

RegCM3 积云参数化方案对中国南方夏季强降水过程模拟的影响

李建云^{1,2} 王汉杰²

1 中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101

2 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

摘要 利用区域气候模式 RegCM3 的最新并行版本, 选择 Anthes-Kuo、MIT-Emanuel 和 Grell 3 种积云参数化方案, 对 2003 年 7 月发生在淮河流域的强降水过程进行了多组模拟试验, 重点分析比较了 3 种参数化方案对降水总量分布、主要降水时段和基本气象要素场的模拟能力, 并相对实测降水和要素场进行了统计检验。对比分析试验结果, 发现 RegCM3 对中国南方夏季强降水具有较好的模拟能力, 不同参数化方案对中高层流场特征的模拟没有实质性差异。但对低层 850 hPa 流场结构(切变线、副高、低空急流、湿舌等)和水汽输送状况模拟存在一定差异, 这也是它们能否正确模拟降水分布及过程、强度等特征的关键, 也是 Kuo 方案降水模拟效果相对优于其他两种参数化方案的主要原因。

关键词 区域气候模式 强降水 极端气候事件 积云对流方案

文章编号 1006-9585 (2008) 02-0149-12 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Influences of Modeling the Summer Heavy Rain Process in Southern China Using Cumulus Convective Parameterization Schemes

LI Jian-Yun^{1, 2} and WANG Han-Jie²

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

2 *Institute of Aeronautical Meteorology, Air Force Academy of Equipment, Beijing 100085*

Abstract With the latest parallel version of regional climate model (RegCM3), three different cumulus convective parameterization schemes, Anthes-Kuo, MIT-Emanuel and Grell, are used to test their capability in simulating the heavy rain process happened in Yangtze-Huaihe River valley in July 2003. The simulations were conducted on the monthly total amount, procedural amount and distributional pattern of precipitation, the wind, potential height and humidity field structure either in the lower or middle-upper atmosphere. By analyzing the model outputs, we obtained that RegCM3 is capable of simulating the basic three dimensional atmospheric structure in Southern China while the summer heavy rain happened. Based on present case study of July 2003, we found that Anthes-Kuo scheme is better than Grell and MIT-Emanuel scheme in simulating the amount, distributional pattern and procedural intensity of the precipitation. Secondly, according to the simulation appraising index of T_s and B_s calculated for different critical values on rainfalls, still, Anthes-Kuo Scheme is better than Grell and MIT-Emanuel scheme in simulating the most common precipitation events with total procedure amount less than 100 mm. For those extreme events with procedure rainfall larger than 100 mm caused mainly by sub-grid scale strong convective systems, the

收稿日期 2007-03-21 收到, 2007-11-30 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40675040 和国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400505

作者简介 李建云, 男, 1968 年出生, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事区域气候模拟和全球变化研究。

E-mail: ljy919748@yahoo.com.cn

present model is unable to handle such systems because of the computational facility. The further research should be directed to raise model resolution or use model nesting techniques. Thirdly, the atmospheric structure in middle-upper levels (higher than 700 hPa) simulated by different cumulus convective parameterization schemes shows negligible differences, while in the lower atmosphere of 850 hPa both wind field and moisture transferring structure are different as different parameterization schemes being used, which interpreted why the simulated precipitation behaved differently and why Anthes-Kuo's scheme is better than the others.

Key words regional climate models, heavy rain, extreme climate events, cumulus convective scheme

1 引言

20 世纪 90 年代以来区域气候模式得到了迅速发展^[1~3], 并已成为研究区域气候变化的一个重要工具。作为区域气候模式的一个典型代表, 美国国家大气研究中心 (NCAR) 的 RegCM 模式应用最为广泛, 已经先后在美国、欧洲、非洲、澳大利亚和东亚—西太平洋地区等作过模拟研究, 并取得显著成效^[4]。在中国以及东亚地区的相关研究中, 该模式也得到了成功的应用。Liu 等^[5,6]最早将 RegCM 模式应用于东亚区域的气候研究, 成功地模拟了 1990 年 6~8 月东亚夏季风降水及 1991 年东亚洪涝期间的极端降水。Luo 等^[7]、龚威等^[8]、吕世华和陈玉春^[9]、范广洲和吕世华^[10,11]分别用 RegCM 或 RegCM2 研究了夏季东亚或中国的季风变化特征, 认为模式基本能再现东亚夏季风爆发的整个过程及雨带的变化, 可以作为研究我国季风降水物理机制和短期气候预测的一个工具。高学杰等^[12]利用 RegCM2 探讨了东亚地区降水数值模拟中水平分辨率和地形的作用。试验结果表明: 东亚地区降水的模拟效果取决于模式的水平分辨率, 模式分辨率越高, 模拟效果越好。同时使用实际地形的模拟效果要优于使用平滑地形。此外, 他们还利用 RegCM2 单向嵌套澳大利亚 CSIRO R21L9 全球海气耦合模式, 进行了温室气体加倍及硫酸盐气溶胶的引入对中国气候变化影响的一系列数值试验研究^[13~15]。分析表明, 温室气体加倍及引入硫酸盐气溶胶对中国区域的地面气温、降水以及环流场均会产生一定影响。

除了 NCAR 的 RegCM 模式外, 我国气象学者还利用自己设计的模式开展了众多研究工作。丁一汇等^[16]、张晶和丁一汇^[17]在区域气候模式的

设计方面进行了有益的尝试, 他们首先参考 BATS 模式, 发展了一个陆面过程模式 (LPM-ZD)。在对该陆面过程模式进行“独立 (Offline)”模拟试验的基础上, 将其与 NCAR 第二代区域气候模式 RegCM2 成功地实现了耦合, 通过对 1991 年江淮暴雨的模拟试验表明, 耦合模式具有较强的模拟性能和模拟能力。史学丽等^[18]通过改进 RegCM2 中的陆面过程、积云对流等物理过程参数化方案, 发展了一个新的区域气候模式 N-RegCM, 对 1994 年和 1998 年夏季异常季风降水的模拟试验表明: 改进的区域气候模式 N-RegCM 模拟性能较原模式有一定提高。最近, 丁一汇和柳艳菊^[19]利用国家气候中心的高分辨率区域气候模式 (RegCM_NCC), 对 1998 年南海夏季风的爆发进行了一系列敏感性试验研究。结果表明: 模式对积云参数化方案的选取十分敏感, 4 种参数化方案中以 Kuo 方案的模拟效果最好, 它比较成功地模拟出了南海夏季风的爆发时间, 爆发前后高、低层风场的剧烈变化, 以及季风与季风雨带的向北推进, 但模拟的雨量和副热带高压位置与观测相比尚存在一定的偏差。同时指出, 采用 4 种参数化方案集成的结果在某种程度上要优于单个方案的结果。此外, 中国科学院全球变化东亚区域研究中心在 MM5V2 的基础上发展了新一代区域环境系统集成模式 (RIEMS), 同时针对东亚地区进行了一系列的模拟试验, 结果表明该模式系统对东亚地区季风环境驱动下的气候特征具有较好的模拟能力^[20~22]。

