

6 套格点土壤水分数据集在内蒙古自治区的适用性评价

宋海清^{1,2}, 朱仲元¹, 李云鹏²

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: [目的] 评价 6 套多源格点土壤水分数据的适用性, 为内蒙古地区陆—气耦合研究、干旱监测和气候变化背景下陆地水资源监测等提供科学的土壤水分精度信息和选择依据。[方法] 以内蒙古地区 2016—2020 年 5—9 月 63 个气象台站逐旬 0—10 cm 土壤水分监测资料为基础, 以相关系数、平均绝对误差和均方根误差为指标, 系统评价了土壤水分主被动探测计划 (SMAP)、欧洲航天局气候变化倡议 (ESA)、中国气象局陆面数据同化系统 (CLDAS)、欧洲中期天气预报中心第 5 代 ERA5 和 ERA5Land 以及美国全球陆面数据同化系统 NOAH 等 6 套格点土壤水分资料在内蒙古的精度和时空变化。[结果] ① 6 套格点土壤水分资料均可以较好地再现内蒙古土壤水分“东湿西干”的空间分布特征, SMAP 在空间上与观测数据吻合最好, 其余五套资料普遍高估了土壤水分。② 从内蒙古及其 3 个气候分区土壤水分的时间序列统计特征来看, 6 套土壤水分格点数据较好地表现出了观测土壤水分的时间变化趋势, 除了 SMAP 与实测最为接近外, 其余五套数据在内蒙古自治区、区内半湿润区和半干旱区普遍偏湿, 且 ERA5 和 ERA5Land 高估较多, 在区内干旱区, SMAP, ERA5 和 ERA5Land 与观测更为接近。③ 6 套格点土壤水分资料在内蒙古及其 3 个分区均与观测值具有极显著的相关系数, SMAP, ESA, CLDAS, ERA5 和 ERA5Land 数据与实测数据的相关性明显优于 NOAH, SMAP 数据的平均绝对误差和均方根误差显著小于其他 5 套数据集。[结论] 格点 6 套土壤水分数据集在内蒙古的适用性各异, SMAP 数据质量总体上较其他五套资料最优, 适用性最好, ESA 数据其次, NOAH 数据相对最差。

关键词: 卫星遥感; 土壤水分; 陆面同化土壤水分; 适用性; 内蒙古自治区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)06-0180-10

中图分类号: S127, S152.7

文献参数: 宋海清, 朱仲元, 李云鹏. 6 套格点土壤水分数据集在内蒙古自治区的适用性评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 180-189. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.025; Song Haiqing, Zhu Zhongyuan, Li Yunpeng. Applicability evaluation of six gridded soil moisture datasets in Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 180-189.

Applicability Evaluation of Six Gridded Soil Moisture Datasets in Inner Mongolia Autonomous Region

Song Haiqing^{1,2}, Zhu Zhongyuan¹, Li Yunpeng²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia

Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Inner Mongolia

Autonomous Region Center for Ecology and Agrometeorology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: [Objective] The applicability of six multi-source gridded soil moisture datasets was evaluated, in order to provide scientific precision information of soil moisture and selection basis for land-atmosphere coupling study, drought monitoring and land water resources monitoring under the background of climate change in Inner Mongolia Autonomous Region. [Methods] Using the soil moisture data observed by 63 meteorological stations in every ten days at 0—10 cm level from May to September from 2016 to 2020 in Inner Mongolia Autonomous Region, and taking correlation coefficient, mean absolute error and root mean

收稿日期: 2021-06-08

修回日期: 2021-06-29

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于冰雪融水转化过程与植被—土壤水热反馈机制的牧草生物量模型构建”(51669018), “改变降水对内蒙古典型草原禁牧与放牧草地水文土壤植被影响机制研究”(51779116); 国家重点研发计划重大自然灾害监测预警与防范专项(2018YFC1506606); 内蒙古自治区气象局科技创新项目(nmqxkjcx202107)

第一作者: 宋海清(1988—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 博士研究生, 研究方向为陆面数据同化和气象水文数值模拟研究。Email: haiqing-song@emails.imau.edu.cn.

通讯作者: 朱仲元(1956—), 男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 博士, 教授, 主要从事水文水资源与草原生态研究。Email: nmgzzy@tom.com.

square error as evaluation indexes, the accuracy and spatio-temporal variation of the SMAP soil moisture from NASA, ESA CCI from the European Space Agency(ESA), CLDAS from the China Meteorological Administration(CMA), ERA5 and ERA5 Land from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF) and NOAH from the global land surface data assimilation system(GLDAS/NASA) were systematically evaluated. [Results] ① Six gridded soil moisture datasets could truly reflected the spatial distribution characteristics of soil moisture in Inner Mongolia, and SMAP was the best. ② According to the statistical characteristics of the time series of soil moisture in Inner Mongolia Autonomous Region and its three climatic regions, the six gridded soil moisture datasets better reflected the temporal variation trend of soil moisture. SMAP was the closest to the measured data, and the other five datasets were generally higher in semi-humid and semi-arid regions of Inner Mongolia, and ERA5 and ERA5Land overestimated higher. In arid regions of Inner Mongolia, SMAP, ERA5 and ERA5Land were closer to the observations. ③ Six gridded soil moisture datasets in Inner Mongolia and its three sub-regions had very significant correlation coefficients, and the correlation coefficients between SMAP, ESA, CLDAS, ERA5, ERA5Land and the observed data was obviously better than that of NOAH. The mean absolute error and root mean square error of SMAP data are significantly smaller than those of the other five datasets. [Conclusion] Six gridded soil moisture datasets have different applicability in Inner Mongolia area. The quality and applicability of SMAP soil moisture are the best, ESA is the second, NOAH is the worst.

Keywords: satellite remote sensing; soil moisture; land data assimilated soil moisture; applicability; Inner Mongolia Autonomous Region

高时空分辨率、高精度的土壤水分数据是准确理解陆—气相互作用、研究陆地水循环和次季节到季节预测的关键基础资料^[1-4]。它不但与能量交换密切相关还与水循环联系紧密^[1-2]。土壤水分是陆面过程模式和分布式水文模式关键的初始条件之一,通过影响感热通量和潜热通量的交换以影响陆面能量平衡和调节底层大气^[5-6]。同时,土壤水分也控制着陆面降水入渗和产流而影响降水的分配^[7-9]。此外,土壤湿度的记忆作用对天气和气候模式模拟的影响可达数周到数月,深刻影响着降水和气温的模拟^[6,10-12],故而准确的土壤水分数据对于天气预报和气候预测准确率的提高具有重要的实用价值和研究意义^[13-14]。

