



顾及地表覆被差异的卫星遥感煤火识别方法

马子钧 李元元 武静 欧阳子琪 王明伟 邱天翔 许志华

引用本文：

马子钧, 李元元, 武静, 等. 顾及地表覆被差异的卫星遥感煤火识别方法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 92–103.
MA Zijun, LI Yuanyuan, WU Jing. Coal fire identification through satellite remote sensing considering the landscapes[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 92–103.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1460>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

融合地表温度与形变的地下煤火多源遥感识别研究

Multi-source remote sensing identification of underground coal fires based on the fusion of surface temperature and deformation.
煤炭科学技术. 2024, 52(7): 139–147 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1201>

遥感方法在宁武煤田煤火识别中的应用

Application of remote sensing method in coal fire identification in Ningwu Coalfield
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 133–139 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021-1461>

西部黄土高原矿区采煤沉陷多源遥感监测技术进展与展望

Progress and prospects of multi-source remote sensing monitoring technology for coal mining subsidence in mining areas of the western Loess Plateau
煤炭科学技术. 2023, 51(12): 9–26 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1113>

基于无人机遥感的煤矸石山植被分类

Classification of coal gangue pile vegetation based on UAV remote sensing
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 245–259 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021-0899>

矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统设计与实现

Design and implementation of quantitative remote sensing monitoring and intelligent analysis system for mine ecological environment
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 346–358 <https://doi.org/10.12438/est.2023-0456>

泰安市土地利用类型与地表温度的关系研究

Study on the relationships between the land use type and the land surface temperature in Taian City
煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f04a2298-3986-4e62-b76b-7fbd672db568>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



马子钧, 李元元, 武 静, 等. 顾及地表覆被差异的卫星遥感煤火识别方法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 92–103.

MA Zijun, LI Yuanyuan, WU Jing, et al. Coal fire identification through satellite remote sensing considering the landscapes[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 92–103.

移动扫码阅读

顾及地表覆被差异的卫星遥感煤火识别方法

马子钧¹, 李元元², 武 静², 欧阳子琪², 王明伟², 邱天翔², 许志华²

(1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 我国矿区煤火问题严重, 已成为破坏区域环境和能源安全的重大威胁。及时、准确地掌握煤火分布范围, 厘清其时空演化规律, 对于煤火区控制和治理具有重要意义。提出了一种顾及地表覆被差异的卫星遥感煤火识别方法。首先, 以 Landsat 卫星影像为基础, 利用辐射传导方程法进行大气校正, 反演绝对地表温度; 其次, 采用支持向量机的监督分类方法, 获取地表土地覆被类型, 并以此为约束确定煤火异常区域; 最后, 采用回归分析方法推演煤火时空分布特征, 构建煤火预测模型。选取内蒙古自治区乌海市为研究区, 以 2018—2023 年的 Landsat-8/9 时序卫星影像为数据源, 开展煤火异常区识别和预测试验。结果表明: 本文所提方法对煤火识别结果与实地核实和低空监测结果一致, 预测煤火区域与卫星反演结果一致, 印证了本文方法对大区域煤火“扫靶式”识别的可靠性, 为矿区煤火及时发现、时空演化规律分析及修复治理提供了可靠的技术支持。

关键词: 煤火识别; 卫星遥感; Landsat-8/9; 辐射传导方程法; 地表温度; 地表覆被

中图分类号: TD75 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)S2-0092-12

Coal fire identification through satellite remote sensing considering the landscapes

MA Zijun¹, LI Yuanyuan², WU Jing², OUYANG Ziqi², WANG Mingwei², QIU Tianxiang², XU Zhihua²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Earth Science and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Coal fire is a serious problem in China's mining areas, which has become a major threat to regional environment and energy security. The timely and accurate grasp of the distribution range of coal fires and the clarification of their spatiotemporal evolution law are crucial for effective control and management in coal fire areas. In this paper, a coal fire identification method based on satellite remote sensing considering the difference of land cover is proposed. Firstly, based on Landsat satellite images, the atmospheric correction was carried out using the radiative conduction equation method to invert the absolute surface temperature. Secondly, the supervised classification method of support vector machine is used to obtain the land cover type and determine the abnormal region of coal fire. Finally, the distribution characteristics of coal fire in time and space are deduced by regression analysis method, and the coal fire prediction model is constructed. Wuhai City, Inner Mongolia Autonomous Region is selected as the research area, and the Landsat time series satellite images from 2018—2023 are used as the data source to carry out the coal fire anomaly identification and prediction experiment. The results show that the coal fire identification results of the proposed method are consistent with the field verification and low-level monitoring results, and the predicted region and coal fire degree are consistent with the satellite inversion results, which confirms the reliability of the proposed method for the “sweep target” identification of coal fires in large areas, and provides reliable technical support for the timely discovery of coal fires in mining areas, the analysis of space-time evolution laws, and the restoration and treatment of coal fires.

Key words: coal fire identification; satellite remote sensing; landsat-8/9; radiative transfer equation method; surface temperature; land cover

收稿日期: 2023-10-12 责任编辑: 宫在萍 DOI: 10.12438/cst.2023-1460

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42371448); 中央高校基本科研业务费资助项目(2023ZKPYDC11)

作者简介: 马子钧(1988—), 男, 内蒙古乌海人, 工程师, 博士研究生。E-mail: mazijunwhs@163.com

通讯作者: 许志华(1987—), 男, 河北保定人, 副教授、博士生导师。E-mail: z.xu@cumtb.edu.cn

0 引言

地下煤火是煤层中的碳被氧化而产生的一种自然现象,通常发生在浅层煤层、矸石山以及排土边坡。我国矿产资源丰富,地下煤火问题严重,导致区域环境破坏,威胁能源安全。及时、准确地识别煤火区域,厘清影响范围,对于煤火治理和生态修复具有重要意义^[1],成为国内外学者的研究热点^[2-4]。目前煤火监测方法主要有磁探测法^[5-6]、雷达探测法^[7]、电阻率探测法^[8]、气体探测法^[9]、温度探测法^[10]、测氡法^[11]、遥感法^[12]等。卫星遥感影像具有监测范围广、长时序重复监测能力强的优势,已成为大范围“扫靶式”煤火监测的有效手段^[13]。国内外众多学者利用卫星遥感方法进行煤火识别探究。李峰等^[14]采用2008年治理前、2011年和2013年治理中以及2015年治理后期的Landsat 5/8热红外波段影像分析内蒙古乌达煤田煤火空间分布格局演变动态,并对探测结果进行了实地验证。LIU等^[15]采用分布式散射干涉技术(DSI)对新疆米泉火区地表沉降进行时空分析,结果表明矿区地表沉降和煤火在空间上存在正向相关性。LI等^[16]基于2015—2020年CBERS-04夜间数据,提出了一种自适应边缘阈值(AET)方法来识别乌达煤田的煤火分布范围。KARANAM等^[17]利用卫星影像中的热红外波段与微波波段来监测煤火和沉降现象的变化,同时借助InSAR对地表形变进行分析,结合地表沉降以及温度异常共同推定煤火区范围;BISWAL等^[18]利用Landsat 5和Landsat 8卫星的热红外波段数据以及无线电探空仪数据,反演了1989—2019年丹巴德内JCF区域的地表温度,并利用时序反演结果分析了煤火的时空演化趋势。

然而,现有研究尚未考虑到地表覆被类型,导致城市-区域级的煤火识别存在局限性,易受城镇热岛效应、沙地等地表类型干扰,导致煤火识别不准。为此,本文提出了一种顾及地表覆被差异的卫星遥感煤火识别方法,基于地表分类结果,对卫星遥感反演的高温异常区进行自适应剔除,提高遥感煤火识别精度,在此基础上,通过长时序的煤火识别结果预测煤火演变趋势。本文以乌海市为研究区,选取2018—2023年Landsat遥感数据,基于卫星遥感温度反演技术与监督分类法相结合的方法提取煤火区并探究诱发煤火的驱动要素,利用热红外数据以及国家能源局基础检查数据进行验证,达到遥感监测煤火的目的,并以2023年1—9月煤火反演结果为依据,预测2023年10月重点煤火区域范围,为煤火区提前预警和修复治理提供数据基础。

