

基于 TVDI 的沁水煤田地表土壤水分时空演变分析

侯莉琴, 张 锦

(太原理工大学 矿业工程学院, 太原 030024)

摘 要:温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)是表征地表干旱的有效指标,其时空格局分析是地表干旱与全球环境变化相互影响下的地表覆被变化的研究内容。以山西沁水煤田为研究区,结合 2000—2010 年 MODND1M 和 MODLT1M 数据,构建了 NDVI-Ts 特征空间并对干湿边拟合分析。结果表明:近 11 年来,沁水煤田年平均 TVDI 均大于 0.4,且总体呈显著增加趋势,地表土壤湿度很低,部分区域处于中度和重度干旱之间。年度内,月平均 TVDI 处于 0.5~0.7 之间,且 7 月份 TVDI 存在明显波动。在空间上,研究区地表土壤湿度分布与地表植被分布基本一致。煤田南部和东部以干旱和极干旱为主,西北山区地带以正常或湿润为主,矿区密集区土壤湿度含量明显低于其他地区,矿井分布附近较其他区域地表干旱现象突出。

关键词:地表土壤水分; 植被指数; 温度植被干旱指数; 空间分布; 沁水煤田

中图分类号: S152.7; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0177-06

Spatiotemporal Variation of Surface Soil Moisture Based on Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) in Qinshui Coalfield

HOU Liqin, ZHANG Jin

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) is a valid indicator to reflect the surface drought. TVDI and the spatiotemporal variation of soil moisture are research topics of global environmental change and the surface soil drought. The variation affects the surface cover change. This method can be used to research the change of ecological environment in coal-field. Taking Qinshui coalfield, Shanxi Province, as an example, combining MODND1M and MODLT1M data of 2000—2010, we built NDVI-Ts feature space and analyzed the dry and wet edges. According to TVDI, the spatiotemporal and variation characteristics of soil moisture were studied. The results showed that the soil moisture of coal surface increased in the past 11 years, and in 2005 before and after the change was bigger. Within the year, monthly average the temperature vegetation dryness index was at around 0.5, and it was obvious fluctuation in July. In space, the distribution of soil moisture was consistent with vegetation distribution in the study area. The two characteristics were basically identical. Coalfield gives priority to arid and extremely arid in the north and east, the southern and eastern mountainous areas were given priority to arid and extreme drought. Simultaneously, in the northwest mountainous areas, soil moisture was mainly normal or moist. The content of soil moisture in mined-out areas was significantly lower than the other regions. The drought phenomenon near the mine is more prominent than distant region.

Keywords: soil moisture; normalized difference vegetation index (NDVI); temperature vegetation dryness index (TVDI); space distribution; Qinshui coalfield

土地退化是当前全球最严重的环境问题之一^[1-2],土壤水分含量是监测土地退化的重要指标。

山西地处黄土高原,近年来由于采矿行为导致大量水土流失和严重的土地荒漠化^[3-4],其中煤田内矿井大

多分布在植被覆盖度低下、气候干燥的生态脆弱区。开采活动势必会对土地造成扰动,使地表变得松散、裸露,在地面坡度大和表土松散的情况下,土壤侵蚀就更加严重。同时由于采煤严重破坏和扰动了土壤结构和组成,使土壤理化性状劣化,导致土壤粗化和旱化。同时低植被覆盖度使得植被涵养水源的功能丧失,加大了地表径流,加剧了水土流失,造成地力衰退,土地退化程度加大。因此监测矿区土地退化及干旱情况具有非常重要的意义。

利用遥感技术进行地表土壤水分监测可追溯到 20 世纪 70—80 年代^[5-7]。Watson 等^[8]利用热红外波段应用热模型进行土壤湿度遥感监测;Carlson^[9]利用 NOAA/AVHRR 资料对土壤有效水分和热惯量进行计算。Jakson 等^[10]综合利用可见光、近红外和热红外等数据研究叶片温度、土壤水分和植被指数之间的关系,提出了作物缺水指数(CWSI);应用 MODIS 的温度植被干旱分析反演干旱区干旱指数变化。Gillies 等^[11]利用遥感反演地表真实温度和 NDVI 三角方法估求土壤的有效水分;Sandholt 等^[12]提出了估测土壤表层水分状况的温度植被干旱指数(TVDI)。近年来,国内学者在土壤水分遥感监测方面也进行了大量研究,极大地推动了遥感土壤湿度的研究,其中应用 TVDI 反演不同区域土壤湿度及干旱程度,日益完善了遥感土壤水分监测研究^[13-20]。

