

基于 MTVDI 与 DDI 二元回归模型对毛乌素沙地腹部土壤表层水分的研究

王思楠 李瑞平 韩 刚 田 鑫 王耀强 胡勇平

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要: 采用温度植被干旱指数法(MTVDI)与荒漠化指数法(DDI),利用2016年4月、9月的Landsat数据对毛乌素沙地腹部的土壤水分进行反演,并与实测的土壤水分进行对比检验,将所反演的土壤含水量图划分为4个等级,基于此分析了2个时期毛乌素沙地腹部的旱情土壤水分分布变化。结果显示:(1)4月份MTVDI指数与0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm土层土壤含水量的 R^2 值分别为0.656、0.646、0.637,整体高于9月份 R^2 值0.457、0.436、0.431,MTVDI能够较好地反映毛乌素沙地腹部土壤表层水分,且精度较高;(2)荒漠化指数DDI与MTVDI结合建立二元线性回归模型监测区域土层0~10 cm深度含水量,平均相对误差为10.95%;(3)4月份,研究区0~10 cm表层土壤含水量5%~10%区域占总面积的53.72%以上,达到了6 256 km²,含水量偏低,需要加强当地水资源管理。

关键词: 土壤表层水分; 温度植被干旱指数; 荒漠化指数; 水分变化; 毛乌素沙地

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

Study on the surface soil water in Mu Us Desert using binary regression models of MTVDI and DDI

WANG Si-nan, LI Rui-ping, HAN Gang, TIAN Xin, WANG Yao-qiang, HU Yong-ping

(Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia, Hohhot 010018, China)

Abstract: By using the Temperature Vegetation Drought Index (MTVDI) and Desertification Index (DDI) and two sets of Landsat data of Mu Us Desert collected from April and September of 2016, we modeled surface soil water status and compared with the measured soil moisture values. The simulated soil moisture content diagram was divided into four categories based on the analysis of surface soils water conditions in the two periods. The results showed that: (1) In April, the R^2 values of the MTVDI index values and the measured soil moisture contents from 0 to 10 cm, 10 to 20 cm and 20 to 30 cm were 0.656, 0.646 and 0.637, respectively, which were higher than the value of R^2 of 0.457, 0.436 and 0.431 respectively in September. (2) The combined modeling of DDI and MTVDI was a better binary linear regression model to monitor the water content of 0~10 cm in the soil, with an average relative error of 10.95%. (3) In April, low water content of 5%~10% of the soil moisture in topsoil was observed in about 6 256 km² of land, which accounted for over 53.72% of the total area. Therefore, local water resource management should be enhanced.

Keywords: surface soil water; MTVDI; DDI; moisture change; Mu Us Desert

土壤水分是监测土地退化的重要指标,同时也是衡量土壤干旱程度的重要指标^[1]。及时知晓土壤水分状况,可以了解旱情程度^[2]。遥感技术能够有效、大面积、实时动态地获取干旱地区旱情资料^[3-5],为各级政府与农业生产部门提供决策依据。

因此,利用遥感进行旱情监测是一个研究和应用的热点^[6-8]。作为同时与归一化植被指数(Normalized vegetation index, NDVI)和陆地表面温度(Land surface temperature, LST)相关的温度植被干旱指数(Temperature vegetation drought index, TVDI)可用于

收稿日期: 2018-06-11

修回日期: 2019-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51769021); 内蒙古自然科学基金(2015MS0513); 国家自然科学基金(51169016)

作者简介: 王思楠(1993-),男,山西朔州人,硕士,研究方向为水利遥感信息。E-mail: nmgnysdx2016@163.com

通信作者: 李瑞平(1973-),男,呼和浩特人,博士,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉与农业水利信息技术研究。E-mail: nmglrp@163.com

干旱监测^[9-12],尤其是监测特定年内某一时期整个区域的相对干旱程度。

目前利用地表温度-植被指数(Ts-NDVI)特征空间进行旱情监测已取得一定的进展^[13],但是使用归一化植被指数容易造成红光饱和,背景的土壤噪声也在一定程度上损害了NDVI的空间一致性。鉴于此,利用改进的TVDI模型降低实际计算过程中的偏差,同时提高土壤水分反演计算的准确性就显得尤为重要。伍漫春等^[14]在此基础上采用土壤调节植被指数(Modified soil adjusted vegetation index,MSAVI)对其进行改进,证明地表温度-土壤调节植被指数(Ts-MSAVI)能够更好地反映区域土壤水分状况,是一种更有效的土壤水分监测方法^[15]。

