

# 一种减少有限区气候模式 嵌套误差积累的方法

李 莉

赵俊英

颜 宏

黄丽萍

(中国气象科学研究院, 北京 100081) (国家气象中心) (中国气象局) (国家气象中心)

## 提 要

介绍了一种用于减少有限区气候模式中嵌套误差积累的新方法——三维嵌套方法,详细阐述了这种方法提出的原因、必要性和它的理论基础。在有限区气候模式上进行三维嵌套与二维嵌套的对比试验,试验结果表明三维嵌套方案可减少嵌套预报误差的积累,并且对于降水的预报也有很大的改善。

**关键词:** 三维嵌套 嵌套误差 误差积累

## 引 言

以全球粗分辨率气候模式的结果为侧边界值或背景气流场,用有限区模式研究模拟下垫面等强迫项或局地特性的变化对局地气候的影响,近年来进展很快。在此情况下要采用嵌套的方法,即在全球气候模式中嵌套更细的区域气候模式作为增强预报来更细致地描述局地气候特征。侧边界所带来的误差是有限区域预报模式的主要误差来源之一。另外由于气候模式需要做长时间积分,因此区域气候模式还存在误差的积累性问题。在深入分析侧边界误差特征的基础上,发现误差积累较严重的地区主要是集中在模式大气上部。我们针对这一误差分布,采用三维嵌套方法以减少嵌套误差积累。

近年来对三维嵌套方法开展了以下探讨:第一阶段,赵俊英、王晓峰在复杂地形条件下嵌套细网格模式(以下简称 YH 模式)上进行三维嵌套试验,试验结果表明,三维嵌套方案在长时间积分中运行稳定,而且有助于减小区域模式的侧边界嵌套误差。随积分时间的延长,三维嵌套方法的优越性更加明显。第二阶段,在有限区气候模式上进行三维嵌套试验。

本文将重点阐述三维嵌套理论,并通过在有限区气候模式上进行三维嵌套与二维嵌

套的对比试验,分析三维嵌套方法对于减小区域气候模式中嵌套误差积累的作用。

## 1 三维嵌套方法的理论基础

### 1.1 三维嵌套方法的提出

进行区域气候模拟与预测,可采取两种途径:全球和有限区气候模式。运行全球模式需要强有力的计算机条件的支持,其分辨率受到很大限制,另外高分辨率全球气候模式还将受制于全球高分辨率的资料。由于计算机资源的限制、观测资料覆盖率的不足以及通讯系统的制约,使全球预报发展受到一定限制。因此,要实现很高分辨率的全球气候模拟目前仍然有困难。为提高局地天气预报的准确率,人们早已采用有限区细网格模式与全球粗网格模式嵌套的方法,以提高模式局地的水平分辨率以及垂直分辨率。假定全球模式预报不受有限区模式预报影响(单向嵌套),那么区域气候模拟即为在全球气候模式预报的大尺度背景气流驱动下的局地气候的增强模拟。因此,嵌套的本质就是将全球模式模拟的结果(主要是大尺度模式气候)切换到区域气候模式,作为有限区域模拟所必须的背景环流信息。

嵌套方法的研究,虽然通过前人大量的工作,已取得许多可贵的经验,但是,嵌套误差问题并没有最终解决,目前嵌套误差仍然

是有限区模式预报中误差的主要来源之一。侧边界嵌套误差,在天气尺度预报中主要有三个方面的来源:由差分方程代替微分方程及侧边界的超定义导致计算波的产生并在边界附近发生反射、折射等;天气尺度的波动在移入或移出有限区时,由于格距不同的模式大气中大气波动的相速计算误差等造成预报的“失真”;非绝热过程的模拟中由于粗细网格对参数化模拟的次网格尺度强迫项的不同造成虚假的非绝热平流。这些都可能造成侧边界附近的预报误差,甚至发生计算不稳定。有限区气候模拟除存在以上嵌套误差的共性外,还有其特殊性,主要是长时间积分中误差的积累性。从目前我国区域气候模拟的状况看,为使积分稳定,需进行边界处理的过渡区格点数需占模拟区域总格点数的50%以上,尽管如此,在流出边界附近仍然经常出现大量虚假降水,说明区域气候模拟中边界嵌套误差的积累问题是严重的。因此对区域气候模拟中误差的种类、来源及其时空分布和时间积累性特点作一比较系统的分析,并在此基础上提出减少误差的新思路、新方法已成为进一步提高区域气候模拟的准确率和使之业务化的一个急待解决的问题。

