

# LASG/IAP 大气环流谱模式对陆面过程的敏感性试验

包庆<sup>1,2</sup> 刘屹岷<sup>1</sup> 周天军<sup>1</sup> 王在志<sup>1</sup> 吴国雄<sup>1</sup> 王鹏飞<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 将中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室最近发展的高分辨率全球大气环流谱模式 SAMIL-R42L26, 分别与两个陆面模式——NCAR 通用陆面模式 CLM 和简化的简单生物圈模式 SSiB 进行耦合。在比较了两个陆面过程模式, 指出 CLM 改进方面的基础上, 通过分析两个陆气耦合模式所模拟的陆气通量交换结果, 指出新版本的陆气耦合模式(SAMIL-R42L26 与 CLM 耦合)对表面感热、温度、降水率、潜热通量和海平面气压场的模拟能力大大提高, 尤其对于夏季表面感热通量场, 使亚洲北部和东南部、格陵兰岛以及北美洲大部分地区的数值从  $100 \text{ W/m}^2$  降低到接近  $60 \text{ W/m}^2$ , 与 NCEP 再分析资料一致。新版本的陆气耦合模式模拟陆地表面能量收支趋于平衡, 为下一步发展海-陆-气-冰耦合气候系统模式提供保障。采用 CLM 陆面模式, SAMIL-R42L26 能较好地模拟亚洲季风区地表感热和潜热的季节演变趋势, 而采用 SSiB 陆面模式的结果, 则存在较大误差。文中的结果表明, 不同的陆面模式所模拟的大气下垫面(包括洋面)通量发生的变化, 通过陆气耦合过程产生的影响不仅仅是局地性的, 而且是全球范围的。

**关键词** 大气环流模式 陆面模式 陆气通量

**文章编号** 1006-9895(2006)06-

**中图分类号** P435

**文献标识码** A

## The Sensitivity of the Spectral Atmospheric General Circulation Model of LASG/IAP to the Land Process

BAO Qing<sup>1, 2</sup>, LIU Yi-Min<sup>1</sup>, ZHOU Tian-Jun<sup>1</sup>, WANG Zai-Zhi<sup>1</sup>,  
WU Guo-Xiong<sup>1</sup>, and WANG Peng-Fei<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** The new version of the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics/Institute of Atmospheric Physics (LASG/IAP) general circulation model (R42L26) is coupled with National Center for Atmospheric Research Community Land Model (NCAR CLM) and the Simplified Simple Biosphere (SSiB) model, respectively. The comparison of these two different kinds of land surface schemes indicates that there are certain improvements in CLM, including the land surface is represented by five primary subgrid land cover types in each grid cell; the vegetated portion of a grid cell is further divided into patches of 4-16 plant functional types; the relative area of each subgrid unit, the plant functional type, and leaf area index are obtained from 1 km satellite data; the soil texture dataset allows vertical profiles of sand and clay. Most of the physical parameterizations in the model have also been updated: 10 layers for soil temperature and soil water; a multilayer

**收稿日期** 2005-08-01, 2006-01-06 收修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418300, 中国科学院团队国际合作伙伴计划“气候系统模式研发及应用研究”, 国家自然科学基金资助项目 40475027、40523001、40233031

**作者简介** 包庆, 男, 1979 年出生, 博士研究生, 主要从事气候数值模拟研究。E-mail: baoqing@mail.iap.ac.cn

snowpack; runoff based on the TOPMODEL concept; new formulation of ground and vegetation fluxes; and vertical root profiles from a global synthesis of ecological studies. Thus, the veracity of soil moisture and surface albedo has been improved greatly. By analyzing the simulated land-atmosphere flux in these two versions of coupled models, it is found that the land surface energy budget tends to be balanced in the new version of land-atmosphere coupled model (SAMIL-R42L26 coupled with CLM), which provides the most important guarantee for the next generation of the ocean-land-atmosphere coupled model, while there is the virtual energy source, which is about  $2 \text{ W/m}^2$ , in the old version (SAMIL-R42L26 coupled with SSiB). Moreover, the performances of the new version land-atmosphere coupled model are greatly improved in the simulation of the surface temperature, precipitation rate, surface latent heat flux, sea-level pressure and most notable surface sensible heat flux, which is reduced from more than  $100 \text{ W/m}^2$  to nearly  $60 \text{ W/m}^2$  in the broad region of north and southeast Asia, Greenland and North America, which is consistent well with NCEP reanalysis data. Due to the increase of simulated surface albedo and soil moisture, the surface temperature is reduced about  $10^\circ\text{C}$  in Antarctica and Greenland, which more approach the observation. Compared with the version coupled with SSiB land surface model, SAMIL-R42L26 coupled with CLM also has better performance in simulating the seasonal evolution of the surface sensitive heating and latent heating in Asian monsoon region, the results are very close to reanalysis data. Base on the different simulation between these two different kinds of land surface schemes, it is implied that the effect of land-atmosphere coupled process is not only in local region but also in global scale.

**Key words** atmospheric general circulation model, land surface model, land-atmosphere flux

## 1 引言

自 20 世纪 90 年代初开始,中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG/IAP)致力于研制一个全球海洋-大气-陆地-海冰耦合的气候系统模式(GOALS)<sup>[1]</sup>。随着计算机速度不断的提高,以及计算机并行技术的应用,气候系统模式的水平分辨率和垂直分辨率都得到了很大的提高。其中,GOALS 系统的大气模式水平分辨率由较低分辨率的全球大气环流谱模式 R15L9 (球谱函数采用菱形 15 波截断,水平分辨率相当于  $7.5^\circ$  经度  $\times$   $4.5^\circ$  纬度,垂直方向共分 9 层)<sup>[2]</sup> 提高为 R42L9 (水平分辨率相当于  $2.81^\circ$  经度  $\times$   $1.66^\circ$  纬度),模式的模拟性能也有了很大的改进<sup>[3]</sup>。最近,通过采用消息传递技术(MPI)进行并行,极大地提高了模式的运算速度,从而实现了大气模式的垂直分辨率由 R42L9 增至 R42L26。该大气环流谱模式最近被 LASG 正式命名为 SAMIL (Spectral Atmosphere Model of IAP LASG)<sup>[4]</sup>。为方便讨论,以下将该模式简称为 SAMIL-R42L26。

陆面过程是影响气候变化的基本物理过程之一,通过水、能量、动量和碳的交换,影响整个气候系统<sup>[5]</sup>。陆面和大气之间水、能量和动量交换,在短时间尺度(约 1 天)上即反馈给大气模式,从

而使陆气耦合系统能够合理地描写陆面过程与边界层过程和湿对流的相互作用。陆地下垫面状况在很大程度上决定了陆地表面的能量和水分平衡,从而深刻影响着局地、区域乃至全球大气环流和气候的基本特征<sup>[6, 7]</sup>。早期的大气环流模式和简单的陆面模式耦合试验表明,土壤湿度对表面温度和降水的模拟能力影响很大<sup>[8]</sup>。2003 年全球陆气耦合试验(GLACE)结果也指出,夏季北半球在一些热点地区(如北美太平洋中部、西非、赤道非洲和印度等地),土壤湿度异常显著影响降水场,由于这些地区降水和土壤湿度存在如此紧密的联系,季节降水预测的准确性也会因为土壤湿度模拟能力的提高而增大<sup>[9]</sup>。Vernekar 等<sup>[10]</sup>的工作指出:由于雪具有高反照率、低粗糙高度和低热传导的特性,所引起的作用也是全球尺度的,对气候变化也有巨大的影响<sup>[11]</sup>。秋季雪盖的范围可以解释冬季欧亚大陆  $18\% \sim 52\%$  的温度异常<sup>[12]</sup>,欧亚大陆雪盖范围的增大导致陆地反气旋性环流的加强<sup>[13]</sup>。陆面特征的改变也会影响陆面的水循环,如植被的自然变化能够影响其对水的拦截作用和蒸腾作用,这些变化所产生的影响又通过地表能量平衡影响到其他过程的变化<sup>[5]</sup>。因此,采用性能好的陆面过程模式已经成为气候系统模式能很好地模拟陆气通量的必要条件。

旧版本 GOALS 耦合模式中的陆面分量是采用早期 Xue 等<sup>[14]</sup>提出的简化的简单生物圈模式 (SSiB), 刘辉等<sup>[15]</sup>实现了 SSiB 陆面模式和大气模式 R15L9 耦合, 并指出陆面过程的改进对 7 月气候模拟有很大提高; 孙岚等<sup>[16]</sup>介绍了耦合模式 (R15L9-SSiB) 模拟性能, 利用改进的再循环降水模式, 进一步讨论了陆面过程参数化明显改进降水模拟的机理。SSiB 陆面模式在 R15L9 (水平方向为菱形截断 15 波, 垂直方向分为 9 层) 分辨率下对陆气通量具备一定的模拟能力, 但是随着大气模式分辨率的提高、物理过程的完善和大量高分辨率卫星遥感资料的产生, 改进陆面分量模式已经成为正确模拟气候系统的迫切任务。本文通过美国国家大气研究中心 (NCAR) 第五代耦合器 cp15<sup>[17]</sup>, 实现了高分辨率全球大气环流谱模式 (SAMIL-R42L26) 与 NCAR CLM 2.0 陆面过程模式的耦合。通用陆面过程模式 CLM 是 NCAR 通用气候系统模式 (CCSM) 的组成部分, 代表目前世界上比较先进的陆面模式<sup>[18]</sup>。

