

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.04.006

引用格式:袁晶,陈艳,唐春花,等. 遥感地热 GIS 预测方法研究——以江西宁都地区为例[J]. 华东地质, 2023, 44(4): 424-438.
(YUAN J, CHEN Y, TANG C H, et al. Remote sensing geothermal GIS prediction method—a case study in Ningdu City, Jiangxi Province[J]. East China Geology, 2023, 44(4): 424-438.)

遥感地热 GIS 预测方法研究——以江西宁都地区为例

袁晶^{1,2}, 陈艳¹, 唐春花¹, 孙超¹, 宛胜¹, 钱正江¹, 唐泉¹, 汪明有¹

(1. 江西省地质调查勘查院, 江西 南昌 330030;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 遥感技术在地热资源调查与预测中被广泛应用。为解决传统遥感地热预测方法预测结果精度低、假异常多的问题, 文章提出了一种遥感地热 GIS 预测方法。以江西宁都为研究区, 开展了成热地质条件研究, 分析了地质、遥感、物探等对地热的指示作用, 进一步提出了地层、岩浆岩、控热断裂、控水断裂、断裂交汇、ETM+热红外反演温度、ASTER 热红外反演温度、羟基异常、土壤湿度、高程、水系、航磁、重力等 13 个预测因子。运用证据权法、找矿信息量法和特征分析法开展了地热预测, 经综合分析圈定地热有利区 79 处, 其中 A 类 12 处、B 类 22 处、C 类 45 处。已知地热与 A 类、B 类地热有利区吻合, 部分 A 类地热有利区经野外查证发现地热异常, 表明预测结果可信度较高。遥感地热 GIS 预测方法具有遥感数据多源、预测因子多、智能化等特征, 是一种实用有效的预测方法, 可作为地热资源调查中的一种常规技术方法使用。

关键词: 遥感; 地热; 热红外; 预测因子; GIS 技术; 宁都

中图分类号: P627; P314

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2023)04-424-15

地热资源是可再生清洁能源, 随着我国对改善能源结构、发展清洁能源的要求与日俱增, 地热资源的开发利用越来越受到重视。遥感技术作为地热资源综合勘查技术之一, 在地热预测与勘查中发挥着重要的作用^[1-4]。前人基于遥感技术的地热预测方法可概括为两类: 一是遥感热红外地表温度圈定地热异常。例如, WANG K 等^[7]、任正情等^[9]、杨俊颖等^[10]采用两种不同的遥感热红外数据分别圈定了辽宁丹东、江西寻乌、西藏尼木地区 9 处、11 处、21 处地热异常区, 异常面积大但精度低; 二是基于遥感热红外的多元信息地热预测法^[12-19], 在热红外反演温度的基础上添加多元综合信息开展预测。例如, 闫佰忠等^[12]基于 TM 数据反演了长白山地区地表温度, 结合布格重力及磁场等物探因子, 采用判别分析法对地热异常进行了识别, 预测了 5 处地热远景区; 姚金等^[13]基于 ETM+热红外反

演温度, 结合地层、断裂和地形地貌条件, 在粤北地区圈定了 7 个 I 级和 9 个 II 级地热远景区; 熊永柱等^[14]同样基于 ETM+热红外反演温度, 结合断裂和岩体条件, 预测了腾冲地区 8 处地热异常; SARA M 等^[15]基于 Landsat8 TIRS 反演地表温度, 结合断层、地震活动密度、大地热流、重力等因子, 预测了埃及苏伊士湾沿海地区 7 处地热异常; 郝明等^[19]同样基于 Landsat8 TIRS 反演地表温度, 分别从全局、局部分块和高程分区等多视角提取温度异常, 采用 D-S 证据理论方法融合多角度信息, 结合断裂构造缓冲区圈定青岛市 11 处地热异常。前述预测的地热异常经实地调查已得到验证, 部分异常内发现了地热。上述研究表明, 遥感热红外法可以有效预测地热, 但需结合地层、岩体、断裂、地形地貌、重力、磁法等因子进行综合分析, 提升预测结果的精度和准确度。因此, 选择有利的预测因子, 可以提高预测的精准度。

* 收稿日期: 2022-11-20 修订日期: 2023-03-28 责任编辑: 袁静

基金项目: 江西省地质局“遥感方法在地热资源调查与预测中的应用”项目资助。

第一作者简介: 袁晶, 1986 年生, 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事基础地质、矿产勘查及遥感地质工作。Email: southseafrog@126.com。

通信作者简介: 唐春花, 1965 年生, 女, 教授级高级工程师, 本科, 主要从事地质科研及遥感地质工作。Email: 553827851@qq.com。

江西宁都地热地质条件优越,目前已发现地热 7 处,其中水温 $>60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温地热水 2 处(蓝田、李村)^[20]。近几年,中国地质调查局水文地质环境地质研究所、江西省自然资源厅分别在小布镇陂下^[21]、安福乡罗陂开展了地热勘查工作,分别探获 $43.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地热水,说明宁都地区地热资源潜力较大。因此,本文以江西宁都为研究区,分析区内地热地质特征及成热规律,在前人总结的预测因子基础上,继续增加与地热相关的因子,运用 GIS 技术开展地热预测及综合分析,圈定地热有利区,以期进一步提高地热预测精准度。

1 研究区地热地质特征

1.1 地质背景

研究区主要出露新元古代—寒武纪、泥盆纪—二叠纪和白垩纪地层(图 1)。新元古代—寒武纪地层主要为一套中浅变质岩,广泛分布于研究区北部大沽乡、东山坝,中部青塘、湛田及南部对坊—固村,构成褶皱基底;泥盆纪—二叠纪地层以碎屑岩和碳酸盐岩为主,主要出露于研究区中部青塘一带;白垩纪地层为一套红色碎屑岩,主要呈 NNE 向条带状分布于黄石—东山坝一带,员布、赖村、固村等地亦零星分布,构成区内规模不等的断陷盆地。岩浆活动强烈,以加里东期为主,多形成花岗岩基,如研究区北部大金竹岩体和中南部的鹅婆、会同岩体,岩性主要为斑状黑云母二长花岗岩。其次为燕山期,多形成花岗岩基、岩株,如研究区北部的黄陂、带源岩体和南部的湖坊岩体,岩性主要为黑云(二云)二长花岗岩。断裂发育,以 NNE 向、NE 向为主,其次为 NW 向,少量呈近 EW 向。NNE 向断裂规模最大,常具多期活动特征,如鹰潭—安远断裂带纵贯研究区,控制了宁都断陷盆地的展布。NE 向断裂规模次之,变化较大,在变质岩和花岗岩体中尤为发育。NW 向断裂规模一般不大,形成较晚。

1.2 热源

区域大地热流、花岗岩放射性生热率均表明研究区地热背景值较高,同时区内深大断裂的发育有助于深部热量向地表运移,具备形成地热的良好热源条件。

1.2.1 大地热流

江西省已知有代表性的 25 个实测大地热流值为 $57.8\sim 101\text{ mW/m}^2$,平均热流值 70.14 mW/m^2 ,略高

于大陆整体的平均热流值 63 mW/m^2 ,其中赣南地区平均热流值 76.03 mW/m^2 ,高于全省平均值^[22-23]。宁都北部大地热流值为 $81\sim 106\text{ mW/m}^2$,平均热流值 93.6 mW/m^2 ,高于周边的兴国县(平均热流值为 79.7 mW/m^2)和万安县(平均热流值 74.1 mW/m^2),远高于全省大地热流平均值和中国陆区平均大地热流值 $(61.5\pm 13.9\text{ mW/m}^2)$ ^[24]。

