

区域和全球模式的嵌套技术 及其长期积分试验*

陈 明 符淙斌

(中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029)

摘 要 将区域模式嵌入澳大利亚 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) 的全球模式中, 并将其应用于区域模式的长期气候积分试验。模拟结果表明, 当区域与全球模式嵌套时, 边界吸收问题十分重要, 由区域模式得到的高分辨率大尺度环流形式在边界上必须与全球模式提供的强迫一致, 同时区域模式必须给出基于模式内部物理过程产生的高分辨信息。因此, 在嵌套过程中, 必须仔细考虑缓冲区的设置, 使大尺度强迫与中尺度特征充分混合, 既保持区域模式内外的一致性, 又使区域内部中尺度强迫物理过程得到充分发展。将区域模式与澳大利亚 CSIRO 的 9 层 21 波三角形截断谱模式嵌套后, 完成了连续 3 年的区域气候模式积分。模拟结果表明, 由于区域模式较好地刻划了区域尺度的地形、下垫面和海岸线分布等的细节特征, 模拟的区域气候特征比全球模式有较大的改进, 尤其是对季风降水的模拟, 区域模式明显改进了全球模式的模拟结果。

关键词: 区域气候; 嵌套; 长期积分

1 简介

目前全球气候模式正广泛应用于气候变化的研究。在模拟全球温度和降水的变化趋势及大气痕量气体的气候效应问题等方面展开了卓有成效的工作。但是相对于全球气候和环境变化的研究而言, 区域变化研究还很不充分, 尤其是在东亚地区, 受复杂自然条件和剧烈的人类活动的影响, 区域气候和环境正在发生巨大变化。对这种变化和变化趋势的预报, 是人们十分关注的问题。受较低分辨率的影响, 全球模式在模拟区域尺度气候及气候变化方面, 其可信程度还很不够, 不同的全球模式对区域气候的模拟结果差别较大, 尤其是在东亚特殊的季风气候背景下, 全球模式结果与实际观测还有较大差异^[1,2]。

为了克服全球模式在区域变化研究中的缺陷, 更好地了解区域尺度上的气候变化, 必须逐渐发展适应东亚地区特点的区域模式。与全球模式相比, 区域模式的优越性是显而易见的。区域模式既受大尺度环流强迫, 又能够反映区域和中尺度的影响。嵌套的区域和全球模式构成了一个完整的系统, 从某种意义上说, 区域模式能够修正全球模式在区域尺度上的模拟结果, 提高区域气候和气候变化模拟的可信度。嵌套的区域气候模式具有较高的分辨率, 能够更好地刻划地形和地表状况, 同时包含详细的陆面物理过程模

式。它能够刻划许多大尺度环流难以分辨的区域尺度温度、降水和土壤水循环特征,成为研究区域气候的一个有力工具。通过本文的工作,我们希望完成区域和全球模式的嵌套,并进行连续多年的气候模拟,讨论我国大陆东部区域气候对大尺度外强迫和内部物理机制的响应。

由于区域气候模式还存在一定程度上的不确定性,模拟结果受各种不同物理过程参数化方案和大尺度强迫的影响,因此我们的工作不是为了详细刻划区域气候准确的细节特征,而是更加注重讨论模式对各种外部强迫和内部机制的敏感性响应,讨论区域气候模式在多大程度上改进了全球气候模式在区域尺度上的缺陷,为模式的进一步发展和完善,为准确的区域气候模拟提供基础。

2 区域和全球模式简介

2.1 区域模式

区域气候模式是在中尺度气象模式 MM4 的基础上发展起来的一个三维原始方程数值模式(动力学框架可参阅文献[3,4])。模式中几个重要的物理过程包括辐射计算、边界层处理、积云对流参数化、陆面过程模式等等^[5~7]。辐射计算采用改进的 CCM2 辐射方案,将太阳辐射分为近红外和可见光部分,太阳光谱分 18 个波段进行计算,晴空辐射包括瑞利散射和 O_3 、 CO_2 、 H_2O 、 O_2 的辐射效应,在有云的情况下考虑云顶反射、云与云、云与地面间的多次反射。模式的湿过程方案包括云水和雨水的预报、可分辨尺度的平流等等,用 Kuo-Athens 型积云方案刻划积云对流过程。模式下边界与陆面过程模式 BATS 耦合,以刻划植被、土壤和大气间的动量、热量和水汽交换,考虑了包括一层植被与三层土壤及雪被在内的陆面物理过程。它包含 18 种植被类型,并区分土壤的质地和颜色。在区域模式中要求给出一系列 BATS 场的初始值,因此假设土壤表面温度和植被温度与大气最底层的气温一致,土壤水含量根据植被和土壤类型确定。预报量包括土壤上下层的温度、植被冠层温度、叶面温度等。土壤水文过程包括土壤水预报、降水、径流、积雪、蒸发、土壤水扩散等。土壤水运动从高分辨的土壤模式中求出,地表径流是降水率和土壤饱和度的函数。边界层的计算采用 Holtslag 的中等分辨率方案,表面蒸发依赖于土壤水可获得率。在边界层通量计算中,湍流输送在稳定和近中性层结条件下由涡旋扩散决定,其扩散系数依赖于表面粗糙度和近地层大气稳定度。在不稳定条件下,湍流输送由于对流调整进行,除标准温度调整外,也重新调整湿度的垂直分布。这一方案包含了反梯度输送项,刻划了深干对流引起的非局地输送。

