

神东矿区干旱空间异质性及其环境驱动机制

邵天意¹, 李文华^{2*}, 包斯琴¹, 王楠³, 马雅婷¹, 申丛林⁴

(1.内蒙古农业大学, 呼和浩特 010010; 2.内蒙古地理信息中心, 呼和浩特 750306; 3.中国地质大学, 北京 100089; 4.内蒙古兴安盟科右中旗巴仁哲木镇林业站, 内蒙古 兴安盟 029425)

摘要: 【目的】分析神东矿区干旱空间异质性及其环境驱动机制, 为该地区生态环境改善的精准施策提供参考。【方法】基于温度干旱植被指数(Temperature Vegetation Drought Index, TVDI)分析神东矿区2002—2018年植被生长季的地表干旱状况, 利用地理探测器分析不同环境因子对干旱空间异质性的影响。【结果】2002—2018年, 空间平均TVDI呈持续下降趋势, 2018年空间平均TVDI最低, 为0.561。年内干旱程度最严重时期集中在5—8月, 研究区西南部干旱程度大于东北部。降水、归一化植被指数、土壤类型的地理探测器 $q>10\%$, 以上因子与其他因子之间的交互作用能增强单因子对干旱空间异质性的解释性能。塌陷区年平均TVDI高于非塌陷区。【结论】TVDI可有效表征矿区干旱状况, 降水、归一化植被指数、土壤类型为影响研究区干旱空间异质性的主要因子。

关键词: 干旱; 温度干旱植被指数; 时空变化; 空间异质性; 神东矿区

中图分类号: S165.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023333

OSID: 

邵天意, 李文华, 包斯琴, 等. 神东矿区干旱空间异质性及其环境驱动机制[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(3): 45-51, 93.

SHAO Tianyi, LI Wenhua, BAO Siqin, et al. Spatial variation in drought and its determining factors in Shendong mining region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(3): 45-51, 93.

0 引言

【研究意义】神东矿区作为我国最大的井工矿区, 常年进行煤炭开采作业, 改变了矿区原有的地质形态, 扰动地表生态环境, 致使地表沉陷, 地下水位下降, 土壤水分和养分流失。受自然环境及地下采煤活动的综合影响, 该地区易遭受风力侵蚀, 干旱发生频率逐年升高, 严重影响区域生态质量及农业生产。鉴于此, 探索神东矿区干旱空间异质性及其对采煤塌陷的响应对于该地区生态环境可持续发展具有重要意义。

【研究进展】尽管诸多学者致力于干旱研究^[1-5], 但矿区干旱研究却较为少见。以往研究通常基于土壤水分、植被长势来表征干旱^[6-8]。王金满等^[9]确定了西北荒漠戈壁矿区的土地生态复垦方向为超旱生灌木林或草地, 并基于此方向建立了适合西北荒漠戈壁矿区土地生态复垦模式。吴丽等^[10]研究了干旱半干旱矿区塌陷裂缝对旱情的影响。王尚义等^[11]得出非矿区土壤含水率高于矿区的结论。陶涛等^[12]分析了凹凸棒对半干旱矿区土壤减渗保水的作用机理。毕银丽等^[13]聚焦于生态复垦措施力度大的干旱矿区, 指出该类型矿区植被覆盖

度呈逐年上升趋势, 地表温度呈逐年下降趋势, 矿区干旱级别由干旱逐渐转变为正常。陈星彤等^[14]发现矿区土壤物质组成是造成土壤水分变异系数和有效水分参数存在较大差异的根本原因。【切入点】目前, 针对矿区干旱问题的研究依然存在不足, 干旱半干旱矿区环境因素对土壤水分的作用机理与影响规律尚不明晰^[15-16]。【拟解决的关键问题】温度干旱植被指数(Temperature Vegetation Drought Index, TVDI)在反演地表土壤水分方面的精度较高, 可用于表征区域干旱状况^[17]。鉴于此, 本研究整合了Landsat遥感卫星数据、高程(DEM)数据和气象数据, 基于遥感反演的TVDI, 采用地理探测器模型探究神东矿区2002—2018年植被生长季(5—10月)干旱空间异质性及其环境驱动机制, 明确研究区干旱影响因素, 为矿区生态修复提供理论参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

神东矿区位于晋陕蒙交界(109°51'—110°46'E, 38°52'—39°41'N), 位于毛乌素沙地与黄土高原过渡地带。海拔高程介于905~1 507 m, 属温带半干旱大陆性气候。该地区常年大风频繁, 干燥少雨, 降水集中在每年的6—9月。年平均气温为6.6℃。植被生长季短, 休眠期长, 植被覆盖率低, 郁闭度差。蒸发量一般为降水量的4~5倍, 每年通常出现2次干旱,

收稿日期: 2023-07-23 修回日期: 2023-12-01

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: 李文华(1973-), 男。会计师, 主要从事测绘地理信息工作。E-mail: 43266031@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

