

文章编号: 1671-251X(2023)06-0068-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18096

地下煤火火源探测研究

邓军^{1,2}, 屈高阳¹, 任帅京^{1,2}, 王伟峰^{1,2}, 王彩萍^{1,2}, 王津睿¹

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 陕西省煤火灾防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 介绍了煤火的演化发展过程及煤火的特点, 阐述了按照探测器空间位置不同划分的4层空间探测技术, 即地下探测法、地表探测法、航空探测法及航天探测法的探测机理及研究进展, 分析了上述4种探测技术的优缺点。指出现有研究存在的问题: ①探测精度不足, 获取范围难以精准圈定。②探测技术落后, 火区高温点精准探测困难。③探测手段单一, 无法准确判断地下煤火燃烧具体信息。针对地下煤火呈现出隐蔽性、耦合性、复杂性等新特点, 提出了地下煤火火源探测技术发展方向: ①对探测仪器数据进行精细化处理, 提高磁性差对温度的灵敏度、电阻率法的检测精度、红外探测法的特征提取率及结果精度。②将高新设备应用于煤火探测技术。③完善多层次探测技术的协同利用。首先通过第4层级航天遥感技术进行大规模的火区探测, 得到地下煤火异常的基本空间分布特征; 然后通过第3层级航空遥感探测技术进一步探测, 得到具体的地下煤火空间分布; 最后通过第2和第1层级的地表探测技术及地下探测技术进行补充和验证, 得到更加详细的煤田火区高温点分布。④形成对煤田火区的三维可视化、动态化监测与预警。针对4种不同层级探测技术的数据进行三维反演、联合反演成像, 根据成像结果, 对煤火发展蔓延进行可视化监测预警, 实现地下煤火灾害主动防控。

关键词: 地下煤火; 火源探测; 地下探测法; 地表探测法; 航空探测法; 航天探测法

中图分类号: TD75

文献标志码: A

Research on underground coal fire source detection

DENG Jun^{1,2}, QU Gaoyang¹, REN Shuaijing^{1,2}, WANG Weifeng^{1,2}, WANG Caiping^{1,2}, WANG Jinrui¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory for Prevention and Control of Coal Fires in Shaanxi Province, Xi'an 710054, China)

Abstract: This paper introduces the evolution and development process of coal fire and its features. This paper expounds on the detection mechanism and research progress of four layers of space exploration technology divided according to the different spatial positions of detectors. The technologies include underground, surface, aerial, and aerospace detection methods. The paper analyzes the advantages and disadvantages of the above four detection technologies. The existing research problems are pointed out. ① The detection precision is insufficient and it is difficult to accurately delineate the acquisition range. ② The detection technology is outdated, and it is difficult to accurately detect high-temperature points in fire areas. ③ The detection method is single and cannot accurately determine the specific information of underground coal fire combustion. In view of the new features of underground coal fire, such as concealment, coupling and complexity, the development directions of underground coal fire detection technology are proposed. ① The detection instrument data needs to be finely processed, so as

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-05-15; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074215, 52204239); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022JQ-517); 博士后科学基金资助项目(2022M722557)。

作者简介: 邓军(1970—), 男, 四川大竹人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为煤火灾防治研究, E-mail: dengj518@xust.edu.cn。

引用格式: 邓军, 屈高阳, 任帅京, 等. 地下煤火火源探测研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 68-77.

DENG Jun, QU Gaoyang, REN Shuaijing, et al. Research on underground coal fire source detection[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 68-77.



扫码移动阅读

to improve the sensitivity of magnetic difference to temperature, the detection precision of the resistivity method, the feature extraction rate and the result precision of the infrared detection method. ② It is suggested to utilize high-tech equipment to serve coal fire detection technology. ③ It is suggested to improve the collaborative utilization of multi-level detection technology. Firstly, large-scale fire detection is carried out using the fourth level aerospace remote sensing technology to obtain the basic spatial distribution features of underground coal fire anomalies. Secondly, further exploration is carried out using the third level aerial remote sensing detection technology to obtain the specific spatial distribution of underground coal fires. Finally, a more detailed distribution of high-temperature points in the coal field fire area is obtained by using the surface detection technology and underground detection technology at the second level and the first level to supply and verify. ④ It is suggested to develop 3D visual and dynamic monitoring and early warning of coal field fire areas. 3D inversion and joint inversion imaging are performed by use of data from four different levels of detection technology. Based on the imaging results, visual monitoring and early warning of coal fire development and spread are carried out, so as to achieve active prevention and control of underground coal fire disasters.

Key words: underground coal fire; fire source detection; underground detection method; surface detection method; aerial detection method; aerospace detection method

0 引言

煤炭作为我国主体能源,在各个领域都发挥着重要的作用,且其地位在短时间内难以改变^[1]。煤田火灾(简称煤火)是由于地下煤炭自燃而引起的一种特殊的自然灾害,全世界每年有10亿t煤炭被地下煤火烧毁,占据世界煤炭消费量的1/8^[2]。地下煤火灾害困扰着全世界。美国宾夕法尼亚州的塞特利亚煤田大火从1962年5月开始一直燃烧至今^[3]。我国是世界上煤火灾害最严重的国家^[4]。截至2019年底,仅我国新疆地区处于燃烧的火区面积达477.73万m²,每年燃烧损失456.16万t煤炭^[5]。宁夏地区煤田火区有37处,过火面积超过394万m²,分布在贺兰山中部的汝箕沟、二道岭等地区^[6]。内蒙古地区煤田火区有26处,火区面积达1903万m²,主要分布在古乌达、鄂尔多斯及准格尔等地区^[7]。

煤火不仅造成大量煤炭资源损失,而且释放出大量有毒有害气体,污染大气环境。地下煤火火源精准探测是煤火灾害防治的前提,是准确探测和圈定煤火位置及范围的关键^[8]。因此,笔者对煤火的演化发展及煤火特点进行了介绍,阐述了不同探测技术的探测机理,比较了不同探测技术的优缺点,分析了目前探测技术存在的问题,并对地下煤火火源探测技术的发展趋势进行了展望。

