

基于多源遥感数据的 TVDI 方法在荒漠草原旱情监测的应用

王思楠, 李瑞平*, 韩刚, 胡文, 田鑫

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探讨近年来广泛使用的低空间分辨率的 MODIS 数据以及高空间分辨率的 Landast 8 数据对同一地区的旱情状况, 选择内蒙古自治区干旱频发的乌审旗荒漠草原为研究区, 借助分裂窗算法反演地表温度 (T_s), 获取归一化植被指数 ($NDVI$), 建立温度植被干旱指数 (TVDI) 的干旱监测模型, 分别反演 MODIS-TVDI 和 Landast8-TVDI, 并与同期野外实测的不同深度土壤含水量进行回归分析。结果发现, 基于 MODIS 和 Landast8 2 种遥感数据计算得到的 TVDI 与各层的土壤水分线性相关显著, 两者都能表征地表的干旱分布, 且 Landast8-TVDI 与各层土壤含水量的相关性大于 MODIS-TVDI 与各层土壤含水量的相关性, 其中 0~10 cm 表层土壤含水量的相关性要好于 0~20 cm、0~30 cm 的相关性。因此 Landast8-TVDI 能够更好地反映乌审旗荒漠草原的土壤水分状况, 更适宜于旱情监测。

关键词: 多源遥感数据; 温度植被干旱指数; 土壤含水量; 荒漠草原

中图分类号: TP79; S155.47

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)03-0458-07

Application of the multi-source remote sensing data-based TVDI method in monitoring desert grassland drought

WANG Sinan, LI Ruiping, HAN Gang, HU Wen, TIAN Xin

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract: An investigation of the drought condition was conducted in Wushen County Desert Grassland, a drought prone region of the Inner Mongolia Autonomous Regions using the MODIS data with low spatial resolution and the Landast 8 data with high spatial resolution. With a drought monitoring model that was built on temperature vegetation drought index (TVDI) in the split window algorithm for retrieving land surface temperature (T_s) and the normalized difference vegetation index ($NDVI$), the inversion of MODIS-TVDI and Landast8-TVDI were conducted and a regression analysis was made with the measured soil moisture in different depths. The results showed that the linear correlation was significant between soil the moisture in different layers and the TVDI calculated from two remote sensing data of MODIS and Landast8. Both of them could characterize the drought distribution in the land surface. Besides, the correlation between Landast8-TVDI and the soil moisture of each layer was greater than that between MODIS-TVDI and the soil moisture. Of which, the correlation in the surface layer of 0-10 cm was better than that in the layer of 0-20 and 0-30 cm. Therefore, Landast8-TVDI could better reflect the status of soil moisture in the desert grassland and is more suitable for drought monitoring.

Key words: multi-source remote sensing data; temperature vegetation drought index; soil water content; desert grassland

干旱是一种水量相对亏缺的自然现象, 频发于各个历史时期, 是影响内蒙古草地畜牧业生产的主要灾害之一, 主要表现在牧草和畜产品减少、草地

退化和荒漠化加剧、地下水位下降和生态环境遭到严重威胁。常规的监测方法无法实现大面积、动态监测, 而且费时、费力。遥感技术能够有效、大面

收稿日期: 2016-10-25

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金 (2015MS0513), 内蒙古自治区科技计划项目 (20140153) 和内蒙古自治区水利科技项目 (NSK201403) 共同资助。

作者简介: 王思楠, 硕士研究生。E-mail: nmgnxdx2016@163.com

* 通信作者: 李瑞平, 博士, 教授。E-mail: nmglrp@163.com

积且实时动态地获取干旱地区旱情资料, 并且解决了常规方法存在的问题, 随着遥感传感器的发展, 利用不同传感器获取的数据, 计算各种能直接或间接反映干旱情况的参数或指标, 已形成了很多种方法。基于特征空间的温度植被旱情指数 (temperature vegetation dryness index, TVDI) 综合了植被指数和地表温度的特点, 是目前应用最广泛的遥感干旱指数之一^[1-8]。

