



## 遥感在大兴安岭森林覆盖区地质矿产调查中的应用 ——以黑龙江洛古河 1:5 万区域地质矿产调查工作为例

周传芳<sup>1</sup>, 陈卓<sup>1,2</sup>, 孙彦峰<sup>1</sup>, 梁中恺<sup>1</sup>, 杨长保<sup>3</sup>, 姜平<sup>1</sup>, 冯嘉<sup>1</sup>, 杜海双<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086;

2. 中国地质大学, 北京 100083; 3. 吉林大学, 吉林 长春 130026

**摘要:** 大兴安岭地区森林覆盖严重, 气候严寒, 交通极为不便, 野外有效工作时间短, 给区域地质矿产调查工作增加了难度, 急需遥感手段提高成果质量和效率。在黑龙江大兴安岭洛古河等 4 幅 1:5 万区域地质矿产调查工作中, 利用 SPOT7、Landsat7/8、ASTER 等多种遥感数据开展地质矿产解译, 进行遥感影像分区, 建立地层、构造和侵入岩解译标志, 提取羟基和铁染蚀变异常, 结合水系沉积物测量成果划分了成矿有利区, 有效降低了地质矿产调查强度, 提高了调查效率, 增强了调查质量。表明遥感技术在大兴安岭高植被覆盖区地质矿产调查过程中能够取得较好效果。

**关键词:** 遥感; 地质矿产调查; SPOT7; Landsat7/8; ASTER; 森林覆盖区; 大兴安岭

## REMOTE SENSING APPLIED IN GEOLOGICAL AND MINERAL SURVEY IN FOREST-COVERED AREA OF DAXINGANLING MOUNTAINS: A Case Study of 1:50 000 Regional Geological and Mineral Survey in Luoguhe, Heilongjiang Province

ZHOU Chuan-fang<sup>1</sup>, CHEN Zhuo<sup>1,2</sup>, SUN Yan-feng<sup>1</sup>, LIANG Zhong-kai<sup>1</sup>,

YANG Chang-bao<sup>3</sup>, JIANG Ping<sup>1</sup>, FENG Jia<sup>1</sup>, DU Hai-shuang<sup>1</sup>

1. Harbin Center of Comprehensive Natural Resources Survey, CGS, Harbin 150086, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Jilin University, Changchun 130026, China

**Abstract:** Due to the heavy forest cover, harsh climate, inconvenient transportation and short effective time for field work in Daxinganling Mountains, remote sensing technology is urgently needed to improve the quality and efficiency of regional geological and mineral survey. In the 1:50 000 regional geological and mineral survey of Luoguhe in Heilongjiang Province, multiple remote sensing data including SPOT7, Landsat7/8 and ASTER are used for geological and mineral interpretation, remote sensing image zoning, establishment of interpretation markers for strata, structures and intrusive rocks, and extraction of hydroxyl and iron-stained alteration anomalies, and the favorable mineralization areas are divided combined with the stream sediment survey results, which both effectively reduces the geological survey intensity and improves the survey efficiency and quality. The study indicates that remote sensing technology can achieve good results in geological mineral survey in the dense vegetation coverage areas of Daxinganling Mountains.

**Key words:** remote sensing; geological and mineral survey; SPOT7; Landsat7/8; ASTER; forest-covered area; Daxinganling Mountains

收稿日期: 2021-07-21; 修回日期: 2021-10-19. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“黑龙江大兴安岭地区洛古河、兴华沟林场、阿凌河、1072.3 高地幅 1:5 万区域地质矿产调查”(DD2016007803), “大兴安岭山区生态地质调查”(DD20191014).

作者简介: 周传芳(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质矿产、生态地质及多金属勘查和研究, 通信地址 黑龙江省哈尔滨市南岗区保健副路 1 号, E-mail//546011015@qq.com

## 0 引言

遥感数据是区域地质调查中必不可少的数据之一<sup>[1]</sup>,航空航天遥感技术在大中比例尺区域地质填图中的应用被列入国家重点新技术推广项目计划以来,在区域地质调查、生态环境调查和地质灾害调查等工作中发挥了越来越重要的作用<sup>[2-5]</sup>.遥感图像能够详尽地反映地质景观,在解决基础地质问题、提高区域地质调查质量以及加快区域地质调查步伐等方面具有显著的作用<sup>[6-8]</sup>,特别是在道路更新、岩性识别、构造解译、蚀变异常提取等方面具有独特的优势<sup>[4]</sup>.遥感先行,地质现象引导地质路线的填图方法被普遍运用到了区域地质填图之中<sup>[9-10]</sup>.

遥感技术在我国西北部基岩裸露区和西南部岩溶地区的区域地质调查中发挥了重要作用<sup>[11-12]</sup>,在大兴安岭森林覆盖区对于中生代火山机构的圈定、区域断裂构造的解译效果较好,但在岩石和地层解译方面效果不明显,这主要是由于植被覆盖和地表残坡积层厚,岩石光谱反射受到影响所致.大兴安岭是中国重要的成矿区带之一,2000年以来,中国地质调查局先后在大兴安岭北部区调空白区部署了多幅1:5万区域地质矿产调查工作<sup>[13]</sup>.该地区植被发育,基岩露头稀少,交通极为不便.同时,该区气候寒冷,适合野外地质工作的时间短,给区域地质矿产调查增加了难度.在中国地质调查局“黑龙江大兴安岭洛古河等4幅1:5万区域地质矿产调查”项目实施过程中,采用遥感技术先行的原则:布置路线前遥感地质解译—路线中遥感解译验证—路线后对遥感影像总结分析,形成地质体解译标志,进而指导合理布设地质路线,并结合水系沉积物测量异常在遥感圈定的成矿利于区针对性地开展矿产勘查工作,取得了较好效果.

## 1 区域地质概况

研究区位于大兴安岭北部黑龙江省和内蒙古自治区结合部位,区内地势西南高东北低,海拔标高在350~1072 m之间,属低山地形.大地构造位置处于兴蒙造山带东段额尔古纳地块之上(图1a).研究区出露的地层包括古元古界兴华渡口岩群变质岩、南华系佳疙瘩组变质岩、震旦系额尔古纳河组变质岩、晚三叠世—早侏罗世富源沟中—基性火山岩(未建组)<sup>①</sup>、中上

侏罗统一—白垩统额尔古纳河群陆源碎屑沉积岩(自下而上依次出露绣峰组、二十二站组、漠河组、阿凌河砾岩<sup>①</sup>)、下白垩统九峰山组砂岩、早白垩世甘河组基性火山岩和新生代古近系孙吴组和第四系堆积物等.岩浆岩主要包括早寒武世、晚奥陶世、晚二叠世、早侏罗世和早白垩世中酸性侵入岩,岩性以二长花岗岩、花岗闪长岩为主.受漠河推覆构造的影响,研究区内沉积盆地北部地质体多发生韧性变形;脆性断裂以北西、北东向为主,近东西向、近南北向次之(图1b)<sup>[14]</sup>.

