

南海海洋环流季节变化的数值模拟研究

许 婷^{1,2}, 曹永港³

(1.交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室,天津 300456;

2.天津大学 环境科学与工程学院,天津 300072)

3.国家海洋局南海调查技术中心 水文气象室,广东 广州 510300)

摘 要:基于 POM(Princeton Ocean Model)海洋模式,对南海不同深度环流的季节性变化进行了数值模拟研究。模拟结果表明:南海表层和上层环流受季风影响,在夏季西南季风驱动下,南海表层环流在南部呈现强反气旋式结构,在南海北部则是一个弱的气旋环流;在冬季东北季风驱动下,南海表层环流结构呈气旋式,并且明显加强了沿越南沿岸向南流动的西边界流;春季和秋季为南海季风的转换期,其对应的环流特征也处于冬季环流与夏季环流的过渡流型,流速与冬季和夏季相比较弱。南海 200 m 层环流的季节变化与表层相似。在 500 与 1 000 m 层,则出现许多处中尺度漩涡,流场也变得较为紊乱。

关键词:POM 模式;南海环流;垂向结构;季风

中图分类号:P731.2

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2017)01-0062-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2017.01.007

南海总面积约 $356 \times 10^4 \text{ km}^2$,是西太平洋面积最大的边缘海,地形从四周向中央加深,平均水深超过 1 000 m,最大水深可达 5 377 m。南海被大陆和岛屿环抱,使其成为半封闭海盆,通过多个海峡与外界大洋相通,比如:巴士海峡、巴林塘海峡、巴布延海峡、民都洛海峡、巴拉巴克海峡、马六甲海峡等。

南海处于东南亚季风核心区域,不同季节其风向变化明显,属典型的季风性气候^[1]。南海表层洋流运动方向与风向有很大关系,例如:冬季以东北季风为主,洋流也呈从东北向西南方向运动,反之,以西南季风为主的夏季,其洋流运动方向则与冬季相反,主要流向东北向。春、秋为季风转换期,风向多变,风力较弱,因此,春、秋季节南海环流特征不如冬、夏季明显^[2]。

南海复杂环流体系的驱动机制主要受控于东南亚季风气候,其次,南海通过各海峡通道与外界大洋产生的水体交换运动也会对环流产生重要影响^[2],例如:黑潮(又称日本暖流,属于太平洋赤道洋流的北分支)就对南海北部海域的环流形态产生了重要影响;南海深层环流主要受吕宋海峡深层水入侵驱动影响。除此之外,南海环流运动机制也与其自身的地貌特征、海水密度梯度等因素息息相关。

关于南海海洋环流的研究一直是近 30 a 来国内外海洋学者研究的热点之一,并取得了大量成果,例如:韩玉康等^[3]结合高度计和 SODA(Simple Ocean Data Assimilation)再分析资料,利用改进的挪威版 HYCOM(The HYbrid Coordinate Ocean Model)海洋模式对南海的中尺度涡现象开展了数值模拟研究,揭示了南海中尺度涡的结构特征、能量以及与背景场的相互作用。在南海环流动力机制研究方面,张晶等^[4]

收稿日期:2016-11-30

资助项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——南中国海及其附近海域中尺度多因素海洋环流数值模拟关键技术研究(Tks150210);国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室开放基金资助项目——南海风暴潮动力过程中风-浪-流耦合数值模拟研究(SCS1606);国家重点研发计划课题——珠江河口与河网演变机制及治理研究-多维时空尺度动力-泥沙-地貌过程模拟研究及长周期演变预测(2016YFC0402603)和珠江河口与河网多目标治理技术方案及水沙调控措施研究(2016YFC0402605);国家自然科学基金项目——波浪破碎作用下气泡演化机理与输运规律研究(51509023);水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金资助项目——沙脊沙波及路由海床稳定性研究(HESS1401)

作者简介:许 婷(1985-),女,副研究员,博士研究生,主要从事海岸河口水环境数值模拟方面研究.E-mail:xuting1228@163.com

(王 燕 编辑)

认为太平洋通过吕宋海峡向南海输运水体和热盐,并传递厄尔尼诺等气候信号,对南海的环流、水体和海洋环境都产生重要影响。此外,Chu 等^[5]采用 POM 海洋模式研究了南海环流热力学结构和季节性变化规律;游小宝等^[6]通过模拟南海冬季环流现象,证实了气旋式和反气旋式涡旋的存在。Wang 等^[7]采用 HYCOM 模式模拟研究了南海主要海峡通道的水通量季节性变化情况。虽然关于南海环流结构的研究已经取得了不少进展,但是由于南海环流系统受海底复杂地形、季风气候、多个海峡水交换、惯性效应等多种不确定性因素影响,使得南海环流系统结构异常复杂多变,截止目前,仍存在许多争议和有待深入探讨的地方。

鉴于此,为更好地揭示不同季节南海环流结构的垂向变化规律,本文研究目的是通过采用由美国普林斯顿大学 Alan Blumberg 和 George L.Mellor 提出的三维斜压原始方程模式——POM 海洋模式^[8],全面考虑南海海面高度、海面热通量、季风、温度场、盐度场、流等多因素条件模拟南海环流的季节变化规律。

1 数据资料与模式配置

POM 海洋模式已被广泛用于陆架海洋环流的模拟研究^[9-11],为避免赘述,本文略去了模式方程和差分格式介绍(详见文献[8])。

1.1 计算区域与网格剖分

南海区域的模拟范围为 $99^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$, $1^{\circ}\text{S}\sim 32^{\circ}\text{N}$,包含了整个南海以及西太平洋的一部分。由于南海上层环流受到黑潮入侵的显著影响,黑潮模拟准确与否直接影响模式对南海环流模拟的准确度。因此,为了在模式中正确体现黑潮的作用,将模式东边界延伸至西太平洋。

