

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.006

基于多源卫星遥感产品的土壤湿度融合与降尺度研究

何涯舟^{1,2}, 张珂^{1,2}, 晁丽君^{1,2}, 王晟^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对卫星遥感土壤湿度产品时空分辨率较低、难以满足中小流域洪水预报要求的问题,以秦淮河流域为研究区,将 SMOS、SMAP 和 AMSR2 等 3 种卫星遥感土壤湿度产品采用集合平均的方式进行融合,在地形湿度指数与土壤湿度关联关系的基础上建立空间降尺度方法,从而实现精细尺度的土壤湿度获取。研究表明,多源遥感融合产品相较于原有卫星具有更小的均方根误差,在日均值和季度均值上都更为接近实测结果,改善了单颗卫星监测时段间隔大、监测数据不准确的弊端,具有更好的适用性。

关键词: 土壤湿度; SMOS; SMAP; AMSR2; 多源融合; 空间降尺度; 地形湿度指数; 秦淮河流域

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)06-0040-07

Study on soil moisture merging and downscaling based on multi-source satellite remote sensing products

HE Yazhou^{1,2}, ZHANG Ke^{1,2}, CHAO Lijun^{1,2}, WANG Sheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Recourses, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Considering that satellite retrieved soil moisture (SRSM) products have relatively coarser spatiotemporal resolutions and, therefore, cannot meet the demand of flood forecasting in small and medium-sized watersheds, this study takes the Qinhuai River Basin as the research area to develop a method to merge three SRSM products and further downscale it to a finer resolution. The merged product was obtained based on three SRSM products, i. e., the SMOS, SMAP and AMSR2 products, via an assembling average method. The downscaling procedure was implemented to obtain the fine-scale soil moisture based on the relationship of topographic wetness index and soil moisture. The results showed that the RMSE of merged product is lower than that of original SRSM product. Besides, the merged product is close to the observations regarding both daily and seasonal average values. The method proposed in this paper can overcome the disadvantages of a single SRSM product, such as large time interval and lower precision, with a potential of worldwide applicability.

Key words: soil moisture; SMOS; SMAP; AMSR2; multi-sources merging; spatial downscaling; topographic wetness index; Qinhuai River Basin

土壤湿度(即土壤含水量,通常以体积含水量来度量)可通过控制地表能量通量、土壤热容量等途径影响水文过程,在大气与陆地的能量交换中发挥着重要的作用,更是地表产汇流过程的关键控制因子^[1-4],也是干旱监测、水文情势预测研究中的关键影响因素。

自 20 世纪 70 年代末以来,全球范围内已有多个机构针对不同的传感器发布了多种微波卫星遥感土壤湿度数据产品^[5],如欧洲太空局于 2009 年 11 月发射的土壤湿度与海水盐度(soil moisture and ocean salinity, SMOS)卫星^[6],其利用 L 波段相干辐射计获得地表微波辐射,使其能每隔 3 d 获得全球范围内的土壤湿度观

基金项目: 国家自然科学基金(51879067,52009028);中央高校基本科研业务费专项(B220203051,B220204014)

作者简介: 何涯舟(1996—),男,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:286928550@qq.com

通信作者: 张珂(1979—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:kzhang@hhu.edu.cn

引用本文: 何涯舟,张珂,晁丽君,等. 基于多源卫星遥感产品的土壤湿度融合与降尺度研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):40-46.

HE Yazhou, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Study on soil moisture merging and downscaling based on multi-source satellite remote sensing products[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(6):40-46.

测数据;日本宇航局(Japan Aerospace Exploration Agency,JAXA)发射的地球水环境变动监测卫星上搭载的 AMSR2(Advanced Microwave Scanning Radiometer 2)卫星^[7-8];NASA 于 2015 年发射的土壤湿度主被动观测(Soil Moisture Active and Passive,SMAP)卫星^[9-10],采用 L 波段主动、被动微波辐射计与合成孔径雷达来探测地球表层的土壤湿度;中国发射的风云三号系列卫星(FY3B 及 FY3C)^[11]等。

