

# BATS1e 陆面模式对 $p-\sigma$ 九层区域气候模式性能的影响

黄 安 宁 张 耀 存

南京大学大气科学系, 南京 210093

**摘 要** 将 BATS1e (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme version 1e) 陆面模式与  $p-\sigma$  九层区域气候模式 (P $\sigma$ RCM9) 进行耦合, 发展了一个包含有更复杂陆-气相互作用的区域气候模式 (BATS1e-P $\sigma$ RCM9)。通过对东亚地区 1 月和 7 月气候平均场和 1991 年江淮流域梅雨期间三次强降水过程的数值模拟, 考察了 BATS1e 陆面模式对 P $\sigma$ RCM9 模式模拟性能的影响。数值试验结果表明, BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式对东亚区域冬、夏季气候平均场的模拟能力有明显提高, 且对近地层和对流层低层各气象要素场模拟效果的改善比对流层中高层更加明显。与 P $\sigma$ RCM9 模式的模拟结果相比, BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式对中国东南部地区降水的模拟与观测更为一致, 并且对江淮流域梅雨期间的强降水过程也有较好的模拟能力。由于 BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式改进了地气之间动量、热量和水汽通量交换的计算, 更好地描述了陆地下垫面与大气之间的相互作用, 从而改善了模式对近地层各气象要素场的模拟。因此, 通过耦合 BATS1e 陆面模式能较明显地提高 P $\sigma$ RCM9 模式模拟东亚区域短期气候变化的能力, 这为区域气候模式的进一步发展奠定了基础。

**关键词** 陆面模式 区域气候模式 数值模拟 模式性能

**文章编号** 1006-9895 (2007) 01-0155-12

**中图分类号** P435

**文献标识码** A

## Impacts of the BATS1e Land Surface Model on the Performance of the $p-\sigma$ Regional Climate Model

HUANG An-Ning and ZHANG Yao-Cun

*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*

**Abstract** The  $p-\sigma$  regional climate model (P $\sigma$ RCM9) was developed for climate forecast over East Asia in the 1990s, and it has good performance in simulating the climate change over East Asia, but it still has some deficiencies and need to be improved, for instance, its land surface process treatment is so simple that it can not elaborately describe the exchanges of the momentum fluxes, heat fluxes and moisture fluxes between land and air. The calculations of these flux exchanges are very important to improve the performance of P $\sigma$ RCM9, so it is necessary to improve these flux calculations in P $\sigma$ RCM9. For this purpose, the authors choose Biosphere - Atmosphere Transfer Scheme version 1e (BATS1e) to replace the old soil model in P $\sigma$ RCM9 regional climate model. BATS1e has been developed for suiting various NCAR General Circulation Models (GCMs), and its special emphasis has been given to describe properly the role of the vegetation in modifying the surface moisture and energy budgets. It has been coupled with many GCMs and RCMs, and it has good performance in simulating the flux exchanges between land and air.

A coupling model (BATS1e-P $\sigma$ RCM9) with much more complex land - air interactions has been developed by incorporating BATS1e into P $\sigma$ RCM9 in this paper, and the impacts of the BATS1e on the P $\sigma$ RCM9 are examined by

**收稿日期** 2005-09-26, 2005-12-19 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40275032、40333026

**作者简介** 黄安宁, 男, 1979 年出生, 南京大学大气科学系在读博士, 目前主要从事区域气候变化和数值模拟研究。

E-mail: yczhang@nju.edu.cn

simulating the mean fields over East Asia in January and July and the three heavy rain processes occurred over the Yangtze River and Huaihe River basins during the Meiyu period in 1991. The model results show that the capability of the BATS1e-P $\sigma$ RCM9 in simulating the climate mean fields over East Asia in winter and summer has been improved obviously, and the improvement of the simulated meteorological elements in the near-surface layer and the lower troposphere is more remarkable than in the middle-upper troposphere. The BATS1e-P $\sigma$ RCM9 can simulate the precipitation over southeastern China much better compared with the P $\sigma$ RCM9 results, and it has a good performance in simulating the three heavy rain processes over the Yangtze River and Huaihe River basins during the Meiyu period in 1991. The improved simulations of the meteorological elements in each model layer follow the improvement in simulating the land-air interactions in BATS1e-P $\sigma$ RCM9 owing to the improved calculations of the exchanges of momentum fluxes, heat fluxes and moisture fluxes between land and air. Therefore, the performance of the P $\sigma$ RCM9 in simulating short-range regional climate changes over East Asia can be improved notably by introducing BATS1e land surface model. This work provides a good base for the further development of the P $\sigma$ RCM9 regional climate model.

**Key words** BATS1e, P $\sigma$ RCM9, numerical simulation, model performance

## 1 引言

20 世纪 70 年代, 钱永甫等<sup>[1]</sup>设计了一个  $p-\sigma$  混合坐标系原始方程模式, 用于研究青藏高原对东亚季风环流的影响, 后经过众多研究者对这个模式的不断改进和完善<sup>[2~7]</sup>, 最后将这个模式发展为一个水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 并包含有较完善物理过程的九层区域气候模式 (P $\sigma$ RCM9)。为了考察 P $\sigma$ RCM9 模式的性能, 气象工作者做了大量工作来研究该模式对气候平均场、异常气候年、季节变化和年际变化等方面的模拟效果<sup>[7~10]</sup>, 并与五层模式的模拟结果作比较, 发现该模式的模拟效果在总体上明显优于五层模式, 它对东亚地区气候变化具有较强的模拟能力, 因而 P $\sigma$ RCM9 模式为研究东亚地区的气候变化提供了一个有力的工具。目前, 此模式已经成为南京大学大气科学系用于区域气候模拟的主要研究模式之一, 但该模式还存在许多不足之处需要进一步完善<sup>[7, 8]</sup>, 如它对陆面过程的考虑过于简单, 仅仅用一个土壤模式来描述陆-气之间的相互作用, 土壤模式将土壤分成表层和深层, 利用热量守恒原理导出表层和深层土壤平均温度的预报方程以及地表温度的计算公式, 地表类型只取 5 种<sup>[11]</sup>, 虽然这样的耦合能够抓住主要的陆-气相互作用特征, 但由于陆-气相互作用是一个非常复杂的过程, 仅仅这样实现的陆-气耦合是不够的。陆面过程是影响气候变化最基本的物理过程之一, 它包括热力过程 (如辐射和热交换过程)、动量交换过程 (如摩擦及植被的阻挡等)、水文过程 (如降

水、蒸发和蒸腾、径流等)、地表和大气的物质交换过程以及地表以下的热量和水分输送过程。下垫面状况在很大程度上决定了表面的能量和水分平衡, 从而影响着局地、区域乃至全球大气环流和气候的基本特征。过去的研究表明 P $\sigma$ RCM9 模式虽然能较好地模拟出东亚地区的大气环流特征, 但是由于该模式未能较细致地刻画陆地下垫面与大气间的相互作用而对降水以及地-气间各种通量交换的模拟还不够理想<sup>[7~9]</sup>, 因此有必要改进 P $\sigma$ RCM9 模式中陆面过程参数化方案, 用更能刻画下垫面特征的陆面模式替换 P $\sigma$ RCM9 模式中的陆面过程模式, 改善地-气之间各种通量交换的计算, 这对于提高该模式模拟东亚区域气候特征的能力具有重要的意义, 也为研制一个较完善的考虑海-陆-气相互作用的区域气候系统模式打下基础。

