

地质找矿中遥感信息的综合研究与深化应用 ——以铀矿为例

刘德长, 叶发旺, 赵英俊, 杨旭, 伊丕源, 董秀珍

(核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析国家级重点实验室, 北京 100029)

摘要: 以铀矿勘查为例, 通过对遥感信息进行综合研究与深化应用的思考, 提出后遥感应用技术的新理念, 并认为它是将遥感信息的应用“从技术层面提升到科学层面”的重要途径。在此基础上, 又提出砂岩型铀矿断隆成矿的观点, 进而建立了我国克拉通和大型活化盆地的铀矿区域找矿模式。在上述观点和模式指导下, 利用新型遥感技术, 特别是高分辨率遥感数据, 在塔里木盆地北缘柯坪断隆东段发现了3条颇具规模的铀矿化带, 取得了显著的找矿效果。

关键词: 铀矿勘查; 遥感技术; 综合研究; 成矿观点与找矿效果

中图分类号: TP 79: P 619.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-070X(2011)03-0014-06

0 引言

地质勘查工作的深入开展对遥感技术的应用提出了更高的要求。如何深化应用遥感信息, 以便更有效地服务于矿产资源勘查, 已成为当前遥感地质工作者积极探索的科学难题和热点。而开发新型遥感探测技术与先进的图像处理方法、促进遥感技术与多学科的交叉集成, 是这一探索的方向和重要途径。本文结合铀资源勘查, 重点从遥感信息综合研究的角度, 对其在地质勘查领域深化应用的这一科学难题进行了探索。

1 地质找矿中遥感信息综合研究和深化应用的思考与理念

1.1 思考

(1) 遥感技术在地质领域应用的局限性。遥感技术在地质领域应用的局限性主要表现在遥感所获得的信息主要是地表信息, 而目前找矿更多的是需要地下深部信息。因此, 单靠遥感技术本身很难解决复杂的地质找矿问题。

(2) 找矿难度愈来愈大, 遥感技术与传统技术相结合已成必然。随着地质勘查工作的深入发展, 一方面, 出露地表的矿床明显减少, 勘查的目标已由地表或近地表转向地下深处的隐伏矿床, 因此找矿的难度愈来愈大; 另一方面, 由各种地学手段获得的信息愈来愈丰富, 如何最大限度地利用这些信息资源, 以提高勘查效果, 是值得重视的问题。

(3) 遥感技术要与迅速发展的现代信息技术相

整合。进入21世纪以来, 现代信息技术得到迅速发展, 如何将这些新技术(如: 三维地理信息系统(GIS)技术、三维可视化技术、仿真模拟技术、虚拟现实技术等)应用于地质勘查领域, 进一步解决矿产资源的勘查问题。

鉴于上述思考, 笔者提出了遥感信息深化应用的思路: 即充分发挥遥感技术优势, 实现遥感技术应用的以下两个结合: 一是遥感信息与传统地学信息的结合, 二是遥感技术与现代信息技术的结合; 同时, 在遥感技术应用的过程中要注入地质专业知识, 将信息转化为创新思维, 用来指导找矿决策和实践。

1.2 理念

遥感技术的应用不仅包括遥感技术本身的应用, 还应包括遥感技术及其延伸应用, 而且随着遥感技术应用的深入, 更要重视遥感信息及其延伸应用。据此, 作者出了“后遥感应用技术”的理念^[1]。

陈述彭院士曾指出“面对盲矿和深部矿床的找矿难题, 遥感的应用须从遥感‘技术索引’的思路走出来, 从‘控矿构造’迈向与成矿机理相结合的高度, 遥感的应用须与物化探、磁力、重力、地震探矿相结合”。他还强调要将遥感信息的应用“从技术层面提升到科学层面”^[2], 而“后遥感应用技术”探讨的正是实现这一跨越的重要途径。