温度植被干旱指数方法精度高, 简单易行。20 世纪 90 年代初, Price^[9]、Carlson 等^[10]研究发现利用遥感资料获得的地表温度与植被指数所构成的散点分布图呈三角形, Nemani 等^[11]通过理论分析认为地表温度-植被指数特征空间呈梯形分布。2002 年 Sandholt 等^[12]提出温度植被干旱指数, 对特征空间进行了较为明晰的诠释和解析。赵杰鹏等^[13]利用云掩膜矫正和多天平均温度合成减少云的影响并消除地形的影响, 改进了 Sandholt 的 TVDI 土壤水分反演模型, 发现改进的模型对土壤水分估算显著提高。伍漫春等^[14]针对目前西北地区广泛存在的农业干旱问题, 选取 TM 影像, 应用土壤调整植被指数 (modified soil adjusted vegetation index, MSAVI) 构建 Ts/MSAVI 特征空间, 结果表明 MTVDI 模型能够较好地反映区域土壤水分状况。张喆等^[15]针对植被指数对植被状况的敏感性, 得出 TVDI 在不同季节下针对不同植被覆盖情况, 土壤水分的反演效果不同。如今综合利用多源遥感数据反演土壤湿度成为研究的一个主要方向^[16]。张友静等^[17]综合利用 TM、MODIS 和 ENVISATASAR 影像数据, 采用水云模型对北京郊区的农田土壤水分进行研究, 计算得到的土壤水分与实测数据的相关系数达到了 0.9。屈创^[18]利用 Landsat ETM+、ASTER2 种遥感数据采用温度植被干旱指数法反演白龙江流域不同土壤深度的土壤水分, 并对反演结果进行精度对比。结果表明, 基于 Landsat ETM+ 数据反演得到的土壤水分结果精度较高。王继燕^[19]利用 MODIS 和 TM 数据探讨了干旱区小流域尺度土壤水分的反演方法, 通过分别比较基于不同数据源 TVDI 的模型, 发现高空间分辨率的 TM 遥感数据具有较高的反演结果。由于 TVDI 方法的研究主要是针对平原、山区、沙漠绿洲和草原等, 较多是利用单一类型遥感数据进行旱情监测的应用研究, 所以本研究以 MODIS 和 Landast OLI 数据为基础, 分析比较荒漠草原区植被指数 *NDVI* 与地表温度 (T_s) 构成的特征空间, 利用野外实测的数据进行验证, 同时探讨了植被指数和地表温度构成的 TVDI 与土壤含水量数据的关

系, 并且以 TVDI 为基础分析了研究区的旱情分布状况。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

乌审旗位于鄂尔多斯高原西南部, 毛乌素沙地腹地, 处于蒙、陕、宁经济发展的“金三角”地带, 素有“沙漠中的草原, 牛羊背上的城市”的美称。37°38'~39°23'N、108°17'~109°40'E, 面积 11 645 km²。整体地势由西北向东南平缓倾斜, 平均海拔 1 300 m, 年降水量 300~400 mm, 多年平均蒸发量 2 443 mm, 属温带极端大陆性半干旱气候。植被以荒漠草原为主, 是草原植被中最干旱的一类草原, 生态环境十分脆弱, 在长期的自然和人为的因素综合干扰下将面临更大的挑战。



图 1 研究区地理位置和采样点分布

Figure 1 Geographical location of the study area and distribution of sample points

1.2 数据源与处理

研究用的影像数据由美国航空航天局 (NASA) 获取的 2014 年 4 月 22 日和 2015 年 9 月 25 日 2 期覆盖乌审旗的 MODIS L1B 影像数据以及相近时间美国地质调查局 (USGS) 获取的 Landsat 8 OLI/TIRS 影像数据。2 期影像都选择在与野外数据同步采集的晴空无云或者少云成像质量相对好的天气情况。同时利用 ENVI 软件对 MODIS 影像进行辐射校正、几何校正、投影转换、矢量裁剪、去 bow-tie 效应和云检测, 对 Landsat 8 OLI/TIRS 图像进行辐射定

