收我国首批布放在西太平洋海域的 HM2000 型剖面浮标观测资料;2016 年 9—11 月期间,项目组还在西太平洋的典型边缘海——南海海域布放了一批国产 HM2000 型剖面浮标,正式拉开了由我国主导建设“南海 Argo 区域海洋观测网”的序幕。其中部分观测资料已经通过互联网与其他 Argo 成员国共享;同时还具备了通过北京 GTS 接口上传由我国布放的北斗剖面浮标观测资料的能力。由此,北斗剖面浮标数据服务中心(中国杭州)已经成为继 Argos 卫星地面接收中心(法国图卢兹)和 Iridium 卫星地面接收中心(美国马里兰)后,第三个为全球 Argo 实时海洋观测网提供剖面浮标观测数据传输服务的国家平台。

随着我国 Argo 实时海洋观测网建设的不断完善和国际 Argo 计划的长期维持,这些源源不断的、覆盖全球海洋的实时、高质量 Argo 资料及其衍生数据产品,不仅已直接用于海洋和大气科学领域的基础研究中,而且也已应用于海洋和天气/气候业务化预测预报中,并有望大幅提高我国海洋和天气/气候预测预报的精度,因而有着不可估量的经济和社会效益。据国际 Argo 计划办公室的一份统计材料表明,自 1998 年以来世界上 35 个国家的科学家在全球 20 种主要学术刊物(包括 JGR、GRL、JPO、JC 等)上累计发表了 2 662 篇与 Argo 相关的学术论文,其中由中国学者发表的论文就达 370 篇,仅次于美国(约 780 篇),排名第二。由此可见,Argo 资料已经成为我国海洋科研、海洋教育、海洋管理,以及海洋交通运输和海洋渔业等资源开发领域的基础和应用研究中不可或缺的重要数据源。

在项目实施过程中,来自国家海洋局第二海洋研究所、国家海洋环境预报中心和浙江大学的科研人员陆续撰写并公开发表了一批研究论文和技术分析报告,以及申请获得了多项软件著作权登记和发明专利。现将部分调查研究成果汇编成

册, 谨以此向关心、帮助和支持该项目的各级领导和专家、同行表示衷心感谢!

本文集汇编的 28 篇论文, 主要来自执行国家科技基础性工作专项“西太平洋 Argo 实时海洋调查”重点项目期间取得的部分调查研究成果, 还有一部分来自承担国家重点基础研究发展计划、国家海洋公益性行业科研专项、国家科技支撑计划、国家发改委卫星高技术产业化示范工程、中国科学院战略性先导科技专项、测绘地理信息公益性行业科研专项和一批国家自然科学基金项目中涉及 Argo 资料应用研究的成果。内容涉及区域 Argo 实时海洋观测网建设、Argo 数据质量控制技术、Argo 衍生数据产品研发及其应用、Argo 数据共享管理和剖面浮标技术研发等多个方面。

中国 Argo 计划实施得到了国家科技部、国家自然科学基金委员会、国家海洋局、中国气象局、中国科学院等部门、单位的高度重视和大力支持。

本文集由国家科技基础性工作专项“西太平洋 Argo 实时海洋调查”重点项目(项目编号: 2012FY112300)资助出版。

中国 Argo 计划首席科学家

国际 Argo 指导组成员



2017 年 3 月 28 日于杭州

目次

全球 Argo 海洋观测十五年	Stephen C. Rise 等	(1)
中国 Argo 海洋观测十五年	刘增宏等	(18)
热带太平洋海域上层海洋热盐含量研究概述	杨小欣等	(39)
台风海域实时海洋监测及其应用研究综述	曹敏杰等	(57)
基于 Argo 资料研究 2001—2012 年期间印度洋-太平洋海域上层海洋热含量变化	吴晓芬等	(68)
西太平洋暖池海域上层海洋热盐含量初步研究	杨小欣等	(83)
热带太平洋混合层盐度季节-年际变化特征研究	黄国平等	(103)
西北太平洋海洋温度锋生与锋消机制的初步研究	赵宁等	(117)
西北太平洋温盐分布的时空尺度分析	安玉柱等	(130)
基于 Argo 资料的西北太平洋海表面盐度对台风的响应特征分析 ...	吴铃蔚等	(142)
上层海洋对苏迪罗超强台风(2015 年)的响应以及与中尺度海洋特征的相互作用	刘增宏等	(151)
全球海温三维非对称性特征诊断及其成因分析	王辉赞等	(171)
基于海温参数模型推算 Argo 表层温度	张春玲等	(186)
利用遥感 SST 反演上层海洋三维温度场	张春玲等	(203)
基于混合层模型反推 Argo 表层温度和盐度	赵鑫等	(220)
流场约束的相关尺度及其在 Argo 资料融合中的初步应用	王公杰等	(241)
西太平洋 Argo 资料的两种同化方案	连喜虎等	(250)
利用 Barnes 逐步订正法重构全球海洋 Argo 网格资料集	李宏等	(263)
新版全球海洋 Argo 网格数据集及其可靠性检验	李宏等	(294)
Argo 盐度延时质量控制改进方法的试应用	卢少磊等	(311)
Argo 资料协同管理方法研究	董贵莹等	(330)
全球 Argo 资料共享与服务平台设计与实现	吴森森等	(342)
一种跻身全球 Argo 实时海洋观测网的国产海洋观测仪器: HM2000 型剖面浮标	沈锐等	(355)