虽然TVDI以及改进的MTVDI都可以较好地监测土壤水分,但是精度还不是很高。针对这一问题,本研究根据研究区的特点采用修正土壤调节植被指数MSAVI构成的MTVDI指数,并利用野外同步实测的土壤水分数据分析和比较不同土壤深度的监测性能,探讨荒漠化差值指数(Desertification difference index,DDI)对毛乌素沙地腹部土壤水分状况的监测精度的影响,能够对毛乌素沙地农牧业活动提供一定的指导,同时也为改善大尺度区域的气候及改善毛乌素沙地生态环境打下基础。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区为毛乌素沙地腹地的乌审旗,它位于鄂尔多斯高原西南部,处于蒙、陕、宁经济发展的“金三角”地带。东经108°17′~109°40′,北纬37°38′~39°23′,面积11 645 km²。其所处位置为年平均气温6.8℃,多年平均降水量350~400 mm,多年平均蒸发量2 443 mm,海拔一般在1 300~1 400 m的干旱区,生态环境脆弱,沙生植被是本地区植被主体。

1.2 数据来源

1.2.1 遥感数据 研究用的2016年4月21日和9月28日两期轨道号为128/33、128/34,覆盖乌审旗的Landsat8 OLI遥感数据由地理空间数据云提供。对Landsat影像数据进行辐射定标,利用Modtran 4模型进行大气校正以及裁剪镶嵌等一系列的处理。

1.2.2 土壤含水量数据 参照土地利用类型图、荒漠化程度分布图等资料,在2016年4月20日、21日与9月27日、28日借助手持GPS布设了23个样区(图1),每个样区中包含5个子样点A1~A5共5组(1 km×1 km像元,如图2)共计115个子样点,重复0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm的土层深度,逐

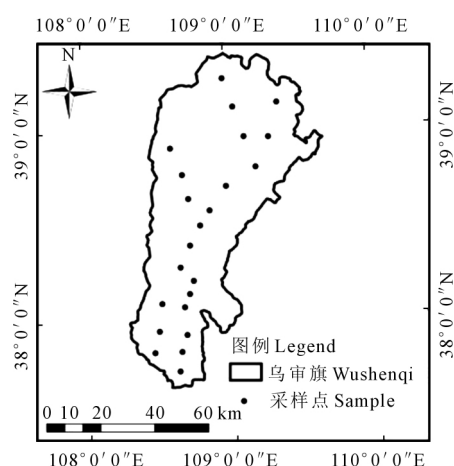


图1 采样点分布

Fig.1 Sampling site distribution

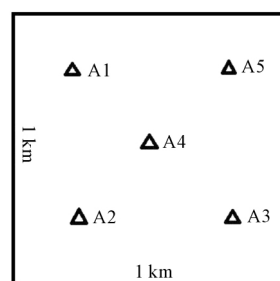


图2 子样点采样设计

Fig.2 Sampling design at each site

点用土钻采集样品,并刮去样本点土壤表层的浮土后迅速封装。在实验室利用烘干法计算土壤含水量数据。

1.3 数据处理

1.3.1 构建Albedo-NDVI特征空间 不同荒漠化信息相对应的地表反照率Albedo与归一化植被指数NDVI的特征空间中具有显著的线性关系,计算公式如下:

$$NDVI = \frac{\alpha_4 - \alpha_5}{\alpha_4 + \alpha_5} \quad (1)$$

$$A = 0.356\alpha_2 + 0.130\alpha_4 + 0.373\alpha_5 + 0.085\alpha_6 + 0.072\alpha_7 - 0.0018 \quad (2)$$

式中A为地表反照率, α_2 、 α_4 、 α_5 、 α_6 、 α_7 为经过大气校正后的第2、4、5、6、7波段的反射率。

为了进一步确定公式(4)中的K值,在研究区选择分布于不同沙漠化类型的300个点,并进行归一化处理,然后利用Albedo和NDVI两组数据进行回归拟合(如图3),得到相应的方程:

$$A = 0.8438 - 0.5531 \times NDVI \quad (3)$$

1.3.2 荒漠化差值指数提取 Verstrate等^[16]研究

发现在代表荒漠化变化趋势的垂直方向上划分 Albedo - NDVI 特征空间, 荒漠化差值指数 DDI 能够有效地区分出不同程度的荒漠化土地, 计算公式如下:

DDI = K × NDVI - Albedo
a × K = - 1 (4)

式中 a 为式 (3) 中垂线的斜率, 由此, 确定荒漠化差值指数 DDI 的最终表达式为:

DDI = 1.808 × NDVI - Albedo (5)

1.3.3 植被指数 - 地表温度特征空间 Sandholt 等^[17] 在研究 NDVI 和 Ts 的散点图时发现二者呈现三角形分布, 在此基础上, 前人还发现 NDVI 和 Ts 构成的特征空间可以间接表示土壤含水状况, 因此提出了温度植被干旱指数的概念。本文使用 TVDI 由改进型土壤调整植被指数和地表温度^[18] 计算得到, 其定义为公式:

MTVDI = (Ts - T_{smin}) / (T_{smax} - T_{smin}) (6)

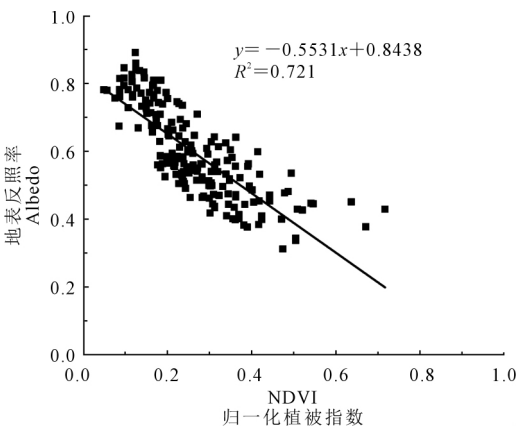


图 3 Albedo 与 NDVI 的回归分析
Fig.3 Albedo and NDVI regression analysis

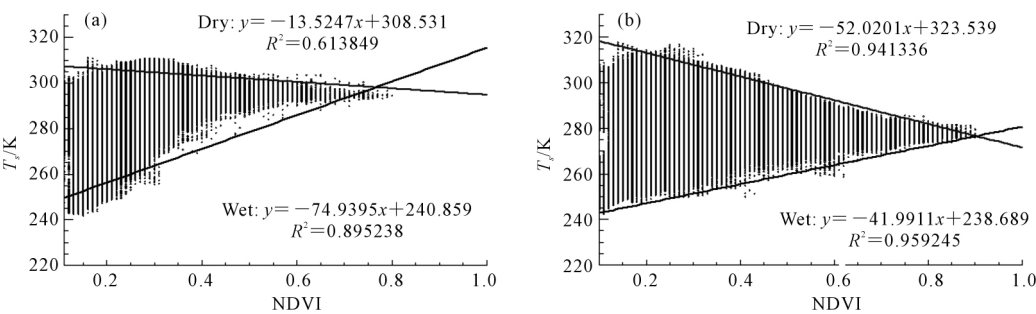


图 4 2016 年 4 月 (a)、9 月 (b) Landsat8 的 Ts-MSAVI 特征空间
Fig.4 Ts-MSAVI feature space of Landsat8 in April (a) and September (b) 2016

表 1 不同时相干湿边拟合结果

Table 1 Non-simultaneous wetting-edge and wetting-edge fitting

时间 Time	类别 Category	干边 Dry edge	R ²	湿边 Wet edge	R ²
2016-4-21	Landsat TVDI	y = -13.5247x + 308.531	0.61	y = -74.9395x + 240.859	0.89
2016-9-28	Landsat TVDI	y = -52.0201x + 323.539	0.94	y = -41.9911x + 238.689	0.96

T_{smax} = MSAVI a + b
T_{smin} = MSAVI c + d (7)

式中 Ts 为任意像元地表温度; T_{smax} 为干边上的地表温度; T_{smin} 为湿边上的地表温度。a、b、c、d 是干、湿边通过线性拟合的模型参数。

2 结果分析

2.1 基于 Landsat8 数据的 Ts 和 MSAVI 构建特征空间

通过 Landsat8 数据计算的植被指数对应地表温度的最大值和最小值, 构建毛乌素沙地腹部 2 期不同时期相的 Ts-MSAVI 特征空间。根据公式 (6) 并拟合干、湿边方程 (表 1)。结果表明, MSAVI 对应 Ts 的最大值和最小值呈近似线性关系, 随着植被指数的增大, 地表温度的最大值呈减小趋势, 地表温度的最小值呈增大趋势, 二者差值呈减小趋势。从图 4 可以看出 2 期不同时期相的散点图的形状相似^[19], 其中 9 月的干、湿边的 R² 都比 4 月的大。

