

临空煤田火区地表温度变化特征及驱动机制*

刘阳¹, 张志义^{1†}, 李成², 姜维³, 管伟明¹

(1. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆乌鲁木齐 830017; 2. 新疆维吾尔自治区煤田地质局一五六煤田地质勘探队, 新疆乌鲁木齐 830009; 3. 新疆亚新煤层气投资开发(集团)有限责任公司, 新疆乌鲁木齐 830009)

摘要: 为探究煤田火区煤层自燃对矿区及周围环境地表温度的影响,以七泉湖矿区为研究区,以覆盖研究区的Landsat 7/8影像为数据源,采用辐射传输方程反演得到5期地表温度数据.将计算结果与MODIS LST观测数据进行对比,研究2012—2022年七泉湖矿区及周围环境的地表温度变化特征,使用地理探测器将地表温度变化数据与各因素的数据进行空间匹配和统计分析.结果表明:七泉湖矿区及周围环境地表温度在2012—2022年呈现动态分布,温度较高的区域集中在矿区采坑部位,周边地区地表温度随距采坑区距离的增加而缓慢下降;土地利用、地表反照率、植被指数对地表温度影响程度高,坡度、坡向影响程度较小.

关键词: 煤田火区; 地表温度; 辐射传输方程; 地理探测器

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.06.17.0001

中图分类号: TD75; P423.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)03-0323-012

引文格式: 刘阳, 张志义, 李成, 姜维, 管伟明. 临空煤田火区地表温度变化特征及驱动机制[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(3): 323-334.

英文引文格式: LIU Yang, ZHANG Zhiyi, LI Cheng, JIANG Wei, GUAN Weiming. Characteristics and driving mechanisms of land surface temperature variations in the fire zone at the coalfield-atmosphere interface[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(3): 323-334.

Characteristics and Driving Mechanisms of Land Surface Temperature Variations in the Fire Zone at the Coalfield-Atmosphere Interface

LIU Yang¹, ZHANG Zhiyi¹, LI Cheng², JIANG Wei³, GUAN Weiming¹

(1. School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. No. 156 Coalfield Geological Exploration Team, Xinjiang Uygur Autonomous Region Coalfield Geology Bureau, Urumqi Xinjiang 830009, China; 3. Xinjiang Yaxin Coalbed Methane Investment and Development (Group) Co. Ltd., Urumqi Xinjiang 830009, China)

Abstract: In order to explore the influence of spontaneous combustion of coal seam in coalfield fire area on the mining area and surrounding environment, the Qiquan Lake mining area was taken as the research area, and the Landsat 7/8 image covering the research area was used as the data source. The radiative transfer equation method was used to invert the surface temperature data of five periods. The calculation results were compared with the MODIS LST observation results. The surface temperature variation characteristics of the Qiquan Lake mining area and its surrounding environment from 2012 to 2022 were studied. Using the geographic detector, the land surface temperature change data and the data of various factors are spatially matched and statistically analyzed. The results show that the surface temperature of Qiquan Lake mining area and its surrounding environment presents a dynamic distribution from 2012 to 2022. The areas with higher temperatures are concentrated in the mining pit area of the mining area, and the surface temperature of the surrounding area decreases slowly with the increase of the distance from the mining pit area. Land use, surface albedo and vegetation index have a high degree of influence on surface temperature, while slope and aspect have a small degree of influence.

Key words: coalfield fire area; surface temperature; radiative transfer equation; geographical detector

* 收稿日期: 2024-06-17

基金项目: 国家自然科学基金“荒漠化矿区风积沙箱式充填体承载变形机理研究”(51964042); 新疆维吾尔自治区重大科技专项“新疆难开采煤炭煤层气资源高效开发地质适应性研究和选区评价”(2022A03015).

作者简介: 刘阳(1998—), 女, 硕士生, 从事火区治理和生态修复的研究, E-mail: Lyang050409@163.com.

† 通讯作者: 张志义(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事寒旱区矿产资源绿色开采与环境修复的研究, E-mail: xjuzhiyi@xju.edu.cn.

0 引言

煤层自燃灾害在中国新疆许多地区频发,其不仅造成大量煤炭资源的损失,还严重破坏了当地的生态环境.污染物的扩散还使灾害影响超出了矿区范围,对周边地表环境造成破坏.新疆作为我国乃至全球煤田煤火发育最严重的地区之一^[1],截至2022年底,仍有41处初生煤田火区有待治理,总面积达490.38万平方米(图1)^[2].

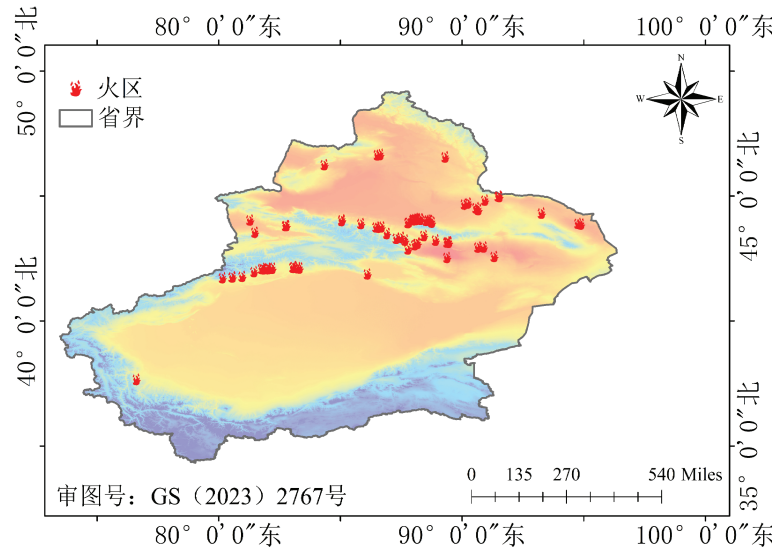


图1 中国新疆火区分布情况

新疆远离海洋、地处内陆且被山脉环绕,海洋水汽难以到达,导致区域内降水稀少、气候干旱.大部分煤田火区的地下水位较低,煤火易沿煤层倾向方向蔓延,极易引发煤田火灾,部分煤层自燃倾向性大,加剧了燃烧强度.煤层自燃倾向性是煤层自燃的主要因素^[3],在某些地区,煤层呈急倾斜状,极易引发上部煤层坍塌,继而导致裂隙形成,这些裂隙与地表连通形成供氧通道,从而引发采空区内煤炭燃烧.煤火的持续燃烧使形成的空洞不断扩大,加速了煤田火区的发展,进而使煤火区包括周围环境在内的地表温度显著提升、水分加速蒸发、土壤湿度降低,破坏了地表覆被生境,甚至导致植物死亡^[4].

