

2001—2020 年黄土高原干旱时空动态及其对气候变化的响应

樊莉莉¹, 耿斌¹, 王吉林², 陈杰³

(1.石家庄职业技术学院, 石家庄 050081; 2.黄河水利科学研究院, 郑州 450003;

3.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要:为实现对黄土高原区域范围内旱情动态监测,基于 MODIS NDVI 和 LST 数据计算了温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI),并基于 TVDI 时序数据探究了黄土高原 2001—2020 年 TVDI 时空动态、未来持续状态及降水、气温对 TVDI 的影响。结果表明:(1) 20 a 间黄土高原 TVDI 以 0.000 2/a 的速率增加,2005 年、2007 年大范围呈现重旱。春季 TVDI 增加速率小(增长速率=0.000 2/a, $R^2=0.000\ 3$),夏季 TVDI 的增加速率为 0.001 2/a,秋季 TVDI 的增加速率最大(增长速率=0.004 4/a, $R^2=0.283\ 6$),冬季 TVDI 呈减小趋势。(2) 春、夏两季将来一段时间内黄土高原大部分区域 TVDI 将呈减小趋势,秋季 TVDI 在将来一段时间内大部分像元数将呈变小趋势,将来一段时间冬季 TVDI 持续增加,尤在陕西中部地区的这种趋势更为明显。(3) 除夏季 TVDI 与降水以正相关性为主外,其他三季均以负相关为主。春、冬季气温与 TVDI 以负相关为主;夏、秋季以正相关性为主。综上,黄土高原未来一段时间内干旱程度可能会有所减小,但不同季节的干旱差异性较大,因此未来黄土高原生态恢复工程应综合考虑当地的水资源实现生态可持续发展。

关键词: TVDI; 时空动态; 气温; 降水; 黄土高原

中图分类号: P426.6; S165⁺.2; P429

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)06-0183-09

Temporal and Spatial Dynamics of Drought and Its Response to Climate Change in the Loess Plateau from 2001 to 2020

FAN Lili¹, GENG Bin¹, WANG Jilin², CHEN Jie³

(1. Shijiazhuang Vocational Technology Institute, Shijiazhuang 050081, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To realise the dynamic and continuous monitoring of drought in the Loess Plateau region, based on the Temperature Vegetation Drought Index (TVDI), the temporal and spatial distribution characteristics of TVDI in the Loess Plateau from 2001 to 2020 and the influence of precipitation and temperature on the change of TVDI were studied. The results showed that: (1) TVDI increased at a rate of 0.000 2/a in 20 years, and severe drought occurred in 2005 and 2007. The increase rate of TVDI is relatively low in spring (growth rate=0.000 2/a, $R^2=0.000\ 3$), the increase rate of TVDI is 0.001 2/a in summer, the increase rate of TVDI is the greatest in the autumn (growth rate=0.004 4/a, $R^2=0.283\ 6$), and the increase rate of TVDI is decreasing in the winter. (2) In the spring and summer, TVDI will decrease in most areas of the Loess Plateau in the future. In autumn, TVDI will decrease in most places. In winter, TVDI will continue to increase in the future, especially in central Shaanxi. (3) The relationship between TVDI and precipitation in spring, autumn and winter is mainly a negative correlation, and the correlation coefficient is mainly between -0.5 and 0. There is a positive correlation between TVDI and precipitation in summer. In spring and winter, the temperature is negatively correlated with TVDI, that is, the temperature increases, while the TVDI decreases in summer. There is a positive correlation between TVDI and temperature in summer and autumn.

收稿日期: 2021-02-04

修回日期: 2021-03-18

资助项目: 国家自然科学基金“长江流域洪水对气候变化的热力学响应机理及迁移路径研究”(52009091)

第一作者: 樊莉莉(1979—),女(回族),河北南宫人,硕士,副教授,主要从事水土保持及地理学研究。E-mail: wangjilin0223@163.com

The drought degree of the Loess Plateau may decrease in the future, but the drought varies greatly in different seasons. Therefore, the future ecological restoration project of the Loess Plateau should comprehensively consider the local water resources to achieve ecological sustainable development.

Keywords: TVDI; spatial and temporal dynamics; temperature; precipitation; the Loess Plateau

黄土高原作为中国重要的农业区之一,大部分地区属于半干旱和亚湿润气候,沿东南—西北方向的年平均降水量(1961—2009 年)为 143.6~811.8 mm,干旱事件的频繁发生使该地区 21 世纪面临最复杂的挑战之一^[1-2]。但干旱事件的发生是一个复杂的过程,受气候变化、植被退化、人类活动等多种因素的影响,由于其发生频率高、持续时间长、影响范围广等原因,目前干旱已成为影响农业、生态最严重的气象灾害^[3-4]。近年来,在全球变暖的影响下,黄土高原地区的温度将在整个世纪持续升高,并随后加速该地区的水分流失,使土地退化与恢复、干旱成为严重影响黄土高原生态环境的气候因子^[5]。因此,及时、有效监测黄土高原干旱发展规律已成为亟待解决的问题。

目前已有诸多学者对黄土高原的干旱进行了研究^[6-10]。在干旱变化趋势的研究中,有学者发现 1960—2016 年黄土高原干旱整体呈上升趋势,山西西部、宁夏北部和甘肃中东部地区的干旱加重最为显著,而西北部和西南部则表现为变湿趋势^[6-9]。也有学者发现未来时期(2018—2100 年)黄土高原干旱发生次数明显增多,未来干旱趋势显著加重的区域占黄土高原面积的 51.62%~99.90%,80%的地区将发生从无旱到轻旱、从无旱到中旱的等级转换^[10]。因黄土高原降水主要集中在夏、秋季,因此不同地区的干旱程度也因季节不同而存在显著差异。如有研究发现黄土高原东南部和西部在春、冬季干旱发生频率较其他地区频繁,而西北部干旱在夏、秋季发生频率较其他地区高,这主要与降水量、气温和蒸散发存在显著相关性^[6,10-12]。也有研究发现黄河上游的干旱危害趋于严重,中游干旱危害过去 40 a 中已得到一定程度缓解^[13]。虽然目前针对黄土高原干旱时空动态的研究很多,但很多是基于“点”尺度进行的,不同研究学者的结论不一致,且很少探讨未来干旱的持续情况和季节性气候对干旱的影响情况。而黄土高原干旱作为我国长期的一些生态环境监测任务,因此需要继续关注。温度植被干旱指数(TVDI)综合考虑了温度与植被双重特征,可以较为综合的反映一个地区干旱状况^[14-18]。如刘一哲^[19]、齐述华^[20]、程伟^[21]、候静^[22]等分别对藏北地区、全国、内蒙古草地的干旱变化特征进行分析,发现综合了植被覆盖信息和陆地表面温度信息