2 遥感信息的综合研究与我国砂岩型铀矿断隆成矿观点的提出

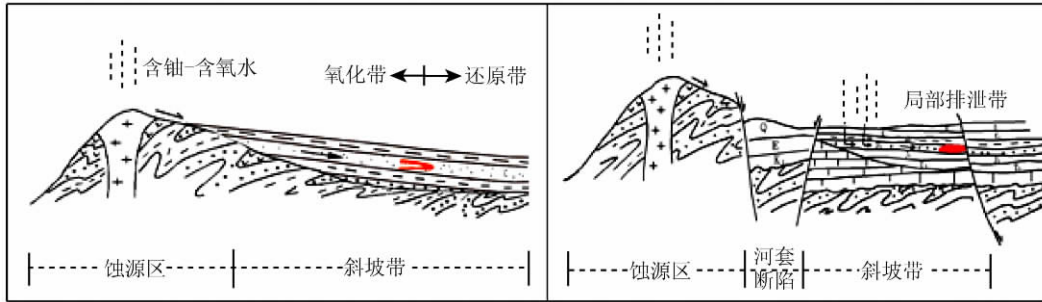
2.1 鄂尔多斯盆地东胜铀矿床遥感信息的综合研究

2.1.1 对地质资料分析的质疑

东胜铀矿床位于鄂尔多斯盆地东部, 是近年来

发现的一处特大型砂岩型铀矿床。关于矿床成因,研究初期人们认为它属层间氧化带铀成矿类型,铀源来自盆地北缘蚀源区的含铀地层和中性酸性岩体,在氧化条件下,雨水淋出的铀渗入地下,经地下水搬运,沿渗透性高的砂岩层迁移,在从氧化带进入还原带的过渡地带,由于氧化还原环境的变化,发生了铀的沉淀和富集,形成了该铀矿床(图1(a))。可是,

经矿化同位素年龄分析,矿床的形成经历了从 $120 \pm 11 \text{ Ma} \sim 8 \pm 1 \text{ Ma}$ 的一个漫长过程^[3],新生代时($20 \pm 2 \text{ Ma}$ 和 $8 \pm 1 \text{ Ma}$)继续有铀矿化形成,但新生代时,河套断陷已经形成,断陷的下陷已将蚀源区与成矿区分开,这时成矿的铀源已不可能再来自盆地北缘(图1(b))。因此笔者认为,用传统的观点难以完全解释东胜铀矿床的形成。



(a) 传统的铀成矿观点示意图 (b) 断隆成矿观点示意图
图1 传统的铀成矿观点与断隆成矿观点铀源对比

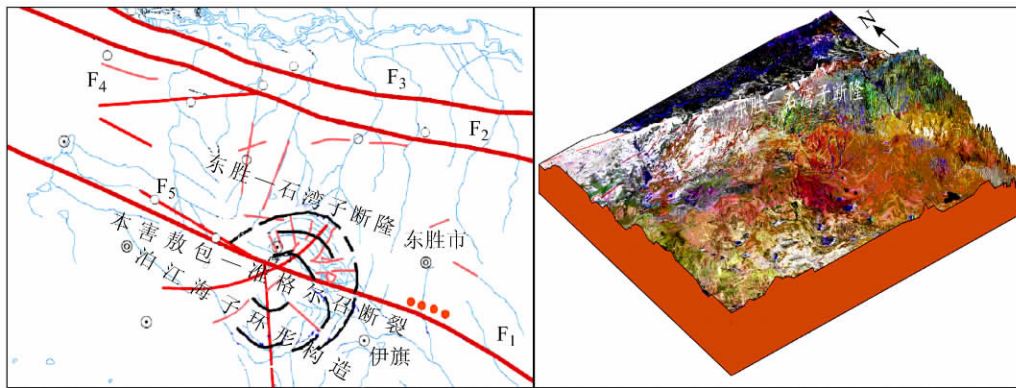
Fig. 1 The comparison figure of the traditional and fault - uplift mineralization viewpoint about the uranium source

