

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

温国涛^{1,2}, 白建军^{1,2}, 孙嵩松^{1,2}

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119; 2. 地理学国家级实验教学示范中心, 陕西师范大学, 陕西 西安 710119)

摘要: 利用 MODIS 归一化植被指数 (NDVI) 产品 MODLT1M 和 MODIS 地表温度产品 MODND1M, 计算 2004—2014 年陕西省月温度植被干旱指数 (TVDI), 基于 TVDI 采用一元线性回归、Theil - Sen Median 趋势分析、Mann - Kendall 检验等方法来研究陕西省 11 a 来干旱的空间分布特征、时间变化特征及干旱演变趋势, 并结合气象数据进一步探究引起干旱变化的气象因素。研究表明: 11 a 中陕西省干旱发生频率呈现北高南低的特点, 陕北、关中、陕南三大区域干旱发生的频率分别为 68.2%、53.8%、22.7%, 且均以轻度干旱为主; 陕西省旱情主要出现在春季, 11 a 春季的平均 TVDI 值在 0.6~0.7 之间波动; 陕西省 11 a 中干旱情况整体呈减弱趋势, TVDI 值减小、不变、增大的区域分别占 55.38%、42.89%、6.20%; TVDI 与湿润指数对干旱的表征具有一致性, 且年均 TVDI 值与年降水量呈显著负相关关系 ($P=0.019$), 降水是引起 TVDI 下降的一个重要气象因子。

关键词: 干旱变化特征; 遥感; 温度植被干旱指数; 湿润指数; 陕西省

中图分类号: TP79; P426.616 **文献标志码:** A

Variation of drought in Shaanxi from 2004 to 2014 based on remotely sensed data

WEN Guo-tao^{1,2}, BAI Jian-jun^{1,2}, SUN Song-song^{1,2}

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Geography Education, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract: NDVI, simple linear regression method, Theil - Sen Median trend analysis method and Mann - Kendall test method were used to calculate the monthly TVDI in Shaanxi from 2004 to 2014, thereby analyzing the spatial distribution features, temporal variation features and the evolution trend of drought. The results indicate that: (1) The occurrence frequency of drought in Shaanxi province was higher in the north and lower in the south, with Shanbei, Guanzhong and Shannan being 68.2%, 53.8% and 22.7% respectively. (2) The drought of Shaanxi province mainly occurred in spring, the average TVDI in spring over the past eleven years varied between 0.6 and 0.7. (3) The drought of Shaanxi province showed a downward trend as a whole. (4) TVDI was consistent with wetness index on monitoring drought, and annual TVDI value had a significantly negative correlation with annual precipitation, precipitation was an important meteorological factor causing the decline of TVDI.

Keywords: variation of drought; remote sensing; temperature vegetation drought index; wetness index; Shaanxi

干旱的波及范围广, 持续时间长, 是影响农业生产和人类生活最严重的自然灾害之一^[1]。我国是一个农业大国, 干旱成为威胁我国农业发展和造成社会经济损失的重要因素, 尤其是在干旱频发的西北和华北地区^[2]。陕西省地处我国西北地区东部生态环境脆弱带上, 自然灾害发生频繁, 干旱是陕西省对国民经济尤其是对农业危害最大的气象灾害之一^[3]。因此, 长期以来对于干旱的监测以及研究都

是政府部门和相关学者关注的热点问题。

传统的干旱监测方法主要是对监测站的单点数据进行采样, 监测速度慢、范围有限。并且由于土壤水分分布不均, 单点采样具有随机性, 要代表较大范围内土壤水分的分布状况是不准确的, 因此, 难以满足大区域干旱监测的需求^[4]。近年来, 遥感技术以其客观、及时、经济、覆盖范围广、数据连续等优点, 弥补了地面站点监测的不足, 已被证明是干旱监测

果研究区的植被覆盖包含从裸地到植被全覆盖,土壤湿度包含从极干旱到极湿润的各种情况,那么以遥感获得的 NDVI 和地表温度(T_s)为横纵坐标组成的散点图呈三角形^[19-20]或者梯形^[21-22],即 $T_s - NDVI$ 特征空间。Sandsolt 等^[23-24]基于 $T_s - NDVI$ 特征空间,提出了一种简化的温度植被干旱指数 TVDI,它是卫星数据得到的地表温度 T_s 与植被指数 NDVI 为基础,TVDI 与土壤湿度直接相关,是表征植被受水分胁迫的指标,可表示为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{\min}}}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}} \quad (1)$$

式中, T_s 代表任意像元的地表温度; $T_{s_{\min}}$ 代表某一 NDVI 对应的最低地表温度,即湿边; $T_{s_{\max}}$ 代表某一 NDVI 对应的最高地表温度,即干边。TVDI 的取值为 0 ~ 1 之间, TVDI 取值越接近于 1, 则该像元越干旱, TVDI 越接近于 0, 则该像元越湿润。干湿边方程可表示为:

$$T_{s_{\max}} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad (2)$$

$$T_{s_{\min}} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad (3)$$

式中, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为方程拟合系数。为了减小 NDVI 饱和对结果的影响, 本文选取 0.2 ~ 0.8 范围内的 NDVI 进行特征空间干湿边的拟合^[25]。