标、利用 Modtran 4 模型进行大气校正和几何精纠正等一系列的处理。

2 研究方法

2.1 植被指数

植被指数是利用卫星不同波段探测数据组合而成,能反映植物生长状况的指数。植被生长好时,NDVI 值较大,而干旱导致植被缺水时,NDVI 值会降低,从而 NDVI 的波动可以用于表征指示干旱程度。归一化植被指数具体计算公式如下:

$$NDVI=(NIR-R)/(NIR+R) \quad (1)$$

式中: NIR 为近红外波段; R 为红波段。

2.2 地表温度

现有分裂窗算法中^[20], Qin 等^[21]提出的 2 因素反演模型仅需要 2 个基本参数,并保持很高的反演精度,满足干旱监测所需要的温度快速反演要求,因而是近年来广泛使用提取 MODIS 地表温度的方法之一。由于 Landsat8 TIRS 的 2 个热红外通道,分别是 10 和 11 波段,其中心波长分别为 10.6 μm 以及 12 μm ,理论上更加完善、严密,精度更高,与 MODIS 数据的 31、32 波段非常接近。故也采用劈窗算法提取温度,具体计算公式如下:

$$T_s=A_0+A_1T_1+A_2T_2 \quad (2)$$

式中: T_s 为地表温度, A_0 、 A_1 、 A_2 为分裂窗算法的系数。 T_1 、 T_2 分别是由 Planck 函数求解出的亮度温度。简化公式如下:

$$T_i=K_{i2}/\ln(1+K_{i1}/I_i) \quad (3)$$

式中: K_{i1} , K_{i2} 取值如表 1。

表 1 K_{i1} 和 K_{i2} 取值
Table 1 K_{i1} and K_{i2} values

传感器 Sensor	波段 Band	K_{i1} /m ² ·sr ⁻¹ · μm^{-1}	K_{i2} /Kelvin
MODIS	$i=31$	729.541636	1 304.413871
	$i=32$	474.684780	1 196.978785
Landsat8 TIRS	$i=10$	774.89	1 321.08
	$i=11$	480.89	1 201.14

确定亮度温度以后,由覃志豪等^[22]提出的 NDVI 法分别确定 2 种遥感数据的地表比辐射率,同时根据影像获取时的状况与乌审旗所处地理位置,选取 Modtran4 模型采用中纬度夏季的大气模式进行模拟大气透过率。将这些关键参数带入公式(2)便可提取地表温度。

2.3 植被指数—地表温度特征空间

Price^[9]和 Carlson 等^[10]研究发现,如果研究区植被覆盖包含从裸土到全覆盖,土壤湿度变化情况

较大时,以遥感数据反演的 NDVI 和 T_s 为横纵坐标的散点图呈三角形。Sandholt 等^[12]在 NDVI 和 T_s 的散点图呈现三角形分布特征的研究基础上发现,NDVI 和 T_s 构成的特征空间有一系列的土壤湿度等值线,两者之间的斜率与土壤水分呈负相关,并且是特征空间重要的统计特征。用于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。TVDI 由遥感图像提取的植被指数和地表温度计算得到,其定义为公式:

$$TVDI=(T_s-T_{s\min}/T_{s\max}-T_{s\min}) \quad (4)$$

式中: T_s 为任意像元地表温度; $T_{s\max}$ 为干边上的地表温度,即为研究区域内具有某个 NDVI 值像元的最高地表温度。 $T_{s\min}$ 为湿边上的地表温度。即为研究区域内具有某个 NDVI 值像元的最低地表温度。

“干湿边”可以利用下式计算。

$$T_{s\max}=VI a + b \quad T_{s\min}=VI c + d \quad (5)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 是干、湿边通过线性拟合的模型参数。植被覆盖区像元 TVDI 的取值理论上应在 0 和 1 之间。在干边上 TVDI=1,在湿边上 TVDI=0。TVDI 值越大,土壤湿度越低,表明土壤缺水越严重,干旱程度越高;反之干旱程度越低。因此可以利用 TVDI 对荒漠草原的干旱状况进行遥感监测。

3 结果与分析

3.1 Landsat 8 和 MODIS 数据的 T_s 和 NDVI 构建特征空间

通过 Landsat 8 和 MODIS L1B 2 种不同传感器数据,提取植被指数对应地表温度的最大值和最小值,构建荒漠草原 2 期不同影像的 T_s -NDVI 特征空间。当 NDVI 较大或较小时,像元数通常较少,这些像元的土壤湿度处于某种状态,难以保证此 NDVI 下存在由干到湿的不同状态,两端像元并不是真正的干湿边,应筛选并去除那些不满足条件的异常值。根据公式(5)拟合干、湿边方程。结果(表 2)表明 NDVI 对应 T_s 的最大值和最小值呈近似线性关系,随着植被指数的增大,乌审旗荒漠草原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 2 和图 3 可以看出两期不同传感器影像数据的散点图的形状基本相似,都类似三角形^[23]。从而证明,TVDI 法可以用于大范围区域的土壤湿度反演。

