

郑婧, 谢正辉, 戴永久, 等. 2009. 陆面过程模型 CoLM 与区域气候模式 RegCM3 的耦合及初步评估 [J]. 大气科学, 33 (4): 737 - 750.
Zheng Jing, Xie Zhenghui, Dai Yongjiu, et al. 2009. Coupling of the common land model (CoLM) with the regional climate model (RegCM3) and its preliminary validation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 737 - 750.

陆面过程模型 CoLM 与区域气候模式 RegCM3 的耦合及初步评估

郑婧^{1, 2, 3} 谢正辉^{1*} 戴永久⁴ 袁星^{1, 2} 毕训强⁵

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 国家卫星气象中心, 北京 100081

4 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875

5 The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste 34100, Italy

摘 要 陆面过程通过影响陆面和大气之间物质(如, 水分)和能量的交换影响气候, 其参数化方案对数值天气预报、全球及区域气候模拟有重要影响。本研究利用对生物物理、生物化学过程考虑更全面的陆面模式 Common Land Model (CoLM) 替代区域气候模式 RegCM3 原有的陆面模式 BATS, 发展了耦合区域气候模式 C-RegCM3; 将其应用于东亚地区典型洪涝年份夏季气候模拟以进行评估, 结果表明新耦合的模式 C-RegCM3 能合理模拟大尺度环流场、近地表气温和降水的分布特征, 对西北半干旱地区降水模拟比 RegCM3 有所改进。通过利用区域气候模式 C-RegCM3 及 RegCM3 对地表能量和水文过程模拟结果的比较, 发现在半干旱、半湿润过渡区 C-RegCM3 模拟的潜热增大、感热减小; 模拟的地表吸收太阳辐射差异较明显的地区位于模式模拟的主要雨区; C-RegCM3 在上述过渡区模拟的夏季地表土壤湿度比 RegCM3 偏干, 这与它在过渡区降水模拟偏少、蒸散发模拟偏大相对应, 体现了该模式在半干旱、半湿润过渡带模拟出比 RegCM3 更明显的局地土壤湿度-降水-蒸散发之间的正反馈作用。

关键词 陆面过程模型 区域气候模式 耦合

文章编号 1006-9895 (2009) 04-0737-14

中图分类号 P461

文献标识码 A

Coupling of the Common Land Model (CoLM) with the Regional Climate Model (RegCM3) and Its Preliminary Validation

ZHENG Jing^{1, 2, 3}, XIE Zhenghui^{1*}, DAI Yongjiu⁴, YUAN Xing^{1, 2}, and BI Xunqiang⁵

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*

4 *School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875*

5 *The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste 34100, Italy*

Abstract Land surface processes affect the climate through exchanges of materials (e. g., water) and energy across

收稿日期 2008-01-30, 2008-05-21 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-126-2、KZCX2-YW-217, 国家重点基础研究发展规划项目 2009CB421407

作者简介 郑婧, 女, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事陆面过程模式与区域气候模式的双向耦合研究和区域气候模式的应用工作。

E-mail: jzheng@mail.iap.ac.cn

* 通讯作者 E-mail: zxie@lasg.iap.ac.cn

the land-atmosphere interface, and their parameterizations play an important role in numerical weather forecasting and global and regional climate studies. In this work, the Common Land Model (CoLM), with biophysical and biochemical process parameterizations, is coupled to the regional climate model RegCM3 by replacing its original land surface scheme BATS. The newly coupled model is called C-RegCM3 hereafter. Simulations by C-RegCM3 for summer climate of a flooded year over East Asia are undertaken to validate the newly developed model. C-RegCM3 shows reasonable results of general atmospheric circulation, near-surface air temperature and precipitation, and it improves the simulation of precipitation in the semi-arid region of Northwest China. Comparisons of simulated surface energy and hydrological processes by C-RegCM3 and those by RegCM3 indicate that C-RegCM3 tends to get more latent heat fluxes but less sensible heat fluxes in the semi-arid and semi-humid areas, while the region, where obvious difference between the absorbed solar radiation from C-RegCM3 and that from RegCM3 exists, is located in the simulated rainy areas. The simulated soil moisture at the surface by C-RegCM3 tends to be drier, which is consistent to less precipitation and more evapotranspiration in this region than that by RegCM3 in the transition zone of semi-arid and semi-humid areas during summer. It means that the simulated positive feedback of soil moisture-precipitation-evapotranspiration by C-RegCM3 is stronger than that by RegCM3 over the transition zone.

Key words land surface model, regional climate model, coupling

1 引言

陆面是大气、水文、生态过程的耦合界面。发生在陆地表面与大气之间的物质和能量交换的陆面过程,其参数化方案在数值天气预报和气候数值模拟研究中起着重要作用。陆面模型从简单的水桶模型(Manabe, 1969)发展到考虑植被作用的土壤-植被-大气传输方案,如 BATS (Biosphere-atmosphere transfer scheme) (Dickinson et al., 1993)、IAP94 (Dai et al., 1997) 等,进而到考虑植被与大气之间生物物理和生物化学过程,如 LSM (Bonan, 1995)、AVIM (Ji, 1995) 等,以及结合 BATS、LSM 和 IAP94 的优点所发展而对生物物理化学过程考虑更加合理的 CoLM (Common Land Model) (Dai et al., 2003) 和 CLM (Community Land Model) (Oleson et al., 2004) 等。

区域气候模式研究及模拟应用在近年取得了进展(罗勇等, 2002; Leung et al., 2003; Wang et al., 2004; Giorgi, 2006; 冯锦明等, 2007), 在东亚地区应用的区域气候模式包括 RegCM_NCC (Ding et al., 2006; Shi et al., 2007)、IPRC-RegCM (Wang et al., 2003)、RAMS (Liston et al., 2000)、RIEMS (Fu et al., 2000)、P_oRCM9 (王世玉等, 2003)、CREM (施洪波, 2007) 以及 RegCM 系列 (Giorgi et al., 1999; 吕世华等, 1999; Steiner et al., 2005; 高学杰等, 2006; 胡轶佳等, 2008) 等。由于区域气候模式能够考虑大尺度强迫和中、小尺

度强迫的相互作用,比大气环流模式(GCM)更合理地描述复杂地形、海陆差异、土地利用等次-GCM 网格的尺度强迫效应,因此,将陆面过程模型耦合应用于水平分辨率较高的区域气候模式,能减少区域气候模式内物理过程描述的不准确所带来的不确定性,改善区域气候数值模拟(Giorgi et al., 2000; Christensen et al., 2001; 黄安宁等, 2007),对于改进由陆面过程引起的中尺度强迫对区域气候影响的模拟与预测具有重要意义。

本研究所用的区域气候模式 RegCM3 (<http://users.ictp.it/~pubregcm/RegCM3/>) 是在 NCAR 原有的区域气候模式 RegCM 的基础上通过不断完善其中的物理过程发展起来的 (Giorgi et al., 1993a, 1993b; Pal et al., 2007), 其陆面过程模型是 BATS (Dickinson et al., 1993)。本研究将对生物物理、生物化学过程考虑更全面的陆面模式 CoLM 与区域气候模式 RegCM3 耦合发展了区域气候模式 C-RegCM3, 并将其应用于东亚地区年典型洪涝年份夏季气候模拟以进行初步评估。文中第 2 节介绍用于耦合的区域气候模式及陆面过程模式,以及在此基础上发展的 C-RegCM3; 第 3 节以 1998 年东亚典型洪涝年的夏季为例,通过数值试验对新耦合的 C-RegCM3 进行评估; 第 4 节给出总结。

