遥感技术在新疆双河市南部地热资源调查中的应用研究

齐志龙[1]，呼冬强[2]，陆建国[1]，喜　英[1]

（1. 新疆地质矿产勘查开发局第一水文工程地质大队，乌鲁木齐 830000；2. 新疆工程学院，乌鲁木齐 830000）

摘要：新疆地域辽阔，约占我国陆地总面积的六分之一，地热资源丰富，亟须开展地热资源勘查。采用最新的 GF-2、Landsat-8 卫星数据，对双河市南部地区进行 1∶5万水文地质遥感解译，着重解译区内地貌、地质构造、泉点及泄出带的分布情况，采用 landsat-8 卫星数据进行地表温度反演，圈定地热异常点。结合野外验证，对各种地质和地热信息进行动态对比分析，论述了工作区内地热地质演化及趋势变化与地热地质要素的空间分布特性及相互联系，圈地了有效的地热靶区，为该区后期地热勘查提供依据，为新疆开展地热勘查寻找有效的技术方法提供了借鉴。

关键词：新疆；遥感；地热

中图分类号：P314　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1671－1807(2024)10－0227－06

地热资源是一种绿色、低碳、可循环利用的可再生能源，具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点，其开发利用对于推动清洁能源生产和消费、促进发电、供暖、康养、旅游、种养殖等行业发展具有重要意义，是促进生态文明建设和高质量发展的重要矿产能源。国内外学者对地热资源勘查开发提出众多方法和理论，郝明等[1]提出一种证据理论融合多视角遥感信息的地热异常探测方法，基于遥感数据反演的温度信息，分别从全局、局部分块和高程分区等多视角提取温度异常；蔺文静等[2]在阐述中国地热资源特征的基础上，针对中国不同类型的地热资源，采用不同的计算方法对浅层地热能、水热型地热资源和干热岩地热资源进行了潜力评估；李悦和关锌等[3]在介绍我国新能源开发利用的基础上，提出了地热资源开发利用的独特优势；周福宝等[4]围绕煤矿火灾共性基础科学问题和煤火热能转化清洁利用技术，分析了煤火热能资源开发利用领域中煤火热资源评估、煤火地热提取系统和方法、热能转化与利用等重点方向的关键基础理论和核心技术；唐海等[5]选取 landsat8 遥感数据，利用热红外遥感技术高效地圈定地热异常区并对隐伏断裂进行预测；关锌[6]提出借鉴国外经验，促进我国地热产业政策发展；刘育平[7]认为开展低碳排放能源研究，对于加快中国低碳能源的勘查开发和利用的步伐，促进中国可再生能源事业的发展，缓解所面临的能源危机及全球气候变化均具有重要的意义；王转转等[8]在对比分析国内外地热分类研究成果的基础上，依照赋存埋深和温度将地热资源划分为浅层地热资源、水热型地热资源和干热岩三个大类，再从地热资源富集赋存的关键要素出发，进一步细分为岩浆型、隆起断裂型和沉降盆地型三亚类，将干热岩细分为强烈构造活动带型、沉积盆地型、高放射性产热型和近代火山型四亚类；蔺文静等[9]分析高放射性产热型、沉积盆地型、近代火山型和强烈构造活动带型等四种类型干热岩成因模式的基础上，结合我国的地质构造背景、地热地质条件，对未来我国干热岩资源重点勘查方向及靶区进行了论述，并重点针对目前不同类型区干热岩资源勘探工程进行了梳理；张宇轩等[10]提出攻关地热资源开发技术、加强关键矿产全生命周期研究，为实现碳中和目标提供重要的地质解决方案；丁亮和赵彦涛等[11]提出为有效勘探开发地热资源，加强环境保护，不仅要高度重视设备方面的研发工作，还需要制定完善的法律法规体系，加强地热资源开发利