## 2 遥感数据处理

### 2.1 数据选择

遥感数据尽量选择云量小、冰雪植被覆盖少的影像资料,东北地区一般春秋季节为最佳时相.经多种多时相数据对比,最终选定研究区春季和秋季的SPOT 7、Landsat 7 ETM+、Landsat 8 OLI、ASTER影像数据(表1).3类影像数据均无云和冰雪覆盖,植被影响较少.

### 2.2 彩色合成

彩色合成时的波段选择是根据影像应用目的、制图区地质情况和图像信息量丰富程度确定的<sup>[3]</sup>.由于人眼对彩色影像的识别远高于对灰度影像的识别,因此可通过对多光谱或高光谱进行彩色合成来提升目视解译的辨别能力<sup>[9]</sup>.彩色合成处理时,波段选择是关键,不同的波段组合反映的地貌信息程度不同,取得的效果也不一样.相关系数反映了波段相关的程度,其值越小,信息量的重叠就越小.方差反映像元亮度值离散度,方差越大,信息量越丰富.理想的波段组合应该是波段相关系数最小,方差最大(信息量丰富).考虑到不同波段的相关性(表2),在利用Landsat 7 ETM+进行彩色合成时,选定了7、4、2波段,合成后的图像不仅充分反映研究区不同地物的界线和相同地物间的层次,而且影像色彩丰富,接近于真彩色,反差适中.针对Landsat 8 OLI则选定7、5、3波段合成方式,合成效果显示,其波段波长和信息量均与Landsat ETM+的7、4、2波段合成相近.

### 2.3 几何校正

以国家地理测绘局1:5万地形图为参考图像进行遥感图像校正.先将地形图以300 dpi分辨率、TIF格

①武警黄金第三支队.1:5万区域地质矿产调查报告(洛古河幅、兴华沟林场幅、阿凌河幅、1072.3高地幅).2019.

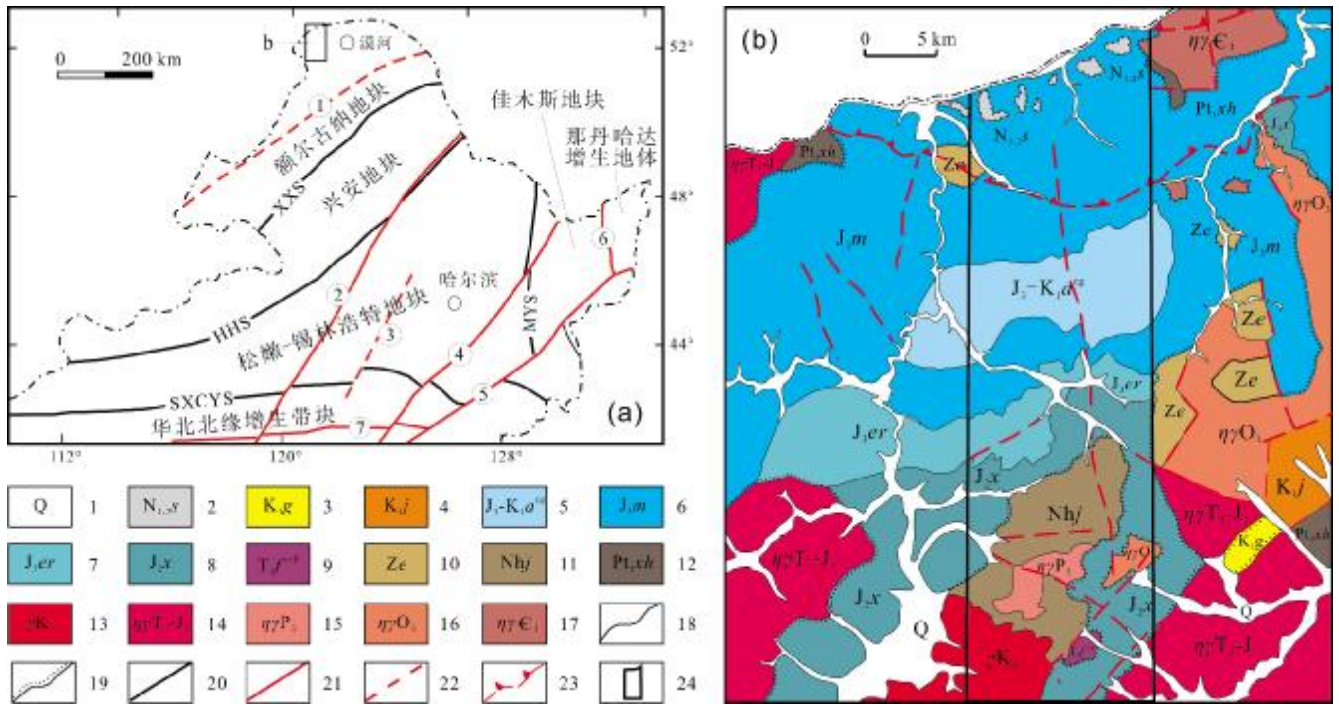


图1 研究区大地构造位置及地质简图

Fig. 1 Tectonic location and geological sketch map of the study area

a—东北北部大地构造分区图(据文献[15])(geotectonic division of northern Northeast China, from Reference [15]); b—洛古河地区地质图(据文献[14])(geological map of Luoguhe region, from Reference [14]); XXS—新林—喜桂图缝合带(Xinlin-Xiguitu suture zone); HHS—贺根山—黑河缝合带(Hegenshan-Heihe suture zone); MYS—牡丹江—依兰缝合带(Mudanjiang-Yilan suture zone); SXCYs—索伦—西拉木伦河—长春—延吉缝合带(Solon-Xar Moron River-Changchun-Yanji suture zone); ①—得尔布干断裂(Derbugan fault); ②—嫩江—八里罕断裂(Nenjiang-Balihan fault); ③—中央断裂(central fault); ④—佳木斯—伊通断裂(Jiamusi-Yitong fault); ⑤—敦化—密山断裂(Dunhua-Mishan fault); ⑥—跃进山断裂(Yuejinshan fault); ⑦—赤峰—开原断裂(Chifeng-Kaiyuan fault); 1—第四系(Quaternary); 2—新近系中新统—上新统孙吴组(Neogene Miocene-Pliocene Sunwu fm.); 3—下白垩统甘河组(L. Cretaceous Ganhe fm.); 4—下白垩统九峰山组(L. Cretaceous Jiufengshan fm.); 5—上侏罗统—下白垩统阿凌河砾岩(U. Jurassic-L. Cretaceous Alinghe conglomerate); 6—上侏罗统漠河组(U. Jurassic Mohe fm.); 7—上侏罗统二十二站组(U. Jurassic Ershierzhan fm.); 8—中侏罗统绣峰组(M. Jurassic Xiufeng fm.); 9—晚三叠世—早侏罗世富源沟中—基性火山岩(L. Triassic-E. Jurassic Fuyuangou intermediate-basic volcanic rock); 10—震旦系额尔古纳组(Sinian Erguna River fm.); 11—南华系佳疙瘩组(Jiageda fm. of Nanhua sys.); 12—古元古界兴华渡口群(Paleoproterozoic Xinghuadukou gr.); 13—早白垩世花岗岩(E. Cretaceous granite); 14—晚三叠世—早侏罗世二长花岗岩(L. Triassic-E. Jurassic monzogranite); 15—晚二叠世二长花岗岩(L. Permian monzogranite); 16—晚奥陶世二长花岗岩(L. Ordovician monzogranite); 17—晚寒武世二长花岗岩(L. Cambrian monzogranite); 18—整合界线(conformity); 19—角度不整合界线(angular unconformity); 20—构造边界(tectonic boundary); 21—中生代断裂(Mesozoic fault); 22—遥感解译断层(remote sensing-interpreted fault); 23—推覆构造(nappe structure); 24—研究区位置(study area)

