



热红外遥感技术在安徽省金寨县地热资源调查中的应用

朱 丽, 任正情

安徽省地质矿产勘查局 313 地质队, 安徽 六安 237000

摘 要: 利用热红外遥感技术进行地热异常信息的提取可以为地热资源调查提供重要的依据。在充分掌握金寨县区域地质背景的基础上, 采用 Landsat 8 热红外 TIRS10 波段数据通过大气校正法进行地表温度反演, 采用高分一号和高分二号数据进行线环构造遥感解译, 再将遥感反演的地表温度、解译的线环构造和其他地质条件、已知地热资料进行综合分析, 建立地热异常区圈定依据, 圈定地热异常区, 并结合相关判定因子剔除假异常。最终在研究区共圈定 7 个潜在地热异常区, 为下一步地热资源实地调查提供先导支持。

关键词: 热红外遥感; 地表温度反演; 大气校正法; 地热资源; 安徽省

Application of thermal infrared remote sensing technology in geothermal resource survey in Jinzhai County, Anhui Province

ZHU Li, REN Zheng-qing

No. 313 Geological Team, Anhui Bureau of Geology and Mineral Exploration, Lu'an 237000, Anhui Province, China

Abstract: The extraction of geothermal anomaly information with thermal infrared remote sensing technology can provide important basis for geothermal resource survey. Based on the regional geological background of Jinzhai County, the Landsat 8 TIRS10 band data are adopted for surface temperature inversion by atmospheric correction method, and the GF-1 and GF-2 data for remote sensing interpretation of linear and ring structures. Then, the surface temperature obtained from remote sensing inversion, interpreted linear and ring structures, and other geological conditions as well as the known geothermal data are comprehensively analyzed to delineate geothermal anomaly areas and eliminate false anomalies in combination with relevant judgment factors. Finally, a total of 7 potential geothermal anomaly areas are recognized in the study area, providing a guiding support for the next field survey of geothermal resources.

Key words: thermal infrared remote sensing; surface temperature inversion; atmospheric correction; geothermal resource; Anhui Province

0 引言

我国地热资源分布广泛, 储量丰富, 资源种类多,

包括浅层地热能资源、水热型地热资源和干热岩资源。地热资源作为一种清洁的新型能源, 具有成本低、使用

收稿日期: 2023-08-10; 修回日期: 2023-11-27. 编辑: 张哲.

基金项目: 安徽省自然资源厅、安徽省财政厅公益性地质工作项目“六安市金寨县地热资源调查评价”(2022-g-1-14).

作者简介: 朱丽(1993—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事遥感地质调查与资源环境应用工作, 通信地址 安徽省六安市金安区佛子岭中路 103 号, E-mail//1085754231@qq.com

通信作者: 任正情(1988—), 女, 高级工程师, 从事遥感和地质勘查工作, 通信地址 安徽省六安市金安区佛子岭中路 103 号, E-mail//446412806@qq.com

引用格式: 朱丽, 任正情. 热红外遥感技术在安徽省金寨县地热资源调查中的应用[J]. 地质与资源, 2025, 34(1): 70-76.

Zhu L, Ren Z Q. Application of thermal infrared remote sensing technology in geothermal resource survey in Jinzhai County, Anhui Province [J]. Geology and Resources, 2025, 34(1): 70-76.

方便和可持续利用等优点,地热资源综合利用的社会、经济和环境效益均很显著,在发展国民经济中具有越来越重要的作用^[1-2]。

热红外遥感技术可以通过传感器获得地物热红外辐射信息,通过大气校正法、单通道算法和分裂窗算法等方法可以反演地表温度信息。热红外遥感技术具有信息量大、检测精度高且受地面条件限制小的特点,可以更加高效、低成本地圈定地热异常区。地热异常区圈定需要综合分析地形地貌、地质构造、温度异常、地表覆被类型等区域特征信息,是确定地热资源靶区,进而开展实地调查的重要前提^[3-5]。