2.2 CSIRO 全球谱模式

澳大利亚 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) 的谱模式是一个 9 层 21 波三角形截断的全球气候模式,其水平分辨率为 5.625° (经) $\times 3.25^\circ$ (纬)。它是基于 Gordon 的能量守恒模式发展起来的全球气候模式。物理过程参数化方案包括 Arakawa 的积云对流方案、Deardorff 的土壤湿度计算方案和 GFDL 的短波辐射计算方案。模式边界层以相似理论为基础,湍流交换依赖于局地稳定度。分析表明这一谱模式在积分 5 年后已经达到稳定,我们以模式 6~8 年的结果作为区域模式的驱动场,谱模式每天输出三个时次,分别是 08 时、16 时、24 时。

3 区域范围及嵌套过程

3.1 模式范围

由于模式积分的时间比较长, 考虑到机时和计算空间问题, 我们选择中国大陆东部地区及小部分海洋作为区域模式的积分空间。模式中心点位于 (36°N , 116°E), 水平格距为 60 km, 垂直方向分 10 层, 对应的 σ 层高度分别为 0、0.15、0.3、0.45、0.6、0.75、0.85、0.93、0.97、0.99、1.0, 模式大气顶部气压是 100 hPa。模式地形和下垫面特征如图 1 所示, 地形是根据全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的实测地形资料经双线性插值后再经过 9 点平滑后得到。在 60 km 的分辨率下, 主要的地形和海岸线特征都被刻划出来, 如西南的四川盆地和东北的长白山等地形高低中心在图中都有清楚的反映。

3.2 嵌套过程的基本原理和方法

嵌套模式的基本思想是, 用粗分辨率的全球模式模拟全球气候, 然后用其输出结果来驱动高分辨率的区域气候模式。在这种单向嵌套技术中, 区域模式产生的环流并不反馈到全球模式中, 但要求全球模式能够提供气候对各种强迫的正确响应。全球模式的典型分辨率在 200~400 km 左右, 从区域气候模拟的角度上说, 这样粗的分辨率已极大地歪曲了局地地形、海岸线及下垫面分布状况等一系列影响局地气候的因子。因此发展区域和全球模式的嵌套技术, 既可以获得大尺度天气系统的基本特征, 又能够获得由大量中尺度强迫引起的高分辨率信号, 从而有助于了解全球气候背景下的区域气候特征及其重要的物理机制。但是, 嵌套技术目前仍在发展中, 许多方面还有待于进一步研究和证实。我们尤其关心的两个问题是: 嵌套区域模式是否能够积分足够长的时间而不引起模式误差的过度增长, 嵌套区域气候模式模拟的天气系统是否代表了真实的天气特征并能够反映高分辨率的区域和中尺度强迫过程。

嵌套的区域气候模式要求给出初始场和随时间变化的边界强迫场, 包括风场、温度场、湿度场和气压场。对于一个给定的积分时段, 这些变量首先从全球模式的输出结果中插值到区域模式的格点上, 并通过指数松弛技术设置边界缓冲区, 以有效地阻止边界波的反射。当区域与全球模式嵌套时, 边界吸收是一个重要问题。边界上提供给区域模式内部大尺度的大气结构, 驱动区域模式内部中尺度和天气尺度系统发展。从这个意义上讲, 区域模式模拟了局地强迫引起的高分辨率环流, 叠加在大尺度场上。因此, 边界场必须满足的条件是由区域模式引起的大尺度环流必须与全球模式提供的大尺度强迫一致, 同时, 区域模式必须给出基于模式内部物理过程产生的高分辨率信息。因此, 大尺度强迫不可太强, 以至于掩盖了区域内部的中尺度强迫信号。缓冲区的作用在于使大尺度强迫与区域模式得到的中尺度结果充分混合, 既保持区域模式内外的一致, 又使区域模式内部中尺度强迫物理过程充分发展。

