

地面波谱及视反射率在矿产资源预测中的应用*

——以洞嘎矿区为例

The application of ground spectrum and its apparent reflectivity to the prognosis of mineral resources: a case study of the Dongga ore district

王海平¹, 杨竹森¹, 曲晓明¹, 张彤²

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国石油天然气总公司遥感中心, 北京 100083)

WANG HaiPing¹, YANG ZhuSeng¹, QU XiaoMing¹ and ZHANG Tong²

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Remote Sensing Center of Chinese Petroleum-Gas Industry Corporation, Beijing 100083, China)

洞嘎铜矿位于冈底斯斑岩铜矿带中段。目前在该斑岩铜矿成矿带内已发现铜(金)矿(点)十多处, 其中具大型矿床潜力的 4 处, 中小型矿床 5 处及一系列矿点和矿化点。该成矿带内铜多金属的矿化类型多, 其成矿特点和地面波谱特征在雅鲁藏布江西段乃至整个西藏地区皆具诸多代表性。大量基础地质和矿产地质研究表明, 尽管该成矿带内铜多金属矿产资源丰富、极具找矿前景, 然而成矿带内的地面波谱、地空反射率相关及遥感矿化信息识别研究仍较薄弱。

1 矿床地面波谱数据采集及其波谱特征

1.1 洞嘎铜矿区地质概况

洞嘎铜金矿位于冈底斯岩浆弧南侧的布托—萨沃拉—南木切复式向斜南翼。该复式向斜北、南两翼分别出露中下侏罗统田巴群和未分白垩系, 矿床地处南翼的白垩系中。

矿区主要为白垩系(未分)和第四系出露, 区内白垩系可划分为上、下两个岩性单元。上部岩性单元仅部分出露在矿区西北和东北部, 岩性主要为一套火山集块岩和火山角砾岩。下部岩性单元分布在矿区附近, 可细分为 3 个岩性段: 上段为凝灰岩、凝灰质泥岩、粉砂岩、砂岩; 中段为凝灰质砂岩、砂砾岩夹少量火山碎屑岩和火山岩; 下段为火山角砾岩、凝灰岩、安山岩。第四系主要为冲洪积和残坡积物分布在河道、冲沟洼地。

矿区岩浆岩分布在西部和南部, 主要出露燕山晚期花岗闪长斑岩, 属谢通门中酸性杂岩的次级单元。矿区内尚发育有大量规模不等的浅成-超浅成岩脉, 主要为斜闪煌斑岩、安山玢岩、辉绿岩脉和石英脉等。

矿区断裂构造发育, 以东西向和北西向断裂为主, 其次为北北西向, 少量为北北东向和近南北向。断裂性质变化大且具多期活动特征。近东西向断裂早期多为压、压扭性, 晚期曾出现张、张扭性活动; 北西向则为压扭、张扭性; 北北西向和北北东向断裂多表现为张扭性特点; 近南北向断裂早期为张扭性、晚期又显示出局部压扭性特点。

1.2 波谱数据采集

波谱数据采集包括典型矿床的地面波谱数据及其 ETM 图像数据的采集。洞嘎矿区的地面波谱数据系

*本文得到国家“十五”科技攻关项目(2003BA612A)的资助
第一作者简介 王海平, 男, 研究员, 从事遥感地质研究。

笔者用 RS-II 波谱仪在野外实测, 野外波谱实测采用比较测量法, 即:

$$\rho_{\text{物}} = \rho_{\text{标}} \cdot \frac{A_{\text{物}}}{A_{\text{标}}}$$

上式中, $\rho_{\text{物}}$ 、 $\rho_{\text{标}}$ 分别为地物、仪器标准板的反射率, $A_{\text{物}}$ 、 $A_{\text{标}}$ 分别为地物、标准板的波谱计数。为保证野外测值的精确性, 测点用 GPS 定位, 用高精度的 FieldSpec Pro FR 波谱仪对测值作稳定性检查, 测量精度为 1.5%。