HM2000 型剖面浮标的压力测量功能与性能剖析	张素伟等	(373)
北斗卫星系统在 HM2000 型剖面浮标中的应用	张素伟等	(388)
COPEX 和 HM2000 与 APEX 型剖面浮标比测试验及资料质量评价		
.....	卢少磊等	(399)
北斗剖面浮标数据接收服务系统设计及其业务运行	刘增宏等	(419)
西北太平洋边缘海——南海 Argo 区域海洋观测网设计与构建	刘增宏等	(441)

全球 Argo 海洋观测十五年

Stephen C. Riser¹, Howard J. Freeland^{2*}, Dean Roemmich³, Susan Wijffels⁴,
Ariel Troisi⁵, Mathieu Belbéoch⁶, Denis Gilbert⁷, Jianping Xu⁸,
Sylvie Pouliquen⁹, Ann Thresher⁴, Pierre-Yves Le Traon¹⁰, Guillaume Maze⁹,
Birgit Klein¹¹, M. Ravichandran¹², Fiona Grant¹³, Pierre-Marie Poulain¹⁴,
Toshio Suga¹⁵, Byunghwan Lim¹⁶, Andreas Sterl¹⁷, Phillip Sutton¹⁸,
Kjell-Arne Mork¹⁹, Pedro Joaquín Vélez-Belchí²⁰, Isabelle Ansorge²¹,
Brian King²², Jon Turton²³, Molly Baringer²⁴ and Steve R. Jayne²⁵

1. 华盛顿大学海洋学院, Seattle, Washington 98195, USA (美国)
2. 加拿大渔业与海洋部海洋科学研究所, North Saanich, British Columbia V8L 4B2, Canada (加拿大)
3. 斯克里普斯海洋研究所, 9500 Gilman Drive, 0230, La Jolla, California 92093-0230, USA (美国)
4. 澳大利亚联邦科学与工业研究组织天气和气候研究中心, Hobart, Tasmania 7004, Australia (澳大利亚)
5. 阿根廷海军航道测量局, A. Montes de Oca 2124, Buenos Aires C1270 ABV, Argentina (阿根廷)
6. 海洋学及大洋气象学联合委员会, BP 70, Plouzané 29280, France (法国)
7. 加拿大渔业与海洋部 Maurice-Lamontagne 研究所, Mont-Joli, Quebec G5H 3Z4, Canada (加拿大)
8. 国家海洋局第二海洋研究所, No. 36 Baochubei Road, Hangzhou, Zhejiang 310012, China (中国)
9. 法国海洋开发研究院, BP70, Plouzané, 29280 France (法国)
10. 法国海洋开发研究院和 Mercator Océan, 8-10 rue Hermes Parc Technologique du Canal, Ramonville St. Agne 31520, France (法国)
11. 德国联邦海洋与水文局, Bernhard-Nocht-str., 78, Hamburg 20359, Germany (德国)
12. 印度海洋信息服务中心, Hyderabad, Andhra Pradesh 500090, India (印度)
13. 海洋研究所国际项目部, Wilton Park House, Wilton Place, Dublin 2, Ireland (爱尔兰)
14. 意大利海洋与地球物理学研究所, Borgo Grotta Gigante, 42/c, Sgonico, Trieste 20359, Italy (意大利)
15. 日本海洋科技厅和日本东北大学, Aramaki-Aza-Aoba 6-3, Aoba-Ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan (日本)

