

# 我国可地浸砂岩型铀矿勘查方法技术研究

韩绍阳<sup>1</sup>, 侯惠群<sup>2</sup>, 腰善丛<sup>1</sup>, 程纪星<sup>1</sup>, 柯 丹<sup>1</sup>

(1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2 中国核科技信息与经济研究院, 北京 100037)

[摘要] 针对可地浸砂岩型铀矿的成矿特点和勘查工作目标, 本文总结了解决砂岩型铀矿的选区、综合评价及直接定位等不同阶段地质任务的一套快速勘查方法技术。扼要地介绍 GIS、现代遥感和各种物化探勘查方法技术在砂岩型铀矿勘查中的应用潜能与综合应用。

[关键词] 砂岩型铀矿; 勘查方法; 综合应用

[文章编号] 1000-0658(2004)05-0306-09 [中图分类号] P632; P619.14 [文献标识码] A

## 1 引言

自 20 世纪 90 年代初以来, 我国铀矿勘查的主攻方向转为储量大、开采成本低的可地浸砂岩型铀矿。我国可地浸砂岩型铀矿主要产在北方大、中型中生代盆地, 覆盖厚, 地表无明显的铀矿化显示。国外通常采用以钻探为主, 结合少量物化探工作的办法寻找此类型铀矿床, 但是这种办法需以大量投资为后盾, 不符合我国国情。随着科学技术的飞速发展及多学科的相互渗透影响, 各种先进的找矿方法不断涌现, 常规方法的测量技术及数据处理解释技术也日新月异。加速铀资源勘查工作, 落实更多的资源储量和后备勘查基地, 应该在区域调查、区域评价、地质勘查及铀资源评价的各阶段充分利用现代信息技术, 发挥遥感、物化探等勘查方法技术的优势, 以较少的资金投入获取尽可能多的深部成矿地质信息。

目前, 我国铀矿地质勘查工作已积累了大量资料, 而且还在不断产生新的资料, 因

此必须使用计算机信息处理手段, 挖掘与铀矿床生成有密切联系的“浓缩信息集”。借助计算机进行信息挖掘和信息综合, 将帮助地质学家从海量数据中处理人脑难以完成的复杂的找矿信息分析工作; 成矿作用过程的复杂性决定了矿床元素的不均匀性和多变性, 也决定了地球物理场与地球化学场的复杂多变性; 因而应运用现代计算机信息处理手段及信息挖掘方法, 对勘探资料作深层次的成矿信息提取与研究, 以便有效地研究复杂的成矿规律。针对砂岩型铀矿的成矿特点, 建立一套快速勘查方法技术系统, 快速实现可地浸砂岩型铀矿的选区、评价及定位, 具有很强的现实意义, 将推动我国的铀矿地质事业飞跃发展。

## 2 砂岩型铀矿勘查工作的目标

可地浸砂岩型铀矿由于其特殊的成矿机制, 地表很难看到与成矿有关的迹象。矿体与围岩之间的物性界面为渐变结构, 物性差异很不明显, 导致许多物化探方法不能发挥

[收稿日期] 2003 04 24 [改回日期] 2004 02 13

[作者简介] 韩绍阳 (1975-), 男, 工程师, 1998 年毕业于华东地质学院, 2001 年获核工业北京地质研究院硕士学位, 现为在读博士, 指导教师侯惠群研究员, 研究方向: GIS 与地球物理信息处理技术。

较好的效果。以 GIS 为基本技术平台, 通过数据处理和多源地学信息综合解释, 研究铀成矿地质环境或提取与铀成矿相关的弱信息, 可作为铀资源勘查工作部署的依据。可地浸砂岩型铀矿勘查工作需解决的主要问题有:

- (1) 查明研究区的基底起伏形态, 划分断裂构造, 分析研究区的地球化学环境, 估算蚀源区的铀源淋失情况;
- (2) 确定含矿砂体或有利赋矿岩性的空间展布、形态及规模;
- (3) 定位古河道及层间氧化带前锋线;
- (4) 划分研究区岩性、岩相;
- (5) 快速探测沉积盆地浅部 (500 m 以内) 地层精细结构与岩性分层;
- (6) 提取地面和航空地球物理弱信息及综合解释多源信息;
- (7) 直接圈定铀矿体的空间分布。

