



移动扫码阅读

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.

遥感方法在宁武煤田煤火识别中的应用

高玉荣, 隋刚, 张新军, 孔嘉媛, 张和生
(太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:煤火燃烧会对周围地区的环境、经济和安全造成严重影响, 准确识别煤田自燃引起的火区范围对于监测与治理煤火具有重要意义。相关学者分别通过提取地表热异常或地表形变信息来识别煤火范围, 但由于方法及手段单一, 而引起煤火发生因素众多, 导致试验结果不够准确。为提高煤火识别准确性, 通过实际应用研究, 利用融合卫星热红外技术与雷达技术的煤火识别方法, 应用于山西省宁武煤田的火区识别。首先采用 ASTER-TES(Temperature-Emissivity Separation) 算法对 ASTER 夜间热红外数据进行地表温度反演, 同时利用 SBAS-InSAR(Small Baseline Subset InSAR) 技术对 Sentinel-1 数据进行地表沉降信息反演, 然后通过阈值分割法提取研究区域中的高温异常区域和沉降异常区域, 进而融合处理, 获得疑似煤田火区范围, 最后利用测氡的实地勘测方法所确定的煤火范围对试验结果进行对比验证分析。结果显示: 研究提出的方法对宁武煤田火区范围的识别准确率高达 93.78%, 较单一的温度反演方法与沉降异常方法提高 43.29% 和 62.23%, 但有部分火区未被识别, 原因在于利用地表形变识别火区的阈值难以获取。结果表明: 热红外技术与雷达技术协同识别方法能够有效克服单一识别方法的不足, 显著提高煤火范围的识别精度, 为准确圈定火区的治理范围提供有力参考, 今后应深入研究地表形变探测火区的方法特性, 从而获得更加全面准确的煤火范围。
关键词:煤田火区; 多源遥感; 夜间热红外遥感; 温度异常; 地表沉降

中图分类号: TP751; TD75 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)05-0133-07

Application of remote sensing method in coal fire identification in Ningwu Coalfield

GAO Yurong, SUI Gang, ZHANG Xinjun, KONG Jiayuan, ZHANG Hesheng

(School of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Coal fire cause serious influence on environment, economy and safety of surrounding area. It is of great significance to accurately identify the scope of coal fire caused by spontaneous combustion in coal field for monitoring and controlling coal fire. Relevant scholars identified the scope of coal fire by extracting surface thermal anomaly or surface deformation information respectively, but due to the single method and means, there are many factors causing the occurrence of coal fire, so the experimental results are not accurate enough. In order to improve the accuracy of coal fire identification, the coal fire identification method combining satellite thermal infrared technology and radar technology is applied to the fire area identification of Ningwu Coalfield in Shanxi Province through practical application research. Firstly, the ASTER-TES(Temperature-Emissivity Separation) algorithm is used to retrieve land surface Temperature from ASTER thermal infrared data at night. At the same time, surface subsidence information is inverted using The Sentinel-1 data of SBAS-InSAR(Small Baseline Subset InSAR) technology, and then the abnormal high temperature area and abnormal settlement area in the study area are extracted by threshold segmentation method, and then the range of suspected coal field fire area is obtained by fusion processing. Finally, the experimental results are compared and verified by the coal fire range determined by the field survey method of measuring radon. The results show that the accuracy of the proposed method is as high as 93.78%, which is 43.29% and 62.23% higher than that of the single temperature inversion method and the settlement anomaly method. However, some fire zones have not been identified, mainly because it is difficult to obtain the threshold of identifying fire zones using surface deformation. The results show that the cooperative iden-

收稿日期: 2022-05-03 责任编辑: 常琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-1461

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42101414)

作者简介: 高玉荣(1996—), 女, 陕西韩城人, 硕士研究生。E-mail: 1398937539@qq.com

通讯作者: 张和生(1962—), 男, 山西高平人, 副教授, 博士。E-mail: zhsgis@126.com

tification method of thermal infrared technology and radar technology can effectively overcome the deficiency of single identification method, significantly improve the identification accuracy of coal fire range, and provide a powerful reference for accurately determining the control range of fire area. In order to obtain more comprehensive and accurate range of coal fire, it is necessary to study the characteristics of surface deformation detection method in the future.

