#### DOI: 10.5846/stxb201808151745

聂艳,马泽玥,周逍峰,于雷,于婧.阿克苏河流域土壤湿度反演与监测研究.生态学报,2019,39(14): - . . Nie Y, Ma Z Y, Zhou X F, Yu L, Yu J.Soil moisture retrieval and monitoring in the Aksu River basin.Acta Ecologica Sinica,2019,39(14): - .

# 阿克苏河流域土壤湿度反演与监测研究

# 聂 艳1,马泽玥1,周逍峰1,于 雷1,于 靖2,\*

1 华中师范大学 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室,武汉 430079
 2 湖北大学 资源环境学院,武汉 430062

**摘要:**以新疆阿克苏河流域为研究区,以 GF-1 WFV 和 Landsat8 OLI 两种高分辨率遥感影像为数据源,结合 102 个不同深度层的 土壤湿度实测数据,选择垂直干旱指数(PDI)、改进型垂直干旱指数(MPDI)和植被调整垂直干旱指数(VAPDI),对土壤湿度指 数反演的效果进行比较和验证。结果表明,两种数据源下的 PDI、MPDI、VAPDI 与土壤湿度实测含水量的决定系数较高,尤其 是 0—10 cm 的相关性最强,平均决定系数达到 0.68,说明基于光学遥感影像近红外和红光波段反射率构建的反演指数对近地 表层土壤湿度信息更敏感,但对地下较深层次的土壤湿度反演精度略低;MPDI 和 VAPDI 能够在一定程度上克服混合像元对土 壤湿度光谱信息的影响,反演的精度要比 PDI 高,尤其是高植被覆盖度区,采用垂直植被指数(PVI)修正的 VAPDI 反演精度最 佳;基于两种遥感数据源的土壤湿度空间异质性基本一致,但空间分辨率较高的 GF-1 WFV 模拟的土壤湿度空间分异更加精细 和明显。研究结果可为"一带一路"背景下干旱半干旱地区大范围和动态监测土壤湿度、开展定量节水灌溉等提供理论基础和 实践参考。

关键词:土壤湿度;反演模型;高分辨率遥感影像;阿克苏河流域

# Soil moisture retrieval and monitoring in the Aksu River basin

NIE Yan<sup>1</sup>, MA Zeyue<sup>1</sup>, ZHOU Xiaofeng<sup>1</sup>, YU Lei<sup>1</sup>, YU Jing<sup>2,\*</sup>

Hubei Provincial Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation, Central China Normal University, Wuhan 430079, China
 College of Resources and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China

**Abstract:** As a basic parameter in the formation, transformation, and consumption of surface water resources, soil moisture has a very important influence on vegetation growth, agricultural production, and the healthy function of regional ecosystems. Monitoring of soil moisture by remote sensing plays a significant role in the dynamic characterization and management of surface heat balance, water evapotranspiration, and soil moisture in agricultural production. In order to verify the applicability of GF-1 data to the rapid acquisition of agricultural parameters in arid and semi-arid regions, this study simulated, compared, and validated the effectiveness of soil moisture inversion. All data were sampled from the vegetated area of the Aksu River basin in July 2016. GF-1 WFV images, Landsat8 OLI images, as well as measured soil moisture data were used to retrieve the perpendicular drought index (PDI), modified perpendicular drought index (MPDI), and vegetation analyses of PDI, MPDI, VAPDI, and measured soil moisture in the 0—10, 10—20, and 20—30 cm depth layers based on GF-1 WFV images and Landsat8 OLI images, were good. In the 0—10 cm depth layer, the average determination coefficient was 0.68, all models met the accuracy requirements of soil moisture inversion. Inversion indices based on NIR-Red spectral space derived from optical remote sensing images were more sensitive to soil moisture

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41401232);农业农村部农业遥感重点开放实验室开放课题(2016002);华中师范大学中央高校基本科研业务 费(CCNU18TS002)

收稿日期:2018-08-15; 网络出版日期:2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yjing@ hubu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

information near the surface layer, but the accuracy of soil moisture retrieval for deeper layers was slightly lower in the study area. Second, in the area of moderate vegetation coverage, MPDI and VAPDI had higher inversion accuracy than PDI; to a certain extent, they overcame the influence of mixed pixels in soil moisture spectral information. In the area of high vegetation coverage, VAPDI modified by PVI was not susceptible to vegetation saturation, and thus had higher inversion accuracy. Third, the spatial heterogeneity of soil moisture retrieved by the remote sensing types was similar. However, GF-1 WFV images were more sensitive to changes in soil moisture, which reflected the actual soil moisture level covered by different vegetation. These results provide a practical reference for dynamic monitoring of surface soil moisture and largescale water-saving irrigation projects in the arid and semi-arid regions, under the Belt & Road initiative.

