

doi: 10.11720/wtyht.2020.0017

李英宾, 谢明宏, 张占彬, 等. 综合物探方法在上杭盆地古石背地区铀矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1283-1293. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0017>

Li Y B, Xie M H, Zhang Z B, et al. The application of comprehensive geophysical method to the exploration of uranium deposits in the paleo-Shibei area of Shanghang Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1283-1293. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0017>

综合物探方法在上杭盆地古石背地区 铀矿勘查中的应用

李英宾^{1,2}, 谢明宏^{1,2}, 张占彬^{1,2}, 李毅^{1,2}, 魏滨^{1,2}, 张伟^{1,2}

(1. 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002; 2. 中核集团 铀资源地球物理勘查技术中心(重点实验室), 河北 石家庄 050002)

摘要: 古石背地区具有良好的铀成矿地质背景, 发现了一些矿化点和铀异常, 前人工作主要集中在矿化点的周围和浅部, 对研究区整体成矿环境的评价和深部成矿条件的认识不足。本文简要介绍了土壤氡、地面伽马能谱和音频大地电磁测量的工作方法, 通过综合物探测量对研究区铀成矿环境进行了分析, 通过开展土壤氡、地面伽马能谱测量工作, 圈定了铀矿异常位于地表的大致位置, 通过开展音频大地电磁测量(AMT)查明了控矿断裂古石背断裂和控矿岩层石帽山群的发育特征, 推断解释结果得到了钻探验证, 为该类型的铀矿勘查工作提供了参考。

关键词: AMT; 地面伽马能谱; 土壤氡; 古石背地区; 铀矿勘查

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)06-1283-11

0 引言

上杭盆地位于闽西南拗陷带连城—上杭复向斜南西端^[1-3], 古石背地区位于上杭盆地南东部, 基底成熟度较高, 铀含量较高, 存在富铀层、段; 中生代构造—岩浆活动强烈, 并以中酸偏碱性岩浆侵入和火山喷发为主, 形成大面积含铀性好的火成岩, 具备良好的铀成矿地质背景。但前人工作主要集中在矿化点的周围和浅部, 对研究区整体成矿环境的评价和深部成矿条件认识不足。近几年, 地面伽马能谱和土壤氡测量在探索铀矿化特征及铀矿床成因等方面得到了广泛应用^[4-8], 两种方法在断裂识别和岩体划分方面效果显著, 但多反映的是浅部信息, 对深部的放射性特征反映不足; 音频大地电磁测量对深部断裂构造的探测具有较好的效果^[9-14]。本文简要介绍了音频大地电磁测量、地面伽马能谱和土壤氡测量的工作方法, 通过综合物探测量圈定了物化探异常, 查明了控矿断裂古石背断裂和控矿岩层石帽