积云参数化作为数值模式中最重要的非绝热物理过程之一, 一直备受国内外学者的关注, 但不同的学者研究结果差别较大。Giorgi 等^[23~25]研究指出, 不同的积云参数化方案在气候模拟中所得结果有较大差别。成安宁等^[26]在比较 Manabe、Kuo、Arakawa-Schubert 3 种方案后认为降水的

模拟差别较大,特别是夏季,Kuo 方案对东亚季风降水模拟相对较好。潘劲松等^[27]则认为 Betts 方案的模拟能力优于 Kuo 方案和 Grell 方案。翟国庆等^[28]对 RegCM2 中的 Betts-Miller 对流参数化方案进行了敏感性试验,提出了适合我国东部地区汛期区域气候模拟的 Betts-Miller 方案中较优的关键性参数取值。刘晓东等^[29]利用意大利国际理论物理研究中心 (ICTP) 的 RegCM3 模式对 1998 年 5~8 月中国东部降水进行了模拟试验研究,试验结果表明采用 Kuo 方案和 Grell 方案时模拟的降水效果要好于 Betts-Miller 方案,同时认为 RegCM3 可以应用于中国东部夏季风降水的研究。

应当指出的是,虽然广大学者针对东亚区域的气候特点,对区域气候模式中积云参数化等物理过程进行了许多研究,也取得了不少有价值的成果。但目前区域气候模式的模拟结果与实况之间的关系还很不稳定,常表现出部分地区或季节的缺陷^[30, 31],而且没有完全避免虚假降水中心的产生^[6, 32, 33]。其中的问题之一在于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大气的状态。Krishnamurti 等^[34]最近提出的“超级集成方法 (Superensemble methodology)”也许是积云参数化问题研究的一个发展方向。该方法首先假定降水的短期 (1 天) 预报误差主要来源于积云参数化,在此基础上对 6 种版本的佛罗里达州大学全球谱模式中不同积云参数化方案的对流加热,赋以不同的地理分布权重。这些权重值是根据每一成员模式在大约 85 个降水预报试验中的表现确定的。采用超级集成方法构建的新模式在随后的 NWP 降水预报中有较好的表现,与构建新模式的单个成员模式及总体平均 (Ensemble mean) 相比,降水预报误差明显减小,预报技巧有显著提高。此外,ICTP 的 RegCM3 作为一个有用的气候模拟工具,其中的积云参数化方案也在不断改进。与 RegCM2 相比,新版本的 RegCM3 改进了云和降水的物理过程。原有的显式水汽方案^[35]得到简化;积云对流降水方案除原来的 Grell 方案和 Anthes-Kuo 方案 (以下简称 Kuo 方案) 外,新增了 MIT-Emanuel (以下简称 Emanuel 方案) 积云对流方案^[36, 37]。由于 3 种积云参数化方案中的有关参数均是针对北美及欧洲

地区而设,是否适合东亚地区特殊的地理环境及季风气候特征还有待验证。因此有必要对其中的各种物理过程等诸多因子进行更深入细致的研究和探讨。

2003 年 7 月淮河流域发生了特大洪涝灾害,全流域总降水量普遍有 400~600 mm,比常年同期偏多 1~2 成,部分站点为历史同期的最大值或次大值,出现了 1991 年以来最大的洪水^[38]。本文研究目的在于通过模拟试验,重点考察区域气候模式 RegCM3 中不同积云对流参数化方案 (分别为 Kuo、Grell 和 Emanuel 方案) 对这次极端降水事件模拟的影响,从而为进一步改进 RegCM3 中的积云参数化方案,使之更适合于我国东部地区的降水模拟提供参考依据。

2 模式简介与试验设计

2.1 模式简介

本文所用的区域气候模式为意大利国际理论物理研究中心 (ICTP) 于 2006 年 6 月推出的 RegCM3 最新并行版本。该模式采用了 MM5 的动力框架,垂直方向为 σ 坐标,水平方向采用 “Arakawa B” 交错网格。模式的主要物理过程包括积云对流降水、辐射过程、行星边界层、陆面过程、大尺度降水和气压梯度等 6 种方案,侧边界处理有固定边界、时间相关、时变流入流出、线性松弛、指数松弛和海绵边界等 6 种方案可供选择。

2.2 试验方案设计

模拟区域中心点位于 (30°N , 115°E), 水平格距 60 km, 水平网格数 46×46 , 垂直方向非均匀分为 18 层, 顶层气压为 50 hPa^[27, 29, 39]。利用美国环境预报中心 (NCEP) 每日 4 次、水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的再分析资料作为模式驱动场。侧边界采用指数松弛方案,缓冲区 12 圈。模式中地形高度资料选用 USGS 分辨率为 $10'$ 的 GTOPO30 地形数据集;植被和土地利用资料选用分辨率为 $10'$ 的全球陆地覆盖特征数据集 (GLCC)。海温资料来自 NCEP Reynolds 等^[40] 的周平均海温。积分时间从 2003 年 6 月 1 日~8 月 1 日。其中第一个月作为模式的 Spin-up 时间,取第 2 个月的模拟结果作分析。

用于模式结果检验的资料包括：1) 国家气象信息中心提供的 1951~2003 年中国 192 个地面国际交换站实况日降水量、月总降水量；2) 2003 年每日 4 次、分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的 NCEP 再分析资料。

2.3 模拟结果检验方法

为了客观评价 RegCM3 中不同参数化方案对强降水模拟效果的影响，采用如下的统计方法进行客观评价和分析。其中对降水场，利用 Cressman 方法将模拟结果插值到站点上与站点实测降水进行对比分析和检验；其余要素场则将观测值插值到模式格点上与模拟结果进行对比分析和检验。

2.3.1 相关性检验

一般可以用偏差 (BIAS)、均方根误差 (RMSE)、相关系数 (COR) 和距平相关系数 (ACC) 来检验模式对天气尺度特征的模拟能力。

(1) 偏差 (BIAS)

$$B_{ias} = \frac{\sum_i (\phi_{m,i} - \phi_{o,i})}{N} \quad (1)$$

(2) 均方根误差 (RMSE)

$$R_m = \left[\frac{\sum_i (\phi_{m,i} - \phi_{o,i})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (2)$$

(1) 和 (2) 两式中， $\phi_{m,i}$ 为模式模拟的第 i 个站点降水值， $\phi_{o,i}$ 为相应的第 i 个站点降水观测值， N 为参加评分的总站点数。

