

# 砂岩型铀矿航空伽马能谱数据微弱信息 增强的地质意义

赵希刚<sup>1</sup> 吴汉宁<sup>2</sup> 杨建军<sup>2</sup> 张云宜<sup>1</sup> 赵翠萍<sup>1</sup> 柏冠军<sup>2</sup> 王靖华<sup>2</sup>

(1. 核工业 203 研究所, 陕西 咸阳 712000; 2. 西北大学地质系, 陕西 西安 710069)

**摘要:**伽马能谱测量是一种寻找铀矿的直接方法,但是产于中生代沉积盆地中的砂岩型铀矿,由于其矿化品位较低,埋藏深,伽马能谱测量结果具有强度低、变化平稳,无明显的放射性异常信息,常规的数据处理方法(如单元素分布趋势分析和单元素比值)难以识别。在此情况下,选择航空伽马能谱测量的 U、Th、K 元素参数进行组合,同时给出了多元素组合参数的数学模型、选择目的及其地质意义,增强和提取与砂岩型铀矿成矿有关的伽马能谱数据的微弱信息,利用数理统计分析中的聚类分析、逻辑回归分析进行综合评价,从铀源和铀的活化迁移富集系数方面给出了砂岩型铀矿的成矿概率。试验证明与常规方法相比,采用多元素组合参数对十红滩、阿右旗已知地区的航空伽马能谱测量数据进行微弱信息增强和提取,砂岩型铀矿找矿的微弱信息得到明显增强。因此,航空伽马能谱测量数据的多元素组合参数增强微弱信息,作为预测砂岩型铀矿成矿有利区的有效方法,对砂岩型铀矿找矿具有一定的地质意义和适用性。

**关键词:**航空伽马能谱;多元素组合参数;微弱信息增强;砂岩型铀矿

**中图分类号:**P631 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2007)03-0478-08

砂岩型铀矿产于中生代渗入型沉积盆地中的可渗透含水砂岩中,属于后生富集矿床。其矿化品位较低,埋藏深,伽马能谱测量无明显的放射性异常信息,常规的数据处理方法(如单元素分布趋势和元素比值)难以识别。如何在航空伽马能谱测量资料的基础上,识别出产在中生代盆地中的隐蔽性砂岩型铀矿的航空伽马能谱微弱信息,是盆地中砂岩型铀矿找矿亟待解决的问题。在地表覆盖较厚的中生代盆地中,航空伽马能谱测量结果具有强度低、变化平稳、无明显异常显示的特点,这就决定了在数据的处理方法选择和使用中应侧重于 U、Th、K 等多元素组合参数特征的研究,尽可能发掘原始资料数据中的微弱信息,从中识别出与地质背景或地球化学有联系的砂岩型铀矿化特征<sup>[1-4]</sup>。

## 1 铀、钍、钾地球化学特征

航空伽马能谱测量是一种多参数的地球化学找矿方法<sup>[5]</sup>。可以同时获得放射性总道计数和 U、Th、K 3 个天然放射性元素含量值。研究表明,早期板块运动和地壳-地幔对流运动

产生的岩石、流体不均匀分布,形成了 U、Th、K 等放射性元素的富集区和贫化区。前寒武纪大气缺氧,地壳处于还原条件的情况下,U、Th、K 等放射性元素有着密切的伴生关系,但在不同的地球化学环境下,它们的活动性可以形成不同的变化规律。铀元素是复杂多变的,在还原条件下为四价铀(U<sup>IV</sup>)是不可溶的,而且活动性不强。在氧化条件下为六价铀(U<sup>VI</sup>),在地下水中以铀酰离子络合物形式存在,可溶解或被吸附而发生运移,在后期表生改造作用下,原生岩层体(铀源体)中的铀元素活化迁移,以多种形式被搬运。而钍元素的地球化学特征与铀元素不同,它是自然界放射性元素中化学性质最稳定的,并且一般不受成岩后期改造和地球化学作用因素的影响。因此,当氧化环境下铀元素被淋失而迁移时,钍元素则保留了下来,并且常常在粗碎屑物中形成了含量较高的钍元素沉积。钾元素是比较活泼的元素,在氧化和还原条件下其化学活动性几乎相等。天然放射性元素的这些地球化学特征差异性,构成了利用各种不同的能谱参数特征研究和解决地质问题的理论基础。根据上述理论,在分析整理十红滩铀矿

收稿日期:2007-02-12;修改日期:2007-03-29

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2003CB214604)资助。

作者简介:赵希刚,男,1963年生,博士,教授高级工程师,从事地球物理探测和信息技术的研究和生产工作;E-mail:

zhaoxigang418@126.com。

床和阿右旗地区航空伽马能谱资料时,从总结 U、Th、K 元素地球化学活动特点与分布规律为出发点,提出了适合盆地砂岩型铀矿找矿及地质研究的航空伽马能谱资料的微弱信息处理方法。设计并建立了多种能谱组合参数特征的数学模型,以揭示测量结果所反映的地质意义。

## 2 航空伽马能谱数据微弱信息增强与提取

根据 U、Th、K 元素的地球化学特征,从技术方法上可利用多元素组合参数计算以及数理统计等数学分析方法进行综合研究,从航空伽马能谱数据图像上识别线性构造,探索

表 1 航空伽马能谱多元素组合参数数学模型及地质意义

Table 1 Mathematical modeling of multi-element combination parameters for airborne gamma energy spectrometry and its geological significance

