

师春香,张帅,孙帅,等,2018.改进的 CLDAS 降水驱动对中国区域积雪模拟的影响评估[J].气象,44(8):985-997.

改进的 CLDAS 降水驱动对中国区域 积雪模拟的影响评估*

师春香^{1,2} 张 帅¹ 孙 帅¹ 姜立鹏² 梁 晓² 贾炳浩³ 吴 捷⁴

1 南京信息工程大学地理科学学院,南京 210044

2 国家气象信息中心,北京 100081

3 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

4 中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081

提 要: 积雪因为其特定的属性在气候变化和水文循环中扮演着重要角色,在大气和陆面之间起到了调节能量和水交换的显著作用,而陆面驱动数据的质量决定着模式对积雪的模拟效果。本文采用 CLDAS(CMA Land Data Assimilation System)和改进后的降水驱动(CLDAS-Prcp)分别驱动 Noah3.6 陆面模式对积雪变量进行模拟,并对中国主要的积雪区东北区域、新疆区域、青藏高原区域的积雪覆盖率、雪深、雪水当量的模拟效果进行了评估。结果表明,CLDAS-Prcp 改善了原有驱动在冬季由于低估降水所造成的模拟积雪量偏少的情况;东北区域模拟结果与观测的时间变率最为一致,积雪覆盖率、雪深、雪水当量的相关系数分别为 0.42,0.78,0.93;而雪水当量的改进效果最明显,均方根误差和偏差分别减小了 54.8%和 83.1%,相关系数提高了 0.47;同时,CLDAS-Prcp 不仅能反映积雪变量的年际变率,而且能够较准确地反映出强度较大的突发降雪事件。

关键词: CLDAS,积雪模拟,中国区域,Noah3.6

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.08.001

Effect of Improved Precipitation CLDAS on Snow Simulation in China

SHI Chunxiang^{1,2} ZHANG Shuai¹ SUN Shuai¹ JIANG Lipeng²
LIANG Xiao² JIA Binghao³ WU Jie⁴

1 School of Geographic Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

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

4 Laboratory for Climate Studies, CMA, Beijing 100081

Abstract: Snow cover plays a significant role in climate change and hydrological cycle due to its specific properties, regulating energy and water exchange for atmosphere and land surface. The quality of the forcing data has a great influence on the result of model simulation. This paper adopts CLDAS and CLDAS-Prcp data driving on Noah 3.6 land surface model to simulate snow variables, and assesses snow cover fraction (SCF), snow depth (SD), the snow water equivalent (SWE) in major snow areas, such as North-east China, Xinjiang and Tibetan Plateau Region. The result shows that CLDAS-Prcp can improve snow simulation in the winter, removes poor snow simulation due to underestimating precipitation of CLDAS.

* 国家自然科学基金重点项目(91437220)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506002 和 GYHY201206008)及国家气象科技创新工程攻关任务(气象资料质量控制及多源数据融合与再分析)共同资助

2017 年 10 月 19 日收稿; 2018 年 3 月 19 日收修定稿

第一作者:师春香,主要从事多源数据融合与同化研究. Email:shicx@cma.gov.cn

Model result of Northeast China is the most consistent with observations, CORR of SCF, SD and SWE are 0.42, 0.78 and 0.93 respectively. The improvement of snow water equivalent is most obvious, RMSE and BIAS are reduced by 54.8% and 83.1% respectively, while CORR is increased by 0.47. Thus, CLDAS-Prcp not only has better simulation capability but also reflects the extreme snow events.

Key words: CLDAS(CMA Land Data Assimilation System), snow simulation, China, Noah 3.6

引 言

积雪是气候系统重要的组成部分,是冰冻圈中地理分布最广泛、季节和年际变化最显著的成员。雪盖通过表面不同的反照率、地表通量,调制了陆面-大气间的能量交换,极大地影响了大气非绝热加热过程(孙菽芬和李敬阳,2002)。肖林和车涛(2015)在进行青藏高原积雪对气候反馈的初步研究时发现积雪对气候存在正的辐射强迫,冬季积雪的异常分布会导致东亚冬季风环流的异常(陈海山等,2003)。同时,春季积雪异常改变了夏季的土壤湿度和温度分布(李震坤等,2009)。朱玉祥和丁一汇(2007)则认为高原积雪是一种重要的陆面强迫因子,青藏高原冬季多雪,是引起中国东部夏季降水出现“南涝北旱”的一个重要原因。近年来全球气候异常,可能与前期的积雪异常有很大的关系,应关注积雪影响天气气候的问题(Li and Wang,2011;左志燕和张人禾,2012;许立言和武炳义,2012a;2012b;张若楠等,2015;张人禾等,2016;杨凯等,2017)。

对积雪物理过程的认识随着观测资料的不断丰富而逐渐深入,不同精度的反映积雪内部水、热物理过程的模型不断发展(Jordan,1991;Yang et al,1997;Sun et al,1999;Dai et al,2003)。用于气候研究的绝大多数 GCMs 所采用的积雪参数化方案(李伟平等,2009)或模型则过于简单(Wu and Wu,2004),这些简单的模型对积雪的变化难以满足当代气候研究的需要(陈海山和孙照渤,2004),因此许多学者开展了积雪模拟研究,Wei and Dong(2015)进行了 CMIP5 青藏高原积雪深度模拟,Yuan et al(2016)在“SnowWind”模型基础上提高了对青藏高原积雪的估计,Xie and Hu(2016),Xie et al(2018)对比了两种积雪覆盖率的参数化方案,以及对积雪分布以及收支平衡的影响,认为积雪变率的表达对青藏高原积雪模拟效果的提高十分重要。李弘毅和王建(2013)则针对我国青藏高原积雪特征,提炼出现阶段空间分布式积雪水文模拟中的关键问题;模

式结构对模拟结果至关重要,同时,Zhang(2015)也发现影响陆面过程模型积雪模拟精度的不确定性中,驱动的不确定性最大,尤其是驱动中的降水和辐射,其次是模式结构以及参数化方案。因此,对于陆面过程模拟,驱动场和模式结构是决定模式模拟效果至关重要的因素,不同的驱动场会对模拟结果产生不同的影响。

国家气象信息中心提供的 CLDAS(CMA Land Data Assimilation System)驱动数据,尽管在夏季的陆面过程模拟有着良好的表现(潘昉等,2012),但是由于原降水驱动融合的背景场和站点观测在冬季存在一些问题,在冬季降水的刻画能力上有所欠缺,因此 CLDAS 研究团队对此进行了改进。本文分别选用了改进前后的两种 CLDAS 降水驱动陆面模式进行模拟,对积雪覆盖率(snow cover fraction,SCF)、雪深(snow depth,SD)、雪水当量(snow water equivalent,SWE)进行评估。一方面对比不同驱动对模式模拟结果所带来的影响,一方面分析改进的降水驱动的积雪模拟结果在中国区域的改进效果和具体表现。

1 研究区域和数据

1.1 研究区域

中国积雪的分布自南向北逐渐增厚,由西向东,明显减少。中国积雪分布范围广泛,其中新疆、东北和青藏高原是三个大值区,主要分布在东北和内蒙古自治区东部地区、新疆北部和西部地区以及青藏高原地区。依据李培基和米德生(1983)应用中国气象台站积雪观测资料,以年累计积雪日数大于 60 d 的地区为稳定积雪区的定义,中国的东北区域、新疆地区及青藏高原地区均为稳定积雪区。本文选取东北区域($35^{\circ}\sim 61^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 141^{\circ}\text{E}$)、新疆区域($34^{\circ}\sim 48^{\circ}\text{N}$ 、 $73^{\circ}\sim 96^{\circ}\text{E}$),以及青藏高原区域($26^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$ 、 $73^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$)这三个稳定积雪区和中国区域($15^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)对积雪模拟的效果进行评估。