2 耦合模式 C-RegCM3

本节介绍所用的陆面过程模式 CoLM、区域气

候模式 RegCM3, 以及在此基础上所发展的陆气耦合模式 C-RegCM3。

2.1 陆面过程模式 CoLM

CoLM (Dai et al., 2003) 是在 20 世纪 90 年代发展起来的, 结合了 BATS (Dickinson et al., 1993)、IAP94 (Dai et al., 1997)、LSM (Bonan, 1995) 三个模式的优点, 对生物物理、生物化学过程考虑得更加全面合理。它采用 USGS (U. S. Geological Survey) 陆面分类, 每个计算网格可再分为 24 种下垫面类型, 能反映出地表非均匀性特点。垂直方向上, CoLM 的土壤采用指数分层的方法分为不均匀的 10 层, 深度可达 3.43 m, 上面土壤层分的比较薄, 最上面三层的深度小于 10 cm, 其中顶薄层仅 1.75 cm。在土壤之上是一层的冠层和可根据雪盖厚度变化的、最多五层的雪盖层。CoLM 的生物物理过程可分为与植被覆盖相关的物理过程和与土壤水热传导相关的物理过程。在地表反照率的计算上, CoLM 中的雪面和裸土反照率沿用 BATS 的方法, 但是冠层反照率的处理方法不同: 植被的反照率用的是简化的二流近似方案, 将土壤和冠层的反照率通过简单的公式结合逼近浓密和稀疏的植被, 并提供叶面积指数 (LAI) 合理的中间值; 此外, CoLM 采用“二叶模型”对同一叶片分开考虑了向阳面和背光面, 计算其辐射、叶面积温度和光合作用气孔传导率。在处理由于湍流运动而引起地表动量、感热、潜热通量时, CoLM 修正了 BATS 用来参数化地表稳定度的函数, 裸土的蒸发也进行了修正。计算土壤温度和土壤湿度时, CoLM 显式求解了一个十层土壤模型和一个可多达五层并能调节层数的雪盖层, 每层间都计算热量的传递以推算各土壤层和雪层的温度; 并对土壤的水热属性有相应的处理。另外, CoLM 采用 TOPMODEL (TOPography-based hydrological MODEL) 的方法计算径流 (Stieglitz et al., 1997)。总的来说, CoLM 能够更真实地考虑陆地生物圈的生物物理和生物化学过程, 数值求解方案合理可用。

2.2 区域气候模式 RegCM3

RegCM3 (<http://users.ictp.it/~pubregcm/RegCM3/>) 是目前世界上应用最广泛的区域气候模式之一 (Pal et al., 2007), 其动力框架与 MM5 相似, 主要物理参数化方案包括: NCAR CCM3 辐射传输方案 (Kiehl et al., 1996)、非局地行星边界

层方案 (Holtslag et al., 1993), 三种可选择的积云对流参数化方案——Grell 方案 (Grell, 1993)、改进的 Kuo 方案 (Anthes, 1977) 和 MIT-Emanuel 方案 (Emanuel et al., 1999), 大尺度降水 SUBEX 方案 (Pal et al., 2000), 海洋通量参数化的订正方案 (Zeng et al., 1998), 陆面参数化方案 BATS1e (Dickinson et al., 1993) 等。

BATS 在垂直方向上分 3 层土壤, 底部为 3 m 深, 第一层土壤为 10 cm 深; 土壤层之上还有 1 层冠层和 1 层雪盖。水平方向上 RegCM3 所用地表覆盖类型包括海洋一共 20 种, 每个网格只有一种地表覆盖类型。在冠层反照率的计算上, BATS 基于不同的陆面覆盖类型给定每一种植被对长波和短波的反照率, 其热量和水汽的粗糙度长度也是设为常数。BATS 使用两层强迫-恢复模型来计算土壤温度 (Deardorff, 1978), 当雪盖存在时, 一个复合的土壤/雪盖层温度被修正作为地表温度层, 这种单一的雪盖层只考虑了雪盖表面属性, 并且雪盖和裸土是在一起计算温度和土壤湿度的 (Yang et al., 1997)。其冠层用的是一层大叶模型, 并不计算光合作用率。

2.3 耦合区域气候模式 C-RegCM3

陆面模型和气候模式之间耦合时, 陆面过程和大气之间的一般界面被限定在能量通量 (包括辐射通量、感热通量和潜热通量)、动量通量和陆面方案输入和输出的一些量上 (Polcher et al., 1998)。本研究将 CoLM 耦合到 RegCM3 以后的新模式称为 C-RegCM3, 以区别原有 BATS 陆面方案的 RegCM3。在初始化模式以及读入侧边强迫场后, 首先计算模式的动力框架, 计算过程中同时调用不同物理过程模块。计算到陆面模块时, 由大气模式分量先对陆面模式分量提供包括长波和短波辐射、大气密度、降水, 以及底层大气的高度场、温度场、风场、气压场和比湿等驱动场, 接着由陆面模式返回大气模式的主要有地表反照率、天顶角、地表拖曳系数、地表温度、蒸散发, 以及感热和潜热通量等。所有物理过程计算完毕后由时间循环控制进入下一时刻或者计算完毕退出模式。陆面模式计算时 CoLM 所需的短波辐射强迫包括可见光直射、可见光散射、近红外直射、近红外散射; 返回大气的地表反照率也分别是对应上述四种短波的反照率。

3 模式评估

3.1 试验设计

本文选择 1998 年东亚典型洪涝年的夏季进行模拟分析, 设计了两个数值比较试验来对耦合 C-RegCM3 进行评估。模拟试验所选的研究区域中心点位于中国大陆中部 (36°N , 102°E), 并涵盖了对我国气候有显著影响的青藏高原大地形, 总网格数为 120×90 (如图 1 所示的大扇形区域)。模拟的水平分辨率为 60 km, 垂直方向采用 18 层地形 σ 坐标。模拟所用的初值和侧边界驱动场是 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 分辨率的 ERA40 资料 (http://data.ecmwf.int/data/d/era40_daily/), 每 6 小时更新一次侧边界场; 海温资料用的是 NOAA CDC 的周海温资料 OISST (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.noaa.oisst.v2.html>)。研究区域最外围 18 个网格圈为缓冲区, 采用指数松弛方案 (Davies et al., 1977) 进行侧边界场的降尺度处理, 图 1 中的小扇形区域为去掉缓冲区后的模式内部区域。在研究区域内划分了八个子区域 (图 1 虚线矩形框), 即华南 [SE: ($20^{\circ}\text{N} \sim 26^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$)], 长江流域 [YR: ($26^{\circ}\text{N} \sim 32^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$)], 淮河流域 [HR: ($32^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$)], 西南 [SW: ($25^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$)], 华北 [N: ($34^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$,

$110^{\circ}\text{E} \sim 122^{\circ}\text{E}$], 东北 [NE: ($40^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{E}$)], 高原东部 [PL: ($30^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$)] 和西北 [NW: ($37^{\circ}\text{N} \sim 42^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$)]. 此外, 图 1 中的等值线代表模式地形高度; 灰色阴影代表中国大陆 1960~1999 年四十年观测的气候平均年降水量空间分布, 并以 200 mm、450 mm、650 mm 线为阈值划分为干旱、半干旱、半湿润、湿润区, 作为后文分析时的参考。可以看出, 上述八个子区域有如下气候分区特征: 华南 (SE)、长江流域 (YR)、淮河流域 (HR) 和西南 (SW) 为湿润地区, 华北 (N)、东北 (NE) 和高原东部 (PL) 为湿润半湿润地区, 西北 (NW) 为干旱半干旱区。模式运行时选择 Arakawa-Schubert 闭合假设的 Grell 积云参数化方案; 边界层用非局地边界层方案。两个试验积分时段都是从 1998 年 5 月 1 日至 1998 年 9 月 1 日, 取 6~8 三个月的模拟结果进行分析。

3.2 模拟结果与分析

1998 年为东亚地区典型的强季风降水年, 这一年夏季我国长江流域出现了仅次于 1954 年的全流域的特大洪涝。本节对比了 C-RegCM3 和 RegCM3 对 1998 年夏季模拟的结果, 从大尺度环流场、近地表气温、降水以及地表能量通量和地表土壤湿度等几个方面进行分析, 对区域气候模式