平均 6 a 出现 1 次大旱。

1.2 数据来源

Landsat 数据来源于地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn>)，基于 Landsat 数据计算神东矿区归一化植被指数 (Normalized Different Vegetation Index, *NDVI*) 和地表温度 (Land Surface Temperature, *LST*)。选取 2002、2006、2010、2014、2018 年 30 m 空间分辨率的 Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI 影像 30 景。对影像数据进行辐射定标、大气校正、裁剪等预处理。DEM 数据来源于地理空间数据云平台，提取坡度、坡向信息。气象数据和 1 km 空间分辨率的土壤类型数据来源于中国科学院资源与环境数据中心 (<https://www.resdc.cn>)，选取与遥感影像数据时段相对应的研究区周围 12 个气象站点的月平均降水量、平均气温、平均相对湿度、平均日照时间。

1.3 研究方法

1.3.1 TVDI 的计算

以 *NDVI* 为横坐标，*LST* 的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，该特征空间的斜率为 *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，*TVDI* 绝对值越小，干旱程度越小。线性拟合得到神东矿区 *TVDI* 特征空间的干湿边方程，计算每个像元的 *TVDI*，详细计算方法见文献[18]。

求得研究区各像元的 *TVDI*，基于干旱半干旱区的 *TVDI* 分级标准^[19]对于干旱进行分级，如表 1 所示。

表 1 TVDI 分等定级

Tab.1 TVDI grading

TVDI	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	干旱

1.3.2 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等^[20]提出的一种新的地理统计学方法。包括单因子探测模块、双因子交互探测模块、生态探测模块、风险探测模块。本研究基于单因子探测模块分析神东矿区干旱空间异质性及其环境驱动因素，环境因子对于干旱的解释程度以统计量 q 量化， q 越大表示解释力越强，详见文献[20]。基于双因子交互探测模块识别不同因子对神东矿区 *TVDI* 的交互影响。双因子交互探测的原理和方法详见文献[20]。基于风险探测模块判断评价指标在不同子区域间的属性平均值是否存在显著差异。

2 结果与分析

2.1 2002—2018 年神东矿区 TVDI 时空变化特征

神东矿区 2002、2007、2010、2014、2018 年植被生长季 *TVDI* 的月度变化如图 1 所示。各年植被生长季 *TVDI* 均呈不规则变化，2002 年空间平均 *TVDI* 的最高值出现在 7 月，2007、2010 年空间平均 *TVDI* 的最高值出现在 6 月，2014 年空间平均 *TVDI* 的最高值出现在 5 月，2018 年空间平均 *TVDI* 的最高值出现在 8 月，表明神东矿区 *TVDI* 最高值集中在 5—8 月，该时段研究区干旱程度较大。

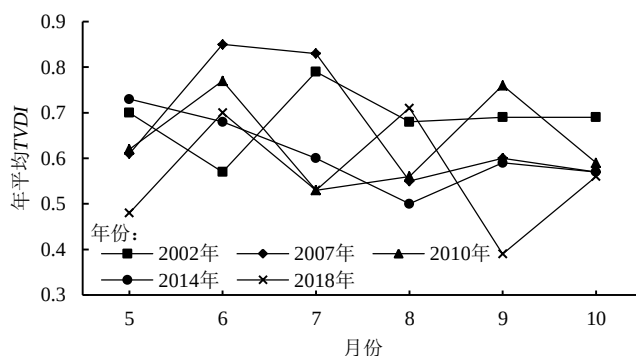


图 1 2002—2018 年植被生长季 TVDI 变化

Fig.1 Changes of TVDI in vegetation growth season from 2002 to 2018

2002、2007、2010、2014、2018 年神东矿区年平均 *TVDI* 变化如图 2 所示。神东矿区年平均 *TVDI* 在 2002 年最高，为 0.686。年平均 *TVDI* 呈年际下降趋势，年际变化速率为 0.03/16 a，2014—2018 年降幅最大。

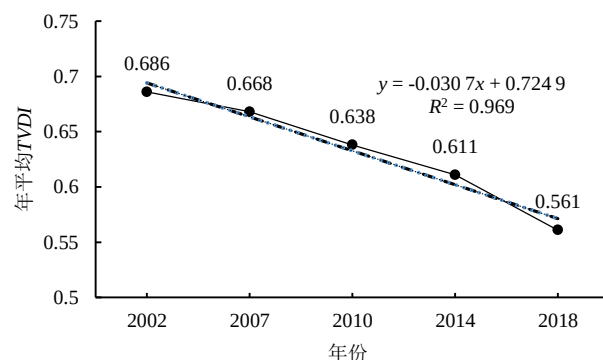


图 2 2002—2018 年神东矿区 TVDI 年际变化

Fig.2 Inter-annual changes of TVDI in Shendong mining area from 2002 to 2018

基于遥感反演 *TVDI* 得到神东矿区 2002、2007、2010、2014、2018 年 *TVDI* 的空间分布，并对各年 *TVDI* 空间分布按照干旱半干旱区 *TVDI* 分级标准进行重分类，结果如图 3 所示。2002 年研究区西南部干旱程度较高，处于较干旱等级。2007 年研究区中西部区域处于干旱、较干旱等级，研究区中部、西南