1.3 矿床地面波谱特征

洞嘎铜矿区地面波谱反射特征示于图 1。图中, 强蚀变(硅化)角砾岩的反射率最高, 反射率曲线上叠置的特征谱带多、谱幅变化大。铜矿体的波谱反射率最低, 其反射率曲线形态与角砾岩几乎完全一致, 曲线上出现的特征谱带位置、谱幅亦完全相同。弱蚀变角砾岩和蚀变角砾岩的地面波谱反射率居中, 其反射曲线上出现特征谱带数量多、谱幅变化大。

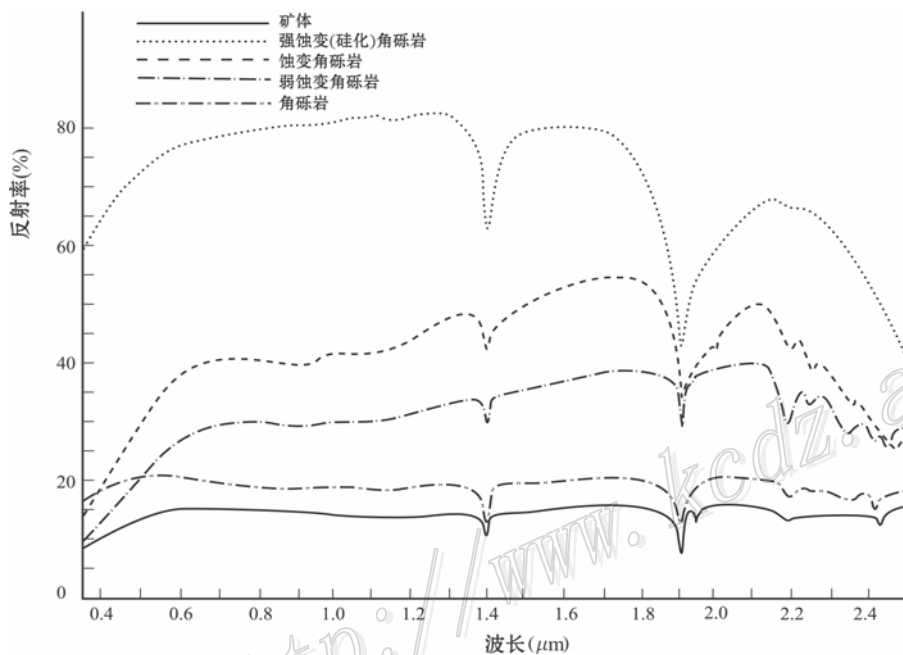


图 1 洞嘎铜矿区地物波谱反射曲线

现明显的二价铜吸收。铜矿体波谱反射率在矿区最小, 其特征表明, 矿体中金属硫化物含量高, 金属硫化物的不透明波谱行为不仅导致一些特征谱带的谱幅变小, 同时还使某些特征谱(如二价铜吸收谱)的丢失, 并使得近红外光区特征谱带“弱化”和矿体反射率总体下降。

洞嘎铜矿区的上述波谱反射特征表明: ①成矿蚀变越强、蚀变岩石波谱反射率越高; ②矿区蚀变角砾岩普遍含铜较高, 其它晚白垩统地层不含铜; ③矿区内花岗斑岩和花岗闪长斑岩普遍有铜谱带吸收现象; ④ETM4、5、7 波段是识别含矿蚀变角砾岩, 尤其是强蚀变角砾岩的最佳波段; ⑤低反射率(角砾岩及早白垩统)背景上出现蚀变角砾岩反射率陡降, 是雅鲁藏布江西段判别该类型铜矿的重要波谱标志。

2 视反射率图像

对于洞嘎铜矿区这样高海拔地区, 由于地形等因素影响, 遥感图像的亮度值不可能代表地表物体的反射和发射波谱特征 (Waston, 1972), 不宜直接进行地空波谱反演。因此, 应该在获得 ETM 图像视反射率基础上, 通过地空反射率相关分析与矿化信息识别研究, 方能抑制典型识别波谱产生的大概率不确定性影响, 并有效地进行矿化信息识别。

