

不同对流参数化方案对1991年江淮 暴雨的模拟对比

赵应龙^{1,2} 谭言科¹ 王 铁¹

1 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

2 94643部队, 漳州 363000

摘要 采用最新发布的区域气候模式 RegCM3.1, 分别引入 Grell-AS、Grell-FC、Kuo 和 MIT-Emanuel 4 种积云对流参数化方案, 对 1991 年 5~7 月江淮地区暴雨进行模拟试验。从各月降水量的模拟来看, Grell-AS 方案较好地模拟出了江淮暴雨的强度, 尤其是对 7 月降水的强度和位置的模拟与观测非常接近; Grell-FC 方案能较好地反映 7 月江淮暴雨的强度和位置, 但对华南地区降水模拟一直显著偏强; Kuo 方案能模拟大尺度降水的情况, 但对强对流性降水模拟偏弱; MIT-Emanuel 方案较好地反映了 5 月降水的空间形势, 但各月降水的模拟都比观测强。从各区月平均降水的对比发现, Grell-AS 和 Kuo 方案的模拟要优于 Grell-FC 和 MIT-Emanuel 方案。从降水的南北变动来看, Grell-AS 方案较好地刻画了江淮地区雨带的强度和南北变动。高低空环流形势和整层水汽通量的分析表明, 造成 MIT-Emanuel 方案降水模拟偏强的主要原因与水汽输送偏强有关。对 4 种积云对流参数化方案进行集合, 其结果表明, 物理过程集合方法能有效地减小物理过程参数化的不确定性对模拟结果的影响。

关键词 区域气候模式 对流参数化方案 暴雨 模式物理集合

文章编号 1006-9585 (2008) 06-0727-11 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

Comparisons of Various Convection Parameterization Schemes for Heavy Rain Simulations over the Yangtze-Huaihe Valley in 1991

ZHAO Ying-Long^{1,2}, TAN Yan-Ke¹, and WANG Tie¹

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

2 *94643 Army, Zhangzhou 363000*

Abstract By using Grell-AS, Grell-FC, Kuo and MIT-Emanuel cumulus convection parameterization schemes, a new version of the regional climate model RegCM3.1 has been used to simulate heavy rains from May to July 1991 over the Yangtze-Huaihe valley. In the simulation of monthly rainfall, Grell-AS scheme well simulated the intensity of heavy rains over the Yangtze-Huaihe valley, especially the intensity and spatial distribution in July. Grell-FC scheme well simulated the spatial distribution and intensity of heavy rains over the Yangtze-Huaihe valley in July, however it always obviously overestimated the rainfall over east and south China. Kuo scheme was able to simulate the large-scale rainfall, but it often underestimated the convective heavy rains. MIT-Emanuel scheme well simulated the spatial distribution in May, but the simulated monthly rainfalls were often heavier than the observations. The schemes of Grell-AS and Kuo exhibited better performance than the schemes of Grell-FC and MIT-Emanuel in the simulation of monthly mean precipitation in various subdivisions. The scheme of Grell-AS well simulated the in-

收稿日期 2007-09-11 收到, 2008-08-03 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40405010

作者简介 赵应龙, 男, 1981 年出生, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事海气相互作用和季风研究。E-mail: azyl2008@163.com

tensity and variations of rain belts over the Yangtze-Huaihe valley. The analysis of high and low level wind and water vapor flux in whole levels indicated that the stronger simulation of water vapor flux caused the overestimated rainfall in MIT-Emanuel scheme. The ensemble was created by choosing four kinds of cumulus convection parameterization schemes, the results indicated that the physical process ensemble method could effectively reduce the simulated errors from the physical process parameterization uncertainty.

Key words regional climate model, convection parameterization scheme, heavy rains, model physical ensemble

1 引言

我国地处东亚季风区,地形复杂,气候多变,属于典型的季风性气候。对我国东部夏季季风降水的模拟研究,一直是国内外关注的焦点。20世纪90年代以来,区域气候模式取得了迅速的发展,相对于全球大气环流模式,它具有较高的分辨率,对局地气候有较好的模拟能力,成为研究区域气候及气候变化的重要工具。我国学者在使用区域气候模式对东亚和中国地区气候模拟方面已开展了大量的工作^[1~6],符淙斌等^[7]利用MM4对东亚季风雨带的演变进行模拟,认为要正确模拟东亚季风雨带的演变还需要对决定区域气候的主要物理过程在参数化方面作进一步的改进,说明了积云参数化方案对夏季降水模拟的重要作用。史学丽等^[8]在NCAR/RegCM2的基础上通过改进其中的陆面过程、积云对流、辐射传输和边界层等物理过程的参数化方案,得到了比原方案更为合理的模拟结果。罗勇等^[9,10]、吕世华等^[11]用RegCM2研究了夏季东亚和中国的季风变化特征,都认为RegCM2模式能基本再现东亚夏季季风爆发的整个过程以及雨带的变化,但雨带的位置和强度并不是很准确。张冬峰等^[12]指出RegCM3模拟的降水分布主要存在南方偏多、北方偏少的系统性误差。Liu等^[13]指出降水模拟的不足可能与积云参数化方案有关。然而对于东亚地区,在积云参数化方案的比较上一直存在较大的差异。Huang等^[14]应用大气环流模式考察了东亚地区夏季季风降水和环流对不同对流参数化方案的敏感性,结果表明,似乎Kuo方案比A-S方案或Manabe方案更适用于夏季季风降水和环流的模拟,这可能是由于东亚地区的夏季降水云系往往是积云和层云的混合,Kuo的对流参数化方案能够反映东亚夏季季风降雨云系的特征。潘劲松等^[15]利用区域气

