

doi: 10.6046/zrzyyg.2023180

引用格式: 邱骏挺, 李江坤, 葛藤菲, 等. 多源遥感信息在砂岩型铀矿勘查中的应用——以巴音戈壁盆地银根地区为例[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 43-54. (Qiu J T, Li J K, Ge T F, et al. Application of multi-source remote sensing data in the exploration of sandstone-type uranium deposits: A case study of the Yingen area, Bayingobi basin[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 43-54.)

多源遥感信息在砂岩型铀矿勘查中的应用

——以巴音戈壁盆地银根地区为例

邱骏挺¹, 李江坤², 葛藤菲³, 木红旭¹, 芮歆旻¹, 杨云汉¹, 杨燕杰¹

(1.核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2.核工业航测遥感中心, 石家庄 050049;
3.中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 砂岩型铀矿是一类重要的铀矿资源, 而遥感是一种重要的矿产资源勘查方法。由于砂岩型铀矿多形成于地下, 地表常被沉积物覆盖。这种情况下, 遥感是否能在砂岩型铀矿勘查中发挥作用成为值得探讨的问题。本研究以巴音戈壁盆地银根地区为研究对象, 在获取 Sentinel2, Landsat7 ETM+, ASTER, ALOS DEM 以及航空放射性数据的基础上, 开展了地形可视化、构造解译、K-T 变换、归一化植被指数(normalized difference vegetable index, NDVI) 计算、蚀变矿物提取、Th/U 比值计算等工作, 并从次生还原砂岩型铀矿的成矿模式、条件与控矿要素出发, 对结果进行综合分析。分析表明, 银根地区中部为隆起带而东南部为凹陷带, 两者间为斜坡带。隆起带花岗质岩石可作为重要的铀源。斜坡带上发育的多条近东西走向的断裂构造为含铀含氧水向地下迁移创造了条件。凹陷区发育的断裂富水带和强地表蒸发作用为含铀含氧水排泄蒸发以及驱动地下水循环创造了条件。因此, 银根地区隆起带、斜坡带、凹陷带构成一套完整的含铀含氧水循环体系。综合前人资料, 认为中部斜坡带可能是一处较好的形成次生还原砂岩型铀矿的地段。本研究也说明, 即便在覆盖严重的地区, 遥感技术依然可从识别成矿条件与控矿要素的角度, 为砂岩型铀矿找矿提供指引。

关键词: 遥感; 砂岩型铀矿; 巴音戈壁; 银根地区

中图法分类号: TP 627; P 627 **文献标志码:** A

文章编号: 2097-034X(2024)04-0043-12

0 引言

铀是一种重要的战略资源, 对保障国防和能源安全具有重要作用。近年来, 我国天然铀产业持续实施重大转型, 产业布局、战略重心正由南方硬岩型逐步向北方砂岩型转移, 相关的勘查力度也逐年增强。相比松辽、二连和鄂尔多斯, 巴丹戈壁盆地当前的铀矿找矿工作仍比较薄弱。相关资料显示, 该盆地为叠置在克拉通与晚古生代褶皱基底接合部上的伸展断复合盆地^[1,2], 其凹陷内发生的多期构造活动剥露的富铀花岗岩体提供了重要的铀成矿物质来源。近年来, 在该盆地中南部的一系列铀找矿突破^[3-5], 使巴丹戈壁盆地的铀矿勘查越来越受到重视。

传统地质勘查效率低、难度大、成本高, 遥感技术则具有空间覆盖范围广、数据获取速度快、信息丰

富、价格便宜等特点, 在开展大区域尺度地表矿产勘查方面具有得天独厚的优势^[6-12], 已在硬岩和热液型铀矿勘查方面得到应用^[13-15]。相比而言, 砂岩型铀矿多形成于地下^[16-17], 地表经常被沉积物覆盖。针对砂岩型铀矿, 遥感技术是否依然能发挥作用, 以及如何发挥作用成为重要命题, 不仅关乎遥感技术本身的发展, 也对如何实现覆盖区砂岩型铀矿找矿的快速突破起到关键作用, 得到一些学者的关注^[18]。

次生还原砂岩型铀矿是指原始缺乏还原组分或富含氧化组分的砂岩地层受外来还原物质影响, 使其具备铀还原能力, 而在其中形成的铀矿。由于外来还原物质多与石油、天然气和硫化氢有关, 因而也被称为油气相关砂岩型铀矿^[19]。次生还原砂岩型铀矿在世界范围分布极广, 如: 哈萨克斯坦 Chu-Sarysu 盆地中的 Inkai 铀矿、澳大利亚 Eromanga 盆地中的 Oban 铀矿、美国德克萨斯州 Coastal Plain 铀

收稿日期: 2023-06-25; 修订日期: 2023-08-08

基金项目: 国防科工局 HNKF 项目“航空高光谱与伽玛能谱铀矿勘查集成软件系统研发”(编号: YH2001-5)资助。

第一作者: 邱骏挺(1987-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事遥感铀矿勘查方面的研究。Email: midimyself@126.com。

矿集区、中国北方松辽盆地中的钱家店铀矿^[20]等。这类铀矿的产生与蚀源区、富铀地层、斜坡带、缓坡带、排泄带、富水带、冲积扇和扇三角洲前缘、辫状河沉积以及深部油气还原物质等密切相关。

本文以巴丹吉林盆地北部的银根地区为研究对象,开展了多源遥感数据的获取与处理工作,并从次生还原砂岩型铀矿的成矿条件与控矿要素出发,有针对性地对遥感信息进行综合分析,在此基础上对可能的铀成矿区域进行了预测。

1 区域地质背景

巴音戈壁盆地大地构造位于西伯利亚、华北、塔

里木和哈萨克斯坦板块的结合部位,其北部和南部分别以宗乃山—沙拉扎山隆起和巴丹吉林断裂为界(图1)。盆地基底由太古宇乌拉山群变质岩、古元古界阿拉善群变质岩以及古生代碎屑岩、碳酸盐岩和中酸性火山岩构成^[2,21]。盆地盖层主要由侏罗系、下白垩统巴音戈壁组 and 上白垩统乌兰苏海组构成^[4,21-24]。盆地内岩浆岩主要形成于元古宙、古生代和中生代,岩性包含花岗岩、花岗闪长岩、花岗闪长玢岩、黑云闪长岩、石英闪长玢岩等^[25]且主要沿宗乃山—沙拉扎山、狼山—巴彦诺尔公一带分布。盆地内区域断裂主要呈东西走向,包括位于北部的宗乃山—沙拉扎山断裂和南部的巴丹吉林断裂。

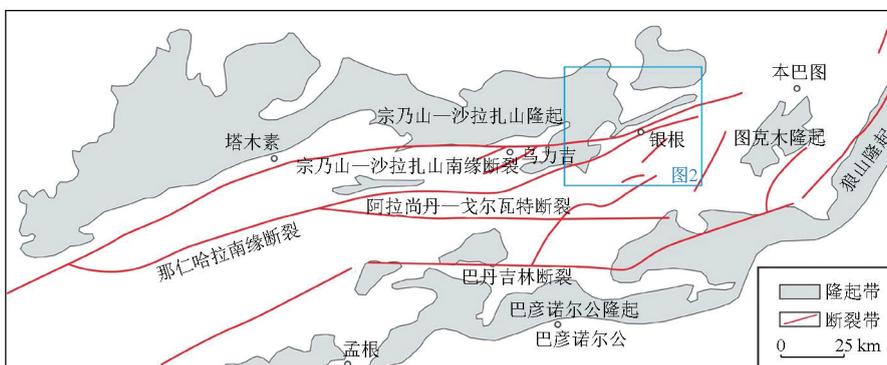


图1 巴音戈壁盆地及银根地区示意图(据文献[26],略有修改)