方法类型	参数	数学模型	选择目的及地质意义
单元素分布趋势 (常规方法)	铀	U	研究 U、Th、K 元素的区域分布趋势和变化规律,对比不同元素含量差异,从而得到有用的地质找矿信息
	钍	Th	
	钾	K	
比值 (常规方法)	铀钍比	U/Th	研究地层和岩石中放射性核素在地质、地球化学及地球物理作用过程中动态平衡破坏状况。也是建立其他能谱信息参数的基础
	铀钾比	U/K	
	钍钾比	Th/K	
多元素组合参数 (增强方法)	古铀量	$G_u = Th / (\overline{Th} / \overline{U})$	成岩原生状态下地质单元中 Th/U 具有相对确定的规律,利用 Th 元素相对稳定的性质间接反映测区原始铀当量含量,高值区指示并圈定原始状态下的铀源层(体)
	活化铀迁移量	$F_U = U - G_U$	用现今测量铀与“古铀”之间的差异表征铀元素在成岩后期活化迁移的数值。利用区域内 $F_U$ 的平均值或变化趋势,对测区内铀元素淋滤或叠加富集的状况进行评价,了解古铀及现今测量铀之间的差异及变化数值。评价铀在区域上的活化迁移量
	相对变迁系数	$B = \overline{Th} / \overline{U} / (Th/U)$	探讨低背景情况下铀元素的相对迁移状况,了解测区后期改造铀元素活化迁移规律
	铀丰富程度指数	$U_A = U \cdot K / Th$	着重了解原始状态下铀的丰富程度及叠加富集状况
	铀改造程度指数	$U_B = Th \cdot K / U^2$	利用该参数表征铀的改造条件与程度,圈定铀淋滤区范围
	铀迁移富集系数	$U_C = U^3 / Th \cdot K$	沉积盆地中 U/Th、U/K 增高表明该地段存在铀的后期活化迁移富集,在原有高 U 含量的铀源层,形成叠加后生富集。了解铀元素在地球化学作用下迁移并相对富集的情况,划分沉积盆地中找矿远景区
	地球化学活动性指数	$TF = U \cdot K / Th^2$	进行地球化学作用分区并推测可能存在的地球化学作用变异带(氧化还原过渡带)
	钍归一化	$K_d = K - A + B \log Th$ $U_d = U - A' + B' \cdot Th$	消除测量结果中非矿化因素干扰,突出与矿化有关的元素运移信息
综合评价	综合关系数	$S_k = \sum_{i=1}^P X_{ik} h_i$	利用 P 种处理方法所得到的测量结果 $X_{ik}$ 及其权系数 $h_i$ , 求取被测对象的融合信息,可以对被测对象进行更全面的综合评价。找矿地区综合评价系数定量化的高低一般是根据该区已知矿床(点)的综合评价系数确定。权系数的大小根据成矿因素确定

应用不同方法提取与砂岩型铀矿成矿有关的航空伽马能谱测量的微弱信息。

2.1 多元素组合参数

单元素比值参数能反映测区同一地段不同放射性元素分布的差异,但是其效果比较单一,而且常常具有多解性,因此在航空伽马能谱资料处理中,常把它作为一种中间变量引入特征参数中参加计算。多元素组合参数则是在单元素比值参数的基础上综合了多种信息,进一步分析放射性元素活化迁移特征,从而有针对性地评价铀矿成矿有利地段及解决一些地质问题[9]。航空伽马能谱数据多元素组合参数见表1。通过在十红滩铀矿床和潮水盆地唐家沟铀矿床试验,认为古铀量(Gu),活化铀迁移量(Fu),铀相对变迁系数(B),铀迁移富集系数(Uc),地球化学活动性指数(TF),综合评价系数(Sk)在航空伽马能谱测量的微弱信息增强和提取方面效果更明显。

2.2 参数的数理统计分析

数理统计方法是航空伽马能谱资料及其多元素组合参数的综合分析的主要研究方法和手段。可利用SPSS数据统计分析软件,对工作区的U、Th、K多元素比值和能谱组合参数特征计算结果进行聚类分析、逻辑回归分析,还可利用多元素组合参数计算结果的独立性特点进行综合参数相关分析,以便对被测对象成矿条件进行分类,从而提高地质认识和应用效果,将定性分析推向半定量—一定量化判识。从而达到砂岩型铀矿综合分析 with 铀矿成矿预测的目的。

2.3 线性构造的识别

用滤波、平滑、细化和边缘检测等图像处理技术进行物化探资料处理,实现伽马能谱图像的线性构造信息的自动识别,提高了构造解释的精度和效率[2,4]。首先,应用滤波和平滑对航空伽马能谱图像进行低通滤波将使图像平滑,而对图像进行高通滤波将使图像锐化。其次,对已滤波和平滑的航空伽马能谱图像进行细化,有助于突出形状特点和减少冗余的信息量,细化方法如Hilditch、Pavlidis、Rosenfeld和基于索引表等算法。笔者采用最基本的Hilditch细化方法,用一个3×3的方向模板在图像范围内,逐一像素扫描移动,将图像中的像素逐次削除,最后得到线宽度为1个像素的图形。最后,根据图像边缘灰度的变化进行边缘检测,边缘检测应用边缘算子法。边缘检测算子检查每个像素的邻域并对灰度变化率进行量化,也包括方向的确定,大多数使用基于方向导数掩码求卷积的方法。边缘检测算子种类也很多,主要有Roberts、Sobel、Prewitt、Krisch和高斯-拉普拉斯算子。本文采用Roberts边缘检测算子,其是一种利用局部差分算子寻找边缘的算法。通过航空伽马能谱图像的线性信息增强,为基础地质研究中线性构造的识别和解释提供充分的依据。