### 3 GIS 技术在铀资源评价中的应用

可地浸砂岩型铀矿评价的过程就是信息的搜集、整理、处理、成矿信息的提取、综合分析、成矿区带或找矿靶区的确定及成果表示的过程。GIS 的应用可贯穿于铀资源评价工作的整个过程, 表现出传统方法不可比拟的优越性<sup>[1]</sup>。GIS 提供了在计算机辅助下对地理、地质、地球物理、地球化学和遥感等多信息进行集成管理、有效综合与分析的能力。应用 GIS 进行铀资源评价不仅可加深对可用地质数据的理解, 而且可加深对地质模型本身的理解。专家们可交互式地对多源地学信息进行对比, 在综合分析中获得新的启发或认识, 完善与总结规律。这也是传统的工作方式很难或无法实现的。基于 GIS 的矿产资源评价方法的最大优点, 表现为以下几个方面: (1) 合理、有效的空间数据库管理大大提高了铀资源评价效率; (2) 实现了传统方法难以进行的对各种地质体的多种空间关系的定量分析; (3) 系统软件为物化探数据的空间可视化创造了条件, 使评价更直观; (4) 空间分析方法使成矿信息的综合更加合理;

(5) 系统软件大大提高了生产单位的制图效率; (6) 所建的数字数据库可反复使用。基于 GIS 的铀资源评价工作的主要任务是在对研究区的资料充分研究的基础上, 确定合适的数据源、建立合理有效的 GIS 数据库, 提取成矿信息 (单因素空间关系的确定和量化) 以及对多种成矿信息的综合分析 (多种空间关系集成)。总之, GIS 的出现实现了铀矿地质工作的现代化, 为综合找矿及进行高效准确的成矿远景区预测提供了良好的条件和环境。

各种图件是铀资源研究成果的主要载体。GIS 多维图示技术的迅速发展及其在地质模型研究中的应用是地学领域最近几年的一个亮点; 借助二维、三维乃至四维图示技术, 能将庞杂的地学数据形象化、立体化、动态化, 大大提高了它们的可视化程度和推断解释的准确性。通过计算机多维图示技术, 对砂岩型铀矿中的多源信息进行可视化分析和模拟, 更有利于铀成矿环境的分析和成矿信息的提取。在海拉尔和鄂尔多斯盆地铀资源评价中, GIS 技术在多源信息数据库的建立、管理及成矿信息的提取及综合、制图输出等过程中发挥了重要作用, 大大提高了铀资源评价的工作效率和预测精度。

### 4 高分辨率遥感技术的应用

遥感技术以其宏观、快速的特征在寻找可地浸砂岩型铀矿的选盆和选区工作中可以发挥巨大的作用。高分辨率遥感影像在铀资源勘查中得到了广泛应用, 所谓高分辨率, 即指: 高空间分辨率 ( $< 10 \text{ m}$ )、高光谱分辨率 ( $< 20 \text{ nm}$ )、高时间分辨率。利用高分辨率遥感数据可提供高分辨率、高精度定位的立体观测地貌特征、从宏观上了解沉积盆地的岩性岩相变化、地形地貌特征、区域构造展布, 现代地下水补、径、排体系的时空分布乃至植被覆盖区的植被与铀矿化的关系等。

利用遥感技术解决的主要问题有: (1) 建立大型铀成矿区域的大地构造环境、背景

遥感影像特征; (2) 我国主要产铀盆地与中亚、蒙古等产铀盆地遥感影像特征对比研究; (3) 砂岩型铀矿的控矿因素影像特征研究, 包括盆地地下水补、径、排体系, 蚀源区, 断裂带及斜坡带等影像特征。遥感技术获取的图像数据具有实时、高空间分辨率和高光谱分辨率、覆盖范围广的特点, 是地理信息系统 (GIS) 重要的数据源。

## 5 水化学方法的应用

可地浸砂岩型铀矿的形成与地下水的活动密切相关, 砂岩型铀矿的勘查离不开水化学方法。测量含矿层水中溶解氧、硫化氢及 pH、Eh 值可以寻找层间氧化带、氧化-还原过渡带及还原带; 测量含矿层水中的铀、镭、钍、钍及其他铀的伴生元素可以确定找矿目的层的含铀性。水化学方法还可用来研究地下水演化规律, 盆地地下水补、径、排条件及其时空分布规律, 恢复古水文地质环境, 综合分析铀矿体的空间定位条件。

## 6 现代地球物理方法的应用

在地球物理勘探方法中, 地表的观测值实际上是地下不同深度、不同广度、不同形状的地质体在地表的综合反映, 即观测数据中既含有浅部的细节信息, 又含有深部的构造信息, 还含有各种噪声。地球化学采样数据同样如此, 既含有矿化异常, 也含有各种级别的背景异常。因此, 如何将这些模糊的、隐蔽的成矿信息通过“解密”提取出来, 圈定“致矿”异常和“矿致”异常, 是铀资源勘查发展领域中的战略性前沿课题。在地球物理勘探中, 每种地球物理方法都有其应用前提, 不可避免地存在多解性, 需依靠地质资料, 通过多种方法的综合应用, 合理地减少解释的多解性。

