https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.305

基于无人机热红外的山区地热资源靶区圈定

李冰川[1],唐广龙[2],赵恒谦[2*],谢 吾[1],陶右鹏[2*],韩梦云[2],徐一鸣[3],胡 浩[1],吴 扬[1]

1. 河北省地质矿产勘查开发局第八地质大队,河北省海洋地质资源调查中心,河北秦皇岛 066000
2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083
3. 河北宝地建设工程有限公司,河北秦皇岛 066000

摘 要: 针对卫星热红外遥感在地热探测中存在空间分辨率低、易受太阳辐射影响等问题.研究依托DJI Mavic 3T无人机平台,获取研究区高分辨率真彩色与热红外影像.并基于DJI Thermal SDK建立自动化地表温度反演流程,得到无人机地表温度结果.通过现场温度实测数据验证,无人机温度结果与实测点位温度变化趋势具有良好一致性;将无人机热红外影像重采样至30 m后,与Landsat-8 TIRS温度反演结果在空间分布上有较强的一致性.基于提出的"十字型"与"一字型"地热靶区圈定模式,结合研究区构造格局与热异常分布规律,共识别出6处潜在地热靶区,并综合米地温实测数据与既有地质资料对其地热成因进行了分析.研究表明,无人机热红外技术能够在复杂山地环境中实现高精度地热异常识别,为小尺度地热靶区圈定、资源潜力评价提供重要技术支撑.未来需引入多深度米地温数据与浅层热扩散模型,以增强热异常与深部热源之间的定量联系.

关键词: 无人机热红外;地热异常;地表温度反演;地热靶区圈定;环境地质.

中图分类号: TP79 **文章编号:** 1000-2383(2026)06-2433-12 **收稿日期:** 2025-09-27

UAV Thermal Infrared Geothermal Target Area Delineation for Shallow Geothermal Resources

Li Bingchuan[1], Tang Guanglong[2], Zhao Hengqian[2*], Xie Wu[1], Tao Youpeng[2*], Han Mengyun[2], Xu Yiming[3], Hu Hao[1], Wu Yang[1]

1. *Eighth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Hebei Center of Marine Geological Resources Survey, Qinhuangdao* 066000, *China*
2. *School of Earth Science and Surveying and Mapping Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing* 100083, *China*
3. *Hebei Baodi Construction Engineering Co., Ltd., Qinhuangdao* 066000, *China*

Abstract: In view of the low spatial resolution and strong susceptibility to solar radiation effects of satellite-based thermal infrared remote sensing in geothermal exploration, this study employs a DJI Mavic 3T unmanned aerial vehicle to acquire high-resolution true-color and thermal infrared imagery over the study area. An automated land surface temperature retrieval workflow was developed based on the DJI Thermal SDK to obtain UAV-derived surface temperature data. Validation using in situ temperature

基金项目: 河北省地矿局地质科技项目(No.4540601YBNYNA6);中国矿业大学(北京)中央高校基本科研业务费专项资金项目(No.2025JCCXDC01).

作者简介: 李冰川(1990-),男,工程师,主要从事水文地质、矿产地质勘查工作. ORCID:0009-0007-6365-6786. E-mail:1031425014@qq.com
* **通讯作者:** 赵恒谦,E-mail:zhaohq@cumtb.edu.cn; 陶右鹏,E-mail:17796746816@163.com

引用格式: 李冰川,唐广龙,赵恒谦,谢吾,陶右鹏,韩梦云,徐一鸣,胡浩,吴扬,2026.基于无人机热红外的山区地热资源靶区圈定.地球科学,51(6):2433-2444.

Citation: Li Bingchuan, Tang Guanglong, Zhao Hengqian, Xie Wu, Tao Youpeng, Han Mengyun, Xu Yiming, Hu Hao, Wu Yang, 2026. UAV Thermal Infrared Geothermal Target Area Delineation for Shallow Geothermal Resources. *Earth Science*, 51(6): 2433-2444.

measurements demonstrates that the UAV-retrieved temperatures exhibit a high degree of consistency with the observed temperature variation trends at ground sampling points. After resampling the UAV thermal infrared imagery to 30 m, the retrieved temperatures show strong spatial agreement with those derived from Landsat-8 TIRS data. Based on the proposed "cross-shaped" and "linear" geothermal target delineation patterns, six potential geothermal targets were identified by integrating the regional structural framework with the spatial distribution characteristics of thermal anomalies. Furthermore, the geothermal genesis of the delineated targets was analyzed through the combined use of measured shallow ground temperature data and existing geological information. The results indicate that UAV-based thermal infrared technology enables high-precision identification of geothermal anomalies in complex mountainous terrains, providing effective technical support for small-scale geothermal target delineation and resource potential assessment. Future work should incorporate multi-depth ground temperature measurements and shallow heat diffusion models to strengthen the quantitative linkage between surface thermal anomalies and deep geothermal heat sources.

Key words: UAV thermal infrared; geothermal anomaly; surface temperature inversion; geothermal target delineation; environment geology.

在化石燃料资源逐渐耗竭及全球能源转型加速推进的背景下,可再生能源在全球能源体系中的地位日益显著(Avtar *et al.*,2019;Zhao *et al.*,2024).地热能、太阳能、风能、潮汐能及水力发电等绿色新能源,作为全球能源结构转型的关键要素,其占比稳步提升,激发了广泛的学术研究与实际应用探索(Ng′ethe and Jalilinasrabady, 2023; Rohit *et al.*, 2023;Wang *et al.*,2024).地热能是地球内部蕴藏的热能,属于清洁且可再生的能源类型,具有热能供应稳定、成本低廉、效率高等优势(王康,2020;江晓雪和朱传庆,2025;雷云开等,2025).相较于风能和太阳能,地热能的开发利用更高效且全面,且不受昼夜、气候及季节变化的限制(Li *et al.*,2015;屈泽伟等,2024).我国自20世纪70至20世纪80年代开始地热开发利用,近年来地热资源的战略地位愈加凸显.2024年7月发布的《中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》中明确提出因地制宜开发生物质能、地热能及海洋能等新能源(中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见,2024.https://www.gov.cn/zhengce/202408/content_6967663.htm).