1.3.2 Mann-Kendall 趋势检验 Theil-Sen Median 趋势分析原理^[26]: 衡量趋势大小的指标为

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right) \quad (4)$$

式中, $1 < j < i < n$, Median 代表所求序列的中位数。正的 β 值表示“上升趋势”, 负的 β 表示“下降趋势”, β 等于零表示“不变趋势”。

Mann-Kendall 趋势检验的原理: 对于时间序列 X , Mann-Kendall 趋势检验统计量如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (5)$$

其中, x_j 为时间序列的第 j 个数据值; n 为数据样本的长度; sgn 是符号函数, 其定义如下:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta > 0) \\ 0 & (\theta = 0) \\ -1 & (\theta < 0) \end{cases} \quad (6)$$

Mann^[27] 和 Kendall^[28] 证明, 当 $n \geq 8$ 时, 统计量 S 基本服从正态分布, 其均值为 0, 方差为:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n-5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i-5)}{18} \quad (7)$$

其中, t_i 是第 i 组数据点的数目。标准化统计量 Z_c ,

按照如下公式计算:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (8)$$

即: Z_c 服从标准正态分布。Mann-Kendall 趋势检验的方法是零假设 $H_0: \beta = 0$, 当 $Z_c > Z_{(1-\alpha)/2}$ 时, 拒绝零假设。其中 $Z_{(1-\alpha)/2}$ 为标准正态分布, α 为显著性检验水平。

1.3.3 湿润指数计算 湿润指数 (W_i) 能较客观地反映某一地区的水热平衡状况, 是降水量与潜在蒸散量之比, 是判断某一地区气候干湿程度的指标^[29]。年湿润指数的计算公式为:

$$W_i = \frac{R}{\sum ET_i} \quad (9)$$

式中, R 是年降水量(mm); $\sum ET_i$ 为月可能蒸散量之和, 某一地区的湿润指数越大, 则表明该区气候越湿润; 而湿润指数越小, 则气候越干燥。 ET_i 的计算采用刘多森^[30] 等提出的月可能蒸散量动力学模型的改进形式:

$$ET_i = \frac{22d_i(1.6 + U_i^{1/2})\omega_{oi}(1 - h_i)}{P_i^{1/2}(273.2 + t_i)^{1/4}} \quad (10)$$

式中, i 是月份; P_i 是月平均气压(mbar); t_i 是月平均气温($^{\circ}\text{C}$); d_i 是月的天数, U_i 是在 10 ~ 12 m 高度处观测的月平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ω_{oi} 是温度为 t_i 时的饱和水汽压(mmHg), 而 h_i 是月平均相对湿度。本次研究共获得陕西省 20 个气象站点 11 a 的相关气象数据。

2 结果分析

2.1 TVDI 特征空间及验证性评价

利用 IDL 编程, 在 NDVI 为 0 ~ 1 的范围内, 以 0.01 为步长, 求算相同 NDVI 下所有不同像元对应的最大地表温度和最小地表温度, 得到 11 a 132 个时间段的 $T_s/NDVI$ 特征空间。对每期特征空间的干边和湿边进行线性拟合, 计算 TVDI 值。以 TVDI 年均值较大的 2007 年为例, 表 1 为 2007 年每月的特征空间干湿边拟合方程, 从干湿边的拟合结果来看, NDVI 与地表温度 T_s 的最大值呈负相关关系, 且相关性显著, 即干边方程斜率为负, 线性拟合效果好。而 NDVI 和地表温度 T_s 的最小值呈弱相关关系或不具有相关关系。说明地表温度的最小值随 NDVI 变化较小。

表 1 2007 年 T_s - NDVI 特征空间干湿边拟合方程Table 1 The dry and wet edges in T_s /NDVI space estimated by linear regression for 2007