1 煤火的演化及特点

1.1 煤火的演化发展

煤自燃是一个自发氧化升温最后引起燃烧的过程,主要包括热量的自发产生及其逐渐积累^[9]。关

于煤自燃的起因,国内外科研工作者做了一系列研究,提出了一系列假说,包括细菌假说、酚基作用假说、自由基作用假说、煤氧复合学说等^[10]。这些假说中,煤氧复合学说已经慢慢被学术界认同,认为煤自燃过程中的主要反应物是煤和氧气,煤体表面对氧气进行了物理吸附、化学吸附和化学反应,产生了大量的热量,当热量聚集到一定程度时导致煤自燃^[11]。煤自燃发生后,高温致使煤岩体形成热破坏裂隙,为煤火的燃烧提供了漏风供氧通道(当煤温在200℃、氧气体积分数为3%和保持适当供风量时,就可以维持煤氧复合反应),使火区燃烧中心沿着破坏裂隙四处延伸,形成煤田火。关于地下煤火的发展演化,文献^[12]研究了煤火发展过程中热-流-固-化耦合作用机制,煤岩体中的热量传递主要以传导、对流和辐射3种方式进行,发现煤岩体裂隙的变形服从节理单元模型,渗流服从Darcy定律。文献^[13]研究了煤火煤岩体裂隙渗流的热-流-固多场耦合力学特性,通过有限元方法对煤火区的热-流-固的耦合全过程进行了研究,得出煤田火区燃烧中心发展推进至不同位置时的位移场、主应力应变场、剪应力场及温度分布规律。

1.2 煤火的特点

煤火经过漫长的发展,具有以下特点:①存在历史久远,发火时间长、温度高,煤岩体储存的热能大。②火区既有露头火,也有地下火,部分火源埋藏深,位置难确定。③煤火属于非控燃烧,着火范围广、着火点分散,露头火区地表的地形高差大、坡度陡。④煤层露头风化破碎和煤体烧成灰烬产生大量

空洞,上覆岩层强度因高温烧烤而降低,导致地表塌陷,形成的裂隙漏风通道复杂。⑤煤岩体温度升高形成热力风压,导致火区漏风增大,供氧充分,燃烧动力强,促使煤火不断向纵深快速发展蔓延。⑥火区所在区域一般气候干燥、风沙大、缺水少土。⑦火区燃烧现象集中沿塌陷断裂带分布,伴有蒸汽、青烟、硫磺结晶体,有些局部地段直接出现燃烧的明火。⑧火区燃烧与采空区显著相关,在开采深度较大的采空区域,地表塌陷强烈,高温点多且有较多明火,地下火势凶猛。

2 地下煤火火源探测技术

地下煤火火源探测是根据煤火的特点,利用相关设备,对火区的热场、浓度场、光场、电场及磁场变化进行探测,圈定煤田高温点区域,进而区分煤田火区的烧变区、临界区和正常区。根据探测原理可分为直接调查法、遥感法、直探法、物探法及化探法^[14-16];根据探测器的空间位置可分为地下探测法、地表探测法、航空探测法和航天探测法^[17],对比见表 1。

表 1 地下煤火探测技术对比

Table 1 Comparison of underground coal fire detection technologies

空间	方法	原理	优点	缺点
地下探测法	钻孔指标气体分析法	煤在燃烧的不同阶段产生的气体种类和浓度不同	成本效益高,不受地形限制	气体会随着裂隙往上漂移,导致定位有偏差
	钻孔测温法	在火烧区地表钻探取芯测温	可以直接靠近火源探测温度	成本高昂,不能完成火区大比例尺填图
地表探测法	地面温度测量法	根据地表探测的温度推断火区的着火范围及发展趋势	对浅埋煤层的煤田火区探查效果好	易受通风和环境条件的影响,如太阳辐射、风和降水
	电阻率法	比较未发火区和发火区电阻值的差异	操作简单方便	受大地杂散电流干扰大
	磁法探测	岩石经高温烧变后铁磁物质磁性变化	抗干扰性好,经济适用性强	探测深度有限,分辨率不够高
	自然电位法	煤层燃烧引起自然电位异常	结果可靠,简单易操作	多热解温度与非高温情况不适用
	瞬变电磁法	根据观测地下介电感应产生的二次场进行高温点探测	对阻值异常区有较强的分辨力	抗干扰能力差
	地质雷达探测	高频电磁波在介质分界面会产生反射	操作简单方便快捷	探测深度有限
	测氦法	测量地表的氦含量反推地下煤火温度	操作简单灵活	受到埋深、火区上覆岩层性质、地表大气流动、地层水分含量的影响
	电磁辐射法	基于煤体温度与电磁辐射信号强度的相关性	非接触,无需钻孔	信号的作用机制尚处于研究阶段
航空探测法	航空热红外遥感探测	以航空器为载体,探测煤田火区表面植被或岩石辐射的特性差异信息	节省时间,与煤火有关的信息丰富	热红外波段分辨率较低,对红外信息不能很好的反映
	航空多光谱遥感探测	以航空器为载体,利用波谱曲线和波段之间波谱特征的差异提取相关的热信息	探测时间短,可大面积探测煤田火区	易受太阳辐射、坡向、坡度和其他热源的影响
	航空高光谱遥感探测	用窄而连续的光谱通道持续对地面遥感成像	操作简单方便,节省时间	空间分辨率较低,对小块煤火显示误差较大
航天探测法	航天热红外与高分辨率遥感探测	结合地表温度、风力等地质信息,通过星载热红外与高分辨率遥感查看煤火燃烧痕迹和现象	成本效益高,节省时间,准确性好	采集的光谱信息有限
	航天多光谱遥感探测	以航天器为载体,利用波谱曲线和波段之间波谱特征的差异提取相关的热信息	能够有效探测大规模煤火	易受太阳辐射、坡向、坡度及其他热源的影响