尽管如此,地热能开发仍面临地下热源探测困难这一主要瓶颈(Romaguera *et al.*,2018).目前,地热探测主要采用传统的地球物理方法,但该方法劳动强度大且探测周期较长(Ciriaco *et al.*,2020).因此,亟需高效技术来识别地热异常区.遥感技术作为地热勘探的重要工具,可以快速、直接地获取地热异常信息(Liu *et al.*, 2023).例如,Zaini *et al.*(2022)利用长时序Landsat 8数据提取地表热异常温度,对Peut Sagoe火山进行了地热勘测分析.Li *et al.*(2023)通过GEE计算青藏当雄—羊八井盆地多时相地表温度,采用地形校正、海拔校正及多时相序列对比提取热异常信号.同年,Xu *et al.*(2023)基于遥感解译资料与地热勘探数据,利用层次分析法划分了杭嘉湖平原地热潜力区.Chao *et al.*(2024)通过融合冬季长时序Landsat 8地表温度与ASTER夜间产品的昼夜信息,圈定了云南瑞丽区域的地热异常区.

近年来,无人机与热红外相机的结合为地热探测提供了新的路径.无人机以其低成本、高灵活性、自动避障功能及获取高分辨率热红外影像的能力,成为地热探测的有力工具(Molchanov *et al.*,2014).与卫星数据相比,无人机在时间和空间覆盖上更具优势,特别适用于小范围高精度探测任务(高彦彦,2022).例如,Ramírez-González *et al.*(2019)在Seltun区域利用无人机热红外传感器拍摄热红外图像,并与地面测量结果对比,评估了无人机热红外数据的准确性,分析了地热区的表面温度分布特征.Silvestri *et al.*(2020)利用无人机热红外技术探测意大利比安坎纳地热区的地表温度.徐凯磊等(2022)通过无人机获取煤田火区的真彩色与热红外影像,实现了火区的圈定与识别.尽管卫星热红外数据能够提供地热分布及变化的大致范围,但其局限性在于无法精准定位地热点.对于小型且温度较低的地热区域,高分辨率的无人机热红外成像技术是一种更为适宜的选择(Yin *et al.*,2025).

本研究利用无人机搭载可见光与热红外相机获取娄杖子镇四家村的可见光与热红外数据,计算地表温度,结合已有地质构造数据圈定地热靶区,探讨地热区的形成机理.研究旨在为基于无人机技术的地热精细探测提供新思路和方法.

1　研究区与数据源

1.1　研究区概况

娄杖子镇四家研究区位于河北省秦皇岛市青龙满族自治县西北部,区内出露地层主要为太古界王厂片麻岩、小关庄片麻岩、中元古界蓟县系沉积地层及新生界第四系全新统地层.

研究区内岩浆活动强烈,以中生代侵位为主,经过长期地质变迁,形成了如今的肖营子岩体.该岩体位于研究区东南部肖营子一带,呈不规则状或近等轴状,面积约 350 km^2,岩体侵入于太古宇变质岩系和中元古界高于庄组地层中,为一规模较大的复式岩体.

区内断裂构造发育,以北西向及北东向断裂构造为主.本区断裂为区域性断裂——青龙－大屯右行走滑断裂系统的次级断裂,该断裂系统切割深度大,影响范围广,多属壳级断裂,沟通了深部热源.北东向断裂构造多被后期岩脉所充填,为本区主要的导热构造.北西向断裂构造多为张性、张扭性断裂,断裂规模较大,导水、富水性强,为深部地下热水向上迁移至浅部提供了良好通道和存储空间.本区的控热构造为北东向及北西向断裂,深部地热流体通过北西向断裂与北东向断裂交汇部位形成的通道上涌至地壳浅层并富集,形成娄杖子镇四家村地热田.

1.2　数据源概况

1.2.1　研究区 RGB 图像　为提升研究区地热靶区划定的精度,2024 年 4 月 3 日 10:00 至 13:00 期间,利用 DJI Mavic 3T 无人机的可见光相机获取了 RGB 影像.飞行任务实施前,已预先规划合理航线并设置相关参数(表 1),以确保影像重叠率不低于 75%.受拍摄时段光照差异及镜头光学特性的影响,原始影像呈现色调不均,包括不同时间段的亮度差异以及由画幅中心向边缘逐渐增强的亮度衰减.为此,首先对影像进行亮度校正与均衡化处理,以保证整体亮度一致,随后开展拼接处理.无人机航空影像正射化的数据处理方法已较为成熟,其基本流程如图 1 所示.在飞行过程中,无人机交替获取可见光与热红外影像.基于 Python 脚本将两类数据加以分离,并分别存放于独立文件夹,再通过 PIX4D 软件分别拼接生成正射影像(图 2).

1.2.2　热红外数据　采用 DJI Mavic 3T 自带的热红外传感器获取研究区的热红外影像,大疆 Mavic 3T 无人机以其紧凑便携的设计、长达 45 min 的有效作业续航及扩展的作业半径脱颖而出.此机型标志

表 1　2024 年 4 月 3 日无人机飞行参数设置

Table 1　Drone flight parameter settings on April 3, 2024

飞行设置	起飞高度 (m)	航线高度 (m)	航向重叠度 (%)	旁向重叠度 (%)
参数	110	110	85	75

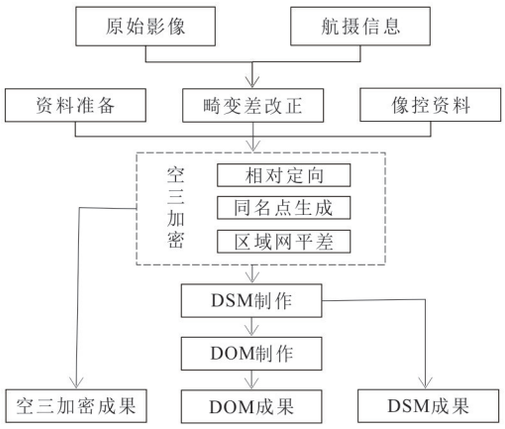


图 1　无人机数据处理流程

Fig.1　Flow unmanned aerial vehicle (UAV) data processing flow

图 2　研究区 RGB 影像

Fig. 2　RGB image of the study area

表2 无人机热红外相机参数

Table 2 Parameters of the thermal and infrared camera on the drone

性能参数	具体参数值
无人机型号	DJI Mavic 3T
热成像传感器类型	非制冷氧化钒(VOx)
分辨率	640 × 512
镜头	DFOV:61° 等效焦距:40 mm 光圈:f/1.0 对焦距离:5 m至无穷远
像素大小	12 μm
波长范围	8~14 μm
测温方式	点测温、区域测温
测温精度	±2 ℃ 或 ±2%,取较大值
测温范围	−20 ℃ 至 150 ℃(高增益模式) 0 ℃ 至 500 ℃(低增益模式)
照片拍摄模式	单张拍摄:640×512 定时拍摄:640×512 JPEG:2/3/5/7/10/15/20/30/60 s
照片格式	JPEG(8位) R-JPEG(16位)

表3 2024年4月3日凌晨无人机热红外飞行参数设置

Table 3 UAV thermal infrared flight parameter settings for the early morning of April 3, 2024

