

# 基于MODIS数据的山东省2014—2016年干旱监测分析

王正东, 郭鹏, 万红, 杨纲

(山东农业大学 信息科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

**摘要:**针对近年频发的干旱情况不能准确及时监测评估的问题,以山东省为研究区,基于温度植被干旱指数方法(TVDI),利用S-G加权滤波对MODIS地表温度产品MOD11A2和植被指数产品MOD13A2数据进行了重建,根据重建后的数据计算2014—2016年山东省的温度植被干旱指数,在比较NDVI-LST与EVI-LST构建的温度植被指数干旱模型(TVDD)的基础上,利用效果更好的EVI-LST构建的TVDI模型反演山东省2014—2016年的干旱情况,最后利用气象站观测数据对TVDI结果进行了相关性分析。研究表明,山东省在2014—2015年全年平均干旱面积占比分别为37.62%,41.7%,2016年基本无旱情发生。气象站观测的降水、温度与TVDI的相关性均在0.32以上,且均通过显著性检验,说明植被覆盖信息和陆地表面温度信息相结合反演的TVDI空间和时间分布能够较好地反映表层土壤水分变化趋势,其作为旱情评价指标是合理的。

**关键词:**MODIS; 干旱监测; S-G滤波; TVDI; 山东省

**中图分类号:**TP79; S152.7

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)02-0330-07

## Analysis of Drought Monitoring in Shandong Province from 2014 to 2016 Based on MODIS Data

WANG Zhengdong, GUO Peng, WAN Hong, YANG Gang

(College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

**Abstract:** Shandong Province was selected as the study area in the study due to the conditions of droughts occurred frequently in this province in recent years. MODIS land surface temperature products MOD11A2 and vegetation index data MOD13A2 were reconstructed by using the S-G weighted filtering. The temperature vegetation dryness index (TVDI) covering the period from 2014 to 2016 in Shandong Province was calculated by using the data of reconstruction after the Temperature Vegetation Dryness Index models were constructed by comparing NDVI-LST and EVI-LST. The research found that the TVDI model constructed by EVI-LST could better reflect drought conditions from 2014 to 2016 in Shandong Province. Finally, the meteorological data were used to perform correlation analysis of TVDI. The results showed that annual average drought area accounted for 37.62% in 2014 and 47.1% in 2015, and no drought occurred in 2016 in Shandong. The coefficients of correlations between precipitation/temperature observed by meteorological stations and TVDI were greater than 0.32, suggesting that TVDI space and time distribution inverted by combination of vegetation information with the land surface temperature can well reflect the surface soil moisture change trend and it is reasonable to take TVDI as the drought evaluation index.

**Keywords:** MODIS; drought monitor; S-G filter; TVDI; Shandong Province

干旱是我国乃至世界上许多国家主要的自然灾害之一,不仅会对生态系统和环境造成极大破坏,还会严重影响社会经济活动以及居民生活。在全球变暖的大趋势下,干旱的发生变得越来越频繁,干旱监测也成为全球关注的一个科学热点问题。山东省地

处黄淮海地区,是主要的产粮大省,受季风影响明显,属于水资源短缺省份,近几年,出现了持续的少雨及异常气候事件频率增多的现象,受旱灾影响严重。因此,如何及时、有效、准确地监测黄淮海地区干旱的发生、旱情的发展已成为有关部门关注的焦点。

常规的土壤水分监测手段通过人工测墒完成,耗时、耗力。利用遥感卫星监测干旱则具有周期短、范围广等优点,通过对研究区的遥感影像进行分析,可以快速获得干旱数据,确定干旱等级,从而为防灾减灾工作提供依据<sup>[1]</sup>。温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)是遥感监测干旱的常用方法之一,利用该方法可以及时、准确和有效地监测干旱情况,能较好地监测不同地表面,且具有计算较简单,容易实现等优点<sup>[2]</sup>,许多学者已进行过相关研究。如齐述华等<sup>[3]</sup>利用 NOAA-AVHRR 数据,采用温度植被干旱指数法反映表层土壤水分变化情况。王婷婷等<sup>[4]</sup>利用趋势线法对 2002—2009 年每年 8 月份的 TVDI 值进行回归分析,来研究 2002—2009 年松辽平原的干旱变化趋势。

本文以山东省为研究区,利用 MODIS 的 NDVI, EVI, LST 产品,在使用 Savitzky-Golay(S-G)滤波方法进行重构,填补缺失数据的基础上,分别构建 NDVI-LST 和 EVI-LST 特征空间,建立基于时间序列的温度植被干旱指数对山东省 2014—2016 年干旱变化的时空演变特征进行分析,并探讨其与气象因子之间的关系。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