表1 遥感数据基本参数

Table 1 Basic parameters of remote sensing data

数据采集时间	空间分辨率	数据类型	用途
2014-04-29	多光谱 30 m, 全色 15 m	Landsat 8 OLI	构造、岩石组合解译
1999-09-03	多光谱 30 m, 全色 15 m	Landsat 7 ETM+	构造、岩石组合、蚀变解译
2013-09-01	多光谱 30 m, 全色 15 m	Landsat 8 OLI	构造、岩石组合解译
2014-09-20	多光谱 30 m, 全色 15 m	Landsat 8 OLI	构造、岩石组合解译
2015-09-23	多光谱 30 m, 全色 15 m	Landsat 8 OLI	构造、岩石组合解译
2015-09-19	多光谱 6 m, 全色 1.5 m	SPOT 7	构造、岩石组合解译

表2 Landsat 7 ETM+各波段间相关系数  
Table 2 Correlation coefficients between bands of Landsat 7 ETM+

波段	1	2	3	4	5	6	7
1	1.00	0.94	0.96	0.15	0.74	0.30	0.84
2		1.00	0.96	0.24	0.80	0.77	0.87
3			1.00	0.18	0.81	0.81	0.90
4				1.00	0.43	0.66	0.18
5					1.00	0.85	0.93
6						1.00	0.91
7							1.00

式扫描成数字图像,每幅选取15~16个控制点,将扫描的地形图校正到实际地理位置,而后将其作为参考图像进行遥感图像的几何校正及重采样.几何校正采用多项式模型,重采样方法为最临近法,校正后误差小于1个像素.

#### 2.4 图像融合

遥感影像的空间分辨率和光谱分辨率通常互相制约,高空间分辨率的影像一般具有较低的光谱分辨率,而高光谱分辨率的影像则具有较低的空间分辨率.高空间分辨率的影像适于精确地识别地物,而高光谱分辨率则可以提供更为丰富的地物信息.图像融合是一种继承全色波段高空间分辨率和多光谱影像的光谱信息,得到同时具有较高空间分辨率和光谱分辨率的影像的方法<sup>[9,16]</sup>.本次遥感解译中,采用Landsat 7 ETM+的7、4、2波段和Landsat 8 OLI的7、5、3波段,与

SPOT 7的全色波段进行融合,生成1.5 m分辨率的彩色遥感影像,既提高了影像的地面分辨率,又增强了影像色彩的丰富程度.

### 3 遥感解译

遥感地质解译是在经过处理达到最佳观察效果的遥感图像上采用目视解译和人机交互解译等方法,利用影像的大小、纹理和色调等进行直接解译,利用水系特征和构造地貌特征进行间接解译,提取岩石、构造和蚀变信息等相关地质特征<sup>[7,17-18]</sup>.本次根据SPOT 7影像和Landsat 7/8影像融合后生成的1.5 m分辨率的假彩色图像,参照已搜集的研究区的1:25万数字地质图,首先进行影像单元划分,其次建立研究区构造格架,在此基础上对比地质图与对应的遥感图像,建立解译标志,开展研究区内地质体的解译.

#### 3.1 影像分区

遥感影像单元主要根据整个研究区内遥感图像的色彩、色调、纹理和水系特征进行划分,代表区域内大的地质单元或植被类型单元.将研究区共划分为6个影像单元,编号分别为I、II、III、IV、V、VI号区(图2a),各影像单元特征见表3.

#### 3.2 构造

断裂构造在影像上表现为线性影纹、呈线性延伸的带状异常色调、不同色调地质体边界呈直线状接触、地质体错断、线性沟谷、河流水系的直角拐弯等特征.

本次遥感解译线性构造依据其形成的期次,由老

表3 影像分区特征

Table 3 Characteristics of remote sensing image zoning

分区	位置	颜色	纹理	水系	主要地质体
I区	研究区北部,黑龙江沿岸	以绿色、草绿色夹红色为主,无植被覆盖地段则呈现暗红色调	比较光滑	水系不发育	第四纪冲洪积物、孙吴组、漠河组为主
II区	研究区中西部,以低山丘陵为主	以暗绿色和草绿色为主,裸露区段以暗红和粉红色调为主	粗糙	冲沟发育,形成不太典型的树枝状水系、蠕虫状水系	以漠河组为主
III区	从南至北以北北东走向条带状贯穿全区	以草绿色、浅绿色为主,植被覆盖少的地段呈黄绿色、黄白色	稍显粗糙	冲沟以树枝状水系为主,多形成狭长冲沟,局部有不典型的“丰”字形水系	绣峰组、阿凌河砾岩和侵入岩体为主,少部分为额尔古纳河组变质岩
IV区	研究区西南部,以低山丘陵为主	以绿色、草绿色调为主,伴有暗粉红色彩,岩石和土壤裸露区以红色、深红色调为主	比较粗糙	冲沟发育,多数形成短粗树枝状水系	佳疙瘩组、绣峰组及晚二叠世侵入岩为主
V区	研究区西南部	裸露区以粉红色和红色为主,覆盖区以草绿和绿色调为主	相对光滑	细长的树枝状和蠕虫状水系,冲沟发育相对较少	早白垩世侵入岩为主
VI区	研究区东南部,以低山丘陵为主	整体以红、绿色为主	比较粗糙	较宽的树枝状水系,冲沟特别发育	早侏罗世侵入岩



至新划分为近 E-W 向、NW 向、NE 向、近 S-N 向 4 组。其中,近 E-W 向断裂,由于构造发育时代早,受后期强烈的构造-岩浆活动影响,解译标志不太明显,总体上呈较短的东西向冲沟,断续延伸。受漠河逆冲推覆构造影响,研究区北部的近 E-W 向构造的西段有向 SW 方向转向的趋势,南部漠河逆冲推覆构造影响减弱至消失,则不存在这种现象。NW 向和 NE 向构造属于同一期次,两者具有相互切割的关系,从规模上来看,NW 向断裂构造的规模明显大于 NE 向构造,且 NW 向构造更具连续性。近 S-N 向断裂是研究区内最新期次的构造,区内 E-W 向、NW 向、NE 向构造均被近 S-N 向断裂构造所切割(图 2b)。

