

引用格式: Wang Hao, Hao Ying, Yuan Song, *et al.* Applicability Assessment of SMAP Soil Moisture Products in the Huaihe River Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 1009–1021. [王皓, 郝莹, 袁松, 等. SMAP土壤水分产品在淮河流域的适用性评估[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 1009–1021.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.1009

SMAP土壤水分产品在淮河流域的适用性评估

王皓¹, 郝莹², 袁松¹, 陈光舟², 靳莉莉²

(1. 安徽省气象台, 安徽 合肥 230000;

2. 淮河流域气象中心, 安徽 合肥 230000)

摘要: 选取淮河流域为研究区域, 利用2016年6月至2019年5月流域内的313个土壤水分观测站0~10 cm土壤体含水量数据, 使用多种指标分析SMAP卫星(Soil Moisture Active Passive)9 km分辨率土壤水分产品(L2_SM_P_E)精度的空间和时间(年、月、日尺度)特征, 并讨论植被、土壤、地形等对精度影响。结果表明: ①整体来看, L2_SM_P_E在淮河流域达不到 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 的预期精度, 存在湿区高估、干区低估的现象, 但可以较好地反映流域土壤水分的空间分布特征, 也能较为准确地指示高湿区和低湿区。②L2_SM_P_E的精度存在明显的区域差异和季节差异。冬季精度明显优于其他季节, 流域大部分地区的无偏均方根误差(ubRMSE)均接近预期精度, 且在流域北部的部分地区、伏牛山区和大别山区达到了预期精度。在春秋季节, 流域北部和大别山区的精度较高。夏季L2_SM_P_E的可用性较差。③L2_SM_P_E和降水有较好的一致性, 对降水的响应比土壤水分观测值敏感。在降水过程中和降水结束后, L2_SM_P_E的误差以随机误差为主; 当土壤相对干燥, 则以系统性负偏差为主。④L2_SM_P_E的精度与采样点的土壤类型关系并不密切, 山地地区的精度要优于其他地区。

关键词: SMAP; 土壤水分; 淮河流域; 评估

中图分类号: S152.7; TP79

文献标志码: A

文章编号: 1004-0323(2021)05-1009-13

1 引言

土壤水分是大气系统与水文循环过程的重要参量, 是控制地表与大气相互作用、地表水量平衡与能量平衡的关键因子, 也是很多气象及水文模型、干旱监测模型、作物生长模型等的重要初始参数之一, 因此及时准确地获取大范围、高精度的土壤水分数据, 对气象预报、水文预报、农业生产、旱涝监测等都具有十分重要的意义^[1-3]。

常规观测是在有限的采样点上测定土壤水分, 可以测定多个不同深度的土壤水分, 数据精度高, 但由于观测网密度低或测站布局不合理, 且获得的是点尺度的数据, 导致地面观测数据空间代表性

差, 不能反映土壤水分空间分布的真实性。遥感技术的发展实现了土壤水分观测由代表站的“点”向区域性的“面”的转变, 微波遥感不受云、雨、光照等天气条件影响, 可以全天时、全天候、大范围地监测土壤水分的时空变化, 因此借助遥感手段获取的土壤水分数据得到了越来越多的应用^[4-6]。

国内外相关的科研机构 and 业务部门开发了多种不同分辨率的卫星反演土壤水分产品, 主要产品有: 欧洲航天局(ESA)的SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)^[7-8]、中国国家卫星气象中心(NSMC)的风云三号系列卫星(FY3B、FY3C)^[9-10]、日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)的AMSR2

收稿日期: 2020-06-28; 修订日期: 2021-07-28

基金项目: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-032)。

作者简介: 王皓(1987—), 男, 安徽滁州人, 工程师, 主要从事GIS应用研究。E-mail: dibazhang@qq.com

通讯作者: 郝莹(1982—), 女, 安徽涡阳人, 高级工程师, 主要从事水文气象研究。E-mail: DG1328006@smail.nju.edu.cn

(Advanced Microwave Scanning RadioBiaster2)^[11-12], 美国国家航空航天局(NASA)的SMAP(Soil Moisture Passive and Active)^[13]等。

SMAP是NASA设计的全球第一个主被动微波相结合的监测卫星。该卫星于2015年1月31日成功发射,旨在提供全球陆地表面5 cm深度的土壤水分估算值^[14-15]。其最大的亮点就是同时搭载了L波段雷达和L波段辐射计,雷达仪器和辐射计仪器都在一个685 km近极地太阳同步轨道的平台上,共享一个6 m网状反射天线,以恒定的40°入射角和1 000 km的条带宽度观察地球表面^[16]。相比于其他的微波土壤水分产品,SMAP具有幅宽大、重访周期短、分辨率高等优势。SMAP的主要精度评估指标为无偏均方根误差(ubRMSE),预期精度为ubRMSE小于0.04 m³/m³,考虑到升尺度误差,有些研究^[17]将预期精度修订为ubRMSE小于0.06 m³/m³,但在获取遥感数据的过程中,由于大气、目标地物、地形等多种因素导致土壤水分产品的误差存在区域性差别,因此需要开展不同区域的质量评估和应用研究。

近年来,国内外学者对SMAP卫星土壤水分产品的评估应用已取得较多的研究成果^[16-28]。Collander等^[16]验证了SMAP L2不同分辨率的土壤水分产品,结果显示,36 km的微波辐射计产品L2_SM_P符合预期精度0.04 m³/m³,9 km的雷达与辐射计组合产品L2_SM_AP接近预期精度0.04 m³/m³,3 km的雷达产品L2_SM_A符合预期精度0.06 m³/m³。Cui等^[19]对SMAP和其他7种卫星土壤水分产品进行了评估,发现在美国区域SMAP产品表现最好。Zhu等^[23]对中国河南地区FY-3C、AMSR2和SMAP 3种卫星土壤湿度产品进行了质量评估,发现SMAP在时间和空间上都表现要好。Sun等^[17]利用全国655个土壤水分监测站初步评估了2015年4月1日~2016年8月31日中国范围内7个区域36 km分辨率的SMAP土壤水分产品的可用性,结果表明ubRMSE为0.058 m³/m³,基本符合预期精度。但在淮河流域ubRMSE均大于0.07 m³/m³,误差较其他区域偏大,不具备实用价值。王雅正等^[27]在山东地区对比分析了FY-3B、FY-3C、SMAP和SMOS 4种卫星土壤水分产品,其中SMAP的ubRMSE为0.05 m³/m³,具有较高的应用价值。

淮河流域作为洪涝灾害频发的流域,基于卫星遥感的大范围、高分辨率的土壤水分产品对提升该

流域水文气象预报准确率、干旱监测预警能力、水资源管理能力等具有重要的实用价值。但在以往的研究中,缺少对此区域开展具有针对性的精细评估,使用的产品数据空间分辨率低,时间序列短,观测对比数据稀疏,评估结果过于概化。

因此实验选用空间分辨率9 km的SMAP卫星被动微波土壤水分产品L2_SM_P_E(2016年6月~2019年5月),利用淮河流域内更加稠密的土壤水分观测站数据进行对比统计分析,更加精细地评估淮河流域内SMAP土壤水分产品精度的空间分布特征,并从季节尺度、月尺度和日尺度分析探测误差特征,探讨不同地形地势、植被覆盖和土地利用对探测精度的影响。为SMAP土壤水分产品在淮河流域的适用性提供科学的参考。

2 研究区域

淮河流域地跨湖北、河南、安徽、山东、江苏五省,流域面积27万km²。淮河可分为上、中、下游3段,上游为山区,地面落差大;中下游以平原为主,地面落差较小。淮河流域处于南北气候过渡带,年平均气温14.5℃,年平均降水842 mm。降雨多集中在每年的6~9月,且降雨年际变化大,地区分布不均匀。受特殊的地理位置、复杂的气候条件影响,淮河流域水旱灾害发生频繁(图1)。

