

两种积云对流参数化方案对 1998 年区域气候 季节变化模拟的影响研究

胡轶佳¹ 钟中¹ 闵锦忠²

¹ 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

² 江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044

摘 要 利用区域气候模式 RegCM3, 选择 Kuo-Anthes 积云对流参数化方案和基于 FC80 假设的 Grell 积云对流参数化方案, 对 1998 年东亚气候分别进行年尺度模拟, 模拟结果对比分析表明: 在春、夏季转换时期, 两者模拟的降水形势差别较大, 对江淮、中南和华南地区的夏季降水量模拟差别最为明显。对流层上层模式变量和模式大气质量对积云对流参数化方案的选择不敏感, 而对流层中、下层模式变量对积云对流参数化方案比较敏感。不同积云对流参数化方案对 8 天时间尺度的天气系统模拟差别比较大。在积云对流比较活跃的夏季, 不同参数化方案会导致模式大气出现不同的系统性偏差。由于模式在陡峭地形处动力过程计算方案存在缺陷, 在高原与盆地的交界处, 模式误差会产生明显的突变。

关键词 区域气候模式 积云对流参数化方案 小波分解 系统性偏差

文章编号 1006-9895 (2008) 01-0090-11

中图分类号 P463

文献标识码 A

Impacts of Cumulus Parameterization Scheme on the Seasonal Variation Simulation of Regional Climate in 1998

HU Yi-Jia¹, ZHONG Zhong¹, and MIN Jin-Zhong²

¹ Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing 210044

Abstract Cumulus convection is one of the primary physical processes influencing the transportation and distribution of energy and mass in the atmosphere, and it is also the most difficult process represented in numerical models. Due to the different strategies employed in different cumulus parameterization schemes (CPS), the obtained simulation results are considerably sensitive to the adopted CPS.

In this paper, using the regional climate model RegCM3, an annual scale simulation is performed over East Asia for 1998 with the Kuo-Anthes CPS (EKuo) and the Grell CPS based on the Fritsch-Chappell assumption (EGrell). The impact of the employed CPS on seasonal variation simulations is analyzed.

The comparative analysis between the precipitations simulated with EKuo and EGrell and obtained from CRU shows that the temporal and spatial features of precipitation distribution can be reproduced well using the Kuo-Anthes or Grell schemes. However, the sensitivity of the precipitation simulation to the employed CPS is more distinct in spring and summer than in autumn and winter, and the most significant distinction appears in April and May. In autumn and winter, when cumulus convection is not active, essentially similar precipitation scenarios are obtained; this is also true over Southwest and North China for all seasons. However, the precipitation scenarios are different

over the Changjiang River – Huaihe River basin, South Central China, and South China in summer, and the precipitation simulation over South China is most sensitive to the employed CPS.

The temporal variation characteristics of the regionally averaged biases of the daily meteorological variables simulated with EKuo and EGrell show that the variables in the upper troposphere and the surface pressure are independent of the employed CPS basically, whereas the variables in the lower troposphere are sensitive to the used CPS. However, there is no essential difference between the simulated regional atmospheric circulations. By applying the db5 wavelet decomposition method to the simulated temperature biases for EKuo and EGrell, it can be seen that in addition to the lower-frequency climatic difference during the period of active cumulus convection, the synoptic-scale perturbation with 8-day period is also sensitive to the employed CPS.

Finally, the systematic error in the model is also discussed for the simulation conducted in summer. This discussion suggests that different systematic errors appear for the simulations performed by employing different CPSs during the period of active cumulus convection. Due to the error in the calculation scheme for the dynamic process over the area with a steep terrain, abrupt changes appear in the conjoint area between the Tibetan Plateau and the basin.

Key words regional climate model, cumulus parameterization scheme, wavelet decomposition, systematic error

1 引言

积云对流是影响大气能量、质量输送和分布,并对降水过程有直接影响的重要物理过程,它对大气环流和气候变化也有十分重要的影响,是气候模式中最难以描述的物理过程之一。由于不同参数化方案反映的作用机制不同,相应的反馈机制也不同,导致降水、大气环流模拟结果存在一定的差异。Donner 等^[1]、Kuo 等^[2]和平凡等^[3]用气候模式研究了不同的积云对流参数化方案对 2~3 个月时间尺度气候模拟的影响。他们指出:不同积云对流参数化方案对平均水平风场、平均经圈环流、低纬降水、加热场、500 hPa 高度场、海平面气压场等的模拟效果差别均较大。王安宁等^[4]利用全球模式比较了 Manabe 方案、Kuo 方案和 Arakawa-schubert 方案的模拟结果,认为降水的模拟差异最大,特别是夏季,Kuo 方案模拟的东亚季风降水结果相对较好。

区域气候模式对积云对流参数化方案的选择同样敏感,符淙斌等^[5]对我国东部季风雨带演变所作的模拟试验表明:区域气候模式基本上能刻画夏季雨带的主要位置和它的演变特征,但模拟与观测之间的关系还很不稳定,存在的问题之一是区域气候模式中所采用的积云对流参数化方案还不能真实地刻画实际的大气过程以及积云对流和大尺度环流通过网格和次网格尺度运动的相互作用。潘劲松等^[6]比较了 NCAR 区域气候模式 RegCM2 中不同积云

对流参数化方案的影响,结果也表明不同的积云对流参数化方案对降水的模拟存在显著差异。刘永强等^[7, 8]指出区域气候模式对降水模拟的不足,可能与采用的积云对流参数化方案有关,例如对 1991 年夏季的模拟中,Grell 方案模拟的降水量一般比观测值大,而 Kuo 方案一般偏小。Martínez-Castro 等^[9]用 RegCM3 中的 Kuo 方案和基于两种假设的 Grell 方案对加勒比海地区的夏季气候进行敏感性试验,发现不同的积云对流参数化方案模拟的温度和降水具有不同的系统性偏差。