的 TVDI 指数能很好模拟土壤表层水分变化情况,在地表干旱监测方面具有较大应用潜力^[19-21]。

因此,本文基于 NASA 提供 2001—2020 年黄土高原的 MOD13A-NDVI 和 MOD11A2-LST 数据,基于 Python 编程计算得到 2001—2020 年黄土高原季节性 TVDI 指数,并基于 TVDI 指数探究了不同植被分区不同季节干旱时空动态和季节性气温、降水对季节干旱的影响情况,以期为我国黄土高原生态工程制定和未来生态环境治理提供参考意见。

1 研究区与研究方法

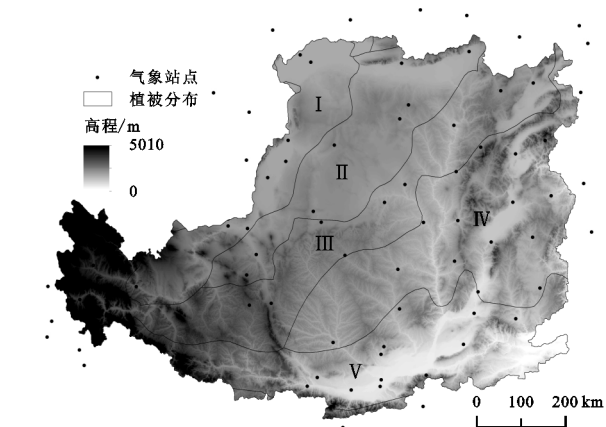
1.1 研究区概况

黄土高原位于中国北方(33.7°—41.3°N, 100.8°—114.6°E),穿越黄河上中游,总面积达 $6.49 \times 10^5 \text{ km}^2$,包括山西、内蒙古、陕西、河南、宁夏、甘肃、青海 7 省。区域处在沿海向内陆、平原向高原过渡地带,自南向北兼跨暖温带、中温带两个热量带,自东向西横贯半湿润、半干旱两个干湿区,受经纬度和地形的双重制约。降水量少而不均,从西北向东南逐渐增加,6—9 月,该地区 60%~70% 的年降水量以高强度风暴的形式出现。年平均气温为 3.6℃,西北部为 14.3℃。该地区全年气温日较差较大,冬季干冷,夏季湿热,秋季气温迅速下降,春季气温迅速上升。据估计,该地区的年潜在蒸发量(865~1 274 mm)超过了降水水平^[3](图 1)。

1.2 数据来源

(1) 遥感数据。NDVI 作为植被绿色度和活动性的衡量标准,已被广泛用于在大空间尺度上检索植被生长监测方面。我们使用了由星载传感器 MODIS 观测得出的 NDVI 数据计算 TVDI 指数。MODIS NDVI 数据集是从 MOD13A3 产品版本 6 产品中提取的,空间分辨率为 1 km,时间间隔为 16 d。地表温度数据(LST)选取 MOD11A2 产品提供的白天地表温度数据,该数据空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 d,数据处理方法与 NDVI 数据一致。为进一步去除异常值的影响,本文基于 Timesat3.3 插件提供的 S-G 滤波法对 NDVI 和 LST 数据进行去噪,然后采用最大值合成法合成为月值数据^[23]。LST 在不同的海拔高度上会因气温和大气湍流的影响而存在显著变化^[24-25]。而黄土高原地形起伏明显,气温和降水的时空

差异性大,因此本文对地表温度进行地形校正才能满足后续要求,地表温度订正公式见文献[26—27]。



注: I 为温带南部荒漠草原区, II 为温带南部典型草原区, III 为温带南部森林(草甸)草原区, IV 为暖温带北部落叶栎林区, V 为暖温带南部落叶栎林亚区,下同。

图 1 黄土高原植被分区及气象站点空间分布

(2) DEM 数据。因海拔会影响地表温度,因此本文使用 DEM 对 LST 数据进行地形校正。我们使用了 Google Earth Engine(GEE)平台提供的 2000 年的 90 m 的 NASA DEM 和 2015 年的 30 m 的 AW3D 作为 LST 地形校正的 DEM 数据。首先将其采样成 1 000 m 分辨率,2001—2010 年的 LST 采用 NASA DEM 进行校正,2011—2020 年的 LST 采用 AW3D 进行校正。

(3) 气象数据。本文的气候要素主要为气温和降水,来源于 2001—2020 年黄土高原及其周边地区的气象站(图 1),数据可从中国气象局数据网(<http://data.cma.cn>)获取。本研究利用 ANUSPLINE 以不同时段 DEM 为协变量,将气温和降水数据从点尺度插值成为 1 000 m 分辨率的栅格数据。将 12—2 月定义为冬季,3—5 月定义为春季,6—8 月定义为夏季,9—11 月定义为秋季^[28]。

(4) 中国植被区划数据来源于 1:100 万植被图。该植被区划数据是依据植被类型和地理分布特征进行划分区域,可以反映植被地理分布的规律性及其与环境的关系,提供区域或全球的植被地理图式^[29]。

1.3 研究方法

1.3.1 温度植被干旱指数(TVDI) LST 对裸露土壤或稀疏植被条件下的地表加热过程(热容量和热导率)有影响,因此对地表土壤含水量很敏感。随着植被覆盖度的增加,LST 对地表土壤含水量的变化响应缓慢。Price 等^[30]发现 NDVI 和 LST 的遥感像素值散点图通常为三角形或梯形。后来,Sandholt 等^[31]基于 LST-NDVI 典型的关系构建了 TVDI 指数用于反映地表干旱程度。理论上,在三角域中,与

