

# 粤北地热资源遥感调查探测模式与应用

姚金, 李静荣, 凌造

(广东有色工程勘察设计院, 广州 510080)

**摘要:** 目前, 地热资源勘查仍以传统的物探方法为主, 这样在探测区地热宏观环境条件不明时, 就会出现投资风险大或盲目开采的情况; 而遥感对地热资源的探测是弥补这一不足的先进技术。本文利用陆地卫星遥感数据处理方法进行了有效的遥感地质解译, 依据陆地卫星红外遥感数据所反映的地物辐射温度差异特点, 对遥感影像进行波段差值运算、HIS(HLS)彩色变换的增强处理, 获得了工作区范围内的热异常分布格局。另通过遥感地质解译、地面调查等综合分析, 剔除地热假异常, 有效提取了地热异常的分布范围。综合热红外遥感地热异常和遥感地质解译及野外实地调查所获得的地质、构造、地形地貌等信息, 建立有利于形成地下热水的信息模式, 以指导实际寻找未知区域地下热水工作。上述实例说明, 该技术方法切实可行, 值得进一步研究和推广。

**关键词:** 遥感技术; 红外遥感; 地下热水; 信息模式

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2011.00144

## 1 引言

随着经济社会的发展和科技进步, 地热资源开发利用的经济、社会和环境效益越来越显著, 对地热资源的需求也越来越迫切。地热资源的开发对充分利用清洁能源, 缓解当今社会能源紧张状况, 发展循环经济具有重要的意义<sup>[1]</sup>。

目前, 地热资源的勘查工作仍然是以传统的物探方法为主要手段, 包括重力、磁法、电法等探测方法<sup>[2]</sup>。近几年来, 随着遥感技术的迅速发展, 利用遥感热红外波段探测地热资源的方法也不断得以深化。这是由于传统的物探方法具有周期长、投资大等缺陷, 尤其在探测区范围较大而地热宏观环境条件不明时, 则容易出现投资风险大或盲目开采的情况。通过地热引起的地表温度异常进行地热资源的探测, 具有效率高、范围广、节省经费等特点<sup>[3]</sup>。但单一的利用遥感热红外波段来探测地热异常还存在着一些问题, 比如, 如何排除地面非地热异常引起的热异常区和太阳辐射所带来的干扰信息, 以及如何提高不同成像条件下的遥感图像的处理精度等<sup>[4]</sup>。鉴此, 本文结合地热资源与地质、地貌环境等条件分析, 提出多元信息综合应用的思路, 利用遥感技术建立“成热水信息模式”方法, 进

行地热资源的勘查, 以反映地质、构造、地热异常, 以及地形地貌等对地热资源的综合影响与作用。这样就将单一热红外异常探测技术, 得以拓展, 大大提高了地热资源勘查的精度。

## 2 粤北地热资源探测的地学分析

地热资源的形成与其地质、构造、地形地貌等因素有着密切的关系(图1)。

### 2.1 地热与断裂构造的关系

广东省控制地热分布的断裂带, 主要是构成该省基本构造骨架的北东向(即华夏系)断裂和东西向构造, 大部分地热位于北东向断裂与北西向断裂(常常是次一级断裂构造)的交汇处, 北东向断裂是控热构造, 北西向断裂是导热(水)构造<sup>[5-6]</sup>。研究区地质构造主要受北东向吴川-四会、恩平-新丰深大断裂和近东西向佛冈-丰良深大断裂控制<sup>[7]</sup>。

#### (1) 东西向构造带

工作区的东西构造主要是由酸性、中酸性侵入岩体、中酸性火山岩带, 隐伏基底构造, 以及断裂带、褶皱带、旋扭构造等构成。其中, 大东山-贵东带、佛冈-南昆山带与热泉分布密集带关系尤为密

收稿日期: 2009-10-13; 修回日期: 2010-08-15.

