

师春香,姜立鹏,朱 智,等. 基于 CLDAS2.0 驱动数据的中国区域土壤湿度模拟与评估[J]. 江苏农业科学,2018,46(4):231-236.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.04.059

基于 CLDAS2.0 驱动数据的中国区域土壤湿度模拟与评估

师春香^{1,2},姜立鹏^{1,2},朱 智²,姜志伟²,梁 晓²,韩 帅²,张 涛²

(1. 南京信息工程大学地理与遥感学院,江苏南京 210044; 2. 国家气象信息中心,北京 100081)

摘要:基于高时空分辨率的中国气象局陆面数据同化系统(CMA Land Data Assimilation System,CLDAS)2.0 版本的大气驱动数据,使用 Noah-MP 陆面模式模拟中国区域 2013—2014 年土壤湿度的时空变化,将模拟结果与自动土壤水分观测站的逐小时观测值进行对比,并选取 6 个研究区,分析区域的平均土壤湿度时间变化特点。结果表明:Noah-MP 模式能够很好地模拟出中国区域 0~10 cm 土壤湿度空间分布,模拟值和观测值均呈现由西北向东南和西南地区递增的趋势;从全国尺度来看,模拟值与观测值非常接近,相关系数大于 0.9,均方根误差为 0.008 m³/m³;从区域尺度看,Noah-MP 能够很好地模拟出各研究区土壤湿度的时间变化,但是对于冻土融化时东北地区的土壤湿度存在轻微的低估。基于 CLDAS2.0 驱动数据得到的土壤湿度模拟结果具有较高准确性,可为农业干旱研究提供一定参考。

关键词:中国气象局陆面数据同化系统 2.0;Noah-MP 陆面模式;土壤湿度模拟;时间变化特点;空间分布;评估
中图分类号:P416.2;S127 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)04-0231-06

土壤湿度是反映陆面表面状况的一个重要物理量^[1-2],也是农业干旱监测中的重要指标^[3-5]。土壤湿度在时间尺度上具有周尺度甚至月尺度的记忆能力,可直接影响短期气候变化和中尺度天气过程^[6];同时土壤湿度可以通过影响地表反照率和蒸散发,进而对农作物生长产生影响^[7]。尽管土壤湿度在农业气象、气候变化等研究中非常重要,但是观测值的有限密度和数量制约了相关研究的开展^[8-9],因此研究者通过使用陆面模式对陆表状况进行模拟^[10],获取时空分布连续的土壤湿度模拟结果,进而开展相关研究。

尽管研究者在陆面模型发展与改进方面开展了大量的工作,但是陆面模式的模拟结果仍然存在一定的误差。改善陆面模式模拟结果的途径主要有以下 4 种:(1)制作更为精确的大气驱动数据^[11];(2)更换土壤质地等地表参数^[12];(3)改进陆面模式中的物理过程^[13];(4)同化观测资料^[14],其中高质量、高时空分辨率的大气驱动数据是准确的陆面过程模拟中不可缺少的。

对于陆面模式研究者来说,缺乏长时间序列的、高分辨率的、接近真实的大气驱动数据一直是困扰他们的一大问题^[15],并且大量关于大气驱动数据的研究也证明了准确的、有更多观测信息存在的驱动数据对于提高陆面模式模拟结果的重要性,大气驱动数据的质量对陆面模式真实模拟地表状况影响很大^[16-19]。近年来,许多研究团队致力于研究全球以及区域的大气驱动数据作为陆面模式的驱动场^[20-25]。尽管

国际上已有几套全球大气强迫数据集可供陆面过程研究使用,但在全球各地的质量有很大的差异。虽然中国研究者最近几年也开展过关于大气驱动数据集的研究^[26-32],但还缺少高质量、高时空分辨率的大气驱动数据集供相关研究使用,可以说高质量、高时空分辨率的中国区域大气驱动数据的缺乏已经变成制约陆面过程模拟及相关研究的重要因素。

笔者基于高质量、高时空分辨率的中国气象局陆面数据同化系统(CMA Land Data Assimilation System,CLDAS)2.0 驱动数据,运行 Noah-MP 陆面模式对中国区域土壤湿度进行模拟,并根据逐小时的土壤湿度观测值对土壤湿度模拟结果进行评估,探讨在使用高质量、高时空分辨率驱动数据的情况下,陆面模式对土壤湿度的模拟精度,试图为农业干旱监测提供更为准确的土壤湿度格点数据。

