

黑潮研究进展分析*

张灿影¹ 冯志刚¹ 张晓琨² 张启龙^{** 1}

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 国家海洋局第一研究所, 青岛 266061)

摘要: 黑潮是北太平洋西边界强流, 具有高温高盐特征, 其季节变化和年际变化对我国近海的环流结构和温盐分布起到了决定性作用。本文简要概述了黑潮相关研究计划, 并利用 Netdraw 软件对黑潮研究文献的关键词进行聚类分析, 发现黑潮的研究内容主要围绕东海、南海、海表温度、黑潮大弯曲和黑潮延伸体展开, 然后结合文献解读探讨了黑潮的研究进展。最后, 为了更深入地开展黑潮的调查研究, 提高我国的黑潮研究水平和实力, 提出了四条建议: (1) 注重海洋再分析资料数据集的建设; (2) 研制具有自主知识产权、适合我国近海的高分辨率海洋环流模式; (3) 加大海洋观测、探测等基础设施研发的投入; (4) 加强国际合作, 开展全流域黑潮调查研究。

关键词: 黑潮; 东海; 南海; 黑潮大弯曲; 黑潮延伸体; 海表温度

中图分类号: P67 文献标识码: A doi: 10.16507/j.issn.1006-6055.2017.03.002

Analysis on Research Progress of Kuroshio*

ZHANG Canying¹ FENG Zhigang¹ ZHANG Xiaokun² ZHANG Qilong^{** 1}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;
2. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: Kuroshio is a strong Western Boundary Current in Pacific, with a feature of high temperature and high salinity whose seasonal and interannual changes will play a decisive role in the structure of the circulation and thermohaline distribution in China's coastal waters. In this paper, international strategies and projects on the Kuroshio are analyzed. In addition, keyword clustering analysis is conducted using the Netdraw software, and it is found that the Kuroshio research refer to the East China Sea, the South China Sea, sea surface temperature, Kuroshio large meander and Kuroshio extension. Then combining with literature interpretation, the research progress of kuroshio is summarized. In order to conduct in-depth investigation and study of the kuroshio, and raise the Kuroshio research level and the power of our country, four advice are put forward in the end, including (1) Focusing on the construction of oceanic reanalysis datasets. (2) Developing proprietary and appropriate high resolution ocean circulation model. (3) Increasing input in the development of ocean observations and detection infrastructure. (4) Strengthening international cooperation and carrying out the whole basin Kuroshio investigation and research.

Key words: Kuroshio; East China Sea; South China Sea; Kuroshio large meander; Kuroshio extension; sea surface temperature

1 引言

黑潮(Kuroshio)因其海水深蓝,远看似黑色,故而得名。它以高温、高盐、流幅窄、流速强、流量大而著称,是北太平洋副热带环流系统中最重要的组成部分。黑潮自菲律宾以东海域($11^{\circ} \sim 14.5^{\circ}N$)从北赤道流(North Equatorial Current, NEC)分离后,便沿着吕宋岛东岸北上,越过吕宋海峡,从台湾岛和石垣岛之间进入东海,然后沿着东海大陆架坡折处流向

东北,在日本九州岛西南约 $29^{\circ}N$ 、 $128^{\circ}E$ 附近折向东,经吐噶喇海峡流出东海,进入日本以南的太平洋海域,并于 $35^{\circ}N$ 、 $141^{\circ}E$ 附近离开日本海岸向东流去,成为黑潮延伸体(或续流)。值得指出的是,黑潮在流经吕宋海峡时以分支或流套的形式入侵南海,而在台湾东北部和日本九州西南部各分出一个分支,形成台湾暖流(Taiwan Warm Current, TWC)和对马暖流(Tsushima Warm Current, TSWC)。若按照其所在的地理位置来划分的话,狭义的黑潮应由源区黑潮、东海黑潮和日本以南黑潮组成,而广义的黑潮则还应包括黑潮续流(图1)。源区黑潮位于吕宋岛和台湾岛以东、 $130^{\circ}E$ 以西海域^[1],是黑潮的源头,也是热带太平洋向高纬地区输送水量、热量和能量的主要通道。通常,流经东海和日本以南海域的

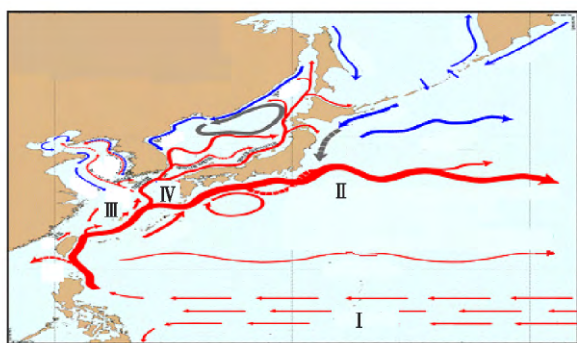
2017-01-09 收稿 2017-03-02 接受 2017-03-09 网络发表

* 中国科学院战略性先导科技专项“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”(WPOS)子课题(XDA11020306)资助

** 通讯作者, E-mail: qzhang@qdio.ac.cn; Tel: 0532-82898508

黑潮分别被称之为东海黑潮和日本以南黑潮,而黑潮续流则指离开日本海岸继续向东流的那一段,最东可达 160°E 附近。于是,从地理范围看,整个黑潮系统南北跨越约 15 个纬度($20^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}$),东西则跨越约 40 个经度($120^{\circ} \sim 160^{\circ}\text{E}$)。

黑潮作为沟通西太平洋与东海、南海的主要海流^[2],对中国海的环流、热盐输运及多尺度过程的相互作用都起着非常重要的作用,其季节和年际变化也对我国的气候有很大影响^[3]。了解黑潮的变动及其影响是预测气候与加强渔业资源管理的基础。为此,本文通过分析国际、国家或地区的黑潮战略计划部署实施情况,并结合科研论文产出的文献计量分析,探讨了黑潮研究进展,以期为我国黑潮科研活动的开展以及研究战略的制定提供参考依据。



I 北赤道流, II 黑潮, III 台湾暖流, IV 对马暖流

图 1 黑潮流系示意图(修改自文献[4])

2 国际及国家或地区的黑潮研究计划概述

国际上对黑潮的调查研究活动最早可追溯到 1914 年,但大范围且较系统的海洋调查始于 20 世纪中期。在 1965 年以前的一些专题调查中,唯有 1914 ~ 1937 年间在苏澳—与那国岛断面进行的调查较为系统且持续时间也较长^[5],而在 1925 ~ 1928 年、1933 ~ 1942 年、1948 ~ 1949 年、1956 年、1958 年和 1959 年完成的几次大面调查却不够完整、系统,而且这些调查大都位于台湾岛附近海域^[1]。

2.1 国际研究计划

世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)由世界气象组织(WMO)与国际科学联合会(ICSU)联合主持,以物理气候系统为主要研究对象,制定并实施了一系列的核心计划,其中有一部分研究项目涉及到黑潮。譬如,世界大洋环流试验(World Ocean Circulation Experiment, WOCE)(1990 ~ 2000)中涉及到太平洋西部边界流研究的内容主要包括:温盐结构和海平面的基本特征及其