### 6.1 重磁方法

在砂岩型铀矿勘查中, 重力勘探方法的应用前提是密度差异, 碎屑沉积物的密度为  $1.8 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ , 埋深越大密度越高, 砂岩和

泥岩密度相差  $2\% \sim 3\%$ ; 磁法勘探的前提是磁性差异, 沉积盖层属弱磁性, 砂岩与泥岩的磁化率只相差几个单位; 因此进行盆地沉积盖层的分层不是重磁方法的优势。但沉积盖层与盆地基底的磁性差及密度差很大, 因此重磁方法的主要任务是查明研究区的基底起伏形态和划分断裂构造。

在铀资源勘查中, 实测得到的重磁异常, 大都比较复杂, 直接对实测异常解释, 往往有不少困难。所以解释之前, 需要对异常进行某些变换或处理。目前, 对重磁异常进行转换和处理的方法繁多, 每一种处理方法的功能、适用条件和应用范围也各有不同, 因此在对实测异常进行处理时, 应根据研究目的, 合理地选择转换和处理方法。对重磁异常进行处理的目的可以概括为:

(1) 把不同规模地质体引起的异常区分开来。例如为了寻找和研究局部构造, 通常采用计算剩余异常和求导数等处理方法来突出局部异常。

(2) 使异常简单化, 以便于解释。例如, 一般来说  $\Delta T$  异常受斜磁化的影响,  $\Delta T$  异常和磁性体之间的对应关系不如垂直磁化异常  $Z_a$  密切。通过处理, 把实测的  $\Delta T$  异常换算为垂直磁化条件下的垂直磁异常, 处理后的异常不仅容易解释, 而且可以提高解释结果的准确程度。

(3) 突出异常的某一内在特点, 以便于解释。根据异常解释任务的需要, 对异常做适当的处理, 可以突出有用的信息、压制干扰信息, 提高异常的“信噪比”, 使问题变得容易解决。例如, 若异常解释的重点是解决深部问题, 可通过向上延拓等处理手段突出深部地质体的异常, 压制浅部地质体的异常。

#### 6.1.1 利用重磁异常解释断裂构造

利用重磁资料划分断裂构造的前提是断裂带及其两侧岩石密度、磁性的差异。重、磁场所反映的断裂主要特征如下:

(1) 重、磁场的线性梯度带;

(2) 串珠状重、磁异常带, 即在断裂后

期因岩浆活动不均匀,引起串珠状的沿断裂分布的线性异常带;

(3) 重、磁等值线的异常轴突然发生错动。这通常反映了断裂的水平位移和先后时序;

(4) 不同特征的重、磁场区分界线;

(5) 在重磁场的垂向或水平导数图上的线性异常带。

#### 6.1.2 利用重磁异常查明盆地基底起伏形态

在中新生代沉积盆地中,高布格重力异常一般对应着基岩(或沉积盖层)的隆起区,而低布格重力异常对应基岩(或沉积盖层)的凹陷区。在基性岩石的隆起区,一般对应着高磁异常区。把重磁方法结合起来,可提供更多关于工作区的地质信息,以便查明基岩的起伏形态。

对重磁异常进行反演,可获得基岩的埋深。对重力异常反演可获得密度界面的埋藏深度及起伏形态,进而分析盖层结构和基底构造。在诸多密度界面反演方法中,Parker反演方法应用效果较好。在基岩埋深反演过程中,密度差的选取是关键,同时要参考已知地层的相关参数(岩性、厚度、埋深、密度)。利用磁异常,可进行磁性界面反演,了解磁性层的埋藏深度及起伏形态,进而分析磁性基底构造和沉积盖层构造。多年的工作经验表明,目前理论上较成熟并经过实践检验的是切线法。使用这种方法计算磁性体深度,可以充分发挥人的主观能动作用,针对不同特点的 $\Delta T$ 异常曲线和异常的平面特征采用不同的具体算法。利用切线法求取磁性体的深度、宽度,只需考虑磁场的特点而不必考虑场源的性质,即切线法反演结果不依赖于场源的磁性特征。

#### 6.1.3 进行重磁异常资料解释应注意的几个问题

(1) 深入研究物性资料和地质资料

对重磁异常的解释来说,确定不同岩层、地质体、地质构造的物性,并研究它们的规律性特征是一项基础工作,在此基础上研究不同的物性界面在重磁异常中的可能反映,可为异

常解释打下坚实的基础。广泛收集、深入研究与工作地区有关的地质资料是做好重磁异常解释的另一项基础工作。重磁异常解释的目的是解决地质问题,离开具体地质条件的异常解释是盲目的,难以达到预期的地质效果,甚至可能会得出与实际情况相差较大的结论。

