

朱司光,陈海山,周晶. 2013. NCAR_CLM 系列模式对全球近 50 a 陆面状况的模拟及其比较分析[J]. 大气科学学报,36(4):434-446.

Zhu Si-guang, Chen Hai-shan, Zhou Jing. 2013. Simulations of global land surface conditions in recent 50 years with three versions of NCAR Community Land Models and their comparative analysis[J]. Trans Atmos Sci,36(4):434-446. (in Chinese)

NCAR_CLM 系列模式对全球近 50 a 陆面状况的模拟及其比较分析

朱司光^{1,2}, 陈海山^{1,2}, 周晶³

(1. 气象灾害教育部重点实验室(南京信息工程大学), 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044; 3. 江苏省气象局, 江苏 南京 210008)

摘要:基于普林斯顿大学 1948—2006 年 3 h 一次、 $1^\circ \times 1^\circ$ 空间分辨率的全球陆面驱动数据, 利用 NCAR 系列陆面模式 CLM3.0、CLM3.5、CLM4.0, 分别对全球近 50 a 的陆面状况进行了 offline 模拟试验。在此基础上, 对比分析了不同版本模式对全球土壤温度、土壤湿度、地表感热、潜热和地表径流气候态的模拟结果, 揭示了不同版本模式对全球陆面变量模拟的差异及主要特征。结果表明: 1) CLM 系列模式模拟的土壤温度、湿度在全球范围内存在一定差异。与 CLM4.0 相比, CLM3.0 和 CLM3.5 模拟的 1 月、7 月的浅层和深层土壤温度在北半球中高纬度存在明显的暖偏差。CLM3.0 模拟的土壤湿度在北半球高纬地区均存在不同程度的偏湿, 而在热带及中纬度地区则以偏干为主, 尤其是对热带地区深层土壤湿度的模拟存在严重偏干的现象; 相比之下, CLM3.5 模拟的浅层土壤湿度仅在北半球高纬地区存在偏湿的现象; 二者对深层土壤湿度的模拟差异较小。2) CLM 系列模式模拟的地表能量通量和地表水文变量也存在较明显的差异。模式对潜热通量和感热通量的明显差异主要出现在热带地区, 与 CLM4.0 相比, CLM3.0 模拟的潜热(感热)通量总体偏小(大), 而 CLM3.5 模拟的潜热(感热)通量以偏大(小)为主。CLM3.0 模拟的地表径流在热带地区明显偏大, CLM3.5 在一定程度上改善了上述区域径流偏大的问题, 但过分低估了上述地区的地表径流。3) 模式模拟结果的差异具有明显的季节变化和区域性特点。总体而言, CLM3.0 对不同地区的土壤湿度和冠层蒸散的季节变化模拟都存在较大偏差, 其模拟的土壤湿度明显偏低, 而对冠层蒸腾作用在冠层蒸散过程中所做的贡献估计不足; CLM3.5 和 CLM4.0 对上述结果有了较明显的改进。对于其他陆面因子的季节变化而言, CLM3.0 的模拟能力也存在一定程度的不足, 而 CLM3.5 和 CLM4.0 的模拟结果则更为合理。

关键词: 共用陆面模式; 陆面过程; 数值模拟; 比较分析

中图分类号: P461.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7097(2013)04-0434-13

Simulations of global land surface conditions in recent 50 years with three versions of NCAR Community Land Models and their comparative analysis

ZHU Si-guang^{1,2}, CHEN Hai-shan^{1,2}, ZHOU Jing³

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster (NUIST), Ministry of Education, Nanjing 210044, China;

2. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008, China)

Abstract: Based on the global $1^\circ \times 1^\circ$ and 3-hr atmospheric forcing data from 1948 to 2006 developed at Princeton University, the global land surface conditions in recent 50 years are produced by offline

收稿日期: 2012-05-10; 改回日期: 2013-02-03

基金项目: 全球变化重大科学研究计划(2011CB952004); 国家自然科学基金资助项目(41075082); 江苏省“333 高层次人才培养工程”; 江苏省“青蓝工程”; 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

通信作者: 陈海山, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为陆面过程与气候数值模拟, haishan@nuist.edu.cn.

simulation with three different versions of NCAR Community Land Model (i. e., CLM3.0, CLM3.5 and CLM4.0). Through comparing the simulation results, the differences in simulated soil temperature, soil moisture, latent heat, sensible heat and surface runoff among the three models and the main features are discussed. Results show: 1) Differences in the simulated soil temperature and soil moisture are detected among three versions of CLM. Compared to CLM4.0, both CLM3.0 and CLM3.5 show warm bias in the simulated January and July soil temperatures at both shallow and deep layers in the mid-high latitudes of the Northern Hemisphere. The soil moisture simulated by CLM3.0 is too wet in the high latitudes of the Northern Hemisphere, but too dry in the mid-latitudes and the tropics. In contrast, no evident difference is found between CLM3.5 and CLM4.0 except that the soil moisture at shallow layer simulated by CLM3.5 is wetter than that of CLM4.0 in the high latitudes of the Northern Hemisphere. 2) Evident differences in the simulated surface energy fluxes and hydrological variables are found among three versions of CLM. Compared to CLM4.0, the differences in the latent heat and sensible heat fluxes simulated by other two models mainly appear in the Tropics. CLM3.0 underestimates (overestimates) the latent heat (sensible heat) fluxes to some extent, while CLM3.5 basically gives larger latent heat flux (smaller sensible heat flux). In addition, the surface runoff simulated by CLM3.0 is evidently overestimated in the tropics, where it is improved but somewhat underestimated by CLM3.5. 3) Differences among the model results vary with not only the season but also the selected region. On the whole, CLM3.0 produces larger bias in the simulation of the seasonal cycles of the soil moisture and canopy transpiration over the selected regions, and underestimates the soil moisture and the contribution of canopy transpiration to canopy evapo-transpiration seriously. Such results have been improved in both CLM3.5 and CLM4.0. In case of other land surface variables, CLM3.0 also exhibits some deficiencies, but CLM3.5 and CLM4.0 show better performance.

Key words: community land surface model; land surface process; numerical simulation; comparative analysis

0 引言

正如海洋一样,作为地球气候系统下垫面的陆地对天气、气候能够产生显著的影响。大气与陆地之间不断进行着动量、能量和物质的交换,陆地和大气之间存在不同尺度的相互作用(Charney, 1975; Shukla and Mintz, 1982; 陈海山和孙照渤, 2002)。陆地表面的诸多基本属性,如土壤湿度、土壤温度、感热、潜热和地表径流,都是导致气候变化的关键因子(孙菽芬, 2005)。为了深入认识陆面过程在气候系统中的作用,近年来许多国际陆面观测计划也相继展开。然而,由于陆地表面的复杂多样,观测结果的代表性有限,同时观测记录时间较短、空间代表性远远不够,很难满足相关研究的需要。因此,采用数值模式来模拟和研究陆面过程的影响已成为这个领域的重要手段。陆面模式的发展已有数十年的历史。Manabe(1969)在全球气候模式中引入了陆地水文循环的概念,建立了早期的简单陆面模式,即水桶模式(Bucket model)。水桶模式将全球近地层土壤假设成有一定深度、能容纳一定水量的水桶,认为地面蒸发与桶里的水量成线性关系,用简单概念化的地表水文方案计算土壤含水量。其后,人们在陆

面模式中引入了植被、大气和土壤圈相互作用及其反馈机制,考虑了植被气孔导度对蒸腾的控制作用(Deardorff, 1978)。Dickinson et al. (1986)发展的生物圈—大气传输模式(BATS)和 Sellers et al. (1986)发展的简化生物圈模式(SiB)是这一阶段陆面模式的代表。20世纪90年代以来,随着全球变暖受到越来越多的关注,有关碳循环的研究也成为气候变化研究的重要方面。与此同时,植物生理学和生态学的发展取得了显著进步,使得在陆面模式中描述植被的生物化学过程成为可能。Sellers et al. (1996)对SiB模式加以改进,引入了反映植被光合作用和水汽传输的冠层模型,对植被的生化过程进行描述。由于生物化学模块的引入,新的陆面模式将陆面与大气之间的能量、水分和碳交换有机地结合在一起,进一步提升了模式的模拟能力。此后发布的陆面模式大多加入了同类功能的模块(Bonan, 1996a, 1996b; 陈海山和孙照渤, 2004, 2005)。

在综合当时已有陆面模式优点的基础上, Dai et al. (2003)发展了新一代通用陆面过程模式CoLM(Common Land Model)。而后, NCAR将其引入新一代气候系统模式中,进行了一定的改进并将其命名为CLM2.0(Community Land Model 2.0)。同

年,经过对地球生物物理部分参数化过程的改进和程序优化,CLM3.0版本正式发布(Oleson et al., 2004)。之后,NCAR在2007和2010年相继发布了CLM3.5和CLM4.0两个后续版本(Oleson et al., 2008, 2010)。

