

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.02.010

# 基于 ASTER 光谱特征的岩性填图和蚀变 信息提取:念扎金矿例析

宋伊圩<sup>1</sup>,王鹏<sup>2</sup>,连琛芹<sup>3</sup>,代雪健<sup>4</sup>,王斌<sup>1</sup>

(1. 西安矿产资源调查中心,陕西 西安 710100;2. 西宁自然资源综合调查中心,青海 西宁 810012;3. 呼和浩特自然资源综合调查中心,内蒙 呼和浩特 010000;4. 成都军民融合地质调查中心,四川 成都 610000)

**摘要:**基于 ASTER 光谱特征进行岩性解译和蚀变信息提取在找矿勘查方面有着广泛应用,但在国内鲜有报道。以雅鲁藏布江缝合带念扎金矿为研究区,通过对与  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Al}-\text{OH}$ 、 $\text{Mg}-\text{OH}$ 、硅酸盐、碳酸盐等成分相关特征的矿物光谱特征分析,运用“波段比值法+假彩色合成法”进行细致的岩性单元分类与地质填图,运用“地质遥感剖面+最优密度分割法”定量圈定与矿化有关的蚀变带范围,结合已有的控矿构造信息,提供推测找矿有利区 2 处。研究表明,基于 ASTER 光谱特征的岩性填图和蚀变信息提取方法进行找矿预测,在西藏高海拔地区具有天然的适用性,可以准确指示岩性和蚀变的关键找矿标志,是西藏地区快速有效找矿勘查的重要手段,也为区内其他相同类型的金矿床研究提供借鉴。

**关键词:**ASTER;岩性解译;蚀变信息提取;找矿推测;念扎金矿

中图分类号:P627

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)02-0126-11

## Lithologic Mapping and Alteration Information Extracting Based on ASTER Spectral Signature: An Example from Nianzha Gold Deposit

SONG Yiwei<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>, LIAN Chenqin<sup>3</sup>, DAI Xuejian<sup>4</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Xining Natural Resources Investigation Center, Xining 810012, Qinghai, China; 3. Hohhot Natural Resources Investigation Center, Hohhot 010000, Inner Mongolia, China; 4. Chengdu Military-civilian Integration Geological Survey Center, Chengdu 610000, Sichuan, China)

**Abstract:** Lithologic interpretation and alteration information extracting based on ASTER spectral analysis have been widely used in ore exploration. The authors carried out the study in Nianzha gold deposit of Yarlung Zangbo suture zone. Minerals components such as  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}-\text{OH}$ ,  $\text{Mg}-\text{OH}$ , silicate and carbonate were analyzed based on ASTER spectrum. This paper used “band ratio method + false color synthesis” for lithologic classification and geological mapping and quantitatively delineated the range of mineralization-related alteration zone and two prospecting target areas with the “geologic-remote sensing profiles + best density separation method”. The results show that lithological mapping and alteration information extracting based on aster

收稿日期:2020-09-29;修回日期:2021-01-22

基金项目:国家重点研发计划“青藏高原大陆碰撞造山型金矿成矿系统结构和形成机制”(2016YFC0600307)。

作者简介:宋伊圩(1992-),男,工程师,主要从事矿床学研究工作。E-mail:1846486606@qq.com。

spectral are suitable for prospecting prediction in high altitude areas of Tibet, which can accurately indicate the key prospecting indicators of lithology and alteration. It proves to be an important means of rapid and effective ore exploration in Tibet, and provides reference for other deposits of the same type in the belt.

**Keywords:** ASTER; lithologic interpretation; alteration information extracting; ore prospecting; Nianzha gold deposit

岩性填图与蚀变信息提取是遥感地质学应用研究中的重要方向(田淑芳等,2013)。国内外地质工作者对利用遥感技术进行岩性填图和蚀变信息提取进行了大量的研究(Mars et al., 2006; 妙超,2013; 宿虎等,2020; 闫颖等,2015),并成功地应用于地质找矿勘查中。

ASTER 多光谱遥感数据以其丰富的波段信息、较高的空间分辨率、数据易获取的特点成为找矿勘查数据源的重要选择。然而基于 ASTER 矿物光谱特征对矿区进行系统岩性填图和蚀变信息提取,以此服务找矿勘查的实例在国内鲜有报道。青藏高原雅鲁藏布江是中国重要的金成矿带(侯增谦等,2008; Wang et al., 2020; 王庆飞等,2020),该区带内的念扎金矿是区域成矿学研究的重点区域。矿区海拔高、自然环境恶劣,给找矿勘查带来了较大困难,因而进行遥感调查具有很高的实用和研究意义。

## 1 研究区地质概况

研究区位于青藏高原南部,行政区划隶属于西藏自治区日喀则市仁布县。该区地形起伏较大,基岩多裸露,植被稀少,沟谷地区部分被第四系覆盖,十分适合开展遥感调查工作。

研究区大地构造位置位于雅鲁藏布江缝合带(图 1a),空间上近东西向展布,南以冈底斯逆冲大断裂(GCT)、冈底斯大断裂(GT),北以仲巴-江孜断裂为界,夹持于拉萨地体与喜马拉雅地体之间,缝合带内由北向南被区域断裂分割为不同地体,依次为日喀则弧前盆地、雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带以及朗杰学增生楔 3 个构造单元(图 1b)(Chung et al., 2005; Ding et al., 2005; 侯增谦等,2006; Yin et al., 2000)。沿缝合带发育一系列造山型金矿,包括马攸木金矿、念扎金矿、邦布金矿。其中,念扎金矿位于缝合带中段,金储量 25 t, Au 品位平均值为  $3.08 \times 10^{-6}$  (图 1b)(李华健等,2017; 张雄,2017)。

矿区北部为白垩纪—始新世冈底斯火山弧,夹有少量白垩纪火山碎屑沉积岩,发育有一系列脆韧性构造;南部仁布蛇绿混杂岩带构造侵位于朗杰学岩群中,带内发育北东向大型逆断层(图 1c)。矿体即产生于闪长岩与超基性岩接触处。