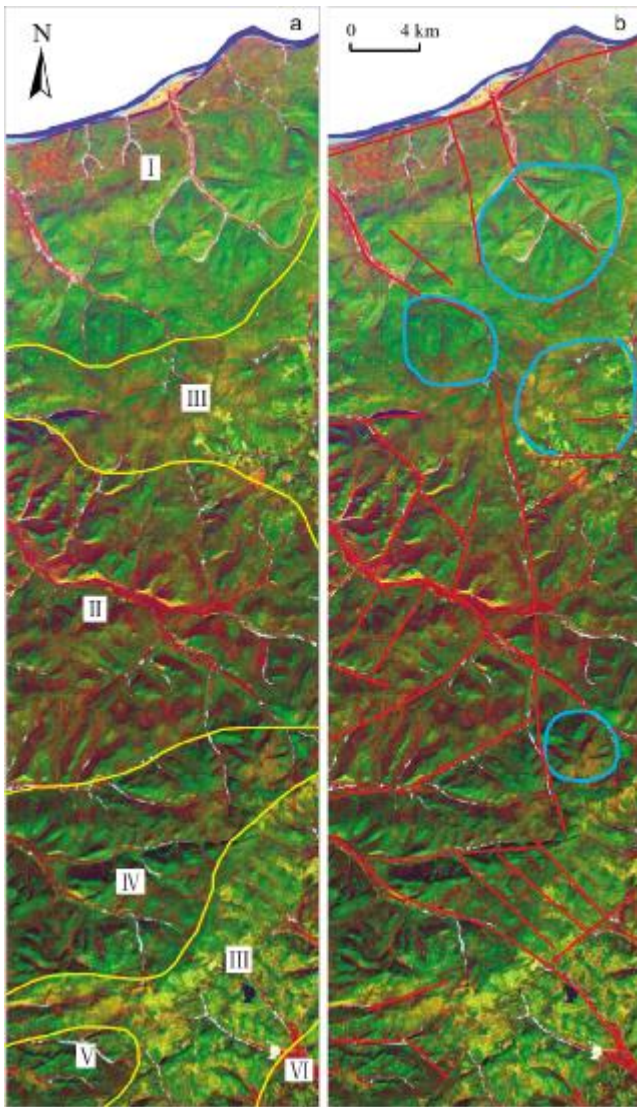


图 2 研究区遥感影像单元划分

Fig. 2 Division of remote sensing image units in the study area

除直线型断裂构造外,区内还发育较多的环形构造,特别是环形断裂构造。大的环形构造主要分布在研究区以外的东西两侧,区内发育规模相对较小的若干个环形断裂构造,呈圆形和似环形(图 2b)。空间上有大环套小环特点或不同环形断裂组合交切。这些环形断裂构造的发育可能与沉积岩下隐伏的侵入岩有关。

### 3.3 地质体

综合前人 1:25 万区域地质调查<sup>①</sup>及本次工作成果,通过对研究区的遥感影像特征进行分析并与野外地质剖面、路线地质调查等对比分析,依其地貌位置、形态、色调、水系和纹理特征,对洛古河地区的主要地质单元进行综合解译,划分并建立了相关解译标志(图 3)。

#### (1) 古元古界兴华渡口岩群(Pt<sub>ixh</sub>)

该岩群仅在研究区东北部有少量出露,以粉红色为主,夹有少量植被覆盖的绿色斑点,地势平坦。影像纹理粗糙、不清晰,水系不发育,形成蠕虫状水系(图 3a)。

#### (2) 南华系佳疙瘩组(Nhj)

主要分布于研究区中南部,岩性为二云石英片岩、石英片岩夹大理岩等<sup>[19]</sup>,岩石均发生变形强烈(图 4a)。遥感影像上植被覆盖处色调呈草绿色、嫩绿色,在植被覆盖少或者裸露区呈褐色斑块,影像纹理粗糙、不清晰,地形起伏不大,有单独分布的条带状和圆形山脊,地势相对较低(图 3b)。

#### (3) 震旦系额尔古纳河组(Ze)

主要分布于研究区西北部,出露面积较小,岩性为二云片岩、绿泥片岩、千枚岩夹大理岩或少量灰岩(图 4b)。遥感影像显示植被覆盖相对较少,影像特征上呈黄绿色调,冲沟短而直,分支较少,地势相对平坦,影像表面纹理较光滑(图 3c)。

#### (4) 中侏罗统绣峰组(J<sub>xx</sub>)

主要分布于研究区南部,岩性主要为细砾岩、粗粒长石砂岩、中细粒长石砂岩夹粉砂岩<sup>[20]</sup>(图 4c)。在植被覆盖区影像色调以蓝绿、草绿、浅绿色为主,在植被不发育地段以暗红色为主。遥感影像纹理光滑,局部交杂有较粗糙的块状体,地势起伏不大,为低山丘陵,形成条带状山脊,水系以蠕虫状、扇状、放射状水系为

①黑龙江省地质调查总院. 1:25 万区调修测报告(漠河县幅、漠河幅、兴安幅). 2012.