地表温度是地表能量和水分平衡的关键参数之一,同时也是人类活动强度的指示因子^[5].监测地表温度有助于了解研究区域水分、温度、植被等环境因子的变化情况.以新疆淮南煤田大泉湖火区为例,董敬宣等^[6]利用Landsat 8影像数据反演地表温度,揭示了火区温度场的时空变化特征.邱程锦等^[7]采用大气校正法,选取4景Landsat TM数据,对乌达煤田的地表温度进行反演,分析了煤火区地表温度的时空变化格局及演变趋势. Jiang等^[8]、Huo等^[9]采用单通道算法对乌达煤田的煤火进行反演,并对煤火蔓延方向及发展趋势进行分析.结果表明,除了燃烧造成的直接损失外,火区持续燃烧还导致大量优质煤炭资源的损失,影响区域土地利用和植被生长,甚至引发区域沉降.杨洁^[10]以水西沟火区为研究对象,分析和预测其地表温度及植被演变的趋势.研究显示煤火过程持续发生动态变化,地表植被生长发育趋势总体向变坏的方向发展.地理现象分异是内在驱动力影响下的外在体现^[11],故煤火区域地表温度分异驱动机制的研究是分析地表温度时空分布规律的关键.

干旱气候条件下,煤田火区的生态环境极其敏感,煤火燃烧对生态环境造成的破坏难以逆转.特别是新疆地区煤层自燃灾害频发,掌握煤田火区地表温度的动态变化及主要驱动因素,不仅具有重要的现实意义,还能为煤田火区的生态服务提供有力支持.本文选择新疆七泉湖火区及其周边环境作为研究区域,基于2012—2022年5个生长季的Landsat 7/8影像,分析了地表温度时空演变特征,引入地理探测器,详细探究植被指数、土地利用、地表反照率、坡度、坡向5个因素,对煤田火区地表温度时空演变的驱动因素与驱动机制进行定量分析.

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

新疆七泉湖煤田火区位于吐鲁番市高昌区七泉湖镇,地处吐鲁番盆地北缘,天山山脉之博格达南麓,属低山丘陵区带.研究区最高海拔为+1 049 m,最低为+922 m,相对高度差一般为50 m,地势总体为东北高、西南

低,西部宽阔平缓而东部较陡峭,属干旱荒漠气候,降水稀少,夏季炎热干燥,冬季干燥少雪,日照充足.这些气候特征导致煤层暴露在地表,围岩分裂加剧,裂隙发育严重,为煤层自燃提供了充足的氧气.研究区位置如图2所示,无地表水流,西侧紧邻煤窑沟河,东侧6 km处有黑沟河,以南有七泉湖镇供水系统.

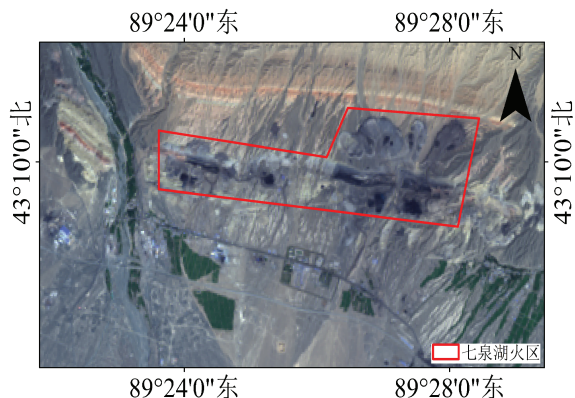


图2 研究区位置示意

1.2 研究数据

从地理空间数据云平台获取Landsat 7 TM、Landsat 8 TIRS/OLI影像作为数据源,选取行列号为141/30的2012年8月19日、2014年8月1日、2017年8月9日、2019年8月23日、2022年8月15日云量低于10%的影像数据.根据七泉湖煤田火区的开采情况,选用上述5个年份的影像数据可充分反映煤田火区地表温度演变特征.地表植被覆盖程度、地表反照率、土地覆被均利用影像数据通过ArcGIS 10.3、ENVI 5.6处理得出.用于验证Landsat地表温度反演结果精度的MOD11A1产品来自LAADS DAAC网站 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>).

2 研究方法

2.1 地表温度反演算法

国内外学者对反演地表温度的方法进行了广泛研究^[12-13],其中辐射传输方程法是应用Landsat数据进行反演的一种具有较高精度的方法,故本文选用该方法对研究区地表温度进行计算.该方法根据普朗克公式^[14-15]求得亮度温度 T_s :

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left[\frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right]}, \quad (1)$$

式中: K_1 、 K_2 均为传感器定标参数,详见表1,不同传感器取值不同; $B(T_s)$ 为温度 T_s 的黑体辐射亮度.

表1 传感器定标参数^[16]

传感器	$K_1/[W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)]^{-1}$	K_2/K
Landsat 5/TM	607.76	1 260.56
Landsat 7/ETM+	666.09	1 282.71
Landsat 8/TIRS	774.89	1 329.24

2.1.1 地表比辐射率的估算

基于归一化植被指数($NDVI$)阈值的经验法是获取地表比辐射率的主流方法之一^[17].为提高地表温度遥感反演的准确性,可以利用 $NDVI$ 将影像分为3个部分:水体、城镇和自然表面,分别计算比辐射率^[17]:

$$\begin{cases} \epsilon_{water} = 0.995, & NDVI \leq 0, \\ \epsilon_{building} = 0.9589 + 0.086 \times \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} - 0.0671 \times \left(\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right)^2, & 0 < NDVI \leq 0.7, \\ \epsilon_{surface} = 0.9625 + 0.0614 \times \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} - 0.0461 \times \left(\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right)^2, & NDVI > 0.7. \end{cases} \quad (2)$$

根据式(3)计算NDVI:

$$NDVI = \frac{B_5 - B_3 \text{ 或 } B_4}{B_5 + B_3 \text{ 或 } B_4}, \quad (3)$$

式中: Landsat 7中, B_5 为近红外波段, B_3 为红外波段; Landsat 8中, B_5 为近红外波段, B_4 为红外波段. 采用像元二分法^[16]计算植被覆盖度 P_V :

$$P_V = \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S}, \quad (4)$$

式中: $NDVI_S$ 为裸土或无植被覆盖区域累计百分比为5%的NDVI值; $NDVI_V$ 为植被完全覆盖区域累计百分比为95%的NDVI值.

