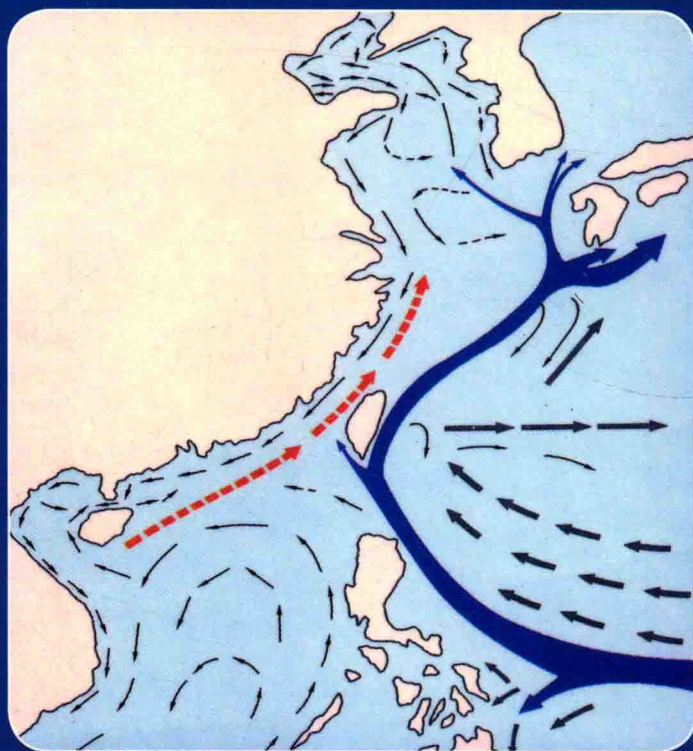


卫星海洋环境动力学国家重点实验室
国家海洋局第二海洋研究所 资助出版

西北太平洋 及其边缘海环流

第二卷

袁耀初 编著



海洋出版社

卫星海洋环境动力学国家重点实验室 资助出版
国家海洋局第二海洋研究所

西北太平洋及其边缘海环流

第二卷

袁耀初 编著

海洋出版社

2016年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

西北太平洋及其边缘海环流. 第二卷/袁耀初编著. —北京: 海洋出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-5027-9650-1

I. ①西… II. ①袁… III. ①北太平洋-边缘海-大洋环流-文集 IV. ①P731.27-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 307584 号

责任编辑: 高 英 朱 林 陈茂廷

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

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

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

开本: 889mm×1194mm 1/16 印张: 36.5

字数: 1103 千字 定价: 188.00 元

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

海洋版图书印、装错误可随时退换

袁耀初简介



袁耀初，1937 年 11 月生，浙江宁波人。1960 年北京大学数学力学系力学专业毕业；1960—1964 年在北京大学数学力学系力学专业从事教育工作；1964—1973 年在国防科委从事物理力学研究；1973 年调入国家海洋局第二海洋研究所，现任国家海洋局第二海洋研究所二级研究员，博士生导师，从事物理海洋学研究。自 20 世纪 80 年代以来，袁耀初主持和参加国家自然科学基金重点、面上和重大国际合作基金项目 11 项，主持和参加国家海洋局、国家攻关及国家重点基础发展规划“973”项目、科学技术部基础和重大国际合作项目等项目 13 项，综合上述项目总共 24 项，深入开展了西北太平洋环流及其边缘海环流研究，发表论著 200 余篇。研究内容概括为以下几个方面：黑潮研究（自源地至日本以南海域）；琉球群岛以东西边界流及深层流研究；黄、东海海域环流；黄、东海海域“入海气旋爆发性发展过程的海气相互作用”调查研究；南海环流变异及其与太平洋水相互作用；菲律宾以东海域环流等；自 1977 年以来，成功地提出和发展与实际观测结果相一致的 10 种海洋环流数值研究模式，应用于不同海域。1979 年获浙江省先进工作者称号，1986 年获国家海洋局在“六五”期间双文明建设中先进海洋工作者称号，1992 年起享受国务院政府特殊津贴，1995 年获国家海洋局科技进步一等奖，1996 年获国家科技进步二等奖，1996 年获国家海洋局科技进步二等奖，1997 年获国家海洋局科技进步奖，1997 年获“国家海洋局双百人才工程”海洋科学研究类第一梯队首批人选，2005 年获海洋局海洋创新成果二等奖。曾任国际大地测量与地球物理学联合会（IUGG）中国委员会委员，1991 年至 2013 年任国际太平洋与亚洲边缘海研究委员会执行委员（The Pacific-Asian Marginal Seas (PAMS) Steering Committee Member）。

袁耀初虽年逾古稀,但仍保持满腔热情,与学生和同事们合作,继续奋斗在科研工作上,例如在杭州 2013 年 4 月主持第十七届国际太平洋与亚洲边缘海研究 (PAMS) 国际会议,在日本那霸 (Naha) 2015 年 4 月第十八届太平洋与亚洲边缘海研究 (PAMS) 国际会议,他主持专题 3 (Session: 3) “The circulation in South China Sea and its Interaction with the neighboring waters (南海环流以及它与邻近海域水体相互作用)” 学术报告与研讨,并在会上做了特邀报告。他寄语:心胸坦荡,虚怀若谷,保持平常心、心无杂念,才能将名利看穿,不为荣辱所动,能容人与物,保持精神欢愉。

前 言

由于西北太平洋及其边缘海的特殊地理位置及其在全球气候变化中的重要作用,自 20 世纪 80 年代以来,该区域的研究在国内外越来越受到重视。多年来,我国发起多项研究计划,组织了诸多研究项目,我国的海洋科学工作者在该区域的研究中取得了许多杰出而丰硕的成果。笔者在长约 40 年的科研生涯里主要致力于西北太平洋及其边缘海环流的研究,在此期间,主持或参加国家科学技术部项目、国际合作项目及国家海洋局项目 13 项,主持或参加国家自然科学基金项目 11 项,取得了一系列重要成果。笔者的成果以中文和英文形式发表在国内外许多著名杂志及专著上。这些成果在一定程度上反映了西北太平洋及其边缘海环流研究的进步过程,也成为这一领域和相关领域开辟未来的重要基础。我们将这一领域自 1980 年至今以笔者作为作者的重要成果整理成文集,取名《西北太平洋及其边缘海环流》出版。

本文集分 4 卷出版,共收录论文预估 203 篇;第一卷、第二卷汇集中文论文 106 篇,第三卷、第四卷汇集英文论文预估 97 篇。

第一卷包含 3 部分内容:第一部分黄、东海环流,东海与日本以南黑潮的变异以及琉球群岛以东海流(论文 36 篇);第二部分黄、东海海气相互作用的研究“入海气旋爆发性发展过程的相互作用”(论文 10 篇);第三部分评述性论文(论文 6 篇)。

