

干部继续教育系列教材

数值天气预报中的 若干新技术

廖洞贤 柳崇健 主编

气象出版社

数值天气预报中的若干新技术

廖洞贤 柳崇健 主编

气象出版社

(京)新登字 046 号

内 容 简 介

本书涉及到数值天气预报领域的最新发展,深入浅出地论述了从网格设计、物理过程与边界层参数化、卫星资料应用、四维同化一直到并行计算和可预报性等各主要研究方向的前沿课题及其成果,基础理论与实际应用并重,不但适合于大气科学、海洋学、水文学、应用数学和计算流体力学等专业的科技工作者和大专院校师生阅读,亦可供广大从事业务预报工作的科技人员在应用时参考。

本书是北京气象学院干部继续教育系列教材之一。

数值天气预报中的若干新技术

廖洞贤 柳崇健 主编

责任编辑:黄丽荣 终审:纪乃晋 周诗健

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路 46 号 100081)

开本:850×1168 1/32 印张:14.4 字数:380 千字

1995 年 7 月第 1 版 1995 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册

ISBN 7-5029-1732-2/P·0762

定价:28 元

前 言

近十年来,在数值天气预报领域内涌现了许多新技术。比如,在资料同化方面,有以伴随方程为动力约束,结合资料约束的变分技术,可以直接使用各不同时刻的所有观测资料(如卫星辐射资料),使资料和模式协调,从而代替了客观分析和初始化;在积云对流方面,有质量通量方案和 Betts 对流调整方案,前者可以考虑积云和环境场之间的相互作用,卷出、卷入和上升、下沉的质量通量等;在计算方法方面,有半拉格朗日法和多重网格法,前者可以显著延长时间步长,而对计算精度无大影响,后者可以加快椭圆型方程的数值解的收敛速度,在高精度情况下,比超松弛法快十倍以上,而且,随着并行计算机的发展,并行算法也得到迅速发展,大气模式的设计有适应其发展的趋势。

因此,对于我国每一个数值天气预报工作者来说,只有经常更新知识,才能跟上时代,不至落后;从而,我国的数值天气预报事业才会兴旺发达,永远立于国际先进行列。

为了满足上述需要,经中国气象学会数值预报专业委员会发起,我们就最近十年来国内外数值天气预报新技术中有代表性的方面,编写了《数值天气预报新技术讲义》,并于 1993 年 10 月在中国气象局天气司、科教司、中国气象学会数值预报专业委员会、国家气象中心和北京气象学院联合举办的全国数值天气预报新技术讲习班上试讲,后经编委参考学员提出的宝贵意见组织修改增补成《数值天气预报中的若干新技术》一书,希望此书的出版能对广大读者有所帮助。

必须指出,由于篇幅和撰稿者水平有限,我们不可能将所有新技术都一一进行介绍,很可能将重要的遗漏了,也可能还有技术或文字上的错误,希望读者能无保留地提出批评意见,以便日后改正,是所至盼。

廖洞贤 柳崇健

1994年6月

序 言

现代社会的一大特点是教育观的根本转变,受教育不再只是青少年的事了。青年人要接受教育,中年人要接受教育,甚至老年人也要接受教育,接受教育已成为现代社会里每个人的终身义务。二次世界大战后成人教育在全世界蓬勃发展,成人教育的发展不仅提高了整个社会的文明程度,也使每个人能更好地适应现代社会的高速发展和高节奏的生活。

现代社会被人们称之为信息社会、知识爆炸的社会,“知识”正以前所未有的速度在更新、更替。已经接受教育、甚至高等教育的人如果不重新回到课堂去学习,就会落伍,就会跟不上时代发展的步伐,也就难以为社会的进步作出更大的贡献,难以在自己的社会贡献中实现自己的价值。继续教育的任务就是要使那些已经接受过高等教育的人再次接受教育,重新学习和掌握已经更新和发展了的知识。

国家教委最近公布的《中国教育改革和发展纲要》中指出:成人教育是传统学校教育向终身教育发展的一种新型教育制度,对不断提高全民族素质、促进经济和社会发展具有重要作用,要把大力开展岗位培训和继续教育作为重点,重视从业人员的知识更新。