2.1 地下探测法

1) 钻孔指标气体分析法。煤在燃烧的不同阶段产生的气体浓度和种类不同,且密度小的气体会向上升,煤田火区高温点与地表形成火风压差,高温区域的气体在火风压差的作用下向地表流动^[18]。通过在疑似高温点的位置进行钻孔,在钻孔位置处用气囊采集孔内的气样,并将采集到的气样用气相色谱分析仪分析气体成分及浓度,通过气体特征与煤温之间的关系绘制煤田火区着火点位置。文献^[19]通过褐煤、烟煤和无烟煤 3 种不同煤阶的程序升温实验,将煤自燃过程中产生的 CO、CO₂、CH₄ 等气体进

行分析,得出 CO、C₂H₄、C₂H₂ 为煤自燃程度标志性气体,并利用现场检测数据进行了验证,验证结果与实验结果一致。文献^[20]通过热重分析实验、指标气体检测实验和煤自燃氧化实验等方法,研究了鄂尔多斯红庆梁煤矿煤样的指标气体生成规律、燃烧过程及燃烧阶段划分,得出煤在燃烧过程中可分为自燃潜伏期、缓慢自燃期、加速自燃期和燃烧期 4 个阶段,以及用于表征煤自燃程度的标志性气体。

2) 钻孔测温法。钻孔测温法是通过在煤田火区的不同位置进行钻孔,将测温仪放入孔洞中,根据传感器显示的数值变化确定高温点位置^[21]。20 世纪

60年代以前,钻孔测温是探测近地表煤田火区的主要方式。文献[22]采用钻孔测温法对路基两侧地下煤层的自燃情况进行了勘察,确定了路基下部煤层燃烧区域、燃烧深度和燃烧烈度,发现煤层燃烧源位于地下约50 m处,沿竖向钻孔的温度分布呈抛物线状。文献[23]通过钻孔测温法对阜康气煤一号井煤火区进行监测,结果表明阜康气煤一号井共有5处火区,火区面积为51 000 m²,测量结果为下一步火区治理工作奠定了基础。文献[24]在宁夏回族自治区运用钻孔测温法测量了隐蔽火源的准确温度和深度,并结合热红外技术对其进行了验证,验证结果表明了钻孔测温法的准确性。文献[25]运用钻孔测温法对新疆大泉湖火区西部区域的地下温度场进行了测量,得到火区地下温度场的分布情况,为煤田火区封堵治理提供数据支持。

2.2 地表探测法

1) 地表温度测量法。地表温度测量法对浅埋煤层的煤田火区探查效果最佳。煤燃烧产生的热量传至地表会造成温度异常,采用热电偶、分布式光纤等测温仪测量异常区域的地表温度,根据温度推断火区的着火范围及发展趋势。文献[26]对内蒙古乌达煤田火区表面热现象进行了连续5 a的监测,调查了乌达20多个煤火区中的动态,并根据这些动态将煤火分为新点燃火灾、加速燃烧火灾、持续燃烧火灾、缓慢燃烧火灾及熄灭火灾5类。文献[27]研究表明,夜间特别是黎明前测量最适合分析煤火区的表面温度,此时太阳温度对测量结果的影响有限,背景和热异常之间的温差很大,此外,在较冷的季节沿裂隙和喷口与周围基岩的煤火引起的热异常对比最为突出。

2) 电阻率法。煤和岩石的电阻率会随着温度的变化而变化,通过观测沿剖面方向各个位置电阻值的变化情况,比较未发火区和发火区电阻值的差异(发火区的电阻值高),判断自然发火位置的区域与范围。文献[28]通过对电阻率法探测煤火进行了数值模拟,发现低电阻率异常出现在燃烧锋面位置,高电阻率异常出现在熄灭煤火区。文献[29]建立了煤火地电分类模型,并运用模型对煤火进行了正演电模拟和反演分析,研究结果表明该模型可有效消除高电阻异常煤火的遗漏,为灭火工作提供了参考。文献[30]采用复合对称四极装置和温纳装置对煤田火区进行了高密度电法(属于电阻率法的分支)探测,准确分辨出了火区的燃烧中心、烧空区和垮落带,为煤火灾害有效防治提供了支撑。

3) 磁法探测。煤层上覆岩石中一般会含有大量

的菱铁矿及黄铁矿结核,煤层在燃烧过程中,这些铁质矿物质发生复杂的化学变化,大部分转变为磁铁矿。岩石在地磁场作用下从高温至居里点(岩石的居里点温度为600~700℃),冷却后形成烧变岩,烧变岩会产生很强的“温差剩磁”,使得磁场强度高于正常磁场的几十甚至上千nT。根据这一磁性差异,确定煤火从燃烧中心到熄灭降温带的范围,从而达到磁法对火区范围的探测。文献[31-33]对新疆、甘肃和宁夏等地近20个煤田进行磁法探测,通过对磁测线剖面进行定期观测,发现磁异常曲线向煤层倾斜方向推移,并且运用采集的岩样进行高温焙烧试验,试验结果与实际测量结果相同。文献[34]利用磁法在南乌特印第安保留区对已燃烧、正燃烧和未燃烧区域的煤层进行划定,研究表明高浓度的氧气会妨碍磁铁矿的形成,同时赤铁矿比磁铁矿更容易形成。文献[35]基于火区煤岩磁性规律研究,对内蒙古鄂尔多斯纳林庙火区进行了磁法探测,测量结果与现场踏勘结果一致,验证了磁法探测技术的可靠性。

4) 自然电位法。煤火不仅能够改变火区的温度场和磁场,还能改变火区的自然电场。自然电位法是通过两点间测量到一定大小的电位差,来反演火区的温度场。文献[36]从岩石的物理特性入手,通过理论分析、数值模拟和实验验证,研究了岩石受热升温过程中自然电位的变化规律及激电特征,为自然电位法应用于煤火探测提供了理论依据。文献[37]对煤火自然电位异常的成因进行了研究,指出煤火自然电位异常主要来源于3个方面:由温度梯度导致的热电位、由煤的氧化还原反应引起的氧化还原电位、由火区水蒸气运移导致的流动电位。