1 研究区概况

金寨县位于安徽省六安市,地处大别山北麓,境内地形起伏大,总体呈西南高东北低地势,地貌类型主要为中低山和丘陵。大地构造位于秦岭-大别造山带的最东段,褶皱和断层发育较多,构造复杂,区域地壳活动强烈,具有高热流的区域背景热状态。区内岩石以岩浆岩和变质岩为主,无较大范围分布可作为地热盖层的岩石。研究区内存在大范围层状热储可能性很小,推测以带状热储为主。区内中生代构造-岩浆活动强烈,早白垩世岩浆岩分布广泛,为地热形成提供岩浆岩基础条件。断层破碎带会形成地下水富集,基岩裂隙水沿断层向地下渗透,为地热提供丰富的水源^[6-7]。

大别山是超高压变质带,中生代深部火山与岩浆活动频繁。金寨县作为高放射性花岗岩及其变质岩分布地区,干热岩地热资源赋存的地质条件有利。根据已有干热岩地热调查评价成果,金寨县为高温异常远景区,推测 3 000 m 的深部温度可大于 145 ℃,被列为干热岩重点调查评价远景靶区^①。金寨县现有水热型地热资源开发利用工程仅 1 处,为吴家店镇西庄温泉,最初沿西庄村竹根河沿岸出露有 5 处天然温泉,均沿竹根河展布,出水温度 26~50 ℃。西庄温泉区域范围内岩浆热液活动频繁,构造发育,岩性为花岗闪长岩、二长花岗片麻岩,无明显盖层^②。

2 地表温度反演

2.1 遥感数据源

本次遥感影像数据源包括高分一号(GF-1)、高分

二号(GF-2)和陆地资源卫星 Landsat 8。其中 GF-1、GF-2 及 Landsat 8 的多光谱影像主要用于区域地质构造解译,Landsat 8 OLI 热红外数据(TIRS10)用于地表温度反演(数据源信息见表 1),并对原始数据进行几何校正、图像融合、配准、裁剪等预处理。

表 1 遥感数据源信息

Table 1 Information of remote sensing data source

产品名称	空间分辨率/m	获取时间	云量/%	主要用途
Landsat 8	15	2015-01-03	0.91	地表温度反演
GF-1	2	2020-04—2020-10	<2	线环构造解译
GF-2	0.8	2020-01—2020-09	<1	线环构造解译

为尽量减少人类工程活动对地表温度的影响,热红外数据选取 2015-01-03T02:49(北京时间)的卫星影像。影像基本无云,且冬季影像可在一定程度上减少太阳辐射和植被覆盖对地表温度的影响,突出地温异常,质量符合应用要求。TIRS10 波段数据主要反映的是地物在热红外区的辐射信息,可探测 10.6~11.2 μm 热红外波段的辐射,图像上所记录的是地物的热辐射温度^[8]。

2.2 研究方法

大气校正法的基本原理是:首先估算大气对地表热辐射的影响因子,然后把这部分大气影响从卫星传感器所观测到的热辐射总量中减去,得到地表热辐射强度,通过热辐射强度与地表温度的关系函数计算得到地表温度值。

卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 由 3 部分组成:大气向上辐射亮度 $L_\uparrow$;地面的真实辐射亮度经过大气层之后到达卫星传感器的能量;大气向下辐射到达地面后反射的能量。卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 的表达式,即辐射传输方程为:

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] \tau + L_\uparrow \quad (1)$$

式中, ε 为地表比辐射率, T_s 为地表真实温度(K), $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度, τ 为大气在热红外波段的透过率,则温度为 T 的黑体在热红外波段的辐射亮度 $B(T_s)$ 为:

$$B(T_s) = [L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau\varepsilon \quad (2)$$

然后用普朗克公式的函数获取 T_s 值:

①安徽省地质调查院. 安徽省干热岩地热资源调查报告. 2018.

②安徽省地质矿产勘查局 313 地质队. 安徽省金寨县沙坪沟钨矿详查报告. 2012.

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1) \quad (3)$$

对于 TIRS Band 10, $K_1=774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$, $K_2=1321.08 \text{ K}$.

从上可知此类算法需要 2 个参数: 大气剖面参数和地表比辐射率. 大气剖面参数可以由成影时间以及中心经纬度获得^[9-12].

