



中国气象科学研究所与南京气象学院联招

博士 研究生 学位论文

一个全球大气环流动力学框架——东亚区域气候双向
嵌套模式的研究及数值试验

Numerical Study on a Two-way Nesting Model of a
GCM Framework and a RCM of East Asia

姓 名: 王 兰 宁

专 业: 气 象 学

研 究 方 向: 数值预报与大气环流模拟

导 师: 郑庆林 研究员

2002年3月 北京

一个全球大气环流动力学框架——东亚区域气候双向嵌套模式的研究及数值试验

摘要

全球大气环流模式与区域气候模式进行嵌套用于研究区域气候变化已经成为研究、预测区域气候变化的重要手段。区域气候的演变必须是在全球气候变化的大尺度背景下进行,同时,区域气候的变化又能影响全球气候,即不同尺度的大气运动之间存在着相互作用、相互制约的关系。通常的全球大气环流模式与区域气候模式之间的单向嵌套不能描述出区域气候变化与全球气候变化之间的相互影响关系。本论文研究和设计了一个全球大气环流动力学框架——东亚区域气候双向嵌套模式,进行了数值试验研究,得到了以下主要结果:

1. 设计了一个能够满足能量积分约束的全球大气环流动力学框架模式,用于提供区域气候模式所需的大尺度环境场。它是各类大气环流模式的基本模式,有利于在理论上研究全球大气环流模式与区域模式之间的双向嵌套机理。全球模式采用谱方法求解,即水平方向采用球谐函数组成的基函数进行三角形截断,截断波数为 21,垂直方向采用 5 层等距的 σ 坐标的垂直有限差分方法,时间积分上使用半隐式时间积分方案,模式中考虑了地形作用。

2. 在国际通用的区域气候模式 RegCM2 (Regional Climate Model 2) 的基础上。根据东亚地区复杂的地形和下垫面状态,改进了原模式的垂直、水平结构和陆面植被特征分布、初值处理及有关的计算方法,发展了一个能有效的与全球大气环流动力学框架模式实现双向嵌套的、适用于东亚地区的东亚区域气候模式。

3. 研究和发展的一个全球大气环流与区域气候双向嵌套模式。在双向嵌套模式中,全球大气环流动力学框架模式有效地为东亚区域气候模式提供大尺度环境场。由于在东亚区域气候模式中较好地考虑了陆气之间的相互作用、复杂的下垫面地形和陆面植被特征分布,较高精度的描述了这一地区大气演变特征,通过双向嵌套机制的反馈作用对全球大气环流变化产生影响,改进全球大气环流动力学框架模式的预测结果,从而也为东亚区域气候模式提供更好的边界条件,以进一步改进东亚区域气候模式的预测结果。

4. 在本论文的全球大气环流与区域气候之间的双向嵌套模式中,提出了一种双向倾向法:全球大气环流动力学框架模式为东亚区域气候模式提供边界倾向场,区域气候模式也是以倾向,而不是以变量反馈到全球模式中。由于采用双向倾向,避免了大量之间小差的计算,特别是对于地形复杂地区。此外,在本方案中,未对来自全球模式和来自区域模式的倾向场进行平滑等处理,使得有限区内信息能够真实、不被扭曲和不间断的反馈到全球大气环流运动当中,提高了双向嵌套模

式的稳定性和预报精度。

5. 通过本论文研究和发展的全球大气环流动力学框架——东亚区域气候双向嵌套模式的双向嵌套和单向嵌套对比数值试验的多个个例的平均结果,可以看出,由于全球大气环流动力学框架模式考虑了来自东亚区域气候模式的反馈作用,预报的月平均温度场距平相关系数在全球和北半球范围内分别提高了1.7%和3.6%,月平均纬向风场的距平相关系数分别提高4.0%和5.1%,月平均经向风场的距平相关系数分别提高了4.0%和4.2%,而月平均高度场的距平相关系数分别由29.4%增加到36.5%和由54.6%增加到55.1%。东亚区域气候模式也由于自身对全球大气环流动力学框架模式的反馈作用,使得全球大气环流动力学框架模式的预报结果得到改进,从而又为东亚区域气候模式提供了更好的边界条件,也改进了东亚区域气候模式的预报结果,多个个例的双向与单向嵌套对比数值试验的平均结果可以看到,东亚区域气候模式预报的东亚地区高度场、温度场、纬向风场、经向风场的月平均场距平相关系数分别提高了8.7%、16.1%、12.6%、20.8%。双向和单向嵌套的多个个例平均结果的对比表明,对气候预测,全球大气环流动力学框架——东亚区域气候双向嵌套模式中的双向嵌套预测结果明显优于单向嵌套。