Fig.1 Map shows the Bayingobi basin and the location of Yingen region (Modified after reference[26])

2 多源遥感数据

本研究使用的遥感数据包括 Landsat7 ETM+, ASTER, ALOS DEM, Sentinel2 等卫星遥感数据,此外还收集了银根地区的航空放射性数据。其中

Landsat7 ETM+用于 K-T 变换分析和 NDVI 指数计算,ASTER 数据用于地表蚀变信息提取、ALOS DEM 用于地形分析、Sentinel2 用于制作研究区彩色合成图以及进行地表构造解译。航空放射性数据用于地表铀(U)、钍(Th)异常分析。相关数据的基本情况 & 数据来源见表 1。

表 1 多源遥感数据信息表

Tab.1 Basic information about the remote sensing data

数据类型	数据产品编号	数据来源	数据用途
Landsat7 ETM+	ELP130R032_7T20020624	美国地调局 Earth Explorer 平台	K-T 变换提取亮度、绿度、湿度信息,计算 NDVI 指数
	ELP131R031_7T20000828		
	ELP131R032_7T20000828		
ASTER	AST_L1T_00305202001040345	美国地调局 Earth Explorer 平台	用于地表蚀变信息的提取
	AST_L1T_00305262003035432		
	AST_L1T_00305302002040158		
	AST_L1T_00306122001040904		
	AST_L1T_00307142001040817		
	AST_L1T_00307272000041451		
ALOS DEM	内蒙古 12.5m ALOS DEM	立方数据社	用于地形分析
	L2A_T48TWK_A031590_20230325T035301	欧空局 Open Access Hub	用于制作研究区真彩色图像和进行构造解译
L2A_T48TVL_A031590_20230325T035301			
L2A_T48TVK_A031590_20230325T035301			
L2A_T48TWL_A031590_20230325T035301			
航空放射性	银根地区航空放射性数据	核工业航测遥感中心	用于地表 U 和 Th 分析

3 数据处理与结果

3.1 彩色合成与构造解译

银根地区彩色合成图使用 Sentinel2 卫星遥感数据制作。该数据的 2 波段、3 波段和 4 波段分别对应真彩色图像的蓝、绿和红色波段。首先利用 ENVI5.3 打开 4 景 Sentinel2 卫星遥感数据,依次选择每景数据的 2,3,4 波段分别赋予蓝、绿、红波段完成彩色合成,之后利用 Mosaic 工具对 4 景数据进行

拼合,并完成匀色工作,最终根据银根地区的地理范围对拼合后的结果进行裁剪,获得银根地区的彩色合成影像结果(图 2(a))。

构造解译采用地质资料配合目视解译的方式进行。在 ArcGIS 平台中,首先对银根地区的地质资料进行空间配准,将地质资料中记载的信息矢量化并叠加在银根地区彩色合成影像图上,之后再根据影像的颜色和纹理变化特征对叠合的信息进行修正与补充。本次主要解译断裂和岩体侵入构造,解译结果如图 2(b)所示。

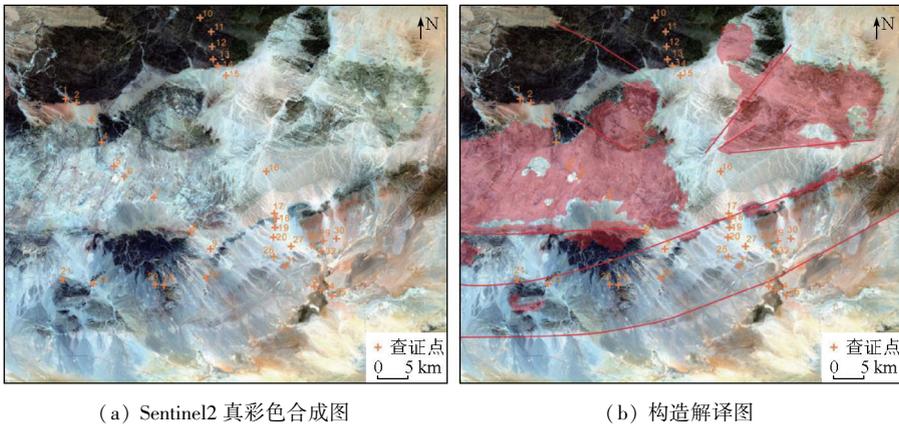


图 2 银根地区 Sentinel2 真彩色合成及构造解译图(4(R),3(G),2(B)合成)

Fig.2 True color combination and structure interpretation images of Sentinel2 data for Yingen region (4(R),3(G),2(B))

3.2 K-T 变换

K-T 变换(Kauth-Thomas 变换)又称为缨帽变换(Tasseled Cap),是一种转换系数固定的特殊主成分变换,其中最常用的 3 个变换分量是亮度、绿度和湿度分量,分别用来表示地表的裸露程度、植被情况和土壤湿度情况。木红旭等^[6]利用 K-T 变换对松辽盆地的区域构造排泄带进行识别,其中亮度分量用来表示地表白碱带,绿度和湿度分量用来表示地表富水情况。由于 K-T 变换的系数对不同传感器

是不同的,且本次使用的为 Landsat7 ETM+数据,因而在进行处理时使用 ENVI5.3 软件的 Tasseled Cap 功能并设置数据类型为 Landsat 7 ETM,依次对 3 景 ETM+数据进行处理,得到的前 3 个分量分别为亮度、绿度和湿度分量,再利用 Density Slice 对亮度、绿度和湿度异常进行密度分割,并对异常结果进行 Mosaic 拼接,最终根据银根地区的地理范围对拼合后的结果进行裁剪,得到银根地区的亮度、绿度和湿度异常分布结果(图 3(a)(b)(c))。

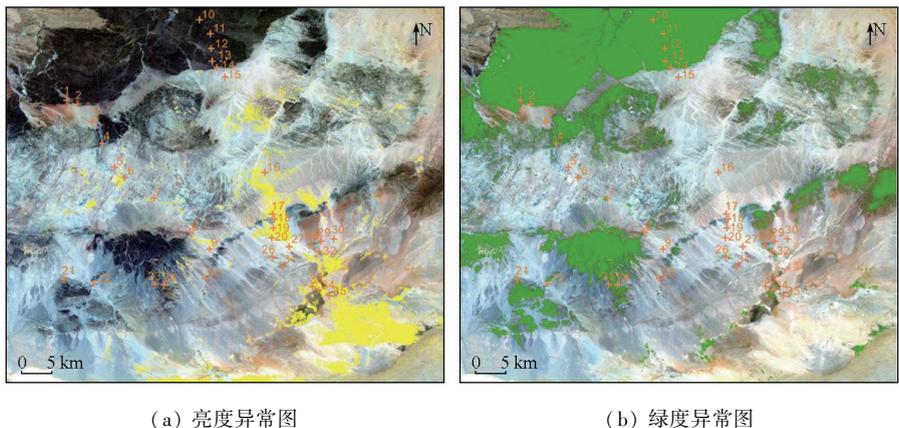


图 3-1 银根地区 K-T 变换及植被异常提取结果图

Fig.3-1 Results of K-T transformation and vegetation anomaly extraction for Yingen region