模式网格采用正交曲线网格,一方面可以更好地拟合陆地边界,另一方面可以减少计算量。模式网格格点数为 381×301 ,分辨率约为 10 km,垂向分为 23 层。采用较高的分辨率有助于模拟大、中尺度海水运动。海底地形采用了分辨率为 $1'\times 1'$ 的地形数据 ETOPO 1(Earth's Topography and Bathymetry)。模式最小水深设置为 10 m,最大水深设置为 5 500 m。计算区域水深地形详见图 1。

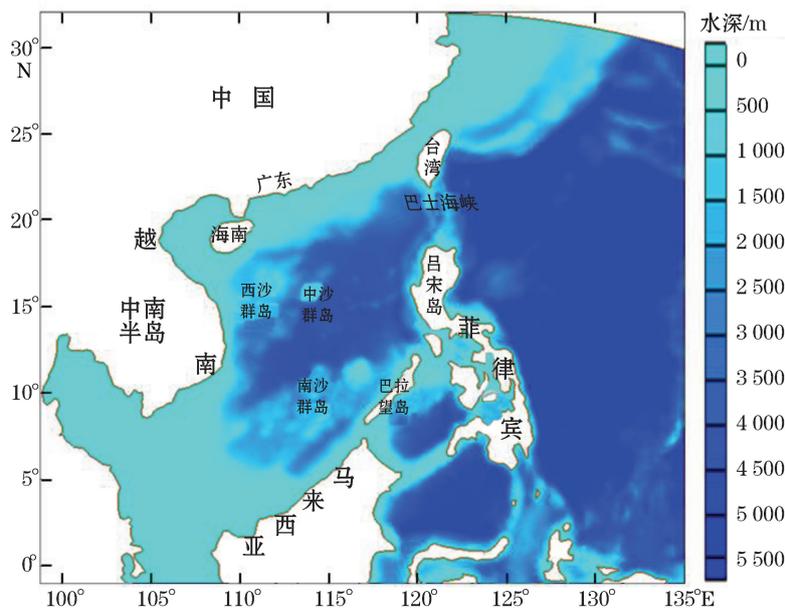


图 1 南海计算域水深地形

Fig.1 The bathymetric map of the computational domain in the South China Sea

1.2 计算条件配置

模式以 World Ocean Atlas 2001(简称 WOA 01)1 月份月平均温度场和盐度场作为初始场,采用气候态月平均的海表强迫场和侧边界条件驱动,从静止开始积分,积分 15 a 后模式达到稳定。其中,模式海表强迫场采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的再分析资料(1948—2011 年),包括风场、净短波辐射、净长波辐射、感热和潜热通量等。侧边界条件采用的 SODA 2.2.4 月平均再分析资料。宏波^[12]对比了利用 SODA 和 ECCO(Estimating the Circulation and Climate of the Ocean)等不同的再分析资料做为南海区域模式侧边界的结果,指出使用 SODA 资料模拟的黑潮的位置和强度效果较好,因此,本文使用 SODA 资料作为侧边界条件,包括海表高度、温度、盐度和流场。本文采用的 POM 模式在模拟过程中考虑了海表温度松弛。

1.3 模拟结果合理性检验

以预热结果作为真实年份模拟的初始场,SODA 2.2.4 月平均再分析资料作为侧边界条件,NCEP 日平均的风场、净短波辐射、净长波辐射、感热和潜热通量作为大气强迫,进行了 10 a(2001—2010 年)的模拟试验,以检验 POM 模式在南海的模拟性能。以 10 a 平均状态作为南海气候态,比较了 POM 模式模拟的夏季和冬季的南海表层温度场与 WOA 2013(World Ocean Atlas 2013)观测结果(图 2),二者之间具有极高相似性,说明本文的模拟结果合理可信。南海夏季的海表温度较为均匀,绝大部分海域为 28~30 °C。在南海北