2.2 Landsat8-MTVDI 与土壤水分相关性分析

利用野外实测采样点 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土层的土壤含水量值与 MTVDI 值进行回归分析用于反演精度验证。从图 5 和图 6 中可以看出不同遥感数据获取的不同月份 MTVDI 和土壤各层含水量具有一定的负相关。即 MTVDI 越高, 土壤含水量越低, 满足 MTVDI 指数值越大土壤水分越低的原理。4 月份 MTVDI 指数与 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土壤含水量的 R² 值分别为 0.656、0.646、0.637, 整体高于 9 月份 R² 值 0.457、0.436、0.431。不管是低植被覆盖度的 4 月还是高植被覆盖度的 9 月, 在 0~10 cm 深度的 R² 值均大于 10~20 cm、20~30 cm 深度的 R² 值。说明 MTVDI 能够较好地反映土壤表层的含水量状况。

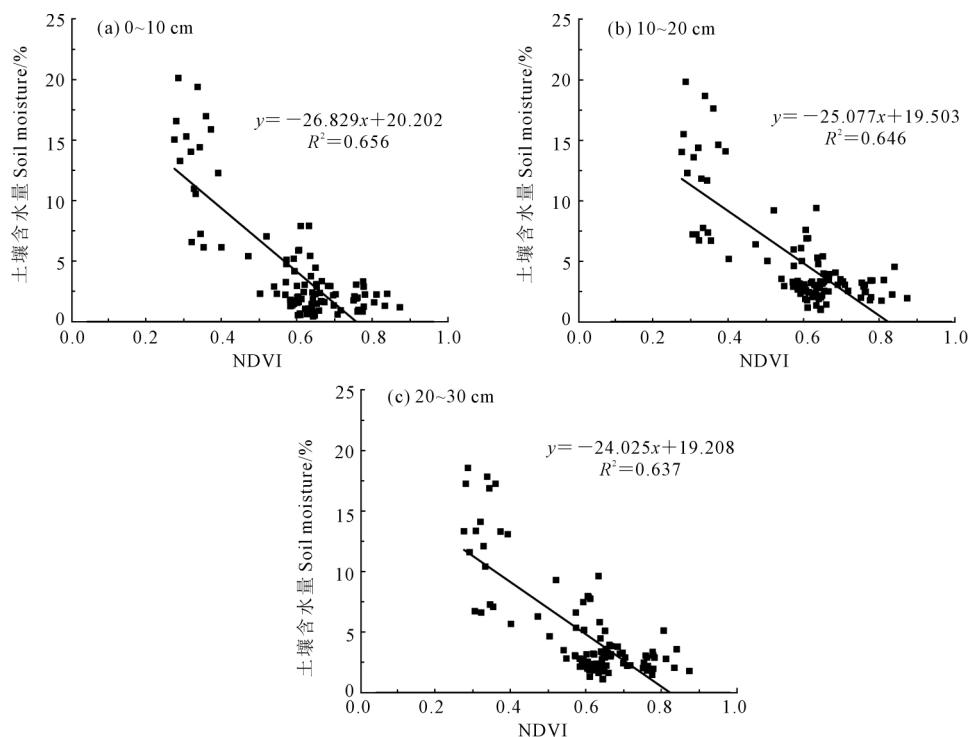


图 5 2016 年 4 月不同深度下土壤水分与 MTVDI 回归分析

Fig.5 The regression analysis of soil moisture and MTVDI at different depths in April 2016

