

中国科学院海洋研究所编辑

海洋科学集刊

STUDIA MARINA SINICA

Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences

42

科学出版社

2000年10月

《海洋科学集刊》编辑委员会

主 编 相建海

副主编 孙 松 高 抒

编 委 (按姓氏笔画为序)

王 雷 李新正 宋金明 张培军 林荣根

周名江 范 晓 俞志明 赵永平 侯一筠

侯保荣 秦 松 阎 军 焦念志

海洋科学集刊

第 42 集

中国科学院海洋研究所 编辑

青岛市南海路 7 号

邮政编码 266071

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码 100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000 年 10 月第 一 版 开本 787×1092¹ 1/16

2000 年 10 月第一次印刷 印张 12 1/2 插页 2

印数 1—800 字数 351 000

ISBN 7-03-008111-0/P·1179

定 价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

海洋科学集刊 第 42 集

(2000 年 10 月)

目 录

有限区域海面风场数值模式的建立	谢 强、侯一筠、尹宝树等(1)
普里兹湾及其邻近海区冰-海相互作用的数值研究 I. 模式	史久新、乐肯堂、于康玲(10)
普里兹湾及其邻近海区冰-海相互作用的数值研究 II. 环流	史久新、乐肯堂、于康玲(22)
秋末寒潮大风作用下南黄海西部流场及温、盐度变动特征分析	赵保仁、徐丹亚、杨玉玲等(38)
胶州湾海水中悬浮体的分布及其季节变化	张铭汉(49)
营养盐对小球藻的生长、脂肪含量及 EPA 含量影响的研究	李荷芳、周汉秋(55)
藻类中植物生长素的研究	牟晓真、范晓、韩丽君(65)
成体文昌鱼实验室培养产卵、排精及其受精卵早期发育的观察	张士璠、朱锦天、贾翠红等(74)
促熟措施对南美白对虾雌虾性腺成熟率的影响	黄鹤忠、梁德海、易建国(77)
梭鱼出血性败血病原菌研究	梁海生、王新成、王文兴等(81)
中华绒螯蟹大水体高产育苗技术研究	徐世英、梁 刚、魏正喜等(86)
胶州湾水母类生态的初步研究 I. 群落结构及其年季变化	马喜平、孙 松、高尚武(91)
胶州湾水母类生态的初步研究 II. 数量时空变化及同环境因子的关系	马喜平、孙 松、高尚武(100)
中国近海蛾螺科的初步研究 I. 唇齿螺属及甲虫螺属	李凤兰、林民玉(108)
中国近海盘管虫属(多毛纲:龙介虫科)的研究 I	孙瑞平、杨德渐(116)
南海亮钩虾属(甲壳动物:端足目)的研究	任先秋(136)
中国近海蛇首螺科和两新种的研究	马绣同、张素萍(146)
海南岛海鱼寄生复殖吸虫补遗	申纪伟、李笑红(153)
东韩暖流驱动机制的正压数值研究(英文)	王 凯、鲁英宰、方国洪(163)
用 X 射线分析显微镜对海藻元素的研究 I. 海藻的 X 射线荧光光谱(英文)	严小军、范 晓、永田忠博(172)
用 X 射线分析显微镜对海藻元素的研究 II. 裙带菜孢子叶的元素定位(英文)	严小军、陈予敏、范 晓等(182)
用 X 射线分析显微镜对海藻元素的研究 III. X 射线分析显微镜引导下羊栖菜中含溴化合物的分离(英文)	严小军、范 晓等(189)

STUDIA MARINA SINICA, No. 42

(Oct. ,2000)

CONTENTS

Construction of Wind Field Model in Limited Sea Area	
..... Xie Qiang, Hou Yijun, Yin Baoshu <i>et al.</i> (9)	
A Numerical Study of the Ice-Ocean Interaction in the Region of Prydz Bay, Antarctica	
I . Model	Shi Jiuxin, Le Kentang, Yu Kangling(21)
A Numerical Study of the Ice-Ocean Interaction in the Region of Prydz Bay, Antarctica	
II . Circulation	Shi Jiuxin, Le Kentang, Yu Kangling(37)
Characteristics of Current and Temperature Variations in the West Part of the Southern Yellow Sea Under Strong Wind Action of the Cold Waves in the Late Autumn...	
..... Zhao Baoren, Xu Danya, Yang Yuling <i>et al.</i> (48)	
Distributions and Seasonal Variations of Suspended Matter in Jiaozhou Bay Seawater	
..... Zhang Minghan(54)	
Effects of Nutrients on Growth, and Content of Total Lipid and EPA, of <i>Chlorella</i> sp-2	
..... Li Hefang, Zhou Hanqiu(64)	
Reviews of Research on Auxins in Algae	Mu Xiaozhen, Fan Xiao, Han Lijun(73)
Observation on Spawning and Early Embryogenesis in Laboratory - Reared Adult <i>Amphioxus Branchiostoma Belcheri Tsingtauense</i>	
..... Zhang Shicui, Zhu Jintian, Jia Cuihong <i>et al.</i> (76)	
Efficacy of Several Measures for Increasing the Ovary Maturity Rate of Female Prawn <i>Penaeus vannamei</i>	
..... Huang Hezhong, Liang Dehai, Yi Jianguo(80)	
Study on Hemorrhagic Septicaemia in Mugil So-Iuy Basilewsky	
..... Liang Dehai, Wang Xincheng, Wang Wenxing <i>et al.</i> (85)	
Research on Technique of Breeding <i>Eriopis Sinensis</i> in Large Area Production	
..... Xu Shihong, Liang Gang, Yin Zhengliang <i>et al.</i> (90)	
Ecology of Jellyfishes in Jiaozhou Bay I . Seasonal and Annual Changes in Community Structure	
..... Ma Xiping, Sun Song, Gao Shangwu(99)	
Ecology of Jellyfishes in Jiaozhou Bay II . Seasonal and Inter-annual Variations in Species Composition and Abundance	
..... Ma Xiping, Sun Song, Gao Shangwu(107)	
A Preliminary Study on the Buccinidae from China Coasts I . <i>Engina and Cantharus</i>	
..... Li Fenglan, Lin Minyu(114)	
Study on <i>Hydroides</i> (Polychaeta; Serpulidae) from Waters off China I	