本文第 2 节将对所用到的模式进行简单介绍, 比较两个陆面过程的差异, 概述试验方案、所用到的资料以及陆气耦合的实现过程, 第 3 节对两个陆气耦合模式积分的结果进行分析, 第 4 节给出主要结论。

## 2 模式介绍和试验方案

### 2.1 大气环流谱模式 SAMIL-R42L26

SAMIL-R42L26 是全球大气环流谱模式, 在水平方向为菱形截断 42 波, 分辨率相当于  $2.8125^\circ$  经度  $\times 1.66^\circ$  纬度, 采用  $\sigma$ - $p$  混合垂直坐标系, 分为 26 层 (即 R42L26)。模式动力框架独特, 引入了一参考大气, 采用半隐式时间积分方案<sup>[19, 20]</sup>。物理过程包括 Edwards 和 Slingo<sup>[21]</sup>提出的新的辐射参数化方案, 和云量诊断参数化方案, 并引入基于统计方法的层积云方案<sup>[4]</sup>。还充分考虑了其他重要的次网格物理过程, 如 Tiedtke<sup>[22]</sup>提出的湿对流调整方案以及垂直、水平扩散等。边界层参数化过程采用非局地边界层参数化方案<sup>[4]</sup>。模式物理过程中还考虑了地形重力波拖曳<sup>[23, 24]</sup>。

### 2.2 简化的简单生物圈模式 (SSiB)

简化的简单生物圈模式 (SSiB)<sup>①</sup>属于土壤、植

被与大气间的运输模型, 即“大叶模型”, 是陆面过程模式发展进入第二个阶段的代表模式之一。SSiB 模式植被冠层有 1 层, 土壤部分分成 3 层。SSiB 模式资料分辨率  $7.5^\circ$  经度  $\times 4.5^\circ$  纬度, 下垫面陆地部分分为 13 种类型, 即常绿阔叶林、落叶阔叶林、落叶阔叶林与常绿针叶林的混合林、常绿针叶林、落叶针叶林、草地及落叶阔叶林和灌木、草地、小片的落叶灌木、稀疏落叶阔叶灌木和裸土间杂区、沙漠、冻土地带、冬小麦耕作区、永久性冰原情形。植被和土壤的分类分别取自文献<sup>[25~27]</sup>的数据库。SSiB 模式考虑叶面积指数、粗糙高度和绿色度等植被信息随季节和纬度的变化, 所以每个月给出固定植被信息值<sup>[28]</sup>。SSiB 陆面模式所需要的大气边界条件均由 AGCM 模式最低层高度上格点平均值提供, 具体包括如下物理量: 温度、湿度、风场、表面气压、大尺度降水、对流性降水、表面向下的长波辐射通量和短波辐射通量, 其中大气模式的降水在 SSiB 模式中都认为是对流性降水。SSiB 陆面模式时间步长为 10 min, 与大气模式相同。

### 2.3 通用陆面过程模式 (CLM)

通用陆面过程模式 (CLM) 是 NCAR 在 BATS、中国科学院大气物理研究所 IAP94 和 NCAR 的 LSM 基础上, 研制的新一代陆面过程模式<sup>[18]</sup>。CLM 陆面模式根据光合作用和植物水分的关系, 考虑了植物的水汽吸收并引入了植物吸收二氧化碳进行光合作用的生物化学模式, 对地表碳通量和二氧化碳浓度的日循环和季节循环具有较好的模拟能力, 是陆面模式发展第三个阶段的代表模式之一。CLM 陆面模式植被冠层有 1 层, 土壤温度和土壤水分分成 10 层, 显式处理液态水和冰; 包含一个多层积雪模式, 雪盖最多分 5 层; 同时基于 TOPMODEL 思想加入地面径流参数化方案<sup>[18]</sup>, 并且采用新的公式表示地面和植被通量, 由全球综合生态学研究来确定根的垂直结构。其分辨率与大气模式分辨率相同 ( $2.8125^\circ$  经度  $\times 1.66^\circ$  纬度), 下垫面陆地部分每个格点内分为 5 个次网格覆盖类型 (冰川、湖泊、湿地、城市和植被), 每个网格内的植被部分又被分成 4~16 种不同功能植物类型, 每种类型有自己叶面积指数、茎面积指数和冠层高

① 本文采用简化的简单生物圈模式 SSiB 是 Liu 和 Wu<sup>[15]</sup>的版本, 并非 SSiB 模式的最新版本。

度；每个次网格单元的相对面积、植被类型和叶面积指数都源于分辨率 1 km 的卫星资料<sup>[29]</sup>；土壤质地数据集考虑沙地和粘土的垂直变化。CLM 必需的大气边界层状况均来自模式最低层高度上格点值，与 SSiB 所需基本相同，另外需要大尺度降雪和对流性降雪。CLM 陆面模式允许自由选择时间步长（但积分一天的时间步数必须是整数），不需要与大气模式一致。目前取为 20 min。

### 2.4 试验设计

分别将 SAMIL-R42L26 与 CLM 和 SSiB 进行耦合，采用 PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) 提供的包含季节变化的气候月平均海温、海冰分布，强迫模式系统，各自完成 16 年的陆气耦合积分。以下对两组耦合试验，分别简称“R42\_CLM”和“R42\_SSiB”。由于 SAMIL-R42L26 前一个版本 R15L9 中采用的陆面模式为 SSiB，故本文对 R42\_CLM，亦称作“新版陆气耦合模式”。模式积分前 6 a 左右可以被看作陆气之间的调整过程（图 1），取积分达到平衡态的后 10 a 平均作为全球模拟场。本文着重对模式模拟的夏季（JJA）关键陆气通量的气候平均态进行检验。

模式的后处理部分采用 NCAR 诊断包<sup>[30]</sup>，该诊断包为 CCSM 大气模式工作组开发的后处理软件包，全部用 NCL (NCAR Command Language)<sup>[31]</sup> 语言编写。其特点是操作方便，自带大量标准的观测/再分析资料集，使用者可以较为便捷地对模式结果进行分析比较。本文用到的观测资料如下：

- (1) 1979~1998 年 NCEP/NCAR 月平均再分析资料；
- (2) 1979~1998 年 CMAP 月平均降水率资料；
- (3) 1979~1993 年 ECMWF 月平均再分析资料。

## 3 结果分析

### 3.1 地表能量平衡

在气候变化研究领域，陆-气相互作用中能量平衡发挥重要作用。地表面能量平衡可以表示为

$$S \downarrow (1 - \alpha) + L \downarrow - L \uparrow + H_s + H_1 + G + F = 0, \quad (1)$$

其中， $S$  为短波， $\alpha$  为反照率， $L \downarrow$  为地面接收长波， $L \uparrow$  为地面放出长波， $H_s$  表示地表感热， $H_1$  为地表潜热， $G$  表示土壤热通量， $F$  为光学作用和呼吸作用时产生的化学能量。根据 Sellers<sup>[32]</sup> 的研究，

式 (1) 等号左边的后两项在陆气能量平衡所占份额低于 1%，因此在气候数值模拟研究中可以忽略。

图 1 给出 R42\_CLM 和 R42\_SSiB 两组试验模拟的全球平均地表面能量收支，即式 (1) 等号左边的前 5 项之和。由图 1 可见，两组试验经过 6 a 左右的陆气通量调整过程，最终达到一个平衡态，R42\_SSiB 的平衡态在  $2 \text{ W/m}^2$  左右。这意味着平均每年会有  $2 \text{ W/m}^2$  的能量从陆气界面进入大气，而这在真实大气中是不存在的，换言之，R42\_SSiB 在陆气界面上存在虚假的能量源。周亚军等<sup>[33]</sup> 指出 SiB (SSiB 是 SiB 简化后的版本，其模拟结果与简化前的相当接近<sup>[14]</sup>) 在计算净辐射时有  $\pm 7\%$  的误差，蒸发率最大可达  $\pm 25\%$ ，平均值为  $\pm 15\%$ 。而 CLM 陆面模式每步积分都将地表面能量盈余严格控制 在  $0.1 \text{ W/m}^2$  以内，因此 R42\_CLM 在模拟全球平均地表面能量平衡方面是成功的，其平衡态趋于  $0.0 \text{ W/m}^2$ 。目前，在采用“非通量订正”的直接耦合技术的气候系统模式中，控制耦合模式气候漂移的前提条件是保证大气顶的能量平衡，如果陆气界面的能量平衡被破坏，这将影响大气顶的能量收支，从而导致耦合模式出现气候漂移<sup>[4]</sup>。R42\_CLM 模式在陆气界面能量的平衡，为下一步发展海-陆-气-冰耦合的气候系统模式提供了保障。