候模式RegCM2对1991年和1994年5~7月2个个例进行模拟试验,发现Betts方案的模拟能力明显优于Kuo方案和Grell方案。刘晓东等^[16]利用RegCM3对1998年5~8月中国东部降水进行了模拟试验,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。由此可以看出,到目前为止适合东亚地区季风气候的对流参数化方案还没有达到一致的结论,因此对东亚地区的对流参数化方案还需作进一步研究。另外,潘劲松等^[15]和刘晓东等^[16]得出了完全相反的结论,这很可能是由于选取的个例不同而造成的,同时表明没有哪一种积云对流参数化方案在任何情况下都是最优的。因此,分析各种参数化方案的模拟能力,并从多种参数化方案集合的角度来减小模拟误差,是一个值得研究的问题。

本文利用区域气候模式RegCM3.1对1991年5~7月发生在江淮地区的强降水进行模拟试验,比较Grell-AS、Grell-FC、Kuo和MIT-Emanuel 4种积云对流参数化方案对我国东部地区夏季降水的模拟结果,主要分析了各种参数化方案在强降水区域和时段的模拟表现,以及在不同区域对降水的模拟能力。选择模拟较优和较差的参数化方案,就水汽通量场进行对比分析,寻找造成降水误差的主要原因。最后,对4种积云参数化方案进行物理集合,为今后利用区域气候模式对东亚季风区降水进行模拟时,减小参数化处理的不确定性对模拟结果的影响提供一些参考。

2 模式及试验设计

目前,意大利国际理论物理研究中心(IC-TP)在NCAR的RegCM3.0模式基础上,对模式的部分物理参数化过程进行了重要的改进和完善,在原来积云参数化方案中增加了MIT-Emanuel方案^[17,18],于2006年5月发布了RegCM3.1,

其模拟性能有待于进一步的试验研究。

本文选取的模拟个例是在江淮地区产生特大洪涝的 1991 年湿季风年，模式水平分辨率为 $60\text{ km} \times 60\text{ km}$ ，水平格点数取 51×55 ，垂直方向分 18 层，模拟区域的中心位于 $(30^\circ\text{N}, 114^\circ\text{E})$ ，模式顶层气压为 50 hPa，积分时间步长为 180 s。利用欧洲中心 ERA-40 再分析资料，为模式提供初边值场，每 6 h 更新一次；海温资料为 NCEP/NCAR 的 OISST 周平均资料。侧边界选择指数松弛方案，海洋通量参数化选择 Zeng 方案，缓冲区宽度为 12 个格点。模式积分时间 1991 年 4 月 15 日~7 月 31 日，其中 4 月 15~30 日为 Spin-up 时间。分别采用 Grell 方案、Kuo 方案和 MIT-Emanuel 方案进行模拟试验，其中 Grell 参数化方案在应用过程中采用了 Arakawa-Schubert 假设^[19]和 Fritsch-Chappell 假设^[20]，这两种假设对应的方案分别简称为 Grell-AS 方案和 Grell-FC 方案。用于模拟检验的资料为国家气候中心提供的 1991 年 5 月 1 日~7 月 31 日全国 730 站的逐日降水资料，其中模拟区域有 516 个站点，将站点资料插值到模式格点用于模拟对比；另外还用到 1991 年 7 月 ECMWF $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 经纬网格的风场和相对湿度再分析资料，时间间隔为 6 h。

图 1 是模式模拟区域的地形高度及观测站点分布情况，为了深入细致地比较各积云对流参数化方案对我国东部 5~7 月降水的模拟能力，本文从试验区选择了 3 个分区进行对比研究。A、B 和 C 区分别代表了我国的华北、江淮和华南地区，其中区域 A 的范围为 $(34 \sim 42^\circ\text{N}, 110 \sim 120^\circ\text{E})$ ；区域 B 的范围为 $(28 \sim 34^\circ\text{N}, 114 \sim 122^\circ\text{E})$ ；区域 C 的范围为 $(22 \sim 28^\circ\text{N}, 110 \sim 120^\circ\text{E})$ 。华南地区的选取与以往不同，这里主要是考虑到降水分布的一致性，根据 1991 年 5~7 月降水的观测资料，在 22°N 以南和 110°E 以西降水明显偏强，而所选取的区域降水分布比较一致。

3 不同对流参数化方案的模拟与观测对比

3.1 各月模拟降水分布的对比分析

3.1.1 5 月降水的对比

为了比较各积云对流参数化方案对东亚季风

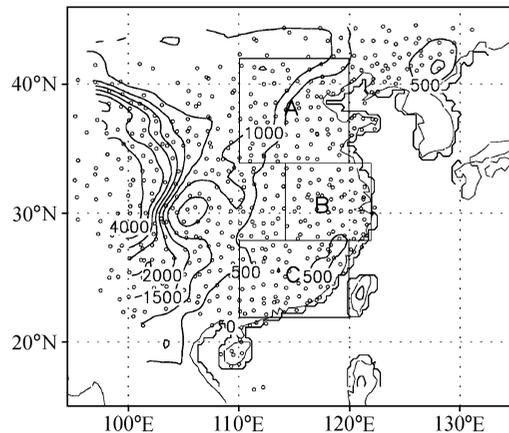


图 1 模拟试验区域的地形高度及观测站点分布 (单位: m)

Fig. 1 Topographic height and distribution of observation stations for model domain (units: m)

区降水的模拟能力，在其他参数设置不变的情况下，分别对 4 种积云对流参数化方案进行模拟试验。图 2 为 1991 年 5 月总降水量的观测和 4 种积云对流参数化方案的模拟结果。从观测场来看 (图 2a)，降水主要出现在长江流域和华南地区，200 mm 以上的降水区主要分布在 30°N 附近，在 $(30^\circ\text{N}, 118^\circ\text{E})$ 处有一个 300 mm 以上的降水中心。从模拟情况来看，各方案模拟的降水范围和强度都比观测偏大。其中，Grell-AS 方案和 Kuo 方案模拟的 200 mm 以上降水区主要在江淮流域，但降水范围明显比观测大，对 300 mm 以上的降水大值区模拟范围也偏大偏西；Grell-FC 方案和 Kuo 方案对长江以南地区的降水模拟明显偏强，其中 Grell-FC 方案在两广地区还出现了虚假的强降水中心；Emanuel 方案基本上反映出了降水的分布形势，但整个江淮和华南地区模拟的降水都在 200 mm 以上，降水中心略偏南，在江西、湖南到广西一带，强度明显偏强，在西部边界也有较强的虚假降水。

