

# RIEMS 中积云对流参数化方案对我国降水的影响

熊喆 符淙斌

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

**摘要** 利用区域环境集成系统模式 RIEMS 选择 Kuo-anthes (KA) 和 Grell (GCC) 积云对流参数化方案, 进行 1991 年 5~8 月敏感性试验, 重点考察了区域环境集成系统模式中两种积云对流参数化方案对 1991 年江淮流域持续性暴雨的模拟能力。结果表明: 1) 对于 200 hPa 西风急流的位置和强度来说, 采用 GCC 积云对流参数化方案较采用 KA 对流参数化方案, RIEMS 模式模拟的结果更加接近观测; 2) 不管模式采用哪种参数化方案, RIEMS 模式都能模拟出 850 hPa 上的水汽输送和流场, 但模式模拟的水汽输送都比观测强; 3) 不管是采用 GCC 方案还是 KA 方案 RIEMS 模式基本上能够模拟出平均气温的空间分布, 但对于长江以南地区, 模式模拟的温度较观测偏低, 对长江以北地区模式模拟的温度偏高。而采用 GCC 方案模式模拟的温度更加接近观测, 并且对大部分地区温度偏差在  $-1.65 \sim 1.5$  °C; 4) 对于降水来说, 采用 GCC 方案模式能够较好地模拟降水的空间分布特征以及雨带季节性移动, 但模拟的雨带较观测的偏北, 大约为  $1 \sim 2$  纬度。尽管 GCC 积云对流参数化方案在 RIEMS 模式中模拟中国地区降水更加接近观测, 但由于积云对流参数化在不同水平分辨率下影响模式模拟的效果, 因此对利用 RIEMS 模式进行数值模拟应考虑不同水平分辨率下积云对流参数化方案的适用范围。

**关键词** 区域环境集成系统模式 积云对流参数化

**文章编号** 1006-9585 (2006) 03-0387-08 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

## Impact of Convective Parameterization on RIEMS Simulation of Summer Precipitation

XIONG Zhe and Fu Cong-Bin

*Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029*

**Abstract** By using Kuo-Anthes (KA) and Grell cumulus convective (GCC) parameterization schemes in Regional Environment Integrated Modeling System (RIEMS), spatial pattern of surface air temperature, and location and intensity of precipitation, westerly jet, moisture transport and the temporal evolution of East Asia monsoon rain belt in summer 1991 are analyzed with two cumulus convective parameterization schemes. It showed that: 1) model with GCC scheme can better reproduce the spatial pattern of 200 hPa westerly jet than that with KA scheme; 2) model with GCC scheme and KA scheme can reproduce the pattern of moisture transport and streamline at 850 hPa but these patterns simulated by RIEMS with GCC scheme were closer to observation; 3) model with GCC scheme better reproduce the pattern of surface air temperature. When regionally averaged, seasonal mean temperature biases with GCC scheme is less than with KA scheme and is in the range of  $-1.65 \sim 1.5$  °C; 4) for precipitation, the model with GCC scheme tended to give better simulation than with KA scheme, especially in July. For regionally aver-

**收稿日期** 2006-03-17 收到, 2006-04-12 收到修定稿

**资助项目** 中国科学院知识创新工程重点方向项目 KZCX3-SW-218、国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400506、国家自然科学基金项目 40231006 和国家留学基金委 PPP 项目

**作者简介** 熊喆, 男, 1971 年出生, 博士, 助理研究员, 主要从事区域模式的研究。E-mail: xzh@tea.ac.cn

aged, seasonal precipitation biases with GCC scheme is less than with KA scheme over most regions and is mostly in the range of  $-1.36\%$ — $50\%$  of observations, and RIEMS with GCC scheme better reproduce the temporal evolution of East Asia summer monsoon rain belt with steady phases separated by more rapid transitions.

**Key words** Regional Environment Integrated Modeling System, cumulus convective parameterization scheme

## 1 引言

积云对流参数与大尺度环流通过网格尺度与次网格尺度动力的相互作用,直接影响大气能量、质量的输送和分布及降水过程的物理过程,它对大气环流与气候变化起十分重要的作用,是数值预报模式中十分重要的非绝热加热物理过程之一。不同的对流参数化方案在气候模式中所得的结果差异较大。成安宁等<sup>[1]</sup>利用全球模式比较 Manabe、Kuo、Arakawa-schubert 方案,认为降水的模拟差异较大,特别是夏季,Kuo 方案对东亚季风降水结果相对较好。