矿区强蚀变角砾岩的波谱反射率变化大, 反射曲线上呈现的特征谱多。VNIR 区反射率 K 值极大点位于 $0.60 \mu\text{m}$ 处, NIR 区的反射率略有下降, 在 $1.40 \mu\text{m}$ 、 $1.90 \mu\text{m}$ 和 $2.20 \mu\text{m}$ 处形成 3 个特征谱带, 前两谱带为强谱、后者谱带较弱。蚀变角砾岩的波谱反射率仅低于强蚀变角砾岩, 波谱反射率变化大、其上叠置的特征谱带多, 在 $0.90 \mu\text{m}$ 处出现二价铜吸收带。弱蚀变角砾岩波谱反射率低于强蚀变和蚀变角砾岩, 反射曲线相对平滑, 在 $0.90 \mu\text{m}$ 处未出

据遥感辐射理论和地球的辐射平衡理论，ETM 图像视反射率可表为：

$$\rho_s(TMi) = \frac{L_{TMi}}{\sum \omega_i L_{TMi} + L_{TM6}} \tag{1}$$

上式中， $\rho_s(TMi)$ 为 ETM 波段的视反射率， ω_i 、 L 分别为权系数和辐射亮度值。由（1）式不难看出，视反射率图像的关键在于权系数 ω_i 计算和辐射亮度值 L 的转换。

各 ETM 波段权系数 ω_i 用下式计算：

$$\omega_i = \frac{E(\lambda_i)\Delta\lambda_i}{\sum E(\lambda_i)\Delta\lambda_i}$$

计算时，先计算传感器所有波段内的太阳平均光谱辐照度（表 1），然后再计算该波段的权系数 ω_i 。

表 1 ETM 各波段的太阳平均光谱辐照度和权系数

波 段	波长/ μm	平均辐照度/($\text{w}\cdot\text{m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)	权系数/%
ETM1	0.45~0.52	0.1979	23.9
ETM2	0.52~0.60	0.1715	23.6
ETM3	0.63~0.69	0.1486	15.3
ETM4	0.76~0.9	0.0990	23.7
ETM5	1.55~1.75	0.0244	8.4
ETM6	10.4~12.5		
ETM7	2.08~2.35	0.0103	4.8

辐射亮度值 L 用下式计算：

$$L = \frac{DN}{K_0} - K_0$$

将图像亮度 DN 转换为辐射亮度值 L 后，再代入式（1），便可形成视反射率图像。

3 矿化信息识别及其找矿应用效果

区内地空波谱相关性研究表明，矿床的地面波谱反射率与其对应的视反射率图像数据呈线性相关。首先以矿床地面波谱平均反射率为因变量，对应的 ETM 图像视反射率数据为自变量，对区内矿床地面波谱反射率与视反射率图像作回归相关分析，并分别计算回归系数（ a 、 b ）和相关系数（ γ ）。经回归分析及西支沟地区已知矿床的回归系数和相关系数（表 2）计算，谢通门县荣玛地区共建立了 9 个地空反射率相关模型。

表 2 谢通门县荣玛地区矿床回归系数与相关系数

矿 床	ETM4			ETM5			ETM7		
	a	b	γ	a	b	γ	a	b	γ
洞嘎	-2.835	0.941	0.879	-3.602	0.932	0.910	-5.214	0.889	0.886
雄村	-4.107	0.873	0.906	-3.101	0.895	0.903	-5.144	0.802	0.879
南岔沟	-3.755	0.917	0.881	-2.367	0.861	0.893	-3.871	0.964	0.921

注：a、b—回归系数； γ —相关系数。

荣玛地区的上述 9 个地空反射率相关模型经过显著性（ γ 法，表 3）检验，表明上述 9 个相关模型显著。

据区内铜多金属矿床地面波谱数据研究，区内建立了两类矿床的地面波谱识别模型，即鸡冠式和双峰相映式模型。鸡冠式亦为洞嘎铜多金属矿床波谱模型(冲江、厅宫等矿区地面波谱属于这类模型)，该模型

