

海洋环流模式的发展和应用

II. 近海和区域环流模式*

李荣凤 游小宝

P4 A

(中国科学院大气物理所大气科学和地球流体力学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 回顾了近20年来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近海和区域海洋环流模式发展和应用的历程。介绍了正压区域海流模式在中国近海海流数值模拟研究中的应用以及一个24层、最高水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的三重嵌套的中国近海环流模式及其应用。在嵌套模式基础上, 基于变分原理, 建立了一个中国近海环流的资料同化分析系统。初步结果表明, 资料同化提高了模式计算的真实性, 所揭示的黑潮的强度和流幅、夏季黄海冷水团的位置等都更接近观测结果。

关键词: 正压模式; 斜压模式; 南海暖流; 嵌套; 变分原理; 资料同化

1 引言

1980年, 由中国科学院大气物理研究所(简称大气物理所)和中国科学院力学研究所联合组织在北京西颐宾馆召开了一个“洋流会议”。这个会议规模并不大, 却第一次把从事大气科学、海洋科学和力学科学的科研人员组织在一起, 其中曾讨论了学科间的互相借鉴和补充问题。这个会议召开后不久, 大气物理所就开始了我国独具特色的近海和区域海洋环流模式的发展和应用研究。

正压模式首先是从1983年开始的, 它是基于曾庆存^[1]提出的海洋—大气耦合模式中简单版本的设计思想。正压模式的发展经历了从直角坐标到球坐标, 应用区域从小范围的南海到整个太平洋。计算的上层海流得到了南海的季节性环流和整个中国海的海流系统, 特别是首次模拟得到了“南海暖流”和验证了冬季逆风流动的“台湾—对马—津轻暖流系统”。

正压模式只能得到风驱动的上层(0~200 m)平均海流, 而随着海洋工程、环境、渔业、国家安全等对海洋环境提出更高的要求, 迫切需要研究中国近海环流的三维结构。为了满足我国近海的科学研究、环境预测和决策以及国防建设的需求, 我们从20世纪90年代初开始发展大气物理所的近海和区域三维斜压海洋环流模式。斜压模式首先应用于南海, 并得到了合理的南海环流的分布。为了推广到整个中国海, 同时解决大范围的水边界问题并满足较高的空间分辨率, 2000年, 我们发展了一个三重嵌套的斜压海洋环流模式, 模式的最高分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。在嵌套模式基础上, 最

2003-01-20收到, 2003-04-08收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目40076009和中国科学院知识创新工程重大项目KZCX1-SW-01-16共同资助

近我们基于变分原理,初步建立了一个中国近海的资料同化分析系统。

近海和区域海洋环流模式的发展和应用,主要是围绕中国海环流系统的数值模拟、机制研究并最终实现对它的预测而进行的。海洋环流模式和资料同化系统都还在不断的发展和完善过程中。下面较详细地介绍了正压模式(第2节)和斜压模式(第3节)的发展过程及其应用。

2 近海和区域正压海洋环流模式的发展及其应用

2.1 正压模式的发展

正压模式的第一个版本采用直角坐标,仅适用于低纬和范围不太大的海区(IAP-ROCM 1.1)^[2]。该模式不采用当时国际上流行的“刚盖”近似,而是保留“自由”海面,并考虑了真实的海岸线形状和风场效应、 β 效应以及非线性效应和海底地形等因素;在不规则侧边界海域中,如果忽略耗散项和强迫项,该模式设计的差分格式仍保持完全能量守恒;时间积分方案采用了分解算法以便于节省计算时间。

随着大气物理所计算机性能的不断提高,也为了进行更大范围的海流计算,于1989年完成了第二个版本的调试和运行(IAP-ROCM 1.2)^[3]。IAP-ROCM 1.2的设计思想基本上与IAP-ROCM 1.1相同,但采用了球坐标,水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。计算区域几乎为整个太平洋,并包括了全部的中国海域。因为我们重点是计算由风驱动的上层海流,因此取最大无扰动水深为200 m,这样大部分中国海域的真实海底地形仍能得到真实反映。南海中央海盆、东海东部和太平洋则取为理想化的200 m平底地形。

