

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.239

引用格式: 李士杰, 刘小玉, 秦昊洋, 等. GeoAHSI 新工具精确刻画新疆哈密赤湖铜钼矿床蚀变分带特征[J]. 中国地质调查, 2024, 11(5): 55–65. (Li S J, Liu X Y, Qin H Y, et al. Accurate characterization of the alteration zoning in Chihu copper–molybdenum deposit by a new tool GeoAHSI in Hami area of Xinjiang[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(5): 55–65.)

# GeoAHSI 新工具精确刻画新疆哈密赤湖铜钼矿床蚀变分带特征

李士杰, 刘小玉\*, 秦昊洋, 何海洋, 王思琪, 孙旭

(中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 蚀变分带特征能够指示与斑岩型矿床相关的热液蚀变活动, 是斑岩型矿床的重要找矿标志之一。高光谱遥感数据凭借精细的光谱信息, 能够准确刻画各类热液蚀变矿物的空间分布, 从而为斑岩型矿床的识别和定位提供可靠依据。以 Teracorder 算法框架为基础, 开发并开源了适用于国产高光谱数据矿物识别工具 GeoAHSI, 实现了便捷、高效的国产高光谱遥感数据批量处理和矿物填图工程化应用。在此基础上, 使用 GF-5 高光谱成像仪 (Advanced Hyperspectral Imager, AHSI) 影像作为遥感数据源, 结合野外采样分析, 对赤湖铜钼矿床进行了地表矿物填图及验证工作。结果表明, AHSI 高光谱矿物填图结果精细地刻画出了以叶腊石 + 明矾石为核心, 向外逐渐过渡高岭石 + 叶腊石和高岭石 + 白云母蚀变矿物组合的典型斑岩型矿床热液蚀变分带特征, 并与传统地质填图单元和构造具备较好的空间分布一致性。此外, GeoAHSI 工具还提取了该地区白云母吸收特征波长分布, 揭示了赤湖铜钼矿床富铝白云母与斑岩型矿化之间的关系。研究为斑岩型矿床蚀变矿物及蚀变分带识别提供了成熟、有效的工具及方法, 对推动国产高光谱遥感卫星支撑新一轮找矿突破战略行动具有一定指导意义。

**关键词:** GeoAHSI; 高光谱矿物填图; GF-5; 蚀变矿物; 赤湖铜钼矿

**中图分类号:** P237

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8706(2024)05-0055-11

## 0 引言

光谱学可以根据矿物的电子跃迁和基团振动在反射太阳光谱范围(400, 2 500] nm 引起的吸收来识别它们。特别地, 短波红外 (Shortwave infrared, SWIR) 光谱区域(2 000, 2 500] nm 是识别碳酸盐矿物和含水矿物(如云母和黏土)的关键光谱区间<sup>[1-3]</sup>, 它们通常是热液蚀变的产物, 这就为遥感开展热液矿床勘探提供了理论基础。在世界范围内, 遥感技术用于矿产勘查始于 20 世纪 70 年代, 大部分研究关注于热液矿床勘探, 有大量的文献详细阐述了遥感技术在这类矿床勘查中的应用。尤

其是自 20 世纪 90 年代初以来, 随着高光谱成像技术的进步, 高光谱遥感在矿产勘查领域取得了巨大的成功。20 世纪 90 年代, 由 Clark 等<sup>[4]</sup> 发展起来的 Tetracorder 矿物识别专家系统不断成熟完善, 为高光谱矿物识别提供了强大的算法框架和基础工具。Dalton 等<sup>[5]</sup> 使用 Tetracorder 系统对科罗拉多州西南部阿尼玛斯河流域的 AVIRIS 影像进行分析, 得到的矿物分布图用于结合其他研究确定自然和人为来源的酸性、含金属地表径流的相对范围及对水质的影响。Kokaly 等<sup>[6]</sup> 在 Tetracorder 算法框架的基础上, 简化了专家识别规则, 增加了用户对光谱诊断特征的权重、匹配阈值的自主调控余地, 发展出了物质识别与特征分析算法 (Material Iden-

收稿日期: 2024-06-20; 修订日期: 2024-08-27。

基金项目: 中国地质调查局项目“东天山—北山成矿带金矿资源潜力动态评价(编号: DD20230372)”资助。

第一作者简介: 李士杰(1988—)男, 工程师, 主要从事高光谱遥感方面的研究工作。Email: 1045105061@qq.com。

通信作者简介: 刘小玉(1992—), 女, 工程师, 主要从事高光谱遥感方面的研究工作。Email: 582697086@qq.com。

tification and Characterization Algorithm, MICA), 并使用它首次完成了阿富汗全境的 Hymap 高光谱矿物填图工作。Swayze 等<sup>[7]</sup>基于机载可见/红外成像光谱仪 (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS) 数据研究内华达州 Cuprite 地区的中新世晚期泥质蚀变, 精细刻画了该地区的热液蚀变过程, 并识别出早期蒸汽加热热液事件。Halley 等<sup>[8]</sup>描述了一个与白云母化学成分变化相关的光谱模型, 用于刻画一个理想化的斑岩型矿床的温度和 pH 值剖面。Kokaly 等<sup>[9]</sup>对阿拉斯加 orange hill 斑岩型铜矿床综合应用实验室野外和成像光谱仪数据进行了从微米到千米尺度的矿物信息提取。Hoefen 等<sup>[10]</sup>收集了多尺度成像光谱仪数据, 包括钻孔岩芯、野外和航空高光谱数据, 对黄石国家公园热液系统进行了从微米到米级成像分辨率的地下和地表蚀变矿物填图。

