

吕宋和台湾岛以东黑潮季节与年际变化 规律的对比分析*

武 杰^{1,3} 张林林^{1,2,4} 闫晓梅^{1,2,4}

(1. 中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071;
3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 青岛 266237)

摘要 黑潮是北太平洋副热带环流系统的一支重要的西边界流。前人对不同流段黑潮的季节和年际变化进行了诸多研究,然而基于不同数据所得结论仍存在差异,尤其是不同模式计算所得流量差别很大,而且以往研究往往着眼于某一流段,对不同流段黑潮变化之间的异同及其原因涉及较少。本文基于卫星高度计数据,评估了 OFES(Ocean general circulation model For the Earth Simulator)和 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model)两个模式对吕宋岛和台湾岛以东黑潮季节与年际变化的模拟能力,进而对两个海域黑潮变化的异同及其物理机制进行了分析。结果表明:HYCOM 模式对黑潮季节变化的模拟较好,而 OFES 模式对黑潮年际变化的模拟较好。吕宋岛以东黑潮和台湾岛以东黑潮在季节与年际尺度上的变化规律均不相同,且受不同动力过程控制。吕宋岛以东黑潮呈现冬春季强而秋季弱的变化规律,主要受北赤道流分叉南北移动的影响;而台湾岛以东黑潮呈现夏季强冬季弱的变化特点,主要受该海区反气旋涡与气旋涡相对数目的季节变化影响。在年际尺度上,吕宋岛以东黑潮与北赤道流分叉及风应力旋度呈负相关,当风应力旋度超前于流量 4 个月时相关系数达到了 -0.56;而台湾岛以东黑潮的流量变化则受制于副热带逆流区涡动能的变化,且滞后于涡动能 9 个月时达到最大正相关,相关系数为 0.44。本研究对于深入理解不同流段黑潮的多尺度变异规律及其对邻近海区环流与气候的影响具有重要意义,同时对于黑潮研究的数值模式选取具有重要参考价值。

关键词 黑潮; 流量; 季节和年际变化; ENSO(El Niño-Southern Oscillation)

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20200300062

黑潮作为北太平洋副热带环流的西边界流,对海洋中物质和能量的经向输送起到关键作用,同时对西太平洋暖池的热收支也具有重要作用(Pickard *et al*, 1983; Lukas *et al*, 1996; Hu *et al*, 2015)。太平洋北赤道流(North Equatorial Current, NEC)向西流动,到达吕宋岛东岸分叉形成两支海流,即北向的黑潮(Kuroshio Current, KC)和南向的棉兰老流(Mindanao Current, MC)(Nitani, 1972; Hu *et al*, 1991; Lukas *et al*, 1996)。黑潮在向北流动的过程中,经过吕宋海峡时一

部分水体入侵南海,剩余的主体部分沿台湾岛东岸继续向北进入东海,在 30°N 转向东后从吐噶喇海峡流出东海。黑潮具有高温、高盐、流速高和流量大等特征,将大量热量从低纬度地区输送到中纬度地区,对太平洋甚至全球的气候和环境变化具有重要影响,而且对流经海域的生态环境和渔业也有显著影响(Chen, 1996; Lukas *et al*, 1996; Sakamoto *et al*, 2005)。

从 20 世纪开始,许多学者就利用观测和模式数据对源区黑潮流速和流量的季节变化进行了研究。黑

* 国家自然科学基金, 41776021 号, 41606016 号; 中科院战略先导专项, XDB42010102 号; 全球变化与海气相互作用专项, GASI-IPOVAI-01-01; 山东省重大科技创新项目, 2018SDKJ0105 号; 山东省自然科学基金, ZR2016DQ04 号; 鳌山科技创新计划项目, 2016ASKJ12。武 杰, 硕士研究生, E-mail: 2250565022@qq.com

通信作者: 张林林, 博士生导师, 研究员, E-mail: zhanglinlin@qdio.ac.cn

收稿日期: 2020-03-08, 收修改稿日期: 2020-03-31

潮源区所在的 NMK 流系(NEC, MC 和 KC)具有明显的春季强秋季弱的变化特点(于非等, 2000; 周慧等, 2006; 康霖, 2011; 李博, 2016)。Qu 等(1998)基于水文断面观测的研究表明源区黑潮在 4—6 月份最强而在 9—10 月份最弱。王凡等(2001)利用全球海洋同化数据研究了西太平洋环流的季节变化, 却发现源区黑潮流量在 1 月份最强, 9 月份最弱。Lien 等(2014)利用 1992—2013 年期间的局地海表面异常(Sea Level Anomaly, SLA)数据计算了 18.75°N 断面黑潮流量的季节变化, 结果表明黑潮输送在春季和冬季(秋季)较强(弱)。源区黑潮的变化受 NEC 分叉变化影响很大, NEC 分叉点在 10 月份移到最高纬度, 此时 12°—14°N, 127°—130°E 海区的风应力旋度为正且海区的海表面高度降低, 北太平洋热带环流增强而北太平洋副热带环流减弱, 导致吕宋岛以东黑潮表现为秋季偏弱(Qiu *et al.*, 1996, 2010; Chen *et al.*, 2011)。总的来讲, 虽然多数研究显示源区黑潮春季增强, 但也有研究指出了其冬季增强的现象。

受观测手段以及观测时间的影响, 不同研究中对台湾岛以东黑潮流量的估算也存在较大差异, 年平均值在 15—33Sv 之间(Liang *et al.*, 2003; 贾英来等, 2004; Hsin *et al.*, 2008; 王辉赞等, 2018)。Tang 等(2000)利用 1992—1994 年期间多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)测得的数据研究了台湾岛东北 25.125°N 断面黑潮流量的季节变化, 结果表明夏季黑潮流速最大超过 100cm/s, 而冬季黑潮流速小于 100cm/s。Hsin 等(2008)根据 EAMS(East Asian Marginal Seas)模式计算了 1982—2005 年期间台湾岛以东 22°—25°N 之间黑潮的流量, 发现 24°N 黑潮的流量有明显的季节变化, 其夏季流速大于秋季和冬季。Yin 等(2019)基于卫星高度计数据研究了台湾岛以东的中尺度涡, 其结果表明黑潮流量的季节变化和该海区反气旋涡与气旋涡的相对数目季节变化有关。总体来讲, 不同研究对吕宋岛和台湾岛以东黑潮流量的数值及其季节变化虽然有一些相对一致的结论, 但部分结果仍存在差异。

前人对于黑潮流量的年际变化也进行了一系列研究。Kim 等(2004)基于 OGCM(Ocean General Circulation Model)资料得出, NEC 与源区黑潮流量的年际变化与 NEC 分叉纬度很好的对应, 当 ENSO (El Niño-Southern Oscillation)处于正相位时, NEC 分叉纬度北移, 黑潮输送减弱, 而当 ENSO 处于负相位时情况相反。Chen 等(2015)发现由于 NEC 分叉的南移,

2010 年 11 月—2012 年 10 月期间 18°N 断面黑潮在 200—700m 之间的平均流速增强了 15cm/s。Qiu 等(1996)则指出并不是所有 NEC 的年际输送峰值都对应于 ENSO 事件, 而且棉兰老流(源区黑潮)与 NEC 在准两年周期上的相关性更好(差)。