3.1.2 6 月降水的对比

从观测场 (图 3a) 中可以看出，6 月 200 mm 以上的降水区主要出现在江淮地区、长江中上游和华南地区一带，在江淮地区和华南西部地区有 300 mm 以上的强降水区。从模拟来看，Grell-AS 方案模拟出了江淮地区和华南西部地区两个降水中心，但降水中心位置偏北，强度明显偏大，对长江以南地区降水模拟普遍偏强；Grell-FC 方案

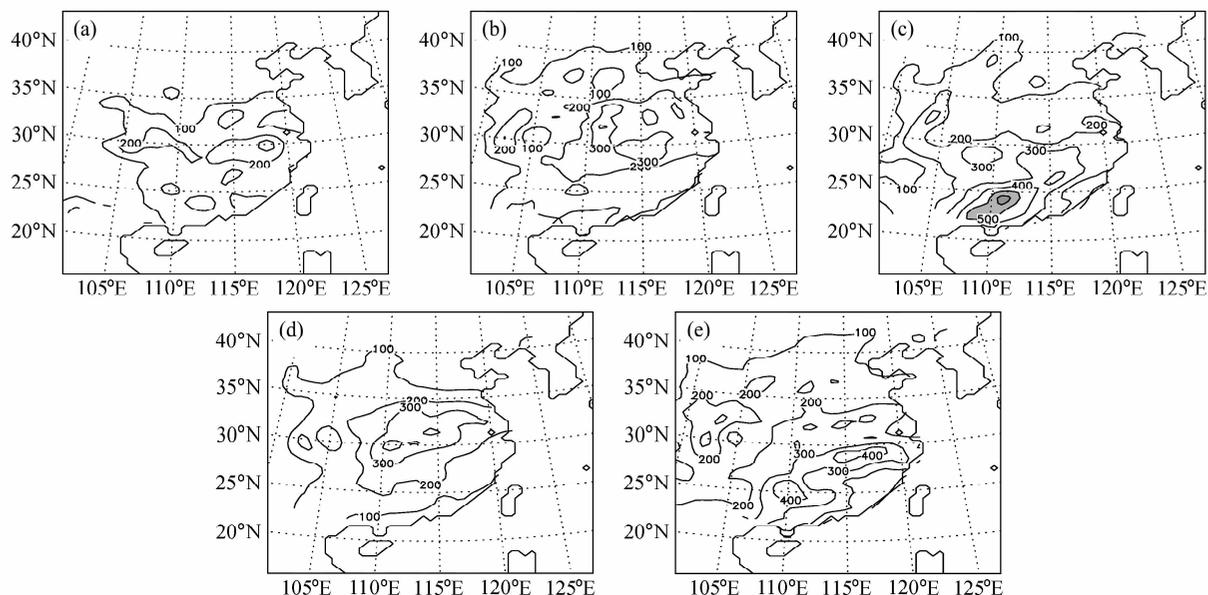


图2 1991年5月观测和模拟的降水分布(单位: mm, 阴影区 ≥ 500 mm): (a) 观测值; (b) Grell-AS方案; (c) Grell-FC方案; (d) Kuo方案; (e) Emanuel方案

Fig. 2 Observed and simulated monthly precipitation in May 1991 (units: mm, shadow ≥ 500 mm): (a) observed; (b) Grell-AS scheme; (c) Grell-FC scheme; (d) Kuo scheme; (e) Emanuel scheme

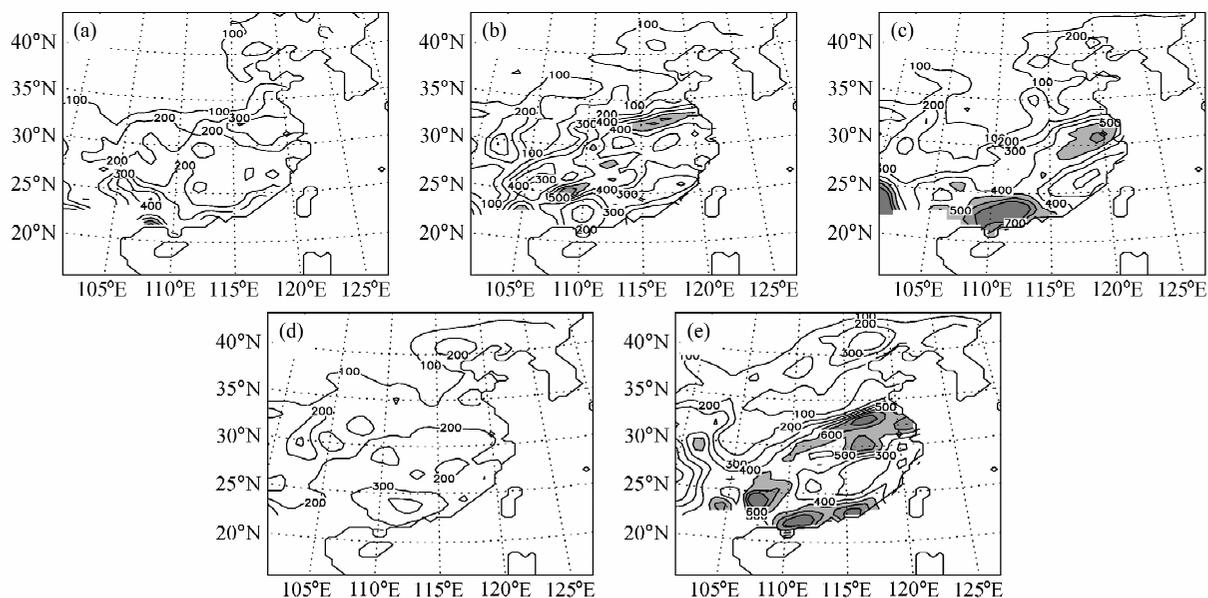


图3 同图2, 但为6月

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for Jun

较好地反映了江淮地区和华南地区的两个降水中心, 但降水量模拟明显偏大, 尤其是在两广地区降水量超过 700 mm, 与观测偏差较大; Kuo 方案对于江淮和华南西部地区的降水中心没有模拟出来, 而在广东地区出现一个较强降水中心; Emanuel 方案能较好地模拟出降水的空间分布, 强降

