

区域气候模拟中多种对流参数化方案的 比较研究*

P4 A

潘劲松

翟国庆 高坤

(浙江省气象台, 杭州 310017)

(浙江大学地球科学系, 杭州 310008)

摘要 利用区域气候模式 RegCM2, 选择 Betts-Miller、Kuo-Anthes 和 Grell 3 种积云对流参数化方案, 进行了 1991 年和 1994 年 5~7 月 2 个个例的东亚季风区区域气候模拟试验, 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、雨带南北变动和基本气象要素场的模拟能力, 并相对实测降水 and 基本要素的观测分析进行了统计检验。通过对比, 发现 Betts 方案的模拟能力明显优于其他两种方案。

关键词: 东亚季风; 降水; 区域气候模式

1 前言

国内外许多气象专家利用区域气候模式, 做过大量的模拟试验^[1-9]。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, 能反映雨带的主要位置和演变特征, 但是模拟的雨带强度和范围往往与观测不甚吻合。刘永强等^[2,3]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, 例如在 1990 年夏季各个区域的模拟中, Grell 方案模拟的降水量一般比观测值偏大, 而 Kuo 方案一般偏小; Giorgi 等^[8,9]也指出对物理过程采用不同的参数化方案, 所得结果差异还是较为明显的。

积云对流参数化对区域气候的降水模拟是非常重要的, 因为积云在大尺度环流强迫和控制下发生后, 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的作用。如 1991 年特大暴雨就与异常强的积云对流活动有关, 形成洪涝的 3 场暴雨由第一场暴雨以锋面性降水为主发展到第三场暴雨为异常强的对流性降水^[10]。

从上面的模拟试验, 理论和实况分析来看, 我们认为虽然前人对 Kuo 和 Grell 方案作过简单的降水比较, 但还有待于对多种参数化方案进行多个例试验, 并作深入细致的比较研究, 找出较优的适合我国东部地区降水的对流参数化方案, 为进一步改进参数化方案提供线索, 这对降水的气候模拟是非常必要的。在日前所用的区域气候模式 RegCM2 中, 有 Kuo-Anthes 和 Grell 参数化方案可供选择, 我们又加入了经过短期模拟试验而被证实是合理的 Betts-Miller 方案, Betts 方案在国内外区域气候模拟中已广

2000-03-14 收到, 2001-07-19 收到再改稿

* 国家“九五”重中之重科技项目“我国短期气候预测系统研究”96-908-02-04-3 子专题资助

泛采用, 并取得了较好的模拟效果。由于 Betts 方案对大量对流区热力结构的观测事实进行分析研究, 然后把得到的准平衡热力廓线作为对流调整参考廓线^[11], 因而相当于保证了全球模式在对流存在时, 格点尺度上总是维持“真实”的温湿结构。我们知道, 在东亚, 特别是在长江中下游及其以南地区, 5~7 月强降水过程中, 积云对流活动是非常旺盛的。由于 Betts 方案对流区温湿结构的调整比 Kuo 和 Grell 方案采用的云模式调整更具有“真实”的性质, 所以 Betts 方案在东亚效果更好。

本文首先简单介绍了上述 3 种参数化方案的基本原理, 并通过 1991 年和 1994 年 5~7 月的模拟试验, 深入细致地比较 3 种参数化方案对降水和基本要素场的模拟状况, 统计检验它们在中国季风区的气候模拟能力, 分析比较各种参数化方案在强降水区域、强降水时段以及弱降水时段的表现, 选择出较优的参数化方案, 为今后用区域气候模式做东亚降水预报提供一些参考。

2 区域气候模式和模拟设计

本试验采用的区域气候模式 RegCM2 是气候模式 CCM2 和中尺度气象模式 MM4 相耦合而成的。为了进行区域气候模拟, 美国 NCAR 和宾州大学共同对一些气候过程的物理参数进行了扩充和修改, 其详细说明可参考文献[8]、[9]和[12]。在模拟中采用了 CCM2 的大气辐射计算方案, BATS 陆面生态模式, 显式的 Holtslag 高分辨边界层模式和张弛指数侧边界方案, 非对流降水采用非显式水汽方案, 缓冲区的宽度为 5 个格点。

本文的模拟个例选取强降水落区不同的 1991 年江淮特大洪涝和 1994 年长江以南大范围异常降水, 试验中心位于 (30°N, 115°E), 范围为 49×55 格点, 格距为 60 km, 垂直方向非均匀分为 15 层。利用欧洲中期天气预报中心 7 层 2.5°×2.5° 的高空资料, 1°×1° 的地面资料以及全球海温资料来产生 10 层标准等压面的格点分析场, 然后插值到 σ 面上, 产生 τ 面上的初始场和侧边界条件。1991 年个例从 5 月 1 日连续积分到 7 月 15 日, 1994 年个例从 5 月 1 日连续积分到 7 月 31 日, 积分的时间步长为 180 s。

3 3 种积云对流参数化方案的原理

3.1 Betts-Miller 积云参数化

Betts-Miller 方案^[13~15]采用瞬时平衡假设, 认为由于积云对流的存在, 对流区温湿结构受到对流强迫, 将在一个对流调整时段内, 同时向根据实测资料归纳的一个准平衡热力学参考状态张弛逼近, 这个热力学参考状态由虚湿绝热线和饱和气压差的垂直分布廓线决定。