月份 Month	干边 Dry edge	湿边 Wet edge
1	$T_{s_{max}} = -5.1456x + 13.265$ ($R^2 = 0.6513$)	$T_{s_{min}} = 7.483x - 11.307$ ($R^2 = 0.5962$)
2	$T_{s_{max}} = -12.312x + 35.843$ ($R^2 = 0.8730$)	$T_{s_{min}} = 9.6307x - 7.9174$ ($R^2 = 0.3784$)
3	$T_{s_{max}} = -10.622x + 37.342$ ($R^2 = 0.8285$)	$T_{s_{min}} = 7.4364x - 0.3578$ ($R^2 = 0.5531$)
4	$T_{s_{max}} = -13.467x + 38.604$ ($R^2 = 0.8899$)	$T_{s_{min}} = 14.652x + 0.4849$ ($R^2 = 0.3298$)
5	$T_{s_{max}} = -12.206x + 44.429$ ($R^2 = 0.8591$)	$T_{s_{min}} = 2.9519x + 14.45$ ($R^2 = 0.2119$)
6	$T_{s_{max}} = -12.228x + 45.357$ ($R^2 = 0.9288$)	$T_{s_{min}} = 1.1766x + 12.591$ ($R^2 = 0.052$)
7	$T_{s_{max}} = -14.978x + 50.926$ ($R^2 = 0.8812$)	$T_{s_{min}} = -1.9233x + 16.659$ ($R^2 = 0.0519$)
8	$T_{s_{max}} = -15.293x + 47.955$ ($R^2 = 0.9398$)	$T_{s_{min}} = -2.9571x + 16.398$ ($R^2 = 0.0803$)
9	$T_{s_{max}} = -17.425x + 43.519$ ($R^2 = 0.7347$)	$T_{s_{min}} = 3.801x + 10.061$ ($R^2 = 0.1908$)
10	$T_{s_{max}} = -10.563x + 29.216$ ($R^2 = 0.7822$)	$T_{s_{min}} = 12.322x - 6.7151$ ($R^2 = 0.2317$)
11	$T_{s_{max}} = -7.9507x + 23.293$ ($R^2 = 0.9086$)	$T_{s_{min}} = 0.059x + 1.0577$ ($R^2 = 0.019$)
12	$T_{s_{max}} = -3.9307x + 12.864$ ($R^2 = 0.6294$)	$T_{s_{min}} = 2.52x - 5.783$ ($R^2 = 0.1569$)

利用陕西省境内分布的 20 个土壤湿度站点的实测土壤相对湿度数据进行 TVDI 监测结果验证。利用土壤相对湿度数据计算土壤湿度年均值。并将土壤湿度年均值与各土壤站点周围 3×3 像元的 TVDI 年均值做相关性分析(图 2, 图 3), 从图 2 和图 3 可以看出, TVDI 与 10、20 cm 土壤相对湿度均呈现负相关关系, 相关系数 (R^2) 分别为 0.3923 和 0.344。这说明 TVDI 能够反映土壤水分状况, 作为旱情评价指标具有一定的合理性^[31-33]。

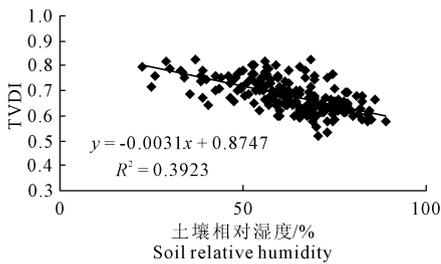


图 2 TVDI 与 10 cm 土层土壤相对湿度的关系

Fig.2 Relationship between TVDI and soil relative

humidity in 10 cm depth

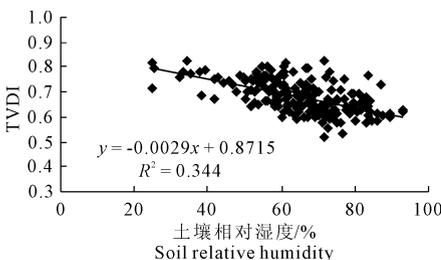


图 3 TVDI 与 20 cm 土层土壤相对湿度的关系

Fig.3 Relationship between TVDI and soil relative

humidity in 20 cm depth

2.2 干旱的空间分布特征

以 TVDI 作为干旱分级指标, 采用齐述华等^[34-36]用于干旱半干旱地区的干旱等级划分方法, 将干旱状况划分为五种类型(表 2)。

表 2 TVDI 干旱等级划分标准

Table 2 Criteria for classification of drought with TVDI

干旱等级 Drought level	干旱类型 Drought type	TVDI
1	重度湿润 Severe wetness	$0 < TVDI \leq 0.2$
2	轻度湿润 Mild wetness	$0.2 < TVDI \leq 0.4$
3	正常 Normal level	$0.4 < TVDI \leq 0.6$
4	轻度干旱 Mild drought	$0.6 < TVDI \leq 0.8$
5	重度干旱 Severe drought	$0.8 < TVDI \leq 1.0$

对 11 a 中陕北、关中、陕南三个地区的各月 TVDI 进行干旱等级划分, 并分别统计各干旱类型的出现频率, 统计结果见表 3。

表 3 11 a 各干旱类型出现频率/%

Table 3 Occurrence frequency of each drought type

干旱类型 Drought type	陕北 Northern Shaanxi	关中 Guanzhong	陕南 Southern Shaanxi
重度湿润 Severe wetness	0.0	0.0	3.8
轻度湿润 Mild wetness	3.8	6.8	24.2
正常 Normal level	28.0	39.4	49.3
轻度干旱 Mild drought	62.1	51.5	22.7
重度干旱 Severe drought	6.1	2.3	0.0

从各干旱类型频率统计来看, 陕西省干旱发生次数由北向南呈递减趋势, 三个地区的干旱发生频率分别为 68.2%、53.8% 和 22.7%, 其中以轻度干旱为主, 轻度干旱发生频率分别为 62.1%、51.5% 和