Key words: Coalfield fire zone; multi-source remote sensing; night thermal infrared remote sensing; temperature anomaly; surface subsidence

0 引言

山西省煤炭资源丰富,2022年全省规模以上原煤产量为130 714.6万t,同比增长8.7%。大规模开采带来严重的生态问题,其中煤的自燃危害尤其严重。煤火燃烧不仅造成巨大的能源浪费和经济损失^[1-2],还会产生大量有害气体,危害人民生命健康,同时也会引起地表裂缝和塌陷,对当地的基础设施产生影响。因此,准确识别煤田火区范围对于煤火监测与治理具有重要意义。

近年来,大量学者对新疆、内蒙古、宁夏等地较大范围煤田火区进行了探测与研究。自20世纪60年代以来,国内外已经发展了多种煤田火区探测技术,主要包括磁探法、物探法、化探法和遥感法等^[3]。其中利用煤层燃烧的物理、化学特性进行探测的方法由于技术限制、成本较高,均不适用于大面积火区^[4]。而遥感技术具有探测范围大、获取周期短、时效性强、经济效益高等优势,已成为煤田火区识别领域的重要发展方向^[5]。

利用煤火燃烧产生热量,传导至地表造成温度异常这一特性,学者们通过地表温度反演提取热异常信息对煤火进行识别和监测。地表温度反演算法总体分为单通道法、分裂窗法、日夜法、TES、分裂窗和温度比辐射率分离结合法^[6]。邱程锦等^[7]通过大气校正的反演方法对Landsat TM/ETM进行处理,并提取温度异常区域来判定煤火范围;李峰等^[8]利用TES算法反演内蒙古乌达矿区4个时期的地表温度,并采用自适应梯度阈值法提取对应火区范围来监测并评估乌达煤火的治理效果。但深部煤火产生的热量可能传导不到地面,易造成煤火区漏判,另外砂岩吸热、城市热岛效应等因素也会导致与煤层燃烧无关的高温异常区^[9],从而造成误判,所以仅利用热红外遥感提取热异常区域的方法识别煤田火区范围存在一定缺陷。针对煤火燃烧会造成地下空洞,引起地表塌陷变形等特性,少部分学者利用InSAR技术进行煤火识别和监测。如JIANG L等^[10]通过PS-InSAR、Stacking和D-InSAR三种合成孔径雷达方法对乌达煤田进行了监测,证实了利用In-

SAR手段进行地表形变分析,可以有效判断地下煤火的燃烧情况;RIYAS等^[11]为了表征印度Jharia煤矿火灾的时空动态,利用新小基线子集(N-SBAS)技术计算了该煤田2017—2020年地表变形时间序列,但煤矿开采^[12]、地质灾害等也会引起地表形变,从而对煤火识别产生影响。

综上所述,现有方法虽然在煤火识别方面取得了较多研究成果,但识别特性单一,易受地物吸热、煤矿开采等因素的影响。因此采用融合热异常信息和地表形变信息来识别煤田火区可以有效克服单一方法的不足,提高煤火识别准确性。笔者利用多源遥感手段,通过融合卫星热红外技术与雷达技术,首次对山西省宁武煤火进行识别分析研究。

1 研究区域概况与数据源

1.1 研究区域概况

研究区位于宁武县东寨镇境内,地理坐标为东经112°03'57"~112°12'39",北纬38°46'41"~38°53'47"。区内地势高峻,山岭纵横,海拔在2000m左右,地形总体西高东低,最高处位于西部,海拔2020m,最低处位于东部深沟底,海拔1670m,最大高差为350m。属温带大陆性气候,寒冷多大风,昼夜温差较大,年平均气温7℃。研究区域内的煤矿主要分布在中部,呈南北走向,包含寺耳沟煤矿,小西沟煤矿,车道沟煤矿,三马营煤矿等多个煤矿区。由于煤矿开采引发了地面塌陷、地裂缝、最终形成火风压,造成了多个煤火自燃区域^[13],加之小煤窑不规范化的开采方式,产生的煤火问题未能得到及时解决。

1.2 数据源

研究采用2019-08-14在宁武过境的Terra卫星上的ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)传感器获取的夜间遥感数据。由于晚上太阳辐射消失,所获取的热红外遥感影像能更准确地提取热异常信息^[14]。卫星过境时间为14:34:12(UTC),云覆盖量为2%,数据产品级别为L1T,轨道号为222/211,时相和云覆盖量满足试验要求。所用的ASTER数据参数见表1。