水中心主要出现在江淮地区和华南地区, 但是降水强度显著偏强, 在华北地区也出现了一个较强的虚假降水中心。

3.1.3 7月降水的对比

从观测图(图4a)中可以看出, 7月 200 mm 以上的降水区在长江流域和华南地区, 其中 500

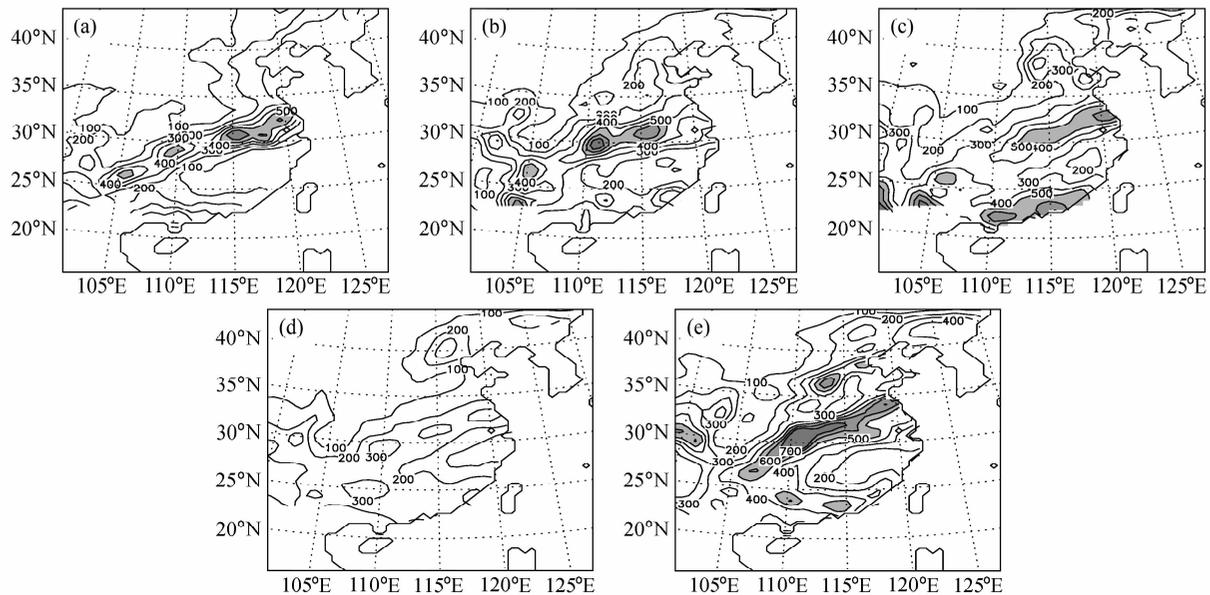


图 4 同图 2, 但为 7 月

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for Jul

mm 以上的强降水中心主要出现在江淮地区、湖南西北部 (29°N , 110°E) 和贵州西部 (26°N , 105°E)。从模拟情况来看, Grell-AS 方案中 200 mm 以上降水区形势与观测基本一致, 东西向的 3 个强降水中心也能很好地体现, 不足之处是江淮地区强降水区比观测偏小; Grell-FC 方案较好地模拟出了江淮地区和 (26°N , 105°E) 附近两个强降水中心, 但没有模拟出 (29°N , 110°E) 附近的降水中心, 另外在华南和华北地区出现了两个虚假的降水中心; Kuo 方案基本上模拟出了 7 月长江流域和华南地区多雨的基本形势, 江淮地区和 (29°N , 110°E) 附近也出现了降水中心, 但强度比观测明显偏弱, 华北地区也出现一个虚假的降水中心; Emanuel 方案模拟的强降水区主要集中在长江流域, 但其降水中心的范围和强度明显比观测大, 在西部边界处有一较强的中心, 这可能与边界影响有关, 另外在 (37°N , 113°E) 附近和东北地区也出现较强的虚假降水中心。

3.2 5~7 月各区域月平均降水量的对比

图 5 是各参数化方案在 1991 年 5~7 月不同区域月平均降水的模拟与观测对比。可以看出, 不同的积云对流参数化方案在不同月份、不同区域模拟结果有较大的差别。对于华北地区 (A 区) 而言, 5 和 6 月各方案降水模拟都偏高, 7 月除 Kuo 方案外, 其他方案也都偏高; 5 月 Grell-FC

和 Kuo 方案、6 月 Grell-AS 方案、7 月 Kuo 方案与观测较为接近。对于强降水江淮地区 (B 区) 来说, 5 月 Grell-FC 方案模拟较好, 比观测高出 22.9%, 其他方案模拟偏强 45% 以上; 6 月 Kuo 方案降水与观测较为接近, 但模拟稍微偏弱, 为 -18.5%, 而另外 3 种方案都偏强, Emanuel 方案甚至比观测偏强 97%, 模拟效果不理想; 7 月 Kuo 方案降水的模拟比观测偏弱 38.8%, 没有反映出江淮地区强降水的特征, Grell-AS 方案与观测最为接近, 仅偏强 10.7%, 而 Grell-FC 和 Emanuel 方案都偏强 20% 以上。华南地区 (C 区), Grell-AS 方案和 Kuo 方案相对来说模拟较好, 5 月基本与观测一致; Grell-FC 方案和 Emanuel 方案对降水的模拟偏强, 其中 Grell-FC 方案更为显著, 3 个月的偏差都在 100% 以上。从上面 3 个月 3 个区域共 9 次的对比情况来看, 与观测最接近的是: Grell-AS 方案 4 次, Kuo 方案 3 次, Grell-FC 方案 2 次, Emanuel 方案 0 次; 与观测差距最大的是: Emanuel 方案 5 次, Grell-FC 方案 3 次, Kuo 方案 1 次, Grell-AS 方案 0 次。这表明, 对于不同的区域和月份, 各方案模拟的效果都存在差别。其中, Grell-AS 方案比较接近于观测, 但都比观测略偏高; Kuo 方案对于强降水区 (B 区) 的模拟不足, 未能较好地反映 6 和 7 月江淮地区特大暴雨的特征; Grell-FC 方案对华南地区 (C

