

环台湾岛海域冬季水文要素的数值模拟

蒋小平¹, 钟 中¹, 张金善²

(1. 解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘 要: 本文利用 POM 模式对环台湾岛海域冬季的水文要素进行了数值模拟, 对有代表性的水平环流、温度场和上升流三个要素所进行的分析表明: 模式再现了台湾岛东岸的高温高盐强流速区即黑潮, 黑潮在冬季并无直接进入台湾海峡的分支存在; 西岸的东北向流在冬季各个层次上都存在, 台湾东北部的冷涡模拟与实况较为一致。温度场和上升流的分布与水平环流有很好的对应关系。本文还进一步验证了前人的一些研究成果, 并对一些特殊物理现象的成因进行了定性解释。

关键词: 环台湾岛海域; 黑潮; 上升流; POM; 数值研究

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2006)3 - 0051 - 07

1 引言

本文研究的环台湾岛海域指台湾岛周围 $20^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 之间的海域, 该海域连接我国东海、南海及太平洋, 地理位置特殊, 是经济和军事要地, 包括台湾海峡、台湾南部海区、台湾岛以东的大洋深水区以及台湾北部海区。

环台湾岛海域海底地形复杂, 台湾岛以东海区的水深大都在 2 000m 以上, 并存在大量海脊和岛屿, 台湾东北角, 在苏澳—三貂角以东, 地形急变, 等深线与海岸近乎正交, 水深从南北两侧的 1 000~2 000m 陡减为 500m 左右, 最浅处不到 200m。台湾海峡及台湾岛北部海区为典型的边缘陆架浅海, 水深较浅, 台湾海峡内绝大部分水深不到 100m; 台湾浅滩和澎湖水道是海峡中两个特殊地区, 台湾浅滩平均水深仅 20m 左右, 而澎湖水道则是海峡中水深最大的地方, 水深一般超过 100m。环台湾岛海域的复杂地形是导致该海域复杂水文要素的重要原因。

从目前的研究现状看, 已有研究成果多是根据资料分析或诊断分析获得的^[1~3], 数值研究则多是模拟台湾海峡和台湾以东黑潮区^[4~6], 专门针对环台湾岛海域进行甚高分辨率的数值模拟研究还比较少见。已有的研究中, 沙文钰等^[7~8], 用三维数值模式对该海域进行了潮汐的数值模拟, 揭示了该海域潮汐的特征, 但尚未见到对海流、温度、盐度、上升流等其它水文要素数值模拟的文章, 本文运用 POM (Princeton Ocean Model), 对该海域冬季水文要素进行甚高分辨率的模拟研究。

2 模式和数值试验方案

收稿日期: 2005-09-12

基金资助: 国家自然科学基金(40333026)和科技部社会公益性项目(2000DIB20096)资助

作者简介: 蒋小平(1981-), 男, 在读博士, 主要从事浪流耦合等研究。

本文采用 σ 坐标原始方程海洋模式 POM 的最新版本 POM2K, POM 模式已被广泛应用于世界大洋的众多海区, 计算结果与实测资料基本一致, 具有较强的可靠性。

该模式采用 Mellor-Yamada 二阶湍流闭合模式计算垂向混合系数, 采用内外模分裂解法对方程求解, 外模态受表面波速和 CFL 条件的限制而采用较短时间步长, 内模态受内波波速和 CFL 条件的限制而采用较长时间步长。采用自由表面以更加准确地反映重力外波的作用, 时间差分在水平方向上采用显式格式, 垂向上采用隐式格式, 水平差分采用“Arakawa C”网格, 有关 POM 的具体介绍参见文献[9]。

2.1 模式网格和地形

本文的 POM 模式采用正交曲线网格, 可控制网格疏密。图 1 是模式计算区域平均网格距 $0.5(\Delta x + \Delta y)$ 等值线图, 其最小网格距达到了 2.50km, 平均网格距为 4.98km。在分辨能力的范围内, 模式保持了真实的海岸线和海岛形状。在垂直方向上, 模式采用不均匀间隔的 15 个分层, 在海洋的表层和底层取较高的垂直分辨率。

