

# 近年来统一模式的兴起

廖洞贤

(南京气象学院)

**摘要** 评述了数值预报统一模式的优点,它能提高工作效率,改进预报质量。

**关键词** 数值预报统一模式, 变网格统一模式

## 1 问题的提出

随着数值天气预报的发展,许多国家的气象中心所采用的预报模式越来越细,越来越专门。比如,用作气候估测或模拟的气候模式、用作中期预报的全球模式、用作短期预报的有限区域模式,以及用作暴雨预报的中尺度模式和台风模式等。为了使资料同化和它们协调,针对不同的模式,一般还建立了相应的同化系统。另外,在这些模式中,有些是相互依赖或紧密联系的。如有限区域模式的边值由半球或全球模式预报提供,或者两者作双向信息交换。中尺度模式和有限区域模式之间也有类似情况。不过,这种边界值的提供往往还不是同步的,如全球模式预报所依据的初始场时间大多早于有限区域预报所依据的初始场时间,等等;而且,由于不同模式所用的时间步长和网格距不同,它们之间的联系还需要通过时、空插值才能实现。

由于以上情况,以及模式设计思想的不同,在它们之间难免还存在有不协调。比如,即使都用有限差分,格式还可能不同;即使都采用郭晓岚积云对流参数化方案,细节也不尽相同。并且,对于这些模式,其研究、改进和业务人员需要几套。这对于一个人力、计算机资源和资料有限的气象中心来说,是一个沉重的负担!如果随着工作的发展,一出现新的重要的业务,就研制一个模式和其相应的资料同化系统,那么,不可避免地需要不断增加

编制,扩大并提高计算机系统,甚至做很多重复劳动!那么,数值天气预报这样发展下去,是否合理?这些模式是否可以合并或部分合并,甚至优化成为统一的模式?这是摆在数值天气预报工作者面前,值得深思并需认真研究的问题。

## 2 建立统一模式的可能性

根据上面提出的问题,把现用模式合并并进行优化是一个有效的途径。但问题是,有这个可能吗?这是需要回答的问题。为此,下面我们将首先就现用模式的共性和个性进行分析,并叙述一些重要的有关试验,再就建立统一模式的可能性进行分析。

### 2.1 现用模式的共性和个性

#### 2.1.1 模式的共性

主要有:它们所用的基本方程相同,都是 Navier-Stokes 方程、热力学方程、连续方程和状态方程等,只是各不同模式,针对其预报对象的尺度的不同,对方程一些项的取舍、简化有所不同,甚至还要增加一些其他方程而已。其次,所用的基本资料相同,使用特殊资料或特殊加密资料很少。至于物理过程,则一般都要考虑辐射、边界层、大尺度凝结和积云对流、湍流交换、摩擦、下垫面能量平衡和水分循环等,但程度上和方法上各有所不同。

#### 2.1.2 模式的个性

由于预报对象的尺度不同,各模式的计算域和分辨率很不相同,预报的时效也相差

很大。一般说来,气候模式的水平分辨率最低,中尺度模式最高,而时效则与此成反比。不同模式所用的计算方法也往往很不相同。一般全球性模式,除英国等外,普遍采用谱方法,而有限区域模式和中尺度模式,除个别中心外,一般采用差分法。至于坐标和时间积分,则不同模式千差万别,即使在同一中心也是如此。比如,在美国国家气象中心,既有用 $\sigma$ -坐标的,也有用 $\eta$ -坐标的;既有用欧拉法的,也有用半拉格朗日法的。而且,不同模式着重考虑的动力过程和物理过程还有所不同。如气候模式和长期预报模式普遍对海-气耦合、持续性非绝热加热很重视,而其他模式则对在较短时期内起作用的非绝热加热重视。以辐射为例,前者较重视其持续的辐射收支的作用,而后者更重视其短期的行为,如日变化、云和辐射的相互作用等。在动力过程中,则主要依预报对象的空间尺度而异。如全球性的模式,一般都要考虑 $f$ 、 $\beta$ 和地球曲率的作用,而有些中尺度模式则不予考虑或不完全予以考虑。此外,有些气候模式还要考虑大气化学过程,以及生物群体吸收、排放 $\text{CO}_2$ 的作用等。