2.2 正压模式的应用

为了满足南海石油开发和海洋工程建设的需要,并完成“七五”国家攻关课题,于1984年首先将IAP-ROCM 1.1在国产T-Q6计算机上应用于南海。南海海流的初步计算结果在“南海石油开发环境国际研讨会”上报告后受到了高度的重视,并首次在数值模拟中得到了“南海暖流”^[4]。随后,根据计算结果讨论了南海的季节性环流^[5]。首次计算出“南海暖流”是件很有意义的事情。因为,当时不仅对于“南海暖流”的形成原因不清楚,对于它的存在性也仍有存疑。冬季逆风而动的“南海暖流”是我国全国海洋综合调查期间(1959~1960)由观测实践揭示出来的新现象^[6]。管秉贤^[7,8]根据1966~1968年期间的黑潮联合调查(CSK)资料和国家海洋局南海分局于1971~1973年冬季开展的海流观测,对于以前发现的“南海暖流”提供了进一步的证据。数值模式能再现“南海暖流”,不仅为它的存在性提供了又一个证据,也为进一步讨论它的形成机制提供了一个方便的工具。该模式还用于西太平洋洋流的数值模拟,公认的一些主要流系如黑潮、北赤道流和北赤道逆流等几乎都得到了反映。模拟出了棉兰老冷涡的中心位置,强度和范围随季节的变化。特别是模拟的哈马黑拉涡旋的出现和消亡情况与调查分析结果十分一致^[9]。“七五”期间,与中国科学院南海海洋研究所合作用这个模式首次对南沙海域的海流进行了数值计算^[10],并与1988年夏季的考察结果做了比较,在有观测的地方二者的符合程度令人满意,在航海禁区无观测的地方计算海流则弥补了空白。

1989年,把IAP-ROCM 1.2用于太平洋是在Convex计算机上实现的。计算结果

再现了太平洋的主要流系，如：黑潮、亲潮、北（南）赤道流、北赤道逆流、东澳大利亚海流和加利福尼亚海流等都再现在计算结果中了，并且还可以清楚地看到它们的季节变化；特别需要指出的是，首次得到了中国的渤海、黄海、东海、南海作为一个整体海域的海流系统^{11、12}。由于计算区域比较大，没有人为给定的中国海域的开边界，太平洋流系特别是黑潮与我国近海环流的相互作用和水交换得到了充分的考虑，因此，由计算得到的中国海域的海流系统与实况相符（图 1）。另外，模式计算结果也为我们进一步讨论和研究打下了基础。