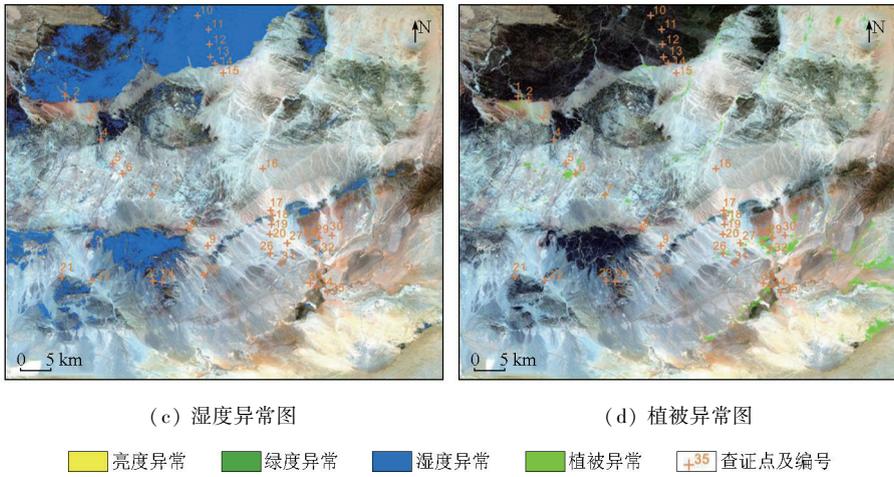


图 3-2 银根地区 K-T 变换及植被异常提取结果图

Fig.3-2 Results of K-T transformation and vegetation anomaly extraction for Yingen region

3.3 NDVI 指数

NDVI 即归一化植被指数,其数值等于近红外谱段反射强度同红谱段反射强度之差与二者之和的比值,计算方法为:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R), \quad (1)$$

式中: NDVI 为归一化植被指数; NIR 为近红外波段影像; R 为红波段影像。

研究中利用 ENVI5.3 Classic 软件的 Band math 功能模块计算 NDVI,公式为:

$$NDVI = (B1 - B2) / (B1 + B2), \quad (2)$$

式中: NDVI 为归一化植被指数; B1 和 B2 分别为 Landsat7 ETM+ 的 4 波段数据和 3 波段数据。

依次计算 3 景 Landsat7 ETM+ 的 NDVI 结果后,利用 Density Slice 对每景中的异常进行密度分割,再利用 Mosaic 对分割结果进行拼合,最终根据银根地区的地理范围对拼合后的结果进行裁剪,获得银根地区植被异常分布结果(图 3(d))。

3.4 蚀变提取

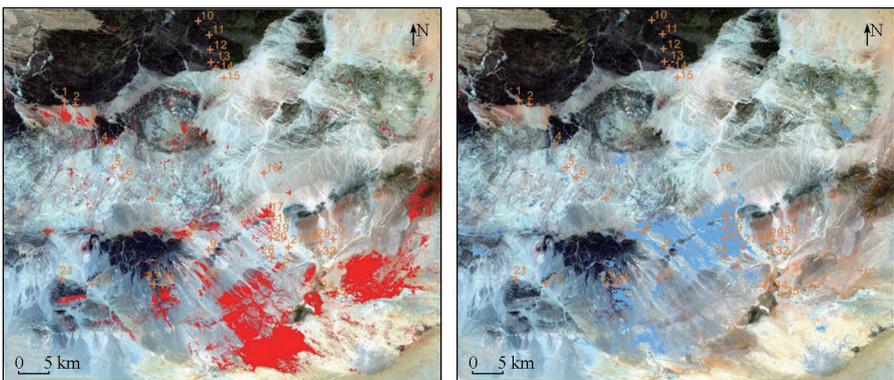
蚀变矿物提取利用 ASTER 数据配合主成分分

析法进行,具体提取方法参考文献[27]。本次共提取 4 种蚀变,分别为铁染(赤铁矿、褐铁矿等)、黏土(高岭石、蒙脱石、伊利石等)、碳酸盐和绿泥石(方解石、白云石、绿泥石、绿帘石等)、硅化(石英)。不同蚀变矿物提取所使用的波段组合与主成分如表 2 所示。

表 2 蚀变矿物提取使用的 ASTER 数据波段组合与主成分表
Tab.2 Selected ASTER bands and principal components for alteration mineral extraction

蚀变类型	ASTER 波段	主成分
铁染	1,2,4	PC2
黏土	4,5,6	PC2
碳酸盐和绿泥石	10,13,14	PC3
硅化	10,12,14	PC2

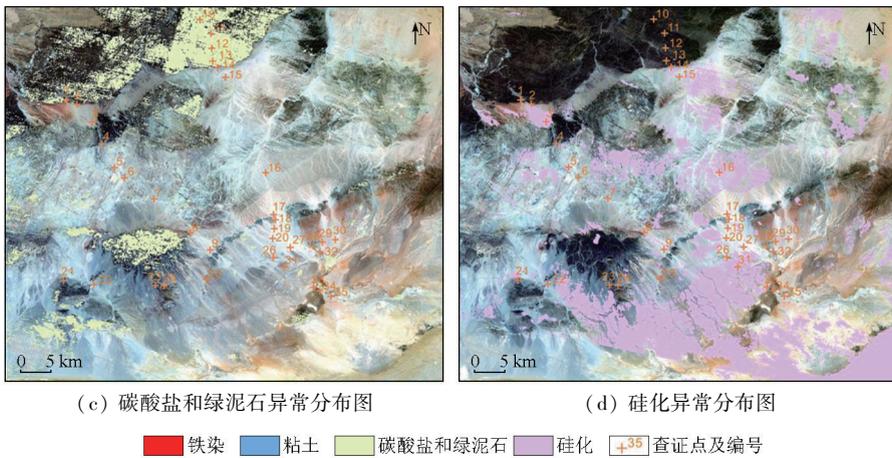
利用上述波段组合依次对 6 景 ASTER 数据开展主成分分析,并对主成分运用 Density slice 进行密度分割,提取不同的蚀变异常,再利用 Mosaic 对异常结果进行拼合,最终根据银根地区的地理范围对拼合后的结果进行裁剪,获得银根地区蚀变异常分布结果(图 4)。



(a) 铁染异常分布图 (b) 黏土异常分布图

图 4-1 银根地区蚀变异常分布图

Fig.4-1 Results of alteration mapping for Yingen region



(c) 碳酸盐和绿泥石异常分布图 (d) 硅化异常分布图

■ 铁染 ■ 粘土 ■ 碳酸盐和绿泥石 ■ 硅化 □ +35 查证点及编号

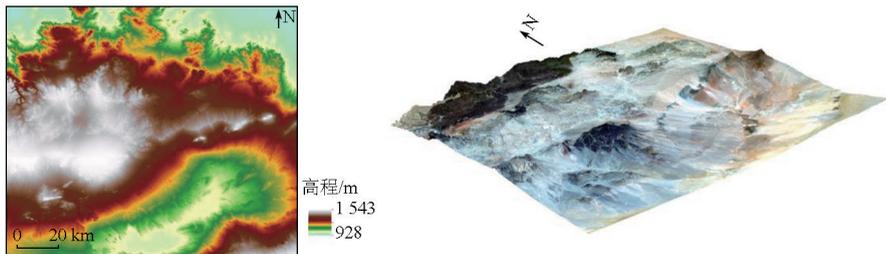
图 4-2 银根地区蚀变异常分布图

Fig.4-2 Results of alteration mapping for Yingen region

3.5 地形可视化

地形可视化分析采用 ALOS 卫星相控阵 L 波段合成孔径雷达 (PALSAR) 采集的 DEM 数据进行。该数据拥有 12.5 m 的空间分辨率。首先根据银根地区的地理范围对 DEM 数据进行裁剪,之后运用

ArcGIS 对 DEM 进行彩色渲染,获得具有不同色度的数字高程图(图 5(a))。同时,利用 ENVI 5.3 的 3D Surface View 功能,将银根地区的数字高程同 Sentinel2 彩色合成结果进行三维可视化展示(图 5(b))。