1.2 CLDAS 驱动数据

1.2.1 CLDAS 驱动数据

“CLDAS 驱动数据”产品包含气温、气压、湿度、风速、降水、短波辐射六个要素,各要素为覆盖亚洲区域($0^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 、 $60^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$)的逐小时、等经纬度($0.0625^{\circ}\times 0.0625^{\circ}$)网格产品,时间长度从 2008 年至今。气温、气压、湿度、风速产品以 ECMWF 数值分析/预报产品为背景场,通过多重网格三维变分技术融合地面自动站观测数据而形成;短波辐射产品基于 DISORT 辐射传输模型,利用 FY-2 卫星全圆盘标称图 VIS 通道数据反演而形成;降水由 FY-2/EMSIP 降水产品与中国区域降水融合产品叠加拼接而成。其中中国区域的融合降水是由 CMORPH (Climate Prediction Center Morphing) 卫星降水以及自动站观测降水融合而成。但是尽管该降水(潘昉等,2012)在夏季取得了较好的表现,但是它仍存在些许不足,一方面作为背景场的 CMORPH 卫星监测冬季降水的能力差,导致冬季部分地区降水数据缺失,另一方面,自动站在冬季降水观测不准确,导致该降水驱动在冬季与观测的一致性较差,进一步可能导致陆面模拟中积雪变量的低估。本文选取驱动的时间范围为 2008—2014 年。

1.2.2 CLDAS-Prcp 驱动数据

基于驱动数据降水存在的问题,CLDAS 研究团队对此进行了改进,制作了 CLDAS-Prcp 驱动数据。使用 MERRA2 (Modern Era Retrospective-analysis for Res) 再分析降水资料对 CMORPH 卫星降水资料进行了补充,将两者作为联合背景场,然后结合 MERRA2 再分析资料、日降水人工观测资料、气温资料以及自动站逐小时降水观测,得到新的逐小时降水资料,弥补冬季结冰期区域逐小时站点降水观测资料,制作了 1998—2015 年时间分辨率为逐小时、空间分辨率为 0.0625° 的中国区域融合降水产品。本文选用了采用 CLDAS-Prcp 驱动陆面模式进行积雪变量的模拟,时间范围为 2008—2014 年。

1.3 评估数据

1.3.1 MODIS 积雪覆盖率数据

MODIS 是美国 EOS (Earth Observing System) 系

统中主要的传感器之一,它具有较高的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率,在积雪、植被研究等方面都得到了广泛应用(Yuan et al, 2016; 李洛晞等, 2016)。MODIS/AQUA (TERRA) 包括 MYD10C1 (MOD10C1)、MYD10C2 (MOD10C2) 和 MYD10CM (MOD10CM) 积雪覆盖率产品,MYD10C1 (MOD10C1) 是逐日雪盖产品,是将分辨率为 500 m 的 MYD10A1 观测依据地表类型处理成 0.05°CMG 的格网数据产品。MODIS 积雪产品的精度较高,在不受积雪条件和地表覆盖类型的影响,准确率大约可达 90% (Hall et al, 2002; 2010; Hall and Riggs, 2007)。MOD10A2 的绝对精度可以达到 93% (Hall and Riggs, 2007), MOD10A1 在加拿大地区雪季 160 d 的平均一致率可达到 93% (Simic et al, 2003)。同时,MODIS 积雪产品在中国地区的质量也得到广泛验证,新疆北部晴天时 MOD10A1 产品精度很高,总精度可达到 98.5%,积雪分类精度为 98.2% (张学通等, 2008)。东北地区 MOD10A2 积雪产品则倾向于低估积雪覆盖面积,MOD10C2 的积雪产品监测的积雪面积与较为相近(仲桂新等, 2010)。因此本文采用 MODIS/AQUA 的数据集 MYD10C1 作为检验数据,数据采用等经纬度投影,空间分辨率为 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$,本评估选取的数据时间为 2008—2014 年。

1.3.2 站点雪深数据

雪深的检验数据是由中国气象局国家气象信息中心提供的气象数据统一服务接口 (Meteorological Unified Service Interface Community, MUSIC) 的全国综合气象信息共享系统 (CIMISS) 数据。MUSIC 是面向气象业务和科研,提供全国统一、标准、丰富的数据访问服务和应用编程接口。本文从 CIMISS 获取中国地面逐日积雪深度资料,该接口提供 1951 年 1 月 1 日 00:00:00 时至今的积雪深度资料(单位: cm),评估选用的时间是 2008—2014 年。

1.3.3 MERRA2 雪水当量数据

MERRA 是新一代全球高分辨率卫星时代再分析资料,产品相比其他全球再分析资料在青藏高原地面气温表达方面具有一定的优势,在能量平衡与水循环等诸多领域得到了广泛应用(除多等, 2016); 在中亚地区的适用性评估结果表明, MERRA 的降

水资料比 ERA-Interim 具有更高的精度(胡增运等,2013;秦艳慧等,2015)。MERRA 的资料在中纬度密集植被区显示出比 AMSRE 更好的优势(Yi et al,2011);而 MERRA2 数据是 NASA 发布的大气再分析数据,融合了最新的 GEOS-5(Goddard Earth Observing System Data Assimilation System Version 5)数据。本文采用 MERRA2 中 Land 数据作为雪水当量的检验数据,Land 数据包括一系列陆表变量,例如积雪覆盖率、积雪深度、雪水当量、叶面积指数以及地面总降水,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$,评估采用雪水当量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)作为模式模拟的检验数据,时间分辨率为 1 h。

2 试验设计和方法

2.1 模式介绍

Noah 陆面过程模式基于在俄勒冈州立大学 OSU 模式,由美国环境预报中心多个机构共同发展、优化以及改进,可以同 WRF 模式大气以及其他模式耦合。Noah 刻画了积雪的积累和消融过程,基于物理参数化方案模拟陆气之间能量、动量、水的交换,模拟积雪的积累、升华、融化和热交换处理,在积雪处理方面考虑了积雪老化、冰盖液态水再结冰、冻土以及积雪压实过程的动态雪深和密度变化过程,模式采用积雪-植被-土壤混合层。模式可以输出 SWE、SD 以及积雪密度,并且通过区域的经验消融曲线计算出积雪覆盖率(SCF)。Noah3. 3-3. 6 采用的关于 SCF 参数化方案是(Koren et al,1999)针对 NECP 气候模型雪盖和冻土参数化方案提出的,这个参数化方案强调了积雪覆盖率和雪水当量的关系。很多学者也对该模型进行了进一步的研究与评估(Ben,2010;田静等,2011;张果等,2016)。本文陆面模拟采用 Noah3. 6。Noah 中积雪融化受向下

长波辐射、向下短波辐射以及感热通量和潜热通量影响,在这几个变量的影响下,如果地表温度低于 0°C ,则积雪不融化,否则积雪蒸发、升华以及融化可能会同时发生。当处于降雪或冰冻状态下,模式利用降水对雪水当量进行初始化,雪深受雪水当量、积雪密度、积雪表面温度以及土壤表面温度影响,由雪水当量和积雪密度计算得出。当雪水当量超过积雪为全覆盖时雪水当量阈值时,积雪覆盖率为 100%,否则依据当时雪水当量、雪水当量阈值,调整系数重新计算积雪覆盖率,计算关系如下:

$$RSNOW = SNEQV/SNUP$$

$$SNCOVR = 1 - [EXP(-SALP \times RSNOW) - RSNOW \times EXP(-SALP)]$$

式中,SNCOVR 表示积雪覆盖,SNEQV 为雪水当量,SNUP 表示积雪覆盖率为 1 时雪深阈值,RSNOW 为 SNEQV 和 SNUP 的比值,SALP 为可调系数。