变异;海流及其输运的分析和变化;黑潮锋面和锋面涡的特征;黑潮路径及大弯曲的变化特点^[6]。而气候变率和可预报性研究(CLIVAR)计划(1993 ~ 2008)则重点关注黑潮延伸体海气相互作用在气候系统中的作用。

全球海洋观测网(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, Argo)是“全球海洋观测业务系统”(GOOS)计划中一个针对深海区温盐结构进行观测的子计划,在黑潮研究方面,主要支持黑潮延伸体海气相互作用和海气热交换研究。

黑潮及邻近海域的合作研究(Cooperative Study of The Kuroshio And Adjacent Regions, CSK)计划是针对黑潮开展的一项规模较大的国际合作调查研究项目。在 1965 ~ 1977 年间,该项目的调查范围几乎遍及西北太平洋的中、低纬海域,包括日本海和我国黄、东、南海,其规模在西北太平洋合作调查史上是前所未有的,获得了丰硕的成果,并出版了大量的资料报告。

中日黑潮合作调查研究项目主要包括 1986 ~ 1992 年间实施的中日黑潮合作调查研究项目和 1995 ~ 1998 年间开展的中日副热带环流合作调查研究项目。在 1986 ~ 1992 年间,中日双方通过深入的调查研究,基本弄清了东海黑潮的流速结构、流量及其变化特征,也基本探明了台湾暖流的结构、动力特征和季节变化特点,从而加深了对东海陆架环流的认识。在 1995 ~ 1998 年间,中日双方围绕黑潮源头副热带区海洋环流的特性及其变化规律进行了联合调查研究,重点分析了黑潮源区的水文结构与海流状况及其与东海黑潮的关系、副热带逆流的特征与变异以及琉球以东海域的西边界流,并研究了调查海区的海气相互作用及其对气候的影响以及该海区的生物生产机制。

2.2 国家或地区研究计划

自上世纪中叶以来,除上述国际研究计划外,中国(包括台湾省)和美国等国家还各自组织实施了大量的黑潮研究计划和项目。这些研究计划和项目的实施,不仅获得了大量的现场调查资料,还在黑潮的变异与机制、黑潮对邻近海域海洋环境的影响、黑潮流域海气相互作用等方面取得了一大批重要研究成果。

在美国,国家科学基金会(NSF)、美国海军研究室(ONR)和美国海洋大气管理局(NOAA)是海洋科学基础研究的主要资助方。2004 年,NSF 资助了黑

潮延伸体系统研究(KESS)项目,旨在研究黑潮延伸体区的环流结构、路径变化及其相关物理过程,识别和量化黑潮延伸体和逆流相互作用的动力和热力学机制^[7]。ONR 资助的黑潮与棉兰老流的起源探测计划(Origins of Kuroshio and Mindanao Current, OK-MC)(2011~2014 年)主要对黑潮和棉兰老流区的物质、能量运输和流量模式、温盐特性以及涡旋对平均流的影响等方面进行了调查研究。

我国对黑潮的调查研究始于 20 世纪 80 年代初期,特别在中日黑潮合作调查研究项目实施之后,我国对黑潮研究的投入持续加大。除了国家自然科学基金委员会资助了多个有关黑潮的专题研究项目外,科技部也实施了一些涉及黑潮研究的国家重点基础研究发展计划(973 项目),并取得了许多重要研究成果。自 2013 年以来,中国科学院也组织实施了战略性先导科技专项(A 类“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响(Western Pacific Ocean System: Structure, Dynamics and Consequences, WPOS)”之“黑潮及其变异对中国近海生态系统的影响”项目。

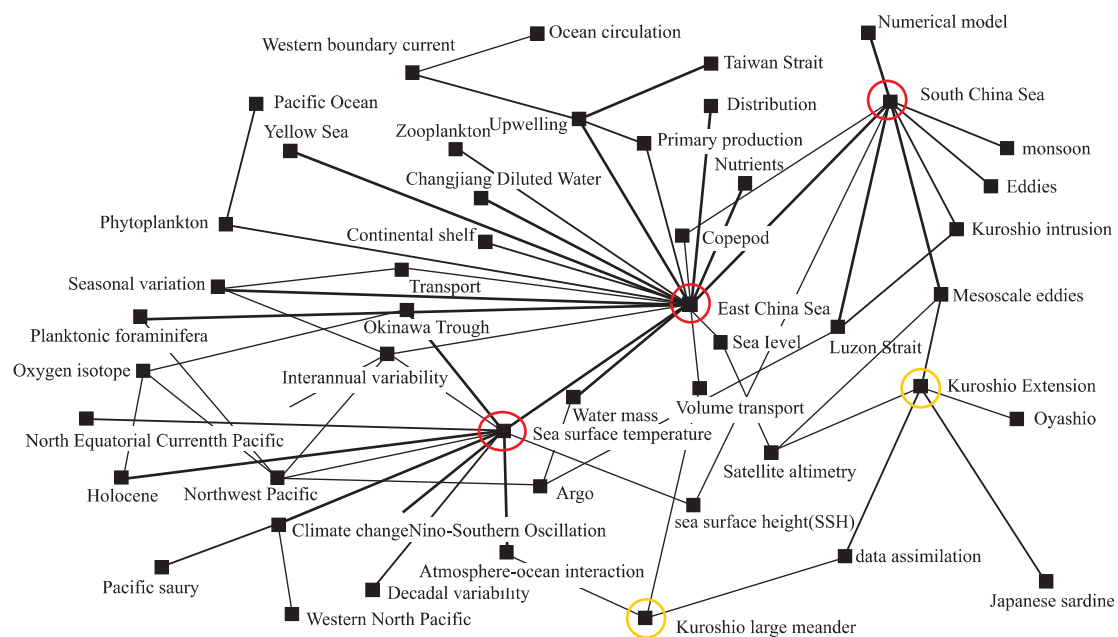
中国台湾从 20 世纪 60 年代初便开展了台湾以东及其附近海域黑潮的调查研究。在 1989~2000 年间,实施了旨在研究东海与黑潮之间相互作用以及物质交换过程的 KEEP(Kuroshio Edge Exchange Process)计划。该计划是全球联合海洋通量研究

(Joint Global Ocean Flux Study, JGOFS)计划的一部分,主要包括台湾东北部黑潮锋与涡旋、黑潮逆流、台湾周围海域上升流、水交换等方面的研究内容,重点调查研究黑潮与东海大陆架间的物质交换过程,尤其是碳^[8,9]。近期实施的黑潮通量变化探测计划(OKTV)(2012 年 8 月~2015 年 7 月)是由台湾科技部资助、台湾大学、海洋大学、台湾师范大学和台湾交通大学参加的黑潮主题研究项目。OKTV 的研究目标为:观测与探讨台湾以东黑潮的变动与动力过程;量化黑潮各项物理及生地化参数。

3 学术研究进展分析

为了解黑潮的研究现状,本文以美国信息科学研究所(ISI)的科学引文索引(SCIE)数据库为基础,利用文献计量工具对国际黑潮研究文献进行分析。检索策略是 $ts = Kuroshio^*$,文献类型为 article、proceedings paper 和 review,检索时间为 2016 年 10 月 20 日。在得到初步检索结果后,将数据进行合并、去重和清洗处理,最终得到 1952~2015 年间 SCIE 数据库中黑潮相关研究论文 2776 篇。