2.1.2 矿床区域构造背景遥感研究的启示

针对上述质疑,利用ETM彩色合成图像对东胜

铀矿床的区域构造背景进行了研究(图2)。

经研究,有以下3点新发现:



(a) 东胜—石湾子断隆构造遥感解译图 (b) 东胜—石湾子断隆构造三维可视化图

图2 东胜—石湾子断隆构造遥感解译及三维可视化

Fig. 2 Fault - uplift structure of the Dongsheng - Shiwanzhi

(1) 东胜地区发育一断隆构造(东胜—石湾子断隆构造),东胜铀矿床位于该断隆构造的南缘。该断隆构造在ETM图像上显示为一楔形隆起的断块(图2(a))。断隆的北缘为河套断陷的南缘断裂带 F_2 和 F_3 ,断隆的南缘为本害敖包—准格尔召断裂,西部发育北西(NW)和北东(NE)向断裂 F_3 和 F_4 。这样,由 F_1 、 F_2 (和 F_3)、 F_4 、 F_5 围成的楔形断块,在ETM图像上其色调与周围明显不同,纹理比周围明显改变,反映为一隆起断块。该断块构造在三维可视化图像上显示得更为形象和逼真(图2(b))。

(2) 矿床南面存在一条北西西(NWW)向的区域性断裂(本害敖包—准格尔召断裂)。该断裂是

作者通过遥感解译发现的。 F_1 断裂在遥感图像上表现为其南北两侧的色调、纹理明显不同(图2(b))。该断裂不仅在重力、航磁上有反映,而且经野外检验,在地表存在明显的断裂破碎带(泊江海子以西的格尔盖一带表现最为清楚)。已知矿床的矿化地段沿该断裂呈NW向展布。

(3) 矿床的西部出露一环状构造(泊江海子环状构造)。通过对ETM图像进行地质解译发现,在泊江海子一带存在一个略呈椭圆状环状构造。环状构造地表呈现为同心环状水系和一系列放射状水系。据野外检验,这些环状和放射状水系主要反映一些裂隙带和小断层,环状构造与圆形的重力低位

异常对应说明环形构造中心没有花岗岩侵入。经对环状构造发育地区出露地层酸解烃的取样分析,甲烷、乙烷含量很高,最高可达 $6\ 041\ \mu\text{l}/\text{kg}$ ^[4]。

2.1.3 新发现地质现象的遥感信息综合研究

先将收集的研究区的遥感、地质、地球物理(重力、航放、航磁)、地球化学数据建成 GIS 数据库;然后利用 GIS 分析功能,将遥感信息与传统地学信息集成(复合和融合),并进行数据挖掘和知识发现。通过综合研究进一步认为:东胜—石湾子断隆构造为一基底隆起背景上的富铀断块,它的不断隆升,能够为成矿提供铀源;断隆南缘断裂为一从地表切入盆地基底的贯穿性断裂,是深部物质向上运移的通道;环状构造为一与油气有关的环状构造,反映该区油气活动的中心^[4],可以为成矿提供油气等还原物质。

由上述构造要素构成的成矿背景叠加在早期大青山—河套蚀源区与南部斜坡带的成矿背景之上^[5],构成了该区铀矿形成的特殊区域地质构造环境。

2.2 东胜铀矿床的断隆叠加成矿

在综合研究了东胜铀矿床的区域地质构造背景之后,又进一步研究了矿床的成矿特征,发现油气和热流体参与了成矿过程,矿化有明显的叠加现象,如铀源的叠加、成矿流体的叠加^[6]和成矿年龄的多期性等,且铀矿化类型具双重性和复杂性等。

将矿床的成矿背景信息与矿床的成矿特征信息综合,并注入铀矿地质专业知识,实现了信息的转化,重新认识了东胜铀矿床的成矿过程,认为该矿床经历了如下 3 个发展阶段(为了可视化这一成矿过程,还通过计算机进行了模拟):

