

# 多尺度非静力通用模式框架的设计策略\*

陈德辉 杨学胜 张红亮 胡江林

(中国气象科学研究院,北京100081)

## 摘 要

针对目前国际上数值预报模式的最新发展趋势,综述了新形势下多尺度非静力通用数值预报模式框架的设计策略。目前世界上开发通用模式主要有两个途径,一是建立一个离散化方案和源程序代码共享的、全球和有限区通用的模式,二是建立一个单一的全球可变分辨率的模式。还从通用模式方程组的选取策略、模式网格属性的构造、时间积分方案、空间离散方案、垂直坐标的选取等方面进行了分析。

关键词: 非静力 多尺度 通用模式

## 引 言

在传统的原始方程动力模式框架设计中,大多数预报模式都采用静力平衡近似。在模式分辨率不太高的条件下(如模式水平格距  $\Delta x > 10$  km),静力平衡假设不仅是对模式方程组高阶精度的近似,同时也非常有效地滤去垂直声波、抑制其发展和传播,这类的静力平衡原始方程动力模式已在研究和业务气象部门得到了广泛应用。然而,在模式分辨率较高的条件下(如模式水平格距  $\Delta x < 5$  km),静力平衡假设已不再适用。国外的一些研究也表明<sup>[1]</sup>,当模式水平格距小于5 km时,非静力平衡动力过程作用将是显著的、不可忽略的。

随着高性能计算机与大气探测技术的发展,特别是大量的新观测仪器如卫星、雷达、GPS等的布设,数值预报的主要资料源已从传统的常规探空发展为雷达、卫星等遥感探测为主,这使资料的覆盖面与时空分辨率都发生了质的变化,也大大促进了非静力中尺度模式的研究开发。国外近年的实践也表明了中尺度天气数值预报是可行的,并且在预报中取得了成功。

在这一新的发展阶段,各国纷纷研究建立模式网格距离从1 km到100 km、区域模式与全球模式统一、天气预报模式与短期气候预测(月、季、年)模式通用、研究模式与业务模式通用的新一代多尺度通用数值预报模式,以取代现有的多套不同尺度模式共存的数值预报业务体系。这一新体系的形成,使气象预报产生了新的飞跃,并为气象服务水平的提高创造了重要的前提条件。目前,加拿大<sup>[2,3]</sup>、英国<sup>[4]</sup>、法国<sup>[5]</sup>等国家的气象业务中心都建立了程度不同的多尺度统一模式。

\* 本文得到国家“十五”科技攻关课题 2001 BA607B02 及 863 课题 2002 AAI 04210 的资助。  
2002-09-02 收到,2003-03-19 收到修改稿。

由于通用模式的尺度范围涵盖了从全球到中尺度,因此在动力框架的设计策略上与静力模式也有所不同。“多尺度通用”涉及数值预报模式的核心问题,其通用性只限于模式的绝热框架部分,即全球、中尺度、气候、环境等模式共享同一绝热框架和离散化方案及源程序代码;而为满足不同预报尺度的要求,其物理过程部分一般需要针对不同的预报对象发展其相应的物理过程,如中期、中尺度、气候等等。即使绝热动力部分也不是只采取简单的处理办法,而是采用可多种选择的处理办法,例如可以“开关式”选择静力平衡或非静力平衡,离散方案采用可以兼顾计算精度和守恒性的技术,分辨率可以任意选择,采用适用于不同尺度的半隐式半拉格朗日时间差分方案。因此,新一代多尺度通用模式系统原则上是科学的、可行的。

建立新一代多尺度通用模式的优点至少可以:(1)使原来业务气象中心同时维护、改进几套模式程序转为只维护、改进一套模式程序,大大降低了业务运行及维护成本;(2)使数值预报模式向不同体系结构的计算机上移植时,更容易、更省时,成本更低;(3)使科研开发与业务预报模式统一起来,有利于科研成果向业务的转化;(4)使有限的人力、物力、财力高度集中,有利于数值模式、资料同化、物理过程参数化等方面的研究开发工作的集约化发展;(5)采用 FORTRAN90 语言编程标准,使程序具有较好的可移植性、可读性,有利于研究成果的共享与科学家的共同参与。