2.3 地表温度反演结果

通过选取的数据源和热红外温度反演方法, 得到研究区的反演地表温度为 $276.15 \sim 296.15 \text{ K}$ ($3 \sim 23 \text{ }^\circ\text{C}$). 根据已有历史资料, 金寨县 1 月的平均气温为 $1 \sim 11 \text{ }^\circ\text{C}$. 由于地表温度会比气象台报告的空气温度高, 这个高度在冬季的温度约为 $2 \sim 4 \text{ }^\circ\text{C}$, 并且由于绝对温差的存在, 反演结果的相对较高并不影响地热区域的判定. 所以最终将 $3 \sim 13 \text{ }^\circ\text{C}$ 设定为正常地表温度; 而 $13 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上为温度较高区域, 定为异常区域, 可能是裸露岩石或是人类聚居地. 将温度划分为 5 个等级: $<10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10 \sim 13 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $13 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15 \sim 16 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $>16 \text{ }^\circ\text{C}$. 从反演结果看, 梅山水库及响洪甸水库周边温度均较低, 其次为山体背阴处, 呈片块状或者直条状分布, 多位于金寨县中部、南部和东部区域, 而高温区多分布在白塔畈镇、铁冲-汤家汇镇一带、关庙-花石-吴家店南部一带、天堂寨北部-燕子河一带以及青山镇北部一带(图 1).

3 构造遥感解译

研究区由于经历长期的构造作用, 构造分布的形式和形态都十分复杂. 通过对遥感影像进行分析, 结合前人研究成果, 建立了活动线性构造和环形构造的解译标志, 在此基础上对金寨地区构造进行解译.

3.1 线性构造

线性构造解译是指具有一定遥感影像特征的受地质构造控制的线性影像. 由于线性构造的多期活动及分段性, 不同方向、不同性质的线性构造多次叠加和交切改造, 形成复杂多样的构造形态. 线性构造是遥感地热勘察实践中一种常用的提示信息, 其解译标志包括^[13-16]: 1) 地貌单元变化突然, 两种不同地貌单元截然相接或新老地貌形态交接线等, 往往是区域性大断裂造成的, 如金寨断裂带地表影像特征十分突出, 形成一明显平直线性影像, 局部色调浅灰色, 两侧地貌截然不同, 北部山脊线与构造平行, 南部山脊线与构造垂直(图 2a); 2) 陡坎呈直线状分布, 遥感图像上片状或三

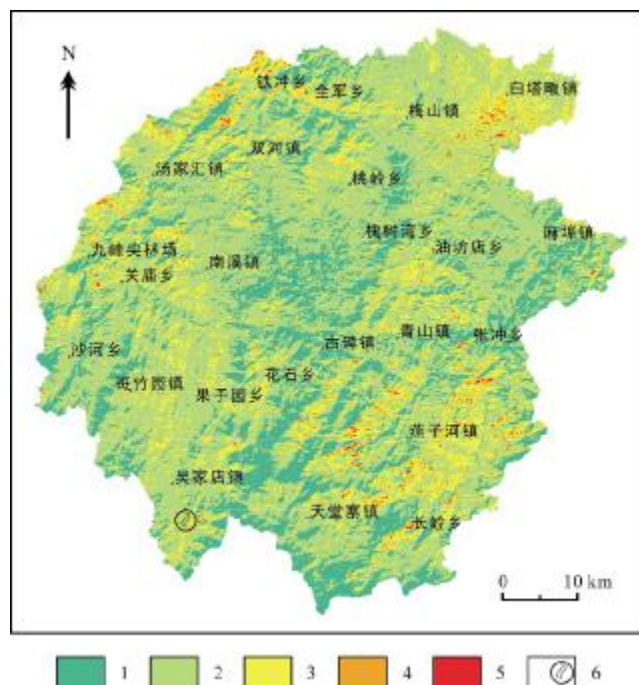


图 1 Landsat 8 的 TIRS10 波段金寨县地温反演结果图

Fig. 1 Surface temperature retrieval result of Landsat 8 TIRS10 band

1—温度值小于 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperature lower than $10 \text{ }^\circ\text{C}$); 2—温度值 $10 \sim 13 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperature of $10 \sim 13 \text{ }^\circ\text{C}$); 3—温度值 $13 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperature of $13 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$); 4—温度值 $15 \sim 16 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperature of $15 \sim 16 \text{ }^\circ\text{C}$); 5—温度值大于 $16 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperature higher than $16 \text{ }^\circ\text{C}$); 6—热泉点(hot spring)

角状阴影呈线状延伸一定的距离, 指示线性构造的存在, 如水口庙断层(图 2b); 3) 山脊错断现象, 不同方向的断裂构造在研究区极为发育, 当断裂与山脊走向垂直或者斜交时, 指示两盘相对运动, 山脊发生错动, 如栗树咀-燕子河断裂(图 2c); 4) 水系标志明显, 断裂的形成和活动对水系有明显的控制作用, 主要表现为河流呈直角状、折线状急转弯, 平直、格状水系发育, 多条河流的拐点、汇流点直线状排列等, 如天堂寨南河-茶铺断裂(图 2d).