4 模拟结果分析

4.1 温度的模拟结果

利用区域气候模式与 CSIRO 的全球谱模式嵌套, 完成了连续 3 年的区域气候模

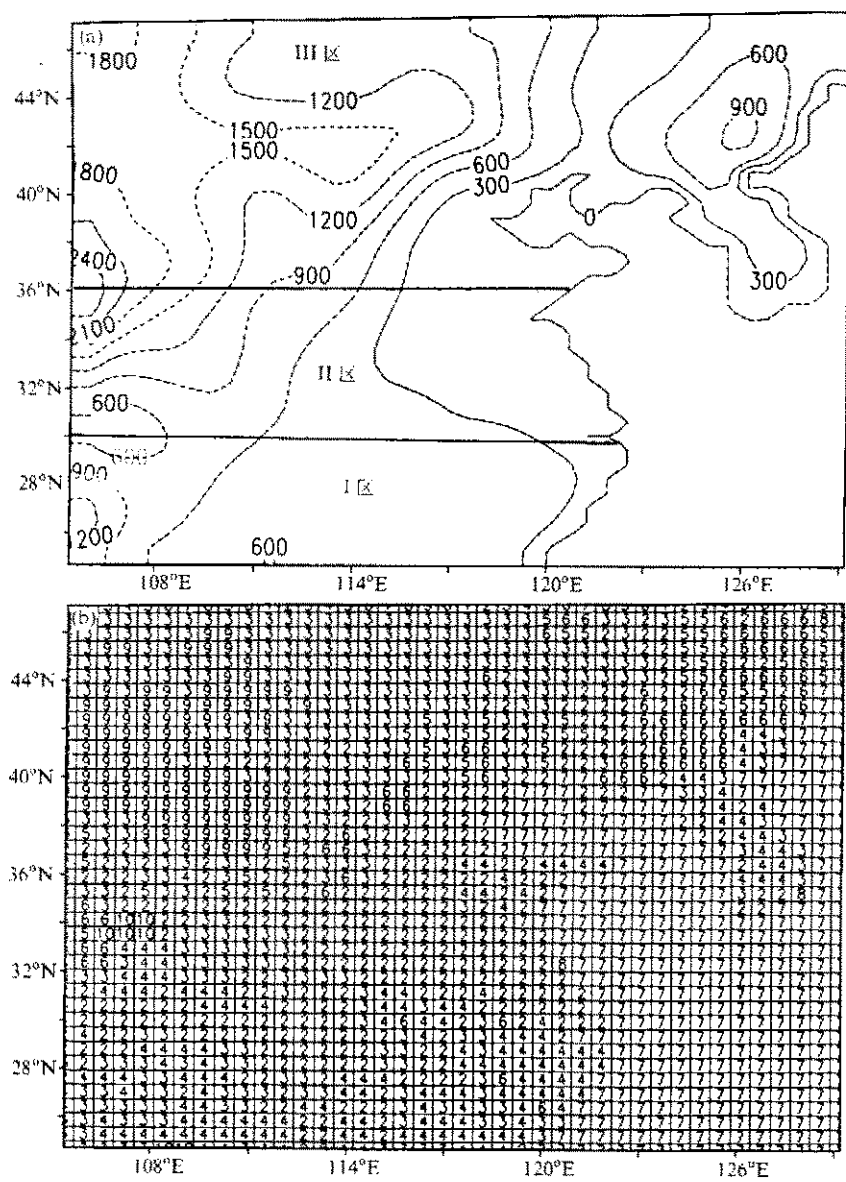


图 1 区域模式的地形 (a) (单位: m) 和地表分类 (b)

- 1: 农作物; 2: 短草; 3: 长绿针叶林; 4: 落叶针叶林; 5: 落叶阔叶林; 6: 长绿阔叶林; 7: 海洋;
8: 沙漠; 9: 苔原; 10: 灌溉农作物; 11: 半沙漠; 12: 冰原; 13: 沼泽

拟。谱模式每天输出三个时次的结果, 分别是 08 时, 16 时, 24 时, 以此作为区域模式的驱动场。由于次网格强迫在近地层表现最为显著, 嵌套过程在大气低层有极其重要的意义, 因此我们重点讨论地面温度和降水的模拟, 它们也是气候变化中两个最重要的变量。

图 2 是观测和区域及全球模式模拟的 1 月份平均温度。总的说来区域和全球模式都较好地模拟了地面温度的空间分布特征, 大陆北部的冷中心和西南地区的暖中心位置都与观测较为一致。但是冬季区域模式模拟的地面温度比观测偏低, 南方偏低程度更为严