* E-mail: Howard.Freeland@dfo-mpo.gc.ca

16. 韩国气象厅国家气象研究所, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea (韩国)
17. 荷兰皇家气象研究所, PO Box 201, 3730 AE de Bilt, The Netherlands (荷兰)
18. 新西兰国家水与大气研究所, 301 Evans Bay Parade, Greta Point, Wellington 6021, New Zealand (新西兰)
19. 海洋研究所, PO Box 1870 Nordnes, 5817 Bergen, Norway (挪威)
20. 西班牙海洋学研究所, Vía Espaldón, Dársena Pesquera, Parcela 8, 38180 Santa Cruz de Tenerife, España (西班牙)
21. 开普敦大学海洋研究所海洋学系, 7701 Rondebosch, South Africa (南非)
22. 南安普顿国家海洋中心, Empress Dock, Southampton, Hampshire SO14 3ZH, UK (英国)
23. 英国气象局, FitzRoy Road, Exeter, Devon EX1 3PB, UK (英国)
24. 美国海洋大气局大西洋海洋与气象实验室, 4301 Rickenbacker Causeway, Miami, Florida 33149, USA (美国)
25. 伍兹霍尔海洋研究所, Woods Hole, Massachusetts 02543, USA (美国)

摘要: 从 1971 年至今, 气候系统中积聚的热量有 90% 以上储存在海洋中。因此, 海洋在决定地球气候中扮演着重要角色。即使在最有利的条件下, 观测海洋也并不容易。从历史看, 利用船只开展的海洋调查, 在广袤的海洋上依然留下了大量空白区域, 特别是南大洋, 在很长一段时间里都没有调查。在过去的 15 年中, 随着由 Argo 剖面浮标组成的全球 Argo 海洋观测网的问世, 才使得统一对全球 2 000 m 上层海洋进行时空同步观测成为现实。初期 Argo 计划的主要目标是建立一个系统的全球剖面浮标观测网, 使其能与全球海洋观测系统 (GOOS) 中的其他观测平台形成一个整体。该观测网免费提供全球海洋 2 000 m 水深以上海水的温度和盐度资料。这些资料在收集后的 24 h 内向公众免费提供, 被广泛应用于与季节至 10 年甚至数 10 年尺度的气候变化相关的研究中, 以便改进海气耦合气候模式的初始场和海洋分析预报系统的边界条件等。

关键词: Argo 计划; Argo 浮标; 全球海洋

20 世纪 90 年代末, 由于没有系统的全球观测, 在地球气候变化监测方面进展甚微, 这是大家所公认的。于是, 有一些海洋学家提出, 利用现有的技术, 并通过国际间的紧密合作, 可以建立一个实时监测全球海洋的浮标观测网。Argo 计划也就应运而生。本文回顾了 Argo 计划过去 15 年所取得的进展, 并对未来 10 年内可能发生的变化进行了展望。

1 Argo 观测网历史与现状

Argo 计划^[1]是全球海洋观测系统^[2]的重要组成部分, 致力于监测全球海洋上层

温、盐度的演变。观测网使用的剖面浮标长 2 m, 通过改变自身浮力来调节深度并随海流自由漂移。在 Argo 计划中, 大部分浮标被设置在 1 000 m 深度漂移 (称为漂移深度)。Argo 浮标典型的工作循环过程如图 1 所示。浮标被布放在海面并下潜到漂移深度, 漂移约 9 d 后, 会自动下潜至 2 000 m 深度, 随后上浮到海面, 约需 6 h, 并在上浮过程中测量海水温、盐度等要素。在海面, 浮标通过卫星向地面接收站发送观测数据; 数据发送完毕后, 浮标又会自动下潜至漂移深度, 准备下一个剖面的测量, 如此往复循环。通常, 每个浮标能在 5 年 (或 5 年以上) 期间重复 200 次以上每隔 10 d 的循环观测。自 Argo 计划实施以来, 各成员国已经布放了超过 10 000 个浮标, 目前仍有约 3 900 个浮标在海上正常工作。Argo 计划明确规定, 所有数据准实时地发送给各国的天气预报中心及两个全球 Argo 资料中心 (GDACs, 位于美国和法国), 并通过它们无条件免费向广大用户提供。

