

宋海清, 李云鹏, 师春香, 等. 2016. 内蒙古地区下垫面变化对土壤湿度数值模拟的影响 [J]. 大气科学, 40 (6): 1165–1181. Song Haiqing, Li Yunpeng, Shi Chunxiang, et al. 2016. Impact of underlying surface change on the numerical simulation of soil moisture in Inner Mongolia of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1165–1181, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1601.14289.

内蒙古地区下垫面变化对土壤湿度数值模拟的影响

宋海清¹ 李云鹏¹ 师春香² 于燕³ 孙小龙¹ 杨晓华¹ 吴昊⁴

¹ 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 呼和浩特 010051

² 国家气象信息中心, 北京 100081

³ 浙江省气象科学研究所, 杭州 310002

⁴ 呼伦贝尔市气象局, 内蒙古海拉尔 021008

摘 要 利用第二次全国土壤调查土壤质地数据 (SNSS) 和中国区域陆地覆盖资料 (CLCV) 将陆面过程模式 CLM3.5 (Community Land Model version 3.5) 中基于联合国粮食农业组织发展的土壤质地数据 (FAO) 和 MODIS 卫星反演的陆地覆盖数据 (MODIS) 进行了替换, 使用中国气象局陆面数据同化系统 (CMA Land Data Assimilation System, CLDAS) 大气强迫场资料, 分别驱动基于同时改进土壤质地和陆地覆盖数据的 CLM3.5 (CLM-new)、基于只改进陆地覆盖数据的 CLM3.5 (CLM-clcv)、基于只改进土壤质地数据的 CLM3.5 (CLM-snss) 和基于原始下垫面数据的 CLM3.5 (CLM-ctl), 对内蒙古地区 2011~2013 年土壤湿度的时空变化进行模拟试验, 研究下垫面改进对 CLM3.5 模拟土壤湿度的影响。将四组模拟结果与 46 个土壤水分站点观测数据进行对比分析, 结果表明: 相对于控制试验, CLM-clcv、CLM-snss 和 CLM-new 都能不同程度地改进土壤湿度模拟, 其中 CLM-clcv 主要在呼伦贝尔改进明显, CLM-snss 则在除呼伦贝尔以外的大部地区改进显著, CLM-ctl 模拟的土壤湿度在各层上均系统性偏大, 而 CLM-new 模拟土壤湿度最好地反映出内蒙古地区观测的土壤湿度的时空变化特征, 显著改善了土壤湿度的模拟, 体现在与观测值有着更高的相关系数和更小的平均偏差与均方根误差。

关键词 CLDAS (CMA Land Data Assimilation System) CLM3.5 (Community Land Model version 3.5) 土壤湿度 下垫面 内蒙古地区

文章编号 1006-9895(2016)06-1165-18

中图分类号 P461.4

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1601.14289

Impact of Underlying Surface Change on the Numerical Simulation of Soil Moisture in Inner Mongolia of China

SONG Haiqing¹, LI Yunpeng¹, SHI Chunxiang², YU Yan³, SUN Xiaolong¹, YANG Xiaohua¹, WU Hao⁴

¹ Ecological and Agricultural Meteorology Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051

² National Meteorological Information Center, Beijing 100081

³ Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310002

⁴ The Weather Bureau of Hulunbuir City, Hailar, Inner Mongolia Autonomous Region 021008

收稿日期 2014-10-13; 网络预出版日期 2016-01-29

作者简介 宋海清, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事陆面数据同化研究。E-mail: haiqingsong2010@163.com

通讯作者 李云鹏, 男, 研究员, E-mail: lyp5230@163.com

资助项目 内蒙古自治区气象局科技创新项目 nmqkjc201406、nmqkjc201602, 内蒙古自治区气象局青年基金项目 nmqnx201603, 国家公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306022、GYHY201306045, GYHY201506016, 国家自然科学基金项目 91437220

Funded by The Scientific and Technological Innovation Project of the Inner Mongolia Meteorological Bureau (Grants nmqkjc201406, nmqkjc201602), Youth Foundation of the Inner Mongolia Meteorological Bureau (Grant nmqnx201603), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grants GYHY201306022, GYHY201306045, GYHY201506016), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 91437220)

Abstract The Community Land Model version 3.5 (CLM3.5) is used to investigate the impact of underlying surface change on soil moisture (SM) simulation over Inner Mongolia. The model is driven by CLDAS (the atmospheric forcing data of CMA Land Data Assimilation System) outputs for the period of 2011 to 2013. Four 3-year (2011–2013) experiments with different surface information, i.e. the soil texture dataset from the Second National Soil Survey on China (SNSS) and CLCV (Chinese land cover derived from vegetation map) (CLM-new), the dataset from FAO and CLCV (CLM-clcv), the dataset from SNSS and the MODIS (CLM-snss), and the dataset from FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations) and MODIS (CLM-ctl), are conducted. Results of SM simulations from the four experiments are compared to in-situ measurements of soil moisture collected at 46 stations. It is found that the observed temporal variations of SM can be better simulated in all the three experiments (CLM-new, CLM-snss, and CLM-clcv) compared to that in the control experiment (CLM-ctl). Major improvements are found over Hulunbuir in the CLM-clcv simulation, while improvements over large areas except Hulunbuir have been found in the CLM-snss simulation. Systematic overestimation of soil moisture at each soil layer is found in the CLM-ctl simulation. Among the four experiments, the CLM-new performs best and can well reproduce the spatial-temporal patterns of soil moisture in Inner Mongolia. The high correlation coefficient between the CLM-new simulation and observations and small bias and root mean square error indicate that this experiment can well simulate soil moisture in Inner Mongolia.

Keywords CLDAS (CMA Land Data Assimilation System), CLM3.5 (Community Land Model version 3.5), Soil moisture, Underlying surface, Inner Mongolia area

1 引言

土壤湿度是陆地—大气相互作用过程中十分重要的地球物理参数之一，它主要通过影响陆—气之间的水循环和陆地能量平衡来影响近地层大气状态，进而对气候产生影响。林朝晖等（2008）研究指出，土壤湿度的异常会致使地表反照率、地表蒸发和植被长势的改变，从而影响陆地表面向大气输送的潜热、感热和辐射。研究表明：在全球尺度上，土壤湿度在气候变化中的作用仅次于海表温度（SST），在陆地上的作用甚至超过了 SST（US National Research Council, 1994; Chahine, 1992）。Chang and Wetzel（1991）研究认为，土壤湿度和植被的变化改变了表面大气的斜压结构导致对流风暴的形成。Ferranti and Viterbo（2006）指出，精确的土壤湿度预报可以提高中小尺度数值天气预报的准确性。Chen and Dudhia（2001）研究表明，土壤湿度初始场的准确性对中尺度模式极为重要。故如何精确地估算土壤湿度对数值天气预报以及短期气候预测的改善有着十分重要的研究意义与应用价值（郭维栋等，2007），同时也对农业、林业干旱监测预警和国民经济发展有着重要的实用价值。

土壤质地是影响土壤水文学参数的重要土壤物理性质之一，它不但影响水力传导率和饱和土壤含水量，还会影响土壤热容和导热率等土壤热力学参量。Clapp and Hornberger（1978）研究表明土壤

水分转换系数与土壤质地相关。梁晓和戴永久（2008）研究发现，陆面水文过程对土壤质地敏感。Oleson et al.（2010）指出土壤质地影响陆面模式中的土壤湿度、土壤渗透和蒸散发等。吴龙刚等（2014）使用 Shanguan et al.（2012, 2013）根据第二次中国土壤调查数据发展的高分辨率的中国区域土壤质地数据集替换 CLM3.5（Community Land Model version 3.5）自带土壤质地数据，在中国区域进行土壤质地对陆面过程的敏感性试验，结果表明：土壤质地对土壤水文学变量的影响较大，尤其是土壤湿度、土壤渗透和总径流；并且基于新土壤质地模拟的土壤湿度更加趋近观测值。同时指出，在北方干旱和半干旱地区，土壤质地对模式模拟土壤渗透和径流较为敏感，主要因其改进的土壤质地含砂土比例大于模式自带土壤质地，这导致了饱和土壤含水量小，饱和水力传导率大，在降水不变的前提下，径流和土壤渗透相应的增大。陆地覆盖通过地表反照率而影响陆—气之间的能量平衡和水循环。早在上世纪 80 年代，科学家们就认识到陆地覆盖类型对气候的影响，并在一系列的陆面模式中考虑了植被在陆地水循环和能量循环中的作用（Dickinson et al., 1986, 2006; Xue et al., 1991; Dai and Zeng et al., 1997; Dai et al., 2003; Oleson et al., 2004）。Benitez et al.（2004）在模式模拟中使用了不同的陆地覆盖数据，研究表明模式模拟结果间的差别最大可达 45%；Twine et al.（2004）研究发现陆地覆盖由森林改为农田后年平均蒸散减小、径

流增大。陈锋和谢正辉(2009)基于中国 1:100 万植被图和马里兰大学 AVHRR 森林覆盖数据发展了一套中国区域陆地覆盖资料(Chinese land cover derived from vegetation map, CLCV),并用于陆面模式模拟研究,数值结果表明:地表覆盖变化对中国区域蒸散、地表反照率、感热和径流等具有一定的影响。以上研究表明,下垫面中的土壤质地和陆面覆盖是影响陆面过程模拟结果的重要因素。

内蒙古地区自东向西分为半湿润区、半干旱区和干旱区,年平均降水量在 50~500 mm,东部地区处于温带季风气候和温带大陆性气候的过渡地带,东部大部地区年均降水量超过 300 mm,西部地区是我国西北干旱区的重要组成部分,位于干旱区的东部,阿拉善盟中西部降水最少,年降水量不足 100 mm,部分地区不足 50 mm,中部地区是半干旱、干旱区的气候过渡区,中部大部地区年降水量在 100~300 mm。气温年较差大,全区变化在 32°C~47°C 之间。研究显示内蒙古地区也是陆—气相互作用较强区域之一(Koster et al., 2004)。内蒙古是我国北方最重要的生态防线,拥有全国面积最大的草原和林区,对下垫面变化较为敏感(于燕和谢正辉, 2012)。近年来,受全球气候变化的影响,内蒙古地区天气灾害和农牧业气象灾害频发。本文利用以第二次土壤调查数据为基础的土壤质地数据和 CLCV 资料替换陆面过程模式 CLM3.5 相应的下垫面数据,使用国家气象信息中心师春香(Shi et al., 2011)发展的高质量近实时高时空分辨率 CLDAS 大气驱动场(2011~2013 年),对内蒙古地区土壤湿度的时空变化进行模拟,并与台站观测土壤湿度进行对比验证,以评估 CLM3.5 模拟土壤湿度在内蒙古地区的适用性和下垫面改进对 CLM3.5 模拟土壤湿度的影响,这对于全区农牧业旱涝监测有着重要意义与实用价值,同时也为进一步改善陆面模式的地球物理过程提供依据。

2 模式和数据介绍

2.1 CLM3.5 简介

公用陆面模式(Community Land Model, CLM)是当今国际上发展最为完善的陆面过程模式之一。它是公用气候系统模式(Community Climate System Model, CCSM)的陆面模块,是由多家科研单位合作在 CoLM(Common Land Model, CoLM)和 NCAR LSM(NCAR Land Surface Model, NCAR LSM)等