本文基于 MODIS 时序数据反演地表土壤水分,并对山西省沁水煤田 2000—2010 年的地表温度植被干旱指数信息进行提取,形成长时间序列地表土壤水分分布图,并对其时空分布特征进行分析研究。

1 研究区概况及数据预处理

1.1 研究区概况

沁水煤田位于山西省中南部(35°11′—37°43′N, 111°55′—113°49′E),介于太行山、吕梁山、五台山、中条山之间,跨太原、阳泉、晋城等 20 余个市县,面积近 3 万 km²。该煤田内已建成阳泉、潞安、晋城等大型矿务局,地方煤矿在数百处以上,是中国无烟煤和炼焦煤最大的供应基地。煤田内含煤面积为 30 500.1 km²,资源量为 3 316.5 亿 t,区内产量约为 10 530 万 t。研究区地形地貌较为复杂,多以山区、丘陵为主,属温带大陆性干旱季风气候,年平均降雨量为 400~600 mm,且多集中 7—9 月份,植被覆盖度较低。

1.2 数据源及预处理

(1) 温度数据和 NDVI 数据。数据采用美国 LAADS 提供的 MOD09 GA 中的 MODND1M 中国 NDVI 月合成产品数据和 MOD11A1 中的

MODLT1M 中国地表温度月合成产品,空间分辨率为 1 km,时间序列为 2000—2010 年,共 11 a。由于温度数据在某些区域存在缺失,所以在裁剪时将缺失值默认为 NaN,不参与 TVDI 的计算。

根据分类需要利用 MODIS 数据处理软件 MRT (MODIS Reprojection Tools) 对研究区同一时相的所有 Tile 进行提取 NDVI 和地表温度,像素可信度数据以及 MODIS 四个波段的反射率数据,并对它们进行批量拼接、等面积投影转换等预处理,最后对拼接后的影像进行裁剪得到研究区数据。

(2) 沁水煤田矢量图,主要用于裁剪研究区范围,比例尺为 1:1 万。为了方便与其他数据叠加,将所有数据都处理为统一的空间投影坐标系。

(3) Landsat 遥感数据,由 2000—2010 年轨道号为 path125,row34 云量较少的 5—8 月的 TM/ETM 影像,主要用于精度验证。

1.3 模型选择

温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)是基于地表温度和植被指数而构建的表征地表干旱程度指数。植被指数与地表温度是遥感获取的地表物理参数。在总结分析了大量模型的基础上,选择 TVDI 模型反演研究区土壤水分,从而获得区内不同区域、不同时间段的土壤水分。其中 TVDI 模型为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}} \quad (1)$$

式中: T_s 为地表温度; T_{smax} 为相同 NVDI 值对应的最大地表温度; T_{smin} 为相同 NVDI 值对应的最小地表温度; TVDI 的值域为 (0, 1)。TVDI 越大,土壤湿度越低, TVDI 越小,土壤湿度越高。

而 T_{smax} , T_{smin} 是通过通过对 T_s —NDVI 特征空间的干、湿边模拟得到:

$$T_{smax} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad \text{干边方程} \quad (2)$$

$$T_{smin} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad \text{湿边方程} \quad (3)$$

式中: a_1 , b_1 是干边拟合方程的系数; a_2 , b_2 是湿边拟合方程的系数。

本研究应用 TVDI 反演 2000—2010 年山西沁水煤田的月土壤水分数据,并使用 ENVI 中的 SPEAR 工具跳转至 Landsat TM/ETM 影像对反演的结果进行精度验证。

2 结果与分析

2.1 沁水煤田同月期各年份 T_s —NDVI 特征空间及对应干湿边拟合分析

按照一定 NDVI 步长值提取同一 NDVI 对应下

的所有地表温度的最大值和最小值。应用 IDL 编程,从图 1 可以看出,每一期特征空间的干边和湿边都具备相似的形状。在 NDVI 大于某个值时,随着植被指数 NDVI 的增大,陆地表面温度的最大值在逐渐减小,同时陆地表面温度的最小值会出现缓慢升高,且陆地表面温度的最大值、最小值与 NDVI 呈近线性关系。