(1) 早白垩世初期阶段。断隆构造所在地区与北部大青山隆起区相连,构成大青山—河套蚀源区与南部斜坡带的成矿格局。铀源主要来自蚀源区的古老地层和不同时代的花岗岩体,形成了 $120 \pm 11\ \text{Ma}$ 的层间氧化带型的铀矿化(图 3)。

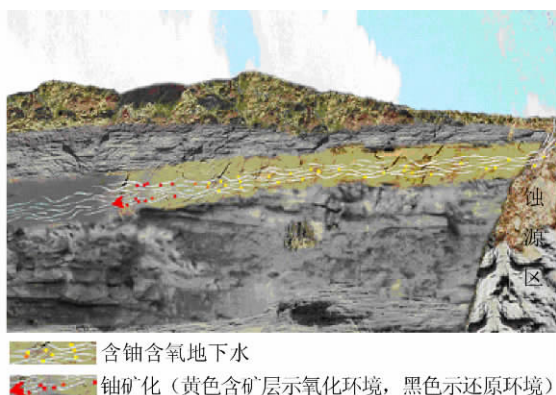


图 3 东胜铀矿床形成过程计算机模拟图之一

Fig.3 First figure of the computer simulation of the formation process about the Dongsheng uranium deposit

(2) 晚白垩世阶段。断隆南缘断裂形成,断裂的活动导致深部油气(以气为主)上升,沿断裂带上升的油气,一方面改造了早期形成的层间氧化带型的铀矿化;另一方面导致油气参与了成矿过程,形成 $80 \pm 5\ \text{Ma}$ 的铀矿化(图 4)。

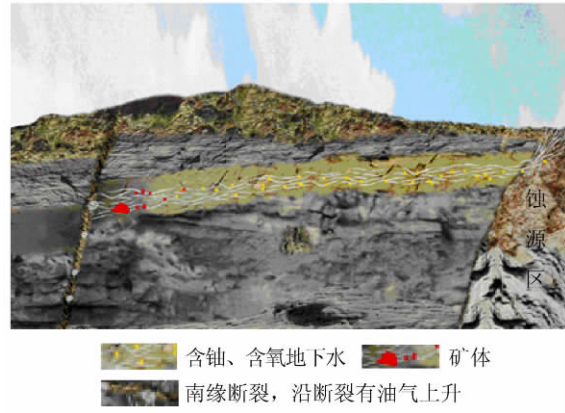


图 4 东胜铀矿床形成过程计算机模拟图之二

Fig.4 Second figure of the computer simulation of the formation process about the Dongsheng uranium deposit

(3) 新生代阶段。河套断陷发生,断隆构造整体隆升,使得成矿区与蚀源区隔开。由于断隆构造的不断隆升,致使延长组、延安组和直罗组富铀层露出地表,含矿层遭受风化剥蚀,在干旱气候条件下,为成矿提供了新的铀源。沿断裂上升的油气和热流体与地下水带来的新铀源相遇,发生还原与酸化,形成了 $20 \pm 2\ \text{Ma}$ 和 $8 \pm 1\ \text{Ma}$ 的富铀矿化(图 5)。

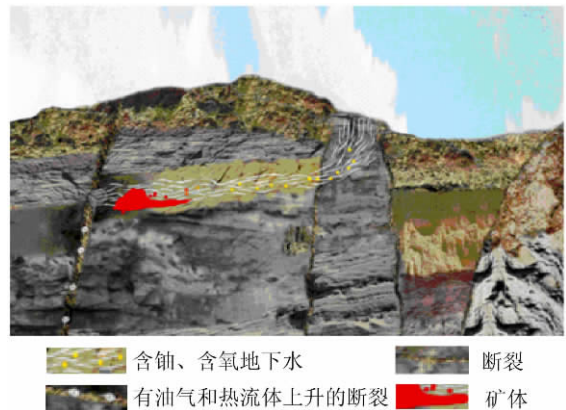


图 5 东胜铀矿床形成过程计算机模拟图之三

Fig.5 Third figure of the computer simulation of the formation process about the Dongsheng uranium deposit