Ray 等^[12]对 AMSR-E、AMSR2、SMOS、SMAP 等 4 种卫星遥感土壤湿度产品在美国德克萨斯州的适用性进行了验证,结果表明,SMAP 数据的相关系数介于 0.37~0.92 之间,其反演效果最好。Mishra 等^[13]利用基于 SMAP 土壤湿度数据的土壤湿度亏缺指数,结合土壤特征信息对农业干旱进行了量化,结果表明,SMAP 土壤湿度数据很好地捕捉到了原位土壤湿度的动态变化。Kumar 等^[14]对 AMSR-E、ASCAT、SMOS、AMSR2、SMAP 等 5 种卫星遥感土壤湿度产品采用基于信息理论的评价方法,对产品的时间序列、测量误差、数据的随机性和规律性进行了综合分析,结果表明,除了 SMAP 以外的其他 4 种产品对土壤湿度的反演都存在低估的情况。综上所述,若直接采用某种遥感土壤湿度产品进行适用性评价会存在一定的误差。

由于各种卫星的工作方式及数据处理方式不同,且受地面地理环境与植被覆盖的影响,导致单一卫星产品无法准确反映某一确定区域的实际土壤湿度状态及空间分布情况。若采用某种方式将多种卫星产品各自优势互补,则可以在单一卫星无法准确探测相关数据的情况下,综合寻求某一确定研究区域的最佳估计值。本文在秦淮河流域开展了多源卫星遥感土壤湿度产品的融合研究,并对融合土壤湿度进行降尺度处理。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

秦淮河流域(图 1)面积约为 2 631 km²,长宽各约 50 km,位于 118°43'E~119°18'E、31°35'N~32°07'N 之间。流域地形呈锅形,四周丘陵山区占流域总面积的 80%;中间腹部为低洼圩区和河湖水面,占流域总面积的 20%。地势从南向北倾斜,上游坡度和扇面大,中下游坡度较缓。秦淮河流域共有大小 16 条支河汇入,是一个典型的一干多支树状型河道,且大都为山丘河道,具有源短、坡陡、流急、汇流快的特点,出口处受江潮顶托,排水不畅,历史上洪涝灾害不断。

1.2 数据

秦淮河流域墒情站点较少,桥头站位于南京市溧水区方便水库附近,在研究区范围内数据情况较好。本文采用桥头站 2016 年 3 月 15 日至 2017 年 11 月 29 日的逐日土壤湿度数据。

采用 SMOS、SMAP、AMSR2 卫星于 2016 年 1 月至 2018 年 12 月共同观测期作为研究时段。卫星遥感土壤湿度产品分别为:SMOS 卫星 L2 级 MIR_SMUDP2 土壤湿度产品,数据格式为 NetCDF;SMAP 卫星 L3 级土壤湿度产品,数据格式为 HDF5;AMSR-2 卫星 L3 级土壤湿度产品,数据格式为 HDF5。

表 1 3 种卫星遥感土壤湿度产品相关信息

Table 1 Information of three satellite soil moisture products

产品名称	观测波段/GHz	空间分辨率/km ²	时间分辨率/d	数据来源
SMOS	1.413(L 波段)	25×25	1	https://earth.esa.int/web/guest/home
SMAP	1.41(L 波段)	36×36	1	https://search.earthdata.nasa.gov
AMSR2	10~36 (X,K,Ka 波段)	25×25	1	https://search.earthdata.nasa.gov

由于卫星遥感土壤湿度产品空间分辨率不一致,因此先采用双线性插值法,将空间分辨率为 36 km×36 km 的 SMAP 数据插值成与 SMOS、AMSR2 数据一致的 25 km×25 km 分辨率,同时将 3 种卫星遥感土壤湿度产品的地理坐标统一投影到 WGS1984 坐标。用于融合的 SMAP、SMOS、AMSR2 数据的时间段为 2016 年 1 月至 2018 年 12 月,空间分辨率为 25 km×25 km,数据空间范围为 118°50'E~119°50'E、31°50'N~32°50'N。