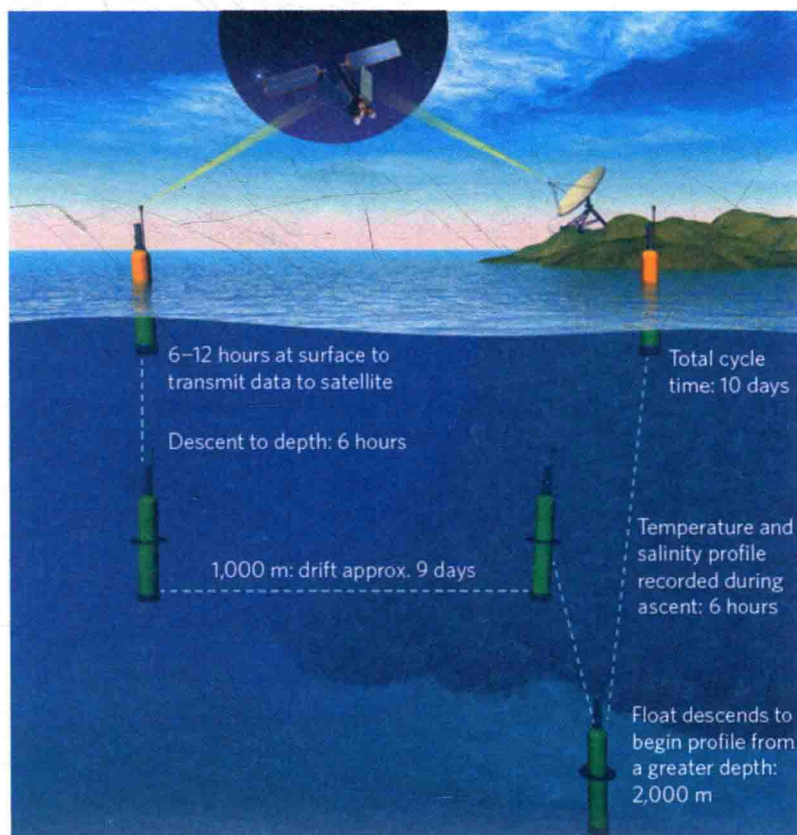


图 1 Argo 浮标典型的工作循环过程

浮标在海面开始下潜至 1 000 m (漂移深度), 并在该深度停留 9~10 d。通常 9 d 后, 浮标会自动下潜至 2 000 m 深度, 启动自身携带的采样传感器, 并在其上浮到海面过程中测量海水的温、盐度等海洋环境要素。当浮标到达海面后, 会在海面漂浮足够长的时间, 以便向 Argos 或铱卫星系统传输采集的数据。随后, 浮标再次下潜到漂移深度, 开始下一个循环。整个循环周期通常为 10 d。该图由美国斯克里普斯海洋研究所

Megan Scanderbeg 女士提供

Argo 浮标的布放始于 1999 年, 开始的计划是在 2007 年年底之前建成由 3 000 个浮标组成的全球海洋观测网, 2007 年 11 月该目标已经实现。现在, 由 Argo 观测的资料比 20 世纪获取的观测资料总和还要多 (图 2)。历史上, 海洋观测的偏差多存在于那些更容易观测的海域, 所以北半球和近海海域更具代表性。虽然 Argo 浮标无法在近海观测, 但该计划已帮助我们有效消除了在空间上存在的偏差。Argo 还极大地改善了海洋 (特别是极地海洋) 调查中的季节性观测偏差。目前, Argo 每年在南大洋获得的冬季观测剖面已经超出过去 100 年获得的剖面数量总和。全球海洋数据库中在南大洋 (30°S 以南) 的温、盐度剖面大部分来自于 Argo。