1 研究区与数据概况

1.1 研究区概况

乌海市($39^{\circ}10'0''$ ~ $39^{\circ}50'0''$ N, $106^{\circ}40'0''$ ~ $107^{\circ}0'0''$ E)地处黄河上游,东临鄂尔多斯高原,南与宁夏石嘴山市隔河相望,西接阿拉善草原,北靠肥沃的河套平原,是“宁蒙陕甘”经济区的结合部和沿黄经济带的中心区域,总面积1754 km²。该地区矿产资源丰富,矿种较多,有探明储量的矿产25种。该地区矿产质量较好,分布集中,其中矿产规模达到大型的矿床有8处,中型21处,小型25处,矿产资源分布如图1所示。

乌海市碳含量很高,盛产焦煤,其煤矿中的硫含量也很高。乌海市产生煤火主要是由于硫化物分解产热。其中位于西部乌达区的矿区为乌达煤田,东部煤矿分布在骆驼山一带。1961年,乌达煤田的苏海图矿区首次发现了由于大规模的开采活动导致的煤层燃烧现象,直到2002年,乌达矿区已形成了16个火区,面积达307.6 km²。目前,乌海及周边地区主要煤炭产地煤田自燃问题严重。据2022年第2轮中央生态环保督察反馈问题统计,内蒙古自治区在期有效露天矿山1482家,占矿山总数的61.6%,目前仍有500多 km²需要治理修复。

1.2 数据采集

1.2.1 煤火识别数据

本文煤火识别所用研究数据为2018—2023年的Landsat-8/9影像,其中,陆地成像仪(Operational Land Imager, OLI)的空间分辨率为30 m,热红外传感器(Thermal Infrared Sensor, TIRS)的空间分辨率为100 m,含云量少于5%。受卫星过境时间、热红外影像稀疏、云层覆盖等因素影响,每年所用的影像时间有所差别,导致影像反演的地表温度在各年际之间存在明显差异。本文中的遥感影像数据采集时间为当天的11:00左右,便于排除数据采集时间段温度差异的影响。由于单张影像无法覆盖整个研究区,本文通过对多景影像拼接,得到各时期的卫星影像。此外,选取分辨率为30 m的SRTM DEM^[19](Shuttle Radar Topography Mission, Digital Elevation Model)产品数据对卫星影像进行地形校正。

1.2.2 煤火预测数据

为验证本研究对卫星遥感煤火预测结果,选用的研究数据为2023年1—10月的Landsat OLI-TIRS影像。其中2023年2月、8月以及9月的数据采用的是Landsat9卫星遥感数据,2023年1月、3月、4月、5月、6月、7月以及10月采用的是Landsat8

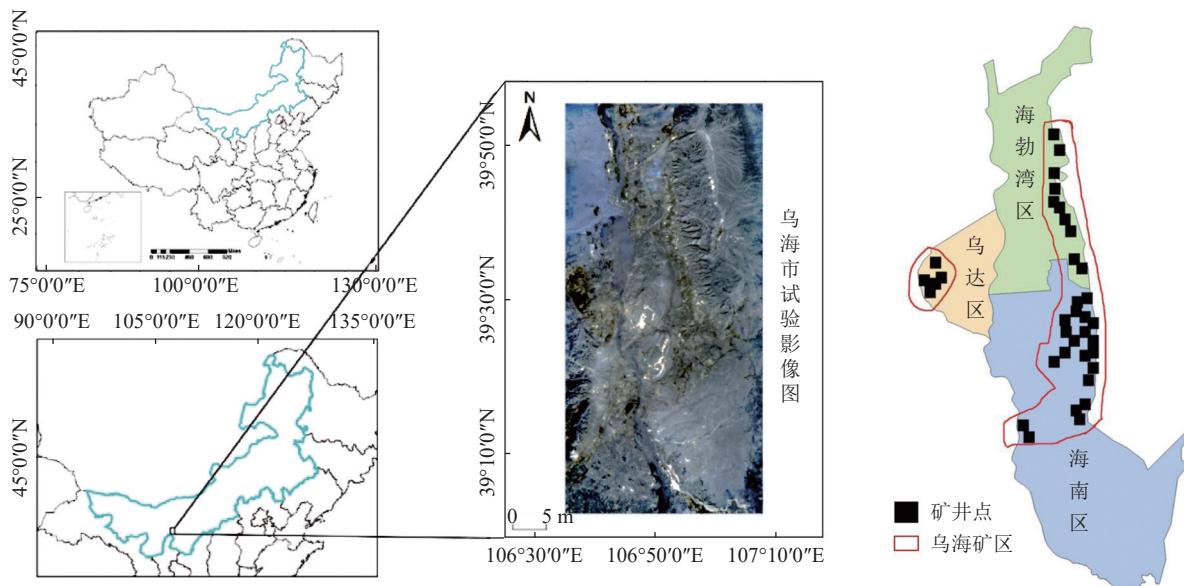


图1 乌海市试验区矿产资源分布

Fig.1 Mineral resources distribution map of experimental area of Wuhai City

卫星遥感数据,详见表1。此外,为精细实现煤火预测效果,本文选取煤火严重的乌达行政区和苏海图矿区进行验证。

表1 卫星数据
Table 1 Satellite data

日期	卫星
2023-01-26	Landsat8
2023-02-19	Landsat9
2023-03-31	Landsat8
2023-04-16	Landsat8
2023-05-18	Landsat8
2023-06-19	Landsat8
2023-07-05	Landsat8
2023-08-30	Landsat9
2023-09-15	Landsat9
2023-10-09	Landsat8

2 研究方法

本文提出的顾及地表覆被差异的卫星遥感煤火识别技术路线如图2所示,主要包括以下6个步骤:

1)数据预处理:通过几何校正、辐射定标、大气校正以及矢量裁剪等方法,对遥感数据进行预处理。

2)地表温度反演:利用大气校正反演方法,获取地表覆盖绝对温度。

3)相对温度反演:以所有像素值的平均温度值为基准,消除季节差异对煤火温度异常的影响。

4)土地利用分类:利用基于向量机(Support Vector Machine, SVM)^[20]的土地利用分类方法,排除城镇、沙漠等异常区的影响。

5)煤火区提取与分析:参考文献已有成果,将所有像素数字量化值(Digital Number, DN)的一倍标准差作为阈值,提取高温异常范围,再进一步除去沙地、城镇等高温区域的影响得到煤火区。

6)真实性验证:进行实地考察,探究本方法的准确性。

2.1 基于大气校正法的地表温度反演

本文以2018—2023年的Landsat-8/9影像数据为基础,首先对数据进行预处理,包含几何校正、辐射定标、大气校正、矢量裁剪等步骤,接着通过大气校正法^[21](辐射传导方程法)对乌海市地表温度进行定量反演。在进行数据预处理之后,首先利用近红外波段和红波段计算归一化植被指数NDVI,然后基于NDVI计算植被覆盖度、地表比辐射率,继而以大气在热红外波段的透过率以及地表比辐射率为参数计算黑体在热红外波段的辐射亮度,最后反演地表温度^[22],其主要原理是去除大气对地表热辐射产生的误差,将热辐射强度转换为相应的地表温度。