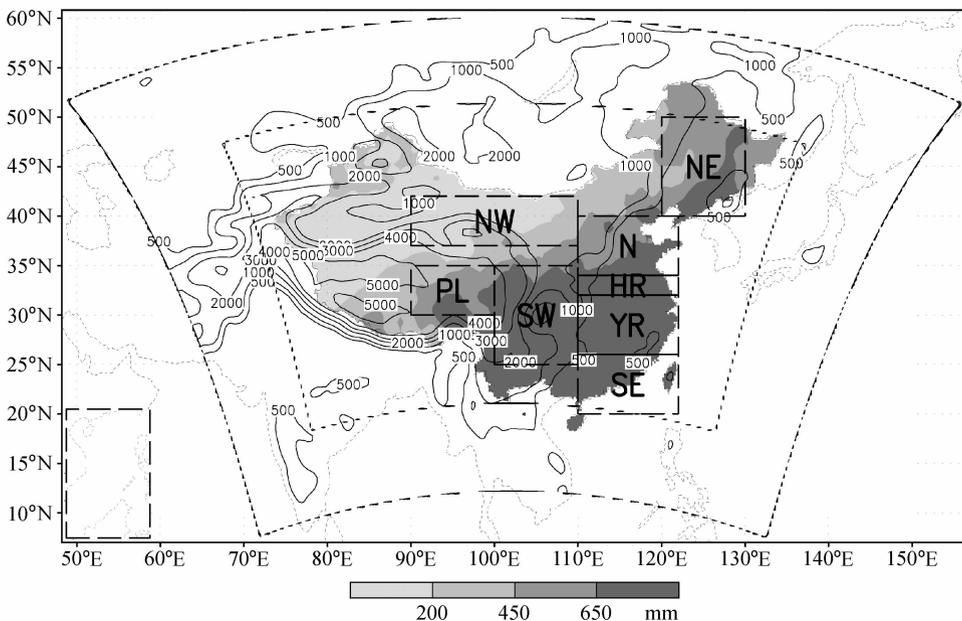


图 1 研究的模拟区域及子区域划分。等值线为模式地形高度, 单位: 米; 阴影为 1960~1999 年的年平均降水量

Fig. 1 Simulation domains and subregions. Isogram refers to the model terrain altitude (m); shading indicates the mean annual precipitation from 1960 to 1999

C-RegCM3 的性能给出初步评估。所用到的验证资料包括: 对应时段的 ERA40 再分析资料、我国 671 个气象站点的近地表日平均气温和降水资料、 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率的 CRU_TS2.0 月平均地表气温资料 (http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU_TS_2_0.html) 以及 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率的东亚地区日降水的合成观测资料 (Xie et al., 2007)。在比较地表土壤湿度时用的是中国地区 120 多个站点的土壤湿度观测数据。

3.2.1 大尺度环流场

已有一些研究表明, 1998 年夏季主要的大尺度环流异常特征体现在西太平洋副高较常年持续异常偏南和中高纬盛行经向环流 (陶诗言等, 1998; 黄荣辉等, 1998; 颜宏, 1998; 李维京, 1999)。具体表现在: 6 月初, 副热带高压开始西移, 6 月中旬有一次北跳但不是很明显, 一直在 25°N 附近维持, 对应长江流域第一段梅雨, 雨带位于长江流域及其以南地区; 6 月下旬副高忽然北跳到 30°N 以北, 于

7 月上、中旬控制了 110°E , 长江流域的降雨中断; 7 月中旬副高再次从中太平洋向西扩展, 西移期间 7 月下旬又忽然南落到 25°N 以南, 雨带又移到华南, 长江中下游出现了“二度梅”; 8 月初, 副高西伸到 120°E 附近, 并再次北跳到 30°N 以北, 长江中下游的梅雨结束, 雨带移到华北和东北。此外, 500 hPa 中高纬环流在 1998 年 6~7 月为双阻型, 乌拉尔地区和鄂霍次克海为阻高, 贝加尔湖地区为低槽区; 8 月欧亚大陆中高纬度仍然维持阻塞形势, 阻高在贝加尔湖地区。从区域气候模式的模拟结果和 ERA40 的比较可以看出, C-RegCM3 和 RegCM3 均可模拟出 1998 年夏季 500 hPa 这些主要的大尺度环流的基本特征 (如图 2 所示), 但西太平洋副高 (5880 位势米线) 6 月份西伸范围模拟略偏弱, 7、8 月份则模拟的比 ERA40 略偏北。此外, C-RegCM3 模拟的鄂霍次克海阻高比 RegCM3 略偏弱, 如图 3a 为 C-RegCM3 与 RegCM3 模拟的夏季平均 500 hPa 高度场差异图。

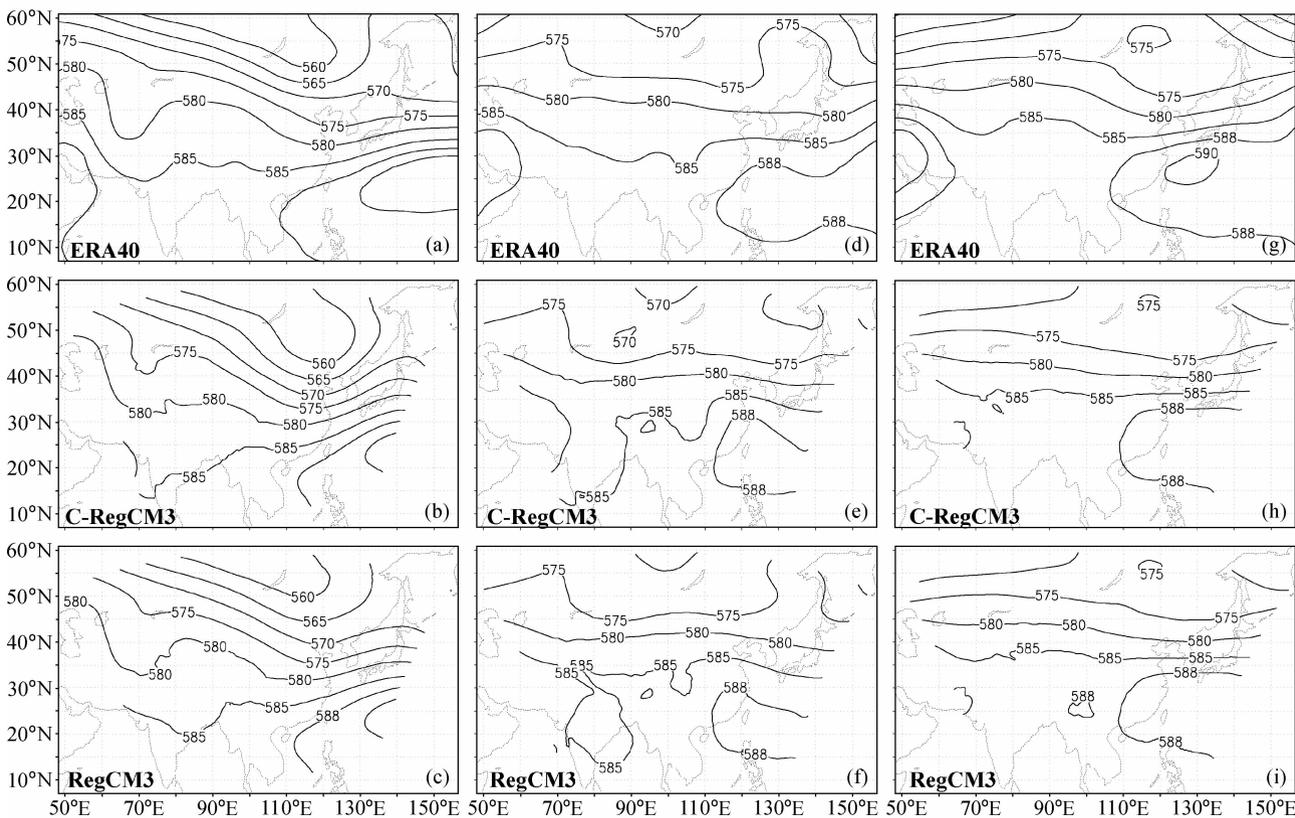


图 2 1998 年夏季 (a~c) 6 月、(d~f) 7 月、(g~i) 8 月 500 hPa 高度月平均环流场 (单位: dagpm): (a, d, g) ERA40 再分析资料; (b, e, h) C-RegCM3 模拟结果; (c, f, i) RegCM3 模拟结果

Fig. 2 Monthly mean 500-hPa geopotential height (dagpm) for (a-c) Jun, (d-f) Jul and (g-i) Aug in 1998: (a, d, g) ERA40 reanalysis; (b, e, h) C-RegCM3 simulation; (c, f, i) RegCM3 simulation