表 1 热红外数据参数
Table 1 Thermal infrared data parameters

卫星	成像日期	成像时间	数据等级	云量	波段	波长/ μm	分辨率/m
ASTER	2019-08-14	14:34:12(UTC)22:34:12(UTC+8)	L1T	2%	10	8.125 ~ 8.475	90
					11	8.475 ~ 8.825	90
					12	8.925 ~ 9.275	90
					13	10.25 ~ 10.95	90
					14	10.95 ~ 11.65	90

采用的雷达影像数据为 Sentinel-1A 数据,用于煤田火区的地表变形监测。试验选用工作模式为 IW、极化方式为 VV 的 SLC 数据。选取 2018 年 6

月至 2020 年 1 月的 26 景影像 (SAR 数据成像时间见表 2) 用于差分干涉处理。外部参考 DEM 选用空间分辨率为 12.5 m 的 ALOS PALSAR 数据。

表 2 SAR 影像成像时间统计
Table 2 Statistics of SAR imaging time

序号	成像日期	序号	成像日期	序号	成像日期	序号	成像日期
1	2018-06-06	8	2018-11-21	15	2019-05-08	22	2019-10-23
2	2018-06-30	9	2018-12-15	16	2019-06-01	23	2019-11-16
3	2018-07-24	10	2019-01-08	17	2019-06-25	24	2019-12-10
4	2018-08-17	11	2019-02-01	18	2019-07-19	25	2020-01-03
5	2018-09-10	12	2019-02-25	19	2019-08-12	26	2020-01-27
6	2018-10-04	13	2019-03-21	20	2019-09-05		
7	2018-10-28	14	2019-04-14	21	2019-09-29		

2 研究方法

以山西宁武部分煤田为研究区域, ASTER 夜间热红外影像、Sentinel-1A 影像为试验数据,采用多源遥感融合的方法进行煤火区域识别。首先采用温度比辐射率分离算法 (ASTER- TES) 进行地表温度反演,通过一定的阈值提取研究区的热异常范围,结合 SBAS-InSAR 技术提取地表持续变形信息,将热异常信息与地表形变信息空间叠加分析后得到研究区内煤火的疑似分布区域,再根据部分实测煤火范围进行验证分析。研究流程如图 1 所示。

2.1 温度反演

温度反演中 2 个至关重要的因素是温度和地表比辐射率。传统的温度反演算法常常假设比辐射率已知,来求解地表温度,而 TES 算法则根据一定的先验知识作为约束条件,同时求解比辐射率和温度。由于 ASTER TES 算法是针对 ASTER 数据反演的官方算法^[15],充分利用了 ASTER 数据的 5 个热红外波段,且吸收了发射率归一化 NEM、光谱比值 RATIO、和最大最小发射率差值 MMD 3 个模块的优点,精度较高,故采用此算法进行地表温度反演,其包括 3 个部分:

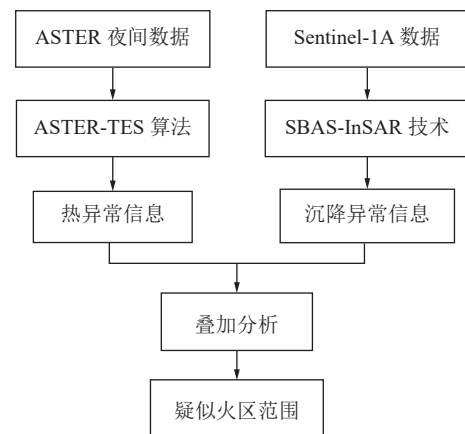


图 1 研究流程

Fig.1 Research process

1)NEM 模块:初步估算目标表面温度并且从辐射亮度观测中减去反射的大气辐射。

$$R_i = L_{\text{grd}} - (1 - \varepsilon_{\text{max}}) L_{\text{atm}\downarrow} \quad (1)$$

$$T_i = c_2 / \left[\lambda_i \ln \left(\frac{c_1 \varepsilon_{\text{max}}}{\lambda_i^5 \pi R_i} + 1 \right) \right] \quad (2)$$

$$T_{\text{NEM}} = \max(T_i) \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{R_i}{B_i(T_{\text{NEM}})} = [\pi R_i \lambda_i^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda_i T_{\text{NEM}}}} - 1)] / c_1 \quad (4)$$