## 2.2 两个试验

### 2.2.1 变网格和突变网格的试验

早在七十年代初,就有人进行过变网格研究(Sundquist, 1970; Anthes, 1970)<sup>[1,2]</sup>,但最早投入业务预报的则是加拿大气象中心(Staniforth 和 Mailhot, 1988)<sup>[3]</sup>,目的是做区域预报。1992年 Gravel 和 Staniforth 为了解变网格和突变网格对预报的影响,在以网格距为 100 公里的中心区以外做了变网格(中心区以外网格距以 10% 递增)和突变网格(中心区以外为 350 公里)的浅水方程预报的比较试验<sup>[4]</sup>。还用网格距为 50 公里的均匀网格(包括中心区以外的、与两种变网格相同的半球范围的计算域)预报作为对照,分别计算了变网格预报和突变网格预报的均方根高度差,如图 1 所示。可以看出,变网格预报的高度差明显比突变网格预报的为小。

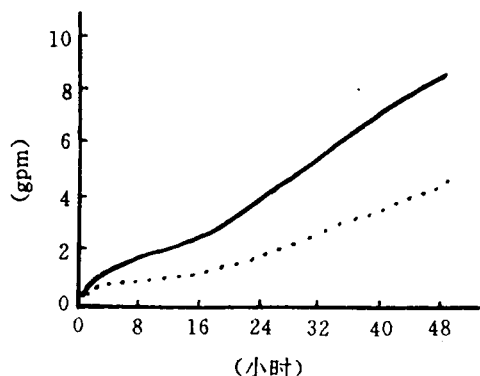


图 1 变网格预报和突变网格预报均方根高度差(5 个例子平均。实线:突变网格,虚线:变网格)

### 2.2.2 完全可压缩非静力区域模式的试验

Tanguay 等(1990)曾用完全可压缩非静力半隐式半拉格朗日区域模式进行试验<sup>[5]</sup>。发现尽管没有加静力假设以滤去沿垂直方向传播的声波,但用 100 公里的网格,效果仍和用静力模式的很相似;非静力可压缩的作用弱而不产生有害作用;而且,和静力模式相比,额外运算量也不大。这说明区域预报和中尺度预报可以在不同分辨率下用同一完全可压缩非静力模式。

上面两个试验说明:制作变网格预报是可行的,只要网格距是渐变的即可(当然,也要有合适的算法);区域模式和中尺度模式在提法上可以统一起来,而相对于前者,增加的额外运算量并不大。

### 2.3 建立统一模式的可能性

根据以上情况,尽管各模式的共性很多,但个性也很突出,要把它们完全有机地统一起来,困难是巨大的。不过,既有共性,至少有可能做部分的统一。从现用模式看,差别较小的是做中期预报的全球模式和有限区域模式。它们除了计算范围、分辨率,甚至所用算法有明显不同外,其他没有本质的差别。比如,两者预报的时效差较小,所用物理过程大体相同。如果一些参数依赖于水平网格距,有些过程可视为相同。即使有的模式还要考虑

一些其他过程,也可以单独保留。至于无法统一的分辨率和计算范围等,则可以用变网格和相应的算法来解决。在这方面,加拿大和法国气象学者已做出贡献,下面还将对它们各做适当的介绍。所以,研制统一模式是可能的,也是可行的,至少是部分可行的。如果统一的方式再灵活些,则统一的模式还可以扩大,甚至包括所有业务上应用的模式。

### 3 两类统一模式

当前,已建立的统一模式有两类:一是变网格模式;一是多种模式的复合体,下面不妨称为“灵活”统一模式。现在,我们分别进行叙述。

#### 3.1 变网格统一模式

在这类模式中,网格距是随位置而变的,有粗有细。这方面有代表性的是加拿大气象中心(Côté等,1993)<sup>[6]</sup>和法国气象局(WMO,1992)<sup>[7-9]</sup>的工作。

##### 3.1.1 加拿大气象中心的工作

采用球面经纬度坐标,水平网格如图2所示。在图中,北美地区(以下称“中心区”)为均匀细网格, $\Delta\lambda=\Delta\varphi=0.5^\circ$ ,中心位于 $51^\circ\text{N}$ , $103^\circ\text{W}$ ,计算时则在旋转球面坐标的赤道上。