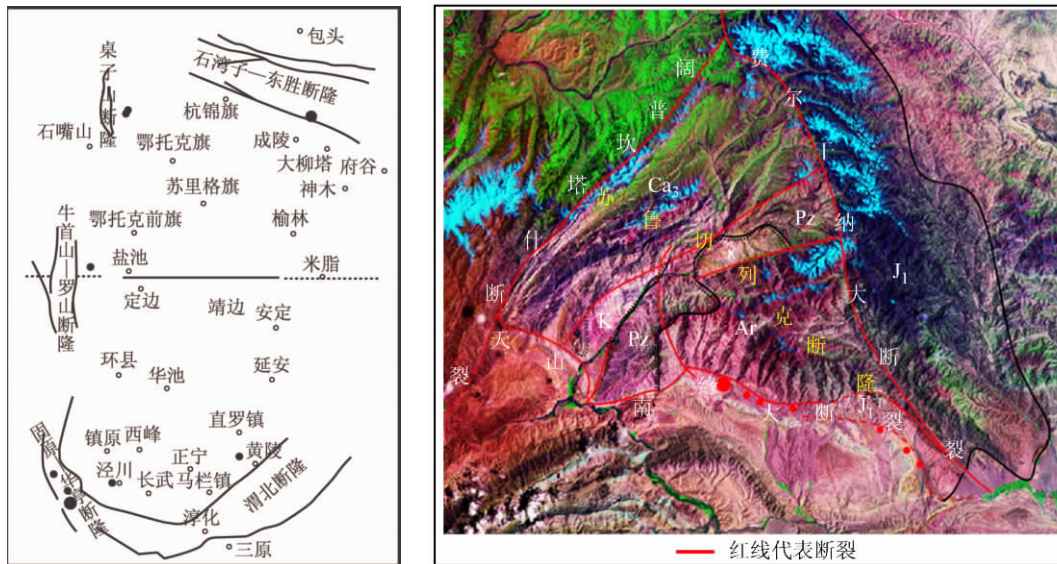
多次铀成矿作用的叠加形成了东胜特大型铀矿床。

2.3 砂岩型铀矿断隆成矿观点的提出

(1) 断隆非叠加成矿的证据。当扩大研究范围后发现,鄂尔多斯盆地的其他铀矿床在空间分布上也与断隆构造有关,如黄陵铀矿床位于渭北断隆的

北缘 国家湾铀矿床位于固原—华亭断隆上 磁窑堡铀矿床位于牛首山—罗山断隆的西缘等(图6(a))。塔里木盆地的北缘断隆与铀矿床的空间分

布关系同样密切相关 如 巴什布拉克铀矿床处于苏鲁切列克断隆的南缘(图6(b)) 日达里克铀矿床处于上新统之后形成的康村断隆的南缘等。



(a) 鄂尔多斯盆地断隆与铀矿床分布关系

(b) 巴什布拉克矿床与断隆构造关系遥感解译图

图6 断隆与铀矿床空间分布关系

Fig. 6 The spatial distribution relationship of fault and uranium deposit

综合断隆叠加成矿和非叠加成矿的研究成果，笔者提出了砂岩型铀矿断隆成矿的观点。

(2) 断隆成矿的机理。通过对断隆构造成矿机理的研究认为：① 断隆构造的隆升作用，使深部的铀矿床和富铀层被抬升到地表，遭受风化、剥蚀，为新的成矿过程提供铀源；② 断隆边缘斜坡带的地形和沉积环境(有利于形成赋矿的粗碎屑的沉积地层)；③ 断隆边缘贯穿性断裂是将深部还原性物质向上运移的导通等。这些有利的成矿要素在断隆构造环境形成了最佳组合，从而使断隆构造孕育了源(铀源) - 运(搬运) - 聚(富集) 统一的成矿条件。