飞行设置	起飞高度(m)	航线高度(m)	航向重叠度(%)	旁向重叠度(%)
参数	110	110	80	70

表4 2024年4月3日白天无人机热红外飞行参数设置

Table 4 Daytime UAV thermal infrared flight parameter settings for April 3, 2024

飞行设置	起飞高度(m)	航线高度(m)	航向重叠度(%)	旁向重叠度(%)
参数	110	110	85	75

着大疆首次在小型行业无人机上集成了长焦、广角以及热成像相机,实现了技术上的高度融合.Mavic 3T所配备的热成像相机(表2)在出厂时已经由大疆官方进行了辐射定标,该相机拥有640×512的高分辨率,这一性能与大疆的高端产品如经纬M30T、禅思H20系列相媲美.其旗舰级的红外感知能力,即便在夜间执行侦察任务时,也能凭借异常温度点的快速识别,精准锁定目标.尤为值得一提的是,Mavic 3T的热成像相机与可见光相机能够协同工作,实现28倍乃至连续变焦功能,这一特性极大地促进了高效比对与目标准确性的确认.结合其卓越的影像处理能力、快速的部署速度以及持久的续航能力,Mavic 3T在诸如城区安全巡逻、野外搜救行动、夜间作业以及消防救援等多种安防应用场景中,均展现出了非凡的实用价值与效能.

在2024年4月3日获取的无人机夜晚热红外数据航拍时间选择在黎明以前(地方时2:00—5:00),尽量避开太阳直射的时段,降低太阳辐射对地面局部温度的影响,减小累计误差,同时要求风力在4级以下,以便安全作业,无人机飞行参数设置如表3.

在2024年4月3日获取的无人机白天热红外数据,航拍时间选择在上午10:00—13:00,目的获取白天的研究区地表温度情况,无人机飞行参数设置如表4.

由于没有同天的Landsat8热红外数据,因此选取2024年4月1日的Landsat 8影像用于娄杖子研究区的地表温度反演,并与无人机地表温度反演结果进行对比验证.

2 研究方法

2.1 无人机热红外地表温度反演

本研究基于DJI Mavic 3T无人机平台获取研究区热红外影像,并调用DJI Thermal SDK构建自动化地表温度反演流程.无人机获取的热红外R-JPEG影像中嵌入了用于温度反演的原始热辐射数据(raw thermal image)以及影像采集时的位置信息、姿态参数等成像元数据.热成像传感器的非均匀性校正、响应特性、镜头透射率及波段修正等辐射定标参数由相机固件内部维护,并不以标准EXIF或XMP字段形式明文存储于影像文件中,需通过DJI Thermal SDK对嵌入的二进制热数据进行解析并完成温度反演.

在温度反演过程中,DJI Thermal SDK结合相机固件内置辐射定标信息及用户设定的参数,基于其内置热辐射换算模型将原始热辐射数据转换为地表温度结果.本文将地表发射率设为0.95,反射背景温度设为25 ℃,环境相对湿度设为50%,传感器至目标的距离根据无人机飞行高度进行设置.通过上述设置,能够避免人工解析与重复标定可能引入的不确定性,且反演得到的地表温度结果与DJI官方Thermal Analysis Tool所输出的温度结果保持一致.

温度反演完成后,利用Pix4D Mapper软件对单

幅热红外影像进行几何校正与拼接，生成连续的热红外正射影像．鉴于无人机作业高度较低，大气吸收和背景辐射对测温结果的影响较小，本文未引入独立的大气传输模型进行额外校正（Silvestri *et al.*，2020）．上述流程能够稳定获取高空间分辨率的地表温度场，为后续地热异常识别提供可靠数据基础．

2.2　卫星影像地表温度反演

普适性单通道算法，即 single-channel method（JMS）算法，在后续研究中得到了优化（李胜林等，2023）．本文采用的是这一优化后的算法，旨在利用 Landsat8 的 TIR10 波段来估算地表温度 T_s．该算法可表述为：

$$T_s=\gamma\left[\varepsilon^{-1}\left(\psi_1 L+\psi_2\right)+\psi_3\right]+\delta\ , \tag{1}$$

式（1）中：L 为辐射值，由 Landsat 8 第 10 波段经过辐射定标得到；ε 为比辐射率，γ，δ 的计算公式如下：

$$\gamma=\frac{T_b^2}{b_\gamma L},\delta=T_b-\frac{T_b^2}{b_\gamma}\ , \tag{2}$$

式（2）中：T_b 为 Landsat 8 第 10 波段的亮度温度；对于第 10 波段，b_γ 为 1 324 K；ψ_1，ψ_2，ψ_3 通过大气水汽含量计算而来，公式如下：

$$\begin{aligned}\psi_1&=0.040\,19\omega^2+0.029\,16\omega+1.015\,23\ ,\\ \psi_2&=-0.383\,33\omega^2-1.502\,94\omega+0.203\,24\ ,\\ \psi_3&=0.009\,18\omega^2+1.360\,72\omega-0.275\,14\ .\end{aligned} \tag{3}$$

3　结果与分析

3.1　无人机地表温度结果与验证

无人机地表温度反演结果如下所示．

凌晨温度最高为 60.35 ℃，最低温度为 −35.06 ℃，在图 3 中可以明显看出河流与道路温度较建筑与裸地温度高（图 3）．4 月 3 日白天温度最高为 52.51 ℃，最低温度为 −11.87 ℃，从图 4 中可以看出地表温度高的区域多集中于裸地，裸地由于土壤的热传导性较差，热量在表层积累后容易通过热传导的方式向下传递，使得整个土层都能吸收并储存热量．水体的比热容远大于土壤，这意味着水体需要吸收更多的热量才能升高相同的温度．因此，在春季白天，当太阳辐射能量照射到水体和裸地上时，水体由于其较大的比热容，升温速度会相对较慢．