第二卷包含 5 部分内容:第一部分台湾海峡与台湾岛以东环流、黑潮的变异以及琉球群岛以东海流(论文 24 篇);第二部分吕宋海峡海流和南海环流及其与太平洋水相互作用(论文 15 篇);第三部分西北太平洋环流及赤道流系(论文 3 篇);第四部分菲律宾以东海域环流(论文 2 篇),第五部分评述性论文(论文 10 篇)。

第三卷包含 3 部分内容:Chapter 1. Circulations in the Yellow and East China Seas, Variability of the Kuroshio and the Currents East of the Ryukyu Islands (论文 31 篇); Chapter 2. Study on the Air-Sea Interaction Process of Cyclone Outbreak over the

Yellow and East China Seas (论文 13 篇); Chapter 3. Review (预估论文 4 篇)。

第四卷包含 5 部分内容: Chapter 1. Currents in Taiwan Strait, the Kuroshio and its Influence on the Circulation East of Taiwan, and the Currents East of the Ryukyu Islands (论文 15 篇); Chapter 2. Currents in the Luzon Strait, Variability of Circulations in the South China Sea and its Interaction with Pacific Water (预估论文 28 篇); Chapter 3. A Study of Models for the Calculation of an Equatorial flow (论文 2 篇); Chapter 4. The Circulation in North Pacific (论文 1 篇); Chapter 5. Review (预估论文 3 篇)。

为了读者了解这套文集反映的研究成果的进展脉络、要点的方便以及根据需要查阅内容的方便,笔者还对这套文集的内容进行了系统地分析,指出了文集在各具体方面的重要贡献,并以“承担的项目和研究贡献概述”为题的内容置于前言之后。

笔者希望这一系列研究成果能有助于人们更全面、深入地了解西北太平洋环流及其边缘海环流,有助于从事海洋研究新一代学者们,在未来科学研究创新与发现以及开发前沿,提供帮助与正能量;真诚地希望这套文集对海洋环境及资源开发与利用也会起到积极作用。

本文集汇总成果的获得受到来自国家自然科学基金委员会、国家科学技术部、国家海洋局的 24 个项目(详见“承担的项目和研究贡献概述”)的资助;本文集汇总成果的获得和本文集的出版也得到卫星海洋环境动力学国家重点实验室以及国家海洋局第二海洋研究所等大力资助与帮助;在此我们表示衷心的感谢。我们还十分感谢上述研究项目与论文成果的合作者——苏纪兰院士、管秉贤教授、周明煜研究员、秦曾灏教授、孙湘平研究员、袁业立院士、方国洪院士、胡敦欣院士、陈大可院士、刘倬腾教授、陈镇东教授、日本国高野健三教授、金子新教授、韩国 Lie Heung-Jae 博士等等,正是在与他们真诚、成功的合作支持下完成了所有合作研究项目,他们为这套文集成果的获得,做出了很重要贡献。我也向本套文集收录文章的其他所有作者表示诚挚的谢意,感谢他们对相关论文所做出的重要贡献。本套文集的出版过程中,《海洋学报》编辑部的高英、陈茂廷等同志做了大量的编辑方面的很辛苦工作,编辑、校对都十分细致,为本文集出版作出了很大贡献,在此一并表示深深地感谢!

袁耀初

2016 年 6 月

承担的项目和研究贡献概述

近几十年来西北太平洋及其边缘海环流研究得到国家和海洋学界的高度重视,并取得了一系列重要成果。随着海洋科学技术的发展,这些成果对将这一领域的研究引向深入以及对其他相关领域研究的渗透愈来愈显珍贵。《西北太平洋及其边缘海环流》文集共分4卷,收录了袁耀初等为作者、发表时间自1980年至2017年预估的论文203篇。这些论文反映了袁耀初在主持和在西北太平洋及边缘海洋环流研究等方面取得的重要成果。为了让读者清晰了解这套文集反映的袁耀初等的工作脉络及其对科学的重要贡献,以下分承担的项目和研究贡献概述两个方面给予介绍。

一、承担的项目

我们的研究,国家自然科学基金委员会、国家科学技术部以及国家海洋局等给予了有力的资助与帮助。自20世纪80年代以来,袁耀初负责和参加国家自然科学基金(重点、面上和重大国际合作)基金、国家海洋局、国家攻关及国家重点基础发展规划“973”项目、科学技术部基础和重大国际合作项目等以下共24项。

(一) 主持或参加国家科学技术部项目、国际合作项目及国家海洋局项目等情况

(1) 国家海洋局国际合作项目“中美在长江口及其附近海域沉积动力学合作调查研究”(1980—1983年,主要参加者)。

(2) 国家海洋局项目“中日黑潮合作调查研究”(1986—1992年,总负责人:苏纪兰,南方片课题负责人:袁耀初,北方片负责人:孙湘平、郭炳火)。

(3) 国家海洋局项目“国家海洋局第二海洋研究所与日本筑波大学、九州大学及鹿儿岛大学合作研究”(1991—1993年,中方负责人:袁耀初,日方负责人: Takano Kenzo)。

(4) 中日副热带环流合作调查研究(1995—1999年,总负责人:苏纪兰,国家海洋局第二海洋研究所负责人:袁耀初)。

(5) 国家海洋局项目“国家海洋局第二海洋研究所与日本广岛大学在台湾以东黑潮及其邻近海域海流合作研究”(1996—1999年,中方负责人:袁耀初,日方负责人: Kaneko Arata)。

(6) 国家海洋局项目“国家海洋局第二海洋研究所与韩国海洋研究与发展研究所(KORDI)合作研究: The Circulation and Air-Sea Interaction in the Yellow and Each China Seas, with Special Attention to the Cyclonic Outbreaks”(1999—2000年,中方负责人:袁耀初,韩方负责人: Lie Heung-Jae)。

(7) 国家海洋局项目“国家海洋局第二海洋研究所与日本广岛大学合作研究: The Circulation and Air-Sea Interaction in the Yellow and Each China Seas, with Special Attention to the Cyclonic Outbreaks”(1999—2000年,中方负责人:袁耀初,日方负责人: Kaneko Arata)。

(8) 国家科技部基础项目“气旋发展对海洋环流及水文影响的研究”(1999—2000年,负责人:袁耀初)。

(9) 国家科技部“973”“中国近海环流形成变异机制、数值预测方法及对环境影响的研究”02课题“东海黑潮结构变异及其与陆架水的相互作用”(G1999043802, 1999—2004年,负责人:袁业立,袁耀初)。

(10) 国家科技部“973”“中国近海环流形成变异机制、数值预测方法及对环境影响的研究”05课题“南海季风环流及其变异机理研究”(G1999043805, 1999—2004年,负责人:袁耀初、王康增)。

(11) 国家海洋局国家专项“极端天气过程重点海域海流——海温和盐度影响”(2004—2006年,主要参加者,负责东海海流与水文的影响)。

(12) 主持国家科学技术部国际科技国际合作重大项目“中美印(尼)日南海与邻近海域水交换及其变异合作研究”(No. 2006DFB21630, 2007—2010年,负责人:袁耀初、方国洪)。

