

▪ 水土资源与环境 ▪

文章编号: 1672-3317(2023)06-0059-08

基于 TVDI 的旱情时空动态变化监测

——以神东矿区为例

邵天意¹, 包斯琴^{1*}, 王楠², 韩阿茹汗¹

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010020;

2. 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院, 北京 100089)

摘要: 【目的】监测旱情的时空动态变化, 对神东矿区的土地复垦及生态恢复提供科学依据。【方法】采用 1991、2002、2007、2010、2014 年和 2018 年植被生长季 36 景 Landsat 数据, 基于温度干旱植被指数 (TVDI) 遥感反演模型, 应用偏差分析、线性倾向趋势分析、空间转移矩阵等数理统计分析方法对神东矿区 1991—2018 年植被生长季旱情时空动态变化进行监测。【结果】①月际变化表现为, TVDI 在每年 6—9 月出现低值, 整体 UF~UB 曲线几乎小于 0, TVDI 呈下降趋势。年际变化表现为, 1991、2002、2007、2010 年 TVDI 偏离值大于 0, 1991—2010 年 TVDI 呈上升趋势, 2014、2018 年偏离值小于 0, 2010—2018 年 TVDI 呈下降趋势, 变化趋势同月际变化一致。②神东矿区 TVDI 空间分布始终表现为西南高于东北, 干旱等级面积逐年减少。③神东矿区 TVDI 呈下降趋势面积大于 TVDI 呈上升趋势面积, TVDI 显著下降趋势面积最大为 2 394.74 km², 显著上升面积最小为 425.91 km²。④神东矿区干旱状态逐渐向较干旱、正常状态转变。较干旱状态逐渐向正常和较湿润状态转变。向干旱及较干旱状态转变的范围较小。【结论】基于 TVDI 模型进行神东矿区旱情动态变化监测效果良好, 变化明显, 可为神东矿区土地复垦提供参考。

关键词: 温度干旱植被指数; 时空动态变化; 旱情; 神东矿区

中图分类号: S165.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022509

OSID: 

邵天意, 包斯琴, 王楠, 等. 基于 TVDI 的旱情时空动态变化监测: 以神东矿区为例[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 59-66.
SHAO Tianyi, BAO Siqin, WANG Nan, et al. Monitoring Spatiotemporal Dynamic of Drought in Shendong Mining Area Based on Temperature Vegetation Dryness Index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 59-66.

0 引言

【研究意义】干旱是自然生态系统产量的重要输入因子, 同时也是植被发挥蒸腾作用及光合作用的限制因子, 其在一定程度上能够决定一个地区的植被类型和植被生长结构^[1], 更是衡量荒漠化程度以及指导生态恢复措施实施的重要影响因子, 对准确且快速的掌握旱情状况对土地复垦、生态修复和农业生产具有指导意义^[2]。【研究进展】传统长时间序列的旱情监测方法需要消耗巨大的人力、物力和财力。相比于传统的监测方法, 遥感监测具有监测范围广、时效性长等特点^[3]。诸多学者^[4-6]针对遥感监测领域进行的大量研究表明, 表观热惯量模型进行干旱遥感监测需要地表反照率和太阳辐射作为参数, 其更适用于裸土的研究区, 同时还需考虑土壤类型变化对监测结果的影响。基于冠层温度的遥感监测方法在实际监测中易

受自然气候条件, 卫星传感器等影响会产生不确定的误差^[7-8]。综合作物长势进行干旱监测以植被长势状态表征干旱程度存在相对大的滞后性, 预警时效较差。微波遥感监测旱情对卫星影像数据的精度要求极高^[9-10]。综上所述, 利用研究区归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 与地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 建立温度干旱植被指数 (Temperature Drought Vegetation Index, TVDI) 干旱监测模型能够消除了单一因素对监测结果的影响, 更具时效性, 且该模型监测适用于中高植被覆盖地区^[11]。TVDI 模型是一种采用光学和热红外遥感通道数据进行地表水分的遥感反演方法^[12]。对于植被覆盖区而言, 地表水分一定程度上决定着植被的冠层温度, 在一定条件下, 植被的冠层温度能间接反映植被的供水状况^[13-15]。据此, Sandholt 等^[16]基于 NDVI 与 LST 建立了 T_s -NDVI 特征空间, 计算得到的 TVDI 能够很好地反演出地表水分, 其反演精度也得到了验证^[17]。诸多学者^[18-20]也基于不同数据源利用 TVDI 模型进行地表水分反演并进行精度验证, 发现 TVDI 在 0~10 cm 土层深度具有良好的反演

收稿日期: 2022-09-14 修回日期: 2023-03-01 网络出版日期: 2023-04-12
基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项课题 (ZDZX2018058)
作者简介: 邵天意 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事土地资源整治与保护。E-mail: 1275193561@qq.com
通信作者: 包斯琴 (1972-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事土地资源整治与保护。E-mail: baosiqin163@163.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

效果。【切入点】国内基于 *TVDI* 模型进行地表水分动态监测的研究很多,但针对地势复杂沟壑纵横的矿区进行的研究尚不多见。神东矿区受地理位置的影响干旱程度高,加之矿区内常年进行煤炭开采作业,导致地表结构被破坏,土壤水分流失严重,干旱程度加剧。【拟解决的关键问题】本文基于 *TVDI* 模型,利用神东矿区 1991—2018 年植被生长季遥感数据进行干旱程度动态监测,以期为研究区的生态恢复和土地复垦提供指导建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

