



中国科学院大气物理研究所

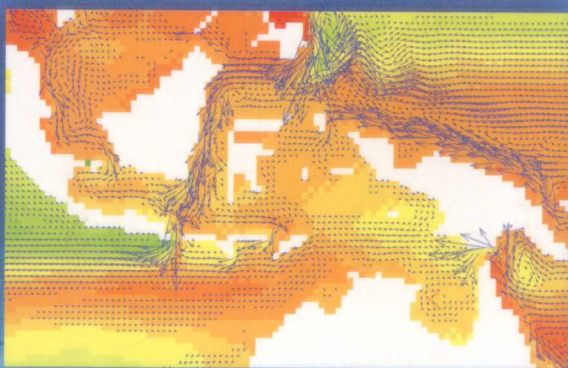
大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 技术报告

LASG/IAP 气候系统海洋模式 (LICOM1.0) 参考手册

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

刘海龙 俞永强 李 薇 张学洪 编著



科学出版社

www.sciencep.com

LASG/IAP 气候系统海洋模式 (LICOM1.0)

参考手册

刘海龙 俞永强 李 薇 张学洪 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了中国科学院大气物理研究所(IAP)大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)气候系统海洋模式(LASG/IAP Climate System Ocean Model,简称 LICOM)第一版本的原理、程序设计和使用说明。LICOM 是 LASG 全球海气耦合模式课题组在以往研究工作的基础上设计和发展的第 4 个大洋环流模式。它既可单独积分用于海洋学研究,也被用做耦合气候系统模式的海洋分模式,提供气候问题的研究使用。

本书是 LICOM 的设计者编写的模式用户手册,可供海洋和气象等学科的科研人员在了解模式原理和物理过程时参考。

图书在版编目(CIP)数据

LASG/IAP 气候系统海洋模式(LICOM1.0)参考手册/

刘海龙等编著.—北京:科学出版社,2004.3

ISBN 7-03-013026-X

I. L... II. 刘... III. 海洋—气候变化—系统模型—手册 IV. P732.5-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 015939 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2004 年 8 月第一次印刷 印张: 7 3/4

印数: 1—600 字数: 159 000

定价: 15.80 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

前言

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(LASG)成立于1985年。自建室以来,LASG一直把数值模式的发展和作为最重要的研究领域之一,其中气候系统模式的发展和作为尤其受到重视。早在20世纪80年代中期,在第一届实验室主任曾庆存先生的推动下,LASG就在国内率先开展了气候模式发展和气候数值模拟的研究。近20年来,LASG的科学家们在大气环流模式、海洋环流模式、陆面过程模式、海气耦合模式,乃至包括大气、海洋、海冰和陆面过程在内的物理气候系统模式的发展和作为等方面取得了长足的进步,并在国际气候模拟研究团体中占有一席之地。

但是,发展气候系统模式(CSM)是一项长期的、艰巨的任务。为了实现CSM的可持续发展,特别要强调科学家之间、课题组之间、乃至研究团体之间有效的分工和协作,尽快改变传统的“小作坊”工作方式。这是一个亟待解决的问题,正如在LASG赢得“计算机世界科学类最高荣誉奖——21世纪成就奖”的案例研究项目“大气研究”中所提到的:

“气候系统模式发展是一个巨大的工程,需要精诚合作、明确分工和有效的组织管理。然而,在中国,模式人员难以联合起来,一起发展一个公用的或团体的气候系统模式。一些课题组都含有模式发展的研究内容,而每个课题组都想发展自己的模式,很少愿意把他们重复的工作合并在一起进行合作。最终,这些课题组之间不可避免地出现低水平重复和低水平竞争。这是中国模式发展领域普遍存在的一个大问题。”

为了推动气候系统模式的联合发展,LASG受国家自然科学基金委员会地球科学部的委托,于2001年11月15日在北京主持召开了“第一届气候系统模式发展研讨会”。在达成广泛共识的基础上,LASG和中国气象局国家气象中心(国家气候中心)、中国气象科学研究院、南京大学大气科学系、中国科学院南海海洋研究所共同提出了“全球气候系统模式联合研究计划(2001~2005)”的建议(详见LASG的网页<http://web.lasg.ac.cn>)。