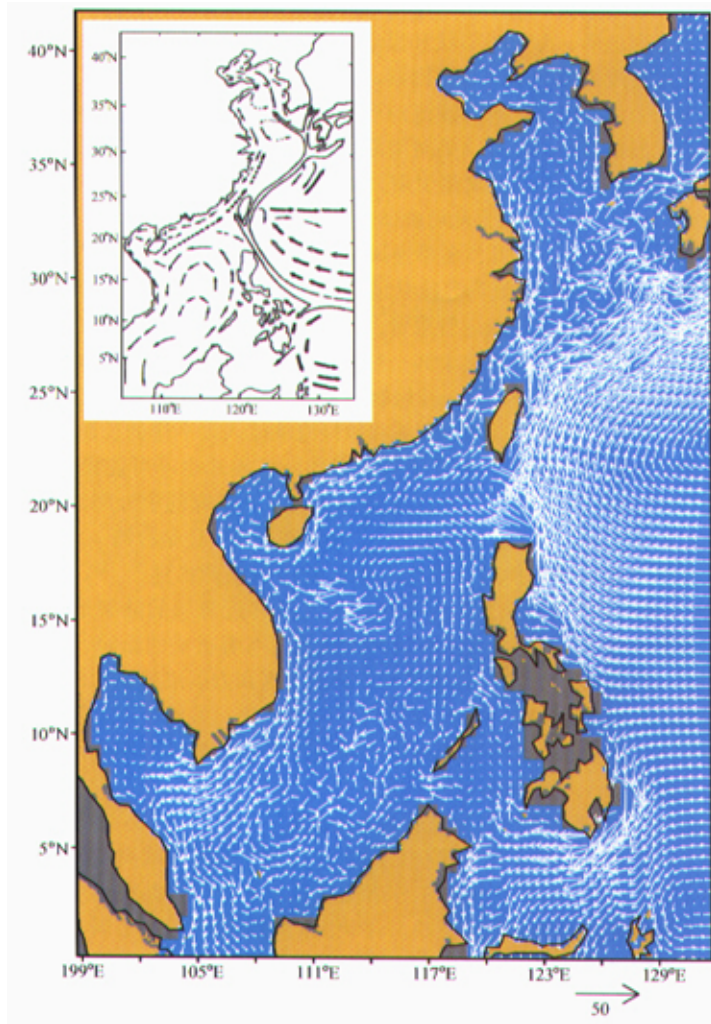


图 1 计算的中国海及邻近海域的冬季环流¹²（单位： cm s^{-1} ）和主要流系¹³示意图

2.2.1 参与南海暖流形成机制的讨论

用 IAP-ROCM 1.1 计算的结果所显示的“南海暖流”仅仅是它的“雏形”，而用 IAP-ROCM 1.2 计算的结果则完整地揭示了“南海暖流”，它从海南岛东南、西沙群岛以北开始，冬季逆风向东北流动，一直穿过台湾海峡，与台湾暖流相连结。其位置和流速向东增强的趋势与实测及分析结果都相当一致。计算的“南海暖流”比断面观测与分析的“南海暖流”更为连续和完整。我们得到的南海暖流被认为是与实测结果最为接近的一次模拟计算^[13]。为了考察黑潮、陆架地形、风场和岛屿对于南海暖流的影响，又做了一些模拟实验，比如：打开或封闭巴士海峡，改变陆架地形，海南岛存在或不存在等等。根据数值模拟结果对于南海暖流形成机制提出的看法是：逆风的南海暖流是在风、海底地形、海岸线形状和黑潮入侵诸因素的共同作用下产生的，黑潮的入侵并非是南海暖流得以形成的决定因素，而只是加强了南海暖流^[14]。目前，南海暖流的存在已得到公认。但是，南海暖流的形成机制仍是我国近海物理海洋学上一个有争议的问题。我们根据数值模拟结果对南海暖流形成机制提出的见解引起了海洋学家的注意，并多次被国内外的有关文献引用。

2.2.2 台湾—对马—津轻暖流系统的验证和对马暖流源地的分析

与中国海流系统有关的几支冬季逆风流动的海流如：“南海暖流”、“台湾海峡暖流”、“台湾暖流”和“对马暖流”等曾引起中外海洋学家的广泛注意。但是，对这些海流的源地和驱动机制却众说纷纭。管秉贤^[15]指出存在着一支 NE 向流，它可能是联系南海东北部—台湾海峡—东海西北半部—对马海峡的水量通道。方国洪等^[16]基于流量平衡，进一步提出了“台湾—对马—津轻暖流系统”的新概念。对这支纵贯南海北部、东海和日本海，穿过台湾海峡、对马海峡和津轻海峡流入太平洋的长而窄的海流系统，不仅不可能完全由观测来证实，而且粗分辨率的海洋模式也不可能模拟出来。因此，台湾—对马—津轻暖流系统的提出在从事东海和日本海研究的中外海洋学家中引起了争议。有人不相信它的存在^[17]，有人提出：“是黑潮分派？还是台湾—对马暖流系统？”的问题。这支暖流系统在我们的计算结果中得到了完整的描述^[11, 12]，我们并提出了“海南—台湾—对马—津轻暖流”受控于中国海及其邻近海域的陆架地形和强大的黑潮，反映了北太平洋环流系统对我国海域的海流状况有着重要的影响^[12]。模式再现的“海南—台湾—对马—津轻暖流”证实了管秉贤的观点和方国洪新概念的正确性，更加有利于改变以往人们对该海域环流基本结构的传统看法。另外，计算海流的分布也表明，对马暖流确实有一部分源自东海中部大陆沿岸水和黑潮水的混合水，另一部分如传统所说的来自九州西南黑潮的一个分支。

2.2.3 整编出版了太平洋及中国近海表层海流图集

由于开发利用海洋、海洋环境保护、海洋科研预报、海洋减灾和海洋工程等事业的蓬勃发展，海洋科学家和广大海洋工作者为了认识海洋，掌握海洋规律以便更好地利用海洋，希望得到能生动形象地反映海洋状况的海流图集。为了满足这种需要，大气物理所和国家海洋信息中心根据计算海流和实测海流，于 1996 年联合汇编出版了我国首册《太平洋及中国近海表层海流图集》^[3]。该图集曾提供给国内军队和其他有关部门参考使用，并被美国、意大利、澳大利亚、韩国和泰国的一些研究机构和大学图书馆收藏。

3 近海和区域三维海洋环流模式的发展及其应用

3.1 近海和区域斜压海洋环流模式在南海中的应用

在“八五”国家重点科技专项计划“南沙群岛及其邻近海区综合科学考察项目”中, 我们的任务是研制一个能够模拟海底地形复杂和多岛屿的南沙海域的斜压海洋模式。从 1993 年开始, 郭冬建等^[19] 基于曾庆存^[1] 提出的海洋—大气耦合模式和张学洪等^[18] 的一些计算设计, 发展了一个 24 层、 η 垂直坐标、C-网格南海斜压模式 (IAP-ROCM 2.1)。该模式水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 最大水深 4 000 m, 四周取闭边界积分了 90 天。计算出了合理的南海海面高度的分布, 上层流分布与观测和以往研究结果比较一致¹⁾。