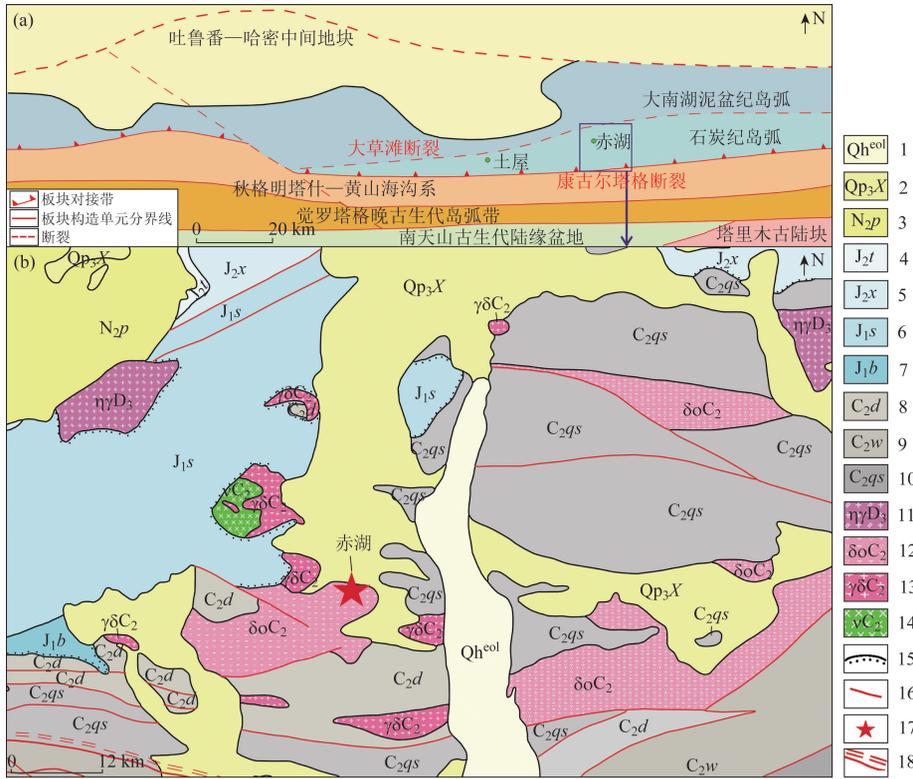
受历史上装备和数据源限制, 国内并未系统性地开展西部地区高光谱遥感调查工作, 找矿急需的蚀变填图工作程度很低, 制约了找矿突破<sup>[11]</sup>。从 2018 年起, 我国陆续发射了高分五号卫星 (GF-5)、资源一号 02D 星 (ZY1-02D)、资源一号 02E 星 (ZY1-02E)、高光谱综合观测卫星 (GF-5A)、高光谱观测卫星 (GF-5B) 等一系列技术参数达到国际领先水平的高光谱遥感卫星, 为新一轮找矿突破战略行动提供了海量优质高光谱遥感数据, 大规模地在我国中西部地区重要成矿带推广国产高光谱遥感卫星矿物填图工作的时机已经成熟。但在目前情况下, 针对国产高光谱遥感卫星矿物填图应用的相关软件工具和数据产品仍难以见及, 典型热液矿床的高光谱遥感矿床定位模型与预测技术方法研究亦较匮乏, 直接限制了国产高光谱遥感卫星在新一轮找矿突破战略行动中的应用。作者团队开发并开源了面向国产高光谱遥感卫星的矿物填图软件工具包 GeoAHSI, 使用 GF-5 高光谱成像仪 (Advanced Hyperspectral Imager, AHSI) 影像作为遥感数据源, 结合野外采样分析, 对赤湖铜钼矿床进行了地表蚀变特征研究, 揭示了其蚀变空间分布规律, 同时初步验证了 GeoAHSI 和 GF-5 AHSI 影像在斑岩型矿床蚀变填图中的有效性, 研究旨在进一

步推动国产高光谱遥感卫星支撑新一轮找矿突破战略行动。

## 1 区域背景

赤湖铜钼矿床地处塔里木板块与准噶尔板块碰撞对接带上, 位于大草滩断裂与康古尔塔格大断裂所夹持的近 EW 向展布的石炭纪增生拼贴岛弧带中 (图 1)。该岛弧为著名的斑岩型铜成矿带, 形成土屋、延东、赤湖、灵龙等中-大型铜矿床 (点), 其成矿过程与岛弧形成过程中火山机构和岩浆活动有关, 含矿浅成岩和超浅成岩为次火山岩相。区域上与斑岩型铜 (钼) 矿化关系最密切的地层为石炭系, 由海陆交互的钙碱性岛弧型火山岩及内源碎屑岩组成, 属准噶尔板块南缘扩张增生产物。其中最重要的地层为脐山组 ( $C_2qs$ ), 一套海相中基性火山岩-碎屑岩建造, 包括 3 个非正式的亚组, 分布在康古尔塔格断裂与大草滩断裂之间, 地层南老北新。第一亚组由内源碎屑岩、沉凝灰岩组成, 局部夹少量生物灰岩、砂砾岩等, 发育条带状糜棱岩; 第二亚组主要由中基性火山熔岩组成, 局部夹少量碎屑岩和火山碎屑岩, 火山岩岩石系列以钙碱性为主, 碱性和拉斑系列次之, 具过渡特征, 岩石组合为玄武岩-安山岩-英安岩; 第三亚组紧邻大草滩断裂分布, 岩石组合为灰绿色内源碎屑岩夹沉凝灰岩、玄武岩、火山角砾岩及生物灰岩等。侵入于脐山组 ( $C_2qs$ ) 第二亚组内部及其与第三亚组接触带中的闪长玢岩和斜长花岗斑岩是寻找斑岩型铜 (钼) 矿床的主要目标岩体, 赤湖、土屋、延东斑岩型铜 (钼) 矿床即分布其中<sup>[12-13]</sup>。

区内广泛发育钙碱系列同熔造山花岗岩, 主要侵入于石炭系脐山组 ( $C_2qs$ ) 中, 与地层同构造线方向呈线形跳跃式分布。岩体形态多呈近 EW 向不规则的长条状、透镜状, 与主构造线方向基本一致。线形构造比较复杂, 主要为近 EW 向压扭性断裂及与之有关的韧性剪切变形带, 其次为 NW 向和 NE 向次级走滑断裂。此外, 在脐山组 ( $C_2qs$ ) 中, 还大量发育中酸性浅成岩和次火山岩体, 该类岩体在本区常常是寻找斑岩型铜矿床的目标地质体<sup>[14-15]</sup>。



1. 全新统风成沙; 2. 上新统冲洪积层; 3. 上新统葡萄沟组泥岩-砂岩建造; 4. 中侏罗统头屯河组泥岩-砂岩建造; 5. 中侏罗统西山窑组砂岩-砾岩夹煤层建造; 6. 下侏罗统三工河组泥质砂岩-粉砂岩夹煤层建造; 7. 下侏罗统八道湾组含薄煤层碎屑岩建造; 8. 上石炭统底坎儿组杂砂岩-灰岩建造; 9. 上石炭统梧桐窝子组岩屑凝灰岩-粉砂岩-灰岩建造; 10. 上石炭统脐山组细碧岩-角斑岩建造; 11. 二长花岗岩; 12. 石英闪长岩; 13. 花岗闪长岩; 14. 辉长岩; 15. 角度不整合接触; 16. 断裂; 17. 赤湖铜铅矿; 18. 韧性剪切带

图1 赤湖地区大地构造位置(a)及研究区地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic location of Chihu area (a) and geological sketch of the study area (b)

## 2 研究方法

### 2.1 遥感数据和反射率标定

本研究使用了一景 2019 年 7 月 28 日获取的 GF-5 AHSI 影像(序列号: L10000052137), AHSI 影像具有 330 个离散、狭窄(VNIR: ~0.004 μm; SWIR: ~0.008 μm)、近似均匀分布的光谱通道, 连续覆盖(0.39, 2.52] μm 电磁波谱区域。AHSI 影像的空间分辨率为 30 m, 幅宽 60 km。在进行矿物光谱分析之前, 需要对 AHSI 影像进行辐射定标和大气校正, 得到地表反射率影像。首先, 对 GF-5/ZY-1 AHSI 影像(L1A 级)要剔除 1 400 nm 和 1 900 nm 的水汽吸收带及毗邻区低信噪比波段, 然后, 进行条带均衡化处理及大气校正, 得到地表反射率影像(L2A 级)<sup>[16]</sup>。

本研究使用“全局去条纹”方法来去除影像中的条带噪声并抑制 smile 效应。将条纹噪声 DN 值

参照整幅图像 DN 值的标准差与均值进行线性拉伸, 具体计算方法为

$$D_C = \alpha D_0 + \beta \quad (1)$$

$$\alpha = \sigma_N / \sigma_{iN} \quad (2)$$

$$\beta = m_{iN} - \alpha m_N \quad (3)$$

$$D_C = \sigma_N (D_0 - m_N) / \sigma_{iN} + m_{iN} \quad (4)$$

式中:  $D_C$  为去噪后的像元 DN 值;  $D_0$  为原始 DN 值;  $\beta$  为偏移值;  $\alpha$  为校正增益系数;  $\sigma_N$  和  $m_N$  分别表示整幅图像在第  $N$  波段 DN 值的标准差和平均值;  $\sigma_{iN}$  和  $m_{iN}$  分别表示图像第  $N$  波段第  $i$  列的标准差和平均值。以上均为无量纲。