1.2.2 放射性生热

花岗岩放射性元素(U、Th、K)含量较高,放射性元素衰变生热是本区地热形成的主要热源^[25]。赣南地区岩石放射性背景值较高,花岗岩的放射性生热率平均值为 $3.3\text{ }\mu\text{W/m}^3$ ^[26],宁都北部地区花岗岩放射性生热率平均值高达 $6.47\text{ }\mu\text{W/m}^3$ ^[24]。刘峰等^[24]测得燕山期黄陂岩体放射性生热率平均值 $5.32\sim 8.01\text{ }\mu\text{W/m}^3$,属高产热(HHP)花岗岩。产于黄陂岩体中的小布地热井水温 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[21],而产于加里东期会同岩体中的蓝田和李村地热井水温分别达到了 $82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[25],推测会同岩体放射性生热率高于黄陂岩体。

1.2.3 地下水深循环

地下水深循环为地热水热源之一。研究区已知地热全部分布于 NNE 向和 NE 向区域性断裂带上,以鹰潭—安远、大余—南城、驿前—黄岗山断裂带为代表,普遍经历多次活动,切割深,破碎带宽,成为良好的控热导热构造,并为热水的形成提供沟通深部热源的良好通道。

1.3 水文地质

研究区地下水主要类型有碎屑岩类裂隙孔隙水、碳酸盐岩类岩溶水、变质岩类裂隙水、花岗岩类裂隙水。碎屑岩类裂隙孔隙水以红色碎屑岩裂隙孔隙水为主,分布于白垩纪红盆中,地下水赋存空间以孔隙为主,溶隙、裂隙甚少。碳酸盐岩类岩溶水含水岩组为石炭纪—二叠纪灰岩、白云岩,岩溶较发育,富水性好;变质岩类裂隙水含水岩组为新元古代—寒武纪变质岩,岩石破碎,裂隙发育,透水性较好。区内长期的断裂活动导致花岗岩中裂隙和节理发育,花岗岩类裂隙水丰富。

1.4 地热分布

研究区已发现地热水 7 处(表 1),其中 2 处水温超过 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,蓝田水温达 $82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。已知地热受区域 NNE 向、NE 向断裂控制,其中,肖田和罗陂地热受 NNE 向鹰潭—安远深大断裂带控制,桃源村地热受

表 1 研究区已知地热基本特征
Table 1 Known geothermal characteristics in the study area

名称	位置	地层或岩性	断裂	天然温泉温度/℃	地热井温度/℃	流量/(m ³ ·d ⁻¹)
肖田	带源岩体	侏罗纪花岗岩	鹰潭—安远断裂带	42	52	385
桃源村	黄陂岩体	侏罗纪花岗岩	招携—小江断裂带	27	—	—
罗陂	宁都盆地边缘	青白口纪库里组、 白垩纪河口组	鹰潭—安远断裂带	—	43.6	655
蓝田	会同岩体	志留纪花岗岩	驿前—黄岗山断裂带	57	82	1 000
石上	会同岩体	志留纪花岗岩	驿前—黄岗山断裂带	35.5	—	207
李村	会同岩体	志留纪花岗岩	驿前—黄岗山断裂带	52	63	878
小布	黄陂岩体	侏罗纪花岗岩	大余—南城断裂带	—	45	700

2 预测因子及取值

研究区 NE 向、NNE 向断裂以及花岗岩体是控制地热水的主要因素。遥感、物探等信息对成热具有指示作用,比如特定区间的热红外反演温

度、羟基异常、土壤湿度、航磁、重力等信息可以指导地热找矿。按“已知预测未知”的思路,分析研究区地质、遥感、物探等多元信息与已知地热的相关性,优选能够应用于未知地区的预测因子(表 2)。

表 2 研究区地热预测因子及取值表
Table 2 Geothermal predictors and their values in the study area

分类	预测因子	因子内容	因子提取
地质	岩浆岩	I 级	加里东期花岗岩
		II 级	燕山期花岗岩
	地层	I 级	前寒武纪变质岩
		II 级	白垩纪沉积岩
	已知控热断裂	鹰潭—安远断裂带、大余—南城断裂带、驿前—黄岗山断裂带等	提取 1 000 m 缓冲区
	断裂	推测控热断裂	区域 NE 向、NNE 向断裂
		控水断裂	次级 NW 向、近 EW 向断裂
		断裂节点	控热断裂与控水断裂节点
			提取断裂节点 250 m 缓冲区
	ETM+反演温度	I 级	$\bar{X}_E + \sigma_E \leq X_E < \bar{X}_E + 2\sigma_E$
		II 级	$\bar{X}_E + 0.5\sigma_E \leq X_E < \bar{X}_E + \sigma_E$
遥感	ASTER 反演温度	I 级	$\bar{X}_A + 1.5\sigma_A \leq X_A < \bar{X}_A + 2.5\sigma_A$
		II 级	$\bar{X}_A + 0.5\sigma_A \leq X_A < \bar{X}_A + 1.5\sigma_A$
	羟基异常	$\bar{X}_{OH} + 1.5\sigma_{OH} \leq X_{OH} < \bar{X}_{OH} + 2.5\sigma_{OH}$	提取 2.43~4.02 异常区
	土壤湿度	$\bar{X}_S + \sigma_S \leq X_S < \bar{X}_S + 2\sigma_S$	提取 0.14~0.31 异常区
	DEM	高程	海拔低于 350 m
		水系	水系缓冲区
	物探	航磁	航磁 50~130 nT
		重力	重力低值区, < -50 m/s ²
			提取航磁 50~130 nT 面文件 提取重力 -72~-50 m/s ² 面文件

2.1 地质因子

2.1.1 地层因子

研究区出露地层主要有新元古代—寒武纪变

质岩、泥盆纪—二叠纪沉积岩和白垩纪沉积岩。新元古代—寒武纪变质岩中分布已知地热有 2 处,分别为肖田和罗陂地热,其中肖田地热位于变质岩与

花岗岩接触带,罗陂地热位于变质岩与宁都断陷盆地西侧接触带。泥盆纪—二叠纪沉积岩中未见已知地热分布;白垩纪沉积岩中分布已知地热 2 处,分别为罗陂地热和石上地热,分列宁都盆地西、东缘。根据地层与已知地热的相关性,将地层因子从高至低分为两级,Ⅰ级为新元古代—寒武纪变质岩,Ⅱ级为白垩纪沉积岩(表 2)。

2.1.2 岩浆岩因子

研究区主要出露加里东期和燕山期花岗岩。加里东期花岗岩体中发现地热 3 处(蓝田、李村、石上),水温较高,其中 $>60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有 2 处。燕山期花岗岩中发现地热 3 处(小布、桃源村、肖田),水温偏低,最高 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。加里东期花岗岩成热条件优于燕山期。根据岩浆岩与已知地热的相关性,将岩浆岩因子从高至低分为两级,Ⅰ级为加里东期花岗岩,Ⅱ级为燕山期花岗岩(表 2)。

2.1.3 断裂构造因子

鹰潭—安远、招携—小江、大余—南城、驿前—黄岗山断裂带为已知控热断裂(表 1),均为区域性深大断裂带,断裂辐射范围广。研究区多数已知地热分布于控热断裂 500 m 范围内,少数地热离断裂 800~900 m,因此,提取已知控热断裂 1 000 m 缓冲区作为预测因子。区域次一级 NE 向、NNE 向断裂为推测控热断裂,提取推测控热断裂 500 m 缓冲区作为预测因子。NW 向、近 EW 向断裂常形成地下水排泄的通道,为控水断裂,提取控水断裂 250 m 缓冲区作为预测因子。构造体系的复合地段,由于各种应力作用集中和叠加,断裂构造复杂,为热水的运移和向地表排泄创造了良好条件。肖田、桃源村、石上、蓝田、李村 5 处已知地热分布于 NW 向、