山东省位于中国东部沿海,地处 114°20′—122°43′E, 34°23′—38°23′N,地幅辽阔,陆地南北最长距离约 420 km,东西最宽约 700 km,全省总面积为 15.8 万 km<sup>2</sup>,境内最高处位于泰山,海拔为 1 524 m,最低处位于东北部的黄河三角洲,海拔为 2 m 左右。山东的气候类型属暖温带季风气候,降水集中,四季分明,冬夏较长,全年平均温度为 10~14℃,年平均降水量为 550~950 mm,但是降水季节分布不平衡,对农业生产影响较大,因此寻求一种大范围、实时的旱情监测手段对于山东省的社会经济发展具有现实推动意义。

### 1.2 数据来源与预处理

本研究所使用的 MODIS 遥感数据从 MODIS 官网(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)下载得到,主要有 8 d 合成的地表温度产品(MOD11A2)和 16 d 合成的植被指数产品(MOD13A2),分辨率为 1 km,时间范围为 2014 年 1 月—2016 年 12 月,MOD11A2 和 MOD13A2 数据的原始格式都为 EOS-HDF。在对数据预处理时,首先利用 MRT(MODIS Reprojection Tools)对两种产品数据进行格式转换、拼接、重投影等批处理,然后根据山东省的行政区划边界裁剪得到

研究区影像,最后得到研究区 3 年的归一化植被指数产品(NDVI)数据、增强型植被指数产品(16 d 合成数据)和陆地表面温度数据(8 d 合成数据)以及相应的质量控制文件。

温度和降水等气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/>)提供的中国地名气候资料月值数据集,本文选取惠民、定陶、济南、兖州、潍坊 5 个国家级气象站的每月月平均降水量和月平均温度数据,起止时间为 2014—2016 年,研究区气象站点的空间分布如图 1 所示。

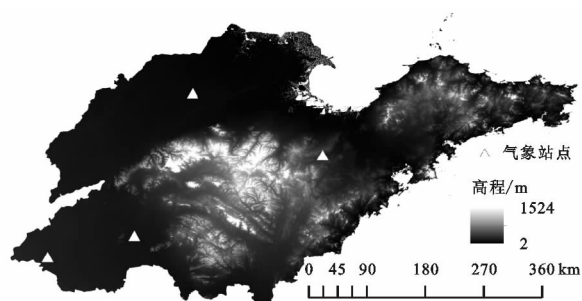


图1 研究区范围与气象站点位置

### 1.3 数据重建

在获取遥感影像时,因为存在传感器设计、大气传输、太阳光照角度、观测视角等随机干扰因素,影像中会存在很多噪声,当有云覆盖时,会造成数据的缺失,所以获取的影像数据有时无法准确表达地表情况,因此有必要进行数据重建。由 Savitzky 等<sup>[5]</sup>提出的移动窗口的加权平均算法 S-G 滤波重建能够较好地完成任务平滑,内插,反映真实的植被生长、气象变化等地表情况,适用于 NDVI, EVI 等数据的重建<sup>[6]</sup>。S-G 滤波是一种特殊的低通滤波器,用于数据的噪声平滑,具有实现简单、先验知识少等优点,可以较真实地体现植被的生长变化情况<sup>[7]</sup>。

S-G 滤波是以平滑时间序列数据为移动窗口的加权平均算法<sup>[8]</sup>,该方法中的加权系数取决于一个滤波窗口内给定高阶多项式的最小二乘拟合次数。若某个数据集内包含  $n$  个点,半窗口的宽度为  $m$ ,滤波器的长度等于滑动数组的宽度等于  $N$ 。 $C_i$  为平滑窗口内对应每个点的卷积系数,则对于第  $j$  个点来说,平滑后的值即为:

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i y_{j+1}}{N} \quad (1)$$

式中: $Y_j^*$  为拟合后的结果。

根据像元可信度值(pixel reliability)和权重选择质量控制(quality control)文件分别对影像的每个像元赋予权重,通过编程分别对 NDVI, EVI 和 LST 进行 S-G 时序滤波处理。除因时间而异的观测条件会

使时间序列呈现类似于锯齿状的不规则波动,在其中的某一次观测时由于不同设备间的电磁干扰,或者观测设备的位置偏移等原因会产生高频噪声与干扰,所以还需要进行空间滤波,目的是提高单次观测获取的影像的质量,因此本研究使用中值滤波消除空间上的异常值。