重。分析认为，造成这种现象的可能原因是全球模式模拟的地面温度本身就偏低，偏低的温度不断通过边界强迫进入模式内部，直接影响区域模式模拟结果。另外，由于区域模式分辨率较高，地形特征刻画详细，一些局地地形的海拔高度明显高于全球模式中的地形高度，这种变化的地形高度会影响环流和降水，通过大气内部的一系列复杂反馈过程，也可能造成区域模式的地表温度偏低，地形增高本身也使地面温度降低。但是比较区域和全球模式的结果，我们仍然可以看到有意义的结果，由于区域模式中包含更为详细的地形，在区域模式的积分结果中，温度呈明显的槽脊状波动结构，北部的冷中心分别对应地形的高值中心。这些特征反映了区域下垫面的强迫过程，而在谱模式的输出结果中，温度场的分布显然十分光滑。

图 3 是观测和区域及全球模式模拟的 7 月份平均温度，夏季地面温度的模拟结果仍

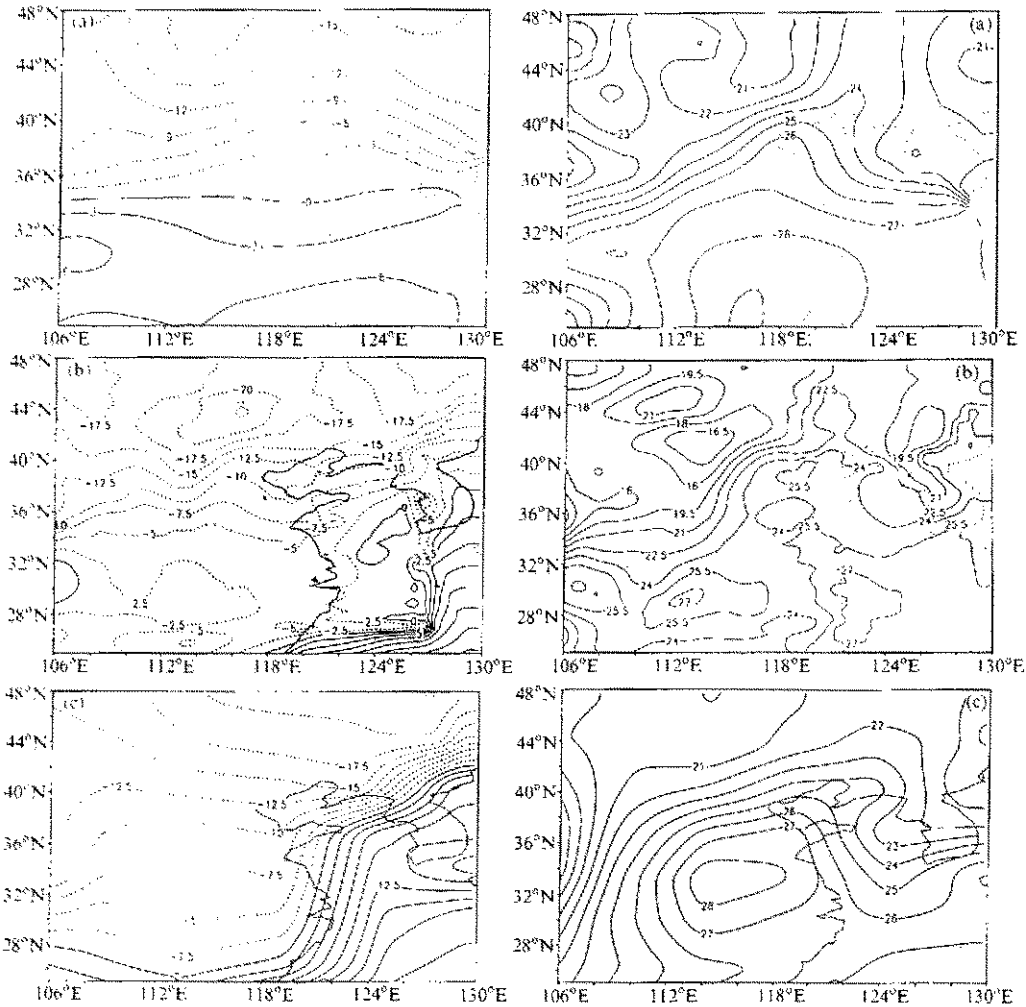


图 2 观测和模拟的 1 月地面温度 (°C)
(a) 观测; (b) 区域模式模拟结果;
(c) 全球模式模拟结果

图 3 观测和模拟的 7 月地面温度 (°C)
(a) 观测; (b) 区域模式模拟结果;
(c) 全球模式模拟结果

然偏低, 大陆南方温度的模拟值比观测偏低 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 西北地区模拟比观测偏低 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在 40°N 附近对应地形的高值中心有一个明显的冷中心, 平均温度仅 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。受区域模式高分辨率影响, 地面温度分布明显复杂, 也更加接近实际观测。在华北北部和西北部, 地处山区和高原, 温度低于东部平原地区, 沿秦岭和大巴山区有弱温度槽, 显然是受地形影响所至。