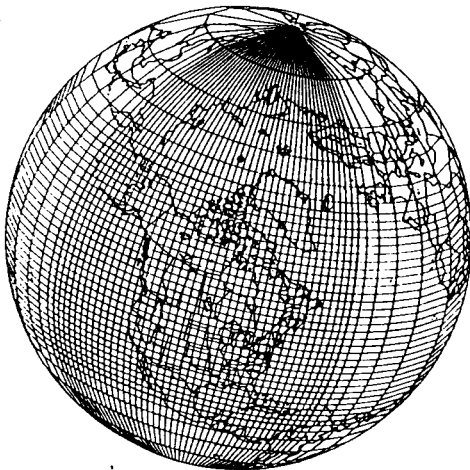


图2 加拿大气象中心统一模式所用水平变网格

从中心区向外,网格距逐渐加大,相邻网格距之差约10%。在中心区共 $161\times 121$ 点,全球共 $224\times 169$ 点,前者约为后者的51%。可是,如果在全球范围内 $\Delta\lambda,\Delta\varphi$ 都取 $0.5^\circ$ ,则共有 $720\times 361$ 点。所以,全球变网格和全球均匀细网格点数之比约为1:7,使用变网格节省CPU时间是显然的。图3a、b各是用全球均匀细网格和全球变网格,用旋转球面坐标有限元浅水方程模式做的48小时预报。从图中可以看出:在中心区,用肉眼很难看出两者的差别,只是在远离该区的中亚地区相差较大。这可能与中亚地区分辨率太低有关;看来,在分辨率上做些调整,使粗网格预报质量得到改善是可能的。值得注意的是:在粗、细网格之间没有进行任何平滑,也没有出现像一般嵌套网格预报那样的寄生波和波的反射现象。不过,除中心区外,许多地区的网格不是正方形,有的地方, $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 相差较大,这容易造成两个方向截断误差的不协调,影响预报质量。另外,在远离中心区的地区,有的地区 $\Delta x$ (或 $\Delta y$ )很小,这看来不是预报所需要的。

##### 3.1.2 法国气象局的工作

1977年Schmidt曾定义过一个从球面到球面的正形投影(通过复平面),再利用投影的放大系数只是位置的函数而与方向无关的特点,使微分运算变得很简单,从而建立起全球谱模式并构造网格。

在Schmidt工作的基础上,从球面到球面的正形投影如图4所示;其中复平面 $P$ 切于以 $O$ 为心的球面上的极点 $N$ 。光从对极点 $S$ 把球面上的任一点 $A(\lambda,\mu)$ 投影到复平面 $P$ 上的某一点 $z(\mu=\sin\varphi)$ ,再经过变换

$$h(z) = c(z + be^{it}) \quad (1)$$

变成复平面的另一点 $z'$ ,再经过逆正形投影投射到球面上的点 $B(\lambda',\mu')$ 。这里 $\lambda$ 表示经度, $\varphi$ 表示纬度。变换(1)可以分解为