2.2 高温异常区域识别

地下存在煤火时,通常会导致地表形成热异常,因此可以提取煤火引起的温度异常范围来识别煤火异常区^[23]。研究数据时间跨度较大,反演所得的地

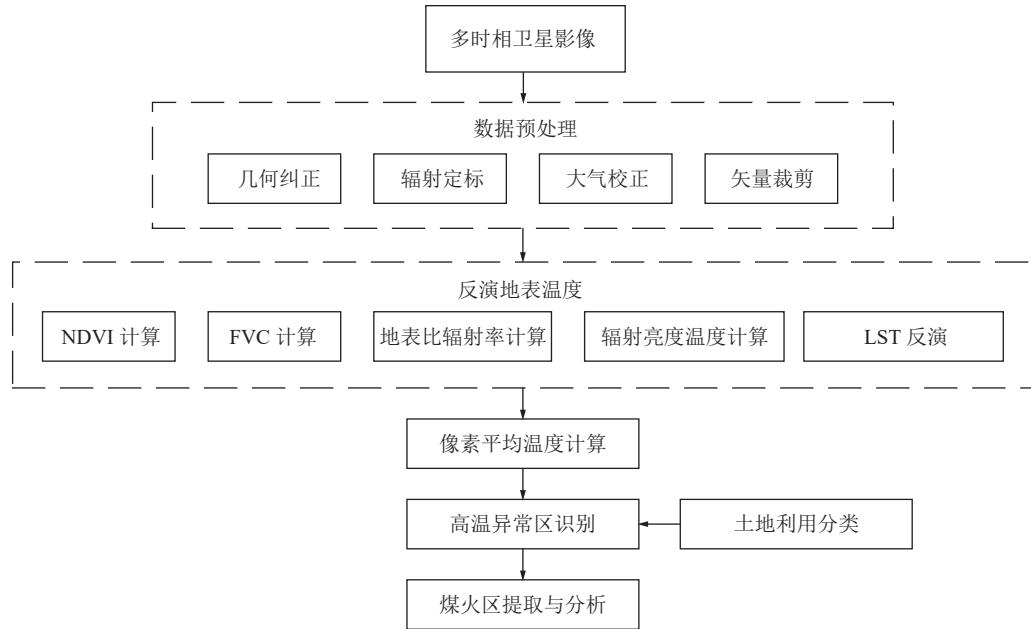


图 2 顾及地表覆被差异的卫星遥感煤火识别技术路线

Fig.2 Technical route of coal fire identification by satellite remote sensing considering land cover difference

表温度包含不同的季节、时间、气候条件以及不同的地表类型等条件差异^[24], 不宜采用固态阈值。为此, 本文采用像素平均温度获取相对温度 DN 值, 用不同年份遥感图像的相对温度进行比较, 以此剔除季节因素的影响, 在此基础上采用所有 DN 值的一倍标准偏差计算动态阈值来检测热异常像素, 提取高温异常区, 计算方法见式(1):

$$t = T - \bar{T} - \sigma, t \geq 0 \quad (1)$$

式中: $t \geq 0$ 的部分为高温异常区的温度, $^{\circ}\text{C}$; T 为反演出来的地表绝对温度, $^{\circ}\text{C}$; \bar{T} 为地表平均温度, $^{\circ}\text{C}$; σ 为所有 DN 值的一倍标准偏差动态阈值, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 顾及地表覆被差异的煤火区域识别

“热岛效应”会导致城镇地区的温度明显高于周边地区。此外, 大面积的沙地、裸土、建筑物等区域遥感影像反演的地表温度较高, 会对煤火识别结果造成干扰。因此, 本文首先采用支持向量机进行土地利用分类研究, 继而结合乌海市的地表覆盖情况细致判别具体的煤火区域范围。

支持向量机作为一种分类模型, 可以将分类问题转化为一个凸二次规划问题的求解^[25]。根据 SVM 分类算法对土地覆盖类型进行处理, 将乌海市影像的高温异常区定义为 C 土地利用类型为沙地部分的高温异常区定义为 C_1 、土地利用类型为城镇的高温异常区定义为 C_2 , 排除掉沙地和城镇影响后的高温异常区域 M , 即为根据土地利用类型分类后获

得的精细化煤火区域预测结果见式(2):

$$M = C/C_1/C_2 \quad (2)$$

2.4 基于回归分析的卫星遥感煤火预警预测方法

回归预测^[26](Regression Forecasting)是回归方程的一项重要应用, 基于预测的相关性原则, 获取影响预测目标的各因素, 继而找出这些因素与预测目标之间的函数关系的近似表达。研究首次尝试将回归预测方法拓展到煤火检测领域中, 主要步骤包括: 确定自变量和因变量、建立回归预测模型、进行相关分析、检验回归预测模型、计算并确定预测值等。

本方法采用多元线性回归分析方法^[27]。对于多元线性回归方程, 在模型和数据满足线性回归的基本假定的前提下, 设因变量为 Y , 影响因变量的 k 个自变量分别为 X_1, X_2, \dots, X_k , 假设每一个自变量对因变量 Y 的影响都是线性的, 也就是说, X_i 在其他自变量不变的情况下, Y 的均值随着自变量的变化均匀变化。回归模型的数学表达为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (3)$$

式中: $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 为回归参数。

3 结果与分析

3.1 卫星遥感地表温度反演

使用大气校正法反演得到 2018—2023 年间的乌海市地表绝对温度, 如图 3 所示。从图 3 可以看

出,夏季地表温度总体偏高,冬季地表温度偏低,说明季节因素对地表温度的影响剧烈。

为消除季节性差异对高温异常区识别的影响,本文将遥感反演的绝对地表温度进行归一化处理^[28]。以遥感反演的乌海市地表绝对温度均值为基准进行逐年差值归一化,得到2018—2023年乌海市地表相对温度图,如图4所示。结果表明,归一化后的各年地表相对温度在空间上存在较大的相似性,剔除了季节性差异导致的显著性年际温度偏差,为高温异常区的识别提供了可靠的数据基础。此外,从图4中可以看出,近年来,乌海市在黄河沿岸的地表温度普遍偏低,在西部乌达煤田、东部矿区的相对地表温

度普遍偏高。

3.2 高温异常区域识别

为消除季节差异对地表绝对温度的影响,以地表相对温度为基础,将每年地表温度的标准差设定为阈值,由此确定乌海市各年卫星遥感反演的高温异常区,视为潜在的煤火区域,并将煤火范围叠加到该地区的卫星影像,如图5所示。在此基础上,将提取的高温范围叠加到乌海市行政规划区域,用于分析高温异常区的空间分布及其演化规律,结果如图6所示。结果表明,乌海市近年的高温异常区域面积主要集中分布在乌达区的乌达煤田南部、海勃湾区的东部和东北部以及海南区的东南部等地,

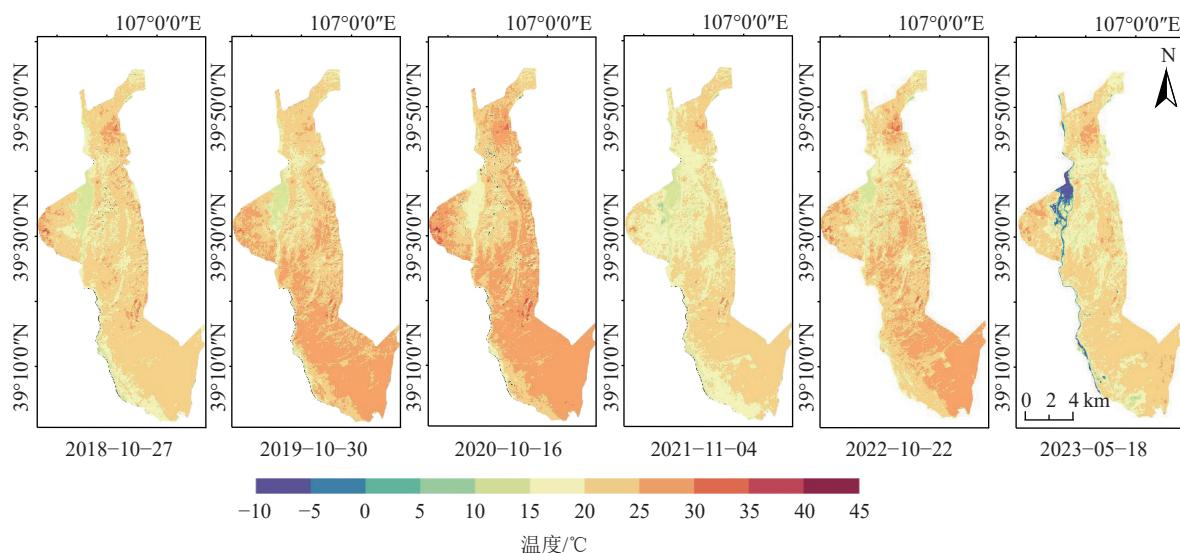


图3 2018—2023年乌海市地表绝对温度遥感反演结果

Fig.3 Absolute surface temperature remote sensing inversion results for Wuhai City from 2018 to 2023