式中: R_i 为第 $i(i=10, 11, \dots, 14)$ 波段的地表辐射亮度; L_{grd} 为包含大气下行辐射的地表辐射亮度; ε_{max} 为初始最大发射率, 取 0.96; L_{atm} 为大气下行辐射亮度; λ_i 为波段 $i(i=10, 11, \dots, 14)$ 的波长; T_{NEM} 为 NEM 模块的输出温度; c_1 为第一辐射常数, c_2 为第二辐射常数, 其中 h 为普朗克常数, $6.626\ 176 \times 10^{-34}$ J·s; c 为真空光速, $2.997\ 924\ 58 \times 10^8$ m/s; k 为玻尔兹曼常数, $1.380\ 6 \times 10^{-23}$ J/k。

2) RATIO 模块: 利用 NEM 模块估算的发射率计算相对发射率值。

$$\beta_i = 5\varepsilon_i / \sum_{j=1}^5 \varepsilon_j \quad (5)$$

式中: β_i 为第 $i(i=10, 11, \dots, 14)$ 波段的相对比辐射率。

3) MMD 模块: 进一步估算发射率和温度。

$$\text{MMD} = \max(\beta_i) - \min(\beta_i) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{min}} = 0.994 - 0.687\text{MMD}^{0.737} \quad (7)$$

$$\varepsilon_i = \beta_i \left(\frac{\varepsilon_{\text{min}}}{\min(\beta_i)} \right) \quad (8)$$

$$T_{\text{max}} = c_2 / \left[\lambda_{\text{max}} \ln \left(\frac{c_1 \varepsilon_{\text{max}}}{\lambda_{\text{max}}^5 \pi R_{\text{max}}} + 1 \right) \right] \quad (9)$$

其中: ε_{min} 为发射率最小值; \max 为发射率 ε_i 最大值 (ε_{max}) 所对应的波段。当 $\text{MMD} < 0.03$ 时, 灰体的精度很低, 不再使用 MMD 方法, 此时直接将 ε_{min} 设为 0.983。数值根据水体和浓密植被的性质确定^[16]。

对比发现, 热红外数据与雷达数据在地理位置上存在偏差, 但雷达数据难以选取控制点, 故以与雷达数据空间位置较为匹配的 Landsat 影像为基准影像, 利用 Arcgis 对 ASTER 数据进行地理配准。随后采用 ENVI 软件对地理配准后的 ASTER 数据进行辐射定标, 大气校正处理, 并基于 IDL8.7 平台实现该算法。重复式 (1)~式 (9), 直到迭代计算的相邻 2 次的温差 < 0.3 K 或迭代次数 > 12 次为止, 得到相应的地表温度值, 通过一定的阈值提取温度异常区域。经统计, 温度反演的结果符合正态分布, 将 $(\mu + 2\sigma)$ 作为高温阈值进行地表热异常的提取, 其中, μ 为温度反演结果中统计值的数学期望, σ 为统计值的标准差^[17]。

2.2 地表沉降

短基线集时序分析技术 (SBAS-InSAR) 是一种基于多幅 SAR 影像的时间序列方法, 克服了传统 D-InSAR 中存在的时间、空间失相关问题, 通过时空基线较短的干涉对提取地表形变信息^[18]。

对于在 $t_A, t_B (A, B=0, 1, \dots, N, A \neq B)$ 时刻生成

的第 K 幅干涉图, 其任意像元的干涉相位值为^[19-20]:

$$\begin{aligned} \Phi_k(x, y) &= \Phi[t_B, x, y] - \Phi[t_A, x, y] \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, y) - d(t_A, x, y)] \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\Phi[t_A, x, y]$, $\Phi[t_B, x, y]$ 分别为 t_A, t_B 时刻相对于初始时刻 t_0 的形变相位; x, y 分别为方位向与距离向坐标; λ 为雷达波长; $d(t_A, x, y)$ 和 $d(t_B, x, y)$ 为相对于初始时刻 t_0 的视线方向的形变量。