基于此,本文对国际上多尺度通用模式的设计进行了深入的调研,对设计中应注意的一些问题进行了分析,在设计同类模式中采用的一些方法进行了介绍,以期能对我国此类气象模式的设计有所启发和帮助。

## 1 通用模式的策略

目前世界上开发一个非静力多尺度通用模式主要有两个途径,一是建立一个离散化方案和源程序代码共享的、全球和有限区通用的模式,二是建立一个单一的全球可变分辨率的模式。

第一种方法的典范是英国气象局(United Kingdom Meteorological Office, (UKMO)),它用一个全球的分统一分辨率的经纬有限差分模式(Cullen, 1993<sup>[4]</sup>)进行中期、长期和气候模拟;对中尺度预报采用其有限区版本,与全球模式共享离散化方案和源码程序,但其物理过程参数化方案由于预报对象的不同而在各自的科学内容上有所侧重。业务上为了获得在英国区域的 36 h 预报,全球模式首先在全球水平网格上积分,为同一模式的有限区版本提供侧边界条件。有限区模式在一个更高分辨率的旋转经纬格点上运行。

第二种方法用一个单一的全球可变分辨率的模式(Cote 等, 1998a<sup>[2]</sup>, 1998b<sup>[3]</sup>),根据用户可做相应的设置,如加拿大气象中心。对全球尺度的问题,如中期、月、季节预报、污染物的长期传输、气候预报等,采用一个均匀的经纬网格是比较合适的。该方法的模式分辨率是可调的,如针对着眼于北半球的应用可降低南半球的分辨率,反之亦然(Fox-Rabinowitz 等, 1997<sup>[6]</sup>, Krinner 等, 1997<sup>[7]</sup>)。由于模式采用可变分辨率,对某些区域的应用,如中尺度预报和区域的空气质量和气候模拟,可提高关心区域的分辨率。

实现全球的可变分辨率有以下几种方法,如 Courtier and Geleyn (1998b)<sup>[8]</sup>、Hardiker

(1997)<sup>[9]</sup>基于 Schmidt (1977)<sup>[10]</sup>提出的连续坐标投影方法,法国气象局的 ARPEGE 全球模式采用该方案,在法国分辨率最高。但其正形投影或等角坐标转换的独特性限制了其中尺度模式中的应用(Caian 和 Geleyn, 1997)<sup>[11]</sup>。因此对更高分辨率的应用,法国气象局不得不开发一个有限区非静力模式,但使用与全球同样的源程序,这与英国气象局(UKMO)的做法相似。Sharma 等(1987)<sup>[12]</sup>在其大气环流模式中用的是另外一种周期变化且正交但非正形投影的连续坐标投影方法。而在 Paegle(1989)<sup>[13]</sup>的模式中,其分辨率采用有限元方法且随经向变化。

Cote 等(1998a<sup>[2]</sup>)和 Fox-Rabinowiz(1997)<sup>[6]</sup>用的是一种规则的可任意旋转的经纬网格,该方法允许分辨率在两个坐标方向同时变化,因此较为灵活。加拿大的全球环境高分辨率模式 GEM 模式使用该方法。在一个单一的动力学系统中,全球可变分辨率模式存在预报区域内外气流相互作用的现象。

## 2 模式方程组的选取

静力原始方程滤掉了高频垂直传播的声波,静力近似在垂直尺度与水平尺度的比例较小时是成立的。目前大多数天气和气候业务模式中都采用这一假定。但随着高性能计算机的持续发展以及雷达、卫星等非常规资料的使用,这种情况也在逐渐改变。中尺度模式在研究中的应用已经有很多年了(ARPS<sup>[14]</sup>;MM5<sup>[15]</sup>;MESO-NH<sup>[16]</sup>),因此其实时应用也是可行的。但当水平尺度达到 10 km 或更小的运动变得重要时,静力假定就出现问题了,通常认为静力原始方程对细的中尺度模拟是不适合的。

