文章编号:1672-3031(2019)04-0271-07

基于遥感和地面测量的多尺度土壤水分产品验证分析

庞治国[1,2], 路京选[1,2], 卢奕竹[1,2], 付俊娥[1,2], 江 威[1,2], 李 琳[1,2]
(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 遥感反演是大尺度土壤水分监测的有效手段, 但地面验证一直是土壤水分遥感反演的瓶颈。针对地面土壤水分测量, 频域反射仪(FDR)和宇宙射线中子法(CRS)在土壤水分测量中展现出较大的应用潜力。本研究选取不同像元尺度的土壤水分遥感反演结果, 包括30 m分辨率Landsat土壤水分反演、1 km分辨率MODIS土壤水分反演和SMAP卫星3 km分辨率和9 km分辨率土壤水分反演产品, 利用CRS和FDR土壤水分监测数据对不同像元尺度土壤水分结果进行精度验证分析。结果表明: CRS在30 m分辨率、1 km分辨率、3 km分辨率和9 km分辨率土壤水分反演结果中精度均较FDR方法高, 其中1 km分辨率中CRS反演值的均方根误差小于3 km分辨率和9 km分辨率的误差。CRS测量方法对小降水事件较敏感, 会带来一定误差。

关键词: 土壤水分; 宇宙射线中子法; 频域反射仪; 多尺度验证
中图法分类号: TP 751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.04.004

1 研究背景

地表土壤水分是地表与大气相互作用的重要因子, 是作物生长、发育的基本条件, 对陆地表面蒸散、水的运移、碳循环有很强的控制作用, 是气候、水文、生态、农业等领域衡量土壤干旱程度的重要指标[1-3]。土壤含水量的时空分布与变化对陆地-大气间热量平衡、陆面大气环流和土壤温度变化产生显著的影响[4-5]。大范围的土壤水分的监测是农业过程研究和环境因子评价的重要组成部分, 而区域尺度甚至全球范围的土壤水环境反演又是陆地过程模式研究中必不可少的一个参量[2], 在改善区域及全球气候、预测区域干湿情况研究中意义重大[6-7]。

长期以来, 小尺度范围土壤含水量的测定方法主要有烘干法、中子法、时域反射仪(TDR)法、频域反射仪(FDR)法[3], 这些方法测定的数据能较准确地反映测定点的土壤含水量, 但耗时费力[8]。同时, 由于监测手段的局限性, 在实际科学研究中, 往往只能通过有限的点位监测数据来推断整个面甚至三维空间的土壤含水量分布[5]。土壤作为一个复杂的非均质系统, 这种由地统计学方法获取的土壤水分信息与实际情况不可避免地存在较大差距[5]。1990年代中期, 遥感技术开始应用于区域尺度上的土壤水分测定, 该方法能快速测定区域乃至全球的土壤表层含水量, 信息量大, 但遥感法的空间分辨率较低, 且通过遥感数据只能估计表层几厘米深度的土壤含水量, 受植被覆盖的影响也较大[3,6,9]。由此可见, 在确定土壤含水量的FDR方法和遥感方法之间, 存在一个空间尺度上的技术空白, 即在农田和小流域等中小尺度上, 上述方法已经难以满足日益发展的土壤科学研究和现代化精准农业对大量、快速、准确的农田土壤水分动态信息的需求[8,10-13]。当前, 针对小尺度土壤水分测量, 宇宙射线中子法(CRS)在土壤水分测量中具有较大应用潜力[14-16]。

基于近地面环境宇宙射线中的快中子浓度与土壤含水量的关系发展了一种无危害, 非接触, 不破坏土壤, 不受土壤质地、密度、盐分等影响的宇宙射线中子法(CRS)测量法[15,17], 测量范围最大可达700 m, 测量深度最大可达70 cm, 高分辨率, 安装方便, 低功耗, 长时间(测量时间间隔从分钟—

收稿日期: 2019-06-04
基金项目: 国家自然科学基金项目(51779269)
作者简介: 庞治国(1975-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事遥感技术在水利行业应用研究。E-mail: pangzg@iwhr.com

年)连续在线自动监测平均土壤含水量的区域土壤水分测量系统，近年来在土壤水测量、干旱监测、农业灌溉、坡面稳定性分析、数值预报等领域得到广泛应用[10-11,17]。Chrisman等[18]人利用宇宙射线探测车绘制土壤水分含量图，以校准验证土壤水的卫星数据。Almeida等[19]将快中子数、电容探针网络测得的土壤水和多重自适应神经模糊推理系统(m-ANFIS)结合起来，对湿润期的表层土壤水进行了可靠估计。Baroni等[20]针对中子数的修正问题，利用一种扩展方法直接估计土壤含水量，而不需要对每一种时变氢源的影响一一进行修正。Han等[21]将该方法应用于我国黑河流域异质的灌溉农田中，证实宇宙射线法可以测量面尺度上的真实土壤含水量。