(a) 数字高程图 (b) 地形三维可视化图

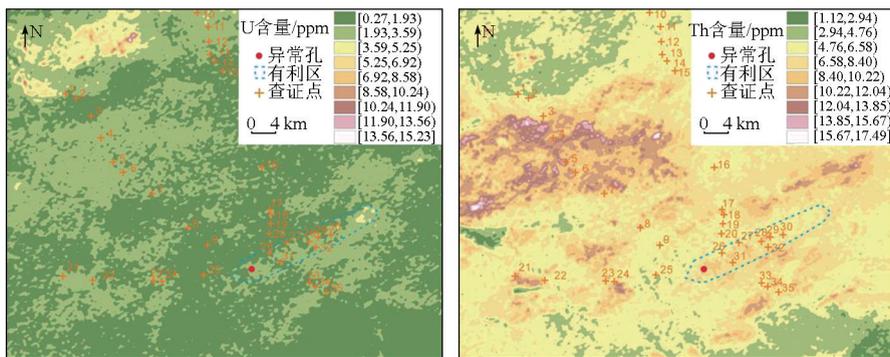
图 5 银根地区彩色数字高程与地形三维可视化图

Fig.5 Digital elevation model and 3-D visualization for Yingen region

3.6 航空放射性

本研究使用的航空放射性数据由中国铀业航测遥感中心利用机载航空放射性仪器实测获取。测量结果为包含坐标的 U, Th, K(放射性钾)、总道散点值。利用 ArcGIS 载入散点值后,先运用反距离权重

法依次生成 U, Th, K 3 种元素的含量空间插值结果(图 6(a)(b)(c))。之后,运用 ArcGIS 的栅格计算功能,以 Th, U 空间插值结果为基础,计算获得 Th/U 比值结果(图 6(d))。



(a) U 元素异常图 (b) Th 元素异常图

图 6-1 银根地区航空放射性数据空间插值结果图

Fig.6-1 Interpolation map of airborne radioactive data for Yingen region

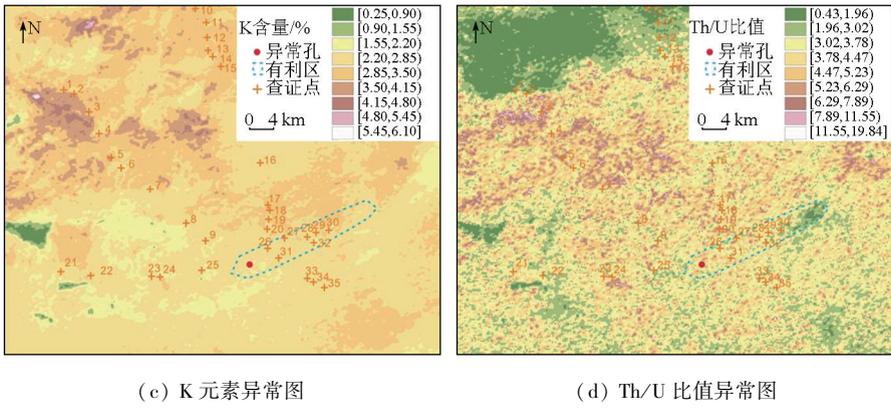


图 6-2 银根地区航空放射性数据空间插值结果图

Fig.6-2 Interpolation map of airborne radioactive data for Yingen region

4 讨论

4.1 多源遥感信息特征及野外验证

从真彩色图像上看(图 2(a)),银根地区的遥感影像西北部整体偏黑色,中部偏灰白色、墨绿色,东南偏淡红色。区内岩体主要出露于中部地区(图 2(b)),以灰白色为主,含少量黑色、墨绿色。岩体的岩石类型主要为花岗闪长岩,有明显的挤压片理化,片理化后的岩石易破碎散落于地表(图 7(a))。

影像中的黑色、墨绿色部分为玄武岩、辉绿岩等,玄武岩有气孔构造和杏仁构造(图 7(b))。

区内断裂整体呈东西、北东东走向,少量呈北西、北东走向(图 2(b))。在遥感影像图上,断裂呈明显线状,常伴随串珠状分布的暗色岩体或岩性的突然变化(图 2(a))。在航空放射性图上,断裂经过处的航放异常表现出截然的变化(图 6(a))。野外查证中可见断裂面上的新生矿物(图 7(c)),近东西向的断裂附近岩石中可见剪切节理,指示近南北向的挤压作用(图 7(d))。

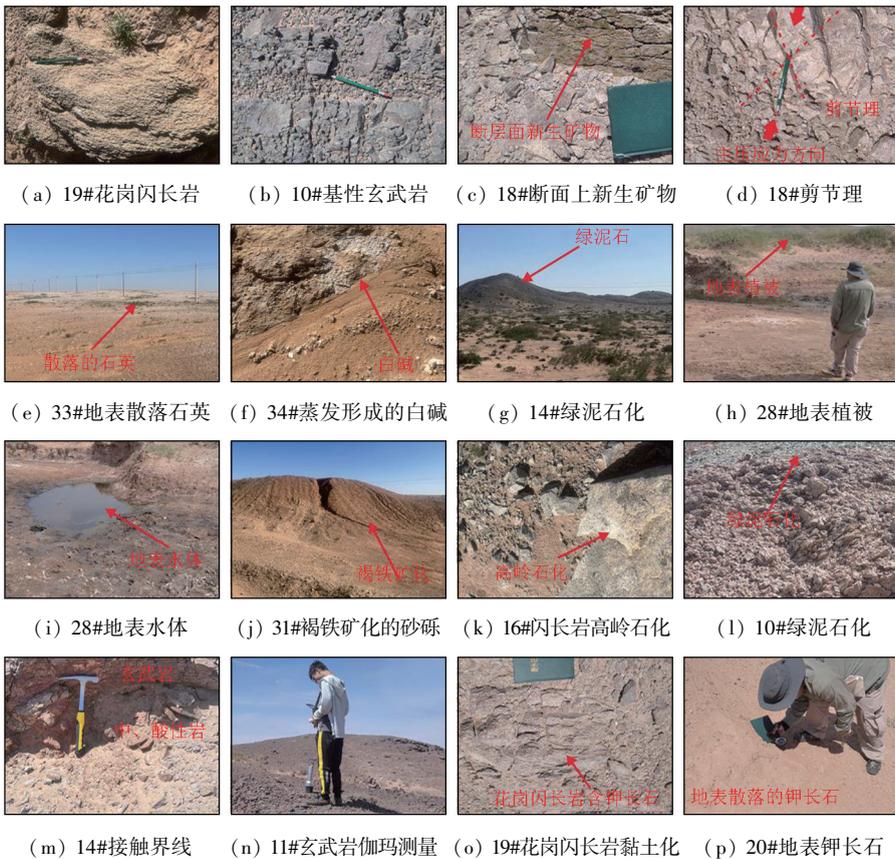


图 7 银根地区野外查证照片(带查证点编号)

Fig.7 Field photographs of remote sensing information extraction(with field validation spot number)

在亮度、绿度和湿度图上,亮度异常主要分布于南部地区,在中部地区呈北东-南西向狭长分布,在靠近北部地区呈总体北东东向的零星散布(图3(a)),野外查证发现亮度异常与地表散落的白色石英颗粒(图7(e))和地表蒸发产生的白碱有关(图7(f))。相比而言,绿度和湿度异常分布较广,且二者在空间上重合度较高(图3(b)(c))。在北部主要与真彩色图像上的黑色区域范围一致(图2(a),图3(b)(c)),在中部和南部主要呈近东西向的展布。在东南部仅有零星分布。野外查证发现,影像北部和中部的绿度和湿度异常实际上是玄武岩和辉绿岩发生的绿泥石化蚀变(图7(g)),只有南部零星分布的绿度和湿度异常才与植被(图7(h))和地表水(图7(i))有关。