Key Words: soil moisture; inversion model; high resolution remote sensing image; Aksu River basin

土壤湿度作为陆面水资源形成、转化及消耗过程中的基本参数,对植被生长、农业生产和区域生态系统健 康运转具有重要影响[1]。遥遥感技术的发展,特别是近年来不同传感器、多时相、多波段、高光谱技术的发 展,为大范围、及时、准确土壤湿度遥感监测提供了可能[2]。自20世纪80年代起,就有很多学者提出了基于 不同遥感数据源及波段信息的土壤湿度反演模型和方法,其中最具代表性的有热惯量法、微波遥感监测法、热 红外遥感监测法、温度-植被综合指数法和光谱特征空间法等<sup>[3-9]</sup>。1977年 Richardson 和 Wiegand 建立 Nir-Red 光谱特征空间提出基于土壤背景线的垂直植被指数后,从遥感光谱特征空间提取土壤水分信息建立土壤 湿度遥感反演模型的方法被学者们持续关注,学者们先后提出了归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、增强型植被指数(Extreme value index, EVI)、温度植被干旱指数(Temperature vegetation dryness index, TVDI)、垂直干旱植被指数(Modified perpendicular drought index, MPDI)等监测作物生 长期的土壤湿度变化状况,这种通过遥感影像计算各类指数间接反映土壤含水量的模拟方法应用最为广 泛<sup>[10-16]</sup>。前述研究虽然取得了不错的成果,但所采用的遥感数据源多为 TM、ETM+甚至中分辨率的 MODIS 影像,而基于高分辨率遥感数据的研究却很少,更没有研究对比不同指数/传感器在干旱半干旱农业区的反演 效果和适用性。因此,本文结合高分辨率遥感数据(GF-1 WFV 和 Landsat8 OLI)高空间、高时间分辨率和宽覆 盖的特点,以新疆维吾尔族自治区的阿克苏河流域为研究区,重点探讨不同高分辨率遥感数据源、不同指数在 流域尺度土壤湿度反演中的可行性和适用性,定量监测阿克苏河流域土壤湿度的时空变化信息,以协调灌区 各分闸口的灌溉定额,促进流域水资源的合理分配和高效利用,拓展国产高分系列遥感数据在精准农业、农业 信息定量提取等方面的应用范围,为"天地网一体化"的现代农业信息获取和农情信息遥感监测提供理论 基础。

# 1 研究区概况

阿克苏河流域位于新疆维吾尔自治区西部、塔里木盆地西北部,地处塔里木河上游平原地区,地理位置为 40°—41°35′N,78°47′—82°43′E。具有明显的大陆性季风气候,干燥少雨,多年平均降水量约45 mm,20 m<sup>2</sup> 水面蒸发量1500 mm,年太阳辐射总量达到6000 MJ/m<sup>2</sup>时,农业全部依靠地表水渠系灌溉和地下水井抽水灌 溉。阿克苏流域绿洲是新疆主要的灌溉绿洲农业区和重要的粮食、瓜果生产基地之一,也是中国重要的棉花 生产区。近年来,随着阿克苏地区社会经济的发展,流域内地下水位不断降低,农业生产受到一定影响,胡杨 林等重要的生态系统也逐渐退化。因此,借助高分辨率遥感数据实现大面积高精度的土壤湿度的实时监测对 流域水资源利用及生态安全评价具有极大的现实意义。

#### 2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

选取阿克苏流域的阿瓦提县(灌溉农业为主)、阿拉尔市(灌溉农业为主)和温宿县(林果业为主)3个实

验区(图1),实测数据为0—10、10—20、20—30 cm 深度层的土壤体积含水率(相对值),采用托普云农 TZS-2X-G 土壤水分温度速测仪测量(理论相对误差小于 3%),采样时间为 2016 年 7 月 14 日—7 月 20 日,采样时 点前后一个星期天气状况稳定。采样时根据不同土地覆盖类型,选取面积大于 30 m×30 m 的规则地块,在地 块中间位置选择 2 m×2 m 的样方,样方内随机测量 3 次取平均值,同步记录 GPS 样点坐标、土地覆盖类型和 植被密集程度等信息;共采集 102 个样点(土壤湿度实测数据 306 个),其中阿瓦提采样区、阿拉尔采样区和温 宿采样区的实测样点分别为 45、30 个和 27 个;样点覆盖类型包括小麦、棉花、水稻、果园、林地和裸地,以农田 植被为主(图 1)。



图 1 阿克苏河流域土壤湿度实测样点分布图 Fig.1 Distribution of measured samples of soil moisture in study area

采用两种高分辨遥感数据,一是 GF-1 WFV 多光谱影像,空间分辨率为 16 m,成像时间 2016 年 6 月 13 日、7 月 6 日、7 月 22 日和 8 月 12 日,主要利用红光波段(Band 3)和近红外波段(Band 4)数据;二是 Landsat8 OLI 遥感影像,空间分辨率 30 m,成像时间 2016 年 7 月 18 日,主要利用红光波段(Band 4)和近红外波段(Band 5)数据。在分析之前,对各遥感影像进行了预处理,然后借助 ArcGIS10.1 将实测样点数据与预处理后的影像进行地理坐标配准。