### 3.2 表面感热通量

图 2 给出了 R42\_CLM 和 R42\_SSiB 所模拟的 10 a 平均 JJA 表面感热通量的全球平均分布，观测资料取 NCEP 再分析资料 1979~1998 年 JJA 气候平均值。为了进一步突出 R42\_CLM 陆气耦合模式改进之处，分别给出 R42\_CLM 与 NCEP、R42\_

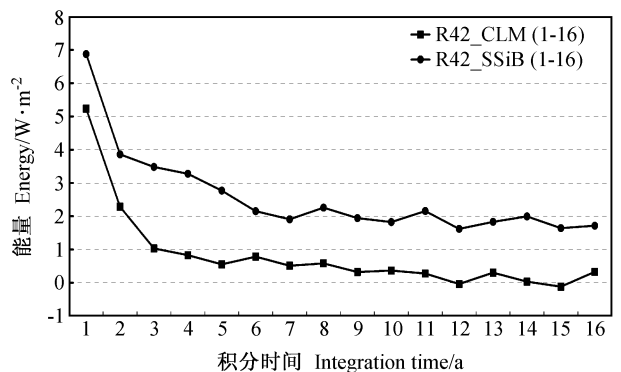


图 1 R42\_CLM、R42\_SSiB 陆气耦合模式所模拟全球平均地表面能量收支

Fig. 1 Global mean residual energy at surface from land-atmosphere coupled models; R42\_CLM, R42\_SSiB

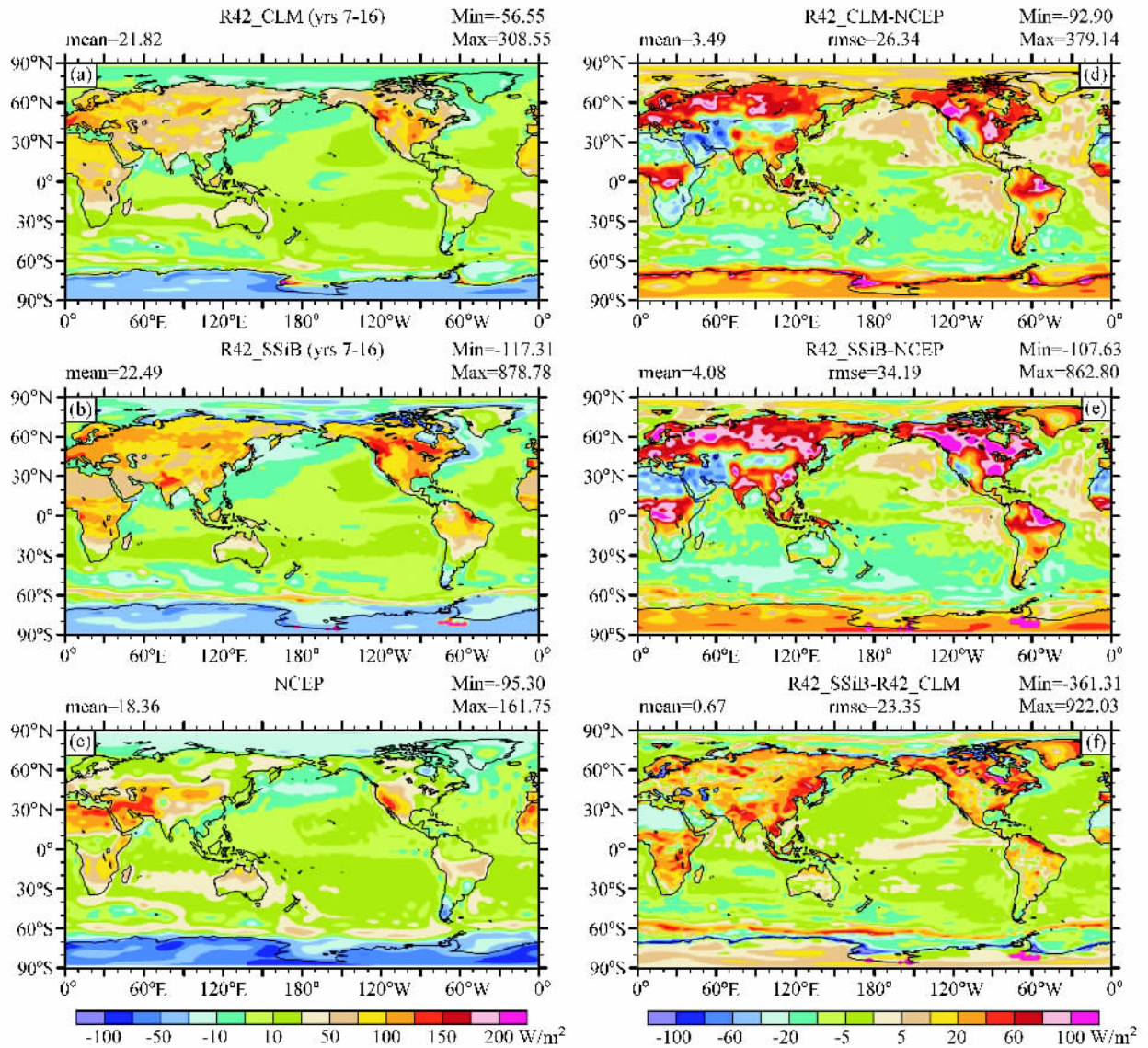


图2 R42\_CLM (a)、R42\_SSiB (b) 陆气耦合模式模拟和 NCEP 再分析 (c) 6~8 月 (JJA) 平均表面感热通量的全球平均分布以及它们之间的差异分布: (d) R42\_CLM 与 NCEP 再分析资料的差异; (e) R42\_SSiB 与 NCEP 再分析资料的差异; (f) R42\_SSiB 与 R42\_CLM 模式模拟差异。Min、Max、mean 和 rmse 分别表示最小值、最大值、平均值和均方根

Fig. 2 The JJA (Jun - Aug) mean surface sensible heat fluxes derived from R42\_CLM (a), R42\_SSiB (b), NCEP reanalysis (c), and the differences between R42\_CLM and NCEP reanalysis (d), R42\_SSiB and NCEP reanalysis (e), R42\_SSiB and R42\_CLM (f)

SSiB 与 NCEP、以及 R42\_SSiB 与 R42\_CLM 的差异。较之 R42\_SSiB, R42\_CLM 明显改善了原来陆地感热通量偏强的缺点, 在夏季亚洲北部、东南部、格陵兰岛以及北美洲大部分地区, R42\_SSiB 陆气耦合模式比 NCEP 再分析资料偏强  $100 \text{ W/m}^2$  左右。全型涡度方程的诊断分析指出<sup>[34]</sup>, 北美陆地的表面感热通量是决定该地区副热带高压中心位置及其季节变化的关键因素, 夏半年陆面感热加热是导致 1000 hPa 太平洋副热带高压及 500 hPa 北

美副热带高压形成和变化的重要原因。因此, 表面感热通量模拟的改善, 有利于副热带高压的模拟, 这一点从海平面气压分布 (图 9) 和 500 hPa 位势高度图 (鉴于本文着重从陆气通量角度分析模式模拟性能的改进, 中高层变量场图从略) 中均能看出。

CLM 陆面模式区分土壤中的液态水和冰, 模式垂直方向有 10 层, 能够抓住土壤湿度的垂直变化特征, 模拟能力明显强于 SSiB 模式的 3 层土壤



分层, Slater 等<sup>[35]</sup>的文章指出:多层模式模拟土壤特性的能力高于单层模式。为兼顾模式性能和计算量, CLM 把陆面分成 10 层计算。其模拟的土壤湿度在东亚地区、西西伯利亚平原、北美北部、南美中部和赤道非洲大于 R42\_SSiB 的结果(图略), 全球陆表面平均来看, R42\_CLM 土壤湿度偏湿 2.4%。土壤湿度被认为是仅次于海表面温度的重要参量, Pitman<sup>[5]</sup>分析陆面过程在气候模式中的作用, 根据他的分析, 图 3 给出土壤湿度偏湿引起陆气通量变化的示意图。土壤湿度偏湿引起陆地感热通量降低, 从 R42\_SSiB 与 R42\_CLM 的差异图中可以看出: R42\_CLM 陆气耦合模式模拟夏季陆地感热通量强度在上述地区普遍减弱, 接近再分析资料。

R42\_CLM 陆气耦合模式对于格陵兰岛和中高纬地区表面感热通量模拟性能的改善(图 2f), 主要源自 CLM 陆面模式增加了积雪和冻土的处理方案, 使模拟的地表面反照率在北半球中高纬度地区明显增加, 尤其是在格陵兰岛, R42\_CLM 和 R42\_SSiB 模拟的该地区地表反照率相差 0.25 以上。地表反照率增加, 将引起表面感热通量降低, 使得 R42\_CLM 模式模拟中高纬地区地表感热通量更加接近再分析资料。此外, CLM 陆面模式增加积雪