2.1.2 辐射亮度计算

卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 为^[18]:

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_S) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] \tau + L_\uparrow, \quad (5)$$

式中: ε 为地表比辐射率; $B(T_S)$ 为黑体辐射亮度; τ 为大气在热红外波段的透过率; L_\downarrow 为大气下行辐射亮度; L_\uparrow 为大气上行辐射亮度. 热红外波段的 $B(T_S)$ 为:

$$B(T_S) = \frac{L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow}{\tau\varepsilon}. \quad (6)$$

2.2 地表反照率

使用地理探测器对各因素驱动的地表温度时空变化机制进行定量分析时, 地表反照率作为反映地表对太阳辐射反射能力的重要因素, 进而影响地表和大气之间的辐射能量分配过程^[19]:

$$A = 0.356R_1 + 0.130R_3 + 0.373R_4 + 0.085R_5 + 0.072R_7 - 0.0018, \quad (7)$$

式中: R_1 为蓝光波段; R_3 为红光波段; R_4 为近红外波段; R_5 为近红外1波段; R_7 为近红外2波段. 为比较不同年份的地表反照率, 在统一的量纲下对地表反照率进行归一化处理, 将值域限制在 $[0, 1]$ ^[20]:

$$NA = \frac{A - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}, \quad (8)$$

式中: NA 为处理后的地表反照率; A 为处理前的地表反照率; A_{\max} 为原始地表反照率最大值; A_{\min} 为原始地表反照率最小值.

2.3 地表温度分级

为得到研究区地表温度的时空演变特征, 将地表温度数据进行等级划分得到等级分布图. Landsat影像数据源自不同时间且受气象因素影响显著, 为消除时间及气象因素的影响, 确保不同期的地表温度具有可比性, 选用平均值-标准差的方法^[21], 将不同期次Landsat地表温度的反演结果分为5个等级, 如表2所示.

表 2 地表温度划分等级

温度等级	温度范围
低温	$T < \text{平均值} - \text{标准差}$
次低温	$\text{平均值} - \text{标准差} \leq T < \text{平均值} - 0.5 \times \text{标准差}$
中高温	$\text{平均值} - 0.5 \times \text{标准差} \leq T < \text{平均值} + 0.5 \times \text{标准差}$
次高温	$\text{平均值} + 0.5 \times \text{标准差} \leq T < \text{平均值} + \text{标准差}$
高温	$T \geq \text{平均值} + \text{标准差}$

2.4 地理探测器

地理探测器是一种基于统计学方法的分析工具, 主要用于探测空间异质性并揭示其潜在的驱动力. 本文采用该工具分析植被指数、地表反照率、土地利用、坡度、坡向与地表温度分布变化之间的关系^[22]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}, \quad (9)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \tag{10}$$

$$SST = N \sigma^2, \tag{11}$$

式中: q 为探测影响因素对地表温度的解释能力, q 值与自变量 X 对属性 Y 的解释能力呈正相关; $h = 1, 2, \dots, L$, 即层次编号; L 为各因素的分层; N_h 为第 h 层的单元数量; N 为整个区域的单元数量; σ_h^2 为第 h 层的属性 Y 方差; σ^2 为整个区域的属性 Y 方差; SSW 为层内方差之和; SST 为整个区域总方差。

3 结果与分析

3.1 地表温度精度验证

选取MOD11A1的1 km LST数据观测产品, 通过ArcGIS 10.3平台裁剪得到研究区的LST数据. 由于MODIS地表温度数据是基于广义分裂窗算法在无云条件下计算获得的^[23], 与本文采用的算法存在差异, 因此, MODIS地表温度数据与反演数值之间存在一定误差. 此外, 由于两种数据的分辨率不同, 提取研究区地表温度反演结果及MOD11A1地表温度数据后, 采用栅格处理工具将Landsat数据反演结果重采样至1 km分辨率, 再与MODIS地表温度数据进行对比分析, 以减少误差. 为更直观地分析反演精度, 借助数据管理工具创建覆盖研究区的“渔网”, 利用数据分析工具将反演结果与观测结果提取至Excel中. 由于影像中小部分区域受云量影响, 导致个别采样点与实测数据间有较大差异, 为反映真实的验证结果, 保留了误差较大的数据. 由图3可知, 2012、2014、2017、2019、2022年的相关系数分别为0.82、0.80、0.77、0.80、0.84, 可见误差对反演结果影响不大, 满足矿区地表温度时空演变研究的要求.