目前,国际上广为使用的区域气候模式是意大利国际理论物理中心 (ICTP) 发展的 RegCM3,其中已加入了多种可供选择使用的积云对流参数化方案,包括 Kuo-Anthes 方案^[10]、Grell 方案、Betts-Miller 方案^[11]和 Emanuel 方案^[12],其中 Grell 方案中还包括两种可以选择的假设,一种是 Fritsch 和 Chappell^[13]在 1980 年提出的(简称 FC80),另一种是 Arakawa 和 Schubert^[14]在 1974 年提出的(简称 AS74)。前人在区域气候模式对积云对流参数化方案敏感性方面的研究基本上都是对季节以下时间尺度个例进行模拟结果对比分析的,对积云对流参数化方案影响模式大气内部物理振荡过程的特征没有开展深入研究。本文以 1998 年为例,分别采用常用的 Kuo-Anthes 方案和基于 FC80 假设的 Grell 方案进行东亚区域气候年尺度模拟,通过对模拟结果进行小波分解的方法,详细揭示区域气候模式对积云对流参数化方案在季节变化过程模拟中的敏感性

及其不确定性的可能原因,并分析了模式的系统性误差。

2 试验方案设计

2.1 模式简介

本文采用的模式是 ICTP 发展的最新版本区域气候模式 RegCM3,其动力内核主要采用静力平衡版本的中尺度模式 MM5,垂直坐标采用 σ 坐标系。为减少陡峭地形附近的水平辐散,加入了可分离显式时间差分方案,使其动力内核更接近非静力版本的 MM5。积云参数化有多种方案可选择,侧边界条件采用时变的指数松弛方案,模式可由全球再分析资料驱动,也可与全球模式耦合运行。边界层方案采用非局地的 Holtslag 方案。为计算地表潜热、感热和动量通量,采用最新版本的陆面-大气传输模式 BATS1E。

RegCM3 的改进主要有:(1)用最新版本的 CCM3 辐射方案代替原有的 CCM2;(2)传统的显式水汽方案被其更经济简化的版本代替;(3)增加了一些物理过程的新计算方案,如用于计算云中次网格尺度变量的云、降水方案,新的海表面通量参数化方案,Betts-Miller 和 Emanuel 积云对流参数化方案;(4)采用新的参数化方案来描述次网格尺度的地形和土地利用类型的应用;(5)用 USGS 的全球陆地覆盖特征和全球 $30'$ 高度资料创建模式地形,使模式能更精确地表示出下垫面的状况;(6)在模式中增加了新的脚本,并对模式的输入、输出界面进行改进,使模式更易于运行和调试。

2.2 试验方案设计

模式水平分辨率取 60 km ,水平格点数取 64×64 ,垂直方向分 18 层,模式区域中心位于 $(30^\circ\text{N}, 112^\circ\text{E})$,模式层顶气压为 50 hPa ,积分时间步长 200 s 。在模式区域内选择 5 个有代表性的气候区(图 1),即 I: 华北地区、II: 江淮地区、III: 中南地区、IV: 华南地区、V: 西南地区。模式侧边界采用指数张弛时变边界方案,侧边界缓冲区选为 10 圈,初始和边界条件由 NCEP/NCAR 再分析资料提供,侧边界条件每 6 小时更换一次。海洋通量参数化方案选择 Zeng 方案^[15],海温资料来源于英国 Hadley 中心的 GISST 海温资料,每月更新一次。共做了两个试验,分别选择 Kuo-Anthes 和基于 FC80 假设的 Grell 积云对流参数化方案,进行从

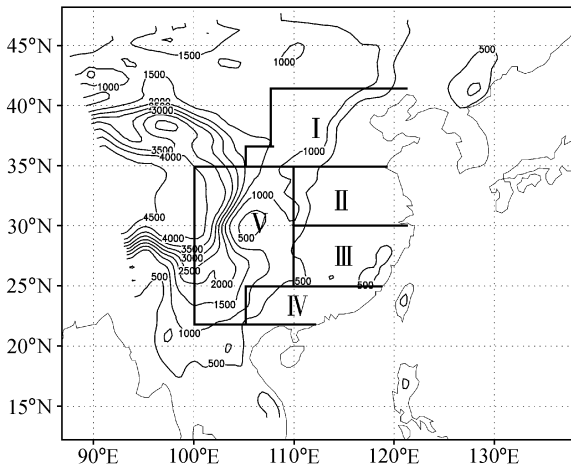


图 1 模式区域的地形高度(单位: m)和分区位置。I: 华北地区; II: 江淮地区; III: 中南地区; IV: 华南地区; V: 西南地区
Fig. 1 Topography height (m) in the model domain and climatic sub-regions in China. I: North China; II: Changjiang River-Huaihe River basin; III: South Central China; IV: South China; V: Southwest China

1998 年 1 月 1 日 00 时积分到 12 月 31 日 18 时的年尺度模拟,简记为试验 EKuo 和试验 EGrell。

3 模拟结果分析

3.1 降水

本文采用分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的 CRU^[16] 全球月平均降水资料作为观测资料,将其插值到模式区域网格上与 EKuo 和 EGrell 试验模拟的月平均降水进行对比分析。

图 2 为逐月降水模拟场与观测场的相关系数以及模拟场之间的相关系数随时间演变图,从图中可以看出,两个试验模拟的各月降水场与观测场之间的相关系数都在 0.2 以上,各月的相关都是显著的(置信度 0.05 的相关系数置信限值为 0.187),可见两种参数化方案试验在一定程度上都能模拟出各月月平均降水的分布形势。

对比两个试验模拟场与观测场的相关系数演变曲线可以看到,对于不同的月份,EKuo 和 EGrell 对降水场形势的模拟效果不一样。2 月、3 月、5 月和 11 月 EKuo 模拟的降水场形势好于 EGrell,4 月、7 月和 8 月 EGrell 模拟的降水场形势好于 EKuo,而 1 月、6 月、9 月、10 月和 12 月,EKuo 和 EGrell 模拟降水场与观测之间的相关系数非常接近,可见这几个月降水场形势的模拟受积云对流

