

李云, 俞永强. 2014. 涡分辨率全球海洋环流模式 LICOM 模拟的吕宋海峡流场的季节变化 [J]. 气候与环境研究, 19 (5): 547–558, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13035. Li Yun, Yu Yongqiang. 2014. Seasonal variation of circulation and water transports in Luzon Strait derived from a quasi-global eddy-resolving ocean general circulation model LICOM [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (5): 547–558.

涡分辨率全球海洋环流模式 LICOM 模拟的吕宋海峡流场的季节变化

李云^{1,2,3} 俞永强¹

¹ 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

³ 国家海洋环境预报中心, 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081

摘 要 分析了一个 $1/10^\circ$ 的涡分辨率全球环流模式 LICOM (LASG/IAP Climate system Ocean Model) 对吕宋海峡附近海洋环流的模拟能力。结果表明, 模拟的吕宋海峡附近上层环流及输运具有明显的季节变化特征, 除 6 月是东向净流出外, 其余月份均为西向流入, 冬季流量最大。年平均流量在 -3.76 Sv ($1\text{ Sv}=10^6\text{ m}^3/\text{s}$), 其中上层 (600 m 以上) 流量起主要贡献, 为 -3.60 Sv, 与目前已有的研究结果基本一致。南海通过 6 个海峡完成与外界的水交换, 其中吕宋海峡和巴拉巴克海峡是大洋水进入南海的主要通道, 其余海峡均以流出为主, 流出量最大的是台湾海峡 (1.99 Sv), 其次是卡里玛塔海峡 (1.03 Sv)。进一步分析表明, 由季风引起的埃克曼输送量约占吕宋海峡流量的 11%, 而由季风引起的吕宋海峡压力梯度形成的西向的地转流对吕宋海峡的输运起支配作用。作为黑潮源头的太平洋北赤道流流量对吕宋海峡输运的季节变化也有一定影响。

关键词 吕宋海峡输运 季节变化 季风 黑潮

文章编号 1006-9585 (2014) 05-0547-12

中图分类号 P731.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13035

Seasonal Variation of Circulation and Water Transports in Luzon Strait Derived from a Quasi-Global Eddy-Resolving Ocean General Circulation Model LICOM

LI Yun^{1,2,3} and YU Yongqiang¹

¹ State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

³ Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081

Abstract The LASG/IAP climate system ocean model (LICOM), a quasi-global $1/10^\circ$ eddy-resolving ocean general circulation model, was used to simulate the seasonal variation of water exchange in the Luzon Strait. The seasonal variation in the upper circulation and the Luzon Strait Transport (LST) were found to be significant. Except for the eastward LST in June, westward LST dominates all other months. The biggest LST occurs in winter. The mean LST is estimated to be approximately -3.76 Sv ($1\text{ Sv}=10^6\text{ m}^3/\text{s}$), and the upper-layer (600 m) flux is the major contributor (-3.60 Sv). The South China Sea (SCS) exchanges waters with its adjacent oceans through six straits. The Luzon Strait and the Balabac Strait are the main channels through which the ocean water flows into the SCS. The Taiwan Strait (1.99 Sv) and

收稿日期 2013-02-25 收到, 2013-05-06 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究计划项目 2010CB950502, 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05110302, 海洋公益性行业科研专项 201105002

作者简介 李云, 男, 1981 年出生, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事海洋数值模式研究工作。E-mail: liyunmefc@gmail.com

the Karimata Strait (1.03 Sv) take the first and second places of the four outflow straits. A mechanism analysis shows that Ekman transport caused by monsoon events accounts for only 11% of the LST. However, the westward geostrophic current, resulting from a pressure gradient caused by monsoon events, plays a dominant role in the water exchange of the Luzon Strait. As the source of the Kuroshio, the North Equatorial Current also has some impact on the seasonal variation of the LST.

Keywords Luzon Strait transport, Seasonal variation, Monsoon, Kuroshio

1 引言

南海作为东南亚地区最大的边缘海,通过台湾海峡、吕宋海峡、民都洛海峡、卡里玛塔海峡、巴拉巴克海峡、马六甲海峡等与太平洋和印度洋相连(图1)。其中,吕宋海峡由于具有较深的海槽(最大深度 2500 m 以上),使得南海与西太平洋之间存在由表层至深水层的充分的水交换,因此是南海与大洋进行水交换的主要通道,吕宋海峡的环流结构对于整个南海的能量和物质平衡有着重要的影响。

吕宋海峡输运(Luzon Strait Transport, LST)受季风、黑潮、不稳定机制和中尺度涡等影响显著,存在明显的季节变化。由于实测资料相对缺乏,许多研究成果仍存在分歧,如黑潮水通过吕宋海峡入侵南海的方式,最初的观点是黑潮有直接分支进入南海(仇德忠等, 1984; 郭忠信等, 1985; Pu et al., 1992),这一观点也得到了一些数值模拟的支持(Metzger and Hurlburt, 1996; Chern and Wang, 1998; 刘秦玉等, 2000)。之后,“流套说”被广泛提出。李立和伍伯瑜(1989)根据对历史资料的分析提出了“黑潮南海流套”的设想,第一次明确“南海流套”的概念; Zhang et al. (1995)利用一个非线性诊断模式证明了流套的存在; Farris and Wimbush (1996)依据卫星海面温度资料,也认为东北季风期间黑潮在吕宋海峡形成顺时针的流套。苏纪兰(2005)提出一种新观点,认为不可能有稳定的黑潮分支进入南海,黑潮水只能以非稳态的方式进入南海,如亚中尺度涡的形式。Yuan et al. (2006)通过对卫星资料的分析支持了这一观点。此外,源自太平洋的中尺度涡或者波动是否能通过海峡传播入南海也是争论的焦点之一(Hu et al., 2001; Li et al., 2007)。

对于吕宋海峡的流场结构和输送特征,近几十年来许多学者从海洋观测以及动力计算方面都做了大量的研究工作。如黄企洲(1983, 1984)利用 13 个航次的温盐资料给出了不同季节吕宋海峡流

量的估计; 郭忠信等(1985)根据海洋调查温盐资料,通过地转流计算给出了黑潮进入南海的体积输送量; Qu (2000)通过温盐资料动力计算说明吕宋海峡上层的输运量 1~2 月最大, 6~7 月最小; Chu and Li (2000)利用 P 矢量方法分析气候态温盐得到平均输运量,认为 2 月入侵最强, 9 月最弱; 刘秦玉等(2000)分析了吕宋海峡部分温盐深仪(conductivity temperature, depth, CTD)和声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)资料,表明海峡流量主要集中在 500 m 以上水层; Liang et al. (2003)利用 Sb-ADCP 观测估算出吕宋海峡 300 m 以上水层流量约为 -3.3 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$); Tian et al. (2006)利用 2005 年 10 月东方红 2 号观测的分析吕宋海峡的净输运量为 -6 ± 3 Sv; 胡筱敏等(2008)利用 Argos 表层漂流浮标对吕宋海峡表层流场季节分布特征进行了分析; 鲍献文等(2009)利用 2007 年 7 月 13 日至 8 月 5 日在吕宋海峡 120°E 的 CTD 观测,运用动力计算的方法得出了吕宋海峡经向断面流速分布。通过这些研究工作,对于吕宋海峡的输送特征,现在形成的比较共性的结论是:吕宋海峡的输运具有比较显著的季节变化特征,在春夏两季通过吕宋海峡入侵南海的流量较小,秋冬两季较大;吕宋海峡的水交换具有“三明治”状的垂向结构(Qu, 2002; Tian et al., 2006),即中层水流出南海,上层和底层水由太平洋流入南海。