4 月 3 日凌晨使用 MITIR 测温计 TP688 进行地面测温．测温点位如图 5 所示，尽量选择均匀分布的点位，既包含已知地热井，又包含裸地背景温度值．

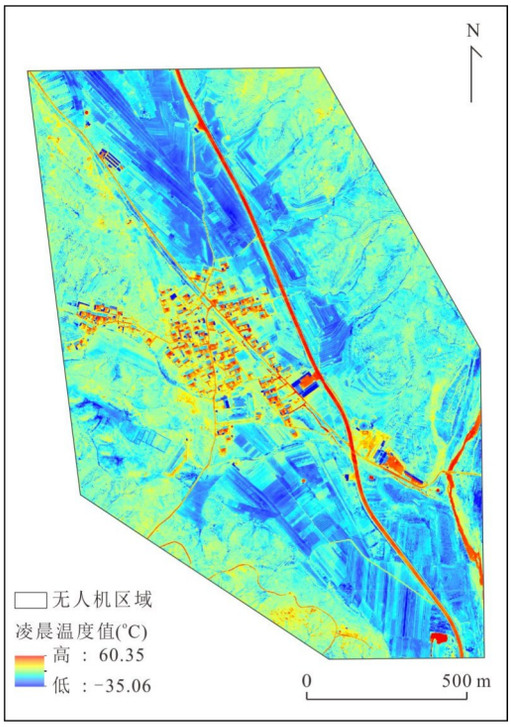


图 3　2024 年 4 月 3 日凌晨温度结果

Fig.3　Temperature results in the early morning of April 3, 2024

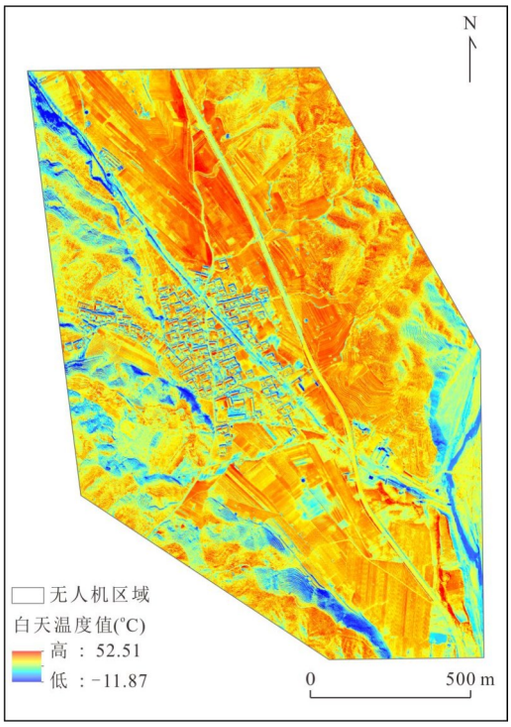


图 4　2024 年 4 月 3 日白天温度结果

Fig.4　Daytime temperature results for April 3, 2024

由图 6 中的温度变化曲线可见，各测点的温度

图 5　验证点采集具体点位

Fig. 5　Specific locations of verification point collection

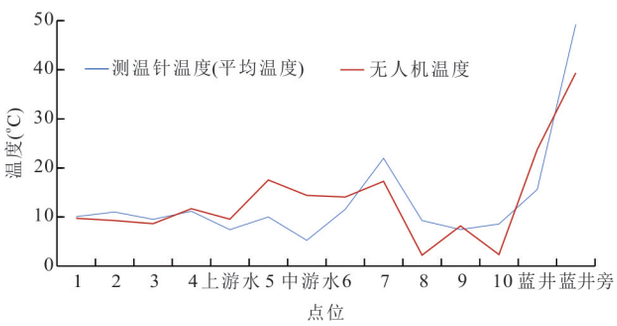


图 6　2024 年 4 月 3 日凌晨实地测温与无人机温度对比

Fig. 6　Comparison of field temperatures and drone temperatures in the early morning of April 3, 2024

变化趋势整体一致，且大多数测点处无人机反演温度与实测温度具有较好的一致性．仅在上游水、5 号点及中游水等少数测点处，两者之间存在一定差异．需要指出的是，无人机热红外影像获取的是地表或水体表层的辐射温度信息，而现场实测数据反映的是点位尺度下的水体或近地表环境温度，二者在观测对象与空间尺度上并不完全一致．在凌晨低温条件下，该差异在部分水体相关测点处表现得相对明显，但并不影响无人机热红外数据对区域相对温度变化特征及地热异常空间分布的整体刻画能力．

从图 7 温度变化曲线可知，相比于白天温度，凌晨实测温度与无人机反演温度的拟合程度更高．其中，6 号、8 号和蓝井旁测点的温度变化趋势与整体规律存在一定差异，而其余测点的无人机反演温度变化趋势与实测温度较为一致．但是白天无人机温度中 7 号点为已知地热井点，高于背景温度 3 号点 17.23 ℃，凌晨无人机所测 7 号点温度值高于背景温度 3 号点 8.62 ℃，且蓝井旁点位为居民开采用井流经河流，实地勘查温度较高，白天的地表温度结果

表 5　2024 年 4 月 3 日凌晨实测温度与无人机温度对比

Table 5　Comparison between field-measured temperature and UAV-derived temperature on the early morning of April 3, 2024

点位	测温针温度(℃)	无人机温度(℃)
1	10.07	9.74
2	11.00	9.27
3	9.50	8.64
4	11.17	11.66
上游水	7.40	9.54
5	10.00	17.52
中游水	5.23	14.40
6	11.57	14.06
7	21.95	17.26
8	9.27	2.24
9	7.43	8.17
10	8.57	2.34
蓝井	15.60	23.77
蓝井旁	49.20	39.35

表 6　2024 年 4 月 3 日白天实测温度与无人机温度对比

Table 6　Comparison between field-measured temperature and UAV-derived temperature during daytime on April 3, 2024

点位	测温针温度(℃)	无人机温度(℃)
1	22.13	29.26
2	28.60	30.94
3	28.50	18.47
4	29.83	27.30
上游水	12.27	23.32
5	27.33	26.84
中游水	10.73	22.37
6	26.77	20.91
7	42.94	35.70
8	32.63	37.85
9	22.97	25.31
10	31.23	34.05
蓝井	30.90	33.13
蓝井旁	49.63	31.00

中并不明显,所以对于地热靶区的圈定凌晨的无人机地表温度结果更有利.

为进一步验证无人机反演结果,采用Landsat 8影像进行对比分析.由于Landsat 8地表温度产品的空间分辨率为30 m,而无人机热红外影像的分辨率为15 cm,两者存在近200倍的差异.为保证尺度一致性,将无人机覆盖的约2 km²区域划分为30 m格网,并在每个格网内计算无人机反演温度的均值,以便与Landsat 8结果进行对比.

由图8可见,娄杖子镇四家村的Landsat影像地表温度反演结果与无人机白天地表温度均值结果在空间分布上具有较好一致性,高温区主要分布在四家村的北部和南部,低温区则集中于村庄内部.

