

源区黑潮季节变异及其动力机制的数值研究*

耿 伍^{1,2} 侯一筠¹ 齐 鹏¹ 赵 伟^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

提要 应用 POM2K 模式对中国海黑潮区气候态平均环流进行了数值模拟。采用正交曲线网格, 模式区域为太平洋海盆, 特别的在中国海区域进行加密并较好的拟合了岸线; 垂向分为 21 层, 并在海表 9 层以上采用对数网格分布; 采用 COADS 气候态月平均的风应力, 并将模式的温度结果和 MODIS 月平均的 SST 数据进行同化, 然后将模式模拟出的流量、海表高度异常同实测数据和卫星观测数据进行了对比验证, 结果均显示模拟结果可信度较高。接着本文探讨了北赤道流分岔位置季节性的变化对源区黑潮流量的影响, 结果表明, 秋冬季节北赤道流分岔位置较靠北, 源区黑潮流量较大, 而春夏季节北赤道流分岔位置较靠南, 黑潮流量较小。在此基础上, 针对源区黑潮的动力机制进行了数值实验。实验中主要考虑了以下动力因子对源区黑潮季节性变化的影响: (1) 风应力; (2) 非线性; (3) 黑潮的斜压敏感性, 然后通过与控制实验的对比, 讨论了不同的动力因素对吕宋海峡净流量和吕宋海峡上层环流场的影响。

关键词 黑潮; 数值模拟; 吕宋海峡; 曲线网格

中图分类号 P731

黑潮是太平洋区域的一支强劲的北赤道流, 起源于菲律宾以东海域, 流经台湾东岸进入东海, 沿东海大陆架外缘向东北方向流动, 穿越吐噶喇海峡后返回北太平洋。黑潮具有高温、高盐、高流速的特征, 它的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的作用。然而黑潮流经吕宋海峡时, 流态发生显著变化, 黑潮是以何种方式穿过吕宋海峡进入南海是近几年来各国学者研究的重点: 第一种观点认为存在“南海分支”。仇德忠等(1984)根据 20°N, 114°E 及 19.5°N, 113°E 的实测流速资料及南海北部的漂流瓶资料, 认为南海北部陆坡附近夏季存在着一支向西流动的海流, 并认为它是黑潮的一个分支, 即黑潮的“南海分支”; 第二种观点认为存在“南海流套”。Nitani(1972)在讨论 CSK 调查结果时指出: 黑潮在吕宋海峡有一支在 20°N 向西进入南海, 但大部分绕着一个暖涡转, 然后回到黑潮主轴。这一描述是对黑潮“南海流套”的最早记述。此后李

立等(1989)根据该海域的观测结果, 第一次明确地提出了黑潮“南海流套”这一概念; 第三种观点是“流套”和“分支”都存在。如黄企洲等(1996); 第四种观点(Li *et al.*, 1998)认为在吕宋海峡处, 黑潮主流进入海峡后以“流套”形式流出, 但在黑潮主流的左侧会伴随着流环的形成, 某些时候会伴随着流环的脱离; 第五种观点(苏纪兰, 2005)认为黑潮是以亚中尺度涡的形式进入南海的。

由于对吕宋海峡黑潮形变形式的分歧, 关于吕宋海峡黑潮形变的动力机制, 也是众说纷纭。刘秦玉等(1996)利用位涡守恒理论给出定性解释, 指出吕宋海峡宽度、 β 效应等因素决定了黑潮流套在吕宋海峡常年存在有其必然性; Chern 等(1998)通过高分辨率 OGCM 对南海北部的模拟及数值实验, 指出夏季南海水和黑潮水垂向层结的不同会对黑潮流套的弯曲程度有影响, 西南季风将强层结的南海水推向北部, 会减弱黑潮流套的弯曲度; 苏纪兰(1999)利用 2.5 层

* 国家自然科学基金重点资助项目(90411013), 中国科学院海洋研究所创新项目资助(KZCX2-YW-201)。耿伍, 硕士, E-mail: gengwu@scsio.ac.cn

通讯作者: 侯一筠, 博士生导师, 研究员, E-mail: yjhou@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2011-12-08, 收修改稿日期: 2012-03-05

约化重力模式发现黑潮在台湾岛南部西深的暖舌受其北部半径较大的气旋涡的影响; Farris 和 Wimbush (1996)发现黑潮以流套方式入侵南海的形成由一个局地超临界积分风应力参数决定; Metzger 和 Hurlburt (1996)通过 1.5 层全球模式发现, 吕宋海峡流量与复杂的地形、季风场以及南海与太平洋的贯通性都有关系; Metzger 等(2001)利用北太平洋数值模式 NLOM 研究了模式分辨率对模拟结果的影响, 结果显示当模式分辨率较高时, 黑潮主流反而不易进入南海。

总之, 吕宋海峡处黑潮的形变与黑潮流量、吕宋海峡的宽度、南海区域风应力的强度、黑潮水和南海水垂向层结的不同等机制有关。但究竟那种机制是吕宋海峡黑潮形变的决定性机制, 尚未有定论。

近年来, 数值模拟已成为研究黑潮的一个重要手段, 然而大多数研究是基于区域模式, 即在开边界处根据观测值或全球模式结果给定流量(Wang *et al.*, 2002; 翟丽等, 2004; Qiao *et al.*, 2006), 区域模式的缺点是模式结果对开边界的依赖较大, 且不能很好的描述黑潮的季节性变化趋势。还有一些研究是基于一个较大的研究区域, 并将区域的侧边界设定为固边界, 目的是消除开边界对数值模拟结果的影响, 如 Yang 等(2002)利用 POM(Blumberg *et al.*, 1987)模式计算了太平洋区域嵌套下的南海的环流状况; 赵伟等(2007)利用 POM 模式计算了太平洋区域嵌套下的吕宋海峡处的环流状况; 魏泽勋等(2002)利用 MOM2 建立了一个嵌套于全球大洋环流模式中的高分辨率中国近海环流数值模式; Metzger 等(2001)利用北太平洋数值模式 NLOM 研究了模式分辨率对模拟结果的影响。

以上这些研究都是基于正交网格下的数值模拟, 基于正交曲线网格下的研究不多, 采用正交曲线网格的优点是: (1)可以增加有效网格节点的个数; (2)局部区域可以方便的进行加密; (3)更好的拟合岸线。本文采用 POM2K 模型(POM2K 模型是 POM 模型的升级版, 其与 POM 模型的最大区别是在计算海表面湍动能的过程中, 采用了新的经验计算公式, 这种经验公式包含了海表面波浪破碎对垂直混合系数的影响, 当模式垂直分辨率在海洋上层较高时, 由波浪破碎所引起的垂直混合系数将对海洋上层环流的模拟产生重要的影响, 从而改进模式在海洋上层的模拟效果), 建立了一个嵌套于太平洋区域的正交曲线网格数值模式, 并在中国近海进行加密。这样, 在现有

的计算条件下, 我们可以在不增加计算负担的前提下, 有效地提高了重点关心区域的分辨率。

1 数值实验方案

1.1 数值模式

采用三维 POM2K 模式, 取太平洋海盆(100°E—80°W, 20°S—60°N)作为计算区域。以往研究表明, 黑潮模拟结果的优劣依赖于边界条件, 只考虑小区域难以模拟出来自大洋的波动或涡旋现象对南海及其黑潮的影响。有鉴于此, 模式需要考虑全球或至少包括太平洋海盆区域。模式的东边界为大陆, 西边界赤道以南部分和模式北边界距研究的区域较远, 将其封闭对计算结果不会有很大的影响(Yang *et al.*, 2002); 另外, 本文将南边界的位置取在 20S, 是因为这一纬度的平均风应力旋度为零, 可以近似认为穿过这个纬带的经向质量输送为零, 从而认定穿越这一纬带的质量交换不会从很大程度上影响黑潮的数值模拟结果。这样, 我们取整个计算区域为封闭边界。

