

LICOM 模拟的南海贯穿流及其对南海上层热含量的影响

王伟文^{1,2}, 俞永强³, 李超¹, 周文⁴, 刘钦燕¹, 王东晓^{1*}

(1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室(LED), 广东广州 510301; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 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), 北京 100029; 4. 香港城市大学能源及环境学院佳达亚太气候研究中心, 香港)

摘要: 利用 SODA(Simple Ocean Data Assimilation)数据、XBT(Expendable Bathythermograph)观测数据和绕岛环流理论(island rule)诊断计算结果评估了一个涡相容(eddy-permitting)全球海洋环流模式——LICOM对南海贯穿流及南海上层热含量的模拟能力,同时利用模式输出探讨了南海贯穿流对南海上层热含量的影响。NEC(North Equatorial Current)分叉的垂向结构、南海内区环流的季节和吕宋海峡体积输送的年际变化等分析结果都表明,LICOM能获取西北太平洋-印尼海域环流和南海贯穿流的合理模拟结果。模式模拟的南海上层热含量季节变化与观测及同化数据都表现出良好的一致性,尤其在南海内区。相关分析表明,吕宋海峡热输送主要控制着南海内区上层的热含量变化,两者呈显著负相关,这进一步证实了南海贯穿流作为一支冷平流调制着南海上层热含量变化的重要事实。

关键词: 南海贯穿流; 涡相容全球海洋环流模式; 热含量; 体积输送

中图分类号: P722.7; P731.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2010)02-0001-11

1 引言

南海作为东南亚最大的边缘海,通过吕宋海峡、民都洛海峡、台湾海峡和卡里曼丹海峡与邻近西北太平洋和印尼海域相连,南海水交换一直以来是人们关注的热点^[1-4]。Qu等^[5]利用过去40a的风应力数据和高分辨率海洋环流模式(OGCM)研究指出,源自吕宋入侵的太平洋海水,部分穿越南海向南进入爪哇海后经望加锡海峡返回太平洋,这支流存在较强的El Niño信号,对印尼贯穿流(ITF)的热输送存在显著影响。南海贯穿流因其对印尼贯穿流的影响以及由此引起的潜在气候意义,近年来受到很多学者的关注。Yu等^[6]利用多年复合高分辨率卫

星图像和数值模拟跟踪入侵南海的黑潮水,从而进一步证实了南海贯穿流的存在。随后,Yaremchuk等^[7]利用“反向模拟逼近”法定量估算了南海贯穿流的流量及其在3个出流海峡(卡里曼丹、民都洛和台湾海峡)的分布情况。

由于受到资料的限制,目前关于南海贯穿流年际变化的相关研究较少。Wang等^[8]利用海洋同化数据和绕岛环流理论诊断计算探讨了南海贯穿流的年际变化,提出西、中部赤道太平洋风场是调节吕宋海峡体积输送(LST)年际变化的主要因素,而吕宋海峡附近的局地风场则是相对次要的。Liu等^[9]利用类似的研究方法指出,在年际尺度上,由于北赤道太平洋风场异常强迫导致北赤道

收稿日期: 2009-12-11; **修订日期:** 2010-04-20。

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-214); 国家自然科学基金(40806005); 中国科学院南海海洋研究所青年基金(SQ200814)。

作者简介: 王伟文(1981—),男,广东省广州市人,硕士研究生,从事海洋环流与海气相互作用研究。E-mail: weiwenwang@scsio.ac.cn

* **通信作者:** 王东晓,研究员,博士生导师。E-mail: dxwang@scsio.ac.cn

流(NEC)强弱变化和分叉点南北移动,使得南海贯穿流和 ITF 之间存在一种相互调制作用。随后,他们又探讨了南海贯穿流和 ITF 的年代际变化特征及可能的动力机制^[10]。无论在季节还是年际变化上,南海贯穿流都是造成 ITF 主要通道望加锡海峡次表层流速最大值的重要原因,南海贯穿流在印-太区域的气候变化中起着重要的作用^[11-12]。Qu 等^[13]回顾了南海贯穿流近年的研究进展,综合讨论了其动力机制、季节到年际变化及其在气候研究的应用等方面。

近年的研究表明,南海贯穿流有如一个“热盐输送带”^[14],向印尼海域运送高达 0.2 PW (1 PW = 1×10^{15} W) 的热量和 0.1×10^6 m³/s 的淡水,而南海在年际尺度上则有如一个“热容器”,在某些年份存储热量而在其他年份释放热量,这表明以往的研究低估了南海在调整印尼海域及邻近西太平洋和东印度洋的海表面温度(SST)上所做出的贡献。南海海盆的净海表热通量为 20~50 W/m²^[13],就气候平均态而言,从大气获取的巨大热量必须以平流的形式来平衡,而在这个过程中,南海贯穿流以冷平流的形式发挥着举足轻重的作用。对此,我们将利用一个海洋环流模式进行数值试验,探讨南海贯穿流的特征和作用。本文的主要目的有两点:首先是检验 LICOM 对南海贯穿流及南海上层热含量的模拟能力;然后根据模式结果讨论南海贯穿流对南海热含量变化的影响。

本文的结构如下:第 2 部分介绍所选用的 OGCM 和资料分析方法;第 3 部分首先利用 SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 资料^[15]、绕岛环流理论^[16]、XBT (Expendable Bathythermograph) 观测数据以及过去的研究结果检验模式对南海贯穿流和南海上层热含量的模拟能力,然后利用模式结果分析南海贯穿流对南海上层热含量的影响;最后一部分给出结论与讨论。

2 模式与资料分析方法

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(LASG/IAP Climate system Ocean Model)^[17-18]进行模拟试验。LICOM 是一个准全球涡相容(eddy-permitting)的原始方程模式,从 LASG/IAP 第三代全球海洋环流模式^[19]的基础上发展起来的,水平方向采用球坐

标,垂直方向为 η 坐标^[20-21]。 η 坐标和 z 坐标的关系可以表示为:

$$\eta = -\frac{z_0 - z}{z_0 + H_b} \times \eta_s; \quad \eta_s = \frac{H_b}{H_m},$$