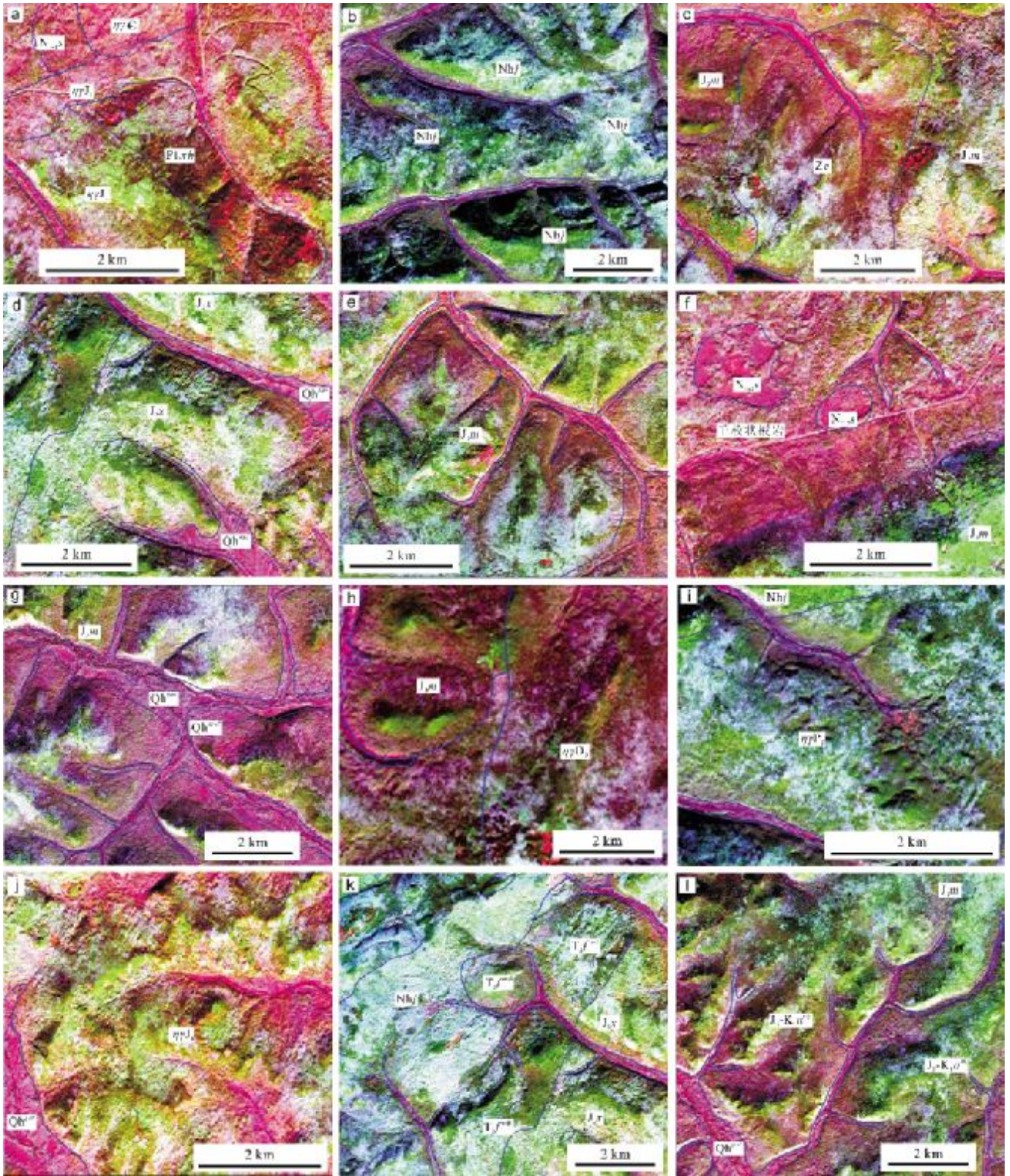


图 3 研究区主要地质单元遥感影像图

Fig. 3 Remote sensing images of major geological units in the study area

主(图 3d).

(5)上侏罗统漠河组(J<sub>3m</sub>)

在研究区的中部和中东部呈大面积发育,岩性主

要为粗粒长石砂岩、中粒长石砂岩夹砾岩、粉砂岩<sup>[14]</sup>(图 4d)。在遥感影像上植被发育地段呈绿色、草绿色、黄绿色,在裸露区或植被较少的地段则呈红色、红褐



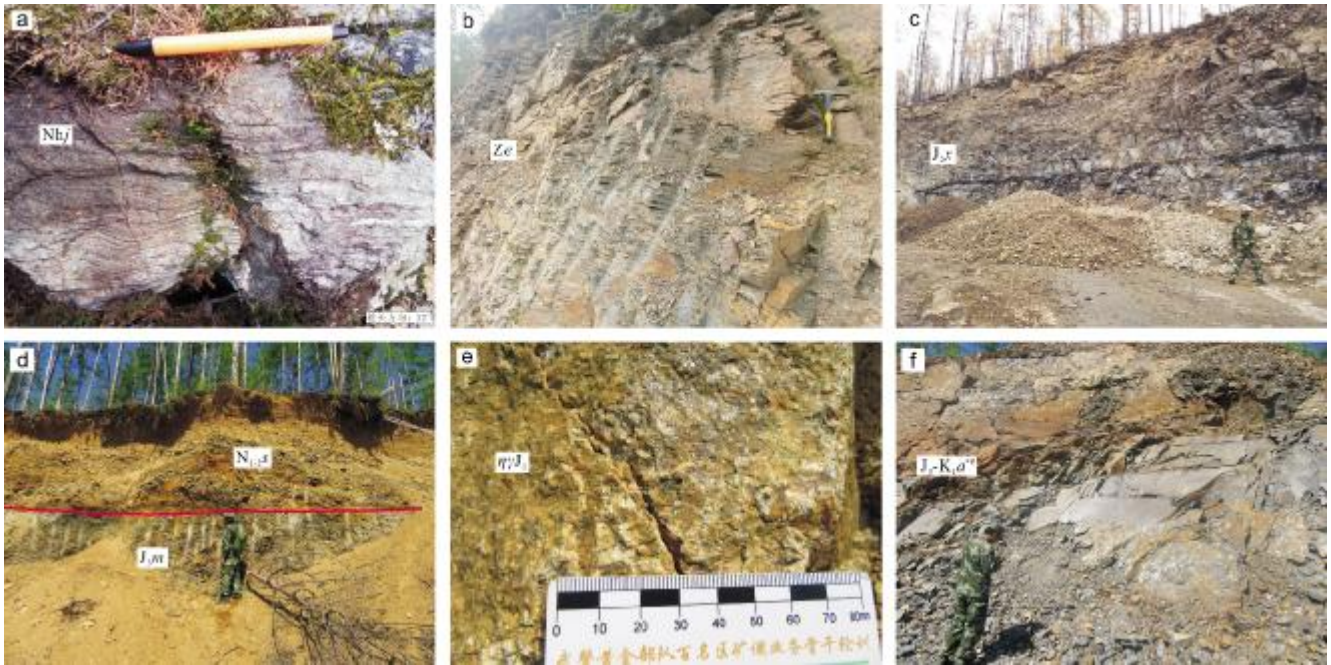


图4 野外实地查证照片

Fig. 4 Field photographs of geological units

色,冲沟较发育,延伸长且较窄,常形成比较典型的树枝状水系,地形相对平坦,影像表面纹理粗糙(图3e).

#### (6)孙吴组( $N_{1-2s}$ )

在研究区北部零星分布,上覆于漠河组和阿凌河砾岩之上,岩性主要为弱固结—未固结的砂砾石层(图4d).遥感影像上以粉红色斑块为主,有植被覆盖地段呈绿色、草绿色,影像表面粗糙,地势相对较高,地表平坦,水系不发育(图3f).

#### (7)第四系上更新统一级阶地( $Qh^{3pl}$ )

主要分布于研究区中西部,以长而窄、切割较深的冲沟为主要特征,植被覆盖相对较少,地势起伏较大.植被覆盖处影像呈草绿色,覆盖较少地段为褐色和褐红色,影像表面纹理粗糙,有条带状冲沟痕迹(图3g).

#### (8)第四系冲积物( $Qh^{pl}$ )

主要分布于河流两侧,在影像上呈红色、粉红色,大片冲沟状分布,部分地段为村庄、城镇,受人类活动影响较大.该组地层界线在SPOT 7影像上清晰可见(图3g).

#### (9)晚奥陶世二长花岗岩( $\eta\gamma O_3$ )

在研究区中东部有少面积发育<sup>[21-22]</sup>,影像以红色、粉红色彩为主,局部为粉白色,植被覆盖少,植被覆盖

处为绿色和草绿色为主.因面积较小,内部几乎没有水系发育,周边水系以钳状、蠕虫状和不太典型的树枝状水系为主,形成北东向的条带状山脊,影像表面纹理粗糙(图3h).

#### (10)晚二叠世二长花岗岩( $\eta\gamma P_3$ )

出露于研究区中南部<sup>[20]</sup>,影像以绿色、草绿色彩为主,植被覆盖厚.局部裸露地段为粉红色斑点状,局部形成较陡的圆形山,具有蠕虫状水系和不太典型的树枝状水系,影像表面纹理粗糙,多有鱼鳞状纹理出现(图3i).