本文利用 NetDraw 软件对黑潮研究关键词进行聚类共现分析,并采用 Pathfinder 算法对数据进行了优化处理,即消除网络节点之间较为错综复杂而又相对次要的关联,从而提取出能够反映各关键词之间主要联系的网络关系,结果如图 2 所示。由图 2 可



连线粗细表示关键词间相关度的大小。

图 2 黑潮研究关键词热点分析

看出,黑潮研究关键词系统中共有三个中心点:东海(East China Sea)、南海(South China Sea)、海表温度(Sea Surface Temperature, SST),而次级中心点为黑潮大弯曲(Kuroshio Large Meander)和黑潮延伸体(Kuroshio Extension)。

3.1 东海

在东海,与黑潮相关的关键词包括海表温度(Sea Surface Temperature)、上升流(Upwelling)、季节变化(Seasonal Variation)、水团(Water Mass)、浮游动物(Zooplankton)、分布(Distribution)、营养物质(Nutrients)、黄海(Yellow Sea)、长江冲淡水(Changjiang Diluted Water)、大陆架(Continental Shelf)等。

前已提及,黑潮进入东海后,在台湾东北部和日本九州西南部各分出一个分支,形成台湾暖流和对马暖流。而对马暖流在济州岛东南方又分出一个分支,进入黄海,形成黄海暖流。这些分支(台湾暖流、对马暖流和黄海暖流)将黑潮的能量、热量和物质输送到东海陆架、黄海甚至渤海。不仅如此,黑潮的主轴和流量皆存在着显著的季节和年际变化,并时常与东海陆架发生强烈的水交换。因此,黑潮及其分支的变异以及与陆架水的物质交换和能量转化将极大地影响东海和黄海的海洋环境状况、物质和能量运输,不仅会改变东海的环流结构、水团性质和热盐分布,还将对陆架区的营养物质以及其它生物化学物质的通量和分布产生影响,从而改变近海的生物多样性和生态系统的结构与功能^[10-12]。从关键词共现图并结合文献解读分析可知,关于东海黑潮的研究内容主要集中在以下两方面。

3.1.1 黑潮路径、流量和热输送的时空变化特征与机制

黑潮进入东海后沿着冲绳海槽与大陆架之间的陆坡向东北方向流动,但在大尺度气旋式涡旋的影响下,黑潮水有时会出现两种不同的运动路径:反气旋式的北部路径和气旋式的南部路径,但北部路径并不稳定,大约每隔1~3个月便会发生一次向南部路径转变的现象^[13,14]。

如果将流经台湾岛以东水道(ETS)和吐噶喇海峡(TS)的黑潮分别视为东海黑潮的上、下游部分,那么流经PN断面的黑潮则视为东海黑潮的中部^[15](图3)。大量的资料分析表明,黑潮流量存在着显著的多尺度时空变化。在上游区,黑潮的年平均

均流量一般在20~33 Sv($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)之间,但流量的变化较为复杂,除有约100 d的季节内振荡外^[16],还有夏强秋冬弱的季节变化^[17]和2~5 a的年际变化^[18]。在中部,黑潮的年平均流量为24.3 Sv^[19],而且存在着夏强秋弱的季节变化^[19,20]和2~8 a的年际变化^[19,21]。此外,黑潮流量还有25 a的年代际变化和线性递增趋势,在1956~2005年间,流量增加了8.7 Sv^[19]。在下游区,黑潮的平均流量为24.1 Sv,也有夏强冬弱的季节特征,但其年际变化的主周期为4 a^[22]。

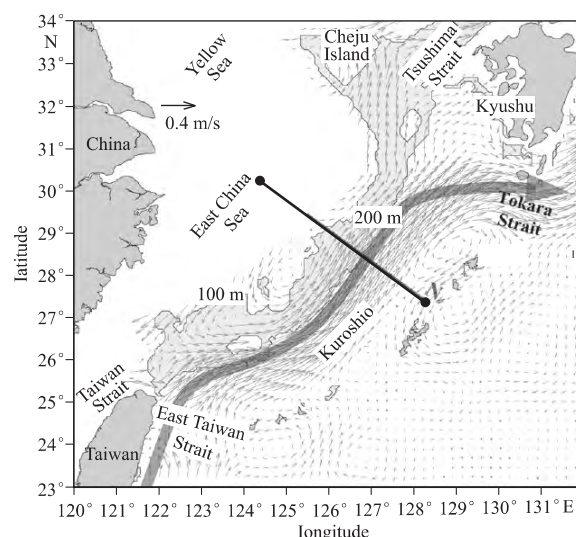


图3 东海黑潮上(ETS)、中(PN)、下游(TS)的位置^[15]

东海黑潮的时空变化机制较为复杂,且多种多样。黑潮流量的季节内振荡主要是由来自于副热带西北太平洋的中尺度涡旋(包括气旋式涡旋和反气旋式涡旋)导致的。气旋式涡旋会引起黑潮主轴的离岸弯曲,使得部分黑潮水分流到琉球岛链以东,从而降低了通过台湾以东进入东海的黑潮流量,而反气旋式涡旋则会使得黑潮东侧的水位升高,因而增加了黑潮进入东海的流量^[23]。黑潮流量的季节变化主要与季风和密度场的季节变动有关。在秋冬季节,东海陆架盛行强而冷的东北风,它不仅会产生强的西向埃克曼输送,诱导黑潮水向陆架扩展,而且还会从海面吸取大量的热量,导致海面冷却,使得陆架区的海水密度明显增大,导致更多的黑潮水入侵陆架^[24]。黑潮主流的流量随之减弱,而在夏季,暖湿的偏南风有利于更多的黑潮水进入东海,但不利于黑潮入侵陆架,于是黑潮流量增强。黑潮流量和热输送的年际和年代际变化分别与黑潮流域上空的经向风异常和太平洋年代际振荡(PDO)有关。当前期

黑潮流域上空盛行偏南(北)风时,黑潮将增强(减弱),黑潮流量和热输送皆增多(减少),而在前期 PDO 指数处于偏高(低)时期,黑潮流量和热输送皆偏多(少)^[19-25]。但与之不同的是,黑潮下游处流量的年际变化主要是由黑潮的弯曲导致的^[26]。

3.1.2 黑潮向东海陆架的入侵路径及其水交换

黑潮经台湾岛以东进入东海后,因其西倾的等压面失去了台湾岛的“支撑”而发生空间上的地转调整,因而在台湾东北部出现了向东海陆架的入侵^[27],并形成一分支,即人们所熟知的台湾暖流。此外,黑潮在沿着陆坡向东北流动过程中,大约在九州西南部的 29°N、128°E 附近开始转向,其中大部分黑潮水转向东流,经吐噶喇海峡返回太平洋,而少部分则流向北,形成一分支进入对马海峡,成为对马暖流^[28]。如果将台湾暖流和对马暖流认为是黑潮向陆架的入侵路径,那么东海黑潮向陆架的入侵主要发生在台湾东北部和日本九州西南部海域。