3 数据处理和成图

首先把不同比例尺的航空伽马能谱测量实际资料,录入

计算机并建立数据库。网格化方法采用二元一次局部多项式。增加网格密度,就增大了网格结点正好位于原始数据点的可能性,数据可靠。搜寻方式采用椭圆搜寻(Search Ellipse),长轴垂直航空测线,目的是消除航线造成的异常。成图采用数字图像显示技术成图[4]。数字图像的实现过程并不复杂,是根据每个数据点数值,根据其大小转换为彩色阶或者灰度阶值,使其整体上形成不同的像素构成伪彩色图像。与传统的等值线图或平面剖面图相比它具有两个特点:一是对原始数据保真性强。二是有利于捕捉微弱信号。数字图像

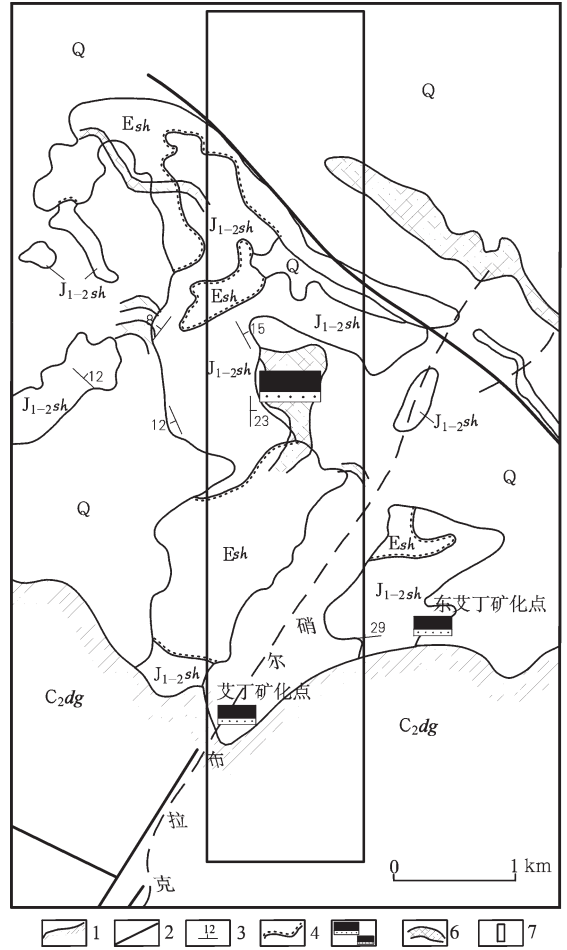


图1 十红滩地区地质略图

Q—第四系;Esh—部善群;J1-2sh—水西沟群;C2dg—迪坎尔组; 1—盆地边界;2—断裂;3—地层产状;4—不整合界面; 5—铀矿床、点;6—铀矿体;7—试验区范围

Fig.1 Geological map of the Shihongtan area

Q—Quaternary; Esh—Shanshan Group; J1-2sh—Shuixigou Group; C2dg—Dikan'er Formation. 1—Basin boundary; 2—Fault; 3—Attitude; 4—Unconformity; 5—Sandstone type uranium deposit or occurrence; 6—Uranium orebody; 7—Experimental area

①倪卫冲,张红健,王洪岭.航空伽马能谱弱异常信息提取.核工业航测遥感中心“九五”科技论文,2003,17-24.

②侯惠群,韩绍阳.砂岩型铀矿航磁、航放弱信息提取方法技术初探.核工业北京地质研究院建院45周年文集,2004.

对于分析判别铀矿成矿有利区和识别线性构造十分有利。

## 4 应用实例

### 4.1 十红滩砂岩型铀矿床

新疆吐哈盆地是一个油气、煤和铀矿等多种能源矿产同盆共存的山间盆地。十红滩砂岩型铀矿床位于吐哈中生代

盆地南缘艾丁湖斜坡带上。盆地基底为古生代石炭系迪坎儿组(C<sub>2dg</sub>)的碎屑岩、火山岩、灰岩,盖层为中新生代的含煤碎屑岩建造。地表出露地层有第四系(Q),白垩系的鄯善群(Esh),中下侏罗统水西沟群(J<sub>1-2sh</sub>)等,后期改造(掀斜、差异性升降)造成地层形成北倾的单斜层,局部发育鼻状隆起(图1)。盆地南部觉罗塔格山区发育大面积花岗岩和中酸性火山