神东矿区位于陕西省榆林市北部和内蒙古自治区鄂尔多斯市南部 (109°51'—110°46'E, 38°52'—39°41'N), 区内大部分为典型的风成沙丘及沙滩地地貌。海拔 800~1 385 m, 沟壑纵横, 地表支离破碎, 水土流失十分严重。神东矿区地处毛乌素沙地与黄土高原的过渡地带, 属半干旱大陆性季风气候, 温度年较差较大, 年平均气温 6.6 °C, 1 月平均气温 -10.1 °C, 7 月平均气温 20.5 °C。区内干旱少雨, 降水集中, 汛期为 6—9 月, 占全年降水量的 76%, 降水年际变化较大, 最大年达 919.10 mm, 最小量仅为 108.60 mm。区内以沙生植物为主, 植被每年 4 月返青, 10 月叶落, 郁闭较差。区内风沙土 (Aeolian sandy soil) 占矿区总面积的 50%, 黄土性土 (Loess soil) 占总面积的 30%, 红土性土 (Red native soil) 占总面积的 10%, 土壤具有质地较粗, 结构不良, 肥力低, 抗侵蚀性差的特点。研究区位置如图 1 所示

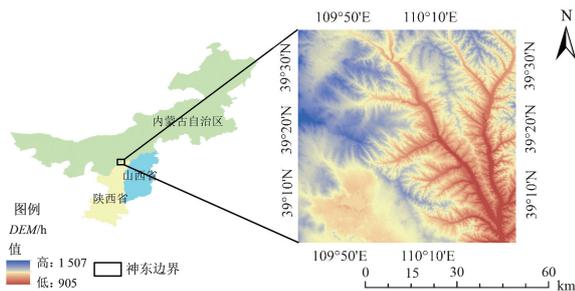


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area location

1.2 数据来源

遥感影像数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 中的美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 发射的陆地系列卫星 (Landsat) 所搭载的 30 m 空间分辨率数据, 包括 Landsat5-TM 和 Landsat8-OLI, 时间分辨率为 16 d 的 2 种传感器。数据时相选取神东矿区 1991、2002、2007、2010、2014、2018 年植被生长季 (5—10 月) 共 36 景影像,

在 1991—2018 年数据质量上均选择云量小于 10% 反演效果好的数据单元, 借助 ENVI 5.3 进行辐射定标、大气校正、镶嵌等预处理, 然后利用数据估算得到空间分辨率 30 m 的 *NDVI* 及 *LST* 数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 *TVDI* 计算方法

以提取得到研究区的归一化植被指数 (*NDVI*) 为横坐标, 地表温度最大值和最小值为纵坐标进行线性拟合, 形成关于 T_s -*NDVI* 的三角形特征空间, 将该特征空间的斜率作为 *TVDI* 的等值线, *TVDI* 自下而上升高, *TVDI* 的绝对值越大, 干旱程度越大。因此, 在研究区拟合出其特征空间的干湿边方程, 即可得到每个像元的干旱指数, 其计算式为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_min}}{T_{s_max} - T_{s_min}}, \quad (1)$$

式中: *TVDI* 为温度干旱植被指数; T_s 为地表真实温度; T_{s_max} 为地表最高温度; T_{s_min} 为地表最低温度。*TVDI* 值越大, 代表地表水分越低, 干旱程度越大。*TVDI* 的干湿边拟合方程为:

$$T_{s_max} = a_1 + b_1 NDVI \quad (\text{干边}), \quad (2)$$

$$T_{s_min} = a_2 + b_2 NDVI \quad (\text{湿边}), \quad (3)$$

式中: a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 分别为干湿边线性拟合方程的系数。

在干湿边方程中, 其斜率在生态学意义上代表着土壤含水率在饱和与不足时的地表温度值, 将各像元的 *NDVI* 值带入所对应的干湿边方程, 计算出最高地表温度 (T_{s_max}) 与最低地表温度 (T_{s_min}), 利用式 (1) 计算各像元对应的 *TVDI* 值。本文采取适用干旱半干旱区的 *TVDI* 分级标准进行分级, 如表 1 所示^[21]。

表 1 *TVDI* 分等定级

Table 1 <i>TVDI</i> classification and classification	
<i>TVDI</i> 范围	干旱程度
0~0.2	湿润
0.2~0.4	较湿润
0.4~0.6	正常
0.6~0.8	较干旱
0.8~1.0	干旱

1.3.2 偏差分析法

本文采用偏差分析法^[22]分析研究区 1991—2018 年植被生长季的 *TVDI* 时间分布特征。偏差分析法可以在时间尺度上通过某年 *TVDI* 与多年平均的 *TVDI* 距离, 表示某一时期 *TVDI* 偏离多年平均 *TVDI* 的程度。*TVDI* 偏离值为正值, 表示年均 *TVDI* 高于多月平均水平, *TVDI* 在时间序列上呈上升趋势, *TVDI* 偏离值为负值, 表示年均 *TVDI* 低于多年平均水平, *TVDI* 在时间序列上呈下降趋势。

1.3.3 Mann-Kendall 检验法^[23]

Mann-Kendall 检验法 (M-K 检验法) 是世界气象组织推荐并广泛使用的非参数检验方法。其不需要服从特定的分布, 亦不受样本值的影响, 因此广泛应用于分析一般数据在时间序列上的趋势检验和突变点检验。对于时间变量 (x_1, x_2, \dots, x_n) , n 为时间序列的长度, M-K 法定义了其统计量 S :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_k), \quad (4)$$

式中: $\text{Sgn}()$ 为函数符号, 规则如下:

$$\text{Sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & x_j - x_k > 0 \\ 0, & x_j - x_k = 0 \\ -1, & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (5)$$

S 为正态分布, 其均值为 0, 方差 $\text{Var}(s) = (n-1)(2n+5)/18$, 当 $n > 10$ 时, 正态分布统计量计算为:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & s < 0 \end{cases} \quad (6)$$