目前,在中国科学院知识创新工程重要方向项目“亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响”和国家自然科学基金重点项目的支持下,LASG正在研制的模块化耦合气候模式就是实现上述联合研究计划的一个具体步骤。该模式借鉴了NCAR CSM的模块化耦合和直接耦合的经验,拟建立一个可以方便替换不同的大气、海洋、陆面和海冰子模式的模块化直接耦合系统框架,便于进行多种模式组合的耦合试验和比较分析,并在尽可能短的时间内为更大范围的联合研究提供一个基础模式。

这个模块化耦合气候模式的海洋分模式就是这本技术报告所叙述的“LASG/IAP气候系统海洋模式”(LASG/IAP Climate system Ocean Model,简称LICOM),现在推出的是它的第一个版本LICOM1.0。LICOM1.0是LASG全球海气耦合模式课题组在以往研究工作的基础上设计和发展的第4个大洋环流模式,这是一个水平格距为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 、垂直方向30层的准全球海洋环流模式,实现了MPI和OpenMP的混合并行计算和初步的模块化,可以进行长期积分来模拟大洋风生环流和热盐环流,总体效果较原来的模式有明显改进。

为使 LASG 发展的耦合气候模式以及它的各个分模式能广泛地得到使用,并在与模式使用者和研究者的互动过程中不断改进, LASG 将及时地推出这些模式中比较成熟的版本并提供尽可能详细的技术手册。现在,我们高兴地看到了第一本这样的手册——“LASG/IAP 气候系统海洋模式(LICOM1.0)参考手册”以 LASG 技术报告的形式正式出版。随着 LASG 耦合气候模式研究工作的进展,我们也期待着有关大气环流模式和大气—海洋和海冰—陆面过程耦合模式等方面的技术报告的陆续发表。

感谢 LASG 全球海气耦合模式课题组的历届成员 10 多年来为发展 LASG 海洋环流模式所付出的艰辛努力和国内外同行的帮助,感谢 LASG 的上级主管部门:中国科学院、国家自然科学基金委员会和中国科学技术部的支持以及依托单位大气物理研究所相关研究室及支撑部门,特别是计算信息中心的协作和帮助。

吴国雄

说明

LICOM1.0 参考手册是由刘海龙(lhl@lasg.iap.ac.cn)、俞永强(yyq@lasg.iap.ac.cn)、李薇(liwei@lasg.iap.ac.cn)和张学洪(zxh@lasg.iap.ac.cn)编写,并以中国科学院大气物理研究所(IAP)大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)技术报告的形式发表的正式出版物。作者的通信地址是:北京 9804 信箱 LASG,邮编 100029。

LICOM 是由 LASG 全球海气耦合模式研究组设计和发展的、用于海洋自身变化规律以及海洋与气候系统其他分量相互作用研究的海洋环流数值模式。本着 LASG 的开放原则,研究组一直并将继续把所发展的海洋环流模式和海气耦合模式中比较成熟的版本免费提供给从事气候和海洋研究的团体和个人使用。随着这本手册的发表,LICOM1.0 的源程序和必要的数据库也将向研究者开放。

经验表明,即使是经过长期使用和检验的气候数值模式,仍然可能存在技术性的错误。在这一点上 LICOM 也不例外,这是需要提请使用者特别注意的。作者欢迎并鼓励使用者指出模式和手册中的错误,并将在核实和改正以后在 LASG 的气候模式主页上予以公布。作者期待着在与模式的研究者、使用者的互动过程中使 LICOM 模式得到不断改进。

LICOM1.0 参考手册、源程序和数据文件可以从 LASG 气候模式主页(<http://web.lasg.ac.cn/FGCM/index.htm>)下载或直接联系第一作者。LICOM 最新动态可到 LASG 气候模式主页查询。

LICOM1.0 模式的引用方式:

刘海龙、俞永强、李薇、张学洪,2003:LASG/IAP 气候系统海洋模式(LICOM1.0)参考手册,大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)技术报告特刊,北京,科学出版社,107 页

