

黑潮与东海水交换研究

张瑞冰^{1,2,4}, 侯一筠^{1,2,3}, 刘亚豪^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用高分辨率 ROMS(regional ocean modeling system)数值模式模拟东海地区的多年平均流态。数值模拟结果在黑潮的流速、路径、流量等方面与近年来对黑潮的认识相一致。利用模式结果, 计算东海及邻近海域主要水道的水通量。结果表明: 台湾海峡、中国台湾-西表岛之间水道是海水进入东海的主要通道, 对马海峡、吐噶喇海峡、大隅海峡与西表岛-宫古岛-冲绳岛-奄美大岛之间水道是海水流出东海的主要通道。分析 PN 断面的流量的变化特征, 结果表明黑潮流量在春季与夏季较大, 秋季与冬季较小, 年平均流量为 24.16 Sv, 与前人研究结果一致。计算跨越 200 m 等深线的年平均净向岸体积输送为 0.99 Sv, 在台湾东北与九州西南地区表现为黑潮入侵陆架地区, 年平均入侵流量分别为 1.907 Sv 与 0.065 Sv, 在黑潮中段地区, 跨越 200 m 等深线流量呈现交错状分布, 年平均净通量为 0.982 Sv, 表现为由东海陆架地区流向黑潮。上述结果对黑潮与东海之间物质与能量交换研究有一定参考价值。

关键词: 东海; 黑潮; ROMS 数值模式; 水交换

中图分类号: P731.2 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2017)12-0117-10

DOI: 10.11759/hyxx20160405001

黑潮起源于菲律宾以东的北赤道流的北向分支, 它由台湾岛以东海区跨过宜兰海脊流入东海, 在此与陆架坡折相遇后, 主轴向右偏转, 沿陆坡转向东北流动, 最后在九州西南向东偏转, 通过吐噶喇海峡流入日本以南海域。黑潮具有流量大、流速强、高温、高盐等特征。观测研究表明在黑潮路径发生明显偏转的台湾东北与九州西南地区, 黑潮水与陆架水之间发生强烈的相互作用^[1-5], 大量的黑潮水入侵陆架的同时, 陆架水也被夹卷到黑潮中^[6-7]。黑潮入侵陆架所引起的物质与能量交换, 不仅改变了陆架海的水文环境, 而且对于营养物质的分布十分重要^[8]。

研究东海与黑潮的水交换, 就离不开对东海环流体系的时空特征的深入了解。随着近年来黑潮联合调查(Cooperative Study of the Kuroshio, CSK), WOCE(World Ocean Circulation Experiment), KEEP(The Kuroshio Edge Exchange Processes Study)等计划项目的开展, 诸多学者利用实测资料计算分析了东海与黑潮的多个关键断面的时空特征。结果表明: 台湾海峡与中国台湾至西表岛水道为外海进入东海的主要通道, 对马海峡与吐噶喇海峡为海水流出东海的主要通道^[9-16]。林葵等^[9]通过 1960—1970 年 13 次观测资料计算得出台湾以东黑潮的平均流量为 25.25 Sv。Johns 等^[10]利用 WOCE 计划的观测资料, 计算得到台

湾以东的黑潮流量为 21.5 Sv。Isobe^[11]总结前人的研究指出, 台湾海峡年平均流量为 1.2 Sv, 冬季基本为零, 秋季为 2.5 Sv。赵保仁等^[12]利用实测温盐资料, 使用动力计算方法, 估算了吐噶喇海峡的年平均流量为 24.5 Sv。魏艳洲等^[13], 基于 1987—2010 年的水文调查资料, 使用逆方法计算得到吐噶喇海峡流量为: 春季 21.6 Sv, 夏季 22.57 Sv, 秋季 19.84 Sv, 冬季 22.04 Sv, 呈现夏强秋弱的特征。Isobe 等^[14]、Teague 等^[15]与 Takikawa 等^[16]分别利用 10 个月、3 a 与 5.5 a 的船载 ADCP 数据计算得到对马海峡年平均流量基本一致为 2.6 Sv。

中外学者对于黑潮向东海的入侵也做了大量研究工作。Imasato 和 Qiu^[17]利用拉格朗日粒子示踪方法证实了黑潮的向岸入侵在水交换过程中起到重要

收稿日期: 2016-04-05; 修回日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41476018, 41506021, 41421005, U1406401); “全球变化与海气相互作用”专项项目(GASI-IPOVAI-01-06); 中国科学院先导专项项目(XDA11020101)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China.No.41476018, No.41506021, No.41421005 and No.U1406401; “Global Change and Air-Sea Interaction Special Project”, No.GASI-IPOVAI-01-06; Priority Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA110201010]

作者简介: 张瑞冰(1988-), 男, 山东菏泽人, 硕士, 研究方向: 海洋环流的数值模拟与预测, 电话: 0532-82898930, E-mail: Laozhang-dezhexue@163.com; 侯一筠, 通信作者, 研究员, 主要从事海洋环流与波动研究, 电话: 0532-82898608, E-mail: yjhou@qdio.ac.cn

作用。Tang 和 Yang^[18], Chuang 与 Liang^[19]利用 KEEP 调查数据指出,台湾东北地区是黑潮入侵陆架的一个关键区域,而且在季风与台湾暖流的影响下黑潮在台湾东北的入侵主要发生在秋季与冬季。于非等^[20]分析卫星浮标(Argos)资料,发现 110 个随黑潮进入东海的浮标中,有 31 个在台湾东北地区入侵陆架,且入侵时间主要集中在秋、冬季。胡筱敏等^[21]利用更多的 Argos 资料分析表层流场季节性变异指出,在台湾东北海域,黑潮表层水向东海陆架区的入侵以秋、冬季最强,春季次之,而夏季几乎不发生,并且认为台湾东北黑潮表层入侵的季节性变异与台湾海峡流量的季节性变异有一定关系。同时,于非等^[20],胡筱敏等^[21]分析 Argos 资料,结果表明九州西南地区为黑潮入侵东海的另一重要区域。且表层入侵主要发生在春季、秋季及冬季,夏季不明显。