若 $Z > 0$, 表明 TVDI 在时间序列上呈上升趋势, 若 $Z < 0$, 反之, 绝对值越大, 趋势越明显; 且 $Z \geq 1.28$ 、1.96、2.32 时, 分别通过了 90%、95%、99% 水平的信度检验, 在该水平上显著。UF 曲线与 UB 曲线的交点, 为 TVDI 在时间序列上的突变点。

1.3.4 趋势分析和 F 检验

线性倾向率 (B_{slope}) 能够反映 TVDI 在空间上随时间变化的上升或下降趋势。因此, 本文逐像元计算 1991、2002、2007、2010、2014、2018 年的 TVDI 均值, 得到相应年份的 TVDI 空间分布, 并利用线性倾向率计算研究区 1991—2018 年植被生长季的 TVDI

在空间上的线性变化趋势。其计算式为:

$$B_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times TVDI_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n TVDI_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}, \quad (7)$$

式中: B_{slope} 为线性倾向趋势; i 为 36 个月变量 ($i=1, 2, 3, \dots, 36$), $n=36$, $TVDI_i$ 为第 i 月的 TVDI 值。若 $B_{\text{slope}} > 0$, 表示干旱程度在空间上随时间变化呈上升趋势; $B_{\text{slope}} < 0$, 表示研究区干旱程度在空间上随时间变化呈下降趋势。用 F 检验对 TVDI 的空间变化趋势进行显著性分析, 根据 F 检验显著性临界值 ($\alpha=0.05$), 将 F 值划分为显著下降、显著上升、不显著下降、不显著上升 4 种趋势。

1.3.5 空间转移矩阵

空间转移矩阵来源于系统分析中对系统状态与状态转移的定量描述, 可以定量识别 TVDI 不同等级在某一时间间隔的空间格局变化, 不仅可以反映 TVDI 不同等级的面积变化, 还可以直观反映 TVDI 各等级面积转入转出情况^[25]。

2 结果与分析

2.1 神东矿区植被生长季 TVDI 时间变化特征

2.1.1 TVDI 月际变化特征

利用 ArcGis10.7 像元统计工具, 统计 TVDI 值, 得到神东矿区 1991—2018 年植被生长季 TVDI 月际变化如图 2 所示。由图 2 可知, 神东矿区 1991—2018 年 TVDI 月际变化非常明显, 月均 TVDI 在 0.35~0.85 之间波动。2007 年 6 月 TVDI 均值最高为 0.85, 说明地表干旱程度最大。2018 年 9 月 TVDI 均值最低为 0.39, 说明地表干旱程度最小。月均 TVDI 在每年的 6—9 月出现最低值, 这是由于神东矿区降水集中导致的, 与神东矿区 6—9 月为汛期的自然条件相吻合。

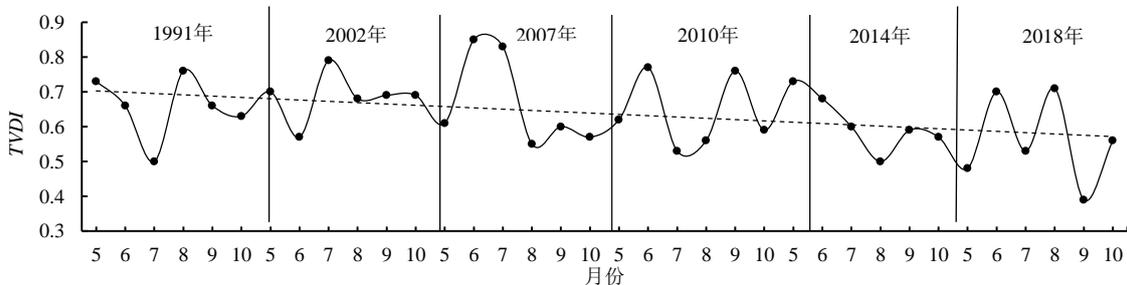


图 2 神东矿区 1991—2018 年植被生长季 TVDI 月际变化

Fig.2 Intermonthly TVDI variation of vegetation growing season in Shendong Mining Area from 1991 to 2018

2.1.2 TVDI 突变分析

采用 M-K 突变检验法对神东矿区 1991—2018 年植被生长季的月均 TVDI 进行检验, 如图 3 所示。图 3 检验结果表明, UF~UB 曲线几乎处于显著性水平 $\alpha=0.05$ 置信区间内, TVDI 值呈下降趋势 ($UF < 0$),

与神东矿区月际变化规律相吻合。1991 年 7—10 月存在 4 个突变点, 2014 年 9 月存在 1 个上升趋势突变点, 2018 年 5 月、7 月左右存在一个上升趋势、一个下降趋势突变点。

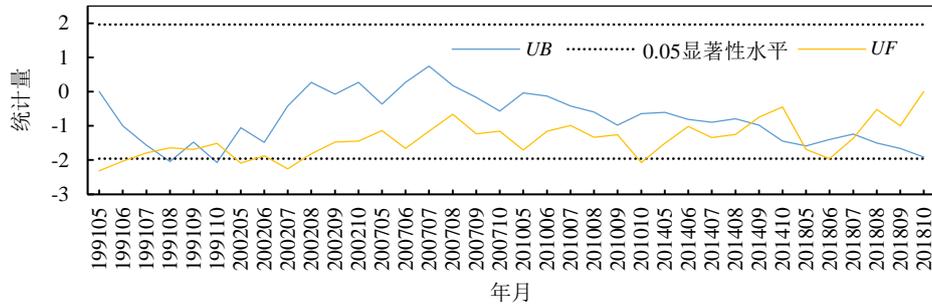


图3 1991—2018年神东矿区植被生长季TVDI M-K检验

Fig.3 TVDI M-K test of vegetation growing season in Shendong Mining Area from 1991 to 2018