在发展 IAP-ROCM 2.1 的过程中, 为了取得经验, 我们同时把 POM^[20] 和 Takano 教授^[21] 提供的模式 (简称 TK 模式) 应用于南海。POM 是垂直方向为 σ 坐标的自由表面的 C-网格模式, 它的一个显著特点是它包含了一个二阶动量湍流闭合方案, 以此计算垂直混合系数。TK 模式垂直方向用 Z 坐标, “刚盖”近似, B-网格。计算结果表明, POM 和 TK 对南海环流的基本特征有较好的模拟能力。尽管没有在相同条件下运行这些模式以便进行比较, 但仍然发现这些模式有需要改进的地方。比如: IAP-ROCM 2.1 计算的流场不够光滑, POM 计算的边界流较弱^[22], TK 计算的深层温度偏高等。从 1995 年开始, 游小宝等借鉴和吸收了 不少大气物理所 20 层全球海洋环流模式发展中使用的技术和方法²⁾, 并引进了 POM 和 TK 中更适合于近海计算的一些处理方法和技巧, 建立了适合于南海的另一个 24 层 η 坐标和自由表面的区域斜压海洋环流模式 (IAP-ROCM 2.2), 模式方程和差分格式参见文献 [23]。

通过合适的海面边界和侧开边界条件的处理, 给定黑潮在吕宋以东的流量来考虑黑潮对南海北部环流的影响, 把 IAP-ROCM 2.2 应用于南海, 图 2 给出了这个模式的计算结果。可以看到, 冬季南海的海盆尺度的气旋式环流结构以及南北的两个中尺度气旋式涡旋都被很好的模拟出来, 也较好地模拟了南海暖流、黑潮在巴

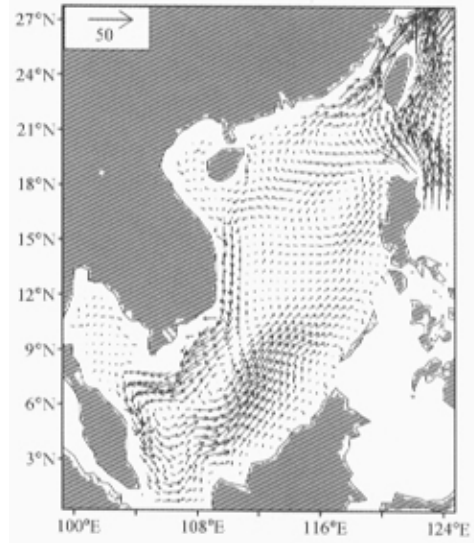


图 2 IAP-ROCM2.2 模拟的 25 m 层的冬季南海环流 (单位: cm s^{-1})

1) 郭忠信等, “八五”国家重点科技专项计划专题研究报告: 南沙海域水团与环流结构及海流数值模拟, 1995, 86~106.

2) Zhang Xuehong, Chen Keming, Jin Xiangze, Lin Wuyin, Yu Yongqiang, User guide for an oceanic general circulation model, 1993.

士海峡的入侵和流动路径的反气旋式弯曲等,南海的西边界流和南海暖流的流动流经都比较合理。

3.2 三重嵌套的中国近海和区域斜压海洋环流模式

国外的大洋环流模式已经具有相当高的水平^[24, 25],但因为不包括陆架区,都没能很好地模拟出中国近海海流。国外一些专门研究南海的区域环流模式^[26~28]也都未能完全地计算出冬季的南海暖流和黑潮对南海北部环流的影响。Chao等^[29]用东北风的松弛也只能模拟出12月到翌年4月冬季的南海暖流。开边界处理欠妥可能是问题的主要原因之一。如像在IAP-ROCM 1.2模式中所做的那样,把渤海、黄海、东海、南海和西太平洋作为一个整体海域进行计算,对于南海来说可以避免不必要的开边界处理,又能充分考虑黑潮对于中国近海环流的影响,这会有利于计算南海和整个中国海海流。为兼顾对高精度海流结构的需求和降低计算消耗,游小宝等^[30]于2000年又发展了一个三重嵌套的区域斜压海洋环流模式(IAP-ROCM2.3)。三个区域分别为: I: ($62^{\circ}\text{S}\sim 62^{\circ}\text{N}, 99\sim 289^{\circ}\text{E}$), 水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$, 几乎包括整个太平洋; II: ($0\sim 51^{\circ}\text{N}; 99\sim 143^{\circ}\text{E}$), 水平分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$, 包括整个中国近海和日本海, 黑潮主体在此区域; III: ($16\sim 35^{\circ}\text{N}, 110\sim 135^{\circ}\text{E}$), 水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。三个区域最大水深都取3000 m, 垂直方向24层。在Hellerman和Rosenstein气候风应力^[31]强迫和恢复海面热盐条件下(海表温度和盐度取自Levitus资料^[32, 33])。I区域模式积分250年后为II区域模式提供随时间变化的侧边界条件以及海面高度、温、盐、流相匹配的初始场。II区域模式积分了80年后, 提供初值和边值给III区域, III区域模式也积分了80年, 模式海洋已经基本达到平衡状态。对模式积分最后一年的结果进行了分析。I区域模式再现了太平洋存在的一些大的流系和涡旋, 模拟出了黑潮、北赤道流、北赤道逆流、赤道潜流和棉兰老海流以及棉兰老涡旋和哈