# 2.2 研究方法

# 2.2.1 垂直干旱指数

垂直干旱指数(Perpendicular drought index, PDI)是根据植被-土壤二元组合在红光-近红外二维空间光谱分布变化规律而提出的一种土壤水分反演指数,它在实践应用中取得了较好效果<sup>[8-10,17]</sup>。PDI的计算公

式为:

$$PDI = (R_{red} + M \times R_{nir}) / \sqrt{M^2 + 1}$$
(1)

式中, $R_{nir}$ 和 $R_{red}$ 为遥感影像中近红外和红光波段反射率,分别对应本研究中 GF-1 WFV 影像的第三、第四波段和 Landsat8 OLI 影像的第四、第五波段反射率;M为土壤线斜率。

借助 ENVI 5.1,从经预处理的研究区 GF-1 WFV 遥感影像中提取每个土壤湿度实测样点像元在近红外和 红光波段的反射率,将 102 个实测样点的反射率在 Nir-Red 构成的二维光谱特征空间中进行离散化,然后进 行趋势线拟合得到研究区的土壤线方程如公式 2。

$$y = 1.2381x + 0.0367, R^2 = 0.938 \tag{2}$$

根据土壤线的定义可以确定研究区土壤线斜率 M 为 1.2381,土壤线在纵坐标上的截距 I 为 0.0367。由于 同一地块的土壤线差异不大,基于 Landsat8 OLI 的土壤湿度反演模型构建时采用同样的土壤线。 2.2.2 改进型垂直干旱指数

PDI 没有考虑地表植被覆盖对红光和近红外波段的强散射作用,因此主要适用于低植被覆盖或裸土地区 土壤湿度的遥感反演<sup>[8-10,18]</sup>。针对此局限性,引入植被覆盖度 *f*<sub>v</sub>对在 Nir-Red 光谱特征空间的混合像元进行 分解,克服植被对红光和近红外波段的散射影响,获取与土壤湿度有关的纯土壤像元反射率,得到 MPDI<sup>[18]</sup>, 计算公式如下:

$$MPDI = \frac{R_{red} + M \cdot R_{nir} - f_v (R_{red,v} + M \cdot R_{nir,v})}{(1 - f_v) \sqrt{M^2 + 1}}$$
(3)

式中, $R_{red,v}$ 、 $R_{nir,v}$ 为植被在 Red 和 Nir 波段的反射率; $f_v$ 为植被覆盖度。 $f_v$ 是指植被(包括叶、茎、枝)在地表的 垂直投影面积占统计区总面积的百分比,本研究主要利用 $f_v$ 来克服遥感影像中混合像元对土壤湿度光谱信息 的影响,公式如下:

$$f_{v} = \left(\frac{\text{NDVI-NDVI}_{s}}{\text{NDVI}_{v} - \text{NDVI}_{s}}\right)^{2}$$
(4)

式中,NDVI。、NDVI。分别代表纯植被和裸土的归一化植被指数。借助 ENVI 5.1 中的 Band math 工具,通过红光波段和近红外波段的反射率,可以计算获取各时期 GF-1 WFV 和 Landsat8 OLI 遥感影像的 NDVI 值;由于研究区地表覆盖复杂,计算得到的 NDVI 最大/最小值可能存在误差,拟取累积概率为 5%和 95%的 NDVI 值作为最小值和最大值。

2.2.3 植被调整垂直干旱指数

考虑到覆盖饱和的影响,引入垂直植被指数(PVI)代替 $f_v$ ,作为植被覆盖表征量,在 PVI-PDI 二维空间对 PDI 模型进行修正,提出了适用于高植被覆盖区土壤湿度反演的植被调整垂直干旱指数(Vegetation adjusted perpendicular drought index, VAPDI)<sup>[8-10]</sup>。

如图 2 所示,三角形 ABC 内所有土壤湿度等值线近似为直线,且交于 A 点。在 PVI=0 的裸土区,三角形 ABC 内任一点 E 的 PDI 可以近似用土壤湿度等值线 AE 与横坐标轴的交点 F 的 PDI 代替, OF 的长度即为 E 点修正后的 PDI,即 PVI 趋于 0 时, VAPDI 等于 PDI。

根据三角形相 似原理得到任意 X 点的 VAPDI 计算公式如下:

$$VAPDI(X) = PDI(A) - \frac{|PDI(A) - PDI(X)| * PVI(A)}{PVI(A) - PVI(X)}$$
(5)

其中,垂直植被指数 PVI 的计算公式如下:

$$PVI = |R_{nir} - M \cdot R_{red} - I| / \sqrt{M^2 + 1}$$
(6)

式中,*I*是土壤线表达式的截距。借助 ENVI 5.1 中的 Band math 工具,获取各时期 GF-1 WFV 和 Landsat8 OLI 遥感影像的 PVI 值。

