

doi: 10.6046/zrzyyg.2022250

引用格式: 张元涛,潘蔚,余长发. GF-5 高光谱数据在铀矿勘查中的应用[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(4): 61-70. (Zhang Y T, Pan W, Yu C F. Application of GF-5 hyperspectral data in uranium deposit exploration[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(4): 61-70.)

GF-5 高光谱数据在铀矿勘查中的应用

张元涛^{1,2}, 潘蔚¹, 余长发¹

(1. 核工业北京地质研究院, 遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室, 北京 100029;

2. 核工业二八〇研究所, 德阳 618300)

摘要: 高分五号(GF-5)卫星自2018年发射以来,利用该型卫星AHSI高光谱数据开展铀矿勘查应用的研究少见报道。为此,以内蒙古卫境地区为研究区,基于GF-5 AHSI数据,采用光谱沙漏技术提取了针铁矿和低铝、中铝及高铝绢云母蚀变异常;采用主成分变换(principal component analysis, PCA)及PCI Geomatica软件中的LINE模型,自动提取了研究区线性构造,制作了研究区线性构造密度分布图;最后结合ArcGIS软件,通过对各证据层的整合,制作了研究区铀成矿潜力图。结果表明:所采用的蚀变信息、线性构造提取以及多证据层整合方法可行,获得的铀成矿潜力图可靠性较高。根据研究结果结合地质资料,圈定了1处铀矿预测区,为该区后续铀矿勘查工作提供了指导,同时也将为GF-5 AHSI数据在地质领域的应用提供参考。

关键词: 高分五号; 高光谱; 蚀变信息; 线性构造; 权重叠加; 铀矿

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)04-0061-10

0 引言

高光谱作为一种先进的成像光谱技术,具有光谱分辨率高和图谱合一的优势^[1]。自诞生以来,该技术已经广泛应用于地质、生态、农业等多个领域,其中在地质领域的应用尤为广泛。高光谱技术能反映不同地物精细的光谱特征,借助该技术,国内外学者进行了大量构造解译、岩性识别以及矿物提取等研究,并取得了很好的效果^[2-10]。

高分五号卫星(GF-5)于2018年5月成功发射,其所搭载的可见光短波红外高光谱相机(Advanced Hyperspectral Imager, AHSI)可获取高光谱分辨率和大幅宽的高光谱数据。目前在地质领域,只有少数学者借助该数据进行了岩性识别、构造解译^[3]、岩性分类^[4]以及矿物提取^[5-7]等研究。但由于各种原因,将该数据用于铀矿勘查的研究较少。

内蒙古卫境地区地处内蒙古自治区中北部,属于巴音宝力格隆起铀成矿带,目前已经发现了大量的花岗岩型铀矿化点、异常点,具有优越的花岗岩型铀成矿潜力^[11]。此外,该区裸露的基岩为遥感地

质研究提供了有利的条件。为促进GF-5高光谱数据在地质领域的应用及内蒙古卫境地区铀矿勘查工作,本文以内蒙古卫境地区为研究区,基于GF-5高光谱数据,采用光谱沙漏技术开展蚀变端元识别及蚀变信息提取,并借助PCI Geomatica软件中的LINE模型自动获取了研究区线性构造。在此基础上,利用ArcGIS软件将各类蚀变信息及线性构造进行整合,制作研究区铀成矿潜力图,圈定铀成矿有利区,以期为该区后续铀矿勘查工作提供参考。

1 研究区地质背景

卫境地区地处中蒙边境,内蒙古自治区二连浩特市西南,属中低山丘陵草原区,地势相对平坦。区内地表植被稀少,基岩裸露程度高,影像纹理特征清晰,不同岩性地层色调差异明显,多种类型蚀变发育,十分有利于开展遥感地质研究。

研究区地质图略图如图1所示。研究区的大地构造位置处于二连浩特—锡林浩特褶皱带西南段,巴音宝力格隆起西段。出露地层主要有青白口系、二叠系大石寨组、侏罗系上统、白垩系上统、新近系

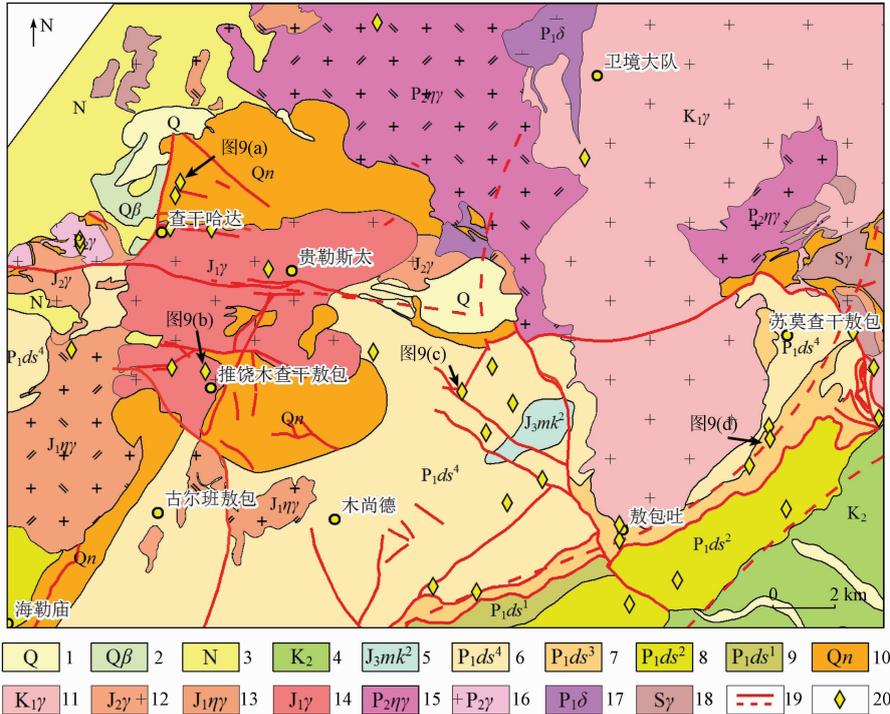
收稿日期: 2022-06-16; 修订日期: 2022-10-12

基金项目: 中国核工业集团公司集中研发项目“第四代铀矿勘查关键技术研究与示范(第一阶段)”(编号: 中核科发[2021]143号)和国防科技工业局高分专项项目“高分数据(民用部分)在铀资源勘查核查应用技术”(编号: 55-Y20A12-9001-16/17)共同资助。

