

基于加权融合 TIR 数据的 LST 反演与硅化信息提取 ——以广东仁差盆地铀多金属矿区为例

曹海玲, 王正海, 秦昊洋, 孙袁超, 尹国盼

中山大学 地球科学与工程学院, 广州 510275

摘要: 硅化蚀变带是多种金属热液矿床的重要找矿标志之一, 利用遥感技术实现快速大范围识别硅化蚀变信息具有重要意义, 但硅化蚀变通常为弱信息, 目前常规的遥感方法难以有效识别。本文以广东省仁差盆地铀矿区为例, 以 PAN 图像高频分量图与 TIR 图像进行加权融合并进行地温反演, 分析硅化蚀变带与地温异常的关系, 建立遥感硅化蚀变弱信息增强识别模型。结果表明: 采用 PAN 图像高频分量图像与 TIR 图像进行加权融合, 可提高 TIR 图像的空间分辨率, 较好保存热目标光谱特征; 融合前后数据反演的 LST 图变化不大, 后者提高了对地物热异常识别能力; 硅化蚀变带在近似 LST 图中表现为较断裂带更为细小的高温异常带, 并以此为依据进行预测识别。经验证, 已知硅化带与识别硅化带较为吻合。

关键词: 仁差盆地, 热红外 TIR, 图像融合, 硅化蚀变带

中图分类号: P2

引用格式: 曹海玲, 王正海, 秦昊洋, 孙袁超, 尹国盼. 2023. 基于加权融合 TIR 数据的 LST 反演与硅化信息提取——以广东仁差盆地铀多金属矿区为例. 遥感学报, 27(7): 1691–1701

Cao H L, Wang Z H, Qin H Y, Sun Y C and Yin G P. 2023. Inversion of LST and extraction of silicification alteration information based on the weighted fusion TIR data: A case study of the Uranium Polymetallic mining area in RenCha basin of Guangdong province. National Remote Sensing Bulletin, 27(7): 1691–1701 [DOI: 10.11834/jrs.20210543]

1 引言

围岩岩体在热液成矿作用过程中产生了不同的蚀变矿物, 形成围岩蚀变现象, 其中硅化蚀变可发生于高中低温等热液蚀变环境中, 主要产生石英、玉髓、蛋白石等蚀变矿物 (张廷斌等, 2009), 是金、锡、铀等 (王俊虎等, 2010; 王自国等, 2008; 郭帮杰等, 2017a) 多种金属热液矿床的重要找矿标志, 准确识别硅化蚀变信息能为矿产资源评估和开发利用提供依据, 具有重要意义。

遥感影像具有区域宽广、信息量丰富、周期性等特点, 能够宏观、真实地反映地表物体信息, 尤其 Landsat 8 及 ASTER 等遥感影像具有丰富的空间纹理信息, 在矿化蚀变信息识别中具有独特的

优势, 已经成为矿产资源勘查的重要技术手段。有学者基于 ASTER 数据综合多个方法有效提高了矿化蚀变的提取精度, 但计算方式较复杂 (唐淑兰等, 2021); 有学者采用 Landsat ETM 数据中的 ETM6/5 的波段比值增强硅化蚀变信息 (王彪等, 2011), 但该数据的热红外波段范围较宽, 所含石英矿物的波谱特征信息较弱, 利用波段比值方法识别硅化带的限制较大; 硅化带的主要矿物为石英, SiO_2 含量高, 并随着硅化程度的升高而提高, 且遥感热红外波段可识别 Si—O 键的特征 (闫柏琨, 2006), 目前国内外更多以此为依据, 采用各种热红外遥感数据如 ASTER 热红外图像反演 SiO_2 含量来识别硅化带信息, 并取得了不错的成果 (杨长保等, 2009; 刘道飞等, 2015; 郭帮杰等, 2017b)。近年也有学者利用地表温度 LST (Land

收稿日期: 2020-12-10; 预印本: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41572316); 广州市科技计划项目(编号: 201804010274)

第一作者简介: 曹海玲, 研究方向为地质遥感。E-mail: 1902412236@qq.com

通信作者简介: 王正海, 研究方向为资源环境遥感。E-mail: wzhenh@mail.sysu.edu.cn

Surface Temperature)、温度植被干旱指数 TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) 与隐伏断层构造之间的关系识别提取地质构造信息 (卢善龙等, 2009; 张福坤 等, 2016)。但目前的热红外数据多存在空间分辨率较低, 空间细节信息模糊等不足, 而硅化蚀变带常呈脉状、条带状或网状沿岩石裂隙分布, 宽度只为几米到上百米, 呈现细小条带状, 在遥感图像中呈现的蚀变信息较弱。低空间分辨率热红外数据在提取规模较小的脉状或条带状蚀变时受混合像元影响极大, 地物像元的吸收特征易浅化, 无法有效识别提取蚀变信息 (刘磊 等, 2019), 在识别微小硅化蚀变带的应用受到极大的限制。

由于硅化带中的 SiO₂ 含量相对较高 (侯满平和高仕达, 2001), 中脊主要为石英矿物, 两侧及走向端被碎裂岩、角砾岩等相接的断裂带 (王俊虎和张杰林, 2012), 石英矿物含量由中脊向两侧、走向端递减, 呈现细长条带状分布, 可见硅化蚀变带中脊处较坚硬, 抗风化能力强, 残积物堆积及土壤层较薄, 具有透水能力弱、土壤含水量较低、导热率相对较高等特点。白天对硅化蚀变带进行热红外观测, 硅化带升温较周围地段快, 地表温度呈现细长条带状热异常现象, 可利用 LST 热异常进行硅化识别。本文以仁差盆地区的 Landsat 8 遥感数据为例, 依据硅化蚀变带区域内植被覆盖率较低、石英矿物含量高, 其白天地表温度较高的特征, 以 PAN 图像与 TIR 图像进行图像融合的方式提高 TIR 图像分辨率, 增强地表热目标信息分辨率后进行地温反演, 利用硅化蚀变带呈现条带状的热异常信息, 再结合硅化蚀变带的空间特征建立遥感硅化蚀变弱信息增强识别模型。

2 研究区及数据源

2.1 研究区

仁差盆地东北较高中间低, 总体地层产状较为平缓 (图 1), 为一典型的火山断陷形成的地堑盆地。其由一套流纹质、酸性岩为主的杂岩建造组成, 盆地构造以断裂为主, 主要为 NNE 向, 次为 EW 向以及 NWW 向 (邹观石 等, 2017), 并有 SN 向、NW 向、NNE 向构造带的叠加, 由鹧鸪隆、猪麻坝及麻楼断裂构造控制形成 (图 2)。鹧鸪隆

断裂地段的脉体活动、热液蚀变明显, 有绢云母化、绿泥石化、硅化、黄铁矿化, 并见黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等多金属矿物, 出现多处铀矿点; 猪麻坝断裂构造处有多个热液型铀矿化点; 北北东向的鹿子坑断裂由硅化破碎带、构造角砾岩及糜棱岩等组成, 深部热液活动较强, 出现赤铁矿化、硅化、含铀黑色物质等, 显示该断裂与铀、钼、金、银矿化的密切关系。仁差盆地位于火山喷发带的交汇部位, 构造岩浆活动较强烈, 且处于东西向南岭多金属成矿带东端与北东向武夷多金属成矿带南西端的交汇部位, 成矿背景良好, 为我国重要的有色、稀有、稀土和贵金属矿产基地之一。目前已发现盆地内出现多处铀、金、银、钼等多金属矿床点, 如位于鹿子坑断裂上盘的 279 矿床点规模最大, 最具多金属矿化特征, 此外存在多处铀多金属勘查区 (姜峰 等, 2017; 余端珍, 2012; 刘延勇 等, 2007; 刘峤, 2019)。

