

黑潮跨陆架入侵东海年际变化的数值模拟*

杨德周^{1, 2, 3} 许灵静^{1, 2, 4} 尹宝树^{1, 2, 3, 4} 冯兴如^{1, 2, 3}
陈海英^{1, 2, 3} 齐继峰^{1, 2, 3} 崔焯^{1, 2, 4}

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室 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 青岛 266237; 4. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 为了研究黑潮跨过 200m 等深线对东海入侵的年际变化特征, 本文基于 ROMS (Regional Ocean Modeling System) 海洋模式, 对西北太平洋海域进行了高分辨率的数值模拟, 模式水平分辨率高达 4km, 该分辨率可以很好地分辨黑潮以东区域的中尺度涡旋等过程。模式首先进行了 6 年的气候态模拟, 然后进行了 1993 到 2015 年的后报模拟。模式很好地再现了东海陆架已知的环流结构, 模拟出的对马海峡和台湾海峡的年平均流量和观测结果也比较一致。基于模式结果, 利用旋转经验正交函数(EOF)的方法, 对黑潮跨过 200m 等深线流量的年际变化进行分析。EOF 的主要模态表明, 黑潮跨过 200m 等深线对东海陆架的入侵主要发生台湾东北, 并且入侵主要集中在黑潮次表层水中。主要模态的时间系数表明, 黑潮入侵东海陆架的年平均流量存在一个 8 年的变化周期。相关性分析表明, 黑潮入侵东海陆架的年际变化和太平洋年代际振荡 PDO(Pacific Decadal Oscillation)指标具有显著的负相关, 其相关系数达-0.63。该相关可以通过如下过程解释: PDO 会导致东太平洋风应力涡度异常, 由 Sverdrup 关系可知向赤道的体积输运也会相应地产生异常, 根据质量守恒, 向赤道体积输运的异常必然通过西边界流-黑潮的异常来平衡, 从而导致黑潮入侵东海陆架强烈的年际变化。

关键词 黑潮; 东海; 入侵; ROMS

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20170500139

我国黄海、东海和南海均位于北太平洋西边界流——黑潮的西侧, 它输入的物质和能量对我国近海环流的空间和时间分布具有重要调整作用。多年的观测资料表明, 对马海峡的年平均流量约为 2.65Sv ($Sv = 10^6 m^3/s$) (Teague *et al.*, 2003, 2005), 而台湾海峡的流量约为 1.2Sv (Jan *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2010), 这就表明我国东海陆架上约有 1.45Sv 的净跨陆架向岸的海水通量。许多研究表明台湾东北是黑潮输入东海陆架的主要源头, Guo 等(2006)指出东海陆架上存在两处强的黑潮入侵陆架点, 并且都是在黑潮转弯处: 一处位于台湾东北部, 一处位于 30°N 的黑潮转弯处。Yang 等(Yang *et al.*, 2011, 2012, 2013)指出夏季在东海

陆架的底层水中存在两个黑潮入侵分支(近岸黑潮入侵分支和远岸黑潮入侵分支), 通过近岸黑潮分支, 台湾东北的黑潮次表层水可以源源不断地输送到浙江外海的底层; Zhang 等(Zhang *et al.*, 2017)通过计算跨等深线的流量也指出底层是陆架水与大洋水交换的一个重要通道; 由于浙江外海、舟山附近存在很强的上升流(Lv *et al.*, 2006; Qiao *et al.*, 2006), 黑潮近岸分支输入的黑潮次表层水可以通过上升流到达海洋的表层, 从而对该区域的生态环境产生重要的调节作用。敏感性试验的结果也显示陆架初级生产力不论在表层还是次表层, 均对黑潮的营养盐输入有响应(Zhao *et al.*, 2011)。

*中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目, XDA11020104 号, XDA110203052 号; 国家自然科学基金项目, 41576023 号, 41376030 号, 41476019 号; 国家重点研发计划项目, 2017YFC1404000 号, 2016YFC1401601 号。杨德周, 研究员, E-mail: yangdezhou@qdio.ac.cn

通讯作者: 尹宝树, 博士生导师, 研究员, E-mail: bsyin@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-05-21, 收修改稿日期: 2017-09-13

作为北太平洋的西边界流,黑潮除了受到北太平洋大尺度风应力过程的影响外,还受到各种中小尺度过程的影响,特别是中尺度过程,如 Rossby 波、涡旋的影响。Zhang 等(2001)指出黑潮流量具有 100 天左右的振荡是由向西传播的第一斜压模 Rossby 波导致的。Yin 等(2017)研究指出,气旋涡会减弱跨陆坡的位涡梯度,使黑潮向东海陆架的入侵增强,而反气旋涡可以加强跨陆坡的位涡梯度,使黑潮向东海陆架的入侵减弱。已有研究指出,副热带逆流区存在丰富的涡旋时,黑潮的流量会增强;并且台湾东北黑潮流量存在很强的年际变化($\pm 3.5\text{Sv}$),其变化幅度比黑潮流量的季节变化还要高一个量级(Chang *et al.*, 2011)。尽管存在比较强的季风转换,与年际变化相比,台湾以东黑潮的季节变化并不明显,季风对台湾东北黑潮流量的直接影响非常小(Chang *et al.*, 2011)。Oey 等(2010)通过两层模式计算指出,在冬季,由于东海陆架北部水冷却较快,该冷却水加入黑潮后,通过影响惯性边界层,使黑潮在台湾东北能够更深入地入侵到东海陆架上。

综上所述可以发现,中尺度涡旋过程对黑潮入侵东海存在重要的影响,如果进行东海陆架的数值模拟研究,模式的分辨率必须满足能够分辨中尺度涡旋。东海陆架上的黑潮和陆架水锋面区的正压和斜压不稳定都比较强烈,根据正压、斜压不稳定理论该

区域的扰动可以快速发展成锋面涡旋。此外该区域的地形变化剧烈,根据地形 β 和行星 β 效应,在地形变化强烈的陆坡区域会存在地形 Rossby 波,由于受地形影响较大,该波动的振幅主要集中在海底,是一种地形陷波。锋面涡旋、Rossby 波对黑潮入侵东海陆架存在重要影响,模式分辨率必须提高以识别该区域的水动力过程,因此本文建立了高分辨率的具有识别中尺度过程能力的模式,用来研究黑潮跨陆架入侵的年际变化。

