

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2018. 03. 13

引用格式: 汪子义,张廷斌,易桂花,等. Landsat8 OLI 数据斑岩铜矿遥感蚀变矿物组合提取研究[J]. 国土资源遥感,2018,30(3):89-95. (Wang Z Y,Zhang T B,Yi G H,et al. Extraction of hydrothermal alteration mineral groups of porphyry copper deposits using Landsat8 OLI data[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2018,30(3):89-95.)

Landsat8 OLI 数据斑岩铜矿遥感蚀变矿物组合提取研究

汪子义¹, 张廷斌^{1,2,3}, 易桂花¹, 钟康惠¹, 别小娟¹, 王继斌¹, 孙姣姣¹
(1. 成都理工大学地球科学学院,成都 610059; 2. 成都理工大学工程技术学院,乐山 614000; 3. 自然资源部地学空间信息技术重点实验室,成都 610059)

摘要: Landsat8 OLI 数据 NIR 波段(0. 845 ~ 0. 885 μm)和 SWIR2 波段(2. 100 ~ 2. 300 μm)波谱分辨率的提高,已分别成为含 Fe^{3+} 类、Al - OH 类和 Mg - OH 类蚀变矿物的诊断性谱段。通过利用混合调制匹配滤波 (mixture tuned matched filtering, MTMF) 方法,开展多龙矿集区铁格隆远景区含 Fe^{3+} 类、Al - OH 类和 Mg - OH 类蚀变矿物信息提取研究,并与 Hyperion 数据蚀变矿物信息提取结果进行对比分析。研究表明,基于 Landsat8 OLI 提取的 3 类蚀变矿物较为可靠;铁格隆远景区蚀变矿物组合的空间分布与斑岩铜矿经典蚀变分带特征基本吻合;遥感蚀变分带由内而外分别为绢英岩化 + 泥化带 (Al - OH 类蚀变矿物)和青磐岩化带 (Mg - OH 类蚀变矿物), Fe^{3+} 矿物组合则分布在绢英岩化 + 泥化带和青磐岩化带之间或过渡带上。

关键词: OLI; 斑岩铜矿; 蚀变分带; MTMF; 遥感; 铁格隆

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001 - 070X(2018)03 - 0089 - 07

0 引言

世界经济发展的百年历程中,斑岩铜矿提供了超过 75% 的 Cu 资源和超过 50% 的 Mo 资源需求量,同时,也是 Au 和 Ag 等金属资源的重要来源^[1]。我国斑岩铜矿占铜储量的 42. 19%,矽卡岩铜矿占铜储量的 22. 42%^[2]。但是,我国每年的铜产量并不能满足经济发展的需求,Cu 资源需求量对外依赖度高达 70%^[3]。因此,斑岩型铜矿床在工业界和科学界备受关注。

利用遥感技术开展围岩蚀变信息(蚀变矿物)提取研究已有近半个世纪的历程。受岩浆热液作用影响,斑岩型矿床具有良好的水平和垂向蚀变矿物分带特征^[4]。近些年的研究表明,遥感蚀变矿物(组合)提取技术能有效识别斑岩铜矿围岩蚀变的分带特征^[5-6]。目前, TM, ETM + , ASTER, Hyperion 和 Landsat8 OLI 等遥感数据,在遥感蚀变信息(蚀变

矿物组合)提取和识别方面应用广泛^[7-8]。TM 和 ETM + 数据常用来提取铁染和泥化蚀变信息^[9-12],也有研究者用来进行铁镁质岩石信息的识别^[12-14]。其中,主成分分析法(principal component analysis, PCA)是最常用的技术方法。ASTER 数据在 SWIR 和 TIR 波谱区间的波谱分辨率提高,使得 ASTER 数据在蚀变矿物(信息)提取和岩性信息识别等方面应用也较广,通常用来识别 Mg - OH 类、Al - OH 类、 CO_3^{2-} 类和硅化等矿物信息^[15-16]。随着遥感数据信息的深入研究与挖掘,多光谱卫星数据的应用正向着矿物类型细分(铝白云母和铁白云母)^[17]、矿物组合(蚀变的分带)研究^[18]、矿物含量定量化(半定量化)^[19]以及遥感蚀变异常下限定量化确定^[20-21]等方向发展。Hyperion 高光谱遥感数据光谱分辨率较高,可达 10 nm,能更好地识别矿物类型,但因存在幅宽窄、存档数据少和信噪比低等问题,目前多用于矿区蚀变矿物的提取而难以开展区域性应用。随着 Landsat8 OLI 数据辐射分辨率和波

