第41卷 第10期
2019年10月
海 洋 学 报
Haiyang Xuebao
Vol. 41 No. 10
October 2019

魏泽勋, 郑全安, 杨永增, 等. 中国物理海洋学研究 70 年: 发展历程、学术成就概览[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 23–64, doi:10.3969/j.issn.0253−4193.2019.10.003

Wei Zexun, Zheng Quanan, Yang Yongzeng, et al. Physical oceanography research in China over past 70 years: Overview of development history and academic achievements[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 23–64, doi:10.3969/j.issn.0253−4193.2019.10.003

中国物理海洋学研究 70 年:发展历程、学术成就概览

魏泽勋[1], 郑全安[2], 杨永增[1], 刘克修[3], 徐腾飞[1], 王凡[4,17], 胡石建[4], 谢玲玲[5], 李元龙[4], 杜岩[6,17], 周磊[7], 林霄沛[8], 胡建宇[9], 朱建荣[10], 李均益[5], 张正光[8], 侯一筠[4,17], 刘泽[4], 田纪伟[8], 黄晓冬[8], 管玉平[6,17], 刘志宇[9], 杨庆轩[8], 赵玮[8], 宋振亚[1], 刘海龙[11,17], 董昌明[12], 于卫东[13], 连涛[14], 陈朝晖[8], 史久新[8], 雷瑞波[15], 刘煜[13], 于福江[13], 尹宝树[4,17], 陈戈[8], 王岩峰[1], 李整林[16,17], 熊学军[1], 汪嘉宁[4], 李晓峰[4], 王永刚[1]

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 马里兰大学, 马里兰州 学院市 20742; 3. 国家海洋信息中心, 天津 300171; 4. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 5. 广东海洋大学, 广东 湛江 524088; 6. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 7. 上海交通大学, 上海 200030; 8. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 9. 厦门大学, 福建 厦门 361005; 10. 华东师范大学, 上海 200241; 11. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 12. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 13. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 14. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 15. 中国极地研究中心, 上海 200136; 16. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 17. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文概略评述新中国成立70年来物理海洋学各分支研究领域的发展历程和若干学术成就。中国物理海洋学研究起步于海浪、潮汐、近海环流与水团, 以及以风暴潮为主的海洋气象灾害的研究。随着国力的增强, 研究领域不断拓展, 涌现了大量具有广泛影响力的研究成果, 其中包括: 提出了被国际广泛采用的"普遍风浪谱"和"涌浪谱", 发展了第三代海浪数值模式; 提出了"准调和分析方法"和"潮汐潮流永久预报"等潮汐潮流的分析和预报方法; 发现并命名了"棉兰老潜流", 揭示了东海黑潮的多核结构及其多尺度变异机理等, 系统描述了太平洋西边界流系; 提出了印度尼西亚贯穿流的南海分支 (或称南海贯穿流); 不断完善了中国近海陆架环流系统, 在南海环流、黑潮及其分支、台湾暖流、闽浙沿岸流、黄海冷水团环流、黄海暖流、渤海环流, 以及陆架波方面均取得了深刻的认识; 从大气桥和海洋桥两个方面对太平洋–印度洋–大西洋洋际相互作用进行了系统的总结; 发展了浅海水团的研究方法, 基本摸清了中国近海水团的分布和消长特征与机制, 在大洋和极地水团分布及运动研究方面也做出了重要贡献; 阐明了南海中尺度涡的宏观特征和生成机制, 揭示了中尺度涡的三维结构, 定量评估了其全球物质与能量输运能力; 基本摸清了中国近海海洋锋的空间分布和季节变化特征, 提出了地形、正压不稳定和斜压不稳定等锋面动力学机制; 构建了"南海内波潜标观测网", 实现了对内波生成–演变–消亡全过程机理的系统认识; 发展了湍流的剪切不稳定理论, 提出了海流"边缘不稳定"的概念, 开发了海洋湍流模式, 提出了湍流混合参数化的新方法等; 在海洋内部混合机制和能量来源方面取得了新的认识, 并阐述了混合对海洋深层环流、营养物质输运等过程的影响; 研发了全球浪–潮–流耦合模式, 推出一系列海洋与气候模式; 发展了可同化主要海洋观测数据的海洋数据同化系统和用于 ENSO 预报的耦合同化系统; 建立了达到国际水准的非地转 (水槽/水池) 和地转 (旋转平台) 物理模

收稿日期: 2019-08-06; **修订日期:** 2019-09-06。

作者简介: 魏泽勋(1970—), 男, 安徽省巢湖市人, 从事海洋环流、潮汐潮流的数值模拟和理论研究。E-mail: weizx@fio.org.cn

注: 第三名及以后作者排名不分先后

型实验平台；发展了ENSO预报的误差分析方法，建立了海洋和气候系统年代际变化的理论体系，揭示了中深层海洋对全球气候变化的响应；初步建成了中国近海海洋观测网；持续开展南北极调查研究；建立了台风、风暴潮、巨浪和海啸的业务化预报系统，为中国气象减灾提供保障；突破了国外的海洋技术封锁，研发了万米水深的深水水听器和海洋光学特性系列测量仪器；建立了溢油、危险化学品漂移扩散等预测模型，为伴随海洋资源开发所带来的风险事故的应急处理和预警预报提供科学支撑。文中引用的大量学术成果文献(每位第一作者优选不超过3篇)显示，经过70年的发展，中国物理海洋学研究培养了一支实力雄厚的科研队伍，这是最宝贵的成果。这支队伍必将成为中国物理海洋学研究攀登新高峰的主力军。

关键词：物理海洋学；海浪；潮汐；海平面；大洋环流；水团；陆架与边缘海环流；海洋中尺度过程；湍流与混合；数值模拟与数据同化；实验室模拟；大洋与气候；海冰与极地考察；海洋气象与灾害；海洋物理学；海洋环境

中图分类号：P733 **文献标志码：**A **文章编号：**0253-4193(2019)10-0023-42

1 引言

物理海洋学是以物理学的理论、技术和方法，以海水的物理性质和运动为研究对象，阐释海洋中的物理现象及其变化规律，并研究海洋水体与大气圈、岩石圈和生物圈的相互作用的科学[1-2]。它是海洋科学的一个分支，与大气科学、海洋化学、海洋地质学、海洋生物学有密切关系[2]。物理海洋学涵盖的内容包括海浪、潮汐、海洋环流、中尺度涡旋、湍流、混合、气候变化等过程，采用的研究手段包括卫星和现场观测、数值模拟和理论分析，其研究成果在海洋灾害预警预报、海洋环境安全保障、海洋权益维护、海洋资源开发、海上工程、气候预测等方面具有重要应用。

新中国成立70年以来，随着国家实力的增强，中国的物理海洋学研究在调查观测、理论研究和数值模拟及预报方面取得了长足的进步，在海浪、潮汐与海平面、大洋环流、水团和陆架环流、海洋中尺度过程、湍流与混合、数值模拟与同化、实验室模拟、海气相互作用与气候、海冰与极地、海洋气象、海洋物理等方面取得了丰硕的成果，组织实施了针对中国近海、大洋和极地的多个大型观测计划和国际合作项目，成果在海洋环境安全保障中得到良好的应用。

物理海洋学是一门以调查观测为基础的学科。新中国成立早期，受国力所限，调查观测主要限于中国近海，于1957–1960年间先后开展了渤黄海同步观测和全国海洋普查[3]。在此基础上，我们得以对中国近海的海流、水团、跃层分布以及它们的季节变化等有了一个概括的了解。进入20世纪80年代以来，随着改革开放，中国的物理海洋学家有机会进行国际交流，并逐渐开始走向大洋和极地：在1980–2000年间，通过中美、中日、中韩、中朝等国际合作，在热带西太平洋、南海、东海、黄海等海域开展了科学考察研究，其中，中国台湾开展了黑潮边缘交换过程（Kuroshio Edge Exchange Processes, KEEP)；参加了世界大洋环流实验（World Ocean Circulation Experiment, WOCE)、全球海平面观测系统（Global Sea Level Observing System, GLOSS)、热带海洋与大气研究计划（Tropical Ocean-Global Atmosphere, TOGA)等国际海洋计划[4]；大力推进了印度洋的观测[5]；1980年，中国学者董兆乾和张青松前往澳大利亚南极凯西站进行考察；1984和1999年，中国科考船开始挺进南极和北极海域[2]。进入21世纪以来，相继启动了中国Argo实时观测网[6]、“我国近海海洋综合调查与评价专项”[7]、“全球变化与海气相互作用专项”[8]、“南北极环境综合考察与评估专项”[9-10]等一系列专项；发起了由中国学者主导的中–印尼国际合作[11]、西北太平洋海洋环流与气候实验（Northwestern Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment, NPOCE)国际计划等大型海洋科学考察[12]。2017年8月28日至2018年5月18日，完成了为期263 d的环球海洋综合科学考察，在印度洋、大西洋、南极周边海域和太平洋开展了水文气象断面调查、潜/浮标等定点观测、水下滑翔机观测等工作。

物理海洋学是一门建立在物理框架下的、具有很强实用性的学科。新中国成立初期，由于海洋环境安全和国民经济建设的迫切需要，中国的物理海洋学研究主要以海浪、潮汐、近海环流与水团，以及海洋气象灾害（特别是风暴潮）为主。1959年，中国第一部有关潮汐分析和预报的手册《实用潮汐学》[13]出版；1962年，文圣常撰写的《海浪原理》[14]专著问世，开创了中国的海浪研究；1964年，毛汉礼等人首次提出中国近海跃层的研究方法，出版了《中国海温、盐、密度

跃层》[15]; 同年, 赫崇本编写了《中国近海的水系》(见《全国海洋综合调查报告》)[3], 是中国学者首次论述中国近海水系和水团结构及其季节变化的重要文献; 1966 年, 专著《海流原理》[16] 出版, 是中国最早系统介绍海洋环流的著作; 在 1955–1963 年间, 毛汉礼先后翻译了《动力海洋学》(J. Proudman 著)、《海洋》(H. U. Sverdrup 著)、《湾流》(H. Stommel 著), 撰写了《海洋科学》[17] 等著作; 赫崇本主持编写了《海洋学基础理论丛书》、《海洋学》、《潮汐学》, 为中国物理海洋工作者的培养提供了教材。至此, 中国物理海洋学研究初具规模, 建立了自己的研究体系。20 世纪 80 年代以来, 《潮汐学》[18]、《风暴潮导论》[19]、《海雾》[20]、《海浪理论与计算原理》[21]、《潮汐和潮流的分析和预报》[22]、《中国近海水文》[23] 等物理海洋学专著陆续出版, 形成了具有中国特色的物理海洋学体系。随着中国走向大洋和极地需求的增强, 中国积极发展大洋和极地的观测与研究, 在太平洋西边界流[24]、大洋环流与气候变化[25–26]、极地海洋学[27] 等方面均做出了有影响力的成果, 逐步进入了国际前沿研究领域。

在数值模拟和数据同化方面, 中国学者提出了新型混合型海浪数值模拟方法, 发展了第三代海浪模式[28]; 提出了风暴潮预报方法, 建立了超浅海风暴潮数值预报模型[19]; 发展了第三代潮汐潮流预报系统[29]; 推出了 LASG/IAP 气候系统海洋模式(LASG/IAP Climate System Ocean Model, LICOM)系列海洋环流模式[30]; 发展了海浪–潮流–环流耦合数值模式 FIO-COM[31]; 发展了中等复杂的厄尔尼诺–南方涛动(El Niño-South Oscillation, ENSO)预测模型[32]; 推出了 FGOALS、FIOESM、BCC-CSM、BNU-ESM 等气候耦合模式并参与国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Phase, CMIP)[33]。

由于国外的技术封锁, 中国在以海洋声、光、电等物理现象为基础的海洋探测应用技术方面走上了自主研发的道路, 在海洋物理理论和技术研究中取得了突破, 研制了一批具有自主知识产权的海洋探测装备和传感器, 提升了中国海洋观测的技术保障能力。

经过 70 年的不懈奋斗, 物理海洋学研究在实现“查清中国海, 进军三大洋, 登上南极洲”这一海洋梦想的过程中写下了浓重的一笔。本文将从海浪、潮汐与海平面变化、水团、陆架环流、海洋中尺度过程、湍流与混合、数值模拟和数据同化、实验室模拟、大洋环流与气候变化、大型观测、海冰与极地、海洋气象与灾害、海洋物理, 以及海洋环境应用等诸方面, 以作者视野概略记述中国物理海洋学研究 70 年来取得的若干进展。

撰写本文是海洋学报编委会 2019 年 3 月 30 日北京会议决定的, 分工第一(中文版副主编)和第二作者(英文版副主编)牵头, 邀请物理海洋学科有代表性的单位专家共襄盛举。为贯彻会议对综述论文要突出“创新”和“亮点”的要求, 作者团队在撰写过程中遵循如下共识: (1)本文将以公开发表学术论文形式投稿, 只收集和引用已公开发表的、能检索到的成果和资料, 包括学术期刊论文、专著、研究报告、学术会议报告、学位论文以及政府和国际组织文告等, 不收集、不引用未曾公开发表的资料。(2)综述范围涵盖物理海洋学所有分支学科或研究领域(还包括海洋物理学和部分气候学)。这些领域均为物理海洋学有机组成部分, 无先后轻重之分。因此, 篇幅分配大致均等, 发扬中国物理海洋学界历来的“百花齐放百家争鸣”优良传统。(3)尊重学科发展的历史传承, 务必发掘并引用各分支学科新中国成立以来最早期和各阶段代表性研究成果。内容取舍突出“创新”和“亮点”。(4)贯彻学术民主。在文章篇幅受限情况下, 限定每位第一作者被引用文献最多不超过 3 篇, 给更多学者特别是后起之秀崭露头角的机会。港、澳、台和海外国人成果一视同仁。适量引用外国学者中国近海研究代表性成果。(5)写作风格贯彻“实事求是不尚空谈”精神, 以记述科学事实、数据和文献为主线, 摆出史实和事实, 评述自在其中。

2　海浪、潮汐与海平面

2.1　海浪

海浪是中国最早开展研究的物理海洋学分支之一。70 年来, 在海浪理论、现场观测、室内实验、数值模拟和预报等方面均取得了长足的进步。中国学者在不同时期进行过较系统的回顾和展望[34–35]。2000 年之后, 在海浪破碎、海气界面通量、海浪–环流耦合等方面又取得了许多新的突破。

文圣常是中国海浪研究的开创者。他于 1962 年出版的专著《海浪原理》[14], 以及同余宙文合著的《海浪理论与计算原理》[21] 是中国海浪研究的奠基性著作。文圣常提出了随风时或风区成长的普遍风浪谱, 被誉为“文氏风浪谱”, 在海浪研究和预报中得到广泛应用[34]。在海浪谱理论的发展历程中, 其他学者通过引入不同参量和因子, 或从非线性动力学角度, 对海浪的频谱特征、生消过程、细结构等进行了解析[34]。

在海浪统计方面, 中国学者通过引入随机过程理

论，逐渐形成了三维海浪要素的统计分布理论，建立了海浪波面及波高的非正态模型，并对波群的统计性质开展了研究，还将“信息熵”的概念引入海浪统计[34,36]。

在海浪理论方面，袁业立建立了非线性风浪在波数空间成长演化的广义 Schrödinger 方程，丁平兴、孙孚、尹宝树等在风浪非线性频散、非线性波浪的传播与变形、近岸波浪与潮汐风暴潮相互作用等方面进行了理论与数值研究[34, 37]。陈戈等利用卫星高度计与散射计资料揭示了全球“涌浪池”及其特性[38]。

海浪研究的另一个重要进展是海浪及破碎在海气交换、上层海洋混合中的作用。中国学者自 20 世纪 80 年代开始在此做了许多很有特色的工作[34, 39–42]，开展了波–湍相互作用的水槽实验[43] 和现场观测研究[44]，以及海浪波生切应力作用研究[45–46]。浪致混合理论的建立[44, 47]，改进了现有混合参数化方案中上层海洋混合不足的问题，改善了海洋和气候模式对海洋上混合层的模拟[44]。通过波–湍相互作用和波生辐射应力，海浪在台风、海冰、悬沙输运、风暴潮过程中也起关键作用。

在海浪数值模式及其应用方面，从 1986 年启动的“七五”国家科技攻关开始，先后研发了混合型海浪数值模式[48]、第二代海浪数值预报模式 YW-SWP[49]、第三代海浪数值模式 LAGFD-WAM[28] 和球坐标系下的 MASNUM 全球海浪数值模式[50]。同时，基于卫星高度计和合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）遥感的海浪同化也得到快速发展[48]，并用于业务化海浪数值预报[51]。

2.2　潮汐与海平面变化

新中国成立前，中国的潮汐观测和研究十分薄弱，全国仅有 10 余个验潮站，其中 8 个只有高低潮记录，且大量资料因战乱遗失。1948 年编印的潮汐表只有吴淞等 5 个主港的每日高、低潮预报，有些预报值直接抄录国外潮汐表，预报精度也较低[52]。新中国成立后，海军海道测量部门陆续建立了 20 多个长期验潮站。1964 年，国家海洋局成立，开始长期验潮站建设。目前，国家海洋部门业务化运行的长期验潮站共 120 多个，1999 年还在中山站附近建成中国首个南极永久性验潮站。

《实用潮汐学》是中国第一部有关潮汐分析和预报的手册，总结了中国从新中国成立初期采用达尔文调和分析法手工推算潮汐预报，到 20 世纪 50 年代末，引入前苏联杜瓦宁（A. И. Дуванин）非调和方法进行“潮流大面积预报”的工作[13]。1958–1960 年间，根据全国海洋普查开展的 500 多站潮流观测，编制了“潮流永久预报表”。1960 年初，方国洪提出了“准调和分析方法”，被采用为国家标准沿用至今[22, 53]。郑文振和方国洪还给出了中国近海潮波传播示意图和初步的动力解释[3]。

20 世纪 50 年代末，前苏联海洋学家Ъорис最先开展了中国近海的潮波数值模拟。1969 年，在方国洪的倡议下，成立了潮流预报协作研究组，开始了长达 10 年的潮汐潮流预报研究[29]。期间，方国洪等建立了二维潮汐潮流数值模式和潮波方程的变分数值模式，提出了明显优于杜瓦宁法的潮流永久预报新方法，在 1973–1978 年间陆续编制了《中国近海潮流永久预报图表集》，实现了中国近海全海区、多层次潮流预报。中国学者还提出了 jv 模型、潮汐波面分析、不完整记录分析等方法，取得了很好的应用效果[22, 54]。以这些成果为基础的《潮汐学》[18] 和《潮汐和潮流的分析和预报》[22] 是这一时期的代表性著作。

20 世纪 90 年代后期，卫星高度计观测开始用于潮汐研究和模式同化[55–58]。随着计算机的普及和发展，大区域、高精度、可视化的潮汐潮流预报系统成为主流，直接服务于国防和经济建设[29, 58]。现在，在中国海事服务网、国家海洋信息中心全球潮汐预报服务网、各地方海洋预报、气象、水利等部门网站均可以方便地查询沿海各地的潮汐潮流预报。手机应用软件也推出了潮汐潮流预报服务。基于数值模拟等方法，中国学者在潮波动力学方面也取得了丰硕的成果[22, 59–60]。

中国海平面变化研究始于 20 世纪 80 年代，1989 年开始发布《中国海平面公报》。2006 年，中国启动基准潮位核定工作，并于 2015 年颁布了《基准潮位核定技术指南》国家海洋行业标准。2009–2011 年在 56 个验潮站加装全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）设备，实时监测各站高程变化。2009 年起组织开展全国沿海省市海平面变化影响调查评估，并根据国务院领导要求，编制了《海平面上升影响评估专题报告》。2011 年 8 月，首次发射搭载高度计的海洋卫星 HY-2，实现了对全球海平面的持续监测。2014–2015 年开展全国海洋站水准连测。随着 21 世纪以来国家对气候变化的重视，中国在中国近海乃至全球海平面的监测、研究和影响评估及应对等方面取得了一系列进展[61–62]。

3　大洋环流、水团和陆架环流

3.1　太平洋

新中国成立初期，由于远洋科学调查能力的欠缺

和国际局势的动荡，中国大洋环流的研究极为薄弱。20 世纪 50–60 年代，毛汉礼等人率先开始了对大洋环流和西边界流的理论研究[63]。部分学者注意到西北太平洋环流场及其海温对东亚气候的影响[64–65]。改革开放之后，随着中日黑潮合作调查、中美联合调查，以及参与 TOGA 等国际研究计划[66]，中国对西太平洋的系统性科学探索得以起步。

1980–1990 年间开展的中日黑潮联合调查，对黑潮认识和研究上取得了众多突破：揭示了黑潮多核结构、发现了东海黑潮逆流、揭示了东海黑潮流量季节与年际变化及其机理、揭示了东海黑潮热通量季节变化及物质通量变化等[67–68]。在同一时期，中国海洋学家在热带西太平洋环流结构方面取得了一系列新的科学发现，发现并命名了“棉兰老潜流”[24]、“吕宋潜流”[69] 和“北赤道潜流”[70]，探讨了它们的动力学机理[71] 和水团特性[71]，建立了西太平洋次表层环流体系[24]；开展了西太平洋上层环流的定量研究，估算了西太平洋北赤道流、棉兰老流和源地黑潮的流量[71]，开展了太平洋行星波动影响海洋环流的研究[72–73]。

进入 21 世纪之后，随着远洋调查能力的增强，获得了对西太平洋环流动力过程更为深刻的认识，通过长期潜标观测证实了棉兰老潜流、吕宋潜流和北赤道潜流的存在，揭示了其多尺度变异规律[74–76]；指出西太平洋活跃的中尺度涡旋[77–80] 和风生 Rossby 波[81] 是环流高频变异的主要来源[74, 82]；研究了太平洋和南海的相互作用过程，包括黑潮入侵、Rossby 传播等[25, 83]；探讨了中尺度涡旋与大尺度环流之间的复杂涡–流相互作用及其对环流的结构和形态的影响[84–85]；指出太平洋内区的真实环流结构与 Sverdrup 理论具有差异，发现了北赤道逆流之下向西流动的“北赤道次流”[86]。

中国学者在西太平洋环流的低频变异及其与气候变化关系的研究方面也取得了众多成果：对太平洋赤道流分叉点多尺度变异机理[87–88]、太平洋环流异常对水团分布的影响及其与 ENSO 的联系做出了解释[75, 89–94]；指出在人类活动的影响之下，西太平洋环流逐渐显现出了复杂的响应趋势[95–96]，且在副热带西边界流区出现全球海洋增暖的“热斑”现象[24]。

中国是较早对西太平洋暖池（全球最大的暖水库）开展研究的国家之一，分析了暖池的基本分布特征及其与 ENSO 的联系[97–98]，指出暖池是在现代地形和海洋–大气动力过程共同作用下形成的[99]。近年，中国学者提出了暖池“热心”概念，揭示了西太平洋暖池“分裂”现象及其对 ENSO 的影响[100]。

太平洋内部的副热带翻转环流（Subtropical Cell, STC）和热带翻转环流（Tropical Cell, TC）对 ENSO 的低频变异有潜在作用。中国科学家完善了 STC 的动力学框架[101]，指出热带风场强迫是 STC 低频变异的主要原因[102–104]，并可影响 ENSO 的年代变异 [105]；对 STC 下沉分支的变异机理也进行了探索[106–107]，发现 TC 表层和中层相对于赤道幅散、温跃层幅聚的三层结构[108–109]。

3.2　印度洋

印度洋环流是全球大洋环流的重要组成部分。新中国成立初期，中国在印度洋开展的研究相对较少。改革开放之后，随着国家需求向印度洋延拓，中国学者逐渐开始印度洋海洋学研究。早期主要关注的问题大多集中在热带印度洋海气相互作用及其对季风的影响[110] 以及赤道印度洋–太平洋海气系统的耦合关系[111–112]，主要研究对象大多为海表温度，并提出了热带太平洋–印度洋海温联合模态的概念[113]。中国台湾学者参与了 1957–1965 年间实施的国际印度洋科学考察计划（IIOE）。但总体而言，在 2000 年以前，中国对印度洋环流研究较为缺乏。

季风环流是印度洋环流系统区别于太平洋和大西洋的主要特征。在季风转换期间，赤道印度洋表现为自西向东的 Wyrtki 急流。中国学者基于多种观测资料，对 Wyrtki 急流的特征和变异机制进行了研究[114]，指出 Wyrtki 急流分叉对东印度洋盐度平衡有重要作用[115]。另外，在印度洋存在明显的上升流和下沉流区，中国学者对位于西南印度洋的隆起区[116]、位于爪哇岛西侧的上升流[117] 和位于东南印度洋的下沉流[118] 开展了研究。2010 年起，通过组织实施每年一次的国家自然科学基金委员会东印度洋共享航次，积累了丰富的水文站位调查和潜标海流剖面连续观测数据，在热带印度洋环流多尺度变异方面取得了许多新的认识[119]。最近，印度洋经圈环流和南印度洋副热带环流也受到关注，中国学者利用卫星遥感、漂流浮标、Argo 等观测资料和数值模拟等手段，对印度洋热带环流圈热盐输运[120–121]、南印度洋副热带环流[121–122]、副热带模态水[123]等进行了研究。

印尼贯穿流是印度洋环流系统的另一个显著特点。它是全球在低纬度连接两个大洋的唯一水道，也是全球热盐环流的重要通道之一，可以通过改变热带–副热带交换、热带温跃层结构、暖池和冷舌平均温度梯度等的季节–年际变化来影响厄尔尼诺。中国学者较早地关注了印尼贯穿流与南海环流的关联[25, 124–129]，提出了印尼贯穿流南海分支[128] 和南海贯穿流[130]，指出盐度在印尼贯穿流输运变化中具有重要作用[131]。

3.3　洋际相互作用

随着覆盖全球的观测系统投入运行和地球系统模式的快速发展，物理海洋和气候学研究开始关注洋际相互作用，而不仅仅关注单个大洋。洋际相互作用主要通过大气桥和海洋桥实现。

近期，青岛海洋科学与技术试点国家实验室领衔全球众多学者在 *Science* 杂志刊发题为“Pantropical climate interactions”的综述文章，回顾和总结了目前热带太平洋–印度洋–大西洋气候系统之间相互作用的最新研究进展，指出热带印度洋和大西洋海温变化可通过引起太平洋海表面风场异常来调制潜热通量和热带海洋波动，从而影响太平洋气候系统[132]（图 1）。

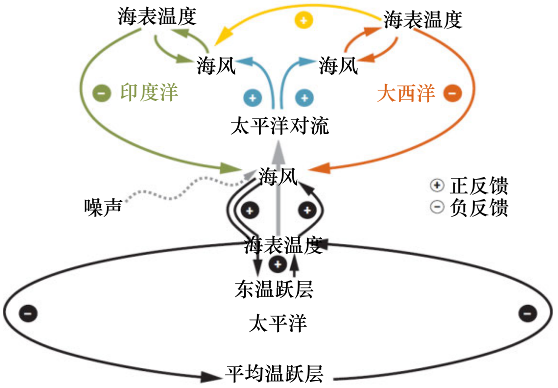

图 1　热带太平洋–印度洋–大西洋之间的海气反馈过程示意图[132]