使用 GF-5 AHSI 影像自带的辐射定标文件对上述经去条纹处理的影像执行辐射定标。之后, 使用 ENVI 自带的大气校正模型 FLAASH 来做大气校正。FLAASH 通过与标准参考大气模型对比来独立地估算每个像素的水汽含量, 并逐像素消除大气中水分子吸收对光谱带来的影响, 它同时也会量化和消除大气中的瑞利散射和气溶胶散射的影响

(路径辐射)以及校正传感器对太阳光谱的响应<sup>[17]</sup>。本研究用赤湖铜钼矿床及周边区域的GF-5 AHSI 地表反射率样例数据(2 000,2 500] nm 谱范围可从 GeoAHSI Github 仓库下载。

### 2.2 光谱分析和实地验证

本文使用 GeoAHSI 1.0 来对 AHSI 数据进行光谱分析。GeoAHSI 是笔者团队使用开源地理空间信息技术开发的一个面向国产高光谱遥感卫星矿物填图应用的纯 Python 工具包(https://github.com/leecugb/GeoAHSI),它继承了由美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)和行星科学研究所(Planetary Science Institute, PSI)的光谱学家以及合作者共同开发了30多年的Tetracorder系统的理论基础和算法,并吸纳了Kokaly等<sup>[6]</sup>对Tetracorder所做的部分简化。Tetracorder 矿物识别系统已在美国西南部的多个荒漠地区通过机载可见红外成像光谱仪(Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS-C)开展矿物填图应用得到验证。此外,Tetracorder 系统在众多环境调查领域也显示出其有效性,证明了该方法的广泛适用性<sup>[18]</sup>。

Tetracorder 系统通过将遥感观测的光谱直接与光谱库里大量特征明确的样本的高质量光谱进行比较(通过基于最小二乘法的形状-匹配算法)来识别其物质成分。Tetracorder 系统进行了几项创新来保证精度和性能的最优化:一是光谱识别算法仅仅使用了光谱吸收特征区间(尤其是诊断吸收特征),而不是整体波谱,大大降低了影像噪声的影响,提高了在复杂场景中识别特定物质成分的鲁棒性;二是引入竞争机制,通过比较遥感观测波谱与各参考物质波谱的相似性来确定最佳识别对象,避免了设置光谱相似度阈值带来的不确定性;三是引入吸收特征的反射率、局部斜率和吸收深度等参数作为约束,消除光谱形状巧合导致的识别歧义,降低虚假检测;四是根据光谱机理不同,采取分区分析的策略,使得它在不执行光谱解混运算的情况下支持多物质识别;五是它允许返回未识别的结果。上述特性使得它在高光谱矿物填图的大范围工程化应用方面具有天然优势,即优良的抗噪声能力、自动化(无需人工干预)和填图一致性。为了支持上述创新,Tetracorder 系统使用了一系列按照专家规则运行的算法,并且支持用户根据应用自定义专家规则,甚至为用户提供了开发新算法的接口。

GeoAHSI 的输入数据为经大气校正得到的地表反射率影像(ENVI Header 格式),我们称其为 Image Cube( $m \times n \times k$  矩阵, $m$  代表行数, $n$  代表列数, $k$  代表波段数)。矿物填图分为3个步骤:首先,通过将 Image Cube 与从 USGS Spectral Library Version 7 中筛选的参考矿物光谱基于专家规则(https://github.com/leecugb/GeoAHSI/blob/main/expert\_rules.json)进行匹配来计算它们的诊断光谱特征在 Image Cube 中的信号强度(相关性+吸收深度),得到 Fit Cube( $m \times n \times s$  矩阵, $s$  代表参考矿物光谱数量)和 Depth Cube( $m \times n \times s$  矩阵);然后,计算 Fit Cube 中沿第三维度(维数  $s$ )最大值对应的索引,降维得到 Mineral Map( $m \times n$  矩阵),并使用该索引检索 Depth Cube 得到 Depth Map( $m \times n$  矩阵);最后,根据预设的颜色表,(https://github.com/leecugb/GeoAHSI/blob/main/colors\_rules.json)为 Mineral Map “赋色”,生成 Color-Coded Map,在赋色的过程中,也可以使用 Depth Map 经拉伸处理作为明度分量,从而呈现更加细腻的填图效果<sup>[19]</sup>。流程图见图2。

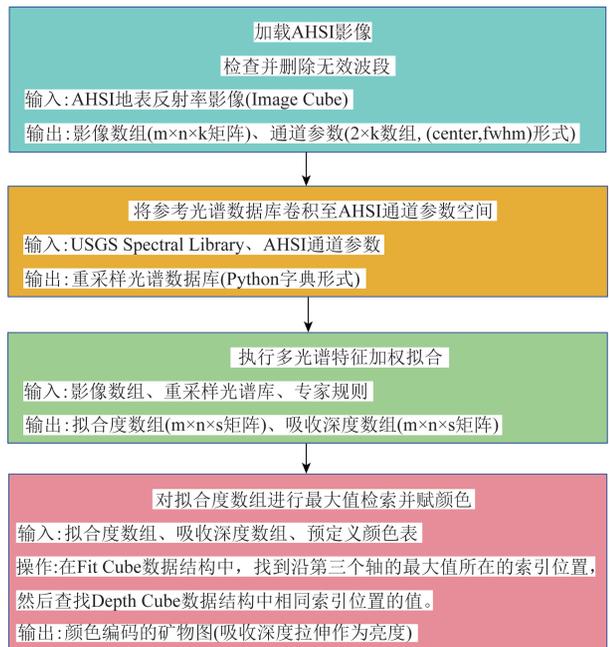


图2 GeoAHSI 基本处理流程

Fig.2 Basic processing flow of GeoAHSI

需要说明的是,GeoAHSI 仅识别在像素光谱中占主导的矿物成分,也就意味着只有当一种物质的光谱不被其他光谱完全掩盖时,才可能通过光谱分析识别出来。因此,在一条影像光谱中识别出占主导的矿物,并不意味着其他物质成分不存在该像素

中。另外,尽管 GeoAHSI 支持光谱吸收深度作为亮度分量的赋色方案,但是这种渐变拉伸容易引起混淆,因此本文使用每种参考矿物被分配一种离散的单一颜色表示方案。

填图结果通过野外查证、样本的实验室光谱分析和 AHSI 光谱与标准光谱库中参考光谱的交互对比来验证。从赤湖铜钼矿床蚀变区采集了 6 个 GPS 定位的土壤样本,使用 iSpecField - WNIR 光谱仪(光谱范围:(350,2 500] nm,采样间隔:1 nm,采样口径:6 mm)进行分析。当野外查证或实验室光谱分析识别出矿物填图中的错误后,重新审核并修改系统中的专家规则<sup>[20-22]</sup>。

### 2.3 矿物成分填图

除了矿物填图外,矿物的短波红外(Shortwave infrared, SWIR)吸收特征位置的细微变化可以提供类质同象成因的成分变化的证据<sup>[23]</sup>。前人的代表