2.1.3 TVDI 年际变化特征

计算得到神东矿区各年植被生长季 TVDI 均值如图 4 所示。从年际变化来看, 年均值波动于 0.56~0.69 之间, 按照地表干旱等级类型划分, 神东矿区干旱程度基本处于正常、较干旱等级, 这与 TVDI 的空间分布相吻合。在研究时段内, 2002 年 TVDI 达到峰值为 0.686, 自 2002 年后 TVDI 逐年下降, 2018 年达到最低的 0.561, 下降速率为 0.02/30 a。该结果在实地调研中得到了验证, 这是由于神东矿区在煤炭开采后进行了大量的土地复垦工作, 水土流失强度减弱, 种植大量的防风固沙植被, 神东矿区地表涵养水源的能力得到提升, 因此地表水分上升, 地表干旱程度呈下降趋势。

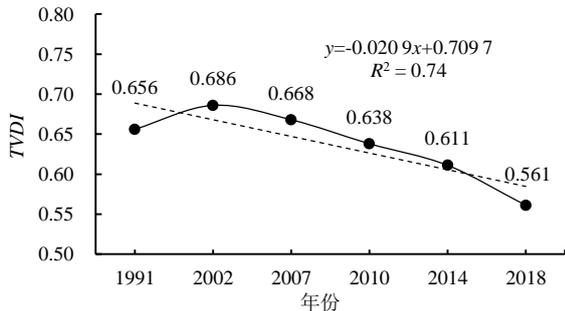


图4 神东矿区 1991—2018 年植被生长季 TVDI 年际变化
Fig.4 Interannual TVDI variation during the vegetation growing season in Shendong Mining Area from 1991 to 2018

2.1.4 TVDI 偏差分析

利用偏差分析法分析神东矿区 1991—2018 年年际 TVDI 变化趋势, 如图 5 所示。神东矿区 1991、2002、2007、2010 年 TVDI 偏离值 > 0, 说明 1991—2010 年 TVDI 均值呈上升趋势, 干旱程度具有增大趋势。其中 1991—2002 年 TVDI 偏离程度最大, 上升趋势最明显, 高于 TVDI 均值 0.05。2014、2018 年 TVDI 偏离

值 < 0, 说明 2010—2018 年 TVDI 呈下降趋势, 干旱程度减小。2014—2018 年偏离程度最大为 0.56, 低于 TVDI 均值 (0.08)。该结果与神东矿区 TVDI 年际变化趋势一致。

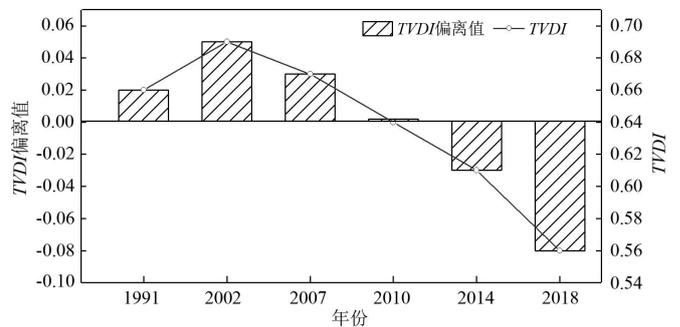


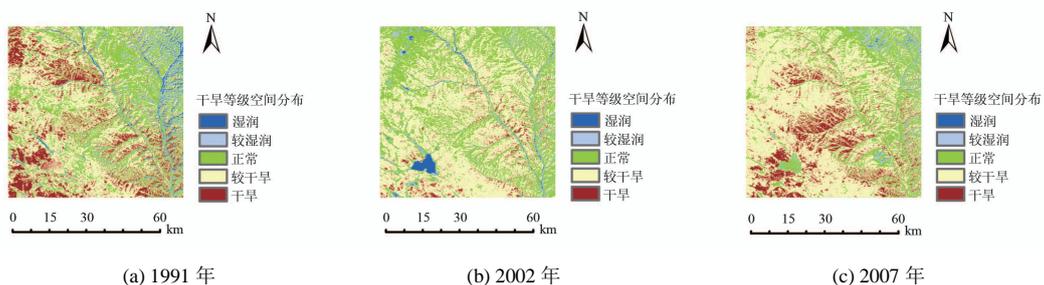
图5 神东矿区 1991—2018 年 TVDI 变化趋势

Fig.5 TVDI trend of Shendong Mining Area from 1991 to 2018

2.2 神东矿区 TVDI 空间变化特征

2.2.1 神东矿区植被生长季 TVDI 干旱等级空间分布

神东矿区 1991—2018 年植被生长季干旱等级的空间分布如图 6 所示。1991—2002 年研究区西部干旱等级下降, 东部区域的干旱等级上升。2002—2007 年研究区中部、南部干旱等级上升。2007—2010 年研究区中部、西部干旱等级基本达到正常级别, 东部地区干旱等级上升。2010—2014 年东部区域干旱等级下降, 西部区域干旱等级略有提升。2014—2018 年研究区西南部干旱等级增大, 中部及东北部的干旱等级有小范围的下降。从干旱等级划分来看, 神东矿区干旱等级始终表现为西南高于东北, 其主要原因为神东矿区的降水量从西南到东北呈递减趋势, 空间上基本处于正常、较干旱和干旱 3 种等级。