基金项目: 广东省财政厅项目(粤财工[2008]157号)。

作者简介: 姚金(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事遥感与物探工作方面的研究工作。E-mail: yaojin\_2007@sina.com

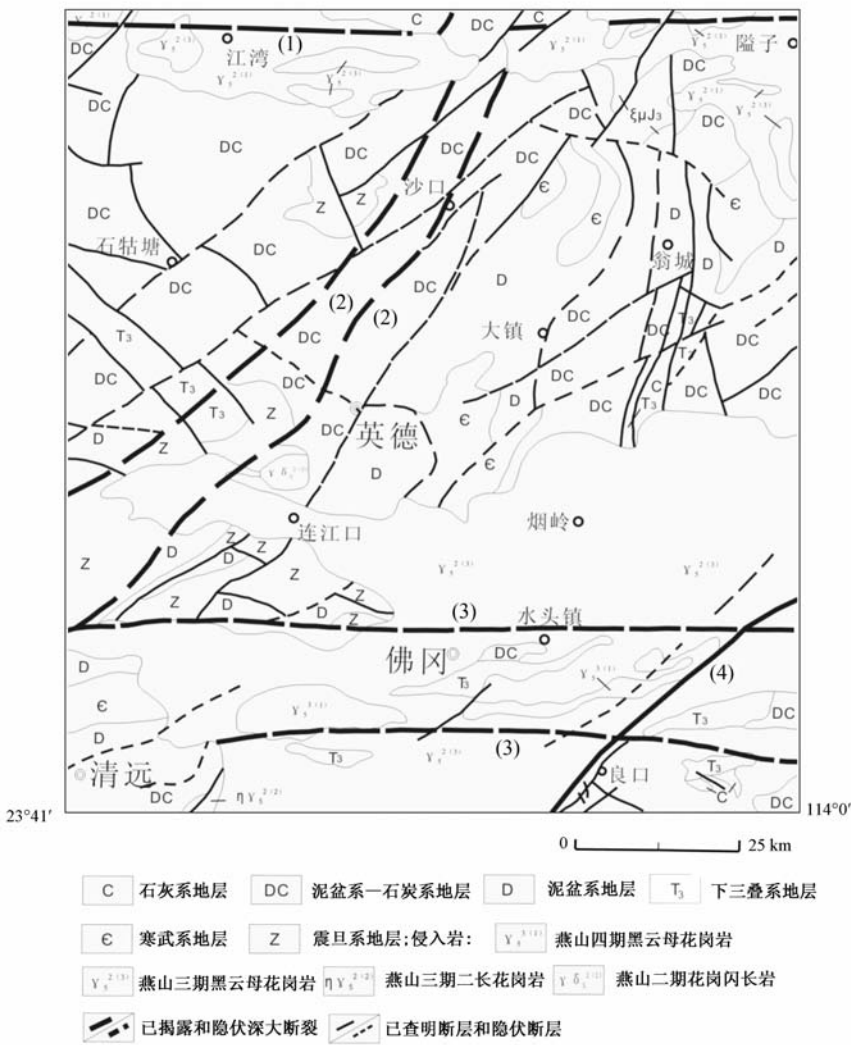


图 1 研究区地质构造略图

Fig. 1 Geologic structure of the study area

深大断裂:(1)南澳深断裂带;(2)吴川—四会深断裂带;(3)佛冈—丰良深断裂带;(4)恩平—新丰深断裂带

切。这些岩体内发育一系列东西向的压性和压扭性断裂,由此可见,东西向复式岩体中发育的东西向断裂,以及隐伏基底断裂,具有非常重要的控热作用,因而推断它们应是研究区内深部地热资源向上运移的主要通道。

(2)北东向构造带

该组断裂带主要表现为一组规模巨大的北东向压扭性断裂,并主要控制着酸性岩浆的侵入和喷出活动,并对该区的地下热水的形成与分布起着一定的主导作用。沿着区域深、大断裂呈串珠状出露的温、热泉数占广东省总数的一半以上。其中,以北东向的断裂带出露的温、热泉最多,生成时间较早,但都经历了先压后张或压、张多次反复交替的多旋回活动。这些断裂切割地壳深、规模大,所以,它们对地下热水的储存、运移和排泄,起着明显的