3.1.1 位温参考廓线

$$\theta_s(P) = \begin{cases} \theta_s(P_b) + \alpha_w \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial p} \right)_m \cdot (P - P_b), & (\text{冻结高度及以下}) \\ \theta_s(P_t) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial p} \right)_{pt} \cdot (P - P_t), & (\text{冻结高度以上}) \end{cases}$$

式中: θ 为位温, $\left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial p}\right)_{pf} = \frac{\bar{\theta}_m(P_i) - \bar{\theta}_m(P_f)}{P_i - P_f}$, 字母上的“-”和下标“a”分别表示对流调整前后的值; $\alpha_w = 1.5$ 为稳定度权重系数; “m”表示虚湿绝热线位温梯度; P_0 、 P_f 、 P_i 分别表示云底、冻结高度、云顶的气压。

3.1.2 湿度参考廓线

定义饱和气压差参数 ΔP^* : $\Delta P^* = P^* - P$, 式中 P^* 表示气块沿干绝热线上升达饱和和所在高度的气压。那么参考廓线为

$$q_a(P) = \frac{379.1}{P^*} \exp\left[\frac{17.269(T^* - 273.16)}{T^* - 35.86}\right],$$

式中 $T^* = T_0(P^*/P)^{R/c_p}$, $P^* = P + \Delta P^*(P)$, T_0 由位温计算式 θ_a 求得。

由于 Betts 方案的温湿参考廓线的确定是建立在大量观测事实基础上的, 因此, 该方案能给出较好的对流加热、增湿的垂直分布。

3.2 Kuo-Anthes 积云参数化

Kuo-Anthes 方案^[12,16]采用质量, 水汽耦合型假设, 把水汽耦合作用分为两部分, 即总量的一部分用于凝结和降水, 另一部分则用于湿润环境空气。设水汽耦合量 M_t 为

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

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

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

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层中, 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。

3.3 Grell 积云参数化

Grell 方案^[12]采用依赖于不稳定化速率的闭合假设, 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态环流, 在云内空气与环境空气之间除了环流的顶和低部外, 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

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

式中 $\gamma = \frac{L}{c_p} \left(\frac{\partial \tilde{q}^*}{\partial T}\right)_p = \frac{L}{c_p} \left(\frac{L}{R_v T^2} \tilde{q}^*\right)$, \tilde{q}^* 表示环境饱和值, h_c 表示云内饱和情况下的湿静力能, $\tilde{h}^*(z)$ 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, 云内的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 降水模拟结果的分析比较

4.1 降水模拟结果对比

4.1.1 总雨量模拟对比

图 1 为 1997 年 5 月 1 日~7 月 15 日总雨量的实况和 3 种参数化方案的模拟结果。从实况图上看, 江淮地区为降水最大的区域, Betts、Kuo 和 Grell 方案都能模拟出来, 其中 Betts 方案模拟的雨量中心值达到 992 mm, 最接近实况, 而 Kuo 和 Grell 方案模拟的中心值只有 800 mm 左右, 与实况相差较大。从雨带的范围来看, 500 mm 的雨区以 Betts 方案最大, Kuo 和 Grell 方案明显偏小, 尤其是 Grell 方案, 范围最小。Betts 方案不仅在 500 mm 雨区的范围和走向与实况比较相似, 而且模拟的江淮地区 750 mm 的雨区范围和特征(除黄山地区外)与实况也非常一致, Kuo 和 Grell 方案则并未真正模拟出 750 mm 的雨区。因此从模拟的 76 d 总雨量的分布特征来看, Betts 方案明显优于 Kuo 和 Grell 方案。

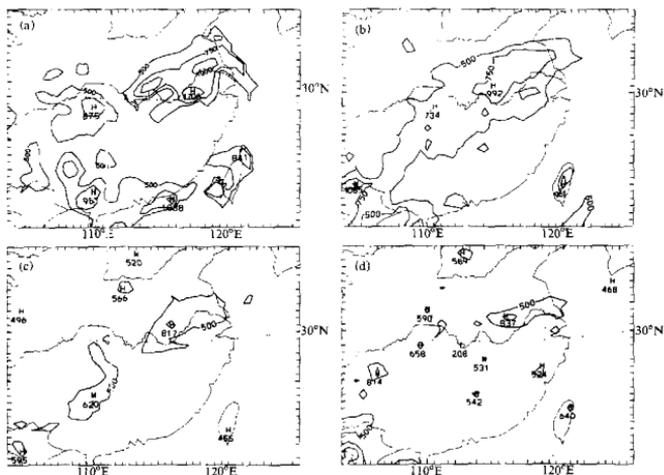


图 1 1997 年 5 月 1 日~7 月 15 日 76 d 总雨量实况和模拟结果(单位: mm)

(a) 实况; (b) Betts 方案; (c) Kuo 方案; (d) Grell 方案

1994 年个例模拟同样表明 Betts 方案预报的总雨量明显比 Kuo 和 Grell 方案更接近实况(图 2)。Betts 方案模拟的 500 mm 雨区主要分布在我国长江流域以南地区, 与实况比较相符, 并且模拟的 750 mm 和 1 000 mm 的雨区范围和分布特征, 明显比另外