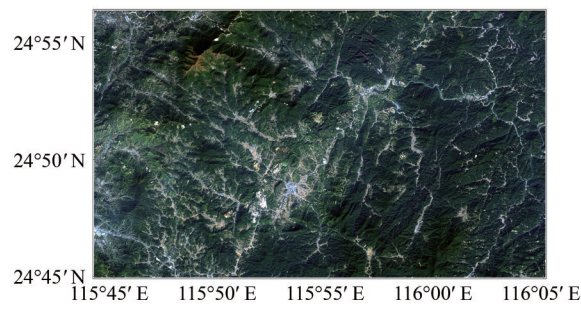


图 1 研究区位置 (多光谱真彩色合成图像: Landsat 8 30 m 单时相)

Fig. 1 Location of study area (Multispectral true color composite image: Landsat 8 30 m mono-temporal)

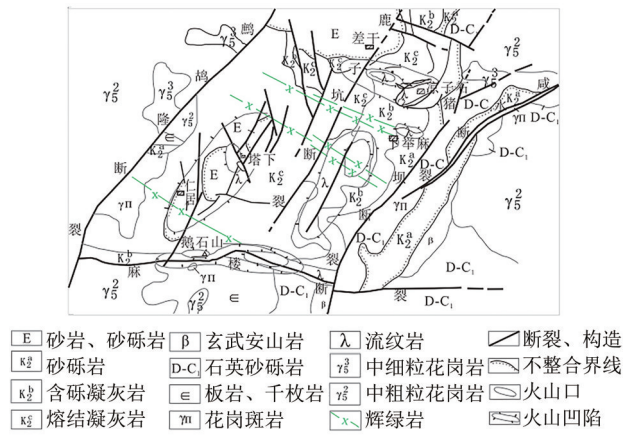


图 2 仁差盆地地质构造简图 (修改自余端珍 (2012))

Fig. 2 Geological structure of Rencha Basin (Modified by Yu (2012))

2.2 数据源及预处理

本文选择地理空间数据云中成像时间为2017-11-01 T 10:45:50（北京时间）的Landsat 8 OLI/TIRS遥感影像数据，行列号为121, 043，平均云量为0.03%，中心经纬度分别为115.44558°E, 24.55318°N。Landsat 8共有11个波段，其中在可见光波段中，除band8 PAN全色波段的空间分辨率为15 m以外，其他均为30 m，TIR热红外波段空间分辨率为100 m；并选用ASTER GDEM V2 30 m分辨率的DEM数字高程数据。

首先对遥感影像进行辐射定标，将数字量化值转换为辐射亮度值、反射率等物理量，使用ENVI中的辐射定标工具直接完成多光谱、全色波段以及热红外数据的定标工作并裁剪出研究区，热红外数据经过辐射定标转化为热辐射强度后通

过普朗克公式转化为亮度温度值，多光谱数据经过辐射定标后进行FLAASH大气校正。

3 研究方法

3.1 Gram Schmidt及基于加权融合的图像融合算法

将缺乏地物色彩信息的PAN图像与空间分辨率较低的多光谱图像进行融合可利于地物分类识别。GS（Gram Schmidt）图像融合算法可对任意波段数的图像进行融合，融合后的图像不仅提高了空间分辨率，且较好保持信息保真度（花利忠等，2017；姜晓晨等，2018），本文采用GS图像融合算法对PAN图像及多光谱图像进行图像融合处理，具体原理及分析（Laben等，2000；李存军等，2004）如下。

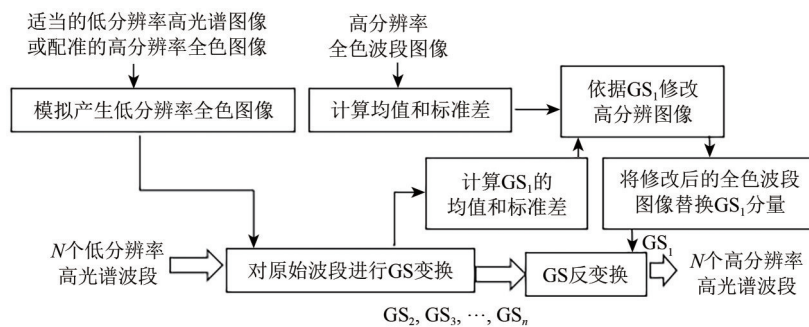


图3 Gram Schmidt 图像融合流程图(修改自李存军等(2004))

Fig. 3 Flow chart of gram schmidt image fusion (Modified by Li et al. (2004))

Landsat 8 TIR 图像仅有100 m空间分辨率，物体的形态和位置信息相对模糊，与PAN图像融合，可提高TIR图像空间分辨率，提高图像的目标识别能力，更好实现遥感对地表的物理观测。但PAN图像为可见光波段，反映高空间分辨率的表面反射特性，TIR图像是依据地物表面自然发射的红外辐射差异形成的图像，反映地物的热状况信息，显示低空间分辨率地物的表面温度，两者成像原理不同，性质差异较大，目前有关两者图像融合的方法较少。

由于图像大部分细节信息几乎存储于图像的低通分量中，高通分量突出反映图像边缘特征和细节信息，弱化低频信息（吴连喜，2003；甄媚和王书朋，2019），可将高空间分辨率PAN图像的高通分量与低空间分辨率TIR图像（band 10）进行加权融合（Jung和Park，2014），提高TIR图像

的空间分辨率，方法如下（为了更好保存TIR图像信息，本文不对TIR图像进行调整）：

（1）基于ENVI中的低通滤波器计算出PAN图像 I_{PAN} 的低频通量即 $I_{LP}(i, j)$ ；

（2）利用公式得到高频通量图 $I_{HP}(i, j)$ ：

$$I_{HP}(i, j) = I_{PAN}(i, j) - I_{LP}(i, j) \quad (1)$$

（3）调整高频通量获取调整型高通图像 $\bar{I}_{HP}(i, j)$ ，以消除其最亮和最暗目标：

$$\bar{I}_{HP}(i, j) = \begin{cases} -T_c \cdot \delta_{HP}, & I_{HP}(i, j) \leq \mu_{HP} - T_c \cdot \delta_{HP} \\ +T_c \cdot \delta_{HP}, & I_{HP}(i, j) \geq \mu_{HP} + T_c \cdot \delta_{HP} \\ I_{HP}(i, j), & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中， μ_{HP} 和 δ_{HP} 分别是PAN图像的高通图像 $I_{HP}(i, j)$ 的均值和标准差， T_c 是排除 I_{HP} 图像中最亮和最暗目标的阈值，使用统计置信水平给出的标准分数（Z分，本文使用95%的置信度的Z分值为1.96，即 $T_c=1.96$ ）；