性研究工作包括用于表征变质历史和矿床的地质与分带特征的白云母 Al 含量或不同成分绿泥石的光谱填图<sup>[24]</sup>。白云母 2 200 nm Al - OH 吸收特征的波长位置偏移与其晶体结构中呈八配位的 Al 含量有关。由于 Tschermak 置换 ( $Al^{oct} + Al^{tet} \leftrightarrow (Fe, Mg, Mn)^{oct} + Si^{tet}$ ),白云母 2 200 nm Al - OH 吸收波长(读取光谱数据并计算局部最小值对应波长,记为  $wv2200$ )与  $Si^{tet}$  含量呈系统性的正比关系<sup>[25]</sup>。这种关系可用于构建热液矿床的温度和 pH 空间分布模型。本研究从 USGS 光谱数据库(Spectral Library Version 7)中筛选了 9 个白云母矿物样本,附有 BeckTM 或 Nicolet 测量波谱和 X 射线荧光光谱法化学成分分析数据,详情见表 1。读取这些白云母样本的光谱数据并计算 2 200 nm Al - OH 吸收特征的中心波长(记为  $wv2200$ ),发现与其  $Al_2O_3$  含量(重量百分比)之间存在显著的负线性相关性(图 3)。

表 1 USGS 波谱库白云母样本

Tab.1 Muscovite samples from USGS spectral library

样本 ID	光谱仪	测量类型	产地	最初捐赠者	现状
GDS114	BECK	AREF	Santa Catalina Mountains, Arizona	Jim Post	*
GDS116	BECK	AREF	Tanzania	C. V. Clemency, SUNY	*
GDS111	BECK	AREF	Guatemala	Jim Post	*
GDS113	NIC4	RREF	Brazil	C. V. Clemency, SUNY	*
GDS117	NIC4	RREF	Isinglass Mine, Siskiyou Co., CA	Jim Post	*
GDS118	BECK	AREF	Capitan Mine, Petaca District, NM	Jim Post	*
GDS108	NIC4	RREF	Methulu, Ontario	Jim Crowley, USGS Reston	*
GDS120	NIC4	RREF	Pegma Mine, Inyo Co., California	Jim Post	*
GDS119	BECK	AREF	Mt. Alamo Mine, Ventura Co. CA	Jim Post	*

注:“\*”表示美国地质调查局丹佛光谱实验室(USGS Denver Spectroscopy Laboratory)。

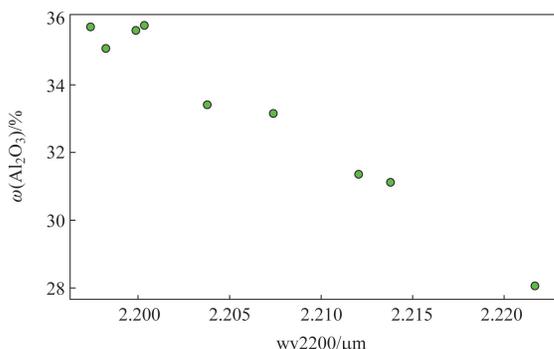


图 3 白云母 2 200 nm Al - OH 吸收特征的中心波长与其  $Al_2O_3$  含量之间关系

Fig.3 Relationship between the wavelength of muscovite 2 200 nm Al - OH absorption characterization and  $Al_2O_3$  abundance

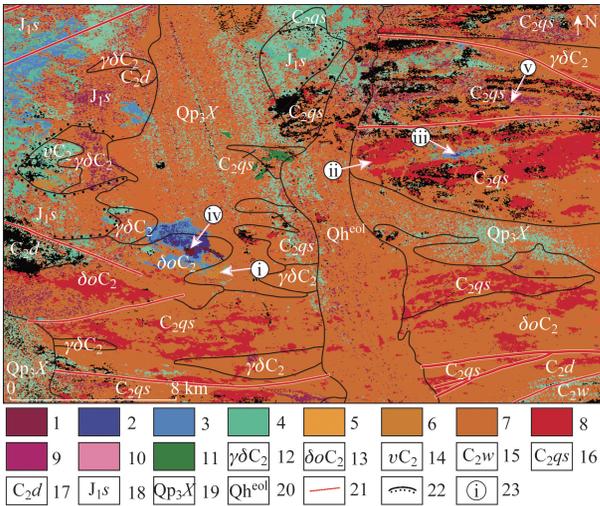
通过 GeoAHSI 识别出在 AHSI 影像光谱中由白云母或伊利石占主导的像素,并计算这些像

素中的 2 200 nm Al - OH 吸收特征的位置。在计算中,对过去连续统处理的白云母 2 200 nm 吸收特征内的 3 个通道(具有最小反射率的通道以及两侧各一个通道)做抛物线拟合。抛物线的对称轴波长用于对该特征的中心波长位置建模<sup>[26-31]</sup>。

## 3 研究结果

### 3.1 GF - 5 AHSI 地表矿物填图

GF - 5 AHSI 在研究区约 90% 的面积产生了可解释的与矿物相关的光谱特征(图 4,图 5)。其他 10% 像素因多方面原因而未分类(呈黑色像素),包括因陡峭的地形或云层的阴影导致的光照不足,对绿泥石/绿帘石的强光谱约束而导致遗漏,或水体等



1. 叶腊石+明矾石; 2. 高岭石+叶腊石+明矾石; 3. 高岭石+白云母; 4. 蒙脱石; 5. 富铝白云母; 6. 中铝白云母; 7. 贫铝白云母; 8. 绿帘石/绿泥石; 9. 绿泥石+白云母; 10. 明矾石; 11. 方解石; 12. 花岗岩闪长岩; 13. 石英闪长岩; 14. 辉长岩; 15. 上石炭统梧桐窝子岩组; 16. 上石炭统脐山组; 17. 上石炭统底坎儿组; 18. 下侏罗统三工河组; 19. 上更新统冲洪积层; 20. 全新统风成沙; 21. 断裂; 22. 角度不整合接触; 23. AHSI 光谱取样点及编号

图4 赤湖地区 GF-5 AHSI 地表矿物填图

Fig.4 Surface mineral mapping based on GF-5 AHSI in Chihu area

因素。图4地表矿物分布展示了研究区光谱特征的复杂横向变化。脐山组( $C_{2qs}$ )是研究区出露面积最大的地层,也是区域上重要的控矿地层。整体上,库姆塔格沙垄以东的脐山组( $C_{2qs}$ )通过白云母、绿泥石+白云母、绿泥石/绿帘石的条带韵律组合清晰地刻画了其内部岩相的空间变化和地层走向。在其内部夹有由高岭石+叶腊石、高岭石+白云母、蒙脱石组成的大致呈同心环状分带分布的蚀变晕带顺 NEE 向延展,为夹璧山金矿的热液蚀变带,与赤湖铜铅矿矿化成因不同,不做过多论述。在研究区南部,脐山组( $C_{2qs}$ )以强绿泥石/绿帘石条带近东西向横贯研究区,呈现较好的空间连续性。向北,由于下侏罗统三工河组( $J_{1s}$ )和上更新统冲洪积层( $Qp_3X$ )的覆盖,脐山组( $C_{2qs}$ )的白云母、绿泥石+白云母、绿泥石/绿帘石条带并未延伸至库姆塔格沙垄以西。相反,在研究区中部脐山组( $C_{2qs}$ )出现了与库姆塔格沙垄以东完全不同的矿物相-方解石(图4,图6),经野外查证为灰岩,含大量化石碎片。