(3) 相关系数 (COR)

$$R = \frac{\sum_i (\phi_{m,i} - \bar{\phi}_m)(\phi_{o,i} - \bar{\phi}_o)}{\left[\sum_i (\phi_{m,i} - \bar{\phi}_m)^2 \sum_i (\phi_{o,i} - \bar{\phi}_o)^2 \right]^{1/2}}, \quad (3)$$

式中， $\phi_{m,i}$ 为模式模拟的第 i 个站点降水值， $\bar{\phi}_m$ 为模式模拟的所有站点降水平均值； $\phi_{o,i}$ 为相应的第 i 个站点降水观测值， $\bar{\phi}_o$ 为所有站点降水观测值的平均值。

(4) 距平相关系数 (ACC)

$$A_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta R_m - \overline{\Delta R_m})(\Delta R_o - \overline{\Delta R_o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\Delta R_m - \overline{\Delta R_m})^2 \sum_{i=1}^N (\Delta R_o - \overline{\Delta R_o})^2}}, \quad (4)$$

式中， ΔR_m 和 $\overline{\Delta R_m}$ 为降水距平百分率的模拟值及

其平均值； ΔR_o 和 $\overline{\Delta R_o}$ 为相应观测值； N 为参加评分的总站点数。

根据统计学中大样本定理^[41, 42]，样本量大于 30 才有统计意义。当样本量较小时，计算所得相关系数可能会离总体相关系数甚远。这时，可以用计算无偏相关系数加以校正。将无偏相关系数记为 r^* ，

$$r^* = r \left[1 + \frac{1-r^2}{2(n-4)} \right]. \quad (5)$$

在下面相关系数和距平相关系数的计算中，如果统计样本小于 30，则按上述关系式进行相应的校正。

2.3.2 降水评分

设定： F 为预报出现某阈值以上降水的站数， O 为观测到某阈值以上降水的站数， C 为某阈值以上降水预报正确的站数，则有：

(1) 真实技巧评分 $T_s = C/(F+O-C)$ 。 T_s 评分表示预报出现某阈值以上降水的准确率，体现了对小概率事件的预报技巧。这种评分标准是衡量模拟降水空间和时间分布的一个尺寸，较好地反映了在模拟某一时段内超过某一降水临界值的精确程度，其值范围为 0~1。预报正确的程度越低，评分越低。完全不正确的预报为 0，完全正确的预报为 1。当发生某一阈值以上降水的站点数小于 3 个时，不再统计该阈值降水的 T_s 评分。

(2) 偏差评分 $B_s = F/O$ 。它反映了预报某一阈值以上降水的区域范围和实况范围的比值，当 $B_s = 1$ 时为最优。

3 降水模拟结果分析

3.1 降水模拟结果对比

3.1.1 月总雨量模拟对比

图 1 为 2003 年 7 月总雨量实况和 3 种参数化方案的模拟结果。从实况图上看，该月主要降雨带位于淮河流域，其中安徽、江苏两省沿淮地区为降水最大的区域。3 种方案都模拟出了主要雨带，其中以 Kuo 方案的效果最好，模拟的 200 mm 雨区范围与实况很接近。Emanuel 和 Grell 方案模拟的 200 mm 雨区范围均偏大。对降水中心强度及位置的模拟，3 种方案中以 Kuo 方案和 Grell 方案较好，Emanuel 方案模拟的 400 mm 强

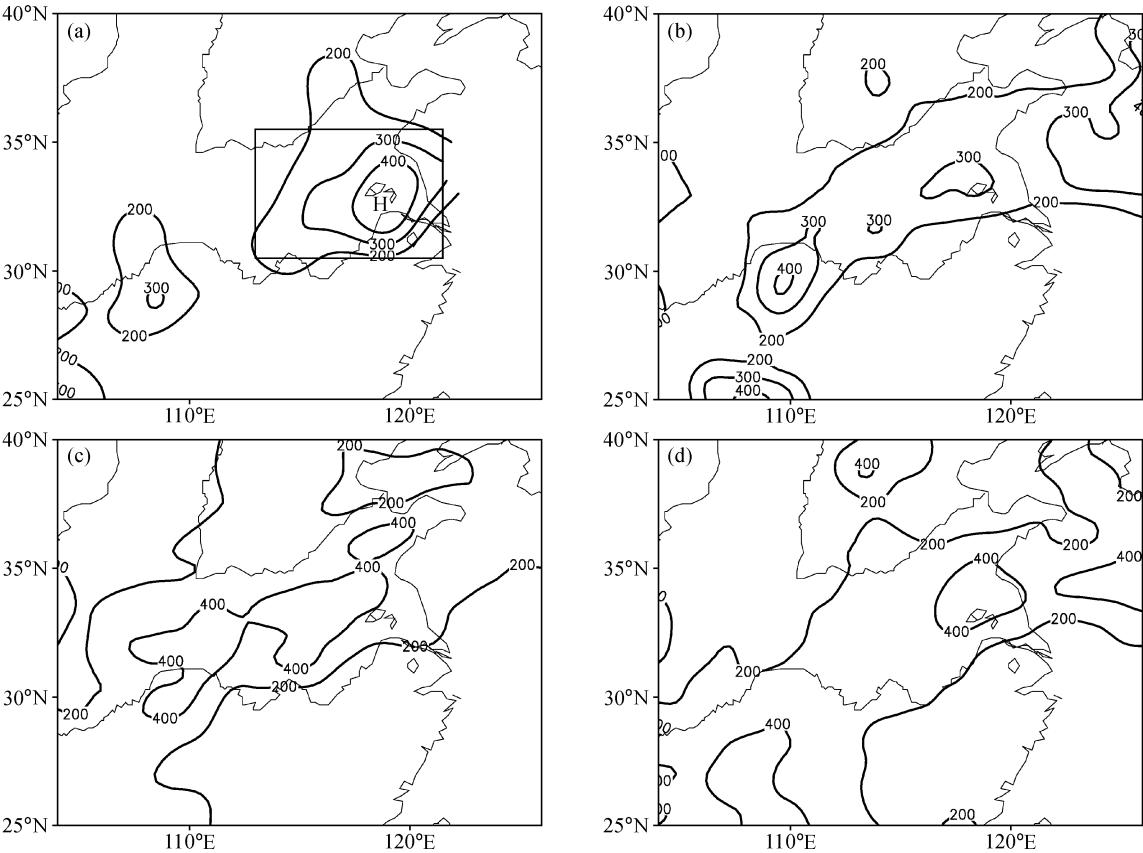


图 1 2003 年 7 月总雨量实况和模拟结果 (单位: mm): (a) 实况; (b) Kuo 方案; (c) Emanuel 方案; (d) Grell 方案
Fig. 1 Observed and simulated monthly precipitation (units: mm) of Jul 2003: (a) observed; (b) Kuo scheme; (c) Emanuel scheme; (d) Grell scheme

降水区位置偏西, 且范围偏大。因此, 从主要降雨带及强降水中心的模拟结果来看, 3 种参数化方案中 Kuo 方案效果最好, Emanuel 和 Grell 方案稍差。