根据赵俊英、黄丽萍分析的嵌套误差来源及时空分布特点可知,嵌套误差来源是多方面的,因此有针对性地减少嵌套误差的思路也不是唯一的,其中一个途径是针对嵌套误差主要集中在模式大气上部的误差分布特点,采用三维嵌套方法。本文主要对该方法进行探讨。

三维嵌套方法最初在1988年提出,当时是将这种方法用于短期气候模式(复杂地形条件下嵌套细网格模式)中。徐传玉<sup>[1]</sup>对1990年8月1日华北暴雨过程进行了三维嵌套数据值模拟,得到了很好的结果。

气候模拟对象的时间尺度决定了模式需要长时间积分,这使长期气候预测和短期天气预报的模式侧边界误差的提法不同:气候模式嵌套误差更侧重误差的平均状况及积累性特点,而在短期天气预报模式则侧重稳定性,所以有些在短期天气预报中比较重要的误差,若不积累的话,则在气候预测和模拟中

并不那么重要。

基于上述原因,我们有必要针对有限区气候模式长时间积分中的侧边界嵌套误差积累性的特点,研究三维嵌套方法对减小侧边界嵌套误差积累的效果。

## 1.2 三维嵌套方法的理论基础

### 1.2.1 地面天气形势的演变受高、低空两方面因子的制约

地面形势预报方程<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\partial H_0}{\partial t} = \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} - \frac{R}{9.8} \ln \frac{p_0}{p} \times [-V \cdot \nabla T + (\gamma_d - \gamma) \omega + \frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt}] \quad (1)$$

方程(1)右边后四项分别是平均层的高度变化、温度变化、垂直运动产生的温度绝热变化项及非绝热变化项。可以看出:地面形势的演变受平均层的高度变化影响,其中又包括涡度平流和热成风涡度平流两部分的影响。例如气旋的发生发展都和高空涡度平流有关,低空涡旋如西南涡等,其形成也和高原高空槽东移有关;地面形势的演变还与低空的绝热、非绝热因子有关;高空气流常常对地面系统有一定的引导。由此可知,地面天气形势的演变受高、低空两方面因子的制约。

### 1.2.2 大气的运动

大气运动具有多尺度波动特征,而且这种多尺度波动特征随高度的分布是不同的。大气波动的原动力之一来自地表外强迫,离地面越远,下垫面不均匀性对动力、热力等强迫效应的作用越小。这造成了大气波动的水平尺度在垂直方向上的不均匀分布。众所周知其中短波运动主要出现在对流层中低层,由此向上,长波、超长波分量逐渐增大,成为大气运动的主要形式,而短波则越来越不明显。

另外,不同纬带天气系统之间的相互作用往往是藉助与不同尺度波与波之间的非线性相互作用来完成的。而许多重大天气过程常发生在这些调整或相互作用时期。国内外的数值预报试验都有这方面的例子<sup>[3]</sup>,即超长波对预报的误差贡献最大。这说明能否在大气模式中描写好超长波的形状和演变是提高预报准确率或模拟质量的一个关键。

### 1.2.3 全球模式与有限区模式的各自优势

全球模式与有限区域模式,在模拟长波和较短波方面各有优势。任何数值模式,由于水平格距或模式分辨率限制,存在着可预报的波长下限( $L_{\min} \sim 8DX$ ),而有限区域模式则不仅存在可预报波长的下限,而且存在上限。这个上限是由有限区侧边界的距离( $X$ )决定的。一般有限区模式的格距比全球模式小,因此有限区模式可以对较短波做更细致的描述;而对于有限区域数值模式而言,其水平尺度大于可预报上限尺度的波的变化信息则主要来自模式外部的所谓侧边界的外部强迫。传统的水平侧边界嵌套方法,仅仅利用了全球模式在有限区模式侧边界附近的信息。仔细分析不难发现,有限区小模式所能表示的波谱是不连续的,间断波段随小模式侧边界间的距离  $X$  增大而增大。

