

# 热红外多光谱遥感技术金矿调查应用研究

童庆禧 郑兰芬 金 浩 王晋年

田庆玖 侯宏飞 叶金山

(中国科学院遥感应用研究所, 北京, 100101)

**摘要:** 根据航空遥感实验获取的 TIMS 图象, 利用计算机图象处理主成分分析和去相关等方法, 并依据 TIMS 成象机制, 提取出花岗岩、斜长片麻岩以及粘土化、硅化等蚀变岩岩性和丰富的断层信息, 结合金矿化带光谱特征, 圈出金矿化异常区, 同时 TIMS 图象也显示了该地区北北东向金矿成矿主断层控制金矿化的规律。现有分析成果表明热红外多光谱扫描仪所获得的图象数据在岩性和金矿化带的识别上, 以及增强断层信息方面有较好效果。

**关键词:** 红外多光谱, 航空遥感, 主成份分析, 去相关处理。

## 引言

1980年美国 Hunt G. R.和 Salisbury<sup>[1~4]</sup>研究了岩石和矿物辐射特征认为: 岩石在热红外波段具有显著的 Si-O 基团伸缩振动引起的特征光谱带(见图 1), 这一特征谱带是利用热红外多光谱扫描成象遥感技术识别地表岩石和矿物成分的基本依据之一。Kahle<sup>[5]</sup>同年采用热红外遥感技术进行了岩石制图研究, 并在岩性识别方面取得了较大的进展。其后, 美国 NASA 国家空间技术实验室(现称 Stennis Space Center)开发研制出热红外多光谱扫描仪(TIMS)<sup>[6]</sup>, 由 Kahle<sup>[7]</sup>进行矿物成分的填图工作, 通过遥感调查表明, 利用 TIMS 可区分热液蚀变硅质壳与沙漠漆壳, 以及识别出玄武岩、硅质岩、碳酸岩和未蚀变的凝灰岩。Gillespie<sup>[8]</sup>利用 TIMS 开展洪积扇研究中, 识别出洪积扇的成份和年代。Michael Abrams<sup>[9]</sup>在风化玄武岩研究中, 发现 TIMS 对二氧化硅以及景观的细微构造信息反应灵敏, 是干旱和半干旱地区的玄武岩岩流制图的有效手段。澳大利亚 David A. R. 等人<sup>[10]</sup>, 于 1986 年也成功地利用航空热红外成象遥感技术, 进行了大比例尺地质填图, 显示了热红外波段遥感技术在地质应用中的潜力。

随着我国遥感技术的发展, 中国科学院上海技术物理研究所 1990 年研制出热红外多光谱扫描仪(TIMS), 它在 8.0~12.5 $\mu\text{m}$  范围内精细地划分为七个波段, 我们利用 TIMS 遥感技术, 根据岩石在热红外的光谱特征, 在唐山北部山区金厂峪金矿区获取了热红外多