应当指出, 本试验中所选取的 3 种参数化方案均没有模拟出 200 mm 等值线断开成 2 个强雨区这一特征, 而且 Kuo 和 Grell 2 种方案在模拟区域南部还模拟出一个虚假的降水中心。这可能是因为这些地区处于模拟区域边缘, 而且下垫面地形及地表状况较为复杂, 给出的侧边界条件不够充分所致。

3.1.2 2003 年 7 月第 1 场暴雨过程雨量对比

董林^[43]指出, 2003 年 7 月第 1 场暴雨过程是该月强度最强、持续时间最长的一次 (图 2)。40 mm 的雨区范围呈东西向分布, 2 个强降水中心分别位于淮河流域上游及鄂渝交界处。3 种方案的模拟结果对比, Kuo 方案模拟的 40 mm 雨区范

围、走向以及两个强降水中心位置与实况最为接近, 位于东部海面上的强降水中心由于缺少实测资料无法验证。Grell 方案模拟的 40 mm 雨区走向东部与实况对应较好, 但西部偏南。对 Emanuel 方案, 不仅模拟的雨带位置偏北, 而且强降水区雨量比实况偏大。

3.2 降水模拟结果检验

3.2.1 相关性检验

为定量分析各方案对 2003 年 7 月淮河流域特大暴雨的模拟能力, 将各方案模拟的月总降水利用 Cressman 方法插值到模拟区域内各站点上, 分别计算各方案模拟的月总降水量与测站降水之间的偏差、相关系数和距平相关系数 (表 1)。从表 1 可以看出, 对整个模拟区域而言, Kuo 和 Emanuel 方案的相关系数均在 0.5 以上, 远大于 0.244 (t 检验 99% 信度)。综合考虑偏差和距平相关系数的数值, Kuo 方案模拟效果最好, Em-

anuel 方案次之, 而 Grell 方案稍差。

为了能更细致地分析不同参数化方案对强降水事件模拟的影响, 计算了模拟区域强降水区 (30~35°N, 113~121.5°E, 见图 1a 中内框) 各站点月降水量与实测降水之间的偏差、相关系数和距平相关系数 (表 2)。从表 2 可以看出, 仍然是 Kuo 方案最好, 强降水区月总降水与实况的相关系数和距平相关系数分别为 0.65 和 0.6, 高于 0.433 (t 检验 95% 信度)。Grell 方案的相关系数达 0.74, 说明该方案对强降水的模拟较好, 三者比较, 仍是 Emanuel 方案稍差。

除了比较 3 种方案对模拟区域和强降水区的月降水量以外, 对主要降水时段雨量的模拟也是检验模式的一项重要指标。为此, 我们计算了各方案模拟的 2003 年 7 月 1~4 日降雨过程总雨量与测站降水之间的偏差及相关系数 (表 3)。由表 3 可见, Kuo 方案相关系数最高达 0.63, 远大于 0.244 (t 检验 99% 信度), Grell 方案也有较好表现, 相关系数达到 0.53。Emanuel 方案稍差。这与强降水区的模拟结果一致。

通过以上分析, 可以看出无论是对主要雨带、强降水中心位置, 还是暴雨过程, Kuo 方案的模拟效果均要优于其他两种方案。这与刘晓东等^[29]的试验结果很相似。这一结果可以供研究者利用 RegCM3 模拟我国南方强降水过程时参考。

3.2.2 不同降雨强度的分级评分

为了进一步检验模式的模拟能力, 将各方案模拟的 2003 年 7 月月总降雨量利用 Cressman 方法插值到站点上, 对站点实测降水与模拟降水值进行分级统计检验, 检验时分 25、50、100、200 和 300 mm 5 个降水阈值, 按照 2.3.2 节给出的方法计算 T_s 和 B_s 评分。

表 4 为不同阈值下 3 种参数化方案月降水检验的 T_s 评分。表中数值显示, 随着降水阈值的增大, 3 种方案模拟的月降水 T_s 评分呈递减趋势, 这与熊磊^[22]和潘劲松等^[27]的试验结果相似。对于月降水量在 100 mm 以下的常规降水事件, 仍是 Kuo 方案表现较好, T_s 评分达到 0.89, 其余两种方案也分别达到 0.77 和 0.67。这应该是气候模拟可以接受的理想数值。表 5 中的 B_s 评分也反映了这一特点, Kuo 方案 B_s 评分最高, 变化在 1.04~1.13 之间, 其余两种方案最差可达 1.4 左右。对

表 1 各方案模拟的月总降水量与测站降水的偏差、相关系数及距平相关系数

Table 1 Bias, root-mean-square errors (RMSE) and correlation coefficients (COR) of monthly precipitation in Jul 2003 simulated using different cumulus convective schemes

	偏差	相关系数	距平相关系数
Kuo 方案	3.47	0.53	0.46
Emanuel 方案	80.93	0.57	0.38
Grell 方案	99.70	0.33	0.12

注: $\gamma_{0.01}=0.244$ (t 检验 99% 信度), 自由度 $n=125$; 黑体表示较优, 下同

表 2 各方案模拟的强降水区月总降水量与测站降水的偏差、相关系数及距平相关系数

Table 2 Bias, root-mean-square errors (RMSE) and correlation coefficients (COR) of monthly precipitation at strong rain area in Jul 2003 simulated using different cumulus convective schemes

	偏差	相关系数	距平相关系数
Kuo 方案	-69.41	0.65	0.60
Emanuel 方案	34.33	0.50	0.42
Grell 方案	34.60	0.74	0.74

注: 强降水区范围 (30.5~35.5°N, 113~121.5°E), $\gamma_{0.05}=0.433$ (t 检验 95% 信度), 自由度 $n=19$

表 3 各方案模拟的 2003 年 7 月 1~4 日总雨量与测站降水的相关系数

Table 3 Correlation coefficients (COR) of simulated precipitation of 1-4 Jul 2003 using different cumulus convective schemes

	偏差	相关系数
Kuo 方案	-1.78	0.63
Emanuel 方案	8.08	0.35
Grell 方案	4.03	0.53

注: $\gamma_{0.01}=0.244$ (t 检验 99% 信度), 自由度 $n=125$

表 4 不同阈值下 3 种参数化方案月降水检验 T_s 评分
Table 4 T_s grade of monthly precipitation simulated using different cumulus convective schemes under different critical values

阈值/mm	Kuo 方案	Emanuel 方案	Grell 方案
25	0.89	0.86	0.86
50	0.77	0.76	0.79
100	0.67	0.67	0.57
200	0.35	0.42	0.32
300	0.18	0.29	0.28

表 5 不同阈值下 3 种参数化方案月降水检验 B_s 评分

Table 5 B_s grade of monthly precipitation simulated using different cumulus convective schemes under different critical values