刘海龙,2002:高分辨率海洋环流模式和热带太平洋上层环流的模拟研究,中国科学院研究生院博士学位论文,178 页

致谢

LASG/IAP 的气候系统海洋模式的建立和发展是一个不断继承和积累的过程,先后有十几位模式发展者为此付出了艰辛努力。在 LICOM1.0 版的模式和参考手册正式推出之际,手册的署名作者要首先感谢模式及模式参考手册前期版本的作者——陈克明博士、金向泽博士、林武银博士和周天军博士。作者们也要感谢在模式的策划、设计、修改和应用过程中做出了贡献的宇如聪研究员、解放军理工大学的刘喜迎博士、中国科学院南海研究所的蔡树群博士;在模式优化和并行方面给予帮助的 SGI 工程师孟念青先生、Intel 工程师唐志博先生和国防科技大学张理论博士;在模式手册的准备过程中提出建议、并参与文稿校对的吴方华和李江龙;阅读手册并出修改意见的李荣凤研究员;特别感谢《大气科学》编辑部的裴申先生为手册正式出版提供的帮助。

感谢 LASG 对于海洋模式发展一贯的支持。感谢 IAP 计算中心提供计算资源、存储设备等的技术支持和高效服务。

参考手册的编写者得到以下项目的资助:

1. 中国科学院知识创新工程重要方向项目“亚洲季风区海—陆—气相互作用对我国气候变化的影响”(批准号:ZKCX2-SW-210);
2. 国家自然科学基金委员会重点项目“发展模块化的耦合气候系统模式”(批准号:40233031);
3. 国家重点基础研究规划项目“地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录”(批准号:G2000078502);
4. 国家自然科学基金委员会重点项目“全球气候变化及其对东亚区域气候变化影响的数值模拟”(批准号:40231004);
5. 国家重点基础研究规划项目“中国近海环流形成和变异机理、数值预测方法及对海岸带资源、环境影响的研究”(批准号:G1999043808);
6. 中国科学院大气物理研究所留所博士启动基金;
7. 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主任基金。

符号和算子

a	地球半径($=6.371 \times 10^6 \text{ m}$)
c	Karman 常数($=0.14$)
$c_1 \sim c_9$	Bryan-Cox 密度公式的参数
c_λ	Smagorinsky 混合方案中 λ 方向黏性系数因子
c_θ	Smagorinsky 混合方案中 θ 方向黏性系数因子
e_A	海表水汽压
e_s	海表饱和水汽压
f^*	Coriolis 参数
g	重力加速度($=9.806 \text{ m s}^{-2}$)
h_1	模式第一层厚度
n	垂直于侧壁的方向
n_{cloud}	云量
n_B	正压过程的时间层数
n_C	斜压过程的时间层数
n_{TS}	温盐过程的时间层数
p	压力
p_{as}	海平面气压
q_A	海表比湿
q_s	海表饱和比湿
r	海表相对湿度
t	时间
u	λ 方向的速度
u_b	λ 方向模式最底层流速
u^*	涡旋诱发的 λ 方向输送速度
$\bar{u}$	λ 方向的正压速度
$\hat{u}$	正斜压耦合后的 λ 方向的斜压速度
v	θ 方向的速度
v_b	θ 方向模式最底层流速
v^*	涡旋诱发的 θ 方向输送速度

$\bar{v}$	θ 方向的正压速度
$\hat{v}$	正斜压耦合后的 θ 方向的斜压速度
w	z 方向的速度
w^*	涡旋诱发的 z 方向输送速度
z	垂直高度坐标
z_0	海表起伏
A_D	穿过等位密度面的扩散系数
A_l	沿着等位密度面的扩散系数($=1.0 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)
A_{ITH}	等位密度面厚度扩散系数($=1.0 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)
A_{ice}	每个网格元中海冰覆盖面积占总面积的百分比
A_h^b	背景垂直扩散系数($=1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)
A_{hh}	水平 Laplace 湍流扩散系数
A_{hv}	垂直湍流扩散系数
A_{mb}	背景垂直黏性系数($=1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)
A_{mh}	水平 Laplace 湍流黏性系数
A_{mv}	垂直湍流黏性系数
$A_{m\lambda}$	λ 方向 Smagorinsky 水平湍流黏性系数
$A_{m\theta}$	θ 方向 Smagorinsky 水平湍流黏性系数
A_{v0}	最大垂直混合系数($=5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)
B_{mh}	水平 Biharmonic 湍流黏性系数
C_0	海底摩擦系数($=2.6 \times 10^{-3}$)
C_p	海水的等压比热($=3.901 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
C_S	对流调整所造成的盐度变率
C_T	对流调整所造成的位温变率
D	海表热通量 Haney 公式中的一阶项系数; 或 Smagorinsky 水平黏性方案的总变形量
D_S	剪切力
D_T	张力
$E-P$	向上的淡水通量,即蒸发率-降水率
F_{aw}	水道的水-气热通量
F_{iw}	冰底和下面的海水之间的热通量
F_S	盐度的湍流扩散项
F_T	位温的湍流扩散项