为了全面认识CRS和FDR土壤水分监测结果对不同像元尺度土壤水分遥感结果的验证效果，本文开展了30 m分辨率、1 km分辨率，以及美国2015年初发射的SMAP土壤水分探测卫星获得的3 km土壤水产品(雷达)和9 km分辨率土壤水产品(雷达与辐射计融合)结果与CRS、FDR等测量结果的比对分析。通过该验证分析，以期建立一套区域尺度上土壤水分监测技术方法，为大范围土壤水分监测结果验证提供有效手段。

2　研究区和研究数据

2.1　研究区　野外实验在中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所基地进行，如图1[15,17]。基地位于内蒙古包头市达茂旗希拉穆仁镇，属于内蒙古自治区中部的乌兰察布荒漠草原区，地理位置为北纬41°22′，东经111°12′。地貌属于阴山北麓低缓起伏丘陵区，总体地势北高南低，东西两侧高，中间低，最高海拔1690.3 m，最低海拔1585.0 m。该地区为中温带半干旱大陆性季风气候，多年平均降水量284 mm，多年平均蒸发量2305 mm，年平均气温2.5 ℃，多年平均风速4.5 m/s。基地所在地局部植被群落呈现典型草原特征，植被建群种为克氏针茅，优势种为羊草，其他重要品种还有冷蒿、糙隐子草、冰草等[22]。

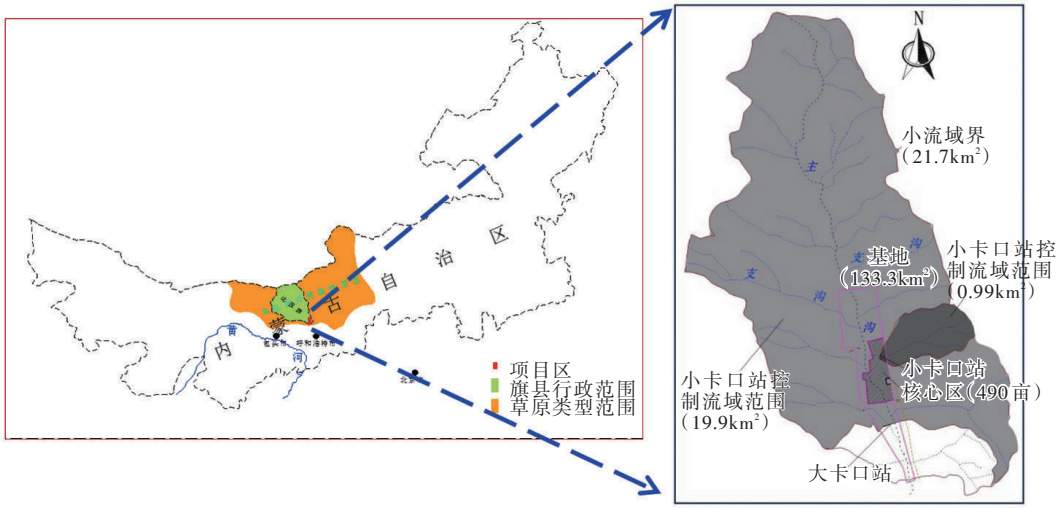


图1　实验基地位置

2.2　土壤水分地面测量方案　根据实验区克氏针茅等主要物种的生长周期，本试验在2015年7月到9月开展测量，该时段为植被的生长期向旺盛期过渡，下垫面变化具有较好代表性。

依据多尺度土壤墒情协同观测方案[15,17]，在点(FDR)、区域(CRS)和卫星像元三种尺度土壤墒情协同观测，实现对不同像元尺度土壤水分验证和分析。如图2所示，点a为FDR土壤水传感器布点、b区域土壤水分测量系统CRS1000B布点、c区域土壤水分测量系统CRS1000B监测范围、d代表大于一公里的卫星像元网格、e代表一公里的卫星像元网格、f代表小于一公里的卫星像元网格。CRS的有效测量深度不是一个恒定不变的值，而是随每次采样土壤含水量状况不同而变化。在本试验区开