1 研究方法

为了研究黑潮入侵东海陆架的年际变化,我们基于 ROMS(Regional Ocean Modelling System)模式(Shchepetkin *et al.*, 2005),对西北太平洋区域进行了高分辨率的数值模拟。如图 1 所示,模拟的经度范围为 105° — 136°E ,纬度范围为 15° — 41°N ,模式垂向分为 31 层,为了保持网格的正交性,模式的水平网格分辨率取为 $3'\times 3'\cos(\theta)$, θ 表示纬度。模式在东海的水平分辨率约为 4km ,该分辨率可以较好的模拟中尺度涡旋以及黑潮和东海陆架水形成的锋面区的锋面涡旋。模式采用的水深地形数据来源于美国的 ETOPO5 和 ETOPO1 (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>),并且根据模拟区域特征,对这两套数据进行了融合和平滑。

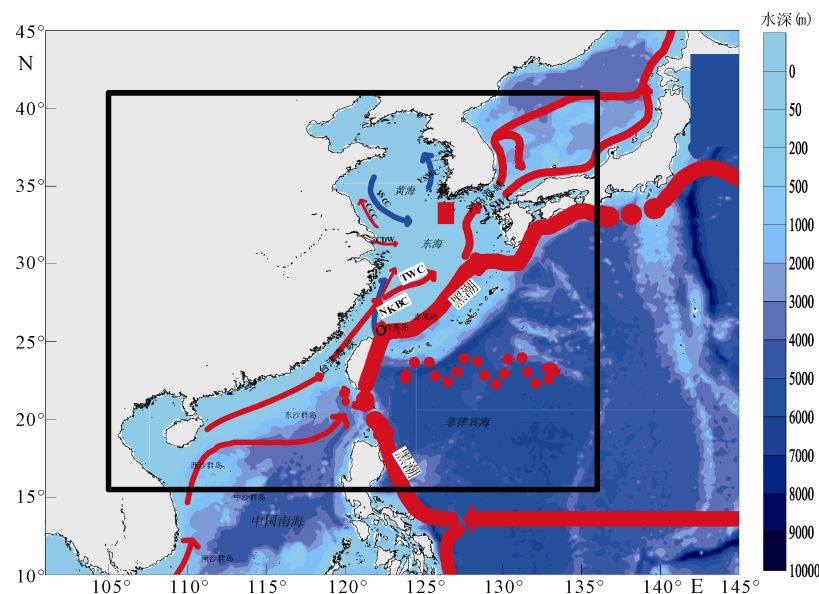


图 1 模式计算区域和东海陆架上的夏季环流特征(Guan *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2012)

Fig.1 Domain of numerical simulation and ocean circulation pattern on the shelf of the East China Sea in summer (Guan *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2012)

注: TWC: 台湾暖流; NKBC: 黑潮近岸分支; TSWC: 对马暖流; CDW: 长江冲淡水; CCC: 苏北沿岸流; YSCC: 黄海沿岸流; YSWC: 黄海暖流

海表边界条件: 数值模式的驱动场来自欧洲气象中心 ERA-interim (Dee *et al.*, 2011), 本文直接采用该中心提供的风应力数据, 时间间隔为 12 小时; 海表面净的太阳短波辐射、净热通量、潜热通量、感热通量以及蒸发和降雨等驱动场数据的时间间隔也均为 12 小时。计算海表净热通量对海表温度的敏感系数 (Maturi *et al.*, 2014), 对模式进行修正。根据研究区域的能量和风应力功率可以估算出模式的 Spin-up 调整时间约为 3 年。

初始条件: 利用已建立的水平分辨率为 $10' \times 10'$ 的太平洋环流模式模拟得到的一月份的月平均温度、盐度和流场 (Yang *et al.*, 2011), 作为本高分辨率海洋模式的初始条件。

开边界条件: 首先根据 1993—2015 年的月平均绝对海面动力高度数据 (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>) 计算得到正压流场; 然后根据已有的大区域温度、盐度分布通过热成风关系计算斜压流; 再根据海面风应力计算出 Ekman 风海流; 最后垂向积分, 得到海洋环流模式外模的开边界条件。内模的开边界条件采用辐射边界条件, 并采用 5 个网格厚度的海绵层抑制模式开边界处的噪声。为模拟出涡旋的影响, 除提高模式的分辨率外, 本文还选取双调和的参数化方案对湍混合张量进行参数化。为准确模拟东海陆架的环流特征, 模式还考虑了 10 个分潮, 分潮调和常数信息参考了前人的文献数据 (Egbert *et al.*, 2002)。此外, 模式还加入了月平均的长江和珠江的径流量 (<http://xxfb.hydroinfo.gov.cn>)。

采用上述数据和计算方法得到的多年平均值作为模式的驱动场和开边界条件, 首先进行了 6 年的气候态模拟。等到模式稳定以后, 把气候态模式最后一年最后一个月的模拟结果, 作为初始条件, 进行 1993—2015 年共 23 年的后报模拟。

2 模拟结果

图 2a—d 给出了气候态模式最后一年的模拟结果, 分别对应四个月的月平均 10m 层流场。本文取 2 月、5 月、8 月和 11 月这四个月份代表北半球的冬、春、夏和秋四个季节。

气候态 4km 分辨率的模式结果表明, 该模式不仅可以很好地再现西北太平洋的主要环流系统, 还准确地再现了黑潮在东海陆架的路径。黑潮在 30°N 左右转向东北, 经吐噶喇进入太平洋, 在东海陆架上由于受位涡守恒限制, 为保持行星涡度和水深的比