## 2 数据处理

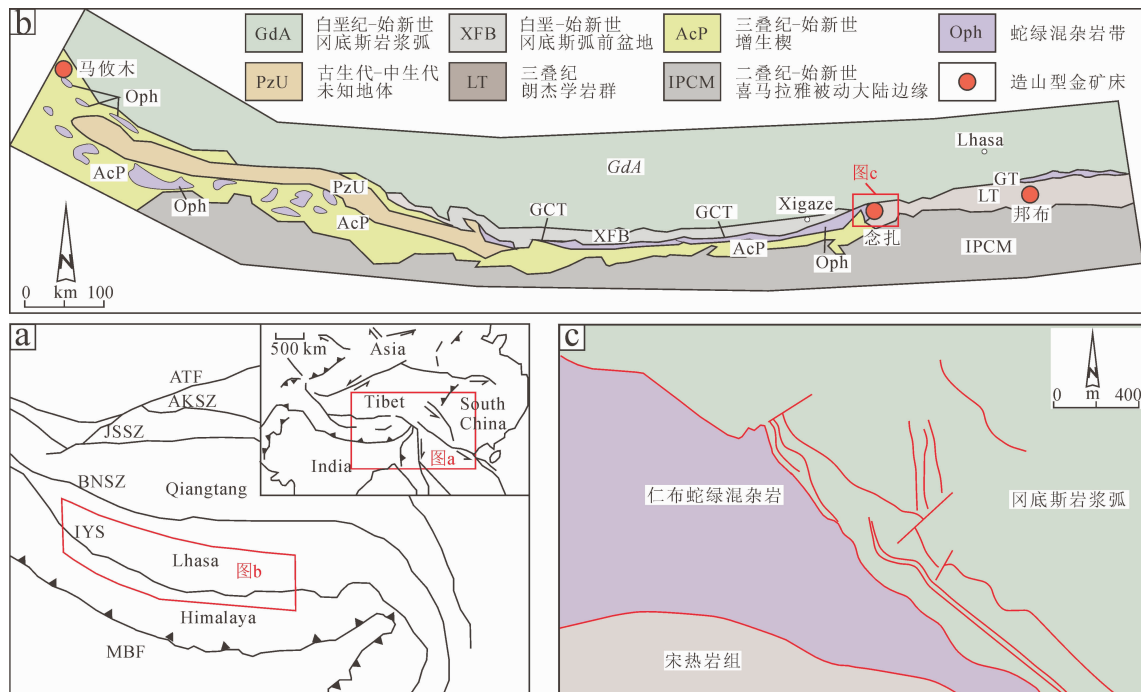
ASTER 遥感数据共有谱段 14 个,其中包括 3 个可见光至近红外波段(VNIR)、6 个短波红外波段(SWIR)、5 个热红外波段(TIR),空间分辨率依次为 15 m、30 m、90 m(表 1)。

表 1 ASTER 遥感影像波段参数表  
Tab. 1 ASTER remote sensing image band parameters

子系统	波段	波长范围( $\mu\text{m}$ )	空间分辨率(m)
可见光-近红外 (VNIR)	1	0.52~0.60	15
	2	0.63~0.69	
	3	0.76~0.86	
短波红外 (SWIR)	4	1.60~1.70	30
	5	2.145~2.185	
	6	2.185~2.225	
	7	2.235~2.285	
	8	2.295~2.365	
热红外 (TIR)	9	2.36~2.43	90
	10	8.125~8.475	
	11	8.475~8.825	
	12	8.925~9.275	
	13	10.25~10.95	
	14	10.95~11.65	

### 2.1 数据预处理

主要采用以下流程对遥感数据预进行处理:①对 ASTER 数据做辐射定标,使影像 DN 值转换为传感器层面的辐射值。②利用三次卷积法(Cubic Convolution)对 SWIR 和 TIR 波段重采样至 15 m



AKSZ. 阿尼玛卿-昆仑造山带; JSSZ. 金沙江缝合带; BNSZ. 班公-怒江缝合带; IYS. 印度河-雅鲁藏布江缝合带; MBF. 中央主断裂; ATF. 阿尔金断裂; GCT. 冈底斯逆冲大断裂; GT. 冈底斯断裂; ZGT. 仲巴-江孜断裂

图 1 (a) 研究区大地构造位置和地质图青藏高原构造格架 (Chung et al., 2005; Yin et al., 2000)、(b) 雅鲁藏布江缝合带构造-地质简图 (Ding et al., 2005)、(c) 念扎金矿地质简图 (张雄等, 2019)

Fig. 1 (a) Schematic tectonic map of the study area of the Tibet plateau (Chung et al., 2005; Yin and Harrison, 2000), (b) Structure-geological sketch of Yarlung Zangbo Suture (Ding et al., 2005), (c) Simplified geological map of the Nianzha gold deposit (Zhang et al., 2019)

的空间分辨率。③将重采样后的 VNIR - SWIR - TIR 波段区进行大气校正, 将传感器层面的辐射值转换为地表反射率。④将大气校正的结果进行打包。

## 2.2 造岩矿物信息提取

前人系统总结了不同矿物的光谱特征, 造岩矿物(石英、方解石等)在一定的波谱范围内具有特征性光谱, 并且 ASTER 波谱范围内具有可鉴定性(图 2)(Hunt et al., 1973; Hunt, 1979; Phillipset al., 2015; Rowan et al., 2003; Rowan et al., 2005)。不同的岩石具有不同的矿物组合, 蚀变发生伴随着蚀变矿物的富集, 基于 ASTER 岩石矿物光谱特征提取的矿物识别指数和蚀变因子, 在岩性界线和蚀变带附近会有数值突变, 这种数值突变指示了矿化蚀变分带的界线。由于各蚀变带的特征矿物有所差异, 光谱特征也有巨大差异, 因此基于光谱特征的蚀变带识别方法具有可靠的理论依据。