3.2 环形构造

环形构造或称遥感影像上的环形影像, 是地壳一定深度下的地质作用在地表上的地貌景观、地质构造和地球物理场、地球化学特征的综合反映. 环形构造在遥感影像上与其他地质体有明显边界线, 其解译标志包括^[17]: 1) 图像上呈环形的线状色调、环形的色块显示(图 3a); 2) 地貌上形成环形的山脊、沟谷、凹地、圆形山丘等(图 3b); 3) 水系中单个河流呈现弧形拐弯, 或者由两条或两条以上河流组成(图 3c).

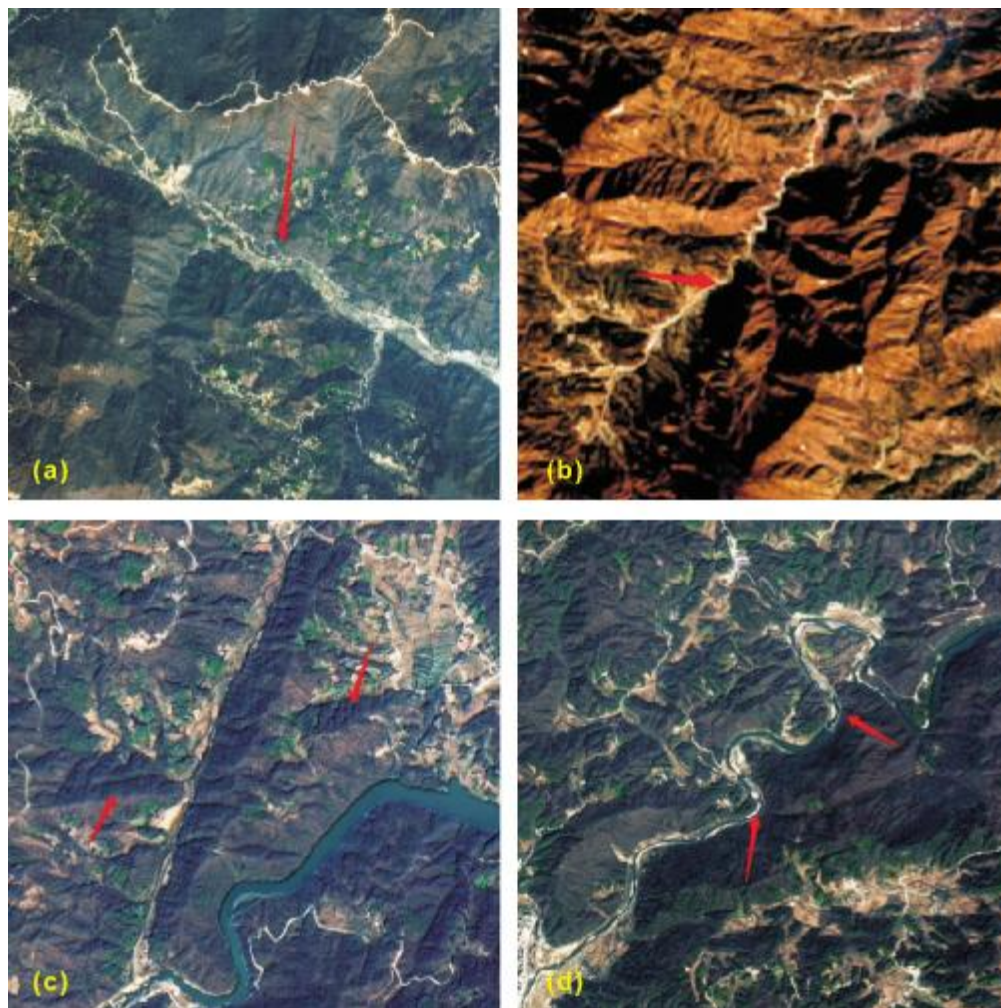


图 2 线性构造遥感解译

Fig. 2 Remote sensing interpretation of linear structures

a—金寨断裂带(Jinzhai fault zone); b—水口庙断层(Shuikoumiao fault); c—栗树咀-燕子河断裂(Lishuzui-Yanzihe fault); d—天堂寨南河-茶铺断裂(Nanhe-Chapu fault in Tiantangzhai)