(2) 认真分析重磁异常特征

在重磁资料解释中,应认真分析重磁异常带特征,对重磁异常图件要反复研读,不漏掉细微的异常细节特点。在解释中,应当重点研究原始异常图,配合使用异常处理结果。只重视研究异常处理结果图件而“冷落”了对原始异常特征分析的做法是不可取的,因为原始异常图包含所有有意义的异常信息,而资料处理结果可能造成某种有用信息的损失。在异常特征研究中,不可忽视对测区异常完整性的分析。注意由于测区范围的局限造成实测异常的不完整,会导致处理结果的畸变,根据它做出的地质解释可能与实际情况不符。

(3) 综合考虑重磁异常解释结果

在同一研究区重磁两种方法实测数据的解释推断结果可能有差别。重磁异常可能是同源的,也可能是不同源的,还可能是部分同源的。即便是在同源的情况下,由于某种岩石、地质体或地质构造与它的围岩之间的物性(密度、磁性)差异程度不同,导致重力异常和磁异常对它们反映的明显程度及相应特征也会有差异。因此,在实际资料解释中可能会出现重磁异常解释结果有差别。当这种情况出现时,应当把两种方法的解释结果综合考虑,相互补充,以提高异常解释的可靠性。

在海拉尔和松辽盆地铀资源评价中,重磁方法提供了大量深部信息,在断裂构造圈定、区域构造单元划分和基底埋藏深度计算等方面发挥了重要作用。

#### 6.2 航空(车载)伽玛能谱测量方法

利用 $\gamma$ 能谱测量寻找铀矿床,其测量数据仅反映地表数十厘米内的放射性场特征。应用该方法直接寻找埋深很浅的铀矿床会取得

满意的效果;但对寻找可地浸砂岩型铀矿而言,由于覆盖厚,地表缺乏明显的找矿标志,且与成矿有关的信息微弱,难以取得理想的效果。多年的研究经验表明,伽玛能谱测量数据在铀资源勘查中也可用于成矿地质环境的研究,如识别沉积盆地的浅部断裂,划分地层,研究沉积地层岩性岩相的变化,估算蚀源区铀的淋失量等。

航空  $\gamma$  能谱测量的优势在于它能够在很短时间内获得大面积精度均一的测量资料;与地面  $\gamma$  能谱测量方法相比,是一种高速度、高效率的地质调查和普查找矿方法。车载  $\gamma$  能谱测量方法作为一种铀矿详查及检查航放异常的手段,具有测量速度快、探测精度高等特点,很适合在我国北方干旱、半干旱的中新生代产铀盆地内开展,又可在不宜进行航测的边境地区进行工作。核工业北京地质研究院(以下简称研院)目前使用的具国际先进水平的 GR-660 车载伽玛能谱探测系统采用 512 道全谱测量和高分辨率(相对 $^{137}\text{Cs}$ 分辨率小于 7.3%)、大体积(8 L)的 NaI(Tl)晶体探测器及天然  $\gamma$  射线自动稳谱;应用噪声调整奇异值分解(NASVD)方法对获得的全能谱原始数据进行预处理后,钾、铀、钍计数率的统计误差水平显著降低(相当于增加探测器晶体体积的 3~5 倍),提高了测量精度,增强了与铀成矿有关的弱信息<sup>[2]</sup>。 $\gamma$  能谱测量方法在砂岩型铀矿勘查中辅助解决如下地质问题:

### (1) 划分岩性、岩相

放射性勘探所研究的对象是含天然放射性元素的地质体。岩浆岩中放射性元素含量比沉积岩高,随着岩浆的演化,其中放射性元素含量有规律地增加。不同沉积地层的放射性元素的含量也是不同的,利用地层放射性元素含量的差异,辅助进行地层岩性的划分是可行的。

$\text{Th}/\text{U}$  值与沉积岩相建造之间存在一定的相关关系。如滨海相碎屑沉积地层的  $\text{Th}/\text{U}$  值大于 6.0,亚浅海相碎屑沉积地层的  $\text{Th}/\text{U}$  值为 3.7~6.0,而浅海相碎屑沉积地层的  $\text{Th}/\text{U}$