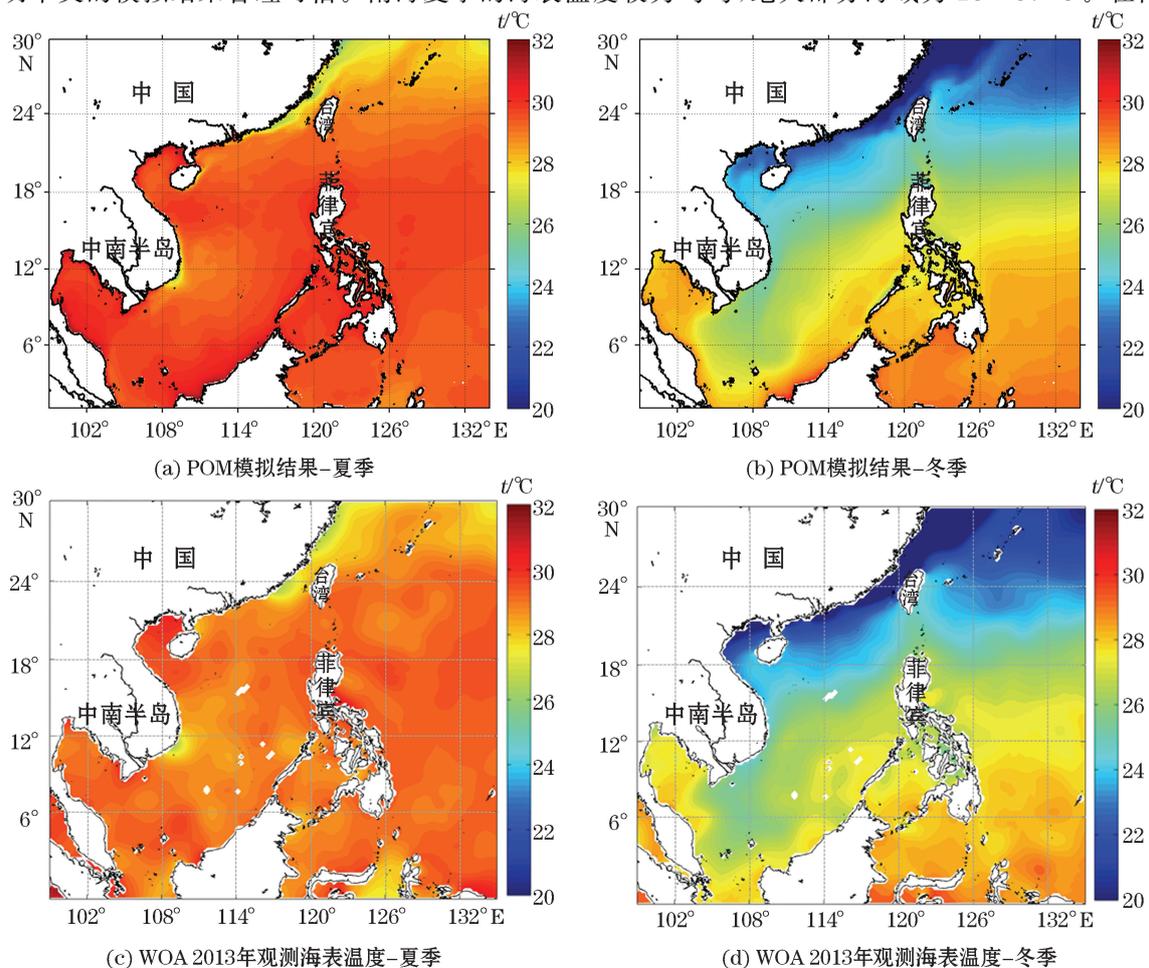


图 2 气候态季节平均的海表温度对比

Fig.2 Comparison of the climate seasonal mean sea surface temperature

部广东沿岸及越南沿岸受上升流影响温度较低,约为 $26\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冬季,南海海表温度的南北梯度较为明显,表现为南部温度高,北部温度低,从南到北温度由 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 递减。在粤东附近,因有来自台湾海峡的低温沿岸流,致使该海域的平均表层水温可下降到 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

前人的研究^[13]表明,南海表层环流主要受季风的影响,其次受通过吕宋海峡入侵南海的黑潮的影响。夏季盛行西南季风,在西南季风强作用影响下,南海南部海域被一个大的反气旋式环流体系所控制,而北部海域则存在一个较弱的气旋式涡旋。同时受局地风应力和南海地形的影响,冬季南海表层环流整体呈气旋式环流结构,并且西边界流存在强化现象。此外,在 $(118^{\circ}\text{E}, 18^{\circ}\text{N})$ 附近存在吕宋冷涡^[14-15]。春秋两季为南海季风的转换期,其环流结构为南海夏季环流和冬季环流之间的过渡形态。本文采用 POM 模式模拟的南海表层环流结构与前人研究的南海大尺度环流特征^[13,16] 相符合。

图 3 为 POM 模式模拟的南海夏季和冬季气候态海表高度异常 SLA (Sea Level Anomaly) 与网格化融合卫星海洋资料 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellites Oceanographic) 卫星高度计资料的对比。两者在大尺度结构上基本一致,具体表现:1) 夏季南海呈现正海表高度异常,且在吕宋口以西和越南以东海区存在高值中心,吕宋口以西的 SLA 强于越南以东的 SLA; 2) 冬季南海以负的海表高度异常为主,低值中心基本呈夏季形态的反相位。