(a) 1991 年

(b) 2002 年

(c) 2007 年

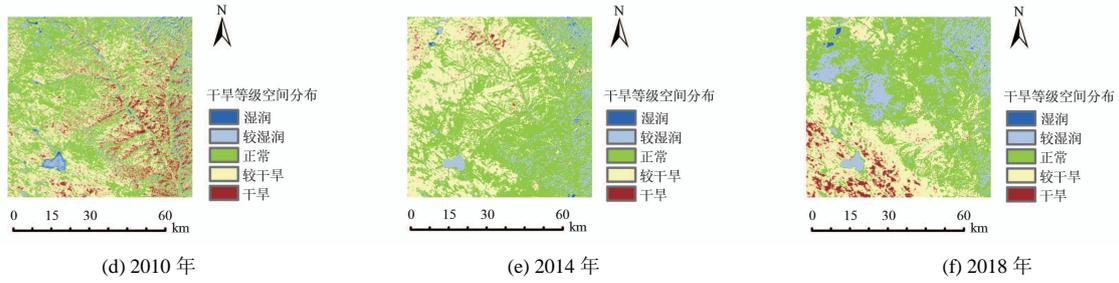


图 6 神东矿区 1991—2018 年植被生长季干旱等级的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of drought grades in the vegetation growing season from 1991 to 2018 in Shendong Mining Area

2.2.2 神东矿区线性倾向趋势分析

利用 ArcGIS10.7, 基于神东矿区 1991—2018 年植被生长季 *TVDI* 的空间分布, 运用式 (7) 计算其线性倾向率 (B_{slope}), 分析其线性倾向趋势, 并对其线性倾向趋势空间分布在 $\alpha=0.05$ 显著性水平上进行 *F* 检验, 如图 7 所示。由图 7 可知, 神东矿区 1991—2018 年 *TVDI* 线性变化趋势下降趋势面积大于上升趋势面积, $B_{slope} < 0$ 的区域集中在研究区的大部分地区, 该区域 *TVDI* 呈下降趋势, 地表干旱程度变小。 $B_{slope} > 0$ 的区域零散分布于研究区的北部、东部、南部, 这些

区域 *TVDI* 呈上升趋势。地表干旱程度变大。根据 *F* 检验的空间分布得知, 在 *TVDI* 呈下降趋势的区域中, 大部分地区下降趋势显著, 下降趋势不显著的地带则零星分布于其中。在 *TVDI* 呈上升趋势的区域中, 上升显著的地区大部分集中在神东矿区的东北部, 该区域内分布着神东矿区的矿井群, 这是由于采煤后塌陷, 造成植被破坏严重, 地表水分下渗速度加快, 地表水分减小, 所以干旱程度增大。神东矿区 *TVDI* 空间变化结果与时间变化的趋势一致

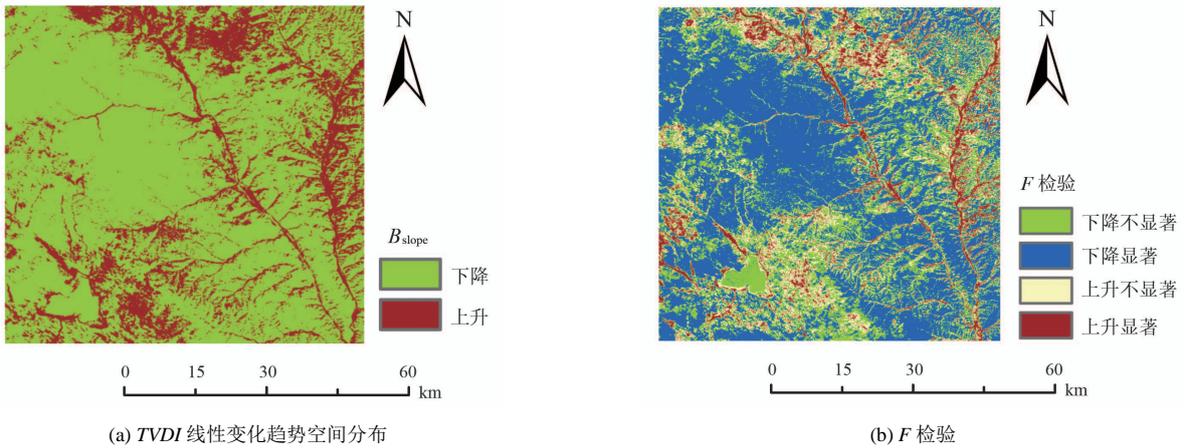


图 7 1991—2018 年神东矿区植被生长季 *TVDI* 线性变化趋势空间分布及 *F* 检验

Fig.7 Spatial distribution and *F*-test of *TVDI* linear trend in vegetation growing season in Shendong Mining Area from 1991 to 2018

通过对神东矿区 *TVDI* 线性倾向趋势面进行计算发现: 神东矿区 1991—2018 年植被生长季 *TVDI* 下降趋势面积为 3 788.43 km², 上升趋势面积为 1 215.33 km², 下降趋势面积大于上升趋势面积。从 *F* 显著性检验结果来看, 神东矿区显著下降面积最大为 2 394.74 km², 显著上升面积最小为 425.91 km², 说明研究区的地表干旱程度得到缓解, 该地区生态恢复效果显著。

2.2.3 神东矿区 *TVDI* 转移矩阵

利用 ArcGIS10.7 空间分析工具, 选择 1991、2002、2010、2018 年的 *TVDI* 干旱等级分布进行空间转移矩阵的计算, 得到神东矿区 1991—2018 年植被生长季干旱等级转移情况, 如图 8 所示。由图 8 可知, 1991—2002 年, 整个研究区的西北、西南、东南大范

围区域由干旱变化为其他 4 种干旱等级。较湿润、正常、较干旱变为干旱零星分布于中东部, 该部分区域旱情有所加重, 其他区域基本保持原有的干旱等级。2002—2010 年, 研究区大部分区域干旱等级由较干旱向正常、较湿润等级转化, 只有西南部小范围由干旱变为其他等级, 东部由较湿润、正常、较干旱转变为干旱。2010—2018 年, 研究区中部、东部干旱等级由干旱转为其他等级, 旱情程度下降, 中部及北方大部分干旱等级则由较干旱变为正常, 西南小部分区域由较干旱转换为干旱, 这一时段研究区旱情转移基本表现为由干旱变为较干旱、较干旱变为正常, 研究区大部分旱情得到一定程度的缓解。