展多次试验，CRS有效深度约为33 cm，本试验中CRS的测量半径为300 m。每个点FDR样点分别测量的是5 cm和15 cm土壤含水量。

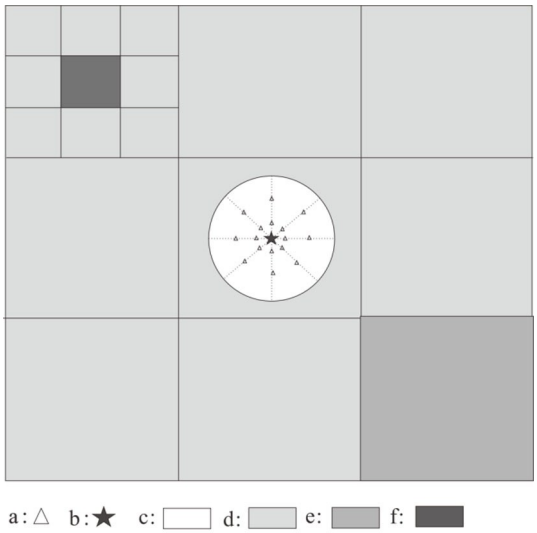


图2　土壤水分地面协同观测方案

2.3　土壤水分遥感反演　本研究所使用共包含4种分辨率土壤水分遥感反演结果，其中SMAP卫星搭载了L波段的雷达和辐射计，探测地表土壤含水量和地表的冻融状态，提供了3 km土壤水分产品(雷达)、9 km土壤水分产品(雷达与辐射计融合)[23]。30 m分辨率和1 km分辨率土壤水分遥感反演结果分别基于Landsat8和MODIS卫星遥感数据反演得到，该反演是基于常用的热惯量法，主要是利用热红外遥感影像反演土壤热惯量(温度日较差)，通过建立热惯量与土壤相对湿度之间的函数关系模型来估算土壤相对湿度[6, 24, 25]。对分辨率为30 m像元尺度，白天地表温度是大气校正法得到的Landsat8 TIRS地表温度，夜间地表温度采用重采样成30 m分辨率的MODIS日地表温度产品，两者的差值即为30 m像元尺度的地表温度日较差，用于30 m土壤水遥感反演。对分辨率为1 km像元尺度，MODIS的日地表温度产品中白天和夜间地表温度的差值作为1 km像元尺度的地表温度日较差，用于1 km土壤水遥感反演。计算公式如下：

$$W=f\ (\Delta T,\ NDVI\ )$$

式中，W为土壤相对含水量，ΔT为温度日较差，可由昼夜地表温度的差值得到。通过实测的土壤水分值与影像对应的反演温度差和归一化植被指数(NDVI)构建回归模型，从而推算各像元的土壤水分含量。

热惯量法主要用于裸土或低植被覆盖区的土壤相对湿度估算。热惯量法估算土壤相对湿度涉及两个时次的卫星资料，要求：①白天和夜间过境时，研究区必须是晴空无云，以获得最高和最低地表温度；②昼夜两幅图像必须经过严格配准后得到昼夜温差；③被测土壤是裸露的或植被覆盖度较低(覆盖度<0.3)[2,26]。

3　30 m分辨率土壤水遥感反演结果验证

通过基于Landsat8的土壤水分遥感反演结果与单点FDR观测结果的拟合分析，发现30 m分辨率遥感反演的土壤含水量与0 ~ 15 cm土层拟合关系较好为0.7626。因此，本文采用0 ~ 15 cm土层拟合关系来进行土壤水分遥感反演，得到试验区CRS范围内2015年7月1号、2015年8月18日、2015年9月19日3个日期的15 cm平均土壤含水量分别为0.073、0.039、0.061，并获得对应日期卫星过境较接近时刻的CRS测量值为0.079、0.04、0.059，如图3、图4和图5，二者误差在0.1 ~ 0.6，说明反演精度较高。

4　1km分辨率表层土壤水遥感反演结果验证

4.1　FDR对像元尺度的土壤水反演结果的验证　利用试验园区布设的6个FDR监测数据对1 km土壤水分遥感反演模型进行参数率定精度分析，结果表明基于不同的FDR建立的土壤水反演模型反演的结果精度存在较大的差异。选择其中FDR-B、FDR-D、FDR-G的模型反演结果进行精度验证，获得2015年7月6日、7月13日、8月15日、8月20日、8月31日、9月15日试验园区内的5 cm、15 cm土壤含水量，并提取对应FDR所在像元的土壤含水量反演结果，与相应日期12：00的FDR土壤水监测数据