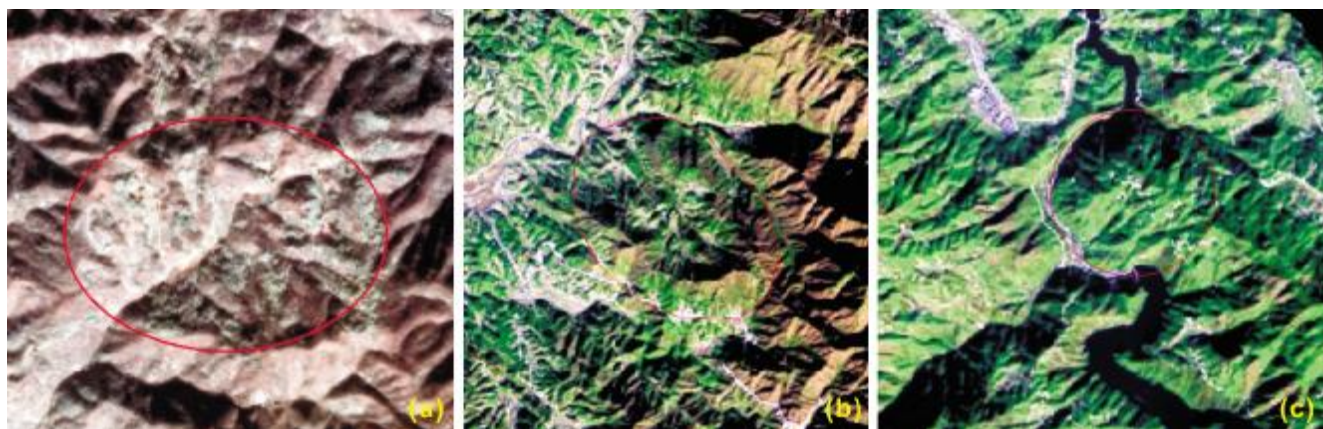


图 3 环形构造遥感解译

Fig. 3 Remote sensing interpretation of ring structures

a—环形色调标志(tone mark); b—环形山脊标志(ridge mark); c—环形水系标志(water system mark)

通过以上线环构造解译标志的分析及对工作区地质的研究,结合已有的地质资料最终新解译线性构造 120 条,其中 4 条为已知断裂构造的延伸,环形构造共 16 条.将解译的线环构造叠加到遥感影像上能得到直观的结果(图 4).

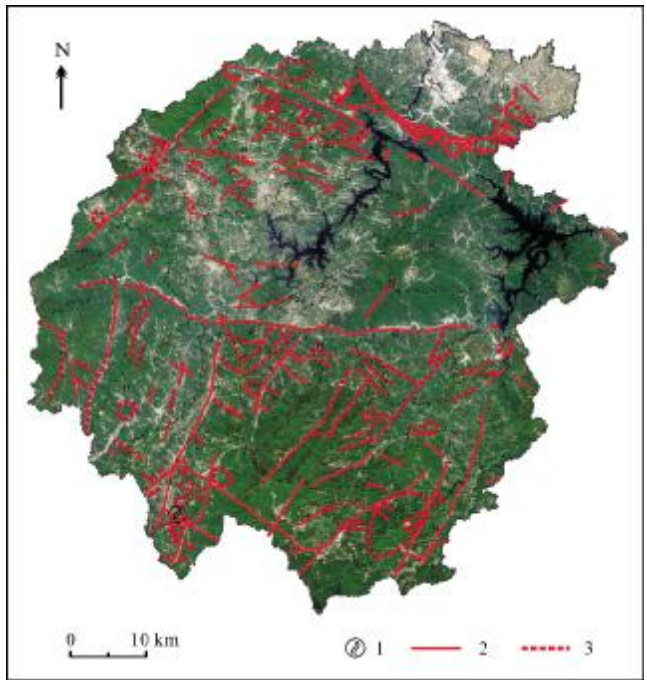


图 4 线环构造遥感解译分布图

Fig. 4 Distribution map of linear-ring structures by remote sensing interpretation
1—热泉点(hot spring); 2—已知断裂(known fault); 3—解译构造(interpreted structure)

4 地热异常区圈定

4.1 地热异常区判定方法

地表温度异常受多种因素的影响,地热引起地表温度增高只是地表温度异常的一种.因此地热异常圈定应结合地质背景、已有地热资料、土地利用类型、地表温度等综合分析,在温度异常的基础上剔除假性异常区,进而确定潜在地热异常区.其判定因子包括传感器、时间、温度、地貌、地表覆被、地质构造等.