和冻土的处理方案改善了冬春季的土壤状况, 因而影响到对夏季陆面感热通量的模拟。

图 4 给出模式模拟亚洲季风地区地表感热的季节演变。很明显, R42\_CLM 能够准确再现整个亚洲地区地表感热的季节循环, 无论在东亚季风区(图 4b)、印度季风区(图 4c)还是西北太平洋地区(图 4d), R42\_CLM 模拟的地表感热季节变化都与再分析资料一致, 从整个亚洲地区(图 4a)来看, R42\_CLM 模拟的误差最大不超过  $10 \text{ W/m}^2$ , 而 R42\_SSiB 对亚洲地区地表感热的模拟能力则较低, 模拟的地表感热在整个亚洲地区偏高  $15 \text{ W/m}^2$  左右, 其季节变化甚至与 NCEP 再分析的相反。R42\_SSiB 在夏季(JJA)北半球误差较大, 主要原因是 SSiB 模式模拟的土壤湿度偏干, 引起地表温度偏高(图 3、图 5)。

### 3.3 表面温度

土壤和植被的性质是决定能量平衡和温度的关键因素之一, 新版本陆气耦合模式在部分地区模拟的土壤湿度和地表反照率的变化, 缓解了 R42\_SSiB 模式在该地区模拟表面温度过高的问题; Bonan<sup>[18]</sup>通过比较 NCAR CLM2 和 LSM1 (Land Surface Model 1) 模拟结果, 指出大部分温度的差异主要是由不同的生物地球物理参数化方案引起的。图

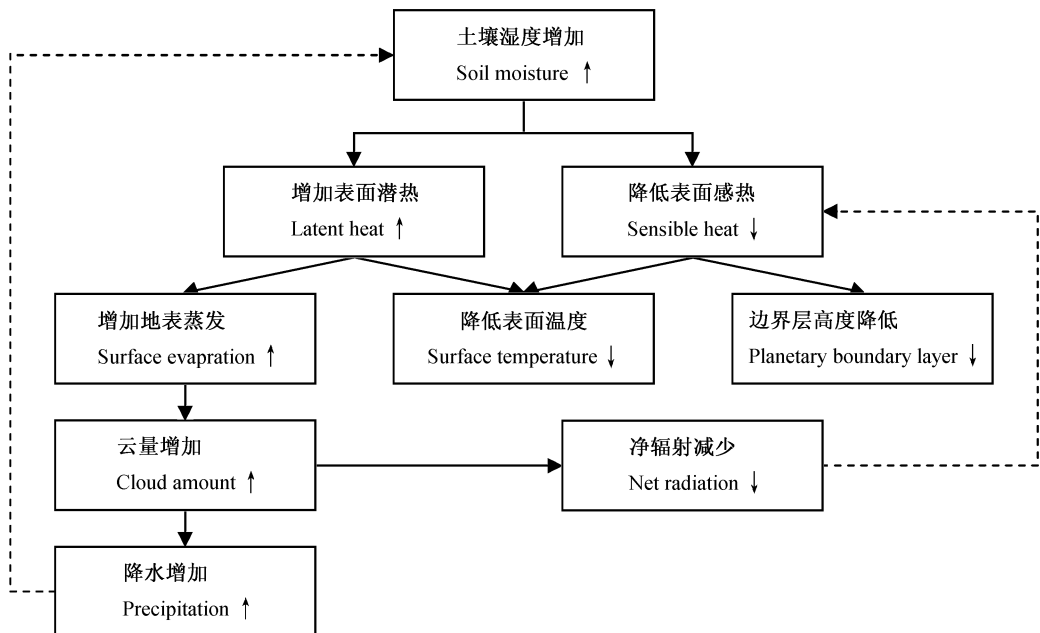


图 3 土壤湿度增加引起陆气通量变化的示意图(虚线表示正反馈过程)

Fig. 3 Schematic diagram for the land - atmosphere flux variation induced by increased soil moisture, positive feedback is identified by dashed line

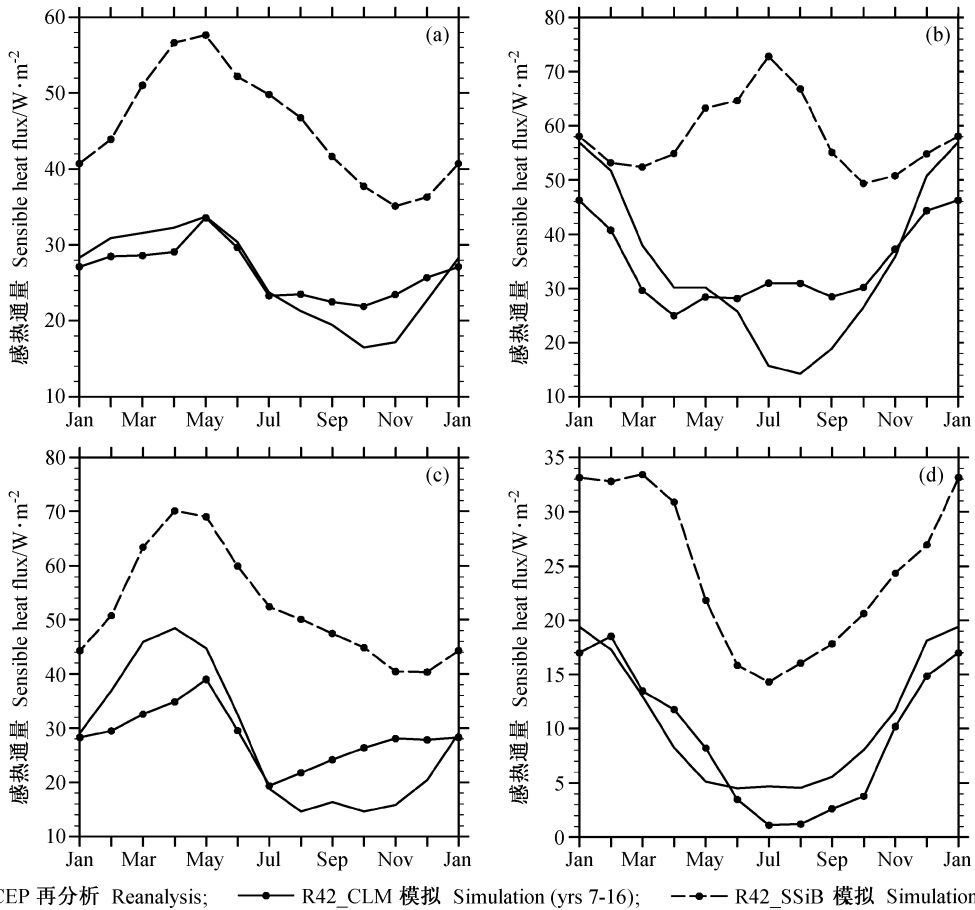


图 4 亚洲季风地区地表感热的季节演变: (a) 亚洲季风区 ( $5^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ); (b) 东亚季风区 ( $22.5^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ); (c) 印度季风区 ( $5^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ ); (d) 西北太平洋季风区 ( $5^{\circ}\text{N}\sim 22.5^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ )

Fig. 4 Seasonal evolution of surface sensible heat flux over the whole Asian monsoon region ( $5^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ) (a), East Asian monsoon region ( $22.5^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ) (b), Indian monsoon region ( $5^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ ) (c), and the northwestern Pacific monsoon region ( $5^{\circ}\text{N}\sim 22.5^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ) (d)

5 给出了 R42\_CLM 和 R42\_SSiB 陆气耦合模式以及 NCEP 1979~1998 再分析资料的 JJA 平均表面气温的全球平均分布。从 R42\_SSiB 与 NCEP 差异图中不难看出, 夏季陆地上表面温度普遍高于 NCEP 再分析资料, 亚洲北部、北美洲大部分、格陵兰岛和南极地区差异达  $10^{\circ}\text{C}$  以上。由于模拟的地表反照增加, R42\_CLM 陆气耦合模式模拟格陵兰岛和南极温度与 NCEP 再分析资料十分接近。北美北部和南美大部分地区要比 R42\_SSiB 模拟低  $4\sim 8^{\circ}\text{C}$ , 趋近于实测资料。但是, R42\_CLM 模拟的北半球陆表温度仍然偏高。进一步分析表明, 表面温度过高主要是由于地表净短波辐射偏强所致, 即使采用固定气候云方案<sup>[36]</sup>, 问题同样存在, 表明大气模式的辐射方案尚需完善。

### 3.4 降水率

数值模式模拟表明, 陆面过程对于降水率影响很大<sup>[37]</sup>。陆气通量发生变化, 在基本气流作用下, 势必影响海洋上的环流场。另外, 根据大气中两级热力适应理论<sup>[38]</sup>, 感热加热增加, 近地层出现气旋性环流, 其东部异常发展的偏南风向北输送大量的水汽, 产生异常的降水。因为异常降水伴有深对流加热, 在对流层中层由于加热随高度增加, 南风发展, 从而影响到洋面上的环流场, 改变那里的降水场。图 6 给出了 R42\_CLM 和 R42\_SSiB 陆气耦合模式以及 Xie-Arkin<sup>[39]</sup> 1979~1998 气候平均 JJA 降水率的全球平均分布。从 R42\_SSiB 与 Xie-Arkin 的差异分布 (图 6e) 中可以看到, R42\_SSiB 对印度半岛北部季风降水的模拟偏弱, 误差在  $4\text{ mm/d}$  左