近 EW 向断裂与已知控热断裂交汇处,提取控水断裂与控热断裂节点 250 m 缓冲区作为预测因子(表 2)。

2.2 遥感因子

2.2.1 热红外反演温度

白天和夜间遥感热红外数据的联合应用是一种有效的地热预测方法^[7],本文分别选择 ETM+和 ASTER 数据开展研究区地表温度反演。

(1)ETM+热红外反演。为尽量减少人类活动等干扰因素,选择城市扩张之前的数据开展反演。本文选择时相为 2000 年 1 月 27 日的 Landsat-7 ETM+数据,共 2 景,分别为 121/41 与 121/42,数据重采样分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$,热红外温度反演采用大气校正法^[7,27]。

研究区 ETM+反演地表温度(X_E)为 $-7\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$,已知地热反演温度为 $6.7\sim 8.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表 3)。ETM+反演平均温度 \bar{X}_E 为 $5.88\text{ }^{\circ}\text{C}$,标准差 σ_E 为 1.35。结合已知地热与异常相关性,将异常分为四级: $X_E>8.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\bar{X}_E+2\sigma_E$)为高温异常; $7.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\bar{X}_E+\sigma_E$) $\leq X_E<8.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\bar{X}_E+2\sigma_E$)为中温异常; $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\bar{X}_E+0.5\sigma_E$) $\leq X_E<7.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\bar{X}_E+\sigma_E$)为中低温异常; $X_E<6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\bar{X}_E+0.5\sigma_E$)为低温异常。高温异常呈面状、带状、块状分布,受地表裸露区及人类活动影响较大;中低温—中温异常多呈条带状、串珠状分布,多与断裂相关,如沿鹰潭—安远、大余—南城深大断裂带呈条带状异常,沿竹竿—湛田、对坊—田埠等 NE 向断裂呈串珠状异常;低温异常呈面状分布,在海拔较高的变质岩区低温异常最明显(图 2(a))。

表 3 已知地热的遥感、物探反演结果

Table 3 Remote sensing and physical inversion results of known geothermal

序号	名称	ETM+反演温度/ $^{\circ}\text{C}$	ASTER反演温度/ $^{\circ}\text{C}$	羟基异常	土壤湿度	水系两侧辐射范围/m	高程/m	航磁/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	重力/nT
1	肖田	6.96	7.55	2.8	0.06	78	348	110~120	-68~-66
2	桃源村	6.70	7.85	2.6	0.16	200	233	70~80	-62~-60
3	罗陂	7.3	6.86	0.63	0.27	54	215	70~80	-54~-52
4	蓝田	8.46	8.07	3.3	0.15	184	260	60~70	-58~-56
5	石上	7.82	7.9	2.34	0.24	230	206	80~90	-60~-58
6	李村	8.11	7.95	3.78	0.19	60	228	50~60	-60~-58
7	小布	7.88	6.86	2.43	0.16	187	324	120~130	-62~-60

已知地热与中温异常相关性最好,蓝田、李村、石上、罗陂和小布地热分布于中温区;已知地热与中低温异常相关性次之,桃源村、肖田地热分布于中低温区。因此,与地热相关的ETM+热红外反演异常由高至低分为两级,I级为7.23~8.58℃,II级为6.6~7.23℃(表2)。

(2) ASTER 热红外反演。本文选择时相为2017年6月22日的ASTER夜间数据,共3景,分别为AST_LIT_00302132017143058、AST_LIT_00302132017143049和AST_LIT_00302132017143040,数据重采样分辨率为90 m×90 m,热红外温度反演采用大气校正法^[7,27]。

研究区 ASTER 反演地表温度(X_A)为-1~14℃,已知地热反演温度为6.86~8.07℃(表3)。ASTER反演平均温度 \bar{X}_A 为5.94℃,标准差 σ_A 为1.03。结合已知地热与异常相关性,将异常分为四级: $X_A > 8.51^\circ\text{C}$ ($\bar{X}_A + 2.5\sigma_A$)为高温异常;7.48℃ ($\bar{X}_A + 1.5\sigma_A$) $\leq X_A < 8.51^\circ\text{C}$ ($\bar{X}_A + 2.5\sigma_A$)为中温异常;6.44℃ ($\bar{X}_A + 0.5\sigma_A$) $\leq X_A < 7.48^\circ\text{C}$ ($\bar{X}_A + 1.5\sigma_A$)为中低温异常; $X_A < 6.44^\circ\text{C}$ ($\bar{X}_A + 0.5\sigma_A$)为低温异常。高温异常呈面状、块状集中分布,以青塘、固村异常面积最大;中低温-中温异常呈面状分布,广泛分布于花岗岩区,其中会同岩体异常规模最大;低温异常广泛分布。此外,水域(如河流)相比于周围环境高温异常明显(图2(b))。

已知地热与中温异常相关性最好,蓝田、李村、桃源村、石上和肖田地热分布于中温异常区;与中低温异常相关性其次,罗陂和小布地热分布于中低温异常区。因此,与地热相关的ASTER热红外反演异常由高至低分为两级,I级为7.48~8.51℃,II级为6.44~7.48℃(表2)。

2.2.2 羟基异常

利用ETM+数据,采用主成分分析法提取羟基异常^[28-30]。研究区羟基异常为-5.76~13.4,已知地热羟基异常为0.63~3.78,大部分为2.43~3.78(表3)。羟基异常平均值 \bar{X}_{OH} 为0.04,标准差 σ_{OH} 为1.59。结合已知地热与羟基异常相关性,按 $\bar{X}_{OH} + 1.5\sigma_{OH} \leq X_{OH} < \bar{X}_{OH} + 2.5\sigma_{OH}$ 提取羟基异常。与地热相关的羟基异常为2.43~4.02(表2),主要分布于花岗岩区,其次为变质岩区,白垩纪碎屑岩区几乎无异常。异常与断裂具相关性,大规模的羟基异

常沿NNE向、NE向断裂带分布(图2(c))。

2.2.3 土壤湿度

研究区大面积植被土壤覆盖,通过对地表土壤湿度的反演,探究土壤湿度对寻找地热水的指示作用。利用ETM+数据,采用光谱特征空间法提取土壤湿度^[31-33]。研究区土壤湿度为-0.42~0.87,已知地热土壤湿度为0.06~0.27,大部分为0.15~0.27(表3)。土壤湿度平均值 \bar{X}_S 为-0.03,标准差 σ_S 为0.17。结合已知地热与土壤湿度相关性,按 $\bar{X}_S + \sigma_S \leq X_S < \bar{X}_S + 2\sigma_S$ 提取与地热相关的土壤湿度为0.14~0.31(表2)。土壤湿度高值异常沿河流分布,与地热相关的土壤湿度异常则多沿沟谷等地势低洼处呈带状、线状分布(图2(d))。

2.2.4 DEM

地热水空间分布与地形地貌及水系有关,研究区已知地热分布于相对地势较低的地区,大多分布在山间低洼的河谷和溪流边。基于ArcGIS平台,运用水文分析法^[34-35],利用10 m分辨率DEM数据提取等高线和水系(图2(e)、图2(f))。高程较低且相对高差大有利于水源补给及排泄,已知地热出露海拔为206~348 m(表3),本文高程因子提取海拔低于350 m的地区为有利区(表2)。河流、水沟等水系附近是形成地热水的有利位置,已知地热分布于水系两侧54~230 m内(表3),可提取水系250 m缓冲区作为预测因子(表2)。

2.3 物探因子

2.3.1 航磁

据1:20万航磁等值线图,研究区航磁-130~220 nT,已知地热均分布于50~130 nT正磁异常区(表3),因此与地热相关的航磁因子提取50~130 nT(表2)。