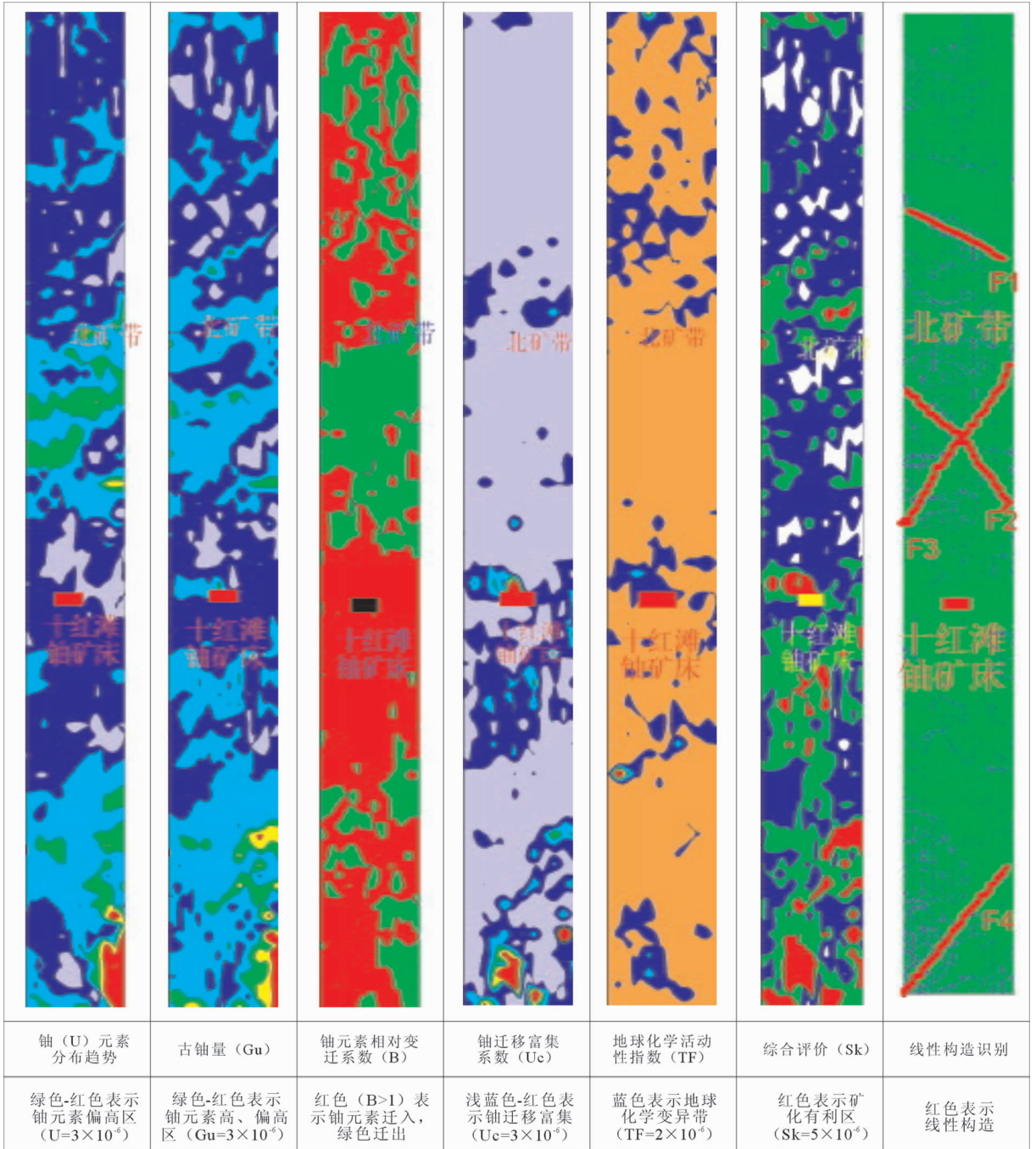


图 2 十红滩铀矿床航空伽马能谱数据微弱信息提取系列图

Fig.2 Series map of weak information enhancement and extraction of airborne gamma energy spectral data from the Shihongtan sandstone type uranium deposits

岩,为铀成矿提供了丰富的铀源。含矿层位是中下侏罗统水西沟群( $J_{1-2}sh$ )的陆相碎屑岩层,为富铀层,沉积相为辫状河和河流三角洲相。水文地质构成相对完整的地下水补给-径流-排泄系统,觉罗塔格山是艾丁湖斜坡带孔隙水的主要补给源。研究区断裂构造以NW、NE、EW向展布为主,断裂构造多与盆地基底断裂有关。经过几年的勘探,已发现了十红滩南、北两个铀矿带,一些矿点以及与砂岩型铀矿成矿密切相关的多层层间氧化带,成矿前景良好<sup>[7-9]</sup>。

#### 4.1.1 十红滩地区放射性参数特征

整理航空伽马能谱资料知:研究区铀含量平均值为 $1.81 \times 10^{-6}$ ,略高于地壳丰度值( $1.7 \times 10^{-6}$ ),为高铀区。但是不同时代的地层,不同岩性的铀含量差异大。一般蚀源区(古生代地层、岩浆岩体)古铀量(Gu)较高,活化铀迁移量(Fu)为负值,表明存在铀活化迁出,是工作区铀源层(体)。含矿层中下侏罗统是工作区含铀层,该层铀的迁移系数 $B > 1$ ,活化铀迁移量为 $0.11 \times 10^{-6}$ ,说明沉积成岩后存在铀的迁入,是有利的砂岩型铀矿成矿层。地面伽马能谱测量 $U = 2.13 \times 10^{-6}$ ,均方差 $\delta = 2.38 \times 10^{-6}$ ,变异系数 $Cv = 1.12$ 。说明该区铀含量高,变异系数变化大,属于理想的铀矿成矿区。