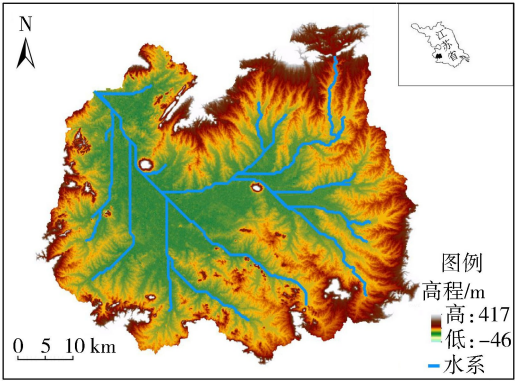


图 1 研究区位置和 DEM 空间分布
Fig.1 Location of study area and spatial distribution of DEM

2 研究方法

2.1 融合方法

由于缺少 SMOS、SMAP、AMSR2 等 3 种卫星遥感土壤湿度产品在中国地区应用的误差信息,因此在计算时给予三者相同的权重。在进行加权平均过程中,由于各卫星运行轨道与绕地周期不同,且相对于空间尺度较小的秦淮河流域,土壤湿度遥感数据存在不同程度的缺测。对于 3 种卫星均无观测数据的时段,融合产品中作为空值处理;对于仅有一种卫星观测数据的网格,取该卫星观测数据值;对于两者及以上的卫星均有观测数据的网格,对多卫星观测数据进行加权平均。综合来说,对具有多卫星同步观测条件的时段观测数据,采用加权平均的方式生成融合土壤湿度产品。

2.2 基于地形湿度指数降尺度方法

目前,大多数卫星遥感土壤湿度产品的空间分辨率较低,运用于中小型流域水文模型和灾害预测研究的适用性较差,因此采用降尺度的方法,将低空间分辨率的数据转化成高空间分辨率的数据。比较常用的降尺度方法是将低分辨率的微波产品与高分辨率的传感器相结合,如合成孔径雷达(SAR)及光学/热红外产品^[15],或采用基于模型、地理信息的方法进行卫星遥感土壤湿度数据的降尺度处理^[16-18],或采用基于研究区域下垫面条件,如植被覆盖和土壤质地等因素,建立下垫面条件与土壤湿度之间的关系以得到高空间分辨率的产品^[19]。

本文采用基于下垫面条件因素的地形湿度指数(topographic wetness index, I)作为低空间分辨率遥感观测数据与高空间分辨率下垫面条件数据之间的联系。定义湿度系数 K_w 作为土壤湿度和地形湿度指数间的转换参数,湿度系数初值由土壤湿度与其面上均值的比值确定:

$$K_{w,25} = \bar{S}_{25} / \bar{E}_{25} \tag{1}$$

式中: $\bar{S}_{25}$ 为卫星遥感土壤湿度在分析时段时间序列上的均值, m^3/m^3 ; $\bar{E}_{25}$ 为 $\bar{S}_{25}$ 在研究区域面上的均值, m^3/m^3 。

定义系数 C 为 K_w 的函数,对于不同的地形坡面形态采用不同的公式计算:

$$C_{25} = \begin{cases} \frac{K_{w,25}}{K_{a,25}} - 0.16\cos A_{25} - 0.09\sin A_{25} & \varnothing \leq 0 \\ \frac{K_{w,25}}{K_{a,25}} - 0.14\cos A_{25} - 0.10\sin A_{25} + 0.02\cos 2A_{25} & \varnothing > 0 \end{cases} \tag{2}$$

其中 $K_a = (1 - K_e\alpha)/(1 - K_e\alpha_0)$

式中: A 为坡向; K_a 为坡度和坡向的函数; α 为坡度; α_0 为区域平均坡度; K_e 为与坡向相关的系数,对于西向坡面 $K_e = -0.003$,对于南向坡面 $K_e = 0.005$,对于东向坡面 $K_e = 0.002$,对于北向坡面 $K_e = -0.01$; $\varnothing$ 为曲率。

根据不同的地形坡面形态采用不同公式计算 C ,再建立 C_{25} 与 I_{25} 之间的关系,采用线性回归方式对两者进行拟合,得到系数 ρ 和 q 的值:

$$C_{25} = \rho I_{25} + q \tag{3}$$

利用 I_{90} (I_{90} 表示 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 空间分辨率条件下的地形湿度指数值) 计算 C_{90} ,结合式(2)计算高分辨率下的 K_w ,将高分辨率 K_w 值带入:

$$S_{i,m,90} = K_{w,i,m,90} \times S_{i,m,25} \tag{4}$$

式中: $S_{i,m,90}$ 为第 m 个 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ 分辨率网格内所包含的所有 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 分辨率网格中的第 i 个土壤湿度值, m^3/m^3 ; $S_{i,m,25}$ 为第 m 个 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ 分辨率网格内采用距离平方倒数法插值成 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 分辨率矩阵网格数据中的第 i 个土壤湿度值, m^3/m^3 ; $K_{w,i,m,90}$ 为第 m 个 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ 分辨率网格内所包含的所有 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 分辨率网格中的第 m 个土壤湿度系数。