（4）计算TIR图像融合图 $I_{TIR}^{FUS}(i, j)$ ：

$$I_{\text{TIR}}^{\text{FUS}}(i, j) = I_{\text{TIR}}(i, j) + \alpha \cdot \bar{I}_{\text{HP}}(i, j) \quad (3)$$

式中, $I_{\text{TIR}}(i, j)$ 、 $\bar{I}_{\text{HP}}(i, j)$ 分别为 TIR 原始图像 (band10) 及调整型高通图像, α 是一个介于 TIR 图像及调整型高通图像 $\bar{I}_{\text{HP}}(i, j)$ 之间的尺度因子 (控制调节空间细节信息和热目标信息, α 越大, 空间分辨率越高, 热信息细节降低, 可根据研究需求取值), 综合上述式 (1)—(3) 对 PAN 图像及 TIR 图像进行融合。

3.2 大气校正法

采用大气校正法对 Landsat 8 的 TIR band 10 反演研究区地表温度。卫星传感器所观测的热辐射总量 L_λ 主要是大气向上辐射亮度 $L \uparrow$ 、大气向下辐射亮度 $L \downarrow$ 以及地表真实辐射亮度经过大气层后的辐射亮度, 用 TIR 热红外数据所获取的热辐射总量减去大气对地表辐射影响量, 再把所得的热辐射强度转化为相应的地表温度即可, 公式 (邓书斌等, 2014; 段四波等, 2021) 如下:

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L \downarrow] \tau + L \uparrow \quad (4)$$

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

$$B(T_s) = [L_\lambda - L \uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L \downarrow] / \tau \varepsilon \quad (5)$$

T_s 可用普朗克公式的函数获取:

$$T_s = K_2 / \ln(K_1 / B(T_s) + 1) \quad (6)$$

由 Landsat 8 OLI 数据元文件可知, TIRS Band 10 中, $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \mu\text{m} \times \text{sr})$, $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ 。

采用覃志豪等 (2004) 改进的 NDVI 阈值法将

地物划分为水体、自然表面以及建筑物 3 类进行地表比辐射率的计算, 自然表面多为 ε_{NS} , 建筑物则为 ε_{B} , 公式如下: 水体为 0.995, 其他的公式如下:

$$\varepsilon_{\text{NS}} = 0.9625 + 0.0614P_v - 0.0461P_v^2 \quad (7)$$

$$\varepsilon_{\text{B}} = 0.9589 + 0.086P_v - 0.0671P_v^2 \quad (8)$$

式中, P_v 即植被覆盖度, 公式如下:

$$P_v = ((\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{Soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{Soil}})) \quad (9)$$

NDVI 为归一化植被指数, $\text{NDVI}_{\text{Soil}}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值, 取百分比接近 0.5% 的值 0.050980, NDVI_{veg} 则代表完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值, 即纯植被像元的 NDVI 值取百分比接近 99.5% 的值 0.717647。

依据美国 NASA 官网 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/> [2020-12-10]) 可知大气剖面参数即大气向上辐射亮度为 $0.90 \text{ W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$, 大气向下辐射亮度为 $1.52 \text{ W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$, 平均大气透过率为 0.88, 综合式 (4)—(9) 即可反演地表温度。

4 结果与分析

4.1 多光谱及 TIR 影像图像融合效果分析

由仁差盆地的多光谱真彩色合成图像 (图 4 (a)) 及 PAN 图像细节信息 (图 4 (b)) 可知, 多光谱真彩色合成图像的地物色彩丰富, 但其细节信息较模糊。基于 ENVI 软件中的 GS 算法工具将 PAN 图像与多光谱图像进行融合得图像 GSpm (图 4 (c))。融合前后图像对比 (图 4 (a) 和 4 (c)), 图 4 (c) 显示耕地轮廓, 空间纹理信息得到提高, 且融合前后的图像信息整体较为一致, 有效提高了多光谱图像的空间纹理信息并保存其光谱信息特征。

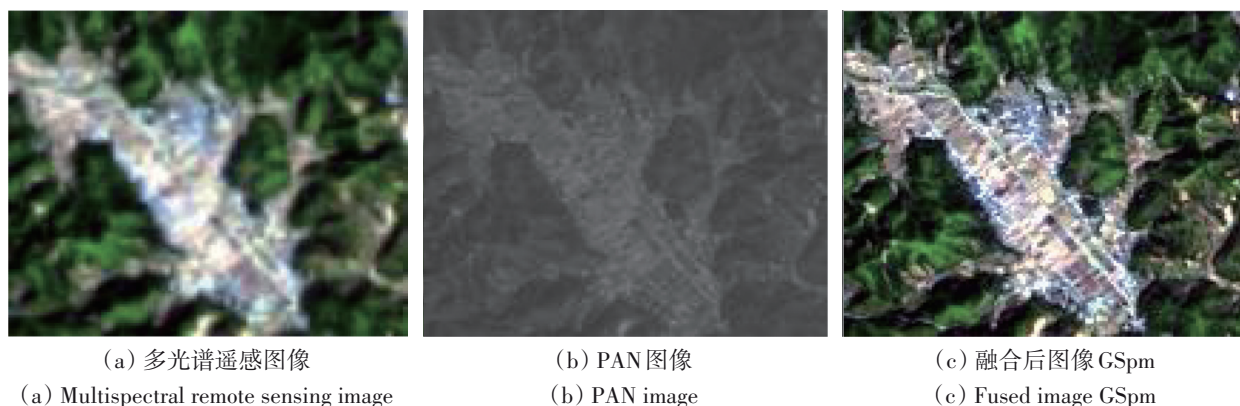


图 4 多光谱影像融合前后的细节对比

Fig. 4 Comparison of details before and after multispectral image fusion

利用 ENVI 软件依据式 (1)—(3) 对 PAN 及 TIR 图像进行加权融合运算, 以不同 α 值对比探讨最佳尺度因子, 统计结果如表 1 及图 5。 α 值从 0.5—15, TIR 原图与融合后 FUS 图的均值差及标准差差值增加较快, 相关性逐步下降, 即融合后图像增加了 PAN 图像的信息量, 但损失 TIR 原图的灰度及光谱信息, α 值越大, FUS 图的信息特征越偏向 PAN 图像。以 0.5—5 为 α 值, FUS 图与 PAN 图相关

性较低, 空间分辨率提高效果较不明显。 α 值取 15 时, FUS 图像的标准差差值、均值差较大, 且融合前后的相关性 (0.816899) 低于 PAN 图像与 FUS 图像的相关性 (0.852696), 热信息亏损较多。 α 值取 10, 融合前后的均值及标准差相距不大, 其灰度均值及信息量影响较小, 融合前后的相关性也仍能保持在 0.9 左右, 在较大提高空间分辨率的同时, 较好保存 TIR 图像的光谱特征。

表 1 不同 α 阈值下 TIR 图像融合定量评价参数
Table 1 Quantitative evaluation parameters of TIR image fusion under different thresholds

参数	阈值 α				
	0.5	1	5	10	15
融合前后均值差值	0.00032	0.00064	0.003198	0.006396	0.009595
融合前后标准差差值	0.000624	0.00137	0.011527	0.033317	0.062706
融合前后相关性/TIR	0.999673	0.998702	0.970359	0.900108	0.816899
融合前后相关性/PAN	0.655585	0.669426	0.760012	0.825587	0.852696

