

中国海洋学文集

OCEANOGRAPHY IN CHINA

13

南海海流数值计算及中尺度特征研究

薛惠洁 柴扉 许建平 等著



海洋出版社

中国海洋学文集

13

南海海流数值计算及中尺度特征研究

薛惠洁 柴 扉 许建平 等著

海洋出版社

2001年·北京

内 容 简 介

本文集的论文以 POCM 模式对南海海流进行三维数值计算及由此而得的大量结果为基础, 结合南海季风实验及国家重点基础研究规划项目中大量实测的海流和温度盐度资料, 参考众多学者对南海的研究论文, 经两年的分析而写成。刊出论文 20 篇, 其中, 关于环流、中尺度涡和升降流的论文 15 篇; 关于海峡水交换的论文 2 篇; 关于温盐分布特征和季风暴发的影响及不同季节水团结构的论文 3 篇。

本文集是海外学者与国内学者合作、精心研究的成果。文集内容丰富, 是一本深入了解南海物理海洋学内容的重要文献, 可供科研、教学部门有关人员参考及图书馆收藏。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国海洋学文集. 13/薛惠洁等著. —北京: 海洋出版社, 2000.12

ISBN 7-5027-5408-3

I. 中... II. 薛... III. 海洋学-文集
IV. P7-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 079127 号

责任编辑 陈茂廷

责任印制 刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京海洋印刷厂印刷 新华书店发行所经销

2001 年 12 月第 1 版 2001 年 12 月北京第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 16.5

字数: 419 千字 印数: 1~1200 册

定价: 38.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

序

南海是西太平洋最大的热带边缘海, 面积约为 $350 \times 10^4 \text{km}^2$. 其地形复杂, 海区内岛礁星罗棋布, 海盆最深处可达 5 000 m, 四周又有众多海峡与东海、大平洋、苏禄海、爪哇海及印度洋相通. 南海有着复杂的动力和热力结构, 并有其自身的环流系统, 在海盆尺度环流中还嵌套着许多中尺度的结构.

南海的资源与开发利用, 对于人口众多的周边国家的社会、经济与生活至关重要. 因此, 南海研究一向为国际学术界和周边国家所重视. 但由于历史和自然地理方面的原因, 有关南海海域的海洋和大气科学观测资料处于相对薄弱状态. 直至 20 世纪 60 年代越战期间, 才有了大量主要是上层的 XBT 资料. 进入 80 年代, 鉴于南海海洋资源开发、南海季风在地区海洋大气环境中的重要性等, 开始对南海进行一些规模较大的调查研究, 其中我国也投入了相当的研究力量.

在开展南海调查研究的同时, 也有许多海洋学家作了大量的南海环流数值研究工作, 并且取得了一些有价值的结果. 但是, 对于南海这样的复杂环流系统, 这些工作只能说是初步的, 还有许多的数值模拟工作等待我们去进行, 才能对南海环流的结构和一些中尺度特征等得到更深入的认识. 本文集作者总结了前人有关南海环流数值研究工作, 提出了一些改进方案, 通过数值计算分析, 并结合历史资料的验证, 提出了一些有价值的观点.

薛惠洁、柴扉两位博士身居海外, 教学和科研多有建树, 并且关心祖国海洋科学的发展, 与国内多个单位经常开展交流合作. “南海海流数值计算及中尺度特征研究”文集是他们多年精心研究的成果, 也是与国内学者合作研究的成果. 本文集的出版, 对加强我国南海研究以及对国内外华裔学者合作研究皆有促进作用.

中国科学院 院士

国家海洋局第二海洋研究所 名誉所长 苏纪兰

国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室 主任

2000 年 8 月 18 日于杭州

中国海洋学文集

13

目次

序	苏纪兰	I
南海海流数值计算	薛惠洁 柴 扉 徐丹亚 侍茂崇	1
南海东北部环流的改进逆模式研究	王桂华 薛惠洁 许建平	15
南海东北部黑潮的入侵流套及其环流	薛惠洁 柴 扉 侍茂崇	23
南海中、北部海域主要环流及其季节演变		
..... 柴 扉 薛惠洁 许建平 侍茂崇 蒋松年		39
南海西南部环流	侍茂崇 江明顺 许建平 薛惠洁 柴 扉	57
南海沿岸流特征及其季节变化	薛惠洁 柴 扉 徐丹亚 侍茂崇	64
吕宋海流与吕宋涡旋形成机制研究	侍茂崇 薛惠洁 柴 扉	76
中沙南反气旋涡及周边海流形成和演变机制研究		
..... 侍茂崇 江明顺 柴 扉 薛惠洁		90
南海北陆架区 3 个典型反气旋涡水文特征及演变规律		
..... 柴 扉 薛惠洁 侍茂崇		105
南海升降流区域分布及形成机制分析	柴 扉 薛惠洁 侍茂崇	117
海南岛东部上升流研究	柴 扉 薛惠洁 侍茂崇	129
珠江口及其邻近海域环流模式结构		
..... 薛惠洁 柴 扉 王丽娅 陈介中		138
吕宋海峡水平逆量计算	薛惠洁 柴 扉 侍茂崇	152