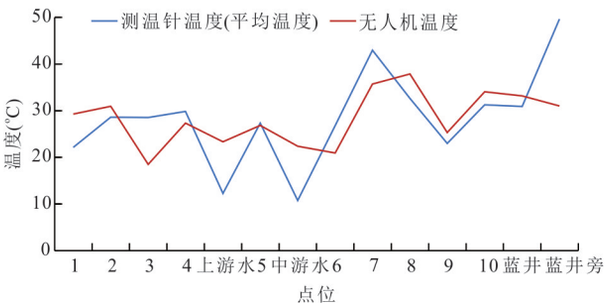


图7　2024年4月3日白天实地测温与无人机温度对比

Fig. 7　Comparison between field-measured temperature and UAV-derived temperature during daytime on April 3, 2024

ZK1井对应于图5中的测温点7,以该点为例,2024年4月3日凌晨无人机测得温度为17.26 ℃,而实测温度为21.95 ℃,两者相差5 ℃.其中,实测数据由测温针在土壤表面下5 cm处获取,在凌晨低温条件下,该深度与地表温度存在差异,从而导致偏差.将无人机数据进行30 m重采样后提取ZK1处温度为26.58 ℃,与实测值相差约16 ℃.推测ZK1点为地热井位置,其浅层土壤温度与地表温度差异显著;同时,测温针存在一定误差,其测得结果与地表真实温度有略微偏差.此外,Landsat 8的反演结果为单个像元值(30 m × 30 m),该像元包含ZK1点周边多种地物类型的平均信息,亦非单点真实值,因此也会产生一定偏差.

3.2　地热靶区圈定

3.2.1　地体方面地热靶区圈定模式　以ZK1点为例,开展了"十"字形测温布设(图9).结果显示,夜间中心点温度最高,凌晨时其温度为21.95 ℃.在该时段,温度自中心向外逐渐降低,中心点比周边高

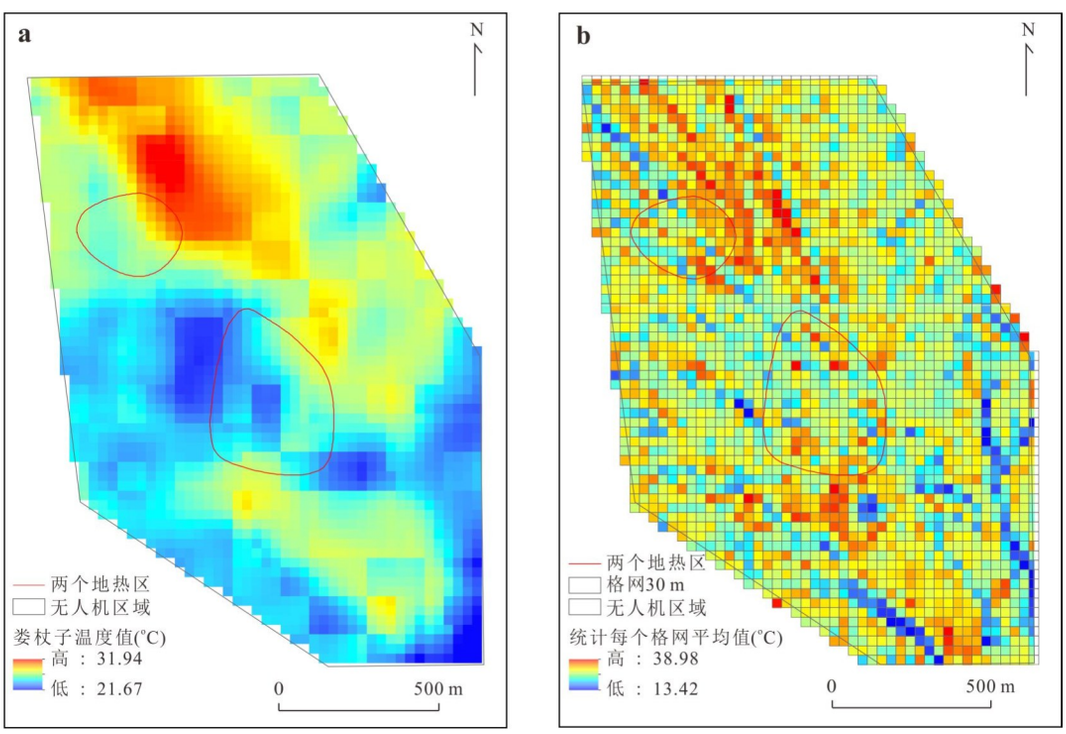


图8　无人机地表温度与Landsat 8地表温度对比

Fig.8　Comparison between UAV land surface temperature and Landsat 8 land surface temperature

a. 2024-04-01 Landsat 8地表温度结果; b. 2024-04-03无人机30 m取均值结果

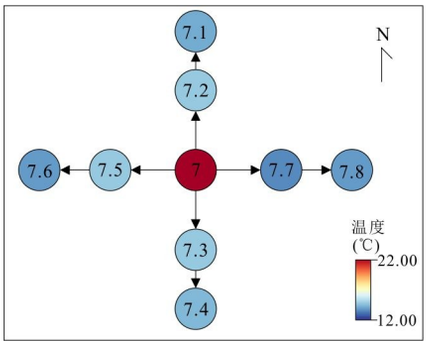


图9　地体方面找地热靶区模式

Fig. 9　Model for locating geothermal target areas in terms of geology

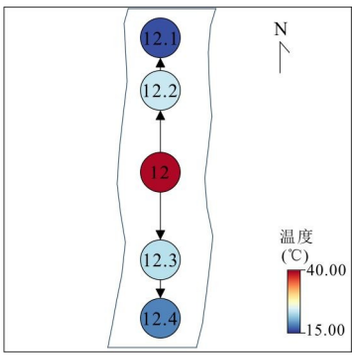


图10　水体方面找地热靶区模式

Fig.10　Model for locating geothermal target areas in terms of water bodies

约7 ℃(表7),这一分布特征与无人机反演结果一致.因此,可利用"中心温度高、外围温度低"的空间格局来识别潜在地体方面的地热靶区.

3.2.2　水体方面地热靶区圈定模式　在图5中,蓝井旁点位位于居民私自开采的地热井(蓝井)桥下,是居民生活用水的排出口,夜间实测时可见水体表面有热气冒出.将该点位命名为12号点,其测温方式如图10所示.实测结果显示,蓝井旁点位凌晨温度为49.2 ℃.以该点为中心,在南北方向布设"一"字形测温带,并结合无人机反演结果进行分析,结果见表8.可以表8看出,夜间温度沿南北方向呈现"低—低—高—低—低"的分布特征.结合实地调查,该特征与蓝井旁点位热水外排的实际情况一致.因此,可通过识别类似"低—低—高—低—低"的温度异常格局,圈定潜在水体型地热靶区.

