

doi:10.3799/dqkx.2013.042

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

周 丹¹, 张振飞^{1*}, 龙 斐², 罗 成²

1. 中国地质大学数学地质遥感地质研究所, 湖北武汉 430074

2. 云南迪庆矿业开发有限责任公司, 云南香格里拉县 674400

摘要: 在残积物、土壤覆盖区, 若基岩中存在断层, 则可能使局部覆盖层加厚、湿度和植被密度相对提高、近地面物质热惯量加大, 并在白天的热红外观测中因地表升温较慢而显示地面温度相对较低。这些效应可用温度植被干旱指数 (TVDI) 加以表征, TVDI 的线状低值区 (负异常) 可作为指示隐伏断层的标志。利用 Landsat7 ETM+ 数据, 运用温度植被干旱指数 (TVDI) 方法, 在面积约 26 km² 的云南羊拉铜矿区进行了隐伏断层识别。结合可见光遥感影像解译及露头地段实地调查, 测制了该矿区断层分布图。该研究成果对于羊拉矿区矿山生产有一定的实际意义, 同时也显示了热红外遥感技术在覆盖区矿区地质应用方面的潜力。

关键词: 热红外遥感; 温度植被干旱指数; 隐伏断层; 羊拉铜矿区。

中图分类号: P534.4

文章编号: 1000-2383(2013)02-0423-08

收稿日期: 2012-09-25

Mapping Buried Faults Using the Temperature-Vegetation-Dryness Index with an Application in Yangla Copper Mining Area, Yunnan

ZHOU Dan¹, ZHANG Zhen-fei^{1*}, LONG Fei², LUO Cheng²

1. Institute of Mathematical Geology & Remote Sensing, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Mining Development Co., Ltd, Diqing, Yunnan, Shangrila 674400, China

Abstract: In mountainous areas with eluvium overburden, thickness, moisture and vegetation of the overburden layer may be locally increased where faults are developed in the bedrock. At such localities thermal inertia of the near-surface materials is larger than that in the surrounding areas and relatively low surface temperature due to slower diurnal heating rate may be observed in the daytime. Therefore, the temperature-vegetation-dryness index (TVDI), a combination of surface temperature and vegetation, may be used to retrieve buried faults. Using Landsat7 ETM+ data, we have identified buried faults in this study with TVDI in Yangla copper mining district, Yunnan, which is about 26 km² in area and is covered by residual deposits for the most part. A distribution map of faults of the district is obtained with linear lows of TVDI as indicators of buried faults combined with visible image interpretation and field investigation. While essential for mining practice in Yangla, our results show a remarkable potential of thermal infrared remote sensing in ore-field geological studies in poorly outcropped regions.

Key words: thermal infrared remote sensing; temperature-vegetation-dryness index; buried faults; Yangla copper deposit.

近 30 多年来, 卫星热红外遥感对地观测获得了快速发展和广泛应用。概略地说, 目前这些应用主要有 3 个大的方面: 一是根据不同成分、结构的地表物质的各红外波段波谱特征和影像特征进行地表矿物

填图、岩石识别, 用于地表地质研究及遥感找矿等领域, 最近 Van der Meer *et al.* (2012) 做了全面综述; 二是利用热红外波段通过探测地表温度分布, 根据地表热异常 (通常指地面温度高于周围地段的局部)

基金项目: 云南铜业集团有限公司科研合作项目 (No. 2012026410)。

作者简介: 周丹 (1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感地质研究。E-mail: ciwei.dan@163.com.

* **通讯作者:** 张振飞, E-mail: zfzhang@cug.edu.cn

识别和分析地下深部构造活动,并用于油气勘查(刘福江等,2008; Wu *et al.*, 2012)、地震(郑兰哲等,1996; Tronin *et al.*, 2002; Genzano *et al.*, 2007; Pulinets and Dunajacka, 2007)及大气环境研究(Bateson *et al.*, 2008)等领域.这些研究一般针对大断层.关于地表热异常的形成机制有多种假说,如“排气说”(深部断裂活动使 CO_2 、 CH_4 等温室气体排出地表导致地面及近地面大气温度升高(强祖基等,1997))、“排水说”(深部断裂活动可“挤出”热水在地表附近对流从而引起表面升温(Surkov *et al.*, 2006))、“电离说”(强震前活动断裂处排出氢气和水汽,在太阳辐射下引起近地面空气电离从而导致地面升温(Pulinets *et al.*, 2006))及“变形说”(深部断裂活动的应变能转换为热能引起地面升温屈春燕等,2004)等;三是主要在农业和环境领域,利用热红外波段通过地面温度反演及诸如植被指数(NDVI)、温度植被干旱指数(TVDI)等指标的计算,进行土壤含水量、农作物旱情监测(如 Carlson *et al.*, 1994; Moran *et al.*, 1994; Goetz, 1997; Goward *et al.*, 2002)及城市热岛监测研究(季青等,2009).