2.2 试验设计和评估指标

试验采用 Noah3. 6 陆面模式,利用 CLDAS 和 CLDAS-Prcp 分别进行模拟,对模式中积雪变量,包括积雪覆盖率、雪深、雪水当量,在东北区域、新疆区域、青藏高原区域三大稳定积雪区,以及中国区域 2008—2014 年积雪模拟的表现进行评估。模式输出模拟结果的频率为 1 d,模式验证数据分别为 MODIS/AQUA 积雪覆盖率日数据 MYD10C1,国家级自动站 CIMISS 雪深日数据以及 MERRA2 雪水当量小时数据。在利用 MERRA2 雪水当量小时数据进行比对时,首先要进行时间尺度变换,将小时数据处理成日平均雪水当量。为了进行对比评估,检验过程中将格点的数据统一处理成模式输出的分辨率 0.0625° 。本文采取的评估指标包括季节平均值、偏差(BIAS)、均方根误差(RMSE)以及相关系数(CORR)具体公式如下:

$$BIAS = N^{-1} \sum_{i=1}^N [X_m(i) - X_o(i)]$$

$$RMSE = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N [X_m(i) - X_o(i)]^2}$$

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^N [X_m(i) - N^{-1} \sum_{i=1}^N X_m(i)][X_o(i) - N^{-1} \sum_{i=1}^N X_o(i)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [X_m(i) - N^{-1} \sum_{i=1}^N X_m(i)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N [X_o(i) - N^{-1} \sum_{i=1}^N X_o(i)]^2}}$$

式中, X_o 为观测值, X_m 为模式模拟值, N 为参与计算的观测的个数, 其中 $i=1, 2, \dots, N$ 。

3 结果与分析

3.1 对积雪覆盖率(SCF)模拟影响的评估

积雪覆盖率产品的精度评估分别基于 Noah3.6 模拟和 MYD10C1 日产品的积雪覆盖率, 进行季节平均、季节偏差、均方根误差以及相关系数的评估。从 2008—2014 年中国区域季节平均积雪覆盖率(图 1a, 1b; 此处包括下文中的季节, 都指的是积雪季节, 即从 11 月至次年 4 月)可以看出, 在积雪期 MODIS 的积雪主要集中在东北区域、新疆区域以及青藏高原区域, 而融雪期积雪覆盖率有所下降, 东北区域和新疆北部的积雪覆盖率略高于青藏高原。无论在积雪期还是融雪期, CLDAS-Prp 模拟结果(图 1e, 1f)的基本形态与 MODIS 观测数据相吻合, 但是 CLDAS 在整个中国区域模拟的 SCF 偏低。

从 CLDAS-Prp 模拟结果与 MODIS 积雪覆盖

率季节偏差的空间分布(图 2c, 2d)可以看出, 在积雪期除去青藏高原以及周围的地区为负偏差, 中国大部分地区已由 CLDAS 模拟(图 2a, 2b)的负偏差转为正偏差, CLDAS-Prp 改善了 CLDAS 在东北和新疆区域模拟 SCF 的低估问题, 同时解决了青藏高原地区高估问题。由于融合降水产品的改进, 青藏高原中西部高估情况基本消除, 但东北地区 and 新疆北部略高于观测。融雪期 CLDAS-Prp 的表现与积雪期相同, 负偏差范围减小, 偏差值普遍低于积雪期。

由 2008—2014 年中国区域积雪覆盖率逐日 CORR(图 3a, 3b)对比发现 CLDAS 的模拟结果(图 3a)CORR 较低, 普遍在 0.4 以下, 青藏高原和中国南部甚至出现负相关。在东北地区 and 新疆北部 CORR 普遍在 0.2~0.5, 新疆南部及青藏高原地区的 CORR 基本在 0.1 以下, 说明 CLDAS 的模拟结果在时间变率上与卫星观测一致性较差; 而 CLDAS-Prp 的积雪覆盖率模拟结果(图 3b)在整个中国区域 CORR 都得到提高, 青藏高原区域的负相关基本消失, 上升至 0.3 左右, 东北地区的 CORR 最高可达 0.6~0.7, 新疆南部地区的 CORR 提升到 0.5

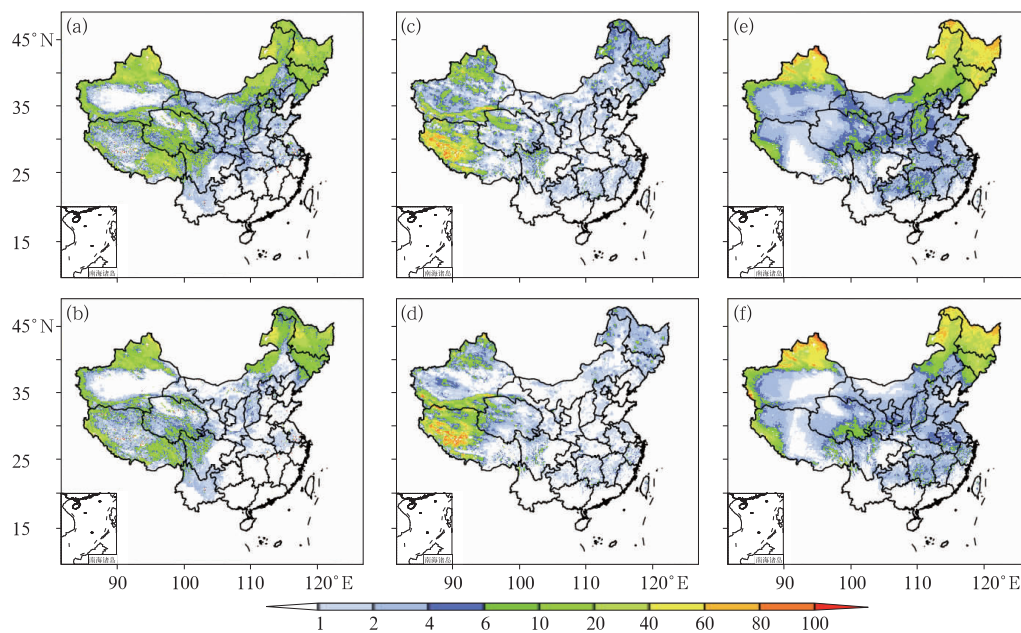


图 1 2008—2014 年(a, c, e)积雪期(NDJ), (b, d, f)融雪期(FMA)中国区域季节平均积雪覆盖率(单位: %)

(a, b)MODIS 的观测数据, (c, d)CLDAS 模拟结果, (e, f)CLDAS-Prp 模拟结果

Fig.1 Seasonal MEAN of SCF during (a, c, e) snow-accumulating period (NDJ), and

(b, d, f) snow-melting period (FMA) in China from 2008 to 2014 (unit: %)