近年来,国内外学者利用该系列模式开展了大量研究。例如:杜川利等(2008)用NCEP/DOE R2大气强迫资料驱动CLM3.0,对中国区域的陆面过程进行了数值模拟,认为CLM3.0基本上可以反映站点观测土壤湿度的年际变化,但模式模拟的年际振幅较观测明显偏小。宋耀明等(2009a, 2009b)利用CLM3.0对长白山温带混交林和千烟洲热带人工针叶林两种典型生态系统的陆气相互作用进行了模拟,认为该模式能较好地模拟出观测站点地表能量和水分平衡的基本特征。陈海山等(2010)、熊明明等(2011)利用普林斯顿大学全球大气外强迫场资料驱动CLM3.0,分别对中国区域土壤温度、湿度进行了模拟和评估,认为模式总体上能模拟出中国地区多年平均土壤温度和湿度的空间分布,能较好地反映出中国地区土壤温度的年际变化,但对土壤湿度年际变化的模拟能力总体较差。Li and Ma (2010)利用4套不同的大气强迫资料驱动CLM3.5,对黄河流域的土壤湿度进行了模拟,认为模式不但能模拟出土壤湿度的季节和年际变化,而且能模拟出土壤湿度变化的长期趋势。Nicolsky et al. (2007)的工作则改进了CLM3.0对永久冻土层温度的模拟能力。Sakaguchi and Zeng (2009)在CLM3.5中引入了一种新的可变土壤阻抗处理方案。Bonan and Levis(2010)利用CLM4.0模拟了氮循环对全球碳收支的影响。

尽管利用CLM系列模式开展的研究工作已经很多,但是大多数研究主要针对单个模式的应用;尽管有少数研究通过单点模拟,分析了不同模式之间的差异,但这些模式在全球尺度上的差异具有什么样的特征?其空间分布的特征是什么?目前尚不清楚。与此同时,CLM系列陆面模式在物理过程上存在很大的差异,这些差异对模拟结果到底能够产生什么样的影响?回答上述问题,有助于提高我们对陆面模式关键物理过程的理解。本文旨在利用不同版本的CLM模式,在对全球陆面过程进行模拟的基础上,对比和分析CLM系列模式之间的结果差异,以此加深对陆面物理过程的认识,也为该系列模式的应用和改进提供一定的参考。

1 模式简介

本文所用陆面模式为美国国家大气研究中心

(NCAR)的公用陆面模式(Community Land Model),该系列模式是目前较具代表性的陆面模式,被广泛应用于陆面过程和全球气候的模拟研究。早期版本CLM3.0包括一个植被层、至多5个雪层、10个土壤层,可以对生物物理过程、生物化学过程和人文过程等进行模拟,另外还包含了动态植被模块供用户选择。

其后,NCAR发布了新一版的陆面模式CLM3.5(Oleson et al., 2008)。在该版本中,模式使用了新的基于MODIS资料的地表数据集(Lawrence and Chase, 2007),改进了模式中冠层对降水的拦截系数和冠层积分方案(Lawrence et al., 2007; Thornton and Zimmermann, 2007),采用了一个基于水文模型(TOP-MODEL)的模块来模拟表层和次表层径流(Niu et al., 2005),加入了一个简单的地下水模块以确定地下水埋深(Niu et al., 2007),并引入了新的冻土过程方案(Niu and Yang, 2006)。

2010年NCAR推出了全新的CLM4.0版本(Oleson et al., 2010)。与CLM3.5相比,它改进了水文参数化方案,增加了5层基岩层,使得土壤层数达到15层;此外,模式还引入了城市冠层模块,可用于研究城市化引起的相关效应;在模拟积雪时,考虑了气溶胶沉降对反照率的影响;更新了描述植被类型的地表数据集,在模式中增加了描述碳氮循环的模块(Lawrence et al., 2011)。

2 资料和方法

试验的驱动数据为普林斯顿大学1948—2006年3 h一次、 $1^\circ \times 1^\circ$ 空间分辨率的全球大气外强迫场资料。该驱动数据是基于NCEP/NCAR的再分析资料、气候研究中心(CRU)的逐月气候变量资料、全球降水气候计划(GPCP)的逐日降水资料、热带降水观测计划(TRMM)的降水资料以及美国国家航空航天管理局(NASA)的逐月地表辐射收支资料等基础数据发展而来的。该驱动数据集包括近地面2 m气温、风速、比湿、降水、近地面气压、大气向下长波辐射通量和太阳向下短波辐射通量等7个近地面气象要素(Sheffield et al., 2005)。地表数据资料分别来自各个版本模式自带的陆面特性参数数据集。本文利用3个版本的模式进行76 a的离线(off-line)模拟试验,其中前18 a为spin up期,利用1948年的强迫场资料反复驱动模式运行,这里选取1957—2006年的模拟结果进行分析。

由于模式输出的部分陆面变量的垂直分布并不均匀,因此本文在分析土壤温度和土壤湿度时,分别

选取模式输出结果的第三层(6.2 cm)和第七层(62 cm)来大致代表浅层土壤和深层土壤。同时选取1月和7月的结果来分别代表冬季和夏季的情况。重点分析3个版本模式对土壤温度、土壤湿度、地表感热、潜热和地表径流的气候态分布,以及不同陆面分量的季节变化的模拟结果的差异。

3 模拟结果分析

3.1 全球陆面变量气候态模拟的对比分析

图1给出了CLM系列模式模拟的最近50 a不同层次平均土壤温度的差值分布。与CLM4.0相比,CLM3.0、CLM3.5模拟的1月、7月浅层和深层

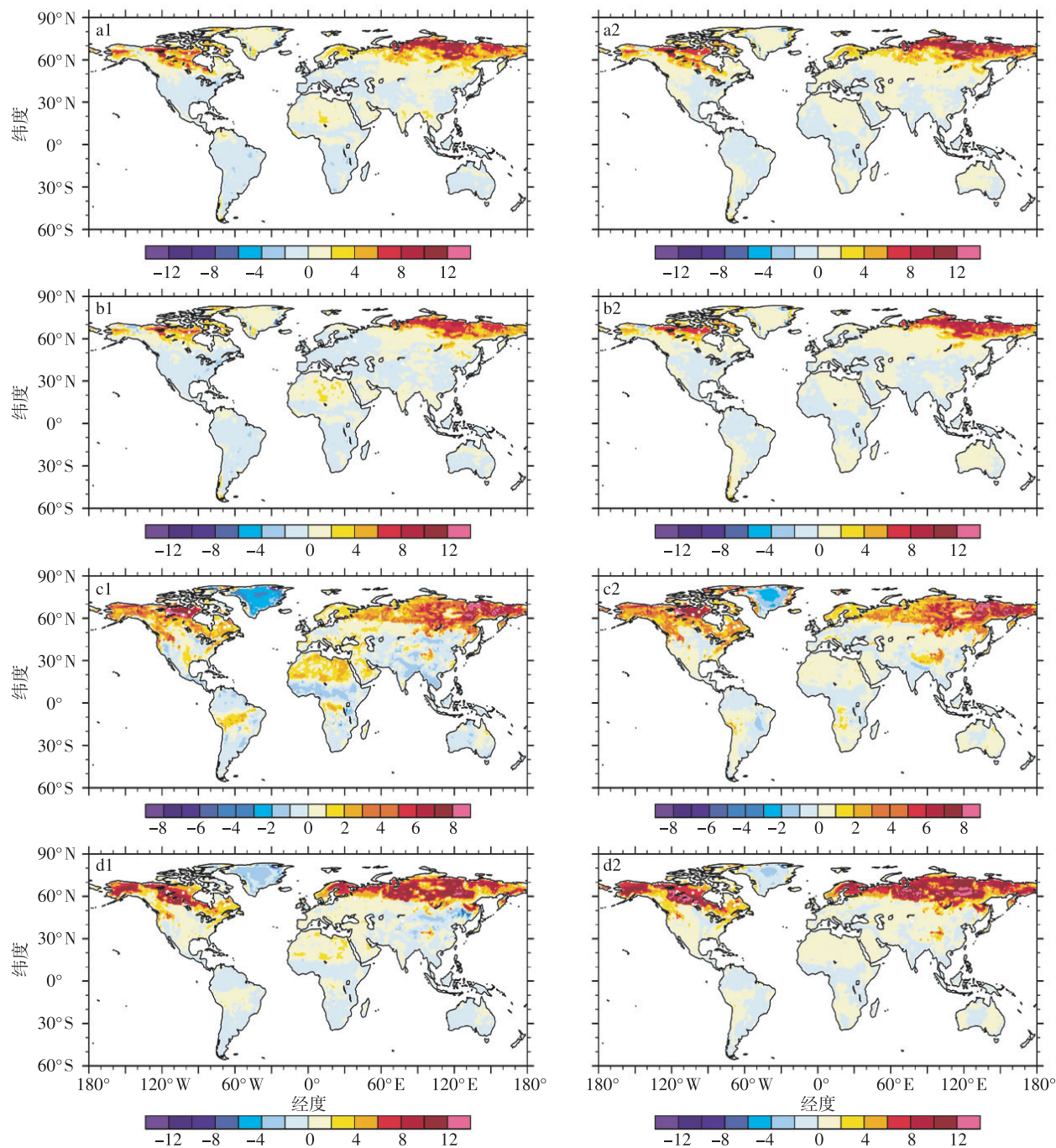


图1 CLM系列模式模拟的50 a(1957—2006年)平均浅层(a,b)和深层(c,d)土壤温度差值的空间分布(a,c,冬季;b,d,夏季;1代表CLM3.0与CLM4.0的差值,2代表CLM3.5与CLM4.0的差值;单位:℃)