收稿日期：2024-01-28

作者简介：齐志龙(1978—)，男，新疆乌鲁木齐人，高级工程师，研究方向为水文地质、工程地质、地质灾害；通信作者呼冬强(1988—)，男，陕西延川人，硕士，副教授，研究方向为成矿规律成矿预测；陆建国(1975—)，男，新疆乌鲁木齐人，高级工程师，研究方向为水文地质、工程地质、地质灾害；喜英(1978—)，女，新疆乌鲁木齐人，高级工程师，研究方向为水文地质、工程地质、地质灾害。

用过程的监督与管理；陈艳等[12]基于地理信息系统(geographic information system，GIS)的数学地质统计预测方法-证据权法，对武功山隆起区地热资源开展了预测；顾新鲁等[13]采用归类统计分析方法，结合全疆典型地热区(带、点)地热资源分布规律及赋存规律等，将区域地质构造、次级构造、大地热流背景及热源、地热水源流体等确定为地热系统形成机制的主控因素，总结出 5 类地热系统控热模式。新疆地域辽阔，约占我国陆地总面积的六分之一，地热资源尤为丰富，其地质构造在一定程度上决定了地热资源以地热温泉和地下深部热水两种主要形式存在，但新疆地热资源埋藏较深，开发费用较高，地热资源勘查和综合开发利用难度较大，运用有效的勘查技术方法，有利于发掘新疆地热资源潜力。本文采用最新的 GF-2、Landsat-8 等卫星数据，对双河市南部地区进行 1∶5 万水文地质遥感解译，着重解译区内地貌、地质构造、泉点及泄出带的分布情况，并采用 landsat-8 卫星数据进行地表温度反演，圈定地热异常点，结合野外验证，对各种地质和地热信息进行动态对比分析，论述工作区内地热地质演化及趋势变化与地热地质要素的空间分布特性及相互联系。

1　研究区概况

研究区位于新疆双河市，属天山北脉博罗科努山北麓，西接博乐市 30 km，距博乐阿拉山口机场 11 km，北距阿拉山口口岸 51 km，东临精河县 33 km，兰新铁路、G312 国道横穿全境，交通极其便利。研究区以博尔塔拉断裂控制区域为基础，研究地热资源的形成机理、控热构造的规模，圈定面积 2 405 km^2，其中以双河市南部山前断裂、已有地热井及存在地热异常的区域作为重点研究区。

本文以高分辨率数据、中等分辨率数据及热红外数据为基准数据，应用 3S 技术，采取遥感数据与多源数据相结合、计算机自动提取与人机交互解译相结合、室内综合研究与实地调查相结合的方法，在 ENVI、ARCGIS、MAPGIS K9 等软件平台支持下，客观地对工作区基础地质、水文地质及地热资源分布情况实施遥感研究。研究总体思路如图 1 所示。

2　遥感图像处理与制作

2.1　遥感图像处理

遥感影像及成果数据均采用高斯-克吕格投影，2000 国家大地坐标系(2000 年国家提出的测量投影系统)。数据处理平台由较高版本的 ENVI、MAPGIS、PHOTOSHOP 等图形图像处理和数据集成软件及相应硬件构成。图像处理工作是在 ENVI 图像处理系统软件环境中完成的，数据应用的目的在于进行高精度水文地质环境地质解译，卫星数据的图像处理的最终目标是制作高分辨率的彩色合成图像，遥感图像处理步骤主要有主要包括波段组合选择、几何纠正、色调匹配、数字镶嵌、图像注记和制作。