3 数据与方法

3.1 SMAP数据

SMAP卫星包含4个等级22种土壤水分产品,这些产品是由美国宇航局国家冰雪数据中心的分布式主动归档中心(NSIDC DAAC)发布。L1数据产品为经过标定和地理定位校准后的表面雷达后向散射和亮度温度数据产品;L2产品是根据L1产品和辅助信息,经过反演得到的半轨道的土壤水分产品;L3产品为L2产品的全球日融合数据产品;L4产品是模型衍生的增值数据产品,包括地表和根区土壤水分产品、生态系统碳交换产品等。SMAP所有产品均可从NSIDC(<https://nsidc.org/data/smap/smap-data.html>)下载。

由于在2015年7月SMAP卫星的L波段雷达损坏,不能提供主动被动结合产品。实验采用2016年6月~2019年5月SMAP卫星L2级数据中的土壤水分产品L2_SM_P_E,SMAP微波辐射计的原始空间分辨率为36 km,L2_SM_P_E产品是根据SMAP Level-1B(L1B),使用Backus-Gilbert最优

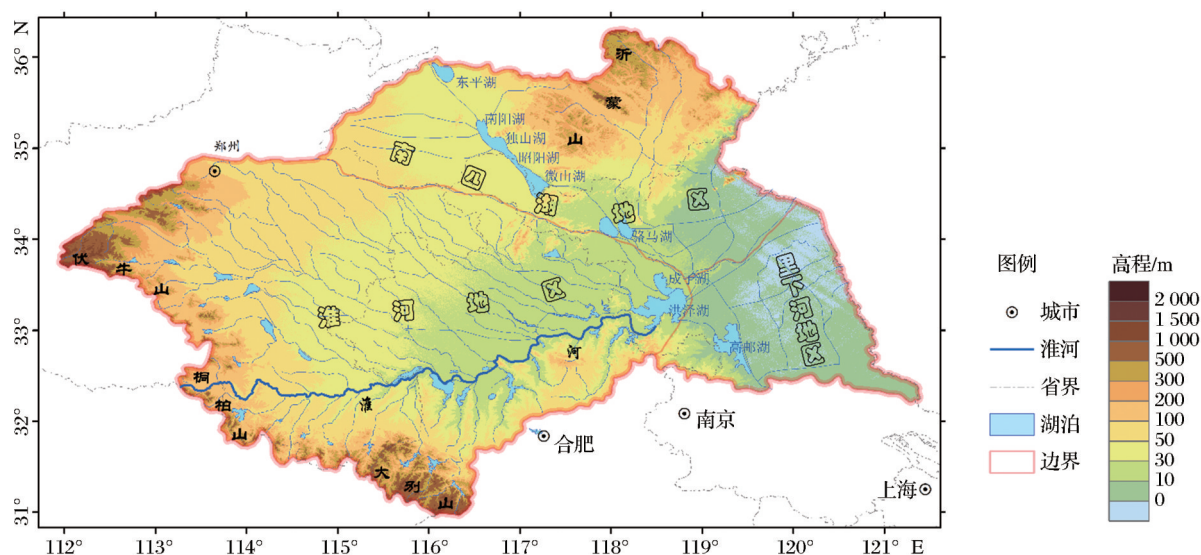


图1 淮河流域地形图

审图号:GS(2020)303

Fig.1 Topographic map of the Huaihe River Basin

插值技术内插得出的空间分辨率为9 km的土壤水分产品,该产品是输出在9 km EASE-Grid 2.0投影上的0~5 cm表面土壤体积含水量(m^3/m^3)。

实验将1 d内的升轨数据与降轨数据的平均值作为SMAP的日值数据。

3.2 土壤水分地面观测数据

所用资料为2016年6月~2019年5月淮河流域土壤水分地面观测数据,来源于全国综合气象信息共享平台(CIMISS),共有313个站,时间分辨率为1 h。实验将1 d内的逐小时10 cm土壤体积含水量资料取平均值作为日值观测数据。

3.3 地理信息数据

为评估不同下垫面下SMAP土壤水分产品的精度,实验使用中国科学院资源环境科学数据中心的1:100万植被类型、土壤类型和地形地貌类型空间分布数据,空间分辨率为1 km,将淮河流域内的样本数据分别按3种类型分类统计。

按植被类型,分为湖泊水库、栽培植被、沼泽、草甸、草丛、灌丛、阔叶林、针叶林和其他9种植被类型。

按土壤类型,分为淋溶土、半淋溶土、初育土、半水成土、水成土、盐碱土、人为土、城区、湖泊水库、滨海盐场/养殖场10种土壤类型。其中湖泊水库、城区不做讨论,水成土、盐碱土样本过少,也不做分析。

按地形地貌,分为湖泊水库、平原、台地、丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地7类。

3.4 评估指标

为更加全面地检验SMAP土壤水分产品的可

靠性和准确性,选取多种指标对其进行评估,分别为相关系数R、偏差Bias、均方根误差RMSE、无偏均方根误差ubRMSE,计算公式如下:

相关系数R,用以反映卫星土壤水分产品与土壤水分地面观测数据之间相关关系密切程度的统计指标。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{obs,i} - \bar{V}_{obs})(V_{sim,i} - \bar{V}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{obs,i} - \bar{V}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (V_{sim,i} - \bar{V}_{sim})^2}} \quad (1)$$

其中: $V_{obs,i}$ 、 $V_{sim,i}$ 分别是第*i*天的地面观测数据和SMAP卫星数据; \bar{V}_{obs} 、 \bar{V}_{sim} 分别是其在时间范围内的平均值; n 是时间序列长度。

偏差Bias,用以反映卫星土壤水分产品与地面观测数据之间的系统差异。

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{sim,i} - V_{obs,i})}{n} \quad (2)$$

均方根误差RMSE,用以反映卫星土壤水分产品与地面观测数据之间的偏差,SMAP遥感产品并没有使用均方根误差作为预期精度的指标,但AMSR2使用均方根误差小于0.1作为预期精度目标。在本研究中也参考此指标。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{sim,i} - V_{obs,i})^2}{n}} \quad (4)$$

无偏均方根误差ubRMSE,消除了RMSE的偏差,能够更好地表征卫星土壤水分产品中的随机误差。SMAP预期精度为ubRMSE小于0.04 m^3/m^3 ,

也有些研究^[17]则把预期精度修订为 ubRMSE 小于 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 实验中因为使用了 9 km 分辨率的 SMAP 卫星遥感产品, 考虑升尺度误差, 将 ubRMSE 小于 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 作为参考目标。

$$\text{ubRMSE} = \sqrt{\text{RMSE}^2 - \text{Bias}^2} \quad (5)$$

3.5 评估方法

土壤水分地面观测站点数据作为评估的对比数据, 在空间上以点的形式表示(图 2), SMAP 数据与其他下垫面数据都是栅格数据, 以像元的形式

表示。为了避免不同数据之间尺度差异带来的误差, 建立样本对时, 以站点的坐标位置, 与 SMAP 像元与下垫面像元做空间相交运算, 提取相同位置的数据, 组成样本对, 以此评估 SMAP 土壤水分产品的精度。

值得注意的是, 淮河流域绝大部分地区的 SMAP 数据样本数超过 900 d, 其中有约三分之一的地区样本数超过 1 000 d, 具有很强的统计意义。但某些局部区域 SMAP 数据缺失较多, 不具有统计意义, 因此在统计时将样本数较少的数据剔除。