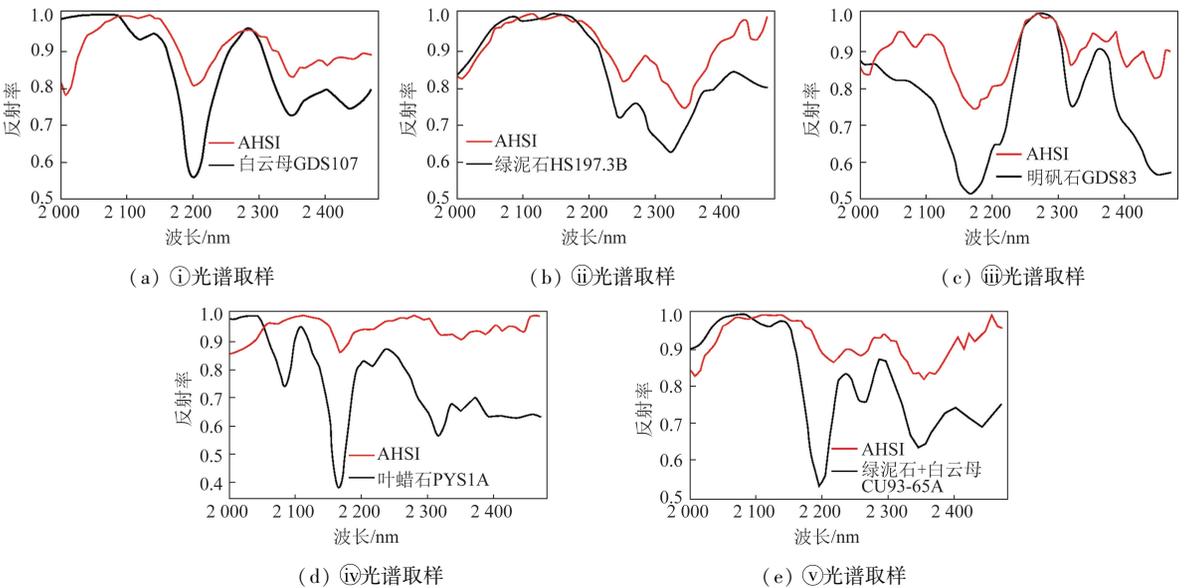


图5 赤湖地区典型矿物 GF-5 AHSI 影像光谱与 USGS 光谱库参考光谱对比

Fig.5 Comparison between GF-5 AHSI spectrum and reference spectrum from USGS spectral library of typical minerals in Chihu area

区内华力西中期酸性侵入岩较为发育,且是斑岩型铜矿化的主要控矿因素。与以细碧角斑岩建造为特色的脐山组( $C_{2qs}$ )不同,区内中酸性岩体以白云母占主导(图4)。当然,也可以看到大量的

带(团)状聚集的绿帘石/绿泥石,可能与岩体内复杂的岩相变化有关。在由白云母、绿帘石/绿泥石、方解石3类矿物的光谱吸收深度组成的假彩色合成图(图7)上,可以进一步增强这种岩相变化信息。

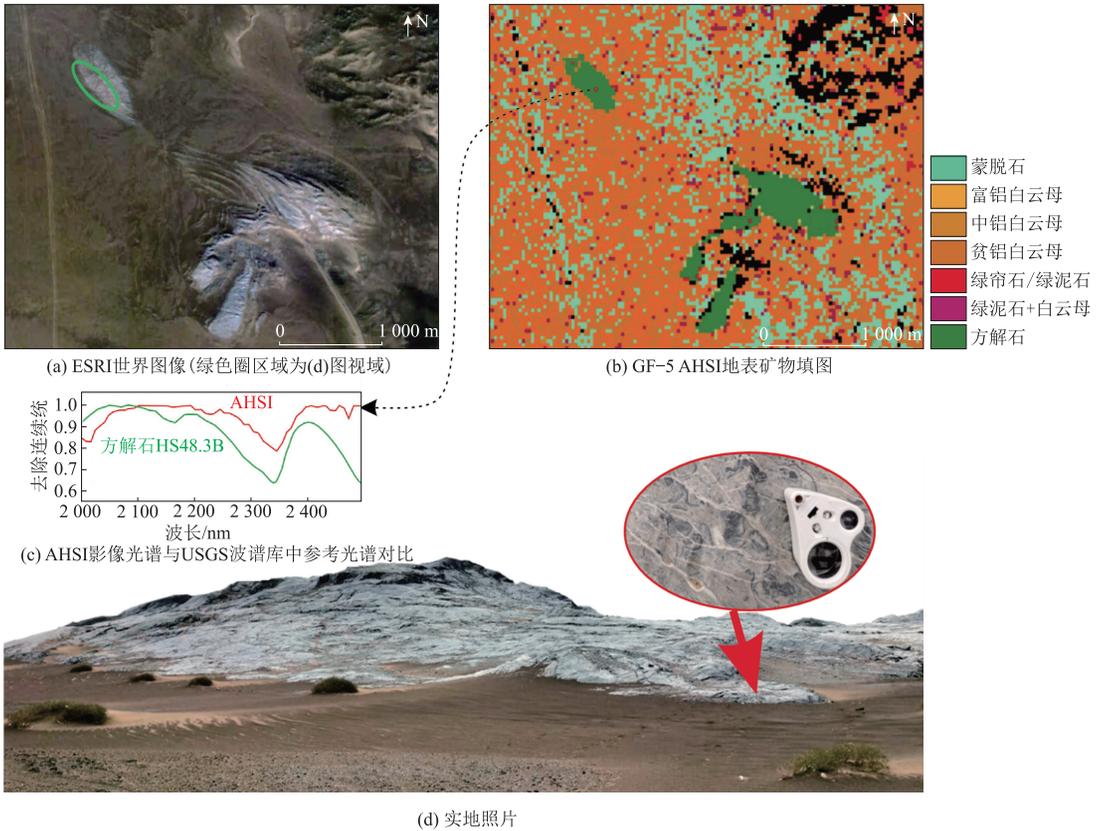


图6 脐山组 (C<sub>2qs</sub>) 灰岩 AHSI 光谱特征

Fig. 6 AHSI spectral characteristics of the limestone in Qishan Formation (C<sub>2qs</sub>)

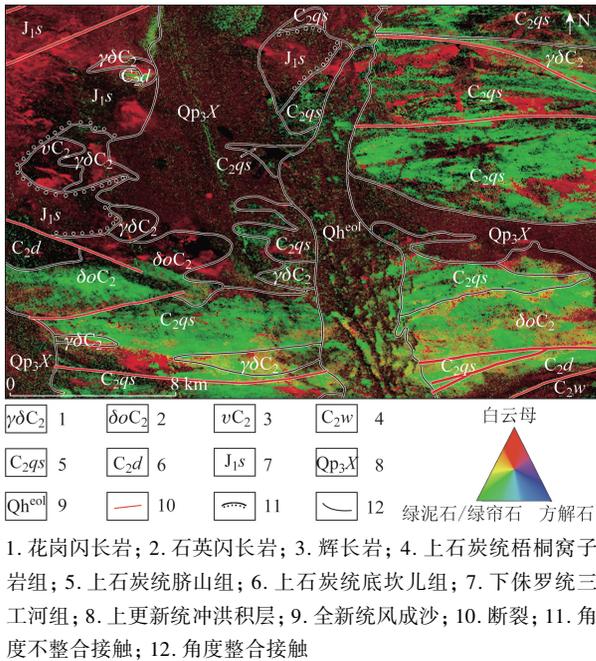


图7 白云母、绿帘石/绿泥石、方解石3类矿物的光谱吸收深度组成的假彩色合成图

Fig. 7 False color composite diagram of spectral absorption depth of the three types of minerals: muscovite, epidote/chlorite and calcite