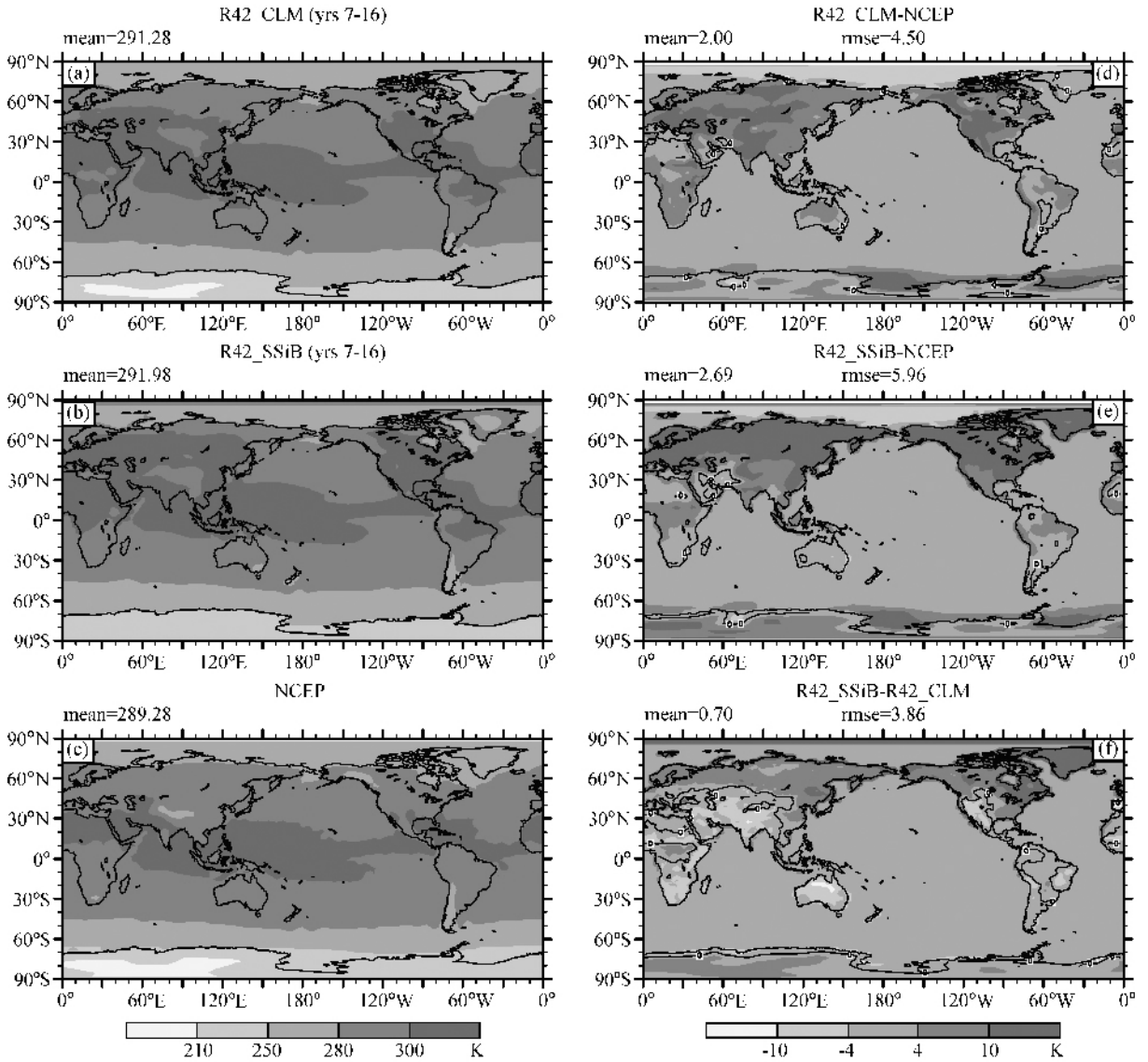


图5 同图2, 但为表面温度

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for surface temperature

右, 对南海季风降水的模拟则偏强, 暖池区的降水太强, 而热带辐合带 (ITCZ) 降水则少 6 mm/d。R42\_CLM 陆气耦合模式对降水率的模拟有很大改善。夏季, 由于东亚地区土壤湿度模拟增加, 降水增大, 雨带向北和西部推进。与 Xie-Arkin 气候场相比, 虽然在印度半岛北部仍偏弱, 但比 R42\_SSiB 模拟的降水增加了 1~2 mm/d, 印度洋和西太平洋及大西洋的 ITCZ 普遍增加 4 mm/d, 非洲中部降雨带的两个中心位置与观测一致。从 R42\_SSiB 与 R42\_CLM 差异分布 (图 6f) 还不难看出, 墨西哥湾和加勒比海地区模拟的降水率模拟降低 6~

8 mm/d, 接近观测资料。

Bonan<sup>[18]</sup> 在比较陆面模式 NCAR LSM1 和 CLM2 对陆气通量模拟的结果时, 没有指出海洋上的通量变化, 只给出陆地上通量的变化。而本文的结果则表明, 不同的陆面模式所模拟的大气下垫面通量均发生变化。因此, 陆气耦合过程对模拟结果的影响, 不仅是局地性的, 而且也是区域性的、乃至全球范围的。

### 3.5 表面潜热通量

图 7 给出了 R42\_CLM 和 R42\_SSiB 陆气耦合模式所模拟的 10 a 平均 JJA 表面潜热通量的全球



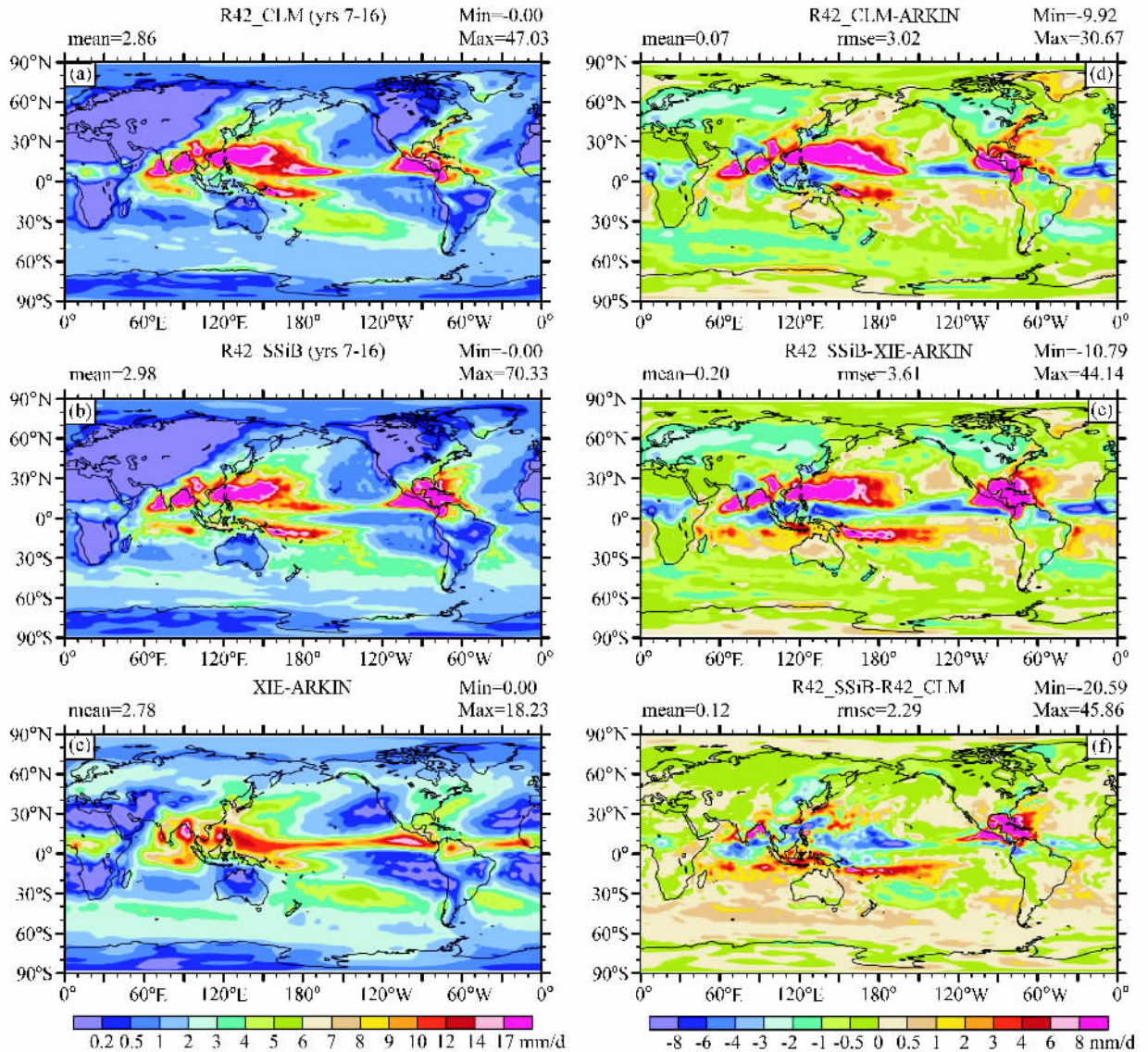


图 6 R42\_CLM (a)、R42\_SsiB (b) 陆气耦合模式模拟和 Xie-Arkin (c) 6~8 月 (JJA) 平均降水率的全球平均分布, 以及它们之间的差异分布: (d) R42\_CLM 与 Xie-Arkin 资料的差异; (e) R42\_SSiB 与 Xie-Arkin 资料的差异; (f) R42\_SSiB 与 R42\_CLM 模式模拟差异  
Fig. 6 The JJA mean precipitation rates derived from R42\_CLM (a), R42\_SSiB (b), Xie-Arkin (c), and the differences between R42\_CLM and Xie-Arkin (d), R42\_SSiB and Xie-Arkin (e), and R42\_SSiB and R42\_CLM (f)

