

三维嵌套技术在有限区域模式长时间积分中的初步应用

王晓峰¹⁾ 李永平¹⁾ 马晓星²⁾ 张瑞怡³⁾

¹⁾(上海台风研究所, 上海 200030)

²⁾(上海中心气象台, 上海 200030) ³⁾(上海气象影视中心, 上海 200030)

摘 要

在复杂地形条件嵌套细网格模式基础上, 利用球圈模式与有限区域模式自嵌套, 就三维嵌套方法在长时间积分中的模拟结果进行了初步分析。结果表明: 三维嵌套对垂直层次选取较敏感; 在长时间积分中模式运行稳定, 积分时间越长, 其优势越明显。这为有限区气候模式侧边界方案提供了新的思路。

关键词: 三维嵌套; 球圈模式; 侧边界

引 言

气候变化对经济和社会发展的影响, 已成为当前各国政府和科学家们所关注的重大问题。为研究细致的区域气候变化, 人们常常应用耦合 GCM 的中尺度数值模式来模拟区域气候, 从而得到给定地区的气候变化特征。国内外学者做了大量相关研究^[1-3], 结果表明: 区域气候模式具有较好的模拟能力。但区域模式的侧边界条件定解问题, 在理论和实际预报中, 都有大量尚需解决的问题。有限区域气候模式与短期天气预报模式相比, 还存在其特殊的难点, 即侧边界误差在长时间积分中的积累问题。为了解决区域气候模式侧边界问题, 其侧边界过渡区往往取得很宽, 几乎占全部积分区域的 50% 以上; 当垂直方向分辨率加大时, 水平圈数也加大。

Anthes^[4]指出: 大模式存在预报波下限为 8 倍模式网格距, 因而其对较大尺度波的预报较好。与大模式预报不同, 有限区域模式不仅存在可预报波下限, 还存在可预报波上限。黄丽萍等^[5]对侧边界误差做了较为详细的分析, 认为在有限区模式中, 许多物理量的误差分布在上层, 如感热场、水汽场等。根据大小模式各自优势及嵌套误差主要集中在中高层这一结论, 可将有限区域模式不仅在水平侧边界与大模式嵌套, 而且在垂直方向的上边界也以某种方式与大模式嵌套, 这即为三维嵌套。赵俊英^[6]做

了相关研究, 认为三维嵌套在技术上可行, 模式亦运行稳定。徐传玉等^[7]采用三维嵌套方法对 1990 年 8 月 1 日华北暴雨过程进行了数值模拟, 结果令人振奋。本文在前人研究基础上实现了三维嵌套长时间积分的稳定运行, 为改善有限区域气候模式侧边界问题提供了有益的探索。

1 模式及方案设计

本文采用颜宏^[8]设计的“复杂地形条件下嵌套细网格模式”(YH 模式), 模式采取单向影响嵌套边界, 在水平结构上取 C 型跳点网格。为了兼取 p 坐标和 σ 坐标的优点, 并考虑到行星边界层的特点, 采用了等厚行星边界层的 $p-\sigma$ 混合坐标系, 垂直方向上分为 6 层。

三维嵌套设计基本思路是在模式大气上层(若干层)引入大模式资料, 再加入强对流订正。若以 $(\frac{\partial A}{\partial t})_D$ 表示原模式预报方程左端项, 引入大模式资料及对流订正后方方程变为:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = (\frac{\partial A}{\partial t})_D + K_\sigma(A - A_{SP}) + K'_{\sigma\alpha}(\frac{\partial A}{\partial t})_c \Delta t \quad (1)$$

式(1)中, A 为小模式预报量(包括 u, v, T, q); A_{SP} 为大模式预报量(包括 u, v, T, q); $(\frac{\partial A}{\partial t})_c$ 为对流引起

的要素变化率; α_a 为对流订正系数,介于 0~1。 K_s , K'_s 为调整系数,当 K_s 取很大值或趋于无穷时,式(1)近似为 $A = A_{sp} + A_c$, $A_c = \alpha_a \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)_c \Delta t$; 当取 $K_s = 0$ 时,则有 $\left(\frac{\partial A}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)_D$, 即同原模式。

作为初次试验,令 $K'_s = 0$, 对比试验如表 1 所示。YH 模式是 $p-\sigma$ 混合坐标,以 400 hPa 为分界线,以上层次为 p 坐标,以下层次为 σ 坐标;其中第 1 层为 100 hPa,第 2 层为 300 hPa,第 3 层 σ 为 0.25。模式预报范围东西方向为 $61.875^\circ \sim 127.5^\circ \text{E}$,南北方向为 $16.875^\circ \sim 52.5^\circ \text{N}$,背景场为 T63 客观分析场,积分时间为 1997 年 10 月 24 日至 12 月 4 日,共 40 d,模式均有日变化,非绝热,网格距为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 。将区域模式分别在纬向和经向方向扩展,得到该模式的球圈形式;由于侧边界误差主要出现在流入流出量最大的东西侧边界,因而可把球圈模式作为无侧边界影响的参考场^[5]。