3 结果与分析

3.1 多源卫星遥感产品融合与适用性

由于遥感反演数据质量受到多因素的影响,与实测值相比往往具有一定的偏差。因此为分析融合产品的适用性,采用由江苏省水文水资源勘测局提供的墒情自动站——桥头站的实测土壤湿度数据与卫星遥感土壤湿度产品、融合土壤湿度进行误差分析,以选择该流域质量更好的产品。采用均方根误差(root mean

squared error, RMSE)来衡量其适用性。

将 2016—2017 年站点实测表层 (10 cm) 土壤湿度数据按时段划分为春季 (3—5 月)、夏季 (6—8 月)、秋季 (9—11 月) 和冬季 (12—次年 2 月)。由表 2 可知, AMSR2 数据在 2016 年及 2017 年春、冬两季土壤湿度均值在 $0.04 \sim 0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间, 与站点实测值相比明显偏低; 在夏、秋两季的反演值虽然有所提升, 但仍表现为低估。因此 SMOS、SMAP、AMSR2 等 3 种卫星集合平均产品 (SSA) 对土壤湿度的

估计受 AMSR2 数据的影响, 其值明显偏低。反观由 SMOS、SMAP 等 2 种卫星集合平均的产品, 2016 年秋季与站点实测均值一致, 2017 年秋季平均值仅高估 $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 与实测数据具有较强的一致性。图 2 也反映出相同的结果, 尽管 SMOS、SMAP 等 2 种卫星集合平均值在其他季节与实测值相比存在一定的高估, 但相较

表 2 卫星遥感产品与站点实测土壤湿度
季节与日均值

Table 2 Daily and seasonal averaged values of gauged soil moisture and remote sensing products						
年份	季节	站点实测	SMOS/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	SMAP/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	AMSR2/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	SSA/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
2016	春季	0.33	0.34	0.41	0.06	0.37
	夏季	0.31	0.42	0.48	0.13	0.45
	秋季	0.38	0.33	0.43	0.08	0.38
	冬季	0.31	0.38	0.39	0.04	0.38
2017	春季	0.31	0.40	0.41	0.05	0.41
	夏季	0.33	0.42	0.47	0.11	0.44
	秋季	0.33	0.37	0.41	0.10	0.39
日均值		0.33	0.38	0.43	0.08	0.40