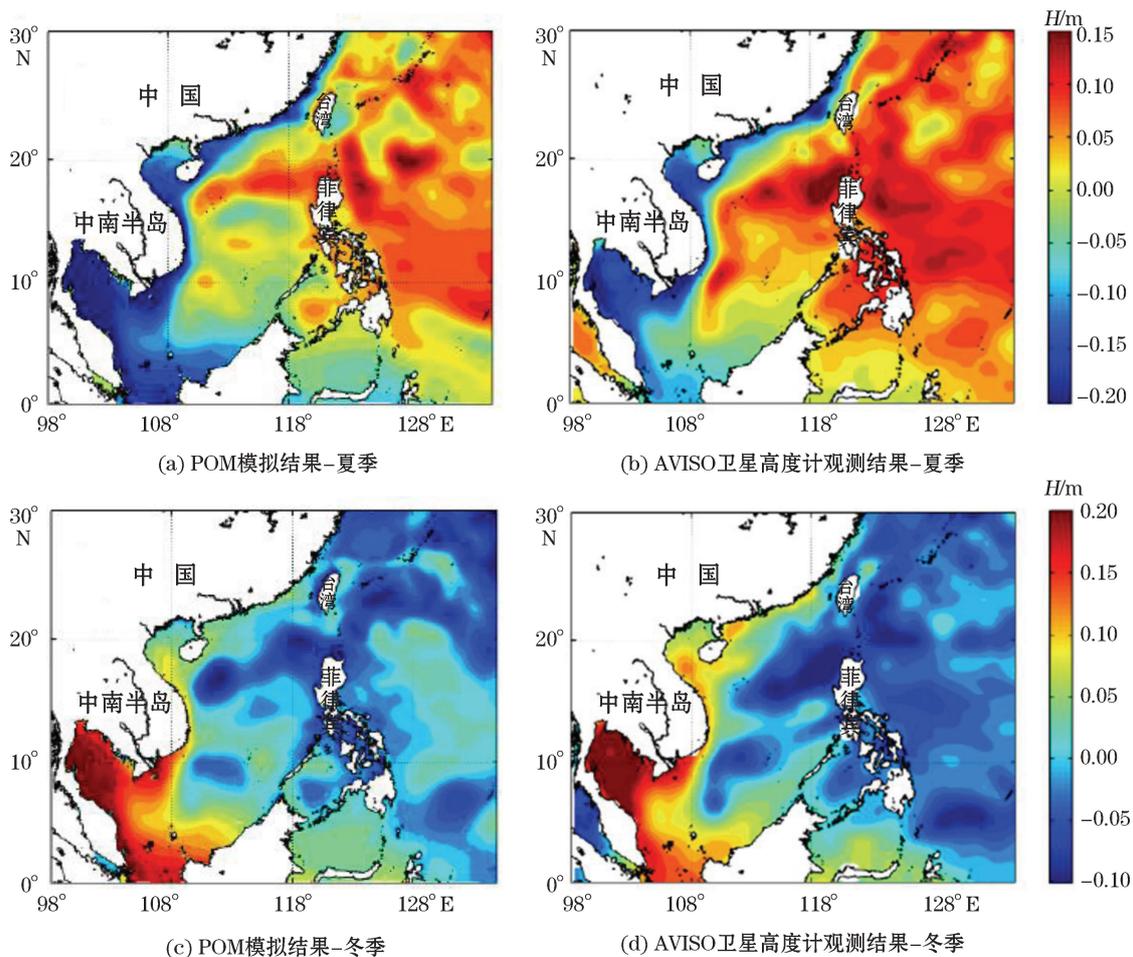


图 3 气候态季节平均的海表高度异常对比

Fig.3 Comparison of the climate seasonal mean anomalies of the sea surface height

通过与观测对比显示本文采用 POM 模式建立的南海环流模式能够较好地模拟南海海洋基本特征。本文以该模式为基础对南海环流开展模式试验研究。

2 结果与讨论

通过 POM 模式模拟得到的南海各月计算结果,取 1 月、4 月、7 月、10 月分别代表冬季、春季、夏季、秋季四个季节。根据前人研究结果^[5,15],0 m 层、200 m 层、500 m 层、1 000 m 层流场具有典型代表性,能更好地揭示南海环流形态垂向结构差异,因此,本文选取了各季节其 0 m 层、200 m 层、500 m 层、1 000 m 层流场分布,详见图 4~7。

2.1 冬季环流状况

冬季,在南海中北部海区(即 12°N 以北海区)存在着一个大型气旋式环流系统;除此之外,尺度较小的气旋式涡旋在吕宋口西北部、越南以东海域也有出现;尽管南海表层海流在冬季情况下被大的气旋式环流体系控制着,但在西沙—中沙群岛、巴拉望岛西南部近岸海域也发现了反气旋式涡旋形态;在东北季风的强作用下,黑潮沿巴士海峡向西北方向挺进南海北部,因此,黑潮对南海北部海域的环流体系会产生重要影响。此外,一支沿东北向运动的南海暖流也对我国粤东沿海海域海流体系产生了重要影响。就整个南海而言,冬季南海表层环流主要呈气旋式运动形态,在南海北部和南部各存在一个中等尺度闭合环流,二者之间还夹存

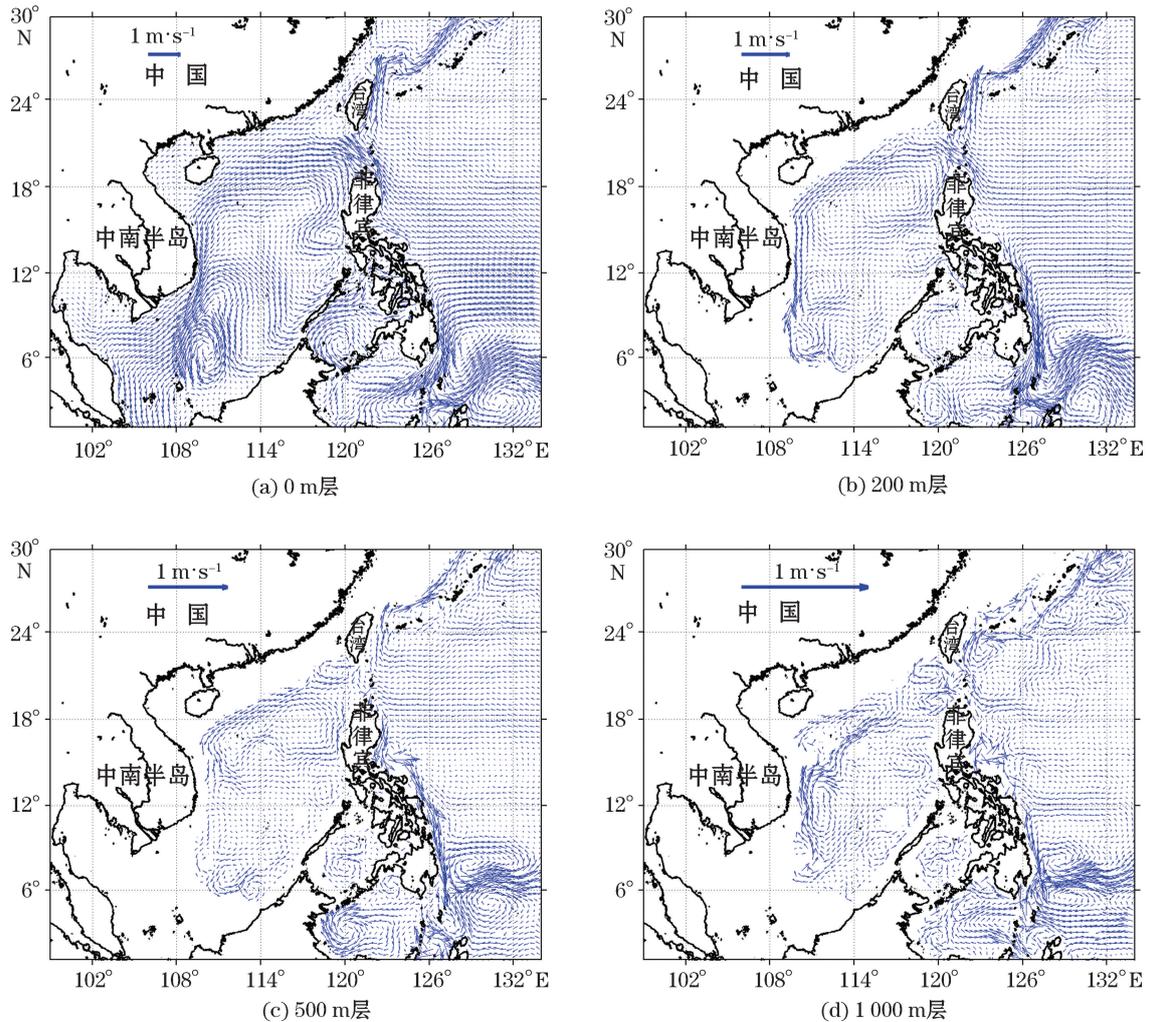


图 4 南海冬季流场分布垂向变化

Fig.4 Vertical variations of the flow field distribution in the South China Sea in winter