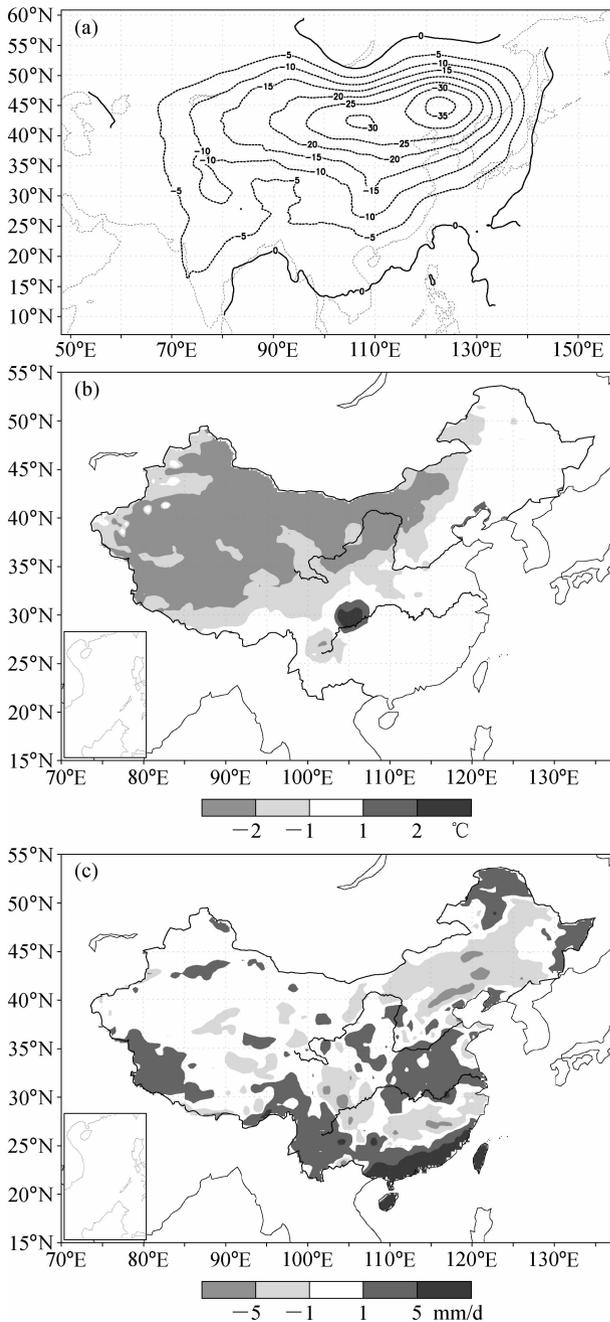


图3 C-RegCM3与RegCM3模拟的夏季平均500 hPa高度场(a, 单位: gpm)、近地表温度(b)、降水(c)的差异

Fig. 3 The differences of (a) 500 hPa geopotential height (gpm), (b) near-surface air temperature and (c) precipitation between C-RegCM3 and RegCM3 simulations

3.2.2 近地表气温和降水

中国大陆夏季近地表大气温度的空间分布主要有两个高值区,一个在东部、南部受夏季副热带高压影响的高温中心,另一个在青藏高原北部的沙漠、半沙漠地带,而青藏高原由于其地形影响则是

冷中心(如图4所示)。其中,近地表气温观测用的是中国地区地面671个台站观测插值成 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的月平均观测气温(图4a)、以及CRU_TS2.0的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的月平均近地表气温(图4b),模式结果分别是C-RegCM3(图4c)和RegCM3(图4d),从左到右三列分别代表6、7、8三个月的月平均地表气温(单位: $^\circ\text{C}$)。从图4可见,两个区域气候模式都较好地反映出了夏季月平均的近地表气温空间分布特征,但东部地区存在着一些冷偏差。图3b给出的是C-RegCM3和RegCM3模拟的夏季近地表气温的差异,结合图4可知C-RegCM3对四川盆地的冷偏差的模拟有一定的改进,两个模式对近地表气温模拟的差异在西北干旱、半干旱地区较明显,C-RegCM3在该地区模拟比RegCM3偏冷。泰勒图(图5a)表示的是C-RegCM3和RegCM3在所划分的八个子区域(见图1)模拟的夏季近地表气温的结果。泰勒图上每个点代表其中一个模式在某个地区模拟的结果,其所在半径与水平方向夹角的余弦值代表模拟与观测的相关系数、该点到原点的距离代表模拟的归一化标准差、该点到REF(此处代表观测)的距离代表模拟与观测的均方根误差,因此泰勒图可以全面反映模拟与观测时间序列的变化趋势、振幅以及误差程度,越接近REF点的模拟结果则与观测越吻合。图5a中的观测资料用的是我国671个气象台站1998年夏季6~8月共92天的逐日气温观测,模拟的结果对应同一时段的C-RegCM3和RegCM3的模拟结果。从图5a可以看出,区域气候模式对近地表气温的模拟性能在所有子区域与观测的相关性都超过了0.205(95%的信度检验);两个模式在华南(SE)和长江流域(YR)模拟的近地表气温的振幅比观测偏小,其他地区则略偏大,但C-RegCM3在淮河(HR)和东北(NE)的温度变化振幅与观测几乎一致(接近半径为1的圆弧)。

降水是气候模式普遍较难模拟的量。图6给出1998年夏季三个月降水的空间分布特征,所用的观测包括中国地区地面671个台站观测插值成 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的月平均观测降水(图6a)以及Xie提供的合成观测资料(Xie et al., 2007)(图6b),模式结果分别是C-RegCM3(图6c)和RegCM3(图6d),从左到右三列分别代表6、7、8三个月的月平均降水(单位: mm/d)。从图6可见,C-RegCM3