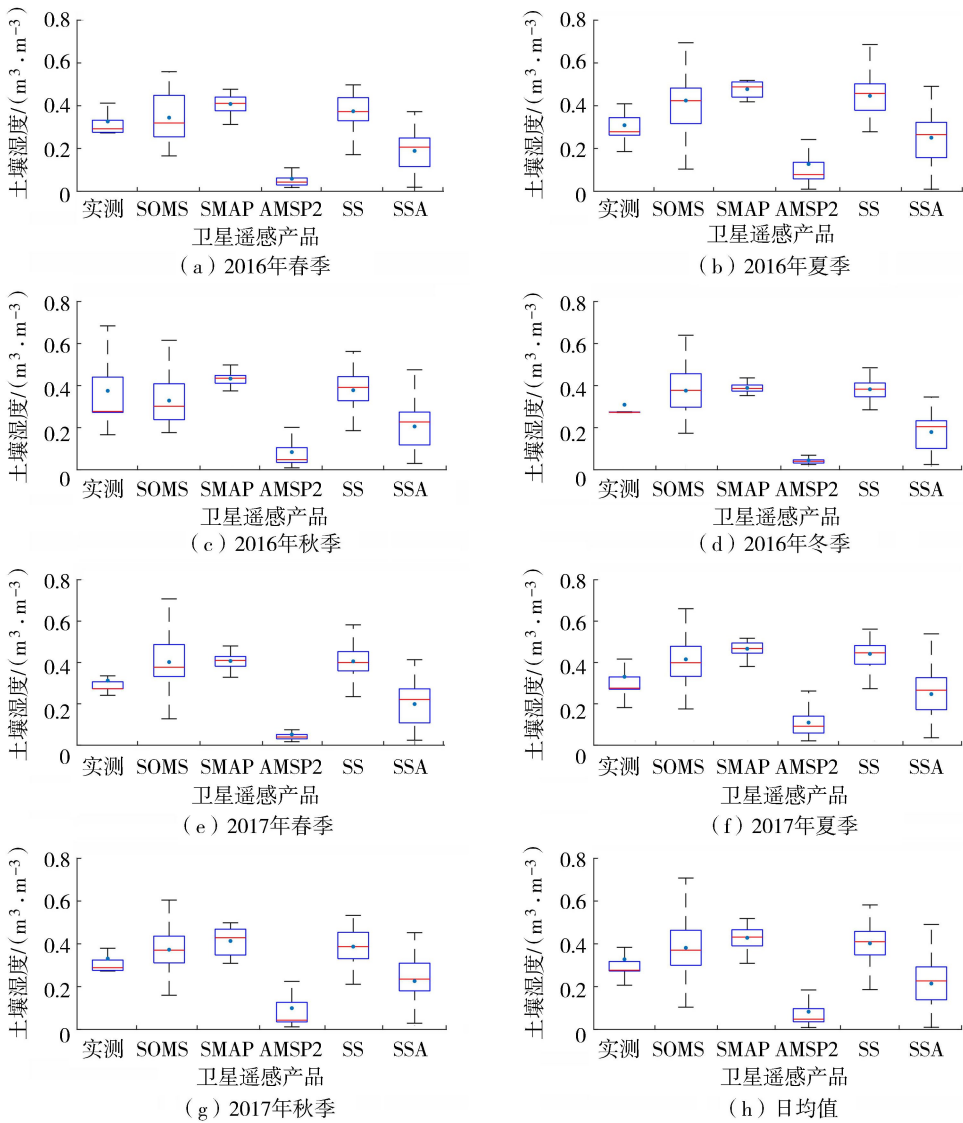


图 2 卫星遥感土壤湿度产品与实测值对比

Fig. 2 Boxplots of comparison between gauged soil moisture and remote sensing products

于三卫星融合产品及其他卫星数据能更好地反映实际土壤湿度情况,且与单一卫星相比其观测时段得到了延长。AMSR2 数据与实测数据相比整体误差较大,均方根误差为 $0.28\text{ m}^3/\text{m}^3$; SMOS、SMAP 数据融合产品(SS)的均方根误差最低为 $0.16\text{ m}^3/\text{m}^3$, 优于 SSA 产品,且相较于单一卫星观测时段更长,数据质量更好(表 3)。

以上结果表明,AMSR2 卫星遥感反演土壤湿度产品相较于其他产品及桥头站实测数据,其值对土壤湿度存在明显的低估,而在春、冬两季低估表现得更为明显。结合已有相关研究,AMSR2 卫星遥感土壤湿度反演产品在我国大部分时间都存在明显的低估,同时存在一定的恒定偏差^[20-21]。因此认为 AMSR2 卫星遥感土壤湿度数据在本研究流域中的适用性不佳,而 SMOS、SMAP 两种卫星数据融合产品(SS)与桥头站实测数据相比,具有较小的均方根误差,在日均值和季节均值上都更为接近实测结果,优化了单颗卫星监测时段间隔大、监测数据不准确等缺点,表明 SS 具有更好的适用性。

图 3 为采用克里金插值法后的融合产品土壤湿度时空特征图,表现了 2016—2017 年秦淮河流域土壤湿度的时空变化。融合产品较好地反映了土壤湿度四季分明的变化特征,即一般情况下夏季土壤湿度值最高,春秋两季次之,冬季最低;且在研究区域表现为 1 a 中流域南部土壤湿度普遍高于北部,相对而言流域西北部土壤湿度在更多时间内处于低值的状态。结合地形地貌特征,流域西北部靠近城市区域,硬化区较多,且人口密集,受人为因素影响较大,土壤湿度确应长期处于低值状态;而流域南部为秦淮河干流流经区域,多为山地、河谷地貌,且植被覆盖情况较流域北部好,因此土壤湿度长期处于较湿状态。