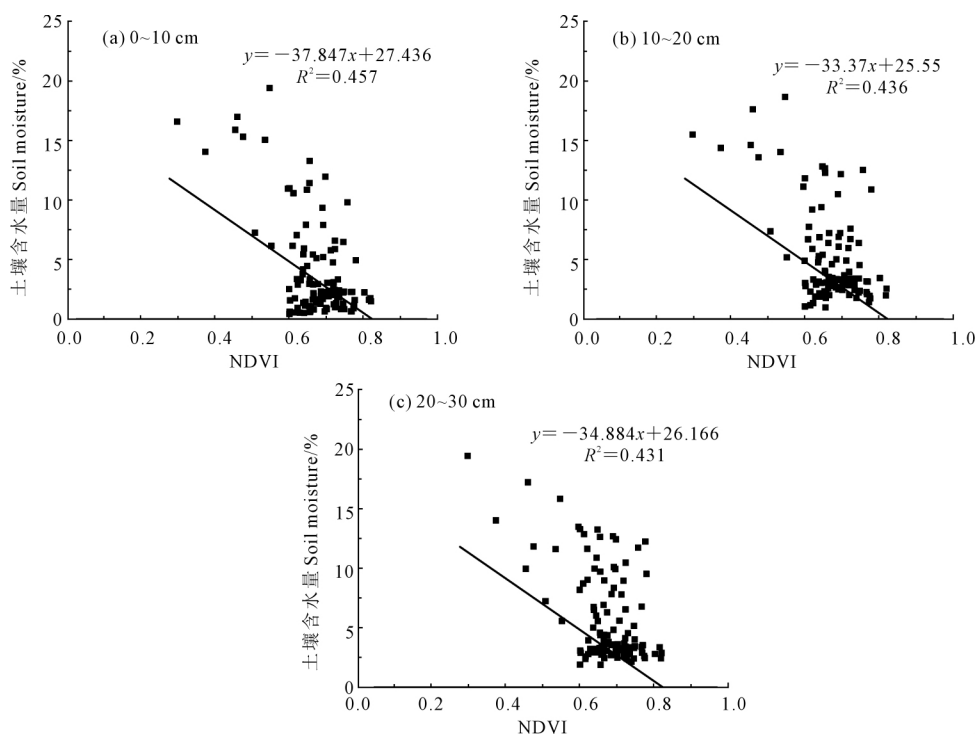


图 6 2016 年 9 月不同深度下土壤水分与 MTVDI 回归分析

Fig.6 The regression analysis of soil moisture and MTVDI at different depths in September 2016

2.3 基于 MTVDI 与 DDI 的二元线性回归干旱监测模型的分析

毛乌素沙地荒漠化程度的加剧 在土壤水分补给和散失的过程当中又受到土地利用、地貌、地形等多

种因素的影响。本研究考虑荒漠化因素条件下 利用 Landsat8 遥感数据提取 2016 年 4 月、9 月不同时相的 MTVDI 指数和 DDI 指数并与 0~10 cm 土层深度含水率建立二元线性监测模型($SMC = a \times MTVDI + b \times$

DDI+c) 利用野外实测土壤 0~10 cm 土层含水量进行验证。最后和单一使用 MTVDI 指数与 0~10 cm 土层深度含水量建立的一元线性监测模型($SMC=a \times MTVDI+c$) 进行精度对比分析 结果如表 2、3 所示。

分析表 2、3 可知,2016 年 2 个不同时相在 0~10 cm 土层深度的含水量的反演过程中,单独利用 MTVDI 监测含水量的相关系数分别为 0.810、0.676,相对误差分别为 12.93%、14.35%,平均相对误差为 13.64%。当引进了 DDI 指数影响因子之后,二元线性监测模型中相关系数分别为 0.842、0.734,相对误差分别为 10.26%、11.64%,平均相对误差为 10.95%。二元线性监测模型提高了反演土壤含水量的精度。说明在 2 个不同时相土壤表层 0~10 cm

深度的含水量受荒漠化信息的影响较大。二元线性回归模型监测 0~10 cm 土层深度的相对含水量空间分布,如图 7 所示。

由图 7 可知:上述 2 期土壤含水量反演图均可反映乌审旗当时的土壤含水量分布情况。分析表 4 可知,2016 年 2 期数据中可得到该区域 0~10 cm 表层土壤含水量在 4 月份 5%~10% 之间的区域,占总面积的 53.72% 以上,达到了 6 256 km²,含水量偏低。0~10 cm 表层土壤含水量在 9 月份 10%~15% 之间的区域,均占总面积的 51.55% 以上,达到了 6 003 km²,含水量偏高。与此同时根据研究区气象局 2016 年气象资料可知该年 9 月份降水偏高,与本文研究的结果基本一致。

表 2 MTVDI 模型对 0~10 cm 土层深度含水量的回归分析

Table 2 Regression analysis of water content in 0~10 cm soil depth using MTVDI model

时间 Time	土层深度 Soil depth/cm	样本数 Sample number	R	a	c	相对误差 MRE/%
4 月 April	0~10	80	0.810	-26.829	20.202	12.93
9 月 September	0~10	80	0.676	-37.847	27.436	14.35

注: a、c 为一元线性监测模型的系数。
Note “a” and “c” are the coefficients of a linear monitored model.