土壤水分数据的获取途径主要有台站观测、卫星遥感反演、陆面过程模式模拟和陆面数据同化^[5]。这 4 种方式各有优缺点,例如台站观测土壤水分是最准确的,但是其空间代表性有限;卫星遥感反演土壤水分能够获取大范围的土壤水分,但其精度和时空分辨率均有待提升,另外卫星遥感反演土壤水分土层深度通常限于 2—7 cm^[5];陆面过程模式模拟土壤湿度可以获取高时空分辨率的土壤水分产品,但模式偏差亟需改善;陆面数据同化却可以融合上述方式的优点,在物理和动力约束条件下,提供最优的高时空分辨率的高精度土壤水分数据产品。然而,这些不同方式获取的土壤水分数据在不同的区域有着不同的表现^[5,15-16],这是因为它们与陆面过程模式参数化、陆面同化技术和观测数据的质量息息相关^[17]。Chen

和 Yuan^[5]在中国区域系统评估了 9 种国际主流的土壤水分产品的可靠性和时空适用性,结果显示在 8 个不同的气候分区中不同来源的土壤水分产品各有优势。Kumar 等^[15]在美国评估了北美陆面数据同化系统(NLDAS)输出产品,发现根区土壤水分产品在不同区域表现各异。Xia 等^[16]在美国评估了 NLDAS-2 的 4 个陆面模式模拟土壤水分数据,结果表明所有模式都能模拟土壤干湿状态,但与观测数据相比显示出较大的偏差,误差可能来源于模型本身、强迫场数据和土壤水分观测误差。陈泓羽等^[18]在青藏高原评价了 3 套卫星土壤水分产品的适用性,反映出在不同季节卫星土壤水分产品适用性不同,表现在降水较多的季节土壤水分质量下降。高琪等^[19]构建和评估了 Landsat 8 土壤水分反演模型,在干旱区荒漠获取了高质量土壤水分。卢晨媛等^[12]评估了中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS)和全球陆面数据同化系统(GLDAS)两套陆面同化土壤水分在川西高原的质量,指出 GLDAS 优于 CLDAS 土壤水分,但 CLDAS 在时空分辨率方面更优。Bi 等^[20]在青藏高原比较了来自 GLDAS 的 4 个陆面模式的土壤水分产品,结果指出所有陆面模式产品都能较好的反映实测土壤水分的时间变化,但都存在系统性的偏差,Mosaic 模式偏差最大。Tavakol 等^[21]评估了土壤水分主被动探测计划(SMAP)卫星土壤水分 3 级和 4 级产品以及短期预测研究与转换陆面信息系统(SPoRT-LIS)土壤水分数据等 3 套产品在性能,并指出

SMAP L4 土壤水分数据表现最优。总的来说,不同来源的土壤水分数据都能较好地再现土壤水分的干湿变化和空间分异特征,但是不同的数据在不同的区域有着不同的适用性。因此,对不同来源的多种卫星反演土壤水分、全球再分析模拟土壤水分和陆面数据同化土壤水分开展适用性评价十分必要和亟需。

内蒙古自治区地处我国北方,位于季风边缘区,有着全国最大的草原,干旱气象灾害是影响内蒙古经济发展的因素之一^[22],研究内蒙古土壤水分时空变化特征对于提高当地天气预报准确率、短期气候预测能力和农牧业干旱监测等有现实的社会意义,对保障当地农牧业经济稳定发展有着重要的实用价值。鉴于此,本研究利用台站观测土壤水分资料,系统的评价美国 SMAP 和欧洲航天局(ESA)两套卫星土壤水分、CLDAS 和 GLDAS-NOAH 两套陆面数据同化土壤水分以及欧洲第 5 代再分析资料 ERA5 及其陆面资料 ERA5Land 再分析土壤水分资料共 6 套土壤水分数据,分析其可靠性,为内蒙古区域土壤水分数据的筛选提供参考,也为干旱评估提供数据质量支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古位于中国北部边疆(97°12'E—126°04'E, 37°24'N—53°23'N),总面积 $1.18 \times 10^6 \text{ km}^2$,毗邻 8 个省和自治区,外与俄罗斯联邦和蒙古国相接壤;地势西高东低,地貌以蒙古高原为主体;气候属于温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温 $-7 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$;内蒙古大部地区降水稀少,年降水量 $35 \sim 550 \text{ mm}$,从东向西依次为半湿润区、半干旱区和干旱区^[22];土壤水分受降水影响较大,亦呈现与降水相似的空间分布——自东北向西南由湿润变为干旱,但土壤水分同时受土壤性质、陆地覆盖、地形以及降水、气温、辐射等因子的影响,因而内蒙古土壤水分空间变异性较大,较难获取高精度的土壤水分数据。

1.2 研究资料与方法

研究所用的格点土壤水分数据为 SMAP, ESA, CLDAS, ERA5, ERA5Land 和 GLDAS-NOAH, 评估所用的台站观测土壤水分数据为来自内蒙古气象局自动土壤水分观测资料。

1.2.1 SMAP 土壤水分数据 “土壤水分主被动探测”计划卫星 SMAP 是美国国家航空航天局(NASA)在 2015 年 1 月发射的轨道观测地球卫星,主要用于监测全球土壤水分分布和冻融状态。卫星重访周期为 2~3 d,分为升轨和降轨,幅宽为 1 000 km,其数据集覆盖时间为 2015 年 3 月至今。它可以提供多

种分辨率的产品,包括 36, 9 和 3 km。用于探测土壤水分的传感器能够获取 0—5 cm 深度的土壤水分,其目标观测精度为均方根误差小于 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[21,23]。SMAP 数据可用来改进天气和气候预测^[24],改进暴雨前土壤湿度监测以改善洪水预测;利用 SMAP 数据提供干旱监测等。本研究使用了 SMAP L4 提供的 3 h 间隔的表层土壤体积含水量^[25],空间分辨率为 9 km,数据版本为 0 530。在美国国家冰雪数据中心下载获取了覆盖全球的 2016—2020 年 5—9 月的数据产品(https://nsidc.org/data/SPL4_SMGP/versions/5)。

1.2.2 ESA CCI 土壤水分数据 ESA CCI 遥感土壤水分数据是由欧洲航天局气候变化倡议项目提供的基于主动和被动微波传感器生产的包含主动数据集、被动数据集和融合数据集的长时间序列(1979 年至今)土壤水分数据集,以下简称 ESA 土壤水分数据。本研究使用的是利用各种主动和被动微波传感器观测获得的土壤水分产品进行融合得到的融合土壤水分数据集,其空间分辨率为 25 km,时间分辨率为 10 d 合成的产品,该产品土壤层深度约为 2—5 cm,其采用了基于 TCA(triple-collocation analysis)的融合方法,是目前应用最广泛的土壤水分产品之一^[26]。Ma 等^[27]研究表明 ESA 土壤水分数据的无偏均方根误差较优。研究选取 2016—2020 年土壤体积含水量旬数据集,数据获取地址为:<https://www.esa-soil-moisture-cci.org/index.php?q=node/145>。

