

# 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 气候模式的耦合模拟试验\*

丁汇 张晶 赵宗慈

(国家气候中心, 北京, 100081)

## 摘 要

在第一部分提出的陆面过程模式与区域气候模式 RegCM 实现耦合的基础上, 利用这一耦合模式(简称 CRegCM)对中国中东部地区 1991 年 5~7 月江淮大暴雨时期的强降水气候特征进行了模拟, 并与 NCAR 的区域气候模式 RegCM2(此处称 NRegCM)在同样初、边值条件和同样物理过程选项下的模拟结果进行了对比分析。分析结果表明, 模式 CRegCM 具有较强的模拟性能和模拟能力, 基本上成功地模拟了这次极端的降水气候事件。在某些方面, 如地面气温和与陆面过程有关要素的模拟上, CRegCM 的模拟结果要比 NRegCM 的结果更合理。  
关键词: 陆面过程模式, 区域气候模式, 耦合模拟。

## 1 引 言

大气模式中的陆面过程处理对大气模式有着非常重要的意义, 如陆气间的感热、潜热通量是大气热量、水汽方程的下边界, 这些通量计算的准确度影响大气模式温度场和湿度场的计算精度; 同时陆面过程的处理也直接影响大气模式模拟近地面气象要素的质量, 如地表气温、低层云量等; 另外陆面过程与大气中其它物理过程还存在着各种反馈机制, 如低层云影响地表辐射平衡, 感热、潜热通量影响边界层交换和湿对流过程的强度等等。所有这些事实都表明准确细致地考虑陆面过程是发展大气模式、提高大气模式模拟质量的一个重要内容。因此发展陆面过程模式的最终目的是将其应用于大气模式中进行模拟研究。目前, 许多陆面过程模式比较成功地与 GCMs 相耦合并进行了全球气候模拟, 如 BATS 与美国 NCAR-CCM<sup>[1]</sup>, SiB 与美国 NMC-GCM<sup>[2]</sup>, IAP94 与中国 IAP-GCM<sup>[3]</sup>等等。这些模式对大尺度气候特征和气候变化表现了比较强的模拟能力。并且大量的模拟结果还表明, 详细的陆面过程处理更有利于描述和表征局地气候特征。因此发展更完善的陆面过程模式并将其与区域气候模式相耦合对进行区域气候的研究和预测具有更突出的重要意义。

目前, 美国 NCAR 发展起来的第二代区域气候模式 RegCM2<sup>[4,5]</sup>中, 陆面过程处理采

\* 初稿时间: 1996 年 9 月 10 日; 修改稿时间: 1997 年 3 月 19 日。

资助课题: 国家“九五”重中之重科技项目 95-906-02-04。

用 Dickinson 的陆气传输方案 BATS<sup>[6]</sup>。在文中的第一部分<sup>[7]</sup>已经讨论过, BATS 中关于土壤温度和土壤水气的计算不是非常精确, 并且没有考虑陆面过程(特别是降水过程)的次网格分布特征, 而在气候模式中, 土壤温度和土壤水汽是两个重要的物理量, 降水的次网格分布特征又直接影响土壤水汽, 许多模拟研究都表明, 土壤水汽对降水乃至全球气候有着非常明显的影响。因此, 发展更加完善的陆面过程模式是非常必要的。NCAR 最新版本 GCM(CCM3) 使用 Bonan 最新发展的陆面过程模式 LSM<sup>[8]</sup> 替代了 BATS。张晶、丁一汇<sup>[7]</sup>正是从这一点出发, 在 BATS 模式基础上, 发展了一个陆面过程模式。并用这个模式代替 BATS 与区域气候模式 RegCM 相耦合。利用这个新的耦合模式对中国季风区的夏季区域气候特征进行模拟来检验耦合模式的模拟能力。下面首先简要介绍区域气候模式 RegCM、陆面过程模式以及它们的耦合, 然后介绍耦合模拟试验的设计, 在文章的第四部分分析模拟结果, 检验耦合模式的模拟能力, 最后给出结论。

## 2 模式简介

文中使用的区域气候模式是美国 NCAR 发展的第二代区域气候模式 RegCM2<sup>[4,5]</sup>。刘永强、丁一汇<sup>[9]</sup>对区域气候模式 RegCM 以及利用这个模式开展的区域气候模拟研究做了详细的综合评述。RegCM 是 NCAR 于 1989 年开始研制的, 它是由一个有限区域中尺度气象模式, 大气环流模式输出结果及一个单向嵌套系统组成。具体地就是选定一个模拟区域, 然后利用大气环流模式模拟或同化分析输出的大尺度气象场作为初始条件和边界条件积分有限区域中尺度模式, 来更准确更详细地揭示大尺度背景场下的区域气候特征, 区域模式的模拟结果不反馈给大气环流模式。区域气候模式 RegCM 是在中尺度气象模式 MM4 的基础上发展起来的。考虑到气候模拟需要长时间积分的特点以及陆面过程, 大气辐射过程对气候模拟的重要作用, RegCM 对标准版本的 MM4 进行了扩充和改进。NCAR 在改进和发展 RegCM 的同时, 也利用 RegCM 开展了大量的区域气候模拟试验研究。刘永强、丁一汇<sup>[9]</sup>综合分析了这些模拟结果, 指出 RegCM 对于模拟局地强迫导致的区域气候特征已具有一定的模拟能力, 并且在许多方面要比分辨率较粗的 GCM 模式模拟得好。例如 Liu, et al<sup>[10]</sup>、刘永强、丁一汇等<sup>[11]</sup>用 RegCM 对中国季风区域气候特征均作出了比较成功的模拟。另一方面, 利用 RegCM 进行的物理过程参数化方案的敏感性试验表明<sup>[12]</sup>, 区域气候模式 RegCM 对物理过程参数化方案非常敏感。而在目前的模式中关于物理过程的处理还是一个相当薄弱的环节, 因此进一步完善和改进物理过程的处理对提高区域气候模式 RegCM 的模拟质量非常重要。

针对陆面过程对区域气候模拟的重要性以及目前区域气候模式 RegCM 中的陆面方案 BATS 的许多不足, 张晶、丁一汇<sup>[7]</sup>发展了一个陆面过程模式并将其应用于区域气候模式 RegCM 中。这个陆面过程模式包括一层林冠, 四层土壤。土壤表层的物理量值需要有精确的模拟, 因此, 这个模式对表层土壤分层较细并采用物理方程求解; 为节约计算机时, 同时考虑到深层土壤的物理量主要受季节因子影响, 变化幅度小, 对深层土壤分层较粗并利用经验方法处理。模式还考虑了降水的次网格分布特征及其影响。在通量计算中考虑了两类阻抗作用: 湍流阻抗和表面阻抗。另外, 在模式中还利用一个简单的雪盖模式考虑了雪的影响。