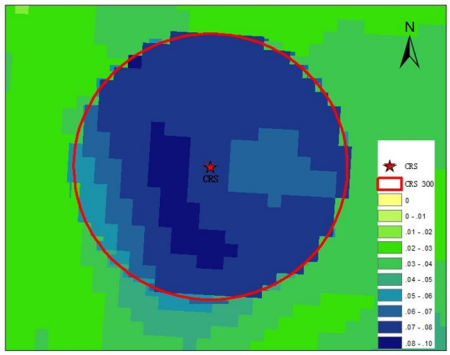


图3　30 m分辨率2015年7月1日土壤含水量分布

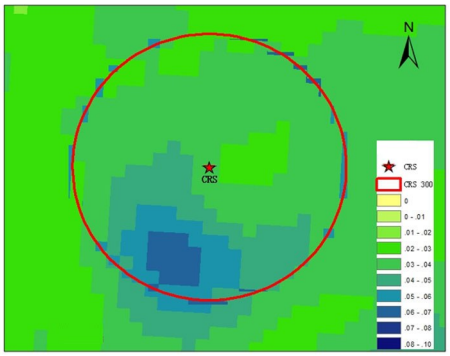


图4　30 m分辨率2015年8月18日土壤含水量分布

对比。基于FDR-B、FDR-D、FDR-G监测数据建立的1 km土壤水反演结果的相对误差的差异大，反演结果的精度分化明显，如图6，FDR-B、FDR-D、FDR-G反演结果的均方根误差分别为0.0196、0.0170、0.0224。

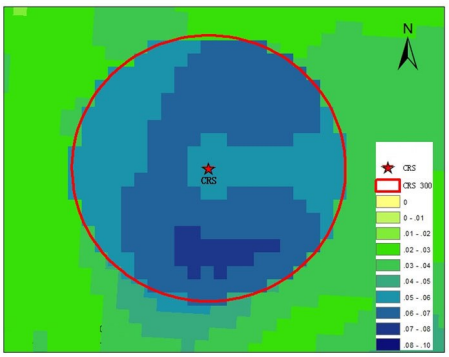


图5　30 m分辨率2015年9月19日土壤含水量分布

4.2　CRS对像元尺度的土壤水反演结果的验证　利用CRS监测数据建立1 km土壤水反演模型，反演2015年7月6日、7月13日、8月15日、8月20日、8月31日、9月15日研究区的土壤含水量，提取CRS对应像元的土壤含水量反演结果，并用对应日期12：00的CRS土壤水监测数据对反演结果进行验证，反演结果与实测值间的相对误差，如图7所示。基于CRS监测数据建立的1 km土壤水反演结果的相对误差均小于0.55，均方根误差为0.0157。

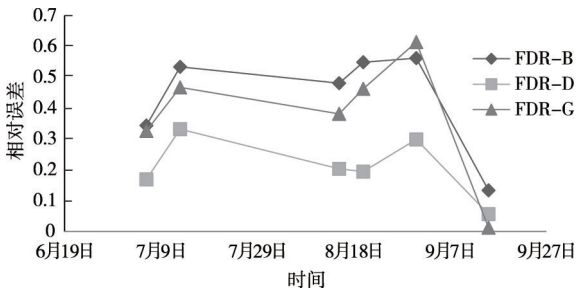


图6　FDR监测数据与1km分辨率遥感反演数据的相对误差

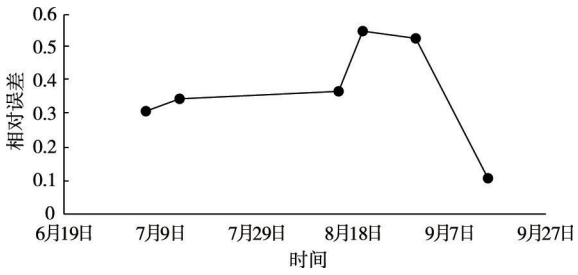


图7　CRS监测数据与1km分辨率遥感反演数据的相对误差

对比CRS及FDR对像元尺度的土壤水反演结果的验证结果，CRS反演值的均方根误差最小，相对误差总体偏低，而FDR监测点在对应像元中的安装位置影响反演结果的精度，CRS数据对像元尺度的土壤含水量的验证效果优于FDR数据，如图8。