部处于干旱等级。2010 年，研究区全域干旱程度降低，东南部处于干旱等级，其余地区为正常等级。2014 年，研究区西北部地区干旱程度升高，基本处于较干旱等级，中东部区域处于正常等级。2018 年，研究区西南部干旱程度明显升高，干旱面积增加，东北、西北部干旱程度下降。

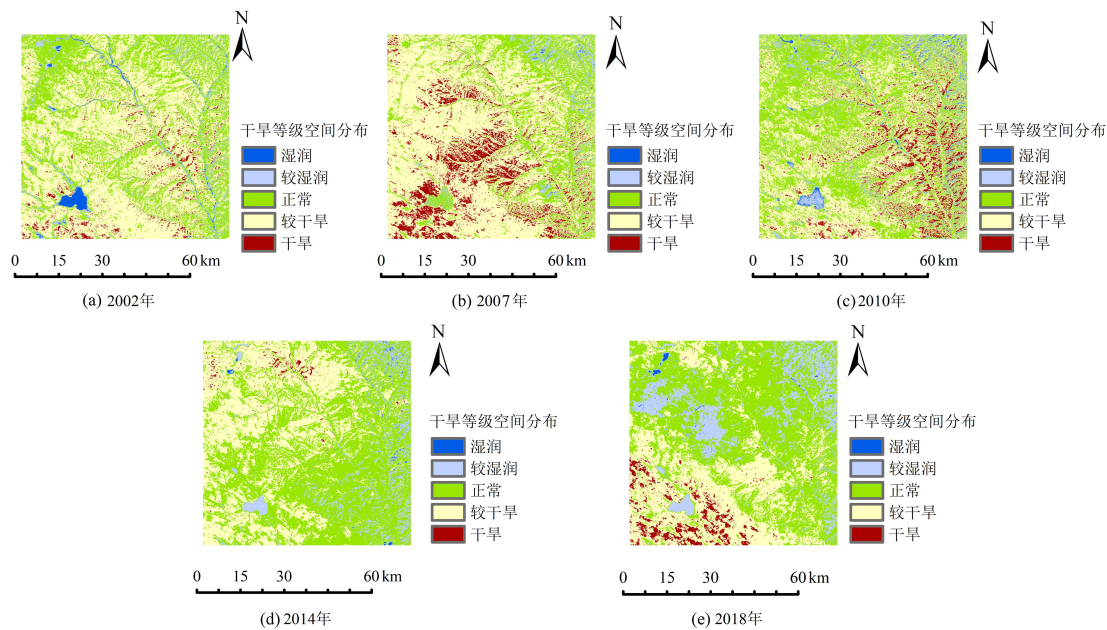


图 3 2002—2018 年神东矿区 TVDI 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of TVDI in Shendong mining area from 2002 to 2018

2.2 神东矿区干旱空间异质性分析

传统回归分析不能从整体上反映因子交互作用下的 TVDI 空间异质性^[21]。因此，本研究选取 2002、2010、2018 年植被生长季的土壤类型、NDVI、DEM、坡度、坡向、降水量、气温、相对湿度、日照时间 9 个影响因子对 TVDI 空间异质性的影响机理进行研究。应用地理探测器量化各因子以及不同因子间的交互

效应。利用 ArcGIS 10.7 重分类工具对各影响因子进行分类，将其转换成离散化变量，各因子的分级结果如表 2 所示。利用 ArcGIS 10.7 中的渔网创建工具，生成研究区 1 km×1 km 尺度格网，取每个格网中心点作为采样点，对重分类后的 9 个因子的栅格数据进行采样，采样点共计 5 116 个。

表 2 TVDI 各因子分级结果

Tab.2 Classification of TVDI influencing factors

级别	土壤类型	坡向	坡度	高程/m	NDVI	相对湿度/%	气温/℃	降水量/mm	日照时间/h
1	干旱土(≤91)	无坡向(≤0)	极缓坡(0~2°)	905~1 065	0~0.2	45~48	16.8~17.14	28~34	260~263
2	初育土(91~125)	阴坡(0~45)	缓坡(2~15°)	1 065~1 127	0.2~0.4	48~49	17.14~17.33	34~37	263~265
3	半水成(125~148)	半阴坡(45~135)	斜坡(15~25°)	1 127~1 175	0.4~0.6	49~50	17.33~17.50	37~39	265~268
4	盐碱土(148~175)	阳坡(135~225)	急坡(25~35°)	1 175~1 217	0.6~0.8	50~51	17.50~17.74	39~42	268~271
5	高山土(175~213)	半阳(225~315)	急陡(35~55°)	1 217~1 255	0.8~1	51~53	17.74~18.02	42~44	271~273
6	铁铝土(213~230)	阴坡(315~360)	垂直坡(≥55°)	1 255~1 292	-	53~55	18.02~18.28	44~50	273~276
7	-	-	-	1 292~1 330	-	55~57	18.28~18.57	50~53	276~278
8	-	-	-	1 330~1 377	-	57~59	18.57~19.23	53~58	278~280
9	-	-	-	1 377~1 507	-	-	-	-	280~284

