

初始条件和边界条件对区域模式模拟 青藏高原区域气候的影响^①

刘黎平¹ 钱永甫² 吴爱明²

(1 中国科学院兰州高原大气物理研究所 甘肃省兰州市 730000)
(2 南京大学大气科学系 江苏省南京市 210008)

摘 要 用 GFDL 气候场及 GCM 的模拟结果分别为区域模式(MM4)提供初始条件和边界条件,模拟了青藏高原地区夏季区域气候特征。通过比较不同初始条件和边界条件时区域模式的模拟结果,分析了初始条件和边界条件对模拟结果的影响。虽然这两种方法都模拟出了青藏高原附近的主要区域气候特征,但 GFDL 提供初始条件和边界条件时 MM4 的模拟结果明显优于用 GCM 提供初始条件和边界条件时的模拟结果,特别是在高层。GCM 输出结果与实际资料的系统误差也导致了 MM4 模拟结果的系统误差。

关键词 区域气候模拟 初始条件 边界条件

分类号 P435

1 引 言

由于 GCM 分辨率的限制,它对象青藏高原这样具有复杂地形区域的气候平均场的模拟结果并不理想。利用高分辨率的区域气候模式模拟该区域的气候特征很有必要。对于区域气候模式来讲,模拟的误差来源主要有两种,一是模式的动力和热力过程的近似与参数化产生的误差,二是模式的初始条件和边界条件引起的误差。Giorgi^[1]和 Dickinson^[2]的研究结果从理论上证明:大尺度的大气运动对区域模式的中小尺度特征的模拟有较大的控制甚至支配作用。所以,用准确的大尺度分析资料给区域模式提供较准确的初始条件和边界条件对区域模式的模拟很重要。即使相同的边界条件,由于气候系统的非线性作用,初始条件的较小误差仍可能影响模式的模拟结果。

在本文中我们通过比较不同资料为区域模式提供初始条件和边界条件时的模拟结果,来研究初始条件和边界条件对区域模式模拟结果的影响。

① 收稿日期: 1997-10-15; 改回日期: 1998-04-03
第一作者简介: 刘黎平, 男, 1963 年 6 月出生, 博士, 研究员, 主要从事双线偏振雷达理论和应用及青藏高原云和降水的数值模拟研究

2 模式简介和试验方案设计

本文用 PSU/NCAR 发展的中尺度模式 MM4^[3], 它的水平网格采用“Arakawa B”网格结构, 垂直方向上采用 σ 坐标, 分 10 层, 水平网格为 41×41 , 格距为 120 km, 积分步长为 2 min。模式主要物理过程包括: 水平、垂直扩散, 干空气的对流调整, 大范围的稳定性降水和积云对流参数化及大气边界层物理过程等。该模式在地表温度计算过程中, 包括了辐射这一非绝热行星边界层的驱动因子, 计算辐射时考虑了晴天和多云两种情况。在处理云对辐射影响时, 采用 Benjamin 参数化方案^[4], 并将云分为低云、中云和高云, 分别计算它们对短波和向下长波辐射的影响, 未涉及大气辐射过程传输方程的数值求解。在辐射处理方面采用 MM4 标准版本的方法, 未做新的改动。

MM4 是一区域模式, 侧边界的处理尤为重要, 本文用海绵边界条件, 即:

$$P4 \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_n = w(n) \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_{MC} + [1 - w(n)] \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_{LS} \right], \quad (1)$$

其中 α 表示任何一变量, 下标 MC 表示模式计算的倾向, LS 表示大尺度倾向或观测资料的倾向, n 是从最靠边界(在边界上 $n=1$)算起的格点数, 对于叉点, $w(n)$ 从边界向内分别为 0.0, 0.4, 0.7, 0.9, ; 对于圆点, $w(n)$ 为: 0.0, 0.2, 0.55, 0.8, 0.95, 对于其它区域内的点, $w(n)=1$ 。后面模拟结果分析时, 去掉了侧边界内 5 圈的结果。