通过温度反演,把反演的地表温度分为 5 个等级.由于大别山区地热多为中低温特性,因此在地表温度较高区域还无法确切排除某一异常高温范围.将大于 13 ℃的地表温度均作为研究区的异常高温区,得到地温异常初步范围.根据地热反演结果,将这个温度列为地热异常的温度基础,结合地貌、地表覆盖类型、构

造等判定因子,并根据地热异常区的形态及与线性构造的走向相关性,进行地热异常区的划分.除此之外,居民区及工厂等建筑物附近的地热形态与其形状相关,与断裂构造走向相关性较小,将此类区域剔除出地热异常区^[18-19].

4.2 结果分析

依据 OLI 热红外影像反演的地温信息,结合遥感解译的线环构造和其他相关地质要素综合判定,金寨县共圈定 6 处地热异常区和 1 处伪地热异常区.主要发育于断裂构造汇合部位,地热异常多呈不规则椭圆形形态展布,异常信息强度良好(图 5).

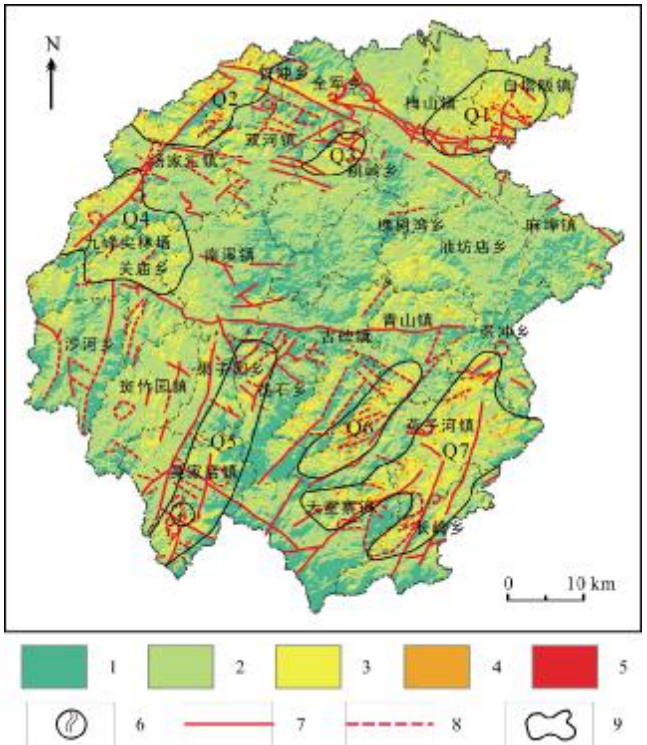


图 5 地热异常区分布图

Fig. 5 The distribution map of potential geothermal anomaly zones
1— $T < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2— $10\sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3— $13\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4— $15\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5— $T > 16\text{ }^{\circ}\text{C}$;
6—热泉点(hot spring); 7—已知断裂(known fault); 8—解译构造(interpreted structure); 9—地热异常区(geothermal anomaly area)

通过对遥感反演的地热异常区进行特征分析,结合地球物理和地球化学等资料,大别山区的岩浆岩存在至少有 100 Ma 以上,其地热主要与岩浆岩中放射性元素的放射性生热和存在于深大断裂处的地幔热源等有关^[20].可见反演的地热异常区内断裂构造密集.地表温度异常区判定结果如表 2 所示.