由于观测资料的不连续性,很难通过资料来全面分析出吕宋海峡环流的季节变化规律及其物理机制,因此目前数值模式成为研究南海环流的一个重要工具。在模式研究方面, Metzger and Hurlburt (1996)采用一个 1.5 层的约化重力模式计算出吕宋海峡的年平均流量约为 -4.4 Sv; Fang et al. (2003)利用一个水平分辨率 3° 、在中国近海加密为 $1/6^\circ$ 的全球大洋变网格环流数值模式计算出吕宋海峡的年平均流量约为 -6.4 Sv; Cai et al. (2005)利用 $1/2^\circ$ 分辨率的 LICOM 全球模式对南海和其毗邻海域的水交换进行了计算,认为吕宋海峡的年均

流量为 -4.27 Sv ; 赵伟等 (2007) 利用 POM 模式的数值模拟认为吕宋海峡年平均流量为 -5.7 Sv , 除 5 月和 6 月为净流出外, 其余月份均为净流入; 陈兆云等 (2009) 利用 ROMS 模式计算出吕宋海峡的年均净流量为 -13.05 Sv 。鉴于计算条件的限制, 上述全球模拟研究中水平和垂向的分辨率较粗, 而区域模拟研究又仅考虑南海或西北太平洋的局部, 难以准确模拟出大洋环流及涡动对南海及黑潮的影响, 再加上所用到大气强迫资料的不确定性, 因此各模式的模拟结果存在很大的差异。本文将利用中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 发展的高分辨率 LICOM (LASG/IAP Climate system Ocean Model) 全球环流模式的模拟结果 (Yu et al., 2012), 该模式水平分辨率为 0.1° , 垂直方向有 55 层, 能够较好地模拟大尺度环流和中尺度涡旋的基本特征, 本文将用该模式模拟结果分析吕宋海峡水交换的季节变化特征和物理机制。由于季风和黑潮在 LST 中起到的作用一直是研究和讨论的热点 (Metzger and Hurlburt, 2001; Wang et al., 2008, 2012), 因此本文也利用模式结果对季风和黑潮对 LST 季节变化的影响进行了探讨。

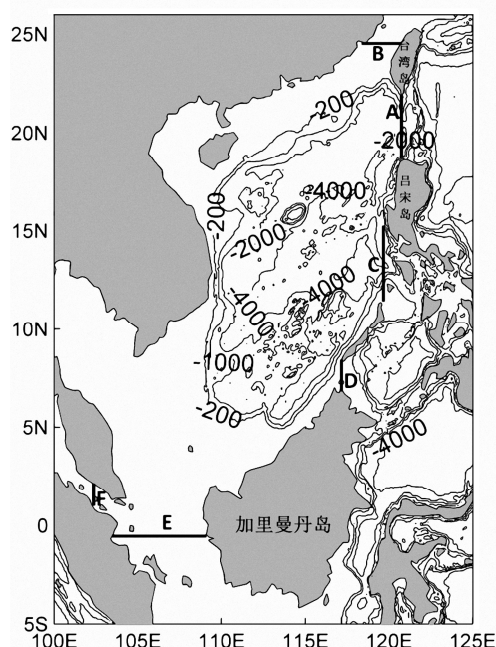


图 1 南海地形及海峡 (地形数据来源于 ETOP5, A 为吕宋海峡, B 为台湾海峡, C 为民都洛海峡, D 为巴拉巴克海峡, E 为卡里玛塔海峡, F 为马六甲海峡)

Fig. 1 Bottom topography and straits in the South China Sea derived from the ETOP5 dataset (A is Luzon Strait, B is Taiwan Strait, C is Mindoro Strait, D is Balabac Strait, E is Karimata Strait, and F is Malacca Strait)

2 数值模式介绍和试验设计

本文采用中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 发展的气候系统海洋模式 LICOM 进行数值模拟试验 (Yu et al., 2012)。LICOM 是一个基于三维原始方程的准全球涡分辨率海洋模式, 水平方向采用球坐标, 垂直方向采用 η 坐标 (Mesinger and Janjic, 1985)。模式具有较高的分辨率, 水平分辨率达到 0.1° (纬度) $\times 0.1^\circ$ (经度), 覆盖范围为 $75^\circ\text{S} \sim 65^\circ\text{N}$, 垂直分为 55 层, 其中 600 m 以上分为 40 层, 这样的分辨率已达到了涡分辨的要求, 且在模式中引进了 Canuto 垂直混合方案, 对垂向混合过程的模拟能力也较以往模式有了较大的提高。

该涡分辨率海洋模式采用气候月平均的风应力和热通量以及观测温度和盐度作为初始值, 从静止状态开始积分了 12 个模式年, 其中强迫场资料均来自海洋模式比较计划 (Ocean Model Intercomparison Project, OMIP) 强迫场 (Röske, 2001), 原始资料是 ERA15 再分析数据 (Gibson et al., 1997)。此外, 模式盐度在海表向 Levitus 气候平均盐度 (Levitus and Boyer, 1994) 恢复。由于模式的北边界在 66°N , 是一个开边界, 为了保证模拟结果与观测的一致性, 我们在开边界上将模式的温度和盐度海洋向气候平均的 Levitus 资料恢复, 而对于速度则当作刚壁边界条件处理。

在上述 12 年数值试验的基础上, 利用 2000~2007 年逐日的 QuikSCAT 海表风应力强迫模式, 同时采用同期的 COREs 资料 (Large and Yeager, 2004) 计算得到的海表热量通量和淡水通量强迫模式, 继续在 12 年 spin-up 的基础上将模式积分 8 年。关于海表湍流通量的具体计算方案, 详情请见 Yu et al. (2012)。由于 LICOM 中不包括海冰模式, 在计算海表通量过程中还采用了 Hadley 中心提供的海冰密集度资料 (Rayner et al., 2006)。当海水的温度低于冰点 (-1.8°C) 时, 直接将温度恢复成冰点温度。本文所用到的模拟结果, 都是来自于模式后 8 年的积分。