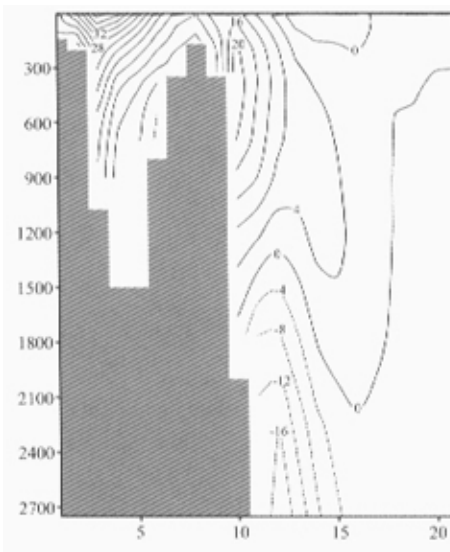


图3 IAP-ROCM2.3模拟的Pcm1-2-W和Pcm1-2-E断面流速(间隔: 4 cm s^{-1})

马黑拉涡旋的季节变化。另外,再现的太平洋海面高度分布的基本特征和赤道太平洋区域的槽脊结构与观测结果相当一致。这表明I区域模式为II区域模式提供的初值和侧边界条件是可信的。II区域模式模拟出了中国近海人们所熟知的沿岸流系和暖流系统以及它们的季节变化。比如: 黄海暖流冬季顺风流动最强, 其他季节较弱, 夏季几乎消失; 南海海流的季节性转向等都与实况和以往的研究结果相符。III区域模式比II区域模式更精细地揭示出了台湾周围的流况: 相对的强流带和弱流区分辨得很清楚; 在一些层上南海暖流终年绕台湾浅滩向北流过台湾海峡; 图3给出由III区域模式计算的一个西北-东南向断面[从($126^{\circ}\text{E}, 28^{\circ}\text{N}$)至($131^{\circ}\text{E}, 23^{\circ}\text{N}$)]上秋季的流速分布。这个断面与中日黑潮

合作调查使用的一部分 Pcml-2-W 和 Pcml-2-E 断面连接起来的位置相近。可以看到,黑潮核心位于陆坡上,深层出现弱的南向逆流;琉球海流核心位于地形坡度最陡的地方,特别是位于 500~600 m 之间的大于 20 cm s^{-1} 的最大流速与 OA 测站在 570 m 观测到的流速值 19.8 cm s^{-1} 非常接近^[34]。但是计算的琉球潜流比观测值过强可能是因为取 3000 m 最大水深造成的。

3.4 中国近海环流模式的资料同化系统

由于海洋观测的困难性,目前的观测数据无论在空间上还是在时间上都还很有限和不连续,对海洋状态缺乏完整和可信的描述。解决这一问题的途径之一是发展四维资料同化系统。由 Smith^[35] 发起的全球海洋资料同化实验 (GODAE) 目前已进入执行阶段,国内,周广庆等¹⁾ 基于大洋环流模式和变分原理建立了一个全球海洋资料同化系统。区域海洋资料同化也是 GODAE 的重要内容。主要发达国家都在积极攻关并在业务上加以应用。在此基础上开发的区域海洋再分析资料集对于研究区域海洋环境具有广泛的科学应用价值。

在上述嵌套的海洋环流模式基础上,游小宝等²⁾ 于 2002 年初步建立了一个中国近海的资料同化分析系统,并拟建立长时间系列的中国近海海洋变量再分析资料集,以便为近海环流的研究和预测提供资料和手段。同化方案采用基于变分原理的最优插值方法。变分方法避免了传统 OI 方法在选取观测资料上高代价和任意性,使得空间上所有的观测资料都可以用于同化分析。同化方案中模式协方差矩阵考虑了水平各项异性并采用共轭梯度方法通过迭代求解修正量,但没有考虑垂向相关。

目前,在同化分析中只做温度场的同化,通过动力学模式产生相应的盐度场和流场。同化区域包括整个中国海 ($0\sim 40^\circ\text{N}$, $100\sim 140^\circ\text{E}$),采用的资料包括 $1^\circ\times 1^\circ$ 的全球网格海表温度分析场^[36]、1998 年世界大洋数据集^[37] 中海温的垂直剖面如 CTD、XBT 和 MBT 资