1.2.3 CLDAS 土壤水分数据 CLDAS 陆面同化土壤水分产品是中国气象局国家气象信息中心发展的实时业务运行的中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS-V2.0)输出的土壤水分数据,它由同化了全国区域自动站逐小时观测数据得到的气温、气压、比湿、风速、短波辐射和降水驱动美国国家大气研究中心 NCAR 陆面模式 CLM3.5 和 Noah-MP 进行集合模拟得到土壤水分,相对于 CLDAS-V1.0, CLDAS-V2.0 采用陆面模式集合模拟的方式减小了单一模式模拟的不确定性,同时提高了陆面模拟精度。CLDAS 土壤水分时空分辨率为逐小时 $0.062 \text{ }^\circ \times 0.062 \text{ }^\circ$ 网格数据,覆盖东亚地区,垂直分为 5 层,时间长度为 2008 年至今,并在中国区域得到了评估应用^[28],本研究选用 2016—2020 年 5—9 月的 0—10 cm 层土壤体积含水量用于对比分析。CLDAS 数据由中国气象数据网(http://data.cma.cn/data/cdcdetail/data-Code/NAFP_CLDAS2.0_NRT.html)获取。

1.2.4 ERA5 土壤水分数据 ERA5 再分析土壤水分数据^[29-30]是由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)

研制的第 5 代再分析资料,相对于第 4 代再分析资料 ERA-Interim,ERA5 在观测资料 and 同化技术以及数值模式方面均有显著改进,同化方法为 10 个集合成员的集合 4 维变分同化方案(4DVar),时空分辨率分别为逐小时、31 km(水平),时间覆盖为 1950 至今,数值模式版本升级为 Cy41r2,辐射传输模式选用 RTTOV-11。土壤水分数据分为 4 层,分别为 0—7,7—28,28—100,100—289 cm。本研究选用 2016—2020 年 5—9 月 0—7 cm 层数据用于分析。数据通过哥白尼气候变化服务网(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/>)下载获取。

1.2.5 ERA5Land 土壤水分数据 ERA 5Land 再分析土壤水分数据^[31]是由 ECMWF 发展的第 5 代再分析陆面数据集。它是由降尺度技术进行降尺度后的 ERA5 再分析数据驱动高分辨率 ECMWF 陆面模式 TESSEL 得到的数据集,ERA5Land 的大多数参数与 ERA5 配置一样。ERA5Land 最主要的优势是水平分辨率提高到了 0.1°,时间分辨率与 ERA5 同为 1 h。评估结果显示 ERA5Land 在水循环描述中更优,尤其是对土壤水分和湖泊的描述得到了增强。垂直层、数据选取及获取地址与 ERA5 相同。

1.2.6 GLDAS-NOAH 土壤水分数据 GLDAS-NOAH 土壤水分数据^[32]是由 NASA 和国家海洋大气管理局(NOAA)共同研发的 GLDAS 输出的数据集。本研究选用的是 GLDAS 2.1 版本,它是 GLDAS1 的升级版,是目前业务运行的陆面数据同化系统,时间覆盖 2000 年至今。相对于 GLDAS1,其主要改进了入射太阳辐射和降水。GLDAS 数据集包含 4 个陆面过程模式输出产品(Mosaic,Noah,CLSM 和 VIC),本研究选用的 GLDAS-NOAH 数据时空分辨率为 3 h,0.25°,由于 NOAH 陆面模式垂直分为 4 层,为了与卫星反演土壤水分对比,选用 GLDAS-NOAH 的 0—10 cm 层进行分析,以下简称 NOAH 土壤水分数据。数据通过 NASA 地球数据网(https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS_NOAH025_3H_2.1/summary)下载得到。

1.2.7 观测土壤水分数据 目前内蒙古自治区有固定地段土壤水分自动观测站 120 个,能够实现逐小时连续观测,但质量各异。选取了质量较好且观测时间连续的 63 个土壤水分自动观测站 0—10 cm 土壤体积含水量数据用于评价土壤水分格点产品。同时为了减小由灌溉带来的不确定性,本研究只选用固定地段土壤水分自动站观测数据用于分析。评价时间段为 2016—2020 年 5—9 月(有冻土和积雪的时段不观测)。考虑到卫星反演土壤水分数据的回访周期为

2~3 d 和避免卫星反演土壤水分产品出现空缺值的影响,本研究以旬为时间单位将观测资料进行时间平均得到旬平均土壤水分观测值,以与上述格点土壤水分数据进行匹配和评价分析。

1.2.8 研究方法 由于内蒙古自治区东西狭长,东西部气候特征差异显著,故根据王文等^[33]的研究方法,即依据多年平均年降水量将研究区分为区内半湿润区、区内半干旱区和区内干旱区等 3 个分区(表 1)进行统计分析。用于研究区干湿气候分区的格点多年平均年降水量数据来源于广泛应用的中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018 年),该数据集由何杰等^[34]制作发布,精度介于台站观测数据和卫星反演降水数据,由于其时间序列长、时空分辨率高,得到了广泛的应用。研究使用 40 a 的年均降水进行干湿分区。由于 6 套格点土壤水分数据的时间分辨率不同,同时兼顾卫星重访周期因素,将 6 套格点数据集按照时间平均得到逐旬土壤水分数据,以与站点观测土壤水分数据进行时间匹配。对于 6 套格点数据空间分辨率不同无法进行空间匹配的问题,本研究依据刘川等^[35]的研究而采用邻近格点法将格点数据与站点观测进行一一匹配,同时减小了格点资料插值到站点带来的插值误差。

表 1 内蒙古自治区气候分区与土壤水分观测站点统计

| 气候分区 | 平均降水量 P/mm | 土壤水分观测站数量 |
|--------|---------------------|-----------|
| 区内半湿润区 | $400 \leq P < 800$ | 11 |
| 区内半干旱区 | $200 \leq P < 400$ | 44 |
| 区内干旱区 | $P < 200$ | 8 |

由于站点观测土壤水分数据和 SMAP,ESA,CLDAS,ERA5 和 ERA5Land 格点土壤水分数据的单位为体积含水量,本研究参考卢晨媛方法^[12]将 GLDAS-NOAH 土壤水分数据转换为体积含水量,也就是将单位由 kg/m^2 转换为 m^3/m^3 ,具体计算公式如下:

$$SM = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \times \frac{\text{m}^3}{1\,000\text{ kg}} \times \frac{1\,000\text{ mm}}{1\text{ m}} \times \frac{1}{\text{SMT}/\text{mm}} \quad (1)$$

式中:SM 表示土壤体积含水量(m^3/m^3);SMT 表示土壤层厚度(mm)。

为了更加全面地评价 6 套格点土壤水分数据的可靠性和精度,在进行时间上的统计分析时,采用相关系数(R)、绝对平均偏差(MAE)、均方根误差(RMSE)和规范化标准差(SDV)等评价指标来度量格点数据与观测资料之间的一致性和误差,其中相关系数越接近 1 表示两个序列的变化趋势越一致,MAE 和 RMSE 越接近 0 表示格点土壤水分越接近