对台湾岛以东黑潮的年际变化, 利用不同数据得出的结论以及影响机制有较大差异。贾英来等(2004)利用石垣基隆的验潮站数据结合 SODA(Simple Ocean Data Assimilation)风应力资料得到: 台湾岛以东黑潮流量具有 2—5 年的显著周期, 在 1991 年前台湾岛以东黑潮流量的年际变化与太平洋内区的风应力旋度存在着密切的关系, 而在 1991 年后可能受到其他因素的控制。Hwang 等(2002)发现台湾岛以东黑潮的输送与 ENSO 有密切的关系, 当流量滞后于 ENSO 1 个月时正相关系数为 0.6。而 Chang 等(2012)基于卫星高度计数据和验潮站数据则指出 PTO(Philippines-Taiwan Oscillation)是北太平洋年际变化的一个重要参数, ENSO 只能解释北太平洋环流的部分变化。当 PTO 为正相位时, 增强了 STCC-NEC 系统的垂直剪切, 并通过涡旋增强了台湾岛东北的黑潮输送, PTO 处于负相位时情况相反。此外, Hsin 等(2013)基于 1982—2005 年期间 EAMS 资料发现台湾岛以东气旋与反气旋的相对强度是影响黑潮年际变化的重要因素, 而 Yan 等(2016)通过分析 1993—2011 年期间卫星高度计数据发现台湾岛以东气旋与反气旋的相对数目才是影响黑潮流量年际变化的关键因子。

综上所述, 已有研究对不同流段黑潮的季节和年际变化做了很多分析, 但基于不同来源数据所得到的结论仍存在差异, 不同模式计算得到的流量在数值上有很大差别, 而且以往研究往往着眼于黑潮的某一流段, 对不同流段黑潮变化之间的异同及其原因涉及较少。本文利用卫星高度计数据、OFES(Ocean general circulation model For the Earth Simulator)模式和 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model)模式数据对黑潮在吕宋岛和台湾岛以东两个海域的季节和年际变化进行了对比分析, 评估了两个模式对黑潮季节和年际变化的模拟能力, 进而对两个海域黑潮变化的异同及其物理机制进行了研究。

1 数据以及方法

本文所用的是日本地球模拟器得到的高精度海洋模式 OFES 1980—2018 期间的月输出数据。OFES

是一种基于 GFDL/NOAA(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/National Oceanic and Atmospheric Administration) MOM3(modular ocean model)的模式, 其空间范围为 75°S—75°N, 水平分辨率为 0.1°×0.1°, 垂直方向上每层间隔厚度参考了真实海洋的温跃层厚度, 随深度加深而逐渐变大, 从表层的 5m 到最深处的 6065m 共分为 54 层。关于 OFES 模式的详细描述见 Masumoto 等(2004)。

本文还用到了 HYCOM 全球海洋环流模式数据, 该模式垂向采用混合坐标(等密度坐标、 σ 坐标和 z 坐标), 其优点是可以在不同层结的海洋中选用相对应的垂直坐标系: 在深海中选用等密度坐标系, 而在浅海中选用随底坐标。HYCOM 模式同化了现存的观测数据, 包括水平流场、海表面以及温盐数据。该模式的水平分辨率为 1/12°×1/12°, 垂直方向上从 5m 到 5000m 共分为 50 层。本文采用 1994—2015 年共 22a 的输出数据, 关于 HYCOM 模式的主要特点见 Chassignet 等(2007)。此外, 还用到了 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 10m 的再分析风场数据。ECMWF 数据范围覆盖全球 (0°—360°E, 90°S—90°N), 目前可以达到的最高精度为 0.125°×0.125°, 本文选取 0.25°×0.25°精度的风场数据进行研究。另外, 本文采用的卫星高度计数据是由 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)在 CNES(Centre Nation D'Etudes Spatiales)支持下发布的 1993—2017 年期间的输出数据, 该产品基于 DUACS (Data Unification and Altimeter Combination System)多任务高度计数据处理, 并且对所有的卫星数据进行了最优插值, 最终计算得到海表面高度数据(Sea Surface Height, SSH), 并进一步通过地转关系计算了地转流速。

本文利用 OFES 模式和 HYCOM 模式的数据对黑潮在吕宋岛以东(18°N)和台湾岛以东(24°N)两个断面处的经向流速进行分析, 再利用高度计计算出的地转流进行验证。黑潮体积输送的计算公式为

$$VT = \int_{x_2}^{x_1} \int_0^m V dz dx, \quad (1)$$

其中, V 为经向流速, 而 x_1 和 x_2 分别是黑潮主体的东西边界。在垂直方向上, 本文对不同的计算方法进行了比较和评估, 第一种方法为在深度上统一取 600 或 800m, 计算所有北向流速, 考虑到黑潮影响深度的变化, 第二种方法取黑潮的下边界为 5 或 10cm/s 等值线。结果表明不同的计算方法在数值上有 1—2Sv 的

差异, 但在季节变化和年际变化上无明显差异(图略)。本文最终选择 5cm/s 为标准确定黑潮的下边界计算黑潮的流量。

2 黑潮的季节变化

2.1 流速

黑潮在吕宋岛以东流速比较强而且流向基本向北(图 1), 本文选择 18°N 断面对黑潮进行分析。图 2a 和 c 给出了 OFES 和 HYCOM 模式中该断面处黑潮的平均流速结构, 可以看到黑潮流核主要在 0—600m 之间, 表层流速最强超过 70cm/s, 在黑潮下方 500m 以深是南向的次表层流-吕宋潜流(图 2c), 流速最大值为 10cm/s。在黑潮以东有南北向交替的海流存在, 这种现象可能与东侧 150—600m 深度间的暖涡有关(Guan, 1983)。如图 2 所示, OFES 和 HYCOM 模式中黑潮主流都在 122°—124°E 之间, 所以计算表层流速时取这个经度范围内的平均值。图 3a 展示了基于卫星高度计数据、HYCOM 模式和 OFES 模式数据得到的黑潮在 18°N 断面表层流速的季节变化, 其平均值分别为 27.1、29.9 和 26.6cm/s。可以看到, HYCOM 模式和卫星观测到黑潮表层流速的季节变化位相一致, 都在 1 月份最强(分别为 31.3 和 35.0cm/s), 而在 9 月份最弱(分别为 21.1 和 23.6cm/s), 这和王凡等(2001)利用全球海洋同化数据得到的结论一致。吕宋岛以东黑潮表层流速的季节变化与 NEC 分叉点季节性的南北偏移呈现反相关的关系(图 3e), 当分叉点偏

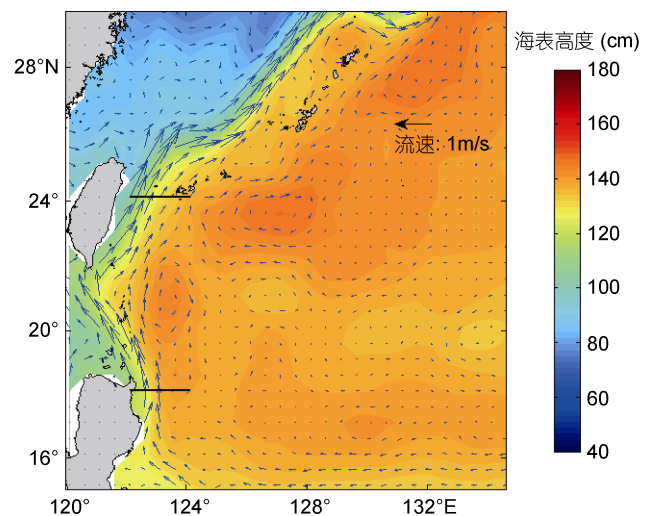


图 1 黑潮流域表层地转流场图

Fig.1 Surface geostrophic current in the Kuroshio area
注: 根据卫星高度计数据计算出的地转流流场, 背景场是海表面高度(Sea Surface Height, SSH), 两条黑色的直线分别是所取的 18°N 断面和 24°N 断面