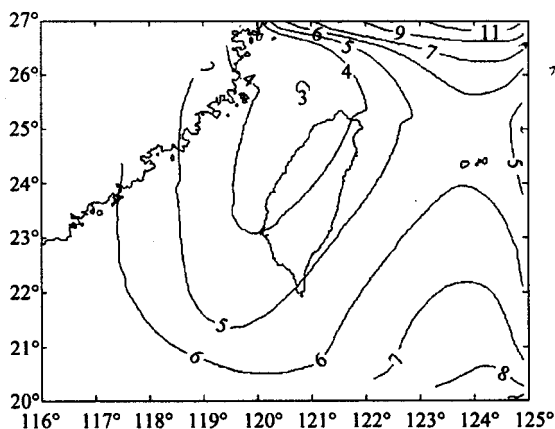


图 1 模拟区域风格距等值线图

2.2 模式强迫场

风场资料取气候月平均风应力场。本文旨在模拟冬季的水文要素, 故取典型的一月份风场。

本文的开边界条件由以下方法获得: 利用全球大洋模式 MOM (Modular Ocean Model) 和 Levitus 温盐资料和风应力资料, 从静止海洋出发, 采用恢复算法, 积分一百年。为提高研究区域水文要素模拟的准确率, MOM 模式全球变网格格距在 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 范围内设定为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。大洋模式运行结果和容新尧等^[10]所进行的计算结果相当, 因本文重点研究环台湾岛海域水文要素模拟特征, 大洋模式模拟结果不再赘述。将第一百年冬季一月份的稳定流插值到 POM 模式模拟区域边界, 以提供开边界的流速值, 为保证模式进出水量平衡, 对 MOM 模式提供的开边界流速还进行了适当调整。

模式区域的南边界和西边界为流入, 东边界和北边界为流出, 故温盐在西边界和南边界上取气候平均值。东边界和北边界则根据以下方程确定:

$$\frac{\partial}{\partial t}(T, S) + U_n \frac{\partial}{\partial n}(T, S) = 0$$

模式考虑热盐效应, 初始条件海流取为静止, 水位偏差取为零, 海洋从初始状态开始积分, 计算出稳定的流场后, 再数值积分一个月, 输出分析结果。

3 模式结果与分析

3.1 水平环流

海域内的海流主要受黑潮、大陆沿岸流、南海暖流和南海季风漂流的影响,且黑潮起主导作用。

黑潮北上途径巴士海峡的过程中,究竟有无分支进入台湾海峡,一直是一个有争议的问题。早期的观点倾向于肯定黑潮分支进入台湾海峡。例如,伍伯瑜^[11]认为,终年都有黑潮分支由巴士海峡进入台湾海峡。近期的研究则多倾向于黑潮“流套”的观点,李荣凤等^[12]把南海和西太平洋作为一个整体所进行的数值模拟结果揭示了流套的结构,并指出南海暖流一部分进入了台湾海峡,一部分与“套流”合并。刘秦玉等^[13]用位涡守恒理论对黑潮流套作了理论解释,揭示了其存在的必然性。可见关于黑潮有无直接的分支进入台湾海峡,近期多倾向于持否定观点。

传统观念认为台湾海峡的海流受季风控制,冬季东北季风盛行时,为西南向流。然而,越来越多的研究表明,冬季,至少在深层,海峡内仍为东北向流。胡建宁和傅子琅^[14]指出:在台湾海峡南部,存在着一支东北向的逆风海流,即南海暖流向北的延伸。张以恩等^[15]根据人工水母的投放、回收结果,发现台湾海峡的底层流一年四季都是东北向流动。方国洪等^[16]对台湾海峡偏西一侧三条断面的海流分析也表明,冬半年深度平均的海流流向,以北和东北向为主。

台湾暖流是出现在长江口以南、台湾海峡以北,浙、闽近海的一支比较稳定的海流,终年流向东北,具有高温、高盐的特征。关于它的来源问题,有4种观点:一是认为源自台湾东北海域的黑潮分支;二是认为来自台湾海峡;三是夏季台湾暖流上层水来自台湾海峡,下层水源自台湾东北海域的黑潮次表层水;四是无论冬季还是夏季,台湾暖流均来自于两处:一处是来自台湾海峡,另一处是来自台湾东北海域的黑潮分支,而不同季节,来自两处的海流强弱有所差异。