其中, z_0 为海表面起伏, H_b 为准阶梯状的海底地形, H_m 为最大地形深度。与 z 坐标模式相比, η 坐标系统的 LICOM 可以更好的描述自由海面和处理复杂的海底地形,更适用于地形复杂的边缘海环流模拟,因此对南海贯穿流的模拟也可能更具优势。模式引进了一些较为成熟的物理参数化方案,如等位密度面参数化方案^[22],南北纬 30° 之间采用依赖于 Richardson 数的 Pacanowski-Philander (P-P) 垂直混合方案^[23]等。模式覆盖 75°S 至 65°N,水平分辨率 0.5°×0.5°,垂直分辨率 30 层,其中上 300 m 分为 12 层,以便能更好描述温跃层动力。模式的分辨率不高,但足以再现南海-印尼海域的环流特征。

我们采用上述模式进行模拟试验,热通量和风应力强迫场采用欧洲中期数值预报中心逐月再分析数据(以下简称 ERA40)^[24],SST 恢复场采用英国大气科学数据中心的 SST 资料(GISST)^[25]。模式从静止状态 Spin-up 320 a 达到稳定后,用 ERA40 逐月资料强迫,从 1958 年到 2000 年积分 43 a,对其逐月输出结果进行分析。过去对 LICOM 的评估工作认为该模式不仅能够模拟出大尺度海洋环流的基本特征,而且具备印尼贯穿流和南海水交换的模拟能力^[26-29]。文章第 3 部分会重点讨论模式试验对南海贯穿流和南海上层热含量的模拟情况。

本文采用了 3 种不同的数据(方法)计算吕宋海峡的体积输送量。SODA 和 LICOM 输出分别用 17.25°~21.75°N, 120.25°E 和 18°~22.5°N, 120.5°E 断面的纬向流速分量的垂向积分,即式 $VT = \int \bar{u}dA$ 计算体积输送,其中 A 表示吕宋海峡的垂向面积元, u 为纬向流速。本文采用 1.4.2 版的 SODA 资料,选取与 LICOM 模式试验输出相同的时间跨度,即从 1958 年 1 月到 2000 年 12 月。LICOM 的模式地形来自美国海军海洋学办公室提供的数字地形数据库(DBDB5, http://www7320.nrlssc.navy.mil/DBDB2_WWW/)。LICOM 和 SODA 的水平分辨率相同,但模式的海陆分布和海底地形很可能对吕宋海峡黑潮入侵的模拟有显著影

响^[30]。图 1 对比了 LICOM 和 SODA 在吕宋海峡附近的模式地形, 两者的垂直分辨率不同, 海陆分布

也存在差异, 吕宋岛地形的明显差异可能对 NEC 分叉和黑潮流轴的模拟产生影响。

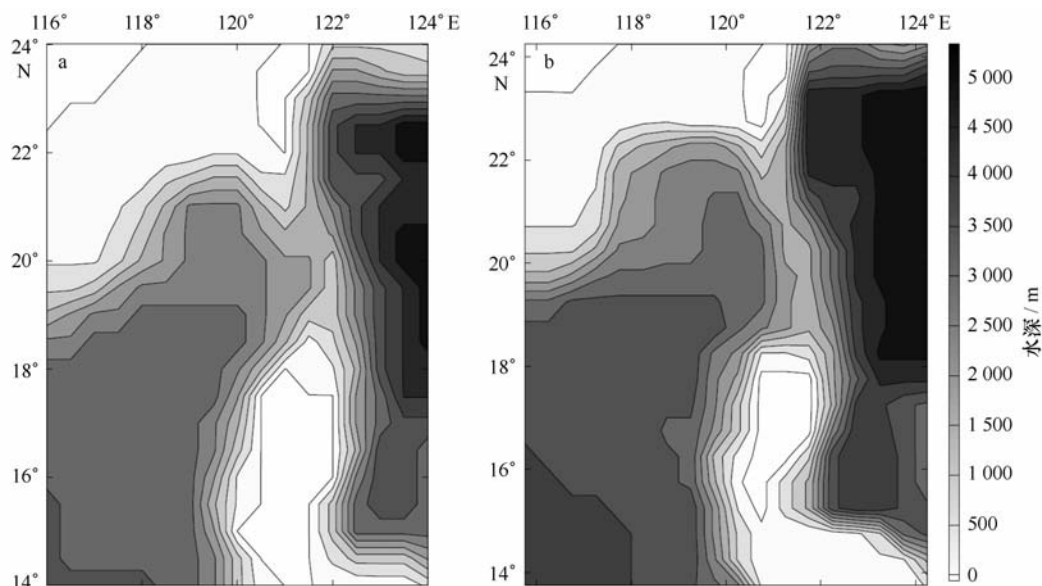


图 1 吕宋海峡附近的模式地形(单位:m)

a. LICOM, b. SODA

绕岛理论得到的 LST 通过沿菲律宾-棉兰老岛至太平洋东岸的封闭路径^[8-9]的风应力积分来表示(忽略了摩擦效应对积分结果的影响)。风应力资料采用与模式强迫场相同的 ERA40 逐月资料。用于计算南海上层热含量的 XBT 数据取自美国国家海洋数据中心(NODC)的 WOD05(World Ocean Database 2005, http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD05/pr_wod05.html), 数据使用前经过了剔除异常值等质量控制^[31]。鉴于 XBT 没有盐度数据, 热含量采用垂向平均温度来表示, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。为了增强可比性, 与观测数据进行比对时(图 5)模式输出热含量采用相同方法计算, 否则(如图 6)采用式 $HC = \int C_p \rho T dz$ 计算, 其中 T 为温度, ρ 为海水密度, C_p 为定压比热。

3 结果分析

3.1 西北太平洋-印尼海域环流形态

图 2 给出了 LICOM 和 SODA 季节平均的南海及邻近海域上层环流(LICOM 上层 222 m, SODA 上层 229 m)。模式较真实的再现了西北太平洋-印尼海域及南海环流的基本特征。NEC 向西与菲律宾海岸相遇后, 南北分叉为向北的黑潮和向南的棉