值为 2.0~3.5<sup>[3]</sup>。

### (2) 划分断裂

沉积盖层中的断裂,为氢的释放和运移提供了良好条件,而  $\gamma$  能谱测量中测得的当量铀含量实际上是镭系氢的子体核素 $^{214}\text{Bi}$ 的含量。该核素反映了除近地表岩石、土壤中的与镭平衡的 $^{214}\text{Bi}$ 外,还包括氢气由深部沿断裂构造、破碎带等连通的自由通道运移到近地表的衰变产物—— $^{214}\text{Bi}$ ;因此沉积盖层断裂附近,表现出高的铀变异系数带。

### (3) 研究盆地内地球化学环境及铀的迁移规律

$\gamma$  能谱测量可以提供产铀盆地内铀、钍、钾元素的空间分布特征。天然放射性元素钾、铀、钍的地球化学特性决定着它们在自然环境中的分布,不同地球化学环境可以不同方式影响它们的活动性。钾是比较活泼的元素,在氧化和还原条件下都易于随地下水迁移。铀的化学性质复杂多变,在氧化状态下被溶解或吸附而迁移。钍是化学性质最稳定的天然放射性元素,一般不受成岩后期的地球化学因素干扰,在大多条件下较难溶解,其迁移方式更多地以机械搬运为主。钾、铀、钍在各种岩石中的正常分布和在特定条件下的富集或成矿,既取决于它们的特性,又取决于所发生的地质和地球化学过程。据此,可以根据放射性能谱测量资料,研究沉积盆地的地球化学环境;针对盆地周围蚀源区中的岩浆岩,也可以研究铀的活化迁移和富集情况以及铀的活化迁移方向等。

在二连盆地铀资源评价中,航空伽玛能谱测量方法在研究成矿地质环境及捕获铀矿化异常信息的应用中,取得了较好效果。

## 6.3 电法

在可地浸砂岩型铀矿勘探中,应用较为成功的电法是“电磁成像技术”,该电磁测量技术分为频率域和时间域两类。产铀盆地中沉积盖层中泥岩的电阻率为 1~20  $\Omega\cdot\text{m}$ ,砂岩的电阻率为 15~60  $\Omega\cdot\text{m}$ ,基岩的电阻率为 80  $\Omega\cdot\text{m}$  以上,因此采用电法可以区分不同的岩层。应

用“电磁成像技术”可解决如下地质问题:

- ①查明对铀成矿有利的砂体规模及其空间展布;
- ②查明工作区的隔水层及其厚度;
- ③查明工作区的断裂构造及其产状特征;
- ④查明工作区基底的埋深及其起伏情况;
- ⑤根据电阻率测量剖面, 结合地质资料, 可辅助分析盆地的沉积相。

(1) EH4 电磁成像测深技术的应用

本项技术采用的仪器为美国 20 世纪 90 年代中期推出的一种可控源大地电磁频率域测量系统 (EH4 型)。该仪器同国内开发研制的电法测量仪器相比具有如下特点:

- ①同时采用人工电磁场和天然电磁场两种场源;
- ②既具有有源电磁法的稳定性, 又具有无源电磁法的节能和轻便;
- ③能同时接收和分析  $X$ 、 $Y$  两个方向的电场和磁场, 反演  $X$ 、 $Y$  电导率张量剖面, 对反演二维地质体特别有利;
- ④EH4 设备轻, 观测时间短, 可快速密点连续测量, 进行 EMAP 连续快速观察。
- ⑤实时显示采集数据, 图像直观。

针对砂岩型铀矿的找矿特点, 核地研院在应用该项技术方面进行了一系列开发研究, 特别是自行开发了 EMAGE-2D 二维反演软件。该软件大幅度地提高了地质解释的精度, 提高了测量分辨率, 并能在野外现场给出实时反演结果。近年来在海拉尔和松辽盆地的工作实践证明, 应用该技术在探明基底形态、地层产状和断裂构造、砂体的空间展布等方面取得了较好效果, 可清晰地分辨出泥-砂-泥的地层结构。

(2) 瞬变电磁方法 (TEM)

实现时间域电磁成像技术所采用的方法是瞬变电磁方法 (TEM)。核地研院采用的仪器是从加拿大凤凰公司进口的 V-5 多功能电法测量系统。该方法的原理是利用一定波形的电磁脉冲激发地质体, 在一次场断电后, 观测二次场随时间的衰减特性。该系统除具

有穿透高阻层能力强, 人工源方法随机干扰影响小的优点外, 还能提高电性分辨能力; 同时利用多次脉冲激发, 可以提高信噪比; 选择不同的时间窗口进行观测, 可有效地压制地质噪声。时间域电磁计算的复杂性使目前的定量解释仅限于一维反演, 该套仪器现配套使用的反演软件为美国 INTERPEX 公司的 TEMIX 软件, 其应用流程为:

- ①根据曲线的连续性删除噪声较大的时间点;
- ②用 OCCAM 反演自动计算出平滑模型;
- ③根据平滑模型给出层状初始模型;
- ④用 ridge regression 法做一维层状模型反演;
- ⑤应用等效模型分析反演模型的有效性。

2002 年 7 月, 核地研院 (腰善丛等) 在海拉尔西胡里吐盆地采用 V-5 进行了 TEM 应用试验。通过比较 TEM 和 EH4 的反演结果 (相同地段), 认为 TEM 的一维反演结果与 EH4 的二维反演结果基本吻合; 在地下构造满足一维条件的地段, TEM 的分辨精度更高; 但对于地下构造较为复杂的地区, 由于 TEM 目前仅能作一维反演, EH4 的测量结果更为可靠。

6.4 地震勘探

高成本的“地震”勘探方法可解决的地质任务是 ①确定基底的埋深; ②提供构造基础图件; ③提供更多的盖层细节信息。在松辽盆地和鄂尔多斯盆地部分地区, 应用地震勘探方法清晰地探测出了工作区的地层精细结构和构造展布方向。

微动测深技术是近年来地震勘探方法的一个新进展, 它利用地壳的天然微震作震源, 探测观测台阵地下的地层结构。与常规地震勘探方法相比, 它不需要人工震源, 具有成本低、效率高等优点 (徐贵来, 2001)。在可地浸砂岩型铀矿勘查中, 适用于在区调和普查阶段了解盆地基底及不同波速地层的深度、厚度变化, 为选区和圈定成矿有利地段提供依据。该项技术难度较大, 特别是浅部 (500 m 以内) 弱微动信号的提取与识别是需解决

的主要问题：需要提高系统的信噪比，研制与之匹配的检波器。

## 7 砂岩型铀矿定位方法技术应用

### 7.1 自然电位测量技术

层间氧化带砂岩型铀矿的一个重要标志是，在氧化还原过渡带，因氧化-还原环境的存在导致了天然原电池的产生；其在地表可引起明显的自然电位异常，铀矿化大都分布在自然电场的高低过渡部位。自然电位测量的优点是不需要供电电源，工作速度快，成本低；缺点是非矿异常（如山地电场等）和各种干扰（如工业游散电流等）等影响因素较多。在内蒙古巴彦毛都盆地铀资源评价中，利用自然电位方法较好地圈出氧化-还原过渡带（姚毅锋，2003）。

### 7.2 深穿透地球化学方法技术

该方法分为地表疏松沉积物中金属活动态测量和地气中超微量金属测量两类，通过测量样品中的金属元素活动态圈定异常，预测铀矿床。前者采取地表疏松介质，提取样品中反映深部铀矿化信息的金属元素活动态部分；后者是在地表采取源于深部的样品，分析气体中的金属元素含量<sup>[4]</sup>。成功应用该项技术的关键在于建立非传统的地球化学勘查体系，研制特殊有效的新方法，选择特殊有效的采样介质和使用灵敏度极高的分析技术。在已知的新疆 512 矿区、十红滩矿区及东胜矿床，该项技术取得了良好的试验效果（尹金双，2001）。

### 7.3 氡气测量技术

绝大多数放射性找铀矿方法，主要建立在测量镭的衰变产物氡及其子体的基础上<sup>[5]</sup>，这是因为在铀系中氡及其子体辐射的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  相对强度较大， $\alpha$  占 57.1%， $\beta$  占 59%， $\gamma$  占 98%。利用氡气测量方法直接找矿是基于 Rn 的迁移和地气理论。图 1 示出了由于地球深部地气运移作用（深部铀矿床中的金属铀、镭可能被迁移到近地表）以及氡的迁移作用，和铀、及铀系的衰变物在近地表积累的过程。

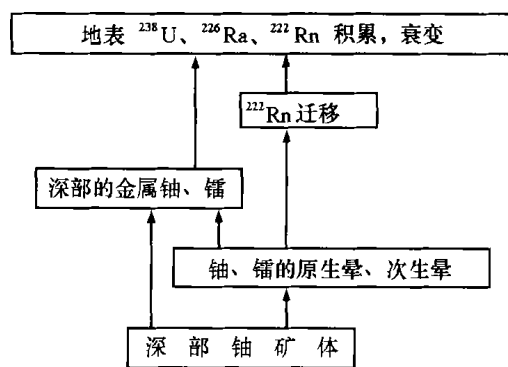


图 1 深部铀矿床在地表形成氡异常信息的机理模式框图

Fig. 1 Chart showing the model of formation mechanism of radon anomaly information at the surface above deep-seated uranium deposits