值为常数, 黑潮主要沿着 200m 等深线流动, 随纬度的北移, 其流轴稍微偏离等深线。由于模式分辨率的提高, 模拟得到的黑潮路径与前人 (Guo *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2011) 的模拟结果相比, 更加接近观测值 (Hu *et al.*, 2008)。随着模式分辨率的提高, 黑潮在吐噶喇海峡的转弯纬度向南移动, 本文模拟的黑潮转向太平洋的位置恰好在 30°N 左右, 避免了在海洋环流模式模拟黑潮经常遇到的黑潮过冲问题。在以往的研究中黑潮就出现了向北过冲的问题 (Guo *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2011), 该问题随着模式分辨率的提高得到了解决。此外, 从海表流场还可以发现, 黑潮表层水冬季入侵东海陆架比夏季强, 春、秋季节为冬、夏季入侵特征的过渡状态, 这也与观测结果一致 (Hu *et al.*, 2008); 这种特征与冬季季风和夏季季风的 Ekman 输送具有较好的一致性, 冬季盛行的北风使东海陆架水降温较快, 导致水体密度增大, 向岸的 Ekman 输送在闽浙沿岸会出现下降流; 另外一方面, 该向岸的 Ekman 水体输送导致近岸的海面高度偏高, 而东海陆架上海面高度偏低, 使得台湾东北黑潮水入侵东海陆架增强。由于 Ekman 层厚度在约 20m, 其对上层黑潮水的影响较为明显。

该海洋模式也成功地模拟出了黑潮入侵吕宋海峡的几种典型结构。比如, 已有研究表明, 黑潮在冬季多以流套方式入侵南海, 而在夏季多以跨越方式经过吕宋海峡 (Nan *et al.*, 2015)。从图 2a 和图 2c 可以看出, 模拟的结果中黑潮入侵吕宋海峡也分别表现出了流套入侵和跨越结构。此外, 黑潮冲出吕宋海峡时在台湾的东南角形成的兰屿冷涡, 也在模式中得到反映 (图 2)。由于模式分辨率的提高, 一些中尺度涡旋特征、琉球外海的西边界流和琉球西侧的黑潮逆流 (Guan *et al.*, 2006) 也都得到再现。

模拟结果还表明, 在夏季环绕黄海冷水团 (见图 2c) 存在着气旋式的热盐环流, 其中一部分可以进入日本海; 此外冬季的黄海暖流也得到了较好的刻画 (见图 2d)。

东海陆架上有一个显著的特征是台湾暖流, 四个季节的模拟结果表明: 春、夏季台湾暖流很强, 起源于南海, 通过台湾海峡进入东海陆架, 最终一部分会通过马海峡进入日本海。冬季台湾暖流较弱, 主要由台湾以东的黑潮表层水所构成, 由于南下的闽浙沿岸流, 通过台湾海峡的水通量在冬季甚至会出现净通量为南下的情况 (Hu *et al.*, 2010), 该流路在模拟结果中也得到了准确再现。

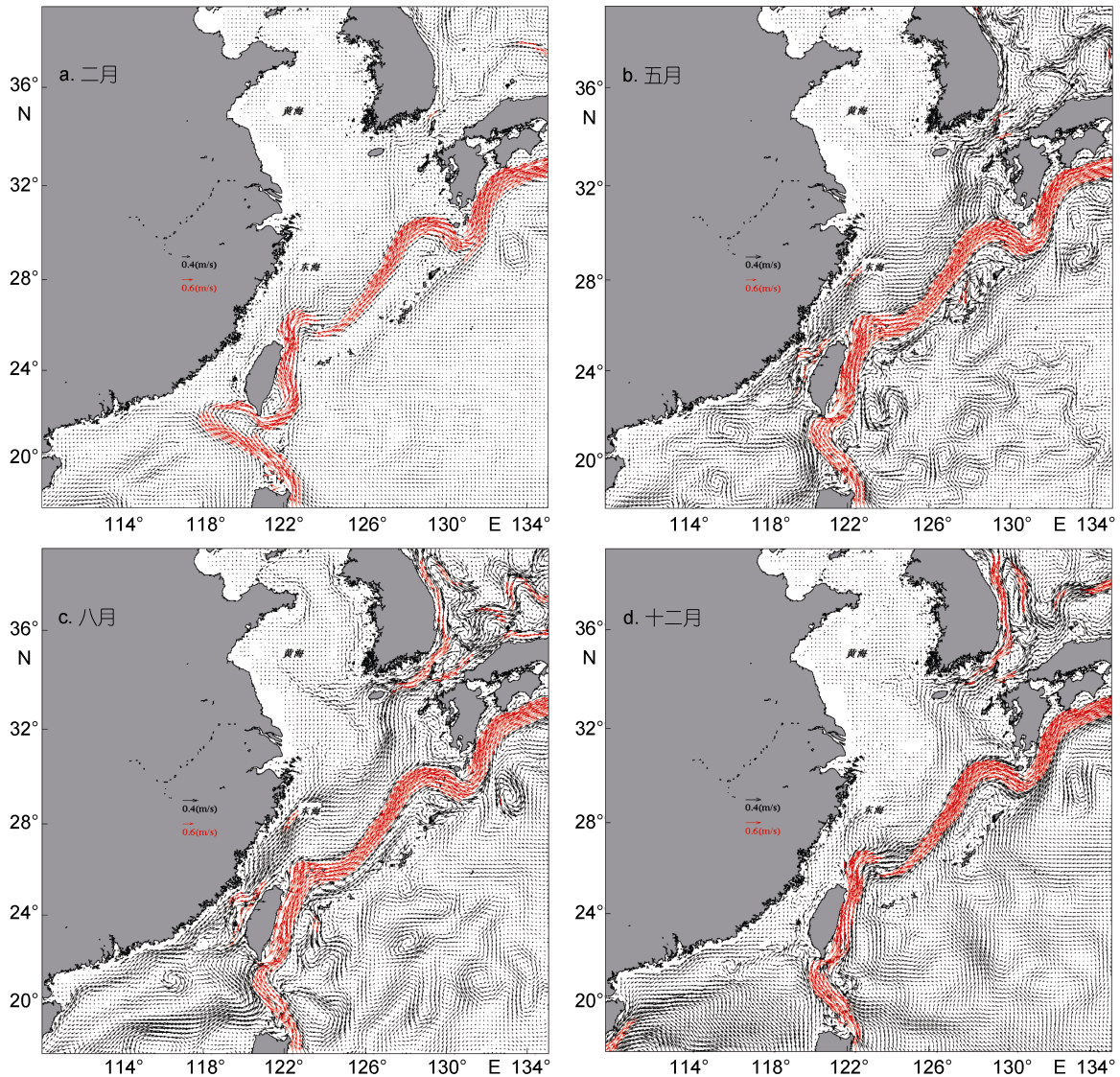


图 2 气候态模式模拟得到的海洋 10m 深度层二月(a)、五月(b)、八月(c)和十二月(d)的月平均环流场

Fig.2 Monthly mean ocean circulations at 10 m depth from climatology run in February, May, August and November(a—d, respectively)