3 结果分析

3.1 南海上层环流

在吕宋海峡附近的模拟结果 (见图 2) 显示,

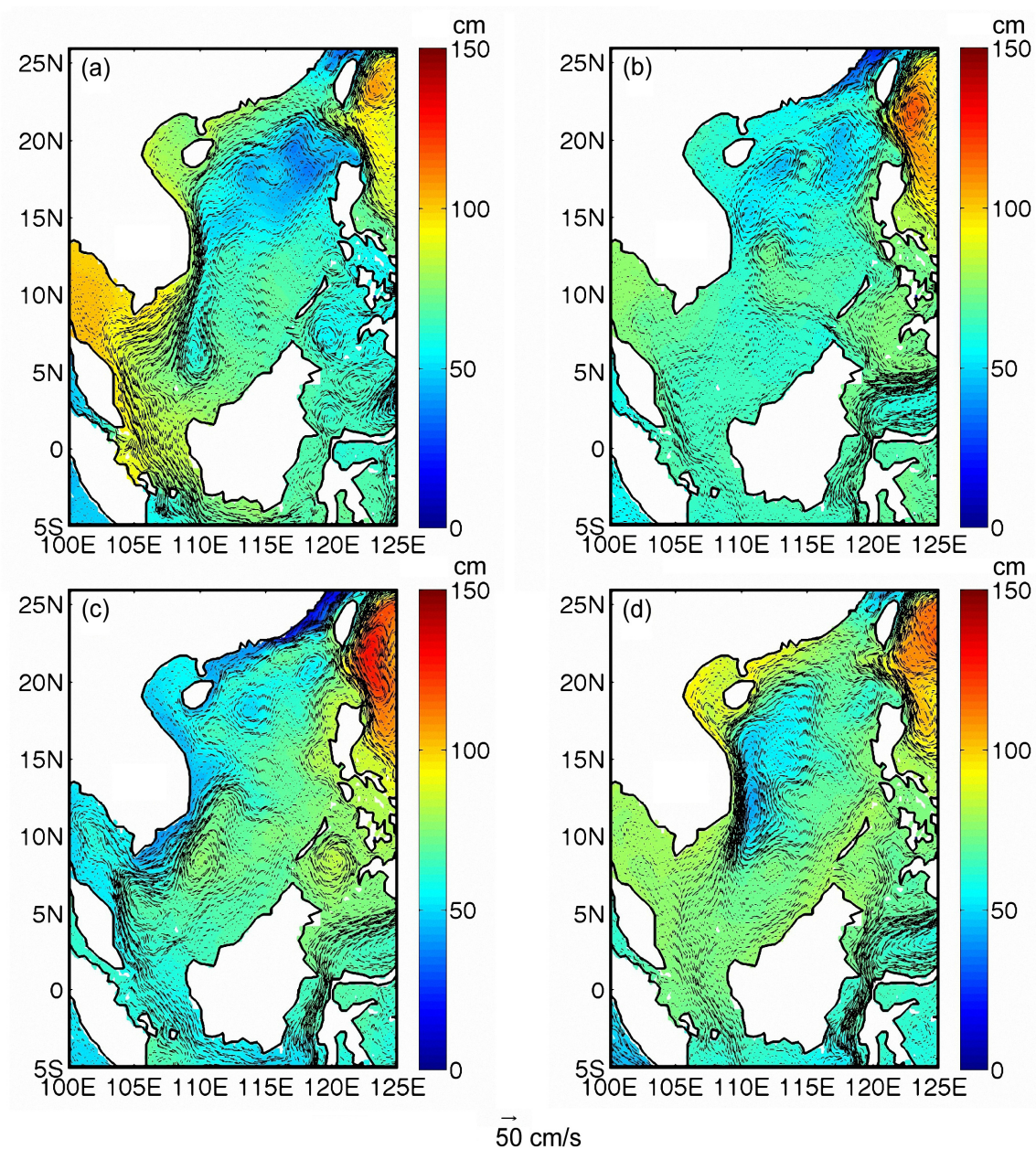


图2 模式模拟的 (a) 1月、(b) 4月、(c) 7月、(d) 10月南海表层 (100 m 平均) 流场及海面高度季节变化

Fig. 2 Simulated horizontal velocities at the surface (mean in upper 100 m) and sea surface heights in (a) Jan, (b) Apr, (c) Jul, and (d) Oct

冬季, 黑潮北上后主轴位置向西北方向倾斜, 通过吕宋海峡进入南海, 在 (21°N, 120°E) 附近发生分叉, 主轴部分沿陆架向西南方向深入南海, 一部分形成反气旋式环流在海峡北部流出南海。流入南海的表层最大流速在 1.2 m/s 左右。春季, 黑潮北上后主轴位置基本处于吕宋海峡东侧, 沿台湾岛东侧继续北上。反气旋式环流的曲度大为收缩, 但在 (21.5°N, 120.5°E) 附近仍有一支很弱的分支进入南海, 最大流速小于 0.4 m/s。夏季, 黑潮主轴完全处于吕宋海峡以东, 且流速较春季有所减弱。进入

南海的黑潮分支基本消失。秋季, 黑潮主轴方向在吕宋岛东北又开始向西北方向倾斜, 处于向冬季形态的过渡阶段。在 (21°N, 120.75°E) 附近开始分叉, 较冬季分叉位置偏东, 流速偏小, 流幅偏窄。模拟显示表层流场的季节变化规律与胡筱敏等 (2008) 利用 1979~2003 年间世界海洋环流实验—表面流项目 (World Ocean Circulation Experiment—Surface Velocity Programme, WOCE-SVP) 和中国自行投放的漂流浮标资料分析得出的吕宋海峡附近海域表层流场的季节分布规律类似, 均显示在表层, 春

夏两季不存在向南海的入侵现象, 入侵只发生在秋冬两季。Centurioni et al. (2004) 对 1989~2002 年间的漂流浮标也表明, 穿过吕宋海峡进入南海的浮标仅出现在 10 月至次年 1 月。对海面高度的模拟也支持了这种流场结构, 秋冬两季台湾岛西南与吕宋岛西北侧的显著的动力高度梯度可以导致吕宋海峡中部产生一支很强的西向流, 产生比春夏季更强的西向输送。温度和盐度的模拟结果与世界大洋数据集 2005 版 (World Ocean Atlas 2005, WOA05) 相比, 除了在部分近岸浅水区误差较大外, 其他大部分区域均较为吻合, 同样也显示了黑潮高温高盐水向吕宋海峡入侵的季节变化 (图 3)。冬季时, 有明显的高温高盐水舌经吕宋海峡延伸至南海, 夏季时该现象基本消失。

3.2 吕宋海峡垂向流场结构及流量分析

图 4 是模式模拟的 120.75°E 断面 600 m 以上垂向流场结构。由 1、4、7、10 月的吕宋海峡 (120.75°E) 纬向流速垂直分布可以看出, 基本形态均为“两出一入”结构, 即在海峡北部和南部以出流为主, 在海峡中部以入流为主。模拟的断面结构与船载 ADCP (Shipboard Acoustic Doppler Current Profiler, Sb-ADCP) 1991~2000 年观测结果 (Liang et al.,

2003) 非常相似, 根据观测结果, 上层 300 m 的体积输运为 -3.3 Sv , 这也与模式在上 300 m 层的模拟结果 -3.46 Sv 近似, 显示了模式在吕宋海峡断面较好的模拟能力。秋冬两季, 入流的流幅大于春夏两季, 其中, 1 月的流入范围约为 $19.5^\circ\text{N} \sim 21.25^\circ\text{N}$, 7 月的流入范围为 $19.75^\circ\text{N} \sim 21.25^\circ\text{N}$ 。同时, 秋冬两季的流入流速远大于春夏两季, 其中, 1 月的最大流速在表层, 约在 20.25°N 处, 最大流速约为 0.6 m/s ; 7 月的最大流速约在 100 m 深度 20.5°N 附近, 最大流速仅为 0.16 m/s 。模式模拟的各月通过吕宋海峡的月平均流量如表 1 所示, 除了 6 月外, 其余月份均为净流入。全年的流量冬季大, 夏季小, 其中 12 月流量最大, 为 -9.05 Sv , 6 月为净流出, 为 0.56 Sv 。模拟结果证明, 冬季南海水与北太平洋水体交换最强, 春季最弱, 从全年的季节变化分析, 每个季节都有太平洋水净输入南海。全年平均的净流量为 -3.76 Sv 。Qu (2000)、苏纪兰 (2005) 等的研究表明, 通过吕宋海峡进入南海的西太平洋水主要来自上层 600 m 以浅 (即黑潮上层的水体), 本文的模式结果也证明了这一点。模式模拟的 600 m 层以上的年平均流量为 -3.60 Sv , 与整个断面的年均流量 -3.76 Sv 基本相当。