(3) 断隆成矿观点的核心。断隆成矿观点的核心是强调构造 特别是深位贯穿性断裂和油气，甚至热流体等深部还原性物质在砂岩铀成矿过程中的重要作用。认为该类型铀矿床的形成不同于传统的层间氧化带类型铀矿床 不只是个浅部地质作用过程，而是深部与浅部地质作用的复合。

(4) 断隆成矿观点提出的找矿意义：①我国克拉通盆地砂岩型铀矿的区域找矿，应围绕着断隆构造及其边缘进行；②围绕断隆构造找矿，不要局限于砂岩型铀矿，应开展多目标找矿(包括砂岩型、碳硅泥岩型和热液型)；③不同断隆构造形成的背景、

演化历史、成矿条件和找矿潜力不尽相同，即使同一断隆构造不同部位的成矿环境和条件也不尽相同。因此，找矿时要进行具体的地质分析。

3 在断隆成矿观点指导下，应用新型遥感技术取得的找矿效果

3.1 柯坪断隆成矿地质环境分析

将已知的铀矿点、矿化点投影到柯坪断隆 ETM 遥感图像上进行分析发现，铀矿点、矿化点几乎全集中在柯坪断隆构造变动最强烈的东段，而断隆上的古生代地层在东西段呈连续分布，那么已知铀矿化与构造变动强烈地区之间存不存在内在联系(图7)。经对遥感信息与重力、航磁和地质资料进行综合分析发现，该区发育几条深大断裂，并存在两个岩浆活动中心，二叠纪有大面积玄武岩喷发和基性岩脉侵入，并产有热液型铅锌矿等。因此，认为柯坪断隆东段是一处热液型矿床成矿区，提出该区的找矿思路要有所改变，应从原来找碳硅泥岩型铀矿为主的思路转向找含铀热流体型铀矿为主的思路，也即从地层找矿为主的思路转变为以断裂为主的找矿思路。

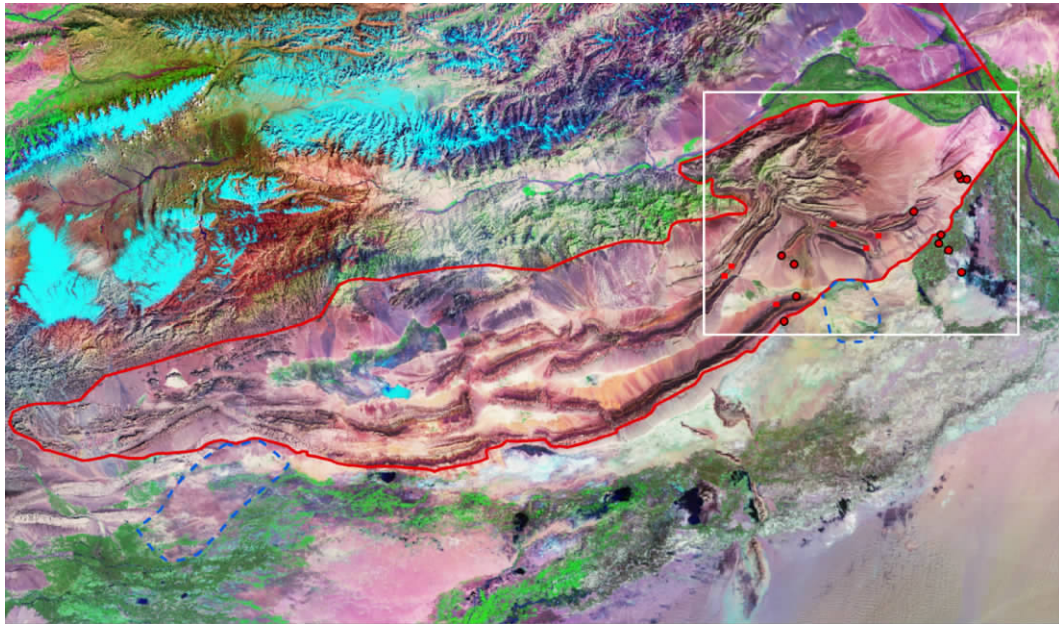


图 7 柯坪断隆遥感影像与已知铀矿化点叠加图
(红线表示断裂 红线圈定的范围为成矿远景区,方框示已知铀矿化点的集中区 红点示铀矿化点)