在台湾东北部海域,黑潮在表层的入侵路径主要有两条:一条为沿台湾岛北岸的西北向入侵,而另一条则由陆架坡折的直接进入(图 4),但前者主要出现在冬季,而后者则全年都存在^[29]。可是,由于缺乏长时间、大范围的测流资料,人们大都利用水文调查资料和数值模拟的示踪物实验来研究黑潮次表层水的入侵路径及其变动问题。苏纪兰等^[30]通过水团特征分析发现,春夏季黑潮次表层水在台湾东北部的入侵途径一般有两处:一处较靠近台湾岛,而另一处则在彭佳屿至钓鱼岛之间。从台湾以东释放的示踪物所占据的区域和浓度可知,黑潮次表层水主要从台湾东北部的深层入侵陆架^[31],而杨德周等^[32]则依据示踪物的运移轨迹将黑潮次表层水的

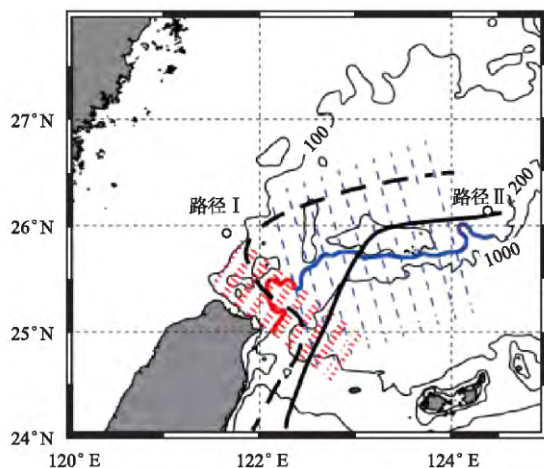


图 4 基于海表漂流浮标轨迹得到的黑潮入侵陆架的路径^[29]

入侵路径命名为台湾东北部黑潮底部分支流(KBBCNT)(图 5)。

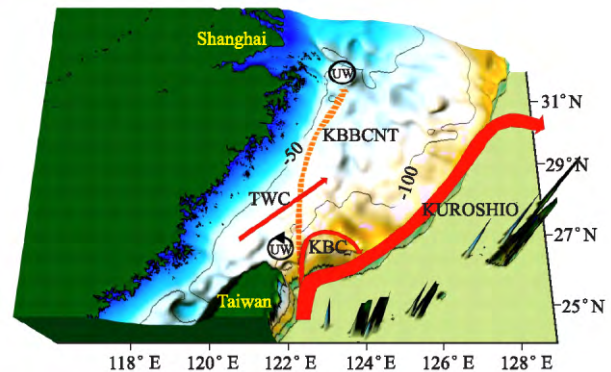
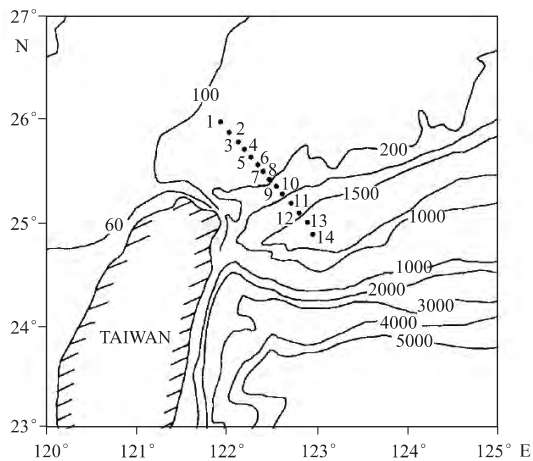


图 5 台湾东北部黑潮入侵的新路径(KBBCNT)^[32]

在日本九州西部海域,黑潮向陆架的入侵主要是通过其对马暖流来实现的。由于对马暖流是黑潮在九州西南部的一个北向分支^[1],因此从它的强弱变化便能较好地了解黑潮在东海东北部的入侵行为。对马暖流从东海东北部开始向北流动,然后通过对马海峡进入日本海,最后大部分海水通过津轻海峡(小部分经宗谷海峡)流入北太平洋。在九州西部,黑潮北向分支的流量约为 4.0 Sv^[33],而对马暖流在对马海峡的流量则为 1.8 Sv^[15]。

如果用通过 200 m 等深线的黑潮通量作为衡量黑潮入侵指标的话,那么在台湾以北至九州以西海域皆有黑潮向陆架入侵的现象,但存在着季节尺度的时空特征:冬季全流域的入侵最强(1.69 Sv),而夏季则最弱(0.48 Sv);在空间上,台湾东北部的黑潮入侵较强,而九州西南部的入侵则较弱^[34]。

毋庸置疑,黑潮在向陆架入侵的同时,还与陆架水进行水交换。但因缺乏大量的有针对性的调查资料,有关黑潮与东海陆架水交换的研究尚不够深入。早期的研究大多用 T-S 多边形混合百分比法来探讨东海陆架处水团间的混合过程^[35],比如 Chen 等^[36]利用此法较为详细地研究了 1988 年 9 月至 1989 年 12 月间黑潮与陆架水团间的交换过程(图 6 为调查站位)。结果发现,在台湾东北部主要有四个水团参与了黑潮与陆架的水交换,但各水团的作用有所不同。在东海陆架上,表层陆架水所占的比例由 9 月的 70%~80% 减少到 12 月的 20%,而底层陆架水则由 9 月的 10% 减少到 12 月的几乎为零;陆架水的减少引起了黑潮水的大量入侵,9 月黑潮表层水、黑潮热带水和黑潮中层水在陆架上的比例分别为 10%、50% 和 30%,而在 12 月则分别是 30%~50%、30% 和 10%~30%。

图6 台湾东北部海域的调查站位^[36]

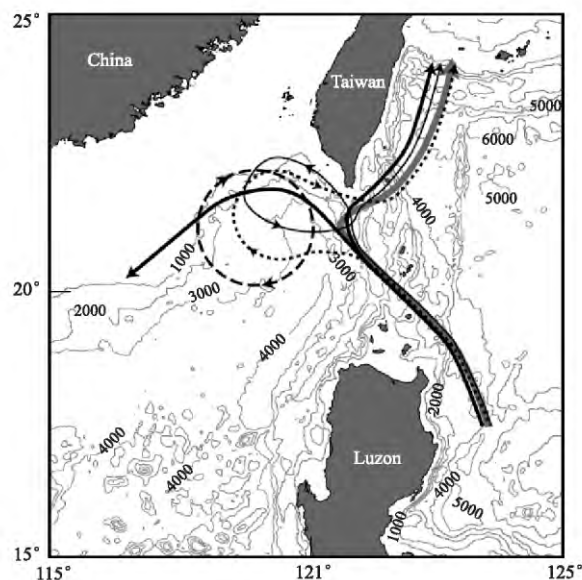
3.2 南海

在南海,与黑潮相关的关键词包括黑潮入侵(Kuroshio Intrusion)、中尺度涡(Mesoscale Eddies)、吕宋海峡(Luzon Strait)、分支(Branch)、数值模型(Numerical Model)和季风(Monsoon)等。南海是西太平洋最大的边缘海,也是一个半封闭的深水海盆,其跨度大约为 $0^{\circ} \sim 23^{\circ} \text{N}$ 、 $99^{\circ} \sim 121^{\circ} \text{E}$,面积约达 350万 km^2 ,平均水深逾 1800m ,最深可达 5420m 。它通过台湾海峡、吕宋海峡、民都洛海峡和巴拉巴克海峡、邦加海峡、加斯伯海峡和卡里马塔海峡、马六甲海峡分别与东海、西太平洋、苏禄海、爪哇海及印度洋相通。南海岛屿众多,海底地形复杂多样,既有宽广的大陆架,又有险峻的大陆坡和辽阔的深海盆地。黑潮在流经吕宋海峡时会发生形变并入侵南海,与南海进行质量、动量和能量的交换,从而对南海的温盐特征、环流结构和生态系统产生重要影响^[37]。黑潮与南海的水交换主要是通过吕宋海峡进行的,是黑潮影响南海最直接的通道^[38]。从关键词共现图,并结合文献解读分析可知,在南海有关黑潮的研究内容主要如下。