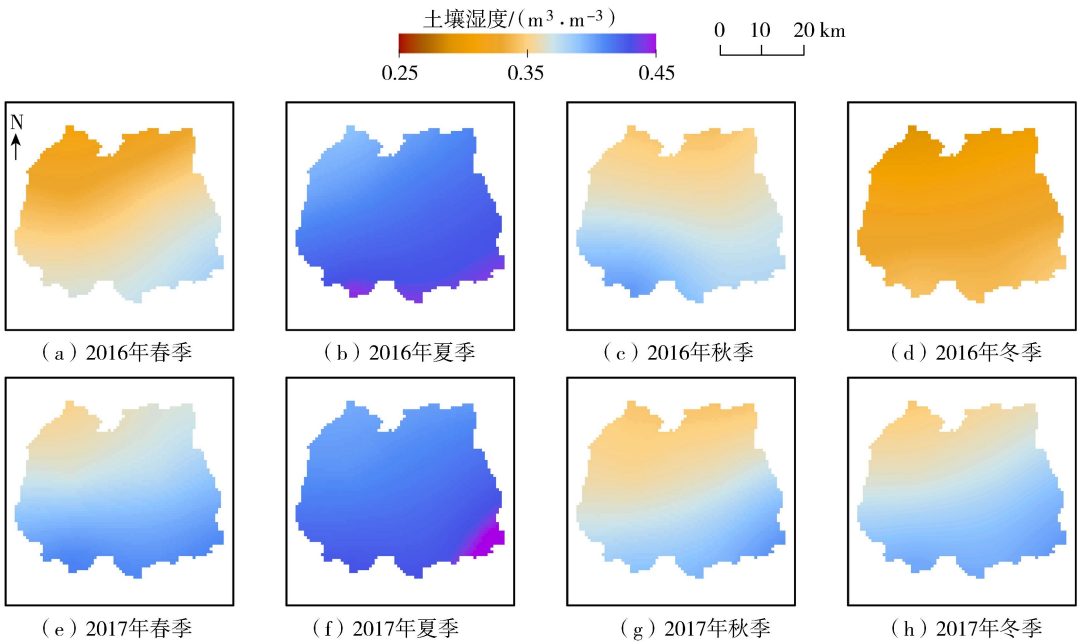


图 3 克里金插值下的土壤湿度融合产品时空特征

Fig. 3 Spatiotemporal distribution of merged soil moisture by using Kriging interpolation

3.2 降尺度结果分析

采用基于地形湿度指数降尺度方法将 $25\text{ km}\times 25\text{ km}$ 分辨率的融合产品降尺度到 $90\text{ m}\times 90\text{ m}$,采用 $90\text{ m}\times 90\text{ m}$ 分辨率数据对秦淮河流域卫星遥感观测土壤湿度状态以季节划分,对秦淮河流域范围内土壤湿度的时空变化进行分析(图 4)。全年秦淮河流域河道及河岸附近一定范围内土壤湿度均处于相对高值状态,但在一定程度上仍然可反映土壤湿度随季节的变化,表现为夏季最高,春秋两季次之,冬季最低。整体上看,流域