Fig. 1 Distributions of difference in averaged soil temperature at (a,b) surface layer and (c,d) deep layer simulated by different versions of CLM during 1957—2006 (a, c, winter; b, d, summer; 1 represents CLM3.0 minus CLM4.0, and 2 means CLM3.5 minus CLM4.0; units: °C)

土壤温度的明显差异主要出现在北半球中高纬地区,二者的模拟值较 CLM4.0 明显偏高,最大暖偏差可达 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。总体而言,模拟的深层土壤温度的暖偏差明显大于浅层土壤温度的暖偏差,且暖偏差的范围明显扩大。Lawrence et al. (2011) 研究认为,CLM3.0 与 CLM3.5 在高纬地区的这种暖偏差

与观测结果并不一致,而 CLM4.0 则在一定程度上改进了该区域的模拟结果。

就土壤湿度而言,CLM3.0 与 CLM4.0 之间的差值较大(图 2)。与 CLM4.0 的结果相比,CLM3.0 模拟的 1 月、7 月的土壤湿度在北半球高纬地区均存在不同程度的偏湿,而在热带及中纬度

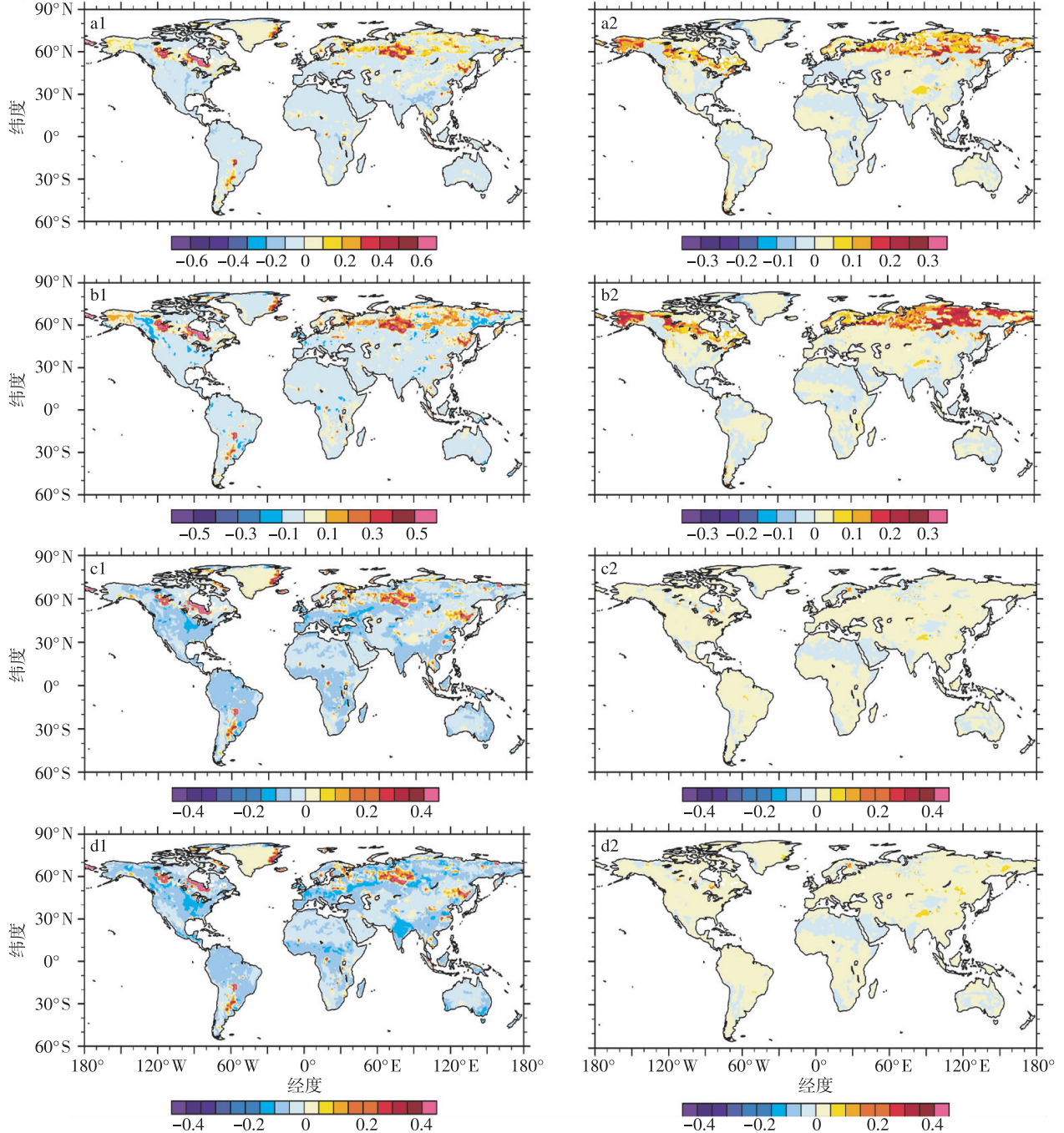


图 2 CLM 系列模式模拟的 50 a (1957—2006 年) 平均浅层(a,b)和深层(c,d)土壤体积含水量差值的空间分布(a,c,冬季;b,d,夏季;1 代表 CLM3.0 与 CLM4.0 的差值,2 代表 CLM3.5 与 CLM4.0 的差值;单位: mm^3/mm^3)

Fig. 2 Distributions of difference in averaged volumetric soil water content at (a,b) surface layer and (c,d) deep layer simulated by different versions of CLM during 1957—2006 (a,c, winter; b,d, summer; 1 represents CLM3.0 minus CLM4.0, and 2 means CLM3.5 minus CLM4.0; units: mm^3/mm^3)

地区则以偏干为主,尤其是对热带地区深层土壤湿度的模拟存在严重偏干的现象。相比之下,CLM3.5与CLM4.0之间的差别主要出现北半球高纬地区的浅层,CLM3.5模拟的1月、7月的浅层土壤湿度在北半球高纬地区也存在不同程度的偏湿现象;二者模拟的深层土壤湿度的差异总体较小。

3个模式模拟的潜热通量的主要差异出现在热带地区(图3a,b)。与CLM4.0相比,CLM3.0的模拟值总体较小,而CLM3.5的模拟值则偏大,模式间的潜热通量差值甚至可达 40 W/m^2 。冬季,模拟的潜热通量差值主要集中在热带地区;夏季,模拟的潜热通量在北半球中高纬地区存在较大差异。总体