主导控制的作用。

2.2 地热与岩浆岩的关系

研究区内岩浆岩主要分布在南、北部地区,出露的岩浆岩都以大型花岗岩岩基为主,呈东西向条状分布,岩体内尚有大量基性岩脉、石英脉,以及浅成花岗斑岩岩株。如大东山-贵东复式岩体、佛冈复式岩体,以及东北部的热水岩体。本次工作所调查和新发现的地热,几乎都是围绕着这三大东西向复式岩体。在研究区内共调查了 36 处温泉点,其中有 32 处是分布在花岗岩岩体内,另外 4 处分布在花岗岩体的外接触带的石炭系的灰岩中。说明研究区内的地热同样与岩浆岩关系十分密切,尤其是燕山期的花岗岩体,结合前人所研究的资料更充分说明了这三大复式花岗岩体即为该区的控热岩体。

2.3 粤北的地热特征<sup>[8]</sup>

(1)地下水源

从本次调查所取的地热水样分析结果和以往资料显示,该区地热水类型主要为低矿化度  $\text{HCO}_3-\text{Na}$  型,从而确认地热水是处于强循环的水文地质环境,同时地热水所含气体以氮、氢为主,依此看出该区地下水的补给主要来源于大气降水。

(2)热储层

研究区地下水类型主要有松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。由于该区断裂构造非常发育,沿断裂带在强烈构造应力作用下,形成破碎裂隙发育带,构造带类型复杂,有硅化,构造角砾岩化和糜棱岩化构造带,断裂经历了多次不同性质的活动,在地热流体作用下产生水热蚀变,为地热流体的运移和贮存提供了空间,属本区的热储层。

(3)热储盖层

该区热储盖层主要为第四系洪积层和坡残积层为主,第四系冲洪积层中粗颗粒间普遍充填泥质物质,坡残积层以粘性土为主,透水性均较差,富水性弱,具有良好的隔水性和隔热性,该两层直接覆盖于热储层之上,属良好的热储盖层。但由于地表水冲刷作用,局部第四系厚度较薄甚至缺失,形成热储层与地表相通的“天窗”,使地热水向地表排

泄,形成自然出露温泉。

3 地热资源的图像处理与识别分析

本次工作主要采用 2002 年 11 月 7 日过境的 ETM+数据源,共 8 个波段,涉及两景数据。解译过程中为提高解译图像的的可识别性,采用分辨率为 30m 的 ETM+5、4、3 的合成彩色图像与分辨率为 15m 的 ETM+8 全色波段图像进行融合处理。同时还采用了 1:5 万彩色卫片(共 24 幅)和黑白航片(1:19 000)进行辅助解译。

3.1 地热的地质基础判释

实际工作中通过 ERDAS IMAGINE 9.2 和 MAPGIS 6.7 软件进行遥感地质解译,首先,将融合处理后的 ETM+ 5、4、3 组合影像图进行几何校正等处理<sup>[9]</sup>,然后,转换成 \* msi 格式,依据已有地质资料,在 MAPGIS 软件下进行分析,同时对 1:5 万彩色卫片进行解译,并转绘至 1:5 万地形图上,最后依据 1:5 万彩色卫片解译结果在 MAPGIS 环境下进行修正,复杂地区用放大镜目视航片,而后整饰成图<sup>[10]</sup>,图 2 为工作区内良口地区遥感解译图。