本文利用 Landsat7 ETM+热红外波段,在云南羊拉铜矿区进行了隐伏断层识别研究.结合可见光波段影像解译和野外调查,测制了该矿区断裂构造分布图.羊拉铜矿区位于滇西北高山区,区内除沟谷两侧陡坡、道路边、采场等处有天然或人工基岩露头外,大部分被厚度不等的残积物、土壤以及密度不等的植被覆盖.由于露头条件和穿越条件限制,过去进行的中、大比例尺地质调查均未能较好地查明该区内断裂构造情况.但矿山生产中发现,矿区内延伸规模数百米至数千米的断裂构造十分发育,对矿体的追索、圈定造成很大影响,研究查明区内断裂构造的分布及性质已成为一项紧迫任务.笔者发现 ETM+热红外影像能够较好地反映该区的隐伏断层,对隐伏断层有指示意义的是地面温度“负异常”(这里指地面温度低于周围地段的局部)及土壤湿度及植被密度的局部高值.根据该特点,本文采用温度植被干旱指数(TVDI)方法(Carlson *et al.*, 1994; Sandholt *et al.*, 2002)进行隐伏断层识别;并对 TVDI “负异常”指示隐伏断层的物理机制做概略的定性解释. TVDI 负异常指示隐伏断层在羊拉铜矿区表现很明显,笔者认为这一特点对于地理、地质条件类似的地区具有一定普遍性.该研究对于羊拉铜矿区的勘查和生产具有实际意义,同时在矿区地质构造遥感研究方法和思路方面也是一次有益的探索.

1 思路和方法

1.1 基本思路

虽然大量研究表明活动断裂可使地面温度升高从而表现出遥感热红外异常(如强祖基等,1997; Surkov *et al.*, 2006),但这不是绝对的,可能存在许多原因使断层附近地面温度并不总是升高.比如,如果断层规模较小并已处于不活动期,则可能不足以引起地下热水的向上循环、不发生显著的排气、也不释放显著的应变能,从而不会引起地面升温.即使存在这些条件能够引起地面升温,升温的幅度也未总是很大而不被地面昼夜温差变化所淹没.因此,尤其矿区尺度的中小规模断层,并不总是与地面温度的正异常密切相关.但是断层破碎带引起的地表物质热惯量异常可能成为隐伏断层存在的指示标志.一般来说被残积物、土壤覆盖的隐伏断层地表破碎带因抗风化力较弱,残积、土壤层会比周围没有断层的地段加厚.残积、土壤层因孔隙度高而可能含水量高于基岩、导热率低于基岩,从而热惯量大于基岩.热惯量较大意味着在同等加热条件下温度变化较慢.所以在断层破碎带发育处,地面温度昼夜变化速度和幅度较之残积层较薄的周围地段要小(假设其他条件如地形、地面比辐射率及反照率等的影响可忽略).在白天中午左右进行热红外观测,将会在断层发育处由于升温较周围地段慢而观测到地面温度负异常(如果在夜间观测,则因降温较慢而可能见到地面温度正异常).因此,白天的地面温度负异常是指示隐伏断层的一种可能标志.大量研究表明,土壤湿度及规格化植被指数(NDVI ,可指示植被发育程度)与地面温度有一定关系(Carlson *et al.*, 1994; Sandholt *et al.*, 2002).在羊拉矿区观察到残积、土壤层较厚地段植被密度也有相对变大的趋势,植被情况在一定程度上可指示覆盖层厚度和湿度.为了更充分地利用信息,本文综合考虑到地面温度和植被发育情况的指标,即前人(Carlson *et al.*, 1994; Sandholt *et al.*, 2002)在农业和环境领域常用的温度植被干旱指数(TVDI)作为隐伏断层识别指标.

以上是本文利用热红外数据在矿区范围内识别隐伏断层的基本思路.由于研究区地质构造的复杂性,孤立使用红外遥感数据不可能全面准确地识别出所有断层.实际工作中,笔者是将温度植被干旱指数方法与可见光图像解译及野外调查相结合开展研究的.

1.2 方法

1.2.1 温度植被干旱指数(TVDI)的计算 一定地

区(如一景影像)范围内每个像素点的温度植被干旱指数(TVDI)定义为地面温度和规格化植被指数(NDVI)的函数,其表达式为(Carlson *et al.*, 1994; Sandholt *et al.*, 2002):

$$TVDI(T_s, NDVI) = \frac{T_s - T_{s,min}(NDVI)}{T_{s,max}(NDVI) - T_{s,min}(NDVI)}, \quad (1)$$

式中: $T_{s,max}$ 和 $T_{s,min}$ 分别是对应于一定NDVI值的最高和最低地面温度.从(1)式可见,为计算一个像素的TVDI,需要先获得该像素的NDVI和 T_s ,还需在研究地区范围内求出 $T_{s,max}$ 和 $T_{s,min}$.地面温度 T_s 需通过温度反演获得(后述);NDVI由以下公式计算:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}, \quad (2)$$