为定量地检验模式的结果, 本文计算了跨过台湾海峡和对马海峡的水通量(计算断面见图 3)。水通量为 5 天的平均值, 开始于 1 月 1 号。台湾海峡水通量(见图 4)的模拟结果表明台湾暖流夏季最强, 冬季最弱, 其他季节为过渡模态, 模式结果不仅准确再现了季节变化特征, 还给出了 1.01Sv 的年平均通量, 该值与多年的观测结果 1.2Sv 很接近(Isobe, 2008; Jan *et al*, 2006)。

模拟结果表明, 通过对马海峡的水通量也具有非常明显的季节变化: 夏季最强, 冬季最弱。同时, 数值模式给出的 2.76Sv 的年平均水通量, 与观测到的对马海峡 5 年的平均值也比较接近(Ito *et al*, 2014; Teague *et al*, 2005)。

综上所述, 该高分辨率的海洋模式可以准确地模拟近海环流特征, 因此可以用来研究黑潮入侵东海陆架的年际变化。

3 黑潮入侵东海陆架的分布及年际变化

图 5 给出了气候态模式模拟得到的黑潮跨 200m 等深线(断面如图 3 所示)的年平均水通量空间分布, 正值表示进入东海的水通量(单位为 Sv), 负值表示海水跨过 200m 等深线离开东海的水通量。气候态年平均的水通量分布表明, 黑潮主要从台湾东北入侵东海陆架, 跨过整个东海陆架的年平均水通量约为 1.79Sv 。图 4 给出的对马海峡(2.76Sv)和台湾海峡(1.01Sv)的水通量表明约有 1.75Sv 的黑潮入侵水跨过

200m等深线进入东海,这和沿着200m等深线直接计算得到的黑潮入侵东海陆架的水通量是一致的,这也进一步表明模式结果是稳定可靠的。此外,图5表明在A-B之间有5.39Sv的黑潮水跨过200m等深线进入东海;而在B-C之间,存在跨过200m等深线从东海陆架进入黑潮的水流量约4.08Sv。这部分水体是黑潮分支入侵到东海陆架后,在地形的影响下出现反气旋偏转,大部分入侵水体又重新回到黑潮主流系中,从而形成了陆架指向黑潮的流量,而从台湾海峡来的台湾暖流也会有一部分水加入到该4.08Sv的水通量中。上述计算结果表明,黑潮从台湾东北入侵到东海陆架的净流量约为1.31Sv。值得注意的是,黑潮通过吐噶喇转向东,在进入太平洋的位置,即C-D区域(见图5),也存在黑潮向陆架的入侵,约0.48Sv,由图2知该部分水体会通过对马海峡进入日本海。综上,沿着200m等深线,黑潮入侵东海存在两个主要位置:台湾东北和九州外海,其中台湾东北入侵的水通量约是九州西南外海入侵的3倍。

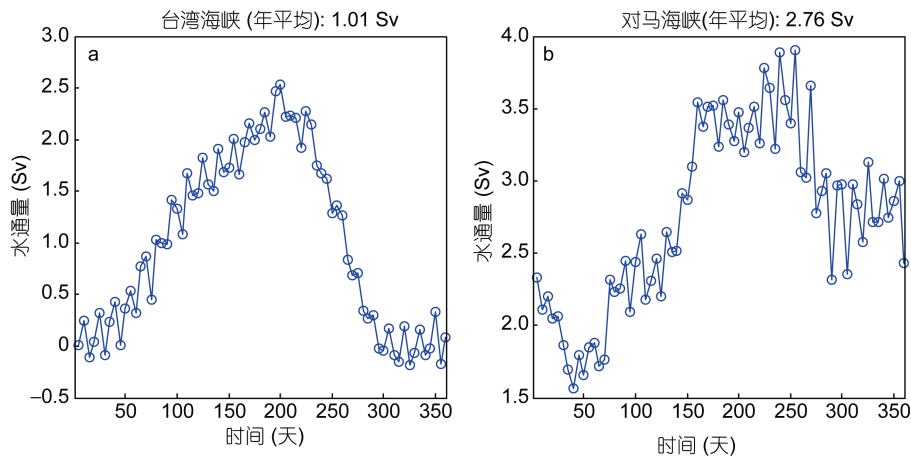


图4 气候态模式模拟得到的台湾海峡和对马海峡的水通量

Fig.4 Volume flux across the Taiwan Strait and Tsushima Strait

注: 横轴时间坐标的第一天对应于气候态模式最后一年的1月1号

为了分析黑潮入侵东海陆架的年际变化,首先对模拟得到的1993—2015年跨200m等深线的年均黑潮入侵流量作REOF分解(Lian *et al.*, 2012),结果见图6和图7。从空间模态可以看出,无论是第一模态还是第二模态,黑潮的主要入侵结构均出现在台湾东北,即主要集中在A-B之间,而在C-D之间并没有明显的黑潮入侵模态;并且在A-B之间第一模态和第二模态具有相似的空间分布特征,在靠近海岸的区域A存在正的模式,而在靠近B的位置存在负的模式,且靠近A区域的正模式最大值出现在次表层。图6和图7的时