(a, b) MODIS observation, (c, d) CLDAS model result,

(e, f) CLDAS-Prp model result

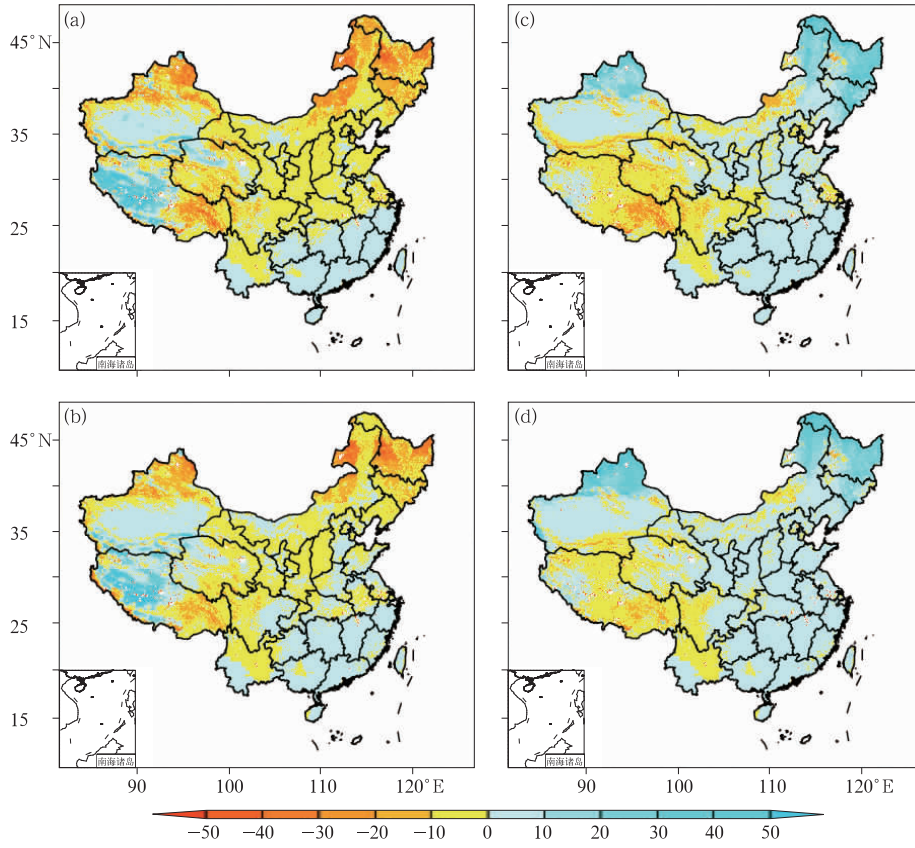


图 2 2008—2014 年(a,c)积雪期(NDJ),(b,d)融雪期(FMA)

中国区域积雪覆盖率季节 BIAS(单位:%)

(a,b)CLDAS 模拟结果,(c,d)CLDAS-Prcp 模拟结果

Fig. 2 Seasonal BIAS of SCF during (a, c) snow-accumulating period (NDJ), and (b, d) snow-melting period (FMA) in China from 2008 to 2014 (unit: %)

(a, b) CLDAS model result, (c, d) CLDAS-Prcp model result

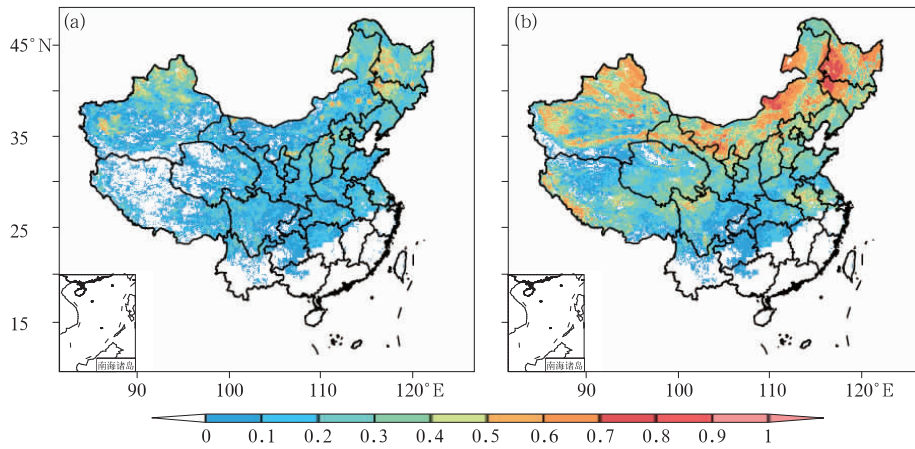


图 3 2008—2014 年中国区域积雪覆盖率逐日 CORR 对比图

(a) CLDAS 模拟结果,(b) CLDAS-Prcp 模拟结果

Fig. 3 CORR of SCF in China from 2008 to 2014

(a) CLDAS model result, (b) CLDAS-Prcp model result

左右。虽然 CLDAS-Prcp 模拟结果的 BIAS 及 RMSE 上改进不是很明显,但是与观测相关上改进效果明显,说明改进后的模拟结果和观测一致性较好。

表 1 说明在几个主要积雪区,CLDAS-Prcp 模拟结果改进了 SCF 较低的情况,与观测一致性有所

提高。CLDAS-Prcp 在青藏高原地区 SCF 的模拟能力较好,BIAS 和 RMSE 最小,分别为 -2.21% 和 13.1%,在东北区域模拟能力较弱,BIAS 和 RMSE 分别为 18% 和 37.6%,但是在主要积雪区中东北区域与观测的相关性最好,相关系数为 0.416,CORR 提升了 0.18。

表 1 中国区域以及各主要积雪区 2008—2014 年积雪覆盖率评价指标结果汇总
Table 1 Evaluation results of SCF in China and the main snow areas from 2008 to 2014

	CLDAS 驱动			CLDAS-Prcp 驱动		
	RMSE/%	BIAS/%	CORR	RMSE/%	BIAS/%	CORR
东北区域	21.6	-7.62	0.243	37.6	18	0.416
新疆区域	21.4	-4.56	0.144	22.6	3.49	0.312
青藏高原区域	16.6	-1.19	0.627	13.1	-2.21	0.205
中国区域	16.2	4.4	0.171	19.4	4.54	0.352

在上述积雪覆盖率季节平均值的对比中,CLDAS-Prcp 的表现 在东北和新疆区域略高于观测,在 BIAS 和 RMSE 上的改进不是十分明显,这有可能是由于 MODIS 在东北森林地区反演精度有关。东北地区具有广大的山区,森林覆盖率高,蕴育着丰富的森林。Su et al(2010)发现,MODIS 在森林地区以及山区对雪监测的能力不够,可能会对积雪覆盖率形成低估;MOD10A1 在加拿大地区雪季 160 d 的平均的一致率可达到 93%;其中,常绿阔叶林的一致性最低,只有 80%,尤其是在融雪期(Simic et al,2003);中国东北地区 MOD10A2 积雪产品倾向于低估积雪覆盖面积,林地植被的积雪产品积雪分类精度值变化最大,对于光学遥感,由于林冠对积雪信息的部分屏蔽效应,林下积雪覆盖特征很难被检测到,使得通常的线性光谱混合模型在林区很难得

到较高的结果精度,其次云量和积雪深度也是影响影像精度的重要原因(仲桂新等,2010)。因此,CLDAS-Prcp 模拟值在东北和新疆区域略高于 MODIS,有可能是受 MODIS 本身低估积雪覆盖率的影响。

3.2 对雪深(SD)模拟影响的评估

图 4 为 2008—2014 年中国区域季节平均积雪深度,其中雪深观测来自于 CIMISS 逐日积雪数据,发现三个积雪区中 CIMISS 站点观测的积雪主要集中在东北区域和新疆区域,雪深大概在 0.05 m 以上,其他区域雪深基本处在 0.02 m 以下。从两种驱动的积雪覆盖率模拟结果中可以看出,CLDAS-Prcp 模拟结果的基本形态与 CIMISS 站点观测数据相吻合,CLDAS 模拟结果偏低。

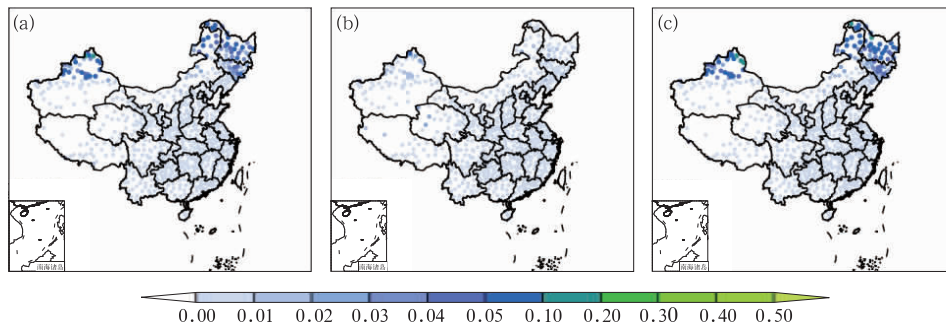


图 4 2008—2014 年中国区域季节平均积雪深度(单位: m)
(a) CIMISS 雪深观测数据, (b) CLDAS 模拟结果, (c) CLDAS-Prcp 模拟结果