植被异常在研究区内呈零星分布(图3(d)),表明研究区整体干旱。在研究区的东南部,植被异常与绿度异常在空间分布上较为一致,野外查证也证实了植被的存在(图7(h)),但在其他区域二者则相差较大(图3(b)(d)),如前所述这是由于很多绿度异常实际上是玄武岩和辉绿岩的绿泥石化所致。

在蚀变方面,铁染异常主要呈片状分布于研究区的东南部,另在北部和中部有零星分布(图4(a)),野外发现铁染异常主要是地表的红色砂砾中的褐铁矿化导致(图7(j));黏土异常主要呈片状分布于中部地区,其他地区则呈零星分布(图4(b)),野外发现黏土异常与花岗闪长岩中的白云母和长石风化形成的高岭石有关(图7(k));碳酸盐/绿泥石异常主要分布于北部(图4(c)),少量分布于中部,且与真彩色图像上的黑色区域重合度很高(图2(a),图4(c)),与绿度和湿度图上呈面状的异常信息重合度也很高(图3(b)(c),图4(c)),这些实际上都与基性岩的绿泥石化有关(图7(g)(l))。硅化异常分布范围很广(图4(d)),但在彩色合成图显示的黑色区域却几乎没有分布(图2(a),图4(d)),这是因为黑色区域实际为基性岩,而基性岩的石英含量低。有意思的是,在酸性岩体分布区域,硅化异常也不是十分强烈,因为酸性岩的主体岩性为花岗闪长岩(图7(a)),除石英外还含有大量暗色矿物和长石;而在研究区东南部没有酸性岩体出露的地区,硅化异常却大面积分布,这是因为地表散落了大量的石英颗粒(图7(e))。

在地貌方面,研究区中部地势较高,在东北、西北和东南地势相对较低(图5(a))。酸性花岗岩体主要分布在中部的隆起区之上(图2(b),图5(b))。在研究区的东南部,有一条北东东走向的长条形凹

陷(图5(a))。铁染异常、亮度异常多分布于该凹陷内(图3(a),图4(a),图5(b))。黏土异常多分布在从中部隆起到东南部凹陷过渡的斜坡带上(图4(b),图5(b))。硅化异常在凹陷中有大量分布,在斜坡带上也有少量分布(图4(d),图5(b))。绝大多数的植被异常也都分布在凹陷中(图3(d),图5(b))。碳酸盐/绿泥石异常基本都在凹陷之外(图4(c),图5(b))。另外,从银根地区的彩色合成图上可以看出,从中部隆起至东南部凹陷的斜坡带上发育多组冲积扇(图2(a),图5(b))。

在航空放射性方面,银根地区放射性U元素的含量总体偏低(图6(a))。在研究区范围内仅有少量的富集区域,其中最明显的富集区域位于研究区的西北部,与彩色合成图像上的黑色区域重合(图2(a),图6(a))。根据蚀变异常提取结果,黑色区域有碳酸盐/绿泥石异常(图4(c)),结合野外查证,该地表面以玄武岩和辉绿岩为主,但玄武岩之下还有中、酸性岩浆岩(图7(m)),对玄武岩进行地表伽玛能谱测量(图7(n)),发现其所含U含量并不高,因此U异常可能并不是玄武岩导致的,而可能与玄武岩覆盖的中酸性岩浆岩有关。另一处较弱的U富集区位于研究区东南部凹陷带的东北角,分布面积较小。花岗闪长岩的总U含量介于1.93~3.59 ppm之间(图6(a)),但其Th含量和放射性K含量往往较高,其中Th含量超过8.40 ppm(图6(b)),放射性K含量超过4.15%(图6(c)),这与野外使用地表伽玛能谱仪测量的结果接近。高的放射性K含量暗示着岩体中包含较多的钾长石,与野外发现的花岗闪长岩中含有肉红色的钾长石的现象一致(图7(o))。值得注意的是,在研究区中部的斜坡带上,放射性K的异常值在2.85%~3.50%,明显高于东南部凹陷中放射性K的含量(图6(c)),而此处又正好与大面积黏土异常相重合(图4(b)),说明斜坡带上的沉积物可能包含较多的长石,石英相对较少,这与野外观察到的斜坡带上有大面积散落的长石的现象一致(图7(p))。相反,在东南部凹陷中,有大量的硅化异常(图4(d)),而放射性K的含量相对较低(图6(c)),说明凹陷中沉积物少长石而多石英,这与观察到的大面积散落的石英颗粒有关(图7(e))。

表3列出35个野外查证点查证结果,其中酸性岩主要指花岗闪长岩、二长花岗闪长岩,基性岩主要指玄武岩、辉绿岩,亮度异常代表地表散落石英和白碱,绿度异常代表植被和绿泥石化基性岩,湿度异常代表地表水,铁染、绿泥石、黏土和硅化分别代表褐铁矿(赤铁矿)、绿泥石、高岭石化长石和散落石英。

如表3所示,岩性识别、植被异常、亮度和绿度异常、以及各类蚀变信息的准确度较高,达80%以上,湿度准确度较低,仅33%。在放射性异常方面,地表实测结果与航放结果存在一定差异,其中U、Th地面实测值普遍比航放高,放射性K则偏低(表3),这与二者测量面积不同有关:能谱仪仅反映露头的伽

玛强度,航放则反映一定范围的伽玛强度。虽然有差异,但二者反映的不同类型岩石的放射性总体特征是一致的,如北部基性岩具有较弱的U含量和比较接近的Th、U含量,中部的酸性岩U含量较低但Th/U比较高,有较为明显的U迁出特性等。

表3 野外查证结果表^①
Tab.3 Results of the field validation

查证点	岩性信息		K-T变换信息			植被异常	蚀变信息				放射性信息(地面实测/航空)		
	酸性岩	基性岩	亮度	绿度	湿度		铁染	绿泥石	黏土	硅化	U含量/ppm	Th含量/ppm	K含量/%
1		+		+	-					+	6.50/3.59	4.48/2.94	1.18/2.85
2		+		+	-					+			
3							+				5.82/1.93	9.16/6.58	1.20/4.15
4		+		+							7.65/3.59	20.1/13.85	0.98/2.85
5	+									+			
6	+		+			+				+	2.15/3.59	19.8/12.04	1.10/2.85
7	+		+										
8	+			+			+			+			
9			-							+			
10		+		+	-					+	8.58/3.59	7.44/6.58	0.38/4.15
11		+		+	-					+	7.40/3.59	8.28/6.58	0.20/2.85
12		+		+	-					+			
13		+		+	-					+			
14		+								+			
15	+												
16			+							+	2.20/1.93	12.2/6.58	1.36/2.85
17			+				-			+			
18	+												
19	+		+							+			
20			+							+			
21		+											
22		+											
23		+					+						
24		-					+						
25							+						
26				+		+				-	4.56/1.93	10.1/6.58	0.10/2.85
27			+			+				+			
28				+	+	+					8.95/3.59	16.4/10.22	1.12/2.85
29				+	+	+					10.15/3.59	18.2/13.85	0.70/2.85
30											7.68/6.92	15.1/10.22	0.16/3.5
31										+			
32				+	+	+					9.85/3.59	9.32/10.22	0.30/2.85
33			+										
34			+	+		+	+						
35			+				+						
查证点	7	12	11	13	9	7	9	7	8	8			
正确点	7	11	10	13	3	7	8	7	7	7			
正确率/%	100	92	91	100	33	100	89	100	88	88			