为讨论季节变化, 将模式区域划分为三个子区域, 区域范围如图 1 所示, 图 4 是三个子区域平均的模拟和观测到的温度季节变化。区域和全球模式都较好地再现了中国大陆东部地区温度的季节变化, 模拟与观测的温度误差在 $2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。但是在区域和全球模式中, 整个区域平均的模拟温度比观测偏低, 华南和长江中下游地区偏低程度尤其严重, 华北模拟温度也偏低, 但是总的模拟效果比长江中下游及其以南地区要好。

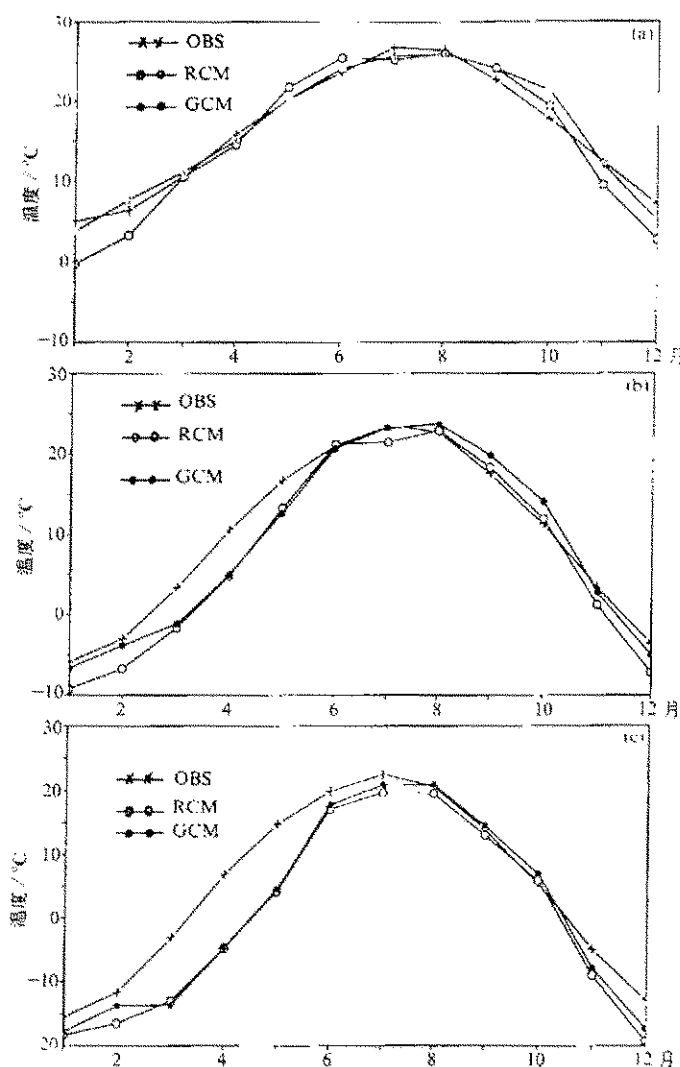


图 4 观测和区域模式及全球模式模拟的三个子区域温度季节变化
(a) 华南; (b) 长江中下游; (c) 华北

4.2 降水的模拟结果

降水的模拟是区域气候模拟中一个重要的也是最难模拟的因子。根据观测，我国冬季盛行寒冷干燥的西北气流，大陆东部的雨带主要位于长江以南；夏季盛行温暖湿润的西南气流，强降水中心位于江淮地区，雨带的季节性移动呈跳跃式，表现出明显的季风气候特征。下面分析一下区域和全球模式的结果，并与观测进行对比。

图 5 是 7 月份观测和模拟的降水分布。从观测看，7 月降水呈东西向带状分布，长江中下游地区和辽东半岛、山东半岛等沿海地区为最大降水区域。自东南向西北降水逐渐减少，这也是我国气候雨带的典型分布。分析区域模式结果，雨带的主要位置模拟和