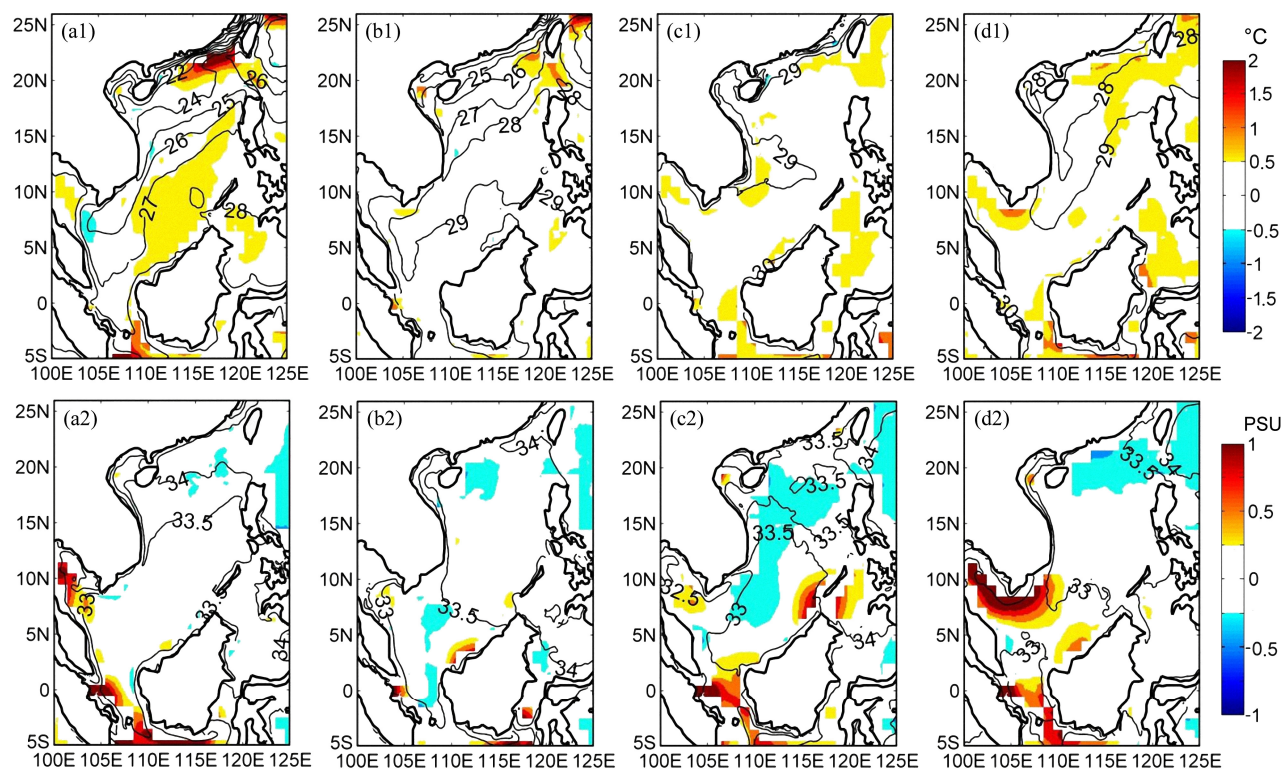


图 3 模式模拟的 (a) 1 月、(b) 4 月、(c) 7 月、(d) 10 月南海表层温度及盐度模拟值 (等值线) 及与 WOA05 数据的偏差 (填色)

Fig. 3 Simulated sea surface temperature and salinity (contours) and the bias compared with the WOA05 data (shaded) in (a) Jan, (b) Apr, (c) Jul, and (d) Oct

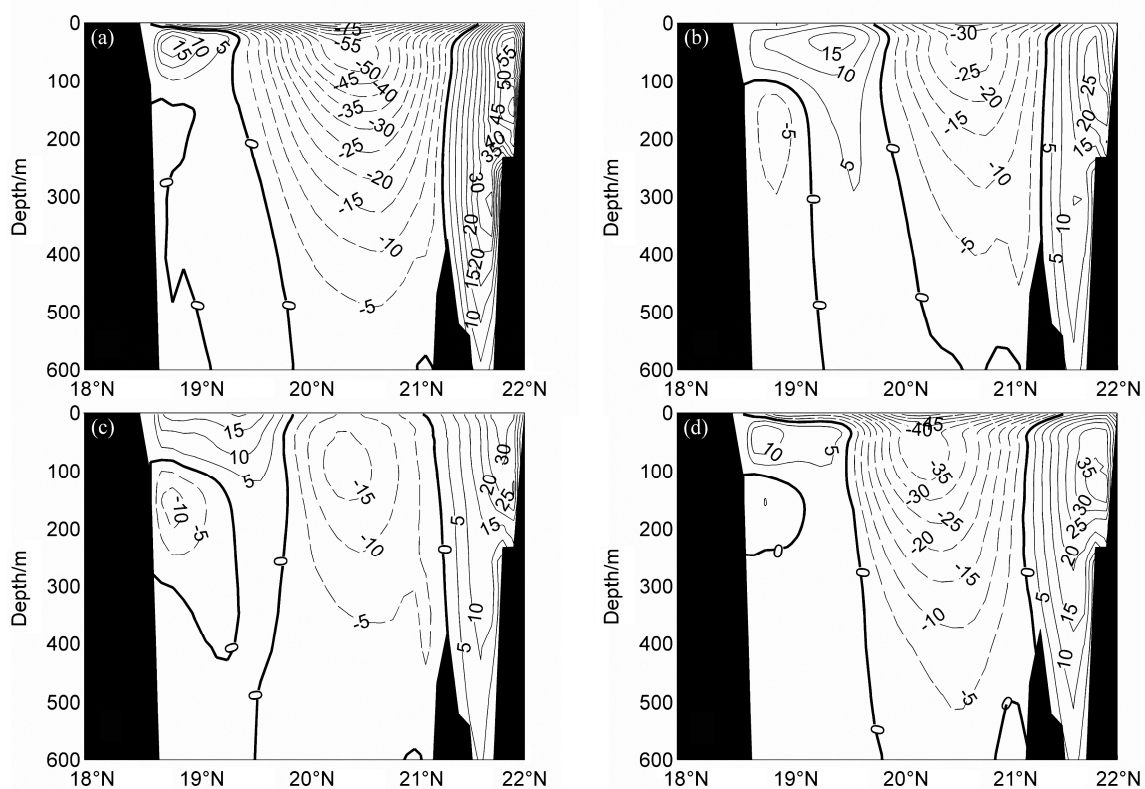


图4 吕宋海峡 (a) 1月、(b) 4月、(c) 7月、(d) 10月 120.75°E 断面 0~600 m 纬向流场结构 (正值表示东向流, 负值表示西向流, 单位: cm/s)
Fig. 4 Zonal flow (cm/s) sections at Luzon Strait across 120.75°E in (a) Jan, (b) Apr, (c) Jul, and (d) Oct (positive and negative values indicate eastward flow and westward flow, respectively)

表 1 南海各海峡月平均流量估计

Table 1	Monthly average volume transports estimated for various channels of the South China Sea												Sv
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
吕宋海峡	-7.97	-6.07	-3.44	-0.18	-0.21	0.56	-0.47	-2.65	-2.03	-5.97	-7.64	-9.05	-3.76
吕宋海峡 (600 m)	-8.07	-5.11	-4.23	-1.17	-1.25	0.32	-0.01	-1.58	-1.79	-4.96	-7.11	-8.50	-3.60
台湾海峡	0.87	1.13	1.86	2.63	3.22	3.42	3.87	3.48	1.55	0.83	0.57	0.45	1.99
民都洛海峡	3.06	1.46	-0.45	-2.32	-1.21	-1.74	-0.85	0.73	0.69	2.59	3.45	4.02	0.78
巴拉巴克海峡	-0.86	-0.97	-1.17	-1.30	-0.50	-0.35	-0.40	0.32	0.30	0.56	0.33	-0.10	-0.34
卡里玛塔海峡	4.35	4.02	2.75	0.88	-1.33	-1.97	-2.28	-2.04	-0.75	1.71	2.85	4.11	1.03
马六甲海峡	0.51	0.48	0.44	0.22	-0.05	-0.01	0.01	0.09	0.24	0.20	0.25	0.39	0.23

注: 负号表示流入南海。

由于吕宋海峡处流态复杂, 流量变化受季风、黑潮强度、中尺度涡等多种因素影响, 并且目前尚无较长时间序列的观测, 再加上其具有多时间尺度的变化, 因此不同研究者根据不同观测资料或不同模式估算的吕宋海峡流量变化存在较大差异, 从定量上较难形成统一的结论, 所以很难从定量上评估模式结果的好坏。表 2 显示了不同研究者对吕宋海峡不同季节平均流量的估算和本文模式的估算。可以看出, 虽然从具体数值上来说差异较明显, 但是从量级和季节变化规律上看, 研究结果较为一致。