兰老流。模式模拟的年平均 NEC 分叉纬度在表层为 13.0°N , 分叉点随深度增大而北移^[32-33], 222 m 层为 14.0°N , 432 m 层为 15.2°N , 876 m 层能达到 18.7°N 。对 SODA 数据进行分析能得到相似的结果, 表层、229 m、465 m 和 918 m 的年平均分叉纬度分别为 12.9°N , 14.6°N , 17.5°N 和 20.1°N 。NEC 分叉的纬度可以认为是其体积和热盐输运在黑潮和棉兰老流之间分配比例的一个指标^[32], 模式对 NEC 分叉的成功模拟为其在太平洋低纬度西边界流(黑潮和棉兰老流)乃至南海内区环流的模拟奠定了动力基础。图 3 是 LICOM 和 SODA 黑潮年平均经向流速的垂向剖面。模式模拟的黑潮年平均流轴(以 0.1 m/s 流速等值线为界)深度在 432 m 层, 同化数据的结果则在 381 m 层, 前者较后者深约 50 m。两者总体流轴宽度基本一致, 但中心流轴(流速大于 0.5 m/s)模式宽度较同化结果大。模式在棉兰老流断面的模拟结果也与同化数据较为一致(图略)。

棉兰老流大部分向南构成棉兰老涡, 其余部分进入印尼海域, 成为驱动 ITF 的主体。黑潮流轴在跨过吕宋海峡时发生弯曲, 部分进入南海。黑潮流套(loop current)在模式与 SODA 的模式存在一定差异, 入侵南海的强度在流场上的表现也

不尽相同,前面讨论的吕宋海峡附近海陆分布和海底地形以及模式强迫场的不同可能是造成这些差异的主要原因。南海环流的季节特征,包括冬季海盆尺度的气旋环流和夏季的“偶极子”结构^[34-35]都在模式中成功再现。对南海西边界流,

模式能较好的重现其流轴,与 SODA 相比,夏季越南离岸急流(offshore jet)的模拟结果不明显。由于离岸急流是非线性过程,模式可能需要更多观测数据的制约,另外与模式分辨率较低也存在一定关系。

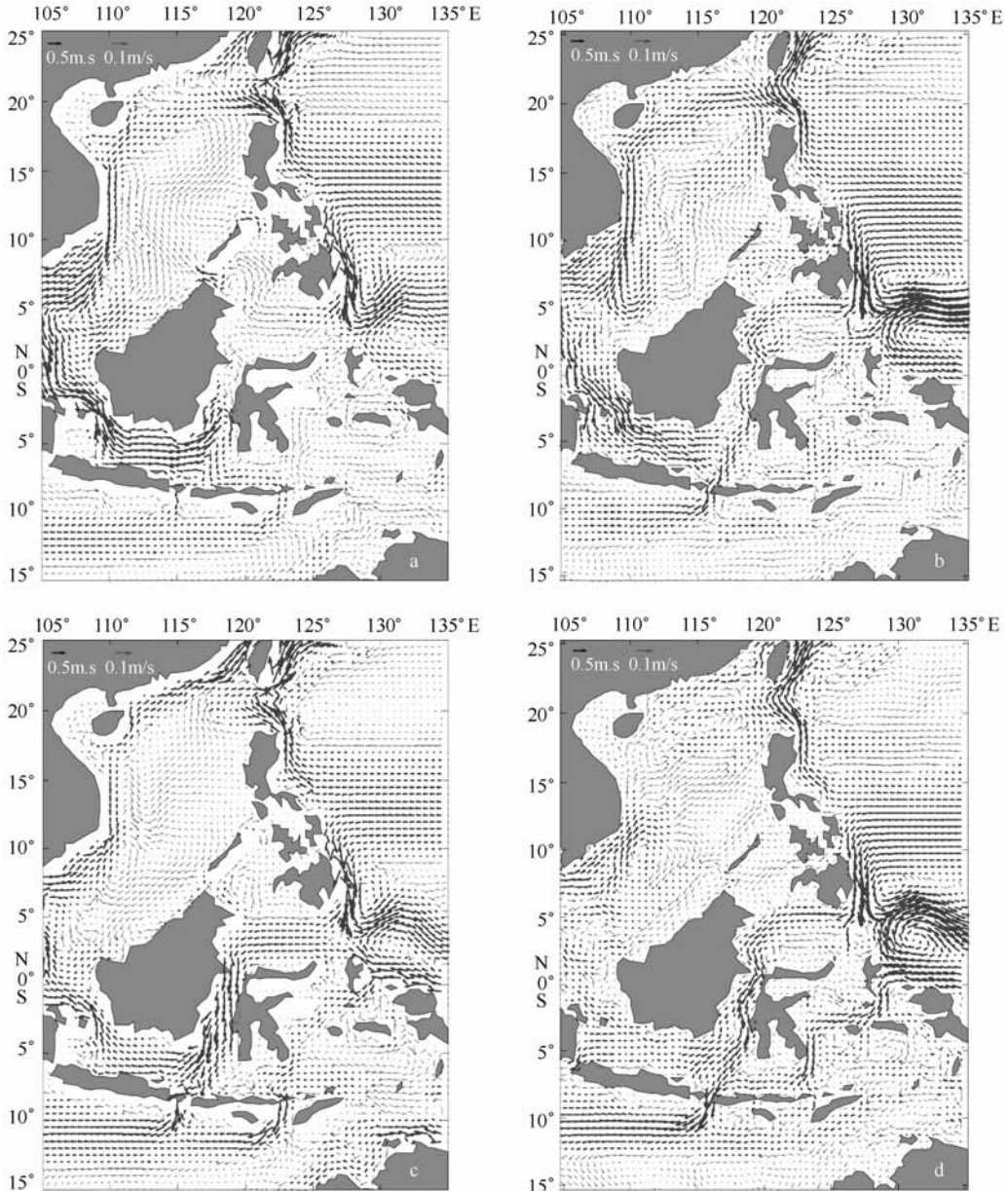


图2 LICOM 和 SODA 的南海及邻近海域季节平均上层环流(LICOM 上层 222 m, SODA 上层 229 m)
a. LICOM 冬季, b. SODA 冬季, c. LICOM 夏季, d. SODA 夏季

近年的观测研究发现,望加锡海峡的经向流速剖面存在强烈的垂向剪切^[36],已有研究指出这是由于冬季风驱动爪哇海的低盐低密度水进入望加锡海峡南部,产生向北的压力梯度,从而抑制了上层太平