5) 瞬变电磁法。瞬变电磁法是通过不接地回线(磁性源)或接地导线(电性源)向地下发射一次脉冲电磁场,根据观测地下介质感应产生的二次场进行高温点探测。文献[38]通过电阻率变化规律模型计算一维瞬变电磁响应,使用广义模式识别算法将响应反演为层状模型,并对比了电性源瞬变电磁和磁性源瞬变电磁的探测效果,结果表明电性源瞬变电磁能够较好地反映地下隐蔽火源的位置。文献[39]推导了均匀地球模型上瞬变电磁响应的表达式,并对表达式的有效性进行了交叉检验,提高了瞬变电磁的适用性和经济效益。

6) 地质雷达探测。煤火在燃烧过程中,会使得地下空间形成破碎形态,雷达向地下发射电磁波,电磁波在遇到不同的空间形态波阻抗分界面时产生不同强度的反射现象,通过对捕捉到的反射信号的能

量差异进行分析,得到地下煤火燃烧形成的空间形态,实现对煤火燃烧区域的探测。文献[40]以山西平朔安太堡露天矿 9 号煤田火区作为研究对象,运用探地雷达法对煤田火区的燃烧情况进行探测,并用钻孔测温法对雷达探测结果进行验证,结果表明地质雷达能够有效对地下煤火进行探测。文献[41]根据煤田火区燃烧状况探测的实际需要,对地质雷达探测技术提出了 ARMA 谱密度期望值的算法和构造谱剖面的算法,并对内蒙古乌达煤田火区进行了实际探测应用,获得了良好效果。

7) 测氦法。煤岩介质中含有一定量的氢元素,随着温度的升高,氢含量的析出量逐渐增大,当地下煤层燃烧产生高温高压时,不仅增加了煤岩中氢的析出率,还加快了氢的上升速率,这种现象会导致火区上方形成氢含量较高的异常区,通过测量地表的氢含量可探测地下煤炭燃烧的位置与范围^[42]。目前确定氢含量异常的方法有传统统计法、分形法^[43]和趋势面分析法^[44]。文献[45]通过验证传统统计法、分形法和趋势面分析法的氢异常下限,得出运用 3 种方法确定的异常区域面积大小与探测异常能力的高低为:趋势面分析法>分形法>传统统计法。文献[46]利用程序升温试验台,研究了氢的析出量与煤温的关系、氢的迁移规律及其在火源点温度、火源点位置等方面的适用条件,结果表明氢的析出量随煤温的升高先增大,达到着火点温度后再减小。文献[47]对内蒙古伊泰集团有限公司宝山煤矿上覆岩层地表诱发的裂隙氢进行了研究,得出了氢迁移的主要机制为扩散和对流效应。

8) 电磁辐射法。电磁辐射法是基于煤体温度与电磁辐射信号强度映射关系进行煤体温度测量。文献[48-49]通过电磁辐射测试系统,研究了不同变质程度煤在氧化加热过程中电磁辐射的变化规律,发现高温区的电磁辐射信号与温度有较好的对应关系。文献[50]通过研究不同尺寸煤加热和燃烧过程中电磁辐射信号的变化情况,揭示了煤加热燃烧过程中电磁辐射信号产生机理:煤燃烧火焰产生的带电离子,在带电离子产生和消失的链式反应过程中产生电磁辐射信号。文献[51]通过研究电磁辐射强度与煤的粒度、测试距离及温度之间的关系,确定了电磁辐射的优势频谱,并通过优势频谱成功圈定了煤田火区高温异常区域。

2.3 航空探测法

1) 航空热红外遥感探测。航空热红外遥感探测是以航空器为载体,通过红外遥感器(如红外摄影机、红外扫描仪)探测煤田火区表面植被或岩石所辐

射的特性差异信息,来确定火区的范围和燃烧程度。文献[52]通过机载热感相机红外侦察系统对宾夕法尼亚州的煤矸石火进行了探测,发现煤火高温区在图像中呈现亮色调,证明了该技术的可行性。文献[53]通过无人机热红外成像技术对山西省煤田火区进行了地表温度测量,根据三维地表温度模型划分了 4 个高温区,研究结果为后续灭火方案提供了技术支持。文献[54]使用无人机热红外遥感技术对新疆宝安煤矿火区进行了探测,运用自适应梯度阈值法和人工阈值法对煤火信息进行了提取,对火区范围进行了圈定。文献[55]通过无人机的热红外遥感对陕北神木市的地下煤火进行了勘探,为灭火工程提供了准确依据。

2) 航空多光谱遥感探测。多光谱图是利用波谱曲线和波段之间波谱特征的差异提取相关的热信息,通过热红外影像的温度反演实现地面温度的测量,进而完成矿区煤火的精细化定量监测。20 世纪 80 年代,我国开始使用机载多光谱方法进行煤火调查,利用波长为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 的热红外波段,对宁夏汝箕沟煤矿、山西太原西山煤矿等地的煤火进行了探测。文献[56]使用无人机多光谱遥感技术对澳大利亚昆士兰中部地区的火灾严重程度进行了分析,划分了高严重区域、低严重区域及未燃烧区域,量化了火灾燃烧等级。

3) 航空高光谱遥感探测。高光谱遥感探测技术运用窄而连续的光谱通道对地面进行持续遥感成像,具有高空间、高辐射和光谱三维信息数据量大等特点。文献[57]通过航空高光谱遥感图像处理方法对内蒙古大岭矿的煤火进行监测,查清了火区分布范围。文献[58]通过夜间机载热红外成像光谱仪获取航空热红外高光谱遥感数据,采用发射率归一化法建立空-地回归方程反演火区温度,结果表明 TASI 数据 1—6 波段($8\ 054.8\sim 9\ 679.3\ \text{nm}$)适合煤火热红外温度反演,为矿区煤田灭火提供了一定的数据支持。文献[59]通过夜间航空高光谱图像对宁夏汝箕沟煤田火区进行定量调查研究,确定了探测的热红外波段、拟合关系式和热异常对应的温度,准确地圈定了宁夏汝箕沟煤田火区范围。