为了较细致地考虑植被在地表水汽和能量收支中的作用, Dickinson 等<sup>[12]</sup>在 1986 年设计了一个生物圈-大气圈传输方案 BATS (Biosphere - Atmosphere Transfer Scheme), 经过不断的改进和完善, 最后发展成 BATS1e (BATS version 1e) 陆面模式<sup>[13, 14]</sup>, 这是目前国际上比较流行的一个陆面模式。该模式为典型的单层大叶模式, 它是在一系列可以直接观测到的陆面参数的基础上, 根据物理概念和理论建立起来的关于植被覆盖表面上空的辐射、水分、热量和动量交换以及土壤中水热过程的参数化方案, 较为真实地考虑了植被在陆地水热过程中的作用, 尤其对植被生理过程, 如蒸腾进行了较细致的描述。它是一个比较成熟的陆面过程模

式, 该模式性能良好, 已与多个大气环流模式进行了耦合, 并得到较为广泛的应用<sup>[15~17]</sup>, 因此本文选用此模式替换 P $\sigma$ RCM9 模式中的土壤模式而实现较为复杂的陆-气耦合, 从而把 P $\sigma$ RCM9 模式发展成为一个较为完善的陆-气耦合区域气候模式 (BATS1e-P $\sigma$ RCM9)。在此基础上, 利用这个新发展的区域气候模式对东亚地区冬季和夏季的气候平均场以及 1991 年江淮流域梅雨期间的三次强降水过程进行数值模拟, 通过与实测资料的对比分析, 考察了 BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式对东亚地区冬、夏季气候平均场以及中国东南部汛期特大降水过程的模拟性能, 为区域气候模式的进一步发展打下基础。

## 2 模式介绍和数值试验方案

### 2.1 模式介绍

本文所用 P $\sigma$ RCM9 模式中的大气模式是一个  $p-\sigma$  混合坐标系原始方程模式, 该模式在大气中共有 9 层, 其中 400 hPa 以上为  $p$  坐标, 每层厚度均取为 100 hPa, 近地面的边界层厚度取为 50 hPa, 而中间为  $\sigma$  坐标, 也取为四层, 每一层厚度为  $\Delta\sigma=0.25$ 。模式水平分辨率为  $1^\circ\times 1^\circ$ , 模式区域为 ( $0^\circ\sim 60^\circ\text{N}$ ,  $70^\circ\text{E}\sim 140^\circ\text{E}$ ), 包括了整个青藏高原、东亚大陆以及孟加拉湾、南海和西太平洋部分海域。模式物理过程主要有对流调整、湍流扩散、大尺度凝结、积云对流和辐射加热等过程。辐射过程包括太阳短波辐射和大气长波辐射, 并考虑了大气中几种主要吸收气体的影响以及云量的变化和气候效应, 积云对流参数化采用郭晓岚方案<sup>[2]</sup>, 边界层采用依据相似理论设计的参数化方案<sup>[5]</sup>。时间积分方案是 1 小时欧拉后差和 5 小时中央差交替进行, 时间步长为 3 分钟。

原 P $\sigma$ RCM9 模式的土壤模式较为简单, 模式将土壤分为两层, 第一层较薄, 反映土壤温度和水分的变化, 第二层较厚, 反映土壤温度和湿度的年变化, 由热量和水分守恒原理建立土壤表层和深层平均温度和湿度的预报方程<sup>[11]</sup>。原模式将陆面分为 5 种类型, 分别是粘土草地、热带雨林、沙漠、泥泞土和雪面。除此之外, 原模式中还有一个与土壤模式相类似的海洋混合层模式<sup>[18]</sup>, 也分为两层, 厚度分别为 50 m 和 250 m, 假定在第一层海温随深度没有变化, 在第二层海温随深度线性下降, 并

假设层底温度梯度为零, 没有考虑洋流的影响。

BATS1e 陆面模式有一层植被、一层雪盖和三层土壤, 其中第一层土壤厚 10 cm, 第二层土壤深 1~2 m, 第三层土壤深 3 m。若下垫面是海洋, 则海洋表面温度取观测的月平均值; 若是陆面, 对每一模式格点分别定义陆面状况和土壤类型参数, 区分不同的陆地和不同的植被物理特性, 模式中考虑了降水、降雪、蒸发蒸散、径流、渗透、融雪等过程, 利用强迫-恢复法<sup>[19]</sup>计算各土壤层温度。植被冠层温度和湿度通过求解包含有感热通量、辐射通量和潜热通量的能量平衡方程和包括降水、蒸发、蒸散等的水分平衡方程得到。土壤湿度由求解各土壤层含水量的预报方程得到, 考虑了降水、融雪、叶面下滴、蒸发、表面径流, 植被根系以下的水分渗透、土壤层间水分的扩散交换等过程。根据土壤湿度、植被覆盖状况、雪盖 (包括植被对雪的遮挡) 计算地表反照率, 地表的感热通量、水汽和动量通量是由根据相似理论导出的地面拖曳系数公式来计算, 拖曳系数依赖于表面的粗糙度和大气稳定度, 而表层的蒸发率依赖于土壤湿度。在 BATS1e 陆面模式中, 按照 Dickinson 等<sup>[14]</sup>的分类方法将地表植被划分为 20 种类型, 土壤质地分为 12 类 (沙土 1~粘土 12), 土壤颜色分为 8 类 (淡 1~黑 8)。

陆面过程参数化方案直接影响到地气间各种通量的计算, 而这些通量往往会影响到模式对各个气象要素的模拟, 如热量通量将会影响地表温度的变化, 动量通量会影响大气中风速的分布, 水汽通量会影响空气中的水分含量和降水。从上面的介绍可以看出, BATS1e 陆面模式与 P $\sigma$ RCM9 模式耦合后比原模式更加细致地考虑了地-气之间的相互作用, 那么它到底对 P $\sigma$ RCM9 模式模拟东亚区域气候特征的性能是否有改进以及改进的程度有多大, 这是我们想要了解的, 本文将通过对数值试验结果与观测资料和 NCEP/NCAR 再分析资料的对比分析来展开讨论。

### 2.2 数值试验方案

本文设计了两组方案, 第一组方案包括两组试验: (1) 控制试验 (CTR), 利用原来的 P $\sigma$ RCM9 模式进行数值模拟; (2) 耦合试验 (NEW), 利用 BATS1e-P $\sigma$ RCM9 耦合模式进行数值模拟。这组方案主要是为了考察 BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式对东亚地区冬、夏季气候平均场的模拟能力。其中每组

试验又包括 20 个 (10 个冬季和 10 个夏季) 数值试验。对于冬季, 分别利用 1980~1989 年间每天一次的 NCEP/NCAR 资料经过初值处理得到模式所需的初始场和边界强迫场, 模式分别从每年的 12 月 16 日 20 时 (北京时, 下同) 开始积分, 至下一年 1 月 31 日结束, 连续积分 45 天, 取后 31 天的平均值作为 1981~1990 年间各年 1 月的模拟结果。对于夏季, 模式初始场和边界强迫场的提取和冬季类似, 模式分别从 1981~1990 年间每年的 6 月 16 日 20 时开始积分, 至 7 月 31 日结束, 连续积分 45 天, 取后 31 天的平均值作为 1981~1990 年间各年 7 月的模拟结果。需要指出, 在耦合试验中, BATS1e 陆面模式所需的初始土壤湿度根据每一模式格点的陆面参数来确定, 而初始土壤温度由每天 1 次的 NCEP/NCAR 资料提供, 初始植被温度简单取为大气模式最低层的气温。

