科学通报 2009 年 第 54 卷 第 18 期: 2826 ~ 2834
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

区域环境集成系统模式以及对我国夏季季风的模拟研究

熊喆, 符淙斌, 延晓冬

中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029
E-mail: xzh@tea.ac.cn

2009-06-30 收稿, 2009-09-04 接受
国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB400506, 2009CB421100)、国际科技合作项目(编号: 2006DFB919200)、中国科学院知识创新工程重要方向项目群(编号: KZCX2-YW-Q11-03)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目(编号: IAP07211)资助

摘要 重点介绍了中国科学院区域气候-环境重点实验室研制的区域环境集成系统模式 RIEMS 2.0, 以及利用该模式对东亚地区进行了 1979 年 1 月到 2000 年 12 月的长期积分试验, 重点考察了区域气候模式对东亚地区的夏季季风的模拟能力. 结果表明: (1) RIEMS 2.0 模式能够较好地模拟出夏季表面大气温度的空间分布以及不同区域温度的年变化; 同时模式模拟季平均和月表面大气温度与观测之间偏差大约一般在 1~2℃. (2) 对于降水来说, RIEMS 2.0 模式能够较好地模拟夏季降水的空间分布特征以及东亚地区雨带季节性演变, 同时 RIEMS 2.0 模式模拟的雨带演变较 RIEMS 1.0 更加接近观测. (3) RIEMS 2.0 模式能够模拟出大尺度环流背景场. 该研究表明区域环境集成系统模式能够较好地应用于我国区域夏季季风气候模拟研究工作.

关键词
区域环境集成系统模式 RIEMS 2.0
东亚夏季季风

区域气候变化的模拟是气候研究的优先领域之一, 它为气候变化的影响评估提供了区域尺度气候变化的详细信息[1]. 在地球系统科学联盟(ESSP)的研究框架中, 明确提出了全球变化区域集成研究的方向, 从而使得全球变化的区域研究进入了一个新的阶段. 特别是在 IPCC 2001 年第 3 次评估报告和 IPCC 2007 第 4 次评估报告区域气候变化越来越受到世界关注.

东亚地区为典型的季风区, 这里气候的主要特点是变率大, 包括季节、年际和年代际, 甚至世纪尺度的变化. 在季节尺度上, 夏季风降水是东亚地区年降水的主要部分, 而且主要是与天气尺度及中尺度天气系统相关联的暴雨有关, 而暴雨出现的位置和强度受到区域尺度的地形和下垫面状况的显著影响. 另外, 季风雨带的季节性北进并不是连续的渐变过程, 而是表现出阶段性的突变性跳跃[2].

虽然全球气候模式的发展研究已经取得了长足的进步, 它们对于几千公里尺度的大气环流和气候已有相当的模拟能力, 但是迄今为止, 它们在区域尺度上的模拟能力还比较低. 特别是对地面气候的模拟能力尚需大的提高. 其原因除了模式分辨率较粗, 不能很好地描述地形和地表的中尺度特征的影响之外, 它们对于区域气候有重要影响的区域尺度人类活动的贡献, 如工业气溶胶的排放和土地利用/土地覆盖变化等因子在模式中无法考虑, 东亚地区正是这类区域强迫最为明显的地区. 发展高分辨率的区域气候模式是获得区域气候变化信息并研究其变化机理的主要途径之一[3].

区域气候模式首先是美国大气研究中心的 Dickinson 等人[4]和 Giorgi 和 Bates[5]研究小组完成. 到目前为止, 区域气候模式已得到广泛应用, 不仅用于目前条件下的气候模拟、古气候模拟以及二氧化碳加倍等试验, 而且被成功地应用于许多不同地区, 如美国大陆、欧洲、东亚、澳大利亚以及非洲等地区. 已

引用格式: 熊喆, 符淙斌, 延晓冬. 区域环境集成系统模式以及对我国夏季季风的模拟研究. 科学通报, 2009, 54: 2826~2834
Xiong Z, Fu C B, Yan X D. Regional integrated environmental model system and its simulation of East Asia summer monsoon. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0669-2

有的一些研究表明，区域气候模式与 GCM 相比可以显著地改进对气候空间分布特征的模拟. 由观测场作为边界条件的区域气候模拟显示，区域(10^5~10^6 km^2) 平均温度的偏差小于 2℃，降水的误差小于 50%[1]. 在东亚，不少研究机构使用不同的区域气候模式对亚洲地区进行了气候模拟，结果表明: 大部分区域气候模式可以较好地模拟出亚洲季风雨带季节移动的主要特征.

中国科学院大气物理研究所东亚区域气候环境重点实验室暨全球变化东亚区域研究中心提出了“人类影响下亚洲季风系统变化的区域模拟”研究计划，在国家攀登计划和国家重点基础研究计划支持下于 20 世纪 90 年代初开始区域气候模式的发展和应用工作，并与南京大学大气科学系合作完成了区域环境系统集成模式(RIEMS 1.0)[6]的第一版本，经过初步检验和应用，该模式能够较好地模拟东亚区域气候的主要特征[7]. 目前在国家重点基础研究发展计划《我国生存环境与北方干旱化趋势预测研究》支持下建立了一个具有独立版权的区域环境系统集成模式(RIEMS 2.0)[8]，与 RIEMS 1.0 主要区别是将原来 RIEMS 1.0 动力框架由静力框架改为非静力框架，同时保留了 RIEMS 1.0 中辐射过程 CCM3 和陆面过程模式 BATS 1e，并在此基础上耦合了简化的化学模式和区域海洋模式 POM 以及植被大气相互作用陆面过程模式 AVIM. 本文重点将介绍中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室发展具有独立版权的区域集成环境系统模式 RIEMS 2.0 以及该模式对我国夏季季风模拟性能.