收稿日期: 2016 - 11 - 23; 修订日期: 2017 - 02 - 20

基金项目: 国家自然科学基金项目“西藏典型斑岩型铜矿床遥感蚀变信息重现性机理研究”(编号: 41202233)、自然资源部公益性行业科研专项“斑岩 - 浅成低温热液成矿系统研究及勘查评价示范——以西藏多龙整装勘查区为例”(编号: 201511017)和中国地质调查局地质调查项目“西藏物玛—先遣地区斑岩型铜金矿成矿规律研究与找矿靶区优选”(编号: 12120113095300)共同资助。

第一作者: 汪子义(1988 -),男,硕士研究生,主要从事遥感地质研究。Email: 763340359@qq. com。

通信作者: 张廷斌(1978 -),男,博士,教授,主要从事遥感地质、生态遥感研究。Email: zhangtb@cdut. edu. cn。

谱分辨率的大幅提升,为铁染类、羟基类、 CO_3^{2-} 类和硅化等 4 类蚀变矿物信息的提取研究提供了新的数据来源^[22-25]。

以班公湖—怒江成矿带多龙矿集区铁格隆斑岩铜矿远景区为例,在对铁格隆远景区各蚀变带蚀变矿物(组合)波谱分析的基础上,利用混合调制匹配滤波(mixture tuned matched filtering, MTMF)方法开展基于 OLI 数据的蚀变矿物组合提取研究,并与 Hyperion 高光谱数据提取结果进行对比验证,初步分析铁格隆远景区基于 OLI 数据的蚀变矿物组合分带特征。

1 研究区概况

青藏高原是聚合板块最发育的地区,对斑岩型铜矿床及伴生矿床形成十分有利,具有良好的斑岩型铜矿床成矿前景,已经成为我国最重要的矿产资源基地之一^[2,26-27]。青藏高原气候干旱、空气稀薄、植被稀疏、基岩裸露等特点,也为遥感蚀变矿物识别和提取提供了良好的地表环境。其中,西藏多龙矿集区大地构造位置属三江构造系(一级构造单元)、羌塘弧盆地系(二级构造单元)、扎普—多不杂岩浆弧(三级构造单元),位于班公湖—怒江结合带西段,是冈底斯陆块与羌塘陆块的分界线^[28]。多龙矿集区中的铁格隆斑岩铜矿远景区作为本文研究区域,主要出露下侏罗统曲色组(J_1q)、中侏罗统色哇组(J_2s)以及第四系(Q_4);岩浆岩较发育,主要有花岗闪长斑岩和辉长岩等^[29]。研究区工作程度较低,在地表和钻孔内见硅化、绢云母化、褐铁矿化和角岩化^[29],地表常见蚀变矿物主要有褐铁矿、绢云母、高岭石、石英、绿泥石和绿帘石等。

2 遥感数据源与矿物波谱特征分析

2.1 遥感数据源

Landsat8 OLI 数据 VNIR 波谱区间有 6 个波段, SWIR 波谱区间有 3 个波段,波段设置如表 1 所示。

表 1 OLI 数据波段设置

Tab.1 Bands setting of OLI data		
波段号	波长范围/ μm	空间分辨率/m
8 (pan)	0.520 ~ 0.680	15
1 (Coastal)	0.433 ~ 0.453	30
2 (Blue)	0.450 ~ 0.515	
3 (Green)	0.525 ~ 0.600	
4 (Red)	0.630 ~ 0.680	
5 (NIR)	0.845 ~ 0.885	
9 (Cirrus)	1.360 ~ 1.390	
6 (SWIR1)	1.560 ~ 1.660	
7 (SWIR2)	2.100 ~ 2.300	

OLI 数据获取于 2015 年 11 月 22 日,为经过几何校正的 L1T 产品,地理参考为 UTM 投影 WGS 坐标系。Hyperion 数据获取于 2004 年 10 月 30 日,为 L1R 产品,没有地理参考,需要以 OLI 数据为基准进行几何校正。为了削弱大气散射和吸收等影响,OLI 数据进行了辐射定标和基于 MODTRAN (moderate resolution transmittance) 辐射传输模型的大气校正等预处理;Hyperion 数据进行了坏波段去除、辐射定标、坏线修复、条纹去除、Smile 效应去除、基于 MODTRAN 辐射传输模型的大气校正和几何校正等预处理,几何校正误差控制在 0.5 个像元以内。

2.2 矿物波谱特征分析

利用 SVC HR-1024 波谱仪采集了地表常见蚀变矿物褐铁矿、高岭石、白云母和绿泥石等的野外光谱,并对野外采集矿物波谱、USGS 波谱库矿物波谱和基于 OLI 波谱重采样的 USGS 矿物波谱进行了对比分析,对比结果示意图如图 1 所示。