22.7%。重度干旱主要发生在陕北、关中地区,其发生频率分别为 6.1% 和 2.3%,陕北、关中地区在 11 a 中有超过一半的月份处于干旱状态,干旱较为严重。陕南地区在 11 a 中有接近一半的月份干旱等级为正常,而处于湿润状态的频率为 28%,高于发生干旱的频率,陕南地区干旱等级整体上为正常偏湿润,这与陕南秦巴山区气候湿润,降水较为丰沛有关。

2.3 干旱的时间变化特征

为了研究 2004—2014 年陕西省总体干旱状况的变化特征,取每年月 TVDI 的平均值代表年均 TVDI,作年均 TVDI 变化图(图 4)。从年均 TVDI 的变化情况来看,11 a 中陕西省的陕北、关中、陕南三个

地区的 TVDI 均呈现出波动下降的趋势。为了进一步说明其变化的趋势及显著性等特点,利用一元线性回归方法对不同地区的 TVDI 进行回归分析,结果见表 4。

从回归方程的斜率来看,三个地区的回归方程斜率均为负,说明 11 a 来各地区 TVDI 值均在减小。其中陕北地区 TVDI 变化最大,其次是陕南地区,TVDI 变化最小的是关中地区。而从变化的显著性来看,关中地区 TVDI 变化的显著性较陕北地区和陕南地区弱,但三个地区的回归方程均通过了 0.05 的显著性检验,说明整体上陕西省 TVDI 在 2004—2014 年之间呈现出减小的状态,全省的干旱状况总体上呈减弱的趋势。

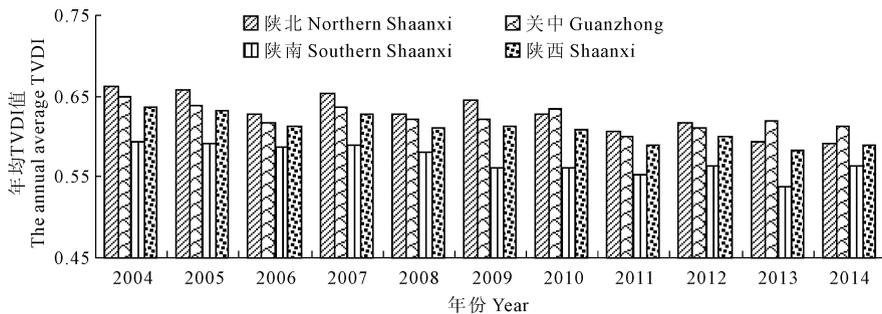


图 4 2004—2014 年陕西省 TVDI 年际变化

Fig. 4 Annual variation of TVDI from 2004 to 2014 in Shaanxi

表 4 不同区域 TVDI 的一元线性回归特征及干旱变化趋势

Table 4 Characteristic of linear regression of TVDI in different areas and trend of drought

地区 Region	回归方程 Regression equation	R^2	显著性 Significance	TVDI 趋势 Trend of TVDI	干旱趋势 Trend of drought
陕西 Shaanxi	$y = -0.0051x + 10.768$	$R^2 = 0.8492$	$P < 0.01$	减小 Decrease	变湿 Wet
陕北 Northern Shaanxi	$y = -0.0067x + 14.001$	$R^2 = 0.7972$	$P < 0.01$	减小 Decrease	变湿 Wet
关中 Guanzhong	$y = -0.003x + 6.5871$	$R^2 = 0.4951$	$P < 0.05$	减小 Decrease	变湿 Wet
陕南 Southern Shaanxi	$y = -0.0048x + 10.182$	$R^2 = 0.7555$	$P < 0.01$	减小 Decrease	变湿 Wet

统计每个月份陕西省 11 a 的平均 TVDI 值(图 5),以研究陕西省干旱的年内变化特征。从图 5 来看,陕北地区旱情多发于春夏两季,春季旱情尤为严重,春季 TVDI 在 0.70~0.77 之间波动,4、5 月份最大,随着夏季降雨的到来,其 TVDI 逐渐下降,但大部分时间仍处于较干旱的状态;关中地区年内 TVDI 波动较小,全年大部分时间 TVDI 在 0.6~0.7 之间变化,为轻度干旱状态,旱情主要发生在春冬两季;陕南地区全年大部分时间处于正常偏湿润状态,但在降水较少的冬季会发生轻度干旱,随着春季降水的增多,其 TVDI 值呈快速下降趋势,而到了汛期集中的 6、7 月份,其 TVDI 值达到最低,在 0.4~0.5 之间波动,较为湿润。

2.4 干旱的时空演变趋势

各地区的年平均 TVDI 反映的是该地区的总体干旱状况,而区域内地形复杂,植被覆盖差异较大,基于像元的旱情变化分析能更有效地反映其干旱状况。以陕西省年平均 TVDI 表征当年的干旱情况。研究区内的每个像元,对应 11 a 的时间序列 TVDI 值,将研究区内每个像元的年均 TVDI 值按公式(4)进行趋势分析,若 β 为正值,表明该栅格所在的位置年平均 TVDI 有增加的趋势,干旱情况在加重,相反,如果 β 为负值,表明当地 TVDI 在减小,干旱情况呈减弱趋势。由于趋势值 β 等于零的情况极少出现,所以根据实际情况将 β 介于 -0.001 到 0.001 之间的像元划分为稳定不变的区域。图 6 为 TVDI