6. 本论文研究和发展的全球大气环流动力学框架——东亚区域气候双向嵌套模式中的全球大气环流动力学框架模式具有普适性,因而,本论文的研究成果不但具有理论价值,也可应用于其它各种全球大气环流模式与区域模式之间的双向嵌套模式的研究。在全球大气环流动力学框架模式中加入物理过程后,更能提高双向嵌套模式的预测能力,具有实际应用价值。

关键词: 双向嵌套 全球大气动力学框架 区域气候 相互作用

双向倾向法

Numerical Study on a Two-way Nesting Model of a GCM Framework and a RCM of East Asia

ABSTRACT

A popular method in Regional climate change (RCC) simulation/prediction is one-way nesting model that a Regional climate model (RCM) is nested in a General Circulation Model (GCM). Although the regional climate evolves under the global climate changes, the regional climate influences the global climate change simultaneously. This means that a interaction relationship has existed in different scale atmosphere motion, and the one-way nesting model can not describe the interaction relationship between the regional climate and the global climate. A two-way nesting model of a global circulation dynamical framework model and a East Asia regional climate model is investigated in this paper. By theoretical analyses and comparison experiments between the two-way nesting and one-way nesting scheme in the two-way nesting model, the main results are obtained as follows:

1. A global circulation dynamical framework model (GCDFM) which satisfies energy integral relation, and contains 5 sigma levels in the vertical, and use spherical harmonics as horizontal basis with triangular truncation at wavenumber 21, and including terrain, has been designed to provide the large-scale field for RCM in this study. The model is a basic model of a great variety general circulation models and it is propitious to study the two-way nesting mechanism of global model and limited area model in theory.

2. On this study, according as East Asia complicated topography, land use and nested with the global circulation dynamical framework model, East Asia Regional Climate Model (EARCM), a regional climate model is developed on the base of Regional climate model 2 (RegCM2) by improving its land vegetation over East Asia, horizontal and vertical structure, initial field processing method and calculating scheme and applied in East Asia.

3. A two-way nesting model of a global circulation dynamical framework model and a East Asia regional climate model is studied and developed in this paper. In the two-way nesting model, the global circulation dynamical framework model provides the large-scale surroundings for East Asia regional climate model. The two-way nesting model could describe the

atmosphere characteristics over East Asia in some details because the interaction between the land and the atmosphere, complicated topography and the distribution of land use are taken into account. East Asia climate could influence the global circulation by the two-way nesting mechanism in this model. The model could simulate/forecast the interaction relationship of different scale atmosphere motion preferably.

4. In the two-way nesting model that is studied in this paper, a two-way nesting method—two-way tendency scheme is brought out. The GCDFM provides the boundary tendency field for the EARCМ, and the information that the EARCМ fed back to the GCDFM is in the form of tendency instead of variable too. The trivial difference between two great variables is avoided by the two-way tendency scheme, and the error is less than the variable method in complicated topography. Because the tendency fields which come from the GCDFM and the EARCМ are not smoothed, the information of RCM could be truly, non-interrupted fed back to the GCDFM so that the two-way nesting model runs steadily.

5. Two-way and one-way nesting scheme comparison experiments of this paper are carried out. Average result of several cases shows that anomaly correlation coefficients of monthly mean temperature field, monthly mean zonal wind field and monthly mean meridional wind field which the GCDFM forecasts increase 1.7%, 4.2%, 4.0% over the globe and 3.6%, 5.1%, 4.2% over the North hemisphere respectively, and the anomaly correlation coefficient of the monthly mean height field increases to 36.5% from 29.4% over the globe and enhances to 55.1% from 54.6% because the feedback effect of the EARCМ is thought over in the GCDFM. By the same cause, the GCDFM could provide boundary for the EARCМ rather better so that anomaly correlation coefficients of monthly mean height field, monthly mean temperature field, monthly mean zonal wind field and monthly mean meridional wind field which the EARCМ forecasts increase 8.7%, 16.1%, 12.6% and 20.8% over East Asia respectively. All of these indicate that the two-way nesting scheme is superior to the one-way nesting scheme.