我们使用的大气环流模式是由 Bourke^[5] 和 Mcavane^[6] 设计, 后又经 Simmonds^[7] 和林元弼^[8] 等改进的一个菱形截断 15 波的 9 层全球大气环流模式, 它包含了较为完善的物理过程。其动力学框架建立在原始方程组的基础上, 包括涡度方程、散度方程、连续方程、热力学方程和水汽方程。方程求解时在水平方向上采用了球谐谱展开, 垂直方向采用 σ 坐标, 9 层的 σ 分别为 0.99, 0.92, 0.81, 0.66, 0.50, 0.33, 0.18, 0.07, 0.01; 物理过程和非线性项用格点空间计算, 时间积分采用半隐式方案, 时间步长为 30 min, 模式的物理过程考虑了水平和垂直次网格扩散。边界层采用 Monin-obukhov 参数化方案, 包括下垫面粗糙度、湿度、海温、极冰和雪盖的影响。辐射过程考虑了地-气系统的长波和太阳的短波辐射, 吸收气体包括水汽、CO₂ 和 O₃, 云分为高、中、低云。积云对流参数化采用 Manabe 对流调整方案。

分别用 GCM 模式的模拟结果和 GFDL 气候场资料为 MM4 提供初始条件和边界条件, 具体做法如下: GCM 和区域气候模式彼此单独进行时间积分, 粗网格模式的模拟结果为细网格模式提供初始条件和边界条件, 而细网格的模拟结果不对粗网格的模拟产生任何影响。将 GCM 从 1979 年积分到 1989 年, 得到这 11 年平均的 6, 7, 8 月模拟气候场, 再将 6, 7, 8 月模拟气候场分别作为 6 月 15 日、7 月 15 日和 8 月 15 日的气候场, 利用线性插值即可得到 6 月 15 日到 7 月 30 日逐日的气候场, 然后再将 GCM 网格点上的模拟场在水平方向上利用双线性插值, 在垂直方向上用气压对数线性插值, 就可得到相应的区域模式网格点的物理量。模式初始积分时刻为 6 月 15 日, 积分过程中, 每 24 h 给 MM4 模式更换一次侧边界值, 在两次更换的侧边界值间则按时间的线性插值给定每一时步的侧边界值, 共积分 45 天, 用后 30 天模拟结果的平均代表 7 月的气候状态。我们用 GCM 11 年积分的平均作为区域模式的初始条件和边界条件主要有两个原因, 一是 GFDL 资料为多年平均气候资料, 为了结果的比较, GCM 也用多年平均资料; 二是计算时间所限。同样, 用

多年平均的 6, 7, 8 月的 GFDL 气候场资料, 线性插值得到 6 月 15 日到 7 月 30 日逐日的气候场, 模式初始积分时刻也为 6 月 15 日, 积分过程中每天与观测资料嵌套一次, 共积分 45 天, 用后 30 天的模拟结果的平均代表 7 月的气候状态。下面分别分析这些模拟结果并与高原观测资料和 GFDL 资料进行比较。

3 高空气候场的比较

首先, 我们以高原气候图集资料为标准来分析模拟结果^[9]。通过分析不同初始条件和边界条件时 MM4 模拟的 300 hPa 高度场和温度场的结果及相应的气候观测场资料(图略)可以看出, 虽然两种初始条件和边界条件时区域模式都模拟出了高原上空的暖高压, 但 GCM 结果提供初始条件和边界条件时区域模式的模拟结果在高原北部与实况相差很大, 温度和高度场的槽被模拟成了脊, 且暖高压中心也偏东北。而 GFDL 资料提供初始条件和边界条件时模拟的暖高压位置与实况场很接近, 高压北部沿 75°E 的槽也被模拟出来, 只是在高原北侧的高度场数值偏大, 温度偏高, 即模拟高原北侧的气压梯度比实际的要小。下面着重分析 500 hPa 以下模拟的气候场。

图 1, 2 给出了不同初始条件和边界条件时 500 hPa 的模拟结果, 图 3 为对应的观测场(引自《高原气候图集》)。500 hPa 上高原西南部被热低压所控制, 高原北部和南侧则分别存在一高压带。两种方法都模拟出了高原上的热低压和其南北两侧的高压带, 但两种方法模拟的高原南北两侧的高压带比实际场偏离高原, 南部的高压带过强, 这可能与模拟的高原上空的辐合过强有关。这两种方法的模拟结果主要差异在高原北侧, GFDL 资料提供初始条件和边界条件时 MM4 模拟的高原北部的槽和脊的结构与高原图集的结构较接近, 且模拟出了兰州附近的小高压。而 GCM 模拟结果提供初始条件和边界条件时 MM4 的模拟结果在高原北侧 40°N 以北与实际结果相差很大, 30°N, 70°E 附近的高压区没有模拟出来。