此外,很多学者利用数值模拟手段对东海与黑潮水交换进行研究。Guo 等^[22]利用 POM 模式,计算黑潮跨越东海大陆架 200 m 等深线的向岸体积输送,并分析了其季节变化特征。结果表明,向岸体积输送最大为 3 Sv,出现在秋季,最小值不足 0.5 Sv,出现在夏季。同时还指出,风生 Ekman 效应是影响这一通量的季节变化的重要因素。Lee 和 Matsuno^[23]采用 RIAM Ocean Model 模式模拟的结果表明:黑潮向陆架入侵显著的区域为台湾东北和九州西南地区,黑潮中段的入侵被限制在外陆架边缘,跨越大陆架 200 m 等深线的向岸体积输送为冬季 2.74 Sv,春季 2.43 Sv,夏天 2.47 Sv 和 秋季 2.84 Sv。Yang 等^[24]利用 ROMS 模式,对台湾东北部黑潮入侵东海陆架的途径、结构、起源和机制进行了细致的研究。结果表明,在台湾东北部,下层海流由近岸黑潮底层入侵分支与远岸黑潮底层分支这两个黑潮入侵分支组成。其中底层入侵分支则从 250 m 深度逐渐向西北涌升到 60 m 等深线,在 27.5°N, 122°E 处转向东北,而后则沿着 60 m 等深线流向东北。而离岸分支在东海陆架上基本上沿着 100 m 等深线流动。

本文利用 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model)提供的 5'×5'的全球再分析数据作为模式开边界强迫,采用区域海洋模式 ROMS(Regional Ocean Modeling System)^[25]对东海地区进行了数值模拟。利用模式结果分析东海关键断面流量的季节变化特征与大陆架 200 m 等深线的通量分布。

1 数值模式

ROMS 是采用自由海面、内外模分裂技术与地

形跟随坐标系统并直接求解三维非线性斜压原始方程组的数值模式。该方程组采用了静压近似与 Boussinesq 近似。ROMS 可以耦合大气模型,波浪模型,生物地球化学模型、沉积模型与海冰模型,来进行海洋环流、生物地球化学、泥沙运输与海冰的研究。

1.1 模拟区域与网格设置

如图 1 所示,本文的模拟范围为 16°~42°N, 116°~136°E,包括了吕宋海峡,部分中国南海与全部的中国东海、黄海、渤海。本文中中国渤海、黄海、东海视为一个海域,简称为东海。

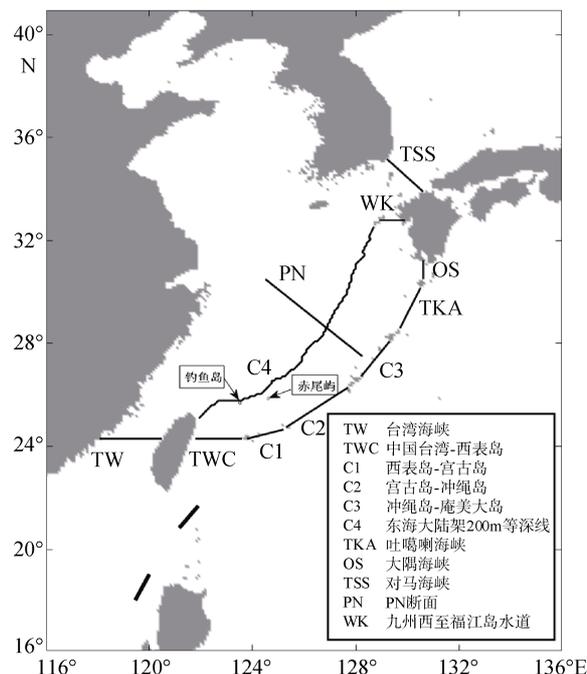


图 1 模拟的区域与地形及东海重要的断面

Fig. 1 Simulation domain and positions of sections in the East China Sea

模式水平方向上,采用曲线正交网格,水平分辨率设为 5'×5'。根据 Guo 等^[22]研究结果表明,要准确模拟黑潮的路径与流态,在东海陆架区域,计算网格的水平分辨率应小于 10 km。本文的模拟中,计算网格水平分辨率达到了 8.43 km,满足了对计算网格水平分辨率的要求。

海洋中海底地形崎岖不平,例如渤海的平均水深为 25 m,而冲绳海槽海域水深可达 2 000 m。在海洋数值模拟中,垂直方向上如果采用 Z 坐标,每层 1 m,为了要分辨全部研究区域,需要根据海水最深处来安排垂向数组,即在冲绳海槽区域需要使用垂向 2 000 的数组,而在渤海区域,没有必要使用如此大的数

组。这样会使得大量计算资源浪费在没有水的计算网格上。因此,在垂直方向上,ROMS采用能够拉伸的跟随地形S坐标系,进行水深非对等的方式安排垂向数组,从而保证了浅水区垂向分辨率足够高,又避免了在深海区不必要的加密。同时,ROMS提供两种跟随地形坐标到Z坐标的变化函数,和4种拉伸函数。拉伸函数可以在海表和海底局部加密。本文采用第二种变化函数与第四种拉伸函数^[26],着重加密海洋上层,垂向取为30层。此处选取模拟区域南边界,绘图描述具体分层细节(图2)。

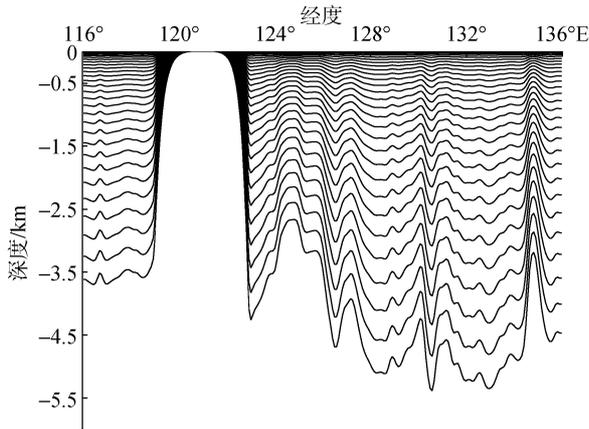


图2 南部边界具体分层细节
Fig. 2 Vertical grid of south boundary

1.2 数据介绍

地形数据:模式水深采用ETOPO1数据集,取10 m为最小模式水深,即模式中水深小于10 m的地方设为10 m。同时为保证数值模拟的稳定性与准确性,还对水深数据做了平滑,采用以下平滑系数:

$$r = \frac{\Delta h}{2h} = \frac{h^{+1/2} - h^{-1/2}}{H^{+1/2} + H^{-1/2}} = 0.25 \quad (1)$$