1 数据与方法

1.1 土壤湿度观测值及质量控制方法

本研究所使用的土壤湿度观测来源于国家气象信息中心资料服务室,时间分辨率为逐小时,时间尺度是 2013—2014 年。

由于目前土壤水分自动站点在处于布设-验收-业务化的过程中,土壤湿度观测值的质量参差不齐,因此对于土壤湿度观测值进行质量控制是很有必要的。气象数据质量控制一般包括极限值检查、时间一致性检查、空间一致性检查等步骤,本研究参考了韩帅提出的土壤湿度观测值质量控制方案^[33],并根据观测值实际情况对质量控制方案进行相应的改动。本研究所使用的土壤湿度观测值质量控制方法包括以下 3 步:(1)由于观测仪器的土壤体积含水量测量范围是 0~0.5 mm³/mm³,并且在土壤湿度观测站点所在的场地不会出现土壤中没有水分的情况,因此剔除了 ≤0 或 >0.5 mm³/mm³ 的土壤湿度观测值;(2)由于在 0℃ 以下,土壤中的水分会以

收稿日期:2017-06-02

基金项目:国家自然科学基金重点项目(编号:91437220);国家公益性行业科研专项(编号:GYHY201306045、GYHY201206013、GYHY201306022)。

作者简介:师春香(1964—),女,山西吕梁人,博士,研究员,主要从事陆面数据同化研究。E-mail:shicx@cma.gov.cn。

固态和液态 2 种形态存在,同时土壤湿度观测仪器在 0℃ 以下并不能正常工作,因此根据站点的 10 cm 土壤湿度观测值对相应时次的土壤湿度观测值进行过滤,如果 10 cm 土壤湿度观测值小于 0℃,则剔除相应时刻的土壤湿度观测值;(3) 由于各土壤湿度观测站开始业务化的时间并不一致且各站点的土壤湿度观测值质量存在差异,须要选取有效观测值较多的站点,因此本研究剔除了年观测时间 <180 d 站点的所有土壤湿度观测值。经过质量控制后,选取 931 个站点的 0~10 cm 土壤湿度观测值,站点分布情况如图 1 所示,由此可以看出经过质量控制后的土壤湿度观测站呈现东南密集、西北稀疏的空间分布特征,并且由于剔除了 10 cm 土壤温度 <0℃ 时对应的土壤湿度,在青藏高原地区只有零星站点在质量控制后保留了下来。

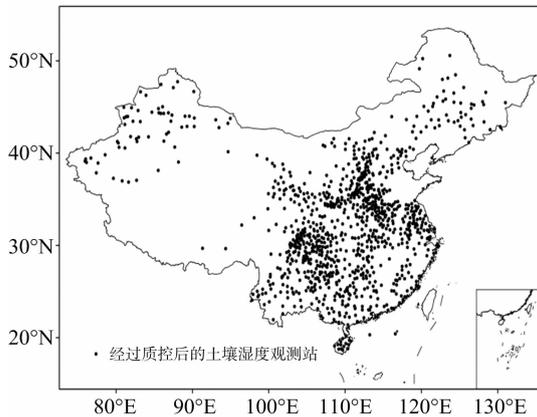


图1 土壤湿度观测站点的空间分布

由于在土壤湿度观测值质量控制过程中,北方地区的冬季土壤湿度观测值大多数被剔除,为了在研究中与其他地区的土壤湿度情况进行对比,笔者选取了 2013—2014 年 4—10 月的 0~10 cm 土壤湿度作为研究对象。

1.2 CLDAS2.0 驱动数据

《国家气象科技创新工程(2014—2020 年)实施方案》明确指出,研制中国区域千米分辨率地面气温、气压、湿度、风、降水、辐射、土壤温湿度、积雪等产品是国家气象信息中心的任务之一。为了完成这一目标,国家气象信息中心进行了较长远的发展规划,位于核心地位的是中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS)的建设,该系统计划分为 4 个阶段进行,即 CLDAS1.0~CLDAS4.0。其中,CLDAS1.0 系统目前已经在国家气象信息中心业务运行,其主要目标是设计一个可扩展的陆面数据同化系统框架,并为系统升级预留接口。2015 年,国家气象信息中心气象数据研究室开始了 CLDAS2.0 系统研发工作,其主要任务是建设一个较长时间序列(2008—2014 年)的大气驱动数据以及实现基于该大气驱动数据的多个陆面模式运行,并且为建立长时间序列(1979 年至今)的大气驱动数据做准备。本研究使用的 CLDAS2.0 驱动数据来源于国家气象信息中心气象数据研究室,包括近地面气温、气压、湿度、风速、降水和短波辐射 6 个要素,空间分辨率为 0.062 5°,时间分辨率为 1 h。