(13) 国家科学技术部“973”项目“基于全球实时海洋观测计划(Argo)的上层海洋结构、变异及预测研究”(No. 2007 CB816003, 2008—2011年,项目负责人:陈大可,课题“太平洋西边界流与中国近海的热盐交换”负责人:王桂华,子课题“吕宋海峡海域两侧上、中和深层热盐交换的差异和变化”,负责人:袁耀初)。

(二) 主持或参加国家自然科学基金项目情况

(1) 国家自然科学基金面上项目“西北太平洋环流及其对我国近海环流的影响”(批准号:49070257, 1991—1993年,主持人:袁耀初)。

(2) 国家自然科学基金重点项目“东海陆架边缘海海洋通量的模式研究”(批准号:49136136, 1992—1995年,主持人:袁耀初)(附:由胡敦欣负责总的重点项目“东海陆架边缘海海洋通量的研究”(编号:49136130),共有6个重点项目,本项目是其中之一重点项目)。

(3) 国家自然科学基金面上项目“台湾以东黑潮与深层流研究”(批准号:49776287, 1995—1997年,主持人:袁耀初)。

(4) 国家自然科学基金面上项目“东海环流数值研究”(批准号:49776287, 1998—2000年,主持人:袁耀初)。

(5) 国家自然科学基金重点项目“黄、东海入海气旋爆发性过程的海气相互作用研究”(批准号:49736200, 1998—2001年,主持人:袁耀初)。

(6) 国家自然科学基金面上项目“琉球群岛两侧海流变异的研究”(批准号:40176007, 2002—2004年,主持人:袁耀初)。

(7) 国际(地区)合作与交流项目“第12届太平洋与亚洲边缘海/日本海与东中国海研讨会”(批准号:40311340050, 2003年,主持人:袁耀初)。

(8) 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流重大项目“中日吕宋海峡流量及其变异的国际合作研究:观测与模式”(批准号:40520140073, 2005—2009年,主持人:袁耀初)。

(9) 国家自然科学基金面上项目“南海北部浮游动物昼夜垂直迁移的声学观测研究”(批准号:41406021, 2015—2017年,主要参加者)。

(10) 国家自然科学基金面上项目“琼州海峡的沿海声层析研究”(批准号:41476020, 2015—2017年,主要参加者)。

(11) 国家自然科学基金面上项目“琉球海流的起源及其对东海的入侵和影响”(批准号:41576001, 2016年1月—2019年12月,主要参加者)。

二、研究贡献概述

对上述24项科研项目,我们深入开展西北太平洋环流及其边缘海环流研究。我们的重要成就与贡献,概括地总结为以下几个方面。

(一) 黑潮研究(自源地至日本以南海域)

1. 东海黑潮及其变异

在对外开放的新形势下,国家海洋局于1986—1992年实施了中日黑潮合作调查研究项目,其中国家海洋局第二海洋研究所负责中日东海黑潮合作调查研究,并由袁耀初主持这个项目研究。其后的20世纪90年代期间,袁耀初作为主持人之一仍继续主持与日本科学家进行多次合作研究。

(1) 关于东海黑潮来源,改变了传统的看法,认为除沿台湾东岸北上的黑潮主流以外,还有部分来自琉球群岛以东。

由于台湾岛至西表岛之间的通道（约位于 24.5°N ）水深较浅，黑潮不能全部由此通道通过。问题是黑潮有多少流量能通过此通道？经过调查研究与数值计算，我们发现黑潮在台湾东南的净向北流量约为 $45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，其中的大约 56%，即 $25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量能通过此通道进入东海。之后，在 1998 年台湾大学刘倬腾等以及在 1999 年杨益等分别对在台湾东北海域 11 调查航次的水文资料进行分析和计算结合 ADCP 测流资料，表明通过该通道流量为 $(23 \pm 3) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，证实了我们的发现。其次，我们发现东海黑潮流量除来自台湾东侧的直接贡献外，还有部分表层水来自琉球群岛的东南侧、部分中层低盐水来自通过冲绳岛以南海脊深槽进入东海的琉球海流水。这些补充使得东海流量的多年平均值增至 $27 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。这些发现已被中国台湾学者陈镇东在 1998 年论文所引用。

（2）揭示黑潮多核结构和发现东海黑潮逆流。

黑潮流结构，甚为复杂，主要有两个特性。对于这两个主要特征揭示的贡献：①袁耀初是较早发现黑潮多核结构者之一。以东海著名的 PN 断面为例，在 1992 年 1 月和 4 月，分别出现 1 个流核和 2 个流核，在 1997 年 7 月厄尔尼诺期间，PN 断面也有 2 个流核，而在 1995 年和 1998 年秋季，我们首次发现黑潮在东海 PN 断面出现 3 个流核，这表明黑潮的流核多数呈多核结构。在 TK 断面（吐噶喇海峡）也是如此。并指出，黑潮主核心的最大流速，总是出现在最大的地形坡度处。②通过海洋观测和理论研究袁耀初都发现，在东海东北向流动的黑潮以下水层总存在一支向南流动的逆流，其位置一处位于坡折底部附近，另一处位于海槽下层。

（3）系统地揭示了东海黑潮流量季节变化。

我们通过多年调查研究与理论计算揭示：黑潮通过 PN 断面的流量多年统计季平均值在夏季时最大，秋季最小，多年平均值为 $27.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。黑潮通过 TK 断面的流量也是夏季最大。

（4）揭示东海黑潮年际变化。发现 1995 年与 1998 年是东海黑潮的异常年，也发现 1997 年强厄尔尼诺期间黑潮出现异常现象。

发现 1995 年与 1998 年东海黑潮出现异常现象：黑潮通过 PN 断面流量在春季最大，夏季最小。同期黑潮通过 TK 断面的流量的季节变化也如此，这与上述东海黑潮多年统计的流量季节变化规律，即夏季时最大的结论相反。袁耀初发现，出现这个异常现象与冲绳岛以南反气旋涡的强度变化以及从厄尔尼诺过渡到拉尼娜现象有关。

袁耀初还发现，1997 年强厄尔尼诺时、1998 年夏季及以后出现拉尼娜现象时黑潮的流态和流量都出现异常现象。在 1997 年厄尔尼诺时东海黑潮流速与流量都减小，通过 PN 断面的平均流量为 $25.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，低于多年平均值，并发现 1997 年东海黑潮流量的季节变化与平常年变化规律相反，东海黑潮的流量在夏季最小。