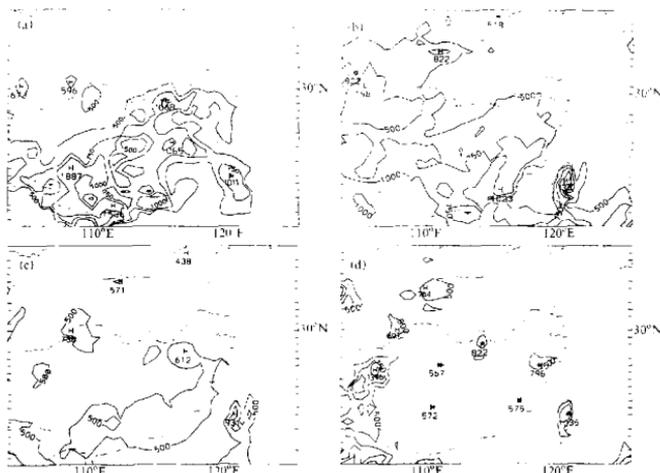


图2 1994年5月1日~7月29日90 d总雨量实况和模拟结果(单位: mm)
(a) 实况; (b) Betts方案; (c) Kuo方案; (d) Grell方案

两方案更接近实况。Kuo和Grell方案的模拟效果很差, 500 mm雨区范围很小, 两方案基本上没有预报出750 mm和1000 mm成片区域降水, 与实况相差很大。

4.1.2 1991年第3场暴雨过程雨量对比

陆尔和丁一汇^[10]指出, 1991年第3场暴雨过程积云对流活动最强, 雨量最大。300 mm雨区范围呈东北-西南向分布, 3个雨量中心分别位于大别山区、苏北东部和浙赣皖交界处(图3)。从3方案的模拟来看, Betts方案预报的300 mm雨区范围最大, 最接近实况, Kuo方案和Grell方案偏小, 没有模拟出强降雨带东北-西南向的分布特征。另外, 3方案未能预报出浙赣皖交界处的雨量中心, 对于其他两个雨量中心, Betts方案模拟的中心值和位置都较好, 为527 mm和406 mm(主要是对流性降水量), 而Kuo和Grell方案的一个中心为400 mm左右和600 mm左右, 另一个中心位置不相符或不明显。由此可见, Betts方案对1991年第3场暴雨过程中异常强的积云对流活动的模拟是最佳的。

4.1.3 主要降水时段模拟的对比

将各方案模拟的强降水区平均候雨量的时间演变曲线与实况进行对比(图4、图5), 表明在两个例中, Betts方案对强降水时段出现时间和强度的模拟, 均优于另外两方案。如模拟的1991年第3场暴雨的峰值分别出现在积分第25~30天, 第45天和第65~70天, 与实况雨峰出现时间基本相符, 相比较而言, Betts方案模拟的3场暴雨的峰值强度和出现时间明显优于Kuo和Grell方案。而1994年6月中旬前后出现的降水强

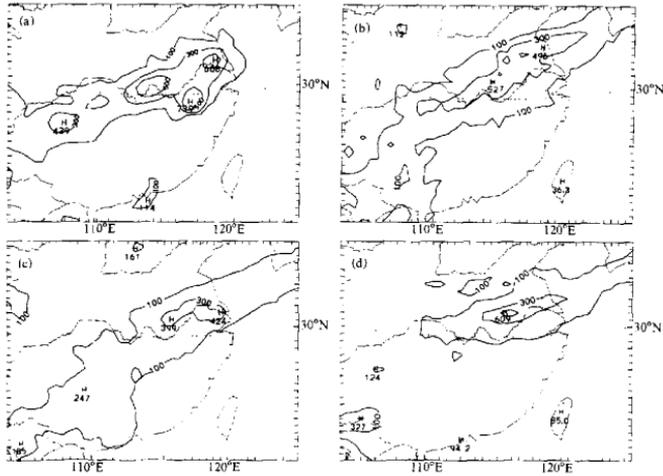


图3 模拟积分第61~74天的降水和相应的实况雨量(单位: mm)

(a) 实况; (b) Betts方案; (c) Kuo方案; (d) Grell方案

度也是 Betts 方案比 Kuo 方案更接近实况。

将各方案模拟的降水场插值到测站上, 与站点实测雨量分别求强降水时段的相关系数(表1), 从表1可以看出, 在1991年的3场暴雨期和1994年6月中旬前后的强降水时段, Betts方案的相关系数都明显大于Kuo和Grell方案, 这与图4和图5揭示的

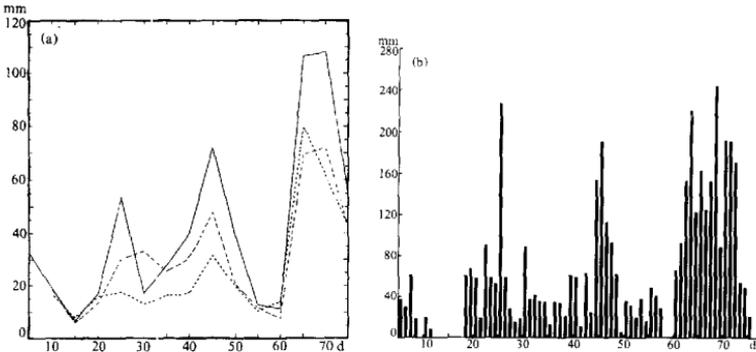


图4 1991年5月1日~7月15日强降水区域(江淮地区)平均候雨量的时间演变曲线

(a) 三方案模拟图(实线为Betts, 虚线为Kuo, 点虚线为Grell); (b) 实况直方图

表 1 各方案模拟的强降水时段雨量与测站降水的相关系数

| 方案 | 1991 年个例 | | | 1994 年个例 |
|----------|----------|---------|---------|----------|
| | 第 1 场暴雨 | 第 2 场暴雨 | 第 3 场暴雨 | 6 月中旬前后 |
| Betts 方案 | 0.45 | 0.40 | 0.73 | 0.30 |
| Kuo 方案 | 0.17 | 0.32 | 0.56 | 0.26 |
| Grell 方案 | 0.02 | 0.19 | 0.51 | 0.01 |