着一小型反气旋式环流。南海深度 200 和 500 m 层的流态在冬季越南沿岸均出现自北向南的沿岸流,且在南海西南部出现气旋涡。冬季沿岸流在 10°N 附近出现明显的离岸流。其中,南海深度 500 m 层的流态较为紊乱,出现了许多中尺度涡旋。南海深度 1 000 m 的流态在越南沿岸,南向与北向的沿岸流在 15°N 附近相遇,北向的沿岸流形成气旋涡,南向的沿岸流出现离岸流向东北方向流去。冬季环流状况详见图 4。

2.2 春季环流状况

春季南海海面风场处于季风转换期,风向多变。3 月和 4 月海表平均风应力矢量依然呈东北向,但到了 5 月,除了巴士海峡至海南岛区域海表风应力方向仍呈偏东向外,其余海域则以偏南向为主。由数值模拟结果可知,与南海冬季表层环流相比,南海春季表层环流主要具有以下特征:表层环流体系不再是一个大的气旋式环流系统,只有在南海北部(即 16°N 以北海区)保持局部环流小体系;原先位于越南东部海域的气旋式环流,其环流强度明显减弱;位于吕宋岛西北部海域的气旋式环流其环流形态也变得不明显;巴拉望岛西南部附近海域的反气旋式涡结构也已经消失,在越南东南部近海出现一个新的反气旋式涡结构;而在越南东南部外海则存在一个气旋式涡旋。南海春季深度 200 m 层的流态与表层相似,但流速强度明显减弱。但是,待深度增加到 500 m 处时,流态有所紊乱,开始出现许多处中尺度涡旋,尤其在南海北部海盆处,这种现象更明显。在南海深度 1 000 m 处,台湾琉球群岛东侧沿岸附近海域出现多处中尺度涡旋,并且南海西边界流现象有所强化。春季环流状况详见图 5。

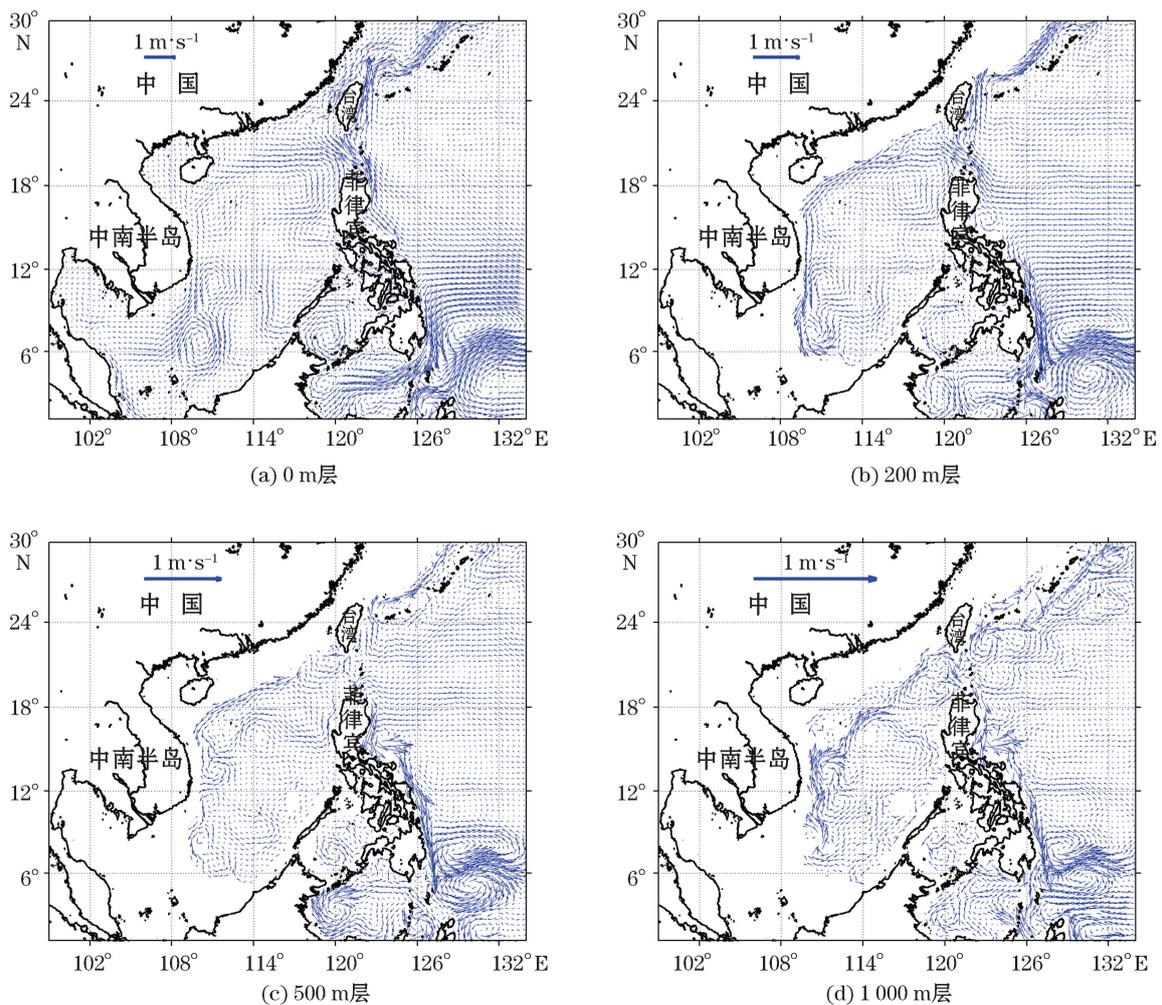


图 5 南海春季流场分布垂向变化

Fig.5 Vertical variations of the flow field distribution in the South China Sea in spring