近十几年随着计算机技术和中尺度气象模式的迅速发展,为了更好地了解全球气候变化中的区域影响,国内外气候学家开始致力于区域气候模拟的研究,并做过大量的模拟工作。一些研究表明:利用区域气候模式 RegCM2 对我国或东亚地区夏季降水的模拟,能够反映雨带的主要位置和演变特征,但是模式模拟的雨带强度和范围往往与观测不甚吻合。Liu 等<sup>[2]</sup>指出对降水模拟的不足,可能与采用积云对流参数化方案有关。积云对流参数化方案对区域气候的降水的模拟是非常重要的,因为积云对流与大尺度环境的作用是相互反馈,相互影响的。一方面,积云是在大尺度环流强迫和控制下发生的大尺度动力抬升,低空盛行的大尺度及天气尺度的水分和质量辐合,是影响积云发生发展的重要参数,中纬度积云对流同时还受热力学结构(不稳定性)和垂直风切变的影响;另一方面,积云对流又通过其感热、潜热和动量输送等反馈作用影响大尺度环流,并在决定大气温度、湿度场的垂直结构中起着关键作用。

从上面的试验来看,大多数研究尽管用多种积云对流参数化方案对我国夏季降水的影响进行了比较,并且指出 Grell 方案模拟的降水量一般比观测偏大,Kuo 方案一般偏小,但这些研究大多

数仅限于中国东部地区<sup>[3~11]</sup>,大多数区域气候模式采用的模拟控制区域并不完全包括对我国气候有重要影响的大地形——青藏高原。因此,要想全面考察区域尺度上积云对流参数化方案对我国夏季季风的影响,找出较优的适合我国降水的对流参数化方案,就必须在模拟中包括整个青藏高原和我国干旱和半干旱地区。这样才能更好地了解各种积云参数化对模拟我国夏季降水的影响,从而为进一步改进区域气候模式中的参数化方案提供依据。

1991 年夏季中国江淮地区出现了 20 世纪罕见的特大洪涝灾害<sup>[12]</sup>,这次持续性大降水过程是中国近 40 年来的一次著名大暴雨事件。它的雨量之大、持续时间之久、影响之广和灾害之重都是历史上所少见。这场暴雨发生在江淮的梅雨季节,其主要特点是:梅雨来得早,持续时间长,梅雨期降水量大,暴雨时段集中,强度大,落区少动。选取持续性大暴雨作为试验,其目的是为了检验中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心发展的区域环境系统集成模式(RIEMS)中不同积云参数化方案对极端天气事件模式模拟的能力,同时了解 RIEMS 模式中积云对流参数化对模拟我国夏季降水的影响,为利用该区域气候模式预测我国未来气候变化提供参考。

## 2 模式介绍与实验设计

### 2.1 模式介绍以及实验设计

本文所用的区域环境集成系统模式<sup>[13]</sup>是中国科学院全球变化东亚区域研究中心于 1998 年发展起来的。该模式是以美国大气研究中心和美国宾夕法尼亚大学发展的中尺度模式(MM5)为动力框架,耦合一些研究气候所需的物理过程方案,这些过程包括生物圈-大气圈输送方案<sup>[14]</sup>、Holtlag<sup>[15]</sup>行星边界条件、修改的 CCM3 辐射方案等。

模式模拟区域网格中心位于( $37^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\text{E}$ ),

水平分辨率为 60 km, 网格点数为 111 (经向) × 91 (纬向)。垂直方向为 16 层。模式层顶气压为 100 hPa。积分的时段为 1991 年 5 月 1 日~8 月 31 日, 用美国环境预报中心的 NCEP 再分析资料 II 作为 RIEMS 的驱动场。采用指数松弛侧边界方案, 缓冲区的大小为 10 层。模式中地形来自于 PSU/NCAR 30' 地形资料; 地表覆盖植被类型资料来自于水平分辨率为 1° × 10° 国际卫星陆面气候计划 (ISLSCP) 数据, 并将地表覆盖植被类型资料 15 类转化为生物圈—大气圈输送方案中的 18 类, 然后将地形和地表覆盖植被类型插值到模式网格点上。

## 2.2 用于检验模式的数据

用于模式检验的资料包括: 1) 700 个观测站点的月平均表面大气温度和月总降水量; 2) 160 个观测站点的日降水; 3) 水平分辨率为 0.5° × 0.5° 的全球观测温度和降水资料<sup>[16]</sup>。

对于降水来说, 首先对观测月降水量数据采用客观分析方法插值, 将其插值到分析控制区网格点上; 然后, 对于海洋和没有观测报告分析的控制区网格点, 用全球观测月降水网格点资料进行双线型插值得到的网格点上的数据代替, 最后形成观测月总降水量。

