

▪ 作物水肥高效利用 ▪

文章编号: 1672-3317 (2023) 04-0001-07

基于作物水分胁迫指数的表层土壤含水率遥感估算

林人财¹, 陈鹤^{1*}, 张德宁², 魏征¹, 蔡甲冰¹, 曾冉³, 张丽莉³, 贾玉玲³

(1.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2.德州市潘庄灌区运行维护中心, 山东 德州 253000;

3.沧州市水利工程质量技术中心, 河北 沧州 061000)

摘要:【目的】探究作物水分胁迫指数(CWSI)与表层土壤含水率的空间分布特征,并分析不同下垫面(葵花、夏玉米、春小麦和甜椒)表层土壤含水率的遥感估算精度。【方法】利用MOD16A2遥感数据和气象数据,结合Penman-Monteith(P-M)模型,基于CWSI反演河套灌区解放闸灌域表层土壤含水率,并对不同下垫面的表层土壤含水率进行验证。【结果】CWSI的空间分布与表层土壤含水率相反,CWSI大的区域,表层土壤含水率小;春小麦下垫面遥感估算的表层土壤含水率效果较好,决定系数(R^2)为0.748,其次为葵花, R^2 为0.357;灌溉次数较多的夏玉米和甜椒的表层土壤含水率估算精度较差,可见基于CWSI的表层土壤含水率遥感估算方法对土壤干旱较为敏感。【结论】基于CWSI的表层土壤含水率遥感估算方法更适用于灌水较少且耐旱作物下垫面的表层土壤含水率估算。

关键词: 土壤含水率; CWSI; MOD16A2; 解放闸灌域

中图分类号: S161

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022447

OSID:



林人财, 陈鹤, 张德宁, 等. 基于作物水分胁迫指数的表层土壤含水率遥感估算[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 1-7.

LIN Rencai, CHEN He, ZHANG Dening, et al. Estimating Topsoil Water Content Using Crop Water Stress Index and Remote Sensing Technologies[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 1-7.

0 引言

【研究意义】土壤含水率是农业、气象和水文领域的重要参数,在水资源评价、天气预报和水文模拟等方面应用广泛^[1]。在农业领域,土壤含水率是作物灌溉制度制定的重要依据,及时、准确地获取土壤含水率对指导农业灌溉及提高农业水资源利用效率具有重要意义^[2]。传统的土壤含水率监测方法如烘干法和TDR法可获得精准的点尺度土壤含水率数据,但需消耗大量的人力、物力和财力,且无法实现区域尺度监测。随着遥感技术的发展,区域尺度监测成为可能。河套灌区是我国特大灌区之一,由乌兰布和、解放闸、永济、义长和乌拉特5个灌域组成。解放闸灌域是河套灌区的第二大灌域,耕地面积占灌域总面积的70%以上;及时、准确地获取解放闸灌域土壤含水率对指导农业灌溉及提高农

业水资源利用效率具有重要意义。

【研究进展】利用遥感方法进行区域尺度土壤含水率监测的研究已取得丰富成果。以往研究已提出一系列土壤含水率遥感反演模型,如经验回归模型^[3]、水分亏缺指数模型^[4]、水量平衡模型^[5]和BP神经网络模型^[6]。Hoskera等^[7]建立了实测土壤含水率与Sentinel-1后向散射系数之间的线性回归模型,结果表明VV+VH组合极化在土壤含水率反演中表现较好。赵建辉等^[8]提出了基于特征数据和GA-BP神经网络的农田表层土壤含水率估算方法,精度较好。Zribi等^[9]基于植被校正的水云模型和半经验模型,并结合ENVISAT ASAR反演土壤含水率;结果表明,该方法对于小麦下垫面土壤含水率的估算精度较高。其中,作物水分胁迫指数(Crop Water Stress Index, CWSI)模型是基于能量平衡方程建立,物理意义明确,适用范围广,在农田植被覆盖区域可取得较好的土壤含水率估算精度。宋小宁等^[10]基于亚像元尺度的蒸散模型,在西北草原区利用地表缺水指数进行了区域缺水监测。【切入点】当前,基于CWSI反演区域土壤含水率的研究主要是利用无人机热红外遥感在农田尺度进行观测,并以此诊断作物水分胁迫状况,难以满足区域尺度的监测需求。【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究利用

收稿日期: 2022-08-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3900602); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SK2022TS13); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(ID0145B022021, ID0145B052021)