1.4 数据重建效果分析

利用 S-G 时序滤波以及空间滤波方法对 2014—2016 年 3 年的 NDVI,EVI,LST 时间序列影像进行了重建。对于 LST,从图 2 中可以看出,LST 数据受到其他干扰因素的影响较大,数据缺失较为严重,在利用 S-G 滤波方法对原始数据进行重建之后,对原始观测数据进

行了平滑,并且对缺失观测值的地方进行了填补,惠民地表温度的均方根误差(RMSE)从滤波前的 11.6 减少至 10.5,EVI 的 RMSE 从 0.15 减少至 0.13,说明原始数据的突降点得到了纠正。重建结果与气象站的观测数据相一致,图 2 给出了重构后的像元温度值与站点实测温度值之间的相关性分析( $R^2_{\text{济南}}=0.94$ ; $R^2_{\text{惠民}}=0.91$ ),表明滤波后的温度值与实测值具有很高的相关性,说明经过重构后的数据与站点实测数据在趋势上是一致的;重建后的 NDVI,EVI 趋势线更符合植被的生长规律,得到了更为准确的观测数据,这与其他学者的研究结果具有很好的一致性,因此可以利用重建后的数据进行后续研究。

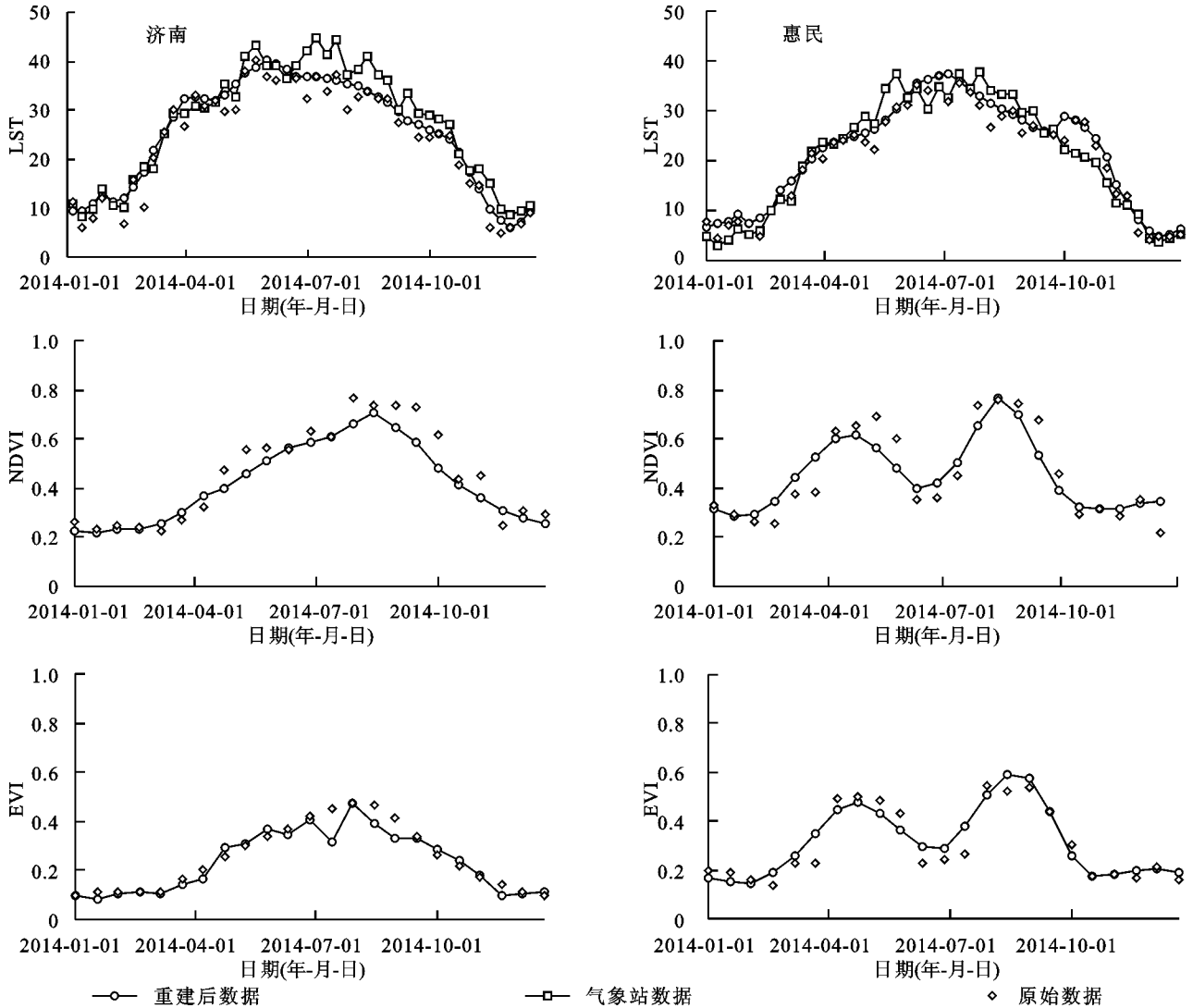


图 2 S-G 滤波重构值、站点实测值与原始值的对比

1.5 植被指数—地表温度特征空间

Lambin 等<sup>[9]</sup>指出了地表温度与归一化植被指数两者存在的关系,建立 TVDI 模型对于消除土壤背景的影响效果较好。如果研究区是从裸土到植被完全覆盖,土壤湿度从极湿润变化到极干旱时,以 LST 和 VI 为纵横坐标构建的散点图呈三角形。植被覆盖区

的 TVDI 理论取值应处于(0,1)之间<sup>[10]</sup>。TVDI 值越低则表明干旱程度越轻,反之 TVDI 值越高,则干旱程度越严重。TVDI 由植被指数(NDVI/EVI)和地表温度(LST)计算得到,其定义为公式:

$$TVDI = \frac{T_S - T_{Smin}}{T_{Smax} - T_{Smin}} \quad (2)$$

式中:  $T_s$  为在一定的分辨率条件下任意像元的地表温度;  $T_{Smin}$  表示某一 NDVI 对应的最低地表温度值, 即湿边;  $T_{Smax}$  为某一 NDVI 对应的最高地表温度值, 即干边。

$$T_{Smax}=a_1+b_1\times NDVI$$