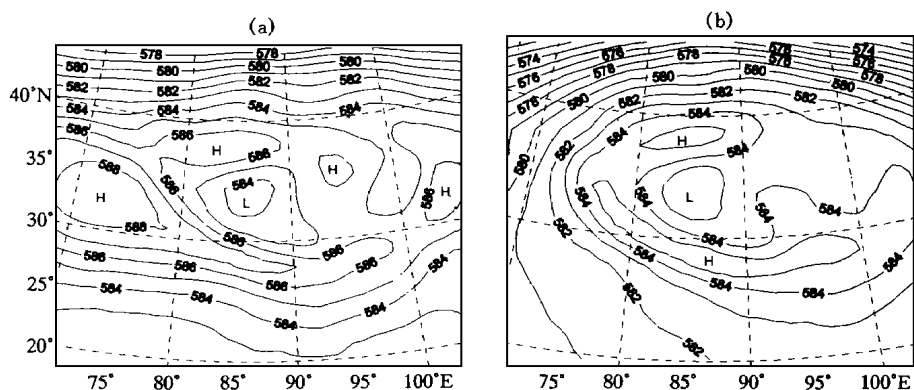


图 1 500 hPa 高度场的对比
(a) 与 GFDL 资料嵌套, (b) 与 GCM 嵌套

Fig. 1 The comparison of simulated heights of 500 hPa
(a) nesting with GFDL data, (b) nesting with GCM

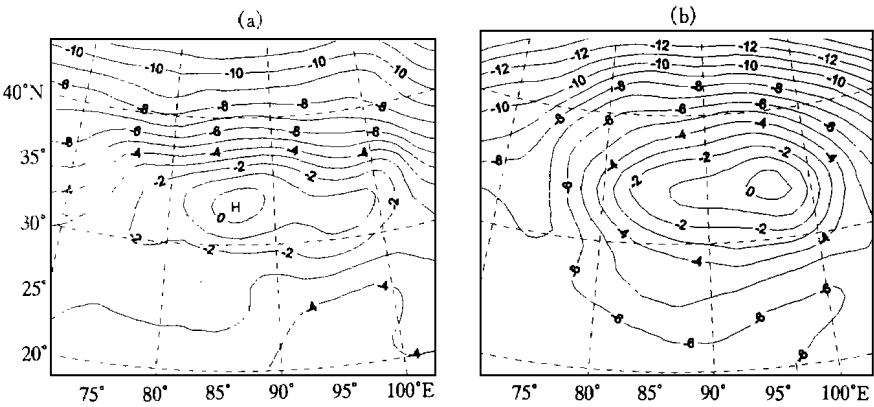


图 2 500 hPa 温度场的对比
说明同图 1
Fig. 2 The same as Fig. 1, but for temperature

从 500 hPa 温度场来看, GFDL 提供初始条件和边界条件时 MM4 模拟的高原上空的高温区位置与实际场很接近, 而 GCM 提供初始条件和边界条件时模拟的高温区明显偏离高原主体, 存在明显误差。

GCM 输出的高度和温度场的数值与 GFDL 资料相比明显偏低, 系统误差导致了这种资料作为初始条件和边界条件时 MM4 模拟的高度场和温度场也偏低, 出现系统性的差异。如在 500 hPa 上, GCM 提供初始条件和边界条件时 MM4 模拟的高度场和温度场的数值要比 GFDL 资料提供初始条件和边界条件时的模拟结果平均来讲要低 2 °C 和 2 gpdm。

从以上结果可知: 不管用哪种方法提供初始条件和边界条件, 区域模式都模拟出了青藏高原的主要气候特征, 它分辨出了 GCM 难以分辨的区域气候特征。而初始条件和边界条件的误差也很明显地影响了模拟结果。

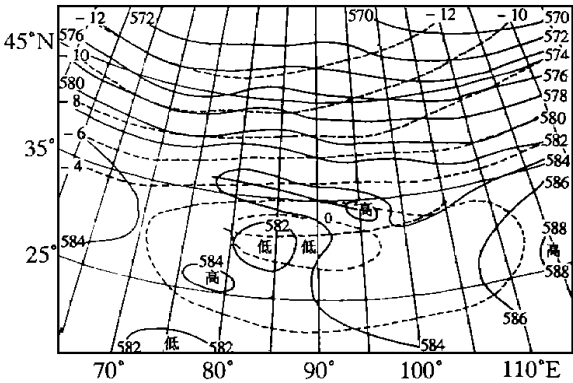


图 3 与图 1, 2 对应的观测场
(引自《高原气候图集》)
实线为高度场, 虚线为温度场
Fig. 3 The observed height and temperature fields of 500 hPa. solid line for height, dashed line for temperature