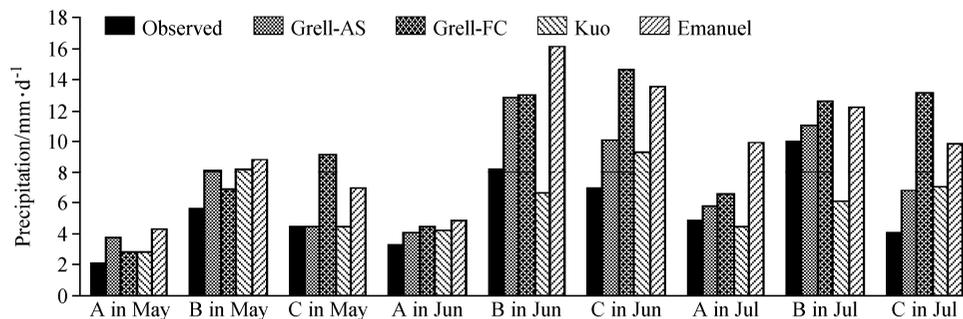
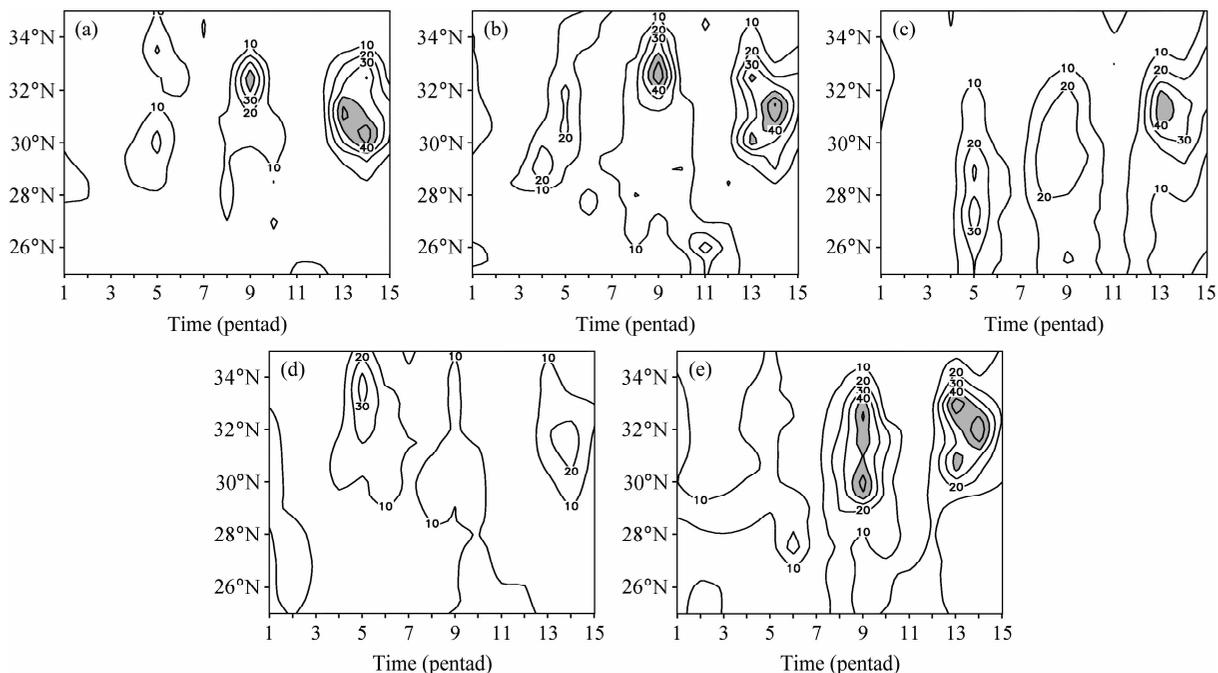


图5 1991年5~7月各区月平均降水的观测和模拟值

Fig. 5 Observed and simulated monthly mean precipitation in various subdivision from May to Jul 1991

图6 1991年5~7月113~119°E候平均降水量的纬度-时间剖面(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 阴影区 $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$): (a) 观测值; (b) Grell-AS方案; (c) Grell-FC方案; (d) Kuo方案; (e) Emanuel方案Fig. 6 Latitude-time cross-section of pentad mean precipitation between 113–119°E from May to Jul 1991 (units: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, shadow $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$): (a) observed; (b) Grell-AS scheme; (c) Grell-FC scheme; (d) Kuo scheme; (e) Emanuel scheme

区)的模拟明显偏强,3个月的模拟在4个方案中都是最强的,而且模拟偏差都在100%以上;对于模式新增的Emanuel方案,各月各地区的模拟都明显偏强,因此还需要对Emanuel方案中的一些关键参数进行修改和调试才能适用于东亚地区。相对来说,Grell-AS方案和Kuo方案要优于Grell-FC方案和Emanuel方案。这与文献[16]中Kuo方案和Grell方案模拟的月降水量与实况比较接近的结论一致。

3.3 雨带南北变动的对比

对季风雨带随时间南北变动的模拟也是反映

模拟好坏的一个重要指标,图6是113~119°E候平均降水量的纬度-时间剖面。这里使用的是候平均资料,从5月1日开始,每5天计为1候,共计算了15候。从图6a可以看出,1991年的3次暴雨分别发生在4~5、8~10和13~15候3个时段,其中第1场暴雨过程中,雨带中心首先出现在29~30°N附近,第5候末雨带突然北跳至34°N;第2场暴雨过程第8候雨带位于31°N附近,第9候雨带北跳至33°N,到第10候雨带缓慢南退至29°N,这次暴雨过程主要发生在淮河流域;而第3场暴雨过程持续时间比较长,从第13