.....	Sun Ruiping, Yang Dejian(134)
Studies on Genus <i>Photis</i> (Crustacea: Amphipoda) from the South China Sea	
.....	Ren Xianqiu(142)
Study on <i>Colubrariidae</i> from China Seas, with Descriptions of Two New Species ...	
.....	Ma Xiutong, Zhang Suping(151)
Addendum to the Parasite Digenetic Trematodes from Marine Fishes in Hainan Island	
.....	Shen Jiwei, Li Xiaohong(159)
Barotropic Numerical Studies on the Driving Mechanisms of the East Korean Warm	
Current	Wang Kai, Lo YoungJae Fang Guohong(163)
Elemental Studies on Marine Algae by X-Ray Analytical Microscope Part I . X-Ray	
Fluorescence Spectra of Marine Algae ...	Yan Xiaojun, Fan Xiao, Tadahiro Nagata(172)
Elemental Studies on Marine Algae by X-Ray Analytical Microscope Part II . Mapping	
of Elements in Sporophyll of <i>Undaria Pinnatifida</i> Suringar	
.....	Yan Xiaojun, Chen Yumin, Fan Xiao <i>et al.</i> (182)
Elemental Studies on Marine Algae by X-Ray Analytical Microscope Part III . Separation	
of Bromo-Compound in <i>Sargassum Fusiformis</i> Guided by X-Ray Analytical	
Microscope	Yan Xiaojun, Fan Xiao <i>et al.</i> (189)

有限区域海面风场数值模式的建立*

谢 强

(中国科学院南海海洋研究所)

侯一筠 尹宝树 范顺庭 程明华

(中国科学院海洋研究所)

目前,国内外大尺度天气预报数值模式已经取得很大成就,如在预报地面气旋系统的移动和发展等方面。然而,这些模式的铅直分辨率一般不高,通常不包括边界层的动力过程,因而,在预报海面风场上,数值天气预报模式还没有令人满意的效果。目前所用的边界层预报模式尽管具有较高的水平分辨率和垂直分辨率,但要求大量的计算和资料,很难用于日常业务预报;另一种边界层诊断模式,用到的风场数据是气象工作者从天气形势(大尺度)分析中,通过差值等方法获得的,缺乏针对性,而且精度较低(WMO, 1988; WMO, 1990)。

作者认为,适于海洋要素预报的风场模式应是定位于有限区域,或称中尺度模式,并根据台站的具体资料来源和工作状况力争建立一套适于海洋要素预报的中尺度风场数值模式。鉴于以上,作者建立了一个适于海洋要素预报的有限区域海面风场数值模式。模式采用符合动力及热力学条件的简化方程组对大尺度风场进行加密,通过数值模拟得到适于海洋要素预报的有限区域海面风场。并将该模式运用于渤海这一有限区域,获得了良好的效果,说明该模式对海洋要素预报具有很好的应用前景。

一、模式的建立

中尺度气象模式为研究、预报中尺度气象现象开辟了另一途径,但是由于目前尚没有较好的技术为中尺度模式提供初值,因此,此模式还很不成熟。现有的模式主要是针对一些特殊大气现象而建立,如云尺度模式(许焕斌等, 1990)、强风暴模式(王谦等, 1990)等。目前仅有英国气象局 15km 格距的中- β 模式在作半业务预报试验。

为反映海面风场的物理机制和提高计算精度,我们研制出一种有限海域风场模式,这种模式不像一般采用的在仅有几条等压线的天气图上进行人工加密的方法,而是采用符合动力及热力学条件的方程组通过数值模拟得到较密的($10' \times 10'$)计算网格点上的风场,即通过天气图辩认(地面, 500hPa, 750hPa, 850hPa 的温度、湿度、压强等)及常规探空资料,结合海面的动力(岛屿、岸线、海面粗糙度)、热力(海面温度、湿度及反照率)条件,利

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 3757 号。

中国科学院重点资助项目, KZ952-S1-420 号。

收稿日期: 1999 年 4 月 5 日。

用符合动力、热力学条件的方程组进行数值模拟,计算出较密细网格点上的风场数据。

忽略大气分子粘性摩擦,不考虑加热,可得状态方程

$$p = \rho R_d T$$

基本方程组的矢量形式

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \vec{V}) \\ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - g\vec{k} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中, t 为时间, ρ 为密度, $\vec{V}$ 为矢量速度, p 为压强, g 为重力加速度, θ 为位温。