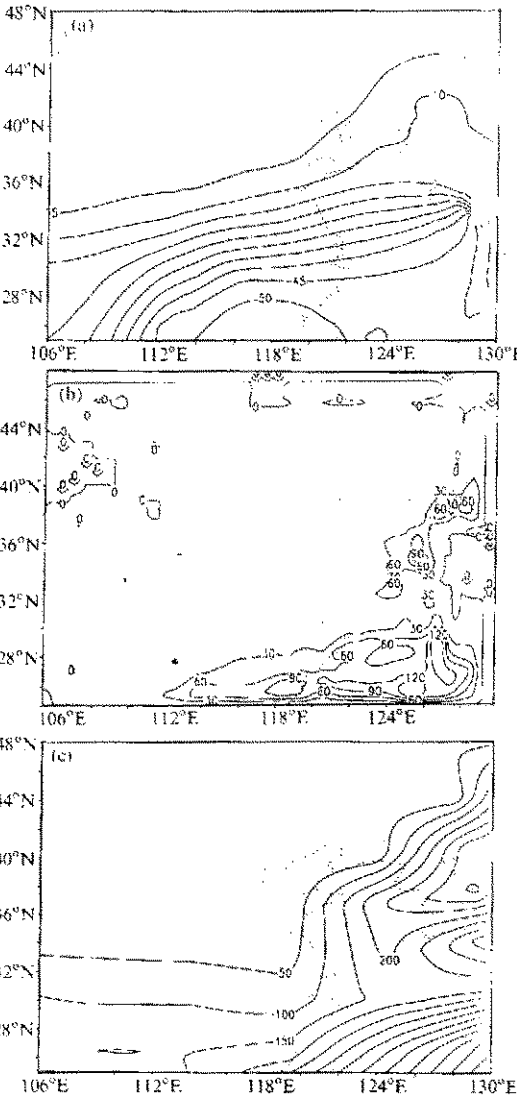
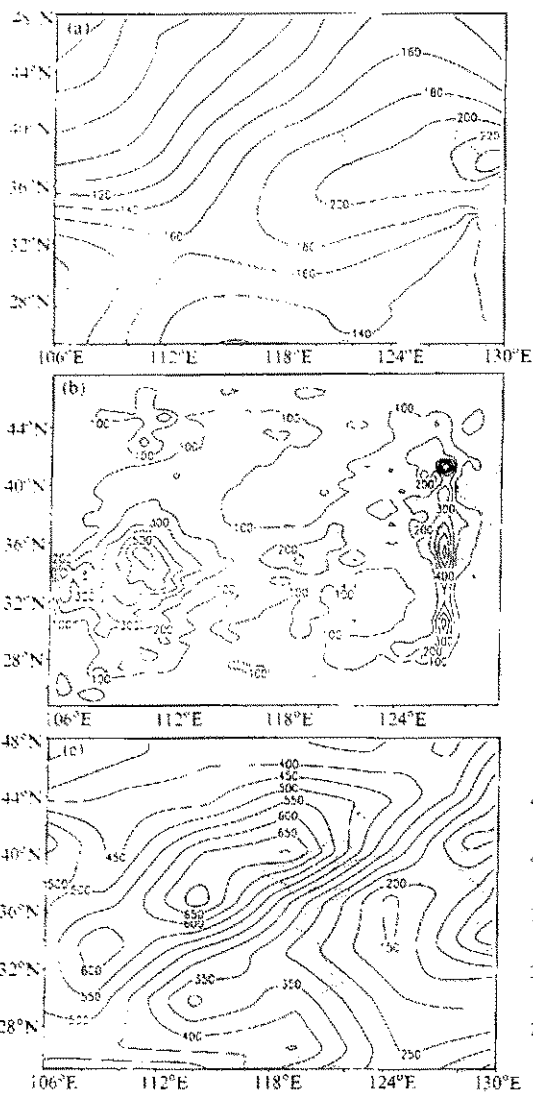


图 5 观测和模拟的 7 月降水 (单位: mm)

(a) 观测; (b) 区域模式模拟结果;
(c) 全球模式模拟结果

图 6 观测和模拟的 1 月降水 (单位: mm)

(a) 观测; (b) 区域模式模拟结果;
(c) 全球模式模拟结果

观测较为一致,从长江中下游到东部沿海一带,雨带呈东西向带状分布,沿此区域向南两侧,降水迅速减少。受地形影响,朝鲜半岛出现一个降水中心。区域模式模拟的降水空间分布与观测较为吻合,但是降水的大小存在一定差异。在大陆东部沿海地区,自南向北直到辽东半岛,降水的大小和空间分布都与观测较为一致,降水总量略有偏低。长江中下游地区,模拟降水的最大值可以达到 600 mm,是观测降水的 2~3 倍。雨带中心位于 (110°E , 34°N) 附近,包括四川盆地、湖南、湖北、安徽和贵州北部,并一直向北伸展到陕西和山西的部分地区。这一较强降水显然是在局地地形和大尺度环流的共同作用下形成的。该地区位于起伏地形的南向坡面,山地的强迫抬升和偏南气流的辐射对该地区降水有重要影响。总的说来,区域模式模拟的夏季降水在沿海平坦地区较好,在起伏山地模拟降水比观测偏高。从全球模式的积分结果看,强降水中心呈西南-东北走向,从长江中下游地区一直伸展到我国西北和华北的半干旱地区,月平均降水达到 600~700 mm,大陆东部海洋上的强降水中心在全球模式的结果中成为降水较少的区域。比较区域的全球模式的结果,区域模式对降水模拟的改进是显而易见的,无论降水的空间分布还是降水的强度,区域模式的结果都比全球模式更加符合观测事实。