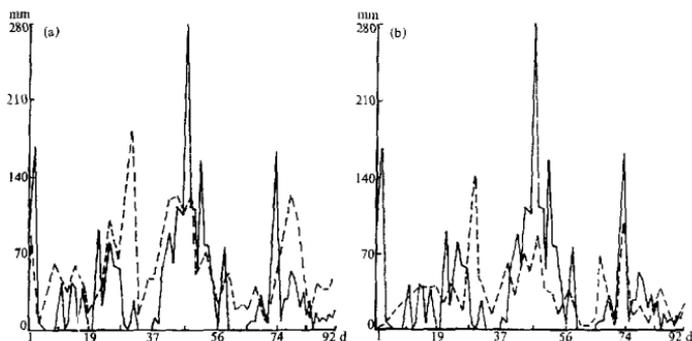


图 5 1994 年 5 月 1 日~7 月 31 日强降水区域(江南地区)最大日雨量的时间演变曲线
(a) 实况(实线)和 Betts 方案(虚线)模拟图; (b) 实况(实线)和 Kuo 方案(虚线)模拟图

特征是相符的,说明 Betts 方案对强降水时段的模拟优于 Kuo 和 Grell 方案。

4.1.4 雨带向北变动的对比

图 6 是长江中下游地区雨带南北变动的剖面图,1991 年从 5 月开始的第 5 候和第 8~9、13~14 候雨带的出现和位置, Betts 方案均模拟较好,特别是对 8~9 候雨带由 28~29°N 北跳到 33°N 附近,有逼真的模拟,而其他两方案对雨带的南北变动的模拟则明显偏差。1994 年雨带南北变动的模拟(图略)不如 1991 年,但三方案中仍以 Betts 方案模拟最好,4~6 候雨带由开始时 30°N 附近逐渐向南移动到 28°N 以南, Betts 方案对这一南摆的趋势有反映,但时间上滞后一候。

4.2 降水模拟检验

将测站实测降水与模拟后插值到测站上的预报值进行统计检验,检验时分 5 个降水阈值,分别采用 C_1 、 T_1 和 B_1 评分进行评定。设: 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, X 为预报不出现某阈值以上降水且观测不出现的站数,那么:

$$(1) \text{ 分类预报评分 } C_1 = \frac{C + X}{F + O - C + X}$$

现总的正确次数的百分率。从 5 个阈值的评分来看(表略),三方案差异不大,说明它们无论对哪一阈值降水,由于包含预报不出现的正确次数,因而总的预报成功率都较高。

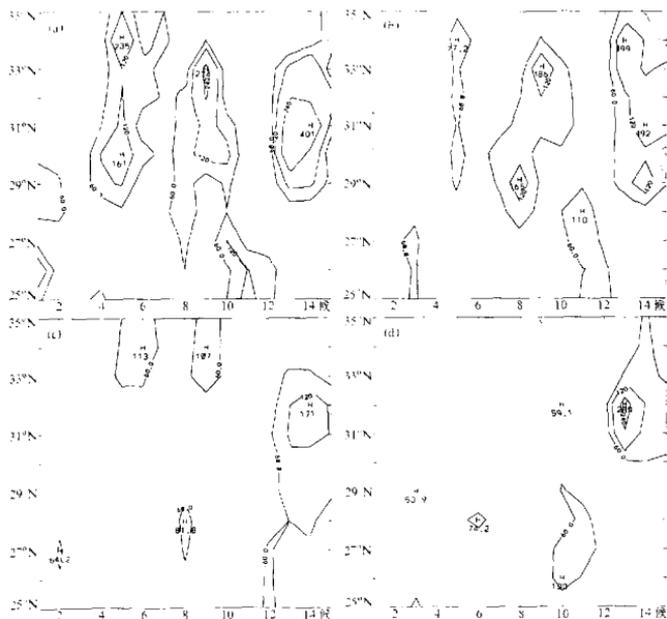


图 6 1991 年 5~7 月长江中下游地区 (113~119°E) 雨带南北变动的时-空剖面图
(a) 实况; (b) Betts 方案; (c) Kuo 方案; (d) Grell 方案

(2) 真实技巧评分 $T_s = \frac{C}{F+O-C}$, 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。表 2 给出不同降水强度下 3 种参数化方案试验的 T_s 评分的时间平均值, 黑体表示三方案中最优者, 显然 Betts 方案相对另外两方案的优越性体现在 25 mm 以上的较强降水事件的预报, 对强度为 25、50、100 mm 以上降水的准