南部较为湿润,北部相对较干燥,夏季时流域西北部及东南部土壤湿度较大,处于湿润状态,春季和冬季时流域西北部则表现为相对较干旱。

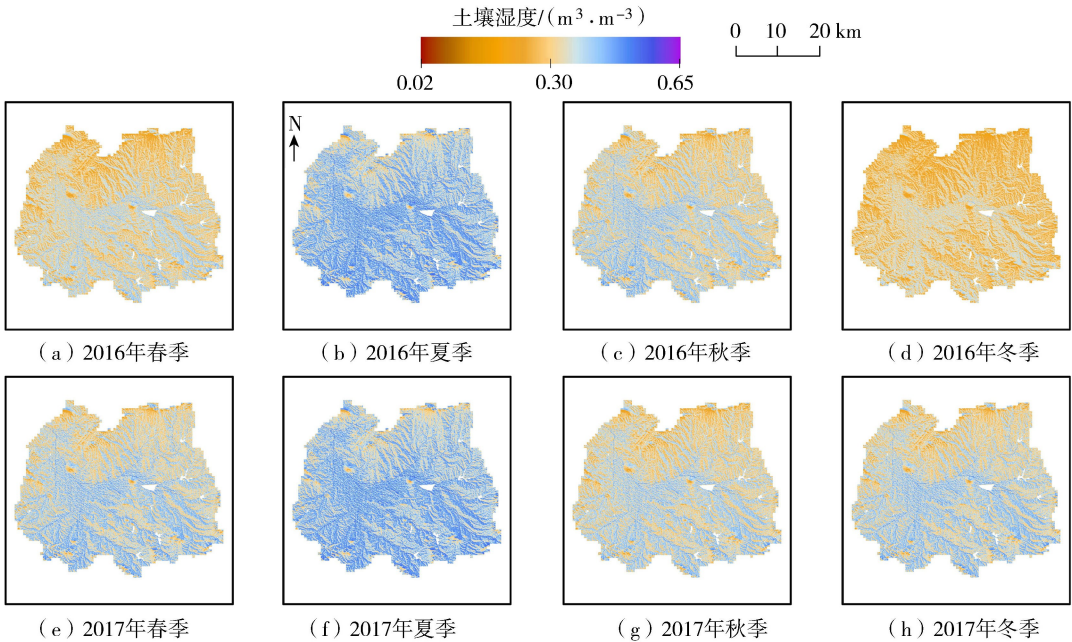


图 4 地形湿度指数降尺度下土壤湿度融合产品时空特征

Fig. 4 Spatiotemporal distribution of soil moisture by downscaling the merged product with topographic wetness index

降尺度后的融合卫星遥感土壤湿度数据能够在一定程度上根据研究区域的地形地貌特征较好地反映与河流、山脉等实际情况相结合的土壤湿度状态。一般而言,土壤湿度与地形湿度指数表现为线性关系,且地形湿度指数的空间变化与土壤湿度的空间变化也表现为线性关系。从流域内的山脉、河流等角度分析,在坡度趋近于零的区域,地形湿度指数表现为高值,而在这些区域往往是地势平缓的坡脚或者位于河谷、河岸等地形上处于下凹或低点的位置,这些区域往常年处于土壤湿度相对较高的状态;而对于坡度较大的区域,受到重力因素的影响,其值往常年处于较低状态,表明地形湿度指数与土壤湿度具有一定的相关关系。

4 结 语

本文以秦淮河流域 SMOS、SMAP、AMSR2 卫星遥感土壤湿度为数据源,采用集合平均方式对其进行融合,在此基础上对融合土壤湿度数据进行了降尺度处理。研究结果表明:SMOS、SMAP 两个卫星遥感数据融合产品(SS)在 2016 年秋季与站点实测均值一致,在 2017 年秋季平均仅高估 0.07 m³/m³,与实测数据具有较强的一致性,均方根误差最低为 0.16 m³/m³。而 AMSR2 产品在秦淮河流域的适用性不佳,相较于其他产品及桥头站实测数据,其对土壤湿度存在明显的低估,在 2016 年及 2017 年春、冬两季土壤湿度均值在 0.04 ~ 0.06 m³/m³ 之间,与站点实测相比明显偏低,在夏、秋两季虽有所提升,但仍表现为低估。与实测数据相比,多源卫星遥感融合产品的精度优于单颗卫星,具有更好的适用性;基于地形湿度指数降尺度处理后,获得了更适合于中小型流域土壤湿度状态分析及分布式水文模型的高分辨率土壤湿度卫星遥感反演融合产品。

参考文献:

[1] GALLEGOE B,TAYLOR C M,HARRIS P P,et al. Global observational diagnosis of soil moisture control on the land surface energy balance[J]. Geophysical Research Letters,2016,43(6):2623-2631.