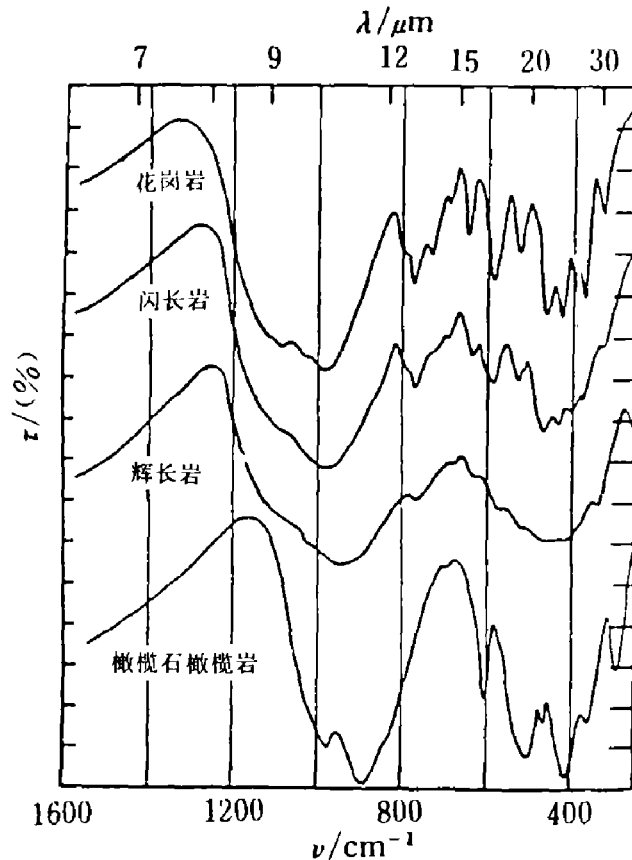


图1 岩石热红外透射光谱

Fig. 1 Transmission spectra of rocks in thermal infrared region

光谱 (TIMS) 图象, 经计算机图象处理和金矿光谱信息提取, TIMS 图象可直接用于岩性划分和构造填图, 以及圈定金矿化光谱异常带. 结果表明, TIMS 遥感技术在地质应用方面有较大的潜力.

## 1 TIMS 数据获取

1990年11月, 我们用中国科学院上海技术物理所研制的热红外多光谱扫描仪, 在8~12.5 $\mu\text{m}$ 热红外波段细分了七个0.4~0.8 $\mu\text{m}$ 宽的光谱谱段, 飞机上的辐射定标由恒定辐射的参考源来实现. 我们以唐山北部山区金厂峪大型金矿为中心获取了二条航带的热红外多光谱 (TIMS) 图象数据. 数据获取的飞行参数见表1.

表1 获取的热红外多光谱图象数据飞行参数

Table 1 Flight parameters of the acquired TIMS

相对航高	4000 m	扫描速率	301/s
仪器	热红外多光谱扫描仪 (TIMS)	地面分辨率	12 m
扫描视场	90°	数据记录	HDDT 模拟磁带
瞬时视场	3 mrad		

## 2 TIMS 图象机理

TIMS 图象记录的是地面目标在  $8.0\sim 12.5\mu\text{m}$  波段的热辐射能, 图象的灰度值实际反映了地物目标的热辐射强弱, 根据普朗克物体辐射关系式<sup>[1]</sup>有:

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}, \quad (1)$$

式 (1) 中  $L_{\lambda}$  为给定波长的物体辐射能量,  $\varepsilon_{\lambda}$  为给定波长发射率,  $B_{\lambda}$  为给定波长的黑体辐射能量.

TIMS 地面分辨率为  $12\text{m}$ , 根据平面混合辐射模型, 组合物的辐射强度  $L_{\lambda}(C)$  就是物体  $A$ ,  $L_{\lambda}(A)$  和  $B$ ,  $L_{\lambda}(B)$ ……的加权平均值, 即:

$$L_{\lambda}(C) = fL_{\lambda}(A) + (1-f)L_{\lambda}(B), \quad (2)$$

式 (2) 中  $f$  为  $A$  物体辐射源所覆盖的面积与组合物总面积之比, 如果这些源是粗糙表面朗伯体时,

$$\varepsilon(C) = f\varepsilon(A) + (1-f)\varepsilon(B), \quad (3)$$

式 (3) 中  $\varepsilon(C)$  为组合物的双向发射率,  $\varepsilon(A)$  为  $A$  物体的发射率,  $\varepsilon(B)$  为  $B$  物体的发射率. 根据式 (3), TIMS 图象上所反映的地物发射率是地面一定地域内各种地物加权结果, 当岩石和矿物分布占有一定的面积时, 可粗略认为 TIMS 象元反映了单矿物或岩石的发射率.