# 3 结果与分析

#### 3.1 土壤湿度反演模型构建

## 3.1.1 土壤实测湿度的描述性统计

以研究区 102 个表层(0—10 cm) 土壤湿度实测数 据为例进行描述性统计分析,结果见表 1。各植被类型 的表层土壤湿度均值和中值接近,说明研究区土壤湿度 整体分布较为均匀;裸土的中值和均值存在差异,且变 异系数达到 43.8%,说明研究区裸土的干、湿度存在一 定差异;土壤湿度最大值和最小值分别为 0.485 和 0. 088,对应的覆盖类型分别为水稻和裸土;102 个实测样 点的土壤湿度平均值和标准差分别为 0.225 和 0.081。 3.1.2 土壤湿度反演模型构建

依据各采样点的土地利用类型、植被覆盖度、地形、 坡度坡向等具体指标,从 102 个采样点中选取 68 个作 为建模样本集,剩余的 34 个样点作为反演模型精度验 证和评价的验证样本集。通过 ENVI 5.1 中的 Band



#### 图 2 PVI-PDI 光谱特征空间像元散点分布示意图

Fig. 2 Distribution schematic of pixels in PVI-PDI spectral feature space

PVI:垂直植被指数 perpendicular vegetation index; PDI:垂直干旱 指数 perpendicular drought index; D为A到BC的垂足,E为三角 形 ABC 任意一点,G为点E到AD的垂足,F为AE 延长线于BC 的交点

math 工具,计算获取 GF-1 WFV(2016 年 7 月 22 日)与 Landsat8 OLI(2016 年 7 月 18 日)影像的 *f*<sub>v</sub>、PVI 两个 参数和 PDI、MPDI 和 VAPDI,借助 SPSS 19.0 对 68 个建模样本 3 个深度层的土壤湿度实测数据和对应的 PDI、MPDI 和 VAPDI 分别进行拟合,发现线性拟合效果最好,汇总回归模型见表 2。

Table 1         Statistics of measured soil moisture samples in different land cover types							
覆盖类型 Type	样点数 Point	最大值 Maximum	最小值 Minimum	中值 Median	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 Variation coefficient
水稻 Rice	12	0.485	0.202	0.324	0.318	0.09	0.283
小麦 Wheat	17	0.352	0.178	0.245	0.237	0.091	0.384
棉花 Cotton	29	0.305	0.143	0.224	0.213	0.076	0.357
果园 Orchard	24	0.315	0.119	0.207	0.214	0.081	0.379
林地 Woodland	11	0.305	0.123	0.219	0.207	0.075	0.362
裸土 Bare land	9	0.223	0.088	0.149	0.162	0.071	0.438

表 1 不同植被覆盖类型下的土壤湿度实测数据统计表

从表 2 可以看出, 拟合模型均为负相关,除了基于 GF-1 WFV 影像的 20—30 cm 深度层的 PDI、MPDI 拟 合模型和基于 Landsat8 OLI 影像的 20—30 cm 深度层的 PDI 拟合模型通过 0.05 的显著性检验外,其余模型均 通过 0.01 的显著性检验,具备统计学意义;尤其是各指数均与 0—10 cm 深度层的土壤湿度相关性最强,平均 *R*<sup>2</sup>达到了 0.68,说明基于光学遥感影像近红外和红光波段构建的遥感反演指数对近地表层土壤湿度信息具有 较强的敏感性,能够模拟和监测更大范围的土壤湿度的空间变化,但对地下较深层次的土壤湿度反演精度 略低。

从各回归模型的决定系数 R<sup>2</sup>来看, MPDI、VAPDI 的拟合效果要明显优于 PDI, 这是因为在 Nir-Red 二维 光谱特征空间中,各像元的反射率由土壤、植被甚至其他地物信息共同决定, PDI 指数没有考虑到植被覆盖对 土壤光谱信息的影响,因此无法完全反映出表层土壤湿度的实际水平。而 MPDI 和 VAPDI 分别利用了不同 的植被覆盖表征量对混合像元的光谱信息进行修正,因而所表达的土壤湿度信息更精确, 与土壤湿度实测值 之间的相关性高于 PDI。