1 区域环境系统集成模式(RIEMS 2.0)简介

1.1 RIEMS 2.0 动力框架

区域环境集成系统模式采用美国气象研究中心和美国滨州大学发展中尺度模式 MM5 V3.6.1 的非静力动力框架[9].

1.2 辐射方案

RIEMS 2.0 使用 NCAR CCM3[10]的辐射方案. CCM3 中在长波参数化方案中，对于晴辐射加入少量的 CO_2 波段的痕量气体(CH_4, N_2O, CFC11, CFC12); 在短波参数化方案中，加入了气溶胶. 太阳辐射的计算考虑了 O_3, H_2O, CO_2 和 O_2 等气体的吸收和放射作用，遵循 δ-埃丁顿近似法. 它包括了 0.2~5 μm 之间 18 个波谱段. 长波辐射的计算考虑了 O_3, H_2O, CO_2 等气体及云的贡献. 对于云的散射和吸收，对于液态水滴云采用 Slingo[11]的辐射参数化方案，云作为灰体来处理.

1.3 陆面过程模型

RIEMS 2.0 模式中陆面过程方案包括 Dickinson 等人[12]描述的生物-大气传输方案(BATs 1e)和 Ji[13]植被大气相互作用模式 AVIM. 生物圈-大气圈输送方案是为了描述植被在改变地表动量、热量和水汽通量输送中的作用，而设计的一种陆面参数化过程. BATS 中包含了 18 种植被类型、12 种土壤纹理(由粗糙到细微)和不同的土壤颜色(由浅到深). 植被大气相互作用模式是 Ji[13]在简化一维地表过程模式的基础上加入了植被生理模块发展而来的，该模式包括陆表物理过程和植被生理学过程，使得大气对植被的影响和植被对大气的作用处于一个动态的相互作用过程.

1.4 积云对流参数化方案

RIEMS 2.0 模式中积云对流参数化方案包括(1) Kuo-Anthes 积云对流参数方案[14]; (2) Grell 积云对流参数方案[15]; 其中 Grell 积云对流参数化方案包括两个闭合假设方案: (1) Arakawa 和 Schubert 闭合方案[16]; (2) Fritsch-Chappell 闭合方案[17]，分别称作 AS74 和 FC80. 这两个闭合假设方案之间的基本差异在于 AS74 封闭假设中对流通量和降雨与大气状态的变化趋势有关，而 FC80 方案中对流通量和大气不稳定程度有关，但两个闭合方案在大尺度过程和对流之间都达到了静态平衡. 在 RIEMS 1.0 中 Grell 积云对流参数化方案只有 AS74 闭合假设方案.

1.5 海洋通量方案

RIEMS 2.0 模式包括两种海洋通量方案. (1) BATS 使用标准 Monin-Obukhov 近似关系计算通量，对于对流和非常稳定的条件没有特殊处理. 此外，粗糙程度设为常数，而不是风和稳定性的函数; (2) Zeng 等人[18]海洋通量方案. 该方案描述了所有稳定条件，并包括了一个阵风速度来计算边界层尺度变化产生的额外通量. 在 RIEMS 1.0 中只有前一种海洋通量方案.

1.6 侧边界方案

RIEMS 2.0 包括 Davies 和 Turner[19]的线性松弛、Giogri 等人[20]的指数松弛和 Liang 等人[21]的线性和指数相结合的侧边界方案. 在 RIEMS 1.0 中只有线性松

弛侧边界方案.

2 实验设计

模式模拟区域的网格中心位于(37°N, 105°E), 水平分辨率为 60 km, 模式的模拟网格点数为 87(经向)×75(纬向). 垂直方向为 16 层. 模式层顶气压为 50 hPa. 积分的时间为 1979 年的 1 月 1 日连续积分到 2000 年 12 月 31 日, 采用美国环境预报中心的分辨率为 2.5°×2.5°时间间隔为 6 h 的 NCEP 再分析资料II[22]作为 RIEMS 的驱动场来驱动 RIEMS 2.0 模式. 采用指数松弛侧边界方案, 缓冲区的大小为 10 层. 陆面过程采用生物-大气传输方案, 积云对流参数化方案采用 FC80 闭合方案的 Grell 参数化方案. 模式中地形和植被数据来自于美国地质调查局(USGS)高分辨率的数据, 其水平分辨率为 0.0833°×0.0833°. 初始的雪深设定为 0, 初始的每个格点的土壤湿度依赖于植被类型和土壤类型.

用于模式检验的资料包括: (1) 中国地区 700 个观测站点的日平均表面大气温度和日降水量; (2) 水平分辨率为 0.5°×0.5°的亚洲地区日降水[23]和全球月平均大气温度资料[24]. 对于观测站点的资料采用 cressman 插值方法插值到模式格点上, 对于网格资料采用双线型插值到模式网格上. 对于没有观测数据的格点采用网格资料插值得到的数据代替, 最终形成观测月降水和温度. 尽管模式模拟的区域范围包括中国、朝鲜半岛和日本等, 但本文分析的重点放中国不同区域. 为了方便, 将中国分为 7 个区域: (1) 华北地区, (2) 华中北部地区, (3) 华北南部地, (4) 西部干旱半干旱地区, (5) 西北地区, (6) 华中, (7) 华南[7].

3 模拟结果分析

3.1 多年平均大尺度环流

图 1 为多年夏季平均 200 hPa 纬向风场的空间分布. 从观测图上可以清楚的看到在 35°~45°N 之间西风急流, 平均急流轴位于 40°N 地区, 即从我国新疆, 经河西走廊、河套、晋、冀北部, 然后从渤海东部途径朝鲜入海至日本海. RIEMS 2.0 模式基本上能够模拟出 200 hPa 夏季的西风急流的位置, 特别是等风速线的范围与 NCEP 再分析资料非常一致, 但只是 RIEMS 2.0 模拟出的西风急流强度为 30 m/s 的范围偏小. 模式模拟与观测空间相关系数为 0.989.