①: 针对岩性信息、K-T变换信息、植被异常信息、蚀变信息,在检查点发现遥感识别信息与实际相符记“+”,不相符记“-”;针对放射性信息,表格中记录的是野外使用能谱仪测量的结果。

4.2 基于成矿模式、条件与控矿要素的有利区预测

遥感技术在铀矿勘查领域已有成功的应用案例^[13-15],主要是利用其提取与铀成矿有关的岩石、构造和蚀变信息,再综合这些信息进行有利区预测。这种方法针对岩浆岩、火山岩和热液型铀矿效果较

好,但对砂岩型铀矿却存在明显缺陷,主要原因是砂岩型铀矿形成于地下,地表蚀变和岩石类型与其成矿关系并不密切。例如,本研究中提取的铁染、黏土和绿泥石化信息多为地表岩石风化导致,并不能指示深部砂岩铀成矿作用。因此,按照传统的遥感识

别岩性、构造、蚀变的方法进行砂岩型铀矿的勘查显然是行不通的。

因此,本研究提出一种基于成矿模式、条件与控矿要素的多源遥感信息砂岩型铀矿有利区预测方法,并以次生还原砂岩型铀矿为例进行探索。图8展示了次生还原砂岩型铀矿的经典成矿模式,即含铀岩浆岩风化导致铀从岩石中迁出,随水顺排泄带

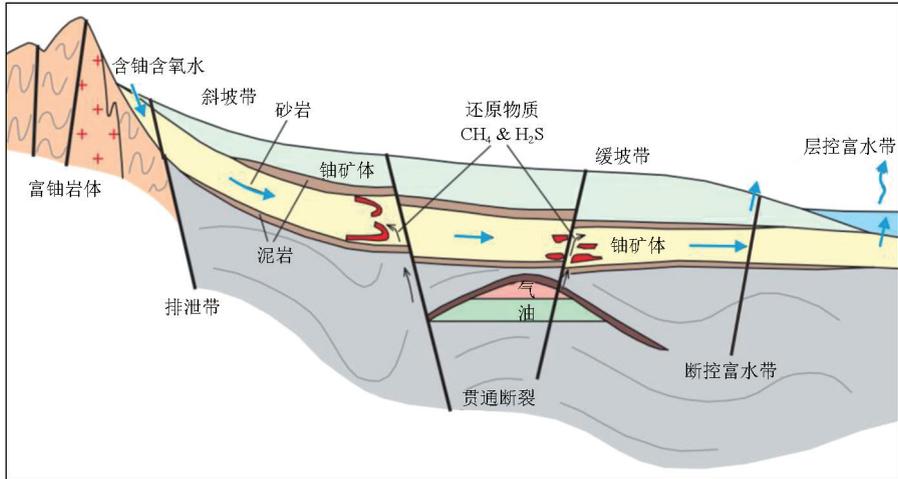


图8 典型次生还原砂岩型铀矿成矿模式图(据[19]有修改)

Fig.8 Metallogenic model of typical secondary reduction sandstone type uranium deposit (modified according to [19])

在铀源条件方面,位于研究区中部的花岗闪长岩的总U含量介于1.93~3.59 ppm之间(图6(a)),Th/U比值介于3.78~4.47,部分可达到6.29以上(图6(d))。由于正常岩浆岩的Th/U比值接近4,此处出现的高Th/U比值说明U发生了迁出,也说明花岗闪长岩可以作为重要的铀源。

在迁移条件方面,数字高程显示研究区中部地势较高,而东北、西北和东南的地势相对较低(图5(a))。因此,位于研究区中部的花岗闪长岩迁出的U可能沿东北、西北和东南3个方向的构造斜坡带迁移。此外,在隆起区至东南凹陷之间的斜坡带上发育2条近东西(北东东)走向的断裂带(图2(b))。其中,位于北部的断裂周围较为干旱,植物长势差,而位于南部的断裂周围较为湿润,可看到地表水和长势较好的植物(图7(h)(i)),说明北部断裂可能为排泄带,使地表水迁入地下,而南部断裂为富水带,使地下水的迁出。2条断裂带构成了一个良好的水循环体系,为U的迁移提供了有利条件。

在赋存条件方面,通过光学遥感影像可见南部斜坡带有多组冲积扇和辫状河分布(图2(a))。这些沉积环境易于形成泥-砂-泥结构的沉积地层。天津地质矿产研究所于2006年在同一斜坡带距离银根苏木以东约40 km处施工了ZK1201和ZK1202钻孔(据全国重要地质钻孔数据库服务平台)。2个钻孔中可见泥-砂-泥结构的地层,说明南部斜坡带

进入地下,并在重力作用下沿斜坡带或缓坡带中的泥-砂-泥结构的砂岩层迁移,最终被沿贯通断裂迁入的外来还原物质还原而逐步富集成矿。该成矿模式涉及的成矿条件包括:铀源条件(含铀岩浆岩)、迁移条件(排泄带、斜坡带或缓坡带、富水带)、赋存条件(泥-砂-泥结构地层)和富集条件(还原性物质),控矿要素主要为引入还原物质的贯通性断裂。

具有良好的铀赋存条件。

在富集条件方面,在南部斜坡带的2条断裂间可见一处规模较小的U异常(图6(a)),该异常的Th/U小于3.02,部分小于1.96(图6(d)),说明此处U为次生富集。在该异常附近可见砂-砾互层的沉积(图9(a)),且已固结成岩(图9(b))。将该点位置对应到地质图上,发现该点位于下白垩统巴音戈壁组内(图9(c)),据1:20万地质图银根幅K-48-XXVIII,1979)。巴音戈壁组岩性为褐红色砂砾岩、砾岩夹砂砾岩、紫红色泥岩、泥页岩、砂质泥岩,整体偏氧化环境,但该点沉积岩整体呈绿色、墨绿色、灰色,代表了相对还原的环境。天津地质矿产研究所2006年施工的ZK001和ZK002这2个钻孔中可见油页岩(据全国重要地质钻孔数据库服务平台),表示银根地区深部可能有重要的还原物质。综合这些现象,此处的U异常很可能与深部的还原物质有关。

在控矿要素方面,在南部斜坡带的南、北两条断裂之间还发育着多条小的隐伏断裂,由于这些断裂的活动导致深部还原物质得以迁移并形成还原环境,有利于铀的还原沉淀。此外,这些断裂也导致原先隐伏的还原地层出露于地表,如图9所示的还原砂-砾岩地层。

综上所述,银根南部斜坡带具备完整的铀源、迁移、赋存和富集条件,是一处有利的寻找次生还原砂

岩型铀矿的地区(图6),本研究在该范围的28,29,30这3个地面检验点测得较高的地表U放射性异常(表3),核工业二〇八大队在该范围发现铀矿化

异常孔(图6,ZKY1-2),应沿斜坡带上的贯通断裂加强铀矿找矿工作。

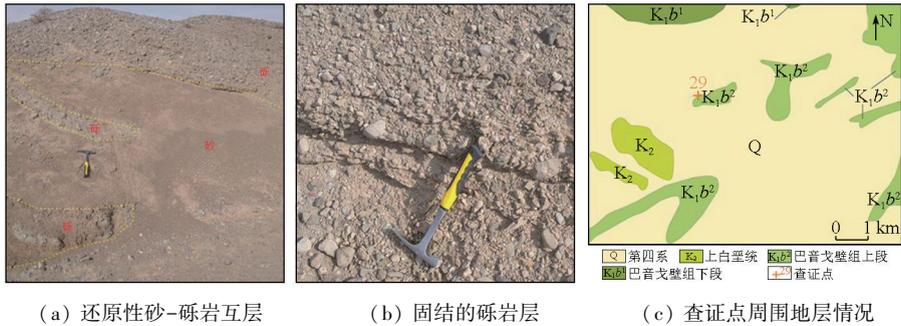


图9 还原性砂岩、砂砾岩(地质图据1:20万地质图银根图幅K-48-XXVIII,1979)