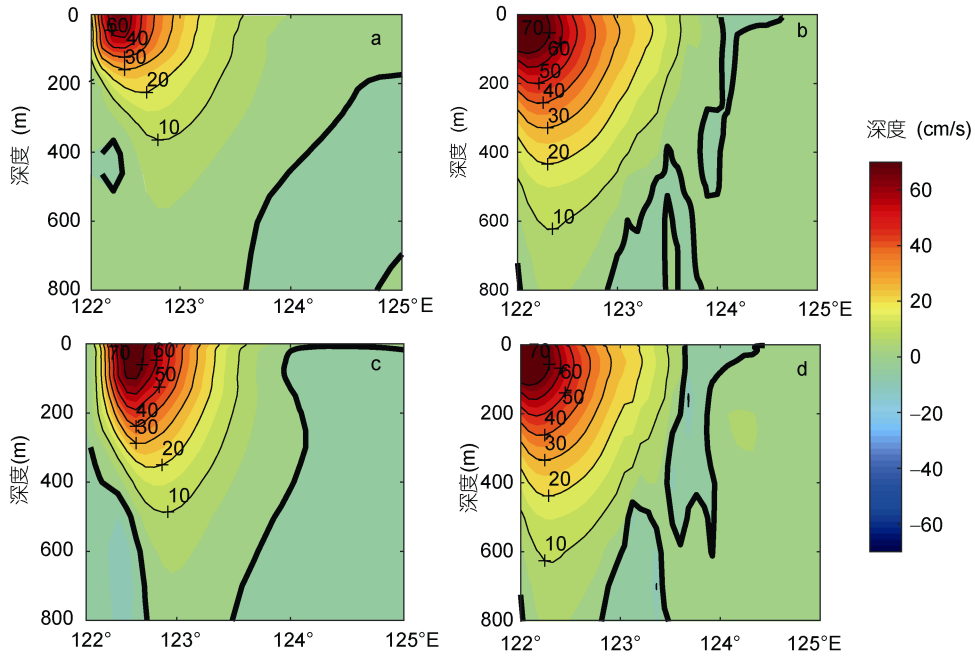


图2 OFES 模式模拟的 18°N(a)和 24°N(b)断面处的黑潮平均经向流速以及 HYCOM 模式模拟的 18°N(c)和 24°N(d)断面处的黑潮平均经向流速

Fig.2 Mean meridional velocity of Kuroshio at 18°N(a) and 24°N(b) sections simulated by OFES, and mean meridional velocity of Kuroshio at 18°N (c) and 24°N(d) sections simulated by HYCOM

注: 图中黑色粗线表示速度为 0cm/s

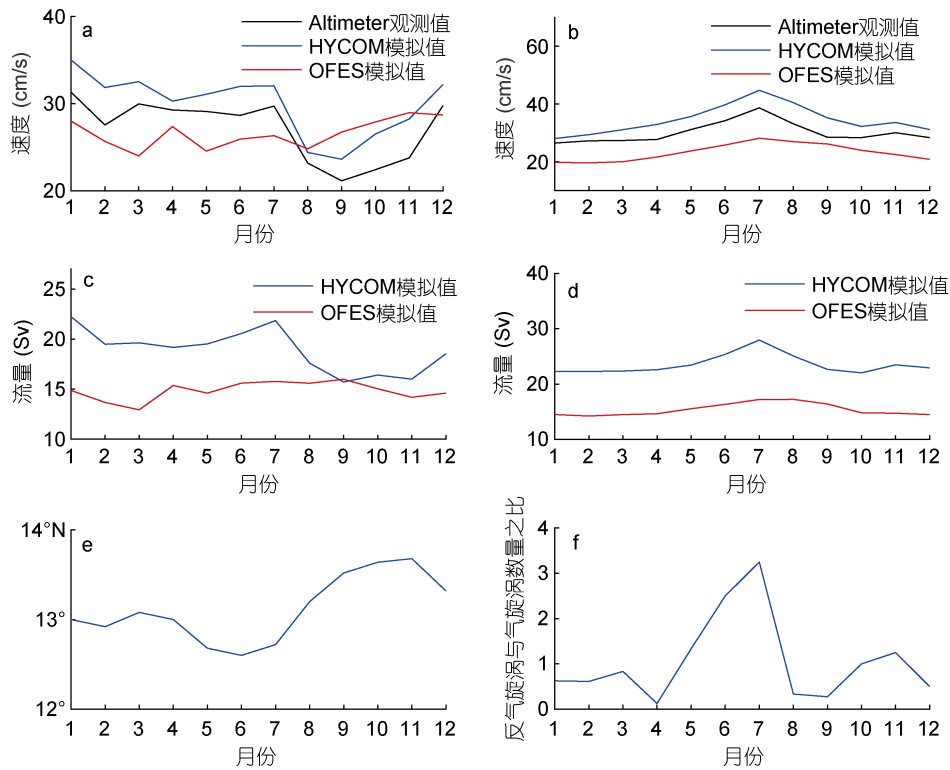


图3 黑潮表层流速(a、b)、黑潮流量(c、d)、NEC 分叉点纬度(e)、反气旋涡与气旋涡数量之比(f)的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of surface velocity V of the Kuroshio(a, b), volume transport of Kuroshio(c, d), the annual cycle of the NECBL(e), the ratio between anticyclonic eddy number and cyclonic eddy number(f)

注: a 和 b 分别为 18°N 和 24°N 断面的黑潮流速, c 和 d 分别为 18°N 和 24°N 断面的黑潮流量, f 为 Yin 等(2019)的计算结果

北时, 黑潮流速偏弱, 反之亦然, Qiu 等(1996)的研究中就指出了这一点。此外, 与卫星观测结果相比, OFES 模式模拟的吕宋岛以东黑潮的表层流速较弱且季节变化的位相也不一致(图 3a)。

对于台湾岛以东黑潮, 其在 24°N 断面上的经度范围同样为 122° — 124°E (图 2b 和 d)。类似地, 图 3b 比较了基于卫星高度计、HYCOM 模式和 OFES 模式数据得到的 24°N 断面上黑潮表层流速的季节变化。与 18°N 断面的结果类似, HYCOM 模式得到的流速数值最大(34.5cm/s), 卫星高度计计算得到的黑潮表层流速次之(30.1cm/s), 而 OFES 模式中的流速最小

(23.2cm/s), 和卫星高度计结果差别相对较大。三种数据计算的黑潮流速季节变化位相一致, 都显示黑潮在夏季较强而冬季较弱, 在 7 月份达到最大值, 而在 1 月份流速最小, 这与 Tang 等(2000)基于 ADCP 观测的研究结果一致。

2.2 流量

前人研究指出黑潮表层流速和流量的变化趋势密切相关, 但却不是完全一致, 黑潮的流量在更大程度上取决于黑潮流速的垂直结构(管秉贤, 1964)。为了更好地理解黑潮的季节变化规律, 图 4 给出了 HYCOM 模式中黑潮在 18°N 和 24°N 两个断面上流速垂直结构

