

西藏尼木地区遥感数据地温反演与 地热异常预测

杨俊颖¹⁾, 温夏伟²⁾, 谭红兵¹⁾

1) 河海大学地球科学与工程学院, 南京, 211100;

2) 中国三峡新能源(集团)股份有限公司华东分公司, 南京, 210000



内容提要:为探明西藏尼木地区地热资源的空间分布及指导该区地热资源的勘探与开发,选取2010年1月21日与2月22日的Landsat 5TM数据,基于单波段的单窗算法进行地表温度反演,并利用ArcGIS软件分析了地表温度、已有地热异常点、构造及人类活动之间的关系,对该区潜在的地热异常进行预测。结果表明,地表温度分别为: $-21.75 \sim 40.65^{\circ}\text{C}$, $-18.95 \sim 46.45^{\circ}\text{C}$,二者进行对比分析表明反演结果符合实际且结果可靠。依据遥感数据地温反演结果,发现区内温度异常区比背景区高10 K以上,研究区存在未被发现的隐伏断层及地热活动异常信息,由此划分出21个潜在地热异常区。结论认为位于亚东—谷露与雅鲁藏布江缝合带交汇区的尼木地区地热异常特征明显,勘探开发前景广阔;在高寒缺资料区基于遥感单窗算法进行温度反演,可以有效提取地热异常信息,帮助预测具有开发前景的地热异常区,并进一步识别圈定具有勘探意义的靶区。

关键词:地热资源;热红外遥感;地表温度;单窗算法

地热集水、热、矿于一体,是蕴藏在地球内部的一种自然热能,与煤、石油、天然气及其它矿产一样,也是一种宝贵的矿产资源(顾少白,1985),更是独特的水资源。地热能是一种可再生能源,以热水或蒸汽的形式储存在地下,更清洁、更安全(DiPippo, 2005; Siahaan et al., 2011)。西藏地区具备天然的地热地质条件,蕴藏着丰富的地热资源,是地中海—喜马拉雅环球地热带的一部分。《西藏温泉志》共记录了西藏677个温泉,居全国之首(佟伟,2000)。总体来看,温泉沿雅鲁藏布江及其南、北两岸出露,呈东西向展布,严格受南北向断裂或地堑控制(韩同林,1990)。高温热储区集中于藏南,呈现南强北弱的特点(佟伟等,1981),并沿SN向断裂带以“簇丛”状分布(王鹏等,2016);张朝锋等(2018)指出青藏高原地热活动受控于地质构造演化,EW向区域性构造缝合带和SN向深大断裂的交汇部位是地热的主要活跃区域,岩浆活动为地热提供热源。西藏地热资源不仅是宝贵的财富,如羊八井蕴藏丰富的地热资源且已成功应用于电力能源的开发(杨期隆等,1991;多吉等,2007);也是众多学者开展各种地

质理论研究的热点。赵平等(2003)通过测定羊八井地热水中锶同位素组成,认为上新世花岗岩应当是地热水的富集岩层;侯增谦等(2001)通过青藏高原热泉及其热水沉积物的电子自旋共振(ESR)测年资料,推演了0.5 Ma以来的隆升历史。研究地热水中各类稀有、分散性元素富集规律也对揭示青藏高原盐湖等丰富矿产资源成因机制有重要意义(多吉,2003; Zhang Wenjie et al., 2015)。本研究选择的尼木地区刚好处于两条地热活动带的交汇区,区内水热活动强烈,地热显示类型丰富,地热资源储量大,具有很大的开发利用潜力。2018年尼木县续迈乡地热资源综合开发项目正式顺利开钻,为尼木县地热资源进一步勘探与开发远景规划提供了重要依据,对推动该县经济建设和生态建设有着十分重要的示范作用和实际意义。

尽管尼木地区具有很高的地热潜力,但目前也仅续迈乡进行了开发利用。区内地形复杂、环境恶劣,仅通过地面调查难以确定有潜力的地热区,长期阻碍着尼木地区地热资源的开发。刘志龙等(2020)利用大地电磁测深数据进行三维反演并结

注:本文为国家自然科学基金资助项目“西藏地热水演化过程中的硼、锂同位素分馏规律与地质意义”(编号:41872074)的成果。

收稿日期:2021-03-11;改回日期:2021-07-31;网络首发:2021-08-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.08.023

作者简介:杨俊颖,男,1996年生,硕士研究生,主要从事西藏地热方面的研究;Email:2926078694@qq.com。通讯作者:谭红兵,男,1972年生,教授,主要从事水文地质、环境地质、矿产地质研究;Email:tan815@sina.com。

合地震测线及其他地质资料进行地质解译及地热资源远景区预测,可靠性高但前期工作量较大且技术要求较高。因此,借助遥感技术确定潜在地热区是极为有利的方法。遥感调查可以提供有关一般地质构造、热异常位置及其表现形式等信息,以指导后续的地面调查和地质制图 (Hodder, 1970; Van der Meer et al., 2014; Reeves and Rae, 2016)。在地热区域普查中,热红外遥感技术具有快速、经济、探测区域大等优势被广泛应用(曹凯等,2006)。国内外已有不少学者结合遥感开展了地热研究。周厚芳(2003)利用多源遥感数据,通过反演研究区的地表温度和数据融合,结合遥感地热地质解译结果,对拉萨地区的未知地热点进行了预测;张中言(2010)使用 Landsat 5TM 数据,通过单窗算法反演地表温度和遥感解译地质构造相结合,确定羊八井地区控制地热的主要构造和地热异常集中区;Kiavarz 等(2017)基于地理信息系统的多准则决策分析方法为开发地热资源提供了巨大的潜力;赵珍等(2019)

利用 ArcGIS 和 RS 技术在福州地区提取出潜在地热区;Dargea 等(2019)基于 Landsat 遥感数据和一些辅助数据,利用 ArcGIS 分析提取出埃塞俄比亚 Tulu Moye 的潜在地热区。但对于高寒区的地热异常预测,如何结合区域特征去除伪异常是个重要问题。

本文以西藏尼木地区热红外遥感数据基于单窗算法进行地表温度反演,并利用 ArcGIS 分析地表温度,然后结合研究区特征剔除伪异常,进而对该区域潜在地热异常进行预测。研究结果对探明亚东—当雄—谷露巨型地热带中段尼木地区地热资源的空间分布规律,指导进一步勘探、地热异常评价及开发具有重要意义。