气象继续教育的功能还有着更为特殊而重要的内涵。它不仅是一般性地充实从业人员的知识,提高他们的基本素质,它还直接关系到气象现代化的进程,关系到气象现代化建设所创造的社会效益和经济效益。

1984年1月国家气象局在北京召开了全国气象工作会议,一

致通过了《建国以来气象工作基本经验总结》和《气象现代化建设发展纲要》，气象事业重新走上了健康发展的轨道，气象现代化建设从此大踏步地前进了，取得了举世瞩目的成绩。今年国家气象局又召开了具有深远意义的全国气象工作会议，总结经验，规划未来，气象事业又将上一个新的台阶。

面对着这样一个令人兴奋的局面，我们还有着一重顾虑，那就是人才的匮乏。因为任何现代化工程项目的建设不仅仅是一个资金问题，建成后能否充分发挥建设效益的关键性制约因素，是管理水平和技术人员素质的高低。在“气象卫星综合应用业务系统”、“大气监测自动化系统”等六大骨干工程正在加紧建设的今天，“十年树木，百年树人”，管理人员和技术人员的超前培训已经迫在眉睫。

有鉴于此，为适应这种形势，国家气象局 1990 年在成都召开了全国气象教育工作会议，对三所直属高等院校的任务和分工做了调整，明确指出，今后北京气象学院要把成人教育、特别是高层次继续教育作为工作的重点。这是具有重大战略意义的决策，充分体现了国家气象局领导在发展气象现代化的进程中所具有的远见卓识。

经过近三年的努力，北京气象学院已初步建成了继续教育体系，对一批中高层次的管理人员和技术人员进行了短期培训，并且编写了一部分具有一定水平的教材，我们决定陆续出版，希望最终能形成一个完整的教材体系，对推进继续教育的发展做出一份微薄的贡献。

我院继续教育尚处起步阶段，由于种种条件的制约，当前

面临的困难甚多,师资队伍与高层次继续教育不相适应,在这种条件下编写的教材一定很不成熟。其中的缺陷、不足和错误,欢迎读者批评指正。

丑纪范

1993年3月30日于北京

目 录

1. 大气模式中的网格设计·····	(1)
2. 完全能量守恒差分法及其应用 ·····	(26)
3. 原始方程模式的分解算法和半拉格朗日法 ·····	(47)
4. 自适应网格法和多重网格法在计算地球流体力学中的 应用 ·····	(95)
5. 环流模式中的辐射参数化·····	(125)
6. NWP 应用卫星探测热辐射新进展 ·····	(148)
7. 边界层大气过程参数化和中尺度气象的 数值模拟·····	(178)
8. 次网格积云对流参数化·····	(231)
9. 四维同化的理论和新方法·····	(262)
10. 大规模并行计算——21 世纪气象数值模拟与预报 的未来 ·····	(295)
11. 大气科学问题并行计算方法 ·····	(307)
12. 大中尺度大气模式中云降水过程的模拟 ·····	(334)
13. 大气可预报性研究的新进展——对数值预报效果 的预测 ·····	(365)
14. 若干著名的全球大气环流模式的比较 ·····	(392)

1. 大气模式中的网格设计

廖洞贤

1.1 前言

众所周知,任何一个模式都需要离散化才能进行计算,因而,也需要网格设计。考虑计算精度和网格分辨率有关,模式中所能表示的波随网格而异;而且网格不同,未知变量的配置不同,所能采用的计算方法也受到很大限制。所以,网格设计和模式设计紧密相关,研究模式和设计模式者都非常重视。

虽然,网格设计还受到计算机性能的极大影响,但后者种类繁多,不针对一定的型号,很难考虑它们之间的关系。为此,在本文中,我们将限于其和模式有关的部分。

下面我们将依次就在天气学和动力学方面的考虑、垂直分辨率和水平分辨率的协调、嵌套网格和变网格、适应网格和自适应网格等进行讲述。

1.2 天气学和计算精度的考虑

1.2.1 水平方向

许多物理量,如平流、气压梯度的计算,都和空间差商的计算有关,后者的精度直接影响数值解的精度。如用气象要素 f 的差商和其微商之比

$$R = \frac{\frac{\Delta f}{\Delta x}}{\frac{\partial f}{\partial x}} \quad (1.1)$$