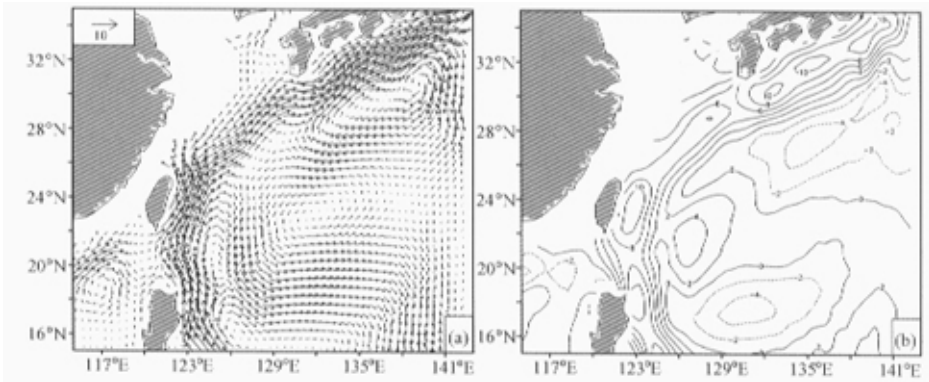


图 4 1982 年 6 月同化与未同化模式计算流速的差别

(a) 90 m 层上的流速差矢量,单位: cm s^{-1} ; (b) 流速差等值线,间隔: 2 cm s^{-1}

1) 周广庆、李旭,一个基于大洋环流的全球海洋资料同化系统,手稿。

2) You Xiaobao, Li Rongfeng, Zhou Guangqing et al., Sea Temperature Variational Data Assimilation in the China Sea and Its Adjacent Areas, LASG Annual Report 2002, 188~192.

料和欧洲中心再分析风应力 (ERA15)^[36]。采用上述模式气候积分最后一年的结果作为初值, 用 1979 年~1989 年欧洲中心风应力驱动模式, 并在模式积分到 1981 年 11 月时开始资料同化。同时我们选取在相同风应力驱动下未加入同化分析的模式积分资料作为比较。带有海温资料同化系统的三维环流模式版本我们称之为 IAP-ROCM 2.3。

图 4 是 1982 年 6 月份同化与未同化模式计算结果的差别。可以看到黑潮区同化后的结果更为真实, 整个东海黑潮的流速增大, 流轴更集中。特别是在台湾以东和日本以南, 在 90 m 层上的流速增加 10 cm s^{-1} 以上。而且出现了黑潮逆流和副热带逆流。图 5 为 8 月份 30 m 层的温度水平分布。未同化模式和 Levitus^[37] 气候资料均未显示夏季由闭合等温线所刻画的海黄冷水团, 但是同化模式结果与观测的海黄冷水团无论其位置还是其强度都十分相近。这结果表明, 同化模式大大提高了对海洋环流模拟的真实性。