1 尼木地区概况

研究区位于西藏自治区中部地区,包括尼木县与仁布县。地理坐标:东经 89°37′~90°25′,北纬 29°04′~29°38′(图 1)。区内平均海拔在 3800 m 以上,总体地势四周高中间低,地形起伏显著,地表水

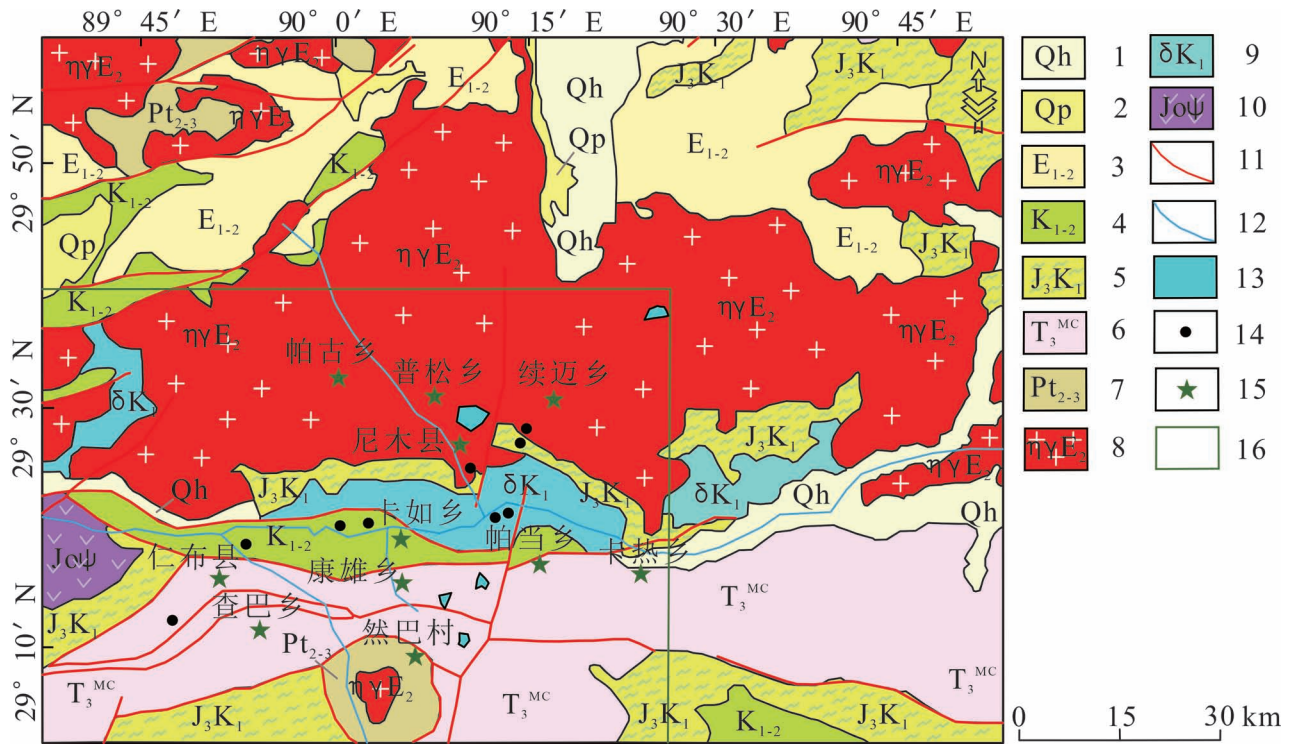


图 1 西藏尼木地区地质图(依潘桂棠等,2004)

Fig. 1 Geological map of Nimu Area, Xizang(Tibet) (from Pan Guitang et al., 2004&)

1—第四系全新统;2—第四系更新统;3—古近系古新—始新统;4—白垩系下—上统;5—白垩系上侏罗—下白垩统;6—三叠系上统;7—元古宇中—新元古界;8—古近纪花岗岩;9—白垩—侏罗纪闪长岩;10—蛇绿岩;11—断层;12—河流;13—湖泊;14—温泉;15—城镇;16—研究区

1—Quaternary Holocene; 2—Quaternary Pleistocene; 3—Paleogene Paleocene—Eocene; 4—Lower—Upper Cretaceous; 5—Upper Jurassic—Lower Cretaceous; 6—Upper Triassic; 7—Mesoproterozoic—Neoproterozoic; 8—Paleogene granites; 9—Cretaceous—Jurassic diorites; 10—Ophiolite; 11—fault; 12—river; 13—lake; 14—hot spring; 15—town; 16—the study area

系发育,雅鲁藏布江干流东西向横贯整个研究区,其支流则呈南北向分布于区内,同时还有大小不同的湖泊分布。

在构造上,研究区为雅鲁藏布江缝合带与班公错—怒江缝合带夹持的冈底斯—拉萨地块大地构造单元区(吴珍汉等,2005),属于亚东—当雄—谷露南北向分布的地热带中段。主要断裂为南北向延展的亚东—谷露深大断裂带,与东西向展布的雅鲁藏布江深大断裂带近似正交(吕文明,1992)。区内活动构造主要为吉达果—尼木断裂构造带和九子拉—桑雄断裂构造带(刘昭等,2014),吉达果—尼木断裂构造带由一组南北向断裂组成,地表显示一长条状的山间谷地,谷地两侧均可见断层面与断崖,及由于构造作用所形成的山前台地。同时沿主要断裂发育有多组近东西向的次级断裂。沿断裂带岩石破碎,节理、裂隙发育,为地热提供了良好的活动场所。九子拉—桑雄断裂构造带也由一组南北向断裂组成,东西方向各发育一条主断裂,均属于张性断裂,沿主断裂发育有次级构造。区内出露地层主要有白垩系、三叠系、古近系、第四系等,出露岩石类型主要有岩浆岩、蛇绿岩,其中区内出露的岩浆岩类主要为各类花岗岩,如二长花岗岩、正长花岗岩等(刘昭等,2014)。

由于受到河流和印度洋暖湿气流的影响,区内气候类型以高原温带季风湿润气候及高原温带季风半湿润气候为主,表现为:空气稀薄、氧气少、气压低、日照时间长、太阳辐射强、气温偏低、雨季与旱季分明(戴家洗,1990)。区内最高气温出现在6、7月,最低出现在1月。此外,区内气候另一重要特征是昼夜温差大,年平均气温较低。