Fig. 1　Pantropical feedbacks affecting ENSO[132]

大气桥过程通过某洋盆海温异常激发的热带大气波动、遥相关波列和风暴轴调整来调制另一洋盆的海表面热通量和海平面高度，并在某些海域通过海气相互作用局地放大或传播异常信号。中国学者指出，热带大西洋在近几十年主导了热带的低频变化[132]。大西洋多年代际振荡激发的大气遥相关异常，可引起北太平洋的海平面气压和海表面温度异常，最终信号传向热带西太平洋，调制暖池的多年代际变化[133]。热带印度洋与太平洋之间也能够通过大气桥在年际和年代际气候变化中相互影响[134–136]。

海洋桥过程通过洋际物质能量交换、海洋长波和涡旋，来传递年际及以上时间尺度的异常信号。其中，印尼贯穿流是唯一一支发生在低纬度大洋间的流动，对大洋物质能量平衡及全球气候十分重要。中国学者提出了印尼贯穿流的南海分支，并发起了中–印尼国际合作项目南海–印尼海水交换及对鱼类季节性洄游的影响（The SCS-Indonesian Seas Transport/Exchange and Impact on Seasonal Fish Migration, SITE），对其进行了观测研究[11]。南海分支主要通过南海贯穿流[130] 实现，从吕宋海峡进入南海，以南海西边界流的形式经卡里马塔海峡流入爪哇海，随后和印尼贯穿流主流汇合[25]。另一方面，印尼贯穿流还是联系热带印度洋和太平洋的海洋信号通道，对印度洋偶极子（Indian Ocean Dipole, IOD）-ENSO 相互作用[137]、利文流（Leeuwin Current, LC）年际异常等有重要意义[120]。中国学者对印尼贯穿流变化的调制机理也进行了研究，指出局地降水在其中起到重要作用[131]。

3.4　海洋水团

海洋水团是物理海洋学的基本问题和最早研究的对象之一。全国海洋普查（1958–1960 年）推动了中国海洋水团研究，给出了中国近海水团的分布、消长等基本特征与规律[3, 138]。赫崇本等[139] 和管秉贤[140] 先后对黄海冷水团的水文及环流特征进行了系统的描述。Chu[141] 给出台湾岛周边海域的水团特征。毛汉礼等[15] 利用 T-S 关系定量分析了中国近海水团，开创了中国近海水团研究的先河。徐斯等[142] 探讨了有界水团的混合问题，并提出了混合终点的概念，推论了 T-S 图解法的一些性质。

1980–2009 年的 30 年间，中国的海洋水团研究进入鼎盛时期，取得了许多成果。苏育嵩提出了“变性水团”的概念，定义了浅海变性水团，并提出聚类分析，用于中国近海水型分布和水系划分[143]。聚类分析法，以及 Fisher 型逐步判别法、T-S 图解法、对应分析法和曲线族拟合法等方法，在中国近海水团研究中得到了应用与发展[23, 143–146]。

2000 年以来，国家“908”专项（2003–2011 年）和一些重大、重点研究项目的实施，积累了中国近海丰富的高精度现场调查资料，进一步提升了对中国近海水团分布及季节变化的认识[7, 147]。例如，一些学者更为深入地分析了北部湾[148]、台湾海峡南部[149] 水团的分布及变化特征，研究了黄海冷水团[150] 的强度变化，划分了南海北部的水团[151]，并指出太平洋次表层水在南海北部的影响范围和作用[152]。

在大洋和极地水团研究方面，中国学者做出了的重要贡献包括：太平洋次表层水[153]、副热带模态水[154–155] 和高盐水[105,156–157]、印度洋副热带模态水[123]、大西洋模态水[158]、乃至全球海洋水团的潜沉[159]，以及南极和北极周边海域水团的分布及变化等方面[160–162]。

3.5　陆架与边缘海环流

陆架与边缘海是海岸和大洋之间的过渡水域，通常水深较浅。其环流受陆架地形、大洋环流、风应力和河流入海冲淡水等的控制。东海是世界上最为广

阔的陆架海之一, 黄海是半封闭的陆架海, 其环流由太平洋西边界流黑潮及其分支台湾暖流、对马暖流、黄海冷水团、季风驱动的沿岸流、河流入海冲淡水尤其是长江巨量冲淡水驱动的海流等组成, 具有显著的时空变化特征。早在 20 世纪 50 年代, 管秉贤[163] 提出了中国沿岸表面海流系统的概念, 这是中国较早将整个东中国陆架海(东海和黄海总称)环流当作一个系统去描述。此后, 国内外学者对于东中国陆架环流的研究做了很多工作, 并不断完善和深入。在 1980–2000 年间, 通过中美、中日、中韩、中朝等国际合作, 在热带西太平洋、南海、东海、黄海等海域开展了科学考察研究。中日之间经历 10 年的黑潮合作调查研究, 出版了黑潮调查研究论文选集[67–68]。

黄海显著的水文特征是夏季黄海冷水团及其产生的气旋式环流。冬季黄海冷水团消失, 环流主要由受季风驱动向南流动的中国沿岸流和朝鲜沿岸流、以及作为补偿流的济州岛西南侧流向西北的黄海暖流组成。夏季, 黄海冷水团可以诱发一个气旋型涡旋[164], 从而构成了黄、渤海环流系统[165]。潮混合作用被认为是影响该环流系统的重要因子[166–168]。而逆风北上的黄海暖流偏向黄海深槽的西侧流动[169]。

东海陆架环流主要由沿陆架坡的黑潮、向东北流动的台湾暖流、随季风转变流向的闽浙沿岸流组成。台湾暖流终年存在, 大量的研究集中在它的起源、归宿和时空变化以及分支上[23, 170]。目前, 被普遍接受的观点认为黑潮水在台湾东北侧的跨陆架入侵是台湾暖流的主要来源, 沿内陆架的台湾暖流一直可以延续至长江河口水下河谷区域[171], 整个东海陆架的台湾暖流向东北流动, 汇入对马暖流和黄海暖流[23, 163]。黑潮在流经东海陆架时, 与东海陆架环流发生水交换, 对中国沿海水动力系统也有重要影响[172–173]。胡敦欣还指出, 黄东海上升流是该海域底质沉积的重要驱动力之一[164]。长江冲淡水对东中国陆架海环流有重要影响, 扩展构成黄、东海典型的水文现象。研究指出, 冬季受偏北风和浮力驱动, 长江冲淡水出口门后向南输运, 形成一条狭长的冲淡水带; 夏季长江冲淡水近区主要受潮汐调制、远区受偏南风和陆架环流影响[23, 174]。

南海是西太平洋最大边缘海, 水域宽深、几近封闭, 具备形成独具特色环流系统条件。1970–1980 年代起, 原国家海洋局和中国科学院南海海洋研究所先后开展了南海中部调查、南海海区综合调查研究和南沙调查, 南海成为我国边缘海物理海洋学研究热点, 在南海环流、黑潮与南海相互作用等方面取得了许多成果, 例如提出了黑潮入侵南海的流套结构等[175], 也拉开了南海中尺度涡研究的序幕[66]。特别是近 10 年来, 中国在南海环流特征研究方面取得了丰富的研究成果。台湾学者起步更早、贡献良多。这在后文各分领域中均有评述。

陆架波是风驱动大陆浅海的典型动力过程。中国陆架波研究始于 20 世纪 70 年代。冯士筰[176] 根据中国近海陆架的特点, 建立了考虑底摩擦的宽陆架海陆架波模型。陈大可和苏纪兰[177] 根据中国沿海验潮站及海流数据计算出夏季和冬季陆架波的周期和传播相速度。王佳等[178] 利用正压二维浅水非线性方程数值模式, 计算出黄、东海存在两个自由陆架波, 在黄海海域呈气旋式传播。Hsueh 和 Pang[179] 采用 V 字结构地形剖面, 利用正压长波模型给出黄海沿岸陆架波的传播特点。Ding 等[180] 利用数值模拟计算出南海北部陆架波的传播相速度为 5.5～17.9 m/s。Yin 等[181] 将强迫陆架波理论应用到东海陆架。Li 等[182] 利用卫星高度计沿轨数据分解出了陆架波垂直岸方向的模态结构。

4　海洋中尺度过程

4.1　涡旋

水平直径在 10～500 km 之间、水平旋转且持续时间由数天至数月的中尺度涡旋广布全球海洋。认识到海洋速度场由中尺度涡旋主导, 是近现代物理海洋学发展中一个重要的概念突破, 观测资料揭示海洋中 90% 的动能是以中尺度涡旋形式存在的。中国科学家早在 1979 年就评述了海洋中尺度涡研究的重要意义及进展[183], 并在 1985 年就报道了在南海中部观测到中尺度暖涡[184]。

南海中尺度涡是中国学者研究的重点, 经过众多研究机构、多年的系统观测与共同努力, 基本确定了南海中尺度涡旋的宏观特征, 包括涡旋在南海海盆的空间分布特征[185–190]、涡旋统计特征的季节与年际变化[186, 191–192], 涡旋的三维结构[80, 193–197], 以及涡旋运动学的特征[183, 189, 191]。作为一个实例, 图 2 给出中国海洋大学南海中尺度涡实验(2013–2014)的研究区和声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)锚系观测站位, 以及由观测结果得出的暖涡从吕宋海峡西口向西传播过程中发生的耗散现象。

中国学者提出了南海中尺度涡产生的多种可能机制[183, 193, 198–204]。近期, 将南海中尺度涡视为群体运动现象, 先后提出和发展了长寿涡列、驻波模态和 Rossby

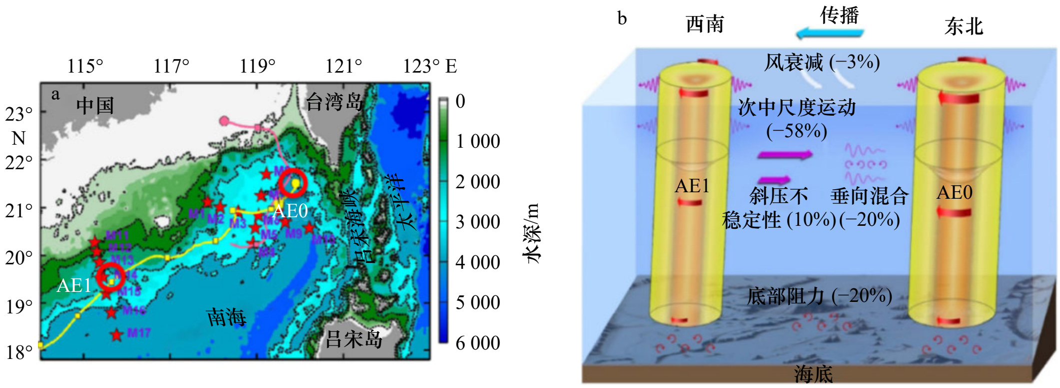

图 2　中国海洋大学南海中尺度涡实验 (2013–2014 年)

Fig. 2　South China Sea Mesoscale Eddy Experiment (S-MEE) by Ocean University of China in 2013/2014

a. 研究区，红星代表 ADCP 锚系观测站位，填色图表示水深，黑色虚线分别表示 100 m、500 m、1 000 m、2 000 m 和 3 000 m 等深线，黄线和粉红线分别代表实验期间一个暖涡和一个冷涡的运动轨迹；b. 该暖涡从吕宋海峡西口向西传播过程中发生的耗散，各动力学过程对涡旋耗散的贡献见图中黑色标识[197]

a. Locations of the S-MEE mooring arrays (red stars). The color shading shows bathymetry with black dashed lines indicating the isobaths of 100 m, 500 m, 1 000 m, 2 000 m and 3 000 m, respectively; yellow and magenta lines denote the trajectories of an anticyclonic eddy (AE) and a cyclonic eddy (CE), respectively. b. Schematic diagram of the eddy dissipation processes. Contribution of each dynamical process to the eddy dissipation is illustrated in this schematic[197]

标准模等概念[183, 205]。在西太平洋海域，对涡旋与大尺度环流，如西太平洋赤道流系[206]、副热带逆流[207]、黑潮及其延伸体[24]、副热带回流圈[208]之间的相互作用，以及涡旋对模态水潜沉的影响[209]，对台湾以东黑潮流量的影响[210]等方面进行了研究。

自 20 世纪 90 年代始，卫星高度计极大推进了对全球范围内中尺度涡旋结构与演变的认识。中国学者利用卫星高度计、Argo 浮标等数据开展了一系列研究，揭示了大洋中尺度涡的三维结构[211]，定量评估了中尺度涡的全球物质与能量输送能力[212–215]，揭示了中尺度涡在气候系统中扮演着与大尺度环流同等重要的角色。中国学者还开展了大西洋[216]、印度洋[217]、南大洋[218]等海域中尺度涡的研究，并探索利用卫星数据反演中尺度涡全水深三维结构[211, 214]，以及利用人工智能预测中尺度涡变异[219]。

4.2　锋面

海洋锋是海洋中不同水系或水团的交界面，在中国近海十分显著，是中国物理海洋学及海洋交叉学科中的重要课题之一[220]。

毛汉礼等[221]利用盐度水平分布的季节变化来表征长江冲淡水及其混合特征。1986–1993 年原国家海洋局和日本科学技术厅联合开展“中日黑潮合作调查研究”项目，对东海黑潮锋及锋面涡做了详细观测[220, 222]。1989–2000 年中国台湾开展了 KEEP 计划，利用多学科联合观测，给出“东海黑潮表层水与东海陆架水之间通过锋面过程进行水量和物质交换”的科学认知[223]。2003–2011 年“我国近海海洋综合调查与评价(简称‘908’)”专项的实施，实现了高技术支持下的综合调查与科学研究相结合，给出了中国各海区海洋温度、盐度、密度等大范围、高精度基础数据，描述了锋面分布的基本特征和季节变化[7, 147]。陈大可还指出，由于锋面能够产生垂向物质输运，因而锋区附近具有较高的生物生产力水平[224]。

随着调查数据的积累、遥感技术的发展和数模分辨率的提高，对中国近海锋面的研究越来越深入，如中国近海锋面的季节变化规律总结[220, 225]、锋面弯曲导致的不稳定现象[225]以及针对局部特殊动力过程导致的锋面结构变化的研究[220, 225–227]。中国近海海温锋区位置相对固定，锋面强度和控制范围具有季节性变化周期。冬季的海温锋形态成熟，黑潮流域与邻近陆架海域的锋面相互作用清晰可见。夏季受太阳辐射影响，离岸远海的海温锋(如南海陆架锋、吕宋海峡黑潮入侵锋、东海黑潮锋等)基本消失，仅在沿岸地区和浅滩边缘存在由潮混合产生的海温锋[220, 225]。在锋面动力学机理研究方面，中国学者指出地形、正压不稳定、斜压不稳定等均对东海黑潮锋面的弯曲有重要影响[225]。此外，潮致混合形成密度(温度、盐度)锋面，并伴生锋面次级环流，是引起上升流的动力机制之一[168, 228]。由于缺乏更高时空分辨率的观测，目前对中国近海锋面的预报研究较少，主要集中于黑潮锋的预报[225]。

4.3　内波

内波是发生在海洋内部的波动。20 世纪 40 年代，海洋调查仪器的进步使内波研究进入快速发展时

期, 尤其是在 60–70 年代, 以 Garrett 和 Munk 基于观测调查给出大洋内波谱模型(GM72 和 GM75)为标志, 国际海洋内波研究进入全盛时期。相对而言, 我国海洋内波研究开展较晚, 中国学者于 1963 年在舟山群岛海域通过开展短期定点观测, 获得了东海浅海内波的周期、波向、波速和波长等内波基本特征[229]。在 70–90 年代, 观测发现渤海、黄海和南海的近海海域也存在着活跃的海洋内波, 并描绘了这些海域内波的基本特征[230–233], 分析了黄海地形对内波传播的调制作用[234]。中国学者还通过构建内波理论方程、数值模式和小型水槽试验对海洋内波开展了一些探索研究[235–236]。通过上述研究, 中国学者在 20 世纪末对周边海域浅海内波的基本结构特征有了初步认知。

在 21 世纪初叶, 中国学者对中国周边海域内波开展了系列研究, 实现了对周边海域内波气候态发生特征的认知。利用卫星高度计和 SAR 遥感数据, 分析了西北太平洋第一岛链内潮的生成和传播[237], 给出了中国周边南海、东海和黄海内孤立波的生成源地、发生区域、传播方向和演变过程等统计特征[238–240]。中国台湾学者与美国合作在南海北部陆架区开展了亚洲海国际声学试验(Asia Seas International Acoustic Experiment, ASIAEX), 分析了南海北部内孤立波和内潮的短期发生特点、动力结构特征和能量空间变化, 探讨了南海北部内波生成与吕宋海峡天文潮的关系[241–242]; 之后, 中国台湾学者与美国再次合作开展了 WISE/VANS 与 IWISE 等观测试验, 获得了南海北部内孤立波的生成演变过程、季节变化规律和第二模态内孤立波的发生特征[243]。利用数值模拟和理论分析, 中国学者进一步探究了南海北部内孤立波生成过程机制及黑潮对吕宋海峡内波生成的影响[240, 244–245]。图 3 为利用由卫星图像中提取的3 500 余个内波波包绘制的南海内波与传播方向分布[240]。

2010 年后, 在国家“863”计划和海洋局专项等项目的支持下, 中国海洋大学构建了“南海内波潜标观测网”, 实现了对南海北部内波生成–演变–消亡全过程超过 9 年的连续观测, 布放回收潜标 100 余套次, 最多同时在位 18 套全水深观测潜标, 获取了 3 000 余个内孤立波的生命全周期观测数据, 在此基础上明晰了南海北部内孤立波的生成–演变–消亡过程与机制, 探讨了 ENSO 事件对南海北部内孤立波的影响, 剖析了内波与中尺度涡的相互作用过程[246–250]。中国科学院在吕宋海峡西侧和陆架区开展了内波潜标观测, 并分析了南海内潮的季节变化特征及其在南北方向上的差异[251–253]。自然资源部第一海洋研究所在东沙岛西侧开展了内波潜标观测, 在此基础上分析了东沙岛西侧内孤立波的动力学特征和发生规律[254]。基于 KdV 理论模型结合压力逆式回声仪(Pressure Inverted Echo Sounder, PIES)观测, 中国学者进一步探讨了南海北部内潮向内孤立波的演变过程[255]。在数值模拟方面, 中国学者在构建三维内波数值模式的基础上对周边海域内波的生成开展了定量化分析, 探究了其传播过程及其影响因素, 明晰了其耗散区域, 系统讨论了

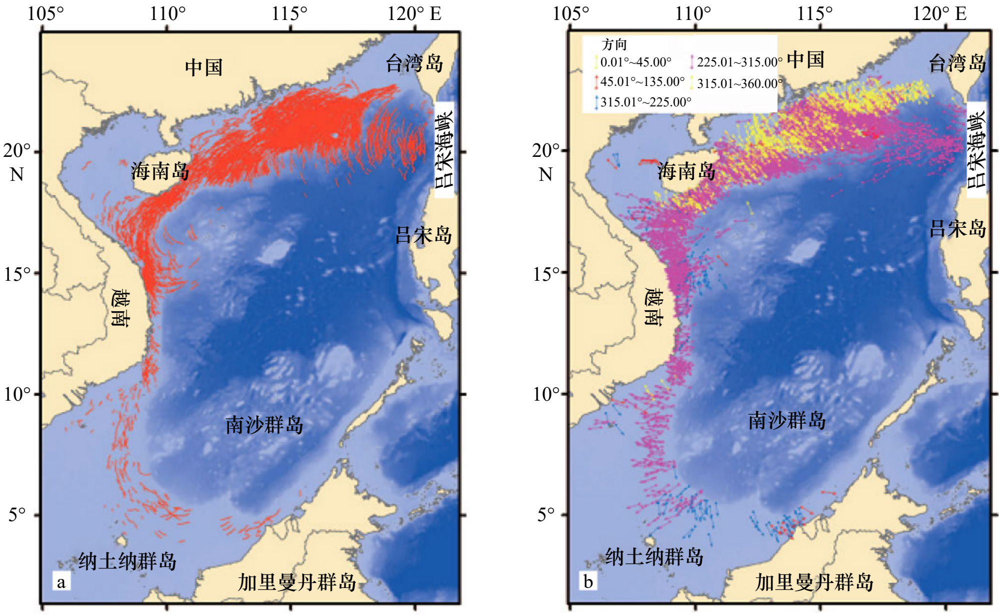

图 3　利用卫星图像绘制的南海内波 (a) 与传播方向 (b) 分布图[240]

Fig. 3　The distribution map (a) and the propagation direction map (b) of internal waves in the South China Sea[240]

内波与中尺度涡的相互作用过程与机制[256–258]。

5 湍流与混合

湍流是一种无规则、多尺度、有结构的流体运动状态，是自然界、工程领域和日常生活中随处可见的现象。由于高度非线性，湍流是物理学界尚未解决的经典科学难题之一。湍流以“集装箱”式输运的效率极高，以能量耗散、质量扩散、热扩散、涡黏性等表征的输运能力是层流的成千上万倍，尤其是湍流的大尺度拟序结构能够极大地影响输运过程。海洋湍流能量的维持需要外源，跨等密度面混合所需要的能量主要来自风和潮汐提供的机械能[259–260]。此外，非破碎浪致混合能够通过波–湍相互作用强化湍流[44]。湍流混合是维系全球大洋环流能量平衡的关键因子，在调控海洋热量与物质的分布、海洋生物地球化学过程，乃至全球气候变化研究等方面皆起十分重要的作用。

5.1 海洋湍流

中国海洋湍流研究起步较晚，这主要受限于观测技术的发展。早期的研究工作主要围绕湍流模式理论的发展[47, 261–262]，建立了正压浅海湍流运动的雷诺应力封闭模型[263]与准地转斜压湍流两层模式[264]，提出了把混合层与动力不稳定相结合的海洋垂向湍流混合参数化新方法[265]。近年来在全球海洋模式中湍流参数化方案的改进[41, 266]、湍流的大涡模拟[267–268]、非破碎海浪生湍流机制等方面开展了一些工作。在海洋湍流的基础理论研究方面也取得了一些进展，如发展了“从湍流到湍流”的剪切不稳定理论[269]，提出了海洋流动的“边缘不稳定”概念[270]。在海洋湍流的观测方面，在近海[271–276]、远海[277–278]与深海[279]都开展了卓有成效的工作。在海洋边界层湍流特征与机理方面，开展了海洋上边界层[280]及其湍动能[281]、朗缪尔湍流及其台风影响[282–283]、海洋底边界层湍流[284–285]等研究。同时，开展了强潮驱动的湍流混合[286]、波浪环境下湍流雷诺应力的估算[287]、海冰下水体湍扩散系数[288]与黏性系数估计[289]、小尺度流速剪切控制机理[290]以及中尺度湍流波数谱特征[291]等若干研究。图 4 所示为海洋大尺度湍流的有序结构实例：海洋带状流[292]。

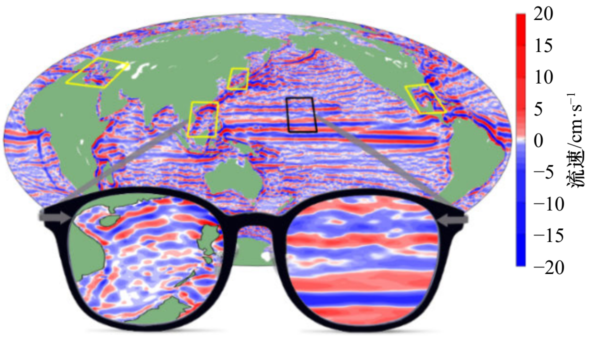

图 4 海洋带状流：湍动海洋中的有序结构

Fig. 4 Ocean strip flow: organized structures in turbulent oceans

红色为东向流，蓝色为西向流

Shading indicates flow direction: Red is eastward current and blue westward current

5.2 海洋混合

海洋中蕴含着大尺度环流、中尺度过程、亚中尺度运动、微尺度混合等丰富的多尺度动力过程，其中跨等密度面混合过程是调控全球经向翻转环流的动力源泉。受多种机制影响，微尺度混合呈现显著的时空间歇性。中国学者围绕混合的时空特征、影响机制及其对大尺度环流和生物地球化学过程的调制作用等问题开展了大量研究。从研究区域看，涵盖了黄海[168]、东海[293]、南海[294–303]、吕宋海峡[304]、北太平洋西边界流区[278, 305]、赤道太平洋冷舌区[306]、南大洋普里兹湾[307]等海区。从影响机制看，研究指出非破碎的表面波[43]和波浪–湍流相互作用[44, 308]均可以促进混合，进而影响上混合层的深度[309]。考虑该机制对湍流能量收支的作用[47, 310]，可以显著改进海洋模式中的 Mellor-Yamada 和 KPP 等混合参数化方案[311–312]，进而改善海洋模式对海洋表层温度[313]、上层温度[314]及海洋环流[44]的模拟能力，提高对热带气旋路径预报能力[315]，改善气候模型的性能[316]。此外，朗缪尔环流[315]、双扩散对流[317]等过程也会影响海洋混合。而在浅海陆架区[318]和河口区[276, 319]，还需考虑径流淡水和潮流对混合的影响。中国学者还重点研究了海洋内部混合的不同能量来源，如内潮能量[267, 320]、风输入的近惯性能量[321]、中尺度涡能量[322–323]等，以及影响混合的多种过程，如内潮[324]、内孤立波[325]、近惯性内波[326]、中尺度涡[302, 327]、非线性波–波相互作用[328–331]、低频流与内波间的能量交换[332]等，进而阐明混合对水团演变及深层环流[333–334]、营养物质的垂向输运[335]、底边界层沉积物再悬浮[336]等过程的影响。

6 数值模拟、数据同化与实验室模拟

6.1 海洋与气候数值模式

海洋数值模式通过求解地球流体力学方程来模拟海水的运动及海洋状态的演化。从其刻画的运动形态时空尺度不同，可分为海洋环流、海浪、潮汐、

风暴潮等数值模式，通过与大气、陆面、海冰、生物地球化学等过程耦合，组成气候或地球系统模式[31, 44]。中国海洋环流模式原以应用国外模式为主。21 世纪初，中国科学院大气物理研究所大气和地球流体力学数值模拟国家重点实验室基于早期自主开发的准全球多层海洋环流模式[337–338]，推出了海洋环流模式 LICOM 1.0[30]。此后，又陆续推出 LICOM2.0[339] 和 LICOM3.0[340]。LICOM 系列及早期的海洋环流模式在不同时期分别与多个大气环流模式耦合，组成海气耦合模式，并逐渐完善形成“全球海洋–大气–陆地系统模式”(GOALS)[341–343]、“灵活的”耦合气候模式的原始版本(FGCM-0)[344] 和不同版本的“灵活性全球海洋–大气–陆地系统模式”(FGOALS)[345]。目前，基于 LICOM3.0 的全球涡分辨海洋预报系统(LICOM Forecast System, LFS)开发工作正在快速推进。中国学者提出了海洋动力系统数值模式体系概念，基于多运动形态相互作用理论，发展了全球涡分辨率海浪–潮流–环流耦合数值模式 FIO-COM，并在多个领域实现了业务化应用[346]。