6. Because the GCDFM possesses universality of the two-way nesting model which is studied and developed in this study, the result of this study could be applied in two-way nesting models of other GCMs and LAMs (Limited Area Model). The forecasting ability of the two-way nesting model should be increased if physical process is imported in the GCDFM.

Keywords: two-way nesting global circulation dynamical framework
regional climate interaction two-way tendency scheme

致 谢

论文是在郑庆林研究员的悉心指导和严格要求下完成的，在选题和完成论文的整个过程中，郑庆林研究员倾注了大量心血。郑老师在科学事业上勤勉治学、严谨求实的治学态度是我永远学习的榜样；恩师循循善诱、诲人不倦的教学作风使我受益终生。郑老师带我一步步走入数值天气预报的科学殿堂，是对我人生无价的馈赠。

自三年前师从郑老师攻读博士学位至今，郑老师、宋青丽老师在我的学习和生活上给予了无微不至的关怀和帮助，在我即将毕业，开始新的学习和工作之时，谨向他们致以衷心的感谢。

在中国气象科学研究院近三年的学习生活中，师兄张朝林博士、师妹袁佳双给我许多帮助，博士同学张胜军、曹云昌、徐影、朱政慧、孙颖、及张培群博士、李建平博士；学长周兵博士、徐国强博士、杨军博士都在学习和生活上给予我许多帮助。研究生部孟玉巧老师、陆业传老师和熊东放老师也都给予我许多关心和鼓励。

至此论文完成之时，我也由衷的感谢陕西省气象局的各位领导：崔讲学局长、陈洪田副局长、胡宜品副局长、谢双亭副局长和杜继稳台长、张来相处长以及我的科长田武文、同事黄祖英，他们的支持和鼓励是我得以完成博士研究生学习生活的基石。

最后，要特别感谢的是我的妻子苟力珍对我的支持和默默无私的奉献，三年来，许许多多的困难都由她来承担，论文的完成也凝聚着她的心血，无以为谢，谨将此文奉献给她。

目 录

摘要

ABSTRACT

目录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 区域嵌套模式的发展	2
1.3 全球大气环流模式与区域模式的嵌套	5
1.4 本文拟研究的问题	12
1.5 研究方案设计及本文安排	14
第二章 一个全球大气环流动力学框架模式及其能量结构	16
2.1 引言	16
2.2 模式基本运动方程组	17
2.2.1 水平运动方程组	17
2.2.2 连续方程	20
2.2.3 热力学方程	21
2.2.4 静力方程、状态方程和水汽混合率方程	22
2.3 模式的能量和一些重要的全球积分守恒量	23
2.3.1 能量关系	24
2.3.2 质量	28
2.3.3 水汽量	28
2.3.4 涡度	29
第三章 一个适用于东亚地区的区域气候模式	31
3.1 引言	31
3.2 一个适用于东亚地区的区域气候模式	33
3.2.1 东亚区域气候模式的控制方程	33
3.2.2 陆面过程	35
3.2.3 积云对流参数化方案	37
3.2.4 时间积分方案	37
3.3 模式下垫面特征及垂直结构	38
3.3.1 计算区域	38
3.3.2 垂直结构	39
3.3.3 下垫面植被分布特征的改进	41