除了吕宋海峡外, 南海还通过台湾海峡、民都洛海峡、巴拉巴克海峡、卡里玛塔海峡、马六甲海峡完成与外界海域的水交换。对模式模拟的各通道月平均流量的统计如表 1 和图 5 所示。模式的模拟结果显示, 从全年的收支情况看, 吕宋海峡和巴拉巴克海峡是大洋水进入南海的主要通道。其中吕宋海峡的流量约是巴拉巴克海峡的 10 倍以上, 占海水收支的支配地位。其余 4 个海峡均以流出为主, 流出量最大的是台湾海峡, 为 1.99 Sv, 其次是卡里玛塔海峡, 为 1.03 Sv。与吕宋海峡相比, 台湾海峡

表 2 不同学者对吕宋海峡断面流量季节变化的估算

Table 2 Comparison of estimated seasonal mean transports through the Luzon Strait

Sv

	Qu (2000) 动力计算	Fang (2003) 全球模式	Lan (2004) <i>P</i> 矢量方法	Cai et al. (2005) 全球模式	赵伟 (2007) 区域模式	陈兆云 (2009) 区域模式	Wang et al. (2009) 全球模式	高分辨率 LICOM
1 月	-5.3	-11.27	-5.53	≈-5.60	-9.5	-21.03	≈-6.8	-7.97
4 月		-4.11	-2.50	≈-3.00	-3.1	-2.01	≈-3.0	-0.18
7 月	-0.2	-2.40	-0.29	≈-3.10	-1.6	-9.08	≈-2.4	-0.47
10 月		-7.65	-2.24	≈-5.20	-9.2	-17.96	≈-5.2	-5.97
全年平均	-3.0	-6.40	-2.69	-4.27	-5.7	-13.05	-4.5	-3.76

注：负号表示流入南海。

表 3 不同学者对南海各海峡水收支的估计

Table 3 Comparison of estimated annual mean transports through each strait in the South China Sea

Sv

	Cai et al. (2002)	Fang et al. (2003)	Cai et al. (2005)	Dong et al. (2008)	Fang et al. (2009)	Liu et al. (2011)	高分辨率 LICOM
吕宋海峡	-1.17 ^①	-6.40 ^①	-4.27 ^①	-4.64 ^①	-4.80 ^①	-4.81 ^①	-3.76 ^①
台湾海峡	0.93 ^②	1.15 ^④	2.56 ^②	0.43 ^④	1.71 ^②	1.44 ^③	1.99 ^②
民都洛海峡	-0.02 ^⑤	0.25 ^⑤	-0.07 ^⑤	0.45 ^③	1.35 ^③	2.27 ^②	0.78 ^④
巴拉巴克海峡	0.04 ^④	1.35 ^③	-0.08 ^④	0.11 ^⑤	0.41 ^⑤	-0.01 ^⑥	-0.34 ^⑤
卡里玛塔海峡	0.22 ^③	3.65 ^②	1.86 ^③	3.74 ^②	1.16 ^④	1.42 ^④	1.03 ^③
马六甲海峡					0.16 ^⑥	0.27 ^⑤	0.23 ^⑥

注：序号表示不同研究成果反映的对各海峡流量绝对值大小的排序。

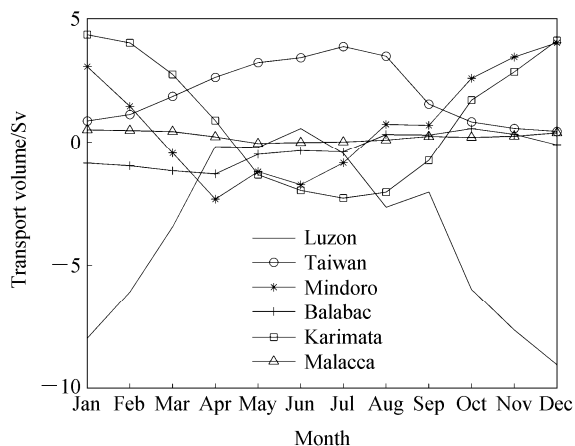


图 5 南海各海峡月平均流量估计

Fig. 5 Monthly average volume transports estimated for various channels of the South China Sea

和卡里玛塔海峡的流量同样存在显著的季节变化。南海水通过台湾海峡全年流出南海，夏季受西南季风影响，流量达到最大值。卡里玛塔海峡冬季时为净流出，夏季时为净流入，冬季流出量约是夏季流入量的两倍。南海通过这 6 个海峡与外界的水交换，达到水量的基本平衡。表 3 列出了本研究与其他学者对海峡水交换的估计，可以看出，所有的研究结果都肯定了吕宋海峡对南海水交换起到的支配作用，但是对其他海峡流量绝对值的排序存在较大分歧，其中蔡树群等 (2002)、Cai et al. (2005)、Fang

et al. (2009) 和本文的研究结论一致，认为台湾海峡是南海水净流出的主要通道。

Qu et al. (2000)、Wang et al. (2006) 曾用绕岛环流理论来估计大洋风应力对 LST 年际变化的影响。基于一个线性无粘的 Sverdrup 理论 (Godfrey, 1989)，吕宋海峡体积输送可以通过下式估算：

$$T_{\text{LST}} = \oint_{\text{ABCD}} \tau^{(l)} dl / [\rho_0 (f_N - f_S)] + \int_{\text{DA}} F dl / (f_N - f_S),$$

其中， $\tau^{(l)}$ 是风应力沿积分路径 ABCDA (如图 6) 上的分量， dl 为积分路径的微分， f_N 和 f_S 分别为路径北段 CD 和路径南段 AB 的科里奥利参数，参照 Wang et al. (2006) 选取的纬度，分别为 18.75°N 和 4.75°N ， ρ_0 为海水平均密度，取 1034 kg/m^3 ； F 为摩擦力。式中的第二项为摩擦效应带来的流量损耗。根据 Qu et al. (2000) 的算法，可近似为 DA 积分段风应力沿路径的积分和 DA 段地转流量的差值，即

$$\int_{\text{DA}} F dl / (f_N - f_S) = - \int_{\text{DA}} \tau^{(l)} dl / (f_N - f_S) + g \Delta P / (f_N - f_S),$$

其中， ΔP 是苏禄群岛北端到南端的动力高度差对 400 m 深度的积分； g 是重力加速度，取 9.8 m/s^2 。

这样，根据绕岛环流理论，利用模式采用的 QuikSCAT 海表风应力场以及模拟得到的海面动力

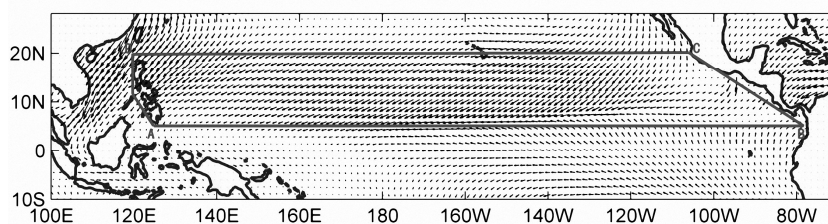


图6 绕岛理论风应力的积分路径 (箭头为风应力方向)

Fig. 6 Integration path of the wind stress used in the Island Rule (arrows denote the direction of the wind stress)

高度, 得出绕岛理论估算的年平均输运量为 -4.92 Sv, 如除去台湾海峡的年均净输出 1.99 Sv, 则据绕岛理论得出的吕宋海峡年均输运量为 -2.93 Sv, 与 Qu et al. (2000)、Wang et al. (2006) 的估算基本相当, 与模式的模拟结果 -3.76 Sv 也较为接近, 说明模式模拟的吕宋海峡气候平均流量在一定程度上可以由绕岛理论所解释。

3.3 吕宋海峡流量变化的影响机制分析

早期的研究表明, 冬季在东北季风的作用下, 黑潮上层有一支海水进入吕宋海峡, 并向西进入南海北部海域; 夏季受西南季风影响, 上层海水从南海流向太平洋 (Wyrski, 1961; Watts, 1971)。但最近的研究结果均倾向于黑潮水经过吕宋海峡终年进入南海, 只是在夏季流量很小, 冬季流量较大。虽然在结论上有所差异, 但研究成果均可表明, 南海季风的存在是 LST 存在显著的季节变化的重要原因之一 (Qu, 2000; Wang et al., 2006; Han and Huang, 2009; Wang et al., 2012)。