NDVI 轴平行的三角形底边对应于研究区域内蒸散量最大的像素点,三角形的顶边(斜边)对应于研究区域内的零蒸散量像素点。在三角形顶部和底部之间,三角形的大部分对应于不同干旱条件下的蒸发量。随着 NDVI 沿 x 增加轴,最大 LST 减小,可以使用最小二乘法拟合负斜率,定义为干边缘。湿边缘由一组点组成,这些点为不同的地表植被覆盖形成一条水平线或倾斜线。在垂直方向上,NDVI 值恒定的三角形域的底部到顶部,由于表层土壤的水分胁迫,LST 逐渐增加,从湿边处的最小值到湿边处的最大值^[32]。干旱边缘地表土壤含水量相应地从最大值减小到最小值,TVDI 从 0 增加到 1,表明地表从极端潮湿变为极端干旱。TVDI 使用以下等式估算:

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

式中: T_s 为观测到的地表温度; $T_{s_{max}}$ 和 $T_{s_{min}}$ 分别为像素的最小和最大地表温度,它们在研究区域中具有相同的 NDVI 值,并被定义为湿边缘和干边缘。 $T_{s_{max}}$ 和 $T_{s_{min}}$ 通过散点图上下限的点组计算,他们的方程式如下:

$$T_{s_{max}} = a + b \cdot NDVI \quad (2)$$

$$T_{s_{min}} = c + d \cdot NDVI \quad (3)$$

式中: a, b, c, d 为在整个研究区域内估计的干湿边缘参数,包括整个表面水分含量范围。

1.3.2 TVDI 变化趋势分析 本文采用 Sen 斜率法分析近 20 a 黄土高原 TVDI 变化趋势。并基于 Mann+Kendall 对 Sen 趋势分析的显著性进行检验。Sen 的计算公式为^[33]:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (4)$$

式中: β 为干旱变化趋势;median 为取中值函数;当 $\beta < 0$ 时,TVDI 呈增加趋势; $\beta > 0$ 时,TVDI 呈减小趋势。

1.3.3 TVDI 未来持续状态分析 本文利用 Hurst 指数对黄土高原不同季节的 TVDI 进行未来变化趋势预测。Hurst 指数是根据时间序列长期依赖性 or 持续性的一种有效方法,一般采用 R/S 分析方法计算 Hurst 指数,具体算法见参考文献[34]。其中,Hurst >0.5 ,表示序列 TVDI 的长期相关性为正持续性;Hurst $=0.5$,表明 TVDI 变化为随机序列,与过去没有关系;Hurst <0.5 ,表示序列 TVDI 长期相关性特征为反持续性^[35]。

1.3.4 气温、降水对 TVDI 的影响分析 本文采用偏相关分析法分析季节性气温和降水对不同季节 TVDI 的影响情况^[36]。气温、降水和 TVDI 之间的

偏相关系数计算公式如下：

$$r_{ij \cdot 11, 12, \dots, 1n} = \frac{r_{ij \cdot 11, 12, \dots, 1n-1} - r_{i1n \cdot 11, 12, \dots, 1n-1} r_{j1n \cdot 11, 12, \dots, 1n-1}}{(1 - r_{i1n \cdot 11, 12, \dots, 1n-1}^2)(1 - r_{j1n \cdot 11, 12, \dots, 1n-1}^2)} \quad (5)$$

式中： r_{ij} 为 i 和温度 j 之间的偏相关系数，控制变量为降水量，反之亦然； i 为 TVDI； j 和 n 分别为季节性气温和降水量。

2 结果与分析

2.1 TVDI 空间分布特征

参阅吴黎等^[36]对研究区 TVDI 进行分级， $\text{TVDI} \leq 0.46$ ，地表湿润，无旱； $0.46 < \text{TVDI} \leq 0.57$ ，土壤水分正常或近地表空气偏干，轻旱； $0.57 < \text{TVDI} \leq 0.76$ ，土壤表面干燥，植被叶片缺水干黄，中旱； $0.76 < \text{TVDI} \leq 0.86$ ，土壤出现干土层，叶片干黄，重旱； $0.86 < \text{TVDI} \leq 1$ ，地表植物出现干枯死亡现象，特旱。

使用均值法计算得到 20 a 间黄土高原 TVDI 的时间特征发现(表 1,图 2)：黄土高原 TVDI 平均每年的增长速率为 0.000 2，TVDI 集中在 0.6~0.7，属中旱等级，即土壤表面干燥、植被叶片有缺水干黄现象。2005 年 TVDI 有最大值(0.738 2)，2012 年有最小值(0.591 8)。但不同季节 TVDI 的变化特征各不相同：春季 TVDI 的增加速率为四季最小(增长速率=0.000 2/a， $R^2=0.000\ 3$)，变化速率与年均值相同，变旱趋势不明显，但从每年均值的变化来看，春季 TVDI 的波动性最大，且其波动走势与年均值走势一致，但波动性比年均值大；夏季 TVDI 的增加速率为 0.001 2/a， R^2 为 0.453，变化速率大于春季和年均值；秋季 TVDI 的增加速率最大(增长速率=0.004 4/a， $R^2=0.283\ 6$)，变化较为明显，且与年均值变化基本呈相反趋势；冬季 TVDI 在 20 a 间的变化呈现变湿趋势，TVDI 呈减小趋势(减小速率=-0.004 3， $R^2=0.339\ 5$)，减小速率明显，且与年均值变化趋势基本呈相反趋势。总体而言，2012 年为 TVDI 变化的突变年份。

从 TVDI 均值空间图发现，近 20 a 黄土高原干旱整体为北部和东南部高，西部和西南部低的空间分布特征，最低值集中在黄土高原西部的青海省的西宁、门源、贵德、甘肃的临夏、临洮及东部山西的太原地区，TVDI 基本在 0.57 以下，即属于轻旱、无旱级别。最高值集中在黄土高原东南部河南和山西的长武等地区，TVDI 值基本在 0.76 以上，属重旱级别。从不同年份来看，2005 年的干旱程度最大，除黄土高原西部的部分地区，其他 TVDI 值均在 0.76 以上；其

次为 2007 年，其空间分布特征与 2005 年相似，TVDI 大范围表现为重旱；2019 年的干旱程度仅次于 2007 年，尤其在内蒙古的银川等地区，干旱程度为重旱。TVDI 最小的为 2014 年和 2012 年，TVDI 值集中在 0.7 以下，干旱程度较低(图 3)。

表 1 TVDI 年际变化相关系数

研究时段	TVDI 线性变化公式及显著性
年均值	$y=0.0002x+0.3397, R^2=0.001$
春季	$y=0.0002x+0.2752, R^2=0.0003$
夏季	$y=0.0012x-1.6598, R^2=0.0453$
秋季	$y=0.0044x-8.1224, R^2=0.2836$
冬季	$y=-0.0043x+9.3774, R^2=0.3395$