本次工作除了在影像图上解译出较明显大的

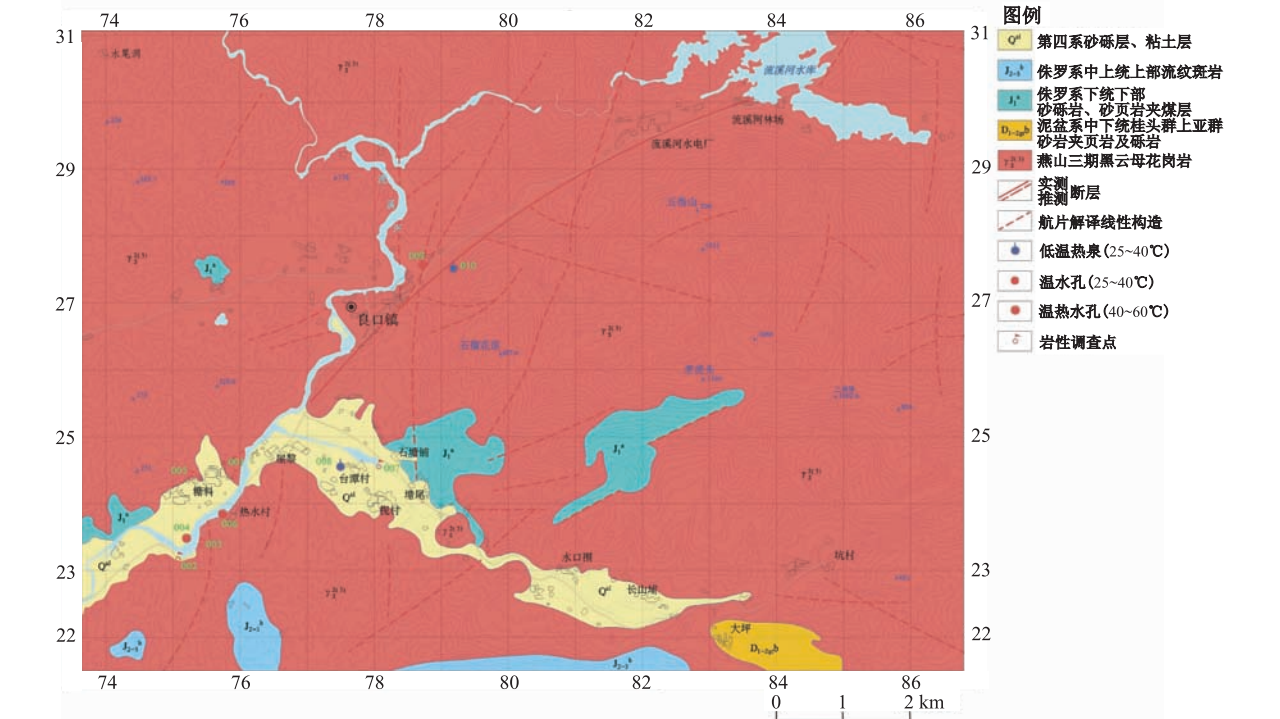


图 2 良口地区遥感解译图  
Fig. 2 Remote sensing interpretation chart of Liangkou Town

区域构造和断裂构造外,还解译出 800 余条大小断裂构造,建立了断裂解译标志。

### 3.2 地下热水的热红外图像处理分析

通过图像配准和几何校正,以及图像波段差值运算、IHS(HLS)彩色变换分析处理,获得了地质构造、岩性、地形地貌等信息与地下热水的形成关系,从而建立多元信息条件下的找地热水模式,形成快速、准确地寻找地下热水资源的新技术途径。

#### (1) 图像波段差值运算法

利用 ETM+6 与 ETM+7 波段相减,能使一部分反射的太阳辐射干扰得以抵消,有利于突出温差所引起的光谱特征(2007,乔玉良等)<sup>[11]</sup>。为了更好地显示温差在图像上显示的效果,我们选择采用了 ETM+(6-7)、4、3 波段进行影像合成,并对合成影像图采用线性拉伸的空间域图像作增强处理,以达到增强图像的可视效果<sup>[12]</sup>。

最后,通过分别调整 R、G、B 3 个通道的亮度关系,使得合成 ETM+(6-7)、4、3 图像上的地热资源异常信息更加突出,其他干扰信息则降到最低<sup>[11]</sup>(图 3)。