山群的发育特征, 为铀矿勘查工作提供了参考资料。

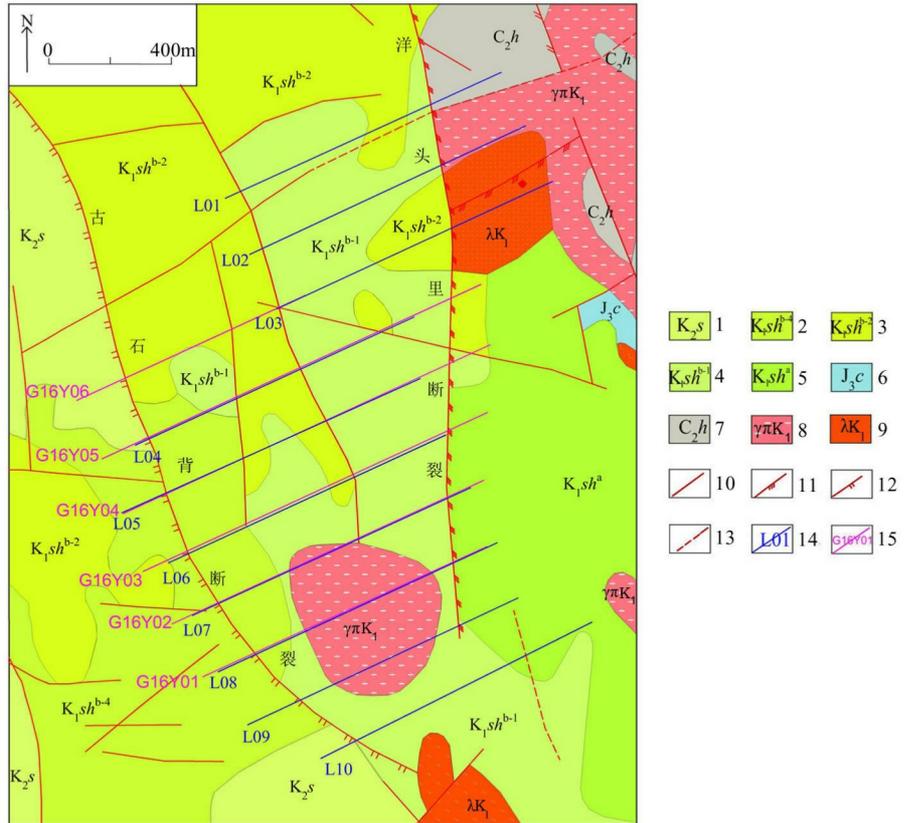
1 研究区地质特征

上杭盆地位于闽西南拗陷带连城—上杭复向斜南西端, 处于上杭—云霄深断裂与古田—上杭大断裂带的反接复合部位^[15], 受NW向上杭—云霄深断裂(梯子岭断裂)控制。研究区位于上杭盆地北东部, 并处于古石背断裂与洋头里断裂夹持部位(图1)。地层主要为上石炭统、上侏罗统, 下白垩统。石炭统为一套砂砾岩; 上侏罗统为一套杂色砂砾岩、粉砂岩; 下白垩统石帽山群为流纹岩、英安岩、安山岩等。铀矿化主要产于石帽山群流纹岩、火山碎屑岩中。岩体主要分布于研究区的北东及南东侧, 为次火山岩侵入体, 岩性为燕山晚期流纹斑岩及花岗斑岩。研究区内断裂构造发育, 其中, 洋头里断裂及其次级断裂控制了石帽山群上下组的展布, 是本区的主要含矿构造; 古石背断裂具有张扭性特征, 既是控岩构造, 又是含矿构造, 为铀矿储存提供了空

收稿日期: 2020-01-15; 修回日期: 2020-05-08

基金项目: 中国核工业地质局项目“福建省上杭县古石背—章金地区音频大地电磁测量”(201539-1)

作者简介: 李英宾(1979-), 男, 毕业于中国地质大学(武汉), 工程师, 现从事铀矿勘查工作。Email: 799982826@qq.com



1—上白垩统;2—下白垩统细粒流纹岩;3—下白垩统黑云母流纹岩;4—下白垩统凝灰质砂岩;5—下白垩统安山岩;6—上侏罗统白云质灰岩;7—上石炭统砂砾岩;8—燕山期花岗岩斑岩;9—燕山期次流纹岩;10—实测断层;11—压扭性断层;12—张性断层;13—推测断层;14—地面伽马能谱、土壤氡测线及其编号;15—AMT 测线及其编号

1—upper Cretaceous; 2—lower Cretaceous fine-grained rhyolite; 3—lower Cretaceous biotite rhyolite; 4—lower Cretaceous tuffaceous sandstone; 5—lower Cretaceous andesite; 6—upper Jurassic dolomitic limestone; 7—upper Carboniferous sandstone conglomerate; 8—yanshanian granite porphyry; 9—yanshanian sub rhyolite; 10—measured fault; 11—compression torsion fault; 12—tensile fault; 13—inferred fault; 14—ground gamma energy spectrum, soil radon line and its number; 15—AMT line and its number

图 1 研究区地质及测线布置

Fig.1 Geological and survey line layout of the study area

间。部分近 EW 向断裂被辉绿岩脉充填,发育挤压片理,铀矿化常出现在其下盘。

2 方法介绍

2.1 音频大地电磁测深 (AMT)

本次电法测量使用 EH-4 测量系统。布置测线 6 条,测线方向 65°,线距 200 m,点距 20 m,测点共 354 个(图 1)。EH-4 采用张量测量、十字型布极,电极、磁探头分别以测量点为中心对称布设,其中 E_x 、 H_x 平行于测线方向, E_y 、 H_y 垂直于测线方向。研究区远离干扰源,电磁谐波干扰较小,地形复杂,后期对数据进行了静态校正和地形改正。数据质量用总体均方误差来衡量,视电阻率、相位平均均方相对误

差分别为 6.24%、5.95%,满足规范要求,原始数据质量可靠。

EH-4 数据处理包括实时处理和室内处理。实时处理由仪器采集程序自动完成,室内处理包括预处理和反演处理。本次使用仪器自带软件进行数据预处理,首先进行时间序列数据挑选,重新频谱计算,将成果数据转换成“*.avg”数据格式进行静态校正,本次静态校正采用了常用的 FLMA(定长平滑滤波)方法。反演处理时,第一层厚度 15 m,选择均匀半空间电阻率模型,圆滑系数为 0.20,并加入高程文件进行地形改正。

2.2 地面伽马能谱

地面伽马能谱测量以伽马射线和物质的相互作用为基础,以能直接、快速地测定探测体中 Th、U、K

三种元素的含量为特点。在硬岩地区的铀矿勘查中,该方法在研究铀元素的迁移、富集规律和铀矿床的发现与评价等方面得到了很多应用。

本次布设地面伽马能谱测线 10 条,测线方向 65° ,线距 200 m,点距 20 m,测点共 530 个(图 1)。本次测量仪器为经检定合格的 FD-3022 四道伽马能谱仪。定点观测,测量时间 $t = 120$ s。

2.3 土壤氡测量

氡属于天然铀放射性气体,半衰期 3.82 d,一个月即可达到铀镭放射平衡。氡为气态,易溶于水,易于在土壤、岩石中通过,在抽吸力、压力以及对流、扩散相互作用下,断裂构造可为氡气提供通道,土壤氡及其子体对断裂构造在地表的位置具有较好的指示作用。

本次土壤氡测量和地面伽马能谱点位重合(图 1),测量仪器选用 HDC-C 型环境测氡仪,其探测器

为两块大面积金硅面垒,可双向探测;采样片为高压薄膜,厚约 $4 \mu\text{m}$,直径 70 mm;本底计数 $\leq 0.25 \text{ min}^{-1}$;灵敏度 $\geq 0.014 \text{ min}^{-1}/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$;采样时间 2 min;测量下限 $\leq 300 \text{ Bq/m}^3$ 。