第二组方案也包括两组试验: (1) 控制试验 (CTR91), 利用原来的 P $\sigma$ RCM9 模式进行数值模拟; (2) 耦合试验 (NEW91), 利用 BATS1e-P $\sigma$ RCM9 耦合模式进行数值模拟。用这两个模式分别模拟 1991 年江淮流域梅雨期的三次强降水过程, 用以考察 BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式模拟中国东南部地区汛期特大降水过程的能力。利用 1991 年 6 小时间隔 (1 天 4 次) 的 NCEP/NCAR 资料经处理后作为模式的初始场和边界强迫场, 模式从 1991 年 5 月 1 日 00 时开始积分, 至 8 月 1 日 00 时结束。BATS1e 陆面模式的初始化与第一组方案的类似。

### 3 数值模拟结果与实测资料的对比分析

#### 3.1 冬季和夏季气候平均场的模拟

首先, 分别将 CTR 试验和 NEW 试验 10 个冬季和夏季的模拟结果作平均, 得到冬、夏季气候平均场, 并与同一时段中国区域的台站观测资料和每天一次的 NCEP/NCAR 再分析资料的冬、夏季气候平均场进行对比分析, 考察 BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式模拟东亚地区冬季和夏季气候平均场的性能。本文所用的台站观测资料为 1981~1990 年间中国区域 580 个台站的降水和地面气温资料以及 540 个台站的地表温度资料, 为方便与模式结果进行对比分析, 将这些资料插值处理成  $1^\circ \times 1^\circ$  的格点资料。

为了定量地了解模式结果与观测场之间的关系, 用下式计算它们的空间相关系数:

$$A_{CC} = \frac{\sum_{I=1}^N (R_{FI} - \overline{R}_F)(R_{OI} - \overline{R}_O)}{\sqrt{\sum_{I=1}^N (R_{FI} - \overline{R}_F)^2 \sum_{I=1}^N (R_{OI} - \overline{R}_O)^2}}$$

它反映的是两个场的空间分布形势的相似程度, 式中  $R_{FI}$  为某个气候要素在第  $I$  个格点的模拟值,  $\overline{R}_F$  为模拟值在该点的平均值,  $R_{OI}$  为第  $I$  格点的观测值,  $\overline{R}_O$  为观测的平均值,  $N$  为总格点数。

#### 3.1.1 中国区域地表温度和地面气温

从图 1 中可以看出, 模拟的 1 月份地表温度场的分布形势与实际情况基本上是一致的, 在我国黄河以南大部分地区的地表温度基本为正值, 而在其他地区为负值。CTR 试验 (图 1a) 模拟的地表温度零度线到达黄河以北地区, 较观测值偏北, 在黄河以南和东北地区的温度比观测值偏高, 而在青藏高原地区却比观测值偏低, 尤其是在高原的中西部地区偏低最明显。分析 NEW 试验 (图 1b) 模拟的地表温度分布特征发现, 零度线较 CTR 试验的模拟结果有明显的南移, 与观测值较一致, 且正值区的温度值与观测非常接近。NEW 试验在青藏高原地区模拟的地表温度比 CTR 试验的模拟结果有所升高, 与观测值接近, 而在东北地区模拟的地表温度比原模式的结果有微弱降低, 但是效果不明显, 仍然比观测值偏高。

分析图 2 发现, 与 1 月份的情况类似, 模拟的地表温度的分布形势与观测场基本一致。CTR 试验 (图 2a) 模拟的地表温度场除了在青藏高原中西部地区较观测值偏低外, 在其他地区基本上偏高, 尤其在青藏高原的西北侧最明显, 中心值比实况高出  $15^\circ\text{C}$  以上。与原模式的结果相比, NEW 试验 (图 2b) 模拟的地表温度在青藏高原中西部地区有较大幅度的升高, 与观测值更加接近, 但仍然偏低。与观测场相比, NEW 试验模拟的地表温度在华南地区比观测值偏低  $3\sim 6^\circ\text{C}$  左右。除了上述地区外, 加入 BATS1e 陆面模式后模拟的地表温度值及其分布形势在中国其他地区与观测值基本一致。

从图 3 看出, 模拟的冬季地面气温场与观测场的分布形势基本一致, 无论是 CTR 试验还是 NEW 试验模拟的地面气温场在青藏高原中西部都较观测值偏低, 只是 NEW 试验模拟的地面气温在青藏高原中西部地区较 CTR 试验的模拟结果有所升高, 与观测值接近。同时发现, CTR 试验模拟的正地

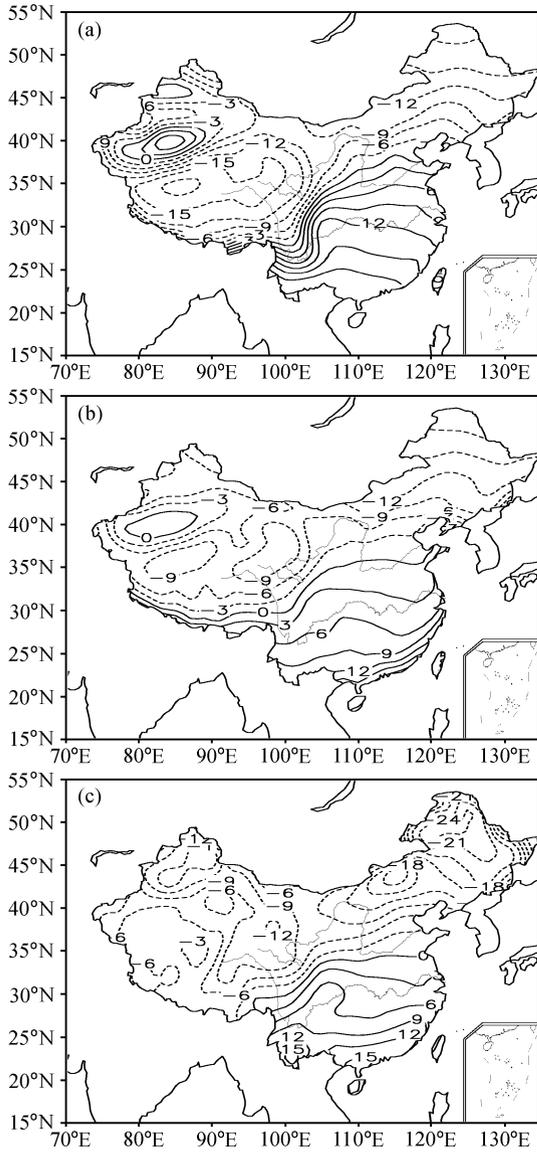


图 1 中国区域 1 月份地表温度场 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ): (a) CTR 试验; (b) NEW 试验; (c) 观测  
 Fig. 1 The surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) over China in Jan: (a) CTR; (b) NEW; (c) observation