计算区域采用正交曲线网格, 水平网格节点总数为 241×241。模式水平方向在中国海区域具有较高的分辨率, 从福建沿岸的 15km 网格间距递增到琉球群岛以东的 20km 间距; 在南海, 平均网格间距也达到 25km。垂向为变网格划分, 共为 21 个 sigma 层, 为使海洋表层有较高的分辨率, 在表层附近的 9 层是按对数分布的。

模式采用真实底地形, 地形数据取自 ETOPO2 ver2.2, 最大水深取为 4000m, 最小水深为 10m。本文曲线网格节点上的水深数据是按双线性插值方法计算得到, 考虑到在地形水深变化剧烈的区域计算容易发散, 还需对这样的水深数据进行平滑处理。

由于本文不考虑环流的高频变率, 所以数值试验未包含潮流强迫。也未包含河口径流。尽管如此, 数值实验表明, 本文模式能较好地表达海面高度、热盐环流和质量输送的季节性变化。

1.2 初始条件

速度零启动。初始温盐取自 Levitus 资料集的气候态年平均数据。

大气强迫: 包括机械强迫和热力强迫。

整个计算区域的海面的机械强迫采用 COADS 数据集提供的气候态月平均风应力。海面的热力强迫: 海表温度(SST)采用热通量边界条件, 且将卫星的温度数据同化进模式中, 具体公式(Ezer *et al.*, 2000)为:

$$Q_M = Q_C + \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_C \cdot (T_S^0 - T_M^0) \quad (1)$$

其中, Q_M 代表执行 POM2K 所需要的热通量, Q_C 代表气候态月平均热通量, $\left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_C$ 为气候态月平均热通量对气候态月平均温度的偏导数, Q_C 、 $\left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_C$ 均取自 COADS 资料集; T_S^0 是 MODIS 数据集的气候态月平均海表温度(SST), 本文中 MODIS 气候态月平均数据是将 2002 年 7 月至 2007 年 6 月的 MODIS 数据进行平均; T_M^0 是本文 POM2K 模式计算出来的温度。本文通过公式(1)将卫星的 SST 数据同化进 POM2K 模式中。数值试验表明能有效地改善温度模拟的结果。

考虑盐度对计算结果影响不大, 文中直接采用来自 Levitus 数据集的气候态月平均海表盐度作为海表盐度的边界条件。

侧向固壁处速度边界给以自由滑移条件。侧向固壁温盐边界为零梯度条件, 并且没有热量、盐度和速度的通量穿越侧向固壁发生。

1.3 计算方案

取外模态时间步长 30 秒, 内模态时间步长 1350 秒。先采用 MODIS 气候态月平均海表温度条件强迫运行 4 年, 当计算趋于稳定, 再采用热通量边界条件(公式(1))运行 2 年, 将第 6 年的计算结果进行分析。

2 模式验证

2.1 中国海主要断面流量

为了定量地了解中国近海的环流状况, 有必要给出各海域之间的域际体积交换情况, 为此本文给出了东中国海几处关键断面的月平均流量图, 如图 1 和表 1 所示, 其中正号表示流进东中国海, 负号表示流出东中国海。从表 1 可知, 台湾以东海域, 具体位置是台湾至西表岛海域, 年平均流量为 30.6Sv(1Sv=1×10⁶m³/s), 最大值出现在 3 月, 为 32.4Sv, 最小值出现在 9 月, 为 29.4Sv, 变化幅度不大, 而 chu(1976)根据 1974—1975 年间在台湾岛至石垣岛之间的 6 次海洋调查, 计算得出从台湾以东加入东中国海的平均流量为 29.3Sv, 本文计算结果比观测资料略大, 但也在合理范围之内。台湾海峡年平均流量为 2.3Sv, 且所有月份均为自南向北流入东中国海, 这与 Fang 等(1991)和赵保仁等(1991)的估算结果一致, 而赵保仁(1991)估算得到台湾海峡北上流量夏季最大为 3.16Sv, 冬季较小为 1.05Sv, 年平均为 2.1Sv, 本文计算得到

的台湾海峡流量变化趋势与其基本一致。Miita 等(1984)根据观测资料计算得到对马海峡流量在 3.3—4.2Sv 之间, 平均流量为 3.6Sv, 由于他们的观测数据夏季较多, 因此这一平均值更接近夏季的流量, 而本文夏季计算出来的对马海峡流量为 3.2Sv, 可以说与观测事实基本一致。本文中大隅-吐噶喇海峡年平均流量为 24.0Sv, 而赵保仁等(1991)根据 1977—1984 年 KRE 调查资料估算了大隅-吐噶喇海峡地转流量平均为 24.5Sv, 本文结果与其符合的较好。值得一提的是本文计算所得的台湾以东海域月平均流量变化趋势与大隅-吐噶喇海峡基本一致, 最大值和最小值分别都出现在冬季 3 月和夏季 9 月, 且呈现典型的季节变化, 说明从台湾以东海域进入东中国海域的黑潮水绝大多数从大隅-吐噶喇海峡流出, 大隅-吐噶喇海峡和台湾以东海域构成了黑潮出入东中国海的主要通道。另外, 从台湾以东海域和台湾海峡流入东中国海的平均流量为 32.9Sv, 而从对马海峡和大隅-吐噶喇海峡流出东中国海的平均流量为 26.9Sv, 流入大于流出 6Sv, 说明介于台湾和吐噶喇海峡之间的琉球群岛附近海域也有海流流出东中国海。

2.2 海表面高度异常及其与高度计数据的对比

为了更进一步检验模式的可信度, 本节将南海季节性海面高度异常(SSHA)与卫星高度计数据进行比较研究。将模拟所得的海表面高度按季节平均, 再减去模式平均海表高度, 得到季节性海表面高度异

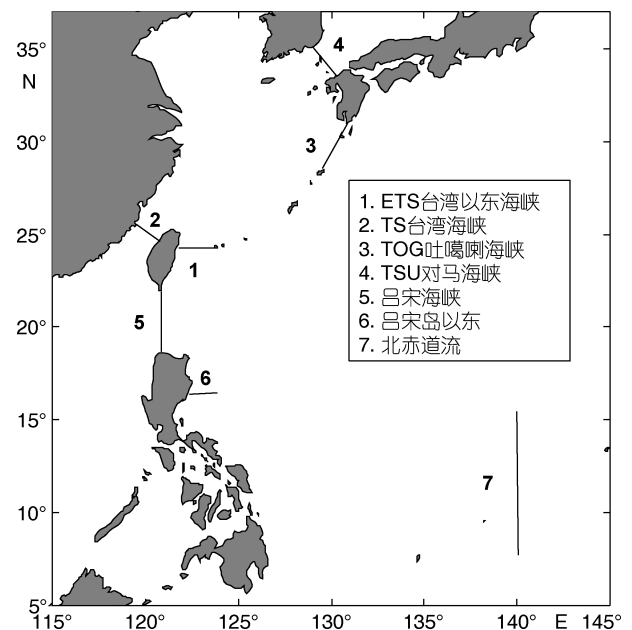


图 1 各断面主要位置

Fig. 1 The position of the intersections

表 1 各断面月平均流量(单位: Sv)
Tab.1 The discharge of the intersections (Sv)

| 月份 | 1.ETS | 2.TS | 3.TOG | 4.TSU |
|------|-------|------|-------|-------|
| 1 | 30.3 | 2.0 | -25.1 | -2.3 |
| 2 | 31.6 | 2.3 | -26.5 | -2.3 |
| 3 | 32.4 | 2.5 | -27.6 | -2.5 |
| 4 | 31.4 | 2.6 | -26.7 | -2.9 |
| 5 | 30.2 | 2.9 | -24.9 | -3.1 |
| 6 | 30.8 | 3.2 | -23.7 | -3.2 |
| 7 | 31.0 | 3.0 | -23.1 | -3.2 |
| 8 | 29.9 | 2.4 | -21.7 | -3.2 |
| 9 | 29.4 | 1.7 | -21.4 | -3.2 |
| 10 | 30.2 | 1.8 | -21.6 | -3.3 |
| 11 | 30.3 | 1.8 | -22.3 | -3.2 |
| 12 | 29.3 | 1.8 | -23.7 | -2.7 |
| 平均 | 30.6 | 2.3 | -24.0 | -2.9 |
| 实测均值 | 29.3 | 2.1 | -24.5 | -3.6 |