其中: ρ_{nir} 和 ρ_{red} 分别为近红外波段和红波段反射率. $T_{s,max}$ 和 $T_{s,min}$ 需要根据全区NDVI和温度反演结果进行估计.一般在 T_s-NDVI 坐标平面(称 T_s-NDVI 特征空间)上(齐述华等,2003;伍漫春等,2012),像素点的分布接近于梯形或三角形,如本次所用羊拉矿区一景ETM+数据的 T_s-NDVI 散点图如图1所示.其中三角形区域的上下两边(分别称为干边和湿边)对应 $T_{s,max}$ 和 $T_{s,min}$,可分别用直线拟合:

$$T_{s,max} = a_1 + b_1 \times NDVI, \quad (3)$$

$$T_{s,min} = a_2 + b_2 \times NDVI, \quad (4)$$

式中:未知系数 a_1, b_1, a_2, b_2 可用最小二乘法确定.

地面温度 T_s 通过温度反演得到,可以采用辐射传输方程法(Sobrino *et al.*, 1994).首先估计像素点上黑体辐射亮度:

$$L_t = \frac{L_\lambda - L_u - \tau(1 - \epsilon)L_d}{\epsilon\tau}, \quad (5)$$

式中: L_λ 为热红外波段(Landsat7 ETM+第6波段)像素的观测辐射亮度($Wm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)(即 $L_\lambda = Gain \times DN + Bias$,其中DN表示ETM+影像第6波段像元灰度值,Gain和Bias是第6波段的增益和偏置,都是定标参数); L_d 和 L_u 分别表示大气向下和向上辐射亮度($Wm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$), τ 为大气透射率,是与ETM+观测数据同时提供的、在遥感数据预处理中根据实时大气剖面探测数据经模拟计算的参数.对于本次所用羊拉矿区数据, $L_u = 0.17 Wm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, $L_d = 0.30 Wm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, $\tau = 0.97$. ϵ 为地表比辐射率,其值随地物不同而异,本文根据前人经验取值:当 $0.157 \leq NDVI \leq$

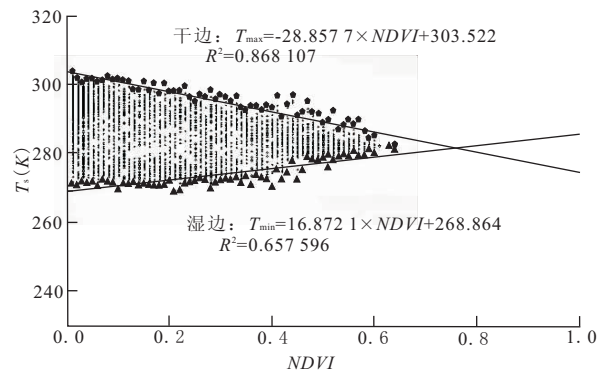


图1 羊拉矿区 ETM+影像 T_s-NDVI 特征空间散点图及拟合的干、湿边(黑三角与黑圆点为一定NDVI对应的 T_s 的最小值和最大值; R^2 为相关系数)

Fig.1 T_s-NDVI space scatter plot of an ETM+ image in Yangla copper mining area, with fitted dry and wet edges

0.727时,利用Van经验公式求算(Van de Griend and Owe,1993),即:

$$\epsilon = 1.0094 + 0.047 \ln(NDVI);$$

当 $NDVI \leq 0$ 时对应于水体,取 $\epsilon = 0.995$;当 $0 < NDVI < 0.157$ 一般认为对应于人工建筑或干燥裸土地,取 $\epsilon = 0.923$;当 $NDVI > 0.727$ 时,对应于植被完全覆盖,取 $\epsilon = 0.986$ (覃志豪等,2004;季青等,2009;郑国强等,2010).

得到 L_t 后,按照Planck定律计算出地面温度 T_s :

$$T_s = K_2 / \ln\left(\frac{K_1}{L_t} + 1\right), \quad (6)$$

式中: K_1, K_2 是与波长有关的常数,对于本次在羊拉矿区使用的ETM+数据(热红外波段的中心波长为 $11.5 \mu m$), $K_1 = 666.09 Wm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$, $K_2 = 1287.71 K$.

1.2.2 隐伏断层识别及综合解译分析 经上述过程计算出各像素TVDI,可生成TVDI灰度图像.该图像的相对低值区(负异常)表示地面温度低和/或植被指数及湿度较高.若这些负异常呈线状展布,且不与线状负地形(沟谷)重合,则是隐伏断层存在的指示标志.线状TVDI负异常与地形沟谷重合,这时往往可利用地形地貌特征,通过可见光影像解译或野外观测,来判断或确定是否有断层.断层识别是一个综合分析过程,在被覆盖、缺少目视解译标志的地段,根据线状TVDI负异常来判断是否有隐伏断层;覆盖区的TVDI线状负异常有时延伸穿过露头地段或有特征地形地貌地段,在这些地段可通过遥感目视解译或野外观测对隐伏断层加以验证和确认.对于断层的形态产状及(力学和运动学)性质也

需要在露头上进行分析.