变化空间分布图。从图中可以看出,陕北大部分地区 TVDI 呈减小状态,干旱呈现减弱趋势,陕南大部分地区 TVDI 呈稳定状态,干旱状况不变,在关中地

区出现了一定面积的 TVDI 变大区域,而该地区 TVDI 减小区域面积较小,表明该地区干旱呈现出加重的趋势。

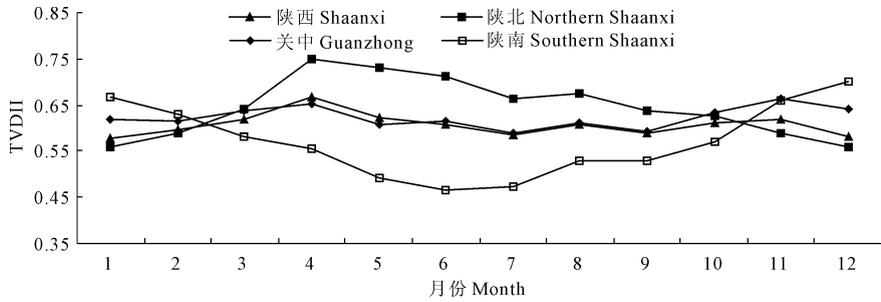


图 5 TVDI 月值(11 a 平均值)变化情况

Fig.5 The monthly variation of average TVDI(11 - years average)

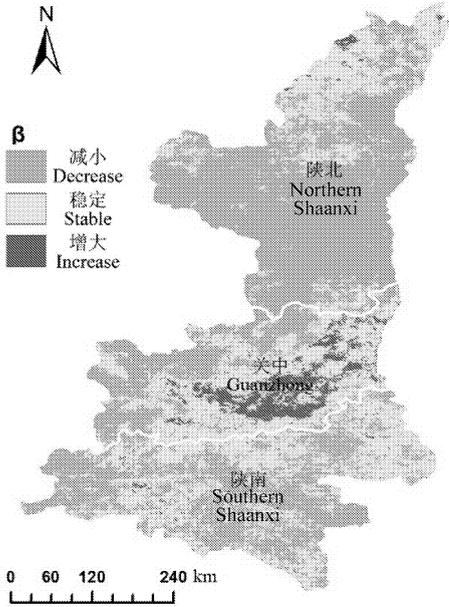


图 6 TVDI 变化趋势空间分布

Fig.6 Spatial distribution of variation trend for TVDI

到陕西省干旱变化类型空间分布(图 8),划分标准见表 5。

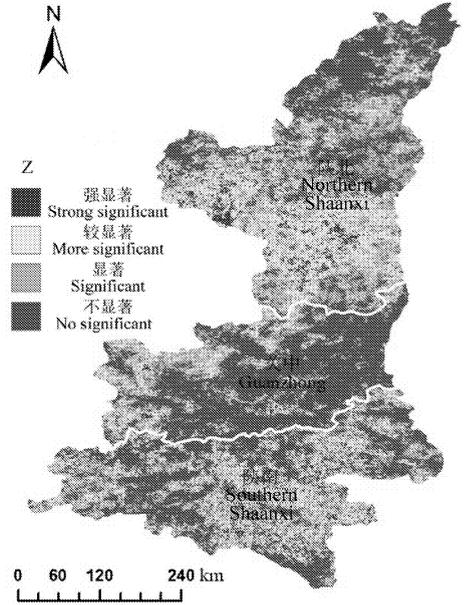


图 7 TVDI 变化显著性空间分布

Fig.7 Spatial distribution of variation significance for TVDI

TVDI 趋势值 β 的计算结果仅能反映在一定时间序列里, TVDI 呈增加或者减小的趋势,并不能表示发生这种趋势的显著性,所以需要利用公式(5)~(9)进行趋势显著性检验。在显著性检验中,选取 0.001、0.01、0.05 三个显著性水平,其对应的 Z_c 值分别为 3.29、2.58、1.96,以此将显著性划分为 4 个级别,分别为强显著、较显著、显著、不显著。TVDI 变化显著性的空间分布如图 7 所示。将 TVDI 变化趋势空间分布和 TVDI 变化显著性空间分布进行叠加,得到像元尺度上 TVDI 实际变化情况。通过对 TVDI 实际变化进行重新分类,可以将陕西省 2004—2014 年干旱变化划分为显著变湿、变湿、轻微变湿、稳定不变、显著变干、变干、轻微变干 7 种类型,并得

对于干旱实际变化结果进行分区统计,统计结果如表 6。从表 6 和图 8 可以看出,陕西省三大区域陕北、关中、陕南干旱状况保持稳定的面积分别为 32.58%、62.18%、39.73%,均是所有变化类型中所占面积最大的区域,说明陕西省 2004—2014 年整体干旱状况变化较小。显著变湿的面积分别为 4.97%、0.93%、3.94%,这说明干旱状况显著好转的区域很小,在这 7 种变化类型中除了稳定不变类型外,面积所占最大的为变湿和轻微变湿的区域,其面积之和在陕北、关中、陕南所占的百分比分别为 67.29%、30.95%、68.35%,这说明虽然 TVDI 减小