中国从 20 世纪 70 年代末开始发展气候模式，并将其应用于气候过程的模拟研究[31]。近年来，随着中国综合国力的增强，在地球系统模式研发和模拟上的投入逐年加大，气候模拟研究队伍逐步壮大。2007 年之前，我国参加 CMIP1、CMIP2 和 CMIP3 的地球系统模式仅有中国科学院大气物理研究所的 GOALS/FGOALS 系列[342, 344]，而到 2013 年，FGOALS 系列之外[347–348]，新增国家气候中心的 BCC-CSM 系列[349]、自然资源部第一海洋研究所的 FIO-ESM[44] 和北京师范大学的 BNU-ESM[350] 等共 6 个模式版本参与到 CMIP5 中。在正在开展的 CMIP6 耦合模式计划中，预计中国 7 家单位共 8 个模式研发团队将参与其中。其中，FIO-ESM 是参与 CMIP5 计划中唯一包含海浪分量模式的地球系统模式。

运行效率是高分辨率海洋数值模式发展和应用中的一个重要挑战。模式水平分辨率每提高一倍，计算量会增加约 1 个数量级，模式输出数据量会增加 1 个数量级[31]。在海洋模式计算方案方面，华东师范大学研究团队提出了高精度、无频散和低耗散的平流计算格式 HSIMT，显著改进了海洋数值模式中物质输运模拟的精确性和稳定性，已被海洋数值模式 COAWST/ROMS 采用[350]。在海洋模式算法方面，清华大学研究团队提出了高可扩展的海洋环流模式正压求解方案，改进了海洋环流模式的计算性能，使 POP 海洋环流模式在万核规模有了近 6 倍的性能加速，这一方案被美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)的 CESM 地球系统模式作为海洋分量模式默认求解器采用[351]。在高效并行技术方面，自然资源部第一海洋研究所研究团队提出了非规则并行剖分方案，可使得模式并行剖分达到负载近绝对均衡，并行规模可达 10 万核[352]，随后基于中国神威·太湖之光超级计算机，突破了主从核系统计算框架设计和循环折叠优化等若干关键技术，应用到 MASNUM 海浪模式全机并行规模超千万核，浮点并行效率提高至 36%。

6.2　海洋数据同化

数据同化技术通过将观测数据与数值模式的有机结合，以改进数值模拟和预测预报的精度。该技术在海洋领域的应用研究发端于 20 世纪 80 年代。1998 年国际上发起了“全球海洋数据同化试验(Global Ocean Data Assimilation Experiment, GODAE)”计划，中国相继开展了工作。韩桂军等[353] 及吕咸青和刘文剑[354] 讨论了伴随方法在理想试验中和简单的数值试验算例中的应用。卫星遥感的发展和 Argo 观测网的运行促进了同化技术的发展。Zhu 等[355] 和基于三维变分方法研发了完整的海洋数据同化系统，是当时世界上少数几个可以同化主要海洋观测数据的海洋数据同化系统，在国内外多家科研和业务部门推广应用[356–357]。Xie 和 Zhu[358] 研发了基于等密度面模式的 Argo 同化技术，解决了同化密度引起的强非线性问题。Zheng 和 Zhu[359] 基于中等复杂程度耦合模式研发了耦合同化系统，国内多家业务部门将其应用于 ENSO 预报。Yan 等[360]基于集合同化方法构建并在网站发布了印度洋和太平洋海洋再分析数据集，并用于评估观测系统[361]。Han 等[362] 发布了中国近海再分析数据集。Cheng 和 Zhu[363] 基于集合同化方法和观测构建了一套格点化的全球历史温度数据集，已被应用于全球海洋变暖估算、未来气候变化预估、海平面变化以及区域气候变化研究。

近 20 年来，在海洋和气候研究中使用的数据同化方法主要包括最优插值、变分同化和滤波方法。滤波同化方法是当前研究热点，在早期线性滤波研究的基础上，针对非线性问题发展起来了变形 Kalman 滤波等一系列同化方法，解决了滤波同化中的一些关键问题，目前已应用于业务化模式[364–367]。

6.3　实验室模拟

实验室物理模型实验，是将物理过程进行抽象简化，利用真实流体进行模拟实验。在避免数值模型的人为假设的同时，也具有实验成本低、可控制和可重

复性高等优点，是海洋科学研究不可或缺的重要手段，但也存在耗费高、定量化不足的问题。由于研究海洋现象的尺度不同，物理模型实验通常分为非地转实验（主要是水槽/水池）和地转实验（旋转平台）。

非地转实验水槽（池）建设方面，中国涉海高校和单位发展了一系列具有国际一流水准、能满足多种海洋实验需求的大型实验设施群。自然资源部第一海洋研究所、交通运输部天津水运工程科学研究院、大连理工大学、浙江大学、中国海洋大学、中国科学院深海科学与工程研究所、天津大学、南京信息工程大学、广东海洋大学等单位均建有水槽实验室，这些实验设施具有模拟风场、波浪、海流、海洋内波等多种或其中几种水动力环境的能力，可有效应用于海洋内波[368–372]、海气相互作用[43]、海浪机理[373]以及海洋工程等领域的教学和实验研究。

中国在旋转水池的建设和研究上起步较晚，但是随着近年来中国在海洋领域的投入不断加强，目前已经有包括中国海洋大学、南京信息工程大学、中国科学院大气物理研究所、浙江大学在内的多家单位都建立了自己的旋转实验平台，见表 1。

表 1　国内主要地球流体旋转实验平台

Tab. 1　Major geophysical hydrodynamic rotational experimental platforms in China

实验室名称	所属单位	直径	深度	旋转周期
地转平台实验室	中国海洋大学	40 cm; 2 m	40 cm; 40 cm	—
行星流体力学实验转台	南京信息工程大学	1 m	40 cm	>2 s
大气和海洋环流移动模拟实验平台系统	中国科学院大气物理研究所	0.8～1.5 m	—	>4 s
地球流体力学旋转水槽	浙江大学	3 m	50 cm	>3 s

由于可以通过旋转平台模拟科氏力的作用，因此旋转平台试验可以更真实地模拟地球流体动力过程，例如旋转框架下层化湍流过程[374]、海洋中尺度过程[374]及次中尺度过程[375]、内波的演变与发展过程[372, 376–378]等。

目前，中国的实验平台仍不能满足不断扩大的科研试验需求，不久的未来，中国有望建成世界上最大的地球流体旋转平台（图 5），直径约 14 m，最大注水深度约 1.2 m，旋转周期约为 30～1 000 s，将会为中国的物理海洋学发展添加新的推力。

7　大尺度海洋–大气相互作用

海洋–大气相互作用是地球各圈层耦合中最活跃部分，中国学者对该领域研究贡献良多。

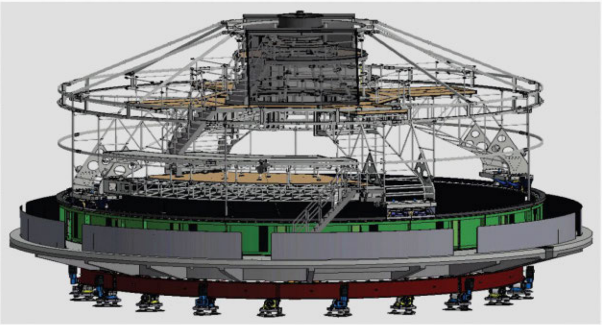

图 5　大型实验平台主体设计

Fig. 5　Schematic design diagram of large experimental platform

ENSO 是气候系统中最剧烈的年际尺度振荡，对全球大部分地区的天气和气候系统有着重要影响[379]。Fu 等[380]发现厄尔尼诺存在一种在日界线附近为主要增暖区的新形态，它的产生与副热带海气相互作用[381]、热带高频强西风异常现象[382]有密切联系。Cai 等[132]指出热带印度洋变化可加速厄尔尼诺的消亡，并有助于厄尔尼诺向拉尼娜的位相转变；热带大西洋赤道及北部海域的海温变化对 ENSO 事件的多样性具有重要贡献。Mu 和 Duan[383]提出条件非线性最优扰动（Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP）法，能够刻画大气和海洋系统中的非线性运动特征，已被广泛应用于 ENSO 等事件的预报。张荣华等建立的中等复杂程度海气耦合模式（IOCAS ICM），为国际学术界提供 ENSO 实时预报结果[32]。

在热带印度洋，中国学者提出了印度洋海盆模态（IOB）[384]，指出 IOB 能够影响亚洲夏季风[384–386]和西太平洋台风活动[121]。Liu 等[386]和 Zheng 等[387]预测了未来气候变化情境下的 IOD 和 IOB 变化。杜岩等[121]还指出印度洋热带环流圈热盐输运对区域气候模态有重要影响。

在年代际气候变化研究方面，吴立新团队建立了能够分离中低纬海洋–大气通道在年代际气候变率中作用的模式动力实验体系、中高纬海洋热盐环流变异影响热带海洋–大气耦合系统的动力学框架及大西

洋海洋环流与海温年际–年代际变化的预测模型, 系统阐述了副热带环流在太平洋气候系统年代际变化中的调控机理, 揭示了北大西洋年代际变化模态是海–气耦合模态, 阐述了海洋层结变化以及海洋 Rossby 波调整对于中纬度年代际气候变率受全球变暖影响的作用机理[387–393]。刘征宇等阐述了海洋动力过程尤其是行星波动在确定气候系统年代际变率的时间尺度中的作用, 发展了分离不同海洋大气动力过程在太平洋气候系统多年代际变化中相对作用的数值模式方法, 详细论述了在年代际时间尺度上热带外气候变率影响热带气候系统的不同动力过程, 发展了利用数值模式研究中纬度大气环流对海洋变率响应的初值方法, 改进了定量估计中纬度海洋对大气反馈作用的统计分析方法[394–397]。谢尚平和日本合作者在 2000 年前后阐述泛大西洋年代际气候振荡机理; 发展了热带大西洋年代际变率的海气耦合动力模型; 提出风–蒸发–海表温度(Wind-Evaporation-SST, WES)反馈机制, 在气候研究中得到广泛应用[398]。构建了全球变暖下热带降水变化的理论框架, 并提出全球变暖背景下不均匀性决定降雨变化区域分布的观点, 得到观测和数值模拟的一致证实[399–400], 还提出赤道太平洋海表面温度冷却作用是近 15 年来全球变暖停滞的主要因素, 指出太平洋年代际振荡在 20 世纪末的位相转换可通过调制全球平均温度, 造成全球变暖停滞现象[401–402]。Zhang 等[403]基于观测资料揭示了大西洋温盐及热含量的时空演变过程, 指出大西洋深层西边界流及深层赤道开尔文波是大西洋深海热量传输的主要路径, 且传输过程具有 60 年的周期特征。

Liu 等[404]发现了北太平洋黑潮延伸体为中心的马蹄型海温异常对大气环流的反馈作用。揭示了影响台湾以东黑潮变异的北太平洋副热带海域年代际变化的机理, 定量给出黑潮延伸体海洋异常信号在海洋温跃层内传播到台湾以东的海洋内部通道; 为确定北太平洋动力过程在气候变化中的作用提供了理论依据。揭示了太平洋副热带逆流与副热带模态水之间的联系; 发现全球变暖背景下, 北半球副热带模态水减少导致的副热带逆流减弱和 SST 增暖空间分布的非均匀性; 为依据海洋动力过程预测未来气候提出了新的理论依据[405–406]。

杨海军等阐述北大西洋热盐环流对温室气体浓度变化的响应; 揭示了大西洋经向翻转环流基于海气耦合模型的年代际变化机制; 阐明了风通过海冰及垂直扩散作用对大西洋经向翻转环流的影响[407–408]。

近期南大洋的显著增暖备受关注。Chen 和 Tung[409]研究发现北大西洋和南大洋的深层水域中的热量增加, 使得 21 世纪以来全球变暖出现停滞。Gao 等[410]预计风应力的增加将推动亚南极模态水的加深和南半球热含量的增加, 从而减缓全球表层温度增暖的速度。Xue 等[411]观测发现风速变化对南大洋夏季海洋酸化速率有着重要的调控作用, 大大提高了对南大洋酸化机制的认识, 为预测南大洋碳吸收和评估其对生态系统的影响提供了重要的理论依据。

8　海冰、极地

1969 年的渤海大冰封事件造成的中国重大经济损失, 是推动中国海冰监测与研究的关键契机[412]。随后, 中国学者在海冰数值模式中的热力学与动力学过程[413–415]、冰–海耦合[416–418]等方面取得了进展, 并用于业务化海冰预报。工程海冰学也随之得到发展[419], 在海洋平台上开展全方位立体工程海冰现场监测研究[420], 建立了被国际标准采纳的柔性海洋平台结构冰力时程函数和冰力谱[421], 在冰与结构物作用力的物理模拟[422]和工程海冰数值模拟方面也取得很大进展[423]。1980 年 1 月, 董兆乾和张青松前往澳大利亚南极凯西站进行考察, 拉开了中国极地物理海洋学调查与研究的序幕[424–425]。1984 年,“向阳红 10”号考察船执行我国首次南极科学考察, 开始在长城站沿海[426]及南设得兰群岛周边海域进行水文调查[427]。1989 年中山站建成后, 调查与研究海域扩展到普里兹湾及其邻近海域[9, 428], 并开展了冰架[429]、冰间湖[430]与海洋相互作用的研究。近些年来, 罗斯海与阿蒙森海成为新的调查区域。以往南大洋海盆区的研究多集中在锋面[431]与南极绕极流[432]。最近在混合[307]、亚南极模态水[410]/南极中层水[433]长期变化等方面均取得了突出成果。

中国首次北极考察于 1999 年由“雪龙”号执行, 其中第 5 次(2012 年)和第 8 次(2017 年)北极考察分别通过了东北和西北航道, 其他航次的调查区域均集中在白令海、白令海峡、楚科奇海和加拿大海盆, 初步摸清了调查海域的水文情况[10], 对北冰洋水团变化、环流等进行了研究[160, 434–436]。

中国学者在南大洋与北冰洋开展的理论研究[437]和数值模拟[438–442], 加深了对极地物理海洋学的认识, 取得的研究成果揭示出极地海洋在全球变化中的重要作用[62, 409]。

中国极地海冰观测与极地考察同步发展。1981 年张青松[443]观测了南极固定冰的形成和破碎过程。之后, 在长城站和中山站附近开展了固定冰层理学、

形态学和热力学的观测研究[444–445]。1996 年效存德和秦大河[446]获得了北极中心区域海冰形态和雪层剖面特征的空间分布。随后，在北极冰面边界层研究[447]、海冰形态学定量化[448]、积雪和海冰层理结构[449]、海冰物质平衡[450]、海冰和融池的空间分布[451]以及海冰光学等方面[452]都取得了突出的观测研究成果。通过优化同化方案发展了海冰预报模式[453]。利用卫星观测产品，发展了刻画冰间湖产冰率[454]和水道分布[455]的遥感算法。我国多个地球系统模式参与了预估南北极海冰变化的国际比较计划[44, 456]。研究表明，北极海冰的快速减少会对中国天气气候过程产生重要的影响[457–458]。

9 海洋气象

9.1 台风

中国受台风（或热带气旋）影响严重，自新中国成立以来就十分重视台风的研究工作，并积极参与国际交流与合作。1972 年，全国台风科研协作组织成立，推动了《台风年鉴》（1989 年后改名为《热带气旋年鉴》）的整编工作[459]。该年鉴是世界气象组织（World Meteorological Organization, WMO）全球热带气旋资料集（International Best Track Archive for Climate Stewardship, IBTrACS）之一，也是全球唯一收录登陆台风降水及大风数据的资料集。2008 年，中国台风最佳路径资料集被纳入 IBTrACS[460]，参与国际资料交换和比较计划。

20 世纪 90 年代起，国内外开展多次大规模的台风现场试验，促进了台风尤其是异常台风的研究。在国家科技攻关“85–906”项目和国际热带气旋研究合作项目支持下，我国学者在台风的突变现象和预报技术方面取得了新的进展[461–462]。经过几代学者的努力，大大提高了对台风机制[463–466]、台风与海洋相互作用等的认识[467]，在台风资料同化[468–469]、物理过程参数化[470]、台风监测和预报[315, 471–472]等关键技术上实现了突破，为中国台风灾害防御提供了有力的科技支撑。

9.2 风暴潮

中国是西北太平洋沿岸风暴潮灾害最严重的国家。新中国成立以来，中国风暴潮理论、预报和防灾减灾能力得到很大提升，因风暴潮灾害造成的死亡人数大幅减少。1970 年，国家海洋环境预报中心开始发布风暴潮预报，国内风暴潮研究也逐步开展。秦曾灏和冯士筰[473]建立的浅海风暴潮理论，为中国风暴潮预报奠定了理论基础。孙文心等[474]基于该理论首次开展了风暴潮的数值模拟。1982 年，冯士筰[19]编著的《风暴潮导论》系统论述了风暴潮理论和预报方法。1990 年前后，王喜年等开始了中国第一代业务化台风风暴潮数值预报工作[475]。于福江等开发了覆盖中国海的温带风暴潮数值预报系统，并于 2003 年投入业务化运行[476]。尹宝树等建立考虑天文潮和海浪共同作用的渤海风暴潮和海浪模型[37]。王培涛、陈永平等先后发展了风暴潮集合数值预报系统，避免了台风路径预报不确定性对风暴潮预报的制约[477–478]。

9.3 巨浪

巨浪指由强烈大气扰动，如热带气旋、温带气旋和强冷空气等天气系统以及海浪自身调制引起的灾害性海浪。自 20 世纪 50 年代中国启动海浪研究以来，就对巨浪十分关注。赵九章等在海浪观测方面开展了大量开创性工作[479]，后人基于观测对巨浪灾害进行了个例分析，并收集整理了巨浪灾害史料集[480–482]。80–90 年代，中国学者基于文氏二代谱模式[48]和 LAGFD-WAM 三代谱模式[28]对巨浪过程进行了模拟[49, 483–484]。2000 年之后，中国学者在巨浪的生成及演变方面取得了系列进展。例如，畸形波传播及模拟[482, 485]、风暴潮–海浪耦合机理[482]、年代际巨浪演化规律[486]等。

9.4 海啸

海啸是由海底地震等因素引起的海水大规模波动形成的一种大洋长波，破坏力极强。中国受到灾害性海啸的影响极为少见，但在南海马尼拉海沟等海域的潜在海啸，仍有可能对中国造成一定威胁，受到学者们的关注[487]。

中国自 20 世纪 70 年代以来，开展了中国历史海啸灾害资料的整编与分析工作。1983 年，中国加入太平洋海啸预警系统国际协调组。90 年代后期，原国家海洋局组织建立了太平洋海啸资料数据库、太平洋海啸传播数值预报模式和越洋、近海海啸数值预报模型，并应用于中国一些核电站的环境评价中[487–488]。国家海洋环境预报中心于福江等开发了基于 GPU 并行框架的 CTSU 数值模式，建立了基于情景数据库的定量海啸预警系统。上述定量化预警技术已在由中国牵头建设的南海海啸预警中心实现业务化运行[489]。

10 海洋物理

海洋物理是研究声、光、电磁等信号在海洋中传播规律、与海洋相互作用机制，以及利用它们探测海洋的一门科学[490]。

海洋声学是现代海洋技术的物理基础。中国海洋声学研究始于 1958 年，汪德昭带领一批北京大学

的大三学生在三亚的南海研究站与前苏联水声学家开展合作研究。1996 年, 中美在远黄海开展了第一次国际合作实验。期间, 中国学者在广义相积分简正波理论 (WKBZ)、浅海声场和声传播、浅海海底参数反演、浅海射线简正波混响理论与技术等方面取得重要进展。1997 年, 第一届国际浅海声学会议在北京举办, 会上关定华对 1958–1996 年间中国在浅海声学研究中取得的进展进行了总结[491]。

在 2012 年第三届国际海洋声学会议上, 张仁和综述了 1997–2012 年间中国浅海声学的研究进展[492], 主要包括: 基于 WKBZ 理论发展的波束位移射线简正波理论 (BDRM)、耦合简正波抛物方程计算模型 (CMPE3D) 和耦合简正波声场模型 (DGMCM3D); 提出了多物理量联合海底参数反演方法; 建立了相干混响模型; 描述了海洋内波引起的声场起伏; 提出了浅海声学被动层析方法和声源定位方法; 将沿海声层析应用于中国近岸多站位组网观测实验, 并完成了沿海声层析数据和近岸水动力模式的数据同化研究[493]。

2012 年后, 中国在深海声学研究方面取得了一系列重要进展[494], 突破了 10 000 m 水深水听器关键技术, 打破了国外对我国深水水听器的技术封锁。从此, 中国具备了深海大范围水声信号长时间采集的能力, 获得了马里亚纳海沟 9 300 m 深处的人工地震信号、南海和西太平洋深海复杂地形下的远程声信号传播数据, 实现了 1 000 km 级的超远程声传播与水声通信, 发展了基于大深度声场的水下目标定位方法。此外, 根据台风过程中海洋环境噪声记录, 建立了风生噪声模型; 基于射线理论解释了海底地形对声传播的影响机理; 建立了适用于深海的海洋混响本底及异地混响模型; 揭示了中尺度涡旋、内波和海浪引起的声场起伏统计特性及其影响机理。

海洋光学主要研究光在海水中的传播以及海水的光学性质, 是海洋遥感和探测的物理基础。新中国成立以来, 中国在海洋光学理论、海水光学特性调查和仪器研发, 以及以光学为核心手段的海洋探测技术方面均取得了长足的进步。

在海洋光学理论研究方面, 建立了变换辐射传递模型, 解决了海水光学传递函数、水中窄光束传输等典型问题[495]; 针对卫星海洋光学遥感信息提取和反演, 中国学者在海洋水体不同波段的遥感模型、波浪对水下光场影响[496] 等方面都提出了自己的见解。

在海水光学特性调查方面, 中国自 1974 年起在南海开展海洋光学测量[497]。从 20 世纪 90 年代起, 进一步完善了光学特性测量和数据处理方法, 并开始规模化调查[498–499], 完成了海洋水色卫星定标检验海上同步光学调查 (1998–2012 年)、“908”专项光学调查 (2003–2012 年)、“全球变化与海气相互作用专项”光学调查等大型光学调查 (2011–2020 年), 获取了中国近海水体的光吸收、光散射、光离水辐射特性及其季节变化的相关数据[500–501]。

在海水光学特性测量仪器研发方面, 20 世纪 60–80 年代在第一机械工业部和原国家海洋局支持下, 研制了海水透明度计、小角度海水散射仪、走航式海面照度计、海水光学多参数测量仪等海洋光学仪器[502]。20 世纪 80 年代以来, 在国家“九五”至“十二五” “863”计划的支持下, 中国海水光学特性测量仪器得以迅速发展, 研发了深水照度计、海洋光学多参数测量仪、海面和海水层光学测量系统、海洋光学浮标、多波段透射率仪、浊度计、海洋高光谱辐射实时观测系统、阵列式多角度水体体散射函数测量仪等仪器[503–506]。

在海洋探测应用技术方面, 自主研制了多普勒激光雷达[507]、深海原位激光拉曼光谱仪[508], 在拉曼-荧光联合原位探测、激光诱导击穿光谱原位探测等方面也取得了突破[509–510]。在水下视觉技术与三维目标定位[511–513], 以及激光通信方面, 突破了照明与成像方式、激光扫描、通信链路、调制编码、宽视场窄带接收技术等一系列关键技术, 取得了重要进展并多次开展海试[514–516]。

11　大型观测计划、大型项目

经过近 70 年的发展, 在全国海洋普查、中国近海海洋综合调查、大洋专项、极地专项、中国科学院先导项目等一系列以海洋调查和能力建设为主体任务的国家重大专项的支持下, 中国逐渐建立了由卫星、飞机、调查船、岸基监测站、浮标和志愿船等组成的近海海洋立体观测体系。

在国产调查仪器装备应用方面, 早在 20 世纪 50–60 年代, 主要以人工观测为主, 观测效率低; 20 世纪 80 年代以后, 开始大量进口国外自记自容式海洋调查仪器装备, 提高了观测效率; 20 世纪 90 年代以来, 开始了海洋调查仪器装备国产化研制和海试应用, 积累了一定的技术基础, 但是由于缺乏对核心技术的把握, 国产海洋调查仪器装备的市场占有率尚低。

自 20 世纪 90 年代开始, 中国开始布设定点连续观测的海床基、潜标和浮标, 多以单个、分散和短期为主。21 世纪以来, 中国定点连续观测逐步向阵列化发展, 对中国近海、西太–南海–东印度洋进行了区域针对性调查, 积累了海洋调查布局区域控制和整体

协同方面的系列经验。

中国于 2002 年正式加入全球 Argo 计划，至 2018 年底，已在全球海洋中维持了约 100 个活跃浮标组成的 Argo 区域，建立了以深海大洋观测为主的中国 Argo 实时观测网[6]。2013 年至今，中国科学院海洋研究所建成了西太平洋实时科学观测网并实现稳定运行（图 6），实现了对西太平洋上层赤道流系、西边界流和中深层环流的同步连续观测和深海潜标数据的长周期实时传输[517–518]。中国海洋大学自 2009 年以来在南海布放潜标 350 余套次，构建了目前国际上规模最大的区域海洋潜标观测网——南海潜标观测网，并于 2016 年实现全面覆盖南海深海盆的深海多尺度动力过程长期连续观测[519]。青岛海洋科学与技术试点国家实验室提出“透明海洋”重大科学计划，以构建一个长期的、连续的、实时的立体观测网等为目标[520]，并于 2015 年底开始在黑潮延伸体附近海域布放深海潜标。中国在南北极环境综合考察与评估专项等的支持下，发展了极地在线近岸海洋环境监测系统、极地潜标和极地大型海–气耦合浮标等海床基观测系统[521]。在国际合作调查方面，自然资源部第一海洋研究所先后开展了 SITE 和“印尼贯穿流海域水体输运、内波和混合观测研究（Transport, Internal Waves and Mixing in the Indonesian Throughflow regions and impacts on seasonal fish migration, TIMIT）”[11]、“印尼爪哇沿岸上升流潜标观测”[522] 等中–印尼国际合作项目以及“安达曼海上层海洋及海气相互作用观测研究”[523] 等中–泰国际合作项目。此外，中国科学家积极参加第二次国际印度洋科学考察计划（International Indian Ocean Expedition-2, IIOE-2），在 IIOE-2 的发起、规划、实施等阶段都发挥了重要作用，并与日本、美国科学家共同发起了东印度洋上升流研究计划（Eastern Indian Ocean Upwelling Research Initiative, EIOURI）[5]。

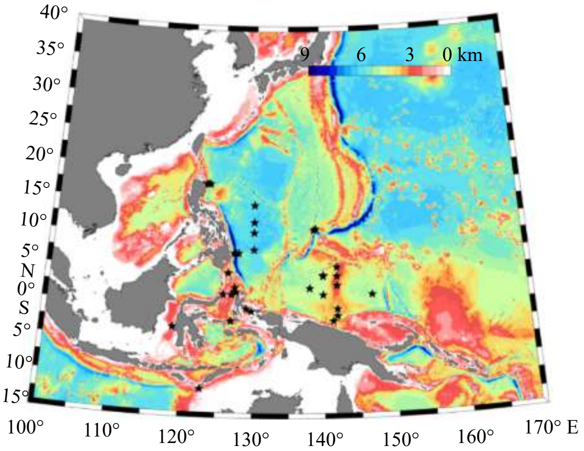

图 6　西太平洋科学观测网潜标和浮标位置图（黑色五角星）

Fig. 6　Locations of subsurface moorings and buoys in the western Pacific (black pentacle)