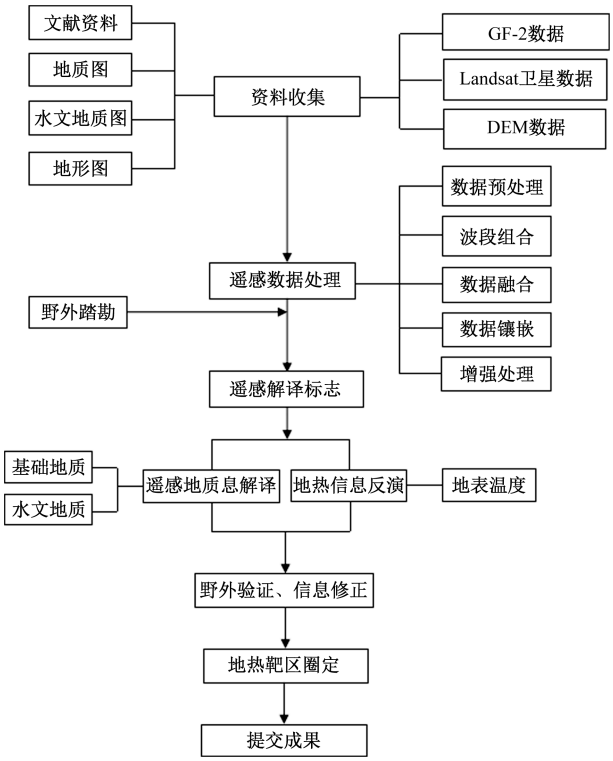

图 1 技术路线

2.2　遥感解译方法

遥感地质主要解译内容包括地质构造、地表水体、地下水溢出带、泉点等与地热资源调查工作关系密切的各类要素信息，形成基础地质、水文地质遥感解译图，为地热资源调查提供基础资料。

采用目视解译及人机交互解译的方法进行相关信息提取。人机交互解译是在地理信息系统支持下，由经验丰富的专业人员进行遥感影像解译。解译主要是通过对各类对象的色调、纹理等影像解译标志判读而实现。人机交互解译方法是目前较多采用的一种解译方法。随着计算机技术的发展，传统的目视解译已经升级为在计算机屏幕上的人机交互解译，即不再在打印的纸质遥感图像上用彩色或玻璃铅笔进行勾画，而是直接在计算机屏幕上，借助先进的遥感图像处理软件和 GIS 软件，直接圈定和勾画目标物界线。在计算机屏幕上实现信息提取，可任意放大或缩小，精确地确定位置或追索边界。根据相关标准，将不同解译内容分图层，用不同的符号和颜色表示不同的专题、类型等

信息。随着国产卫星数据的空间分辨率的提高,使得人机交互解译能够实现全分辨率解译,解译尺度优于1∶10 000,在影像可视化最大范围内进行各类信息的提取,更精细、精准地捕捉解译要素细节,为工作区水文地质调查提供客观、全面的基础数据。

2.3 地表温度反演

地表温度(land surface temperature,LST)是区域和全球尺度上陆地表层系统过程的关键参数,综合了地表与大气的相互作用以及大气和陆地之间能量交换的结果。地表温度作为众多基础学科和应用领域的一个关键参数,能够提供地表能量平衡状态的时空变化信息,在数值预报、全球环流模式以及区域气候模式等研究领域得到广泛的应用。

根据普朗克定律(Planck's law),绝对温度大于0 K的任何物体都会向外以电磁波的形式辐射能量。处于热平衡状态下的黑体在温度 T 和波长 λ 处的辐射能量可以用普朗克定律表示,即

$$B_\lambda(T)=\frac{C_1}{\lambda^5[\exp(C_2/C_2\lambda T-\lambda T)-1]} \quad (1)$$

式中:$B_\lambda(T)$为黑体在温度 T(K)和波长 λ(μm)处的光谱辐亮度(W·μm^{-1}·Sr^{-1}·m^{-1});C_1 和 C_2 是物理常量($C_1=1.191\times10^8$ W·μm^{-4}·Sr^{-1}·m^{-2},$C_2=1.439\times10^4$ μm·K)。

由于绝大多数自然地物都是非黑体,它们的热辐射需要在式(1)中加入地表发射率 ε 的影响。地表发射率可定义为地物的实际热辐射与同温同波长下黑体热辐射的比值。自然地物的热辐射可以用地表发射率乘以式(1)的普朗克函数得到。显然,如果大气对卫星获取的辐亮度信号没有影响,那么在已知地表发射辐射和发射率的情况下,地表温度就能根据式(1)反演得到。