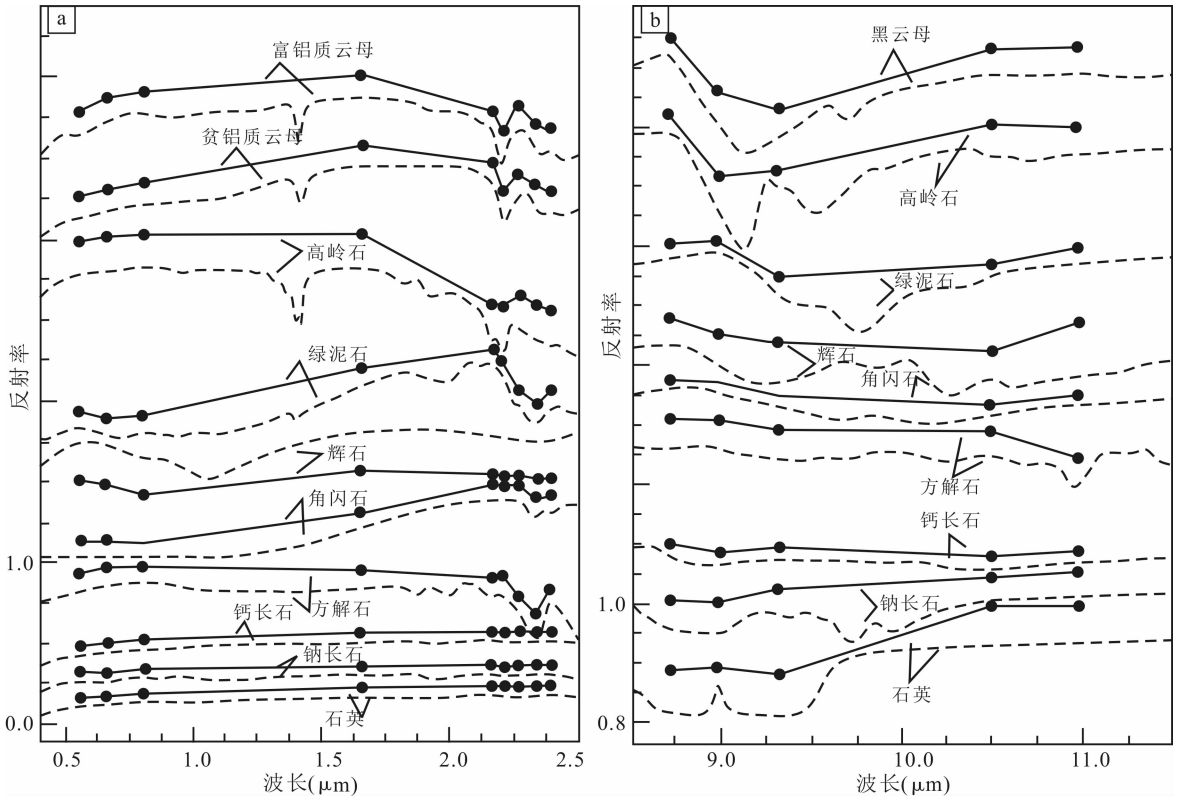
其中,  $Fe^{3+}$  指数 ( $Fe3$ ):  $Fe^{3+}$  离子信息运用波段

比值公式  $band2/band1$  值可以对其进行识别与增强, 是提取褐铁矿、黄铁矿等矿物信息的有效手段(图 2)(Rowan et al., 2005)。

$Fe^{2+}$  指数 ( $Fe2$ ): 运用波段运算公式  $band1/band2 + band5/band3$  可以突出  $Fe^{2+}$  离子的信息显示(图 2)(Rowan et al., 2005)。大量的研究实践表明, 含  $Mg-OH$  的富铁硅酸盐矿物, 如绿泥石、绿帘石同样适用于该波段比。

$Al-OH$  指数 ( $RBD6$ ):  $Al-OH$  基团的光谱特征表现为在  $2.20 \mu m$  附近有较宽的吸收谷, 运用波段运算  $(band5 + band7)/band6$  能突出富  $Al-OH$  基团的矿物信息, 可以识别白云母、高岭土等黏土矿物(图 2)(Rowan et al., 2005)。

$Mg-OH$  指数 ( $RBD8$ ):  $Mg-OH$  基团在  $2.30 \sim 2.40 \mu m$  有明显的强吸收特征, ASTER 波段比  $(band6 + band9)/band8$  可以突出富  $Mg-OH$  矿物的信息, 可以以此来鉴定含角闪石、黑云母等矿物岩石(图 2)(Rowan et al., 2005), 并且对于含绿泥石、



(a). 特征矿物可见光-近红外波段反射率曲线; (b). 特征矿物热红外波段反射率曲线

图2 主要岩石矿物的反射光谱图(虚线为实际光谱,实线为重采样至 ASTER 的光谱)(Rowan et al., 2005)

Fig. 2 Reflectance spectra of major minerals (dashed line is actual spectrum, solid line is resampled to ASTER spectrum)

绿帘石蚀变的变质岩同样有效,而在此波段范围内碳酸根离子具有较为相似的特征,因此会混入部分碳酸根离子的信息,需要根据其他指数加以区分。

**石英指数 (Qi):** 该指数运用的计算方法为:  $\text{band11}/(\text{band10} + \text{band12}) * (\text{band13}/\text{band12})$ , 指示了  $\text{SiO}_2$  在岩石矿物中的含量,前人多次验证了该方法的有效性(Rockwell et al., 2008)。火成岩一般随  $\text{SiO}_2$  含量的降低,岩石由酸性向基性演化(花岗岩至橄榄岩)。因此,公式  $\text{band12}/\text{band13}$  可以作为岩石中铁镁含量高低的衡量依据(图 2)(Rockwell et al., 2008),称为铁镁指数(MI)。

**辉石指数(RBD13):** 在实际运用过程中,铁镁指数其识别地层中的超基性岩片效果不是很明显。普通辉石在  $10.52 \mu\text{m}$  附近具有光谱吸收极大值特征(图 2),本次工作根据辉石的光谱特征,运用 ASTER 波段比  $(\text{band10} + \text{band14})/\text{band13}$  来提取富辉石矿物的信息,该波段比记作辉石指数(RBD13)。