海洋声学调查方面，中国开展了覆盖了南海、西北太平洋和部分印度洋区域的多个海洋声学调查专项。迄今已成功研制了深海声学潜标，取得了一大批珍贵海洋声学数据，形成了一整套海洋声学调查规范。

海洋光学调查方面，1998 年，中国引进了第一台水色剖面仪，这一时期在东海和黄海开展了实验性的光学调查及研究工作。2002 年，发射了第一颗海洋水色卫星 HY-1A。卫星在轨运行期间，在黄海、东海及南海开展了多次用于卫星传感器辐射定标和真实性检验的海洋光学调查工作。2006 年开始的“我国近海海洋综合调查与评价”专项，开展了 4 个季节覆盖中国近海海区的 37 个航次光学调查与研究。此后，通过国家专项的实施，将光学调查与研究工作的范围向南海、东印度洋和西太平洋扩展。

目前，中国海洋调查区域以管辖海域为主。经过近 70 年的发展，形成了一定规模的海洋调查与测量船队，在海洋调查专项的持续支持下，培养了大批专业海洋调查与测量人员，快速形成了从近海向深远海调查的格局。但是中国对全球海洋调查仍处于起步阶段，在西太平洋、东印度洋和南北极等重点海域较为系统的海洋调查方兴未艾。

12　海洋环境及应用

新中国成立以来，中国石油化工产业、海洋资源勘探开发技术迅速发展，海洋开发利用范围和强度不断扩大，导致各类海上溢油、危险化学品（以下简称危化品）泄漏事故多发，对海洋生态环境和国民经济都造成了不良影响。物理海洋学对这些事故的应急处理和危险预报等方面起着至关重要的作用。

中国学者在海洋溢油模拟预测理论和应用方面，开展了大量工作。早期受计算能力的限制，多应用参数化的方法，由风场和海面流场推测油膜轨迹[524]。之后，海洋水动力模型和计算方案被引入了海面油膜漂移预测[525–526]。安伟等[527] 通过集成三维水动力模块、气象模块、环境敏感区域模块和决策支持模块，建立了中国近海溢油漂移预测系统。李彤和谢志宜[528] 应用“油粒子”模型得到了较传统平流扩散模型精度更好的油膜轨迹预测结果。李燕等[529] 将数据同化技术应用到了溢油预测模型中，进一步提高了模拟

精度。王永刚等建立了一个包含多种过程的溢油漂移预测模型并业务化运行[530]。乔方利等[531]建立了全球长时间尺度溢油预测方法，并在 2018 年东海“桑吉”轮溢油事件中应用。

中国针对海洋中泄漏危化品扩散的数值模拟研究起步于 20 世纪世纪末[532]。早期，大多采用简单的二维模型对易溶保守液体化学品的污染扩散进行数值计算[533–534]。进入 21 世纪，危化品漂移扩散的数值模拟转向三维，危化品的种类和扩散模型也趋于多元化[535]。余江等[536]根据密度、溶解度、挥发性等特征，建立了危化品分类方法，对提高泄漏危化品漂移扩散的模拟有重要的参考价值。

13　结语

本文以翔实的科学事实、大量数据和文献评述新中国成立 70 年来物理海洋学各领域研究（主要包括物理海洋和海洋气象，也涉猎海洋物理与海洋观测）从无到有、从小到大、从弱到强，发展壮大的历史轨迹。可以说这是一部丰富生动、遵循了唯理与实证科学精神的探索史。

在这 70 年发展历程中，有一段史实值得回忆。1964 年，国家海洋局成立。国家赋予的使命概括为 3 句话 15 个字，即“查清中国海，进军三大洋，登上南极洲”。这是当年的国家海洋战略，也是当年中国人民的海洋强国梦。从本文评述可见，经过半个世纪三代人艰苦卓绝、可歌可泣的努力奋斗，当年的梦想不仅成为现实，而且已经超越。

70 年的实践表明，国家的海洋战略是学科发展的灯塔，国家经济建设、国防建设和维护海洋权益的刚性需求是海洋学科发展的不竭原动力，国家实力是学科发展的坚强后盾，遍布全国的众多研究群体是学科发展的生力军，通过国际交流与合作研究分享国外科研新思路、新方法、新数据和新成果是学科发展不可或缺的推动力。这即是宝贵的历史经验，也对未来发展有重要参考价值。

总结历史的辉煌成就是为了开创更加美好的未来。可以预期，在中国“加快建设海洋强国”和“走向深海大洋”战略规划指引下，随着国家综合实力不断增强，物理海洋学研究作为探索海洋科学的第一梯队，必将迎来更大、更好的发展机遇。“今日非昨日，明日更辉煌”。

本文以已发表的科研成果为依据，从一个侧面评述中国物理海洋学研究 70 年来的发展概况。这些科研成果是学科发展史重要组成部分，但不是全部。由于文章篇幅限制，没能列出所有收集到的研究成果（每位第一作者以 3 篇为限）。一叶扁舟盛不下大海，仅能承载有限的记忆。本文对国家重大专项调查和攻关项目、获奖项目以及突出贡献科学家等的记述欠详或缺失。这些局限性有待于撰写长篇幅专著来突破。

致谢：撰写本文是一项社会公益活动，得到各参加单位大力支持，特别是自然资源部第一海洋研究所提供了宝贵人力、物力和财力支持，作者深表谢意。王鼎琦、金娇燕、万荣强、王建、邱子珊等自始至终为该项活动提供卓有成效的技术支持，在此谨表谢忱。作者对 4 位审稿人为修改本文提出的宝贵批评和建议深表谢意。

参考文献：

[1]　中国大百科全书普及版编委会. 海洋——神秘的水世界[M]. 北京: 中国大百科出版社, 2013.
China Encyclopedia Popularization Editorial Committee. Oceans—Mysterious Water World[M]. Beijing: China Encyclopedia Press, 2013.

[2]　中国科学技术协会. 中国海洋学学科史[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2015.
China Association for Science and Technology. History of Ocean Sciences in China[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2015.

[3]　中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室. 全国海洋综合调查报告[R]. 北京：科学出版社, 1964.
The Office of Ocean Comprehensive Survey, Ocean Group, the State Commission for Science and Technology of the People's Republic of China. Report of Comprehensive Survey of China Seas[R]. Beijing: Science Press, 1964.

[4]　《中国海洋志》编纂委员会. 中国海洋志[M]. 郑州: 大象出版社, 2003.
The Compilation Committee of History Oceanography in China. History of Oceanography in China[M]. Zhengzhou: Daxiang Press, 2003.

[5]　于卫东, 方越, 刘琳, 等. 第二次国际印度洋科学考察计划(IIOE-2)介绍[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(1): 1−7.
Yu Weidong, Fang Yue, Liu Lin, et al. Introduction of the second international Indian Ocean expedition (IIOE-2)[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(1): 1−7.

[6]　刘增宏, 吴晓芬, 许建平, 等. 中国Argo海洋观测十五年[J]. 地球科学进展, 2016, 31(5): 445−460.

Liu Zenghong, Wu Xiaofen, Xu Jianping, et al. Fifteen years of ocean observations with China Argo[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(5): 445−460.

[7] 乔方利. 中国区域海洋学——物理海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
Qiao Fangli. Regional Oceanography of China Seas—Physical Oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.

[8] 《中国海洋年鉴》编纂委员会. 2017中国海洋年鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 2018.
Compilation Committee of China Ocean Yearbook. 2017 China Ocean Yearbook[M]. Beijing: China Ocean Press, 2018.

[9] 国家海洋局极地专项办公室. 南极周边海域物理海洋和海洋气象考察[M]. 北京: 海洋出版社, 2016.
Chinese Arctic and Antarctic Administration. Physical Oceanography and Marine Meteorological Investigations around the Antarctic[M]. Beijing: China Ocean Press, 2016.

[10] 国家海洋局极地专项办公室. 北极海域物理海洋和海洋气象考察[M]. 北京: 海洋出版社, 2016.
Chinese Arctic and Antarctic Administration. Physical Oceanography and Marine Meteorology in the Arctic Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2016.

[11] Wei Zexun, Li Shujiang, Susanto R D, et al. An overview of 10-year observation of the South China Sea branch of the Pacific to Indian Ocean throughflow at the Karimata Strait[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(4): 1−11.

[12] 胡敦欣. 西北太平洋海洋环流和气候试验国际合作项目(NPOCE)——科学/贯彻计划[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
Hu Dunxin. Northwestern Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment (NPOCE)-Science/Implementation Plan[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011.

[13] 中国人民解放军海军司令部海道测量部. 实用潮汐学[M]. 天津: 中国人民解放军海军司令部海道测量部, 1959.
Hydrography (Sea Survey) Department, PLA Navy Command. Practical Tidology[M]. Tianjin: The Department of Navigation Survey, PLA Navy Headquarters, 1959.

[14] 文圣常. 海浪原理[M]. 济南: 山东人民出版社, 1962.
Wen Shengchang. Principles of Sea Waves[M]. Jinan:Shandong People’s Publishing House, 1962.

[15] 毛汉礼, 任允武, 万国铭. 应用T-S关系定量地分析浅海水团的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(1): 1−22.
Mao Hanli, Ren Yunwu, Wan Guomin. A preliminary investigation on the application of using T-S diagrams for a quantitative analysis of the watermasses in the shallow water area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1964, 6(1): 1−22.

[16] 景振华. 海流原理[M]. 北京: 科学出版社, 1966.
Jing Zhenhua. Principles of Ocean Current[M]. Beijing: Science Press, 1966.

[17] 毛汉礼. 海洋科学[M]. 北京: 科学出版社, 1955.
Mao Hanli. The Sea[M]. Beijing: Science Press, 1955.

[18] 陈宗镛. 潮汐学[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
Chen Zongyong. Tidology[M]. Beijing: Science Press, 1980.

[19] 冯士筰. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
Feng Shizuo. Introduction to Storm Surge[M]. Beijing: Science Press, 1982.

[20] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983.
Wang Binhua. Sea Fog[M]. Beijing: China Ocean Press, 1983.

[21] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
Wen Shengchang, Yu Zhouwen.Theories and Calculation Principles of Sea Waves[M]. Beijing: Science Press, 1984.

[22] 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
Fang Guohong, Zheng Wenzhen, Chen Zongyong, et al. Analysis and Prediction of Tides and Tidal Currents[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986.

[23] 苏纪兰, 袁业立. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
Su Jilan, Yuan Yeli. Hydrography of the Seas Adjacent to China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005.

[24] Hu Dunxin, Wu Lixin, Cai Wenju, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate[J]. Nature, 2015, 522(7556): 299−308.

[25] 王东晓, 方国洪, 王启, 等. 热带太平洋环流变异与海气相互作用[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
Wang Dongxiao, Fang Guohong, Wang Qi, et al. Tropical Pacific Ocean Circulation and Air–Sea Interaction[M]. Beijing: China Ocean Press, 2009.

[26] 李建平, 吴国雄, 胡敦欣. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
Li Jianping, Wu Guoxiong, Hu Dunxin. Sea-Air Interaction in the Asian-Indian Ocean-Pacific Interchange Region and Its Impact on Short-Term Climate in China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011.

[27] 冷疏影, 李薇, 李克强, 等. 2018年度海洋科学与极地科学基金项目评审与资助成果分析[J]. 地球科学进展, 2018, 33(12): 1305−1313.
Leng Shuying, Li Wei, Li Keqiang, et al. An introduction of the projects managed by division of marine and polar sciences, department of earth sciences, national natural science foundation of China in 2018[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(12): 1305−1313.

[28] Yuan Yeli, Hua Feng, Pan Zengdi, et al. LAGFD-WAM numerical wave model-I. Basic physical model[J]. Acta Oceanologica Sinica,

1991, 10(4): 483−488.

[29] 方国洪, 魏泽勋, 王永刚. 我国潮汐潮流区域预报的发展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 331−336.
Fang Guohong, Wei Zexun, Wang Yonggang. Development of tide and tidal current regional prediction in China[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(4): 331−336.

[30] 刘海龙. LASG/IAP气候系统海洋模式(LICOM 1.0)参考手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Liu Hailong. Manual of LASG/IAP Climate System Ocean Model LICOM 1.0 [M]. Beijing: Science Press, 2004.

[31] 宋振亚, 刘卫国, 刘鑫, 等. 海量数据驱动下的高分辨率海洋数值模式发展与展望[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(2): 161−170.
Song Zhenya, Liu Weiguo, Liu Xin, et al. Research progress and perspective of the key technologies for ocean numerical model driven by the mass data[J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(2): 161−170.

[32] 张荣华, 高川. 关于2015年厄尔尼诺事件的二次变暖过程: 一个基于中等复杂程度海洋模式的诊断分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(9): 1027−1039.
Zhang Ronghua, Gao Chuan. Processes involved in the second-year warming of the 2015 El Niño event as derived from an intermediate ocean model[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2017, 47(9): 1027−1039.

[33] 周天军, 邹立维, 吴波, 等. 中国地球气候系统模式研究进展: CMIP计划实施近20年回顾[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 892−907.
Zhou Tianjun, Zou Liwei, Wu Bo, et al. Development of earth/climate system models in China: A review from the coupled model intercomparison proiect perspective[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 892−907.

[34] 管长龙. 我国海浪理论及预报研究的回顾与展望[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(4): 549−556.
Guan Changlong. A review of history and prospect for study of sea wave theory and its forecast in China[J]. Journal Of Ocean University Of Qingdao, 2000, 30(4): 549−556.

[35] 喻沧. 20世纪中国学术大典-测绘学、大气科学、固体地球物理学、应用地球物理学、海洋科学[M]. 福州: 福建教育出版社, 2002.
Yu Cang. 20th Century Chinese Academic Dictionary: Surveying and Mapping, Atmospheric Sciences, Solid Earth Geophysics, Applied Geophysics and Ocean Science[M]. Fuzhou: Fujian Education Press, 2002.

[36] 侯一筠, 段永亮, 陈更新, 等. 浅水非线性随机海浪的波高分布[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2009, 39(12): 1795−1800.
Hou Yijun, Duan Yongliang, Chen Gengxin, et al. Statistical distribution of nonlinear random wave height in shallow water[J]. Science in China(Series D: Earth Sciences), 2009, 39(12): 1795−1800.

[37] 尹宝树, 王涛, 侯一筠, 等. 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 109−116.
Yin Baoshu, Wang Tao, Hou YiJun, et al. Numerical study of the influence of waves and tide-surge interaction on waves in Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(1): 109−116.

[38] Chen Ge, Chapron B, Ezraty R, et al. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(11): 1849−1859.

[39] 张书文. 波浪破碎气体的卷入过程及相关统计量的估计[J]. 物理学报, 2008, 57(5): 3287−3292.
Zhang Shuwen. Air bubble entrainment by breaking waves and estimation of the related statistical quantities[J]. Acta Physical Sinica, 2008, 57(5): 3287−3292.

[40] Yuan Yeli, Han Lei, Hua Feng, et al. The statistical theory of breaking entrainment depth and surface whitecap coverage of real sea waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(1): 143−161.

[41] 赵栋梁. 海洋飞沫及其对海-气相互作用影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(6): 624−632.
Zhao Dongliang. Progress in sea spay and its effects on air-sea interaction[J]. Advance in Earth Sciences, 2012, 27(6): 624−632.

[42] Wang Haili, Yang Yongzeng, Sun Baonan, et al. Improvements to the statistical theoretical model for wave breaking based on the ratio of breaking wave kinetic and potential energy[J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 60(1): 180−187.

[43] Dai Dejun, Qiao Fangli, Sulisz W, et al. An experiment on the nonbreaking surface-wave-induced vertical mixing[J]. Journal of Physical Oceanography, 2010, 40(9): 2180−2188.

[44] Qiao Fangli, Yuan Yeli, Deng Jia, et al. Wave-turbulence interaction-induced vertical mixing and its effects in ocean and climate models[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2016, 374(2065): 20150201.

[45] 孙孚, 钱成春, 王伟, 等. 海浪波生切应力及其对流驱动作用的估计[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2004, 47(12): 1147−1154.
Sun Fu, Gao Shan, Wang Wei, et al. Wave-induced stress and estimation of its driven effect on currents[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 47(12): 1147−1154.

[46] 吴克俭, 杨忠良, 刘斌, 等. 波浪对Ekman层的能量输入[J]. 中国科学 D辑: 地球科学, 2008, 38(1): 134−140.
Wu Kejian, Yang Zhongliang, Liu Bin, et al. Wave energy input to the Ekman layer[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 38(1): 134−140.

[47] 袁业立, 乔方利, 尹训强, 等. 基于二阶矩闭合模式平衡解的海浪生湍流混合系数解析估计[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(2): 171−180.
Yuan Yeli, Qiao Fangli, Yin Xunqiang, et al. Analytical estimation of mixing coefficient induced by surface wave-generated turbulence based on the equilibrium solution of the second-order turbulence closure model[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(2): 171−180.

[48] Wen Shengchang, Zhang Dacuo, Chen Bohai, et al. A hybrid model for numerical wave forecasting and its implementation-I. The wind wave model[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1989, 8(1): 1−14.

[49] 尹宝树, 王涛, 范顺庭. YW-SWP海浪数值预报模式及其应用[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(3): 293−300.
Yin Baoshu, Wang Tao, Fan Shunting. YW-SWP sea wave numerical prediction model and its application[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(3): 293−300.

[50] 杨永增, 乔方利, 赵伟, 等. 球坐标系下MASNUM海浪数值模式的建立及其应用[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 1−7.
Yang Yongzeng, Qiao Fangli, Zhao Wei, et al. MASNUM ocean wave numerical model in spherical coordinates and its application[J]. Haiyang Xuebao, 2005, 27(2): 1−7.

[51] Sun Meng, Yang Yongzeng, Yin Xunqiang, et al. Data assimilation of ocean surface waves using Sentinel-1 SAR during typhoon Malakas[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 70: 35−42.

[52] 郑文振. 潮汐工作三十年的成就和展望[M]//中国海洋学会. 我国海洋科学三十年. 北京: 海洋出版社, 1980.
Zhen Wenzhen. Achievements and prospects of tidal research over the past 30 years[M]//China Oceanographic Society. Marine Science Researches in the Recent 30 Years in China. Beijing: China Ocean Press, 1980.

[53] 陈满春, 储英杰, 刘克修, 等. 浅水港口潮汐预报准调和方法的改进[J]. 海洋学报, 2006, 28(1): 9−17.
Chen Manchun, Chu Yingjie, Liu Kexiu, et al. Improved schemes of quasi-harmonic method for tide prediction of shallow water ports[J]. Haiyang Xuebao, 2006, 28(1): 9−17.

[54] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
Huang Zuke, Huang Lei. Tidal Theory and Calculation[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005.

[55] 朱江, 曾庆存, 郭冬建, 等. 利用伴随算子法从岸边潮位站资料估计近岸模式的开边界条件[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1997, 27(5): 462−468.
Zhu Jiang, Zeng Qingcun, Guo Dongjian, et al. Estimation of open boundary conditions for nearshore model from tidal gauge data by Adjoint Operator Method[J]. Science in China Series D: Science in China, 1997, 27(5): 462−468.

[56] 丘仲锋, 何宜军, 吕咸青. 黄海、渤海TOPEX/Poseidon高度计资料潮汐伴随同化[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 10−18.
Qiu Zhongfeng, He Yijun, Lü Xianqing. Tidal adjoint assimilation with the TOPEX/Poseidon altimetry data in the Huanghai and Bohai Seas[J]. Haiyang Xuebao, 2005, 27(4): 10−18.

[57] 汪一航, 方国洪, 魏泽勋, 等. 基于卫星高度计的全球大洋潮汐模式的准确度评估[J]. 地球科学进展, 2010, 25(4): 353−359.
Wang Yihang, Fang Guohong, Wei Zexun, et al. Accuracy assessment of global ocean tide models base on satellite altimetry[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(4): 353−359.

[58] 王辉, 万莉颖, 秦英豪, 等. 中国全球业务化海洋学预报系统的发展和应用[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1090−1104.
Wang Hui, Wan Liying, Qin Yinghao, et al. Development and application of the Chinese global operational oceanography forecasting system[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(10): 1090−1104.

[59] 崔欣梅, 方国洪, 滕飞, 等. 潮汐共振研究综述[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(4): 537−546.
Cui Xinmei, Fang Guohong, Teng Fei, et al. A review on studies of tidal resonance[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(4): 537−546.

[60] Teng Fei, Fang Guohong, Xu Xiaoqing. Effects of internal tidal dissipation and self-attraction and loading on semidiurnal tides in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea: a numerical study[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2017, 35(5): 987−1001.

[61] 左军成, 左常圣, 李娟, 等. 近十年我国海平面变化研究进展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2015, 43(5): 442−449.
Zuo Juncheng, Zuo Changsheng, LI Juan, et al. Advances in research on sea level variations in China from 2006 to 2015[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2015, 43(5): 442−449.

[62] Chen Xianyao, Zhang Xuebin, Church J A, et al. The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993–2014[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(7): 492−495.

[63] 毛汉礼. 海洋学的任务、发展和现况[J]. 科学通报, 1956(9): 7−15.
Mao Hanli. The Mission, development and current situation of oceanography[J]. Cinese Science Bulletin, 1956(9): 7−15.

[64] 吕炯. 西北太平洋及其在东亚气候上的问题[J]. 地理学报, 1951, (1/2): 69−88.
Lü Jiong. The northwestern Pacific Ocean and its influences on the climate of China[J]. Acta Geographica Sinica, 1951, (1/2): 69−88.

[65] 张丕远, 陈恩久. 北太平洋地区海面水温与气温的一些特征[J]. 地理学报, 1961, 27: 57−65.
Zhang Peiyuan, Chen Enjiu. Characteristics of sea surface temperature and air temperature in the North Pacific[J]. Acta Geographica Sinica, 1961, 27: 57−65.

[66] 苏纪兰, 袁耀初, 姜景忠. 建国以来我国物理海洋学的进展[J]. 地球物理学报, 1994, 37(S1): 85−95.
Su Jilan, Yuan Yaochu, Jiang Jingzhong. Advances in physical oceanography in China since the establishment of the PRC[J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(S1): 85−95.

[67] 袁耀初. 西北太平洋及其边缘海环流第1卷[M]. 北京: 海洋出版社, 2016.
Yuan Yaochu. Circulations in the Northwestern Pacific and its Neighboring Marginal Seas-Volume Ⅰ[M]. Beijing: China Ocean Press, 2016.

[68] 袁耀初. 西北太平洋及其边缘海环流第2卷[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
Yuan Yaochu. Circulations in the Northwestern Pacific and its Neighboring Marginal Seas - Volume Ⅱ[M]. Beijing: China Ocean Press, 2017.

[69] Qu Tangdong, Kagimoto T, Yamagata T. A subsurface countercurrent along the east coast of Luzon[J]. Deep-Sea Research Part Ⅰ: Oceanographic Research Papers, 1997, 44(3): 413−423.

[70] Wang Fan, Hu Dunxin. Preliminary study on the formation mechanism of counter western boundary undercurrents below the thermocline-a conceptual model[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1999, 17(1): 1−9.

[71] Qu Tangdong, Mitsudera H, Yamagata T. On the western boundary currents in the Philippine Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1998, 103(C4): 7537−7548.

[72] 巢纪平, 张人禾. 热带海气相互作用波及其不稳定性[J]. 气象学报, 1990, 48(1): 46−54.
Chao Jiping, Zhang Renhe. The air-sea interaction waves in the tropics and their instabilities[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1990, 48(1): 46−54.

[73] Liu Qinyu, Qin Zenghao. Nonlinear Rossby waves in the inertial boundary current and their possible relation to the variability of the Kuroshio[J]. Elsevier Oceanography Series, 1991, 54: 49−61.

[74] 王凡, 汪嘉宁, 张林林, 等. 主流系与西太平洋暖池变异机制研究进展[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1145−1155.
Wang Fan, Wang Jianing, Zhang Linlin, et al. Research progresses in the variability of western Pacific main current system and warm pool[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1145−1155.

[75] Wang Fujun, Wang Qingye, Hu Dunxin, et al. Seasonal variability of the Mindanao Current determined using mooring observations from 2010 to 2014[J]. Journal of Oceanography, 2016, 72(5): 787−799.

[76] Ren Qiuping, Li Yuanlong, Wang Fan, et al. Seasonality of the Mindanao Current/Undercurrent System[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(2): 1105−1122.

[77] Guan Bingxian. Major features of warm and cold eddies south of the Nansei Islands[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1983, 1(3): 248−257.

[78] Zhou Hui, Yuan Dongliang, Guo Peifang, et al. Meso-scale circulation at the intermediate-depth east of Mindanao observed by Argo profiling floats[J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 53(3): 432−440.

[79] Sheu W J, Wu C R, Oey L Y. Blocking and westward passage of eddies in the Luzon Strait[J]. Deep-Sea Research Part Ⅱ: Topical Studies in Oceanography, 2010, 57(19/20): 1783−1791.

[80] Yang Guang, Wang Fan, Li Yuanlong, et al. Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific Ocean: Statistical characteristics and three-dimensional structures[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(4): 1906−1925.

[81] Zhao Jun, Li Yuanlong, Wang Fan, et al. Spatial-temporal patterns and driving mechanisms of semiannual variations in the Philippine Sea[J]. Deep-Sea Research Part Ⅰ: Oceanographic Research Papers, 2012, 68: 105−115.

[82] Chiang T L, Wu C R, Qu Tangdong, et al. Activities of 50–80 day subthermocline eddies near the Philippine coast[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(5): 3606−3623.

[83] Xie Lingling, Zheng Quanan, Tian Jiwei, et al. Cruise observation of Rossby waves with finite wavelengths propagating from the Pacific to the South China Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 2016, 46(10): 2897−2913.

[84] Wang Zheng, Yuan Dongliang. Nonlinear dynamics of two western boundary currents colliding at a gap[J]. Journal of Physical Oceanography, 2012, 42(11): 2030−2040.

[85] Ma Xiaohui, Jing Zhao, Chang Ping, et al. Western boundary currents regulated by interaction between ocean eddies and the atmosphere[J]. Nature, 2016, 535(7613): 533−537.

[86] Yuan Dongliang, Zhang Zhichun, Chu P C, et al. Geostrophic circulation in the tropical North Pacific Ocean based on Argo profiles[J]. Journal of Physical Oceanography, 2013, 44(2): 558−575.

[87] Chen Zhaohui, Wu Lixin. Long-term change of the Pacific North Equatorial Current bifurcation in SODA[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 41(9): 3172−3180.

[88] Zhai Fangguo, Hu Dunxin, Wang Qingye, et al. Long-term trend of Pacific South Equatorial Current bifurcation over 1950-2010[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41: 2014GL059934.

[89] Li Yuanlong, Wang Fan, Zhai Fangguo. Interannual variations of subsurface spiciness in the Philippine Sea: Observations and mechanism[J]. Journal Physical Oceanography, 2012, 42(6): 1022−1038.