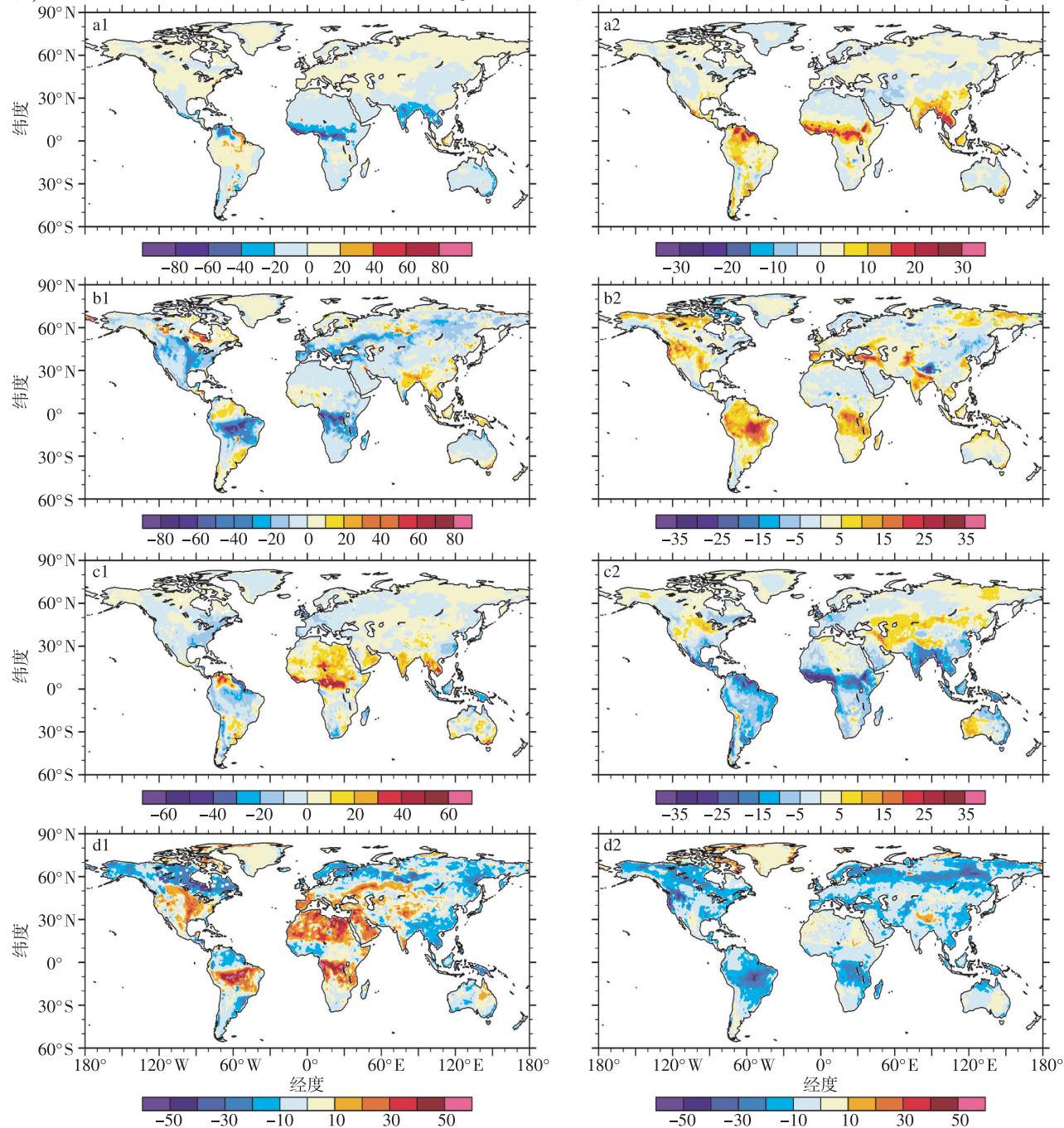


图3 CLM系列模式模拟的50 a(1957—2006年)地表潜热通量(a,b)和感热通量(c,d)差值的空间分布(a,c,冬季;b,d,夏季;1代表CLM3.0与CLM4.0的差值,2代表CLM3.5与CLM4.0的差值;单位: W/m^2)

Fig. 3 Distributions of difference in averaged (a,b) latent heat flux and (c,d) sensible heat flux simulated by different versions of CLM during 1957—2006(a,c, winter;b,d, summer; 1 represents CLM3.0 minus CLM4.0, and 2 means CLM3.5 minus CLM4.0; units: W/m^2)

而言, CLM3.0 的模拟值较 CLM4.0 偏小, 而 CLM3.5 的模拟值则较 CLM4.0 存在不同程度的偏高。模拟的感热通量差值(图 3c、d)在空间分布上与潜热通量的情况大致相反。冬季, 感热通量的差异主要出现在热带地区, 与 CLM4.0 相比, CLM3.0 模拟的感热通量总体偏大, 而 CLM3.5 的模拟值则存在不同程度的偏小。夏季, CLM3.0 的模拟值在热带、副热带地区较 CLM4.0 总体偏高, 北美高纬度地区及东亚大部分区域则有不同程度的偏低; 而 CLM3.5 的模拟结果在全球陆地均较 CLM4.0 存在不同程度的偏低。

图 4 是不同模式模拟的地表径流差值的空间分布。与 CLM4.0 相比, 无论在冬夏, CLM3.0 模拟的地表径流在南美的亚马逊、非洲中部的刚果盆地、澳大利亚北部等热带地区均明显偏大。CLM3.5 在一定程度上纠正了上述区域径流模拟值偏大的问题, 但其模拟的径流在热带区域较 CLM4.0 出现了偏小的现象。

3.2 不同区域陆面变量季节变化模拟的对比分析

由前面的分析可以看出, 模式间的结果存在很大的空间差异。为了分析模拟的陆面变量季节变化的差异, 选取了 5 个典型的代表区域, 即西伯利亚、北美北部、萨赫尔、亚马逊流域和东亚地区, 做进一

步的对比分析。

在西伯利亚地区(图 5), CLM3.0、CLM3.5 模拟的不同季节的表层土壤温度均较 CLM4.0 有不同程度的偏高, 尤其以冬、夏季的偏差最为明显; 而 CLM3.0、CLM3.5 模拟的深层土壤温度与 CLM4.0 的偏差主要出现在夏季, 总体偏高(偏差可达 5°C 以上), 其余季节偏差总体较小, 偏高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。与 CLM4.0 相比, CLM3.0、CLM3.5 模拟的表层土壤偏湿 5% 左右; CLM3.0 模拟的不同季节的深层土壤也存在不同程度偏湿; CLM3.5 模拟的深层土壤湿度主要表现为夏半年偏干、冬半年偏湿的特点。CLM3.0、CLM3.5 模拟的感热通量与 CLM4.0 的差异主要出现在夏季; 与 CLM4.0 相比, 其余两个模式模拟的感热通量总体偏小。CLM3.0、CLM3.5 模拟的潜热通量与 CLM4.0 的差异在冬季不明显, CLM3.0 模拟的春、秋季(夏季)潜热通量较 CLM4.0 略偏大(小), CLM3.5 模拟的潜热通量情况类似, 但差值较小。但我们也注意到, CLM3.0 模拟的冠层蒸腾潜热通量和土壤表面的蒸发潜热通量与 CLM4.0 的差异较大, 尤其在夏季。北美北部地区的模拟结果与西伯利亚地区的模拟结果基本类似(图 6)。

在萨赫尔地区(图 7), 3 个模式的土壤温度模

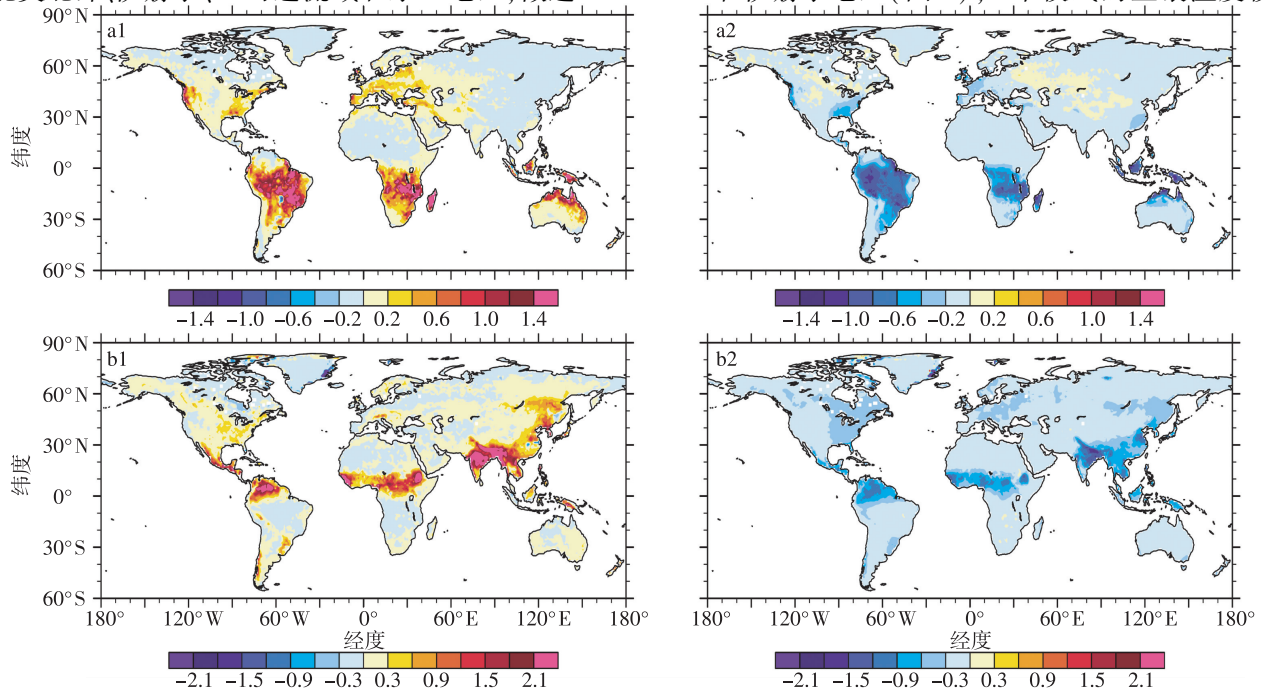


图 4 CLM 系列模式模拟的 50 a(1957—2006 年)平均地表径流差值的空间分布(a. 冬季; b. 夏季; 1 代表 CLM3.0 与 CLM4.0 的差值, 2 代表 CLM3.5 与 CLM4.0 的差值; 单位: mm/d)