2.3.2 重力

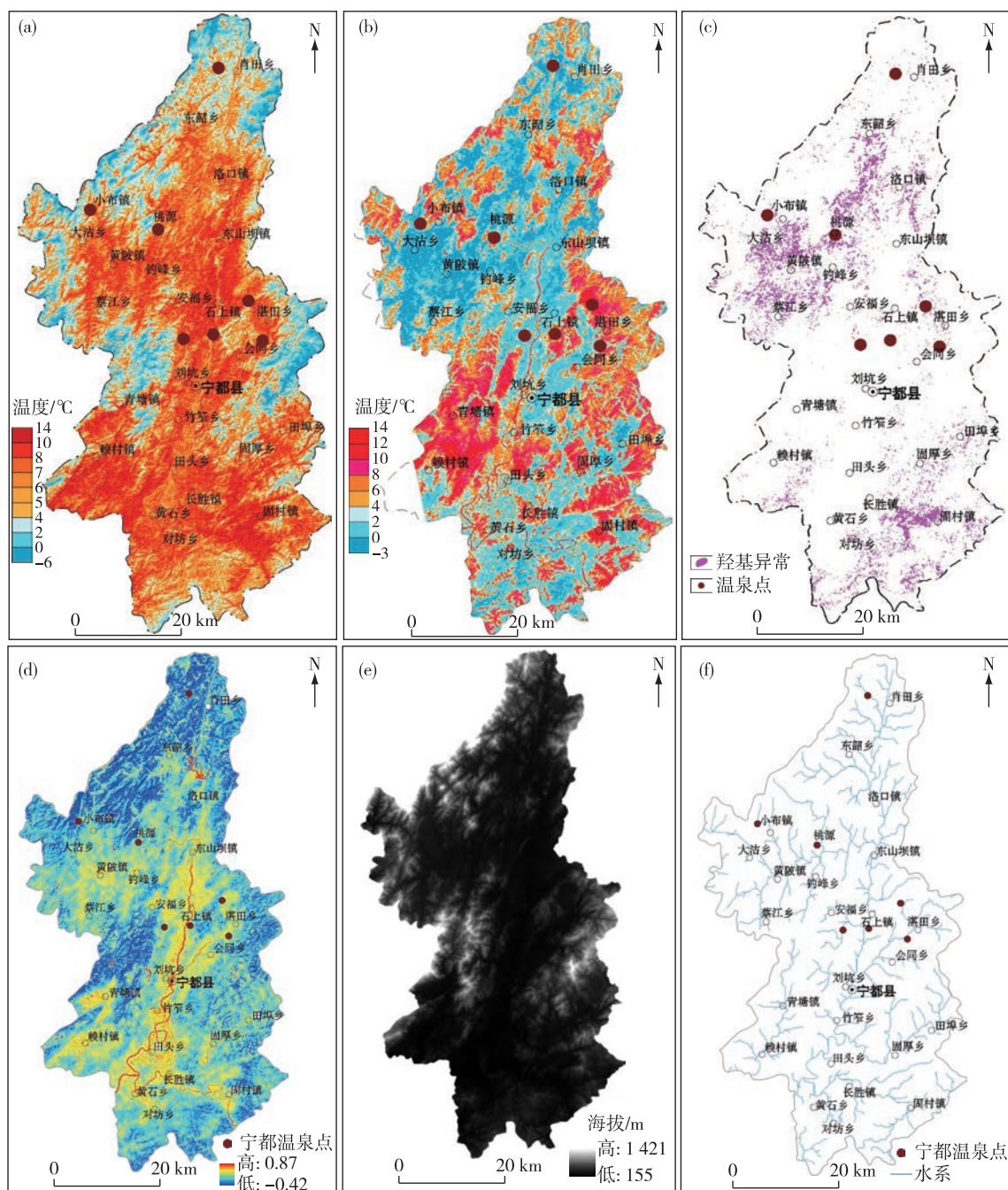
据1:20万布格重力等值线图,研究区处于低重力区,布格重力-72~-32 m/s²,已知地热全部分布于低于-50 m/s²的地区(表3),因此与地热相关的重力因子提取-72~-50 m/s²(表2)。

3 地热预测

3.1 证据权法

3.1.1 预测方法及流程

证据权法是开展成矿预测的常用方法^[36-38],本



(a).ETM+温度反演图;(b).ASTER 温度反演图;(c).羟基异常图;(d).土壤湿度图;(e).DEM 图;(f).水系图

图 2 基于遥感数据的预测因子图

Fig. 2 Predictors based on remote sensing data

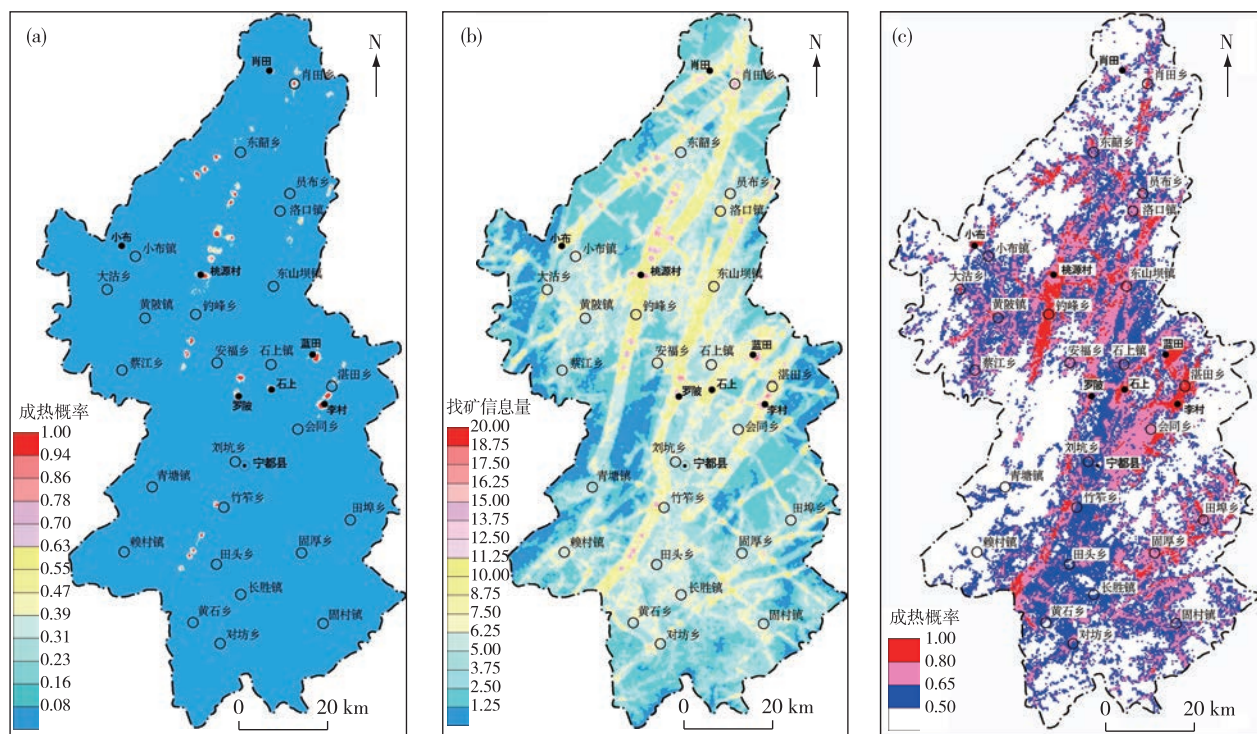
文应用到地热预测中来。基于 MOPAS 3.0 平台,主要预测流程:① 提取并建立与成热相关的预测因子;② 建立网格单元,网格大小 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$;③ 预测网格单元二值化;④ 已知地热点叠加分析;⑤ 计算先验概率;⑥ 计算各因子与成热的相关性;⑦ 计算成热概率。