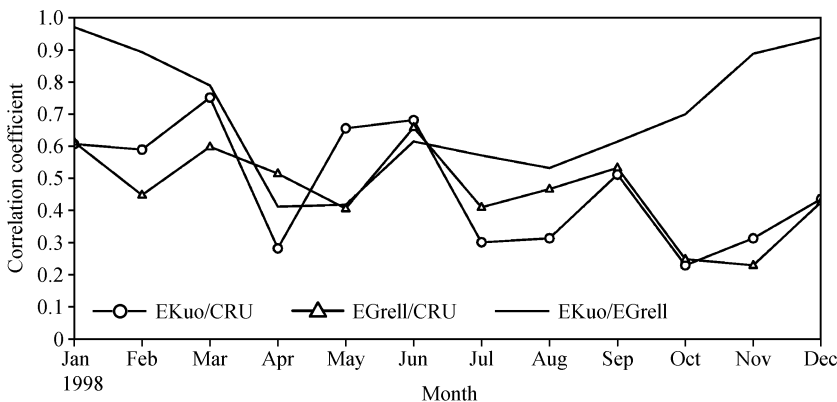


图2 月平均降水模拟场之间及其与观测场的相关系数随时间演变图

Fig. 2 Temporal variations of correlation coefficients between simulated mean monthly precipitation fields and between them and observations

参数化方案影响不大。平均而言, 秋、冬季节的降水形势模拟对积云对流参数化方案的选择不甚敏感, 不同积云对流参数化方案模拟的降水场分布形势相关系数较高。而春、夏季节降水形势的模拟对积云对流参数化方案选择比较敏感, 其中春季的4月和5月对积云对流参数化方案选择最为敏感, 两者的相关系数仅为0.4左右, 原因可能在于这两个月份处于春、夏季交替的时期, 大尺度环流系统变化最为剧烈, 而不同参数化方案受这样的大气环流强迫所产生的反馈作用也有很大的差别, 故产生的降水场形势也差别很大。

图3为各分区EKuo、EGrell模拟和观测的各月月平均降水率, 从图中可以看出, EKuo和EGrell都能模拟出降水的季节变化。例如, 1998年南方地区出现罕见的春汛, 3月上旬, 中南、华南大部分地区降水明显增多, 江西、广西、广东、湖南和福建的降水为建国以来同期最大值, 从图3c、d可以看到EKuo和EGrell试验都能模拟出3月份降水的峰值。6月中、下旬, 江南、华南持续出现暴雨或大暴雨, 广西大部分地区连降暴雨, 造成建国以来最严重的洪涝灾害, 这对应于图3d中6月份模拟与观测降水的强峰值对应。7月份, 由于二度梅, 雨带位于长江中下游地区。到了8月份雨带移至黄淮流域, 所以7、8月份江淮和华北地区的降水都有所增多, 从图3a、b可以看出, 模式对此也有反映, 只不过模拟值都较观测偏小。9月份以后, 各分区的降水迅速减少, 直到12月都减为1 mm/d左右或以下。

比较EKuo和EGrell的模拟降水率随时间变化曲线进一步表明, 不同参数化方案对不同月份降水量模拟存在一定差别, 这种差别表现为: 两者在西南和华北地区模拟的降水量基本相同。在秋季和冬季, 两者差别不大, 这主要是因为在这些区域和时段中积云对流活动不是很活跃。而江淮、中南和华南地区的夏季(6~8月)降水量模拟对参数化方案比较敏感, 尤其是华南地区的夏季降水量模拟更是如此。因此, 在对这些区域进行夏季气候模拟时, 要慎重选择适当的参数化方案才能模拟出更合理的降水强度。

另外, 从图3还可以看出, 在华南地区的春、夏季(3~8月), EGrell模拟的月平均降水较观测偏高, 而EKuo模拟的月平均降水较观测偏低。在江淮地区春、夏季的大部分月份, EKuo模拟的月平均降水率要大于观测和EGrell模拟值。在华北、西南地区除夏季的大部分月份, EKuo和EGrell模拟的月平均降水率都较观测偏高。

3.2 温度、湿度和地面气压

图4为EKuo和EGrell模拟的逐日温度、湿度以及地面气压的区域平均偏差随时间演变图。从图4a可以看到, 模式在大气低层($\sigma=0.865$)以负的温度偏差为主, 秋、冬季节偏差较大, 最大超过-3 K, 而春、夏季节偏差较小。由于低层温度偏差为负, 导致大气质量偏大, 故地面气压以正的系统性偏差为主, 偏差大小随时间的分布与低层温度偏差大小随时间的分布相对应(图4f)。