黑体在特定温度 T(K)下单色辐射强度的极大值所对应的波长 λ_{max} 可以用维恩位移定律表示,即

$$T\lambda_{max}=2\ 897.9\ \mu\text{m} \quad (2)$$

根据这一性质,对于温度在250~330 K的地表来说,其峰值波长 λ_{max} 主要处于热红外波长范围(8.8~11.6 μm),而对于诸如火灾、火山喷发的高温地表,其温度可高于800 K,那么它们的峰值波长 λ_{max} 主要处于中红外波长范围(3~5 μm)。因此,可以根据不同的需求选择不同的波长范围来探测地表热辐射状况。

3 研究区地貌及遥感特征解译

3.1 地形地貌遥感解译特征

研究区地势西高东低,由数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据提取了工作区高程信息。通过高程模型(图2)可知,工作区处在盆地西端,西侧、南侧及北侧三面环山,受流水侵蚀作用的改造,河流自西向东流入艾比湖,艾比湖为工作区海拔最低点,海拔约为106 m,西南端山体海拔最高,约为1 750 m。

工作区为起伏较小的山前冲洪积平原地带,地势平坦,其可概略划分为三个影像单元。

(1)工作区中东部影像,色调极为杂乱,主要由冲洪积堆积物组成,地形起伏小,影像表面较为光滑,发育辨状、树枝状及不规则水系,为工作区主体,目前主要为农田及双河市城区,其内水利设施完善,这为地质构造、泉点等与地热资源相关信息的解译工作增加了较大的干扰因素。

(2)工作区东北部影像,色调较为单一,显示为浅绿色调,主要由湖积堆积物组成,为艾比湖的西部,与其西侧影像单元界线明显。

(3)工作区北侧、西侧影像,色调较为复杂,其中中酸性侵入岩体显示为浅红色调,色调均匀且单一,其受风化剥蚀作用和构造活动影响最为明显,平行状水系密集发育,而地层地质体显示为深红色、深灰色等色调,其山体地形起伏较大,切割中等一深,多呈"V"形河谷,山脊多呈刃脊,尖棱明显。

依地貌成因类型和形态特征,工作区可划分为五类地貌类型,即湖积平原、冲洪积平原、侵蚀丘陵、侵蚀低山及侵蚀中山。其中湖积平原分布在该区东北部,为艾比湖的一部分;冲洪积平原分布在该区中东部,主要为农田及双河市城区;侵蚀丘陵分布在该区山前洪积扇群地带;侵蚀低山集中分布在该区西部;侵蚀中山主要分布在该区北部和西南部(图3)。