1.3 Noah-MP 陆面模式

Noah-MP(the Community Noah Land Surface Model with

Muti-Parameterization Options) 陆面模式是 CLDAS2.0 系统添加的主要陆面模式,也是美国新一代的陆面模式。目前 Noah-MP 陆面模式已经广泛应用于陆面过程模拟研究。Yang 等利用 Noah-MP 陆面模式对全球 50 个主要流域的水文状况进行模拟,结果表明 Noah-MP 陆面模式能够较好地模拟出地表温度、土壤湿度等重要的陆表变量^[34];Cai 等利用北美陆面数据同化系统(North-American Land Data Assimilation Systems, NLDAS)平台测试了 4 个陆面模式(Noah、Noah-MP、CLM、VIC)在水文上的表现,结果表明,相对于其他 3 个陆面模式,Noah-MP 陆面模式在模拟土壤湿度以及陆地水储量上表现得最好^[35]。

由于表层土壤湿度对于农作物生长以及气候变化研究是十分重要的,因此本研究选取了 0~10 cm 土壤湿度作为研究对象。同时为了在区域尺度上对土壤湿度的模拟结果进行评估,参考朱晨等的研究结果^[8],并结合实际观测站点的空间分布,在中国区域选取 6 个研究区(图 2),其中 I 区为东北地区,II 区为华北地区,III 区为江淮地区,IV 区为东南地区,V 区为西北东部地区,VI 为西南地区。

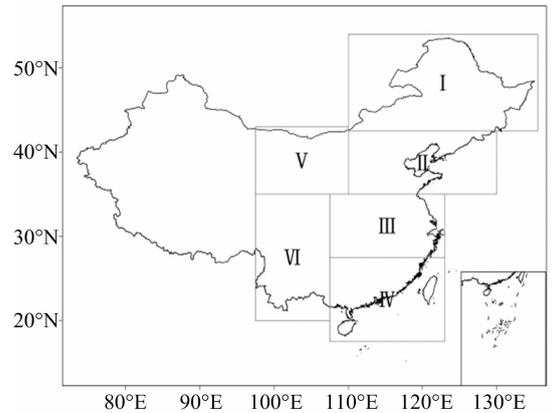


图2 中国研究区划分图示

2 结果与分析

2.1 土壤湿度模拟误差的空间分布

图 3 给出了由中国区域 0~10 cm 土壤湿度观测值与 Noah-MP 模拟值的空间分布,由此可以看出,东南地区是土壤湿度的高值区,土壤体积含水量都在 0.25~0.40 m³/m³ 之间,而河套地区是土壤湿度的低值区,土壤体积含水量在 0.05~0.15 m³/m³ 之间,土壤湿度从西北地区向东南和西南地区递增。从 0~10 cm 土壤湿度的空间分布来看,华北地区较为干燥,而东南和西南地区较为湿润,这样的土壤湿度分布特点与孙丞虎等的研究结果^[36-37] 较为一致。从图 3-b 可以看出, Noah-MP 模式对中国东部土壤湿度的模拟结果也呈现出从西北地区向东南和西南地区递增的特点,但略有差异,主要体现在对于新疆南部地区土壤湿度出现了明显的低估,这可能是由 2 个原因造成的:(1) 观测站点所在地与整体环境出现了差异;(2) 剔除了 10 cm 土壤温度 <0℃ 时的 0~10 cm 土壤湿度观测值,造成一些土壤湿度观测低值没有通过质量控制流程。Noah-MP 模式在河套地区出现了轻微的高估;而对于东南地区和西南地区的土壤湿度模拟得很好。从空间相关系数来看, Noah-MP 土壤湿度模拟值与观测值之间的