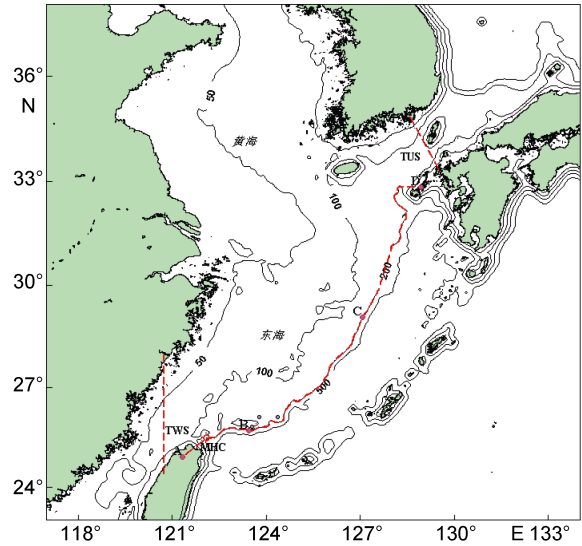


图3 计算水通量的断面位置

Fig.3 The locations of the transection for volume flux calculation

注: 黑色线为水深等值线;红色断线(A-B-C-D)表示跨200m等深线的水通量断面,上下两条红色虚线分别表示对马海峡(TUS)和台湾海峡(TWS)两个断面

间系数表明,第一模态和第二模态的方差贡献率约达到80%,黑潮入侵东海陆架存在明显的年际变化,尤其值得注意的是,跨陆架入侵在2004年前后发生了较大的变化,这一年台湾东北黑潮入侵非常弱,但是指向黑潮的回流非常强,该时间正好是PDO信号发生位相转变期间。第一模态和第二模态的时间系数也表明,黑潮入侵存在一个约8年周期的振荡,其在1994年后逐渐增强,然后又逐渐变弱,在2004年前后达到最低值,然后又逐渐增强在2008年前后达到最强然后又逐渐减弱,似乎在2014年达到最低。

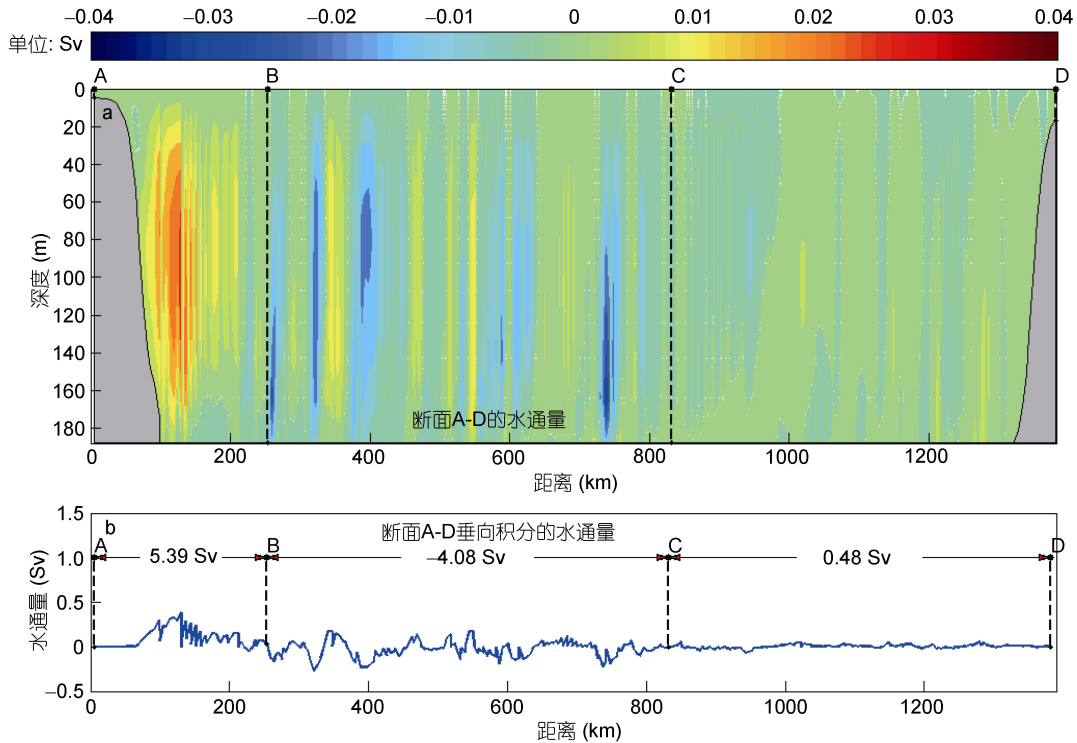


图 5 跨 200m 等深线的年平均水通量分布

Fig.5 Annual mean volume flux distribution along 200m isobath (see Fig.3 for location), where onshore transport is positive.
注: 断面位置参考图 3, 正值表示跨过等深线向陆架的入侵

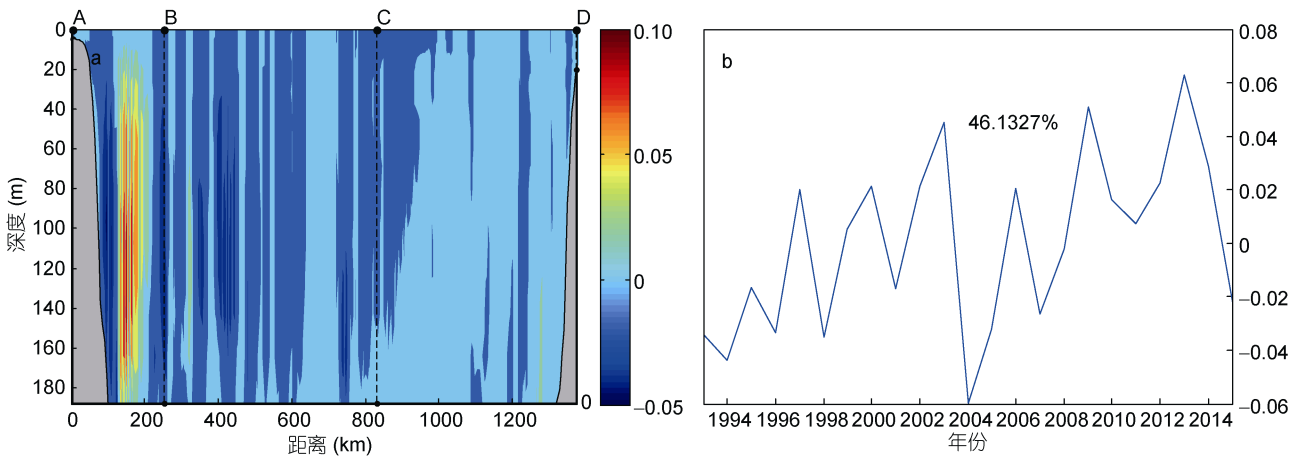


图 6 跨 200m 等深线的年平均水通量 REOF 分解的第一空间模态和时间系数

Fig.6 First spatial pattern and time coefficients of REOF from annual-mean volume transport across the 200m contour
注: b 中的 46.1327% 表示第一模态的方差贡献率