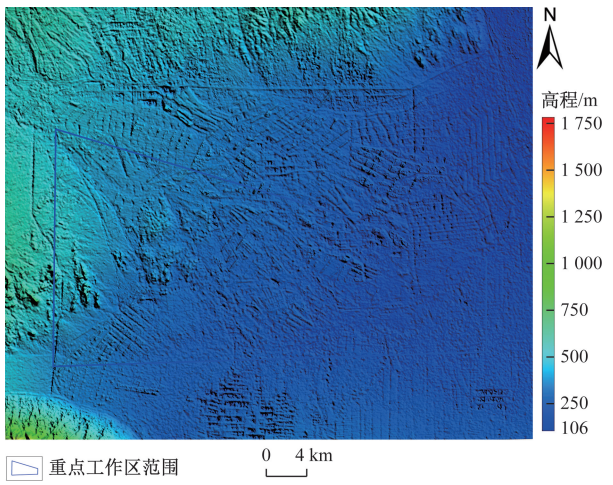

图2 研究区高程模型

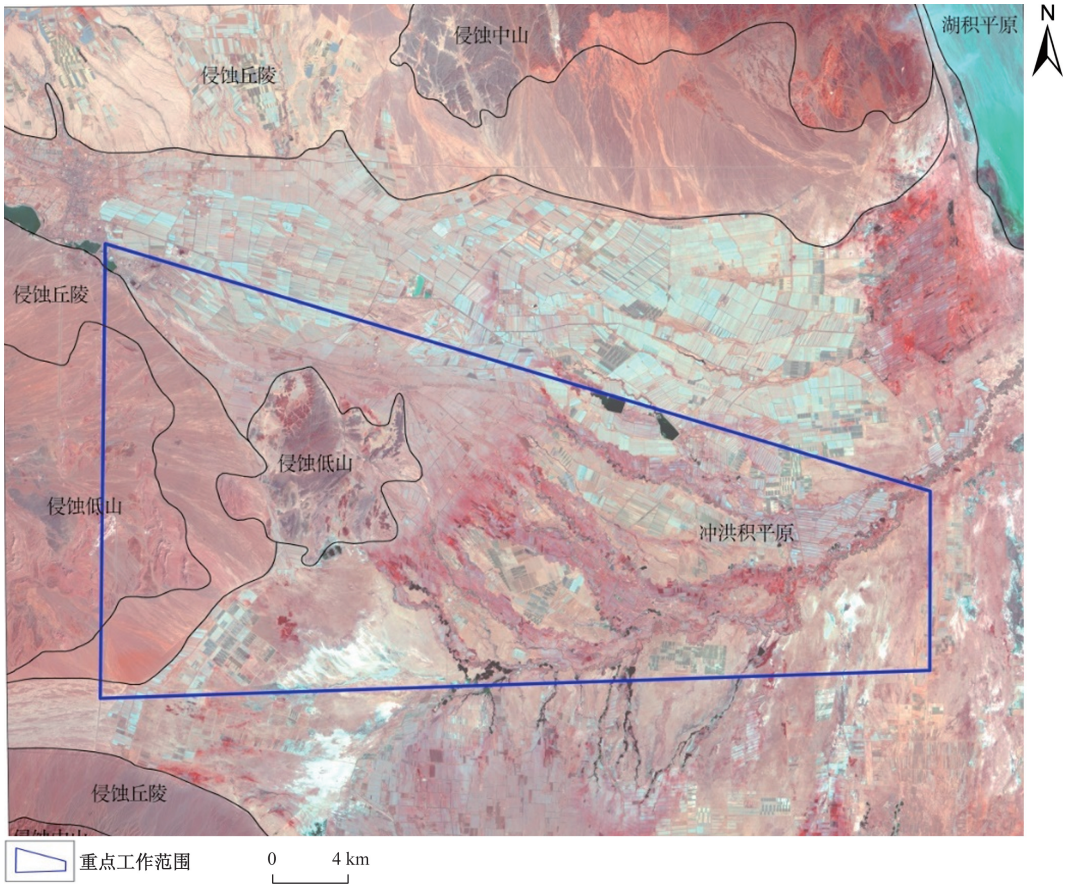

图 3　研究区遥感影像

3.2　地质构造解译特征

断层构造是一种线形构造，在遥感影像上表现为较为明显的线性影像。主要表现形式有两种：一是线性的色调异常，即线性的色调与两侧的地质体色调都明显不同；二是两种不同色调的分界面呈线状延伸。但具备这两个影像特征的地物不一定都是断层，如山脊、较小的河流、道路、岩层的走向、岩层的界面有时也具有上述特征。

断裂构造的解译标志主要有以下类型：一连串负地形呈线状排列；不同岩性构成的地形，三角面呈线状排列；河谷、山脊呈直线状延伸或被切断；冲积-洪积扇群的顶端处于同一直线（或弧线）上；盆地边缘呈直线、折线和转折；河谷异常平直或锐角急转弯；河道突然变宽或变窄；水系变形点（散开点、收敛点、拐点等）处于同一直线上；地下水溢出点，处于同一直线上。根据断裂构造的通识解译标志及解译人员的经验，对工作区进行地质构造解译，如图 4 所示，工作区地质构造结合 DEM 高程模型数据主要表现为：连串负地形呈线状排列，河谷、山脊呈直线状延伸。