作者简介: 林人财(1995-),男,博士研究生,主要从事农业遥感研究。
E-mail: rencaihrs@iwhr.com

通信作者: 陈鹤(1986-),女,高级工程师,主要从事农业遥感研究。
E-mail: chenhe@iwhr.com

MOD16A2 数据和气象数据, 结合 Penman-Monteith (P-M) 模型, 基于 CWSI 反演解放闸灌域 2014 年表层土壤含水率, 并利用实测数据对不同下垫面 (葵花、夏玉米、春小麦和甜椒) 的表层土壤含水率进行精度验证, 为指导农业灌溉及提高农业水资源利用效率提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河套灌区 (106°16'E—109°27'E, 40°10'E—41°18'N) 位于内蒙古自治区西部, 北靠阴山山脉, 南临黄河, 东与包头市接壤, 西与乌兰布和沙漠相邻, 横跨巴彦淖尔市的乌拉特前旗、五原县、临河市、杭锦后旗和磴口县, 东西长 250 km, 南北宽 50 km^[11]。灌区由乌兰布和、解放闸、永济、义长和乌拉特 5 个灌域组成。解放闸灌域 (106°43'E—107°27'E, 40°34'E—41°14'N) 是河套灌区第二大灌域 (图 1), 灌域面积为 2 345 km², 70% 以上为耕地, 粮食作物主要为夏玉米和春小麦, 经济作物主要为葵花和甜椒^[12]。春小麦、夏玉米、葵花和甜椒的生育期分别为 3 月 25 日—8 月 5 日、5 月 1 日—9 月 20 日、5 月 28 日—9 月 13 日和 5 月 15 日—9 月 10 日。灌域地处干旱半干旱内陆地区, 海拔高度为 1 008~1 092 m, 多年平均降水量为 151.3 mm, 多年平均蒸发量为 2 300 mm, 多年平均气温为 9 ℃。

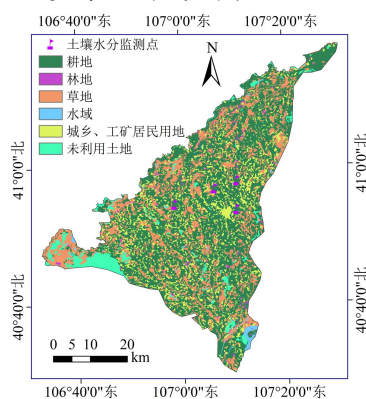


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical map of the study area

1.2 MODIS 数据

遥感数据来源于 Terra 和 Aqua 卫星搭载的 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 传感器观测的标准陆地产品数据。Terra 的过境时间为 10:30, Aqua 的过境时间为 13:30。MOD16A2 包含实际蒸散量 (ET)、潜在蒸散量、潜热通量和潜在潜热通量。本研究使用的数据为 MOD16A2 中的 ET, 获取时间为 2014 年 5 月 1 日—9 月 24 日, 该数据已在全球范围内得到广泛验证并应用^[13]。MOD15A2H 包含叶面积指数 (LAI)、光合有效辐

射分数、质量等级和每个变量的标准差。本研究使用的数据为 MOD15A2H 中的 LAI, 获取时间为 2014 年 5 月 1 日—9 月 24 日。MOD16A2 和 MOD15A2H 的空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 8 d。以上产品均通过 NASA 数据平台 (<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 下载, MOD16A2 和 MOD15A2H 已经过辐射、大气和几何校正, 通过 MRT 重投影至 WGS84/UTM (北 48 区) 坐标系统, 将空间分辨率重采样至 250 m, 并进行质量控制、数据插补和平滑处理, 得到最终的 ET 和 LAI 数据。

1.3 地面数据

1.3.1 气象数据

气象数据获取自国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>), 包含解放闸灌域及其周边共 10 个国家级气象站点 2014 年的气象数据, 包括降水量、平均气温、最高气温、最低气温、平均风速和平均相对湿度等逐日气象数据。部分气象站点数据存在缺失或异常, 采用中值线性插值法进行插补后再通过反距离权重法进行空间插值, 得到解放闸灌域气象数据的空间分布结果。表 1 为气象站点基本信息。

表 1 气象站点基本信息

Table 1 Basic information of meteorological stations

站点名称	站点编号	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m
杭锦后旗	53420	107.13	40.90	1 056.7
乌拉特后旗	53324	107.02	41.45	1 576.8
海力素	53231	106.40	41.40	1 509.6
临河	53513	107.42	40.75	1 039.3
磴口	53419	107.00	40.33	1 055.1
乌海	53512	106.82	39.68	1 091.6
伊克乌素	53522	107.85	40.05	1 184.3
乌拉特中旗	53336	108.52	41.57	1 288.2
五原	53337	108.27	41.10	1 022.7
乌拉特前旗	53433	108.65	40.73	1 020.4

1.3.2 土壤含水率数据

在解放闸灌域的春小麦、夏玉米、葵花和甜椒种植区域内布设土壤含水率监测设备。监测仪器为中国水利水电科学研究院自主研发的 CTMS-On line 型作物冠层温度及环境因子测量系统, 可连续观测土壤含水率信息, 用于验证遥感土壤含水率估算模型。土壤含水率监测点位于地表以下 10 cm (表层)、20 cm (根层) 和 40 cm (深层), 仪器布设详见图 2。采集时间为 2014 年 5 月 1 日—9 月 24 日, 覆盖夏玉米、葵花和甜椒生育期, 由于春小麦播种初期无需灌溉, 故未考虑 4 月的土壤含水率监测。监测时间间隔为 1 h, 由逐时数据计算每日平均值, 得到逐日土壤含水率数据。

