

地面岩石波谱测试找矿综合研究 ——以山西灵丘地区为例

李 嵩
LI Song

山西省地质调查院, 山西 太原 030006

Geological Survey of Shanxi Province, Taiyuan 030006, Shanxi, China

摘要:结合区域地质背景,从实测岩矿波谱出发;对实测波谱进行预处理,建立实测波谱库;以岩矿波谱特征理论为指导,以实测样本波谱特征为参照,分析不同矿物波谱具有的特征谱与诊断谱,通过野外岩石样品岩矿鉴定,利用多元线性拟合的方法,从实测波谱中反演氧化物含量,其结果可靠。采用克里金插值法对研究区氧化物进行插值,利用分形理论提取各氧化物异常;采用异常叠加法得到研究区异常集中区。结合化探异常及地质背景,提取了研究区31个找矿远景区。

关键词:波谱;分形;找矿;山西灵丘

中图分类号:P627 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)08-1467-09

Li S. A comprehensive study of the surface rock spectrum test: A case study of Lingqiu area in Shanxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(8):1467-1475

Abstract: Combined with the regional geological background and starting with the measured spectrums of rocks and minerals, the author first made pretreatment of the measured spectrum and, on such a basis, established the measured spectral library. With the rock and mineral spectral characteristics theory as a guide and the spectral characteristics of the measured sample as the reference, an analysis of different mineral spectrum has a characteristic spectrum and diagnostic fault spectrum; through the rock and mineral identification of the field rock samples, the multiple linear regression method is used for inversion of oxide content from the measured spectrum. The result is reliable. Within the study area oxides are interpolated by Kriging interpolation method, the fractal theory is used for extraction of oxide anomaly; with the abnormal superposition method, the anomalous concentration area in the study area is extracted; combined with geochemical anomalies and geological background, 31 ore-searching prospective areas are delineated in the study area.

Key words: spectrum; fractal; prospecting; Lingqiu in Shanxi Province

用成像波谱数据能细致地分辨多种粘土矿物,准确地圈定出由上升岩浆热液造成的酸性蚀变、由溶有岩浆气体的地下水造成的酸性蚀变,以及由沸腾热液形成的伊利石-蒙脱石带。利用便携式短波红外矿物分析仪对典型矿床进行波谱矿物测量以指导找矿,目前也有一些可以借鉴的实例。如加拿大温哥华 Gitennes 勘探公司对秘鲁 Virgen Property 金远景区利用 PIMA-H 测量仪,对钻孔岩心手标本

和公路边的露头样本进行了波谱矿物测量。结果发现,在与金矿化相关的地区,地开石含量增加,认为地开石是发现金矿化区的直接指示矿物^[1-2]。依据这一规律,加大了钻孔的钻进深度,结果发现了与地开石、明矾石和石英有关的另一处金矿化。

由于受数据源的限制,中国仅有中国科学院遥感所、中国国土资源航空物探遥感中心(以下简称航遥中心)等少数单位开展了较系统的应用研究工

收稿日期:2016-01-09;修订日期:2017-07-01

资助项目:山西省地勘基金项目《山西省灵丘银铜铅锌钼成矿区遥感地质调查》(编号:晋国土资发[2012]232号)

作者简介:李嵩(1965-),女,学士,高级工程师,从事遥感地质研究。E-mail: 498905402@qq.com

作,且内容主要集中在矿物填图方面。近几年来,成像波谱技术在矿物填图方面的应用取得了明显进展。航遥中心在“九五”期间承担了原地矿部重点科研项目“成像波谱方法技术开发应用研究”,利用美国 Cuprite 矿区的航空可见和红外成像波谱仪 AVIRIS 数据和 MAIS 数据,开展了蚀变矿物提取和矿物填图方法试验;评价了成像波谱一些常用数据处理和识别方法的实用性和有效性^[3]。中国地质调查局负责的国家 863 计划“对地观测技术在国土资源调查中的应用”项目中由航遥中心承担的“成像波谱矿物填图技术及其应用示范”,从矿物离子或离子基团、矿化蚀变类型与蚀变分带、蚀变矿物共生组合 3 个层次分析和总结了主要矿物的波谱行为和混合波谱效应;评价了一些常用的波谱参量的稳定性和在矿物识别中的作用;初步建立了“矿物大类-矿物类型-具体矿物-矿物变种”的矿物识别分层谱系和一些常见蚀变矿物的波谱识别规则^①。

本次研究区为山西省灵丘地区,通过对野外岩矿样本的波谱测试分析,以岩矿波谱特征理论为指导,以实测样本波谱特征为参照,分析不同矿物波谱具有的特征谱与诊断谱,系统地开展基于岩矿波谱特征的找矿综合研究。通过野外岩石样品的采集,进行野外岩性光谱的测定;通过岩矿鉴定确定具体的岩性和氧化物含量,结合已知矿物波谱特征和工作区内的典型岩矿波谱特征,拟定进行氧化物提取的波段;在进行波谱预处理之后,利用所建立的波谱库,采用线性拟合进行氧化物的反演。经过误差分析,对研究区内所有样品点进行反演、插值,利用分形理论提取氧化物异常区,结合化探异常,进行叠合分析,最终获得研究区找矿预测区。

1 地质背景

研究区位于山西断隆、燕山台褶带和内蒙地轴 3 个Ⅱ级构造单元的结合部位,Ⅲ级单元属于燕山台褶带西端。其西南以唐河断裂与山西断隆内的五台山断拱分开,北部隔桑干河新断陷与内蒙地轴相望。燕山台褶带是山西省境内中生代构造-岩浆活动最强的地段,省境内的中生代火山岩集中分布于该构造单元内^[4],侵入岩也十分发育,是寻找银、锰、铜多金属的重要区段。