第一作者: 张元涛(1991-),男,博士研究生,主要研究方向为地学目标识别。Email: 809316163@qq.com。

和第四系。其中青白口系主要为是一套变质岩,包括大理岩、片岩、板岩及结晶灰岩等;二叠系大石寨组,包括一、二、三和四岩组,岩性主要有千枚岩、凝灰岩、流纹岩、板岩、大理岩及英安岩等。二者为区内主要的含矿地层^[11]。岩浆岩方面,研究区侵入岩

广布,主要以二叠世、侏罗世及白垩世花岗岩体为主。其中与铀矿化关系密切的主要是早侏罗世花岗岩及早白垩世花岗岩。构造方面,研究区内断裂构造发育,主要有 NE 向、NW 向断裂,局部有近 SN 及近 EW 向构造。



1. 第四系; 2. 玄武岩; 3. 新近系; 4. 白垩系; 5. 侏罗系满克头鄂博组二岩段; 6. 大石寨组四岩组; 7. 大石寨组三岩组; 8. 大石寨组二岩组; 9. 大石寨组一岩组; 10. 青白口系; 11. 早白垩世花岗岩; 12. 晚侏罗世花岗岩; 13. 早侏罗世二长花岗岩; 14. 早侏罗世花岗岩; 15. 晚二叠世二长花岗岩; 16. 晚二叠世花岗岩; 17. 早二叠世闪长岩; 18. 志留纪花岗岩; 19. 断层(虚线为推测断层); 20. 野外验证点

图1 研究区地质图略图(据核工业 208 大队 2015 年资料改编)

Fig.1 Sketch map of geology in research area (modified after the 2015 data from No. 208 Geologic Party, CNNC)

2 数据源及预处理

2.1 GF-5 高光谱数据

GF-5 卫星是中国高分辨率对地观测系统重大专项中实现高光谱分辨率观测的卫星,卫星轨道高度 705 km,其搭载的 AHSI 能获取可见光、近红外、短波红外共 330 个波段的数据,影像幅宽达 60 km (表 1)。所用高光谱图像成像时间为 2019 年 11 月 3 日,景号为 88317,数据级别为 L1 级,研究区内图像清晰,无云、雪干扰,有利于遥感地质解译和信息

表 1 GF-5 AHSI 图像的主要参数

Tab.1 Main parameters of GF-5 AHSI image

波段	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm	空间分辨率/m	波段数
可见光-近红外(VNIR)	390.324 ~ 1 029.18	5	30	150
短波红外(SWIR)	1 004.77 ~ 2 513.25	10		180

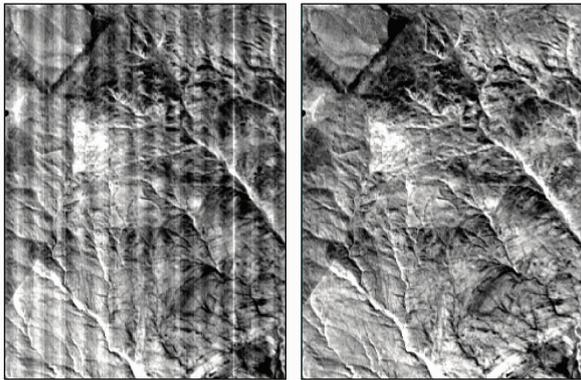
提取。

2.2 数据预处理

利用成像光谱数据对地物进行识别依赖于地物精细的光谱特征,为从图像中获取地物真实的光谱特征,必须进行光谱数据的辐射定标与大气校正等预处理。此外,由于 GF-5 AHSI 图像条带噪声明显,因此需进行条带去除。涉及的主要预处理包括辐射定标、大气校正、波段选择、条带去除、正射校正及光谱去噪平滑等。

其中大气校正利用 ENVI 软件中 FLAASH 大气校正模块来完成,校正过程中不进行分块处理。为减少质量较差波段以及 VNIR 与 SWIR 之间重复波段对提取结果的影响^[12],同时考虑到阴离子与阳离子诊断谱带的分段性^[13],分别选取 400 ~ 1 000 nm (共 140 个波段)和 2 058 ~ 2 361 nm(共 37 个波段) 2 个波谱区间段的图像数据进行研究。为去除条带噪声,采用“全局去条纹”的方法^[14]分别对 2 个波谱区间的图像进行条带去除。经过处理,图像的条带

噪声得到有效消除(图 2)。正射校正可对图像同时进行倾斜改正和投影差改正。利用 ENVI 中的 RPC Orthorectification Workflow 模块,结合影像自带的 RPC 文件以及软件自带的 DEM 文件(GMTED2010.jp2)进行正射校正处理。校正后的图像基于 WGS-84 椭球被投影到 UTM 投影(UTM Zone 49N)。最后利用最小噪声分离(minimum noise fraction,MNF)正反变换进行去噪和光谱平滑处理。



(a) 原始影像 (b) 修复后影像

图 2 波段 276 原始影像与条纹修复后影像

Fig. 2 Band 276 original image and fringe - restored image

3 信息提取及成矿潜力图制作

本文信息提取技术流程如图 3 所示。

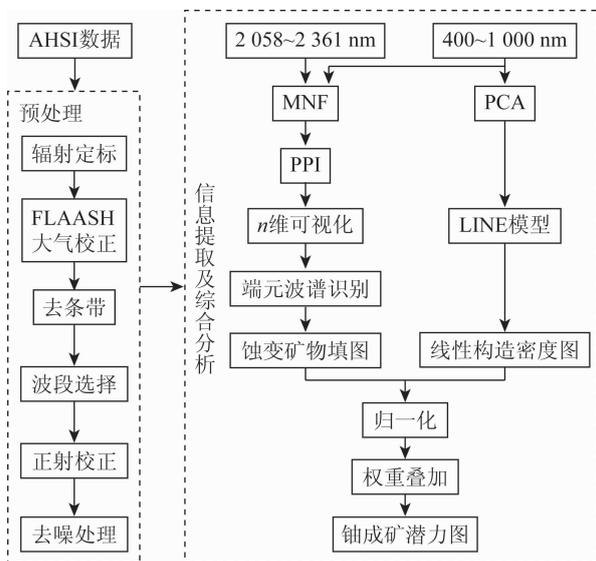


图 3 研究流程图

Fig. 3 Flow chart of research

基于 GF-5 AHSI 数据,采用光谱沙漏技术进行高光谱蚀变信息提取,采用主成分变换(principal component analysis,PCA)和 PCI Geomatica 软件中的 LINE 模块提取线性构造,最后结合 ArcGIS 中的