台湾海峡水平通量研究	柴 扉 薛惠洁 侍茂崇	168
1998 年夏季南海上层环流与中尺度涡旋观测研究		
.....	许建平 薛惠洁 侍茂崇 刘增宏	178
1998 年南海季风暴发前后海洋环流演变及其成因分析		
.....	潘玉球 许建平 詹华平	188
1998 年夏季风暴发前后南海海洋水文特征及其变异		
.....	许建平 李金洪 刘增宏 朱伯康	197
1998 年春夏季南海若干重要水文特征及其形成机制分析		
.....	许建平 潘玉球 柴 扉 刘增宏 朱伯康	211
1998 年夏冬季节的南海水团及其分布		
.....	刘增宏 许建平 李 磊 侍茂崇	221
用 TOPEX/POSEIDON 资料研究南海海面高度和地转流的季节变化		
.....	刘克修 马继瑞 许建平 韩桂军 范振华	231
附图：南海海流数值计算结果		241
编后语		254

OCEANOGRAPHY IN CHINA

13

CONTENTS

Introduction	<i>Su Jilan</i>	I
A circulation model of the South China Sea		
..... <i>Xue Huijie, Chai Fei, Xu Danya, Shi Maochong</i>		1
Researches of modified inverse model about circulation in the northeast of the South China Sea	<i>Wang Guihua, Xue Huijie, Xu Jianping</i>	15
The loop current incursion of Kuroshio and main circulations in the northeastern South China Sea	<i>Xue Huijie, Chai Fei, Shi Maochong</i>	23
General circulation and its seasonal variation in the northern and central South China Sea	<i>Chai Fei, Xue Huijie, Xu Jianping, Shi Maochong, Jiang Songnian</i>	39
The circulation in south - west area of the South China Sea		
..... <i>Shi Maochong, Jiang Mingshun, Xu Jianping, Xue Huijie, Chai Fei</i>		57
Characteristics and seasonal variation of the coastal currents in the South China Sea		
..... <i>Xue Huijie, Chai Fei, Xu Danya, Shi Maochong</i>		64
Formation of the Luzon Current and the Luzon cyclonic gyre		
..... <i>Shi Maochong, Xue Huijie, Chai Fei</i>		76
Formation of the Zhongsha southern anticyclonic circulation and the circulation in the deep basin of the South China Sea		
..... <i>Shi Maochong, Jiang Mingshun, Chai Fei, Xue Huijie</i>		90
Hydrographic characteristics and seasonal variation of three anticyclonic eddies on the northern continental shelf of the South China Sea		
..... <i>Chai Fei, Xue Huijie, Shi Maochong</i>		105
Formation and distribution of upwelling and downwelling in the South China Sea		
..... <i>Chai Fei, Xue Huijie, Shi Maochong</i>		117
Upwelling east of Hainan Island	<i>Chai Fei, Xue Huijie, Shi Maochong</i>	129
Zhujiang River Estuarine circulation model		
..... <i>Xue Huijie, Chai Fei, Wong Lai-an, Chen Jay-chong</i>		138

Transport through the Luzon Channel and water balance in the South China Sea	
.....	<i>Xue Huijie, Chai Fei, Shi Maochong</i> 152
The study of horizontal transport in the Taiwan Strait	
.....	<i>Chai Fei, Xue Huijie, Shi Maochong</i> 168
Observation and study of the circulation and meso – scale eddies in the upper layer of the South China Sea in the summer of 1998	
.....	<i>Xu Jianping, Xue Huijie, Shi Maochong, Liu Zenghong</i> 178
The evolutional features of oceanic circulations and their reason analysis before and after the eruption of the South China Sea monsoon of 1998	
.....	<i>Pan Yuqiu, Xu Jianping, Zhan Huaping</i> 188
Hydrographic characteristics and its variation of the South China Sea before and after monsoon onset in the summer of 1998	
.....	<i>Xu Jianping, Li Jinhong, Liu Zenghong, Zhu Bokang</i> 197
Several significant hydrographic characteristics and their formation mechanism in the South China Sea during the spring and summer of 1998	
.....	<i>Xu Jianping, Pan Yuqiu, Chai Fei, Liu Zenghong, Zhu Bokang</i> 211
Characteristics and distribution of water masses in the South China Sea during the summer and the winter of 1998	<i>Liu Zenghong, Xu Jianping, Li Lei, Shi Maochong</i> 221
Sea surface height anomaly and geostrophic circulation variations in the South China Sea from POPEX/POSEIDON altimetry	
.....	<i>Liu Kexiu, Ma Jirui, Xu Jianping, Han Guijun, Fan Zhenhua</i> 231

南海海流数值计算

薛惠洁^{1,2}, 柴 扉^{1,2}, 徐丹亚³, 侍茂崇^{2,4}

1. School of Marine Science, University of Maine, Orono, ME 04469-5741, U. S. A.

2. 青岛海洋大学, 青岛 266003.

3. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301.

4. 国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 杭州 310012.

摘要: 本文引入普林斯顿海洋模式(POM)用以计算南海及其邻近海域的环流. 模式具有 151×101 水平网格点, 垂直方向以 σ 坐标系方法分为22层. 本模式以细网格方法, 保持了真实的海岸线和海岛形状, 刻画出南海6 000 m的真实地形, 及其相应的流动. 初始值和侧向开边界条件, 取自美国海军研究生院 $\frac{1}{4} \times \frac{1}{4} \times 20$ 全球模式结果. 将1988~1997年的10 a中1月份流速分量(u , v)、温度(T)和盐度(S)值分别加以平均, 取作初始量; 将1988~1997年的诸月平均值, 内插到我们的模式中开边界的网格点上, 以此作为逐月侧向热力和动力的强迫条件. 海面风场、净热通量和淡水通量则取自海洋大气综合资料库(COADS). 在展示模式结果时, 为了方便观察, 我们将 σ 坐标各层用三次样条插值方法, 求出实际的等深面上要素分布.