比较图4的各条偏差曲线可以看到, 模式积分

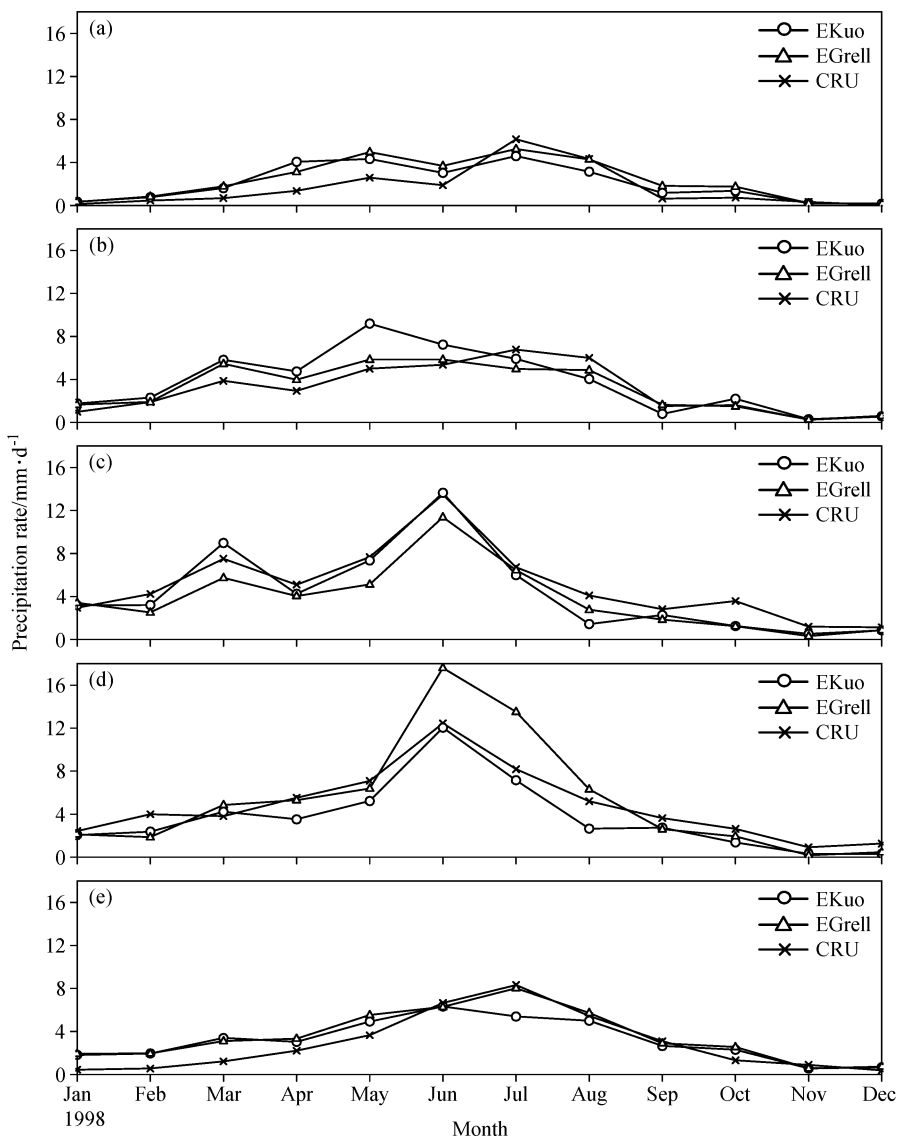


图3 各气候分区模拟与观测的月平均降水率随时间演变图: (a) 华北地区; (b) 江淮地区; (c) 中南地区; (d) 华南地区; (e) 西南地区
Fig. 3 Temporal variations of simulated and observed mean monthly precipitation rate in each sub-region; (a) North China; (b) Changjiang River-Huaihe River basin; (c) South Central China; (d) South China; (e) Southwest China

3 个月以后其对积云对流参数化方案的敏感性才能表现出来, 这一方面是由于两种积云对流参数化方案的不同影响需要一定的时间积累才能达到可以被检测出来的程度, 另一方面, 模式区域一般要到 4 月份以后积云对流才开始活跃。11 月份以后, 积云对流活动又变得不再活跃, 两者的差异又开始变得不明显。

不同模式变量对积云对流参数化方案的敏感性是不一样的, 同一变量在不同层次的敏感性也不相同。总体而言, 对流层上层模式变量和模式大气质量(地面气压)对积云对流参数化方案的选择不敏

感, 而模式大气对流层中、下层变量对积云对流参数化方案比较敏感, 特别是对流层中层更是如此。这是因为积云对流主要发生在对流层中层, 不同参数化方案的影响在其直接产生作用的范围内表现得最明显。比较两种积云对流参数化方案对流层中层模式大气温度和湿度偏差的演变(图 4b、d)还可以看出, 虽然模式积分 3 个月以后两者在量值上的差别开始逐渐明显, 但大多数情况下, 两者演变的位相呈现出基本一致的特征。即采用不同的积云对流参数化方案并不能改变模式偏差的位相, 说明方案的选择对模式描述大气过程的相对能力没有明显变