的基础上发展而来。它借鉴吸收了生物圈—大气圈传输方案陆面模式 BATS(Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, BATS)(Dickinson et al., 1993)、中国科学院大气物理研究所陆面模式 IAP94(Land surface model which was established at the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences in 1994, IAP94)(Dai and Zeng, 1997)和 NCAR LSM(Bonan, 1996)的优点发展的第三代陆面过程模式(Oleson et al., 2004)。大量研究对陆面参数和水文过程进行改善(Niu et al., 2005, 2006, 2007),并更新了基于 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)资料的下垫面数据集(Lawrence and Chase, 2007)以及冠层截留方案(Lawrence et al., 2007)的改进。由此发展成为 CLM3.5(Oleson et al., 2007; available at <http://www.cgd.ucar.edu/tss/clm/distribution/clm3.5/index.html>)。大量“离线”(offline)试验结果表明:与观测的径流、土壤湿度以及总水储量相比,CLM3.5 在全球蒸散发的分配上有了显著改善,并使得模拟的土壤湿度更湿,植被水压更小,植被蒸腾作用和光合作用增强,总陆地水储量年际变化的改良,径流年际变化的相位和振幅也有改善(Oleson et al., 2004, 2008; 马倩, 2011; 朱司光, 2012; 刘建国, 2013)。

2.2 土壤质地数据集和 CLCV 陆地覆盖数据

CLM3.5 自带的土壤质地数据是联合国粮农组织(FAO)(FAO et al., 2009)发展的 1:10 万全球土壤质地数据,在中国区域由 61 个土壤剖面插值得到,无法较好代表中国区域的土壤质地空间特征;其陆地覆盖资料是 Lawrence and Chase(2007)基于 2000 年 11 月至 2001 年 12 月 MODIS 极轨卫星遥感监测数据发展的地表数据集,陈锋和谢正辉(2009)研究显示,该陆地覆盖资料与观测陆地覆盖资料有一定差别。本文使用的土壤质地数据是以第二次土壤数据调查(1979~1985 年)为基础,空间分辨率为 30"。该调查数据包含 8979 个土壤单元,垂直空间上分为八层(0~2.296 m)。为了基于该调查数据构建可以用于 CLM3.5 模式运行的土壤质地数据,首先将该数据插值成垂向 10 层、空间分辨率为 $0.0625^\circ \times 0.0625^\circ$,其次将该数据替换相应的土壤质地数据(Shangguan et al., 2012, 2013; 吴龙刚等, 2014)。CLCV 陆地覆盖资料是陈锋和谢正辉(2009)基于中国 1:100 万植被图和马里兰大学 AVHRR 森林覆盖资料(Defries et al., 2000)发展的

一套中国区域陆地覆盖数据。

图 1 为内蒙古地区第二次全国土壤调查土壤质地 (the Second National Soil Survey on China, SNSS) 数据和 FAO 资料的砂土和粘土在 0~30 cm 层和

30~100 cm 层的分布。可以看出, 两层土壤质地空间分布比较一致。土壤质地出现较大差异的地区主要分布在内蒙古西部荒漠戈壁地区、毛乌素沙地、浑善达克沙地、科尔沁沙地和呼伦贝尔沙地一带,

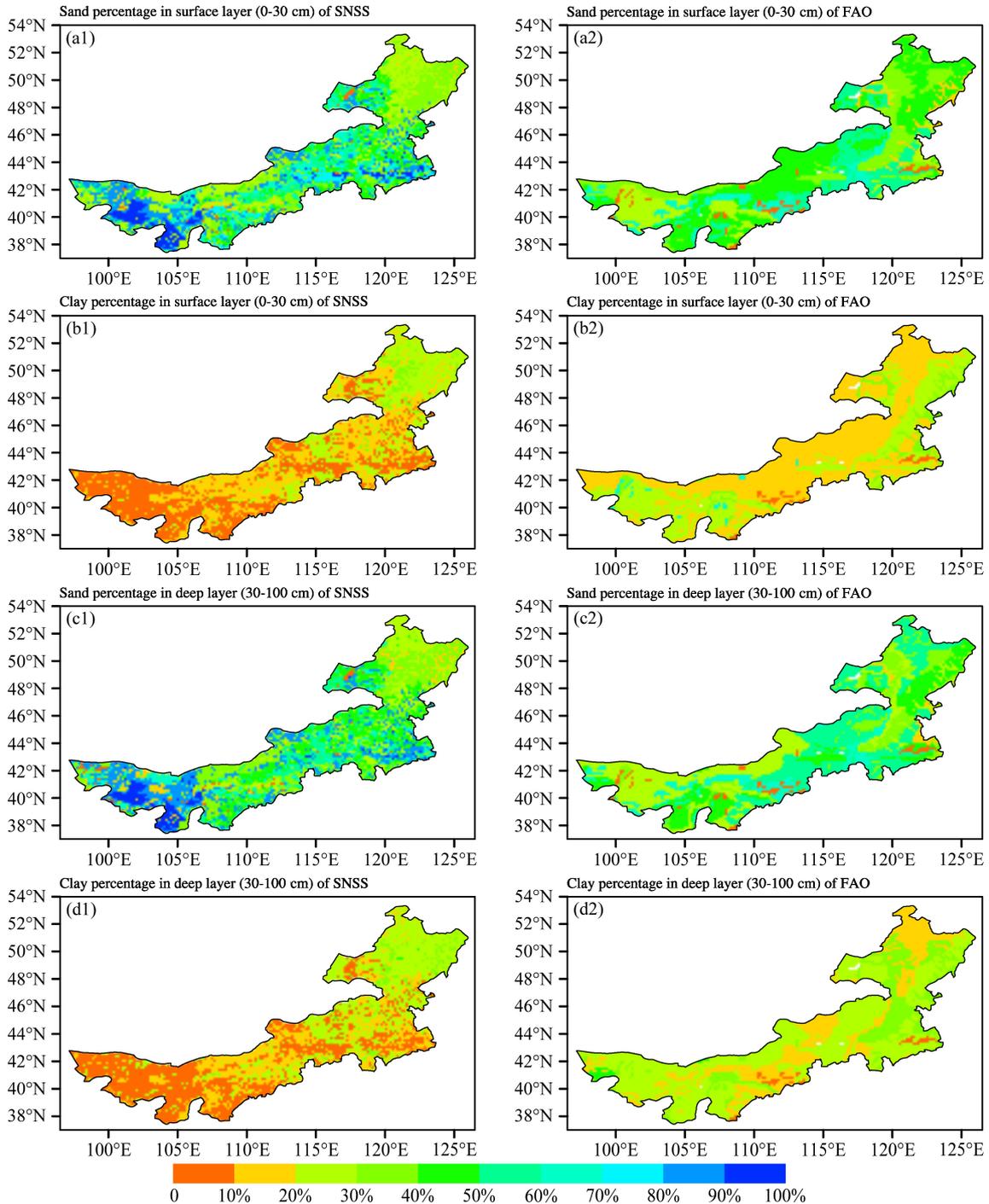


图 1 SNSS 和 FAO 土壤质地数据在内蒙古地区的分布: (a1、a2) 0~30 cm 层砂土百分比; (b1、b2) 0~30 cm 层粘土百分比; (c1、c2) 30~100 cm 层砂土百分比; (d1、d2) 30~100 cm 层粘土百分比

Fig. 1 Distributions of soil texture in Inner Mongolia based on SNSS (the Second National Soil Survey on China) and FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations): (a1, a2) Sand percentage in 0–30 cm layer; (b1, b2) clay percentage in 0–30 cm layer; (c1, c2) sand percentage in 30–100 cm layer; (d1, d2) clay percentage in 30–100 cm layer

这些地区的植被退化和荒漠化导致了砂土含量较高(图 1a1、c1), 粘土含量较低(图 1b1、d1); FAO 资料则无法精确反映出呼伦贝尔西部、通辽市和赤峰市中部、锡林郭勒盟北部和阿拉善盟大部的土地沙化, 在这些地区, 砂土含量差别较大, 数值明显低于 SNSS。

图 2 为 MODIS 资料与 CLCV 资料主要陆地覆盖在内蒙古地区的分布。CLCV 资料相对于 CLM 所用的 MODIS 陆地覆盖数据有一定差别, 特别是裸土、温带落叶灌木及 C₃ 草(经 C-3 卡尔文循环途

径固定二氧化碳的草) 差别最大。内蒙古中东部地区裸土差别较为显著, CLCV 资料裸土面积比例明显低于 MODIS 资料; CLCV 中针叶林的分布与 MODIS 资料基本相当, 差异主要出现在大兴安岭中南部一带; CLCV 中阔叶林面积较 MODIS 偏大, 在呼伦贝尔中部和东部、兴安盟和通辽东南部差别明显; CLCV 中灌木空间分布与 MODIS 个别地区差别较大, MODIS 中灌木主要分布在呼伦贝尔市中部和东部以及鄂尔多斯南部, 而 CLCV 中灌木主要分布在兴安盟西南部、通辽市北部、赤峰市西北