## 3 两种积云对流参数化方案的原理

### 3.1 Grell 积云参数化方案

Grell 积云参数化<sup>[17]</sup>采用依赖于不稳定速率的闭合假设, 提出了一个简化的单云概念模型, 云内有上升和下沉引起的两个稳定态环流, 在云内空气与环境空气之间除了环流的顶部和底部外, 并没有直接的混合。云内水汽的收支在饱和假定下可近似表示为

$$q_c(z) = q^* + \frac{r}{1+r} \frac{1}{L} [h_c(z) - \bar{h}(z)],$$

式中

$$\gamma = \frac{L}{c_p} \left( \frac{\partial q^*}{\partial T} \right)_P,$$

$q^*$  表示环境饱和值,  $h_c$  表示内饱和情况下的湿静力能,  $\bar{h}(z)$  表示环境饱和和湿静力能。

该方案根据动力控制和有效浮力能来计算云上升质量通量和云下沉质量通量, 云内潜热释放

并不直接加热环境, 而是维持云的垂直质量通量, 对流反馈完全由补偿性质量通量和云顶及云底的卷出效应所决定。

### 3.2 Kuo-Anthes 积云参数化方案

Kuo-Anthes 积云参数方案<sup>[18]</sup>采用质量和水汽辐合型假设。把水汽辐合作用分为两部分, 一部分用于凝结和降水, 另一部分用于湿润环境空气。设水汽辐合量  $M_t$  为

$$M_t = -g^{-1} m^2 \int_0^1 \nabla \cdot \frac{P' V q_v}{m} d\delta$$

式中,  $P' = P_s - P_t$ ,  $P_s$  是地面气压,  $P_t$  是模式层顶气压,  $V$  为风速,  $q_v$  为水汽混合比,  $m$  是地图放大因子。  $M_t$  的一部分  $(1-b) M_t$  被用于层云降雨, 余下部分  $bM_t$  则用于湿润环境空气, 为湿润因子, 按照 Anthes 方案, 它与云柱的平均相对湿度  $\overline{H_R}$  有关:

$$b = \begin{cases} 2(1 - \overline{H_R}), & \overline{H_R} \geq 0.5 \\ 1.0, & \overline{H_R} < 0.5 \end{cases}$$

该方案认为积云本身的上升运动侵入到深厚的条件性不稳定中, 把低层大尺度环境场辐合的水汽输送到高层, 凝结成云降雨, 释放潜热。云内暖湿空气经云壁侧向混合, 根据一维云模式确定的对流加热、增湿垂直分布函数来影响环境空气。

该方案根据动力控制和有效浮力能来计算云上升质量通量和云下沉质量通量, 云内潜热释放并不直接加热环境, 而是维持云的垂直质量通量, 对流反馈完全由补偿性质量通量和云顶及云底的卷出效应所决定。

## 4 模拟结果的比较

### 4.1 两种积云对流化方案模拟的大气环流与观测资料的比较

图 1 为 1991 年 7 月 200 hPa 纬向风场的空间分布。从观测图上 (图 1a) 可以清楚地看到在 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。从模拟的结果来看, 无论采用 Kuo-Anthe (KA) 积云对流参数化方案或 GCC 方案, 模式基本上能够模拟出 200 hPa 夏季的西风急流的位置, 但采用 GCC 方案模拟出的西风急流的范围和大小与观测