#### (11)早侏罗世二长花岗岩( $\eta\gamma J_1$ )

早侏罗世细中粒似二长花岗岩在研究区中南部大面积产出(图4e).植被覆盖处色调以草绿色、嫩绿色为主,植被覆盖少或者裸露区呈褐色斑块,影像纹理粗糙、不清晰,地形起伏不大,地势相对较低,水系发育,形成树枝状水系(图3j).

#### (12)晚三叠世—早侏罗世富源沟中—基性火山岩(未建组)( $T_3 f^{\alpha-\beta}$ )<sup>①</sup>

主要分布于研究区东南部,岩性为安山岩、玄武安山岩等.影像色彩以绿色、草绿为主,局部为蓝绿色,植被覆盖较少地段呈红色、粉红色.常形成圆形山,具

①武警黄金第三支队. 1:5万区域地质矿产调查报告(洛古河幅、兴华沟林场幅、阿凌河幅、1072.3高地幅), 2019.

有环状水系、蠕虫状水系和不太典型的树枝状水系,影像表面纹理粗糙,多位于地势较高部位(图 3k)。

(13)晚侏罗世—早白垩世阿凌河砾岩(未建组)( $J_3-K_1a^{cs}$ )<sup>①</sup>

主要分布于研究区中部,出露面积较大,岩性以中砾岩、细砾岩、粗砾岩夹粗—中粒长石砂岩为主(图 4f)。植被覆盖地段影像以绿色、草绿色彩为主,局部为蓝绿色,植被覆盖较少地段呈红色、粉红色,常形成条带状山脊,地表常形成直径较小的圆形山包,具有树枝状水系,影像表面纹理粗糙(图 3l)。

3.4 蚀变提取

采用主成分分析法,对 Landsat 7 ETM+影像选择 1、4、5、7 四个波段组合进行蚀变信息提取,提取含 OH<sup>-</sup>的蚀变矿物;对于 ASTER 影像选择 1、3、4、5 四个波段组合进行蚀变信息提取,提取出含 Fe<sup>3+</sup>的蚀变矿物。经上述主成分分析变换之后获得特征向量,通过对比分析,均选择第 4 主成分进行蚀变信息提取(表 4)。蚀变信息圈定可以采用均值加方差或最优密度分割法<sup>[23-24]</sup>,此次将第 4 主成分按照均值加标准差的 2.0 倍、2.5 倍和 3.0 倍分为一级、二级和三级蚀变异常。从蚀变分布特征看,主要沿侵入岩呈环形、弧形或条带状分布。

吴燕清等<sup>[25]</sup>在根据遥感信息圈定远景区时,综合考虑了铁染和羟基蚀变的叠合情况、异常面积、构造交点及近矿蚀变等综合信息。此次根据异常区内是否有已知矿点、异常面积、异常强度、聚合程度、羟基和铁染异常共生情况 5 个条件同时出现的程度,将研究区蚀变异常分为 4 类:甲类异常为异常区内有矿床或矿点,分布面积较大,强度以一级居多,异常聚合程度强,羟基和铁染完全共生的区域;乙类异常为异常区内无矿

床,异常分布面积较大,异常强度以一级居多,异常聚合程度强,羟基和铁染完全共生的区域;丙类异常为异常区内无矿床,异常分布面积较小,异常强度为一级或二级居多,异常聚合程度较强,羟基和铁染部分共生的区域;丁类异常为异常区内无矿床,异常分布面积很小,异常强度为一级或二级居多,异常聚合程度较强,羟基和铁染部分共生的区域。研究区划分出乙类异常 3 个(A5、A6、A8),丙类异常 2 个(A7、A9)。

4 成矿有利区圈定

本次区域地质矿产调查中水系沉积物测量工作圈定单元素异常 376 处、综合异常 11 处。根据水系沉积物综合异常与羟基和铁染异常共生关系,结合研究区解译的线性构造、环形构造、侵入岩等地质单元,综合分析认为研究区为金及多金属成矿有利地带,A5、A6、A8 号蚀变异常为成矿有利区。

A5 成矿有利区面积约 32.03 km<sup>2</sup>,区内蚀变异常呈片状,东南部、南部以羟基蚀变为主,北部为羟基蚀变。羟基异常和铁染异常的强度高,羟基一级异常占 90%左右,二级羟基异常占 10%,铁染一级异常占 90%以上,羟基与铁染异常共生程度较高。A5 成矿有利区位于水系沉积物异常 6 号异常(乙 3 类异常,发育 Au、Ag、Cu、Zn、Pb、Mo 等 16 种元素 44 个单元素异常)东部。异常区内岩性主要为中侏罗统漠河组和二十二站组砂岩,有闪长岩等岩脉侵入,处于环形断裂构造带边部。蚀变异常分布在断裂构造的交汇部位,表明蚀变可能与构造活动有关,与区域上宝兴沟金矿床具有类似的地质特征<sup>[26]</sup>,具有一定找矿潜力。

A6 成矿有利区面积约 19.5 km<sup>2</sup>,区内蚀变异常呈半环状,以羟基蚀变为主,面积 2.06 km<sup>2</sup>。羟基异常与

表 4 蚀变提取主成分特征向量

Table 4 Feature vectors of alteration information extraction by principal component analysis

主成分	1	4	5	7	主成分	1	3	4	5
PC1	0.19454	0.35306	0.474729	0.55391	PC1	0.19456	0.58598	0.47068	0.2356
PC2	0.58199	0.38500	-0.47088	-0.30152	PC2	-0.35125	-0.47652	-0.25932	0.68325
PC3	0.58617	-0.55262	-0.25621	0.53395	PC3	0.56953	-0.19267	-0.42623	0.17987
PC4	0.45220	-0.50328	0.65218	-0.56876	PC4	-0.58356	0.63598	-0.69525	0.35785

①武警黄金第三支队. 1:5 万区域地质矿产调查报告(洛古河幅、兴华沟林场幅、阿凌河幅、1072.3 高地幅), 2019.