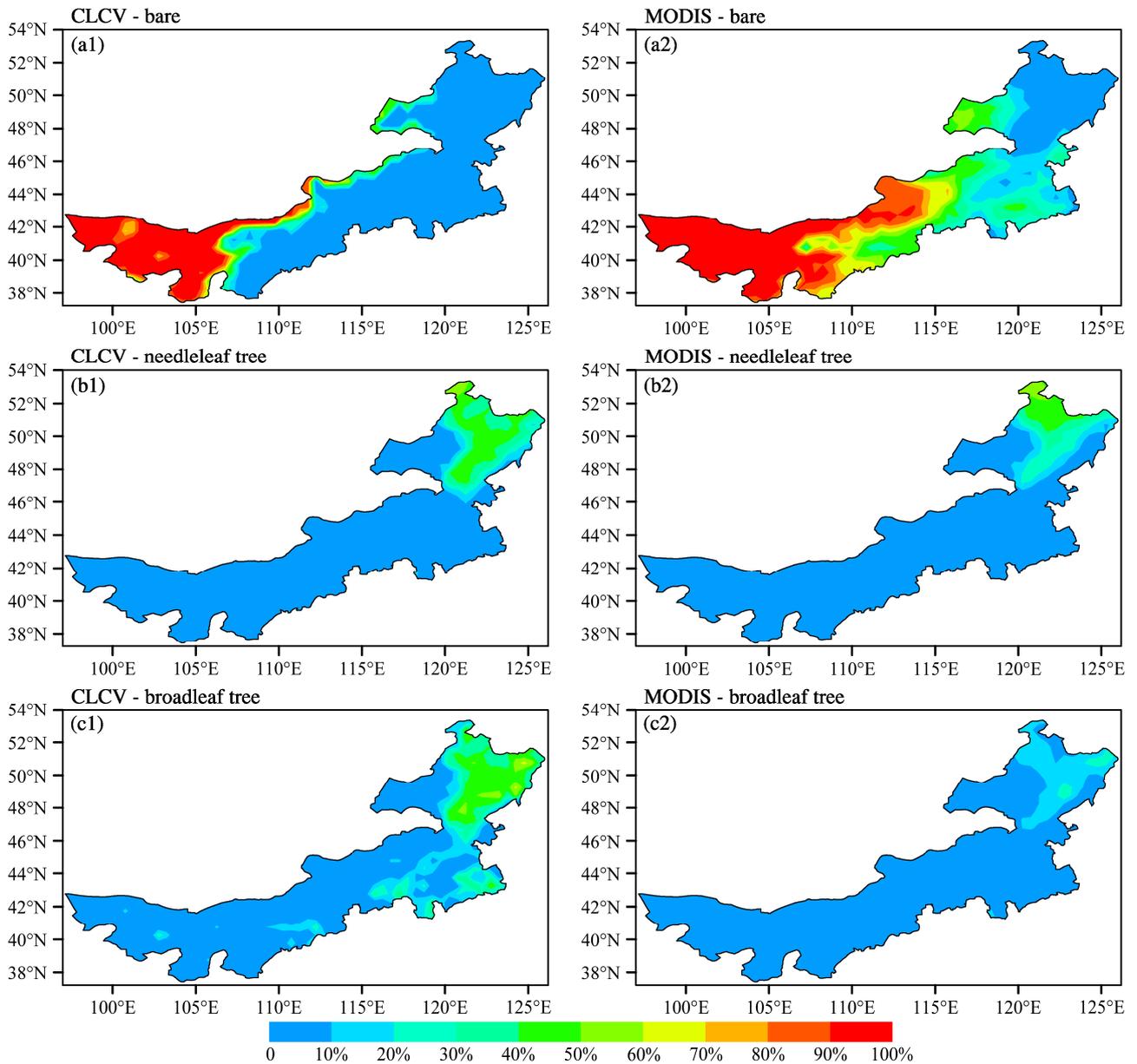


图 2 内蒙古地区 CLCV 资料和 MODIS 资料各 CLM 植物功能型覆盖度百分比: (a1、a2) 裸土; (b1、b2) 温带常绿针叶树; (c1、c2) 温带常绿阔叶树; (d1、d2) 温带常绿阔叶/温带落叶阔叶灌木; (e1、e2) C₃ 草; (f1、f2) 农作物
 Fig. 2 Distributions of the percentage of CLM plant functional types (PFTs) cover for CLCV data and MODIS data in Inner Mongolia. (a1, a2) Bare soil; (b1, b2) needleleaf tree; (c1, c2) broadleaf tree; (d1, d2) shrub; (e1, e2) C₃ grass; (f1, f2) crop

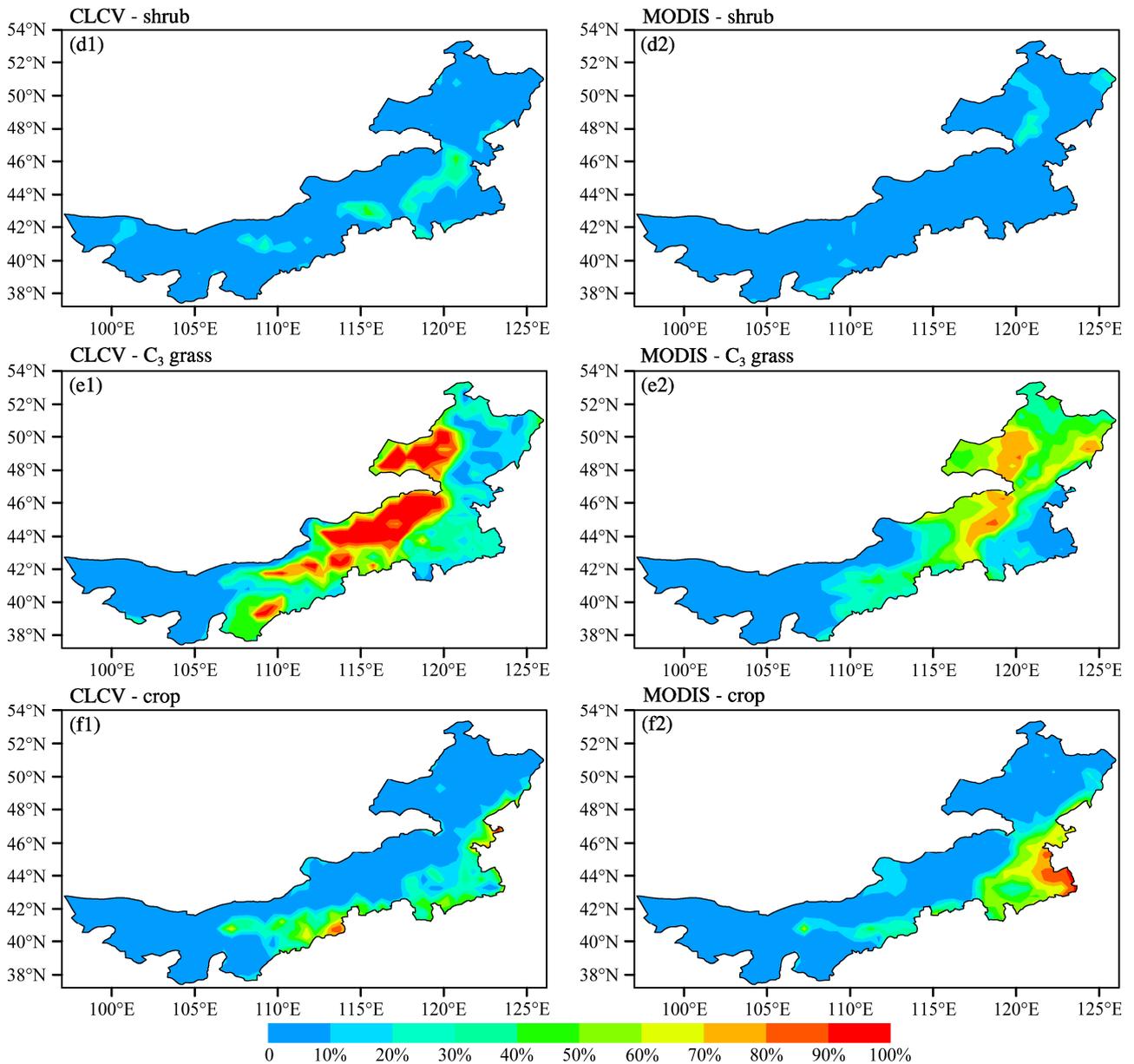


图2 (续)
Fig. 2 (Continued)

部和锡林郭勒盟东南部；在 MODIS 资料中，C₃ 草主要分布在呼伦贝尔、兴安盟和锡林郭勒盟，而在 CLCV 中，C₃ 草主要分布在呼伦贝尔西部、锡林郭勒盟和鄂尔多斯，差别较大；CLCV 中农作物与 MODIS 基本类似，主要差异地区为赤峰、通辽和乌兰察布南部；内蒙古地区两种资料的湖泊差异主要分布在中西部，CLCV 资料湖泊面积显著大于 MODIS 资料中湖泊分布；CLCV 中湿地面积比 MODIS 偏大较多，MODIS 资料内蒙古地区湿地面积几乎为零，CLCV 中湿地主要分布在呼伦贝尔中

部和东部（图略）。

由于以上下垫面的差异，本文利用基于观测的土壤质地资料 SNSS 和陆地覆盖 CLCV 资料替换 CLM3.5 相应的下垫面资料，然后以该资料作为模式的输入数据，模拟得到的土壤湿度结果与 CLM3.5 自带下垫面数据集模拟得到的结果进行比较分析。需要指出的是，本文虽然考虑了地表覆盖的变化，但由于叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 资料的限制，没有同时考虑对应的 LAI 变化。LAI 是植物影响陆—气间能量与水分循环的重要参量，

研究区 LAI 分布呈现东高西低的趋势, 呼伦贝尔地区 LAI 最高, 阿拉善高原 LAI 最低。为了研究两套资料中某个格点中 CLCV (MODIS) 出现某类 PFT 而 MODIS (CLCV) 资料不出现的情况的差异, 我们对两套陆地覆盖资料有该类差异的格点进行了统计, 结果发现温带落叶阔叶灌木有一定差别, 其中有差异的格点数占 9.5%, 其次是 C₃ 草和温带常绿针叶林, 分别占 5.46% 和 2.4%, 对此可认为两套陆地覆盖资料中有这种差异的格点所占比例较低, 故而认为该种差异并不显著。为此, 可以认为 LAI 的相应变化对模拟结果影响有限。

2.3 CLDAS 大气强迫场

CLDAS 数据集是由国家气象信息中心师春香 (Shi et al., 2011) 发展的中国气象局陆面数据同化系统近实时数据集, 该数据主要包括逐小时、空间分辨率为 $0.0625^{\circ} \times 0.0625^{\circ}$ 的覆盖东亚地区 ($0^{\circ} \sim 60^{\circ}N$, $70^{\circ}E \sim 150^{\circ}E$) 的 2 m 气温、2 m 湿度、地表气压、10 m 风速、地面短波辐射、降水和多层土壤湿度 (垂直)。本试验采用该数据集的 2011~2013 年大气强迫场资料作为陆面模式的驱动数据。气温、气压、比湿和风速的融合主要通过 LAPS/STMAS 系统融合得到 (张涛, 2013)。逐小时降水数据主要来自于国家气象信息中心的中国区域小时降水量融合资料、国家卫星气象中心的 FY-2E 静止卫星反演小时降水, 以及 NOAA 气候预测中心 (Climate Prediction Center, CPC) 制作的 CMORPH (Climate Prediction Center Morphing) 卫星融合降水资料。潘旻等 (2012) 对该数据进行了评估, 结果表明: 融合了自动站的 CMORPH 降水资料在降水量值和空间分布上均更趋于合理。Jia et al. (2013) 将 FY-2C 地面入射太阳辐射与 15 个地面观测站点的地面入射太阳辐射进行了对比, 结果表明: FY-2C 太阳辐射产品与地面观测有着较好的一致性; 与 ERA-Interim、NCEP-DOE 和 FLASHFlux 的辐射产品相比, FY-2C 卫星地面入射太阳辐射反演资料精度与国外同类资料精度相当。龚伟伟 (2014) 将 CLDAS 大气强迫数据与观测数据进行对比分析, 结果表明: 融合自动站观测的驱动场资料更接近实测。

2.4 站点观测资料

土壤湿度验证评估所用站点资料来自内蒙古自治区生态与农业气象中心的农业气象站观测数据, 该数据包含了内蒙古地区 2005 年以来的 89 个常规人工站观测资料 (Z 报)、农业气象旬报 (AB

报) 和农业气象加测报 (TR 报) 数据。由于 AB 报只有 0~10 cm 和 10~20 cm 两层观测值, 所以只将其 0~10 cm 的资料用于进行评估顶层评估, 10~50 cm 层使用 Z 报和 TR 报资料。其观测的数据为相对湿度, 观测时间 Z 报为暖季节逢 3 (每月 3 日、13 日和 23 日) 或逢 8 (每月 8 日、18 日和 28 日) 观测、AB 报为暖季节逢 3 观测和 TR 报为暖季节逢 8 观测, 在有冻土的时段停止观测。为了与模式模拟结果进行对比, 这些资料被处理成土壤体积含水量。为了更为准确的验证模式的模拟结果, 首先将位于灌溉区的部分灌溉站剔除, 只选用自然条件下的站点; 其次选取了 2011~2013 年观测时间较为连续的站点数据, 并挑选出在 3~9 月的观测值超过观测的 80% 的 46 个站点, 分布如图 3 所示。