**方解石指数(Ci):** 碳酸根离子( $\text{CO}_3^{2-}$ ) 在  $2.32 \sim 2.33 \mu\text{m}$  和  $11.2 \mu\text{m}$  附近均有发射率极小值的特征,

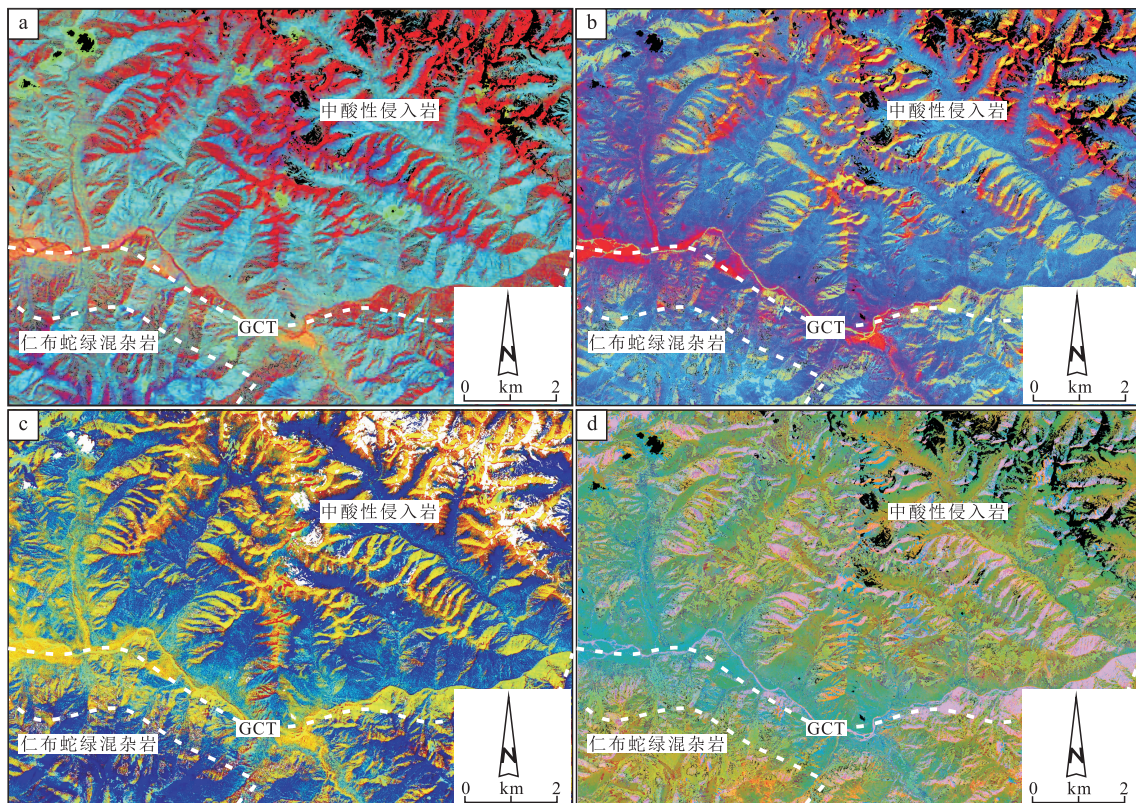
ASTER 波段比  $\text{band13}/\text{band14}$  对于提取如灰岩、大理岩等具有重要意义(图 2)(Mars et al., 2011)。

### 3 岩性单元识别

本次研究通过系统分析念扎金矿岩石矿物的光谱特征,在数据预处理的基础上,对岩石矿物光谱的光谱信息进行强化,共提取了 8 种矿物识别指数,包括:① 石英指数(QI)。② 铁镁指数(MI)。③ 方解石指数(Ci)。④ 辉石指数(RBD13)。⑤  $\text{Fe}^{2+}$  指数( $\text{Fe}2$ )。⑥  $\text{Fe}^{3+}$  指数( $\text{Fe}3$ )。⑦ Al-OH 指数(RBD6)。⑧ Mg-OH 指数(RBD8)。将各矿物识别指数进行假彩色合成,可以实现岩性单元的可视化(图 3)。

念扎金矿南部构造仁布蛇绿混杂岩主要混杂了板岩、玄武岩和大理岩,整体而言该岩组相对富集辉石和富碳酸盐矿物(胡敬仁, 2014; 张雄等, 2019)。因此,辉石指数与方解石指数会呈现高值特征(图 3a)。冈底斯岩浆岛弧带大面积出露于研究区北部,





(a). ASTER RGB; QI - RBD13 - CI; (b). ASTER RGB; QI - RBD8 - MI; (c). ASTER RGB; QI - RBD6 - MI; (d). ASTER RGB; RBD8 - Fe2 - RBD6

图3 研究区各矿物识别指数假彩色合成影像

Fig. 3 False-color composite images of the mineral identification indexes of the study area

主要岩性为白垩纪和始新世的中酸性侵入岩,侵入岩体由中酸性向酸性岩浆演化,岩性由闪长岩过渡为花岗岩,石英矿物含量增加。因此,始新世的侵入岩中石英指数具有区域极大值的特征(图 3a、图 3b、图 3c)。同时,白垩纪岩体中辉石作为次要矿物出现(胡敬仁,2014),导致该世代岩体中辉石指数高于北部背景值(图 3a)。比马组( $K_1b$ )是一套火山碎屑沉积岩,以安山岩、英安岩为主夹砂岩大理岩,空间上主要与酸性侵入岩接触,其铁镁指数(MI)要高于北部的中-酸性侵入岩,大理岩中含有大量的白云石,因此会使地层中方解石指数表现出高值特征(图 3a)。比马组中英安岩、安山岩发生了强烈的高岭土化、绢云母化(胡敬仁,2014),其中的 Al - OH 可通过 ASTER 波段比  $(band5 + band7) / band6$  进行识别(图 3c)。

朗杰学岩群中宋热岩组( $T_3s$ )可表现为板岩夹变质砂岩、变玄武岩,发育了绿泥石-绿帘石蚀变,可见黄铁矿化(胡敬仁,2014)。在冈底斯深大断裂

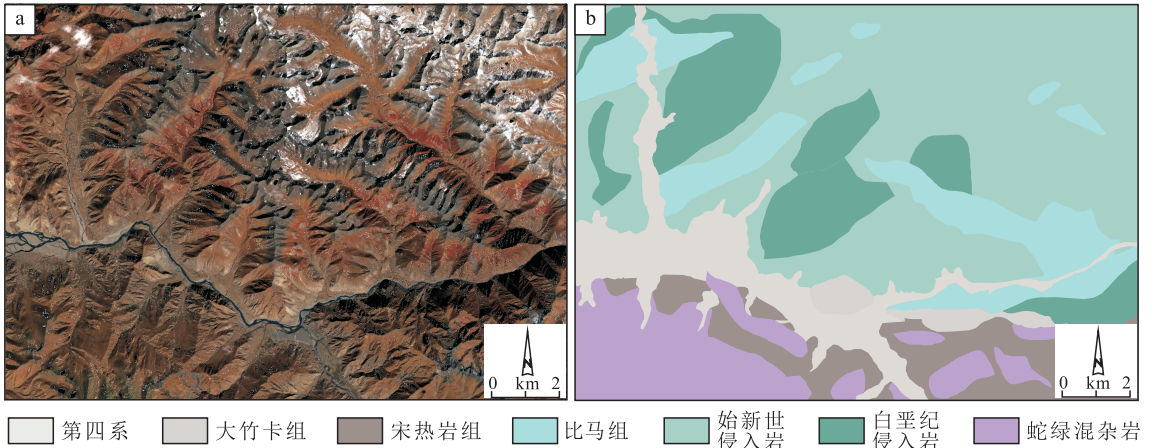
(GCT)南部主要将其与蛇绿岩进行区分,通常宋热岩组具有较低的辉石指数和较高的 RBD8、Fe2 指数(图 3a、图 3b、图 3d)。