表 2 研究区地表温度热异常区判定表

Table 2 Determination of surface thermal anomaly areas in the study area

编号	范围	判定结果	特征
Q1	白塔畈与梅山镇交界部位	地热异常区	地表温度异常明显,范围较大,为非城镇区域,异常分布均匀,不受地形影响,且构造发育密集
Q 2	汤家汇镇北部、铁冲乡西北部	地热异常区	地表温度异常明显,分布较广,局部受地形影响阴阳坡温度差异较大,其余部分分布较均匀,且处于金寨断裂与金刚台断裂的交汇处
Q 3	桃岭乡西北部	地热异常区	地表温度异常明显,分布均匀,临近金寨大断裂,且各方向小断裂发育
Q 4	汤家汇镇南侧及关庙乡北侧	地热异常区	地表温度异常分布不均,范围较大,金刚台断裂穿插其中,影像上局部线性构造明显,且两侧都有异常分布
Q 5	吴家店镇东部及花石乡西侧,果子园东侧小部分地区	地热异常区	地表温度异常明显,局部分布不均,阳坡和阴坡都存在异常,断裂构造呈格状发育,局部发生位移,区域内有西庄温泉一处
Q 6	燕子河镇西部	伪地热异常区	阳坡地温异常分布范围明显比阴坡大,且温度差异较大,线性构造发育不明显,认为地温异常为太阳辐射造成的
Q 7	燕子河东部分布最广,其次为天堂寨和长岭乡北部	地热异常区	断裂构造较为发育,延伸较长,地温异常分布多数不受地形影响,阴阳坡均有高温异常,也较为集中

5 结论

采用 Landsat 8 热红外数据通过大气校正法进行地表温度反演,得到研究区的反演地表温度为 3~23 ℃,其中判定 3~13 ℃代表正常地表温度,而 13 ℃以上为异常区域.再采用 GF-1、GF-2 数据对研究区线环构造进行遥感目视解译,通过已知断裂的遥感影像建立解译标志.结合研究区相关地质资料,最终新解译线性构造 120 条、环形构造共 16 条.依据热红外影像反演的地温信息,结合解译的线环构造和其他相关地质要素综合分析,研究区共圈定 7 处潜在地热异常区.

热红外遥感技术可以快速获取地面温度,具有速度快、成本低、直观形象等优点.结合已有的地质资料和解译的控热构造,可以获取多方面的地热成矿有利条件及空间分布规律,分析地热异常成因模式,在地热资源调查领域发挥更大的作用.

参考文献(References):

[1]王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4):449-459.

Wang G L, Zhang W, Liang J Y, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38 (4): 449-459.

[2]王贵玲,陆川.碳中和目标驱动下干热岩和增强型地热系统增产技术发展[J].地质与资源,2023,32(1):85-95,126. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.01.011shu

Wang G L, Lu C. Stimulation technology development of hot dry rock and enhanced geothermal system driven by carbon neutrality target[J]. Geology and Resources, 2023, 32(1): 85-95, 126. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2023.01.011

[3]边宇,杨永鹏,李萌,等.热红外遥感技术在地热资源调查中的应用[J].中国矿业,2021,30(S2):153-157.

Bian Y, Yang Y P, Li M, et al. Application of thermal infrared remote sensing techniques in geothermal resources surveying[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(S2): 153-157.

[4]任正情,方泓锦,王学平.热红外遥感技术在江西寻乌地区地热勘查中的应用[J].地质学刊,2021,45(3):277-282.

Ren Z Q, Fang H J, Wang X P. Application of thermal infrared remote sensing in exploration of geothermal resources in Xunwu area, Jiangxi Province[J]. Journal of Geology, 2021, 45(3): 277-282.

[5]郭宝东,孙中任,石玉学,等.MT 法在鄂尔多斯盆地北部地热资源勘查中的应用[J].地质与资源,2023,32(1):64-69.

Guo B D, Sun Z R, Shi Y X, et al. Application of magnetotelluric sounding method in geothermal resources exploration in northern Ordos Basin[J]. Geology and Resources, 2023, 32(1): 64-69.

[6]林伟,王清晨,Faure M,等.从北淮阳构造带的多期变形透视大别山构造演化[J].中国科学(D辑:地球科学),2005,35(2):127-139.

Lin W, Wang Q C, Faure M, et al. Tectonic evolution of the Dabieshan orogen: In the view from polyphase deformation of the Beihuaiyang metamorphic zone[J]. Science in China (Series D), 2005, 48(7): 886-899.

[7]王龙平,魏永霞,程宏超,等.安徽长江经济带地热资源赋存特征及潜力评价[J].中国地质,2022,49(6):1765-1777.