初始条件:采用WOA09资料1月份平均的温度、盐度场,作为初始温、盐条件。初始流速与海表高度均设为0。

边界条件:模式东南西北4个边界均设为开边界,其中开边界水位选用Chapman边界条件,正压流速选用Flather边界条件,斜压流速与三维温、盐采用Radiation+Nudging边界条件。开边界的水位与三维温度、盐度、流速均由HYCOM提供的1992—2012年再分析数据所计算的气候态结果插值到计算网格来得到。与此同时,本文计算了开边界通量随时间变化见图3。从图中可见,在模拟区域通量封闭。

气候态驱动场:数值模拟中的海表热通量、动量

通量、淡水通量和SST(sea surface temperature)等数据采用COADS的气候态月平均数据。其中SST用来对热通量进行修正(见公式(2)),此外,长江的气候态径流量作为点源加入到模式的计算中,长江的盐度设为0。

$$Q = Q_{obs} + \frac{dQ}{dSST}(SST_{model} - SST_{obs}) \quad (2)$$

其中, Q 为净热通量, $\frac{dQ}{dSST}$ 由块体公式计算得到,下标 obs 代表气候态月平均的观测资料,下标 model 代表模式数据。

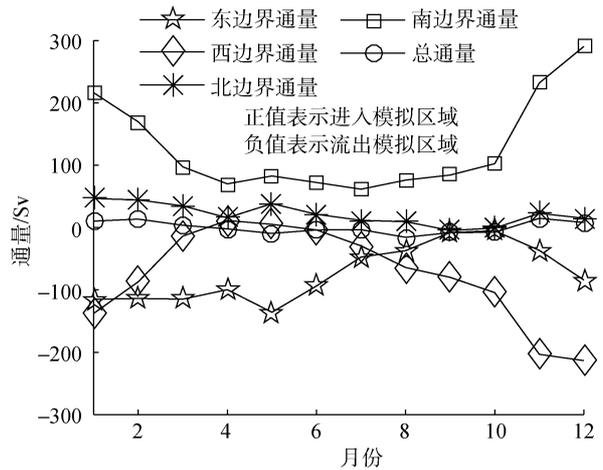


图3 模拟区域边界通量
Fig. 3 Boundary flux

1.3 模式的稳定

利用气候态驱动条件与边界条件,模式共运行9 a,达到稳定状态。对计算模拟区域的动能做体积平均,得到的平均动能曲线见图4。从图中可见,模拟海域能量在短时间快速增加,达到最大值后逐渐减少,经过5年时间基本稳定。下面采用第9年的模拟结果,对黑潮的流径、流速、流量与东海的水通量进行分析。

2 表层流场与PN断面

2.1 表层流场

图5给出表层10 m的流场的年平均结果。Guan^[27]定义黑潮核心为黑潮表层速度流场0.4 m/s等值线所包含的区域,这一定义被广泛应用于黑潮流径的研究。从图中可以看出,黑潮经过台湾岛以东进入东海,与陆架坡折相遇,转向东北后沿着最大地形坡度在冲绳海槽内流动,后经吐噶喇海峡流入日本以南海

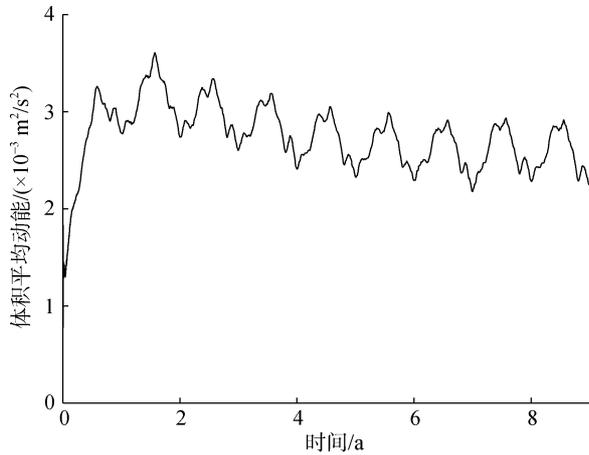


图4 模拟海域的体积平均动能曲线
Fig. 4 Volume average kinetic energy

域。台湾东北和九州西南地形坡折区是东海黑潮的两个主要转折区。在台湾东北海域，黑潮主轴转向东北的同时会有一个分支穿过坡折入侵东海，入侵的黑潮分支随台湾暖流一起北上。与台湾东北类似，在九州西南海区也发生黑潮入侵陆架海区的现象，入侵黑潮水与东海外陆架水汇合后，北上流向对马海峡。

黑潮与东海环流具有明显的季节变化(图 6)。从图中可以看出台湾暖流，在夏季(8月)最强、冬季(2月)最弱。黑潮表层流速呈现出春夏强秋冬弱的特征，与浦泳修等^[28]根据电磁海流计资料计算所得的结果一致。

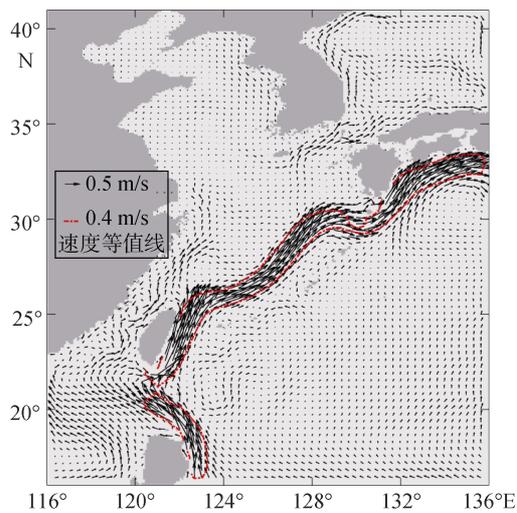


图5 模式 10 m 水深处年平均流场
Fig. 5 Annual current distribution at 10 m depth

2.2 PN 断面

PN 断面是日本长崎海洋气象台从 1972 年至今

定期观测的一条横跨东海黑潮的水文断面，每年实施春夏秋冬四季观测，采用高精度仪器采集数据，站点布设紧密。图 7 给出模拟所得 PN 断面的冬季与夏季的速度、温度与盐度分布。温度与盐度分布与 OKa 和 Kawabe^[29]通过 1988 到 1994 年计算而得的月平均温度场与盐度场较为一致。特别是夏天温度与盐度舌所能到达的范围与深度与他们的结果较为一致。速度场的分布也能较好的反映黑潮的流场结构。浦泳修等^[28]利用 1972—1983 年的 PN 断面温盐资料计算的 12 年平均的体积输送量为 20 Sv。林葵等^[9]利用中、日双方调查资料计算的 PN 断面的平均流量为 25.84 Sv。魏艳州等^[13]利用 1987—2010 年的水文调查资料，使用逆方法计算了 23 年的 PN 断面黑潮流量为：春季 22.72 Sv，夏季 23.50 Sv，秋季 20.98 Sv，冬季 23.62 Sv，年平均为 22.705 Sv。由本文模式结果计算，PN 断面的年平均流量为 24.162 Sv，与魏艳州与林葵的结果较为一致。