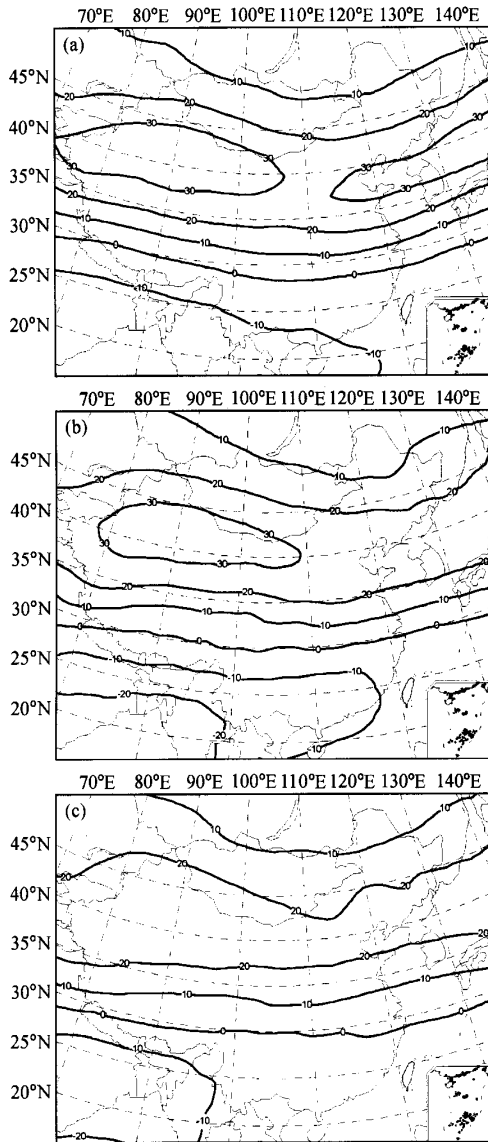


图1 1991年7月200 hPa纬向风场(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )的空间分布: (a) ECMWF; (b) GCC方案; (c) KA方案

Fig. 1 200 hPa monthly mean zonal wind in July 1991 (units:  $m \cdot s^{-1}$ ): (a) ECMWF; (b) GCC Scheme; (c) KA Scheme

比较一致, 而采用KA方案模式模拟的西风急流的强度较观测弱、范围较观测偏小(图1b、c)。

图2为1991年7月850 hPa水汽输送场的空间分布。这里的水汽输送为100乘以相对湿度( $q$ )与经向风速( $v$ )的乘积。从ECMWF再分析资料可以看出有两个极大正值中心, 其中一中心位于孟加拉湾地区, 强度达到500, 而另一中心

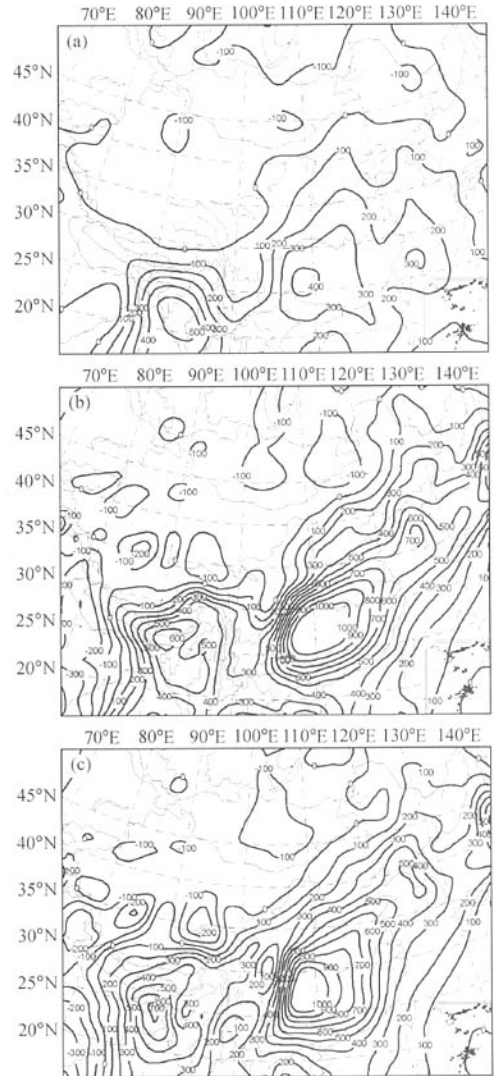


图2 1991年7月850 hPa水汽输送场的空间分布: (a) ECMWF; (b) GCC方案; (c) KA方案

Fig. 2 Monthly mean vapor transport ( $100 \times q \times v$ ) at 850 hPa in July 1991: (a) ECMWF; (b) GCC Scheme; (c) KA Scheme

位于(25°N, 110°E), 其强度达到400。在我国东部的水汽输送呈西南-东北走向, 同时在我国西部干旱/半干旱地区和东北的北部存在负值区(图2a)。采用GCC方案(图2b)与KA方案(图2c)模式基本上能够模拟出水汽输送场的空间分布, 但与观测存在差异。采用GCC方案模拟的两个极大正值中心位置与观测较为一致, 但中心

强度较观测强,同时模拟出正值区的范围较观测大。采用 KA 方案模式模拟位于印度东部和孟加拉湾南部的极大正值较观测位置偏西偏北,强度较观测强,同时在西南地区出现两个低值中心,该中心在观测中没有,可能是两个虚假的中心,并且模式模拟出水汽输送正值区的范围较观测大,同时较采用 GCC 方案模拟的范围大。

图 3 为 1991 年 7 月 850 hPa 流场。从观测图

上(图 3a)可以看出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的气流,途经我国新疆北部以后形成西南气流,在流场图上,可以清楚地看到在模拟控制区的北部有一个反气旋存在;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。而南支气流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