真实值,SDV 越接近 1 表示格点土壤水与观测土壤水的离散程度越一致。总的来说,较高的 R , 较低的 MAE 和 RMSE 表明格点土壤水分数据质量较好。另外,使用 Taylor 图方法^[36]对 6 套格点资料性能进行综合评价,它综合考虑了 R 和 SDV 的指标,用距离观测点(Taylor 图中 REF 点)的距离大小来表示各套数据集的性能,距离越小,表示效果越优。相关系数(R)、绝对平均偏差(MAE)、均方根误差(RMSE)和规范化标准差(SDV)的计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (SM_i - \overline{SM})(OBS_i - \overline{OBS})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (SM_i - \overline{SM})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (OBS_i - \overline{OBS})^2}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |SM_i - OBS_i| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SM_i - OBS_i)^2} \quad (4)$$

$$SDV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SM_i - \overline{SM})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (OBS_i - \overline{OBS})^2}} \quad (5)$$

式中:SM 表示任意一套格点土壤体积含水量;OBS 表示站点观测土壤水; i 表示第 i 个样本; n 为样本个数; \overline{SM} 表示任意一套格点土壤体积含水量的平均值; \overline{OBS} 表示观测土壤水的平均值。

2 结果与分析

2.1 土壤水的空间分布

利用 2016—2020 年 5—9 月的观测与 SMAP, ESA, CLDAS, ERA5, ERA5Land 和 NOAH 这 6 套格点平均土壤水分制作了 5 a 平均土壤水分空间分布图(图 1)。由图 2 观测土壤水分的空间分布图可知,内蒙古地区土壤水分呈现从西部向东部逐渐递增、从南部向北部逐渐递减的空间特征,土壤水分的高值区主要分布在内蒙古的东北部,土壤体积含水量高于 $0.23 \text{ m}^3/\text{m}^3$,内蒙古西部的阿拉善高原为低值区,土壤水分普遍低于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$,与年平均降水量空间分布类似,在降水少的区域土壤水分也较低。6 套格点土壤水分数据的空间分布与观测数据一致性较好,均能较好地再现内蒙古土壤水分“东湿西干”的空间分布特征(图 3)。除 SMAP 以外,其余几种数据均对研究区大部的土壤水分有不同程度的高估。SMAP 土壤水分在空间上与观测吻合最好,尤其是对浑善达克沙地较干的土壤有着较优的反演能力,但对内蒙古东南部有低估、呼伦贝尔西部有高估现象。ESA, CLDAS 与 NOAH 土壤水分在空间分布上较

为相似,均高估了研究区的土壤水分,呈现偏湿状态,但 CLDAS 陆面同化土壤水分空间分辨率最高,局地细节也更多,在研究区东北部好于 ESA 和 NOAH。ERA5 与 ERA5Land 土壤水分的空间分布几乎一致,但 ERA5Land 由于分辨率更高,解析出更多的局地细节,在内蒙古西部与观测吻合较好,甚至能再现河套灌区土壤水分较高的特征,但在中东部高估严重。需要指出的是,ESA, CLDAS 和 NOAH 均无法再现阿拉善高原东南部较低的土壤水分分布,呈现高估状态,这与观测事实不符。

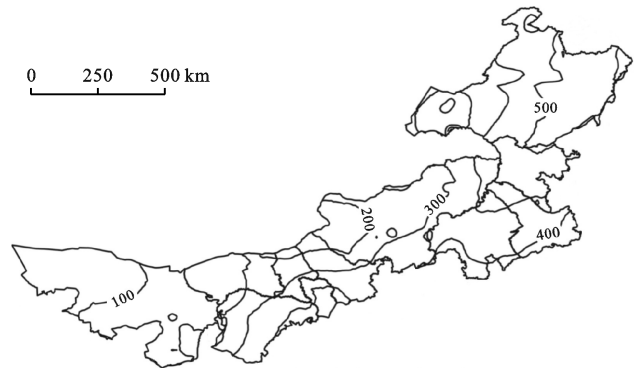


图 1 内蒙古自治区 1979—2018 年年均降水等值线分布

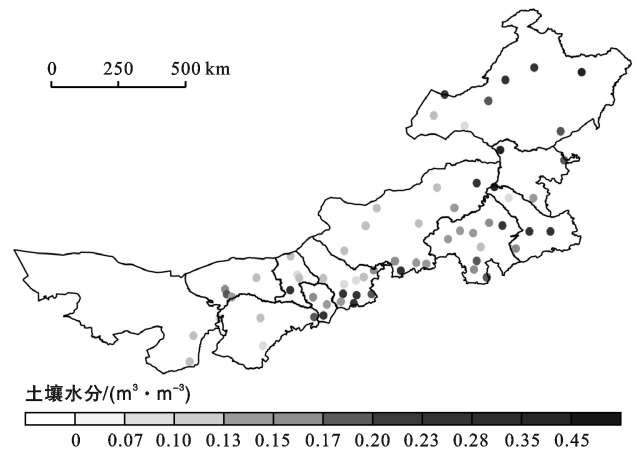


图 2 内蒙古自治区 2016—2020 年 5—9 月平均 0—10 cm 土壤水分分布

2.2 6 套格点土壤水分的时间序列分析

利用 6 套格点土壤水分数据与实测土壤水分数据的时间序列图,分析格点土壤水分数据的时间变化和变化幅度。从图 4 可以看出,实测土壤水分基本在每年 5 月第 2 旬开始下降,到 6 月底 7 月初处于较低值,随后开始上升,在 7 月底 8 月初达到最高值,然后开始下降;这与雨带的南北移动是相吻合的,内蒙古区域在每年的 7 月下旬和 8 月上旬是降水量最大的时段,此时夏季风达到鼎盛,故而土壤水分随之升高,8 月中旬后雨带开始南撤,土壤水分随之下降^[37],故

而在此阶段土壤水分波动较剧烈。由内蒙古区域平均土壤水分的时间序列图(图4)可以看出,SMAP土壤水分的变化趋势与实测土壤水分的一致性最高,在盛夏降水多时能够响应其变化,表现出较好的季节变化特征,但在每年的7月中旬至8月下旬时段,SMAP出现略高估的现象。其余5套格点土壤水分数据亦有着较好的变化趋势,但在整个研究时段内均出现偏湿现象,另外在春末夏初和秋初时节高估程度相对于盛夏时段要小,更加接近实测值,ERA5和ERA5Land数据的高估程度最为严重,其次为CLDAS,NOAH和ESA数据偏湿程度再次之。

在区内半湿润区,6套格点数据与实测土壤水分的变化趋势基本一致,季节变化明显。SMAP数据的变化趋势与实测最为一致,但在5月出现低估现

象。其余5套格点资料均偏湿,ERA5和ERA5Land偏湿程度最大。在区内半干旱区,土壤水分的时间变化与内蒙古区域的变化基本一致,这主要是因为内蒙古区域包含63个测站,而区内半干旱区则包含了44个测站,占到了整个研究区域站点总数的65%以上。在区内干旱区,土壤水分格点数据表现出异于其他区域的特征,虽然6套格点土壤水分数据的变化趋势与实测的基本一致,但趋势要差于内蒙古自治区、区内半湿润区和区内半干旱区。在2016—2017年5—9月,SMAP表现出低估的特征,ERA5和ERA5Land也在该时段出现部分偏干现象;在整个研究时段,ESA,CLDAS和NOAH均呈现偏湿状态,明显差于SMAP,ERA5和ERA5Land。SMAP土壤水分数据依然有着与实测最为一致的变化趋势。