研究区高温地热系统的热源主要是壳内局部熔融层的贡献(佟伟等,1978,1982)。纵横交错的活动构造组成的构造断裂系统,为地下流体提供了储集空间和运移通道,尤其是在南北向断裂与其它方向断裂的交汇处,这些部位既是水源的通道,又是地热流体运移和储集的空间,是水热活动的最佳部位(刘昭等,2014)。区内地下热水的补给主要来源于大气降水和冰雪融水。冷水沿断裂不断下渗,温度不断增加,当温度增加到一定程度,由于冷热水密度差开始向上运移并在低洼地带排泄。区内的续迈地热田应用地球化学温标得到的深部热储温度约为145℃(孙红丽等,2015),而续迈乡出露的温泉泉口温度最高约80℃左右,区内出露的其他温泉泉口温度也都不超过50℃,说明地热流体在上升至地表过

程中受到不同比例的冷水混合降低了水温。区内地热的排泄方式一是通过径流方式补给河水或向低洼地带排泄,二是以蒸发形式排泄。

2 地表温度反演

2.1 反演方法

目前利用热红外遥感数据反演地表温度的方法主要有:大气校正法、劈窗算法、单窗算法、多通道算法。其中劈窗算法和多通道算法不适用于传感器只有一个热红外通道的情况,大气校正法需要估计大气热辐射和大气地表热辐射传导的影响,需要实时的大气剖面等多方面数据,如不同高度的大气温度、气压、水份含量、气溶胶含量等,而这些实时数据常常缺乏,且计算过程复杂,误差也较大(一般>3℃),在实际中应用非常困难。于是覃志豪等(2001)根据地表热辐射传导方程,充分考虑大气与地表的多重影响,发现大气平均作用温度可替代大气向下平均作用温度,减少了方程中变量的个数,进而推导出简便易行并且精度较高的单窗算法,反演中仅需要地表辐射率、大气透射率和大气平均温度3个参数,该方法适用于仅有一个热波段的遥感数据,反演数据绝对误差达到<1.1℃。适用于TM6数据的单窗算法公式为:

$$\begin{cases} T_s = \frac{a(1-C-D)}{C} + \frac{[b(1-C-D) + C + D] T_6 - DT_a}{C} \\ C = \tau \varepsilon \\ D = (1 - \tau) [1 + \tau(1 - \varepsilon)] \end{cases} \quad (1)$$

式中, τ 为大气透射率, ε 为地表比辐射率,皆为无量纲值, T_s 为地表温度(K), T_a 为大气平均作用温度(K), T_6 为TM6的像元亮度温度(K), a 和 b 是常量,在一般情况下(地表温度在0~70℃范围内)取 $a = -67.35535$ 及 $b = 0.458606$ 。

2.2 数据选取与处理

考虑到研究区独特的地理气候条件,经反复比对最终选取了2010年1月21日和2月22日夜间的Landsat 5TM数据,一方面高温区域更为突显,另一方面,研究区域海拔高、日照时间长、日间太阳辐射对陆地表面的影响较大。选择两幅不同时间的遥感影像数据是为了对比验证反演结果的可靠性,并且单窗算法相关参数是基于Landsat 5TM数据推算得到的,因此选取此数据作为研究数据。遥感数据预处理与地表温度反演均在ENVI中进行实现。反

演中所用到的气象数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)。

获得的数据首先需要进行预处理,包括:辐射定标、几何校正、大气校正、研究区裁剪。单窗算法重点针对 TM6 波段,还需要将 TM6 波段影像的灰度值转化为相应的像元亮度温度,计算公式为:

$$T_6 = \frac{K_2}{\ln\left(1 + \frac{K_1}{0.1238 + 0.005632156 Q_{dn}}\right)} \quad (2)$$

其中 Q_{dn} 为影像的灰度值(0 ~ 255 之间的无量纲值), T_6 为 TM6 的像元亮度温度(K), K_1 和 K_2 为发射前预设的常量,对于 Landsat 5 TM 数据, $K_1 = 60.776$, $K_2 = 1260.56$ 。

2.3 参数计算

大气平均作用温度主要取决于大气剖面气温分布和大气状态。由于卫星飞过研究区上空的时间很短,一般情况下很难实施实时大气剖面数据和大气状态的直接观测,故选择 与研究区地理条件相似的中纬度冬季标准大气数据代替,并采用覃志豪等(2003)提出的大气平均作用温度 T_a 的估计方程进行估算:

$$\begin{cases} T_a = 16.0110 + 0.92621T_0 & \text{中纬度夏季平均大气} \\ T_a = 19.2704 + 0.91118T_0 & \text{中纬度冬季平均大气} \end{cases} \quad (3)$$

式中, T_a 和 T_0 的单位均为 K, T_0 为地面附近的气温。

大气透射率对地表热辐射在大气中的传导有非常重要的影响,因而是地表温度遥感的基本参数。研究表明,大气透射率的变化主要取决于大气水分含量的动态变化,其他因素因其动态变化不大而对大气透射率的变化没有显著影响,根据这一特征,覃志豪等(2003)提出了大气透射率估计方程(表 1)

表 1 大气透射率估计方程

Table 1 Atmospheric transmittance estimation equation

大气剖面	水分含量 $w(H_2O)$ [g/(cm ² · Z)]	大气透射率估计方程
高气温	0.4~1.6	$\tau = 0.974290 - 0.08007w(H_2O)$
高气温	1.6~3.0	$\tau = 1.031412 - 0.11536w(H_2O)$
低气温	0.4~1.6	$\tau = 0.982007 - 0.09611w(H_2O)$
低气温	1.6~3.0	$\tau = 1.053710 - 0.14142w(H_2O)$

注: Z 为地面到传感器的高度。

国内的气象资料一般没有水分含量值,需要根据温度和相对湿度进行计算。地表比辐射率是地表温度反演中一个关键参数,地表比辐射率主要取决于地表的物质结构和遥感器的波段区间。TM6 波段区间为 10.45 ~ 12.6 μm。地球表面不同区域的地表结构从卫星像元的尺度来看,可以大体视作由 3 种类型构成:水面、城镇和自然表面(覃志豪等, 2004)。本次利用混合像元分离法结合经验公式法来进行地表比辐射率的计算。首先根据 TM4、TM3 波段的灰度值 $B4$ 、 $B3$ 计算 $NDVI$:

$$NDVI = \frac{B4 - B3}{B4 + B3} \quad (4)$$

式中 $NDVI$ 为归一化植被指数(-1~1 之间的无量纲值),然后通过 $NDVI$ 计算植被覆盖度,计算植被覆盖度采用的是混合像元分离法,将影像大致分为水体、植被和建筑,计算公式如下:

$$F_v = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (5)$$

其中 F_v 为植被覆盖度, $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ 分别是植被(vegetation)和裸土(soil)的 $NDVI$ 值,在本次研究中, $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ 分别取 0.6 和 0.05。