2 应用

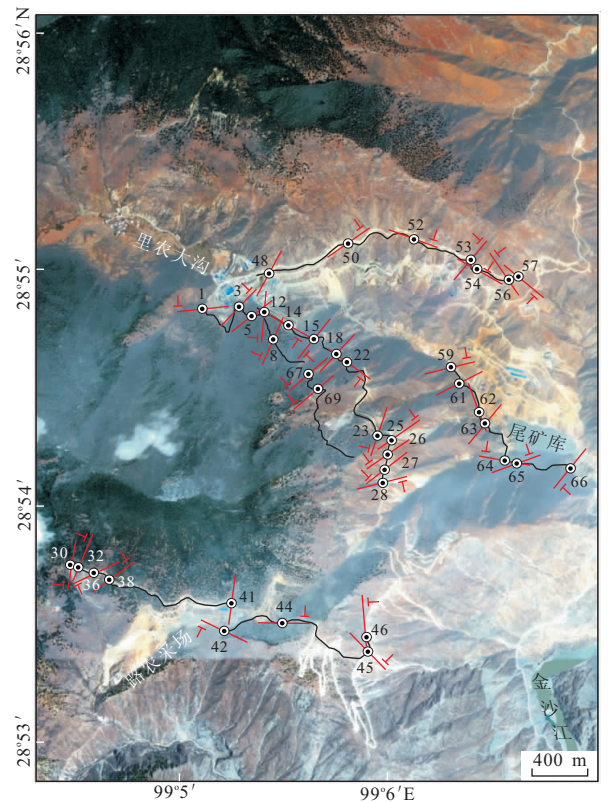
2.1 羊拉矿区地理地质简况及遥感数据

云南德钦县羊拉铜矿区位于滇西北山区,地理坐标为东经 $99^{\circ}04'00''\sim 99^{\circ}07'30''$,北纬 $28^{\circ}52'\sim 28^{\circ}56'$. 区内地形总体西高东低,海拔高度 $3\ 800\sim 4\ 500\text{ m}$,东侧金沙江峡谷 $2\ 200\text{ m}$. 中偏北部有北西向里农大沟穿过矿区,沟两侧陡坡基岩露头良好;东中部及南部有矿山开发中修建的公路和采场也揭露了基岩. 其余大部分地表有厚数厘米至数米的残积物和土壤发育并有稀疏灌木和草本植物. 西部高山区顶部地形相对平缓,覆盖层较厚,最厚可超过 10 m ,并发育森林(图 2). 区内年降水量 $600\sim 800\text{ mm}$,昼夜温差较大,冬季 12 月晴天气温为 $-10\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右. 区内出露基岩地层主要为泥盆系变质粉砂岩、石英片岩及大理岩地层,总体走向北北东,向北西西缓倾;区内有燕山期花岗岩闪长岩体沿北北东向带状分布于矿区中轴线附近. 大部分矿体在岩体接触带附近地层中顺层产出.

本次用 TVDI 方法进行隐伏断层识别使用的是由美国地质调查局网站 (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) 下载的 Landsat7 ETM+ 遥感数据一景(影像编号: p132r040_7x20001225, 轨道号: 132-40), 第 6 波段(热红外)空间分辨率为 60 m , 其他波段 30 m , 获取时间为 2000-12-25T03:42(GMT)(北京时间 11:42), 数据质量较好, 清晰无云. 利用矿区 1:10 000 地质图对该景数据进行了投影变换与裁剪. 另外还使用了 GeoEye-1 卫星遥感影像(分辨率为 0.5 m) 和 Google Earth 三维影像地图(分辨率为 2.5 m) 进行目视解译作为辅助方法.

2.2 断层识别结果及讨论

用前述方法和数据, 获得温度植被干旱指数影像及断层解译结果如图 3. 由图 3 可见, 区内有许多呈线状展布的 TVDI 低值区(负异常). 结合可见光目视解译和野外验证, 可以确认大多数线状负异常所在处存在隐伏断层, 图 3 中用红线标出了所有识别出的断层. 可见羊拉矿区断层发育, 延伸规模 2 km 以上的断层至少有 20 多条. 这些断层走向以北东向为主, 也有北西西—北西向和近南北向的, 倾角一般 50° 以上. 图 3 中, F4 是矿区现行大比例尺地质图上已有的一条断层, TVDI 负异常很好地反映了 F4. 矿区南部(图 3 的 A 处)和北部(B 处)、中部