平均分布, 因诊断软件中 NCEP 再分析资料没有该量, 因此观测资料取自 ECMWF 再分析资料 1979~1993 年 JJA 气候平均值。从 R42\_SSiB 与 ECMWF 的差异图中可以看到, 夏季 R42\_SSiB 模拟的陆表潜热通量, 普遍比再分析资料偏低  $60 \text{ W/m}^2$  左右, 而在青藏高原地区, 比再分析资料偏高大约  $30 \text{ W/m}^2$ 。由图 6b 可知, 青藏高原东侧四川盆地的虚假降水中心是导致该地区潜热偏高的原因。而潜热的偏高将进一步引起局地降水增多 (图 3), 是一正反馈过程。分析 R42\_SSiB 与 R42\_CLM 陆气

耦合模式结果差异, 可以看出夏季 R42\_CLM 模拟的潜热通量更加接近再分析资料; 夏季高原东侧四川盆地的潜热中心强度减弱, 亚洲东部、南部地区模拟能力增强, 南极地区潜热模拟与 ECMWF 再分析资料一致, 孟加拉湾、墨西哥和墨西哥湾潜热通量偏强的现象有所改进。

图 8 给出模式模拟的亚洲季风地区地表潜热的季节演变, 对于东亚季风区 (图 8b), R42\_CLM 能够很好地再现该地区地表潜热的季节演变趋势, 而 R42\_SSiB 模拟的地表潜热偏低约  $10 \text{ W/m}^2$ ; 但对

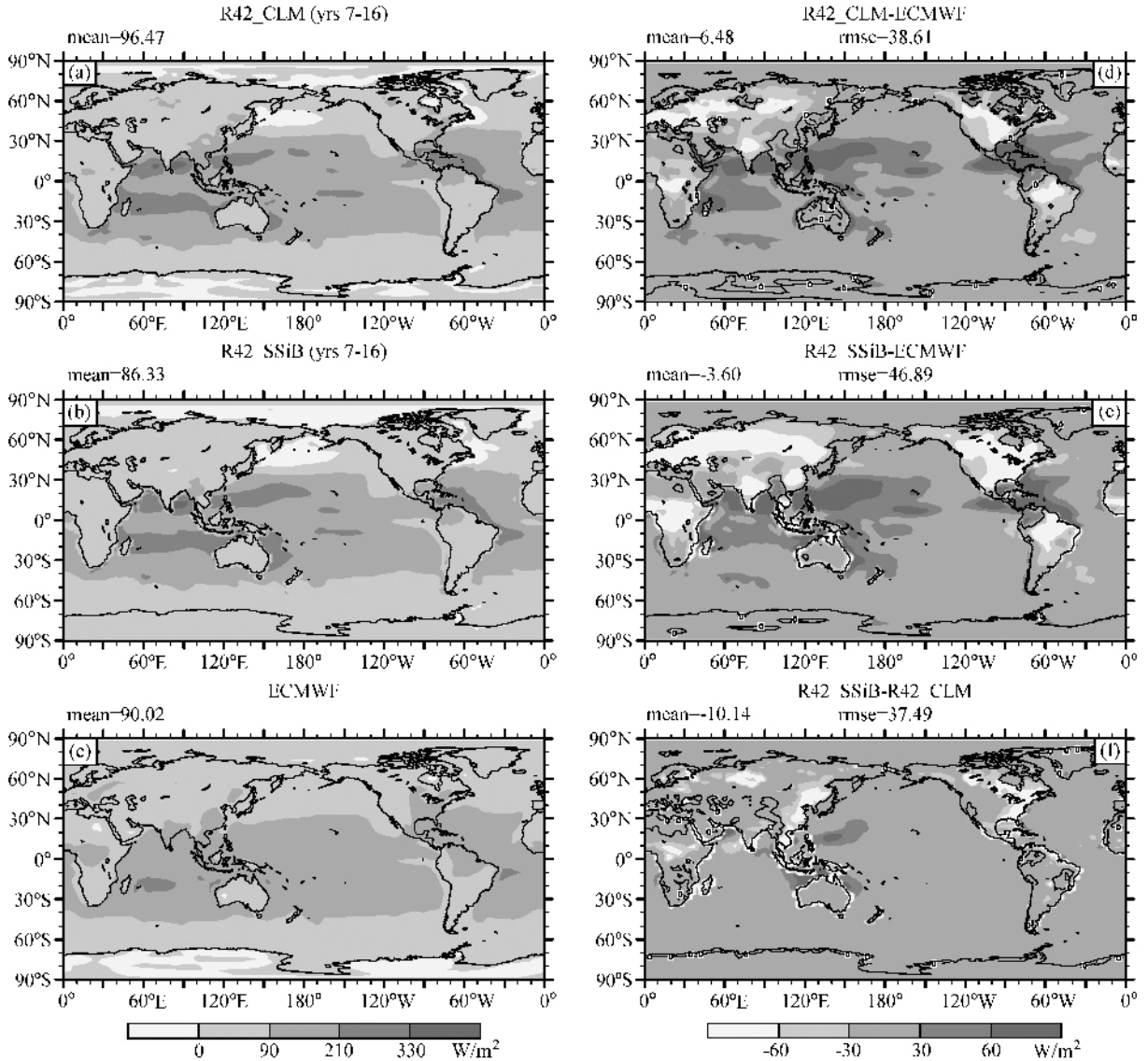


图7 R42\_CLM (a)、R42\_SSiB (b) 陆气耦合模式模拟和 ECMWF 再分析 (c) 6~8 月 (JJA) 平均表面潜热通量的全球平均分布以及它们之间的差异分布: (d) R42\_CLM 与 ECMWF 再分析资料的差异; (e) R42\_SSiB 与 ECMWF 再分析资料的差异; (f) R42\_SSiB 与 R42\_CLM 模式模拟差异

Fig. 7 The JJA mean surface latent heat fluxes derived from R42\_CLM (a), R42\_SSiB (b) and ECMWF reanalysis (c), and the differences between R42\_CLM and ECMWF reanalysis (d), R42\_SSiB and ECMWF reanalysis (e), and R42\_SSiB and R42\_CLM (f)

于印度季风区 (图 8c) 和西北太平洋地区 (图 8d), R42\_CLM 模拟的地表潜热偏高, 因此导致整个亚洲季风区 (图 8a) 模拟偏强, 这与上述两区域降水偏差较大相对应, 其原因可能与缺乏海气相互作用有关。与海洋模式耦合后, 在该区域对气候平均降水场的模拟有显著改善<sup>[40]</sup>。不过从变化趋势来看, R42\_CLM 模拟结果与再分析资料一致。

### 3.6 海平面气压

图 9 给出 R42\_CLM 和 R42\_SSiB 陆气耦合模

式以及 NCEP 再分析资料 1979~1998 年平均 JJA 海平面气压分布。由 R42\_SSiB 与 NCEP 差值图 (图 9e) 中可以看到, 夏季亚洲热低压模拟强度偏强。对副热带高压形成机理的研究表明, 强大的陆面感热加热使副热带高压中心和低压中心在低空分别位于加热中心的西侧 (洋面上) 和东侧 (陆地上)<sup>[34, 41]</sup>。由图 2 可知, R42\_SSiB 模拟的夏季北美洲大部分地区表面感热偏强, 因此使得北美洲西侧北太平洋副高范围增大、强度增加, 而东侧北美低