为了尽量减少植被对地表水分的影响,选取 2000—2006 年每年 4 月份的 T_s —NDVI 特征空间及对应干湿边进行拟合。研究发现,每期图像的特征空

间干湿边形状会有所变化,具体参见图 1,且干湿边存在明显的负相关性。由于是同期影响,每幅图像的最高和最低温度基本持平。当 $NDVI < 0$ 时,陆地表面是水体,此时土壤水分分为 100%,故本设计只分析 $NDVI > 0$ 的情况。本研究区内由于有较频繁的开采行为,地表形态的破坏现象较多,故矿区内地表土壤水分含量分布与地表形态破坏程度相对应,地表干旱程度较为严重,通过拟合干湿边方程,得到干边方程中 NDVI 与 T_{smax} 的平均 R^2 为 0.197 78,湿边方程中 NDVI 与 T_{smin} 的平均 R^2 为 0.099 76。

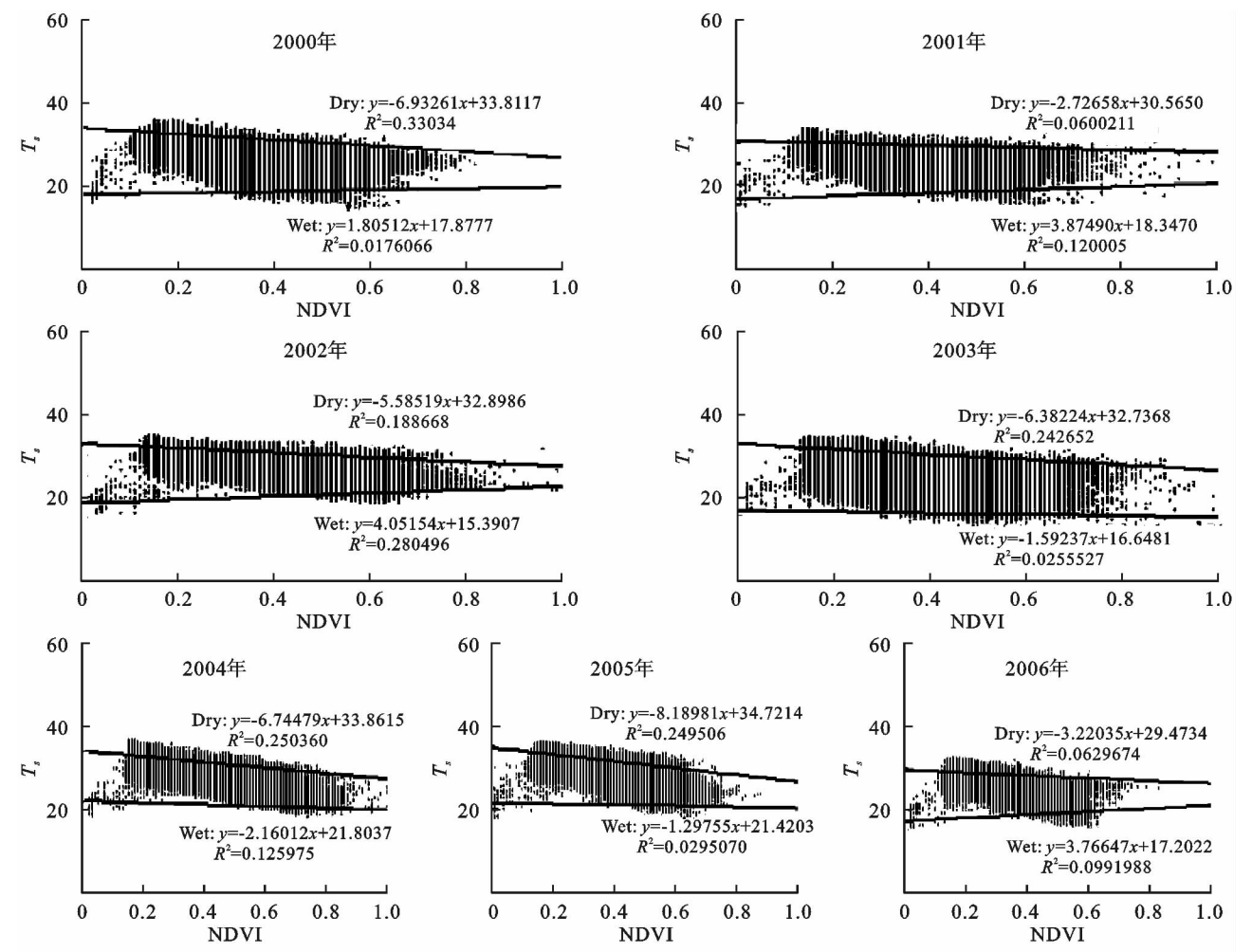


图 1 T_s —NDVI 特征空间及干湿边方程拟合

2.2 沁水煤田 TVDI 演变时序特征分析

通过对 T_s —TVDI 计算,应用特征空间拟合的干湿边方程,进行掩膜提取得到沁水煤田 2000—2010 年地表 TVDI 动态变化情况。选取表征地表土壤干旱差异较为明显的第二季度和第三季度进行对比分析,同时对 4 月、5 月、6 月进行月份间的详细对照,结果表明第三季度的 TVDI 处于 0.5 左右,而第二季度的 TDVI 为 0.6~0.7。即沁水煤田在春季植被稀疏时总体表现为中度干旱,而在夏季植被覆盖度增加时地表土壤水分含量有较为明显的改善,具有显