再考虑到作为氡气迁移通道的断裂构造的存在，地下水的活动，气温的变化等等，源于深部铀矿床的氡气可能迁移到地表。地气理论认为地球深部存在地气流，当上升的地气流经过砂岩型铀矿体及其周围铀含量很高的原生晕和次生晕时，将携带其中的超微细粒活性金属铀及其子体镭一起迁移到地表附近，同时地气流作为载体也可将氡运移到地表，使深部信息传递到地表；这部分叠加的活动态铀、镭和氡带来了深部铀矿化信息。

在地形较平缓 and 浮土成分较均匀的地区进行氡法找矿是最有利的。氡气的测量方式分为微分（瞬时测量）和积分测量两种。氡的微分测量，有时也称常规测量，它包括硫化锌闪烁室法、活性炭抽气吸附测量法、“RaA”法等。氡的积分测量方法包括径迹蚀刻法、热释光法以及  $\alpha$  仪法等。在某些地质条件下，由于 Ra 或 Rn 发生横向迁移，可能导致氡异常和铀矿床的空间位置不相吻合。在鄂尔多斯盆地东胜矿床上，氡法取得了良好的试验效果。

### 7.4 综合测井技术

综合测井是可地浸砂岩型铀矿找矿勘查中和钻探相结合的有效方法，包括  $\gamma$  总量和  $\gamma$  能谱、自然电位、密度、声波、电阻率、井径和井斜等测井系列。目的是获取岩石的天

然放射性、密度、电阻率等地球物理参数及确定岩石孔隙度、渗透率、泥质含量等, 为可地浸砂岩型铀矿储量计算和评价提供必要的参数; 并根据测井曲线划分地层、岩性、含水层及矿化层等, 对沉积构造环境、层序地层及沉积相等进行研究。

### 7.5 弱信息提取技术

通过实用的数据 (如航磁、航放) 综合解释方法和弱信息提取技术, 直接定位砂岩型铀矿床的空间位置, 是地球物理数据处理中面临的难题之一, 已受到国内外众多地球物理学家的关注。目前从国内外的发展趋势看, 要有效地获取有用信息有两个途径, 一是提高探测器精度, 改进测量采集技术, 降低噪声水平; 二是借助于数据处理模型。20 世纪 70 年代以来, 随着地质找矿基础理论研究和地球物理技术自身的发展, 带动了数据处理和解释技术的发展, 用压制干扰、增大信噪比等方式提取有用信息的数据处理技术得到广泛应用, 例如相关分析、相关滤波等方法, 分形和多重分形及小波分析技术等。

航磁、航放等地球物理测量数据蕴涵丰富的地质信息。由于各种地质因素和干扰因素叠加, 往往使观测到的地球物理场复杂化, 使得与铀成矿有关的微弱异常被淹没掉, 靠常规数据处理方法难于提取。在我国铀资源勘查资金投入有限的今天, 如何合理地开发利用已有的物探资料, 从中提取更多的反映铀成矿环境的弱信息; 甚至捕捉砂岩型铀矿在地表显示的弱信息, 直接圈定铀矿化的赋存部位, 已显得尤为迫切和重要。在东胜-榆林地区的铀资源评价中, 核地研院应用航放弱信息提取技术圈出了找矿目的层直罗组中氧化-还原过渡带的空间位置, 与钻探资料给出的结果基本一致, 为铀资源评价提供了有利依据。

总之, 通过弱信息提取方法技术体系的研究, 可加快地面和航空物探方法直接选取找矿靶区的速度, 提高铀资源预测精度; 在缩短铀资源勘查周期及节省勘查经费上, 将体现出巨大的经济效益和社会效益。

## 8 铀资源勘查中找矿方法技术的综合应用

铀资源勘查是由面到点, 由表及里, 由疏到密, 不断缩小成矿靶区的一个循序渐进过程。在各个阶段应开展不同的勘查工作, 工作流程各环节不能跨越, 也不能缺失。从以上简述可以看出, 各种找矿方法各有其具体研究对象及应用前提, 各有所长及不足。砂岩型铀矿的成矿作用是一个极其复杂的地质过程, 铀矿床的形成则是这一过程中多种地质因素共同作用的最终结果。对未知铀矿床的预测, 本身就是一项综合性很强、难度很大的技术工作, 依靠单一的找矿方法获取的信息对成矿远景的评价往往是片面的。铀矿床本身就是一个和谐的统一体, 不同找矿方法获取的地学信息, 如地质、物探、化探及遥感等信息, 是其不同侧面的有关特征的反映, 只有综合分析多源信息及成矿信息的关联, 才能对成矿靶区的优劣性做出合理评估<sup>[6]</sup>。