关键词: 普林斯顿模式; 环流; 海面风; 通量; 南海

1 引言

南海是西太平洋最大的热带边缘海, 面积约为 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 是连接太平洋和印度洋的一条重要通道, 向来为国际学术界和周边国家所重视. 对于超过地球总人口数60%的南海周边国家的社会、经济与生活, 季风的深远影响至关重要. 南海季风的研究, 始终是大气、海洋学界关注的一个热点^{[1,2],1)}. 近期研究表明, 南海季风与影响全球的厄尔尼诺现象有着密切关系^[3~6]. 但是季风的研究, 必须以环流的研究为基础. 作为大气下垫面海水动力和热力状况, 与上层大气之间有着复杂的交换和反馈机制. 缺乏海洋这一大背景场, 季风的研究就很难达到预期效果.

南海有着复杂的地形、动力和热力结构. 海区内岛礁星罗棋布, 四周又有台湾海峡、吕宋海峡、民都洛海峡、巴拉巴克海峡、卡利马塔海峡和马六甲海峡与东海、太平洋、苏禄海、爪哇海及印度洋相通, 并与它们进行水交换(见图1). 但是, 除了吕宋海峡深度超过2 000 m、民都洛海峡超过1 000 m以外, 多数海峡深度不超过100 m. 由此可见, 南海是一个封闭程度很高的海.

南海海域宽广、深邃, 有其自身环流系统. 它位于季风区, 其纵轴与季风走向颇为一致, 十分有利于漂流的发展. 其环流形式受季风影响显著. 更由于其复杂地形, 在大环流的背景上存在许多中小涡旋的结构.

1) 南海季风实验计划, 南海季风实验项目办公室. The South China Sea Monsoon Experiment Science Plan, January, 1995.

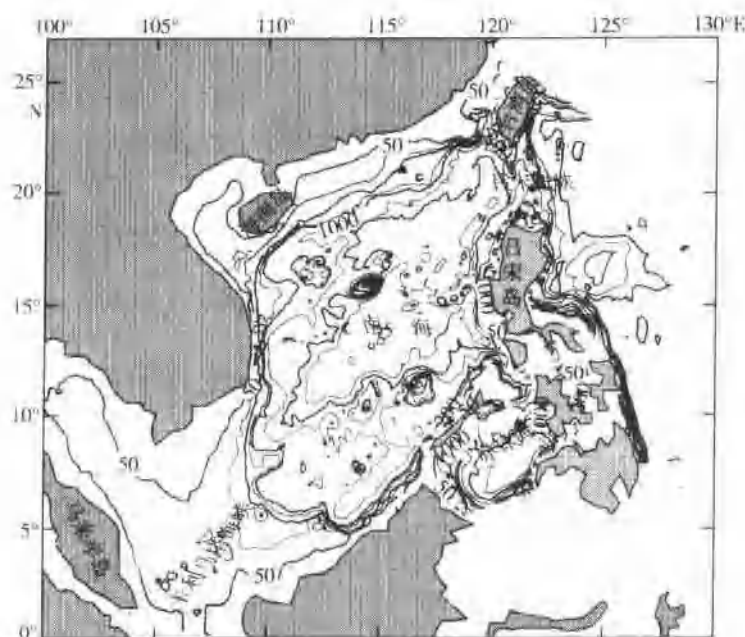


图1 南海海底地形及周边环境

等深线为 50, 100, 200, 1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000 m.

由于历史和自然地理方面的原因,有关南海海域的海洋和大气科学观测资料处于相对薄弱状态.直至 20 世纪 60 年代,鉴于南海海洋资源开发、南海季风在地区和全球海洋大气环境中的重要性,人们才开始对南海进行大规模调查研究.但是,这些调查研究主要集中在夏季和冬季这两个季节,所以对南海季风的发生发展过程却知之不多.鉴于南海海域宽广,且又缺乏实际观测资料,因此用数值模拟是经济而又实用的方法之一.在数值模拟的基础上,用实际观测资料加以验证,不断改进、修正数值模拟的结果,使其能够反映实际运动状态,则是我们最终目的.

迄今为止,已经有许多海洋学家作了大量的南海数值计算工作^[7~15],并且取得了一些有价值的结果.但是,许多模式分辨率较低,对一些重要的动力和热力强迫过程过于简化,其结果不能给出南海环流的详细结构和一些中小尺度涡变化特征.我们的工作将对上述的不足作出相应改进,其要点如下:

(1) 扩大计算区域.

我们的模式不仅包括全部南海水域,而且覆盖与南海相邻的部分水域,特别是东边界一直延伸到 125°E,这样就可以充分展现黑潮水向南海入侵过程,免去一些人为的假定.

(2) 缩小了南海北部陆架陆坡区计算网格的间距,大大提高了水平方向的分辨率.

(3) 表面强迫过程更完善,开边界条件相对一致.