铁染异常共生程度较低,羟基一级异常占85%以上,二级羟基异常占10%,三级羟基异常占5%。A6成矿有利区与水系沉积物异常7号异常(乙3类异常,发育Ag、Cu、Zn、Ni、Cr、V等11种元素15个单元异常)较为吻合,稍有偏移,可能是由于地形导致元素发生迁移所致。异常区内岩性主要为阿凌河砾岩和漠河组砂岩,南北向构造从异常区内穿过,东侧发育有环形构造。

A8成矿有利区面积约30.0 km<sup>2</sup>,蚀变异常呈东西向条带分布,以铁染蚀变为主,面积2.6 km<sup>2</sup>,铁染一级异常占85%左右。A8成矿有利区与水系沉积物异常9号异常(丙1类异常,发育Mo、Zn、Ni、Sn等8种元素8个单元异常)较为吻合,异常区内及周边主要为晚二叠世二长花岗岩和佳疙瘩组变质岩,处于一条环形构造带东部。区内发育一条近东西向断裂和3条北西向断裂及次级断裂构造,具有一定找矿潜力。

## 5 结论

(1)多源、多时相遥感影像的协同应用在解决大兴安岭植被覆盖区地质解译方面具有一定优势,通过对彩色合成后遥感影像的颜色、纹理、地貌、水系等特征进行对比分析,能够建立大兴安岭高植被覆盖区各类岩石组合解译标志,对地质构造解译效果较好。

(2)SPOT 7 全色波段与 Landsat 7/8 多光谱波段融合后制作成1.5 m分辨率彩色影像图,既保留了Landsat影像的多波段信息,也提高了影像的空间分辨率,可以增强对高植被覆盖区地质体的识别能力。

(3)对ASTER和ETM+数据4个波段进行主成分分析,提取铁染和羟基蚀变信息效果较好。选择某一特征向量,按照标准差的2.0倍、2.5倍和3.0倍,可提取一级、二级和三级蚀变异常。在遥感提取的蚀变异常基础上,综合分析研究区地层、线环构造、侵入岩等成矿地质背景和水系沉积物异常,可为大兴安岭地区金及多金属找矿提供方向。

## 参考文献(References):

[1]张克信,孙贇,于庆文,等.基于数字填图系统的遥感等数据在构造-地层分区和地层单位识别中的应用——以1:25万民和县幅、临夏市幅和定西市幅数字地质填图为例[J].地质通报,2008,27(7):965-973.

Zhang K X, Sun Z, Yu Q W, et al. Application of remote sensing data to the tectono-stratigraphic division and recognition of stratigraphic units based on the digital mapping system: A case study of 1:250 000 digital geological mapping of the Minhe County, Linxia City and Dingxi City sheets, northwestern China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(7): 965-973.

[2]薛重生. 遥感技术在区域地质调查中的应用研究进展[J]. 地质科技情报, 1997, 16(S1): 15-22.

Xue C S. Application and progress of remote sensing techniques in regional geological surveying [J]. Geological Science and Technology Information, 1997, 16(S1): 15-22.

[3]闫颖, 陈有妍, 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 Y, Chen Y X, Meng Y, et al. Application of remote sensing technique in the geologic mapping of Daheishan region, eastern Tianshan [J]. Northwestern Geology, 2015, 48(2): 231-237.

[4]张晓东, 刘湘南, 李明涛, 等. 遥感在宁夏贺兰山东北段1:50 000区域地质调查中的应用研究[J]. 矿产与地质, 2016, 30(4): 674-680.

Zhang X D, Liu X N, Li M T, et al. Application of remote sensing technique in 1:50,000 scale regional geological survey of northeastern section of Helan Mountain of Ningxia [J]. Mineral Resources and Geology, 2016, 30(4): 674-680.

[5]凤骏. 遥感技术在新疆乌齐里克它乌一带1:5万区域地质矿产调查中的应用[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014: 1-49.

Feng J. The application of remote sensing technology in the 1:50 000 regional geology and mineral resources survey, Wujiliketawu, Xinjiang [J]. Xinjiang: Xinjiang Normal University, 2014: 1-49.

[6]陈昌礼. 全面推广遥感技术, 加速1:5万区域地质调查进程[J]. 国土资源遥感, 1991(2): 1-6.

Chen C L. Spreading remote sensing technology overall and speeding up 1:50 000 regional geological survey [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1991(2): 1-6.

[7]张志平, 吴勇, 焦世文, 等. 遥感地质解译路线在西藏羌塘地区1:5万区域地质调查中的应用[J]. 甘肃地质, 2014, 23(3): 82-89.

Zhang Z P, Wu Y, Jiao S W, et al. Application of remote sensing routine interpretation for 1:50 000 regional geological survey in Qiangtang area of Tibet [J]. Gansu Geology, 2014, 23(3): 82-89.

[8]胡健民, 陈虹, 邱士东, 等. 覆盖区区域地质调查(1:50 000)思路、原则与方法[J]. 地球科学, 2020, 45(12): 4291-4312.

Hu J M, Chen H, Qiu S D, et al. Thoughts, principles and methods of regional geological survey in covered area (1:50 000) [J]. Earth Science, 2020, 45(12): 4291-4312.

[9]吴志春, 郭福生, 刘林清, 等. 遥感技术在区域地质调查中的应用研究——以江西省1:5万阆上幅区调应用为例[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(4): 364-374.