铀资源勘查方法的综合应用, 应是在地质研究的基础上, 根据具体的地质条件和自然景观, 并结合各种方法的应用前提, 正确地配合使用各种方法, 从不同的侧面提取各种成矿信息, 提高地质研究程度及成果解释的可靠性, 以达到经济有效地发现铀矿床的目的。

在铀资源战略选区阶段 (中小比例尺预测), 适宜采用效率高、费用低的遥感技术、航空物探技术 (航磁、航放), 并可开展重力测量和水化测量, 并尽量收集工作区的相关地质资料, 根据现代砂岩型铀矿的成矿理论, 基于 GIS 软件平台进行多源信息的综合分析, 圈定有成矿远景的地段。在大比例尺预测阶段, 在圈定的远景区内开展大比例尺的地面物化探工作 (如 EH4 电磁测量、化探、地震、自然电场等方法及氡气测量等), 提供地质细节信息, 如揭露含矿砂体的空间位置和定位可能的铀矿化异常等。在完成物化探综合解释后, 进行钻探工程揭露评价, 最后利用综合测井技术完成资源量评价。



## 9 小结

如何以铀矿床模型研究为基础, 将区域成矿学、多源信息找矿综合研究、铀资源定量预测有机地结合起来, 实现经验模型法与成因概念模型法的统一, 达到运用地、物、化、遥多源信息研究成矿规律, 以及以成矿学为基础研究的多源信息找矿模型, 是铀资源评价发展领域中的重要研究课题。砂岩型铀矿属外生成因类型, 与内生矿床相比, 有其独特的成矿机制和赋存规律, 与特定的区域地质-地球化学环境密切相关。砂岩型铀矿的形成受控于古气候、古水文地质条件、地层结构, 岩石地球化学类型、新构造运动、层间氧化带(或古河道)、铀源条件等诸多因素。这些因素构成了砂岩型铀矿的供给、运移及卸载和富集的完整统一的时空体系。对这一完整体系的研究不能孤立进行, 更不能割裂开来。要着眼于地球动力学演化特征及地质演化史的研究, 以此为主线, 以地质-地球物理-地球化学异常为突破口, 逐一串起导致铀成矿诸多因素的链环。这对于更深层次地揭示砂岩型铀矿的成矿及赋存规律, 指导我国铀资源战略选区、资源评价及找矿工

作都具有重要意义。

总之, 在铀资源勘查中, 只有合理地选择、综合运用不同的找矿方法技术, 使其相互补充、验证, 才能去粗取精、去伪存真, 全面客观地认识各种地质现象, 以最小的代价(如人力、物力及财力的消耗)、最快的速度(最小的时间消耗)获取充分的有用地质信息, 更经济有效地寻找和评价铀矿床。

### [参考文献]

- [1] 韩绍阳. 以 ArcView 3.2 为平台的砂岩铀矿勘查信息系统的研制及应用 [硕士学位论文] [D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2001.
- [2] 韩绍阳, 侯惠群, 翟玉贵, 等. GR-600 全能谱信息挖掘及应用技术研究 [J]. 物化探计算技术, 2004. 26 (1): 54~60.
- [3] 王懋基, 张文斌. 航空物探解释方法及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [4] 王学求. 寻找和识别隐伏大型特大型矿床的勘查地球化学理论与方法 [J]. 物探与化探, 1998. 22 (2): 81~89.
- [5] 吴慧山. 核技术勘查 [M]. 北京: 原子能出版社, 1998. 218~219.
- [6] 赵鹏大. 矿产勘查理论与方法 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2001.

## Study of techniques for prospecting and exploration of in-situ leachable sandstone-type uranium deposits in China

HAN Shao-yang<sup>1</sup>, HOU Hui-qun<sup>2</sup>, YAO Shan-cong<sup>1</sup>, CHENG Ji-xing<sup>1</sup>, KE Dan<sup>1</sup>

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. China Research Institute of Nuclear Technical Information and Economy, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Being aimed at metallogenic features and exploration targets of in-situ leachable sandstone-type uranium deposits, this paper summarizes a set of methods and techniques for fast prospecting and exploration of sandstone-type uranium deposits at different stage geologic work, such as: target area selection, comprehensive assessment of promising areas and direct localization of subsurface ore bodies. In the meantime, authors briefly introduce the application potential and integrated application of GIS, modern remote sensing techniques, various kinds of geophysical and geochemical methods and techniques to prospecting and exploration of sandstone-type uranium deposits.

**Key Words:** sandstone-type uranium deposits; exploration techniques; integrated application