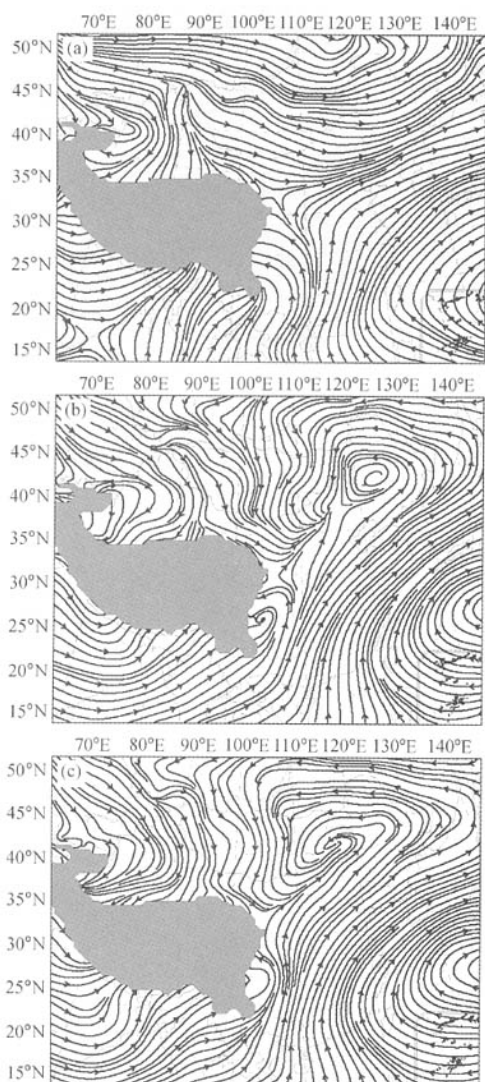


图 3 1991 年 7 月 850 hPa 流场: (a) ECMWF; (b) GCC 方案; (c) KA 方案

Fig. 3 Mean streamline fields at 850 hPa in July, 1991: (a) ECMWF; (b) GCC Scheme; (c) KA Scheme

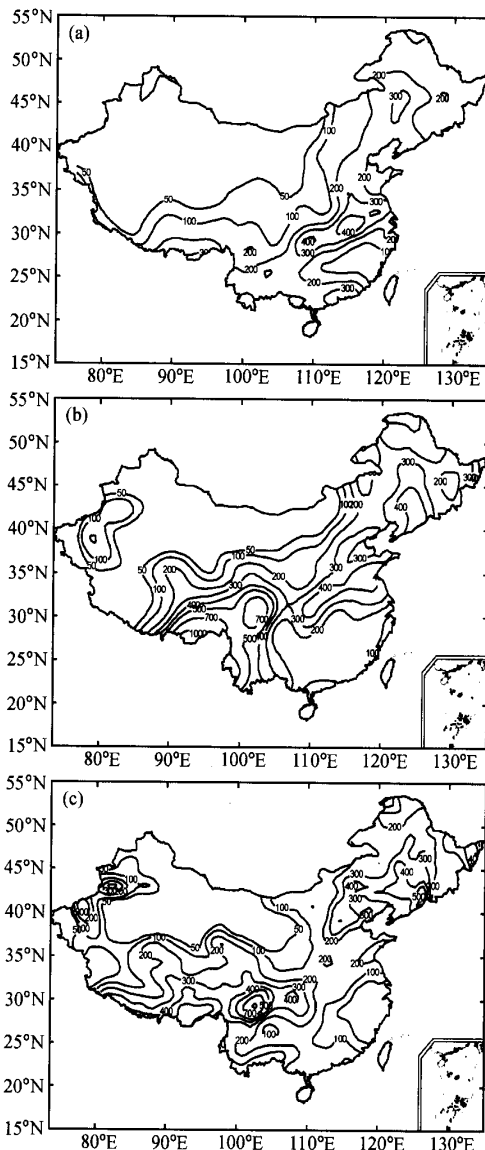


图 4 1991 年 7 月降水的空间分布 (单位: mm): (a) 观测; (b) GCC 方案; (c) KA 方案

Fig. 4 Monthly total precipitation in July, 1991 (units: mm): (a) observation; (b) GCC Scheme; (c) KA Scheme

江流域与北气流汇合；同时在西太平洋地区有一个大的反气旋，该反气旋与地面上太平洋副热带高压相对应。不管模式采用 GCC 方案（图 3b）还是 KA 方案（图 3c），模拟基本上能够模拟出流场的空间分布，但是它们在东北地区出现一个大的气旋，这可能是导致模式在东北地区降水模拟的偏多的原因；而对于副热带高压位置的模拟，采用 GCC 方案较 KA 方案更加接近观测。