阈值 /mm	Kuo 方案	Emanuel 方案	Grell 方案
25	1. 13	1. 16	1. 12
50	1. 10	1. 31	1. 24
100	1. 04	1. 38	1. 44
200	1. 13	2. 03	2. 29
300	0. 43	2. 50	2. 64

200 mm 以上的强降水事件, 各种方案的模拟效果均呈现下降趋势。 T_s 评分变化在 0. 18~0. 42 之间, B_s 评分最高可达 2. 5 以上。 其中随机因素很多, 无法再用来评价参数化方案的优劣。 另一个十分重要的原因是: 梅雨锋区的强降水多是由中、小尺度的暴雨云团形成的, 由于水平分辨率不足, 区域气候模式对此类中、小尺度系统的作

用反映不够。 这是造成强降水评分偏低的主要原因。

4 基本要素场分析

为了从天气学的角度解释以上不同方案的模拟结果, 我们分析了各种参数化方案对 2003 年 7 月 1~4 日强降水过程发生时流场特征的模拟结果。

图 3 是 850 hPa 平均风场, 由图 3a 可见, 对于切变线的位置和强度模拟, Kuo 方案的模拟结果与实况最为接近, Emanuel 和 Grell 方案模拟的切变线跨越 35°N, 南侧低空急流的范围和强度也偏强, 这可能是它们对这次过程性模拟较差的原因之一。

图 4 为 3 种方案模拟的 2003 年 7 月 1~4 日月平均 850 hPa 比湿场。 与实况对比, Kuo 方案较

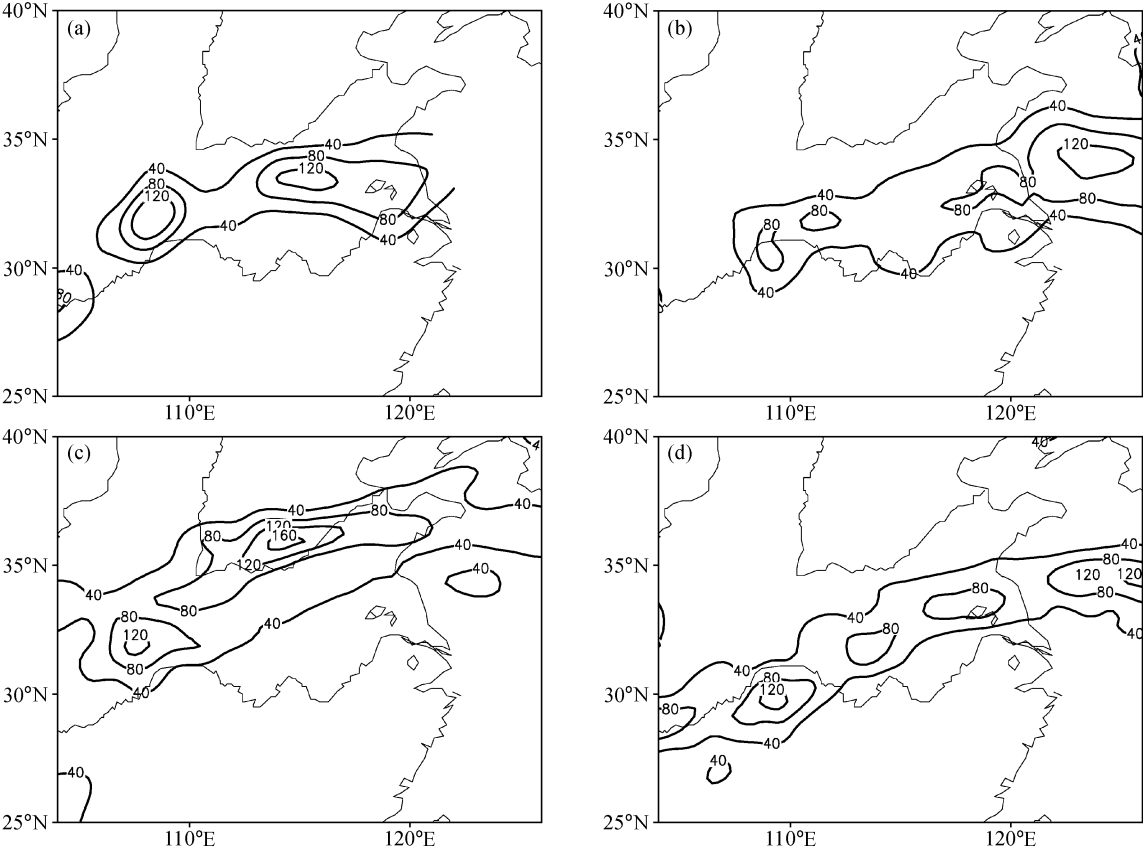


图 2 2003 年 7 月 1~4 日总雨量实况和模拟结果 (单位: mm): (a) 实况; (b) Kuo 方案; (c) Emanuel 方案; (d) Grell 方案

Fig. 2 Observed and simulated precipitation (units: mm) of 1—4 Jul 2003: (a) observed; (b) Kuo scheme; (c) Emanuel scheme; (d) Grell scheme