1.1 地 层

出露地层主要为太古宇结晶变质基底恒山杂岩,阜平群榆林坪组,五台群石咀亚群滑车岭组、老潭沟组、文溪组、庄旺组、金岗库组,台怀亚群鸿门岩组,中新元古界长城系上统高于庄组,蓟县系下统杨庄组、雾迷山组,青白口系望狐山组,古生界寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系,中生界侏罗系、白垩系及新生界。前长城系主要为中-深变质的片麻岩、麻粒岩、浅粒岩、斜长角闪岩、大理岩、磁铁石英岩等。长城系-奥陶系为陆表浅海相沉积,以灰岩类、白云岩类为主,发育少许碎屑岩类。石炭系、二叠系为内陆湖相沉积,由粘土岩类、砂岩类、页岩类组成,砂页岩中常含煤层。侏罗系、白垩系及新生界主要为内陆河流相、风成相沉积和陆地火山沉积,前者以泥、砂、砾等碎屑和黄土、红土为主,后者则由基性-酸性、钙碱性-碱性的熔岩类、火山碎屑岩类和少量陆屑岩类组成^[4]。其中北部中新元古界长城系高于庄组富含银、锰,是区内银、锰矿的主要矿源层之一,南部石咀亚群金岗库组为主要含铁层位。

1.2 构 造

研究区的主体构造格架最终形成于燕山期。从中生代持续至今的断块拗隆、挤压推覆、拉张裂陷造成的地貌变迁和断裂的分布,不仅决定了中生代以来各地层单元的分布,也决定了前中生代所有地层的分布格局。导岩构造主要为 NW 向、NE 向,形成岔口-刘庄、六棱山-刁泉 2 条 NW 向,庄旺-刁泉 NE 向、太那水-太白维山 SN 向等多条构造岩浆岩带组成的网格状格架。广灵-蔚县块拗西段唐河断裂和东段六棱山-刁泉断裂之间,与之平行的正断层十分密集,形成以地堑、地垒为特征的 NW 向断阶带。涞源块隆中部发育横贯该块隆的 NE 向逆冲断层,形成太白维山和招柏一带的推覆构造。推覆体的前缘发育一系列同斜倒转褶皱及次级逆冲断层,与主断裂推覆滑动构成“入”字型构造^[4]。

地球化学异常多分布于构造交会部位,集中分布在(半)隐伏岩体及其附近,围绕岩体呈环带状,沿某些构造异常显示有走向分带。矿产集中分布在岩体附近的构造中,尤其是构造交会部位。

1.3 岩 浆 岩

岩浆活动强烈,侵入岩、火山岩分布较广泛,并明显受 NEE 向和 NW 向 2 组断裂控制,形成了与成

矿有直接联系的构造岩浆岩带。区内太白维山、塔地、浑源3个燕山期火山岩盆地中,生成与火山构造相关的金属矿产,如金、铜、银、锰、钼、铅、锌等,主要产于火山颈或次火山岩中。燕山期中性-酸性侵入岩具多期次、多阶段特征。

1.4 变质岩

研究区为古老变质岩系发育地区,变质岩石广泛出露,为中太古界阜平群榆林坪组,新太古界五台群金岗库组、庄旺组、文溪组、老潭沟组、滑车岭组、鸿门岩组,以及滹沱群四集庄组、寿阳山组。主要岩石类型为区域变质岩。混合岩化作用在石咀亚群金岗库组、庄旺组、文溪组中局部有微弱显示,阜平群中的混合岩化作用比较强烈。

2 波谱库建立

在充分研究山西省灵丘成矿区地质背景的基础上,采用美国SVC HR1024便携式地物光谱仪对研究区内的岩石标本进行光谱采样,以获得该区域各类岩性矿物的光谱特征。岩矿波谱测试仪器基本基础指标与要求:波段范围为1300~2500nm,光谱分辨率优于2nm,波长定标精度优于2nm,采样带宽,分为三部分: $\leq 1.5\text{nm}$, 350~1000nm, $\leq 3.8\text{nm}$, 1000~1890nm, $\leq 2.5\text{nm}$, 1890~2500nm;同时光谱分辨率也分三部分: $\leq 3.5\text{nm}@700\text{nm}$, $\leq 9.5\text{nm}@1500\text{nm}$, $\leq 6.5\text{nm}@2100\text{nm}$ 。

2.1 野外实测波谱数据获取与处理

野外样本采集尽量覆盖不同的岩石单元,对观察点及采样点的部署及验证主要包括典型地类标志点、解译困惑点和重要地物点。主要包含沉积岩、火山岩、变质岩等。通过对获取的波谱测试数据进行一系列的预处理,得到野外岩矿样本稳定可靠的反射波谱数据,为进一步实测波谱特征分析奠定数据基础。实测波谱数据的预处理,包括仪器的限制修正、波谱曲线平滑处理、去除连续统等,并对测得的波谱数据质量进行检查^[5-7]。通过波谱测试仪得到样本的波谱曲线,为了保证数据准确性,对每个测试面进行了不少于10次采样,其目的是为了获取稳定的波谱曲线,尽量减少测试过程中产生的失误。

2.1.1 实测波谱数据的仪器限制修正

地物的反射波谱应当是连续、平稳过渡的。经过实际检查,所有的波谱数据在1000~1001nm和

1890~1891nm处存在断开,这是由所用波谱仪的性质造成的。仪器测试的波谱范围为350~2500nm,由3个通道组成。其中可见光-近红外(VNIR)通道的波谱范围为350~1000nm,2个短波红外通道(SWIR1和SWIR2)的波谱范围分别为1000~1890nm和1890~2500nm。3个通道测量的波谱范围之间有极小部分的重叠。利用不同通道分别对白板进行定标,因此存在一定的差别,导致波谱不连续。