Weighted Overlay 工具进行综合分析制作研究区铀成矿潜力图。

3.1 蚀变信息提取

蚀变信息(矿物)提取是高光谱遥感的主要研究内容之一,国内外学者进行了广泛的研究^[2,5-9,13,15-16]。大量研究表明,一般阴离子诊断带位于 2 000 ~ 2 500 nm 光谱区域,而 Fe^{2+} , Fe^{3+} 和 Mn^{2+} 等阳离子的诊断带一般位于 400 ~ 1 200 nm 光谱区域^[17]。基于特征提取、端元光谱选取和光谱相似性匹配的矿物信息提取技术(即沙漏技术)是最早发展的面向高光谱信息提取的技术^[18],包括了 MNF、像元纯净指数(pixel purity index, PPI)、 n 维可视化、端元光谱识别以及矿物填图等步骤,在矿物填图领域广泛应用^[2,6-9,19-20]。

3.1.1 端元波谱判定

经 MNF 变换、PPI 计算以及 n 维可视化分析,分别提取了 VNIR 和 SWIR 波谱区间的端元光谱。在 VNIR 波谱区间段共获得 5 条影像端元光谱,利用光谱特征拟合(spectral feature fitting,SFF)进行光谱分析,并结合专家知识综合分析每条端元光谱的特征吸收位置、吸收深度、吸收宽度和光谱整体形态等。经筛选,最终识别 1 条铁铁矿光谱(图 4(a))。可见,获取的端元光谱与 USGS 参考光谱在波形及吸收位置方面一致性较高。同样,在 SWIR 波谱区间段初步获取的 7 条图像端元光谱基础上,最终筛选出 3 条蚀变矿物端元光谱,最终识别为低铝绢云母、中铝绢云母及高铝绢云母(图 4(b))。前人研究表明,绢云母的铝羟基(Al-OH)吸收峰波长与云母中六次配位铝(Al^{VI})含量呈负相关^[16,21],据此可区分出低铝绢云母、中铝绢云母及高铝绢云母^[5,16]。高铝绢云母的 Al-OH 吸收峰在 2 190 ~ 2 202 nm 之间,中铝绢云母的 Al-OH 吸收峰在 2 202 ~ 2 212 nm,低铝绢云母的 Al-OH 吸收峰在 2 212 ~ 2 225 nm^[22]。但在具体划分的过程中,不同学者有不同的依据。如文献[16]以 Al-OH 在 2 195 nm,2 210 nm 和 2 225 nm 处的主吸收特征结合共同的 2 345 nm 处的次级吸收特征进行不同铝含量绢云母的划分,而文献[5]则以 2 193 nm,2 201 nm 和 2 218 nm 处的吸收特征进行划分。本次研究识别的绢云母端元,在 2 345 nm 附近具有共同的次级吸收特征,主吸收特征分别出现在 2 201 nm,2 210 nm 和 2 218 nm,据此将其分别划分为高铝绢云母、中铝绢云母和低铝绢云母(图 4(b))。

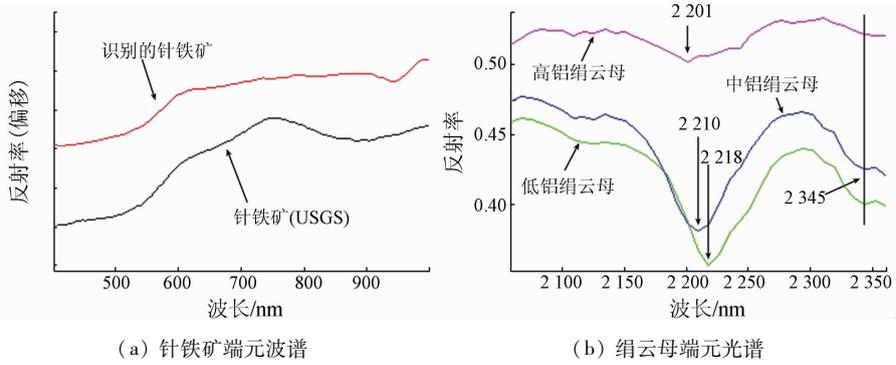


图 4 端元波谱及标准光谱

Fig. 4 Endmember spectrum from AHSI image and standard spectrum from USGS spectral library

3.1.2 矿物填图

端元波谱获取后,可利用填图算法对参考端元和图像光谱进行处理和分析,实现矿物的种类、组成成分或者丰度的反演。填图算法大致可分为基于像素和亚像素方法^[23]。其中基于像素的光谱角匹配(spectral angle mapper, SAM)和光谱信息散度(spectral information divergence, SID),以及基于亚像素的混合调制匹配滤波(mixture tuned matched filtering, MTMF)和匹配滤波(matched filtering, MF)等算法都得到了广泛应用。MF是一种部分解混或光谱分解技术,用于在高光谱图像的每个像素中寻找感兴趣目标的丰度,可最大限度地提高感兴趣目标的响应,抑制复合未知背景的背景响应^[23]。其输出结果为匹配滤波得分,得分越接近1表明像元光谱与参考目标越匹配^[24]。本次研究利用MF进行蚀变填图,并结合中值滤波对提取结果进行了优化。

3.2 线性构造提取

线性构造这个概念首先由霍布斯提出,泛指航空照片和卫星照片上呈现的与构造有关的线形影像,包括节理、断裂构造、劈理、构造裂隙、构造破碎带等^[25]。线性构造在遥感图像中主要表现为连续或不连续的线性体,由色调差异、地貌特征显示的非人工的线性影像和弧形影像组成。其在本质上与地壳断裂相关,成因上与地质作用有直接或间接的关系,且大多受地质构造控制^[26],能大致反映一个地区的基本构造格局。在成矿方面,线性构造往往为岩浆成矿溶液的上升、转移、凝固和富集提供了有利场所,是十分重要的控矿构造因素,并在一定程度上影响着成矿带的分布范围及赋存位置等^[27]。

从遥感图像中提取线性构造,常用的方法有目视解译、自动或半自动提取,其中 PCI Geomatica 软件中的 LINE 模块常用于线性构造自动提取研究^[28-30]。该模块包含边缘探测和线探测 2 部分功能,只需对该模块的 6 个参数(表 2)进行简单设置,

就能快速提取遥感图像中的线性构造。本次研究以 VNIR 400 ~ 1 000 nm 波谱范围的图像为数据源,借助 PCA 将变换后的第一主分量导入 LINE 模块以自动提取线性构造,模块相应参数设置如表 2 所示。

表 2 LINE 模块不同参数及研究采用值
Tab. 2 Different parameters of the LINE module and their actual values