(4) 对一些热力、动力和水量平衡过程(从而也是盐量平衡过程)进行长达 20 a 的时间积分,并且取得较稳定的结果,由此我们可以讨论一些物理现象的季节变化和彼此相关过程.

2 模式概述

2.1 动力方程

在 σ 坐标系下,假定海水密度为常数,则模式的全动力方程为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD + gD \frac{\partial \eta}{\partial t} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M \partial u}{D \partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M D \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M D \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M \partial v}{D \partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M D \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M D \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

其中, u, v 分别为速度的东分量和北分量; K_M, A_M 分别为水平和垂直涡动系数; $D = H + \eta$, 其中 $H(x, y), \eta(x, y, t)$ 分别为水深和海面起伏. σ 从海面 ($\sigma = 0$) 到海底 ($\sigma = -1$). ω 是 σ 变换下的垂向速度分量, 与真实垂向速度有如下关系:

$$\omega = w - u \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - v \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) - \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right). \quad (4)$$

模式采用 Mellor 和 Yamada (1982) 建立的湍流封闭子模式, 其模式方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 D}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q \partial q^2}{D \partial \sigma} \right) \frac{2K_M}{D} \\ & \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] - \frac{2Dq^2}{A_1} + \frac{\partial}{\partial x} \left(DA_H \frac{\partial q^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DA_H \frac{\partial q^2}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial uq^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial vq^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 l D}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q \partial q^2 l}{D \partial \sigma} \right) + \frac{E_1 l K_M}{D} \\ & \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] - \frac{Dq^3}{B_1} \bar{W} + \frac{\partial}{\partial x} \left(DA_H \frac{\partial q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DA_H \frac{\partial q^2 l}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $q^2/2, l$ 分别代表湍动能和湍宏观尺度; ρ 为水密度, 取 $\rho = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 壁函数 $\bar{W}$ 定义为:

$$\bar{W} = 1 + E_2 \left(\frac{l}{kL} \right)^2, \quad (7)$$

其中,

$$(L)^{-1} = (\eta - z)^{-1} + (H + z)^{-1}, \quad (8)$$

混合系数 K_M 和 K_q 通过如下关系式求得:

$$K_M = lqS_M, \quad (9)$$

$$K_q = lqS_q, \quad (10)$$

S_M 和 S_q 是稳定性函数, 通过下式获得:

$$G_M = \frac{l^2}{q^2 D} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right]^{1/4}, \quad (11)$$

$$S_M (1 + 6A_1^2 G_M - 9A_1 A_2 G_H) = A_1 (1 - 3C_1), \quad (12)$$

$$S_q = 0.2, \quad (13)$$

方程 (5) ~ (13) 中, A_1, A_2, C_1, E_1, E_2 是经验常数, 其值分别为:

$$(A_1, A_2, E_1, E_2, C_1) = (0.92, 0.74, 1.8, 1.33, 0.08).$$

2.2 模式主要特征

用于计算南海及其邻近海域的环流模式, 是 Blumberg 和 Mellor^[16] 建立起来的一个三维、

斜压、 σ 坐标、C 网格、自由面、原始方程组的环流模式，即普林斯顿大洋模式 (Princeton Ocean Model, 简化为 POM)。其主要特征为：

(1) 垂直混合系数由二阶湍动能闭合的子模式确定。

(2) 水平网格采用曲线正交坐标和 Arakawa C 网格系统，变量呈交错分布，使南北边界正好经过 V-格点，东西边界正好经过 U-格点。

(3) 垂直方向采用 σ 坐标，垂直速度和湍流变量落在层与层之间的界面上，而其他变量则落在每层中间。

(4) 水平差分格式采用显式，垂直差分格式采用隐式，隐式差分可以消除垂直坐标的时间限制，并可以在表面和底边界处采用比较细微的垂直分辨率。

(5) 模式采用自由表面和一个分裂的步长，模式由外模式和内模式两部分构成，其中外模式为一个二维模式，用基于 CFL 条件和外波波速的短时间尺度，内模式为一个三维模式，采用基于 CFL 条件和外波波速的长时间尺度。

2.3 计算网格

该模式具有 151×101 水平网格点 (图 2)，以 σ 坐标系方法将垂直方向分为 22 层。模式域内保持了真实的海岸线 and 海岛形状。这种网格的划分可以很好地刻画出南海 6 000 m 的真实地形，及其相应的足够细微的流动。在展示模式结果时，为了方便观察，我们将 σ 坐标各层用三次样条插值方法，求出实际的等深面上要素分布。