$$T_{Smin}=a_2+b_2\times NDVI$$

(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<sup>[10]</sup>。由地表温度最大值拟合而成的称为干边, 最小值拟合而成的则称为湿边。由 TVDI 的原理可知, 地表温度最大值与植被指数呈负线性关系。若植被覆盖度小于 20%, 低植被覆盖度对应的 NDVI 不能准确反映出区域内植被生长情况; 若植被覆盖度大于 80% 时, 其对应的 NDVI 增长速度会逐渐减慢并趋于平缓, 出现一种饱和状态, 并且对于植被监测的灵敏度也下降。由此得出, NDVI 更适用于中等植被覆盖率的情况。因此, 在拟合特征空间中每一步长 NDVI 对应 LST 最大值与最小值时, 选择处于 0.2~0.8 范围内的 VI 值<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 TVDI 计算

在 VI 为 0.2~0.8 的范围内, 以 0.01 为步长, 提取每一步长 NDVI, EVI 像元对应的所有 LST 像元中的最大值与最小值, 并采用最小二乘拟合方法对每期特征空间的干湿边进行线性拟合, 得到干湿边的拟合方程及其相关系数, 结果见表 1—2。从干湿边的拟合结果来看, NDVI 与 LST 的最大值呈负相关关系, 与最小值呈正相关关系。EVI-LST 构成的特征空间干湿边斜率与 NDVI-LST 一致, 但 EVI 与 LST 构建的特征空间中干湿边拟合的相关系数更高, 主要因为 EVI 加入了蓝色波段来增强植被信号, 消除土壤背景和气溶胶散射的影响, 因此能够克服 NDVI 在高植被覆盖地区增长缓慢趋于平缓, 容易饱和, 在低植被覆盖地区容易受到土壤植被影响等缺点。进入 7 月份后, 相关系数均降低, 原因可能是进入夏季后, 山东大部分地区地表温度普遍较高, 因此随着 NDVI, EVI 的变化, 地表温度变化较小。

图 3 为 2015 年 1 月济南市 NDVI, EVI 与 LST 构建的散点图, 由图 3 可知, 相比 NDVI, EVI 总体偏低, 适用于高植被覆盖区域, 在构建特征空间时, 拟合的干湿边更稳定, 趋势更明显, 干湿边的相关系数分别达到 0.84, 0.86, 而 NDVI 的干湿边相关性仅为 0.79, 0.74, 因此, 本文选择 EVI 和 LST 构建 TVDI 模型进行下一步的研究。