波谱不连续是由于定标标准不同造成的,因此需要将三段单独的波谱拉伸到同一标准之下。由于波谱特征的吸收和反射与波谱的形态关系密切,通过特征峰、谷反映矿物的波谱特征,整体反射率的高低影响不大,因此,考虑对每条波谱的不同波段进行系数修正。以1001~1890为基准,对每条波谱的350~1000nm和1891~2500nm分别乘以相应的系数,将波谱拉伸到同一标准。即定义每一点的反射率为 R_i ,修正后的反射率为 R_i' 。处理后的波谱曲线基本连续、平滑,无明显跳跃与剧烈抖动现象,大部分可以满足连续性要求。在波谱走向方面趋势较一致,但仍有少数波谱无法通过拉伸得到连续平滑的曲线,这是由于仪器设备性能限制造成的。因此对部分波谱曲线,1000nm和1890nm处的波谱吸收不纳入特征统计。

2.1.2 实测波谱数据的平滑处理

在可见光-近红外波段,通过波谱仪直接测出来的波谱数据存在一定的干扰信息,表现在波谱上为曲线抖动,这主要是由于人工操作波谱仪进行测试时,在采样时抖动及波谱仪本身的设计工艺造成的。这就需要对波谱进行均值平滑处理,减小人为及机器自身对波谱数据造成的干扰^[7]。通过曲线滑动窗口均值处理,可有效减轻波谱的抖动现象。

平滑方式采用均值法滤波光滑,光滑采用多项式线条光滑,对每点波长的反射率与周围的点做均值处理。对于波谱曲线上的每一点,有:

$$R_i' = (R_{i-1} + R_i + R_{i+1}) / 3 \quad (1)$$

式中: R_i' 为均值后的点波谱值, $R_{i-1} + R_i + R_{i+1}$ 分别为该点与左右两点的波谱值。

2.2 实测波谱信噪比估算

信噪比估算采用波谱平滑的方法,采用9个波段大小的窗口,逐波段对波谱进行平滑处理,每个波段平滑后的值为窗口内9个波段反射率的均值。

以平滑后的波谱作为信号估计值,计算平滑前后波谱差值的绝对值。将信号估计值与噪声估计值之比作为信噪比估计值。即:

$$\bar{S}_i = \frac{1}{9}(S_{i-4} + S_{i-3} + \cdots + S_{i+3} + S_{i+4}) \quad (2)$$

$$SNR_i = \frac{\bar{S}_i}{|\bar{S}_i - S_i|} \quad (3)$$

其中: SNR_i 为波长为*i*的信噪比, S_i 为波长为*i*的实际反射率值, $\bar{S}_i$ 为波长为*i*的信号估计值。

通过统计发现,波长在 1.9283~1.9470 μm 及 2.4662 μm 以后的波谱反射率的信噪比倒数多大于 0.2,说明数据的可靠性差,予以舍去。

通过以上预处理,得到的波谱数据基本符合数据进一步分析的要求。按照波谱入库标准,建立波谱数据库。同时,为了突出波谱特征,进行包络线处理,增强了波谱特征信息。

3 氧化物反演

实测波谱是研究区实际地物的反射率反映,应用统计分类的方法,根据波谱的形态和特征,确立波谱与特定岩石氧化物含量的关系。先将实测岩石氧化物样本进行分类,从数据中寻找规律,再作用于野外样本,以获得全区的氧化物分布情况。

3.1 氧化物样本分析

首先,应用 SPSS Statistics 软件对野外样本的矿物分析结果进行聚类处理,提取独立性较高的样本。对本次研究来说,实测的波谱数据可以看作每个野外采集的样本,即作为研究对象个体。这种方法更多地考虑波谱形态的相似性而非波谱反射率的绝对值,对于波谱的聚类有很好的对应关系,可以将样本的种类划分为不同的类别。

通过计算,得到各岩石样本氧化物之间相关性系数的关系矩阵。该矩阵代表了该方法各岩石样本之间的相关性,从而将具有相同峰谷特征的矿物波谱曲线聚类,体现了不同的矿物组成^[8]。一般表现为,样品对其自身相似度为 1,对不同的样品相似性呈现不同的数值。它们之间的相关系数最大为 1 的,可以认为是同类岩石^[9]。

通过聚类分析最终确定用于波谱分形的岩石氧化物分析结果,具有独立性、代表性,共计 40 个样本。

通过从实际岩石混合波谱中解算氧化物,需要

的数据基础为野外实际测试的波谱曲线(新鲜面)、野外样本的鉴定结果、岩矿鉴定结果;理论基础为火山岩含量反算方法、回归分析等。要进行岩石的氧化物分解计算,需要从三方面进行:①整理野外采集样本的地质描述、野外定名等地质资料,从宏观上把握采集的样本的岩石类型、矿物组成;②实际测试的野外采集样本的反射率波谱数据;③野外采集样本岩矿鉴定岩石分析结果^[7,10]。

3.2 反射率和含量的关系

光谱吸收特征包括吸收位置(P)、吸收深度(A_L)、吸收宽度(W)、吸收总面积(A)、对称度(S)等,与岩石和矿物的类型、矿物含量、遥感仪器的分辨率有关。这些参数有助于识别矿物类型,确定矿物成分、含量和矿物的特征光谱波段^[11-14]。本次工作采用 IDL 语言,通过高斯函数拟合、波谱分形等,提取了光谱的吸收特征。结合矿物本身的波谱特征和络线消除法^[10],可以快速定位特定矿物的波谱特征。