3 试验设计

本次模拟设计了四组试验, 第一组试验使用 CLM3.5 自带的下垫面资料, 即控制试验, 记为 CLM-ctl; 第二组试验使用 SNSS 资料替换原模式中相应的土壤质地资料, 其余均与控制试验相同, 记为 CLM-snss; 第三组试验使用 CLCV 资料替换原模式中相应的陆地覆盖资料, 其余均与控制试验相同, 记为 CLM-clcv; 第四组试验同时使用 SNSS 资料和 CLCV 资料替换原模式中相应的土壤质地资料和陆地覆盖资料, 其余均与控制试验相同, 记为 CLM-new。

本研究中模拟区域为 ($35^{\circ} \sim 55^{\circ}N$, $97^{\circ} \sim 127^{\circ}E$)。用 Qian et al. (2006) 发展的基于观测的 1948~2004 年大气强迫场资料和 Tian et al. (2009, 2010) 延长了 Qian et al. (2006) 发展的 2005~2010

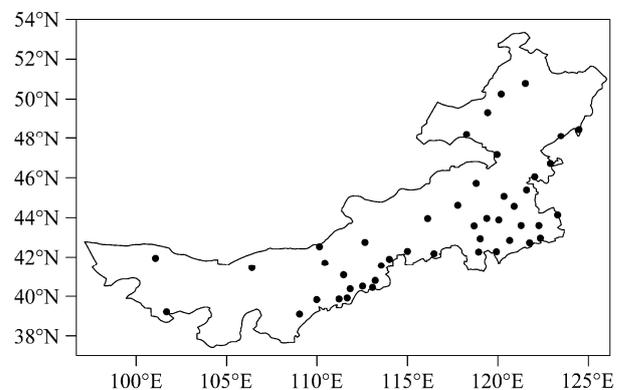


图3 内蒙古地区土壤湿度观测站点分布图

Fig. 3 Locations of the 46 stations (black dots) with in situ soil moisture observations in Inner Mongolia of China

年大气强迫场反复驱动陆面模式积分 126 年, 然后用所得陆面状态结果作为 CLM3.5 的初始场。接着使用 2011~2013 年的 CLDAS 大气强迫场分别驱动上述四组试验 (CLM-ctl、CLM-snss、CLM-clcv 和 CLM-new) 再积分 3 年。最后分别输出 2011~2013 年, 时空分辨率为日平均的 $0.0625^{\circ} \times 0.0625^{\circ}$ 模拟结果。以下将对以上设计的四个模拟试验模拟的土壤湿度与台站观测土壤湿度进行对比验证。

CLDAS 驱动数据具有较高的时空分辨率, 从 2011~2013 年平均降水量和年平均气温分布(图 4) 可以看出, 呼伦贝尔中东部地区降水最多, 西辽河流域部分地区次之, 呈现从东向西降水量逐步减少的趋势; 同时, 呼伦贝尔地区气温最低, 西部地区气温相对较高, 与降水分布趋势相反。这与内蒙古地区降水和气温的空间分布特征相一致。这在一定程度上保证了模拟结果的准确性。

4 结果分析

4.1 空间分布

在模式模拟和观测数据的土壤深度匹配上, 由于台站观测的土壤湿度是 5 层, 分别是 0~10 cm、10~20 cm, 20~30 cm, 30~40 cm, 40~50 cm; 而 CLM3.5 模拟的土壤体积含水量是厚度不等的 10 层, 为了与台站观测深度分层进行对比分析, 本文将 CLM3.5 模拟的多层土壤湿度通过运用土壤层厚度作为加权系数加权平均得到与台站观测一致的体积含水量。考虑到观测第一层 0~10 cm 与观测第二层、第三层土壤湿度同属表层土壤, 本研究只分析评估 0~10 cm 和 10~50 cm 的土壤湿度。在进行统计及比较时, 将模式模拟和台站观测土壤湿度进行时空对应, 采用距离观测站点最近的模式输出的格点值与该观测站点观测值进行比较, 在对研究区进行土壤湿度平均值变化的统计分析时, 将区域内 46 个站点土壤湿度的平均值和与观测站点相对应的格点土壤湿度的平均值计算出 2011~2013 年的时间相关系数、平均偏差和均方根误差 (宋海清, 2013)。

由于台站观测在北方土壤冻结的时段停止观测, 为此将有冻土的观测时段去除。从图 5 能够看出, CLM-ctl、CLM-snss、CLM-clcv 和 CLM-new 模拟土壤湿度的空间分布与台站观测基本一致, 都能较好的再现内蒙古地区土壤湿度的空间分布特征。从图 5a 可以看出, 内蒙古东北部的呼伦贝尔地区是土壤湿度的高值区, 0~10 cm 土壤体积含水

量值在 0.3 左右。兴安盟阿尔山一带土壤体积含水量也相对较高。阿拉善高原和河套地区是土壤湿度的低值区, 土壤湿度值在 0.1 左右。四个土壤湿度模拟结果都可以反映出呼伦贝尔地区土壤湿度高值区和阿拉善高原、河套地区土壤湿度低值区的空间分布特征, 其中 CLM-new 土壤湿度更接近观测值。各个模拟土壤湿度在内蒙古地区的空间分布呈现从东北向西部逐渐减少的趋势, 这与孙丞虎等 (2005) 对中国区域 114 站的 1990~2000 年土壤湿度的分析结果较为一致, 即 0~50 cm 的各个层次土壤湿度都呈现出“两湿一干”的空间分布特征: 东北、华东比较湿润, 西北较为干燥, 特别是以内蒙古西部地区和河套地区是土壤干中心。在 CLDAS 降水强迫作用下模式模拟的土壤湿度空间分布与模式降水场有较好的一致性, 说明模式模拟土壤湿度具有合理性。从图 6 看出, 10~50 cm 土壤湿度的空间分布与 0~10 cm 的趋于一致。其中呼伦贝尔和赤峰、通辽地区大部分站点土壤湿度值较之 0~10 cm 略微有所减少, 这表明该地区大部分台站土壤湿度从浅层 (0~10 cm) 向较深层 (10~50 cm) 有所减少。总体上, CLM-ctl、CLM-snss、CLM-clcv 和 CLM-new 模拟土壤湿度与台站观测值空间分布都比较一致, CLM-new 土壤湿度在绝大部分地区最趋近于观测值, 而 CLM-ctl 土壤湿度在内蒙古中部和西部部分地区偏湿, 无法再现通辽、锡林郭勒盟和阿拉善盟部分地区的干湿状况, 而 CLM-clcv 则在呼伦贝尔地区改善较为明显, CLM-snss 在呼伦贝尔以外的大部地区表现较好。这与其他学者对 CLM3.5 模拟的土壤湿度空间分布特征的研究结果相似 (Li et al., 2011; 杜川利等, 2008; 张文君等, 2008)。

在全自治区大部分地区, 相对于 CLM-ctl 土壤湿度, 0~10 cm CLM-new 土壤湿度的空间分布在大部地区更接近观测值, 使得偏差显著减小, 这主要得益于下垫面的改善。在呼伦贝尔地区, CLM-new 和 CLM-clcv 土壤湿度与观测值几乎完全一致 (图 5)。在该地区的改进主要得益于 CLCV 资料中呼伦贝尔中东部湿地面积较大、针叶林阔叶林比例较高和西部较高比例的 C₃ 草, 这导致了呼伦贝尔中、东部地区蒸散减少 (图 7), 而径流也减少 (图 8), 这与吴龙刚等 (2014) 和陈锋和谢正辉 (2009) 的相关结论一致。而在呼伦贝尔西部, 由于分布着草甸草原和部分沙地的出现, 导致该地区径流增大, 蒸散增强, 而总径流等于降水减蒸散减土壤水

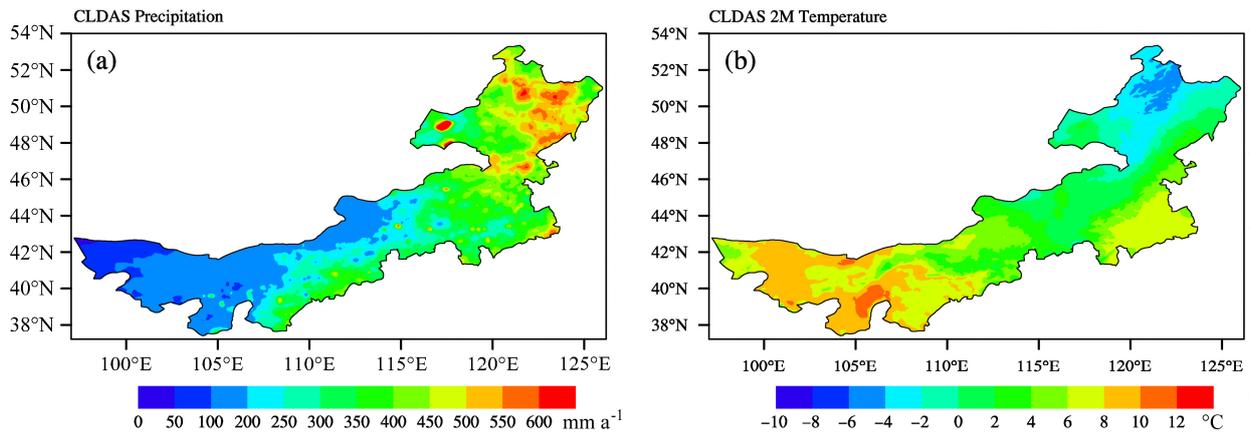


图 4 内蒙古地区 2011~2013 年平均降水量 (左) 和年平均气温 (右) 分布

Fig. 4 Spatial distributions of annually averaged precipitation (left) and 2-m temperature (right) for the period of 2011–2013 in Inner Mongolia