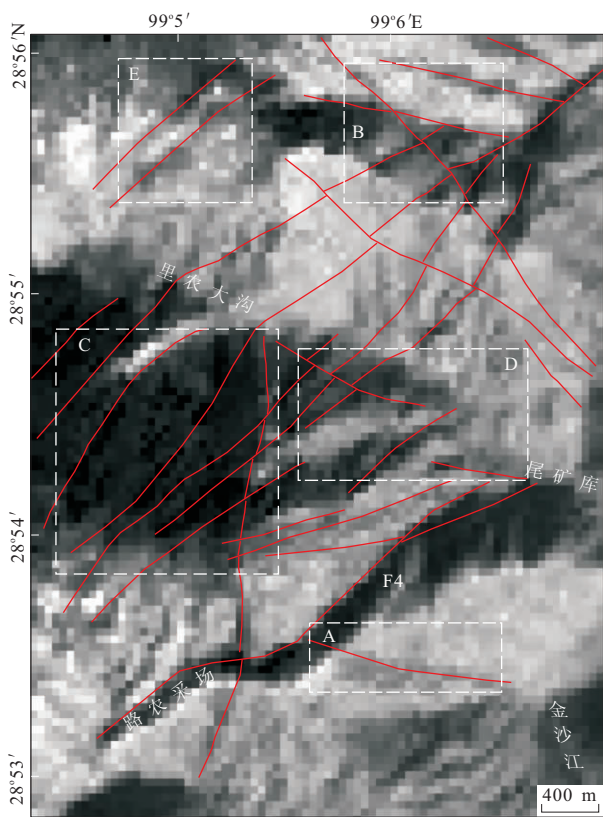


◎14 观测点及编号 — 观测路线 — 观测断层及产状

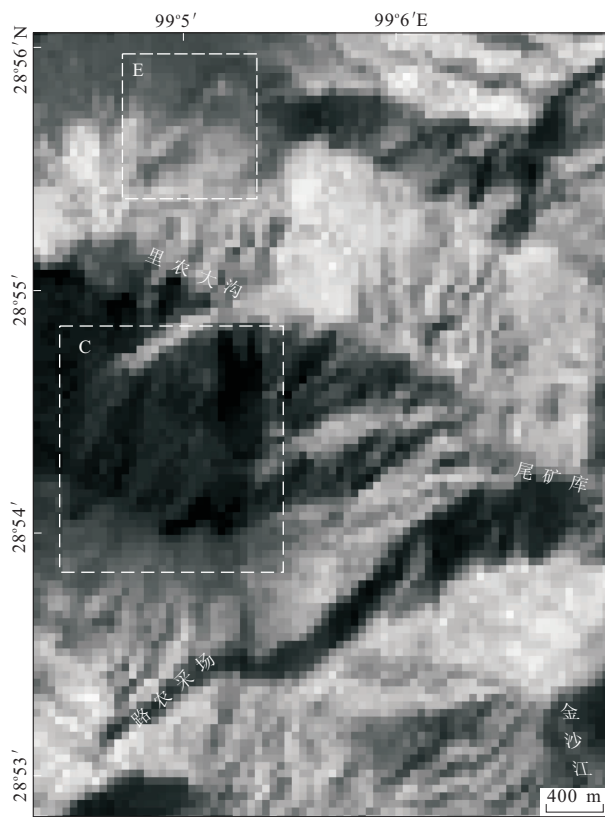
图 2 羊拉矿区 GeoEye-1 真彩色影像及地质调查路线
Fig. 2 GeoEye-1 true color image of Yangla copper mining area with field investigation routes shown

(D 处) 出现近东西向或北西西向 TVDI 线状负异常, 在公路边上露头观察证实为断层引起. 这些断层在可见光影像上缺乏清楚的解译标志, 特别是 A 处, 地形坡度较缓 ($<15^{\circ}$)、残积层较厚(可达 1 m 以上), TVDI 线状负异常与负地形没有明显的关系. 该处不仅可见光目视解译标志不明显, 而且修路揭露的破碎带变形复杂、多个断裂面产状变化较大、级次不易区分, 因此断层的主体走向不易准确判断. 在这种情况下, TVDI 线状负异常的存在为该断层的识别提供了非常重要的信息. 在矿区西部(C 处)及北西部(E 处)高山区顶部, 覆盖较厚(可达数 m)且发育森林, 也缺乏特征性可见光解译标志, 但出现一系列北东向 TVDI 线状负异常. 在 C 处的负异常带向北东延伸到里农大沟南坡露头地段, 野外观察证实这些负异常带指示了断层的存在. 以上事实说明线状 TVDI 负异常能够较好地指示隐伏断层, 在缺乏目视解译标志且无法直接观察的覆盖区可用于确定断层位置和走向.