Wu Z C, Guo F S, Liu L Q, et al. Application of the remote sensing

- technology in regional geological survey: A case study in Tuoshang, Jiangxi Province by 1:50 000[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 2013, 36(4): 364-374.
- [10] 张志军, 刘世华, 孔迪, 等. 北巴颜喀拉山 1:5 万区域地质调查中的遥感解译应用[J]. *现代地质*, 2016, 30(5): 1141-1149.  
Zhang Z J, Liu S H, Kong D, et al. Application of remote sensing interpretation on 1:50,000 regional geological survey of North Bayan Hara Mountain[J]. *Geoscience*, 2016, 30(5): 1141-1149.
- [11] 何鹏, 滕学建, 刘洋, 等. 遥感解译在内蒙古狼山戈壁荒漠地区 1:50 000 地质填图中的应用[J]. *地质力学学报*, 2016, 22(4): 882-892.  
He P, Teng X J, Liu Y, et al. Application of remote sensing interpretation for 1:50 000 geologic mapping in Langshan Gobi desert area, Inner Mongolia[J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(4): 882-892.
- [12] 程洋, 吕勇, 涂杰楠, 等. 遥感技术在岩溶区 1:50 000 区域地质调查中的应用——以黔西北地区为例[J]. *地质力学学报*, 2016, 22(4): 921-932.  
Cheng Y, Lv Y, Tu J N, et al. Application of remote sensing technology in the 1:50 000 regional geological survey in karst area: A case study of northwest Guizhou[J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(4): 921-932.
- [13] 王洪波, 杨晓平. 大兴安岭北段新一轮国土资源大调查以来的主要基础地质成果与进展[J]. *地质通报*, 2013, 32(2/3): 525-532.  
Wang H B, Yang X P. Main geological achievements and progress of the new round of national land and resources survey in north Daxinganling[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(2/3): 525-532.
- [14] 周传芳, 杨华本, 蔡艳龙, 等. 漠河盆地西缘漠河组形成时代及物源区构造环境判别[J]. *中国地质*, 2021, 48(3): 832-853.  
Zhou C F, Yang H B, Cai Y L, et al. Stratigraphic age of the Mohe Formation in the western margin of Mohe Basin and tectonic environment discrimination of provenance [J]. *Geology in China*, 2021, 48(3): 832-853.
- [15] 刘永江, 冯志强, 蒋立伟, 等. 中国东北地区蛇绿岩[J]. *岩石学报*, 2019, 35(10): 3017-3047.  
Liu Y J, Feng Z Q, Jiang L W, et al. Ophiolite in the eastern central Asian Orogenic Belt, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(10): 3017-3047.
- [16] 杨伟, 陈晋, 松下文经, 等. 基于混合像元分解的遥感图像融合实用算法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2010, 40(5): 668-677.  
Yang W, Chen J, Matsushita B, et al. A practical remote sensing image fusion algorithm based on hybrid pixel decomposition [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2010, 40(5): 668-677. (in Chinese)
- [17] 陈添乐, 陈蜀江, 黄铁成. 利用 ETM 数据对新疆西天山赛里木湖四台-温泉县地区进行 1:5 万地质填图的遥感解译及探索[J]. *新疆师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 30(4): 12-18.  
Chen T L, Chen S J, Huang T C. ETM data using western Tianshan Sailimu Lake Sitai-Hot Springs County area in Xinjiang 1:5 million geological mapping and exploration of remote sensing interpretation [J]. *Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2011, 30(4): 12-18.
- [18] 王学超. 遥感技术在内蒙古甘河等地地质矿产调查中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 1-36.  
Wang X C. Application of remote sensing technique to the regional geology and mineral resources survey in Ganhe area of Neimenggu [D]. Changchun: Jilin University, 2016: 1-36.
- [19] 王阳, 马瑞, 和钟铎, 等. 内蒙古塔尔气地区佳疙瘩组地质特征及锆石年代学研究[J]. *世界地质*, 2016, 35(2): 357-369.  
Wang Y, Ma R, He Z H, et al. Research on geological characteristics and zircon U-Pb age of Jiageda Formation in Taerqi, Inner Mongolia [J]. *Global Geology*, 2016, 35(2): 357-369.
- [20] 赵寒冬, 尹志刚, 马丽玲, 等. 上黑龙江盆地中侏罗统绣峰组的沉积环境与大地构造背景[J]. *地质通报*, 2007, 26(7): 823-829.  
Zhao H D, Yin Z G, Ma L L, et al. Sedimentary environment and tectonic setting of the Middle Jurassic Xiufeng Formation in the Upper Heilongjiang River Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(7): 823-829.
- [21] 杨华本, 周传芳, 魏小勇, 等. 漠河地区晚古生代—中生代花岗岩岩浆作用: 对蒙古-鄂霍茨克造山带俯冲闭合的启示[J]. *地质论评*, 2020, 66(S1): 18-20.  
Yang H B, Zhou C F, Wei X Y, et al. Late Paleozoic to Mesozoic granites magmatism in Mohe area and its implication on subduction to collision of the Mongol-Okhotsk Orogen [J]. *Geological Review*, 2020, 66(S1): 18-20.
- [22] 段明新, 周传芳, 杨华本, 等. 黑龙江省漠河县富源沟林场含电气石花岗岩的形成时代及地质意义[J]. *地质科学*, 2019, 54(4): 1290-1307.  
Duan M X, Zhou C F, Yang H B, et al. Geochronology and geochemistry of Fuyuangoulinchang tourmaline-bearing granites in Mohe County, Heilongjiang Province, NE China, and their implications[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2019, 54(4): 1290-1307.
- [23] 吴小娟, 肖晨超, 杨日红, 等. 秘鲁南部斑岩铜矿典型蚀变带矿物信息提取及找矿远景区圈定[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2015, 40(11): 1802-1809.  
Wu X J, Xiao C C, Yang R H, et al. Information extraction of typical alteration zone of porphyry copper deposit and delineation of prospective areas in Southern Peru [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(11): 1802-1809.



- 54(10):2835-2846.
- [16]郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 218-247.
- Zheng Y F, Chen J F. Stable isotope geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2000: 218-247. (in Chinese)
- [17]闫永生, 李向文, 聂春雨, 等. 黑龙江富克山地区水系沉积物测量地球化学特征及找矿远景预测[J]. 物探与化探, 2013, 37(1): 23-29.
- Yan Y S, Li X W, Nie C Y, et al. Geochemical characteristics and metallogenic prospective prognosis of Fukeshan region in Heilongjiang Province based on stream sediment survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(1): 23-29.
- [18]Urusova M A. Volume properties of aqueous solutions of sodium chloride at elevated temperatures and pressures[J]. Russian Journal of Inorganic Chemistry, 1975, 20(11): 1717-1721.
- [19]Haas J L Jr. Physical properties of the coexisting phases and thermochemical properties of the H<sub>2</sub>O component in boiling NaCl solutions [R]. Washington DC: United States Department of the Interior, Geological Survey, 1976:75-674.
- [20]Bodnar R J, Burnham C W, Sterner S M. Synthetic fluid inclusions in natural quartz. III. Determination of phase equilibrium properties in the system H<sub>2</sub>O-NaCl to 1000 °C and 1500 bars [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49(9): 1861-1873.
- [21]辛存林, 徐明儒, 安国堡, 等. 川西南马头山铜金矿床地质和流体包裹体特征及成因[J]. 中国地质, 2019, 46(6): 1556-1572.
- Xin C L, Xu M R, An G B, et al. Deposit geology, fluid inclusion characteristics and ore genesis of the Matoushan Cu-Au deposit in southwest Sichuan Province [J]. Geology in China, 2019, 46(6): 1556-1572.
- [22]Ramboz C, Pichavant M, Weisbrod A. Fluid immiscibility in natural processes: Use and misuse of fluid inclusion data: II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility [J]. Chemical Geology, 1982, 37(1/2): 29-48.
- [23]代军治. 辽宁青城子地区金、银矿床成矿流体特征及成因探讨[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- Dai J Z. Characteristics of ore-forming fluids and discussion on the genesis of Au, Ag deposits in Qingchengzi region, Liaoning Province [D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [24]Roedder E. Fluid inclusions. Volume 12: Reviews in mineralogy [M]. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1984: 1-644.
- [25]Roedder E, Bodnar R J. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1980, 8(1): 263-301.
- [26]Bouzari F, Clark A H. Prograde evolution and geothermal affinities of a major porphyry copper deposit: The Cerro Colorado hypogene protore, Iregion, Northern Chile [J]. Economic Geology, 2006, 101(1): 95-134.

(上接第 641 页/Continued from Page 641)

- [24]宋伊圩, 王鹏, 连琛芹, 等. 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[J]. 西北地质, 2021, 54(2): 126-136.
- Song Y W, Wang P, Lian C Q, et al. Lithologic mapping and alteration information extracting based on ASTER spectral signature: An example from Nianzha gold deposit [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(2): 126-136.
- [25]吴燕清, 王世成, 丁园, 等. 内蒙古新城子盆地铀及多金属矿产勘查遥感应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(6): 1917-1928.
- Wu Y Q, Wang S C, Ding Y, et al. Application of remote sensing in uranium and polymetallic mineral exploration in Xinchengzi basin, Inner Mongolia [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(6): 1917-1928.
- [26]周传芳, 王献忠, 李向文, 等. 黑龙江省塔河县宝兴沟金矿床中生代侵入岩及其对成矿作用的制约[J]. 矿床地质, 2018, 37(1): 137-150.
- Zhou C F, Wang X Z, Li X W, et al. Mesozoic intrusive rocks and their constraints on mineralization in Baoxinggou gold deposit in Tahe County, Heilongjiang Province [J]. Mineral Deposits, 2018, 37(1): 137-150.