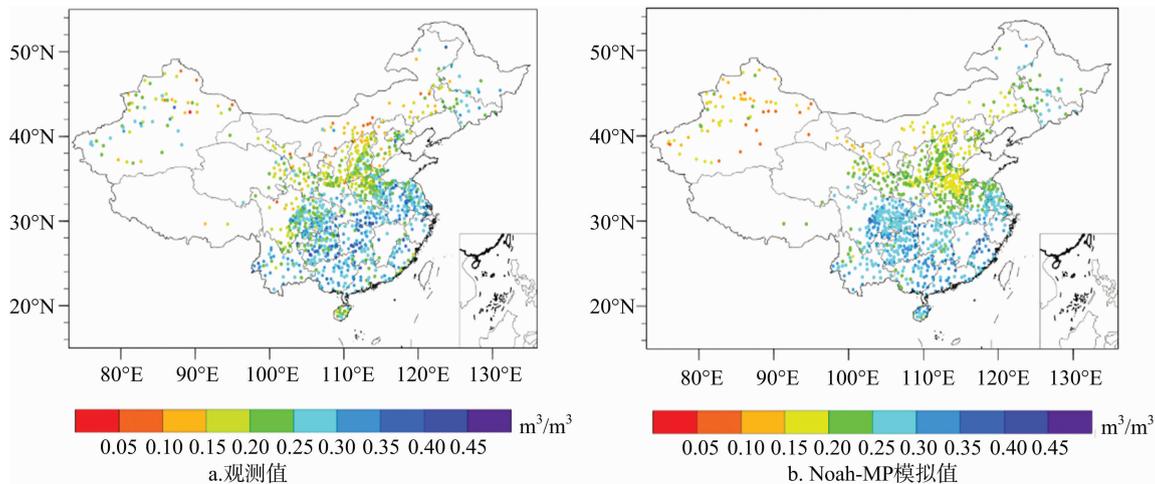


图3 中国区域 0~10 cm 土壤湿度观测值与 Noah-MP 模拟值的空间分布

相关系数为 0.538, 可以通过 0.05 水平的显著性检验。

图 4 给出了 Noah - MP 模式 0 ~ 10 cm 土壤湿度模拟值与观测值偏差的空间分布, 可以看出东南地区主要出现低估, 呈负偏差, 而在北方地区主要呈正偏差; Noah - MP 在新疆地区存在一个负偏差高值中心, 这可能与使用的观测值有关; 同时在四川省存在一个正偏差高值中心, 这可能是由于观测仪器的参数出现了问题, 陈东东等研究表明, 四川省的人工观测土壤湿度和自动观测土壤湿度之间存在较大的差异, 而一般认为通过人工烘干称质量观测的土壤湿度观测值较为准确, 因此四川省的土壤湿度自动观测值是否准确是值得商榷的^[38]。从 Noah - MP 模式 0 ~ 10 cm 土壤湿度模拟值与观测值偏差的统计情况 (图 5) 可以看出, 偏差主要分布在 -0.09 ~ 0.09 m³/m³ 以内, 其中 Noah - MP 模式 0 ~ 10 cm 土壤湿度模拟值在 69.1% 的站点与观测值的偏差在 -0.06 ~ 0.06 m³/m³ 之间, 在 37.7% 的站点与观测值的偏差在 -0.03 ~ 0.03 m³/m³ 之间, 在呈现负偏差的站点 (占总站点数目的 52.6%) 略多于呈现正偏差的站点 (占总站点数目的 47.4%)。

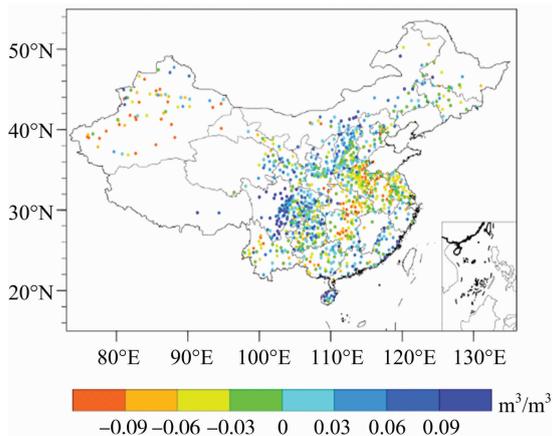


图4 Noah-MP 模式 0~10 cm 土壤湿度模拟值与观测值偏差的空间分布

相关系数大于 0.5; 而相关性在西部地区较弱, 特别是在新疆地区, 模拟值在大部分站点与观测值的相关系数均小于 0.4。从 Noah - MP 模式 0 ~ 10 cm 土壤湿度模拟值与观测值相关系数的分布情况 (图 7) 可以看出, 相关系数在各个区间均有分布, 但是主要分布在 0.5 及以上, 其中在 60% 以上的站点, 土壤湿度模拟值与观测值的相关系数大于 0.6, 可以通过 0.05 水平的显著性检验。