表 1 NDVI-LST 干湿边拟合方程及其相关系数

月序数 (年-月)	干边( $y=ax+b$ )			湿边( $y=ax+b$ )		
	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
2014-01	-16.77	296.43	0.60	27.49	264.28	0.77
2014-04	-17.63	314.05	0.94	6.73	289.71	0.45
2014-07	-10.30	318.66	0.38	-2.44	302.19	0.07
2014-10	-22.78	314.44	0.83	8.58	286.28	0.38
2015-01	-13.82	293.31	0.80	24.17	266.46	0.75
2015-04	-19.19	314.92	0.89	3.09	292.03	0.35
2015-07	-16.04	323.25	0.52	-0.90	301.35	0.01
2015-10	-15.40	310.64	0.67	6.58	286.65	0.15
2016-01	-63.67	319.85	0.84	32.06	258.37	0.88
2016-04	-50.20	335.48	0.84	10.21	287.92	0.74
2016-07	-20.33	335.05	0.20	-11.09	307.93	0.59
2016-10	-49.36	338.01	0.53	-0.53	291.09	0.01

表 2 EVI-LST 干湿边拟合方程及其相关系数

月序数 (年-月)	干边( $y=ax+b$ )			湿边( $y=ax+b$ )		
	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
2014-01	-26.09	296.44	0.84	29.20	270.28	0.93
2014-04	-26.23	314.73	0.95	5.28	291.74	0.48
2014-07	-20.87	322.68	0.81	13.43	294.88	0.71
2014-10	-38.64	316.86	0.97	18.46	285.74	0.84
2015-01	-24.66	294.58	0.84	20.39	273.01	0.86
2015-04	-25.33	314.31	0.96	0.62	294.18	0.02
2015-07	-25.94	325.90	0.90	13.32	294.58	0.47
2015-10	-30.81	313.97	0.92	22.95	283.31	0.78
2016-01	-43.22	300.93	0.89	25.49	267.86	0.93
2016-04	-43.92	325.25	0.69	7.05	291.76	0.35
2016-07	-56.84	347.30	0.84	17.48	291.22	0.64
2016-10	-108.63	347.18	0.88	22.20	283.70	0.45

### 2.2 研究区干旱状况时空分析

根据 EVI-LST 计算得到山东省 2014—2016 年每个月 TVDI 图像, 再以 3—5 月份为春季, 6—8 月份为夏季, 9—11 月份为秋季, 12 月—翌年 2 月份为冬季, 制作每个季度平均 TVDI 图像。然后按照整个研究区域内像元 TVDI 值的分布直方图和中国土壤湿度界定干旱的标准对研究区干旱情况进行分级<sup>[12]</sup>, 将干旱划分为 5 个等级, 分别是潮湿( $0\leq TVDI\leq 0.2$ )、湿润( $0.2\leq TVDI\leq 0.4$ )、正常( $0.4\leq TVDI\leq 0.6$ )、干旱( $0.6\leq TVDI\leq 0.8$ )、重旱( $0.8\leq TVDI\leq 1.0$ ), 分级结果如图 4 所示。

为了分析山东省 2014—2016 年土壤水分时空分布变化趋势, 统计山东省每年各干旱等级土壤面积以及百分比(表 3)。从分析结果看, 2014 年上半年旱情较严重, 进入秋季之后, 重旱与干旱区域的面积显著下降, 表明干旱得到一定程度的缓解; 2015 年旱情为 3 年中最严重的一年, 重旱与干旱区域的面积比例分别高达 7.46%, 34.24%, 表明在一年中山东省有近