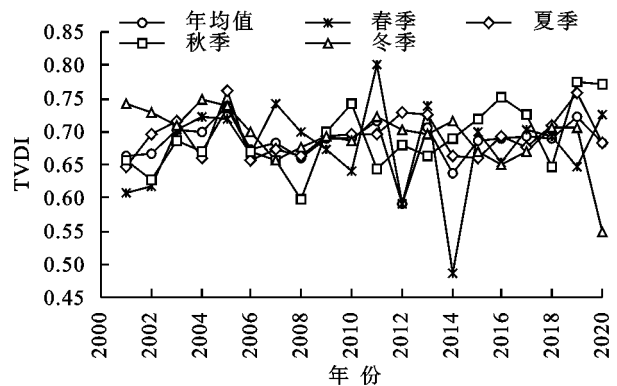


图 2 TVDI 时间曲线

2.2 TVDI 变化趋势分析

基于 Sen 和 M-K 检验方法等到 20 a 间全年及不同季节的 TVDI 的变化趋势的空间分布、不同植被分区中不同变化趋势等级中所占面积百分比(图 4)。其中，春季 TVDI 以增加趋势为主，增加速率集中在 0~0.005/a，占黄土高原总面积的 85.33%。TVDI 呈不显著减少趋势的区域集中在青海西部、甘肃中部、陕西和山西的少部分地区，减少速率集中在 0~0.005/a，占黄土高原总面积的 14.67%；夏季 TVDI 变化速率除在山西少部分地区与春季不同，其他地区与春季的变化趋势相近；秋季 98.21% 的像元数表现为增加趋势，增长速率集中在 0~0.005/a 的像元占 41.67%，56.54% 的像元上增长速率大于 0.005/a，呈不显著减小趋势的像元零星分布在陕西南部地区；20 a 间冬季 TVDI 大部分像元上表现为减小趋势，即土壤湿度在增加，尤其在青海东部大部分地区、甘肃西南部少部分地区减小速率大于 0.005/a，呈增加趋势的像元零星分布在陕西南部少部分地区。从全年变化趋势空间分布来看，20 a 间黄土高原 TVDI 以不显著增加为主，呈减少趋势的区域在青海中部、甘肃大部分地区、陕西中部、南部及山西有零星分布。

从不同植被分区下四季 TVDI 在变化速率分布

区间数据发现(图 4):全年 TVDI 在分区 I 和 II 均以 $0\sim0.005/a$ 变化速率增加,且像元百分比均小于 20%,分区 III、IV 和 V 不显著减小和增加趋势的像元所占百分比各级基本为 50%左右,不显著减小的像元数明显增多。从不同季节来看,春季的像元统计数

与全年的较为相近;夏季呈减小趋势的像元数明显小于春季和全年;秋季 TVDI 整个以增加趋势为主,且不同植被分区的像元数的差异较小;冬季除 V 区统计数与其他 4 区差别较大,其他 4 区相差不大,各个区呈增加趋势的像元占比均小于 20%。