（5）揭示东海黑潮热通量的季节变化及物质通量变化。

在中纬度，海洋与大气都向高纬度处输运热量。以 PN 断面为例，通过 1987—1990 年共 12 个航次调查研究，黑潮通过 PN 断面的年平均热量为 $2.100 \times 10^{15} \text{ W}$ ，揭示了它的季节变化：黑潮通过 PN 断的热量在夏季最大，为 $2.302 \times 10^{15} \text{ W}$ ，其次为冬季与春季，分别为 $2.083 \times 10^{15} \text{ W}$ 与 $2.039 \times 10^{15} \text{ W}$ ，秋季最小，为 $1.957 \times 10^{15} \text{ W}$ 。1994 年春季航次调查，采用改进逆方法，获得通过 PN 断面 T_{CO_2} 、颗粒有机碳（POC）和溶解有机碳（DOC）的通量分别为 $65.0 \times 10^6 \text{ mol/s}$ ， $0.17 \times 10^6 \text{ mol/s}$ 和 $2.2 \times 10^6 \text{ mol/s}$ 。这表明， T_{CO_2} 、POC 和 DOC 分别占总的碳通量的 96.5%，0.2% 和 3.3%，这是首次在东海获得海洋碳通量。

2. 台湾以东黑潮及其变异

（1）发现黑潮在台湾以东至少存在两个不同流态。

在中日副热带环流合作调查研究中，通过理论计算及实测，除获得传统的黑潮主流通过台湾苏澳以东海脊作反气旋弯曲进入东海认识结果外，发现 1995 年 10 月及 1996 年 5—6 月厄尔尼诺期间黑潮还有一个东分支向东北方向进入琉球群岛以东海域，成为琉球群岛以东西边界流的来源之一，称之为琉球群岛以东黑潮分支。但在 1997 年厄尔尼诺期间不存在这个东分支。由此表明台湾以东黑潮至少存在两个不同流态，是与厄尔尼诺（或拉尼娜）现象密切相关。

(2) 发现 1997 年强厄尔尼诺期间, 台湾以东黑潮出现异常现象。

与东海黑潮在厄尔尼诺期间出现异常现象相似, 在 1997 年强厄尔尼诺期间, 台湾以东黑潮流速与流量都明显减小, 1997 年 7 月和 12 月的流量比平常年分别减小约 40% 与 46%。其次, 由于 1997 年强厄尔尼诺期间, 在台湾以东海域不存在黑潮的东分支, 这也是 1997 年强厄尔尼诺期间台湾以东黑潮流量减小的原因之一。

3. 日本以南黑潮海域的海流

在日本以南黑潮海域有以下 8 个航次: ①1976—1977 年 CSK, 1976 年 5 月, 1977 年 3 月、5 月及 1977 年 9 月共 4 个航次; ②1986 年 6 月航次; ③1987 年 12 月—1988 年 1 月冬季航次; ④1988 年 5—6 月航次及 1988 年 10—11 月航次。此外, 为了研究东海黑潮的流量, 琉球群岛以东海流的流量以及黑潮通过日本九州东南断面 KS 流量的三者之间关系, 还有 1987 年 9—10 月秋季航次和 1990 年 1—2 月冬季航次。我们对上述 10 个航次分别采用逆方法、改进逆方法及 β 螺旋方法, 计算了日本以南黑潮流速及流量的季节变化, 得到以下 4 个方面的重要结果。

(1) 1976—1977 年 4 个航次日本以南黑潮大弯曲的变化。

①1976 年 5 月黑潮呈 A 型大弯曲。之后, 黑潮大弯曲向西南方向移动, 如在 1977 年 3 月时。1977 年 5 月, 在纪伊半岛近海, 弯曲变细, 以致最后发生冷涡与黑潮分离现象。1977 年 8 月黑潮大弯曲再次发生, 1977 年 9 月时, 黑潮大弯曲呈 S 状。②1977 年 5 月, 分离出的冷涡中心, 位于 30°N , 137°E , 冷涡中心的水温比周围的水温低 8°C 左右, 直径约为 200 km, 流速较大, 垂直深度可达 700 m 左右。③在这 4 个航次中, 前两个航次黑潮的流幅比后两个航次时宽, 但流速比后两个航次都小, 尤其在 1977 年 9 月航次, 黑潮流速最大, 其最大流速为 109 cm/s 。④这 4 个航次在 200 m 水层 15°C 等温线都能近似表征黑潮流轴的位置。

(2) 关于黑潮通过日本以南海域的流量。

以九州东南断面 KS 为例, 在 1987 年 9—10 月秋季航次, 黑潮通过该断面的流量 (东北向) 为 $67.31 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$, 其中流量的 34.7%, 即 $23.3 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ 为来自东海黑潮通过吐噶喇断面 TK 的流量, 而其余的 65.3%, 即 $44 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ 为来自琉球群岛以东的海流。但是在上层黑潮通过断面 KS 的大部分流量为来自吐噶喇海峡断面 TK 的黑潮水。当然上述流量的分配在不同时期, 是有变化的。例如在 1990 年 1—2 月冬季航次通过断面 KS 流量为 $57.4 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$, 其中来自断面 TK 的黑潮流量为 $21.4 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$, 其贡献为 37.3%, 其余 62.7% 来自琉球群岛以东海流的流量为 $36.0 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3) 日本以南黑潮流向太平洋的流量。

我们计算了日本以南黑潮流向太平洋的流量, 例如在 1987 年 12 月—1988 年 1 月冬季航次、1988 年 5—6 月航次与 1988 年 10—11 月航次在日本以南黑潮流向太平洋的流量分别为 $64 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$, $51 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ 与 $50 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ 。这表明在日本以南黑潮流向太平洋的流量在冬季最大, 春、秋季几乎相同。

(4) 日本以南流量垂向分布。

对日本以南黑潮分层流量计算表明, 黑潮在日本以南, 基本位于 1 500 m 以浅水层中。例如在 1987 年冬季黑潮流量在 1 500 m 以浅流量为总流量的 95%。日本以南黑潮以下都存在逆向流。

4. 黑潮源地

黑潮源地参见以下 (六) 菲律宾以东海域环流。

(二) 琉球群岛以东西边界流及深层流研究

1986—1999 年袁耀初主持了 3 个在琉球群岛以东海域的中日合作调查研究, 在该海域的中外联合调查研究尚属首次。关于琉球群岛以东海流, 有很多问题, 亟需解决的是: 是否存在着持续的、较强的西边界流, 其结构如何, 这是人们长期关注的问题。自 1986 年以来, 对该海域取得以下创新性成果。

1. 通过实测和数值研究相结合, 揭示琉球群岛以东西边界流的确持续存在, 并发现它常有两个流核, 其中一个总在次表层

通过数值计算发现, 这支西边界流有两个流核, 其中一个总在次表层, 占有相当部分流量, 并提出

日本以南黑潮的中、下层流量主要来自这支流的次表层流核。解释了东海黑潮与日本以南黑潮流量有较大的差额的原因。1991—1993 年国家海洋局第二海洋研究所与日本筑波大学等 3 个大学的合作调查研究期间,在该海域进行了两个航次调查,时间长达 11 个月,并在 3 个锚碇站测流,其中锚碇测流站 OC ($25^{\circ}34'N$, $128^{\circ}20'E$),最深观测深度为 4 480 m。实测流证实了袁耀初的发现,并进一步发现上述的流结构在各个季节都存在,但发现次表层的位置有季节变化,从而由实测结果及理论模式都证实琉球群岛以东东西边界流的存在。