图2是模拟的几个不同层次月平均水平环流矢量图。从图2可以看出,台湾以东黑潮存在分支,黑潮主流通过台湾岛苏澳以东海脊作反气旋式弯曲进入东海,东分支则流向琉球群岛以东海域。这是由于黑潮流经苏澳-与那国岛时受地形诱导,使流速高、流幅窄的黑潮水产生分支。

从图2还可以看出,黑潮在冬季并无直接进入台湾海峡的分支存在。台湾暖流得到了较好的再现(见图2a、2b),该暖流应是来自黑潮穿过台湾东北方海脊北上的一个分支。

另一个值得注意的现象是在台湾东北部存在一个气旋式涡。该涡旋中心位置约位于25.0°N, 122.9°E。分析模拟结果发现,无论表层、10m、50m、100m层都有异常的冷水块出现,说明在0~100m之间存在冷涡,冷涡的下界深度大于100m。

在台湾海峡内,北部基本上都为顺风流。24°N以南表层流分布并不像通常所认为的是受强东北季风作用下的单一顺风流,而是呈现出流向复杂、涡旋多发和变化性大的特点。在南部靠近台湾岛一侧,存在一支北向流,该北向流为南海暖流的北向延伸,无论

在表层、10m、50m，该北向流都存在，只是随着深度的增大流速逐渐减小。这个现象与胡建宁等^[14]的观测结果相同。

台湾浅滩南部存在着一个反气旋式涡旋，其中心位置约位于 21.7°N, 119.3°E。我们认为，此涡旋的成因可以这样来解释，岛屿地形对流起了绕流作用。涡旋西北部的台湾浅滩水深较浅，由南海进入台湾海峡的北上流流经台湾浅滩时折向，一部分沿着台湾岛向西北流去，一部分被阻挡向西南流动。

冬季台湾岛东西两岸近海近底层的海流分布与表层有较大不同，深层的黑潮路径，并不都紧贴台湾东岸而北上流动，且随深度的增大，黑潮流轴有些逐渐向右偏的趋势。这与孙湘平等^[1]的研究结果相同，具体原因还有待进一步研究。