3.2.1 氧化物反演模型建立

在线性相关条件下,2个和2个以上自变量对1个因变量的数量变化关系,称为多元线性回归分析。多元回归分析是研究因变量与多个自变量之间变动比例关系的一种方法^[10],最终的结果是建立一种经验性的回归方程^[15]。

本次研究对光谱反射率进行了多种变换:反射率倒数 $1/R$ 、反射率的对数 $\ln R$ 、反射率倒数的对数 $\ln(1/R)$ 。依据 40 个建模样本数据,以 SiO_2 、 P_2O_5 、 CaO 、 TiO_2 、 FeO 、 K_2O 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 MnO 百分含量为因变量,多种反射率变换形式为自变量,进行多元线性回归分析。以反射率为例,在做回归分析的过程中,通过绘制残差散点图去除一些异常点,其中 Y 轴表示标准化残差(ZRESID),X 轴表示标准化预测值(ZPRED),样本基本符合正态分布,各散点随机分布在以 $e=0$ 为中心的横带中,证明该模型是适合的。同时也发现了个别离群点 D3016、D8033、D8032、D3081,在模型建立中予以剔除,增强回归模型的可靠性。

通过反复对比,最终以 SiO_2 、 P_2O_5 、 CaO 、 TiO_2 、 FeO 、 K_2O 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 MnO 百分含量为因变量,以反射率剔除连续统数为自变量,建立回归模型。本次研究采用多元线性逐步回归模型: $Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_4X_4 + \cdots$,其中,Y 代表

Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 等氧化物在岩石中的含量, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ……代表高光谱吸收特征参数, A_0 为常数项, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 代表回归系数^[10,16-17]。

在多元线性逐步回归模型中,由于各光谱吸收特征参数之间是非相互独立的,应从多个变量中筛选那些对因变量 Y 方差贡献最大的光谱变量,同时这些特征参数对因变量的作用是显著的。在每一次筛选光谱变量时,应对当次回归方程中的自变量作显著性检验,及时剔除不重要的光谱变量^[10]。理论上,用逐步回归技术可以找到与因变量 Y 具有最大相关的吸收特征参数 X , 其有最高的估测精度。

本次通过多次试验最后获得下列多元线性氧化物回归模型。 SiO_2 采用波段: $2.3355\mu\text{m}$ 、 $0.691\mu\text{m}$ 、 $0.5793\mu\text{m}$ 、 $1.9256\mu\text{m}$ 、 $0.3461\mu\text{m}$ 、 $0.76056\mu\text{m}$ 、 $0.9358\mu\text{m}$ 、 $1.1144\mu\text{m}$ 、 $2.1671\mu\text{m}$ 、 $1.9363\mu\text{m}$ 、 $1.0110\mu\text{m}$ 、 $1.9336\mu\text{m}$ 、 $2.1597\mu\text{m}$ 。方程为 $Y=185.430 \times X_1 - 80.563 \times X_2 - 21.870 \times X_3 + 167.511 \times X_4 - 41.344 \times X_5 + 110.474 \times X_6 - 144.993 \times X_7 - 1.064 \times X_8 + 121.7338 \times X_9 - 139.607 \times X_{10} + 1234.565 \times X_{11} - 1365.211 \times X_{12} + 118.603 \times X_{13} - 91.416$, 相关系数 R^2 为 0.513。其中 Y 为含量, X_1 、 X_2 ……, 为对应的波段

位置上的反射率包络线剔除后值。其他氧化物采用同样的技术方法,选择不同的波段特征,以提取对应的氧化物含量,具体选择的波段及相关系数 (R^2) 见表 1。

3.2.2 误差分析

利用多元回归方法得出氧化物的反演模型,通过下式计算这部分样品的氧化物含量,把计算得到的氧化物含量与实测氧化物含量比较。

$$f = \frac{Y_{\text{真实}} - Y_{\text{计算}}}{Y_{\text{真实}}} \times 100\% \quad (4)$$

其中, $Y_{\text{真实}}$ 是实测的氧化物含量, $Y_{\text{计算}}$ 是计算的氧化物含量。

反演值与真实值之间的误差率分布如表 2 所示。除 FeO 外,当相对误差小于 15% 时,其比例为 15%~45%;当相对误差小于 35% 时,比例为 40%~77.5%;当相对误差在 100% 以内时,所占比例在 60%~92.5% 之间,其拟合结果能够满足计算要求。

3.3 插值计算

由于反演的结果都是离散点,不便于整个区域研究,所以要进行反演结果的插值,以满足研究区内异常区域的提取。主要目的:①对不足或缺失数据的估计。由于样本分布的密度及分布位置的