3.1.2 预测结果

证据权法预测成果图(图 3(a))显示,异常总体呈 NNE 向、NE 向串珠状分布,与已知控热断裂相关性较高。单异常呈次圆状、不规则椭圆状、哑铃状,异常分带性好,浓集中心明显,多具 1~2 个浓集中心。根据等值线图,以成热概率 0.47 为下限圈定

有利预测单元^①,因预测结果高度集中,由高至低分为两级,其中成热概率 ≥ 0.7 为 I_z 级, $0.7 > \text{成热概率} \geq 0.47$ 为 II_z 级,成热概率 < 0.47 不具成热条

件。已知地热全部分布于 I_z 级有利单元中,且多数位于异常中心。



(a).证据权法预测图;(b).找矿信息量法预测图;(c).特征分析法预测图

图3 研究区基于不同方法的预测成果图

Fig. 3 Prediction results based on different methods in the study area

3.2 找矿信息量法

3.2.1 预测方法及流程

找矿信息量法是以地质异常理论为指导,以地质、物探、化探、遥感、矿产分布等找矿信息为基础,通过统计途径计算各地质因素、找矿标志所提供的找矿信息量,定量地评价控矿因素和找矿标志对指示找矿作用的大小,确定有利成矿部位。该方法广泛应用于找矿靶区或远景区的圈定^[39-41]。本文将找矿信息量法首次运用于地热预测,基于MOPAS 3.0平台,主要预测流程:①提取并建立与成热相关的预测因子;②建立网格单元,网格大小 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$;③预测网格单元二值化;④已知地热点叠加分析;⑤计算各预测因子信息量;⑥计算各预测网格单元信息量。

3.2.2 预测结果

找矿信息量成果图(图3(b))显示,异常总体呈NNE向、NE向串珠状展布,与已知控热断裂相关

性较高。信息量的上限为20,以信息量10为下限圈定有利单元^①,由高至低分为三级,其中信息量 ≥ 16.25 为 I_x 级, $16.25 > \text{信息量} \geq 13.75$ 为 II_x 级, $13.75 > \text{信息量} \geq 10$ 为 III_x 级,信息量 < 10 则不具成热条件。已知地热有5处分布于 I_x 级有利单元内,2处(肖田、小布)分布于 II_x 级有利单元内。

3.3 特征分析法

3.3.1 预测方法及流程

特征分析法是传统类比法的一种量化方法,通过研究模型单元的控矿变量特征,查明变量之间的内在联系,确定各个变量的成矿和找矿意义,建立起某种类型矿产资源的成矿有利度类比模型,然后将预测单元与模型单元的各种特征进行类比,用它们的相似程度表示预测单元的成矿有利性,并据此圈定出有利的成矿单元。该方法在矿产资源潜力评价中广泛应用,效果显著^[42-44]。本文运用MARS 2.0平台开展特征分析法地热预测,主要预

测流程:① 提取并建立与成热相关的预测因子;② 建立网格单元,网格大小 250 m×250 m;③ 预测因子存在标志提取;④ 设置矿化等级;⑤ 模型区选择;⑥ 变量二值化;⑦ 预测变量优选;⑧ 构置预测模型;⑨ 计算因素权重;⑩ 靶区优选。

3.3.2 预测结果

特征分析法预测成果图(图 3(c))显示,有利单元总体呈 NNE 向、NE 向带状、串珠状展布,与已知控热断裂相关性较高。以成热概率 0.5 为下限圈定有利单元^⑨,由高至低分为三级,其中成热概率 ≥ 0.8 为 I_T 级, $0.8 > \text{成热概率} \geq 0.65$ 为 II_T 级, $0.65 > \text{成热概率} \geq 0.5$ 为 III_T 级,成热概率 < 0.5 不具成热条件。已知地热有 5 处分布于 I_T 级有利单元内,2 处(肖田、罗陂)分布于 II_T 级有利单元内。

4 讨论

4.1 预测方法分析

4.1.1 预测因子的选择是关键

基于遥感技术的地热预测,最初仅利用遥感热红外反演温度异常圈定远景区,预测精度低,且假异常较多^[5-11]。随着预测方法不断改进,在热红外反演的基础上,增加多元信息预测因子 3~7 个,预测精度得到了明显提高^[12-19]。本文开展江西宁都地热预测,充分考虑了遥感反演温度与已知地热的关联程度,提取 ETM+ 热红外反演温度 6.6~8.58 ℃、ASTER 热红外反演温度 6.44~8.51 ℃、羟基异常 2.43~4.02、土壤湿度 0.14~0.31 为有利的预测因子。本文基于研究区成热地质条件,将遥感、物探相结合,提取各类预测因子 13 个,以期能够剔除假异常,提高预测精度。

4.1.2 多种预测方法的对比

以往基于 GIS 技术的地热预测采用单一方法^[15,45-46],本文应用了 3 种方法开展地热预测,有助

于对比研究,取长补短。其中,证据权法和特征分析法预测结果表达方式都是成热概率(0~1),成热概率高则寻找地热更有利,已知地热分布在成热概率 ≥ 0.7 的地区。证据权法预测的有利单元具有高度集中、定位精准的特点,而特征分析法预测的有利单元面积较证据权法更大,但其优势在于不会遗漏有利区。找矿信息量法预测结果是以信息量累加值来表达,信息量值越大,代表成热越有利,已知地热分布在找矿信息量 ≥ 13.75 的地区。证据权法和找矿信息量法都是通过对区内已知地热的分析建立各预测因子的影响值或权重,两者异常高值区高度相似(图 3(a)、图 3(b)),但因取值下限的表达方式不同,找矿信息量法预测有利单元范围更广,弥补了证据权法的不足。综上,证据权法预测地热有利区的精准性略高于找矿信息量法,优于特征分析法;特征分析法预测地热有利区的全面性优于找矿信息量法,远高于证据权法。

4.2 综合预测结果及可信度

4.2.1 综合预测结果

证据权法、找矿信息量法和特征分析法预测结果既有共性也有差别,应进一步优化预测成果,缩小预测有利区,达到定位更精准、更有效的目的。根据 3 种方法预测成果划分的 I、II、III 级,本着求同的原则,采取叠加分析的方法,将地热有利区按成热潜力由高到低划分为 A、B、C 三类,分类依据见表 4。A 类地热有利区:同时满足证据权法预测结果达 I_Z 级、找矿信息量法预测结果达 I_X 级、特征分析法预测结果达 I_T,求取三者交集。B 类地热有利区:同时满足证据权法预测结果 $\geq \text{II}_Z$ 级、找矿信息量法预测结果 $\geq \text{II}_X$ 级、特征分析法预测结果 $\geq \text{II}_T$ 级,求取三者交集。C 类地热有利区:同时满足找矿信息量法预测结果 $\geq \text{III}_X$ 级、特征分析法预测结果 $\geq \text{III}_T$ 级,求取二者交集。

表 4 地热有利区分类依据

Table 4 Classification standard of geothermal favorable areas

有利区 分类	分类条件			数量/个
	证据权法	找矿信息量法	特征分析法	
A 类	I _Z 级(成热概率 ≥ 0.7)	I _X 级(信息量 ≥ 16.25)	I _T 级(成热概率 ≥ 0.8)	12
B 类	$\geq \text{II}_Z$ 级(成热概率 ≥ 0.47)	$\geq \text{II}_X$ 级(信息量 ≥ 13.75)	$\geq \text{II}_T$ 级(成热概率 ≥ 0.65)	22
C 类	—	$\geq \text{III}_X$ 级(信息量 ≥ 10)	$\geq \text{III}_T$ 级(成热概率 ≥ 0.5)	45
合计				79

