

初、边值条件对区域气候模拟的影响^{*}

郑益群 钱永甫

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

桂祈军

于 革

(中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101) (中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘 要 利用区域气候模式(RegCM2)对1998年夏季风气候进行了模拟, 并就初、边值条件对模拟结果的影响情况进行了讨论。结果表明: 该模式可以较好地模拟出月际尺度的气候变化, 但对降水异常的模拟还需作进一步完善。通过在几个季节采用不同初始场进行的数值模拟发现, 从春季开始的积分其结果对初始场的敏感性较高, 初始场的差别会对后期模拟产生明显影响。相对来说, 从冬季开始的积分, 其对初始场的依赖性较小, 初始场的差别会在积分过程中逐渐减小, 因而在利用RegCM2进行区域气候模拟时宜从冬季开始。另外, 通过对采用不同侧边界嵌套方案的模拟效果进行简单讨论, 发现当采用较少的缓冲区(5圈)时, 海绵边界对温度、比湿及位势高度的模拟要比指数松弛及流入流出边界好, 降水的模拟也要比其他方案好一些, 但对风场的模拟则不如指数松弛方案。

关键词: 区域气候模拟; 初、边值条件; 敏感性研究

1 引言

虽然全球大气环流模式(GCM)是研究大尺度强迫对大气环流作用的基本工具, 但因其网格较粗, 往往不能有效地描述中、小尺度强迫起主要作用的区域气候的变化, 因而, 目前的全球环流模式在模拟区域气候上虽具有一定的模拟能力, 但仍存在较大的不确定性。针对这种情况, Dickinson等^[1]首先利用一个有限区域中尺度模式(MM4)与其设计的生物圈-大气传输方案(BATS)相耦合, 并与美国国家大气研究中心(NCAR)的公共气候模式(CCM)嵌套在一起, 成功地对美国西部进行了气候模拟。此后区域气候模式(RCM)的研究得到了很大的发展, 现已成为气候模拟研究的热门之一, 区域气候模式的一个主要优越性就是能够对多种不同尺度之间的相互作用进行更好的模拟^[2]。在Giorgi等^[3,4]的努力下, 通过改进MM4的参数化过程, NCAR于1989年成功地研制出第一代区域气候模式——RegCM1, 此后, 他们又对其作了进一步修改, 如加入CCM2的辐射传输方案及Dickinson^[5]改进的BATS1c方案, 并对边界层、积云对流的参数化及土壤温、湿计算等方案进行了改进, 在1993年推出了第二代区域气候模式(RegCM2)^[6,7]。近10年来, NCAR的第一代和第二代区域气候模式已

2000-11-08收到, 2001-04-08收到修改稿

^{*} 中国科学院南京地理与湖泊研究所创新项目CXNIGLAS-A02-06、国家自然科学基金资助项目40102015和博士后基金共同资助

经被广泛地用来模拟北美、西欧、东亚和非洲的区域气候变化与变率^[8]。

中国于 1996 年引进了该模式, 国家“九五”重中之重科技项目“我国短期气候预测系统的研究”中的第二课题“短期气候预测业务动力模式的研制”已将 NCAR RegCM2 作为发展中国高分辨率区域气候业务预测模式的基础。国外已对 RegCM2 的模拟能力作了大量的测试工作, 并就模式对各种参数化方案, 侧边界嵌套方法、垂直和水平分辨率的选取等问题作了详细探讨。中国引进 RegCM2 后, 针对中国区域的地理环境及气候状况作了大量的性能检验工作, 模拟区域主要集中在我国东部及西太平洋地区。本工作的模拟区域为包括青藏高原在内的整个中国区域, 高原地区复杂的地质、地貌及多变的气候背景, 必然会影响到模式的模拟效果, 因而有必要对其模拟性能作进一步研究, 了解模式对初、边值条件的敏感程度, 并进行反复的“调适 (customized)”性试验以获得较好的模拟效果。

2 区域气候模式简介

RegCM2 的动力框架与 MM4 一致, 采用静力、可压缩原始方程、 σ 坐标。模式的水平网格系统采用“Arakawa B”交错网格, 各种试验表明这种网格系统对气压梯度力及水平散度的计算比较精确。模式在垂直方向可任意分层, 各变量在垂直方向也是交替分布的。图 1 给出了 RegCM2 中垂直和水平网格结构, 为了采用高分辨率边界层方案, 垂直方向采取非均匀分层, 通常在大气底部分得较细。该模式在差分方案的设计上保持了质量及动量守恒, 并近似满足总能量守恒。模式气压梯度力的计算采用静力扣除的 Corby 格式。RegCM2 的时间积分方案采用由 Madala^[9]提出的显式分离积分技术, 该方案采用较短的时间步长来处理最快的两个重力模, 而对于其他过程则采用较长的时间步长, 利用该技术可在保证精度的情况下使用超过两倍的时间步长。

为了描述次网格物理过程对模式变量的影响, 必须对这些次网格过程进行参数化。NCAR 自 1993 年推出 RegCM2 后, 一直未停止对其中物理过程参数化的改进。早期