路线地质调查中所发现的断层数目要多于图 3



-0.320 1.432 TVDI 断层



269 304 T_s(K)

图 3 羊拉矿区温度植被干旱指数影像及断层综合解译图 (虚线框表示的位置见正文中说明)

图 4 羊拉矿区地表温度 T_s 影像图

Fig. 3 Temperature-vegetation-dryness index image of Yangla copper mining area, with interpreted faults shown

Fig. 4 Surface temperature (T_s) image of Yangla copper mining area

所反映的断层数目,产状变化也更复杂(参见图 2),这是因为露头观察中记录了较多的规模较小的断层,且如前面提及,在有限露头情况下有时难以判断断层级次,见到的可能只是次级断层.局部地形变化可能造成覆盖物厚度、湿度和热惯量变化(如在陡坡之下往往覆盖物较厚),而这些地形变化未必与断层有关,因此 TVDI 的负异常并不与断层的存在完全一一对应. TVDI 的空间分辨率与热红外波段相同,可识别的负异常带宽度至少 60 m,而断层宽度一般为 10 m 以下,因此 TVDI 线状负异常指示断层位置的准确性受数据分辨率限制.在没有可见光解译标志时,笔者将断层画在负异常带的中轴线上.另外,地形较陡且背向太阳时会出现阴影,这有可能对 TVDI 识别隐伏断层造成影响,但地形较陡处往往露头较好,可以直接观察.由于以上这些原因,断层识别需要综合考虑 TVDI 空间分布、可见光解译标志与露头观测多方面信息.图 3 是一个综合结果.

4. 将图 4 与图 3 进行比较,发现 T_s 的空间分布与 TVDI 基本一致,说明地面温度是影响 TVDI 的主导因素.由图 4 可见地面温度线状负异常在有些地方不如 TVDI 负异常明显,比如在图 4 中虚线方框位置(对应于图 3 的 C、E 处)不够清楚,这些地方植被比较发育.这说明用 TVDI 识别隐伏断层,在羊拉矿区条件下比直接用 T_s 的效果要好.这是因为,从图 1 可见,在植被较发育(NDVI 值较大)时,温度 T_s 变化范围较小,较难区别正负异常;但根据公式(1),TVDI 实际上是由 NDVI 将 T_s 变换到一个统一的相对变化范围,在 NDVI 值较大一端变化范围是相对拉伸的,这必然使 TVDI 在植被较发育处比 T_s 有更好的分辨力.

经反演获得的羊拉矿区地面温度 T_s 影像如图

图 3 绘出的各条断层,有个别地段能在可见光影像上目视解译出相互切错的关系(如图 5,北东向断层的负地形被北西向的切断);还有多处可以观察到断层露头并根据断裂带特点分析其力学和运动学性质(图 6).通过这些直观信息综合分析,发现近南北向断层以

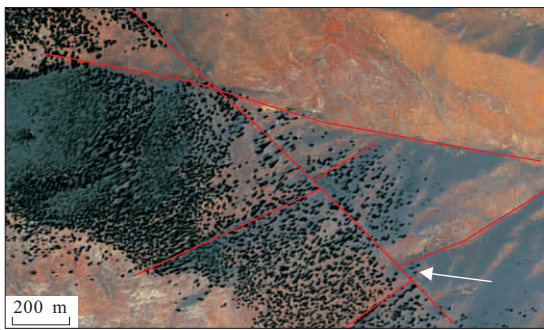


图 5 矿区北部(图 3 的 B 处)GeoEye-1 真彩色影像(白色箭头处见北东向负地形被北西向断层切错)

Fig. 5 GeoEye-1 true color image showing relations between different faults

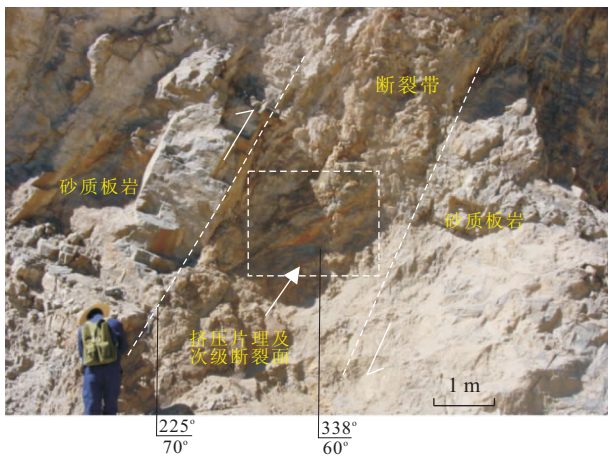


图 6 北西向断裂破碎带照片(位于图 2 的 14 号观测点处,镜头向北西)

Fig. 6 Outcrop of a NW-strike fault at site No. 14 in Fig. 2 根据断层产状与断裂带内挤压片理产状的空间关系,可判断该断层运动方向为左行平移为主并有一定逆冲分量,说明主应力方向为北东东—南西西向挤压

右行平移为主,近东西向断层以左行平移为主,北西向为左行平移逆断层,北东向以右行平移正断层为主.各断层的力学和运动性质与北东—南西向挤压或北东东—南西西向挤压应力场相符.该结论与前人区域构造研究成果是基本一致的(如 Cui *et al.* (2006) 和 Qian *et al.* (2011) 指出该区新生代构造应力场是受印度板块运动影响而呈北东—南西向挤压的).该结论的实际意义在于矿山生产中遇到断层错失矿体时,可以根据断层产状推断被错失矿体的位移方向.