基于地理探测器的因子探测模块分析各因子对 TVDI 空间异质性的影响。基于统计量 q 判断各因子的影响程度^[22]，结果见表 3—表 5。2002 年，各因子对 TVDI 空间异质性的影响程度由高到低为 NDVI (0.153) > 降水量 (0.141) > 土壤类型 (0.12) > 坡向 (0.089) > 相对湿度 (0.055) > 日照时间 (0.053) > 高程 (0.047) > 气温 (0.042) > 坡度 (0.02)。2010 年，各因子对 TVDI 空间异质性的影响程度由高到低为

土壤类型 (0.236) > 降水量 (0.141) > NDVI (0.121) > 坡向 (0.057) > 相对湿度 (0.044) > 气温 (0.042) > 日照时间 (0.038) > 坡度 (0.033) > 高程 (0.017)。2018 年，各因子对 TVDI 空间异质性的影响程度由高到低为日照时间 (0.224) > 降水量 (0.197) > 土壤类型 (0.156) > NDVI (0.132) > 坡度 (0.123) > 相对湿度 (0.111) > 高程 (0.088) > 气温 (0.012) > 坡向 (0.01)。

表 3 2002 年各因子影响力排序

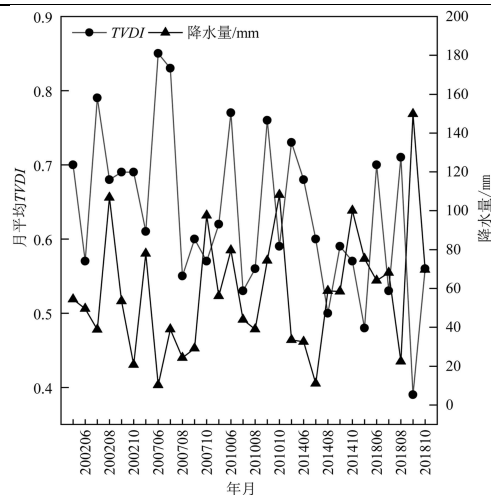
Tab.3 Ranking of the influence of geographical environmental factors in 2002

影响因素	自变量	q	p	影响力排序
土壤类型	X1	0.120	0.00	3
坡向	X2	0.089	0.00	4
坡度	X3	0.020	0.00	9
高程	X4	0.047	0.00	7
NDVI	X5	0.153	0.00	1
相对湿度	X6	0.055	0.00	5
气温	X7	0.042	0.00	8
降水量	X8	0.141	0.00	2
日照时间	X9	0.053	0.00	6

表 4 2010 年各因子影响力排序

Tab.4 Ranking of influence of geographical environmental factors in 2010

影响因素	自变量	q	p	影响力排序
土壤类型	X1	0.236	0.00	1
坡向	X2	0.057	0.00	4
坡度	X3	0.033	0.00	8
高程	X4	0.017	0.00	9
NDVI	X5	0.121	0.00	3
相对湿度	X6	0.044	0.00	5
气温	X7	0.042	0.00	6
降水量	X8	0.141	0.00	2
日照时间	X9	0.038	0.00	7



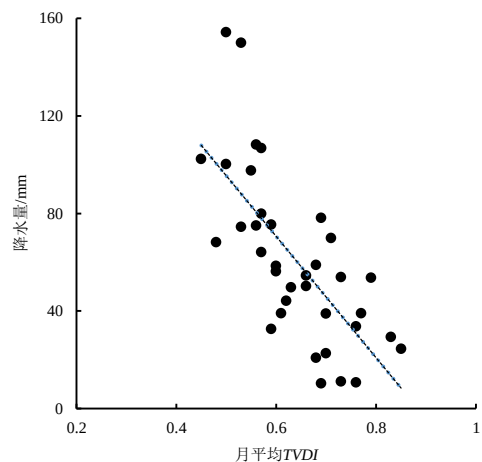
(a) 月平均降水量与月平均 TVDI 线性变化趋势

表 5 2018 年各因子影响力排序

Tab.5 Ranking of influence of geographical environmental factors in 2018

影响因素	自变量	q	p	影响力排序
土壤类型	X1	0.156	0.00	3
坡向	X2	0.01	0.00	9
坡度	X3	0.123	0.00	5
高程	X4	0.088	0.00	7
NDVI	X5	0.132	0.00	4
相对湿度	X6	0.111	0.00	6
气温	X7	0.012	0.00	8
降水量	X8	0.197	0.00	2
日照时间	X9	0.224	0.00	1

综合以上结果可知, 2002 年, NDVI、降水量、土壤类型为影响 TVDI 的主要因子, 贡献率分别为 15.3%、14.1%、12%。2010 年, 对 TVDI 存在主要影响的环境因子为土壤类型、降水量、NDVI, 贡献率依次为 23.6%、14.1%、12.1%。2018 年, TVDI 的主要影响因子为日照时间、降水量、土壤类型、NDVI、坡度、相对湿度。贡献率依次为 22.4%、19.7%、15.6%、13.2%、12.3%、11.1%。由图 4 可知, TVDI 与降水量的变化趋势相反, 二者呈负相关。由图 5 可知, 相同时间内, 当月平均 NDVI 呈增加趋势时, 月平均 TVDI 呈下降趋势, 二者呈负相关。