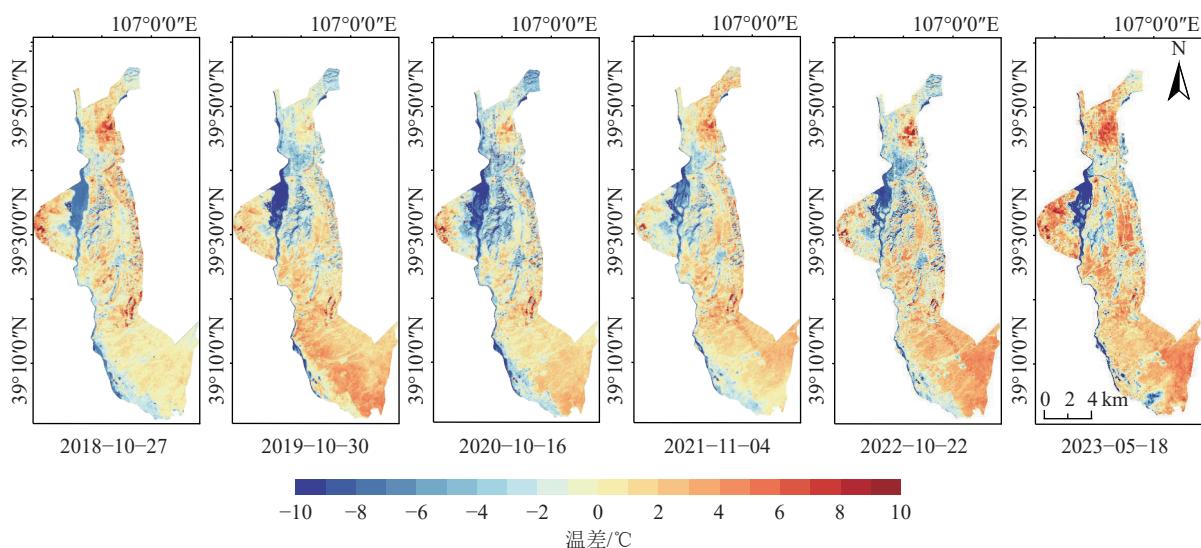


图4 2018—2023年乌海市地表相对温度

Fig.4 Relative surface temperature in Wuhai City from 2018 to 2023

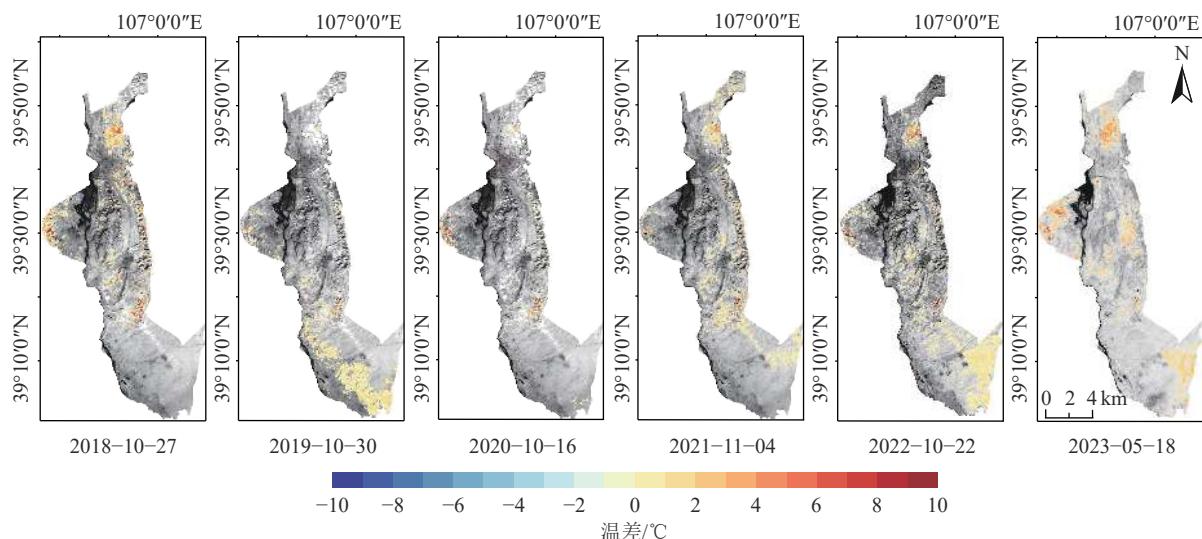


图 5 2018—2023 年乌海市高温异常区范围(叠加到卫星影像)

Fig.5 Range of high temperature anomalies in Wuhai City from 2018 to 2023 (superimposed on the landsat images)

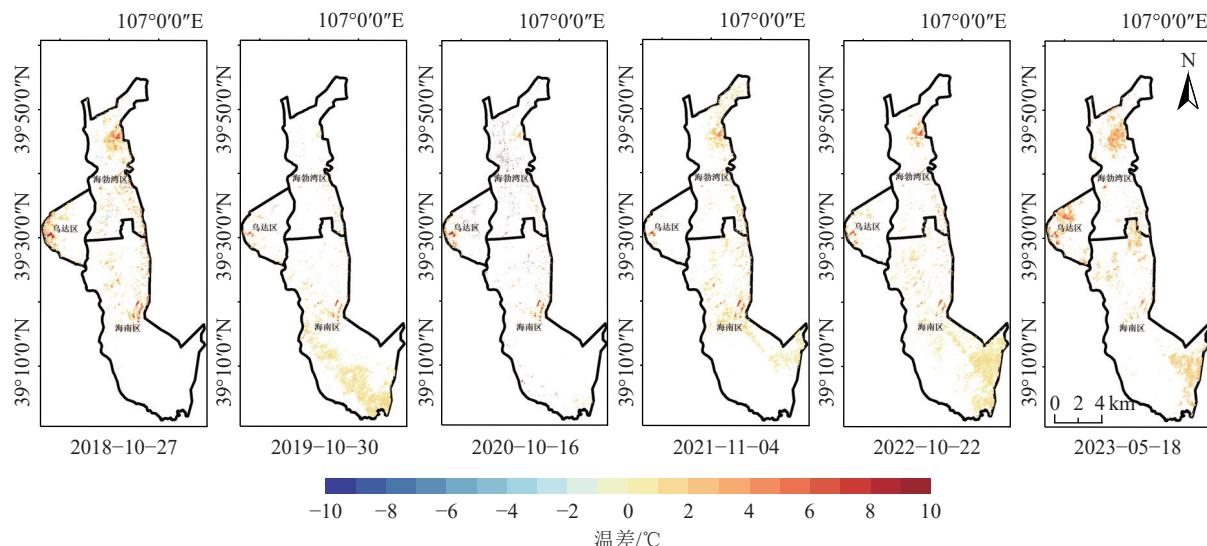


图 6 2018—2023 年乌海市高温异常区范围(叠加到行政区划图)

Fig.6 Range of high temperature anomalies in Wuhai City from 2018 to 2023 (Superimposed on the administrative territorial map)

乌海市高温异常区域在 2018—2020 年间分布变化

明显,于 2020 年达到面积最小,2021—2023 年分布变化较小但呈现出在原有分布基础上面积逐渐扩大的趋势。

3.3 顾及地表覆被差异的煤火区域识别

高温异常区的地表温度变化趋势差异与地表覆盖类型有极大的关联。土地利用分类图能展现乌海市的地表覆盖情况,并在一定程度上反映出人类活动和地质条件对高温异常区的影响。为此,针对乌海市 2018—2023 年的遥感数据,利用基于 SVM 的监督分类方法进行土地利用分类,将乌海市影像区域划分为植被、水域、城镇、沙地、矿地五类,得到乌海市各年的土地覆被类型,以图 7 示意说明乌海