3 结语

(1) 由于断裂破碎带导致地面残积物土壤覆盖

层加厚,湿度、植被密度及地表物质热惯量相对增大,白天地面温度相对较低,可形成线状展布的 TVDI 负异常.因此线状 TVDI 负异常可作为隐伏断层的标志.热红外遥感与可见光遥感及野外调查相结合是研究查明残积—土壤覆盖区断裂构造的有效手段.(2) 在面积约 26 km² 的羊拉矿区至少发育 20 多条延伸规模 1 km 以上的断层,这些断层绝大多数在过去各种比例尺的地质填图中未反映.这些断层走向以北东向为主,也有北西向、北西西向和近南北向的.综合分析表明这些断层的力学和运动学性质符合南西—北东方向的挤压应力场.这些断层的查明对于该矿区生产有重要的实际意义.(3) 由于多种原因,包括数据分辨率、研究区地形地质情况的复杂性及研究程度等,本文的研究结果仍存在不少问题.例如对于规模更小的和可能存在的产状非常平缓的断层尚未涉及,对于已识别出主要断层的几何、力学性质尚不能给出更完整准确的描述,对于 TVDI 负异常指示隐伏断层的机理还缺乏较严格定量的说明.这些问题需要今后进一步研究.

本文的研究得到云南铜业集团有限公司科研合作项目(2010026410)资助和云南迪庆矿业有限公司勘查部的大力支持配合,谨表谢忱.

References

- Bateson, L., Vellico, M., Beaubien, S. E., et al., 2008. The Application of Remote-Sensing Techniques to Monitor CO₂-Storage Sites for Surface Leakage: Method Development and Testing at Lopera (Italy) Where Naturally Produced CO₂ Is Leaking to the Atmosphere. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(3): 388—400. doi: 10.1016/j.ijggc.2007.12.005
- Carlson, T. N., Gillies, R. R., Perry, E. M., 1994. A Method to Make Use of Thermal Infrared Temperature and NDVI Measurements to Infer Surface Soil Water Content and Fractional Vegetation Cover. *Remote Sensing Reviews*, 9 (1—2): 161—173. doi: 10.1080/02757259409532220
- Cui, X. F., Xie, F. R., Zhang, H. Y., 2006. Recent Tectonic Stress Field Zoning in Sichuan-Yunnan Region and Its Dynamic Interest. *Acta Seismologica Sinica*, 19 (5): 485—496. doi:10.1007/s11589-006-0501-x
- Genzano, N., Aliano, C., Pergola, N., et al., 2007. A Robust Satellite Technique for Monitoring Seismically Active Areas: The Case of Bhuj-Gujarat Earthquake. *Tectonophysics*, 431 (1—4): 197—210. doi: 10.1016/j.tecto.2006.04.024