洋水的向南流动。随后,Qu 等^[5]的研究认为这是热带太平洋大尺度风场驱动的南海贯穿流所导致的结果。观测数据显示望加锡海峡冬季上层 100 m 确实存在向北的流动^[37],高分辨 OGCM 的模拟结果^[11]

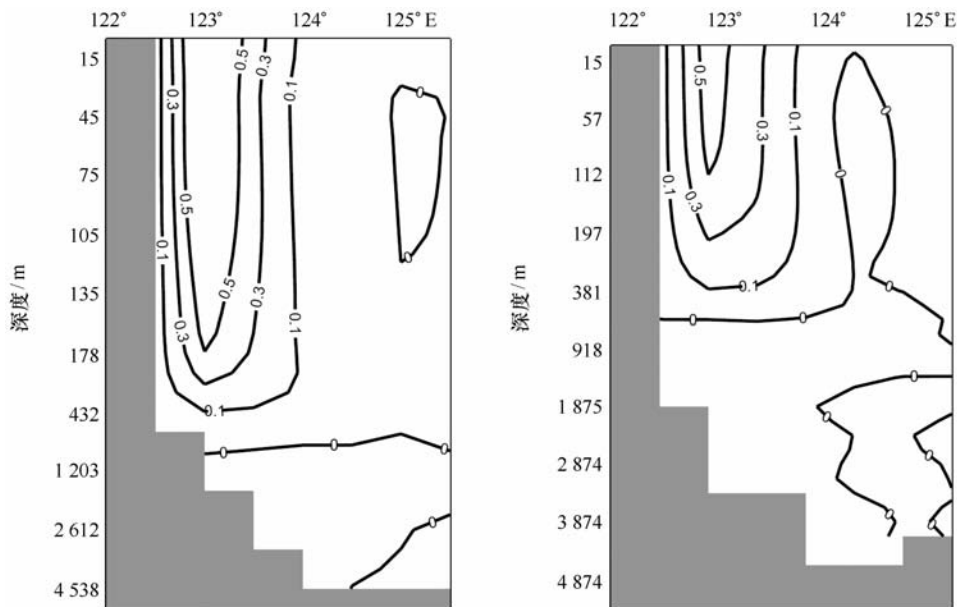


图3 年平均黑潮断面经向流速(m/s)

左图, LICOM(18°N); 右图, SODA(17.75°N)。正值表示流速向北

可以再现这一现象。LICOM 模拟的这一支北向表层流比观测结果要深一些。这一现象在 SODA 中却不明显, SODA 数据显示只有冬季表层(0~20 m)存在微弱的北向流, 且局限在望加锡海峡南部入口附近。

南海贯穿流的主要通道——吕宋海峡因其黑潮入侵对南海环流的深远影响, 长期以来受到很多关注^[38-41]。过往研究认为 LST 的量值在 $0.5 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间^[1,3], LICOM 在吕宋海峡整层积分得到的年平均 LST 为 $1.82 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 比以往 LICOM 的模拟结果略小^[29], 这是由于使用了不同的强迫场造成的。SODA 在吕宋海峡纬向流速垂向积分得到的年平均 LST 为 $1.76 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[8], 与模式结果十分接近。根据绕岛环流理论, 利用模式强迫场的风应力资料(ERA40)积分计算得到的年平均 LST 为 $5.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 比模式输出大, 但由于绕岛环流理论没有考虑底摩擦的影响, 因此我们认为两者的差距在合理的范围内。

图4给出了3种方法得到的LST时间序列的比较, 这里主要讨论三者 在年际变化上的异同。图中曲线已扣除季节循环, 然后通过带通滤波提取2~7.5 a 的变化周期。为便于比较变化趋势, 绕岛环流理论计算的结果除了系数3。三者的同期相关系数分别为0.57(模式与绕岛环流理论)、0.34(模式与SODA)和0.27(SODA与绕岛环流理论), 均通过

95%的显著性检验。可以看出模式在1975—1976年以前的模拟结果与理论计算和同化资料都比较吻合(只有1964—1967年模式未能得到与同化数据和理论计算一致的变化趋势), 之后的吻合度相对较差, 这可能与气候突变前后的资料差异有关。在1995—1997年, 模式结果与理论计算中出现的波峰-波谷相差较大, 而同化资料的峰值大小鉴于前两者之间。这种差异可能源于某种复杂动力过程, 需要进一步深入的定量分析研究。总体上, 经过与理论计算和同化资料的对比, 我们认为 LICOM 对 LST 的模拟较真实。

3.2 南海上层热含量

这一部分我们将讨论 LICOM 对南海上层热含量的模拟, 南海贯穿流对热含量的影响将在下一节进行讨论。首先用 SODA 和 XBT 数据与模拟的南海上层热含量进行比对, 以检验模式的模拟结果(见图5)。选取南海内两个区域进行平均计算, 第一个是西边界流区($10^\circ \sim 18^\circ \text{N}$, $110^\circ \sim 112^\circ \text{E}$), SODA 数据的选取往西北方移 0.25° , 下同; 第二个是南海内区($12^\circ \sim 18^\circ \text{N}$, $114^\circ \sim 120^\circ \text{E}$)。为了便于比较, 把 LICOM 和 SODA 分层输出的热含量插值出上层 200 m 的值, 同样 XBT 数据也计算 200 m 以浅的热含量。在西边界流区, LICOM, SODA 和 XBT 的年平均值分别为 21.28, 20.96 和 20.58 $^\circ \text{C}$; 而在南海内区, 三者的

年平均值分别为 21.79, 21.44 和 21.64 °C, 模式年平均值比同化和观测数据稍大, 这种偏差在西边界流区尤为明显, 但若以观测结果为基准, 最大偏差也不超过 4%, 在南海内区则不超过 1%。就季节循环而言, 三者南海内区的变化模态十分

吻合, 而在西边界流区相对较差, 这可能与西边界流区复杂的动力机制和观测数据的时空分布不均有关。在此区域, 模式与同化数据的差异夏季比冬季大, 这也反映了前面讨论的模式对西边界流, 尤其是夏季离岸急流的模拟与同化数据的差距。