Table 2 Linear regression between PDI/MPDI /VAPDI and measured soil moisture data						
数据源 Image	土壤深度 Depth/cm	指数 Index	回归模型 Regression model	决定系数 $R^2$	标准差 Standard deviation	Р
GF-1 WFV	0—10	PDI	y = -1.6135x + 0.6047	0.6154 **	0.094	0.000
		MPDI	y = -1.1925x + 0.6058	0.7042 **	0.073	0.000
		VAPDI	y = -1.2808x + 0.7045	0.7863 **	0.021	0.000
	10—20	PDI	y = -1.2262x + 0.5391	0.5036 **	1.618	0.007
		MPDI	y = -0.9329x + 0.5470	0.5623 **	1.006	0.005
		VAPDI	y = -1.0496x + 0.603	0.5840 **	0.094	0.000
	20—30	PDI	y = -1.3042x + 0.5696	0.4712*	2.133	0.032
		MPDI	y = -1.0042x + 0.5829	0.5047 *	1.604	0.013
		VAPDI	y = -0.9817x + 0.6253	0.5106 **	1.410	0.008
Landsat 8 OLI	0—10	PDI	y = -3.4284x + 0.7039	0.5265 **	1.471	0.000
		MPDI	y = -2.1545x + 0.7180	0.7191 **	0.069	0.000
		VAPDI	y = -2.7037x + 0.5891	0.7469 **	0.045	0.000
	10—20	PDI	y = -4.2156x + 0.7843	0.5642 **	1.084	0.000
		MPDI	y = -1.9632x + 0.6084	0.5287 **	1.435	0.000
		VAPDI	y = -1.9246x + 0.5078	0.5439 **	1.133	0.000
	20—30	PDI	y = -3.7108x + 0.7469	0.5050*	1.595	0.011
		MPDI	y = -1.8677x + 0.6421	0.5061 **	1.618	0.006
		VAPDI	x = -2.0945x + 0.5423	0 5213 **	1 458	0.008

表 2 两种遥感影像不同反演指数与各层土壤湿度的回归拟合模型

PDI:垂直干旱指数 Perpendicular drought index; MPDI:改进型垂直干旱指数 Modified perpendicular drought index; VAPDI:植被调整垂直干旱 指数 Vegetation adjusted perpendicular drought index; \*:通过 0.05 的显著性检验; \* \*:通过 0.01 的显著性检验

从表2来看,对于WFV,PDI与土壤湿度间的相关性随深度增加而明显减小,而OLI的PDI与3个深度层 土壤湿度间的相关性差异不大,但同样都是在20—30 cm 深度层的相关性最小,标准误差也相对较大。说明 对于WFV和OLI两种遥感影像,当深度超过20 cm,PDI对土壤湿度的敏感度不高,难以准确地反映该深度层 的实际土壤湿度状况。MPDI与土壤湿度的相关性也随着土壤深度增加而减小,基于WFV和OLI的MPDI均 与0—10 cm 土壤湿度相关性最强,*R*<sup>2</sup>达到了0.7,说明基于近红外和红光波段信息构建的反演指数对土壤湿 度的敏感性随深度增加而降低。在3个深度土层上,基于WFV与OLI的MPDI和土壤湿度实测值的相关系 数水平基本相当。两种遥感影像的VAPDI与3个深度层土壤湿度之间都存在线性负相关;其中在0—10 cm 深度层的相关性最强,*R*<sup>2</sup>分别达到了0.7469和0.7869,在10—20 cm和20—30 cm深度层相关性相对较低,但 高于其它两个指数;就传感器而言,基于WFV影像的回归拟合模型的各项系数均优于OLI影像。

## 3.2 反演模型的精度评价

将基于两种传感器的 PDI、MPDI 和 VAPDI 拟合模型得到的不同深度层的土壤湿度反演值,分别与对应 的 34 个验证样点的土壤湿度实测值进行验证分析,并分别计算验证样点土壤湿度反演值与实测值的决定系 数(*R*<sup>2</sup>)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)和均方根误差(RMSE)等指标值,来验证和定量评价反 演模型的精度(表 3)。

由表3可知,从各精度评价指标值来看,3个土壤深度层中,基于WFV和OLI两种传感器的PDI、MPDI、 VAPDI土壤湿度反演模型均在0—10 cm处反演精度最高,说明光学遥感影像更适合于表层土壤湿度的反演, 而对较深层次土壤湿度信息的敏感性较弱,原因是近红外和红光的穿透能力较弱,以反映近地表的光谱信息 为主。

对比 3 种指数的反演结果来看,基于 WFV 和 OLI 两种传感器的 VAPDI 土壤湿度反演模型在 0—10 cm 深度层反演结果的精度均明显高于 PDI 和 MPDI;在敏感性较差的 10—20 cm 和 20—30 cm 处,3 种指数的精

度评价指标虽然相差不大,但 VAPDI 和 MPDI 的反演结果稍优于 PDI。从 GF-1 WFV 和 Landsat8 OLI 遥感数 据源的反演结果精度来看,在同一深度层上,对于不同的反演指数,两种影像的反演精度各有优劣,其中基于 WFV 的 PDI 和 VAPDI 反演结果的 R<sup>2</sup>、MAE、MRE 和 RMSE 均优于 OLI 影像;而利用 MPDI 构建模型时,二者 的反演效果基本一致,反演精度无明显差别。