与 RegCM3 均合理模拟出夏季月平均降水的大致空间分布特征, 即 6 月份主要雨带位于华南地区, 7 月份雨带北移长江附近、东北也有降水, 8 月份

雨带在长江与淮河流域略呈东北-西南走向, 整个夏季的降水主要在长江以南及江淮流域。与观测相比, 区域气候模式 6 月位于广东的降雨模拟偏强,

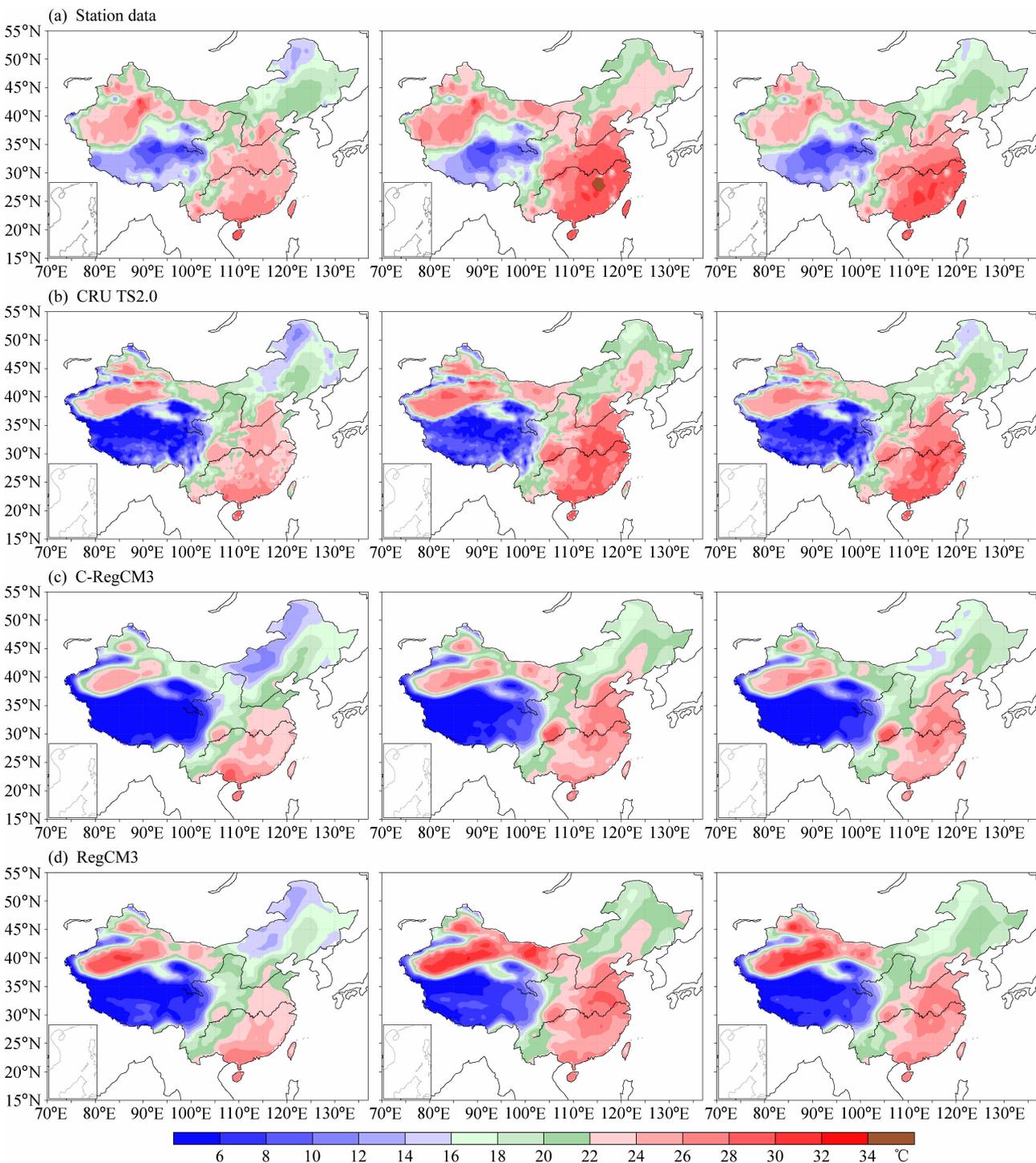


图4 1998年夏季6月(左)、7月(中)、8月(右)观测和模拟的近地表2 m高度气温的空间分布:(a) 台站观测资料;(b) CRU_TS2;(c) C-RegCM3 模拟结果;(d) RegCM3 模拟结果

Fig. 4 Spatial patterns of observed and modeled 2 m-height temperature in Jun (left), Jul (middle) and Aug (right): (a) Station data in China; (b) CRU_TS2 data; (c) C-RegCM3 simulation; (d) RegCM3 simulation

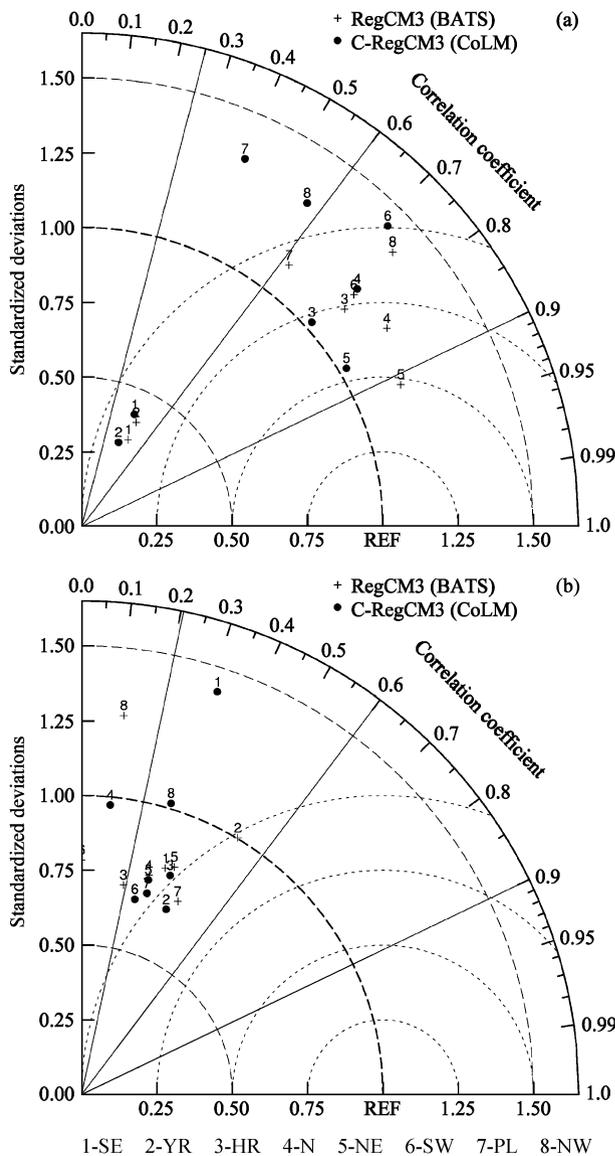


图5 八个子区域 1998 年夏季近地表气温与降水的泰勒图：
(a) 近地表气温；(b) 降水

Fig. 5 Taylor diagrams for (a) near-surface air temperature and (b) precipitation over the eight subregions in the summer of 1998

7、8 月的雨带位置略偏北。从两个模式对 1998 夏季降水模拟的差异图 (图 3c) 可见, C-RegCM3 比 RegCM3 更好地再现了江淮流域的雨带, 此外 C-RegCM3 在江南、华北、东北以及四川盆地降水比 RegCM3 有所减少, 在广东、广西南部则是偏强。泰勒图 (图 5b) 更详细地展示了两个模式在不同子区域的模拟差别, 其中的观测也是我国 671 个气象台站 1998 年夏季 6~8 月共 92 天的日降水。从图 5b 可见, 尽管 C-RegCM3 在华北 (N) 相关系

数不高但其变化振幅却和观测较一致; C-RegCM3 在其他地区与观测的相关性都超过了 0.205 (95% 的信度检验), 在西南 (SW) 的相关系数比 RegCM3 有明显改进; 此外, C-RegCM3 模拟的降水在西北 (NW) 的相关系数提高了, 振幅也更接近观测; 而 RegCM3 在华南 (SE) 误差较小。

3.2.3 地表能量与水文过程

为了比较分析不同陆面参数化方案对区域气候模拟的影响, 本节对地表能量和水文过程的模拟进行了一些比较分析。由于缺乏区域范围的观测资料, 这里仅就 C-RegCM3 和 RegCM3 两个区域气候模式对地表能量中的地表吸收的短波辐射 (SN)、地-气之间的潜热通量 (LH) 和感热通量 (SH) 的模拟进行比较。从 C-RegCM3 和 RegCM3 模拟的 1998 年夏季平均的地表感热和潜热通量的分布特征可知 (图略), 二者模拟的地气之间的能量通量的分布格局是基本合理的, 即在东部、南部湿润地区以潜热通量为主, 在西部、西北等干旱、半干旱地区以感热通量为主; C-RegCM3 与 RegCM3 对感热和潜热通量模拟的波文比的主要差别在干旱、半干旱的西北地区, 这与 C-RegCM3 在该地区模拟的温度比 RegCM3 偏低有关 (图 3b)。图 7 给出的是 1998 年 6~8 月共 92 天 C-RegCM3 和 RegCM3 在八个子区域模拟的地表吸收的太阳辐射、感热通量和潜热通量的比较, 每个点代表 1 天, 8 幅子图分别为 SE、HR、SW、YR、N、NE、NW、PL 八个子区域 (分区如图 1 所示)。从图 7 可知, C-RegCM3 模拟的地表吸收太阳辐射在 SE 地区比 RegCM3 较小, 在 SW、PL、N、NE 几个地区较大, 模式对 SE 与 NE 这两个夏季主要雨区的云和降水模拟的差别 (图 3c) 是使得地表吸收的太阳辐射在这两个地区的模拟结果差异较大的原因之一; 另外, 两模式对地表感热和潜热通量的模拟结果差异较大地区是干旱半干旱的 NW 和湿润半湿润的 PL 两个地区, 且 C-RegCM3 在这两个过渡区模拟的潜热通量比 RegCM3 增大, 而感热通量则减小, 说明半干旱、半湿润的过渡区的地表能量感热和潜热通量的模拟对陆面参数化方案的选择很敏感。

图 8 给出的是模拟与观测的地表土壤湿度的结果 (均转化为土壤体积含水率, 单位: m^3/m^3)。图 8a 为 C-RegCM3 与 RegCM3 模拟的 1998 年夏季平

均地表土壤湿度的差异。从图 8a 可见 C-RegCM3 在华南、东北的北部、云南以及青藏高原西部模拟的地表土壤湿度比 RegCM3 的模拟结果偏大(图

8a 正值区, 局部差异可大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$), 在大部分的干旱、半干旱、半湿润地带则土壤湿度偏小(图 8a 负值区)。利用我国地面 120 多个台站 1998