- Goetz, S. J., 1997. Multi-Sensor Analysis of NDVI, Surface Temperature and Biophysical Variables at a Mixed Grassland Site. *International Journal of Remote Sensing*, 18(1): 71—94. doi: 10. 1080/014311697219286
- Goward, S. N., Xue, Y. K., Czajkowski, K. P., 2002. Evaluating Land Surface Moisture Conditions from the Remotely Sensed Temperature/Vegetation Index Measurements: An Exploration with the Simplified Simple Biosphere Model. *Remote Sensing of Environment*, 79(2—3): 225—242. doi: 10. 1016/S0034—4257(01)00275—9
- Ji, Q., He, L. L., Yu, M., et al., 2009. Study on Relationship between Land Use and Urban Heat Islands Based on Landsat ETM+ Remote Sensing Data. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 25(6): 106—113 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. J., Wu, G. P., Guo, Y., et al., 2008. Extraction of Oil and Gas Haloes Based on ETM+ Data: A Case Study from Yakela, Xinjiang. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(1): 107—111 (in Chinese with English abstract).
- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., et al., 1994. Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-Air Temperature and Spectral Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 49(3): 246—263. doi: 10. 1016/0034—4257(94)90020—5
- Pulinets, S. A., Ouzounov, D., Karelin, A. V., et al., 2006. The Physical Nature of Thermal Anomalies Observed before Strong Earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(4—9): 143—153. doi: 10. 1016/j. pce. 2006. 02. 042
- Pulinets, S. A., Dunajacka, M. A., 2007. Specific Variations of Air Temperature and Relative Humidity around the Time of Michoacan Earthquake M8. 1 Sept. 19, 1985 as a Possible Indicator of Interaction between Tectonic Plates. *Tectonophysics*, 431(1—4): 221—230. doi: 10. 1016/j. tecto. 2006. 05. 044
- Qi, S. H., Wang, C. Y., Niu, Z., 2003. Evaluating Soil Moisture Status in China Using the Temperature/Vegetation Dryness Index(TVDI). *Journal of Remote Sensing*, 7(5): 420—427 (in Chinese with English abstract).
- Qian, X. D., Qin, J. Z., Liu, L. F., 2011. Study on the Recent Tectonic Stress Field in the Yunnan Region. *Earthquake Research in China*, 25(4): 410—425.
- Qiang, Z. J., Kong, L. C., Guo, M. H., et al., 1997. An Experimental Study of Temperature Increasing Mechanism of Satellite Thermoinfrared. *Acta Seismologica Sinica*, 19(2): 197—201 (in Chinese).
- Qin, Z. H., Li, W. J., Xu, B., 2004. The Estimation of Land Surface Emissivity for Landsat TM6. *Remote Sensing for Land & Resources*, 3: 29—42 (in Chinese with English abstract).
- Qu, C. Y., Ma, J., Shan, X. J., 2007. An Attempt to Observe Gas Releasing Phenomena of the Earth by Using Satellite Thermal Infrared Technique. *Seismology and Geology*, 26(3): 539—547 (in Chinese with English abstract).
- Sandholt, I., Rasmussen, K., Andersen, J., 2002. A Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2—3): 213—224. doi: 10. 1016/S0034—4257(01)00274—7
- Sobrino, J. A., Li, Z. L., Stoll, M. P., et al., 1994. Improvements in the Split-Window Technique for Landsurface Temperature Determination. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 32: 243—253.
- Surkov, V. V., Pokhotelov, O. A., Parrot, M., et al., 2006. On the Origin of Stable IR Anomalies Detected by Satellites above Seismo-Active Regions. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(4—9): 164—171. doi: 10. 1016/j. pce. 2006. 02. 020
- Tronin, A. A., Masashi, H., Molchanov, O. A., 2002. Thermal IR Satellite Data Application for Earthquake Research in Japan and China. *Journal of Geodynamics*, 33(4—5): 519—534. doi: 10. 1016/S0264—3707(02)00013—3
- Van de Griend, A. A., Owe, M., 1993. On the Relationship between Thermal Emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for Natural Surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6): 1119—1131. doi: 10. 1080/01431169308904400
- Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M. A., Van Ruitenbeek, F. J. A., et al., 2012. Multi- and Hyperspectral Geologic Remote Sensing: A Review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1): 112—128. doi: 10. 1016/j. jag. 2011. 08. 002
- Wu, M. C., Ding, J. L., Wang, G. F., 2012. Regional Soil Moisture Inversion Based on Surface Temperature and Vegetation Index Characteristic Spaces. *Journal of Desert Research*, 32(1): 148—154 (in Chinese with English abstract).
- Wu, W. Y., Zou, L. J., Shen, X. H., et al., 2012. Thermal Infrared Remote-Sensing Detection of Thermal Information Associated with Faults: A Case Study in Western Sichuan Basin, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 43(1): 110—117. doi: 10. 1016/j. jseaes. 2011. 08. 015
- Zheng, G. Q., Lu, M., Zhang, T., et al., 2010. The Impact of

Difference of Land Surface Emissivity on the Land Surface Temperature Retrieval of Jinan City. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 25 (5): 519—523 (in Chinese with English abstract).

Zheng, L. Z., Qiang, Z. J., Lin, C. G., 1996. Practice and Research on Short Term Impending Earthquake Prediction by Interpreting Satellite Thermal Infrared Anomaly Image. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(6): 665—668 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

季青, 贺伶俐, 余明, 等, 2009. 基于 LandsatETM+数据的福州市土地利用/覆被与城市热岛的关系研究. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 25(6): 106—113.

刘福江, 吴国平, 郭艳, 等, 2008. 基于 ETM+遥感影像油气晕反演: 以新疆雅克拉地区为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(1): 107—111.

齐述华, 王长耀, 牛铮, 2003. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究. *遥感学报*, 7(5): 420—427.

强祖基, 孔令昌, 郭满红, 等, 1997. 卫星热红外增温机制的实验研究. *地震学报*, 19(2): 197—201.

覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等, 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: 29—42.

屈春燕, 马瑾, 单新建, 2004. 利用卫星热红外观测地球排气现象的一次尝试. *地震地质*, 26(3): 539—547.

伍漫春, 丁建丽, 王高峰, 2012. 基于地表温度—植被指数特征空间的区域土壤水分反演. *中国沙漠*, 32(1): 148—154.

郑国强, 鲁敏, 张涛, 等, 2010. 地表比辐射率求算对济南市地表温度反演结果的影响. *山东建筑大学学报*, 25(5): 519—523.

郑兰哲, 强祖基, 赁常恭, 1996. 卫星热红外影像在地震短临预报中的应用. *地球科学——中国地质大学学报*, 21(6): 665—668.