利用尺度分析法,针对中尺度特点,估计式中各项大小,并采用数值计算中通用的方法,对应变量进行如下分解: $A = \bar{A} + A'$, 其中, A 代表任一应变变量,

$$\bar{A} = \int_t^{t+\Delta t} \int_x^{x+\Delta x} \int_z^{z+\Delta z} A dz dy dx / (\Delta t)(\Delta x)(\Delta y)(\Delta z)$$

式中, $\bar{A}$ 表示 A 对有限时间增量 Δt 和空间间隔 $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 的平均。变量 A' 表示 A 对这一平均的偏差,常称为次网格尺度扰动。 Δt 为时间步长, $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 表示模式格距。

本文采用 Pielke(1984)所介绍的分解方法,即确定平均体积,使得次网格尺度扰动含解的非流体静力部分,而可解的尺度则用流体静力假设准确表示。这样,模式的非静力分量的影响将被参数化,而流体静力部分将被显式求解。

同时,引入无量纲气压(Exner 函数 Π) $\Pi = (P/P_0)^{R_d/C_p}$

根据位温定义 $\theta = T(P_0/P)^{R_d/C_p}$ 可得 $\theta = T/\Pi$

则方程组可化为

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \\ \frac{d\bar{u}}{dt} = -\left(\frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial z}\right) - \bar{\theta} \frac{\partial \bar{\pi}}{\partial x} + f\bar{v} \\ \frac{d\bar{v}}{dt} = -\left(\frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'v'}{\partial z}\right) - \bar{\theta} \frac{\partial \bar{\pi}}{\partial y} - f\bar{u} \\ \frac{\partial \bar{\pi}}{\partial z} = -\frac{g}{\bar{\theta}} \\ \frac{d\bar{\theta}}{dt} = -\left(\frac{\partial \bar{u}'\theta'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'\theta'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'\theta'}{\partial z}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, t 为时间; x, y, z 分别为经向、纬向和垂直方向。 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 分别为 x, y, z 方向的速度分量, $\bar{\theta}$ 为位温, u', v', w', θ' 分别为 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 及 $\bar{\theta}$ 的次网格尺度扰动; g 为重力加速度; f 为科氏参数。

为了便于实际运算,将方程组化为地形跟踪坐标系(TFCS)下的控制方程组。

考虑到地形对局地天气的控制作用,应用 Gal-Chen 等地形跟踪坐标系。其形式为:

$$\xi = x, \eta = y, \zeta = H(z - GR)/(H - GR)$$

式中, GR 为地形高度, H 为模式顶高度。为推导地形坐标系下方程组, 首先定义三个无量纲参数: 一个是地形坐标转换参数(Jacobian) G_0 , 另两个参数是沿 x, y 方向的地形斜率 G_1, G_2 。

$$G_0 = 1 - GR/H$$

$$G_1 = \left(\frac{\zeta}{H} - 1 \right) \frac{\partial GR}{\partial x}$$

$$G_2 = \left(\frac{\zeta}{H} - 1 \right) \frac{\partial GR}{\partial y}$$

从式中可以看出, G_0 不随高度变化, G_1, G_2 随高度减小, 即模式层的弯曲程度随高度减小。在地面, 模式层与地表重合, 在模式顶为水平面。由于 $G_0 \neq 0$, 因而这一坐标转换是可逆的, 水平速度分量在新坐标系中保持原来的形式

$$u = \frac{d\xi}{dt} = \frac{dx}{dt}, v = \frac{d\eta}{dt} = \frac{dy}{dt}$$

垂直速度分量为

$$\omega = \frac{d\zeta}{dt} = \frac{G_1 u + G_2 v + w}{G_0}$$

那么, 利用动量守恒、热力守恒和物质守恒原理, 参考 Boussinesq 近似和坐标变换原则将直角坐标系方程换算为地形跟踪坐标系如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}G_0) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}G_0) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(\bar{w}G_0) = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = - \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \zeta} \right) - \left(\frac{\partial \bar{u}'\bar{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'\bar{u}'}{\partial y} \right) \\ \quad + \left(\frac{1}{G_0} \right)^2 \frac{\partial \bar{u}'\bar{w}'}{\partial x} - \bar{\theta} \frac{\partial \bar{\pi}}{\partial x} - gG_1 + \bar{f}\bar{v} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = - \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \zeta} \right) - \left(\frac{\partial \bar{u}'\bar{v}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'\bar{v}'}{\partial y} \right) \\ \quad + \left(\frac{1}{G_0} \right)^2 \frac{\partial \bar{v}'\bar{w}'}{\partial y} - \bar{\theta} \frac{\partial \bar{\pi}}{\partial y} - gG_2 - \bar{f}\bar{u} \\ \frac{\partial \bar{\pi}}{\partial \zeta} = - \frac{g}{\bar{\theta}} G_0 \\ \frac{d\bar{\theta}}{dt} = - \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \zeta} \right) - \left(\frac{\partial \bar{u}'\bar{\theta}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'\bar{\theta}'}{\partial y} \right) + \left(\frac{1}{G_0} \right)^2 \frac{\partial \bar{\theta}'\bar{w}'}{\partial \zeta} \end{cases} \quad (3)$$