Table 3         Accuracy evaluation index value of each soil moisture retrieval model								
数据源 Image	指数 Index	土壤深度 Depth/cm	$R^2$	MAE/%	MRE/%	RMSE/%		
GF-1 WFV	PDI	0—10	0.6037	4.16	8.44	4.96		
		10—20	0.5218	7.23	9.33	7.28		
		20—30	0.4806	9.67	12.60	8.05		
	MPDI	0—10	0.6945	3.29	7.37	4.11		
		10—20	0.5571	6.96	8.93	4.47		
		20—30	0.4994	9.56	11.08	7.94		
	VAPDI	0—10	0.7932	2.23	5.67	3.41		
		10—20	0.5724	6.78	8.35	4.73		
		20—30	0.5016	8.86	10.72	7.68		
Landsat8 OLI	PDI	0—10	0.5338	7.07	9.14	6.90		
		10—20	0.5590	6.88	9.02	4.51		
		20—30	0.5041	8.92	11.13	7.59		
	MPDI	0—10	0.7075	3.14	7.25	3.98		
		10—20	0.5263	7.37	9.40	7.42		
		20—30	0.4819	9.83	12.15	8.17		
	VAPDI	0—10cm	0.7386	2.86	6.18	3.85		
		10—20cm	0.5514	6.79	9.24	4.60		
		20—30cm	0.5146	8.71	10.56	7.25		

表 3 各模型土壤湿度反演结果精度验证指标汇总

MAE:平均绝对误差 Mean absolute error; MRE:平均相对误差 Mean relative error; RMSE: 均方根误差 Root mean squared error

# 3.3 表层土壤湿度反演与动态监测

根据前述分析, 拟选择两种遥感影像的 VAPDI 土壤湿度反演模型, 对阿克苏河流域 0—10 cm 表土层的 土壤湿度进行反演, 通过对实际反演效果的对比分析, 提出推荐的遥感数据源用于土壤湿度大规模动态监测。 3.3.1 表层土壤湿度反演结果分析

以经过预处理的研究区 GF-1 WFV(2016.7.22)、Landsat8 OLI(2016.7.18)遥感影像为基础,在 ENVI/IDL 中计算出各像元的 VAPDI 值,利用构建的土壤湿度反演模型获取每个像元的土壤湿度值,得到研究区表层土 壤湿度的空间分布格局(图 3 和图 4),图中白色部分为掩膜掉的水体与城区,红色表示土壤湿度偏低,由红色 到深蓝色土壤湿度逐渐增高。

通过图 3、4 可以看出,两种遥感影像反演得到的阿克苏河流域表层土壤湿度空间格局基本一致,即靠近 水源的区域土壤湿度高,而远离水源的地区土壤湿度值一般偏低。原因主要是阿克苏河流域自然降水量极 小,流域农业生产需水几乎全部依靠地表渠系和地下水抽水灌溉,而且靠近河流、水库及湖泊等自然水源的地 区一般为农业生产区,如上游托什干河两侧的乌什县、库玛拉河两侧的温宿县南部、中游的阿克苏河两岸的阿 瓦提灌区和阿克苏市中部以及中下游阿克苏河与塔里木河交汇处的阿拉尔灌区,灌溉渠系密集,能够长期保 障该区域农作物用水需求,表层土壤湿度相对较高,均在 0.3 以上;流域内三大水库胜利水库、上游水库、多浪 水库和流域西南部的千鸟湖地区土壤湿度也较高;远离水源的地区多为天然植被或荒漠戈壁区,水网密度小 且缺乏人工灌溉和维护,受流域干燥气候影响大,土壤湿度值一般处于 0.2 以下,部分区域土壤湿度值甚至接 近为 0。

进一步对比两种遥感数据源的土壤湿度反演结果可以发现,图4中不同区域的土壤湿度的高低层次更加

39 卷



图 3 基于 GF-1 WFV 遥感影像的阿克苏河流域土壤湿度空间分布图

Fig.3 Distribution of soil moisture retrieval based on GF-1 WFV image





分明,土壤湿度的空间异质性更加明显,这主要是 GF-1 WFV 遥感影像空间分辨率为 16 m,稍高于 Landsat8 OLI 影像 30 m 的空间分辨率,在土壤湿度反演模型精度相当的情况下,较高的空间分辨率能够表现出更加精细的地表信息,能够更详细的表达土壤湿度的空间异质性,能够为实现精确到地块的农作物灌溉和区域生态安全评价提供参考。

3.3.2 表层土壤湿度动态监测

为进一步探讨流域土壤湿度的时空演变规律,选择2016年6月13日、7月6日、7月22日和8月12日4

个时点的 GF-1 WFV 遥感影像,对流域 0—10 cm 深度层土壤湿度的时空动态变化进行反演监测和分析。按前述同样的方法,得到 4 个时点的 0—10 cm 土壤湿度空间分布图(图 5)。

由图 5 可知,研究区土壤湿度较高的区域主要分布在沿河流两侧的乌什县、温宿县南部、阿瓦提县北部、 阿克苏市东部及阿拉尔市中部等流域中上游地区,该区域是阿克苏河流域主要的农业生产区,灌溉渠系密集, 且 6—8 月份为农作物的主要生长期,农田植被覆盖度高,土壤持水能力强,土壤湿度高且相对稳定,对这一类 土壤湿度相对稳定的流域中上游农田植被区,为提高水资源利用率,减少沟渠水系漫灌带来的水资源损失,农 业需水灌溉可采用滴灌措施;而乌什县北部、温宿县和阿克苏市东部、阿瓦提县西部和南部、柯坪县、沙雅县等 流域边缘及下游地区土壤湿度相对较低,且该地区土地利用类型大多为灌木林、荒草地和裸地,植被覆盖度 低,土壤湿度受地表蒸散发影响较大,时空变化相对强烈;对这类流域边缘及下游表层土壤湿度时空变化强烈 的非农业生产区,应加强人工防护林、生态林的种植与维护力度,防止进一步的土地荒漠化及天然林地、草地 的退化,从而保障阿克苏河流域的农业可持续发展和绿洲生态系统的健康运行。