按上述分类依据,研究区共圈定 79 处地热有利区,其中 A 类 12 个、B 类 22 个、C 类 45 个(图 4)。有利区面积 0.53~13 km²,平均面积为 3.99 km²。

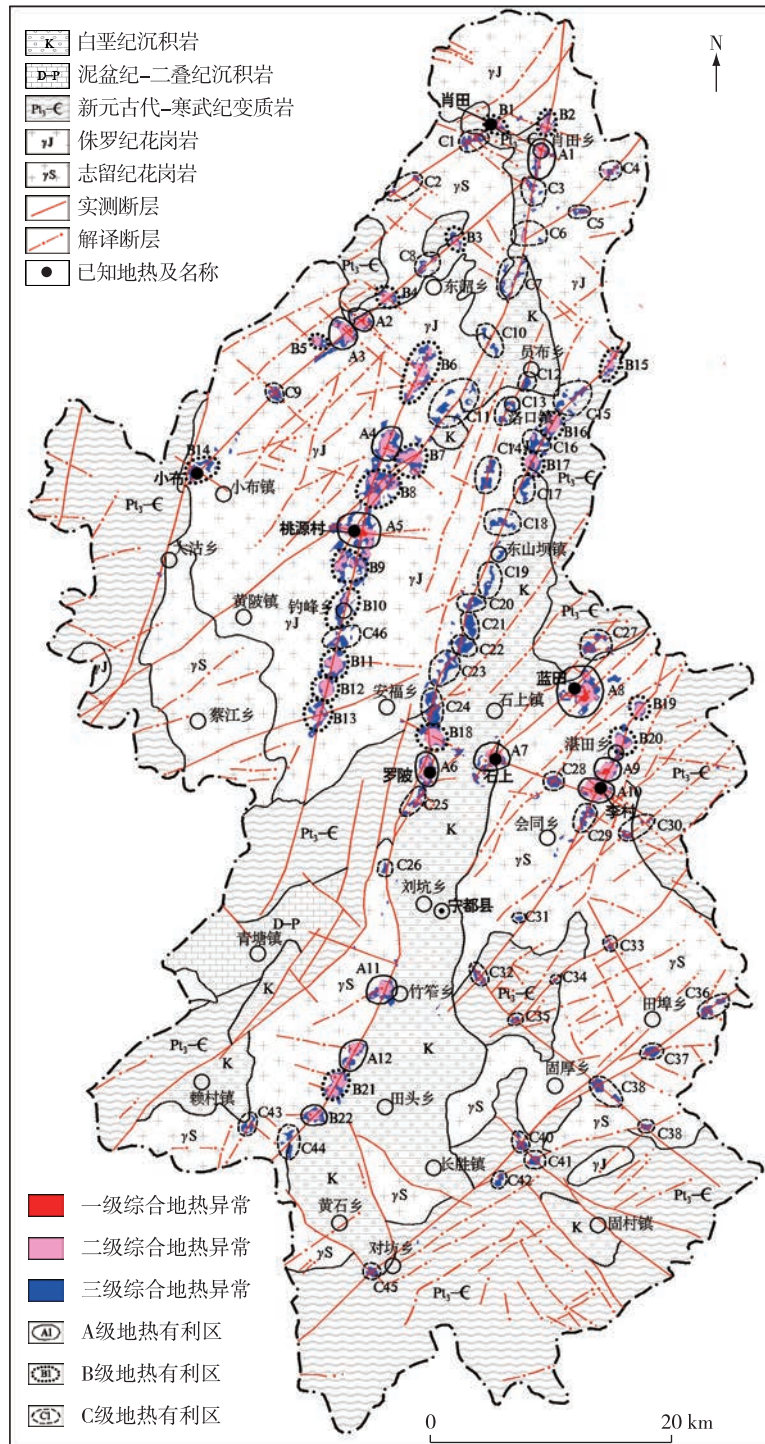


图 4 研究区地热综合预测成果图

Fig. 4 Comprehensive prediction results of geothermal resource in the study area

4.2.2 预测结果可信度

已知地热全部分布于 A 类、B 类有利区中,其

中 5 个 A 类有利区存在已知地热,分别为 A5-桃源村、A6-罗陂、A7-石上、A8-蓝田和 A10-李村,2 个 B

类有利区存在已知地热,分别为 B1-肖田和 B11-小布,C类有利区无已知地热。

本文主要对 A9、A11 有利区开展了野外验证。A9 分布于驿前一黄岗山断裂带的次一级 NE 向断裂上,出露斑状黑云母二长花岗岩,实测地下水 6 处,水温 22~27℃,平均水温 24.3℃,具明显的高温异常。A11 分布于鹰潭—安远断裂带上,西侧为鹅婆花岗岩体,东侧为白垩纪红层,测地下水水温 20.5℃,无异常,水质清澈,实测偏硅酸含量为 50.06 mg/L,达到天然饮用矿泉水标准。

综上,已知地热全部与 A 类、B 类有利区吻合,实地验证了两处 A 类有利区,其中 1 处高温异常明显,均证明本文预测结果可信度较高。

5 结论

(1)ETM+热红外反演温度 6.6~8.58℃、ASTER 热红外反演温度 6.44~8.51℃、羟基异常 2.43~4.02、土壤湿度 0.14~0.31 是江西宁都地区指示地热的有利标志。

(2)提出了地层、岩浆岩、控热断裂、控水断裂、断裂交汇、ETM+热红外反演温度、ASTER 热红外反演温度、羟基异常、土壤湿度、高程、水系、航磁、重力等 13 个地热预测因子。

(3)运用证据权法、找矿信息量法和特征分析法开展地热预测,综合分析圈定地热有利区 79 处,其中 A 类 12 处、B 类 22 处、C 类 45 处。已知地热与 A 类、B 类有利区吻合,部分 A 类有利区经野外查证发现地热异常,表明预测结果可信度较高。

(4)本文研究采用了 2 种遥感数据,提取了 13 个预测因子,运用了 3 种预测方法,具有遥感数据多源、预测因子多、智能化等特征,证明遥感地热 GIS 预测方法是一种实用有效的预测方法,能极大减少野外调查工作量,可作为地热资源调查中的一种常规技术方法使用。

致谢:本文基于“遥感方法在地热资源调查与预测中的应用”项目成果编写而成,是项目全体人员集体成果的结晶。中国地质大学(武汉)张志教授团队在遥感专业技术方面给予了极大的帮助,江西省地质局余忠珍教授级高工、唐维新教授级高工、周雷教授级高工,江西省地质调查勘查院楼法生教授级高工在研究过程中提出了宝贵的建议,在

此一并表示感谢!匿名审稿专家对本文进行了认真、专业的审阅,并提出了具有指导意义的意见和建议,在此表示衷心感谢!

注释

① 江西省地质调查勘查院.遥感方法在地热资源调查与预测中的应用成果报告(内部资料).2021.