2.4 航天探测法

随着航天遥感技术的发展,科研人员开始利用卫星搭载遥感探测技术,对煤田火区环境灾害进行动态监测。航天探测数据来源主要有 Landsat MSS/TM/ETM+ 卫星、SPOT 卫星、NOAA 卫星、EOS 卫星等陆地资源卫星。

1) 航天热红外与高分辨率遥感探测。通过星载

红外探测煤田火区地表对外辐射的红外特性差异,结合高分辨率遥感探测到的火区地表燃烧坑、燃烧沟、地面下沉和地表裂隙等地表特征,圈定煤田火区范围,预测煤火发展趋势,划定煤火异常区。目前常用的高空间分辨率卫星包括 IKONOS 卫星与 Quickbird 卫星, IKONOS 卫星的空间分辨率为 1 m, Quickbird 卫星的空间分辨率为 0.61 m。文献[60]将夜晚的 Landsat ETM⁺6 波段与白天的可见光、近红外和热红外波段信息相结合,对宁夏汝箕沟煤矿的火区范围及动态变化过程进行了分析。文献[61]利用美国陆地资源卫星 LANDSAT-5TM,采用普适性单通道算法反演了 1989 年 7 月 21 日、2001 年 10 月 1 日、2005 年 10 月 7 日 3 个时期内蒙古乌达煤田火区的地表温度,并通过实际勘探煤火区地表温度进行验证,结果表明热红外与高分辨率遥感技术对地表煤火及浅部煤田火区的探测具有一定的有效性。文献[62]基于 2008—2015 年的热红外影像,采用 SAG-BT 法反演了内蒙古乌达煤田火区高温分布情况,发现 2008—2013 年间火区呈现显著缩减趋势,面积减少了 2.5 km², 2013—2015 年间火区面积增加了 0.3 km²,表明火区有复燃的趋势。文献[63]基于分窗算法从 ASTER 夜间热红外数据中获取印度贾里亚煤田的地表温度,发现基于分窗算法计算高温点位置可大幅减少高温点位置误报。文献[64]基于印度 2009—2019 年间煤田的卫星遥感数据,对贾里亚煤田火区的覆盖面积进行了探测,为印度煤火治理提供了有力的数据支撑。

2) 航天多光谱遥感探测。航天多光谱遥感探测是以航天器为载体,利用波谱曲线和波段之间波谱特征的差异提取相关热信息,实现对煤田火区高温点探测的技术。文献[65]根据 Landsat-8 卫星影像数据,采用多光谱遥感探测方法,反演了内蒙古乌达矿区的地表温度,并通过环境监测中心提供的数据验证了反演结果的有效性,提取的煤火信息与实际温度差小于 0.5 ℃。文献[66]利用长期热图像监测方法,追踪了 1986—2020 年间乌达煤田火区范围变化,并采用符号聚合近似算法来判断鲁棒性,获得时空三维煤火动力学特征。文献[67]运用多光谱遥感探测法对煤火进行了监测,认为基于多光谱的 Landsat 对探测煤田火区具有有效性。

3 存在问题及研究展望

3.1 存在问题

国内外学者在地下煤火火源探测领域展开了大量的研究工作,取得了丰硕的成果,但现有研究仍存

在一些不足,主要体现在以下 3 个方面。

1) 探测精度不足,获取范围难以精准圈定。煤田火区的发展具有复杂性和隐蔽性,现有的探测技术种类繁多,但探测技术精度不足,导致火区范围难以精准圈定,如:遥感法无法实现精细化探测,且对地下深部煤火的探测比较困难;磁法和测氦法只能圈定火区的平面分布范围,无法对火区三维深度做精细测量。

2) 探测技术落后,火区高温点精准探测困难。虽然现在煤田火区探测技术发展迅速,但受到技术条件的制约,还有许多关键问题尚未解决。尤其是随着地下煤火深度的增加,煤火反映到地表的信息大幅度减弱,常规探测手段的效率大大降低,且难以达到对煤田火区的可视化判定。

3) 探测手段单一,无法准确判断地下煤火燃烧具体信息。如遥感法中,利用温度和沉降信息来识别地下煤火区域存在一定的缺陷,由于地表的地物吸热缘故,会提取出与煤火无关的温度异常区域,针对煤火的燃烧程度、火源位置、温度分布等信息获取困难。

3.2 研究展望

煤火探测技术是一种多学科、多专业的交叉融合技术。国内外学者在地下煤火高温点探测领域开展了大量的研究工作,取得了一系列进展,但随着地下煤火呈现出隐蔽性、耦合性、复杂性等新特点,煤火探测技术仍然有很长的路要走。

1) 对数据进行精细化处理。未来研究重点将集中在探测仪器数据的精细化处理方面。运用数据清洗、数据校准、数据平滑等对磁法探测得到的数据进行精细处理,提高磁性差对温度的灵敏度。对电阻率法探测得到的数据进行去噪、拟合、插值、相关性分析及聚类分析等精细处理,提高其检测精度。对红外遥感探测法获取的数据进行去噪、平滑、增强和几何校正等精细化处理,提高红外特征提取率及结果精度。加强数据智能化识别,减少数据处理与提取的多解性,数据识别朝着高效、精准、方便等方向发展,提高火区温度反演的准确性。

2) 促进高新探测设备的应用。科技的不断进步促使探测设备不断更新。航天事业的发展,使得航天遥感探测煤火技术研究取得巨大进展;传感器技术的发展,使得能够更加精确地测量到二氧化硫、硫化氢等气体,从而在指标气体分析中更加准确地判断煤火温度。随着科技的发展,未来会有更多的高新设备服务于煤火探测技术。