二、模式物理过程参数化

为了闭合方程组, 考虑到模式计算量, 本文采用一阶 K-理论闭合法。各通量的参数化表达式为

$$\begin{aligned}
-\overline{\theta'u'} &= \frac{k_h}{G_0} \frac{\partial}{\partial x}(G_0 B) \\
-\overline{\theta'v'} &= \frac{k_h}{G_0} \frac{\partial}{\partial x}(G_0 B) \\
-\overline{\theta'w'} &= \frac{k_h}{G_0} \left[\frac{\partial}{\partial x}(G_1 B) + \frac{\partial}{\partial y}(G_2 B) + \frac{\partial B}{\partial \zeta} \right] \\
-\overline{u'u'} &= \frac{2k_m}{G_0} \left[\frac{\partial}{\partial x}(G_0 u) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(G_1 u) \right] \\
-\overline{v'v'} &= \frac{2k_m}{G_0} \left[\frac{\partial}{\partial x}(G_0 v) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(G_2 v) \right] \\
-\overline{w'w'} &= \frac{2k_m}{G_0} \left[\frac{\partial}{\partial x}(G_1 w) + \frac{\partial}{\partial y}(G_2 w) + \frac{\partial w}{\partial \zeta} \right] \\
-\overline{u'v'} &= \frac{k_m}{G_0} \left[\frac{\partial}{\partial x}(G_0 v) + \frac{\partial}{\partial y}(G_0 u) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(G_1 v + G_2 u) \right] \\
-\overline{u'w'} &= \frac{k_m}{G_0} \left[\frac{\partial}{\partial \zeta}(u + G_1 w) + \frac{\partial}{\partial y}(G_0 w) \right] \\
-\overline{v'w'} &= \frac{k_m}{G_0} \left[\frac{\partial}{\partial \zeta}(v + G_2 w) + \frac{\partial}{\partial x}(G_0 w) \right]
\end{aligned}$$

将上述各式代入式(3)中得到的是极复杂的表达式,计算量仍然较大。由于对网格距大于湍流次区的模式的湍流参数化的物理意义尚不十分清楚,为此增加较多计算量可能得不偿失。

为便于调试程序,我们暂略去所有 G_0 水平导数和含 G_1, G_2 的项,即简单地作地形坐标上的垂直扩散和 ζ 面上的水平扩散。

三、行星边界层参数化方案

在中尺度模式中处理行星边界层主要是通过次网格尺度相关项。本文采用分层处理方法(Pielke, 1984)。

1. 粘滞次层

地面与地面粗糙度 z_0 之间一层顶部气温与地表温度 $\bar{\theta}_G$ 关系。

$$\bar{\theta}_{z_0} = \bar{\theta}_G + 0.00962 \left(\frac{\theta_*}{\kappa} \right) \left(\frac{u_* z_0}{r} \right)^{0.45}$$

式中, κ 为冯卡门系数, u_* 为摩擦速度, θ_* 为通量温度。

2. 近地层

即准常通量层,从 z_0 到 h_s 。

$$u_0 = \kappa \bar{V} [\ln(z/Z_0) - \Psi_M(z/L)]$$

$$\theta_0 = \kappa (\bar{\theta}(z) - \bar{\theta}_{z_0}) / 0.74 [\ln(z/Z_0) - \Psi_H(z/L)]$$

式中, h_s 为准常通量层顶, L 为莫宁长度, $L = -\theta_0 u_*^3 / (\overline{g w' \theta' \kappa})$ 。

$$\Psi_M(z/L) = \begin{cases} 2\ln[(1 + \Phi_M^{-1})/2] + \ln[(1 + \Phi_M^{-1})/2] & z/L \leq 0 \\ -2\tan^{-1}\Phi_M^{-1} + \pi/2 & z/L > 0 \\ -4.7z/L & z/L > 0 \end{cases}$$

$$\Psi_H(z/L) = \begin{cases} 2\ln[1 + 0.74\Phi_H^{-1}]/2 & z/L \leq 0 \\ -6.35z/L & z/L > 0 \end{cases}$$

$$\Phi_M = \frac{kz\partial\bar{V}}{u_*\partial z} \cong \begin{cases} (1 - 15z/L)^{-1/4} & z/L \leq 0 \\ 1 + 4.7z/L & z/L > 0 \end{cases}$$

$$\Phi_H = \frac{kz\partial\bar{\theta}}{\theta_*\partial z} \cong \begin{cases} 0.74(1 - 9z/L)^{-1/2} & z/L \leq 0 \\ 0.74 + 4.7z/L & z/L > 0 \end{cases}$$

3. 过渡层

艾克曼摩擦层。

$$0 = K \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + f(\bar{v} - v_g)$$

$$0 = K \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} + f(u_g - \bar{u})$$

式中, u_g, v_g 为 x, y 方向的地转风分量。

四、模式参数化一阶闭合方案

1. 垂直交换系数用

$$K(z) = K_{z_i} + [(z_i - z)^2 / (z_i - z_{h_s})^2] [K_{h_s} - K_{z_i} + (z - h_s) \times \frac{\partial K_{h_s}}{\partial z} + 2(K_{h_s} - K_{z_i}) / (z_i - h_s)] z_i \geq z \geq h_s$$