一个通用模式需要能够涵盖不同尺度范围的天气过程,包括从全球尺度到中尺度,要求其方程组忽略的任何项应该满足守恒定律,如角动量守恒、能量守恒和位涡守恒等。Andrew Staniforth<sup>[1]</sup>根据采用的方程组是深厚大气还是浅薄大气,是否忽略垂直加速度项将模式方程划分为 4 类:完全压缩 Navier-Stokes 方程、非静力原始方程、准静力原始方程和静力原始方程。

现有的非静力模式大致可分为两大类:第一类如大多数静力原始方程一样采用滞弹性近似(Müller 和 Pearce, 1974<sup>[17]</sup>;Schlesinger, 1975<sup>[18]</sup>;Clark, 1977<sup>[19]</sup>)来滤掉快速移动的声波。但滞弹性近似对中尺度模拟是否适合还存在争论,滞弹性近似对水平分辨率和垂直尺度较大的全球模式至少是不适合的。一般需对垂直声波进行隐式处理以消除由于 CFT 稳定条件造成的对时间步长的限制。如日本气象厅<sup>[20]</sup>最新发展的非静力模式、法国气象局的非静力中尺度研究模式 MESO-NH 等都采用该近似。

第二类则采用完全可压缩模式,为了保证计算效率对声波必须做特殊的假设处理。Klemp and Wilhelmson(1978)<sup>[21]</sup>发展了一种时间分裂技术,对声波和移动较慢的波用隐式处理方法,非声波项用“大”时间步长,或者在此基础上,水平平流项和垂直平流项又分别采取不同的时间步长(如 WRF 的“欧拉”版本)。而 Tapp and White(1976)<sup>[22]</sup>则用半隐式时间积分方案来保证线性声波的绝对稳定,也得到了广泛的应用(Tanguay 等, 1990<sup>[23]</sup>),并进一步发展包括线性的重力波(Cullen, 1990<sup>[24]</sup>)以消除其对时间步长的限制。由于其绝对稳定性,该方法常常与半拉格朗日平流方案结合起来使用以获得较高的

计算效率(Golding, 1990<sup>[25]</sup>)。在实际应用中,需要考虑计算效率与解的精度合理取舍问题。与滞弹性系统不同,此方程系统不必做任何的近似,因此适用范围更广。UKMO, WRF, CMC、德国的区域模式LM及ARPS发展的非静力模式等则都采用该方程组。

这其中尤以UKMO新发展的非静力新动力学模式框架最为突出,该模式采用完全的可压缩Navier-Stokes方程,保留了所有的项,并采用深厚大气近似(绝大多数非静力模式则采用浅薄大气近似),以满足一个尺度范围从全球到中尺度都通用的方程组的目的。由于它们对深厚大气都是正确的,因此不仅适用于模拟等温层和中间层,也为模拟深厚行星大气提供了一个良好的基础。这也是迄今为止世界上最为完整的模式方程组之一。

### 3 模式水平网格设计

作为一个区域与全球统一的数值模式或者多尺度通用模式,经纬度格点模式是较理想的选择。一方面,这种模式的网格设计简单,另一方面,可很方便地设计有限区域与全球范围的嵌套模式(如英国气象局的统一模式),也容易与海洋格点模式相耦合。

事实上,格点模式一直是有限区域模式的“主流模式”,在全球谱模式经历了20多年的业务辉煌应用后的今天,人们又重新回到了全球格点模式。在各国气象中心对业务系统进行更新换代的交替时期,英国、加拿大、德国、美国等气象部门及一些研究院校,都扛起了“格点模式”的大旗,其中英国气象局是世界上唯一的一直坚持运行“格点模式”的业务中心;日本也表示5年后将开发新一代的“非谱”模式。在作者2000年访问ECMWF期间,ECMWF的有关专家也表示在模式水平分辨率小于15 km时将重新评估其未来模式的技术发展方向。究其原因主要有:①随着模式分辨率的提高,格点差分计算的精度已与谱模式计算精度相当;②谱模式分辨率提高后,计算量剧增,而计算精度并非随之明显提高;③谱模式在从谱空间转化到格点空间时要进行勒让德变换,造成并行编程的异常复杂,并行效率也不如格点模式;④由于谱模式的计算是全球展开的,因此,有可能把一个“局地”的对流问题变为一个“全球”问题;⑤谱模式的连续性要求较光滑的“谱”地形,在洋面上造成虚假地形波问题(如在海岛周围的海面上空,会出现一些虚假的浅薄波状高云)。