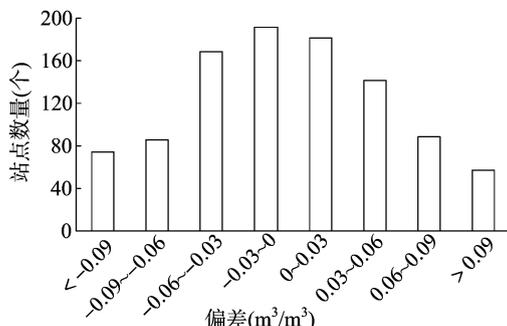


图5 Noah-MP模式0~10 cm土壤湿度模拟值与观测值偏差的分布直方图

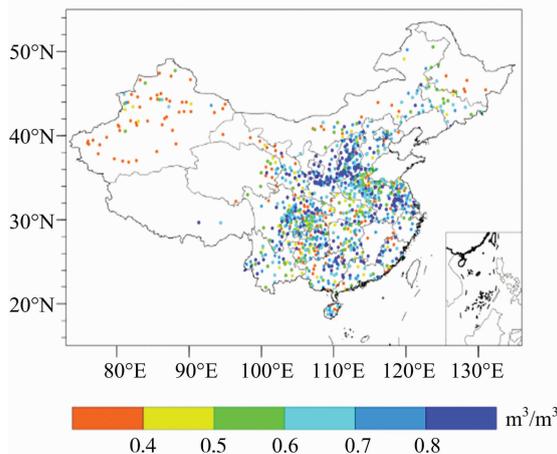


图6 Noah-MP 模式 0~10 cm 土壤湿度模拟值与观测值相关系数的空间分布

图 6 给出了 Noah - MP 模式 0 ~ 10 cm 土壤湿度模拟值与观测值相关系数的空间分布, 可以看出土壤湿度模拟值与观测值的相关性在东部地区较强, 在大部分站点与观测值的

2.2 土壤湿度模拟误差的时间分布

在分析了站点尺度土壤湿度比较结果的基础上, 在区域尺度上对 Noah - MP 模式的土壤湿度模拟值与观测值进行对

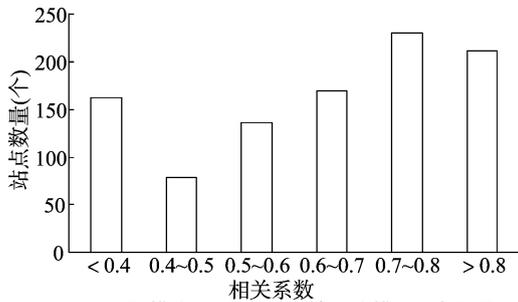


图7 Noah-MP 模式 0~10 cm 土壤湿度模拟值与观测值相关系数的分布区间

比分析。由于在西北西部和青藏高原研究区的土壤湿度观测站较为稀疏,代表性不足,本试验并没有对西北西部和青藏高原研究区的土壤湿度模拟误差时间分布进行研究。从图 8-a、图 8-b 可以看出, Noah-MP 对于 4—5 月期间的东北研究区的 0~10 cm 土壤湿度存在明显的低估,这表明 Noah-MP 模式在冻土融化时的土壤湿度模拟方面还须要进一步改进;从图 8-e、图 8-f 可以看出,在江淮研究区, Noah-MP 模式可以抓住土壤湿度的变化,但是存在轻微的低估。从全国尺度看,尽管土壤湿度模拟值与观测值的变化趋势基本一致,但是 Noah-MP 的土壤湿度模拟值在春季和秋季存在轻微的低估,而在夏季与观测更为接近。

由表 1 可以看出,东北地区 Noah-MP 模式的 0~10 cm 土壤湿度模拟值与观测值的相关性低于其他 5 个研究区,相关系数为 0.665,而其他 5 个研究区的相关系数都大于 0.9,从全国尺度来看, Noah-MP 模式的 0~10 cm 土壤湿度模拟值与观测值的相关性很强,相关系数达到 0.939;从区域尺度和全国尺度来看, 0~10 cm 土壤湿度模拟值与观测值的偏差较小,都在 $-0.03 \sim 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间,其中江淮地区、西南地区的偏差较大,分别为 -0.027 、 $0.023 \text{ m}^3/\text{m}^3$; 6 个研究区 0~10 cm 土壤湿度模拟值与观测值的均方根误差都在 $-0.03 \sim 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以内,其中江淮地区的均方根误差最大,为 $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$,西北东部地区的均方根误差最小,为 $0.01 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

3 结论与讨论

基于国家气象信息中心提供的 CLDAS2.0 驱动数据,使用 Noah-MP 陆面模式对中国区域的陆面过程进行模拟,提取土壤湿度模拟结果,并基于土壤水分自动站的逐小时土壤湿度观测值对模拟结果进行评估与分析,结果表明:(1) Noah-MP 模式能够很好地模拟出中国区域的 0~10 cm 土壤湿度空间分布,偏差主要分布在 $-0.06 \sim 0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以内,相关系数主要分布在 0.5 以上;从区域尺度看, Noah-MP 能够很好地模拟出各区域的土壤湿度变化,各研究区的偏差都在 $-0.03 \sim 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以内。(2) 对于春季北方地区的 0~10 cm 土壤湿度, Noah-MP 模式的模拟结果存在明显的低估现象,这可能是由于该模式在冻土融化时的土壤湿度模拟方面还存在一定的缺陷,须要进一步改进。

参考文献:

[1] Li H, Robock A, Liu S, et al. Evaluation of reanalysis soil moisture simulations using updated Chinese soil moisture observations [J]. Journal of Hydrometeorology, 2009, 6(2): 180-193.