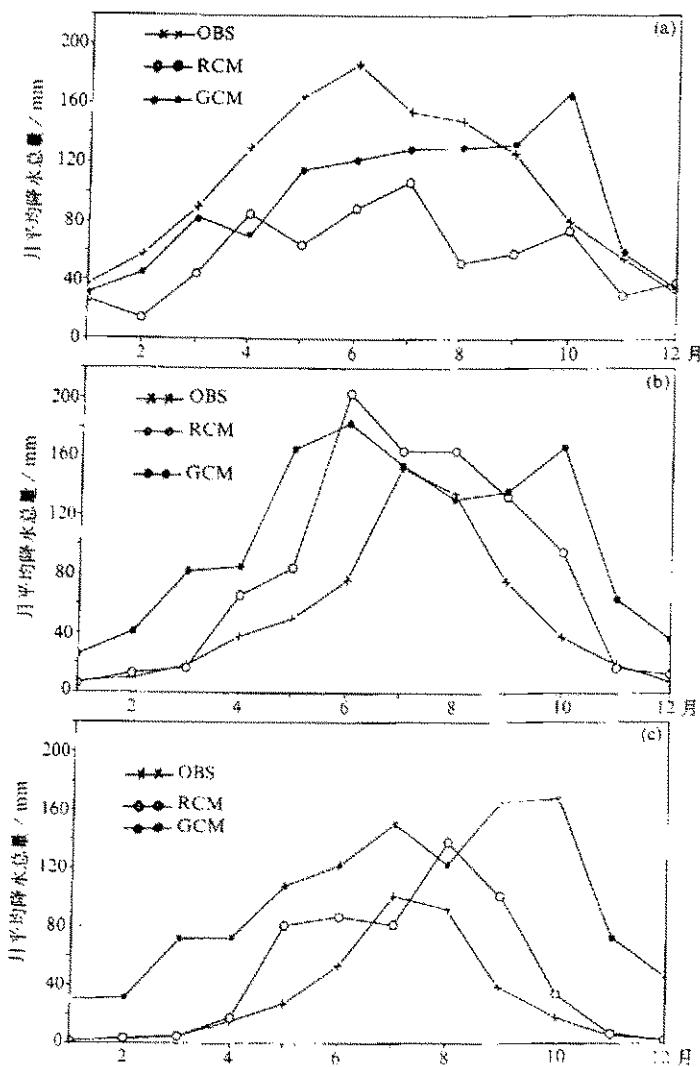


图7 观测和区域模式及全球模式模拟的降水季节变化

(a) 华南; (b) 长江中下游; (c) 华北

冬季降水的模拟结果如图6所示。观测表明冬季降水主要集中在华南和东南沿海的小范围内,呈西南-东北走向分布,降水中心在南岭山地附近摆动,降水量约 50 mm 左右。沿南岭山地向北,降水迅速减少。区域模式模拟降水的趋势和走向基本与观测一致,雨带西起 112°E , 北至 28°N , 沿南岭山地基本呈东西走向分布。自华南沿海向北,降水迅速减少。区域模式的模拟结果与观测十分一致,只是降水略有偏大,中心降水为 90

mm。而在全球模式的积分结果中, 雨带位置明显偏北, 模拟降水普遍在 100 mm 以上, 大大超过观测值。

图 7 是三个子区域平均的月降水总量的季节变化。根据观测, 我国降水主要集中在夏季, 与东亚季风的进退密切相关。自 5 月开始降水有较显著的增加, 7、8 月达到降水的峰值, 10 月之后降水迅速减少。从全球模式的结果看, 模拟降水已大大超过观测值, 降水的季节变化特征也与观测存在很大差异。在整个 5~10 月降水总量都很大, 也没有明显的季节变化。由此可见, 全球模式对东亚季风系统影响下的降水过程描述存在许多缺陷, 并因此造成模拟结果几乎完全失真。但是区域模式的模拟结果有了很大的改善, 模拟降水的大小和季节变化都与观测较为接近。只是长江中下游地区模拟降水的峰值出现在 6 月, 比观测提前 1 个月; 华南地区则出现两个降水小峰值, 分别在 4 月和 7 月; 华北地区模拟降水的峰值出现在 8 月。受模拟的较强季风环流影响, 秋季尤其是 9~10 月降水也比观测强。从整个区域平均结果看, 虽然受模式模拟的较强季风环流影响, 模拟降水的峰值与观测存在约 1 个月的时间差异, 但是模拟降水基本上反映了中国大陆东部地区季风降水的季节变化特征, 模拟与观测降水的偏差维持在 30%~50% 之间。