[90] Hsin Y C, Qiu Bo, Chiang T L, et al. Seasonal to interannual variations in the intensity and central position of the surface Kuroshio east of Taiwan[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(9): 4305−4316.

[91] Yan Youfang, Chassignet E P, Qi Yiquan, et al. Freshening of subsurface waters in the Northwest Pacific Subtropical Gyre: Observations and dynamics[J]. Journal of Physical Oceanography, 2013, 43(12): 2733−2751.

[92] Zhao Jun, Li Yuanlong, Wang Fan. Dynamical responses of the west Pacific North Equatorial Countercurrent (NECC) system to El Niño Events[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(6): 2828−2844.

[93] Wang Jianing, Lu Youyu, Wang Fan, et al. Surface current in "Hotspot" serves as a new and effective precursor for El Niño prediction[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 166.

[94] Duan Jing, Li Yuanlong, Wang Fan, et al. Decadal variations of the mindanao current during 1960-2010[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2019, 124(4): 2660−2678.

[95] Wu Chaorong, Wang Youlin, Lin Yongfu, et al. Weakening of the Kuroshio intrusion into the South China Sea under the global warming hiatus[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(11): 5064−5070.

[96] Hsin Y C. Trends of the pathways and intensities of surface equatorial current system in the North Pacific Ocean[J]. Journal of Climate, 2016, 29(18): 6693−6710.

[97] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学, 1994, 18(2): 141−151.

Huang Ronghui, Sun Fengying. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1994, 18(2): 141−151.

[98] 张启龙, 翁学传. 热带西太平洋暖池的某些海洋学特征分析[J]. 海洋科学集刊, 1997, (38): 31−38.

Zhang Qilong, Weng Xuechuan. Analysis of some oceanographic characteristics of the tropical Western Pacific Warm Pool[J]. Studia Marina Sinica, 1997, (38): 31−38.

[99] 傅刚, 周发琇, 朱抱真. 西太平洋暖池形成与维持的动力学机制[J]. 青岛海洋大学学报, 1993, 23(S2): 51−62.

Fu Gang, Zhou Faxiu, Zhu Baozhen. Study of formation and maintenance mechanism of the West Pacific Warm Pool[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1993, 23(S2): 51−62.

[100] Hu Shijian, Hu Dunxin, Guan Cong, et al. Variability of the western Pacific Warm Pool structure associated with El Niño[J]. Climate Dynamics, 2017, 49(7/8): 2431−2449.

[101] Huang Ruixin, Wang Qi. Interior communication from the subtropical to the tropical oceans[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(12): 3538−3550.

[102] Hong Lingya, Zhang Liping, Chen Zhaohui, et al. Linkage between the Pacific Decadal Oscillation and the low frequency variability of the Pacific Subtropical Cell[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2014, 119(6): 3464−3477.

[103] Zhou Hui, Yuan Dongliang, Yang Li'na, et al. Decadal variability of the meridional geostrophic transport in the upper tropical North Pacific Ocean[J]. Journal of Climate, 2018, 31(15): 5891−5910.

[104] Li Yuanlong, Wang Fan, Sun Yan. Low-Frequency spiciness variations in the tropical Pacific Ocean observed during 2003–2012[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(23): L23601.

[105] Gao Shan, Qu Tangdong, Fukumori I. Effects of mixing on the subduction of South Pacific waters identified by a simulated passive tracer and its adjoint[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2011, 51(1/2): 45−54.

[106] Liu Chengyan, Wu Lixin. An intensification trend of South Pacific mode water subduction rates over the 20th century[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C7): C07009.

[107] Xu Lixiao, Xie Shangping, McClean J L, et al. Mesoscale eddy effects on the subduction of North Pacific mode waters[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(8): 4867−4886.

[108] Wang Chunzai. Subthermocline tropical cells and equatorial subsurface countercurrents[J]. Deep-Sea Research Part Ⅰ: Oceanographic Research Papers, 2005, 52(1): 123−135.

[109] Song Li'na, Li Yuanlong, Wang Jianing, et al. Tropical meridional overturning circulation observed by subsurface moorings in the western Pacific[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 7632.

[110] 陈烈庭, 金祖辉, 罗绍华. 印度洋和南海海温变化的特征及其与大气环流的某些联系[J]. 海洋学报, 1985, 7(1): 103−110.

Chen Lieting, Jin Zuhui, Luo Shaohua. Characteristics of sea temperature variations in the Indian Ocean and South China Sea and their association with atmospheric circulation[J]. Haiyang Xuebao, 1985, 7(1): 103−110.

[111] Ji Zhengang, Chao Jiping. Teleconnections of the sea surface temperature in the Indian ocean with sea surface temperature in the eastern equatorial Pacific, and with the 500 hPa geopotential height field in the Northern Hemisphere[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1987, 4(3): 343−348.

[112] 吴国雄, 孟文. 赤道印度洋–太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和ENSO事件Ⅰ. 资料分析[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 470−480.

Wu Guoxiong, Meng Wen. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific-walker circulation and the ENSO Part Ⅰ: data analyses[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1998, 22(4): 470−480.

[113] 李崇银, 黎鑫, 杨辉, 等. 热带太平洋–印度洋海温联合模及其气候影响[J]. 大气科学, 2018, 42(3): 505−523.

Li Chongyin, Li Xin, Yang Hui, et al. Tropical Pacific-Indian Ocean associated mode and its climatic impacts[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(3): 505−523.

[114] Qiu Yun, Li Li, Yu Weidong. Behavior of the Wyrtki Jet observed with surface drifting buoys and satellite altimeter[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(18): L18607.

[115] Wang Jing. Observational bifurcation of Wyrtki Jets and its influence on the salinity balance in the eastern Indian Ocean[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2017, 10(1): 36−43.

[116] Li Gen, Xie Shangping, Du Yan. Climate model errors over the South Indian Ocean thermocline dome and their effect on the basin mode of interannual variability[J]. Journal of Climate, 2015, 28(8): 3093−3098.

[117] Chen Gengxin, Han Weiqing, Shu Yeqiang, et al. The role of equatorial undercurrent in sustaining the Eastern Indian Ocean

upwelling[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(12): 6444−6451.

［118］ Zheng Shaojun, Feng Ming, Du Yan, et al. Interannual variability of eddy kinetic energy in the subtropical southeast Indian ocean associated with the El Niño-Southern Oscillation[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2018, 123(2): 1048−1061.

［119］ Huang Ke, Wang Dongxiao, Wang Weiqiang, et al. Multi-scale variability of the tropical Indian Ocean circulation system revealed by recent observations[J]. Science China: Earth Sciences, 2018, 61(6): 668−680.

［120］ Zhuang Wei, Feng Ming, Du Yan, et al. Low-frequency sea level variability in the southern Indian Ocean and its impacts on the oceanic meridional transports[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2013, 118(3): 1302−1315.

［121］ 杜岩, 张涟漪, 张玉红. 印度洋热带环流圈热盐输运及其对区域气候模态的影响[J]. 地球科学进展, 2019, 34(3): 243−254.
Du Yan, Zhang Lianyi, Zhang Yuhong. Review of the tropical gyre in the Indian Ocean with its impact on heat and salt transport and regional climate modes[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(3): 243−254.

［122］ Peng Shiqiu, Qian Yukun, Lumpkin R, et al. Characteristics of the near-surface currents in the Indian Ocean as deduced from satellite-tracked surface drifters. Part Ⅱ: lagrangian statistics[J]. Journal of Physical Oceanography, 2015, 45(2): 459−477.

［123］ Ma Jie, Lan Jian. Interannual variability of Indian Ocean subtropical mode water subduction rate[J]. Climate Dynamics, 2017, 48(11/12): 4093−4107.

［124］ Liu Qinyan, Feng Ming, Wang Dongxiao, et al. Interannual variability of the Indonesian Throughflow transport: A revisit based on 30 year expendable bathythermograph data[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2015, 120(12): 8270−8282.

［125］ 袁东亮, 周慧, 王铮, 等. 印尼贯穿流源区环流的多尺度变异及其科学重要性[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1156−1168.
Yuan Dongliang, Zhou Hui, Wang Zheng, et al. The multi-scale variability of the oceancirculation at the Pacific entrance of the Indonesian Throughflow and its scientific importance[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1156−1168.

［126］ Yang Lina, Zhou Lei, Li Shujiang, et al. Spreading of the South Pacific tropical water and Antarctic intermediate water over the maritime continent[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(6): 4423−4446.

［127］ Zhang Ying, Feng Ming, Du Yan, et al. Strengthened Indonesian Throughflow drives decadal warming in the Southern Indian Ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(12): 6167−6175.

［128］ Fang Guohong, Susanto D, Soesilo I, et al. A note on the South China Sea shallow interocean circulation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2005, 22(6): 946−954.

［129］ 刘钦燕, 黄瑞新, 王东晓, 等. 印度尼西亚贯穿流与南海贯穿流的相互调制[J]. 科学通报, 2006, 27(1): 87−94.
Liu Qinyan, Huang Ruixin, Wang Dongxiao, et al. Covariation of the Indonesian throughflow and South China Sea throughflow associated with the 1976/77 regime shift[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 27(1): 87−94.

［130］ Qu Tangdong, Du Yan, Sasaki H. South China Sea throughflow: A heat and freshwater conveyor[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(23): L23617.

［131］ Hu Shijian, Sprintall J. Interannual variability of the Indonesian throughflow: The salinity effect[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2016, 121(4): 2596−2615.

［132］ Cai Wenju, Wu Lixin, Lengaigne M, et al. Pantropical climate interactions[J]. Science, 2019, 363(6430): eaav4236.

［133］ Sun Cheng, Kucharski F, Li Jianping, et al. Western tropical Pacific multidecadal variability forced by the Atlantic multidecadal oscillation[J]. Nature Communications, 2017, 8: 15998.

［134］ Huang Gang, Hu Kaiming, Xie Shangping. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the Northwest Pacific since the Mid-1970s: An atmospheric GCM study[J]. Journal of Climate, 2010, 23(19): 5294−5304.

［135］ Dong Lu, Zhou Tianjun. The Indian Ocean Sea surface temperature warming simulated by CMIP5 models during the twentieth century: Competing forcing roles of GHGs and anthropogenic aerosols[J]. Journal of Climate, 2014, 27(9): 3348−3362.

［136］ Chen Zesheng, Du Yan, Wen Zhiping, et al. Indo-Pacific climate during the decaying phase of the 2015/16 El Niño: Role of southeast tropical Indian Ocean warming[J]. Climate Dynamics, 2018, 50(11/12): 4707−4719.

［137］ Yuan Dongliang, Wang Jing, Xu Tengfei, et al. Forcing of the Indian Ocean dipole on the interannual variations of the tropical Pacific Ocean: Roles of the Indonesian Throughflow[J]. Journal of Climate, 2011, 24(14): 3593−3608.

［138］ 李凤岐, 苏育嵩. 海洋水团分析[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2000.
Li Fengqi, Su Yusong. The Analysis of Water Mass[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 2000.

［139］ 赫崇本, 汪圆祥, 雷宗友, 等. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1959, 2(1): 11−15.
He Chongben, Wang Yuanxiang, Lei Zongyou, et al. A prelimenary study of the formation of Yellow Sea clod mass and its properties[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1959, 2(1): 11−15.

［140］ 管秉贤. 黄海冷水团的水温变化以及环流特征的初步分析[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(4): 255−284.
Guan Bingxian. A preliminary study of the temperature variations and the characteristics of the circulation of the cold water mass of the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963, 5(4): 255−284.

［141］ Chu T Y. The oceanography of the surrounding waters of Taiwan[J]. Report of the Institute of Fishery Biology of Ministry of Economic Affairs and National Taiwan University, 1963, 1(4): 29−39.

［142］ 徐斯, 王锡侯, 王仁树. 关于有界水团混合的讨论[J]. 海洋与湖沼, 1965, 7(3): 278−294.
Xu Si, Wang Xihou, Wang Renshu. A discussion on the mixing of bounded water masses[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1965,

7(3): 278−294.

[143] 苏育嵩, 李凤岐, 王凤钦. 渤、黄、东海水型分布与水系划分[J]. 海洋学报, 1996, 18(6): 1−7.
Su Yusong, Li Fengqi, Wang Fengqin. Water type distribution and water system category of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1996, 18(6): 1−7.

[144] Fan K L. A study of water massses in Taiwan Strait[J]. Acta Oceanographica Taiwanica, 1982, 13: 140−153.

[145] Jan S, Sheu D D, Kuo H M. Water mass and throughflow transport variability in the Taiwan Strait[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006, 111(C12): C12012.

[146] 孙湘平. 中国近海及毗邻海域水文概况[M]. 北京: 海洋出版社, 2016.
Sun Xiangping. Hydrography of China Adjacent Seas and Neighboring Waters[M]. Beijing: China Ocean Press, 2016.

[147] 熊学军. 中国近海海洋——物理海洋与海洋气象[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
Xiong Xuejun. Offshore Oceans of China: Physical Oceanography and Ocean Meteorology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.

[148] Chen Shengli, Li Yan, Hu Jianyu, et al. Multiparameter cluster analysis of seasonal variation of water masses in the eastern Beibu Gulf[J]. Journal of Oceanography, 2011, 67(6): 709−718.

[149] Hu Jianyu, Hong Huasheng, Li Yan, et al. Variable temperature, salinity and water mass structures in the southwestern Taiwan Strait in summer[J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(6 Suppl. 1): S13−S23.

[150] Zhu Junying, Shi Jie, Guo Xinyu, et al. Air-sea heat flux control on the Yellow Sea Cold Water Mass intensity and implications for its prediction[J]. Continental Shelf Research, 2017, 152: 14−26.

[151] 程国胜, 孙佳东, 俎婷婷, 等. 2011年夏季南海北部海区水团分析[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(3): 10−16.
Cheng Guosheng, Sun Jiadong, Zu Tingting, et al. Analysis of water masses in the northern South China Sea in summer 2011[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2014, 33(3): 10−16.

[152] Zhu Jia, Zheng Quanan, Hu Jianyu, et al. Classification and 3-D distribution of upper layer water masses in the northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(4): 126−135.

[153] 李元龙. 热带西太平洋温跃层水团时空特征及中小尺度海洋过程的作用[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2012.
Li Yuanlong. Spatial and temporal variations of thermocline water masses in the western tropical pacific ocean and the effect of mesoscale and finescale oceanic processes[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2012.

[154] 潘爱军. 北太平洋副热带模态水及其形成机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
Pan Aijun. Subtropical mode water and its formation mechanism in the North Pacific[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.

[155] 王然. 北太平洋副热带模态水潜沉率变异规律及其机制研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2016.
Wang Ran. Research for the characteristics and mechanism of the variations of the north pacific subtropical mode waters subduction rate[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2016.

[156] 聂珣炜. 太平洋赤道潜流的水团来源及其输运路径[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2016.
Nie Xunwei. Water sources of the Pacific Equatorial Undercurrent and their main pathways[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2016.

[157] Zhang Linlin, Qu Tangdong. Low-frequency variability of south pacific tropical water from Argo[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(7): 2441−2446.

[158] Qu Tangdong, Zhang Linlin, Schneider N. North Atlantic subtropical underwater and its year-to-year variability in annual subduction rate during the Argo period[J]. Journal of Physical Oceanography, 2016, 46(6): 1901−1916.

[159] 刘成彦. 二十世纪全球海洋潜沉率和浮露率的变化趋势及其机制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Liu Chengyan. Long-term changes of subduction and obduction over the global ocean and their mechanisms in the 20th century[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.

[160] Fu Yao, Wang Chunzai, Brandt P, et al. Interannual variability of Antarctic intermediate water in the tropical north Atlantic[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(6): 4044−4057.

[161] 李亚婧, 李颖, 魏泽勋. 南极半岛周边海域水团及水交换的研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 1−14.
Li Yajing, Li Ying, Wei Zexun. Study on the properties and exchanges of water masses in the region of Antarctic Peninsula[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 1−14.

[162] 曹勇, 赵进平. 2011–2014年中国北极物理海洋学的研究进展[J]. 海洋学报, 2015, 37(11): 1−10.
Cao Yong, Zhao Jinping. Progress in Arctic physical oceanography in China during 2011–2014[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(11): 1−10.

[163] 管秉贤. 中国沿岸的表面海流与风的关系的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1957, 1(1): 95−116.
Guan Bingxian. A preliminary study on the relationship between the surface currents and the winds along China coast[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1957, 1(1): 95−116.

[164] 中国科学院海洋环流与波动重点实验室. 胡敦欣院士论文选集[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
The Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences. Selected Papers of Academician Hu Dunxin[M]. Beijing: Science Press, 2016.

[165] Beardsley R C, Limeburner R, Kim K, et al. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan seas[J]. La Mer, 1992,

30(3): 297−314.

[166] 赵保仁. 黄海冷水团锋面与潮混合[J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(6): 451−460.
Zhao Baoren. The fronts of Huanghai Sea cold water mass included by tidal mixing[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1985, 16(6): 451−460.

[167] Huang Daji, Su Jilan, Backhaus J O. Modelling the seasonal thermal stratification and baroclinic circulation in the Bohai Sea[J]. Continental Shelf Research, 1999, 19(11): 1485−1505.

[168] Lü Xingang, Qiao Fangli, Xia Changshui, et al. Upwelling and surface cold patches in the Yellow Sea in summer: Effects of tidal mixing on the vertical circulation[J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(6): 620−632.

[169] Lin Xiaopei, Yang Jiayan, Guo Jingsong, et al. An asymmetric upwind flow, Yellow Sea Warm Current: 1. New observations in the western Yellow Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C4): C04026.

[170] 翁学传, 王丛敏. 台湾暖流水(团)夏季T–S特征和来源的初步分析[J]. 海洋科学集刊, 1984, 21: 113−133.
Weng Xuechuan, Wang Congmin. Preliminary analysis of T–S characteristics and sources of Taiwan Warm Water (water mass) in summer[J]. Journal of Marine Science, 1984, 21: 113−133.

[171] Zhu Jianrong, Chen Changsheng, Ding Pingxing, et al. Does the Taiwan warm current exist in winter?[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(12): L12302.

[172] Zhou Feng, Xue Huijie, Huang Daji, et al. Cross-shelf exchange in the shelf of the East China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(3): 1545−1572.

[173] Huang Daji, Zeng Dingyong, Ni Xiaobo, et al. Alongshore and cross-shore circulations and their response to winter monsoon in the western East China Sea[J]. Deep-Sea Research Part Ⅱ: Topical Studies in Oceanography, 2016, 124: 6−18.

[174] Wu Hui, Zhu Jianrong, Shen Jian, et al. Tidal modulation on the Changjiang River plume in summer[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C8): C08017.

[175] 李立, 伍伯瑜. 黑潮的南海流套?——南海东北部环流结构探讨[J]. 台湾海峡, 1989, 8(1): 89−95.
Li Li, Wu Boyu. A Kuroshio loop in South China Sea?——On circulations of the northeastern South China Sea[J]. Journal of Oceanography In Taiwan Strait, 1989, 8(1): 89−95.

[176] 冯士筰. f-平面上的宽陆架诱导阻尼波[J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 177−192.
Feng Shizuo. Dissipative trapped-waves over a continental shelf with broad width on an f-plane[J]. Haiyang Xuebao, 1979, 1(2): 177−192.

[177] 陈大可, 苏纪兰. 中国沿岸陆架波的初步研究[J]. 海洋学报, 1987, 9(1): 1−15.
Chen Dake, Su Jilan. Continental shelf waves along the coasts of China[J]. Haiyang Xuebao, 1987, 9(1): 1−15.

[178] 王佳, 袁业立, 潘增第. 陆架波的数值研究及分析[J]. 海洋学报, 1988, 10(6): 666−677.
Wang Jia, Yuan Yeli, Pan Zengdi. Numerical study and analysis of continental shelf waves[J]. Haiyang Xuebao, 1988, 10(6): 666−677.

[179] Hsueh Y, Pang I C. Coastally trapped long waves in the Yellow Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 1989, 19(5): 612−625.

[180] Ding Yang, Bao Xianwen, Shi Maochong. Characteristics of coastal trapped waves along the northern coast of the South China Sea during year 1990[J]. Ocean Dynamics, 2012, 62(9): 1259−1285.

[181] Yin Liping, Qiao Fangli, Zheng Quanan. Coastal-trapped waves in the East China Sea observed by a mooring array in winter 2006[J]. Journal of Physical Oceanography, 2014, 44(2): 576−590.

[182] Li Junyi, Zheng Quanan, Hu Jianyu, et al. A case study of winter storm-induced continental shelf waves in the northern South China Sea in winter 2009[J]. Continental Shelf Research, 2016, 125: 127−135.

[183] 郑全安, 谢玲玲, 郑志文, 等. 南海中尺度涡研究进展[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(2): 131−158.
Zheng Quanan, Xie Lingling, Zheng Zhiwen, et al. Progress in research of mesoscale eddies in the South China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(2): 131−158.

[184] 中科院南海海洋研究所. 南中国海海区综合调查报告(Ⅱ)[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 183−231.
South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Acadmy of Sciences. Report of comprehensive investigation in the South China Sea (Ⅱ)[M]. Beijing: Science Press, 1985: 183–231.

[185] 王胄, 陈庆生. 南海北部之暖心涡流——(一)对南海暖涡之初步观测[J]. 台湾大学海洋学刊, 1987, 18: 92−103.
Wang Zhou, Chen Qingsheng. The warm-core eddy in the northern South China Sea– Ⅰ. Preliminary observations on the warm-core eddy[J]. Acta oceanographica Taiwanica, 1987, 18: 92−103.

[186] 李立. 南海中尺度海洋现象研究概述[J]. 台湾海峡, 2002, 21(2): 265−274.
Li Li. A review on mesoscale oceanographical phenomena in the South China Sea[J]. Journal of the Oceanography in Taiwan Strait, 2002, 21(2): 265−274.

[187] Wang Guihua, Su Jilan, Chu P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(21): 2121.

[188] Xiu Peng, Chai Fei, Shi Lei, et al. A census of eddy activities in the South China Sea during 1993–2007[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C3): C03012.

[189] Chen Gengxin, Hou Yijun, Chu Xiaoqing. Mesoscale eddies in the South China Sea: Mean properties, spatiotemporal variability, and

impact on thermohaline structure[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C6): C06018.
[190] Wang Lei, Gan Jianping. Delving into three-dimensional structure of the West Luzon Eddy in a regional ocean model[J]. Deep-Sea Research Part Ⅰ: Oceanographic Research Papers, 2014, 90: 48−61.
[191] Hwang C, Chen S A. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2000, 105(C10): 23943−23965.
[192] Li Jiaxun, Zhang Ren, Jin Baogang. Eddy characteristics in the northern South China Sea as inferred from Lagrangian drifter data[J]. Ocean Science Discussions, 2011, 7(5): 661−669.
[193] Hu Jianyu, Gan Jianping, Sun Zhenyu, et al. Observed three-dimensional structure of a cold eddy in the southwestern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C5): C05016.
[194] Lin Xiayan, Dong Changming, Chen Dake, et al. Three-dimensional properties of mesoscale eddies in the South China Sea based on eddy-resolving model output[J]. Deep-Sea Research Part Ⅰ: Oceanographic Research Papers, 2015, 99: 46−64.
[195] Lin Y C, Oey L Y, Wang J, et al. Rossby waves and eddies observed at a temperature mooring in northern South China Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 2016, 46(2): 517−535.
[196] Shu Yeqiang, Xiu Peng, Xue Huijie, et al. Glider-observed anticyclonic eddy in northern South China Sea[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2016, 19(3): 233−241.
[197] Zhang Zhiwei, Tian Jiwei, Qiu Bo, et al. Observed 3D structure, generation, and dissipation of oceanic mesoscale eddies in the South China Sea[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24349.
[198] Ho C R, Kuo N J, Zheng Quanan, et al. Dynamically active areas in the South China Sea detected from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(3): 320−328.
[199] Xue Huijie, Chai Fei, Pettigrew N, et al. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2004, 109(C2): C02017.
[200] Jia Yinglai, Liu Qinyu, Liu Wei. Primary study of the mechanism of eddy shedding from the Kuroshio bend in Luzon Strait[J]. Journal of Oceanography, 2005, 61(6): 1017−1027.
[201] Wang Guihua, Chen Dake, Su Jilan. Winter eddy genesis in the eastern South China Sea due to orographic wind jets[J]. Journal of Physical Oceanography, 2008, 38(3): 726−732.
[202] Zhuang Wei, Du Yan, Wang Dongxiao, et al. Pathways of mesoscale variability in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(5): 1055−1067.
[203] 谢旭丹, 王静, 储小青, 等. 南海中尺度涡温盐异常三维结构[J]. 海洋学报, 2018, 40(4): 1−14.
Xie Xudan, Wang Jing, Chu Xiaoqing, et al. Three-dimensional thermohaline anomaly structures of mesoscale eddies in the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(4): 1−14.
[204] Zhao Yuanbing, Liang Xiangsan, Gan Jianping. Nonlinear multiscale interactions and internal dynamics underlying a typical eddy-shedding event at Luzon Strait[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(11): 8208−8229.
[205] Xie Lingling, Zheng Quanan, Zhang Shuwen, et al. The Rossby normal modes in the South China Sea deep basin evidenced by satellite altimetry[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 39(2): 399−417.
[206] Chen Zhaohui, Wu Lixin, Qiu Bo, et al. Seasonal variation of the south equatorial current bifurcation off madagascar[J]. Journal of Physical Oceanography, 2014, 44(2): 618−631.
[207] Qiu Bo. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific subtropical countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory[J]. Journal of Physical Oceanography, 1999, 29(10): 2471−2486.
[208] Qiu Bo, Chen Shuiming. Variability of the Kuroshio extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales[J]. Journal of Physical Oceanography, 2005, 35(11): 2090−2103.
[209] Xu Lixiao, Li Peiliang, Xie Shangping, et al. Observing mesoscale eddy effects on mode-water subduction and transport in the North Pacific[J]. Nature Communications, 2016, 7: 10505.
[210] Zhang Dongxiao, Lee T N, Jhons W E. The Kuroshio east of Taiwan: Modes of variability and relationship to interior ocean mesoscale eddies[J]. Journal Physical Oceanography, 2001, 31(4): 1054−1074.
[211] Zhang Zhengguang, Zhang Yu, Wang Wei, et al. Universal structure of mesoscale eddies in the ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(14): 3677−3681.
[212] Dong Changming, McWilliams J C, Liu Yu, et al. Global heat and salt transports by eddy movement[J]. Nature Communications, 2014, 5(2): 3294.
[213] Xu Chi, Shang Xiaodong, Huang Ruixin. Horizontal eddy energy flux in the world oceans diagnosed from altimetry data[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5316.
[214] Zhang Zhiwei, Zhong Yisen, Tian Jiwei, et al. Estimation of eddy heat transport in the global ocean from Argo data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(1): 42−47.
[215] Zhang Zhengguang, Wangwei, Qiu Bo. Oceanic mass transport by mesoscale eddies[J]. Science, 2014, 345(6194): 322−324.
[216] Zhao Jian, Bower A, Yang Jiayan, et al. Meridional heat transport variability induced by mesoscale processes in the subpolar North Atlantic[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1124.