#### 4.1.2 十红滩地区放射性场特征

为了进行已知十红滩铀矿床和航空伽马能谱多元素组合参数关系的对比研究,利用矿床附近小范围的原始航空伽马能谱测量数据进行了微弱信息增强与提取。从图2系列图片看到,铀元素分布趋势是: $U > 4 \times 10^{-6}$ 的高场分布在蚀源区以及靠近蚀源区的已知矿点(如艾丁矿化点), $2 \times 10^{-6} < U < 4 \times 10^{-6}$ 偏高场分布在盆地内的矿体上(北矿带地区),或者是蚀源区活化铀被淋滤以络合物形式迁移到盆地低洼区,经蒸发富集在地表造成的偏高场( $U$ 高场沿硝尔布拉克河展布)。在盆地南缘含矿目的层——中下侏罗统水西沟群的出露区(十红滩鼻状隆起)存在偏高场, $U < 2 \times 10^{-6}$ 的低场区分布在盆地内部或是十红滩鼻状隆起周围的鄯善群(Esh)或第四系(Q)出露区。

经过微弱信息提取可以清晰地发现,古铀量(Gu)高场分布在蚀源区,偏高场分布在含矿目的层——中下侏罗统水西沟群的地表出露区,由于地表出露区的找矿目的层铀元素被淋滤,使 $Th/U$ 增大,古铀量偏高。铀元素相对变迁系数 $B > 1$ 的地段,目前存在铀矿床或矿体。铀迁移富集系数( $Uc$ )高值区均为目前铀矿体、铀矿点、铀矿化点分布区。地球化学活动性指数(TF)在矿体两侧形成明显的分界线。将有利的多元素组合参数融合得到综合评价指数( $Sk$ ),除蚀源区外,盆地中已知矿床的综合评价指数表现为高值( $Sk \geq 5 \times 10^{-6}$ )。该区的铀元素经过漫长的地质演变及地下水的渗流作用,使蚀源区的铀含量沿着地下水的流向发生了迁移,在盆地内可渗透含水砂岩中的氧化还原地球化学障处还原富集。

从吐哈盆地十红滩铀矿床航空伽马能谱测量微弱信息提取系列图2看到,F2是十红滩铀矿床南、北矿带的分界线,与地质图(图1)上的北西向鹰嘴崖断裂构造吻合。F4是蚀源区北东向断裂在盆地内的延伸。其余两条断裂和遥感解译的

线性构造具有对应性。

从吐哈盆地十红滩铀矿床航空伽马能谱测量微弱信息提取系列图(图2)对比发现,通过微弱信息增强和提取,矿化信息得到较好的显示和识别。

## 4.2 阿右旗地区

阿右旗地区位于华北地台阿拉善台隆西端,包括潮水盆地西部、雅布赖盆地的西南缘、巴丹吉林盆地南缘。潮水盆地夹持于北大山、龙首山拱断带之间,雅布赖盆地的西南缘和巴丹吉林盆地南缘位于北大山之北,它们均是中生代断陷盆地。工作区的蚀源区,北为北大山,南为龙首山。龙首山地区富铀建造和富铀岩体分布广,区内有大量铀矿床、矿点、矿化点。北大山地区与龙首山相比,铀钍丰度较低,区内铀矿化不太发育,但该区花岗岩发育,其面积占北大山基岩出露面积的55%以上,并且后生改造较强,铀易被淋滤迁移,从古铀高场和活化铀迁移富集系数的低值区就证实了这一点。潮水盆地北缘已落实小型的唐家沟煤岩型铀矿床,发育在煤层近地表古氧化代附近。

研究区盆地基底断裂构造非常发育,一组为北西向和东西向的控盆断裂,另一组为北东向和南北向的小型断裂。这些断裂均有继承性,断裂构造发生于加里东末期,后期继承性活动,切穿中生代地层。

纵观 $U$ 、 $Th$ 、 $K$ 元素区域趋势图(图3),可以对整个研究区有一个宏观的认识。在中新生代沉积盆地中,铀元素异常场( $U > 3.5 \times 10^{-6}$ )不受层位或岩性控制,其成因被认为是后期活化运移再富集的结果。铀高值区除分布在龙首山和北大山的蚀源区外,在研究区内也还有多片高值区,如陶家井和盐井子南部的高值区等。认为是蚀源区活化铀被淋滤以络合物形式迁移到盆地内富水区,经蒸发富集在地表造成的。