F_λ	λ 方向湍流黏性项
$F_{\lambda h}$	λ 方向动量方程水平湍流黏性项
$F_{\lambda v}$	λ 方向动量方程垂直湍流黏性项
F_θ	θ 方向湍流黏性项
$F_{\theta h}$	θ 方向动量方程水平湍流黏性项
$F_{\theta v}$	θ 方向动量方程垂直湍流黏性项
H	海表感热通量
H_b	准阶梯状的海底地形
H_m	最大地形深度
K	和扩散有关的三维的二秩张量
L	海表潜热通量
L_1, L_2	太阳辐射穿透加热项中的两个指数衰减的深度($L_1=0.35\text{m}, L_2=23.0\text{m}$)
N_B	一个斜压步中完成正压积分的步数
N_C	一个温盐步中完成斜压积分的步数
Q	海表热通量 Haney 公式中的零阶项系数
Q_{pen}	太阳辐射穿透加热项
Q_S	海表或高纬度侧边界盐度通量
Q_T	海表或高纬度侧边界热通量
R	海表净长波辐射;或主要是沿着等位密度面的扩散项
Ri	Richardson 数
R_u	n 时刻 λ 方向动量方程的 Coriolis 项和 R_u' 项之和
R_u'	λ 方向动量方程中除 Coriolis 项和时间变化项之外的其他项的和
R_v	n 时刻 θ 方向动量方程的 Coriolis 项和 R_v' 项之和
R_v'	θ 方向动量方程中除 Coriolis 项和时间变化项之外的其他项的和
S	海水的盐度
S_1	大洋表层的参考盐度
S_w	模式各层的太阳辐射穿透
S_{w0}	海表净短波辐射
S_λ	等位密度面的 λ 方向坡度
S_θ	等位密度面的 θ 方向坡度
$\mathbf{S}$	等位密度面坡度矢量
S	海水的盐度
S_m	模拟的海表盐度

S_{mod}	模拟的盐度
S_o	观测的海表盐度
S_{obs}	观测的盐度
S_r	参考盐度
T	海水的位温
T_A	海表气温
T_b	海水的冰点($=-1.8^{\circ}\text{C}$)
T_g	大气下垫面温度
T_m	模拟的海表位温
T_{mod}	模拟的海水位温
T_o	观测的海表位温
T_{obs}	观测的海水
T_s	海冰下面的海水位温
T_r	参考位温
V_A	海表风速
X_B	λ 方向平流项和湍流黏性项之和
Y_B	θ 方向平流项和湍流黏性项之和
α	在太阳辐射穿透加热项中为两个衰减深度上分配的比例($=0.58$); 在底边界条件中为底摩擦力的夹角;在 Asselin 滤波中为滤波系数; 在加速收敛中为动量方程的加速因子
α_0	海冰对短波辐射的穿透率($=0.068$)
α_1	海冰反照率($=0.5$)
α_w	海水反照率($=0.1$)
β	海水和海冰的指标, $\beta=1$ 对应于冰面, $\beta=0$ 对应于水面
Γ	盐度方程的加速因子
δS	海水状态方程中盐度的偏差
δT	海水状态方程中位温的偏差
$\delta \rho$	海水状态方程中密度的偏差
Δt_B	正压步的时间步长
Δt_C	斜压步的时间步长
Δt_{TS}	温盐步的时间步长
$\Delta \eta_k$	w 型网格元厚度
$\Delta \eta_{k+1/2}$	T 型网格元厚度
$\Delta \lambda$	λ 网格距