3.2.3　无人机精细地热圈定　如图11中所示,娄杖子地热田有一条北西向断裂,热水主要赋存于太古界王厂片麻岩构造裂隙中,再结合无人机热红外数据提取的热异常信息,共圈定六处靶区,其中1号靶区为ZK1地热井,2号靶区为ZK2井,4、5号靶区在水体中圈定,3号靶区通过分析所处构造位置与本身热异常信息分析圈定.

表7　以7号点为中心的"十"字测温

Table 7　"Cross" temperature measurement centered on Point 7

点位	凌晨夜间温度(℃)
7	21.95
7.1	13.0
7.2	13.5
7.3	13.5
7.4	13.2
7.5	13.5
7.6	12.8
7.7	12.6
7.8	12.8

表8　以蓝井旁点为中心的"一"字无人机温度

Table 8　Drone temperature of the "one" shape centered on the point beside the blue well

点位	夜间温度(℃)
12.1	15.27
12.2	20.73
12	39.35
12.3	20.08
12.4	16.31

4号靶区位于图5蓝井正上方,中间存在热异常,且在无人机地表温度结果中出现明显地表径流热源(图12).如表9所示,通过"一"字水体找热模式对4号靶区位置测温,中间温度为27.01 ℃,上下两边的温度均低于12 ℃,符合水体找热模式.

5号靶区位于图11中四号靶区上方,中间同样存在热异常,且在无人机地表温度结果中出现明显地表径流热源(图13).通过对5号靶区的无人机"一"字形测温得到表10,中心温度最高为26.87 ℃,出现"低—低—高—低—低"趋势.

圈定的3号靶区位于河流旁边实际上是实际勘查中的蓝井,在无人机地表温度结果中呈现明显热异常.6号靶区位于娄杖子村的南部,是一处大口井,在无人机所测温度结果中同样呈现出热异常,为一处潜在地热靶区.对于这几个靶区实际上是否真的存在地热需要进一步实际地验证,例如测水温与地温、绘制水温随深度变化曲线与地温梯度随深度变化曲线、测水化学类型、pH值等进一步进行确定(图14).

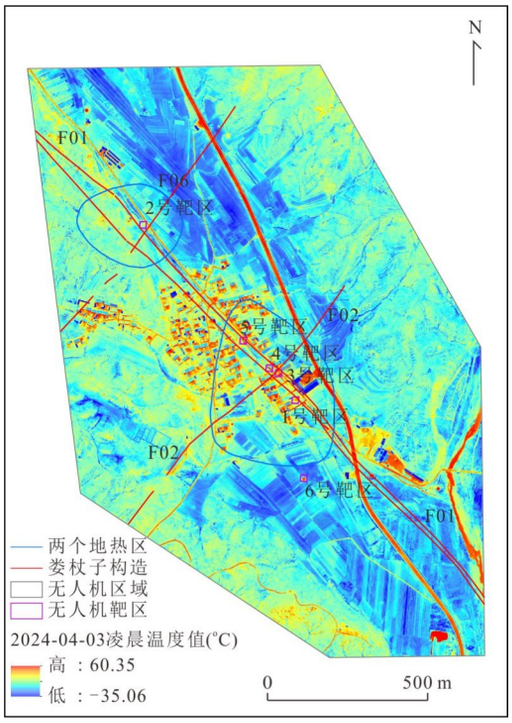


图 11　无人机精细靶区圈定

Fig.11　Delineation of fine target area by UAV

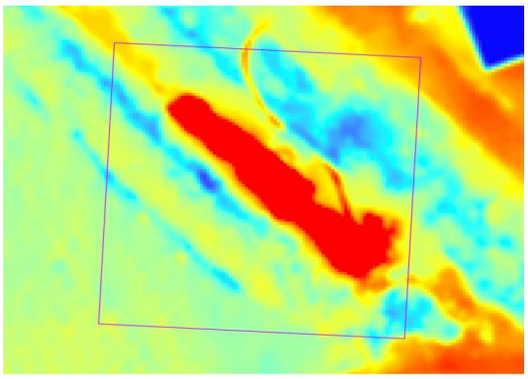


图 12　无人机局部 4 号靶区情况

Fig.12　Local situation of target area of UAV No.4

3.3　地热机理解释

已获取米地温数据,实际采集点位位置如下图所示,通过 3 条线 L1、L2、L3 进行采集,孔深在 0.95～1.00 m,记录当时实际气温与孔温.

将米地温的点位与无人机夜间的地表温度结果叠加,提取点位所在点的温度值,并根据不同点位的空间位置与断裂构造的关系进行地热分析.

总体看米地温结果与无人机温度结果(图 15 和图 16),呈现出的规律为在断裂构造交点处温度较高,而在布控线的两端温度低,L1 与 L3 线的米地温数据均呈现此规律,而 L2 线在断裂东方向呈现温度

表 9　4 号靶区的"一"字无人机温度

Table 9　Drone temperature of the "One" shape in target area No. 4

点位	凌晨温度(℃)
4 号-1	5.13
4 号-2	11.42
4 号	27.01
4 号-3	11.10
4 号-4	7.14

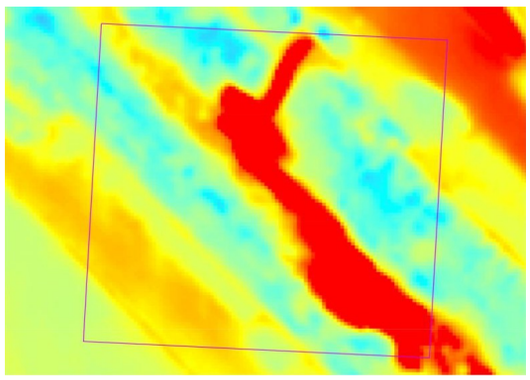


图 13　无人机局部 5 号靶区情况

Fig.13　Local situation of target area of UAV No.5

表 10　5 号靶区的"一"字无人机温度

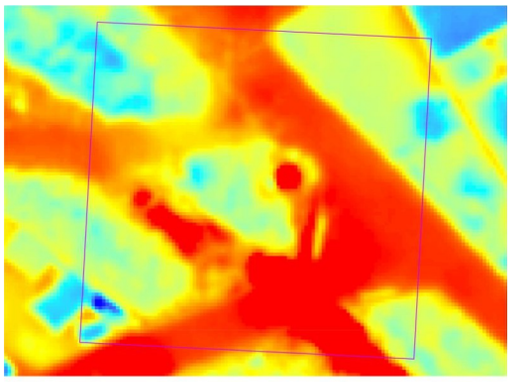
Table 10　Temperature of the "One" shape drone in target area No. 5