为了计算简便, k_m, k_h 等可取相同值。

2. 边界层厚度

$$\frac{\partial z_i}{\partial t} = -\bar{u}_{z_i} \frac{\partial z_i}{\partial x} - \bar{v}_{z_i} \frac{\partial z_i}{\partial y} + \bar{w}_{z_i} + [1.8(w_*^3 + 1.1u_*^3 - 3.3u_*^2 f z_i)] / \left(g \frac{z_i^2}{\theta_{h_s}} \frac{\partial \bar{\theta}^+}{\partial z} + 9w_*^2 + 7.2u_*^2 \right)$$

$$\text{其中, } w_* = \begin{cases} \left(-\frac{g}{\theta_{h_s}} u_* \theta_* z_i \right)^{1/3} & \theta_* \leq 0 \\ 0 & \theta_* > 0 \end{cases}$$

3. 近地层高度

$$h_s = 0.04z_i$$

4. 空间边界条件

模式采用无梯度侧边界不可渗透物质面上边界, 关于下边界我们认为粗糙度 z_0 处中

尺度速度为 0, 即:

$$u(z_0) = \bar{v}(z_0) = w(z_0) = 0$$

海面

$$z_0 = 0.032 u_*^2 / g$$

五、差分方程

垂直方向上, z 层定义 $u, v, \bar{w}, \bar{w}', p, \pi, Z, T$ 层(两个相邻层之中间层), 定义位温为 θ ; 水平方向上, 物质面的高度为 H , 垂直速度为 w, w' 与其他变量是交错的。

$$\text{平流方程采用蛙跃格式 } \frac{\phi^{\tau+1} - \phi^{\tau-1}}{2\Delta t} = -u_i^{\tau} \frac{\phi_{i+1}^{\tau} - \phi_{i-1}^{\tau}}{2\Delta x}$$

垂直方向采用如下隐式格式

$$\begin{aligned} \frac{\phi^{\tau+1} - \phi^{\tau}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta z_j} & \left[K_{j+\frac{1}{2}} \frac{\beta_{\tau}(\phi_{j+1}^{\tau} - \phi_j^{\tau}) + \beta_{\tau+1}(\phi_{j+1}^{\tau+1} - \phi_j^{\tau+1})}{\Delta z_{j+\frac{1}{2}}} \right. \\ & \left. - K_{j-\frac{1}{2}} \frac{\beta_{\tau}(\phi_j^{\tau} - \phi_{j-1}^{\tau}) + \beta_{\tau+1}(\phi_j^{\tau+1} - \phi_{j-1}^{\tau+1})}{\Delta z_{j-\frac{1}{2}}} \right] \\ \beta_{\tau} + \beta_{\tau+1} = 1, \Delta z_j & = z_{j+\frac{1}{2}} - z_{j-\frac{1}{2}}, \end{aligned}$$

其中

$$\Delta z_{j+1} = z_{j+1} - z_j, \Delta z_{j-1} = z_j - z_{j-1},$$

科里奥利项

$$(u_i^{\tau+1} - u_i^{\tau})/\Delta t = f v_i^{\tau}; (v_i^{\tau+1} - v_i^{\tau})/\Delta t = -f u_i^{\tau};$$

气压梯度项

$$\frac{u_{i+1}^{\tau} - u_i^{\tau}}{\Delta t} + \theta \frac{\pi_{i+1}^{\tau} - \pi_{i-1}^{\tau}}{2\Delta x} = 0$$

六、模式初始化

中尺度模式的预报时效一般为 0—12h, 对初值场要求较高。对变化剧烈的局地天气, 则有待于未来将卫星(本章的最后一节利用卫星资料对此作了一些探讨性的工作)、雷达、大气廓线仪、地面高分辨观测等提炼出的扰动信息和中模式较精确的预报引入模式中, 有效地改进它们的预报, 目前尚没有供中模式用的初值。为检验模式和作实例研究, 我们暂用台站单点探空处理法, 并结合常规高空资料, 构造模式初始场。

单点探空处理方法主要是根据地面和高空各层的温度、露点、气压诊断求出这些层上的比湿、饱和比湿和高度, 再将这些参数线性插值(气压为对数插值)到地形坐标面上, 最后诊断出密度、无量纲气压、位温、湿位温等初始值。而中央气象台发布的高空常规资料也是通过探空资料进行的客观分析。

上述两步完成以后, 将已得到各垂直分层上的资料运用一维动力初值化结合 Nudging 方法进行调整。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K(z) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f(v - v_g) + G_u u(u_{obs} - u)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = K(z) \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + f(u - u_g) + G_u v (v_{obs} - v)$$