上述模拟得到的黑潮路径、季节特征、黑潮在台湾东北与九州西南地区表层入侵及东海环流特征与近年来的认识一致。

3 东海水通量及其季节性变化

3.1 东海与外海之间水交换

根据模式结果计算东海各重要断面的月平均流量见图 8。计算结果表明，台湾海峡、台湾-西表岛水道是海水流入东海的主要水道。吐噶喇海峡、大隅海峡、对马海峡是海水流出东海的主要水道。除此之外，宫古岛-冲绳岛-奄美大岛之间水道也有海水全年流出东海，西表岛-宫古岛之间水道即有海水进入东海也有海水流出东海，整体表现为流出。

台湾海峡为东海与南海之间水量交换的重要水道。由模拟结果计算，台湾海峡的年平均流量为 1.44 Sv，海流终年向北由南海进入东海。台湾海峡流量的季节特征为春、夏大，秋、冬小。从春季到夏季是一个逐渐增大的过程，最大值在 7 月为 2.57 Sv，而到了秋季则大幅减弱，最小值出现在 11 月为 0.45 Sv。这与 isobe^[11]总结的结果较为一致。

台湾-西表岛水道是黑潮进入东海的主要通道。本文的计算结果表明，台湾-西表岛之间的年平均流量为 27.52 Sv。变化总体趋势为，夏季较大，冬、春季次之，秋季最小。最大值为 30.82 Sv 出现在 7 月，最小为 25.1 Sv 出现在 11 月。年变化幅度为 5.72 Sv。

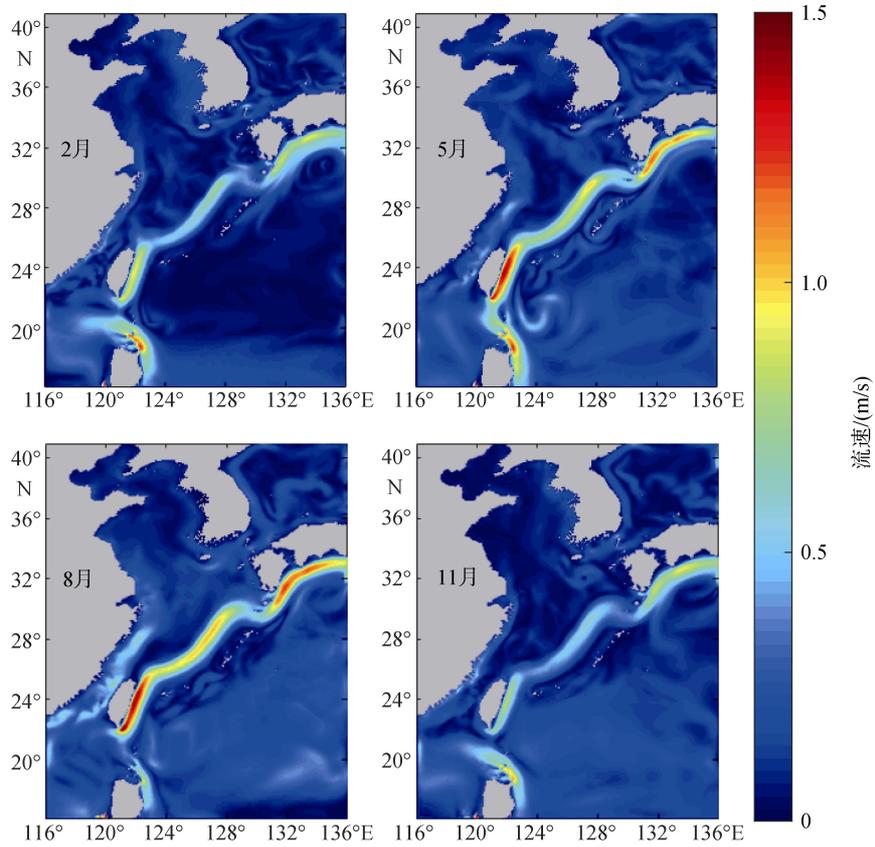


图 6 表层 10 m 流速场的月平均结果

Fig. 6 Monthly current distributions at 10 m depth

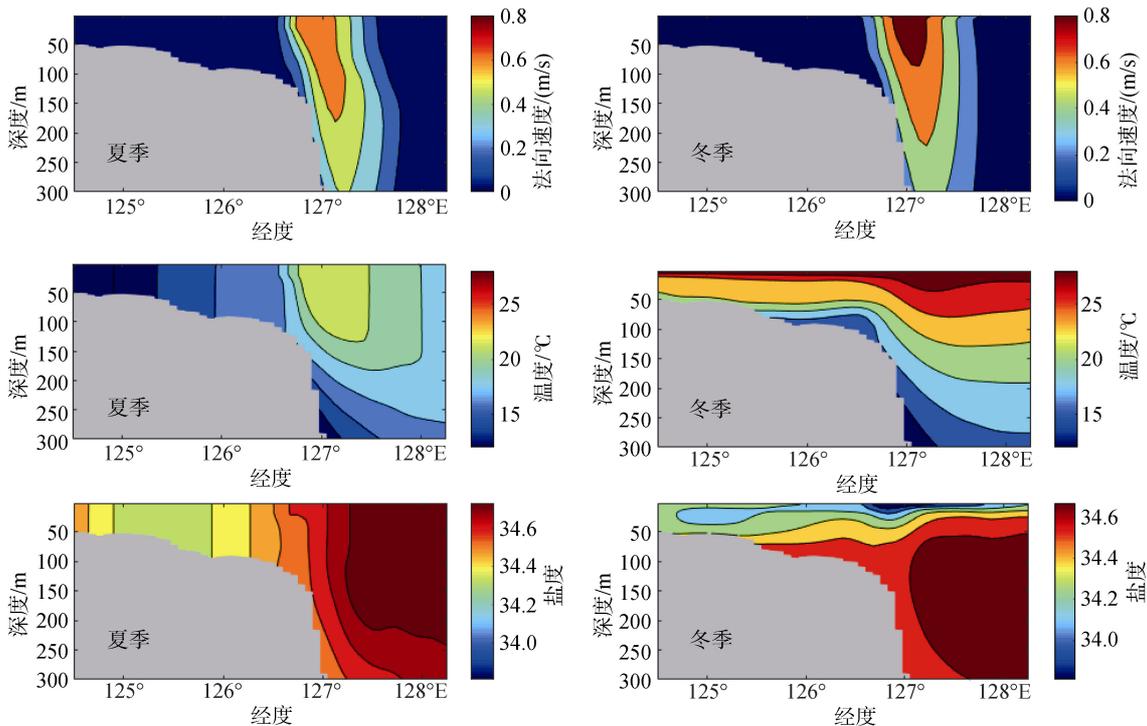


图 7 本文模拟 PN 断面冬、夏季速度、温度、盐度分布

Fig. 7 Model velocities, temperatures, and salinities in winter and summer, results at PN line