文是的主要工作是将本文第一部分改进的陆面过程模式和区域气候模式 RegCM 相耦合,即在 RegCM 中用 LPM-ZD 代替 BATS。经过陆面过程模式和 RegCM 大气模式的修改和调试,两个模式耦合在一起。下面介绍利用这个新的区域气候模式 RegCM 进行的区域气候模拟试验。

### 3 模拟试验设计

为了更好地考察 LPM-ZD 与 RegCM 的耦合模拟能力,文中选取同样的模拟对象分别利用 NCAR 的 RegCM 和新耦合的 RegCM 进行模拟,然后对比分析两例模拟结果来检验 LPM-ZD 和 RegCM 的耦合模拟性能。为了区别起见,将加进 LPM-ZD 的 RegCM 称为 CRegCM,而将原来 NCAR 的 RegCM 称为 NRegCM。这样利用 CRegCM 进行的模拟试验称为 CRegCM 试验,而用 NRegCM 进行的模拟试验称为 NRegCM 试验。

如前所述,RegCM 是在 MM4 基础上发展起来的,它的水平网格距和时间积分步长都比较小,积分起来非常耗费计算机时。受计算机资源所限,这里模拟试验的模拟区域取得较小,模式铅直分层也较少,这样做的结果必然会影响到模拟质量。但本例模拟的主要目的是检验 LPM-ZD 与 RegCM 的耦合是否成功及其模拟能力,并对比分析 CRegCM 试验和 NRegCM 试验的模拟结果。因此这种因缩小模拟区域、减少模式铅直分层的影响对两例模拟都会产生,但对于对比分析和模式性能检验的影响可能不大。这是关于模拟试验的一点说明。

利用 CRegCM 和 NRegCM 进行模拟试验时,选用了 1991 年 5~7 月中国中部和东部的区域气候特征和变化为模拟对象。1991 年 5~7 月中国江淮地区出现了本世纪罕见的特大洪涝灾害,选择这次洪涝灾害进行模拟试验的目的也是为了考察 RegCM 对于特大降水区域气候特征的模拟能力。具体模拟区域的中心位置位于(33 N, 115 E),范围包括中国中部、东部及邻近海域共计  $2100 \times 2040 \text{ km}^2$ 。水平格距为 60 km,这种格点分辨率对模拟中纬度天气过程是足够的。在所选择的精度上,中国中部和东部的地形及海岸线都能比较准确地得到描述(图略)。模式积分时间为 1991 年 5 月 1 日-7 月 30 日,积分步长为 180 s。模式积分所需要的大气初始和侧边界条件由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的分析资料(水平:  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ;垂直: 7 层,时间间隔: 12 h)得到,海温则由月平均观测资料插值到模拟区域的海洋格点上得到。在使用 CRegCM 模拟时,陆面过程模式的第四层土壤的气候温度值是由中国月平均的站点观测资料插值得到。区域模式的垂直分层取为非均匀的 10 层分布。在模式中模式顶层气压取为  $P_{\text{top}} = 100 \text{ hPa}$ 。

模拟试验选用的物理过程参数化方案包括:CCM2 的辐射方案;改进的 Kao 型积云对流参数化方案;Hotslag 行星边界层物理模式。NRegCM 模拟试验采用了陆气传输方案 BATS,CRegCM 模拟试验采用了陆面过程模式 LPM-ZD。这两类陆面过程模式积分时所需要的土壤和植被的初始温度简单地取为大气模式最低层的气温,初始土壤水汽取为植被的函数<sup>[13]</sup>。

在模拟区域、模拟积分时间、积分步长、模式结构和物理方案确定下来以后,分别对模式 CRegCM 和 NRegCM 进行了 3 个月的长时间积分。下面分析模拟结果。

## 4 模拟结果

利用模式 CRegCM 进行了 3 个月的长时间积分, 初步表明陆面模式 LPM-ZD 与 RegCM 的耦合是成功的。下面详细分析 CRegCM 的模拟结果, 首先与观测分析资料进行对比分析, 然后与 NRegCM 的模拟结果进行对比分析。通过这些对比分析考察模式 CRegCM 的模拟性能。为了方便分析, 先概要介绍 1991 年 5~7 月江淮地区强降水过程的气候特征。

### 4.1 1991 年 5~7 月江淮强降水过程的主要气候特征概述<sup>[14]</sup>

1991 年夏季江淮地区持续性特大降水过程是本世纪所罕见的。其特点是入梅早、梅期长、强度大。根据观测资料分析, 1991 年的梅雨从 5 月 18 日开始, 7 月 13 日结束, 梅雨期长达 57 d。降水量也超过多年平均降水量近 2 倍。1991 年 5~7 月中高纬度地区大气环流的持久稳定性和副热带高压位置、强度的异常是造成持续性特大降水过程的直接原因。分析表明在 57 d 的梅雨期内, 乌拉尔山附近的阻塞形势共持续达 45 d, 堪察加附近的阻塞形势达 26 d, 贝加尔湖附近的低槽持续达 48 d。稳定的两阻-槽环流型非常有利于江淮地区梅雨持续性降水的发生。这一年副热带高压的活动特点是持续偏强, 初夏位置偏北, 盛夏位置偏南。西太平洋副热带高压跳过 20°N 的时间比气候平均提早 3 个候; 跳过 25°N 的时间比气候平均推迟 1~2 候。副热带高压脊线在 5 月份的过早北跳和 5~7 月份在 20°~25°N 之间的持续性维持, 使得长江中下游流域以南处在强西南季风的持续控制之下, 加上中高纬地区持续性两阻-槽环流型, 长江中下游流域是辐合区所在位置。这是 1991 年持续性特大降水的原因所在。

### 4.2 CRegCM 的模拟结果与观测资料的比较分析

#### 4.2.1 中低层形势场和要素场

CRegCM 模拟的中低层形势场和要素场的基本形势与 ECMWF 分析资料基本一致。并且 CRegCM 更细致地刻划了模拟区域的区域气候特征。在 5 月份模拟的 850 hPa 风场和高度场上(图略), 模拟区域的中部和南部是强偏南和偏西南气流, 甘肃附近为一低值系统, 其东侧是强南风; 中国东南沿海为副热带高压的外围所控制, 为强的西南风。这一结果与该年 5 月份副热带高压第一次北跳过早, 主要的低层辐合区发生在中国西南、江淮及以北地区的观测分析结果是一致的。850 hPa 的温度高值区与西南季风相一致(图略)。6 月份的模拟结果与 5 月份相比发生了很大的变化, 如图 1 为 6 月份模拟的 850 hPa 风场、温度场和比湿场的月平均分布, 其范围为 25°~41°N, 106°~124°E, 在图 1a 的风场上, 模拟区域主要是西南风和南风所控制, 原来的强南风减弱。高度场上(图略) 甘肃附近仍是低值系统中心, 但其范围东移、扩大, 整个区域位势高度显著降低。850 hPa 比湿(图 1c) 明显增大, 温度场(图 1b) 是北高南低形势, 与大尺度分布相一致, 这也是江淮地区梅雨期典型的低层温度场分布特征。7 月份 850 hPa 强西南风北上至渤海湾和辽东半岛, 中国华北地区的南风显著增强(图略)。这与观测到的 7 月中下旬副热带高压的第二次北跳相一致。这时江淮流域的持续性强降水过程逐渐结束, 主要雨带北移, 850 hPa 的比湿(图略) 在北方地区有大幅度上升。在 500 hPa 图上(图略) 也可以明显地看到西南季风的北上及副热带高压系统的北跳。