表 3 MTVDI 与 DDI 二元监测模型对 0~10 cm 深度含水量的回归分析

Table 3 MTVDI and DDI dual monitoring model for regression analysis of water content in 0~10 cm soil depth

时间 Time	土层深度 Soil depth/cm	样本数 Sample number	R	a	b	c	相对误差 MRE/%
4 月 April	0~10	80	0.842	-23.991	0.516	19.083	10.26
9 月 September	0~10	80	0.734	-36.497	-1.977	27.581	11.64

注: a、b、c 为二元线性监测模型的系数。
Note “a”, “b” and “c” are the coefficients of binary linear monitored model.

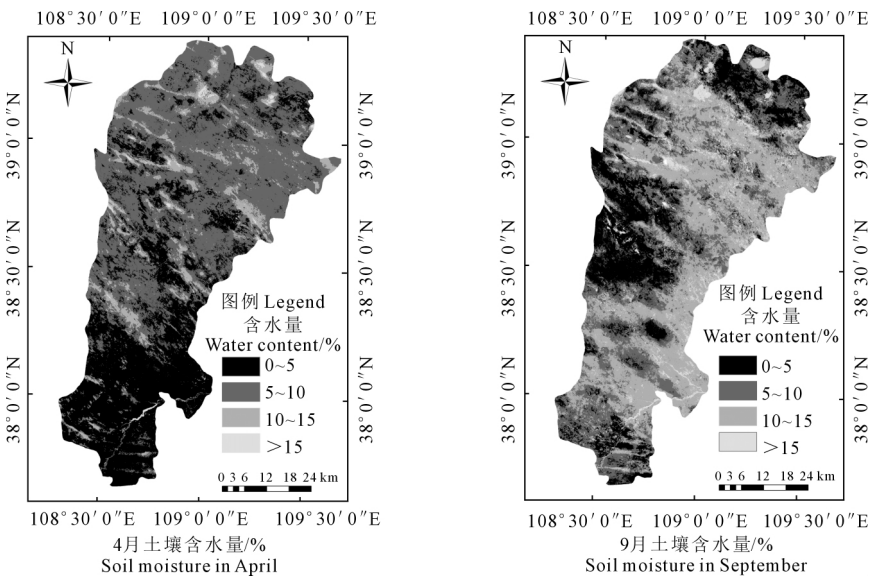


图 7 2016 年 MTVDI 与 DDI 二元监测模型反演 0~10 cm 深度含水量空间分布

Fig.7 Inversion of spatial distribution of water content in 0~10 cm soil depth in 2016 modeled by MTVDI and DDI

表 4 土壤表层含水量面积分布
Table 4 Distribution of surface water content in soil

日期 Date	面积及分布比例 Area and distribution ratio	土壤含水量 Soil moisture content / %				总计 Total
		0~5	5~10	10~15	>15	
2016-04-21	面积 Area/km ²	4941	6256	361	87	11645
	百分比 Ratio/%	42.43	53.72	3.10	0.75	100
2016-09-28	面积 Area/km ²	4283	1247	6003	112	11645
	百分比 Ratio/%	36.78	10.71	51.55	0.96	100

3 结论与讨论

本研究建立了毛乌素沙地腹部 MTVDI 与 DDI 二元线性监测模型与土壤表层 0~10 cm 含水率的关系模型,对该地区土壤表层 0~10 cm 含水率进行反演与精度分析并统计表层土壤含水率的面积分布。

1) 不同植被覆盖度下的 MTVDI 均能反映不同深度的土壤含水量,且呈现不同程度的负相关, R^2 值 4 月份整体高于 9 月份,在 0~10 cm 深度的 R^2 值均大于 10~20 cm、20~30 cm 深度的 R^2 值,并且都高于 0.4。说明 MTVDI 可以作为有效指示地表土壤水分状况的指标。

2) 荒漠化程度加剧,地表覆盖程度下降,地表能量与水分平衡发生变化,均可导致土壤水分发生改变。荒漠化指数 DDI 与 MTVDI 结合建立二元线性回归模型监测区域 0~10 cm 土层深度含水率,平均相对误差值要比单独 TVDI 小 2.69 %。