来衡量差商的精度,则当

$$f = A \sin \frac{2\pi}{L} x \quad (1.2)$$

时,对于不同波长 $L (=q\Delta x)$ 的波,我们可以得到表 1 和表 2⁽¹⁾。从表 1.1 和表 1.2 中可以看出:如要求 R 和 $\hat{C}/C$ 都大于 0.9,波长应大于 $8\Delta x$ 。考虑天气图上一般最短的波的波长在 1000km 以上,

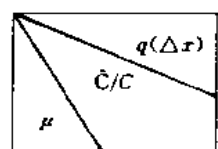
Δx 应小于 125km。

表 1.1 差商的精度比 R

$q(\Delta x)$	2	4	6	8	10	12	14	16
R	0.0000	0.6366	0.8269	0.9002	0.9355	0.9549	0.9668	0.9745

注: $L=q\Delta x$

表 1.2 用蛙跃格式计算的波速比

	4	6	8	10
0.2	0.64	0.83	0.90	0.93
0.4	0.66	0.84	0.91	0.94

注: $\hat{C}$ 、 C 各表示数值解和准确解的波速; $\mu = C\Delta t/\Delta x$ 。

1.2.2 垂直方向

1.2.2.1 层数

在大气中如果从位势高度考虑,要表示温度场至少需要两层;要表示温度随高度的变化,至少需要 3 层;而要表示温度直减率随高度的变化,则至少需要 4 层;为了使计算精密一些,则应在 5 层以上。

1.2.2.2 分层的疏密

现在,许多业务模式都用不等距分层(如 $EC^{(2)}$),考虑对流层顶附近和边界层内温度、风等气象要素随高度变化较大,一般在这些地方分层较密,其他地方较疏。

1.2.2.3 模式顶高度

有些模式顶高度取到大气顶。但由于大气顶资料无定义,其附近资料也少,也有不少模式把顶取到略低于大气顶的地方。如为了作好中长期预报,描述好超长波是很重要的。根据观测,其位势高度的 1 波的中心高度很多都在 200hPa 以上,甚至在 30hPa 以上⁽³⁾,看来,模式顶不能低于 30hPa。

1.2.3 资料误差的影响

前面的讨论没有考虑资料误差的影响。如考虑这一因素,则表 1.1 和表 1.2 中的结果会有所改变。设气象要素 f 的资料误差为 ϵ , 则

$$f = \hat{f} + \epsilon \quad (1.3)$$

式中 $\hat{f}$ 为真值。于是

$$\frac{\Delta f}{2\Delta x} - \frac{\partial \hat{f}}{\partial x} = \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \hat{f}}{\partial x^3} \Delta x^2 + \frac{\Delta \epsilon}{2\Delta x} + \dots \quad (1.4)$$

可见,截断误差虽然随 Δx 的减小而减小,但 $\Delta \epsilon / 2\Delta x$ 的最大误差却随 Δx 的减小而增大,二者是相反的,故存在最佳的 Δx , 记为 $\Delta x_{opt}^{(4)}$ 。在单波的情形,

$$\Delta x_{opt} = \frac{L}{\pi} \sqrt[3]{\frac{3\epsilon_{max}}{4A}} \quad (1.5)$$

如 $L = 10^3 \text{ km}$, $\epsilon_{max}/A = 1/10$, 则 $\Delta x_{opt} \sim 130 \text{ km}$, 比不考虑资料误差情况的稍大。

在谱方法的情况,修艾军曾得出⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sum_{i=0}^{N-1} \{ (F_i - \tilde{F}_n(x_i))^2 \} \\ &\leq \sum_{i=0}^{N-1} \{ (F_i - \bar{F}_n(x_i))^2 + N(\epsilon_0^2 + 2n\sigma_\epsilon^2) \}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