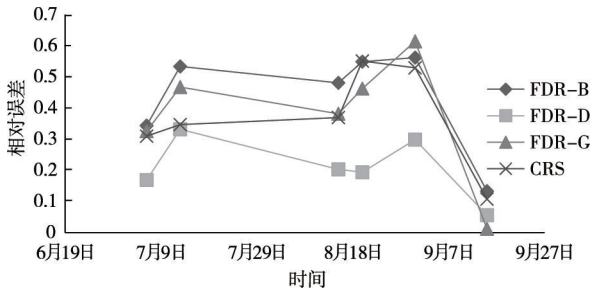


图8　FDR与CRS对1km分辨率表层土壤水遥感反演结果的验证误差分析

5　SMAP土壤水遥感产品的多尺度验证

结合FDR、CRS的观测时间，选用2015年6月11日—7月7日分辨率为3 km和9 km的SMAP全球日土壤水产品(L3_SM_A，L3_SM_AP)。提取FDR、CRS对应像元的SMAP反演结果，其中3 km土壤水产品可用数据分别为：6月14日、6月17

日、6月22日、6月23日、6月25日、6月26日、6月30日、7月1、7月6日；9 km土壤水产品可用数据分别为6月12日、6月14日、6月15日、6月17日、6月18日、6月20日、6月22日、6月23日、6月26日、6月30日。

5.1　3 km空间分辨率产品的多尺度验证　提取出FDR(编号分别为B、C、D、E、F、G，共六个)和CRS观测值，及对应SMAP土壤水产品的像元值，分别计算像元尺度上3 km SMAP土壤水产品与FDR、CRS实测土壤含水量之间的相对误差，如图9所示。

当像元的土壤含水量较低时(如6月22日、26日等)，像元内土壤含水量的空间分布差异小，此时FDR和CRS对SMAP像元的土壤水验证结果相近。当像元的土壤含水量较高时(如6月14日、17日等)，像元内土壤含水量的空间分布差异大，而FDR测量基于点的土壤含水量，FDR的空间位置不同造成6个FDR间测量值变化大，影响了FDR对遥感产品的验证结果，使不同FDR之间的验证结果存在较大差异。FDR-B、FDR-C、FDR-D、FDR-E、FDR-F、FDR-G对SMAP产品验证的均方根误差分别为0.1024、0.0905、0.1067、0.1036、0.0947、0.0942。

在6月25日，CRS和FDR-D、FDR-G的相对误差明显高于其他实测值，这是因为25日有0.2 mm降雨，实验基地位于小流域出口处，CRS对降水敏感使其测量的土壤含水量变大，同时位于坡底的FDR-D和FDR-G由于地势低也增大，而遥感产品反演的是3 km×3 km像元上的平均值，使得CRS和FDR-D、FDR-G的相对误差明显增大。CRS测量的是300 m为半径的圆形区域的土壤含水量，CRS对像元尺度土壤水的验证效果较为稳定，相对误差总体低于FDR的验证效果，采用CRS对SMAP验证的均方根误差为0.1008，并且对小降水事件敏感。综上，CRS比FDR更适合用于3 km像元尺度的土壤水遥感反演产品的验证。