参数	含义	单位	描述	采用值
RADI	滤波半径	像素	指定 Canny 边缘检测算子中用于梯度计算的高斯滤波器的半径大小	12
GTHR	边缘梯度阈值	无	边缘检测过程中,作为边缘的梯度最小值,该值越大,图像中边缘越少	50
LTHR	曲线长度阈值	像素	被视为线性构造的最小长度	25
FTHR	线拟合阈值	像素	线段拟合形成线性构造时允许的最大误差	3
ATHR	角度差阈值	像素	定义要连接的 2 条多段线之间不能超过的角度。当 2 线段之间夹角大于该值时,则不进行连接操作	20
DTHR	连接距离阈值	像素	指定 2 条线段之间进行连接处理的最大间距,当超过该值时,则不进行连接	1

3.3 铀成矿潜力图生成

利用信息综合技术建立区域综合信息矿产预测模型,进行矿产资源定量评价,是当前矿产资源勘查领域信息找矿的重要途径^[31]。本次研究将从 GF-5 高光谱数据中获取的 5 个证据层(针铁矿,高铝、中铝和低铝绢云母蚀变矿物,线性构造)进行整合,以形成铀成矿潜力图。首先,需要对各证据层进行归一化与分类处理。其中归一化处理公式为:

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (1)$$

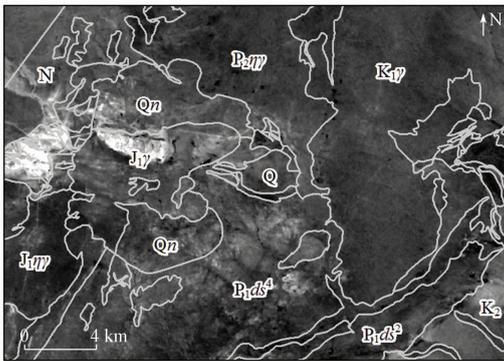
式中: X_n , X , X_{\min} 和 X_{\max} 分别为归一化后的证据层、证据层、证据层中的最小值和证据层中的最大值。其次,将归一化后的证据层按数值范围分为低、中低、中高和高4类,相应的得分为1,2,3和4。最后,通过权重叠加将各证据层进行整合以获取最终结果。

4 结果与讨论

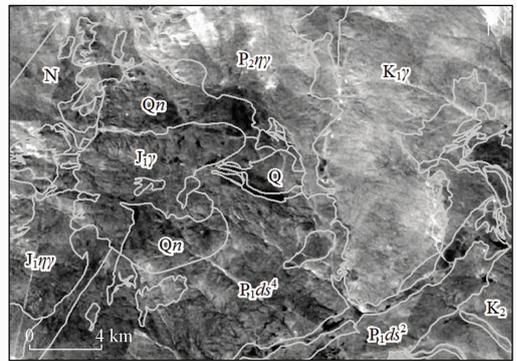
4.1 蚀变矿物分布特征

利用光谱沙漏技术分别从 VNIR 和 SWIR 2 个谱段识别了针铁矿、高铝绢云母、中铝绢云母以及低铝绢云母。结果显示,针铁矿主要呈团块状出现在

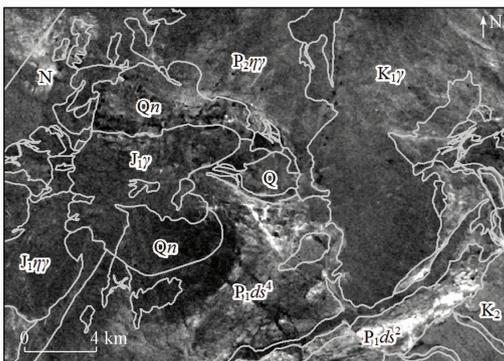
研究区西北部地区(图5)。在地层岩性上,该类蚀变主要分布于侏罗纪、晚二叠世花岗岩与围岩接触带岩体一侧,反映该处蚀变与酸性花岗岩有关的热液活动有关;高铝绢云母主要呈团块状、星点状分布于白垩纪与二叠纪岩体中。局部呈带状出露于 NW 和 NWW 向平直沟谷内,受构造控制明显;中铝绢云母主要呈团块状、带状和星点状出露于研究区东南部、中部以及西北部,尤以东南部近似沿地层展布的蚀变分布范围广。在中部,亦可见一呈“丫”字形分布的强蚀变区,受近 EW 向构造的影响,其顶部蚀变呈串珠状沿 EW 向展布。在岩性地层上,该类蚀变主要分布于二叠系大石寨组及新近系地层中;低铝绢云母主要呈团块状、星点状出露于研究区中部、南部和东南部地区,在地层岩性上,主要出露于二叠系大石寨组及青白口系地层中。



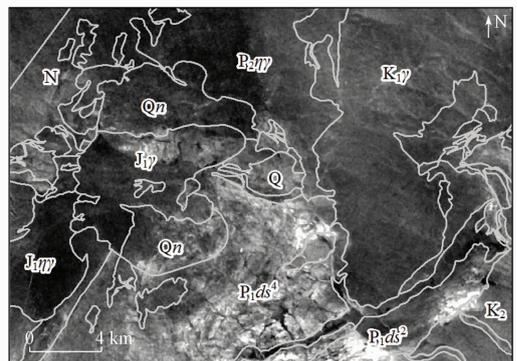
(a) 针铁矿



(b) 高铝绢云母



(c) 中铝绢云母



(d) 低铝绢云母

1. Q 第四系; 2. N 新近系; 3. K₂ 白垩系; 4. P₁d₄ 大石寨组四岩组; 5. P₁d₂ 大石寨组二岩组; 6. Qn 青白口系; 7. K₁γ 早白垩世花岗岩;
8. J₁γ₇ 早侏罗世二长花岗岩; 9. J₁γ 早侏罗世花岗岩; 10. P₂γγ 晚二叠世二长花岗岩