一半面积处于干旱状态,全年各干旱等级土壤面积比例与 2014 年基本相一致,但是 2015 年是在进入冬季之后,干旱才得到减弱,东北部地区表现为相对湿润,其他

地区基本属于正常状态,只有局部地区存在干旱情况;2016 年正常和湿润区域面积占比分别达到 44.52%,42.54%,相对于前两年,干旱面积显著下降。

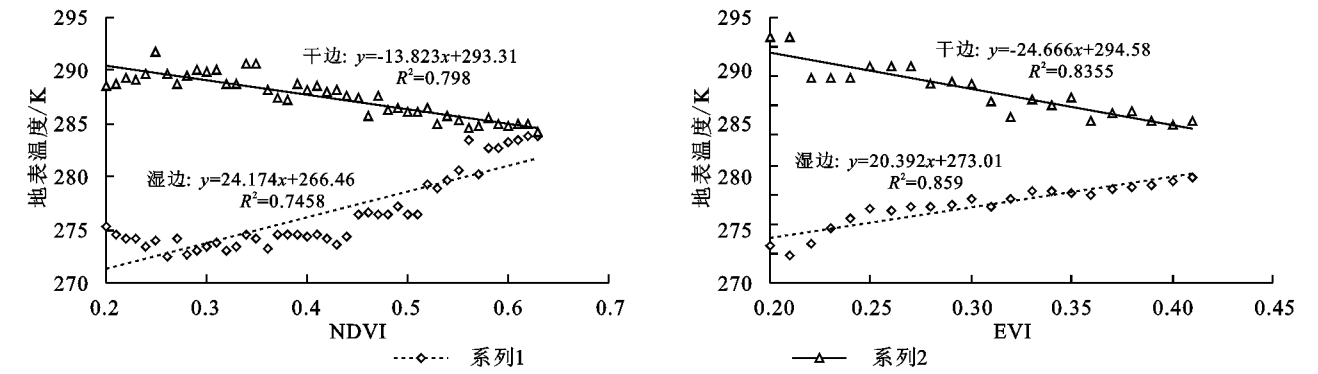


图 3 NDVI,EVI-LST 特征空间干湿边方程

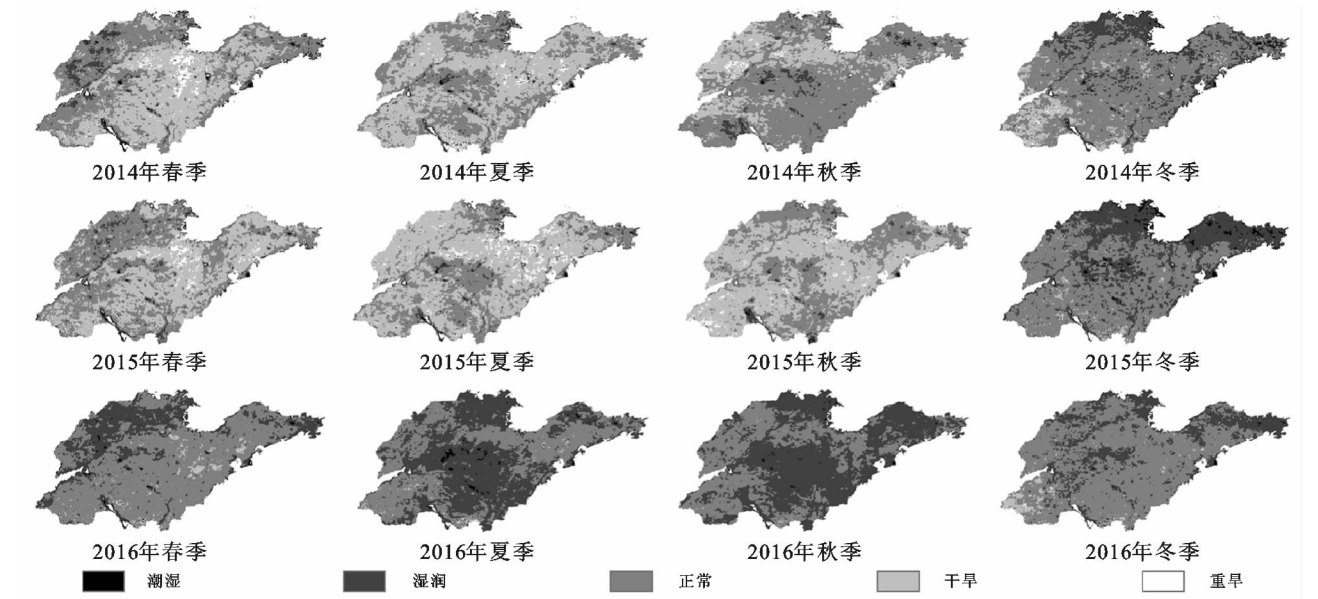


图 4 研究区 3 年旱情等级时空变化

表 3 不同干旱等级面积及比例

土壤水分 状况	TVDI 值	2014 年		2015 年		2016 年	
		面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
重旱	0.8~1	7246	4.93	10966	7.46	1204	0.82
干旱	0.6~0.8	48038	32.69	50367	34.24	13128	8.96
正常	0.4~0.6	69135	47.05	59329	40.33	65240	44.52
湿润	0.2~0.4	21175	14.41	23420	15.92	62342	42.54
潮湿	0~0.2	1350	0.92	3018	2.05	4624	3.16

2.3 TVDI 与气象数据的相关性分析

湿润指数中涉及多种气象因子,为了进一步探究气象因子与 TVDI 变化的关系,本文研究了主要气象因子气温和降水的年际变化及其与 TVDI 的关系。利用山东省的济南、兖州、潍坊、定陶和惠民 5 个国家级气象站收集的每月平均温度和月均降水量与 TVDI 进行相关性分析,根据温度、降水量与 TVDI 的相关系数(表 4)可以得出,TVDI 与温度均通过 0.01 水平的显著性检验,表明相比于降水,TVDI 对温度更为敏感,在