3) 完善多层次探测技术的协同利用。首先通过

第 4 层级航天遥感技术进行大规模的火区探测,得到地下煤火异常的基本空间分布特征;然后通过第 3 层级航空遥感探测技术进一步探测,得到具体的地下煤火空间分布;最后通过第 2 和第 1 层级的地表探测技术及地下探测技术进行补充和验证,得到更加详细的煤田火区高温点分布。利用多层次探测方式协同作业,发挥不同层级探测技术的优势,对探测结果进行相互验证,提高探测的准确性和可靠性,成为未来煤火探测的发展趋势。

4) 形成对煤田火区的三维可视化、动态化监测与预警。针对 4 个不同层级探测技术的数据(如红外遥感数据、高光谱与多光谱遥感数据、电磁数据、测氢数据、地质雷达数据、指标气体数据等)进行三维反演、联合反演成像,根据成像结果,对煤火发展蔓延进行可视化监测预警,实现地下煤火灾害由被动治理到主动防控的根本性转变,是未来煤火探测的发展方向。

4 结语

煤炭在能源体系中的主体地位短期不会改变,煤自燃火灾在未来一段时间内仍将是人类社会面对的重大环境灾害之一。尽管地下煤火火源探测技术有了极大的发展,但在探测精度、探测技术、探测手段等方面仍存在不足。此外,煤火灾害呈现出一些新的特点和难点,需要在此基础上研究更加有效的技术和手段。完善多层次探测技术的协同应用,形成对煤田火区三维可视化、动态化监测与预警,是未来的发展方向。

参考文献(References):

- [1] 王双明, 申艳军, 孙强, 等. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间CO₂地下封存途径与技术难题探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 45-60.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Underground CO₂ storage and technical problems in coal mining area under the "dual carbon" target[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 45-60.
- [2] 郭军, 蔡国斌, 郑学召, 等. 矿井热动力灾害及救援安全性判定研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 116-122.
GUO Jun, CAI Guobin, ZHENG Xuezhao, et al. Research status and prospect of mine thermal disaster and rescue safety judgement[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 116-122.
- [3] MISHRA R K, ROY P N S, SINGH V K, et al. Detection and delineation of coal mine fire in Jharia coal field, India using geophysical approach: a case study[J]. Journal of Earth System Science, 2018, 127(8): 107.
- [4] 朱红青, 袁杰, 赵金龙, 等. 地下煤火分布及探测技术现状研究[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(12): 28-32.
ZHU Hongqing, YUAN Jie, ZHAO Jinlong, et al. Research on the status of underground coal fire distribution and development of the detection technology[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(12): 28-32.
- [5] 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 Xingdong. Analysis on results of the fifth coalfield fire area survey in Xinjiang[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(2): 1-4.
- [6] 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.
- [7] 王伟. 煤田火灾探测与治理技术现状及发展趋势[J]. 煤矿安全, 2020, 51(11): 206-209, 215.
WANG Wei. Current situation and development trend for coalfield fire exploration and governance technology[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(11): 206-209, 215.
- [8] 林柏泉, 李庆钊, 周延. 煤矿采空区瓦斯与煤自燃复合热动力灾害多场演化研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1715-1726.
LIN Baiquan, LI Qingzhao, ZHOU Yan. Research advances about multi-field evolution of coupled thermodynamic disasters in coal mine goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1715-1726.
- [9] ONIFADE M, GENC B. Spontaneous combustion of coals and coal-shales[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(6): 933-940.
- [10] 王德明, 辛海会, 戚绪尧, 等. 煤自燃中的各种基元反应及相互关系: 煤氧化动力学理论及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1667-1674.
WANG Deming, XIN Haihui, QI Xuyao, et al. Mechanism and relationships of elementary reactions in spontaneous combustion of coal: the coal oxidation kinetics theory and application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1667-1674.
- [11] TANG Zongqing, XU Guang, YANG Shengqiang, et al. Fire-retardant foam designed to control the spontaneous combustion and the fire of coal: flame retardant and extinguishing properties[J]. Powder Technology, 2021, 384: 256-266.
- [12] 苏贺涛. 基于重力热管换热的地下煤火治理与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
SU Hetao. Study on underground coal fire control and application based on heat transfer using a gravity