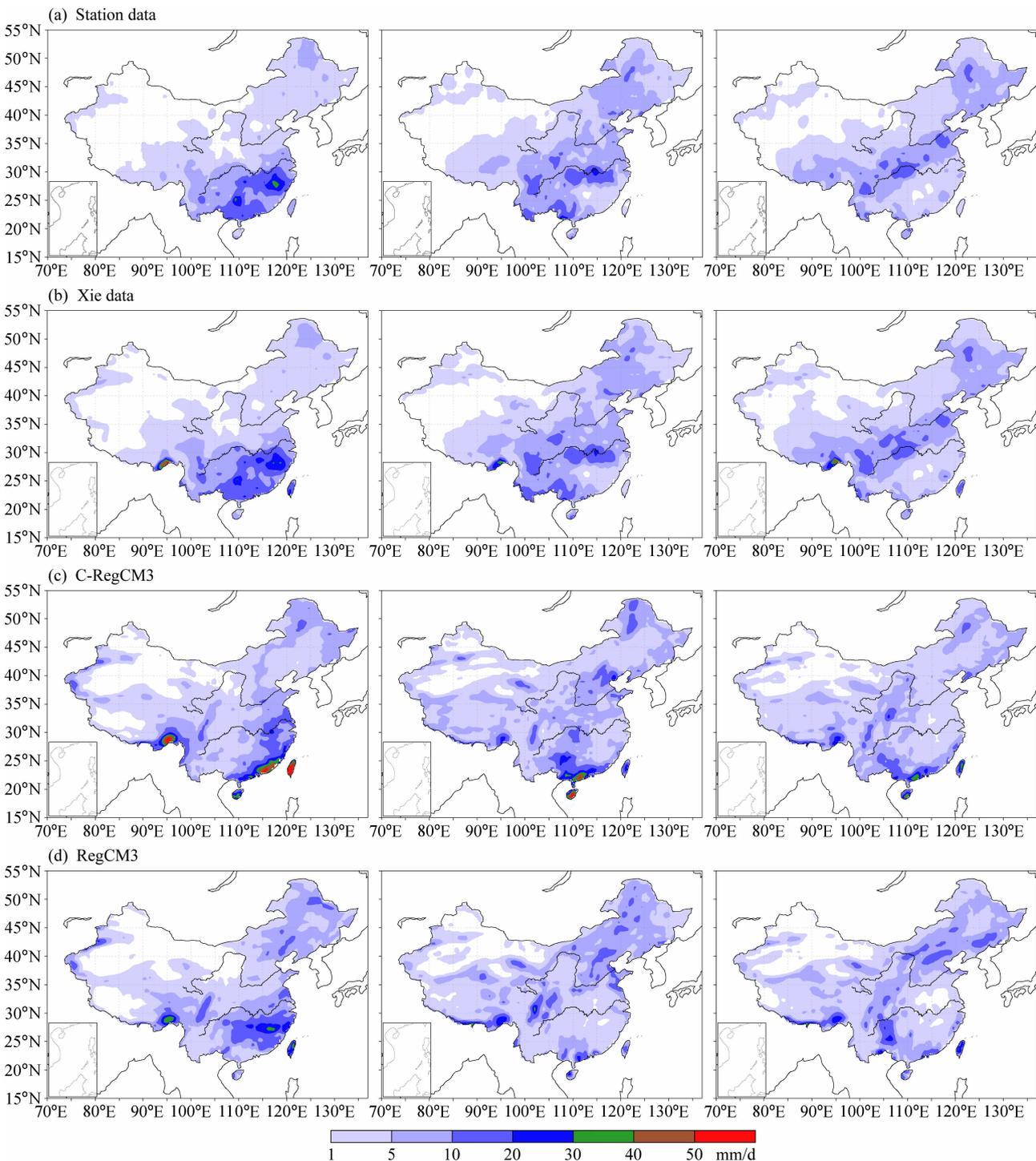


图 6 1998 年夏季 6 月(左)、7 月(中)、8 月(右)观测和模拟的降水的空间分布: (a) 台站观测资料; (b) Xie 合成观测; (c) C-RegCM3 模拟结果; (d) RegCM3 模拟结果

Fig. 6 Spatial patterns of observed and modeled precipitation in Jun (left), Jul (middle) and Aug (right): (a) Station data in China; (b) Xie data; (c) C-RegCM3 simulation; (d) RegCM3 simulation

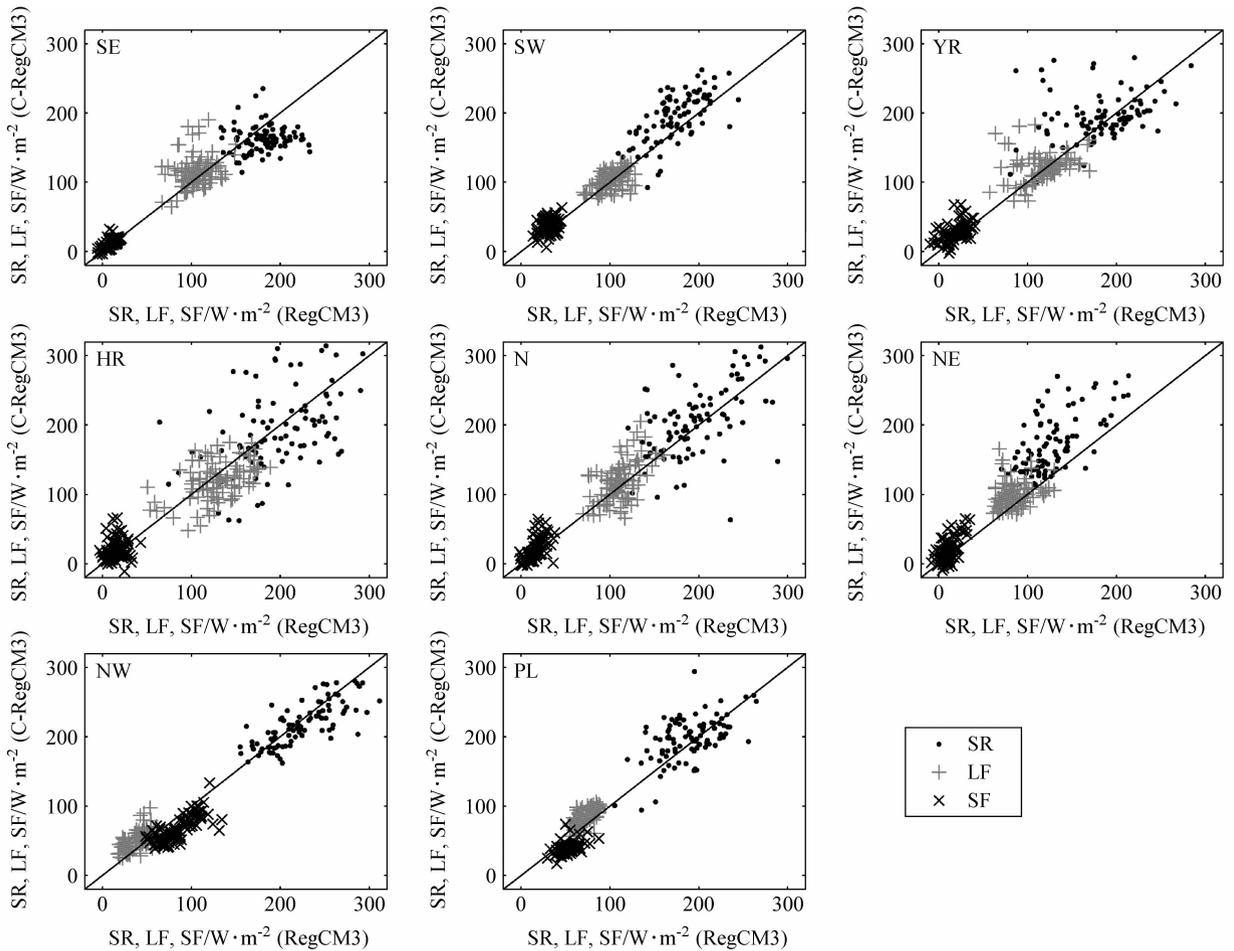


图7 八个子区域模拟的地表吸收的太阳辐射、潜热通量和感热通量。纵坐标为C-RegCM3的模拟,横坐标为RegCM3的模拟,每个点代表1998夏季的一天

Fig. 7 Absorbed solar radiation (SR), latent heat flux (LF) and sensible heat flux (SF) over the eight subregions from C-RegCM3 (y-axis) and RegCM3 (x-axis) simulations. Each point refers to each day in the summer of 1998