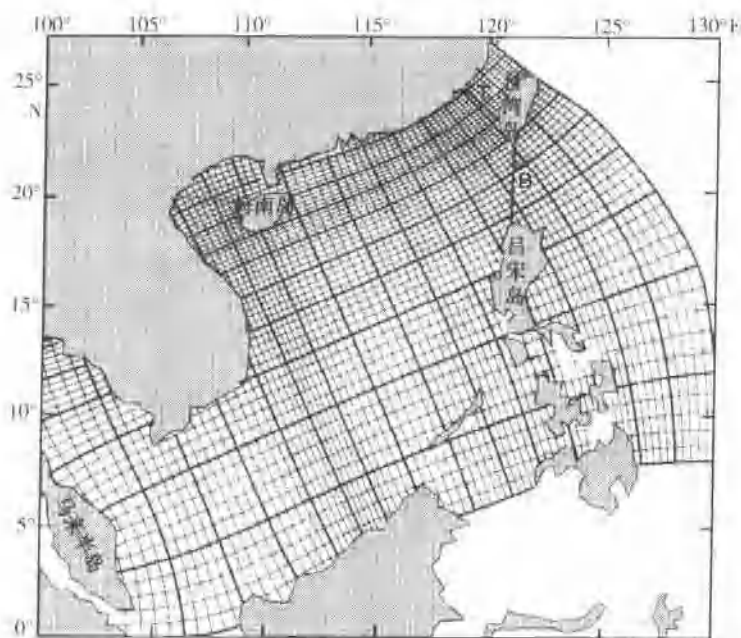


图 2 南海数值计算中水平网格的划分

通过台湾海峡水交换 (断面 T) 和巴士海峡水交换 (断面 B)

2.4 初始条件和积分

初始值取自美国海军研究生院 $\frac{1}{4} \times \frac{1}{4} \times 20$ 全球模式结果，将 1988~1997 年的 10 a 中 1 月份流速分量 (u , v)、温度 (T) 和盐度 (S) 值分别加以平均，取作初始量，以此为基础

开始积分. 积分内模态时间步长为 720 s, 外模态时间步长为 20 s. 模式计算是在 DEC α 工作站上进行. 每 5 d 输出一个结果.

3 边界条件

边界条件正确与否, 是计算结果好坏的决定因素. 其中包括侧向水域开边界条件、海面气候条件、热通量条件和大陆径流注入及蒸发条件.

因为南海海域内, 潮汐余流的量值在海流总体量值中只占一个小的分量, 所以在我们的计算模式中不考虑潮汐效应. 许多研究表明, 形成南海环流的主要因子是: 海面季风作用、黑潮水的入侵、径流和海面热通量的影响. 鉴于此, 我们将海面的强迫因子列为: 逐月风场、热通量、短波辐射和淡水净通量 (蒸发量减去降水量). 这些因子的值皆取自美国海洋和大气综合数据库 (COADS) 中.

3.1 侧向水域开边界条件

将美国海军研究生院全球模式中流速、流向、盐度和温度的月平均结果 (u , v , S , T), 内插到我们模式中的开边界网格点上, 以此作为逐月侧向热力和动力的强迫条件. 经我们计算, 北赤道流流量约为 $30 \times 10^6 \sim 45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 黑潮源头水流量约为 $25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 穿过台湾海峡流量约为 $1 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 穿过卡利马塔海峡与爪哇海之间水交换量约为 $-0.37 \times 10^6 \sim 2.75 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 棉兰老岛海流则接近 $10 \times 10^6 \sim 20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. 在全年中, 流进值出水量是平衡的.

一般来说, 在计算模式中, 开边界条件是很难处理的. 在我们模式中将采用如下一些方式: 对垂直于开边界的流速分量, 采用重力波辐射条件; 温度、盐度和平行于边界的流速计算, 采用迎风差分格式. 由美国海军研究生院的全球模式计算出的入流速度, 作为我们的动力边界条件.

3.2 表面气候条件

12 个月平均气候风场资料取自海洋大气综合资料库 (COADS). 通常用 4 个季度月来描述不同季节海面风速分布. 1 月代表冬季, 4 月为冬季向夏季过渡月, 7 月代表夏季, 10 月为夏季向冬季过渡月. 地处热带的南海, 季风场主要表现为冬季与夏季特征. 冬季是 11 月至翌年 3 月, 夏季是 5~9 月. 4 月和 10 月为过渡阶段.

冬季, 南海气候主要为来自西北利亚冷高压控制, 它以寒潮形式向南移动. 一般情况下, 当冷空气移至中国大陆南方后, 便减弱东移入海, 但当冷空气较强, 冷高压直达中国东南沿海时, 高压前沿的东北气流便会穿过台湾海峡, 直下南海. 由于狭管效应, 南下东北季风会有所加强, 造成南海中部风力较南部和北部风力增大的形势. 东北风直下南海, 在赤道附近, 由于气压场的减弱及科氏力的变低, 风场明显减弱而且分支: 一支气流呈逆时针转向, 在苏门答腊东部形成气旋涡, 而另一支则继续南下并越过赤道, 成为冬半年最强的越赤道气流. 这支气流对南半球影响很大.

因此, 冬季海面盛行温度较低的东北风, 风向大致与南海的菱形长轴平行, 且海域北部、南部风速弱于中部. 1 月东北风风速最强, 平均风速超过 9 m/s. 由于气温偏低、风速强盛, 因此从 12 月至翌年 2 月, 南海大部海面是失热的, 即净热通量为负值.

夏季风场与冬季截然相反, 西南季风吹速整个南海, 风力仍以中部最强 (8 m/s), 只有西南部和东北部较弱. 气流主要来自南半球, 越赤道气流在 105°E 附近北上, 受科氏力影响, 从东南风转为西南风. 5~9 月, 海面主要为暖而弱的西南季风控制, 平均风速约为 6 m/s.