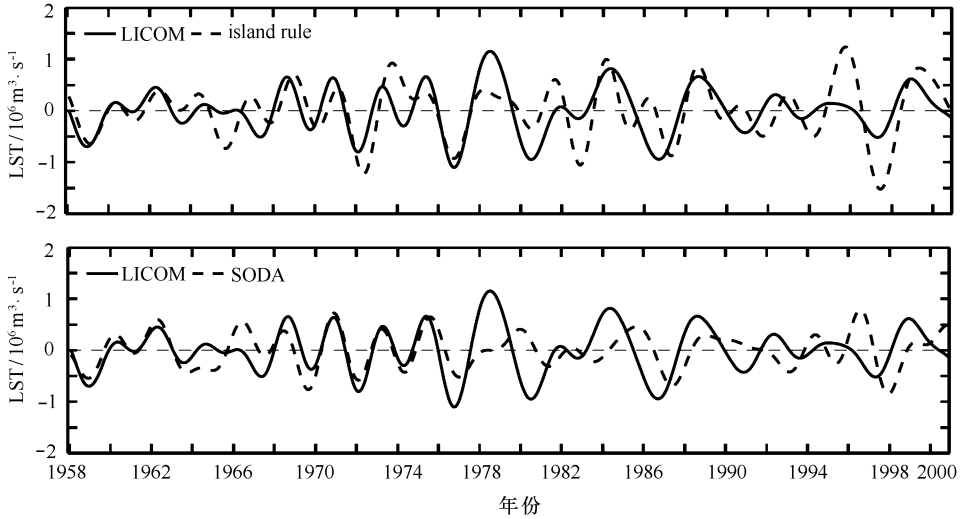


图 4 LICOM 和绕岛环流理论计算得到的 LST(上图), LICOM 和 SODA 输出的 LST(下图) 各时间序列都扣除了季节循环, 然后通过带通滤波提取 2~7.5 a 的际年变化周期

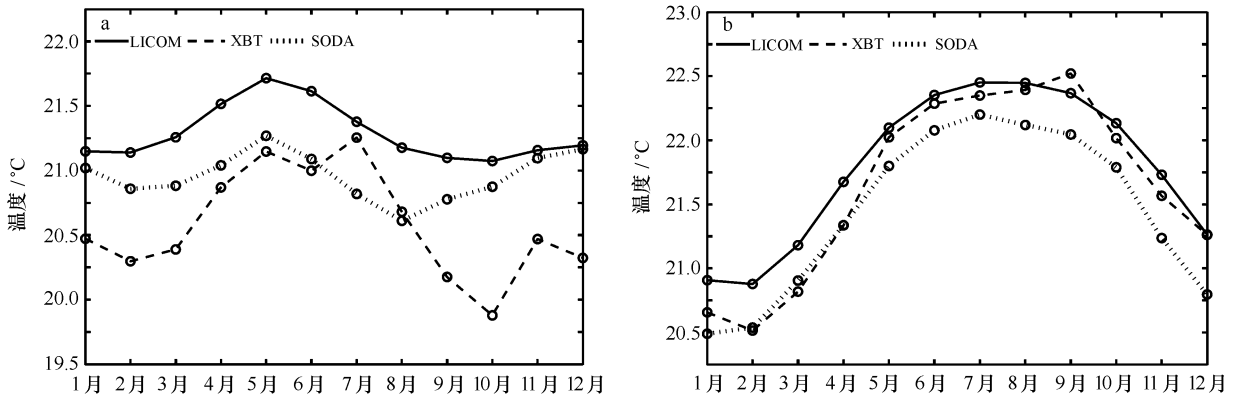


图 5 模式输出(实线)、XBT(虚线)与 SODA(点线)计算所得南海上层热含量季节变化
a. 南海西边界流区(10°~18°N, 110°~112°E), b. 南海内区(12°~18°N, 114°~120°E)

低温高盐的黑潮水经吕宋海峡入侵南海, 对南海的热盐收支有重要影响。LST 驱动的南海贯穿流在南海内是一支冷平流, 南海从大气获取的热量, 主要通过这支冷平流来平衡。我们利用模式结果探讨南海贯穿流对南海上层热含量的影响。LICOM 模拟计算的吕宋海峡热输送量为 0.197 PW, 其中上 222 m 层为 0.190 PW, 占总体的 96.4%。0.19 PW 的年平均热输送量也与高分辨率 OGCM——

水平分辨率 0.1°, 垂向 54 层的 OFES 计算的 0.2 PW^[14] 非常接近。SODA 计算的热输送量略小, 整层积分为 0.166 PW, 上层 229 m 为 0.172 PW。模式计算的体积输送 (volume transport) 与热输送 (heat transport) 的相关系数达到 0.98, 这与 Qu 等^[14] 的观点一致: 忽略由 ENSO 引起的 SST 变化, 可以认为南海的热输送带主要是由南海贯穿流控制的。

3.3 南海贯穿流对南海上层热含量的影响

图6给出了模式上222 m LST异常(扣除季节循)与南海每个网格点同一深度热含量异常的相关系数(通过95%的显著性检验)。两者的负相关体现了南海贯穿流的冷平流作用(这里定义LST流入南海为正)。就时间尺度而言,在上层热含量滞后LST 1~2月时两者显著负相关区就达

到最大,可见其对冷平流的响应是十分迅速的。对于上层热含量滞后LST 0个月,甚至超前1~2个月都有显著负相关出现,这更可能是计算相关系数时的红噪声,两个时间序列如果在某个时刻具有高相关,在错位1~2个时刻时相关系数并不能立刻降到最低,随着超前滞后月份的进一步增加,高相关区便逐渐消失。