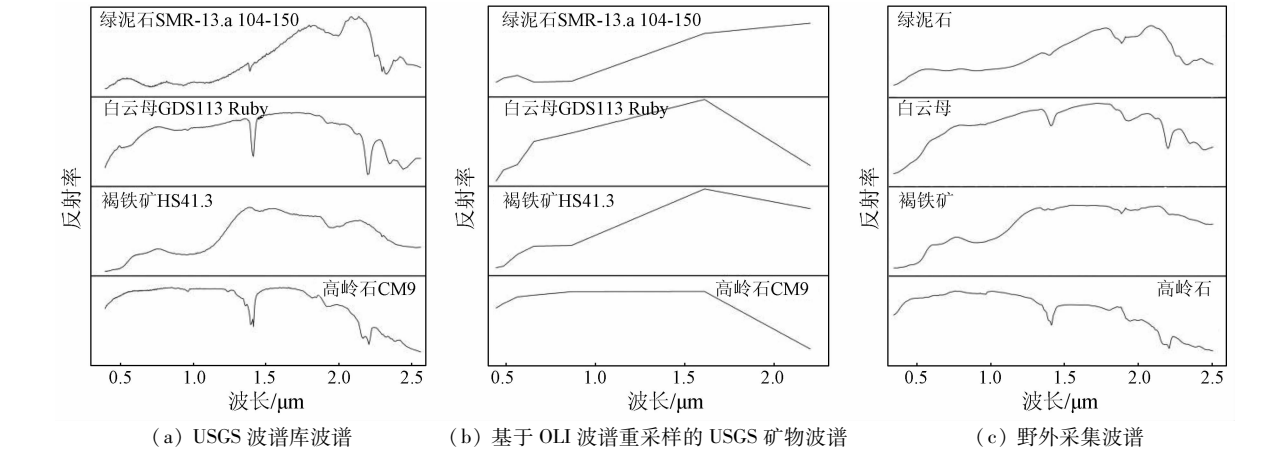


图 1 典型蚀变矿物波谱曲线对比
Fig.1 Comparison of spectra of typical alteration minerals

从图 1(a)和(c)中可以看出:①绢英岩化带中富含白云母(绢云母),白云母在 2.20 μm 附近(2.13 ~ 2.27 μm 之间)具 Al-OH 类矿物吸收特征^[30-32],VIR 波谱区间反射率较低;②褐铁矿在

0.5 μm 和 0.9 μm 附近具吸收特征,是 Fe^{3+} 类矿物的诊断性谱段^[32-34],VNIR 波谱区间反射率较低;③高岭石为泥化带典型蚀变矿物,在 2.05 ~ 2.24 μm 之间具双吸收特点^[32,34],其他波谱区间反射率较高;④绿泥石为青磐岩化带的典型蚀变矿物,通常主要为铁绿泥石和镁绿泥石,绿泥石在 2.32 μm 附近(2.28 μm ~ 2.40 μm 之间)具强吸收特征,主要是由 Mg-OH 类矿物引起,而在 0.90 μm 附近的吸收特征主要是由 Fe^{3+} 类矿物引起^[33-34],VNIR 波谱区间反射率低于 SWIR。对应 OLI 数据重采样波谱(图 1(b)),高岭石和白云母在 SWIR2 波段具有吸收特征;相反,绿泥石在 SWIR2 波段具有反射特征;NIR 波段褐铁矿和绿泥石波谱都具有一定的吸收特征,但区别于褐铁矿,绿泥石在红光波段也具有一定的吸收特征,褐铁矿则为反射特征;而褐铁矿在蓝光波段具吸收特征。

通过对比 OLI 与 TM 和 ETM+ 的波段设置,调整较大的为 NIR 波段(0.845 ~ 0.885 μm)和 SWIR2 波段(2.100 ~ 2.300 μm);NIR 波段波谱宽度变窄,排除了 0.825 μm 处水汽吸收的影响,并且位于褐铁矿吸收谷位置,成为含 Fe^{3+} 类矿物的诊断性谱段;SWIR2 波段光谱分辨率的提高,消除了 CO_3^{2-} 类矿物对羟基类矿物提取的影响^[35],同时成为 Al-OH 类矿物的诊断性谱段,也突出了 Mg-OH 类矿物在 SWIR2 波段的高反射特征。