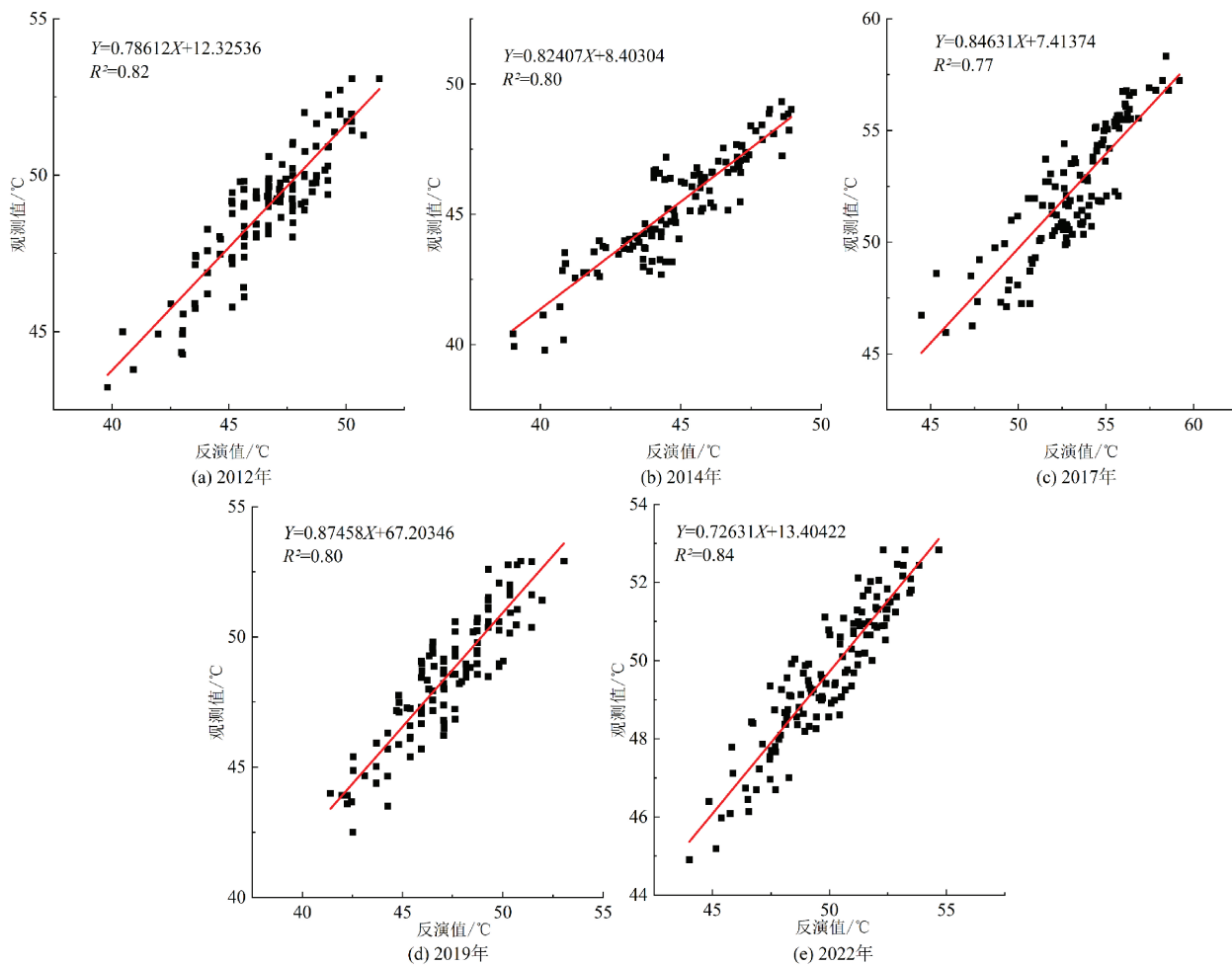


图 3 MODIS观测值和反演值对比散点图

注:(a~e) 分别对应2012、2014、2017、2019、2022年的数据

3.2 地表温度反演结果

进行地表温度反演前,为确保研究数据的精度,需进行辐射定标、大气校正等预处理工作,再利用辐射传输方程法对研究区地表温度的相关参数进行计算.依据上述方法将得到的参数代入式(1),得出研究区地表温度反演结果,并根据结果绘制研究区近10年的地表温度分布图.

由图4可知,研究区2012年地表温度普遍较高,平均温度为40.6℃.地表温度较高的区域集中在矿区采坑部位,一是采坑裸露在地表,煤层暴露在外更易吸收太阳辐射而增温;二是煤火燃烧时排放较多温室气体,机械工作时产生一定热量;三是研究区裸地较多,地表植被覆盖程度低,导致温度较高的区域分布广泛.当前,矿区开采规模尚小,故周围水体受开采影响不大.研究区2014年的地表温度普遍比2012年低,但采坑及附近区域温度仍较高,主要原因为:一方面,随着时间推移,裸地上植物群落会经历一系列的更替发育阶段,在坚硬的岩石表面,最先出现的是地衣,其通过释放酸性物质溶解岩石表面,逐渐形成极薄的土壤;另一方面,人类活动也对地表温度产生影响,一些裸地和荒地被开垦为耕地.植被覆盖程度增加使矿区周围的地表温度有所下降.2017年,研究区地表温度升高,平均温度为53℃,火区采坑面积增大.随着进一步露天开采,矿区内红色区域面积增加且明显高于周围地表温度,与此同时,矿区周围地表温度相较2014年明显升高,但水体及植被茂盛区域地表温度较低.2019年,研究区地表温度同2017年地表温度最相近,红色高温区域相较上一年颜色有所加深.温度较高的区域集中在矿区采坑部位,周边地表温度随距采坑区距离的增加缓慢下降.2022年,地表温度变化情况与上一年变化情况相似.

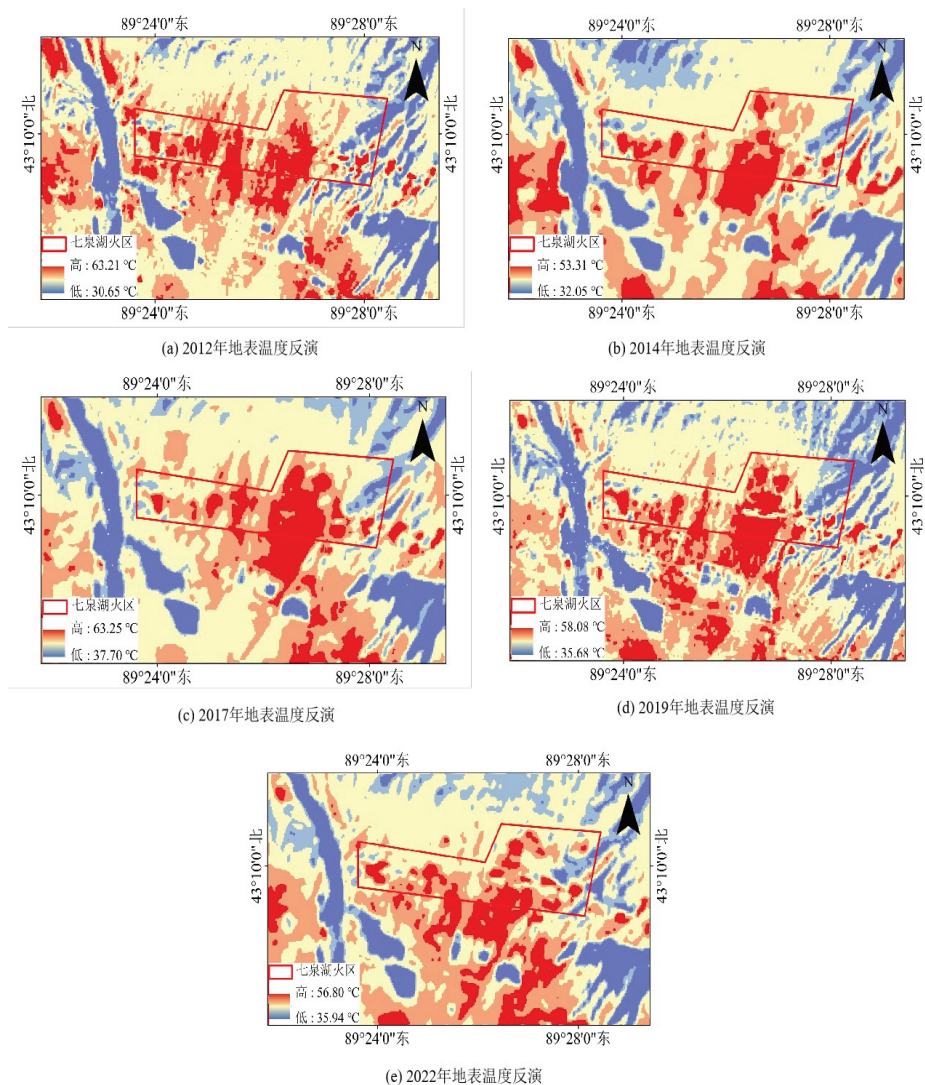


图4 Landsat 8地表温度反演结果

3.3 地表温度变化分析

3.3.1 时空变化分析

在上述地表温度反演结果的基础上,依据地表温度分级方法,利用Arcgis 10.3空间分析功能,借助栅格计算器叠加计算,得到研究区2012—2014、2014—2017、2017—2019、2019—2022年的地表温度空间变化,如图5所示.各期间高温未迁移区集中在采坑部位,且矿区附近多呈现高温、次高温、中高温间的相互转化,低温区多集中在水体和植被覆盖程度高的区域,以及距离矿区较远的裸地.各期间高温不变区域逐期增加,2019—2022年高温未迁移区域有所减少,这主要是由于矿区采取了相应的生态环境保护措施,周边环境得以改善,植被覆盖明显增加.但研究区整体地表温度仍然较高,对矿区及周边环境的修复有待加强.