根据前人的研究,将遥感影像分为水体、城镇和自然表面 3 种类型。且将水体像元的比辐射率赋值为 0.995,自然表面和城镇像元比辐射率估算根据:

$$\begin{cases} \varepsilon_{surface} = 0.9625 + 0.0614F_v - 0.0461F_v^2 \\ \varepsilon_{building} = 0.9589 + 0.086F_v - 0.06711F_v^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\varepsilon_{surface}$ 和 $\varepsilon_{building}$ 分别代表自然表面像元和城镇像元的比辐射率。

3 讨论

3.1 地表温度反演结果分析

两幅遥感影像分别为 1 月 21 日和 2 月 22 日夜间的数 据,反演地表温度范围分别为: -21.75 ~ 40.65 °C (251.4 ~ 313.8K) 和 -18.95 ~ 46.45 °C (254.2~319.6K)(图 2)。相较而言,图 b 的反演结果不论是平均温度还是最高、最低温度都有显著提升,这与当日气象数据是吻合的。并且蓝色部分是研究区内的积雪区,图 b 西北和东北角的积雪区减少,这也是 2 月 22 日气温相对 1 月 21 日有所上升的表现,最重要的是图 2a 与图 2b 的高温区域并没有明显的变化。以上特征表明反演结果符合实际情况且可靠。

结合图 2a 和图 2b 可以看出,区内西北部有大面积低温区,因为海拔较高,有积雪留存,故温度较

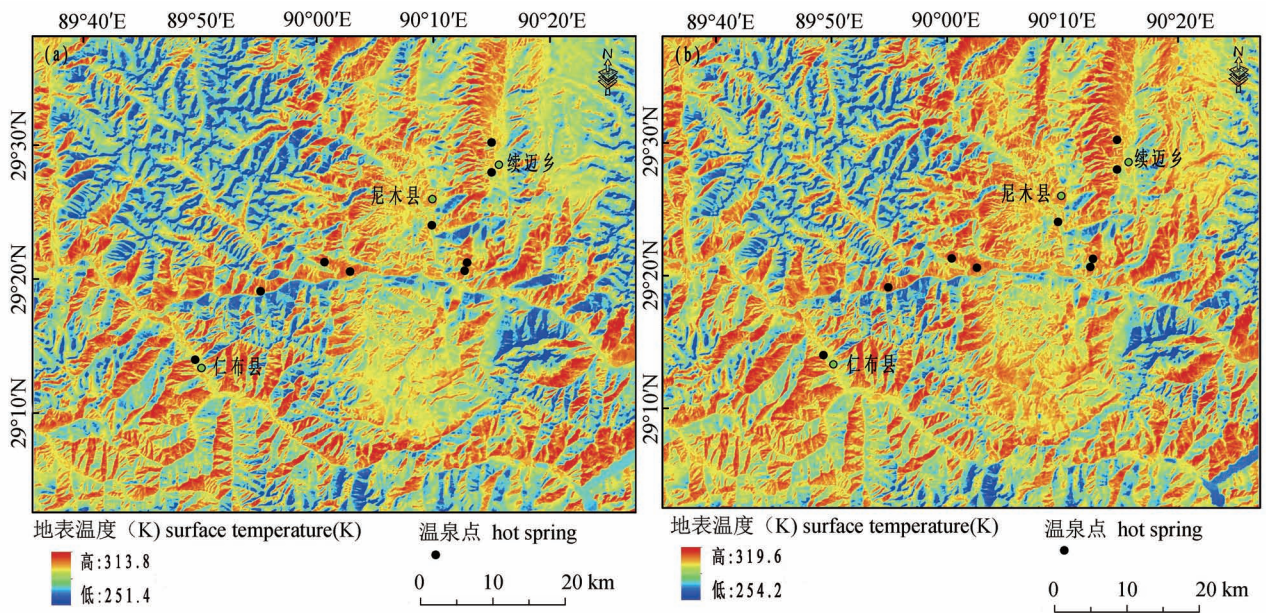


图 2 西藏尼木地区 2010 年 1 月 21 日 (a) 与 2 月 22 日 (b) 地表温度反演结果
Fig. 2 Inversion results of land surface temperature on January 21 (a) and February 22 (b), 2010, in Nimu area, Xizang(Tibet)

低;区内西南部、东南部和中部都有较大面积的高温区域。地表温度异常与地热异常有最直接的关联,但地表温度异常也受多种因素影响,存在地热异常且在表面有热异常只是其中一种。地热异常提取应结合地表温度、已有温泉出露点、构造及人为热影响等进行综合分析,进一步提取潜在地热异常区。因 1 月 21 日的夜间气温较之更低,更易于之后剔除伪地热异常区,故后续的研究选用 1 月 21 日的反演结果。

3.2 潜在地热异常区预测

研究区内目前已知有 9 处温泉出露,为了研究地表温度和温泉点之间的关系,利用 ArcGIS 软件进行温泉点的地表温度提取(表 2),其中因恰布内温泉出露于河漫滩,河水混入比例高,泉水温度与周围地表温度都较低,故此次研究予以排除。其余的 8 处温泉的地表温度范围为:

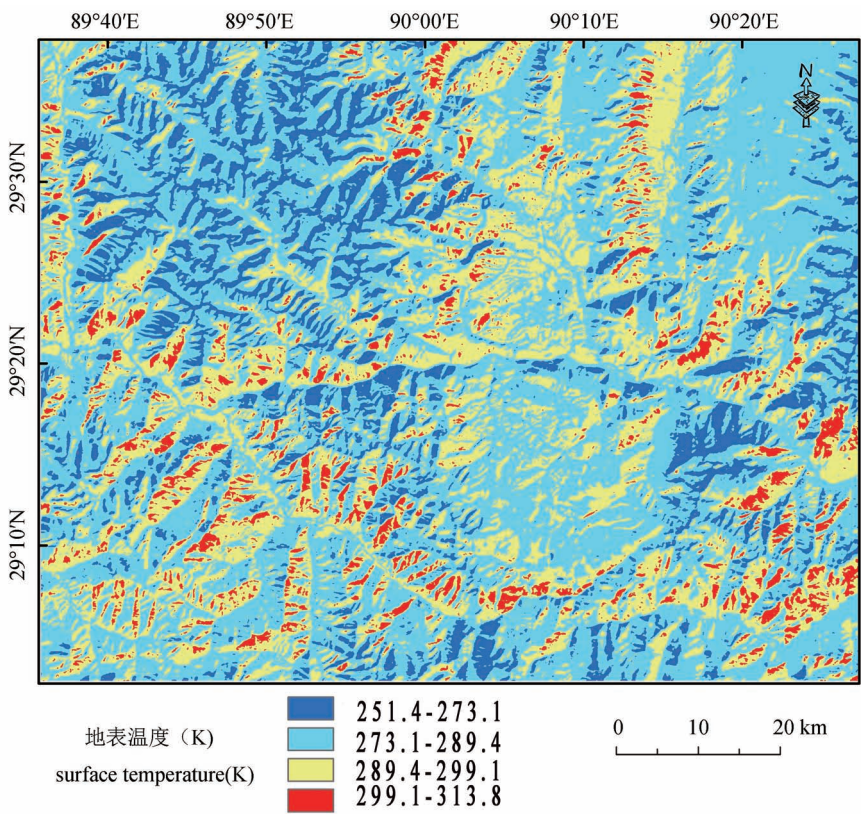


图 3 西藏尼木地区 2010 年 1 月 21 日地表温度反演结果分类
Fig. 3 Classification of land surface temperature inversion results on January 21, 2010, in Nimu area, Xizang(Tibet)

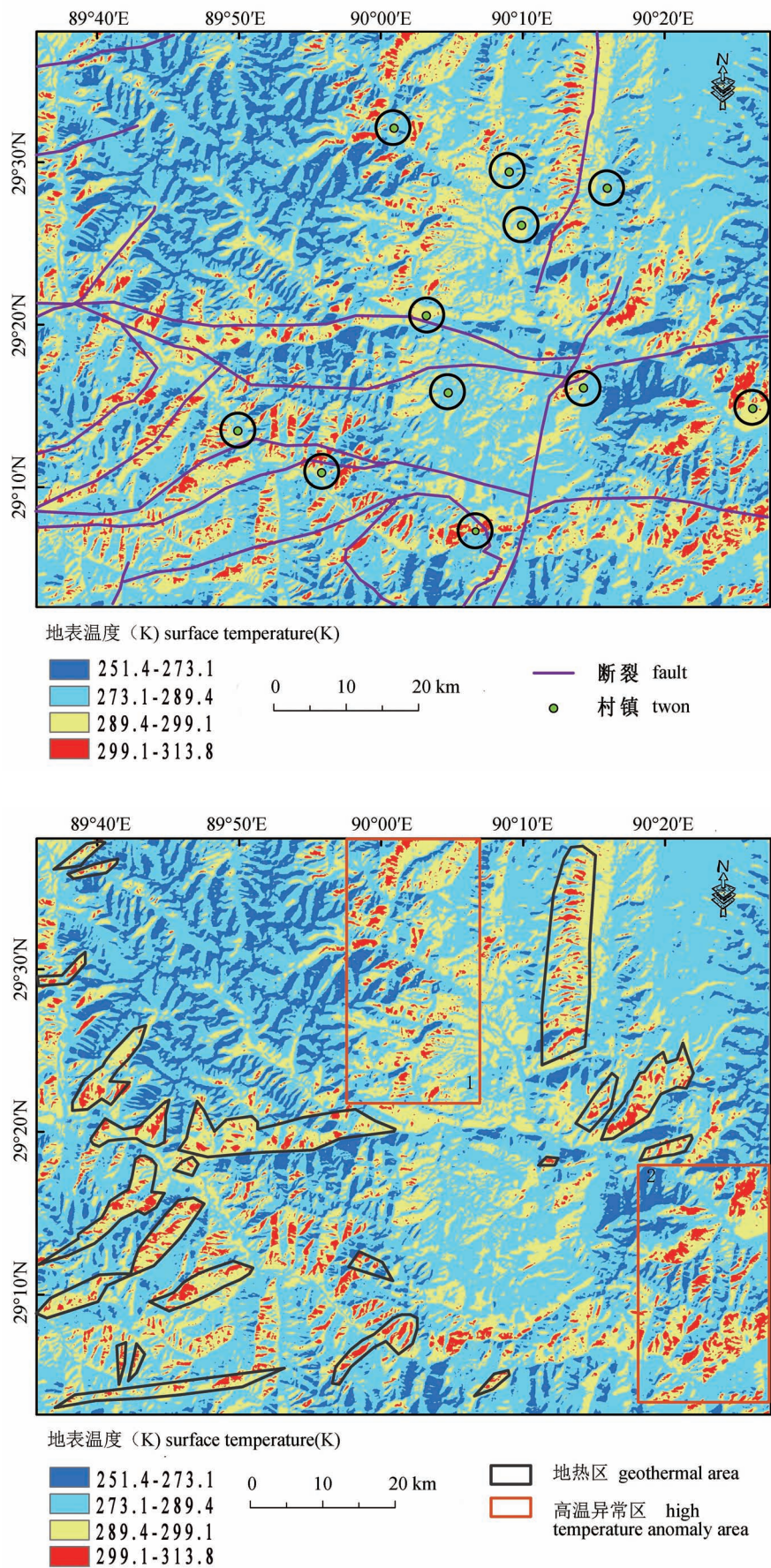


图 4 西藏尼木地区地表温度与构造、村镇综合分析结果
Fig. 4 Comprehensive analysis results of LST, structure, villages and towns, in Nimu area, Xizang(Tibet)

16. 25 ~ 27. 65 ℃ , 研究区的地表温度范围为 : - 21. 75 ~ 40. 65 ℃ 。 Qin Qiming 等 (2011) 发现云南腾冲地区的地热异常区域的温度比背景区域高出约 4 ~ 10 K ; Yosef Mengistu Darge 等 (2019) 发现埃塞俄比亚主裂谷的高温异常区地表温度比背景区高约 3 ~ 9 K 。 由于季节与区域地理条件不同 , 研究区的高温异常区比背景区高 10 K 以上 。 综上 , 对研究区的反演结果进行分类 , 方便进一步提取地热异常区 。

地表温度被分为四类 (图 3) , 前两类 (深蓝色和浅蓝色) 区域地表温度不高于 16. 25 ℃ (289. 4K) , 在本次研究中认为不存在地热异常 ; 图中黄色部分为 16. 25 ~ 26. 25 ℃ (289. 4 ~ 299. 4K) , 研究区已有温泉出露点的地表温度基本在此区间内 , 但本次研究选择更高的地表温度作为地热异常区域 , 温度范围为 : 299. 4 ~ 313. 8 (26. 25 ~ 40. 65 ℃) , 对应红色的部分 。 找到地热异常区还需进一步排除非地热影响区域 。