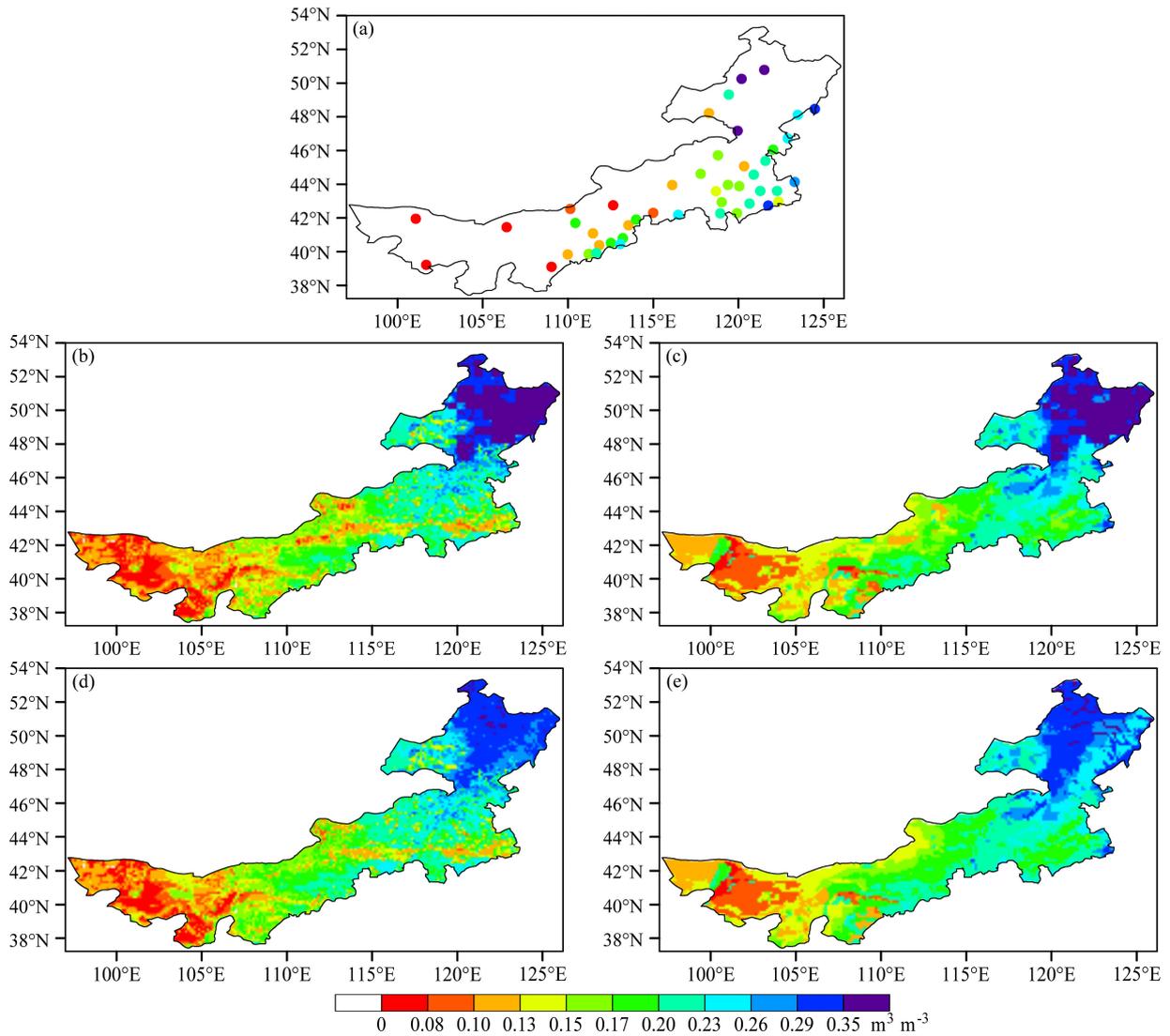


图 5 2011~2013 年平均顶层 0~10 cm 模拟和观测土壤湿度空间分布 (单位: $m^3 m^{-3}$): (a) 站点观测年平均土壤湿度; (b) CLM-new 模拟年平均土壤湿度; (c) CLM-clcv 模拟年平均土壤湿度; (d) CLM-snss 模拟年平均土壤湿度; (e) CLM-ctl 模拟年平均土壤湿度

Fig. 5 Spatial distributions of the simulated and measured (0–10 cm) averaged over 2011–2013 (units: $m^3 m^{-3}$): (a) Measured SM; (b) CLM-new simulated mean SM; (c) CLM-clcv simulated mean SM; (d) CLM-snss simulated mean SM; (e) CLM-ctl simulated mean SM

分或陆表积雪 (Twine et al., 2004), 所以在降水量不变的情况下, 蒸散和径流都减小 (增加), 导致土柱中水分增加 (减小)。综合以上使得 CLM-new 模拟结果在呼伦贝尔中东部较湿, 在西部稍干, 与观测土壤湿度吻合较好。在内蒙古中西部地区, 特别是对锡林郭勒盟中部和西北部以及内蒙古西部地区较低的土壤水分模拟较好, 主要因为 SNSS 土壤质地中上述地区砂土含量较高 (MODIS 资料显著少于 SNSS 资料), 导致饱和含水量减小, 饱和水力传导率大, 土壤蓄水能力弱, 径流和渗透大于改进土壤质地之前, 进而使得土壤水分较小 (吴龙刚等, 2014); 另外, 该地区 CLCV 资料中陆地覆盖主要是 C₃ 草和裸土, 降水量较少, 也是土壤湿度较干

的原因之一。而在赤峰和通辽一带, 由于沙地的存在, 导致该地区砂土比例较高 (图 1), 土壤储水能力差, 径流和土壤渗透大于 CLM-ctl, 使得模拟偏干 (CLM-new 和 CLM-snss)。而在 10~50 cm 层, 在赤峰和通辽一带的西辽河流域, 由于 SNSS 资料中砂土比例较高, 径流增大, 蓄水较差, 造成 CLM-snss 和 CLM-new 土壤水分略微偏干; 该地区主要植被相较于 MODIS 的裸土和农作物, CLCV 资料中主要的植被类型为农作物和 C₃ 草。从结果来看, CLM-clcv 与 CLM-ctl 几乎一致, 径流和蒸散差别较小, 因此改善主要是土壤质地差异引起的。在中西部的干旱半干旱区, CLM-new 最接近观测, 主要是由土壤质地引起的改进, 该地区砂土比例明显

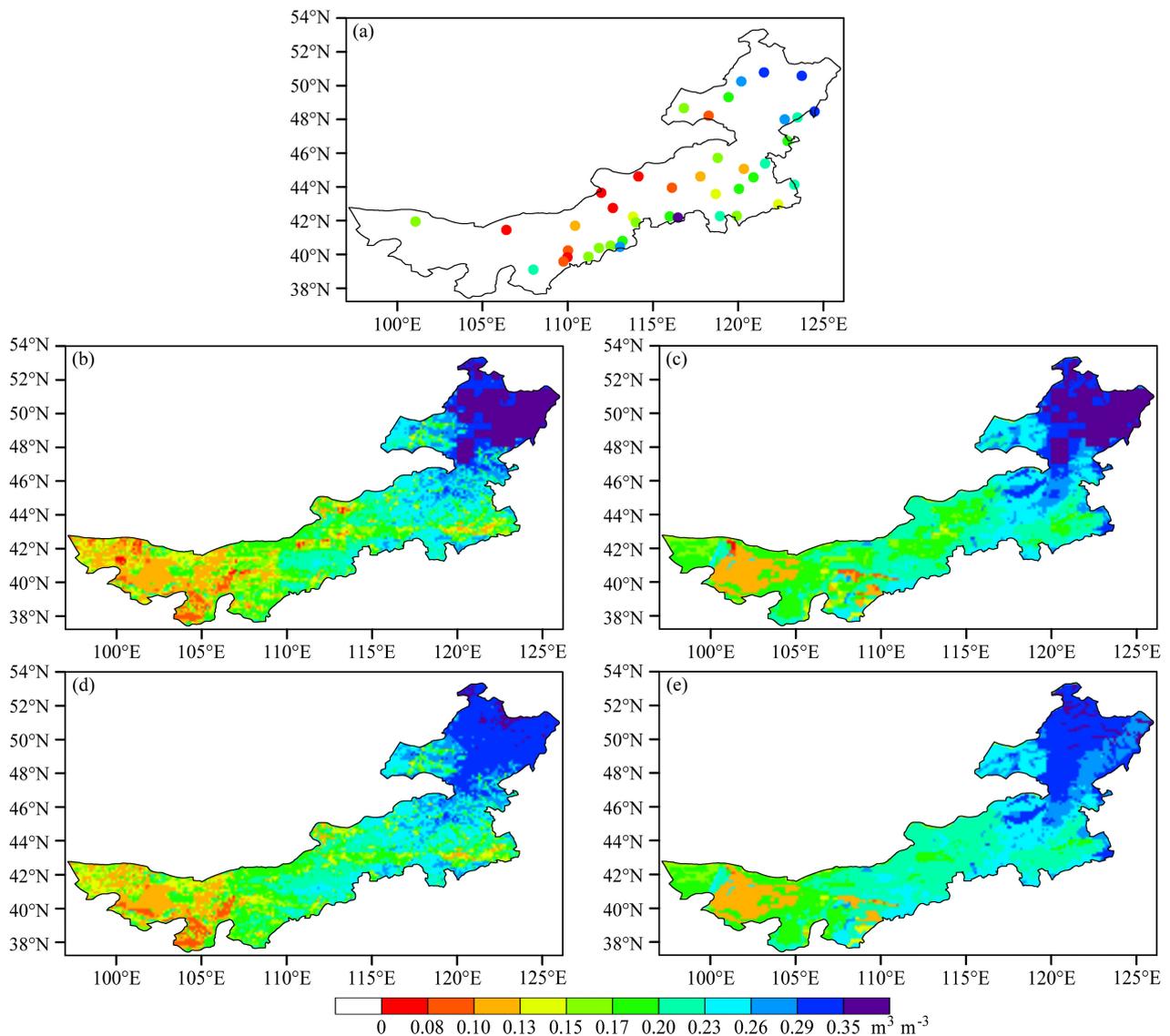


图 6 同图 5, 但为 10~50 cm
Fig. 6 Same as Fig. 5 but for 10~50 cm

高于 FAO, 同理, 该地区土壤湿度较低, CLM-new 模拟的土壤湿度对该地区的刻画更细致准确。

吴龙刚等(2014)研究表明, 土壤质地能够直接影响饱和土壤含水量, 对土壤渗透、土壤湿度和总径流影响显著, 而陆地覆盖主要通过植被的变化而引起的蒸散等量的变化间接影响土壤湿度; 从图 7 和图 8 可以看出, 在内蒙古全区, 除呼伦贝尔一带, 陆地覆盖对蒸散的影响并不很大, 土壤质地对蒸散的影响区域较大; 径流也是在除了呼伦贝尔一带以外的大部地区差别较小, 而土壤质地显著影响了径流。由此可见, 表层土壤湿度受土壤质地影响大于陆地覆盖。

4.2 时间变率

图 9 是各层 2011~2013 年模拟的土壤湿度月平均时间序列与台站观测的比较。从图 9a 可以看出, CLM-clcv 土壤湿度和 CLM-ctl 土壤湿度均比台站观测普遍偏湿, 在春末夏初与观测较为接近, 在夏末和秋季偏湿较多。CLM-new 土壤湿度在春季略微偏干, 在其他季节都与观测值最为接近, 明显改善模拟偏湿的问题。相比于 CLM-clcv, CLM-snss 土壤湿度更能明显改善偏湿的情况, 在个别地区, 例如呼伦贝尔地区却不明显(图 5)。而 CLM-new 土壤湿度却综合了土壤质地和陆地覆盖的更精细准确信息能更好地抓住了 0~10 cm 土壤湿度观测的时间变异性。可以看出, 模拟的土壤湿度都基本上能够再现 0~10 cm 台站观测土壤湿度的年内变化和年际变化, 高值点和低值点也能够匹配。表 1 是各层观测值与 CLM-new 和 CLM-ctl 土壤湿度月平均统计特征, 不论是 CLM-new 土壤湿度还是 CLM-clcv、CLM-snss、CLM-ctl 土壤湿度和台站观测在 0~10 cm 层均显著相关, 并通过了 99.9% 的信度检验, 偏差和均方根误差也较小, CLM-clcv 和 CLM-snss 结果都好于控制试验, 但是 CLM-clcv 的均方根误差略微增大。其中 CLM-new 土壤湿度有着最小的偏差和最高的相关系数, CLM-snss 有着最小的均方根误差。在 10~50 cm 层, 虽然 CLM-ctl 能够再现土壤湿度年内变化的基本趋势, 但是偏湿较多。CLM-clcv 有所改善, 但还是无法从根本上改善偏湿的问题, CLM-snss 则显著改进了偏湿问题; 而 CLM-new 土壤湿度则有更好的表现, 明显改进了偏湿, 与观测最为接近。从表 1 的统计特征可以看出, 四个试验模拟土壤湿度与台站观测在 50 cm 层均显著相关, 并通过了 99.9% 的信度检验, 但是