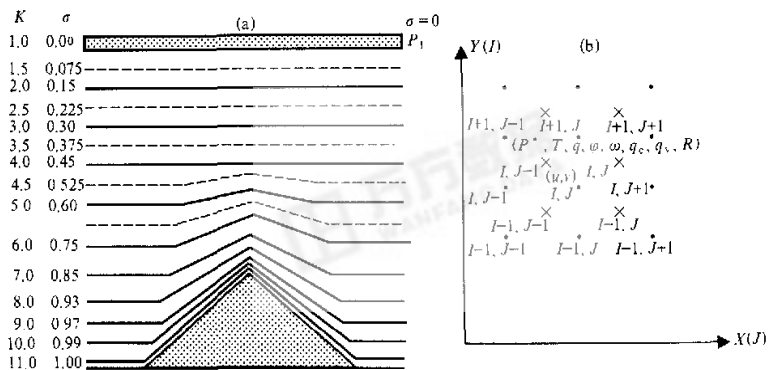


图 1 模式网格结构
(a) 垂直网格; (b) 水平网格

RegCM2 版本中的辐射参数化采用的是 Briegleb^[10]为 CCM2 设计的辐射包——CCM2RAD, 该方案采用 δ -埃丁顿近似来表示 O_3 、 H_2O 、 CO_2 和 O_2 的影响, 散射、吸收光谱从 $0.2 \sim 5 \mu m$ 分为 18 个波段, 云的散射、吸收参数化采用 Slingo^[11]的工作。此后, RegCM2 中又用 CCM3 的辐射包^[12]代替了 CCM2RAD, 虽然新方案中保留了原方案的主要特征, 但增加了其他温室气体 (NO_2 、 CH_4 、CFCs)、大气硫物质及云冰的影响。在积云对流参数化方面, RegCM2 中原本有 Kuo-Anthes 方案及 Grell 方案两种选择, 后来又加入了由 Zhang 和 McFarlane^[13]为 CCM3 发展的深积云对流方案—质量通量方案作为第三种选择。在 RegCM2 中, 水汽可通过显式和隐式两种方法来计算, 采用显式方案时, 水汽、云水和雨水都作为预报量给出, 但因该方案在气候模式中耗用时过多, 其后又对其进行了简化, 该简化方案的改进并不仅仅简化了微物理过程, 而且将云水变化的预报直接用于云辐射计算, 在此前的版本中, 用于云辐射计算的云水变化是通过相对湿度诊断得到的。这种改进为水循环的模拟和能量收支计算的相互作用提供了重要基础^[14]。RegCM2 中设置了两种行星边界层参数化方案, 即整体空气动力学方案及高分辨边界层方案。利用高分辨方案可预报水平风速 (u, v)、位温、水汽混合比 (q_v) 及云水 (q_c) 的垂直混合。对于下垫面强迫过程的描述, RegCM2 中耦合了由 Dickinson^[5]改进的 BATS1e 方案, 该方案在水分循环、地表感热及动量通量计算方面与较早的 BATS 方案类似, 可描述 18 种下垫面类型, 不同之处在于改善土壤湿度计算加进了 3 m 深土壤层, 修正了积雪区的土壤温度强迫回复计算法, 并在利用粗糙度时考虑了非零的“位移长度”订正。

由于区域气候模式在水平方向面积有限, 并未覆盖整个地球表面, 因而必须给出相应的侧边界条件才能使模式封闭。在 RegCM2 中有 6 种侧边界处理方案可供选择, 分别是: (1) 固定边界; (2) 线性松弛边界; (3) 时间相关边界; (4) 时间变化及流入流出边界; (5) 海绵边界; (6) 指数松弛边界。各种边界的具体情况还将在后面的讨论中叙述。

3 RegCM2 对夏季风气候的模拟及对初、边值条件的敏感性

虽然针对 RegCM2 的性能检验工作已经有很多, 而且大多表明该模式可以对区域气候进行较好的再现, 对降水及其他气象要素的模拟基本上都比 GCMs 的模拟效果好。但正如 Giorgi^[14]指出的那样, 区域气候模式中的各种参数化过程往往是针对特定的气候状况和分辨率设计的, 因而在使用时必须针对不同的目的进行反复“调适”。在本工作中由于模拟范围内包含了青藏高原, 高原复杂的地形、地貌所激发出来的中、小尺度强迫必然会影响到模拟效果, 为使模式平稳运行, 对模式地形进行了一次 5 点平滑。为了解该模式在选定的模拟区内的模拟性能, 分别利用 1998 年 5~8 月的逐日资料, 1991 年全年的月平均资料及 1986~1995 年 10 年平均的月气候场资料进行了模拟试验。

3.1 降水季节变化的模拟

降水模拟是检验气候模式模拟效果的综合指标, 一个优良的气候模式应能较好地再现区域降水的季节变化特征。图 2 给出了利用 1998 年逐日资料模拟的该年 6、7、8 月月平均降水情况 (对模拟结果进行了 5 点平滑处理)。模拟期间采用 5 圈海绵边界。对

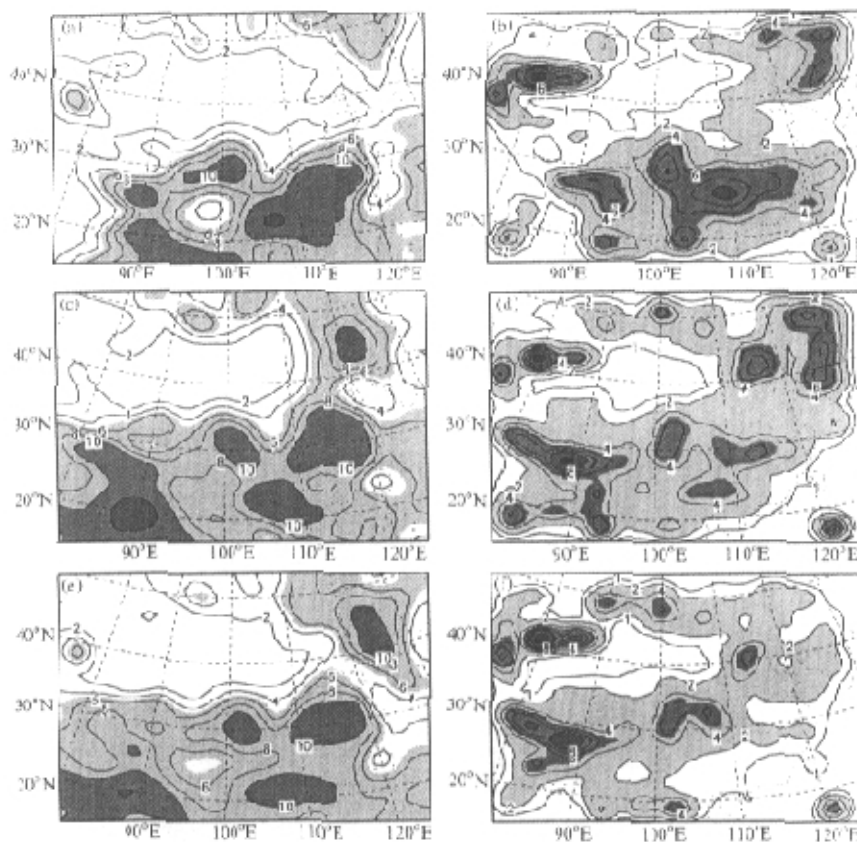


图2 NCEP资料及RegCM2模拟的1998年夏季月平均降水(单位: mm d^{-1})