点位	凌晨温度(℃)
5 号-1	7.54
5 号-2	10.26
5 号	26.87
5 号-3	12.97
5 号-4	7.31

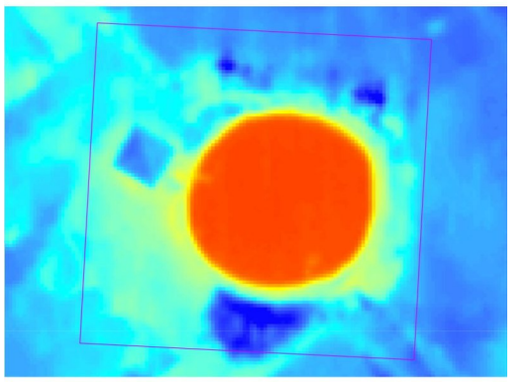
高.在 L1 线的米地温数据中 L1-0901 位于 ZK01 地热井附近,孔温为 36.3 ℃,两侧的 L1-01 与 L1-14 平均温度为 21.5,L1-0901 温度高于两侧约 14.8 ℃. L1-0901 处的无人机夜间温度 10.05 ℃,两侧的 L1-01 与 L1-14 平均温度为 8.94 ℃,L1-0901 温度高于两侧 1 ℃左右.

在 L3 线的米地温数据中 L3-05 位于 ZK02 地热井附近,孔温为 20.8 ℃,两侧的 L3-01 与 L3-09 平均温度为 19.15 ℃,L1-0901 温度高于两侧约 1.65 ℃. L3-05 处的无人机夜间温度 11.74 ℃,两侧的 L3-01 温度为 12.28 ℃, L3-09 温度为 3.47 ℃,L3-05 温度高于 L3-09 温度 8.27 ℃.

由于断裂构造上涌通道的偏移,致使 L2-10 处



a



b

图14　无人机局部3、6号靶区情况

Fig. 14　Local situation of target areas of UAV No. 3 and No. 6

a.3号靶区情况；b.6号靶区情况

图15　米地温采集点位

Fig.15　Collection points of 1-meter soil temperature

地下温度高，而上涌到L1-09处在浅地表显示出地表热异常．而孔深1 m处的温度与地表面的温度存在差别，推测影响因素较多并不具有相关性．

4　结论

本研究基于无人机热红外影像数据，生成了研究区地表温度分布图，圈定了娄杖子镇地热靶区，并结合实测地温数据分析了地热对地表温度的影响．研究主要结论如下．

(1)无人机热红外遥感技术的有效性．本研究验证了无人机热红外遥感技术在获取高分辨率地表温度数据方面的有效性．通过结合地质构造分析与地表温度反演模型，成功圈定了娄杖子镇地热靶区．与传统卫星遥感相比，该方法突破了空间分辨率不足的限制，显著提升了地热异常探测的精度与效率．

(2)圈定结果的准确性与温度分布模式．将无人机热红外数据与实测地温结果进行交叉验证，表明圈定的地热靶区具有较高的准确性．研究发现地热靶区的地表温度分布呈现“十字形”与“一字形”两种典型模式，这为地热资源识别提供了理论依据，并为进一步的勘探和评价奠定了基础．

(3)地热异常的分布特征与技术应用前景．研究表明，地热异常区域主要受断裂构造交点的控制，并表现出显著的地表温度升高特征．无人机热红外遥感技术结合地温测量能够精细揭示地热资源的空间分布特征，为小范围地热资源勘探提供了一种经济高效的技术路径．该方法具有广泛的应用推广价值．

本研究基于无人机热红外成像开展了典型山区地热异常区的靶区圈定，并取得了较好的应用效果，但仍存在一定局限性．研究尚未对地表温度与浅层地温之间的热扩散过程进行定量描述，未来可结合更多米地温观测(包括更深井位及更高测点密度)，构建近地表温度扩散模型，进一步反演浅层热流分布，以增强无人机热异常与深部热活动的机理关联性．其次，方法以娄杖子区域作为典型示范区开展研究，尚未开展大范围研究，未来可在不同类型地热区开展跨区域对比验证，并构建多区域温度特征数据库，结合多源数据提升地热靶区圈定的稳定性与适用性．

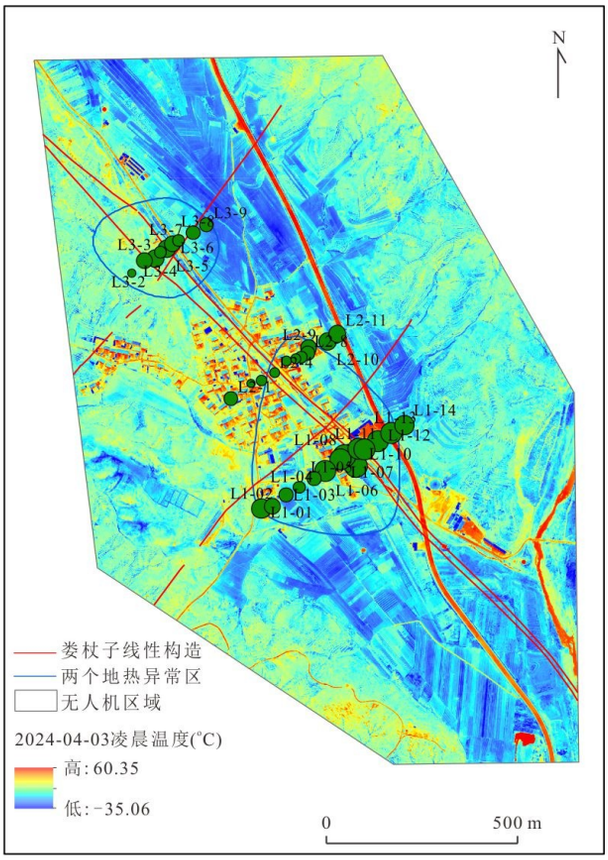


图 16　米地温总体与无人机温度空间对比

Fig. 16　Spatial comparison between overall 1-meter soil temperature and UAV temperature

References

Avtar, R., Sahu, N., Aggarwal, A. K., et al., 2019. Exploring Renewable Energy Resources Using Remote Sensing and GIS:A Review. *Resources*, 8(3): 149. https://doi.org/10.3390/resources8030149

Chao, J. Q., Zhao, Z. F., Xu, S. G., et al., 2024. Geothermal Target Detection Integrating Multi - Source and Multi-Temporal Thermal Infrared Data. *Ore Geology Reviews*, 167: 105991. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105991

Ciriaco, A. E., Zarrouk, S. J., Zakeri, G., 2020. Geothermal Resource and Reserve Assessment Methodology: Overview, Analysis and Future Directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119: 109515. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109515

Gao, Y. Y., 2022. Geothermal Exploration Based on Multi-Source Thermal Infrared Remote Sensing Technology (Dissertation).China University of Mining and Technology, Xuzhou (in Chinese with English abstract).