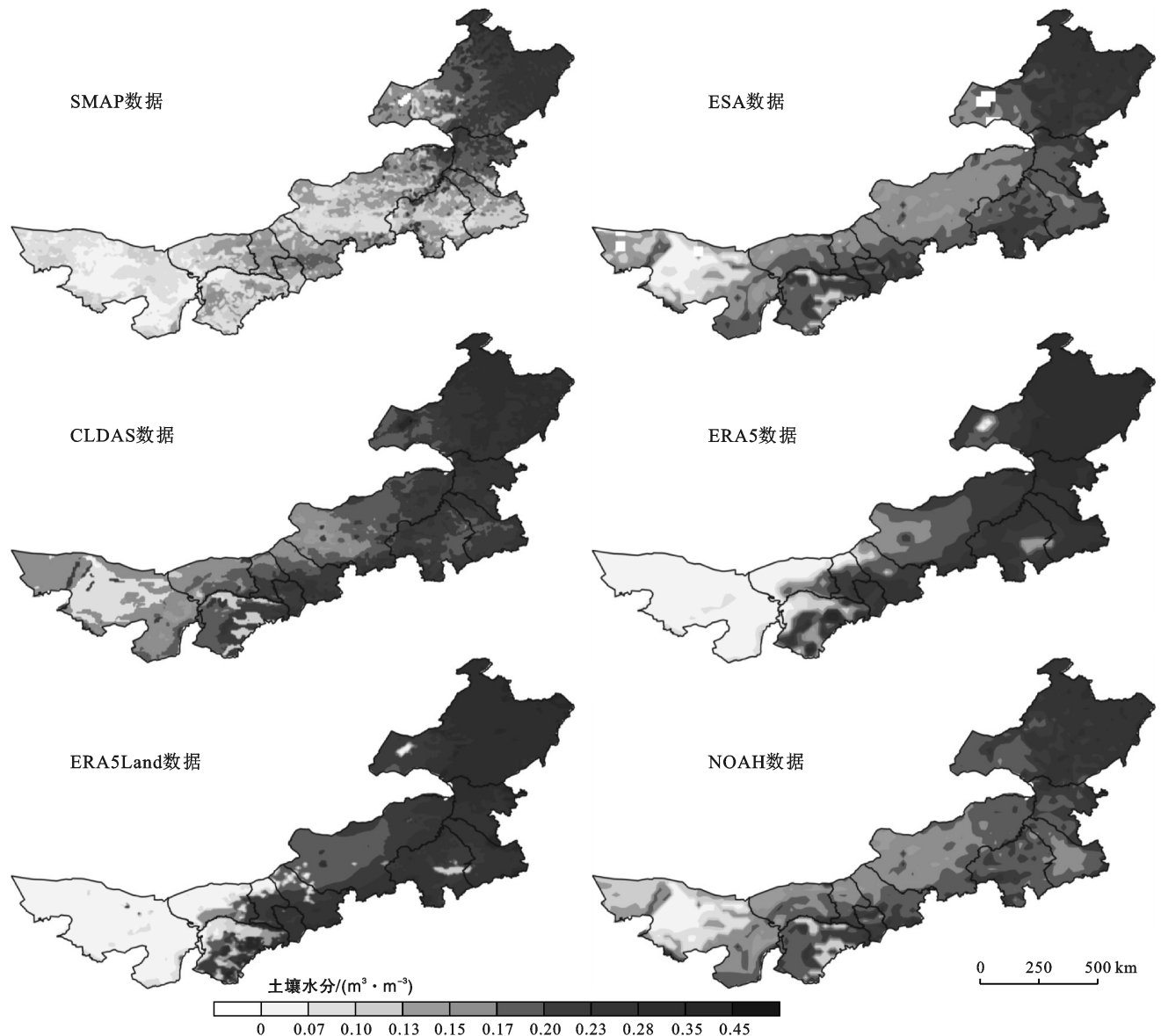


图3 内蒙古自治区6套格点土壤水分空间分布

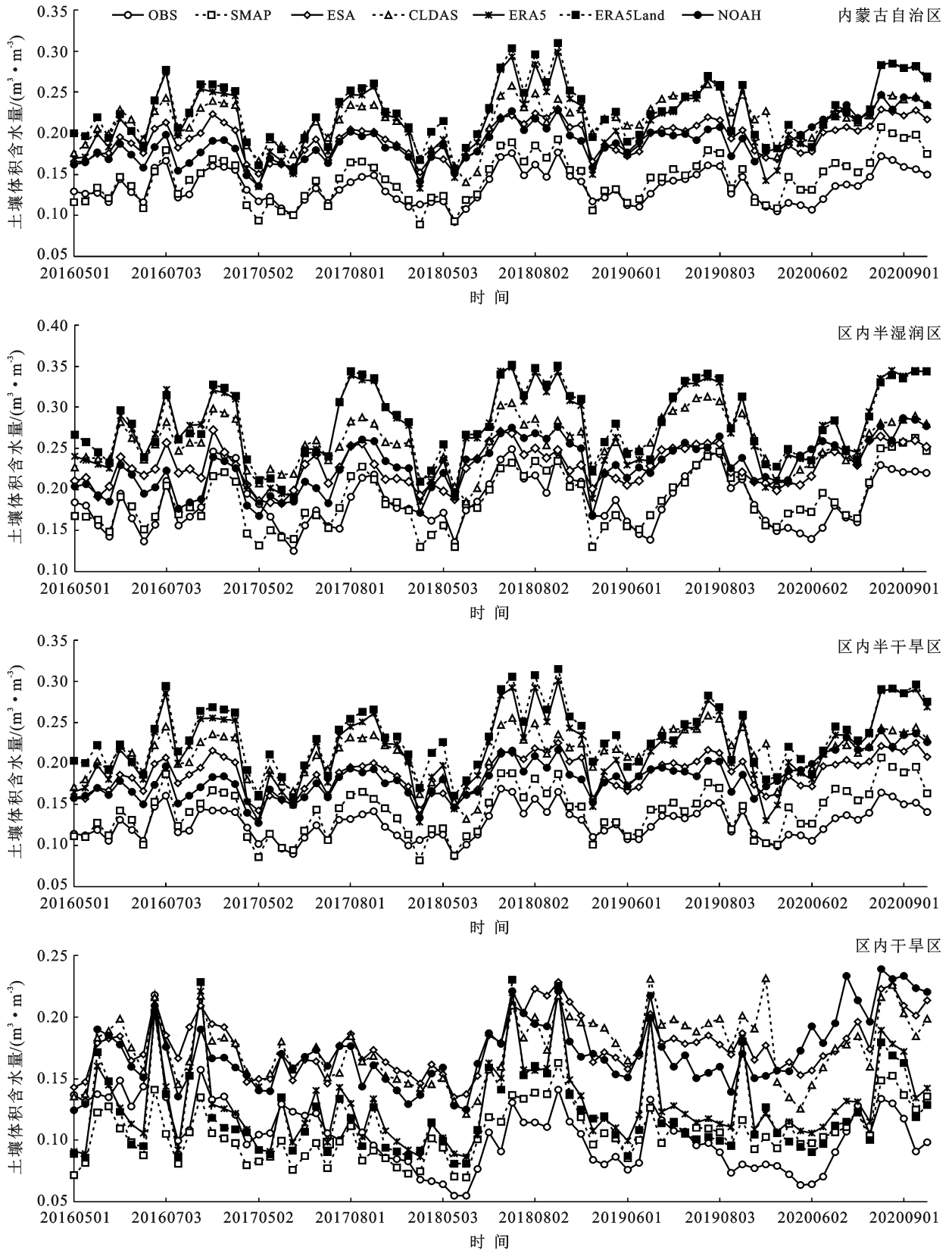


图 4 内蒙古自治区及其 3 个气候分区的 2016—2020 年 5—9 月 0—10 cm 土壤水分的时间序列

2.3 6 套格点土壤水分与观测数据的一致性分析

分别计算出 6 套格点土壤水分数据与实测土壤水分数据的相关系数(R)、均方根误差(RMSE)和平

均绝对偏差(MAE),限于篇幅,空间分布图略。由 6 套格点土壤水分数据的相关系数统计得出 SMAP, ESA, CLDAS, ERA5 和 ERA5Land 的相关系数相对

较高,NOAH 的相关系数明显差于其他数据集,这说明 SMAP,ESA,CLDAS,EAR5 和 ERA5Land 对土壤水分的时间变化趋势把握较好,NOAH 对土壤水分的时间变化能力模拟相对较差。另外也发现在土默川平原区、西辽河流域部分地区和呼伦贝尔部分区域各套格点土壤水分数据的相关系数优于其他区域,而对于地形较为复杂区和锡林郭勒盟草原区相关系数相对较差。从 6 套格点数据的均方根误差统计得出,SMAP 数据的 RMSE 明显小于其他 5 套资料,小于 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 的站点数也最多,仅在大兴安岭林区的几个站点的 RMSE 大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$,这说明 SMAP 数据具有更高的精度。CLDAS,ERA5,ERA5Land 和 NOAH 的 RMSE 大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 测站数量明显多于 SMAP 数据,ESA 次之,这表明 CLDAS,ERA5,ERA5Land 和 NOAH 的精度相对差于 SMAP。从 6 套格点数据的平均绝对误差统计得出,SMAP 数据的 MAE 明显好于其他几套数据,有着最小的偏差,这说明 SMAP 与观测数据的数值最为接近。CLDAS,ERA5 和 ERA5Land 的 MAE 在内蒙古中部大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 测站较多,表明这 3 套资料在内蒙古中部普遍误差较大,精度有待改进。表 2 计算出了 2016—2020 年 5—9 月旬平均 6 套格点土壤水分在内蒙古及其 3 个气候分区平均与观测的相关系数、平均绝对偏差和均方根误差。由此可以看出,各套资料对内蒙古及 3 个气候分区土壤水分的变化描述能力较好,但存在区域差异;各套数据在区域平均

的时间相关系数通过了 99% 的信度检验。6 套格点数据对内蒙古干旱区土壤水分的时间变化描述能力显著差于其他区域,这说明 6 套格点土壤水分数据对区内干旱区土壤水分的变化趋势把握能力明显差于在其他区域,这与 Ma 等人^[27]的研究结果相一致。另外,各套格点土壤水分资料在区内半干旱区的时间相关系数均高于区内半湿润区和干旱区,这说明 6 套格点数据对区内半干旱区土壤水分的时间变化趋势的描述能力优于在区内半湿润区和干旱区;同时,6 套格点数据在区内半干旱区的 MAE 和 RMSE 均差于区内半湿润区,这说明 6 套格点数据在区内半干旱区的精度差于其在区内半湿润区。SMAP,ESA,CLDAS 和 NOAH 数据在区内半湿润区的 MAE 和 RMSE 均小于其在区内半干旱区和干旱区,这说明上述四套数据在区内半湿润区的精度优于其他区域,而 ERA5 和 ERA5Land 在区内干旱区的 MAE 和 RMSE 小于其在区内半湿润区和半干旱区,说明 ERA5 和 ERA5Land 对区内干旱区的模拟精度相对优于其在区内半湿润区和半干旱区。需要指出的是,ERA5 和 ERA5Land 的 RMSE 在区内半湿润区和半干旱区均最大,这说明 ERA5 和 ERA5Land 资料的离散程度较大。6 套资料中 ERA5Land 的相关系数在内蒙古及其 3 个气候分区均最好,但均方根误差较大,NOAH 的相关系数最差。综合相关系数和均方根误差可以看出,SMAP 格点土壤水分数据最优,与观测一致性最好。