纵观 CRegCM 的模拟结果, 它不但基本上模拟了大尺度形势场的基本特征, 特别是

夏季风的活动, 并且进一步揭示了较细致的局地区域气候特征。CRegCM 成功地模拟了 5 月份中国中部和东部的强南风 and 西南风, 自西南至华北西部是较强的南风, 华东和东南地区是强西南季风, 弱辐合发生在华东地区, 与 5 月份雨季在这一地区开始相一致, 而华南无强降水发生。6 月份原来自西南至华北西部的强南风减弱, 四川地区出现较大的西风, 华东至东南仍是西南季风控制, 华东至西南地区是持续的强降水过程。到了 7 月份, 西南季风明显北上, 华北地区出现较大南风, 江淮持续暴雨减弱结束。

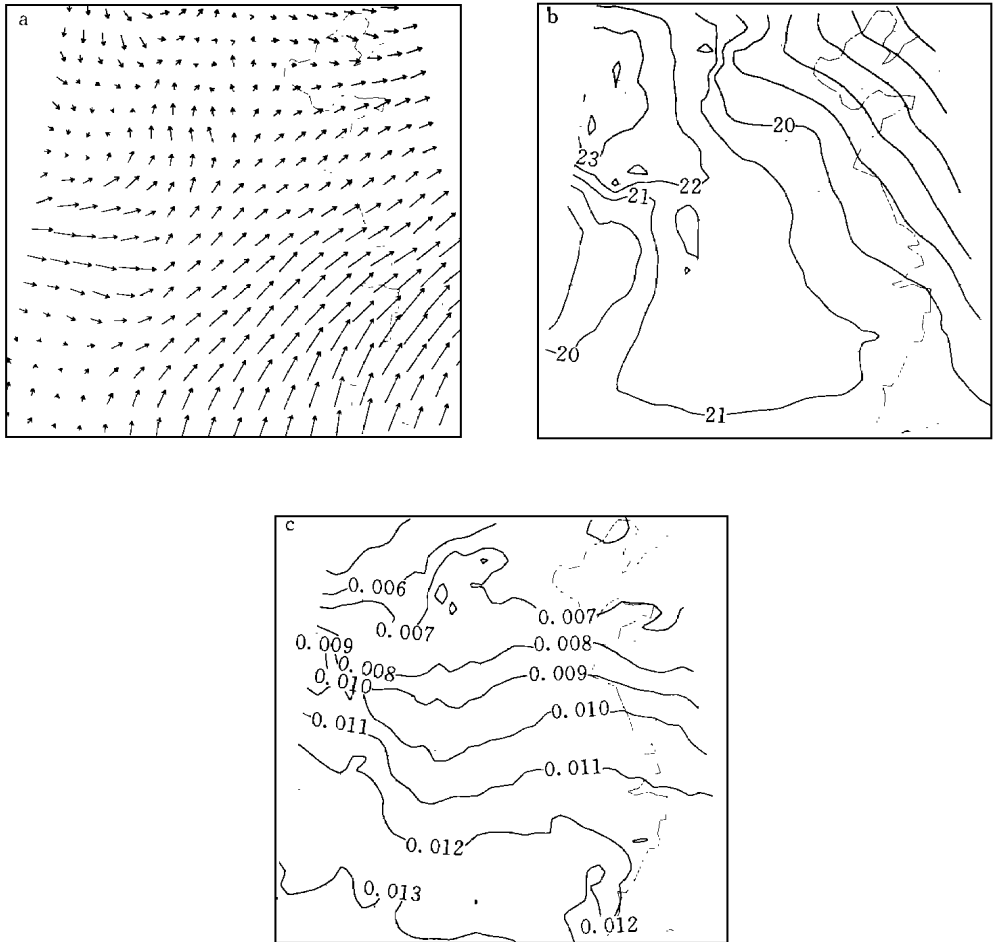


图 1 CRegCM 模拟的 1991 年 6 月 850 hPa 风场、温度场和比湿场的月平均分布  
(a. 风场; b. 温度场( ); c. 比湿场(kg/kg))

#### 4. 2. 2 地面降水和地面气温

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 2 和图 3 分别为 CRegCM 模拟的和实测的(来自《中国气象月报》) 6, 7 月地面降水的分布。根据图 2 和图 3, CRegCM 模拟的月降水与观测的月降水分布基本一致, 但模拟的降水量在大部分地区偏大, 这主要是前面讲过的模拟区域较小, 铅直分辨率较低和模式的误差所致。另外, 个别

异常强降水中心就是所谓的数值点雷暴(NPS),例如位于秦岭山脉的一个山峰对应着一个异常过量的降水中心。5月份降水模拟的不太好(图略),与观测(图略)相比差别较大,这可能与模式的初始积分调整有关。模式模拟了黄山—杭州和武汉附近两个大于200 mm以上的降水中心,但比观测到的河南—湖北北部—安徽—浙江的成片大于200 mm的降水范围小;四川的降水中心也模拟的范围小,强度弱;铜川附近的降水中心位置正确,但强度偏大;华北和华东沿岸降水模拟误差大,可能是边界影响所致。6月份降水模拟结果比较好,如图2a,模拟的自河南南部、湖北北部—江苏、浙江—福建沿海一带大于200 mm的降水区与观测分析结果(图3a)甚为一致,降水中心极值也非常接近,模拟的中心降水极值是500 mm,观测记录的中心极值是419 mm;安康降水中心模拟基本正确;四川南部雨带模拟偏弱;华北和山东半岛的降水模拟偏强。由图2b、图3b,7月份模拟结果也较好,自山东半岛西部—江淮、湖北南部—贵州一带的雨带被正确模拟出来,特别是山东半岛西部和江淮的强降水中心模拟正确,但模拟的雨带西部强度偏弱。由此看来,CR<sub>reg</sub>CM对中国降水分布的气候特征具有比较强的模拟能力,特别是随着积分时间的延长,模拟效果大为提高。

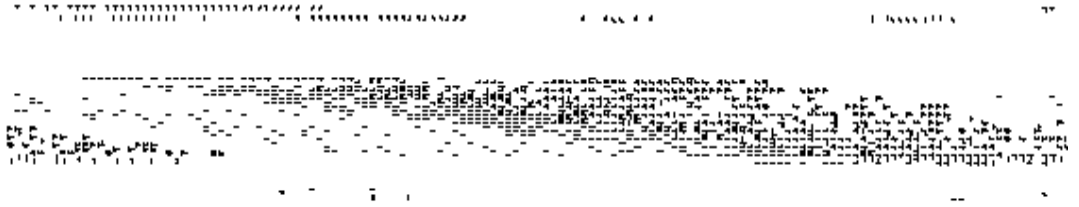


图2 CRegCM模拟的月降水量  
(a. 6月; b. 7月。单位:mm)