### 4 时间离散和空间离散

#### 4.1 时间离散

数值计算效率是大气模拟时必须考虑的一个问题。目前发展的非静力模式大都采用如下的两种时间离散方案,一是时间分裂技术,二是半隐式半拉格朗日方案。

(1)分裂显式时间方案 由于垂直传播的声波和水平传播的重力外波的传播速度比局地的风速大很多倍,而显式欧拉方案的时间步长一般受到传播最快的波速的限制,尤其是对经纬的全球有限差分模式或有限元模式由于在极地经线的辐合而变得更为严重。为了大大延迟声波和重力波扰动的传播,对控制声波和重力波扰动的项进行隐式或半隐式时间处理是必要的,以便可用更大的时间步长。对声波和重力波隐式时间处理的另一个

好处是可以大大地延缓大时间步时来自有限区模式边界区域的误差的内在传播。而为了保证所关心区域预报的一致性免受任何大的误差源的破坏,对这些项采用显式的模式来说,选择一个相当大的可能比较费机时的计算区域是必须的。该方案在分布式计算机上采用区域分解技术易于实现计算程序的并行。目前 ARPS、WRF、日本、MESO-NH 等非静力模式都采用该方案。

(2) 半隐式半拉格朗日方案 采用欧拉平流方案时,隐式或半隐式时间方案受到局地 Courant 数小于 1 的约束。对于一个全球经-纬度格点差分模式来说,由于经线在极地汇合,这一问题变得尤其严重。对那些包含有快波的项采用隐式(或半隐式)处理,可以取较长的时间步长也不会降低计算稳定性和精度(Skamarock 等, 1992<sup>[26]</sup>)。Staniforth (1997)<sup>[27]</sup>指出隐式(或半隐式)时间差分方案还可延迟有限区域模式的侧边界误差(或变网格模式的外区域误差)向内的传播。在全球经纬格点差分模式中,除极地区域外,其它区域的空间离散的截断误差要比时间离散的截断误差大得多,采用半拉格朗日空气质点平流法不仅有助于提高空间离散差分的计算精度,同时也使得模式时间步长的选取主要是基于差分方案的计算精度而不再是计算稳定度,而且拉格朗日气团平流,意味着“位涡平流”(Cullen, 1999<sup>[28]</sup>),也即天气向下游平流。因此半拉格朗日平流方案最近几年已逐渐成为时尚,并已在 ECMWF、UKMO、法国气象局、CMC 等静力、非静力模式中得到了广泛应用。该方法是稳定的,控制方程变为沿新时间步到达的质点轨迹计算,因此物质导数的计算变为沿轨迹的时间差分,通过对出发点(一般来说并不是一个网格点)周围网格点的插值求得上游的值。通常采用线性插值、三次样条等插值方法,但这些传统插值方法非常费时。Purser 和 Leslie(1991)<sup>[29]</sup>提出了一个经济的插值方法——“降阶插值法”。Nair 等(1999)<sup>[30]</sup>对其进行了改进与完善。对同样的截断误差,两时间层方案由于其效率比三时间层高两倍而得到更广泛地应用(Mcdonald 和 Bates, 1987<sup>[31]</sup>; Temperton 和 Staniforth, 1987<sup>[32]</sup>)。

Hortal(1999)<sup>[33]</sup>的结果表明,ECMWF 采用半拉格朗日方法的全球中期数值预报模式比原欧拉半隐式方法的模式快了近 50 倍!即使在没有时间步长优势的情况下,半隐式半拉格朗日方法由于其良好的频散特性仍然是一个好的方案,尽管在平流计算时由于插值的缘故它比一些欧拉方案费时。