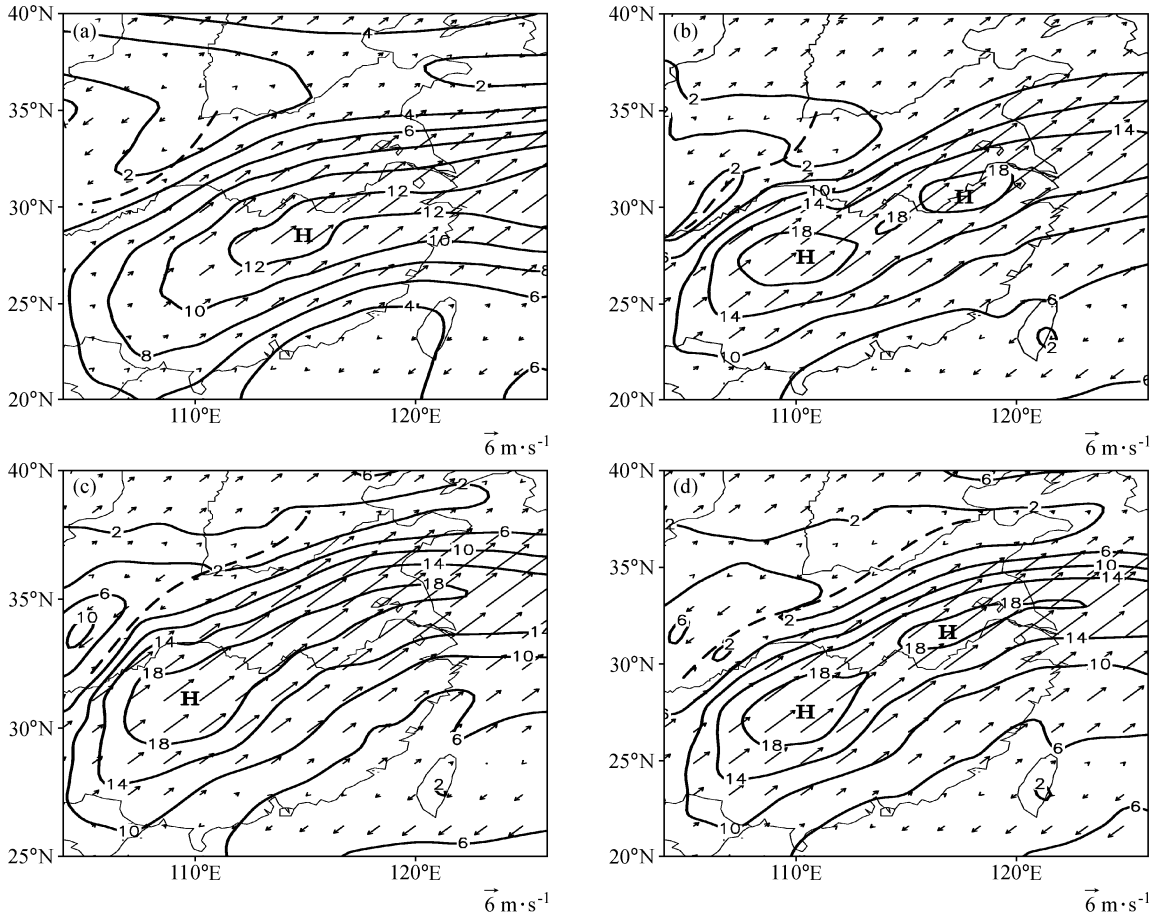


图3 2003年7月1~4日850 hPa平均风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 虚线为切变线): (a) 实况; (b) Kuo 方案; (c) Emanuel 方案; (d) Grell 方案

Fig. 3 Observed and simulated 850 hPa mean wind field (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, dashed is shear line) of 1—4 Jul 2003; (a) observed; (b) Kuo scheme; (c) Emanuel scheme; (d) Grell scheme

好地模拟了与西南气流相伴随的水汽输送, 自四川盆地伸向长江中下游地区的湿舌, 尤其是 $0.014 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 等比湿线的走向和位置与实况十分一致, 但 $0.016 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 等比湿线的范围略大于实况。分析原因可能有两方面, 一是 Kuo 方案模拟的 850 hPa 位势高度场(图略)与实况对比, 位于川渝地区的低压范围较实况略偏大。正是由于降水区上空低层气旋性风切变模拟的不准确, 从而可能直接导致 Kuo 方案模拟的水汽场较实况偏高。二是高原东侧地表起伏较大, 对比检验所用的 NCEP 资料分辨率相对较低, 不能很好地反映该地区 850 hPa 水汽场的实际分布, 这也可能是导致 Kuo 方案模拟的水汽场相对偏高的原因。Emanuel 和 Grell 方案模拟的湿舌位置与实况相比, 位置略偏北。这与两种方案模拟的副高位置偏北

有关(图略)。图3和4揭示的事实说明, 低空 850 hPa 流场特征和水汽输送状况, 直接影响降水的强度分布, Kuo 方案对降水模拟效果较好的主要原因是该方案较好地模拟了低空 850 hPa 的流场和湿度场。

除了低层的流场和水汽场以外, 我们还分析比较了自下而上直至 200 hPa 3 种方案模拟的流场特征(表略)。分析发现, 就高度场的模拟结果而言, 3 种方案的模拟结果在 700 hPa 以上没有实质性差异, 与实况相比, 相关系数均达到 0.95 以上, 500 hPa 达 0.98。风场(包括 u 分量和 v 分量)的相关性也在 0.8 以上, 最高达 0.93 (Kuo 方案 700 hPa)。这说明 RegCM3 的动力学框架是适合我国的区域性气候特点的。不同的参数化方案对低层流场和水汽输送模拟结果的差异, 是造

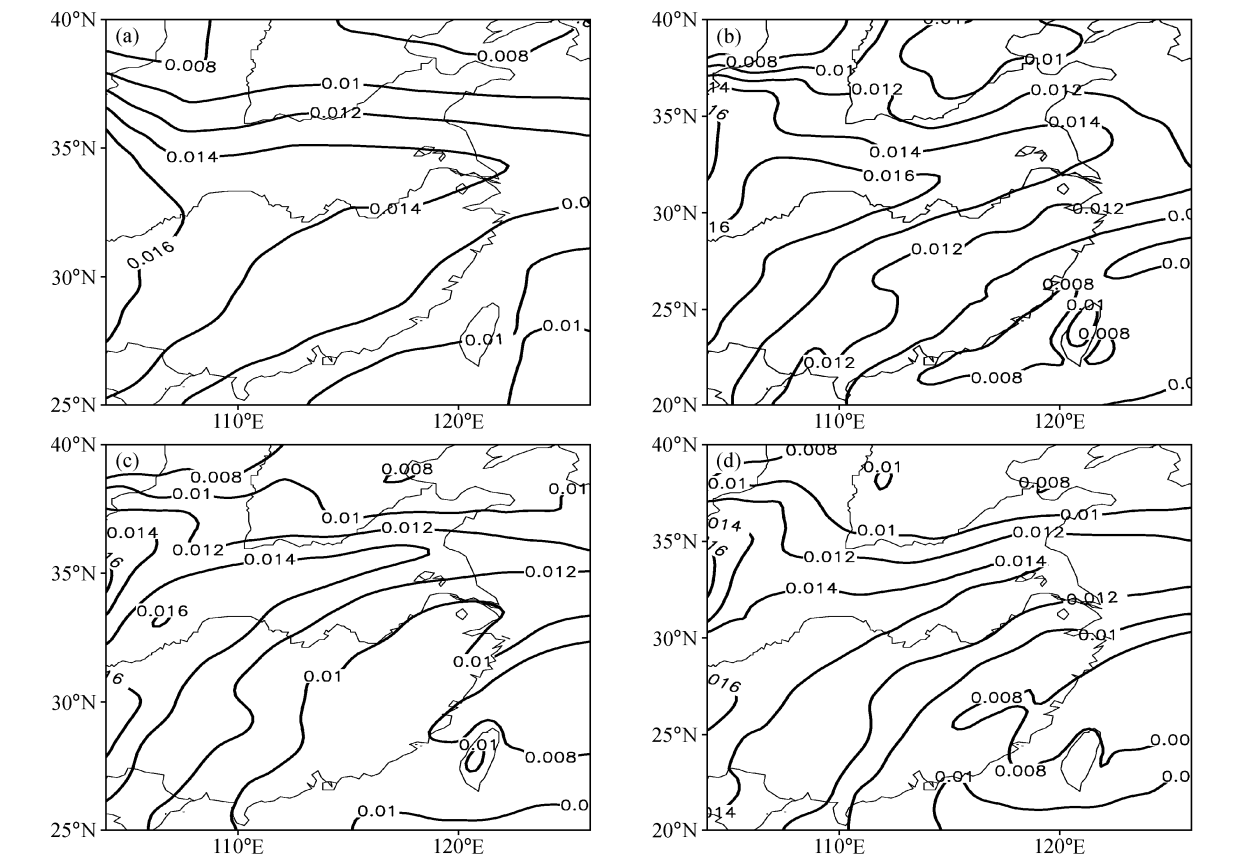


图 4 2003 年 7 月 1~4 日 850 hPa 平均比湿场分布 (单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$): (a) 实况; (b) Kuo 方案; (c) Emanuel 方案; (d) Grell 方案