参考文献

- [1] 周彦儒.热红外遥感技术在地热资源调查中的应用与潜力[J].国土资源遥感,1998,10(4):30-34.
ZHOU Y R. The application of thermal infrared remote sensing techniques in geothermal surveying [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1998, 10(4): 30-34.
- [2] 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.
- [3] FREEK M, CHRISTOPH H, FRANK R, et al. Geologic remote sensing for geothermal exploration: a review[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 33: 255-269.
- [4] 白宇,郑志忠,修连存,等.无人机高光谱遥感技术在自然资源调查中的应用进展[J].华东地质,2022,43(4): 527-538.
BAI Y, ZHENG Z Z, XIU L C, et al. UAV hyperspectral remote sensing technology and its application progress in natural resources survey [J]. East China Geology, 2022, 43(4): 527-538.
- [5] 许军强,白朝军,刘嘉宜.基于遥感技术的长白山火山区地热预测研究[J].国土资源遥感,2008,20(1): 68-71.
XU J Q, BAI C J, LIU J Y. Geothermal resource prognosis based on remote sensing technology in Changbaishan volcanic area[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2008, 20(1): 68-71.
- [6] 杨波,吴德文,赖健清,等.遥感技术在腾冲西南地区地热资源研究预测中的应用[J].国土资源遥感,2003,15(2):23-26.
YANG B, WU D W, LAI J Q, et al. The application of remote sensing technology to the study and forecast of terrestrial heat resources in southwestern Tengchong

- area Yunnan province [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2003, 15(2): 23-26.
- [7] WANG K, JIAN Q G, YU D H, et al. Detecting day-time and nighttime land surface temperature anomalies using thermal infrared remote sensing in Dandong geothermal prospect. [J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2019, 80: 196-205
- [8] XIONG Y, HE J X, MA N, et al. Land surface temperature retrieval based on thermal infrared remotely sensed data of aster(conference paper)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 300(2): 022027
- [9] 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.
- [10] 杨俊颖,温夏伟,谭红兵.西藏尼木地区遥感数据地温反演与地热异常预测[J].地质论评, 2021, 67(6): 1770-1779.
- YANG J Y, WEN X W, TAN H B. Land surface temperature using remote sensing data inversion and prediction of geothermal anomaly area in Nimu, Xizang (Tibet) [J]. Geological Review, 2021, 67(6): 1770-1779.
- [11] SAIBI H, MIA M B, BIERRE M, et al. Application of remote sensing techniques to geothermal exploration at geothermal fields in the United Arab Emirates[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(13): 1251.
- [12] 闫佰忠,邱淑伟,肖长来,等.长白山玄武岩区地热异常区遥感识别[J].吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(6): 1819-1828.
- YAN B Z, QIU S W, XIAO C L, et al. Potential geothermal field remote sensing identification in Changbai mountain basalt area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(6): 1819-1828.
- [13] 姚金,李静荣,凌造.粤北地热资源遥感调查探测模式与应用[J].地球信息科学学报, 2011, 13(1): 144-150.
- YAO J, LI J R, LING Z. Using remote sensing technique to investigate geothermal water in north of Guangdong Province, China [J]. Journal of Geo-information Science, 2011, 13(1): 144-150.
- [14] 熊永柱,陈峰,黄少鹏.基于遥感技术的腾冲地热异常区识别[J].成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 109-118.
- XIONG Y Z, CHEN F, HUANG S P. Application of remote sensing technique to the identification of geothermal anomaly in Tengchong area, southwest China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(1): 109-118.
- [15] SARA M, ABUZIED, MONA F, et al. Multi-criteria decision support for geothermal resources exploration based on remote sensing, GIS and geophysical techniques along the Gulf of Suez coastal area, Egypt [J]. Geothermics, 2020, 88: 101893.
- [16] DANI M, AGUNG S, AGUNG H. Revealing geothermal potential areas with remote sensing analysis for surface temperature and lineament density: case study in south Bajawa, NTT, Indonesia [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 417 (Conference 1): 012009.
- [17] 陈喆,董庆,陈建平,等.基于热红外遥感的川藏铁路昌都—林芝段地热异常区定量预测评价研究[J].遥感技术与应用, 2021, 36(3): 1-11.
- CHEN Z, DONG Q, CHEN J P, et al. Research on quantitative prediction and evaluation of geothermal anomaly area in Qamdo-Nyingchi section of Sichuan-Tibet Railway [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(3): 1-11.
- [18] 辛磊,刘新星,张斌.遥感影像地表温度反演与地热资源预测——以石家庄地区为例[J].地质力学学报, 2021, 27(1): 40-51.
- XIN L, LIU X X, ZHANG B. Land surface temperature retrieval and geothermal resources prediction by remote sensing image: A case study in the Shijiazhuang area, Hebei province [J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(1): 40-51.
- [19] 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/OL]. (2022-06-08) [2022-11-02]. https://9.cglhub.com/detail_38502727e7500f26709d536cfa7c17918a06a6c888f023991921b0a3ea255101fc1cf1fbb4666ae6d8747e8ea5a004e616f04e7e5dfbf4d3d8df932c195333ed78cde4863682e360fa7e662bd7eb6d28?&apistrclassfy=0_14_3.
- HAO M, GAO Y Y, WANG Q, et al. Geothermal anomaly detection based on evidence theory integrating multi-view remote sensing information [J/OL]. (2022-06-08) [2022-11-02]. https://9.cglhub.com/detail_38502727e7500f26709d536cfa7c17918a06a6c888f023991921b0a3ea255101fc1cf1fbb4666ae6d8747e8ea5a004e616f04e7e5dfbf4d3d8df932c195333ed78cde4863682e360fa

- 7e662bd7eb6d28? &apistrclassfy=0_14_3.
- [20] 江西省地质矿产勘查开发局. 江西省环境地质志[M]. 北京:地质出版社, 2017.
Jiangxi Bureau of Geology & Mineral Exploration. Environmental geology of Jiangxi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [21] 刘伟,黄运翠瑶,范超.江西省宁都县陂下地热地质特征及资源评价[J].华东地质,2020,41(4):375-380.
LIU W, HUANG Y C Y, FAN C. Geological characteristics and resource evaluation of Pixia geotherm in Ningdu county, Jiangxi Province [J]. East China Geology, 2020, 41(4): 375-380.
- [22] 姜光政,高棚,饶松,等.中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J].地球物理学报,2016,59(8):2892-2910.
JIANG G Z, GAO P, RAO S, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2892-2910.
- [23] 林乐夫,王安东,孙占学,等.江西省实测地表热流值及特征[J].能源研究与管理,2017(3):91-94.
LIN L F, WANG A D, SUN Z X, et al. Surface heat flow values and characteristics, Jiangxi[J]. Energy Research and Management, 2017(3): 91-94.
- [24] 刘峰,王贵玲,张薇,等.江西宁都县北部大地热流特征及地热资源成因机制[J].地质通报,2020,39(12):1883-1890.
LIU F, WANG G L, ZHANG W, et al. Terrestrial heat flow and geothermal genesis mechanism of geothermal resources in northern Ningdu County, Jiangxi Province [J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(12): 1883-1890.
- [25] 黄长生,侯保全,易秤云,等.赣南地热水形成条件分析与赣县区地热水勘查靶区圈定[J].华南地质,2021,37(1):64-74.
HUANG C S, HOU B Q, YI C Y, et al. Discussion on the formation conditions of geothermal water in southern Jiangxi province and the target area of geothermal water exploration in Ganxian district [J]. South China Geology, 2021, 37(1): 64-74.
- [26] 赵平,汪集,汪缉安,等.中国东南地区岩石生热率分布特征[J].岩石学报,1995,11(3):292-305.
ZHAO P, WANG J, WANG J A, et al. Characteristics of heat production distribution in SE China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(3): 292-305.
- [27] 翟锡丹.长白山地区地表温度异常遥感研究[D].长春:吉林大学,2015.
ZHAI X D. Changbai Mountain area surface temperature anomaly of remote sensing research [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [28] 王宏,范英霞,李晓青.基于遥感技术的新疆大南湖一带地区矿化蚀变信息提取[J].测绘与空间地理信息,2018,41(10):24-26.
WANG H, FAN Y X, LI X Q. Extraction of mineralized alteration information in the area of Xinjiang Dananhu based on remote sensing technology [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(10): 24-26.
- [29] 王烜,雷广新,江洋.基于主成分分析法对遥感蚀变异常提取——以内蒙古伊和诺尔地区 1:5 万矿调为例[J].地质与资源,2014,23(S1):122-128.
WANG X, LEI G X, JIANG Y. Extraction of alteration anomalies from remote sensing data based on principal component analysis: a case study of the 1:50 000 mineral geological survey in Yihenuoer area, Inner Mongolia [J]. Geology and Resources, 2014, 23(S1): 122-128.
- [30] 朱骏.植被干扰区蚀变信息遥感提取方法研究[D].杭州:浙江大学,2012.
ZHU J. A study on remote sensing alteration information extraction in vegetation area [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [31] 罗浩,王红,施长惠.黄河三角洲地区地下水埋深遥感反演[J].国土资源遥感,2013,25(3):145-152.
LUO H, WANG H, SHI C H. Retrieving groundwater in Yellow River delta area using remote sensing [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2013, 25(3): 145-152.
- [32] 杨树聪,沈彦俊,郭英,等.基于表观热惯量的土壤水分监测[J].中国生态农业学报,2011,19(5):1157-1161.
YANG S C, SHEN Y J, GUO Y, et al. Monitoring soil moisture by apparent thermal inertia method [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1157-1161.
- [33] 赵鑫,王萍,马力.基于遥感数据的矿区土壤湿度信息提取及影响因素分析[J].中国科技论文,2019,14(9):991-997.
ZHAO X, WANG P, MA L. Extraction of soil moisture information based on remote sensing data and analysis of influencing factors [J]. China Sciencepaper, 2019, 14(9): 991-997.
- [34] 孔辉,孙增慧,石磊,等.在 ArcGIS 软件下利用 DEM 数据提取流域水系网[J].数字技术与应用,2018,36(9):76-78.