3 地面伽马能谱和土壤氡测量资料解释

3.1 地面伽马能谱测量结果

本次在古石背地区的地面伽马能谱测量工作共取得数据 508 组,FD-3022 四道伽马能谱仪记录的数据包括 K、U、Th 的道计数、含量、道计数率和总含量。其中,总含量指示的是放射强度,K 含量的单位用“%”表示,Th、U 含量的单位用“ 10^{-6} ”表示。各条线测量的结果统计如表 1 所示。

3.2 K、U、Th 及其比值分布频数分析

图 2 为 K、U、Th 及其比值分布频数直方图,可

表 1 地面伽马能谱测量结果统计

Table 1 Statistical table of ground gamma spectrum measurement results

线号	点数	$w(\text{U})/10^{-6}$			$w(\text{Th})/10^{-6}$			$w(\text{K})/\%$		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
L01	50	123.78	2.36	9.86	55.96	17.33	29.83	12.6	0.47	3.66
L02	50	18.29	1.9	4.58	13.64	40.93	24.74	6.85	0.58	2.68
L03	50	34.69	2.39	12.39	38.12	16.61	27.69	2.73	0.46	1.33
L04	50	30.76	1.07	4.9	47.77	24.01	35.85	7.98	0.25	1.82
L05	60	45	2	7.09	39.9	17.8	28.79	7.2	0.7	2.06
L06	49	32.5	1.7	4.69	40.42	8.22	22.35	9.15	1.33	4.09
L07	50	14.87	1.86	5.73	41.07	6.41	21.22	4.77	0.89	2.62
L08	49	22.76	1.81	6.20	45.01	9.16	20.08	3.87	0.63	2.06
L09	50	10.8	1.57	4.23	43.33	9.05	17.52	4.27	1.07	2.34
L10	50	18.63	2.37	8.19	34.11	7.84	15.03	6.83	0.26	2.48

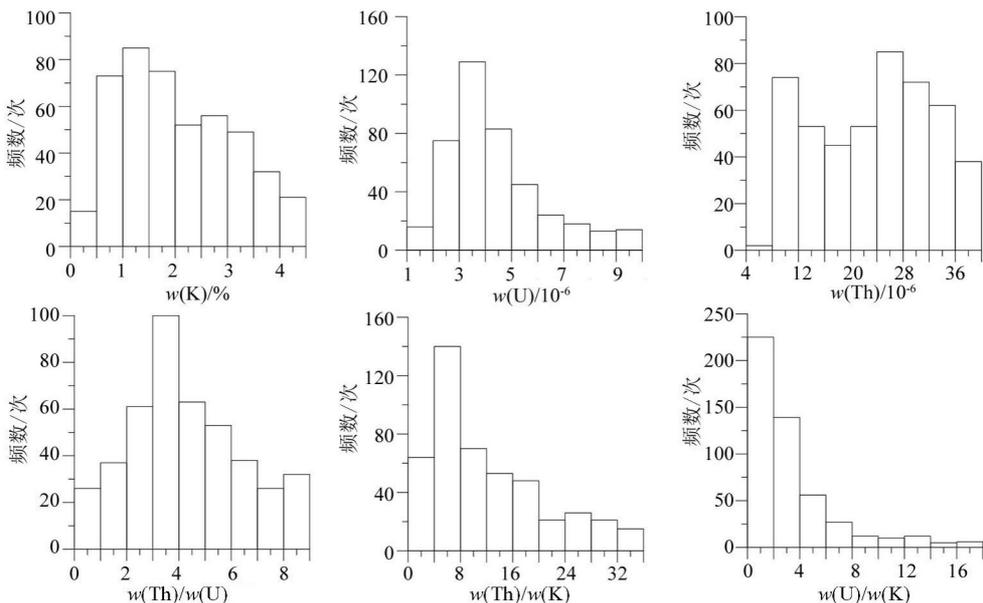


图 2 研究区地面伽马能谱 K、U、Th 及其比值分布直方图

万方数据

Fig.2 Distribution histogram of K, U, Th and their ratio of ground gamma spectrum in the study area