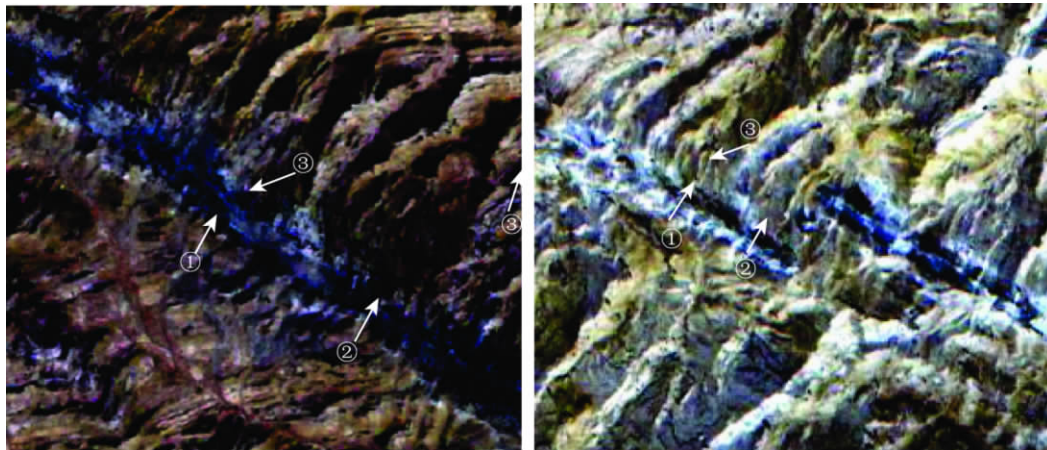
Fig. 7 The superposition figure of remote sensing image and uranium mineralization site

3.2 萨克铀矿化带的发现

在新的找矿思路指导下,利用 ASTER 数据与航放异常信息聚焦分析的方法,发现原来认为孤立分布的两处航放异常,实际上受同一条断裂带控制,推断该带可能是一条铀矿化带。经野外调查和系统地面放射性伽玛能谱测量证实,该带确为一条颇具规模的铀矿化带,命名为萨克铀矿化带。该带受多期次的活动断裂控制,沿该带热液蚀变发育,主要表现为碳酸盐化和赤铁矿化,铀矿化强度高,最高品位大于 3%,是一条值得深部探索的铀矿化带。经包体测温获得了 110℃ 和 210℃ 等 2 个正态分布的峰值,测定的同位素年龄为 172 ± 28 Ma。

3.3 类似铀矿化带的区域搜索

首先建立了萨克铀矿化带地质模型,然后对该地质模型进行遥感反演。此过程先后应用了 TM、ASTER、IKONOS、QuickBird 等数据源,但是只有经增强处理的 QuickBird 图像上,上述萨克铀矿化带的结构特征被反演出来,在分辨率为 0.6m 的图像上,基性岩脉为黑色线状体,断裂带为白色线状体,蚀变现象为沿断裂带分布的灰白色斑状体。三者共同构成了该铀矿化带的遥感影像模式。应用 QuickBird 遥感图像,经模式识别,在萨克铀矿化带外围又发现了 2 条具类似特征的铀矿化带^[6](图 8)。



(a) 新发现矿化带之一
(b) 新发现矿化带之二
①黑色线性体为基性岩脉;②白色线性体为断裂带;③灰白色斑点为褪色蚀变

图 8 新发现的铀矿化带(局部)的 QuickBird 遥感图

Fig. 8 The QuickBird image(local) of the new discovered uranium mineralization belt