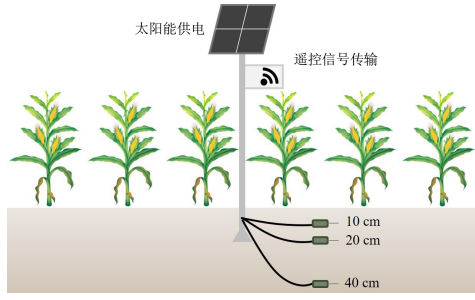


图 2 土壤含水率监测仪器布设示意

Fig.2 Layout diagram of soil water content monitoring instrument

1.4 CWSI 估算

由于实际蒸散发 (ET) 计算需要大量参数, 通常通过冠气温差和饱和水汽压差的线性关系间接计算 $CWSI$ 。本研究采用 P-M 模型^[14]分别计算潜在蒸散发 (ET_p), 进而计算 $CWSI$, 具体计算方法详见陈鹤等^[15]研究:

$$CWSI = 1 - ET / ET_p, \quad (1)$$

式中: ET 为实际蒸散发 (mm); ET_p 为潜在蒸散发 (mm)。

1.5 基于 CWSI 的表层土壤含水率估算

胁迫条件下的 ET 是充分供水条件下的作物蒸散发量 (潜在蒸散发, ET_p) 与土壤水分修正系数 (K_s) 的乘积, 计算式为:

$$ET = K_s ET_p. \quad (2)$$

康绍忠等^[16]提出使用幂函数估算 K_s :

$$K_s = c [(\theta - \theta_{wp}) / (\theta_j - \theta_{wp})]^d, \quad (3)$$

式中: θ 为土壤含水率 (%); θ_{wp} 为凋萎含水率 (%); θ_j 为田间持水率 (%); c 和 d 为经验常数。

由式 (1) 和式 (2) 可得 K_s :

$$K_s = ET / ET_p = 1 - CWSI. \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 可得 θ :

$$\theta = (1 - CWSI)^{1/d} \frac{(\theta_j - \theta_{wp})}{c^{1/d}} + \theta_{wp}. \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 实测土壤含水率变化分析

图 3 为葵花、夏玉米、春小麦和甜椒主要生长季的土壤含水率监测结果。春小麦表层土壤水分亏缺较为严重, 灌溉后表层土壤含水率迅速升高, 随后逐渐下降。夏玉米和甜椒生长季后期表层土壤含水率下降明显。葵花下垫面表层和深层土壤含水率变化较小, 根系层土壤含水率变化剧烈, 这与葵花根系吸水层深度有关。由于解放闸灌域地下水埋深较浅, 故深层土壤含水率较高。8 月上旬—9 月上旬, 葵花根系层土壤含水率低于表层土壤含水率, 这是由于葵花根系发达, 吸收水分和养分的能力强, 约 60% 的根系分布在 0~40 cm 土层内, 在 20 cm 深度处根系分布密度最大。8 月中旬—9 月下旬为葵花灌浆期和成熟期, 作物需水量大, 根系吸水强度高。图 4 为 2014 年 5—8 月的作物 LAI 空间分布。在作物生长初期 (5 月), 解放闸灌域作物种植区的 LAI 较低, 最大值仅为 1.3; 6 月作物种植区 LAI 逐渐提高, 平均值为 0.7; 7 月为作物快速生长, 此时 LAI 达到最大值, 为 6.7; 8 月后, 作物逐渐进入成熟期, 作物生长逐渐减缓, LAI 逐渐减小。