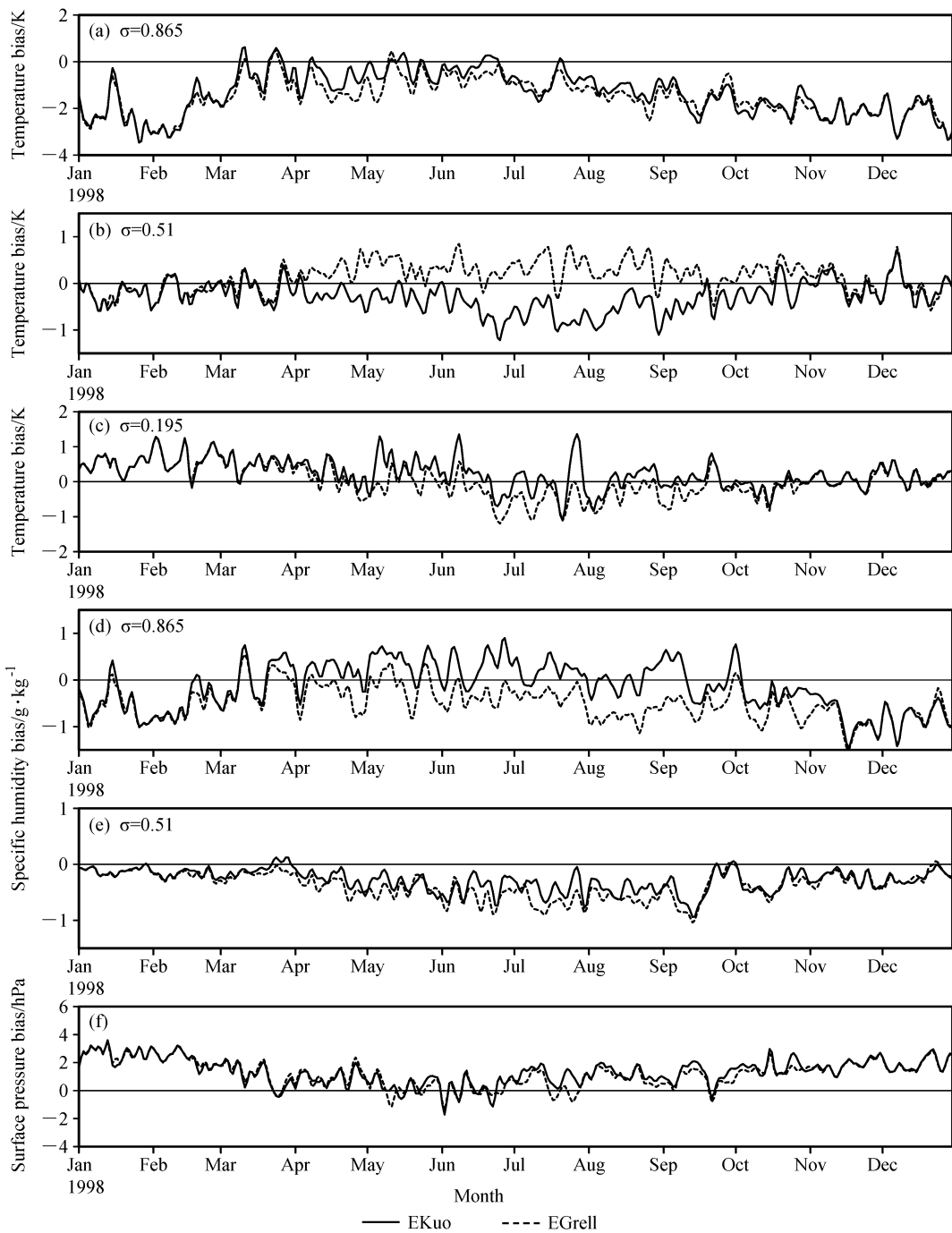


图 4 EKuo 和 EGrell 模拟的温度 (a~c)、湿度 (d、e) 和地面气压 (f) 的逐日区域平均偏差随时间演变图
Fig. 4 Temporal variations of the daily regional mean biases of (a~c) temperature, (d, e) specific humidity, and (f) surface pressure simulated by EKuo and EGrell

化，即好的参数化方案对可以很好描述的过程有可能描述得更好，而对描述能力欠佳的过程仍然是相对欠佳。也就是说，积云对流参数化方案的选择只改变模式大气变量的量值，而对区域大气格局的模拟并不产生很大的影响。

各变量的模拟偏差由于边界条件的制约，不会无限制的增长，而是在一定的范围内波动，波动的发展趋势和周期可以通过小波分析方法检测出来。为此，选择 EKuo 和 EGrell 在 $\sigma=0.51$ 层上的温度偏差时间序列（图 4b）进行小波分解，图 5 是用

db5 小波将偏差时间序列进行 4 层分解得到的, 其中图 5a 为原始温度偏差序列, 图 5c~f 分别为温度偏差序列的 2~16 天周期分量, 而图 5b 为滤去 2~16 天分量后所剩余的低频分量。低频分量可以代

表模式大气的系统性偏差及其演变趋势, 从图 5b 可以看出, EKuo 和 EGrell 在 4~11 月份的偏差差异非常显著, EKuo 的模式大气偏冷, 而 EGrell 偏暖, 这种差异体现了两种参数化方案对大气不同的