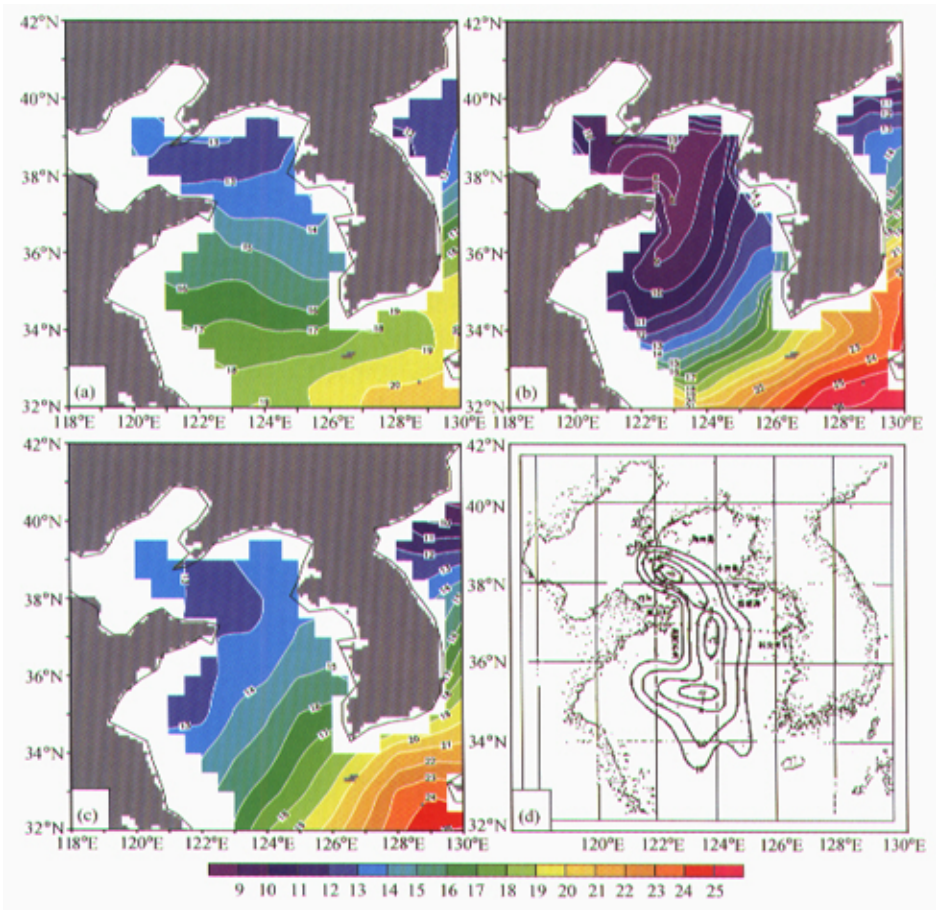


图 5 8 月份水温分布

(a) 未同化模式 30 m 层计算结果; (b) 同化模式 30 m 层分析结果;
(c) Levitus^[37] 30 m 层资料; (d) 实测底层水温分布^[29]

致谢: 特别感谢曾庆存、日本筑波大学 Takano Kenzo 和中国科学院海洋研究所管秉贤教授的关心和帮助。曾庆存教授对模式的发展提供了具体的意见和建议, Takano 和管秉贤教授不断提供资料和回答有关的问题, Takano 教授的斜压海洋模式在南海刚刚能运行就提供给我们学习使用; 感谢包宁、陈克明和金向洋对近海环流模式发展所给予的许多帮助; 感谢朱江和周广庆教授在资料同化研究中给予的无私帮助。

参 考 文 献

- 1 Zeng Qingcun, Some numerical ocean-atmosphere coupling models, in: *Proceedings of the First International Symposium on Integrated Global Ocean Modelling*, Tullin, USSR, 1983.
- 2 Zeng Qingcun, Ji Zhongzhen, and Li Rongfeng, A Numerical Model of Offshore Currents and Some Tests, in: *Proceedings of the International Symposium on Oil Development Environment of the South China Sea*, Dec. 4-7, 1985, Guangzhou, China, 1985, 15~21.
- 3 曾庆存、侯文峰、李荣凤, 太平洋及中国近海表层海流图集, 北京: 海洋出版社, 1996, 95~105.
- 4 Zeng Qingcun, Ji Zhongzhen, Li Rongfeng et al. . A Numerical Simulation of the South China Sea Current, (1) Typical Mean Monthly Current in Winter, in: *Proceedings of the International Symposium on Oil Development Environment of the South China Sea*, Dec. 4-7, 1985, Guangzhou, China, 1985, 1~14.
- 5 曾庆存、李荣凤、季仲贞等, 南海月平均流的计算, 大气科学, 1989, **13** (2), 127~138.
- 6 管秉贤、陈上及, 中国近海的海流系统, 全国海洋综合调查报告 (第五册, 第六章), 1964, 1~85.
- 7 管秉贤, 南海暖流的新证据, 海洋科学 (增刊), 1978, 100~103.
- 8 管秉贤, 南海暖流 (广东外海一支冬季逆风流动的海流, 海洋与湖沼, 1978, **9** (2), 117~127.
- 9 李荣凤、季仲贞、曾庆存, 西太平洋洋流数值模拟, 海洋环流研讨会论文集, 北京: 海洋出版社, 1992, 115~126.
- 10 柯佩辉、仇德忠、李荣凤等, 南沙群岛海区夏季海流数值模拟, 南沙群岛及其邻近海区海洋环境论文集 (一), 武汉: 湖北科学技术出版社, 1991, 12~17.
- 11 Li Rongfeng, Zeng Qingcun, Ji Zhongzhen et al. . Numerical Simulation for a northeastward flowing current from area off the eastern Hainan Island to Tsugaru/Soya Strait, Tokyo, *La mer*, 1992, **30**, 229~238.
- 12 李荣凤、曾庆存, 冬季中国海及其邻近海域海流系统的数值模拟, 中国科学 (B辑), 1993, **23** (12), 1320~1338.
- 13 管秉贤, 中国东南近海冬季逆风海流, 青岛: 中国海洋大学出版社, 2002, 267pp.
- 14 李荣凤、曾庆存、甘子钧等, 冬季南海暖流和台湾海峡暖流的数值模拟, 自然科学进展, 1993, **3** (1), 21~25.
- 15 管秉贤, 东海海流结构及涡旋特征概述, 海洋科学集刊, 1986, **27**, 1~21.
- 16 万国洪、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, 海洋环流研讨会论文集, 北京: 海洋出版社, 1992, 13~27.
- 17 Lie, H. J. , and C. H. Cho, On the origin of the Tsushima Warm Current, *J. Geophys. Res.* , 1994, **99**, 25081~25091.
- 18 张学洪、曾庆存, 大洋环流数值模式的计算设计, 海洋环流研讨会论文集, 北京: 海洋出版社, 1992, 66~81.
- 19 Guo Dongjian, Li Rongfeng, and Zeng Qingcun, Development of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. In *Proceedings of the Circulation Research of the East Asian Marginal Seas International Symposium*, 24-26 January, 1994, Fukuoka, Japan, 62~65.
- 20 Blumberg, A. F. , and G. L. Mellor, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three Dimensional Coastal Ocean Models* (N. S. Heaps ed.), American Geophysical Union, 1987, 1~16.
- 21 Takano, K. , A. Harashima, and T. Namba, A numerical simulation of the circulation in the South China Sea-