4 地面降水和温度的比较

图4给出了两种初始条件和边界条件时MM4模拟的地面降水结果和对应的地面降

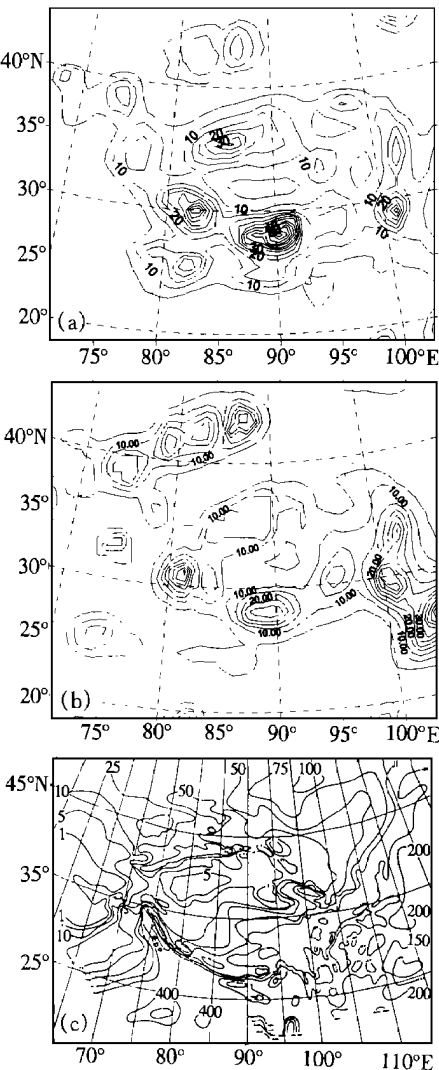


图 4 降水模拟结果与观测场的比较
(a) 与 GFDL 资料嵌套 (b) 与 GCM 嵌套, (c) 观测场(引自《高原气候图集》)
Fig. 4 Comparison between simulated rainfall and observed one, (a) nesting with GFDL data, (b) nesting with GCM, (c) observed results

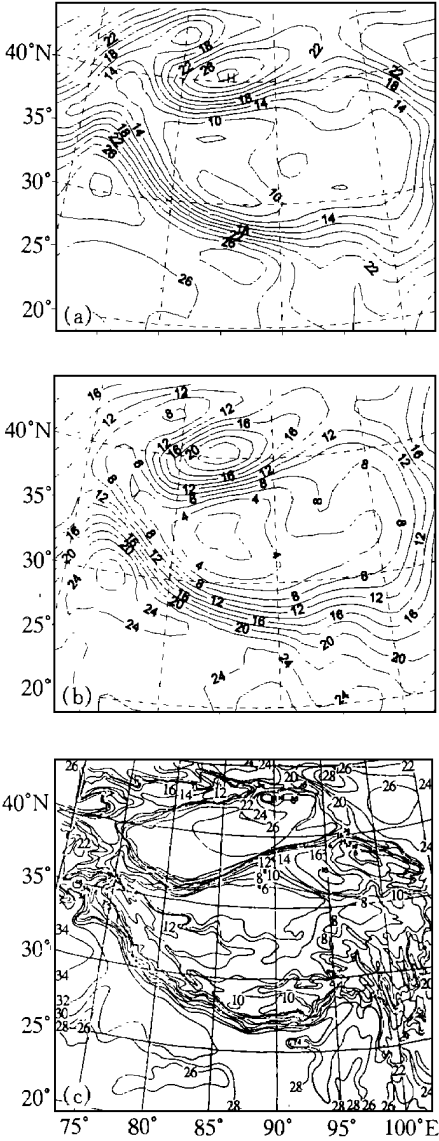


图 5 地表温度模拟结果与观测场的比较
(a) 与 GFDL 资料嵌套, (b) 与 GCM 嵌套, (c) 观测场(引自《高原气候图集》)
Fig. 5 Comparison between simulated surface temperature and observed one, (a) nesting with GFDL data, (b) nesting with GCM, (c) observed results

水场(引自《高原气候图集》)。从模拟结果来看,两种方法都成功地模拟出了沿高原边缘的多雨带,它沿喜马拉雅山的南坡,西经帕米尔到天山再向东南到祁连山,该处是地形坡度最大的区域,上升运动也最强烈,这些模拟结果与观测结果较为一致。有趣的是塔克拉玛干沙漠地区为一少雨区。另外,在高原气候图集上 32°N、78°E, 27°N、87°E, 32°N、75°E