Metzger and Hurlburt (1996) 通过数值试验证明, 风应力旋度引起的埃克曼抽吸对吕宋海峡几乎没有影响, 而由风场引起水体在吕宋海峡堆积形成的压力梯度是形成 LST 季节变化的主要因素。Qu (2000) 研究吕宋海峡流量时, 推测由季风直接引起的埃克曼输送量仅占吕宋海峡上层 ($0\sim 400$ m) 流量的 10%, 但是由季风引起的吕宋海峡压力梯度形成的西向的地转流对吕宋海峡的输运起到了支配作用。当冬季东北风盛行时, 吕宋岛北部海岸线与季风主轴方向较一致, 使得吕宋岛北部的海水被带离外海, 而台湾岛南部海水则出现堆积, 导致冬季跨吕宋海峡的压力梯度很强, 这种很强的南北梯度导致了强劲的西向地转流。而夏季西南季风盛行时则相反, 使得压力梯度几乎等于 0。

对于季风直接引起的埃克曼输送, 根据经向输送公式计算:

$$Q_x = \frac{Y\tau_y}{\rho f},$$

其中, Q_x 为埃克曼输送的纬向分量, Y 是吕宋海峡的南北距离, τ_y 是经向风应力, f 为科里奥利参数, ρ 为海水密度。图 7 是根据模式采用的 QuikSCAT 风应力计算的月平均的纬向输送。结果显示, 全年上层 ($0\sim 600$ m) 的流量输送变化趋势与经向风应力产生的埃克曼输送基本一致, 体现出明显的季节变化规律, 说明了季风的南北分量对吕宋海峡输送的影响。上层平均输运量约为向西 3.6 Sv, 埃克曼输运量约为向西 0.4 Sv, 约占全年上层平均的 11%, 与 Qu (2000) 估算的 10% 相当接近。西向埃克曼输运的最大值出现在 12 月, 输送量为向西 1.15 Sv; 最小值出现在 7 月, 输送量为向东 0.28 Sv, 这与全年平均输送的最大值发生月 (12 月) 和最小值发生月 (6 月) 相当接近。总体上说, 较大的入侵均发生在东北季风期, 较小的入侵或出流均发生在西南季风期。

根据地转方程可导出地转流量计算公式:

$$Q = (P_1 - P_2) \cdot g / f$$

其中, P_1 和 P_2 是吕宋海峡南北端点的动力高度值对深度的积分, 根据 Wyrski (1961)、Qu et al. (2004) 的研究, 取积分深度为 400 m。图 8 是根据模式模拟得到的海面高度估算的通过吕宋海峡的月平均地转流量。通过对比可以证明吕宋海峡的输送中由地转效应引起的输送占主要作用, 远大于季风直接引起的埃克曼输送的作用。同时, 根据刘秦玉等 (1996) 运用位涡守恒原理研究吕宋海峡处流体的运动特征证明, 当黑潮在吕宋海峡失去西边界的支持后, 具有不同涡度的流体柱会在海峡内表现出不同的弯曲形式。在主轴西侧的水柱, 相对涡度较大, 流速较小, 易出现气旋式轨迹, 因此西侧部分流体在海峡南部流出; 而主轴附近的流体流速较大, 向西北运动的过程中因 β 效应以及水体柱厚度的减

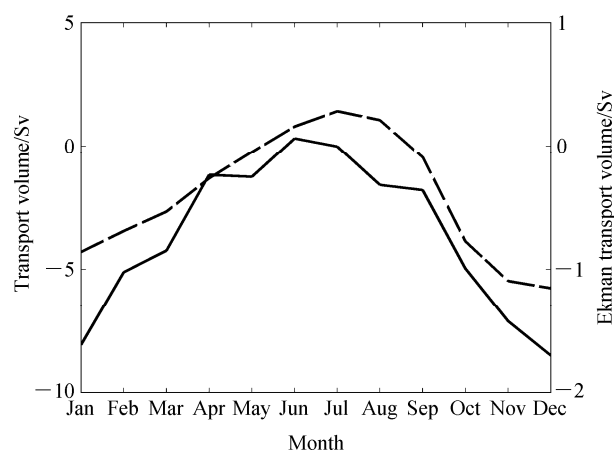


图7 吕宋海峡上层流量(0~600 m, 实线)与艾克曼输送量对比(虚线; 正值表示东向输送, 负值表示西向输送)

Fig. 7 The transport in the upper layer (0~600 m, solid line) of Luzon Strait compared with the Ekman transport (dashed line; positive values indicate eastward transport while negative values indicate westward transport)

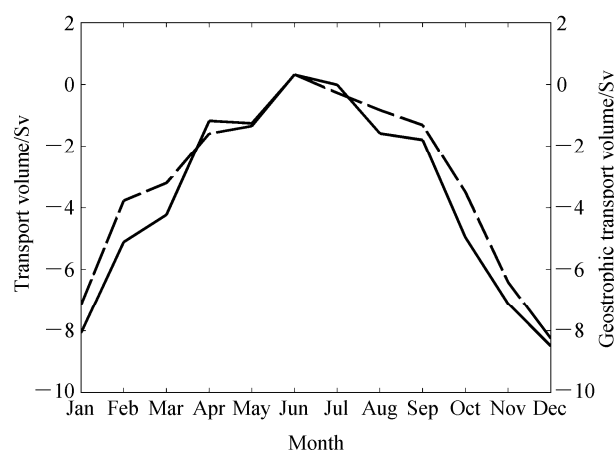


图8 吕宋海峡上层流量(0~600 m, 实线)与地转输送量对比(虚线; 正值表示东向输送, 负值表示西向输送)

Fig. 8 The transport in the upper layer (0~600 m, solid line) of Luzon Strait compared with the geostrophic transport (dashed line; positive values indicate eastward transport while negative values indicate westward transport)

小会使得流场具有负涡度, 配合海峡的宽度, 流体会以反气旋轨迹在海峡北部绕出海峡, 从理论上解释了吕宋海峡“两出一入”的流场结构。

LST 的另一个重要的影响因素是黑潮对海峡附近环流的强迫作用 (Metzger and Hurlburt, 2001)。Wang et al. (2012) 通过对 1986~2008 年间在吕宋海峡附近的 841 个浮标的轨迹研究发现, 在冬季约有 40% 的表面漂流浮标通过黑潮的西侧进入南海, 部分 Argo 浮标的轨迹也表明进入南海的途径不仅

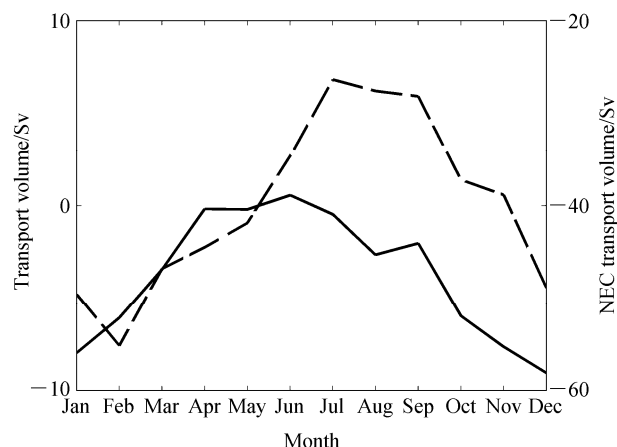


图9 模式模拟的月平均吕宋海峡运输(实线)与 NEC 月均流量(虚线)的比较(正值表示东向输送, 负值表示西向输送)

Fig. 9 Comparison of simulated monthly average transport at Luzon Strait (solid line) and North Equatorial Current (dashed line; positive values indicate eastward transport while negative values indicate westward transport)