解译结果表明，工作区断裂构造发育，在 DEM 高程模型图上断裂构造影像特征较为明显，区内断裂构造展布方向主要有北北西向，北西向及近东西向，分布在新生代地层中的推测断裂对地热资源的分布具有一定的控制作用，主要 7 处解译推测断裂构造。

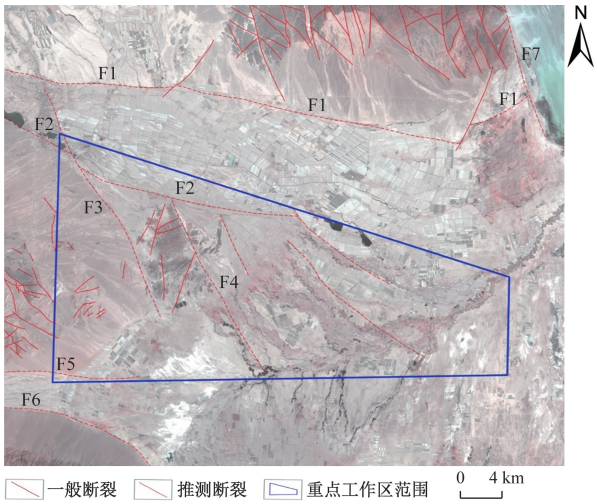

图 4　断裂构造分布

3.3　水文地质解译特征

利用 GF-2 影像对重点工作区地表水体进行遥感解译（图 5），结果显示，区内具一定规模的河流有

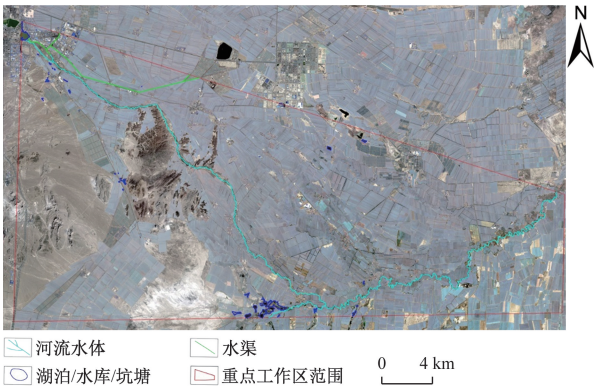

图 5 水系解译分布

2 条,一条河流从该区西北角流入,沿南东向流入该区西部,至该区中南部与另一条河流汇合,沿北东向流入艾比湖;区内分布一个水库,位于该区西北角,其余均为坑塘,其面积较小,分布较为分散,较为集中的分布在该区西北角和中南部;区内水渠分布密集,沿农田边上都有分布,其中该区北部的水渠宽度较大,应为主干渠。

利用 Landsat-7 影像对工作区泉点进行遥感解译,结果显示,区内泉点、泉群极为发育,其泉点分布较为分散,主要分布在第四系全新统及晚更新统冲洪积地层,岩性主要为砂卵砾石,形成的泉点以侵蚀下降泉为主,形成的泉点以侵蚀下降泉为主。

4 地表温度反演

地表温度作为地球环境分析的重要指标,而遥感技术作为现代重要的对地观测手段,使得基于遥感图像的地表温度反演的研究越来越多。主要的地表温度反演方法有大气校正法、单窗算法、单通道法等。本文使用辐射传输方程法对地表温度进行反演。

在获取温度为黑体在热红外波段的辐射亮度后,根据普朗克公式的反函数,求得地表真实温度,到真实的地表温度值,单位为摄氏度(图 6)。

5 地热靶区圈定及分析

根据地热靶区圈定原则,利用遥感技术提取的断裂构造、泉点、地下水泄出带及地表温度信息,结合区内地热地质相关资料,共圈定 3 处地热靶区(图 7)。其具体叙述如下。

YR01 靶区位于工作区中西部,面积约为 310.13 km^2,圈定依据主要有:经过地表温度反演具有明显的地温异常显示;区内分布遥感解译 F_2、F_3、F_4 推测断裂,其中 F_2、F_3 断裂可能为山前边界断裂,并且 F_2 与 F_4 断裂组合成“入”字形构造组合,这些断裂为地的传输提供了有利的通道。