(a)、(c)、(e)分别为NCEP资料的6、7、8月结果,(b)、(d)、(f)分别为模拟的6、7、8月结果

于积云对流参数化方案的选取,虽然 Giorgi 等^[6,7]利用 RegCM1 所作的对比试验表明,Grell 方案减少了小降水事件的频率,增加了大降水事件的频率,使之更接近观测实际。但符淙斌等^[15]的研究却表明,在东亚季风区 Kuo-Anthes 方案明显优于 Grell 方案。因而在本工作中始终采用 Kuo-Anthes 方案。

通过比较 6、7、8 月的 NCEP 降水资料与模拟结果可以发现,6 月份的降水模拟得较好,长江流域及其以南的降水中心与观测资料符合得很好,而川南的降水相对小值区也能模拟出来。但东北地区的降水模拟明显偏大,并在天山附近出现了虚假降水中心。7 月份的降水模拟也还可以,江淮流域的几个降水中心都模拟出来了,而且位置也与资料基本一致,只是中心降水偏小。但孟加拉湾北部的降水中心未能很好地模拟出来,东北的雨区模拟也明显偏弱。从 1998 年的降水模拟来看,RegCM2 基本上可以模拟出降水的月际变化,但对于较小时间尺度的降水异常事件的模拟则效果较差,Dai

等^[16]在对美国不同区域的降水日变化情况进行模拟时发现在不同区域日变化有明显差异, 模拟结果存在相当大的不确定性, 说明利用区域气候模式作日尺度的研究还须作进一步改进; Mearns 等^[17]也指出在较小的时间(逐日和逐时)、空间(局地)尺度上, 模式的模拟效果普遍变坏。另外, 通过比较资料与模拟降水的强度可以发现, 对于主要降水中心的模拟, 采用 Kuo-Anthes 方案的 RegCM2 的模拟结果明显偏小。这与刘永强等^[18]采用 1990 年夏季资料进行的不同积云对流参数化方案对降水模拟影响的研究结果一致。他认为对于模式选取的各个区域, Grell 方案模拟的降水量一般比观测值偏大, 而 Kuo 方案模拟的降水量一般偏小。

3.2 环流形势的模拟

西太平洋副热带高压的季节进退对于中国区域降水及其他气候要素的变化均有重大影响, 而 500 hPa 是西太副高活动表现最明显的层次。图 3 给出了 NCEP 资料及

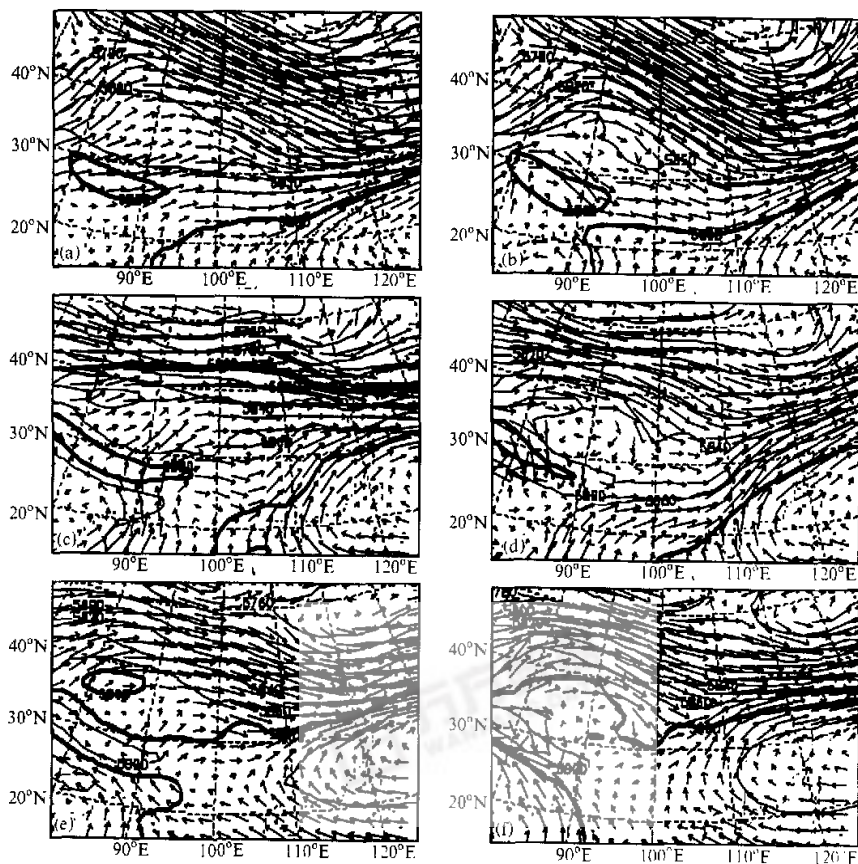


图 3 NCEP 资料及 RegCM2 模拟的 1998 年 500 hPa 夏季位势高度及风矢量
(a)、(c)、(e) 分别为 NCEP 资料的 6、7、8 月结果, (b)、(d)、(f) 分别为模拟的 6、7、8 月结果
位势高度的单位: m, 风矢量的单位: m s^{-1}