图 2 给出了多年(1979~2000 年)平均夏季平均 500 hPa 位势高度场. 从观测图上可以清楚的看到在

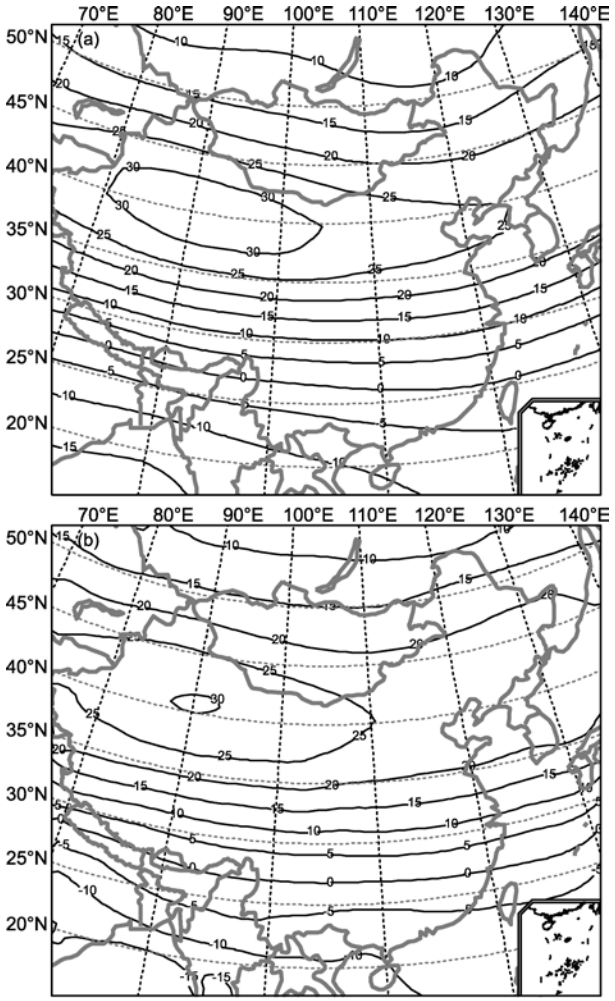

图 1 1979~2000 年平均夏季平均 200 hPa 纬向风场

(a) NCEP; (b) RIEMS 2.0. 单位: m/s

模拟区域范围内包含东压大槽和西太平洋副热带高压. 西太平洋副热带高压脊线位于 24°~25°N 之间, 中纬度东亚大槽槽线从东北西部向西南一直延伸到我国西南地区. RIEMS 2.0 模式能够较好地模拟出 500 hPa 夏季平均位势高度场, 并且空间相关系数为 0.993. 但在孟加拉湾、华中、华南以及西太平洋地区模式模拟的位势高度较观测偏强, 大约为 10~20 gpm, 对于东北北部、新疆以及内蒙古西部大部分地区模式模拟的位势高度较观测偏小, 大约–10~20 gpm.

图 3 为多年平均夏季平均 850 hpa 风场和比湿的空间分布. 从观测图上可以西风气流在青藏高原西端分为两支, 其中一支位于高原西北部的西南气流, 途径我国新疆北部以后形成西南气流, 在风场图上, 可以清楚地看到在模拟控制区的北部有一个反气旋;