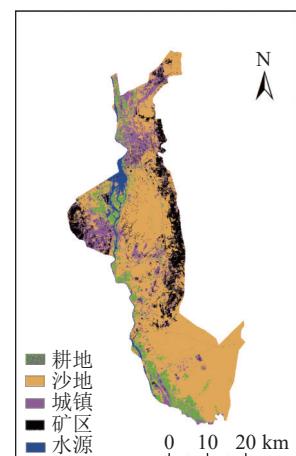


图 7 乌海市 2022 年土地利用现状分类

Fig.7 Wuhai city's 2022 land use status classification

市2022年的地表覆被分类结果。

城镇区域受城市热岛效应的影响较为严重,因此将卫星遥感反演的高温异常区中剔除城镇覆盖范围;此外,海勃湾区的东北部高温异常区为沙地,沙地在有日照的情况下极易吸热,容易形成高温区,作为非煤火区剔除;再者,海南区南部有一部分裸地,该地区属内蒙、新疆半荒漠地带,棕钙土占该地区土壤总面积的99.29%,棕钙土的植被具有草原向荒漠过度的特征,昼夜温差大,该地区年辐射总量达600~670 kJ/cm²,光热资源十分丰富,容易形成高温区,同样作为非煤火区剔除。

综上,在前述卫星遥感反演的高温异常区中剔除地表覆被中的城镇、沙地和棕钙土区域的非煤火高温区,得到煤火异常区域。图8和图9分别为将提取出来的煤火异常区域与遥感影像图及行政区划进行叠加后的结果。可以看出,乌海市近年的煤火异常范围主要集中在乌达区的乌达煤田、海勃湾区东部及海南区东部。从整体上看,2018年和2023年乌海市的煤火区范围相对较大。

从行政区的煤火演化特点看,2018—2023年乌达区的煤火活跃,主要集中在2018和2023年。海勃湾区位于乌海市的北部,该地区煤火偶有发生,主

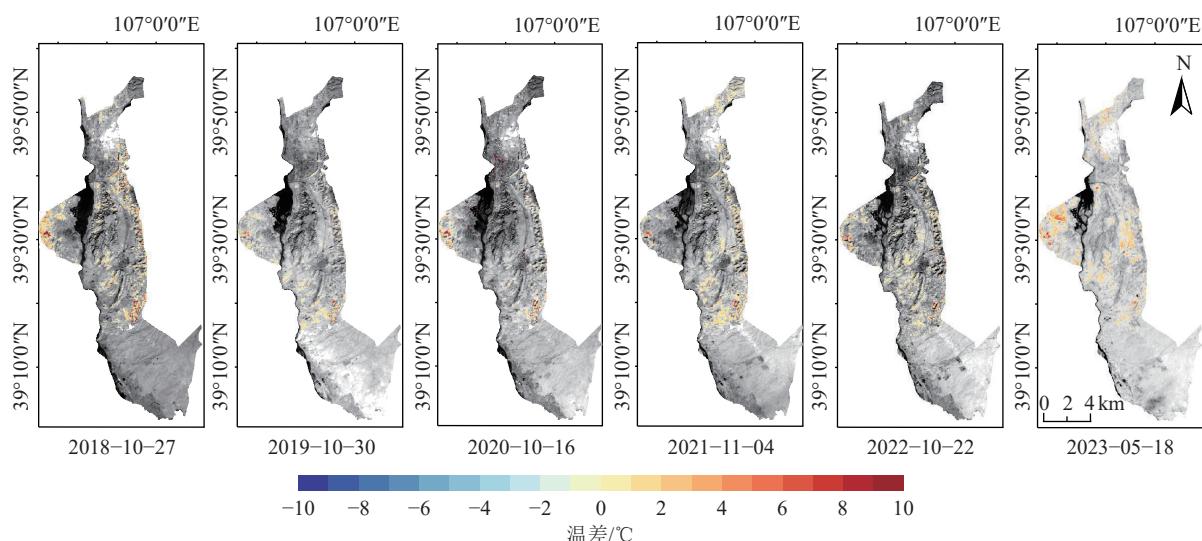


图8 剔除地类影响因素后2018—2023年乌海市煤火识别结果(叠加到卫星影像)

Fig.8 Results of coal fire identification in Wuhai City from 2018 to 2023, after removing the Earth-type influencing factors (superimposed on landsat images)

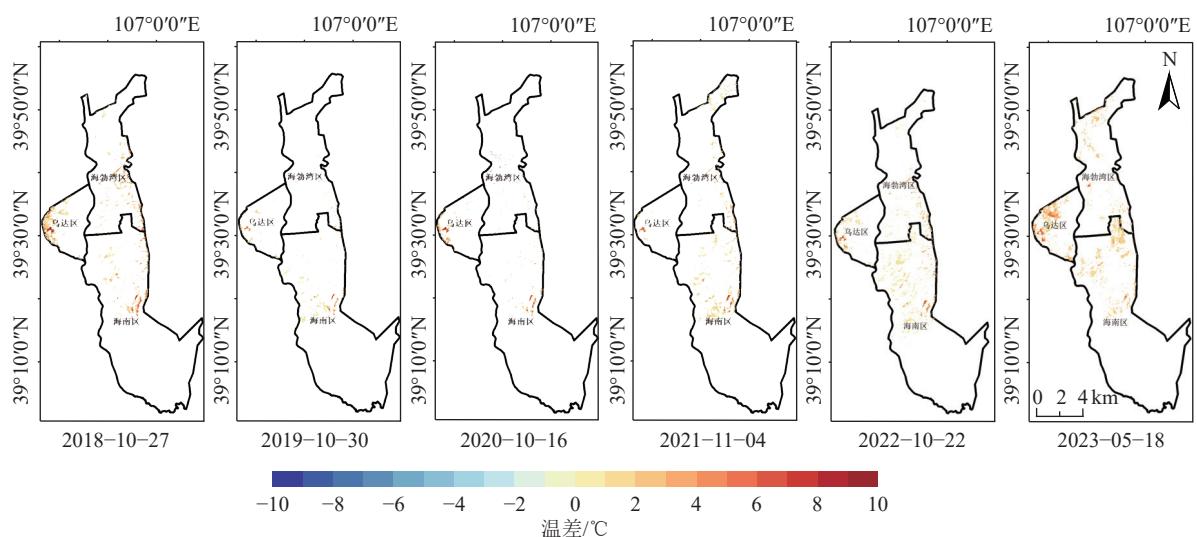


图9 剔除地类影响因素后2018—2023年乌海市煤火识别结果(叠加到行政区划图)

Fig.9 Results of distribution of coal fire anomalies in administrative division of Wuhai City from 2018 to 2023, after excluding influence of land type (Superimposed on administrative territorial map)

要集中在其北部及东部,当地政府对于煤火的治理投入大量资金,可以发现该地煤火治理情况较为显著,该地区的煤火现象基本是隔年发生,除2018年以外,该地区煤火现象很少。而海南区位于乌海市的中南部,面积约占乌海市的1/2,煤火主要集中在该区的东北部。近年来该地区的煤火区分布相比乌达区较稀疏,相比海勃湾区较稠密。

3.4 卫星遥感煤火识别结果验证

为了进一步验证本文方法的可靠性,以2023年卫星遥感反演的煤火重灾区中选取了4个矿区

进行低空热红外遥感验证,包含2类典型场景的煤火区:排土场煤火(路天煤矿4号采区,建安煤矿)和治理区残余煤火(路天矿5号排土场、老石旦煤矿、苏海图煤矿),采用无人机搭载热红外摄像机进行低空地表温度反演。为减少白天太阳光照对煤火温度异常的干扰,无人机遥感时间选择凌晨。低空遥感结果表明,验证区煤火点多且清晰可见,与卫星遥感影像的煤火识别区域保持一致(图10),进一步印证了本文提出的卫星遥感煤火识别方法的可靠性。