由于研究区域内植被较茂密, 为避免完全空间失相关, 将空间基线阈值和时间基线阈值分别设置为 45 m 和 365 d, 对输入的 SAR 数据进行干涉像对的配对, 并对部分像对进行 3D 解缠; 采用 Delaunay MCF 的方法进行解缠, Goldstein 进行滤波; 选择合适的 GCP, 估算和去除残余的恒定相位和经解缠后还存在的相位坡道; 经过两次反演得到形变速率结果, 并将形变速率结果从斜距投影转换为地理投影。由于研究区域的煤火初始燃烧时间未知, 缺乏地表监测资料, 根据相关文献, 将形变阈值确定为 5 mm/a, 沉降速率大于该阈值的作为持续变形区域。

研究区包含城市、裸岩、矿区等, 单一的温度反演与地表形变方法易受地物类型的影响, 利用 Arcgis 软件对实验所提取的温度异常区域与沉降异常区域进行空间叠加, 得到疑似火区范围。

3 试验结果分析

3.1 实测火区验证范围

利用测氦的实地勘测方法确定的煤火范围作为验证数据, 来分析煤火识别方法的准确性。在地下火区燃烧过程中, 燃烧区岩层及其上覆岩层处于高温高压环境中。煤系地层在高温高压作用下, 氦的析出量不断增加^[21], 此外, 煤炭燃烧使煤系地层中孔隙水或裂隙水的温度和矿化度升高, 导致氦的溶解度降低, 使煤系地层中自由氦的数量进一步增加, 这必然在火区上方地表浅层形成一个氦浓度高值区。测氦法虽然能较为准确地圈定煤火范围, 但由于其易受气压、降水等因素影响, 且监测规模有限, 不适用于较大区域的火区识别。故试验选取部分区域进行实地测氦, 用来验证融合方法的有效性。测网布置后在测区开展试验工作, 经过现场调查, 选择在南部测区寺耳沟村附近布置 3 条测线, 对所测的氦值剖面图进行分析, 氦值显示出跳跃式变化, 后进行质量检测, 主要通过室外重复测量的方法, 即在相同点位置重复布设活性炭吸附装置, 在相对一致的地质条件和环境条件下埋置 5 d, 取出测量, 将重复试验结果与初次试验结果进行比较, 分析显示数据质量

良好。沿煤层露头走向,地表岩层含有裂缝,且多处有高温热气流涌出,并伴有异常的刺激性气味。综合分析认定沿煤层露头线方向圈定了 10 个区域为地下火区,以此作为试验的验证数据。

3.2 温度异常分析

煤火燃烧时会产生高温,高温产生的热量会以热辐射的形式向地表传导,在火区地表形成高于周围环境温度的温度异常区。通过一定的阈值,提取的温度异常区范围如图 2 所示,其中添加了实测煤火范围作为验证。由图 2 可以看到,绝大多数确定的火区范围均发生了温度异常,仅有 1 处已确认的火区范围(9 号火区)没有提取出温度异常。但有部分产生温度异常的区域在测氦手段下并没有检测出煤火,这是由于地物自身的物理特性,例如砂岩、裸土等地物吸热以及城镇用地的热岛效应等导致了与煤火无关的温度异常,这也是单纯利用提取地表热异常信息来识别煤火的缺陷。