Fig. 4 Seasonal Mean of SD in China from 2008 to 2014 (unit: m)
(a) CIMISS station observation, (b) CLDAS model result, (c) CLDAS-Prcp model result

从 2008—2014 年中国区域积雪深度季节 BIAS (图 5) 可以看出, CLDAS 的模拟结果在全国的站点基本表现为负值, 说明 CLDAS 模拟(图 5a)的雪深小于实际雪深; CLDAS-Prcp 模拟(图 5b)的雪深相较 CLDAS 在中国大部分地区负偏差明显减少, 且在东北以及新疆地区呈现正偏差, 说明 CLDAS-Prcp 模拟的雪深在该地区大于实际观测的雪深, 在东北和新疆区域的 $BIAS < 0.03$ m, 其他地区 BIAS 基本在 ± 0.01 m 左右, 改善了之前中国区域整体雪深过小的情况。

从 2008—2014 年中国区域雪深季节 RMSE 对比(图 6)可以看出, CLDAS 的模拟结果(图 6a)的雪深, 在东北地区 and 新疆北部地区 RMSE 较大; CLDAS-Prcp 的雪深的模拟结果(图 6b)在新疆北部和东北区域以及青藏高原东部区域的 RMSE 明显减

小。由于融合降水驱动的改进, CLDAS-Prcp 模拟结果在在新疆北部和东北区域的 RMSE 基本下降到 0.06 m 以下, 中国大部分地区包括青藏高原区域的 RMSE 也有所减小, 基本在 0.01 m 以下。

图 7 为 2008—2014 年中国区域积雪深逐日 CORR 对比, 可以看出 CLDAS 的模拟结果(图 7a)在时间变率上与卫星观测一致性较差, CORR 普遍在 0.1~0.5; 而 CLDAS-Prcp 的雪深的模拟结果(图 7b)在整个中国区域内的 CORR 都得到了明显的提高, 在东北区域和新疆区域的 CORR 普遍可达 0.7 以上, 在青藏高原的站点的 CORR 提高到 0.5 左右, 以及内蒙古地区、陕西、山西北部以及宁夏以及安徽、江苏地区的相关性也得到很大的提升。CLDAS-Prcp 不仅提升了雪深的模拟能力, 且与观测的一致性得到大大改进。

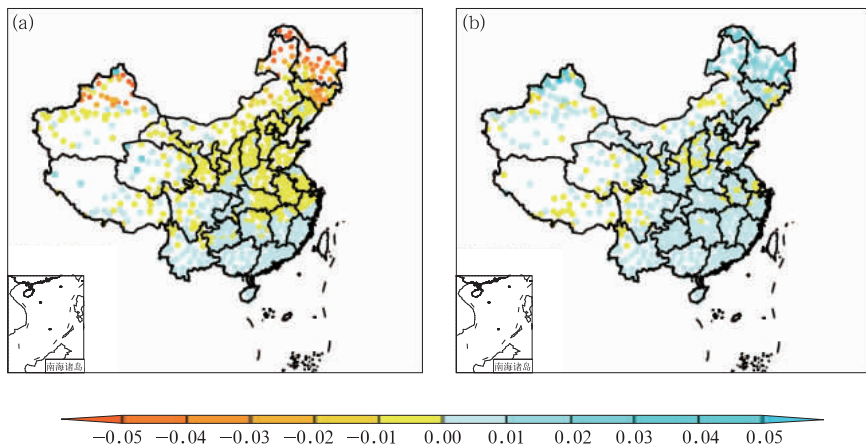


图 5 同图 3, 但为积雪深度季节 BIAS(单位: m)

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for seasonal BIAS of SD (unit: m)

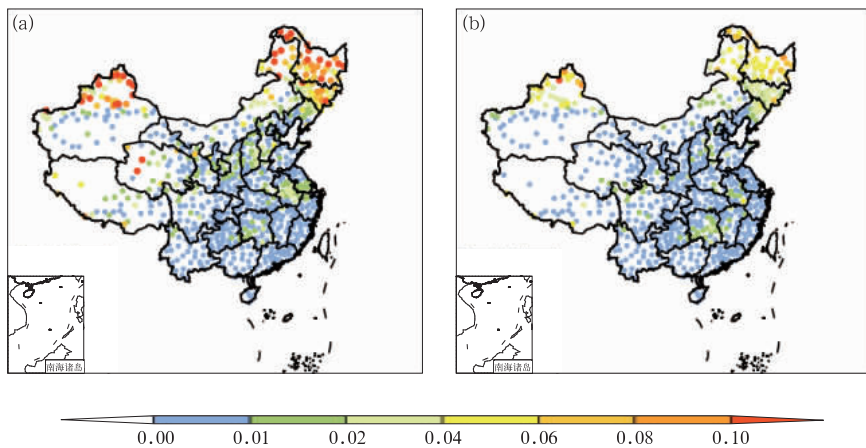


图 6 同图 3, 但为积雪深度季节 RMSE(单位: m)

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for seasonal RMSE of SD (unit: m)

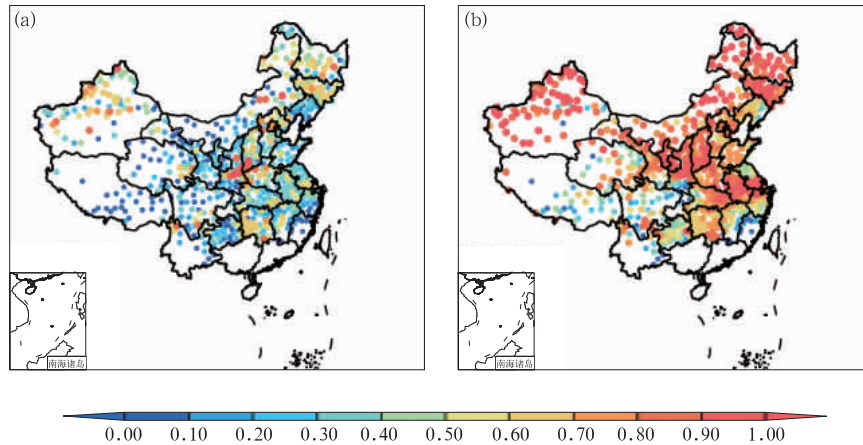


图 7 同图 3, 但为积雪深度逐日 CORR

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for CORR of SD

从表 2 可以总结出在几个主要积雪区, CLDAS-Prcep 模拟结果普遍改进了雪深较小的情况, 积雪的模拟能力以及时间变率的一致性均有改进。改进后的模拟结果对青藏高原地区的雪深得到了较好的模拟, BIAS 和 RMSE 最小, 分别为 -0.11×10^{-2} 和 0.695×10^{-2} m, 东北区域表现稍差, BIAS

和 RMSE 分别为 0.641×10^{-2} 和 2.623×10^{-2} m, 但是新疆区域在几个主要积雪区中与观测的相关性最好, 相关系数为 0.795, 而青藏高原最低, 相关系数为 0.604。中国区域整体相关系数提高大约 0.4, 同时 RMSE 和 BIAS 分别减少 38.8% 和 69%。

表 2 2008—2014 年中国区域以及各主要积雪区雪深评价指标结果汇总

Table 2 Evaluation results of SD in China and the main snow areas from 2008 to 2014