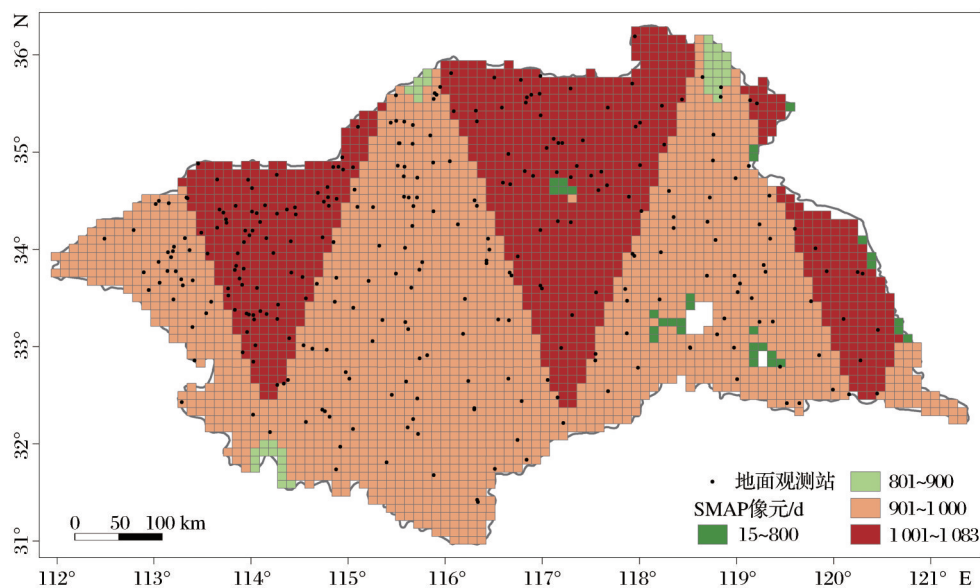


图 2 SMAP 数据与观测站点在淮河流域的分布

审图号: GS(2020)303

Fig.2 Distribution of SMAP data and observation stations in the Huaihe River Basin

按照不同时间尺度(总体、季、月、日)划分数据, 计算各样本点的评估指标。再利用反距离权重法, 对各样本点的评估指标插值, 得到各指标的空间分布图。

反距离权重插值 IDW^[29-30] (Inverse Distance Weight), 是基于地理学第一定律: 地物之间的相关性与距离有关, 一般来说, 距离越近, 地物间相关性越大; 距离越远, 地物间相异性越大。参与计算的样本点权重与距离成反比, 距离越近, 权重越大, 距离越远, 权重越小。

$$Z(s_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_{i0}^{-p}} Z(s_i) \quad (6)$$

其中: $Z(s_0)$ 为 s_0 处预测值; $Z(s_i)$ 为在 s_i 处测量值; n 为 s_0 处周围参与插值的的样本点数; d_{i0} 为 s_0 处与 s_i 处之间的距离; p 是距离的幂, 通常取 2。实验中使用 ArcGIS 的 IDW 工具进行插值, 计算参数参考了

Zhu 等^[23]研究中采用的参数, 结合实际的误差分析, 最终选择分辨率为 0.01, 权重为 2, 相邻点数为 5。

4 结果分析

4.1 总体评估结果

从地面观测数据与 SMAP 的日平均土壤水分空间分布对比图来看(图 3)看出, SMAP 土壤水分产品的空间分布和地面观测数据较为相似, 均以淮河为分界, 呈现南湿北干的分布特征。淮河以北日平均土壤水分普遍低于 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 淮河以南地区则普遍高于 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。值得注意的是, SMAP 可较好地反映出淮河以南、里下河地区、南四湖附近等土壤水分高值区, 也能体现沂蒙山区北部、南四湖西部的低湿区。但是在淮河以北地区, SMAP 土壤水分产品较地面观测数据偏小, 存在低估。

近 3 a SMAP 土壤水分产品的评估结果显示, SMAP 土壤水分产品与地面观测数据在整体上的

相关系数为0.384,通过了0.001的显著性检验,Bias为 $-0.062 \text{ m}^3/\text{m}^3$,遥感产品呈现低估现象,RMSE为

$0.136 \text{ m}^3/\text{m}^3$,ubRMSE为 $0.121 \text{ m}^3/\text{m}^3$,整体未达到SMAP卫星土壤水分产品的预期精度 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

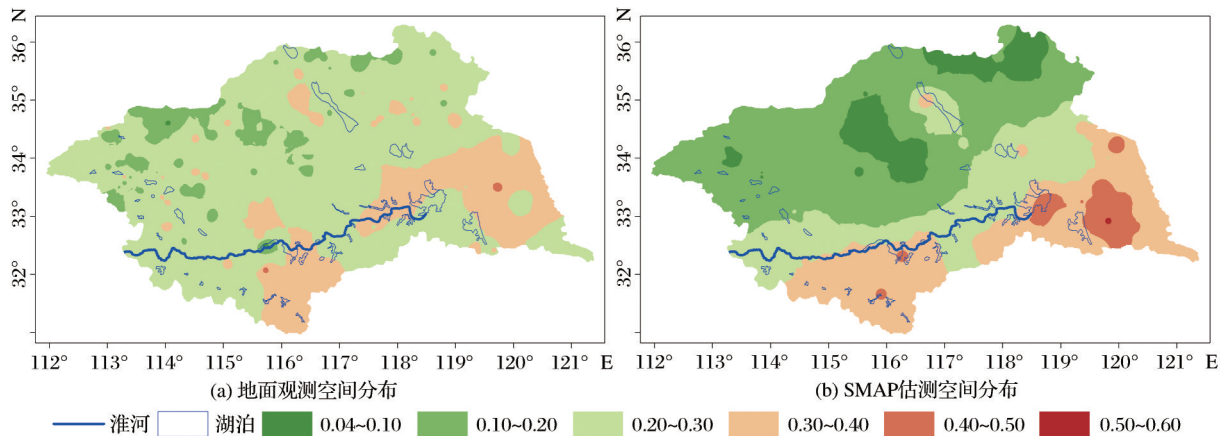


图3 地面观测数据与SMAP数据的日平均土壤水分空间分布

审图号:GS(2020)303

Fig.3 Spatial distribution of daily average soil moisture of ground observation data and SMAP data

4.2 误差的空间分布特征

进一步分析SMAP土壤水分产品的精度的空间分布特征,从图4(a)可以看出,除里下河区域外,SMAP土壤水分产品在淮河流域大部分地区都和地面观测数据相关性较好,尤其是淮干上游,两者相关系数高达0.6~0.8,最高为0.85。图4(b)偏差的分布也存在明显的空间差异性,淮河以北以负偏差为主,淮河以南以正偏差为主,在湖泊等潮湿地区多呈现出正偏差。这与Sun等^[17]得出的“SMAP遥感土壤水分产品在湿润地区存在高估”结论相类似。

图4(c)显示RMSE分布较为随机,但高值区大都位于流域东部,尤其是里下河和沂沭泗地区,是RMSE的大值区,但淮干中上游、流域西北部的RMSE小于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。图4(d)中的ubRMSE明显比RMSE偏小,也呈现出西低东高的现象,高值区位于流域东南部的里下河地区以及湖泊水库等区域附近,在流域的西北部,局部地区的ubRMSE小于参考精度 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$,整体都达不到预期精度 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

综合以上分析得知,SMAP土壤水分产品的精

度在淮河流域存在明显的区域差异,在流域西部和北部,SMAP数据和实况相关性好误差较小,而在东南部误差较大,可用性不高。在湿润地区,SMAP土壤水分产品存在明显高估。

4.3 不同时间尺度的评估结果

4.3.1 季节尺度评估

气象学上为便于应用与比较,通常以3~5月为春季;6~8月为夏季;9~11月为秋季;12月和次年1、2月为冬季。

分季节的评估结果显示,在秋冬两个季节,相关系数比春夏大,说明SMAP土壤水分在秋冬季的 trend 变化和地面观测数据较为一致。但从Bias来看,4个季节都出现不同程度的低估现象,其中夏季的最小,冬季的最大,同时RMSE也是冬季最大,也就是说冬季存在较大的系统性低估。

进一步分析每个季节的无偏均方根误差的空间分布特征,得知在春季流域的北部和东南部均存在大片区域ubRMSE小于 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$,占总面积的25.59%。在夏季,流域大部分地区的精度较差,ubRMSE小于 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 的区域仅占总面积的