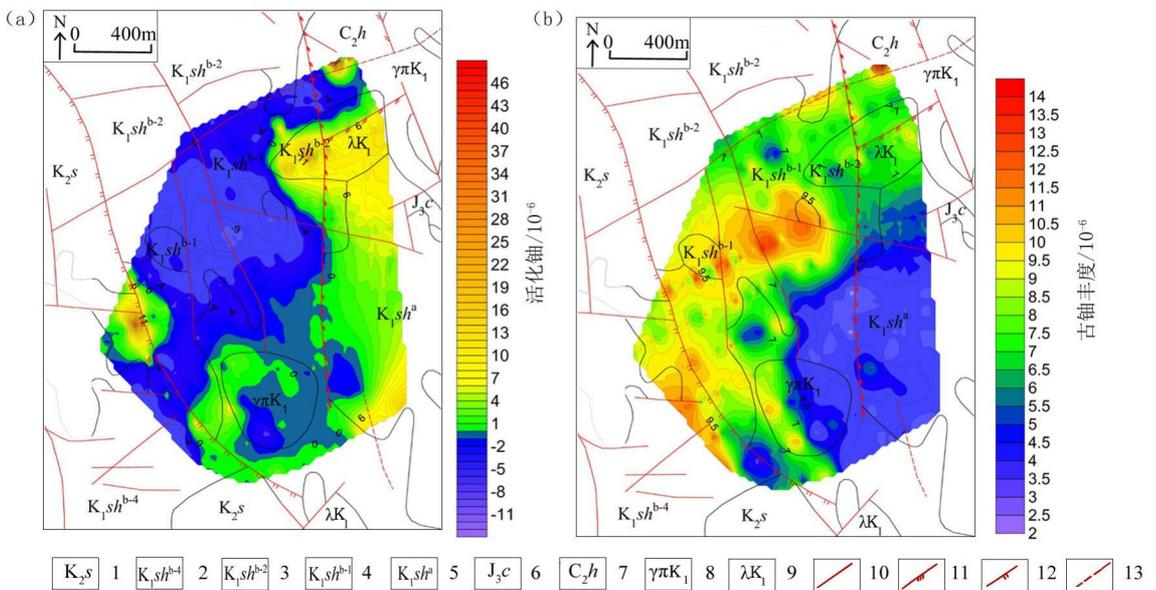
用于研究 K、U、Th 分布规律。研究显示:K 含量主要在 0.5%~4%, 含量分布较均匀, 中值为 2.51%; U 含量以单峰形态分布, 主要集中在 $(2\sim 5)\times 10^{-6}$, 超过 10×10^{-6} 的数值较少故未作统计, 高值呈现拖尾现象; Th 含量呈现双峰形态分布, 主要集中于 $(8\sim 40)\times 10^{-6}$, 分布较均匀; Th/U 服从正态分布, 剩余均不服从正态分布。这说明研究区 U 非单一作用形成, 是多期地质作用叠加形成的。

3.3 古铀丰度 (GU)、活化铀 (FU) 特征

通过 U、Th 之间的关系可以分析研究区的地质情况, 处于 Th、U 平衡时, U 含量是含铀地段的标志, U 易活化迁移, 研究 Th、U 之间关系比直接测量

的 U 含量更加有研究意义, 张云宜认为古铀丰度 GU 为 U 与 (U/Th) 平均值的比值, 研究区范围较小, U/Th 的评价值取固定值, 研究区 U/Th 的平均值为 3.40。由每个测点的 U 含量可得出每个测点 GU, 由图 3 可见, 研究区原始铀含量较高, 基本上都在 3×10^{-6} 以上, 具有南东低、北西高的特点, 西北部大部分区域在 7×10^{-6} 以上。

活化铀 $FU = U - GU$, $FU > 0$ 时活化铀叠加富集, $FU < 0$ 时活化铀淋失, 由图 3 可见, 受古石背断裂和洋头里断裂控制, 研究区中部 $FU < 0$, 处于淋失状态, 东部和西部 $FU > 0$, 处于叠加富集期, 富集区呈条带状分布。



- 1—上白垩统; 2—下白垩统细粒流纹岩; 3—下白垩统黑云母流纹岩; 4—下白垩统凝灰质砂岩; 5—下白垩统安山岩; 6—上侏罗统白云质灰岩; 7—上石炭统砂砾岩; 8—燕山期花岗岩; 9—燕山期次流纹岩; 10—实测断层; 11—压扭性断层; 12—张性断层; 13—推测断层
- 1—upper Cretaceous; 2—lower Cretaceous fine-grained rhyolite; 3—lower Cretaceous biotite rhyolite; 4—lower Cretaceous tuffaceous sandstone; 5—lower Cretaceous andesite; 6—upper Jurassic dolomitic limestone; 7—upper Carboniferous sandstone conglomerate; 8—yanshanian granite porphyry; 9—yanshanian sub rhyolite; 10—measured fault; 11—compression torsion fault; 12—tensile fault; 13—speculative fault

图 3 研究区活化铀 (a)、古铀丰度 (b) 等值线

Fig.3 Isoleth map of activated uranium (a) and paleouranium abundance (b) in the study area

3.4 地面伽马能谱测量成果分析

根据地面伽马能谱测量规范 (EJ/T363-2012) 对测量数据的背景值、标准偏差、变异系数进行了统计, 对偏高晕、高晕、异常晕进行了圈定, 统计结果见表 2。

从研究区 U、K、Rn、Th 等值线平面图 (图 4) 可见, U、K、Rn、Th 高晕、偏高晕、异常晕呈现团块状分布, 其展布受断裂及花岗岩脉控制。依据统计出的异常晕下限圈定出 U 异常晕 5 片, K 异常晕 3 片, Rn 异常晕 3 片, 其中 U 异常晕集中于东部和西部地区, 显示出构造相关性。其中 U1、U2 异常晕处于洋

头里断裂和 NE 向断裂交汇部位, 产于石帽山群、花岗岩斑岩的接触部位, 满足构造、蚀变等成矿条件。U3 异常晕处于近 EW 向断裂和古石背断裂交汇部位, 异常浓集程度最高; 土壤氡异常晕位于研究区西部, 呈团块状、带状分布, 沿古石背断裂展布。Rn1 异常晕面积较大, 沿 NW 向展布, Rn2 异常晕处于近 EW 向断裂和古石背断裂交汇部位, 呈椭圆状沿 NW 向展布, 异常浓集程度最高。K 异常晕主要处于研究区西部, 沿古石背断裂展布, 其中 K1 异常晕范围较大, 幅值较高。