Wang L P, Wei Y X, Cheng H C, et al. Characteristics and potential

- evaluation of geothermal resources in Anhui of Yangtze River Economic Zone[J]. *Geology in China*, 2022, 49(6): 1765–1777.
- [8] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat 8 数据地表温度反演算法对比[J]. *遥感学报*, 2015, 19(3): 451–464.
- Song T, Duan Z, Liu J Z, et al. Comparison of four algorithms to retrieve land surface temperature using Landsat 8 satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 451–464.
- [9] 赵珍, 李贵仁, 陈刚. ArcGIS 和 RS 技术在高植被覆盖率地区地热资源勘查中的应用[J]. *勘察科学技术*, 2019(2): 44–48.
- Zhao Z, Li G R, Chen G. Application of ArcGIS and RS technology in exploration of geothermal resources at high vegetation coverage ratio area[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2019(2): 44–48.
- [10] 冯鹏, 岳昊, 刘晓源. 基于 Landsat 8 数据的地表温度反演研究——以哈尔滨主城区为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(9): 223–225.
- Feng P, Yue H, Liu X Y. Land surface temperature inversion based on Landsat 8 data: Take the main city of Harbin as an example[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(9): 223–225.
- [11] Sheng L, Tang X L, You H Y, et al. Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 738–746.
- [12] Guo Y B, Zhang C H. Analysis of driving force and driving mechanism of the spatial change of LST based on Landsat 8[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2022, 50(9): 1787–1801.
- [13] 周传芳, 陈卓, 孙彦峰, 等. 遥感在大兴安岭森林覆盖区地质矿产调查中的应用——以黑龙江洛古河 1:5 万区域地质矿产调查工作为例[J]. *地质与资源*, 2022, 31(5): 632–641, 613.
- Zhou C F, Chen Z, Sun Y F, et al. Remote sensing applied in geological and mineral survey in forest-covered area of Daxinganling Mountains: A case study of 1:50 000 regional geological and mineral survey in Luoguhe, Heilongjiang Province[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(5): 632–641, 613.
- [14] 韩乐乐, 丁伟翠, 陈宣华, 等. 西准噶尔地区多源遥感信息的线性构造提取与定量分析[J]. *中国地质*, 2019, 46(5): 1209–1223.
- Han L L, Ding W C, Chen X H, et al. Linear structure extraction and quantitative analysis of multi-source remote sensing information in West Junggar Basin[J]. *Geology in China*, 2019, 46(5): 1209–1223.
- [15] 卢克轩, 刘新星, 张娟, 等. 京津冀地区线环构造遥感地质解译与控矿规律分析[J]. *地质与资源*, 2022, 31(2): 175–182.
- Lu K X, Liu X X, Zhang J, et al. Remote sensing geological interpretation and ore-controlling regularity of line-ring structures in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(2): 175–182.
- [16] 张焜, 马世斌, 李宗仁, 等. 高分一号卫星数据遥感地质解译[J]. *遥感信息*, 2016, 31(1): 115–123.
- Zhang K, Ma S B, Li Z R, et al. Geological interpretation of GF-1 satellite imagery[J]. *Remote Sensing Information*, 2016, 31(1): 115–123.
- [17] 梁树能, 魏红艳, 甘甫平, 等. “高分二号”卫星数据在遥感地质调查中的初步应用评价[J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(4): 63–72.
- Liang S N, Wei H Y, Gan F P, et al. Preliminary application evaluation of GF-2 satellite data in remote sensing geological survey[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(4): 63–72.
- [18] 龙登红, 周小龙, 杨坤光, 等. 青藏高原东北缘深部地质构造与地热资源分布关系研究[J]. *中国地质*, 2021, 48(3): 721–731.
- Long D H, Zhou X L, Yang K G, et al. Research on relationship between the deep structure and geothermal resource distribution in the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 2021, 48(3): 721–731.
- [19] Nishar A, Richards S, Breen D, et al. Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei-Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand[J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 1256–1264.
- [20] 豆保娜, 王安东, 万建军, 等. 安徽金寨地区花岗岩类放射性地球化学特征及岩石圈热结构研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(3): 234–242.
- Dou B N, Wang A D, Wan J J, et al. Radioactive geochemical characteristics of granitoids and thermal structure of lithosphere in Jinzhai area, Anhui Province[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 45(3): 234–242.