表1 评估指标的季节分布特征

Table 1 Seasonal distribution characteristics of evaluation indicators

季节	样本数	地面观测值	SMAP数值	相关系数 R	偏差 Bias	均方根误差 RMSE	无偏均方根误差 ubRMSE
春	64 623	0.236	0.177	0.383	-0.059	0.130	0.115
夏	61 649	0.253	0.238	0.397	-0.016	0.133	0.132
秋	59 631	0.258	0.191	0.421	-0.067	0.126	0.107
冬	48 003	0.266	0.146	0.447	-0.120	0.159	0.104
总体	233 906	0.252	0.190	0.384	-0.062	0.136	0.121

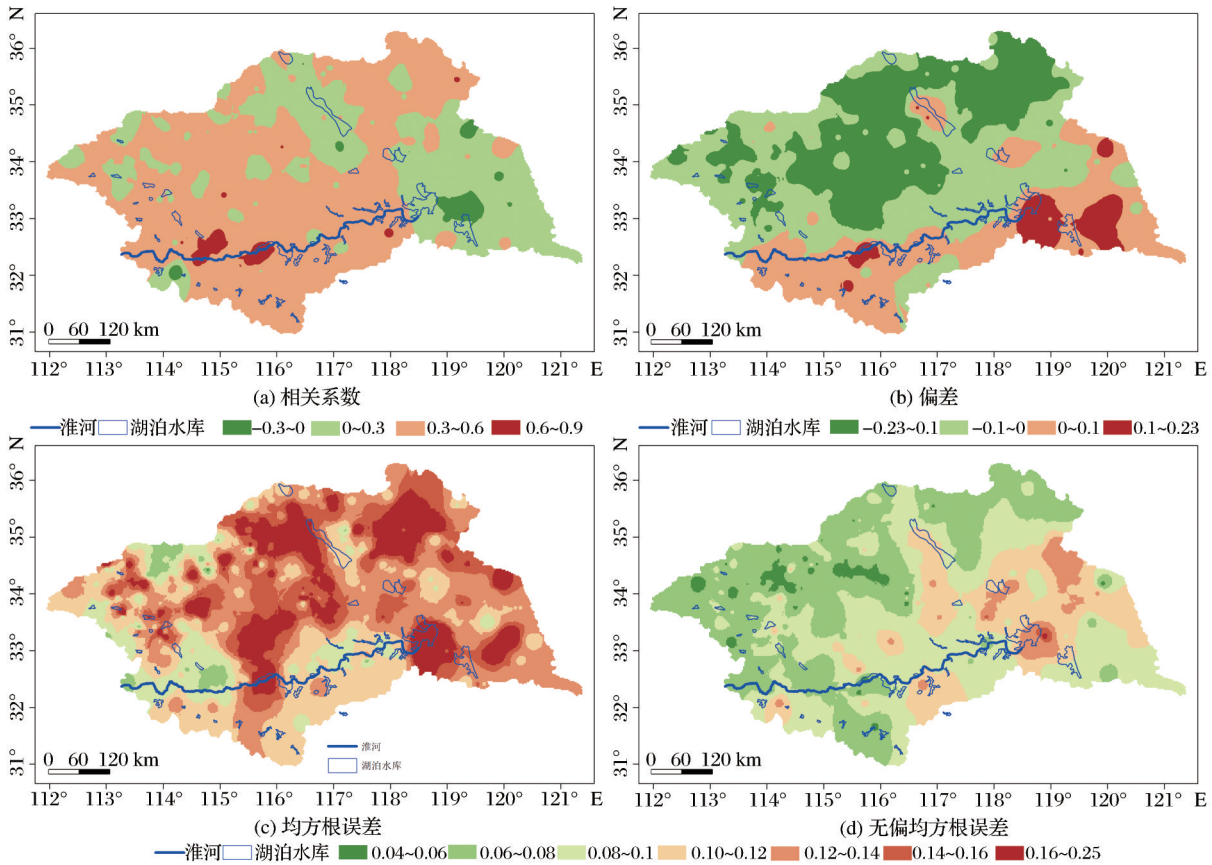


图4 评估指标的空间分布

审图号:GS(2020)303

Fig.4 Spatial distribution of evaluation indicators

4.29%。秋季,流域北部和大别山区部分地区ubRMSE小于 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$,占总面积的18.94%。到了冬季,精度大幅提升,流域大部分地区的ubRMSE均小于 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$,占总面积的59.88%。并且在流域北部的部分地区、伏牛山区和大别山区出现大片区域ubRMSE达到预期精度 $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$,占总面积的7.31%(图5)。

4.3.2 月尺度评估

分月的评估结果显示,在12个月份中,R在0.4上下波动;Bias随月份先升后降,除7月以外的11个月都出现了不同程度的低估现象,且与降水数据呈现明显的相关性,降水越少,负偏差越大,两者的相关系数为0.889。RMSE与ubRMSE均大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$,未达到参考精度,同时RMSE出现与Bias相反的变化趋势,ubRMSE出现与Bias相似的变化趋势。进一步分析两者的月平均值分布(图6(e)),发现SMAP土壤水分产品与降水的起伏趋势一致,其与月平均降水的相关系数达到0.956,对降水的响应敏感。而地面观测数据则对降水的响应不敏感,相关系数为-0.118。

进一步分析每月的无偏均方根误差的空间分布特征(图7),得知研究区内达到预期精度的区域从1月到6月在逐月递减,然后从6月到12月逐月增加,空间分布与上述季节分析相类似。

在1、2、3、12月中,大别山区、伏牛山区、沂蒙山部分区域都达到了预期精度,而在整体精度较差的7~9月,里下河部分地区达到了预期精度。淮河干流及沿淮地区全年表现都较差,与其他地区差异明显。

从图7(m)达到预期精度区域面积占比可以看出,达到预期精度的区域全年都在20%以下,6月最低,仅为0.37%,达到参考精度的区域变化幅度较大,最大75.05%,最小21.22%,全年有5个月(1、2、10、11、12月)超过50%

4.3.3 日尺度评估

从SMAP数据和地面观测数据的逐日变化趋势图来看(图8(a)),SMAP土壤水分产品和降水的一致性较好,对降水的响应比较敏感,即随着降水的出现,土壤湿度有明显增加,降水停止后土壤湿度开始显著降低,统计得出SMAP土壤水分产品和