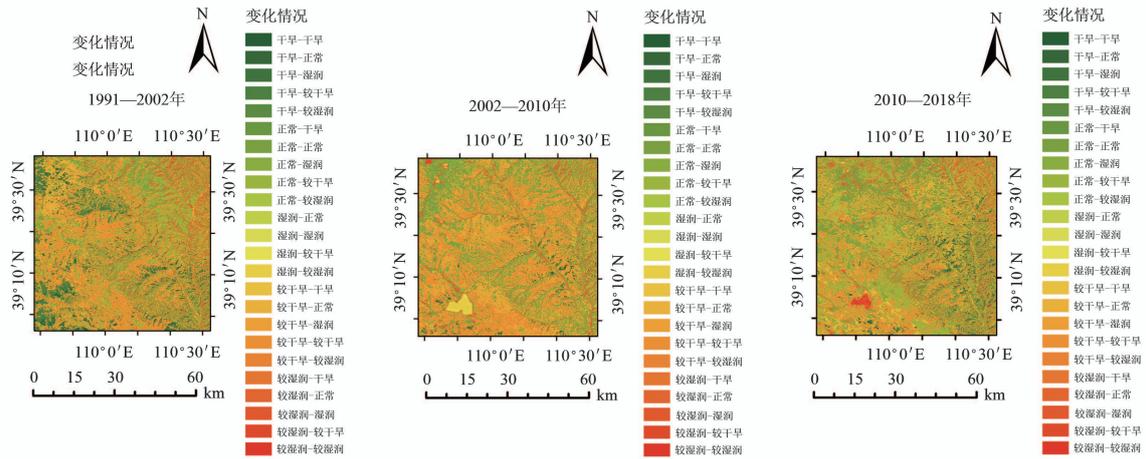


图8 神东矿区 1991—2018 年植被生长季 TVDI 转移矩阵

Fig.8 TVDI transfer matrix of vegetation growing season from 1991 to 2018 in Shendong Mining Area

综上所述,神东矿区在研究区间内,干旱等级变化均有不同程度的波动,但在空间上基本表现为由干旱等级向较干旱、正常等级转变,较干旱等级向正常、较湿润等级进行转变,说明神东矿区进行的一系列生态恢复及水土保持措施达到了一定成效。神东矿区地处我国西北内陆,空间跨度较大,因此水热状况差异较大,且随着地表与地下的采煤扰动,地表覆盖变化复杂,加之自然因素及人类活动的影响导致了地表水分在时间和空间上变化明显^[26]。

3 讨论

本文基于 TVDI 模型对神东矿区 1991—2018 年植被生长季的旱情进行监测。从 TVDI 的月际变化来看,神东矿区每年植被生长季内 6—9 月 TVDI 出现最低值,该结果与神东矿区降水集中的特点相吻合^[27]。TVDI 的年际变化显示,神东矿区自 1991—2018 年,TVDI 整体呈下降趋势,下降速率为 0.02/10 a,地表水分逐年上升,旱情逐步得到缓解,该结果与刘英等^[28]基于梯度结构相似度的神东矿区土壤湿度空间分析得到的神东矿区土壤湿度在空间上呈增加趋势,旱情缓解的结果一致。对 TVDI 时间变化进行趋势分析发现,神东矿区 2018 年 TVDI 下降趋势最为显著,这是由于神东矿区在 2018 年前后实施了大量的水土保持措施,在不考虑自然因素对各年 TVDI 变化影响的情况下,研究结果与实地调查结果一致。神东矿区 1991—2018 年干旱等级的空间分布表明,研究区干旱程度,始终为西南部高于东北部,这是由于该地区西南部地处毛乌素沙地边缘^[29]。干旱等级面积减少,正常及较湿润面积增加,该结果与 TVDI 的时间变化特征相吻合。从线性倾向趋势的空间分布来看,研究区整体 TVDI 下降趋势面积远远大于 TVDI 上升趋势面积,且 TVDI 呈上升趋势的区域集中在神东矿区的矿井群附近,这是由于采煤后地表塌陷,地表发生变

形,地表水下渗速度加快,加快该区域的水土流失^[30]。利用转移矩阵分析发现,整个研究区在 1991—2018 年间,干旱等级向较干旱、正常转化,而较干旱等级大多向正常、较湿润转化,旱情逐步得到缓解。

本文是在保证 TVDI 模型对神东矿区旱情监测具有较高的精度下进行研究,研究发现的 TVDI 在时间序列中存在多个突变点问题,还需要在后续研究中对突变点的变化情况进行相关验证。下一步还需要对造成其发生时空演变的自然及人为因素进行更深一步的研究,以期有神东矿区的水土保持措施及生态恢复提供参考。

4 结论

1) 1991—2018 年神东矿区植被生长季 TVDI 在 0.35~0.85 之间波动,每年 6—9 月出现低值。TVDI 月际变化整体呈下降趋势。

2) 年际变化表明,1991、2002、2010 年 TVDI 偏离值 < 0, TVDI 呈下降趋势,2014、2018 年 TVDI 偏离值 > 0, TVDI 呈上升趋势。TVDI 在时间序列上整体呈下降趋势,下降速率为 0.02/10 a。

3) 神东矿区 1991—2018 年植被生长季 TVDI 干旱等级空间分布,始终表现为西南高于东北。研究区干旱等级面积逐年减少,正常、较湿润等级面积逐年增加。

4) 研究区 TVDI 下降趋势面积远大于 TVDI 上升趋势面积。显著下降趋势面积最大为 2 394.74 km²,显著上升面积最小为 425.91 km²。

5) 1991—2018 年,TVDI 的干旱等级逐渐向较干旱、正常等级转变。TVDI 的较干旱等级逐渐向正常和较湿润等级转变。向干旱及较干旱等级转变的范围较小。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献：