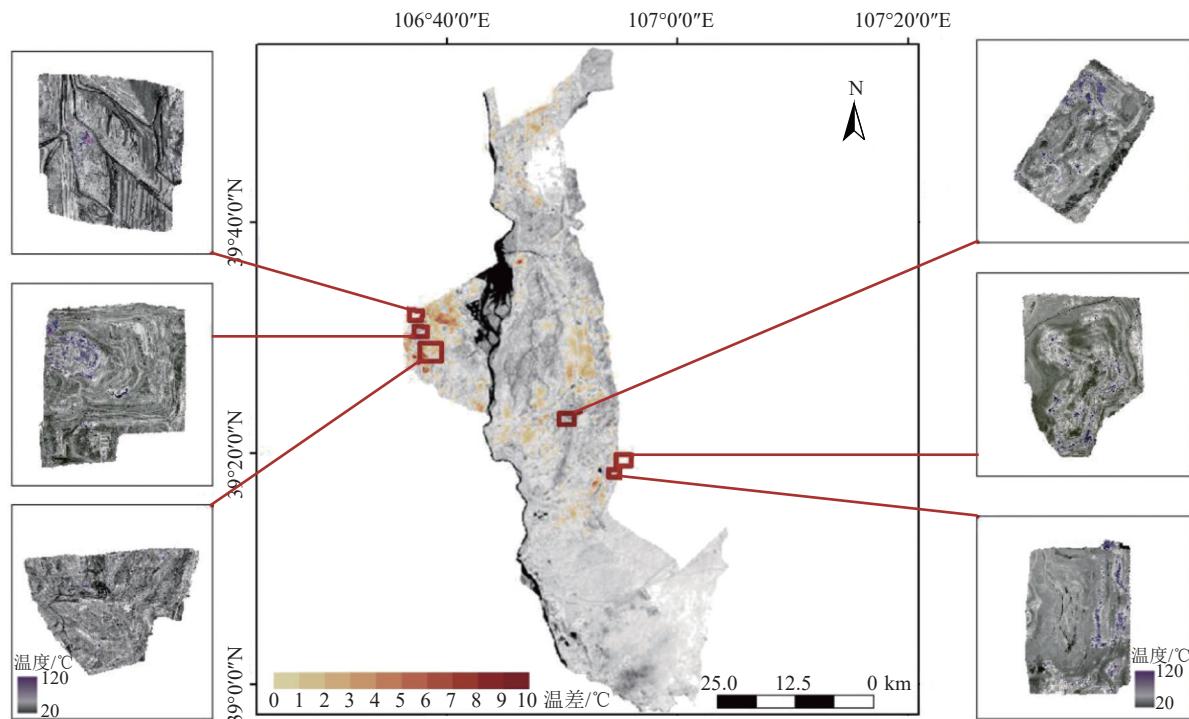


图10 基于低空热红外遥感的矿区级卫星遥感煤火反演结果验证

Fig.10 Verification of coal fire inversion results achieved by Landsat images using the low altitude thermal infrared remote sensing as reference

3.5 卫星遥感煤火预测与验证

3.5.1 乌达区地表煤火区预测结果

利用前文所述方法反演得到2023年1—10月的乌达区煤火分布结果,如图11所示。结果表明:

1)从煤火分布范围上看,1—10月乌达区的煤火范围集中在该区中西部,总体煤火范围变化不大,其中该区在西北部的煤火范围在4月份偶有增大,但在9月份近乎消失,可能与政府大力治理有关。

2)从煤火严重程度上看,煤火严重地区主要集中在西部矿区,东部地图煤火较少。

3)综上,该区煤火在时空分布范围和严重程度上具有一定的相似性,为后续煤火回归预测提供良

好的数据基础。

为验证本文对煤火预测结果的可靠性,本文以乌达区2023年1—9月的反演结果为基础,预测该区10月份的煤火分布情况,并与该区10月份的煤火反演结果进行对比,如图12所示。结果表明:本文对乌达区的煤火预测范围与卫星遥感反演结果基本吻合,煤火亮温程度保持一致,印证了本文结果的可靠性,能够客观的预测乌达区煤火空间分布范围、特点及其演化趋势。

3.5.2 苏海图矿区煤火预测结果

为更精准地刻画煤火异常区预测结果,本文进一步探究了回归预测模型在矿区尺度的煤火反演预

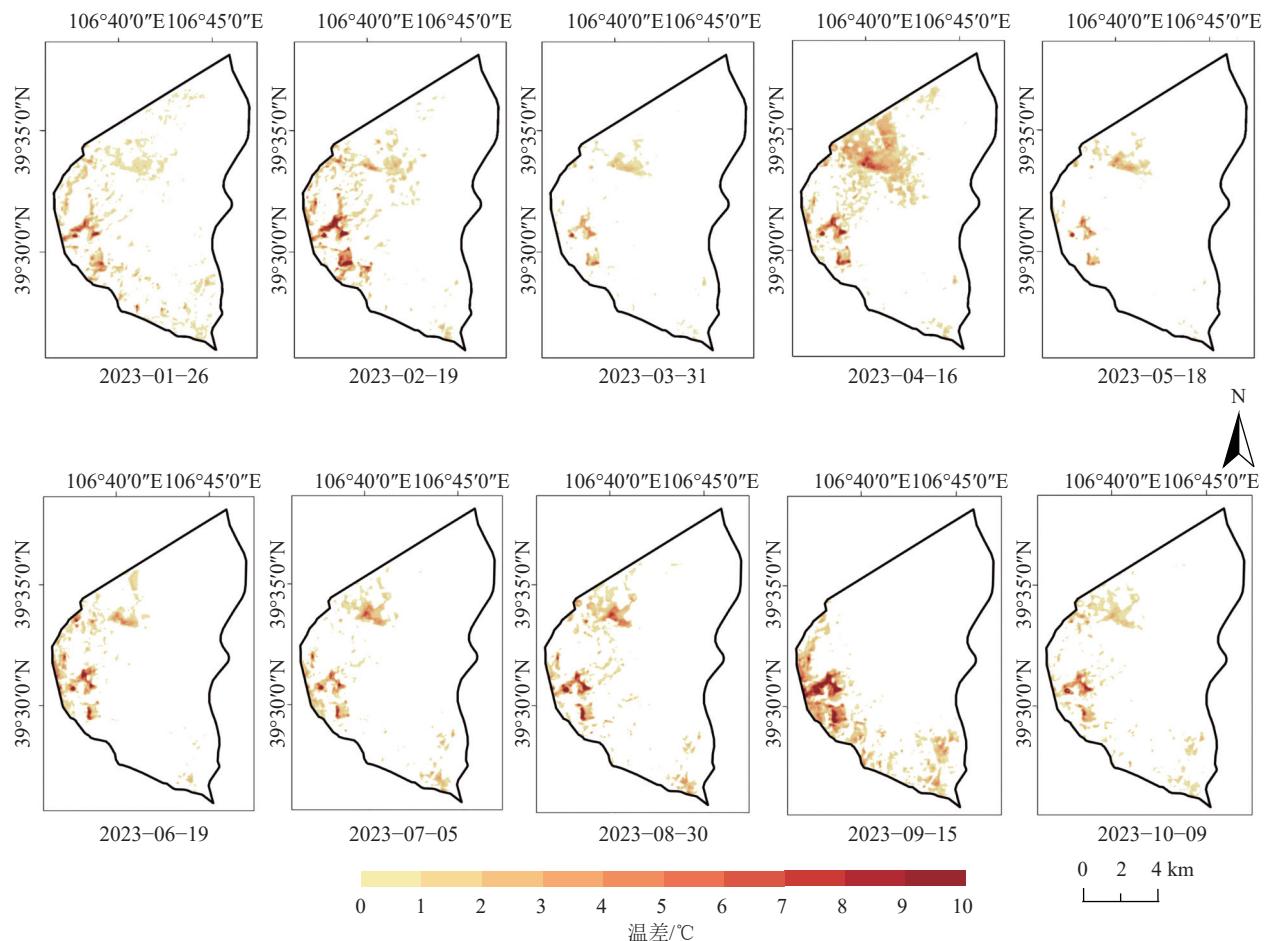


图 11 2023 年 1—10 月乌达区煤火异常区分布

Fig.11 Distribution map of coal fire anomaly in Wuda District from January 2023 to October 2023