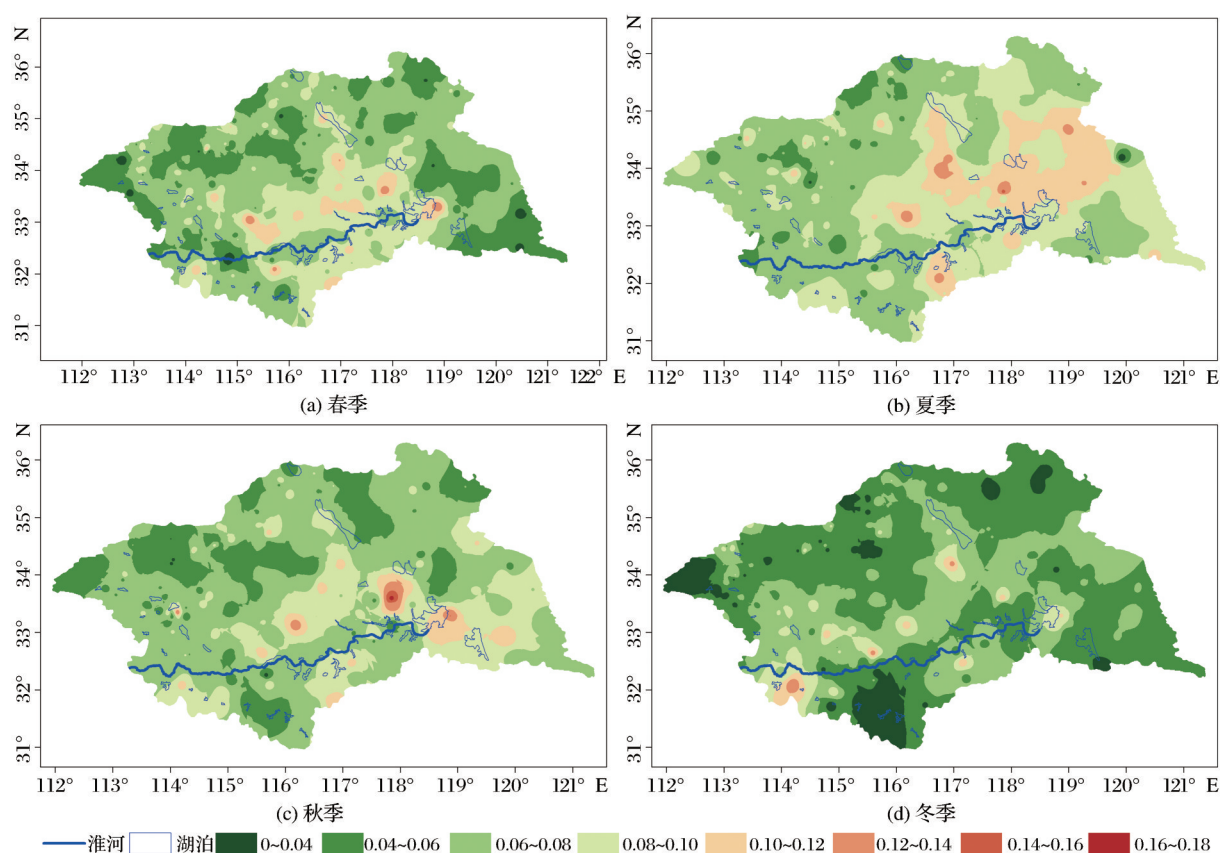


图5 无偏均方根误差的季节空间分布

审图号:GS(2020)303

Fig.5 Seasonal spatial distribution of ubRMSE

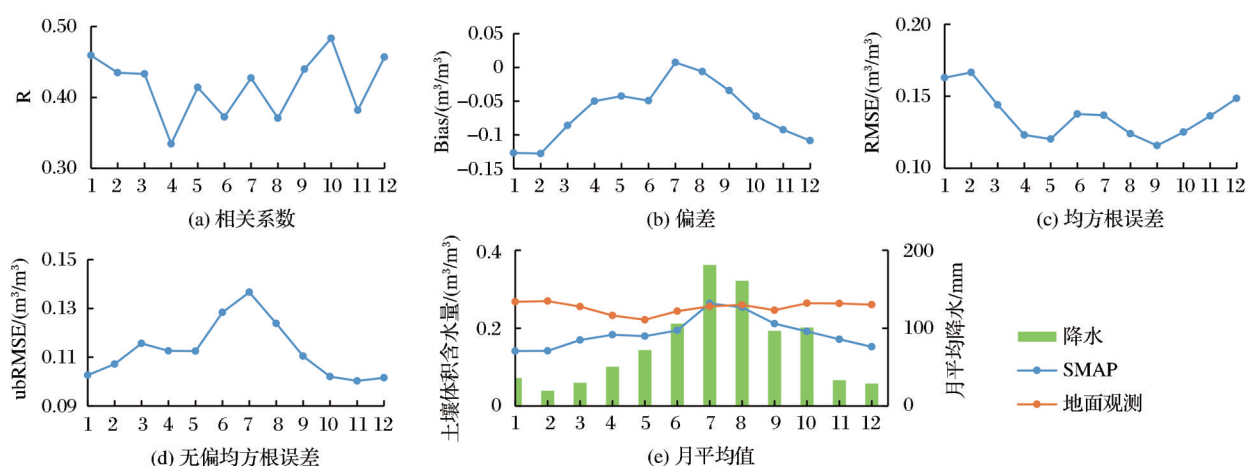


图6 评估指标的月分布特征

Fig.6 Monthly distribution characteristics of evaluation indicators

流域日平均面雨量的相关系数为0.483,高于地面观测数据和流域日平均面雨量的相关系数0.218。图8(b)、图8(c)和图8(d)也可以看出,SMAP数据和地面观测数据的R、Bias、RMSE、ubRMSE的大小都和降水有关联,特别是Bias相关系数为0.429。

总体来看,在降水过程中和结束后一段时间,相关系数降低、Bias和RMSE减小,但ubRMSE增

大,可见在土壤比较潮湿的时候,SMAP数据没有明显的系统误差,以随机误差为主。在无雨日或降水偏少的时间段,相关系数相对较高、SMAP数据和地面观测数据相比呈现较大的负偏差,RMSE也较大,但是ubRMSE却显著减小,可见在土壤较为干燥时,两者之间的随机误差减小,以系统误差为主。