很显著的区域并不多,但大部分区域的 TVDI 在减小,干旱状况呈减弱趋势。三个地区中变干区域所占面积均很小,分别为 0.16%、5.94%、0.11%,且变干区域集中在关中城市群及周边地区,此外西北毛乌苏沙漠边缘地区以及汉中市周边小部分地区也出现变干趋势,主要因为城市的发展使得该区域植被覆盖度下降,地区生态系统整体抵抗自然灾害的能力在减弱。

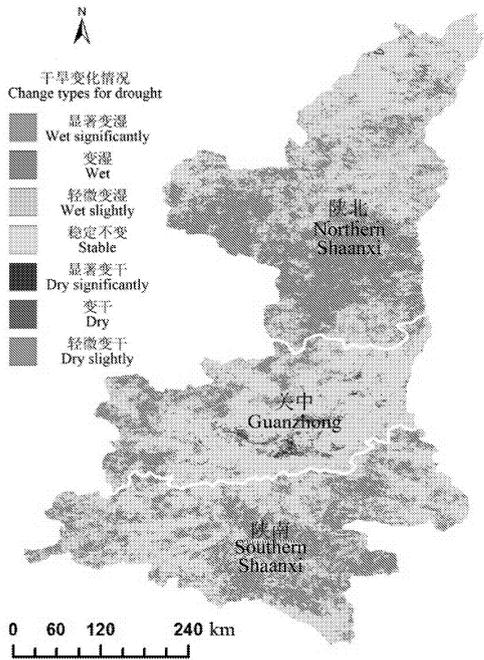


图 8 陕西省 2004—2014 年干旱变化类型空间分布
Fig.8 Spatial distribution of drought changes in Shaanxi from 2004 to 2014

表 5 干旱变化显著性等级划分

Table 5 Scaled drought according to the significance of variation

β	$ Z_c $			
	> 3.29	3.29 ~ 2.58	2.58 ~ 1.96	1.96 ~ -1.96
> 0.001	显著变湿 Wet significantly	变湿 Wet	轻微变湿 Wet slightly	稳定不变 Stable
-0.001 ~ 0.001	稳定不变 Stable	稳定不变 Stable	稳定不变 Stable	稳定不变 Stable
< -0.001	显著变干 Dry significantly	变干 Dry	轻微变干 Dry slightly	稳定不变 Stable

2.5 TVDI 变化与气象因子的关系

湿润指数是表征气候干湿程度的重要指标。为了探究引起 TVDI 变化的气象因素,本文计算了陕西省境内均匀分布的 20 个气象站点的 2004—2014 年的年湿润指数,并提取以各气象站点为中心 9×9

个像元数范围的 TVDI 年平均值,将各地区 TVDI 年平均值与该地区各个气象站点的年湿润指数做相关性研究,相关性结果见表 7。结果显示 TVDI 与湿润指数均呈负相关关系,且通过了 0.05 水平的显著性检验,其中陕北地区 TVDI 与湿润指数的相关性最好,相关系数为 -0.656,且通过 0.01 水平的显著性检验。这说明湿润指数变化和 TVDI 变化对陕西省 11 a 来干旱变化的表征具有一致性,气象因素是引起干旱变化的原因之一。

表 6 各干旱变化类型所占面积比/%

Table 6 The ratio of area for each drought type

变化类型 Change type	陕北 Northern Shaanxi	关中 Guanzhong	陕南 Southern Shaanxi	陕西 Shaanxi
显著变湿 Wet significantly	4.97	0.93	3.94	4.03
变湿 Wet	30.99	12.69	27.59	24.97
轻微变湿 Wet slightly	31.30	18.26	28.62	26.38
稳定 Stable	32.58	62.18	39.73	42.89
显著变干 Dry significantly	0.02	0.46	0.01	0.12
变干 Dry	0.06	1.90	0.03	0.50
轻微变干 Dry slightly	0.08	3.58	0.08	1.11

表 7 陕西省 TVDI 与湿润指数相关性分析

Table 7 Correlation analysis between TVDI and wetness index in Shaanxi

地区 Region	相关系数 Correlation coefficient	显著性 Significance
陕西 Shaanxi	-0.158	$P < 0.05$
陕北 Northern Shaanxi	-0.656	$P < 0.01$
关中 Guanzhong	-0.259	$P < 0.05$
陕南 Southern Shaanxi	-0.246	$P < 0.05$

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 的相关关系。以一年 12 个月气温的平均值作为年平均气温,以一年 12 个月降水量之和作为年降水量,计算研究区 20 个气象站点的年平均气温及年降水量,并取各站点平均值来代表陕西省 11 a 的整体气温和降水情况,即可分别得到 11 个时间序列的气温和降水值,对时间序列值进行一元线性回归分析(图 9,图 10)。结果显示 11 a 间,陕西省年降水量在 450 mm 到 700 mm 之间波动,且出现增加的趋势,回归方程通过 0.05 水平的显著性检验,说明 11 a 来陕西省降水量在显著增加。而 11 a 的温度在 11.2℃到