2. 首次揭示琉球群岛以东西边界流的来源

发现琉球群岛以东西边界流有 3 个来源:反气旋式的再生环流、 $130^{\circ}E$ 的西向流及台湾以东黑潮的东分支。反气旋式的再生环流总是存在;黑潮的东分支在 1995 年 10 月及 1996 年 5—6 月拉尼娜期间存在,已被实测流证实,但在 1997 年厄尔尼诺期间不存在。这属首次报道。

3. 首次定量计算了琉球群岛两侧的水(包括中层低盐水)交换

东海与西北太平洋通过琉球海脊的水交换是一个重要课题,首先定量计算了通过琉球海脊的流量。中国台湾陈镇东直接引用了袁耀初的结论:“Yuan 等(1995)报导了 WPS(西菲律宾海)低盐水通过 $127^{\circ}E$ 与 $26^{\circ}N$ 附近琉球海脊中深的峡谷进入琉球海槽”。

4. 1991—1993 年发现在任何季节琉球群岛以东 3 000 m 深海域存在一支稳定的、西南向流

深层流关系着海洋深处的水更新,深层流的研究对长期的气候变化的了解和认识海流结构皆有实际意义。袁耀初与日方科学家合作,通过长期的海流实测及数值研究相结合,获得了上述发现。必须指出,在锚碇测流站 OC ($25^{\circ}34'N$, $128^{\circ}20'E$),最深观测深度为 4 480 m,时间长达 11 个月,发现各个季节琉球群岛以东 3 000 m 深海域均存在一支稳定的、西南向边界流,这在我国属首次发现,填补了我国深层流研究的空白。

(三) 黄、东海海域环流

1. 揭示黄海暖流结构,发现黄海暖流在冬、夏季不同动力成因

黄海暖流是黄海的主要海流。发现了黄海暖流在冬、夏季不同成因及动力机制,首次揭示冬季偏北风场与地形变化相互作用有助于黄海暖流向西北方向流,揭示冬季黄海环流有两个涡旋:西侧涡旋为气旋式涡,而东侧涡旋为反气旋式涡,中间槽处黄海暖流流向与风向相反,向西北流动;而在夏季偏南风的作用,不可能使其北上。

2. 揭示台湾暖流在冬、夏季的不同形态以及对马暖流来源,得到了浙江近岸上升流的两个重要结论

台湾暖流是东海陆海架主要海流,它由内、外两侧分支组成。袁耀初等通过数值模式与海流实测相结合,揭示台湾暖流的内侧分支在冬、夏季的不同来源,并进一步揭示冬季台湾暖流的重要特性:它位于强沿岸锋的东侧,流速较强,其西侧则为沿岸南向流。关于东海陆架环流,首先指出地形与斜压场相互作用是重要动力原因,而其次是风的作用。揭示对马暖流来源于台湾暖流与黑潮的混合水。

我们分别研究了夏季与冬季浙江近岸上升流,得出以下两个重要结论。

(1) 上升流流速在 $1 \times 10^{-4} \sim 23 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 之间。由于在冬季出现近岸附近锋面,冬季上升流出现的区域比夏季时要向东移。

(2) 浙江近岸上升流的出现是台湾暖流内侧分支与地形变化相互作用的结果。从底部边界层理论可知,在底部 Ekman 层以外,台湾暖流内侧分支基本上是地转流,其方向近似为沿着等深线(沿岸)方向,而在底部 Ekman 层内非地转的、穿越等深线向岸方向分量流动,在斜坡地形下,诱导较强的上升流。这是由于水体必须满足连续方程。台湾暖流内侧分支愈强,则出现的上升流也愈强。

3. 台湾海峡海流

限于资料,我们采用诊断、半诊断和预报模式计算了该海域 1988 年夏季台湾海峡海流,综合获得以下重要结果。

(1) 海峡内水平速度分布,东侧最大,西侧次之,中间最小。速度在表层最大,由诊断、半诊断及预报计算所得表层最大流速分别为 59.1, 62.1 及 62.0 cm/s ,位于澎湖水道内,方向皆为东北向。

(2) 通过台湾海峡的流量为 $0.83 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 向东北方向流向东海。在台湾海峡南边界, 通过东、西两半边界的流量分别为 0.58×10^6 和 $0.25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。这表明, 主要流量是从澎湖水道流入。

(3) 夏季上升流主要发生在福建近岸海域, 台湾近岸上升流主要在海峡东南海域。

(四) 成功地主持黄、东海海域“入海气旋爆发性发展过程的海气相互作用”试验调查, 获得了创新研究成果

在黄、东海海域, 入海气旋发展与爆发引起海上巨大灾害, 对我国国民经济以及人民生命财产带来了巨大损失。爆发性气旋如果没有海洋提供水汽使潜热大量释放, 不可能形成。然而, 对其产生、发展的物理机制尚不十分清楚, 对其预报更是一个难题。反过来, 由于气旋的强烈发展, 也改变海洋环境状况, 影响海洋生物的生长和活动, 以及近海污染物的扩散与净化过程。因此, 对这类典型海气相互作用的研究, 无论从科学上还是从社会经济上, 以及对提高天气和海洋环境的预报准确率上都有重要意义。

1998—2000 年袁耀初主持的国家自然科学基金重点项目“黄、东海入海气旋爆发性发展过程的海气相互作用研究”, 也属国家海洋局科学研究重点项目, 并被列入中、韩、日国际合作研究项目。袁耀初与中国气象学家周明煜、秦曾灏合作研究, 圆满地按计划完成了 1999 年 6 月两个航次各项任务, 获得物理海洋学及气象学 7 个调查项目的高质量观测资料, 实现了国际合作研究, 为完成本项目打了很好基础。

该项目通过海洋和大气同步观测, 采用观测与理论分析及数值模拟相结合的方法, 获得如下突出成果与进展: ①黄、东海各流系相互作用对热通量分布有直接影响; ②观测与模式都发现在气旋发展过程中, 气旋中心区存在负的潜热和感热通量, 这与水文及环流结构的特征有直接相关; ③黑潮及其两侧暖、冷涡对气旋发展与加强所需要能量及气旋路径有重要影响; ④海洋对大气的热输送, 特别是潜热输送对气旋发展起着重要作用; 还提出海上气旋发展的新动力机制。

2002 年 6 月通过国家自然科学基金委项目验收, 项目综合评价为 A。验收专家组对项目成果鉴定意见: “以上成果在国内外还未见诸文献报道, 属首次发现。部分研究成果对入海气旋发展的预报具有实用价值”。鉴定专家组一致认为该项目的总体水平属国际先进, 部分为国际领先。

(五) 南海环流变异及其与太平洋水相互作用

1999 年以后, 袁耀初主要从事南海环流及其变异、南海与黑潮相互作用研究, 负责了 4 个重要项目(或课题)。以下阐述 4 个项目(或课题)获得的创新研究成果。