根据岩石和矿物实验室辐射光谱数据, 在热红外 ( $8\sim 12.5\mu\text{m}$ ) 波段各种岩石发射率是不同的. 斯坦福大学 Lyon R.J.P.<sup>[12]</sup>通过对岩石发射率与其化学成份关系的研究, 建立了岩石红外辐射的峰值波长与二氧化硅含量关系曲线 (见图 2), 这种关系反应了在  $8.0\sim 12.5\mu\text{m}$  波段岩石发射特征与矿物成份以及化学成份的含量, 尤其是与二氧化硅的含量有很大的关系. 从图中可以看出, 不同岩石的辐射低值峰随波长有很大变化, 在  $8.0\sim 12.5\mu\text{m}$  光谱段, 变化的幅度达  $2.5\mu\text{m}$ . 随二氧化硅含量的增加 (从  $36\%$  增加到  $59\%$ ), 岩石红外辐射低峰逐渐向波长较短  $12.5\mu\text{m}$  到  $8.0\mu\text{m}$  的方向偏移, 这种辐射谷现象是一种剩余射线效应<sup>[13]</sup>, 即在这个波长处, 由于岩石的反射率增加, 造成发射率的降低, 结果抑止了岩石的辐射. 由于二氧化硅是硅酸岩岩石和矿物的基本组分, 同时在金矿勘探中硅化信息也是一种重要标志, 它与红外辐射的这种密切关系, 为 TIMS 识别岩性提供了理论依据.

地物辐射温度是 TIMS 图象另一重要贡献因素,

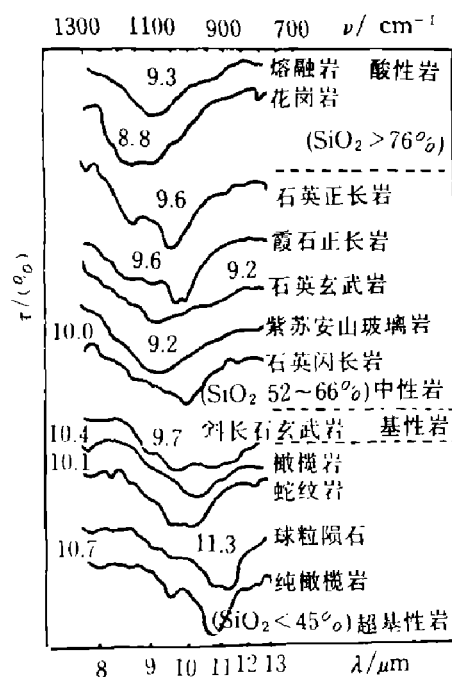


图 2 岩浆岩类岩石的热红外光谱  
Fig. 2 Thermal infrared spectra of igneous rocks (Lyon R.J.P. 1966)

根据斯忒藩-玻尔兹曼定律和混合辐射模型<sup>[11]</sup>有:

$$\varphi L_{\lambda}(C) = f\varphi L_{\lambda}(A) + (1-f)\varphi L_{\lambda}(B). \quad (4)$$

由于  $\varepsilon$  对一定辐射源和混合辐射源是常量, 因此有

$$T_c^4 = K_1 T_A^4 + K_2 T_B^4, \quad (5)$$

即混合辐射源与单体辐射源温度为 4 次幂关系, 当单体辐射源占有一定的面积时, TIMS 图象上反映出来的辐射强度主要为单体温度的放大信息. 从上述关系中可知, 当地面岩石和矿物温度有微小的差异时, 在 TIMS 图象上将有显著的区别. 产生这种现象的原因是地表岩石和矿物均处在同样的太阳辐射环境中, 当物质成份和结构出现差异时, 能量转换效率不同, 辐射温度的细微变化经 4 次幂放大后, 由 TIMS 获取的以温度为主导的图象上将得到显著的反映.