图 8 给出了 1993 年到 2015 年多年平均的沿着 200m 等深线的水通量垂向积分的结果。从图中也可以看出, 台湾东北存在黑潮入侵东海陆架的净流量。垂向积分的跨 200m 等深线的水通量 REOF 分解第一模态的入侵时空特征表明, 入侵主要发生在台湾东北, 并且该入侵存在强烈的年际变化: 在 2004 年存在出一个很弱的黑潮入侵, 而 2012 年左右入侵则相

对较强; 从时间系数图中也可以看出该入侵模态在近 23 年呈现逐渐增强的趋势(见图 9)。

为进一步分析黑潮入侵的年际变化特征, 对 23 年跨陆架的黑潮入侵通量作功率谱分析(图 10)。分析结果表明黑潮的跨陆架入侵存在 8 年的周期变化, 其置信度超过了 90%。对跨陆架的黑潮流量和 PDO 进行相关性分析(图 11), 发现二者存在显著的负相关,

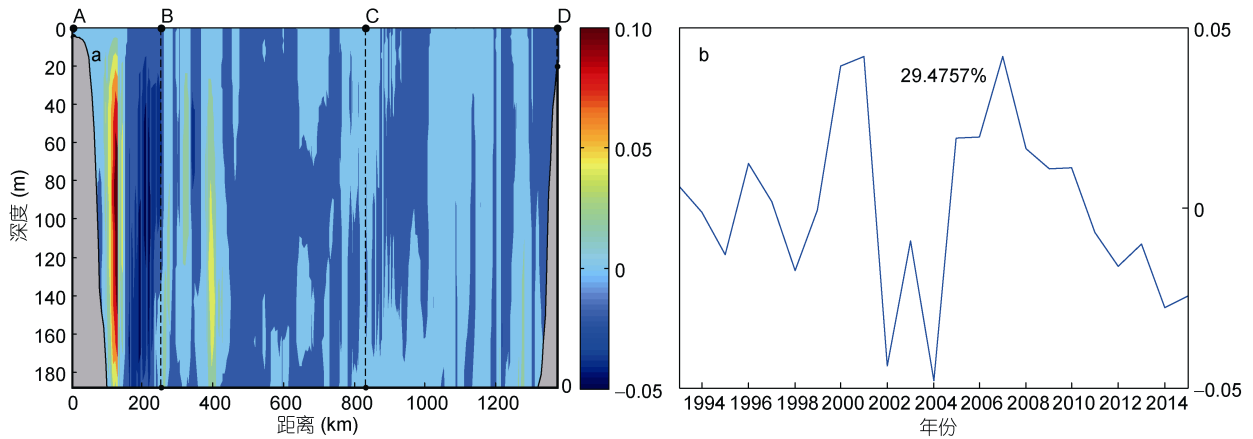


图 7 跨 200m 等深线的年平均水通量 REOF 分解的第二空间模态和时间系数

Fig.7 Second spatial pattern and time coefficients of REOF from annual-mean volume transport across 200m contour
注: b 中的 29.4757% 表示第二模态的方差贡献率

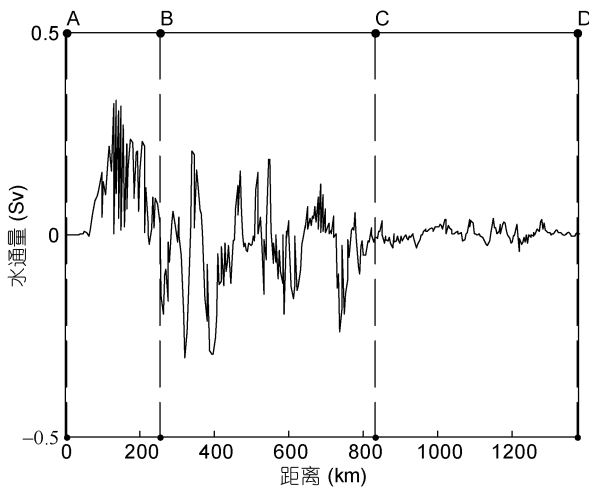


图 8 跨 200m 等深线垂直积分的 1993—2015 年多年平均的水通量

Fig.8 Vertically integrated volume flux across 200m contour from 1993 to 2015

相关系数达-0.63, 说明黑潮入侵的年际变化主要由 PDO 控制。但是由于分析采用的数据为年平均数据, PDO 信号和入侵通量的变化存在一年以内的超前或滞后相关在本文中体现不出来。PDO 信号对入侵通量的影响可能是通过东太平洋的低频 Rossby 波来实现的, 通过缓慢调整, Rossby 波将东太平洋的异常信号输送到西太平洋, 从而使入侵东海陆架的黑潮流量产生约 8 年的周期变化。另外一种可能的解释为: PDO 使太平洋风应力旋度发生变化, 由 Sverdrup 关系(Pedlosky, 1996; Huang *et al*, 2009)知, 大洋内区的南向输送会相应地产生异常, 根据质量守恒, 大洋内区水通量的异常必须通过西边界流变化进行调整。第三种可能的解释为: 根据涡度守恒, PDO 异常期间, 风应力输入了过多的涡度, 该涡度异常必须通过增大西边界的摩擦而耗散, 而增大摩擦有几种途径: 第