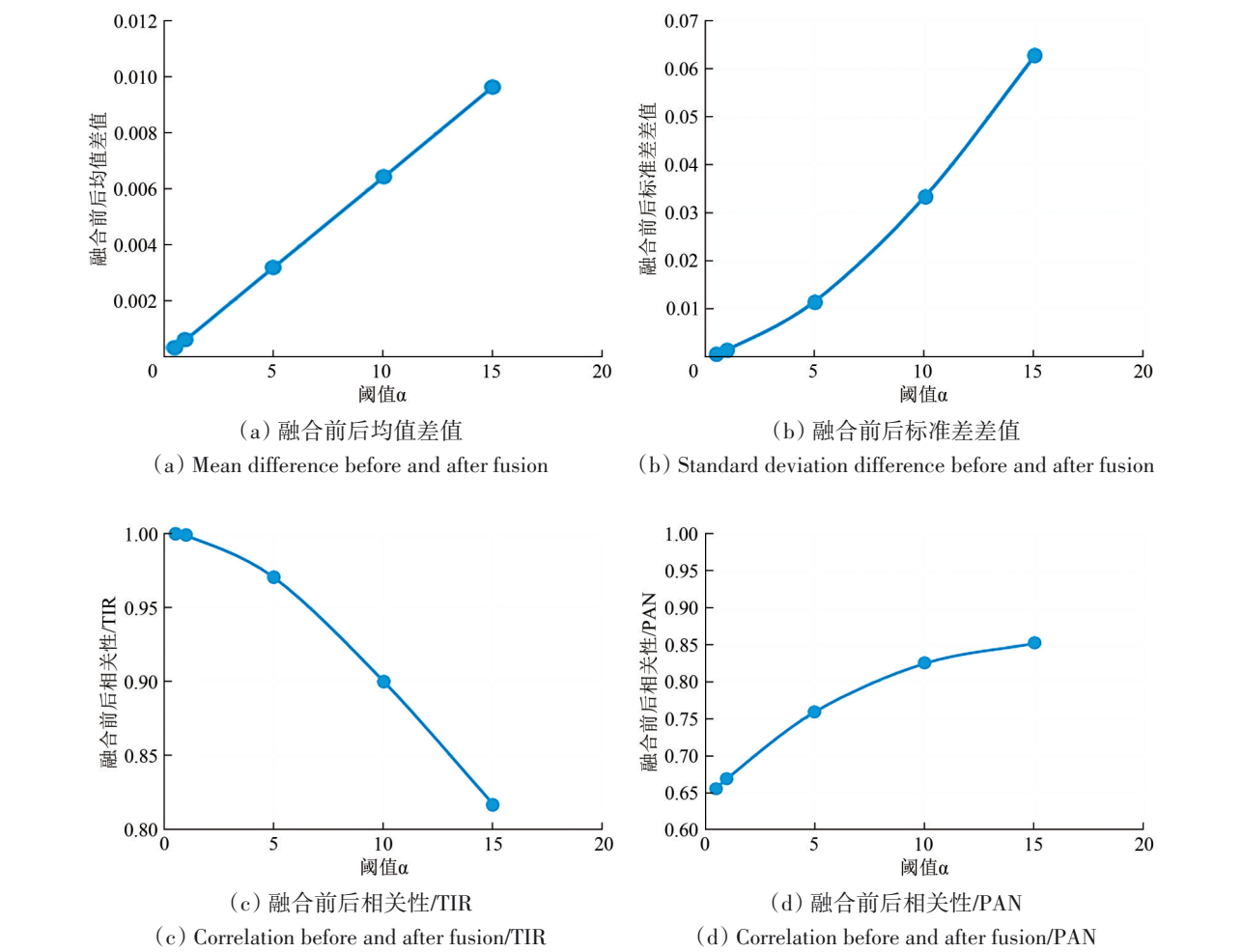


图 5 不同 α 阈值下, 融合前后的均值差、标准差差值及融合前后相关性散点图 (FUS/TIR、FUS/PAN)
Fig. 5 The mean difference, standard deviation difference and correlation scatter plot of FUS images before and after fusion under different α thresholds

根据加权融合算法公式, α 值取 10, 可得图像 (IFUS)。融合前后的子区 (图 6 (b)、图 6 (c)) 对比分析, 融合后图像的灰度亮度与 TIR 原图像几乎一致, 且融合后 IFUS 图像中的道路、水系、耕地等地物的位置、形态轮廓更为清晰, 空间纹理信息增强。由统计数据可知 (表 2), IFUS 图像与 TIR 原图的均值差仅为 0.006396, 变化并不大, 图像平均亮度较为一致。而相较于 TIR 原图, IFUS 图像的标准差增加了 0.033317, 信息量增加。

IFUS 图像与 TIR 原图的相关性为 0.900108, 高于与 PAN 图像 (0.825587), 融合前后图像仍保持较高的相关性, IFUS 图像与 PAN 图像的相关性主要表现在 IFUS 图像边缘及部分细节信息, 而与原始 TIR 图像的相关性则更多体现在 IFUS 图像的中心细节。可见, 该方法提高 TIR 图像的空间分辨率, 也较有效保存了光谱特征信息, 有利于 TIR 图像热目标的后续分析。

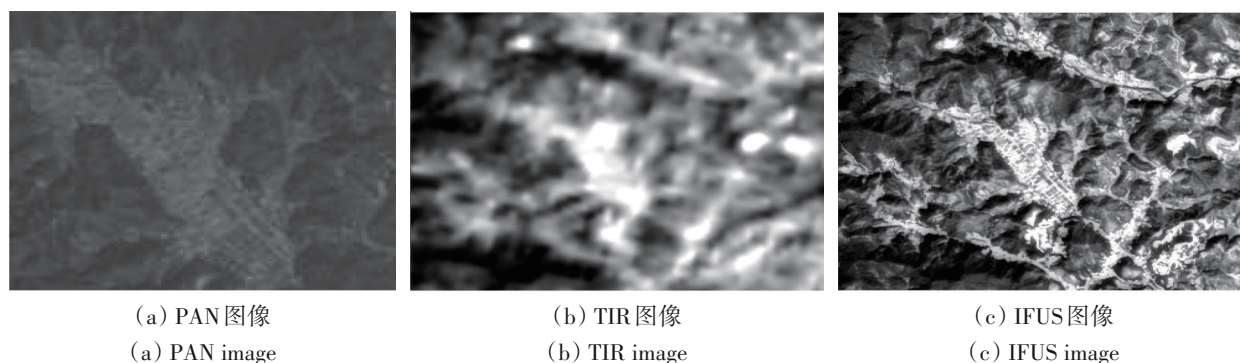


图 6 热红外影像融合前后的细节对比

Fig. 6 Comparison of details of TIR images before and after fusion

4.2 图像融合前后的地温反演分析

分别以 TIR 原图像与图像融合后的 IFUS 图像根据地温反演算法反演仁差盆地的地表温度, 将融合前后的地温反演图用 ArcGIS 软件分别沿色带拉伸为 LST 及 LST1 (图 7)。空间分辨率仅有 100 m 的 TIR 图像反演后的地表温度分布图中 (图 7 (a)), 地温分布中的地物界线极其模糊, 城镇、植被区、裸地及水系等地物信息几乎糅杂于一体, 难以辨识具体地物的地温分布, 各地物间缺乏一定的空