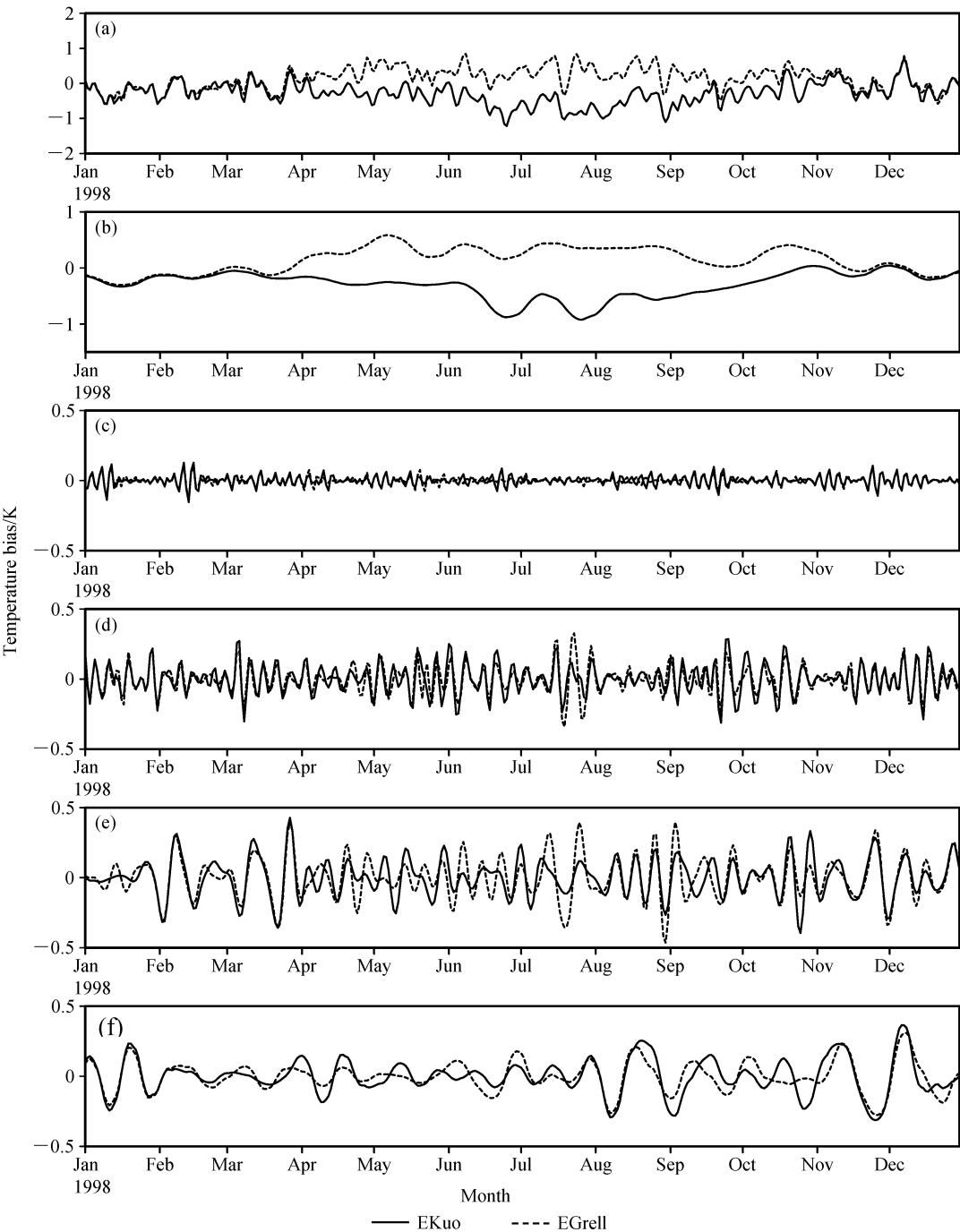


图 5 $\sigma=0.51$ 层上的区域日平均温度偏差小波分解图 (单位: K): (a) 温度偏差原始序列; (b) 滤波后剩余的低频分量; (c) 2 天周期分量; (d) 4 天周期分量; (e) 8 天周期分量; (f) 16 天周期分量

Fig. 5 Wavelet decomposition of daily regional mean temperature bias at $\sigma=0.51$: (a) Original series of mean temperature bias; (b) low-frequency component after filtering; (c) the component with 2-day period; (d) the component with 4-day period; (e) the component with 8-day period; (f) the component with 16-day period

反馈机制。时间序列的高频分量反映叠加在模式系统性偏差上的波动及其周期。可以推断，偏差之所以产生波动，主要是由于模式区域内一直有不同时间尺度的天气系统活动，并且模式对不同尺度天气系统的刻画存在一定误差造成的。从图 5c~f 可以看到，由 EKuo 和 EGrell 的偏差曲线分解出来的各个周期分量存在差别，而这种差别也在 4~10 月份较为明显。但可以看到，两者分解出来的同一周期波动的位相基本相同，只不过振幅不同而已，说明不同参数化方案对同一天气系统的响应是不同的。图 5 还表明，除扰动的低频分量（图 5b）外，两种积云对流参数化方案在 8 天左右周期扰动的差异最明显，说明通常天气尺度的扰动对积云对流参数化方案比较敏感。

将图 4 中其他变量的偏差曲线进行同样的小波分解（图略），可以发现它们和 $\sigma=0.51$ 层的温度具有基本一致的分周期扰动特征。表 1 是 EKuo 和 EGrell 各变量偏差原始序列、滤波后剩余的低频分量以及滤出的各周期分量之间的相关系数。从表 1 可以看到，EKuo 和 EGrell 模拟的 $\sigma=0.51$ 层上的温度差别最大，偏差原始序列和滤波后剩余的低频分量之间的相关系数都非常低，甚至为负值。说明不同参数化方案对大气中层的温度影响最大，并且对气候尺度模拟的影响也最大。其次是中层的湿度，相关系数也相对较低。而各变量原始序列滤波得到的分周期分量之间的相关系数表明，除 $\sigma=0.865$ 层上的湿度之外，其他变量滤出的 8 天周期分量之间的相关系数都最低，即 8 天时间尺度的天气尺度系统模拟对积云对流参数化方案比较敏感。

3.3 夏季的系统性偏差

东亚区域性气候模拟的难点之一在于其复杂的地形和海陆分布^[17]，模式在模拟受复杂地形影响

下的气候状态时，会存在一定的系统性偏差。这些系统性偏差主要是由模式大尺度驱动场和模式内部的物理、动力过程决定，部分反映了模式内部动力框架和物理方案的缺陷。鉴于前两节分析发现，夏季气候模拟对积云对流参数化方案最敏感，故本节只分析 EKuo 和 EGrell 在夏季（6~8 月）的系统性偏差。

图 6 是沿南北方向上第 30 到 34 格点之间（约 27°N~32°N）几种物理量的夏季平均偏差图。其中，实线为 EKuo 试验，虚线为 EGrell 试验。这个区域横跨了青藏高原、四川盆地及中国西南和中南的部分地区。海拔高度最高为 4500 m。从图 6 中可以看出，误差在东、西边界上都接近于零，由于缓冲区中松弛系数是由外向里指数减小的，因此大尺度边界场的控制作用也向里越来越小，误差因而越来越大。低层的误差分布受地形影响最大，对于 $\sigma=0.865$ 层的温度偏差来说，两个试验的偏差都为负值，即都偏冷，分布形势与地形的分布有类似之处，在地形的峰值及青藏高原上，误差值较大。在青藏高原到四川盆地之间，地形高度存在很大的落差，误差也变得很大，在 105°E 左右达到最低值（-2.7 K）。在平原上，误差不存在明显突变，但 EGrell 的误差比 EKuo 的误差大一些，即更偏冷。对于 $\sigma=0.865$ 层的湿度来说，在高原与盆地的交界处，误差变化仍然十分剧烈，从西边界附近的零附近陡降至 -3 g/kg，误差最大值仍然位于 105°E。平原上，误差变化平缓，EGrell 在低层偏干，而 EKuo 在低层偏湿。对于地面气压来说，误差在高原和平原上都为正，EGrell 的误差略小一些，在高原与盆地的交界处，两个试验的地面气压误差都降为负值。由低层变量的误差分布特点可以看出，两

表 1 EKuo 与 EGrell 各变量偏差原始序列、滤波后剩余的低频分量以及各周期分量之间的相关系数
Table 1 Correlation coefficients of original series, low-frequency component after filtering and components with different periods between simulated results with EKuo and EGrell

	温度			比湿		地面气压
	$\sigma=0.865$	$\sigma=0.51$	$\sigma=0.195$	$\sigma=0.865$	$\sigma=0.51$	
偏差原始序列	0.94	0.30	0.81	0.78	0.83	0.91
低频分量	0.96	-0.40	0.87	0.80	0.90	0.96
2 天周期分量	0.87	0.85	0.90	0.86	0.76	0.88
4 天周期分量	0.93	0.84	0.83	0.73	0.75	0.87
8 天周期分量	0.84	0.76	0.75	0.87	0.65	0.79
16 天周期分量	0.93	0.81	0.78	0.78	0.86	0.88