著的季节性变化特征。而这些特征与该区域季节性降雨的年内分布规律有关,即山西降水多集中于每年的 7—9 月,且每年 7 月的降雨量达到全年峰值,由此可见研究区地表水分含量和植被分布具有明显的物候年周期性。

从图 2 可看出 4 月、5 月、6 月份的 TVDI 值逐渐减小,即随着降水增加和植被覆盖度变大,地表土壤水含量逐渐增多,符合物候变化的客观规律;在图 3 中很明显看出,第 3 季度由于降水和植被覆盖度的变化导致其 TVDI 值明显低于第 2 季度;同时从图 2 和

图 3 可以看出,2000—2002 年整个煤田区的 TVDI 有轻微降低的趋势,但 2002 年后 TVDI 又会逐渐升高至平稳直至 2009 年后突然出现一个明显拐点。整体上看,近 11 年来,沁水煤田年平均 TVDI 均大于 0.4,且总体呈显著增加趋势,部分区域处于中度干旱和重度干旱之间,这也从侧面验证了沁水煤田位于山西东南部较为干燥的气候特征。

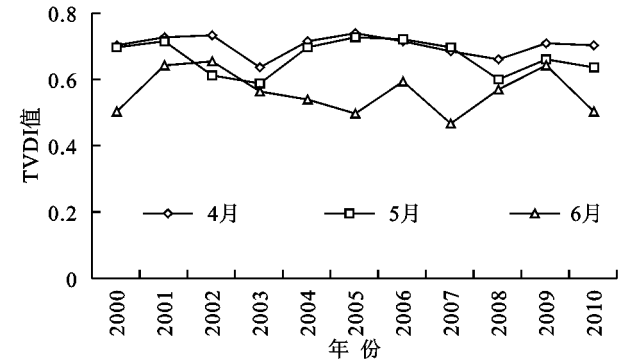


图 2 2000—2010 年年际沁水煤田地区 TVDI 均值变化

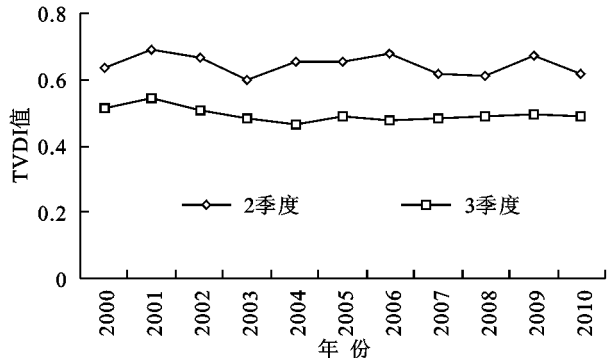


图 3 2000—2010 年第 2 季度和第 3 季度
沁水煤田地区 TVDI 均值变化

采用温度植被指数反演地表土壤水分,得到的土壤水分分为相对湿度,即其干旱或者湿润只是相对于本幅影像而言。通过掩膜提取,统计获取每幅影像 TVDI 的均值并进行重分类。从空间分析上看,研究区内地表土壤水分分布具有明显的连续性和聚集性。沁水煤田 TVDI 月均值见表 1。