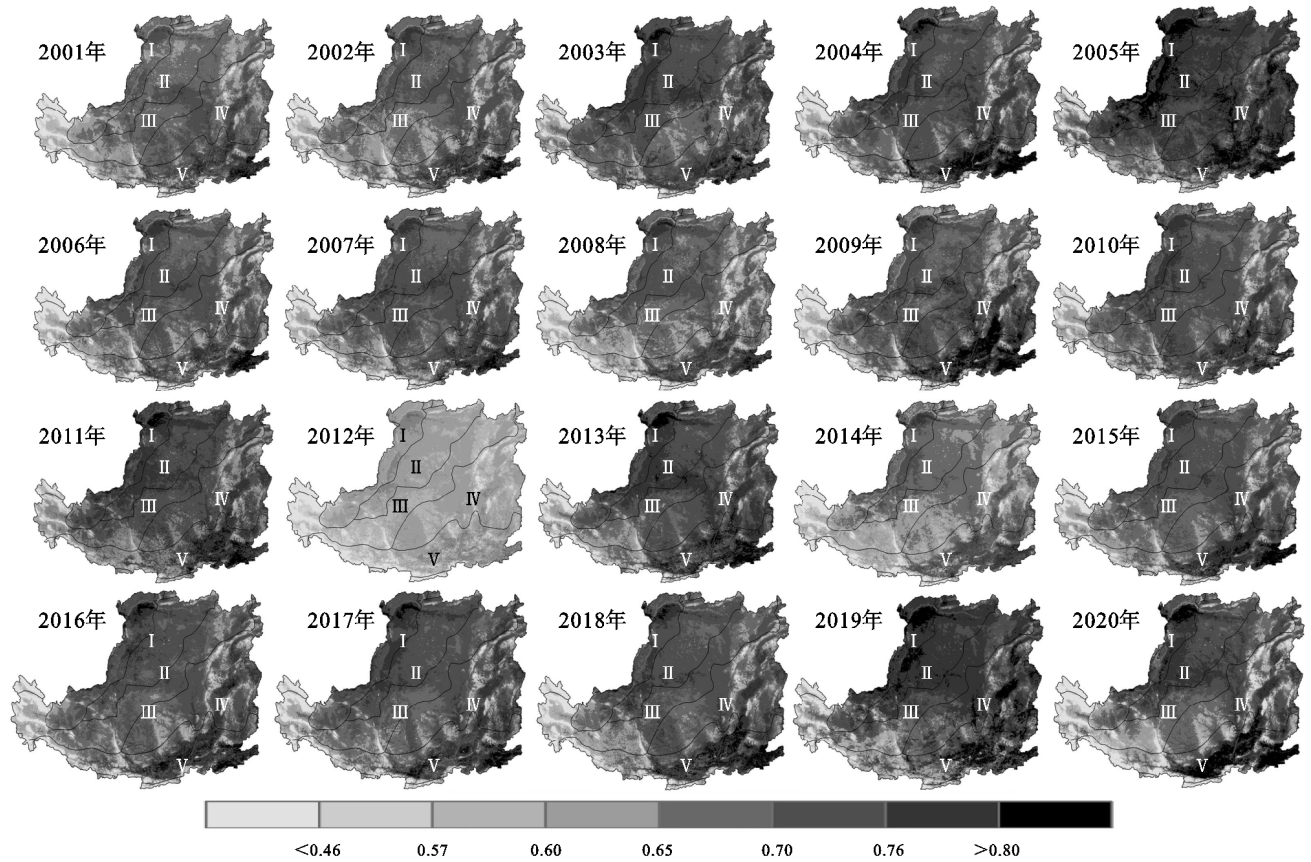


图 3 2001—2020 年黄土高原 TVDI 空间分布

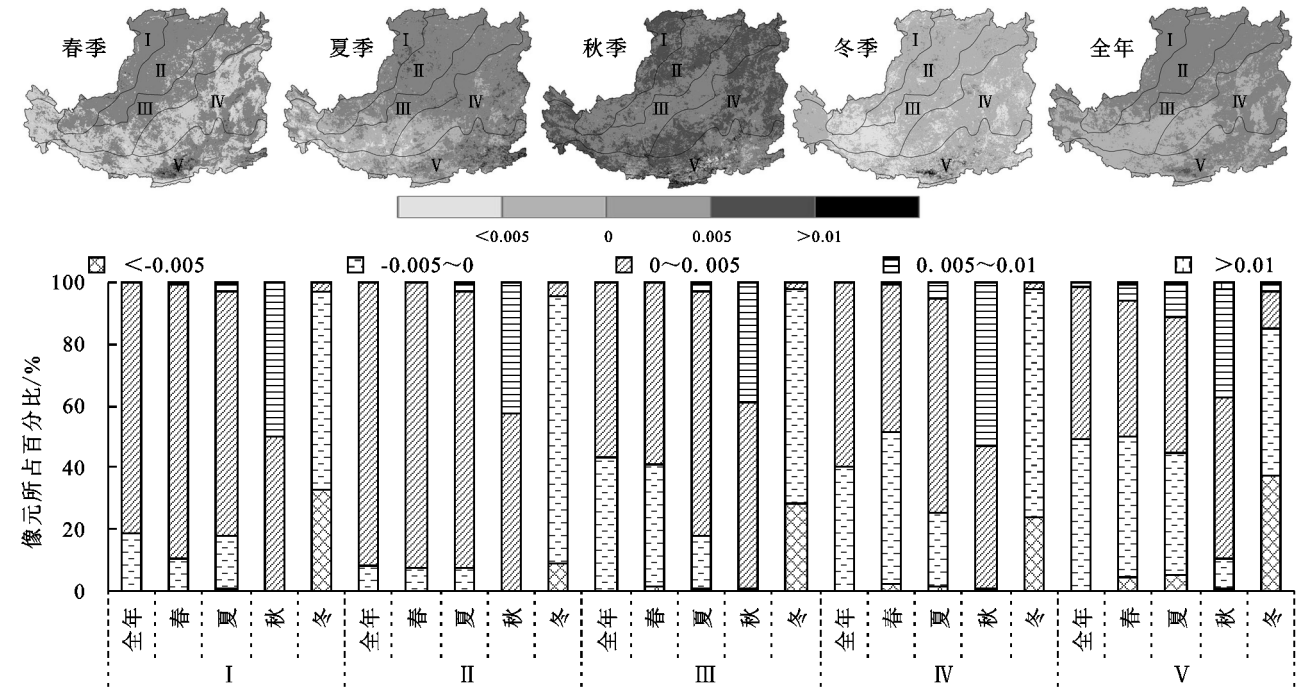


图 4 2001—2020 年黄土高原 TVDI 变化趋势及不同分区 TVDI 变化趋势

2.3 TVDI 未来持续趋势分析

从黄土高原 Hurst 指数年变化、各季节变化持续性空间分布(图 5)发现:黄土高原春季 Hurst 指数均值为 0.41,表示将来 TVDI 变化特征与过去 20 a 黄土高原春季 TVDI 长期相关性特征为反持续性,即将来黄土高原春季 TVDI 将以减小趋势为主,在陕西境内的大部分像元上的这种持续性较其他地区更强;夏季 Hurst 集中在 0.5 以下的像元占比为 61.76%,但在青海省西部、内蒙古的中部和北部、山西和陕西的少部分地区的 Hurst 集中在 0.5 以上,即这些区域的未来变化趋势与过去 20 a 的趋势相反,结合趋势分析发现青海省未来 TVDI 变大,其他几个地区未来 TVDI 均继续变小;秋季整个地区 TVDI 的 Hurst 指

数为 0.47,即秋季 TVDI 未来以变小趋势为主,呈增加趋势的主要集中在山西北部、内蒙古南部;冬季 Hurst 值为 0.51,大部分像元变化趋势与过去 20 a 相反,即冬季 TVDI 未来呈增加趋势,在陕西中部地区的这种趋势更为明显。

从全年来看,Hurst 指数均值为 0.45,即未来一段时间内的持续状态与过去 20 a 的变化呈相反趋势,空间分布上存在明显的空间异质性,存在明显的分区差异,在子植被分区 I, II 的 Hurst 集中在 0.5 以上,根据变化趋势结果表明在 I 区域未来一段时间内,TVDI 将呈减小趋势。III, IV, V 三区的 Hurst 指数集中在 0.5 以下,即未来一段时间的变化趋势与过去 20 a 的变化趋势相反。