根据异常晕下限, 圈定 U、K、Rn 异常晕复合区

表 2 研究区地面伽马能谱和土壤氡测量数据统计

Table 2 Statistical table of ground gamma spectrum and soil radon measurement data in the study area

	$w(U)/10^{-6}$	$w(Th)/10^{-6}$	$w(K)/\%$	$w(Rn)/(Bq \cdot m^{-3})$
背景值(X)	5.04	24.38	2.24	3560
标准偏差(S)	2.74	9.67	1.28	1400
变异系数(C_v)	0.54	0.40	0.57	0.39
偏高晕下限($X+S$)	7.78	34.05	3.52	4960
高晕下限($X+2S$)	10.52	43.72	4.8	6360
异常晕下限($X+3S$)	13.26	53.39	6.08	7760

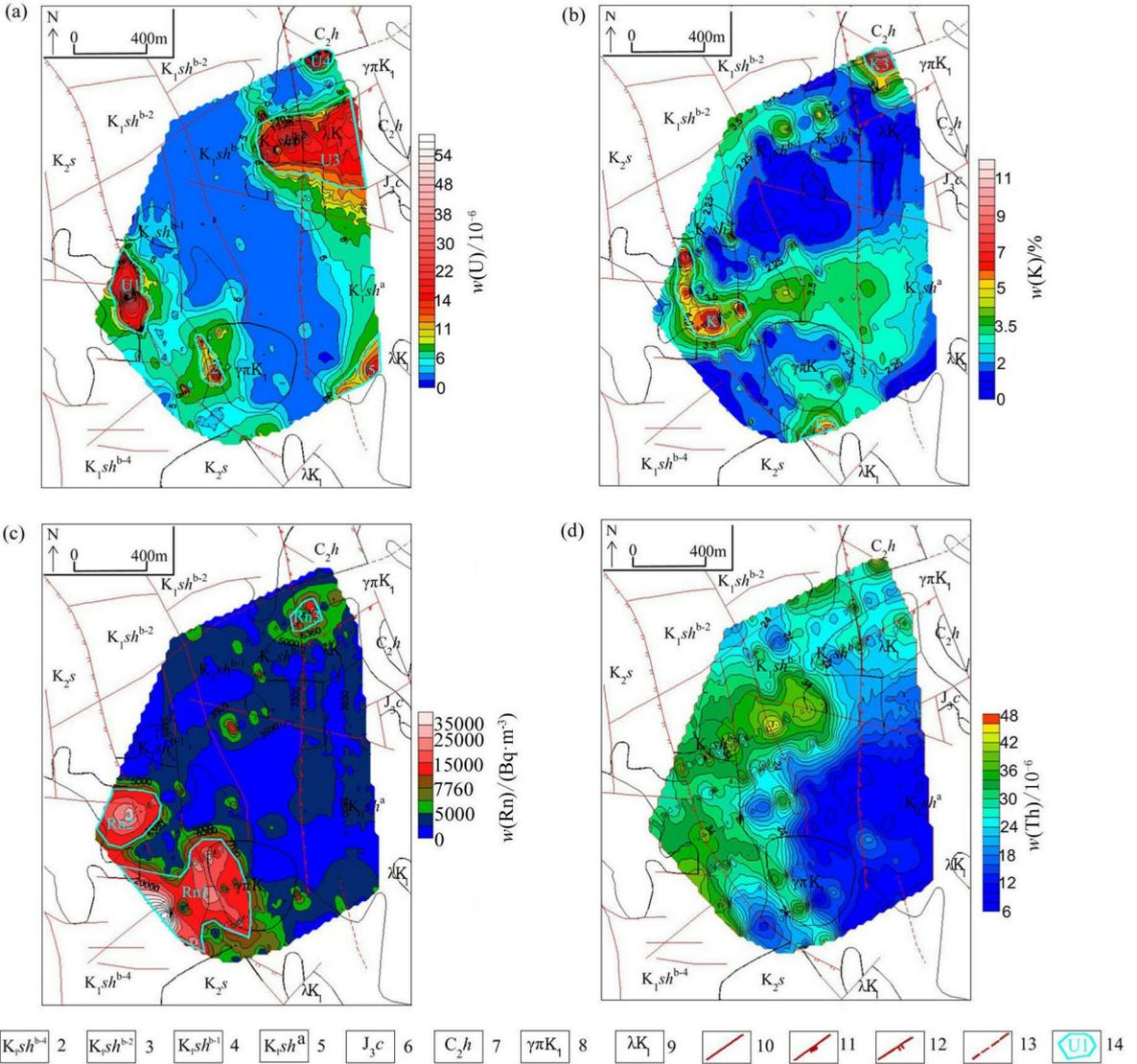


图 4 研究区 U、K、Rn、Th 等值线平面

Fig.4 Study area U, K, RN, Th contour plan

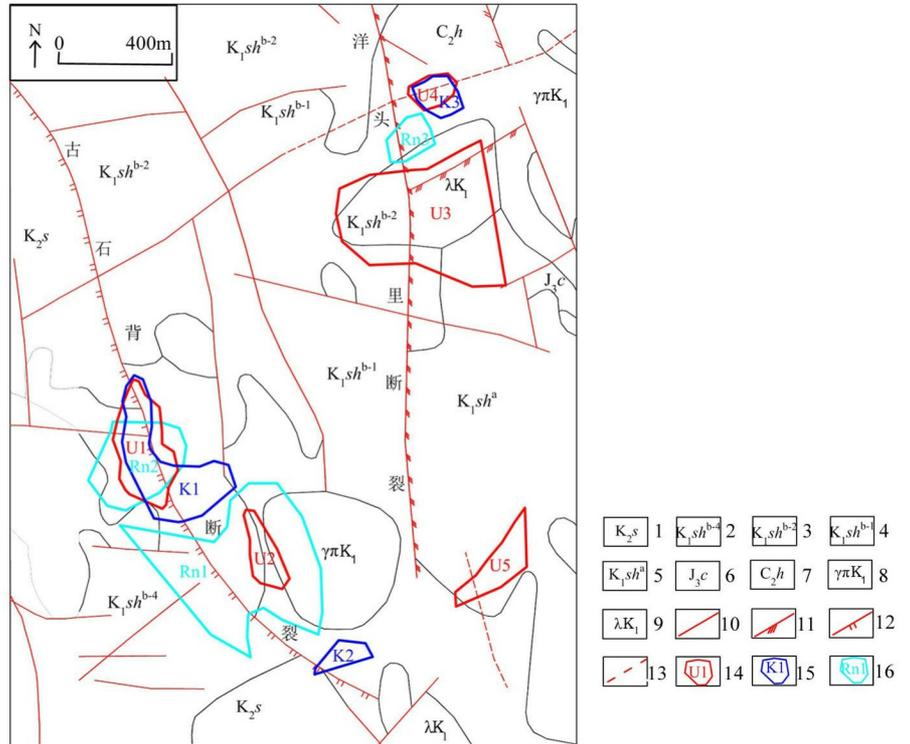
万方数据

1—上白垩统;2—下白垩统细粒流纹岩;3—下白垩统黑云母流纹岩;4—下白垩统凝灰质砂岩;5—下白垩统安山岩;6—上侏罗统白云质灰岩;7—上石炭统砂砾岩;8—燕山期花岗岩斑岩;9—燕山期次流纹岩;10—实测断层;11—压扭性断层;12—张性断层;13—推测断层;14—圈定异常晕及其编号

1—upper Cretaceous; 2—lower Cretaceous fine-grained rhyolite; 3—lower Cretaceous biotite rhyolite; 4—lower Cretaceous tuffaceous sandstone; 5—lower Cretaceous andesite; 6—upper Jurassic dolomitic limestone; 7—upper Carboniferous sandstone conglomerate; 8—yanshanian granite porphyry; 9—yanshanian sub rhyolite; 10—measured fault; 11—compression torsion fault; 12—tensile fault; 13—inferred fault; 14—circle abnormal halo and its number