RegCM2 模拟的 500 hPa 位势高度及风矢量情况。从月际尺度来看, RegCM2 能够较好地模拟出副高的东、西进退及南、北移动。表征副高变化的 5880 位势米线, 在 6 月份已北跳到了华南地区, 资料与模拟结果基本吻合, 而且两者在青藏高原都出现了一个高压中心。RegCM2 也能较好地模拟北方的浅槽。到 7 月份, 副高脊线进一步北抬, 从 NCEP 资料来看, 5880 线的北界移动到了长江流域, 但模拟的 5880 线却稍偏南、偏东。8 月份, 副高进一步加强西伸, 在 500 hPa 上, 副高外圈的 5880 线与同时加强的南亚高压合为一体, 中国区域的夏季环流型也发展到鼎盛阶段。从风矢量场来看, 模拟的风环流基本上与位势高度场一致。但在 8 月份, 500 hPa 模拟图上的西南季风仍在黄河以北与西北风相持 (图 3f), 而观测资料图 (图 3e) 上此时的西南季风已经随着副高南撤了, 该月偏北风与偏南风的交界处位于江淮流域而非黄河以北, 使得 8 月份江淮流域的实测降水猛增, 造成该地区严重的洪涝灾害。

从 500 hPa 的温度场来看, 模拟结果与观测资料基本吻合, 尤其是 6 月份。比较各层的模拟结果可以看到 (图略), 无论是温度场、位势高度场, 抑或是比湿场都以 500 hPa 左右的中层模拟效果最好, 而高层 (100 hPa 左右) 的效果其次, 低层 (如 850 hPa、900 hPa) 的效果最不理想, 这可能与高层和低层较多地受到上、下边界的影响, 而且低层的物理量场插值误差较大有关。

从总体上来说, RegCM2 基本上模拟出了 1998 年夏季月际尺度的气候变化, 副高的东、西进退, 雨带的移动都与观测结果基本一致。但对于该年 8 月份江、淮流域的异常强降水过程的模拟则不够理想, 由此可见, RegCM2 能够较好地模拟出中国区域月际尺度的气候平均状态, 但对于气候异常事件的模拟则还须作进一步的改进和完善。

3.3 区域气候模式对不同季节初始场的敏感性

大气过程是非绝热并且是高度非线性的运动过程, 但对于短期天气过程研究来说, 由于非绝热强迫的作用时间短, 往往可把其看成绝热的初值过程来加以研究。对于气候研究来说, 非绝热的外强迫作用却是头等重要的问题, 而初始场的影响反而变得不甚重要, 这是气候学研究与天气学研究的一个重要区别。如果没有非绝热外源强迫, 那么大气热机将在 15 d 内趋于死寂状态, 也就是说大气系统所携带的初始信息会在半个月内完全消失, 有人据此认为大气运动的预报极限是 15 d, 当然, 作为平均状态的气候来说其可预测期限将会大大延长。范新岗等^[19]在进行气候系统的全局性研究时也指出, 平均值预报的可预报期限远远超过了逐日预报, 而且耦合模式的可预报期限也明显超过非耦合大气模式的预报期限。另外, 由于带有初始信息的大气与外强迫之间高度非线性的相互作用, 也有可能使初始信号的衰减速度发生变化, 从而使预报时效与绝热状态相比有所不同。对于气候模拟来说, 当模拟时间超过典型的天气预报时效 (如 3~5 d) 后就可认为它是气候方式运行的。Giorgi^[14]对此有更为严格的定义, 他认为当有限区域模式 (LAMs) 的模拟时间超过模式的适应时间 (Spin-up-time) 时, 则 LAM 以“气候方式”运行。考虑到下垫面物理过程往往需要较长的适应时间, 因而在气候模拟时常常将前 15 d 结果作为强烈受初始场影响的“病态”资料加以剔除。由于大气运动的高度非线性, 不同季节初始场的适应时间会有所区别, 而且对其后的模拟效果影响也有所不同。周家斌^[20]在论述短期气候变化的预测方法时也指出, 由于气候系统的非线性相互作用, 它们对初值也十分敏感。因而对如何选择适应时间较短, 且对其后气候模拟效

果影响较小的初始场的问题进行研究也是很有必要的。为此，本工作设计了 6 组试验，分别是 Ei291、Ei210、Ei591、Ei510、Ei791、Ei710。试验名称代码中，“2”、“5”和“7”分别指从 1 月 15 日、4 月 15 日及 6 月 15 日开始的积分；“91”和“10”则分别指采用 1991 年的月平均资料 and 1986~1995 年 10 年平均的月气候场资料作为初始场来进行模拟。在各组试验中所采用的侧边界强迫场资料均为 10 年平均的月气候场，模拟时间都为 4 个月，其余各种方案的选择也完全一致。图 4 给出了同时积分的 3 对试验的不同高度 (150 hPa、500 hPa、850 hPa) 上比湿和温度场的方差时间演变曲线。方差计算采用以下公式：