3 蚀变矿物提取与分析

3.1 提取方法

MTMF 方法是一种高光谱数据制图方法,近年

来被广泛应用到多光谱蚀变矿物提取中^[24,35-36]。该方法通过对目标波谱的最优线性检测与评估,在混合像元分解基础上,反演每个像元中不同探测目标的丰度^[37]。该方法主要基于目标波谱的整体形态,矿物波谱特征分析时,不仅分析了矿物的吸收特征,还分析了矿物的整体波谱形态及吸收特征对整体形态的影响。匹配结果由 2 个部分构成,分别记录了目标端元波谱的匹配程度得分和不可信度得分,匹配得分与不可信度得分比值则能较好地表达蚀变矿物丰度信息^[38]。MTMF 方法提取蚀变矿物时,还需要以最小噪声分离(minimum noise fraction rotation, MNF)、纯净像元指数计算、N 维散点图纯净像元(端元)选取和端元波谱分析(端元识别)等系列数据处理为基础。

3.2 OLI 数据蚀变矿物提取

OLI 数据识别出的端元中共有 3 种端元与研究区常见矿物波谱特征比较吻合,利用 SAM 方法对 3 种端元进行矿物类型识别,端元 1 与野外白云母和高岭石 SAM 匹配得分最高分别为 0.885 和 0.902;端元 2 与野外绿泥石 SAM 匹配得分最高为 0.913,端元 3 与野外褐铁矿 SAM 匹配得分最高为 0.847。3 种端元与重采样 USGS 波谱匹配得分情况见表 2。因此,确定端元 1 为 Al-OH 类蚀变矿物,端元 2 为 Mg-OH 类蚀变矿物,端元 3 为铁染类蚀变矿物。OLI 数据 3 类蚀变矿物丰度如图 2 所示。

表 2 OLI 数据 3 种端元 USGS 波谱库波谱 SAM 得分

Tab.2 SAM score of three endmembers of OLI data

端元编号	矿物名称	SAM 得分
1	高岭石 + 蒙脱石 + 白云母	0.912 + 0.893 + 0.886
2	绿泥石 + 绿帘石	0.915 + 0.901
3	黄钾铁矾 + 赤铁矿	0.818 + 0.792

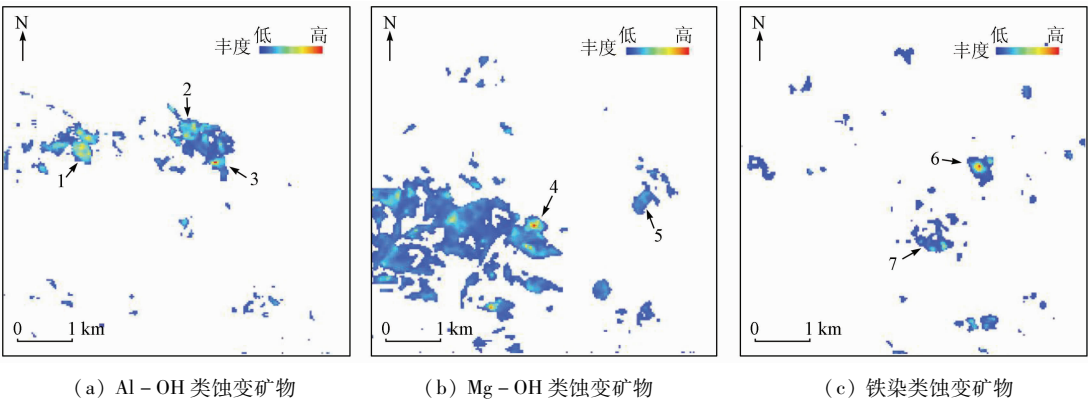


图 2 3 种端元矿物丰度

Fig.2 Abundance of three endmembers

从图 2 中可以看出,Al-OH 类蚀变矿物信息主要呈 EW 向串珠状集中展布,分布于研究区中部;Mg-OH 类蚀变矿物信息大面积团块分布于研究区

西南部,东部、北部有零星分布;铁染类蚀变矿物信息团分布在 Al-OH 类和 Mg-OH 类蚀变矿物信息之间,斑块状分布。OLI 数据遥感蚀变矿物空间分

布基本符合斑岩铜矿围岩蚀变分带特征,即由内而外分别是 Al - OH 类蚀变矿物(绢云母化 + 泥化)、铁染类蚀变矿物和 Mg - OH 类蚀变矿物(青磐岩化)。

3.3 Hyperion 数据蚀变矿物提取

Hyperion 数据共识别出 4 种端元分别与研究区常见矿物褐铁矿、绿泥石、高岭石和白云母波谱特征比较吻合,采用 SAM 方法对这 4 种端元进行定性和定量分析,确定矿物类型。端元 1,2,3 和 4 分别与野外矿物白云母、高岭石、绿泥石和褐铁矿波谱匹配得分最高,分别为 0.823,0.849,0.917 和 0.862。这