在此期间海面吸收热量,且从北向南逐渐增加。

春季,在南海并无代表性风场,4月是冬季风场向夏季过渡的缓变阶段,5月上、下旬是冬季风场向夏季过渡的突变阶段。4月,随着太阳辐射在北半球的增强,高气压中心已经移到东太平洋上,南海为西伸的副热带高压脊控制,因此海区以吹东风为主,总体而言,风速较小,呈反气旋式弯曲。5月上旬,开始进入夏季风初级阶段,15°N以南的东风分量减小,而南风分量增大,到5月中旬,夏季风场已基本定型^[17]。

10月,夏季风场已基本消失,冬季风型已初步建立,东北季风已深入到12.5°N,但是风力还不够强大和稳定(图3 a, b, c, d)。

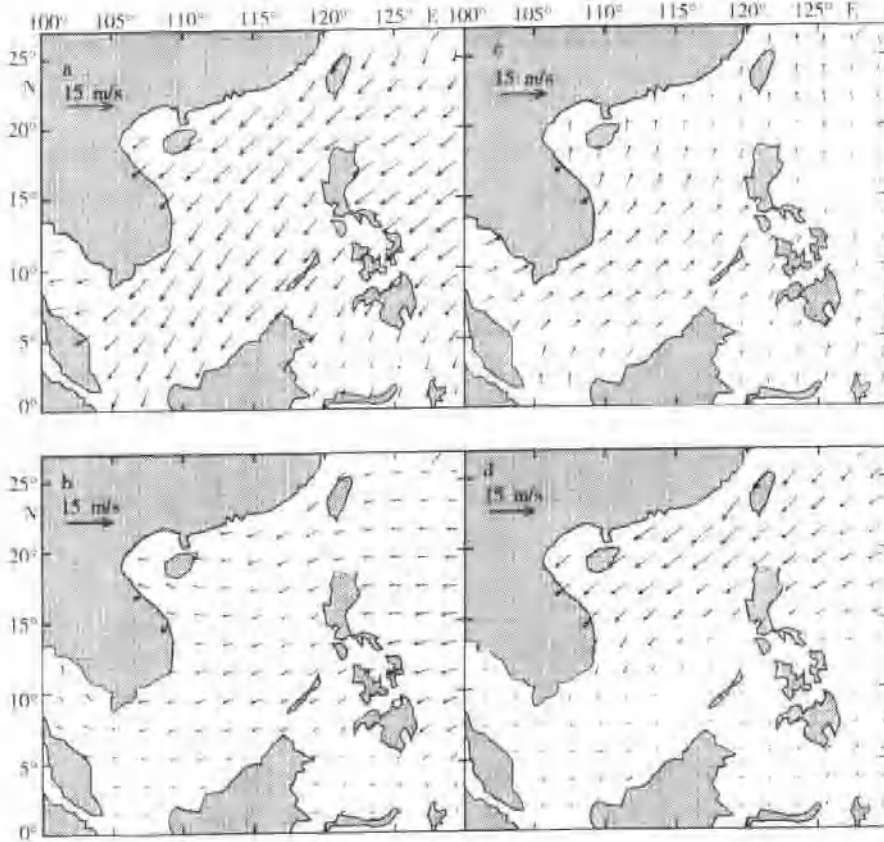


图3 海面风场(引自COADS)

a. 1月, b. 4月, c. 7月, d. 10月

海面风应力采用块体公式计算:

$$\vec{\tau} = \rho C_d \vec{V} |\vec{V}|,$$

式中, $\vec{\tau}$ 为风应力; ρ 为空气密度; C_d 为海面风曳力系数; $\vec{V}$ 为风速矢量, $|\vec{V}|$ 为风速矢量的模。 C_d 与 10 m 高度处平均风速 $\bar{U}_{10}$ 的相关方程为:

$$C_d = (0.8699 + 0.0599 \bar{U}_{10}) \times 10^{-3} \quad \bar{U}_{10} \leq 10 \text{ m/s},$$

$$C_d = (0.8719 + 0.0704 \bar{U}_{10}) \times 10^{-3} \quad \bar{U}_{10} > 10 \text{ m/s}.$$

3.3 径流

湄公河和珠江,是注入南海淡水最多的两条河流。入海径流对河口及其邻近区域的环流

会产生显著影响。夏季,在西南季风影响下,珠江冲淡水向东北方向运动,不仅可以到达东沙群岛,而且可以影响台湾浅滩。在一些时候,甚至可以穿过台湾海峡,到达东海。冲淡水可以覆盖 21°N 以北的广东东部、福建西部的广阔水域。湄公河冲淡水则影响到越南海岸东南部大部水域。冬季,在东北季风影响下,珠江冲淡水的核心转而向西,经粤西沿岸,到琼州海峡东口,此时一部分冲淡水穿过海峡到达北部湾,而另一部分冲淡水则转而向南,沿海南岛东部海域流动。湄公河冲淡水则沿岸南下,进入泰国湾。在我们的模式中,湄公河的年平均径流量取为 $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$,珠江的年平均径流量取为 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ^[18]。径流量的季节变化如表 1 所示。

表 1 湄公河和珠江的径流量诸月分配的百分数

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
径流量分配 (%)	2.162	2.425	3.372	7.700	14.631	19.233	13.622	13.452	10.371	6.070	4.062	2.900

3.4 热通量、短波辐射及淡水通量

3.4.1 热通量

热通量是指通过海而热交换量之总和。其主要热交换分量有:从海面进入海水中的太阳辐射(短波)、有效回辐射(长波)、蒸发潜热(包括降水)和湍流热交换。负值表示海面失热,正值表示海而得热。