Fig. 4 Distributions of difference in averaged surface runoff simulated by different versions of CLM during 1957—2006(a. winter; b. summer; 1 represents CLM3.0 minus CLM4.0, and 2 means CLM3.5 minus CLM4.0; units: mm/d)

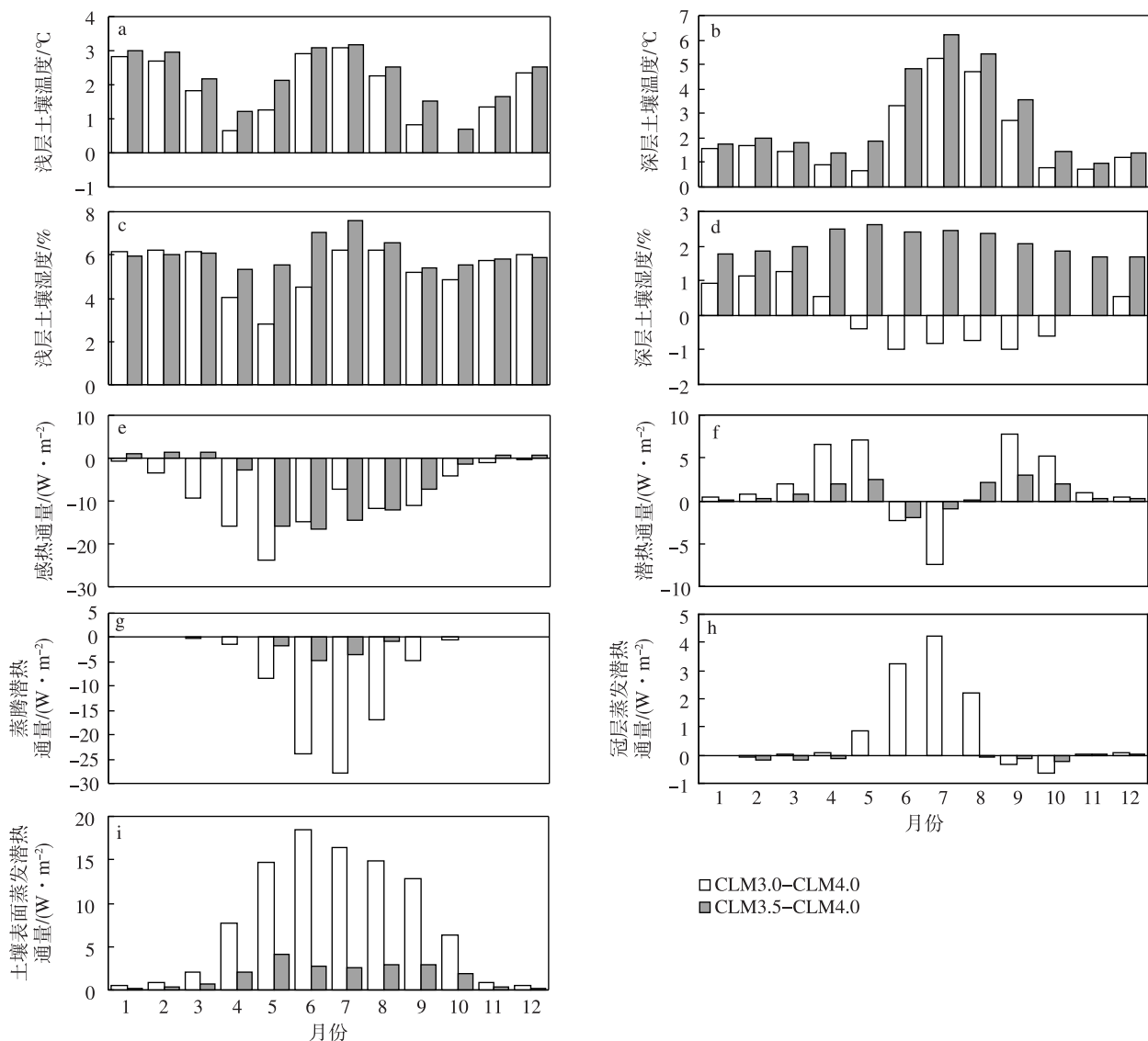


图 5 不同模式模拟的西伯利亚地区 (60 ~ 140°E, 51 ~ 66°N) 平均陆面变量差值的逐月变化 a. 浅层土壤温度 (°C); b. 深层土壤温度 (°C); c. 浅层土壤湿度 (%); d. 深层土壤湿度 (%); e. 感热通量 (W/m²); f. 潜热通量 (W/m²); g. 蒸腾潜热通量 (W/m²); h. 冠层蒸发潜热通量 (W/m²); i. 土壤表面蒸发潜热通量 (W/m²)

Fig. 5 Seasonal cycles of averaged differences of simulated land surface variables over the Siberia (51—66°N, 60—140°E) a. surface layer soil temperature (°C); b. deep layer soil temperature (°C); c. surface layer soil humidity (%); d. deep layer soil humidity (%); e. sensible heat flux (W/m²); f. latent heat flux (W/m²); g. latent heat flux of transpiration (W/m²); h. canopy latent heat flux of vaporization (W/m²); i. ground latent heat flux of vaporization (W/m²)

拟结果较为一致,偏差基本小于 1 °C。CLM3.0 模拟的不同季节的表层、深层土壤湿度与 CLM4.0 相比,均存在不同程度的偏干;而 CLM3.5 与 CLM4.0 的结果较为接近。对能量通量的模拟方面,CLM3.0 模拟的感热(潜热)通量在北半球冬季较 CLM4.0 明显偏大(偏小);而 CLM3.5 与 CLM4.0 的模拟结果较为接近,模拟的感热(潜热)通量在北半球冬季较 CLM4.0 略微偏小(偏大)。在对蒸散的模拟中,CLM3.0 的结果低估了蒸腾作用在蒸散

过程中的贡献,而对冠层蒸发所作的贡献估计过高 (Lawrence et al., 2007);而 CLM3.5 和 CLM4.0 则调整了冠层蒸腾和冠层蒸发在蒸散过程中所占的比例,模拟出了蒸腾作用的主导地位。两个模式模拟的地表蒸发较 CLM4.0 略偏高。

在亚马逊流域(图 8),3 个模式模拟的土壤温度差异不大。而对于土壤湿度,则是 CLM3.0 的模拟结果严重偏干,CLM3.5 和 CLM4.0 对此做出了改进,改善了模拟结果中土壤偏干的问题。在能量