面气温区的值较观测值偏高,而在加入 BATS1e 陆面模式之后这一结果得到较大的改善,使得模拟的正地面气温区与观测更加接近。

从模拟和观测的中国地区 7 月份的地面气温场 (图 4) 发现,与 1 月份的模拟结果类似,无论是 CTR 试验还是 NEW 试验模拟的地面气温场在青藏高原地区都比观测值偏低,不过在加入 BATS1e 陆面模式之后,NEW 试验模拟的地面气温场在青藏高原中西部地区较 CTR 试验的结果有较大幅度

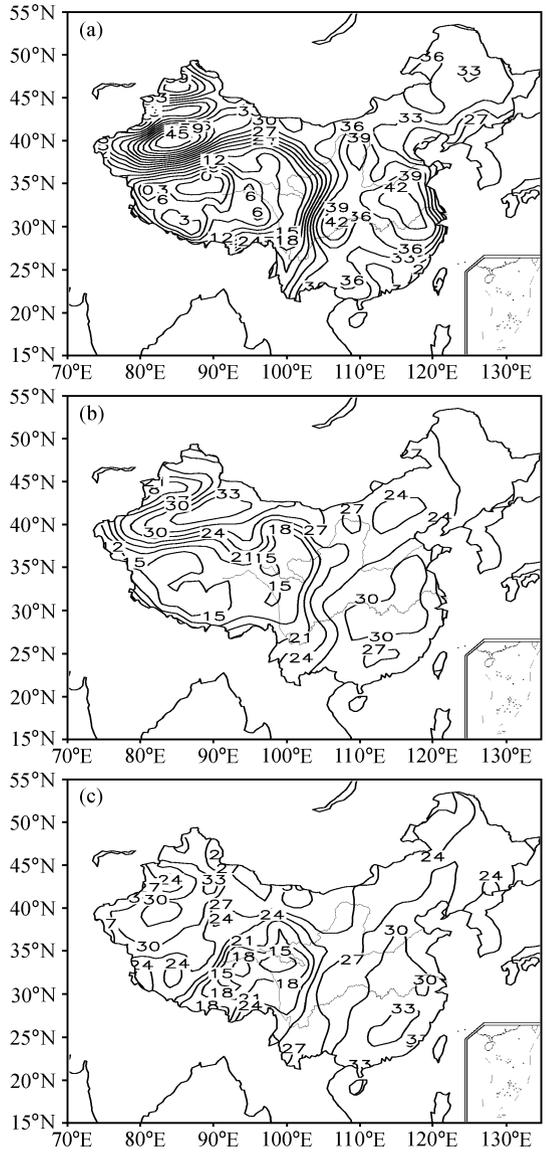


图 2 同图 1, 但为 7 月份  
 Fig. 2 As in Fig. 1, except for Jul

的升高,与观测值更加接近。CTR 试验模拟的地面气温在江淮地区较观测值偏高,而在青藏高原东北侧和华南沿海地区较观测值偏低。NEW 试验模拟的地面气温在华南沿海地区仍然较观测值偏低。除了上述地区外,CTR 试验和 NEW 试验模拟的地面气温在中国其他地区与观测值非常接近。

表 1 给出了 CTR 试验和 NEW 试验模拟的中国区域 1 月和 7 月的地表温度场和地面气温场与观测场之间的空间相关系数。从表 1 可以看出,无论是 CTR 试验还是 NEW 试验模拟的地表温度和地面气温均是冬季好于夏季,可能是由于在冬季影响

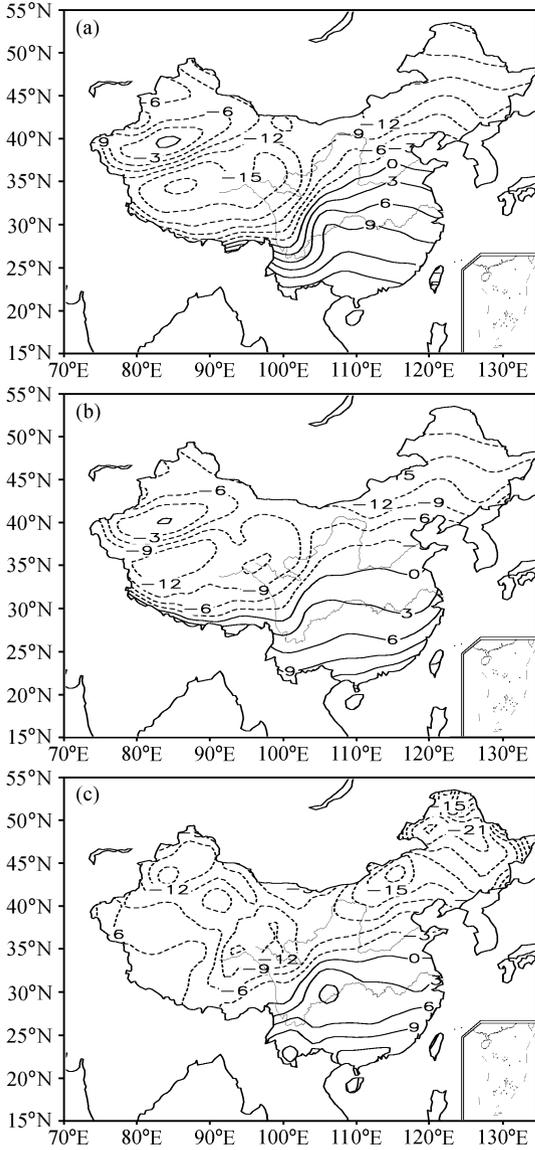


图3 中国区域1月份地面气温场,其余同图1  
Fig. 3 Same as in Fig. 1, but for the surface air temperature over China in Jan

它们的因子相对单一所致。BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式模拟的地表温度和地面气温无论是在冬季还是夏季都比原 P $\sigma$ RCM9 模式模拟的结果更加接近观测场,模拟效果有一定程度的改进,相对而言,夏季的改进效果更明显,尤其是地表温度,相关系数从 0.631 提高到 0.792。