表 2 内蒙古自治区及 3 个气候分区平均 2016—2020 年 5—9 月旬 0—10 cm 土壤水分 6 套数据分别与站点观测的相关性

| 区域 | SMAP 数据 | | | ESA 数据 | | | CLDAS 数据 | | |
|--------|---------|---|--|-------------|---|--|----------|---|--|
| | 相关系数 | 平均绝对偏差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 均方根误差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 相关系数 | 平均绝对偏差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 均方根误差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 相关系数 | 平均绝对偏差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 均方根误差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) |
| 内蒙古自治区 | 0.905* | 0.013 | 0.016 | 0.895* | 0.058 | 0.059 | 0.816* | 0.081 | 0.082 |
| 区内半湿润区 | 0.839* | 0.015 | 0.019 | 0.727* | 0.042 | 0.047 | 0.780* | 0.071 | 0.074 |
| 区内半干旱区 | 0.933* | 0.016 | 0.019 | 0.910* | 0.060 | 0.060 | 0.823* | 0.085 | 0.086 |
| 区内干旱区 | 0.455* | 0.022 | 0.026 | 0.541* | 0.072 | 0.076 | 0.505* | 0.070 | 0.075 |
| 区域 | ERA5 数据 | | | ERA5Land 数据 | | | NOAH 数据 | | |
| | 相关系数 | 平均绝对偏差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 均方根误差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 相关系数 | 平均绝对偏差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 均方根误差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 相关系数 | 平均绝对偏差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) | 均方根误差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) |
| 内蒙古自治区 | 0.913* | 0.082 | 0.085 | 0.936* | 0.091 | 0.093 | 0.681* | 0.055 | 0.058 |
| 区内半湿润区 | 0.808* | 0.088 | 0.093 | 0.860* | 0.093 | 0.096 | 0.667* | 0.044 | 0.050 |
| 区内半干旱区 | 0.923* | 0.091 | 0.094 | 0.949* | 0.104 | 0.106 | 0.733* | 0.056 | 0.059 |
| 区内干旱区 | 0.570* | 0.031 | 0.037 | 0.563* | 0.028 | 0.035 | 0.413* | 0.067 | 0.073 |