其中, G_u, G_v 是 Nudging 强迫系数, u_{obs}, v_{obs} 为观测值。

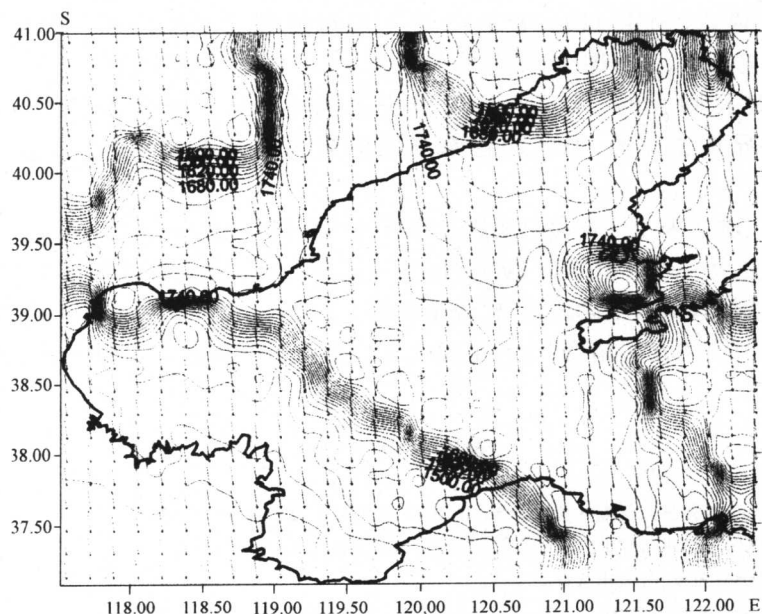


图1 1998年3月19日8时渤海风场数值模拟
(图中数字为等压线数)

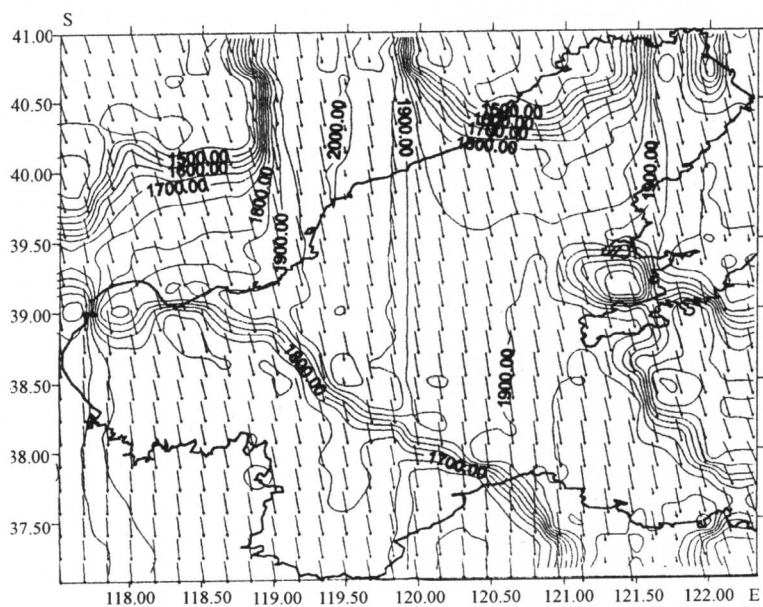


图2 1998年3月19日20时渤海风场数值模拟
(图中数字为等压线数)

七、模式检验及结果

根据上述模式,利用1998年3—4月于渤海海域的观测结果,对渤海海域风场进行了模拟(见图1,2),图中风速单位为 cm/s 。从图中可以看出,风速值与所观测的8~9级是相吻合的,风向也与观测的北风相一致。值得注意的是,其陆地与海面风场的差异是明显的,尤其是辽东半岛的半岛效应非常明显,与实测结果相一致。

综上所述,本文采用符合动力及热力学条件的简化方程组对大尺度风场进行加密,通过数值模拟建立了一个计算省时、实用性强、适应地方台站进行海洋要素预报的有限区域风场模式,将该模式试用于渤海区域,效果良好。

为使模式具有更高的精度,今后工作中有必要在初始化过程中引入气象雷达数据和卫星资料。

参 考 文 献

- 王谦,胡志晋,1990,三维弹性大气模式和实测强风暴模拟,大气科学,14(4):441—453。
许焕斌,王思薇,1990,三维可压缩大气中的云尺度模式,气象学报,48(1):80—90。
杨大升等,1982,动力气象学,气象出版社。
Pielke, R. A. (张杏珍等译),1984, Mesoscale meteorological modeling, Academic Press, 677。
WMO, 1988, Guide to Wave Analysis and Forecasting, WMO-NO. 702。
WMO, 1990, Proceedings of the Commission for Marine Meteorology Technical Conference on Ocean Waves, WMO-TD-NO. 350。

CONSTRUCTION OF WIND FIELD MODEL IN LIMITED SEA AREA *

Xie Qiang* *, Hou Yijun* **, Yin Baoshu* **, Fan Shunting* **, Cheng Minghua* **

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences NH)* * (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences)* **

ABSTRACT

Based on the features of limited sea areas and scale analysis methods, the orders of every term in the mesoscale meteorological models are estimated, and at the same time a wind field model of limited sea area is developed, for numerical simulation of marine dynamics phenomena such as waves tides and storm surges, particularly for application to forecasting of marine dynamical characteristics. Furthermore, the initialization methods for the wind field forecast were improved and the model was applied to Bohai sea for forecasting examination. The simulated results showed some details never obtained before and agreed well with observational data. The model has been used for forecasting of combine wave-tide-surge.

* Contribution No. 3757 from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.