3.2 Landsat 8-TVDI 和 MODIS-TVDI 与土壤水分相关性比较

根据表 2 中的干、湿边方程,利用公式(4),便可求得研究区基于 Landsat 8 OLI/TIRS 数据和

MODIS 数据的 TVDI 旱情空间分布数据。

利用手持 GPS 野外定位获取 24 个采样点的经纬度, 每个采样点 (1 km×1 km 像元, 如图 4) 包含 5 个子样点 A1~A5 共 5 组重复的 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土壤样本。在 24 个采样点中, 每个采样点的 5 组重复, 其含水量偏差极大, 用单

点土壤含水量与对应像元的温度植被干旱指数值进行分析必然存在很大误差。故可将按上述选取原则获得采样点的 5 组不同深度的土壤含水量值, 与不同遥感数据反演 TVDI 数据进行回归分析, 以减小混合像元、土壤含水率空间变异等因素的影响。

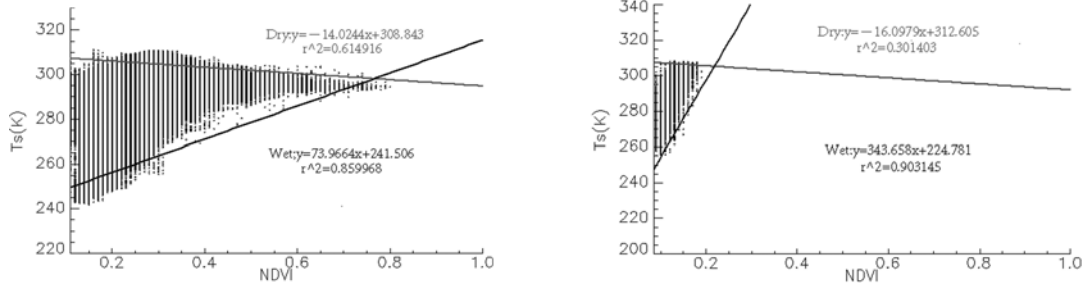


图 2 2015 年 4 月 Landast8 和 MODIS 的 T_s -NDVI 特征空间
Figure 2 Feature space Landast8 and MODIS of T_s -NDVI in April 2015

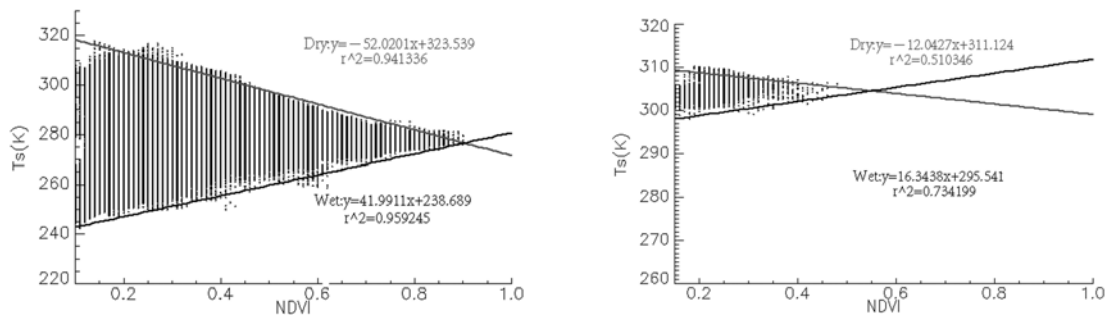


图 3 2015 年 9 月 Landast8 和 MODIS 的 T_s -NDVI 特征空间
Figure 3 Feature space of Landast8 and MODIS of T_s -NDVI in September 2015

表 2 不同遥感数据干湿边拟合结果

Table 2 Different remote sensing data the edge fitting results

日期 Date	类别 Category	干边 Dry edge	R^2	湿边 Wet edge	R^2
2015-04-22	MODIS TVDI	$-16.0979x + 312.605$	0.30	$343.658x + 224.781$	0.90
2015-04-19	Landast TVDI	$-14.0224x + 308.843$	0.61	$73.9664x + 241.506$	0.86
2015-09-25	MODIS TVDI	$-12.0427x + 311.124$	0.51	$16.3438x + 295.541$	0.73
2015-09-26	Landast TVDI	$-52.0201x + 323.539$	0.94	$41.9911x + 238.689$	0.96