冈底斯弧前盆地大竹卡组在研究区也有少量范围出露,砂砾岩物源区主要为岩浆岛弧碎屑砂砾岩、砂砾岩大竹卡组,矿物类型多样(胡敬仁,2014),在假彩色合成影像上表现为杂色特征。

此外,研究区内广泛分布了第四系沉积物,通过目视解译的方法识别较为容易(图 4a),解译结果见图 4b。

#### 4 蚀变信息提取

造山型金矿床少有蚀变分带的特征,内蚀变带受到流体成分的控制,外蚀变带以围岩为主导,矿化远端的围岩蚀变与金矿化并无关联(王庆飞等,2019),因此内蚀变带是造山型金矿床的重要找矿标志。



(a). ASTER band3-2-1 合成影像;(b). 基于矿物光谱指数解译的研究区岩性单元

图 4 研究区岩性单元遥感解译结果图

Fig. 4 Remote sensing interpretation results of lithology units in the study area

念扎金矿产生于镁铁岩席与闪长岩体的接触处,金主要以自然金的形式赋存在蚀变闪长岩中(李华健等,2017)。矿化主要发生在蚀变闪长岩中,越靠近超基性岩片,蚀变越强,蚀变类型主要包括强硅化、褐铁矿化、碳酸盐化和绿泥石化。

#### 4.1 蚀变信息加强

笔者采用石英指数( $Q_i$ )、三价铁指数( $Fe_3$ )、方解石指数( $C_i$ )、二价铁指数( $Fe_2$ )作为硅化、褐铁矿化、碳酸盐化、绿泥石化的蚀变因子。在研究区北部选取了穿越矿体和不同世代火山岩约 20 km 的遥感光谱剖面(图 5a),采集了不同蚀变因子光谱曲线,分析各类型蚀变与金矿的空间位置关系(图 5b)。

可以发现,比马组夹有灰岩地层导致方解石指数表现为高值特征,代表了碳酸盐化的方解石指数( $C_i$ )在 A-A' 剖面 14 km 附近发生跃变,在矿化中心表现出连续的高值特征,碳酸盐化蚀变与金矿范围表现出高度的空间一致性(图 5b)。矿体远端褐铁矿化、绿泥石化、硅化的蚀变强度由矿体边部向外围逐渐减弱,在矿化中心没有高值特征。因此,笔者将碳酸盐化蚀变确定为念扎金矿内蚀变类型,空间上与金矿化具有一致性。

#### 4.2 蚀变带圈定

在内蚀变带类型确定的基础上,采用最优密度分割的方法定量计算蚀变强度的异常下限。最优密度分割(刘庆生,1999;吴德文等,2002)的方法使各分割段的段内离差总和最小,段间离差总和最大,定

量确定各级分割点,该方法提取的蚀变异常信息可以加强高值区的信息而压制其他区段的显示(张守林,2006)。

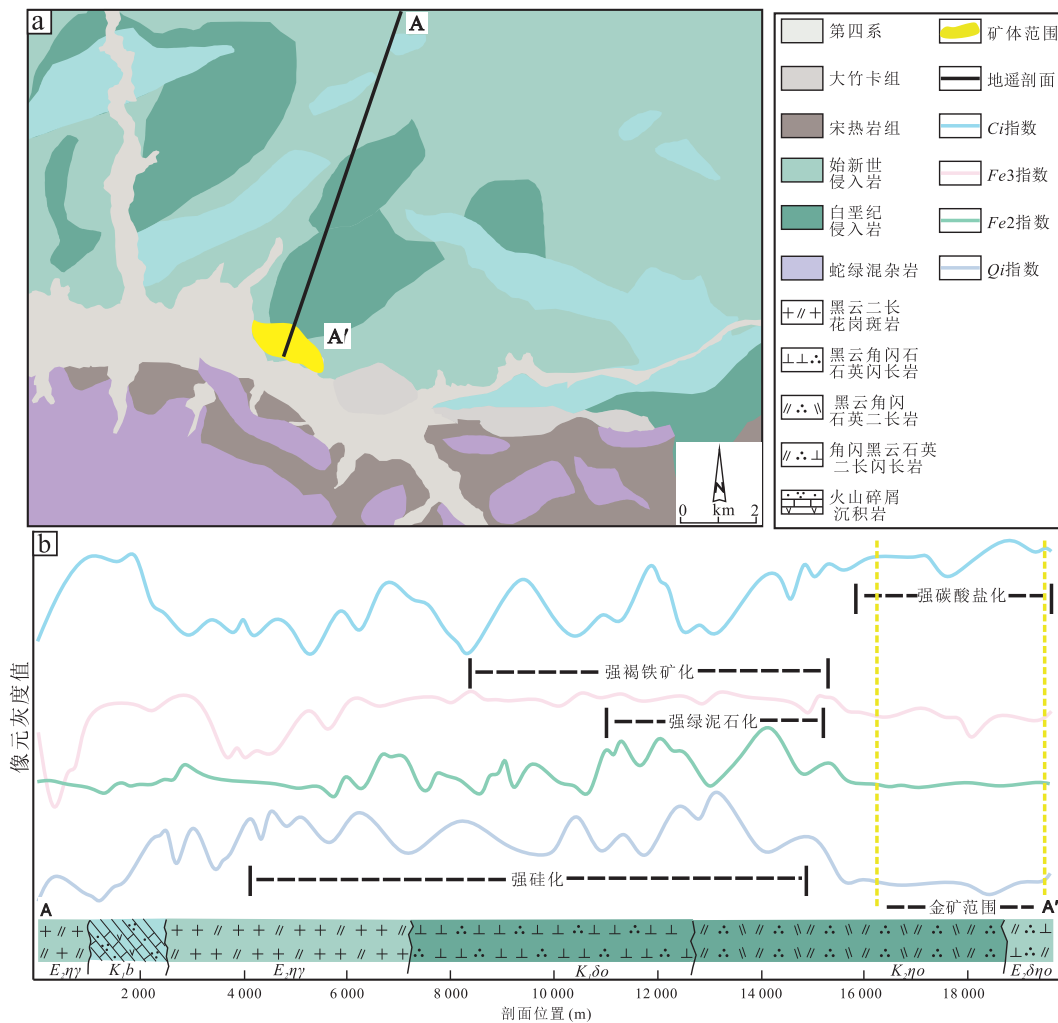
从图 6 可以看出,当方解石指数( $C_i$ )、褐铁矿指数( $Fe_3$ )、绿泥石指数( $Fe_2$ )、石英指数( $Q_i$ )分割段数分别为 4、4、5、5 时,曲线趋于平稳,分别为合理分割段数,从而定量确定了蚀变强度的分割阈值(图 6)。由于比马组的灰岩地层(图 7a)以及矿区东北部花岗岩体石英含量总体较高(图 7d),会导致方解石指数以及石英指数出现高异常。总体来看,强蚀变带基本沿着雅鲁藏布江缝合带展布,远离超基性岩片蚀变强度逐渐减小,以最优密度分割法计算的阈值作为圈定矿区蚀变带的依据。