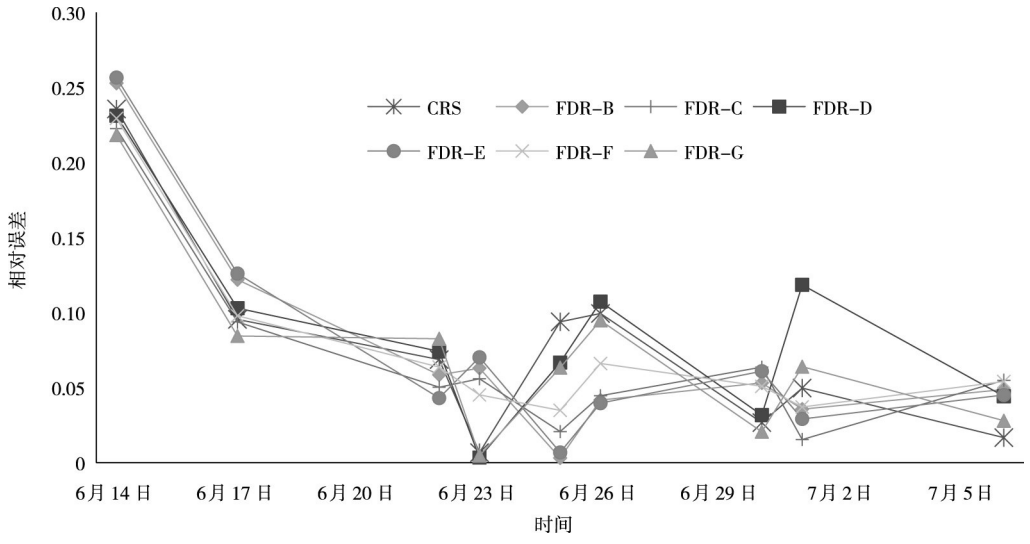


图9　像元尺度3 km SMAP土壤水产品与对应实测含水量的相对误差

5.2　9 km空间分辨率产品的多尺度验证　分别计算像元尺度上9 km SMAP土壤水产品与FDR、CRS实测土壤含水量之间的相对误差，如图10所示。对于9 km空间分辨率SMAP产品，FDR的验证差异仍然明显，而CRS与遥感反演结果比较接近。由于CRS、FDR所在实验基地位于小流域出口处，所以当像元土壤水较低时，CRS和FDR的测量值仍在0.1 m^3/m^3以上，比SMAP反演的平均土壤含水量数值高。6月15日、23日有降雨，降雨量分别达到2.4 mm、17.8 mm，B、C、E、F这四点的FDR在实验基地内的地势高，降水后雨水汇流至坡底D、F处，导致D、F测量值明显比B、C、E、F高。而CRS对降雨敏感，测量值相应变大。因此，6月23日不同FDR和CRS的验证结果存在明显差异。对于9 km像元，CRS与SMAP结果更接近，在有降水发生时反应敏感，相对误差低于FDR，对SMAP验证的均方根误差为0.0943。

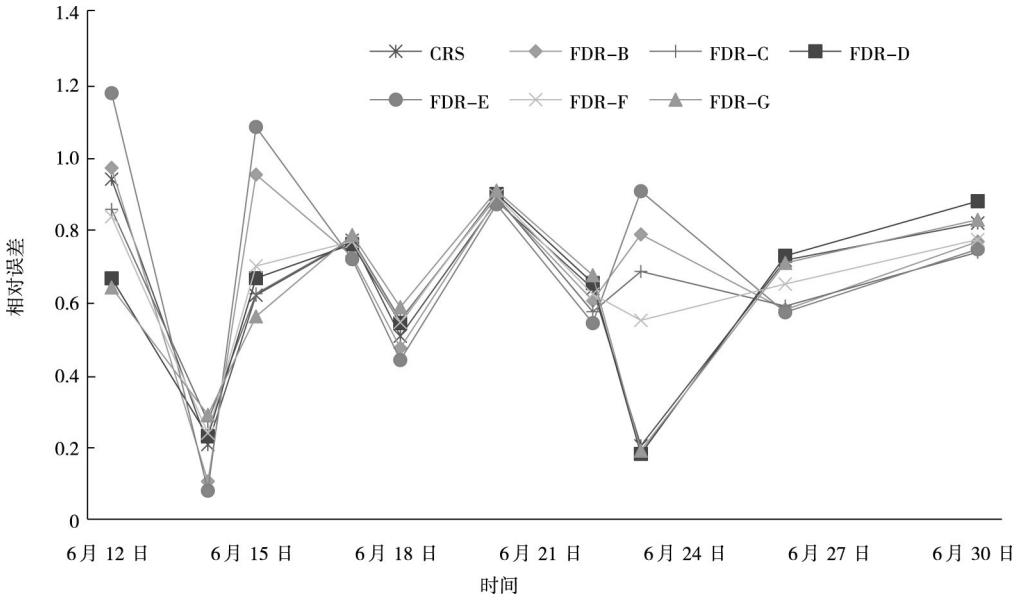


图 10　9 kmSMAP土壤水分产品与对应实测含水量的相对误差

6　结论

本文利用实测的CRS和FDR土壤水分监测结果对不同像元尺度土壤水分遥感反演结果进行精度验证，分析了不同测量方法在不同的尺度土壤水分反演结果验证精度，结论如下：

（1）针对30 m分辨率Landsat光学反演土壤水分结果，CRS验证的相对误差分别为0.1 ~ 0.6，说明CRS验证精度较高。

（2）针对1 km分辨率MODIS数据土壤水分反演结果，FDR反演结果的均方根误差分别为0.0170 ~ 0.0224，CRS反演值的均方根误差为0.016，表明CRS数据对1 km像元尺度的土壤含水量的验证效果优于FDR数据。