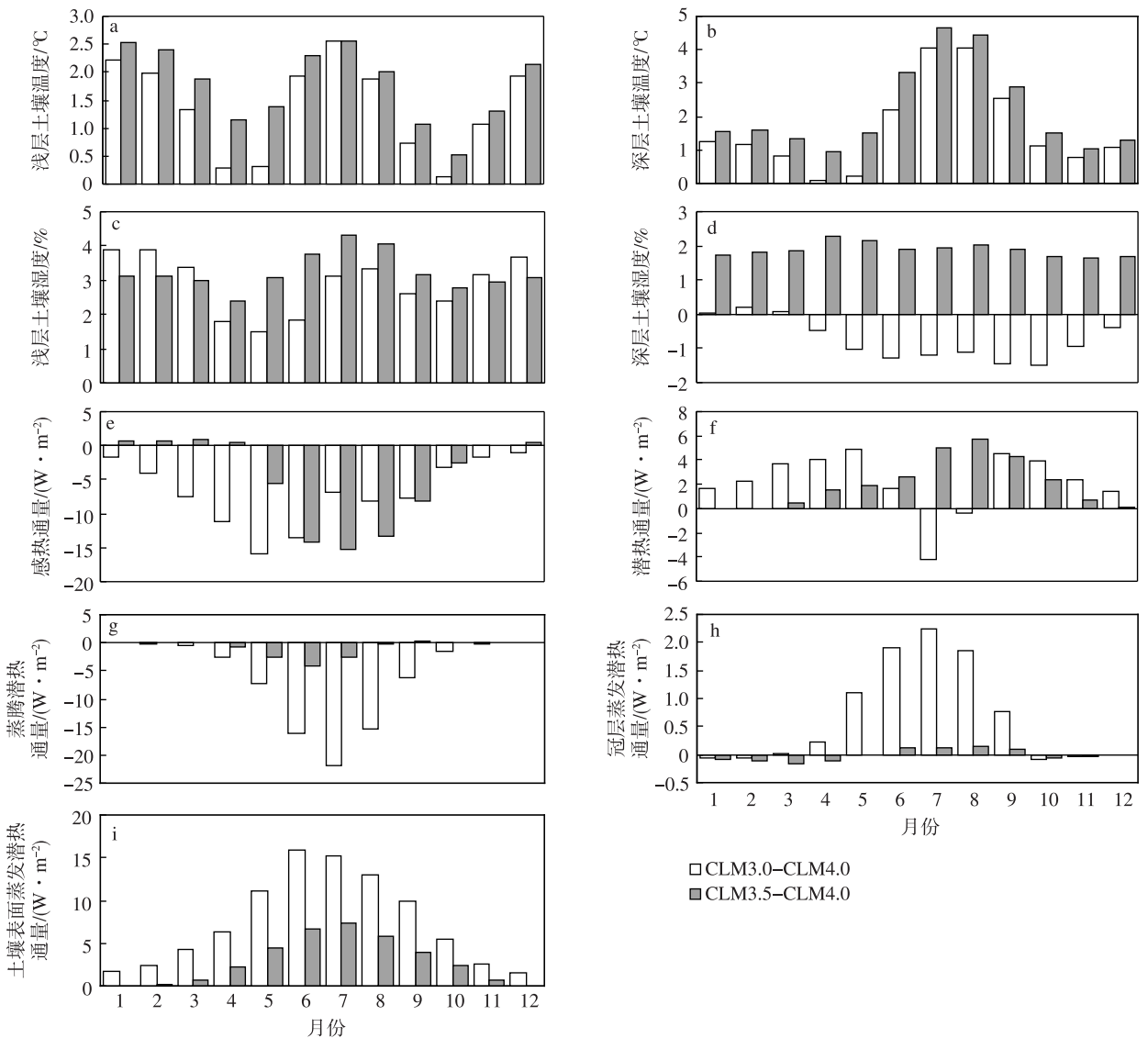


图 6 不同模式间模拟的北美北部地区(80~130°W,40~70°N)平均陆面变量差值的季节变化 a. 浅层土壤温度(°C); b. 深层土壤温度(°C);c. 浅层土壤湿度(%);d. 深层土壤湿度(%);e. 感热通量(W/m²);f. 潜热通量(W/m²);g. 蒸腾潜热通量(W/m²);h. 冠层蒸发潜热通量(W/m²);i. 土壤表面蒸发潜热通量(W/m²)

Fig. 6 Seasonal cycles of averaged differences of simulated land surface variables over the North America(80—130°W,40—70°N) a. surface layer soil temperature(°C);b. deep layer soil temperature(°C);c. surface layer soil humidity(%); d. deep layer soil humidity(%);e. sensible heat flux(W/m²);f. latent heat flux(W/m²);g. latent heat flux of transpiration(W/m²);h. canopy latent heat flux of vaporization(W/m²);i. ground latent heat flux of vaporization(W/m²)

通量模拟方面,CLM3.0 模拟的感热(潜热)通量较 CLM4.0 在 7—10 月期间偏大(小),在其余季节偏小(大);而 CLM3.5 模拟的感热(潜热)通量总体较 CLM4.0 略微偏小(大)。对于蒸散过程的模拟,CLM3.0 也存在明显低估蒸腾作用而高估冠层蒸发作用的问题,CLM3.5 和 CLM4.0 对此做出了修正。CLM3.0、CLM3.5 对该区域土壤表面蒸发的模拟较 CLM4.0 存在偏大的现象,尤其是 CLM3.0。

在东亚地区(图 9),3 个模式模拟的土壤温度

差异相对较小,但相对 CLM4.0 而言,CLM3.5 的模拟结果存在一定程度的偏高。CLM3.0 模拟的土壤湿度还是存在偏低问题,而 CLM3.5 则略偏高。CLM3.0、CLM3.5 模拟的感热和潜热通量较 CLM4.0 总体偏小。对于蒸腾的模拟,CLM3.0 的结果偏低约 6 W/m²,与前述两个区域一样,低估了蒸腾的作用。对于冠层蒸发,CLM3.0 在夏季则明显高于另外两个模式,最大高出了 10 W/m²。

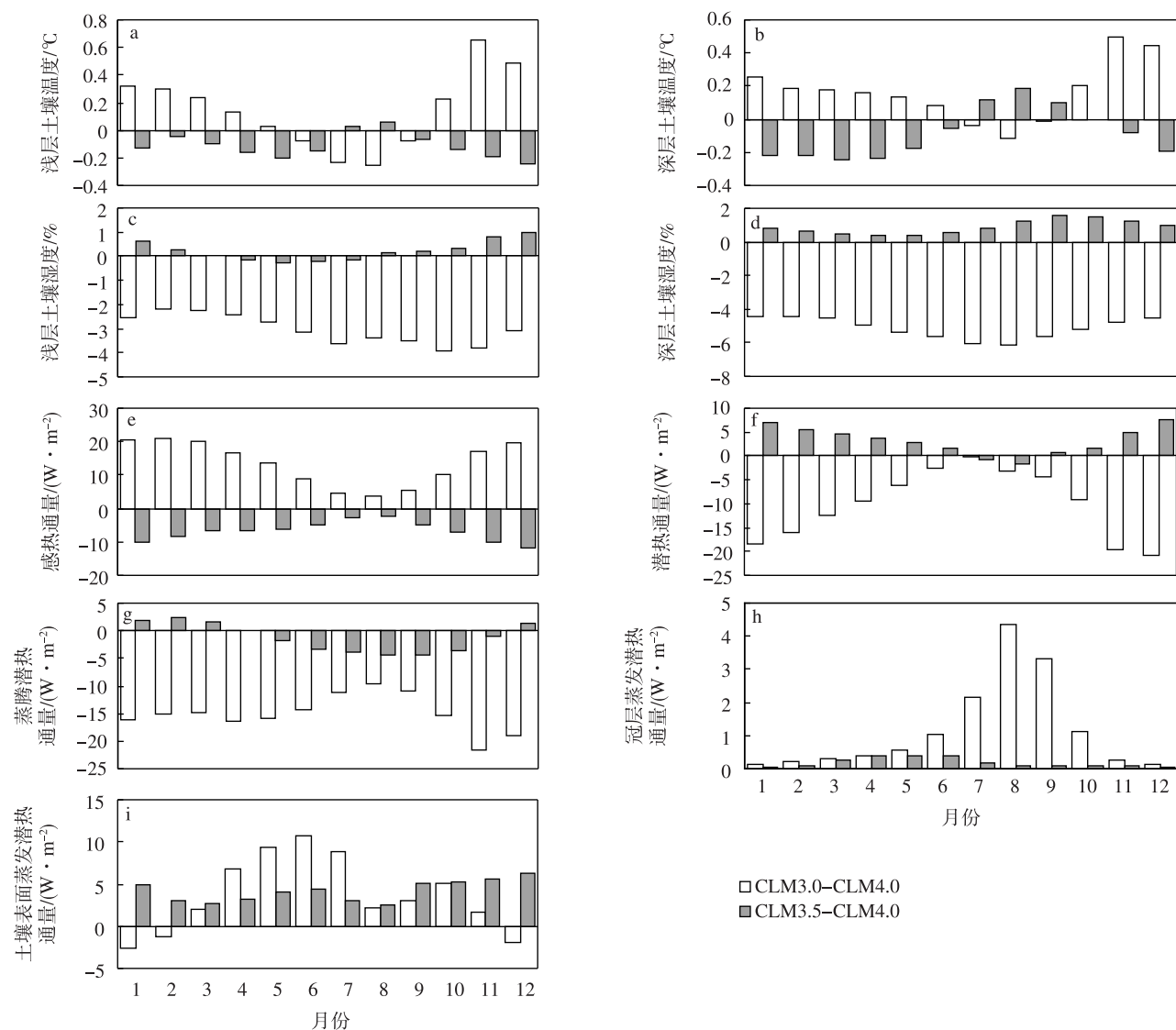


图7 不同模式间模拟的萨赫尔地区($0^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{E}$, $4\sim 19^{\circ}\text{N}$)平均陆面变量差值的季节变化 a. 浅层土壤温度($^{\circ}\text{C}$); b. 深层土壤温度($^{\circ}\text{C}$); c. 浅层土壤湿度(%); d. 深层土壤湿度(%); e. 感热通量(W/m^2); f. 潜热通量(W/m^2); g. 蒸腾潜热通量(W/m^2); h. 冠层蒸发潜热通量(W/m^2); i. 土壤表面蒸发潜热通量(W/m^2)

Fig. 7 Seasonal cycles of averaged differences of simulated land surface variables over the Sahel ($4\sim 19^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{E}$) a. surface layer soil temperature($^{\circ}\text{C}$); b. deep layer soil temperature($^{\circ}\text{C}$); c. surface layer soil humidity(%); d. deep layer soil humidity(%); e. sensible heat flux (W/m^2); f. latent heat flux (W/m^2); g. latent heat flux of transpiration (W/m^2); h. canopy latent heat flux of vaporization(W/m^2); i. ground latent heat flux of vaporization(W/m^2)