$$h(z) = h_2 h_1(z) \quad (2)$$

其中

$$h_1(z) = z + be^{it} \quad (3)$$

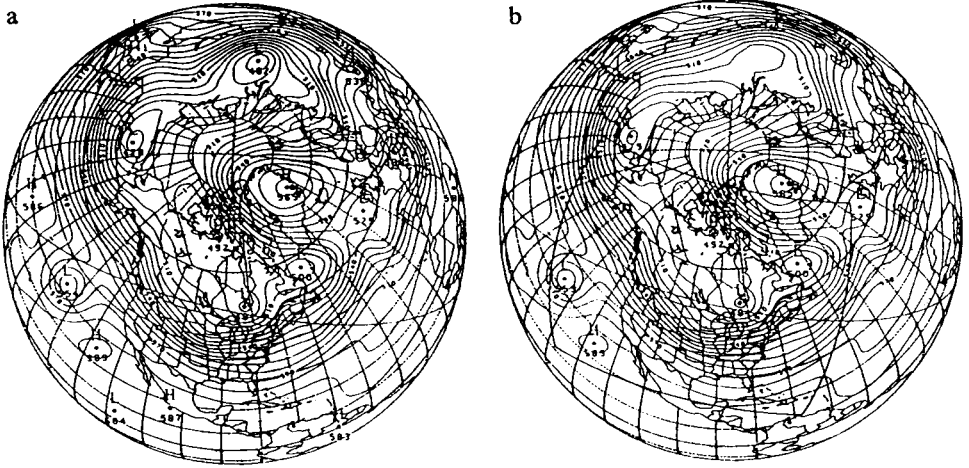


图 3 a. 全球均匀细网格 48 小时预报; b. 全球变网格 48 小时预报

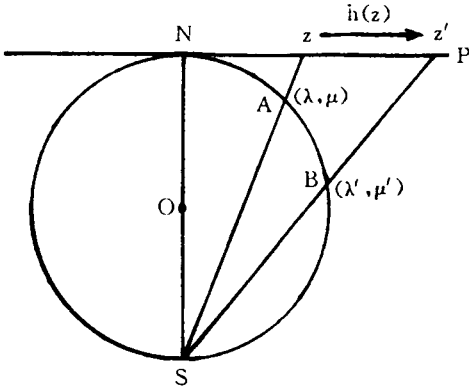


图 4 从球面到球面的正形投影

$$h_2(\cdot) = c(\cdot) \quad (4)$$

$\tau$  是旋转角。如  $\tau=0$ ,  $h_1(z)$  表示平移。 $h_2(\cdot)$  表示按比率  $c$  放大;  $c$  设为一大于零的实数。

根据文献[8], 如只考虑放大, 放大系数是一阶球谐函数的平方, 故其阶数是 2, 这时, 全球有一个收缩区(高分辨)和一个伸展区(低分辨)。如用浅水方程变网格 T 21 做预报, 则在收缩区的预报近于均匀网格的 T 42; 反之在伸展区, 用变网格 T 42 做的预报和用均匀网格的 T 21 相当。这说明通过正形投影使收缩区分辨率提高的方法是有效的。

如果还考虑  $h_1(z)$ , 则极点位置可以移动, 这时情况比较复杂, 但可以构造更实用的

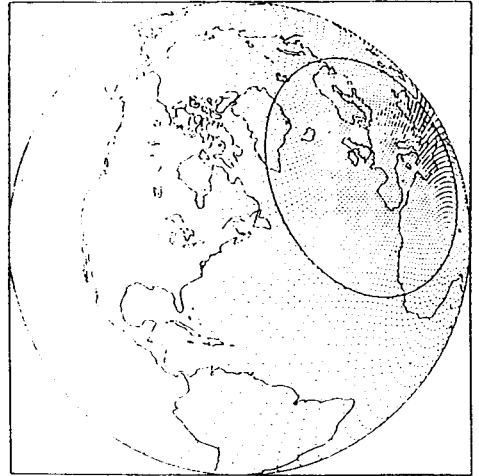


图 5 法国气象局研制的变网格

变网格。

现在, 这个方法经过改进并采用半拉格朗日技术后, 已在业务预报中应用<sup>[7]</sup>。其变网格如图 5 所示, 可以看出, 网格距变化是明显的。

### 3.2 灵活统一模式

这类模式是为了照顾现实, 就已有模式进行最大限度的统一、优化和协调而成的复合体。它有同一的语言和标准子程序, 可以在统一的结构下联接起来; 在网格、动力框架和

物理过程上,也尽量如此;相差较大的,如经过加工可以统一的,也统一起来;实在不能统一的,则作为单独的子程序保留。这方面有代表性的是英国气象局的工作(Cullen,1993)。为了了解得清楚些,下面我们将就该局的过去情况、采取的措施、统一模式的主要特点、模式的耦合,以及预报上的改进等依次予以说明。

### 3.2.1 过去的情况

过去有4个业务模式,即全球预报模式、全球气候模拟模式、区域预报模式和中尺度模式。它们除前面所谈的共性外,都是差分模式,且程序结构也相似。至于个性,这里主要谈全球预报模式和全球气候模式。首先,两者所用的计算方法不同,前者为Gadd所提的分裂显式(1985),后者为Corby(1977)所用的通量形式的瞬时能量守恒格式。尽管两者都用 $\sigma$ -坐标且分辨率在对流层顶和近地面较高,但不论是垂直分辨率还是水平分辨率,前者都比后者为高。可是,后者所用物理过程却较前者先进。