3片(图5),编号分别为U1+K1+Rn2、U2+Rn1、U4+K3。综合分析认为其中的U1+K1+Rn2、U2+Rn1异常复合区找矿潜力较大,这两个异常复合区浓集程度高,且其分布受导矿、含矿断裂古石背断裂的控制

明显,具有较好的成矿前景,尤其是U1+K1+Rn2异常复合区,是U、K、Rn的综合异常复合区,是成矿最有利区段。



1—上白垩统;2—下白垩统细粒流纹岩;3—下白垩统黑云母流纹岩;4—下白垩统凝灰质砂岩;5—下白垩统安山岩;6—上侏罗统白云质灰岩;7—上石炭统砂砾岩;8—燕山期花岗斑岩;9—燕山期次流纹岩;10—实测断层;11—压扭性断层;12—张性断层;13—推测断层;14—圈定U异常晕及其编号;15—圈定K异常晕及其编号;16—圈定Rn异常晕及其编号

1—upper Cretaceous; 2—lower Cretaceous fine-grained rhyolite; 3—lower Cretaceous biotite rhyolite; 4—lower Cretaceous tuffaceous sandstone; 5—lower Cretaceous andesite; 6—upper Jurassic dolomitic limestone; 7—upper Carboniferous sandstone conglomerate; 8—yanshanian granite porphyry; 9—yanshanian sub rhyolite; 10—measured fault; 11—compression torsion fault; 12—tensile fault; 13—inferred fault; 14—circle U abnormal halo and its serial number; 15—circle K abnormal halo and its serial number; 16—circle Rn abnormal halo and its serial number

图5 古石背地区综合物探复合异常晕图

Fig.5 Composite anomaly halo map of comprehensive geophysical exploration in the paleoshiBei area

4 AMT 资料推断解释

4.1 研究区岩石电阻率特征

本次对研究区岩石电性参数进行了测量统计(表3),由表3可见:沙县组泥岩为相对低阻电性特征;石帽山群岩性复杂,其中凝灰质细砂岩、砂岩表现为相对中低阻电性特征,上覆流纹岩和下伏安山岩表现为相对中阻电性特征;长林组和黄龙组电阻率相差不大,相对安山岩和花岗斑岩表现为相对中低阻电性特征;燕山期花岗斑岩为相对高阻电性特征,不同岩层之间存在明显的电性差异。