常。卫星高度计资料为 TOPEX/POSEIDON(T/P)卫星数据,该卫星数据的精度达到了厘米的量级,可信度较高。本文中所用到的 T/P 资料是 French archiving, validation, and interpolation of satellite oceanographic data(Aviso)计划经过潮汐、逆压差以及电磁偏向等多钟校正后的产品,其处理后的产品的时间分辨率为 7 天,空间分辨率为 $1/4 \times 1/4$ 度,将 1992—2007 年的所有数据按时间进行季节性的平均,得到了南海的季节性海面高度异常(SSHA),为了更好的将数值模拟结果与其进行对比,特将模式结果从正交曲线网格按双线性插值方法插值到 $1/4 \times 1/4$ 度的网格节点上,结果如图 2 所示。南海海面高度距平具有明显的季节特征。无论从模式结果还是 T/P 数据都可以清晰地看到:在冬季,吕宋岛西侧出现一典型的负距平中心, T/P 资料的振幅达到 10cm,对应的模式结果为 9cm,具有典型的东北高西南低的特征。在夏季,情况刚好相反,具有典型的东北低西南高的特征,吕宋岛西侧的负的距平中心变成了正的距平中心, T/P 数据显示振幅达到 12cm,模式结果略小为 8cm,但模式结果相对 T/P 而言距平中心稍微靠北。此外,在春季, T/P 数据显示越南东侧出现一较强的正距平中心,到了夏季,该距平中心开始向南转移,且振幅从 8cm 上升到 11cm。对应的模式结果也反应出这一特征,但距平中心南移的幅度不够明显。到了秋季, T/P 数据显示一负的距平中心占据了几乎整个南海,而模式结果显示这一特征不是很明显。为了定量的给出模式结果与 T/P 数据的符合程度,本文还求出了二者的相关系数,

并给出了二者的散点图,如图 3 所示,横轴为模式模拟结果,纵轴为 T/P 结果,中间的那条直线为 $y=x$,散点越是靠近 $y=x$,则表示模拟结果越好。通常认为,相关系数在 70%以上表示相关较好。而本文模式计算结果和对应的 T/P 数据的相关系数随着季节变化分别为 73.1%(冬季)、83.7%(春季)、78.9%(夏季)和 79.3%(秋季)。可见本文结果和高度计资料具有良好的 consistency。

3 模式主要结果

3.1 北赤道流分岔位置

图 4 是 4 个典型月份的海表面高度场季节性变化图,具体月份为 2 月、5 月、8 月和 11 月,西行的北赤道流在 10°N — 13°N 之间分成南北两支,南下的构成了棉兰老流(Mindano Current),北上的分支即为黑潮。从全年典型的 4 个月份的海表高度场可以看出,海表高度场呈现北高南低的特征,春季 5 月份和夏季 8 月份的北赤道流朝正西方向,而秋季 11 月份和冬季 2 月份的北赤道流则略向西北方向偏移,并伴随着北赤道流分岔位置典型的季节性变化。图 5 显示从 1 月至 7 月,分岔位置逐渐由北向南偏移,而从 8 月至 12 月,分岔位置又开始从南向北偏转,分岔位置最北发生在 11 月份,达到 12.6°N ,而最南发生在夏季 7 月份,为 10.7°N ,二者相差 1.9 度。也就是说,秋冬季节北赤道流分岔位置较偏北,而在春夏季节北赤道流分岔位置较偏南。

3.2 吕宋以东断面及北赤道流(NEC)流量

图 6 给出了吕宋岛以东断面和北赤道流的流量(断面位置见图 1,本文将北赤道流断面选在 140°E 、 7°N — 16°N ,而将吕宋岛以东断面选在 16°N 、 122°E — 124°E),从图中可以看出两个断面的流量具有典型的季节性变化,且变化趋势基本相同。从冬季 1 月至夏季 7 月,北赤道流(NEC)流量逐渐减小,而从 8 月开始至 12 月份,又开始递增,全年最大流量发生在冬季 1 月为 66Sv,最小流量发生在夏季 7 月为 23Sv,全年平均流量为 45Sv。吕宋岛以东断面黑潮流量的变化趋势与 NEC 流量变化趋势基本一致,最大流量出现在冬季 1 月,为 33Sv,最小流量发生在 8 月约为 7Sv,全年平均流量为 19Sv。本文模拟的吕宋岛以东黑潮和北赤道流的流量在春夏季节偏小,可能是在计算流量时,由于北赤道流的上下波动,无法准确的界定位置,甚至有可能将北赤道逆流包括进来,因此本文只是粗略的计算了两个固定断面的流量,但流