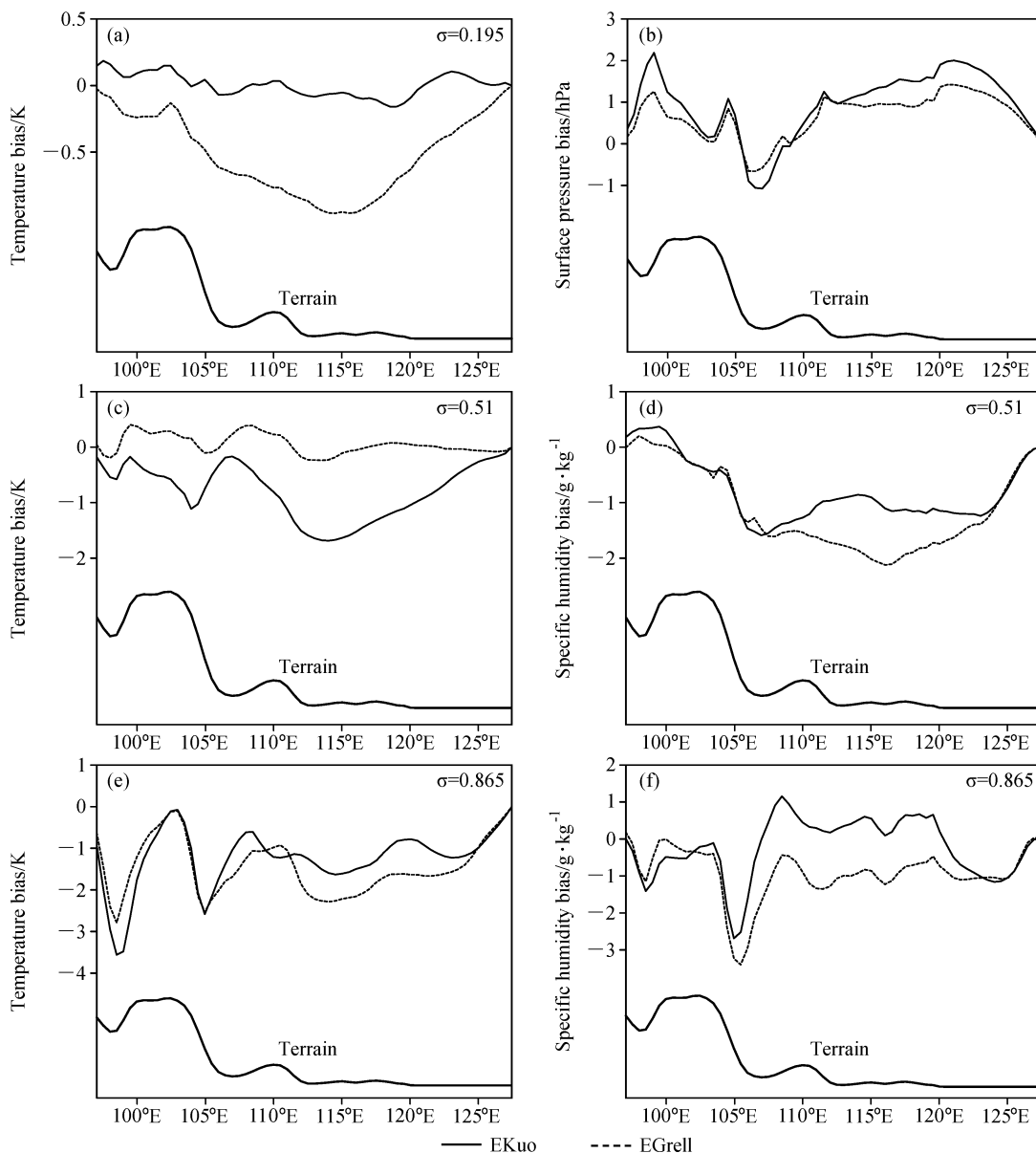


图 6 沿南北方向上第 30 到 34 格点之间的季平均偏差图: (a、c、e) 温度; (b) 地面气压; (d、f) 湿度

Fig. 6 Seasonal mean biases averaged between grid point numbers 30 and 40 in north-south direction: (a, c, e) Temperature; (b) surface pressure; (d, f) specific humidity

个试验在平原上都具有稳定的误差分布,而且差别比较明显,只有在高原与盆地的交界处,由于陡峭地形的影响,误差会出现明显的突变。这种误差的突变在模式积分过程中一直维持着,对模式其他区域尤其是下游地区会产生很不利的影响。这种误差突变的最可能原因是模式在陡峭地形处气压梯度力计算方案的缺陷,由此而产生的虚假环流有可能会伴随着虚假的重力波影响其他地区气候的模拟。另外,从图 6 还可以发现,虽然两个试验采用的积

云对流参数化方案不同,但误差在陡峭地形上的变化趋势一致,可见,不管采用什么样的积云对流参数化方案,都不能克服陡峭地形处模式动力过程计算方案的缺陷。

在对流层中层,模式偏差分布特点仍与地形分布有关。对于温度来说,EGrell 的误差较小,基本上在零线附近震荡,EKuo 具有偏冷的系统性误差。对于湿度来说,两个试验的误差都为负,且在高原上两者误差分布较为一致。而在平原上 EGrell 的

误差要大于 EKuo 的误差, 偏干更明显。到了对流层上层 ($\sigma=0.195$), 模拟误差分布和地形的关系已不明显, 且 EKuo 的误差比 EGrell 的误差小, EGrell 试验整体偏冷。