第一, 1999 年 10 月—2004 年 9 月“973”项目“中国近海环流形成变异机理、数值预测方法及对环境的影响研究”, 袁耀初负责所属课题 05: “南海季风环流及其变异机理”。①专家组成果评审一致认为, 05 课题首次成功地回收长期、深海锚碇测流系统和吕宋海峡锚碇测流系统, 对完成多个课题的目标与内容起了很重要作用, 对项目总目标的实现, 有突出贡献。锚碇测流站位于南海东北部, 成功地获得 450 m 以浅 77 天 ADCP 资料, 以及在 2 000 m 和 2 300 m 7 个月海流计资料, 对上、中层及深层流的重要特征有新的认识和发现: 日与月平均流速在 1 月最强, 9 月次强, 8 月最弱; 季节变化, 冬季流速最强, 秋季其次, 夏季最弱。自 50 m 至 2 300 m 均存在两个多月周期振动: 在 450 m 以浅水层振动周期为 75 天, 振动方向为逆时针; 在 2 000 m 与 2 300 m 水层振动周期分别为 68 天和 69 天, 振动方向也以逆时针为主。②成功地进行了吕宋海峡航次调查, 引导了中日国际合作重大研究项目。通过吕宋海峡锚碇测流发现, 在 200 m 处黑潮向西北方向入侵, 在 500 m 处黑潮流速可达 40 cm/s 以上, 而在 800 m 处南海水向东流。发现 14 天的大潮/小潮周期变化及 4~6 天周期的天气尺度振动。③采用多种模式, 揭示了南海环流在冬、夏季的季节特征及其变异的动力机理。

第二, 以下两个重大项目: (1) 袁耀初主持的国家自然科学基金国际(地区)合作和交流项目“中日吕宋海峡流量及其变异的合作研究: 观测与模式”(2005—2009 年); (2) 国家科技部国际合作项目“中美印(尼)日南海与邻近海域水交换及其变异合作研究”(2007—2010 年, 负责人: 袁耀初、方国洪)执行过程中, 于 2008 年 4 月和 10 月两次在吕宋海峡中日合作调查航次, 采用了声学层析系统这项关键性技术观测海流, 并与锚碇测流系统紧密结合, 获得了成功。对吕宋海峡(也包括整个南海)海流观测这项关键性技术属首次应用。

第三, 2009 年 1 月—2011 年 12 月参加“973”Argo 项目, 负责所属“吕宋海峡海域两侧上、中和深层热盐交换的差异和变化”课题, 主持了 3 个调查航次。特别是 2009 年 7 月 7 日—2011 年 4 月 10 日调查航次, 在锚碇站 N2 ($20^{\circ}40.441'N$, $120^{\circ}38.324'E$) 获得了 50 m 至 550 m 各水层长期、很丰富的海流观测资料, 国内在此区域调查是很少有的。通过锚碇观测、Argo 漂流标观测资料以及模式研究, 获得不少创新成果。

上述第二与第三的 3 个项目(或课题)的研究成果, 分以下两个方面: (1) 南海环流的季节变化; (2) 南海与太平洋水相互作用, 分为上、中、深层的 3 个水层阐明创新成果。

1. 南海环流的季节变化

南海环流的结构分为南海海盆尺度环流、次海盆尺度环流及中尺度涡旋。南海环流具有很强的季节变化特性。在南海存在着许多活跃的中尺度涡, 关于气旋型和反气旋型涡旋研究的综述, 请见本文集第二集评述性论文管秉贤与袁耀初(2006)《中国近海及其附近海域若干涡旋研究综述 I: 南海和台湾以东海域》及袁耀初与管秉贤(2012)《南海和台湾以东及其附近海域涡旋, 中国区域海洋学——物理海洋学》。我们采用计算结果与实际观测达到一致的许多数值研究模式: (1) 改进逆方法, (2) 发展三维海流的诊断模式, 并与上述改进逆方法相结合, (3) The P-vector method, (4) 广义随底坐标海洋模式(a generalized topography-following ocean model), (5) 自组织特征图(the self organizing map (SOM)) 及 (6) $(1/12)^{\circ}$ global HYCOM model 等计算了南海环流与吕宋海峡海流的季节与年际变化。主要结果, 以南海中部与北部海域环流为例, 给出如下。

(1) 南海中部环流重要特征。

① 在夏季及夏季风爆发前(在 1998 年南海夏季风爆发前, 即自 4 月 22 日—5 月 24 日)重要特征。

在夏季, 南海中部、越南中部外海存在较强反气旋型涡 W1 及其东北冷涡 C1, 在不同年夏季 W1 与 C1 相对位置有所变化。在越南近岸、暖涡 W1 西侧存在一支北向西边界流, 揭示了西部强化现象。在 W1 与 C1 之间存在一支逆风东南向海流。这是夏季南海中部环流的一个重要特征, 其动力机制是斜压场与地形联合作用《Joint effect of the baroclinicity and relief (JEBAR)》和在偏南季风作用下风应力和地形相互作用是产生上述夏季环流的最重要动力原因。只有考虑上述两个最重要的动力原因, 才能产生上述实际的夏季南海环流。倘若采用 Sverdrup 关系计算流速, 得到的流速的量级偏小, 至少相差一个数量级。这也表明, 夏季南海环流不满足 Sverdrup 关系。上述 W1 与 C1 在夏季时总是成对产生, 不少学者称它们为偶极子, 但 W1 强度比 C1 强度大, 因此袁耀初等(2005)称它们为准偶极子。但是, 在 1998 年南海夏季风爆发前, 即自 4 月 22 日—5 月 24 日航次, 越南以东近岸的北向沿岸流强于 1998 年夏季时北向沿岸流。在 1998 年南海夏季风爆发前这支较强的、北向的沿岸流一直可达 $17^{\circ}N$ 附近。而在 1998 年夏季时这支沿岸北向西边界流自计算海域的西南边界只能达 $14^{\circ}N$ 附近。

比较 2000 年夏季航次与 1998 年夏季航次时的南海环流系统, 可以发现在定性上两者结构十分相似, 但定量上也有不同之处。例如与 2000 年夏季航次时相比较, 1998 年夏季反气旋式涡 W1 的位置南移, 其最大流速为 56 cm/s, 小于 2000 年夏季时的最大流速 66 cm/s, 暖涡 W1 的水平尺度也要小于 2000 年夏季时暖涡 W1 的水平尺度。