CR<sub>reg</sub>CM模拟的地面气温在分布形势和变化趋势与观测分析(来自《中国气象月报》)相比基本一致。如图4和图5为6月份的模拟和观测结果,可以看出CR<sub>reg</sub>CM模拟的地面气温分布与观测基本一致,主要高温和低温中心位置模拟较正确,特别是暖舌自中国南部伸向华北地区这一分布形势模拟正确。但在模拟区域的南部模拟值略高于实测。

根据以上分析,陆面过程模式与RegCM大气模式相耦合的区域气候模式CR<sub>reg</sub>CM对中国1991年5~7月的持续性强降水过程的气候特征和变化具有比较强的模拟能力。

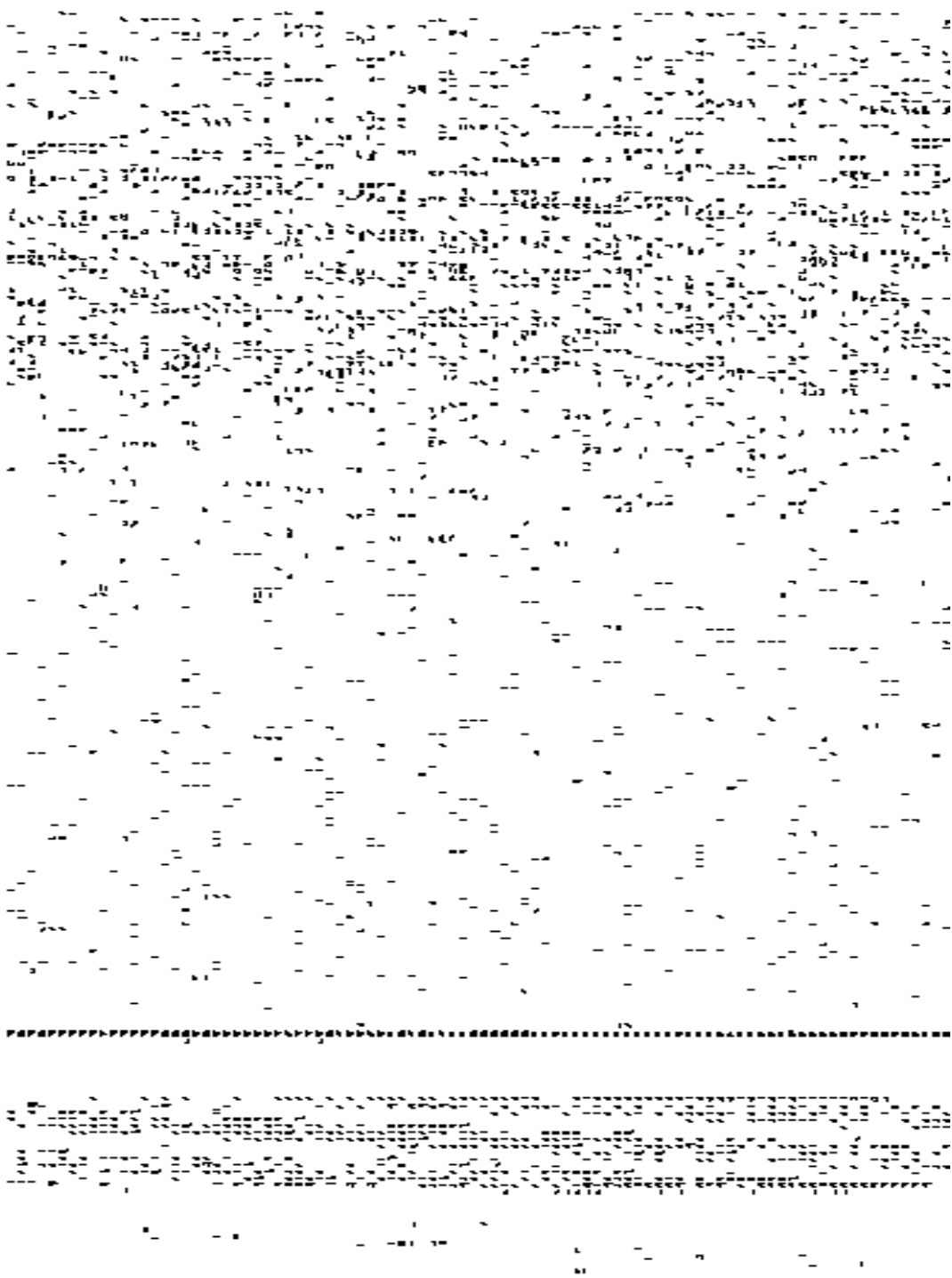


图 3 观测的月降水量

(a. 6 月; b. 7 月。单位: mm。资料取自《中国气象月报》)

模拟的结果与实测资料分析的结果基本一致。并且区域气候模式进一步细致地揭示了大尺度背景场下的区域气候特征,特别是 CRegCM 比较正确地模拟了中国主要雨带的特征和雨带内降水中心的分布,这对区域气候的分析研究和预测是十分重要的。

### 4.3 CRegCM 与 NRegCM 模拟结果的比较分析

为了进一步检验陆面过程模式与 RegCM 大气模式耦合模拟性能,将美国 NCAR 的区域气候模式 NRegCM 在同样的初、边值条件和同样的物理过程选项下也进行了气候模拟积分。通过对比分析 CRegCM 和 NRegCM 的模拟结果来检验陆面模式 LPM-ZD 的模拟性能。下面主要对比分析近地面气象要素场和陆面过程要素场的模拟结果。

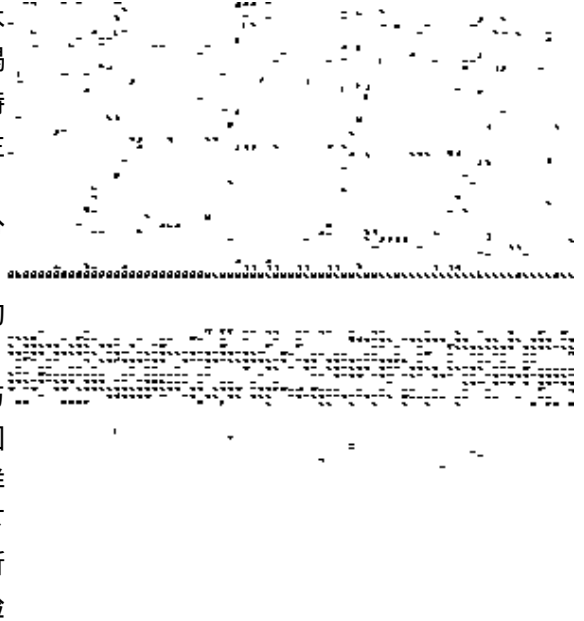


图 4 CRegCM 模拟的 6 月月平均地面气温( )