注: * 表示通过了 99.9% 的信度检验。

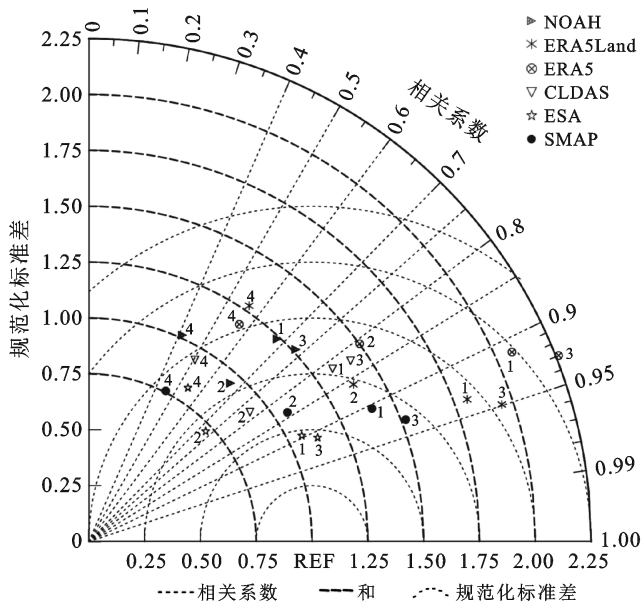
2.4 土壤水分 6 套格点数据精度的 Taylor 图评价

逐旬土壤水分随时间的变化对评估 6 套格点土壤水分数据有重要作用。从内蒙古自治区及其 3 个

气候分区的区域平均 2016—2020 年 5—9 月逐旬土壤水分的 Taylor 图(图 5)可以看出,6 套格点土壤水分资料在不同区域的相关系数均在 0.4 以上,除了区

内干旱区以外,大部分都在 0.6 以上,6 套格点数据的相关系数差距不显著;从规范化标准差可以看出,6 套数据中大部分高估了土壤水分,尤其是在内蒙古自治区和区内半干旱区的 ERA5 和 ERA5Land 数据,偏差较大,但却有着最优的相关系数。

综合来看,在内蒙古自治区,所有格点数据的规范化标准差均大于观测规范化标准差,SMAP 和 ESA 表现好于其他数据;在区内半湿润区,SMAP 和 CLDAS 表现优于其他数据;在区内半干旱区,SMAP 和 ESA 表现较好;在区内干旱区,CLDAS 表现相对较好。



注:1 内蒙古自治区;2 区内半湿润区;3 区内半干旱区;4 区内干旱区。

图 5 内蒙古自治区以及 3 个气候分区 2016—2020 年 5—9 月 6 套格点土壤水分资料旬平均时间序列相对于观测值的 Taylor 图

3 讨论

从研究结果来看,格点土壤水分数据在不同气候分区与观测土壤水分的相关性和误差存在差异,不管是卫星反演土壤水分数据、陆面同化土壤水分数据还是再分析土壤水分数据都可能受到陆地覆盖、土壤质地和降水等的影响。

(1) 同一卫星反演土壤水分数据在不同气候分区表现出较大的精度差异,下垫植被是影响土壤水分卫星反演的因素之一。SMAP 和 ESA 土壤水分数据的卫星反演精度在植被覆盖区域会受到不同程度的影响。Ma 等^[27]研究显示在较低的植被光学厚度、高地表粗糙度以及空间异质性较高的区域,SMAP 的反演质量还有待提升。

(2) 土壤质地是影响陆面模式模拟土壤水分的最重要的土壤水力学参数之一,研究表明准确的土壤质地能够显著提高土壤水分的陆面模拟能力,从而能够大幅减小模拟误差^[37]。而本研究所用 NOAH 土壤水分和 CLDAS 土壤水分并未采用较为真实的土壤质地数据,这也是 CLDAS 使用基于自动站雨量计观测降水融合驱动场驱动陆面模式得到的 CLDAS 土壤水分的多年平均空间分布与 NOAH 相似的原因之一,尤其是在鄂尔多斯高原东部,CLDAS 与 NOAH 土壤水分空间分布几乎一致,但 NOAH 的降水驱动数据质量差于 CLDAS,这充分说明土壤质地对土壤水分模拟的重要性。

(3) 本研究所用的 ESA,ERA5 和 NOAH 土壤水分数据均为 25 km 分辨率,而在内蒙古自治区自动土壤水分观测站稀疏,本文使用邻近格点法虽然减小了插值带进去的误差,但一个格点只对应一个站点,这使得 25 km×25 km 的一个网格数据对应一个站点数据,造成一定的尺度不匹配问题。另外自动观测站空间代表性不能代表大网格的土壤水分状况。

(4) 土壤水分自动站观测层次为 0—10 cm 层土壤水分,而卫星反演土壤水分层次为约 2—7 cm^[5],在垂直土壤层匹配上也存在一定的误差,而影响评价结果的准确度。

(5) CLDAS,NOAH 以及 ERA5Land 使用的陆面模式植被覆盖并没有动态更新,这使得植被蒸散发产生一定误差,进而影响土壤温度、土壤水分以及土壤下渗等,造成土壤水分数据出现一定的误差,下一步同化植被叶面积指数 LAI 改善土壤温湿度模拟是值得开展的研究方向。

4 结论

(1) 6 套格点土壤水分数据能够较好的反映内蒙古观测土壤水分的“东湿西干”的空间分布特征,在不同的气候分区有明显的差异性。其中 SMAP 数据表现最优,有着更好的空间分布特征。ESA,CLDAS,ERA5,ERA5Land 和 NOAH 等数据集均呈现出偏湿的特点。

(2) 从 3 个气候分区土壤水分时间序列来看,6 套资料均能描述出土壤水分的时间变化趋势,相关系数较高。各套数据在区内半湿润区和半干旱区土壤水分的时间变化趋势描述能力显著优于区内干旱区,尤其在半干旱区的表现更好(相关系数最高)。SMAP 数据的变化趋势与实测最为一致。

(3) SMAP,ESA,CLDAS,ERA5 和 ERA5Land 的相关系数相对较高,NOAH 的相关系数明显差于其

他数据集。另外从 MAE 和 RMSE 方面来看, SMAP 仍然有着较高的精度。总体而言, SMAP 产品与实测土壤水分相关性最优, 精度最高, 其次为 ESA 和 CLDAS 格点土壤水分数据。鉴于此, 可以为缺乏土壤水分观测的内蒙古提供可靠的土壤水分资料来源, 亦可以用于干旱评估监测应用。

[参 考 文 献]