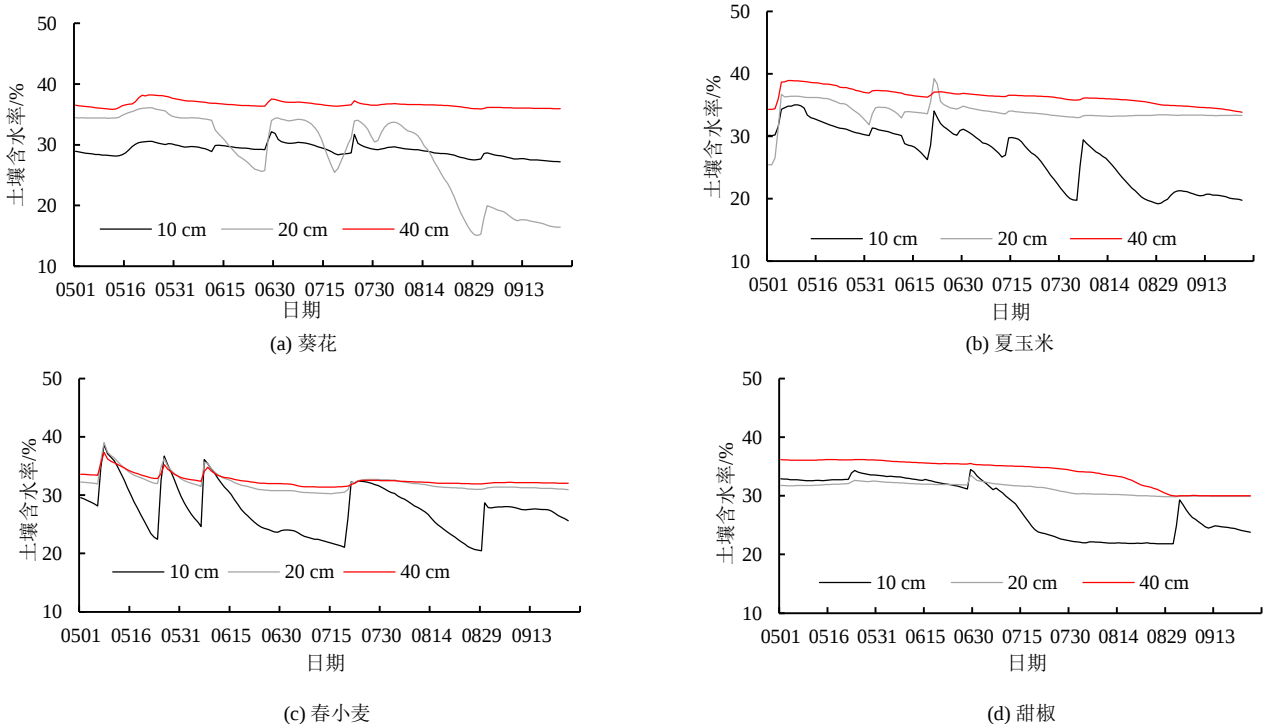


图 3 不同下垫面实测土壤含水率

Fig.3 Measured soil water content in different underlying surfaces

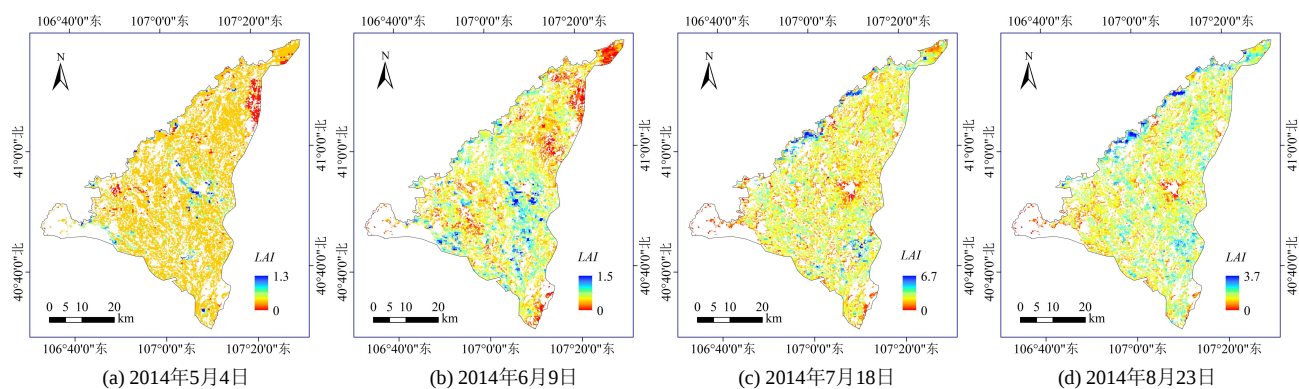


图 4 作物生育期典型代表日的 LAI 空间分布

Fig.4 Spatial distribution of LAI on typical representative days of crop growth period

2.2 表层土壤含水率估算与验证

以监测点为圆心, 在半径为 1 m 的范围内, 每隔 15 d 进行 1 次取土采样, 利用烘干法得到土壤含水率, 将其与仪器观测结果进行对比。葵花、夏玉米、春小麦和甜椒的决定系数 (R^2) 分别为 0.82、0.87、0.73 和 0.85, 表明监测系统连续观测的数据稳定、可靠。根据式 (5) 分别率定春小麦、夏玉米、葵花和甜椒对应的 c 、 d 值, 估算解放闸灌域 2014 年 5—8 月的表层土壤含水率, 并利用实测的表层土壤含水率进行验证。图 5 为土壤含水率估算值与实

际观测值的对比结果。遥感估算的 4 种下垫面土壤含水率介于 20%~40%之间。春小麦的遥感估算结果较好, R^2 为 0.748, 其次为葵花, R^2 为 0.357。夏玉米的土壤含水率估算值与实测值拟合结果不理想, 但其拟合直线斜率为 0.79, 土壤含水率值均匀分布在 1:1 线两侧, 散点分布特征与春小麦相似。灌域内甜椒的灌溉方式主要为充分灌溉, 土壤含水率维持在相对稳定水平, 遥感估算结果并不理想, 表明基于 CWSI 的遥感估算方法对充分灌溉的作物土壤含水率监测不具有优势。