赤湖铜矿区以叶腊石 + 明矾石、高岭石 + 叶腊石、高岭石 + 白云母构成的若干同心环状蚀变晕带最为醒目(图8)。蚀变晕带以叶腊石 + 明矾石为核心,向外逐渐转变成高岭石 + 叶腊石和高岭石 + 白云母。从分布形态来看,蚀变带明显受 NW 向构造控制。

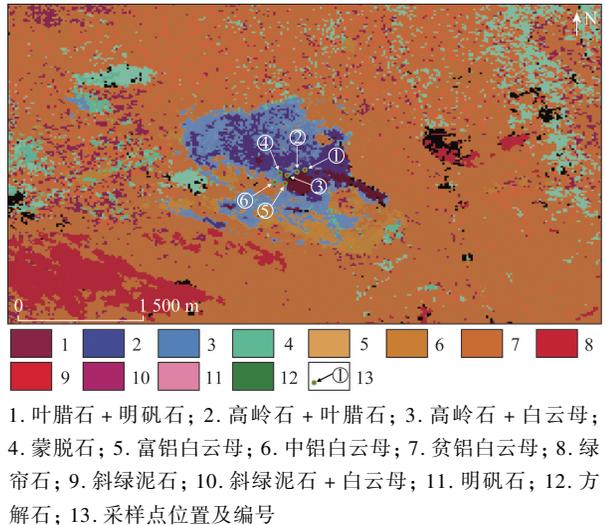


图8 赤湖铜钼矿区 GF-5 AHSI 地表矿物填图  
Fig. 8 Surface mineral mapping based on GF-5 AHSI in Chihu copper - molybdenum deposit

图9显示了白云母 2 200 nm Al - OH 吸收波长的空间变化(吸收波长和吸收深度分别经归一化处理作为色相和亮度分量)。很容易观察到,围绕叶腊石 + 明矾石和高岭石 + 叶腊石组成的核心蚀变带,白云母 2 200 nm Al - OH 吸收波长有朝短波

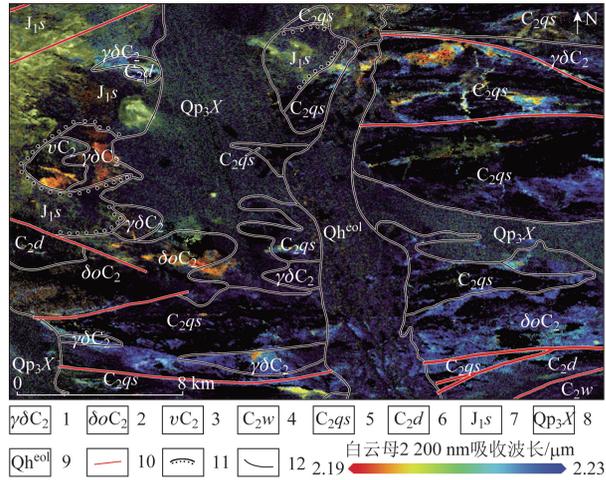


图9 基于 GF - 5 AHSI 数据提取的白云母 2 200 nm 吸收波长分布图

Fig.9 Muscovite 2200 nm absorption wavelength distribution extracted from GF - 5 AHSI data

方向偏移的倾向,揭示了赤湖铜钼矿床对富铝白云母的偏好特征。

### 3.2 野外样品 SWIR 分析

图 10 显示了在赤湖铜钼矿床主核心蚀变带采集的 6 个土壤样本(采样位置及编号见图 8)的实验室光谱,以及对对应位置处的 AHSI 像元光谱。AHSI 光谱容易根据蚀变带类型进行分组:光谱②、⑤代表叶腊石 + 明矾石核心蚀变带,光谱③、④代表高岭石 + 叶腊石/明矾石过渡带,光谱①、⑥代表高级泥化核心边缘的高岭石 + 白云母带,光谱⑥代表了可能的青磐岩化带。实验室光谱和 AHSI 光谱在总体上保持了逻辑上的一致性。当然,由于视场的巨大差异,也存在有显著差异的情况。与 AHSI 30 m<sup>2</sup> × 30 m<sup>2</sup> 的地面瞬时视场 (Instantaneous field of view on the ground, GIFOV) 相比, iSpecField - WNIR 光谱仪的光斑尺寸小(6 mm),可以减少面积混合,从而提高光谱纯度。实验室光谱②中 1.43 μm、1.49 μm 对应的 OH 吸收特征,1.76 μm 对应的 OH/H<sub>2</sub>O/S - O 合频振动吸收和 2.3 μm 对应的 Al - OH 吸收特征清楚地揭示了明矾石的存在,1.86 μm 对应的 OH/H<sub>2</sub>O/S - O 合频振动反映了黄钾铁矾的存在。实验室光谱③、④中出现了强烈的石膏光谱特征,同时 1.41 μm、2.20 μm 处的 OH/Al - OH 吸收带显示出高岭石/伊利石的存在。

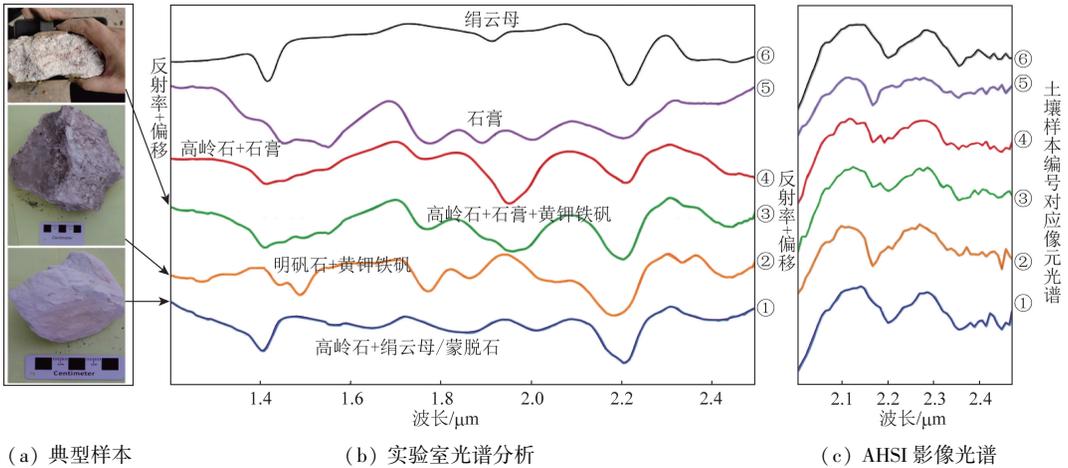


图 10 样本实验室光谱与 AHSI 光谱对比分析

Fig.10 Comparative analysis of laboratory spectrum and AHSI spectrum for the collected samples

## 4 讨论

### 4.1 GF - 5 AHSI 地表矿物填图辅助区域地质填图

从区域地质填图目的来看,GF - 5 AHSI 地表

矿物填图的效果参差不齐。近 EW 向延伸的不同矿物相(白云母、绿泥石 + 白云母、绿泥石/绿帘石)条带刻画了伴有矿物学变化的石炭系海陆交互相火山 - 碎屑岩建造的横向连续展布。在库姆塔格沙垄以西、赤湖铜钼矿以北,由于下侏罗统三工河