12 个月海而净热通量取自海洋大气综合资料库(COADS)。10 月, 15°N 以北热通量全部变为负值(失热),11 月负值区域移到 8°N 以北,12 月则全海域均为负值。1 月西南海域开始增温,至 4 月,除台湾海峡外,全部海域均为正值。南海中部热收入最多,为 $120\text{ W}/\text{m}^2$ 。5~7 月, $120\text{ W}/\text{m}^2$ 等值线逐渐向北移动。8 月以后,热通量开始减小(见图 4a, b, c, d)。

3.4.2 淡水通量

淡水通量是指蒸发量减去降水量之后的剩余量。

12 个月海面淡水通量取自海洋大气综合资料库(COADS)。逐月淡水通量有如下特征:

(1) 北部海域冬半年(10 月至翌年 4 月),蒸发量大于降水量,因此淡水通量为正;夏半年(5~9 月)蒸发量小于降水量,淡水通量为负。全年平均结果,蒸发量大于降水量。淡水通量最大正值出现在 12 月,淡水通量最大负值出现在 8 月。

(2) 南海中部海域淡水通量月变化特征与北部相似,但是全年蒸发与降水基本平衡。淡水通量最大正值出现在 1 月,淡水通量最大负值出现在 8 月。

(3) 南海西南部海域淡水通量基本为负值,即全年降水大于蒸发。最大负值出现在 10~12 月。

(4) 吕宋岛西部是淡水通量特殊区,南海中北部最大负值区就出现在这里。6~9 月,负值基本都在 $0.5\sim0.8\text{ m}$ 之间。它表明这里降水远超过蒸发。最大负值出现区域和后面将要谈及的吕宋涡占据空间是一致的。

4 结果讨论

对该模式积分历时 20 a,在这样长的时间尺度下,可以认为 $4\,000\text{ m}$ 以上海水层的能量已趋稳定。图 5 给出通过台湾海峡、吕宋海峡的海水输运量(见图 5a)和南海与苏禄海内积分动能(见图 5b)的逐年变化。图中表明,像台湾海峡这样浅水域,水量输运年变化很快可以达到稳定,而吕宋海峡水量输运仍然存在年际变化。

我们计算了模式中所有的物理海洋参数的月平均值，以及它们随时间积分的演变过程。这些物理海洋参数包括水平流速、垂直流速、海面起伏、温度场、盐度场、密度场，以及由这些变量延伸出的相关复合变量。例如，总能量、总有效位能、总表面有效位能、总动能、水平辐散、水平相对涡度和动量等。因此，可以从不同侧面对其结果进行广泛讨论。

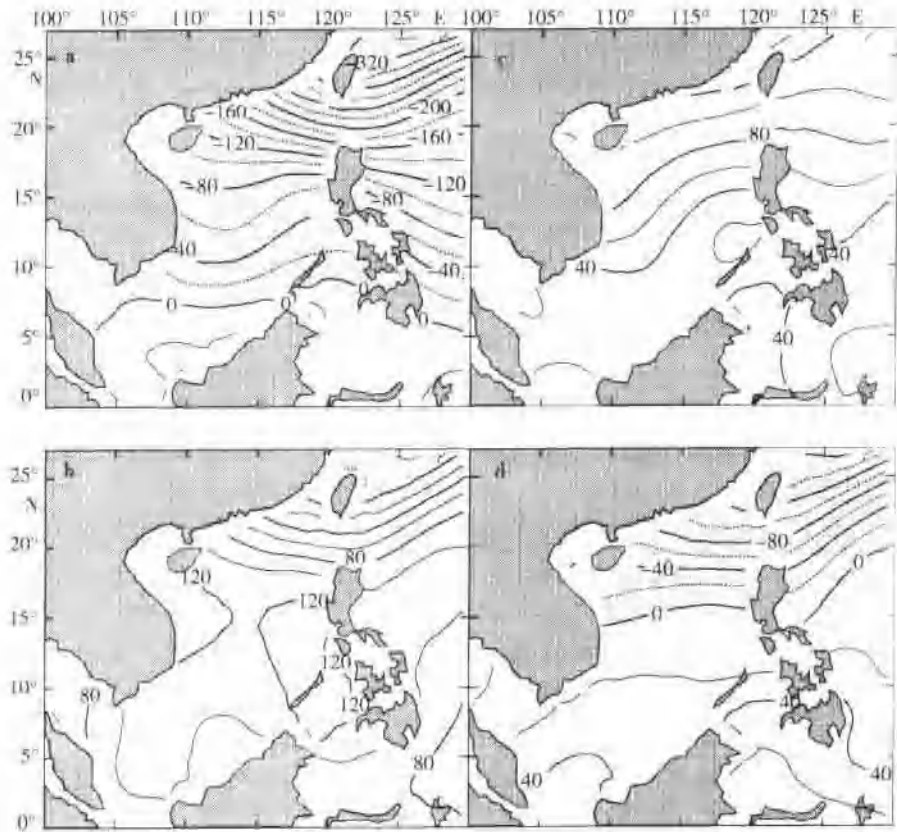


图4 海面热通量 (引自 COADS) (单位: W/m^2)
a. 1月, b. 4月, c. 7月, d. 10月

计算结果表明，在实际的风应力驱动下，具有实际水深和侧边界真实地形的南海海域，呈现众多的大、中尺度环流与涡旋。这是南海环流主要特征。我们认为，斜压调整是形成南海中尺度涡的决定性因子，边界入流和风应力驱动是影响中尺度涡的主要因素，海底地形对中尺度涡旋也有一定作用。中尺度涡旋的演变（时间上的生消和空间上的迁移）是南海环流季节调整的可能方式。基于数值模拟的结果，我们将探讨这些不同尺度环流与涡旋的水平范围、垂直结构、温盐场的配置、大尺度水平辐合、辐散以及与之相关的时空结构。