表 2 不同阈值下 3 种参数化方案降水检验 T_s 评分的时间平均值

| 试验 阈值 | 1991 年个例 | | | 1994 年个例 | | |
|----------|-------------|--------|----------|-------------|--------|----------|
| | Betts 方案 | Kuo 方案 | Grell 方案 | Betts 方案 | Kuo 方案 | Grell 方案 |
| 0.25 mm | 0.82 | 0.82 | 0.83 | 0.80 | 0.81 | 0.80 |
| 10 mm | 0.56 | 0.57 | 0.52 | 0.53 | 0.49 | 0.48 |
| 25 mm | 0.36 | 0.35 | 0.26 | 0.36 | 0.29 | 0.23 |
| 50 mm | 0.20 | 0.15 | 0.11 | 0.18 | 0.09 | 0.07 |
| 100 mm | 0.08 | 0.04 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |

准确率, 1991 年和 1994 年分别达到 0.36、0.20、0.08 和 0.36、0.18、0.04, 明显高于 Kuo 方案, 更高于最差的 Grell 方案。

(3) 偏差评分 $B_s = F/O$, 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。从表 3 可以看到, 1991 年对于 50 mm 和 100 mm 以上降水的预报, Betts 方案的 B_s 评分值达 0.92 和 0.60, 明显大于 Kuo 和 Grell 方案, 最接近于 1; 而 1994 年 100 mm 以上降水的 B_s 评分, 达 0.83, 也明显优于另外两个方案; 由 B_s 评分也可看出, 各对流方案对弱降水预报区域偏大, 而对强降水预报区域偏小。

表 3 不同阈值下 3 种参数化方案降水检验 B_s 评分的时间平均值

| 阈值 | 1991 年个例 | | | 1994 年个例 | | |
|---------|-------------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| | Betts 方案 | Kuo 方案 | Grell 方案 | Betts 方案 | Kuo 方案 | Grell 方案 |
| 0.25 mm | 1.22 | 1.22 | 1.23 | 1.25 | 1.26 | 1.27 |
| 10 mm | 1.34 | 1.25 | 1.28 | 1.47 | 1.38 | 1.41 |
| 25 mm | 1.27 | 0.99 | 0.77 | 1.56 | 1.05 | 0.89 |
| 50 mm | 0.92 | 0.64 | 0.35 | 1.55 | 0.57 | 0.61 |
| 100 mm | 0.60 | 0.34 | 0.19 | 0.83 | 0.22 | 0.33 |

以上分析表明, Betts 方案对 25 mm 以上的较强降水体现了比 Kuo 和 Grell 方案更

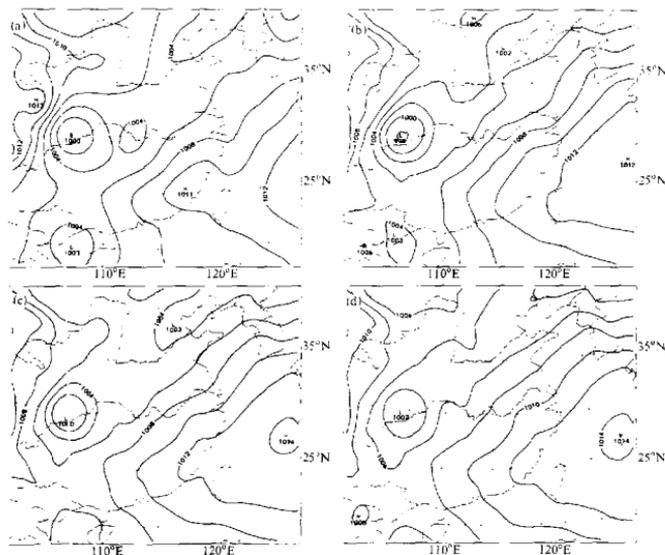


图 7 1991 年 6 月 10~15 日候平均海平面气压场 (单位: hPa)
(a) 实况; (b) Betts 方案; (c) Kuo 方案; (d) Grell 方案

好的短期气候预报技巧。另外分析三方案的 T_e 和 B_e 评分的时间演变曲线(图略)可知,在强降水时段,Betts方案的 T_e 和 B_e 评分更优于其他两方案。

5 基本要素候平均场的分析比较

5.1 主要要素场特征模拟的对比

5.1.1 海平面气压场

在强降水时段的1991年6月10~15日海平面气压场(图7)模拟中,3种方案都与实况比较吻合;但Betts方案对自长江中上游伸向华北的低槽和东南沿海的副高与实况更相符,Kuo和Grell方案模拟的副高明显偏强;而Betts方案模拟的四川境内的低压中心强度比实况和Kuo与Grell方案都强。

5.1.2 低层流场

从850 hPa流场的模拟与分析的对比(图8)中可以看到,对于切变线的位置,Betts方案模拟得最好,Grell方案模拟的切变线略偏北而且强度较弱,Kuo方案则弱而不明显;Betts方案模拟的西南低空急流强度偏大,但中心位置要好于另外二者。从850 hPa的 V 分量通过暴雨中心区的南北向时间剖面图(图9)来看,在强降水的第25