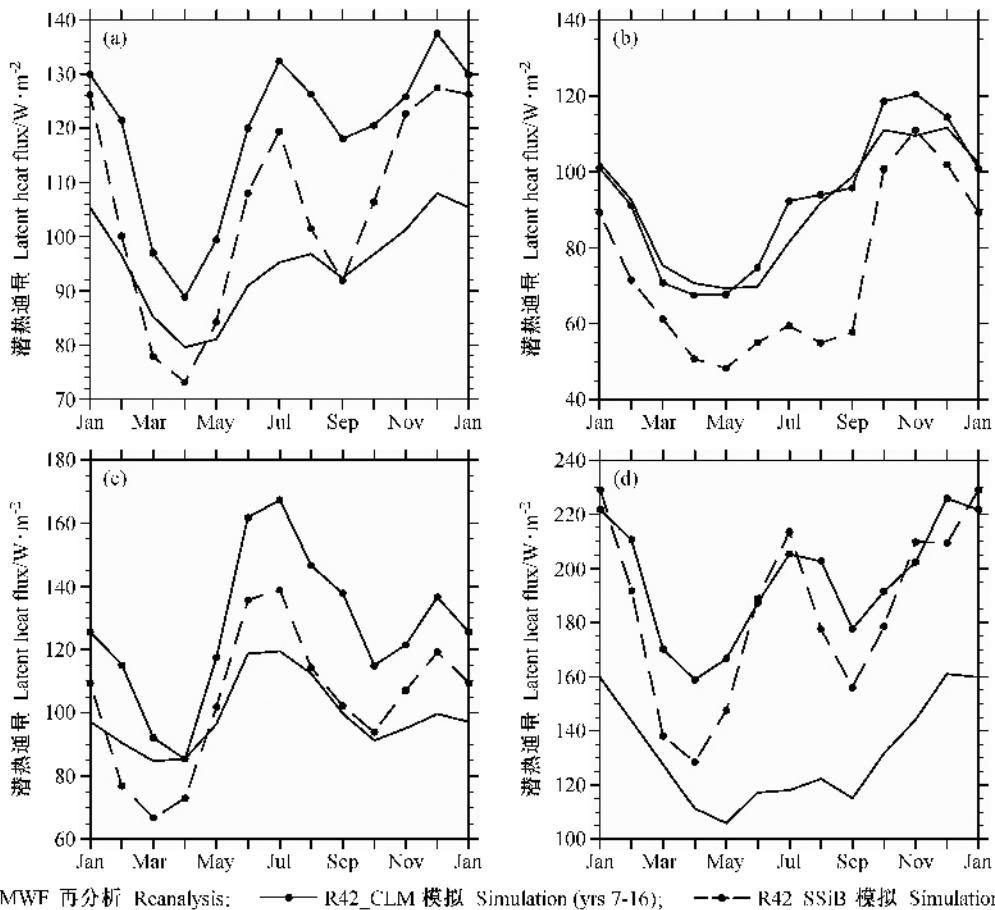


图 8 亚洲季风地区地表潜热的季节演变: (a) 亚洲季风区 ( $5^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ); (b) 东亚季风区 ( $22.5^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ); (c) 印度季风区 ( $5^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ ); (d) 西北太平洋季风区 ( $5^{\circ}\text{N}\sim 22.5^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ )

Fig. 8 Seasonal evolution of surface latent heat fluxes over the whole Asian monsoon region ( $5^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ) (a), East Asian monsoon region ( $22.5^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ) (b), Indian monsoon region ( $5^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ ) (c) and the northwestern Pacific monsoon region ( $5^{\circ}\text{N}\sim 22.5^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ) (d)

压异常偏强, 中心值比 NCEP 再分析资料偏低 10 hPa。在北美地区, R42\_CLM 对表面感热的模拟能力明显强于 R42\_SSiB 模式, 尽管对太平洋副高的模拟仅略好于 R42\_SSiB, 但其模拟的北美洲地区热低压强度减弱、范围缩小, 接近再分析资料。

## 4 结论

本文比较 LASG 最新发展的高分辨率大气环流谱模式 SAMIL-R42L26 分别与两个陆面过程模式 SSiB (1997 年版本<sup>[15]</sup>)、CLM 耦合的结果, 结合多种观测和再分析资料, 分析评估陆气耦合模式模拟地表能量平衡、表面感热、温度、降水率、表面潜热通量和海平面气压等变量场的能力。并指出

CLM 陆面模式由于更新土壤分类和它们的生理及其物理特征参数, 提高陆面模式垂直分辨率, 并增加了一个多层的积雪模式和陆面径流处理方案, 以及采用了新的物理过程参数化方案, 与 R42\_SSiB 相比, R42\_CLM 陆气耦合模式对陆气通量的模拟能力具有明显提高, 主要表现在以下几个方面:

(1) 从能量平衡角度, R42\_CLM 模拟的陆地表面能量收支趋于平衡, 为下一步发展海-陆-气-冰耦合的气候系统模式提供保障; R42\_SSiB 模拟的陆地表面能量收支存在  $2\text{ W}/\text{m}^2$  的误差。

(2) R42\_CLM 陆气耦合模式明显改善了夏季亚洲北部、东南部、格陵兰岛以及北美洲大部分地区表面感热通量模拟结果, 较好地再现了亚洲季风区地表感热的季节演变特征。

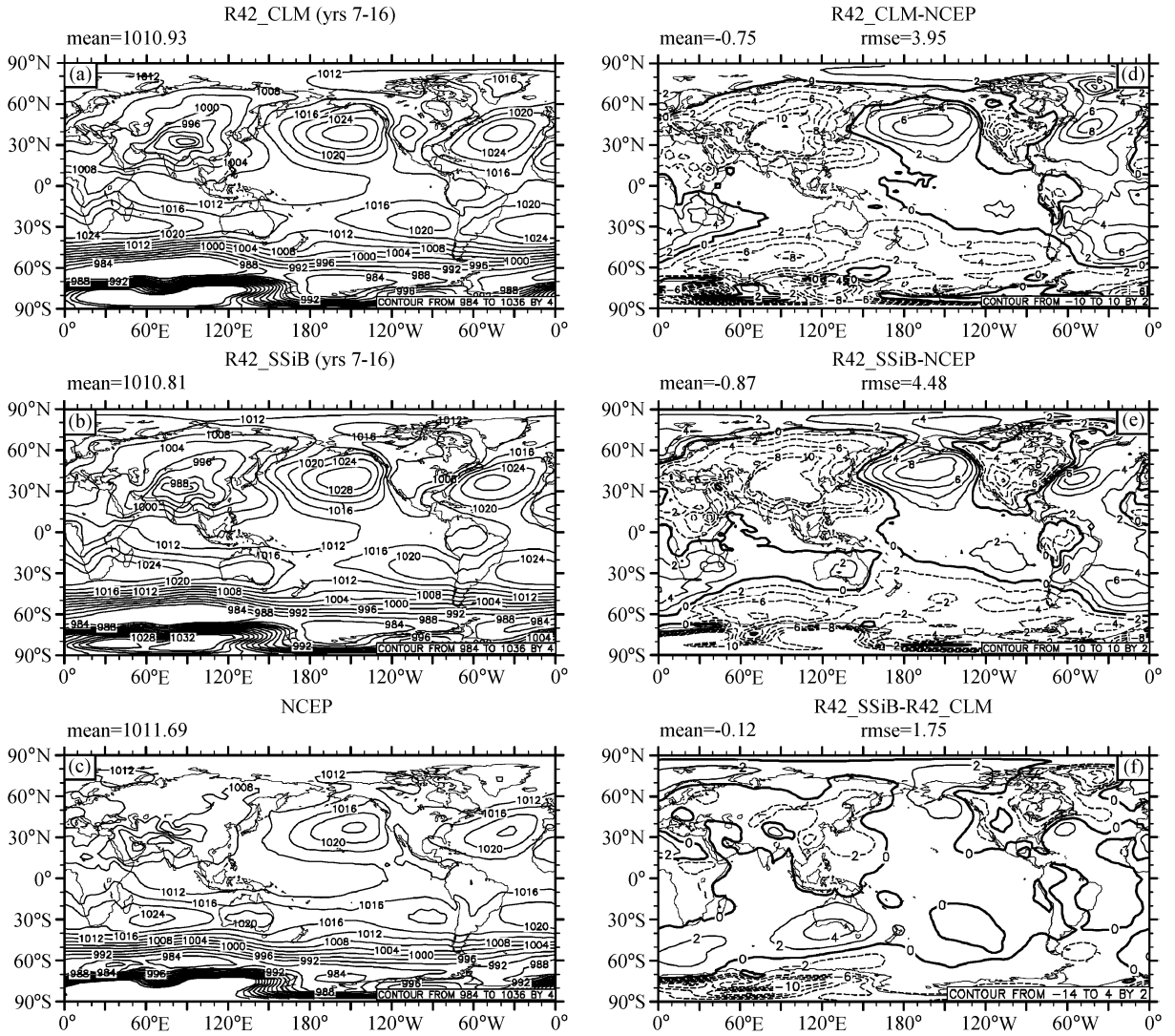


图9 同图2, 但为海平面气压(单位: hPa)

Fig. 9 Same as Fig. 2, but for sea level pressure (hPa)

(3) 在表面温度的模拟中, R42\_CLM 陆气耦合模式对中高纬地区的模拟能力增强, 特别是模拟的格陵兰岛和南极地区地表温度更加准确。

(4) R42\_CLM 模拟的降水率, 在夏季印度洋和西太平洋及大西洋的 ITCZ 区域比 R42\_SSiB 有很大改善, 但欧亚大陆西部降水仍然偏少 3 mm/d。未来对降水强度和中心位置模拟能力的提高, 寄希望于积云对流参数化方案的改进和海气耦合的作用。