- assisted heat pipe[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [13] 肖旻. 煤田火区煤岩体裂隙渗流的热-流-固多场耦合力学研究特性[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- XIAO Yang. Study on the mechanical characteristics of coal-rock mass of coalfield fires with thermo-hydro-mechanical coupling for fissure seepage[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [14] 武建军, 蒋卫国, 刘晓晨, 等. 地下煤火探测、监测与灭火技术研究进展[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(12): 1669-1674.
- WU Jianjun, JIANG Weiguo, LIU Xiaochen, et al. Innovative technologies for exploration, monitoring and extinction of underground coal fires[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(12): 1669-1674.
- [15] 郭刚, 贾继标, 黄丹青, 等. 鄂尔多斯浅层煤矿煤火区探测方法[J]. *煤矿安全*, 2013, 44(9): 137-139.
- GUO Gang, JIA Jibiao, HUANG Danqing, et al. Fire area detection method of shallow coal mine in Ordos[J]. *Safety in Coal Mines*, 2013, 44(9): 137-139.
- [16] 齐福辉, 张福英. 地下煤火的探测及防治[J]. *中国煤炭地质*, 2010, 22(增刊1): 143-146.
- QI Fuhui, ZHANG Fuying. Detection and controlling of underground coal burning[J]. *Coal Geology of China*, 2010, 22(S1): 143-146.
- [17] SONG Zeyang, KUENZER C. Coal fires in China over the last decade: a comprehensive review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 133: 72-99.
- [18] 梁运涛, 罗海珠. 中国煤矿火灾防治技术现状与趋势[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(2): 126-130.
- LIANG Yuntao, LUO Haizhu. Current situation and development trend for coal mine fire prevention & extinguishing techniques in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(2): 126-130.
- [19] GUO Jun, WEN Hu, ZHENG Xuezhao, et al. A method for evaluating the spontaneous combustion of coal by monitoring various gases[J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 2019, 126: 223-231.
- [20] LI Zongxiang, ZHANG Mingqian, YANG Zhibin, et al. Division of coal spontaneous combustion stages and selection of indicator gases[J]. *Plos One*, 2022, 17(4): 1-13.
- [21] 李文华. 煤田钻孔测温中几个问题初探[J]. *煤田地质与勘探*, 1984, 12(3): 60-62.
- LI Wenhua. Discussion on some problems in borehole temperature measurement in coal field[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1984, 12(3): 60-62.
- [22] 王彩波, 李德增. 高速公路下伏自燃采空区路基煤火热传递数值分析[J]. *土工基础*, 2022, 36(6): 952-955, 968.
- WANG Caibo, LI Dezeng. Numerical analysis of thermal transfer of coal fire distribution in unfilled abandon mine underlying an expressway[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2022, 36(6): 952-955, 968.
- [23] 张青松. 复合埋深条件下煤自燃火源范围探测技术[J]. *煤炭技术*, 2014, 33(7): 270-271.
- ZHANG Qingsong. Fire detection technology of coal spontaneous combustion scope location based on compound mining depth coal seam[J]. *Coal Technology*, 2014, 33(7): 270-271.
- [24] DU Bin, LIANG Yuntao, TIAN Fuchao. Detecting concealed fire sources in coalfield fires: an application study[J]. *Fire Safety Journal*, 2021, 121. DOI: 10.1016/J.FIRESAF.2021.103298.
- [25] 李光宇. 矿井火与地表火共存型煤田火区浅部封堵治理技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- LI Guangyu. Study on the shallow sealing method of mine fire and surface fire coexisting areas[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [26] KUENZER C, ZHAGN Jianzhong, HIRNER A, et al. Multitemporal in-situ mapping of the Wuda coal fires from 2000 to 2005 assessing coal fire dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [27] ZHAGN Jianzhong, KUENZER C. Thermal surface characteristics of coal fires 1 results of in-situ measurements[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2007, 63(3/4): 117-134.
- [28] SHAO Zhenlu, WANG Deming, WANG Yanming, et al. Electrical resistivity of coal-bearing rocks under high temperature and the detection of coal fires using electrical resistance tomography[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 204(2): 1316-1331.
- [29] SONG Wujun, WANG Yanming, SHAO Zhenlu. Categorical modeling on electrical anomaly of room-and-pillar coal mine fires and application for field electrical resistivity tomography[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 136: 474-483.
- [30] 邵振鲁, 王德明, 王雁鸣. 高密度电法探测煤火的模拟及应用研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(3): 468-474.
- SHAO Zhenlu, WANG Deming, WANG Yanming. Simulation of high-density electrical method in detecting coal fires and its application[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 468-474.
- [31] 张秀山. 磁法探测煤层自燃火区[J]. *煤田地质与勘探*, 1980, 8(6): 43-48.
- ZHANG Xiushan. Detection of coal seam spontaneous combustion area by magnetic method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1980, 8(6): 43-48.
- [32] 张秀山. 新疆煤田火烧区特征及防治对策[J]. *新疆地质*, 2001(2): 150-152.
- ZHANG Xiushan. Countermeasure and characterstic of coalfield burning area in Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 2001(2): 150-152.

- [33] 张秀山. 新疆煤田火烧区特征及灭火问题探讨[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(1): 21-24.
ZHANG Xiushan. Probe into Xinjiang coalfield underground combustion area features and fire-fighting problems[J]. Coal Geology of China, 2004, 16(1): 21-24.
- [34] IDE T S, CROOK N, ORR F M. Magnetometer measurements to characterize a subsurface coal fire[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 87(3/4): 190-196.
- [35] 李经文. 基于煤岩磁性的纳林庙矿煤层隐蔽火灾探测研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
LI Jingwen. Research on concealed fire detection of coal seam in Nalinmiao Mine based on magnetic property of coal and rock[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [36] 郭伟红. 温变条件下岩石自然电位及激电特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
GUO Weihong. Study on spontaneous potential and induced polarization characteristics of rock under temperature change[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [37] 邵振鲁. 煤田火灾磁、电异常演变特征及综合探测方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
SHAO Zhenlu. Magnetic and electrical signature of coal fires and comprehensive detection methodology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [38] 曾凡. 煤田隐蔽火区的瞬变电磁探测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
ZENG Fan. Study on detection method of hidden fire area in coalfield using transient electromagnetics[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [39] SINGH N P, UTSUGI M, KAGIYAMA T, et al. TEM response of a large loop source over a homogeneous earth model: a generalized expression for arbitrary source-receiver offsets[J]. Pure & Applied Geophysics, 2009, 166(12): 2037-2058.
- [40] 邵光强, 赵猛超, 曹凯. 火区自然发火范围及发展程度的判定方法[J]. 煤矿安全, 2012, 43(10): 181-184.
SHAO Guangqiang, ZHAO Mengchao, CAO Kai. Judgment method of spontaneous combustion range and development degree of fire area[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(10): 181-184.
- [41] 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.
- [42] 刘洪福, 白春明, 舒祥泽, 等. 用测氡技术探测煤矿地下火区的研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(4): 68-71.
LIU Hongfu, BAI Chunming, SHU Xiangze, et al. A study of detecting underground fire zone applying radon measuring technology[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(4): 68-71.
- [43] 李峰, 刘鸿福, 张新军, 等. 基于分形理论确定地下煤层自燃火区范围[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 15-17, 22.
LI Feng, LIU Hongfu, ZHANG Xinjun, et al. Determination of spontaneous combustion extent in coal seams on the basis of the fractal theory[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(3): 15-17, 22.
- [44] 张玲玲, 刘鸿福, 张新军, 等. 趋势面分析法圈定氡异常[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 79-82.
ZHANG Lingling, LIU Hongfu, ZHANG Xinjun, et al. Delineating radon anomalies by the trend surface analysis[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 79-82.
- [45] 张俊英, 方熙杨, 王海宾, 等. 基于同位素测氡的煤矿火区圈划方法对比研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 38-44.
ZHANG Junying, FANG Xiyang, WANG Haibin, et al. Comparative study of coal mine fire areas zoning methods based on isotopic radon measurement technique[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(1): 38-44.
- [46] WEN Hu, CHENG Xiaojiao, FAN Shixing, et al. A method for detecting hidden fire source in deep mine goafs based on radon measurement and its experimental verification[J]. Applied Geochemistry, 2020, 117: 104603.
- [47] ZHANG Wei, ZHANG Dongsheng, WU Lixin, et al. On-site radon detection of mining-induced fractures from overlying strata to the surface: a case study of the Baoshan Coal Mine in China[J]. Energies, 2014, 7(12): 8483-8507.
- [48] KONG Biao, WANG Enyuan, LI Zenghua, et al. Time-varying characteristics of electromagnetic radiation during the coal-heating process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 434-442.
- [49] KONG Biao, LI Zenghua, WANG Enyuan, et al. An experimental study for characterization the process of coal oxidation and spontaneous combustion by electromagnetic radiation technique[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 119: 285-294.
- [50] KONG Biao, LIU Zhen, YAO Qingguo. Study on the electromagnetic spectrum characteristics of underground coal fire hazardous and the detection criteria of high temperature anomaly area[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(3): 88-99.
- [51] KONG Biao, WANG Enyuan, LU Wei, et al. Application of electromagnetic radiation detection in