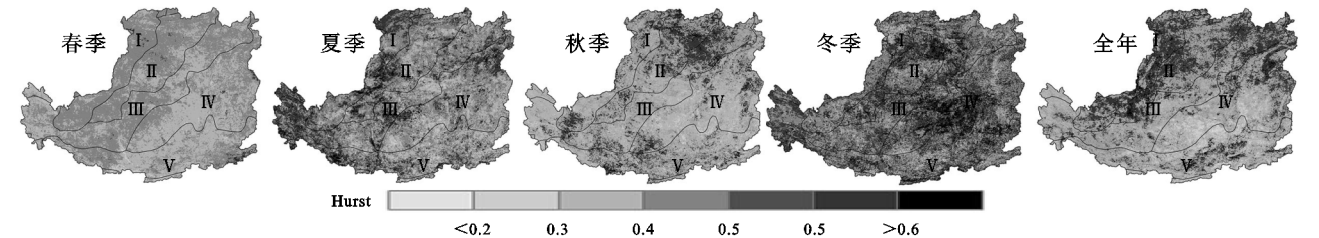


图 5 2001—2020 年黄土高原 Hurst 指数空间分布

2.4 气温、降水对 TVDI 的影响情况

在控制气温的条件下,春季 TVDI 与降水以负相关性为主,占黄土高原总面积的 85.41%,但只有 0.21%的区域达到 $p<0.05$ 的显著性检验。TVDI 与降水呈正相关性区域集中在海拔较高的青海北部、陕西南部地区;夏季 TVDI 与降水以正相关性为主,青海西部、内蒙古大部分地区及山西北部部分地区的相关系数集中在 0.3 以上,相关性较高。在海拔较低的陕西南部部分地区,TVDI 与降水呈极显著负相关关系。秋季 TVDI 与降水以负相关性为主,在陕西西部和甘肃西北部 and 东部的部分像元上相关系数达到 -0.5 以下,但在海拔较低的青海省西部、内蒙古地区的相关系数以正相关为主。冬季 TVDI 与降水主要以负相关为主,甘肃陇南、青海的青海湖区域少部分像元上表现为正相关关系。整年 TVDI 与降水以负相关性为主,仅在河南、陕西南部、山西东部部分像元上表现为正相关关系(图 6)。

在控制降水的条件下春季气温与 TVDI 以负相关为主,即温度升高,TVDI 减小,空间差异较小;夏季 TVDI 与气温以正相关关系为主,即温度升高会导致 TVDI 增大,尤其在陕西、河南、山西南部及甘肃中东部地区的正相关性较大;秋季 TVDI 与气温在黄土高原大部分地区表现为正相关关系,只有在海拔较低的河南、陕西南部部分像元上呈负相关性;冬季 TVDI

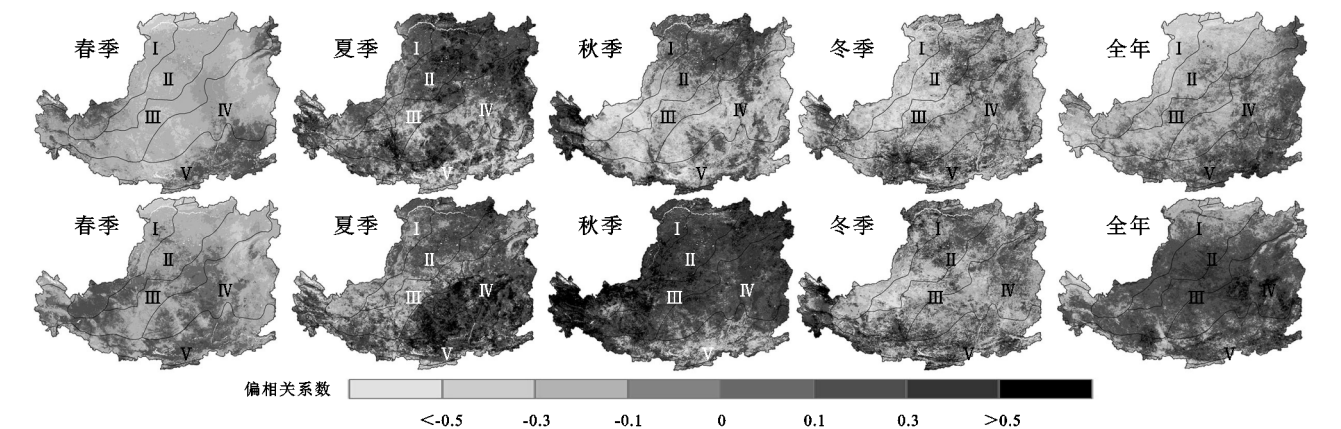
与气温以负相关性为主,尤其在宁夏中部地区。就全年尺度来看,气温对 TVDI 主要为促进作用,即温度的升高会是 TVDI 增大,地干干旱程度加深,仅在海拔较高的内蒙古部分地区、甘肃陇南和青海青藏高原境内地区部分像元上表现为负相关关系。

由图 7 可知,就降水来看,不同植被分区 TVDI 与降水的相关系数与季节存在较为明显的关系,全年除子植被分区 V 的相关系数为正,其他 4 区的 TVDI 与降水均为负相关关系,尤其是分区 I, II 的相关系数达到 -0.2 以下,负相关性明显,III 区相关系数为 -0.14 ,IV 区的相关系数均值为 -0.008 ,相关性接近 0,负相关关系不明显;春季 TVDI 与降水在 5 个区均呈负相关,除 V 区 TVDI 与降水的负相关关系不明显,其他 4 区的相关系数集中在 $-0.2\sim-0.1$;夏季 TVDI 与降水呈正相关关系,II 区的相关系数均值达到 0.2 以上,正相关关系明显,V 区 TVDI 与降水的关系不明显。秋季 TVDI 与降水均呈负相关关系,I, IV 区的负相关性较高,即 TVDI 随降水量的增多,明显下降,其他 3 区的相关性极低;冬季与全年的统计结果较为接近,但其相关性相较全年变低。

不同分区 TVDI 与气温的相关关系存在较大差异,全年 TVDI 与气温在 5 个区的相关系数均为正相关,尤其是 IV 区的相关系数均值达到 0.24,相关性较高,其他 4 区的相关系数在 0.1 上下波动;春季 TVDI 与气温除在 V 区的相关系数在 0 以上,其他 4 区

TVDI与气温均为不显著的负相关关系;夏季在Ⅰ区的 TVDI 与气温的相关系数接近 0,即气温的变化对 TVDI 的影响不大,Ⅱ,Ⅲ区的相关系数接近 0.1,较Ⅳ,Ⅴ区的相关性(0.25 以上)小很多;秋季除植被分

区Ⅰ,Ⅴ区外,其他 3 区 TVDI 与气温的相关系数接近 0.4,相关性极高;冬季 TVDI 与气温的相关性在不同植被分区间的关系为正负相关并存,但总体而言, TVDI 与气温的相关性较秋季低很多。