### 3 TIMS 图象处理

针对航空扫描图象特点, 采用了正切畸变纠正和边缘辐射纠正以及大气辐射校正<sup>[14,15]</sup>等图象预处理方法, 在图象预处理后, 根据 TIMS 内含信息的特点, 利用发射率转换和主成份分析、去相关处理等方法进行地质信息的提取, 具体方法如下:

#### 3.1 TIMS 图象的发射率转换

TIMS 图象灰度值是地表岩石的辐射通量 ( $B_{\lambda}$ ) 的函数:

$$B'_{\lambda} = a + b DN(\lambda), \quad (6)$$

如果 TIMS 经过黑体温度辐射定标, 则  $a, b$  值即可确定为

$$a = (B_2 D_1 - B_1 D_2) / (D_1 - D_2), \quad (7)$$

$$b = (B_1 - B_2) / (D_1 - D_2); \quad (8)$$

式 (7), (8) 中  $B_1, D_1$  分别为高温参考黑体辐射及灰度值,  $B_2, D_2$  分别为低温参考黑体辐射及灰度值.

根据式 (6), (7), (8) 可求得地表岩石辐射强度, 利用

$$\varepsilon_{\lambda} = B'_{\lambda} / B_{\lambda}, \quad (9)$$

即可求得地面岩石的发射率.

#### 3.2 TIMS 温度图象的确定

地表的热异常往往与矿产资源有很好的吻合性, 为此我们用遥感技术分析和评价了金厂峪地区地表热异常与金矿化带的关系.

由能量平衡定律, 地表辐射温度可根据下式求得

$$T_s = T_{\text{mean}} + SV(1-a) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n \cos(n\Omega t - \psi_n)}{[nD_2 + B_2 + (2BD_n)^{1/2}]^{1/2}}, \quad (10)$$

式 (10) 中

$$\psi_n = \cos^{-1}[1 + B(2/nD)^{1/2}], \quad (11)$$

$$C_1 = \frac{1}{\pi} [\sin\delta \sin\psi(1 - \tan^2\delta \tan^2\psi) + \cos\delta \cos^{-1}(-\tan\delta \cos\psi)], \quad (12)$$

$$C_n = \frac{1}{\pi(n^2 - 1)} (n \sin n x \cos x - \cos n x \sin x), \quad (13)$$

$$x = \cos^{-1}(-\tan\delta \tan\psi), \quad (14)$$

$D$  为有效热抗或日热容,  $\Omega$  为地球旋转频率,  $T_{\text{mean}}$  为地下常温层温度,  $C$  为热容,  $V$  为垂直大气传输率,  $S$  为太阳常数,  $t$  为时间,  $B$  为黑体辐射强度,  $\psi$  为地球的高度角,  $\delta$  为太阳倾角。

根据式 (10), 利用 TIMS 数据求解物体辐射温度较困难. Kahle<sup>[5,7]</sup>在对 TIMS 图象研究后, 确定 TIMS 的 DN 值的两个主要贡献因素即光谱发射率和辐射温度中辐射温度为主导因素. 根据主成分分析理论<sup>[16~17]</sup>和 TIMS 图象数据的物理意义, TIMS 的温度图象获取, 可通过主成份分析来实现, 因为第一主成份代表热红外光谱的主要辐射值, 反应了地面地物相对辐射温度特征。

### 3.3 TIMS 图象信息增强

表 2 TIMS 图象相关系数

Table 2 Correlative coefficient of TIMS image

TIMS	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0.93	0.99	0.95	0.97	0.91	0.83
2		1	0.92	0.99	0.86	0.94	0.71
3			1	0.93	0.98	0.90	0.84
4				1	0.89	0.94	0.74
5					1	0.86	0.89
6						1	0.79
7							1