表 1 沁水煤田地区 2000—2010 年每月 TVDI 平均值

年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2000	—	—	0.6693	0.7042	0.6945	0.5050	0.5159	0.5110	0.5188	0.6322	0.6308	0.6242
2001	0.3971	0.5639	0.7054	0.7264	0.7130	0.6396	0.5708	0.5051	0.5609	0.5991	0.5723	0.5546
2002	0.6460	0.5792	0.5817	0.7346	0.6129	0.6566	0.4896	0.5050	0.5177	0.5598	0.5819	0.4168
2003	0.4205	0.5297	0.6268	0.6366	0.5884	0.5626	0.4351	0.4727	0.5376	0.5952	0.4551	0.5465
2004	0.5467	0.5940	0.5257	0.7138	0.6986	0.5396	0.4178	0.4455	0.5209	0.6463	0.5978	0.4988
2005	0.4461	0.4645	0.6510	0.7375	0.7250	0.4987	0.5341	0.4429	0.4957	0.5535	0.5244	0.4525
2006	0.3640	0.5909	0.6484	0.7162	0.7187	0.5958	0.4134	0.5197	0.4969	0.6297	0.5705	0.4640
2007	0.5091	0.5756	0.5568	0.6829	0.6947	0.4695	0.4090	0.5057	0.5343	0.5436	0.5783	0.4955
2008	0.4524	0.4662	0.6105	0.6576	0.5973	0.5700	0.4555	0.5080	0.4960	0.5620	0.5897	0.5859
2009	0.4792	0.4804	0.6422	0.7081	0.6582	0.6401	0.4790	0.4987	0.5012	0.6619	0.4652	0.4499
2010	0.5091	0.4648	0.6306	0.7051	0.6350	0.5022	0.4510	0.4939	0.5138	0.4658	0.5773	0.5229

注:“—”表示该月无数据。

研究发现,沁水煤田的月平均植被干旱指数基本处于 0.5~0.7 之间,同时由于本研究采用的温度植被指数反演土壤水分,故测得土壤水分分为相对湿度。从表 1 明显可以看出 7 月份 TVDI 值存在一个波动,即 TVDI 值降低后又陡然升高,这是由于山西省的降水集中在 7 月份,所以土壤水含量由于降水作用会显著升高,伴随着 TVDI 值的变小;而 8 月、9 月份由于降水减弱,土壤水含量相对降低,则 TVDI 值会增大;10 月、11 月、12 月份降水基本不变,TVDI 处于相对正常分布状态。

2.3 沁水煤田土壤水分等级空间分布

以 TVDI 值作为土壤水分的等级分级指标^[21]将土壤水分划分为 5 级,分别是:极湿润($0<TVDI<0.2$)、湿润($0.2<TVDI<0.4$)、轻旱($0.4<TVDI<0.6$)、中旱($0.6<TVDI<0.8$)和重旱($0.8<TVDI<1$)。并进行重分类,得到的沁水煤田 2000—2010 年各月土壤水分等级分布图,以 2000—2008 年各年 4 月份为例,得到土壤水分分布图(附图 7)。

从空间分布上,研究区地表土壤水分分布状况与地表植被分布特征基本一致。在煤田南部和东部,其地形起伏较大,地表植被稀疏,地类多以沙地和疏林地为主,地表土壤水分多表现为中旱、重干旱状态。而西北山区多处于正常或湿润地带,也有少量的极湿润区域,该区域地形较为平缓,地貌为黄土丘陵区,雨量较为充沛,植被覆盖度也较为密集。结合五大煤业集团集中分布区域进行距离分析,结果表明在矿井分布区地表土壤水分明显低于周边其他区域,常年处于中度干旱和重度干旱状态。同时通过利用 SPEAR 工具选取分类图中 TVDI 值相差较大的点,并结合实地对照观察点其地表覆被物状况,在五大矿区周边选取 59 个矿井进行精度验证,以 2008 年、2010 年为例,精度分别达到了 83.2%和 87.1%,从而验证其干旱情况与 TVDI 值对应。经过选择多样点对比发现,该遥感反演方法具有一定的可靠性。从空间分析上看,研究区内土壤水分分布具有明显的连续性和聚集性。