仅限于表层。这说明了 LST 的主要来源很可能是作为黑潮源头的太平洋北赤道流 (North Equatorial Current, NEC)。我们选取 130°E 断面对模式模拟的 NEC 流量进行分析。根据刘秦玉等 (2003) 认为的 NEC 气候平均位置, 选取 7°N~16°N 作为南北边界, 获得的断面流量与 LST 的比较如图 9 所示。结果显示 NEC 流量与 LST 的季节变化相比滞后约 1 个月, 但仍显示出相似的变化规律, 显示了 NEC 对 LST 季节变化的影响。

综合以上分析, 我们认为吕宋海峡的流动以地转流驱动为主, 而动力高度的南部梯度决定了地转流的强度。在冬季时, NEC 流量较大, 更多的北赤道暖水流动到菲律宾以东海域, 使得南海水与黑潮水之间温度梯度较大 (图 3), 导致吕宋海峡处等水位线基本呈东南—西北走向 (图 2), 使动力高度的南北梯度得到加强, 通过吕宋海峡进入南海的地转流量相应增大, 而驱动这种南北梯度的动力因子主要来源于海面风场的动能, 至于是局地风应力还是海盆尺度风应力的作用则需要进行更多的数值试验进行验证。Metzger and Hurlburt (1996) 利用 1.5 层全球模式, 用不同的风场强迫进行过数值试验, 证明了当在南海和苏禄海由月变化风场驱动, 在外部区域用年平均风场驱动, 显示 LST 的月变化只是平时的 44%, 当南海和苏禄海采用零风场, 外部区域采用月变化风场, 则海峡流量的月变化是平时的 60%, 似乎可以说明局地风场和大尺度洋盆风场对

LST 的季节变化均有贡献,但受简化模式以及平均风场的影响,以往的数值实验并不能很好地说明季风影响机制,未来结合高分辨率原始方程模式和实际风场的数值实验有可能对 LST 季节变化物理机制做出更深入的解释。

4 结论与讨论

(1) 本研究以 Quikscat 风场驱动分辨率为 0.1° (纬度) $\times 0.1^\circ$ (经度) 的准全球海洋环流模式 LICOM, 由于模式的范围包括了较为完整的全球环流系统, 且分辨率具有涡分辨的能力, 加上实际风场的驱动, 使得模式的模拟精度较之以往在吕宋海峡附近的模拟研究具有更高的可信度。

(2) 模拟的吕宋海峡附近上层环流具有明显的季节变化特征, 秋冬两季由西太平洋进入南海的流量较大, 春夏两季的流量较小。年平均流量在 -3.76 Sv, 其中上层 (600 m 以上) 流量起主要贡献, 为 -3.60 Sv, 模式模拟的结果无论是与实际观测获得的流量, 还是与多数学者通过动力计算或数值计算获得的流量相比均较为接近, 模拟的气候平均结果与通过绕岛理论获得的年平均流量也较为接近, 显示了较好的模拟能力。

(3) 南海主要通过吕宋海峡、台湾海峡、民都洛海峡、巴拉巴克海峡、卡里玛塔海峡、马六甲海峡完成与外界海域的水交换。模式的计算结果显示, 吕宋海峡和巴拉巴克海峡是大洋水进入南海的主要通道, 其余海峡均以流出为主, 流出量最大的是台湾海峡 (1.99 Sv), 其次是卡里玛塔海峡 (1.03 Sv)。

(4) 吕宋海峡附近流态及流量季节变化的影响因素相当复杂, 一般认为季风及黑潮是主要因子, 本文利用模式的结果证明: 由季风引起的埃克曼输送量约占吕宋海峡流量的 11%, 而由季风引起的吕宋海峡压力梯度形成的西向的地转流对吕宋海峡的输运起支配作用。作为黑潮源头的 NEC 流量也对 LST 的季节变化有一定影响。

(5) 由于模式的模拟时间较短, 尚难以分析 LST 的年际变化规律以及影响因素, 因此获得长时间的数值模拟序列以对吕宋海峡流场的年际变化规律及物理机制进行研究将是下一步的工作内容。此外, 西太平洋水与南海水交换的物理机制研究尚不充分, 并且中尺度涡的生消过程和影响机制研究也

不够明确, 这些有意义的研究将是未来工作的重点。

致谢 本文中 LICOM 涡分变率海洋模式长期积分试验是在天津国家超算中心的天河-1A 超级计算机系统上完成的。

参考文献 (References)

- 鲍献文, 鞠霞, 吴德星. 2009. 吕宋海峡 120°E 断面水交换特征 [J]. 中国海洋大学学报, 39 (1): 1–6. Bao Xianwen, Ju Xia, Wu Dexing. 2009. Characteristics of water exchange across 120°E section in the Luzon Strait [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 39 (1): 1–6.
- 蔡树群, 刘海龙, 李薇. 2002. 南海与邻近海洋的水通量交换 [J]. 海洋科学进展, 20 (3): 29–34. Cai Shuqun, Liu Hailong, Li Wei. 2002. Water transport exchange between the South China Sea and its adjacent seas [J]. Advance in Marine Science (in Chinese), 20 (3): 29–34.
- Cai S Q, Liu H L, Li W, et al. 2005. Application of LICOM to the numerical study of the water exchange between the South China Sea and its adjacent oceans [J]. Acta Oceanologica Sinica, 24 (4): 10–19.
- Centurioni L R, Niiler P P, Lee D K. 2004. Observations of inflow of Philippine Sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait [J]. J. Phys. Oceanogr., 34 (1): 113–121.
- 陈兆云, 张振昌, 江毓武, 等. 2009. Argos 浮标及模型反演吕宋海峡区域流场季节变化特征 [J]. 厦门大学学报, 48 (5): 719–724. Chen Zhaoyun, Zhang Zhenchang, Jiang Yuwu, et al. 2009. Seasonal variation of Kuroshio at Luzon Strait studied with Argos and numerical model [J]. Journal of Xiamen University (in Chinese), 48 (5): 719–724.
- Chern C S, Wang J. 1998. A numerical study of the summertime flow around the Luzon Strait [J]. Journal of Oceanography, 54 (1): 53–64.
- Chu P C, Li R F. 2000. South China Sea isopycnal-surface circulation [J]. J. Phys. Oceanogr., 30 (9): 2419–2438.
- Dong D P, Zhou W D, Yang Y, et al. 2008. Diagnostic calculations and discussions on main outflow passage of South China Sea [J]. Journal of Tropical Oceanography, 27 (6): 1–5.
- Fang G H, Wei Z X, Choi B, et al. 2003. Interbasin freshwater, heat and salt transport through the boundaries of the East and South China Seas from a variable-grid global ocean circulation model [J]. Science in China, 46 (2): 149–161.
- Fang G H, Wang Y G, Wei Z X, et al. 2009. Inter-ocean circulation and heat and freshwater budgets of the South China Sea based on a numerical model [J]. Dyn. Atmos. Oceans, 47 (1–3): 55–72.
- Farris A, Wimbush M. 1996. Wind-induced Kuroshio intrusion into the South China Sea [J]. Journal of Oceanography, 52 (6): 771–784.
- Gibson J K, Kallberg S, Uppalpa S, et al. 1997. ERA Description, ECMWF Reanalysis Project Report Series 1 [R]. European Center for Medium Range Weather Forecast. UK: Reading, 66.
- Godfrey J S. 1989. A Sverdrup model of the depth-integrated flow for the world ocean allowing for island circulations [J]. Geophys. Astrophys. Fluid Dyn., 45 (1–2): 89–112.
- 郭忠信, 杨天鸿, 仇德忠. 1985. 冬季南海暖流及其右侧的西南向海流 [J]. 热带海洋, 4 (1): 1–9. Guo Zhongxin, Yang Tianhong, Qiu Dezhong.