组( $J_1s$ )和上更新统冲洪积层( $Q_{p_3X}$ )的覆盖,矿物填图结果并未呈现系统性的变化规律,这与风成沙的浅覆盖及这些地质单元含有相同的光谱可识别矿物有关。由于碳酸盐矿物的强光谱吸收(2.30, 2.35]  $\mu\text{m}$ ,在研究区中部准确地识别出了脐山组( $C_2qs$ )的灰岩层位。对于研究区内的中酸性侵入岩,矿物填图以白云母占主导,也可以看到大量的带(团)状聚集的绿帘石/绿泥石,可能与岩体内复杂的岩相变化、构造和热液蚀变活动有关。

研究区南部的石炭纪花岗闪长岩体、石英闪长岩体顺围岩石炭系走向呈条带状分布,其 AHSI 填图结果几乎完全融入围岩的韵律性矿物条带组合中。总的来说,AHSI 矿物填图结果并不能直接对应区域尺度上的单个地质填图单元,意味着它只能用于辅助区域地质填图。

#### 4.2 矿床尺度精细蚀变填图

许多与热液活动有关的蚀变矿物在(2.0, 2.5]  $\mu\text{m}$  光谱区间表现出诊断吸收特征。这些矿物往往在蚀变最强烈的中心区域呈现大致同心环状分带分布规律。一般来说,离中心带越远,蚀变强度越低,并依次产生不同的蚀变矿物,如图8所示。由于地质结构的复杂性,最终地表呈现的蚀变分带通常并不完整,但总体趋势通常可以在野外现场观察到。AHSI 在赤湖铜钼矿床探测到了近乎完美的蚀变晕带,它识别出了多个受 NW 向构造控制的叶腊石+明矾石核心蚀变带,向外逐渐转变成高岭石+叶腊石和高岭石+白云母,不同矿物相大致呈同心环状分带分布。

#### 4.3 白云母 2 200 nm 吸收波长与 Al 成分

在斑岩型矿化系统中,与绢云母 Al-OH 键能相对应的 2 200 nm 吸收特征的中心波长(wv2200)很重要。在绢云母(包括白云母和伊利石)中,当 Al 被(Fe、Mg)+Si 置换时,wv2200 从白云母的 2 195 nm 渐变过渡至多硅白云母的 2 220 nm。围绕斑岩型铜矿体,随着流体 pH 值的降低,绢云母-绿泥石蚀变岩石中的白云母的 2 200 nm 吸收波长朝短波方向移动。本研究基于 GF-5 AHSI 数据提取的白云母 2 200 nm 吸收波长分布图(图9)揭示了类似的情况:接近核心蚀变带,白云母 2 200 nm Al-OH 吸收波长有朝短波方向偏移的倾向。需要说明的是,在赤湖铜钼矿床识别出一片受 NW 向断裂约束的富铝白云母带,正是目前勘探的赤湖铜钼矿床的主体范围。

## 5 结论

(1)综合矿物识别及野外验证结果表明,基于 GeoAHSI 填图工具,应用国产高光谱遥感卫星 GF-5 AHSI 影像数据可成功实现斑岩型矿化系统的蚀变矿物填图工作。由 AHSI 提取的白云母、绿泥石/绿帘石、碳酸盐和黏土的分布并不能严格区分传统的地质填图单元,但其对热液蚀变矿物及其类质同象的精细探测能力可以帮助识别潜在的(岩浆)热液蚀变区域。

(2)在赤湖铜钼矿床进行的填图工作精确刻画了该区域的蚀变分带特征:蚀变核心区域发育多个受 NW 向构造控制的叶腊石+明矾石高级泥化带,向外逐渐转变成高岭石+叶腊石和高岭石+白云母,不同矿物相大致呈同心环状分带分布,形成了近乎完美的“牛眼”蚀变。围绕赤湖铜钼矿高级泥化带,白云母 2 200 nm Al-OH 吸收波长有朝短波方向偏移的倾向,当前勘查的赤湖铜钼矿床的主体即位于一片受 NW 向断裂约束的富铝白云母带上。

(3)本研究深化了对赤湖铜钼矿床蚀变规律的认识,对建立区域斑岩型矿化高光谱识别模型具有一定指导意义,为推动国产高光谱遥感卫星在新一轮找矿突破战略行动中的应用提供了技术参考。

#### 参考文献(References):

- [1] Henderson F M, Lewis A J. Manual of Remote Sensing[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 1998.
- [2] Thompson A J B, Hauff P L, Robitaille A J. Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy[J]. SEG Discovery, 1999(39): 1-27.
- [3] Ben-Dor E, Inbar Y, Chen Y. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400~2 500 nm) during a controlled decomposition process[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(1): 1-15.
- [4] Clark R N, Swayze G A, Livo K E, et al. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS tetracorder and expert systems [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(E12): 5131.
- [5] Dalton J B, Bove D J, Mladinich C S. Remote Sensing Characterization of the Animas River Watershed, Southwestern Colorado, by AVIRIS Imaging Spectroscopy[R]. Reston: USGS, 2005.
- [6] Kokaly R F. Processing Routines in IDL for Spectroscopic Measurements (Installation Manual and User's Guide, Version 1.0) [R]. Reston: USGS, 2011.
- [7] Swayze G A, Clark R N, Goetz A F H, et al. Mapping advanced argil-

lic alteration at Cuprite, Nevada, using imaging spectroscopy[J]. *Economic Geology*, 2014, 109(5): 1179 – 1221.

[8] Halley S, Dilles J H, Tosdal R M. Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits [J]. *SEG Discovery*, 2015(100): 1 – 17.

[9] Kokaly R F, Clark R N, Swayze G A, et al. USGS Spectral Library Version 7[R]. Reston: USGS, 2017: 1 – 61.

[10] Hoefen T M, Finn C A, Bedrosian P A, et al. High – resolution imaging of Yellowstone’s geothermal system from micrometres to metres [J]. *Nature*, 2021, 12(2): 1 – 18.

[11] 闫柏琨, 董新丰, 王喆, 等. 航空高光谱遥感矿物信息提取技术及其应用进展——以中国西部成矿带调查为例 [J]. *中国地质调查*, 2016, 3(4): 55 – 62.

Yan B K, Dong X F, Wang Z, et al. Mineral information extraction technology by airborne hyperspectral remote sensing and its application progress: An example of mineralization belts of western China [J]. *Geological Survey of China*, 2016, 3(4): 55 – 62.

[12] 杜斌, 董涛, 董红国, 等. 蚀变矿物填图技术在斑岩型铜矿找矿勘查中的应用——以滇西北香格里拉松诺矿床为例 [J]. *地质与勘探*, 2021, 57(4): 879 – 894.

Du B, Dong T, Dong H G, et al. Application of alteration mineral mapping in porphyry copper deposits: A case study of the Songnuo deposit in the Shangrila region, Northwest Yunnan [J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(4): 879 – 894.

[13] 翟建军. 斑岩型铜矿找矿中围岩蚀变的应用 [J]. *世界有色金属*, 2021(19): 102, 104.

Zhai J J. Application of wall rock alteration in prospecting for porphyry copper deposits [J]. *World Nonferrous Metals*, 2021(19): 102, 104.

[14] 董新丰, 甘甫平, 李娜, 等. 高分五号高光谱影像矿物精细识别 [J]. *遥感学报*, 2020, 24(4): 454 – 464.

Dong X F, Gan F P, Li N, et al. Fine mineral identification of GF – 5 hyperspectral image [J]. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 2020, 24(4): 454 – 464.

[15] 甘甫平, 王润生, 马乃凡. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(2): 445 – 454.