② 冬季时南海中部、越南中部外海中尺度涡的特性和结构, 与夏季时相反, 但其动力原因与夏季时相同。例如, 在冬季越南近岸出现西边界南向射流, 揭示了西部强化现象。这支沿岸南向射流以东、 $114^{\circ}E$ 以西存在一个尺度大的显著气旋式环流, 其位于南自 $10^{\circ}N$ 附近北至 $16^{\circ}N$ 附近。在区域东中部存在一个尺度不大的、较弱的反气旋暖涡, 此暖水向南一直扩展到巴拉望岛西北。该反气旋涡中心约位于 $14^{\circ}N$ 。在上述强的气旋式环流涡与较弱的反气旋式环流涡之间, 存在一支强的、逆风方向的, 即偏东北方向的海流, 其流速很强。上述是冬季南海中部基本流态。产生上述基本流态的主要动力原因有以下两点: (i) 在偏东北季风作用下, 与地形变化相互作用, 一支强的逆风而上海流沿着南海中间深槽向东北方向流动, 而在西侧形成一个强的气旋式环流, 其东侧形成一个较弱的反气旋式环流。这就是产生上述基本流态的动力原因之一, 我们首次提出这个结论, 并指出, 其动力原因与冬季黄海暖流形成机制有相似

之处。(ii) 斜压场与地形变化的联合效应 (JEBAR) 也是产生上述基本流态的主要动力原因之一。

(2) 南海北部海域环流重要特征。

①在夏季南海北部环流, 受黑潮通过吕宋海峡入侵南海的影响很大。在吕宋岛以西海域存在一个反气旋式涡。在约 118°E 以西海域存在一个气旋式环流系统, 其核心是东沙群岛西南气旋式冷涡, 南海北部环流系统主要受气旋环流所支配。

②冬季时南海北部环流系统: a. 在吕宋岛西北明显存在一个气旋式环流系统, 并有 3 个冷水中心; b. 在此气旋式环流系统的一个冷水中心 (约 $19^{\circ}30'\text{N}$, $119^{\circ}30'\text{E}$) 以西, 存在一个反气旋式涡; c. 在海南岛以南出现一个暖的、反气旋式环流; d. 在南海北部, 114°E 以东、广东沿岸外侧存在一支东北向流。这是管秉贤首次指出的, 冬季时出现南海暖流。

(3) 南海环流的动力机制。

南海环流的动力机制是斜压场与地形联合作用 (JEBAR) 及在季风作用下风应力与地形相互作用是产生上述夏季环流的最重要动力原因。南海环流不满足 Sverdrup 关系。

2. 南海与太平洋水相互作用

(1) 在 400 m 以浅水层黑潮进入吕宋海峡入侵南海。

总结 400 m 以浅水层各时期黑潮进入吕宋海峡入侵南海, 发现黑潮通过吕宋海峡入侵南海的动力原因存在两种时间变化尺度, 即季节变化和年际变化尺度, 其相应动力原因分别是与东亚季风和 ENSO 变化直接相关, 即存在由于季风发生引起的季节变化和由于 ENSO 变化引起的年际变化。例如, 比较 2008 年 10 月与 2009 年夏季黑潮的入侵可以发现, 存在两种变化尺度, 即在 2008 年 10 月由季风引起的季节变化以及在 2009 年夏季由于 ENSO 影响使得黑潮上游弱流量所造成的年际变化。下面我们分别简述这两种时间变化的尺度引起的黑潮通过吕宋海峡入侵南海。

①由于东亚季风发生引起黑潮入侵的季节变化。

由于季风推动黑潮入侵南海机制, 我们从第二与第三的 3 个项目 (或课题) 的研究成果、长期锚碇测流结果以及数值研究成果都表明, 黑潮入侵南海最强发生在冬季 (12 月、1—2 月), 其次分别为春季 (3—5 月), 秋季 (9—11 月), 而最弱是在夏季 (6—8 月)。

②由于 ENSO 变化引起黑潮入侵的年际变化。

主要结果为: ①揭示黑潮在上层 (从表层至约 400 m) 通过吕宋海峡进入南海, 其流量与厄尔尼诺 (或拉尼娜) 现象紧密相关, 例如 1992 年 3 月 (厄尔尼诺年) 与 2008 年 4 月 (拉尼娜年) 黑潮通过吕宋海峡上层进入南海, 其流量分别 $6.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (参见以下 Table 列出的文献 [4]) 与 $2.66 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (参见以下 Table 列出的文献 [5]), 这表明在厄尔尼诺年黑潮通过吕宋海峡入侵南海流量比拉尼娜年大。②从锚碇测流和 Argo 漂移轨迹观测以及模式结果, 首次发现黑潮在 2009 年夏季向西北方向通过吕宋海峡入侵南海 (参见以下 Table 列出的文献 [7, 9])。分析发现斜压场与地形变化的联合效应 (JEBAR) 是 2009 年夏季黑潮入侵的重要机制。黑潮入侵年际变化是由于 2009 年 (El Niño 时期) 黑潮上游弱的流量所致。

③比较了由于季风和 ENSO 变化引起的黑潮入侵南海的两种动力机制。

基于锚碇站 N2 ($20^{\circ}40.441'\text{N}$, $120^{\circ}38.324'\text{E}$) 在 2009 年 7 月 7 日—2011 年 4 月 10 日长期海流观测结果 (以下简称为 “2009—2011 年观测”), 从 AVISO 资料集获得表层地转流以及在 2010—2011 年冬季 Argo 浮子轨迹观测结果, 结合 $(1/12)^{\circ}$ global HYCOM 模式数值计算, 我们比较了 2009—2010 年冬季 (El Niño) 和 2010—2011 年冬季 (La Niña) 期间黑潮入侵南海, 得出以下重要结果 (在本文集第四卷, 参见以下 Table 列出的文献 [8—9]): 这两个冬季黑潮都通过吕宋海峡入侵南海, 但在 2009—2010 年冬季 (简称 period-E) 黑潮入侵要比 2010—2011 年冬季 (简称 period-L) 要强。例如从表层地转流的结果可知, 2009—2010 年冬季 (El Niño) 黑潮能向西北方向入侵南海到达 118°E 以西海域, 而 2010—2011 年冬季 (La Niña) 黑潮向西入侵不能到达 118°E 海域。我们也可以从锚碇测流结果来分析, 定义 $\Delta_{\max}(z)$ 在 period-E 期间与 period-L 期间在观测深度 z 处月平均速度的纬向分量的最大

绝对值的相对差。锚碇测流观测表明 $\Delta_{\max}(z) > 0$, 这也表明在 period-E 期间黑潮入侵强于 period-L 期间。特别在深层 $\Delta_{\max}(z)$ 比在表层大。 $(1/12)^\circ$ global HYCOM 数值模式结果也与观测结果完全一致。其次, 从动力机制分析可知, 也阐明了为什么 2009—2010 年冬季 (El Niño) 黑潮入侵比 2010—2011 年冬季 (La Niña) 强的原因 (参见以下 Table 列出的文献 [8—9])。

④黑潮入侵南海的长周期变化分析。

基于上述“2009—2011 年”观测资料, 采用改进小波功率谱分析进行计算, 发现最强的功率谱密度峰出现在最主要周期为 112 天处等。从动力机制分析, 最主要周期为 112 天出现是与黑潮在吕宋海峡向西北方向入侵南海紧密地相关的, 这是首次、很有价值的发现。