$\Delta\theta_i$	T 型网格元 θ 网格距
$\Delta\theta_{j+1/2}$	U 型网格元 θ 网格距
ϵ	穿过和沿着等位度面的扩散系数的比值;或 Coriolis 力调整的系数
H	地形坐标
η_s	准阶梯状的海底地形与最大地形深度之比
$\dot{\eta}$	η 坐标的垂直速度
κ	反映冰-水湍流热通量交换的常数($=2.04 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
λ	经度
φ	纬度
θ	余纬
ρ	海水现场密度
ρ_0	海水平均密度($1.029 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$)
ρ_{pot}	海水位密度
ρ_r	海水参考密度
$\tau_{b\lambda}$	λ 方向海底的摩擦应力
$\tau_{b\theta}$	θ 方向海底的摩擦应力
τ_S	盐度恢复系数
τ_T	位温恢复系数
τ_λ	λ 方向的风应力
$\tau_{\lambda\lambda}$	应力张量分量
$\tau_{\lambda\theta}$	应力张量分量
τ_θ	θ 方向的风应力
$\tau_{\theta\lambda}$	应力张量分量
$\tau_{\theta\theta}$	应力张量分量
ω	地球旋转角速度($=7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)
Δ	球面二维 Laplace 算子, $\nabla = \frac{1}{a^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta} + \frac{1}{a^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial\lambda^2}$
∇_{3D}	球面三维梯度算子, $\nabla_{3D} = \left(\frac{\partial}{a\partial\theta}, \frac{\partial}{a\sin\theta\partial\lambda}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$

目 录

前言	(i)
说明	(iii)
致谢	(iv)
符号和算子	(v)
1 引言	(1)
1.1 什么是 LICOM	(1)
1.2 LASG 气候系统海洋模式的演化	(1)
1.3 LICOM 1.0 简介	(3)
1.3.1 模式技术改进	(3)
1.3.2 计算机技术改进	(5)
1.4 LICOM 未来发展	(6)
1.5 前一版本 BUG 更正	(7)
1.6 手册内容安排	(7)
2 模式原理	(8)
2.1 模式方程组和边界条件	(8)
2.1.1 球坐标大洋环流控制方程	(8)
2.1.2 湍流黏性项	(9)
2.1.3 湍流扩散项	(11)
2.1.4 中尺度涡旋作用的参数化方案 GM90	(11)
2.1.5 穿透加热项	(12)
2.1.6 对流调整	(13)
2.1.7 海水状态方程	(13)
2.1.8 垂直坐标	(16)
2.1.9 正压方程组	(17)
2.1.10 边界条件	(17)
2.1.11 初始条件	(19)
2.1.12 小结	(19)
2.2 数值方法	(19)
2.2.1 网格	(19)
2.2.2 模式地形	(20)
2.2.3 空间差分	(22)
2.2.4 正、斜压耦合	(25)

2.2.5	时间积分	(25)
2.2.6	Coriolis 力调整	(26)
2.2.7	加速收敛技术	(27)
2.2.8	高纬度平滑	(27)
2.3	其他	(28)
2.3.1	Haney 海表热通量	(28)
2.3.2	热力学海冰模式	(28)
3	程序设计	(30)
3.1	模式变量和参数	(30)
3.1.1	模式网格参数	(30)
3.1.2	模式主要变量	(31)
3.1.3	模式主要参数	(36)
3.2	模式子程序结构和用途	(43)
3.2.1	程序文件列表	(43)
3.2.2	MODULE 和头文件	(45)
3.2.3	主程序和流程图	(45)
3.2.4	其他程序	(47)
3.3	模式并行的实现	(52)
3.3.1	OpenMP 并行的实现	(53)
3.3.2	MPI 并行的实现	(53)
3.3.3	OpenMP 和 MPI 的混合使用	(54)
4	使用说明	(55)
4.1	系统要求	(55)
4.2	模式资料	(55)
4.2.1	资料来源	(56)
4.2.2	资料处理	(56)
4.2.3	资料输入	(56)
4.3	模式编译和运行	(60)
4.3.1	目录结构	(60)
4.3.2	Makefile	(61)
4.3.3	Cshell 脚本	(63)
4.3.4	运行过程	(68)
4.4	模式的输出	(68)
4.4.1	全球平均	(68)
4.4.2	模式时间	(69)
4.4.3	月平均值	(69)
4.4.4	restart 场	(69)