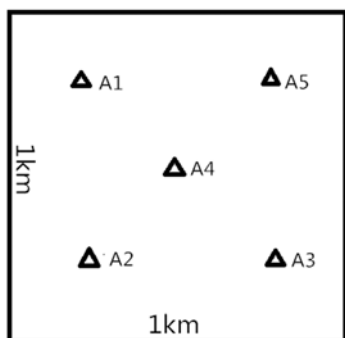


图 4 子样点采样设计
Figure 4 Sampling design of the sample point

从图 5 和图 6 中不同遥感数据获取的不同月份 TVDI 和土壤各层含水量可以看出具有一定的负相关关系。即 TVDI 越高, 土壤含水量越低, 满足 TVDI 指数值越和 1 相近土壤水分越干旱的原理。从相关性分析的结果可以看出, 对于 Landast OLI 和 MODIS2 种数据, 3 个土壤深度的 TVDI 线性回归方程都通过了 0.05 的显著性检验, 具有统计学意义, 说明 3 个深度的土壤水分和 TVDI 指数在 0.05 的置信度水平上都表现出很强的相关性。同时, 在 0~10 cm 土层深度, TVDI 指数和土壤含水量实测值的

相关性均高于 0~20 cm、0~30 cm 土层深度。说明对于 Landast OLI 和 MODIS2 种遥感数据计算的 TVDI 与研究区 0~10 cm、0~20 cm 和 0~30 cm 土壤深度的含水量随着土壤深度的增加，相关性降低。说明 2 种遥感数据计算 TVDI 对表层土壤水分较敏感，与此同时 TVDI 作为旱情监测一个重要指

标具有一定的科学性。但是通过比较 2 种数据的回归结果发现，基于 Landast OLI 遥感数据计算的 TVDI 和土壤含水量的相关性比基于 MODIS 数据计算的 TVDI 和土壤含水量的相关性要高。因此高空间分辨率的遥感数据的 $T_s/NDVI$ 特征空间更适用于荒漠草原旱情监测。

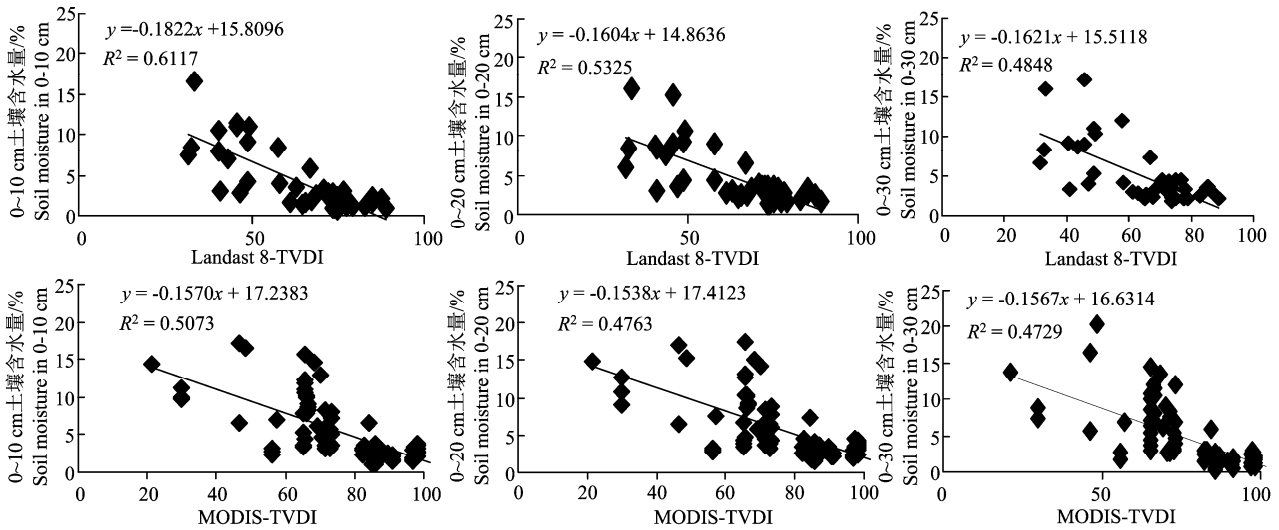


图 5 2015 年 4 月不同深度的土壤水分与 TVDI 回归分析

Figure 5 Regression analysis of soil moisture in different depth and TVDI in April 2015