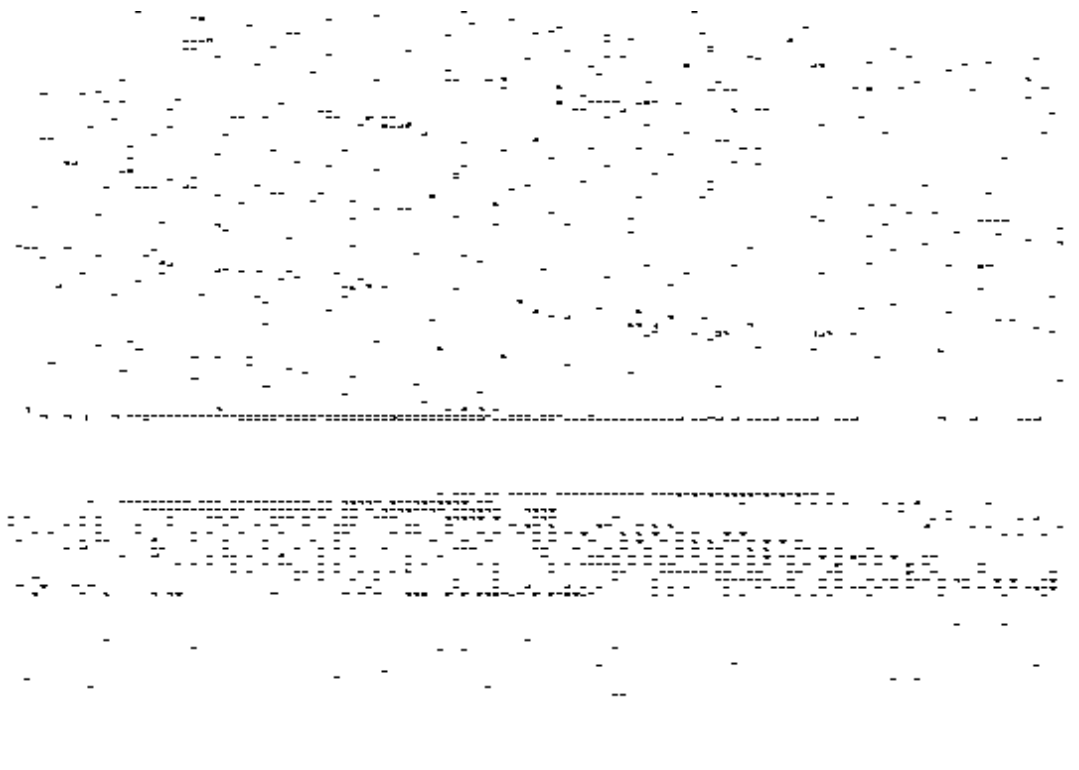


图 5 观测的 6 月月平均地面气温( ) (来自《中国气象月报》)



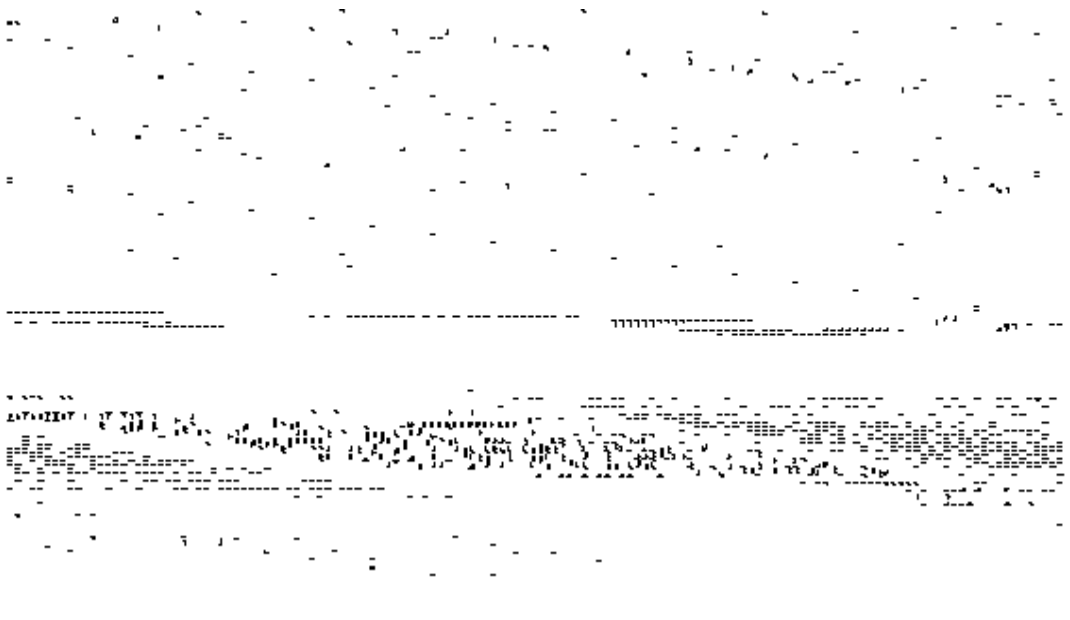


图 6 NRegCM 模拟的月降水量

(a. 6 月; b. 7 月。单位: mm)

#### 4.3.1 地面降水和地面气温

图 6 是 NRegCM 模拟的 1991 年 6、7 月降水量分布。与 CRegCM 的情形相似, NRegCM 对 5 月份的降水模拟的也不好(图略)。没有准确地模拟出河南—湖北北部—安徽—浙江一带的主要雨带, 仅模拟出了位于杭州和武汉附近的两个小范围降水中心, 并且 NRegCM 比 CRegCM 模拟的这两个地区的降水更弱。另外 NRegCM 模拟的苏北强降水中心是虚假的。在 6 月份, NRegCM 基本模拟到了自河南南部、湖北北部—江淮—浙江—福建沿岸的强降水带(图 6a), 但与实测分析(图 3a)相比, NRegCM 对四川降水中心和带状结构的模拟不如 CRegCM 的模拟结果(图 2a)。两个模式对华北和山东半岛的降水模拟均太强。7 月份的主要雨带分布

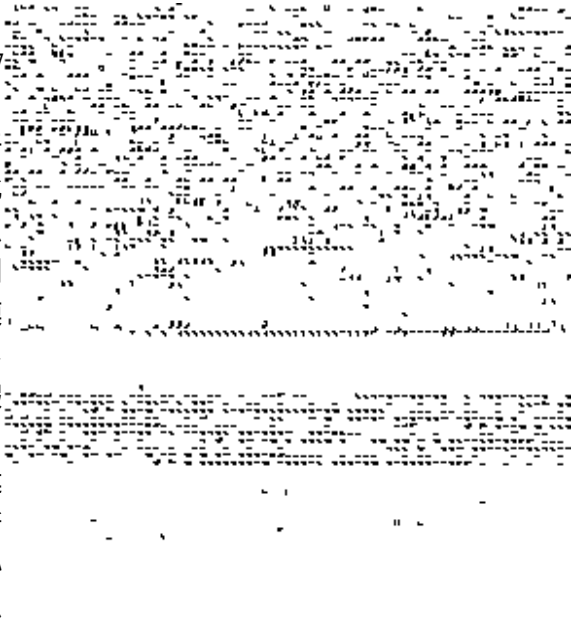


图 7 NRegCM 模拟的 6 月月平均地面气温

(单位:  $^{\circ}\text{C}$ , 资料取自《中国气象月报》)