[217] Cui Wei, Yang Jungang, Yi Ma. A statistical analysis of mesoscale eddies in the Bay of Bengal from 22-year altimetry data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(11): 16−27.

[218] Duan Yongliang, Liu Hongwei, Yu Weidong, et al. Eddy properties in the Pacific sector of the southern ocean from satellite altimetry data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(11): 28−34.

[219] Li Jiaxun, Wang Guihua, Xue Huijie, et al. A simple predictive model for the eddy propagation trajectory in the northern South China Sea[J]. Ocean Science, 2019, 15(2): 401−412.

[220] 任诗鹤, 王辉, 刘娜. 中国近海海洋锋和锋面预报研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(5): 553−563.
Ren Shihe, Wang Hui, Liu Na. Review of ocean front in Chinese marginal seas and frontal forecasting[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(5): 553−563.

[221] 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(3): 183−206.
Mao Hanli, Gan Zijun, Lan Shufang. A preliminary study of the Yangtze diluted water and its mixing processes[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963, 5(3): 183−206.

[222] 汤毓祥, 苗育田. 东海黑潮锋及锋面涡[M]//国家海洋局科技司. 黑潮调查研究综合报告. 北京: 海洋出版社, 1995: 22–24.
Tang Yuxiang, Miao Yutian. Kuroshio front and frontal eddies in the East China Sea[M]//Department of Science and Technology, State Oceanic Administration. Comprehensive Report of Kuroshio Survey and Research. Beijing: China Ocean Press, 1995: 22–24.

[223] Wong G T F, Chao S Y, Li Yuanhui, et al. The Kuroshio Edge Exchange Processes (KEEP) study—an introduction to hypotheses and highlights[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(4/5): 335−347.

[224] Chen Dake, Liu W T, Tang Wenqing, et al. Air-sea interaction at an oceanic front: Implications for frontogenesis and primary production[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(14): 1745.

[225] 刘泽. 中国近海锋面时空特征研究及现场观测分析[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2012.
Liu Ze. The spatio-temporal variability of oceanic fronts offshore China seas and analysis of marine observations[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2012.

[226] Chen C T A, Huang M H. A mid-depth front separating the South China Sea water and the Philippine Sea water[J]. Journal of Oceanography, 1996, 52(1): 17−25.

[227] Chang Yi, Lee M A, Shimada T, et al. Wintertime high-resolution features of sea surface temperature and chlorophyll-*a* fields associated with oceanic fronts in the southern East China Sea[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(21): 6249−6261.

[228] Lü Xingang, Qiao Fangli, Wang Guansuo, et al. Upwelling off the west coast of Hainan Island in summer: Its detection and mechanisms[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): L02604.

[229] 尹逊福, 孔祥德, 潘惠周. 东海西部陆架海区潮内波特征的初步分析[J]. 海洋学报, 1986, 8(6): 722−788.
Yin Xunfu, Kong Xiangde, Pan Huizhou. Preliminary analysis of characteristics of internal tidal waves over the western continental shelf of the East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1986, 8(6): 722−788.

[230] 束星北, 耿世江, 顾学俊, 等. 利用海流观测资料检验近海内波[J]. 海洋学报, 1985, 7(5): 535−538.
Shu Xingbei, Geng Shijiang, Gu Xuejun, et al. Using ocean current observations for distinguishing internal waves in the offshore waters[J]. Haiyang Xuebao, 1985, 7(5): 535−538.

[231] 赵俊生, 耿世江, 王祯祥, 等. 近海潮成内波波包结构的分析[J]. 海洋学报, 1987, 9(2): 137−144.
Zhao Junsheng, Geng Shijiang, Wang Zhenxiang, et al. Analysis of the packet structure of the tide-generated internal wave in the offshore waters[J]. Haiyang Xuebao, 1987, 9(2): 137−144.

[232] 方欣华, 鲍献文, 张玉琳, 等. 南海西南海域的内波和细结构[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(1): 1−8.
Fang Xinhua, Bao Xianwen, Zhang Yulin, et al. Internal waves and fine structure in the southwestern area of the South China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(1): 1−8.

[233] 邱章, 徐锡祯, 龙小敏. 南海北部-观测点内潮特征的初步分析[J]. 热带海洋, 1996, 15(4): 63−67.
Qiu Zhang, Xu Xizhen, Long Xiaomin. A preliminary analysis on internal tide characteristics at an observation point in northern South China Sea[J]. Tropic Oceanology, 1996, 15(4): 63−67.

[234] 鄢锦, 张仁和, 周士弘, 等. 黄海中部内波特征及其引起的声起伏[J]. 声学学报, 1993, 23(3): 281−287.
Yan Jin, Zhang Renhe, Zhou Shihong, et al. Characterizations of the internal waves and their effect on the sound transmission in the midst of the Yellow Sea[J]. Acta Acustica, 1993, 23(3): 281−287.

[235] 徐肇廷, 方欣华, 汪一明. 偶板造波机生成的内波振幅-理论与实验的比较[J]. 水动力学研究与进展, 1989, 4(4): 89−95.
Xu Zhaoting, Fang Xinhua, Wang Yiming. Amplitudes of internal waves generated by even-paddle wave-makers: A comparison between theory and a laboratory experiment[J]. Journal of Hydrodynamics, 1989, 4(4): 89−95.

[236] 蔡树群, 甘子钧. 内波频散关系的一种数值解法[J]. 热带海洋, 1995, 14(1): 22−29.
Cai Shuqun, Gan Zijun. A numerical method of internal waves dispersion relation[J]. Tropic Oceanology, 1995, 14(1): 22−29.

[237] Tian Jiwei, Zhou Lei, Zhang Xiaoqian, et al. Estimates of M_2 internal tide energy fluxes along the margin of Northwestern Pacific using TOPEX/POSEIDON altimeter data[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(17): 1889.

[238] Hsu M K, Liu A K, Liu Cheng. A study of internal waves in the China seas and Yellow Sea using SAR[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(4/5): 389−410.

[239] Meng Junmin, Zhang Jie, Song Wei, et al. SAR imagery in studying internal waves in the northern South China Sea[C]//Proceedings of SPIE 4892. Ocean Remote Sensing and Applications. Hangzhou: SPIE, 2003: 440-449.

[240] Zheng Quanan. Satellite SAR Detection of Sub-Mesoscale Ocean Dynamic Processes[M]. Singapore:World Scientific Publishing Co. Inc., 2017.

[241] Yang Y J, Tang T Y, Chang M H, et al. Solitons northeast of Tung-Sha island during the ASIAEX pilot studies[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 1182−1199.

[242] Chang M H, Lien R C, Tang T Y, et al. Energy flux of nonlinear internal waves in northern South China Sea[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(3): L03607.

[243] Yang Y J, Fang Y C, Chang M H, et al. Observations of second baroclinic mode internal solitary waves on the continental slope of the northern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2009, 114(C10): C10003.

[244] Du Tao, Tseng Y H, Yan Xiaohai. Impacts of tidal currents and Kuroshio intrusion on the generation of nonlinear internal waves in Luzon Strait[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113(C8): C08015.

[245] Chen Zhiwei, Nie Yuhua, Xie Jieshuo, et al. Generation of internal solitary waves over a large sill: From Knight Inlet to Luzon Strait[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(2): 1555−1573.

[246] Guan Shoude, Zhao Wei, Huthnance J, et al. Observed upper ocean response to Typhoon Megi (2010) in the Northern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(5): 3134−3157.

[247] Dong Jihai, Zhao Wei, Chen Hongtao, et al. Asymmetry of internal waves and its effects on the ecological environment observed in the northern South China Sea[J]. Deep-Sea Research Part Ⅰ: Oceanographic Research Papers, 2015, 98: 94−101.

[248] Huang Xiaodong, Zhang Zhiwei, Zhang Xiaojiang, et al. Impacts of a mesoscale eddy pair on internal solitary waves in the northern South China Sea revealed by mooring array observations[J]. Journal of Physical Oceanography, 2017, 47(7): 1539−1554.

[249] Huang Xiaodong, Wang Zhaoyun, Zhang Zhiwei. Role of mesoscale eddies in modulating the semidiurnal internal tide: Observation Results in the northern South China Sea[J]. Journal Physical Oceanography, 2018, 48(8): 1749−1770.

[250] Zhang Xiaojiang, Huang Xiaodong, Zhang Zhiwei, et al. Polarity variations of internal solitary waves over the continental shelf of the northern South China Sea: Impacts of seasonal stratification, mesoscale eddies, and internal tides[J]. Journal of Physical Oceanography, 2018, 48(6): 1349−1365.

[251] Xu Zhenhua, Yin Baoshu, Hou Yijun, et al. Variability of internal tides and near-inertial waves on the continental slope of the northwestern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(1): 197−211.

[252] Liu Junliang, He Yinghui, Wang Dongxiao, et al. Observed enhanced internal tides in winter near the Luzon Strait[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(10): 6637−6652.

[253] Shang Xiaodong, Liu Qian, Xie Xiaohui, et al. Characteristics and seasonal variability of internal tides in the southern South China Sea[J]. Deep-Sea Research Part Ⅰ: Oceanographic Research Papers, 2015, 98: 43−52.

[254] Chen Liang, Zheng Quanan, Xiong Xuejun, et al. Dynamic and statistical features of internal solitary waves on the continental slope in the northern South China Sea derived from mooring observations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(6): 4078−4097.

[255] Li Qiang, Farmer D M. The generation and evolution of nonlinear internal waves in the deep basin of the South China Sea[J]. Journal Physical Oceanography, 2011, 41(7): 1345−1363.

[256] Xie Jieshuo, He Yinghui, Chen Zhiwu, et al. Simulations of internal solitary wave interactions with mesoscale eddies in the northeastern South China Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 2015, 45(12): 2959−2978.

[257] Xie Jieshuo, He Yinghui, Lü Haibin, et al. Distortion and broadening of internal solitary wavefront in the northeastern South China Sea deep basin[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(14): 7617−7624.

[258] Xu Zhenhua, Liu Kun, Yin Baoshu, et al. Long-range propagation and associated variability of internal tides in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(11): 8268−8286.

[259] Guan Yuping, Huang Ruixin. Stommel’s box model of thermohaline circulation revisited: The role of mechanical energy supporting mixing and the wind-driven Gyration[J]. Journal of Physical Oceanography, 2008, 8(4): 909−917.

[260] 沈阳, 管玉平. 基于能量约束的两层模型中热盐环流的基本特性[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 58(8): 1397−1403.
Shen Yang, Guan Yuping. Feature of thermohaline circulation in two-layer conceptual model based on energy constraint[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 58(8): 1397−1403.

[261] 魏皓, 武建平, 张平. 海洋湍流模式应用研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(1): 7−13.
Wei Hao, Wu Jianping, Zhang Ping. Review on turbulence closure models in ocean hydrodynamics[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(1): 7−13.

[262] 魏皓, 冯士筰, 武建平, 等. 齐次湍流动能输运方程封闭模型在浅海动力学中的应用[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(6): 821−827.
Wei Hao, Feng Shizuo, Wu Jianping, et al. Application of homogeneous k-equation turbulent closure model in the coastal sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(6): 821−827.

[263] 徐肇廷, 楼菁, 鹿有余. 正压浅海湍流运动的雷诺应力封闭模型[J]. 青岛海洋大学学报, 1991, 21(3): 1−8.
Xu Zhaoting, Lou Jing, Lu Youyu. A reynolds stress closure model for the turbulence of barotropic shallow water[J]. Journal of Ocean

University of Qingdao, 1991, 21(3): 1−8.

[264] Wang Lei, Jansen M, Abernathey R. Eddy phase speeds in a two-layer model of quasigeostrophic baroclinic turbulence with applications to ocean observations[J]. Journal of Physical Oceanography, 2016, 46(6): 1963−1985.

[265] Chen Dake, Rothstein L M, Busalacchi A J. A hybrid vertical mixing scheme and its application to tropical ocean models[J]. Journal of Physical Oceanography, 1994, 24(10): 2156−2179.

[266] Huang Chuanjiang, Qiao Fangli, Song Zhenya, et al. Improving simulations of the upper ocean by inclusion of surface waves in the Mellor-Yamada turbulence scheme[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2011, 116(C1): C01007.

[267] 蔡树群, 王文质. 大涡模拟及其在海洋湍流数值模拟中的应用[J]. 海洋通报, 1999, 18(5): 69−75.
Cai Shuqun, Wang Wenzhi. Large eddy simulation and its applications to the numerical simulation of turbulence in the ocean[J]. Marine Science Bulletin, 1999, 18(5): 69−75.

[268] Li Shuang, Song Jinbao, He Hailun, et al. Large eddy simulation of turbulence in ocean surface boundary layer at Zhangzi Island offshore[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(7): 8−13.

[269] Liu Zhiyu, Thorpe S A, Smyth W D. Instability and hydraulics of turbulent stratified shear flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 695(3): 235−256.

[270] Thorpe S A, Liu Zhiyu. Marginal instability?[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(9): 2373−2381.

[271] 李文娟, 冷秀华, 魏泽勋, 等. 海洋湍流的测量及相关分析[J]. 海洋科学, 1996, 20(5): 34−38.
Li Wenjuan, Leng Xiuhua, Wei Zexun, et al. The measurement in the oceanic turbulence and correlation analysis[J]. Marine Sciences, 1996, 20(5): 34−38.

[272] 周磊, 田纪伟, 张效谦. 东海陆架坡折小尺度过程观测[J]. 科学通报, 2005, 50(16): 1784−1788.
Zhou Lei, Tian Jiwei, Zhang Xiaoqian. Observation of small-scale processes over shelf break in the East China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(16): 1784−1788.

[273] Lien R C, Sanford B, TSAI W T. Observations of urbulence mixing and vorticity in a littoral surface boundary layer[J]. Journal of Physical Oceanography, 2007, 38(3): 648−669.

[274] 魏传杰, 于非, 郭景松, 等. 黄海西部海洋湍流的季节变化特征分析[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(1): 166−171.
Wei Chuanjie, Yu Fei, Guo Jingsong, et al. Seasonal variation of ocean turbulence in the western Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(1): 166−171.

[275] 连强, 刘志宇. 强潮海湾中的湍流与混合: 观测与数值模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(7): 1043−1053.
Lian Qiang, Liu Zhiyu. Turbulence and mixing in a freshwater-influenced tidal bay: Observations and numerical modeling[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(7): 1043−1053.

[276] Sun Hui, Wang Qingye. Microstructure observations in the upper layer of the South China Sea[J]. Journal of Oceanography, 2016, 72(5): 777−786.

[277] 周宇, 陈桂英, 尚晓东, 等. 南海中部上层海洋湍流混合的空间分布特征及参数化模型[J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 24−33.
Zhou Yu, Chen Guiying, Shang Xiaodong, et al. Spatial variation and parameterization model of upper turbulent mixing in the central South China Sea[J]. Haiyang xuebao, 2015, 37(5): 24−33.

[278] Liu Zhiyu, Lian Qiang, Zhang Fangtao, et al. Weak thermocline mixing in the North Pacific low-latitude western boundary current system[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(20): 10530−10539.

[279] 田川. 深海湍流混合长期连续观测技术与应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Tian Chuan. Study on long-term turbulence monitoring technique and its application in deep-sea mixing research[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[280] Liu Jiuliang, Liang Junhong, McWilliams J C, et al. Effect of planetary rotation on oceanic surface boundary layer turbulence[J]. Journal of Physical Oceanography, 2018, 48(9): 2057−2080.

[281] Li Shuang, Song Jinbao, He Hailun. Large eddy simulation of the rotation effect on the ocean turbulence kinetic energy budget in the surface mixed layer[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32(5): 1198−1206.

[282] Wang Dong, Kukulka T, Reichl B G, et al. Interaction of Langmuir turbulence and inertial currents in the ocean surface boundary layer under tropical cyclones[J]. Journal of Physical Oceanography, 2018, 48(9): 1921−1940.

[283] Zhang Xuefeng, Chu P C, Li Wei, et al. Impact of Langmuir turbulence on the thermal response of the ocean surface mixed layer to supertyphoon Haitang (2005)[J]. Journal of Physical Oceanography, 2018, 48(8): 1651−1674.

[284] Song Dehai, Wang Xiaohua. Suspended sediment transport in the Deepwater Navigation Channel, Yangtze River Estuary, China, in the dry season 2009: 2. Numerical simulations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(10): 5568–5590.

[285] Yang Wei, Wei Hao, Zhao Liang. Observations of tidal straining within two different ocean environments in the East China Sea: Stratification and near-bottom turbulence[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 22(11): 8876−8893.

[286] 刘志宇. 强潮驱陆架海中的湍流与混合[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Liu Zhiyu. Turbulence and mixing in tidally energetic shelf seas[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.

[287] Bian Changwei, Liu Zhiyu, Huang Yongxiang, et al. On estimating turbulent Reynolds stress in wavy aquatic environment[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(4): 3060−3071.

[288] 张莹, 赵进平. 加拿大海盆冰下表层海水湍扩散系数估计[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(5): 695−703.
Zhang Ying, Zhao Jinping. The estimation of vertical turbulent diffusivity in the surface layer in the Canada basin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(5): 695−703.

[289] 刘国昕, 赵进平. 影响北极冰下海洋Ekman漂流垂直结构与深度因素的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(2): 1−7.
Liu Guoxin, Zhao Jinping. The influence of stratification on Ekman drift under sea ice[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(2): 1−7.

[290] Zhang Zhiwei, Qiu Bo, Tian Jiwei, et al. Latitude-dependent finescale turbulent shear generations in the Pacific tropical-Extratropical upper ocean[J]. Nature Communications, 2018, 9: 4086.

[291] Xu Yongsheng, Fu L L. Global variability of the wavenumber spectrum of oceanic mesoscale turbulence[J]. Journal of Physical Oceanography, 2011, 41(4): 802−809.

[292] Zhang Y, Guan Yuping. Striations in marginal seas and the Mediterranean Sea[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(5): 2726−2733.

[293] Lozovatsky I, Liu Zhiyu, Wei Hao, et al. Tides and mixing in the northwestern East China Sea, Part Ⅱ: Near-bottom turbulence[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(2): 338−350.

[294] 杨丽芬, 田纪伟, 谢玲玲. 南海北部陆坡区混合过程观测[J]. 海洋科学, 2008, 32(12): 10−16.
Yang Lifen, Tian Jiwei, Xie Lingling. Observation of mixing processes over the continental slope of the northern South China Sea[J]. Marine Sciences, 2008, 32(12): 10−16.

[295] Tian Jiwei, Yang Qingxuan, Zhao Wei. Enhanced diapycnal mixing in the South China Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(12): 3191−3203.

[296] Liu Zhiyu, Lozovatsky I. Upper pycnocline turbulence in the northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(18): 2302−2306.

[297] Lozovatsky I, Liu Zhiyu, Fernando H J S, et al. The TKE dissipation rate in the northern South China Sea[J]. Ocean Dynamics, 2013, 63(11/12): 1189−1201.

[298] Sun Hui, Yang Qingxuan, Zhao Wei, et al. Temporal variability of diapycnal mixing in the northern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(12): 8840−8848.

[299] Liang Changrong, Chen Guiying, Shang Xiaodong. Observations of the turbulent kinetic energy dissipation rate in the upper central South China Sea[J]. Ocean Dynamics, 2017, 67(5): 597−609.

[300] Liu Yongzheng, Zhao Jing, Wu Lixin. The variation of turbulent diapycnal mixing at 18 N in the South China Sea stirred by wind stress[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 36(5): 26−30.

[301] Shang Xiaodong, Liang Changrong, Chen Guiying. Spatial distribution of turbulent mixing in the upper ocean of the South China Sea[J]. Ocean Science, 2017, 13(3): 503−519.

[302] Yang Qingxuan, Nikurashin M, Sasaki H, et al. Dissipation of mesoscale eddies and its contribution to mixing in the northern South China Sea[J]. Scientific reports, 2019, 9(1): 556.

[303] Li Mingming, Xie Lingling, Zong Xiaolong, et al. The cruise observation of turbulent mixing in the upwelling region east of Hainan Island in the summer of 2012[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 37(9): 1−12.

[304] Zhang Shuwen, Xie Lingling, Cao Ruixue, et al. Observation of upper-ocean mixing in the region west of the luzon strait in spring[J]. Journal of Coastal Research, 2012, 28(5): 1208−1213.

[305] Tseng R S, Shao H J, Chang Y C, et al. Turbulent mixing of the Kuroshio waters Southeast of Taiwan[J]. Kuroshio Science, 2012, 6(1): 27−34.

[306] Liu Chuanyu, Köhl A, Liu Zhiyu, et al. Deep-reaching thermocline mixing in the equatorial Pacific cold tongue[J]. Nature Communications, 2016, 7: 11576.

[307] Wu Lixin, Jing Zhao, Riser S, et al. Seasonal and spatial variations of Southern Ocean diapycnal mixing from Argo profiling floats[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(6): 363−366.

[308] Huang Chuanjiang, Qiao Fangli. Wave-turbulence interaction and its induced mixing in the upper ocean[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(C4): C04026.

[309] Chen Siyu, Qiao Fangli, Huang Chuanjiang, et al. Effects of the non-breaking surface wave-induced vertical mixing on winter mixed layer depth in subtropical regions[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(4): 2934−2944.

[310] Sun Qun, Guan Changlong, Song Jinbao. Wave breaking on turbulent energy budget in the ocean surface mixed layer[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2008, 26(1): 9−13.

[311] Wang Yonggang, Qiao Fangli, Fang Guohong, et al. Application of wave-induced vertical mixing to the K profile parameterization scheme[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C9): C09014.

[312] Li Yan, Qiao Fangli, Yin Xunqiang, et al. The improvement of the one-dimensional Mellor-Yamada and K-profile parameterization turbulence schemes with the non-breaking surface wave-induced vertical mixing[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(9): 62−73.

[313] Song Zhenya, Qiao Fangli, Song Yajuan. Response of the equatorial basin-wide SST to non-breaking surface wave-induced mixing in a climate model: An amendment to tropical bias[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C11): C00J26.

[314] Wang Shizhu, Wang Qiang, Shu Qi, et al. Improving the upper-ocean temperature in an ocean climate model (FESOM 1.4): Shortwave penetration versus mixing induced by nonbreaking surface waves[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2019, 11(2): 545−557.

[315] Zhao Biao, Qiao Fangli, Wang Guansuo. The effects of the non-breaking surface wave-induced vertical mixing on the forecast of tropical cyclone tracks[J]. Chinese science bulletin, 2014, 59(24): 3075−3084.

[316] Li Shuang, Song Jinbao, Fan Wei. Effect of Langmuir circulation on upper ocean mixing in the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(3): 28−33.

[317] Xie Lingling, Li Mingming, Li Min. Observational analysis of the double-diffusive convection in the deep Canada Basin[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 34(11): 71−79.

[318] Shao Huanjie, Tseng Ruoshan, Lien Renchieh, et al. Turbulent mixing on sloping bottom of an energetic tidal channel[J]. Continental Shelf Research, 2018, 166: 44−53.

[319] 林姚坤, 包芸, 陈起程, 等. 夏季长江河口层化与湍流混合特征分析[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(5): 33−39.
Lin Yaokun, Bao Yun, Chen Qicheng, et al. Summertime stratification and turbulent mixing in the Yangtze Estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(5): 33−39.

[320] Wang Xiaowei, Peng Shiqiu, Liu Zhiyu, et al. Tidal mixing in the South China Sea: An estimate based on the internal tide energetics[J]. Journal of Physical Oceanography, 2016, 46(1): 107−124.

[321] Liu Yongzheng, Jing Zhao, Wu Lixin. Wind power on oceanic near-inertial oscillations in the global ocean estimated from surface drifters[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(5): 2647−2653.

[322] Xu Chi, Shang Xiaodong, Huang Ruixin. Estimate of eddy energy generation/dissipation rate in the world ocean from altimetry data[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(4): 525−541.

[323] Yang Guangbing, Zheng Quanan, Yuan Yeli, et al. Effect of a mesoscale eddy on surface turbulence at the Kuroshio Front in the East China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(3): 1763−1777.

[324] Zhu Jia, Hu Jianyu, Liu Zhiyu. On summer stratification and tidal mixing in the Taiwan Strait[J]. Frontiers of Earth Science, 2013, 7(2): 141−150.

[325] Liang Changrong, Shang Xiaodong, Chen Guiying. The vertical heat transport of internal solitary waves over the continental slope in the northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(3): 36−44.

[326] Jing Zhao, Wu Lixin, Ma Xiaohui. Improve the simulations of near-inertial internal waves in the ocean general circulation models[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2015, 32(10): 1960−1970.

[327] Li Min, Xie Lingling, Yang Qingxuan, et al. Impact of eddies on ocean diapycnal mixing in Gulf Stream region[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(6): 1407−1414.

[328] 毛华斌, 陈桂英, 尚晓东, 等. 西沙海域内潮与近惯性内波的相互作用[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 592−600.
Mao Huabin, Chen Guiying, Shang Xiaodong, et al. Interaction between internal tides and near-inertial waves at Xisha area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(2): 592−600.

[329] Xie Xiaohui, Shang Xiaodong, van Haren H, et al. Observations of enhanced nonlinear instability in the surface reflection of internal tides[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(8): 1580−1586.

[330] Guan Shoude, Liu Ze, Song Jinbao, et al. Upper ocean response to Super Typhoon Tembin (2012) explored using multiplatform satellites and Argo float observations[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(18): 5150−5167.

[331] Liang Changrong, Chen Guiying, Shang Xiaodong, et al. Observation of enhanced nonlinear interactions after severe tropical storm Chanchu (2004) in the western South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(6): 3837−3848.

[332] Jing Zhao, Chang Ping, DiMarco S F, et al. Observed energy exchange between low-frequency flows and internal waves in the Gulf of Mexico[J]. Journal of Physical Oceanography, 2018, 48(4): 995−1008.

[333] Wang Xiaowei, Liu Zhiyu, Peng Shiqiu. Impact of tidal mixing on water mass transformation and circulation in the South China Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 2017, 47(2): 419−432.

[334] Xie Xiaohui, Liu Qian, Zhao Zhongxiang, et al. Deep-sea currents driven by breaking internal tides on the continental slope[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(12): 6160−6166.

[335] Du Chuanjun, Liu Zhiyu, Kao S J, et al. Diapycnal fluxes of nutrients in an oligotrophic oceanic regime: the South China Sea[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(22): 11510−11518.

[336] Yuan Ye, Wei Hao, Zhao Liang, et al. Implications of intermittent turbulent bursts for sediment resuspension in a coastal bottom boundary layer: A field study in the western Yellow Sea, China[J]. Marine Geology, 2009, 263(1/4): 87−96.

[337] Zhang Xuehong, Liang Xinzhong. A numerical world ocean general circulation model[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1989, 6(1): 44−61.

[338] Jin Xiangze, Zhang Xuehong, Zhou Tianjun. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/ LASG world ocean general circulation model[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1999, 16(2): 197−215.

[339] Liu Hailong, Lin Pengfei, Yu Yongqiang, et al. LASG/IAP climate system ocean model version 2: LICOM2[M]//Zhou T, Yu Y, Liu Y, et al. Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 15–26.