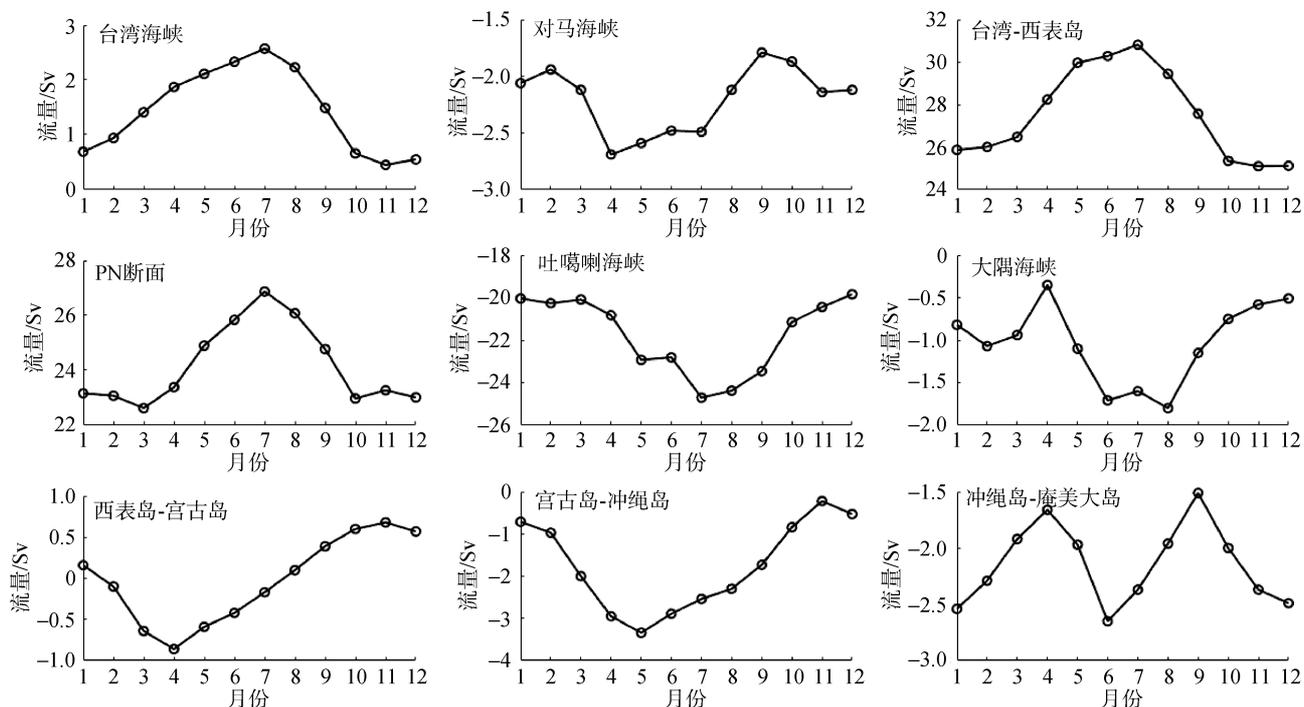


图 8 东海主要断面流量的季节变化

Fig. 8 Time series of monthly volume transport through main section in the East China Sea

除 PN 断面外, 正值表示海水进入东海, 负值表示海水流出东海

A positive value indicates an intrusion onto the continental shelf of the East China Sea

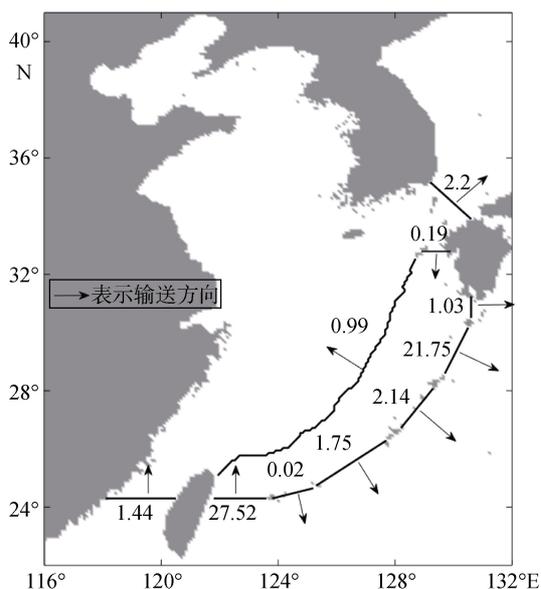


图 9 各断面与水道年平均流量(Sv)

Fig. 9 Annual state water budgets in the East China Sea (Sv)

吐噶喇海峡是黑潮流出东海进入太平洋的主要通道。本文模拟结果表明, 吐噶喇海峡年平均流量为 21.75 Sv, 与台湾-西表岛流量季节变化特征相似, 最大值出现在 7 月为 24.71 Sv, 最小值为 19.84 Sv 出现

在 12 月。

大隅海峡与为黑潮离开东海进入太平洋的另一通道。年平均流量为 1.03 Sv。流量在春季最小为 0.35 Sv, 从春季到秋季逐渐增强, 在 8 月达到最大值 1.71 Sv。从秋季到翌年春季逐渐减弱。

对马海峡为东海与日本海之间的重要通道。是海水流出东海的另一出口。对马暖流经过对马海峡流入日本海。Isobe 等^[14], Teague 等^[15]与 Takikawa^[16]分别利用 10 个月, 3 年与 5.5 年的跨越对马海峡的船载 ADCP 数据计算得到对马海峡年平均流量基本一致为 2.6 Sv。本文的计算结果年平均流量为 2.20 Sv, 季节变化为, 春季最大, 从春季到秋季在逐渐减弱, 从秋季到翌年春季逐渐增强。