## 5 找矿有利区推测

雅鲁藏布江缝合带中深大断裂及其发育的次级构造系统为该区带提供了优越的成矿环境(侯增谦等,2008)。念扎矿区的金矿化严格受到了次级断裂控制(张雄,2017)。因此,对复杂的构造信息进行筛选,提取出控矿构造信息,是念扎金矿遥感成矿预测的重要步骤。笔者以闪长岩界线、内蚀变带、构造为依据来推测找矿有利区(图 8)。

矿区内主要构造包括了冈底斯逆冲大断裂(GCT)及 F1、F2、F3 三条次级构造。区域地质调查资料表明,北东向的 F3 断层切穿了大竹卡组,晚于念扎金矿的成矿年龄(张雄等,2019)。因此,F3 不





(a). 地遥剖面 A-A' 穿越不同时代的地质体和矿化范围;(b). 不同蚀变因子光谱特征曲线 (包括 Ci 指数、Fe3 指数、Fe2 指数、Qi 指数, 分别指示碳酸盐化、褐铁矿化、绿泥石化、硅化蚀变强度)

图 5 研究区综合地遥剖面图

Fig. 5 Comprehensive geology-remote sensing section in the study area

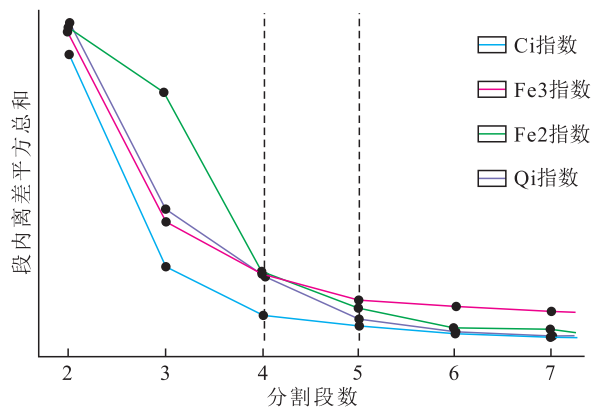


图 6 不同蚀变因子段内离差平方总和的变化曲线图

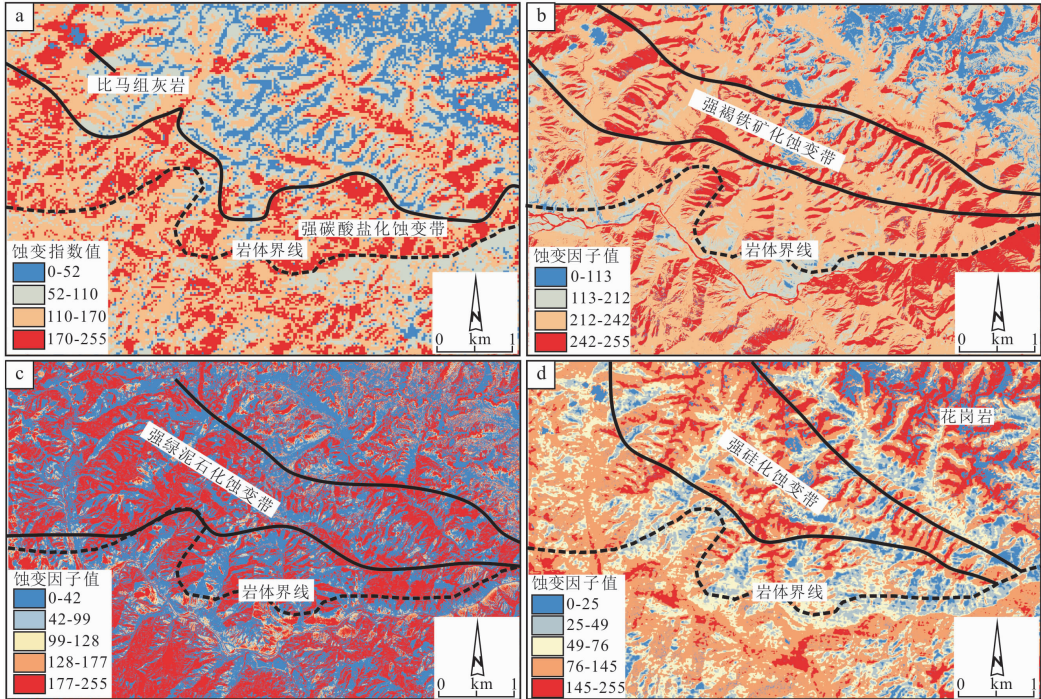
Fig. 6 The variation curve of the sum of squared deviations within the segments of different alteration factors

是导矿构造。矿体通常在侵入岩构造破碎带中产生,因此比马组(K<sub>1b</sub>)火山碎屑岩在靶区推测范围之外。

综上所述,本次工作共推测了 2 处找矿有利区(靶区 A、靶区 B)。其中,靶区 A 受控于逆断层 F1,空间上靠近仁布蛇绿混杂岩,碳酸盐化蚀变强烈,成矿潜力较大;靶区 B 位于韧性剪切带 F2 一侧,南部有大量的超基性岩片分布,也具有一定的成矿潜力(图 8)。