表 1 反演误差分布

Table 1 Inversion error distribution

氧化物	选 用 波 段/ μm	相关系数(R^2)
SiO_2	2.3355、0.691、0.5793、1.9256、0.3461、0.7606、0.9358、1.1144、2.1671、1.9363、1.0110、1.9336、2.1597	0.513
CaO	2.3897、1.7516、1.939、2.3355	0.803
MgO	12.561、1.0148、1.1144、1.2774、1.3524、1.3637、1.3749、1.3972、1.4158、1.4307、1.7121、1.8192、1.8333、1.851、1.858、1.8651、1.8756、1.8861、1.8966、1.9014、1.9041、1.9068、1.9122、1.9175、1.9229、1.9283、1.9309、1.9363、1.9416、1.9523、1.9997、2.0154、2.1024、2.2061、2.2229、2.254、2.2939	0.981
Fe_2O_3	0.4331、0.5557、0.5932、0.6083、0.6438、0.7437、0.7605、0.8151、0.9881、1.0110、1.1144、1.3524、1.3972、1.7121、1.8192、1.8439、1.8931、1.9041、1.9068、1.9122、1.9175、1.9229、1.9283、1.9390、1.9523、2.0847、2.1572、2.2061、2.2658、	0.844
Al_2O_3	0.3401、0.3476、0.4331、0.4922、0.5793、0.6869、0.7605、0.8151、0.9381、0.9881、1.0110、1.1144、1.3972、1.4307、1.7121、1.8192、1.8439、1.8931、1.9068、1.9122、1.9175、1.9283、1.9336、1.9390、1.9523、2.0847、2.1597	0.715
FeO	2.2658、0.8508、1.5414、0.9506、2.2563	0.622
K_2O	0.3401、0.3803、0.5876、0.6220、0.7605、1.1258、1.3524、1.3972、1.7121、1.8966、1.9041、1.9068、1.9122、1.9175、1.9229、1.9283、1.9523、2.1597、2.2061、2.2752	0.798
TiO_2	0.3476、0.4331、0.5793、0.6220、0.7437、0.7605、0.8151、0.9881、1.0110、1.1144、1.3524、1.3972、1.7121、1.8192、1.8439、1.8931、1.9041、1.9068、1.9122、1.9283、1.9523、2.0847、2.1597、2.2061、2.2516	0.858
Na_2O	0.3401、0.3803、0.4922、0.5876、0.6220、0.6869、0.7580、0.8151、0.9300、0.9881、1.1144、1.3524、1.3637、1.3972、1.4158、1.7121、1.8192、1.8966、1.9041、1.9068、1.9122、1.9175、1.9202、1.9256、1.9363、1.9523、2.0847、2.1597、2.2061、2.2799	0.808
P_2O_5	0.3476、0.4331、0.5793、0.6220、0.7280、0.7605、0.8151、0.9300、0.9881、1.0110、1.3524、1.3972、1.4307、1.7121、1.8966、1.9041、1.9068、1.9122、1.9175、1.9202、1.9229、1.9283、1.9363、1.9523、2.0847、2.1597、2.2061、2.2468	0.729
MnO	0.3476、0.4331、0.4922、0.5793、0.6220、0.6869、0.7437、0.7605、0.8151、0.9381、0.9881、1.0110、1.1144、1.3524、1.3972、1.7121、1.8192、1.8439、1.8931、1.9041、1.9068、1.9122、1.9175、1.9229、1.9283、1.9336、1.9390、1.9523、2.0023、2.0847、2.1597、2.2061、2.2516	0.773

表2 反演误差分布

Table 2 Inversion error distribution

误差范围	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
15%以内	45.0	15.0	45.0	22.5	32.5	5.0	27.5	42.5	22.5	20.0	37.5
35%以内	77.5	40.0	65.0	47.5	62.5	12.5	55.0	60.0	47.5	40.0	70.0
100%以内	85.0	72.5	82.5	72.5	82.5	35.0	62.5	80.0	60.0	82.5	92.5

原因,不可能任何空间地点的数据都能实测得到,需要用到插值,以了解区域内观测变量的完整空间分布。②数据的网格化。规则格网能够更好地反映连续分布的空间现象,并对他们的变化作出模拟^[13-14]。

克里格插值(Kriging)是由南非工程师克里格和统计学家西舍尔在20世纪50年代根据样品空间位置和样品间相关程度的不同,对每个样品赋予一定的权重,进行滑动加权平均,来估计未知样品平均值的一种方法^[18-19]。该方法利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点,对未采样点的区域变量的值进行最优、线性、无偏估计。这里采用普通克里格法进行差值。通过验证计算,估值误差平均值较小,趋于零;估值误差的方差与估值理论方差的均值之比趋于1.000;估值误差落在±2倍估值误差的方差内,百分比基本在95%以上;结果满足估值精度要求。结果更形象准确地表达了该区域各种估值的分布情况,可以准确地定位异常区域。通过已知采样点位的分布,根据其间的距离分布,插值像元大小确定为170m×170m。

4 找矿预测

4.1 异常提取

在充分认识研究区不同尺度地质矿产特征的基础上,对矿致异常的空间分析与定量评价展开了系统研究。矿致异常正确识别的前提是背景与异常的合理分割,对单因素而言,实际上是异常下限的计算,可采用基于经典统计学的均值标准差法(Mean+2SD)、基于稳健统计学的中位数绝对偏差法(Median+2MAD)、Tukey箱图法及基于百分数的累积频率法(98%)4种计算方法。对比这4种方法计算的异常下限结果,发现基于经典统计学的均值标准差法不适宜于计算成矿因素含量的异常下限,基于稳健统计学的中位数绝对偏差法计算的异常

下限能够最大程度地避免极端值的影响;基于百分位数的累积频率法始终能各自识别出占总样本数一定比例(如2%)的高值样本和低值样本;推荐异常下限的计算方法使用基于稳健统计学的中位数绝对偏差法和Tukey箱图法,但二者在计算之前须进行对数变换。如前文所述,这里采用了目前比较先进

的分形方法对数据进行异常提取,并圈定了最小靶区^[4,20-21]。

分形方法已经成为提高勘查地球化学、地球物理信息的重要途径之一。采用分形理论的求和法像元亮度-面积模式,对所提取出来的异常进行定量分析,并传统阈值选取方法进行了对比研究。结果表明,区域氧化物、矿物作为一种地质记录,其空间展布不仅具有分形特征,而且具有多重分形的特征^[22-23]。针对研究区的各氧化物插值图,采用亮度-面积模式进行分形异常提取,获得各个氧化物异常分布图。