4 结论

本文利用最新版本区域气候模式 RegCM3, 选择 Kuo-Anthes 方案和基于 FC80 假设的 Grell 方案, 对 1998 年 1 月 1 日到 12 月 31 日进行年尺度模拟, 并对两者模拟的降水、温度、湿度等变量进行对比分析, 以检验区域季节气候变化对积云对流参数化方案的敏感性。

模拟结果分析表明, 两种参数化方案试验在一定程度上都能模拟出各月月平均降水的分布形势, 但对于不同的月份, EKuo 和 EGrell 对降水场形势的模拟效果不同, 且两者对降水场形势模拟效果的好坏交替出现。在春、夏季节, 特别是 4 月和 5 月, 两者模拟的月平均降水形势差别相对较大, 而秋、冬季节的月平均降水场形势模拟受积云对流参数化方案影响不大, 两种参数化方案试验都能模拟出降水量的季节变化, 但不同参数化方案对不同月份的降水量模拟存在着大小不一的差别, 这种差别表现为: 两者在西南、华北地区模拟的降水量差别不大, 在春季、秋季和冬季的大部分月里两者差别不大。而对江淮、中南和华南地区的夏季降水量模拟差别较大, 因此在对这些区域进行夏季气候模拟时, 要慎重选择适当的参数化方案才能模拟出更合理的降水量。

模式模拟的温度、湿度和地面气压在积云对流不活跃的 1~3 月以及 11 月份以后对积云对流参数化方案的选择并不敏感, 而在积云对流活跃的 4~10 月两者对积云对流参数化方案的敏感性才显现出来。总体而言, 对流层上层模式变量和模式大气质量 (地面气压) 对积云对流参数化方案的选择并不敏感, 而模式大气对流层中、下层变量对积云对流参数化方案比较敏感, 特别是对流层中层更是如此。但积云对流参数化方案的选择对模式描述大气过程的相对能力没有明显变化, 它只改变模式大气变量的量值, 而对区域大气格局的模拟并不产生很大的影响。

不同参数化方案对中层大气变量影响最大, 且周期为 8 天左右的过程对积云对流参数化方案比较

敏感, 气候尺度模拟对积云对流参数化方案的敏感性更强。

本文还对夏季模式的系统性误差进行了分析, 发现在高原与盆地的交界处, 由于陡峭地形的作用, 误差会产生明显的突变。这种误差的突变在模式积分过程中一直存在, 对模式的其他区域尤其是下游地区模拟将产生不利影响。这种误差突变表明模式在对陡峭地形处动力过程计算方案还存在缺陷。

本文只使用了目前在东亚比较常用的 Kuo-Anthes 方案和基于 FC80 假设的 Grell 方案进行对比分析, 结论局限于 60 km 分辨率和 1998 年个例模拟。今后, 将进一步采用其他积云对流参数化方案和其他年份模拟结果对以上结论进行验证。

参考文献 (References)

- [1] Donner L J, Kuo H-L, Pitcher E J. The significance of thermodynamic forcing by cumulus convection in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**: 2159~2181
- [2] Kuo Y H, Cheng L S, Bao J W. Numerical simulation of the 1981 Sichuan flood. Part 1: Evolution of a mesoscale southwest vortex. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 2481~2504
- [3] Ping Fan, Gao Shouting, Wang Huijun. A comparative study of the numerical simulation of the 1998 summer flood in China by two kinds of cumulus convective parameterized methods. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (1): 149~157
- [4] 成安宁, 陈文, 黄荣辉. 积云对流参数化方案对气候数值模拟的影响. *大气科学*, 1998, **22** (6): 814~824
Cheng Anning, Chen Wen, Huang Ronghui. Influence of convective parameterization schemes on climate numerical simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22** (6): 814~824
- [5] 符淙斌, 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
Fu Congbin, Wei Helin, Chen Ming, et al. Simulation of the evolution of summer monsoon rainbelts over eastern China from regional climate model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22** (4): 522~534
- [6] 潘泓松, 翟国庆, 高坤. 区域气候模拟中多种对流参数化方案的比较研究. *大气科学*, 2002, **26** (2): 206~220
Pan Jinsong, Zhai Guoqing, Gao Kun. Comparisons of three convection parameterization schemes in regional climate simulations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (2): 206~220
- [7] 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. 中国短期气候预测的模式研究. 北京: 气象出版社, 1996. 106~120
- Liu Yongqiang, Ding Yihui, Zhao Zongci. Regional climate modeling on the extreme anomalous rainfall over Yangtze - Huaihe River valley in 1991. *Study of Short-Term Climate Prediction in China* (in Chinese), Beijing: China Meteorological Press, 1996. 106~120
- [8] Liu Y Q, Avissar R, Giorgi F. Simulation with the regional climate model REGCM2 of extremely anomalous precipitation during the 1991 East-Asia flood: An evaluation study. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 101~116
- [9] Martínez-Castro D, Porfirio da Rocha R, Bezanilla-Morlot A, et al. Sensitivity studies of the RegCM3 simulation of summer precipitation, temperature and local wind field in the Caribbean region. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, **86**: 5~22
- [10] Anthes R A, Hsie E Y, Kuo Y H. Description of the Penn State-NCAR Meso-scale Model Version4 (MM4). Tech Note, NCAR/TN2282+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 1987. 166 pp
- [11] Betts A K. A new convective adjustment scheme. Part I: Observation and theoretical basis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, **112**: 677~691
- [12] Emanuel K A. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**: 2313~2335
- [13] Fritsch J M, Chappell C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37** (8): 1722~1733
- [14] Arakawa A, Schubert Y H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **37**: 674~701
- [15] Zeng X, Zhao M, Dickinson R E. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using the TOGA COARE and TAO data. *J. Climate*, 1998, **11**: 2628~2644
- [16] New M G, Hulme M, Jones P D. Representing twentieth century space time climate variability. Part II: Development of 1901 - 1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate*, 2000, **13**: 2217~2238
- [17] 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验. *大气科学*, 2006, **30** (2): 185~192
- Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, et al. Impacts of horizontal resolution and topography of the numerical simulation of East Asian precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 185~192