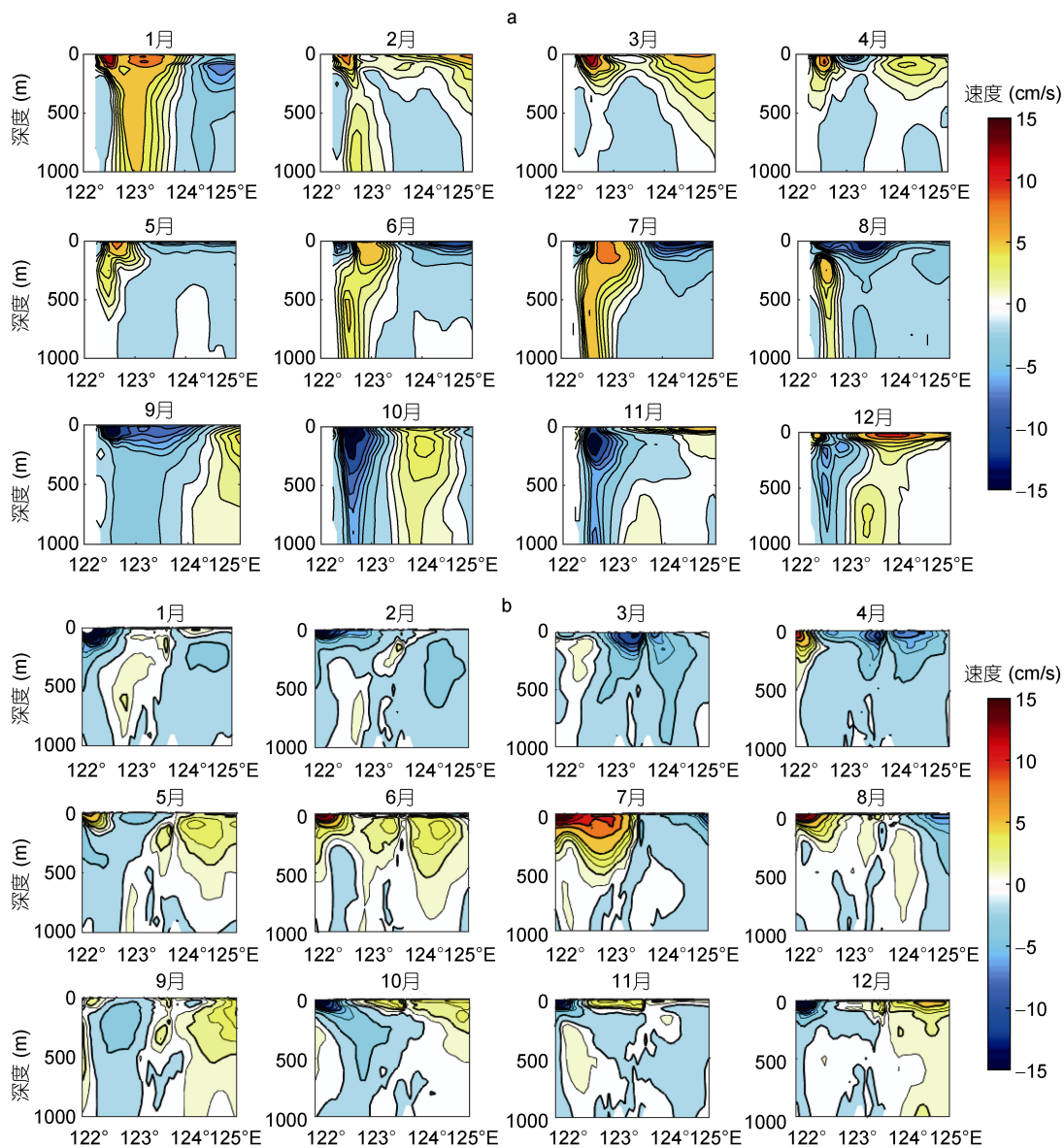


图 4 HYCOM 模式中 18°N (a)和 24°N (b)断面的月平均经向流速异常

Fig.4 Monthly mean velocity anomaly at 18°N (a)和 24°N (b) Section from HYCOM

的季节变化。可以看到,黑潮主体在 122° — 124° E 之间,深度都在 600m 深度以上,吕宋岛以东黑潮流速在 1—7 月份期间都比较强(4 月份较弱),从 8 月份开始逐渐减弱(图 4a)。而台湾岛以东黑潮的流速在 5—8 月份期间较强,其他月份则比较弱(图 4b)。黑潮在两个断面的表层流速和流量都有一致的季节变化特征,说明黑潮流速的垂直结构比较稳定。

基于 HYCOM 模式数据可以进一步计算得到黑潮流量,在水平方向上选取 122° — 124° E 作为黑潮主流的边界,垂直方向上以 $V > 5\text{cm/s}$ 为黑潮的下边界。图 3c 和 d 分别展示了 18° N 和 24° N 两个断面上黑潮流量的季节变化。模式结果表明吕宋岛以东黑潮流量与表层流速的季节变化一致,流量在 1 月和 7 月出现大值(21.8Sv),最小值出现在 9 月份(15.7Sv),且与 NEC 分叉点的季节循环很好地对应(图 3e)。Qiu 等(2010)和 Chen 等(2011)的研究也指出 NEC 分叉点在 6—7 月到达最低纬度且在 10—11 月到达最高纬度,这与本文计算的流量变化规律基本一致。NEC 分叉点在秋季移动到最高纬度,此时 12° — 14° N 和 127° — 130° E 海区的风应力旋度为正且海区的海表面高度降低,北太平洋副热带环流减弱,导致吕宋岛以东黑潮秋季减弱(Qiu *et al.*, 1996)。本文计算得到的 HYCOM 模式中 18° N 断面处黑潮的平均流量为 18.9Sv ,这与 Toole 等(1990)根据观测资料计算得到源区黑潮流量平均值 21.4Sv 基本一致。而 OFES 模式中流量的数值偏小,仅为 14.85Sv ,且 OFES 模式中流量的季节变化不明显。

对于台湾岛以东黑潮, HYCOM 模式模拟的平均流量为 23.6Sv ,且流量和表层流速呈现相同的季节变化(图 3b 和 d),在 7 月份时流量达到了最大值 27.96Sv ,而在春季和冬季较弱。贾英来等(2004)根据验潮站资料计算的台湾岛以东黑潮流量均值为 22.9Sv ,与本文 HYCOM 模式的计算结果一致。而 OFES 模式模拟的黑潮流量平均值仅 15.4Sv ,其强度以及季节变化都比以往的观测结果弱很多。不同于源区黑潮,台湾岛以东黑潮的季节变化受中尺度涡旋影响很大。副热带逆流区海表面的季节性冷却或加热可以影响该区域的层结,并通过区域不均匀的对流导致温跃层坡度变化,进而改变 STCC-NEC 区域的垂直剪切,并进一步通过斜压不稳定过程产生中尺度涡旋(Halliwel *et al.*, 1994; Qiu, 1999)。这些中尺度涡源不断地向西移动,最终到达台湾岛以东海区影响该海区黑潮的流量,本文参考 Yin 等(2019)的研究

计算了到达台湾岛以东的反气旋涡与气旋涡数目的相对比值(图 3f),与台湾岛以东黑潮流量的季节变化一致。夏季到达台湾岛以东的反气旋涡多于气旋涡,从而导致台湾岛以东黑潮增强;而冬季到达台湾岛以东的气旋涡多于反气旋涡,导致台湾岛以东黑潮减弱。因此,涡旋是影响台湾岛以东黑潮流量季节变化的重要因素。

综上,在季节尺度上,黑潮在吕宋岛以东 18° N 断面上的流量表现为冬春季较强而秋季较弱,而在台湾岛以东 24° N 断面上的流量则表现为夏季最强而冬季较弱。在这两个断面上, HYCOM 模式和卫星的结果都较为一致,模拟效果明显优于 OFES 模式。结合前人研究结果,可以看出吕宋岛以东黑潮季节变化主要受到 NEC 分叉点变化的影响,而台湾岛以东黑潮季节变化主要受该海区反气旋涡与气旋涡的相对数目的季节变化影响。

3 黑潮的年际变化

黑潮除了有明显的季节变化特征,也有较明显的年际变化特征。本文利用 OFES 和 HYCOM 模式的月平均数据对黑潮流量的年际变化进行了对比研究。流量计算方法与前文一致,但对计算得到的流量时间序列做了一年低通滤波处理以去除其季节变化。初步分析发现 HYCOM 模式计算得到的黑潮流量时间序列与 ENSO 指数在年际尺度上相关性很弱,这与前人的研究结果有着比较大的差异,而 OFES 模式在年际尺度上的信号更加明显且与 ENSO 的相关关系更好,所以本文选择 OFES 资料详细分析黑潮的年际变化。