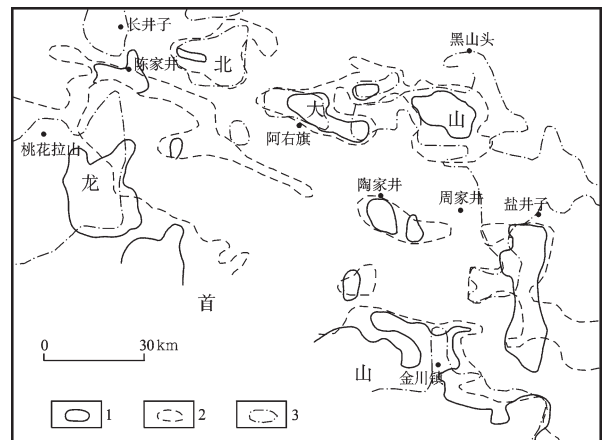


图3 阿右旗地区航空伽马能谱 $U$ 、 $Th$ 、 $K$ 异常图  
1—铀含量异常等值线( $3.5 \times 10^{-6}$ );2—钍含量异常等值线( $8 \times 10^{-6}$ );  
3—钾含量异常等值线(1.75%)

Fig.3 Uranium, thorium and potassium anomalies of airborne gamma energy spectral data in the Alxa Youqi area  
1—Uranium anomaly contour ( $3.5 \times 10^{-6}$ );2—Thorium anomaly contour ( $8 \times 10^{-6}$ );3—Potassium anomaly contour (1.75%)

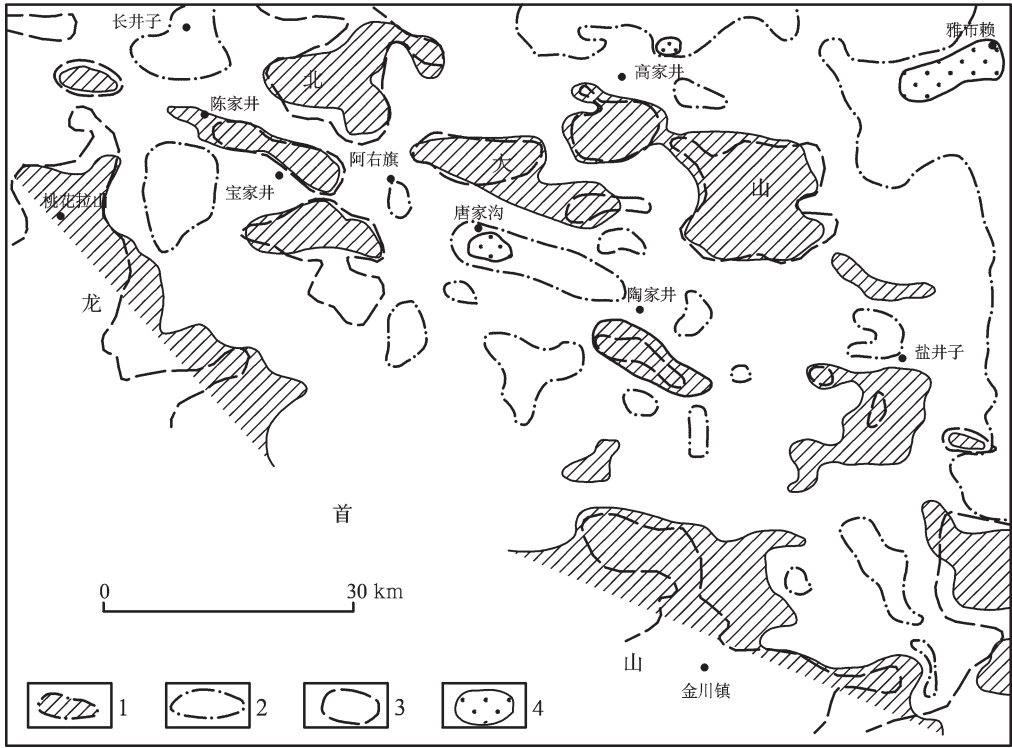


图 4 阿右旗地区航空伽马能谱多元素组合参数成果图

1—古铀高值区等值线( $4 \times 10^{-6}$ ); 2—活化铀富集区等值线( $0.5 \times 10^{-6}$ ); 3—活化铀淋失区等值线( $0.5 \times 10^{-6}$ ); 4—铀迁移富集区等值线( $4 \times 10^{-6}$ )

Fig.4 Multi-element combination parameters of airborne gamma energy spectral data in the Alxa Youqi area  
1—Paleouranium high-value area ( $4 \times 10^{-6}$ ); 2—Activated uranium enrichment area ( $0.5 \times 10^{-6}$ ); 3— Activated leached uranium area ( $0.5 \times 10^{-6}$ ); 4—Migrating uranium enrichment area ( $4 \times 10^{-6}$ )

钍的区域分布趋势明显地反映了测区的铀源体。钍元素含量异常 ( $Th > 8 \times 10^{-6}$ ) 均处于北大山和龙首山的蚀源区内, 并且与加里东期的花岗岩出露范围相吻合。在潮水盆地中间有一条近东西向的钍含量偏高带, 是蚀源区粗碎屑物经过物理搬运沉积在盆地中形成的。