- high-temperature anomalous areas experiencing coalfield fires[J]. *Energy*, 2019, 189. DOI: [10.1016/j.energy.2019.116144](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116144).
- [52] SLAVECKI R J. Detection and location of subsurface coal[C]. Proceedings of the 3rd International Symposium on Remote Sensing of Environment, Michigan Institute of Technology, Science Michigan, 1964: 537-547.
- [53] SHAO Zhenlu, LIANG Yuntao, TIAN Fuchao, et al. Constructing 3-D land surface temperature model of local coal fires using UAV thermal images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022. DOI: [10.1109/TGRS.2022.3176854](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3176854).
- [54] 张雷听, 汪云甲, 赵峰, 等. 基于无人机热红外遥感的新疆宝安煤矿火区探测[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(6): 162-166.
- ZHANG Leixin, WANG Yunjia, ZHAO Feng, et al. Detection and analysis of fire area in Xinjiang Baoan Coal Mine based on UAV thermal infrared remote sensing[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(6): 162-166.
- [55] HE Xiaoyuan, YANG Xingke, LUO Zhen, et al. Application of unmanned aerial vehicle (UAV) thermal infrared remote sensing to identify coal fires in the Huojitu Coal Mine in Shenmu city, China[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13895.
- [56] MCKENNA P, ERSKINE P D, LECHNER A M, et al. Measuring fire severity using UAV imagery in semi-arid central Queensland, Australia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(14): 4244-4264.
- [57] 周小虎, 林燕. 航空遥感在内蒙古大岭矿区煤火信息提取中的应用[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(5): 837-840.
- ZHOU Xiaohu, LIN Yan. The application of information extraction of aerial infrared remote sensing images in Daling Coalfield, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2009, 39(5): 837-840.
- [58] 杨国防, 赵英俊, 田新光, 等. 大柳塔矿区煤火高光谱热红外定量探测研究[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(12): 103-106, 109.
- YANG Guofang, ZHAO Yingjun, TIAN Xinguang, et al. Coalfield fire quantitative detection in Daliuta mining area based on hyperspectral thermal infrared remote sensing[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(12): 103-106, 109.
- [59] 毛耀保. 宁夏汝箕沟煤田火区高光谱定量遥感探测研究[J]. *国土资源遥感*, 2010(3): 69-75.
- MAO Yaobao. Research on hyperspectral quantitative remote sensing detection of the Rujigou coal fire area in Ningxia[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2010(3): 69-75.
- [60] 陈云浩, 李京, 杨波, 等. 基于遥感和GIS的煤田火灾监测研究——以宁夏汝箕沟煤田为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(2): 97-101.
- CHEN Yunhao, LI Jing, YANG Bo, et al. Monitoring coal fires based on remotely sensed data and GIS technique in coalfields—a case study of Rujigou coal field in Ningxia, China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(2): 97-101.
- [61] 蒋卫国, 武建军, 顾磊, 等. 基于遥感技术的乌达煤田火区变化监测[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(6): 964-968.
- JIANG Weiguo, WU Jianjun, GU Lei, et al. Change monitoring in Wuda coalfield fire area based on remote sensing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(6): 964-968.
- [62] 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.
- [63] SINGH N, CHATTERJEE R S, KUMAR D, et al. Retrieval of precise land surface temperature from ASTER night-time thermal infrared data by split window algorithm for improved coal fire detection in Jharia coalfield, India[J]. *Geocarto International*, 2020, 37,3: 926-943.
- [64] BISWAL S S, GORAI A K. Change detection analysis in coverage area of coal fire from 2009 to 2019 in Jharia coalfield using remote sensing data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(24): 9545-9564.
- [65] 李如仁, 贲忠奇, 李品, 等. 基于Landsat-8的煤火监测方法研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(7): 1735-1740.
- LI Ruren, BEN Zhongqi, LI Pin, et al. Study on the method of coal fire monitoring based on Landsat-8 data[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1735-1740.
- [66] CHEN Xue, PENG Junhuan, SONG Zeyang, et al. Monitoring persistent coal fire using landsat time series data from 1986 to 2020[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2022. DOI: [10.1109/TGRS.2022.3142350](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3142350).
- [67] XIA Qing, HU Zhenqi. A novel method to monitor coal fires based on multi-spectral landsat images[J]. *Spectroscopy Spectral Analysis*, 2016, 36(8): 2712-2720.