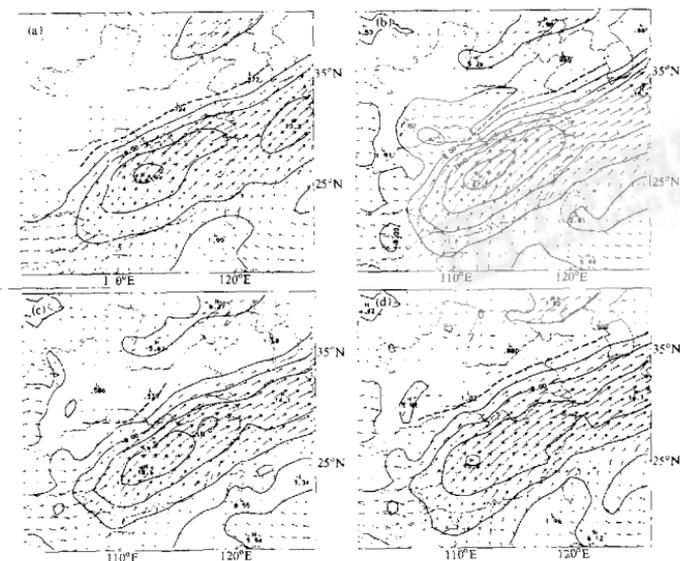


图8 1991年7月5~10日850 hPa候平均风场(单位: m s^{-1})

(a) 实况; (b) Betts方案; (c) Kuo方案; (d) Grell方案

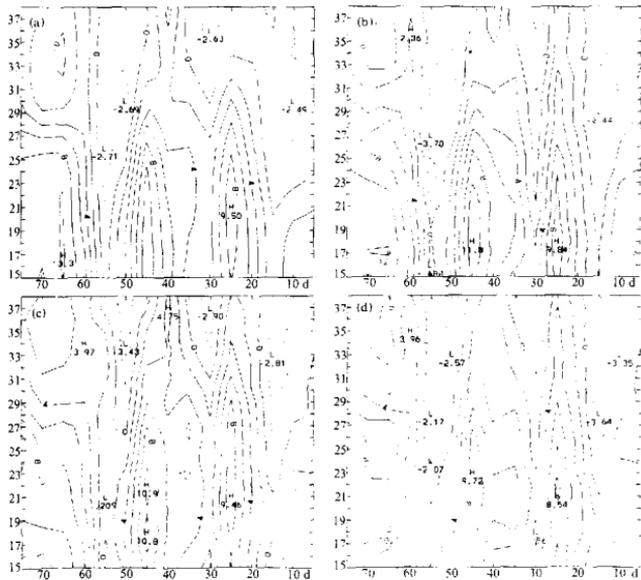


图9 1991年850 hPa的 V 分量南北向(沿 116°E)时间剖面图(单位: m s^{-1})
(a) 实况; (b) Betts方案; (c) Kuo方案; (d) Grell方案
纵坐标为南北向网格

天、45天和65~70天, Betts方案模拟的 V 分量的强度和方向,均优于其他二者。如
在第25和45天, Kuo和Grell方案 4 m s^{-1} 的南风偏北,而Betts方案较接近实况;在
第50~55天,对于 2 m s^{-1} 的北风范围, Betts方案与实况比较一致,而Kuo和Grell
方案则差异较大。同样对 U 分量的模拟也是Betts方案较好。

5.1.3 相对湿度场

图10为1994年6月16~20日850 hPa相对湿度候平均场,与实况相比, Kuo和
Grell方案模拟明显偏湿,相对湿度为90%以上的范围远大于实况,60%的等值线明显
偏北; Betts方案虽然没有模拟出相对湿度为90%以上的湿区, 30°N 以南偏干,但从
整个相对湿度场的分布特征来看, Betts方案明显比Kuo和Grell方案更接近实况,特
别是长江中下游地区湿度等值线密集区的走向和位置,以Betts方案最接近实况。另外
850 hPa温度场也显示Betts方案略好于另外二者(图略)。

5.1.4 垂直运动

在强降水时段,中低层的强抬升运动是造成强降水的重要因素之一,我们选取
1994年个例强降水区域850 hPa垂直运动 ω 的时间演变曲线(图11),可以看到,

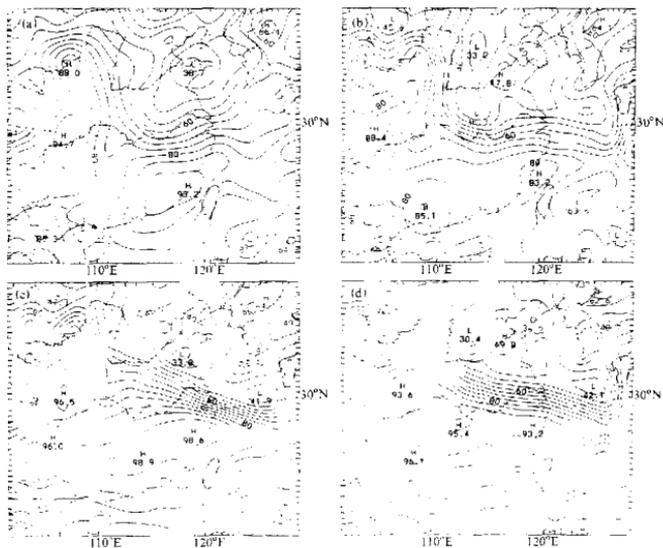


图 10 1994 年 6 月 16~20 日 850 hPa 相对湿度候平均场
(a) 实况; (b) Betts 方案; (c) Kuo 方案; (d) Grell 方案