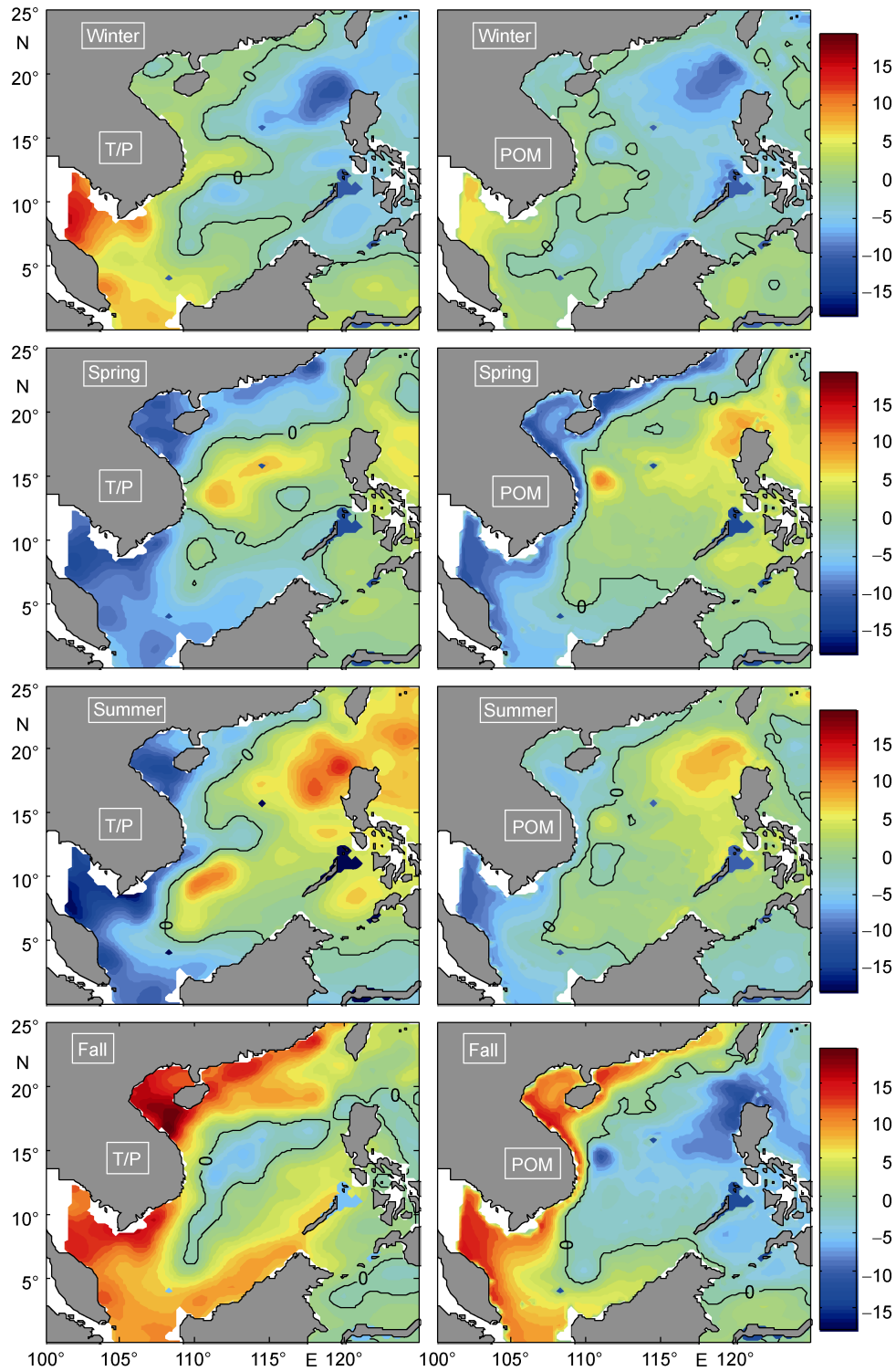


图2 季节性平均海表面高度异常(SSHA)—T/P 数据和 POM2K 结果(单位:厘米)

Fig.2 Seasonal mean sea surface height anomaly(SSHA) from T/P data and POM2K results (cm)

量结果巨大的差异性足以定性地进行季节性分析。

比较图 5 和图 6 可知, 秋冬季节北赤道流分岔的位置较靠北, 北赤道流的流量也明显大于春夏季节,

而北赤道流的流量较大也致使吕宋岛以东黑潮的流量较大; 到了春夏季节, 随着北赤道流的减弱, 北赤道流的分岔位置也跟着南移, 从而又造成了源区黑潮流量的减小。

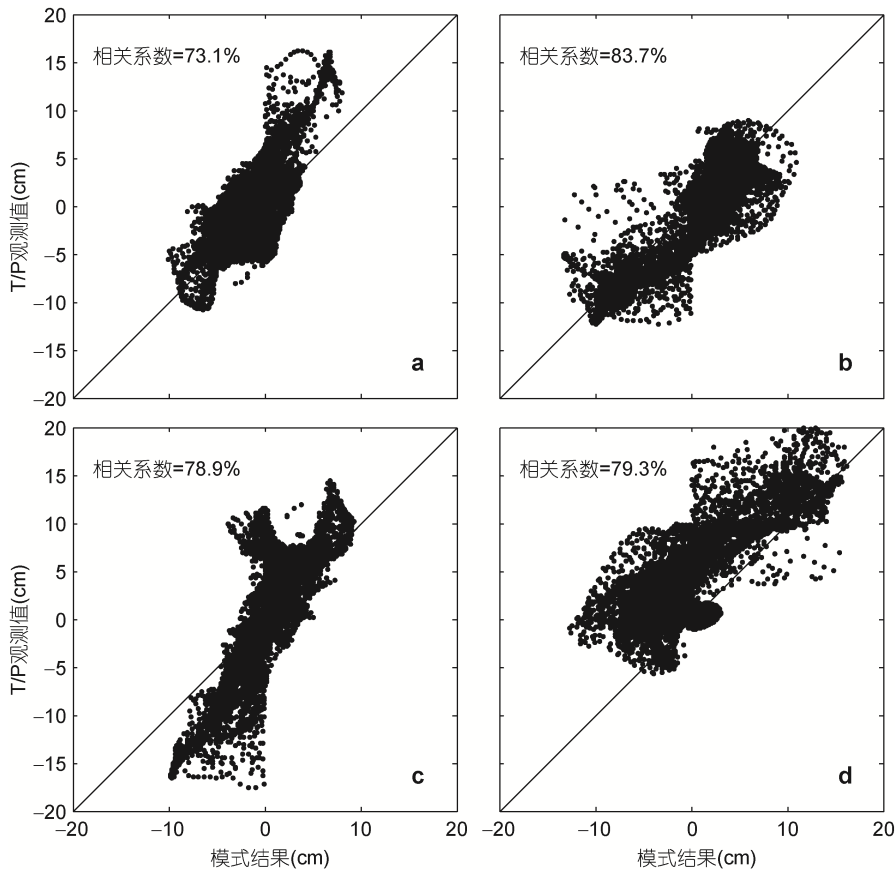


图3 T/P 资料与 POM2K 结果拟合散点图及其相关系数

Fig.3 The fitting scatter diagram and correlation coefficient between T/P data and POM2K results

4 数值实验

先采用 MODIS 气候态月平均海表温度条件强迫运行 4 年, 此时计算趋于稳定, 在此基础上进行 4 组数值实验, 各数值实验均再运行 2 年, 将最后一年的结果进行分析, 具体实验方案参见表 2。实验 1 在原有运行 4 年的基础上, 采用辐射边界条件再运行 2 年, 以作为控制实验, 具体设置同前。实验 2 为了研究季风对源区黑潮的影响, 忽略了风应力, 其他条件不变。实验 3 没有考虑动力方程中的非线性项, 也即忽略 POM2K 内模态和外模态动量方程中的非线性项。实验 4 主要关注的是 POM2K 模式中地形坐标系下斜压梯度力的计算误差, 即在水深梯度较大或垂向密度差别较大时, 在地形坐标系中计算斜压梯度力时会出现两个大项代数和求小项的问题, 从而产生较大的误差, 为此改进了斜压梯度力的计算, 本文采用了和史峰岩等(2000)同样的改进方法, 即是将地形坐标系下的斜压梯度力改在 z 坐标系下进行计算, 以此来研究源区黑潮的强斜压性, 也就是黑潮对斜压梯度力的敏感性研究。

4.1 吕宋海峡断面流量

图 7 是 4 个敏感性实验方案所得到的吕宋海峡处的流量图, 正号表示从南海进入西太平洋, 负号表示从西太平洋进入南海。从控制实验中可以看出穿过吕宋海峡处的净流量存在着典型的季节性变化。计算结果表示全年平均净流量为 2.6Sv, 吕宋海峡从南海流往西太平洋的最大流量为 0.5Sv, 发生在 4 月份, 吕宋海峡从西太平洋流往南海的最大流量为 6.9Sv, 发生在 11 月份。总体来看, 从当年 9 月至翌年 2 月, 也即秋冬季节, 存在着净的黑潮水穿越吕宋海峡进入南海的现象, 而从 3 月至 8 月, 吕宋海峡处的净流量很小, 变化也很微弱, 表明在春夏季节无明显的黑潮水入侵南海。