### 3.2.2 采取的措施

为了使上述模式统一起来,采取了如下措施:

1)把Gadd的分裂显式技术应用于气候模式,并要求能保证热量和水汽守恒。

2)修改边界层参数化方案,使之可以应用分裂显式中所允许的较长时间步长。

3)修改云和辐射方案,以适应预报模式中较高的垂直分辨率,并使之可以应用显式云变量,考虑云和辐射的相互作用。

4)设计一个软件支持系统以满足上面的要求。

### 3.2.3 统一模式的主要特点

和过去的模式相比,主要有如下特点:

1)运动方程 考虑得比过去精细,如地球旋转用3维表示。这样,既照顾到大尺度运动,也在强垂直运动区考虑了柯氏力的垂直分量。此外,还增加了可以用模式平流的示踪物,以便研究化学成分的演变并用来处理气

溶胶。

2)网格和坐标 采用 $p$ - $\sigma$ 混合坐标,使坐标面在低层近似 $\sigma$ -面,便于考虑地形;在高层近似等压面,使计算气压梯度力较精确。

统一模式允许任意分层。如一般为19个面;中尺度模式为30个面,外加地面上25米高处和对流层顶处两个面\*;专用的高层大气模式为49个面,最高可达0.25hPa。

至于水平方向,全部采用经纬度球面坐标,变量分布按Arakawa B跳点网格。不过,只要计算机存储量允许,模式程序可以进行任何分辨率的运算。在业务中,全球预报模式的网格距是0.8550°纬距和1.2500°经距;全球气候模式和高层大气模式是2.500°纬距和3.750°经距。但是,区域模式和中尺度模式采用球面旋转坐标,极点可根据需要置于任一地理位置。在业务中,区域模式的极点是30°N,160°E, $\Delta\lambda=\Delta\varphi=0.44^\circ$ ;中尺度模式的极点是37.5°N,177.5°E, $\Delta\lambda=\Delta\varphi=0.15^\circ$ 。

3)差分格式 本来,分裂显式效率很高,但为了保证总水汽和总热量守恒,原Gadd方案中的Lax-Wendroff平流格式用Heun格式代替,而且,平流阶段和适应阶段之间的计算做了些改变。另外,为了保证守恒,原在高纬地区对温度、水汽等进行的Fourier滤波,改为对其增量进行滤波;但对于区域模式不进行滤波。

4)物理过程 除按统一的要求进行修改外,原诸模式中的物理过程,如陆面过程和边界层过程、大尺度降水和积云对流、辐射、重力波拖曳、水平和垂直扩散等都包括了,但都采用了最新技术。

### 3.2.4 模式的耦合

统一模式可以和其他模式耦合。如与全球和区域海洋模式耦合,与海浪模式和风暴潮模式耦合等。

在统一模式内部也进行耦合。如用全球

\* 依此,中尺度模式应为静力的,和过去所用非静力的不同。

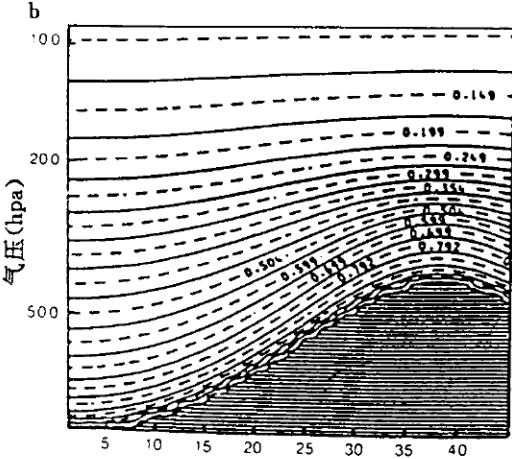
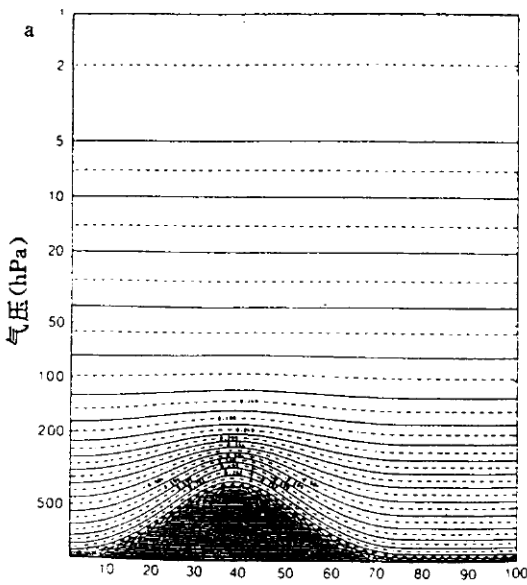