2.3 夏季环流状况

南海夏季被西南季风所控制,由于南海表层环流主要受控于季风风向,因此,夏季南海大部分海区表层洋流主运动趋势基本呈东北向,尤其是在南海北部和中部海域,东北向洋流占据绝对优势;一个大的反气旋式环流体系控制着南海南部海域整个表层洋流的运动趋势。在南海西部海区,存在几个较为显著的局地环流:位于吕宋岛西北部的吕宋冷涡,其中心位置西移至(116°E,18°N)附近,涡旋覆盖范围和强度与冬季相比,均有所减弱;在越南东南部海区,存在两个反气旋式涡旋;在巴士海峡附近海区,由于受南海北部东北向海流阻挡,黑潮流至巴士海峡东侧时,转而折向东北方向,汇入黑潮主流中;起源于金兰湾外海的这支东北向海流,穿越中沙群岛,流入巴士海峡,最后与黑潮汇合构成了一个局地气旋式冷涡,有学者^[17]认为这支海流的强弱程度很大程度上决定了黑潮能否进入南海海域。

夏季受西南季风影响,南海海盆尺度表层环流在南海南部呈现反气旋式结构,在南海北部则是一个弱的气旋环流。受局地风应力及地形的影响,夏季南海西边界流并不是一直沿着越南沿岸向北流动,而是在越南南部(10°~12°N)出现离岸流。南海深度 200 m 层在夏季越南沿岸也会出现自北向南的沿岸流,且在南海西南部出现气旋涡。南海深度 500 m 的流态较为紊乱,出现了许多中尺度涡旋。夏季,越南沿岸也会出现自北向南的沿岸流。南海深度 1 000 m 的流态在越南沿岸,南向与北向的沿岸流在 15°N 附近相遇,北向的沿岸流形成气旋涡,南向的沿岸流出现离岸流向东北方向流去。夏季环流状况详见图 6。

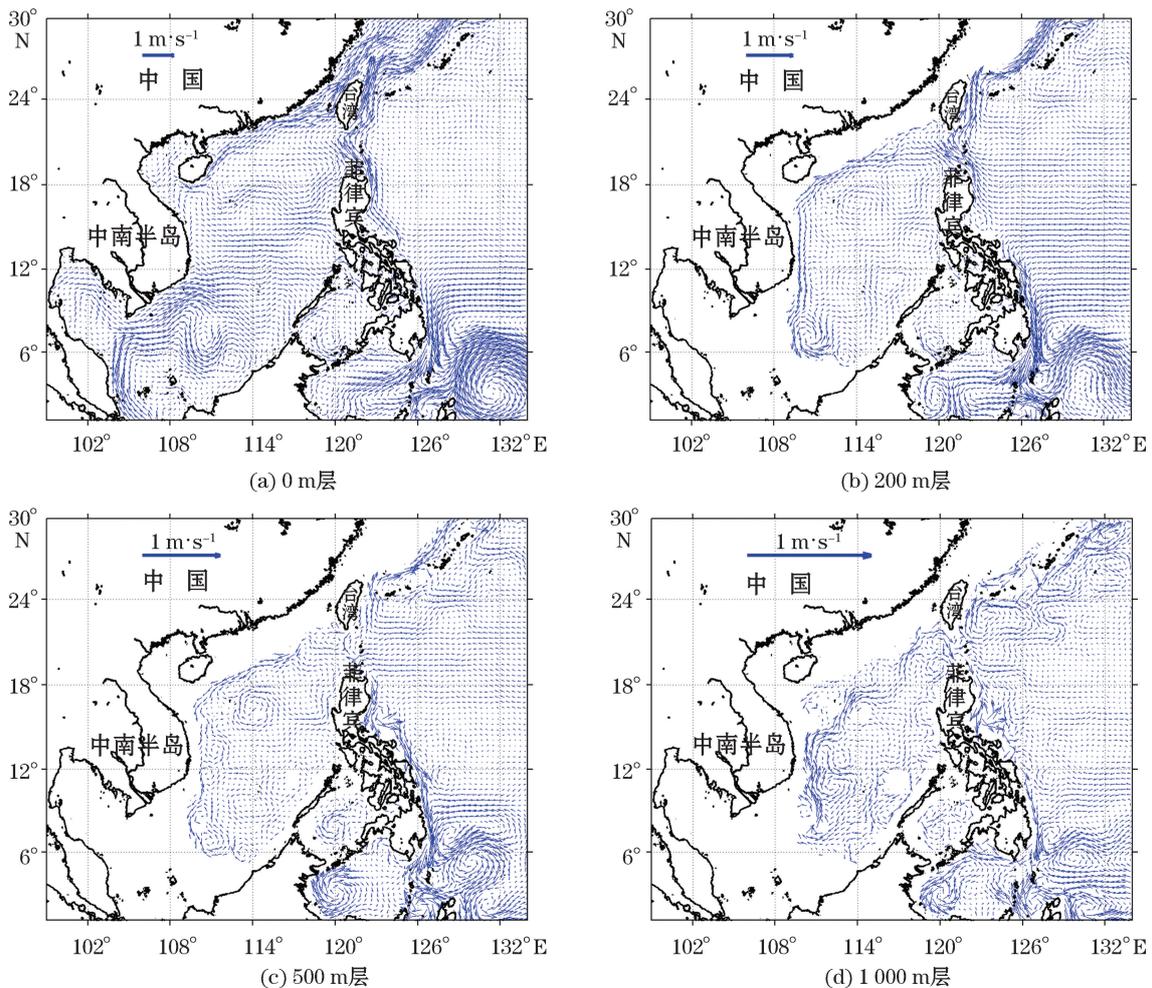


图 6 南海夏季流场分布垂向变化

Fig.6 Vertical variations of the flow field distribution in the South China Sea in summer