间纹理信息。而融合后的 IFUS 图像热目标信息虽比原始 TIR 图像有所减弱, 但其光谱特征与原 TIR 图像相差不大, 融合前的 LST 最低值为 11.22 °C, 地温最高值为 29.63 °C, 而融合后的 LST1 所反演的温度最低为 10.60 °C, 最高为 30.88 °C, 虽并非为准确的地表温度, 但与 LST 图像相比, 温度偏差约为 1 °C, 且两者地温分布趋势相近, 可见其仍具有一定的对比可信度。

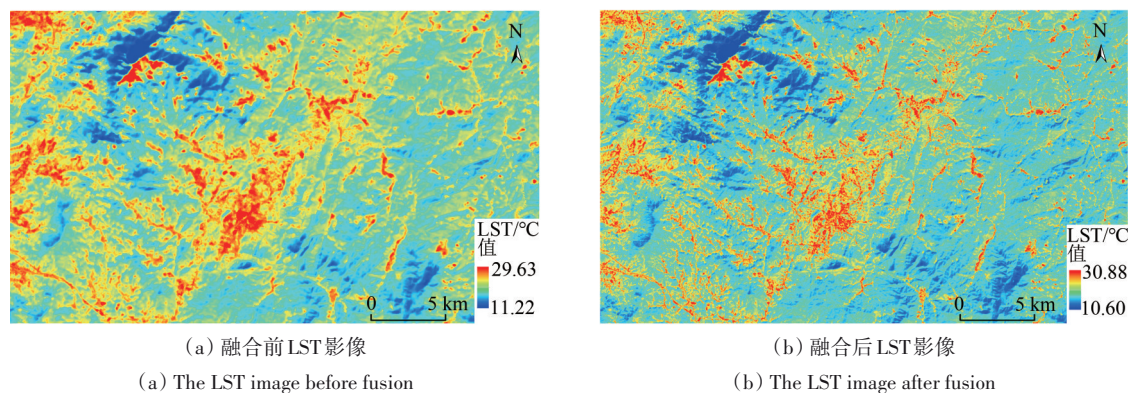


图 7 融合前后地温反演图对比分析

Fig. 7 Comparative analysis of LST retrieval image before and after fusion

图7(b)的地物亮度与图7(a)基本一致,但图7(b)的亮度温度信息更细化,地物间的位置及形态等纹理信息更明显,城镇建筑、耕地、道路、植被区及阴影区等地物特征信息明显细化,各种不同地物间的地表温度对比性增强,如建筑物及道路分别呈现明显的点、带状高温信息特征,而不同植被覆盖区间也呈现清晰的不同地温特征信息,整体相对于图7(a)而言,经过加权融合后进行地温反演而得到的图7(b)更易于进行地物热异常的识别分析。

4.3 基于融合数据的硅化蚀变信息识别与提取

硅化蚀变带中的石英矿物含量多,整体硬度较大,抗风化能力强,在外力作用下不易破碎,残积物堆积及土壤层较薄等特点。在地形地貌上,硅化蚀变带致密坚硬,更易形成比周边地区略高的正地形,如若发育于山体顶部,会形成“薯垄”状地形(王俊虎等,2020),可见其在白天导热率相对较高,而在地表温度中呈现条带状热异常带。

以DEM数据生成仁差盆地多光谱真彩色三维地形图(图8),仁差盆地地形较为破碎,叠加地质资料解译的硅化蚀变带信息(图8蓝色区域),可知遥感图像的范围较大,硅化蚀变带的分布面积较小,信息极为微弱,与周边裸地(主要为耕地)混杂一体,呈现起伏不断的细小条带状,肉眼难以识别。硅化蚀变带比周边略高,但整体主要处于仁差盆地中部地势较低处,在此环境下,硅化蚀变带接受的碎屑沉积物较多,土壤层厚度厚,但其石英含量较高,土壤肥力低,透水性弱,土壤储水能力较低,难以开垦,且由于其空间规模较小,易被两旁高大植被遮挡,表土裸露面积较少,在地表温度中主要呈现狭小细长的弱线性信息。与其相反,断裂带整体硬度较低,风化较为严重,碎屑堆积物较多(周丹等,2013;史超等,2020),与硅化蚀变带相比,土壤肥力较高,温度较低且土壤湿度较大,更利于农作物种植。断裂带附近利于耕地开垦,地表裸露的面积更大,造成的热异常面积比硅化带更为明显。



图8 融合后多光谱真彩色三维地形图(蓝色区域为硅化带)

Fig. 8 Fusion of multi-spectral true-color 3D topographic map(The blue area is silicified zone)

在图7(b)中,高温区温度大致为 21°C 以上,主要以黄红色为主分布于裸地地区,且大多呈现明显粗细不一的线性特征。综合可知,仁差盆地铀多金属矿区中硅化蚀变带与断裂带相似,均会呈现热异常现象,但由于其固有的地质地貌及遥感图像上的信息特征,硅化蚀变带呈现的热异常信息特征较弱,不如断裂带信息特征明显。硅化带的这些地形地质特征在地温反演图LST1中主要表现为黄色及部分红色色带信息,且色带面积较窄,热异常带规模较为细小,即呈现细小线状高温异常带现象。如图9,图9(a)与图9(b)的线性热异常信息相差较大,图9(a)的线性高

温异常带较细小,在全图中较为模糊,主要为黄红色色调,温度相对较低,而图9(b)规模较大,可见农田轮廓,红色色调面积更宽,以此初步推测图9(a)为硅化带,图9(b)则为断裂带区域。

由于道路等人工设施也易形成高温异常信息,本文先结合全国主要公路、铁路图等矢量资料识别标注出国道、省道等道路信息(如图10中的道路标注),再利用硅化蚀变带在LST1地温反演图中呈现黄红色色调的细小条带状的地温信息特征,进行硅化蚀变带信息识别推测(如图10中紫色条带)。为了验证信息提取的准确性,同时将地质图资料中提取的断裂构造带、硅化蚀变带叠加到地

温反演图中。可发现仁差盆地中的断裂带及硅化蚀变带均处于线性高温异常带之中，且断裂带与高温热异常区吻合度较高，所在区域大多呈现宽度较大的线状高温现象。而识别提取的预测硅化蚀变带均沿着断裂带分布，规模较小，宽度较窄，在地温图中呈现比断裂带更为细小的高温异常现象，信息特征较弱。由图 10 可知，预测硅化带（紫色部分）大多与已知硅化带（蓝色部分）相吻合，尤其在鹧鸪隆断裂带及猪麻坝断裂带附近的硅化蚀变带吻合度较好，并在野外进行较好验证（图 10（a）右图）。而部分未成功预测硅化蚀变带区域（图 10（a）、（b）南部硅化带）的规模较小，植被覆盖度较高，该处硅化蚀变带的地温信息难以显示其独有的地温信息特征，往后可借助更高分辨率影像数据进行植被抑制后识别提取。整体而言，本文识别的硅化蚀变带与地质解译的已知硅化蚀变带吻合度较高，该方法在仁差盆地铀多金属矿区中识别硅化蚀变带的应用较好，用该方