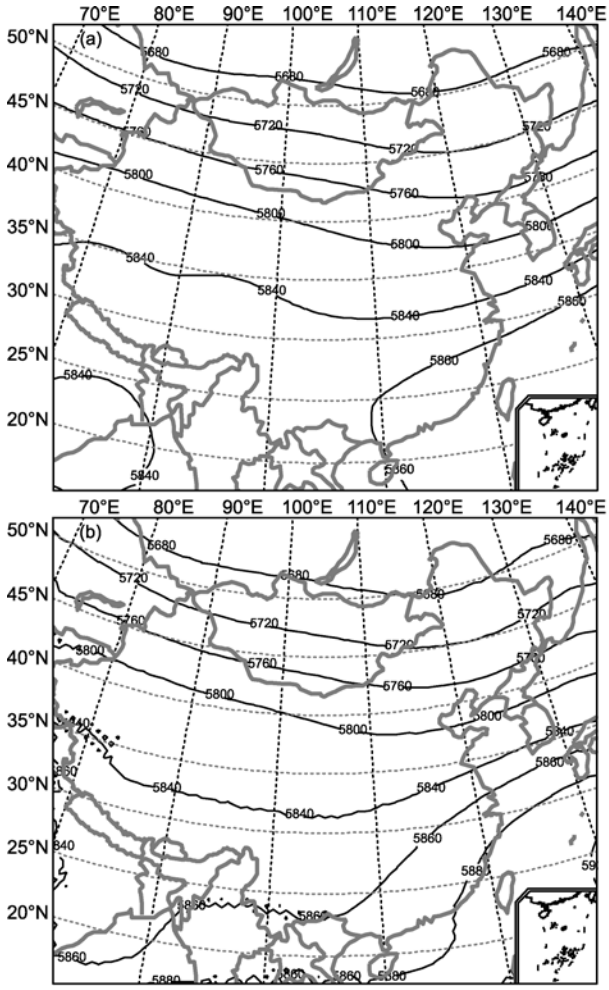

图 2　1979~2000 年平均夏季平均 500 hPa 位势高度场

(a) NCEP; (b) RIEMS 2.0. 单位: gpm

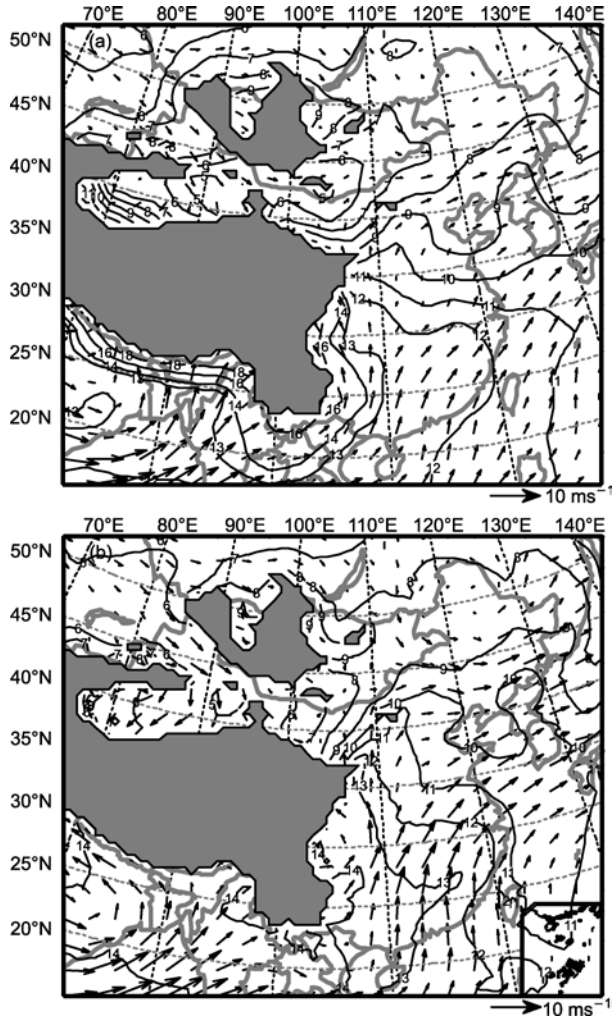

图 3　850 hPa 风场和比湿的空间分布

(a) NCEP; (b) RIEMS 2.0. 其中等值线为比湿(单位: g/kg), 箭头为风场, 阴影部分为地形高度超过 1500 m 的区域

同时由于新疆吐鲁番盆地特殊地形造成在吐鲁番盆地出现反气旋的弯曲; 在高原南侧之后形成西南气流, 在孟加拉湾附近存在气旋弯曲, 然后经我国的西南地区向东, 在长江流域与北气流汇合; 同时在西太平洋地区有一个反气旋. 该反气旋与地面上太平洋副热带高压相对应. RIEMS 2.0 模拟基本上能够模拟出流场的空间分布, 但是 RIEMS 2.0 模式模拟副热带高压风速较观测偏强, 说明模式模拟副热带高压较观测偏强. 从比湿场来看水汽场由南向北方向递减, 比湿大值区位于孟加拉湾和长江以南大部分地区, 大量的水汽沿气流的方向进行输送, 最后形成水汽输送带, 干的区域主要出现在副热带高压下沉区以及中纬度的低压槽的后部. RIEMS 2.0 模式在陆地大部分地区模拟的偏湿, 大约为 0.2~1.5 g/kg, 而在海洋上模拟的偏干, 大约 0.2~0.6 g/kg. RIEMS 2.0 模式模拟能够较好的模拟出夏季水汽空间分布, 但模拟在东北和华北地区模拟的水汽较观测偏多, 这可能是导致在我国北方夏季模拟降水较观测偏多原因之一.

模式能够合理的模拟出大气的垂直结构(图 4). 图 4 给出多年夏季区域平均垂直纬向风、温度和比湿廓线模拟与观测之间的偏差. 对于纬向风速来说, 无论是陆地还是海洋上空, 在低层模式模拟的西风偏强, 而在高层模式模拟的西风偏弱, 与观测偏差大约在–2.3~1.58 m/s, 海洋上比陆地上的偏差小. 对于温度来说, 在对流层中低层模式模拟的温度偏冷, 而在高层模式模拟偏暖. 无论是高层还是低层, 温度偏差在大约在–1.02~1.59℃; 对于比湿来说, 除在海