## 6 讨论

雅鲁藏布江缝合带、哀牢山构造剪切带是青藏



(a). 碳酸盐化;(b). 褐铁矿化;(c). 绿泥石化;(d). 硅化

图 7 研究区各蚀变因子灰度分级图

Fig. 7 Gray scale map of each alteration factor in the study area

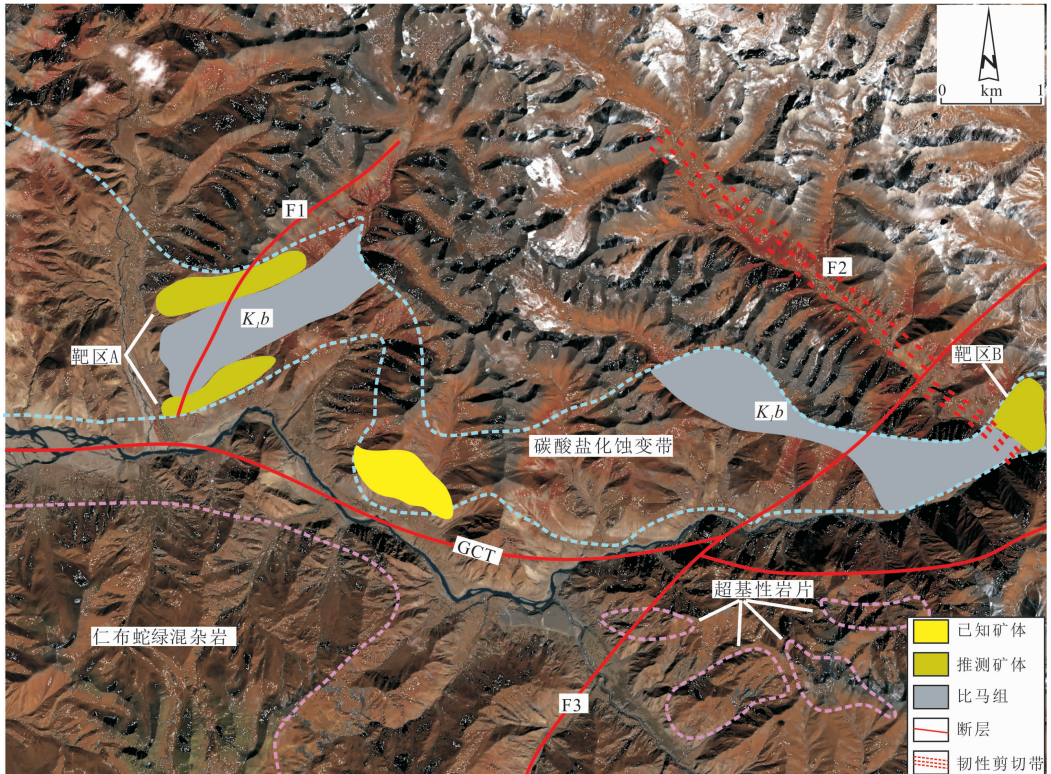


图 8 念扎金矿找矿有利区推测结果图

Fig. 8 The prediction result of favorable area for ore prospecting in Nianzha gold deposit

高原重要的造山型金成矿带(王庆飞等,2019,2020; Wang et al., 2020),其中典型的造山型金矿,如镇沅金矿、长安金矿、金厂金矿、邦布金矿、马攸木金矿等都发育石英脉型金矿化(裴英茹,2016;孙晓明等,2010;Wang et al., 2020;温春齐等,2006;张雄等,2019),硅化与金矿化关系密切。

念扎金矿成矿过程复杂,多期流体活动导致了成矿阶段的多期次性(张雄,2017),区内的成矿作用可分为热液成矿期和表生氧化期,早期中期的矿化作用主要为含石英的硅化作用,晚期的方解石脉对成矿作用不大,但是覆盖了早期的硅化,导致基于反映表壳信息的遥感数据识别出的碳酸盐化蚀变带与金矿范围具有空间一致性。

## 7 认识与结论

笔者基于 ASTER 光谱特征,对念扎金矿进行了岩性填图和蚀变信息提取,以此圈定找矿靶区,总结出以下几点认识。

(1)基于 ASTER 岩石矿物光谱特征建立了  $Fe^{3+}$  指数( $Fe3$ )、 $Fe^{2+}$  指数( $Fe2$ )、Al-OH 指数( $RBD6$ )、Mg-OH 指数( $RBD8$ )、石英指数( $Qi$ )、铁镁指数( $MI$ )、方解石指数( $Ci$ ),以及笔者首次提出的辉石指数( $RBD13$ ),其波段计算方法为  $(band10 + band14)/band13$ 。

(2)念扎金矿的中酸性侵入岩、超基性岩、碎屑沉积岩的矿物组成差异明显,基于 ASTER 岩石矿物光谱特征建立矿区的矿物识别指数,可以有效的提取矿区的岩性单元。

(3)念扎金矿具有造山型金矿的蚀变特征,基于“地质-遥感综合剖面+最优密度分割法”分析各类型蚀变与矿体的空间位置关系,是识别该矿区内蚀变带的有效手段。

(4)将提取的内蚀变带异常范围与含矿地质体界线、已知的控矿构造叠加分析,以此推测找矿有利区,具有可靠的理论支持。

## 参考文献(References):

侯增谦,杨竹森,徐文艺,等. 青藏高原碰撞造山带:I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 337-358.

HOU Zengqian, YANG Zhuseng, XU Wenyi, et al. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(4): 337-358.

侯增谦,王二七. 印度—亚洲大陆碰撞成矿作用主要研究进展[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 20-37.

HOU Zengqian, WANG Erqi. Metallogenesis of the Indo-Asian collisional orogen: new advances[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(3): 20-37.

胡敬仁. 中华人民共和国区域地质调查报告—日喀则市幅(H45C003004)[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2014: 86-190.

HU Jingren. Regional Geological survey report of the People's Republic of China—Xigaze (H45C003004) [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014: 86-190.

李华健,王庆飞,杨林,等. 青藏高原碰撞造山背景造山型金矿床:构造背景、地质及地球化学特征[J]. 岩石学报, 2017, 33(7): 2189-2201.

LI Huajian, WANG Qingfei, YANG Lin, et al. Orogenic gold deposits formed in Tibetan collisional orogen setting: Geotectonic setting, geological and geochemical features[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(7): 2189-2201.