法识别出来的其他预测硅化蚀变带也同样具有较高的勘测意义。

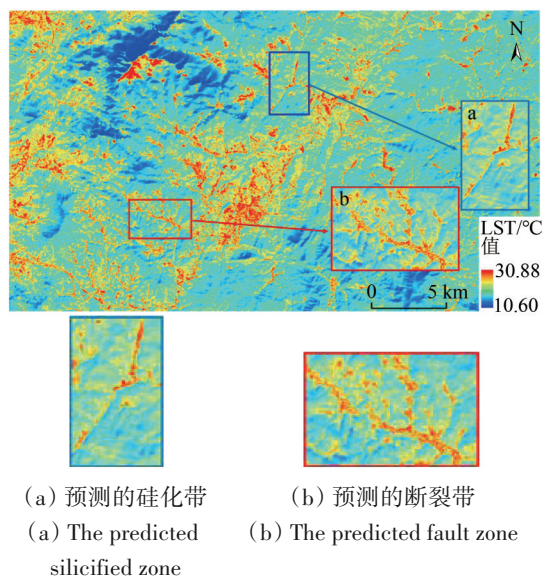
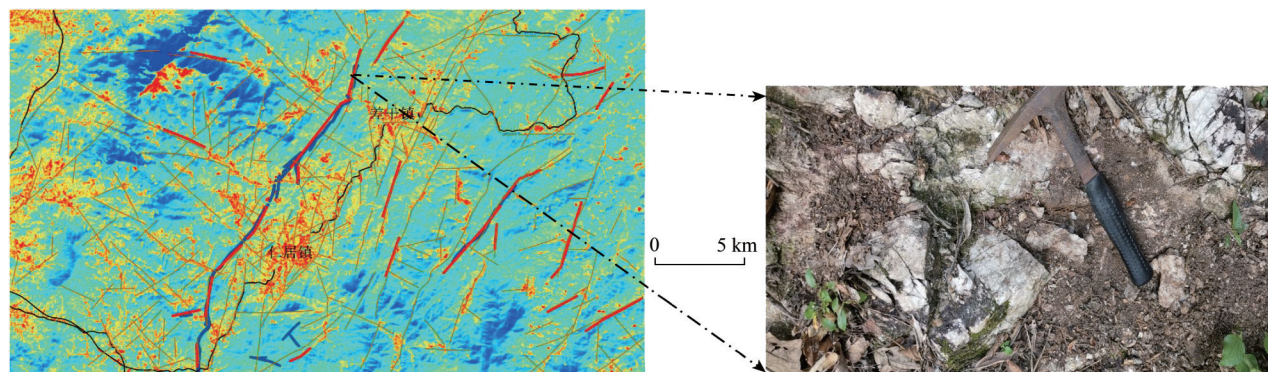


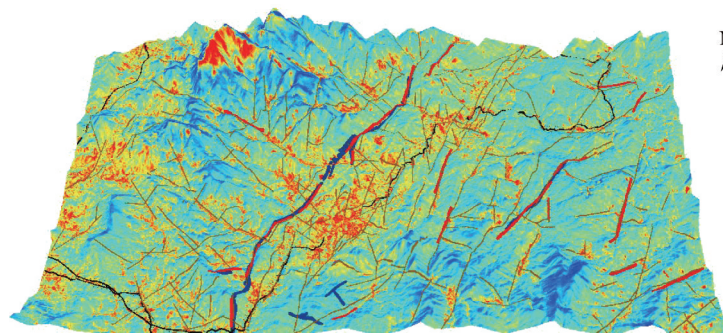
图9 部分典型高温异常区

Fig. 9 Part of the typical high temperature anomaly area.



(a) 左为平面构造叠加图,右为硅化带近景图

(a) The left is the overlay map of planar structures and the right is the close range image of silicified zone after fusion



(b) 三维地形构造叠加图

(b) Three dimensional topographic structure superposition image

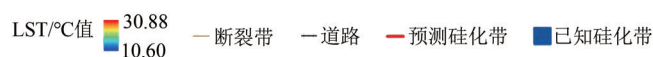


图 10 识别结果及地质构造叠加验证图

Fig. 10 The identification results and verification map of geological structure superposition

5 结 论

本文主要采用图像融合的方法提高TIR图像空间分辨率，以此进行地表温度反演，提高地物地表温度的识别度，可较准确识别裸地中的硅化蚀变带信息，结果如下：（1）加权融合的方法不仅有效提高了TIR图像空间分辨率，增强对空间位置及形态特征等纹理信息的识别能力，也更好保存了TIR图像的热目标光谱信息特征，更加利于TIR图像的物理观测及其后续应用。（2）融合前后数据反演的地温图整体而言误差较小，地物温度有较好的一致性，该方法反演的地表温度不仅对应上具体地物的热信息变化，且增强地物之间的地温对比度，提高了对地物热异常识别能力。（3）仁差盆地硅化蚀变带及断裂带均处于地温图的高温异常区，但硅化蚀变带的条带状信息微弱，呈现的线性条带规模比断裂带小，主要呈现为沿着断裂带呈现细小线状的热异常信息。经验证，已知硅化带与预测识别的硅化带吻合度较高，较为一致，可见该方法可较准确识别裸地中的硅化蚀变信息。

参考文献(References)

- Deng S B, Chen Q J, Du H J and Xu E H. 2014. ENVI Remote Sensing Image Processing Methods. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press: 419-420 (邓书斌, 陈秋锦, 杜会建, 徐恩惠. 2014. ENVI遥感图像处理方法. 2版. 北京: 高等教育出版社: 419-420)
- Duan S B, Ru C, Li Z L, Wang M M, Xu H Q, Li H, Wu P H, Zhan W F, Zhou J, Zhao W, Ren H Z, Wu H, Tang B H, Zhang X, Shang Guo F and Qin Z H. 2021. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1591-1617. (段四波, 茹晨, 李召良, 王猛猛, 徐涵秋, 历华, 吴鹏海, 占文凤, 周纪, 赵伟, 任华忠, 吴骅, 唐伯惠, 张霞, 尚国珪, 覃志豪. 2021. Landsat卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展. *遥感学报*, 25(8): 1591-1617 DOI: 10.11834/jrs.20211296)
- Guo B J, Zhang J L, Wu D and Zhang C. 2017a. Application of airborne hyperspectral remote sensing in the exploration of granite type Sn deposit. *Uranium Geology*, 33(4): 241-245 (郭帮杰, 张杰林, 武鼎, 张川. 2017a. 航空高光谱遥感在花岗岩型锡矿勘查中的应用研究. *铀矿地质*, 33(4): 241-245) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0658.2017.04.008]
- Guo B J, Zhang J L, Wu D and Zhang C. 2017b. Application of hyperspectral remote sensing in silicified zone identification. *Science Technology and Engineering*, 17(3): 154-158 (郭帮杰, 张杰林, 武鼎, 张川. 2017b. 高光谱遥感在硅化带识别中的应用. *科学技术与工程*, 17(3): 154-158) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.