无风实验表明, 当去除风应力后, 吕宋海峡处的净流量无显著的季节变化, 最大的净流量为向西 2.4Sv, 最小的净流量为向西 0.7Sv, 二者仅相差 1.7Sv, 明显小于控制实验的季节变化, 这就表明风应力的季节变化是引起吕宋海峡净流量季节变化的主要驱动力, 去除风应力后, 吕宋海峡处的净流量常年较稳定, 且是从西太平洋进入南海的。

当去除动力方程中的非线性项的时候, 吕宋海峡处的净流量的变化曲线与控制实验的变化曲线几乎一致, 只是在 10 月至 12 月之间略有变化, 说明非线性项除了在秋季对吕宋海峡的净流量略有影响之外, 其他季节几乎没有影响。

斜压敏感性实验得到的流量变化趋势与控制实验基本一致, 但其流量与控制实验有较大的差异, 达到 4—5Sv, 且也呈现出典型的季节性变化, 从 1 月至 9 月, 吕宋海峡净流量从南海指向西太平洋, 向东最大净流量为 5.2Sv, 而从 10 月至 12 月, 吕宋海峡净流量从西太平洋指向南海, 向西最大流量为 2.6Sv, 这就说明将地形坐标系下的斜压梯度力转换到 Z 坐标系下计算之后, 得到的吕宋海峡处的净流量与原来的控制实验有着显著的差异, 但得到的流量具有同样的季节性变化趋势, 表明源区黑潮对斜压梯度力

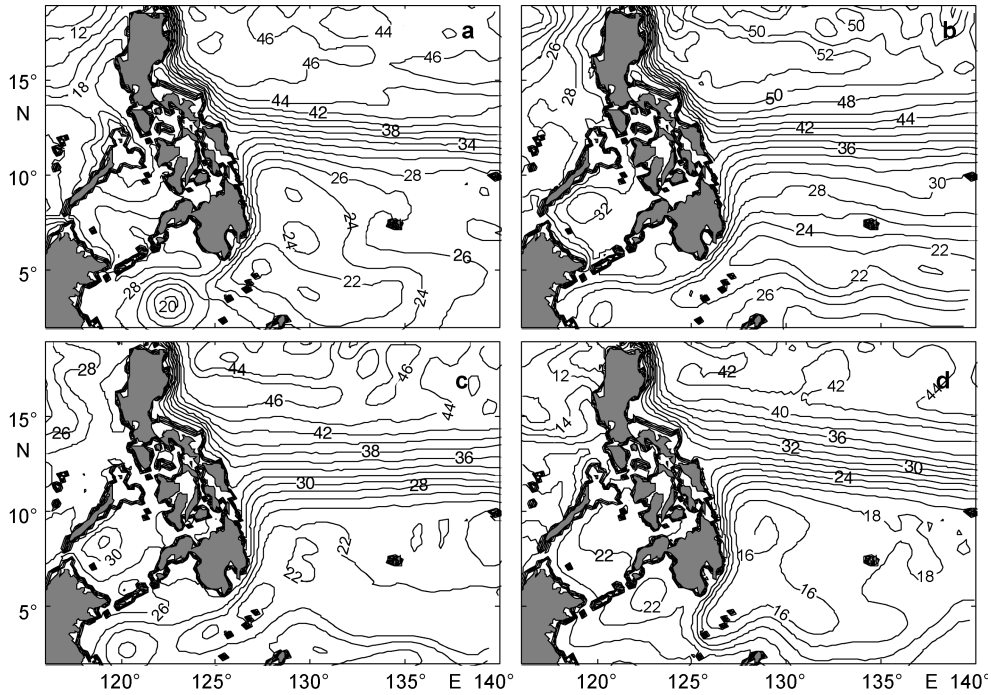


图 4 季节性海表面高度场,等值线间距 2 厘米
a. 2 月; b. 5 月; c. 8 月; d. 11 月

Fig.4 Seasonal sea surface height (SSH) from the model. Contour interval is 2cm
a. February; b. May; c. August; d. November

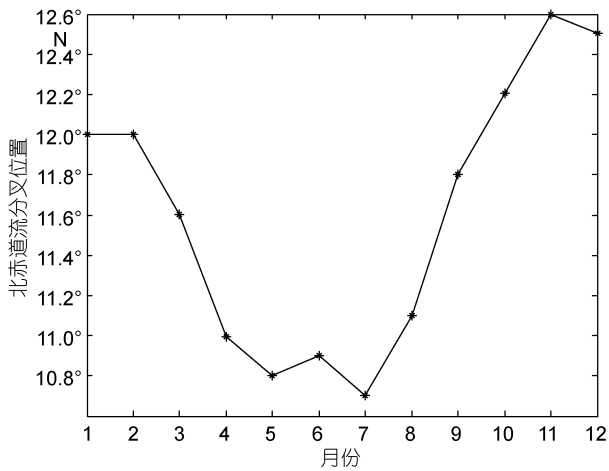


图 5 北赤道流分岔位置

Fig.5 The location of NEC bifurcation

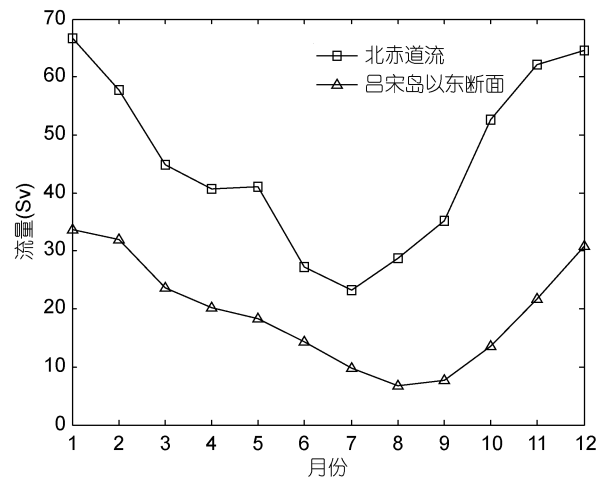


图 6 北赤道流及吕宋以东断面流量图(单位: Sv)

Fig.6 The discharge of NEC and East of Luzon Island (in Sv)

的计算较为敏感, 同样也说明了源区黑潮具有较强的斜压性。

4.2 上层流场

吕宋海峡处的净流量不能完全反映吕宋海峡黑潮复杂的流态, 还需要对吕宋海峡处的流场进行分析, 本文仅讨论海洋上层流场的季节性变化, 为此, 将海洋表层至 200 米深度的流场进行平均, 得到上层

表 2 4 个敏感性实验方案

Tab.2 Scheme of the Four Sensitivity experiments

| 数值实验 | 实验方案 |
|------|-------|
| 实验 1 | 控制实验 |
| 实验 2 | 无风实验 |
| 实验 3 | 去除非线性 |
| 实验 4 | 斜压敏感性 |

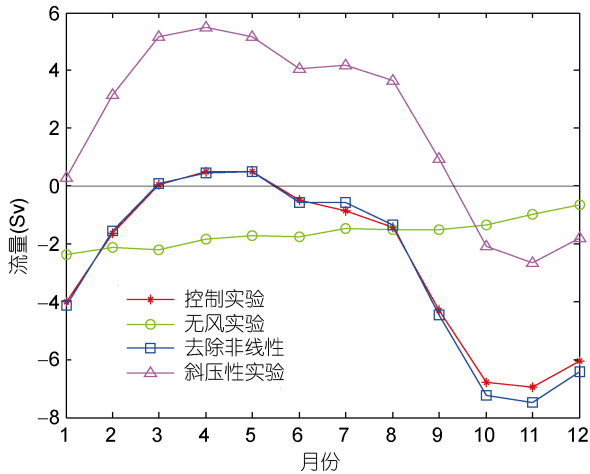


图 7 吕宋海峡处的流量(单位: Sv)
Fig.7 The discharge of Luzon Strait (in Sv)