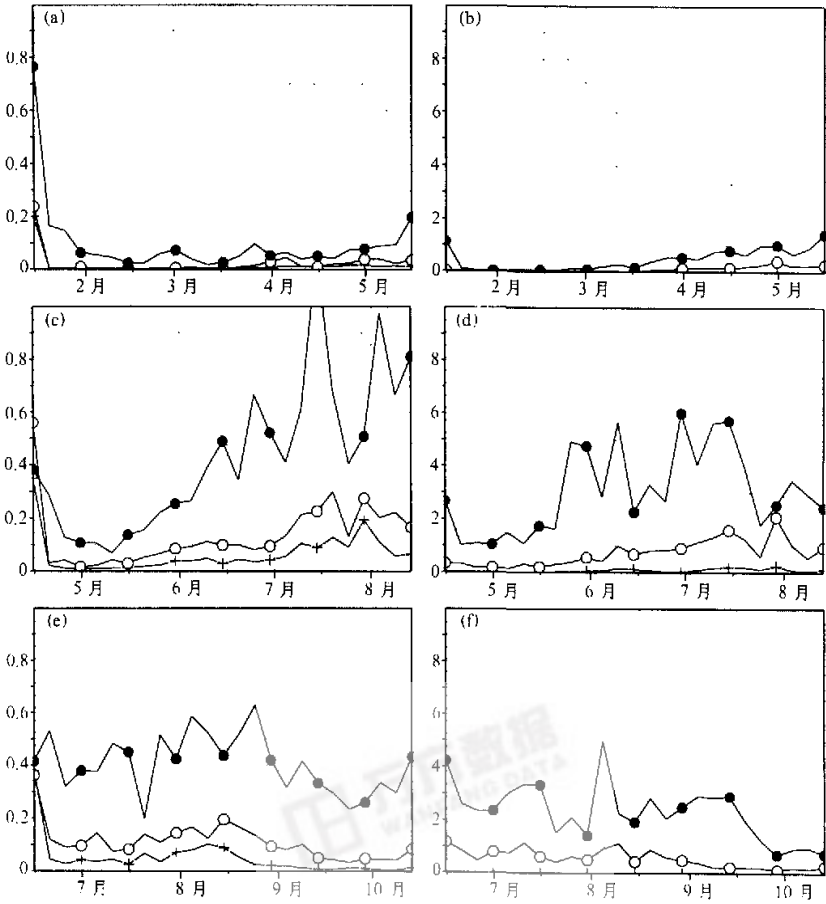


图 4 采用 1991 年月平均资料及 10 年平均的月气候场资料作为初值所得模拟结果间的方差
(a)、(c)、(e) 为温度场方差 (单位: K)，分别为从 1 月、4 月、6 月开始的模拟；(b)、(d)、(f) 为比湿方差 (单位: $\times 10^{-7} \text{ kg kg}^{-1}$)，分别为从 1 月、4 月、6 月开始的模拟
图中十字线为 150 hPa，空心圆圈线为 500 hPa，实心圆圈线为 850 hPa

$$R = \frac{\sum_i \sum_j (F_{ij}^{10} - F_{ij}^{91})^2}{N_r} \quad (1)$$

其中 F^{10} 、 F^{91} 分别为采用 1991 年及 10 年平均的资料为初值进行的模拟结果, N_r 为模拟区域内的总格点数。

通过分析 3 组试验结果可以发现, 各组试验的温度和比湿方差都在第一周内迅速衰减, 但由不同初始场造成的差异并未如通常认为的那样, 随着模拟时间的延长而完全消失, 这说明由于大气运动的高度非线性, 初始信号可以一直延续很长时间, 当然, 采用不同的气候模式, 初始信号的持续性肯定会有所区别。比较利用 1 月、4 月及 6 月 3 组初始场的模拟结果可以发现, 1 月 (图 4a、b) 和 6 月 (图 4e、f) 的初始场对后期模拟的影响较小, 尤其是从 1 月开始的积分, 利用 10 年平均资料或 1991 年资料, 后期模拟的温度和比湿场几乎没有多大差别。而从 4 月 15 日开始的积分, 却对初始场的差别十分敏感 (图 4c、d), 特别是低层 (850 hPa), 而且因采用不同初始场造成的模拟结果差异有随时间不断增大的趋势。这可能是因为 4、5 月份正是中国区域冬、夏季交替的季节, 气候系统较不稳定, 初始场的差别有可能通过与外强迫的非线性作用而被放大, 导致后期模拟结果的显著差异。通过分析位势高度和纬向风的方差也可得到类似的结论, 但位势高度方差的垂直分布却与温度、比湿的方差不太一致, 表现为高层 (150 hPa) 比低层 (850 hPa) 的方差大 (图 5c、e), 这当然是由于高层的位势高度场本身数值较大的结果。图 5b、d、f 给出了沿 x 方向平均的采用不同初始场模拟的 850 hPa 温度时间剖面图, 从图中也可清楚看到, 从 1 月 15 日开始的模拟, 其后期方差较小 (图 5b), 而从 4 月 15 日开始的模拟, 后期方差最大 (图 5d), 并且从几组试验中还可看出, 即使是在强烈受侧边界影响的南、北边界处, 初始场的影响仍然十分明显 (图 5f)。通过分析不同初值对后期降水模拟的影响可以发现, 降水受初值选取的影响较小, 其最大变率不超过 10%, 但也以 4 月 15 日这组试验的降水变率最大 (图略)。

通过以上分析可以知道, 不同初始场对后期模拟结果有明显影响, 因而选择一个合适的初始场对气候模拟来说也是相当重要的。对于中国区域来说, 似乎从冬季开始进行气候模拟是较为适宜的, 该季节的天气系统相对较为稳定。如果从春季开始数值模拟则可能由于环流形势不稳定而将初始误差通过外强迫的非线性作用而放大。另外, BATS 中的水文过程往往需要几个月时间才能调整到新的平衡状态, 因而在季节性降水过程来临之前应该使水文过程有充足的时间进行调整, 以免初始的水含量设置影响降水的模拟。Xue^[21]在做蒙古及内蒙古的植被退化试验时也提出初始积分时间的选取以雨季开始前的几个月为宜。

3.4 不同侧边界嵌套方案的模拟差异分析

对于区域气候模式来说侧边界嵌套方案及缓冲区宽度的选取对模拟效果也有重要影响。Anthes 等^[22]和 Giorgi 等^[23]的模拟研究表明, 应用一个好的嵌套方案与输入一个好的侧边界条件, 比改造区域气候模式的任何物理过程都重要。一个好的侧边界条件必须具备两个要素: 一是由区域模式模拟出的大尺度环流场应该尽可能和大尺度强迫场一致, 二是大尺度强迫场不能够太强, 以致于区域模式无法基于其内部物理过程产生一些