和 28°N 、 95°E 四个强中心也被模拟出来,但是位置和强度与实际降水相比有一定的差别。降水的误差趋势是:高原南部模拟的降水偏小,北部模拟的降水又偏大。降水的位置误差主要来源于对地形资料的平滑,这种平滑主要减小了地形的坡度,特别是在喜马拉雅山附近。两种方法模拟降水的高低中心位置较为一致,反映了地形对降水起很主要的作用。但GCM 提供初始条件和边界条件时在天山附近和昆明附近的降水模拟得过大。

从地表温度来看(图 5),由于模式区域的地形高度变化很大,而地表温度主要受高度影响。所以两种方法模拟的地表温度空间变化较一致,但数值上有 4°C 左右的差异。

地表温度主要反映了地面海拔高度的变化,为了尽量减小地形高度对地表温度的影响,更仔细地讨论地表温度的模拟结果,我们将地表温度订正到某一固定的高度,为此,设

$$T = T_s + \gamma(Z_s - Z_0), \tag{2}$$

其中 T_s 、 Z_s 分别为地表温度和高度, Z_0 为一固定高度,在这里我们取 $Z_0=2\,000\text{ m}$, γ 为地表温度的高度变化率, $\gamma=0.005^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。 T 为订正到 Z_0 高度上的地表温度。图 6 给出了这两种初始条件和边界条件时模拟值订正后的地表温度。因无法从高原气候图集中得出订正后的温度,图 6 中未给出高原气候图集中的结果。两种方法都模拟出了高原主体、罗布泊到印度新德里一线的高温区,GCM 模拟结果提供初始条件和边界条件时模拟的高原主体高温区的位置偏离高原。

从数值上来看,GCM 模拟结果为 MM4 提供初始条件和边界条件时模拟的地表温度偏低,平均比GFDL 资料提供初始条件和边界条件时的模拟结果低 4.0°C 。这与GCM 模式模拟的温度场偏低有直接关系。

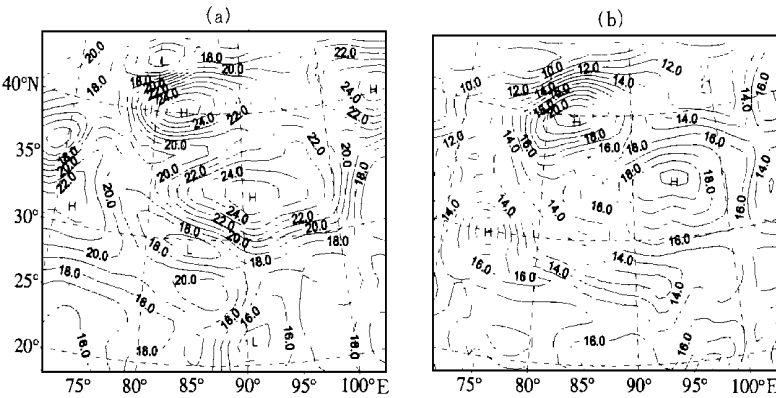


图 6 订正后的地表温度模拟结果的比较
(a) 与 GFDL 资料嵌套, (b) 与 GCM 嵌套

Fig. 6 The reduced surface temperature, (a) nesting with GFDL data, (b) nesting with GCM

5 相关分析

为了进一步比较和检验模拟结果,我们用 Keyser 和 Anthes 提出的对模拟结果定量检验的方法,假定 $A_s(i, j)$ 、 $A_M(i, j)$ 分别为检验场和观测场, $\overline{A_s}$ 、 $\overline{A_M}$ 分别为区域内模拟场和观测场的平均值, N 为观测点的个数,定义均方差误差(RMSE)和误差标准差(SIDE)分别为:

对地

$$\text{RMSE} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (A_M(i, j) - A_s(i, j))^2}{N} \right\}^{0.5}, \tag{3}$$

法模

$$\text{SIDE} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (A_M(i, j) - \overline{A_M} - A_s(i, j) + \overline{A_s})^2}{N} \right\}^{0.5}. \tag{4}$$

表 1 给出了两种初始条件和边界条件时, 100 ~ 500 hPa 各层高度场和温度场的模拟结果与 GFDL 的相关系数、均方差和误差标准差。从表 1 可看出: GFDL 资料作为初始条件和边界条件时 MM4 模拟结果的相关系数明显高于 GCM 提供初始条件和边界条件的结果, 均方差误差和误差标准差大都比与 GCM 嵌套的模拟结果小。这说明与实际气候资料嵌套的模拟结果更接近实际, 而 GCM 模拟结果的误差也明显影响了区域模式与其嵌套的模拟结果。从这里我们也可以更清楚地看出, 由于采用了不同的初始条件和边界条件, 所以模拟结果也不同, 初始条件和边界条件对模拟结果有明显的影响。