4 种端元与 USGS 波谱库矿物波谱匹配得分情况见表 3。因此,确定端元 1 为白云母,端元 2 为高岭石,端元 3 为绿泥石,端元 4 为褐铁矿。依据这 4 种端元矿物波谱分别进行蚀变矿物提取,提取结果如图 3 所示。

表 3 Hyperion 数据 4 种端元 USGS 波谱库 SAM 匹配得分
Tab.3 SAM score of four endmembers of Hyperion data

端元编号	矿物名称	SAM 得分
1	白云母	0.864
2	高岭石 + 蒙脱石	0.859 + 0.825
3	绿泥石	0.888
4	黄钾铁矾 + 针铁矿 + 褐铁矿	0.837 + 0.819 + 0.813

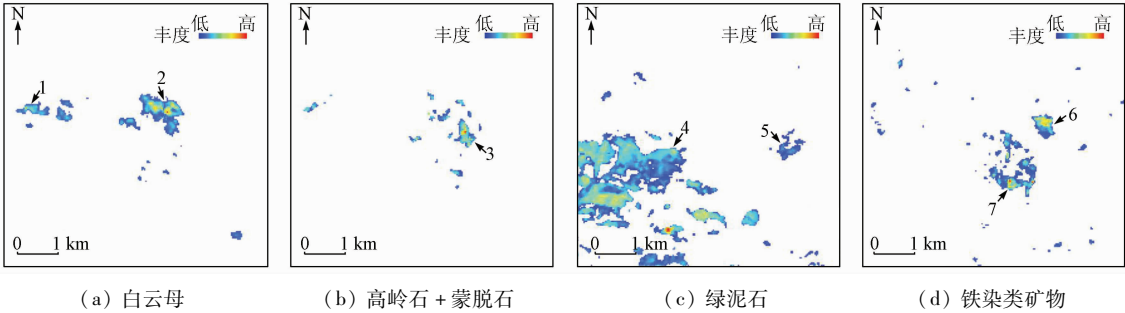


图 3 4 种端元矿物丰度
Fig.3 Abundance of four endmembers

对比图 2 和图 3 可以发现,OLI 数据与 Hyperion 数据提取的蚀变矿物空间分布基本一致。OLI 数据 Al - OH 类矿物主要包含白云母、高岭石和蒙脱石信息,图 2(a)中的 1 和 2 与图 3(a)中的 1 和 2 白云母信息对应,图 2(a)中的 3 与图 3(b)中的 3 高岭石 + 蒙脱石信息对应; OLI 数据 Mg - OH 类矿物与 Hyperion 数据绿泥石空间分布一致,图 2(b)中的 4 和 5 与图 3(c)中的 4 和 5 绿泥石信息对应; OLI 数据铁染类矿物与 Hyperion 数据铁染类矿物空间分布一致,图 2(c)中的 6 和 7 与图 3(d)中的 6 和 7 铁染类矿物对应。

3.4 OLI 和 Hyperion 数据遥感蚀变分带特征
2 种数据遥感蚀变分带特征如图 4 所示。

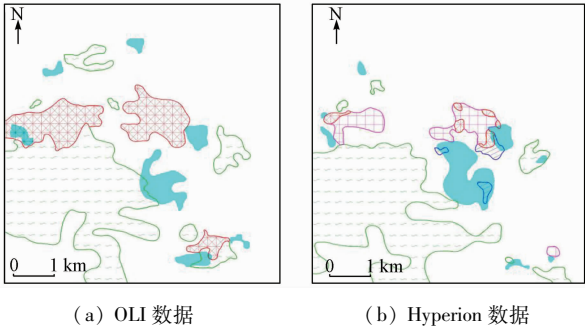


图 4 OLI 和 Hyperion 数据遥感蚀变分带特征
Fig.4 Characteristics of remote sensing alteration zones of OLI and Hyperion data

从图 4 中可以发现,OLI 数据 Al - OH 类矿物主要包含白云母、高岭石和蒙脱石信息,对应斑岩铜矿的绢英岩化 + 泥化蚀变带,分布在内带; Mg - OH 类矿物主要包含绿泥石信息,绿泥石是青磐岩化带主要蚀变矿物,对应青磐岩化蚀变带,分布在外带; OLI 数据和 Hyperion 数据铁染类蚀变矿物空间分布基本一致,主要分布在内外带之间。在图 4(a)中,铁格隆斑岩铜矿远景区围岩蚀变由中心向外围依次是 Al - OH 类(绢云母 + 高岭石 + 蒙脱石)和 Mg - OH 类(绿泥石)蚀变矿物组合分带,对应为绢英岩化 + 泥化带和青磐岩化带围岩蚀变分带特征,铁染类矿物组合则分布在绢英岩化 + 泥化带和青磐岩化带之间; 在图 4(b)中,铁格隆斑岩铜矿远景区围岩蚀变由中心向外围依次是绢云母、绢云母 + 高岭石、高岭石和绿泥石 4 种蚀变矿物组合分带,对应于绢英岩化带→绢英岩化带叠加泥化带→泥化带→青磐岩化带的围岩蚀变分带特征,青磐岩化带在矿区的西南部最为发育。总体上,OLI 和 Hyperion 数据遥感蚀变分带特征一致,符合斑岩铜矿围岩蚀变分带特征。