### 3.1.2 各标准等压面上的气象要素场

表 2 给出了模拟的 1 月份整个模式区域各标准等压面上气温场、风场和位势高度场与 NCEP/NCAR 再分析资料的相关系数。从表 2 中可以看

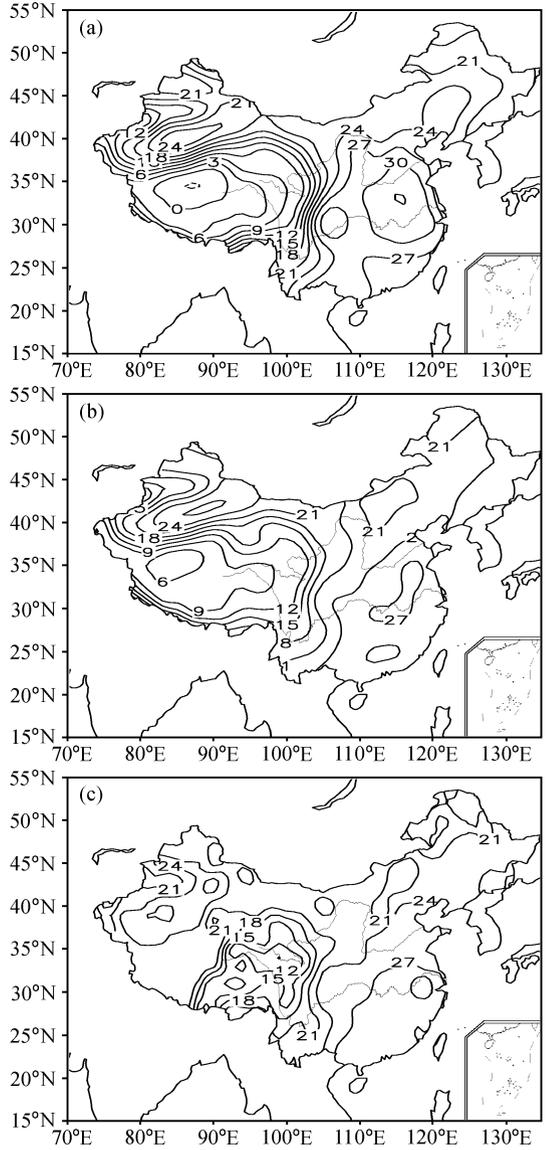


图4 同图3,但为7月份  
Fig. 4 As in Fig. 3, except for Jul

出,CTR 试验和 NEW 试验对对流层中高层各个气象要素场的模拟效果均要好于低层,同时注意到,在两个试验中模拟的各层气温和位势高度与 NCEP/NCAR 再分析资料的相关系数都非常高,而对经向风的模拟效果稍差。比较两个试验模拟结果与 NCEP/NCAR 再分析资料之间的相关系数发现,加入 BATS1e 陆面模式之后模式对对流层低层的温度场、位势高度场和 U 风场的模拟效果有较明显的改善,而对对流层中高层模拟效果的改善不明显。

分析表 3 发现,CTR 试验和 NEW 试验对对流

层中高层各个气象要素场的模拟效果均要好于低层,这与冬季的情况相似。加入 BATS1e 陆面模式之后模式中对流层低层的温度场、风场和位势高度场的模拟效果比 CTR 试验有较明显的改善,而在中高层的改善效果并不明显。

综合分析表 2 和表 3,可以得出如下结论: BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式对各标准等压面上气象要素场的模拟效果较 P $\sigma$ RCM9 模式有不同程度的改善,其中中对流层低层各气象要素模拟效果的改善比对流层中上层更明显。由此可知, BATS1e 陆面

表 1 模拟的中国地区 1 月和 7 月地表温度和地面气温与观测场间的相关系数

Table 1 The correlation coefficients between the simulated surface temperature, surface air temperature and the observations over China in Jan and Jul

试验 Expt	地表温度 Surface temperature		地面气温 Surface air temperature	
	Jan	Jul	Jan	Jul
	CTR	0.915	0.631	0.936
NEW	0.969	0.792	0.966	0.826

表 2 模拟的 1 月份气温场、风场和位势高度场与 NCEP/NCAR 再分析资料的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between the simulated air temperature, wind and geopotential height fields and the NCEP/NCAR reanalysis data in Jan

	气温 Air temperature		纬向风 Zonal wind		经向风 Meridional wind		位势高度 Geopotential height	
	CTR	NEW	CTR	NEW	CTR	NEW	CTR	NEW
100 hPa	0.9465	0.9473	0.9923	0.9924	0.7795	0.7821	0.9988	0.9988
300 hPa	0.9965	0.9966	0.9902	0.9909	0.9411	0.9415	0.9980	0.9983
500 hPa	0.9969	0.9978	0.9360	0.9470	0.8814	0.9353	0.9964	0.9965
700 hPa	0.9923	0.9942	0.6821	0.7898	0.6418	<u>0.6135</u>	0.9844	0.9911
850 hPa	0.9718	0.9931	0.8230	0.8377	0.7545	<u>0.7419</u>	0.9261	0.9520
1000 hPa							0.8787	0.9388

注:下划线表示改进后的模拟效果更差,下同。

Note: The values with underlines show that the simulated results in NEW expt do not become better, the same below.

表 3 同表 2, 但为 7 月份

Table 3 As in Table 2, except for Jul

	气温 Air temperature		纬向风 Zonal wind		经向风 Meridional wind		位势高度 Geopotential height	
	CTR	NEW	CTR	NEW	CTR	NEW	CTR	NEW
100 hPa	0.9725	0.9767	0.8911	0.8702	0.1680	0.1745	0.5726	0.6559
300 hPa	0.8764	0.8831	0.8551	0.8583	0.2933	<u>0.2628</u>	0.9598	<u>0.9559</u>
500 hPa	0.9315	0.9448	0.7533	0.7629	0.3763	0.5403	0.9610	0.9697
700 hPa	0.8207	0.9318	0.6250	0.6821	0.6597	0.6621	0.9409	0.9590
850 hPa	0.6892	0.8523	0.8479	0.8610	0.7231	0.7892	0.9142	0.9279
1000 hPa							0.8792	0.9132

模式对 P $\sigma$ RCM9 模式性能的影响主要集中在对流层低层以及近地面层,而对对流层中高层模拟效果的影响不大。

### 3.1.3 降水

降水作为一个由各种气象要素共同作用而产生的一个量,能否较好地模拟出它的分布特征,是衡量区域气候模式优劣的一个较为关键的指标,下面将比较模式模拟的降水场和观测场间的差异。

图 5 给出了模拟和观测的中国区域 1 月份的降水场,所用的观测资料为中国区域 580 个站 1981~1990 年间 10 平均的 1 月份降水资料。在观测场上(图 5c),降水区主要集中在我国东南部地区,中心强度可以达到 60 mm。从模拟结果看,CTR 试验(图 5a)和 NEW 试验(图 5b)模拟的主要降水区基本上与实际情况接近,只是 CTR 试验模拟的降水大值中心位置偏西,且 30 mm 线所包含的区域比观测场的范围大。但加入 BATS1e 陆面模式之后模拟的降水分布在我国东南部地区比原模式有明显改善,30 mm 降水区的范围以及中心强度都与实际情况非常接近。

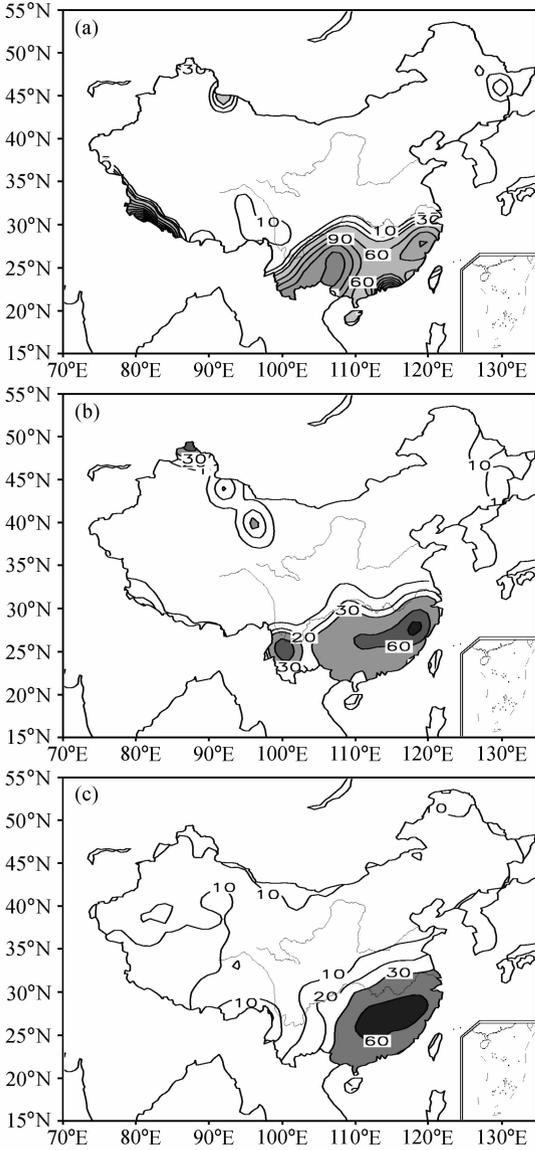


图5 中国区域1月份降水场(单位: mm), 其余同图1  
Fig. 5 Same as in Fig. 1, but for the rainfall (mm) over China in Jan