Jiang, X. X., Zhu, C. Q., 2025. Different Distribution of Deep and Shallow Geothermal Resources in Jizhong Depression under Complex Heat Transfer. *Earth Science*, 50(4): 1485—1498(in Chinese with English abstract).

Lei, Y. K., Wang, S., Huang, X. L., et al., 2025. Hydrochemical Characteristics and Formation-Evolution Analysis of Medium-Low Temperature Geothermal Systems with High Salinity in Coastal Western Guangdong. *Earth Science*, 50(9): 3616—3630 (in Chinese with English abstract).

Li, K. W., Bian, H. Y., Liu, C. W., et al., 2015. Comparison of Geothermal with Solar and Wind Power Generation Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: 1464—1474. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.049

Li, S. L., Liu, B., Zhao, B., et al., 2023. Landsat 8 Land Surface Temperature Product Validation and Analysis. *Chinese Space Science and Technology*, 43(2): 174—182 (in Chinese with English abstract).

Li, X., Jiang, G. Z., Tang, X. Y., et al., 2023. Detecting Geothermal Anomalies Using Multi-Temporal Thermal Infrared Remote Sensing Data in the Damxung - Yangbajain Basin, Qinghai - Xizang Plateau. *Remote Sensing*, 15(18): 4473. https://doi.org/10.3390/rs15184473

Liu, J. Y., Chao, J. Q., Zhao, Z. F., et al., 2023. Identification of Geothermal Potential Based on Land Surface Temperature Derived from Remotely Sensed Data. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(47): 104726 - 104741. https://doi.org/10.1007/s11356-023-29678-0

Molchanov, P., Harmanny, R. I. A., de Wit, J. J. M., et al., 2014. Classification of Small UAVs and Birds by Micro-Doppler Signatures. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 6(3—4): 435—444. https://doi.org/10.1017/s1759078714000282

Ng′ethe, J., Jalilinasrabady, S., 2023. GIS-Based Multi-Criteria Decision Making under Silica Saturation Index (SSI) for Selecting the Best Direct Use Scenarios for Geothermal Resources in Central and Southern Rift Valley, Kenya. *Geothermics*, 109: 102656. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102656

Qu, Z. W., Li, X., Hu, Y. Z., et al., 2024. Detection of Geothermal Resources in Litang Basin Based on Multi-Temporal Thermal Infrared Remote Sensing. *Fault - Block Oil and Gas Field*, 31(4): 652—660(in Chinese with English abstract).

Ramírez-González, L. M., Aufaristama, M., Jónsdóttir, I., et al., 2019. Remote Sensing of Surface Hydrothermal Alteration, Identification of Minerals and Thermal

Anomalies at Sveifluháls-Krýsuvík High-Temperature Geothermal Field, SW Iceland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 254: 012005. https://doi.org/10.1088/1755-1315/254/1/012005

Rohit, R. V., Vipin Raj, R., Kiplangat, D. C., et al., 2023. Tracing the Evolution and Charting the Future of Geothermal Energy Research and Development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184: 113531. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113531

Romaguera, M., Vaughan, R. G., Ettema, J., et al., 2018. Detecting Geothermal Anomalies and Evaluating LST Geothermal Component by Combining Thermal Remote Sensing Time Series and Land Surface Model Data. *Remote Sensing of Environment*, 204: 534−552. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.003

Silvestri, M., Marotta, E., Buongiorno, M. F., et al., 2020. Monitoring of Surface Temperature on Parco Delle Biancane (Italian Geothermal Area) Using Optical Satellite Data, UAV and Field Campaigns. *Remote Sensing*, 12(12): 2018. https://doi.org/10.3390/rs12122018

Wang, K., 2020. Thermal Infrared Remote Sensing Technology for Geothermal Resources Detection Based on Multi-Source & Multi-Temporal Data in Dandong, Liaoning (Dissertation). Jilin University, Changchun(in Chinese with English abstract).

Wang, S., Xu, W., Guo, T. Q., 2024. Advances in Thermal Infrared Remote Sensing Technology for Geothermal Resource Detection. *Remote Sensing*, 16(10): 1690. https://doi.org/10.3390/rs16101690

Xu, K. L., Jiang, X. G., Wan, Y. Q., et al., 2022. Thermal Infrared Remote Sensing Monitoring Technology of UAV in Coalfield Fire Area. *Coal Technology*, 41(7): 120−123 (in Chinese with English abstract).

Xu, L. X., Wu, W. Y., Qian, J. F., et al., 2023. Analysis of Geothermal Potential in Hangjiahu Area Based on Remote Sensing and Geographic Information System. *Frontiers in Earth Science*, 10: 1031665. https://doi.org/10.3389/feart.2022.1031665

Yin, H., Zhang, W., Wang, J., et al., 2025. UAV-Based Thermal Infrared Imaging Technology: A Novel Approach for Rapid Investigation of High-Steep Slopes. *Journal of Earth Science*, 36(3): 1327−1333. https://doi.org/10.1007/s12583-025-2031-2

Zaini, N., Yanis, M., Abdullah, F., et al., 2022. Exploring the Geothermal Potential of Peut Sagoe Volcano Using Landsat 8 OLI/TIRS Images. *Geothermics*, 105: 102499. https://doi. org/10.1016/j. geothermics.2022.102499

Zhao, H. Q., Wang, M. M., Wu, Y. H., et al., 2024. Fast and Nondestructive Discrimination of Coal Types Based on Spectral Feature Parameters. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 322: 124749. https://doi. org/10.1016/j.saa.2024.124749

中文参考文献

高彦彦, 2022. 基于多源热红外遥感技术的地热探测(硕士学位论文). 徐州: 中国矿业大学.

江晓雪, 朱传庆, 2025. 复杂热传递作用下冀中坳陷深、浅部地热资源差异分布. 地球科学, 50(4): 1485−1498.

雷云开, 王帅, 黄学莲, 等, 2025. 粤西沿海高盐度中低温地热系统水化学特征及形成演化. 地球科学, 50(9): 3616−3630.

李胜林, 刘波, 赵犇, 等, 2023. Landsat 8地表温度产品验证与分析. 中国空间科学技术, 43(2): 174−182.

屈泽伟, 李枭, 胡亚召, 等, 2024. 基于多时相热红外遥感的理塘盆地地热资源探测. 断块油气田, 31(4): 652−660.

王康, 2020. 基于多源多时相热红外遥感技术的丹东地热资源探测方法研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学.

徐凯磊, 江晓光, 万余庆, 等, 2022. 煤田火区无人机热红外遥感监测技术. 煤炭技术, 41(7): 120−123.