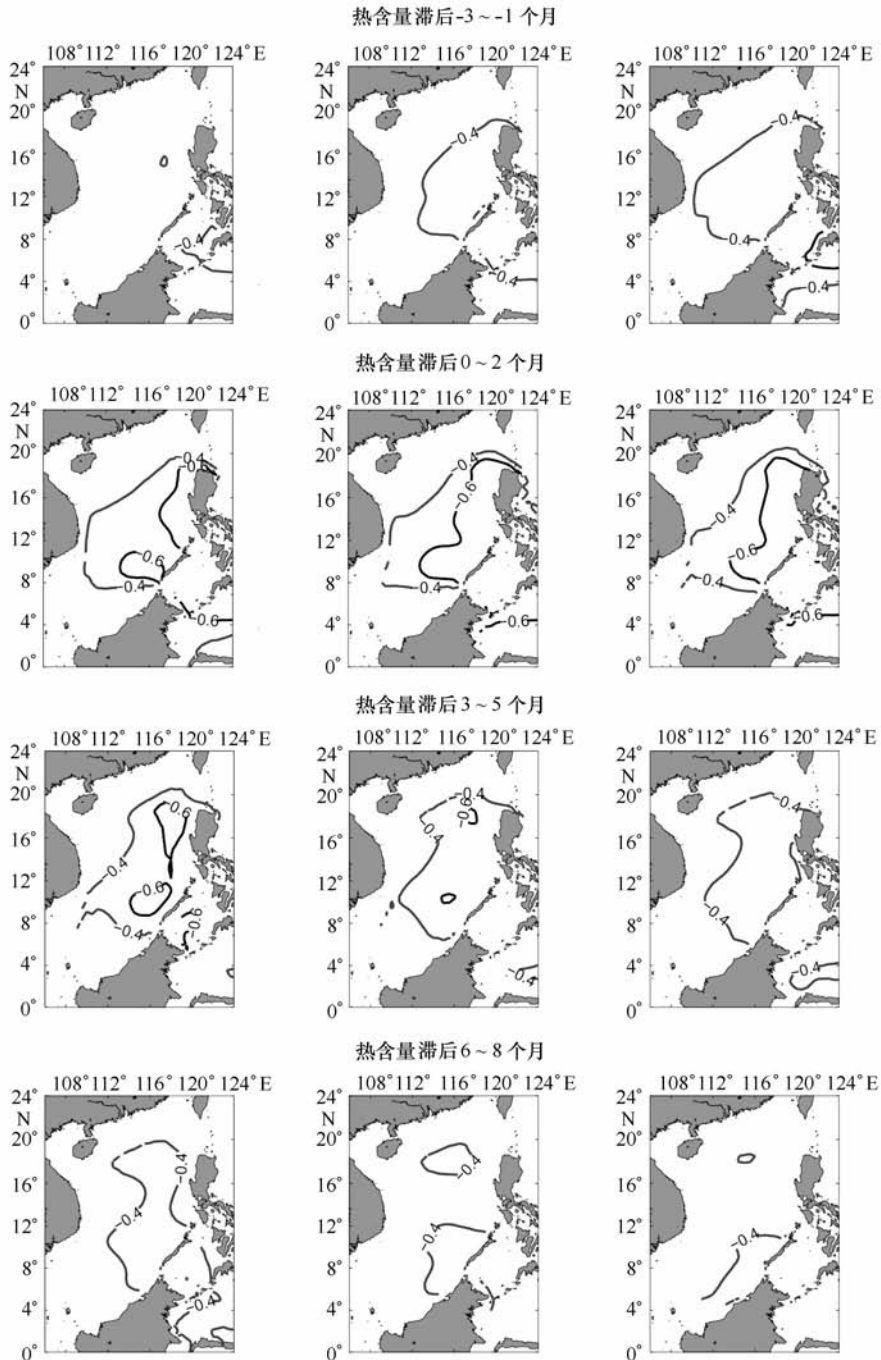


图6 模式输出的LST异常与南海上层热含量异常的超前-滞后相关

就空间分布而言,两者的显著负相关区域主要出现在南海东部的深水海盆区。造成这一现象的原因可能有两个方面:首先,北部陆架区和西边界流区上层热含量与 LST 相关不显著,很可能是由于该区域具有十分复杂的热动力过程,上层热含量受到多方面因素的影响。如局地大气强迫,西边界流主要是西向强化的结果,而不是黑潮入侵的驱动。又如复杂的近岸物理过程,虽然模式并未加入陆地径流,但模式强迫场所用的海气热通量和 SST 恢复场以及侧边界效应等也都会成为重要的影响因素。为此,我们用相同的强迫场做了一组模式敏感试验,关闭南海与外海连通的吕宋海峡、台湾海峡、民都洛海峡和卡里曼丹海峡等。图 7 给出了控制试验和南海关闭试验中南海上层 222 m 热含量异常的同期相关系数分布情况,这可以体现南海贯穿流以外其他因素造成的影响。除水深小于 222 m 的区域没有数据以及部分地形陡峭的陆坡区相关系数不能通过显著性检验外,相比图 6 而言,显著相关(正相关)区出现在深水海盆外缘,进一步表明这些区域上层热含量受到诸多因素的影响,而南海贯穿流所造成的影响就相对变弱。

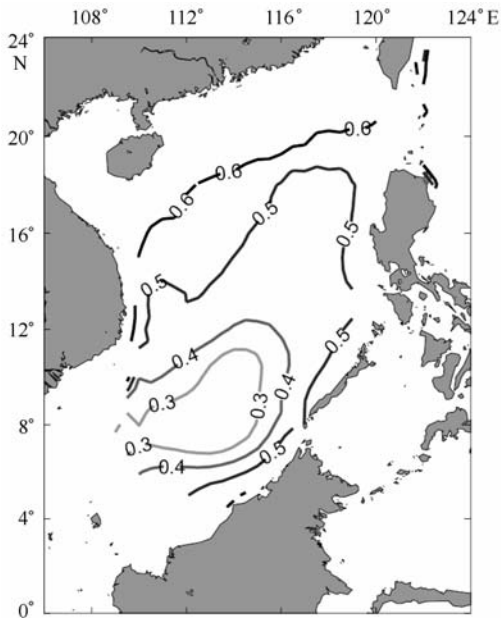


图 7 控制试验与南海关闭试验中南海上层热含量异常的同期相关系数

其次,图 6 的显著负相关区集中在东部海区也可能是因为受通过民都洛海峡和巴拉巴克海峡的平流影响,这两个海峡,尤其是民都洛海峡,也是南海

贯穿流的主要通道,这也进一步显现了南海贯穿流对南海上层热含量影响的整体效应。此外,当计算增加到更深层次时,两者的相关系数会减小(图略),即南海贯穿流主要影响南海内区的上层热含量,对中下层的影响随深度的增加而减弱,或吕宋海峡深水瀑布会以更为复杂的动力形式影响南海的热力变化,都有待进一步的深入研究。