4 结论与讨论

采用普林斯顿大学 1948—2006 年的全球大气外强迫场资料,利用 CLM 系列模式对全球 1957—2006 年的陆面状况进行了 offline 模拟,初步对比了不同版本模式之间在全球范围内模拟结果的差异,并对比分析了不同地区陆面变量季节变化的模拟结果,得到以下结论:

1) CLM 系列模式模拟的土壤温度、湿度在全球

范围内存在一定差异。对于土壤温度的模拟,模式间的差异主要出现在北半球高纬度地区;与 CLM4.0 相比,CLM3.0 和 CLM3.5 模拟的 1 月、7 月浅层和深层土壤温度在北半球中高纬度存在明显的暖偏差。对于土壤湿度的模拟,CLM3.0 与 CLM4.0 之间的差值较大;与 CLM4.0 相比,CLM3.0 模拟的土壤湿度在北半球高纬地区均存在不同程度的偏湿,而在热带及中纬度地区则以偏干为主,尤其是对热带地区深层土壤湿度的模拟存在

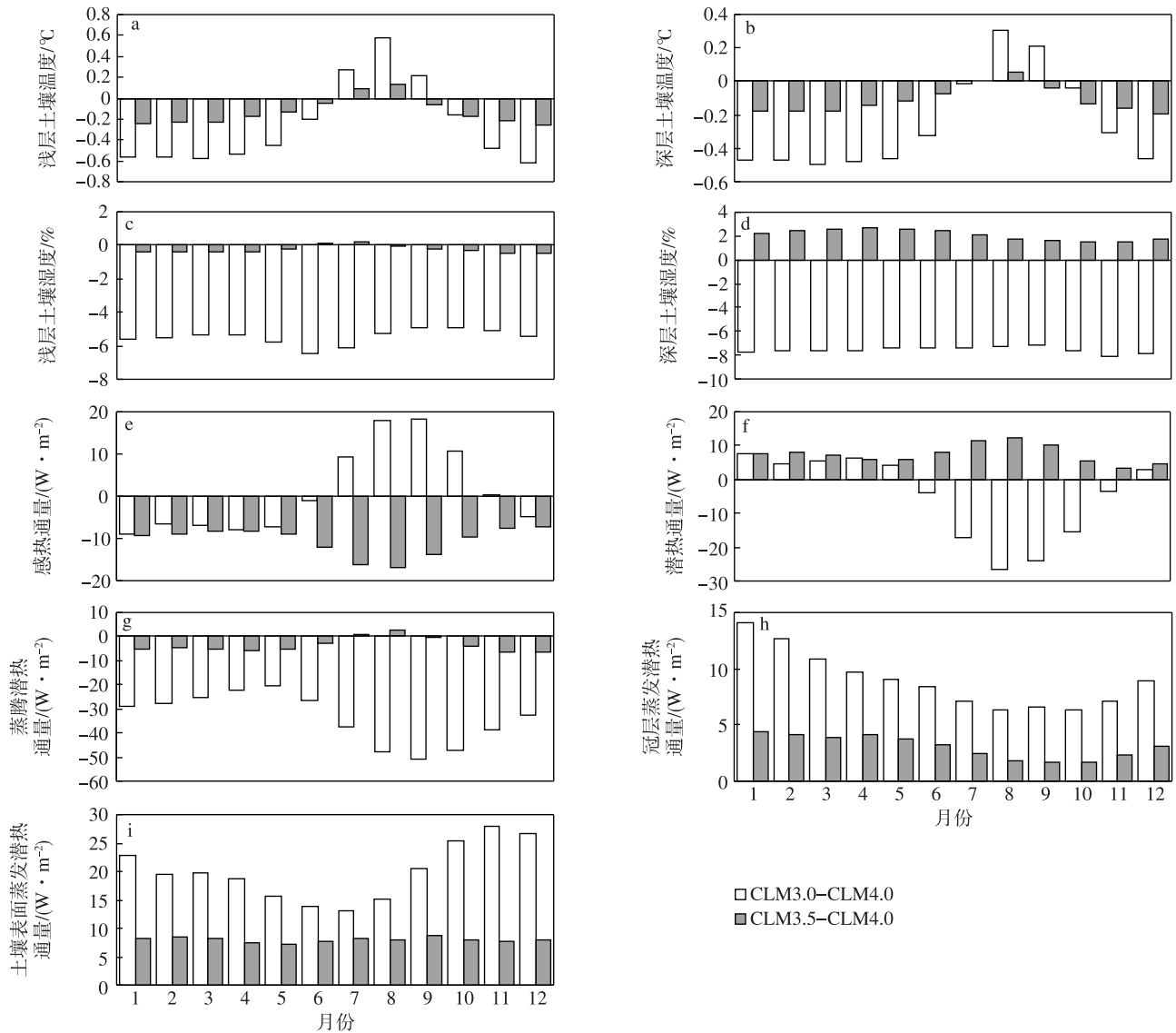


图 8 不同模式间模拟的亚马逊流域(53°~74°W, 14°S~5°N)平均陆面变量差值的季节变化 a. 浅层土壤温度(°C); b. 深层土壤温度(°C); c. 浅层土壤湿度(%); d. 深层土壤湿度(%); e. 感热通量(W/m²); f. 潜热通量(W/m²); g. 蒸腾潜热通量(W/m²); h. 冠层蒸发潜热通量(W/m²); i. 土壤表面蒸发潜热通量(W/m²)

Fig. 8 Seasonal cycles of averaged differences of simulated land surface variables over the Amazon Basin (14°S—5°N, 53—74°W) a. surface layer soil temperature(°C); b. deep layer soil temperature(°C); c. surface layer soil humidity(%); d. deep layer soil humidity(%); e. sensible heat flux(W/m²); f. latent heat flux(W/m²); g. latent heat flux of transpiration(W/m²); h. canopy latent heat flux of vaporization(W/m²); i. ground latent heat flux of vaporization(W/m²)

严重偏干的现象;相比之下,CLM3.5与CLM4.0之间的差别主要出现在北半球高纬地区的浅层,CLM3.5模拟的浅层土壤湿度存在不同程度的偏湿,而二者模拟的深层土壤湿度的差异较小。

2) CLM系列模式模拟的地表能量通量和地表水文变量也存在较明显的差异。对于潜热通量和感热通量的模拟,明显的差异主要出现在热带地区;与CLM4.0相比,CLM3.0模拟的潜热(感热)通量总体偏小(大),而CLM3.5模拟的潜热(感热)通量以

偏大(小)为主。对于地表径流的模拟,与CLM4.0相比,CLM3.0模拟的地表径流在南美的亚马逊、非洲中部的刚果盆地、澳大利亚北部等热带地区均明显偏大,而CLM3.5在一定程度上改善了上述区域径流模拟值偏大的问题,但模拟的径流在热带区域较CLM4.0出现了偏小的现象。