（3）对于3 km分辨率SMAP土壤水分产品，FDR对SMAP产品验证的均方根误差范围为0.0905 ~ 0.1067，CRS对SMAP验证的均方根误差为0.1008，对于9 km分辨率SMAP土壤水分产品，CRS对SMAP验证的均方根误差为0.0943，都高于两个尺度中FDR验证精度，说明CRS比FDR更适合用于3 km和9 km像元尺度的土壤水遥感反演产品的验证。

总体来看，CRS方法在不同尺度土壤水分结果验证精度比FDR测量方法要高，但该方法对小降水事件敏感，会导致一定的偏差。未来将进一步研究CRS在土壤水分三维空间分布结果，验证分析遥感反演像元尺度的土壤水分精度，从而为该方法在我国大范围应用及遥感真实性验证方面提供理论和实际依据。

参　考　文　献：

[1] PERIASAMY S, SHANMUGAM R S . Multispectral and microwave remote sensing models to survey soil moisture and salinity[J] . Land Degradation & Development, 2017, 28(4): 1412-1425 .

[2] RODRIGUEZ F N, BITAR A, COLLIANDER A, et al . Soil moisture remote sensing across scales[J] . Remote Sensing, 2019, 11(2): 190-194 .

[3] PENG J, LOEW A . Recent advances in soil moisture estimation from remote sensing[J] . Water, 2017, 9(7): 530-534 .

[4] AHLMER A K, CAVALLI M, HANSSON K, et al . Soil moisture remote-sensing applications for identification of flood-prone areas along transport infrastructure[J] . Environmental Earth Sciences, 2018, 77(14): 533-539 .

[5] 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 .

[6] CHU D . Modis remote sensing approaches to monitoring soil moisture in tibet, china[J] . Remote Sensing Letters, 2018, 9(12): 1148-1157 .

[7] KLOTZSCHE A, JONARD F, LOOMS M C, et al . Measuring soil water content with ground penetrating radar: A decade of progress[J] . Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-9 .

[8] Zajicova K, Chuman T . Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review[J] . Geoderma, 2019, 343: 116-129 .

[9] ULLAH W, WANG G J, GAO Z Q, et al . Comparisons of remote sensing and reanalysis soil moisture products over the tibetan plateau, china[J] . Cold Regions Science and Technology, 2018, 146: 110-121 .

[10] NGUYEN H H, KIM H, CHOI M . Evaluation of the soil water content using cosmic-ray neutron probe in a heterogeneous monsoon climate-dominated region[J] . Advances in Water Resources, 2017, 108: 125-138 .

[11] WANG E L, SMITH C J, MACDONALD B C T, et al . Making sense of cosmic-ray soil moisture measurements and eddy covariance data with regard to crop water use and field water balance[J] . Agricultural Water Management,2018, 204: 271-280.

[12] MOTEVALLI Z, ZAKERI B . Time-domain spectral inversion method for characterization of subsurface layers in ground-penetrating-radar (gpr) applications [J] . Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2019, 34(1): 93-99 .

[13] ZHANG X L, DAO L G, ZHANG C S, ET al . Mapping the spatial distribution of soil depth in a grassland ecosystem with the aid of ground penetrating radar and gis(northwestern sichuan, china)[J] . Grassland Science, 2018, 64(4): 217-225 .

[14] JAUMANN S, ROTH K . Soil hydraulic material properties and layered architecture from time-lapse gpr[J] . Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(4): 2551-2573 .

[15] MCJANNET D, HAWDON A, BAKER B, et al . Multiscale soil moisture estimates using static and roving cosmic-ray soil moisture sensors[J] . Hydrology and Earth System Sciences,2017, 21(12): 6049-6067 .

[16] LIU X B, CHEN J, CUI X H, et al . Measurement of soil water content using ground-penetrating radar: A review of current methods[J] . International Journal of Digital Earth,2019, 12(1): 95-118 .

[17] ZHU X C, CAO R X, SHAO M G, et al . Footprint radius of a cosmic-ray neutron probe for measuring soil-water content and its spatiotemporal variability in an alpine meadow ecosystem[J] . Journal of Hydrology,2018, 558: 1-8 .

[18] CHRISMAN B, ZREDA M . Quantifying mesoscale soil moisture with the cosmic-ray rover[J] . Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(12): 5097-5108 .

[19] ALMEIDA A C, DUTTA R, FRANZ T E, et al . Combining cosmic-ray neutron and capacitance sensors and fuzzy inference to spatially quantify soil moisture distribution[J] . IEEE Sensors Journal, 2014, 14(10): 3465-3472 .

[20] BARONI G, OSWALD S E . A scaling approach for the assessment of biomass changes and rainfall interception using cosmic-ray neutron sensing[J] . Journal of Hydrology, 2015, 525: 264-276 .