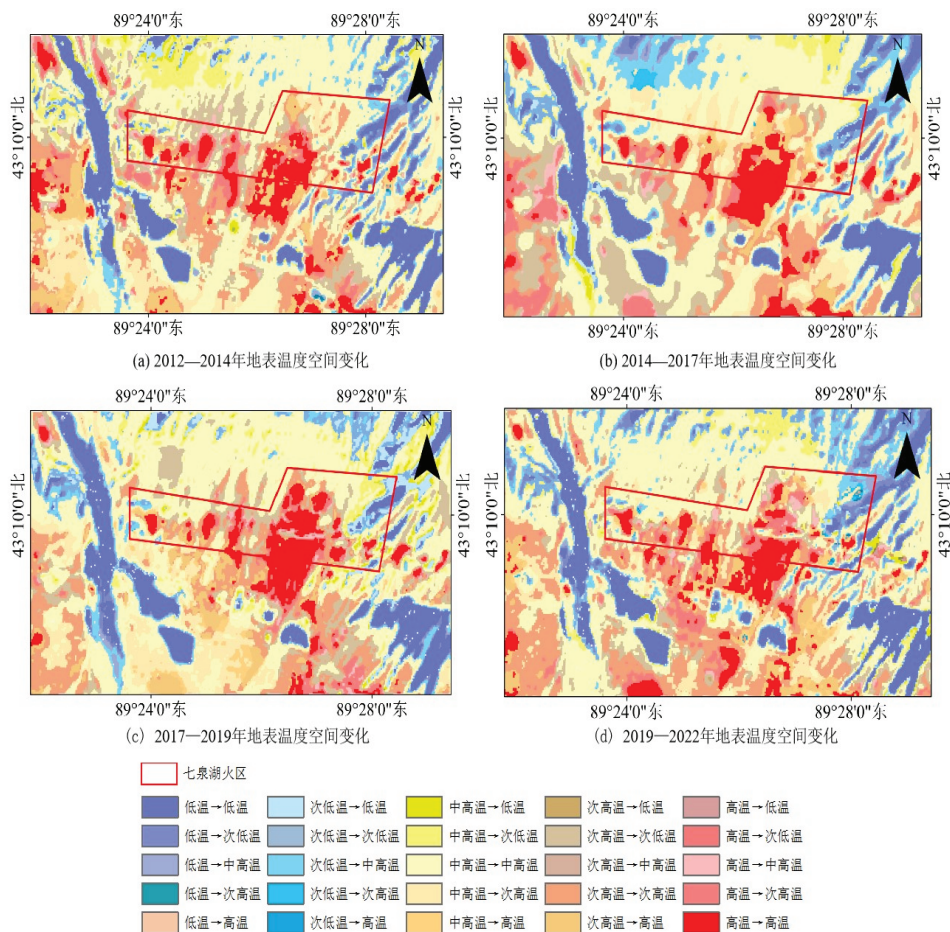


图5 2012—2022年研究区地表温度变化

3.3.2 区域变化分析

利用Arcgis 10.3对研究区2012—2014、2014—2017、2017—2019、2019—2022年的地表温度进行深入数据统计,得到了相应的区域面积变化转移矩阵(表3、表4、表5、表6).2017—2019年,占主导地位的是地表温度无变化区域,约为总面积的62.06%.其中,中高温区域的无变化面积最大,占比达到无变化区域总面积的52.26%.

地表温度升高区域的面积为11.839 5 km²,占研究区总面积的20.24%,主要分布在靠近采矿作业坑道区域及矿区外围裸露地带,这些区域受采矿活动的影响,地表温度上升显著.在地表温度升高区域中,中高温段的面积变化最为显著,达6.009 3 km²,占升高区域总面积的50.76%.地表温度降低区域的面积为13.383 9 km²,主要集中在次高温和中高温区域,这部分降温区域的面积超过了地表温度升高区域的面积.具体表现为从高温转变为次高温、从次高温转变为中高温、从中高温转变为次低温等共9种类型,这几类转换类型的总面积占研究区的17.90%.

根据计算可知,2012—2014、2014—2017、2017—2019年七泉湖矿区及周边环境总体地表温度升高区域的面积均低于地表温度降低区域的面积;但在七泉湖矿区范围内,地表温度升高区域的面积均高于地表温度降低区

域的面积,其主要原因为煤炭开发利用进入高峰期,采坑面积增加.此外,七泉湖火区的煤炭资源开采活动导致矿区范围内几乎无植被生长,煤层露头接触氧气易燃,使得地表温度升高.但随着时间推移,矿区周围裸地逐渐生长出植物,且在人工干预下植被覆盖面积增加,使得矿区周围地表温度降低.

表 3 研究区2012—2014年地表温度面积转移矩阵/km²

2012年	2014年				
	低温	次低温	中高温	次高温	高温
低温	6.580 8	1.305 0	0.504 9	0.021 6	0.007 2
次低温	0.963 9	1.707 3	1.881 0	0.026 1	0.003 6
中高温	0.491 4	3.880 8	21.773 7	5.300 1	0.603 0
次高温	0.004 5	0.034 2	5.041 8	6.732 9	3.227 4
高温	-	-	0.514 8	2.108 7	3.555 9

注:“-”表示无数据,下同

表 4 研究区2014—2017年地表温度面积转移矩阵/km²

2014年	2017年				
	低温	次低温	中高温	次高温	高温
低温	6.622 2	1.067 4	0.347 4	-	-
次低温	0.806 4	2.871 9	3.051 0	0.196 2	0.001 8
中高温	0.225 0	2.165 4	22.505 4	4.458 6	0.366 3
次高温	-	0.001 8	5.587 2	6.904 8	1.694 7
高温	-	-	0.661 5	3.316 5	3.419 1