普遍形成在中等偏高的反射率背景上，ETM5、7 分模型谷底的双反射台地较强，反射峰上有强 CO_3^{2-} 基团

表 3 地空反射率相关模型的显著性检验结果

矿 床	地空反射率相关模型	γ	$\gamma_\alpha(\alpha=0.05)$	显著性
洞嘎	1	0.879	0.811	显著
	2	0.910	同上	同上
	3	0.886	同上	同上
雄村	4	0.906	0.878	显著
	5	0.903	同上	同上
	6	0.879	同上	同上
南岔沟	7	0.881	0.811	显著
	8	0.893	同上	同上
	9	0.921	同上	同上

和羟基团特征谱叠置。双峰相映式亦为雄村铜金矿床波谱模型，其地面波谱模型以双峰相映式为特征，ETM7 分模型的双反射峰上出现强羟基团和 CO_3^{2-} 基团特征谱叠置。

先用上述 9 个地空反射率相关模型将区内 ETM4、ETM5、ETM7 图像视反射率转换成与矿床地面波谱数据相关的地空反射率相关图像，然后将以上三单波段地空反射率相关图像成彩色相关图像。经采样计算，该彩色相关图像的亮度值与已知矿床地面波谱 ρ 值的关系为

洞嘎

$\rho=-4.326+0.730DN$

$\gamma=0.90$

雄村

$\rho=-2.793+0.853DN$

$\gamma=0.88$

南岔沟

$\rho=-5.064+0.591DN$

$\gamma=0.92$

式中， ρ 为已知矿区地面波谱反射率， DN 为彩色地空反射率相关图像亮度值， γ 为相关系数。

据荣玛地区彩色地空反射率相关图像分析，通过区内典型矿床地面波谱识别模型识别表明，区内共识别出 9 个图像异常。这 9 个异常在多种处理图像上都有不同程度显示，其中以人工神经网络图像和地空反射率相关图像上识别出的异常数相同，但后者的异常显示更为清晰。由于交通、气候、工作条件等因素限制，仅查证了部分异常，野外初步查证表明，区内确定的异常有很好的找矿前景。

4 讨 论

由于地形等因素影响，高寒山地区遥感图像的亮度值不可能代表地表物体的反射和发射波谱特征。因此，不宜直接进行地空波谱反演。

研究表明，运用高寒山区 ETM 图像的视反射率研究，通过研究区内典型矿床地面波谱的相关分析，可以克服识别矿化蚀变波谱产生的大概率不确定性影响，并有效地对矿化蚀变信息进行识别。

遥感图像处理过程中，为减少误差及准确定位，需选用研究区的最佳 ETM 图像波段进行地空反射率相关分析，ETM 波谱回归分析中建立的地空反射率相关模型需经数学检验，以确定模型的显著性。

参 考 文 献

程光华. 1980. 概率统计[M]. 北京: 地质出版社. 63~131.

侯增谦. 侯立伟. 叶庆同. 1995. 三江地区义敦岛弧构造-岩浆演化与火山成因块状硫化物矿床[M]. 北京: 地震出版社. 133~152. .

吕斯骅. 1981. 遥感物理基础[M]. 北京: 商务印书馆. 102~134.

王海平. 曲国林. 胡云中. 1997. 遥感数据的地空相关性研究及其在成矿预测中的应用[J]. 国土资源遥感, 33(3): 19~28.

杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 曲晓明. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[J]. 地球学报, 23(1): 17~20.

Robinson N. 1966. Solar Radiation[M]. London and New York: Elsevier Publishing Company. 54~97.

Watson K. 1972. Application of thermal modeling in the geological interpretation of IR images[C]. Proceeding of the Seventh International Symposium of Remote Sensing of Environment, 17~21, May. 2017~2041.