候开始到 15 候结束, 长江流域一直有非常强的降水, 强的降水中心主要出现在 $29\sim 32^{\circ}\text{N}$ 之间, 这与文献 [10, 21] 指出的暴雨过程一致。从模拟情况来看, Grell-AS 方案很好地模拟出了江淮流域的 3 次暴雨过程, 雨带的出现时间、位置和强度与观测基本一致, 尤其对第 2 场暴雨过程中雨带先北进后南退过程有很好的反映; Grell-FC 方案也模拟出了 3 次暴雨过程, 但对第 1 和第 2 次降水过程位置模拟明显偏南, 与观测差距较大; Kuo 方案对第 1 场暴雨模拟偏北偏强, 而第 2 和第 3 场强降水过程基本没有体现出来, 因此模拟效果不理想; Emanuel 方案对于第 1 场暴雨模拟范围偏大, 降水中心没有体现出来, 第 2 场暴雨模拟明显偏强, 在 30°N 出现虚假的强降水。对比 4 种参数化方案, Grell-AS 方案比较准确地模拟出了雨带的强度和南北变动, 相对而言模拟最好。

4 风场和水汽通量的模拟对比

由前对模拟结果的分析可以发现, Grell-AS 方案对于 1991 年 5~7 月江淮暴雨的模拟比较好, 尤其是对于 7 月的降水模拟与观测十分接近 (图 5), 而 Emanuel 方案模拟降水的范围和强度明显比观测要大。下面针对这两种方案, 从风场的高低空配置和水汽通量的模拟情况进行对比分析, 寻找造成降水偏差的主要原因。

4.1 高低空风场的模拟对比

图 7 给出的是 1991 年 7 月 850 hPa 的平均风场, 从 ECMWF 再分析场 (图 7a) 中可以看到, 整个长江流域为西南风控制, 最大风速区在 (28°N ,

115°E) 附近, 为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。造成 7 月降水的水汽主要来源于孟加拉湾和南海。从模拟情况来看, Grell-AS 方案较好地模拟出了江淮地区上空西南气流的位置, 但中心风速比 ECMWF 再分析场偏大, 超过 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在西边界 30°N 附近有一个明显的气旋性环流, 这可能是造成该处 (图 5b) 降水模拟偏强的主要原因。从 Emanuel 方案的模拟来看, 对于西南气流的模拟明显偏强, 长江以南大部分地区的风速都超过 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 大于 ECMWF 再分析场, 在 (30°N , $110\sim 115^{\circ}\text{E}$) 附近等风速线最密集, 因而造成该区域出现异常强降水 (图 5e)。在西边界 30°N 也有比较明显的气旋性环流, 从而造成该处降水模拟偏强。

从 200 hPa 的平均风场 (图略) 来看, ECMWF 再分析场中高空西风急流出现在 38°N 附近, 并在 28°N 附近由西北风转向成为东北风, Grell-AS 方案和 Emanuel 方案都较好地模拟出了高空西风急流的位置和强度, 也准确地模拟出了西北风向东北风的转变。两种方案模拟的情况比较相似, 而不像低层存在较大的差别。可见, 低层风场模拟偏强是造成降水模拟偏强的主要原因。

4.2 水汽通量的模拟对比

从地表面垂直积分的水汽通量, 综合体现了深厚气层中的流场和湿度场, 既能清晰地显示大气环流系统, 又能显示具有明显水汽输送特性的低空西南气流, 水汽通量的分布情况对于降水模拟的优劣有直接影响。

本文垂直积分的水汽输送通量 Q 的经、纬向计算公式为

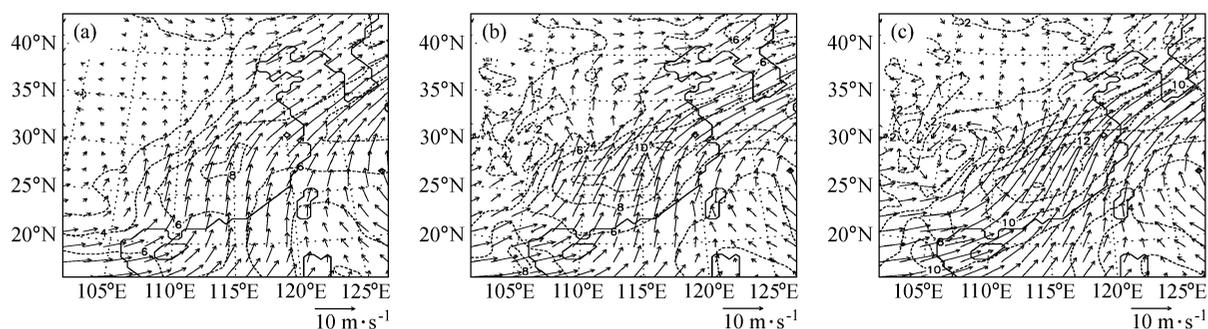


图 7 1991 年 7 月 850 hPa 平均风场 (虚线表示风速等值线): (a) ECMWF 再分析; (b) Grell-AS 方案; (c) Emanuel 方案

Fig. 7 850 hPa mean wind field in Jul 1991 (dashed lines denote isolines of wind): (a) ECMWF reanalysis; (b) Grell-AS scheme; (c) Emanuel scheme

$$Q_u = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q u d p, \quad Q_v = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q v d p,$$

式中, u 、 v 分别为该单位气柱内各层大气的经向风和纬向风, q 是各层大气的比湿, p_s 、 p_t 分别是大气柱的下界气压 (地面气压) 和上界气压 (300 hPa), g 是重力加速度, Q_u 、 Q_v 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。先用逐日各层上的比湿和风场资料计算出水汽通量, 然后进行垂直方向的整层积分, 算出月平均值。