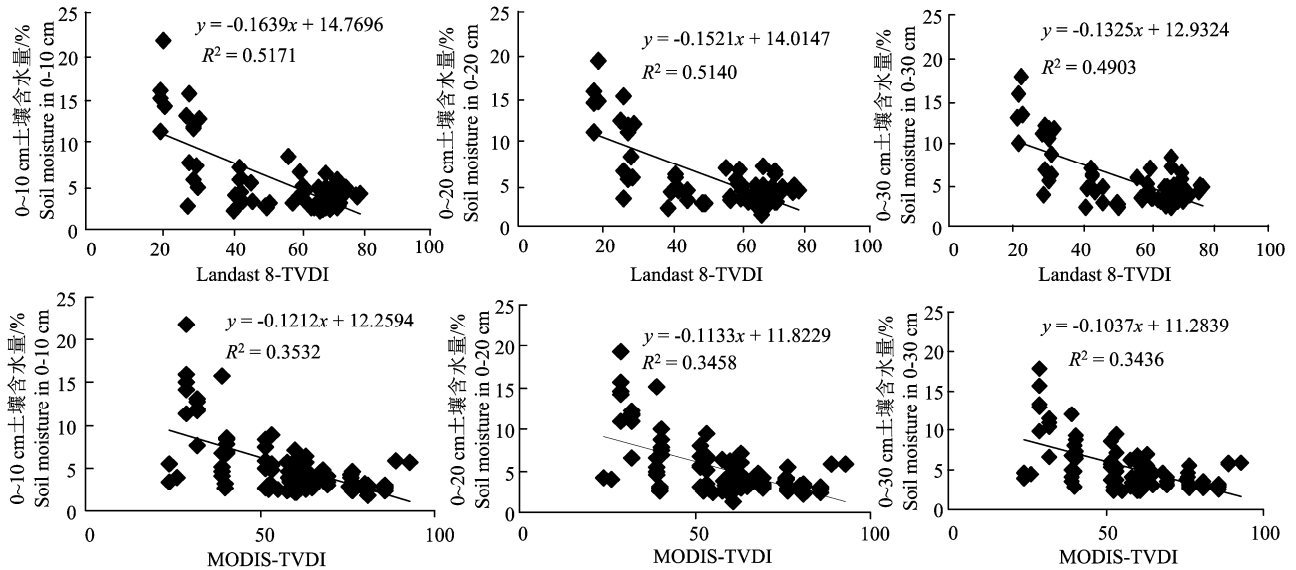


图 6 2015 年 9 月不同深度的土壤水分与 TVDI 回归分析

Figure 6 Regression analysis of soil moisture in different depth and TVDI in September 2015

3.3 验证

对于基于 Landsat 8 和 MODIS 遥感数据的 $T_s/NDVI$ 特征空间反演的土壤含水量与同期野外实测数据中随机抽取 3 个采样点的土壤含水量利用 SPSS 软件进行统计分析取平均相对误差和均方根误差这 2 种评价指标来进行定量分析验证精度。结

果如下表 3 所示。

对比 2015 年 4 月份和 9 月份在基于 Landast8 和 MODIS2 种遥感数据在同一土层深度的反演值，发现在 0~10 cm、0~20 cm 和 0~30 cm 3 个土层深度，基于 Landast8 数据的反演值的 *MRE* 和 *RMSE* 均小于基于 MODIS 数据反演的结果。同时在表层

0~10 cm 处, 2 种遥感数据的反演值的 *MRE* 和 *RMSE* 均小于 0~20 cm、0~30 cm 这 2 个土层深度, 其中在 4 月份基于 Landsat8 数据反演表层结果的 *MRE* 和 *RMSE* 分别为 18.34%、0.87; 在 9 月份基于 Landsat8 数据反演表层结果的 *MRE* 和 *RMSE* 分别

为 21.94%、1.24。不论在植被覆盖度比较低的 4 月, 还是植被覆盖度较高的 9 月, 都同时表明基于 Landsat8 数据反演得到的土壤水分结果更接近于实测值, 反演结果更准确且波动性更小。