	CLDAS 驱动			CLDAS-Prcep 驱动		
	RMSE/ 10^{-2} m	BIAS/ 10^{-2} m	CORR	RMSE/ 10^{-2} m	BIAS/ 10^{-2} m	CORR
东北区域	4.215	-1.593	0.375	2.623	0.641	0.775
新疆区域	4.635	-1.448	0.394	2.246	0.325	0.795
青藏高原区域	1.416	-0.18	0.202	0.695	-0.11	0.604
中国区域	1.798	-0.485	0.302	1.16	0.15	0.698

3.3 对雪水当量(SWE)模拟影响的评估

雪水当量精度检验分别基于 Noah3.6 模拟结果和 MERRA2 小时产品(预处理成平均日产品)的雪水当量的值, 进行季节平均、季节 BIAS、RMSE 以及 CORR 评估。从 2008—2014 年中国区域季节平均雪水当量(图 8a, 8b)可以看出, 在积雪期雪水当量 SWE 的大值出现在东北区域、新疆区域平均值大概在 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右, 而在融雪期则略低。从 CLDAS-Prcep 的雪水当量模拟结果中可以看出, 无论在积雪期还是融雪期, 模拟结果的基本形态与 MERRA2 数据相吻合, CLDAS 驱动模式模拟 SWE 偏低。

从 2008—2014 年中国区域雪水当量季节偏差

(图 9) 可以看出, 在积雪期 CLDAS 的模拟结果(图 9a, 9b)的 SWE 普遍低估, 东北地区 and 新疆北部地区低估明显; 从 CLDAS-Prcep 的雪水当量的模拟结果(图 9c, 9d)可以看出, 新驱动改善了 SWE 的低估问题, 同时解决了青藏高原中西部地区高估问题, 青藏高原区域的高估情况基本消除, 整个中国区域的负偏差的范围有所缩小, 值有所降低, 中部地区大都为值在 0~1 的正偏差。而融雪期的表现与积雪期相同, 但是偏差值普遍低于积雪期。

从 2008—2014 年中国区域雪水当量逐日 CORR 对比(图 10)可以看出 CLDAS 的模拟结果(图 10a)CORR 较低, 在东北地区 and 新疆北部地区 CORR 普遍在 0.2~0.5, 新疆的南部以及青藏高原地区的 CORR 基本在 0.1 以下, 青藏高原部分地区

甚至为负相关;CLDAS-Prcp 的雪水当量的模拟结果(图10b)在整个中国区域内的相关系数都得到了

提高,在青藏高原大部分地区的 CORR 提高到 0.7 以上,东北地区可达 0.9 以上,而在新疆南部地区可

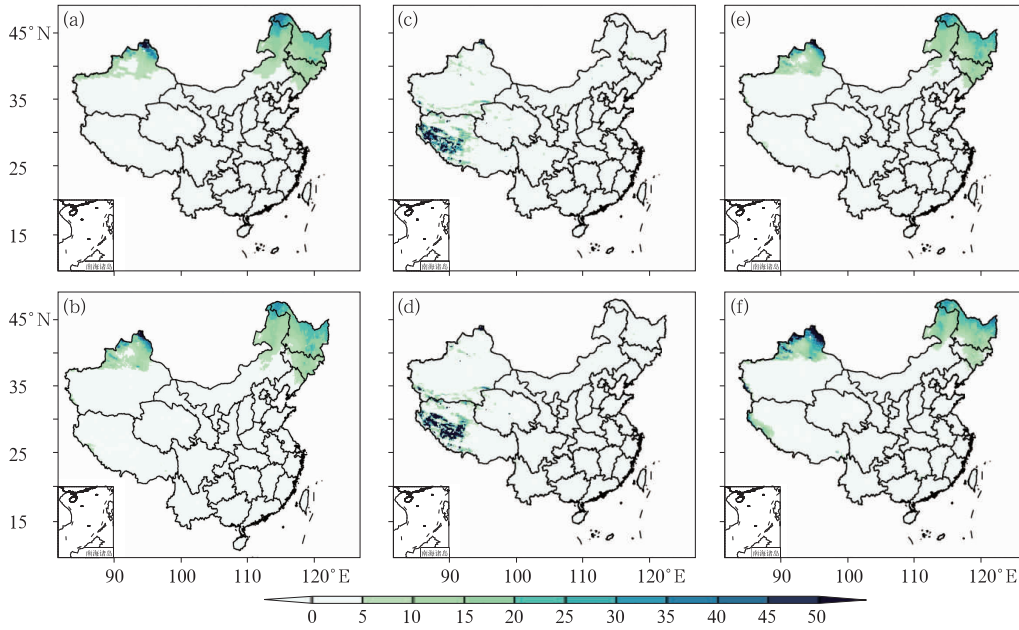


图 8 同图 1, 但为季节平均雪水当量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 8 Same as Fig. 1, but for seasonal mean of SWE (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

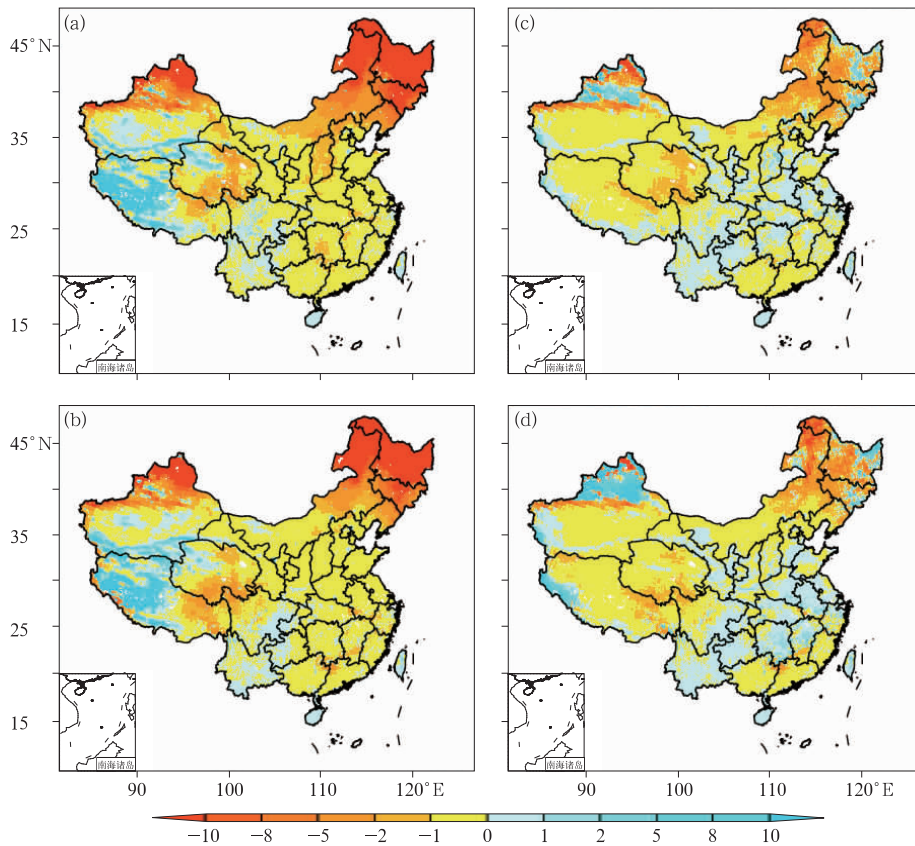


图 9 同图 2, 但为雪水当量季节 BIAS(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 9 Same as Fig. 2, but for seasonal BIAS of SWE (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