#### 4.2 GCC 方案与 KA 方案模拟地面要素的对比分析

地面降水和地面气温是区域气候预测和模拟的主要对象。图 4 给出 1991 年 7 月降水空间分布。从观测图上（图 4a）可以清楚发现降水雨带呈东西走向，位于  $27^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$  附近。有两个大的降水中心：一个位于  $29^{\circ}\text{N}$  附近，其中 400 mm 等值线位于  $(29^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E})$  附近；另一中心位于  $31^{\circ}\text{N}$  附近，其中 500 mm 等值线位于  $(31^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E})$  附近。从图 4b 中可以看出，对于采用 GCC 方案模式基本上能够模拟江淮流域大的雨带，但对于  $29^{\circ}\text{N}$  附近的大降水中心，模式模拟的位置较观测偏东；而采用 KA 方案（图 4c）基本上不能模拟出降水的空间分布，特别是江淮流域东西方向的雨带。对于受持续暴雨过程影响的长江流域来说，采用 GCC 方案模式模拟的降水偏差为  $-1.36\%$ ，而采用 KA 方案模式模拟降水偏差为  $-61\%$ ；对于华南地区来说，采用 GCC 方案模式模拟的降水偏差为  $12\%$ ，而采用 KA 方案模式模拟降水偏差为  $-38\%$ ；对于东北地区，采用 GCC 方案模式模拟的降水较偏多，降水偏差为  $35\%$ ，而采用 KA 方案降水偏差为  $33\%$ ；对于西部/东部干旱-半干旱区来说，采用 GCC 方案模式模拟的降水偏差为  $8\%$ ，而采用 KA 方案模式模拟的降水偏差为  $50\%$ 。

图 5 分别为  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  平均 5~8 月的观测（图 5a）、采用 GCC 方案（图 5b）和 KA 方案（图 5c）模拟的候平均降水随纬度和时间的分布。从观测结果来看：由于在 5 月西太平洋副热带高压第一次北跳过早，因此从观测图上（图 5a）可以清楚地看到 5 月上旬的雨带并不出现在华南沿海，而主要位于  $28^{\circ}\text{N}$  左右；但到 5 月下旬，由于自西南至华北西部的偏南风减弱，华东至东南地区仍是西南季风控制，雨带迅速北移跃到  $31^{\circ}\text{N}$ ，

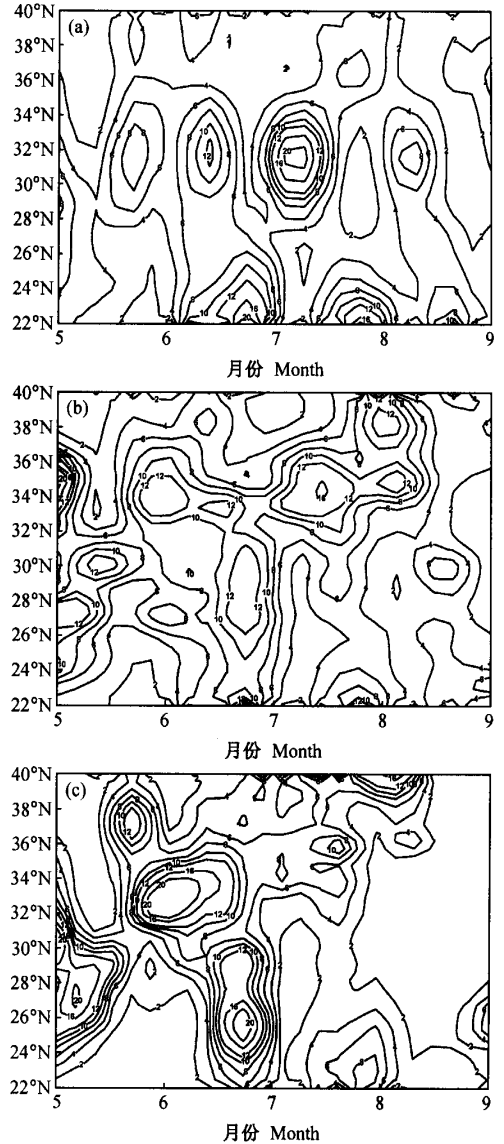


图 5  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  平均 5~8 月候平均降水随纬度和时间的分布（单位： $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ）：(a) 观测；(b) GCC 方案；(c) KA 方案

Fig. 5 Temporal-latitude section of rainfall averaged over  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  in the period of May-August (units,  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ): (a) observation; (b) GCC Scheme; (c) KA Scheme