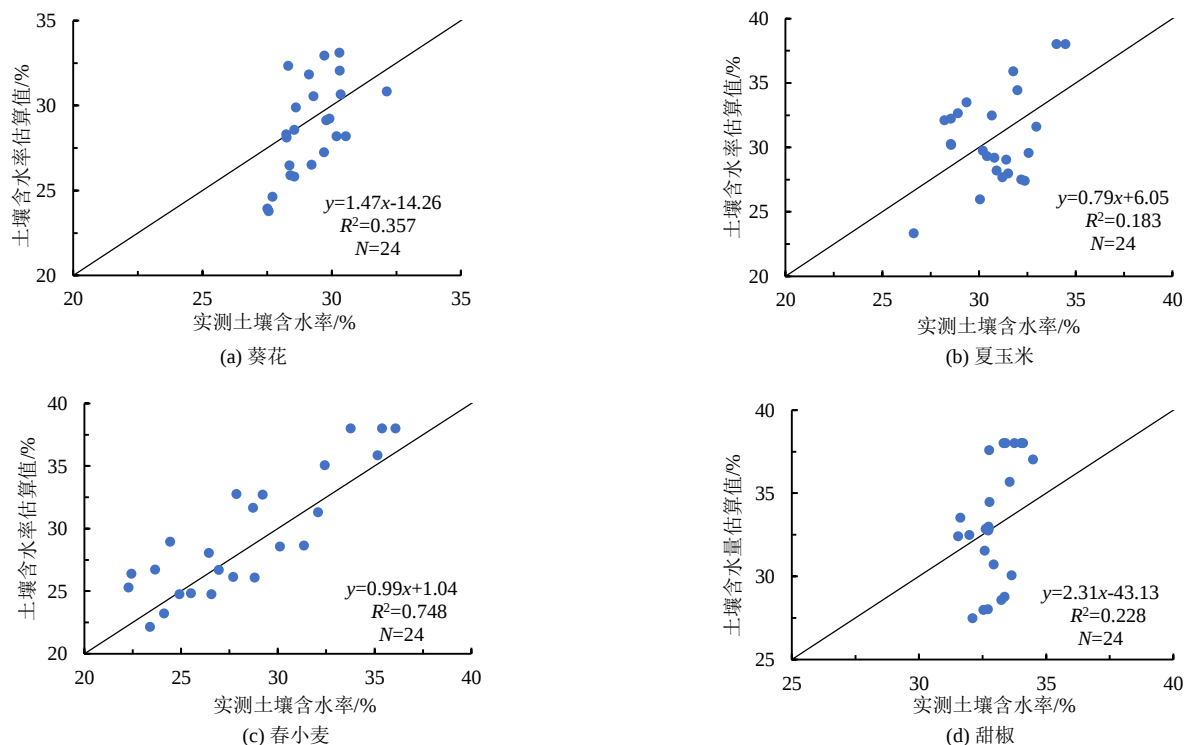


图 5 表层土壤含水率估算值与实测值的对比

Fig.5 Comparison of estimated surface soil water content with measured surface soil water content

2.3 CWSI 和表层土壤含水率空间分布

MOD16A2 受云雨天气影响, 难以获得高质量的长时间序列 CWSI 及土壤含水率。因此, 选择 2014 年解放闸灌域葵花、夏玉米、春小麦和甜椒主

要生长季内晴朗无云的 4 d (5 月 4 日、6 月 9 日、7 月 18 日和 8 月 23 日), 分析 CWSI 的空间分布特征。图 6 为 2014 年葵花、夏玉米、春小麦和甜椒主要生长季 4 个代表日的 CWSI 空间分布。在作物生长初

期（5月）， $CWSI$ 较低，部分区域 $CWSI > 0.8$ ，表明少量作物存在缺水状况，主要分布在灌域西北边缘区域及灌域南部；作物在 6 月进入快速生长期，作物需水量较大，未及时灌溉或灌溉不足的作物区域 $CWSI$ 较大，主要分布在灌域北部；由于 7 月降

水量增加，大部分区域 $CWSI$ 较小，不存在水分亏缺状况；8 月大部分区域 $CWSI$ 较小（平均值为 0.29），空间分布特征表现为北高南低，灌域北部的部分区域 $CWSI$ 较大（0.6~0.8）。

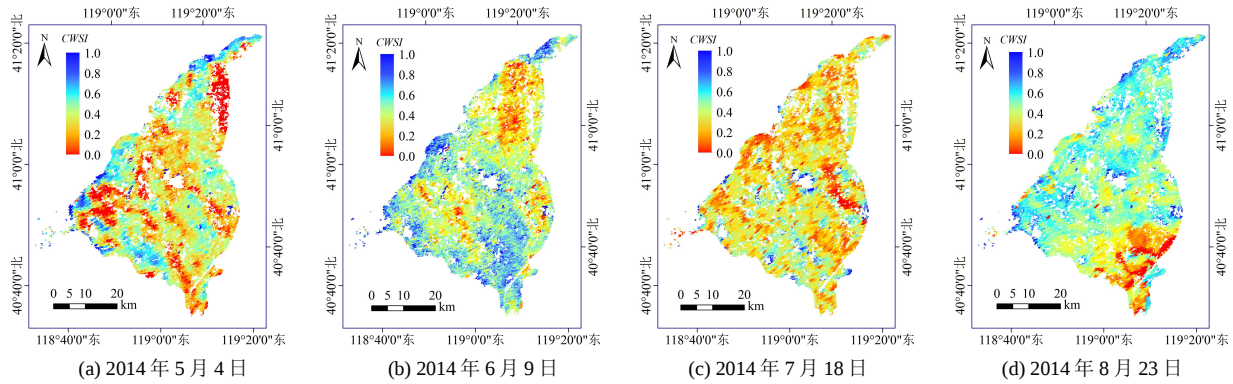


图 6 作物生育期典型代表日的 $CWSI$ 空间分布

Fig.6 Spatial distribution of $CWSI$ on typical representative days of crop growth period