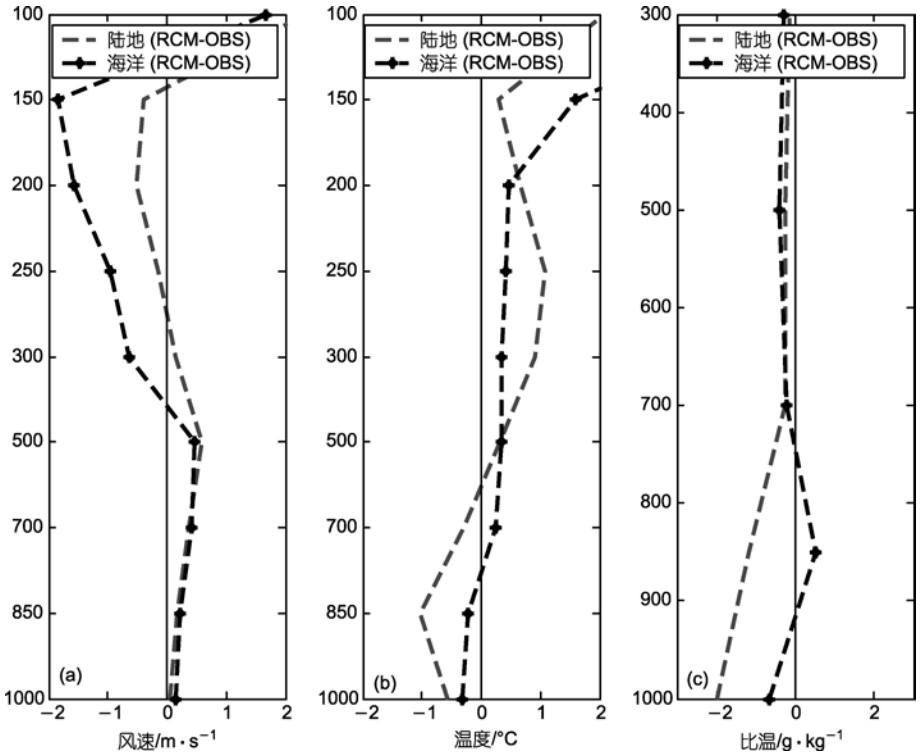

图 4 多年夏季平均区域平均垂直纬向风、温度和比湿廓线模拟与观测之间的偏差

洋上 700 hPa 模式模拟的水汽较观测偏多外，模式在对流层中低层模式的水汽较观测偏少，偏差大约在 –1.97~0.13 g/kg 之间. 模式模拟的温度偏冷和偏干可能的原因有两个: 一个是次网格积云对流参数化. 一些研究表明，一些积云对流参数化方案由于在下沉气流参数化过程出现不确定可能造成对流层的低层偏冷和偏干[20]; 另外一个原因可能是用于驱动区域气候模式的驱动场的不确定性以及与云、辐射、陆面过程相关的物理参数化过程的不确定性造成的. RIEMS 2.0 出现的偏差在其他的区域气候模式中也存在[25~27].

总之, RIEMS 2.0 模式比 RIEMS 1.0 模式模拟大尺度环流场更加接近观测，其主要的原因是 RIEMS 2.0 模式采用了非静力平衡动力框架方案. 该方案的引入使得模式模拟地面气压和温度和水汽输送的计算较 RIEMS 1.0 更加合理并接近观测值，从而导致 RIEMS 2.0 模式模拟控制我国夏季降水的副热带高压和大气的垂直结构更加合理，特别是对流层低层流场和水汽输送强度和位置更加接近观测.

3.2 多年平均夏季平均 2 m 气温和降水

图 5 为多年夏季平均 2 m 气温的空间分布. 从观测图上可以看出等温线趋向纬向分布，温度由南向北递减，同时存在一个低温中心和两个高温中心，其中低温中心位于青藏高原附近，两个高温中心分别位于天山南麓的吐鲁番盆地和长江流域以南的地区. RIEMS 2.0 模式能够较好模拟出夏季平均 2 m 气温的空间分布，但是模式的温度普遍偏低，大约为 1~2℃. 该结果与 IPCC 2001 年报告结果由观测场作为边界条件的区域气候模拟显示，区域(10^5~10^6 km^2)平均温度的偏差小于 2℃比较一致，同时该结果与李巧萍等人[28]及廉丽姝等人[29]采用 RegCM 来研究我国区域气候出现的结果相似. 对于不同区域来说，除华北北部地区温度偏差在–2.08℃以外，模式模拟的温度偏差在–1.43~1.75℃，都在 2℃范围内; 对于均方根误差来说，模拟与观测之间的均方根误差在 1.73~3.69 范围内，西北地区最大，达到 3.69，华南地区最小，为 1.73; 对于不同区域来说，模式模拟与观测的夏季平均 2 m 气温空间相关系数为 0.79~0.90(见表 1).

图 6 为多年平均夏季降水的空间分布. 从观测图上可以清楚发现降水从东南向西北方向递减，降水主要集中在长江以南大部分地区，西北地区降水量较小. RIEMS 2.0 能够好模拟出降水的空间分布，但