从 ECMWF 再分析场 (图 8a) 来看, 造成长江流域特大暴雨的水汽主要来源于孟加拉湾和南海一带, 在长江中下游地区水汽通量都超过 $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 这与 7 月的强降水区对应 (图 5a)。从模拟来看, 两种方案都较好地反映出了水汽的输送情况, 但在强度上明显都要强于 ECMWF 再分析资料, Grell-AS 方案模拟的水汽通量在整个 30°N 以南地区都超过了 $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应长江流域强降水区的在 $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 比 ECMWF 再分析资料略偏大; Emanuel 方案模拟的水汽通量要强得多, 从华南到长江流域有一大片区域的水汽通量超过 $600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 这与 Emanuel 方案模拟的低层风场偏强有很大关系。另外, 在西边界 (30°N , 105°E) 附近 Emanuel 方案有一个水汽通量中心, 这可能是受地形的影响, 进而造成了虚假的降水中心 (图 5e)。

以上水汽通量的对比可以发现, Grell-AS 方案和 Emanuel 方案模拟的水汽输送虽然都比 ECMWF 再分析场强, 但 Grell-AS 方案能较好地把握水汽输送的中心位置, 且强度上更接近于 EC-

MWF 再分析资料, 因此 Grell-AS 方案能更好地模拟降水的位置和强度。而 Emanuel 方案模拟的水汽输送明显偏强, 这很可能是造成 Emanuel 方案降水模拟明显偏强的主要原因。

5 集合结果分析

集合预报的方法在中尺度预报中已经得到广泛的应用, 并有效地减小了预报误差^[22,23]。对于气候的模拟也同样存在着对初值和数值模式的不确定性问题。在数值模式的不确定性方面, 以积云对流参数化问题最为复杂, 不同的对流参数化方案对模拟结果尤其是降水的结果有显著的差别, 这反映了模式物理过程的不确定性对模拟结果的影响。那么, 是否可以考虑利用物理集合的方法来减小模拟误差呢?

前面通过对 Kuo、MIT-Emanuel、Grell-AS 和 Grell-FC 方案的模拟进行比较分析发现, Grell-AS 方案对降水的模拟比较好, 综合而言要优于其他方案, 这与文献 [15] 中 Grell 方案模拟较差的结论有些差别。但这里并不是说 Grell-AS 方案对降水的模拟有绝对的优势, 其他方案在某些时间和区域也能较好地反映降水的情况。这也说明在区域气候模拟中, 引入物理集合是可行的^[24]。

本文由 4 种积云参数化方案组成 4 个集合成员, 对 A、B 和 C 3 个区以每天的平均降水量为样本, 采用最小二乘法求出各方案在各月的回归系数, 得到 4 个成员集合的各区降水量。表 1 是以时间为样本求得的集合和各方案模拟的各区降水

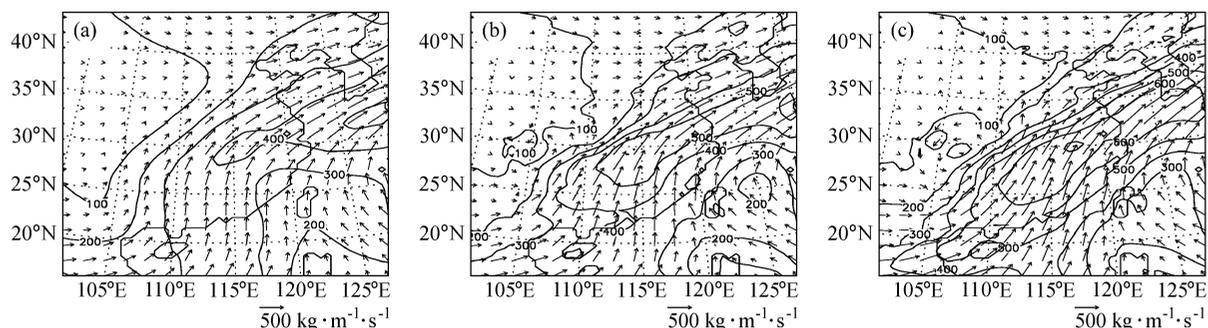


图 8 1991 年 7 月垂直积分的水汽通量矢量分布 (实线表示水汽通量等值线): (a) ECMWF 再分析; (b) Grell-AS 方案; (c) Emanuel 方案

Fig. 8 Distributions of vertically integrated water vapor flux vectors in Jul 1991 (solid lines denote isolines of water vapor flux): (a) ECMWF reanalysis; (b) Grell-AS scheme; (c) Emanuel scheme

表 1 集合和模拟的各分区降水均方根误差

区域	月份	集合	Grell-AS 方案	Grell-FC 方案	Kuo 方案	Emanuel 方案
A	5	2.10	3.29	4.05	3.50	4.95
	6	2.50	2.50	4.80	3.72	3.57
	7	3.94	4.32	6.33	5.40	9.21
B	5	3.72	5.98	5.41	6.37	7.42
	6	4.97	7.74	10.57	7.57	13.67
	7	6.51	7.60	8.16	8.49	8.79
C	5	3.20	4.33	9.03	4.07	4.86
	6	3.82	7.57	10.84	5.14	10.60
	7	4.32	6.48	11.31	6.95	8.33

均方根误差。

从表 1 中可以看出，对各参数化方案进行集合后，在 3 个区域各月物理集合的降水均方根误差都要明显小于单个方案的均方根误差。从物理集合的降水均方根误差来看，最小的均方根误差出现在 5 月 A 区，为 2.10 mm；最大的出现在 7 月 B 区，为 6.51 mm。相对而言，对于 A 区模拟均方根误差要小于 B 区和 C 区，这可能与华北地区主要以大尺度降水为主，而江淮和华南地区主要出现对流性降水，模式对于对流性降水模拟更加困难有关。从 6 月 B 区的均方根误差来看，4 种参数化方案模拟的降水均方根误差都在 7.5 mm 以上，经过物理集合后，均方根误差减小至 4.97 mm，这说明物理集合方法对减小模拟误差有显著作用。