基于 30 m 空间分辨率的作物种植结构（图 7），区域表层土壤含水率大于 33%。分别对葵花、夏玉米、春小麦和甜椒 4 种作物种植区域的土壤含水率进行估算。基于 $CWSI$ 的表层土壤含水率估算模型评估解放闸灌域 2014 年葵花、夏玉米、春小麦和甜椒主要生长季表层土壤含水率，并分析表层土壤含水率分布（图 8）。 $CWSI$ 大的区域，表层土壤含水率小。在作物生长初期（5 月），农田土壤含水率较高；6 月土壤含水率有所降低，表层土壤含水率平均值为 21.79%，标准差为 4.77%，北部作物种植区表层土壤含水率大于 30%；7 月表层土壤含水率空间分布特征不明显，灌域表层土壤含水率平均值为 30.79%；8 月灌域表层土壤含水率平均值为 28.84%，标准差为 3.14%，灌域南部的部分

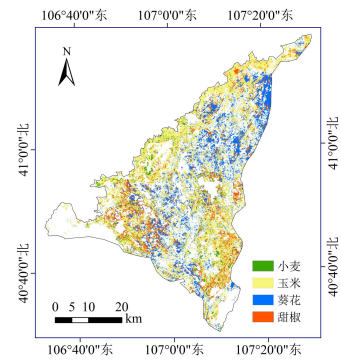


图 7 解放闸灌域种植结构空间分布

Fig.7 Spatial distribution of planting structure in the Jiefangzha Irrigation Field

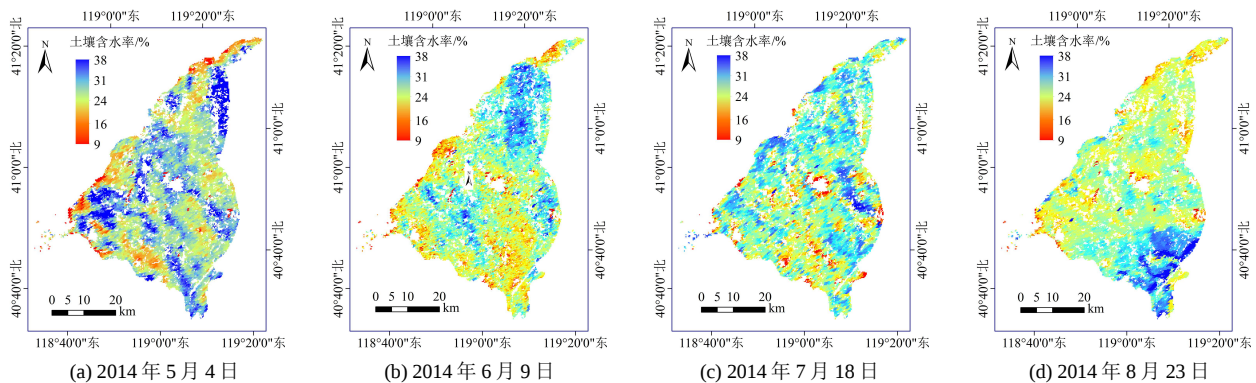


图 8 解放闸灌域表层土壤含水率空间分布

Fig.8 Spatial distribution of surface soil water content in the Jiefangzha Irrigation Field

3 讨论

与表层和根层土壤含水率相比，深层土壤含水率较高，介于 35%~40%之间，这主要是由解放闸灌域地下水埋深较浅所导致。Chen 等^[17]研究表明，解放闸灌域大部分区域地下水位埋深介于 1.15~3.02 m

之间。同时，由于光学遥感卫星电磁波穿透能力较弱，无法探测根层（深层）土壤信号，故本研究仅提出表层土壤含水率遥感估算模型。然而，深层土壤含水率是水文和气候预测模型的重要参数，会影响表层土壤蒸发和植被蒸腾，进而调节土壤-植被-大

气间的水和能量平衡^[18]。因此, 下一步研究应关注如何由表层土壤含水率预测深层土壤含水率。Chen等^[19]基于数据同化方法在位山灌区开展了根层和深层土壤含水率模拟, 模拟结果较好, 且数据同化技术的应用可减小 30%~50%的误差。本研究表明, CWSI 大的区域, 表层土壤含水率小, 这与虞文丹等^[20]的研究结果一致。李伯祥等^[21]在开展遥感反演农田土壤含水率时未进行作物分类。以往区分不同作物下垫面进行表层土壤含水率估算的研究较少, 本研究分别估算了 4 种作物主要生长季的表层土壤含水率, 同时采用实测表层土壤含水率进行验证, 为不同作物的灌溉制度制定提供了科学参考。本研究中夏玉米下垫面验证结果并不理想, 这可能与验证数据偏少有关, 而以往研究^[22-23]在进行遥感反演土壤含水率时, 验证数据均大于 50 个, 验证结果较好。因此, 下一步研究中应尽可能地收集更多的实测数据用于模型验证。