Fig.9 Reduced sandstone and conglomerate(The geological map is according to the 1:200 000 geological map of Yingen area, K-48-XXVIII, 1979)

5 结论

以往研究利用遥感技术提取与铀成矿有关的岩石、构造和蚀变信息,从而对岩浆岩、火山岩和热液型铀矿进行成矿有利区分析。本研究首先根据这一思路,以银根地区为研究对象,综合利用 ASTER, Landsat 和 Sentinel2 等卫星遥感数据,开展了岩性识别、构造解译和蚀变异常信息提取等工作。识别了酸性岩体,解译了近东西向和北东向、北西向断裂,提取了亮度、绿度、湿度、植被等异常,以及铁染、黏土、绿泥石、硅化等蚀变信息。通过开展野外查证,对提取信息的真实性进行了检验,发现酸性岩体和断裂构造解译结果是可信的。亮度信息与地表散落的石英颗粒和蒸发作用形成的白碱密切相关。绿度和湿度信息会受基性岩浆岩的绿泥石化影响,仅有少量信息符合实际情况。植被信息提取较为准确,部分绿度信息与植被异常信息吻合较好。所提取的铁染信息与地表砂砾里的褐铁矿相关。黏土化信息则主要是花岗闪长岩地表风化形成的高岭石。绿泥石化由基性玄武岩和辉绿岩风化所形成。硅化主要与地表散落的石英颗粒有关。通过野外验证,发现遥感提取的各种蚀变和异常信息均与地表岩石风化有关,而与深部砂岩型铀矿的成矿作用没有直接的联系。因此,传统针对硬岩和热液型铀矿的遥感找矿方法并不能很好地解决砂岩型铀矿的找矿问题。

为此,本研究改变思路,从成矿模式、条件与控矿要素的角度出发,引入多源遥感数据,将传统光学遥感同航空放射性以及数字高程数据相结合,并以次生还原砂岩型铀矿为例,从铀源条件、迁移条件、赋存条件、富集条件和控矿要素等多个方面开展有针对性的综合解释。利用光学遥感岩性识别和航空

放射性 U 含量和 Th/U 比值确定了研究区中部的花岗闪长岩具备铀源特征。利用数字高程数据反映了斜坡带特征。利用光学遥感构造解译、航空放射性异常分布和植被异常信息等确定了排泄带和富水带构造,并结合斜坡带特征,认为银根地区南部斜坡带具备良好的水循环条件。同时,利用光学遥感揭示南部斜坡带发育大量冲积扇和辫状河沉积,结合前人钻孔数据,认为南部斜坡带具备有利铀成矿的泥-沙-泥地层结构。最后,通过野外发现的还原性砂-砾岩,结合油气钻孔资料,认为南部斜坡带上可能发育次生还原作用。因此,认为银根地区南部斜坡带是一处有利的寻找次生还原砂岩型铀矿的地区。

实践表明,在地质找矿工作中,使用单一技术手段和固定流程、方法很难达到良好的找矿效果,应结合具体问题合理选择不同的技术方法,充分发挥各方法的优势,实现优势互补。此外,应强化地质认识,首先弄清矿床类型及不同类型矿床的成矿模式、条件和控矿要素,再有针对性的选择方法并开展各类信息和要素的识别与解释,做到“带着认识”找矿。

参考文献(References):

- [1] 罗毅,何中波.内蒙古巴音戈壁盆地砂岩型铀矿成矿条件分析与铀资源潜力评价[R].北京:核工业北京地质研究院,2009.
Luo Y, He Z B. Ore-forming condition analysis and uranium resource potential evaluation of sandstone-type uranium deposit in Bayin Gobi Basin, Inner Mongolia [R]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2009.
- [2] 张成勇,聂逢君,候树仁,等.内蒙古巴音戈壁盆地塔木素地区砂岩型铀矿控制因素与成矿模式[J].地质科技情报,2015,34(1):140-147.
Zhang C Y, Nie F J, Hou S R, et al. Geological characteristics and uranium metallogenic model of Tamusu uranium deposit in Bayin Gobi Basin [J]. Geological Science and Technology Information,