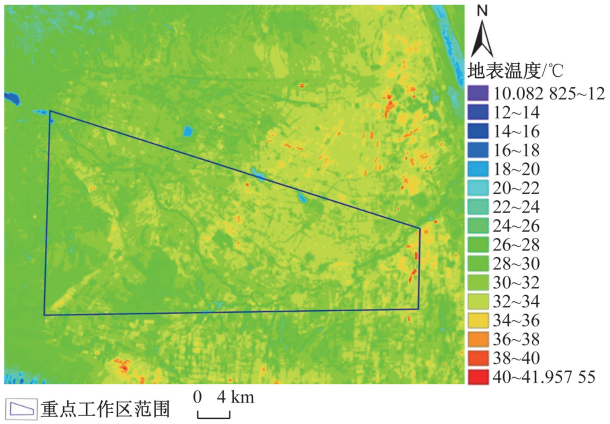

图 6 反演地表温度分布

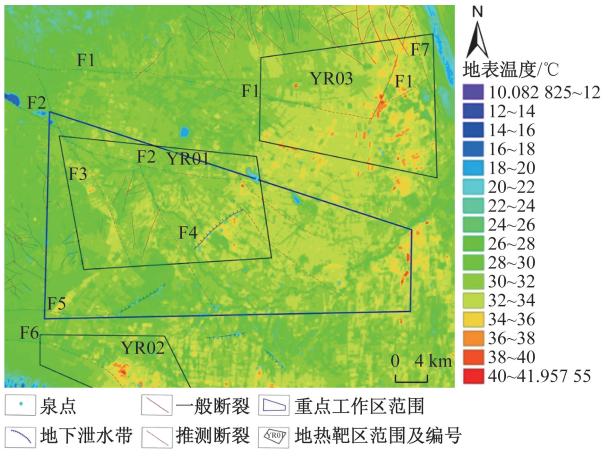

图 7 研究区地热靶区分布

YR02 靶区位于工作区西南部,面积约为 92.61 km^2,其依据主要有:经过地表温度反演具有明显的地温异常显示;区内分布遥感解译 F_6 推测断裂,并且地温异常沿该断裂展布,表明地温异常与该断裂有较大的关系;该区南部分布有面积较大的中酸性岩体,以岩基的形式展布,该岩体为 YR02 靶区提供了充足的热动力源。

YR03 靶区工作区东北部,面积约为 272.94 km^2,其依据主要有:经过地表温度反演具有明显的地温异常显示;区内分布遥感解译 F_1 推测断裂,该断裂被一条北东向断裂错断,在其交汇部位地热异常明显,并且有沿断裂展布的趋势;该区北部分布有面积较大的中酸性岩体,以岩基的形式展布,该岩体为 YR03 靶区提供了充足的热动力源。

6 结论

本文经过全面的遥感研究工作,通过收集、整理大量文献资料,分析了工作区的地质环境背景和水文地质、地热地质特征,利用多源遥感技术对工作区基础地质、水文地质及地热地质进行了遥感解

译,取得了以下结论。

(1)在系统分析工作区各类要素影像特征的基础上,结合以往工作经验,较好地总结了该区要素信息遥感解译标志,对该区断裂构造及泉点信息的解译起到了较好的指导作用。

(2)选取GF-2、Landsat-7及DEM数据作为本次工作的解译底图,在数据处理的基础上,对区内的地貌类型、断裂构造等信息进行了详细地解译,尤其针对第四系地层中的隐伏构造,项目组选取空间分辨率30 m的DEM数据,利用总结的隐伏构造遥感解译标志进行详细辨别,较好地完成了工作区隐伏构造的解译工作。