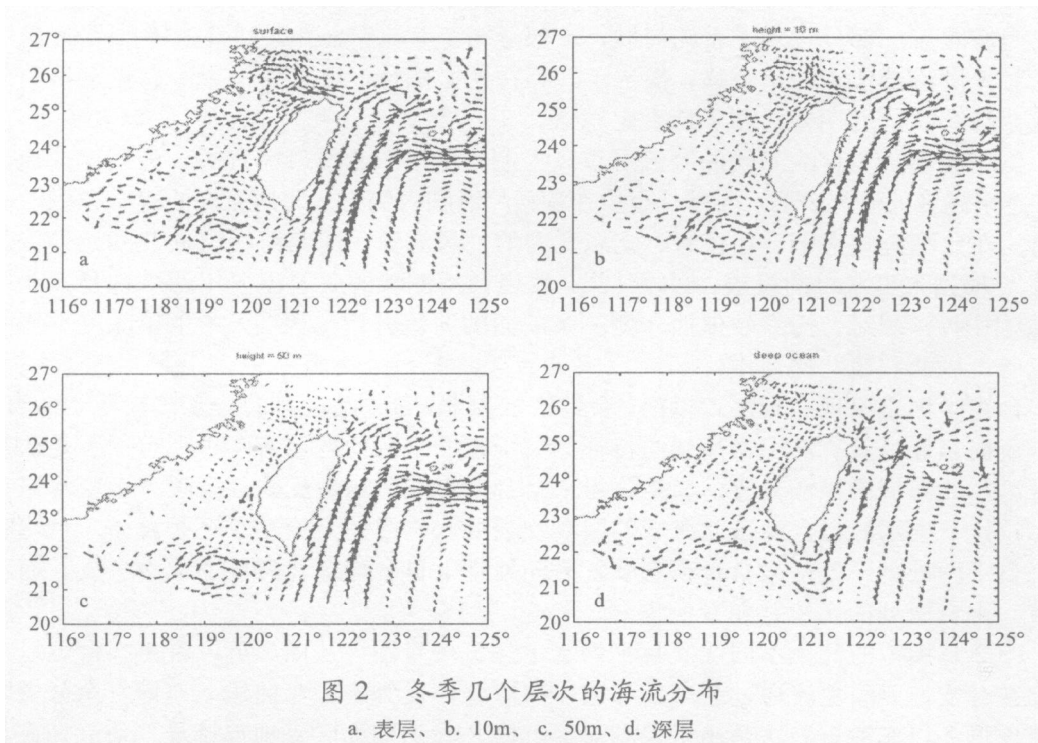


图 2 冬季几个层次的海流分布

a. 表层、b. 10m、c. 50m、d. 深层

3.2 温度

关于冬季环台湾岛海域温度场分布的研究已有一些比较公认的观点^[2]，黑潮在冬季表层水温高达 24~25℃，台湾海峡地区冬季等温线密集，呈东北-西南向分布，西部表层水温 14~16℃，东部为 17~23℃。海峡水温东暖西冷、南暖北冷的分布特点明显，水温差较大。

目前，对台湾东北部冷涡已进行了较多研究，孙湘平^[17]、修树孟^[18]认为就多年平均而言台湾东北近岸的冷水块有 3 处：分别是彭家屿附近海域、台湾岛北部沿岸海域和台湾东岸北部的苏澳到三貂角以东海域。冷涡虽然终年存在，但冷涡的发生区有明显的季节性变化，在冬季只出现在苏澳到三貂角以东海域这一处冷涡。

从冬季表层温度分布图上(见图3)可以明显地看出黑潮水的温度较高,平均温度25℃,流经苏澳-与那国岛后的海流温度减小。冬季由于陆架区的水温较低,故冬季台湾东北彭佳屿附近海域没有出现春、夏、秋三季都有的异常冷水块,但在台湾东岸的苏澳-三貂角一带仍有一股冷水嵌入黑潮锋面内形成锋面冷涡,该冷涡中心温度为22℃,明显低于周围温度。该冷涡与孙湘平、修树孟的描述一致。台湾海峡内,温度大致呈南高北低,东高西低的分布形式,这与实际观测是一致的。值得注意的是闽、浙近海存在一支温度较高的海流,对应水平环流分布图可看出这是黑潮流经台湾岛东北时,部分高温高盐水流入闽、浙近海形成的,即台湾暖流。另外,台湾岛的南部巴士海峡的温度分布也表明,黑潮在冬季并没有明显分支进入台湾海峡。应该指出的是在台湾浅滩南部存在温度的闭合等值线,这是与该处的反气旋涡旋相对应的。

50m层的温度分布总体形式与表层的并没有太大的不同,但数值上减小了。黑潮水平均温度在24.0℃,台湾东北部的冷涡中心温度为21.1℃,台湾暖流也得到了较好的再现。

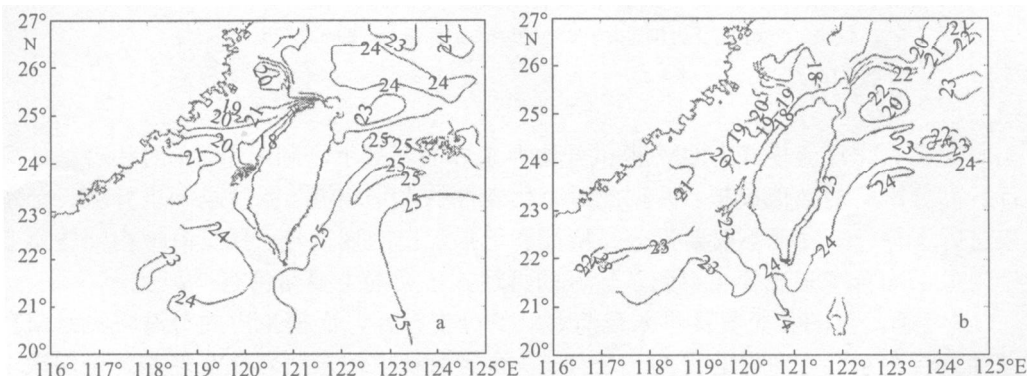


图3 冬季两个层次的温度分布图

a. 表层、b. 50m

3.3 上升流

对该海域的上升流特征已有诸多报导^[19],普遍认为台湾岛的东北冷涡处有较强的上升流,在地形变化急剧的地方也容易出现较强的上升流区,如台湾浅滩等处,可见该海域复杂的地形对上升流的形成有非常重要的作用。