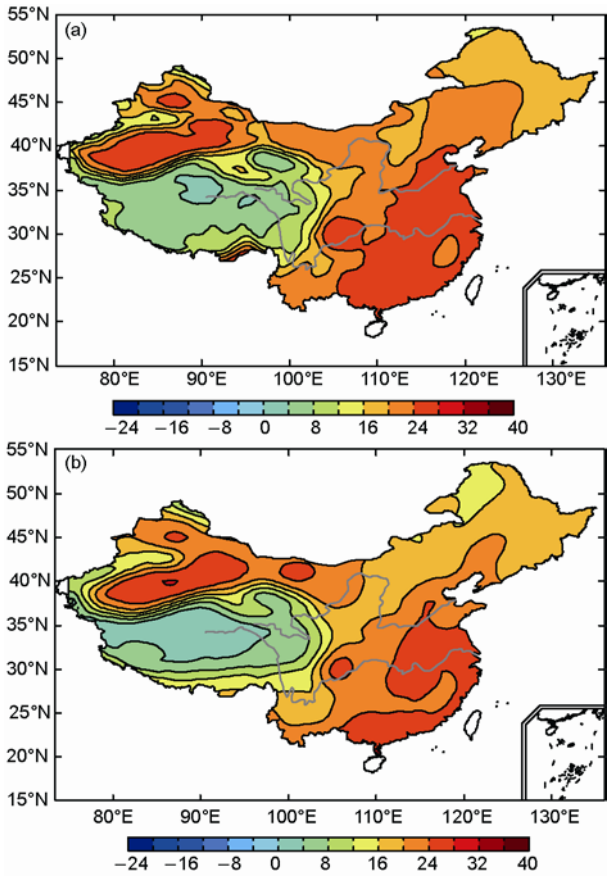

图 5　1979~2000 年夏季平均 2 m 气温的空间分布

(a) 观测; (b) RIEMS 2.0. 单位: ℃

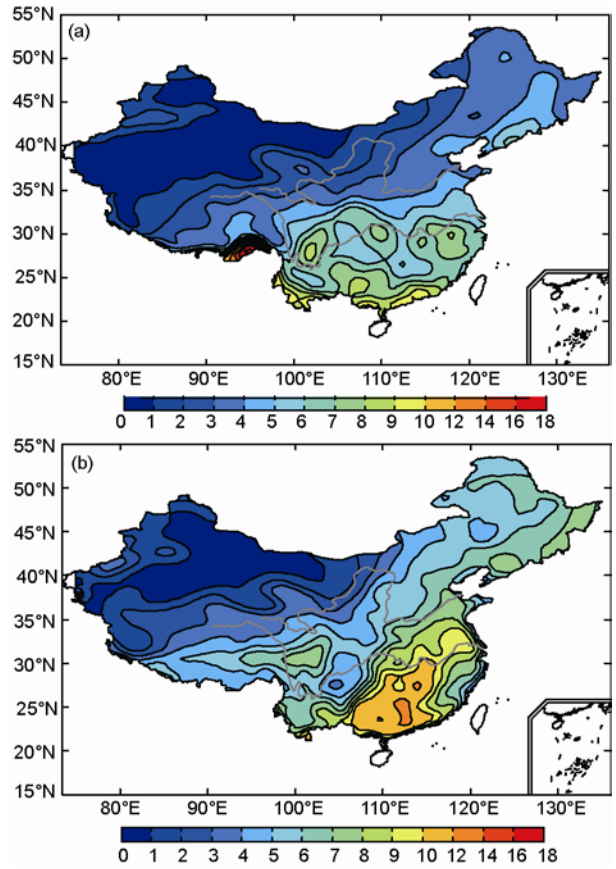

图 6　1979~2000 年平均夏季平均降水的空间分布

(a) 观测; (b) RIEMS 2.0. 单位: mm/d

表 1　不同区域夏季平均 2 m 气温偏差、均方根误差以及空间相关系数

变量	1	2	3	4	5	6	7
偏差/℃	−1.34	−2.08	−1.75	−0.09	0.03	−1.43	−0.72
均方根误差/℃	1.75	2.47	1.98	1.83	3.69	1.97	1.73
相关系数	0.79	0.83	0.83	0.90	0.89	0.87	0.89

对于我国北方大部分地区模式模拟降水较观测偏多, 大约在 50%~87%左右, 而我国北方大部分地区模式模拟降水较观测偏多, 但降水偏差在 30%左右, 这与 IPCC 2001 年在区域(10^5~10^6 km^2)尺度上降水的偏差在 0~50%一致. 对于不同区域来说, 模式模拟与观测之间的均方根误差范围在 0.91~3.62 mm/d, 其中均方根误差最大的地区为华南地区, 而最小的地区为西北地区. 对于空间相关来说, 模式模拟与观测夏季降水相关系数在 0.19~0.89 之间, 华南地区相关系数最小, 为 0.19, 而空间相关系数最高的地区为西部干旱半干旱地区, 相关系数达到 0.89. 对华中地区、华南地区来说, RIEMS 1.0 模拟的夏季降水与观测之间空间相关系数分别为–0.17, –0.37[28], 而 RIEMS 2.0 模拟的夏季降水与观测之间空间相关系数分别为 0.43 和 0.19[28](表 2). 总之, RIEMS 2.0 模式模拟夏季降水空间相关系数比 RIEMS 1.0 有非常大的提高, 并且 RIEMS 2.0 模式比 RIEMS 1.0 模式模拟夏季降水的空间分布更加接近观测, 特别是在模拟我国夏季降水方面避免出现了雨带偏北、华中和华南地区降水与观测偏差非常大的现象, 这与 RIEMS 2.0 模式中耦合了新的海洋通量方案引入有关. 由于 RIEMS 2.0 模式耦合了新的海洋通量方案后实现了海洋与大气之间的相互作用, 从而改变了海洋与大气之间的热量和动量的交换, 引起大气环流场和水汽输送的变化, 导致北方地区降水减少, 南方地区的降水增加, 最终使得 RIEMS 2.0 模式比 RIEMS 1.0 模式模拟的夏季降水的空间分布更加接近观测.

RIEMS 2.0 模式能够较好地模拟出不同区域月降水的年变化(图略), 特别是模式能够较好地模拟出东北、华北北部、华北南部地区, 西北干旱半干旱地

表 2 不同区域夏季区域降水偏差、均方根误差以及空间相关系数

变量	1	2	3	4	5	6	7
偏差/%	63.0%	87.1%	74.7%	50.5%	52.1%	27.8%	28.2%
均方根误差/mm·d^{-1}	2.62	2.61	3.01	1.32	0.91	3.19	3.62
空间相关系数	0.58	0.77	0.35	0.89	0.64	0.43	0.19

区、华中、华南地区降水最大值与观测较为一致，对于西北地区，RIEMS 2.0 模式降水最大出现在 6 月，而观测最大值出现在 7 月. 对于降水强度来说，对于我国大部地区大多月份来说模式的降水较观测偏强，对于华中地区来说，RIEMS 2.0 模式在 1~5 月之间模拟的降水非常接近观测值，对于 6~9 月模式模拟降水较观测偏多，而 10~12 月模拟的降水较观测偏少. 对于华南地区，RIEMS 2.0 能够较好的模拟观测出现的两个峰值，而在 1~5 月和 10~12 月模式模拟的降水较观测偏少，而 6~9 月模式模拟的降水偏多.