CLM-ctl 土壤湿度偏差和均方根误差偏大, CLM-clcv 和 CLM-snss 均改善了相关系数、平均偏差和均方根误差, 而 CLM-new 土壤湿度则有着最好的相关系数和最低的均方根误差、平均偏差。

表 1 内蒙古地区各层模拟土壤湿度和台站观测值的相关系数、平均偏差(单位: $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)和均方根误差(单位: $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Table 1 The correlation coefficients between observations and simulations of monthly volumetric soil moisture over the Inner Mongolia and mean biases (units: $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) and root mean square errors (units: $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) in the simulations of CLM-new, CLM-clcv, CLM-snss and CLM-ctl experiments

	0-10 cm 层			10-50 cm 层		
	相关系数	平均偏差	均方根误差	相关系数	平均偏差	均方根误差
CLM-new	0.79**	0.009	0.025	0.80**	0.044	0.046
CLM-clcv	0.78**	0.034	0.042	0.73**	0.062	0.065
CLM-snss	0.76**	0.009	0.022	0.73**	0.050	0.052
CLM-ctl	0.76**	0.034	0.041	0.65**	0.070	0.072

注: **表示通过了 99.9% 的信度检验

通过对两个不同深度土壤湿度在春、夏、秋三个季节的分析可以看出, 在四个模式模拟土壤湿度中, CLM-clcv 土壤湿度能够更好地体现内蒙古地区春季较干的土壤湿度(图 10), 而在夏季降水较多, 较干的土壤水分得到补充, 此时 CLM-new 与观测最为接近, CLM-snss 次之; 在秋季, 雨带南撤, 土壤湿度随之下降, CLM-new 也最能体现着一点。在 10~50 cm 层, CLM-ctl 土壤湿度在各个季节均存在一定程度的偏湿, 无法体现该地区较干的土壤湿度, 但较好地体现了土壤湿度的季节变化特征: 即春季稍微偏干, 夏季降水较多, 土壤较湿, 秋季土壤湿度逐渐下降。在这一层 CLM-new 和 CLM-snss 土壤湿度显著改善了偏湿的情况, 其中 CLM-new 模拟结果最接近观测。总的来说, CLM-new 土壤湿度在内蒙古地区有更好的适用性, 能够更好地再现内蒙古地区土壤湿度时空分布。另外, 图 9 显示 CLM-new 与 CLM-snss 结果相近, CLM-clcv 与 CLM-ctl 结果相近。

图 10 给出了 2011~2013 年土壤湿度的年际循环。观测中, 内蒙古地区土壤湿度不论是 0~10 cm 还是 10~50 cm 季节循环都不特别显著。可以看出: 在 7 月雨季来临, 土壤湿度有所增加, 并达到极值, 在秋季降水减少, 土壤湿度降低, 入冬之前达到较低水平。0~10 cm 四个试验模拟土壤湿度基本描述了土壤湿度的季节循环, 但与观测资料都有不同程

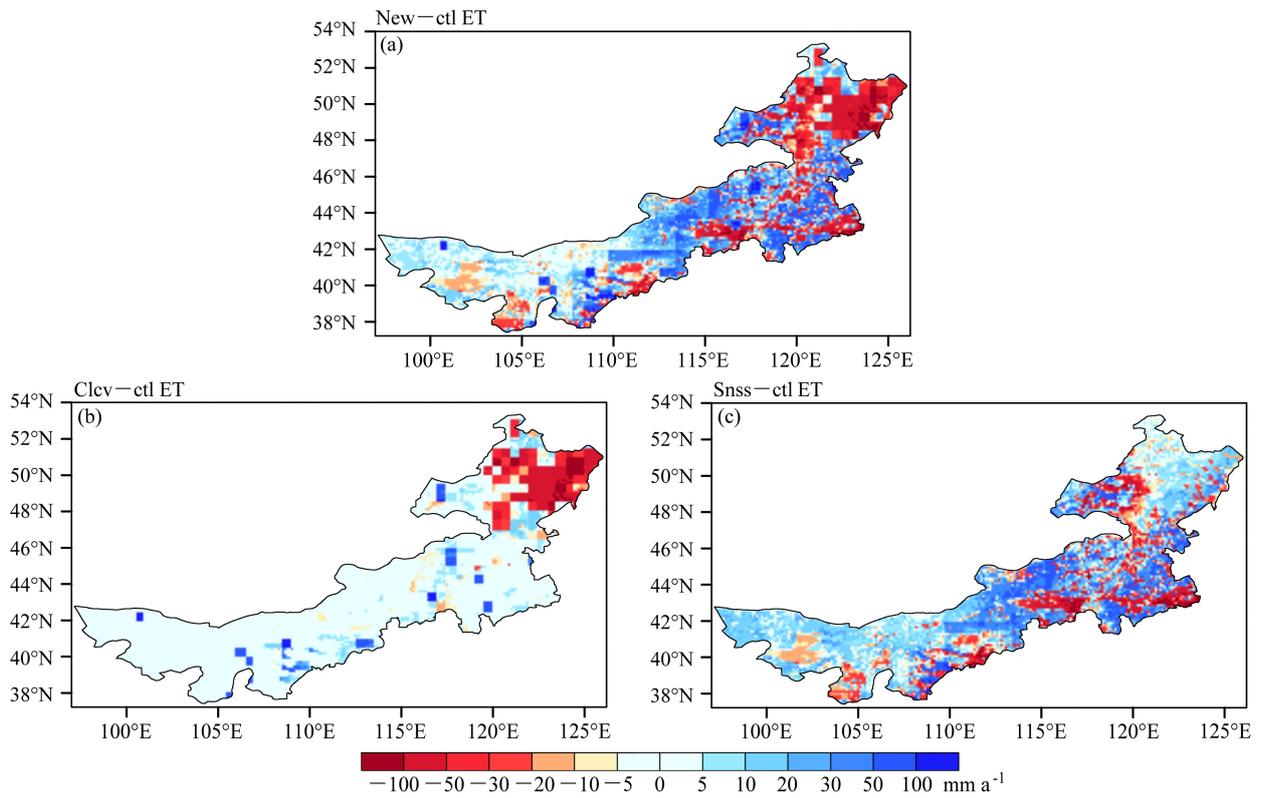


图7 模拟多年平均蒸散在内蒙古地区的差异: (a)CLM-new 与 CLM-ctl 模拟的差异; (b)CLM-clcv 与 CLM-ctl 模拟的差异; (c)CLM-snss 与 CLM-ctl 模拟的差异

Fig. 7 Differences in simulated evapotranspiration over Inner Mongolia: (a) CLM-new minus CLM-ctl; (b) CLM-clcv minus CLM-ctl; (c) CLM-snss minus CLM-ctl