6 结论

(1) 通过采用 4 种不同对流参数化方案，对 1991 年 5~7 月江淮地区暴雨模拟结果对比分析。可以发现，Grell-AS 方案除了 6 月模拟的江淮暴雨位置偏北、强度偏大外，整体上较好地模拟出了江淮暴雨的强度，尤其是对 7 月降水的强度和位置的模拟与观测非常接近，对各区域降水量的模拟与观测也较为接近，并能准确地表现江淮地区雨带的强度和南北变动；Grell-FC 方案模拟出了 6 月江淮暴雨的位置，但强度偏大，对 7 月江淮暴雨的位置和强度模拟较好，但对华南地区降水模拟一直显著偏强；Kuo 方案能模拟大尺度降水的情况，但对江淮地区的强对流性降水却模拟

偏弱；MIT-Emanuel 方案较好地反映了 5 月降水的空间形势，但各月各区域降水的模拟都比观测要强得多。综合而言，采用 Grell-AS 方案对 1991 年江淮暴雨的模拟更为合理。

(2) 高低空风场和整层水汽通量的分析表明，Grell-AS 方案能较好地反映大气环流的高低空形势，并能刻画水汽通量的分布；而 MIT-Emanuel 方案对低层气流的模拟明显偏强，导致水汽输送偏强，这是造成其降水模拟明显偏强的主要原因。

(3) 物理集合的结果表明，不同参数化方案集合的结果要明显优于任意单个方案所得到的结果。本文仅对 4 种积云参数化方案的物理集合进行简单地探讨，其对降水的模拟效果相对于单个方案有了较大程度的改进，说明运用物理集合将是减小模拟误差的有效方法。

致谢 李崇银院士对本文的初稿和修改提出了宝贵意见，两位评审专家提出了非常中肯的意见和良好的建议，在此表示衷心感谢！

参考文献 (References)

- [1] 魏和林, 符淙斌, 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
Wei Helin, Fu Congbin, Wang Wei-Chyung. The effect of lateral boundary treatment of regional climate model on the East Asian summer monsoon rainfall simulation. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, 22 (5): 779~790
- [2] 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
Zhao Zongci, Luo Yong. Investigations of application for the regional climate model over East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (5): 522~532
- [3] 李巧萍, 丁一汇. 区域气候模式对东亚季风和降水降水的多年模拟与性能. *气象学报*, 2004, **62** (2): 140~153
Li Qiaoping, Ding Yihui. Multi-year simulation of the East Asian monsoon and precipitation in China using a regional climate model and evaluation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (2): 140~153
- [4] 刘永强, 丁一汇. 区域气候模拟研究. *应用气象学报*, 1995, **6** (2): 228~239
Liu Yongqiang, Ding Yihui. A review of the study on simulation of regional climate. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1995, **6** (2): 228~239
- [5] 郑益群, 钱永甫, 桂祈军, 等. 初、边值条件对区域气候模拟的影响. *大气科学*, 2002, **26** (6): 794~806
Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Gui Qijun, et al. Effects of initial/lateral boundary conditions on regional climate simulations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (6): 794~806
- [6] 刘华强, 钱永甫. p- σ RCM 模式对中国区域气候季节变化的模拟. *南京气象学院学报*, 2001, **24** (2): 165~170
Liu Huaqiang, Qian Yongfu. Numerical simulations of climate seasonal change in China by p- σ RCM. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2001, **24** (2): 165~170
- [7] 符淙斌, 魏和林, 陈明, 等. 区域气候模拟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. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22** (4): 522~534
- [8] 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
- [9] 罗勇, 赵宗慈. NCAR RegCM2 对东亚区域气候的模拟试验. *应用气象学报*, 1997, **8** (增刊): 124~133
Luo Yong, Zhao Zongci. Numerical simulation of East Asian regional climate with NCAR RegCM2. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1997, **8** (Suppl.): 124~133
- [10] Luo Yong, Zhao Zongci, Ding Yihui. 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
- [11] 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
- [12] 张冬峰, 高学杰, 赵宗慈, 等. RegCM3 区域气候模式对中国气候的模拟. *气候变化研究进展*, 2005, **1** (3): 119~121
Zhang Dongfeng, Gao Xuejie, Zhao Zongci, et al. Simulation of climate in China by RegCM3 Model. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2005, **1** (3): 119~121
- [13] Liu Y, 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**: 26199~26215
- [14] Huang Ronghui, Wu Bingyi, Sung-Gil Hong, et al. Sensitivity of numerical simulations of the East Asian summer monsoon rainfall and circulation to different cumulus parameterization schemes. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (1): 23~41
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Emanuel K A. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48** (21): 2313~2335
- [18] Emanuel K A, M Zivkovic-Rothman. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 1766~1782
- [19] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). Tech. Rep. NCAR/TN-398 + STR, National Center for Atmospheric Research, 1994
- [20] Fritsch J M, Chappell C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective Parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **37**: 1722

- ~1733
- [21] 陆尔, 丁一汇, M Murakami, 等. 1991 年江淮特大暴雨的降水性质与对流活动. *气象学报*, 1997, **55** (3): 318~332
Lu Er, Ding Yihui, M Murakami, et al. The heavy rain character and convection activity over Changjiang-Huaihe river in 1991. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55** (3): 318~332
- [22] 王晨稀, 端义宏. 短期集合预报技术在梅雨降水预报中的试验研究. *应用气象学报*, 2003, **14** (1): 69~78
Wang Chenxi, Duan Yihong. Experiment and research of short-range ensemble forecasting techniques in forecasting mei-yu precipitation. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **14** (1): 69~78
- [23] 陈静, 薛纪善, 颜宏. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验. *气象学报*, 2003, **61** (4): 432~446
Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. The uncertainty of mesoscale numerical prediction of south China heavy rain and the ensemble simulations. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (4): 432~446
- [24] 钟科, 王汉杰. 区域气候模拟研究中的物理集合技术. *气象学报*, 2004, **62** (6): 776~781
Zhong Ke, Wang Hanjie. The physical ensemble technique of the regional climate simulation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (6): 776~781