海洋的平均流场, 为了更清楚的显示模拟结果, 特将模式结果从正交曲线网格按双线性插值方法插值到 $1/4 \times 1/4$ 度的网格节点上, 结果如图 8—图 11 所示。

从控制实验中可以看出, 黑潮在吕宋海峡的流态具有明显的季节性变化, 冬季二月份, 北上的黑潮一部分进入吕宋海峡后流向西北, 在东经 119 度、北

纬 22 度附近发生分岔, 一支折向东北开始汇入台湾暖流, 另一支向北做顺时针偏转后流出南海, 形成流套; 到了春季 5 月, 黑潮折向东北的分支已经消失, 黑潮流套也有所收缩, 黑潮流套延伸到 119.5°E 左右, 另外, 从南海内部来的一支流系汇入黑潮流套; 夏季的情形与春季相似, 只是流套结构有所减弱, 而从南海内部汇入的流系有所增强; 到了 11 月, 从南海内部汇入的流系消失, 黑潮主轴的一部分进入南海, 形成一较强流套结构, 最远延伸到 118°E , 并在黑潮主轴与黑潮流套之间形成一反气旋涡。

无风实验(图 9)表明, 当去除风应力后, 吕宋海峡黑潮的季节性变化不明显, 黑潮主轴的大部分汇入南海并直接向西偏转, 延伸到 117°E 左右时然后折向东北, 在 22°N , 120°E 附近, 即在台湾岛西南部时又开始向东偏转, 绕过台湾岛南部汇入黑潮主轴, 形成流套。另外值得注意的是, 当去除风应力后, 南海暖流也常年保持稳定的状态, 这就表明风应力是维系吕宋海峡上层环流形态季节性变化的主要驱动力。

当去除动量方程中的非线性项后(图 10), 吕宋海峡的环流状况同样具有典型的季节性变化, 在冬季,

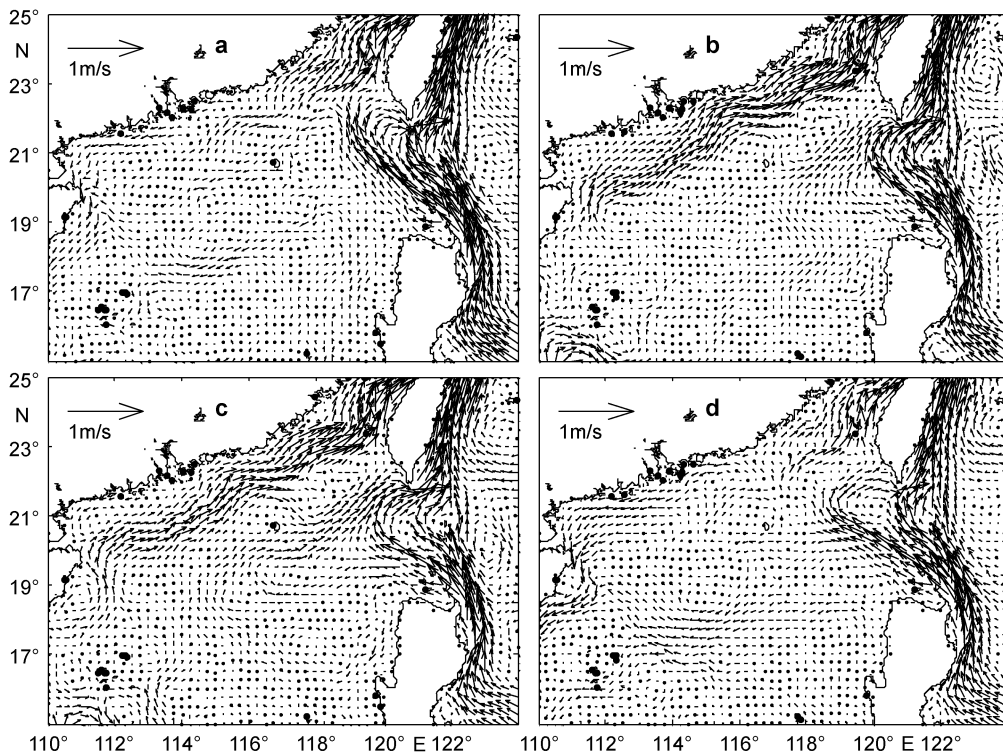


图 8 海洋上层 200m 平均流场(实验 1)
a. 2 月; b. 5 月; c. 8 月; d. 11 月

Fig.8 The upper layer flow vertically averaged in the top 200m(Experiment 1)
a. February; b. May; c. August; d. November

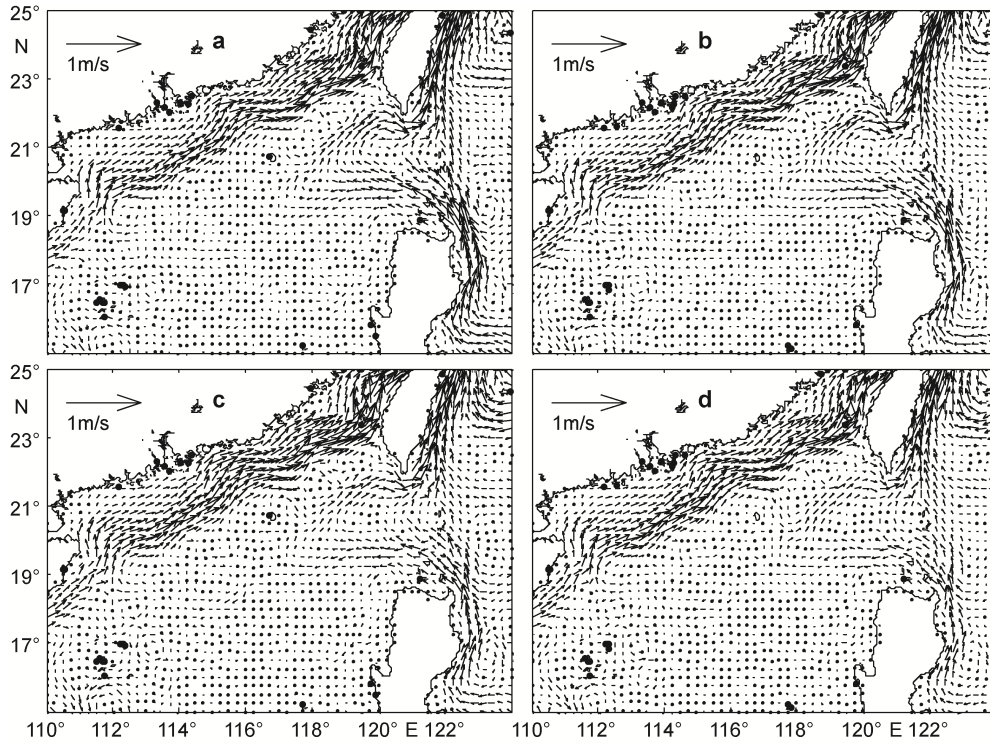


图 9 海洋上层 200m 平均流场(实验 2)

a. 2 月; b. 5 月; c. 8 月; d. 11 月

Fig.9 The upper layer flow vertically averaged in the top 200m (Experiment 2)