图 5 给出了黑潮在两个断面的流量异常经过标准化处理后的月平均时间序列。谱分析结果表明 OFES 模式中 18° N 断面处的黑潮流量具有 3—5a 的显著周期(图略)。如图所示,当 ENSO 处于正相位时, 18° N 断面黑潮流量通常较弱,而当 ENSO 处于负相位时通常较强,而 24° N 断面处的黑潮流量与 ENSO 的相关性较差(图 5)。超前滞后分析的结果表明 18° N 断面的黑潮流量滞后于 Nino3.4 指数 3 个月时达到了最大负相关系数 -0.35 ,而 24° N 断面的黑潮流量滞后于 Nino3.4 指数 10 个月时最大正相关指数只有 0.14,低于 95%置信度水平,意味着台湾岛以东黑潮流量的年际变化基本不受 ENSO 的直接影响。而吕宋岛以东黑潮的年际变化虽受 ENSO 影响,但其具体过程尚不清楚。因此,本文进一步分析了影响两个区域黑潮流量年际变化的因素及相关的动力过程。

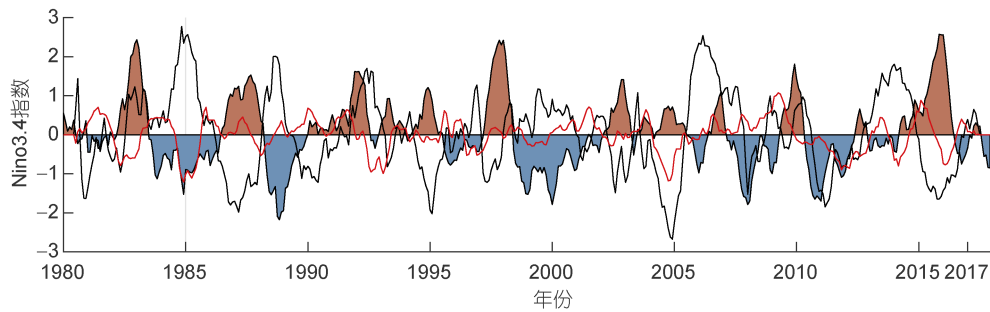


图 5 18°N 和 24°N 断面上的黑潮流量异常与 Nino3.4 指数的时间序列

Fig. 5 Time series of Nino 3.4 index and transport of Kuroshio at 18°N and 24°N

注: 黑色曲线和红色曲线分别是根据 OFES 模式的数据计算得到的 18°N 和 24°N 断面处黑潮流量异常的标准化时间序列; 彩色区域为 Nino3.4 指数(http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Data); 流量和 Nino3.4 指数的时间序列都经过了 1a 的低通滤波处理

如前所述, NEC 分叉点的季节性移动控制着吕宋岛以东黑潮的季节变化, 而大尺度的风应力旋度又是控制 NEC 分叉点移动的关键因素, 所以在年际变化上, 吕宋岛以东黑潮也可能受到 NEC 分叉点和大尺度风应力旋度的影响。Qiu 等(2010)指出 NEC 分叉点的年际移动可以用 12°—14°N 和 127°—130°E 范围内的海表面高度异常(Sea Surface Height Anomaly, SSHA)来表征, 而风应力旋度又控制着 SSHA 的变化, 因此本文利用多年的风场数据计算了这个区域内的平均风应力旋度。此外, 利用卫星高度计数据计算得到的地转流, 可以进一步获得 NEC 分叉点 (NEC

bifurcation latitude, NECBL)的时间序列, 计算得到的 NECBL 平均值为 12.26°N, 与 Yaremchuk 等(2003)根据历史水文资料得到的结果一致。

如图 6 所示, 在年际尺度上, Nino3.4 指数和风应力旋度都与 NECBL 有着一致的变异规律, 即当 ENSO 处于正相位时, 风应力旋度为正值且分叉点偏北, 而当 ENSO 处于负相位时情况与此相反。Nino3.4 指数和 NECBL 的相关系数为 0.52, 而风应力旋度超前 NECBL 3 个月时达到最大正相关 0.65(表 1)。18°N 断面上的黑潮流量与风应力旋度和 NECBL 都有很好的负相关关系(图 6)。风应力旋度为正值且 NEC 分叉点

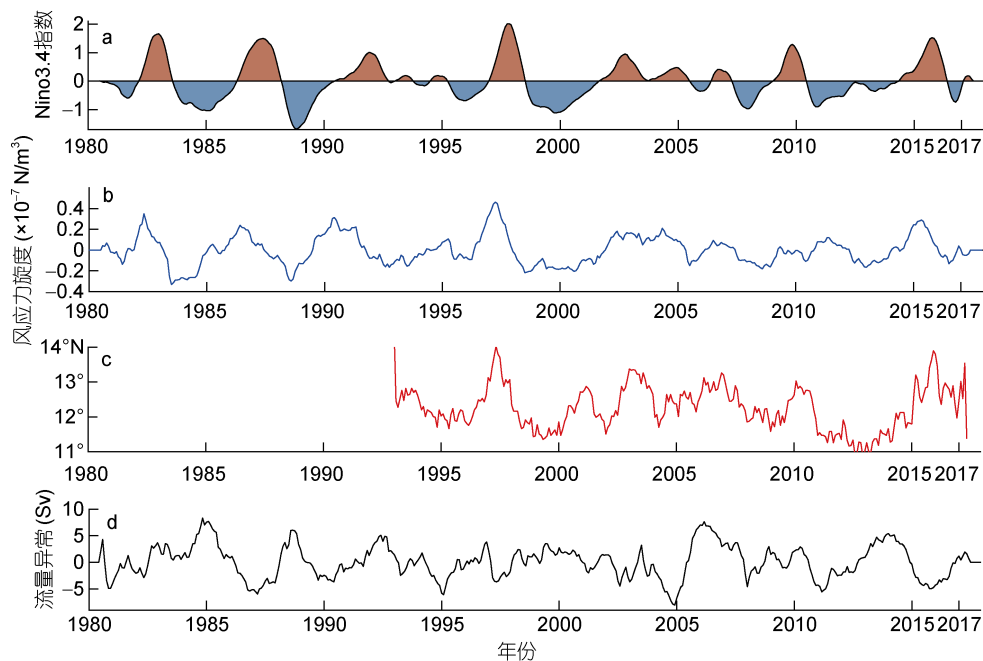


图 6 1980—2017 年 Nino3.4 指数、风应力旋度、NEC 分叉点和流量的时间序列

Fig. 6 Time series of Nino3.4 index, wind stress curl, NEC bifurcation latitude (NECBL), and transport of Kuroshio at 18°N

注: a: Nino3.4 指数的时间序列; b: 根据 Qiu 等(2010)的研究中计算的 12°—14°N, 127°—130°E 区域的平均风应力旋度的时间序列; c: 北赤道流分叉纬度的时间序列(1993—2017 年); d: 18°N 断面流量异常的时间序列; 四组图的数据都经过了 1a 的低通滤波处理

表 1 Nino3.4 指数、风应力旋度、北赤道流分叉点和 18°N 断面黑潮流量间的相关系数/超前滞后月数

	Nino3.4 指数	风应力旋度	北赤道流分叉点	流量
Nino3.4 指数	1	0.71/-6	0.52/0	-0.35/-3
风应力旋度	0.71/6	1	0.65/3	-0.56/4
北赤道流分叉点	0.52/0	0.65/-3	1	-0.76/12
流量	-0.35/3	0.56/-4	-0.76/-12	1