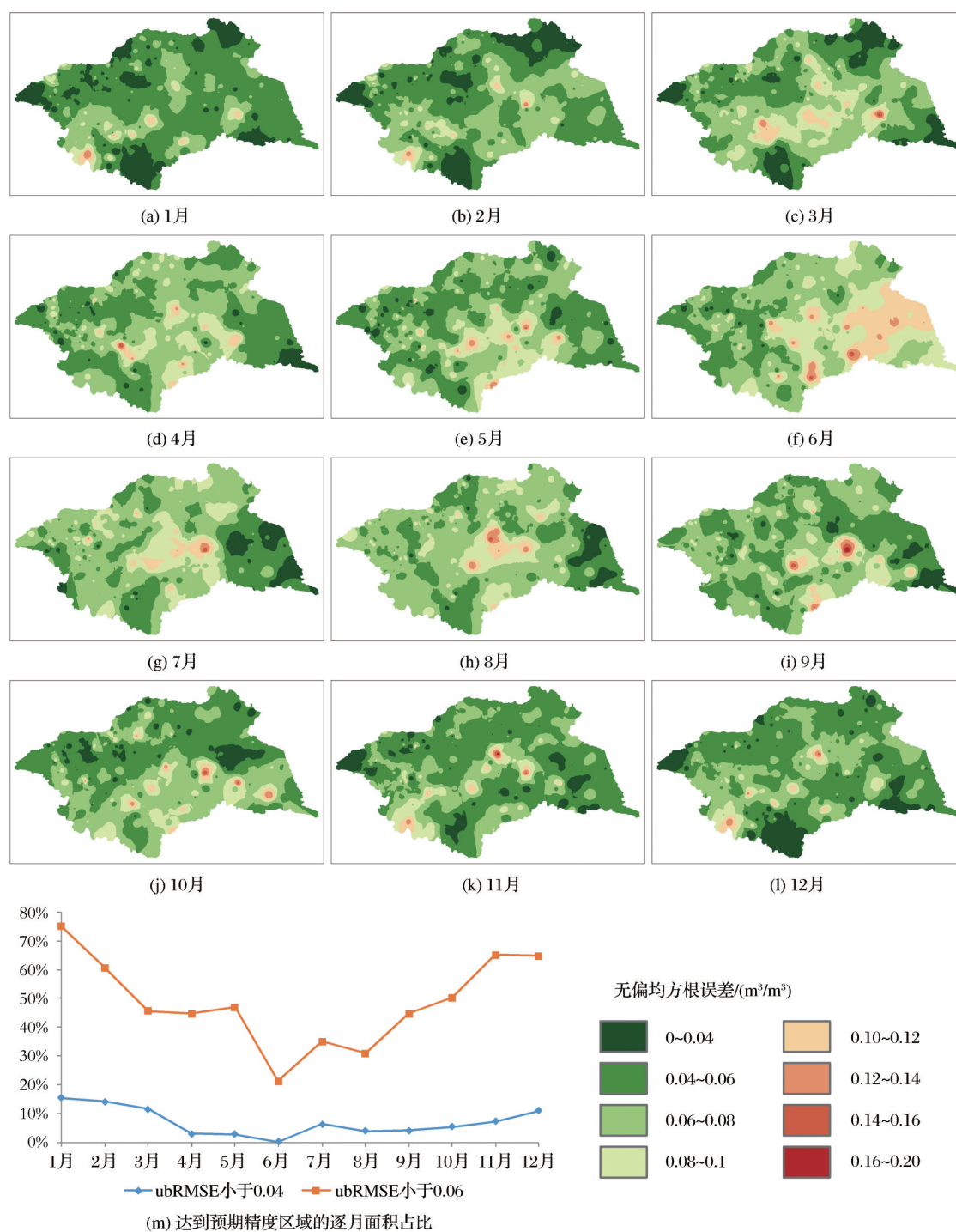


图 7 无偏均方根误差的逐月空间分布

审图号:GS(2020)303

Fig.7 Monthly spatial distribution of ubRMSE

4.4 讨论

Sun 等^[17]、向怡衡等^[31]等研究均表明地形地貌、植被和土壤等下垫面特征是影响卫星遥感探测精度的重要因素,因此,本文也探讨了 SMAP 卫星土壤水分产品在地形地貌、植被类型、土壤类型 3 个影响因子下的准确性和可用性。

淮河流域内的植被以栽培植被为主,因此样本

集中分布在栽培植被地区,少量分布在阔叶林、针叶林和其他植被地区,其他类型地区没有样本或样本过少,不参与讨论。其中其他植被地区表现较好,ubRMSE 为 $0.096 \text{ m}^3/\text{m}^3$,其余地区的评估指标较为接近,接近整体评估结果。其他植被地区分布极少,样本数也偏少(样本点只有 1 个),不足以证明此类型地区的误差精度优于其他地区。

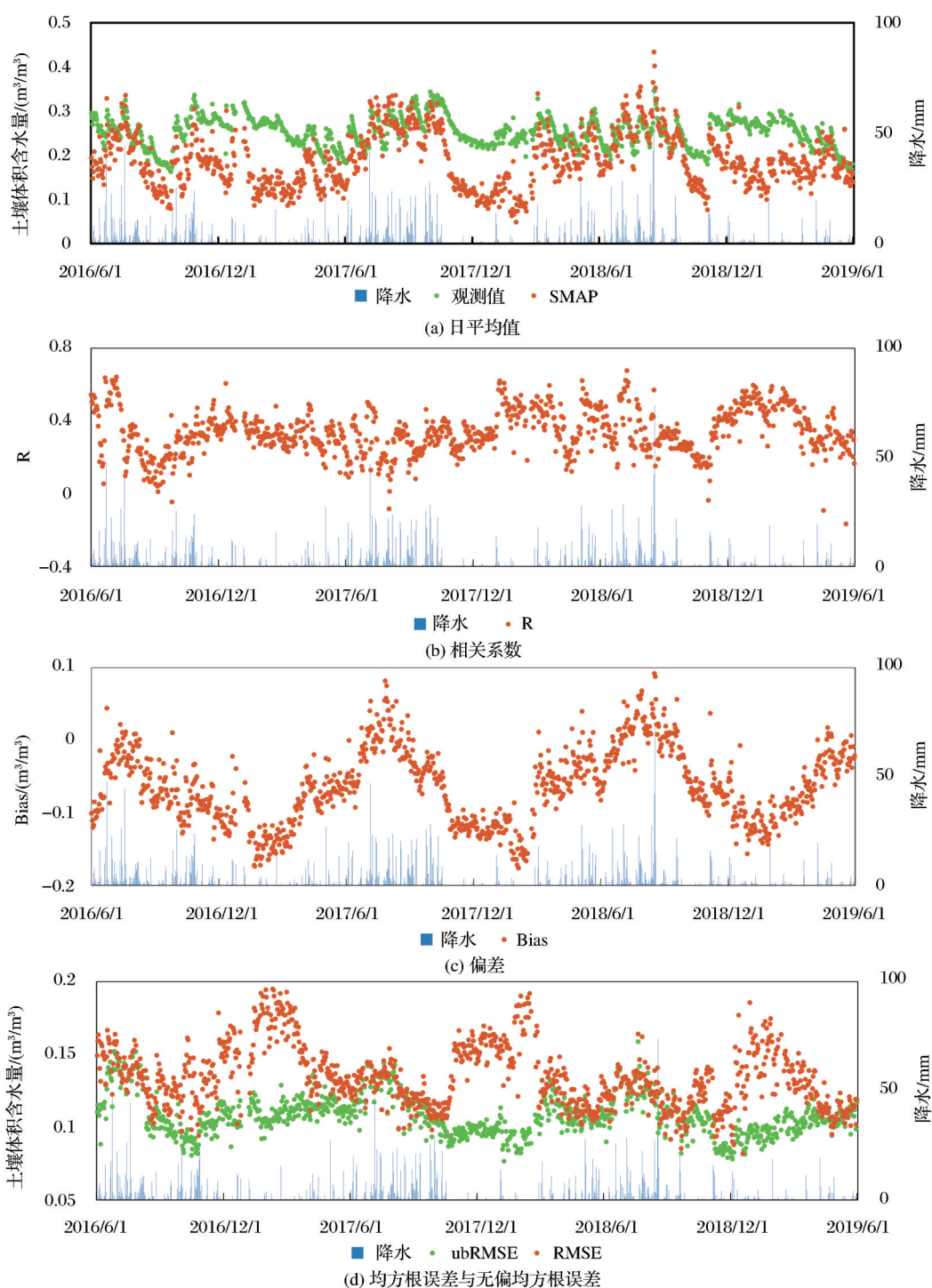


图 8 地面观测数据与 SMAP 数据逐日评估结果

Fig.8 Daily evaluation results of ground observation data and SMAP data

淮河流域的土壤类型相比植被类型分布更加均匀,样本大量分布在半水成土地区,其余样本均匀分布在人为土、淋溶土、半淋溶土和初育土地区。各分类结果也较为相似,差异起伏较小,均接近整体评估结果,其中半淋溶土地区表现稍好,ubRMSE 为 $0.094 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

淮河流域的地形地貌分类与植被类型分布相

似。样本集中在平原地区,有部分台地、丘陵地区样本和少量山地地区样本。其中,山地地区的相关系数明显高于其他地区,中起伏山地地区表现最好,ubRMSE 为 $0.072 \text{ m}^3/\text{m}^3$,其余地区之间差异也较小,且出现了 ubRMSE 随海拔高度增加而减少的现象。

从表 2 也可以看出,无论何种分类方式,淮河流

表 2 不同下垫面特征分类评估结果

Table 2 Evaluation results of different underlying surface types

分类		样本数	相关系数	偏差	均方根误差	无偏均方根误差
		N	R	Bias	RMSE	ubRMSE
植被类型	栽培植被	219 980	0.387	-0.062	0.136	0.121
	阔叶林	9 172	0.218	-0.079	0.136	0.111
	针叶林	3 869	0.445	-0.053	0.134	0.124
	其他植被	885	0.205	0.004	0.096	0.096
土壤类型	半水成土	147 200	0.370	-0.083	0.137	0.108
	人为土	29 720	0.202	0.054	0.143	0.132
	淋溶土	24 323	0.391	-0.045	0.127	0.119
	半淋溶土	19 992	0.275	-0.103	0.139	0.094
	初育土	12 671	0.493	-0.0607	0.126	0.111
地形地貌	平原	202 648	0.386	-0.067	0.138	0.120
	台地	18 691	0.439	0.004	0.118	0.118
	丘陵	9 761	0.307	-0.098	0.136	0.093
	小起伏山地	1 937	0.818	0.010	0.100	0.099
	中起伏山地	869	0.606	-0.213	0.224	0.072