1985. The South China Sea warm current and the SW-ward current on its right side in winter [J]. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 4 (1): 1–9.
- Han G Q, Huang W G. 2009. Low-frequency sea-level variability in the South China Sea and its relationship to ENSO [J]. *Theoretical and applied climatology*, 97: 41–52.
- Hu J Y, Kawanura Y, Hong H S, et al. 2001. 3–6 months variation of sea surface height in the South China Sea and its adjacent ocean [J]. *Journal of Oceanography*, 57 (1): 69–78.
- 胡筱敏, 熊学军, 乔方利, 等. 2008. 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*, 30 (6): 1–16. Hu Xiaomin, Xiong Xuejun, Qiao Fangli, et al. 2008. Surface current field and seasonal variability in the Kuroshio and adjacent regions derived from satellite tracked drifter data [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 30 (6): 1–16.
- 黄企洲. 1983. 巴士海峡黑潮流速和流量的变化 [J]. *热带海洋*, 2 (1): 35–41. Huang Qizhou. 1983. Variations of velocity and transport of the Kuroshio in the Bashi Channel [J]. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2 (1): 35–41.
- 黄企洲. 1984. 巴士海峡的海洋学状况 [M]// 南海海洋科学集刊. 北京: 科学出版社, 6: 53–67. Huang Qizhou. 1984. The oceanographic conditions in the Bashi Channel [M]// *Proceeding of Oceanography of South China Sea* (in Chinese). Beijing: Science Press, 6: 53–67.
- Large W, Yeager S. 2004. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: The data sets and flux climatologies [R]. NCAR/TN-460+STR, 105.
- Levitus S, Boyer T P. 1994. *World Ocean Atlas 1994: Volume 4: Temperature* [R]. NOAA Atlas NESDIS4, U. S. Department of Commerce, Washington D C, 117.
- Li L, Jing C S, Zhu D Y. 2007. Coupling and propagation of mesoscale sea level variability between the western Pacific and the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 (12): 1699–1707.
- 李立, 伍伯瑜. 1989. 黑潮的南海流套? ——南海东北部环流结构探讨 [J]. *台湾海峡*, 8 (1): 89–95. Li Li, Wu Boyu. 1989. A Kuroshio loop in South China Sea?—On circulations of the Northeastern South China Sea [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* (in Chinese), 8 (1): 89–95.
- Liang W D, Tang T, Yang Y, et al. 2003. Upper-ocean currents around Taiwan [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50 (6–7): 1085–1105.
- Liu Q Y, Feng M, Wang D X. 2011. ENSO-induced interannual variability in the southeastern South China Sea [J]. *Journal of Oceanography*, 67 (1): 127–133.
- 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 [J]. *青岛海洋大学学报*, 26 (4): 413–419. Liu Qinyu, Liu Zhuoteng, Zheng Shipai, et al. 1996. The deformation of Kuroshio in the Luzon Strait and its dynamics [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao* (in Chinese), 26 (4): 413–419.
- 刘秦玉, 杨海军, 李薇, 等. 2000. 吕宋海峡纬向海流及质量输送 [J]. *海洋学报*, 22 (2): 1–8. Liu Qinyu, Yang Haijun, Li Wei, et al. 2000. Velocity and transport of the zonal current in the Luzon Strait [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 22 (2): 1–8.
- 刘秦玉, 潘爱军, 刘征宇. 2003. 太平洋北赤道流区上层海洋季节内振荡及斜压稳定性 [J]. *海洋与湖沼*, 34 (1): 94–100. Liu Qinyu, Pan Aijun, Liu Zhengyu. 2003. Intraseasonal oscillation and baroclinic instability of upper layer ocean in the North Equator Current [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica* (in Chinese), 34 (1): 94–100.
- Mesinger F, Janjic Z I. 1985. Problems and numerical methods of incorporation of mountains in atmospheric models [R]. *Lectures in Applied Mathematics*. Amer. Math. Soc., 81–119.
- Metzger E J, Hurlburt H E. 1996. Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea, and the Pacific Ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (C5): 12331–12352.
- Metzger E J, Hurlburt H E. 2001. The importance of high horizontal resolution and accurate coastline geometry in modeling South China Sea inflow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (6): 1059–1062.
- Pu S Z, Yu H L, Jiang S N. 1992. Branchings of Kuroshio into Bashi Channel and South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 11 (2): 1–8.
- 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 [J]. *热带海洋*, 3 (4): 65–73. Qiu Dezhong, Yang Tianhong, Guo Zhongxin. 1984. A west-flowing current in the northern part of the South China Sea in summer [J]. *Tropic Oceanology* (in Chinese), 3 (4): 65–73.
- Qu T D. 2000. Upper-layer circulation in the South China Sea [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 30 (6): 1450–1460.
- Qu T D. 2002. Evidence for water exchange between the South China Sea and the Pacific Ocean through the Luzon Strait [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 21 (2): 175–185.
- Qu T D, Kim Y Y, Yaremchuk M, et al. 2004. Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea? [J]. *J. Climate*, 17 (18): 3644–3657.
- Qu T D, Mitsudera H, Yamagata T. 2000. Intrusion of the North Pacific waters into the South China Sea [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (C3): 5415–5424.
- Rayner N A, Brohan P, Parker D E, et al. 2006. Improved analyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadSST2 data set [J]. *J. Climate*, 19 (3): 446–469.
- Röske F. 2001. An atlas of surface fluxes based on the ECMWF reanalysis—A climatological dataset to force global ocean general circulation models [R]. Germany, Hamburg MPI: Report No. 323, 31.
- 苏纪兰. 2005. 南海环流动力学机制研究综述 [J]. *海洋学报*, 27 (6): 1–8. Su Jilan. 2005. Overview of the South China Sea circulation and its dynamics [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 27 (6): 1–8.
- Tian J W, Yang Q X, Liang X F, et al. 2006. Observation of Luzon Strait transport [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19607, doi:10.1029/2006GL026272.
- Wang D X, Liu Q Y, Huang R X, et al. 2006. Interannual variability of the South China Sea throughflow inferred from wind data and an ocean data assimilation product [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 L14605, doi:10.1029/2006GL026316.
- Wang G H, Chen D K, Su J L. 2008. Winter eddy genesis in the Eastern South China Sea due to orographic wind jets [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 38 (3): 726–732.
- Wang Q Y, Cui H, Zhang S W, et al. 2009. Water transports through the four

- main straits around the South China Sea [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 27 (2): 229–236.
- Wang G H, Wang D X, Zhou T J. 2012. Upper layer circulation in the Luzon Strait [J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 15 (1): 39–45.
- Watts J D C. 1971. A general review of the oceanography of the northern sector of South China Sea [J]. Hong Kong Fish Bull., 2: 41–50.
- Wyrski K. 1961. Physical oceanography of the Southeast Asian waters. Scientific results of marine investigations of the South China Sea and gulf of Thailand 1959–1961 [R]. NAGA Rep. No. 2, University of California, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, 195pp.
- Yu Y Q, Liu H L, Lin P F. 2012. A quasi-global $1/10^\circ$ eddy-resolving ocean general circulation model and its preliminary results [J]. Chinese Science Bulletin, 57 (30): 3908–3916, doi:10.1007/s11434-012-5234-8.
- Yuan D L, Han W Q, Hu D X. 2006. Surface Kuroshio path in the Luzon Strait area derived from satellite remote sensing data [J]. J. Geophys. Res., 111, C11007, doi:10.1029/2005JC003412.
- Zhang M Y, Li Y S, Wang W Z, et al. 1995. A three dimensional numerical circulation model of the South China Sea in winter [C]// In Proceedings of Symposium of Marine Sciences in Taiwan Strait and Its Adjacent Waters. Beijing: China Ocean Press, 73–82.
- 赵伟, 侯一筠, 乐肯堂, 等. 2007. 吕宋海峡水交换季节变化的数值研究 [J]. 海洋与湖沼, 38 (6): 495–503. Zhao Wei, Hou Yijun, Le Kentang, et al. 2007. Numerical study on seasonal variation of water exchange in the Luzon Strait [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica (in Chinese), 38 (6): 495–503.