- Preliminary results, *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1998, **37**(2), 165~182.
- 22 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, *海洋学报*, 2001, **23** (6), 1~10.
- 23 Li Rongfeng, You Xiaobao, and Prunchan Wongwises, A Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, ISBN 974-90322-1-1, Bangkok, Thailand.
- 24 Semtner, A. J., and R. M. Chervin, Ocean general circulation from a global eddy resolving model, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 5493~5550.
- 25 Metzger, E. J., and H. E. Hurlburt, Coupled Dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea, and the Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(C5), 12331~12352.
- 26 Pohlmann, T., A three dimensional circulation model of the south China sea, In: *Three-Dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamics*, (J. C. J Nihoul and B. M. Jamart eds.), Elsevier, New York, 1987, 245~268.
- 27 Shaw, P. T., and S. Y. Chao, Surface circulation in the South China Sea, *Deep-Sea Research*, 1994, **41**(11/12), 1663~1683.
- 28 Peter C. Chu, and C. P. Chang, South China Sea Warm Pool in Boreal Spring, *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14** (2), 195~206.
- 29 Chao, S. Y., P. T. Shao, and J. Wang, Wind relaxation as a possible cause of the South China Sea Warm Current, *J. Oceanography*, 1995, **51**, 111~132.
- 30 You Xiaobao, Li Rongfeng, and Zeng Qingcun, Numerical Simulation of the Current System in the China Sea by Using a nested Mesh Model. In Proceedings of the Ninth Asian Congress of Fluid Mechanics, May, 27~31, 2002, Isfahan, Iran.
- 31 Hellerman, S., and M. Rosenstein, Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates, *J. Phys. Oceanogr.*, 1983, **13**, 1093~1104.
- 32 Levitus, S., and T. P. Boyer, *World Ocean Atlas 1994 Volume 4; Temperature*. NOAA Atlas NESDIS 4, U. S. Department of Commerce, Washington, D. C., 1994, 117 pp.
- 33 Levitus, S., R. Burgett, and T. P. Boyer, *World Ocean Atlas 1994 Volume 3; Salinity*. NOAA Atlas NESDIS 3, U. S. Department of Commerce, Washington, D. C., 1994, 99 pp.
- 34 袁耀初、高野健三、潘子勤等, 1991年秋季东海黑潮与琉球群岛以东的海流, *中国海洋学文集* (第5集), 北京: 海洋出版社, 1995, 1~11.
- 35 Smith, N. R., and M. Lefevre., Monitoring the oceans in the 2000s: an integrated approach, International Symposium: "The Global Ocean Data Assimilation Experiment"(GODAE) Biarritz, October 15~17, 1997.
- 36 Reynolds, R. W., and T. M. Smith, Improved global sea surface temperature analysis, *J. Climate*, 1994, **6**, 929~948.
- 37 Conkright, M. E., S. Levitus et al., *World Ocean Database 1998*, National Oceanographic Data Center Internal Report 14, 1998.
- 38 Gibson, J. K., P. Källberg, S. Uppala et al., *ECMWF Re-Analysis Project Report Series*, 1997.
- 39 赫崇本等, 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨, *海洋与湖沼*, 1959, **2** (1), 1~14.

The Development and Application of the Oceanic General Circulation Models Part II. the Regional Oceanic General Circulation Models

Li Rongfeng, and You Xiaobao

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

Abstract The article reviews the course that the regional ocean models have been developed and applied by LASG/IAP during the last two decades. All of these models, such as: a regional barotropic ocean model, a 24-level tri-nested baroclinic ocean model with the highest horizontal resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, and a temperature data assimilation system based on the nested model and variational principle, have been successfully used in the numerical simulation of the circulation in the China Sea. In particular, the model with assimilation of temperature data gives a realistic simulation, for example, the strength and width of the Kuroshio and the position of Yellow Sea Cold Water in summer revealed by the model coincide well with the observations.

Key words: barotropic ocean model; baroclinic ocean model; South China Sea warm current, nested model; variational principle; data assimilation