表 1 模拟的高度场 (H) 和温度场 (T) 与 GFDL 场的相关系数 (COR)、均方差误差 (RMSE) 和误差标准差 (SIDE)

Table 1 The correlation coefficients (COR), root mean-square errors (RMSE) and standard deviations (SIDE) of simulated height and temperature fields

层/h Pa	初始条件和 边界条件	相关系数		SIDE		RMSE	
		H	T	H	T	H	T
100	GCM 模拟结果	−0.59	0.39	95.5	3.0	128.7	21.5
	GFDL 资料	0.18	0.87	86.7	3.2	167.6	14.5
200	GCM 模拟结果	0.52	0.32	44.5	1.0	127.6	6.4
	GFDL 资料	0.95	0.70	38.3	1.30	41.0	2.9
300	GCM 模拟结果	0.32	0.53	44.2	1.7	63.3	6.3
	GFDL 资料	0.94	0.96	29.9	1.56	29.9	2.4
500	GCM 模拟结果	0.29	0.68	15.5	2.6	21.7	3.7
	GFDL 资料	0.71	0.90	18.4	1.23	23.7	1.38
地表	GCM 模拟结果	0.91		2.8		2.9	
温度	GFDL 资料	0.95		1.2		2.1	

6 小 结

通过对 GFDL 气候场资料和 GCM 模拟结果分别为区域模式提供初始条件和边界条件时模拟结果的比较, 分析了初始条件和边界条件对模拟结果的影响。这两种方法都模拟出了青藏高原附近的主要区域气候特征, 对地面降水和温度的模拟结果也比较合理。但 GFDL 资料提供初始条件和边界条件时的模拟结果明显优于 GCM 模式提供初始条件和边界条件时的模拟结果, 特别是在高层。GCM 输出结果与实际资料的系统误差也导致了区域模式 MM4 模拟结果的系统误差。

参考文献

1 Giorgi F, G T Bates. The climatological skill of regional model over complex terrain. *Mon Wea Rev*, 1989, 117: 2325 ~ 2347

2 Dickinson R E, M Erico, F Giorgi et al. A regional climate model for the western U S A. *Clim Change*, 1989, 15: 383 ~ 412

3 Anthes R A, E Y Hsie, Y H Kuo. Description of the Penn State/ NCAR mesoscale model version 4(MM 4). NCAR Tech Note NCAR/TN-282+str, 669, 1987

4 Benjamin S G. Some effects of surface heating and topography on the regional severe storm environments. Part I : Three dimensional simulation. *Mon Wea Rev*, 1986, 114: 307 ~ 329

5 Bourke A, B Mcavaney, K Puri. Global modelling of atmospheric flow by spectral methods. *Methods in computational physics*, 1977, 17: 311 ~ 320

6 Mcavaney B, W Bourke, K Puri. A global spectral model for simulation of the general circulation. *J Atmos Sci*, 1978, 35: 1557 ~ 1583

7 Simmonds I. Analysis of the spinning of a global circulation model. *J G R*, 1985, 90: 5637 ~ 5660

8 林元弼, 梁建茵. 一个全球谱模式模拟能力的初步分析. *热带气象学报*, 1990, 6: 372 ~ 377

9 中科院兰州高原大气物理研究所, 青藏高原气象科研协作领导小组, 南京大学. 高原气候图集

THE INFLUENCE OF INITIAL AND BOUNDARY
CONDITIONS ON THE SIMULATED RESULTS
OF REGIONAL CLIMATES OVER
QINGHAI-XIZANG PLATEAU

LIU Li-Ping¹ QIAN Yong-Fu² WU Ai-Ming²

(1 Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000)

(2 Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210008)

Abstract We simulate the regional climate in the Qinghai-Xizang Plateau, utilizing the regional model (MM4) and one-way nested technique, compare the simulated results with different nesting methods and discuss the effects of initial and boundary conditions on the simulated results. The results show that main regional climate features are reproduced by the regional climate model but the simulated results nested with GFDL data are better than that with GCM simulated values, the errors simulated by the GCM could certainly affect the simulated results of the nested model MM 4.

Key words Simulate of regional climate Initial condition Boundary condition