由于 TIMS 在 8.0~12.5 $\mu\text{m}$  细分 7 个波段, 波段比较窄, 图象之间相关系数很高, 均达到 0.95 以上 (见表 2), 其彩色合成图象色调单一, 信息量不丰富, 隐含于图象中细微的光谱信息差异难以检测. 根据去相关处理方法对提高图象可识别的信息量, 以及增强地物细微发射率差异, 提高岩石、矿物的可识别性等方面很有效<sup>[5,7,10,11,18]</sup>, 因此本次 TIMS 地质评价工作采用了去相关处理方法, 这种去相关处理是通过一个转换矩阵实现的, 即

$$[D_{ij}] = [R_{ij}][X_i], \quad (15)$$

式 (15) 中  $D_{ij}$  为去相关后光谱值,  $X_i$  为原始灰度值 (发射率转换后图象),  $R_{ij}$  为去相关转换矩阵。

本期彩色插页图 j 为去相关处理后的 TIMS 的 1, 3, 5 (BGR) 波段合成图象. 其合成图象色调较原始图象丰富, 并且地质信息得到突出。

## 4 地质应用分析

金厂峪地区出露的岩石以古老的斜长角闪片麻岩为主, 矿区北西部有燕山期花岗岩出

露, 根据这些岩石  $8\sim 12.5\mu\text{m}$  的光谱, 即  $8.00\mu\text{m}$  有一辐射峰,  $10\sim 11\mu\text{m}$  有辐射谷, 选择去相关处理后的 TIMS1, 3, 5 波段合成. 由于花岗岩与片麻岩的辐射特征差异, 即两种岩石在相同日照条件下, 具有不同的辐射温度, 结果在 TIMS 合成图象上, 被明显区别 (见本期彩色插页图 j), 其中花岗岩为粉红色调 (在图 j 中标注为 E), 而斜长角闪片麻岩为黄灰色调. 由于金矿化主要以绿泥石化、硅化等蚀变为主, 辐射特征近花岗岩, 在图象上呈浅紫色 (在图 j 中标注为 A), 并沿主要控矿断层分布, 显著区别于围岩斜长片麻岩. 由于开采场和废矿石堆表面粗糙度高, 且以硅化、绿泥石化等蚀变岩为主, 在 TIMS 图象上反映为高辐射温度区, 在图 j 中标注为 B, C.

在 TIMS 图象上另一比较突出的特征是, 线性构造信息比较丰富 (图 j 中标注为 D), 除地形立体效果之外, 重要的影响因素是沿断层不仅切穿了地下水的隔水层, 并且也为地下水上下侵下渗提供通道, 这样沿断层造成了一条富水线. 由于水的热辐射能转换率较低, 再加上断层带上岩石结构破碎, 风化较强, 地表粗糙度增大, 漫反射增强, 也加剧了这种能量转换率降低的趋势. 由于这种趋势与背景差异显著, 在 TIMS 图象上便显著的突出出来. TIMS 图象的以上特点, 使得 TIMS 在线性构造和岩性识别上有其独特的效果.

从合成图象的线性构造解译结果可知, 金厂峪矿区位于一个构造特别发育的地段, 在 TIMS 合成图象上后期北西向构造对北北东向构造切穿反映明显. 通过对解译构造分析, 发现金厂峪金矿化多发育在金厂峪环形构造与北北东向断层交接部位 (图 j 中标注为 F). 根据这一特征, 在金厂峪金矿南部也存在一个多组线性组成的小环形构造, 并在北北东向断层与环形构造相交接的部位, 出现了同金厂峪矿区一样的色调异常斑块, 可作为地面地质金矿待验证靶区. 在金厂峪金矿北部有一个多组线性构造交接部位 (图 j 中标注为 G), 根据遥感地质分析, 对金矿化非常有利. 后经地面验证, 这两处金矿化都较发育, 有构成金矿体的前景.

## 5 结论和展望

本遥感调查研究结果表明:

(1) 中国科学院上海技术物理研究所研制和发展的热红外多光谱扫描仪, 所获图象清晰, 质量较高.  $8\sim 12.5\mu\text{m}$  的热红外细分光谱技术对区分岩性, 提取硅化蚀变以及突出线性构造信息方面是有效的. 表明航空热红外多光谱图象 (TIMS) 在地质找金矿的应用中有很大的潜力.