注: 1980—2017 年期间 Nino3.4 指数、12°—14°N 和 127°—130°E 区域内的平均风应力旋度、18°N 断面黑潮流量与 1993—2017 年间 NEC 分叉点(NEC bifurcation latitude, NECBL)之间的相关系数, 月数大于 0 时表示超前, 小于 0 时则表示滞后, 如-0.56/4 表示风应力旋度超前于流量 4 个月时, 相关系数为-0.56

偏北时, 吕宋岛以东黑潮流量较弱(表 1)。特别的, 当风应力旋度超前黑潮流量 4 个月时达到最大负相关-0.56, 而当 NECBL 超前于黑潮流量 12 个月时达到最大负相关-0.76(图 7)。由此可见, 大尺度的风应力旋度与 NEC 分叉点的南北移动是影响 18°N 断面黑潮流量年际变化的主要因素。

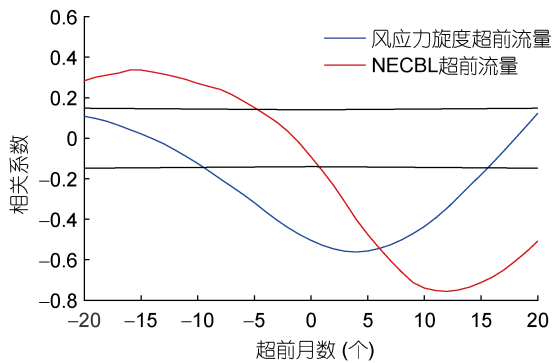


图 7 风应力旋度和北赤道流分叉点与黑潮流量的相关关系

Fig.7 Correlation between wind stress curl, NECBL, and Kuroshio transport

注: 蓝色曲线和红色曲线分别为区域内(12°—14°N, 127°—130°E)平均风应力旋度和分叉点分别与流量的超前滞后分析; 黑色线为 95%置信区间

对于台湾岛以东黑潮, 图 8 给出了利用 OFES 和 HYCOM 模式数据计算得到的 24°N 断面上黑潮流量的时间序列, 可以看到两者都存在较强的年际变化, 但是与 Nino3.4 指数无明显的对应关系, 相关系数分别仅为-0.08 和 0.23, 表明台湾岛以东黑潮在年际尺度上受 ENSO 的直接影响很弱。OFES 模式中模拟的黑潮流量平均值为 14Sv, 年际变化标准差为 1.29Sv, 大于其季节变化标准差 1.12Sv。Hwang 等(2002)根据 TOPEX/POSEIDON 卫星高度计数据计算的台湾岛以东黑潮流量平均值为 19.0±6.0Sv。而 Liang 等(2003)利用 1991—2000 年期间得到的 ADCP 上 300m 数据计算的台湾岛东 22°—25°N 黑潮的流量输送为 15.4—24.3Sv。和前人研究相比, OFES 模式数据计算得到的黑潮流量偏小。

如前所述, 吕宋岛以东和台湾岛以东的黑潮在季节尺度上呈现不同的季节变化规律, 而且在年际尺度上, 台湾岛以东的黑潮流量变化也不同于吕宋岛以东黑潮, 与 ENSO 无显著相关关系, 所以本文推测影响台湾岛以东黑潮年际变化规律的因素与吕宋岛以东黑潮可能不同。Chang 等(2011)研究表明台湾以东 STCC 海区的涡旋能够直接影响黑潮输送的强度, 且涡动能超前黑潮流量 6 个月时达到最大正相关 0.83, 本文利用模式数据对此进行了检验。STCC 区域从台湾岛以东一直延伸到大致 145°E, 20°—23°N 之间, 结合黑潮主体所在的范围, 本文选取(120°—124°E, 20°—23°N)作为涡动能 EKE 计算区域。这里的涡动能由卫星高度计的数据求得, 即

$$EKE \equiv \frac{g^2}{2f^2} \left[\left(\frac{\partial h'}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial h'}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (2)$$

其中, x 和 y 分别是每个点的经纬度, h 为海表高度异常, g 为重力常数, f 为科氏力参数。

对图 8 中黑潮流量时间序列进行谱分析, 发现 OFES 模式和 HYCOM 模式中的台湾岛以东黑潮流量分别有 2—7a 和 3a 的显著周期, 因此我们对 EKE 以及流量的时间序列都进行了 2a 的低通滤波以研究其年际变化之间的关系, 结果如图 9 所示。可以看到, OFES 模式计算得到的黑潮流量与台湾以东海域 EKE 之间除了 2000—2003 年期间相关性较差之外都有较好的正相关关系, 而 HYCOM 的黑潮流量与 EKE 整体相关性较差, 尤其是 2010—2017 年期间。黑潮流量与 EKE 的超前滞后相关关系如图 10 所示, 在 EKE 超前于黑潮流量 9 个月时达到了最大正相关 0.44, 所以台湾以东海域涡旋强度是影响该海域黑潮的重要因素。另外需要指出的是, 吕宋岛以东和台湾岛以东黑潮的年际变化虽然存在着差异, 但并非完全独立, 二者的相对变化除了受风场和涡旋的影响之外, 还可能与吕宋海峡通量的变化有关(Chang *et al.*, 2012; 周艳芳等, 2017)。

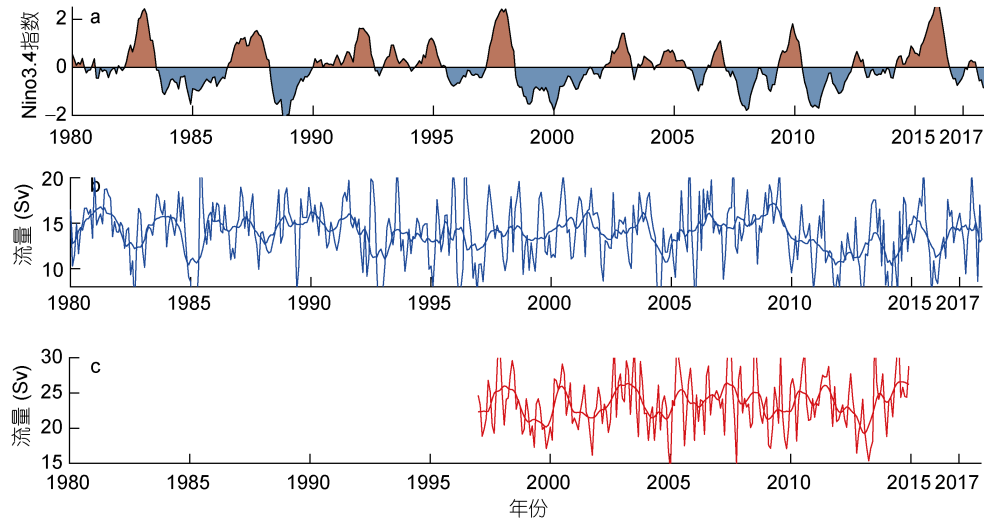


图 8 Nino3.4 指数、OFES 和 HYCOM 模式模拟的 24°N 断面黑潮流量时间序列

Fig.8 Time series of Nino3.4 index and volume transport of Kuroshio at 24°N section from OFES and HYCOM
注: a 和 b 分别是 1980—2017 年期间的 Nino3.4 系数和 OFES 模式中计算得到的黑潮流量时间序列; 蓝色细线是月平均时间序列; 蓝色粗线是经过 1a 低通滤波后的时间序列; c 表示 HYCOM 模式 1998—2015 年期间的流量时间序列; 红色细线是月平均时间序列; 红色粗线是经过 1a 低通滤波后的时间序列