03.022]

- Hou M P and Gao S D. 2001. The silicified zones characteristics of Dang Chong formation and the preliminarily exploration on its coming into being in Ore Area No. 320. *Journal of East China Geological Institute*, 24(4): 277-281 (侯满平, 高仕达. 2001. 320矿区当冲组“硅化带”的特征及成因初探. *华东地质学院学报*, 24(4): 277-281) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-3504.2001.04.003]
- Hua L Z, Deng Q Q, Zhang M L, Yin K and Zhang X X. 2017. Comparisons of fusion algorithms using Landsat 8 OLI image. *Journal of Xiamen University of Technology*, 25(1): 5-11 (花利忠, 邓琪琪, 张敏莉, 尹锴, 章欣欣. 2017. 基于Landsat 8 OLI遥感影像的融合算法比较. *厦门理工学院学报*, 25(1): 5-11) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-4432.2017.01.002]
- Jiang X C, Deng Z D, Wu G Y and Wang D H. 2018. Comparisons on fusion algorithms of Landsat 8 OLI multi-spectral and panchromatic images. *Information Technology and Network Security*, 37(8): 31-35 (姜晓晨, 邓正栋, 武国瑛, 王东豪. 2018. Landsat 8 OLI多光谱与全色影像融合算法的比较. *信息技术与网络安全*, 37(8): 31-35) [DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2018.08.008]
- Jung H S and Park S W. 2014. Multi-sensor fusion of Landsat 8 thermal infrared (TIR) and panchromatic (PAN) images. *Sensors*, 14(12): 24425-24440 [DOI: 10.3390/s141224425]
- Laben C A, Bernard V and Brower W. 2000. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. U.S. No. 6011875
- Li C J, Liu L Y, Wang J H and Wang R C. 2004. Comparison of two methods of fusing remote sensing images with fidelity of spectral information. *Journal of Image and Graphics*, 9(11): 1376-1385 (李存军, 刘良云, 王纪华, 王人潮. 2004. 两种高保真遥感影像融合方法比较. *中国图象图形学报*, 9(11): 1376-1385)
- Liu D F, Chen S B, Chen L and Ma M. 2015. Silicification information extraction based on the content of SiO₂ from ASTER TIR data. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(8): 1396-1402 (刘道飞, 陈圣波, 陈磊, 马明. 2015. 以SiO₂含量为辅助因子的ASTER热红外遥感硅化信息提取. *地球科学—中国地质大学学报*, 40(8): 1396-1402) [DOI: 10.3799/dqkx.2015.124]
- Liu L, Wu M M, Yin C J, Zhou J, Xie W Y and Yin C T. 2019. Influence of the different spatial resolutions for alteration mineral mapping. *Remote Sensing Technology and Application*, 34(5): 1040-1047 (刘磊, 吴朦朦, 尹翠景, 周军, 谢文杨, 尹春涛. 2019. 影像空间分辨率对蚀变信息提取结果的影响研究. *遥感技术与应用*, 34(5): 1040-1047) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.5.1040]
- Liu Q. 2019. Characteristics and metallogenic mechanism of Chagan volcanic-type uranium-polymetal deposits in Rencha basin, North-eastern Guangdong. *Mineral Resources and Geology*, 33(1): 77-82 (刘峤. 2019. 粤东北仁差盆地察甘火山岩型铀—多金属矿床成矿特征及其成矿机理探讨. *矿产与地质*, 33(1): 77-82) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-5663.2019.01.010]
- Liu Y Y, Lu Y X, Liang Y W, Peng Z L, Huang Q R and Ma H M. 2007. Analysis on metallogenic conditions of Rencha volcanic