3) 模式模拟结果的差异具有明显的季节变化和区域性特点。但总体而言,CLM3.0对不同地区的土壤湿度和冠层蒸散的季节变化模拟都存在较大

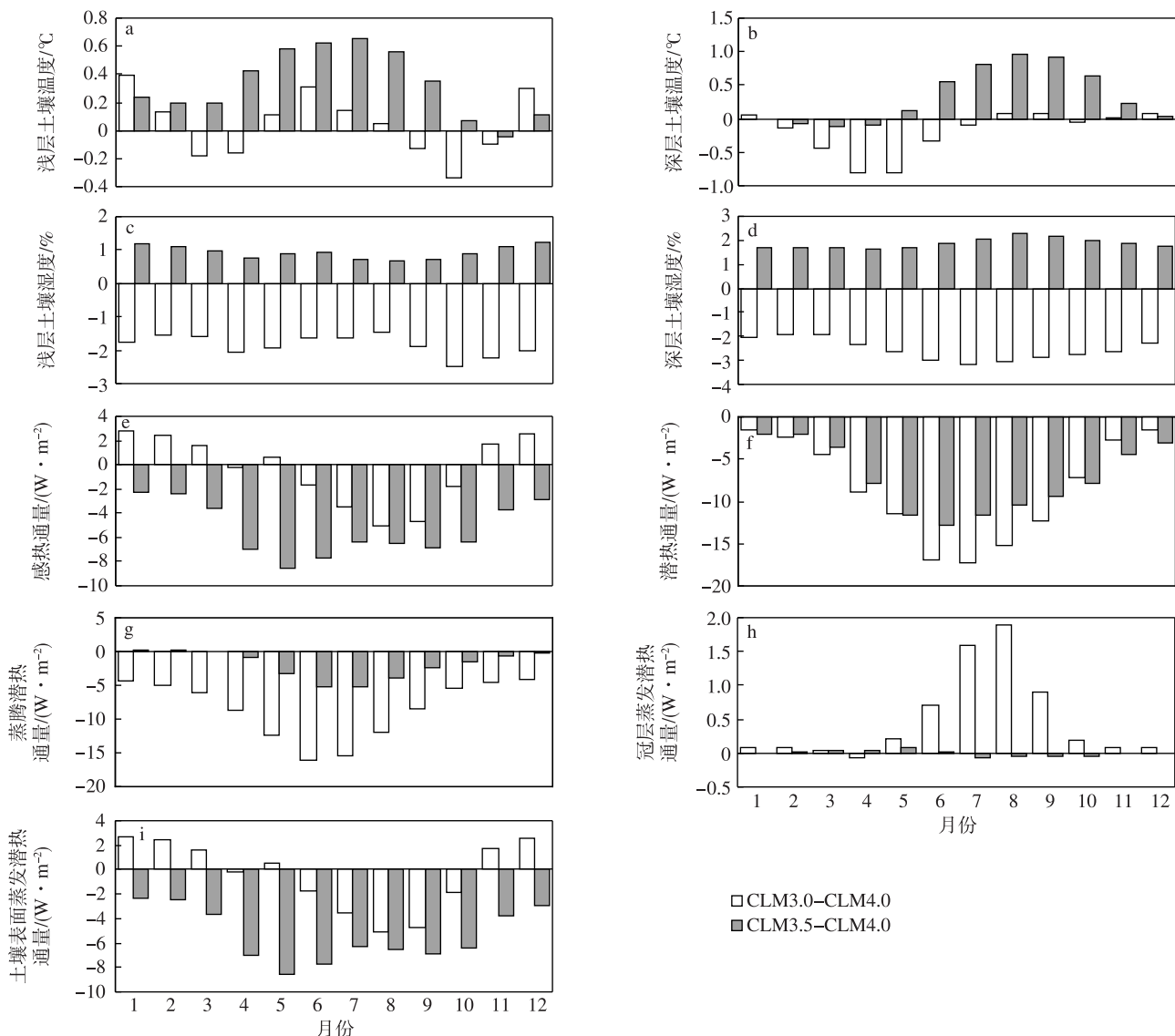


图9 不同模式间模拟的东亚区域(70~135°E,15~55°N)平均陆面变量差值的季节变化 a. 浅层土壤温度(°C);b. 深层土壤温度(°C);c. 浅层土壤湿度(%);d. 深层土壤湿度(%);e. 感热通量(W/m²);f. 潜热通量(W/m²);g. 蒸腾潜热通量(W/m²);h. 冠层蒸发潜热通量(W/m²);i. 土壤表面蒸发潜热通量(W/m²)

Fig. 9 Seasonal cycles of averaged differences of simulated land surface variables over East Asia (15—55°N,70—135°E) a. surface layer soil temperature(°C);b. deep layer soil temperature(°C);c. surface layer soil humidity(%);d. deep layer soil humidity(%);e. sensible heat flux(W/m²);f. latent heat flux(W/m²);g. latent heat flux of transpiration(W/m²);h. canopy latent heat flux of vaporization(W/m²);i. ground latent heat flux of vaporization(W/m²)

的偏差,其模拟的土壤湿度明显偏低,而对冠层蒸腾作用在冠层蒸散过程中所做的贡献估计不足;CLM3.5和CLM4.0对上述结果有了较明显的改进。对于其他陆面因子的季节变化而言,CLM3.0的模拟能力也存在一定程度的不足,而CLM3.5和CLM4.0的模拟结果则更为合理。

文章初步分析了NCAR不同版本模式对全球陆面变量模拟的差异,但由于不同版本模式间物理过程参数化存在较大的差异,对于不同版本模式的

物理过程参数化方案的差异到底能够产生什么样的影响,还有待进行更加详细的对比和分析,尤其需要借助大量的敏感性试验和高质量的陆面观测资料来开展相关的分析和评估工作。

参考文献:

- 陈海山,孙照渤.2002. 陆气相互作用及陆面模式的研究进展[J]. 南京气象学院学报,25(2):277-288.
陈海山,孙照渤.2004. 陆面模式 CLSM 的设计及性能检验 I:模式设计[J]. 大气科学,28(6):801-819.

- 陈海山,孙照渤. 2005. 陆面模式 CLSM 的设计及性能检验 II: 模式检验[J]. 大气科学, 29(2): 272-282.
- 陈海山,熊明明,沙文钰. 2010. CLM3.0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 I: 土壤温度[J]. 气象科学, 30(5): 621-630.
- 杜川利,刘晓东, Wu Wanli. 2008. CLM3 模拟的 1979—2003 年中国土壤湿度及其对全球变暖的可能响应[J]. 高原气象, 27(3): 463-473.
- 宋耀明,郭维栋,张耀存. 2009a. 陆面过程模式 CoLM 和 NCAR_CLM3.0 对中国典型森林生态系统陆气相互作用的模拟 I: 不同模式模拟结果的初步分析[J]. 气候与环境研究, 14(3): 229-242.
- 宋耀明,郭维栋,张耀存. 2009b. 陆面过程模式 CoLM 和 NCAR_CLM3.0 对中国典型森林生态系统陆气相互作用的模拟 II: 不同参数化方案对模拟结果的影响[J]. 气候与环境研究, 14(3): 243-257.
- 孙淑芬. 2005. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型[M]. 北京: 气象出版社.
- 熊明明,陈海山,俞森. 2011. CLM3.0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 II: 土壤湿度[J]. 气象科学, 31(1): 1-10.
- Bonan G B. 1996a. The NCAR land-surface model (LSM version 1.0) coupled to the NCAR Community Climate Model [R]//NCAR Technical Note NCAR/TN-429 + STR. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research.
- Bonan G B. 1996b. Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model[J]. J Geophys Res, 100(2): 2817-2831.
- Bonan G B, Levis S. 2010. Quantifying carbon-nitrogen feedbacks in the Community Land Model (CLM4) [J]. Geophys Res Lett, 37, L07401. doi: 10.1029/2010GL042430.
- Charney J G. 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 101(428): 193-202.
- Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model (CLM) [J]. Bull Amer Meteor Soc, 84(8): 1013-1023.
- Deardorff J W. 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation[J]. J Geophys Res, 83(4): 1889-1903.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. 1986. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model [R]//NCAR/TN-275 + STR. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research.
- Lawrence P J, Chase T N. 2007. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0) [J]. J Geophys Res, 112, G01023. doi: 10.1029/2006JG000168.
- Lawrence D M, Thornton P E, Oleson K W, et al. 2007. The partitioning of evapotranspiration into transpiration, soil evaporation, and canopy evaporation in a GCM: Impacts on land-atmosphere interaction [J]. J Hydrometeorology, 8(4): 862-880.
- Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. 2011. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model [J]. J Adv Model Earth Syst, 3, M03001. doi: 10.1029/2011MS000045.
- Li M X, Ma Z G. 2010. Comparisons of simulations of soil moisture variations in the Yellow River basin driven by various atmospheric forcing data sets[J]. Adv Atmos Sci, 27(6): 1289-1302.
- Manabe S. 1969. Climate and ocean circulation: I The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface[J]. Mon Wea Rev, 97(10): 739-774.
- Nicolosky D J, Romanovsky V E, Alexeev V A, et al. 2007. Improved modeling of permafrost dynamics in a GCM land-surface scheme [J]. Geophys Res Lett, 34, L08501. doi: 10.1029/2007GL029525.
- Niu G Y, Yang Z L. 2006. Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale[J]. J Hydrometeorology, 7(5): 937-952.
- Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E, et al. 2005. A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models [J]. J Geophys Res, 110, D21106. doi: 10.1029/2005JD006111.
- Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E, et al. 2007. Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data [J]. J Geophys Res, 112, D07103. doi: 10.1029/2006JD007522.
- Oleson K W, Dai Yongjiu, Bonan G B, et al. 2004. Technical description of the Community Land Model (CLM) [R]//NCAR/TN-461 + STR.
- Oleson K W, Niu G Y, Yang Z L, et al. 2008. Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle [J]. J Geophys Res, 113, G01021. doi: 10.1029/2007JG000563.
- Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. 2010. Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM) [R]//NCAR Technical Note NCAR/TN-478 + STR. Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research.
- Sakaguchi K, Zeng X B. 2009. Effects of soil wetness, plant litter, and under canopy atmospheric stability on ground evaporation in the Community Land Model (CLM3.5) [J]. J Geophys Res, 114, D01107. doi: 10.1029/2008JD010834.
- Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within GCMs [J]. J Atmos Sci, 43(6): 505-531.
- Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. 1996. A revised land-surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation [J]. J Climate, 9(4): 676-705.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2005. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. J Climate, 8: 3088-3111.
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate [J]. Science, 215(4539): 1498-1501.
- Thornton P E, Zimmermann N E. 2007. An improved canopy integration scheme for a land surface model with prognostic canopy structure [J]. J Climate, 20(15): 3902-3923.