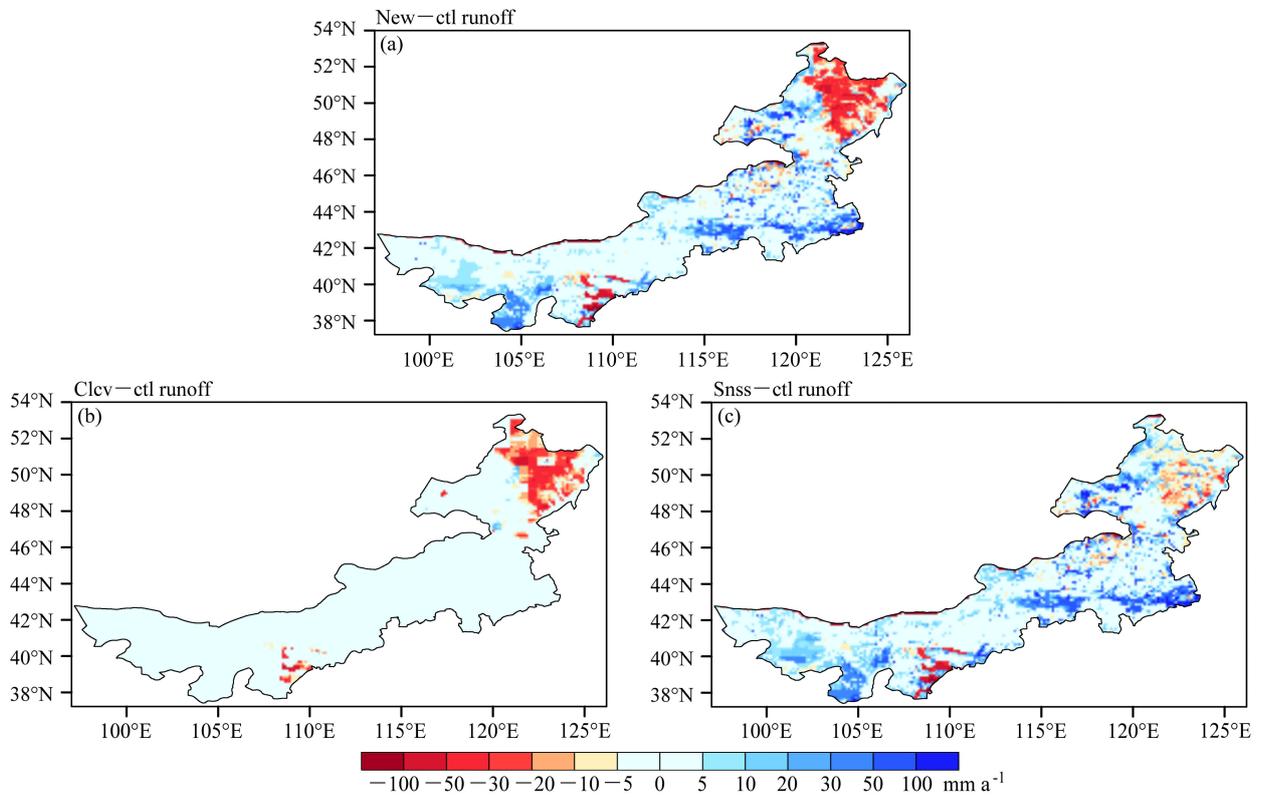


图8 同图7, 但为径流

Fig. 8 Same as Fig. 7 but for runoff

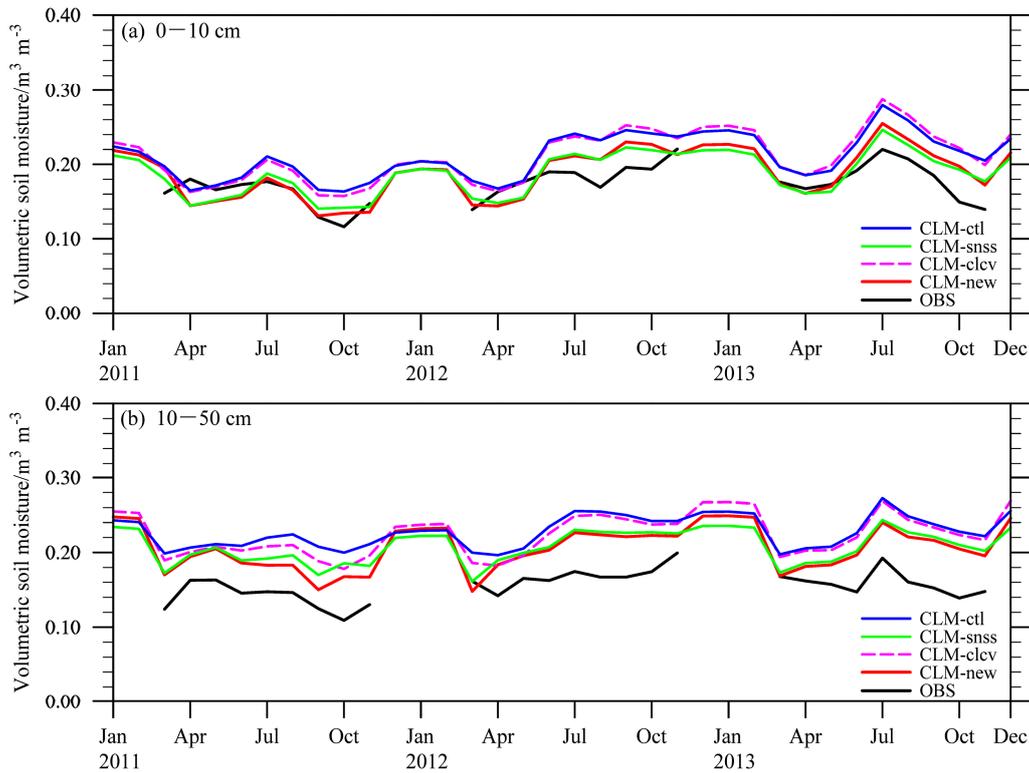


图 9 2011~2013 年观测和模拟的月平均土壤湿度时间序列：(a) 0~10 cm 层；(b) 10~50 cm 层。其中 OBS 表示观测，CLM-new 表示改进下垫面模式模拟土壤湿度，CLM-clcv 表示只改进陆地覆盖模式模拟土壤湿度，CLM-snss 表示只改进土壤质地模式模拟土壤湿度，CLM-ctl 表示原始下垫面模式模拟土壤湿度

Fig. 9 Time series of monthly volumetric soil moisture for 2011–2013 from observations, CLM-new simulation, CLM-clcv simulation, CLM-snss simulation, and CLM-ctl simulation in Inner Mongolia: (a) The top 10 cm layer; (b) the 10–50 cm layer

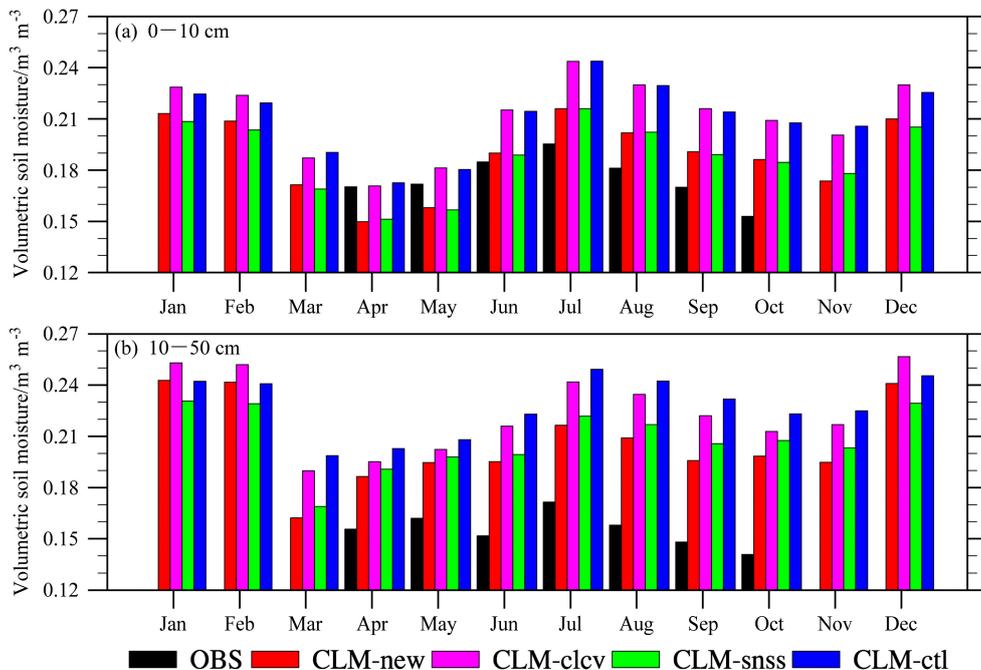


图 10 内蒙古地区 2011~2013 年观测和模拟的土壤湿度：(a) 0~10 cm 层；(b) 10~50 cm 层。黑色表示观测，红色表示 CLM-new 土壤湿度，粉红色表示 CLM-clcv 土壤湿度，绿色表示 CLM-snss 土壤湿度，蓝色表示 CLM-ctl 土壤湿度

Fig. 10 Monthly mean volumetric soil moisture (averaged from 2011 to 2013) from observations (black bars), and from simulations of CLM-new (red bars), CLM-clcv (pink bars), CLM-snss (green bars), and CLM-ctl (blue bars) for Inner Mongolia: (a) The top 10 cm layer; (b) the 10–50 cm layer

度的偏差, 其中 CLM-clcv 和 CLM-ctl 土壤湿度在夏季偏大较多; CLM-new 和 CLM-snss 土壤湿度在春季略微偏小, 在夏秋季节轻微偏大。与前面的结论一致, CLM-new 土壤湿度与观测值更为接近, 不仅减小了与观测之间的偏差, 而且更好地再现了土壤湿度的季节循环。在 10~50 cm 层, 四个试验模拟土壤湿度都比实测值偏高, 其中 CLM-new 土壤湿度与观测之间偏差最小。另外, CLM-snss 模拟土壤湿度与 CLM-ctl 相比一致偏小, 且各月偏小的数值比较一致, 季节变化与 CLM-ctl 也比较一致; 而 CLM-clcv 模拟土壤湿度相比于 CLM-ctl, 在 3~11 月偏低, 12~2 月偏高, 故 CLM-new 与 CLM-ctl 之间的季节差异主要由陆地覆盖变化差异造成的。因为陆地覆盖的变化, 不同植物类型的季节变化特征发生变化, 影响了反照率和冠层截留等的变化, 进而影响了土壤水分的变化。

在冬季, 内蒙古地区气温普遍低于 0°C, 蒸散发较小, 降水较少, 大部地区有积雪覆盖, 土壤冻结, 土壤温度降至冻融点以下, 故土壤水分变化较小, 在冻结之前, 土壤水分均有所回升。相对于控制试验, 由于植被和土壤质地影响, 使得内蒙古地区土壤热通量增大, 饱和和水力传导率大, 土壤蓄水能力弱, 径流和渗透增大, 故而在降水相对较多的暖季节差别更大些。冬季土壤温度普遍下降, 导致土壤含冰量增加 (图未给出), 土壤水分不活跃, 因此在冬季各个试验之间土壤湿度差别变小 (图 10)。由于在有冻土的时段停止观测, 故本文未分析冬季土壤水分变化。

5 总结与讨论

本文利用 CLDAS 2011~2013 年的大气强迫场数据, 分别驱动基于改进下垫面数据的 CLM3.5、只改进陆地覆盖的 CLM3.5、只改进土壤质地的 CLM3.5 和基于原始下垫面资料的 CLM3.5 积分模拟, 获得了内蒙古地区 2011~2013 年的土壤体积含水量数据集。将模拟数据与观测土壤湿度进行了对比分析, 探讨了下垫面资料的改进对土壤湿度模拟的改善, 并讨论了土壤湿度的时空变化特征。结论如下:

(1) 内蒙古地区台站观测土壤湿度分布特点基本呈现从东北向西部递减的特征。同时改进土壤质地和陆地覆盖的 CLM-new 土壤湿度、只改进陆地覆盖的 CLM-clcv、只改进土壤质地的 CLM-snss 和

原始 CLM-ctl 土壤湿度都能够较好地反映这种分布特点。其中 CLM-new 模拟结果更接近观测, 对细节描述更加精确。就季节变化而言, 观测中土壤湿度在春末夏初稍干, 夏末秋初较湿。四个试验模拟土壤湿度在内蒙古地区均描述出土壤湿度的季节变化, 但 CLM-clcv 和 CLM-ctl 与台站观测相比普遍偏湿, CLM-new 和 CLM-snss 土壤湿度显著改善了偏湿的情况, 总的来说 CLM-new 与观测一致性较好。

(2) CLM-new 模拟结果不但提高了相关系数, 还显著降低了平均偏差和均方根误差。说明基于第二次土壤调查数据的土壤质地数据和 CLCV 陆地覆盖资料较原下垫面数据有更好的适用性, 能够改善 CLM3.5 土壤湿度的模拟。究其原因, 主要是土壤质地和陆地覆盖变化改善了饱和土壤含水量、土壤渗透、蒸散发、地表反照率和径流的模拟, 从而直接和间接改善了模式对土壤湿度的模拟。另外, 相比于陆地覆盖, 土壤质地在大部地区更能有效改进模式偏湿的情况, 相对于陆地覆盖变化的影响, 土壤质地的影响更大。

(3) CLM-new、CLM-clcv、CLM-snss 和 CLM-ctl 结果都能反映出台站观测土壤湿度在内蒙古东部的呼伦贝尔为土壤湿度高值区、阿拉善高原部分地区和河套地区为土壤湿度低值区的空间分布特征。CLM-ctl 土壤湿度较之于观测值在 0~10 cm 和 10~50 cm 两个层次均系统性偏湿, 但 CLM-new 土壤湿度最接近于观测。在内蒙古地区, 各层土壤湿度观测和四个试验模拟土壤湿度均显著相关。

一般而言, 土壤湿度增大、植被改善 (如呼伦贝尔中东部地区森林比例增多, C₃ 草比例减少) 均会导致蒸散发增加, 土壤湿度增大同时会伴随径流增加等。而在本研究中, 蒸散和径流均有不同程度的减小。一些研究表明, 不同流域蒸散发量随着森林覆盖率的增加各有不同的变化趋势 (郑绍伟等, 2010); 嫩江流域草地蒸散值大于森林, 具有较小的径流, 表现出很强的蓄水保水作用 (陈祥伟, 2001), 这说明森林增加并不一定意味着蒸散增加和径流增加。而对于呼伦贝尔中东部地区的情形在未来的工作中有待进一步探讨。

尽管使用 CLDAS 大气强迫驱动基于第二次土壤调查数据的土壤质地资料和 CLCV 陆地覆盖数据的 CLM3.5 模拟结果能够更好地反映出内蒙

古地区土壤湿度的空间分布和时空变化特征, 但对土壤湿度的模拟存在一定的误差。这也与陆面模式生物地球物理过程描述不完善等有关。影响陆面模式土壤水分传输的主要因素有地表径流和次地表径流、植被冠层截留、冠层蒸发蒸腾及其与地下水的相互反馈等, 而陆面模式对土壤水热传输过程的描述并不健全。这些都将会导致模式模拟的偏差。