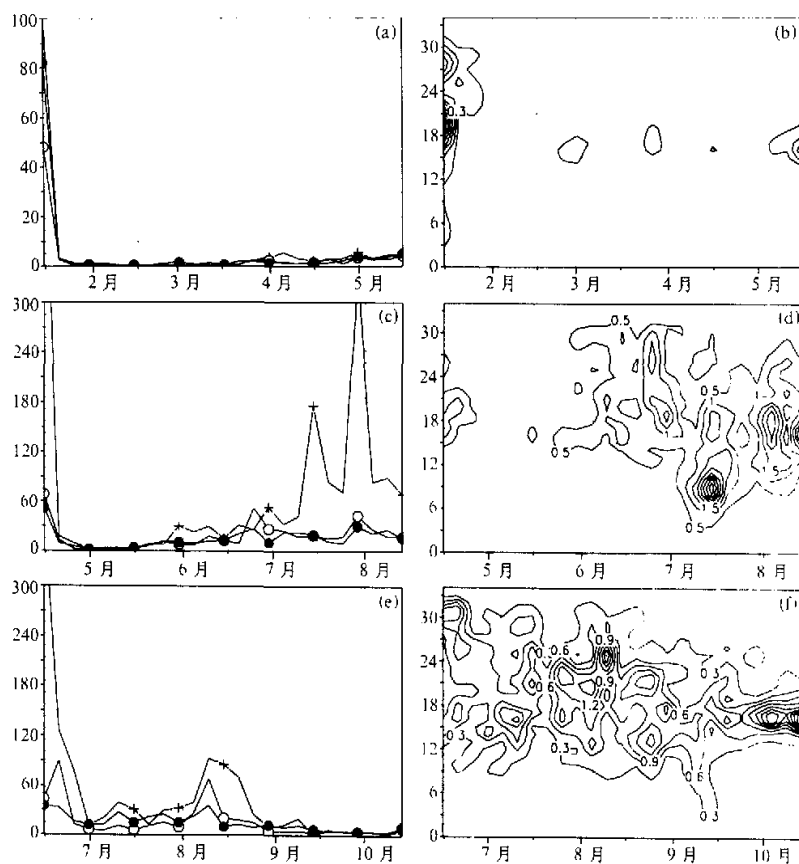


图5 采用1991年月平均资料及10年平均的月气候场资料作为初值得模拟结果间的方差
(a), (c), (e) 为位势高度方差 (分别为从1月、4月、6月开始的模拟), 图中十字线为150 hPa,
空心圆圈线为500 hPa, 实心圆圈线为850 hPa; (b), (d), (f) 为沿 x 方向平均的850 hPa
温度场方差的时间-纬度剖面 (分别为从1月、4月、6月开始的模拟)
纵坐标为位势高度方差 (a, c, e) 及 y 方向格点数 (b, d, f), 位势高度单位: m, 温度场单位: K

高分辨率信息, 也即需使模式有足够的时空来响应中尺度强迫。而在选取缓冲区大小时, 则必须充分考虑模式本身区域的大小^[2]。另外, 也要考虑不同尺度强迫场在不同高度上所起的作用是不同的, Giorgi 等^[7]在利用 RegCM2 研究侧边界对模拟结果的影响时也指出, 在高层大气, 受侧边界的影响较大, 而在低层, 则受下垫面的高分辨率强迫的影响更大些。

在 RegCM2 中一共设置了6种侧边界嵌套方案, 其中海绵边界条件可表示为

$$\alpha_n = \omega(n) \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_{MC} + [1 - \omega(n)] \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)_{LS}, \quad (2)$$

对叉点变量: $n=1,2,3,4$; 对圆点变量: $n=1,2,3,4,5$ 。 α 可表示任何变量; 下标 MC 表示模式计算的倾向, LS 为大尺度的倾向; n 是从最靠边界 (在边界上 $n=1$) 算起的网格点数, $\omega(n)$ 为介于 0 到 1 之间的权重系数。

松弛边界条件包含了模式的预报变量向大尺度场的“松弛”或“逼近”。该方法包括了一个 Newton 项和一个扩散项, 由其计算出边界强迫值再加入到预报变量的倾向计算中:

$$\alpha_n = F(n)F_1(\alpha_{LS} - \alpha_{MC}) - F(n)F_2 \nabla^2(\alpha_{LS} - \alpha_{MC}), \quad (3)$$

其中, $F_1 = 0.1 / \Delta t$, $F_2 = (\Delta s)^2 / 50 \Delta t$, Δt 为时间步长, Δs 为水平格距。

根据 $F(n)$ 的不同取法又可分为线性松弛和指数松弛两种方案。

为了检验不同嵌套方案的模拟效果, 利用 1986~1995 年 10 年平均的月气候场资料作初值和侧边界强迫, 分别采用时间变化及流入流出边界条件 (EB7T)、海绵边界 (EB7S) 及指数松弛边界 (EB7E) 方案进行侧边界嵌套, 缓冲区都定为 5 圈, 在其他各种条件不变的情况下分别进行了 4 个月的模拟, 去掉前 15 d 的模拟结果后作为有效的资料进行分析。在分析中主要考察各种方案模拟结果与 NCEP 月平均资料之间的误差标准差 (S_i)。误差标准差的计算采用以下公式:

$$S_i = \left\{ \frac{\sum_j \sum_l (F_{M,j,l} - \bar{F}_M - F_{A,j,l} + \bar{F}_A)^2}{N_r} \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

其中 F_M , F_A 分别为模拟结果及 NCEP 再分析资料, N_r 为统计域内的格点数, 上划线“-”代表统计域内的平均。

图 6 给出了 200 hPa 及 500 hPa 7、8、9 月比湿场的 S_i 在靠近边界的 15 圈内随离开侧边界的距离而变化的情况。在计算 S_i 时分别对距离侧边界相同的点进行平均。通过比较三种侧边界方案比湿场的 S_i 可以发现, 在 200 hPa, 采用指数松弛 (图 6a) 时在侧边界缓冲区附近的 S_i 比采用海绵 (图 6b) 及流入流出 (图 6c) 边界时的 S_i 要略小一些, 但指数松弛方案在离开缓冲区后其 S_i 迅速增大 (图 6a); 在 500 hPa 上, 则可看到采用海绵边界 (图 6c) 时其 S_i 明显比其他两种方案的 S_i 小, 从缓冲区到模拟区内部的模拟值过渡也比较光滑。从总体上来看, 采用 5 圈缓冲区时比湿场的模拟以海绵边界的效果最好。对于温度场及位势高度的模拟来说, 其结果与比湿场类似, 也以海绵边界的效果较好。而对于纬向风速的模拟, 则以采用指数松弛方案的效果较好 (图略)。对于降水模拟来说, 由于采用的是 10 年平均的月气候场资料, 因而几种嵌套方案的模拟效果都不够理想, 但相对而言, 5 圈海绵边界的效果较好一些, 在边界及陡峭地形处模拟出的虚假降水也较小 (图略)。