本研究将图 3 中红色区域视为可能的潜在地热区 , 而实际地热区的识别还需了解地质构造及人为热活动的影响 。 在 ArcMap 中 , 利用叠加分析可以得到地表温度与构造的关系 , 利

图 5 西藏尼木地区潜在地热异常区
Fig. 5 Potential geothermal anomaly areas in Nimu area, Xizang(Tibet)

用缓冲区分析可以消除人类活动所产生的热异常。考虑到本次研究在冬季夜间,有人类居住的地方可能会引起热异常,因此需将村镇地区的人为热影响排除为伪地热异常。除村镇外,当地居民数量很少且分散故不作考虑,人为热影响随着到村镇区域的距离增加而逐渐减小,2000 m 的经验距离被认为是排除村镇区域热效应的最小必要距离。研究区内最大的村镇是尼木县城,但规模不大,影响直径也在 2000 m 左右。因此,本次研究的缓冲区分析以村镇为圆心,2000 m 为缓冲半径建立缓冲区,来消除伪地热区(图 4)。

地热活动受控于地质构造,具体来说,实际地热区通常分布在断裂周围,并且排列方向与活动断裂的延伸方向一致,或者分布在断裂交叉复合部位的周围,这两点是区分真伪地热区的重要判别依据。同时还需排除人类活动的影响,图 4 中黑色圆圈代表缓冲区,即人为热活动的影响范围。综上,可以提取出潜在地热异常区。首先剔除与活动断裂延伸方向不一致,及不分布在断裂交叉复合部位附近的地热异常区。其次对处于人类热影响范围内的地热异常区也进行剔除。

表 2 研究区内出露温泉点的地表温度
Table 2 Surface temperature of outcropping hot springs in the study area

序号	名称	经纬度	海拔 (m)	地表温度 (℃)
1	沙嘎热泉	90°13'00"E,29°20'05"N	3700	18. 15
2	擦努温泉	89°54'00"E,29°18'00"E	/	23. 45
3	擦米温泉	89°50'00"E,29°13'00"E	/	27. 65
4	棉究温泉	90°00'08"E,29°20'08"N	3714	20. 55
5	恰布内温泉	90°10'38"E,29°23'53"N	3727	6. 35
6	乌坚温泉	90°15'25"E,29°29'35"N	3883	19. 55
7	莫龙沸泉	90°15'00"E,29°26'40"N	3800	21. 95
8	布巴热泉	90°02'00"E,29°20'43"N	3750	20. 65
9	扎曲灿	90°13'05"E,29°20'35"N	3750	16. 25

通过对伪异常地热区的剔除,在研究区内找出了 21 处规模不一的潜在地热异常区(图 5),地热区在研究区的西南角比较密集且规模较大,其中续迈乡周围提取出了南北向的大规模地热区,这正好是 2018 年尼木县续迈乡地热资源综合开发项目的位置。研究区内还出现了两处高温异常区,1 号区域中仅有一村镇,无法造成如此大规模的地表热异常,

且高温区域的排列大致呈南北向规律分布。2 号区域中也仅有一村镇,但如此大面积的高温区域也显然不可能因人类活动而存在,且高温区域排列分布也有明显规律,大致呈北东向。这两个区域根据资料及实地调研,并没有发现能够引起如此大面积温度异常的人类活动,考虑研究区处于两大深大断裂带交汇处,次级构造发育,故推测该区域内可能存在水热活动较强的隐伏断裂构造,从而引起大面积的地表温度异常。

4 结论

亚东—谷露南北向断裂带与雅鲁藏布江缝合带交汇区域地热资源丰富,研究区分布众多规模不一的潜在地热区。热红外遥感数据解译分析表明,区内还存在两大显著高温异常区,排除人类活动影响及其他因素,推断可能存在隐伏断裂,属于地热活动异常区。

热红外遥感提取地热异常信息,重点需对真伪地热区进行判别,因研究区不同,判别依据不尽相同,但本质上都是提取高温异常远景区后,再进一步结合地质构造与其他的一些判别依据,如人类活动,或者是日间向阳面与背阴面导致的温度异常等。具体热红外遥感解译过程中,通过基于单窗算法进行温度反演来提取地热区,是一种有效、准确、经济的地热勘探方法。能够对区域内具有开发前景的地热异常区作出很好的远景区预测,甚至靶区筛选。

致谢:感谢柳子豪博士在西藏野外考察中的照顾和帮助,同时对两位审稿专家提出的宝贵修改意见和建议深表谢意。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

曹凯,江南. 2006. 基于 TM6 的地热资源的热红外遥感探查模型研究. 遥感信息, 21(2):18~21.

戴加洗. 1990. 青藏高原气候. 北京:气象出版社:1~356.

多吉,郑克桢. 2007. 开采浅层地热能为拉萨供暖服务. 见:全国地热(浅层地热能)开发利用现场经验交流论文集. 北京:地质出版社:165~168.

多吉. 2003. 典型高温地热系统—羊八井热田基本特征. 中国工程科学,5(1):42~47.

顾少白. 1985. 世界能源问题. 北京:经济科学出版社:1~213.

韩同林. 1990. 试论藏南活动构造与地热的关系. 见:喜马拉雅地质(Ⅱ). 北京:地质出版社:45~48.

贺金鑫,孙焕朝,李文庆,郑博夫,姜天. 2018. 基于热红外遥感数据辽东地热区地表温度反演. 吉林大学学报(信息科学版), 36(1):62~68.

侯增谦,高永丰. 2001. 0.5 Ma 以来的青藏高原隆升过程——来自冈底斯带热水活动的证据. 中国科学,31(B12):27~33.

刘昭,蔺文静,张萌,谢鄂军,刘志明,王贵玲. 2014. 西藏尼木—那曲地热流体成因及幔源流体贡献. 地学前缘,21(6):356~371.

刘志龙,朱怀亮,胥博文,叶高峰,胡志明,李文龙,王兴元. 2020. 河南尉氏县西部地质地球物理综合解译及地热资源远景区预测. 地质论评,66(5):1446~1455.

吕文明. 1992. 西藏那曲—尼木地热带土壤地球化学特征及其地地质意义. 见:中国西藏高温地热开发利用国际研讨会论文集. 北京:地质出版社:164~172.

潘桂棠,丁俊,姚东生. 2004. 1:150 万青藏高原及邻区地质图说明书. 成都:成都地图出版社:1~3.