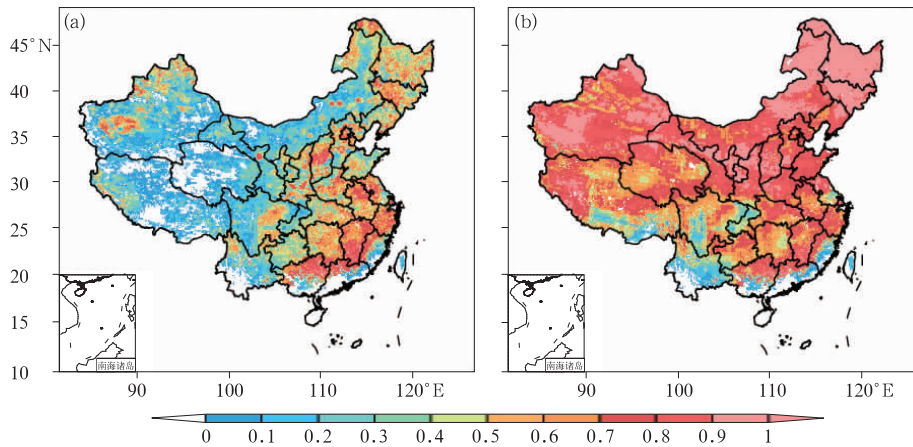


图 10 同图 3, 但为雪水当量逐日 CORR

Fig. 10 Same as Fig. 3, but for CORR of SWE

提升到 0.6~0.9 左右,在整个中国地区 CORR 得到很大的提升,负相关基本消失。也可以看出 CLDAS-Prcep 的模拟结果在青藏高原和新疆的部分地区已由负相关转为正相关。

从表 3 可以观察在从几个主要积雪区,CLDAS-Prcep 模拟结果普遍改进了 SWE 较小的情况,雪水当量的模拟能力和与观测的一致性均有改进。改进后的模拟结果在青藏高原区域的雪水当量得到

较好的模拟,BIAS 和 RMSE 最小,分别为 0.447 和 2.49 kg·m⁻²,而东北区域的 BIAS 和 RMSE 分别为 -2.35 和 10.7 kg·m⁻²,东北区域与观测时间变率的一致性在几个主要积雪区中最好,CORR 为 0.931,而青藏高原最低,CORR 为 0.69。中国区域整体 RMSE 和 BIAS 分别减小了 54.8% 和 83.1%,CORR 提高了 0.47。

表 3 中国区域以及各主要积雪区 2008—2014 年雪水当量评价指标结果汇总
Table 3 Evaluation results of SWE in China and the main snow areas from 2008 to 2014

	CLDAS 驱动			CLDAS-Prcep 驱动		
	RMSE /kg·m ⁻²	BIAS /kg·m ⁻²	CORR	RMSE /kg·m ⁻²	BIAS /kg·m ⁻²	CORR
东北区域	31.8	-20.00	0.447	10.7	-2.35	0.931
新疆区域	8.20	-1.74	0.216	6.51	2.02	0.817
青藏高原区域	7.04	1.45	0.141	2.49	0.447	0.69
中国区域	11.0	-4.63	0.335	4.97	0.784	0.806

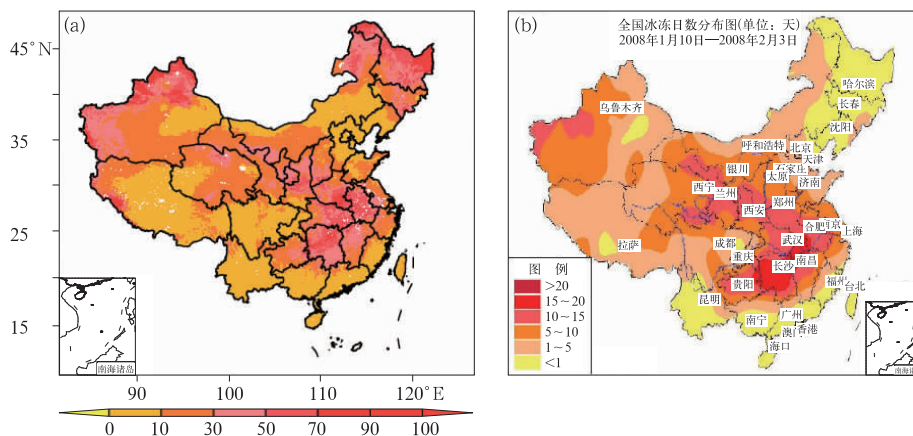


图 11 2008 年 1 月 10 日至 2 月 3 日 CLDAS-Prcep 模式平均积雪覆盖率(a, 单位: %) 与全国冰冻日数(b, 单位: d; 丁一汇, 2010)

Fig. 11 Model SCF (a, unit: %) and frozen days (b, unit: d; 丁一汇, 2010) in China from 10 January to 3 February 2008

3.4 对突发降雪模拟能力的评估

2008年1月我国南部地区发生了百年不遇的雪灾,河南、湖北、江苏和江西西北部、浙江北部出现大到暴雪,湖南、贵州、安徽南部和江西等地出现冻雨或冰冻天气,4次过程主要的发生时间为:1月10—16日,18—22日,25—29日,31日至2月2日(沈永平等,2009)。从2008年1月10日至2月3日CLDAS-Prcep模式平均积雪覆盖率(SCF)与国家气候中心发布的全国冰冻日数(丁一汇,2010)对比结果可以看出,模式模拟的积雪覆盖率与积雪日数空间分布一致。在这段时间,长沙及周边地区的积雪覆盖率达到了70%以上,这与全国冰冻日数15~20d的地区相对应,而西宁、兰州、西安合肥等地处在冰冻日数5~10d的地区,在CLDAS-Prcep的积雪覆盖率图上可以看到明显对应的空间分布,积雪覆盖率基本在10%~30%。除了新疆北部以及东北地区高估,CLDAS-Prcep的模式模拟结果与全国冰冻日数空间分布基本一致。说明CLDAS-Prcep不仅可以较好地模拟积雪变量,同时能够刻画出强度较大的突发降雪事件。

4 结 论

上述试验采用CLDAS和改进后的降水驱动(CLNAS-Prcep)分别驱动Noah3.6陆面模式对积雪变量进行模拟,对比了降水驱动对模拟结果所带来的影响,评估结果说明CLNAS-Prcep改善了原有驱动在冬季由于低估降水所造成的积雪量偏少的情况,并在几个主要积雪区和中国区域都有明显的改进,同时也印证了驱动数据的质量直接决定着模式对积雪的模拟效果。CLNAS-Prcep驱动改进了模式积雪变量的模拟效果,在不同的区域以及不同变量,改进效果不尽相同。从评估效果可以看出,CLNAS-Prcep驱动模式模拟结果能够较好地反映青藏高原的积雪变量,其积雪覆盖率、雪深、雪水当量的RMSE和BIAS分别为13.1%、2.2%, 0.69×10^{-2} m、 -0.11×10^{-2} m, $2.49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $0.447 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,东北区域模拟与观测时间变率最为一致,积雪覆盖率、雪深、雪水当量的CORR分别为0.416, 0.775, 0.931,而雪水当量的改进效果最明显, RMSE和BIAS分别减小了54.8%和83.1%,CORR提高了0.47。而从三个积雪变量比较,三者

与观测的一致性则表现为:雪水当量>雪深>积雪覆盖率。

通过2008年1月的中国南方暴雪事例,也可以看出,CLNAS-Prcep不仅可以较好地反映积雪变量的时间变率,同时能够较准确地反映突发的强度较大的降雪事件。

积雪覆盖率在东北和新疆区域模拟略高于MODIS,可能是作为检验数据的MODIS在森林地区以及山区对雪监测能力不够,对SCF形成低估造成的(Su et al, 2010)。因此,后续工作可以通过地表类型进行区域划分,进行针对不同地表类型区域来评估,进一步深刻探讨新驱动在不同地表类型的表现。同时,未来工作可以考虑通过数据融合以及数据同化(朱国富, 2015a; 2015b)方法对积雪覆盖率SCF的数据质量进行改进,减少驱动和模式结构的不确定性对积雪模拟造成的影响。