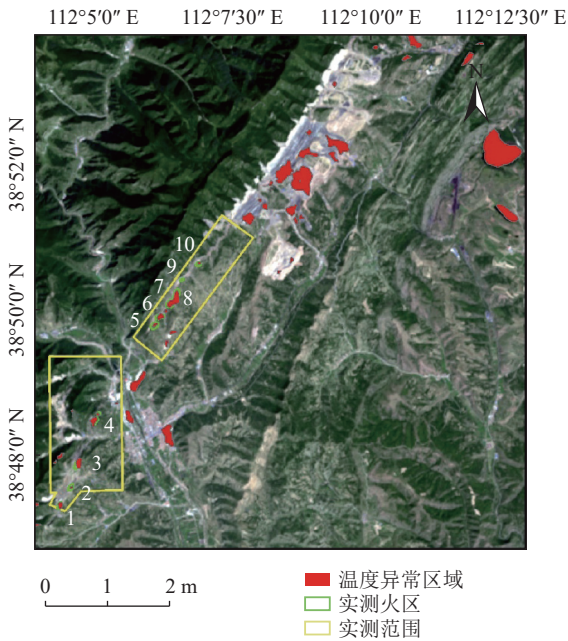


图 2 温度异常图
Fig.2 Temperature anomaly

3.3 地表形变异常分析

深部煤层长时间烧空后会造造成地表塌陷,因此利用时序 InSAR 的方法进行地表形变分析。采用密度分割法,提取 SBAS-InSAR 形变结果中的持续变形区域。如图 3 所示,在实测的 10 处火区范围中,有 7 处发生了明显的沉降,这在一定程度上证实了利用时序 InSAR 技术分析地表形变从而识别煤田火区范围的可行性。但在实测范围中可以看到,有部分持续变形区域并不属于火区范围,可能是因为单纯的地质运动或开采活动,所以仅利用地表形变分析来识别火区也并不完全准确。

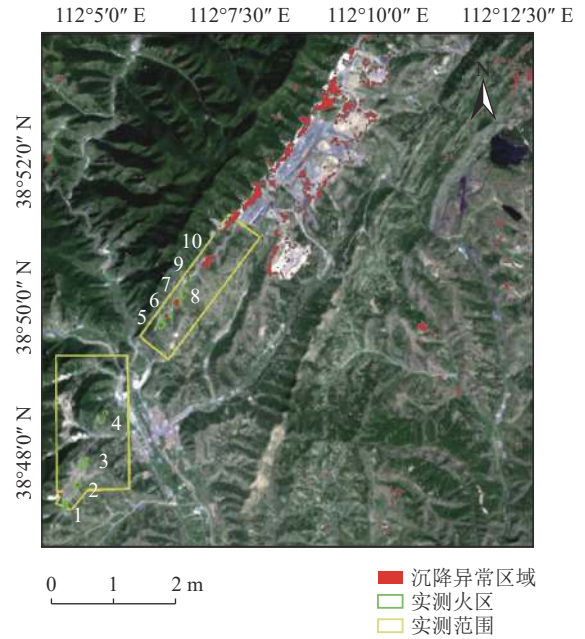


图 3 地表沉降异常图
Fig.3 Surface subsidence anomaly

综合分析所提取的温度异常区域与持续变形区域,在实测的 10 个火区范围中,2、4、6、7、8、10 号火区均检测出了温度异常与持续变形信息。而 1、3、5 号火区虽然显示沉降速率较小,但均出现了热异常,9 号火区发生了较大沉降,但温度仍在正常范围内。

3.4 疑似火区范围分析

将获取的温度异常区域与持续变形区域进行空间叠加分析,根据地表类型进行筛选,得到研究区域的疑似煤火区域。如图 4 所示,共提取出 11 个煤火

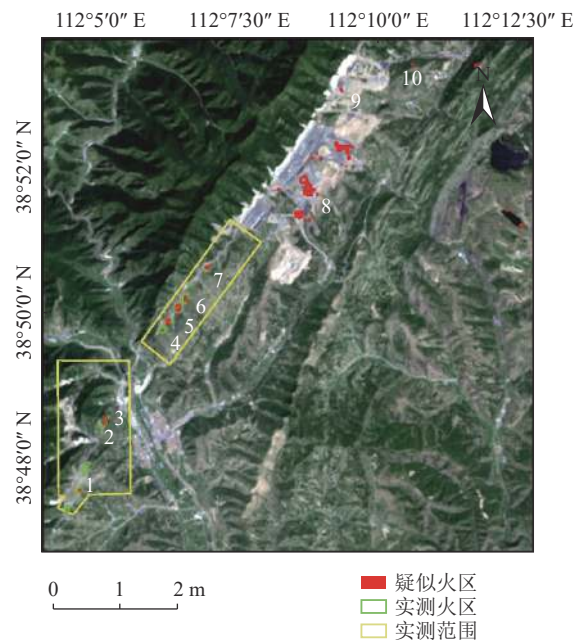


图 4 疑似火区范围
Fig.4 Suspected fire area

区域,且采用笔者的研究方法提取的疑似火区与实测的火区在地理位置上具有较高的一致性。1~7号疑似火区均位于实测煤火范围中,证明了研究提出的识别煤火方法的可行性。

利用实测的火区范围对试验结果进行对比验证。通过 Arcgis 软件进行像元统计,得到各类方法的面积值,经统计,测氦法所得的实测火区面积 S_m 为 183 663.222 672 m^2 ,疑似火区面积为表中的融合法的面积,其值为 43 806.258 4 m^2 ,3种方法的试验结果见表3。其中:

$$R_a = \frac{S_0}{S_r} \times 100\% \quad (11)$$

$$R_0 = \frac{S_0}{S_m} \times 100\% \quad (12)$$

表3 试验结果对比

Table 3 Comparison of experimental results

方法类别	面积 S_r/m^2	重叠面积 S_0/m^2	准确率/%	重叠率/%
融合	43 806.258 4	41 081.146 0	93.78	22.37
温度异常	228 700.000 0	115 480.758 0	50.49	62.88
沉降异常	162 899.999 9	51 390.777 6	31.55	27.98

对于实测范围外提取的火区,缺少实地验证数据,故采用影像对比分析的方法进行验证。如图5所示,从谷歌影像中可以看到,8、9号疑似火区均在矿区内,且存在疑似煤火燃烧后形成的黑色区域,由



(a) 8号疑似火区



(b) 9号疑似火区

图5 谷歌地球中截取的部分疑似火区影像

Fig.5 Google Earth footage of what appears to be a fire zone

式中: R_a 为准确率; R_0 为重叠率; S_0 为试验提取的火区范围与实测火区范围重叠的面积; S_r 为试验提取的火区的面积; S_m 为实测火区的面积。

可以看到,单一的温度异常和沉降异常提取方法的准确率较低,分别为 50.49% 和 31.55%,而融合地表温度信息和沉降信息之后,火区识别的准确率大幅提高,高达 93.78%,较单一方法提高了 43.29% 和 62.23%,这大幅增加了煤火治理的有效性。但不足的是,有大量的火区仍未被识别,主要原因在于利用地表变形信息来识别煤火的研究较少,不够深入,缺乏长期的实地监测资料,难以获取较为准确的形变阈值,导致煤火识别准确性较低,进而影响融合结果。

此判定该区域确实存在煤火。

4 结 论

1) 协同热红外遥感技术和时序 InSAR 技术提取煤田火区,克服了单一遥感技术的缺陷,显著提高了煤火识别的精度,为煤田火区的治理范围提供了有力参考。

2) 试验结果表明,仅利用温度信息和沉降信息来识别煤火区域均存在一些缺陷。由于砂岩等地物吸热,城镇区热岛效应等原因,会提取出与煤火无关的温度异常范围。另外,由于矿区开采等造成的地表沉降也会影响利用沉降信息提取煤火的准确性。

3) 由于缺乏长期实地的地表形变监测资料、煤火燃烧时间未知等,导致利用地表形变信息来识别煤火的方法准确性较低,今后的工作方向将集中于地表形变监测煤田火区的方法研究。

参考文献(References):

- [1] 王晓蕾,姬志岗,魏 慷,等. 煤层开采地表沉陷监测及预测技术现状及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(24): 9696-9706.
WANG Xiaolei, JI Zhigang, WEI Kang, et al. Present situation and development trend of surface subsidence monitoring and prediction technology in coal seam mining[J]. Science Technology and