12.6℃之间波动,没有表现出来明显的变化趋势。

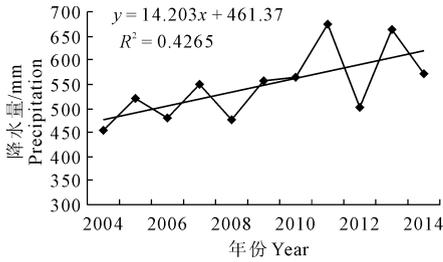


图9 陕西省 2004—2014 年降水量变化

Fig.9 Changes of precipitation in Shaanxi Province from 2004 to 2014

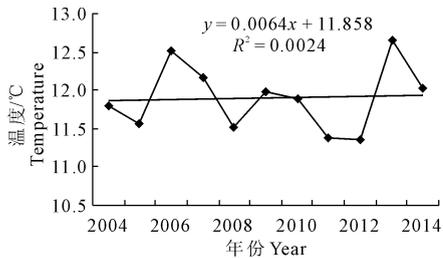


图 10 陕西省 2004—2014 年平均温度变化

Fig.10 Annual temperature change in Shaanxi Province from 2004 to 2014

将 11 a 的年均 TVDI 值与年均气温以及年降水量做 Pearson 相关性分析,结果见图 11 和图 12,结果显示陕西省年均 TVDI 值与陕西省年降水量呈现负相关关系,相关系数为 -0.719 ,相关程度较高,且 $P = 0.019$,通过 0.05 水平的显著性检验。而年 TVDI 与年平均气温基本不存在相关关系。因此,气象因子中的降水增加成为影响陕西省 2004—2014 年 TVDI 值减小,干旱状况减弱的一个主要因素。

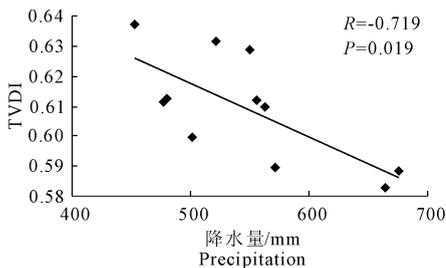


图 11 TVDI 与降水量的关系

Fig.11 Relationship between TVDI and precipitation

3 结论

1) 本研究采用 1 km 分辨率的时间序列 MODIS 数据,将一元线性回归、Theil - Sen Median 趋势分析、Mann - Kendall 检验等方法应用到像元 TVDI 的变化分析上,来研究陕西省 11 a 来干旱的空间分布

特征,时间变化特征及干旱演变趋势。研究结果能较好反映陕西省 11 a 旱情的变化情况,有助于防灾减灾决策的制定,对区域内旱情的准确监测和干旱演变研究具有一定的参考价值。

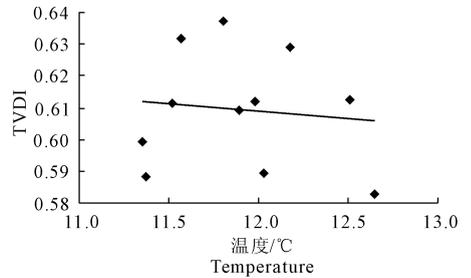


图 12 TVDI 与温度的关系

Fig.12 Relationship between TVDI and temperature

2) 从空间分布看,陕西省干旱分布范围广,11 a 来干旱发生频率呈现北高南低的特点。陕北、关中、陕南三大区域干旱发生的频率分别为 68.2%、53.8%、22.7%,且均以轻度干旱为主。从时间变化来看,陕西省 2004—2014 年 TVDI 值整体上呈下降趋势,且通过 0.05 水平的显著性检验。从年内变化来看,陕西省 TVDI 年内最高值出现在 4 月份和 11 月份,陕西省以春季干旱和冬季干旱为主,全年平均 TVDI 在 0.55 ~ 0.70 之间波动,易发生干旱。

3) 从变化趋势来看,2004—2014 年陕西省有 55.38% 的区域 TVDI 值呈减小趋势,干旱情况在减弱;有 42.89% 区域的 TVDI 值呈不变趋势,干旱情况处于稳定状态;有 6.2% 的区域 TVDI 值呈增加趋势,干旱情况在加重,加重区域集中在关中城市群及周边地区和西北毛乌素沙漠边缘地区。整体上陕西省 11 a 来干旱情况在平稳中呈现减弱变化的趋势。

4) 陕西省 11 a 来 TVDI 值的变化与湿润指数数值的变化是有一致性。在 11 a 中陕西省年降水量在波动中出现了显著的增加,而平均气温基本不变。陕西省 2004—2014 年年均 TVDI 值与年降水量呈现出显著的负相关关系,年降水量的增加成为影响陕西省 TVDI 减小,干旱情况减弱的一个主要因素。