模式采用半隐式半拉格朗日方法需要求解一个 Helmholtz 椭圆方程,多重网格法(Fulton, 1986<sup>[34]</sup>)是目前较常用的求解变系数的椭圆问题的一个方法,但需要提高均匀经纬网格的计算效率;另一种常用的是编程更为方便和易于修改的广义共轭余差法 GCR(Skamarock, 等, 1997<sup>[35]</sup>)。

## 4.2 空间离散

由于位涡平流(Cullen, 1999<sup>[28]</sup>)的缘故,平流项在控制方程中的描述是非常重要的。在过去的半个多世纪里发展了很多空间离散方案来解决这些项,空间导数如何估计,变量如何分布对声波和重力波扰动的传播特性影响非常大,在小尺度时一个不好的方案能使能量在错误的方向上虚假地、有害地传播。因此在过去的数值模式设计中发展了变量分布的各种跳点格式(Arakawa, 1966<sup>[36]</sup>),简洁性是其主要的考虑。而半拉格朗日方案则提供了解决这一问题的一个好方法。

现行 UKMO 的业务统一模式采用 Arakawa B 网格,中央有限差分方案。但当格点长度小于 Rossby 变形半径时,采用 Arakawa C 网格更好(Cullen 等 1997<sup>[37]</sup>),更适用于中尺度气流。Xue M. 等(2000<sup>[14]</sup>)也表明 Arakawa C 格点更有利于地转适应动力学过程。因此 UKMO 的新统一模式,加拿大的 GEM、ARPS、MESO-NH 等模式都采用该方案。

若模式采用半拉格朗日平流方案且拉格朗日质点运动轨迹的计算采用“矢量离散法”(Bates 等,1990<sup>[38]</sup>),采用 C 网格则需计算 4 条轨迹线,这大大增加了计算量。这也是 WRF 模式采用 Arakawa A 格点的一个原因。

Arakawa 和 Moorthi (1987)<sup>[39]</sup>,Leslie 和 Purser (1992)<sup>[40]</sup>的研究指出,对于强涡流与强层流系统,地转适应过程等问题的处理,变量的垂直分布采用 Charney-Phillips 跳层要优于 Lorenz 跳层(如图 1 示)。但由于前者的温度和水平风不在同一层,这就使得湍流通量和地表通量物理过程与动力模式之间的耦合复杂化,但使同化系统中高度增量到平衡风的增量的计算误差大大减小。目前,英国气象局老的统一模式、加拿大气象中心的 GEM 模式和法国气象局的 MESO-NH 模式等均采用 Lorenz 跳层,只有英国气象局新的统一模式及 J H Qian 等(1998)<sup>[41]</sup>的研究模式采用 Charney-Phillips 跳层设置。

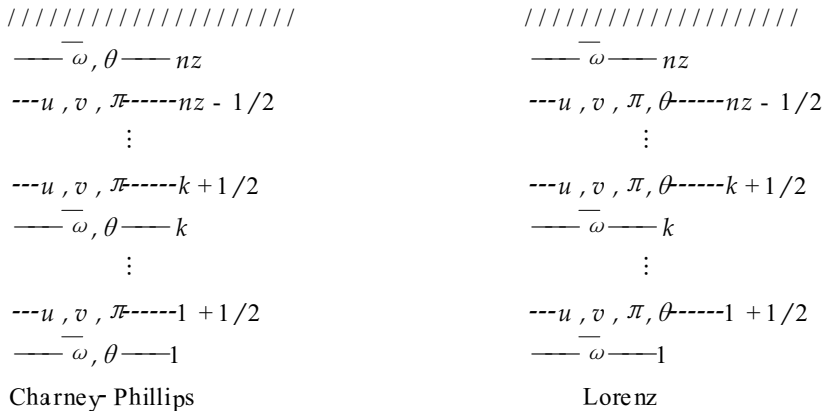


图 1 变量的 Charney-Phillips 和 Lorenz 跳层分布

(其中  $\bar{\omega}$ ,  $\theta$ ,  $\pi$ ,  $u$ ,  $v$  分别表示模式预报变量垂直速度、位温、Exner 气压函数、水平风)