(b) 月平均降水量与月平均 TVDI 之间的线性拟合

图 4 月平均降水量与月平均 TVDI 线性变化趋势及线性拟合

Fig.4 Linear variation trend and linear fitting between monthly mean precipitation and monthly mean TVDI

由表 6—表 8 可知, 不同因子之间的交互作用对 TVDI 空间分布的影响均大于单因子影响。大部分交互作用表现为非线性增强机制, 说明 TVDI 的变化往往并不是受制于某个因素, 而是多因素协同作用的结果。综合各年份结果来看, 降水、NDVI、土壤类型不仅是影响 TVDI 空间分布的主要因素, 而且与其他环境因子之间的交互作用也能够提升对 TVDI 的影响。

2.3 神东矿区干旱对采煤活动的响应分析

由图 6 可知, 各矿井塌陷区年平均 TVDI > 非塌陷

区年平均 TVDI, 说明塌陷区地表干旱程度 > 非塌陷区的地表干旱程度。采煤塌陷后, 塌陷区地表形成裂缝和缺口, 土壤表层含水率沿裂缝大量散失, 地表干旱程度提高, 塌陷区 TVDI 较大。此外, 采煤塌陷导致塌陷断面增多, 间接增加土壤蒸发面, 土壤水分流失更加明显。植被死亡率增加同样会反作用于地表塌陷, 导致风蚀作用加剧, 形成恶性循环, 这也是塌陷区 TVDI 高于未塌陷区的根本原因。

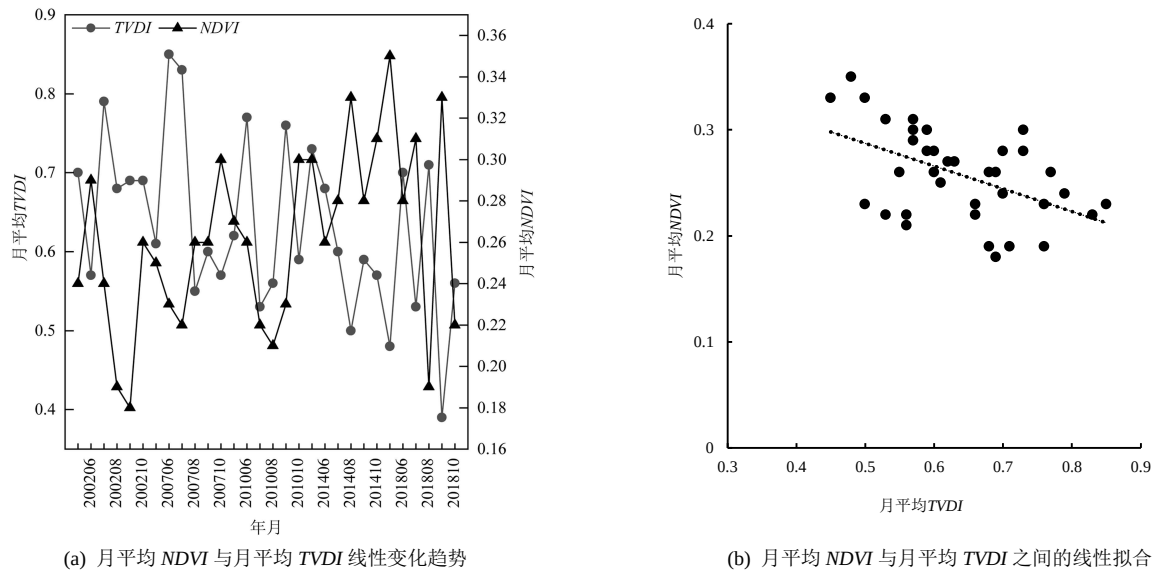


图 5 月平均 NDVI 与月平均 TVDI 线性变化趋势及线性拟合

Fig.5 Linear variation trend and linear fitting of monthly mean NDVI and monthly mean TVDI

表 6 2002 年双因子交互探测结果

Tab.6 Results of two-factor interaction detection in 2002

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X1	0.120								
X2	0.208	0.089							
X3	0.145	0.143	0.021						
X4	0.192	0.177	0.065	0.047					
X5	0.172	0.226	0.195	0.216	0.153				
X6	0.192	0.200	0.069	0.172	0.239	0.055			
X7	0.185	0.166	0.078	0.157	0.204	0.207	0.042		
X8	0.279	0.273	0.166	0.252	0.319	0.208	0.265	0.141	
X9	0.192	0.190	0.083	0.181	0.224	0.168	0.134	0.084	0.053

表 7 2010 年双因子交互探测结果

Tab.7 Results of two-factor interaction detection in 2010

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X1	0.236								
X2	0.292	0.057							
X3	0.264	0.110	0.033						
X4	0.261	0.136	0.054	0.017					
X5	0.310	0.242	0.170	0.176	0.12				
X6	0.304	0.185	0.083	0.149	0.252	0.044			
X7	0.284	0.154	0.091	0.107	0.180	0.187	0.042		
X8	0.293	0.173	0.179	0.230	0.220	0.166	0.269	0.141	
X9	0.296	0.180	0.083	0.140	0.223	0.151	0.124	0.149	0.038