第四章 一个全球大气环流动力学框架——东亚区域气候双向嵌套模式及其数值计算	43
4.1 引言.....	43
4.2 全球大气环流动力学框架模式的数值求解.....	45
4.2.1 水平谱展开方案.....	46
4.2.2 方程组的谱形式.....	50
4.2.3 垂直有限差分方案.....	52
4.3 区域气候模式的数值求解.....	55
4.3.1 区域气候差分方案.....	55
4.3.2 差分方程组.....	56
4.3.3 扩散过程.....	59
4.4 全球大气环流动力学框架——东亚区域气候双向嵌套模式数值计算.....	61
4.4.1 全球大气环流动力学框架模式向东亚区域气候模式提供侧边界倾向场计算方案.....	61
4.4.2 东亚区域气候模式向全球大气环流动力学框架模式反馈倾向场计算方案.....	71
4.4.3 双向嵌套模式耦合原理.....	75
4.5 小结.....	78
第五章 双向/单向嵌套模式数值试验及对比分析	80
5.1 数值试验方案设计.....	81
5.1.1 试验方案设计.....	91
5.1.2 数值试验资料.....	82
5.1.3 数值试验个例.....	82
5.1.4 数值预报结果检验方法.....	83
5.2 双向与单向嵌套模式全球和北半球范围数值试验结果对比分析.....	84
5.2.1 双向与单向嵌套试验全球和北半球范围 500hPa 月距平相关系数.....	84
5.2.2 双向嵌套试验预报的 500hPa 月平均全球温度、高度场与实况对比分析.....	85
5.2.3 双向/单向嵌套试验预报的 500hPa 月平均东北半球高度场与实况场差值的对比分析.....	87
5.3 双向与单向嵌套模式中东亚地区数值试验结果对比分析.....	89
5.3.1 双向与单向嵌套试验东亚地区 500hPa 月距平相关系数.....	89
5.3.2 双向嵌套试验预报的东亚地区 500hPa 月平均要素场与实况对比分析.....	91
5.3.3 双向/单向嵌套试验预报的东亚地区 500hPa 月平均要素场对比分析.....	94
5.4 双向与单向嵌套模式的长期数值积分性能对比分析.....	97
5.4.1 总涡度均方根和总散度均方根.....	97
5.4.2 总质量和总水汽.....	98
5.4.3 总能量.....	99

第六章 总结	101
参考文献	105
附 图	111
致 谢	

第一章 绪论

§1.1 引言

早在二十世纪二十年代, L. F. Richardson 就提出了数值天气预报的设想^[1], 他从原始方程组出发, 将其化为差分方程组, 而后进行数值预报, 由于他对方程组没有进行简化, 同时对物理过程又考虑的非常复杂, 包括云、降水、湍流、地面植被、海洋作用和土壤热传导等等, 加之当时观测资料非常缺乏, 计算工具比较简单, 并且计算不稳定, 他的数值预报试验以失败告终。然而却为人类预报天气开创了一条新的途径。在此后近三十年里, 数值预报一直裹足不前, 未能有进一步发展, 甚至被认为是一个不可能实现的“梦想”。后来, Charney 和 Von Neuman 等吸取 Richardson 数值预报失败的经验教训, 基于尺度分析方法, 在准地转或准无辐散近似、静力近似和刚性垂直边界条件下, 滤去声波、惯性重力波和惯性重力内波等快波^[2], 建立了一个正压模式, 于 1950 年在普林斯顿高等研究所的世界上第一台电子计算机—ENIAC 上, 制作出世界上第一张公认的北美地区 500hPa 数值预报形势图^[3]。这项工作的成功, 向世人证明了数值预报的可行性, 为数值预报在天气预报中的地位奠定了重要基础, 并极大推动了数值天气预报的研究和试验工作。现在, 数值天气预报已经成为天气预报的重要手段和发展方向。

在二十世纪二十年代初期 Richardson 同期也提出使用不均匀网格制作预报的想法^[4], 这说明嵌套网格技术和变网格技术在数值天气预报技术的初期阶段就已经受到人们的注意。但是嵌套网格技术真正得以实际应用却是在六十年代^[5], 随后嵌套技术在国内外区域数值天气预报中得到广泛的应用^[6]。