### 1.2.4 长时间积分中模式嵌套误差分析

赵俊英和黄丽萍等曾将环圈 YH 模式与有限区 YH 模式进行同模式嵌套,以环圈模式预报作参考场,并设计一套诊断分析工具,了解嵌套误差的主要来源及其时空分布特点和时间累积性特征。通过分析发现:

a. 有限区细网格模式在模拟上层大气长波时不如粗网格环圈模式效果好,但其在模拟下层短波时比粗网格环圈模式的下层误差要小。

b. 长时间积分中嵌套造成的动能场、感热场、水汽场误差较大,主要分布在上层边界区,而且明显存在误差积累;质量场和位涡场误差较小,质量场误差主要在下层,位涡场误差主要在模式大气边界上层的流入区。

根据高空系统和地面系统相互联系相互影响的特征、大气的垂直分布特点、全球模式与有限区模式各自的优势以及前期侧边界误差分析得出的误差主要集中在中高层这一结论,我们提出用“三维嵌套”的方法减少区域模式嵌套误差的设想。

由误差分析结果表明,全球模式与有限区模式预报各具优势。用有限区嵌套模式进行区域气候模拟的意义在于能够更细致地刻画低层较短波系统的活动,而对模式大气上部大气长波的描述不如全球模式,表现为较

大的嵌套误差。为了充分发挥全球模式与有限区模式预报的优势,在有限区模式中更多地引入全球模式预报的有用信息,结合大气波动的垂直分布特点,我们设想不仅在模式的水平侧边界,而且在模式大气上部若干层以某种方式引入全球模式预报信息,即实现三维嵌套。其中上边界嵌套既可以是模式大气上部若干层,也可以在模式大气中间层引入大模式预报信息。这就是所谓的三维嵌套方法。

## 2 应用举例

### 2.1 在有限区气候模式上实现三维嵌套

有限区气候模式(以下简称 RegCM2 模式)主要特点:水平结构是 B 型跳点正方形网格;垂直坐标是  $\sigma$  坐标;垂直层数分为 16 层;侧边界的处理采用指数张弛法;行星边界层为 hostslag 行星边界层;采用 KUO 积云对流方案和非显式水汽方案。格距 60km,中心点位置(30°N,115°E),网格点数为 151×79,在本研究中为节省计算时间,将预报区域缩小为 63×55。

在 RegCM2 模式上实现三维嵌套,用 ECMWF 的客观分析场资料作为运行 RegCM2 模式的初值和边界值,时间间隔为 12 小时。在用此资料时,应先作预处理,将资料插值到 RegCM2 模式所要求的层次和格点上,所用的初始场是 1991 年 5 月 1 日 00 时的客观分析场。从 1991 年 5 月 1 日起一直积分到 5 月 31 日,积分时间为一个月,时间步长为 120 秒。

由于 RegCM2 模式采用  $\sigma$  坐标系,而我们进行嵌套的资料是 ECMWF 的客观分析资料,考虑到  $p_{\sigma} = p_{\sigma}(p_s(t))$ ,即  $\sigma$  坐标面随地面气压的变化在不断变化,所以,三维嵌套的实现技术上需要将时间插值后的 ECMWF 分析场资料空间插值到相应时刻的  $\sigma$  面上,然后以某种方式引入 RegCM2 模式。

目前,由于对三维嵌套方法的研究尚做为可行性研究,还处于初步数值试验的阶段,采用了两种方式将全球模式预报资料引入有限区模式:

(1)在模式大气上部若干层直接引入全

球模式预报信息。赵俊英、王晓峰在 YH 模式上实现三维嵌套方法中采用这种嵌套方式,得到了很好的结果。

(2)类似侧边界嵌套方法中的张弛边界处理的思路。本次三维嵌套方案设计中采用这种方式引入 ECMWF 分析场资料。嵌套的物理量为经向风、纬向风、温、湿。嵌套层次为从模式大气顶层到  $\sigma = 0.55$ (对应  $p$  面大约为 500hPa)。