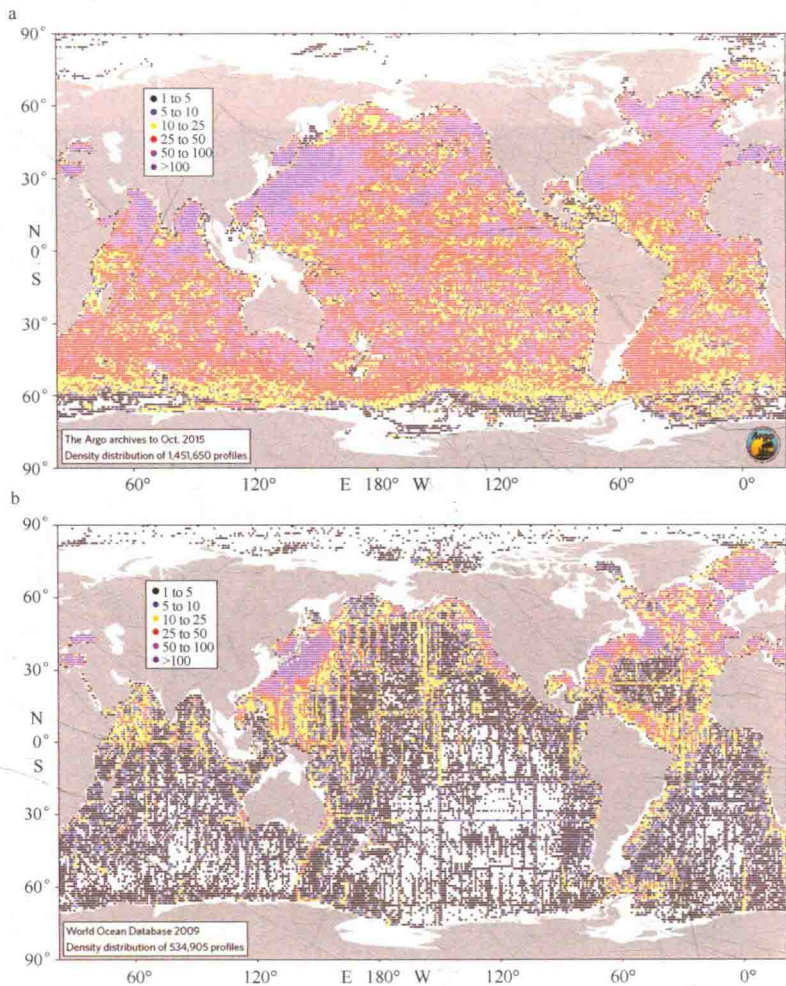


图 2 Argo 浮标剖面采样密度

a. 从 1999 年 1 月至 2015 年 10 月期间收集到了大约 150 万条剖面。数据来源于文献 [57]; b. 收集到的几乎所有历史观测数据 (过去上百年由船载仪器设备观测的 50 万条剖面数据), 来源于世界海洋数据库 2009 (WODB2009) [58]。采样密度是根据每个 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 经纬度网格中收集的剖面总量统计得到的, 并用色板表示相应的剖面数量。该统计分析仅包含不小于 1 000 m 深度、且同时具有温、盐度值的剖面

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 I 工作组提供的 2014 年第 5 次评估报告^[3], 在第 3 章中包含了一个有关“评估海洋变化的可用数据”附件, 其中显示了 1950—1955 年至 2005—2010 年期间每 5 年温、盐度剖面的分布, 可见 2000 年以前 (Argo 观测系统之前) 的资料 (包括北半球) 相当缺乏。尽管该报告没有提到季节性观测偏差问题, 但 Argo 之前的观测系统通常很少能获取冬季的观测资料。从该报告可以清楚地看到, 由于近些年海洋观测系统的扩展, 使得第 5 次评估报告明显与以前的报告有所不同^[4], 而这种改变应归因于 Argo 观测网的出现。当然仍有一些问题需要得到解决。由于 Argo 浮标必须海面传输观测数据, 使原先的浮标无法在高纬度海域的部分冰覆盖区域工作。新的浮标已经能在南极季节性冰区正常工作^[5-6]。虽然 Argo 在海洋中的覆盖并不均匀, 但我们正努力提高那些低覆盖率海域的浮标数量, 如西边界流区。

尽管 Argo 数据量已经轻而易举地超过通过传统方式获取的, 但只有保证资料的高质量才能体现其最大的价值。Argo 计划当初提出的目标是温度、盐度和压力的测量精度分别为 0.005°C 、 0.01 和 $2.5 \times 10^4 \text{ Pa}$ (相当于 2.5 m)。已有的结果表明, 约 80% 的原始剖面数据在经过很小的校正或不用校正, 就能达到该精度标准, 剩余 20% 的数据使用过去 10 多年间开发的延时模式质量控制方法^[7-9]校正后, 同样也能满足该精度要求。开发业务化预报系统的机构需要及时获取数据, 目前约 90% 的 Argo 数据能在浮标观测后的 24 h 内进行发布。