表 8 2018 年双因子交互探测结果

Tab.8 Results of two-factor interaction detection in 2018

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X1	0.156								
X2	0.182	0.011							
X3	0.242	0.143	0.123						
X4	0.239	0.115	0.177	0.088					
X5	0.311	0.171	0.253	0.221	0.132				
X6	0.266	0.148	0.203	0.252	0.292	0.111			
X7	0.189	0.056	0.149	0.164	0.196	0.364	0.013		
X8	0.255	0.125	0.192	0.146	0.237	0.398	0.322	0.197	
X9	0.314	0.256	0.299	0.365	0.374	0.298	0.394	0.423	0.224

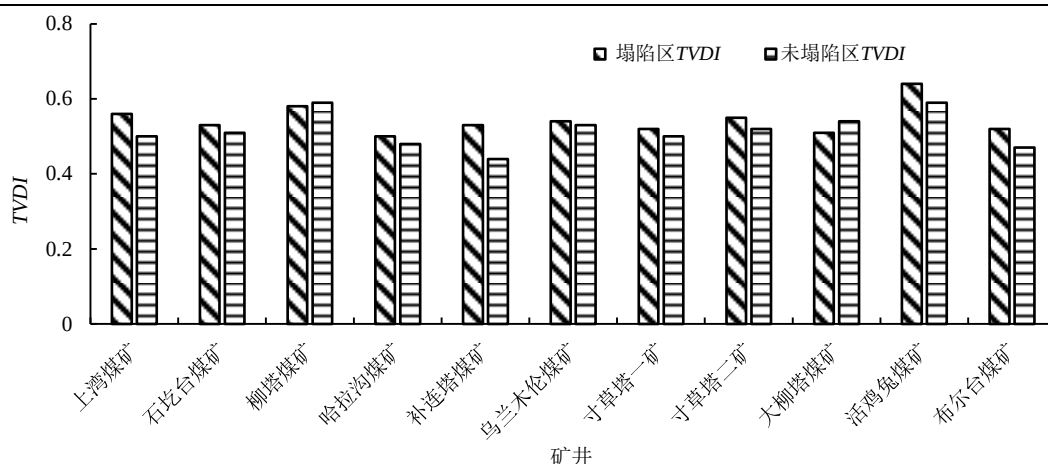


图 6 神东矿区各矿井塌陷区 TVDI 与未塌陷区 TVDI

Fig.6 TVDI and TVDI of each mine subsidence area and non-subsidence area in Shendong mining area

3 讨论

神东矿区地处我国西北内陆,属于干旱、半干旱气候区。该地区包含黄土沟壑区、风积沙区、硬梁地、沙漠高原区多种地貌类型,沟壑纵横、地表支离破碎。研究区水热状况空间差异大,地表覆盖复杂,加之自然因素及人类活动的影响导致神东矿区干旱频发。本文在以往研究基础上,基于 30 m 空间分辨率的遥感数据进行 TVDI 反演,并以此表征研究区干旱状况。神东矿区 2002—2018 年空间平均 TVDI 呈逐年下降趋势,这是因为神东矿区自煤炭开采以来,始终遵循开采与治理并行的原则,矿区土壤保水蓄水能力得到提升,土壤水分增加,干旱程度逐年减弱。研究区干旱等级的空间分布表现出西南地区的干旱程度高于东北部,这不仅与神东矿区降水分布相吻合,也与刘英等^[23]基于 T_s -NDVI 监测神东矿区的旱情结果相吻合。神东矿区干旱异质性主要受降水、NDVI、土壤类型因子的影响。地表塌陷对于干旱具有一定影响,塌陷区干旱程度明显高于未塌陷区。本文并未分析地理环境因子与采煤活动之间的协同作用,未来有待于进一步研究。

4 结论

1) 研究区间内, TVDI 各等级面积在空间上均有不同程度的变化,但各年干旱程度均表现为西南高于东北。

2) 降水、NDVI、土壤类型为主要影响单因子。双因子协同作用能增强对 TVDI 空间分布的解释力,且强于单因子作用。降水、NDVI、土壤类型与其他地理环境因子交互,能够显著提升对 TVDI 空间异质的影响力。