并且一直持续到 6 月上旬，这样在华东至西南地区出现持续的强降水过程；到 7 月上旬雨带第二次向北跳，到达  $32^{\circ}\text{N}$  左右，并且一直持续到 7 月中旬，江淮流域的持续降水过程还在进行；大约在 8 月下旬，雨带明显南撤。而采用 GCC 方案（图 5b）对于雨带的两次北跳基本上能够模拟出

来, 但只是模拟的雨带位置较观测偏北 1~2 个纬度; 而采用 KA 方案 (图 5c) 模式能够模拟 5 月初和 6 月上旬雨带, 并且降水强度较观测偏强, 而对于 6 月中旬至 7 月上中旬江淮流域的持续性降水基本没有模拟出来。

图 6 为 1991 年 7 月平均气温。从观测图上 (图 6a) 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。不管是采用 GCC 方案 (图 6b) 还是 KA 方案 (图 6c) 模式基本上能够模拟出平均气温的空间分布, 但对于长江以南地区, 模式模拟的温度较观测偏低, 大约为 0.75~2.48 °C; 对长江以北地区模式模拟的温度偏高, 偏高最突出的地区为干旱-半干旱地区, 大约偏差为 1.21~2.64 °C。采用 GCC 方案模式模拟的温度较采用 KA 方案模式模拟的温度更加接近观测, 并且温度偏差在 -1.65~1.5 °C。

### 5 结论

本文主要考察区域气候模式对东亚地区温度、降水的气候平均态和雨带季节性的移动。通过以上分析和比较可以得出以下结论:

(1) 对于 200 hPa 西风急流的位置和强度来说, 采用 GCC 积云对流参数化方案较采用 KA 对流参数化方案, RIEMS 模式模拟的结果更加接近观测。

(2) 不论模式采用哪种参数化方案, RIEMS 模式都能模拟出 850 hPa 上的水汽输送和流场, 但模式模拟的水汽输送都比观测强。

(3) 不论是采用 GCC 方案还是 KA 方案, RIEMS 模式基本上能够模拟出平均气温的空间分布; 但对于长江以南地区, 模式模拟的温度较观测偏低, 对长江以北地区模式模拟的温度偏高。采用 GCC 方案模式模拟的温度更加接近观测, 并且温度偏差在 -1.65~1.5 °C。

(4) 对于降水, 采用 GCC 方案模式能够较好地模拟降水的空间分布特征以及雨带季节性移动, 但模拟的雨带较观测的雨带偏北, 大约为 1~2 纬度; 而采用 KA 方案模式能够模拟 5 月初和 6 月上旬雨带, 但对于 6 月中旬至 7 月上中旬长江流域的降水基本没有模拟出来。

本文仅仅是针对 1991 年江淮流域的特大暴雨对 RIEMS 模式中两种积云对流参数化方案进行分析比较, 结论只是初步的。以后将进一步对这两种积云对流化方案的物理机制进行分析, 同时研究模式水平分辨率影响积云对流参数化效果<sup>[19]</sup>。

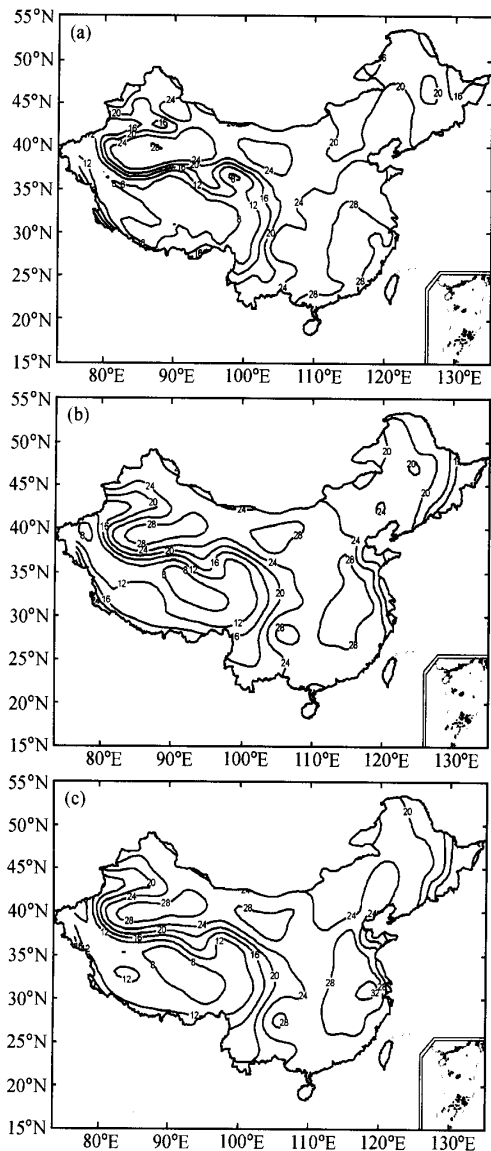


图 6 1991 年 7 月平均气温的空间分布 (单位: °C): (a) 观测; (b) GCC 方案; (c) KA 方案

Fig. 6 Monthly mean surface temperature in July 1991 (units: °C): (a) observation; (b) GCC Scheme; (c) KA Scheme