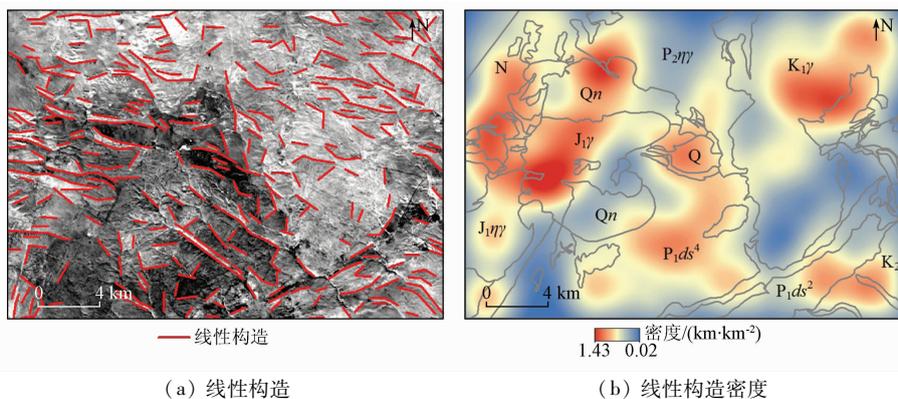
图5 蚀变矿物空间分布

Fig.5 Distribution of alteration minerals

4.2 线性构造分布特征

通过对 VNIR 波段(400 ~ 1 000 nm)高光谱数据的 PCA 变换,获取了一系列线性不相关的主分量;将信息量最大的第一主分量导入 PCI Geomatica 软件中的 LINE 模块,自动提取了研究区线性构造;并结合 ArcGIS Kernel Density 工具,制作了线性构造

密度分布图(图6)。经统计分析,本次研究共获取线性构造 321 条,提取结果主要分布于图像的不同色调分界面以及呈线状展布的色调异常带上,整体效果较好。而在局部区域,提取结果受线状道路及影像接缝的影响,但影响较小。从空间分布来看,提取线性构造主要分布在研究区西部、西北部、中部及



(a) 线性构造 (b) 线性构造密度

- 1. Q 第四系; 2. N 新近系; 3. K₂ 白垩系; 4. P₁ds⁴ 大石寨组四岩组; 5. P₁ds² 大石寨组二岩组; 6. Qn 青白口系; 7. K_{1γ} 早白垩世花岗岩;
- 8. J₁ηγ 早侏罗世二长花岗岩; 9. J_{1γ} 早侏罗世花岗岩; 10. P₂ηγ 晚二叠世二长花岗岩

图 6 线性构造空间分布

Fig. 6 Distribution of linear structures

东北部地带,尤以西部、西北部分布广泛;从地层岩性来看,提取的线性构造在岩体和地层中均有分布,但在早白垩世花岗岩(K_{1γ})南部及晚二叠世二长花岗岩(P₂ηγ)中分布较少;从线性构造方位来看,提取的线性构造主要呈 EW, NWW, NW 向展布(图 7)。这与文献[11]野外查证中发现 NW 向构造最为发育的特征相符。此外,直接观察图像,研究区沟谷多呈 NW 向展布,在一定程度上也印证了提取结果的可靠性。但是,提取的 NE 向线性构造较缺乏,可能是由于 NE 向线性构造在图像中大多不是以线状沟谷显示的,而是以色调差异不显著的界面显示的(图 6)。

间。依据数值范围将各归一化证据层分为低、中低、中和高 4 类,且设置相应的得分为 1, 2, 3 和 4。各证据层分类数值范围以“均值 + n 倍标准差”来确定,其中,对蚀变信息 n 分别取 2, 2.5 和 3,而对线性构造 n 分别取 1.5, 2 和 2.5,最终设置值见表 3。

表 3 各证据层权重值及类别划分

Tab. 3 Weights of evidential layers and their respective classification

图层	权重	数值	类别得分
线性构造密度	0.2	[0.000, 0.723)	1
		[0.723, 0.815)	2
		[0.815, 0.906)	3
		[0.906, 1.000]	4
中铝绢云母蚀变	0.2	[0.000, 0.395)	1
		[0.395, 0.419)	2
		[0.419, 0.444)	3
		[0.444, 1.000]	4
针铁矿蚀变异	0.2	[0.000, 0.728)	1
		[0.728, 0.738)	2
		[0.738, 0.748)	3
		[0.748, 1.000]	4
高铝绢云母蚀变	0.2	[0.000, 0.733)	1
		[0.733, 0.772)	2
		[0.772, 0.811)	3
		[0.811, 1.000]	4
低铝绢云母蚀变	0.2	[0.000, 0.513)	1
		[0.513, 0.545)	2
		[0.545, 0.577)	3
		[0.577, 1.000]	4

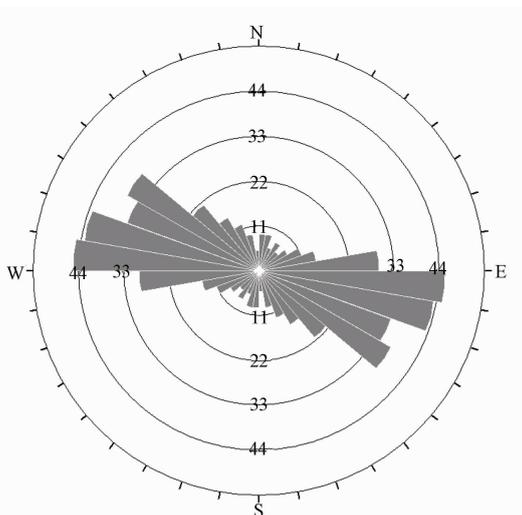


图 7 线性构造玫瑰花图

Fig. 7 Rose diagram of linear structures

4.3 综合分析及铀成矿潜力预测

为对线性构造及 5 类蚀变进行综合分析并确定铀成矿潜力区,需对各证据层进行归一化、分类及权重叠加处理。其中,归一化处理利用式(1)完成。经过归一化处理后的证据层,其像元值介于 0~1 之

基于表 3 值,结合 ArcGIS 中软件的 Reclassify 模块,获取了各证据层分类结果(图 8(a)~(e))。经过分类,有效区分了低、中低、中高及高 4 个等级的区域,并叠合已知放射性异常点及铀矿化点进一步开展铀成矿分析。结果显示,在放射性异常点或铀矿化点聚集区 I(图 8(f)),针铁矿连片分布,局部也见高铝、中铝及低铝绢云母矿物,指示该处铀成矿与上述 4 类蚀变关系密切,尤其是针铁矿。在构造