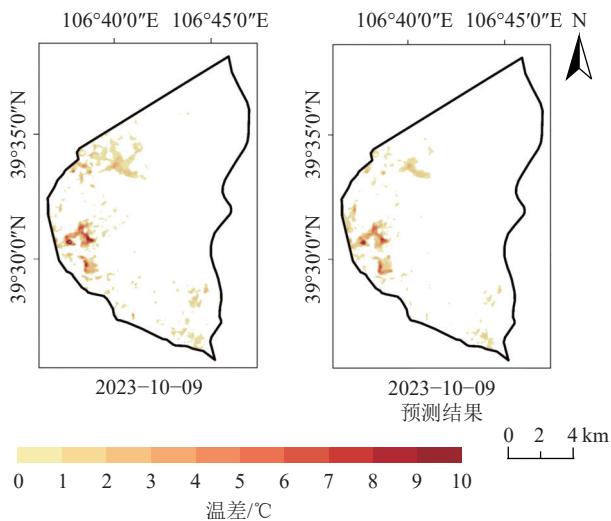


图 12 乌达区煤火预测与遥感反演结果对比

Fig.12 Comparison of coal fire results achieved by regression forecasting and Landsat image identification in Wuda District

测效果。具体选取苏海图煤矿,反演该矿2023年1—9月的煤火范围,以此为依据预测该矿10月份的煤火范围,并与卫星遥感反演结果对比,评估对矿区尺度煤火预测效果。矿区级卫星遥感煤火反演及预

测结果分如图13和图14所示。结果表明,与乌达区区域级的煤火预测结果一致,本文所用回归模型可有效预测矿区尺度的煤火分布及其热温程度。

4 结 论

1)利用大气校正法反演得到乌海市2018—2023年间的地表绝对温度,将遥感反演的绝对地表温度进行归一化处理获得其相对温度并以标准差为阈值获得乌海市近年的高温异常区域,发现乌海市近年的高温异常区域面积主要集中分布在乌达区的乌达煤田南部、海勃湾区的东部和东北部以及海南区的东南部等地,从整体上看,2018年和2023年乌海市的煤火区范围相对较大。

2)借助SVM的监督分类方法对乌海市2018—2023年的遥感数据进行土地利用分类,进而剔除地表覆盖情况对煤火识别的影响,以2023年卫星遥感反演的煤火重灾区中选取了4个矿区进行低空热红外遥感验证,印证了本文提出的卫星遥感煤火识别方法的可靠性。探究发现2018—2023年间乌达区

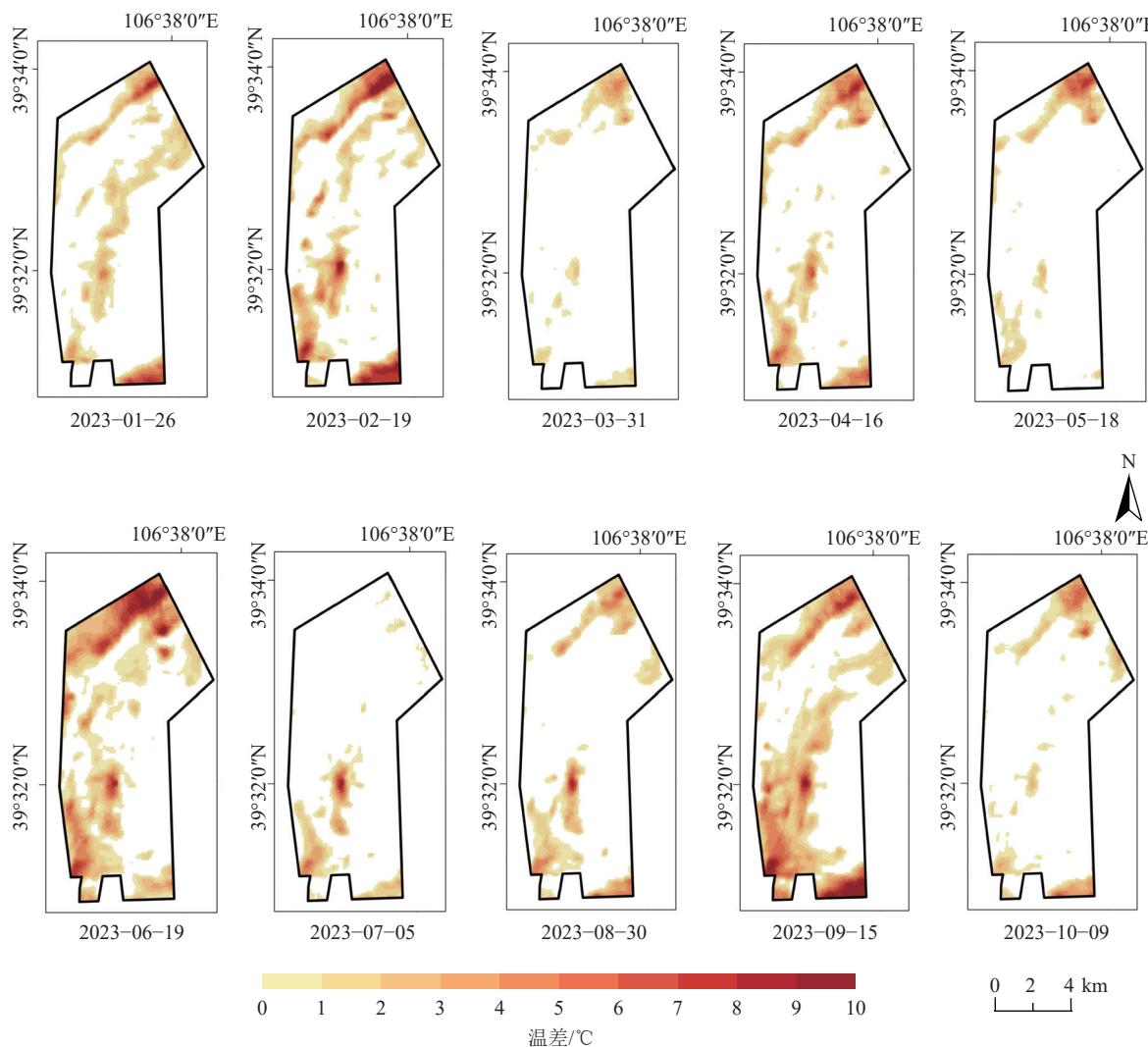


图 13 2023 年 1—10 月苏海图矿区煤火异常区分布

Fig.13 Distribution map of coal fire anomaly in Suhaitu mining area from January 2023 to October 2023

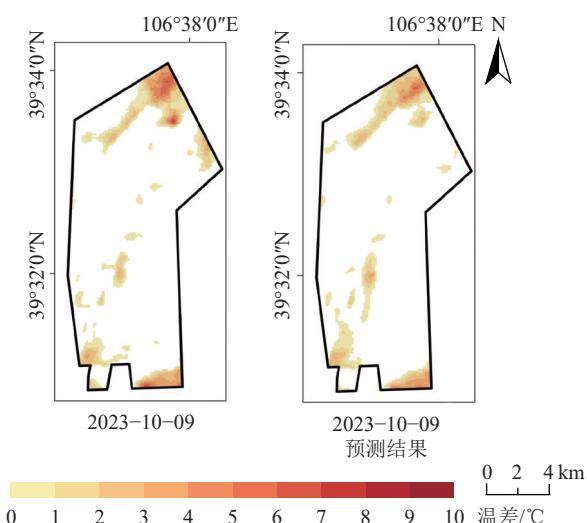


图 14 苏海图煤火范围识别结果对比

Fig.14 Comparison of coal fire results achieved by regression forecasting and Landsat image identification in Suhaitu mining area

的煤火活跃, 主要集中在 2018 和 2023 年。

3) 基于回归预测方法分别针对乌达区区级和苏海图煤矿级的煤火进行预测, 并以反演获得的结果进行精度验证, 探究发现本文所用回归模型可有效预测区级尺度和矿区级尺度的煤火分布及其热温程度, 为预测煤火区域提供了有效的技术手段。

参考文献(References):

- [1] 高玉荣, 隋刚, 张新军, 等. 遥感方法在宁武煤田煤火识别中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 133–139.
GAO Yurong, SUI Gang, ZHANG Xinjun, et al. Application of remote sensing method in coal fire identification in Ningwu Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 133–139.
- [2] YU B, SHE J, LIU G, et al. Coal fire identification and state assessment by integrating multitemporal thermal infrared and InSAR remote sensing data: a case study of Midong District, Urumqi, China[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2023, 196: 11–22.
YU B, SHE J, LIU G, et al. Coal fire identification and state assessment by integrating multitemporal thermal infrared and InSAR remote sensing data: a case study of Midong District, Urumqi, China[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2023, 196: 11–22.