表 5 研究区2017—2019年地表温度面积转移矩阵/km²

2017年	2019年				
	低温	次低温	中高温	次高温	高温
低温	6.489 9	0.788 4	0.288 9	-	-
次低温	2.086 2	2.220 3	1.773 0	0.005 4	-
中高温	0.722 7	3.214 8	21.450 6	6.003 9	0.739 8
次高温	0.000 9	0.144 9	5.075 1	7.543 8	2.240 1
高温	-	0.008 1	0.412 2	1.719 0	3.342 6

表 6 研究区2019—2022年地表温度面积转移矩阵/km²

2019年	2022年				
	低温	次低温	中高温	次高温	高温
低温	6.548 4	2.000 7	0.714 6	0.021 6	0.017 1
次低温	0.684 9	2.441 7	2.995 2	0.095 4	0.027 0
中高温	0.319 5	2.455 2	21.156 3	4.430 7	0.647 1
次高温	0.014 4	0.052 2	3.285 9	9.244 8	2.795 4
高温	0.017 1	0.033 3	0.469 8	2.316 6	3.485 7

2019—2022年,研究区地表温度变化表现出明显的区域特征,地表温度降低区域的总面积达到9.648 9 km²,而地表温度升高区域的面积为13.744 8 km².在温度变化的具体类型中,以中高温至次高温的变化为主,涉及变化的区域面积为4.430 7 km².此外,在地表温度升高区域内,变化类型多样,涵盖了从次高温到高温、中高温到次高温及高温、次低温到中高温等变化.矿区采坑面积急剧增加导致地面塌陷,氧气进入引发采空区内的煤

炭自燃,提升了地表温度.此间,为减轻煤炭开采对环境带来的负面影响,在采矿区周围种植了植被.这一举措虽略微改善了生态环境质量,但受煤矿开采强烈影响的区域,仍然表现出较差的生态环境质量.

综上,七泉湖煤田火区的生态环境保护工作仍是未来的重要任务.需要针对这些区域的特殊情况,采取更加有效的措施,以改善土壤状况、增加绿化覆盖,并进一步减轻煤矿开采活动对该区域生态环境的不利影响.

4 驱动机制分析

4.1 驱动力分析

地理探测器不仅可对单一数据的探测和分析,还具备对多个因素之间复杂交互作用的评估能力^[24].进行因子探测时,通过分析选取的地表温度空间分异性,能够深入了解各因子对地表温度的影响程度.将地表温度图层与因子的空间数据进行匹配,并通过统计分析评估每个因子在不同区域和时间段对地表温度变化的解释能力,即 q 值^[11](表7).

表7 地表温度空间分布影响因素的 q 值

年份	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
	地表反照率	植被指数	土地利用	坡向	坡度
2012	0.062 135	0.532 565	0.435 651	0.049 184	0.018 516
2014	0.081 436	0.407 175	0.455 310	0.041 418	0.019 919
2017	0.051 017	0.477 824	0.518 981	0.031 654	0.034 741
2019	0.050 649	0.469 773	0.480 738	0.056 465	0.021 086
2022	0.124 731	0.527 146	0.517 277	0.018 989	0.013 500

为探究矿区各类因素对地表温度的影响,在矿区范围提取不同年份的影响因子进行对比分析,利用ArcGIS 10.3对相关因素进行栅格离散化处理,以便为后续分析做好准备.采用自然断点法进行数据分级,有效识别数据中的典型分布特征和区间,以便更好体现各因素对地表温度的影响.再利用“渔网”功能生成研究区的采样点,覆盖研究区的各个重要地带,以确保数据的全面性和代表性.成功生成采样点后,收集地表温度数据及对应的各个因子等级数据,据此进行深入的因子探测分析.基于地理探测器的分析结果,能够更加清晰地理解地表反照率、植被指数、土地利用、坡向、坡度在地表温度变化中发挥的作用.这一过程不仅可以得出各影响因子对地表温度的影响权重,还能进一步提高研究人员对煤矿开采区地表温度变化的理解,为环境监测与气候研究提供参考依据.

根据 q 值的大小进行排序,可知各因素在2012、2014、2017、2019、2022年对地表温度的影响解释力:2012年,植被指数>土地利用>地表反照率>坡向>坡度;2014年,土地利用>植被指数>地表反照率>坡向>坡度;2017年,土地利用>植被指数>地表反照率>坡度>坡向;2019年,土地利用>植被指数>坡向>地表反照率>坡度;2022年,植被指数>土地利用>地表反照率>坡向>坡度.

不同年份中,各因素对地表温度的影响表现出相似的趋势.尽管每年的 q 值存在一定波动,反映出各因素的相对重要性随时间的变化而不同,但植被指数和土地利用始终占据主导地位.

4.2 各因素相互作用分析

交互检测器的研究能够深入探索因子之间的相互作用,从而揭示因素 X_1 和 X_2 (以及其他因素 X_i)对因变量 Y 的解释力的增强或减弱程度,有助于判断因素之间是否相互独立^[22].由图6可知,因素之间呈现相互增强的关系,甚至表现出非线性增强的特征.这表明七泉湖火区地表温度的演变特征是多种因素共同作用的结果,且这些因素之间的联动关系在温度变化上发挥了重要作用,较高的交互作用 q 值反映出因素 X_1 和 X_2 之间的相互作用对地表温度的影响程度更为显著.

以“ \cap ”表示两个因素的交互作用,由图6可知,2012—2022年,交互影响较强的因素分别是地表反照率 \cap 植被指数、地表反照率 \cap 土地利用、植被指数 \cap 土地利用、植被指数 \cap 坡向、植被指数 \cap 坡度、土地利用 \cap 坡向.地表反照率、植被指数的提升以及土地利用类型的转变,对于七泉湖火区地表温度以及周围环境的影响,相较于其他因子交互来说更显著.10年间,植被指数和土地利用与其他各因素的交互作用 q 值均较高,这与植被指数与土地利用对火区地表温度的单因子解释力较高有关.煤炭资源的开发对矿区的土地利用结构和植被指数造成显

著影响,进而引发研究区及周边区域生态环境质量的变化,这一变化直接导致地表温度的上升.研究区坡度较缓,故对地表温度影响较小,与地理探测器的结果一致.在单一因子分析中,坡向对于生境质量的影响相对较小,但降水量与其他环境因子之间的复杂交互作用却远远超过了任何单一因素的影响,展现了多因素相互作用的重要性,特别是在描述自然环境变迁时,降水的变化不仅影响植物的生长,还可能通过改变土壤湿度和水分可利用性等途径,间接影响植被的分布与健康状况.随着时间的推移,交互作用 q 值整体上逐渐增大,表明各因素之间的相互关系在研究区地表温度上产生了日益显著的影响.