4 结论与展望

通过分析斑岩型铜矿典型蚀变矿物(组合)在 Landsat8 OLI 数据各波段的吸收和反射特征,基于

MTMF 方法进行了西藏多龙矿集区铁格隆研究区地表蚀变矿物组合的提取研究,得出以下结论:

1)对比 Hyperion 数据蚀变矿物信息提取结果,OLI 数据能够有效区分和识别 Al - OH 类、Mg - OH 类和含 Fe³⁺ 类蚀变矿物信息。

2)对应斑岩型矿床地表蚀变分带模型,OLI 数据 Al - OH 类(绢英岩化 + 泥化)、Mg - OH 类(青磐岩化)和含 Fe³⁺ 类遥感蚀变矿物组合的分带特征良好。

此外,OLI 数据较 TM 和 ETM + 数据将热红外波段细分为 TIR1 和 TIR2 2 个波段,其中,硅化蚀变矿物在 TIR2 波段(11.5 ~ 12.51 μm)具有强吸收特征,对识别硅化蚀变矿物信息十分有利;矽卡岩型铜矿围岩蚀变中富 CO₃²⁻ 类蚀变矿物信息,CO₃²⁻ 类蚀变矿物在 2.34 μm 附近具有显著吸收特征,与 Mg - OH 类矿物波谱吸收特征十分相近,但在可见光—近红外波段有别于 Mg - OH 类蚀变矿物信息。因此,基于 OLI 数据的硅化信息提取和 CO₃²⁻ 类与 Mg - OH 类蚀变信息识别与区分,将是今后 OLI 数据应用研究的重要方面。

参考文献 (References):

[1] Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 2010,105(1):3-41.

[2] 芮宗瑶,陆彦,李光明,等. 西藏斑岩铜矿的前景展望[J]. *中国地质*,2003,30(3):302-308.

Rui Z Y,Lu Y,Li G M,et al. Looking forward to the prospects of porphyry copper deposits in Tibet[J]. *Geology in China*,2003,30(3):302-308.

[3] 周平. 新常态下中国铜资源供需前景分析与预测[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.

Zhou P. An analysis and forecast of China copper supply and demand prospects under the new normal economy[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2015.

[4] Lowell J D,Guilbert J M. Lateral and vertical alteration - mineralization zoning in porphyry ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1970,65(4):373-408.

[5] Rowan L C,Schmidt R G,Mars J C. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq,Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data[J]. *Remote Sensing of Environment*,2006,104(1):74-87.

[6] Zhang T B,Yi G H,Li H M,et al. Integrating data of ASTER and landsat - 8 OLI(AO) for hydrothermal alteration mineral mapping in Duolong porphyry Cu - Au deposit,Tibetan Plateau,China[J]. *Remote Sensing*,2016,8(11):890.

[7] 张远飞,袁继明,杨自安,等. 基于物理意义的二维散点图类型划分与遥感蚀变信息提取[J]. *国土资源遥感*,2013,25(2):57-62. doi:10.6046/gtzyyg.2013.02.11.

Zhang Y F,Yuan J M,Yang Z A,et al. Type classification of 2D scatter plot of remote sensing image based on the physical meaning

and extraction of remote sensing alteration information[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*,2013,25(2):57-62. doi:10.6046/gtzyyg.2013.02.11.

[8] 张远飞,吴德文,袁继明,等. 遥感蚀变信息多层次分离技术模型与应用研究[J]. *国土资源遥感*,2011,23(4):6-13. doi:10.6046/gtzyyg.2011.04.02.

Zhang Y F,Wu D W,Yuan J M,et al. The model and application of multi - level detaching technique of remote sensing alteration information[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*,2011,23(4):6-13. doi:10.6046/gtzyyg.2011.04.02.

[9] Yang Z A,Peng S L,Zhu G C,et al. Spectrum spatial structure characteristic analysis of remote sensing alteration information and interference factors[J]. *Journal of Central South University of Technology*,2009,16(4):647-652.