- 2022, 190: 144–164.
- [3] HUAIZHAN LI, GUANGLI GUO, *et al.* New evaluation methods for coal loss due to underground coal fires[J]. *Combustion Science and Technology*, 2021, 193(6): 1022–1041.
- [4] 于 浩, 包兴东. 新疆硫磺沟煤火治理区地表热异常遥感监测研究[J]. 中国煤炭, 2023, 49(7): 74–80.
- YU Hao, BAO Xingdong. Research on the remote sensing monitoring of surface thermal anomaly in Liuhuanggou coal fire control area in Xinjiang[J]. China Coal, 2023, 49(7): 74–80.
- [5] 宋吾军, 王雁鸣, 邵振鲁. 高密度电法与磁法探测煤田火区的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 899–908.
- SONG Wujun, WANG Yanming, SHAO Zhenlu, *et al.* Numerical simulation of electrical resistance tomography method and magnetic method in detecting coal fires[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(4): 899–908.
- [6] 吴 章, 张振振, 李雄伟, 等. 基于不同高度异常交叉约束反演的航空磁法探测遗煤火区[J]. 煤炭技术, 2023, 42(6): 133–136.
- WU Zhang, ZHANG Zhenzhen, LI Xiongwei, *et al.* Aeromagnetic Method for detecting residual coal fire area based on cross constraint inversion of different height[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(6): 133–136.
- [7] 杨 峰, 彭苏萍, 马建伟, 等. 乌达煤田地下燃烧状况雷达探测谱分析算法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(5): 770–775.
- YANG Feng, PENG Suping, MA Jianwei, *et al.* Spectral analysis for ground penetrating radar surveys of the underground coal fire in Wuda Coal Mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(5): 770–775.
- [8] 贺 强. 双碳目标下我国西部地区地下煤火探测技术研究进展[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(4): 8–13.
- HE Qiang. Research Progress of underground coal fire detection technology in Western China under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Coal Geology of China*, 2022, 34(4): 8–13.
- [9] DUNNINGTON L, NAKAGAWA M. Fast and safe gas detection from underground coal fire by drone fly over[J]. *Environmental Pollution* 2017, 229: 139–145.
- [10] MUJAWDIYA R, CHATTERJEE R S, KUMAR D. MODIS land surface temperature time series decomposition for detecting and characterizing temporal intensity variations of coal fire induced thermal anomalies in Jharia coalfield, India[J]. *Geocarto International*, 2022, 37(8): 2160–2–24.
- [11] 李 昂. 测氡探火技术在东山煤矿观家峪进风井火区治理中的应用[J]. 煤炭技术, 2008, 168(3): 65–67.
- LI Ang. Application of Radon measure technique for fire exploration extinguishing in ventilating shaft of Dongshan coal mine[J]. *Coal Technology*, 2008, 168(3): 65–67.
- [12] 赵禾苗, 阿里木江·卡斯木. 基于 Landsat 数据的乌鲁木齐市热环境时空演化特征分析[J]. 生态科学, 2021, 40(6): 21–29.
- ZHAO Hemiao, ALIMUJIANG, Kasimu. Spatial and temporal evolution of thermal environment in Urumqi based on Landsat data[J]. *Ecological Science*, 2021, 40(6): 21–29.
- [13] 汪云甲, 原 刚, 王 腾, 等. 煤田隐蔽火源多源遥感探测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1651–1661.
- WANG Yunia, YUAN Gang, WANG Teng, *et al.* Research on Multi-source remote sensing detection of concealed fire sources in coalfields[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1651–1661.
- [14] 李 峰, 梁汉东, 赵小平, 等. 内蒙古乌达煤田煤火治理效果的遥感监测与评估[J]. 土地资源遥感, 2017, 29(3): 217–223.
- LI Feng, LIANG Handong, ZHAO Xiaoping, *et al.* Remote sensing monitoring and assessment of fire-fighting effects in Wuda coal field, Inner Mongolia[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, 29(3): 217–223.
- [15] LIU J, WANG Y, LI Y, *et al.* Underground coal fires identification and monitoring using time-series InSAR with persistent and distributed scatterers: a case study of miquan coal fire zone in Xinjiang, China[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 164492–164506.
- [16] LI F, LI J, LIU X, *et al.* Coal fire detection and evolution of trend analysis based on CBERS-04 thermal infrared imagery[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(16): 1–15.
- [17] KARANAM V, MOTAGH M, GARG S, *et al.* Multi-sensor remote sensing analysis of coal fire induced land subsidence in Jharia Coalfields, Jharkhand, India[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 102: 24–39.
- [18] BISWAL S S, GORAI A K. Studying the coal fire dynamics in Jharia coalfield, India using time-series analysis of satellite data[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, 23: 52–64.
- [19] 周兆玺, 省天琛, 李小刚, 等. AW3D30 DEM、SRTM DEM 和 ASTER GDEM 三种开源数据精度对比分析[J]. 青海科技, 2023, 30(6): 46–51.
- [20] CHEN H, WANG Q, SHEN Y. Decision tree support vector machine based on genetic algorithm for multi-class classification[J]. *Systems Engineering & Electronics Journal of*, 2011, 22(2): p. 322–326.
- [21] 侯宇初, 张冬有. 基于 Landsat8 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 Yuchu, ZHANG Dongyou. 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.
- [22] 张晓敏, 刘知微, 方 寒, 等. 基于 Landsat 8 TIRS 地表温度数据反演的深圳城市热岛效应时空分布及土地利用的影响[J]. 气候与环境研究, 2023, 28(3): 242–250.
- ZHANG Xiaomin, LIU Zhiwei, FANG Han, *et al.* Spatiotemporal Distribution of an urban heat island and the influence of land use over Shenzhen based on Landsat 8 TIRS Image data in 2014–2021[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2023, 28 (3) : 242–250.
- [23] YAN S, SHI K, LI Y, *et al.* Integration of satellite remote sensing data in underground coal fire detection: A case study of the Fukang region, Xinjiang, China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2020, 14: 1–12.
- [24] ZHANG J, WANG Y, WANG Z. Change analysis of land surface temperature based on robust statistics in the estuarine area of Pearl River (China) from 1990 to 2000 by Landsat TM/ETM+

- data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(10): 2383–2390.
- [25] 周珂, 陈磊阳, 沈夏炯, 等. 基于 Landsat-8 的开封城区不透水面提取[J]. 地理空间信息, 2019, 17(8): 88–91, 115, 11–12.
ZHOU Ke, CHEN Leiyang, SHEN Xiajióng, *et al.* Impervious Surface Extraction of Kaifeng Urban Area Based on Landsat-8[J]. *Geospatial Information*, 2019, 17(8): 88–91, 115, 11–12.
- [26] 许江蕾. 基于多元回归预测的高光谱图像无损压缩[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
XU Jianglei. Multiple Regression prediction-based lossless compression of hyperspectral images[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [27] 苗回归, 黄飞, 李树清, 等. 基于数值模拟-多元线性回归的大断面隧道平均瓦斯浓度检测位置研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(5): 128–135.
MIAO Huigui, HUANG Fei, LI Shuqing, *et al.* Study on Detection location of average gas concentration in a large section tunnel based on numerical simulation-multiple linear regression[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2023, 60(5): 128–135.
- [28] 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 Jinching, WANG Jian, LIU Licong, *et al.* Remote Sensing technology applied to fire disaster monitoring and measuring of Wuda coalfield[J]. *Coal Engineering*, 2012(8): 130–133.