[2] Xia Y L, Sheffield J, Ek M B, et al. Evaluation of multi-model simulated soil moisture in NLDAS-2 [J]. Journal of Hydrology, 2014, 512(4): 107-125.

[3] 尹楠,姜琦刚,孟治国,等. 基于 RADARSAT-2 全极化数据反演周期性地表土壤湿度[J]. 农业工程学报, 2013(17): 72-79.

[4] 李明星,马柱国. 基于模拟土壤湿度的中国干旱检测及多时间尺度特征[J]. 中国科学(地球科学), 2015(7): 994-1010.

[5] 王素萍,张存杰,宋连春,等. 多尺度气象干旱与土壤相对湿度的关系研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 865-873.

[6] Yeh T, Wetherald R T, Manabe S. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—a numerical experiment [J]. Monthly Weather Review, 1972, 112(3): 474.

[7] 马柱国,符斌斌,谢力,等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 563-566.

[8] 朱晨,师春香,席琳,等. 中国区域不同深度土壤湿度模拟和评估[J]. 气象科技, 2013, 41(3): 529-536.

[9] 朱智,师春香. 中国气象局陆面同化系统和全球陆面同化系统对中国区域土壤湿度的模拟与评估[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(32): 138-144.

[10] 林朝晖,刘辉志,谢正辉,等. 陆面水文过程研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 935-949.

[11] Wang A H, Zeng X B. Sensitivities of terrestrial water cycle simulations to the variations of precipitation and air temperature in China [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(6): 2166-2181.

[12] Shen Y, Yang K, Qin J, et al. Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(10): 4466-4475.

[13] 刘树华,李新荣,刘立超,等. 陆面过程参数化模式的研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 303-311.

[14] 黄春林,李新. 陆面数据同化系统的研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(5): 424-430.

[15] 刘金婷. 多陆面模式、多驱动场对新疆地区陆面过程模拟研究及结果集成[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.

[16] Maurer E P, Wood A W, Adam J C, et al. A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States [J]. Journal of Climate, 2002, 15(22): 3237-3251.

[17] Berg A A, Famiglietti J S, Walker J P, et al. Impact of bias correction to reanalysis products on simulations of North American soil moisture and hydrological fluxes [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D16): 1211-1222.

[18] Fekete B M, Vörösmarty C J, Roads J O, et al. Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates [J]. Journal of Climate, 2004, 17(2): 294-304.

[19] Sheffield J, Ziegler A D, Wood E F, et al. Correction of the high-latitude rain day anomaly in the NCEP-NCAR reanalysis for land surface hydrological modeling [J]. Journal of Climate, 2004, 17(19): 3814-3828.

[20] Sheffield J, Goteti G, Wood E F. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. Journal of Climate, 2006, 19(13): 3088-3111.

[21] Qian T, Dai A, Trenberth K E, et al. Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004. Part I: forcing data and evaluations [J]. Journal of Hydrometeorology, 2006, 7(5): 953-975.