年夏季期间对土壤表层 5~10 cm 土壤湿度的观测资料(站点分布如图 8b 所示,每月 8 日、18 日、28 日观测),选择站点比较密集的黄淮(33°N~37°N, 110°E~115°E)和东北(42°N~47°N, 123°E~128°E)两个地区的区域平均观测与对应模式模拟的逐日地表土壤湿度比较(图 8c),从中可见,RegCM3 模拟的地表土壤湿度在黄淮和东北地区比观测和 C-RegCM3 模拟的都偏大;C-RegCM3 在这两个地区的变化趋势和量值则与观测较一致。综上所述可见 C-RegCM3 在这些过渡区模拟的整个夏季平均地表土壤湿度比 RegCM3 偏干,这种土壤湿度偏干的影响会使得局地蒸散发减小、从而可能引起局地降水减少(图 3c);而降水的减少会进一步加剧土壤的干旱化。这种局地的土壤湿度-降水-蒸散发之间的正反馈作用易导致局地土壤湿度持续偏干,

直至大尺度的水汽输送带来的降水缓解之。

4 总结与展望

本研究实现了陆面过程模式 CoLM 和区域模式 RegCM3 的耦合,使得新耦合的区域气候模式 C-RegCM3 陆面参数化方案更加合理。利用所发展的 C-RegCM3 对东亚地区典型洪涝年夏季气候特征进行了数值模拟,并与 BATS 作为陆面参数化方案的区域模式 RegCM3 模拟的结果作对比分析,以评估 C-RegCM3 的模拟性能。主要结论如下:

(1) 将陆面过程模式 CoLM 与区域气候模式 RegCM3 成功地耦合并进行了 4 个月的气候模拟试验,证明了新耦合模式具有长期积分能力。

(2) 在 ERA40 提供的初、边值条件下,新耦合的 C-RegCM3 比较成功地模拟了 1998 年东亚典型

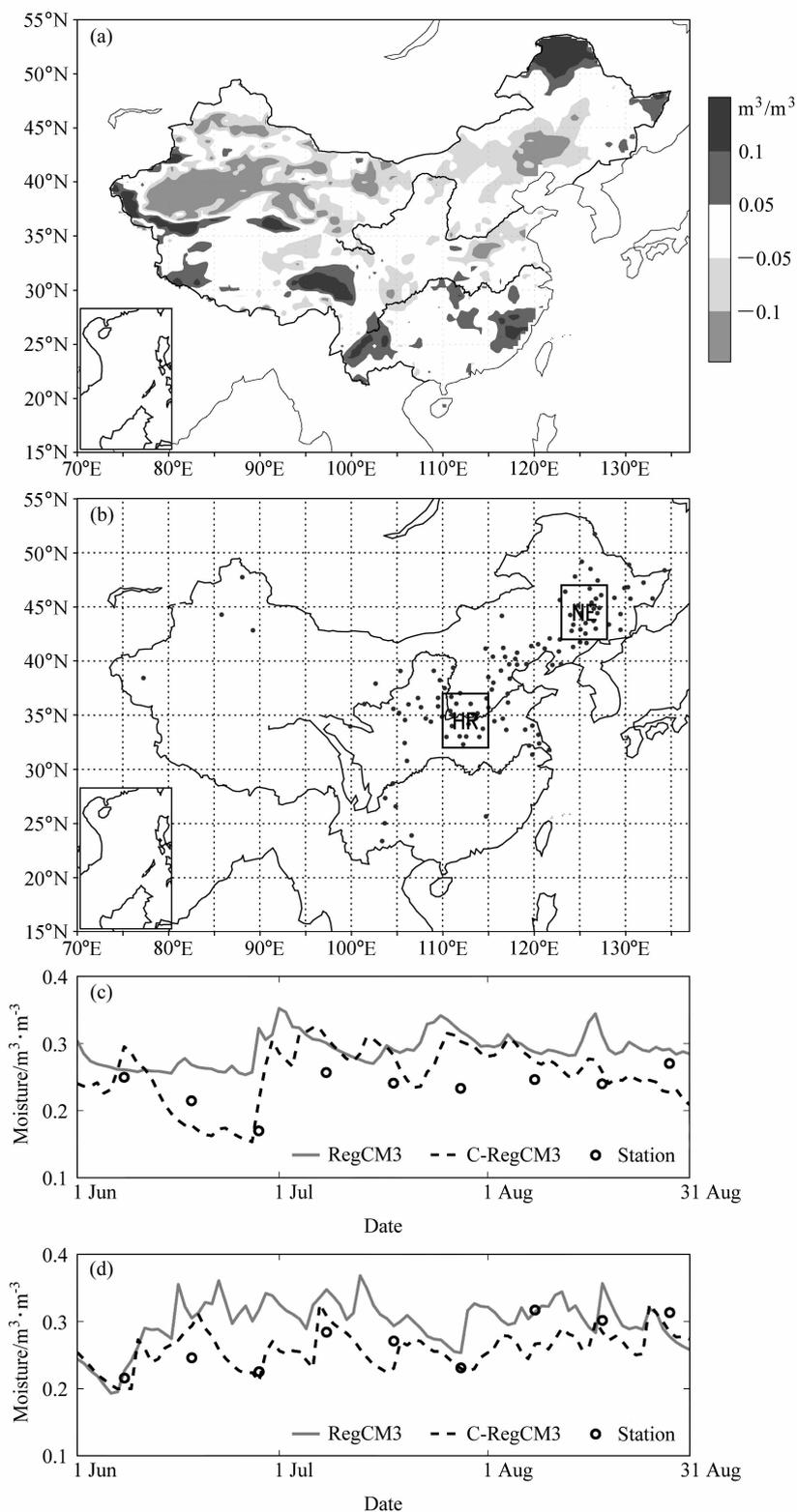


图 8 模拟与观测的地表土壤湿度: (a) C-RegCM3 与 RegCM3 模拟的 1998 夏季平均地表土壤湿度的差异; (b) 土壤湿度观测站点分布; 模拟与观测在 (c) 黄淮 (HR) 和 (d) 东北 (NE) 的时间序列

Fig. 8 (a) The difference of surface soil moisture between C-RegCM3 and RegCM3 simulations; (b) station location of soil moisture; (c, d) temporal patterns of simulated and observed surface soil moisture over (c) the Huanghe River-Huaihe River region and (d) Northeast China

洪涝年夏季副高持续异常偏南和中高纬盛行经向环流的区域气候特征;模拟的大尺度环流场、降水、近地表气温等与观测吻合,且大部分区域的降水和近地表气温与观测的相关性都能达到 95% 以上信度,模式对近地表气温的模拟性能总体上优于降水。

(3) 对两个模式模拟的地表能量进行比较分析,发现在半干旱、半湿润地区的过渡区,C-RegCM3 模拟的潜热增大、感热减小,而且模拟的地表吸收太阳辐射差异较明显的地区则是在两个模式模拟的主要雨区。

(4) 模拟结果的比较表明,C-RegCM3 在过渡区模拟的夏季地表土壤湿度比 RegCM3 偏干,并与 C-RegCM3 在过渡区降水模拟偏少、蒸散发模拟偏大相对应,体现了 C-RegCM3 在过渡带模拟出了比 RegCM3 更明显的局地陆气间土壤湿度-降水-蒸散发之间的正反馈作用。

总的来说,新耦合的 C-RegCM3 能考虑更合理完善的生物物理、生物化学过程,在大尺度环流场、降水、近地表气温、地表感热和潜热通量等方面都体现出模拟结果的合理性和模式的潜力。模拟结果还揭示了不同陆面参数化方案可以引起区域气候模式对东亚夏季气候模拟的差异,区域气候研究要重视过渡带地区陆-气相互作用。另外,新耦合模式中的陆面过程的参数还需要优化调试,对陆面参数化方案引起区域气候模拟差异的原因也还需要进一步深入分析并探讨陆气相互作用对区域气候模拟的影响。