式中 σ_1 为用实际资料只截取前几项的有限 Fourier 展开式在所有网格点的误差的平方和, $n \leq n'$, $N = 2n' + 1$, F_i 为真值, $\tilde{F}_n$ 为截取前 n 项的带有资料误差的 F 值, $\bar{F}_n$ 为截取前 n 项的不带资料误差的 F 值, ϵ_0 为资料系统性误差, σ_ϵ^2 为资料误差的方差。从上式可以看出,如 $n = n'$, 且资料没有误差,则 $\sigma_1 = 0$ 。还可以看到,上式 $\leq$ 号右端第 1 项与 n 成反比, n 愈接近 n' , 误差愈小, $2Nn\sigma_\epsilon^2$ 与 n 成正比, n 愈接近 n' , 误差愈大。故存在最佳项数 n_{opt} 使 σ_1 为最小。

1.3 动力学的考虑

1.3.1 Baer 和 Ji 的工作

Baer 和 Ji(1989)曾根据以静止大气为基本状态的线性模式得

到的垂直结构方程,取不同分层进行离散,求出了不同的正规模⁵⁾。如取标准大气层结,以1000层的数值解为“标准解”,则 σ 等距9层和不同的等距 $\ln\sigma$ 分层的前9个正规模的相当深度的结果如表1.3所示。其中 σ 表示1000层的数值解。从表1.3可以看出:改变分层的方法而不改变分层数,可以使第2~9个正规模的相当深度有明显的变化。看来,自然对数等距分层求得的相当深度比 σ 等距分层求得的更接近“标准解”。而且,只改变对数分层的分层数并不使相当深度受到很大影响,不过,这时随着层数的增加,相当深度趋于“标准解”。

表1.3 不同 σ 和 $\ln\sigma$ 分层的前9个
正规模的相当深度(gpm)

波型	波型数				
	$\Delta\sigma$ 等距		$\Delta\ln\sigma$ 等距		
	9	9	12	15	σ
(1)	9355	9156	9175	9194	9341
(2)	2429	2167	2375	2330	2247
(3)	411	841	789	763	102
(4)	82	391	360	343	311
(5)	58	243	214	205	183
(6)	21	176	150	141	126
(7)	11	127	120	108	88
(8)	6.5	132	93	84	63
(9)	4.0	67	84	68	48

另一方面,如果层数固定,任一种不等距分层都可以求出与其正规模相应的相当深度,以及其与“标准层”的误差。这样,调节不同的分层我们总可以找到在一定层数下最优的分层。使用两参数最优化方法,可以得到层数为7、9、12、15的最优的 σ 分层(以hPa为单位),如表1.4所示⁽⁷⁾。可以看出:这几种分层都是上密下疏,和一般的分层有所不同。

表 1.4 最优 σ -面

7	9	12	15
14.7	13.2	12.3	11.8
28.3	22.3	18.1	16.0
54.6	31.7	26.6	21.8
106	61.9	39.0	29.6
218	103	57.3	40.3
592	172	84.1	54.8
943	297	123	74.4
	653	181	101
	963	266	138
		492	187
		819	254
		985	346
			540
			827
			986

1.3.2 Kasahara 的工作

Kasahara 从另一角度出发,研究了不稳定增长率和相速度对不同垂直分层 N 的依赖关系,以及对于不同水平波长,其不稳定增长率和相速度随垂直分层的变化⁽⁴⁾。他根据郭晓岚的 β -平面准地转无因次线性化位涡方程推出的垂直结构方程,在一定边界条件下求出其正规解,再用其正规解作基函数展开流函数和基本风速(是 $-\ln\sigma$ 的函数),代入位涡方程,从而,求得在 N 一定时,不稳定增长率、相速度对垂直切变和水平波长的依赖关系。其结果如图 1.1 和图 1.2 所示。从图 1.1(a)可以看出:当 $N=9$ 时,在实线和虚线之间有一狭窄的稳定区;在图 1.1(b)中也有相应的狭窄区。在水平波长 $L \leq 1000\text{km}$ 处,是稳定区,和经典结果一致。但是,当 $N=36$ 时,狭窄区消失;在 $L \leq 1000\text{km}$ 处看来是不稳定区。