a. February; b. May; c. August; d. November

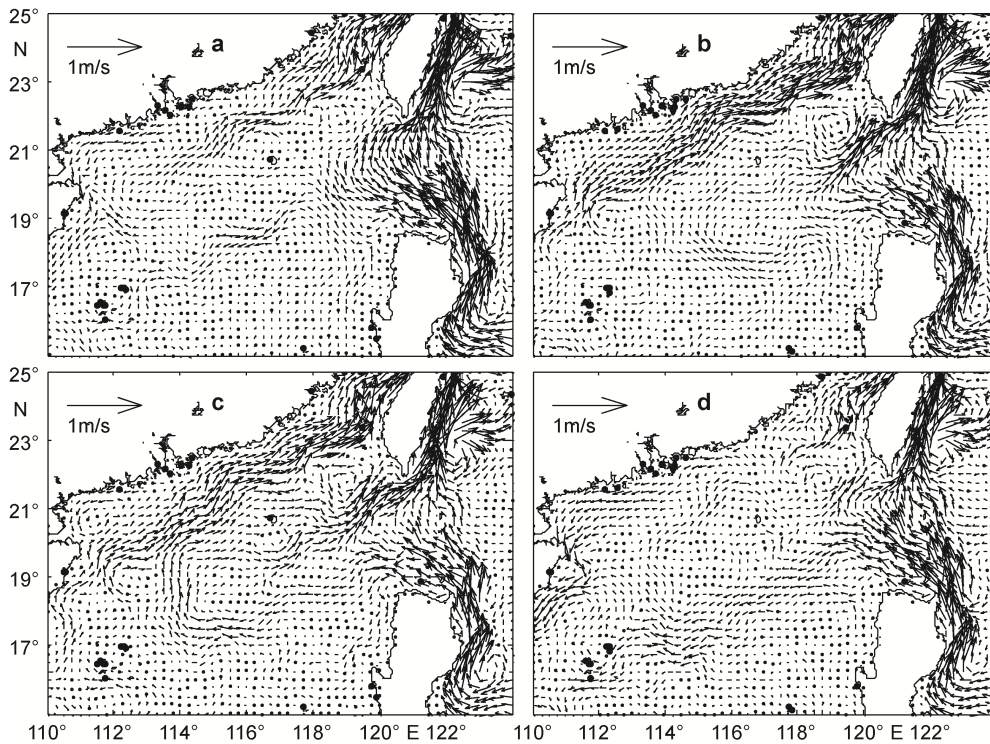


图 10 海洋上层 200m 平均流场(实验 3)

a. 2 月; b. 5 月; c. 8 月; d. 11 月

Fig. 10 The upper layer flow vertically averaged in the top 200m (Experiment 3)

a. February; b. May; c. August; d. November

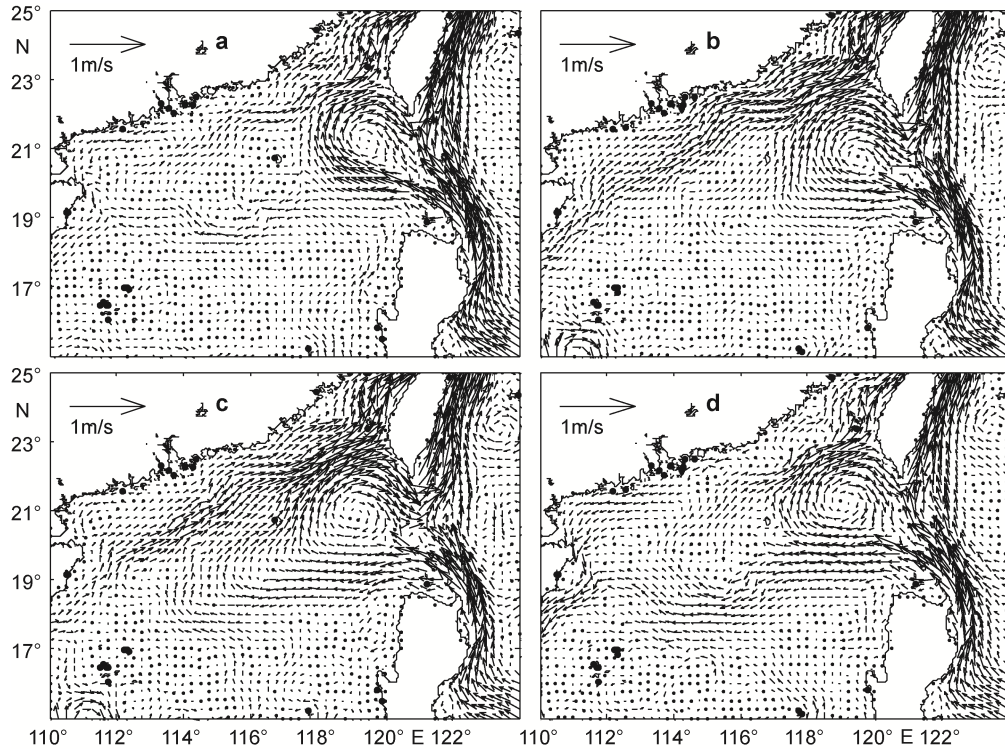


图 11 海洋上层 200m 平均流场(实验 4)

a. 2 月; b. 5 月; c. 8 月; d. 11 月

Fig.11 The upper layer flow vertically averaged in the top 200m (Experiment 4)

a. February; b. May; c. August; d. November

非线性效应使得黑潮流套变弱, 黑潮主轴在吕宋海峡的宽度变大, 并以一较小的反气旋式弯曲迅速离开吕宋海峡进入台湾以东; 到了春季这一趋势逐渐增强, 并在台湾西南部产生一较强的气旋式涡; 在夏季这一趋势不仅存在, 而且从黑潮主轴延伸出来的一支进入南海深处, 最远达 114°E , 经过一系列的与南海内部环流发生相互作用之后又再次回到黑潮主轴, 而到了秋季之后, 这一分支没有折回黑潮主轴, 而是沿着大陆架坡折向西南流动深入南海, 形成黑潮南海分支, 同时, 存在于台湾岛西南的气旋式涡旋也在变弱。综上所述, 去除非线性后可以显著的改变吕宋海峡上层环流状况, 并使得上层黑潮水入侵南海后更容易与周围的流系发生作用, 并在流套周围形成涡旋, 另外可以看到的是在台湾以东黑潮附近常年滋生出一较强的反气旋式涡旋。

从斜压敏感性实验(图 11)可以看出, 吕宋海峡以西终年存在较强的黑潮流套, 且黑潮流套入侵南海的范围较深, 最远可达 114°E , 同时, 黑潮流套和黑潮主轴之间常年伴随着较强的反气旋式涡旋。另外, 冬春季节的流套结构向西北方向偏转的趋势较明显, 但到了夏秋季节这一趋势则不明显。而在秋季, 黑潮

流套在 117°E 附近发生分岔现象, 一支做顺时针旋转并返回黑潮主轴, 并在黑潮主轴与流套之间诱发一反气旋式涡旋, 另一支则向西南偏转, 并在 114°E 再次发生分支, 一部分做气旋式旋转离开黑潮流套, 并沿海南岛南下汇入广东沿岸流, 另一部分又做反气旋式旋转形成一范围较大的黑潮流套, 但流套的强度有所减弱。因此可以说, 改变模式中斜压梯度力的计算方法时对吕宋海峡上层海洋环流结构的影响较大, 并使得黑潮流套常年以较强的形态入侵到南海深处, 说明吕宋海峡处上层海洋对斜压梯度力的计算较为敏感, 同时也说明吕宋海峡处黑潮具有较强的斜压性。

5 结论

本文从模拟源区黑潮的环流状况出发, 构建了一个太平洋尺度的三维斜压模型, 模式采用正交曲线网格, 在现有的计算条件下有效的提高了关心区域的分辨率, 得到的台湾以东海峡处的年平均流量为 30.6Sv , 台湾海峡处的年平均流量为 2.3Sv , 吐噶喇海峡处的年平均流量为 24.0Sv , 对马海峡处的流量为 2.9Sv 。从模式模拟出的关键海域的流量和实测资