Gan F P, Wang R S, Ma A N. Spectral identification tree (sit) for mineral extraction based on spectral characteristics of minerals [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(2): 445 – 454.

[16] 孙雨, 刘家军, 翟德高, 等. 基于资源一号 02D 卫星高光谱数据的甘肃头吊泉—南大滩地区蚀变矿物填图及金矿化带识别 [J]. *地质与勘探*, 2022, 58(2): 399 – 409.

Sun Y, Liu J J, Zhai D G, et al. Alteration minerals mapping and identification of gold mineralization belt based on ZY1 – 02 D hyper – spectral data in the Toudiaoquan – Nandatan area, Gansu province [J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(2): 399 – 409.

[17] 任广利, 杨军录, 杨敏, 等. 高光谱遥感异常提取在甘肃北山金滩子—明金沟地区成矿预测中的应用 [J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(4): 765 – 776.

Ren G L, Yang J L, Yang M, et al. Application of hyperspectral remote sensing anomaly information on metallogenic prediction in the Jintanzi – Mingjingou area of Beishan, Gansu [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(4): 765 – 776.

[18] Livo K E, Clark R N. *The Tetracorder User Guide: Version 4.4* [R]. Reston: USGS, 2014.

[19] Clark R N, Swayze G A, Wise R A, et al. USGS Digital Spectral Library Splib06a [R]. Reston: USGS, 2007.

[20] 徐大兴, 杨彪, 邵兆刚, 等. 哈达门沟金矿蚀变分带的高光谱分析及找矿意义 [J]. *自然资源遥感*, 2023, 35(1): 123 – 131.

Xu D X, Yang B, Shao Z G, et al. A hyperspectral analysis of alteration zoning in the Hadamengou gold deposit and its significance for ore prospecting [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2023, 35(1): 123 – 131.

[21] 纪宏伟, 孙敬博. 新疆哈密地区赤湖铜钼矿床特征和成矿时代探讨 [J]. *矿物学报*, 2011, 31(增刊 1): 595 – 596.

Ji H W, Sun J B. Characteristics and metallogenic era of the Chihu copper molybdenum deposit in Hami, Xinjiang [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(S1): 595 – 596.

[22] 龚林, 陈华勇, 肖兵, 等. 新疆赤湖—福兴铜矿区角闪石矿物化学特征及其地质意义 [J]. *地球化学*, 2018, 47(2): 149 – 168.

Gong L, Chen H Y, Xiao B, et al. Mineral chemistry of hornblende in the Chihu – Fuxing copper district, Xinjiang, and its geological significance [J]. *Geochimica*, 2018, 47(2): 149 – 168.

[23] Harraden C A. Shortwave infrared spectral analysis of hydrothermal alteration associated with the pebble porphyry copper – gold – molybdenum Deposit, Iliamna, Alaska [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133(1): 210 – 220.

[24] van der Meer F D, van der Werff H M A, van Ruitenbeek F J A. Potential of ESA’s sentinel – 2 for geological applications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 148: 124 – 133.

[25] Yang K, Huntington J F, Gemmill J B, et al. Variations in composition and abundance of white mica in the hydrothermal alteration system at Hellyer, Tasmania, as revealed by infrared reflectance spectroscopy [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 108(2): 143 – 156.

[26] 陈富文, 李华芹, 陈毓川, 等. 东天山土屋—延东斑岩铜矿田成岩时代精确测定及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2005, 79(2): 256 – 261.

Chen F W, Li H Q, Chen Y C, et al. Zircon SHRIMP U – Pb dating and its geological significance of mineralization in Tuwu – Yandong porphyry copper mine, East Tianshan mountain [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(2): 256 – 261.

[27] 韩志轩. 新疆东天山土屋—延东斑岩铜矿带地球化学特征及戈壁荒漠覆盖区化探方法研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.

Han Z X. Geochemical characteristics of Tuwu – Yandong porphyry Copper Ore Belt in Eastern Tianshan, Xinjiang and Study on Geochemical Exploration in Gobi Desert Regions [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.

[28] 胡兆鑫. 安徽马头斑岩型铜钼矿异常结构模式研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2014.

Hu Z X. A Study of Anomaly Structure Model of Matou Porphyry

- Mo - Cu Deposit, Anhui Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2014.
- [29] 李智明, 赵仁夫, 霍瑞平, 等. 新疆土屋—延东铜矿田地质特征[J]. 地质与勘探, 2006, 42(6): 1-4.
- Li Z M, Zhao R F, Huo R P, et al. Geological characters of Tuwu - Yandong copper deposit in Xinjiang [J]. Geology and Exploration, 2006, 42(6): 1-4.
- [30] 芮宗瑶, 王龙生, 王义天, 等. 东天山土屋和延东斑岩铜矿床时代讨论[J]. 矿床地质, 2002, 21(1): 16-22.
- Rui Z Y, Wang L S, Wang Y T, et al. Discussion on metallogenic epoch of Tuwu and Yandong porphyry copper deposits in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(1): 16-22.
- [31] 彭方洪, 莫新华, 贺静, 等. 赤湖—土墩地区地球化学找矿效果[J]. 新疆地质, 2001, 19(4): 276-280.
- Peng F H, Mo X H, He J, et al. Role of geochemistry in ore prospecting at Chihu - Tudong region of Eastern Tianshan [J]. Xinjiang Geology, 2001, 19(4): 276-280.

## Accurate characterization of the alteration zoning in Chihu copper - molybdenum deposit by a new tool GeoAHSI in Hami area of Xinjiang

LI Shijie, LIU Xiaoyu, QIN Haoyang, HE Haiyang, WANG Siqi, SUN Xu  
(Xi'an Mineral Resources Research Center of China Geological Survey, Shaanxi Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The characteristics of alteration zoning can indicate the hydrothermal alteration activities associated with porphyry deposits, making it the important prospecting indicators for porphyry deposits. Based on fine spectral resolution, the hyperspectral remote sensing data can accurately delineate the spatial distribution of various hydrothermally altered minerals, providing reliable basis for the identification and localization of porphyry deposits. Based on the Teracorder algorithm framework, the authors developed and made open - source of GeoAHSI, a mineral identification tool for domestic hyperspectral remote sensing satellite imagery, to achieve convenient and efficient batch processing and mineral mapping engineering applications of domestic hyperspectral remote sensing satellite imagery. Based on the research basis and field sampling analysis, the GF - 5 AHSI (Advanced Hyperspectral Imager) imagery was used as remote sensing data source to carry out surface mineral mapping and verification work in Chihu copper - molybdenum mining area. The results show that AHSI hyperspectral mineral mapping accurately characterized the typical hydrothermal alteration zoning characteristics of porphyry deposits with pyrophyllite + alunite as the advanced argillic alteration core and gradually transitioning outward to kaolinite, pyrophyllite, muscovite and other altered mineral assemblages. Moreover, the mineral map had good spatial distribution consistency with traditional geological mapping units and structures. In addition, the GeoAHSI tool also extracted absorption characterization and wavelength distribution of muscovite in this area, and revealed the relationship between aluminum rich muscovite and porphyry mineralization in Chihu copper molybdenum deposit. The study provides a mature and effective tool and corresponding methods for the identification of alteration zoning for porphyry deposits, which could help promote the domestic hyperspectral remote sensing satellites' utilities in the new round of mineral exploration breakthroughs.

**Keywords:** GeoAHSI; hyperspectral mineral mapping; GF - 5; altered minerals; Chihu copper - molybdenum deposit

(责任编辑: 刘丹)