致谢 感谢 NOAA 气候预测中心的谢平平教授提供了东亚地区高分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的降水合成观测资料。感谢两位匿名审稿人对本文工作提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- Anthes R A. 1977. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 105 (3): 270–286.
- Bonan G B. 1995. A Land Surface Model (LSM Version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies; Technical description and user's guide [R]. NCAR Tech Note NCAR/TN-417+STR, National Center for Atmospheric Research.
- Christensen O B, Gaertner M A, Prego J A, et al. 2001. Internal variability of regional climate models [J]. *Climate Dyn.*, 17: 875–887.
- Dai Yongjiu, Zeng Qingcun. 1997. A Land Surface Model (IAP94) for climate studies. Part I: Formulation and validation in off-line experiments [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 14 (4): 433–460.
- Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84 (8): 1013–1023.
- Davies H C, Turner R E. 1977. Updating prediction models by dynamical relaxation; An examination of the technique [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103: 225–245.
- Deardorff J W. 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation [J]. *J. Geophys. Res.*, 83: 1889–1903.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-387+STR, National Center for Atmospheric Research.
- Ding Yihui, Shi Xueli, Liu Yiming, et al. 2006. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC). Part I: Sensitivity study [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 23: 323–341.
- Emanuel K A, Živković-Rothman M. 1999. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56 (11): 1766–1782.
- 冯锦明, 符淙斌. 2007. 不同区域气候模式对中国地区温度和降水的长期模拟比较[J]. *大气科学*, 31 (5): 805–814. Feng J M, Fu C B. 2007. Inter-comparison of long-term simulations of temperature and precipitation over China by different regional climate models[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 31 (5): 805–814.
- Fu C B, Wei H L, Qian Y. 2000. Documentation on a regional integrated environment model system (RIEMS version 1) [R]. TEA-COM Science Report No. 1, START Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China, 26pp.
- 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 2006. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验[J]. *大气科学*, 30 (2): 186–192. Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (2): 186–192.
- Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. 1993a. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative-transfer processes[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (10): 2794–2813.
- Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T, et al. 1993b. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (10): 2814–2832.
- Giorgi F, Huang Y, Nishizawa K, et al. 1999. A seasonal cycle simulation over eastern Asia and its sensitivity to radiative transfer and surface processes[J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 6403–

- 6423.
- Giorgi F, Bi X. 2000. A study of internal variability of a regional climate model [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D24): 29503 - 29521.
- Giorgi F. 2006. Regional climate modeling: Status and perspectives [J]. *J. de Phys. IV*, 139: 101 - 118.
- Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 764 - 787.
- Holtstlag A A M, Boville B A. 1993. Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model [J]. *J. Climate*, 6 (10): 1825 - 1842.
- 胡轶佳, 钟中, 闵锦忠. 2008. 两种积云对流参数化方案对 1998 年区域气候季节变化模拟的影响研究[J]. *大气科学*, 32 (1): 90 - 100. Hu Y J, Zhong Z, Min J Z. 2008. Impacts of cumulus parameterization scheme on the seasonal variation simulation of regional climate in 1998 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 32 (1): 90 - 100.
- 黄安宁, 张耀存. 2007. BATS1e 陆面模式对 $p-\sigma$ 九层区域气候模式性能的影响[J]. *大气科学*, 31 (1): 155 - 166. Huang Anning, Zhang Yaochun. 2007. Impacts of the BATS1e land surface model on the performance of the $p-\sigma$ regional climate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (1): 155 - 166.
- 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞, 等. 1998. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨[J]. *气候与环境研究*, 3: 301 - 313. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Wang Pengfei, et al. 1998. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River basin during the summer of 1998 and cause exploration [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3: 301 - 313.
- Ji Jingjun. 1995. A climate - vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. *J. Biogeography*, 22: 445 - 451.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1996. Description of the NCAR community climate model (CCM3) [R]. Tech. Rep. NCAR/TN-420 + STR, National Center for Atmospheric Research.
- Leung L R, Mearns L O, Giorgi F, et al. 2003. Regional climate research: Needs and opportunities [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84 (1), 89 - 95.
- 李维京. 1999. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响 [J]. *气象*, 25: 20 - 25. Li Weijing. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 25: 20 - 25.
- Liston G E, Pielke R A. 2000. A climate version of the regional atmospheric modeling system [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 66 (1 - 2): 29 - 47.
- 罗勇, 王绍武, 党鸿雁, 等. 2002. 近 20 年来气候模式的发展与模式比较计划[J]. *地球科学进展*, 17 (3): 372 - 377. Luo Y, Wang S W, Dang H Y, et al. 2002. Recent advances in climate models and model intercomparison projects [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 17 (3): 372 - 377.
- 吕世华, 陈玉春. 1999. 西北植被覆盖对我国区域气候变化影响的数值模拟[J]. *高原气象*, 18 (3): 416 - 424. Lü Shihua, Chen Yuchun. 1999. The influence of northwest China afforestation on regional climate in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18 (3): 416 - 424.
- Manabe S. 1969. Climate and the ocean circulation I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 97 (10): 739 - 774.
- Oleson K W, Dai Y, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the Community Land Model (CLM) [R], NCAR Technical Note NCAR/TN-461 + STR, National Center for Atmospheric Research.
- Pal J S, Small E E, Eltahir E A B. 2000. Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 29579 - 29594.
- Pal J S, Giorgi F, Bi X, et al. 2007. Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88: 1395 - 1409.
- Polcher J, McAvaney B, Viterbo P, et al. 1998. A proposal for a general interface between land surface schemes and general circulation models [J]. *Global and Planetary Change*, 19: 261 - 276.
- 施洪波. 2007. 一个区域气候模式 CREM 的建立及其对东亚区域夏季气候的模拟评估分析[D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Shi Hongbo. 2007. Development of a regional climate model (CREM) and its validation over East Asia [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Shi Xueli, Xie Zhenghui, Liu Yiming, et al. 2007. Implementation of a surface runoff model with Horton and Dunne mechanisms into the regional climate model RegCM_NCC [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (5): 750 - 764.
- Steiner A L, Pal J S, Giorgi F, et al. 2005. The coupling of the Common Land Model (CLM0) to a regional climate model (RegCM) [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 82 (3 - 4): 225 - 243.
- Stieglitz M, Rind D, Famigliette J, et al. 1997. An efficient approach to modeling the topographic control of surface hydrology for regional and global climate modeling [J]. *J. Climate*, 10: 118 - 137.
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 1998. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件[J]. *气候与环境研究*, 3: 290 - 299. Tao Shiyun, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. 1998. The great floods in Changjiang River valley in 1998 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3: 290 - 299.
- 王世玉, 钱永甫. 2003. $P-\sigma$ 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[J]. *大气科学*, 27 (5): 798 - 810. Wang Shiyu, Qian Yongfu. 2003. Seasonal and interannual variation simulation of the regional climate of East Asia by a nine-level $P-\sigma$

- σ regional climate Model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (5): 798 - 810.
- Wang Yuqing, Sen O L, Wang B. 2003. A highly resolved regional climate model (IPRC-RegCM) and its simulation of the 1998 severe precipitation event over China. Part I: Model description and verification of simulation [J]. J. Climate, 16 (11): 1721 - 1738.
- Wang Y Q, Leung L R, McGregor J L, et al. 2004. Regional climate modeling: Progress, challenges, and prospects [J]. J. Meteor. Soc. Japan., 82: 1599 - 1628.
- Xie P P, Yatagai A, Chen M Y, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. J. Hydrometeorology, 8: 607 - 626.
- 颜宏. 1998. 1998 年中国特大洪涝灾害的天气气候特点、成因分析及气象预报服务 [J]. 气候与环境研究, 3: 323 - 334.
- Yan Hong. 1998. Analysis on the weather and climate features and causes of the extraordinary flood disaster over China in 1998 and the relevant meteorological prediction services [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3: 323 - 334.
- Yang Z L, Dickinson R E, Robock A, et al. 1997. Validation of the snow submodel of the biosphere - atmosphere transfer scheme with Russian snow cover and meteorological observational data [J]. J. Climate, 10: 353 - 373.
- Zeng X B, Zhao M, Dickinson R E. 1998. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data [J]. J. Climate, 11: 2628 - 2644.