3.2.1 黑潮入侵南海的方式和路径

关于黑潮对南海的影响,是当前争论最多的问题之一,主要集中在黑潮以何种方式进入南海、黑潮与南海的水交换以及黑潮入侵南海的动力机制等方面。黑潮在流经吕宋海峡时,经常会入侵南海,并与南海发生强烈的水交换,但黑潮入侵南海的方式和路径尚未达成共识,目前主要有三种观点:南海的黑潮分支、流套和流环^[39](图7)。

基于 SST、海面高度等资料,Caruso 等^[39]指出,黑潮入侵南海的形态和路径存在着明显的年际变

图7 黑潮入侵南海的路径示意图^[39]

化,在冬季尤其如此。当黑潮在吕宋海峡中部入侵时,便会在南海北部形成一个反气旋流套,可是在某些年的冬季,黑潮会在吕宋海峡北部入侵,并将出现一气旋式流套。

吕宋海峡是沟通西北太平洋和南海的重要通道,其东侧海域属于北太平洋副热带逆流区(Sub-Tropical Countercurrent, STCC),该区域涡旋多发,是北太平洋海域继黑潮延伸体之后的第二大涡旋活跃区^[40]。当中尺度涡旋西传到黑潮附近时,不仅会导致黑潮的流态发生形变,而且也会对黑潮入侵南海的流量产生重要影响^[41]。不仅如此,中尺度涡旋还会使黑潮入侵南海的方式发生改变^[42]。当强度较大的涡旋靠近吕宋海峡时,此处的黑潮路径将从流套(Looping)或脱落旋涡(Eddy Shedding)态转变为跨越(Leaping)态^[43]。

3.2.2 黑潮入侵南海体积输送的季节和年际变化

黑潮不仅在入侵南海的方式和路径上有所不同,而且在入侵时间上也有差异。黄企洲^[44]指出,黑潮在吕宋海峡的体积输送(Luzon Strait Volume Transport, LST) ($0 \sim 1200 \text{m}$) 冬季最大,夏季最小。Wyrki^[45]和 Nitani^[1]都认为,当南海及其邻近海域盛行东北风时,黑潮将入侵南海,而转为西南风时黑潮则不再入侵。这一季节入侵特征得到了其他学者的证实^[46, 47]。可是,另外一些学者却认为,黑潮终年入侵南海。Chu P C 等^[48]利用气候态水文资料估

计了黑潮在吕宋海峡的体积输送并指出,黑潮全年都入侵南海,其中 2 月输送量最大(13.7 Sv),而 9 月最小(1.4 Sv)。曲堂栋等^[49]基于历史温度剖面资料也得到了类似的结果,但输送量却有所不同:在 1~2 月间输送量最大,为 5.3 Sv,而在 6~7 月间输送量最小,仅 0.2 Sv。

黑潮入侵南海的体积输送还存在着显著的年际变化。曲堂栋等^[50]基于高分辨率的海洋环流模式的模拟结果得出,黑潮经吕宋海峡向南海的体积输送存在着较显著的年际变化(其变幅为 3Sv),并与厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)有密切的联系。其中,在厄尔尼诺(El Niño)期间 LST 增强,而在拉尼娜(La Niña)期间则减弱。这些结果也得到了同化数据的验证^[51]。

3.2.3 黑潮入侵南海的影响因素

黑潮入侵南海的季节和年际变化主要受风应力、北赤道流分叉以及 ENSO 等因素的影响。在季节变化方面,冬季,强盛的东北季风阻碍了黑潮主流的北上,因而有利于黑潮水入侵南海,而夏季的西南季风则增强了黑潮主流的北上势力,因而减弱了黑潮水的入侵。在年际变化方面,黑潮入侵南海的输送量与北赤道流的分叉位置变动有很好的对应关系。当北赤道流的分叉点偏南时,吕宋海峡东侧的黑潮输送量增大,不利于黑潮入侵南海,LST 减弱;反之,当北赤道流的分叉点偏北时,吕宋海峡东侧的黑潮输送量减小,有利于黑潮入侵南海,LST 增强^[52-54]。而北赤道流分叉点位置的变动则与 ENSO 和 PDO 有关^[52,55,56]。

3.3 海表温度(SST)

与 SST 相关的关键词包括气候变化(Climate Change)、年代际变化(Decadal Variability)、海气相互作用(Atmosphere Ocean Interaction)、厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、冲绳海槽(Okinawa Trough)和北赤道流(North Equatorial Current)等。SST 是表征黑潮热状态的主要指标之一,通过它可以研究黑潮区的海气相互作用、黑潮变化对降水的影响过程、黑潮与全球变暖和气候变化的关系,以及黑潮与 ENSO 和 PDO 的相关性等。从关键词共现图并结合文献解读分析可知,关于黑潮 SST 的研究内容主要集中在以下两方面。

3.3.1 黑潮区 SST 的时空变化特征与机制

前已提及,黑潮南北跨越达 15 个纬度(20° ~

35°N),而东西跨越则为 40 个经度(120° ~ 160°E)。在如此宽广的海域,黑潮流域的 SST 除了受黑潮本身的影响外,还受太阳辐射、风场、邻近水团、中尺度涡旋等因素的影响。因此,黑潮 SST 存在着很强的时空变化,在东海、日本以南海域和黑潮延伸体 SST 的变化尤为显著。

在 1960~2007 年间,东海黑潮区(22°~34°N, 122°~136°E)的 SST 存在着显著的多时间尺度(季节、年际、年代际和长期变化)的变化特征。其中, SST 的气候态呈夏季高(8 月最高,为 27.2℃)、冬季低(2 月最低,为 17.8℃)的季节变化; SST 除了有 2~7 a 的年际变化外,还有 10~14 a 和 30~50 a 的年代际振荡,而且在 20 世纪 90 年代以后呈线性递增趋势。时间滞后相关分析表明,东海黑潮 SST 的年际变化主要是由 ENSO 引起的,而其 30~50 a 的振荡则是对全球变暖的响应^[57]。

在日本以南海域,黑潮经常发生大弯曲,导致该海域的环流结构和水文状况发生剧烈的变化,而黑潮延伸区则是整个北太平洋中涡动动能最大的海域,也是海洋向大气输送净热通量最大的源。Hosoda^[58]研究表明,虽然海表温度异常主要受到海洋干扰,譬如黑潮延伸体处中尺度涡旋的影响,但 SST 的短期异常变化主要受大气强迫的影响。王闪闪等^[59]选用这两个区的 SST,定义了黑潮指数(KI),分析了黑潮下游段(日本以南至黑潮延伸区) SST 的变化特征。结果表明,在 1941~2009 年间, KI 具有准 3 a 和 7 a 的年际振荡和准 20 a 的年代际变化,并在 1975 年前后经历了一次气候跃变。在 1975 年之前, KI 主要为负值,而之后则基本为正值。进一步分析表明, KI 的年际变化主要是由 ENSO 引起的,而其年代际变化则与 PDO 有关^[59]。