### 5 垂直坐标的选取

垂直坐标的选择,也是多尺度通用模式设计中需要认真考虑的问题。选取时要充分考虑对地形影响的处理,White 和 Bromley(1995)<sup>[42]</sup>认为对非静力模式来讲,最好采用物理高度,其它方案都会导致不必要的近似。但对于不规则分布的地球表面来说(如有地形存在的地方),物理高度坐标下给定模式下边界条件很复杂。NCEP 有限区域模式现采用 ETA 阶梯地形,但由于在阶梯处易滋生虚假的局地小涡旋,其新发展的 WRF 模式采用质量坐标。

目前的绝大多数非静力模式都采用 Chen 和 Somerville (1975)<sup>[43]</sup>提出的一种高度地形追随坐标。

另外,随着高性能并行计算机的发展,模式的离散技术也必须是可并行的,上述的这些方法在编程时也必须高效并行以最大限度地利用计算机资源和满足产品的业务化需求。

## 6 总结与讨论

随着国内外观测系统和通信手段的改进,覆盖全球的、高分辨率的观测资料的获取已不存在本质困难,这使非静力中尺度模式的业务化成为可能。在这一新旧预报系统的更替阶段,世界上主要的气象中心纷纷制订开发其新一代数值预报系统业务的发展战略,并取得了一些令人鼓舞的成果。如 UKMO, NCEP 和 NCAR, 加拿大气象中心、日本气象厅等。综观其模式发展趋势,我们不难看出有如下几个特点:

(1) 发展网格距离从 1 km 到 100 km、区域模式与全球模式统一、天气预报模式与短期气候预测(月、季、年)模式通用、研究模式与业务模式通用的非静力多尺度通用数值预报格点模式已成共识。这方面有两个中心最具代表性,一是以英国气象局为代表的离散化方案和源程序代码共享的、全球和有限区通用的模式,二是以加拿大为代表的单一的全球可变分辨率的模式。美国的 WRF 模式迄今为止已经释放了两个版本,2003 年将发布基于半隐式半拉格朗日方案的模式版本并计划将其扩展到全球模式。而日本气象厅计划在今后的 5 年内也向该方向发展,其非静力中尺度模式虽然还存在一些问题但已经开发成功,并计划将其扩展到半隐式半拉格朗日方案的全球模式。

(2) 在新一代非静力动力模式框架设计中,一部分采用完全可压缩的方程组(如英国、加拿大、美国、中国等),也有一部分采用滞弹性近似(如日本、法国的 MESO-NH、德国等)。但第一种方案由于其方程的完整性、整体性、精确性将成为多尺度通用模式的首选。

(3) 显式欧拉时间方案正逐步被计算更稳定和可采用较长时间步长的半隐式半拉格朗日方案所代替。

(4) Arakawa C 网格由于其对中尺度气流更好的适应性成为大多数非静力模式的选择,而 Arakawa A 网格则由于其变量处理的一致性也成为一部分模式常用的选择。

(5) Charney-Phillips 垂直跳点分布由于对强旋转或强成层气流等的较好描述已成为一些模式的首选方案,打破了以往 Lorenz 垂直跳点分布一统天下的局面。