在 RegCM2 模式上的原侧边界嵌套方案,称之为二维嵌套方案。

### 2.2 降水量预报效果分析

在 RegCM2 模式实现三维嵌套方案和二维嵌套方案,对 1991 年 5 月的月降水量(图 1)作出预报(图 2,图 3),对应实况降水量对预报结果进行分析。

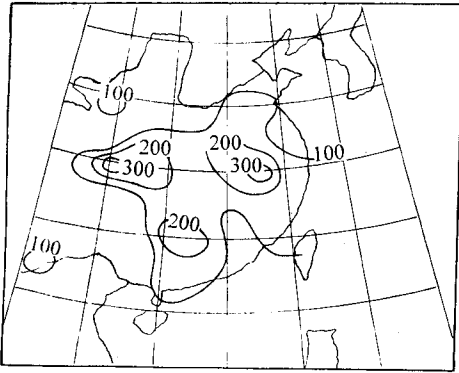


图 1 1991 年 5 月实况降水量/mm

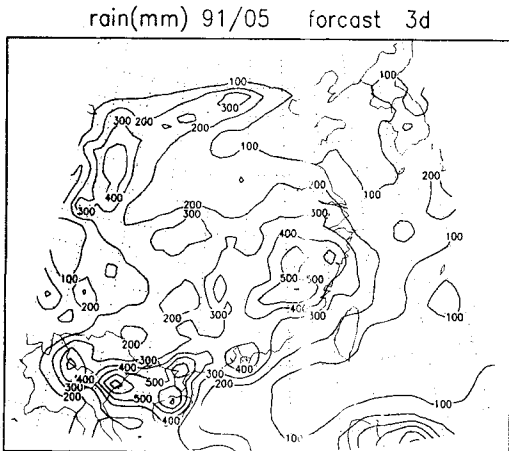


图 2 三维嵌套方案模拟 1991 年 5 月降水量/mm

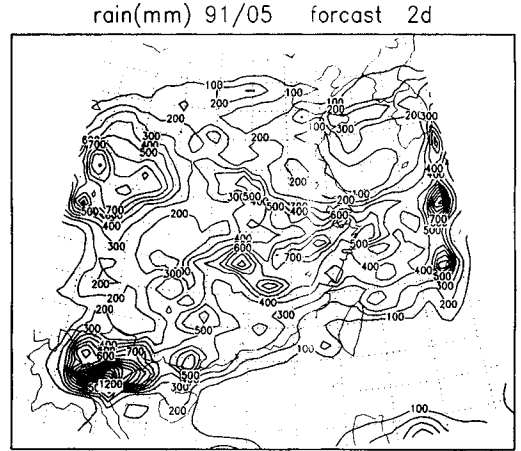


图 3 二维嵌套方案模拟 1991 年 5 月降水量/mm

二维嵌套方案模拟结果与实况比较可以看到:流入边界的虚假降水中心有三个,分别位于北部湾、乐山和甘孜附近,中心最大强度有 1300mm;流出边界的虚假降水中心有三个,分别位于东海和黄海上(图 3),中心最大强度有 1000mm;在涪源附近有 300mm 左右的虚假降水中心;对于中间区域降水的模拟,二维嵌套方案模拟结果与实况比较显得很凌乱,雨带分布不明显,而且强降水中心太多,中心强度偏大,与实况的偏差很大。

三维嵌套方案模拟结果与实况比较来说:流入边界的虚假降水中心有三个,位置与图 3 相差不多,但是强度和范围有显著减小,中心最大强度为 700mm;流出边界的虚假降水中心不明显;对于减小涪源附近的虚假降水中心的效果不大;对于中间区域降水的模拟,整个长江流域的雨带分布较明显,雨带位置接近实况。位于九江附近的强降水中心的位置模拟得很好,但是强度偏强,位于四川盆地的强降水中心模拟得偏东,强度接近实况。

以上这些分析表明:三维嵌套方案模拟降水过程,流入、流出边界出现的虚假降水范围比二维嵌套方案明显缩小,而且强度要比二维嵌套小得多。对于中间区域的降水量预报,三维嵌套方案模拟雨带的位置、强降水中心的分布和量值都较二维嵌套方案模拟的结果有很大改善。

可以认为,三维嵌套方案具有较好的模

拟强降水的能力,较二维嵌套方案来说,改进效果很显著,但是在强度上及范围上和实况相比还有偏差,这并不是仅仅由侧边界嵌套的处理就能够解决的,它还与模式的分辨率以及物理过程的描述等因素有很大的关系。

### 2.3 模式运行稳定性分析

由于地面气压倾向以及地面气压对时间的二阶导数( $\partial^2 p_s / \partial t^2$ )对扰动尤为敏感,我们可以通过观察 $\partial^2 p_s / \partial t^2$ 在整个积分时段中量值变化来分析模式运行的稳定性。图4是