- KONG H, SUN Z H, SHI L, et al. Extracting watershed network from DEM data under arcgis software [J]. Digital Technology & Application, 2018, 36(9): 76-78.
- [35] 罗大游, 温兴平, 沈攀, 等. 基于 DEM 的水系提取及集水阈值确定方法研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 189-194.
- LUO D Y, WEN X P, SHEN P, et al. Information extraction of river networks and determination of drainage area threshold using DEM data [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 189-194.
- [36] 吴恩政. 基于 GIS 的证据权法在矿产资源评价中的应用——以内蒙古白音希勒地区为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- WU E Z. Application of weights-of-evidence method based on GIS on copper and gold mineral resources assessment—a case of Baiyinxile Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [37] 方捷, 张晓东, 张定源, 等. 基于证据权法的安徽东溪金矿大比例尺成矿预测与评价[J]. 华东地质, 2017, 38(1): 37-44.
- FANG J, ZHANG X D, ZHANG D Y, et al. Prediction and evaluation of large scale metallogeny in the Dongxi gold deposit of Anhui Province based on the weights of evidence methodology [J]. East China Geology, 2017, 38(1): 37-44.
- [38] 刘亚洲, 申维. 基于 GIS 的证据权法在铁力—二股地区铅锌多金属矿床预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2018, 54(1): 59-68.
- LIU Y Z, SHEN W. Application of the evidence-weight method based on GIS to the prediction of the lead-zinc polymetallic deposit in the Tieli—Ergu area [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(1): 59-68.
- [39] 王勇, 陈邦国. 找矿信息量法在铜山铜矿成矿预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2002, 38(3): 49-51.
- WANG Y, CHEN B G. The application of prospecting-information contents in metallogenic prognosis at Tongshan copper deposit [J]. Geology and Exploration, 2002, 38(3): 49-51.
- [40] 游远航, 杨建中, 胡明, 等. 找矿信息量法在成矿预测中的应用——以武当西缘铅锌铜矿预测为例[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(1): 58-62.
- YOU Y H, YANG J Z, HU M, et al. Application of prospecting-information contents method for metallogenic prediction: a case study on prediction of lead-zinc-copper deposit in western Wudang area [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2006, 21(1): 58-62.
- [41] 浦路平, 朱国器, 尹意求, 等. 与找矿信息量法结合的含矿网格单元蒙特卡洛矿产资源潜力评价方法的原理及应用[J]. 矿产与地质, 2016, 30(3): 491-496.
- PU L P, ZHU G Q, YIN Y Q, et al. Principles and application of ore-bearing-grid-cell-based monte-carlo method for mineral resource potential assessment combined with prospecting information method [J]. Mineral Resource and Geology, 2016, 30(3): 491-496.
- [42] 娄德波, 肖克炎, 丁建华, 等. 矿产资源评价系统(MRAS)在全国矿产资源潜力评价中的应用[J]. 地质通报, 2010, 29(11): 1677-1684.
- LOU D B, XIAO K Y, DING J H, et al. Application of MRAS in national mineral resource potential assessment [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(11): 1677-1684.
- [43] 陈芳, 杜建国, 许卫, 等. 基于 MRAS 的特征分析法在霍邱式沉积变质型铁矿预测中的应用[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 733-734.
- CHEN F, DU J G, XU W, et al. Application of MRAS-based feature analysis in prediction of Huoqiu sedimentary metamorphic iron deposits [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(S1): 733-734.
- [44] 吴传军, 许德如, 周迎春, 等. 基于特征分析法的琼南矽卡岩型矿床成矿预测研究[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(3): 528-541.
- WU C J, XU D R, ZHOU Y C, et al. Metallogenic prognosis for skarn-type deposits based on characteristic analysis in southern Hainan island [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(3): 528-541.
- [45] 李建明. 基于证据权重法对中国地热的预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- LI J M. Geothermal prediction and research of China based on the method of evidence weight [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [46] 陈喆. 川藏铁路沿线及邻区地热异常区定量预测评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- CHEN Z. Quantitative prediction and evaluation of geothermal anomaly area along Sichuan-Tibet railway and adjacent areas [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.

Remote sensing geothermal GIS prediction method—a case study in Ningdu City, Jiangxi Province

YUAN Jing^{1,2}, CHEN Yan¹, TANG Chunhua¹, SUN Chao¹, WAN Sheng¹, QIAN Zhengjiang¹,
TANG Xiao¹, WANG Mingyou¹

(1. *Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang 330030, Jiangxi, China;*

2. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*)

Abstract: Remote sensing technology is widely used in geothermal resource investigation and prediction. To solve the problems of the low accuracy and many false anomalies in the traditional remote sensing geothermal prediction, this paper presents a method of remote sensing geothermal GIS prediction. Taking Ningdu, Jiangxi Province as the research area, the study on thermal geological conditions was carried out, and the indication functions of geology, remote sensing and geophysical exploration on geothermal energy were analyzed. Furthermore, 13 predictive factors including strata, magmatic rocks, thermal control faults, water control faults, fault intersection, ETM+ thermal infrared inversion temperature, ASTER thermal infrared inversion temperature, hydroxyl anomaly, soil moisture, elevation, water system, aero-magnetism and gravity were put forward. Geothermal prediction was carried out with the methods of evidence-weight, prospecting information and characteristic analysis, and 79 geothermal favorable areas consisting of 12 places of Class A, 22 Class B and 45 Class C were delineated through comprehensive analysis. The known geothermal distribution coincides with Class A and Class B favorable areas, and the Class A favorable areas were partially found with geothermal anomalies by the field investigation, indicating high reliability of the prediction. Remote sensing geothermal GIS prediction is a practical and effective method because of its multi-source remote sensing data, incremental prediction factors and intelligence, which can be used as a conventional technique in geothermal resource survey.

Key words: remote sensing; geothermal; thermal infrared; predictors; GIS technology; Ningdu City