- basin. *Journal of Guilin University of Technology*, 27(4): 469-473 (刘延勇, 卢映新, 梁业武, 彭卓伦, 黄秋荣, 马浩明. 2007. 仁差火山盆地多金属成矿条件分析. *桂林工学院学报*, 27(4): 469-473) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-9057.2007.04.002]
- Lou F, Yu Y S, Zheng Y, Lan H C, Zhu X Q and Qiu W. 2017. Tectonic evolution and mechanism of uranium mineralization structure in the Rencha Basin, Northeastern Guangdong. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 56(4): 145-153 (娄峰, 于玉帅, 郑义, 蓝恒春, 朱晓琼, 邱惟. 2017. 粤东北仁差盆地构造演化与铀成矿构造机制探讨. *中山大学学报 (自然科学版)*, 56(4): 145-153) [DOI: 10.13471/j.cnki.acta.snus.2017.04.022]
- Lu S L, Shen X H, Zou L J, Li C J, Zhang G F, Wu W Y, Liu Y and Zhang Z. 2009. Subsection mean method for relation analysis of the land surface temperature field and the fault: a case study of the Jiangshan-Shaoxing fault between Jinhua and Quzhou of Zhejiang province. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 239-246 (卢善龙, 沈晓华, 邹乐君, 李长江, 章桂芳, 吴文渊, 刘瑛, 张重. 2009. 用于地表温度场与断裂构造关系分析的分段均值法——以江山—绍兴断裂金衢段为例. *地质学报*, 83(2): 239-246) [DOI: 10.3321/j.issn:0001-5717.2009.02.009]
- Qin Z H, Li W J, Xu B, Chen Z X, and Liu J. 2004. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6. *Remote Sensing for Land and Resources*, (3): 28-32, 36, 41 (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*, (3): 28-32, 36, 41)
- Shi C, Huang C, Li S and Nie F. 2020. Identification of buried fault based on TVDI index and land surface temperature inversion. *Yangtze River*, 51(2): 107-111 (史超, 黄超, 李书, 聂峰. 2020. 基于 TVDI 指数的隐伏断层识别. *人民长江*, 51(2): 107-111) [DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.02.019]
- Tang S L, Cao J N and Wang K. 2021. Remote sensing mineralization alteration information extraction based on PCA, Multilevel Segment Method, and SVM. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 653-664 DOI: 10.11834/jrs.20219091. (唐淑兰, 曹建农, 王凯. 2021. 结合 PCA、多尺度分割及 SVM 的 ASTER 遥感蚀变信息提取. *遥感学报*, 25(2): 653-664 DOI: 10.11834/jrs.20219091)
- Wang B, Chen L Y, Wang H, Ren G L, Wu Y F, Huang Z Y, and Fu W W. 2011. Ore prospecting for the Taxkorgan area of west Kunlun using quantitative extraction of mineralized alteration information. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(3): 372-377 (王彪, 陈利燕, 王核, 任广利, 吴玉峰, 黄朝阳, 付王伟. 2011. 遥感蚀变信息定量提取方法在成矿预测中的应用——以西昆仑塔什库尔干地区为例. *大地构造与成矿学*, 35(3): 372-377) [DOI: 10.16539/j.ddgzyckx.2011.03.006]
- Wang J H, Wu D, Zhang J L and Guo B J. 2020. Identification and new discovery of Qiansuilian fault belt in Gaudeamus area, Namibia based on the multi-source remote sensing data. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(5): 183-190 (王俊虎, 武鼎, 张杰林, 郭帮杰. 2020. 基于多源遥感数据的纳米比亚欢乐谷地区千岁兰断裂带识别及新发现. *地质科技通报*, 39(5): 183-190) [DOI: 10.19509/j.cnki.dzktq.2020.0630]
- Wang J H and Zhang J L. 2012. Silicification information extraction of Taoshan uranium ore field based on the aster thermal infrared data//*Proceedings of the National Symposium on the Construction of Uranium Mining Bases (Volume 2)*. Haikou: Chinese Nuclear Society: 257-265. (王俊虎, 张杰林. 2012. 基于 ASTER 热红外数据的桃山铀矿田硅化信息提取//*全国铀矿大基地建设学术研讨会论文集 (下)*. 海口: 中国核学会: 257-265)
- Wang J H, Zhang J L and Zhang J B. 2010. SiO₂ content retrieving and metallogenic factors identification of a granite-type uranium ore-field based on thermal infrared data. *Journal of Geo-Information Science*, 12(1): 126-132 (王俊虎, 张杰林, 张静波. 2010. 基于热红外数据的花岗岩铀矿田地表 SiO₂ 含量反演及其铀成矿要素识别. *地球信息科学学报*, 12(1): 126-132)
- Wang Z G, Wang X J and Hu S L. 2008. Role of silicified alteration belt in ore forming process of Hexi gold deposit. *Metal Mine*, 5: 86-88, 92 (王自国, 王秀娟, 胡世利. 2008. 浅析硅化蚀变带在河西金矿成矿过程中的作用. *金属矿山*, (5): 86-88, 92) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1250.2008.05.024]
- Wu L X. 2003. An arithmetic RS image fusion method for spectral preservation: high pass filter fusion. *Remote Sensing for Land and Resources*, (4): 26-29. (吴连喜. 2003. 一种保持光谱特征的图像融合方法——高通滤波融合. *国土资源遥感*, (4): 26-29) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-070X.2003.04.007]
- Yan B K. 2006. Study on Mechanism of Spectrums of Rocks and Minerals and Information Extraction Method in Thermal Remote Sensing Geology. Beijing: China University of Geosciences, Beijing (闫柏琨. 2006. 热红外遥感岩矿波谱机理及信息提取技术方法研究. 北京: 中国地质大学(北京))
- Yang C B, Zhu Q, Jiang Q G and Liu B. 2009. Silicon dioxide content of surface rock quantify inversion and retrieval by thermal infrared ASTER data. *Geology and Exploration*, 45(6): 692-696 (杨长保, 朱群, 姜琦刚, 刘斌. 2009. ASTER 热红外遥感地表岩石的二氧化硅含量定量反演. *地质与勘探*, 45(6): 692-696)
- Yu D Z. 2012. The geological characteristics and genetic analyses of north deposit in Guangdong northeast Renchai basin. *Sichuan Building Materials*, 38(6): 243-245 (余端珍. 2012. 粤东北仁差盆地北部某矿床地质特征及矿床成因分析. *四川建材*, 38(6): 243-245)
- Zhang B, Zhou J and Wang J N. 2008. Analyses of alteration mineral mapping and mineral resources prospecting using TM or ETM data. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 30(3): 254-259 (张兵, 周军, 王军年. 2008. 遥感蚀变矿物填图与找矿方法. *地球科学与环境学报*, 30(3): 254-259) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-6561.2008.03.005]
- Zhang F K, Xing L X, Han T T, Wang S Z and Liang M. 2016. Relationship between main fault and land surface temperature field of Changbai Mountain area. *Global Geology*, 35(1): 153-162 (张福坤, 邢立新, 韩婷婷, 王守志, 梁敏. 2016. 长白山地区主要断裂带与地表温度场关系研究. *世界地质*, 35(1): 153-162) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2016.01.015]
- Zhang T B, Tang J X and Huang D F. 2009. The model of alteration information extraction with TM/ETM+ remote sensing image. *Remote Sensing Information*, (2): 47-51 (张廷斌, 唐菊兴, 黄丁发.

2009. 矿化蚀变信息提取的TM/ETM+遥感影像模式. 遥感信息, (2): 47-51 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2009.02.009]
- Zhen M and Wang S P. 2019. An adaptive weighted average fusion method for visible and infrared images. *Infrared Technology*, 41 (4): 341-346 (甄媚, 王书朋. 2019. 可见光与红外图像自适应加权平均融合方法. 红外技术, 41(4): 341-346)
- Zhou D, Zhang Z F, Long F and Luo C. 2013. Mapping buried faults using the temperature-vegetation-dryness index with an application in Yangla copper Mining area, Yunnan. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(2): 423-430 (周丹, 张振飞, 龙斐, 罗成. 2013. 用温度植被干旱指数(TVDI)识别隐伏断层: 以云南羊拉铜矿区为例. 地球科学——中国地质大学学报, 38(2): 423-430) [DOI: 10.3799/dqkx.2013.042]
- Zhou G S. 2017. Discussion on the relationship between CO₂ gas and uranium Polymetallic mineralization in Rencha Basin, Pingyuan county, Guangdong province. *Western Resources*, (3): 46-48 (邹观石. 2017. 广东省平远县仁差盆地CO₂气与铀多金属成矿关系探讨. 西部资源, (3): 46-48) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-562X.2017.03.021]

Inversion of LST and extraction of silicification alteration information based on the weighted fusion TIR data : A case study of the Uranium Polymetallic mining area in RenCha basin of Guangdong province

CAO Hailing, WANG Zhenghai, QIN Haoyang, SUN Yuanchao, YIN Guopan

School of Earth Sciences and engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: The silicification alteration zone is an important prospecting indicator for many kinds of metallic hydrothermal deposits. Identifying the silicification alteration information rapidly and widely by remote sensing technology is vital. However, the width of the silicidic alteration zone is only a few meters to hundreds of meters, and it appears as a thin band of a fine ribbon. At present, most of the commonly used thermal infrared data have low spatial resolution and fuzzy spatial details, which limit their applications in identifying microsilicidic alteration zones. Based on the study of the land surface temperature anomaly characteristics of the siliceous alteration zone in the Rencha basin, the enhancement recognition model of siliceous alteration with weak information is established to strengthen the recognition and analysis of the siliceous alteration information.

In this study, the PAN image high-frequency component map and TIR image are weighted and fused by taking the uranium mining area in the Rencha basin of Guangdong Province as an example. Then, a remote sensing model of silicified alteration weakening information enhancement identification is established. This model is based on the analysis of the topographic characteristics of the silicified alteration zone in the Rencha basin and the discussion of its relationship with LST anomalies.

The results show that the weighted fusion of the PAN and TIR image can improve the spatial resolution of the TIR image and preserve the spectral characteristics of the thermal target effectively. In addition, the LST image slightly changes before and after fusion, and the latter improves the ability to identify the thermal anomalies of ground objects. Finally, the silicization alteration zone, a high-temperature anomaly zone smaller than the fault zone in the approximate LST diagram, is predicted and identified accordingly.

In conclusion, the information on the silicified alteration zone in the Rencha basin can be enhanced by the LST retrieval of the weighted fusion image. The silicified bands predicted and identified via this method are consistent with the known ones. This finding illustrates that this method is well applied to identifying the silicified alteration zone in the uranium mining area of the Rencha basin.

Key words: RenCha Basin, Thermal Infrared (TIR), image fusion, silicified alteration zone

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41572316); Science and Technology Program of Guangzhou, China (No. 201804010274)