3.3.2 黑潮 SST 对气候的影响

由于黑潮具有暖流特征,不仅将热带太平洋的暖水向高纬地区输送,同时还向大气释放热量,从而对大气环流和我国东部地区的气候(气温和降水)产生重要影响。研究表明,前期(冬季、春季)黑潮 SST 异常对我国夏季降水都有显著影响。当冬季(1 月)黑潮 SST 异常升高(偏低)时,华南地区的夏季降水减少(增多),将出现干旱(洪涝)^[60],而长江流域的降水则增多(减少),易发生洪涝(干旱)^[61]。李忠贤和孙照渤^[62]基于 NCAR CCM3 模式研究了黑潮 SST 对东亚夏季风的影响,并指出当冬季黑潮

区域海温异常偏高时,西北太平洋副热带高压位置偏西、强度偏强,夏季风较弱,梅雨锋位置偏南,江淮流域及长江中下游地区的降水偏多,而华北和东北地区的降水偏少;反之亦然。春季,当黑潮海温偏高时,中高纬地区的槽和脊加深,西北太平洋副热带高压加强、西伸,导致副热带高压西侧的暖湿气流输送到长江中下游及华南地区,从而使长江中下游及华南地区的夏季降水增多;相反,当海温偏低时,长江中下游及华南地区的夏季降水则减少^[63]。此外,冬季黑潮 SST 对我国东部地区的气温也有明显的影响,特别与华北和华东地区的气温存在着显著的正相关关系^[64]。

3.4 黑潮大弯曲 (KLM)

与黑潮大弯曲 (Kuroshio Large Meander) 相关的关键词包括数值模拟 (Data Assimilation)、输运流量 (Volume Transport) 和海气相互作用 (Atmosphere Ocean Interaction) 等。

在日本以南海域,黑潮的路径并不总是平直的,有时会发生大弯曲,即黑潮流轴向南移动,远离日本海岸。观测发现,黑潮的运移路径表现为双模态特征 (Bimodality),即黑潮有两种典型的运移路径:一种是非大弯曲路径 (Nonlarge Meander, NLM),而另一种则是大弯曲路径 (Large Meander, LM)^[65]。通常,这两种路径可能都会持续几年到十几年的时间,但这两种路径的转换时间却较短,约 2~3 个月^[66]。长期观测表明,在 1963~1975 年间,黑潮的路径处于 NLM 模态,而且黑潮流量较弱;在 1975~1980 年、1981~1984 年、1986~1988 年和 1989~1991 年,黑潮路径则为 LM 模态,且其流量较强^[67]。

近几年,许多学者通过数值模拟,特别是采用较高分辨率的数值模式对黑潮的运移路径进行了模拟研究,发现风应力^[68]、中尺度涡^[69,70]和低位涡水的累积^[71]等对黑潮大弯曲的形成有很大影响。

3.5 黑潮延伸体 (KE)

与黑潮延伸体 (Kuroshio Extension) 相关联的关键词包括数值模拟 (Data Assimilation)、中尺度涡 (Mesoscale Eddies)、大气 (Atmosphere) 和相互作用 (Interaction) 等。

黑潮延伸体是中纬度海气相互作用的关键区,也是海洋涡旋最活跃的区域之一。因此,黑潮延伸体的海气相互作用和中尺度涡一直是科研人员研究的重点内容。Qiu B^[72]在对黑潮延伸区大尺度变化及其对中纬度海气相互作用的影响研究综述中指

出,从年际及年代际时间尺度上看,黑潮延伸体区的 SST 变化对大气环流起着重要的调整作用,而 SST 的变化则是由黑潮延伸体的大尺度波动和风应力旋度场变化导致的。高理等^[73]利用 1993~2004 年卫星高度计资料,分析了黑潮延伸体中尺度涡的变化特征,认为该区的中尺度涡以每年 10 个经度的速度自东向西传播,其平均寿命约为 1 a,而且涡旋的数量和强度皆与厄尔尼诺事件有密切关系。

综上所述可知,在以往的黑潮研究中,大都局限于某一海域,如黑潮源区、东海、日本以南海域和黑潮延伸体。另一方面,由于缺乏大范围、长时间的海流观测资料,以往有关黑潮流量、热输送及其水交换的分析结果大多是根据水文观测资料和数值模拟结果得到的,这些都需要大量的实测流资料加以验证。此外,在以往的研究中,由于人们根据研究需要,使用了不同版本、不同分辨率的海洋模式,因此得到的结果存在着较大差异,这也是一项值得深入探讨的工作。

4 研究展望

通过对黑潮研究的国际战略计划部署与 SCIE 论文产出情况进行分析可以看出,东海黑潮、黑潮对南海的入侵、海温异常、黑潮延伸体海气相互作用以及黑潮大弯曲等方面的研究是近年来黑潮研究的主要内容。为了更深入地开展调查研究,提高我国的黑潮研究水平和实力,现提出建议如下。

4.1 注重海洋再分析资料数据集的建设

目前,已有一批海洋观测、同化和客观分析的高分辨率海洋和大气再分析资料(包括 SODA、COADS、Argo、CTD 数据、OFES 和 CORE 等)问世。这些资料在很多海洋模拟研究中都被作为区域模式驱动场的初始资料,并用来检验模拟结果。可是,中国近海的海洋环流和热盐结构因受局地环境的影响而复杂多变,与世界大洋存在着较大差异,因此有必要对中国海域专门进行资料再分析,研制出一份高质量、高分辨率的、能准确刻画中国近海环流基本特征和变化规律的数据产品。

4.2 研制具有自主知识产权、适合我国近海的高分辨率海洋环流模式

近年来,由于读入数值模式的实测数据种类的增多和质量的优化以及模式自身的发展,利用数值模拟手段来研究黑潮的特性和变异机制也越来越普遍,但众多的海洋环流模式由于其坐标、参数化方案

等的不同,其在不同区域的模拟效果也有较大差异^[74]。因此,加快研制具有自主产权、适合我国近海的高分辨率海洋环流模式,对我国深入开展黑潮变异及其影响研究具有积极的推动作用,而且无论对国民经济建设、气候变化研究,还是对海上军事活动的安全保障都有重要意义。

4.3 加大海洋观测、探测等基础设施研发的投入

技术设备支撑海洋科学发展,科学引领技术先行。美国自然科学基金地球科学部对海洋仪器设备的投入(包括支持用于极端环境和海底探测的远程传感器的开发和部署)极大地提高了美国海洋科学的研究能力。相比之下,我国在海洋仪器设备研制和深海海洋环境监测技术方面仍较落后。因此,我国应继续加大深海探测考察能力的投入,大力开展水下环境监测新技术、新方法及系统集成创新研究,提高立体化海洋环境信息获取和深海观测探测能力,实现对黑潮相关要素参数的长期在线观测/移动船载监测。