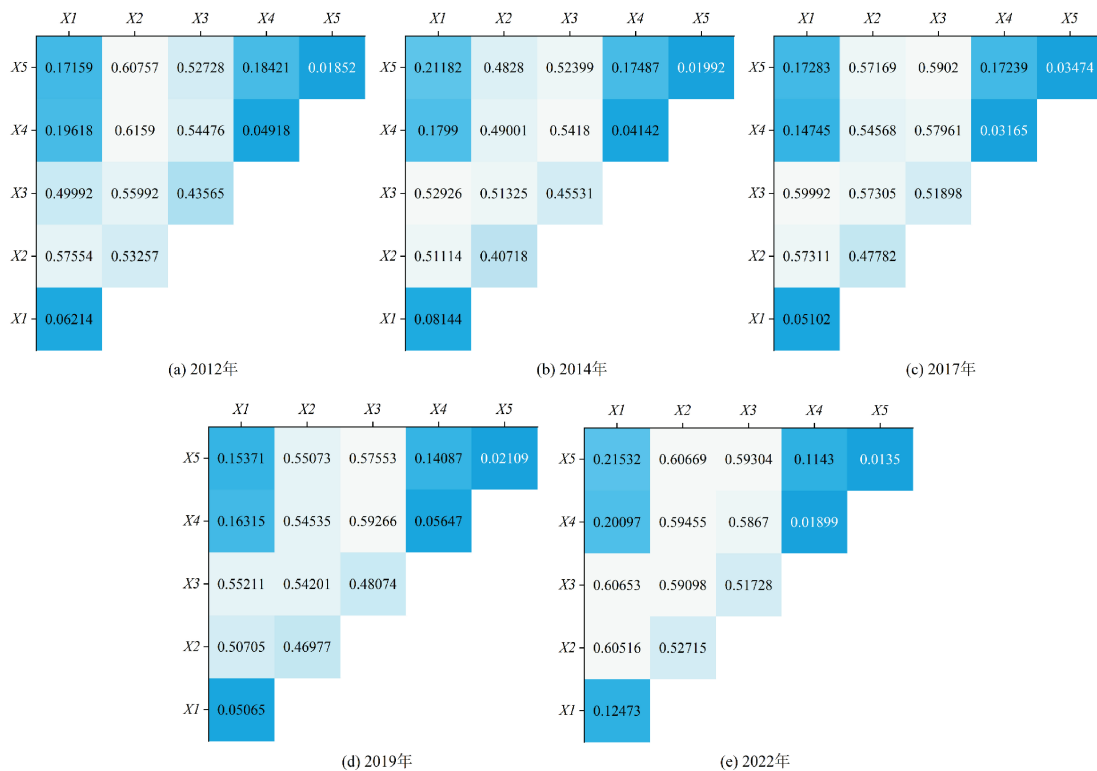


图6 交互探测结果

综上,改变土地利用方式是调节火区地表温度相对有效的手段,处理弃渣堆积地、进行土壤改良是实现植被恢复的前提^[25].目前,针对弃渣的治理,大量先进的技术手段被广泛采用,包括生态植被毯、植生袋、基材喷附和生态灌浆等^[26],均已显示出良好的效果.这些技术不仅能够有效覆盖废弃矿区的土壤,减少水土流失,还能为后续的植被恢复奠定基础.客土覆盖技术也有助于增强土壤的水分保持能力,促进生态系统复苏^[27].这些技术的实施应结合具体地域的生态特点和环境条件,使其能够有针对性地保护当地土地资源,并有效提升研究区的生境质量.随着对矿区生态环境保护工程投入力度的加大,优化矿产开采的布局、改进和优化采矿工艺以及合理规划土地利用等措施显得尤为重要.此外,还需综合利用多种治理手段,建立完善的生态监测系统,及时评估治理效果,并根据监测结果调整治理措施,确保生态恢复工作的持续有效.

5 结论

为研究开采活动随时间发展对矿区及周边环境地表温度的影响,本文对七泉湖火区的地表温度时空变化情况进行研究,借助地理探测器对矿区地表温度的驱动机制进行分析,得出以下结论.

1) 利用Landsat 7和Landsat 8数据,基于辐射传输方程法反演了5期七泉湖火区及周边环境的地表温度数据,并与MODIS数据进行对比验证,结果表明计算精度良好,满足研究需求.

2) 地表温度呈现动态分布,研究区以中高温、次高温区域为主,火区西部蔓延趋势不明显,火区东部逐年向两端蔓延.2012—2019年,矿区开采活动对周围环境影响不大,虽然采坑区地表温度升高,但周边环境整体地表温度升高区域的面积低于降低区域的面积.2019—2022年,随着煤矿开采范围增大,虽然开展了环境修复工作,但地表温度升高区域的面积大于降低区域的面积,表明环境保护及恢复工作仍需进行.

3) 采用地理探测器方法详细分析了影响因子对地表温度的解释力,结果表明土地利用、植被指数和地表反照率对地表温度的解释能力显著高于坡向和坡度.此外,通过相互作用分析,发现研究区各因素主要呈现互相增强和非线性增强,没有独立发挥作用的因子,地表反照率 \cap 植被指数、地表反照率 \cap 土地利用、植被指数 \cap 土地利用、植被指数 \cap 坡向、植被指数 \cap 坡度、土地利用 \cap 坡向对地表温度的空间分布影响显著.

本文旨在揭示煤田火区地表温度的时空演变特征规律,并对火区地表温度变化的主要驱动因素进行定量分析,为评估七泉湖煤田火区的生态修复效果提供了重要参考.然而,在研究过程中,地表温度数据缺乏实地测量,且获取相对精确的大气主要成分信息难度较大,故根据经验参数化方程估算了相关参数,在一定程度上简化了计算过程.此外,应用地理探测器量化不同因素对地表温度变化的影响程度,清晰识别出影响温度分布的主要驱动因子.在探讨地表温度影响因素时,本文主要关注了自然因素与人为因素,存在一定的局限性.为更全面刻画火区的生态环境变化,后续研究应考虑结合更多的社会经济指标,如人口密度、地方GDP等.