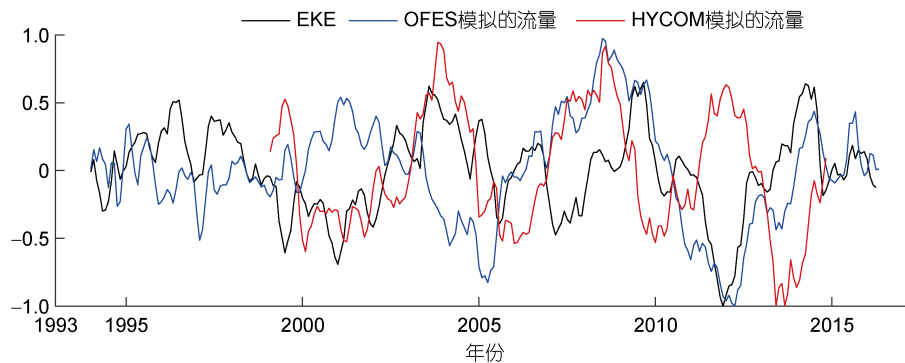


图 9 OFES 和 HYCOM 模式模拟的黑潮流量以及通过卫星高度计数据计算的涡动能 EKE

Fig.9 Normalized time series of Kuroshio transport derived from OFES and HYCOM, and EKE derived from Altimeter
注: 1993—2017 年期间的月平均时间序列: 黑色曲线表示高度计数据计算得到的 STCC 与 NEC 暖涡区平均涡动能 EKE; 蓝色曲线和红色曲线分别是 OFES 模式和 HYCOM 模式(1998—2017 年期间)中 24°N 断面的流量异常; 这三个量的时间序列都经过标准化处理

4 结论

本文利用 1993—2017 年期间的卫星高度计数据, 结合 OFES 数据(1980—2018 年)和 HYCOM 数据(1998—2015 年)对比研究了吕宋岛以东(18°N 断面)和台湾岛以东(24°N 断面)黑潮流速和流量的季节与年际变化特征, 并且探讨了其变化机制, 同时也对两种模式对黑潮在不同尺度上的模拟效果进行了比较分析。研究结果表明对于黑潮表层流速的季节变化, HYCOM 模式结果与卫星高度计观测结果符合较好, 而 OFES 模式结果与观测相差较大, 尤其是对吕宋岛以东黑潮的模拟。在 18°N 断面上, HYCOM 模式和卫星高度计观测的黑潮表层平均流速分别为 29.98 和

27.15cm/s, 模拟的黑潮平均流量为 18.89Sv。黑潮表层流速和流量的季节变化均为冬春较强而秋季较弱, 主要受到 NEC 分叉点的直接影响, 即当分叉点偏北时, 北太平洋副热带环流减弱, 黑潮也随之减弱, 而当分叉点偏南时情况与之相反。在 24°N 断面上, HYCOM 模式和卫星高度计观测得到的黑潮表层流速分别为 34.49 和 30.07cm/s, 模拟得到的黑潮平均流量为 23.55Sv, 季节变化特征为夏季较强而冬季较弱, 主要是受台湾岛以东海区反气旋涡与气旋涡相对数目的季节变化影响。

对于黑潮在两个断面上的年际变化, OFES 模式的模拟结果更好。模式模拟的吕宋岛以东黑潮流量年际变化直接受 NEC 分叉点南北移动和大尺度风应力

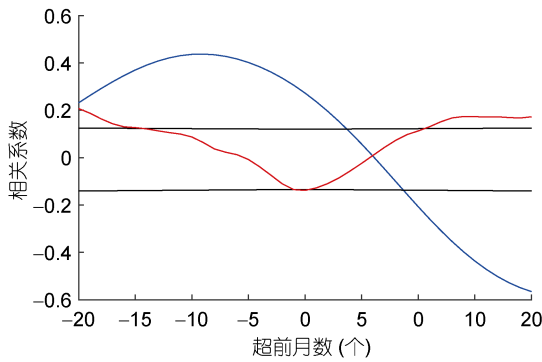


图 10 OFES 模式和 HYCOM 模式模拟的 24°N 断面黑潮流量与 EKE 的相关关系

Fig.10 Correlation between EKE and volume transport of Kuroshio at 24°N estimated from OFES and HYCOM

注: 蓝色曲线和红色曲线分别是 OFES 和 HYCOM 中计算得到的黑潮流量与 EKE 的超前滞后分析, 黑色实线为 95%置信区间; 月数大于 0 表示流量超前于 EKE, 小于 0 则表示滞后

旋度的影响, 相关系数分别可达 -0.76 和 -0.56 。当 ENSO 处于正相位时, (12° — 14° N, 127° — 130° E)区域内风应力旋度较强且 NEC 分叉点偏北, 导致北太平洋副热带环流减弱, 从而使得吕宋岛以东黑潮的输送变弱; 当 ENSO 处于负相位时情况正好相反。台湾岛以东黑潮流量的年际变化主要受产生于 STCC 海区并到达台湾以东海域的涡旋强度的影响, 在涡旋活动较强(弱)的年份, 台湾岛以东黑潮流量也比较强(弱), 黑潮流量变化与该海域 EKE 的相关系数可达 0.44, 而与 ENSO 没有明显的相关关系。

吕宋岛和台湾岛以东黑潮的季节和年际变化由于受到不同动力因素的控制, 表现出不同的变化特点, 但二者的变化也并非完全孤立。比如, 两个流段的黑潮都受到了 NEC 分叉的季节影响, 在夏季都表现出流速和流量的增强, 但是台湾岛以东黑潮的季节变化还受到了涡旋活动的影响, 使得二者季节循环出现差异。在年际尺度上, 黑潮的流量虽然与 ENSO 不是一一对应, 但在 1994/1995、2004/2005、2015/2016 年厄尔尼诺事件期间, 两个断面处黑潮的流量同步变化并且与 Nino3.4 指数呈反相关。年代际尺度上, Wu(2013)也指出在太平洋年代际震荡指数(Pacific Decadal Oscillation, PDO)暖相位期间, 吕宋岛沿岸的风场异常使得 NEC 分叉北移, 进而使吕宋岛和台湾岛以东的黑潮同步减弱。

综上, 虽然西北太平洋 NMK 流系的多尺度变化规律已经比较清晰, 但是不同模式的计算结果在数值以及变化规律上仍有很大的差异, 模式与实际观测也存在一定的差异, 本文选取了吕宋岛以东和台

湾岛以东的两个断面进行了研究, 通过与卫星高度计观测对比发现, HYCOM 模式对黑潮季节变化的模拟较好, 而 OFES 模式对黑潮的年际变化模拟较好, 该结果对开展黑潮研究选取不同数值模式具有一定的借鉴意义, 同时对不同模式未来的改进提供了参考。本文进一步研究发现黑潮在不同区域的季节和年际变化规律有很大的差别, 且受到不同动力过程的控制。对于黑潮在其他区域不同尺度的变化机制, 以及不同模式的适用性还需要进一步的研究分析。