3) 各矿井塌陷区 TVDI 基本大于非塌陷区 TVDI,受采煤活动影响,采煤塌陷区干旱程度大于非采煤塌

陷区。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 杨天垚, 邱建秀, 肖国安. 华北农业干旱监测与冬小麦估产研究[J]. 生态学报, 2023, 43(5): 1 936-1 947.
YANG Tianyao, QIU Jianxiu, XIAO Guoan. Agricultural drought monitoring and winter wheat yield estimation in North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1 936-1 947.
- [2] 尹国应, 张洪艳, 张良培. 2001—2019 年长江中下游农业干旱遥感监测及植被敏感性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1 245-1 256, 1 270.
YIN Guoying, ZHANG Hongyan, ZHANG Liangpei. Remote sensing monitoring of agricultural drought and vegetation sensitivity analysis in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2001 to 2019[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(8): 1 245-1 256, 1 270.
- [3] 康尧, 郭恩亮, 王永芳, 等. 温度植被干旱指数在蒙古高原干旱监测中的应用[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2 534-2 544.
KANG Yao, GUO Enliang, WANG Yongfang, et al. Application of temperature vegetation dryness index for drought monitoring in Mongolian Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2 534-2 544.
- [4] 吴泽棉, 邱建秀, 刘苏峡, 等. 基于土壤水分的农业干旱监测研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1 758-1 769.
WU Zemian, QIU Jianxiu, LIU Suxia, et al. Advances in agricultural drought monitoring based on soil moisture[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1 758-1 769.
- [5] 胡鹏飞, 李净, 王丹, 等. 基于 MODIS 和 TRMM 数据的黄土高原农业干旱监测[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 172-179.
HU Pengfei, LI Jing, WANG Dan, et al. Monitoring agricultural drought in the Loess Plateau using MODIS and TRMM data[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 172-179.
- [6] 李志伟, 王旭, 胡峰. 干旱半干旱地区生态恢复工程建设思路[J]. 陕西煤炭, 2022, 41(3): 182-185.
LI Zhiwei, WANG Xu, HU Feng. Thoughts on construction of ecological restoration projects in arid and semi-arid areas[J]. Shaanxi Coal, 2022, 41(3): 182-185.
- [7] 刘英, 雷少刚, 陈孝杨, 等. 神东矿区植被覆盖度时序变化与驱动因素分析及引导恢复策略[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3 319-3 331.
LIU Ying, LEI Shaoqiang, CHEN Xiaoyang, et al. Temporal variation and driving factors of vegetation coverage in Shendong central mining

- area based on the perspective of guided restoration[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3 319-3 331.
- [8] 马保东, 吴立新, 刘英, 等. 基于 MODIS 的神东矿区土壤湿度变化监测[J]. 科技导报, 2011, 29(35): 45-49.
MA Baodong, WU Lixin, LIU Ying, et al. Soil moisture monitoring in Shendong mining area based on MODIS data[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(35): 45-49.
- [9] 王金满, 白中科, 崔艳, 等. 干旱戈壁荒漠矿区破坏土地生态化复垦模式分析[J]. 资源与产业, 2010, 12(2): 83-88.
WANG Jinman, BAI Zhongke, CUI Yan, et al. Reclamation patterns for the destroyed lands of mining area in arid desertification[J]. Resources & Industries, 2010, 12(2): 83-88.
- [10] 吴丽, 田俊峰, 汤洋, 等. 干旱半干旱矿区采煤裂缝对土壤水分的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 115-120.
WU Li, TIAN Junfeng, TANG Yang, et al. Effects of collapse-fissure on soil moisture in arid and semi-arid mining areas[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 115-120.
- [11] 王尚义, 牛俊杰, 朱炜歆, 等. 晋西北矿区、非矿区不同植被下土壤水分特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 986-991.
WANG Shangyi, NIU Junjie, ZHU Weixin, et al. Change of soil moisture content under different plant species in mining and non-mining areas in Northwest Shanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 986-991.
- [12] 陶涛, 马东豪, 吴思聪, 等. 外源凹凸棒土添加对半干旱矿区复垦土壤水分涵养功能的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 901-908.
TAO Tao, MA Donghao, WU Sicong, et al. Effects of exogenous attapulgitic addition on water conservation function of reclaimed soils in a semi-arid mining area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(4): 901-908.
- [13] 毕银丽, 刘涛. 露天矿区植被协同演变多源数据时序分析: 以准格尔矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 293-302.
BI Yinli, LIU Tao. Time series analysis of multi-source data of coordinated evolution of vegetation in open-pit mining area: Taking Jungar mining area as an example[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 293-302.
- [14] 陈星彤, 吴长悦, 王健, 等. 多约束条件下复垦土壤水分的微波探测及标定[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5): 100-103.
CHEN Xingtong, WU Changyue, WANG Jian, et al. Reclamation soil moisture microwave detection and demarcation in multi-constraints condition[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(5): 100-103.
- [15] 谷裕, 王金满, 刘慧娟, 等. 干旱半干旱煤矿区土壤含水率研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(4): 81-86.
GU Yu, WANG Jinman, LIU Huijuan, et al. Advance of soil moisture in arid and Semi-arid mining areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(4): 81-86.
- [16] 梁洪武, 阿里木江·卡斯木, 张雪玲, 等. 干旱区绿洲城市群地表温度时空变化及其影响因素: 以天山北坡城市群为例[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3 650-3 664.
LIANG Hongwu, KASIMU Alimujiang, ZHANG Xueling, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of land surface temperature in oasis urban agglomeration in arid region: A case study in the urban agglomeration on the Northern slope of Tianshan mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3 650-3 664.
- [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] 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.
- [19] 迪里胡玛尔·阿汗木江, 玉素甫江·如素力, 买合木提江·维吉旦, 等. 基于不同植被指数 TVDI 和 VSWI 模型的焉耆盆地土壤湿度反演[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(21): 122-129.
DILIHUMAER Ahanmujiang, YUSUFUJIANG Rusuli, MAIHEMUTUJIANG Weijidan, et al. Retrieval of soil moisture in Yanqi basin based on TVDI and VSWI models with different vegetation indices[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(21): 122-129.
- [20] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [21] 赵伟, 文凤平, 蔡俊飞. 被动微波土壤水分遥感产品空间降尺度研究: 方法、进展及挑战[J]. 遥感学报, 2022, 26(9): 1 699-1 722.
ZHAO Wei, WEN Fengping, CAI Junfei. Methods, progresses, and challenges of passive microwave soil moisture spatial downscaling[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(9): 1 699-1 722.
- [22] 马金玲, 周宏飞. 塔里木盆地西北部不同类型蒸发器水面蒸发变化趋势分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 300-304.
MA Jinling, ZHOU Hongfei. Analysis on the variation trends of evaporation from water surface different evaporators in the Northwest Tarim Basin, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(3): 300-304.
- [23] 刘英, 马保东, 吴立新, 等. 基于 NDVI-ST 双抛物线特征空间的冬小麦旱情遥感监测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 55-63.
LIU Ying, MA Baodong, WU Lixin, et al. Drought remote sensing for winter wheat based on double parabola NDVI-ST space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 55-63.