[21] HAN X J, JIN R, LI X, et al . Soil moisture estimation using cosmic-ray soil moisture sensing at heterogeneous farmland[J].Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(9): 1659-1663 .

[22] LU Y, SONG W, LU J, et al . An examination of soil moisture estimation using ground penetrating radar in desert steppe[J] . Water, 2017, 9(7): 521 .

[23] PURDY A J, FISHER J B, GOULDEN M L, et al . Smap soil moisture improves global evapotranspiration[J] . Remote Sensing of Environment, 2018, 219: 1-14 .

[24] MA C Y, WANG J L, CHEN Z, et al . An assessment of surface soil moisture based on in situ observations and landsat 8 remote sensing data[J] . Fresenius Environmental Bulletin, 2018, 27(5): 3236-3244 .

[25] MILLARD K, THOMPSON D K, PARISIEN M A, et al . Soil moisture monitoring in a temperate peatland using multi-sensor remote sensing and linear mixed effects[J] . Remote Sensing, 2018, 10(6): 903-918 .

[26] 蔡静雅，庞治国，谭亚男 . 宇宙射线中子法在荒漠草原土壤水测量中的应用[J] . 中国水利水电科学研究院学报，2015，13(6)：456-460 .

Multi-scale soil moisture product verification analysis based on ground monitoring and remote sensing

PANG Zhiguo[1,2], LU Jingxuan[1,2], LU Yizhu[1,2], FU June[1,2], JIANG Wei[1,2], LI Lin[1,2]

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*;
2. *Research Center in Flood and Drought Disaster Reduction of Ministry of Water Resources, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Remote sensing inversion is an effective mean of large-scale soil moisture monitoring. However, verification of soil moisture remote sensing inversion is difficult at ground. For the measurement of ground soil moisture, the frequency domain reflectometry(FDR) and cosmic ray neutron(CRS) are showing great application potential in soil moisture measurement. This study selected soil moisture inversion results at different pixel scales, including 30m resolution of Landsat soil moisture inversion, 1km resolution MODIS soil moisture inversion, and SMAP satellite 3km resolution and 9km resolution soil moisture inversion products. Then, CRS and FDR soil moisture means were used to analyze the accuracy of soil moisture at different pixel scales. The results show that the accuracy of CRS in 30m resolution, 1km resolution, 3km resolution and 9km resolution soil moisture inversion is higher than that of FDR methods. Compared with 3km resolution and 9km resolution of soil moisture inversion products, the root mean square error of CRS is lower in 1km resolution soil moisture inversion product. The CRS measurement method is sensitive to precipitation events.

Keywords: Soil moisture; cosmic ray neutron method; frequency domain reflectometry; multi-scale verification

(责任编辑：祁　伟)

(上接第270页)

Comparative analysis of hydrological and hydrodynamic calculation method for flash flood in small watershed

LIU Changjun[1], WEN Lei[2], ZHOU Jian[3], ZHAO Xuantao[4], GUO Liang[1], WEI Yongqiang[5]

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*;
2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*;
3. *Cold and Arid Institute of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 210098, *China*;
4. *North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou* 450045, *China*;
5. *Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha* 410007, *China*)

Abstract: For the fine simulation of flash flood in small watersheds, this paper proposes a spatial and temporal source-variable mixed runoff model in small watershed, and builds a distributed simulation model of stormwater flash flood with small watershed as the unit, The visual distributed hydrological model software FFMS and hydrodynamic calculation software FHMS are developed. Taking the calculation of the storm flood in the small watershed of Baogai Temple as an example, the hydrological and hydrodynamic methods were used respectively to calculate the storm flooding process in the small watershed, and analyzed the calculation accuracy, efficiency and practicability of the two methods. The results of the case study show that: Fisrt, hydrological and hydrodynamics can simulate the stormwater flash flood in small watershed, and the simulation results are basically consistent with the actual measurements; Second, for calculation of storm floods in ungauged small watersheds, the hydrological modeling has faster modeling speed and higher computational efficiency compared with hydrodynamic method modeling; Third, when dealing with the formation mechanism and evolution process of storm floods under complex terrain conditions, the hydrodynamic calculation results are more precise and accurate; For flood forecasting and warning in small and medium watersheds in mountainous areas, the hydrological method is more practical.

Keywords: flash flood; spatio-temporal variable source mixed flow production model; modular distributed hydrological model; hydrodynamic method; flash flood simulation

(责任编辑：李福田)