## 参考文献 (References)

- [1] 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. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22** (6): 814~824
- [2] Liu Y, 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**: 26199~26215
- [3] Liu Y, Giorgi F, Washington W M. Simulation of summer monsoon climate over east Asia with an NCAR regional climate model. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**: 2331~2348
- [4] 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. Meteor. Soc.*, 1991, **117**: 1171~1206
- [5] 王建捷, 胡欣, 郭肖容. MM5 模式中对流化方案的比较试验. 应用气象学报, 2001, **12** (1): 41~51  
Wang Jianjie, Hu Xin, Guo Xiaorong. Comparison experiments on cumulus parameterization schemes of the MM5. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2001, **12** (1): 41~51
- [6] 彭新东, 吴晓鸣, 坪木和九. 积云对流化对一次梅雨锋暴雨过程影响的模拟检验. 高原气象, 1999, **18** (3): 451~461  
Peng Xindong, Wu Xiaoming, Tsuboki Kazuhisa. Numerical test of convective parameterization on the simulation of a meiyu-front rainstorm. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (3): 451~461
- [7] 刘一鸣, 丁一汇. 修正的质量通量积云对流方案及其模拟实验研究 I. 方案介绍及对 1991 年洪涝过程的模拟. 气象学报, 2001, **59** (1): 10~22  
Liu Yiming, Ding Yihui. Modified mass flux cumulus parameterization scheme and its simulation experiment. Part I: Mass flux scheme and its simulation of the flooding in 1991. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (1): 10~22
- [8] 刘一鸣, 丁一汇. 修正的质量通量积云对流方案及其模拟实验研究 II. 三种积云方案的对流活动及 MFS 方案相关参数的敏感实验. 气象学报, 2001, **59** (2): 129~144  
Liu Yiming, Ding Yihui. Modified mass flux cumulus parameterization scheme and its simulation experiment. Part II: Cumulus convection of the schemes and the sensitivity experiments of MFS. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (2): 129~144
- [9] 潘劲松, 翟国庆, 高坤. 区域气候模式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, Guo Kun. Comparisons of three convective parameterization schemes in region climate simulations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (2): 206~220
- [10] 熊喆. 区域气候模式对东亚气候时空演变特征的模拟研究. 气候与环境研究, 2004, **9** (2): 295~302  
Xiong Zhe. Evolutionary character of climatology over East Asia by RIEMS. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 295~302
- [11] 熊喆. 区域气候模式 RIEMS 对东亚地区的模拟. 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
- [12] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993. 255pp  
Ding Yihui. *Study of Heavy Rainstorm over the Yangtze River in 1991* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 255pp
- [13] Fu Congbin, Wei Helin, Qian Yun. Documentation on Regional Integrated Environmental Model System (RIEMS, Version D), TEACOM Science Report, No. 1, START Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China, 2000, 36pp
- [14] Dickinson R E, Henderson, Sellers. A biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Technical Note, NCAR/TN-387+STR, 1993, 72pp
- [15] Holtslag A A M, De Brujin E I F, Pan H L. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 1561~1575
- [16] New M, Hulme M, Jones P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate*, 2000, **13**: 2217~2238
- [17] Grell A G, Dudhia H, Sranfler D S. A description of the fifth-generation Penn State-NCAR Meso-scale Model (MM5). NCAR Tech. Note NCAR/TN-398 + STR, Natl. Center for Atmos. Res., Boulder, Co. 1994. 122 pp
- [18] Anthes R A, Hsie E Y, Kuo Y H. Description of the Penn. State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4). Tech. Note, NCAR/TN-282+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 1987. 66pp
- [19] 周天军, 钱永甫. 模式的水平分辨率影响积云对流参数化效果的数值试验. 高原气象, 1996, **15** (2): 204~211  
Zhou Tianjun, Qian Yongfu. Numerical experiment of effect of model horizontal resolution on cumulus parameterization. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1996, **15** (2): 204~211