复杂度方面,该区线性构造复杂度为最高等级(图 8 (e))。如在 WJ17-219 号点,该处岩性破碎且发育针铁矿及绢云母等蚀变(图 9(a)),存在放射性异

常(伽玛测量值为 90~240 ppm),侧面印证了提取结果的可靠性。

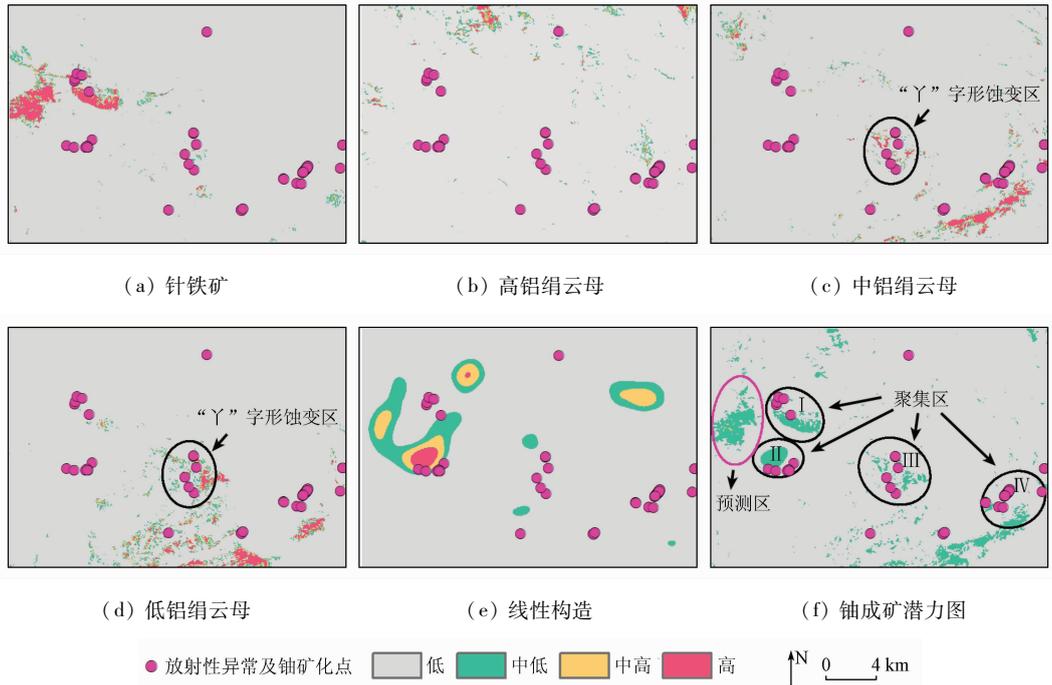


图 8 各证据层分类结果及铀成矿潜力图

Fig. 8 Classification results of evidential layers and mineral potential map of uranium



图 9 卫境地区野外查证照片

Fig. 9 Field verification photos in Weijing area

在聚集区 II,基于 GF-5 AHSI 提取的上述 4 类蚀变不明显。但在该处野外查证中发现一受构造控制呈近 EW 向展布的蚀变带,带内发育强烈的硅化、赤铁矿化、褐铁矿化及高岭土化等^[32]。本次研究未能识别出这些蚀变,可能是所用图像空间分辨率相

对较低,导致未能识别该处呈小规模展布的蚀变异常。而在构造复杂度方面,该区构造复杂度高,指示该区的热液通道及储矿空间十分发育(图 8(e))。如在 WJ17-160 号点,该点位于花岗岩体内,岩性破碎发育强烈的硅化、赤铁矿化、褐铁矿化及针铁矿

化等蚀变,整个蚀变分布受构造控制显著,伽玛测量值为 80 ~ 120 ppm(图 9(b))。

在中部聚集区 III,见一“丫”字形蚀变带,有研究表明该处 Al - OH, Mg - OH, Fe - OH 和碳酸盐类蚀变矿物大量聚集且硅化蚀变强度高^[32]。本次研究发现,该“丫”字形区域的 Al - OH 矿物主要为中铝绢云母,外侧则出露低铝绢云母蚀变(图 8(c)、(d))。野外查证中发现 WJ17 - 171 点岩石破碎,发育有石英脉、硅质脉、赤铁矿、褐铁矿及针铁矿等蚀变,并存在放射性异常(伽玛测量值为 50 ~ 200 ppm)(图 9(c))。

在聚集区 IV,有研究指出该处 Al - OH 蚀变矿物最为发育^[33 - 34]。本次研究发现敖包吐岩体(K₂γ)与地层的接触带发育的 Al - OH 矿物主要是中铝绢云母(图 8(c))。在野外查证中发现 WJ17 - 59 点除发育绢云母蚀变外,沿构造破碎带发育强烈的硅化、赤铁矿化、褐铁矿化及针铁矿化等蚀变(图 9(d)),且沿构造破碎带发育强放射性异常(伽玛测量值 400 ~ 900 ppm)。

综上所述,本文采用的蚀变信息及线性构造提取方法可行;针铁矿,高铝、中铝和低铝绢云母蚀变矿物以及线性构造与铀成矿关系密切,可作为该区铀矿找矿指示性要素(证据层)。

为此,基于分类结果,结合 ArcGIS 软件中的 Weighted Overlay 模块将各证据层整合。本次研究假定各证据层权重相同,即对矿床的形成有相同的重要性(表 3)。整合得到的结果如图 8(f)所示,从中可发现研究区被划分为低、中低及中高 3 个区域。其中,成矿概率低的区域占整个研究面积的 94.22%,中低概率区域的占比为 5.76%,而中高概率的区域范围较小,占比仅为 0.02%。

将已知放射性异常点及铀矿化点叠加于铀成矿潜力图上可以看出,已发现的 4 处放射性异常点或铀矿化点聚集区(I, II, III 及 IV)均位于潜力图上的中低概率区域附近(图 8(f)),从而在一定程度上印证了该潜力图的可靠性。依据上述结果,结合地质资料进一步圈定出预测区一处。该预测区内包含中低、中高概率成矿有利区,且连片分布。在蚀变方面,该预测区发育强烈的针铁矿蚀变,并发育一定高铝绢云母蚀变。此外,该区线性构造复杂度为中高级别,暗示有更大概率形成热液通道和储矿空间,进一步可指导研究区下一步铀矿勘查工作。

5 结论

1) 在内蒙古卫境地区利用 GF - 5 AHSI 数据采

用光谱沙漏技术成功提取了研究区针铁矿、低铝、中铝以及高铝绢云母蚀变矿物。采用 PCA 和 PCI Geomatica 软件中的 LINE 模块自动提取了研究区线性构造。并通过以上结果的分析及野外查证,指出了各证据层的空间展布规律并验证了提取结果的可靠性。

2) 借助 ArcGIS 软件,实现了各证据层的整合,制作了可靠性较高的铀成矿潜力图。其中,成矿概率低、中低及中高的区域占比分别为 94.22%, 5.76% 和 0.02%。据此结合地质资料,圈定出 1 处预测区,从而为该区后续铀矿勘查工作提供了指导,同时也为 GF - 5 高光谱数据在地质找矿领域的应用提供了参考。