从模拟的冬季上升流分布可以看出(见图4),黑潮存在诸多上升流区,垂直速度较强,20m层最大上升流速度达 $5.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。另一个较强的上升流区位于苏澳-与那国岛之间的水道区域,这是黑潮水流经该区域时沿岸爬坡的结果。此外,在台湾东北方彭佳屿附近海域也存在一较强的上升流,中心速度达 $2.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 以上。50m层上升流都比20m层强,最大上升流达到 $7.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$,台湾东北海域上升流速达到 $4.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 以上。

台湾海峡内上升流主要分布在台湾海峡的东部,靠近台湾岛的一侧,经向分布范围较广、距岸范围较窄但很明显。台湾浅滩附近的上升流较为强大,此上升流主要归因于风生Ekman输送造成的近岸减水和底层水的涌升补偿。台湾浅滩以南海域的底层,终年

有一支从西南向东北流动的海流,该海流与海底等深线成一定交角,有利于深层海水沿陆架陡坡爬升。值得指出的是已有的研究结果^[20]发现冬季海坛岛(25.20°N, 120.00°E)附近存在较强的上升流,50m 层最大上升流速达到了 $3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$,但本文模拟结果并没有在该处发现这样强的上升流。其原因可能是未考虑长江冲淡水和潮汐对上升流的影响。

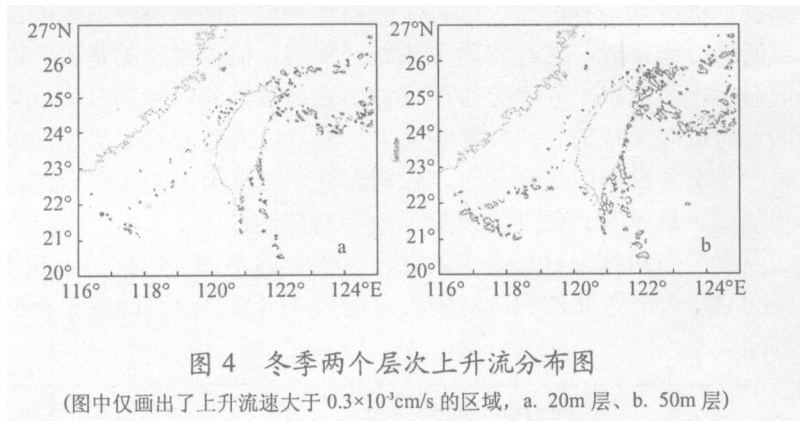


图 4 冬季两个层次上升流分布图

(图中仅画出了上升流速大于 $0.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 的区域, a. 20m 层、b. 50m 层)

4 结论与讨论

本文在大洋环流模式 MOM 提供开边界条件的基础上,利用 POM 对环台湾岛海域进行甚高分辨率的数值模拟。并据此对有代表性的水平环流、温度场和上升流三个物理要素进行了分析,发现不仅要素分布特征和已揭示出的规律较一致,海域内一些重要的物理现象,如台湾暖流等也得到了较好的再现。本文的主要结论有:

(1) 冬季,黑潮并无直接进入台湾海峡的分支存在,而模拟出的台湾暖流是来自于黑潮穿过台湾东北方海脊北上的一个分支,台湾海峡内的东北向流在冬季各个层次上都存在。

(2) 台湾海峡内,温度大致呈南暖北冷,东暖西冷的形式分布,这与实际相符合。台湾东北部的冷涡在 0~100m 之间都存在,冷涡中心温度明显低于周围温度,形成一个较强的闭合冷涡,该冷涡的形成是黑潮次表层水涌升造成的。

(3) 上升流的分布与地形有着非常密切的关系,在地形变化急剧的地方一般都为较强的上升流区,如台湾浅滩附近、苏澳-与那国岛之间的水道等区域。

可以看出,本文的模拟是较为成功的。但本文模拟只是针对冬季环台湾岛海域进行的,还需要对其它季节进行模拟验证。另一方面,在对环台湾岛海域水文要素和特殊物理现象进行成功模拟的基础上,可进一步开展诊断研究,深入揭示物理现象形成和维持的物理机制。相应的研究工作结果将另文发表。

参考文献:

- [1] 孙湘平,苏玉芬,修树孟. 台湾岛东西两岸的海流[J]. 黄渤海海洋,1996,14(2):9~16.
- [2] 肖 晖,郭小刚,吴日升. 台湾海峡水文特征研究概述[J]. 台湾海峡,2002,21(1):126~138.
- [3] 刘金芳,刘 忠,等. 台湾海峡水文要素特征分析[J]. 海洋预报,2002,19(3):22~32.