[340] 俞永强, 唐绍磊, 刘海龙, 等. 任意正交曲线坐标系下的海洋模式动力框架的发展与评估[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 877−889.
Yu Yongqiang, Tang Shaolei, Liu Hailong, et al. Development and evaluation of the dynamic framework of an ocean general circulation model with arbitrary orthogonal curvilinear coordinate[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 877−889.

[341] Zhang Xuehong, Bao N, Yu R C, et al. Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992, 16(2): 129−144.

[342] 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. LASG全球海洋−大气−陆面系统模式(GOALS/LASG)及其模拟研究[J]. 应用气象学报, 1997, 8(S1): 15−28.
Wu Guoxiong, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. Global ocean atmosphere land system model of LASG(GOALS/LASG) and its performance in simulation study[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1997, 8(S1): 15−28.

[343] 96-908科技项目办公室, 项目执行专家组. 短期气候预测业务动力模式的研制[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
The Project Office of Expert Group on 96-908 Science and Technology Project Implementation. Development of Operational Dynamics Model for Short-term Climate Prediction[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000.

[344] Yu Yongqiang, Yu Rucong, Zhang Xuehong, et al. A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation model[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, 19(1): 169−190.

[345] 张雅乐, 俞永强. FGOALS模式4个版本太平洋年代际气候变率模拟的比较[J]. 大气科学, 2016, 40(01): 176−190.
Zhang Yale, Yu Yongqiang. Comparison of Pacific interdecadal variability simulated by four versions of the LASG/IAP flexible global ocean-atmosphere-land system model[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2016, 40(01): 176−190.

[346] Shi Junqiang, Yin Xunqiang, Shu Qi, et al. Evaluation on data assimilation of a global high resolution wave-tide-circulation coupled model using the tropical Pacific TAO buoy observations[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 37(3): 8−20.

[347] Li Lijuan, Lin Pengfei, Yu Yongqiang, et al. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, Grid-point version 2: FGOALS-g2[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013, 30(3): 543−560.

[348] Bao Qing, Lin Pengfei, Zhou Tianjun, et al. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, spectral version 2: FGOALS-s2[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013, 30(3): 561−576.

[349] Wu Tongwen, Song Lianchun, Li Weiping, et al. An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies[J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(1): 34−56.

[350] Wu Hui, Zhu Jianrong. Advection scheme with 3rd high-order spatial interpolation at the middle temporal level and its application to saltwater intrusion in the Changjiang Estuary[J]. Ocean Modelling, 2010, 33(1/2): 33−51.

[351] Hu Yong, Huang Xiaomeng, Baker A H, et al. Improving the scalability of the ocean barotropic solver in the community earth system model[C]//International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. Austin, Texas: ACM, 2015.

[352] 赵伟, 宋振亚, 乔方利, 等. 基于非规则类矩形剖分的高效并行海浪数值模式[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(5): 1049−1058.
Zhao Wei, Song Zhenya, Qiao Fangli, et al. High efficient parallel numerical surface wave model based on an irregular quasi-rectangular domain decomposition scheme[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(5): 1049−1058.

[353] 韩桂军, 李冬, 马继瑞, 等. 数据同化在海洋数值产品制作及预报中的应用研究[J]. 海洋通报, 2000, 18(5): 54−62.
Han Guijun, Li Dong, Ma Jirui, et al. A study on the application of data assimilation in numerical products and prediction of oceanography[J]. Marine Science Bulletin, 2000, 18(5): 54−62.

[354] 吕咸青, 刘文剑. 数据同化中的伴随方法及其有关问题的研究[J]. 海洋科学, 2001, 25(3): 44−50.
Lü Xianqing, Liu Wenjian. Study on the adjoint method in data assimilation and the related problems[J]. Marine Sciences, 2001, 25(3): 44−50.

[355] 朱江, 周广庆, 闫长香, 等. 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, 2007, 37(2): 261−271.
Zhu Jiang, Zhou Guangqing, Yan Changxiang, et al. A three-dimensional variational ocean data assimilation system: Scheme and preliminary results[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(2): 261−271.

[356] Xiao Xianjun, Wang dongxiao, Yan Changxiang, et al. Evaluation of a 3dVAR system for the South China Sea[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(5): 547−554.

[357] Liu Ye, Zhu Jiang, She Jun, et al. Impacts of assimilating ocean profile observations using a bottom-topography-following recursive filter on ocean forecasting in North Sea/Baltic Sea[J]. Ocean Modelling, 2009, 26(2/3): 75−87.

[358] Xie Jiping, Zhu Jiang. Ensemble optimal interpolation schemes for assimilating Argo profiles into a hybrid coordinate ocean model[J]. Ocean Modelling, 2010, 33(3/4): 283−298.

[359] Zheng Fei, Zhu Jiang. Coupled assimilation for an intermediated coupled ENSO prediction model[J]. Ocean dynamics, 2010, 60(5): 1061−1073.

[360] Yan Changxiang, Zhu Jiang, Xie Jiping. An ocean data assimilation system in the Indian Ocean and West Pacific Ocean[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(11): 1460−1472.

[361] Liu Danian, Zhu Jiang, Shu Yeqiang, et al. Targeted observation analysis of a Northwestern Tropical Pacific Ocean mooring array using an ensemble-based method[J]. Ocean Dynamics, 2018, 68(9): 1109−1119.

[362] Han Guijun, Li Wei, Zhang Xuefeng, et al. A regional ocean reanalysis system for coastal waters of China and adjacent seas[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(3): 682−690.

[363] Cheng Lijing, Zhu Jiang. Benefits of CMIP5 multimodel ensemble in reconstructing historical ocean subsurface temperature variations[J]. Journal of Climate, 2016, 29(15): 5393−5416.

[364] Yin Xunqiang, Qiao Fangli, Shu Qi. Using ensemble adjustment Kalman filter to assimilate Argo profiles in a global OGCM[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(7): 1017−1031.

[365] 魏泽勋, 徐腾飞, 王永刚, 等. 南海及周边海域风浪流耦合同化精细化数值预报与信息服务系统简介[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 86−90.
Wei Zexun, Xu Tengfei, Wang Yonggang, et al. Introduction to the fine-resolution wind-wave-current coupled forecasting and information service system for the South China Sea and its adjacent sea areas[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(3): 86−90.

[366] 刘娜, 王辉, 凌铁军, 等. 一个基于MOM的全球海洋数值同化预报系统[J]. 海洋通报, 2018, 37(2): 139−148.
Liu Na, Wang Hui, Ling Tiejun, et al. Development of global ocean general circulation numerical forecasting system in China[J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(2): 139−148.

[367] Sun Junchuan, Wei Zexun, Xu Tengfei, et al. Development of a fine-resolution atmosphere-wave-ocean coupled forecasting model for the South China Sea and its adjacent seas[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(4): 154–166.

[368] Wang Tao, Chen Xu, Jiang Wensheng. Laboratory experiments on the generation of internal waves on two kinds of continental margin[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(4): L04602.

[369] 马永星. 内波射线的传播与内孤立波过周期地形能量损耗的实验研究[D]. 青岛：中国海洋大学, 2014.
Ma Yongxing. The laboratory experiment study of propagation of internal beams and energy dissipation of internal solitary waves passing periodic topography[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.

[370] Jia Xiaona, Chen Xu, Li Qun, et al. Study on internal waves generated by tidal flow over critical topography[J]. Journal of Ocean University of China, 2014, 13(5): 728−732.

[371] 马永星, 陈旭, 刘长乐, 等. 内波水槽中非均匀密度层结的实现及实验验证[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(6): 1−6.
Ma Yongxing, Chen Xu, Liu Changle, et al. One method of preparation of non-uniformly stratified fluid in the internal waves tank and the experimental validation of this method[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(6): 1−6.

[372] Wang Jinhu, Chen Xu, Wang Wei, et al. Laboratory experiments on the resonance of internal waves on a finite height subcritical topography[J]. Ocean Dynamics, 2015, 65(9/10): 1269−1274.

[373] 马昕, 赵栋梁. 降雨对波浪成长的影响实验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(3): 10−15, 32.
Ma Xin, Zhao Dongliang. Experimental study on rainfall effects on wave growth[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(3): 10−15, 32.

[374] Zhang Yu, Chen Chen, Zhang Zhengguang, et al. Rotating horizontal convection and the potential vorticity constraint[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 803: 72−93.

[375] Yuan Yeping, Horner-Devine A R. Experimental investigation of large-scale vortices in a freely spreading gravity current[J]. Physics of Fluids, 2017, 29(10): 106603.

[376] 黄鹏起, 陈旭, 孟静, 等. 内孤立波破碎所致混合的实验研究[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(3): 533−539.
Huang Pengqi, Chen Xu, Meng Jing, et al. An experimental study on mixing induced by internal solitary wave breaking[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(3): 533−539.

[377] 孟静, 王树亚, 陈旭. 分层流体中水平运动源生成内波的表面流场特征[J]. 海洋湖沼通报, 2017, (4): 45−51.
Meng Jing, Wang Shuya, Chen Xu. Surface velocity field of internal waves generated by a sphere horizontal moving in stratified fluid[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017, (4): 45−51.

[378] Wang Shuya, Chen Xu, Wang Jinhu, et al. Experimental investigation of internal tides generated by finite-height topography[J]. Ocean Dynamics, 2018, 68(8): 957−965.

[379] Wang Bin, Chan J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific[J]. Journal of Climate, 2002, 15(13): 1643−1658.

[380] Fu Congbin, Diaz H F, Fletcher J O. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with warm episodes of the Southern Oscillation[J]. Monthly Weather Review, 1986, 114(9): 1716-1739.

[381] Chang Ping, Zhang Li, Saravanan R, et al. Pacific meridional mode and El Niño-Southern Oscillation[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(16): L16608.

[382] Chen Dake, Lian Tao, Fu Congbin, et al. Strong influence of westerly wind bursts on El Niño diversity[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(5): 339−345.

[383] Mu Mu, Duan Wansuo. A new approach to studying ENSO predictability: Conditional nonlinear optimal perturbation[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(10): L16608.

[384] Yang Jianling, Liu Qinyu, Xie Shangping, et al. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(2): L02708.

[385] Xie Shangping, Hu Kaiming, Hafner J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. Journal of Climate, 2009, 22(3): 730−747.

[386] Liu lin, Xie Shangping, Zheng Xiaotong, et al. Indian ocean variability in the CMIP5 multi-model ensemble: the zonal dipole mode[J].

Climate Dynamics, 2014, 43(5/6): 1715−1730..

[387] Zheng Xiaotong, Xie Shangping, Liu Qinyu. Response of the Indian Ocean basin mode and its capacitor effect to global warming[J]. Journal of Climate, 2011, 24(23): 6146−6164.

[388] Wu Lixin, Li Chun, Yang Chunxue, et al. Global teleconnections in response to a shutdown of the Atlantic meridional overturning circulation[J]. Journal of Climate, 2008, 21(12): 3002−3019.

[389] Zhang Honghai, Wu Lixin. Predicting North Atlantic sea surface temperature variability on the basis of the first - mode baroclinic Rossby wave model[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C9): C09030.

[390] Ma Hao, Wu Lixin. Global teleconnections in response to freshening over the Antarctic Ocean[J]. Journal of Climate, 2011, 24(4): 1071−1088.

[391] Yang Yun, Wu Lixin, Fang Changfang. Will global warming suppress North Atlantic tripole decadal variability?[J]. Journal of Climate, 2012, 25(6): 2040−2055.

[392] Fang Changfang, Wu Lixin, Zhang Xiang. The impact of global warming on the Pacific Decadal Oscillation and the possible mechanism[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(1): 118−130.

[393] Geng Tao, Yang Yun, Wu Lixin. On the mechanisms of Pacific decadal oscillation modulation in a warming climate[J]. Journal of Climate, 2019, 32(5): 1443−1459.

[394] Liu Zhensheng, Wu Lixin, Gallimore R, et al. Search for the origins of Pacific decadal climate variability[J]. Geophysical research letters, 2002, 29(10): 42-1−42-4.

[395] Liu Zhengyu, Alexander M. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections[J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45(2): RG2005.

[396] Liu Zhengyu, Wen Na, Liu Yun. On the assessment of nonlocal climate feedback. Part I: The generalized equilibrium feedback assessment[J]. Journal of Climate, 2008, 21(1): 134−148.

[397] Zhong Yafang, Liu Zhengyu. On the mechanism of Pacific multidecadal climate variability in CCSM3: The role of the subpolar North Pacific Ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(9): 2052−2076.

[398] Okumura Y, Xie Shangping, Numaguti A, et al. Tropical Atlantic air-sea interaction and its influence on the NAO[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(8): 1507−1510.

[399] Xie Shangping, Deser C, Vecchi G A, et al. Global warming pattern formation: Sea surface temperature and rainfall[J]. Journal of Climate, 2010, 23(4): 966−986.

[400] Long Shangmin, Xie Shangping, Zheng Xiaotong, et al. Fast and slow responses to global warming: Sea surface temperature and precipitation patterns[J]. Journal of Climate, 2014, 27(1): 285−299.

[401] Kosaka Y, Xie Shangping. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling[J]. Nature, 2013, 501(7467): 403−407.

[402] Xie Shangping, Kosaka Y, Okumura Y M. Distinct energy budgets for anthropogenic and natural changes during global warming hiatus[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 29−33.

[403] Zhang Min, Wu Zhaohua, Qiao Fangli. Deep Atlantic Ocean warming facilitated by the deep western boundary current and equatorial Kelvin waves[J]. Journal of Climate, 2018, 31(20): 8541−8555.

[404] Liu Qinyu, Wen Na, Liu Zhengyu. An observational study of the impact of the North Pacific SST on the atmosphere[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(18): L18611.

[405] Luo Yiyong, Liu Qinyu, Rothstein L M. Simulated response of North Pacific mode waters to global warming[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(23): L23609.

[406] Luo Yiyong, Liu Qinyu, Rothstein L M. Increase of South Pacific eastern subtropical mode water under global warming[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(1): L01601.

[407] Huang Boyin, Zhu Jiang, Yang Haijun. Mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) variability in a coupled ocean-atmosphere GCM[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(2): 241−251.

[408] Yang Haijun, Wang Kun, Dai Haijin, et al. Wind effect on the Atlantic meridional overturning circulation via sea ice and vertical diffusion[J]. Climate Dynamics, 2016, 46(11/12): 3387−3403.

[409] Chen Xianyao, Tung K K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration[J]. Science, 2014, 345(6199): 897−903.

[410] Gao Libao, Rintoul S R, Yu Weidong. Recent wind-driven change in Subantarctic Mode Water and its impact on ocean heat storage[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(1): 58−63.

[411] Xue Liang, Cai Weijun, Takahashi T, et al. Climatic modulation of surface acidification rates through summertime wind forcing in the southern ocean[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 3240.

[412] 张方俭. 我国的海冰[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
Zhang Fangjian. Sea Ice in China[M]. Beijing:China Ocean Press, 1986.

[413] 程斌. 一维海冰热力模式的守恒型差分格式和数值模拟[J]. 海洋通报, 1996, 15(4): 8−16.
Cheng Bin. The conservative difference scheme and numerical simulation of one dimensional thermodynamic sea ice model[J]. Marine

Science Bulletin, 1996, 15(4): 8−16.

[414] 吴辉碇, 白珊, 张占海. 海冰动力学过程的数值模拟[J]. 海洋学报, 1998, 20(2): 149−162.
Wu Huiding, Bai Shan, Zhang Zhanhai. Numerical simulation for dynamical processes of sea ice[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(2): 149−162.

[415] 刘煜, 吴辉碇, 张占海, 等. 基于质点-网格模式的海冰厚度变化过程数值模拟[J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 14−21.
Liu Yu, Wu Huiding, Zhang Zhanhai, et al. Modeling for the dynamic process of ice thickness variation using a particle-in-cell ice model[J]. Haiyang Xuebao, 2006, 28(2): 14−21.

[416] Zhang Zhanhai, Wu Huiding. Numerical study on tides and tidal drift of flea ice in the ice-covered Bohai Sea[C]//Sea Ice Observation and Modeling: Proceedings of 93's International Symposium on Sea Ice. Beijing: China Ocean Press, 1994: 34–46.

[417] Li Hai, Bai Shan, Wu Huiding. Coupling the Bohai ice model with Blumberg-Mellor model[M]//Shen Hung-Tao. Ice in Surface Waters. Rotterdam: Balkema Publishers, 1998: 305-311.

[418] 刘钦政, 白珊, 黄嘉佑, 等. 一种冰–海洋模式的热力耦合方案[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 13−21.
Liu Qinzheng, Bai Shan, Huang Jiayou, et al. A thermodynamic coupling scheme for ice-ocean model[J]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(6): 13−21.

[419] 丁德文. 工程海冰学概论[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.
Ding Dewen. Introduction to Engineering Sea Ice Science[M]. Beijing: China Ocean Press, 1999.

[420] Su Jie, Yang Bo, Du Ling, et al. Monitoring thin ice thickness by upward-looking sonar in Bohai Sea[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2013, 23(2): 96−103.

[421] Xu Ning, Yue Qianjin, Bi Xiangjun, et al. Experimental study of dynamic conical ice force[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 120: 21−29.

[422] 李志军, 王永学, 曲月霞, 等. 半圆型结构冰压力的物理模拟试验研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4): 445−452.
Li Zhijun, Wang Yongxue, Qu Yuexia, et al. physical modeling study of ice forces on semi-circular structure[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(4): 445−452.

[423] 季顺迎, 岳前进. 工程海冰数值模型及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Ji Shunying, Yue Qianjin. Numerical Model and Application of Engineering Sea Ice[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[424] 苏玉芬, 董兆乾. 南印度洋夏季的锋区及其水文特征[C]//国家南极考察委员会. 南极科学考察论文集(2). 北京: 海洋出版社, 1984: 25−40.
Su Yufen, Dong Zhaoqian. Front zones in the South Indian Ocean and their hydrographic characteristics in summer[C]//National Antarctic Investigation Commission. Proceedings of Antarctic Research Expeditions (2). Beijing: China Ocean Press, 1984: 25-40.

[425] Smith N R, Dong Zhaoqian, Kerry K R, et al. Water masses and circulation in the region of Prydz Bay, Antarctica[J]. Deep-Sea Research Part Ⅰ: Oceanographic Research Papers, 1984, 31(9): 1121−1147.

[426] 孙洪亮. 南极长城站潮汐观测与分析[J]. 南极研究, 1990, 2(1): 66−72.
Sun Hongliang. Observation and analysis of the tide at the great wall station, Antarctica[J]. Antarctic Research, 1990, 2(1): 66−72.

[427] 许建平, 赵金三, 羊天柱. 南设得兰群岛邻近海域物理海洋学特征和磷虾的关系[C]//国家南极考察委员会. 中国第一届南大洋考察学术研讨会论文专集. 上海: 上海科学技术出版社, 1989: 14−25.
Xu Jianping, Zhao Jinsan, Yang Tianzhu. Relationship of euphausiacea with physical oceanographic characteristics in the adjacent sea area of South Shetland Islands[C]//National Antarctic Investigation Commission. Proceedings of the First Symposium of China on Southern Ocean Expedition. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1989: 14-25.

[428] 乐肯堂, 史久新, 于康玲. 普里兹湾区水团和热盐结构的分析[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(3): 229−236.
Le Kentang, Shi Jiuxin, Yu Kangling. An analysis on water masses and thermohaline structure in the region of Prydz Bay, Antarctica[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996, 27(3): 229−236.

[429] 陈红霞, 潘增弟, 矫玉田, 等. 埃默里冰架前缘水的特性和海流结构[J]. 极地研究, 2005, 17(2): 139−148.
Chen Hongxia, Pan Zengdi, Jiao Yutian, et al. Hydrological character and sea-current structure in the front of Amery ice shelf[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2005, 17(2): 139−148.

[430] Guo Guijun, Shi Jiuxin, Gao Libao, et al. Reduced sea ice production due to upwelled oceanic heat flux in Prydz Bay, East Antarctica[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(9): 4782−4789.

[431] 高郭平, 韩树宗, 董兆乾, 等. 南印度洋中国中山站至澳大利亚费里曼特尔断面海洋锋位置及其年际变化[J]. 海洋学报, 2003, 25(6): 9−19.
Gao Guoping, Han Shuzong, Dong Zhaoqian, et al. Structure and variability of fronts in the South Indian Ocean along sections from Zhongshan Station to Fremantle[J]. Haiyang Xuebao, 2003, 25(6): 9−19.

[432] Zhang Linlin, Sun Che, Hu Dunxin. Interannual variability of the Antarctic Circumpolar Current strength based on merged altimeter data[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(16): 2015−2021.

[433] Yao Wenjun, Shi Jiuxin, Zhao Xiaolong. Freshening of Antarctic intermediate water in the South Atlantic Ocean in 2005-2014[J]. Ocean Science, 2017, 13(4): 521−530.

[434] 赵进平, 高郭平, 矫玉田. 1999年楚科奇海台及其周边海域中层与深层水增暖[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2004, 34(2): 188−194.

Zhao Jinping, Gao Guoping, Jiao Yutian. Warming in Arctic intermediate and deep waters around Chukchi Plateau and its adjacent regions in 1999[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 34(2): 188−194.

[435] Zhong Wenli, Zhao Jinping. Deepening of the Atlantic water core in the Canada Basin in 2003-11[J]. Journal of Physical Oceanography, 2014, 44(9): 2353−2369.

[436] Zhong Wenli, Steele M, Zhang Jinlun, et al. Circulation of Pacific winter water in the western Arctic ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(2): 863−881.

[437] 巢纪平, 李耀锟. 南极绕极流及经圈翻转流的双平衡态理论[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1697−1705.
Chao Jiping, Li Yaokun. Two equilibria of the Antarctic Circumpolar Current and its associated Meridional Overturning Circulation[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41(11): 1697−1705.

[438] 侍小兵, 俞光耀, 董兆乾. 南极普里兹湾夏季流场诊断分析[J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(S1): 293−311.
Shi Xiaobing, Yu Guangyao, Dong Zhaoqian. Diagnostic analysis of current field in the summer in Prydz Bay, Antarctica[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1995, 25(S1): 293−311.

[439] Shi Jiuxin, Le Kentang, Choi B H. Circulation and its seasonal variability in region around the Kerguelen Plateau[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 21(1): 1−17.

[440] Li Xiang, Su Jie, Wang Zeliang, et al. Modeling Arctic intermediate water: the effects of Neptune parameterization and horizontal resolution[J]. Advances in Polar Science, 2013, 24(2): 98−105.

[441] Zhang Yu, Chen Changsheng, Beardsley R C. Studies of the Canadian Arctic Archipelago water transport and its relationship to basin-local forcings: Results from AO-FVCOM[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(6): 4392−4415.

[442] Liu Chengyan, Wang Zhaomin, Cheng Chen, et al. Modeling modified circumpolar deep water intrusions onto the Prydz Bay continental shelf, East Antarctica[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(7): 5198−5217.

[443] 张青松. 南极大陆东部戴维斯站地区海冰观测[J]. 冰川冻土, 1986, 8(2): 143−148.
Zhang Qingsong. Sea ice observations and measurements at Davis, east Antarctica[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1986, 8(2): 143−148.

[444] 秦大河. 南极洲乔治王岛长城湾一年生海冰的发育特征和物理性质[J]. 冰川冻土, 1991, 13(2): 115−130.
Qin Dahe. Developing and physical characteristics of first-year sea ice in Great Wall Bay and its adjacent area by King George Island, Antarctica[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1991, 13(2): 115−130.

[445] Lei Ruibao, Li Zhijun, Cheng Bin, et al. Annual cycle of landfast sea ice in Prydz Bay, east Antarctica[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C2): C02006.

[446] 效存德, 秦大河. 中国首次远征北极点科学考察队“雪冰与环境”考察简介[J]. 地球科学进展, 1996, 11(3): 318−320.
Xiao Cunde, Qin Dahe. Brief introduction to the "snow ice and environment" study of China's first expedition Arctic science expedition team [J]. Advances in Earth Science, 1996, 11(3): 318−320.

[447] 卞林根, 王继志, 孙玉龙, 等. 北冰洋中心区海冰漂流与大气过程[J]. 海洋学报, 2014, 36(10): 48−55.
Bian Lingen, Wang Jizhi, Sun Yulong, et al. Sea ice drifting and atmospheric processes over the central Arctic Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(10): 48−55.

[448] 孙波, 温家洪, 康建成, 等. 北冰洋海冰厚度穿透雷达探测与下表面形态特征分析[J]. 中国科学:地球科学, 2003, 32(11): 952−958.
Sun Bo, Wen Jiahong, He Maobing, et al. Sea ice thickness measurement and its underside morphology analysis using radar penetration in the Arctic Ocean[J]. Science in China Series D:Earth Sciences, 2003, 32(11): 952−958.

[449] Huang Wenfeng, Lei Ruibo, Han Hongwei, et al. Physical structures and interior melt of the central Arctic sea ice/snow in summer 2012[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 124: 127−137.

[450] Lei Ruibo, Li Na, Heil P, et al. Multiyear sea-ice thermal regimes and oceanic heat flux derived from an ice mass balance buoy in the Arctic Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(1): 537−547.

[451] Lu Peng, Li Zhijun, Cheng Bin, et al. Sea ice surface features in Arctic summer 2008: Aerial observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(4): 693−699.

[452] Zhao Jinping, Li Tao, Barber D, et al. Attenuation of lateral propagating light in sea ice measured with an artificial lamp in winter Arctic[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 61(1): 6−12.

[453] Yang Qinghua, Losch M, Losa S N, et al. Brief communication: The challenge and benefit of using sea ice concentration satellite data products with uncertainty estimates in summer sea ice data assimilation[J]. The Cryosphere, 2016, 10(2): 761−774.

[454] Fu Hongli, Zhao Jinping, Frey K E. Investigation of polynya dynamics in the northern Bering Sea using greyscale morphology image-processing techniques[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(7): 2214−2232.

[455] Zhang Yuanyuan, Cheng Xiao, Liu Jiping, et al. The potential of sea ice leads as a predictor for summer Arctic sea ice extent[J]. The Cryosphere, 2018, 12(12): 3747−3757.

[456] Shu Qi, Song Zhenya, Qiao Fangli. Assessment of sea ice simulations in the CMIP5 models[J]. The Cryosphere, 2015, 9(1): 399−409.

[457] Liu Jiping, Curry J A, Wang Huijun, et al. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(11): 4074−4079.

[458] Wu Bingyi, Su Jingzhi, D’Arrigo R. Patterns of Asian winter climate variability and links to Arctic sea ice[J]. Journal of Climate, 2015,

28(17): 6841−6858.

[459] 范永祥.《台风年鉴》整编出版[J]. 气象科技资料, 1973(4): 3.
Fan Yongxiang. Edition and publication of ‘Yearbook of Typhoon’[J]. Meteorological Science and Technology, 1973(4): 3.

[460] Ying Ming, Zhang Wei, Yu Hui, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287−301.

[461] 陈联寿. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究进展述评[M]. 北京: 气象出版社, 1996.
Chen Lianshou. Review of Research Process on Typhoon Science, Operational Experiments and Weather Dynamics Theory[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996.

[462] 陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 672−681.
Chen Lianshou. The evolution on research and operational forecasting techniques of tropical cyclones[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 672−681.