域内所有地区均没有达到 SMAP 卫星土壤水分产品的预期精度和参考精度。

进一步分析不同下垫面分类的各月 ubRMSE 的分布,从图 9 可以看出,大多数分类的各月 ubRMSE 都大于 0.08m³/m³,表现较差,其他植被和

中起伏山地地区表现较好。其中,其他植被地区有 6 个月达到参考精度,11 月达到了预期精度,中起伏山地地区有 5 个月达到参考精度,3 月达到了预期精度。这与前面的分析结果较为一致,精度表现好于整体分析结果。

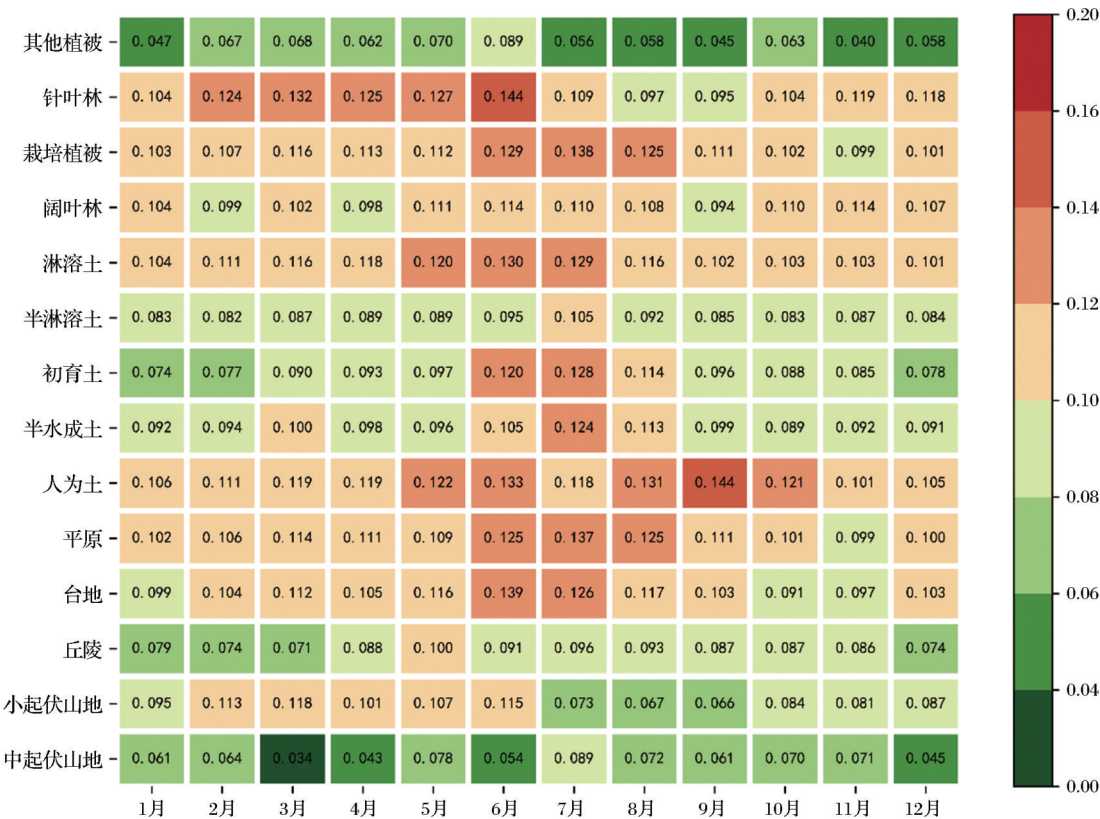


图 9 不同下垫面类型的无偏均方根误差月分布

Fig.9 Monthly ubRMSE distribution of different underlying surface types

5 结论与讨论

5.1 结论

使用淮河流域内2016年6月~2019年5月的土壤水分地面观测数据,对SMAP卫星L2级土壤水分产品L2_SM_P_E进行了较为全面的评估,从整个流域范围来看,9 km分辨率的SMAP土壤水分产品和Sun等^[17]研究得出的结论相似,L2_SM_P_E和地面观测数据的相关系数为0.38,ubRMSE为 $0.121 \text{ m}^3/\text{m}^3$,未达到SMAP预期精度。但由于本研究使用了高分辨率遥感产品和较为稠密的观测站点,系统评估了数据精度的空间分布以及季节、月、日尺度特征,以及SMAP土壤水分产品和降水的一致性,得出一些有实用价值的结论。

(1)SMAP土壤水分产品可以较好地反映淮河流域南湿北干的空间分布特征,也能较为准确地指示高湿区和低湿区。在较为湿润的淮河以南地区及水库、湖泊,SMAP土壤水分产品存在明显高估,在淮河以北地区,低估较为明显。

(2)SMAP土壤水分产品的精度存在明显的区域差异和季节差异。在冬季表现最好,与地面观测值的变化趋势最为一致,虽然存在较为明显的系统性低估,但是流域大部分地区的ubRMSE均接近预期精度,且在1、2、3、12月流域北部的部分地区、伏牛山区和大别山区ubRMSE达到了预期精度。在春季,流域北部和东南部、大别山区精度较高,秋季SMAP在流域北部和大别山区表现稍好。SMAP产品在夏季的可用性较差,但是7~9月里下河部分地区达到了预期精度。淮河干流及沿淮地区全年表现都较差,与其他地区差异明显。

(3)SMAP土壤水分产品和降水有较好的一致性,对降水的响应敏感,其月平均值与月平均降水的相关系数为0.956,日值与日降水量的相关系数为0.483,均高于地面观测值与降水的相关系数。在降水过程中和降水结束后,土壤处于潮湿状态时,SMAP土壤水分产品误差以随机误差为主,ubRMSE较大;当土壤相对干燥,误差则以系统性负偏差为主,ubRMSE较小。

(4)SMAP土壤水分产品的精度与采样点的土壤类型关系并不密切。其他植被与山地地区的精度要优于其他地区。

5.2 讨论

在研究中,SMAP土壤水分产品和地面观测数据的垂直代表深度不匹配,前者是地表以下0~5 cm

处的土壤水分数据,后者是地表以下10 cm处的土壤水分数据,从地面观测数据和降水的一致性较差这种情况来看,地面观测数据不能十分准确地代表5 cm处的土壤水分,这种情况可能加大了SMAP土壤水分产品的估计误差,实际情况下,SMAP土壤水分产品的精度很可能好于本研究的评估结果。

后续研究将结合SMAP土壤水分产品的时空分布特征,寻找对应的偏差订正方法。另一方面,降水作为土壤水分自然输入的首要因素,可寻找其与土壤水分的量化关系,并将其引入订正方法中,以提高SMAP产品精度。

参考文献(References):

- [1] 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. [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.]
- [2] Chen Haishan, Zhou Jing. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. part II: sensitivity experiment analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(1): 1-13. [陈海山, 周晶. 土壤湿度年际变化对中国区域极端气候事件模拟的影响研究 II. 敏感性试验分析[J]. 大气科学, 2013, 37(1): 1-13.]
- [3] Ma Zhuguo, Fu Congbin, Xie Li, *et al.* Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change [J]. Advance in Earth Science, 2001, 16(4): 563-566. [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): 563-568.]
- [4] Zhang Chao, Wang Huixiao. A brief review of advances in soil water research [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(4): 117-125. [张超, 王会肖. 土壤水分研究进展及简要评述[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4): 117-125.]
- [5] Zhao Tianjie. Recent advances of L-band application in the passive microwave remote sensing of soil moisture and its prospects [J]. Progress in Geography, 2018, 37(2): 198-213. [赵天杰. 被动微波反演土壤水分的L波段新发展及未来展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37(2): 198-213.]
- [6] Pan Ning, Wang Shuai, Liu Yanxu, *et al.* Advances in soil moisture retrieval from remote sensing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4615-4626. [潘宁, 王帅, 刘彦序, 等. 土壤水分遥感反演研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4615-4626.]
- [7] Kerr Y H, Waldteufel P, Richaume P, *et al.* The SMOS soil