(6) 半隐式半拉格朗日方案的计算效率和上游点的插值精度、Helmholtz 方程的计算效率与并行等是以后新非静力模式开发中需要认真解决的问题。

我们也希望这些新的发展趋势能为那些有志于开发中国气象数值预报模式系统的科学家们提供一个更加广阔的思路,有一定的借鉴和启发作用。毕竟一个模式系统的开发研究是一个系统性的复杂工程,国外一些成功的经验可使我们少走很多弯路,并在此基础上融进一些具有中国特色的技术,发展中国自己的多尺度通用模式框架,为提高天气预报的准确率、防灾减灾、社会发展与国防建设具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 Staniforth A, White A, Wood N, et al. Unified model documentation paper, No. 15, UKMO, 2002, personal communication.
- 2 Cote J, Gravel S, Methot A, et al. The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part I: Design considerations and formulation. *Mon. Wea. Rev.*, 1998a, **126**: 1373 ~ 1395.
- 3 Cote J, Gravel S, Methot A, et al. The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part II: Results. *Mon. Wea. Rev.*, 1998b, **126**: 1397 ~ 1418.
- 4 Cullen M J P. The unified forecast/ climate model. *Meteor. Mag.*, 1993, **122**: 81 ~ 94.
- 5 Bubnova R, Gello G, Bernard P, et al. Integration of the fully elastic equations cast in hydrostatic pressure terrain-following coordinate in the framework of the ARPEGE/ALADIN NWP system. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**: 515 ~ 535.
- 6 Fox-Rabinowitz M, Stenichkov G, Suarez M, et al. A finite-difference GCM dynamic core with a variable resolution stretched grid. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 2943 ~ 2968.
- 7 Krinner G, Genthon C, Li Z-X, et al. Studies of the Antarctic climate with a stretched grid generation circulation model. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 13, 731 ~ 13, 745.
- 8 Courtier P, Geleyn J F. A global numerical weather prediction model with variable resolution: Application to the shallow water equations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1998b, **114**: 1321 ~ 1346.
- 9 Hardiker V. A global numerical weather prediction model with variable resolution. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 59 ~ 73.
- 10 Schmidt F. Variable fine mesh in the spectral global models. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1977, **50**: 211 ~ 217.
- 11 Caian M, Geleyn J F. Some limits to the variable mesh solution and comparison with the nested LAM one. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1997, **123**: 743 ~ 766.
- 12 Sharma O P, Upadhyaya H, Braine-Bonnaire T H, et al. Experiments on regional forecasting using a stretched coordinate general circulation model. In: Short and Medium Range NWP, Proc. WMO/IUGG NWP Symposium, 1987, Tokyo, Japan, *Met. Soc. Japan*, 263 ~ 271.
- 13 Paegle J. A variable resolution global model based upon Fourier and finite element representation. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**: 583 ~ 606.
- 14 Xue M, Droege-meier K K, Wong V. The advanced regional prediction system (ARPS) — A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2000, **75**: 161 ~ 193.
- 15 Anthes R A, Warner T T. Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, 1978, **106**: 1045 ~ 1078.
- 16 Bougeault P, Mascart P. The MESO-NH Atmospheric Simulation System: Scientific Documentation. CNRS, Meteor. France, 2000, personal communication.
- 17 Miller M J, Pearce R P. A three-dimensional primitive equation model of cumulonimbus convection. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1974, **100**: 133 ~ 154.
- 18 Schlesinger R E. A three-dimensional numerical model of an isolated deep convective cloud: Preliminary results. *J. Atmos. Sci.*, 1975, **32**: 934 ~ 957.
- 19 Calrk T L. A small-scale dynamic model using a terrain-following coordinate transformation. *J. Comput Phys.*, 1977, **24**: 186 ~ 215.
- 20 Saito T, Kato E, Hito H. Documentation of the Meteorological Research Institute / Numerical Prediction Division Unified Nonhydrostatic Model. Forecast Research Department, Meteorological Research Institute, 2002, personal communication.