[463] 陈联寿, 丁一汇. 西北太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Chen Lianshou, Ding Yihui. Introduction to Typhoons in the Northwest Pacific[M]. Beijing: Science Press, 1979.

[464] 端义宏, 余晖, 伍荣生. 热带气旋强度变化研究进展[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 636−645.
Duan Yihong, Yu Hui, Wu Rongsheng. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 636−645.

[465] 任福民, 吴国雄, 王小玲, 等. 近60年影响中国之热带气旋[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
Ren Fumin, Wu Guoxiong, Wang Xiaoling, et al. Tropical Cyclones Affecting China over the Last 60 Years[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011.

[466] 胡姝, 孙立尹, 李英. 热带气旋结构和强度变化研究进展[J]. 气象与环境学报, 2014, 3(4): 91−98.
Hu Shu, Sun Liyin, LI Ying, et al. Progress in tropical cyclone intensity and structure change[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2014, 3(4): 91−98.

[467] 周磊, 陈大可, 雷小途, 等. 海洋与台风相互作用研究进展[J]. 科学通报, 2019, 64(1): 66−78.
Zhou Lei, Chen Dake, Lei Xiaotu, et al. Progress and perspective on interactions between ocean and typhoon[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(1): 66−78.

[468] Luo Zhexian, Fan Ping. Simulations of the motion of tropical cyclone-like vortices in the presence of synoptic and mesoscale circulations[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(3): 519−528.

[469] 陈葆德, 王晓峰, 李泓, 等. 快速更新同化预报的关键技术综述[J]. 气象科技进展, 2013, 3(2): 29−35.
Chen Baode, Wang Xiaofeng, Li hong, et al. An overview of the key techniques in rapid refresh assimilation and forecast[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2013, 3(2): 29−35.

[470] 雷小途, 陈联寿. 热带气旋风场模型构造及特征参数估算[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 25−31.
Lei Xiaotu, Chen Lianshou. A method to construct tropical cyclone wind distribution models and estimate its characteristic parameters[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 25−31.

[471] 马雷鸣. 国内台风数值预报模式及其关键技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1013−1022.
Ma Leiming. Research progress on China typhoon numerical prediction models and associated major techniques[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1013−1022.

[472] Li Qingqing, Wang Yuqing, Duan Yihong. A numerical study of outer rainband formation in a sheared tropical cyclone[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2017, 74(1): 203−227.

[473] 秦曾灏, 冯士筰. 浅海风暴潮动力机制的初步研究[J]. 中国科学, 1975, 18(1): 64−78.
Qin Zenghao, Feng Shizuo. A preliminary study on the mechanism of shallow water storm surge[J]. Scientia Sinica , 1975, 18(1): 64−78.

[474] 孙文心, 冯士筰, 秦曾灏. 超浅海风暴潮的数值模拟(一)——零阶模型对渤海风潮的初步应用[J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 193−211.
Sun Wenxin, Feng Shizuo, Qin Zenghao. Numerical modeling of an ultra-shallow water storm surge (Ⅰ)[J]. Haiyang Xuebao, 1979, 1(2): 193−211.

[475] 王喜年, 尹庆江, 张保明. 中国海台风风暴潮预报模式的研究与应用[J]. 水科学进展, 1991, 2(1): 1−10.
Wang Xinian, Yin Qingjiang, Zhang Baoming. Research and applications of a forecasting model of typhoon surges in China seas[J]. Advances in Water Science, 1991, 2(1): 1−10.

[476] 于福江, 王喜年, 戴明瑞. 影响连云港的几次显著温带风暴潮过程分析及其数值模拟[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 113−122.
Yu Fujiang, Wang Xinian, Dai Mingrui. Analysis and numerical simulation of some severe extratropical storm surges influenced on lianyungang[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(1): 113−122.

[477] 王培涛, 于福江, 刘秋兴, 等. 台风风暴潮异模式集合数值预报技术研究及应用[J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 56−64.
Wang Peitao, Yu Fujiang, Liu Qiuxing, et al. Research and applications on multi-model ensemble numerical typhoon surge forecast technology[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(3): 56−64.

[478] 陈永平. 近岸风暴潮和台风浪集合化预报及灾害评估[R]. 水利部公益性行业科研专项技术报告, 2014.
Chen Yongping. Ensemble prediction and disaster assessment of storm surge and typhoon-driven waves in the near offshore waters[R].

Special technical report on scientific research of public welfare industry of the Ministry of Water Resources, 2014.

[479] 管秉贤. 深切缅怀著名海洋学家、我国海浪科研事业的开拓者和奠基人赵九章先生[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 275−279.
Guan Bingxian. Dearly cherish the memory of excellent oceanographer and academecian Zhao Jiu-zhang, the pioneer and founder of Chinese ocean wave research undertakings[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(3): 275−279.

[480] 刘占英. 气旋波浪的个例分析[J]. 海洋预报服务, 1985, 2(1): 86−89.
Liu Zhanying. A case study of cyclone-induced sea waves[J]. Marine Forecast Service, 1985, 2(1): 86−89.

[481] 许富祥. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布[J]. 海洋学报, 1996, 18(2): 26−31.
Xu Fuxiang. Temporal and spatial distribution of disastrous waves in the China offshore waters and its adjacent seas[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1996, 18(2): 26−31.

[482] 陶爱峰, 沈至淳, 李硕, 等. 中国灾害性海浪研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(14): 26−34.
Tao Aifeng, Shen Zhichun, Li Shuo, et al. Research progress for disastrous waves in China[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(14): 26−34.

[483] 王文质, 陈俊昌, 黎满球, 等. BSCS海浪数值预报方法[J]. 热带海洋, 1990, 9(4): 9−15.
Wang Wenzhi, ChenJunchang, Li Manqiu, et al. BSCS numerical forecasting method for ocean waves[J]. Tropic Oceanology, 1990, 9(4): 9−15.

[484] 潘增弟, 孙乐涛, 华锋, 等. LAGFD-II区域性海浪数值模式及其应用 Ⅰ. 海浪数值模式[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(4): 343−349.
Pan Zengdi, Sun Letao, Hua Feng, et al. LAGFD-II regional numerical wave model and its application Ⅰ. numerical wave model[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 23(4): 343−349.

[485] 刘首华, 牟林, 刘克修, 等. 畸形波研究的进展及存在问题[J]. 地球科学进展, 2013, 28(6): 665−673.
Liu Shouhua, Mu Lin, Liu Kexiu, et al. Research advance and problems in freak waves[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(6): 665−673.

[486] He Hailun, Song Jinbao, Bai Yefei, et al. Climate and extrema of ocean waves in the East China Sea[J]. Science China: Earth Science, 2018, 61(7): 980−994.

[487] 刘桦, 赵曦, 王本龙. 海啸预警与海岸带减灾研究进展[C]//第二十一届全国水动力学研讨会暨第八届全国水动力学术会议暨两岸船舶与海洋工程水动力学研讨会论文集. 济南: 中国力学学会, 中国造船工程学会, 2008.
Liu Hua, Zhao Xi, Wang Benlong. Advances in tsunami warning system and hazard mitigation in coastal zones[C]//Proceedings of the 21st National Symposium on Hydraulics, the 8th National Symposium on Hydraulics and the Symposium on Ships and Ocean Engineering Hydraulics across the Taiwan Strait. Ji’nan: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, China's Society of Naval Architecture, 2008.

[488] 王培涛, 赵联大, 于福江, 等. 海啸灾害数值预报技术研究现状[J]. 海洋预报, 2011, 28(3): 74−79.
Wang Peitao, Zhao Lianda, Yu Fujiang, et al. Review of the numerical forecasting technology on the tsunami hazards[J]. Marine Forecasts, 2011, 28(3): 74−79.

[489] 赵联大, 于福江, 滕骏华. 南海定量海啸预警系统[J]. 海洋预报, 2015, 32(2): 1−6.
Zhao Lianda, Yu Fujiang, Teng Junhua. SCS quantitative tsunami warning system[J]. Marine Forecasts, 2015, 32(2): 1−6.

[490] 刘智深, 关定华. 海洋物理学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004.
Liu Zhishen, Guan Dinghua. Ocean Physics[M]. Ji’nan: Shandong Education Press, 2004.

[491] Guan Dinghua. Development of shallow water acoustic in China[M]//Zhang Renhe, Zhou Jixun. Shallow-Water Acoustics. Beijing: China Ocean Press, 1997: 23-28.

[492] Zhang Renhe, Li Zhenglin, Peng Zhaohui, et al. Overview of shallow water acoustics in the State Key Laboratory of Acoustics[J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1494: 16.

[493] Zhu Zenan, Zhu Xiaohua, Guo Xinyu, et al. Assimilation of coastal acoustic tomography data using an unstructured triangular grid ocean model for water with complex coastlines and islands[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(9): 7013−7030.

[494] 张仁和, 李整林. 深海声学专辑·编者按[J]. 中国科学: 物理学·力学·天文学, 2016, 46(9): 094301.
Zhang Renhe, Li Zhenglin. Special issue: deep ocean acoustics[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica &Astronomica, 2016, 46(9): 094301.

[495] Zhang Tinglu, Liu Hai. Deblurring the underwater image using the Monte Carlo method[C]//Proceedings of SPIE 2258. Ocean Optics Ⅻ. Bergen, Norway: SPIE, 1994, 2258: 564–567.

[496] 潘德炉. 海洋水色遥感机理及反演[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
Pan Delu. Mechanisms and Inversion of Ocean Color Remote Sensing[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.

[497] 钟其英. 南海海洋光学研究现状与展望[J]. 南海研究与开发, 1989(1): 36−40.
Zhong Qiying. Status and prospects of marine optics in the South China Sea[J]. Research and Development of South China Sea, 1989(1): 36−40.

[498] 唐军武, 陈清莲, 谭世祥, 等. 海洋光谱测量与数据分析处理方法[J]. 海洋通报, 1998, 17(1): 71−79.
Tang Junwu, Chen Qinglian, Tan Shixiang, et al. Methods of oceanic spectral data measurement and analysis[J]. Marine Science Bulletin, 1998, 17(1): 71−79.

[499] 王岩峰, 丁永耀. 光学观测小波方法的比较研究[J]. 黄渤海海洋, 1999, 17(1): 36−40.
Wang Yanfeng, Ding Yongyao. A comparison study on the technique for observation of short wave using optical means[J]. Journal of Oceanograpgy of Huanghai &Bohai Seas, 1999, 17(1): 36−40.

[500] 李铜基. 中国近海海洋——海洋光学特性与遥感[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
Li Tongji. China Offshore Seas: Ocean Optical Properties and Remote Sensing[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.

[501] 国家海洋局. 中国近海海洋图集——海洋光学特性与遥感[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
State Oceanic Administration. China Offshore Ocean Atlas: Ocean Optical Properties and Remote Sensing[M]. Beijing: China Ocean Press, 2017.

[502] 郭传杰. 中国科学院[M]. 北京: 中国科学院, 2009.
Guo Chuanjie. Chinese Academy of Sciences[M]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2009.

[503] 黄晓圣, 吴东, 张亭禄, 等. 图像式海水小角度散射函数测量仪[J]. 光学学报, 1998, 18(12): 1716−1720.
Huang Xiaosheng, Wu Dong, Zhang Tinglu, et al. A scatterometor for sea water scattering function measurement[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(12): 1716−1720.

[504] 曹文熙, 李彩, 柯天存, 等. 基于双光路原理的海水IOPs高光谱测量仪方案[J]. 光学技术, 2003, 29(2): 139−141,145.
Cao Wenxi, Li Cai, Ke Tiancun, et al. Hyperspectral meter for measuring inherent optical properties of sea water based on principle of double-optical-path[J]. Optical Technique, 2003, 29(2): 139−141,145.

[505] 任永琴, 王世忠. 海水浊度测量传感器研究[J]. 海洋技术, 2004, 23(4): 29−31.
Ren Yongqin, Wang Shizhong. A seawater turbidity sensor[J]. Ocean Technology, 2004, 23(4): 29−31.

[506] Li Cai, Cao Wenxi, Yu Jing, et al. An instrument for *in situ* measuring the volume scattering function of water: Design, calibration and primary experiments[J]. Sensors, 2012, 12(4): 4514−4533.

[507] 王东祥, 宋小全, 冯长中, 等. 相干多普勒激光雷达观测渤黄海海洋大气边界层高度研究[J]. 光学学报, 2015, 35(S1): 1−7.
Wang Dongxiang, Song Xiaoquan, Feng Changzhong, et al. Coherent doppler lidar observations of marine atmospheric boundary layer height in the Bohai and Yellow Sea[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(S1): 1−7.

[508] Zhang Xin, Du Zengfeng, Zheng Ronger, et al. Development of a new deep-sea hybrid Raman insertion probe and its application to the geochemistry of hydrothermal vent and cold seep fluids[J]. Deep-Sea Research Part Ⅰ: Oceanographic Research Papers, 2017, 123: 1−12.

[509] Chen Jing, Ye Wangquan, Guo Jinjia. Diurnal variability in chlorophyll-*a*, carotenoids, CDOM and SO_4^{2-} intensity of offshore seawater detected by an underwater fluorescence-Raman spectral system[J]. Sensors, 2016, 16(7): 1082.

[510] 郭金家, 卢渊, 刘春昊, 等. Na_2SO_4溶液激光拉曼/激光诱导击穿光谱联合探测[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 259−261.
Guo Jinjia, Lu Yuan, Liu Chunhao, et al. Joint analyses of Na_2SO_4 solution by laser induced breakdown spectroscopy and Raman spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(1): 259−261.

[511] 孙传东, 陈良益, 高立民, 等. 水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. 应用光学, 2000, 21(4): 39−46.
Sun Chuandong, Chen Liangyi, Gao Limin, et al. Water optical properties and their effect on underwater imaging[J]. Journal of Applied Optics, 2000, 21(4): 39−46.

[512] Zheng Bing, Zheng Haiyong, Zhao Lifeng, et al. Underwater 3D target positioning by inhomogeneous illumination based on binocular stereo vision[C]//2012 Oceans-Yeosu. Yeosu, South Korea: IEEE, 2012: 1-4.

[513] 吴中芳, 周少聪, 何贤强. 水下物体偏振成像探测的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 283−290.
Wu Zhongfang, Zhou Shaocong, He Xianqiang. Experimental study on underwater objects detection based on polarization imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 283−290.

[514] 何宁, 李海岭, 张德琨, 等. 水下激光通信中信号的分集接收[J]. 激光与红外, 2002, 32(4): 228−229.
He Ning, Li Hailing, Zhang Dekun, et al. The multiple diversity reception of signal under water in laser communication[J]. Laser & Infrared, 2002, 32(4): 228−229.

[515] 刘金涛, 陈卫标. 星载激光对水下目标通信可行性研究[J]. 光学学报, 2006, 26(10): 1441−1446.
Liu Jintao, Chen Weibiao. Long distance underwater laser communication system based on low-density parity check codes and pulse-position modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(10): 1441−1446.

[516] 米乐, 胡思奇, 周田华, 等. 基于低密度奇偶校验码和脉冲位置调制的水下长距离光通信系统设计[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 225−231.
Mi Le, Hu Siqi, Zhou Tianhua, et al. Long distance underwater laser communication system based on low-density parity check codes and pulse-position modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 225−231.

[517] 王凡, 汪嘉宁. 我国热带西太平洋科学观测网初步建成[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 258−263.
Wang Fan, Wang Jianing. Initial establishment of China’s scientific observing network in western tropical pacific ocean[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2): 258−263.

[518] 汪嘉宁, 王凡, 张林林. 西太平洋深海科学观测网的建设和运行[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1471−1479.
Wang Jianing, Wang Fan, Zhang Linlin. Construction and operation of a deep-sea scientific observation network in the western Pacific[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1471−1479.

[519] 田纪伟, 赵玮, 周春, 等. “南海潜标观测网”成功实现南海深海盆全覆盖. 2017年度中国海洋与湖沼十大科技进展[EB/OL]. (2018–01–15)[2019–07–21]. http://www.sohu.com/a/216918286_726570.

Tian Jiwei, Zhao Wei, Zhou Chun, et al. ‘South China Sea submarine observation network’ successfully achieves full coverage of the South China Sea deep basin. Ten major scientific and technological advances in Oceanologia et Limnologia Sinica in 2017[EB/OL]. (2018–01–15)[2019–07–21]. http://www.sohu.com/a/216918286_726570.

[520] 吴立新. 加快建设海洋强国、走向深蓝需要“透明海洋”[J]. 海洋世界, 2017(11): 28−31.

Wu Lixin. Speeding up construction of China into a powerful ocean country and towards deep blue waters need ‘Transparent Ocean’[J]. Ocean World, 2017(11): 28−31.

[521] 何剑锋, 张芳, 林凌. 我国极地海底观测系统的发展与展望[J]. 地球科学进展, 2013, 28(5): 566−571.

He Jianfeng, Zhang Fang, Lin Ling. Development and prospect of Chinese polar seabed observation systems[J]. Advance in Earth Sciences, 2013, 28(5): 566−571.

[522] 董玉杰, 王辉武, 刘延亮, 等. 南爪哇流的季节内变化[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(3): 326−331.

Dong Yujie, Wang Huiwu, Liu Yanliang, et al. Intraseasonal variations of the South Java Current[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(3): 326−331.

[523] Liu Yanliang, Li Kuiping, Ning Chunlin, et al. Observed seasonal variations of the upper ocean structure and air-sea interactions in the Andaman Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 938(2): 922−938.

[524] 武周虎, 赵文谦. 海面溢油扩展、离散和迁移的组合模型[J]. 海洋环境科学, 1992, 11(3): 33−40.

Wu Zhouhu, Zhao Wenqian. Combined model for oil spill spreading, dispersion and migration[J]. Marine Environmental Science, 1992, 11(3): 33−40.

[525] 牟林, 赵前. 海洋溢油污染应急技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

Mou Lin, Zhao Qian. Emergency Response Technology for Marine Oil Spill Pollution[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[526] Cai Yang, Mu Lin, Li Huan, et al. A review of numerical modeling research on the marine oil spill[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 15(2): 71−86.

[527] 安伟, 王永刚, 王新怡, 等. 中国近海海上溢油预测与应急决策支持系统研发[J]. 海洋科学, 2010, 34(11): 78−83.

An Wei, Wang Yonggang, Wang Xinyi, et al. An oil spill forecast and emergency decision support system in China offshore[J]. Marine Science, 2010, 34(11): 78−83.

[528] 李彤, 谢志宜. 水上事故溢油漂移轨迹预测模型研究与应用[J]. 海洋科学, 2013, 38(7): 56−61.

Li Tong, Xie Zhiyi. Study and application of oil spill trajectory model[J]. Marine Science, 2013, 38(7): 56−61.

[529] 李燕, 朱江, 王辉, 等. 同化技术在渤海溢油应急预报系统中的应用[J]. 海洋学报, 2014, 36(3): 113−120.

Li Yan, Zhu Jiang, Wang Hui, et al. The assimilation technology application in the oil spill emergency forecasting system of the Bohai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(3): 113−120.

[530] Wang Yonggang, Wei Zexun, An Wei. Development of an oil spill forecast system for offshore China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(4): 859−870.

[531] Qiao Fangli, Wang Guansuo, Yin Liping, et al. Modelling oil trajectories and potentially contaminated areas from the Sanchi oil spill[J]. Science of the Total Environment, 2019, 685: 856−866.

[532] 张洪芹. 海上危险化学物质扩散模拟研究的进展[J]. 海洋湖沼通报, 1990(3): 76−79.

Zhang Hongqin. Progress in modelling of the transport of hazardous chemical spill at sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1990(3): 76−79.

[533] 朱国林, 雷孝平, 陆凤桐. 大连湾易溶保守液体化学品污染扩散的数值计算[J]. 大连海事大学学报, 1999, 25(1): 74−78.

Zhu Guolin, Lei Xiaoping, Lu Fengtong. The numerical simulation of soluble and conservative liquid chemicals pollutant diffusion in Dalian Bay[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1999, 25(1): 74−78.

[534] 王泽良, 王日新, 陶建华. 渤海湾流场以及污染物分布的数值模拟研究[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(2): 224−230.

Wang Zeliang, Wang Rixin, Tao Jianhua. Numerical simulation of tidal current and pollutant distribution of Bohai Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1999, 30(2): 224−230.

[535] 陈俊天, 李淑江, 孙俊川, 等. 海上危化品漂移扩散数值模拟研究进展[J]. 海洋科学, 2018, 42(7): 158−166.

Chen Juntian, Li Shujiang, Sun Junchuan, et al. Progress and perspective on numerical simulation of hazardous chemicals' drift-diffusion in the sea[J]. Marine Sciences, 2018, 42(7): 158−166.

[536] 余江, 卢士强, 刘志国, 等. 突发化学品水污染快速模拟中化学品分类研究[J]. 上海环境科学, 2015, 34(4): 144.

Yu Jiang, Lu Shiqiang, Liu Zhiguo, et al. A study on classification of chemicals in fast simulating chemical water pollution emergency[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2015, 34(4): 144.

Physical oceanography research in China over past 70 years：Overview of development history and academic achievements

Wei Zexun[1]， Zheng Quanan[2]， Yang Yongzeng[1]， Liu Kexiu[3]， Xu Tengfei[1]， Wang Fan[4,17]， Hu Shijian[4]，
Xie Lingling[5]， Li Yuanlong[4]， Du Yan[6,17]， Zhou Lei[7]， Lin Xiaopei[8]， Hu Jianyu[9]， Zhu Jianrong[10]， Li Junyi[5]，
Zhang Zhengguang[8]， Hou Yijun[4,17]， Liu Ze[4]， Tian Jiwei[8]， Huang Xiaodong[8]， Guan Yuping[6,17]， Liu Zhiyu[9]，
Yang Qingxuan[8]， Zhao Wei[8]， Song Zhenya[1]， Liu Hailong[11,17]， Dong Changming[12]， Yu Weidong[13]， Lian Tao[14]，
Chen Zhaohui[8]， Shi Jiuxin[8]， Lei Ruibo[15]， Liu Yu[13]， Yu Fujiang[13]， Yin Baoshu[4,17]， Chen Ge[8]， Wang Yanfeng[1]，
Li Zhenglin[16,17]， Xiong Xuejun[1]， Wang Jianing[4]， Li Xiaofeng[4]， Wang Yonggang[1]

(1. *First Institute of Oceanography*, *Ministry of Natural Resources*, *Qingdao* 266061, *China*; 2. *University of Maryland*, *College Park* 20742, *USA*; 3. *National Marine Data and Information Service*, *Tianjin* 300171, *China*; 4. *Institute of Oceanology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Qingdao* 266071, *China*; 5. *Guangdong Ocean University*, *Zhanjiang* 524088, *China*; 6. *South China Sea Institute of Oceanology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Guangzhou* 510301, *China*; 7. *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200030, *China*; 8. *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*; 9. *Xiamen University*, *Xiamen* 361005, *China*; 10. *East China Normal University*, *Shanghai* 200241, *China*; 11. *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029, *China*; 12. *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044, *China*; 13. *National Marine Environmental Forecasting Center*, *Beijing* 100081, *China*; 14. *Second Institute of Oceanography*, *Ministry of Natural Resources*, *Hangzhou* 310012, *China*; 15. *Polar Research Institute of China*, *Shanghai* 200136, *China*; 16. *Institute of Acoustics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*; 17. *University of Chinese Acdamy Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: This paper reviews development history and academic achievements of the research of physical oceanography branches in China over past 70 years since foundation of new China. The physical oceanography research in China began with studies of sea waves, tides, offshore circulation, water masses, and ocean meteorologic disasters with emphasis on the storm surge. With the rise of China, the research fields have been gradually expanded. Meanwhile, a great deal of significant research results have been achieved, such as, developed general wind wave spectra and swell spectra that are adapted broadly by the international community as well as the third generation sea wave numerical models; establishment of analytical and forecast methods for tides and tidal currents including quasi-harmonic analytical methods and permanent forecast methods of tides and tidal currents; discovered and named Mindanao Undercurrent, revealed multi-core structures and mechanisms of multi-scale variability of the Kurohsio in the East China Sea, and systematically described the circulation system of the western boundary of the Pacific; proposed the South China Sea Branch of Indonesian Throughflow (the South China Sea Throughflow); gradually improved continental shelf circulation systems of China offshore waters, and obtained deep understandings on the South China Sea circulation, the Kuroshio and its branches, Taiwan Warm Current, Zhejiang-Fujiang Coastal Current, the Yellow Sea Cold Water Mass Circulation, the Yellow Sea Warm Current, the Bohai Sea Circulation and continental shelf trapped waves; systematically summed up inter-ocean interactions of the Pacific Ocean-the Indian Ocean-the Atlantic Ocean through the atmospheric and oceanic bridges; developed methods for the water mass analysis of shallow seas, generally clarified features and mechnisms of distribution and evolution of water masses in China offshore waters, and had contributions to studies of distribution and movement of water masses in deep oceans and polar oceans; clarified general features and generation mechanisms of mesoscale eddies in the South China Sea, explored 3-D structure of eddies, and quatitatively estimated material and energy transportation abilities of eddies in global oceans; basically clarified spatial distribution and seasonal variability features of ocean fronts in China offshore waters, proposed frontogenesis mechnisms including topograpgy, barotropic and baroclinic instabilities; built mooring observation net for internal waves in the South China Sea, achieved systematic understanding of mechnisms for the full process of generation-evolution-dissipation of internal waves; development of shear instability theories of turbulence and ocean turbulence models, proposed a concept of current edge instability and new methods for turbulence-mixing paraterization; obtained new understandings for ocean interior mixing mechanisms and energy sources, and clarified effects of mixing on the deep layer circulation and nutrient material transportation processes; developed the Global Wave-Tide-Current Coupling Model, and a series of ocean and climate models; developped ocean data assimilation systems that may assimilate the majority of ocean observation data and coupling assimilation systems used for ENSO prediction; built physical model experiment platforms with ageostrophic water tanks/pools and geostrophic rotation platforms that satisfy the international standards; developed error analysis methods for ENSO prediction, built theory systems for inter-decadal variability of ocean and climate systems, explored response of mid-deep ocean layers to global climate change; primarily built ocean observation net in China offshore waters; continued Arctic and Antarctic expeditions; built operational forecast systems for typhoon, storm surge, extremely high waves and tsunami to provide supports for reducing meteorologic disasters in China; broke through foreign blockade to ocean technologies, successfully developed 10 km deepwater hydrophone and a series of instruments for observing ocean optical features; developed prediction models for oil spilling and dangerous/chemical material drifting and spreading in order to provide scientific supports to emergence processes and warning/forecast of risk events that are brought along ocean resources development. A great deal of literatures of academic results cited in this paper (maximum 3 papers selected for each first author) show that the development of physical oceanography research over past 70 years has trained a research team with solid strength. This is the most precious achievement. This research team will serve as a principal force to scale new heights in physical oceanography in China.

Key words: physical oceanography; ocean waves; tides; sea level; ocean general circulation; water mass; coastal ocean circulation; meso-scale processes; turbulence and mixing; numerical modeling; data assimilation; laboratory simulation; air-sea interaction; climate; sea ice; Arctic and Antarctic expeditions; ocean meteorology and disasters; ocean physics; marine environment