- Engineering, 2020, 20(24): 9696–9706.
- [2] 张丹, 武伟伟. 尾矿库安全管理信息化建设重要性探讨[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(3): 117–120.
ZHANG Dan, WU Weiwei. Discussion on importance of information construction of safety management of tailings pond[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(3): 117–120.
- [3] 刘竞龙, 汪云甲, 闫世勇, 等. 乌鲁木齐东侧煤火多源遥感融合探测[J]. 煤矿安全, 2019, 50(8): 158–161.
LIU Jinglong, WANG Yunjia, YAN Shiyong, et al. Multi-source remote sensing fusion detection of coal fire in eastern urumchi[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(8): 158–161.
- [4] 许怡, 范洪冬, 党立波. 基于TIRS和TCP-InSAR的新疆广域煤田火区探测方法[J]. 金属矿山, 2019(10): 164–171.
XU Yi, FAN Hongdong, DANG Libo. Detection method of fire area in Xinjiang wide area coalfield based on TIRS and TCP-InSAR[J]. Metal Mine, 2019(10): 164–171.
- [5] 邓军, 李贝, 王凯, 等. 我国煤火灾害防治技术研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(10): 1–7, 101.
DENG Jun, LI Bei, WANG Kai, et al. Research status and outlook on prevention and control technology of coal fire disaster in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 1–7, 101.
- [6] 李召良, 段四波, 唐伯惠, 等. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 899–920.
LI Zhaoliang, DUAN Sibao, TANG Bohui, et al. Review of methods for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 899–920.
- [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, 44(8): 130–133.
QIU Jincheng, WANG Jian, LIU Licong, et al. Remote sensing technology applied to fire disaster monitoring and measuring of Wuda coalfield[J]. Coal Engineering, 2012, 44(8): 130–133.
- [8] 李峰, 梁汉东, 赵小平, 等. 基于ASTER影像的乌达火区遥感监测研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(11): 15–18.
LI Feng, LIANG Handong, ZHAO Xiaoping, et al. Remote sensing monitoring research on coal fire in Wuda mine by ASTER images[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(11): 15–18.
- [9] 刘振岭, 郑忠亚. 采空区煤体自燃温度场演变模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8): 114–120.
LIU Zhenling, ZHENG Zhongya. Simulation test study on temperature field evolution of coal spontaneous combustion in gob[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 114–120.
- [10] JIANG Liming, LIN Hui, MA Jianwei, et al. Potential of small-baseline SAR interferometry for monitoring land subsidence related to underground coal fires: Wuda(Northern China) case study[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 115(2): 257–268.
- [11] RIYAS Moidu Jameela, SYED Tajdarul Hassan, KUMAR Hrishikesh, et al. Detecting and analyzing the evolution of subsidence due to coal fires in Jharia coalfield, India using sentinel-1 SAR data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1521.
- [12] 张凯, 李全生, 戴华阳, 等. 矿区地表移动“空天地”一体化监测技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 207–213.
ZHANG Kai, LI Quansheng, DAI Huayang, et al. Research on integrated monitoring technology and practice of “space-sky-ground” on surface movement in mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 207–213.
- [13] YAN Shiyong, SHI Ke, LI Yi, 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.
- [14] 朱爱萍. 基于ETM数据煤田火区温度反演研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(3): 83–86.
ZHU Aiping. Based on the temperature inversion in the coal fire area ETM data[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2018, 41(3): 83–86.
- [15] 蒋卫国, 武建军, 顾磊, 等. 基于夜间热红外光谱的地下煤火监测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 357–361.
JIANG Weiguo, WU Jianjun, GU Lei, et al. Monitoring method of underground coal fire based on night thermal infrared remote sensing technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2): 357–361.
- [16] 田国良, 柳钦火. 热红外遥感[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 208–213.
- [17] 周吕, 鲁金金, 文学霖, 等. 基于小基线集时序干涉雷达分析武汉中心城区地表沉降时空特征[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 40–46.
ZHOU LYU, LU Jinjin, WEN Xuelin, et al. Spatial-temporal characteristics analysis of ground subsidence in central urban areas of Wuhan based on small baseline subset interferometric synthetic aperture rader[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(1): 40–46.
- [18] 张文哲. 基于SBAS-InSAR技术的天津市地表沉降监测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
ZHANG Wenzhe. Surface subsidence monitoring in Tianjin based on SBAS-InSAR technology[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [19] 邓军, 鹿璐. 基于融合分布式目标的SBAS方法矿区地表沉降监测[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 205–211.
DENG Jun, LU Lu. Surface subsidence monitoring in mining area based on SBAS method fusing distributed scatterers[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 205–211.
- [20] 余昊, 陈炳乾, 康建荣, 等. 基于SBAS-InSAR的关闭矿井地表形变规律研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(2): 45–51.
YU Hao, CHEN Bingqian, KANG Jianrong, et al. Research on surface deformation law of closed mine based on SBAS-InSAR[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(2): 45–51.
- [21] 周斌, 周文强, 董智宇, 等. 氧化升温过程中煤岩介体氡析出特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 859–866.
ZHOU Bin, ZHOU Wenqiang, DONG Zhiyu, et al. Experimental study on radon exhalation characteristics of coal and rock during oxidation heating[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 859–866.