Fig. 4 Observed and simulated 850 hPa mean specific humidity (units: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) of 1—4 Jul 2003; (a) observed; (b) Kuo scheme; (c) Emanuel scheme; (d) Grell scheme

成强降水模拟差异的主要原因。

5 结语和讨论

本文利用最新推出的 RegCM3 并行版本,通过选择不同积云参数化方案对 2003 年 7 月发生在淮河流域的强降水事件进行了多组模拟试验,得到了以下初步结论:

(1) RegCM3 模式能够模拟我国南方梅雨锋暴雨发生时的基本流场结构特点,对 2003 年 7 月的强降水过程模拟发现, Kuo 方案的模拟结果要优于 Grell 和 Emanuel 方案,模拟的主要雨带和强降水中心位置以及过程雨量等与实况更为接近。

(2) T_s 和 B_s 评分结果表明,对于月降水小于 100 mm 的区域性降水事件, Kuo 方案模拟结果优于 Grell 方案和 Emanuel 方案。月降水大于 100 mm 的局地性降水主要有中、小尺度暴雨云团

形成。受计算条件的限制,本文使用的模式分辨率尚不足以反映这类降水事件。利用更高分辨率的模式或模式嵌套技术,反映此类中、小尺度系统的作用,将是进一步的研究方向。

(3) 不同参数化方案对中层流场特征的模拟没有实质性差异。但对低层 850 hPa 流场结构(切变线、副高、低空急流和湿舌等)和水汽输送状况模拟存在一定差异,这既是它们能否正确模拟降水分布及区域强度的关键,也是 Kuo 方案对降水的模拟优于其他两种参数化方案的主要原因。

总之,区域气候模拟中积云对流参数化方案的选择是十分重要的。对于本文的试验个例,综合环流场和降水场的模拟结果看, Kuo 方案更适合模拟中国夏季南方强降水,模拟的降水空间分布与观测实况更为接近。主要原因可能是 7 月正是中国南方梅雨期,此时造成降水的云系多为积云和层云的混合云系,梅雨锋内部又多对流云活

动,而改进的 Kuo 方案对混合云系以及对流性降水的模拟效果较好^[19, 26, 44, 45]。

限于计算条件,本文模拟试验区域主要针对有强降水过程的江淮流域及其以南地区,范围偏小,分辨率不高,而且仅选取了 2003 年 7 月一个强降水个例,因此所得到的只是初步结论,而且 Kuo 方案模拟的降雨强度和范围与实况相比仍然存在一定偏差。今后随着计算条件的改善,可以通过扩大模拟范围、提高模式水平与垂直分辨率、增加试验个例、延长模拟时间等方法更全面地检验 RegCM3 模式的性能,了解该模式的系统性误差等情况。

参考文献 (References)

- [1] 赵宗慈, 罗勇. 二十世纪九十年代区域气候模拟研究进展. 气象学报, 1998, **56** (2): 225~246
Zhao Zongci, Luo Yong. Advance on investigations of regional climate modeling since 1990. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (2): 225~246
- [2] 陆其峰, 潘晓玲, 钟科, 等. 区域气候模式研究进展. 南京气象学院学报, 2003, **26** (4): 557~565
Lu Qifeng, Pan Xiaoling, Zhong Ke, et al. Advances in regional climate model studies. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (4): 557~565
- [3] 刘鸿波, 张大林, 王斌. 区域气候模拟研究及其应用进展. 气候与环境研究, 2006, **11** (5): 649~668
Liu Hongbo, Zhang Dalin, Wang Bin. Recent advances in regional climate modeling and applications. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (5): 649~668
- [4] Giorgi F, Mearns L O. Introduction to special section Regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104** (D6): 6335~6352
- [5] Liu Y Q, Giorgi F, Washington W M. Simulation of summer monsoon climate over East Asia with a NCAR regional climate model. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122** (10): 2331~2348
- [6] Liu Y Q, Avissar R, Giorgi F. A simulation with the regional climate model RegCM2 of extremely anomalous precipitation during the 1991 East Asian flood: An evaluation study. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101** (D21): 26199~26215
- [7] Luo Y, Zhao Z C, Ding Y H. Ability of NCAR RegCM2 in reproducing the dominant physical processes during the anomalous rainfall episodes in the summer of 1991 over the Yangtze-Huaihe Valley. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (2): 236~254
- [8] 龚威, 李维亮, 周秀骥. 用改进的区域气候模式模拟中国夏季降水. 见: 曹鸿兴主编, 中国短期气候变化及成因研究. 北京: 气象出版社, 1996. 110~116
Gong Wei, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Simulation of summer precipitation over China using improved regional climate model. In: *Research of Short-range Climate Change and Cause of China* (in Chinese), Cao Hongxing, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1996. 110~116
- [9] 吕世华, 陈玉春. 区域气候模式对华北夏季降水的气候模拟. 高原气象, 1999, **18** (4): 632~640
Lü Shihua, Chen Yuchun. Simulation of summer precipitation over North China in 1991 and 1994 with a NCAR regional climate model. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (4): 632~640
- [10] 范广洲, 吕世华. 高分辨嵌套区域气候模式对我国中、东部地区夏季气候的数值模拟. 高原气象, 1999, **18** (4): 641~648
Fan Guangzhou, Lü Shihua. Simulation of summer climate over center and East China using a high resolution nested regional climate model. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (4): 641~648
- [11] 范广洲, 吕世华. 陆面植被类型对华北夏季降水影响的数值模拟研究. 高原气象, 1999, **18** (4): 649~658
Fan Guangzhou, Lü Shihua. Simulation of summer climate over center and East China using a high resolution nested regional climate model. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (4): 649~658
- [12] 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 Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 185~192
- [13] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 I: 模式对中国气候模拟能力的检验. 气象学报, 2003, **61** (1): 20~28
Gao Xuejie, Ding Yihui, Zhao Zongci, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model Part I: Evaluation of the model simulation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (1): 20~28
- [14] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 II: 中国区域气候的可能变化. 气象学报, 2003, **61** (1): 29~38
Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. Part II: Climate change. *Acta Me-*

- teorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (1): 29~38
- [15] 高学杰, 林一骅, 赵宗慈. 用区域气候模式模拟人为硫酸盐气溶胶在气候变化中的作用. *热带气象学报*, 2003, **19** (2): 169~176
Gao Xuejie, Lin Yihua, Zhao Zongci. Modelling the effects of anthropogenic sulfate in climate change by using a regional climate model. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19** (2): 169~176
- [16] 丁一汇, 张晶, 赵宗慈. 一个改进的陆面过程模式及其模拟试验研究第二部分: 陆面过程模式与区域气候模式耦合模拟试验. *气象学报*, 1998, **56** (4): 385~399
Ding Yihui, Zhang Jing, Zhao Zhongci. An improved land-surface processes model and its simulation experiment Part 2: Land-surface processes model (LPM-ZD) and its coupled simulation experiment with regional climate model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (4): 385~399
- [17] 张晶, 丁一汇. 一个改进的陆面过程模式及其模拟试验研究第一部分: 陆面过程模式及其“独立 (off-line)”模拟试验和模式性能分析. *气象学报*, 1998, **56** (1): 1~19
Zhang Jing, Ding Yihui. An improved land-surface processes model and its simulation experiment. Part 1: Land-surface processes model (LPM-ZD) and its “off-line” tests and performance analyses. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (1): 1~19
- [18] 史学丽, 丁一汇, 刘一鸣. 区域气候模式对中国东部夏季气候的模拟试验. *气候与环境研究*, 2001, **6** (2): 249~254
Shi Xueli, Ding Yihui, Liu Yiming. Simulation experiments of summer rainbelt in China with the regional climate model. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 249~254
- [19] 丁一汇, 柳艳菊. 南海夏季风爆发的数值模拟. *应用气象学报*, 2006, **17** (5): 526~537
Ding Yihui, Liu Yanju. Simulation of the South China sea summer monsoon onset. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2006, **17** (5): 526~537
- [20] Fu C B, Wei H L, Qian Y, et al. Documentation on a regional integrated environmental model system (RIEMS Version 1). TEACOM science report (Seventh), No. 1, START Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China, 2000, 1~26
- [21] Xiong Z, Wang S Y, Zeng Z M, et al. Analysis of simulated heavy rain over the Yangtze River Valley during 11—30 June 1998 using RIEMS. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (5): 815~824
- [22] 熊喆. 区域气候模式 RIEMS 对东亚气候的模拟. *气候与环境研究*, 2004, **9** (2): 251~260
Xiong Zhe. The multiyear surface climatology of RIEMS over East Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 251~260
- [23] Giorgi F. Sensitivity of simulated summertime precipitation over the western United States to different physics parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 2870~2888
- [24] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second-generation regional climate model (REGCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121** (10): 2794~2813
- [25] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121** (10): 2814~2832
- [26] 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
Chen Anning, Chen Wen, Huang Ronghui. Influence of convective parameterization schemes on climate numerical simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1998, **22** (6): 814~824
- [27] 潘劲松, 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
- [28] 翟国庆, 高坤, 潘劲松. 区域气候模拟中 Betts-Miller 对流参数化方案的敏感性试验. *大气科学*, 2003, **27** (3): 330~344
Zhai Guoqing, Gao Kun, Pan Jinsong. The sensitivity experiments of Betts-Miller convective parameterization scheme in regional climate simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (3): 330~344
- [29] 刘晓东, 江志红, 罗树如, 等. RegCM3 模式对中国东部夏季降水的模拟试验. *南京气象学院学报*, 2005, **28** (3): 351~359
Liu Xiaodong, Jiang Zhihong, Luo Shuru, et al. A simulation of summer precipitation over Eastern China with RegCM3. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, **28** (3): 351~359
- [30] Giorgi F, Mearns L O, Shields C, et al. A regional model study of the importance of local versus remote controls of the 1988 drought and the 1993 flood over the central United States. *J. Climate*, 1996, **9**: 1150~1162
- [31] 赵宗慈, 罗勇, Leung R, et al. 东亚夏季风的模拟研究—3 个区域气候模式的对比. *应用气象学报*, 1997, **8** (增刊): 116~123
Zhao Zongci, Luo Yong, Leung R, et al. Simulations of summer monsoon over East Asia: Intercomparisons of

- three regional climate models. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1997, **8** (Suppl.): 116~123
- [32] 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. Simulation with the regional climate model of extremely anomalous precipitation during the 1991 East Asian flood. In: *Research of Short-range Climate Forecast over China with Model* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1996. 106~120
- [33] 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 summer monsoon rainbelts over Eastern China from regional climate model. *Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1998, **22** (4): 522~534
- [34] Krishnamurti T N, Sanjay J. A new approach to the cumulus parameterization issue. *Tellus A*, 2003, **55** (4): 275~300
- [35] Hsie E Y, Anthes R A, Keyser D. Numerical simulation of frontogenesis in a moist atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 2581~2594
- [36] Emanuel K A. A scheme for representing cumulus convection in large scale models. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48** (21): 2313~2335
- [37] Emanuel K A, Zivkovic-Rothman M. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 1766~1782
- [38] 徐良炎. 淮河流域暴雨频繁洪涝严重 江南华南酷热少雨伏旱发展—2003 年 7 月. 气象, 2003, **29** (10): 62~63
Xu liangyan. Frequent heavy rain caused flood in the Huaihe River in July 2003. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2003, **29** (10): 62~63
- [39] 汤剑平, 赵鸣, 苏炳凯. 分辨率对区域气候极端事件模拟的影响. 气象学报, 2006, **64** (4): 432~442
Tang Jianping, Zhao Ming, Su Bingkai. Effects of model resolution on the simulation of regionally climatic extreme events. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (4): 432~442
- [40] Reynolds R W, Marsico D C. An improved real-time global sea surface temperature analysis. *J. Climate*, 1993, **6**: 114~119
- [41] 王梓坤. 概率论基础及应用. 北京: 科学出版社, 1976. 148~150
Wang Zikun. *The Fundament and Application of the Probability* (in Chinese). Beijing: China Science Press, 1976. 148~150
- [42] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 21~22
Wei Fengying. *The Techniques of Statistical Diagnosis and Forecast of Modern Climate* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 21~22
- [43] 董林. 淮河流域暴雨致洪 南方地区高温罕见. 气象, 2003, **29** (10): 58~61
Dong Lin. The rainstorm and flood in HuaiHe valley and infrequent high temperature in south of China. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2003, **29** (10): 58~61
- [44] 刘一鸣. 中国关于积云参数化方案的应用. 气象学报, 1998, **56** (2): 247~255
Liu Yiming. Application of cumulus parameterization schemes in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (2): 247~255
- [45] Huang R H, Wu B Y, Sung G H, et al. Sensitivity of numerical simulation of the East Asian summer monsoon rainfall and circulation to different cumulus parameterization schemes. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (1): 23~41