4.4 加强国际合作,开展全流域黑潮调查研究

因受调查资料的限制,目前对黑潮的研究多集中在某一区域,因此,从全流域的角度对黑潮的时空变化特征与机制进行调查,对于全面而深入地了解黑潮的结构特征、变化规律及其影响过程具有重大的理论意义和应用价值。但应指出是,由于黑潮流域广阔,涉及多个国家和地区(中国和台湾省、菲律宾、日本等),因此需要加强国际合作,加大投入,科学布局,并建立一套长期有效的黑潮监测系统,从而为深入开展全流域黑潮研究奠定可靠的资料基础。

参考文献

- [1] NITANI H. Beginning of the Kuroshio in Kuroshio: Physical Aspects of the Japan Current [M]. Seattle: University of Washington Press, 1972: 129-163.
- [2] 卢汐, 宋金明, 袁华茂, 等. 黑潮与毗邻陆架海域的碳交换[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 214-225.
- [3] 王兆毅. 黑潮对中国近海环流影响的数值模拟研究[D]. 北京: 国家海洋环境预报研究中心, 2012.
- [4] 中韩海洋科学共同研究中心. 韩国首次统一规定周边海域的海流名称[CP/DK]. 2016-12-29. http://www.ckjorc.org/cn/cnindex_newshow.do?id=2437.
- [5] SUDA K. On the Variations of the Oceanographical States of Kuroshio in the Original Region(Part I) [J]. Geophysical Magazine, 1937, 11(4): 373-410.
- [6] 范元炳, 蒲书箴. 我国海洋科学领域的全球变化研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(1): 62-71.
- [7] WATTS R D, DONOHUE K A. KESS [CP/DK]. 2016-12-20. <http://www.po.gso.uri.edu/dynamics/KESS/index.html>.
- [8] 李威, 王琦, 马继瑞, 等. 台湾以东黑潮锋时空分布及形成机制研究[J]. 海洋通报, 2011, 13(4): 13-32.
- [9] WONG G T F, CHAO Siyuan, CHUNG Y C, et al. KEEP-Exchange Processes Between the Kuroshio and the East China Sea Shield: Preface [J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(4): 331-334.
- [10] CHEN C T A, RUO R, PAID S C, et al. Exchange of Water Masses Between the East China Sea and the Kuroshio off Northeastern Taiwan [J]. Continental Shelf Research, 1995, 15(1): 19-39.
- [11] HSUEH Y. The Kuroshio in the East China Sea [J]. Journal of Marine Systems, 2000, 24(1-2): 131-139.
- [12] HUNG J J, CHEN C H, GONG G C. Distributions, stoichiometric patterns and cross-shelf exports of dissolved organic matter in the East China Sea [J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2003, 50(6): 1127-1145.
- [13] NAKAMURA H, ICHIKAWA H, NISHINA A, et al. Kuroshio Path Meander Between the Continental Slope and the Tokara Strait in the East China Sea [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(108): 211-227.
- [14] NAKAMURA H. Numerical Study on the Kuroshio Path States in the Northern Okinawa Trough of the East China Sea [J]. Journal Of Geophysical Research-Oceans, 2005, 110(C4): DOI: 10.1029/2004JC002656.
- [15] LIU Zhiqiang, GAN Jianping. Variability of the Kuroshio in the East China Sea Derived from Satellite Altimetry Data [J]. Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers, 2012, 59(3): 25-36.
- [16] JOHNS W E, LEE T N, ZHANG Dongxiao, et al. The Kuroshio East of Taiwan: Moored Transport Observations from the WOCE PCM-1 Array [J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(4): 1031-1053.
- [17] LEE J S, TAKESHI M. Intrusion of Kuroshio Water onto the Continental Shelf of the East China Sea [J]. Journal of Oceanography, 2007, 63(2): 309-325.
- [18] 贾英来, 刘秦玉, 刘伟, 等. 台湾以东黑潮流量的年际变化特征 [J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(6): 507-512.
- [19] 齐继峰, 尹宝树, 杨德周, 等. 东海黑潮流量的年际和年代际变化 [J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(6): 1141-1147.
- [20] ICHIKAWA H, BEARDSLEY R C. Temporal and Spatial Variability of Volume Transport of the Kuroshio in the East China Sea [J]. Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers, 1993, 40(3): 583-605.
- [21] 汤毓祥, 林葵, 田代知二. 关于东海黑潮流量某些特征的分析 [J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(6): 643-651.
- [22] 魏艳州, 黄大吉, 朱小华. 1987~2010年PN、TK断面黑潮流场的时空变化 [J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(1): 30-37.