表 2 五大典型矿区部分采样点信息

矿区名称	矿井	中心坐标	覆被类型	TDVI
太原煤气化集团	清河煤矿	112. 1110E, 38. 0070N	稀疏林地	0. 6
	峪口煤矿	112. 0790E, 37. 9750N	废弃工矿用地	0. 8
	嘉乐泉煤矿	112. 0950E, 37. 9880N	林地	0. 5
阳泉煤业集团	石港煤业	113. 4330E, 37. 1670N	耕地	0. 4
	兴峪煤业	113. 4410E, 38. 0140N	有明显塌陷的坡耕地	0. 5
	坪上煤业	113. 6540E, 37. 6440N	裸地	0. 7
汾西矿业集团	新阳煤业	111. 6700E, 37. 1410N	废弃工矿用地	0. 8
	新峪煤业	111. 6340E, 37. 0940N	梯田	0. 4
	新柳煤业	111. 5400E, 37. 0830N	坡耕地	0. 4
潞安矿业集团	郭庄煤业公司	112. 9400E, 36. 3310N	废弃工矿用地	0. 8
	王庄煤矿	113. 1070E, 35. 9520N	工业广场	0. 9
	余吾煤矿	112. 8700E, 36. 3660N	耕地	0. 4
晋城无烟煤集团	长平煤矿	112. 9080E, 35. 5680N	废弃工矿用地	0. 9
	寺河矿	112. 5370E, 35. 5970N	裸露地	0. 9
	成庄煤矿	112. 7320E, 35. 6100N	稀疏林地	0. 7

2.4 基于矿井的地表土壤 TVDI 的分布特征

在土壤水分等级分布图基础上,选取分布集中、对地表影响严重的五大典型矿井作为特征点进行多环缓冲分析,在定性、定量分析和评价的基础上选取距离矿井 15,30,45 km 作为分析距离,对影响区范围内 TVDI 分布情况进行分析,以各个矿井的影响范围(45 km)作为分析范围,并通过设置影响范围值进行分类,结果表明在 15 km 缓冲范围内,重度干旱的比例最大,其中在干旱较为严重的潞安矿区达到 93.1%,其次在 15~30 km,基本以中度干旱为主,而在矿区的 30~45 km 处,就基本以轻度干旱为主,甚至在地表土壤水分含量较多的汾西矿区轻度干旱占分析区域的 8.4%,详见表 3。

表 3 矿井影响范围干旱程度分布 %

矿井 名称	缓冲 距离/km	比例		
		重旱	中旱	轻旱
太原煤气化	0~15	33.0	17.3	15
	15~30	13	15.2	26.7
	30~45	9.6	4.3	11.6
汾西矿业	0~15	35.8	28	22.2
	15~30	31.8	24.3	11.9
	30~45	7.6	8.9	8.4
阳泉煤业	0~15	31.4	38.6	27.2
	15~30	14.6	36.1	38.4
	30~45	6.4	15.8	28.9
潞安矿业	0~15	93.1	6.9	0
	15~30	75.4	19.6	5
	30~45	53	34.2	12.8
晋城无烟煤	0~15	78.3	12.1	9.6
	15~30	68.7	23.8	7.5
	30~45	18.4	27.9	51.6

3 结论

(1) 应用空间分辨率为 1 km、时间分辨率为 1 月的 MODIS 中国合成产品,采用温度植被干旱指数

法反演了沁水煤田地区 2000—2010 年 130 期土壤水分数据,并使用 ENVI 中的 SPEAR 工具进行了精度验证。研究发现 TVDI 土壤干湿边方程的拟合较为准确,尤其是湿边方程的拟合,这说明 TVDI 能够作为土壤水含量指标具有合理性。可通过应用大尺度 MODIS 数据对大区域范围内的地表土壤水分分布进行研究。

(2) 根据每期数据的 TVDI 平均值对沁水煤田地区土壤水含量的月、季节、年度变化做趋势分析,得出本研究区 7 月份土壤水含量最高的结论与山西省降水规律相吻合,并发现 2001 年、2003 年、2007 年该区域地表 TVDI 发生较大的变化,同时在空间分布上在矿区比较集中的区域存在较为明显的地域差异性。

(3) 针对煤田内采区空间分布特征进行样点选取及影响范围分析,得出采区密集区域土壤水分含量明显低于采区稀疏区域,距离矿区越近地表干旱程度越严重。

参考文献:

[1] 黄森旺,李晓松,吴炳方,等.近 25 年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析[J].地理学报,2012,67(5):589-598.

[2] 匡薇,马勇刚,李宏,等.中亚 1999—2012 年间土地退化强度与趋势分析[J].国土资源遥感,2014,26(4):163-169.