本研究提出了基于 CWSI 的表层土壤含水率估算方法, 得到作物主要生长季表层土壤含水率, 其空间分辨率为 250 m, 这主要受限于 MOD16A2 数据的空间分辨率。数据融合方法为提高空间分辨率提供了新思路, 该方法早期仅应用于卫星波段反射率融合, 后来被证明也可应用于地表参数, 例如蒸散发^[24]和土壤水分^[25]。未来可利用时空自适应反射率融合模型和增强型时空自适应融合模型等数据融合方法得到逐日 30 m 土壤含水率数据集, 以为农业水资源管理提供更加精细的数据支撑。

4 结 论

1) CWSI 的空间分布趋势与表层土壤含水率的空间分布趋势相反。

2) 春小麦下垫面遥感估算的表层土壤含水率验证结果较好, R^2 为 0.748, 其次为葵花, R^2 为 0.357。

3) 本研究提出的方法对于土壤干旱更为敏感, 适用于灌水较少且耐旱作物的表层土壤含水率估算。

参考文献:

- [1] 冯舒, 赵文武, 陈利顶, 等. 2010 年来黄土高原景观生态研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 3 957-3 966.
FENG Shu, ZHAO Wenwu, CHEN Liding, et al. Advances in landscape ecology in the Loess Plateau since 2010 in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 3 957-3 966.
- [2] 艾璐, 孙淑怡, 李书光, 等. 光学与 SAR 遥感协同反演土壤水分研究进展[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 10-18.
AI Lu, SUN Shuyi, LI Shuguang, et al. Research progress on the cooperative inversion of soil moisture using optical and SAR remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(4): 10-18.
- [3] 张新乐, 秦乐乐, 郑兴明, 等. 基于主动微波遥感的典型黑土区土壤水分反演[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(10): 43-51.
ZHANG Xinle, QIN Lele, ZHENG Xingming, et al. Soil moisture inversion based on active microwave remote sensing in typical black soil area[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(10): 43-51.
- [4] JACKSON R D, IDSO S B, REGINATO R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1 133-1 138.
- [5] ROBINSON J M, HUBBARD K G. Soil water assessment model for several crops in the high plains[J]. Agronomy Journal, 1990, 82(6): 1 141-1 148.
- [6] 尚松浩, 雷志栋, 杨诗秀. 冬小麦田间墒情预报的经验模型[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 31-33.
SHANG Songhao, LEI Zhidong, YANG Shixiu. Empirical model for soil moisture forecast in winter wheat field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(5): 31-33.
- [7] HOSKERA A K, NICO G, IRSHAD AHMED M, et al. Accuracies of soil moisture estimations using a semi-empirical model over bare soil agricultural croplands from sentinel-1 SAR data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1 664.
- [8] 赵建辉, 张晨阳, 闵林, 等. 基于特征选择和 GA-BP 神经网络的多源遥感农田土壤水分反演[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 112-120.
ZHAO Jianhui, ZHANG Chenyang, MIN Lin, et al. Retrieval for soil moisture in farmland using multi-source remote sensing data and feature selection with GA-BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 112-120.
- [9] ZRIBI M, CHAHBI A, SHABOU M, et al. Soil surface moisture estimation over a semi-arid region using ENVISAT ASAR radar data for soil evaporation evaluation[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(1): 345-358.
- [10] 宋小宁, 赵英时. 改进的区域缺水遥感监测方法[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2006, 36(2): 188-194.
SONG Xiaoning, ZHAO Yingshi. Improved remote sensing monitoring method for regional water shortage[J]. Science in China(Series D: Earth Sciences), 2006, 36(2): 188-194.
- [11] 牛乾坤, 刘浏, 黄冠华, 等. 基于 GEE 和机器学习的河套灌区复杂种植结构识别[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 165-174.
NIU Qiankun, LIU Liu, HUANG Guanhua, et al. Extraction of complex crop structure in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia using GEE and machine learning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(6): 165-174.
- [12] BAI L L, CAI J B, LIU Y, et al. Responses of field evapotranspiration to the changes of cropping pattern and groundwater depth in large irrigation district of Yellow River Basin[J]. Agricultural Water Management, 2017, 188: 1-11.
- [13] 褚荣浩, 李萌, 谢鹏飞, 等. 安徽省近 20 年地表蒸散和干旱变化特征及其影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1 229-1 239.
CHU Ronghao, LI Meng, XIE Pengfei, et al. Characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration and drought in Anhui Province during recent 20 years[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(6): 1 229-1 239.
- [14] 王斌, 付强, 王敏, 等. 不同时间步长的 Hargreaves 公式修正式适用性研究[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(8): 131-135.
WANG Bin, FU Qiang, WANG Min, et al. Applicability on verified equations of Hargreaves at different time steps[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(8): 131-135.
- [15] 陈鹤, 蔡甲冰, 张宝忠, 等. 灌区尺度遥感蒸散发模型时间尺度提升方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 149-152.
CHEN He, CAI Jiabing, ZHANG Baozhong, et al. Research on remote sensing ET model temporal up-scaling method at irrigation district level[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(9): 149-152.