对4个时点的表层土壤湿度的时空动态监测结果分析发现,阿克苏河流域表层土壤湿度空间格局稳定但随时间变化特征较为复杂,研究区降水稀少,主要依托区域完善的沟渠体系进行地表灌溉,因而以阿克苏河为轴线的绿洲农业核心区,土壤湿度保持在35%以上,特别是当人工开闸放水进行灌溉时,农田植被区的土壤湿度会明显增强;另外,在中国气象数据网(http://data.ema.en/)查阅2016年6—7月的全国24小时降水量分布图,发现2016年6月28日前后阿克苏河流域北部、2016年7月6—12日全流域尤其是11—12日阿拉尔、沙雅县等地区有过一次持续降水,尽管日降水量在几毫米,但对土壤湿度的影响还是较大的,7月22日反演的土壤湿度也明显增强,特别是阿拉尔、沙雅县的大部分区域,这也与植被指数估算土壤湿度存在5—10天

39卷

的延迟天数吻合<sup>[10]</sup>。

#### 4 讨论

目前关于区域土壤湿度的遥感反演研究中,采用 MODIS 数据和 Landsat TM/ETM 数据偏多,而 Landsat OLL/TIRS 系列数据的开放,为区域土壤水分监测提供了新的数据源<sup>[19]</sup>;GF-1 遥感卫星作为中国高分辨率对 地观测系统国家科技重大专项的首发星,其WFV 传感器具有 16 m 空间分辨率、800 km 幅宽、4 天覆盖周期的 特点,在农业监测与评估应用方面具有独特的优势<sup>[20]</sup>,使得在小尺度层次上进行大范围土壤湿度空间格局研 究成为可能。本研究在前人研究基础上尝试以 GF-1 WFV 和 Landsat8 OLI 两种高分辨率遥感影像为数据源,利用 PDI、WPDI、VAPDI 对阿克苏河流域进行不同深度层土壤湿度反演与动态监测,验证 GF-1 WFV 反演土 壤湿度的可行性和获取最适反演深度;而在获取区域土壤湿度后,可结合从水源到田间输配水的复杂过程构 建的流域水资源可达性模型和农作物种植格局、农作物灌溉定额等,提出格网化或灌区化的灌溉用水量的快 速测评技术,以协调灌区各分闸口的灌溉定额,对促进流域水资源的合理分配和高效利用具有较强的应用 前景。

本研究不同植被指数的反演结果表明,MPDI和 VAPDI 能够在一定程度上克服混合像元对土壤湿度光谱 信息的影响,反演的精度要比 PDI高,尤其是高植被覆盖度区,采用垂直植被指数(PVI)修正的 VAPDI 反演 精度最佳,这与杨学斌等学者<sup>[16]</sup>的 PDI、MPDI 与植被覆盖区实测土壤含水量的 R<sup>2</sup>分别为 0.37、0.5355 以及吴 春雷等学者<sup>[9]</sup>的 PDI、VAPDI 与裸土、麦茬、土豆、豇豆 4 种植被覆盖类型土壤实测含水率的 R<sup>2</sup>分别为 0.630、 0.504、0.571、0.543 和 0.599、0.523、0.602、0.585 的研究结论相似。这主要是由于 PDI 指数在构建拟合模型 时,将遥感影像中各像元反射率视为单一裸土反射率,忽视了混合像元的影响,土壤湿度信息区分能力较差, 因而从遥感机理上来说其反演结果的误差较大,主要适合于裸土或者植被稀疏的地区。而经*f*。和 PVI 修正的 MPDI 和 VAPDI 建立的土壤湿度反演模型,通过对遥感影像中的混合像元进行不同程度的分解,使用植被和 裸土像元二者的综合反射率进行拟合,就能更加精确地反演出表层土壤的湿度信息,反演结果更接近实测值, 也更适用于植被覆盖度较高的区域。PVI 在表征植被覆盖信息时能较好地消除土壤背景的影响,且相比*f*。不 易出现植被覆盖饱和现象,更能精确地表达植被覆盖信息,因此在高植被覆盖度区域,VAPDI 比 MPDI 更具有 优势。

在土壤-植被-大气系统中,土壤湿度的光谱信息不仅会受到植被覆盖的影响,还受大气状况、传感器差异、土壤背景等复杂环境因素的影响,因此在后续的研究中,还需要进一步对不同遥感传感器、不同气候区的 土壤湿度反演效果进行对比分析,提取合适的因子对现有土壤湿度反演指数进行修正,特别是融合温度等参 数进行协同反演,以提高模型的反演精度,从而找到一套适用范围广、精确度高的土壤湿度遥感反演方法。