利用观测资料来驱动区域气候模式时, 较宽的缓冲区理应比窄缓冲区的模拟效果好; 但当利用 GCM 作嵌套进行模拟时, 则因为 GCM 结果本身存在的误差, 缓冲区未必越宽模拟效果就越好 (与观测资料进行比较), 必须在选定的模拟区域内对不同宽度缓冲区的模拟效果进行反复试验, 以选取合适的宽度。当缓冲区较宽时 (如 18 圈), 许多工作都表明指数松弛嵌套方案的效果最好^[2,7,8]。但本工作的研究却发现, 当缓冲区取得较少 (5 圈) 时, 采用海绵边界似乎比采用指数松弛边界的模拟效果要好一些, 尤其是对中、低层的温度、比湿及位势高度的模拟, 因而当受到模拟区域格点数量的限制

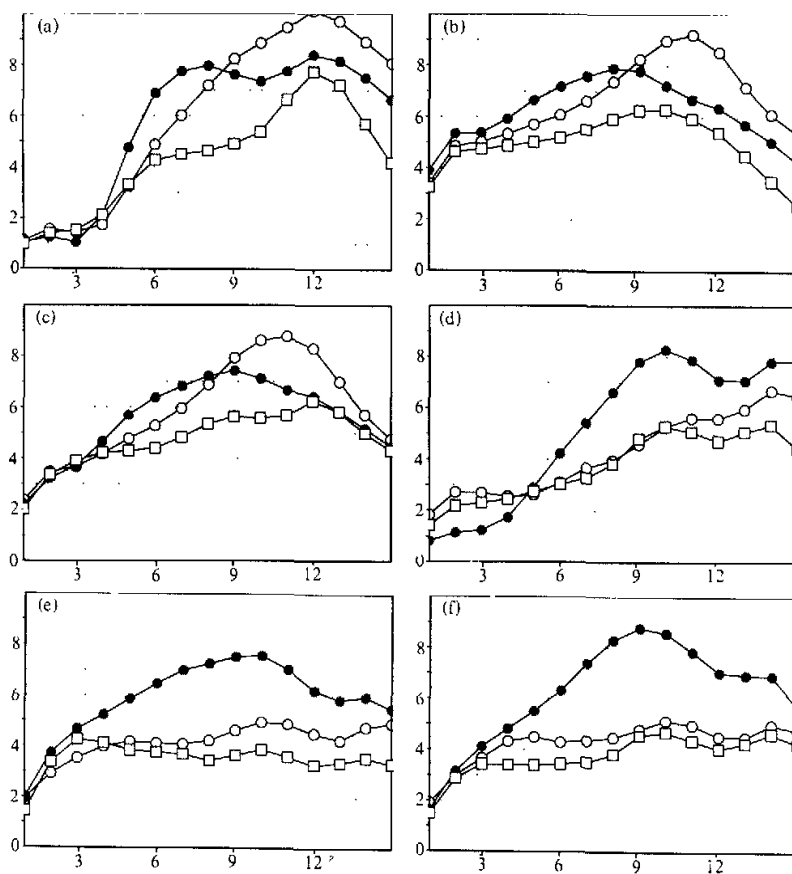


图6 NCEP 资料与模拟结果间的比湿误差标准差随离开侧边界的距离而变化的情况
(a), (b), (c) 为 200 hPa 的比湿 S_i (分别为指数松弛、海绵及流入流出边界的模拟结果), 单位: $\times 10^{-5} \text{ kg kg}^{-1}$; (d), (e), (f) 为 500 hPa 的比湿 S_i (分别为指数松弛、海绵及流入流出边界的模拟结果), 单位: $\times 10^{-4} \text{ kg kg}^{-1}$. 空心圆圈线为 7 月, 实心圆圈线为 8 月, 空心方块线为 9 月的结果, 横坐标为离开侧边界的格点数, 纵坐标为比湿的误差标准差

而无法选取较宽缓冲区时, 以采用海绵边界为宜。另外, 在本工作中还对分别采用 10 年平均的月气候场资料、1991 年月平均场资料及采用 1998 年逐日资料来驱动 RegCM2 的模拟结果进行了比较, 结果表明, 采用较高时间分辨率的资料作为大尺度强迫场可以明显提高模拟效果, 无论是温度、气压、湿度、风等气候要素的方差, 还是降水的差值都有所减小 (图略), 这可能与高时间分辨率资料包含更为真实的天气变化信息有关。

4 结语

RegCM2 是目前广泛使用的区域气候模式, 通过采用 1998 年逐日资料进行的模拟

发现, 该模式可以较好地模拟出月际尺度的气候变化, 无论是降水中心的季节性移动还是副高的东、西进退以及其他物理量场的变化均与实际情况基本吻合, 但对该年 8 月份江淮流域的降水异常的模拟还不够理想, 说明在利用该模式进行气候异常的模拟时, 还须作进一步的完善。通过在不同季节采用不同初始场进行的数值模拟发现, 从春季开始的积分其结果对初始场的敏感性最高, 初始场的差别会对后期模拟产生明显影响, 且这种影响随时间衰减缓慢。相对来说, 从冬季开始的积分, 对初始场的依赖性较小, 初始场的差别会在积分过程中逐渐减小。因而在利用 RegCM2 进行区域气候模拟时宜从冬季开始, 这样即使初始场存在一定误差, 也不至于对数值模拟的结果产生显著影响。