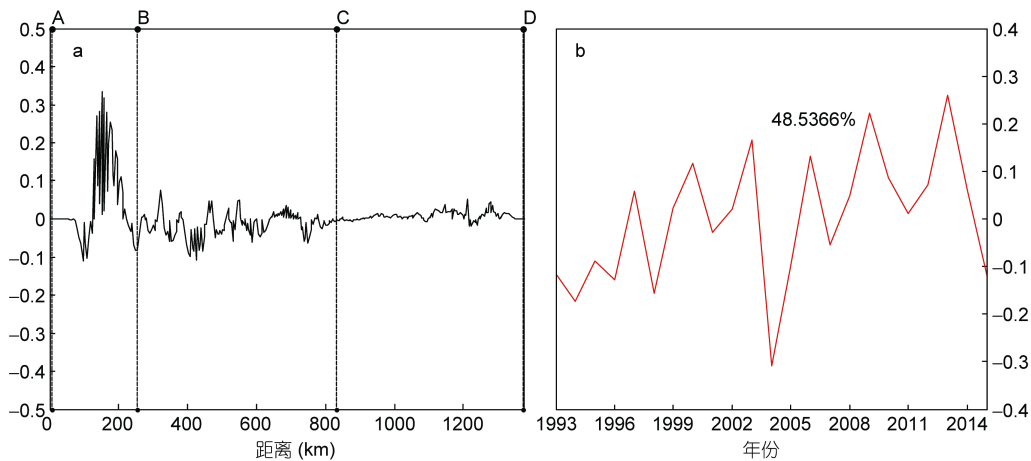


图 9 跨 200m 等深线垂直积分的年平均水通量 REOF 分解的第一空间模态和时间系数

Fig.9 First spatial pattern and time coefficients of REOF from annual-mean vertically integrated volume transport across 200m contour
注: b 中的 48.5366% 表示第一模态的方差贡献率

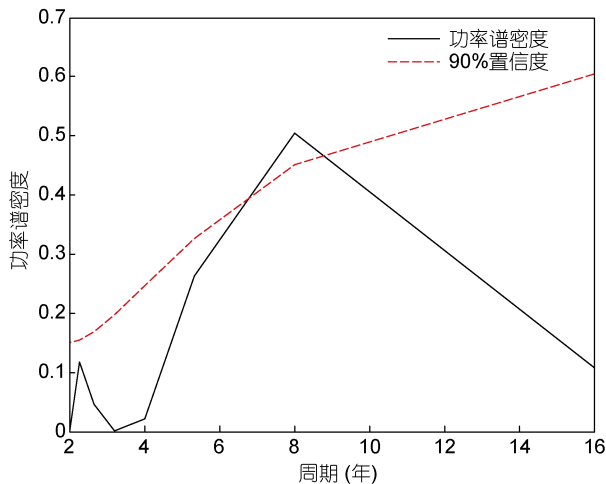


图 10 年平均跨陆架入侵流量的功率谱分析

Fig.10 The power spectrum of annual-mean cross-shelf volume flux

一种是增大西边界流的流速,从而增大摩擦,耗散输入的异常涡度;第二种是更多的黑潮水入侵到陆架,通过增大海底接触面积耗散多余的涡度;第三种是

通过西边界流产生更多的涡旋,从而增大了摩擦的影响,使涡度耗散。这几种机制均能够引起黑潮入侵东海陆架的年际变化。

4 结论

为研究黑潮向东海陆架的入侵,建立了水平分辨率高达 4km 的海洋环流模式,模式包括了潮汐、潮流、热通量、风应力、长江径流、蒸发和降水等驱动场。模式首先进行了 6 年的气候态模拟,然后又进行了 23 年的后报模拟。模拟结果较为准确地再现了东海陆架上的环流结构和关键海峡的水通量。

基于数值模式的后报结果,对 23 年的黑潮跨陆架水通量进行了时空分析。REOF 分析表明,黑潮跨 200m 等深线的入侵主要发生在台湾东北,并且入侵模态主要发生在次表层。对主模态的时间系数分析表明,黑潮入侵存在很强的年际变化,其中 2004 年是一个入侵转换年份,模拟结果表明 2004 年台湾东北的黑潮入侵非常弱,而后逐渐变强,然后又减弱。

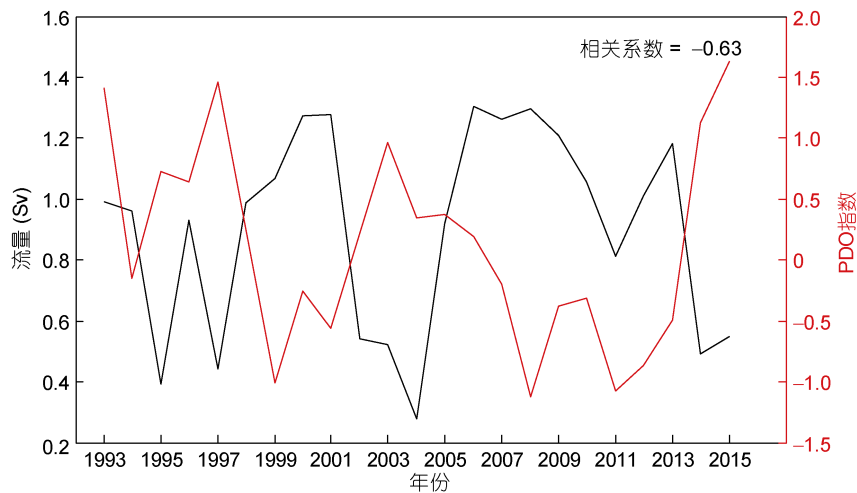


图 11 年平均跨陆架入侵流量与 PDO 信号的相关分析

Fig.11 The correlation coefficient of annual-mean cross-shelf volume flux and PDO signals

黑潮跨 200m 等深线的入侵具有一个约 8 年的周期。相关性分析表明,黑潮跨 200m 等深线的入侵和 PDO 信号具有显著的负相关,说明黑潮入侵东海陆架的年际变化主要受到外海太平洋信号的控制: PDO 信号可以通过风应力涡度的异常影响大洋内区南向的涡度输送,大洋内区的向南涡度输送异常必然通过西边界流-黑潮进行调整,进而影响黑潮对东海陆架的入侵,从而导致其和 PDO 显著相关。

致谢 本文的数值模拟是在中国科学院海洋研究

所的高性能计算平台上完成的,特此致谢。

参 考 文 献

- Chang Y L, Oey L Y, 2011. Interannual and seasonal variations of Kuroshio transport east of Taiwan inferred from 29 years of tide-gauge data. *Geophysical Research Letters*, 38(8): L08603
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J *et al*, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656): 553—597
- Egbert G D, Erofeeva S Y, 2002. Efficient inverse Modeling of

- barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2): 183—204
- Guan B X, Fang G H, 2006. Winter counter-wind currents off the southeastern China coast: A review. *Journal of Oceanography*, 62(1): 1—24
- Guo X, Miyazawa Y, Yamagata T, 2006. The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: The origin of the Tsushima Warm Current. *Journal of Physical Oceanography*, 36(12): 2205—2231
- Hu J Y, Kawamura H C, Li Y Y *et al*, 2010. Review on Current and Seawater Volume Transport through the Taiwan Strait. *Journal of Oceanography*, 66(5): 591—610
- Hu X M, Xiong X J, Qiao F L *et al*, 2008. Surface current field and seasonal variability in the Kuroshio and adjacent regions derived from satellite-tracked drifter data. *Acta Oceanologica Sinica*, 27(3): 11—29
- Huang R X, 2009. Ocean circulation: wind-driven and thermohaline processes. Cambridge University Press, 3302—3305
- Isobe A, 2008. Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves. *Journal of Oceanography*, 64(4): 569—584
- Ito M, Morimoto A, Watanabe T *et al*, 2014. Tsushima Warm Current paths in the southwestern part of the Japan Sea. *Progress in Oceanography*, 121: 83—93
- Jan S, Sheu D D, Kuo H M, 2006. Water mass and throughflow transport variability in the Taiwan Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C12): C12012
- Lian T, Chen D K, 2012. An evaluation of rotated EOF analysis and its application to tropical pacific SST variability. *Journal of Climate*, 25(15): 5361—5373
- Lv X G, Qiao F L, Xia C S *et al*, 2006. Upwelling off Yangtze River estuary in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C11): C11S08
- Maturi E, Sapper J, Harris A *et al*, 2014. GHRSSST Level 4 OSPO Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (GDS version 2). National Oceanographic Data Center, NOAA, Dataset
- Nan F, Xue H J, Yu F, 2015. Kuroshio intrusion into the South China Sea: *Progress in Oceanography*, 137: 314—333
- Oey L Y, Hsin Y C, Wu C R, 2010. Why does the Kuroshio northeast of Taiwan shift shelfward in winter? *Ocean Dynamics*, 60(2): 413—426
- Pedlosky J, 1996. *Ocean Circulation Theory*. New York: Springer-Verlag
- Qiao F L, Yang Y Z, Lv X G *et al*, 2006. Coastal upwelling in the East China Sea in winter. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C11): C11S06
- Shchepetkin A F, McWilliams J C, 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4): 347—404
- Teague W J, Jacobs G A, Ko D S *et al*, 2003. Connectivity of the Taiwan, Cheju, and Korea straits. *Continental Shelf Research*, 23(1): 63—77
- Teague W J, Hwang P A, Jacobs G A *et al*, 2005. Transport variability across the Korea/Tsushima Strait and the Tsushima Island wake. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(11—13): 1784—1801
- Yang D Z, Yin B S, Liu Z L *et al*, 2011. Numerical study of the ocean circulation on the East China Sea shelf and a Kuroshio bottom branch northeast of Taiwan in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C5): C05015
- Yang D Z, Yin B S, Liu Z L *et al*, 2012. Numerical study on the pattern and origins of Kuroshio branches in the bottom water of southern East China Sea in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C2): C02014
- Yang D Z, Yin B S, Sun J *et al*, 2013. Numerical study on the origins and the forcing mechanism of the phosphate in upwelling areas off the coast of Zhejiang province, China in summer. *Journal of Marine Systems*, 123—124: 1—18
- Yin Y Q, Lin X P, He R Y *et al*, 2017. Impact of mesoscale eddies on Kuroshio intrusion variability northeast of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(4): 3021—3040
- Zhang D X, Lee T N, Johns W E *et al*, 2001. The Kuroshio east of Taiwan: Modes of variability and relationship to interior ocean mesoscale eddies. *Journal of Physical Oceanography*, 31(4): 1054—1074
- Zhang J, Guo X Y, Zhao L *et al*, 2017. Water Exchange across Isobaths over the Continental Shelf of the East China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 47(5): 1043—1060
- Zhao L, Guo X Y, 2011. Influence of cross-shelf water transport on nutrients and phytoplankton in the East China Sea: a model study. *Ocean Science*, 7(1): 27—43

NUMERICAL STUDY ON INTER-ANNUAL VARIATION OF CROSS-SHELF INTRUSION OF KUROSHIO INTO EAST CHINA SEA

YANG De-Zhou^{1, 2, 3}, XU Ling-Jing^{1, 2, 4}, YIN Bao-Shu^{1, 2, 3, 4}, FENG Xing-Ru^{1, 2, 3},
CHEN Hai-Ying^{1, 2, 3}, QI Ji-Feng^{1, 2, 3}, CUI Xuan^{1, 2, 4}

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

Abstract In order to examine the inter-annual variation of Kuroshio intrusion across the 200m contour of continental shelf of the East China Sea (ECS), a Regional Ocean Modeling System (ROMS) was used to study water exchange between Kuroshio and ECS. The horizontal resolution was 4 km, in which mesoscale eddies can be resolved. At first, the model was run for six years with climatology forcing, followed by a hindcast run from 1993 to 2015 to analyze the inter-annual variation of volume flux across the 200m contour. A well-known ocean circulation pattern on the ECS shelf is reproduced faithfully in our modeling. In addition, there are good agreements between model results and observed volume flux across Taiwan Strait and Tsushima Strait. Based on numerical model results, annually mean cross-shelf volume flux along 200m contour was investigated. Rotated Empirical Orthogonal Function (REOF) was used to analyze the inter-annual variation of volume flux. The leading modes of REOF show that the Kuroshio intrusion mainly occurs in the subsurface water of the Kuroshio northeast of Taiwan, and clearly shows 8-year-period inter-annual variation in strength. The variation of magnitude correlates to the Pacific Decadal Oscillation (PDO) very well, and its negative correlation coefficient reach as high as 0.63. The good correlation between PDO and inter-annual variation of cross-shelf volume flux could be interpreted as that PDO induced abnormal wind stress curl; it in turn caused abnormal equatorward volume transport according to Sverdrup relation; and finally, the equatorward volume transport must be compensated by intensified western boundary current according to the continuity equation.

Key words Kuroshio; East China Sea; intrusion; ROMS