2.4 秋季环流状况

到了秋季,西南向季风开始消退,虽然南海表层东北向海流仍能穿越中部大部分海区经中南半岛一直流至巴士海峡,但该支海流强度已经大为减弱;在南海北部海域,海流主流向基本呈西南方向;在金兰湾和海南岛东部海区均出现一个气旋式涡结构,二者共同构建了一个新的气旋式环流系统;在东沙群岛西南海域也存在一个气旋式环流;在南海南部(115°E,5°N)附近出现一个反气旋式的环流;当黑潮经过巴士海峡南部时遭遇一支东北向海流,受其阻挡,黑潮遂折向东北方向汇入黑潮主流中。秋季为南海季风的转换期,其对应的环流特征也处于冬季环流与夏季环流的过渡流型。秋季,南海深度 200 m 层流态分布与表层相近,南海深度 500 m 层与 1 000 m 层在南中国海海盆处和台湾琉球群岛东侧沿海岸域出现许多处中尺度漩涡,流态较复杂。秋季环流状况详见图 7。

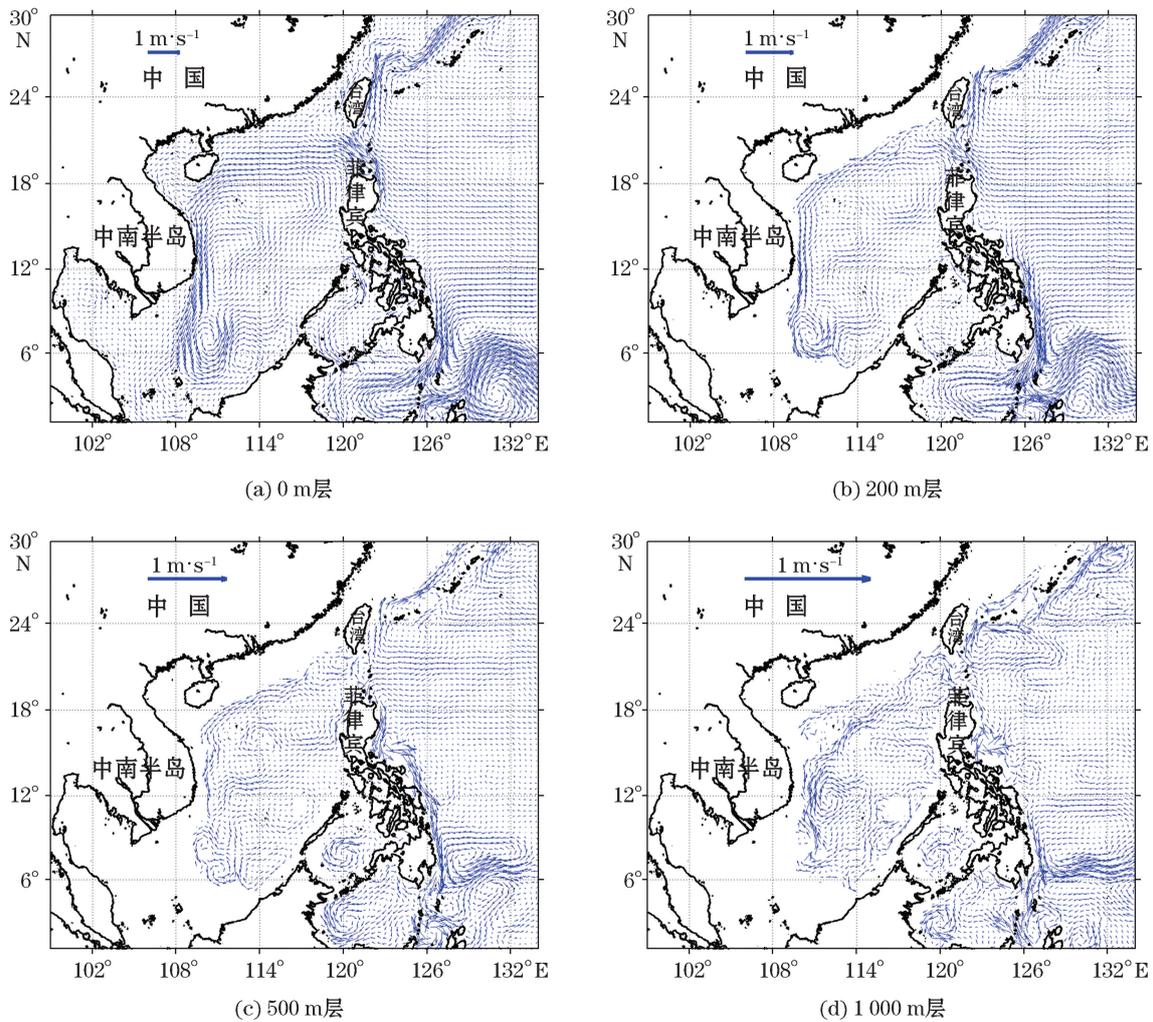


图 7 南海秋季流场分布垂向变化

Fig.7 Vertical variation of the flow field distribution in the South China Sea in autumn