[10] Sojodehe M,Rasa I,Nezafati N,et al. Application of spectral analysis to discriminate hydrothermal alteration zones at Daralu copper deposit,SE Iran[J]. *Arabian Journal of Geosciences*,2015,9(1):41.

[11] 张廷斌,唐菊兴,李志军,等. 西藏尕尔穷铜金矿多光谱遥感地质特征与外围找矿预测[J]. *国土资源遥感*,2014,26(4):170-178. doi:10.6046/gtzyyg.2014.04.27.

Zhang T B,Tang J X,Li Z J,et al. Remote sensing geological characteristics and ore prediction in the Ga'erqiong Cu - Au deposit,Tibet[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*,2014,26(4):170-178. doi:10.6046/gtzyyg.2014.04.27.

[12] Ramadan T M,Kontny A. Mineralogical and structural characterization of alteration zones detected by orbital remote sensing at Shalatein District,SE Desert,Egypt[J]. *Journal of African Earth Sciences*,2004,40(1/2):89-99.

[13] Pournamdari M,Hashim M,Pour A B. Spectral transformation of ASTER and Landsat TM bands for lithological mapping of Soghan ophiolite complex,south Iran[J]. *Advances in Space Research*, 2014,54(4):694-709.

[14] 别小娟,张廷斌,孙传敏,等. 藏东罗布莎蛇绿岩遥感岩矿信息提取方法研究[J]. *国土资源遥感*,2013,25(3):72-78. doi:10.6046/gtzyyg.2013.03.13.

Bie X J,Zhang T B,Sun C M,et al. Study of methods for extraction of remote sensing information of rocks and altered minerals from Luobusha ophiolite in East Tibet[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*,2013,25(3):72-78. doi:10.6046/gtzyyg.2013.03.13.

[15] Cui J,Yan B K,Wang R S,et al. Regional - scale mineral mapping using ASTER VNIR/SWIR data and validation of reflectance and mineral map products using airborne hyperspectral CASI/SASI data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*,2014,33:127-141.

[16] Di Tommaso I,Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina[J]. *Ore Geology Reviews*,2007,32(1/2):275-290.

[17] Rowan L C,Mars J C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer(ASTER) data[J]. *Remote Sensing of Environment*,2003,84(3):350-366.

[18] Abbaszadeh M,Hezarkhani A. Enhancement of hydrothermal alteration zones using the spectral feature fitting method in Rabor Area,