5 讨论

从上述模式的积分结果看, 区域模式不但给出了中国大陆东部地区温度分布的总体趋势, 而且刻划了由于海陆分布和地形非均匀性引起的详细的温度结构。由于地形高低差异引起的温度冷暖中心分布有清楚的反映。模拟与观测的温度误差在 2~5 °C 左右。

对区域模式降水模拟的结果分析表明, 总的说来中国大陆沿海地区和东部地势平坦地区降水模拟较好, 长江中下游地区模拟降水偏高, 在西北和华北地势起伏较大的地方, 降水模拟值显著偏高。分析造成上述现象的原因, 主要是由于在大尺度背景场的强迫下, 大量暖湿的西南气流从模式的西部和西南部进入模式区域内部, 为模式降水带来丰沛的水汽。在副热带高压和西风带系统的共同作用下, 形成长江中下游及其北部的降水过程。在地势起伏的山区, 地形的强迫抬升, 山地背风坡涡旋的发展以及山地重力波的加强都是触发不稳定能量释放的有效机制, 成为影响局地降水的重要因素。在区域模式的积分过程中, 不断受到大尺度边界场的强迫, 这种强迫对区域模式内部的积分结果有显著影响。我们知道在 CSIRO 的谱模式中, 垂直方向的涡旋输送强度取决于局地稳定度和对流调整, 缺乏深对流和边界层物理过程描述, 垂直输送因此比较微弱。它的直接后果是使边界层输送的大量水汽集中在对流层的底部, 加剧了地形引发的降水过程。因此在区域模式的积分过程中, 应当仔细考虑垂直方向的水汽输送和积云对流参数化方案, 尤其是在复杂地形区域, 对大气热含量及其输送, 包括云物理过程和云预报方案的粗糙处理, 都是造成模式结果不确定性的原因。

参 考 文 献

- and Simulation of Climate and Climate Change*, Part II, M. E. Schlesinger, Ed., Kluwer Academic Publishers, 1989, 841~879.
- 2 Thompson, S. L. and Pollard, D., A global climate model with a land surface transfer scheme, Part I: present climate simulation, *J. Climate*, 1995, **8**, 732~761.
 - 3 Athens, R. A. and T. Warner, Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other meteorological studies, *Mon. Wea. Rev.*, 1978, **106**, 1045~1078.
 - 4 Athens, R. A., E. Y. Hsie, and Y. K. Kuo, Description of the Penn State? NCAR Mesoscale Model version 4 (MM4), NCAR Tech. Note, NAAR / TN-282+STR, 1987, 66pp.
 - 5 Giorgi, F., Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Climate*, 1990, **3**, 941~963.
 - 6 Giorgi, F., G. T. Bates and M. R. Marinucci, Development of a second generation regional climate model, Part I: boundary layer and radiative transfer process, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**, 2794~2812.
 - 7 Dickinson, R. E., P. J. Kennedy, A. Henderson-Sellers and M. Wilson, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for NCAR Community Climate Model, Tech. Note, NCAR / TN-275, 1986.
 - 8 Watterson, I. G., Dix, M. R., Gordon, H. B., and McGregor, J. L., The CSIRO nine-level atmospheric general circulation model and its equilibrium present and doubled CO₂ climates, *Aust. Meteor. Mag.*, 1995, **44**, 111~125.

A Nest Procedure between Regional and Global Climate Model and Its Application in Long Term Climate Simulations

Chen Ming and Fu Congbin

*(Global Change System for Analysis, Research and Training Regional Center for Temperate East Asia,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)*

Abstract A regional climate model (RCM) is nested into CSIRO global circulation model (GCM) for long term climate simulations. Numerical experiments show that how to set buffer zone is important in the nest procedure between RCM and GCM. High resolution output from RCM must be consistent with GCM in the boundary layer, and at the same time RCM must be able to give the information based on its own physical processes. In this article, a RCM is nested into CSIRO-GCM and a continuous three-year climate simulation is finished. Model output shows that with high resolution and detailed description of land surface characteristics, RCM has improved the simulation in comparison with GCM, especially in the simulation of monsoon precipitation.

Key words: regional climate model; nest procedure; long term simulation