§1.2 区域嵌套模式的发展

嵌套模式,是指在所关心的区域嵌入一个有限区域细网格模式,该模式的边界值由大尺度的粗网格模式提供。嵌套模式的使用,一方面可以在计算量增加不多的情况下提高有限区内的水平分辨率,另一方面可以改进对梯度较大的气象变量的计算效果,更重要的是,当对某一区域或全球范围使用一个模式时,该模式中的所有物理过程和参数化方案在模式运行时被设定后,则在该区域内或全球范围内均相同,无法顾及不同区域和不同尺度的天气、气候系统的差异,譬如,在北美地区的降水以对流性降水为主,而在东亚地区则是以混合层状云降水为主,若采用同一种积云对流参数化方案,势必造成在某一地区降水预报、模拟的较好,而在另一地区则较差的现象。而在嵌套模式中,由于包括有两个或两个以上的模式,因而可以在不同模式中采用不同的物理过程和参数化方案,以考虑不同地区的差异,并且,在粗网格区域,对于大尺度系统,因其满足静力平衡近似,可使用静力平衡关系,积分步长也可以加大,避免不必要的精度损失,而在细网格区域,可以使用非静力平衡方程,以刻画中小尺度系统。

嵌套模式最早被用于实际试验是在1960年,并于70年代中期开始在业务中使用。在嵌套模式发展的早期阶段,嵌套模式预测、研究的主要对象是有限区内的中短期天气预报,其中,主要的嵌套方法有以下两种:

1. 有限区域模式之间的同模式单向嵌套;
2. 有限区域模式之间的同模式双向嵌套;

最初,有限区域模式之间进行嵌套时,主要采用有限区域模式之间的同模式单向嵌套,这种方法比较简单,其具体做法是对同一个有限区域模式选取不同的计算区域,在所关心的区域使用较高水平分辨率,称为细网格区域,而后进一步选取一个计算区域,其水平分辨率较前者为低,称其为粗网格区域;对粗网格区域的选取,要求包含着细网格区域,且其计算区域必须远大于细网格区域。单向嵌套

模式积分时,首先是粗网格模式进行积分,而后将其结果作为侧边界条件提供给细网格模式,再进行细网格模式的积分运算。

随着单向嵌套模式的应用,其缺点也不断暴露出来。在单向嵌套模式中,细网格模式只是使用粗网格模式的计算结果作为侧边界,未能将其计算结果反馈回粗网格模式,即将不同尺度的大气运动机械地割裂开来,而实际大气中,不同尺度的大气运动之间存在相互作用关系,因此,单向嵌套模式不符合实际大气的运动规律。

鉴于单向嵌套模式的缺点,人们开始发展双向嵌套模式,对于嵌套模式的研究及其应用,国外学者做了大量的工作^[7-20],提出了多种嵌套方法,如箱式法,变量法等等,但均为同模式的自嵌套方法。在 Penn State/Ncar 中尺度气象模式 MM4^[21]中,就采用了一个同模式的自嵌套方案,它是一个两重双向嵌套方案,其基本原理依据于文献[14],外重模式为内重模式提供侧边界,以驱动内重模式积分运行,内重模式将其积分结果反馈回外重模式,以体现不同尺度大气运动之间的相互作用关系。内、外重模式变量在边界处采用线性插值进行交换,内、外重模式格距之比为 1:3;在 Penn State/Ncar 随后发展的中尺度气象模式 MM5^[22]中,亦采用与 MM4 相同原理的双向嵌套方案,不过,在 MM5 中,它是一个三重双向嵌套方案,模式可分为内、中、外三重,各重之间的格距之比为 1:3:9。这种双向嵌套插值方案较之 MM4 的两重嵌套方案更为细致、实用,因而得到了广泛应用,然而,这种方法也有其不足之处,首先,内、外重模式之间或内、中、外三重模式之间的变量(信息)交换仅仅局限在模式边界上,而非模式计算区域整体,因而交换区域有限,不能够充分反映出不同尺度大气运动之间的相互作用关系,其次,在小区域向大区域反馈信息之后,为了保证模式系统能够稳定运行,要对反馈后的信息进行平滑,导致小区域反馈回来的信息遭到扭曲,不能准确反映出小尺度天气系统对大尺度天气系统(相对于小区域天气系统而言)的影响和作用,再者,模式各重之间的格距之比为 1:3 或 1:3:9,即格距之比为无理数,造成不必要的精度损失,并使得在模式交界区附近的模式场容易出现不协调的现象。