参考文献 (References)

- Benitez P C, McCallum I, Obersteiner M, et al. 2004. Global supply for carbon sequestration: Identifying least-cost afforestation sites under country risk consideration [R]. International Institute for Applied System Analysis, IR-04-022.
- Bonan G B. 1996. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide [R]. Boulder, CO (United States): Climate Glob Dyn Div, National Center for Atmospheric Research, 1–150.
- Chahine M T. 1992. The hydrological cycle and its influence on climate [J]. *Nature*, 359 (6394): 373–380, doi:10.1038/359373a0.
- Chang J T, Wetzel P J. 1991. Effects of spatial variations of soil moisture and vegetation on the evolution of a prestorm environment: A numerical case study [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119 (6): 1368–1390, doi:10.1175/1520-0493(1991)119<1368:EOSVOS>2.0.CO;2.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (4): 569–585, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2.
- 陈祥伟. 2001. 嫩江上游流域生态系统水量平衡的研究 [J]. *应用生态学报*, 12 (6): 903–907. Chen Xiangwei. 2001. Water balance of watershed ecosystem in river upper reaches of Nenjiang [J]. *Chinese J. Appl. Ecol.* (in Chinese), 12 (6): 903–907.
- 陈锋, 谢正辉. 2009. 基于中国植被数据的陆面覆盖及其对陆面过程模拟的影响 [J]. *大气科学*, 33 (4): 681–697. Chen Feng, Xie Zhenghui. 2009. A land cover dataset based on Chinese vegetation data and its impact on land surface simulations [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 33 (4): 681–697, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.03.
- Clapp R B, Hornberger G M. 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties [J]. *Water Resour. Res.*, 14 (4): 601–604, doi:10.1029/WR014i004p00601.
- Dai Y J, Zeng Q C. 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, doi:10.1007/s00376-997-0063-4.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84 (8): 1013–1023, doi:10.1175/BAMS-84-8-1013.
- Defries R S, Hansen M C, Townshend J R G, et al. 2000. A new global 1-km dataset of percentage tree cover derived from remote sensing [J]. *Global Change Biol.*, 6 (2): 247–254, doi:10.1046/j.1365-2486.2000.00296.x.
- 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 Tech. Note NCAR/TN-275+STR, doi:10.5065/D6668B58.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN387 + STR, 1–77, doi:10.5065/D67W6959.
- Dickinson R E, Oleson K W, Bonan G, et al. 2006. The community land model and its climate statistics as a component of the community climate system model [J]. *J. Climate*, 19 (11): 2302–2324, doi:10.1175/JCLI3742.1.
- 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.
- Du Chuanli, Liu Xiaodong, Wu Wanli. 2008. CLM3-simulated Chinese soil moisture during 1979–2003 and its possible response to global warming [J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 27 (3): 463–473.
- FAO, IIASA, ISRIC, et al. 2009. Harmonized world soil database (version1.1) [R]. Rome: FAO and IIASA.
- Ferranti L, Viterbo P. 2006. The European summer of 2003: Sensitivity to soil water initial conditions [J]. *J. Climate*, 19 (15): 3659–3680, doi:10.1175/JCLI3810.1.
- 龚伟伟. 2014. CMA 陆面数据同化系统 (CLDAS) 产品评估 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 37pp. Gong Weiwei. 2014. Evaluation on the products of CMA Land Data Assimilation System [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 37pp.
- 郭维栋, 马柱国, 王会军. 2007. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨 [J]. *气候与环境研究*, 12 (1): 20–28. Guo Weidong, Ma Zhuguo, Wang Huijun. 2007. Soil moisture——An important factor of seasonal precipitation prediction and its application [J]. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 12 (1): 20–28, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.01.003.
- Jia B H, Xie Z H, Dai A G, et al. 2013. Evaluation of satellite and reanalysis products of downward surface solar radiation over East Asia: Spatial and seasonal variations [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (9): 3431–3446, doi:10.1002/jgrd.50353.
- Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. *Science*, 305 (5687): 1138–1140, doi:10.1126/science.1100217.
- 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. Hydrometeorol.*, 8 (4): 862–880, doi:10.1175/JHM596.1.
- 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 (G1), doi:10.1029/2006JG000168.
- Li Mingxing, Ma Zhuguo, Niu Guoyue. 2011. Modeling spatial and temporal variations in soil moisture in China [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 56 (17): 1809–1820, doi:10.1007/s11434-011-4493-0.
- 梁晓, 戴永久. 2008. 通用陆面模式对土壤质地和亮度的敏感性分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (5): 585–597. Liang Xiao, Dai Yongjiu. 2008. A sensitivity study of the common land model on soil texture and soil

- brightness [J]. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 13 (5): 585–597, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.05.01.
- 林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 等. 2008. 陆面水文过程研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 935–949. Lin Zhaohui, Liu Huizhi, Xie Zhenghui, et al. 2008. Recent progress in the land-surface and hydrological process studies [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 32 (4): 935–949, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.19.
- 刘建国. 2013. 陆面水文过程集合模拟及其不确定性研究 [D]. 中国科学院大学博士学位论文, 54–98. Liu Jianguo. 2013. Ensemble simulation for land surface hydrologic process and its uncertainty [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences, 54–98.
- 马倩. 2011. 基于多模式集合的陆面水文过程模拟研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 55–76. Ma Qian. 2011. Investigating the land water cycle based on multimodels [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences, 55–76.
- 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 (D21), doi:10.1029/2005JD006111.
- Niu G Y, Yang Z L. 2006. Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale [J]. *J. Hydrometeorol.*, 7 (5): 937–952, doi:10.1175/JHM538.1.
- 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 (D7), doi:10.1029/2006JD007522.
- Oleson K W, Dai Y J, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Tech. Note NCAR/Tn-461+Str, doi:10.5065/D6N877R0.
- Oleson K W, Niu G Y, Yang Z L, et al. 2007. CLM3.5 Documentation [R]. Boulder: National Center for Atmospheric Research.
- 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 (G1), doi:10.1029/2007JG000563.
- Oleson K W, Bonan G B, Feddema J J, et al. 2010. Technical description of an urban parameterization for the Community Land Model (CLMU) [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-480+STR, doi:10.5065/D6K35RM9.
- 潘畅, 沈艳, 宇婧婧, 等. 2012. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验 [J]. *气象学报*, 70 (6): 1381–1389. Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, et al. 2012. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 70 (6): 1381–1389, doi:10.11676/qxxb2012.116.
- Qian T T, Dai A G, Trenberth K E, et al. 2006. Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004. Part I: Forcing data and evaluations [J]. *J. Hydrometeorol.*, 7 (5): 953–975, doi:10.1175/JHM540.1.
- Shangguan W, Dai Y J, Liu B Y, et al. 2012. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China [J]. *Geoderma*, 171–172: 85–91, doi:10.1016/j.geoderma.2011.01.013.
- Shangguan W, Dai Y J, Liu B Y, et al. 2013. A China data set of soil properties for land surface modeling [J]. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5 (2): 212–224, doi: 10.1002/jame.20026.
- Shi C X, Xie Z H, Qian H, et al. 2011. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54 (9): 1430–1440, doi:10.1007/s11430-010-4160-3.
- 宋海清. 2013. 基于 PODEn4DVar 数据同化方法的全球陆面数据同化系统发展 [D]. 北京信息科技大学硕士学位论文, 41–42. Song Haiqing. 2013. The development of a global land data assimilation system based on PODEn4DVar [D]. M. S. thesis (in Chinese), Beijing Information Science Technology University, 41–42.
- 孙丞虎, 李维京, 张祖强, 等. 2005. 淮河流域土壤湿度异常的时空分布特征及其与气候异常关系的初步研究 [J]. *应用气象学报*, 16 (2): 129–138. Sun Chenghu, Li Weijing, Zhang Zuqiang, et al. 2005. Distribution and variation features of soil humidity anomaly in Huaihe River basin and its relationship with climatic anomaly [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 2005, 16 (2): 129–138, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.02.001.
- Tian X J, Xie Z H, Dai A G, et al. 2009. A dual-pass variational data assimilation framework for estimating soil moisture profiles from AMSR-E microwave brightness temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D16): D16102, doi:10.1029/2008JD011600.
- Tian X J, Xie Z H, Dai A G, et al. 2010. A microwave land data assimilation system: Scheme and preliminary evaluation over China [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D21), doi:10.1029/2010JD014370.
- Twine T E, Kucharik C J, Foley J A. 2004. Effects of land cover change on the energy and water balance of the Mississippi River basin [J]. *J. Hydrometeorol.*, 5 (4): 640–655, doi:10.1175/1525-7541(2004)005<0640:EOLCCO>2.0.CO;2.
- U S National Research Council. 1994. GOALS (Global Ocean-Atmosphere-Land System) for Predicting Seasonal-to-International Climate [M]. Washington D C: National Academy Press, 103.
- 吴龙刚, 王爱慧, 盛炎平. 2014. 土壤质地对中国区域陆面过程模拟的影响 [J]. *气候与环境研究*, 19 (5): 559–571. Wu Longgang, Wang Aihui, Sheng Yanping. 2014. Impact of soil texture on the simulation of land surface processes in China [J]. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 19 (5): 559–571, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13055.
- Xue Y, Sellers P J, Kinter J L, et al. 1991. A simplified biosphere model for global climate studies [J]. *J. Climate*, 4 (3): 345–364, doi:10.1175/1520-0442(1991)004<0345:ASBMFG>2.0.CO;2.
- 于燕, 谢正辉. 2012. 中国区域陆面覆盖变化的气候效应模拟研究 [J]. *气候变化研究进展*, 8 (6): 426–433. Yu Yan, Xie Zhenghui. 2012. A simulation study on climatic effects of land cover change in China [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis* (in Chinese), 8 (6): 426–433, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.06.006.
- 张涛. 2013. 基于 LAPS/STMAS 的多源资料融合及应用研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 20pp. Zhang Tao. 2013. Multi-source data fusion and application research base on LAPS/STMAS [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 20pp.
- 张文君, 周天军, 宇如聪. 2008. 中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间的比较 [J]. *大气科学*, 32 (3): 581–597. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. Spatial distribution and temporal variation of

- soil moisture over China. Part I: Multi-data intercomparison [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 32 (3): 581–597, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.15.
- 郑绍伟, 慕长龙, 陈祖铭, 等. 2010. 长江上游森林影响流域水文过程模拟分析 [J]. 生态学报, 30 (11): 3046–3056. Zheng Shaowei, Mu Changlong, Chen Zuming, et al. 2010. Simulations and analysis on the effects of forest on the hydrological processes in the upper reaches of Yangtze River [J]. Acta Ecol. Sinica (in Chinese), 30 (11): 3046–3056.
- 朱司光. 2012. NCAR_CLM 系列陆面模式对全球和区域陆面过程模拟的对比研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 15–23. Zhu Siguang. 2012. Comparison study on simulation results of global and regional land surface progresses from three versions of community land model [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 15–23.