4 结论

实践表明,如果用同样的方法和手段研究同一个问题,由于看不到新的现象和事实,认识将很难有所突破。遥感技术在地质找矿中的重要作用,就是它能够迅速发现用常规地质方法很难发现的地质体和地质现象,如果将这些新发现与传统地质方法得到的信息相结合,将会促进地质人员重新考虑问题和进行创造性思维,以致新概念的生产和矿化规律新认识的形成。正如陈述彭院士曾经指出的“没有先进技术支持的理论是落后的”。同时可以看出,遥感技术的应用不仅限于“线、环、块”的识别和蚀变信息的提取,更重要的是它还可以进行成矿理论的研究。因此,需要将遥感的应用“从技术索引的思路走出来”,“从技术层面提升到科学层面”。这样才能使遥感在地质找矿中发挥更大的作用。

充分发挥遥感技术的优势,最大限度地利用现有的地质勘查信息资源,进行新理论的探索和建立

新的找矿模式,并利用新模式进行找矿,这是一条从“信息找矿”到“理论找矿”再到“模式找矿”的正确途径,实践证明可以取得显著的找矿成果。

参考文献:

- [1] 陈述彭. 矿产资源与遥感信息深度开发应用[C]//遥感科技论坛论文集. 北京:地震出版社,2007:373-375.
- [2] Liu De - chang ,Ye Fa - wang ,Zhao Ying - jun ,et al. A New Concept and Practice of Remote Sensing Information Application - Post Remote Sensing Application Technology and Application Case to Geology[C]//Proceedings of SPIE 15th Nation Symposium on Remote Sensing ,Guiyang City ,China: The International Society for Optical Engineering ,2006 ,6200: 1 - 7.
- [3] 刘汉彬,夏毓亮,田时丰. 东胜地区砂岩铀矿成矿年代及成矿铀源研究[J]. 铀矿地质,2007,23(1):23-29.
- [4] 刘德长,叶发旺,张杰林. 泊江海子油气环状构造的发现及其对铀成矿的重要作用[J]. 国土资源遥感,2007(1):69-71.
- [5] 肖新建,李子颖,方锡珩,等. 东胜砂岩型铀矿床古层间氧化带成因追溯[C]//中国核学会铀矿地质分会学术交流会议论文集,北京:核工业北京地质研究院,2005年12月.
- [6] 刘德长,杨旭,张杰林. 新型遥感技术数据的铀资源勘查应用[J]. 地球信息科学学报,2009,11(3):268-272.

Comprehensive Study and Deepened Application of Remote Sensing Information: A Case Study of Uranium Exploration

LIU De - chang , YE Fa - wang , ZHAO Ying - jun , YANG Xu , YI Pi - yuan , DONG Xiu - zhen
(National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Image Analysis Technology , Beijing Research Institute of Uranium Geology , Beijing 100029 , China)

Abstract: With the uranium exploration as an example , this paper puts forward a new concept of post - remote sensing application technology based on the thinking of the comprehensive research and deepened application of remote sensing information. This new concept is considered to be an important way to *promote the application of remote sensing information from technology to science*. On such a basis , the viewpoint of fault - uplift mineralization of sandstone - type uranium is proposed and a model of regional prospecting for uranium in the craton and activated basin of China is established. Under the guidance of the viewpoint and the model and by using the new technique , 3 uranium mineralization belts were found in the Kalpin fault - uplift on the northern margin of Tarim basin , thus achieving good prospecting result.

Key words: Uranium exploration; Remote sensing; Comprehensive research; Mineralization viewpoint and prospecting effect

第一作者简介:刘德长(1938-),研究员,博士生导师,长期从事铀矿构造与遥感技术在铀资源勘查和核军事领域的应用。目前正在从事高光谱遥感技术和后遥感应用技术的开拓研究。

(责任编辑:丁群)