2 最新成果与发现

Argo 计划的最大价值体现在其数据集的广泛应用: 从 20 世纪 90 年代末 Argo 计划开始实施起, 已经有近 2 100 篇相关科学论文使用了 Argo 数据, 彰显了 Argo 观测网对有关海洋与气候基础科学的促进作用。早在 Argo 观测网实施前 1 个世纪, 人类便开始了对这些全球海洋重要状态参数的观测 (而流速通常采用推断方法获得)。20 世纪 80、90 年代期间开展的世界大洋环流实验 (WOCE), 沿着一系列横穿世界大洋的断面获得了 8 000 多条高质量的船载 CTD 剖面资料, 这对认识和估算当时海洋状态提供了重要的数据源。然而, 由于断面数量有限, 使得 WOCE 对全球海洋的观测留下了大量空白区域, 尤其在南大洋海域。为此, 全球 Argo 海洋观测网的高时、空分辨率的采样及其高质量的观测数据, 为人类进一步认识海洋环流提供了新的视角。

尽管科学家利用从 20 世纪 80 年代开始收集的成千上万条船载海洋温盐度资料, 经过平均之后得到了全球海洋图集^[10], 但正如前面提到的, 这些图集受到观测密度和频次的影响, 误差较大。随着 Argo 海洋观测网在全球绝大多数海域内获取的观测数据, 无论是在表层还是次表层, 在全球海洋还是局地海域, 均可以得到前所未有的海洋温、盐度详细结构^[11], 并可为估算一些气候指标 (例如海洋热含量和海平面变化等) 提供可靠的依据。利用 Argo 浮标漂移轨迹估算得到的全球海洋流场数据

集^[12], 已经开始应用到海洋内部流场验证的系统研究中^[13-14]。Argo 资料也被用来改进对海洋复杂空间变化(尺度小于气候尺度)的研究^[15-16]。虽然, Argo 计划启动之初并没有涉及到这些方面, 但许多有关中尺度涡和重力内波的研究工作, 也都开始使用 Argo 剖面资料^[17]。

Argo 观测网为全球海洋观测系统中的其他组成部分提供了极大地补充, 特别是卫星高度计。Argo 浮标的现场观测资料与卫星高度计反演的海表高度异常数据相结合, 可以构建出时间序列的海洋环流动力学状态(如北大西洋的经向翻转流^[18]和高分辨率的三维温度场^[19])。目前在一些海域, 已有将卫星高度计资料和浮标轨迹资料结合计算得出相对于 $1\,000 \times 10^4$ Pa 的绝对地转流的方法^[20-21]。Argo 资料 and 高度计资料已经在海洋分析与预测等领域开始系统应用。许多气候模式也都同化了 Argo 次表层温度资料, 大大提高了模式对大气的季节内波动、季风活动以及海气相互作用(如 ENSO)等问题的预报能力^[22]。

由于 Argo 观测资料可以全面反映海洋状态, 从而为研究海洋年代际或更长时间尺度的变化提供了可靠依据。Argo 观测与 19 世纪下半叶开展的“挑战者”号考察对比, 提供了一个极好的案例^[23]。该项研究揭示了过去 135 a 中, 海洋温度的增加值从表层的 0.6°C 逐渐减小到 1 000 m 处的 0°C (图 3)。另外, 在 135 a 中 900 m 以上海洋温度平均增加了 0.3°C 。由气候模式获得的相似结果进一步证实了这种变化^[24]。由于过去半个世纪对全球海洋仅有稀疏的观测数据, 故当前揭示的海洋温度变化可能早就发生了。这也进一步强调了海洋在气候变化中的作用, 以及长期维持全球观测系统的必要性。

通过将 2004—2008 年期间的 Argo 数据与 2001 年以前的船载 CTD 数据进行对比^[25-26], 揭示了近数十年海洋 0~1 000 m 范围内温、盐度全球尺度的变化。对比结果表明, 近 10 年大部分海洋近表层温度的升高都要比过去几十年大, 一些海域甚至超过了 1°C 。部分海域也存在下降的趋势(如从智利到阿拉斯加的东太平洋海域温度降低了 1°C)。从 20 世纪中叶开始, 全球上层海洋平均温度升高 0.2°C 。近期的研究表明, 截至 2013 年, 这种上升趋势并没有改变^[27]。