图 7 为多年平均观测和区域气候模式模拟的 110°~120°E 平均 5~9 月份的候平均降水随纬度和时间的分布. 从观测的结果来看，自 5 月中旬左右雨带在华南沿海出现，一直到 6 月 10~24 日左右还在南岭以南摆动，此时降水雨带位于 21°~24°N 左右，但此后雨带突然迅速北移，跳跃到 27°~30°N，即长江中下游地区，梅雨季节由此开始；一直到 7 月 10~14 日，雨带离开江淮地区，第二次向北跃进，到达 35°N 左右，即华北；大约在 7 月下旬，雨带到达最北位置；8 月下旬，由于亚洲内陆冷空气南下，雨带即迅速南撤，不到一个月时间就已经撤离大陆；此后，只有台风活动时，才不时给华南沿海带来降水，这样形成了我国东南季风雨带移动规律，即雨带北上过程中出现 3 次停滞和 2 次飞跃. 3 次停滞出现在华南、江淮、华北，3 次停滞之间出现 2 次飞跃，即从华南到长江中下游和从江淮到华北[30]. 从模式模拟的结果来看，5 月到 6 月上旬雨带位于 22°~25°N，即长江中下游地区，到 6 月下旬雨带明显北跳，到达 26°~28°N，并且一直持续到 7 月上中旬，到 8 月雨带明显南撤，主要集中在我国华南地区，这与观测比较一致. 从观测和模式模拟的比较分析看，区域模式能够较好地模拟季风区雨带季节性的移动特征，但对于 5~9 月份来说，模式模拟的雨强度偏小，对于 8 月中下旬位于 31°N 大的降水中心模式没有模拟出来，同时对于 9 月来说，模式在 30°N 附近模拟出一个虚假的大降水中心.

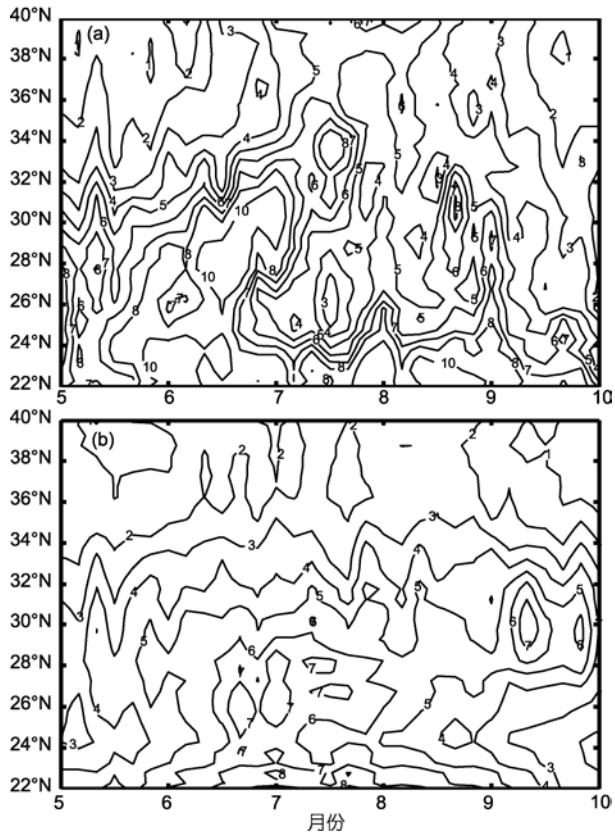

图 7 110°~120°E 平均 5~8 月候平均降水随纬度和时间的分布

(a) 观测; (b) RIEMS 2.0. 单位: mm/d

4 结论与讨论

本文主要考察中国科学院区域气候-环境重点实验室研制的区域环境集成系统模式对东亚夏季季风环流、表面大气温度、降水和雨带季节性的演变进行研究. 通过以上分析和比较可以得出以下结论: (1) RIEMS 2.0 模式能够较好的模拟出不同季节温度的空间分布以及不同区域温度的年变化；同时模式模拟季平均和月表面大气温度与观测之间偏差一般在 1~2℃，这与 IPCC(2001)报告中报告的在区域尺度 10^5~ 10^6 km，温度偏差在 1~2℃较为一致. (2) 对于降水来说，RIEMS 模式能够较好地模拟夏季降水的空间分布特征，同时，模式能够较好地模拟不同区域降水的年变化. 同时，模式能够较好地模拟雨带的季节性移动，但 RIEMS 2.0 模式模拟的的雨带演变较 RIEMS 1.0 更加接近观测. (3) RIEMS 2.0 模式能够模拟出大尺度环流，如 200 hPa 西风急流、500 hPa 位势高度场和 850 hPa 水汽输送场.

由于RIEMS 2.0模式采用非静力平衡框架，使得模式模拟地面气压和温度和水汽输送的计算在大尺度环流更加合理并接近观测；耦合区域海洋模式的RIEMS 2.0模式通过一些敏感实验发现，区域海洋模式的耦合将改变了海洋与大气之间的热量和动量的交换，引起大气环流场和水汽输送的变化，导致北方地区降水减少，南方地区的降水增加，从而使得RIEMS 2.0模式比RIEMS 1.0模式模拟的夏季降水的空间分布更加接近观观测；植被大气相互作用的陆面过程模式考虑植被生长过程和叶面积指数的季节变化，植被的叶面积指数的变化影响地表反照率的变化，而反照率的变化将影响地表能量平衡，从而影响大气中能量的收支，最终引起大气环流的影响，将植被大气相互作用的陆面过程模式耦合到 RIEMS 2.0 后将实现了植被和大气之间的相互作用，从而将区域环境集成系统模式对夏季我国东部气温偏高现象以及中国雨带偏强的现象有所改进[31]；考虑沙尘、硫酸盐、海盐、黑碳以及有机碳等5种气溶胶的辐化学模式射效应耦合 RIEMS 2.0 模式，将直接影响RIEMS 2.0 模式中大气的长波辐射和短波辐射以及光学厚度，从而影响大气和地表能量平衡，因而影响地面温度和降水的影响. 总之，RIEMS 2.0模式耦合化学模式和区域海洋模式以及植被大气相互作用陆面模式模式后不仅仅能够对夏季我国气温偏高现象和雨带位置分布以及大尺度环流的模拟较 RIEMS 1.0 模式有非常大的改进和提高，而且还能够对合理地模拟出陆面物理过程和生物过程以及评估气溶胶的辐射效应. 尽管RIEMS 2.0模式比RIEMS 1.0模式对我国夏季降水和温度以及大气环流的模拟更加合理，但RIEMS 2.0模式在模拟过程中出现温度偏低和降水模拟的偏多现象，这可能与积云对流参数化有关，这方面工作有待进一步研究.