参 考 文 献

- 于非, 蒲书箴, 赵新等, 2000. 热带西太平洋主要流系的季节变化和年际变化. 热带海洋, 19(1): 30—37
- 王凡, 张平, 胡敦欣等, 2001. 热带西太平洋环流及其季节变化. 科学通报, 46(23): 1998—2002
- 王辉赞, 魏林进, 张全礼等, 2018. 台湾以东黑潮路径识别与变化规律. 海洋与湖沼, 49(2): 271—279
- 李博, 2016. 北太平洋低纬度西边界环流的季节和年际变异特征与机制. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文
- 周慧, 许建平, 郭佩芳等, 2006. 北太平洋西边界流研究综述. 海洋学研究, 24(2): 49—59
- 周艳芳, 谢强, 陈更新等, 2017. 基于海洋模式数据的吕宋海峡输运量和菲律宾黑潮流量关系的分析. 海洋与湖沼, 48(6): 1269—1275
- 贾英来, 刘秦玉, 刘伟等, 2004. 台湾以东黑潮流量的年际变化特征. 海洋与湖沼, 35(6): 507—512
- 康霖, 2011. 北太平洋低纬度西边界流的时空特征及其与 ENSO 循环的联系. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文
- 管秉贤, 1964. 黑潮流速流量的分布、变化及其与地形关系的初步分析. 海洋与湖沼, 6(3): 229—251
- 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
- Chang Y L, Oey L Y, 2012. The Philippines–Taiwan oscillation: monsoonlike interannual oscillation of the subtropical–tropical Western North Pacific wind system and its impact on the Ocean. Journal of Climate, 25(5): 1597—1618
- Chassignet E P, Hurlburt H E, Smedstad O M *et al*, 2007. The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. Journal of Marine Systems, 65(1—4): 60—83
- Chen C, 1996. The Kuroshio Intermediate Water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf. Oceanologica Acta, 19: 523—527
- Chen Z H, Wu L X, 2011. Dynamics of the seasonal variation of the North Equatorial Current bifurcation. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C2): C02018
- Chen Z H, Wu L X, Qiu B *et al*, 2015. Strengthening Kuroshio observed at its origin during November 2010 to October

2012. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(4): 2460—2470
- Guan B, 1983. Major features of warm and cold eddies south of the Nansei Islands. *Journal of Oceanology and Limnology*, 1(3): 248—257
- Halliwel Jr G R, Olson D B, Peng G, 1994. Stability of the Sargasso Sea subtropical frontal zone. *Journal of Physical Oceanography*, 24(6): 1166—1183
- Hsin Y C, Qiu B, Chiang T L *et al*, 2013. Seasonal to interannual variations in the intensity and central position of the surface Kuroshio east of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(9): 4305—4316
- Hsin Y C, Wu C R, Shaw P T, 2008. Spatial and temporal variations of the Kuroshio East of Taiwan, 1982—2005: A numerical study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 13(C4): C04002
- Hu D X, Cui M C, 1991. The western boundary current of the Pacific and its role in the climate. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 9(1): 1—14
- Hu D X, Wu L X, Cai W J *et al*, 2015. Pacific western boundary currents and their roles in climate. *Nature*, 522(7556): 299—308
- Hwang C, Kao R, 2002. TOPEX/POSEIDON-derived space-time variations of the Kuroshio Current: applications of a gravimetric geoid and wavelet analysis. *Geophysical Journal International*, 151(3): 835—847
- Kim Y Y, Qu T D, Jensen T *et al*, 2004. Seasonal and interannual variations of the North Equatorial Current bifurcation in a high-resolution OGCM. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C3): C03040
- Liang W D, Tang T Y, Yang Y J *et al*, 2003. Upper-ocean currents around Taiwan. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(6—7): 1085—1105
- Lien R C, Ma B, Cheng Y H *et al*, 2014. Modulation of Kuroshio transport by mesoscale eddies at the Luzon Strait entrance. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(4): 2129—2142
- Lukas R, Yamagata T, McCreary J P, 1996. Pacific low-latitude western boundary currents and the Indonesian throughflow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5): 12209—12216
- Masumoto Y, Sasaki H, Kagimoto T *et al*, 2004. A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean—Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator). *Journal of the Earth Simulator*, 1: 35—56
- Nitani H, 1972. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K eds. *Kuroshio: Physical Aspects of the Japan Current*. Seattle: University of Washington Press, 129—163, 129—163
- Qiu B, 1999. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific subtropical countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory. *Journal of Physical Oceanography*, 29(10): 2471—2486
- Qiu B, Chen S M, 2010. Interannual-to-Decadal Variability in the Bifurcation of the North Equatorial Current off the Philippines. *Journal of Physical Oceanography*, 40(11): 2525—2538
- Qiu B, Lukas R, 1996. Seasonal and interannual variability of the North Equatorial Current, the Mindanao Current, and the Kuroshio along the Pacific western boundary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5): 12315—12330
- Qu T D, Mitsudera H, Yamagata T, 1998. On the western boundary currents in the Philippine Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C4): 7537—7548
- Sakamoto T T, Hasumi H, Ishii M *et al*, 2005. Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high resolution climate model. *Geophysical Research Letters*, 32(14): L14617
- Pickard G L, Emery W J *et al*, 1983. *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. *Continental Shelf Research*, 1(3): 303
- Tang T Y, Tai J H, Yang Y J, 2000. The flow pattern north of Taiwan and the migration of the Kuroshio. *Continental Shelf Research*, 20(4—5): 349—371
- Toole J M, Millard R C, Wang Z *et al*, 1990. Observations of the Pacific north equatorial current bifurcation at the Philippine coast. *Journal of Physical Oceanography*, 20(2): 307—318
- Wu C R, 2013. Interannual modulation of the Pacific decadal oscillation (PDO) on the low-latitude western North Pacific. *Progress in Oceanography*, 110: 49—58
- Yan X M, Zhu X H, Pang C G *et al*, 2016. Effects of mesoscale eddies on the volume transport and branch pattern of the Kuroshio East of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(10): 7683—7700
- Yaremchuk M, Qu T D, 2003. Seasonal variability of the large-scale currents near the coast of the Philippines. *Journal of Physical Oceanography*, 34(4): 844—855
- Yin Y Q, Lin X P, Hou Y J, 2019. Seasonality of the Kuroshio intensity east of Taiwan modulated by mesoscale eddies. *Journal of Marine Systems*, 193: 84—93

COMPARATIVE ANALYSIS OF SEASONAL AND INTERANNUAL VARIATION OF KUROSHIO EAST OF LUZON AND TAIWAN ISLAND

WU Jie^{1,3}, ZHANG Lin-Lin^{1,2,4}, YAN Xiao-Mei^{1,2,4}

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

Abstract The Kuroshio is an important western boundary current of the subtropical gyre in the North Pacific. Previous studies focused on the seasonal and interannual variation of Kuroshio in different areas. However, the conclusions are different due to different datasets, especially different model outputs. Moreover, previous studies often focus on one part of the Kuroshio, and seldom involve the Kuroshio variations in different areas and their causes. Based on satellite altimeter data, we evaluated the simulation of OFES and HYCOM models on the seasonal and interannual variations of the Kuroshio east of Luzon Island and Taiwan Island, and then analyzed the difference of Kuroshio variations in these two regions and their physical mechanism. The results show that HYCOM model is better in simulating the seasonal variation of the Kuroshio, and OFES model is better in simulating the interannual variation of the Kuroshio. Seasonal and interannual variations of the Kuroshio east of Luzon Island and Taiwan Island are different and controlled by different dynamic processes. The Kuroshio east of the Luzon Island is strong in winter/spring and weak in autumn, which is affected mainly by the meridional shift of the North Equatorial Current bifurcation, while the Kuroshio east of Taiwan Island is strong in summer and weak in winter, which is mainly affected by the eddy activity east of Taiwan Island. On the interannual time scale, the Kuroshio east of the Luzon Island exhibits negative correlation with the North Equatorial Current bifurcation and the wind stress curl. When the wind stress curl leads the Kuroshio transport by 4 months, the correlation coefficient reaches -0.56 , while the volume transport of the Kuroshio east of Taiwan Island is subject to the variation of eddy kinetic energy (EKE) in the Subtropical Countercurrent region, and their correlation coefficient reaches 0.44 when the transport lags the EKE by 9 months. The results of this study are important for further understanding the multi-scale variability of Kuroshio in different areas and its influence on the circulation and climate in the adjacent waters, and also for the selection of numerical models for Kuroshio research.

Key words Kuroshio; volume transport; seasonal and interannual variation; ENSO(El Niño-Southern Oscillation)