注:上为降水偏相关系数空间分布图,下为气温偏相关系数空间分布图。

图 6 TVDI 与气温、降水偏相关系数

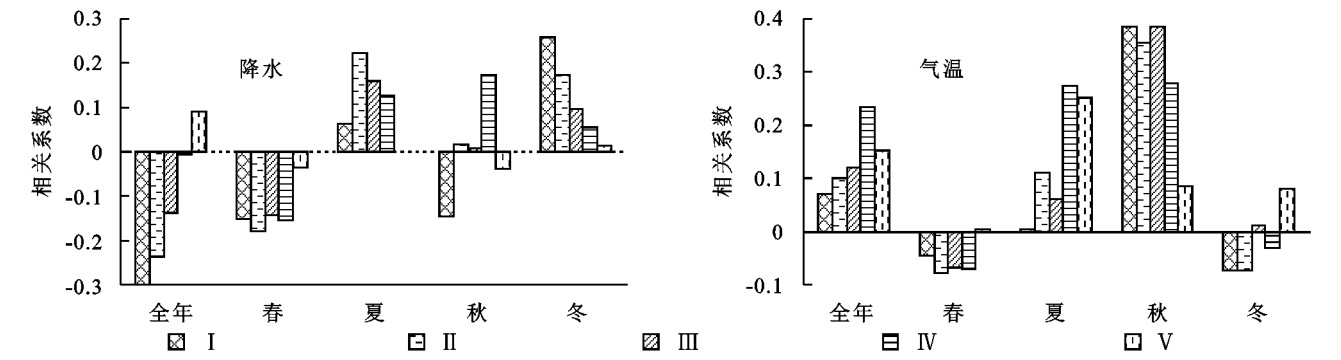


图 7 黄土高原 TVDI 与季节性气候不同植被分区的平均相关系数分布

3 讨论与结论

3.1 讨论

地处半湿润、半干旱、干旱的黄土高原地区,因生态环境十分脆弱、干旱灾害严重、土壤侵蚀剧烈而成为世界上水土流失最严重的地区,且 90% 的黄河泥沙来自黄土高原,因此黄土高原的生态健康直接维系黄河的健康运行。因此,20 世纪 80 年代以后,国家开展了一系列水土保持工程、退耕还林(草)工程、坡耕地整治工程控制水土流失,改善黄土高原生态环境建设。但随着植被覆盖度大幅度增加也使黄土高原部分地区土壤蒸发量加大,土壤干燥化程度加深^[28,37-39]。本文通过研究 2001—2020 年黄土高原干旱时空分布特征、过去 20 a 呈现的趋势、未来一段时间可能持续的趋势及其对气温和降水变化的响应。通过研究近 20 a 黄土高原时空分布特征,发现黄土高原过去 20 a 整体为变旱趋势,干旱整体呈现出北部、东南高、西部、西南低的空间分布特征,最低值集中在黄土高原西部的青海省的西宁、门源、贵德、甘肃

的临夏、临洮及东部山西的太原地区,属于轻旱、无旱级别,但在 2005 年、2007 年、2019 年大面积呈现为重旱,仅有海拔较低的青海没有出现重旱现象。最高值在黄土高原东南部河南和山西的长武等地区,属重旱级别。刘英等^[39]通过 TVDI 指数对陕西省的干旱监测也发现 2005 年比相近年份的受旱面积大,也有报道显示 2007 年在内蒙古、宁夏、河南、陕西等地区受到严重的旱灾,且干旱范围较大,局地干旱非常严重,全国因旱受灾面积多于 1991 年以来的年均值,这一研究结果和报道均为本文的研究结果提供支持。

20 a 间黄土高原 TVDI 以不显著增加趋势为主,即干旱程度在不显著增加,呈减小趋势的区域在青海中部、甘肃大部分地区、陕西中部、南部及山西有零星分布,未来一段时间内的干旱程度呈减弱趋势,但存在明显的分区差异。但春、夏两季干旱以增加趋势较秋季显著,冬季整体干旱程度减小。未来一段时间内黄土高原春季大部分区域的干旱程度有所缓解,夏季在大面积上表现为干旱缓解趋势,冬季未来一段时间内会在大范围变旱,尤其在陕西中部地区的这种趋势

更为明显。降水量与 TVDI 呈负相关,仅在河南、陕西南部、山西东部部分像元上表现为正相关关系;气温对 TVDI 起促进作用,即温度的升高会使 TVDI 增大,地表干旱程度加深,仅在海拔较高的内蒙古部分地区、甘肃陇南和青海青藏高原境内地区部分像元上表现为负相关。究其原因可能是因为黄土高原位于东亚夏季风影响区域边缘,东南部降水受夏季风制约,东亚夏季风强度显著减弱,导致黄土高原东、南部干旱增加。

3.2 结论

(1) 20 a 间黄土高原 TVDI 整体呈现出北部、东南高,西部、西南低的空间分布特征,最低值集中在青海省的西宁、门源、贵德,甘肃的临夏、临洮及东部山西的太原地区,TVDI 基本在 0.57 以下,即属于轻旱、无旱级别。最高值集中在黄土高原东南部河南和山西的长武等地区,TVDI 值基本在 0.76 以上,属重旱级别。

(2) 20 年间,黄土高原 TVDI 以不显著增加为主,在青海中部、甘肃大部分地区、陕西中部、南部及山西零星分布有呈减少趋势的像元。春季 85.33% 的面积上 TVDI 呈现出不显著的增加趋势,增加速率集中在 $0 \sim 0.005/a$,夏季 TVDI 以不显著增加趋势为主;秋季 98.21% 区域为增加趋势,56.54% 的像元上增长速率大于 $0.005/a$,冬季 TVDI 大部分像元上表现为减小趋势。

(3) 黄土高原 Hurst 指数均值为 0.45,即未来一段时间内黄土高原 TVDI 可能呈现出不显著的减少趋势,这说明黄土高原的干旱程度会有所缓解。春季未来一段时间内黄土高原大部分区域的 TVDI 将呈减小趋势,在陕西境内的大部分像元上的这种持续性较其他地区更强;夏季未来一段时间内青海省未来 TVDI 变大,其他几个地区未来 TVDI 均呈变小趋势;未来秋季 TVDI 将在一段时间内大部分像元数呈变小趋势,继续呈增加趋势的主要集中在山西北部、内蒙古南部的少部分地区;冬季未来一段时间冬季 TVDI 将呈增加趋势,尤其在陕西中部地区的这种趋势更为明显。

(4) 20 年间,黄土高原 TVDI 与降水除在河南、陕西南部、山西东部少部分地区呈现出正相关,其他大部分地区表现为负相关,气温对 TVDI 主要为促进作用,但在海拔较高的内蒙古部分地区、甘肃陇南和青海青藏高原境内地区部分像元上表现为负相关关系。春季 85.41% 的面积上 TVDI 与降水之间的关系