3) 通过二元线性回归监测模型反演的土壤表层含水量分布图发现:该区域 0~10 cm 表层土壤含水量在 4 月份 5%~10% 之间的区域,占总面积的 53.72% 以上,达到了 6256km²,含水量偏低;0~10 cm 表层土壤含水量在 9 月份 10%~15% 之间的区域,达到了 6 003 km²,均占总面积的 51.55% 以上,含水量偏高。

本研究在 MTVDI 指数的基础上,考虑了毛乌素沙地腹部荒漠化信息,建立 MTVDI 指数和 DDI 指数的二元线性回归监测模型,在一定程度上提高了 MTVDI 指数指示土壤水分的合理性。从另一个角度看,MTVDI 指数指示土壤水分的能力与 DDI 指数有很大关系,使用单一的 MTVDI 指数无法精确达到反映干旱特征的目的,这也促使干旱监测由单因素向多因素综合发展,综合多指数的干旱监测模型是研究复杂的干旱监测问题的新途径,在解决干旱监测的复杂问题中有着较大的应用潜力。本研究尚属可行性研究,但单期的影像不能说明研究结果的普遍性,在后续的研究中将会进一步考虑采用多期遥感数据做动态分析。

参 考 文 献:

[1] 杨秀海,卓嘎,罗布.基于 MODIS 数据的西北地区旱情监测[J].草业科学,2011,28(8):1420-1426.

[2] 温国涛,白建军,孙嵩松.基于时间序列遥感数据的陕西省 2004—2014 年干旱变化特征分析[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):221-229.

[3] 吴黎.基于温度植被干旱指数的黑龙江省旱情动态研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):276-282.

[4] 张瑶瑶,崔霞,宋清洁,等.基于不同下垫面的农业干旱遥感监测方法与发展前景[J].草业科学,2017,34(12):2416-2427.

[5] 王思楠,李瑞平,韩刚,等.基于遥感数据对毛乌素沙地腹部旱情等级的景观变化特征分析[J].干旱区地理,2018,41(5):1080-1087.

[6] 冯蜀青,殷青军,肖建设,等.基于温度植被旱情指数的青海高寒区干旱遥感动态监测研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(5):141-145.

[7] 杨曦,武建军,闫峰,等.基于地表温度-植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J].生态学报,2009,29(3):1205-1216.

[8] 韩刚,李瑞平,王思楠,等.基于多尺度遥感数据的荒漠化草原旱情监测及时空特征[J].江苏农业学报,2017,33(6):1301-1308.

[9] 陈斌,张学霞,华开,等.温度植被干旱指数 TVDI 在草原干旱监测中的应用研究[J].干旱区地理,2013,36(5):930-937.

[10] 刘英,岳辉,李遥,等.基于 MODIS 的河南省春旱遥感监测[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):218-223.

[11] 王思楠,李瑞平,韩刚,等.基于多源遥感数据的 TVDI 方法在荒漠草原旱情监测的应用[J].安徽农业大学学报,2017,44(3):458-464.

[12] 张喆,丁建丽,李鑫,等.TVDI 用于干旱区农业旱情监测的适宜性[J].中国沙漠,2015,35(1):220-227.

[13] 刘公英,申海凤,胡佳,等.基于 TVDI 指数的冬小麦旱情动态研究——以河北省邢台市为例[J].干旱地区农业研究,2015,33(4):227-232.

[14] 伍漫春,丁建丽,王高峰.基于地表温度-植被指数特征空间的区域土壤水分反演[J].中国沙漠,2012,32(1):148-154.

[15] 季国华,胡德勇,王兴玲,等.基于 Landsat8 数据和温度-植被指数的干旱监测[J].自然灾害学报,2016,25(2):43-52.

[16] Verstrate M M, Pinty B. The potential contribution of satellite remote sensing to the understanding of arid lands processes [J]. Vegetation, 1991, 91(1-2):59-72.

[17] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2-3):213-224.

[18] 贾志豪,李文娟,徐斌,等.陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J].国土资源遥感,2004,16(3):28-32.

[19] 蔡亮红,丁建丽,魏阳.基于多源数据的土壤水分反演及空间分异格局研究[J].土壤学报,2017,54(5):1057-1067.