孙红丽,马峰,蔺文静,刘昭,王贵玲,男达瓦. 2015. 西藏高温地热田地球化学特征及地热温标应用. 地质科技情报,34(3):171 ~ 177.

覃志豪, Li Wenjuan, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, Pedro Berliner. 2003. 单窗算法的大气参数估计方法. 国土资源遥感,15(2):37 ~ 43.

覃志豪, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, Pedro Berliner. 2001. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报,56(4):456 ~ 466.

覃志豪,李文娟,徐斌,陈仲新,刘佳. 2004. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计. 国土资源遥感,16(3):28 ~ 36.

佟伟,张知非,廖志杰,朱梅湘,章铭陶. 1982. 西藏高原的水热活动和上地壳热状态初探. 地球物理学报,25(1):34~40.

佟伟,张知非,章铭陶,廖志杰,由懋正,朱梅湘,过颖顺,刘时彬. 1978. 喜马拉雅地热带. 北京大学学报(自然科学版),14(1):76 ~ 89.

佟伟,章铭陶,张知非,廖志杰,由懋正,朱梅湘,过颖顺,刘时彬. 1981. 西藏地热. 北京:科学出版社:1~118.

佟伟. 2000. 西藏地热志. 北京:科学出版社:1~300.

王鹏,陈晓宏,沈立成,肖琼,吴孝情. 2016. 西藏地热异常区热储温度及其地质环境效应. 中国地质,43(4):1429~1438.

吴珍汉,吴中海,胡道功,王薇,张作辰,雷伟志. 2005. 青藏铁路沿线活动断裂与地质灾害图集. 北京:地震出版社:1~146.

杨期隆,辛奎德. 1991. 西藏羊八井地热田简介. 地质论评,37(3):283~287.

张朝锋,史强林,张玲娟. 2018. 青藏高原新生代岩浆活动与地热关系探讨. 中国地质调查,5(2):18~24.

张中言. 2010. 西藏羊八井地区遥感数据地温反演与地热异常探讨,导师:张登忠. 成都:成都理工大学硕士学位论文.

赵平,多吉,谢鄂军,金建. 2003. 中国典型高温热田热水的锶同位素研究. 见:中国科学院地质与地球物理研究所二〇〇三学术文集,569~576.

赵珍,李贵仁,陈刚. 2019. ArcGIS 和 RS 技术在高植被覆盖率地区地热资源勘查中的应用. 勘察科学技术,(2):44~48.

周厚芳. 2003. 多源遥感数据在地热异常分析中的应用研究——以拉萨地区为例. 导师:刘闯. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所硕士学位论文.

Cao Kai, Jiang Nan. 2006&. Study on thermal infrared remote sensing exploration model of geothermal resources based on TM6. Remote Sensing Information,21(2):18~27.

Dai Jiayi. 1990#. Climate of the Xizang (Tibetan) Plateau. Beijing: Meteorological Press:1~356.

Dargea Y M, Hailua B T, Muluneha A A, Kidane T. 2019. Detection of geothermal anomalies using Landsat 8 TIRS data in Tulumoye geothermal prospect, Main Ethiopian Rift. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,74:16~26.

DiPippo R. 2005. Geothermal Power Plants: Principle, Applications and Case Studies. Britain: Butterworth-Heinemann Ltd:1~518.

Duo Ji,Zheng Keyan. 2007#. Exploitation of shallow geothermal energy for Lhasa heating services. In: National Geothermal (Shallow Geothermal Energy) Development and Utilization of Field Experience Exchange Conference Proceedings. Beijing: Geological Publishing House:165~168.

Duo Ji. 2003&. The basic characteristics of the Yangbajing geothermal field—typical high temperature geothermal system. Strategic Study of CAE,5(1):42~47.

Gu Shaobai. 1985#. World Energy Problem. Beijing:Economic Science Press:1~213.

Han Tonglin. 1990#. Try to discuss the relationship between active tectonics and geothermal in south Xizang (Tibet). In: Himalayan Geology (II). Beijing: Geological Publishing House:45~48.

He Jinxin ,Sun Huanchao, Li Wenqin, Zheng Bofu, Jiang Tian. 2018&. Land surface temperature retrieval in eastern Liaoning geothermal area based on thermal infrared remote sensing date. Journal of Jilin University(Information Science Edition),36(1):62~68.

Hodder D T. 1970. Application of remote sensing to geothermal prospecting. Geothermics, 2(part I):368~380.

Hou Zengqian,Gao Yongfeng. 2001#. The uplift process of the Xizang (Tibetan) Plateau since 0.5 Ma: Evidence from hot water activity ingangdese zone. Science China,31(B12):27~33.

Kiavarz M,Jelokhani-Niaraki M. 2017. Geothermal prospectivity mapping using GIS-based Ordered Weighted Averaging approach: A case study in Japan’s Akita and Iwate provinces. Geothermics,70:295~304.

Lü Wenming. 1992 &. Soil geochemistry characteristics and its geothermo-geological meaning in Naqu—Nimu geothermal belt of Tibet. In: Selected Papers of the International Symposium on High Temperature Geothermal Exploitation and Utilization in Xizang (Tibet), China. Beijing:Geological Publishing House:164~172.

Liu Zhao, Lin Wenjing, Zhang Meng, Xie Ejun, Liu Zhiming, Wang Guiling. 2014&. Geothermal fluid genesis and mantle fluids contributions in Nimu—Naqu, Tibet. Earth Science Frontiers, 21(6):356~371.

Liu Zhinglong, Zhu Huailiang, Xu Bowen, Ye Gaofeng, Hu Zhiming, Li Wenlong, Wang Xingyuan. 2020&. Comprehensive geological and geophysical interpretation and geothermal resources prospection of western Weishi County, Henan Province. Geological Review, 66(5):1446~1455.

Pan Guitang, Ding Jun, Yao Dongsheng. 2004#. 1:1.5 million geological map of Qinghai—Tibet Plateau and adjacent areas. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House:1~3.

Qin Qiming, Zhang Ning, Nan Peng, Chai Leilei. 2011. Geothermal area detection using landsat ETM+ thermal infrared data and its mechanistic analysis — A case study in Tengchong, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,13(4):552~559.

Qin Zhihao, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, Pedro Berliner. 2001&. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data. Acta Geographica Sinica,56(4):456 ~ 466.

Qin Zhihao, Li Wenjuan, Xu Bin, Chen Zhongxin, Liu Jia. 2004&. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6. Remote Sensing for Land & Resources, 16(3):28 ~ 36.