- [16] 康绍忠, 熊运章. 干旱缺水条件下麦田蒸散量的计算方法[J]. 地理学报, 1990, 45(4): 475-483.
KANG Shaozhong, XIONG Yunzhang. A method of calculating evapotranspiration from the farmland with soil water deficit in arid and semiarid areas[J]. Acta Geographica Sinica, 1990, 45(4): 475-483.
- [17] CHEN H, WEI Z, LIN R C, et al. Estimation of evapotranspiration and soil water content at a regional scale using remote sensing data[J]. Water, 2022, 14(20): 3 283.
- [18] 梁顺林, 李小文, 王锦地. 定量遥感: 理念与算法[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2019.
LIANG Shunlin, LI Xiaowen, WANG Jindi. Quantitative remote sensing: Ideas and Algorithms[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2019.
- [19] CHEN H, LIN R C, ZHANG B Z, et al. Improving soil water content and surface flux estimation based on data assimilation technique[J]. Remote Sensing, 2022, 14(13): 3 183.
- [20] 虞文丹, 张友静, 郑淑倩. 基于作物缺水指数的土壤含水量估算方法[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(3): 77-83.
YU Wendan, ZHANG Youjing, ZHENG Shuqian. Estimation of soil moisture based on crop water stress index[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2015, 27(3): 77-83.
- [21] 李伯祥, 陈晓勇. 基于 Sentinel 多源遥感数据的河北省景县农田土壤水分协同反演[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(6): 752-761.
LI Boxiang, CHEN Xiaoyong. Synergic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 images for soil moisture retrieval in vegetation covered agricultural areas of Jingxian County of Hebei Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(6): 752-761.
- [22] 高琪, 王玉珍, 冯春晖, 等. 基于改进型光谱指数的荒漠土壤水分遥感反演[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 142-150.
GAO Qi, WANG Yuzhen, FENG Chunhui, et al. Remote sensing inversion of desert soil moisture based on improved spectral indices[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 142-150.
- [23] BOUSBIH S, ZRIBI M, EL HAJJ M, et al. Soil moisture and irrigation mapping in A semi-arid region, based on the synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(12): 1 953.
- [24] 白亮亮, 蔡甲冰, 刘钰, 等. 基于数据融合算法的灌区蒸散发空间降尺度研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 215-223.
BAI Liangliang, CAI Jiabing, LIU Yu, et al. Spatial downscaling of evapotranspiration in large irrigation area based on data fusion algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 215-223.
- [25] ABOARD A S, BAI L L, ZHANG C J, et al. Generating surface soil moisture at 30 m spatial resolution using both data fusion and machine learning toward better water resources management at the field scale[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 255: 112 301.

Estimating Topsoil Water Content Using Crop Water Stress Index and Remote Sensing Technologies

LIN Rencai¹, CHEN He^{1*}, ZHANG Dening², WEI Zheng¹,
CAI Jiabing¹, ZENG Ran³, ZHANG Lili³, JIA Yuling³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Operation and Maintenance Center of Panzhuang Irrigation District, Dezhou 253000, China;

3. Cangzhou Water Conservancy Engineering Quality Technology Center, Cangzhou 061000, China)

Abstract: 【Objective】 Change in topsoil water content is intricately linked to plant transpiration, and understanding its spatiotemporal variation at large scales is crucial to improving water and agriculture management. The objective of this paper is to investigate the feasibility of remote sensing for estimating topsoil water content, its association with crop water stress index (*CWSI*) and the impact of cropping systems. 【Method】 The experiment site was an irrigation field at Jiefangzha in Hetao Irrigation District. The topsoil water content in different cropped lands (sunflower, summer maize, spring wheat and pepper) was calculated, inversely, in 2014 using the MOD16A2 imagery, meteorological data, and the P-M model and *CWSI*. The estimated soil water content was compared with ground-truth data. 【Result】 The *CWSI* and topsoil water content were inversely proportional. The method was accurate for estimating topsoil water content in wheat and sunflower lands, with the determination coefficient between the estimated and measured soil water content for the wheat and sunflower lands being 0.748 and 0.357, respectively. However, it was less accurate for maize and pepper lands as they were irrigated more frequently. These suggested that the remote sensing-based method works better when the soil is dry than when it is wet. 【Conclusion】 The *CWSI*-based remote sensing method is more suitable for estimating topsoil water content in lands planted with drought-tolerant crops than lands grown with water-demanded crops which need more irrigation. Our results provide insight into the impact of cropping systems on accuracy and reliability of remote sensing methods for estimating topsoil water content. It has potential application for agricultural management in arid and semi-arid regions.

Key words: soil water content; *CWSI*; MOD16A2; Jiefangzha irrigation field

责任编辑: 韩 洋