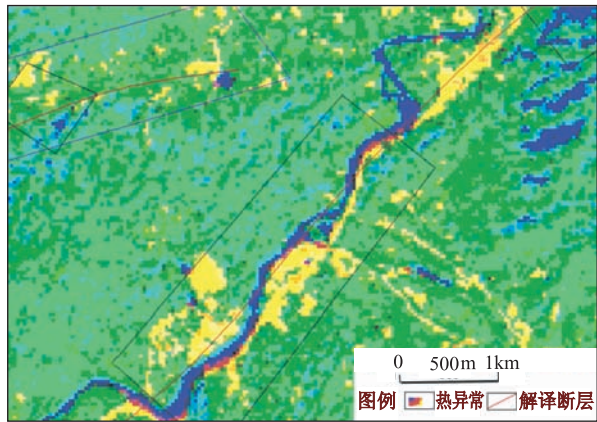


图 3 波段差值法提取良口地区地下热水信息图

Fig. 3 The result of geothermal water information extraction in Liangkou Town by multi band subtraction approach

#### (2) IHS(HLS)彩色变换法

亮度值的变化可以改进图像质量<sup>[13]</sup>,色彩变换,不仅可以使热红外波段的遥感信息和较高分辨率的图像波段相融合,提高热辐射模拟的地面精度,更重要的是可以将热红外信息以符合人眼视觉感受的颜色序列的变化,形象、直观地反映在图像上。在融合之前需要对 ETM+6 影像进行灰度拉伸、直方图均衡等预处理,使得影像色调均衡和清晰<sup>[14]</sup>。

TM6 图像数据可反映出地面的辐射温度,进而分析图像的色调差异判读地热异常。另利用一般的 TM/ETM+热红外亮温计算模式可以得到 TM6 像灰度值和地面亮温之间的定量关系<sup>[15]</sup>。

首先,将 TM6 波段图像灰度值转化为辐射亮度值:

$$L_b = L_{\min} + (L_{\max} - L_{\min}) DN / 255 \quad (1)$$

式中, $L_b$  为辐射亮度值; $L_{\max}$ 、 $L_{\min}$  分别为该波段探测器可探测最高和最低辐射值; $DN$  为 TM6 图像的灰度值。

然后,将辐射亮度值换算成地面亮温。如不考虑大气影响,则可通过辐射亮度  $L_b$  推算地面高温  $T_b$ :

$$T_b = K_1 / [L_b (K_2 / L + 1)] \quad (2)$$

式中, $T_b$  为亮温; $K_1$ 、 $K_2$  为校正计算常数,对某一特定传感器而言是已知常数<sup>[16]</sup>。

利用 Landsat 热红外亮温计算模式,首先,将两个公式代入对 TM6 进行计算,然后,以 TM6 波段图像为主进行 HLS 变换<sup>[17]</sup>:先对 TM6 波段进行灰度拉伸,使其温度之间的差异显示更加明显,而后将灰度拉伸后的图像滤去灰度值低于 85 部分的图像作为 H 值。再把几何分辨率相对较高的 ETM+8 波段作为 L 值参与 HLS 色彩变换<sup>[18]</sup>。图 4 为彩色变换提取良口地区地下热水信息图像。

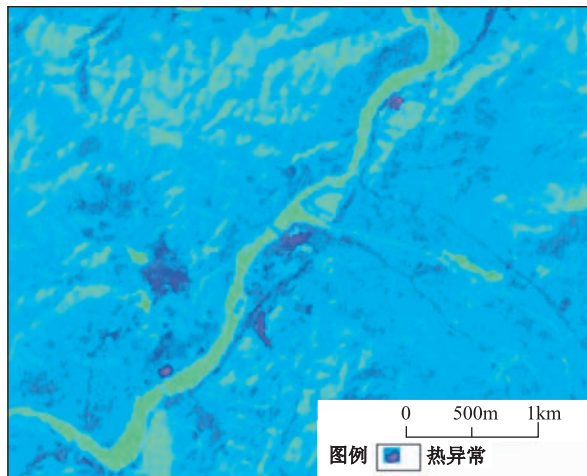


图 4 彩色变换法提取良口地区地下热水信息图像

Fig. 4 The result of geothermal water information extraction in Liangkou Town by color transformation approach