3) 尽管本文基于 GF - 5 高光谱数据很好地提取了研究区的蚀变信息,但也存在由于影像空间分辨的制约未能有效识别呈小规模展布的蚀变的缺陷,由此可以看出单一数据源有一定的适用条件。因而在遥感蚀变信息提取乃至遥感地质勘查中,采用多源遥感数据可互补数据之间的不足,提高蚀变信息提取及勘查效果。

志谢: 感谢核工业北京地质研究院栗旭升博士在论文撰写中给予的宝贵建议,同时也感谢审稿专家给予的宝贵意见。

参考文献(References):

- [1] 童庆禧,张兵,张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 689 - 707.
Tong Q X, Zhang B, Zhang L F. Current progress of hyperspectral remote sensing in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 689 - 707.
- [2] 叶发旺,孟树,张川,等. 甘肃龙首山菱岭铀矿床交代型铀矿化蚀变航空高光谱识别[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(2): 279 - 292.
Ye F W, Meng S, Zhang C, et al. Identification of alkali - metasomatism type alteration associated with uranium mineralization using airborne hyperspectral in Jiling uranium deposit in Longshoushan area, Gansu Province[J]. Journal of Geo - Information Science, 2019, 21(2): 279 - 292.
- [3] 李娜,甘甫平,董新丰,等. 高分五号卫星高光谱数据岩性 - 构造解译初步应用评价[J]. 上海航天, 2019, 36(s2): 187 - 191, 198.
Li N, Gan F P, Dong X F, et al. Preliminary application and evaluation of GF - 5 satellite hyperspectral data in lithology - structure interpretation[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(s2): 187 - 191, 198.
- [4] Ye B, Tian S F, Cheng Q M, et al. Application of lithological mapping based on advanced hyperspectral imager (AHSI) imagery on-board Gaofen - 5 (GF - 5) satellite[J]. Remote Sensing, 2020, 12(23): 3990.
- [5] 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*, 2020, 24 (4): 454 - 464.
- [6] 连琛芹, 姚佛军, 陈懋弘, 等. GF - 5 高光谱数据在植被覆盖区的蚀变信息提取研究——以广东省玉水铜矿为例[J]. *现代地质*, 2020, 34(4): 680 - 686.
- Lian C Q, Yao F J, Chen M H, et al. The study on alteration information extraction of GF - 5 hyperspectral data in vegetation coverage area: A case study of the Yushui copper deposit in Guangdong Province [J]. *Geoscience*, 2020, 34(4): 680 - 686.
- [7] 孙雨, 刘家军, 赵英俊, 等. 基于 GF - 5 高光谱数据的蚀变矿物填图及地质应用——以甘肃省瓜州县花牛山地区为例[J]. *中国地质*, 2022, 49(2): 558 - 574.
- Sun Y, Liu J J, Zhao Y J, et al. Alteration mineral mapping based on the GF - 5 hyperspectral data and its geological application: An example of the Huaniushan area in Guazhou County of Gansu Province [J]. *Geology in China*, 2022, 49(2): 558 - 574.
- [8] 王茜, 任广利. 高光谱遥感异常信息在阿尔金索拉克地区铜金矿找矿工作中的应用[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(1): 277 - 285. doi: 10. 6046/ zrzyyg. 2021036.
- Wang Q, Ren G L. Application of hyperspectral remote sensing data - based anomaly extraction in copper - gold prospecting in the Solake area in the Altyn metallogenic belt, Xinjiang [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(1): 277 - 285. doi: 10. 6046/ zrzyyg. 2021036.
- [9] 张川, 叶发旺, 徐清俊, 等. 新疆白杨河铀钍矿区航空高光谱矿物填图及蚀变特征分析[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(2): 160 - 166. doi: 10. 6046/ gtzyyg. 2017. 02. 23.
- Zhang C, Ye F W, Xu Q J, et al. Mineral mapping and analysis of alteration characteristics using airborne hyperspectral remote sensing data in the Baiyanghe uranium and beryllium ore district, Xinjiang [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, 29(2): 160 - 166. doi: 10. 6046/ gtzyyg. 2017. 02. 23.
- [10] Kumar C, Chatterjee S, Oommen T, et al. Automated lithological mapping by integrating spectral enhancement techniques and machine learning algorithms using AVIRIS - NG hyperspectral data in Gold - bearing granite - greenstone rocks in Hutti, India [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 86: 102006.
- [11] 余长发, 张元涛. 内蒙古卫境地区铀矿找矿预测[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(33): 13575 - 13582.
- Yu C F, Zhang Y T. Uranium prospecting in Weijing area of Inner Mongolia [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(33): 13575 - 13582.
- [12] Wan L, Lin Y, Zhang H, et al. GF - 5 hyperspectral data for species mapping of mangrove in Mai Po, Hong Kong [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 656.
- [13] 孙永彬, 王瑞军, 魏本赞, 等. 高光谱遥感地空综合预测方法在新疆卡拉塔格地区铜金矿床找矿中的应用[J]. *中国地质*, 2018, 45(1): 178 - 191.
- Sun Y B, Wang R J, Wei B Z, et al. The application of hyperspectral remote sensing ground - air integrated prediction method to the copper gold deposit prospecting in Kalatag area, Xinjiang [J]. *Geology in China*, 2018, 45(1): 178 - 191.
- [14] 谭炳香, 李增元, 陈尔学, 等. EO - 1 Hyperion 高光谱数据的预处理[J]. *遥感信息*, 2005, 20(6): 36 - 41.
- Tan B X, Li Z Y, Chen E X, et al. Preprocessing of EO - 1 Hyperion hyperspectral data [J]. *Remote Sensing Information*, 2005, 20(6): 36 - 41.
- [15] Van der Meer F D, Van der Werff H M A, Van Ruitenbeek F J A, et al. Multi - and hyperspectral geologic remote sensing: A review [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 14(1): 112 - 128.
- [16] 叶发旺, 孟树, 张川, 等. 航空高光谱识别的高、中、低铝绢云母矿物成因学研究[J]. *地质学报*, 2018, 92(2): 395 - 412.
- Ye F W, Meng S, Zhang C, et al. Minerageny study of high - Al, medium - Al and low - Al sericites identified by airborne hyperspectral remote sensing technology [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(2): 395 - 412.
- [17] 甘甫平, 王润生, 马嵩乃. 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.
- [18] 闫柏珉, 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.
- [19] 孙雨, 聂江涛, 田丰, 等. 相山铀矿岩芯 HySpex 成像高光谱数据蚀变矿物提取及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 2015, 51(1): 165 - 174.
- Sun Y, Nie J T, Tian F, et al. Alteration mineral mapping of the Xiangshan uranium core using HySpex imaging hyperspectral data and its geological significance [J]. *Geology and Exploration*, 2015, 51(1): 165 - 174.
- [20] Tripathi M K, Govil H. Evaluation of AVIRIS - NG hyperspectral images for mineral identification and mapping [J]. *Heliyon*, 2019, 5(11): e02931.
- [21] 梁树能, 甘甫平, 闫柏珉, 等. 白云母矿物成分与光谱特征的关系研究[J]. *国土资源遥感*, 2012, 24(3): 111 - 115. doi: 10. 6046/ gtzyyg. 2012. 03. 20.
- Liang S N, Gan F P, Yan B K, et al. Relationship between composition and spectral feature of muscovite [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2012, 24(3): 111 - 115. doi: 10. 6046/ gtzyyg. 2012. 03. 20.
- [22] 张川, 叶发旺, 王建刚, 等. 桂东北苗儿山中段向坪坪铀矿床钻孔岩心高光谱特征分析[J]. *铀矿地质*, 2019, 35(6): 366 - 372.
- Zhang C, Ye F W, Wang J G, et al. Spectral characteristics analysis of drill core in the Xiangyangping uranium deposit in the middle Miaoershan mountain, northeastern Guangxi [J]. *Uranium Geology*, 2019, 35(6): 366 - 372.
- [23] Guha A. Mineral exploration using hyperspectral data [M]. *Hyperspectral Remote Sensing*. Elsevier, 2020: 293 - 318.
- [24] Salehi T, Tangestani M H. Large - scale mapping of iron oxide and hydroxide minerals of Zefreh porphyry copper deposit, using Worldview - 3 VNIR data in the Northeastern Isfahan, Iran [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 73: 156 - 169.
- [25] Hobbs W H. Lineaments of the Atlantic border region [J]. *Geolog-*