(下转第 93 页)

weight of AHP-CRITIC method to evaluate water-saving levels in 2020. **【Result】** Among the nine counties we studied in the analysis, one county (Yongcheng) reached grade I, five counties (Liangyuan, Luyi, Suiyang, Zhecheng and Xiayi) reached grade II, and three counties (Dancheng, Huaiyang, Taikang) reached grade III water saving levels. Overall, water-saving levels in the beneficiary areas were higher. Water consumption per 10000-yuan GDP, water-saving irrigation rate, domestic water consumption per capita in urban areas, leakage losses from the water supply network in urban areas, and reclaimed water utilization were the factors that influenced the water-saving levels in the beneficiary areas. The evaluated results were consistent with the ground-truth data observed in the studied areas. **【Conclusion】** The TOPSIS method based on the AHP-CRITIC combination weighting is reliable for evaluating water-saving levels at regional scale. Our results provide guidelines for optimal allocation of the diverted water to the beneficiary areas in Henan province.

Key words: Yangtze-to-Huaihe water diversion project; water-saving level; index system; AHP-CRITIC method; TOPSIS method

责任编辑: 韩 洋

(上接第 51 页)

Spatial variation in drought and its determining factors in Shendong mining region

SHAO Tianyi¹, LI Wenhua^{2*}, BAO Siqin¹, WANG Nan³, MA Yating¹, SHEN Conglin⁴

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2. Inner Mongolia Geographic Information Center,

Hohhot 750306, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100089, China;

4. Forestry Station, Barenzhemu Town, Keyouzhong Banner, Xing'an League 029425, China)

Abstract: 【Objective】 The Shendong mining region is the largest coal mine in China. Extensive coal mining for many years has altered the geological landscape and disrupted ecology, leading to surface subsidence, drop of groundwater table, loss of soil moisture and nutrients, and landscape fragmentation in the region. This paper is to investigate the spatial variability in drought and its correlation to coal mining-induced collapses in the region.

【Method】 The analysis is based on temperature vegetation drought index (*TVDI*), and surface droughts measured from 2002 to 2018. Spatial variations in environmental factors and their effect on drought are analyzed using a geographical detector model by elucidating the response of drought to coal mining. **【Result】** *TVDI* had been consistently decreasing from 2002 to 2018, reaching the lowest point at 0.561 in 2018. Temporarily, May to August saw the most severe drought each year. Spatially, the southwest experienced higher drought severity than the northeast. The *q*-values obtained from the geographic detector analysis for precipitation, normalized vegetation index (*NDVI*), and soil type excepted 10% each year. Synergistic effects between these factors and others significantly improved the explanatory capacity of individual factors for spatial variation in the drought. The correlation coefficients between *TVDI* and precipitation and between *TVDI* and *NDVI* were -0.695 and -0.51, respectively. Average annual *TVDI* was higher in the subsidence areas than in the non-subsidence areas. **【Conclusion】** From 2002 to 2018, *TVDI* spatiotemporally varied in the region, and drought severity was higher and more prevalent in the southwest than in the northeast. Precipitation, *NDVI* and soil type are the factors that affected drought most. These factors combine to explain the spatiotemporal variation in *TVDI* more than by any signal factor. Furthermore, the interplay among precipitation, *NDVI*, soil type and other geographical factors impacts the spatial variation in *TVDI*. It is important to highlight that collapses in coal mining could have contributed to drought occurrence.

Key words: drought; temperature drought vegetation index; spatiotemporal variation; spatial heterogeneity; Shendong mining area

责任编辑: 韩 洋