3 结 论

基于三维斜压原始方程模式——POM 海洋模式,对考虑季风、海面高度、海面热通量、流及温度、盐度

场的南海环流垂向结构季节性变化规律开展数值模拟研究。首先,通过与前人研究和观测对比,证实了本文采用POM模式建立的南海环流模式能够较好地模拟南海区域的环流结构,然后以该模式为基础开展模拟试验研究,并取1月、4月、7月、10月分别代表冬季、春季、夏季、秋季四个季节,分析了南海不同季节其环流形态垂向结构差异。研究表明:南海气候态海盆尺度表层环流主要受季风影响,其次为吕宋口黑潮入侵的影响,但黑潮入侵的影响仅限于南海北部。夏季受西南季风影响,南海海盆尺度表层环流在南海南部呈现反气旋式结构,在南海北部则是一个弱的气旋式环流。受局地风应力及地形的影响,夏季南海西边界流并不是一直沿着越南沿岸向北流动,而是在越南南部($10^{\circ}\sim 12^{\circ}\text{N}$)出现离岸流。在冬季东北季风强作用下,南海海流运动被一个大的气旋式环流体系所控制,同时,南海西边界流增强现象明显,使其沿越南海岸向南流动。春、秋两季为南海季风的转换期,其对应的环流特征也处于冬季环流与夏季环流的过渡流型。春、夏、秋、冬四季南海200 m层流态分布与表层流态均相近,而到了南海深度500 m层与1 000 m层在南中国海海盆处和台湾琉球群岛东侧沿岸海域则出现许多处中尺度漩涡,流态变得较为紊乱,这是因为南海上层海流状况与海表风应力强弱程度有密切关系,同时又受海水密度梯度影响,而当南海水深超过500 m时,其海流运动趋势受风应力影响明显减弱,南海深层垂向强混合造成的压强梯度力可能是驱动吕宋海峡深层环流的主要因素,除此之外,复杂海底地形、底摩擦、地转等因素^[17-18]也会影响到南海深层环流形态。

参考文献:

- [1] 王志邦,孟振光,郭柱国. 南海自然环境特点及其对航行安全的影响[J].广州航海学院学报,2013,21(2):23-26.
- [2] 苏纪兰. 南海环流动力机制研究综述[J].海洋学报,2005,27(6):1-8.
- [3] 韩玉康,周林,吴炎成. 基于HYCOM的南海中尺度涡数值模拟[J].海洋通报,2016,35(3):299-316.
- [4] 张晶,魏泽勋,李淑江,等. 太平洋-印度洋贯穿流南海分支研究综述[J].海洋科学进展,2014,32(1):107-120.
- [5] CHU P C, EDMONS N L, FAN C. Dynamical mechanisms for the South China Sea seasonal circulation and thermohaline variabilities[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29(11):2971-2989.
- [6] 游小宝,李荣凤,张铭,等. 三维斜压模式对冬季南海环流的数值计算[J].海洋学报,2001,23(6):1-10.
- [7] WANG Q Y, CUI H, ZHANG S W. Water transports through the four main straits around the South China Sea[J].*Chinese Journal Oceanology and Limnology*, 2009,27(2):229-236.
- [8] BLUMBERG A F, MELLOR G L. Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight[J].*Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1983, 88(C8): 4579-4592.
- [9] LONIN S A, HERNÁNDEZ J L, PALACIOS D M. Atmospheric events disrupting coastal upwelling in the southwestern Caribbean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010,115(C06030):302-315.
- [10] WANG Z F, DONG S, CHEN C C, et al. Long-term fluctuations in sea level along the US East Coast? A modeling study[J].*Natural Hazards*, 2015,76(3):1603-1624.
- [11] EZER T. Can the Gulf Stream induce coherent short-term fluctuations in sea level along the US East Coast? A modeling study[J].*Ocean Dynamics*, 2016,66(2):207-220.
- [12] 宏波.南海北部环流季节特征及形成机制的数值研究[D].广州:中国科学院南海海洋研究所,2006:22-24.
- [13] LIU Q Y, KANEKO A, SU J L. Recent progress in studies of the South China Sea circulation[J].*Journal of Oceanography*, 2008,64(5):753-762.
- [14] QU T. Evidence for water exchange between the South China Sea and the Pacific Ocean through the Luzon Strait [J].*Acta Oceanologica Sinica*, 2002,21(2):175-185.
- [15] YANG H J, LIU Q Y. Forced Rossby wave in the northern South China Sea[J].*Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2003,50(7):917-926.
- [16] HU J Y, KAWAMURA H, HONG H S, et al. A review on the currents in the South China Sea: Seasonal circulation, South China Sea warm current and Kuroshio[J].*Journal of Oceanography*, 2000,56(6):607-627.
- [17] XIE Q, XIAO J G, WANG D X, et al. Analysis of deep-layer and bottom circulations in the South China Sea based on eight quasi-global ocean model outputs[J].*Chinese Science Bulletin*, 2013,58(32): 4000-4011.
- [18] WEI Z X, FANG G H, XU T F, et al. Seasonal variability of the isopycnal surface circulation in the South China Sea derived from a variable-grid global ocean circulation model[J].*Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(1): 11-20.

Numerical Simulation Study on the Seasonal Variations of Ocean Circulations in the South China Sea

XU Ting^{1,2}, CAO Yong-gang³

(1. *Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T, Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin 300456, China;*

2. *Tianjin University, School of Environmental Science and Engineering, Tianjin 300072, China;*

3. *South China Sea Marine Survey and Technology Center, SOA, Hydro Meteorology, Guangzhou 510300, China)*

Abstract: The seasonal variations of the circulations at different depth in the South China Sea are numerically simulated based on the Princeton Ocean Model (POM). The results show that the surface and the upper circulations in the South China Sea are affected by the monsoon. Driven by the southwest monsoon in summer, the surface circulation in the South China Sea shows a strong anticyclonic structure in the south and becomes a weak cyclonic circulation in the north. When driven by the northeast monsoon in winter, the surface circulation shows a cyclonic structure and strengthens obviously the western boundary current that flows southward along the coast of Vietnam. Spring and autumn are the monsoon switching period in the South China Sea. The circulation characteristics corresponding to this period show a transitional flow pattern between the winter and the summer circulations, with the flow velocity being weaker than those in winter and summer. The seasonal variations of the circulation at 200 m depth in the South China Sea are similar to those of the surface circulation. At the water depth of 500 m and 1 000 m in the South China Sea, many mesoscale whirlpools occur and the flow field there becomes also more disordered.

Key words: POM model; circulations in the South China Sea; vertical structure; monsoon

Received: November 30, 2016