参考文献:

- [1] 闫军. 新疆煤田火灾多发频发原因分析研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(6): 162-163.
YAN J. Study on causes of frequent occurrence of coalfield fires in Xinjiang[J]. Coal Technology, 2022, 41(6): 162-163. (in Chinese)
- [2] 包兴东. 新疆第五次煤田火区普查成果分析[J]. 能源与环保, 2021, 43(2): 1-4.
BAO X D. Analysis on results of the fifth coalfield fire area survey in Xinjiang[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(2): 1-4. (in Chinese)
- [3] WU J J, LIU X C. Risk assessment of underground coal fire development at regional scale[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(1): 87-94.
- [4] 赵禹深, 许献磊, 曹仕龙, 等. 地下煤火探测技术及工程应用综述[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 24-39.
ZHAO Y S, XU X L, CAO S L, et al. A review of underground coal fire detection technology and engineering application[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 24-39. (in Chinese)
- [5] 刘一更. 基于遥感技术的露天矿区生态环境监测与评价方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2024.
LIU Y G. Research on ecological environment monitoring and evaluation methods in open-pit mining areas based on remote sensing technology[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2024. (in Chinese)
- [6] 董敬宣, 曾强, 李根生, 等. 淮南煤田大泉湖火区地表温度反演及时空变化特征[J]. 中国矿业, 2018, 27(1): 160-164.
DONG J X, ZENG Q, LI G S, et al. Analysis of the change characteristics of time and space and inverting of surface temperature of Daquanhu coal fire in south Junggar coalfield[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(1): 160-164. (in Chinese)
- [7] 邱程锦, 王坚, 刘立聪, 等. 遥感技术在乌达煤田火灾监测中的应用[J]. 煤炭工程, 2012(8): 130-133.
QIU C J, WANG J, LIU L C, et al. Remote sensing technology applied to fire disaster monitoring and measuring of Wuda coalfield[J]. Coal Engineering, 2012(8): 130-133. (in Chinese)
- [8] JIANG W G, ZHU X H, WU J J, et al. Retrieval and analysis of coal fire temperature in Wuda coalfield, Inner Mongolia, China[J]. Chinese Geographical Science, 2011, 21(2): 159-166.
- [9] HUO H Y, NI Z Y, GAO C X, et al. A study of coal fire propagation with remotely sensed thermal infrared data[J]. Remote Sensing, 2015, 7(3): 3088-3113.
- [10] 杨洁. 淮南煤田水西沟火区地表环境变化监测研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
YANG J. Monitoring study on surface environmental change of Shuixigou coal fire in southern Junggar coalfield[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021. (in Chinese)
- [11] 张船红, 郭豫宾, 范本, 等. Landsat的城市地表温度时空变化及驱动机制分析[J]. 测绘科学, 2023, 48(1): 127-139.
ZHANG C H, GUO Y B, FAN B, et al. Analysis of spatio-temporal variation and driving mechanism of urban land surface temperature based on Landsat[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(1): 127-139. (in Chinese)
- [12] 方良成, 陈永春, 安士凯, 等. 近十年淮南矿区地表热环境时空演变分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 260-268.
FANG L C, CHEN Y C, AN S K, et al. Temporal and spatial evolution of surface thermal environment in Huainan mining area in the last decade[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 260-268. (in Chinese)
- [13] 侯宇初, 张冬有. 基于Landsat 8遥感影像的地表温度反演方法对比研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(10): 142-147.
HOU Y C, ZHANG D Y. Comparison study on land surface temperature retrieval algorithms based on Landsat 8 remote sensing image[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(10): 142-147. (in Chinese)

- [14] JIMENEZ-MUNOZ J C, CRISTOBAL J, SOBRINO J A, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 339-349.
- [15] JIMENEZ-MUNOZ J C, SOBRINO J A, SKOKOVIC D, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1840-1843.
- [16] 郭俊钰, 祁元, 王宏伟, 等. 青海木里煤田地表温度变化及其影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2023, 45(3): 980-992.
GUO J Y, QI Y, WANG H W, et al. Variation of land surface temperature and its influencing factors in Muli coalfield, Qinghai Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(3): 980-992. (in Chinese)
- [17] 黄洁, 张锦. 基于多源遥感影像的矿区煤火探测方法[J]. *煤炭工程*, 2024, 56(7): 174-180.
HUANG J, ZHANG J. Coal fire detection method in mining area based on multi-source remote sensing images[J]. *Coal Engineering*, 2024, 56(7): 174-180. (in Chinese)
- [18] 王中琪. 广西水牯山石灰石矿区地表温度时空变化特征及影响因素研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
WANG Z Q. Study on temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of surface temperature in Shuigushan limestone mining area, Guangxi[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [19] 陈杨杨. 典型地表覆被变化对地表反照率的影响[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
CHEN Y Y. Effect of typical ground cover changes on surface albedo[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023. (in Chinese)
- [20] 侯春华, 李富平, 何宝杰, 等. 地表反照率和植被覆盖度对矿区热环境的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(12): 117-126.
HOU C H, LI F P, HE B J, et al. Influence of surface albedo and vegetation fractional coverage on thermal environment of mining area[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(12): 117-126. (in Chinese)
- [21] 薛永福, 刘炜, 郑晨键, 等. 2007—2020年银川市地表温度反演及时空变化分析[J]. *现代信息技术*, 2023, 7(11): 111-115.
XUE Y F, LIU W, ZHENG C J, et al. Inversion and spatial-temporal variation analysis of surface temperature in Yinchuan from 2007 to 2020[J]. *Modern Information Technology*, 2023, 7(11): 111-115. (in Chinese)
- [22] 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 J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese)
- [23] STROPPIANA D, ANTONINETTI M, BRIVIO P A. Seasonality of MODIS LST over southern Italy and correlation with land cover, topography and solar radiation[J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2014, 47(1): 133-152.
- [24] 罗瑶, 彭文甫, 董永波, 等. 基于地理探测器下的川西高原地表温度空间格局及影响因子分析: 以西昌市为例[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(3): 738-749.
LUO Y, PENG W F, DONG Y B, et al. Geographical exploration of the spatial pattern of the surface temperature and its influencing factors in western Sichuan Plateau: A case of Xichang City[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3): 738-749. (in Chinese)
- [25] 唐光清. 废弃矿山植被恢复的策略与效果评价[J]. *世界有色金属*, 2024(15): 124-126.
TANG G Q. Strategies and effect evaluation of vegetation restoration in abandoned mines[J]. *World Nonferrous Metals*, 2024(15): 124-126. (in Chinese)
- [26] 珊丹, 崔崴, 邢恩德, 等. 矿山废弃地植被恢复对土壤养分的影响与评价[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 44(1): 101-110.
SHAN D, CUI W, XING E D, et al. Effects and evaluation of vegetation restoration on soil nutrients in abandoned coalmining area[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2024, 44(1): 101-110. (in Chinese)
- [27] 陈金龙. 废弃矿山生态恢复下不同植被模式的恢复效果研究[J]. *绿色科技*, 2022, 24(12): 222-224.
CHEN J L. Research on the restoration effect of different vegetation patterns under the ecological restoration of abandoned mines[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, 24(12): 222-224. (in Chinese)