表 1 实验方案设计

Table 1 Test design

试验	嵌套方案	上边界嵌套	地形	侧边界输入间隔/h
1	球圈	无	无	24
2	二维	无	无	6
3	三维	第 1 层	无	6
4	三维	第 2 层	无	6
5	三维	第 3 层	无	6

2 结果分析

2.1 高度场分析

图 1 为试验 2 与试验 4 高度场模拟期平均的均方差比较。在引入球圈模式第 2 层资料后,试验 4 各层方差都比试验 2 小,在低层改进尤为明显。其中

850 hPa 及 1000 hPa 高度场模拟期平均均方差均超过了 10%,500 hPa 高度场模拟期平均均方差也超过了 8%。而试验 3 和 5 效果较试验 4 差(图略),由此并非所有高层资料的引进就能提高预报能力。在本文中,引入大模式第 2 层即 300 hPa 资料是合适的。以下若无特殊说明,三维嵌套均指试验 4 之结果。

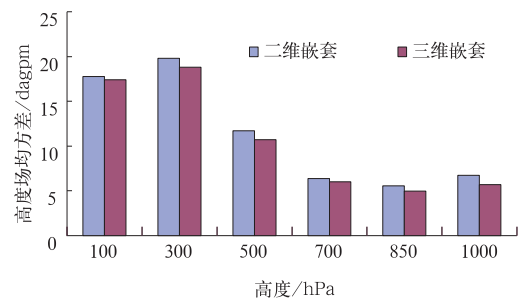


图 1 40 d 平均高度场均方差

Fig. 1 Forty-day average height field mean square deviation

表 2 为高度场旬平均各等压面均方差。前 10 d 积分中三维嵌套在 500 hPa 层次以下改进较为明显,但以上层次则不尽然。在随后的模拟中,三维嵌套的作用开始逐渐显现,所有层次三维嵌套方差均小于二维嵌套方差,尤其在高层与积分初期相比有明显改进。

图 2 为两方案与参考场模拟期平均 500 hPa 高度场偏差。两者均有偏差值由北向南递减的共性,在预报区域的东部,三维嵌套的偏差值明显比二维嵌套小。在 95°E 以东, 42°N 以南的范围内,三维嵌套明显较二维嵌套好。以等值线 20 dagpm 为例,图 2a 的 20 dagpm 等值线最南到 29°N 左右,而图 2b 的该等值线最南到 34°N ,比二维嵌套北移了约 5 个纬度,与参考场更为接近。

表 2 高度场旬平均各等压面均方差(单位:dagpm)

Table 2 Ten-day average height field mean square deviation of each isobaric chart (unit: dagpm)

旬平均嵌套方案	100 hPa	300 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa	1000 hPa
1~10 d 二维	12.08	13.54	11.4	10.89	11.54	13.18
1~10 d 三维	17.74	17.14	11.12	8.73	8.04	9
31~40 d 二维	19.11	20.3	12.72	6.6	4.61	4.05
31~40 d 三维	18.25	17.34	10.72	6.26	3.89	3.05

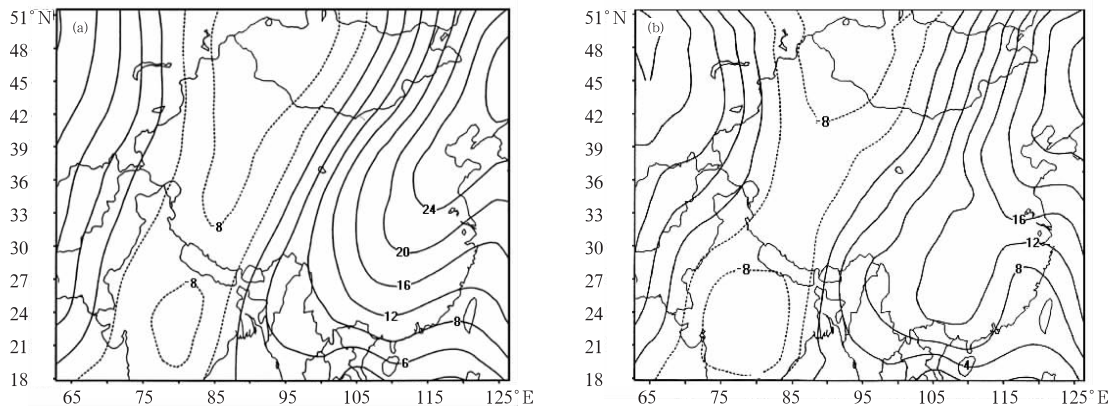


图 2 模拟期 40 d 平均 500 hPa 高度场偏差(单位:dagpm)(a) 二维嵌套,(b)三维嵌套
 Fig. 2 Simulation forty-day average 500 hPa height field discrepancy (unit:dagpm)
 (a) two dimensions nesting, (b) three dimensions nesting