普里兹湾及其邻近海区冰-海相互作用的 数值研究 I. 模式*

史久新 乐肯堂 于康玲

(中国科学院海洋研究所)

南大洋在全球气候系统中起着重要的作用,对世界大洋水团的形成有重要的影响。在世界大洋中,约有 55%—60% 的海水特性应当归结于南大洋的物理过程。目前,南大洋的研究已得到各国海洋学者的日益关注,进展较大。但是,对于地处印度洋扇形区的普里兹湾海区的观测和研究则相对较少,其结果的差别甚大。例如底层水形成问题,有些研究者认为这一海区的底层水主要来源于威德尔海和罗斯海,本区内对底层水的贡献即使有,也是非常小的(Smith, *et al.*, 1984; Mantyla, *et al.*, 1995)。而有些研究者则从观测资料中找到了底层水有可能形成的迹象。就目前研究的结果来看,有些年份,如 1982 年(Middleton, *et al.*, 1989), 1987 年(Woehler, *et al.*, 1988), 1991 年(乐肯堂等, 1996)均发现了异常高盐的陆架水,它有可能与深层水混合而形成底层水。对于该海区的环流特别是深层环流迄今为止也是知之甚少。大多数研究是基于动力高度的计算结果(Grigor'yev, 1967; Smith, *et al.*, 1984, 1993; Middleton, *et al.*, 1989),但他们给出的环流型式相互之间差异很大。这些差异的存在,虽然确有年际变化等因素,但也不能排除研究方法本身的局限。该海区地形复杂(图 1),海冰有显著的季节变化和年际变化(Allison, *et al.*, 1993, 1994),使得该海区的物理海洋状况非常复杂。南极地区由于环境恶劣,海洋观测集中在夏季,并且资料的连续性较差,因而使传统的研究方法受到很大限制。为了充分发挥有限的实测资料的作用,采用合理的动力学和热力学模式并利用数值方法求解模式方程,不失为一种有效的研究途径。迄今为止,这一海区的数值研究还很少,考虑热力学作用的模式则尚未见诸报道。本文将利用最新的资料 and 模式,并在模式中同时考虑动力学和热力学的作用,用以研究普里兹湾海区的环流与海冰的动力学和热力学过程。以往的研究发现,等密面分析是研究普里兹湾海区混合与环流的有效方法(乐肯堂等, 1997),我们将采用国际上新近发展起来的一种基于等密面的数值计算模式,研究普里兹湾海区环流和海冰的季节变化。这一工作将有助于进一步解决该海区南极底层水的形成问题,因而对于深入认识该海区在南大洋环流系统以至全球气候系统中的作用有重要意义。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 3473 号。

国家自然科学基金资助项目, 49876009 号。

收稿日期: 1998 年 4 月 6 日。

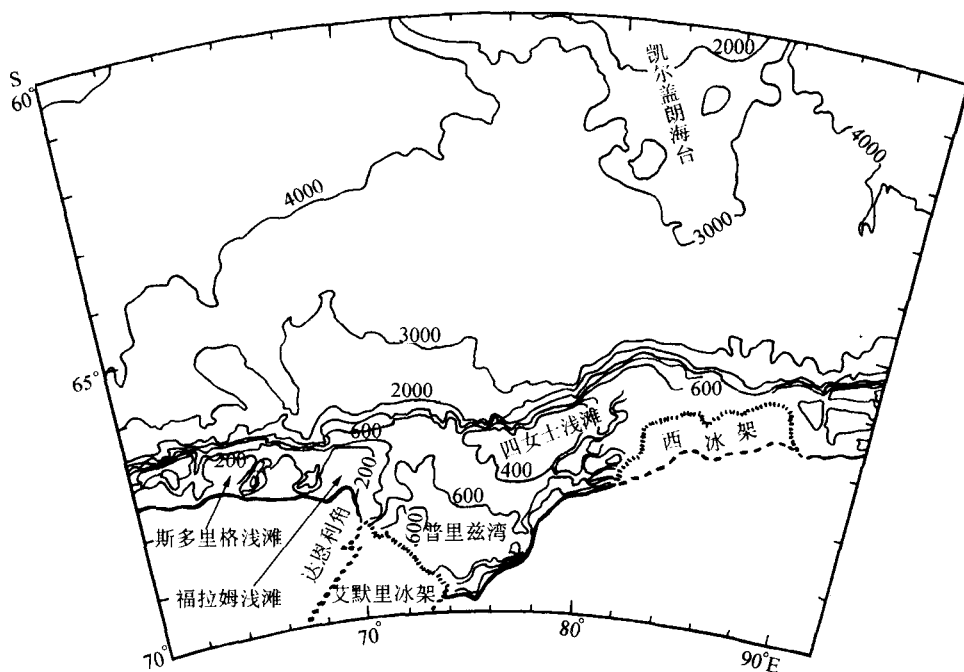


图1 普里兹湾海区的水深分布(m)

一、模 式

传统的三维海洋数值计算,垂向按照深度分层,即采用欧拉坐标。而新近发展起来的等密面模式(Isopycnal Model)则是根据密度(在大洋中一般选用位势密度)分层,即采用拉格朗日坐标,这类模式更加符合海洋的实际,因为基于人们对海洋的了解,除表面混合层外,大洋深层的过程主要是沿等密面进行的。等密面模式的另一先进之处在于,处理斜压问题时比传统的 z 坐标需要更少的分层就可以获得同样的分辨率,这是因为等密面坐标是按密度分层,在密度变化大的地方(跃层)可以自动加密。

Roberts 等(1996)将传统模式与等密面模式进行了比较。他们用目前最常用的基于 z 坐标的 Bryan-Cox-Type 大洋环流模式(HC)和 Miami 大学的等密面模式(AIM)分别对大西洋进行了 30 年的模拟实验,实验中采用了相同的强迫力场和尽可能多的相同的参数。实验结果表明,AIM 比 HC 能更好地模拟北大西洋环流。