4.2 AMT 资料分析

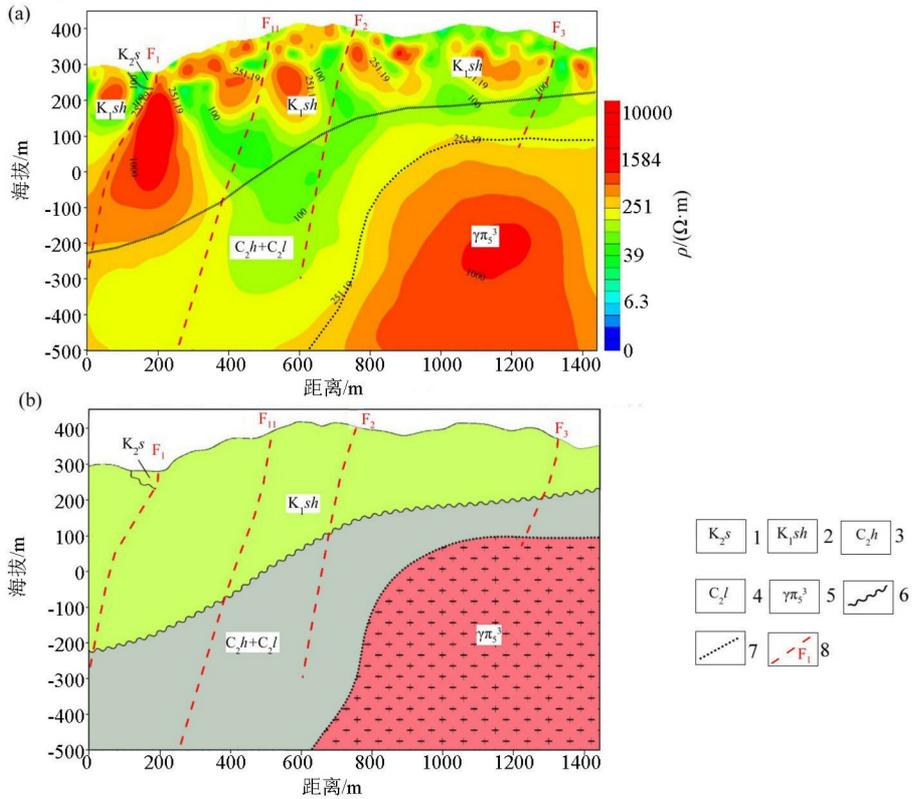
本次共完成AMT测量剖面6条,各剖面反演电

阻率断面图特征大致相似,其电性特征客观地反映了地下岩层、构造在垂向、横向上的变化和延伸情况。下面以其中的5号剖面为例进行说明。5号剖面由南西向北东出露岩性依次为石帽山群流纹岩、凝灰质砂岩、英安岩,经过古石背断裂和洋头里断裂。由G16Y05线反演电阻率地质解释断面图(图6)可见,该剖面共推断解释断裂4条,其编号分别为F₁、F₁₁、F₂和F₃。其中,F₁位于平距200m处,反演电阻率反映为向深部SW向延伸等值线密集带,向深部WS向延伸,倾向W,倾角约78°,切割深度大于560m;F₁₁断裂位于平距520m处,反演电阻率反映为向深部西南方向延伸的低阻带,倾向W,倾角约72°,切割深度大于850m;F₂断裂位于平距760m处,反演电阻率表现为顺等值线密集带下延,

表 3 岩石电性参数测量结果统计

Table 3 Statistical table of measurement results of electrical parameters of rock

地层	岩性	代号	测量数(组)	电阻率/($\Omega \cdot m$)		
				测量值范围	常见值范围	平均值
沙县组	泥岩	K_2s	30	23~99	23~54	36
石帽山群	流纹岩	K_1sh^{b-4}	34	403~1214	403~645	515
	凝灰质细砂岩	$K_1sh_2^{b-2}$	30	63~365	98~240	167
	凝灰质砂岩	K_1sh^{b-1}	31	130~259	130~259	180
	安山岩	K_1sh^a	32	199~646	260~455	355
长林组	砾岩	J_3c	31	135~487	170~350	253
黄龙组	灰岩	C_2h	31	91~418	167~322	256
	燕山期花岗斑岩	$\gamma\pi_5^3$	31	103~1674	584~1175	800



1—沙县组:钙质泥岩、粉砂岩、砂砾岩;2—石帽山群:流纹岩、凝灰质砂岩、英安岩、安山岩等;3—黄龙组:灰白色白云质灰岩、硅质岩;4—林地组:石英砾岩、砂砾岩、粗砂岩夹粉砂岩、页岩;5—花岗斑岩;6—推断不整合接触界线;7—推断岩性接触界线;8—推断断裂及编号
 1—Shaxian formation: calcareous mudstone, siltstone, glutenite; 2—Shimaoshan group: rhyolite, tuffaceous sandstone, dacite, andesite, etc.; 3—Huanglong formation: gray white dolomitic limestone, siliceous rock; 4—Woodland formation: Quartz conglomerate, glutenite, coarse sandstone with siltstone, shale; 5—granite porphyry; 6—inferred unconformity contact boundary; 7—inferred lithology contact boundary; 8—inferred fault and number

图 6 G16Y05 线反演电阻率断面 (a) 及地质推断解释成果 (b)