(5) 对于表面潜热通量的模拟, R42\_CLM 耦合模式在夏季高原东侧潜热中心强度减弱, 对亚洲东部、南部地区和南极大部分地区的模拟能力增

强, 孟加拉湾、墨西哥和墨西哥湾潜热通量模拟偏强的现象有所改进, 范围与再分析资料一致, 并且可以较好地再现亚洲季风区潜热季节演变趋势, 尤其在东亚季风区, 模拟值与再分析资料十分接近。

(6) R42\_CLM 陆气耦合模式模拟的海平面气压分布比较合理, 与 R42\_SSiB 相比, 对北美大陆低压模拟更接近于实际。

综上所述, R42\_CLM 陆气耦合模式在陆气通量模拟方面明显优于旧版 R42\_SSiB, 它能够较准确地再现陆气通量的基本特征, 为接下来发展海-陆-气-冰耦合的气候系统模式提供了保障。特别需要指出的是, 陆气通量模拟效果的改进所带来的影

响, 不仅仅是局地性的, 例如, 通过两级热力适应作用机制、陆气通量模拟的改善, 会进一步影响到海洋上空环流场的分布。

**致谢** 曾与宇如聪研究员、王斌研究员、俞永强博士等进行有益的讨论。本文计算工作, 得到了中国科学院大气物理研究所计算信息科学中心的大力支持。在此一并表示感谢!

### 参考文献 (References)

- [1] Zhang X H, Shi G Y, Liu H, et al. *IAP Global Ocean - Atmosphere - Land System Model*. Beijing: Science Press, 2000. 252pp
- [2] Wu Guoxiong, Liu Hui, Zhao Yucheng, et al. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, **13**: 1~18
- [3] Wu Tongwen, Liu Ping, Wang Zaizhi, et al. The performance of atmospheric component model R42L9 of GOALS/LASG. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**: 726~742
- [4] 周天军, 宇如聪, 王在志, 等. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGALS-s—亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响(第四卷). 北京: 气象出版社, 2005  
Zhou Tianjun, Yu Rucong, Wang Zaizhi, et al. *The Atmospheric General Circulation Model SAMIL and Its Associated Coupled Climate System Model FGOALS-s, Volume 4 of Impacts of the Ocean - Land - Atmosphere Interaction over the Asian Monsoon Domain on the Climate Change over China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005
- [5] Pitman A J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*, 2003, **23**: 479~510
- [6] Charney J, Quirk W J, Chow S-H, et al. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semiarid regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1977, **34**: 1366~1385
- [7] Charney J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1979, **101**: 193~202
- [8] Mintz Y. The sensitivity of numerically simulated climates to land-surface boundary conditions. *The Global Climate*. Houghton J T, Ed. Cambridge University Press, 1984. 79~105
- [9] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 2004, **305** (5687): 1138~1140
- [10] Vernekar A D, Zhou J, Shukla J. The effect of Eurasian snow cover on the Indian monsoon. *J. Climate*, 1995, **8**: 248~266
- [11] Cohen J, Rind D. The effect of snow cover on the climate. *J. Climate*, 1991, **4**: 689~706
- [12] Foster J, Owe M, Rango A. Snow cover and temperature relationships in North America and Eurasia. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1983, **22**: 460~469
- [13] Barnett T P, Dmenil L, Schlese U, et al. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**: 661~686
- [14] Xue Y-K, Sellers P J, Kinter J L, et al. A simplified biosphere model for global climate studies. *J. Climate*, 1991, **4**: 345~364
- [15] Liu H, Wu G X. Impacts of land surface on climate of July and onset of summer monsoon: A study with an AGCM plus SSiB. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, **14**: 289~308
- [16] 孙岚, 吴国雄, 孙菽芬. 陆面过程对气候影响的数值模拟: SSiB 与 IAP/LASG L9R15 AGCM 耦合及其模式性能. 气象学报, 2000, **58** (2): 179~193  
Sun L, Wu G X, Sun S F. Numerical simulations of effects of land surface processes on climate: Implementing of SSiB in IAP/LASG AGCM L9R15 and its Performance. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (2): 179~193
- [17] 周天军, 俞永强, 宇如聪, 等. 气候系统模式发展中的耦合器研制问题. 大气科学, 2004, **28**: 993~1008  
Zhou T J, Yu Y Q, Yu R C, et al. Coupled climate system model coupler review. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28**: 993~1008
- [18] Bonan G B. The land surface climatology of the NCAR land surface model coupled to the NCAR Community Climate Model. *J. Climate*, 1998, **11**: 1307~1326
- [19] 王在志, 吴国雄, 刘平, 等. 全球海-陆-气耦合模式大气模式分量的发展及其气候模拟性能 I: 水平分辨率的影响. 热带气象学报, 2005, **21**: 225~237  
Wang Z Z, Wu G X, Liu P, et al. The development of GOALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation I: Influence of horizontal resolution. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21**: 225~237
- [20] 王在志, 宇如聪, 王鹏飞, 等. 全球海-陆-气耦合模式大气模式分量的发展及其气候模拟性能 II: 垂直分辨率的提高及其影响. 热带气象学报, 2005, **21**: 238~247  
Wang Z Z, Yu R C, Wang P F, et al. The development of GOALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation II: The increase of vertical resolution and its influences. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21**: 238~247
- [21] Edwards J M, Slingo A. A studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 689~720
- [22] Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**: 1779~1800



- [23] Palmer T N, Shutts G J, Swinbank R. Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, **112**: 1001~1039
- [24] 钱永甫. 包络地形和重力波拖曳对气候模拟效果的影响. 应用气象学报, 2000, **11**: 13~20  
Qing Y F. Effects of the envelope orography and gravity wave drag on performance of climate modeling. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2000, **11**: 13~20
- [25] Kuchler A W. World map of natural vegetation: Goode's World Atlas (16th edition). Rand McNally, 1983. 16~17
- [26] Matthews E. Vegetation, land-use and seasonal albedo data sets: Documentation of archived data tape. NASA Technical Memorandum 86107, 1984. 12 pp
- [27] Matthews E. Atlas of archived vegetation, land-use and seasonal albedo data sets. NASA Technical Memorandum 86199, 1985. 53 pp
- [28] Klink K, Willmott C J. Notes on a global vegetation data set for use in GCMs. Dept. of Geography, Univ. of Delaware, Newark, Delaware, 1985
- [29] Oleson K, Bonan G B. The effects of remotely sensed plant functional type and leaf area index on simulations of boreal forest surface fluxes by the NCAR land surface model. *J. Hydrometeorology*, 2000, **1**: 431~446
- [30] <http://www.cgd.ucar.edu/cms/mstevens/diagnostics/index.html>
- [31] <http://ngwww.ucar.edu/ncl/>
- [32] Sellers P J. Biophysical models of land surface processes. *Climate System Modelling*, Trenberth K E, Ed. Cambridge University Press, 1992
- [33] 周亚军, 陈葆德, 孙国武. 陆面过程研究综述. 地球科学进展, 1994, **9** (5): 26~31  
Zhou Y J, Chen B D, Sun G W. Land surface process review. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1994, **9** (5): 26~31
- [34] 刘屹岷, 刘辉, 刘平, 等. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 II: 陆面感热与东太平洋副高. 气象学报, 1999, **57** (4): 385~396
- Liu Y M, Liu H, Liu P, et al. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high II: Land surface sensible heating and East Pacific subtropical high. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (4): 385~396
- [35] Slater A G, Schlosser C A, Desborough C E, et al. The representation of snow in land surface schemes: results from PILPS-2d. *J. Hydrometeorology*, 2001, **2**: 7~25
- [36] Wu Tongwen, Wang Zaizhi, Liu YiMin, et al. An evaluation of the effects of cloud parameterization in the R42L9 GCM. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21**: 153~162
- [37] Koster R D, Suarez M J, Heiser M. Variance and predictability of precipitation at seasonal-to-interannual timescales. *J. Hydrometeorology*, 2000, **1**: 26~46
- [38] 吴国雄, 刘平, 刘屹岷, 等. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响——大气中的两级热力适应. 气象学报, 2000, **58** (5): 513~522  
Wu G X, Liu P, Liu Y M, et al. Impacts of the sea surface temperature anomaly in the Indian Ocean on the subtropical anticyclone over the western Pacific—two stage thermal adaptation in the atmosphere. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (5): 513~522
- [39] Xie P, Arkin P A. Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *J. Climate*, 1996, **9**: 840~858
- [40] 王在志, 宇如聪, 包庆, 等. 大气环流谱模式(SAMIL)海气耦合前后性能的比较. 大气科学(待发表)  
Wang Z Z, Yu R C, Bao Q, et al. A comparison of the atmospheric circulations simulated by the FGOALS-s and SAMIL. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, submitted
- [41] 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 I. 尺度分析. 气象学报, 1999, **57** (3): 257~263  
Wu G X, Liu Y M, Liu P. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high, Part 1: Scale analysis. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (3): 257~263