#### 5 结论

1)对于 GF-1 WFV 和 Landsat8 OLI 遥感影像,PDI、MPDI 和 VAPDI 与研究区 0—10、10—20、20—30 cm 深度层的土壤湿度实测值之间均存在一定的线性负相关关系,其中与 0—10 cm 表层土壤湿度的相关性最强, 平均 R<sup>2</sup>达到了 0.68,表明基于光学遥感影像近红外和红光波段反射率构建的土壤湿度反演指数对近地表层 土壤湿度信息更敏感,但对地下较深层次的土壤湿度反演精度略低。

2)相比 PDI 指数模型, MPDI 与 VAPDI 反演精度更高, 同时具有快速、高效的特点; 受植被覆盖饱和的影响, 在高植被覆盖区宜采用 VAPDI。

3)两种遥感影像反演得到研究区表层土壤湿度空间分布图的总体格局一致,但空间分辨率较高的 GF-1 WFV 遥感影像的反演结果相比 Landsat8 OLI 更精细,得到土壤湿度空间分布结果更有层次性,能够反映出相 近地块土壤湿度的异质状况。

#### 参考文献(References):

[1] 张蕾,吕厚荃,王良宇,杨冰韵.中国土壤湿度的时空变化特征.地理学报,2016,71(9):1494-1508.

- [2] Petropoulos G P, Ireland G, Barrett B. Surface soil moisture retrievals from remote sensing: current status, products & future trends. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015, 83-84: 36-56.
- [3] Al-Bakri J, Suleiman A, Berg A. A comparison of two models to predict soil moisture from remote sensing data of RADARSAT II. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(11): 4851-4860.
- [4] 丁建丽,姚远.干旱区稀疏植被覆盖条件下地表土壤水分微波遥感估算.地理科学, 2013, 33(7): 837-843.
- [5] 姚远,丁建丽,雷磊,江红南,张芳,牛涛.干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性.生态学报,2013,33(17):5308-5319.
- [6] 董婷, 孟令奎, 张文. MODIS 短波红外水分胁迫指数及其在农业干旱监测中的适用性分析. 遥感学报, 2015, 19(2): 319-327.
- [7] 高中灵,郑小坡,孙越君,王建华.利用地表温度与 LAI 的新型土壤湿度监测方法.光谱学与光谱分析,2015,35(11):3129-3133.
- [8] 姚云军,秦其明,赵少华,袁蔚林.基于 MODIS 短波红外光谱特征的土壤含水量反演.红外与毫米波学报,2011,30(1):9-14,79-79.
- [9] 吴春雷,秦其明,李梅,张宁.基于光谱特征空间的农田植被区土壤湿度遥感监测.农业工程学报,2014,30(16):106-112.
- [10] 张月, 王鸿斌, 王一凡, 韩兴, 赵兰坡. 基于植被指数的藏北牧区土壤湿度反演. 农业工程学报, 2016, 32(6): 149-154.
- [11] 刘立文,张吴平,段永红,邢立新,陈圣波,赵敏. TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用. 生态学报, 2014, 34(13): 3704-3711.
- [12] 张翀, 雷田旺, 宋佃星. 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析. 生态学报, 2018, 38(6): 2128-2138.
- [13] 杨涛, 宫辉力, 李小娟, 赵文吉, 孟丹. 土壤水分遥感监测研究进展. 生态学报, 2010, 30(22): 6264-6277.
- [14] Brosinsky A, Lausch A, Doktor D, Salbach C, Merbach I, Gwillym-Margianto S, Pause M. Analysis of spectral vegetation signal characteristics as a function of soil moisture conditions using hyperspectral remote sensing. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2014, 42(2): 311-324.
- [15] Fang L, Hain C R, Zhan X W, Anderson M C. An inter-comparison of soil moisture data products from satellite remote sensing and a land surface model. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 48: 37-50.
- [16] 杨学斌,秦其明,姚云军,赵少华. PDI 与 MPDI 在内蒙古干旱监测中的应用和比较. 武汉大学学报, 2011, 36(2): 195-198.
- [17] Ghulam A, Qin Q M, Zhan Z M. Designing of the perpendicular drought index. Environmental Geology, 2007, 52(6); 1045-1052.
- [18] Ghulam A, Qin Q M, Teyip T, Li Z L. Modified perpendicular drought index (MPDI): A real-time drought monitoring method. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(2): 150-164.
- [19] 徐涵秋, 黄绍霖. Landsat 8 TIRS 热红外光谱数据定标准确性的分析. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(6): 1941-1948.
- [20] Zhou Q B, Yu Q Y, Liu J, Wu W B, Tang H J. Perspective of Chinese GF-1 high-resolution satellite data in agricultural remote sensing monitoring. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(2): 242-251.