料对比的情况来看, 模式具有较高的可信度。南海海面高度异常与高度计数据的对比显示, 最高相关系数为 83.7%, 再次验证了模式具有较高的可信度。

接着, 本文探讨了北赤道流分岔位置与源区黑潮流量的季节性变化关系, 结果显示, 秋冬季节北赤道流的流量较大, 北赤道流分岔的位置较靠北, 从而致使吕宋岛以东黑潮的流量也较大。到了春夏季节, 随着北赤道流的减弱, 北赤道流的分岔位置也跟着南移, 从而又造成了源区黑潮流量的减小。

在此基础上, 本文从研究源区黑潮的动力机制出发, 进行了 4 个敏感性实验, 得到的主要结论为:

(1) 风应力的季节变化是引起吕宋海峡净流量季节变化的主要驱动力, 秋冬季节在强东北风的影响下, 吕宋海峡处的净流量为负, 也就是说吕宋海峡的黑潮水更容易进入南海。而到了夏季, 南海主要受西南季风控制, 但在南海北部及吕宋海峡处的风向较偏南, 此时的黑潮水不容易进入南海。去除风应力后, 吕宋海峡处的净流量常年较稳定, 对于上层环流来说, 风应力的季节变化也是引起吕宋海峡黑潮形态季节变化的主要因素。

(2) 非线性效应对吕宋海峡水交换的季节性变化影响不大, 但对上层海洋环流影响较明显, 去除动量方程中的非线性项后, 黑潮在吕宋海峡的流态变得不稳定, 尤其是夏季入侵深度有所增大, 并且使得黑潮更容易与南海内部流系发生作用, 并滋生出涡旋。

(3) 吕宋海峡处的黑潮具有较强的斜压性, 改变地形坐标系下的斜压梯度力的计算方案后得到的吕宋海峡处的净流量与原来的控制实验有着显著的差异, 同时也说明模式本身在地形梯度较大的地方计算斜压梯度力时容易产生较大的误差。

参 考 文 献

- 黄企洲, 郑有任, 1996. 1992 年 3 月南海东北部巴士海峡的海流. 中国海洋学文集. 北京: 海洋出版社, 6: 42—52
- 李 立, 伍伯瑜, 1989. 黑潮的南海流套? ——南海东北部环流结构探讨. 台湾海峡, 8(1): 89—95
- 刘秦玉, 刘倬腾, 郑世培等, 1996. 黑潮在吕宋海峡的形变及动力机制. 青岛海洋大学学报, 26(4): 413—426
- 仇德忠, 杨天鸿, 郭忠信, 1984. 夏季南海北部一支向西流动的海流. 热带海洋, 3(4): 65—73
- 史峰岩, 朱首贤, 朱建荣等, 2000. 杭州湾、长江口余流及其物质输运作用的模拟研究 I. 杭州湾、长江口三维联合模型. 海洋学报, 22(5): 1—12
- 苏纪兰, 1999. 南海的环流和涡旋, 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 66—72
- 苏纪兰, 2005. 南海环流动力机制研究综述. 海洋学报, 27(6): 1—8
- 赵保仁, 万国洪, 1991. 东海主要水道的流量估算. 海洋学报, 13(2): 169—178
- 赵 伟, 侯一筠, 乐肯堂等, 2007. 吕宋海峡水交换的季节变化的数值研究. 海洋与湖沼, 38(6): 495—503
- 翟 丽, 万国洪, 王 凯, 2004. 南海风生正压环流动力机制的数值研究. 海洋与湖沼, 35(4): 289—294
- 魏泽勋, 万国洪, 崔秉昊等, 2002. 南海海面高度和输运流函数: 全球变网格模式结果. 中国科学(D 辑), 32(12): 987—994
- Blumburg A F, Mellor G L, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. American Geophysical Union, Washington D C, 4: 1—16
- Chern S C, Wang J, 1998. A numerical study of the summertime flow around the Luzon Strait. J Oceanogr, 54: 53—64
- Chu T Y, 1976. Study of the Kuroshio current between Taiwan and Ishigakijima. Acta Oceanogr Taiwanica, 6: 1—24
- Ezer T, Mellor G L, 2000. Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model. Dyn Atmos & Oceans, 32: 185—208
- Fang G, Zhao B, Zhu Y, 1991. Water volume transports through the Taiwan Strait and the East China Sea measured with current meters. in Oceanography of Asian Marginal Seas. Elsevier, Amsterdam. p. 345—358
- Farris A, Wimbush M, 1996. Wind-induced Kuroshio intrusion into South China Sea. J Oceanogr, 52: 771—784
- Li L, Nowlin W, Su J L, 1998. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea. Deep Sea Res(Part I), 45: 1469—1482
- Metzger E J, Hurlburt H E, 1996. Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea and the Pacific Ocean. J Geophys Res, 101(c5), 12433—12455
- Metzger E J, Hurlburt H E, 2001. The importance of high horizontal resolution and accurate coastline geometry in modeling South China Sea inflow. Geophys Res Lett, 28(6): 1059—1062
- Miita T, Ogawa T, 1984. Tsushima current measured with current meters and drifters. In: Ichiye T ed. Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas. Elsevier Oceanography Series. Elsevier, Amsterdam. p. 67—76
- Nitani H, 1972. Beginning of the Kuroshio. Kuroshio: Physical aspects of the Japan Current. University of Washington Press, Seattle. p. 129—163
- Qiao F, Yang Y, Lu X, Xia C *et al*, 2006. Coastal upwelling in the East China Sea in winter. J Geophys Res, 111, C11S06, doi: 10.1029/2005JC003264
- Wang K, Fang G H, Shi X, 2001. Numerical study on the formation of the South China Sea Warm Current II: Baroclinic case. Chinese Journal of Oceanology and limnology, 19(1): 1—9

Yang H, Liu Q, Liu Z *et al*, 2002. A general circulation model study of the dynamics of the upper ocean circulation of the

South China Sea. *J Geophys Res*, 107: 3085, doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2001JC001084>

SEASONAL VARIATION AND DYNAMIC MECHANISM OF THE ORIGINATION OF THE KUROSHIO

GENG Wu^{1,2}, HOU Yi-Jun¹, QI Peng¹, ZHAO Wei^{1,2}

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049*)

Abstract Princeton Ocean Model in an orthogonal curvilinear coordinate was employed to simulate the circulation of Kuroshio. The model had 21 sigma levels in vertical direction includes the whole north Pacific, in high precision for well-fitting the coastline in East China Sea. Climatory monthly wind stress data from COADS were used as the sea surface boundary condition and the satellite sea surface temperature (SST) data are assimilated into the model. In addition, the simulated results of discharge and sea surface height were compared with the measured data and satellite observation data, respectively. The results show high credibility of the model. Moreover, the relationship between seasonal variation of the location of North Equatorial Current (NEC) bifurcation and the discharge from the Kuroshio origination area was studied. The results confide us that the discharge would be bigger when the location of NEC bifurcation is more northern in autumn and winter, or the opposite in spring and summer. On this basis, four sensitive experiments were employed to study the dynamics of the Kuroshio generation, in which the following factors were concerned: (1) wind stress (2) nonlinearity (3) sensitivity of the baroclinicity in origination area of the Kuroshio, for understanding the influence of different factors on the net discharge of Luzon Strait.

Key words Kuroshio; numerical simulation; Luzon Strait; Curvilinear coordinate