从图 6c 中发现, 中国区域 7 月份观测的降水区存在以下几个明显的降水中心: 两广及云贵地区呈东西走向的降水带、川渝地区的降水中心、江淮地区的降水中心以及东北南部地区靠近中朝边境的降水中心, 这几个中心的降水强度均超过 200 mm。从模拟的降水分布图来看, P<sub>0</sub>RCM9 模式在改进之前(图 6a)只模拟出两广地区以及东北南部地区的降水中心, 不过模拟的降水强度偏强。而加入 BATS1e 陆面模式之后(图 6b), 模拟的降水场在中国东部地区的分布特征与观测场非常相似, 基本

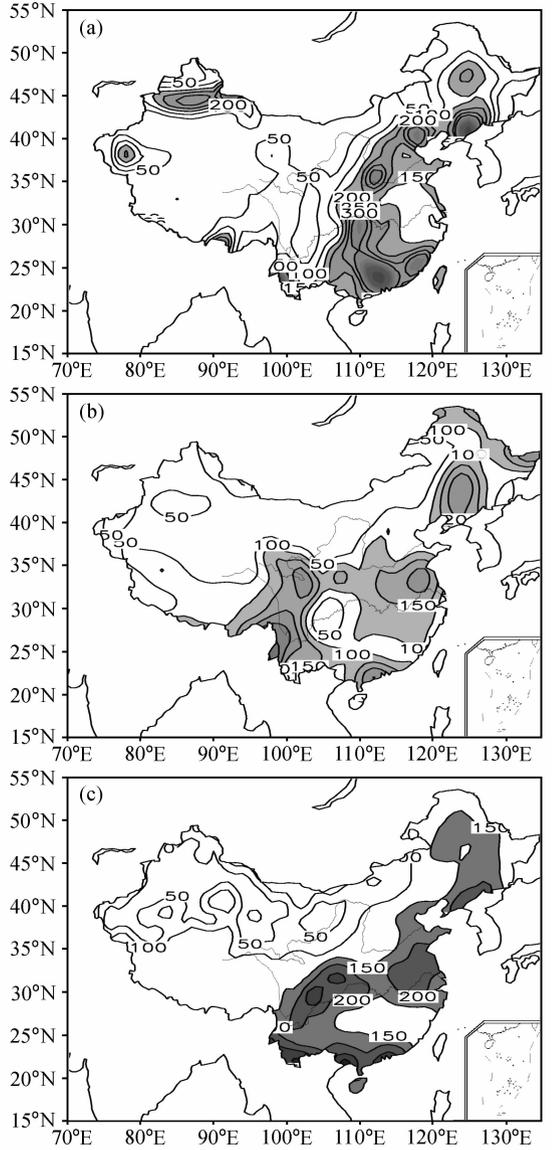


图6 同图5, 但为7月份  
Fig. 6 As in Fig. 5, except for Jul

上模拟出了实际的几个较明显的降水中心, 且降水中心的强度与观测值十分接近, 与 CTR 试验的模拟结果相比, NEW 试验较好地模拟出了江淮地区的降水中心, 但同时需要指出, BATS1e-P<sub>0</sub>RCM9 耦合模式模拟的高原东侧川渝地区的降水中心位置偏北, 这也是 BATS1e-P<sub>0</sub>RCM9 存在的一个不足之处, 还需要作进一步改进。

上面只是定性比较分析了模拟和观测的中国地区 1 月份和 7 月份的降水分布特征。下面通过空间相关系数来定量考察 BATS1e-P<sub>0</sub>RCM9 模式对中国几个主要地区降水分布特征的模拟能力。本文

表 4 模拟的中国地区 1 月和 7 月降水场与观测场间的相关系数

Table 4 The correlation coefficients between the simulated precipitations and the observations over China in Jan and Jul

区域 Region	试验 Expts			
	CTR(Jan)	NEW(Jan)	CTR(Jul)	NEW(Jul)
中国 China	0.533	0.658	0.375	0.452
东北 Northeast China	0.224	0.415	0.472	0.403
华北 North China	0.205	0.311	4.263	0.528
东南 Southeast China	0.308	0.695	-0.122	0.332
西部 West China	0.392	0.210	0.285	0.562

借鉴赵彦等<sup>[20]</sup>的划分方法将中国地区(580个站点)划分为以下几个区域:沿 $105^{\circ}\text{E}$ 分成东部(433个站点)、西部(147个站点)两部分,继而又划分出三个子区域:东北( $42^{\circ}\text{N}$ 以北,共78个站点)、华北( $34^{\circ}\text{N}\sim 42^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}$ 以东,共143个站点)和东南( $34^{\circ}\text{N}$ 以南,  $105^{\circ}\text{E}$ 以东,共212个站点),分别计算各区模拟的降水场和观测场之间的空间相关系数。

由表4可以看出,总的来说,CTR试验和NEW试验模拟的整个中国区域1月和7月的降水场与观测场之间的相关系数都较高,它们对中国地区冬、夏季气候平均的降水均有较好的模拟能力。比较CTR试验和NEW试验模拟的降水与观测场的相关系数发现,NEW试验模拟的1月份降水在我国华北和东南部两个地区较CTR试验的模拟结果具有明显的改善,尤其是在我国东南部地区,相关系数从改进前的0.308提高到改进后的0.695;而对7月份华北、东南部以及西部地区降水的模拟能力较CTR试验具有较大的提高,特别是在东南部地区和西部地区。就整个中国区域来说,加入BATS1e陆面模式之后在1月份和7月份对降水的模拟能力均比CTR试验有不同程度的提高。

### 3.2 1991年江淮流域梅雨期三次强降水过程的模拟

前面我们考察了BATS1e-P $\sigma$ RCM9模式对东亚地区冬、夏季气候平均场的模拟能力,发现它的模拟效果比P $\sigma$ RCM9模式有较明显的改善,特别是更好地模拟出了我国东南部地区夏季气候平均降水场的分布特征,但对气候平均场有较好模拟能力的气候模式并不一定能够较好地模拟气候变化,反

之亦然,这主要取决于模式对初始条件以及外强迫因子变化的敏感程度,因而考察一个气候模式的性能,除了考察它对气候平均场的模拟能力外,考察它对短期气候变化的模拟能力也是非常重要的。在1991年夏季梅雨期间,江淮流域出现了严重的洪涝灾害,气候异常明显,因此,选择1991年夏季异常气候检验BATS1e-P $\sigma$ RCM9模式对中国东部地区汛期强降水过程的模拟能力。

在1991年江淮流域梅雨期间经历了三段强降水期<sup>[21]</sup>:第一段强降水期为5月18日到5月27日,第二段强降水期为6月2日到6月20日,第三段强降水期为6月30日到7月13日。下面用模式模拟1991年江淮流域梅雨期间的三次强降水过程,并与实况作对比分析。