(2) 中层水南海与太平洋水交换。

通过吕宋海峡 500~1 500 m 中层水南海与太平洋水交换的研究得出以下成果: 在 2008 年 10—12 月航次, 模式流和 Argo 漂流标观测资料都发现, 在 10—12 月西北风作用下, 有一个 Argo 漂流标在区域 $20^\circ 20' \sim 21^\circ 00' \text{N}$, $120^\circ 45' \sim 121^\circ 50' \text{E}$ 在表层与 1 000 m 处海流作用下, 迫使其通过吕宋海峡进入南海。进一步研究结果揭示: 在 $20^\circ 30' \text{N}$ 以北, 吕宋海峡附近中层水 (例如 1 000 m 处) 主要是西南向流或西向流, 而在 $20^\circ 10' \text{N}$ 以南, 则是东南向流。但是, 通过吕宋海峡中层水其净流量还是向东方向。这一成果是对以前“吕宋海峡三明治结构”理论 (认为南海中层水总是向东流向太平洋) 的一个发展。

(3) 在 1 500 m 至海底深层南海与太平洋水交换。

在 1 500 m 至海底深层, 模式流表明, 太平洋水通过吕宋海峡, 向西流向南海。例如在 2008 年春季航次, 其向西流量为 $1.74 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (参见以下 Table 列出的文献 [5])。该值与近来其他研究得到的深层流量值较为接近。

(4) 在各时期南海与太平洋通过吕宋海峡上、中、下层水交换的流量。参见下表。

Table Existing estimates of zonal volume transports through the Luzon Strait during spring, summer, autumn and winter (unit : $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, the negative value: westward). *: El Niño years, **: La Niña years, ***: the normal

Source	Upper layer		Middle layer			Deeper layer			Total	Period and model or observation
	0~400 m	0~500 m	400~1 200 m	500~1 200 m	1 200~1 500 m	1 500 m~bottom	1 500~2 000 m	2 000 m~bottom		
Yuan et al. (2014a)									-2.15	2009 summer *
Yuan et al. (2012b)									-4.0	2008 October ***
Yuan et al. (2012a)		-2.66		0.74	-1.0	-1.74			-4.66	2008 April **
Yuan et al. (2009)	-6.6		1.9		0.7		1.1	-0.1	-3.0	1992 March *
Yuan et al. (2008a)	-3.5		0.22		-0.02	-0.20			-3.5	1994 Aug. 28-Sep. 10 *
Yuan et al. (2008b)	-0.82			2.4						2002 spring ***
Liao et al. (2008)	-10.3		2.1		1.0		0			1998 Nov 28-Dec. 27 **

- [1] Yuan Y C, Liao G H, Yang C H. The Kuroshio near the Luzon Strait and circulation in the northern South China Sea during August and September 1994. *Journal of Oceanography*, 2008a, 64 (5): 777-788.
- [2] Yuan Y C, Liao G H, Guan W B, et al. The circulation in the upper and middle layers of the Luzon Strait during spring 2002. *J Geophys Res*, 2008b, 113, C06004, doi: 10.1029/2007JC004546.
- [3] Liao G H, Yuan Y C, Xu X H. Three Dimensional Diagnostic Study of the Circulation in the South China Sea during winter 1998. *Journal of Oceanography*, 2008, 64 (5): 803-814.
- [4] Yuan Y C, Liao G H, Yang C H. A diagnostic calculation of the circulation in the upper and middle layers of the Luzon Strait and the northern South China Sea during March 1992. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2009, 47: 86-113.
- [5] Yuan Y C, Liao G H, Kaneko A, et al. Currents in the Luzon Strait obtained from moored ADCP observations and a diagnostic calculation of circulation in spring 2008. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2012a, 58: 20-43.
- [6] Yuan Y C, Liao G H, Yang C H, et al. Currents in the Luzon Strait evidenced by CTD and Argo observations and a diagnostic model in October 2008. *Atmosphere-Ocean*, 2012b, 50 (sup.): 27-39.
- [7] Yuan Y C, Liao G H, Yang C H, et al. Summer Kuroshio Intrusion through the Luzon Strait confirmed from observations and a diagnostic model in summer 2009. *Progress in Oceanography*, 2014a, 121: 44-59.
- [8] Yuan Y C, Tseng Y H, Yang C H, et al. Variation in the Kuroshio intrusion: Modeling and interpretation of observations collected around the Luzon Strait from July, 2009 to March, 2011. *J Geophys Res: Oceans*, 2014b, 119, doi: 10.1002/2013JC009776, 3447-3463.
- [9] Yuan Yaochu, Zhu Xiao-Hua, Zhou Feng. Progress of studies in China from July 2010 to May 2015 on the influence of the Kuroshio on neighboring Chinese Seas and the Ryukyu Current. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34 (12): 1-10.

上述前 8 篇论文都已在本论文集第四卷 (英文版) Chapter 2 中, 而第 9 篇论文已在第四卷 Chapter 5 中。

(六) 菲律宾以东海域环流

根据 1986—1989 年中美 TOGA 调查 6 个航次的调查资料以及 1991 年 11—12 月“向阳红五号”调查船我国首次 WOCE 调查资料, 采用改进逆方法, 计算了菲律宾以东海域环流, 着重研究了黑潮源地区域、北赤道及棉兰老海的三大主要海流。我们以 TOGA 自 1986 年 2 月至 1989 年 4—5 月的 6 个航次为例, 即 1986 年 2 月, 1986 年 11 月, 1987 年 9—10 月, 1988 年 4—5 月, 1988 年 10 月及 1989 年 12 月航次, 研究这三大主要海流。注意到, 在上述调查期间, 1986 年 10 月至 1987 年 12 月为 El Niño 时期, 而 1988 年 4 月至 1989 年 5 月为 La Niña 时期。因此, 第二与第三两个航次为 El Niño 时期, 而第四、五、六航次则为 La Niña 时期。我们的核心问题是研究上述三大海流的变化与 ENSO 的关系, 采用改进逆方法, 得到了以下 3 个重要结果。

(1) 在 130°E 上北道流的分叉点与 ENSO 的关系。

第二航次至第五航次, 分叉点位置分别在 15.6°N, 14.3°N, 12.6°N, 14.3°N 与 11.2°N。在 1986 年 10 月至 1987 年 12 月 El Niño 时期, 分叉点平均位置为 15°N, 而在 1988 年 4 月至 1989 年 5 月 La Niña 时期平均位置为 12.7°N。这表明在 El Niño 时期分叉点位置向北移, 而 La Niña 时期分叉点位置则向南移。

(2) 关于这三大海流的流量分配。

以第二、四两航次为例, 第二航次 (El Niño 时期), 北赤道流、黑潮和棉兰老流的流量分别为 $69.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (向西方向), $34.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (向北) 和 $35.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (向南), 而第四航次 (La Niña 时期) 流量分别为 $72.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (向西), $37.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (向北) 和 $35.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ (向南)。

(3) 综合上述可知, 在 El Niño (La Niña) 时期, 分叉点位置向北 (南) 移, 黑潮流量减小 (增大), 棉兰老流流量增大 (减小)。