4.5	常见问题	(69)
4.5.1	基本问题	(70)
4.5.2	原理	(70)
4.5.3	配置	(71)
4.5.4	编译、连接和运行	(72)
4.6	常用软件	(73)
4.6.1	Fortran90	(73)
4.6.2	NetCDF	(73)
4.6.3	MPI	(74)
4.6.4	OpenMP	(74)
4.6.5	GrADS	(74)
4.6.6	UNIX Shell	(74)
4.6.7	其他命令	(74)
附录		(75)
A	LICOM1.0 测试结果	(75)
A.1	测试平台	(75)
A.2	试验	(75)
A.3	试验结果	(75)
B	LICOM1.0 的基本性能评估	(76)
B.1	强迫场	(76)
B.2	全球	(80)
B.3	热带太平洋	(89)
B.4	热带印度洋	(94)
B.5	印度尼西亚海区	(98)
C	缩略语	(100)
D	LASG/IAP 大洋环流模式相关论文	(101)
D.1	期刊	(101)
D.2	学位论文	(103)
D.3	专著	(103)
E	参考文献	(103)

1. 引言

1.1 什么是 LICOM

LICOM 是中国科学院大气物理研究所(IAP)大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)气候系统(Climate system)海洋模式(Ocean Model)的英文缩写(LASG/IAP Climate system Ocean Model)。LICOM 是由 LASG 全球海气耦合模式研究组设计和发展的,目的是提供能够模拟大尺度风生环流和热盐环流的数值海洋模式,用以作为耦合气候模式的海洋分模式(简称为气候海洋模式)。目前的耦合气候模式主要是海气耦合模式,未来将发展成为包括更多圈层相互作用的气候系统模式。LICOM 是 LASG 为发展气候系统模式所做的努力的一个重要组成部分。

正如 LASG 在过去十余年中先后推出的 4 层、20 层、和 30 层海洋模式那样,LICOM 也将是一个版本不断更新的模式系列,现在推出的这个版本称为 LICOM1.0。LICOM1.0 是一个水平格距 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 、垂直方向 30 层、覆盖了从 65°N 到 75°S 的准全球范围的海洋环流模式(刘海龙,2002)。它是在原有的水平格距为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 的 30 层海洋模式(Jin 等,1999)的基础上发展起来的。

1.2 LASG 气候系统海洋模式的演化

LASG 发展的第一个气候海洋环流模式是一个格距为 $4^\circ \times 5^\circ$ 、南北范围 $60^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{S}$ 的 4 层模式(Zhang 和 Liang,1989)。按照曾庆存关于海气耦合数值模式的设计(Zeng,1983),该模式考虑了海表高度的时空变化,而没有采用传统的“刚盖”(rigid-lid)近似(Bryan,1969)。这个“完全的”原始方程模式采用了曾庆存等设计的守恒有限差分格式(Zeng 和 Zhang,1987)。此后推出的 LASG 气候海洋模式也都保留了这两个特点。4 层模式的修订版本(Zhang 等,1991)中考虑了盐度的变化,并将原来的 C 网格换成了 B 网格。该模式实现了同 IAP 两层大气环流模式(Zeng 等,1989)的耦合,成功地模拟出赤道太平洋上一类西传的年际气候变动(Zhang 等,1992;Chen 等,1993)。

LASG 发展的第二个气候海洋模式是一个 20 层模式,水平格距仍为 $4^\circ \times 5^\circ$ 。它的原始版本(陈克明,1994;Zhang 等,1996)的南北范围是从 70°N 到南极大陆沿岸,修订版本(俞永强,1997)扩展为包括北冰洋在内的全球模式。模式中还引进了热力学海冰过程。同 4 层模式相比,20 层模式的一个主要改进是模拟出了以北大西洋深水为主要特征的热盐环流。20 层海洋模式先是实现了同两层大气模式的耦合,用来研究增强温室效应引起的气候变化(陈克明,1997),随后又实现了和 9 层 R15 截谱大气环流模式(Wu 等,1996)的耦合(Liu 等,1996;俞永强,1997),后者发展成 LASG 的全球海洋-大气-陆地系统模式(GOALS),用于多方面的气候