计算控制试验的 LST 异常与南海关闭试验的南海上层热含量异常的相关系数发现,各个网格点上的相关系数均低于 0.05,或不能通过显著性检验(图略)。南海是一个半封闭的海盆,其多时间尺度变化主要来自局地大气强迫、外部海洋(太平洋)强迫和南海内部变化三个方面。当我们关闭了南海与西北太平洋之间的各个通道,也就是阻隔太平洋强迫,此时南海上层热含量的变化基本来源于局地大气强迫和南海内部变化。控制试验 LST 与敏感试验南海上层热含量显著负相关的消失,可以说明控制试验本身的 LST 与南海上层热含量的显著负相关确实能反映南海贯穿流的冷平流贡献,而不仅仅是两者在相同气候背景场下产生的一种虚假相关现象。

4 结论与讨论

LICOM 作为国内率先发展起来的全球海洋环流模式,近年来已经做了一些模式评估工作,包括模式对大尺度海洋环流基本特征、印尼贯穿流和南海水交换的模拟能力,以及模式对不同强迫场的响应^[42]等。本文首次探讨了 LICOM 对南海热含量的模拟情况,结合同化数据、XBT 观测数据和绕岛环流理论计算评估了模式对南海环流和上层热含量的模拟。SODA 资料应用到南海环流的研究已有过一些工作^[8-10],但并没有对其进行过系统的评估。本文以 XBT 观测数据和理论计算为辅,着重对比了 SODA 和 LICOM 在西北太平洋-印尼海域模拟的平均态(NEC 分叉)、季节变化(上层环流场和南海上层热含量)和年际变化(LST)的一些主要模态特征的异同。结果表明 LICOM 能再现南海及邻近海域的上层环流场,能较真实的模拟南海贯穿流和南海上层热含量,与同化数据、观测数据以及风应力积分计算结果具有较好的可比性,与过往一些高分辨率 OGCM 和观测研究结论基本一致。当然,在某些方面也显现了模式的不足,如对南海西边界夏季离岸急流和西边界流区上层热含量的模拟,与观测事

实还存在一定差距。

LICOM 模拟试验再现了南海贯穿流调制南海上层热含量变化的主要特征。黑潮在吕宋海峡的入侵不但影响着南海环流的时空变化,同时,由 LST 所驱动的冷平流对南海热含量也具有重要影响。模式结果的相关分析表明, LST 主要控制着南海内区上层的热含量变化,两者成显著负相关。关闭南海的模式试验进一步证实了南海贯穿流的冷平流贡献。南海与印尼海域处于印-太大洋交汇区的典型海洋大陆带中,异常活跃的大气对流活动使得此海区微小的 SST 和上层热含量变化都可能导致剧烈的天气气候变异,南海贯穿流的重要气候学意义可

见一斑。SODA 的上层 LST 与热含量相关分析(图略)也能体现南海贯穿流的冷平流作用。显著负相关区也出现在南海东部内区上层,但相比模式而言,相关系数较低,且高相关区的范围也较小。两者在时间变化上也存在差异。假定 LICOM 与 SODA 的上边界加热相同,差异就来源于侧边界流,尤其是其垂向调制的不同。与 SODA/GFDL 的 z 坐标模式不同, LICOM 采用了可以更好地描述自由海面和处理复杂地形的 η 坐标系统,这很可能说明 η 坐标模式在模拟地形复杂的边缘海的垂向温盐结构时比 z 坐标模式更有潜力。

参考文献:

- [1] METZGER E J, HURLBURT H E. Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea and the Pacific Ocean [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101(C5): 12331—12352.
- [2] LEBEDEV K V, YAREMCHUK M I. A diagnostic study of the Indonesian Throughflow [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(C5): 11243—11258.
- [3] 方国洪, 魏泽勋, 崔秉昊, 等. 中国近海区域水、热、盐输送: 全球变网格模式结果 [J]. *中国科学(D辑)*, 2002, 32(12): 969—977.
- [4] FANG G H, SUI SANTO D, SOESILO I, et al. A note on the South China Sea inter-ocean circulation [J]. *Advance Atmospheric Sci*, 2005, 22(6): 946—954.
- [5] QU T, DU Y, MEYERS G, et al. Connecting the tropical Pacific with Indian Ocean through South China Sea [J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L24609, doi:10.1029/2005GL024698.
- [6] YU Z, SHEN S, MCCREARY J P, et al. South China Sea throughflows evidenced by satellite images and numerical experiments [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, doi:10.1029/2006GL028103.
- [7] YAREMCHUK M, MCCREARY JR J, YU Z J, et al. The South China Sea throughflow retrieved from climatological data [J]. *J Phys Oceanogr*, 2009, 39: 753—767.
- [8] WANG D, LIU Q, HUANG R, et al. Interannual variability of the South China Sea throughflow inferred from wind data and an ocean data assimilation product [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L14605, doi:10.1029/2006GL026316.
- [9] LIU Q, HUANG R, WANG D, et al. Interplay between the Indonesian throughflow and the South China Sea throughflow [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Supp. II): 50—58.
- [10] 刘钦燕, 王东晓, 谢强, 等. 印尼贯穿流与南海贯穿流的年代际变化特征及机制 [J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(6): 1—6.
- [11] TOZUKA T, QU T, YAMAGATA T. Dramatic impact of the South China Sea on the Indonesian throughflow [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L12612, doi:10.1029/2007GL030420.
- [12] TOZUKA T, QU T, MASUMOTO Y, et al. Impacts of the South China Sea throughflow on seasonal and interannual variations of the Indonesian throughflow [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2009, 47: 73—85.
- [13] QU T, Y TONY SONG, YAMAGATA T. An introduction to the South China Sea throughflow: Its dynamics, variability, and application for climate [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2009, 47: 3—14.
- [14] QU T, DU Y, SASAKI H. South China Sea throughflow: A heat and freshwater conveyor [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, L23617, doi:10.1029/2006GL028350.
- [15] CARTON J A, GIESE B S. A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA) [J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 2999—3017.
- [16] GODFREY J S. A sverdrup model of the depth-integrated flow for the world ocean allowing for island circulations [J]. *Geophys Astrophys Fluid Dyn*, 1989, 45, 89—112.
- [17] 刘海龙, 俞永强, 李薇, 等. LASG/IAP 气候系统海洋模式(LICOM1.0)参考手册[M]//大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)技术报告特刊. 北京: 科学出版社, 2003: 107.
- [18] 刘海龙. 高分辨率海洋环流模式和热带太平洋上层环流的模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.