## 4 地下热水模式的构建与应用

### 4.1 地下热水模式

为了便捷地圈定未知地下热水远景区的目的,



进而选择在 MAPGIS 软件下进行图像综合分析,其步骤如下:

(1)把波段差值运算和彩色变换图像转成 \* msi 文件,将地形图扫描或矢量化,并进行校正存为线文件。

(2)在 MAPGIS 下,建立新的工程文件,并填加差值运算的 \* msi 文件、地质解译、地形图和已知温泉点文件。

(3)正确选择文件显示顺序,圈定差值运算图像上的地热异常范围,尽可能剔除假异常信息。

(4)把差值运算图像关闭,填加彩色变换 \* msi 文件,同样圈定其可能由地热引起的热异常范围。

(5)关闭彩色变换文件,调整各文件的显示顺序,生成地热异常、地质构造、地形地貌等信息综合图。

通过上述综合分析认为:

(1)研究区内已查明的地下热水中,除英德横石塘镇一望埠一带、韶关曲江区罗坑镇热水带及翁源官渡庙墩镇热水村温水带出露处为泥盆—石炭系灰岩地层外,其余各带均出现在燕山期花岗岩体内接触带上。且出露在灰岩的地下热水区域大多仍属于花岗岩体的外接触带上,因此,工作区地下热水与花岗岩体关系密切。

(2)地下热水形成的构造特征有:①区域断裂带的弧形段,如弧形断裂与旁侧次级横张、张扭性断裂、劈理构造交汇处。②深、大断裂与次一级断裂交汇处。③深、大断裂旁多组方向次级断裂交汇部位或与区域深、大断裂平行的次一级高角度断裂与之相交的配套断裂。④控热断裂带上盘较下盘的热矿水多。⑤控热断裂下盘为同方向展布的岩体出露时,其内的热矿水比上盘为岩体的断裂段更多。⑥泉眼的分布受控于最低级别构造一小构造的控制。

(3)从研究区内已查明的地下热水、泉可以看出,其出露地形地貌均处于相对周围地势较低的环境,大多在山间小盆地内的河谷和溪流边、山前冲积盆地、冲洪积盆地;灰岩外接触带喀斯特低山丘陵山间冲洪积盆地。

(4)从遥感热红外图像处理结果与已知地下热水信息相互对应的结果显示,在波段差值运算和彩色变换处理结果图像上均有不同程度的地热异常显示,前者显示为红色,后者则显示为紫红色。

依据矿产地质上“相似成矿”原则,为方便有效

地寻找研究区内其他有利的成热水区域,从而可依据以上所总结的 4 个特点即可视为该研究区形成地下热水 4 个充分条件而构建一个便于寻找地下热水的模式。结合该研究内主要构造、地质、地貌,以及热红外处理结果构建出该研究区热水模式(如表 1)。

表 1 工作区有利形成地下热水的信息模式

Tab. 1 The good information pattern for the work area to generate geothermal water

地质信息	地 层 构造	主要以花岗岩体为主,花岗岩内接触带或与其他地层的接触带偏向花岗岩部位 以东北向断裂构造与东西向构造结合部位为主,通常出露于次一级的小断层上
地形地貌	地形地貌	山间河谷、山间冲洪积盆地或溪流边、山前冲洪积盆地
热红外信息	热红外信息	在 ETM+(6-7)、4、3 彩色遥感图上经处理显示亮红色异常信息,在在 HLS 变换图上显示暗红色的异常信息

4.2 地下热水模式的远景区预测与验证

依据所建立的工作区有利形成地下热水的信息模式,对整个工作区范围内进行有利形成地下热水资源远景区的圈定。根据以上条件把所要预测的远景区定为 2 个等级:

I 级:同时满足以上 4 个条件中的 3 个以上的或野外调查时已经发现有温泉出露口的地方。

II 级:满足依据中的两个以上的地方或野外调查时经寻访得知有可能有温泉存在的地方。

在本次工作中,初步圈定出 7 个 I 级和 9 个 II 远景区(如图 5),其中良口镇北溪村远景区经实地调查就已经得到验证(图 6)。该远景区位置恰好位于东北向的广从深大断裂带上,区内次级构造比较发育,以东北、北北东,以及北西向断裂为主。在热红外遥感处理影像图上,也展示出较明显的异常信息。但根据本项目组收集到以往广东省内的地热资料,该区没有地热信息的记录,后经项目组实地发现了一处自然温泉出口,位于良口镇北溪村前小河旁,地形地貌为山间小盆地。温泉出露于第四系覆盖层,距离不到两米处的河沟内有花岗岩出露,山间河沟走向 300°。泉眼在河冲沟北侧,水温 30.5℃,流量约为 0.3 l/s。据当地居民了解,以前温泉水是直接从花岗岩体裂隙中冒出,后因村里修路填埋了原来的出口,因此,现在看到的就是从第四系杂填土中流出,水量相比以前有所减小,温度也相比下降。

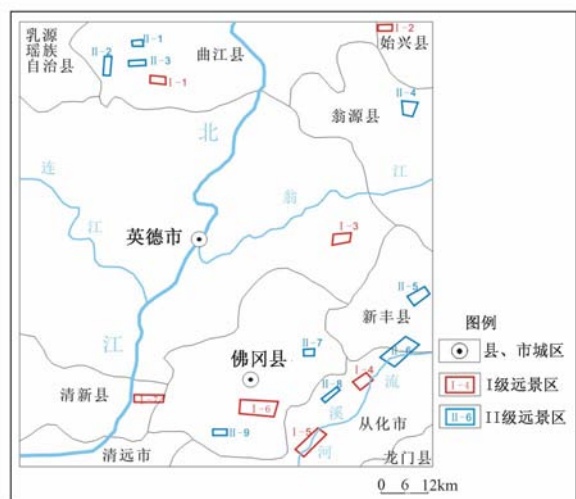


图5 圈定的工作区地热远景区图

Fig. 5 Prospect of the geothermal water area in the selected study area

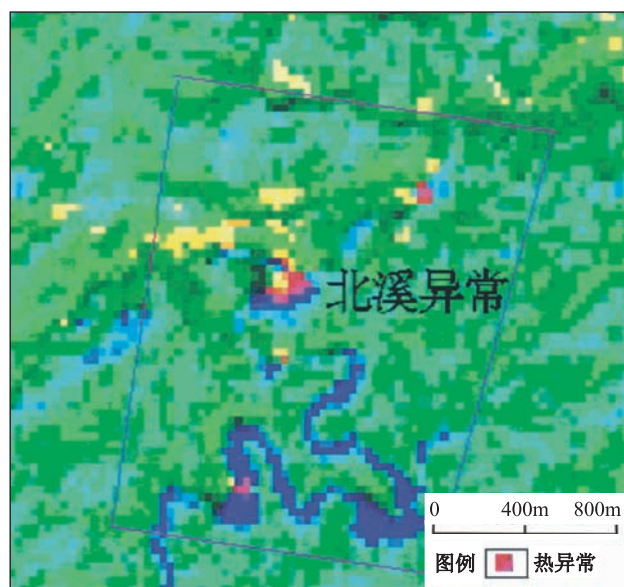


图6 良口镇北溪地热异常

Fig. 6 Geothermal anomaly in Beixi of Liangkou Town

## 5 结语

本次工作将多元信息技术找矿的思路应用于粤北地热资源的调查, 实践应用表明:

(1) 遥感技术寻找地下热水方法, 综合了构造、地质、地貌、热红外 4 个方面的信息, 大大地提高了工作效率和节约投入的经费。从而能更好地服务于寻找地下热水工作。

(2) 以地质找矿“相似成矿”理论为基础, 构建

地下热水模式, 值得进一步深入研究和推广。

本次构建热水模式条件缺少具体系统的地下热水成因研究, 因而给该方法带来少许不确定因素。如果信息模式能考虑地面物探、同位素资料的应用, 效果将更好。另外, 遥感影像还存在着太阳能辐射的干扰等问题<sup>[18-19]</sup>。因此, 在遥感地质解译和热红外信息提取中尚需进行深入的研究。