表 3 2 种遥感数据不同土层深度的土壤水分精度检验

Table 3 Two kinds of remote sensing data accuracy inspection of soil moisture in different soil depth

日期 Date	数据类型 Data type	土层深度/cm Soil depth	平均相对误差/% <i>MRE</i>	均方根误差 <i>RMSE</i>
2015-04-19	Landsat8	0~10	18.34	0.87
		0~20	20.07	1.04
		0~30	21.96	1.21
2015-04-22	MODIS	0~10	21.43	1.36
		0~20	22.54	1.44
		0~30	23.02	1.51
2015-09-26	Landsat8	0~10	21.94	1.24
		0~20	22.05	1.33
		0~30	23.86	1.41
2015-09-25	MODIS	0~10	24.06	1.67
		0~20	24.78	1.73
		0~30	25.08	1.89

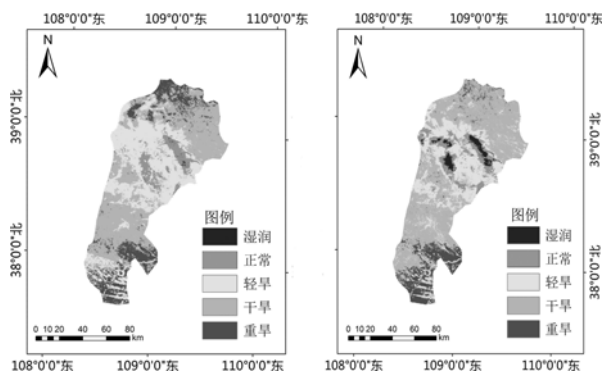


图 7 Landast8-TVDI 旱情等级

Figure 7 Grade of drought by Landast8-TVDI

3.4 荒漠草原旱情等级分布

为了更清晰的了解荒漠草原土壤水分的空间分布, 以高分辨率的 Landast 8-TVDI 值作为不同干旱分级指标, 将旱情划分为 5 级^[24], 分别为: 湿润

($0 < TVDI < 0.2$)、正常 ($0.2 < TVDI < 0.4$)、轻旱 ($0.4 < TVDI < 0.6$)、干旱 ($0.6 < TVDI < 0.8$) 和重旱 ($0.8 < TVDI < 1$)。利用 ENVI 中 Stats 功能统计各级旱情面积。

乌审旗荒漠草原在 4 月份作物生长初期, 植被覆盖度比较低、和 9 月份作物生长良好, 植被覆盖度较高。这 2 个月份的土壤水分状况总体表现以干旱为主, 轻旱为辅, 见表 4。

2015 年 4 月份到 9 月份湿润、正常和干旱的面积都有所增加, 轻旱和重旱的面积有所降低, 出现了“三增两减”的现象。其中“三增”中的干旱比例最明显为 6.7%, “两减”中的轻旱比例最明显为 7.15%。而且从 TVDI 等级图中可以看出, 乌审旗荒漠草原整体干旱, 生态环境严酷, 极不利于植被的生长。与此同时根据研究区气象局 2015 年气象资料可知该年降水偏少, 基本与本研究的结果基本一致。

表 4 干旱面积比例统计

Table 4 Drought area ratio statistics

日期 Date	干旱等级 Dry grade	湿润 Moist	正常 Normal	轻旱 Light drought	干旱 Drought	重旱 Heavy drought
2015-04-19	面积 Area	15.14	745.28	3 973.27	5 289.16	1 622.15
	比例% Ratio	0.13	6.4	34.12	45.42	13.93
2015-09-26	面积 Area	260.85	1 007.29	3 140.66	6 069.37	1 166.83
	比例% Ratio	2.24	8.65	26.97	52.12	10.02

4 讨论与结论

内蒙古草原干旱越来越严重,荒漠草原是草原向荒漠过渡的一类草原,是草原植被中最干旱的一类草原,严重地抑制了畜牧业经济的发展,因此对荒漠草原利用地表温度-植被指数特征空间来对该区域进行旱情监测是必要的,并且具有一定的科学依据,通过对研究区的应用研究得出下面结论。