我国学者也非常重视嵌套模式的发展、研究。郑庆林等^[24]在原 Penn State/Ncar 中尺度气象模式 MM4^[22]的基础上,发展了一个三重双向嵌套的台风数值模式,用于台风的数值模拟研究,在该三重双向嵌套模式中,并未采用 MM4 原模式本身自有的双向嵌套方案,而是提出了一种新的双向嵌套方案,该模式在水平方向上分别以 60km, 120km, 240km 格距形成 25×25 格点的三重嵌套网格,既有高分辨率的模式关键区,又有较高分辨率的模式中重区,以及较低分辨率的模式外重区。关键区考虑较细致的结构,能够提供精度较高的预报结果,特别是改善了对降水的预报;中重区适合于中尺度天气系统,可以提供较好的 48h 预报,如对台风流场、路径等都有良好的预报能力;外重区则能将大尺度环境流场的影响考虑进去,各区之间的水平格距比例为 1:2,所以在模式交界区附近的模式场分布不易出现不协调现象。由于模式具有三重水平结构,既能够较为充分地考虑不同尺度的地形和所关心区域的大气运动的细致结构,又能考虑大尺度环境流场对台风的影响,特别是在该台风模式之中,内、中、外三重模式区之间采用双向嵌套方法,使得台风系统与外尺度环流场之间的相互作用得以体现,因而可以较好的预报出台风的移动路径、不同台风过程中暴雨中心位置、雨区范围以及雨区的扩展。为了研究地形对台风暴雨的影响,郑庆林等^[25-26]利用该三重双向嵌套的台风数值模式进行有无地形对台风登陆后的影响,结果表明:充分、准确地考虑地形之后,对台风登陆之后的衰减及降水强度变化的模拟效果较好,能够较好地模拟出台风路径、登陆时间、位置以及登陆后的衰减等;若取消地形,则模拟的台风路径摆动较小,衰减也很小。同时,由于取消地形,使得地形的动力抬升作用消失,台风暴雨的降水量也随之减少。后来,郑庆林等在这个三重双向嵌套的台风数值模式的基础上,又发展了一个能考虑青藏高原及其背风坡不同尺度地形的数值模式^[27],基于三重双向嵌套模式本身所具有的优点,加之青藏高原大尺度地形及秦岭—大巴山的中尺度地形都在模式中得以较好的体现,因此在对西南涡的移动、发展、形状、范围以及西南涡周围流场的模拟中,成功地模拟出了南支低空急流及北支冷空气的活动,对西南涡产生的降水和雨区分布等模拟效果较好,并通过全地形、1/3 地形和无地形的数值试验对比分析,证明青藏高原大尺度地形的绕流辐合作用和秦

岭一大巴山的中尺度地形的抬升作用，决定了西南涡的移动和发展，并对西南涡天气过程的降水产生增强作用。郑庆林等有关三重双向嵌套数值模式的研制、数值试验工作，将我国的双向嵌套技术向前发展到了一个新的阶段，进一步证明了需要在数值天气预报中充分考虑不同尺度天气系统之间的相互作用。

然而，上述工作都属于有限区域模式的同模式的单、双向嵌套（自嵌套），虽然已经能够反映出在一定区域内不同尺度的大气运动之间的相互作用关系，但仍不能反映全球大气运动与有限区域内部中小尺度天气系统之间的相互作用关系，同时，由于研究重点在于中尺度系统，积分时间较短，还不适于气候研究与预测，例如影响区域气候变化的陆—气相互作用，在中尺度模式当中，考虑的比较简单，而在区域气候模式当中，则需要耦合专门的陆面过程模式，以满足对区域气候变化的研究、预测工作的需要；并且各地区的区域气候虽有地区性差异，更重要的是，区域气候变化与全球大气环流变化是密切相关的，且二者的变化过程是长期和缓慢的，这种相互影响关系使得在使用嵌套模式来研究、预测区域气候变化时，就不能再采用有限区模式的自嵌套方式（包括单向嵌套和双向嵌套两种嵌套方式），而必须采用全球大气环流模式与有限区模式之间的异模式嵌套方式。此外，考虑到区域气候变化对全球气候变化的影响，在区域气候模式与全球大气环流模式的嵌套方案中，应当采用双向嵌套方式。