(3)利用Landsat-7数据进行工作区水文地质遥感解译,明确了泉点及地下水泄出带的分布位置,在此基础上,利用GF-2数据进行重点工作区水文地质遥感精细解译,明确了重点工作区河流、水库/坑塘及泉点的分布情况。

(4)基于Landsat-8数据进行工作区地表温度反演,圈定了4处地温异常区,为地热靶区圈定提供了条件。

(5)根据地热靶区圈定原则,利用遥感技术提取的断裂构造、泉点、地下水泄出带及地表温度信息,结合区内地热地质相关资料,共圈定3处地热靶区,为地热资源调查工作提供基础。

参考文献

[1] 郝明,高彦彦,王青,等. 证据理论融合多视角遥感信息的地热异常探测[J]. 地球科学,2024,49(1):347-358.

[2] 蔺文静,刘志明,王婉丽,等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质,2013,40(1):312-321.

[3] 李悦,关锌. 我国地热资源开发利用优势对比分析[J]. 水文地质工程地质,2011,38(6):139-141.

[4] 周福宝,邓进昌,史波波,等. 煤田火区热能开发与生态利用研究进展[J]. 中国科学基金,2021,35(6):871-877.

[5] 唐海,张代磊,周文纳. 广东阳江盆地遥感数据地温反演及地热异常靶区圈定[J]. 地质论评,2022,68(6):2396-2404.

[6] 关锌. 借鉴国外经验,促进我国地热产业政策发展[J]. 水文地质工程地质,2011,38(2):139-143.

[7] 刘育平. 地热资源的低碳排放效益分析[J]. 水文地质工程地质,2013,40(6):134-138.

[8] 王转转,欧成华,王红印,等. 国内地热资源类型特征及其开发利用进展[J]. 水利水电技术,2019,50(6):187-195.

[9] 蔺文静,王贵玲,邵景力,等. 我国干热岩资源分布及勘探:进展与启示[J]. 地质学报,2021,95(5):1366-1381.

[10] 张宇轩,唐金荣,牛亚卓,等. 中国西北在碳中和进程中的资源优势和地质工作建议[J]. 中国地质,2022,49(5):1458-1480.

[11] 丁亮,赵彦涛. 浅析地热资源勘探开发与环境保护措施[J]. 低碳世界,2023,13(8):55-57.

[12] 陈艳,袁晶,唐春花,等. 武功山隆起区地热资源预测遥感方法研究[J/OL]. 自然资源遥感,1-13[2024-03-06]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/10. 1759. P. 20231225. 1528. 012. html.

[13] 顾新鲁,刘涛,陈锋,等. 新疆地热资源成因类型及控热模式分析[J]. 新疆地质,2015,33(2):275-278.

Application of Remote Sensing Technology in the Investigation of Geothermal Resources in Southern Shuanghe City of Xinjiang

QI Zhilong[1], HU Dongqiang[2], LU Jianguo[1], XI Ying[1]

(1. The First Hydrogeological Brigade of Xinjiang Geological Bureau, Urumqi 830000, China;
2. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830000, China)

Abstract: Xinjiang has a vast territory, accounting for about one-sixth of China's total land area. It is rich in geothermal resources and urgently needs to carry out geothermal resources exploration. In this paper, the latest GF-2 and Landsat-8 satellite data were used to interpret the 1∶50 000 hydrogeological remote sensing in the southern area of Shuanghe City, focusing on the interpretation of the distribution of landforms, geological structures, springs and discharge zones in the area. The Landsat-8 satellite data was used to invert the surface temperature and delineate the geothermal anomaly points. Combined with field verification, the dynamic comparative analysis of various geological and geothermal information was carried out, and the geothermal geological evolution and trend changes in the working area are discussed. The spatial distribution characteristics and interrelations of geothermal geological elements had delineated effective geothermal target areas and provided a basis for later geothermal exploration in the area. It provides a reference for Xinjiang to carry out geothermal exploration to find effective technical methods.

Keywords: Xinjiang; remote sensing; geothermal