从提取结果及分析可以看出,氧化物异常较集中,主要分布于研究区东南部。西北部王成庄—西沟村一带主要分布有SiO₂的二级异常;结合地质图(图1),从叠合效果看,该区域主要分布有变质花岗岩,印证了酸性火山岩SiO₂含量较高的地质特征。白北堡村附近的SiO₂异常区大量出露花岗岩及安山岩,在上侏罗统与岩体接触部位SiO₂异常更加明显,推测该区域内SiO₂异常主要与中生代岩浆岩相关。太白巍山地区的SiO₂异常与太白巍山岩体密切相关,王村铺SiO₂异常与五台群、花岗岩、变质石英闪长岩及伟晶岩密切相关。SiO₂异常主要体现了硅化异常及酸性岩体的特征。

Al₂O₃异常主要分布于白北堡村西北部及上寨镇—红石楞乡—白沙口一带,其中白北堡村西北部主要出露中寒武统,而上寨镇—红石楞乡—白沙口一带Al₂O₃异常分布区内主要出露长城系高于庄组,白云岩含量较高,这一部分Al₂O₃异常推测与铝土矿密切相关。

FeO异常(包括一级“强异常”,二级“次强异常”)主要分布于银厂村—上寨镇之间的区域及大群—河北地界的局部区域,与铁矿关系密切,特别是“一级异常区域”。

CaO异常主要分布于安甲地区,与中侏罗统后

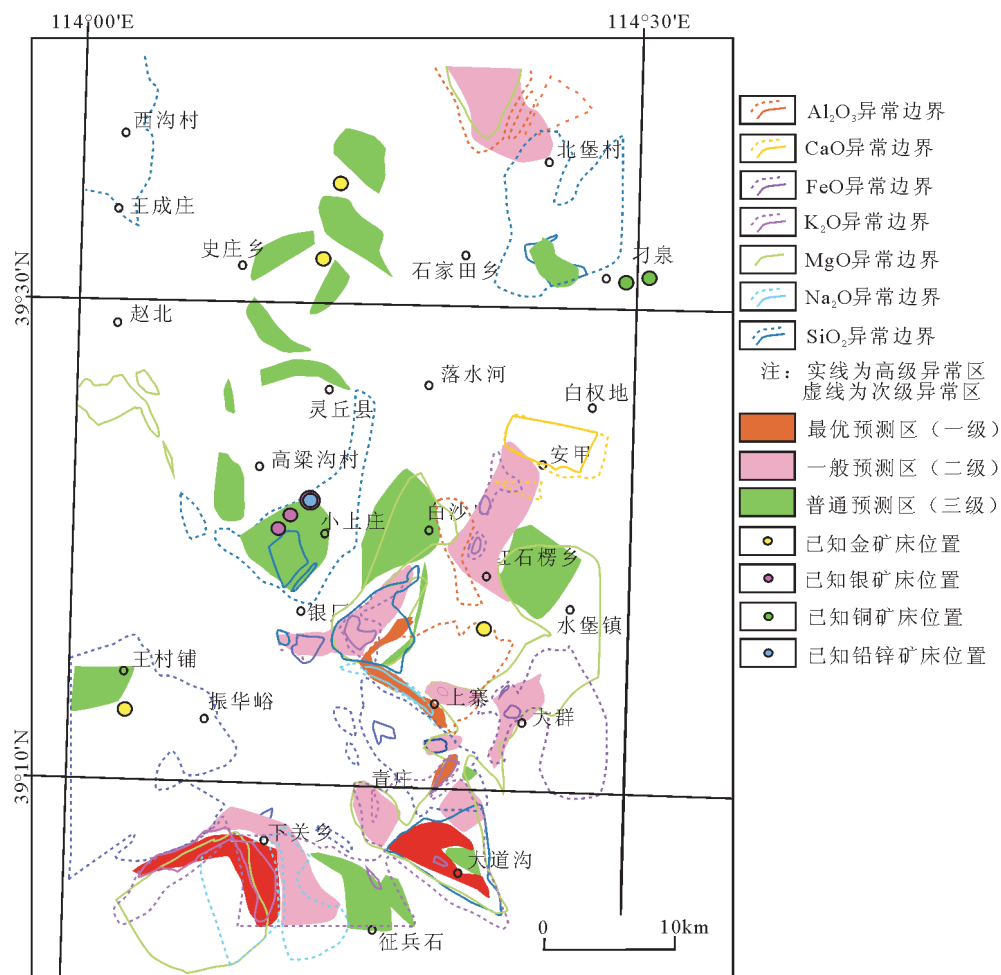


图1 氧化物异常叠合区及远景预测区分布

Fig. 1 Distribution of the oxide anomaly overlap region and the prognostic prospective area

城组密切相关,表现为青磐岩化蚀变带。 MgO 次级异常主要分布于白北堡村西北、赵北村南部地区、白沙口—银厂村及石楞乡—水堡镇—上寨镇一带。其中,白北堡村西北 CaO 异常与中寒武统密切相关,而赵北村南部 CaO 异常主要表现为古近系—新近系粘土密切相关;而白沙口—银厂村及石楞乡—水堡镇—上寨镇一带 CaO 异常主要与长城系高于庄组相关,集中表现为冶镁白云岩的特征。