分布在山东半岛西部—江淮地区—湖北南部—贵州一带。NRegCM 基本上模拟出了这一雨带的分布形势(图 6b), 但比 CRegCM 模拟的雨带分布和结构(图 2b)稍差, CRegCM 更加成功地模拟了位于苏北的降水中心和湖北—贵州的雨带。另外两个模式对西南雨带均模拟的太弱。NRegCM 也存在模拟的降水量偏大问题。总的来看, 两个模式对地面降水的模

拟相差并不显著。但是,两个模式对地面气温的模拟相差较大,NRegCM 模拟的地面气温比 CRegCM 明显偏高。图 7 是 NRegCM 模拟的 1991 年 6 月月平均地面气温。比较图 7 和图 4,两个模式模拟的地面气温分布基本一致。但是在模拟区的中部和南部部分地区 CRegCM 的模拟值仅比实测值高 1~2 左右,而 NRegCM 的模拟值比实测高达到 4~5。NRegCM 模拟的地表温度偏高在刘永强、丁一汇等<sup>[11]</sup>的工作中也有反映,他们曾指出,这个问题可能通过改进地表、边界层参数化方法得到改善,这里的工作证实了这一点,CRegCM 对地面气温的模拟有了较大改进。

#### 4.3.2 陆面过程有关要素

新的耦合模式对陆面过程要素的模拟也是本文所关注的。鉴于目前比较缺乏有关陆面要素的观测资料,因此本文只能通过对比分析 LPM-ZD 和 BATS 对陆面要素的模拟结果来考察 LPM-ZD 的模拟性能。

图 8 和图 9 分别是 LPM-ZD 和 BATS 对土壤表面温度、顶层土壤水汽、根带层土壤水汽、地表迳流和下垫面蒸发 6 月份的月平均模拟结果。由于 LPM-ZD 和 BATS 的土壤分层不同,为了比较方便,各层土壤水汽以单位体积土壤水汽含量(mm/mm)表示。根据图 8a 和图 9a,LPM-ZD 和 BATS 对土壤表面温度的模拟在分布形势上较为一致,但数值差别较大,BATS 普遍比 LPM-ZD 高约 4,在模拟区域的南部,BATS 模拟值比 LPM-ZD 的模拟值高达 10。BATS 模拟的月平均土壤表面温度在 7 月份的最高值达 44 以上,而 LPM-ZD 模拟的最大值仅为 32,由于没有与观测资料对比,不能简单断定哪一个更准确,但是从 NRegCM 模拟的地面气温明显高于观测值的结果来看,BATS 模拟的高土壤温度也可能偏高,因为地面气温受土壤温度的影响十分显著。

LPM-ZD 和 BATS 对月平均土壤水汽的模拟差别较大,5 月份(图略),两个模式的模拟结果差别不太大,这可能是初值的影响还比较大的缘故。6,7 月两个模式模拟结果相差较大,特别是在比较强的降水区,BATS 没有模拟出较高的土壤水汽值,这一点 LPM-ZD