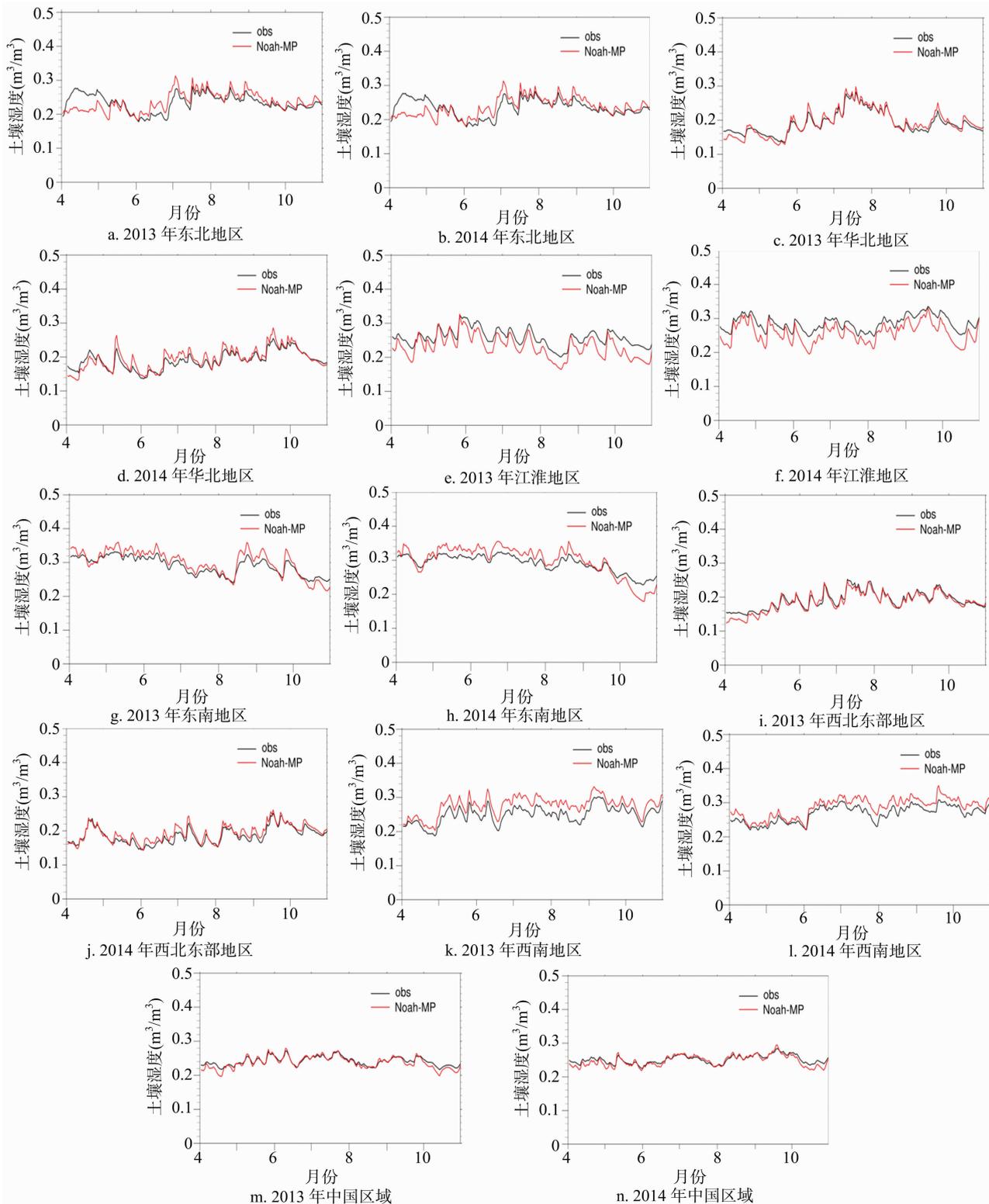


图8 中国6个研究区以及全国2013、2014年4—10月0~10 cm土壤湿度的模拟值与观测值

[22] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381 - 394.

[23] Robock A, Luo L, Wood E F, et al. Evaluation of the North American land data assimilation system over the southern Great Plains during the warm season [J]. Journal of Geophysical

Research: Atmospheres, 2003, 108(D22): 239 - 244.

[24] Xia Y L, Mitchell K, Ek M, et al. Continental - scale water and energy flux analysis and validation for North American Land Data Assimilation System project phase 2 (NLDAS - 2): 2. Validation of model - simulated streamflow [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117(D3): 812 - 819.

表1 6个研究区及全国0~10 cm土壤湿度 Noah-MP模拟值与实测的相关系数、偏差和均方根误差

研究区域	相关系数	偏差 (m^3/m^3)	均方根误差 (m^3/m^3)
I区(东北地区)	0.670	0.008	0.024
II区(华北地区)	0.950	0.004	0.012
III区(江淮地区)	0.947	-0.027	0.030
IV区(东南地区)	0.961	0.009	0.020
V区(西北东部地区)	0.928	0.002	0.010
VI区(西南地区)	0.942	0.023	0.024
全国	0.939	-0.003	0.008

- [25] Xia Y L, Ek M, Wei H L, et al. Comparative analysis of relationships between NLDAS-2 forcings and model outputs[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(3): 467-474.
- [26] 师春香, 谢正辉, 钱辉, 等. 基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度 EnKF 数据同化[J]. *中国科学(地球科学)*, 2011(3): 375-385.
- [27] 师春香. 基于 EnKF 算法的卫星遥感土壤湿度同化研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [28] 何杰. 中国区域高时空分辨率地面气象要素数据集的建立[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [29] 刘波, 马柱国, 冯锦明. 1960—2004年新疆地区地表水热过程的数值模拟研究 I. 以观测资料为基础的陆面过程模型大气驱动场的发展[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 491-502.