TiO_2 一级异常主要分布于上寨镇—银厂地区,异常推测与金红石及钛铁矿密切相关。 MnO 、 P_2O_5 异常分布较少,但白沙口—红石楞乡的 MnO 异常值得关注。 MnO 与 FeO 为同质的,所以它们的异常推测为铁锰矿的异常特征。 Na_2O 的异常

分布类似于 TiO_2 但其更加集中,且主要表现为二级异常,其叠合部分表现为钠质火山岩相关的岩性或矿产。

K_2O 二级异常主要分布于研究区南部,在下关—香沟门—大石头—青庄一带及研究区中部零星分布,与太古宙岩石密切相关。

4.2 找矿预测

找矿预测模型已有很多,例如证据权法、后验证据权法、自适应法、多因子评判(MCM)法^[24-26]等。本次采用分形异常提取,叠加异常进行预测,该方法能够快速地提取弱异常及隐伏异常。

从氧化物异常分级信息提取,大致能够分析出蚀变异常信息及与成矿相关的岩性异常信息,然后通过分析其组成的矿物信息,进一步获取成矿有利

区域,达到矿产预测的目的。

根据以上分析的氧化物异常分布图,圈定各自的异常区域。通过异常区域的叠加,叠加部分较多的区域为成矿远景区(图1)。

对比该地区的 Cu、Au、Ag、Zn、Mo、Pb 地球化学元素分布可知,在刁泉已知矿床区西侧预测了远景区,在已知的资源潜力预测区内得到了印证。北部的预测区主要分布于 Ag、Cu 化探异常的中值区及 Au、Mo、Zn、Pb 地球化学的中低值区域,说明该区域的预测矿种主要为铜、银矿。南部预测区分布于 Cu 地球化学的中高值区、Pb 地球化学的低值区、Zn 地球化学的中高值区、Mo 地球化学的低值区、Au 地球化学的低值区、Ag 地球化学的中高值区,说明该区域的预测矿种主要为铜、锌、银多金属矿种。而中部预测区,地球化学元素含量均体现为中高值,说明处于一个多金属矿床的富集区。水系沉积物异常可大致反映矿区范围,元素组合为 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo,主成矿元素 Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、Au 异常强度高,分带明显,但浓集中心均偏离矿体。土壤及岩石中 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As 异常范围指示了矿化蚀变范围^[25],其异常强度及元素分带特征与矿体特征相对应。

结合前文分析可以得出,氧化物异常分析的结果主要表现为蚀变类的异常信息,例如硅化(SiO_2)、青磐岩化(CaO)、铁染(Fe_2O_3 、 FeO)等异常类信息;对于具有蚀变异常的矿产预测具有指导意义,但是对弱蚀变异常及无蚀变异常的矿产预测帮助不大。而矿物异常信息对矿产预测具有更好的准确性。

4.3 预测区分析

根据前文的论述,划定了研究区内 31 个预测区,结合已知矿产,初步判断,三级预测区以铁矿为主,次为铜、铅、锌矿;其预测区内矿物异常分布以钛铁矿、磁铁矿、赤铁矿异常为主,且多个预测区周边存在已知铁矿点。同时,预测区级别的划分,主要考虑使用异常区域叠加的多少进行划分,异常叠加密集的区域划分为一级预测区,次密集的区域划分为二级异常预测区,依次类推。考虑预测区地层、岩性覆盖情况,推测红石楞地区的预测矿种主要为沉积矿产,包括冶镁白云岩、铝土矿、沉积式铁矿等;银厂—上寨镇—大群预测区矿产与火山岩密切相关;下关以南预测区主要为变

质类型的多金属矿产。

值得注意的是,对于没有划分至一、二、三级预测区域,但同时有个别氧化物异常的区域,考虑与深部矿产相关,或与采样不完整有关,使其异常不够具体明显,但仍有一定的指导意义。特别是与钠长石和 SiO_2 相关的异常区域,着重考虑与碱性岩体密切相关。

(1)刁泉西北预测区:构造上属燕山台褶带的西缘部分。区内主要出露中元古界蔚县系雾迷山组中—上段白云岩、下寒武统底部角砾岩、中寒武统灰岩、下奥陶统白云岩。区内断裂构造发育,主要有 NE 向、NW 向 2 组。成岩母岩为燕山中期晚阶段花岗斑岩、石英斑岩。在灵丘东北部,以燕山期中酸性侵入岩体为中心,在与中生代碳酸盐岩的接触带上,普遍大理岩化,发育铜矿化体,属于接触交代—热液型矿床。该区的铜矿位于燕山沉降带内缘小彦构造—岩浆岩活动带中,为矽卡岩型铜矿,矿化和蚀变具有水平和垂直分带性。铜矿体产在花岗闪长斑岩与灰岩接触部位及捕虏体中。主要岩浆岩为酸性侵入岩(刁泉花岗岩)和火山岩。刁泉花岗岩为成矿母岩,呈复杂的岩株状产出。断层构造发育,且以 NE 向较发育,沿断裂带侵入了刁泉花岗岩,形成矽卡岩型铜矿。根据岩石中暗色矿物的消长关系,可分为黑云母辉石闪长岩、辉石闪长玢岩,其次为黑云母角闪闪长岩、闪长岩等,主要矿物(质量分数)为中长石(60%~70%)、紫苏辉石(3%~10%)、透辉石(2%~5%)、黑云母(5%~10%)、正长石(1%~5%)和石英(<5%)。