(2) TIMS 图象数据分析前进行的发射率图象变换是必要的, 它使信息分析有了理论依据.

(3) TIMS 图象数据的处理和分析与光谱信息库相结合, 可建立岩石在热红外光谱区的识别模型.

(4) 由于地质成矿环境是复杂的, 多种遥感信息的综合应用分析, 即航天、航空以及地面地质调查等信息的综合分析, 可以提高遥感找矿的准确度.

热红外多光谱技术是一种能有效区分岩性, 圈定硅化蚀变带的遥感新技术, 它在遥感地质找矿中将有较好的应用前景.

## 参 考 文 献

- 1 Hunt G R, Salisbury J W. *AFCRL-TR-74-0625*, 1974
- 2 Hunt G R, Salisbury J W. *AFCRL-TR-76-00003*, 1976
- 3 Salisbury J W, Hunt G R. *Science*, 1980, (161): 365-366
- 4 Salisbury J W, Walter L S et al. *Geology Surrey Open-File Report (U.S.)*, 1987, (263): 1-76
- 5 Kahle A B, Rowan L C. *Geology*, 1980, **8**: 234-239
- 6 Palluoi F D, Meeks G R. *JPL Publish*, 1985, **85**(32): 6
- 7 Kahle A B, Geotz A F H. *Science*, 1983, (222): 24-27
- 8 Gillespie A R et al. *Geophysical Review*, 1984, (11): 1153-1156
- 9 Michael Abrams, Elsa Abbotta, Anne Kahle. *Journal of Geophysical Research*, 1990, **96**(B1): 475-484
- 10 David A Rothery. *Mapping from Modern Imagery Proceedings of a Symposium Held by Commission IV of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing & the RS Society in Pollock Halls, Edimburgh, Scotland; Sept. 8-12; 1986; 359-368*
- 11 Ghassem Asrar. *Theory and Application of Optical Remote Sensing*. New York: John Wiley & Sons, 1989. 578-603
- 12 Lyon R J P. *Proceedings of the 5th Symp. on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, 1966, p.215-230
- 13 白长城, 张海兴, 方湖宝. *红外物理*, 北京: 电子工业出版社, 1989, 100-115
- 14 Vincent P K. *Proceedings of the IEEE*, 1975, 137-147
- 15 Roberts R E. *Applied Optics*, 1976, **15**(9): 2085-2090
- 16 Barry S Siegal, Alan R Gillespie. *Remote Sensing in Geology*. New York: John Wiley & Sons, 1980, 195-202
- 17 Alan R Gillespie et al. *Remote Sensing of Environment*, 1986, **20**(3): 209-235
- 18 David A Rothery et al. *International J. Remote Sensing*, 1990, **11**(1): 133-137

## THE STUDY FOR GOLD MINERALIZATION BY THERMAL INFRARED MULTISPECTRAL SCANNER (TIMS)

Tong Qingxi, Zheng Lanfen, Jin Hao, Wang Jinnian,  
Tian Qingjiu, Hou Hongfei, Ye Jinshan

*(Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)*

**Abstract:** TIMS data were acquired on November 1990 in Jinchangyu region. By means of computer image processing such as principal components transformation and decorrelative transformation, etc., some important geological information such as gold mineralized zone, granitic, plagioclase gneiss, clay grouting, silicification and fault system is taken out, and two gold mineralized zones in the research area found. The results show that the gold mineralization in this region is controlled by the NNE fault system. It is proved that the Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) data are very efficient in discrimination of rocks, gold mineralized zones and enhancement of fault information. TIMS remote sensing technique has great potential in geological applications.

**Key words:** infrared multispectral, aircraft remote sensing, principal components analysis, decorrelative transformation.