琉球岛链诸水道为东海与太平洋相通的重要通道, 琉球岛链水域宽广, 本文将之分为 3 段, 它们从南到被分别为西表岛至宫古岛, 宫古岛至冲绳岛, 冲绳岛至奄美大岛水道。

通过西表岛至宫古岛之间水道, 在春季与夏季表现为海水流出东海进入太平洋, 流量逐渐增加到 4 月达最大值后逐渐减弱。在秋季到冬季为海水由太平洋进入东海。流量逐渐增加到 11 月达到最大值后逐

渐减弱。

总结以上结果, 各个断面与水道的年平均流量见图 9。台湾海峡、台湾-西表岛水道、琉球群岛水道、吐噶喇海峡、大隅海峡与对马海峡之间流量闭合。而台湾海峡、200 m 等深线、对马海峡与 WK 水道之间流量不闭合, 有 0.04 Sv 的差值。这可能是由于海表淡水通量的影响所导致。

3.2 穿越 200 m 等深线的向岸体积输送

本文计算了黑潮跨越东海大陆架 200 m 等深线的向岸体积输送与对马海峡和台湾海峡的流量差别以及它们随季节的变化(图 10)。计算结果表明: 此向岸体积输送年平均为 0.99 Sv, 在 11 月, 向岸体积输送达到最大为 1.57 Sv, 随后逐渐减少在翌年 9 月达到最小值为 0.4 Sv。从图中还可以看出黑潮向岸体积输送与对马海峡和台湾海峡的流量差别在数值与季节变化趋势方面基本吻合。

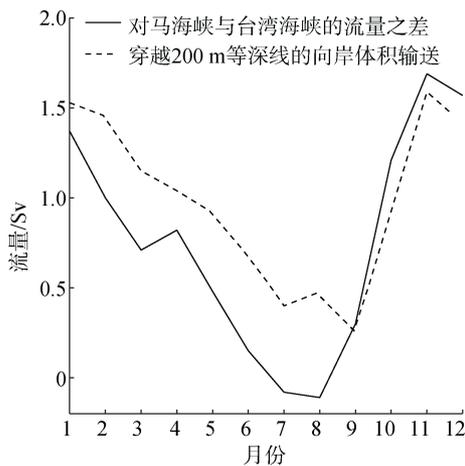


图 10 对马海峡与台湾海峡的流量之差, 穿越 200 m 等深线向岸体积输送

Fig. 10 Monthly difference between volume transports through the Tsushima and Taiwan Straits, Monthly the Kuroshio onshore flux across the 200 m isobaths

本文计算了 200 m 等深线处的年平均流量分布见图 11, 从图中可以看出, 黑潮跨越 200 m 陆架等深线向岸入侵的区域主要为台湾东北地区与九州西南地区。在黑潮中段, 通量体现为交错状分布, 表明黑潮锋面涡旋在黑潮与东海的水交换中起到重要的作用。

为进一步研究 200 m 等深线处通量的时空特征, 将陆架 200 m 等深线分为 3 个部分(见图 12)。将这 3 部分别称为: 台湾东北端、东海黑潮中段和九州西南

段。各部分穿越 200 m 等深线进入和流出东海的通量及其季节性变化见图 13。

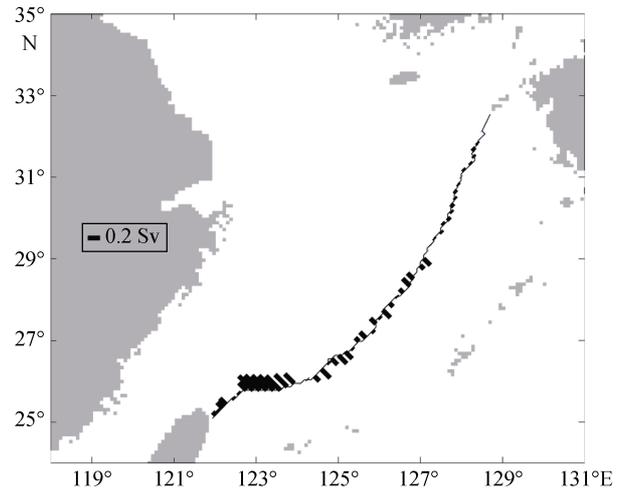


图 11 200 m 等深线处通量分布

Fig. 11 Annual mean fluxes across the 200 m isobaths

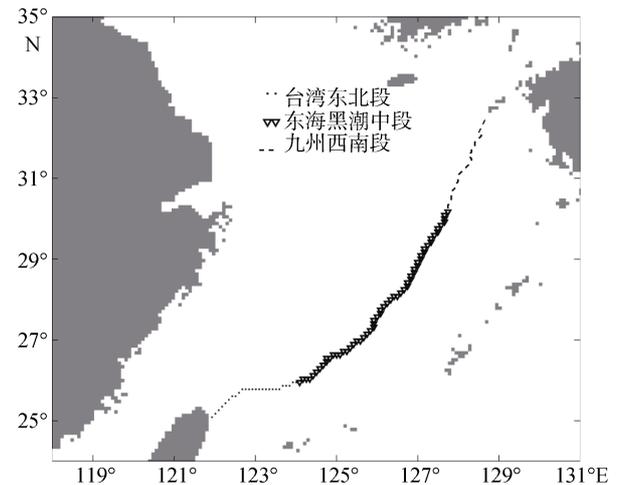


图 12 200 m 陆架等深线分段情况

Fig. 12 Subsection of 200 m isobath

台湾东北段跨越 200 m 等深线年平均净通量为 1.907 Sv, 由黑潮进入东海陆架地区。向陆架的入侵流量在春季最大, 秋冬季次之, 夏季最小。

东海黑潮中段跨越 200 m 等深线年平均净通量为 -0.982 Sv, 负值代表由东海流陆架地区流出进入黑潮。从图 13 中可以看出, 在东海黑潮中段跨越 200 m 等深线的流入与流出年平均流量达到了 2.858 Sv 与 -3.834 Sv, 负值代表由东海流入黑潮。自 20 世纪 80 年代以来, 许多研究发现了在东海陆架与陆坡附近频繁出现黑潮锋面涡旋^[30]。郭炳火等^[6]指出, 黑潮锋面涡旋使得黑潮水向陆架入侵的同时, 也将陆架水