Argo 计划启动以前, 海洋盐度资料比温度要少很多, 20 世纪 80 至 90 年代的 WOCE 计划期间, 只在一些重复断面上收集到了部分高质量盐度观测资料。随着 Argo 计划的启动, 了解 0~2 000 m 范围内的盐度变化才成为可能。与温度一样, 将 Argo 观测的盐度与早期收集的盐度资料进行对比后发现, 盐度也存在年代际变化^[28]。相关研究通过将 Argo 与历史资料对比, 发现在每一个海盆中都存在一个上层海洋盐度变化的模式^[29], 这一变化与表层海水增暖一致, 导致冬季密度“露头”现象(密度锋)向极地迁移。由于在赤道与两极之间的海表面存在温、盐度水平梯度, 导致在任意纬度上的海表水均下沉, 并向赤道方向输运, 随之在高纬度海域会产生一个低盐区。在中纬度海区, 表层升温导致海水蒸发量增加, 从而使得近表层盐度增加。盐度在表层和海盆尺度的变化存在正反馈机制^[28-30]。也就是说, 在盐度高的海区会持续

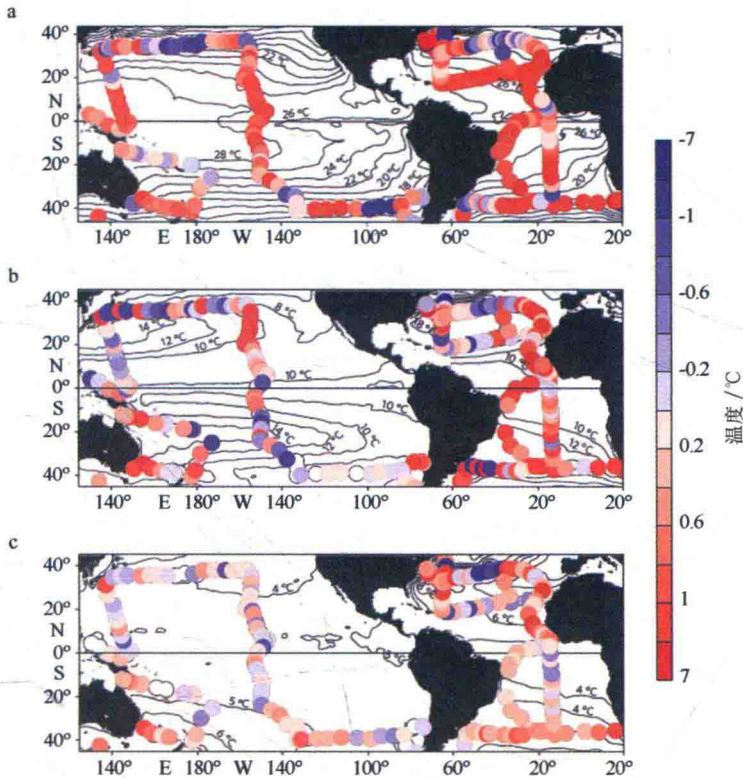


图3 2004—2010年期间全球海洋平均温度分布

a. 海表温度; b. 366 m 水深处温度; c. 914 m 水深处温度。带色的圆点代表 Argo 与“挑战者”号观测间的温度差, 对应差值可参考色彩比例尺。该图由自然出版集团据文献 [23] 重绘

升高, 而在盐度低的海区则会持续降低。这与通过大气进行输送的水汽净增量一致。这种现象同样呈现在使用近似克劳修斯-克拉贝隆 (Clausius-Clapeyron) 热力学方程的气候模式结果中^[30]。

在较区域尺度更大的范围内, Argo 资料被用来研究海洋深层通风的自然变化, 这对热量和气体进入次表层海洋起关键作用。这一过程主要发生在部分北大西洋与南极海域的高纬度地区, 而由此产生的深海环流对世纪尺度的全球气候变化有着重要影响^[31]。过去 10 年大量的观测资料 (包括 Argo 资料、船载 CTD 资料和大气热通量等) 表明, 北大西洋高纬度地区的拉布拉多/伊尔明厄海域 (Labrador/Irminger Sea) 深层对流强度的年际变化与冬季大气状态之间存在很密切的联系^[32]。该研究结果极大地体现了 Argo 对了解拉布拉多海 (Labrador Sea) 深层对流变化的观测能力, 并呈现了自 2008 年以来, 深层对流强度在 2014 年达到最大 (图 4)^[33]。

一些文献也涉及了近表层温、盐度变化的影响等更为具体的科学问题。例如利用 Argo 资料和历史 CTD 资料的对比发现, 在北太平洋中央的热带与亚热带海域, 上层海洋的盐度正在普遍下降, 这可能与这一区域的源头海水 (高纬度海域冬季混合层