另外, 还对采用不同侧边界嵌套方案的模拟效果进行了简单讨论, 结果发现, 当采用较少的缓冲区 (5 圈), 海绵边界对温度、比湿及位势高度的模拟要比指数松弛及流入流出边界好, 降水的模拟似乎也要比其他方案好一些, 但对于风场的模拟则不如指数松弛方案。这种结果与大多数采用 18 圈缓冲区作研究时得出的以指数松弛方案模拟效果最好的结论不太一致, 这可能是因为在采用指数松弛边界时需要要有较多的缓冲区圈数才能获得良好的效果。

参 考 文 献

- 1 Dickinson, R. E., R. M. Errico, F. Giorgi and G. T. Bates, A regional climate model for the western United States, *Climate Change*, 1989, **15**, 383~422.
- 2 魏和林, 符滨斌, 王维强, 区域气候模式侧边界的处理对东亚夏季风降水模拟的影响, *大气科学*, 1998, **22**(5), 779~790.
- 3 Giorgi, F. and G. T. Bates, On the climatological skill of a regional model over complex terrain, *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**, 2325~2347.
- 4 Giorgi, F., On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Climate*, 1990, **3**, 941~963.
- 5 Dickinson, R. E., A. Henderson-Sellers and P. Kennedy, Biosphere atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model, NCAR Tech. Note, 1993, NCAR/TN-387+STR, Natl. Cent. for Atmos. Res. Boulder, Colorado.
- 6 Giorgi, F. et al., Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**, 2794~2813.
- 7 Giorgi, F., M. R. Marinucci, G. T. Bates, and D. C. Gerardo, Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**, 2814~2831.
- 8 赵宗慈, 罗勇, 区域气候模式在东亚地区的应用研究——垂直分辨率与侧边界对夏季季风降水影响研究, *大气科学*, 1999, **23**(5), 522~532.
- 9 Madala, R. V., Efficient time integration schemes for atmosphere and ocean models, in: *Finite-Difference Techniques for Vectorized Fluid Dynamics Calculation*, 1981, Springer-Verlag, 56~74.
- 10 Briegleb, B. P., Delta-Eddington approximation for solar radiation in the NCAR Community Climate Model, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 7603~7612.
- 11 Slingo, J. M., A cloud parameterization scheme Derived from GATE data for use with a numerical model, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**, 747~770.
- 12 Kiehl, J. T., J. J. Hack, G. B. Bonan et al., Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3), NCAR Tech. Note, 1996, NCAR/TN-420+STR, 152pp.
- 13 Zhang, G. J. and N. A. McFarlane, Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model, *Atmos. Ocean*, 1995, **33**, 407~446.

- 14 Giorgi, F. and C. Shields, Tests of precipitation parameterizations available in the latest version of the NCAR Regional Climate Model(RegCM2) over the continental United States, *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**, 6353~6375.
- 15 符滨斌、魏和林、陈明等, 区域气候模式对中国东部季风雨带演变的模拟, *大气科学*, 1998, **22**(4), 522~534.
- 16 Dai, A., F. Giorgi and K. Trenberth, Observed and model-simulated diurnal cycles of precipitation over the contiguous United States, *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**, 6377~6403.
- 17 Mearns, L. O., F. Giorgi, C. Shields et al., Analysis of the variability of daily precipitation in a nested modeling experiment: Comparison with observations and $2 \times \text{CO}_2$ results, *Glob. Planet. Change*, 1995, **10**, 55~78.
- 18 刘永强、丁一汇、赵宗慈, 1991年江淮特大异常降水的区域气候模拟, 赵宗慈主编, 中国短期气候预测的模式研究, 北京: 气象出版社, 1996, 106~120.
- 19 范新岗、张红亮、丑纪范, 气候系统可预报性的全局研究, *气象学报*, 1999, **57**(2), 190~198.
- 20 周家斌, 短期气候变化的预测方法, 叶笃正等主编, 当代气候研究, 北京: 气象出版社, 1991, 164~180.
- 21 Xue, Y., The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian grassland on the regional Climate, *J. Climate*, 1996, **9**, 2172~2189.
- 22 Anthes R. A., Hsie Y. and Kuo Y. H., Description of the PENN States / NCAR Mesoscale model version 4(mm4), NCAR Tech. Note, 1987, NCAR / TN-282+STR, 66pp.
- 23 Giorgi, F., and M. R. Marinucci, An investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model resolution and its implications for climate studies, *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**, 148~166.

Effects of Initial/ Lateral Boundary Conditions on Regional Climate Simulations

Zheng Yiqun and Qian Yongfu

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Gui Qijun

(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101)

Yu Ge

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract The simulation of the 1998 summer monsoon climate and the discussion of the effect of initial and lateral boundary conditions on simulation show that regional climate model (RegCM2) can well simulate the climate variations in monthly scale, but it should be further improved in simulating the climatic anomaly. From the simulations by adopting varied initial fields in different seasons, we find that, the simulation starting from spring is the most sensitive to the initial fields, and the deviation of the initial fields will cause a obvious effect on anaphase simulations. Relatively, the simulation starting from winter is not strongly dependent on initial fields, and the bias of initial fields will gradually decline in the later integration process. The regional climate simulation by using RegCM2 beginning from winter is suitable, in this kind of integration, the results of simulation are not notably affected by initial bias. In addition, we simply discuss the effect of using different lateral boundary schemes on climate simulations. The results show that, if adopting smaller buffer zone (five-grid-point-wide buffer zone), employing sponge lateral boundary brings about a better effect than employing exponential relaxation lateral boundary on temperature / humidity / geopotential height simulations, and a slight improvement also takes place in the precipitation simulations, but worse effect on the wind field simulations.

Key words: regional climate simulations; initial / lateral boundary conditions; sensitivity discussion