钾的区域趋势分布特点是在区内钾元素区域分布变化比较平稳, 而  $K > 1.75\%$  异常位于蚀源区, 一般均严格受花岗岩或某些高钾地质体控制。

古铀量 ( $G_u$ )、活化铀迁移量 ( $F_u$ ) 以及铀迁移富集系数 ( $U_c$ ) 指示了盆地形成以后铀元素发生活化迁移的规律 (图 4)。阿右旗地区航空伽马能谱的古铀高场和活化铀迁移量的负值区位置十分吻合, 说明了该地区蚀源区的铀元素被大量淋滤, 以络合物形式随地下水搬运, 形成了铀元素的主要迁出区 (铀源区)。该区的地下水水流方向是以北大山、龙首山为界向两侧盆地排泄, 地下水携带的铀元素在唐家沟煤岩型铀矿区、雅布赖以西地区、高家井地段附近形成活化铀迁移量 ( $F_u$ ) 和铀迁移富集系数 ( $U_c$ ) 异常区。

利用 SPSS 数据统计分析软件, 对 U、Th、K 元素、元素比值、能谱组合参数计算结果进行聚类分析, U、U/K、 $F_u$ 、 $U_c$  为一类, Th、Th/U、 $G_u$  为另一类, 符合实际情况。逻辑回归分析

采用定性变量, 用 Binary Logistic 回归, 当  $Y=0$  (无矿), 存在 80% 的准确性; 当  $Y=1$  (有矿), 存在 76.9% 的准确性; 从铀源和铀的活化迁移富集系数角度进行信度分析, 预测雅布赖西南缘铀矿成矿的可信度  $\alpha = 76.54\%$ 。

从阿右旗地区航空伽马能谱多元素组合参数解释的综合成果图 (图 5) 可以看出, 在测区范围内唐家沟煤岩型铀矿区、高家井附近和雅布赖地区等形成了活化铀迁移量 ( $F_u$ )、铀迁移富集系数 ( $U_c$ ) 等多元素组合参数的叠加异常, 综合评价系数较高, 是寻找砂岩型铀矿找矿的有利区段。唐家沟是一个铀迁移富集高值中心, 其已被证实存在已知煤岩型铀矿床。雅布赖地区和高家井附近形成了研究区面积较大的两个活化铀迁移量高值区和铀元素迁移富集中心, 而且它们均与其南部的大片铀元素蚀源区有成因上联系, 因此, 唐家沟—陶家井, 高家井—雅布赖西南部是寻找砂岩型铀矿的远景区。

### 5 结论

利用放射性元素 U、Th、K 的地球化学性质和地球化学活动特点, 结合砂岩型铀矿成矿理论, 总结出具有明显效果的 10 种多元素组合参数, 并给出这些组合参数的数学模型、选择目的及其所代表的地质意义, 对航空伽马能谱数据进行

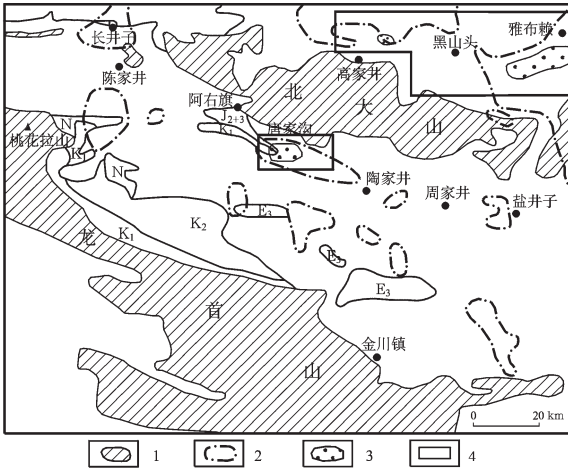


图5 阿右旗地区航空伽马能谱资料综合成果图

1—蚀源区;2—活化铀富集区等值线( $0.5 \times 10^{-6}$ );3—铀迁移富集区等值线( $4 \times 10^{-6}$ );4—砂岩型铀矿成矿的有利区;N—新近系;E<sub>3</sub>—渐新统;K<sub>2</sub>—上白垩统;K<sub>1</sub>—下白垩统;J<sub>2-3</sub>—中上侏罗统

Fig.5 Integration of airborne gamma energy spectral data in the Alxa Youqi area

1-Uranium provenance area; 2-Activated uranium enrichment area ( $0.5 \times 10^{-6}$ ); 3- Migrating uranium enrichment area( $4 \times 10^{-6}$ ); 4-Favorable site for sandstone type uranium mineralization; N-Neogene; E<sub>3</sub>-Eocene; K<sub>2</sub>-Upper Cretaceous; K<sub>1</sub>-Lower Cretaceous; J<sub>2-3</sub>-Middle-Upper Jurassic

微弱信息的增强和提取,在研究区域性放射性元素丰度、分析铀源和铀元素的活化迁移规律,评价砂岩型铀矿成矿条件及找矿前景等方面,具有地质意义和实用价值。

致谢:感谢核工业航测遥感中心提供的航空能谱测量基础资料,使航空放射性数据微弱信息增强和提取研究得以顺利完成。

参考文献 (References):

[1] 张云宜, 赵翠萍. 内蒙古二连盆地东部伽马能谱资料研究及应用[J]. 西北铀矿地质, 1998, (1): 38-42  
Zhang Yunyi, Zhao Chuiping. Study and application on gamma energy spectrum data in Erlian basin, Inner Mongolia [J]. Uranium Geology of Northwest China, 1998, (1):38-42(in Chinese).

[2] 赵希刚. 多源信息处理及其在线环构造识别和多种能源矿藏(床)找矿中的应用—以鄂尔多斯盆地为例[D]. 2006:60-67.  
Zhao Xigang. Multi-information processing and its application in recognizing linear structures and circular structures and prospecting multi-energy source mineral deposits in Ordos Basin, China [D]. 2006:60-67(in Chinese with English abstract).