- tion. ( or <http://www.mri-jma.go.jp> ).
- 21 Klemp J B, Wilhelmson R B. The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**: 1070 ~ 1096.
  - 22 Tap M C, White P W. A nonhydrostatic meso-scale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1976, **102**: 277 ~ 296.
  - 23 Tanguay M, Robert A, Laprise R. A semi-implicit semi-Lagrangian fully compressible regional forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 1970 ~ 1980.
  - 24 Cullen M J P. A test of a semi-implicit integration technique for a fully compressible nonhydrostatic model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1990, **116**: 1253 ~ 1258.
  - 25 Golding B W. The meteorological office mesoscale model. *Meteor. Mag.*, 1990, **119**: 81 ~ 96.
  - 26 Skamarock W C, Klemp J B. The stability of time-split numerical methods for the hydrostatic and nonhydrostatic elastic equations. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**: 2109 ~ 2127.
  - 27 Staniforth A. Regional modeling: a theoretical discussion. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1997, **63**: 15 ~ 29.
  - 28 Cullen M J P. The use of dynamical knowledge of the atmosphere to improve NWP models. In: Proceedings of ECMWF Workshop on Recent Development in Numerical Methods for Atmospheric Modelling, 1999, Shinfield Park, Reading, U.K., 418 ~ 441.
  - 29 Purser R J, Leslie L M. An efficient interpolation procedure for high-order three-dimensional semi-Lagrangian models. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 2492 ~ 2498.
  - 30 Nair R J, Cote J, Staniforth A. Cascade interpolation for semi-Lagrangian advection over the sphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, **125**: 1445 ~ 1468.
  - 31 McDonald A, Bates J R. Improving the estimate of the departure point in a two-time-level semi-Lagrangian and semi-implicit model. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 737 ~ 739.
  - 32 Temperton C, Staniforth A. An efficient two-time-level semi-Lagrangian semi-implicit integration scheme. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1987, **113**: 1025 ~ 1039.
  - 33 Hortal M. Aspects of the numerics of the ECMWF model. In: Proceedings of ECMWF Workshop on Recent Development in Numerical Methods for Atmospheric Modeling, 1999, Shinfield Park, Reading, U.K., 127 ~ 143.
  - 34 Fulton S R. Multigrid methods for elliptic problems: a review. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**: 943 ~ 959.
  - 35 Skamarock W C, Smolarkiewicz P K, Klemp J B. Preconditioned conjugate-residual solvers for Helmholtz equations in nonhydrostatic models. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 587 ~ 599.
  - 36 Arakawa A. Computational design for long-term numerical integrations of the equations of atmospheric motion. *J. Comput. Phys.*, 1966, **1**: 119 ~ 143.
  - 37 Cullen M J P, Davies T, Mawson M H, et al. An overview of numerical methods for the next generation of NWP and climate models. In: Lin, C., R. Laprise, H. Ritchie, eds. Numerical Methods in Atmospheric and Ocean Modelling (The Andre Robert Memorial Volume), Canadian Meteorological and Oceanographic Society, 1997, Ottawa, Canada, 425 ~ 444.
  - 38 Bates J R, Semazzi F H M, Higgins R W, et al. Integration of the shallow water equation on the sphere using a vector semi-Lagrangian scheme with a multigrid solver. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 615 ~ 627.
  - 39 Arakawa A, Moorthi S. Baroclinic instability in vertically discrete systems. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **45**: 1688 ~ 1707.
  - 40 Leslie L M, Purser R J. A comparative study of the performance of various vertical discretization schemes. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1992, **50**: 61 ~ 73.
  - 41 QIAN Jian Hua, Semazzi F H M, Scroggs J S. A global nonhydrostatic semi-Lagrangian atmospheric model with orography. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, **126**: 747 ~ 770.
  - 42 White A A, Bromley R A. Dynamically-consistent, quasi-hydrostatic equations for global models with a complete representation of the Coriolis force. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1995, **121**: 399 ~ 418.
  - 43 Gal-Chen T, Somerville R C J. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations. *J. Comput. Phys.*, 1975, **17**: 209 ~ 228.

## STRATEGY FOR DESIGNING A NON-HYDROSTATIC MULTI-SCALE COMMUNITY MODEL DYNAMIC CORE

Chen Dehui Yang Xuesheng Zhang Hongliang Hu Jianglin  
(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

### Abstract

The strategy for designing a non-hydrostatic multi-scale community model dynamic core is proposed, based on the advances of the numerical weather prediction model and new techniques of radar and satellite observations, etc. There are two approaches in developing community models at present: one is that both global and regional models share a common temporal, spatial discretization approach and codes; the other is to use a single global variable resolution model that can be reconfigured according to applications. Attention is then focused on various design issues, including the strategy for designing community models, the choice of model equations, the construction of model grid properties, the temporal and spatial discretization, the selection of the vertical coordinate, etc.

**Key words:** Non-hydrostatic Multi-scale Community model