4 讨论

1) 受限于 MODIS 数据的时间长度,本文只研究了 2004—2014 年 TVDI 的变化趋势,对长时间干旱变化研究的指导意义有限。采用其他遥感数据源或对多源遥感数据进行数据扩展和完善是后续更长时间序列遥感干旱监测研究的一个重点。

2) TVDI 表征的是地表植被、土壤等要素对气象干旱胁迫的响应情况,能较好地反映土壤湿度的

变化。湿润指数综合考虑降水和气温以及相对湿度、日照时数、风速等气象因子的共同效应,它的物理基础在于体现了两个最重要的地表水分收支分量:大气降水和最大可能蒸散量,能较为客观地反映地区气候的干湿状况。所以 TVDI 与湿润指数对干旱的表征侧重点不一样,TVDI 与气象干旱监测结果会存在一定的差异,这也是本研究中湿润指数与 TVDI 出现显著负相关关系,但相关系数较小的原因。

参考文献:

- [1] 杨波,马苏,王彬武,等.基于 MODIS 的湖南省农业干旱监测模型[J].自然资源学报,2012,27(10):1788-1795.
- [2] 江东,付晶莹,庄大方,等.2008—2009 年中国北方干旱遥感动态监测[J].自然灾害学报,2012,21(3):92-101.
- [3] 王连喜,边超钧,李琪,等.陕西省干旱变化特征及其对玉米产量的影响[J].自然灾害学报,2014,23(6):193-199.
- [4] 胡红武,胡梅,龙玲,等.区域干旱遥感监测研究综述[J].安徽农业科学,2008,36(33):14817-14819.
- [5] 黄友昕,刘修国,沈永林,等.农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法研究进展[J].农业工程学报,2015,31(16):186-195.
- [6] Bhuiyan C, Singh R P, Kongan F N. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region(India) using different indices based on ground and remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2006,8(4):289-302.
- [7] Anderson MC, Hain C, Otkin J, et al. An intercomparison of drought indicators based on thermal remote sensing and NIDAS-2 simulations with U.S. drought monitor classifications[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013,14(4):1035-1056.
- [8] Sandholt Inge, Rasmussen Kjeld, Andersen Jens. 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.
- [9] 孙丽,王飞,吴全.干旱遥感监测模型在中国冬小麦区的应用[J].农业工程学报,2010,26(1):243-249.
- [10] 杨胜天,刘昌明,孙睿.黄河流域干旱状况变化的气候与植被特征分析[J].自然资源学报,2003,18(2):136-141.
- [11] 杜灵通,候静,胡悦,等.2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].农业工程学报,2015,31(14):209-216.
- [12] 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.
- [13] 蔡博峰,于嵘.基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J].遥感学报,2009,13(6):1170-1186.
- [14] 王宁,南忠仁,何磊,等.2001—2011 年肯尼亚植被与降水时空变化特征及其相关性分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2014,50(33):534-540.
- [15] 杨啸.基于时序 NDVI 的湖北省植被覆盖动态变化监测分析[J].长江流域资源与环境,2013,22(2):226-231.
- [16] 白淑英,吴奇,史建桥,等.基于时间序列遥感数据的西藏山南地区植被覆盖变化特征分析[J].中国沙漠,2015,35(5):1396-1402.
- [17] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].生态学报,2013,33(24):7798-7806.
- [18] 周丹,张勃,任培贵,等.基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 a 干旱特征分析[J].自然资源学报,2014,29(4):677-688.
- [19] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990,28:940-948.
- [20] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurement to infer surface soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1994,9(1):161-173.
- [21] Nemani R R, Running S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal Thermal - IR/VHRR data[J]. Journal of Applied Meteorology, 1989,28(4):276-284.
- [22] Moran M S, Rahman A F, Washburne J C, et al. Combining the Penman - Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996,80(2):87-109.
- [23] Sandholt L, 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.
- [24] 赵英时,等.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2013:465-467.
- [25] 沙莎,郭妮,李耀辉,等.我国温度植被旱情指数 TVDI 的应用现状及问题简述[J].干旱气象,2014,32(1):128-134.
- [26] 徐建华.计量地理学[M].北京:高等教育出版社,2014:117-118.
- [27] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [28] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [29] 王允,刘普幸,曹立国,等.基于湿润指数的 1960—2011 年中国西南地区地表干湿变化特征[J].自然资源学报,2014,29(5):830-838.
- [30] 刘多森,汪枏生.可能蒸散量动力学模型的改进及其对辨识土壤水分状况的意义[J].土壤学报,1996,33(1):21-27.
- [31] 宋春桥,游松财,刘高焕,等.基于 TVDI 的藏北地区土壤湿度空间格局[J].地理科学进展,2011,30(5):569-576.
- [32] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997,18(1):71-94.
- [33] 王纯枝,留喜,何延波,等.温度植被干旱指数法(TVDI)在黄淮海平原土壤湿度反演中的应用研究[J].土壤通报,2009,40(5):998-1005.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 姜亚珍,张瑜洁,孙琛,等.基于 TVDI 河北省干热风同期土壤湿度监测研究[J].遥感技术与应用,2014,29(3):442-450.