(2)灵丘研究区预测远景区铁矿:主要为“鞍山式铁矿”,属于沉积变质铁矿。矿体赋存于上太古界五台群文溪组变质岩系内。铁闪石英型磁铁矿为区内主要矿石类型,岩性为铁闪磁铁矿石岩,呈灰黄色,条带状构造。矿石矿物主要为磁铁矿(25%~35%),含少量黄铁矿(2%)、赤铁矿(2%)、褐铁矿(1%)。脉石矿物主要为石英(50.6%)、铁闪石(10%)及少量石榴子石、绿帘石等。副矿物为榍石、矽线石和磷灰石。石英型磁铁矿岩性为磁铁矿石岩,呈灰黑色,条带状构造,矿石矿物主要为磁铁矿(20%~30%),少量为黄铁矿、褐铁矿。脉石矿物主要为石英(60%)、普通角闪石(10%)、少量绿帘石等。副矿物为矽线石、磷灰石等。矿石矿物成分较简单,以磁铁矿为主,常见磁黄铁矿、黄铁矿和少量半

假像赤铁矿。脉石矿物为石英、角闪石、方解石、绿帘石、铁铝榴石、绿泥石等。除致密块状构造矿石为富矿外,其余都为贫铁矿石。

致谢:研究和成文过程中,得到项目组全体成员的大力支持,在此深表感谢。

参考文献

- [1]Gaffey S J. Spectral reflectance of carbonates minerals in the visible and near infrared(0.35~2.55microns):calcite, aragonite, and dolomite[J]. American Mineralogist, 1986, 71:151-162.
- [2]Bierwirth P, Husion D, Bkwett R. Hyperspectral Mapping of Mineral Assemblages Associated with Gold Mineralization in the Cengral Pilbrar, Western Australia[J]. Economic Gology, 2002, 97:819-826.
- [3]王润生,甘甫平,闰柏棍,等. 高光谱矿物填图技术与应用研究[J]. 国土资源遥感, 2010, (1):1-13.
- [4]王翔,范海明. 山西省晋东地区燕山期岩浆岩热液型多金属矿床地质特征[M]. 北京:中国地质出版社, 2013:85-176.
- [5]Zhang B P, Zhang Y M. Application of remote sensing alteration information extraction to copper and iron deposit exploration in Banchangou region, western Tianshan[J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21(1):90-93.
- [6]Crosta A P, Sabine C, Taranik J V. Hydrothermal alteration mapping at Bodie, California, Using AVIRIS hyperspectral data[J]. Remote sensing Environ, 1998, 65:309-319.
- [7]Crowl E Y, James K, Hubbard B E, et al. Hydrothermal alteration on the cascade strato volcanoes: A remote sensing survey[J]. Geological Society of America Abstracts with Programs, 2003, 35(6):552.
- [8]Hunt G R, Salisbury J W. Visible and nearinfrared spectra of minerals and rocks: Silicate Minerals[J]. Modern Geology, 1970, 1: 283-300.
- [9]Hunt G R, Salisbury J W, Lenhoff G J. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and hydroxides[J]. Modern Geology, 1978, 2:195-205.
- [10]张琴. 地表岩石中 Fe_2O_3 和 SiO_2 的遥感定量反演研究[D]. 吉林大学博士学位论文, 2013.
- [11]苏红军,杜培军. 高光谱数据特征选择与特征提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2006, (4):288-293.
- [12]Wang X P, Xie Z Q, Wu Y Z. Information extraction of mineralizing alteration from etm space image: Taking Taxk organ Area of West Kunlun Mountain as an Example[J]. Geology and Resources, 2002, 11(2):119-122.
- [13]Imbroane A, Melenti C, Gorgan D. Mineral Exploration by Landsat Image Ratios[C]//Ninth International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing, 2008: 335-340.
- [14]Tseng D C, Lai C C. A genetic algorithm for MRF-based segmentation of multispectral textured images[J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20:1499-1510.
- [15]王亚飞,钱乐祥,刘含海. 地物光谱曲线特征点的提取和应用[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2006, (36):37-70.
- [16]Hunt G R, Ashley R P. Spectra of Altered Rocks in the Visible and NearInfrared[J]. Economic Geology, 1979, 74: 1613-1629.
- [17]Hunt G R. Spectroscopic Properties of Rocks and Minerals[C]//Carmichael R. C. Practical Handbook of Physical Properties of Rock and Minerals. Boca Raton Florid: CRC Press Inc, 1989: 599-669.
- [18]曾怀恩,黄声享. 基于 Kriging 方法的空间数据插值研究[J]. 测绘工程, 2007, (05):5-8+13.
- [19]张军,王茂芝,陈聆,等. 插值算法在高光谱数据中的应用[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2012, (3):43-46.
- [20]赵鹏大,池顺都. 初论地质异常[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1991, 16(3):241-248.
- [21]赵鹏大,王京贵,饶明辉,等. 中国地质异常[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 1995, 20(2):117-12.
- [22]张焱,周永章,姚凌青,等. 多重分形与地质统计学方法在粤北刘家山地区矿化指示中的应用[J]. 地学前缘, 2012, 19(4):151-158.
- [23]Shen W, Zhao P D. The theoretical study of statistical fractal model and its application in mineral resource prediction[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(3):369-376.
- [24]范海明. 基于适宜性模型多元信息成矿预测研究[J]. 科技创新与生产力, 2013, (6):35-37.
- [25]范海明,暴玉. 基于多因子评判(MCE)法的灵丘地区铜矿预测[J]. 华北国土资源, 2014, 3:102-104.
- [26]Jia Y H, Li D R, Jia B S. Data Fusion Techniques for Multisources Remotely Sensed Imagery[J]. Remote Sensing Technology And Application, 2000, 15(1):41-44.
- ①王润生,闫柏琨,刘圣伟,等. 岩矿遥感信息量化技术研究. 中国国土资源航空物探遥感中心, 2007.