- [19] JIN X Z, ZHANG X H, ZHOU T J. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model [J]. *Adv Atmos Sci*, 1999, 16:197—215.
- [20] MESINGER F, JANJIC Z I. Problems and numerical methods of the incorporation of mountains in atmospheric models [J]. *Lectures in Applied Mathematics*, 1985, 22: 81—120.
- [21] 宇如聪. 具有陡峭地形的有限数值天气预报模式设计[J]. *大气科学*, 1989, 13: 139—149.
- [22] GENT P R, MCWILLIAMS J C. Isopycnal mixing in ocean circulation models [J]. *J Phys Oceanogr*, 1990, 20: 150—155.
- [23] PACANOWSKI R C, PHILANDER G. Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean [J]. *J Phys Oceanogr*, 1981, 11: 1442—1451.
- [24] UPPALA S M, KALLBERG P W, SIMMONS A J, et al. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131:2961—3012.
- [25] RAYNER N A, HORTON E B, PARKER D E, et al. Versions 2.3b and 3.0 of the Global Sea Ice and Sea Surface Temperature (GIS-ST)Data Set [M]. Hadley Centre Internal Note 85, 1998: 98.
- [26] LIU H L, ZHANG X H, LI W, et al. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(5): 675—690.
- [27] LI W, LIU H L, ZHANG X H. Indonesian Throughflow in an eddy-permitting oceanic GCM [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(21): 2305—2310.
- [28] LIU H L, LI W, ZHANG X H. Climatology and variability of the Indonesian throughflow in an eddy-permitting oceanic GCM [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(4): 469—508.
- [29] CAI S Q, LIU H L, LI W, et al. Application of LICOM to the numerical study of the water exchange between the South China Sea and its adjacent oceans [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(4): 10—19.
- [30] METZGER E J, HURLBURT H E. The Importance of high horizontal resolution and accurate coastline geometry in modeling South China Sea inflow [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(6): 1059—1062.
- [31] PANKAJAKSHAN T, GHOSH A K, SARUPRIA J S, et al. An interactive graphical system for XBT data quality control and visualization [J]. *Computers & Geosciences*, 2001, 27: 867—876.
- [32] QU T, LUKAS R. The bifurcation of the North Equatorial Current in the Pacific [J]. *J Phys Oceanogr*, 2003, 33: 5—18.
- [33] 何映辉, 蔡树群, 王盛安. 北赤道流分叉点及南海北部环流的研究进展[J]. *海洋学研究*, 2009, 27(3): 74—84.
- [34] WYRTKI K. Physical oceanography of the southeast Asian waters [M]. *Naga Rep. 2*, 195 pp., Scripps Inst. of Oceanogr., La Jolla, Calif., 1961.
- [35] YUAN Y C, LIU Y G, LIAO G H, et al. Calculation of circulation in the South China Sea during the summer of 2000 by the modified inverse method [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(1): 14—30.
- [36] GORDON A L, SUSANTO R D, VRANES K. Cool Indonesian Throughflow as a consequence of restricted surface layer flow [J]. *Nature*, 2003, 425: 824—828.
- [37] GORDON L, SUSANTO R D, FFIELD A, et al. Makassar Strait throughflow, 2004 to 2006 [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L24605, doi:10.1029/2008GL036372.
- [38] 刘秦玉, 杨海军, 李薇. 吕宋海峡纬向海流及质量输送[J]. *海洋学报*, 2000, 27(2): 1—8.
- [39] QU T, MITSUDERA H, YAMAGATA T. Intrusion of the North Pacific waters into the South China Sea [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(C3): 6415—6424.
- [40] LAN J, WANG D. Optimal estimation of absolute geostrophic velocity field in the vicinity of the Luzon strait using the variational data assimilation technique [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 21(2): 157—163.
- [41] YUAN D, HAN W, HU D. Surface Kuroshio path in the Luzon strait area derived from satellite remote sensing data [J]. *J Geophys Res*, 2006, 111, C11007, doi:10.1029/2005JC003412.
- [42] 李超. 东半球暖池季节变化与上混合层热收支分析[D]. 中国科学院南海海洋研究所, 2007.

An investigation of the South China Sea throughflow and its impact on upper layer heat content of the South China Sea using LICOM

WANG Wei-wen^{1,2}, YU Yong-qiang³, LI Chao¹, ZHOU Wen⁴, LIU Qin-yan¹, WANG Dong-xiao¹

(1. *Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*; 2. *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*; 4. *Guy Carpenter Asia-Pacific Climate Impact Centre, School of Energy and Environment, City University of Hong Kong, Hong Kong, China*)

Abstract: The simulation of an eddy-permitting global oceanic general circulation model (OGCM) on the South China Sea throughflow (SCSTF) and upper layer heat content of the South China Sea (SCS) is evaluated by using island rule, Simple Ocean Data Assimilation (SODA) and Expendable Bathythermograph (XBT) data. The impact of the SCSTF on upper layer heat content of the SCS is also investigated. Analysis of vertical structure of North Equatorial Current (NEC) bifurcation, seasonal variability of the SCS circulation pattern and interannual variability of Luzon Strait transport (LST) indicate that LICOM can obtain a reasonable modeling result of the SCSTF and circulation in the Indo-Pacific region. Annual mean and seasonal variability of upper layer heat content of the SCS in the model are consistent with those calculated from SODA and XBT, particularly in the inner area of the SCS. In addition, correlation analysis show that there is significant negative correlation between the LST and the SCS upper layer heat content, which further confirms the observational truth that the SCSTF acts as a cold advection in adjusting the upper layer heat content of the SCS.

Key words: South China Sea throughflow (SCSTF); eddy-permitting OGCM; heat content; volume transport