参考文献

- 陈海山,孙照渤,2004.积雪季节变化特征的数值模拟及其敏感性试验[J].气象学报,62(3):269-284.
- 陈海山,孙照渤,朱伟军,2003.欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响II.数值模拟[J].大气科学,27(5):847-860.
- 除多,杨勇,罗布坚参,等,2016. MERRA再分析地面气温产品在青藏高原的适用性分析[J].高原气象,35(2):337-350.
- 丁一汇,2010.第九讲 东亚季风与冷涌[M]//高等天气学系列讲座单元三:热带大气环流和天气系统.北京:气象出版社.
- 胡增运,倪勇勇,邵华,等,2013. CFSR、ERA-Interim和MERRA降水资料在中亚地区的适用性[J].干旱区地理,36(4):700-708.
- 李弘毅,王建,2013.积雪水文模拟中的关键问题及其研究进展[J].冰川冻土,35(2):430-437.
- 李洛晔,沈润平,李鑫慧,等,2016.基于MODIS时间序列森林扰动监测指数比较研究[J].遥感技术与应用,31(6):1083-1090.
- 李培基,米德生,1983.中国积雪的分布[J].冰川冻土,5(4):9-18.
- 李伟平,刘新,聂肃平,等,2009.气候模式中积雪覆盖率参数化方案的对比研究[J].地球科学进展,24(5):512-522.
- 李震坤,武炳义,朱伟军,2009.春季欧亚积雪异常影响中国夏季降水的数值试验[J].气候变化研究进展,5(4):196-201.
- 潘旸,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.
- 秦艳慧,吴通华,李韧,等,2015. ERA-Interim地表温度资料在青藏高原多年冻土区的适用性[J].高原气象,34(3):666-675.
- 沈永平,王国亚,魏文寿,等,2009.冰雪灾害[M].北京:气象出版社:49-50.
- 孙菽芬,李敬阳,2002.用于气候研究的雪盖模型参数化方案敏感性研究[J].大气科学,26(4):558-576.
- 田静,苏红波,孙晓敏,2011. GDAS数据和NOAH陆面模式在中国应用的精度检验[J].地理科学进展,30(11):1422-1430.

- 肖林,车涛,2015.青藏高原积雪对气候反馈的初步研究[J].遥感技术与应用,30(6):1066-1075.
- 许立言,武炳义,2012a.欧亚大陆积雪两种物理效应对 2010 年春末夏初华南降水的影响[J].大气科学,36(2):271-282.
- 许立言,武炳义,2012b.欧亚大陆积雪与 2010 年中国春末夏初降水的关系[J].高原气象,31(3):706-714.
- 杨凯,胡田田,王澄海,2017.青藏高原南、北积雪异常与中国东部夏季降水关系的数值试验研究[J].大气科学,41(2):345-356.
- 张果,薛海乐,徐晶,等,2016.东亚区域陆面过程方案 NOAH 和 NOAH-MP 的比较评估[J].气象,42(9):1058-1068.
- 张人禾,张若楠,左志燕,2016.中国冬季积雪特征及欧亚大陆积雪对中国气候影响[J].应用气象学报,27(5):513-526.
- 张若楠,张人禾,左志燕,2015.中国冬季积雪变异及其与北极涛动的联系[J].大气科学,39(3):634-642.
- 张学通,黄晓东,梁天刚,等,2008.新疆北部地区 MODIS 积雪遥感数据 MOD10A1 的精度分析[J].草业学报,17(2):110-117.
- 仲桂新,宋开山,王宗明,等,2010.东北地区 MODIS 和 AMSR-E 积雪产品验证及对比[J].冰川冻土,32(6):1262-1269.
- 朱国富,2015a.理解大气资料同化的根本概念[J].气象,41(4):456-463.
- 朱国富,2015b.数值天气预报中分析同化基本方法的历史发展脉络和评述[J].气象,41(8):986-996.
- 朱玉祥,丁一汇,2007.青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题[J].气象科技,35(1):1-8.
- 左志燕,张人禾,2012.中国春季降水异常及其与热带太平洋海面温度和欧亚大陆积雪的联系[J].大气科学,36(1):185-194.
- Ben L, Xia Youlong, Mitchell K E, et al, 2010. Noah LSM snow model diagnostics and enhancements[J]. J Hydrometeorol, 11(3): 721-738.
- Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E, et al, 2003. The common land model[J]. Bull Amer Meteor Soc, 84(8):1013-1024.
- Hall D K, Riggs G A, 2007. Accuracy assessment of the MODIS snow products[J]. Earth Sci, 21(12):1534-1547.
- Hall D K, Riggs G A, Foster J L, et al, 2010. Development and evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow-cover product[J]. Remote Sens Environ, 114(3):496-503.
- Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, et al, 2002. MODIS snow-cover products[J]. Remote Sens Environ, 83(1/2):181-194.
- Jordan R, 1991. A one-dimensional temperature model for a snow cover[R]. Technical Documentation for SNTHERM. 89. Special Report 91-16. Hanover; USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory:49.
- Koren V, Schaake J, Mitchell K, et al, 1999. A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models[J]. J Geophys Res, 104(D16):19569-19585.
- Li Dongliang, Wang Chunxue, 2011. Research progress of snow cover and its influence on China climate[J]. Trans Atmos Sci, 34(5): 627-636.
- Niu Guoyue, Yang Zongliang, Mitchell K E, et al, 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements[J]. J Geophys Res, 116(D12):D12109. DOI: 10.1029/2010JD015139.
- Simic A, Fernandes R, Brown R, et al, 2003. Validation of VEGETATION, MODIS, and GOES + SSM/Isnow-cover products over Canada based on surface snow depth observations[J]. Hydrol Process, 18(6):1089-1104.
- Su Hua, Yang Zongliang, Dickinson R E, et al, 2010. Multisensor snow data assimilation at the continental scale: the value of Gravity Recovery and Climate Experiment terrestrial water storage information[J]. J Geophys Res, 115(D10):D10104.
- Sun Shufen, Jin Jiming, Xue Yongkang, 1999. A simple snow-atmosphere-soil transfer model[J]. J Geophys Res, 104(D16):19587-19597.
- Wang Xianwei, Xie Hongjie, Liang Tiangang, 2008. Evaluation of modis snow cover and cloud mask and its application in northern Xinjiang, china[J]. Remote Sens Environ, 112(4):1497-1513.
- Wei Zhigang, Dong Wenjie, 2015. Assessment of simulations of snow depth in the Qinghai-Tibetan plateau using cmip5 multi-models [J]. Arct, Antarct, Alp Res, 47(4):611-625.
- Wu Tongwen, Wu Guoxiong, 2004. An empirical formula to compute snow cover fraction in GCMs[J]. Adv Atmos Sci, 21(4):529-535.
- Xie Zhipeng, Hu Zeyong, 2016. Comparison of the snow simulations in community land model using two snow cover fraction parameterizations[C]. Vienna; EGU General Assembly.
- Xie Zhipeng, Hu Zeyong, Xie Zhenghui, et al, 2018. Impact of the snow cover scheme on snow distribution and energy budget modeling over the Tibetan plateau[J]. Theor Appl Climatol, 131(3-4):951-965.
- Yang Zongliang, 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(2):353-373.
- Yi Yonghong, Kimball J S, Jones L A, et al, 2011. Evaluation of MERRA land surface estimates in preparation for the soil moisture active passive mission[J]. J Climate, 24(15):3797-3816.
- Yuan Wenping, Xu Wenfang, Ma Minna, et al, 2016. Improved snow cover model in terrestrial ecosystem models over the Qinghai-Tibetan plateau[J]. Agric For Meteorol, 218-219:161-170.
- Zhang Yongfei, 2015. Multivariate land snow data assimilation in the Northern Hemisphere: development, evaluation and uncertainty quantification of the extensible data assimilation system[D]. Austin: The University of Texas at Austin:1-5.