参考文献

1 Houghton J T, Ding Y H, Griggs D G, et al. IPCC 2001, Climate Change. The Science Basis, Contribution of Working Group Ⅰ to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2001

2 符淙斌, 王淑瑜, 熊喆, 等. 亚洲区域气候模式比较计划的进展. 气候与环境研究, 2004, 9: 225—239

3 Houghton J T, Meira Fiblbo L G, Callander B A, et al. IPCC, Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1995

4 Dickinson R E, Errico M, Giorgi F, et al. A regional climate model for the western USA. Clim Change, 1989, 15: 383—422

5 Giorgi F, Bates G T. The climatological skill of a regional model over complex terrain. Mon Weather Rev, 1989, 117: 2325—2347[doi]

6 Fu C B, Wei H L, Qian Y. Documentation on Regional Integrated Environmental Model System (RIEMS, Version 1.0). TEACOM Science Report, No, 1, START Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China. 2000

7 Xiong Z, Fu C B, Zhang Q. On the ability of the regional climate model RIEMS to simulate the present climate over Asia. Adv Atmos Sci, 2006, 3: 784—791[doi]

8 Xiong Z, Fu C B, Yan X D. Documentation on Regional Integrated Environmental Model System (RIEMS Version 2.0). TEACOM Science Report, No, 1, START Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China, 2006

9 Grell G A, Dudhia B A, Stauffer D R. Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model(MM5). Technical Report, TN-398+STR, NCAR Boulder Colorado. 1994

10 Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. Description of the NCAR community climate model (CCM3). Technical Report, NCAR/TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research. 1996

11 Slingo J M. A gcm parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds. J Atmos Sci, 1989, 46: 1419—1427[doi]

12 Dickinson R E, Henderson-Sellers A. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Technical Report, NCAR/TN-387+STR. 1993

13 Ji J J. A climate Vegetation interaction model: Simulating physical and biological process at the surface. J Biogeogr, 1995, 22: 445—451[doi]

14 Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. Mon Weather Rev, 1977, 117: 1423—1438

15 Grell G. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. Mon Weather Rev, 1993, 121: 764—787 [doi]

16 Giorgi F, Marinucci M R. Validation of a regional atmospheric model over Europe: Sensitivity of wintertime and summertime simulation to selected physics parameterizations and lower boundary conditions. Quart J Roy Meteorol Soc, 1991, 117: 1171—1206

17 Fritsch J M, Chappell C F. Numberical prediction of convectively driven mesoscale pressure system. Part Ⅰ: Convective parameterization. J Atmos Sci,r 1980, 37: 1722—1733[doi]
18 Zeng X B, Dickinson R E. Intercomparsion of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using to TOGA COARE and TAO data. J Clim, 1998, 11: 2628—2644[doi]
19 Davies H C, Turner R E. Updating prediction models by dynamical relaxation: An examination of the the technique. Quart J Roy Meteorol Soc, 1977, 103: 225—245[doi]
20 Giorgi F, Marinucci M R, DeCanio G. Development of a second-generation regional climate model(RegCM2). Part Ⅱ: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. Mon Weather Rev, 1993, 121: 2814—2832 [doi]
21 Liang X Z, Kunkel K E, Samel A N. Development of a regional climate model for U.S. Midwest application. Part Ⅰ: Sensitivity to buffer zone treatment. J Clim, 2001, 14: 4363—4378[doi]
22 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project. Bull Amer Meteorol Soc, 1996, 76: 437—472[doi]
23 Xie P P, Arkin P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observation, satellite estimates, and numerical model output. Bull Amer Meteorol Soc, 1997, 78: 2539—2558 [doi]
24 New M, Hulme M, Jones P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part Ⅱ: Development of 1901—1996 monthly grids of terrestrial surface climate. J Clim, 2000, 13: 2217—2238[doi]
25 Leung L R, Ghan S J, Zhao Z C, et al. Inter-comparison of regional climate simulations of the 1991 summer monsoon in east Asia. J Geophys Res, 1999, 104: 6425—6454[doi]
26 Sasaki H Y, Sato Y, Adachi K, et al. Performance and evaluation of the MRI regional climate model with the spectral boundary coupling method. J Meteorol Soc Jpn, 2000, 78: 477—489
27 Wang W C, Gong W, Wei H. A regional model simulation of the 1991 severe precipitation over the Yangtze-Huai River valley. Part I: Precipitation and circulation statistics. J Clim, 2000, 13: 74—92[doi]
28 李巧萍, 丁一汇. 区域气候模式对东亚季风和中国降水的多年模拟与性能检验. 气象学报, 2004, 62: 140—143
29 廉丽姝, 束炯. 区域气候对我国中、东部夏季气候的数值模拟. 热带气象学报, 2007, 23: 162—170
30 Ding Y H. Summer monsoon rainfall in China. J Meteorol Soc Jpn, 1991, 70: 243—266
31 高荣. 动态植被过程对区域气候影响的数值模拟的研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2006. 1—139