采用三维嵌套方案和二维嵌套方案对1991年5月进行31天的积分时, $\partial^2 p_s / \partial t^2$ 随积分时间的延长的变化曲线。可以看到整个积分全过程,三维嵌套方案中 $\partial^2 p_s / \partial t^2$ 比二维嵌套方案的 $\partial^2 p_s / \partial t^2$ 振幅要小得多,最大值比二维嵌套方案小一个量级,而且随积分次数的增加, $\partial^2 p_s / \partial t^2$ 变化很小,只有微小的波动。由此我们认为三维嵌套方案比二维嵌套方案运行要相对稳定。

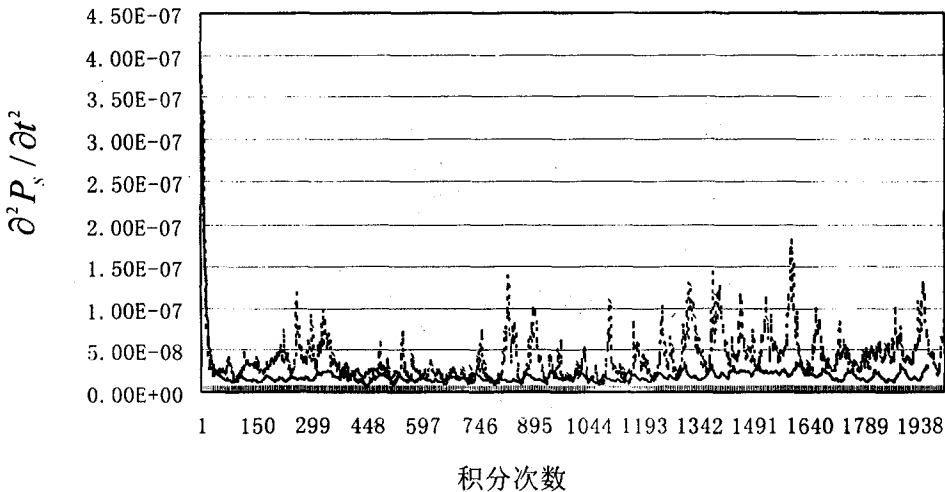


图4  $\partial^2 p_s / \partial t^2$  随积分时间的变化(单位: $10^{-7} \text{hPa/s}^{-2}$ )(实线:三维嵌套,虚线:二维嵌套)

### 3 结论与讨论

(1)通过在有限区气候模式上进行三维嵌套和二维嵌套的对比试验,我们看到三维嵌套方案与二维嵌套方案相比,对降水预报的改进很显著;利用三维嵌套方案进行长时间积分,模式是可以较为稳定的运行的。

(2)三维嵌套方法的思路是正确的,方法是可行的,它为有限区域气候模拟减小嵌套误差提供了新的思路,随积分时间的延长,三维嵌套方法的优越性更加明显。

与二维嵌套相比,三维嵌套方法有利于减小长时间积分中的嵌套误差积累,在降水量预报方面取得了较明显的改进,而且采用

三维嵌套方法的模式运行稳定性很好。但是也存在一些问题,如流入、流出边界的虚假降水需要进一步减小,预报强降水中心的强度有夸大现象。上述问题还有待今后进一步研究改进。

### 参考文献

- 徐传玉, 颜宏. 对一次华北暴雨过程的三维嵌套数值模拟. 华北地区中尺度暴雨试验论文集, 北京: 气象出版社, 1992: 194~208.
- 朱乾根. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1992: 313~320.
- 廖洞贤, 张可苏等. 关于大气模式中的若干协调问题的研究. 中期数值预报研究成果汇编(1), 1990.

# A New Method for the Reduction of the Accumulation of Lateral Boundary Errors

Li Li

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Yan Hong

(Chinese Meteorological Administration)

Zhao Junying

(National Meteorological Center)

Huang Liping

(National Meteorological Center)

## Abstract

A new method of Three Dimensions Nested used to reduce the accumulation of lateral boundary errors was introduced. The reason, the need to point out this method and its principle basement were expounded in details. The contrast experiments between the three Dimensions Nested and the Two Dimensions Nested were conducted. The results show that the Three dimensions Nested not only can help to reduce the accumulation of lateral boundary errors, but also can make the simulation of rainfall more accurate.

**Key Words:** three dimensions nested errors in nesting accumulation of lateral boundary errors