温度升高时,作物生长需水量大,地表水分蒸发速度加快,蒸发量大于降雨量,土壤含水量降低,使得地表较为干旱,导致 TVDI 值升高;TVDI 与降水也均通过 0.05 水平的显著性检验,且 TVDI 与降水量存在显著负相关关系,当存在连续降水时,TVDI 的值会呈降低趋势,但两者并不同步,TVDI 的变化存在一定的滞后性,当降水量变化稳定时,TVDI 也随之趋于稳定。以潍坊市为例,2014—2016 年 3 年中的降水量明显少于其他区域,从气象站统计 3 年年均温度

与年均降水量中可以看出 3 年年平均降水量仅为 378,435,478 mm,相比于同时期其他地区,明显偏少,所以潍坊在 3 年中一直处于 TVDI 偏高的情况。

2015 年降水量相比于 2014 年有所增加,但是受到“历史最强”厄尔尼诺的影响,干旱情况更加严重,2015 年 TVDI 与温度的相关系数较高,除定陶外均达到 0.76 以上,而同年降水与 TVDI 的相关系数仅有 0.5 左右,最高仅达到 0.69,因此温度成为 2015 年 TVDI 值升高、干旱加重的主要影响因素,所以即使在降水量增加的情况下,干旱程度并没有减弱反而增强。2016 年年平均降水量明显升高,潍坊、定陶、兖州等地降水量均达到 3 年最高水平,TVDI 反演的季度干旱情况也表明全省干旱情况有所减弱。

表 4 温度、降水量与 TVDI 的相关系数

气象站	TVDI 与温度的相关系数			TVDI 与降水的相关系数		
	2014 年	2015 年	2016 年	2014 年	2015 年	2016 年
潍坊	0.76*	0.83*	0.34*	0.53*	0.63**	0.59*
兖州	0.49*	0.90*	0.48*	0.65*	0.48*	0.50**
定陶	0.58*	0.46*	0.59*	0.53**	0.32*	0.51**
惠民	0.71*	0.79*	0.79*	0.35**	0.41*	0.56**
济南	0.74*	0.76*	0.86*	0.93*	0.69*	0.63**

注:\*表示达到 0.01 的显著性水平;\*\*表示达到 0.05 的显著性水平;剩余表示未通过显著性检验。

3 结论与讨论

(1) 利用 S-G 滤波与空间滤波对植被指数与地表温度进行重建,可以有效消除卫星数据在时间和空间上存在的缺失值和噪声的影响,对滤波后的温度值与实测值做相关性分析,相关系数均在 0.91 以上,说明经过重构后的数据与站点实测数据在趋势上基本一致,因此可以利用重构后的数据进行 TVDI 模型的构建。

(2) NDVI/EVI-LST 特征空间的干边随着植被指数的增大而呈递减趋势,而湿边在气温较低月份与植被指数关系明显,另外 NDVI 与 EVI 在构建特征空间上也有所不同,NDVI 与 LST 构成的特征空间更平缓;而 EVI 与 LST 构成的特征空间范围更集中,在干湿边拟合时,趋势更稳定,相关性更高,因此运用 EVI-LST 构建 TVDI 更为合理。

(3) 从时间上看,山东省 2014 年干旱主要集中在春季和夏季,全年平均干旱面积占到全省面积的 37.62%,在进入春季之后,温度迅速回升,植被生长迅速,蒸发旺盛,干旱面积显著提高,进入 8 月之后,除局部发生重旱外,大部分地区的旱情得到缓解。2015 年干旱分布情况基本与 2014 年一致,但持续时

间更长,全年平均干旱面积比例增加,占全省面积的 41.7%。只有当进入 12 月份之后,干旱才减弱。2016 年由于降水量显著增多,只有在 2,3 月份有一次范围较大的旱情,其余月份除局部地区外全省大部分地区相对湿润。

(4) 从空间上看,2014 年和 2015 年年均重旱面积比例分别达到 4.93%,7.46%,其中鲁中与半岛交界处、鲁西南地区是干旱较为严重的地区,根据 3 年的变化情况分析得出,干旱分布体现为由东南向西北转移的趋势。湿润以及正常的区域主要分布在中部的山区、最北部的平原地区以及胶东地区。