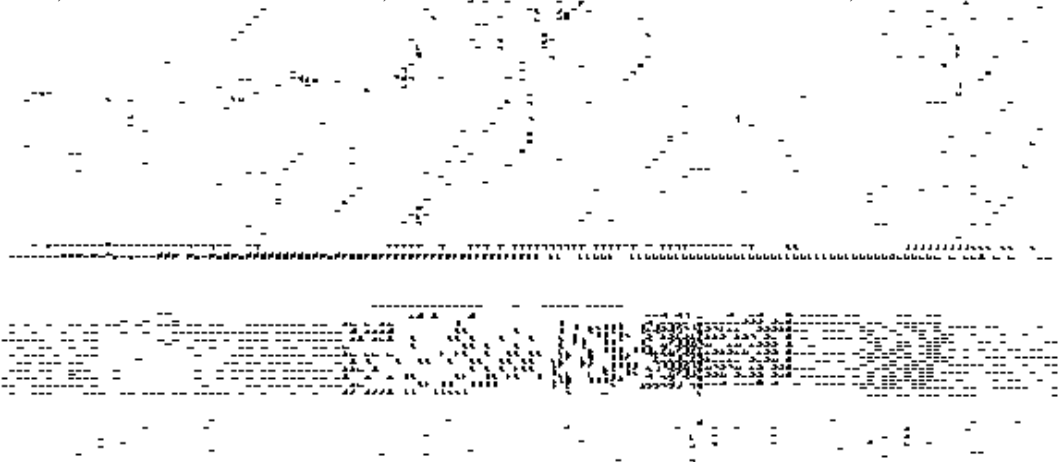


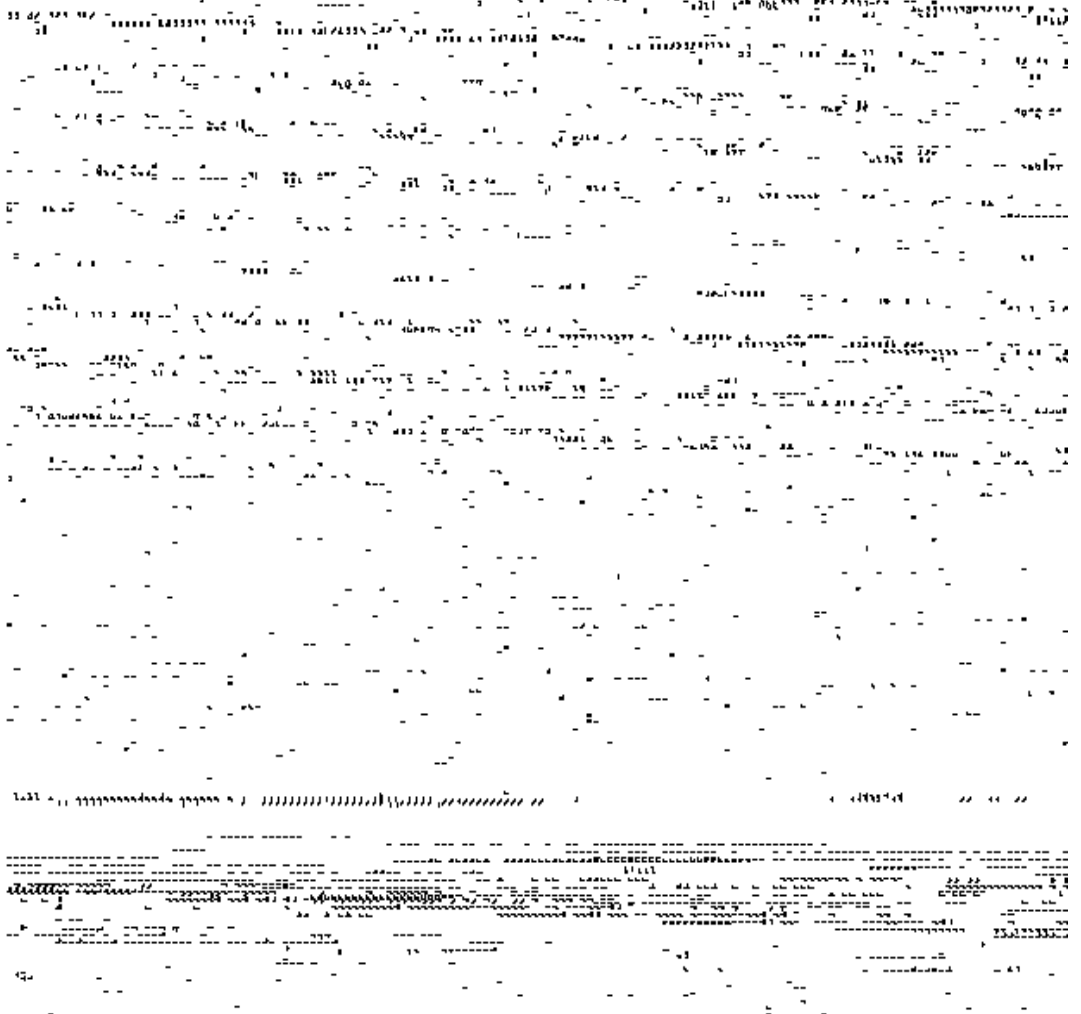
图 8 CRegCM 模拟出的 6 月月平均土壤表面温度等物理量分布

(a. 土壤表面温度( $^{\circ}\text{C}$ ); b. 顶层土壤水汽( $\text{mm}/\text{mm}$ );  
c. 根带层土壤水汽( $\text{mm}/\text{mm}$ ); d. 地表逡流( $\text{mm}/\text{d}$ ); e. 下垫面蒸发( $\text{mm}/\text{d}$ ))

给出了比较成功的模拟。在 6 月份, LPM-ZD(见图 9b, c) 和 BATS(图略) 的模拟结果, 对应于江淮地区降水中心, LPM-ZD 模拟出了月平均地表土壤水汽(土壤顶层水汽) 高值中心, 在江淮沿岸有 0.35 以上的高值区。根带层的土壤水汽分布也是如此。在 7 月份(图略), LPM-ZD 模拟的月平均地表土壤水汽的高值区与山东半岛西部—江淮地区—湖北—贵州一线的雨带相一致。与山东半岛西部和江淮地区强降水中心相对应的是大于 0.35

的大范围地表土壤水汽的高值区。同样在这一区域是根带层土壤水汽大于 0.4 的高值区。BATS 对于土壤水汽的模拟似有矛盾之处,随着降水的发生,降水逐渐渗透到土壤中,根层土壤水汽有所增加,但表层土壤水汽很少变化。BATS 模拟的土壤水汽偏少与 BATS 中地表径流的处理可能有关,从 BATS 模拟的地表径流(图略)可以看出,模拟值比 LPM-ZD 的模拟值(图 9d)明显偏大,特别在强降雨区,偏大更为明显,这就导致了 BATS 模拟的土壤水汽偏少。这种模拟结果与 Pitman<sup>[15]</sup>的结果相同,表明 LPM-ZD 中关于降水分布的次网格特征及其影响的处理是合理的。

对于下垫面蒸发(包括植被的蒸腾)的模拟,在 5 月份(图略),LPM-ZD 和 BATS 模拟相差不大。两个模式模拟的蒸散量值也较小,这与相对少的土壤水汽相关。另外 LPM-



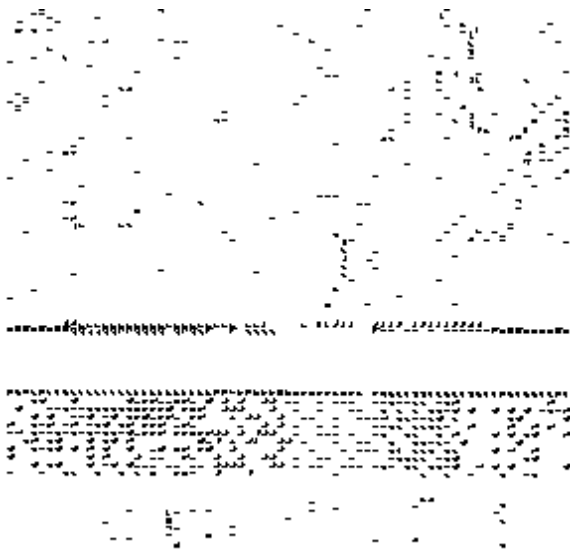


图9 NRegCM 模拟出的6月月平均土壤表面温度等物理量分布  
(a. 土壤表面温度( ); b. 顶层土壤水汽(mm/mm); c. 根带层土壤水汽(mm/mm); d. 地表径流(mm/d); e. 下垫面蒸发(mm/d))

ZD 和 BATS 还模拟了几个大值中心, 通过与土壤水汽的模拟对比分析可以发现, LPM-ZD 模拟的蒸散高值中心与根带土壤水汽的高值中心(大于 0.35)相对应, 表明这些高值中心主要是植被的蒸腾作用。而 BATS 模拟的蒸散高值中心与地表土壤水汽的高值中心较接近, 表明这里的高值中心主要是土壤蒸发。在 6, 7 月份, LPM-ZD 模拟的 6 月下垫面蒸发分布(图 9e) 和 BATS 模拟的下垫面蒸散量值(图略) 均有所增加, 这是降水逐渐渗透到土壤中, 土壤中水分增加的结果。通过与土壤水汽的模拟结果对比, 可以看出强蒸散区与根带土壤水汽的高值区有很好的对应关系。这表明降水使得土壤根带层水分增加, 也有利于植被蒸腾作用增强, 这时植被的蒸腾作用不容忽视。另外从图中还可以发现, 在强降水区中心(江淮地区) 蒸发并不是最大值中心。这与丁一汇、吴晓曦等<sup>[16]</sup> 利用观测资料计算的结果一致。这是由于在强降水区陆气比湿差较小所致。

另外对于感热通量的模拟, 两个模式的模拟结果基本一致(图略), 位于模拟区北部和南部边界(降水很少) 均是感热通量高值区, 中部为模拟的降水区, 降水区感热通量小, 这与丁一汇、吴晓曦等<sup>[16]</sup> 利用观测资料计算的结果也是一致的。