卷入黑潮当中，在陆架水与黑潮水的交换中起到十分重要的作用，这两个流量数值，表明黑潮中段的

黑潮锋面涡旋现象在黑潮与东海的水交换过程中起到重大的作用。

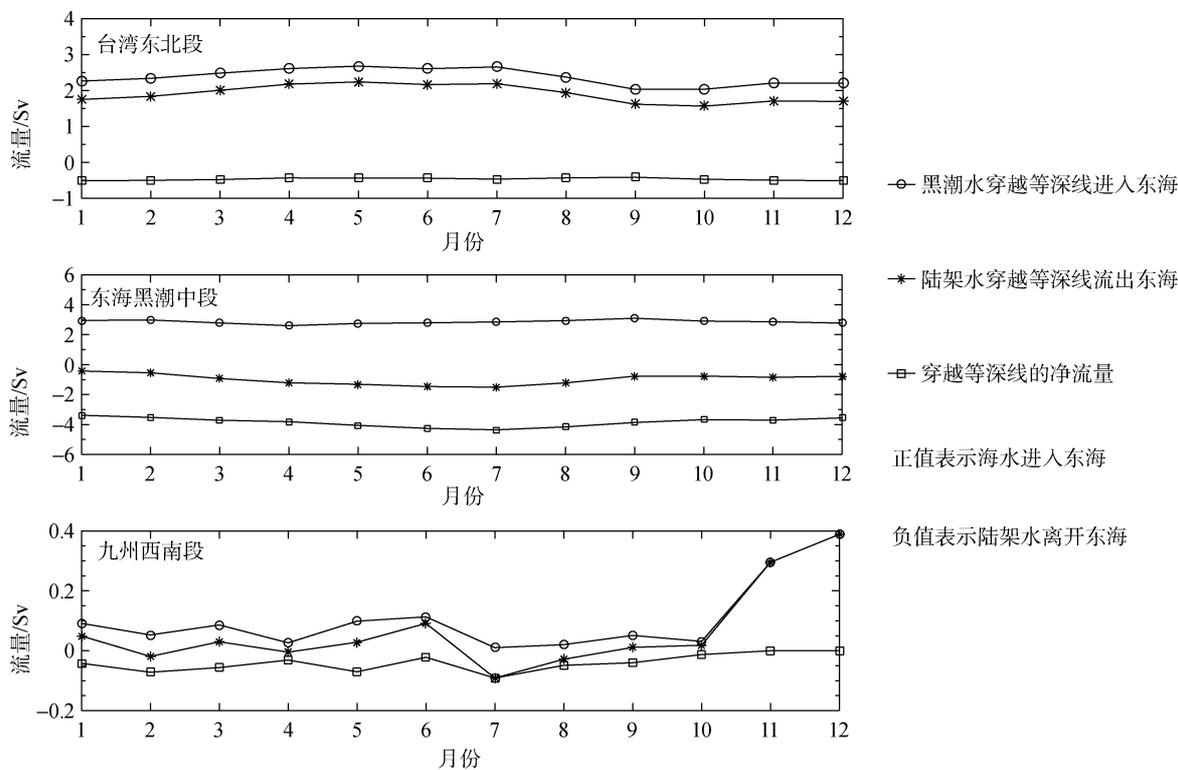


图 13 跨越 200 m 等深线上各段的通量随时间变化

Fig. 13 Monthly fluxes across the 200 m isobaths in three sections

九州西南地区跨越 200 m 等深线年平均净流量为 0.065 Sv, 由黑潮进入东海。向陆架的入侵流量在秋季最大, 夏季最小。

本文计算的跨越 200 m 等深线向岸体积输送与 Guo 等^[22]年的计算结果在季节变化趋势上相一致, 最大值比他们的结果要小 1.4 Sv。这可能是选用不同的边界驱动数据所导致的。

4 结论与展望

计算表明, 东海陆架水交换存在着明显的时空变化。台湾海峡, 台湾-西表岛之间水道是外海水进入东海的通道。吐噶喇海峡、大隅海峡、对马海峡、宫古岛-冲绳岛、冲绳岛-奄美大岛之间水道为海水流出东海进入外海的通道。各通道的水通量的季节性变化相似。流量最大值往往出现在春季与夏季, 最小值出现在秋季与冬季。

黑潮跨越大陆架 200 m 等深线的向岸年平均体积通量为 0.99 Sv, 黑潮入侵东海主要发生在台湾东北与九州西南地区。年平均入侵流量分别为 1.907 Sv

与 0.065 Sv, 在黑潮中段地区, 跨越 200 m 等深线流量呈现交错状分布, 表明黑潮锋面涡旋过程在黑潮与东海水交换过程中起到重要作用。

本文在东海与黑潮水交换方面做了一些研究工作, 在进一步的研究工作中需要利用数值模式, 设定实验, 研究东海通量变化的动力机制和 PDO (Pacific Decadal Oscillation, 太平洋年代际涛动)与 ENSO(EI Nino and South Oscillation, 厄尔尼诺与南方涛动)现象影响黑潮的物理过程与机制。在黑潮中段地区, 黑潮锋面涡旋是影响黑潮与东海水交换的重要过程, 在以后工作中拟用实测资料分析与数值模式相结合的研究方法, 探索研究黑潮锋面涡旋在东海陆架水交换中的作用。

参考文献:

[1] Tang T Y, Yang Y J. Low frequency current variability on the shelf break northeast of Taiwan[J]. Journal of Oceanography, 1993, 49(2): 193-210.
 [2] Chuang W S, Liang W D. Seasonal variability of intrusion of the Kuroshio water across the continental shelf