## 参考文献:

- [1] 田廷山, 李明朗, 白治. 中国地热资源及开发利用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [2] 周厚芳, 刘闯, 石昆法. 地热资源探测方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003(4): 656 - 661.
- [3] 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(4): 24 - 28.
- [4] 杨锋杰, 韩震, 江涛, 等. 地热资源的热红外遥感[J]. 矿山测量, 1999(3): 25 - 27.
- [5] 凌造. 粤北地区地下热水资源分布特点[J]. 科技信息, 2009(24): 257 - 263.
- [6] 李德荣. 广东省地热资源现状及开发前景展望[J]. 地热能, 2004(4): 22 - 27.
- [7] 周海燕, 周川, 姚锦梅. 广东从化温泉的水文地球化学模拟[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 619 - 623.
- [8] 叶闻文. 广东三坑地热田形成条件及开发潜力分析[J]. 水文地质工程地质, 2000(3): 16 - 18.
- [9] 丰茂森. 遥感图像数字处理[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [10] 况顺达, 林卫华, 刘沛. MAPGIS 在遥感解译中的应用[J]. 贵州地质, 2001, 18(2): 116 - 118.
- [11] 乔玉良, 吕芳, 王栋, 等. 卫星遥感技术在寻找地下热水中的应用[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(4): 58 - 62.
- [12] 王可丽. 哈尔滨地区地下热水资源预测[J]. 煤炭技术, 2004, 23(1): 99 - 102.
- [13] 韦玉春, 汤国安, 杨昕, 等. 遥感数字图像处理教程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [14] 赵慧. 热红外遥感影像中温度信息的提取研究[D]. 武汉大学, 2005.
- [15] 姚玉增, 李敏, 金成洙. 矿业开发对资源型城市扩展及热环境的影响-以埠新市为例[J]. 地质找矿论丛, 2008, 23(1): 73 - 76.
- [16] 王霓虹, 周洪泽, 范艳芳. 城市热岛效应的遥感和地理信息系统方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(10): 1420 - 1423.
- [17] Allis R G. A Study of the Use of Downhole Heat Exchanger in the Moana Hot Water Area, Reno[D]. Oregon Institute of Technology, USA. 1981.
- [18] 贺辉, 彭望球, 匡锦瑜. 自适应滤波的高分辨率遥感影

像薄云去除算法[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(3): 305 - 311.

[19] 乔玉良, 连胤卓, 王国芳, 等. 应用红外遥感寻找地下热水实验研究[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(2): 184 - 188.

# Using Remote Sensing Technique to Investigate Geothermal Water in North of Guangdong Province, China

YAO Jin, LI Jingrong, LING Zao

(Guangdong Nonferrous Metals Engineering Investigation Design Institute, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** The exploitation of geothermal resource has very important significance to make the best use of clean energy sources, play down the strain in energy sources and develop circulatory economy. At present, the traditional geophysical exploration method of geothermal resource has the disadvantages of long period and large investment resulted by the anomalies in gravity, magnetism and electricity. It is likely to appear large risk investment or blind mining. However, the exploitation of geothermal resource based on modern remote sensing technique that uses infrared wave band has the characteristics of speediness, large area and lower cost in geothermal information extraction. Using relative data processing method, we carried through remote sensing geological interpretation. According to the differences of ground object radiation temperature reflected by earth satellite infrared remote sensing data, we enhanced effects in band difference algorithm and HIS (HLS) color switch in order to distill the distribution of geothermal anomaly. Finally, based on an information pattern, we got the geothermal area through combining remote sensing geological interpretation with information in geological structure and landform, and directed the searching of geothermal water in unknown region. This technique is scientific, valid, and ought to be applied in other regions.

**Key words:** remote sensing technique; infrared remote sensing; geothermal water; information pattern.