如果针对不同水平波长,研究不稳定增长率、相速度和 N 的关系,则有图 1.3 和图 1.4。从图中可以看到:如 $L=4000\text{km}$, $N < 20$ 时,不稳定增长率和相速度随 N 的变化都较大;而在 $N > 20$ 时,不稳定增长率的变化才迅速减小。对于 $L=16000\text{km}$ 的波,则

当 $N=70$ 时变化仍可察觉,看来还须 N 再大一些才无大变化。这些情况说明:随着 L 的增加,数值解近于收敛所需的 N 也增加。

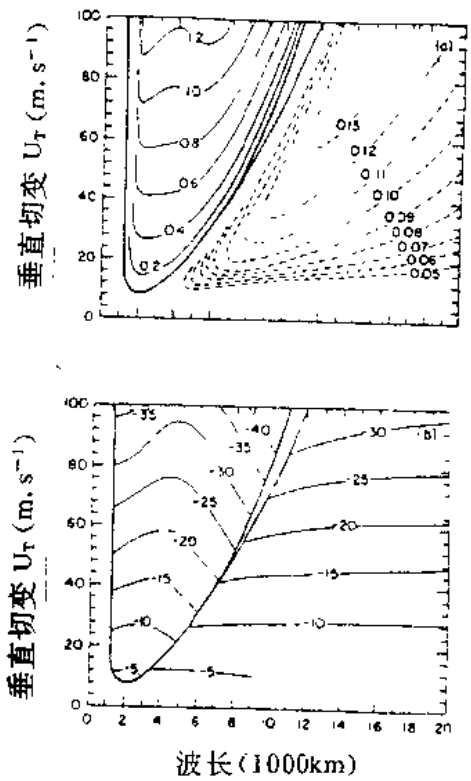


图 1.1 $N=9$ 时,不稳定增长率和相速度对垂直切变和水平波长的
依赖关系 (a)不稳定增长率;(b)相速度

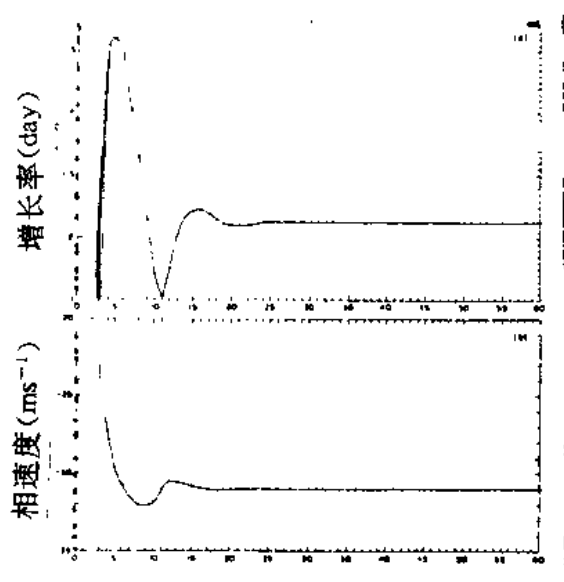


图 1.3 $UT=10\text{m/s}, L=4000\text{km}$ 时, 最不稳定模的增长率和相速度
对 N 的依赖 (a) 不稳定增长率; (b) 相速度

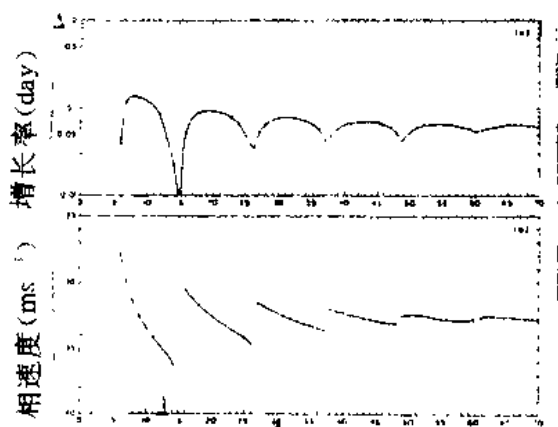


图 1.4 和图 1.3 相同, 但 $L=16000\text{km}$