- northeast of Taiwan[J]. *Journal of Oceanography*, 1994, 50(5): 531-542.
- [3] 于非, 臧家业, 郭炳火, 等. 黑潮水入侵东海陆架及陆架环流的若干现象[J]. *海洋科学进展*, 2002, 20(3): 21-28.
Yu Fei, Zang Jiaye, Guo Binghuo, et al. Some phenomena of the invasion of the continental shelf and shelf circulation in the East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2002, 20(3): 21-28.
- [4] 胡筱敏, 熊学军, 乔方利, 等. 利用漂流浮标资料对黑潮及其邻近海域表层流场及其季节分布特征的分析研究[J]. *海洋学报*, 2008, 30(6): 1-16.
Hu Xiaomin, Xiong Xuejun, Qiao Fangli, et al. Analysis and study of the Kuroshio surface current field and its adjacent waters seasonal distribution with drifting buoy data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(6): 1-16.
- [5] 苏纪兰, 潘玉球. 台湾以北陆架环流动力学初步研究[J]. *海洋学报*, 1989, 11(1): 1-14.
Su Jilan, Pan Yuqiu. A preliminary study on the shelf circulation dynamics north of Taiwan[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11(1): 1-14.
- [6] 郭炳火, 葛人峰. 东海黑潮锋面涡旋在陆架水与黑潮水交换中的作用[J]. *海洋学报*, 1997, 19(6): 1-11.
Guo Binghuo, Ge Renfeng. The effort of Kuroshio frontal waves on water exchange between ECS and Kuroshio[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1997, 19(6): 1-11.
- [7] Isobe A. Driving mechanism of band structure of mean current over the continental shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(8): 1839-1855.
- [8] Chen C T A. The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf[J]. *Oceanologica Acta*, 1996, 19(5): 523-528.
- [9] 林葵, 陈则实. 东海黑潮水与陆架水的季节性输运和交换[J]. *黄渤海海洋*, 1995, 13(4): 1-8.
Lin Kui, Chen Zeshi. Kuroshio and East China Sea continental shelf seasonal water transport and exchange[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1995, 13(4): 1-8.
- [10] Johns W E, Lee T N, Zhang D, 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.
- [11] Isobe A. Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves[J]. *Journal of Oceanography*, 2008, 64(4): 569-584.
- [12] 赵保仁, 方国洪. 东海主要水道的流量估算[J]. *海洋学报*, 1991, 13(2): 169-178.
Zhao Baoren, Fang Guohong. Flow estimation of main channel in the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(2): 169-178.
- [13] 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.
Wei Yanzhou, Huang Daji, Zhu Xiaohua. Variations of Kuroshio at PN, TK line in 1987-2010[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44(1): 30-37.
- [14] Isobe A, Ando M, Watanabe T, et al. Freshwater and temperature transports through the Tsushima-Korea Straits[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, 107(7): 2-1-2-20.
- [15] Teague W J, Jacobs G A, Perkins H T, et al. Low-frequency current observations in the Korea/Tsushima Strait[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(6): 1621-1641.
- [16] Takikawa T, Yoon J H, Cho K D. The Tsushima warm current through Tsushima Straits estimated from ferryboat ADCP data[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(6): 1154-1168.
- [17] Imasato N, Qiu B. An event in water exchange between continental shelf and the Kuroshio off southern Japan: Lagrangian tracking of a low-salinity water mass on the Kuroshio[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1987, 17(7): 953-968.
- [18] Tang T Y, Yang Y J. Low frequency current variability on the shelf break northeast of Taiwan[J]. *Journal of Oceanography*, 1993, 49(2): 193-210.
- [19] Chuang W S, Liang W D. Seasonal variability of intrusion of the Kuroshio water across the continental shelf northeast of Taiwan[J]. *Journal of Oceanography*, 1994, 50(5): 531-542.
- [20] 于非, 臧家业, 郭炳火, 等. 黑潮水入侵东海陆架及陆架环流的若干现象[J]. *海洋科学进展*, 2002, 20(3): 21-28.
Yu Fei, Zang Jiaye, Guo Binghuo, et al. Several phenomena of Kuroshio intruding into the East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2002, 20(3): 21-28.
- [21] 胡筱敏, 熊学军, 乔方利, 等. 利用漂流浮标资料对黑潮及其邻近海域表层流场及其季节分布特征的分析研究[J]. *海洋学报*, 2008, 30(6): 1-16.
Hu Xiaomi, Xiong Xuejun, Qiao Fangli, et al. Using Argos data to analysis Kuroshio and Current System in ECS[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(6): 1-16.
- [22] Guo X, Miyazawa Y, Yamagata T. The Kuroshio on-shore 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.
- [23] 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.
- [24] Yang D, Yin B, Liu Z, 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.
- [25] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional ocean modeling system: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model[J]. *Ocean Modelling*, 2005, 9: 347-404.
- [26] Shchepetkin A F, McWilliams J C. Correction and commentary for“Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system” by Haidvogel et al., *J. Comp. Phys.* 227, pp. 3595–3624[J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(24): 8985-9000.
- [27] Guan Bingxian. Some results from the study of the variation of the Kuroshio in the East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1979, 10(4): 297-306.
- [28] 浦泳修, 许小云. 1972—1983 年期间东海(PN 断面)的黑潮流况[J]. *海洋学报*, 1986, 8(1): 14-20.
Pu Yongxiu, Xu Xiaoyun. Kuroshio at PN line in 1972-1983[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1986, 8(1): 14-20.
- [29] Oka E, Kawabe M. Characteristics of variations of water properties and density structure around the Kuroshio in the East China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 1998, 54(6): 605-617.
- [30] 郑义芳, 郭炳火, 汤毓祥, 等. 东海黑潮锋面涡旋的观测[C]//国家海洋局科技司. 黑潮调查研究论文选(四). 北京: 海洋出版社, 1992: 23-32.
Zheng Yifang, Guo Binghuo, Tang Yunxiang, et al. Observation of Kuroshio Frontal Eddy in the East China Sea[C]//Department of Science and Technology, State Oceanic Administration. Papers on Kuroshio survey (Fourth). Beijing: China Ocean Press, 1992: 23-32.

The East China Seas exchange with the Kuroshio

ZHANG Rui-bing^{1, 2, 4}, HOU Yi-jun^{1, 2, 3}, LIU Ya-hao^{1, 2}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. CAS Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Apr. 5, 2016

Key words: the East China Sea; the Kuroshio; water exchange; regional ocean modeling system (ROMS)

Abstract: In this study, we used the high-resolution numerical model ROMS (regional ocean modeling system) to simulate the current system in the East China Sea. The numerical simulation results are consistent with our current understanding of the Kuroshio. The Taiwan Strait and the channel between Taiwan and Iriomote Island are the main channels of water flowing into the East China Sea. The Tsushima Strait, the Tokara Strait, the Osumi Strait, and the channels between the Ryukyu Islands are the main channels of water flowing out. Our results indicate that the Kuroshio flow is greater during spring and summer, with an annual flux of 24.16 Sv. We determined the Kuroshio net onshore flux across the 200 m isobath to be 0.99 Sv. The Kuroshio onshore flux has two major sources—the Kuroshio intrusion northeast of Taiwan and the Kuroshio separation southwest of Kyushu—with the former providing an annually averaged onshore flux of 1.907 Sv and the latter an annually averaged onshore flux of 0.065 Sv. We estimate the annually averaged onshore flux of the Kuroshio at Midway to be 0.982 Sv.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)