[3] 金和海. 柴东盆地五道梁地区航放异常特征及成因分析 [J]. 铀矿地质, 2004, 20(4):235-244.  
Jin Hehai. Characteristics of airborne radioactive anomalies in Wudaoliang area, Eastern Chaidamu basin and their genesis analysis [J]. Uranium Geology, 2004, 20 (4):235-244 (in Chinese with English abstract).

[4] 赵希刚. 综合物化探方法勘探层间氧化带砂岩型铀矿 [J]. 物探与化探, 2001, 25(1):14-21  
Zhao Xigang. The Application of integrated geophysical and geochemical techniques to the exploration of interstratified oxidation zone sandstone type uranium deposits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25 (1):14-21 (in Chinese with English abstract).

[5] 李运跋, 赵元洪, 童纯涵, 等. 放射性勘探方法[M]. 北京:原子能出版社,1978.  
Li Yunba, Zhao Yuanhong, Tong Chunhan, et al. Radioactivity Prospecting Method [M]. Beijing:Atomic Energy Press, 1978 (in Chinese).

[6] 罗振丽, 张爱敏, 丁在宇. 相干体技术和图像处理技术在检测断层中的应用[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(3):48-50.  
Luo Zhenli, Zhang Aimin, Ding Zaiyu. Synthetical application of coherence cube technology and image manipulation technology in fault detection [J]. Coal Geology of China, 2004, 16 (3):48-50(in Chinese with English abstract).

[7] 周巧生, 李占游. 吐哈盆地西南缘地浸砂岩型铀矿地质特征及找矿前景[J]. 中国地质, 2003, 30(2):186-191.  
Zhou Qiaosheng, Li Zhanyou. Geological characteristics and ore prospects of underground leaching sandstone-type uranium deposits on the southwestern margin of the Turpan-Hami basin [J]. Chinese Geology in China, 2003, 30 (2):186-191 (in Chinese with English abstract).

[8] 吴伯林, 徐高中, 李卫红, 等. 吐哈盆地地浸砂岩型铀矿成矿条件与盆地动力学演化[J]. 中国地质, 2004, 31(1):101-107.  
Wu Bolin, Xu Gaozhong, Li Weihong, et al. Metallogenic conditions of in-situ leachable sandstone-type uranium deposits and dynamic evolution of the Turpan-Hami basin[J]. Geology in China, 2004, 31(1):101-107(in Chinese with English abstract).

[9] 李胜祥, 韩效忠, 蔡煜琦, 等. 伊犁盆地南缘西段中下侏罗统水西沟群沉积体系及其对铀成矿的控制作用 [J]. 中国地质, 2006, 33 (3):572-581 .  
Li Shengxiang, Han Xiaozhong, Cai Yuqi, et al. Depositional system of the Lower -Middle Jurassic Shuixigou Group in the western segment of the southern margin of the Ili basin and its controls on uranium mineralization [J]. Geology in China, 2006, 33 (3):572-581(in Chinese with English abstract).

## Geological significance of weak information enhancement of airborne gamma energy spectral data for sandstone type uranium deposits

ZHAO Xi-gang<sup>1</sup>, WU Han-ning<sup>2</sup>, YANG Jian-jun<sup>2</sup>, ZHANG Yun-yi<sup>1</sup>,  
ZHAO Cui-ping<sup>1</sup>, BAI Guan-jun<sup>2</sup>, WANG Jing-hua<sup>2</sup>

(1. *Research Institute No. 203, CNNC, Xianyang 712000, Shaanxi, China*

2. *Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China*)

**Abstract:** Gamma energy spectral survey is a direct method for uranium prospecting. However, because of lower grades and deep burial, sandstone type uranium deposits occurring in Meso-Cenozoic sedimentary basins have low and uniform gamma-ray values and show no pronounced radioactive anomaly information in the airborne gamma spectral measurements above and around a uranium orebody. So the anomaly is difficult to recognize using conventional data processing methods (e.g. mono-element distribution trend analysis and mono-element ratio). In this case, the element parameters U, Th and K are combined for the airborne gamma spectral measurements, and furthermore, the authors have constructed a mathematical model of multi-element combination parameters to enhance and extract weak information of gamma energy spectral data relating to sandstone type uranium deposits, used the cluster analysis and logical regression analysis in the mathematical statistics to perform integrated evaluation of the prospect area and gave the metallogenetic probability of sandstone type uranium deposits. Experiments demonstrate that, in comparison with routine methods, the use of multi-element combination parameters to enhance and extract weak information of airborne gamma energy spectral data from the Shihongtan and Alxa Youqi areas can significantly enhance weak information about prospecting of sandstone type uranium deposits. Therefore, this method is an effective and applicable method for forecasting areas favorable for sandstone type uranium mineralization.

**Key words:** multi-element combination parameters; airborne gamma energy spectrometry; weak information enhancement and extraction; sandstone type uranium deposits

---

**About the first author:** ZHAO Xi-gang, male, born in 1963, Ph.D and senior engineer, engages in the study of exploration and information technology; E-mail: zhaoxigang418@126.com.