以负相关为主,相关系数主要集中在 $-0.5 \sim 0$,与春季气温也呈负相关;夏季 TVDI 与降水以正相关为主,在海拔较低的陕西南部少部分地区与降水呈极显著负相关,与气温呈正相关;秋季 TVDI 与降水以负相关为主,在海拔较低的青海省西部、内蒙古地区的相关系数以正相关为主,在海拔较高的内蒙古部分地区、甘肃陇南和青海青藏高原境内地区部分像元上表现为负相关;冬季 TVDI 与降水主要以负相关为主,与气温以负相关为主。

参考文献:

- [1] 周忠学.陕北黄土高原土地利用变化与社会经济发展关系及效应评价[D].西安:陕西师范大学,2007.
- [2] 孙艺杰,刘宪锋,任志远,等.1960—2016 年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J].地理研究,2019,38(7): 1820-1832.
- [3] 杨涛,陆桂华,李会会,等.气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J].水科学进展,2011,22(2):279-286.
- [4] 秦大河,丁一汇,王绍武,等.中国西部生态环境变化与对策建议[J].地球科学进展,2002,17(3):314-319.
- [5] 姚玉璧,张强,李耀辉,等.干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J].资源科学,2013,35(9):1884-1897.
- [6] 李明,邓宇莹,葛晨昊,等.1961—2017 年黄土高原气象干旱特征及其与大尺度气候因子的联系[J].生态环境学报,2020,29(11):2231-2239.
- [7] 侯青青,裴婷婷,陈英,等.1986—2019 年黄土高原干旱变化特征及趋势[J].应用生态学报,2021,32(2):649-660.
- [8] 李明,葛晨昊,邓宇莹,等.黄土高原气象干旱和农业干旱特征及其相互关系研究[J].地理科学,2020,40(12): 2105-2114.
- [9] 张永瑞,张岳军,靳泽辉,等.基于 SPEI 指数的黄土高原夏季干旱时空特征分析[J].生态环境学报,2019,28(7): 1322-1331.
- [10] 师玉锋,彭守璋.2018—2100 年黄土高原地区干旱的时空变化[J].兰州大学学报:自然科学版,2020,56(6): 785-792.
- [11] Liu Z, Wang Y, Shao M, et al. Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2016,534: 281-299.
- [12] 张耀宗,张勃,刘艳艳,等.近 50 年陇东黄土高原干旱特征及未来变化趋势分析[J].干旱地区农业研究, 2017,35(2):263-270.
- [13] 李常德,王磊,李晓霞,等.基于 SPI 指数的黄土高原区域旱涝特征分析[J].暴雨灾害,2020,39(5):524-531.
- [14] 吴英杰,全强,陈晓俊,等.2000—2018 年锡林郭勒地区

- 干旱时空变化及其气候响应[J].干旱区地理,2020,43(5):1289-1297.
- [15] 孔婕,李纯斌,吴静.草地土壤水分遥感反演方法的适用性[J].草业科学,2020,37(12):2463-2474.
- [16] 王娜,易桂花,张廷斌,等.基于 TVDI 的青藏高原腹地生长季土壤湿度时空变化及其气候响应[J].草业科学,2020,37(11):2185-2197.
- [17] 蔡庆空,陶亮亮,蒋瑞波,等.基于理论干湿边与改进 TVDI 的麦田土壤水分估算研究[J].农业机械学报,2020,51(7):202-209.
- [18] 吴欣睿,那晓东,臧淑英.温度植被干旱指数在 2000—2015 年松嫩平原土壤湿度中的应用[J].生态学报,2019,39(12):4432-4441.
- [19] 刘一哲,冯文兰,扎西央宗,等.基于 MODIS TVDI 和模糊数学方法的藏北地区旱情等级遥感监测[J].干旱区研究,2020,37(1):86-96.
- [20] 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):420-426.
- [21] 程伟,幸晓平.基于 TVDI 的内蒙古草地干旱变化特征分析[J].中国农业科学,2020,53(13):2728-2742.
- [22] 侯静,侯鹏,陈妍,等.近 15 年来若尔盖地区土壤湿度变化特征及驱动分析[J].环境生态学,2019,1(7):67-71.
- [23] Piao S, Wang X, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal eurasia from 1982 to 2006[J]. Global Change Biology, 2011,17(10):3228-3239.
- [24] Roerink G J, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000,21(9):1911-1917.
- [25] 沙莎,郭锐,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] 冉琼,张增祥,张国平,等.温度植被干旱指数反演全国土壤湿度的 DEM 订正[J].中国水土保持科学,2005,3(2):32-36.
- [27] 赵杰鹏,张显峰,廖春华,等.基于 TDVI 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.
- [28] 汪士为.近 20 年内蒙古干旱时空动态及其对气候、蒸散发变化的响应[J].水土保持研究,2022,29(4):231-239.
- [29] 侯学煜.1:100 万中国植被图[M].北京:科学出版社,2001.
- [30] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent inertia [J]. Remote Sensing of Environment, 1985,18(1):59-73.
- [31] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79:213-224.
- [32] Moran M S, Hymer D C, Qi J. Soil moisture evolution using multi-temporal synthetic aperture radar SAR in semiarid rangeland [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000,105:69-80.
- [33] 汪攀,刘毅敏.Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法在设备运行趋势分析中的应用[J].武汉科技大学学报,2014,37(6):454-472.
- [34] 吴黎.基于 MODIS 数据温度植被干旱指数干旱监测指标的等级划分[J].水土保持研究,2017,24(3):130-135.
- [35] 姜丽霞,王晾晾,吕佳佳,等.基于 Hurst 指数的黑龙江省作物生长季降水趋势研究[J].气象与环境学报,2020,36(2):70-77.
- [36] 徐建华.计量地理学[M].北京:高等教育出版社,2014.
- [37] Wu G L, Liu Y, Fang N F, et al. Soil physical properties response to grassland conversion from cropland on the semi-arid area[J]. Ecohydrology, 2016,9(8):1471-1479.
- [38] 丁一汇,司东,柳艳菊,等.论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J].大气科学,2018,42(3):533-558.
- [39] 刘英,岳辉,侯恩科.MODIS 数据在陕西省干旱监测中的应用[J].国土资源遥感,2019,31(2):172-179.