- [1] 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019 年中国陆表定量遥感发展综述[J]. 遥感学报, 2020, 24(6): 618-671.
LIANG Shunlin, BAI Rui, CHEN Xiaona, et al. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(6): 618-671.
- [2] 张超, 吕雅慧, 鄢文聚, 等. 土地整治遥感监测研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 1-22.
ZHANG Chao, LYU Yahui, YUN Wenju, et al. Analysis on research progress of remote sensing monitoring of land consolidation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 1-22.
- [3] 张瑶瑶, 崔霞, 宋清洁, 等. 基于不同下垫面的农业干旱遥感监测方法与发展前景[J]. 草业科学, 2017, 34(12): 2 416-2 427.
ZHANG Yaoyao, CUI Xia, SONG Qingjie, et al. The agricultural drought remote sensing monitoring methods and prospects based on different underlying surface conditions[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(12): 2 416-2 427.
- [4] 马春锋, 王维真, 吴月茹, 等. 基于 MODIS 数据的黑河流域土壤热惯量反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 197-207.
MA Chunfeng, WANG Weizhen, WU Yueru, et al. Research on soil thermal inertia retrieval in Heihe River Basin based on MODIS data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(2): 197-207.
- [5] 宋承运, 胡光成, 王艳丽, 等. 基于表观热惯量与温度植被指数的 FY-3B 土壤水分降尺度研究[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 20-26.
SONG Chengyun, HU Guangcheng, WANG Yanli, et al. Downscaling FY-3B soil moisture based on apparent thermal inertia and temperature vegetation index[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2021, 33(2): 20-26.
- [6] 陈少丹, 张利平, 闪丽洁, 等. 长江中下游流域土壤湿度遥感反演研究及其影响因素分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(4): 657-669.
CHEN Shaodan, ZHANG Liping, SHAN Lijie, et al. Research on remote sensing inversion of soil moisture and analysis of influencing factors in the middle and Lower Yangtze River Basin[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(4): 657-669.
- [7] 杨涛, 宫辉力, 李小娟, 等. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6 264-6 277.
YANG Tao, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. Progress of soil moisture monitoring by remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6 264-6 277.
- [8] 吴骅, 李秀娟, 李召良, 等. 高光谱热红外遥感: 现状与展望[J]. 遥感学报, 2021, 25(8): 1 567-1 590.
WU Hua, LI Xiujuan, LI Zhaoliang, et al. Hyperspectral thermal infrared remote sensing: Current status and perspectives[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(8): 1 567-1 590.
- [9] 郭妮, 王小平, 王玮, 等. 干旱遥感监测技术进展[J]. 气象科技进展, 2020, 10(3): 10-20.
GUO Ni, WANG Xiaoping, WANG Wei, et al. Review of drought monitoring based on remote sensing technology[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(3): 10-20.
- [10] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 277-293.
ZHAO Chunjiang. Advances of research and application in remote sensing for agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 277-293.
- [11] 李彩瑛, 阎建忠, 刘林山, 等. 基于 TVDI 的羌塘高原夏季土壤湿度变化分析[J]. 地理研究, 2017, 36(11): 2 101-2 111.
LI Caiying, YAN Jianzhong, LIU Linshan, et al. Analysis of soil moisture variation in summer of Qiangtang Plateau based on TVDI[J]. Geographical Research, 2017, 36(11): 2 101-2 111.
- [12] 张德军, 杨世琦, 王永前, 等. 基于 FY3C 地表温度重建的多云地区旱情监测评估[J]. 自然资源学报, 2021, 36(4): 1 047-1 061.
ZHANG Dejun, YANG Shiqi, WANG Yongqian, et al. Assessing drought conditions over cloudy regions based on reconstructed FY3C/VIRR LST[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(4): 1 047-1 061.
- [13] 李正国, 王仰麟, 吴健生, 等. 基于植被/温度特征的黄土高原地表水分季节变化[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4 563-4 575.
LI Zhengguo, WANG Yanglin, WU Jiansheng, et al. Intra-annual surface soil moisture change based on vegetation & temperature characteristics in Loess Plateau area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4 563-4 575.
- [14] 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): 1 192-1 203.
CHEN Shulin, LIU Yuanbo, WEN Zuomin. Satellite retrieval of soil moisture: An overview[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(11): 1 192-1 203.
- [15] 闫峰, 覃志豪, 李茂松, 等. 农业旱灾监测中土壤水分遥感反演研究进展[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 114-121.
YAN Feng, QIN Zhihao, LI Maosong, et al. Progress in soil moisture estimation from remote sensing data for agricultural drought monitoring[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 114-121.
- [16] 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(2/3): 213-224.
- [17] 邵天意, 包斯琴, 贺帅. 基于 TVDI 的神东矿区地表水分时空演变特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 143-154.
SHAO Tianyi, BAO Siqin, HE Shuai. Spatial and temporal evolution characteristics of surface water in Shendong Mining Area based on TVDI[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2023, 51(2): 143-154.
- [18] 吴黎, 解文欢, 张有智, 等. 基于温度植被干旱指数的黑龙江省 20 年干旱时空特征研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 358-363.
WU Li, XIE Wenhuan, ZHANG Youzhi, et al. Research of drought characteristics in Heilongjiang Province nearly 20 years based on temperature vegetation dryness index by remote sensing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 358-363.
- [19] 夏燕秋, 马金辉, 屈创, 等. 基于 Landsat ETM+数据的白龙江流域土壤水分反演[J]. 干旱气象, 2015, 33(2): 213-219.
XIA Yanqiu, MA Jinhui, QU Chuang, et al. Study of soil moisture retrieval based on Landsat ETM+image data in the Bailongjiang Basin[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(2): 213-219.
- [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): 420-427, 436.
QI Shuhua, WANG Changyao, NIU Zheng. Evaluating soil moisture status in China using the temperature/vegetation dryness index (TVDI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(5): 420-427, 436.
- [21] 覃艺, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000 年以来内蒙古生长季旱情变化遥感监测及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 459-475.
QIN Yi, ZHANG Tingbin, YI Guihua, et al. Remote sensing monitoring and analysis of influencing factors of drought in Inner Mongolia growing season since 2000[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 459-475.
- [22] 祁鹏卫, 张贤. 2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5 427-5 436.
QI Pengwei, ZHANG Xian. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of vegetation cover in Chongqing from 2000 to 2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5 427-5 436.
- [23] 赵飞飞, 张显云, 付婷, 等. 贵州典型石漠化区域土壤湿度的时空变化及影响因素分析[J]. 国土与自然资源研究, 2021(4): 38-43.