(上接第230页)

- [8] 杨光圻, 周瑞华, 孙淑庄, 等. 人的地方性硒中毒和环境及人体硒水平[J]. *营养学报*, 1982, 4(2): 81-89.
- [9] Williams P N, Villada A, Deacon C, et al. Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(19): 6854-6859.
- [10] 王欣, 幸苑娜, 陈泽勇, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法检测富硒食品中6种硒形态[J]. *分析化学*, 2013, 41(11): 1669-1674.
- [11] Wang S, Liang D, Wang D, et al. Selenium fractionation and speciation in agriculture soils and accumulation in corn (*Zea mays* L.) under field conditions in Shaanxi Province, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2012, 427/428: 159-164.
- [12] Jaiswal S K, Prakash R, Acharya R, et al. Bioaccessibility of selenium from Se-rich food grains of the seleniferous region of Punjab, India as analyzed by instrumental neutron activation analysis[J]. *CyTA (Journal of Food)*, 2012, 10(2): 160-164.
- [13] 朱建明, 左维, 秦海波, 等. 恩施硒中毒区土壤高硒的成因: 自然硒的证据[J]. *矿物学报*, 2008, 28(4): 397-400.
- [14] Fordyce F M, Guangdi Z, Green K, et al. Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15(1): 117-132.
- [15] 郭宇, 鲍征宇, 马真真, 等. 湖北恩施地区土壤植物系统 Se 元素的地球化学特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(1): 151-155.
- [16] Moon J H, Kim S H, Kim K S, et al. INAA for the evaluation of selenium contents in grain foods consumed by Korean[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, 309(1): 337-341.
- [17] Chilimba A D, Young S D, Black C R, et al. Agronomic

- [30] 左志燕, 张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征[J]. *中国科学(地球科学)*, 2008(11): 1428-1437.
- [31] 张志富. 自动站土壤水分资料质量控制方案的研制[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(1): 101-108.
- [32] 黄飞龙, 李昕娣, 黄宏智, 等. 基于 FDR 的土壤水分探测系统与应用[J]. *气象*, 2012(6): 764-768.
- [33] 韩帅. 基于 CLDAS 驱动数据的 CLM3.5 和 SSIB2 陆面模式模拟评估及干旱监测应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [34] Yang Z L, Niu G Y, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins[J]. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 2011, 116(D12): 1248-1256.
- [35] Cai X T, Yang Z L, Xia Y L, et al. Assessment of simulated water balance from Noah, Noah-MP, CLM, and VIC over CONUS using the NLDAS test bed[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(24): 13751-13770.
- [36] 孙丞虎, 李维京, 张祖强, 等. 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*, 2005, 16(2): 129-138.
- [37] 张文君, 周天军, 宇如聪. 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*, 2008, 32(3): 581-597.
- [38] 陈东东, 王明田, 张玉芳, 等. 四川省土壤湿度自动站和人工观测数据对比分析[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(29): 18066-18068, 18147.
- biofortification of maize with selenium (Se) in Malawi[J]. *Field Crops Research*, 2012, 125: 118-128.
- [18] Sharmasarkar S, Vance G F. Fractional partitioning for assessing solid-phase speciation and geochemical transformations of soil selenium[J]. *Soil Science*, 1995, 160(1): 43-55.
- [19] 朱建明, 秦海波, 李璐, 等. 高硒环境样品中硒的形态分析方法[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, 26(3): 209-213.
- [20] 吴少尉, 池泉, 陈文武, 等. 土壤中硒的形态连续浸提方法的研究[J]. *土壤*, 2004, 36(1): 92-95, 103.
- [21] Khanam A, Platel K. Bioaccessibility of selenium, selenomethionine and selenocysteine from foods and influence of heat processing on the same[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 1293-1299.
- [22] Hawkesford M J, Zhao F J. Strategies for increasing the selenium content of wheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46(3): 282-292.
- [23] Yoneyama S, Miura K, Itai K, et al. Dietary intake and urinary excretion of selenium in the Japanese adult population: the internmap study Japan[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2008, 62(10): 1187-1193.
- [24] Hira C K, Partal K, Dhillon K S. Dietary selenium intake by men and women in high and low selenium areas of Punjab[J]. *Public Health Nutrition*, 2004, 7(1): 39-43.
- [25] Qin H B, Zhu J M, Liang L, et al. The bioavailability of selenium and risk assessment for human selenium poisoning in high-Se areas, China[J]. *Environment International*, 2013, 52: 66-74.
- [26] World Health Organization (WHO), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Vitamin and mineral requirements in human nutrition [EB/OL]. [2016-07-22]. <http://whqlibdoc.who.int/publications/2004/9241546123.pdf2004>. Website.