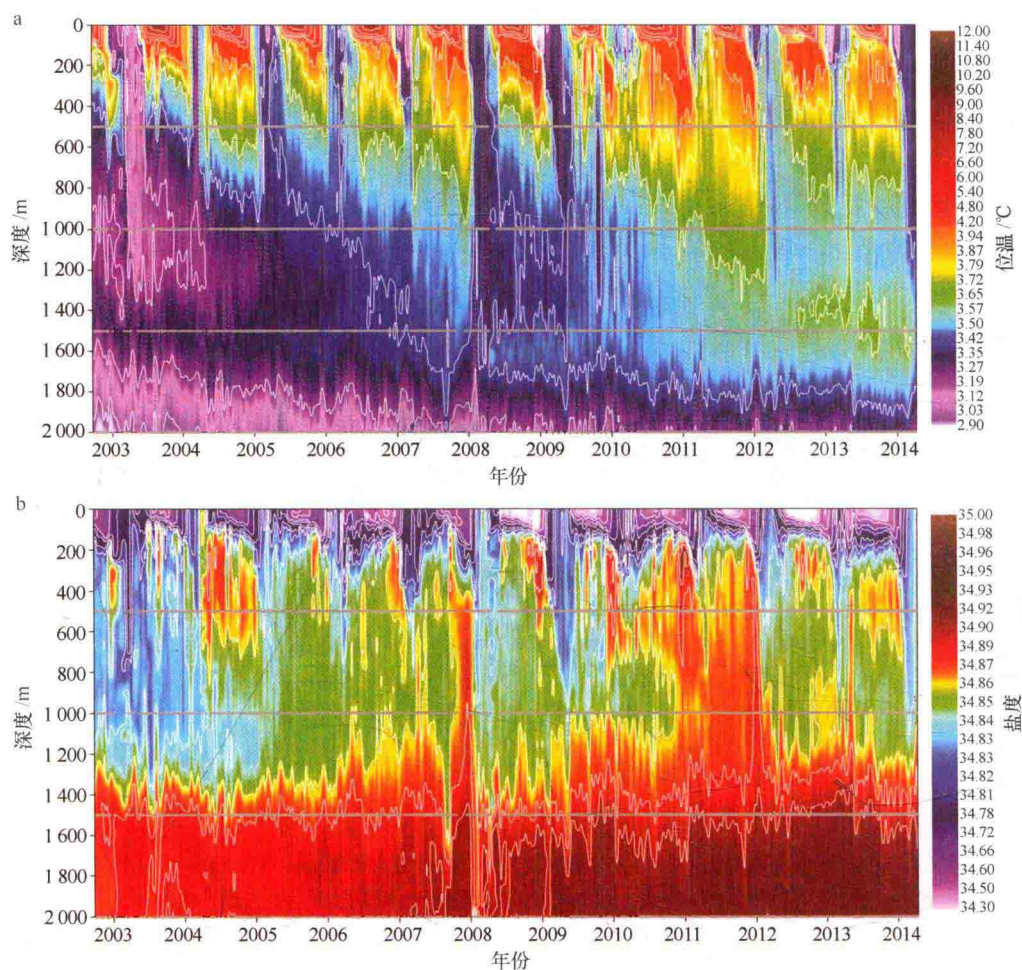


图4 拉布拉多海 (Labrador Sea) 对流

2002—2014 年期间拉布拉多海 (Labrador Sea) 2 000 m 上层位温 (a) 和盐度 (b) 两周一次到年际的变化。数据来自质量控制后的 Argo 资料和船测剖面资料。该图由加拿大贝得福德海洋研究所 Igor Yashayev 先生提供, 并据文献 [32—33] 更新了数据

内的海水) 的盐度正在降低有关^[34—35]。而高纬度海域混合层内海水的淡化又与区域降水增加, 以及区域增温导致的源头海水北移等两方面因素的共同影响有关。该区域的可用数据 (包括 Argo 资料以及其他观测资料) 已足够使研究者构建其真实的区域热量收支模型, 结果表明, 表层密度与盐度随时间的变化主要依赖于区域降水和冬季次表层水向混合层的运输。而从目前的数据来看, 这些影响因子正随着气候的变化而变化。在北太平洋的其他海域也有相关研究, 如源于温哥华岛的一条调查断面, 从 20 世纪 50 年代开始就一直保持利用调查船进行定期考察, 近年来 Argo 观测资料也覆盖了该断面。通过历史资料与 Argo 资料的对比发现, 亚极地表层水正在变暖变淡, 从而导致表层水密度降低且层化加强, 进而降低了大气对海洋次表层的影响^[36]。