[3] 张建彪,闫美芳,上官铁梁.山西采煤的主要生态问题及恢复和重建对策[J].安徽农业科学,2008,36(24):10668-10670.

[4] 王家强,梁继业,李志军,等.利用植被指数—地表温度特征空间反演干旱区土壤干湿状况[J].土壤通报,2014,45(1):39-46.

[5] 邓辉,周清波.土壤水分遥感监测方法进展[J].中国农业资源与区划,2004,25(3):46-49.

[6] 王利民,刘佳,邓辉,等.我国农业干旱遥感监测的现状与展望[J].中国农业资源与区划,2008,29(6):4-8.

- [7] 陈书林,刘元波,温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1192-1203.
- [8] Watson K, Rowan L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images(Thermal modeling for IR images geologic interpretation, discussing physical parameters role in materials natural environmental diurnal temperature behavior)[C]// International Symposium on Remote Sensing of Environment, 7th, University of Michigan, Ann Arbor, Mich., 1971; 2017-2041.
- [9] Carlson T N. Regional-scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia using remote thermal measurements[J]. Remote Sensing Reviews, 1986, 1(2): 197-247.
- [10] Jackson R D, Pinter P J. Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation[J]. Spectral Signatures of Objects In Remote Sensing, 1981: 399-406.
- [11] Gillies R R, Kustas W P, Humes K S. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3145-3166.
- [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 Sensing of Environment, 2002, 79 (2): 213-224.
- [13] 姜琳,冯文兰,刘志红,等. FY-3A/MERSI 与 MODIS 的温度植被干旱指数反演及对比分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 231-234.
- [14] 王海,杨祖祥,王麟,等. TVDI 在云南 2009/2010 年干旱监测中的应用[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(1): 59-65.
- [15] 鲍艳松,严婧,闵锦忠,等. 基于温度植被干旱指数的江苏淮东北地区农业旱情监测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 163-172.
- [16] Liang L, Zhao S, Qin Z, et al. Drought change trend using MODIS TVDI and its relationship with climate factors in China from 2001 to 2010[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(7): 1501-1508.
- [17] 刘冰冰,曾永年. 湖南省严重农业旱情时空变化遥感监测与影响分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(6): 72-79.
- [18] 杜灵通,候静,胡悦,等. 基于遥感温度植被干旱指数的宁夏 2000—2010 年旱情变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 209-216.
- [19] 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(2): 76-81.
- [20] 王华,邵瀚. 基于 TVDI 的江苏省淮东北地区干旱监测技术研究[J]. 地理空间信息, 2016, 14(2): 53-55.
- [21] 刘英. 神东矿区地表植被与土壤湿度遥感监测研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.

~~~~~

(上接第 176 页)

- [9] 王丛梅,杨秀胜,李永占,等. 2013 年 1 月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J]. 环境科学研究, 2013, 26(7): 695-702.
- [10] 冯建灿,胡秀丽,毛训甲. 叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用[J]. 经济林研究, 2002, 20(4): 14-18.
- [11] 李晓,冯伟,曾晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. 西北植物学报, 2006, 26(10): 2186-2196.
- [12] 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [13] Schreiber U, Schliwa U, Bilger W. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer[J]. Photosynthesis research, 1986, 10(1/2): 51-62.
- [14] Larcher W. Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups [M]. Springer Science & Business Media, 2003.
- [15] Rowe D B. Green roofs as a means of pollution abatement[J]. Environmental Pollution, 2011, 159 (8): 2100-2110.
- [16] Darrall N M. The effect of air pollutants on physiological processes in plants[J]. Plant, Cell & Environment, 1989, 12(1): 1-30.
- [17] Haagen-Smit A J. Chemistry and physiology of Los Angeles smog[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1952, 44(6): 1342-1346.
- [18] Garty J, Weissman L, Tamir O, et al. Comparison of five physiological parameters to assess the vitality of the lichen *Ramalina lacera* exposed to air pollution [J]. Physiologia Plantarum, 2000, 109(4): 410-418.
- [19] 苏行,胡迪琴,林植芳,等. 广州市大气污染对两种绿化植物叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 599-604.
- [20] 彭长连,温达志,孙梓健,等. 城市绿化植物对大气污染的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2002, 10(4): 321-327.
- [21] 黎明,马焕成,李复秀,等. 城市大气污染对云南拟单性木兰苗期气体交换及叶绿素荧光的影响[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2): 46-50.