图7给出了模拟和观测的1991年江淮流域梅雨期的第一次强降水过程,从观测的降水分布图(图7c)上看到,沿长江流域有一个呈东西走向的强降水带,其中在长江中下游以南一带地区有两个强降水中心,中心值可达到160mm,从CTR91试验(图7a)和NEW91试验(图7b)的模拟结果来看,CTR91试验几乎没有模拟出上述的几个降水中心,而NEW91试验模拟出的降水中心基本上与实况接近,其中在长江下游偏南地区的降水中心模拟效果较好,但是中心强度较实况偏弱。

从图8c可看到,在长江流域下游的长三角地区和两广地区分别现了两个明显的降水中心,中心强度可达到250mm。从模拟结果来看,CTR91试验(图8a)虽然模拟出了上述的降水中心,但是长江流域下游的降水中心位置比实况偏西,强度偏弱,而两广地区降水中心的位置则偏东偏北。从NEW91(图8b)试验的模拟结果发现,模式基本上模拟出了长江流域下游和两广地区的降水中心,其中江淮流域下游地区模拟的降水中心与实际非常接近,但是150mm等值线所包围的区域比实况的大,而两广地区的降水中心较实况偏弱。

1991年江淮流域的第三次强降水过程发生在6月30日到7月13日间,从降水实况分布图(图9c)上看到,这次强降水过程比第一、二次降水的强度更大,且范围更加集中,雨带沿长江流域呈东北-西南走向,其中在江淮流域中下游地区有一个非常强的降水带,中心降水量超过了500mm。从模拟的结果看,CTR91试验的模拟结果与实况相

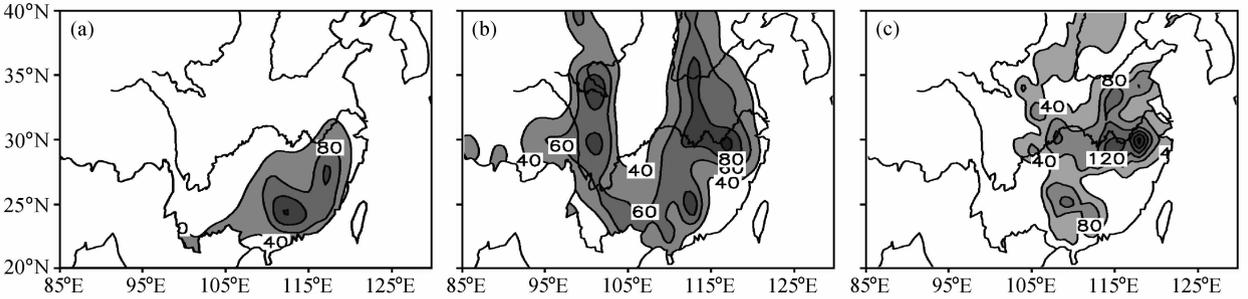


图7 1991年5月18~27日间江淮流域降水总量(单位: mm): (a) CTR91 试验; (b) NEW91 试验; (c) 观测

Fig. 7 The rainfall (mm) over the Changjiang River-Huaihe River valley during 18-27 May 1991: (a) CTR91; (b) NEW91; (c) observation

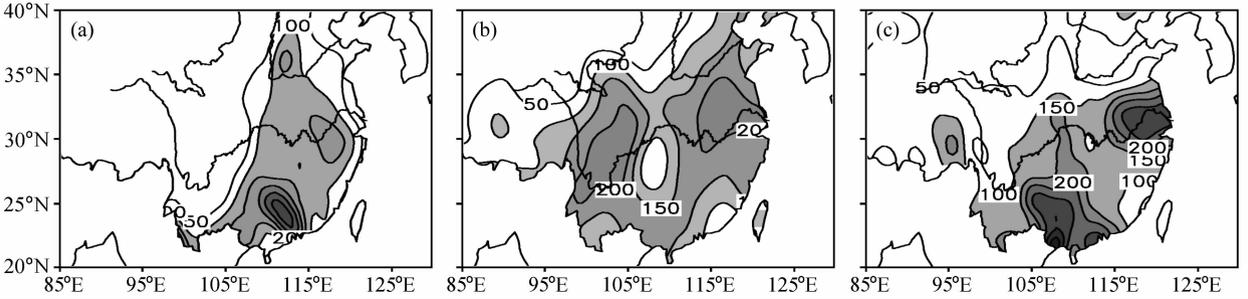


图8 同图7, 但为6月2~20日

Fig. 8 As in Fig. 7, except for 2-20 Jun 1991

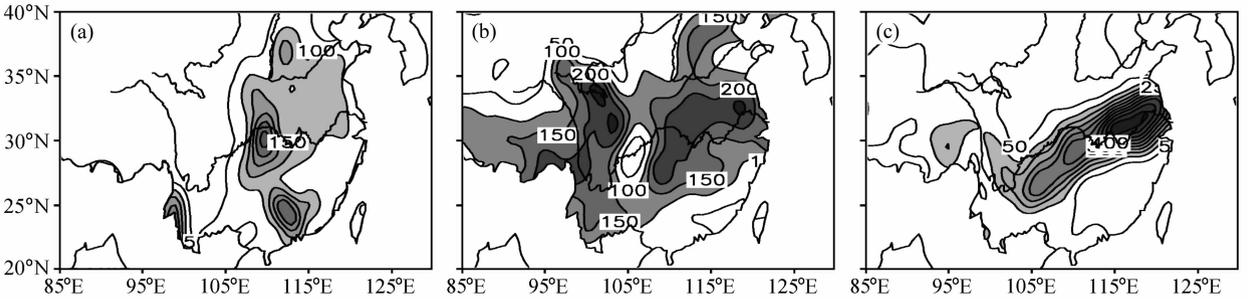


图9 同图7, 但为6月30日~7月13日

Fig. 9 As in Fig. 7, except for 30 Jun-13 Jul 1991

差较大, 而 NEW91 试验基本上模拟出了这条降水带, 不过需要指出, 在江淮流域的降水中心强度比实况偏弱。

综合分析图7、图8和图9发现, NEW 试验对1991年江淮流域梅雨期三次强降水过程的模拟结果与实况基本一致, 与 CTR91 试验的模拟结果相比, NEW91 试验对这三次强降水过程的模拟效果均有明显的改善。初步表明, BATS1e 陆面模式对 P<sub>0</sub>RCM9 模式对中国东部汛期强降水过程的模拟能力具有重要的影响。同时需要指出, BATS1e-P<sub>0</sub>RCM9 耦合模式在夏季模拟的降水量(图6b、图7b、图8b、图9b)均在高原东侧明显存在一个虚假

的南北走向的强降水带, 这是耦合模式的一个系统误差, 可能原因是 BATS1e 陆面过程模式不能细致地刻画夏季高原地区的陆气相互作用特征, 如它对高原积雪的处理较简单, 可能夸大了地气之间的水分交换, 还需要我们进一步改进高原地区地气通量的计算方案。

### 4 结论和讨论

通过数值试验考察了 BATS1e 陆面模式对 P<sub>0</sub>RCM9 模式模拟东亚区域气候特征性能的影响, 得到如下结论:

(1) BATS1e-P<sub>0</sub>RCM9 模式对各标准等压面上

气象要素气候平均场的模拟效果有不同程度的改善, 其中对对流层下层和近地层各气象要素场模拟效果的改善效果比对流层中高层更明显。

(2) BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式较成功地再现了中国区域 1 月和 7 月气候平均降水场的分布特征。与原 P $\sigma$ RCM9 模式的模拟结果比较发现, 它对中国东部地区冬、夏季气候平均降水场的模拟能力有明显的提高。

(3) BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式对中国东南部汛期强降水过程具有较强的模拟能力。

从上面的分析知道, 由于 BATS1e-P $\sigma$ RCM9 模式改进了地气之间动量、热量和水汽通量交换的计算, 更好地描述了陆地下垫面与大气之间的相互作用, 从而改善了模式对近地层各气象要素场的模拟, BATS1e 陆面模式对 P $\sigma$ RCM9 模式模拟东亚地区特别是中国地区的冬、夏季气候平均场和短期气候变化的能力具有重要影响。同时需要指出目前耦合模式还存在的不足之处, 由于 P $\sigma$ RCM9 气候模式的分辨率是  $1^\circ \times 1^\circ$ , BATS1e 模式还不能较好地反映东亚地区的陆面非均匀性特征, 还需要考虑次网格尺度的影响。BATS1e-P $\sigma$ RCM9 耦合模式虽然对东亚地区气象要素场的模拟比原模式有较明显的改进, 但是还不够理想, 特别是夏季在高原东侧明显存在一个虚假的南北走向的强降水带, 这是耦合模式存在的一个系统误差, 还需要我们进一步改进高原地区地气通量的计算方案, 使之能更好地刻画高原地区的陆气相互作用特征。陆-气相互作用作为一个非常复杂的过程, 涉及到不同的下垫面特征, 需要相应的参数化方案来计算各种地气通量, 这些通量往往又直接或间接地影响到各种气象要素场的计算, 这就要求有一个匹配的、合理的陆面参数化方案以提高这些通量的计算精度, 进而改进陆-气耦合模式的模拟性能。本文只考察了 BATS1e 陆面模式对 P $\sigma$ RCM9 模式模拟东亚区气候平均场以及短期气候变化能力的影响, 还需要进一步了解在季节或年际尺度上它对 P $\sigma$ RCM9 模式性能的影响, 以及比较不同的陆面模式对 P $\sigma$ RCM9 模式模拟性能的影响, 选择一个能够更好地描述东亚地区陆-气相互作用特征的陆面模式与 P $\sigma$ RCM9 模式耦合, 为发展区域气候系统模式奠定基础。

### 参考文献 (References)

[1] 钱永甫, 颜宏, 骆启仁, 等. 一个有大地形影响的初始方程

数值预报模式. 大气科学, 1978, **2** (2): 91~102

Qian Yongfu, Yan Hong, Luo Qiren, et al. A P. E. numerical weather prediction model with large scale orography. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1978, **2** (2): 91~102

[2] Kuo H L, Qian Y F. Influence of the Tibetan Plateau on cumulative and diurnal changes of weather and climate in summer. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 2337~2356

[3] Kuo H L, Qian Y F. Numerical simulation of the development of mean monsoon circulation in July. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 1879~1897

[4] 钱永甫. 一个考虑地形的五层原始方程模式. 高原气象, 1985, **4** (2): 1~28

Qian Yongfu. A five-layer primitive equation model with topography. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1985, **4** (2): 1~28

[5] Zhang Qiong, Qian Yongfu. Effects of boundary layer parameterization on the monthly mean simulation. *Acta Meteor. Sinica*, 1999, **13**: 73~85

[6] 刘华强, 钱永甫.  $P-\sigma$  坐标系区域气候模式对冬夏季月平均场的模拟试验. 南京大学学报(自然科学), 1999, **35** (3): 337~345.

Liu Huaqiang, Qian Yongfu. Numerical simulation of monthly mean field in summer and winter by a limited area model with  $P-\sigma$  incorporated coordinate. *Journal of Nanjing University (Natural sciences)* (in Chinese), 1999, **35** (3): 337~345

[7] 王世玉, 钱永甫.  $P-\sigma$  坐标区域气候模式的垂直分辨率对模拟结果的影响. 高原气象, 2001, **20** (1): 28~35

Wang Shiyu, Qian Yongfu. The effects of vertical resolution of  $P-\sigma$  coordinate regional climate on simulated results. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2002, **20** (1): 28~35

[8] 王世玉. 东亚区域夏季风的诊断分析及气候变化的数值模拟研究. 南京大学博士学位论文, 2001

Wang Shiyu. Diagnostic analyses of summer monsoon and numerical studies of regional climate change in East Asia. Ph. D. dissertation (in Chinese). Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, 2001

[9] 王世玉, 钱永甫.  $P-\sigma$  九层区域气候模式对东亚区域气候季节与年际变化的模拟. 大气科学, 2003, **27**(5): 798~810

Wang Shiyu, Qian Yongfu. Seasonal and interannual variation simulation of the regional climate of East Asia by a nine-level  $P-\sigma$  regional climate model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (5): 798~810

[10] 黄安宁, 张耀存. 海温季节和年际变化对东亚区域气候变率模拟的影响. 南京大学学报(自然科学), 2004, **40** (3): 319~329

Huang Anning, Zhang Yaocun. Impacts of seasonal and interannual variability of sea surface temperature on the climate variability over East Asia. *Journal of Nanjing University*

- (Natural sciences) (in Chinese), 2004, **40** (3): 319~329
- [11] 钱永甫. 地表热平衡温度的一种计算方法. 气象科学, 1988, **4**: 14~27  
Qian Yongfu. A method of calculating the surface heat balance temperature. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1988, **4**: 14~27
- [12] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. Biosphere - Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR community Climate Model. NCAR Tech. Note-275 + STR, 1986, 69
- [13] Dickinson R E, Henderson-Sellers A. Modeling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parameterizations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1988, **114**: 439~462
- [14] Dickinson R, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere - Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR community climate model. Near/TN-387 +STR, Boulder, CO, 1993, 72 pp
- [15] Giorgi F, Marinucci M R. Validation of a regional atmospheric model over Europe: sensitivity of wintertime and summertime simulations to selected physics parameterizations and lower boundary conditions. *Quart J. Roy. Meteor. Soc.*, 1991, **117**: 1171~1206
- [16] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiation transfer process. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2794~2813
- [17] Giorgi F, Marinucci M R, Canio G D, et al. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2814~2832
- [18] Qian Yongfu. The effects of different sea surface temperature distributions over the western Pacific on the summer monsoon properties. *Acta Oceano. Sinica*, 1993, **12** (4): 535~547
- [19] Deardoff J W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 1978, **83** (4): 1889~1904
- [20] 赵彦, 林朝晖, 李旭, 等. IAP PSSCA 两组预测试验的评估及比较 I. 降水部分. 大气科学, 2000, **24** (2): 215~222  
Zhao Yan, Lin Zhaohui, Li Xu, et al. Assessment and comparison of two prediction schemes of IAP PSSCA. Part I: Precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (2): 215~222.
- [21] 丁一汇. 1991 年江淮流域持久性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993. 255pp  
Ding Yihui. *Study on Persisting Heavy Rain in the Changjiang and Huaihe Basins in 1991* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 255pp