§1.3 全球大气环流模式与区域模式嵌套

在数值天气预报发展的早期阶段，数值预报的主要对象是中短期天气预报，虽然早在1955年普林斯顿的学术会议上就已经提出将短期数值天气预报的预报时效延长至中期和长期（即气候预报）的想法，但囿于当时的数值天气预报理论、技术方面的问题，以及计算条件的限制，并未付诸实践。后来，一方面数值天气预报技术和计算机技术有了突飞猛进的发展，为气候预测和研究奠定技术基础，另一方面气候变化对经济发展和社会发展的影响及其重要性也愈来愈受到重视，气候预测和研究开始被提上议事日程。1974年世界气象组织（WMO）和国际科学联盟

理事会 (ICSU), 联合召开“气候的物理基础及其模拟”国际讨论会, 从此, 气候模拟研究正式开始。

气候研究的一个重要和长期目标是正确模拟、预测区域气候变化^[28], 在气候研究与预测工作初期阶段, 其研究重点在全球气候变化, 随着研究、预测工作的深入, 区域气候的模拟、预测日益受到重视。目前, 在研究、预测区域气候时, 主要的方法是将全球大气环流模式与区域气候模式进行嵌套, 从而完成对区域气候的模拟、预测工作。

在将全球大气环流模式与区域气候模式进行嵌套时, 首先要选取合适的全球大气环流模式和区域气候模式。根据计算方法的不同, 全球大气环流模式主要有全球大气环流谱模式和全球变网格模式两种, 谱模式具有计算精度高、稳定性好、模式程序简单而有效, 适合于长期数值积分的突出优点, 并且用谱方法来求解球坐标下的控制方程组, 不需要像有限差分法那样, 对球面网格中的极点做特殊处理, 因而特别适合于全球或半球模式。而且, 三角形截断的球谱函数展开式, 可以得到在整个球面均匀的水平分辨率, 这是网格点法难以完全做到的, 再者, 在谱模式中易于应用半隐式时间积分方案, 其计算程序比格点模式简单, 在同样的水平分辨率情况下, 积分步长也要比格点模式长一些, 节省了计算机 CPU 时间, 并且谱方法能自动并彻底的滤去短波, 效果比一般差分法中用平滑算子要好, 因而在模拟、预测全球气候变化时, 大都采用全球大气环流谱模式, 其典型代表为美国国家大气研究中心 (NCAR) 的 CCM1、CCM2、CCM3 系列的通用气候模式。

对于区域气候模式来说, 大部分区域气候模式都是在原来的中尺度模式基础上发展得来的, 目前广为使用的区域气候模式 RegCM2, 就是 Dickion、Giorgi 和 Bates 等^[29-30]于 1989 年, 为了研究区域气候的变化规律和机理, 在有限区中尺度模式 (LAM) 的基础上, 通过与 GCMs 耦合, 发展出一种新的气候模式—区域气候模式。而后 NCAR 发展了第一代区域气候模式 (RegCM), 此模式建立在原 Penn State/Ncar 中尺度气象模式 MM4^[22]的基础上, RegCM 作为第一代区域气候模式, 被应用于美国和欧洲地区的一系列数值试验, 以检验模式的性能。时间积分的长

度从几天、几月到几年不等。RegCM 还与 NCAR 的 CCM 嵌套来模拟现在气候、古气候和二氧化碳加倍的气候效应。结果表明,这种嵌套模式在区域气候研究中有很好的灵活性和应用前景。但早期的区域气候模式 RegCM 还有不少缺点,在分析其缺点的基础上又改进为第二代区域气候模式,即 RegCM2。在 RegCM2 中,几乎所有的模式物理过程都进行了改造,时间积分方案也有改变,采用显式分离算法,对不同物理量其积分步长不同,明显减少积分时间。现在,RegCM2 已成为应用最多的区域气候模式之一。