实况在积分第 45~50 天, 即 6 月中旬前后, 850 hPa 出现了最强的上升运动, 3 种方案比较而言 显然是 Betts 方案的抬升运动最强, 最接近实况, 因而有利于 Betts 方案对降水量模拟得更好。

5.2 要素场的相关性检验

以上定性分析了 Betts 方案模拟的一些基本要素场特征优于 Kuo 和 Grell 方案, 下面相对于基本要素场的观测分析进行统计检验, 其中 3 种对流参数化方案的高空要素预报与实况间的均方根误差的差别并不明显 (表略)。而从表 4 给出的相关系数检验的总体情况看, Betts 方案较优, 特别是湿度场的相关系数一般较另两个试验高约 0.02~0.04, 表明 Betts 方案试验中湿度场与分析场的型式更为相似。

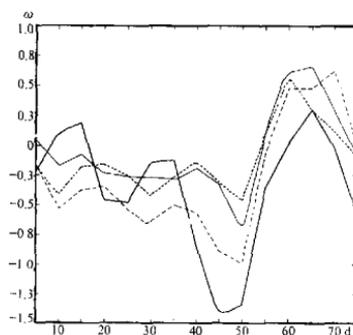


图 11 1994 年强降水区域 850 hPa 平均垂直运动 ω
(单位: Pa s^{-1}) 时间演变曲线
粗实线为实况, 虚线为 Betts 方案, 细实线
为 Kuo 方案, 点线为 Grell 方案

当将强降水与弱降水时段分别进行检验时,发现在强降水时段 Betts 方案与实况湿度场和风场的相关性更为明显,相关系数较另外两个试验高 0.03~0.12,特别是 1991 年强降水时段比湿场的相关系数明显高于 Kuo 和 Grell 方案。而在弱降水时段差别就明显减小,这表明在强降水时段对流活跃, Betts 方案能更及时恰当地描述积云对流,使强降水的模拟更为逼真,湿度场也更与实况相近。

表 4 不同要素场相关系数的垂直、时间平均值

| 试验 要素 | 1991 年个例 | | | 1994 年个例 | | | 1991 年强降水时段 | | | 1991 年弱降水时段 | | |
|----------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| | Betts 方案 | Kuo 方案 | Grell 方案 |
| U | 0.66 | 0.83 | 0.85 | 0.79 | 0.79 | 0.80 | 0.88 | 0.84 | 0.85 | 0.85 | 0.80 | 0.85 |
| V | 0.75 | 0.73 | 0.73 | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 0.75 | 0.72 | 0.70 | 0.77 | 0.75 | 0.76 |
| T | 0.89 | 0.87 | 0.89 | 0.84 | 0.84 | 0.83 | 0.85 | 0.82 | 0.85 | 0.91 | 0.87 | 0.91 |
| Q | 0.82 | 0.79 | 0.78 | 0.81 | 0.78 | 0.78 | 0.79 | 0.71 | 0.67 | 0.77 | 0.78 | 0.75 |
| H_R | 0.64 | 0.63 | 0.61 | 0.65 | 0.63 | 0.63 | 0.65 | 0.60 | 0.58 | 0.57 | 0.60 | 0.59 |
| Z | 0.95 | 0.93 | 0.95 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.97 | 0.97 | 0.96 | 0.95 | 0.88 | 0.95 |

注:表中黑体表示 Betts 方案的相关系数比另外两方案大 0.03 以上

总的看来, Betts 方案模拟的要素场较优,相关系数大于 Kuo 和 Grell 方案,特别是在 1991 年强降水时段, Betts 方案体现出更好的相关性和较小的误差,因而比 Kuo 和 Grell 方案更优越。进一步对垂直方向各层的分析表明,这种优越性主要体现在 Betts 方案对高层的 U 分量,中低层的 V 风量, 700 hPa 以上的温度, 400 hPa 以上的比湿以及高层的高度场(以上图略)模拟最好。

6 结语和讨论

为了了解和比较不同对流参数化方案在区域气候模拟中的作用,我们采用区域气候模式 RegCM2,选择 Betts-Miller, Kuo-Anthes 和 Grell 3 种积云对流参数化方案,对 1991 年和 1994 年 5~7 月进行模拟试验,通过定性分析和统计检验,我们得到以下结论:

(1) 在两年的夏季降水模拟中, Betts-Miller 积云对流参数化方案明显优于 Kuo 和 Grell 方案,它预报的 5~7 月降水总量、主要降水的出现时段以及雨带的南北变动等都比另外两方案更接近实况。Betts 方案预报的强降水区(如 1000 mm、750 mm、500 mm)的范围和分布特征,也明显比 Kuo 和 Grell 方案更与实况相似。

(2) 统计检验表明,3 种方案的分类预报评分 C_1 相差不大,它们对各阈值降水出现与不出现的总的预报成功率都较高。但对于较大强度降水, Betts 方案的 T_s 和 B_s 评分优于 Kuo 和 Grell 方案,并且在强降水时段,这种优越性更加明显,体现了 Betts 方案对小概率事件有更好的预报技巧。如对于强度为 50、100 mm 以上降水的预报准确率,1991 年和 1994 年的 T_s 评分分别达到 0.20、0.08 和 0.18、0.04,明显高于 Kuo 方案,更高于最差的 Grell 方案。