- [23] YANG Yih ,LIU Choteng. Uncertainty Reduction of Estimated Geostrophic Volume Transports with Altimeter Observations East of Taiwan[J]. Journal of Oceanography 2003 59(2) : 251-257.
- [24] 汤毓祥. 东海黑潮区域性变异的分析[J]. 海洋学报,1995,17(4) : 22-29.
- [25] ZHANG Qilong ,HOU Yijun ,YAN Tingzhuang. Inter-Annual and Inter-Decadal Variability of Kuroshio Heat Transport in the East China Sea[J]. International Journal of Climatology ,2012 ,32(4) : 481-488.
- [26] WEI Yanzhou ,HUANG Daji ,ZHU Xiaohua. Interannual to Decadal Variability of the Kuroshio Current in the East China Sea from 1955 to 2010 As Indicated By In-Situ Hydrographic Data [J]. Journal of Oceanography 2013 69(5) : 571-589.
- [27] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. 海洋学报 2001 23(4) : 1-16.
- [28] 宇田道隆. 日本海及ご其の鄰接海区の海況[J]. 水産試験場報告 ,1934 5: 57-190.
- [29] 刘晓辉, 陈大可, 董昌明, 等. 利用拉格朗日方法研究台湾东北黑潮路径变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(12) : 1923-1936.
- [30] 苏纪兰, 潘玉球. 台湾以北黑潮入侵陆架途径的探讨[A]//国家海洋局科技司主编. 黑潮调查研究论文选(二). 北京: 海洋出版社, 1990: 187-197.
- [31] GUO Xinyu ,MIYAZAWA Y ,YAMAGATA T. The Kuroshio Onshore Intrusion along the Shelf Break of the East China Sea: The Origin of the Tsushima Warm Current[J]. Journal of Physical Oceanography , 2006 36(12) : 2205-2231.
- [32] YANG Dezhou ,YIN Baoshu ,LIU Zhiliang ,et al. Numerical Study of the Ocean Circulation on the East China Sea Shelf and a Kuroshio Bottom Branch Northeast of Taiwan in Summer[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres 2011 116(C5) : 86-86.
- [33] LIE H J ,CHO C H ,LEE J H ,et al. Separation of the Kuroshio Water and its Penetration onto the Continental Shelf West of Kyushu [J]. Journal of Geophysical Research Oceans ,1998 ,103 (C2) : 2963-2976.
- [34] 宋军, 郭俊如, 鲍献文, 等. 东海黑潮与陆架海之间的水交换研究[J]. 海洋通报 2016 35(2) : 178-186.
- [35] 李可, 卢中发. 冬夏季东海水团的初步分析[C]//黑潮调查研究论文集. 北京: 海洋出版社, 1987: 177-189.
- [36] CHEN C T A ,RUO R ,PAID S C ,et al. Exchange of Water Masses between the East China Sea and the Kuroshio off Northeastern Taiwan[J]. Continental Shelf Research ,1995 ,15(1) : 19-39.
- [37] NAN Feng ,XUEHuijie ,YUFei. Kuroshio Intrusion into the South China Sea: a Review[J]. Progress in Oceanography 2014 ,137(6) : 314-333.
- [38] 苏纪兰, 袁业立. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 250-296.
- [39] CARUSO M J ,GAWARKIEWICZ G G ,BEARDSLEY R C. Interannual Variability of the Kuroshio Intrusion in the South China Sea [J]. Journal of Oceanography 2006 62(4) : 559-575.
- [40] 赵杰. 吕宋海峡东侧海区中尺度涡旋的统计特征及对黑潮平均流的影响初探[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [41] LIEN R C ,MA B ,CHENG Y H ,et al. Modulation of Kuroshio Transport by Mesoscale Eddies at the Luzon Strait Entrance [J]. Journal of Geophysical Research Oceans ,2014 ,119 (4) : 2129-2142.
- [42] ZHENG Qunan ,TAI C K ,HU Jianyu ,et al. Satellite Altimeter Observations of Nonlinear Rossby Eddy-Kuroshio Interaction at the Luzon Strait[J]. Journal of Oceanography 2011 67(4) : 365-376.
- [43] HU Po ,HOU Yijun . Path Transition of the Western Boundary Current with A Gap Due to Mesoscale Eddies: a 1.5-Layer ,Wind-Driven Experiment [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology , 2010 28(2) : 364-370.
- [44] 黄企洲. 巴士海峡黑潮流速和流量的变化[J]. 热带海洋学报 , 1983(1) : 37-43.
- [45] WYRTKI K. Physical oceanography of the Southeast Asia Waters [R]. California: Scripps Institution of Oceanography, 1961.
- [46] SHAW P T. The Seasonal Variation of the Intrusion of the Philippine Sea Water into the South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres ,1991 96(C1) : 821-828.
- [47] FARRIS A ,WIMBUSH M. Wind-Induced Kuroshio Intrusion into the South China Sea [J]. Journal of Oceanography ,1996 52(6) : 771-784.
- [48] CHU P C ,LI Rongfeng. South China Sea Isopycnal-Surface Circulation [J]. Journal of Physical Oceanography ,2000 ,30(9) : 2419-2438.
- [49] QU Tangdong ,MITSUDERA H ,YAMAGATA T. Intrusion of the North Pacific Waters into the South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres 2000 105(C3) : 6415-6424.
- [50] QU Tangdong ,KIM Y Y ,YAREMCHUK M ,et al. Can Luzon Strait Transport Play a Role in Conveying the Impact of ENSO to the South China Sea? [J]. Journal of Climate 2004 ,17(18) : 3644-3657.
- [51] LIU Qinyan ,HUANG Ruixin ,WANG Dongxiao. Implication of the South China Sea Through Flow for the Interannual Variability of the Regional Upper-Ocean Heat Content [J]. Advances in Atmospheric Sciences 2012 29(1) : 54-62.
- [52] QIU Bo ,CHEN Shuiming. Interannual-to-Decadal Variability in the Bifurcation of the North Equatorial Current off the Philippines [J]. Journal of Physical Oceanography 2010 40(40) : 2525-2538.
- [53] SHEREMET V A. Hysteresis of a Western Boundary Current Leaping across a Gap [J]. Journal of Physical Oceanography 2001 31(5) : 1247-1259.
- [54] YAREMCHUK M ,QU Tangdong . Seasonal Variability of the Large-Scale Currents near the Coast of the Philippines [J]. Journal of Physical Oceanography 2004 34(4) : 844-855.
- [55] WANG Dongxiao ,LIU Qinyan ,HUANG Ruixin ,et al. Interannual Variability of the South China Sea through Flow Inferred from Wind Data and an Ocean Data Assimilation Product [J]. Geophysical Re-

- search Letters 2006 33(14):110-118.
- [56] WU C R. Interannual Modulation of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) on the Low-Latitude Western North Pacific [J]. Progress in Oceanography 2013 110(3):49-58.
- [57] 孙楠楠. 东海黑潮海表温度变化及其与厄尔尼诺和全球变暖的关系 [D]. 青岛: 中国海洋大学 2009.
- [58] HOSODA K, KAWAMURA H. Seasonal Variation of Space/Time Statistics of Short-Term Sea Surface Temperature Variability in the Kuroshio Region [J]. Journal of Oceanography 2005 61:709-720.
- [59] 王闪闪, 管玉平, 黄建平. 黑潮及其延伸区海表温度变化特征与大气环流相关性的初步分析 [J]. 物理学报, 2012, 61(16):169201-169201.
- [60] 徐海明. 华南夏季降水与全球海温的关系 [J]. 大气科学学报, 1997(3):392-399.
- [61] 李跃凤, 丁一汇. 海表温度和地表温度与中国东部夏季异常降水 [J]. 气候与环境研究 2002 7(1):87-101.
- [62] 李忠贤, 孙照渤. 冬季黑潮 SSTa 影响东亚夏季风的数值试验 [J]. 大气科学学报 2006 29(1):62-67.
- [63] 张天宇, 孙照渤, 李忠贤, 等. 春季黑潮区海温异常与我国夏季降水的关系 [J]. 热带气象学报 2007 23(2):189-195.
- [64] WU Zhiyan, CHEN Hongxia, LIU Na. Relationship between East China Sea Kuroshio and Climatic Elements in East China [J]. Marine Science Bulletin 2010 12(1):1-9.
- [65] TAFT B A. Characteristics of the Flow of the Kuroshio South of Japan [M]//STOMMEL H, YOSHIDA K. Kuroshio - Its Physical Aspects, Tokyo: University of Tokyo Press, 1972:165-216.
- [66] KAWABE M. Transition Processes between the Three Typical Paths of the Kuroshio [J]. Journal of Oceanography, 1986 42(3):174-191.
- [67] KAWABE M. Variations of Current Path, Velocity, and Volume Transport of the Kuroshio in Relation with the Large Meander [J]. Journal of Physical Oceanography. 1995 25(12):3103-3117.
- [68] KUROGI M, AKITOMO K. Stable Paths of the Kuroshio South of Japan Determined by the Wind Stress Field [J]. Journal of Geophysical Research. 2003 108(c10):894-895.
- [69] AKITOMO K, KUROGI M. Path Transition of the Kuroshio due to Mesoscale Eddies: A Two-Layer, Wind-Driven Experiment [J]. Journal of Oceanography. 2001 57(6):735-741.
- [70] EBUCHI N, HANAWA K. Trajectory of Mesoscale Eddies in the Kuroshio Recirculation Region [J]. Journal of Oceanography. 2001 57(4):471-480.
- [71] QIU Bo, MIAO Weifeng. Kuroshio Path Variations South of Japan: Bimodality As a Self-Sustained Internal Oscillation [J]. Journal of Physical Oceanography. 2000 30(8):2124-2137.
- [72] QIU Bo. The Kuroshio Extension System: Its Large-Scale Variability and Role in the Midlatitude Ocean-Atmosphere Interaction [J]. Journal of Oceanography. 2002 58(1):57-75.
- [73] 高理, 刘玉光, 荣增瑞. 黑潮延伸区的海平面异常和中尺度涡的统计分析 [J]. 海洋湖沼通报. 2007 1:14-23.
- [74] 吴力川. 南海区域海洋模式适应性比较分析及改进 [D]. 武汉: 武汉理工大学 2013.