[2] 丁旭,赖欣,范广洲. 中国不同气候区土壤湿度特征及其气候响应[J]. 高原山地气象研究,2016,36(4):28-35. (DING Xu,LAI Xin,FAN Guangzhou. Soil moisture characteristics and climate response of different climatic regional in China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,2016,36(4):28-35. (in Chinese))

[3] 范科科,张强,史培军,等. 基于卫星遥感和再分析数据的青藏高原土壤湿度数据评估[J]. 地理学报,2018,73(9):1778-1791. (FAN Keke,ZHANG Qiang,SHI Peijun,et al. Evaluation of remote sensing and reanalysis soil moistureproducts on the Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica,2018,73(9):1778-1791. (in Chinese))

- [4] 段浩,朱彦儒,赵红莉,等.考虑人类活动用水的土壤含水量神经网络反演[J].水利水电科技进展,2021,41(1):49-54. (DUAN Hao, ZHU Yanru, ZHAO Hongli, et al. Inversion of soil moisture using neural network considering human activities [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1):49-54. (in Chinese))
- [5] 郑有飞,黄图南,段长春,等.微波遥感土壤湿度反演算法及产品研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(5):1-7. (ZHENG Youfei, HUANG Tunan, DUAN Changchun, et al. Research progress of microwave remote sensing soil moisture retrieval algorithm and products [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2017, 45(5):1-7. (in Chinese))
- [6] ZHAO L, YANG K, QIN J, et al. The scale-dependence of SMOS soil moisture accuracy and its improvement through land data assimilation in the central Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 152:345-355.
- [7] KOLASSA J, GENTINE P, PRIGENT C, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E and ASCAT microwave observation synergy. Part 1:stellite data analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 173:1-14.
- [8] 张桂欣,郝振纯,祝善友,等. AMSR2 缺失数据重建及其土壤湿度反演精度评价 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (20): 137-143. (ZHANG Guixin, HAO Zhenchun, ZHU Shanyou, et al. Missing data reconstruction and evaluation of retrieval precision for AMSR2 soil moisture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (20): 137-143. (in Chinese))
- [9] O'NEILL P, CHAN S, NJOKU E G, et al. Algorithm theoretical basis document level 2 & 3 soil moisture (passive) data products [M]. Pasadena, CA:Jet Propulsion Laboratory, 2018.
- [10] REICHLER R, DE LANNOY G, LIU Q, et al. SMAP Level 4 surface and root zone soil moisture [C]//Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing:IEEE International, 2016.
- [11] ZHANG K, CHAO L J, WANG Q Q, et al. Using multi-satellite microwave remote sensing observations for retrieval of daily surface soil moisture across China [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(2):85-97.
- [12] RAY R L, FARES A, HE Y, et al. Evaluation and inter-comparison of satellite soil moisture products using in situ observations over Texas, US [J]. Water, 2017, 9(6):372.
- [13] MISHRA A, VU T, VEETIL A V, et al. Drought monitoring with soil moisture active passive (SMAP) measurements [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552:620-632.
- [14] KUMAR S V, DIRMEYER P A, PETERS-LIDARD C D, et al. Information theoretic evaluation of satellite soil moisture retrievals [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 204:392-400.
- [15] 刘静. 土壤水分产品降尺度及验证研究 [D]. 西安:长安大学, 2019.
- [16] SRIVASTAVA P K, HAN D, RAMIREZ M R, et al. Machine learning techniques for downscaling SMOS satellite soil moisture using MODIS land surface temperature for hydrological application [J]. Water Resources Management, 2013, 27(8):3127-3144.
- [17] VAN DER VELDE R, SALAMA M S, EWEYS O A, et al. Soil moisture mapping using combined active/passive microwave observations over the east of the Netherlands [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 8(9):4355-4372.
- [18] MASCARO G, VIVONI E R, DEIDDA R. Downscaling soil moisture in the southern Great Plains through a calibrated multifractal model for land surface modeling applications [J]. Water Resources Research, 2010, 46(8):863-873.
- [19] RANNEY K J, NIEMANN J D, LEHMAN B M, et al. A method to downscale soil moisture to fine resolutions using topographic, vegetation, and soil data [J]. Advances in Water Resources, 2015, 76:81-96.
- [20] CUI H, JIANG L, DU J, et al. Evaluation and analysis of AMSR-2, SMOS, and SMAP soil moisture products in the Genhe area of China [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 2017, 122(16):8650-8666.
- [21] 周俊利,薛华柱,董国涛,等.基于 AMSR2 微波植被指数与地表温度的旱情分析 [J]. 水土保持研究, 2018, 25 (6): 377-382. (ZHOU Junli, XUE Huazhu, DONG Guotao, et al. Drought analysis based on AMSR2 microwave vegetation index and surface temperature [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6):377-382. (in Chinese))

(收稿日期:2022-01-04 编辑:胡新宇)