(3) Betts 方案模拟的基本要素场特征(如切变、副高、低空急流、湿舌等)从总体上看,要优于 Kuo 和 Grell 方案。统计检验显示 Betts 方案的相关系数大于 Kuo 和

Grell 方案, 均方根误差相差不大, 在强降水时段, Betts 方案体现出更好的相关性和更小的误差。

(4) 在区域气候模拟中, 采用不同的积云对流参数化方案, 降水模拟的差别还是相当显著的, 两年的模拟试验表明, Betts 方案明显优于 Kuo 和 Grell 方案, 我们认为这可能与 Betts 方案采用根据大量观测资料归纳出的温湿参考廓线有关。Betts 方案将对流区的温湿结构同时向根据实测资料归纳的一个准平衡热力学参考状态张弛逼近, 相当于保证了全球模式在对流存在时, 格点尺度上总是维持“真实”的温湿结构, 这样就避开了次网格尺度云和中尺度过程维持观测到的准平衡结构的过程细节。而 Kuo 和 Grell 方案则在理论上用云模式来计算云的热力特性及对流对环境的最终定量影响, 它指定了总的对流引起的加热和增湿的垂直分布, 但是它不随时间而变化, 不能给出云的生命史期间或消亡中的热力特性, 因而与 Betts 方案采用的热力学参考态有一定差异, 正是这种差异造成了降水模拟的优劣。

当然, 在降水模拟中, 对流参数化方案只是影响它的一个重要方面, 此外, 它还受到地表过程、大尺度驱动场等多方面的影响, 所以要取得更好的降水模拟, 今后还有待于对其他一些重要因子作相关的试验研究。

由于计算条件的限制, 我们选择的模拟区域主要针对有强降水过程的江淮流域及其以南地区, 模拟范围偏小, 并且只对夏季降水进行了模拟比较, 今后随着计算条件的改善, 可以扩大模拟范围, 选择更多的参数化方案, 增加个例和不同季节降水的模拟, 以期取得更好的比较结果。另外, 对于较优的 Betts 方案, 我们进一步分析了其对强降水区温湿廓线的模拟偏差, 对一些关键参数进行了调试和改进, 这将另文阐述。

参 考 文 献

- 1 Giorgi, F., Sensitivity of simulated summertime precipitation over the western United States to different physics parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**, 2870~2888.
- 2 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.
- 3 罗勇, 赵宗慈, NCAR REGCM 2对东亚区域气候的模拟试验, 应用气象学报, 1997, 8(增刊), 124~133.
- 4 赵宗慈, 罗勇, 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), 116~122.
- 5 Luu Y., R. Avissar and F. A. Giorgi, Simulation with the regional climate model REGCM 2 of extremely anomalous precipitation during the 1991 East-Asian flood, an evaluation study. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**, 26199~26215.
- 6 龚威等, 用改进的 NCAR 区域气候模式模拟中国夏季降水, 中国短期气候变化及成因研究, 北京: 气象出版社, 1996, 110~116.
- 7 Zhao Zongci and Luo Yong, Investigation on the regional climate simulations over East Asia by the NCAR RegCM 2. *The Second CMA/US DOE Science Team Meeting*, Beijing: China Meteorological Press, 1996, 16.
- 8 Giorgi, F., M. R. Marinucci and G. T. Bates, Development of a second-generation regional climate model (RegCM 2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**(10), 2794~2831.
- 9 F. Giorgi, M. R. Marinucci and G. T. Bates, Development of a second-generation regional climate model (RegCM 2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**(10), 2814~2832.

- 10 陆尔. 丁一汇. 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), 318~334.
- 11 廖洞贤, 柳崇健. 数值天气预报中的若干新技术. 北京: 气象出版社, 1994, 164~214.
- 12 Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer, A Description of the Fifth-Generation PENN STATE - NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Technical Note - NT-398+1A, 1993, 42~100.
- 13 Betts, A. K., A new convective adjustment scheme. Part I. Observational and theoretical basis, *Quart. J. Roy Meteor. Soc.*, 1986, 112, 677~691.
- 14 Betts, A. K., A new convective adjustment scheme. Part II. Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, 112, 693~709.
- 15 Betts, A. K., Mixing line of clouds and cloudy boundary layers, *Mon. Wea. Rev.*, 1985, 112, 2751~2763
- 16 程麟生. 中尺度天气模式和模拟. 北京: 气象出版社, 1994, 164~214.

Comparisons of Three Convection Parameterization Schemes in Regional Climate Simulations

Pan Jinsong

(Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310017)

Zhai Guoqing and Gao Kun

(Department of Geophysics, Zhejiang University, Hangzhou 310008)

Abstract By using Betts-Miller, Kuo-Anthes and Grell cumulus convection parameterization schemes in regional climate model (RegCM2), two regional climate simulation experiments of the summers of 1991 and 1994 in East-Asia monsoon region are completed. We analyse and compare the simulation ability of three parameterization schemes to the distribution of the total rainfall from May to July, the major periods of heavy rainfall, variations of the rain-band location and the fundamental meteorology element fields, and give out the results of statistical verifications between the simulations and the observations of the rainfall and the fundamental elements. The comparisons indicate that the simulation ability of Betts-Miller scheme is superior to the other two's.

Key words: East Asia monsoon; precipitation; regional climate model