Qin Zhihao, Li Wenjuan, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, Pedro Berliner. 2003&. Estimating of the essential atmospheric parameters of mono-

- window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat TM6. *Remote Sensing for Land & Resources*, 15(2):37 ~ 43.
- Reeves R, Rae L. 2016. Changes in aerial thermal infrared signature over the Rotorua geothermal field, New Zealand: 1990 ~ 2014. *Geothermics*, 64: 262 ~ 270.
- Siahaan M N, Soebandrio A, Wikantika K. 2011. Geothermal potential exploration using remote sensing technique (case study: Patuha area, West Java). *Asia Geospatial Forum*; 17 ~ 19.
- Sun Hongli, Ma Feng, Lin Wenjing, Liu Zhao, Wang Guiling, Nan Dawa. 2015. Geochemical characteristics and geothermometer application in high temperature geothermal field in Tibet. *Geological Science and Technology Information*, 34(3):171 ~ 177.
- Tong Wei, Zhang Mingtao, Zhang Zhifei, Liao Zhijie, You Maozheng, Zhu Meixiang, Guo Guoying, Liu Shibin. 1981. *Xizang(Tibetan) Geothermal*. Beijing: Science Press: 1 ~ 118.
- Tong Wei, Zhang Zhifei, Liao Zhijie, Zhu Meixiang, Zhang Mingtao. 1982. Hydrothermal activity occurring in Xizang (Tibetan) Plateau and preliminary discussion about the thermal regime within its upper crust. *Chinese Journal of Geophysics*, 25(1):34 ~ 40.
- Tong Wei, Zhang Zhifei, Zhang Mingtao, Liao Zhijie, You Maozheng, Zhu Meixiang, Guo Guoying, Liu Shibin. 1978. The Himalayan Geothermal Belt. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 14(1):76 ~ 89.
- Tong Wei. 2000. *Geothermology of Xizang(Tibet)*. Beijing: Science Press: 1 ~ 300.
- Van der Meer F, Hecker C, Van Ruitenbeek F, Van der Werff H, De Wijkerslooth C, Wechsler C. 2014. Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33: 255 ~ 269.
- Wang Peng, Chen Xiaohong, Shen Licheng, Xiao Qiong, Wu Xiaoping. 2016. Reservoir temperature of geothermal anomaly area and its environmental effect in Tibet. *Geology in China*, 43(4): 1429 ~ 1438.
- Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Hu Daogong, Wang Wei, Zhang Zuochen, Lei Weizhi. 2005. *Atlas of active faults and geological hazards along Qinghai - Tibet Railway*. Beijing: Seismological Press: 1 ~ 146.
- Yang Qilong, Xin Kuide. 1991. A brief introduction to the geothermal system of the Yangbajing geothermal field. *Geological Review*, 37(3):283 ~ 287.
- Zhang Chaofeng, Shi Qianglin, Zhang Lingjuan. 2018. Discussion on the relationship between cenozoic magmatic activity and geotherm in Tibetan Plateau. *Geological Survey of China*, 5(2):18 ~ 24.
- Zhang Wenjie, Tan Hongbing, Zhang Yanfei, Wei Haizhen, Dong Tao. 2015. Boron geochemistry from some typical Tibetan hydrothermal systems: Origin and isotopic fractionation. *Applied Geochemistry: Journal of the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry*, 63: 436 ~ 445.
- Zhang Zhongyan. 2010. Temperature inversion of remote sensing data zone and investigation of geothermal anomaly in Yangbajing region of Tibet. Supervisor: Zhang Dengzhong. Chengdu: Master ' s Dissertation, Chengdu University of Technology.
- Zhao Ping, Duo Ji, Xie Ejun, Jin Jian. 2003. Strontium isotope study of hot water from typical high temperature fields in China. *Proceedings of Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences*: 569 ~ 576.
- Zhao Zhen, LiGuiren, Chen Gang. 2019. Application of ArcGIS and RS technology in exploration of geothermal resources at high vegetation coverage ratio areas. *Site Investigation Science and Technology*, (2):44 ~ 48.
- Zhou Houfang. 2003. Application of Multi-source Remote Sensing Data in Geothermal Anomaly Analysis: A Case Study of Lhasa Area. Supervisor: Liu Chuang. Beijing: Master Dissertation of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences.

Land surface temperature using remote sensing data inversion and prediction of geothermal anomaly area in Nimu, Xizang(Tibet)

YANG Junying¹⁾, WEN Xiawei²⁾, TAN Hongbing¹⁾

1) College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, 211100;

2) East Branch of China Three Gorges New Energy (Group) Co., Ltd, Nanjing, 210000

Abstract: In order to explore the spatial distribution of geothermal resources and guide the exploration and development of geothermal resources in Nimu area, Tibet, the Landsat 5TM data of January 21 and February 22, 2010 were selected to carry out geothermal inversion based on Mono-window Algorithm. The relationship among surface temperature, existing geothermal anomaly points, structure and human activities was analyzed by using ArcGIS software, and the potential geothermal anomaly in this area was predicted. The results show that the surface temperatures are $-21.75 \sim 40.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-18.95 \sim 46.45\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. Combined with the regional characteristics, the inversion results are practical and reliable. According to the results of surface temperature inversion based on remote sensing data, it is found that the temperature anomaly area in the study area is more than 10K higher than the background area, and there are hidden faults and abnormal geothermal activity information in the study area. Thus, 21 potential geothermal anomaly areas are classified. It is concluded that Nimu area, located at the intersection of Yadong—Gulu and Yarlung Zangbo suture zone, has obvious geothermal anomaly

characteristics and broad exploration and development prospects. Surface temperature inversion based on Mono-window Algorithm can effectively extract geothermal anomaly information, help predict geothermal anomaly areas with development prospects, and further identify and delineate target areas with exploration significance.

Keywords: geothermal resources; thermal infrared remote sensing; land surface temperature; mono-window algorithm

Acknowledgement: Financially supported by Supported by National Natural Science Foundation of China "The fractionation of boron and lithium isotopes during the evolution of geothermal water in Tibet and its geological significance" (No. 41872074)

First author: YANG Junying, male, born in 1996, master degree candidate, mainly engaged in studies of geothermal in Xizang(Tibet); Email: 2926078694@qq.com

Corresponding author: TAN Hongbing, male, born 1972, professor, mainly engaged in studies of Hydrogeology, environmental geology, mineral geology; Email: tan815@sina.com

Manuscript received on: 2021-03-11; Accepted on: 2021-07-31; Network published on: 2021-08-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.08.023 **Edited by:** ZHAO Xue, ZHANG Yuxu