刘庆生. 有序岩石遥感信息的最优分割[J]. 国土资源遥感, 1999, 10(2): 50-54.

LIU Qingsheng. Optimum segmentation of sequential rock remote sensing information [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1999, 10(2): 50-54.

妙超. 新疆博格达南缘化探与遥感信息综合应用及找矿预测[J]. 西北地质, 2015, 48(1): 213-220.

MIAO Chao. Comprehensive application of geochemical prospecting and remote sensing information in prospecting of the Southern of Bogda, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(1): 213-220.

裴英茹. 青藏高原南部造山型金矿地质特征及成矿机制[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2016.



- PEI Yingru. Geological characteristics and metallogenic mechanism of orogenic gold deposit in the southern area of Tibetan Plateau[D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2016.
- 宿虎,陈美媛,张丹青,等. 高植被覆盖区遥感矿化蚀变信息提取方法研究——以甘肃省西河县大桥—石峡地区为例[J]. 西北地质, 2020, 53(1): 146-161.
- SU Hu, CHEN Meiyuan, ZHANG Danqing, et al. Study on the Method of Extracting Information of Mineralization Alteration by using Remote Sensing in High Vegetation Coverage Area-Taking Daqiao-Shixia Area of Xihe County, Gansu Province For Example [J]. Northwest-ern Geology, 2020, 53(1): 146-161.
- 孙晓明,韦慧晓,翟伟,等. 藏南邦布大型造山型金矿成矿流体地球化学和成矿机制[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1672-1684.
- SUN Xiaoming, WEI Huixiao, ZHAI Wei, et al. Ore-forming fluid geochemistry and metallogenic mechanism of Bangu large scale orogenic gold deposit in southern Tibet, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(6): 1672-1684.
- 田淑芳,詹骞. 遥感地质学[M]. 北京:地质出版社,2013: 1-324.
- TIAN Shufang, ZHAN Qian. Remote sensing geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013:1-324.
- 王庆飞,邓军,赵鹤森,等. 造山型金矿研究进展:兼论中国造山型金成矿作用[J]. 地球科学, 2019, 44(6): 2155-2186.
- WANG Qingfei, DENG Jun, ZHAO Hesen, et al. Review on Orogenic Gold Deposits[J]. Earth Science, 2019, 44(6): 2155-2186.
- 王庆飞,邓军,翁伟俊,等. 青藏高原新生代造山型金成矿系统[J]. 岩石学报, 2020, 36(5): 1315-1353.
- WANG Qingfei, DENG Jun, WENG Weijun, et al., Cenozoic orogenic gold system in Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(5):1315-1353.
- 温春齐,多吉,范小平,等. 西藏西部马攸木金矿床成矿流体的特征[J]. 地质通报, 2006, 25(1-2): 261-266.
- WEN Chunqi, DUO Ji, FAN Xiaoping, et al. Characteristics of ore fluids of the Mayun gong deposit, western Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(1-2): 261-266.
- 吴德文,张远飞,朱谷昌. 遥感图像岩石信息提取的最优密度分割方法[J]. 国土资源遥感, 2002, 13(4): 51-54.
- WU Dewen, ZHANG Yuanfei, ZHU Guchang. The best density separation method for extracting rock information from remote sensing image[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2002, 13(4): 51-54.
- 闫颖,陈有炳,孟勇,等. 遥感技术在东天山大黑山地区地质填图中的应用[J]. 西北地质, 2015, 48(2): 231-237.
- YAN Yin, CHEN Youxin, MENG Yong, et al. Application of Remote Sensing Technique in the Geologic Mapping of Daheishan Region, Eastern Tianshan[J]. Northwest-ern Geology, 2015, 48(2): 231-237.
- 张守林. 基于 ETM 数据矿化蚀变信息定量提取方法研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2006.
- ZHANG Shoulin. A study on methods used to quantitatively extract mineralized alteration information from ETM data[D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2006.
- 张雄. 青藏高原雅鲁藏布江缝合带造山型金矿成矿作用研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2017.
- ZHANG Xiong. Mineralization of orogenic gold deposits in the Indus-Yarlung Tsangpo suture zone of Tibetan Plateau[D]. Beijing: China University of Geoscience(Beijing), 2017.
- 张雄,赵晓燕,杨竹森. 念扎金矿床热历史:锆石 U-Pb、(U-Th)/He 及磷灰石裂变径迹年代学的制约[J]. 地球科学, 2019, 44(06): 2039-2051.
- ZHANG Xiong, ZHAO Xiaoyan, YANG Zhusen. Thermal History of Nianzha Gold Deposit: Constraints from Zircon U-Pb, (U-Th)/He and Apatite Fission Track

- Geochronology [J]. *Earth Science*, 2019, 44 (06): 2039-2051.
- Chung Sunlin, Chu Meifei, Zhang Yuquan, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. *Earth Science Reviews*, 2005, 68(3-4): 173-196.
- Ding Lin, Kapp P, Wan Xiaoqiao. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet [J]. *Tectonics*, 2005, 24(3): 0278-7407.
- Hunt G R, Salisbury J W, Lenhoff C J. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. VI. Additional silicates [J]. *Modern Geology*, 1973, 4: 85-106.
- Hunt G R. Near-infrared (1.3-2.4)  $\mu\text{m}$  spectra of alteration minerals—Potential for use in remote sensing [J]. *Geophysics*, 1979, 44(12): 1974-1986.
- 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.
- Mars J C, Rowan L C. Aster spectral analysis and lithologic mapping of the khanneshin carbonatite volcano, Afghanistan [J]. *Geosphere*, 2011, 7(1): 276-289.
- Phillips N, Powell R. A practical classification of gold deposits, with a theoretical basis [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65(3): 568-573.
- Rockwell B W, Hofstra A H. Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using Aster thermal infrared emissivity data—implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas [J]. *Geosphere*, 2008, 4 (1): 218-246.
- 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.
- Rowan L C, Mars J C, Simpson C J. Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99(1-2): 105-126.
- Wang Qingfei, Groves D I, Deng Jun, et al. Evolution of the Miocene Ailaoshan orogenic gold deposits, southeastern Tibet, during a complex tectonic history of lithosphere-crust interaction [J]. *Mineralium Deposita*, 2020, 55: 1085-1104.
- Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28(1): 211-280.