- moisture retrieval algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(5): 1384-1403. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184548.
- [8] Kang C S, Kanniah K D, Kerr Y H, *et al.* Analysis of in-situ soil moisture data and validation of SMOS soil moisture products at selected agricultural sites over a tropical region[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(16): 3636-3654. DOI:10.1080/01431161.2016.1201229.
- [9] Parinussa R M, Wang G, Holmes T R H, *et al.* Global surface soil moisture from the microwave radiation imager on board the fengyun-3B satellite[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(19): 7007-7029. DOI: 10.1080/01431161.2014.960622.
- [10] Bao Yansong, Mao Fei, Min Jinzhong, *et al.* Retrieval of bare soil moisture from FY-3B/MWRI data[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(4): 131-137. [鲍艳松, 毛飞, 闵锦忠, 等. 基于 FY-3B/MWRI 数据的裸土区土壤湿度反演[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(4): 131-137.]
- [11] Imaoka K, Kachi M, Kasahara M, *et al.* Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2010, 38(8): 13-18.
- [12] Koike T. Description of the GCOM-W1 AMSR2 soil moisture algorithm [R]. Tokyo: Japan Aerospace Exploration Agency Earth Observation Research Center, 2013: 1-119.
- [13] Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, *et al.* The soil moisture active passive (SMAP) mission[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 704-716. DOI: 10.1109/IGARSS.2008.4779267.
- [14] Brown M E, Escobar V, Moran S, *et al.* NASA's soil moisture active passive (SMAP) mission and opportunities for applications users[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(8): 1125-1128. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00049.1.
- [15] Entekhabi D, Yueh S, O'Neill P E, *et al.* SMAP Handbook [S]. The National Aeronautics and Space Administration: Washington, DC, USA, 2014.
- [16] Colliander A, Jackson T J, Bindlish R, *et al.* Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 215-231. DOI:10.1016/j.rse.2017.01.021.
- [17] Sun Y Y, Huang S F, Ma J W, *et al.* Preliminary evaluation of the SMAP radiometer soil moisture product over China using In situ data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 292. DOI: 10.3390/rs9030292.
- [18] Chan S K, Bindlish R, O'Neill P E, *et al.* Assessment of the SMAP passive soil moisture product[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(8): 1-14. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2561938.
- [19] Cui C, Xu J, Zeng J, *et al.* Soil moisture mapping from satellites: an intercomparison of SMAP, SMOS, FY3B, AMSR2, and ESA CCI over two dense network regions at different spatial scales [J]. Remote Sensing, 2017, 10(1): 33. DOI: 10.3390/rs10010033.
- [20] Liu P W, Bindlish R, Fang B, *et al.* Assessing disaggregated SMAP soil moisture products in the united states[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021(99): 1-1. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3056001.
- [21] Ma C F, Li X, Wei L, *et al.* Multi-scale validation of SMAP soil moisture products over cold and arid regions in north-western China using distributed ground observation data [J]. Remote Sensing, 2017, 9(4): 327. DOI: 10.3390/rs9040327.
- [22] Bai Yu, Meng Zhiguo, Zhao Kai, *et al.* Pixel-scale soil moisture monitoring network an its preliminary validation of Lband soil moisture products [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(1): 78-87. [白瑜, 孟治国, 赵恺, 等. 像元尺度土壤水分监测网络及其对 L 波段土壤水分产品的初步验证结果[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(1): 78-87.]
- [23] Zhu Y C, Li X, Pearson S, *et al.* Evaluation of fengyun-3C soil moisture products using in-situ data from the Chinese automatic soil moisture observation stations: a case study in Henan Province, China [J]. Water, 2019, 11(2): 248. DOI: 10.3390/w11020248.
- [24] Liu J, Chai L N, Lu Z, *et al.* Evaluation of SMAP, SMOS-IC, FY3B, JAXA, and LPRM soil moisture products over the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas [J]. Remote Sensing, 2019, 11(7): 792. DOI: 10.3390/rs11070792.
- [25] Xie Q X, Menenti M, Jia L. Improving the AMSR-E/NASA soil moisture data product using in-situ measurements from the Tibetan platea [J]. Remote Sensing, 2019, 11(23): 2748. DOI: 10.3390/rs11232748.
- [26] Chen Hongyu, Wu Jing, Li Chunbin, *et al.* Applicability evaluation of satellite soil moisture products in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9195-9207. [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.]
- [27] Wang Yazheng, Yang Yuanjian, Liu Chao, *et al.* Analysis on the applicability of Fengyun-3 satellite microwave remote sensing soil moisture products in Shandong [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(4): 318-329. [王雅正, 杨元建, 刘超, 等. 风云三号卫星微波遥感土壤水分产品在山东地区的适用性分析[J]. 中国农业气象, 2021, 42(4): 318-329.]
- [28] Xie Qiuxia, Jia Li, Chen Qiting, *et al.* Evaluation of microwave remote sensing soil moisture products in farming-pastoral area of Shandian River basin [J]. National Remote Sensing

- Bulletin, 2021, 25(4):974-989.[谢秋霞,贾立,陈琪婷,等.闪电河流域农牧交错带微波遥感土壤水分产品评价[J].遥感学报, 2021, 25(4):974-989.]
- [29] Philip G M, Watson D F. A Precise method for determining contoured surfaces[J]. Australian Petroleum Exploration Association Journal, 1982, 22 (1) : 205-212. DOI: 10.1071/aj81016.
- [30] Watson D F, Philip G M. A refinement of inverse distance weighted interpolation[J]. Geoprocessing, 1985, 2: 315-327. DOI:10.1016/S0735-1097(97)00186-1.
- [31] Xiang Yiheng, Zhang Mingmin, Zhang Lanhui, *et al.* Validation of SMOS soil moisture products on different vegetation types in Qilian Mountain[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(5):835-843.[向怡衡,张明敏,张兰慧,等.祁连山区不同植被类型上的SMOS遥感土壤水分产品质量评估[J].遥感技术与应用, 2017, 32(5):835-843.]

Applicability Assessment of SMAP Soil Moisture Products in the Huaihe River Basin

Wang Hao¹, Hao Ying², Yuan Song¹, Chen Guangzhou², Jin Lili²

(1. *Anhui Provincial Meteorological Observatory, Hefei 230000, China;*

2. *Huaihe River Basin Meteorological Center, Hefei 230000, China*)

Abstract: The Huaihe River Basin is selected as the research area. Based on the daily average data of 313 soil moisture observation stations in the Huaihe River basin from June 2016 to May 2019, the soil moisture products (L2_SM_P_E) of SMAP (Soil Moisture Active Passive) with 9 km resolution were assessed by using a variety of indicators. In addition, the influence of vegetation, soil, topography on accuracy were discussed. The results show that: (1) Generally, L2_SM_P_E cannot reach the expected accuracy of $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ in Huaihe River Basin, which has the characteristic of overestimating in wet area and underestimating in dry area, but it can better reflect the spatial distribution characteristics of soil moisture in the basin, and also can indicate the high wet area and low wet area. (2) There are obvious regional and seasonal differences in L2_SM_P_E accuracy. The accuracy in winter is obviously better than that in other seasons, the unbiased root mean square error (ubRMSE) in most areas of the basin is close to the expected accuracy. In some northern parts of the basin and Funiu Mountains and Dabie Mountains, it has reached the expected accuracy. In spring and autumn, the accuracy of the northern part of the basin and Dabie Mountains is higher. In summer, the availability of L2_SM_P_E is poor. (3) L2_SM_P_E have good consistency with precipitation, and its response to precipitation is more sensitive than the observed value of soil moisture. During and after precipitation, the error of L2_SM_P_E is mainly random error; when the soil is relatively dry, it is mainly negative systematic error. (4) The accuracy of L2_SM_P_E is not closely related to the soil type at the sampling point. The accuracy of mountain areas is better than other areas.

Key words: SMAP; Soil moisture; Huaihe River Basin; Comparative assessment