①基于 Landast OLI 和 MODIS2 种不同遥感数据源,采用温度干旱植被指数法(TVDI),反演出乌审旗荒漠草原研究区2015年4月份和9月份不同土层深度的土壤含水量,与各层土壤实测含水量数据都有一定程度的相关性,其中在0~10 cm、0~20 cm和0~30 cm深度的土壤含水量反演值的MRE和RMSE均不大,且MRE和RMSE随着土壤深度的增加而增大,说明TVDI对表层土壤含水量监测较为敏感,能够较好地反映乌审旗荒漠草原表层的土壤含水量状况。

②基于 Landast OLI 和 MODIS2 种不同遥感数据源反演得到乌审旗荒漠草原0~10 cm、0~20 cm和0~30 cm不同深度的土壤含水量,对比分析后发现基于高分辨率的 Landast OLI-TVDI模型在精度上优于MODIS-TVDI,说明采用高空间分辨率的 Landast OLI 数据源可以较好的对乌审旗荒漠草原旱情监测研究。

③干旱不仅与高分辨率的遥感数据源和土壤表层含水量有关,还受土地覆被类型、地形等因素的影响。另外,在复杂地表和多变的气候环境条件下,遥感影像的部分像元数值质量较差,从而影响特征空间干湿边线性拟合的精度,在今后的工作中也要注意加强对无效像元分析剔除等方法的研究。

从以上结论可以看出,TVDI是一种适用于大尺度的简单有效且物理意义明确的旱情监测方法,具有快速、及时和宏观等优势。为了能更准确地反映干旱程度,今后不仅使用高分辨率的遥感数据,还将考虑其他各种因素,建立综合性的旱情监测模型,以便探讨出更加适合荒漠草原旱情的遥感监测方法。

参考文献:

- [1] 齐述华,王长耀,牛铮.利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J].遥感学报,2003,7(5):420-427.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 吴明业,张庆国,徐丽,等.基于 TVDI 指数的安徽省伏旱动态监测与时空演变的研究[J].安徽农业大学学报,2014,41(4):669-674.
- [6] 王莺,王劲松,姚玉璧,等.基于温度植被干旱指数的广东省旱情动态监测[J].草业学报,2014,23(2):98-107.
- [7] 韩刚,李瑞平,岳胜如,等.基于地表温度-植被指数特征空间的荒漠化草原表层土壤含水量反演[J].四川农业大学学报,2015,33(4):385-391.
- [8] 杨玲,杨艳昭.基于 TVDI 的西辽河流域土壤湿度时空格局及其影响因素[J].干旱区资源与环境,2016,30(2):76-81.
- [9] PRICE J C. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation[J]. Water Resour Res, 1980, 16(4): 787-795.
- [10] CARLSON T N, GILLIES R R, SCHMUGGE T J. An Interpretation of methodologies for indirect measurement of soilwater content [J]. Agr Forest Meteorol, 1995, 77(3): 191-205.
- [11] NEMANI R R, RUNNING S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data[J]. J Appl Meteorol, 1989, 28(4): 276-284.
- [12] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J].Remote Sens Environ, 2002, 79(2): 213-224.
- [13] 赵杰鹏,张显峰,廖春华,等.基于 TVDI 的大范围干旱区土壤水分遥感反演模型研究[J].遥感技术与应用,2011,26(6):742-750.
- [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] 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.
- [16] 孙雷刚.多源遥感在土壤水分定量反演中应用概述[J].科技资讯,2012(15):1.
- [17] 张友静,王军战,鲍艳松.多源遥感数据反演土壤水分方法[J].水科学进展,2010,21(2):222-228.
- [18] 屈创.基于多源遥感数据的白龙江流域土壤水分反演研究[D].兰州:兰州大学,2014.
- [19] 王继燕.基于 MODIS 和 TM 数据的干旱区流域尺度表层土壤水分研究[D].北京:中国科学院研究生院,2010.
- [20] KERR Y H, LAGOUARDE J P, IMBERNON J. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm[J]. Remote Sens Environ, 1992, 41(2/3): 197-209.
- [21] QIN Z, DALLY' OLMOS G, KARNIELI A, et al. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-AVHRR data[J]. J Geophys Res, 2001,106 (D19):22655-22670.
- [22] 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(3):28-32.
- [23] 张飞,田源,塔西甫拉提,等.基于 TVDI 的渭干河-库车河三角洲绿洲植被生长期干旱遥感监测研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(6):75-82.
- [24] 姚春生,张增祥,汪潇.使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J].遥感技术与应用,2004,19(6):473-478.