除了 RegCM2 以外,目前比较有代表性的区域气候模式还有科罗拉多州立大学(CSU)的 RCMS 模式、美国能源部太平洋西北国家实验室的 PNNL 模式和美国纽约州立大学气候研究室的 SUNYA 模式,所不同的是,后两者所用的动力框架是非静力平衡有限区模式—MM5 的动力框架。

我国气象学者对区域气候的模拟研究非常重视,国家气候中心引进了 NCAR 区域气候模式 RegCM2,在此基础上,根据我国的区域气候特点,做了大量的改进,将其发展成为 CRegCM2 模式。与 Dickion、Giorgi 和 Bates 等的工作类似,我国学者郑庆林也以中尺度模式 MM4 为基础,耦合了全球气候模式的辐射过程,发展了一个较为简单的区域气候模式,并应用于实际业务预报当中。

区域气候模式的发展,为全球大气环流模式与区域气候模式的嵌套奠定了技术基础。当前,应用于区域气候研究、预测的全球大气环流模式与区域气候模式嵌套类型主要有以下两种:

(1) 全球大气环流模式与区域气候模式单向嵌套

能够反映全球大气运动与区域内部气候系统之间的相互作用的嵌套模式,只能采用全球模式与区域模式相嵌套的方法。如前面所提到的,目前全球大气环流模式(GCMs)多为谱模式,而有限区模式则基本为格点模式,因此,二者之间的嵌套就属于异模式之间的单/双向嵌套。从广义上讲,由观测资料

(如 ECMWF 资料或目前广为使用的 NCEP 再分析资料) 得到环境场, 作为初值和边界条件驱动区域气候模式, 就是一种异模式之间的单向嵌套^[31-36], 这种方法适用于模拟区域尺度过程与全球大气运动之间的关系, 难以应用到气候预测工作中。

对区域气候变化进行预测, 可行的方法就是将 GCMs (全球大气环流模式) 与区域气候模式进行嵌套。为了充分发挥 GCM 模式与格点模式各自的优点, 体现不同尺度大气运动之间的相互作用关系, 符淙斌等^[37]将 CSIRO 的 GCM 模式与由中国科学院大气物理研究所和南京大学科学系合作, 在以 NCAR/PU 的中尺度模式 MM4 为基础发展的一个适用于东亚地区的区域气候系统模式 RCSM-TEA 进行了嵌套, 对中国东部季风雨带 (4-10 月) 的演变进行了模拟, 正确模拟出 6 月位于江淮地区的雨带以及 7 月份的雨带北跳现象。钱云甫^[38]等将 T42 模式与他们发展的 $P-\sigma$ 混合坐标系 5 层原始方程区域气候模式 (NJU-RCM) 进行嵌套, 对中国夏季降水进行了模拟, 结果表明: NJU-RCM 模式成功的模拟出了副热带高压的三次北跳和南退以及随后副热带高压进一步北跳导致梅雨结束的过程, 并对降水过程的模拟以及主要雨带的分布, 都与实际比较吻合。郑庆林等^[39]将他们在 CCM1 模式上发展的 CCM1-LNWP 长期数值预报模式与 NCAR 的 MM4 中尺度气象模式进行单向嵌套, 对长江中上游地区汛期降水进行预报, 取得了较好的效果。在此工作的基础上, 郑庆林等^[40]又在 NCAR 的 CCM3 (T42L8) 气候模式的基础上, 针对月、季、半年度长期数值预报为目的, 合理改变其水平和垂直分辨率但不改变物理过程和计算方法而发展了一个 CCM3 (R15L9) 模式, 并将其与 MM4 进行单向嵌套, 结果表明: 模式能较好地用于中国东北地区农作物气象条件季、半年度预测, 地面气温距平分布的预报准确率令人满意, 且模式具有较好的大尺度大气环流长期预测能力。随着区域气候模式技术的成熟, 郑庆林等将区域气候模式 RegCM2 与在 CCM3 上发展 CCM3-LNWP 模式进行单向嵌套, 应用于中国地区汛期降水的短期气候预测业务^[41-44], 都取得了较好的预报效果, 特别是采用区域气候模式 RegCM2 与在 CCM3 上发展 CCM3 (R15L7)-LNWP 模式进行单向嵌套预报 2001 年我国汛期