- ical Society of America Bulletin, 1904, 15: 483 – 506.
- [26] 贾三石, 王恩德, 付建飞, 等. 辽西钼多金属矿床遥感影像线性体自动提取及成矿有利度分析[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(3): 320 – 324, 253.
- Jia S S, Wang E D, Fu J F, et al. Automatic extraction and ore – forming favorability analysis of linear form in remote sensing image of molybdenum polymetallic deposit in Liaoxi area [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(3): 320 – 324, 253.
- [27] 段俊斌, 彭鹏, 杨智, 等. 基于 ASTER 数据的多金属成矿有利区预测[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 193 – 200. doi: 10.6046/gtzyyg. 2019. 03. 24.
- Duan J B, Peng P, Yang Z, et al. Prediction of polymetallic metallogenic favorable area based on ASTER data [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(3): 193 – 200. doi: 10.6046/gtzyyg. 2019. 03. 24.
- [28] Adiri Z, El Harti A, Jellouli A, et al. Comparison of Landsat – 8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah – Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas [J]. Advances in Space Research, 2017, 60(11): 2355 – 2367.
- [29] Javhar A, Chen X, Bao A, et al. Comparison of multi – resolution optical Landsat – 8, Sentinel – 2 and Radar Sentinel – 1 data for automatic lineament extraction: A case study of Alichur area, SE Pamir [J]. Remote Sensing, 2019, 11(7): 1 – 29.
- [30] Forson E D, Menyeh A, Wemegah D D. Mapping lithological units, structural lineaments and alteration zones in the Southern Kibi – Winneba belt of Ghana using integrated geophysical and remote sensing datasets [J]. Ore Geology Reviews, 2021, 137: 104271.
- [31] 陈建平, 陈勇, 王全明. 基于 GIS 的多元信息成矿预测研究——以赤峰地区为例[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 18 – 26.
- Chen J P, Chen Y, Wang Q M. Study on synthetic informational mineral resource prediction using GIS: A case study in Chifeng region, Inner Mongolia, China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 18 – 26.
- [32] 张元涛, 余长发, 潘蔚, 等. WorldView – 3 影像与 ASTER 热红外影像在内蒙古卫境地区铀矿勘查中的应用[J]. 铀矿地质, 2020, 36(5): 408 – 417.
- Zhang Y T, Yu C F, Pan W, et al. Application of WorldView – 3 and ASTER TIR for the exploration of uranium in Weijing, Inner Mongolia [J]. Uranium Geology, 2020, 36(5): 408 – 417.
- [33] 余长发, 潘蔚, 张元涛, 等. 遥感技术在内蒙古苏莫查干敖包地区铀矿勘查中的应用[J]. 铀矿地质, 2018, 34(6): 372 – 378.
- Yu C F, Pan W, Zhang Y T, et al. Application of remote sensing technique to uranium exploration in Sumoqagan Obo District, Inner Mongolia [J]. Uranium Geology, 2018, 34(6): 372 – 378.
- [34] 张元涛, 潘蔚, 余长发, 等. WorldView – 3 影像在内蒙古苏莫查干敖包地区铀矿勘查中的应用[J]. 铀矿地质, 2019, 35(2): 114 – 121.
- Zhang Y T, Pan W, Yu C F, et al. Application of WorldView – 3 image in uranium exploration in Sumoqagan Obo, Inner Mongolia [J]. Uranium Geology, 2019, 35(2): 114 – 121.

Application of GF – 5 hyperspectral data in uranium deposit exploration

ZHANG Yuantao^{1,2}, PAN Wei¹, YU Changfa¹

(1. National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Image Analysis Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. No. 280 Institute of Nuclear Industry, Deyang 618300, China)

Abstract: However, since GF – 5 launch in 2018, few studies regarding the application of GF – 5 AHSI data for uranium deposit exploration have been reported. In this study, with the Weijing area of Inner Mongolia as the study area, the spectral hourglass technology was applied to extract alteration anomalies of goethite and low –, medium –, and high – aluminum sericite from corresponding GF – 5 AHSI data. Then, the principal component analysis (PCA) and the LINE module in PCI Geomatica software were employed for the automatic extraction of linear structures in the study area, with a linear structure density map created. Finally, a uranium mineralization potential map of the study area was generated by integrating all proof layers based on the ArcGIS software. The results indicate that the extraction of alteration information and linear structures, and the integration of multiple proof layers are feasible, and the obtained uranium mineralization potential map exhibits high reliability. One uranium deposit prediction zone was identified based on the study results and geological data. The study results will guide the subsequent uranium deposit exploration in the study area while providing a reference for the geological application of GF – 5 AHSI data.

Keywords: GF – 5; hyperspectrum; alteration information; linear structure; weighted overlay; uranium deposit

(责任编辑: 张仙)