(5) 对 TVDI 与降水量、温度数据做相关性分析,均达到显著相关,并发现 TVDI 与温度的相关性更强,且通过 0.01 水平的显著性检验,表明改进的 TVDI 指数能够较好地反映山东省 2014—2016 年的旱情变化情况,对研究区旱情的快速准确检测和干旱演变过程的研究具有一定的参考价值,有助于制定相应的防灾和减灾决策。

受限于 MODIS 数据产品本身的问题,本文仍存在一些不足之处:温度是 TVDI 的影响因子之一,而高程的变化是影响地表温度的重要条件。山东省地处丘陵地带,境内高程变化较大,因此还应该考虑高程对温度变化的影响,利用高程对地表温度进行校正从而计算 TVDI。另外,TVDI 与温度、降水数据与有些气象站点的相关关系较弱,其原因可能是:① 由于范围不同,整个行政区观测数据与 3 km×3 km 缓冲区数据的相关性不可能达到很高的水平;② 虽然气象资料是准确的,但参与 TVDI 建模的地表温度和植被指数都是按固定期数合成的数据,尽管假设两者在时相上是相一致的,但实际上可能并不完全一致,存在部分偏差;③ TVDI 与气象因子对干旱的反映侧重点不同,TVDI 是地面植被、土壤等受干旱影响的响应程度,气象因子则比较直观地表现地面湿润情况。

参考文献:

[1] 沙莎,郭锐,李耀辉,等. 温度植被干旱指数(TVDI)在陇东土壤水分监测中的适用性[J]. 中国沙漠,2017,37(1):132-139.

[2] 王凤杰,冯文兰,扎西央宗,等. 基于 FY-3A/VIRR 和 TERRA/MODIS 数据藏北干旱监测对比[J]. 自然资源学报,2017,32(7):1229-1239.

[3] 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(5):420-427,436.

[4] 王婷婷,张洪岩,郭笑怡,等. 基于温度植被干旱指数的

- 松辽平原干旱时空特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 383-389.
- [5] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8): 1627-1639.
- [6] 张悦, 沈润平, 彭露露, 等. 基于重建 MODIS 无云数据反演京津冀地区土壤湿度[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 375-378.
- [7] 王乾坤, 于信芳, 舒清态, 等. MODISEVI 时序数据重建方法及拟合分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(6): 732-741.
- [8] 苏红, 刘峻明, 王春艳, 等. 基于时间序列 MODIS LST 产品的重构研究[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(5): 99-107.
- [9] Lambin E F, Ehrlich D. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(3): 463-487.
- [10] 严婧, 沈润平, 鲍艳松, 等. 江苏地区 MODIS LST 产品重建研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(1): 160-167.
- [11] 朱寿东, 刘慧平, 冯徽徽, 等. 基于时间序列影像的中观尺度农作物长势监测采样方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 127-133.
- [12] 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.

(上接第 329)

- [8] 史继清, 甘臣龙, 扎西顿珠, 等. 基于 CI 指数的河北省干旱特征分析及 R/S 分析[J]. 安徽农业学报, 2015, 43(2): 221-227.
- [9] 杨世刚, 杨德保, 赵桂香, 等. 3 种干旱指数在山西省干旱分析中的比较[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1406-1414.
- [10] 马明卫, 宋松柏. 渭河流域干旱指标空间分布研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 681-691.
- [11] 马海娇, 严登华, 翁白莎, 等. 典型干旱指数在滦河流域的适用性评价[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 728-734.
- [12] 王素萍, 王劲松, 张强, 等. 几种干旱指标对西南和华南区域月尺度干旱监测的适用性评价[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1616-1624.
- [13] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1043-1052.
- [14] 杨金虎, 张强, 王劲松, 等. 近 60 a 来中国西南春季持续性干旱异常特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 215-222.
- [15] 历超, 董洋, 阙伟伦. 基于 CI 指数的黑龙江干旱分析及其应用[J]. 现代化农业, 2017(11): 43-45.
- [16] 翟禄新, 冯起. 基于 SPI 的西北地区气候干湿变化[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 847-857.
- [17] 熊光洁. 近 50 年中国西南地区不同时间尺度干旱气候变化特征及成因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [18] 闫峰, 王艳娇, 吴波, 等. 近 50 年河北省干旱时空分布特征[J]. 地理研究, 2010, 29(3): 423-430.
- [19] 段超宇. 基于 SWAT 模型的锡林河流域融雪径流模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [20] 陈素华, 闫伟兄, 乌兰巴特尔, 等. 干旱对内蒙古草原牧草生物量损失的评估方法研究[J]. 草业科学, 2009, 26(5): 32-37.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级 GB/T20481—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.