- ZHAO Feifei, ZHANG Xianyun, FU Ting, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of soil moisture in typical rocky desertification areas in Guizhou[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2021(4): 38-43.
- [24] 黄静, 张运, 汪明秀, 等. 近 17 年新疆干旱时空分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 1 077-1 088.
- HUANG Jing, ZHANG Yun, WANG Mingxiu, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought and its relationship with meteorological factors in Xinjiang in last 17 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 1 077-1 088.
- [25] 陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 等. 2000—2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力: 以宜宾市为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 5 029-5 043.
- TAO Shuai, KUANG Tingting, PENG Wenfu, et al. Analyzing the spatio-temporal variation and drivers of NDVI in upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015: A case study of Yibin City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 5 029-5 043.
- [26] 庞冉, 王文. 基于 MODIS 数据的吐鲁番盆地 2001—2017 年植被变化及水热组合影响分析[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(5): 1 242-1 252.
- PANG Ran, WANG Wen. Analysis of vegetation index changes and the influence of hydrothermal combination in the Turpan Basin from 2001 to 2017 based on MODIS Data[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(5): 1 242-1 252.
- [27] 王强民, 董书宁, 王文科, 等. 生态脆弱矿区高强度植被恢复对地下水补给的影响[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3 245-3 252.
- WANG Qiangmin, DONG Shuning, WANG Wenke, et al. Effects of high intensive vegetation restoration on groundwater recharge in ecologically fragile mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3 245-3 252.
- [28] 刘英, 吴立新, 岳辉. 基于梯度结构相似度的矿区土壤湿度空间分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(1): 87-93.
- LIU Ying, WU Lixin, YUE Hui. Spatial distribution characteristics analysis of soil moisture in desertification mining areas based on gradient-based structural similarity[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(1): 87-93.
- [29] 蒙古军, 朱利凯, 毛熙彦. 近 30 年来毛乌素沙地土地利用变化驱动力的多尺度研究—以内蒙古乌审旗为例[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(S1): 54-66.
- MENG Jijun, ZHU Likai, MAO Xiyun. A multi-level analysis of the driving forces of land use changes in mu-us desert in recent 30 years: Case study of uxin banner, Inner Mongolia[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(S1): 54-66.
- [30] 张发旺, 赵红梅, 宋亚新, 等. 神府东胜矿区采煤塌陷对水环境影响效应研究[J]. *地球学报*, 2007, 28(6): 521-527.
- ZHANG Fawang, ZHAO Hongmei, SONG Yaxin, et al. The effect of coal-mining subsidence on water environment in the shenfu-Dongsheng mining area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(6): 521-527.

Monitoring Spatiotemporal Dynamic of Drought in Shendong Mining Area Based on Temperature Vegetation Dryness Index

SHAO Tianyi¹, BAO Siqin^{1*}, WANG Nan², HAN Aruhan¹

(1. College of Desert Governance, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010020, China;

2. College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100089, China)

Abstract: 【Objective】 Drought is a stress that crops often experience during their growing season, and comprehending its spatiotemporal dynamics in a region is important to improve agricultural management. In this paper, we propose to predict drought using temperature vegetation dryness index (*TVDI*). 【Method】 The studied site was a mining area in Shendong, Shandong province. We acquired 36 Landsat images during the growing seasons from 1991 to 2018. The *TVDI* calculated from these images was used to estimate the spatiotemporal dynamic of drought for different vegetations using mathematical statistical analysis methods, including deviation analysis, linear tendency analysis and spatial transfer matrix. 【Result】 ①Intra-annually, the value of *TVDI* was low from June to September; overall, the *UF~UB* curve was less than 0, and the *TVDI* exhibited a decreasing trend. Inter-annually, the value of *TVDI* was greater than 0 in 1991, 2002, 2007 and 2010, and showed an increasing trend from 1991 to 2010. The deviation value of *TVDI* was less than 0 in 2014 and 2018 and showed a decreasing trend from 2010 to 2018. ②Spatially, the value of *TVDI* was high in the southwest and low in the northeast, and the areas that experienced drought had declined from 1991—2010. ③Trend analysis showed that the areas where the *TVDI* had decreased from 1991—2010 was larger than the areas where the *TVDI* had increased. The areas where the *TVDI* had decreased were 2 394.74 km² at the most, while the areas where the *TVDI* had increased were 425.91 km² at the least. ④Majority of the studied region has undergone a transition from relatively dry state to normal or wet state, and the transition in the opposite direction is less extensive. 【Conclusion】 Using *TVDI* calculated from satellite images to monitor spatiotemporal dynamics of drought in the mining area in Shendong is accurate and robust. Our findings have important implication for help land reclamation in mining areas.

Key words: temperature drought vegetation index; temporal and spatial dynamics; the drought; Shendong Mining Area

责任编辑: 赵宇龙