- 2015, 34(1): 140-147.
- [3] 申科峰,杨建新,侯树仁,等.内蒙古中生代主要含铀沉积盆地找矿突破技术思路及其成果扩大方向[J].中国地质,2014, 41(4): 1304-1313.
- Sheng K F, Yang J X, Hou S R, et al. Uranium prospecting breakthrough, achievement expanding and prospecting orientation in main Mesozoic - Cenozoic sedimentary uranium basins of Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 2014, 41(4): 1304-1313.
- [4] 李鹏,王强,戴明建,等.巴音戈壁盆地塔木素铀矿床矿石蚀变特征与热流体作用的响应[J].矿物学报,2017(s1): 479.
- Li P, Wang Q, Dai M J, et al. Geological characteristics and uranium metallogenic model of Tamusu uranium deposit in Bayin Gobi Basin [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017 (s1): 479.
- [5] 彭云彪,王强,戴明建,等.巴音戈壁盆地 TMS 铀矿床矿体空间展布特征与找矿预测[J].世界核地质科学,2018, 35(3): 131-136.
- Peng Y B, Wang Q, Dai M J, et al. Ore body spatial distribution characteristics of TMS uranium deposit and prospecting prediction in Bayingebi basin [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2018, 35(3): 131-136.
- [6] 木红旭,马天碧,郭强,等.松辽盆地南部局部排泄构造遥感识别与找矿方向探讨[J].地质与勘探,2023, 59(1): 134-144.
- Mu H X, Ma T B, Guo Q, et al. Remote sensing identification of local drainage fault structures and uranium prospecting direction in the south of Songliao Basin [J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(1): 134-144.
- [7] 刘德长,邱骏挺,闫柏琨,等.高光谱热红外遥感技术在地质找矿中的应用[J].地质论评,2018, 64(5): 1190-1200.
- Liu D C, Qiu J T, Yan B K, et al. Application of thermal inferred hyperspectral remote sensing in ore exploration [J]. *Geological Review*, 2018, 64(5): 1190-1200.
- [8] 刘德长,田丰,邱骏挺,等.柳园-方山口地区航空高光谱遥感固体矿产探测及找矿效果[J].地质学报,2017, 91(12): 2781-2795.
- Liu D C, Tian F, Qiu J T, et al. Application of hyperspectral remote sensing in solid ore exploration in the Liuyuan-Fangshankou area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(12): 2781-2795.
- [9] 刘德长,赵英俊,叶发旺,等.航空高光谱遥感区域成矿背景研究——以甘肃柳园-方山口地区为例[J].遥感学报,2017, 21(1): 136-148.
- Liu D C, Zhao Y J, Ye F W, et al. Study on the metallogenic background of the Liuyuan-Fangshankou area by using airborne hyperspectral remote sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(1): 136-148.
- [10] 刘德长,闫柏琨,邱骏挺.航空高光谱遥感固体矿产预测方法与示范应用[J].地球学报,2016, 37(3): 349-358.
- Liu D C, Yan B K, Qiu J T. The Application of airborne hyperspectral remote sensing technology to mineral resources exploration [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(3): 349-358.
- [11] 刘德长,叶发旺,赵英俊,等.航空高光谱遥感金矿床定位模型及找矿应用——以甘肃北山柳园-方山口地区为例[J].地球信息科学学报,2015, 17(12): 1545-1553.
- Liu D C, Ye F W, Zhao Y J, et al. Airborne hyperspectral remote sensing for gold prospecting around Liuyuan-Fangshankou area, Gansu Province, China [J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2015, 17(12): 1545-1553.
- [12] 刘德长,邱骏挺,童勤龙,等.新疆吉木萨尔地区油气渗漏与盐碱化相关性的航空高光谱遥感探测研究[J].中国地质,2018, 45(5): 1062-1073.
- Liu D C, Qiu J T, Tong Q L, et al. Airborne hyperspectral study of spatial relationship between oil and gas leakage and salinization in Jimusar area [J]. *Geology in China*, 2018, 45(5): 1062-1073.
- [13] Aita S K, Omar A E. Exploration of uranium and mineral deposits using remote sensing data and GIS applications, Serbal area, Southwestern Sinai, Egypt [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14: 2214.
- [14] dos Reis Salles R, de Souza Filho C R, Cudahy T, et al. Hyperspectral remote sensing applied to uranium exploration: A case study at the Mary Kathleen metamorphic-hydrothermal U-REE deposit, NW, Queensland, Australia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 179: 36-50.
- [15] Mariem M I, Amin B P, Hanafi B, et al. Lithological and alteration mapping using Landsat 8 and ASTER satellite data in the Reguibat Shield (West African Craton), North of Mauritania; Implications for uranium exploration [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14: 2576.
- [16] 李子颖,刘武生,李伟涛,等.内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿作用[J].中国地质,2022, 49(4): 1009-1047.
- Li Z Y, Liu W S, Li W T, et al. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 2022, 49(4): 1009-1047.
- [17] 康欢,陈岳龙,李大鹏,等.二连盆地哈达图铀矿床覆盖区地球化学异常源示踪与判别[J].铀矿地质,2019, 35(6): 351-358.
- Kang H, Chen Y, Li D, et al. Tracing and distinguishing geochemical anomalous sources in coverage area of Hadatu uranium deposit of Erlian Basin [J]. *Uranium Geology*, 2019, 35(6): 351-358.
- [18] 刘德长,申晋利,邱骏挺,等.从遥感地质角度对钱家店铀矿区的再认识[J].铀矿地质,2018, 34(5): 314-320.
- Liu D C, Shen J L, Qiu J T, et al. Geological analysis of Qianjiadian uranium deposit based on remote sensing technology [J]. *Uranium Geology*, 2018, 34(5): 314-320.
- [19] Jaireth S, McKay A, Lambert I. Association of large sandstone uranium deposits with hydrocarbons [J]. *AusGeo News*, 2008, 89: 1-6.
- [20] Qiu J T, Mu H X, Yu X Q, et al. Identifying the principal factors controlling uranium enrichment: Semi-quantitative mineralogy and geochemistry of the sandstone-type Qianjiadian uranium deposit, northeast China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 144: 104807.
- [21] 刘波,时志强,彭云彪,等.巴音戈壁盆地塔木素铀矿床地质特征及铀成矿模式研究[J].矿床地质,2020, 39(1): 168-183.
- Liu B, Shi Z Q, Peng Y B, et al. Geological characteristics and uranium metallogenic model of Tamusu uranium deposit in Bayin Gobi Basin [J]. *Mineral Deposits*, 2020, 39(1): 168-183.
- [22] 何中波,罗毅,马汉峰.巴音戈壁盆地含矿目的层沉积相特征与砂岩型铀矿化的关系[J].世界核地质科学,2010, 27(1): 11-18.
- He Z B, Luo Y, Ma H F. Sedimentary facies characteristics of ore-bearing target horizon and its relationship to sandstone-type uranium mineralization in Bayingebi Basin [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2010, 27(1): 11-18.
- [23] 丁叶,侯树仁,王俊林.巴音戈壁铀矿床特征及成因分析[J].

- 矿床地质, 2012, 31(s1): 193-194.
- Ding Y, Hou S R, Wang J L. Geological characteristics and petrogenesis of uranium deposits in Bayingobi [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(s1): 193-194.
- [24] 肖国贤, 李文辉, 候树文, 等. 内蒙古巴音戈壁塔木素铀矿床的控制因素及矿床成因探讨 [J]. *世界地质*, 2017, 25(12): 39-41.
- Xiao G X, Li W H, Hou S W, et al. Controlling factors and genesis of Tamusu Uranium deposit in Bayingebi Basin, Inner Mongolia [J]. *Global Geology*, 2017, 36(4): 1124-1132.
- [25] 史兴俊, 张磊, 王涛, 等. 内蒙古阿拉善盟北部宗乃山中酸性侵入岩年代学、地球化学及构造意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(6): 989-1007.
- Shi X J, Zhang L, Wang T, et al. Geochronology and geochemistry of the intermediate-acid intrusive rocks from Zongnaishan area in northern Alxa, Inner Mongolia, and their tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2014, 33(6): 989-1007.
- [26] 李鹏, 刘波, 叶茂, 等. 巴音戈壁盆地中南部中生代构造-沉积演化对铀成矿的制约及找矿预测 [J]. *中国地质*, 2022, 49(2): 542-557.
- Li P, Liu B, Ye M, et al. Constraints of Mesozoic-Cenozoic tectonic-sedimentary evolution on uranium mineralization and prospecting prediction in the Central and Southern Bayin Gobi Basin [J]. *Geology in China*, 2022, 49(2): 542-557.
- [27] Chen Q, Zhao Z, Zhou J, et al. ASTER and GF-5 satellite data for mapping hydrothermal alteration minerals in the Longtoushan Pb-Zn Deposit, SW China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1253.

Application of multi-source remote sensing data in the exploration of sandstone-type uranium deposits: A case study of the Yingen area, Bayingebi basin

QIU Juntong¹, LI Jiangkun², GE Tengfei³, MU Hongxu¹, RUI Xinmin¹, YANG Yunhan¹, YANG Yanjie¹

(1. *Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China*; 2. *Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050049, China*; 3. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China*)

Abstract: Sandstone-type uranium deposits emerge as important uranium resources, while remote sensing is identified as a vital method for mineral resource exploration. Since sandstone-type uranium deposits typically occur underground and tend to be covered by sediments, whether remote sensing can be effectively applied to the exploration of such deposits merits investigation. This study investigated the Yingen area in the Bayingebi basin. Utilizing multi-source remote sensing data from Sentinel2, Landsat7 ETM+, ASTER, ALOS DEM, and airborne radioactivity measurements, this study performed terrain visualization, structural interpretations, K-T transformation, NDVI index calculation, alteration mineral extraction, and Th/U ratio calculation. The results were then comprehensively analyzed from the perspective of the metallogenic model, metallogenic conditions, and ore-controlling factors of secondary reduced sandstone-type uranium deposits. The analytical results indicate that the Yingen area consists of an uplift zone in the center, a depression zone in the southeast, and a slope zone between them. The granitic rocks in the uplift zone are identified as significant sources of uranium. Multiple EW-trending faults in the slope zone facilitate the migration of uranium-bearing oxidized water underground. Additionally, the water-rich areas in the depression zone, combined with strong surface evaporation, create favorable conditions for the drainage and evaporation of uranium-bearing oxidized water, further promoting groundwater circulation. Therefore, the uplift zone, slope zone, and depression zone in the Yingen area form a complete circulation system for uranium-bearing oxidized water. In combination with previous data, this study holds that the slope zone might serve as a favorable area for the formation of secondary reduced sandstone-type uranium deposits. This study also demonstrates that even in seriously overburden areas, remote sensing can provide valuable guidance for uranium exploration by identifying metallogenic conditions and ore-controlling factors.

Keywords: remote sensing; sandstone-type uranium deposit; Bayingebi; Yingen area

(责任编辑: 李瑜)