为了对南海环流特征及其相关的热力、动力学要素有一个全面的了解，根据南海深度（陆架、陆坡、深海）、影响环流的主要因子（风力、黑潮入侵、热盐环流）、海区环流相对独立体系等，将南海环流从以下6个方面进行论述。

4.1 沿岸流

指主体部分位于陆架之上、沿着海岸方向运动的浅海海流。风力作用是沿岸流盛衰的主要驱动因子。具有明显的季节变化和浅海海流特征。

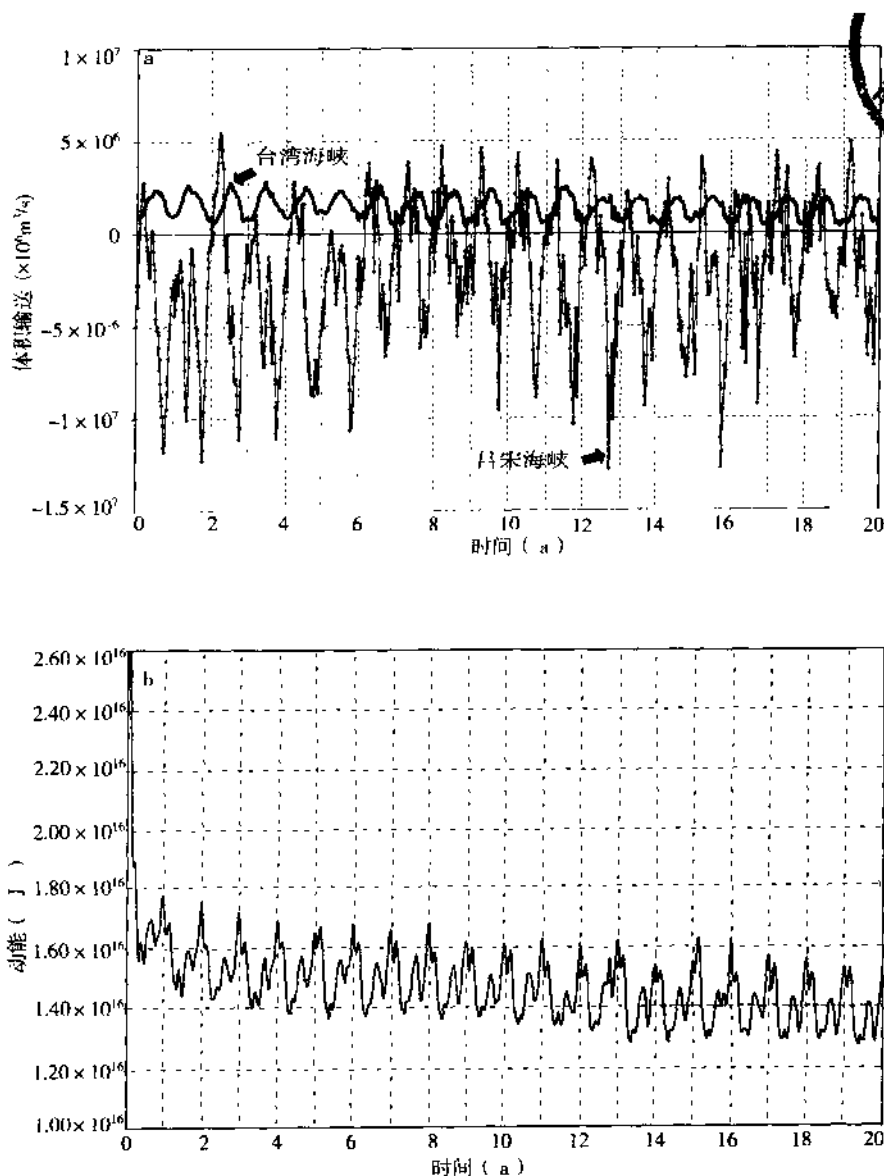


图5 通过台湾海峡和巴士海峡的海水输运量 (a)、南海和苏禄海内积分动能 (b) 随时间的变化

4.1.1 西边界流的强化

冬季风漂流侧向 Ekman 输送, 受到流向右面陆地的影响而堆积, 自海岸指向外海的正压压强梯度力, 产生方向与风漂流一致的地转流。地转流与风漂流合成结果, 形成近岸强流; 夏季风漂流的侧向 Ekman 输送, 造成近岸海面降低, 形成上升流。于是出现方向从外海指向海岸的斜压压强梯度力, 同样产生方向与风漂流一致的地转流。地转流与风漂流合成结果, 形成近岸射流。

4.1.2 沿岸径流对沿岸流温盐结构有重要影响

南海周边地区降雨量大, 年降雨量超过 2 000 mm。大量淡水注入海洋, 使近岸海水盐度显著降低。从沿岸流中可以明显看出低盐水舌的运动。不仅如此, 还会造成海面压力的调整,