- [1] 张井勇, 吴凌云, 陆一气相互作用对东亚气候的影响 [M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [2] Chahine T M. The hydrological cycle and its influence on climate [J]. *Nature*, 1992, 359(6394): 373-380.
- [3] 马柱国, 符淙斌, 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.
- [4] Robertson A, Frédéric V. Sub-seasonal to seasonal prediction: The gap between weather and climate forecasting [M]. Oxford: Elsevier, 2018.
- [5] Chen Yong, Yuan Huiling. Evaluation of nine sub-daily soil moisture model products over China using high-resolution in situ observations [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588(9): 125054.
- [6] 张文君, 周天军, 智海. 土壤湿度影响中国夏季气候的数值试验 [J]. *气象学报*, 2012, 70(1): 78-90.
- [7] 赵娜娜, 于福亮, 李传哲, 等. 降水入渗及土壤水分变化对产流过程影响研究进展 [J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(2): 111-115.
- [8] 彭娜, 谢小立, 王开峰, 等. 红壤坡地降雨入渗、产流及土壤水分分配规律研究 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 17-20.
- [9] Zhao Wei, Li Ainong. A review on land surface processes modelling over complex terrain [J]. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015: 1-17.
- [10] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. *Science*, 2004, 305(5687): 1138-1140.
- [11] Guo Zhichang, Dirmeyer P A, Hu Zengzhen, et al. Evaluation of the second global soil wetness project soil moisture simulations(2): Sensitivity to external meteorological forcing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: 1-11.
- [12] 卢晨媛, 冯文兰, 王永前, 等. 不同深度土壤水分同化产品在川西高原的应用 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 173-181.
- [13] 李得勤, 张述文, 文小航, 等. 土壤湿度参数化及对天气和气候模拟影响的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2016, 31(3): 236-247.
- [14] Ford T W, Quiring S M. Comparison of contemporary in situ, model, and satellite remote sensing soil moisture with a focus on drought monitoring [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(2): 1565-1582.
- [15] Kumar S V, Wang S, Mocko D M, et al. Similarity assessment of land surface model outputs in the North American Land Data Assimilation System [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(11): 8941-8965.
- [16] Xia Y, Sheffield J, Ek M B, et al. Evaluation of multi-model simulated soil moisture in NLDAS-2 [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512(5): 107-125.
- [17] 梁顺林, 李新, 谢先红. 陆面观测、模拟与数据同化 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [18] 陈泓羽, 吴静, 李纯斌, 等. 卫星土壤水分产品在青藏高原地区的适用性评价 [J]. *生态学报*, 2020, 40(24): 9195-9207.
- [19] 高琪, 彭杰, 冯春晖, 等. 基于 Landsat 8 数据的荒漠土壤水分遥感反演 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 125-132.
- [20] Bi Haiyun, Ma Jianwen, Zheng Wenjun, et al. Comparison of soil moisture in GLDAS model simulations and in situ observations over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2016, 121(6): 2658-2678.
- [21] Tavakol A, Rahmani V, Quiring S M, et al. Evaluation analysis of NASA SMAP L3 and L4 and SPoRT-LIS soil moisture data in the United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 229: 234-246.
- [22] 顾润源. 内蒙古自治区天气预报手册 [M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [23] Entekhabi D, Njoku E, O'Neill P, et al. The soil moisture active passive (SMAP) mission [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 704-716.
- [24] Wang Y, Quiring S M. Impact of soil moisture initializations on WRF-Simulated North American monsoon system [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(4): 1-23.
- [25] Reichle R H, Lannoy G D, Liu Q, et al. Global assessment of the SMAP Level-4 surface and root-zone soil moisture product using assimilation diagnostics [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(12): 3217-3237.
- [26] Dorigo W, Wagner W, Albergel C, et al. ESA CCI soil moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 203(15): 185-215.
- [27] Ma Hongliang, Zeng Jiangyuan, Chen Nengcheng, et al. Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: A comprehensive assessment using global ground-based observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231(12): 1-44.

- [18] 安玉发,彭科,包娟.居民食品消费碳排放测算及其因素分解研究[J].农业技术经济,2014(3):74-82.
- [19] 罗婷文,欧阳志云,王效科,等.北京城市化进程中家庭食物碳排放动态[J].生态学报,2005,25(12):3252-3258.
- [20] 刘娜.建筑全生命周期碳排放计算与减排策略研究[D].河北 石家庄:石家庄铁道大学,2014.
- [21] 黎礼刚,李凌云,周紧东,等.护岸工程材料综合能耗和碳排放计算及评价[J].人民长江,2012,43(7):50-55.
- [22] 李艳红.护岸材料碳排放及综合能耗推求与评估[J].水利规划与设计,2017(5):94-97.
- [23] 陈康海.建筑工程施工阶段的碳排放核算研究[D].广东 广州:广东工业大学,2014.
- [24] 贾珍.某绿色建筑的全生命周期碳排放研究[J].建设科技,2016(17):78-81.
- [25] 龚志起,张智慧.水泥生命周期中物化环境状况的研究[J].土木工程学报,2004,37(5):86-91.
- [26] 吴红,崔素萍,王志宏.中国水泥工业环境负荷分析[J].中国建材科技,2006(3):50-54.
- [27] 陈超,胡聃,文秋霞,等.中国水泥生产的物质消耗和环境排放分析[J].安徽农业科学,2007(28):8986-8989.
- [28] 江亿,秦佑国,朱颖心.绿色奥运建筑评估体系研究[J].中国住宅设施,2004(5):9-14.
- [29] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A V. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. International Panel on Climate Change, 2006.
- [30] 李静,刘燕.基于全生命周期的建筑工程碳排放计算模型[J].工程管理学报,2015,29(4):12-16.
- [31] 张中秋.土地整治项目碳排放系统:中国,SR0306433 [P]:2021-02-26.
- [32] 王克,刘芳名,尹明健,等.1.5 °C 温升目标下中国碳排放路径研究[J].气候变化研究进展,2021,17(1):7-17.
- [33] 李茹茹,赵华甫,吴克宁,等.农村土地整治项目 CO₂ 排放及减排政策下的情景模拟[J].水土保持通报,2016,36(6):177-183.
- [34] 高世昌,杜亚敏.国土综合整治对科技创新的需求与对策[J].中国土地,2020(11):37-39.
- [35] 王威,胡业翠.改革开放以来中国国土整治历程回顾与新构想[J].自然资源学报,2020,35(1):53-67.
- [36] 郭义强.生态保护修复有助于碳中和[J].资源与人居环境,2021(4):52-53.
- [37] 何梅,方勇.新时期国土综合整治规划体系初探[J].中国土地,2021(3):30-32.

(上接第 189 页)

- [28] 师春香,姜立鹏,朱智,等.基于 CLDAS 2.0 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.
- [29] Cheng Meilin, Zhong Lei, Ma Yaoming, et al. A study on the assessment of multi-source satellite soil moisture products and reanalysis data for the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing, 2019,11(10):1-18.
- [30] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020,146(730):1999-2049.
- [31] Muñoz S J, Dutra, E, Agustí P, et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. Earth System Science Data, 2021, <https://doi.org/10.5194/essd-2021-82>.
- [32] 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.
- [33] 王文,汪小菊,王鹏. GLDAS 月降水数据在中国区的适用性评估[J].水科学进展,2014,25(6):4-13.
- [34] He Jie, Yang Kun, Tang Wengjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. Science Data, 2020,7(1):1-11.
- [35] 刘川,余晔,解晋,等.多套土壤温湿度资料在青藏高原的适用性[J].高原气象,2015,34(3):653-665.
- [36] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2001, 106(7):7183-7192.
- [37] 宋海清,李云鹏,师春香,等.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,2016,40(6):1165-1181.