- Kerman, Iran [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6 (6): 1957 – 1964.
- [19] 闫柏琨, 刘圣伟, 王润生, 等. 热红外遥感定量反演地表岩石的 SiO_2 含量[J]. *地质通报*, 2006, 25 (5): 639 – 643.
- Yan B K, Liu S W, Wang R S, et al. Quantitative inversion of the SiO_2 content in surface rocks using thermal infrared remote sensing [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25 (5): 639 – 643.
- [20] 张玉君, 曾朝铭, 陈 薇. ETM + (TM) 蚀变遥感异常提取方法研究与应用——方法选择和技术流程[J]. *国土资源遥感*, 2003, 15 (2): 44 – 49. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2003. 02. 11.
- Zhang Y J, Zeng Z M, Chen W. The methods for extraction of alteration anomalies from the ETM + (TM) data and their application; Method selection and technological flow chart [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2003, 15 (2): 44 – 49. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2003. 02. 11.
- [21] 张廷斌. 斑岩铜矿遥感蚀变信息重现性与优选研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- Zhang T B. On the repeatability and optimization of remote sensing mineralized alterations about the porphyry copper deposits: A case study of the typical porphyry copper deposits in Tibet [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [22] Pour A B, Hashim M. Hydrothermal alteration mapping from Landsat – 8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south – eastern Islamic Republic of Iran [J]. *Journal of Taibah University for Science*, 2015, 9 (2): 155 – 166.
- [23] 唐 楠, 王 成, 唐菊兴, 等. 基于主成分分析法的 OLI 数据蚀变信息提取——以西藏多龙铜金矿集区为例[J]. *矿床地质*, 2014, 33 (s1): 745 – 746.
- Tang N, Wang C, Tang J X, et al. Alteration information extraction based on principal component analysis using OLI data: A case study of Doloong Cu – Au deposit, Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33 (s1): 745 – 746.
- [24] 程 洋, 童立强. 基于背景多层次分离的遥感矿化蚀变信息提取模型及应用实例[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30 (3): 586 – 591.
- Cheng Y, Tong L Q. The research on model of the alteration mineral mapping base on multi – level separate background and an application examples [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30 (3): 586 – 591.
- [25] 刘峻杉, 胡 滨, 何政伟. 遥感技术在格咱岛弧地区斑岩铜矿勘查中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2015, 37 (6): 790 – 796.
- Liu J S, Hu B, He Z W. The application of remote sensing technique for porphyry copper exploration in the Gezan arc region [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 37 (6): 790 – 796.
- [26] 侯增谦, 吕庆田, 王安建, 等. 初论陆 – 陆碰撞与成矿作用——以青藏高原造山带为例[J]. *矿床地质*, 2003, 22 (4): 319 – 333.
- Hou Z Q, Lyu Q T, Wang A J, et al. Continental collision and related metallogeny: A case study of mineralization in Tibetan Orogen [J]. *Mineral Deposits*, 2003, 22 (4): 319 – 333.
- [27] 张金树. 冈底斯成矿带东段三大斑岩型矿床地质特征及区域控岩控矿模型研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- Zhang J S. Study on three porphyry – type deposits' geological features and regional structural ore – controlling model in Eastern Gandise Metallogenic Belt [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [28] 胡紫豪. 西藏多龙斑岩型铜金矿预测工作区多元信息找矿预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- Hu Z H. Multivariate information prospecting prediction of Duo – Long porphyry copper deposit forecasting area in Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [29] 孙振明. 西藏班—怒成矿带西段多龙矿集区铜金成矿作用与成矿规律[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- Sun Z M. Copper – gold mineralization and metallogenic regularity of Duolong mineralization area in western Bangongco – Nujiang [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [30] Mars J C, Rowan L C. Regional mapping of phyllic – and argillic – altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms [J]. *Geosphere*, 2006, 2 (3): 161 – 186.
- [31] Bedini E. Mapping alteration minerals at Malmberg molybdenum deposit, central East Greenland, by Kohonen self – organizing maps and matched filter analysis of HyMap data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33 (4): 939 – 961.
- [32] Clark R N, Swayze G A, Wise R A, et al. USGS Digital Spectral Library Splib06a [R]. [s. l.]: U. S. Geological Survey, 2007.
- [33] Cudahy T J, Ramanaidou E R. Measurement of the hematite: Goethite ratio using field visible and near – infrared reflectance spectrometry in channel iron deposits, Western Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1997, 44 (4): 411 – 420.
- [34] Molan Y E, Refahib D, Tarashti A H. Mineral mapping in the Maherabad area, eastern Iran, using the HyMap remote sensing data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 27: 117 – 127.
- [35] 张玉君. Landsat8 简介[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25 (1): 176 – 177.
- Zhang Y J. Introduction of Landsat8 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25 (1): 176 – 177.
- [36] Kruse F A, Baugh W M, Perry S L. Validation of DigitalGlobe WorldView – 3 Earth imaging satellite shortwave infrared bands for mineral mapping [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9 (1): 096044.
- [37] Asadzadeh S, De Souza Filho C R. A review on spectral processing methods for geological remote sensing [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 47: 69 – 90.
- [38] Boardman J W, Kruse F A. Analysis of imaging spectrometer data using N – dimensional geometry and a mixture – tuned matched filtering approach [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49 (11): 4138 – 4152.
- [39] 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]. 2016, 3 (4): 55 – 62.

Extraction of hydrothermal alteration mineral groups of porphyry copper deposits using Landsat8 OLI data

WANG Ziyi¹, ZHANG Tingbin^{1,2,3}, YI Guihua¹, ZHONG Kanghui¹,
BIE Xiaojuan¹, WANG Jibin¹, SUN Jiaojiao¹

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Engineering and Technical, Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China; 3. Key Laboratory of Geoscience Spatial Information Technology, Ministry of Nature Resources, Chengdu 610059, China)

Abstract: The enhancing of NIR band and SWIR2 band of OLI data makes the spectra become the diagnostic spectra of ferric iron minerals, Al – OH and Mg – OH alteration minerals. The authors used the mixture tuned matched filtering (MTMF) mapping method to extract ferric iron, Al – OH and Mg – OH alteration minerals in Tiegelong prospective block of the Duolong porphyry Cu – Au ore concentration area. Compared with the results of mineral mapping from Hyperion data, the three mineral mapping types extracted from Landsat8 OLI are reliable. At the same time, the spatial distribution pattern of alteration minerals agrees with the hydrothermal alteration zone of typical porphyry copper deposits. The remote sensing alteration zones from interior to exterior of the Tiegelong porphyry Cu ore block are phyllic + argillic zone (Al – OH minerals) and propylitic zone (Mg – OH minerals), and the ferric iron minerals are between the arephyllic + argillic and propylitic zones.

Keywords: OLI; porphyry copper deposit; hydrothermal alteration mineral zones; MTMF; remote sensing; Tiegelong

(责任编辑: 陈 理)