图6 a. 全球预报模式和全球气候模拟模式所用标准坐标面; b. 区域模式所用标准坐标面

预报模式的预报值为区域模式提供边界值等。

### 3.2.5 预报上的改进

经过全面的分析比较,在预报上较明显的改进是,新的全球预报模式对高压脊的预报和新的区域模式对降水的预报,其他有好有坏,和老模式相当。

## 4 展望

从前面的分析和已建立的统一模式看,尽管还存在各式各样的问题,但已显示出统

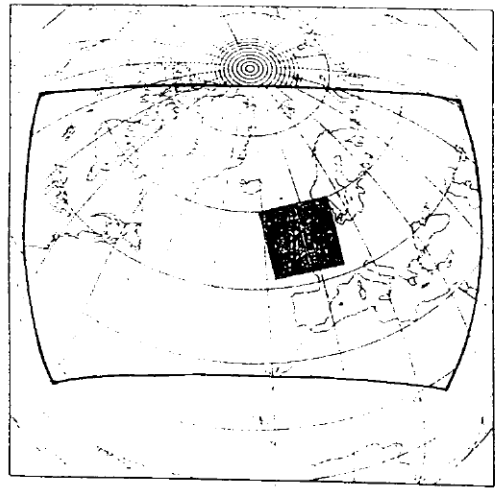


图7 区域模式和中尺度模式积分范围

一模式在提高预报质量、提高工作效率方面的能力和潜力。比如,变网格模式可以消除嵌套模式粗、细网格之间的不协调和由之而引起的寄生波及其反射、折射等,并可以一次做出粗、细网格预报;还可以减少相应的分析同化系统和科研业务人员。灵活统一模式可以减少许多重复性子程序和原模式之间在动力框架、算法和物理过程之间的不协调,使灵活性增强等等。所以,只要再继续改进,发展前景是良好的。不过,从技术观点看,用变网格模式统一两个模式已属不易,要统一更多模式,其困难会更大。但如能达到有机的统一,应当说是最理想的。这仍是我们应当努力的。灵活统一模式在技术上比较容易实现,而工作效率的提高又是立竿见影的。看来,上面两类模式都值得发展;或者,根据不同情况,采用不同方式进行发展。

## 参考文献

- 1 Sundquist, H. and G. Veronis, A simple finite difference grid with non-constant intervals, *Tellus*, 1970, 22, 26-31.
- 2 Anthes, R. A., Numerical experiments with a two dimensional horizontal variable grid, *Mon. Wea. Rev.*, 1970, 98, 810-822.
- 3 A. Staniforth and J. Mailhot, An operational model for

- regional weather forecasting, *Comput. Math. Appl.*, 1988, 16, 1—22.
- 4 S. Gravel and Staniforth, A. N., Variable resolution and robustness, *Mon. Wea. Rev.*, 1992, 120, 2633—2640.
- 5 M. Tanguay, A. Robert and R. Laprise, A semi-implicit semi-Lagrangian fully compressible regional forecast model, *Mon. Wea. Rev.*, 1990, 118, 1970—1980.
- 6 J. Côté et al. A variable-resolution semi-Lagrangian finite element global model of the shallow-water equations, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121, 231—243.
- 7 WMO, Current trends and achievements in limited area models for numerical weather prediction research, WMO/ID, 1992, No. 510.
- 8 P. Courtier and g-F. Geleyn, A global numerical weather prediction model with variable resolution; Application to the shallow-water equations, *Q. J. R. Meteo. Soc.*, 1988, 114, 1321—1346.
- 9 P. Courtier, C. Freydier and g-F. Geleyn, The Arpege project at Météo-France, Note de travail "Arpege", 1991, No. 22.
- 10 M. J. P. Cullen, The unified forecast/climate model, *Meteo. Magazine*, 1993, 122, 81—94.