模拟研究(吴国雄等,1997;Zhang等,2000)。GOALS的第4版本中考虑了淡水通量对海洋盐度的影响(Zhou等,2000),它模拟的大气CO₂增加引起的气候变化(Guo等,2001)被关于气候变化的政府间专门委员会(IPCC)发表的第三次科学评估报告所引用(IPCC,2001)。

20层模式的垂直坐标采用了 η 坐标(Mesinger和Janjic,1985;宇如聪,1989)。这是LASG气候海洋模式的特点之一。模式的时间积分采用了正压和斜压过程“分解-耦合”(Mellor,1993)和Asselin时间滤波(Asselin,1972)相结合的方法,这个方法至今仍在使用。

LASG发展的第三个气候海洋模式(Jin等,1999)是一个30层模式,水平格距约为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 。为了方便同截谱大气环流模式的耦合,水平布网采用了纬圈63波的三角形截谱(T63)方式,故该模式简称为“L30T63”(金向泽等,2000)。同20层海洋模式相比,L30T63最重要的改进在于恒定温跃层(permanent thermocline)和有显著季节和年际变化的赤道温跃层(equatorial thermocline)的模拟。前者得益于用Gent和McWilliams(1990)提出的中尺度涡参数化方案(简称GM90)取代了原来的基于 z 坐标的温度和盐度扩散方案,后者则得益于在热带上层海洋中引入了“P-P”垂直混合方案(Pacanowski和Philander,1981)。在认可L30T63模拟热盐环流能力的基础上,着重检验和评估了它模拟风生环流的能力。这方面的研究包括:模式对不同来源的风应力响应的敏感性分析(俞永强等,2001),对模式模拟西风爆发期间赤道西太平洋暖池热平衡状况能力的检验(刘海龙等,2002),以及对模拟热带太平洋年平均海表温度(SST)和温跃层误差的分析(张学洪等,2003)。

以L30T63为海洋分模式,借助于美国国家大气研究中心(NCAR)气候系统模式CSM-1(Boville和Gent,1998)的模块化框架,LASG推出了一个“灵活的”耦合气候模式的原始版本(FGCM-0;Yu等,2002)。FGCM-0正在被用于热带海气相互作用以及古海洋和古气候的研究,并将为LASG模块化气候系统模式的发展提供必要的知识和经验。

此外,L30T63还实现了和国家气候中心(NCC)T63-大气环流模式(董敏等,2000;叶正清等,2000)的耦合(俞永强和张学洪,2000;刘喜迎,2001),以及与9层R15截谱大气环流模式(Wu等,1996)及其升级版本9层R42截谱大气环流模式(Wu等,2003)的耦合(张韬等,2002;吴统文等,2003)。与T63的耦合模式正在被用于NCC短期气候预测试验和气候变化的研究。

为了更好地应用,在发展模式的同时,对模式文本的建立也给予充分的重视。20层模式(Jin等,2000)和L30T63^①都有较详细的原理和使用说明,这也是本参考手册的基础。

从20世纪80年代末至今,LASG气候海洋模式经历了一个在原有基础上不断改进的过程,这个过程始终是和LASG耦合气候模式的发展和应用结合进行的。

采用非刚盖近似的完全原始方程模式和相应的守恒差分格式,以及用 η 坐标系描写地形起伏和海表高度的时空变化,是这些模式迄今仍然保留的特点。随着垂直和水平分辨率的不断提高和一些成熟的参数化方法(如中尺度涡参数化方案GM90和热带上层海洋垂直混合的P-P方案)的引进,模式模拟风生环流和热盐环流的能力得到了显著的改进。这些模式以及从中获得的知识和经验,为LICOM1.0的推出提供了比较坚实的基础。

^① 周天军、金向泽、张学洪,三十层全球大洋环流模式的原理和三十层全球大洋环流模式使用说明,2000。