2.2 不同嵌套对风场的影响

表 3 为 u, v 场 40 d 平均在各等压面均方差表。对 u 场而言,100 hPa 以下各层次三维嵌套结果均

优于二维嵌套,但 100 hPa 层次不如二维嵌套;而 v 场则在各个层次都得到改进,100 hPa 等压面上改进率接近 5%,比 u 场效果更好。

表 3 u, v 场 40 d 平均各等压面均方差(单位:m/s)

Table 3 Forty-day average u, v field mean square deviation of each isobaric chart (unit: m/s)

u/v	100 hPa	300 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa	1000 hPa
u_{2d}	5.06	3.7	3.49	4.3	4.37	3.47
u_{3d}	5.65	3.33	3.05	4.09	4.13	3.23
v_{2d}	1.91	2.03	1.27	0.65	0.46	0.41
v_{3d}	1.82	1.73	1.07	0.63	0.39	0.31

注: 2 d 表示二维嵌套; 3 d 表示三维嵌套。

2.3 模式稳定性

在本模式中以动能及地面气压倾向均方根值作为判断模式运行是否稳定的依据。图 3 为两方案的动能曲线。对试验 2 而言,在预报前 4 d,动能呈衰减之势,随后振荡攀升。而试验 4 在积分初期,动能有所增加,积分中期相对稳定,随后动能缓慢增加,但增幅小于试验 2。而试验 2 与试验 4 的位势拟能

都较平稳,均无大幅振荡的现象,其位势拟能守恒(图略),模式采用三维嵌套方法在长时间积分中能稳定运行。

2.4 诊断量比较

作为判断方案优劣的指标,本文对两方案大尺度降水、水汽通量等诊断量进行对比,其详细推导见文献[5]。嵌套方案预报量为 M_1 ,球圈模式预报量为 M_0 。令 $S = \frac{M_1 - M_0}{M_1}$, S 为两方案与球圈模式的相对比率。

从图 4 看出,针对大尺度降水试验 4 明显优于试验 2。尤其在第 10—16 天时段,试验 4 模拟结果几乎与参考场重合,随着积分时间的增长,两种方案的误差率都有不同程度的增加,这可能与模式本身及预报所用资料有关。在长时间积分中,水汽预报在边界上层流出区嵌套误差较大。而试验 4 水汽通量误差率极值远小于试验 2;就整个积分时段而言,试验 4 在积分后半时段优势较为明显(图略)。

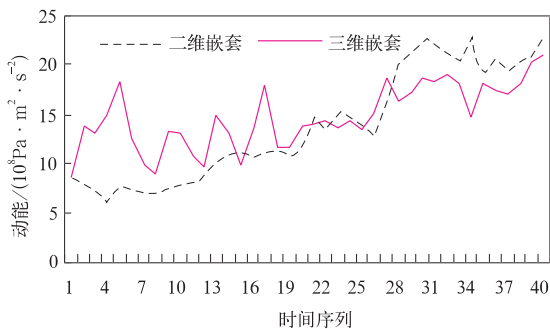


图 3 模拟期动能曲线

Fig. 3 Simulation momentum curve

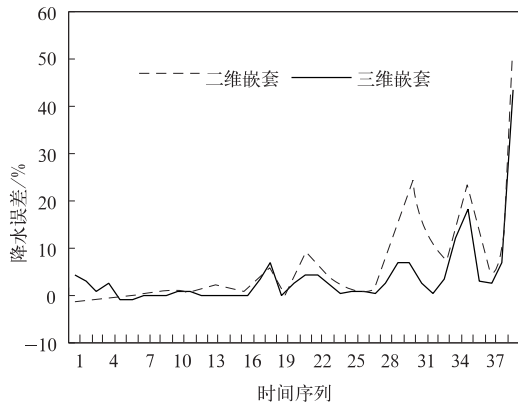


图4 大尺度降水内区误差比率
Fig. 4 Error ratio of large-scale precipitation at inner region

3 讨论

本文利用球圈模式进行模式自嵌套,以球圈模式为参考场,对二维嵌套和三维嵌套长时间积分结果做了初步研究,得到如下几点结论:

- 1) 三维嵌套方案中,大模式嵌套资料的选取非常重要;只有适当层次资料的引入才能起正面作用。
- 2) 模式采用三维嵌套方法在长时间积分中能稳定运行。
- 3) 三维嵌套方案在长时间模拟中优于二维嵌套,且积分时间越长,效果越明显。

需要指出的是,在初步的试验中没有对大模式

资料做更多的处理,这可能是造成积分初期高层模拟不甚理想的原因。如果考虑倾向嵌套,即在垂直方向将大模式资料引入时,设一张弛区,既注意了模式的协调性,又引入了良好的资料。这与水平方向嵌套原理是一致的,需要在今后的工作中做进一步研究。

参考文献

- [1] 刘一鸣,丁一汇,李清泉. 区域气候模式对中国夏季降水的10年回报试验及其评估分析. 应用气象学报,2005,16(增刊): 41-47.
- [2] 李巧萍,丁一汇. 区域气候模式对东亚冬季风多年平均特征的模拟. 应用气象学报,2005,16(增刊):30-40.
- [3] Giorgi F, Marinucci M R, Bates Gary T. Development of a second-generation regional climate model(RegCM2). Part I: boundary-layer and radiative transfer process. *Mon Wea Rev*, 1993,121: 2794-2813.
- [4] Anthes R A. Review: regional models of the atmosphere in middle latitudes. *Mon Wea Rev*, 1983,111:1306-1335.
- [5] 黄丽萍,颜宏,赵俊英. 区域气候模拟中侧边界嵌套误差的研究. 应用气象学报,2004,15(2):152-161.
- [6] 赵俊英,颜宏. “三维嵌套”方案的设计及试验结果分析//台风、暴雨灾害性天气预报技术研究成果汇编. 北京:气象出版社,1995:89-93.
- [7] 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.
- [8] 颜宏. 复杂地形条件下嵌套细网格模式的设计(一)数值模式的基本原理. 高原气象,1987,6(2):1-62.

Preliminary Application of Three Dimensions Nesting to Limited Area Model in Long-term Integral

Wang Xiaofeng¹⁾ Li Yongping¹⁾ Ma Xiaoxing²⁾ Zhang Ruiyi³⁾

¹⁾ (Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030)

²⁾ (Shanghai Meteorological Center, Shanghai 200030)

³⁾ (Shanghai Center of Meteorological Audio & Video, Shanghai 200030)

Abstract

A new nesting technique called three dimensions nesting (3DN) is used in a regional model which is nested in a circulation model based on the complex terrain with high resolution model (YH model). A long term integral is achieved steadily which provides a useful way to process the lateral boundary conditions for regional climate model. 3DN means not only keeping horizontal lateral boundary stable but also changing ways to use GSM data in vertical dimension. The primary results show that only with the appropriate high level data that the long term integral could obtain better outcomes in 3DN model. During the prophase integral, 3DN has an obviously positive impact just on the levels lower than 500 hPa, but not for the other levels. However, with the growing process of integral period, the good effect of 3DN is exhibited gradually. The variance of each level is smaller than the one derived from the two dimensions nesting (2DN) model, particularly for the high levels compared with the result from the prophase integral. As for the mean deviation of height field at 500 hPa level during the whole integral period, the variances of these two nesting technologies have a common character that is the value of deviation decreasing from the North to the South. In the eastern integral area, the deviation of 3DN is obviously smaller than the one of 2DN and more similar to the reference field. The mean variance of the u field for each level in the whole integral time shows that 3DN is better than 2DN at the levels which are lower than 100 hPa; while the one of the v field progresses at all levels. At 100 hPa level, the improved percentage is nearly up to 5% and much better than that of the u field. In the long integral period, dynamic energy and geopotential height keep their stableness with a small swing range, which indicates that 3DN can be run steadily in long term integral numerical experiments. Large scale precipitation, vapor flux and so on are analyzed. 3DN is obviously better than 2DN for large scale precipitation, especially in the middle of the integral term, the result of 3DN is almost the same as that of the reference field. With the increase of the integral time, the errors of both nesting methods rise at a certain degree. During the long integral term, the nesting error of vapor prediction is relatively large at the upper boundary out-going level. However, within that area, the error extremum of vapor flux from 3DN is much smaller than that from 2DN. With regard to the whole integral term, the advantage of 3DN appears especially in the mid-phase and anaphase. It is necessary to point out that there is not much processing for the large scale model data, which is likely the cause for the less satisfaction at upper levels in the integral prophase. If potential nesting is considered, which means that a remittent area will be established when the regional model vertically absorbs data from the large scale model, better result may be obtained in the future study.

Key words: three dimensions nesting; circulation model; lateral boundary