- [4] 张蕴斐, 张占海. 黑潮环流的数值模拟 [J]. 海洋学报, 2003, 25(3): 120~128.
- [5] 蔡树群, 王文质. 南海东北部及台湾海峡环流机制的数值研究 [J]. 热带海洋, 1997, 16(1): 7~14.
- [6] 黄浩升, 孙湘平, 袁业立. 黑潮流域的环流数值研究 [J]. 海洋学报, 1996, 18(5): 134~139.
- [7] 沙文钰, 吕新刚, 蒋国荣. 环台湾岛海域 M2 分潮特征的数值模拟 [J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(1): 80~87.
- [8] 沙文钰, 吕新刚, 等. 环台湾岛海域半日潮波特征的三维模拟 [J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 31~40.
- [9] Blumberg A f and G L Mellor. A Description of a Threeimensional Coastal Ocean Circulation Model. In " Three Dimensional Coastal Models ", American Geophysical Union, Washington D. C. 1987, 4 (N. Heaps, ed) 208.
- [10] 容新尧, 杨修群. 全球海洋环流模式中上层海洋对表面强迫的响应和调整 I (年际变率) [J]. 气象学报, 2004, 26(2): 20~36.
- [11] 伍伯瑜. 台湾海峡及其邻近水域的流型和水文特征 [J]. 海洋通报, 1983, 2(4): 1~8.
- [12] 李荣凤, 季仲贞, 曾庆存. 西太平洋洋流数值模拟 [J]. 海洋环流研讨会论文集, 北京, 海洋出版社, 1992, 115~126.
- [13] 刘秦玉, 等. 黑潮在吕宋海峡的形变及动力机制 [J]. 青岛海洋大学学报, 1996, 26(4): 414~419.
- [14] 胡建宁, 傅子琅. 冬季台湾海峡南部的流系 [M]. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区生态系研究, 北京: 科学出版社, 1991, 103~111.
- [15] 张以愚, 翁学传, 张启龙, 等. 台湾海峡的底层流 [J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(2): 124~131.
- [16] 方国洪, 赵保仁, 朱耀华. 台湾-对马-津轻暖流系统及其动力机制的初步探讨 [C]. 海洋环流研讨会论文选集, 北京: 海洋出版社, 1992, 13~27.
- [17] 孙湘平, 修树孟. 台湾东北海域冷涡的分析 [J]. 海洋通报, 1997, 16(2): 1~10.
- [18] 修树孟, 王 克, 孙培光. 台湾东北海域冷涡及其变异的遥感信息研究 I (冷涡的季节性变化) [J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(2): 57~64.
- [19] 颜廷壮, 李鸿雁, 俞光耀. 福建沿海上升流数值研究 II (台湾海峡上升流的三维数值模拟) [J]. 海洋学报, 1997, 19(5): 12~19.
- [20] 潘玉萍, 沙文钰. 闽浙沿岸上升流的数值模拟 [J]. 海洋预报, 2004, 21(2): 86~95.

Numerical simulation of hydrographic characteristics in the sea area around Taiwan Island in winter

JIANG Xiao-ping¹, ZHONG Zhong¹, ZHANG Jin-shan²

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101 China;

2. Nanjing hydraulic Research Institute, Nanjing 210029 China)

Abstract : In this paper, the numerical simulation of hydrographic characteristics in the sea area around Taiwan Island in winter is conducted by use of POM. The analysis to the representative horizontal circulation, temperature distribution and upwelling show that the model can reproduce the Kuroshio, the stronger current with higher temperature and denser salinity near east coast of Taiwan Island, and there is no separated branch of Kuroshio entering Taiwan Strait in winter. The northeast ward flow near west coast appears from surface to the bottom all the time in winter, and the simulated cold eddy northeast to Taiwan is agreeable with observation. Meanwhile, the temperature and the upwelling is consistence with horizontal current. Based on the further verification to the former results, the possible mechanism of some specific phenomena is also explained.

Key word : sea area around Taiwan island ; Kuroshio ; upwelling current ; POM ; numerical study