目前,国际上从事等密面模式研究的主要有两大群体:德国汉堡 Max-Planck 研究所和美国 Miami 大学的 Rosentiel 海洋与大气科学分校。Miami 模式是沿两个方向发展的,一是建立了一个绝热的、纯风生的模式(Bleck, *et al.*, 1981, 1986),在这一模式中解决了与边界层有关的一些问题,如等密面与海面相交和实际海底地形的处理问题;二是在模式中加入混合层的热力强迫作用(Bleck, *et al.*, 1989)。后来, Bleck 等(1992)把两个方向

的工作结合在一起。

本文所用的模式以德国学者的模式 OPYC(Oberhuber, 1992, 1993a)为基础, 与 Miami 模式相比, 它更好地处理了混合层模式与等密面模式的耦合, 并且采用了先进的时间积分方案, 节约了计算时间。该模式最上层为混合层, 其密度和厚度均为时变的; 混合层之下是基于等密面的分层, 每层密度固定, 而厚度随时间变化。该模式还包括了一个海冰模式, 并且通过混合层模式实现冰-海耦合, 对于我们当前的研究是非常适用的。

1. 大洋模式 将研究海域在垂向按位势密度分为 N 层, 以第 k ($1 \leq k \leq N$) 层单位水体的垂向平均质量通量 $\vec{\Psi}_k = (\rho \vec{v} h)_k$, 质量 $\Phi_k = (\rho h)_k$, 热量 $\Theta_k = (\theta \rho h)_k$ 和盐量 $\Pi_k = (S \rho h)_k$ 的通量形式之守恒方程构成基本方程组

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{\Psi}_k = -\nabla \cdot (\vec{v}_k \vec{\Psi}_k) - h_k \nabla p - \vec{f} \times \vec{\Psi}_k + \nabla \cdot A_k^m \nabla \vec{\Psi}_k + (w\rho\vec{v})_k^{k+} + (w\rho\vec{v})_k^{k-} - (w\rho\vec{v})_{k+}^k - (w\rho\vec{v})_{k-}^k + \vec{\tau}_k^{k-} + \vec{\tau}_k^{k+} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \Phi_k = -\nabla \cdot \vec{\Psi}_k + (w\rho)_k^{k+} + (w\rho)_k^{k-} - (w\rho)_{k+}^k - (w\rho)_{k-}^k + R_k^{P-E} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \Theta_k = -\nabla \cdot (\Theta \vec{v})_k + \nabla \cdot A_k^s \nabla (\Theta)_k + \frac{Q_k}{c_p} + (w\rho\theta)_k^{k+} + (w\rho\theta)_k^{k-} - (w\rho\theta)_{k+}^k - (w\rho\theta)_{k-}^k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \Pi_k = -\nabla \cdot (\Pi \vec{v})_k + \nabla \cdot A_k^s \nabla (\Pi)_k + R_k^{ICE} + (w\rho S)_k^{k+} + (w\rho S)_k^{k-} - (w\rho S)_{k+}^k - (w\rho S)_{k-}^k \quad (4)$$

式中, ρ , $\vec{v}$, θ 和 S 分别为密度、速度、位温和盐度, $(w\rho\vec{v})$, $(w\rho)$, $(w\rho\theta)$ 和 $(w\rho S)$ 分别描述相邻层间的质量通量、质量、热量和盐量的交换过程。各种垂向交换归结为挟入/挟出(entrainment/detrainment)过程(包括穿过等密面的混合和对流), w 表示卷挟速率。脚标 $(\dots)_k^l$ 表示从第 l 层到第 k 层的输运, $l = k - 1$ 代表上面一层, $l = k + 1$ 代表下面一层。把卷挟项分为两项, 即从相邻层进入 k 层的挟入项和从 k 层进入相邻层的挟出项, 是在计算中为了保持位势密度接近给定值之需。 $k = 1$, 代表表层(混合层); $k = N$, 代表底层。除了 $\vec{\tau}$ 以外, 所有的 $1-$ 和 $N+$ 的值均设为零, 而 $\vec{\tau}_1^{N+}$ 代表表面风应力(当存在海冰时, 该项还包含海冰的拖曳力), $\vec{\tau}_N^{1-}$ 代表底摩擦。 P 为压强, f 为科氏参量, A_k^m 为动量的扩散系数, A_k^s 为热量和盐量的扩散系数。方程(2)和(3)中的强迫项 Q_k 和 R_k 分别表示热通量和淡水通量, R_k^{P-E} ($k > 1$ 时为零)为降水减去蒸发后的淡水通量, R_k^{ICE} 与海冰有关, c_p 为水的比热。

方程建立在球坐标系中, 采用拉格朗日坐标后所有的算子均为二维形式(无垂向)。密度的计算采用的是未经简化的海水状态方程(UNESCO, 1981), 其他参量的计算见 OPYC 报告(Oberhuber, 1992)。

2. 混合层模式 在等密面模式中, 需要将各层的位势密度保持在预先给定的值, 这个值在每层中为常数, 且只与层次的序号有关。由于海洋中的等密面可以与海面相交, 为避免出现这种情况, 模式中引入了混合层。海洋中的混合层是由风搅拌和表面浮力通量引起的湍过程造成的。混合层中, 温度、盐度和速度等在垂向分布均匀。模式中包括了