## 5 结 论

在本文中, 陆面过程模式 LPM-ZD 与区域气候模式 RegCM 实现了耦合。利用这个新的耦合模式 CRegCM 对中国中部和东部 1991 年 5~7 月的强降水区域气候特征进行了模拟, 还对比分析了 CRegCM 与 NCAR 区域气候模式 NRegCM 在同样初、边值条件和同样物理过程选项下的模拟结果。这些工作检验了 CRegCM 和 LPM-ZD 的模拟性能和模拟能力。主要结论如下:

(1) LPM-ZD 与 RegCM 大气模式成功地耦合并进行了长达 3 个月的区域气候模拟, 证明了这个耦合模式具有长期积分能力和与大气模式相耦合的能力。

(2) LPM-ZD 与 RegCM 大气模式耦合的区域气候模式 CRegCM 在 ECMWF 大尺

度场提供的初、边值条件下比较成功地模拟了中国 1991 年 5~7 月的强降水区域气候特征。模拟的形势场和要素场合理, 与观测事实基本一致。并且 CRegCM 更细致地刻划了大尺度背景条件下的区域气候特征和变化。特别是 CRegCM 模拟得到了与观测颇为一致的中国江浙至西南一带的雨带分布和最大降水中心分布, 以及这些分布的逐月变化情况。CRegCM 对地面气温分布和变化的模拟也与观测结果很一致。表明耦合模式 CRegCM 对季风雨带和相关联的温度场具有较强的模拟性能和模拟能力。

(3) 对比分析了 CRegCM 和 NRegCM 两个模式对近地面要素场的模拟。对于降水的模拟, CRegCM 比 NRegCM 稍好一些, 特别是在 6, 7 月份, CRegCM 模拟的月平均雨带分布和结构比 NRegCM 更接近于观测结果。CRegCM 明显地改善了 NRegCM 对地面气温的模拟。在中国南部部分区域, CRegCM 和 NRegCM 模拟的地面气温均高于观测结果, 但 NRegCM 的模拟值比观测值高达 4~5, 而在同样地区, CRegCM 的模拟值仅比观测值高 1~2。

(4) 对比分析了 CRegCM 和 NRegCM 两个模式模拟的陆面过程物理量。类似于地面气温的模拟, BATS 模拟的土壤温度显著地高于 LPM-ZD 的模拟结果, 由于 LPM-ZD 构造了物理图象更清晰的土壤温度方程和土壤水汽方程, 因此 LPM-ZD 的结果更具有合理性。另外, 与实测和模拟的降水分布相联系, LPM-ZD 模拟到了比 BATS 更加合理的土壤水汽分布和变化。这是由于 LPM-ZD 中包括了更加详细的陆面水文过程, 考虑了降水的次网格分布特征及其影响。大量的研究事实还表明, 土壤水汽是气候模式中一个非常重要而且非常敏感的物理量, 土壤水汽计算的准确与否, 直接影响陆面过程要素和气候的模拟质量。许多研究也指出: 土壤水汽与降水和气温具有相当重要的反馈作用。因此土壤水汽的精确计算除了改善陆面过程要素的模拟之外也会改善地面降水和气温的模拟。CRegCM 的模拟结果也正说明了这一点。

致谢: 美国 NCAR 的 F. Giorgi 同意本研究使用他们的模式 RegCM2, 刘永强博士、郑维忠博士、王亚非博士为完成本文提供了相关的模式和资料, 沈文海同志为运行模式提供许多帮助, 在此, 一并表示感谢。

## 参考文献

- 1 Dickinson R E and Henderson-Sellers A. Modelling tropical deforestation: a study of GCM land-surface parameterizations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1988, 114: 439~462
- 2 Sato N, Sellers P J, Randall D A, Schneider E K, Shukla J, Kinter J L, Hou Y T and Albertazi E. Effects of implementing the simple biosphere model in a general circulation model. *J Atmos Sci*, 1989, 46(18): 2757~2782
- 3 戴永久. 陆面过程模式及其与大气环流模式的耦合模拟研究: 学位论文 J. 北京: 中科院大气物理研究所, 1995. 287pp
- 4 Giorgi F, Marinucci M R and Bates G T. Development of a second generation regional climate model (RegCM2): boundary layer and radiative transfer processes. *Mon Wea Rev*, 1993, 121: 2794~2813
- 5 Giorgi F, Marinucci M R, DeCanio G and Bates G T. Development of a second generation regional climate model (RegCM2): convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon Wea Rev*, 1993, 121: 2814~2832
- 6 Dickinson R E, Henderson-Sellers A and Kennedy P J. Biosphere atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. NCAR Technical Note, 1993, NCAR/TN-387+STR, 72pp

- 7 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
- 8 Bonan G B. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide. NCAR Tech Note, NCAR/TN - 417+ STR. 1996, 57pp
- 9 刘永强, 丁一汇. 区域气候模拟研究. 应用气象学报, 1995, 6: 228 ~ 237
- 10 Liu Y Q, 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
- 11 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, 见: 赵宗慈主编. 中国短期气候预测的模式研究. 北京: 气象出版社, 1996. 235pp
- 12 Giorgi F and Marinucci M R. Validation of a regional atmospheric model over Europe: sensitivity of winter time and summertime simulations to selected physics parameterizations and lower boundary conditions. Quart J Roy Meteor Soc, 1991, 117: 1171 ~ 1206
- 13 Giorgi F and Bates G T. The climatological skill of a regional model over complex terrain. Mon Wea Rev, 1989, 117: 2325 ~ 2347
- 14 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
- 15 Pitman A J, Yang Z-L and Henderson-Sellers A. Sub-grid scale precipitation using column Model. Climate Dynamics, 1993, 9: 33 ~ 41
- 16 丁一汇, 吴晓曦, 马淑芬. 1991 年江淮暴雨期地气通量与混合层结构的研究. 气象学报, 1997, 55(3): 257 ~ 270

**AN IMPROVED LAND-SURFACE PROCESSES  
MODEL AND ITS SIMULATION EXPERIMENT  
PART2: LAND-SURFACE PROCESSES MODEL  
(LPM-ZD) AND ITS COUPLED SIMULA-  
TION EXPERIMENT WITH REGIONAL  
CLIMATE MODEL**

Ding Yihui Zhang Jing Zhao Zhongci

(*National Climate Center, Beijing, 100081*)

**Abstract**

The Land-surface Process Model LPM-ZD has been successfully coupled with the regional climate model RegCM2 of NCAR. Then the new coupled model(CRegCM) has been applied to simulate the climate characteristic of heavy rainfall in middle and east China for three months from May to July 1991, and compared with model output of NCAR-RegCM2 using BATS as land-surface process scheme, abbreviated NRegCM. The results show that CRegCM has good ability and performance. CRegCM successfully simulate the extreme precipitation event and the simulation of CRegCM for surface temperature and some physical variables related to land surface process are more reasonable than those of NRegCM.

**Key words:** Land-surface process model, Regional climate model, Coupled model simulation.