Fig.6 Interpretation map (b) of inversion resistivity section (a) of G16Y05 line

倾向 W, 倾角约 75° , 切割深度约 700 m; F_3 断裂位于平距 1320 m 处, 反演电阻率反映为等值线密集带, 倾向 W, 倾角约 73° , 切割深度约 300 m。

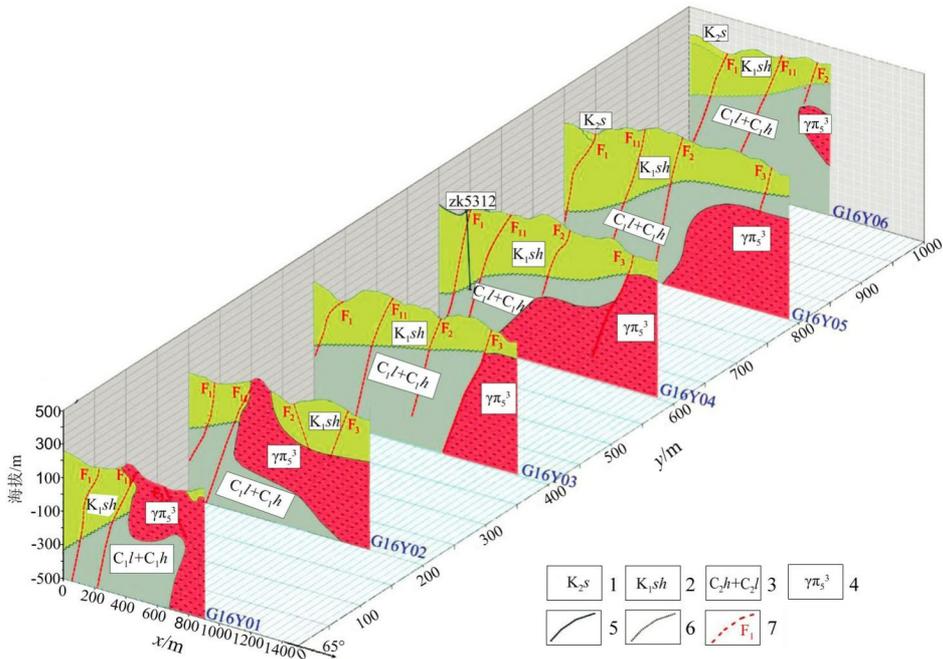
根据反演电阻率断面图地质解释标志, 对该断面的地层进行了推断解释: 反演电阻率断面图纵向

上可以分为 3 个电性层, 第一层表现为相对高阻, 推测为石帽山群下组 (K_1sh) 安山岩的反映; 第二电性层表现为相对低阻, 推测为石炭系黄龙组灰岩及林地组砂砾岩、粉砂岩的综合反映; 第三电性层表现为相对高阻, 推测为花岗斑岩的反映。

4.3 石帽山群的分布特征

根据推断解释的 6 个地质剖面绘制了研究区的地质推断解释综合示意图(图 7)。由图 7 可见,铀矿主要赋存的石帽山群在研究区广泛发育,主要分布在浅部,由西向东呈阶梯状厚度递减,受断裂 F_1 、

F_{11} 、 F_2 和 F_3 控制,厚度 30~580 m。另外,研究区西段受到 NE 向、SEE 向断裂作用,岩层在 G16Y01、G16Y04、G16Y05 线剖面东段较厚,即岩层由南向北发育为厚—薄—厚—薄的过程。



1—沙县组:钙质泥岩、粉砂岩、砂砾岩;2—石帽山群:流纹岩、凝灰质砂岩、英安岩、安山岩等;3—黄龙组:灰白色白云质灰岩、硅质岩+林地组:石英砾岩、砂砾岩、粗砂岩夹粉砂岩、页岩;4—花岗斑岩;5—推断不整合接触界线;6—推断岩性接触界线;7—推断断裂及编号
 1—Shaxian formation: calcareous mudstone, siltstone, glutenite; 2—Shimaoshan group: rhyolite, tuffaceous sandstone, dacite, andesite, etc.; 3—Huanglong formation: gray white dolomitic limestone, siliceous rock+Woodland formation: Quartz conglomerate, glutenite, coarse sandstone with siltstone, shale; 4—granite porphyry; 5—inferred unconformity contact boundary; 6—inferred lithology contact boundary; 7—inferred fault and number

图 7 古石背地区地质推断解释综合示意

Fig.7 Comprehensive diagram of geological inference and interpretation in ancient Shibe area

5 综合应用效果分析

通过对研究区地面伽马能谱测量及土壤氡测量数据的处理分析,圈定出综合物探复合异常晕圈 U1+K1+Rn2、U2+Rn1。这两个异常晕圈浓集程度较高,且由活化铀、古铀丰度等值线图可见,这两个异常所处位置 $FU > 0$,为铀叠加富集区。AMT 测量成果显示,这两个异常晕圈所处位置存在约 300 m 厚的赋矿岩层石帽山群,且该处岩石电阻率表现为相对低阻,为含矿构造古石背断裂的反映。综合分析认为 U1+K1+Rn2、U2+Rn1 两个浓集程度最高的异常晕复合区为铀矿找矿提供的靶区,尤其是 U1+K1+Rn2 异常晕复合区,是 U、K、Rn 的综合异常晕复合区,是成矿最有利区段。

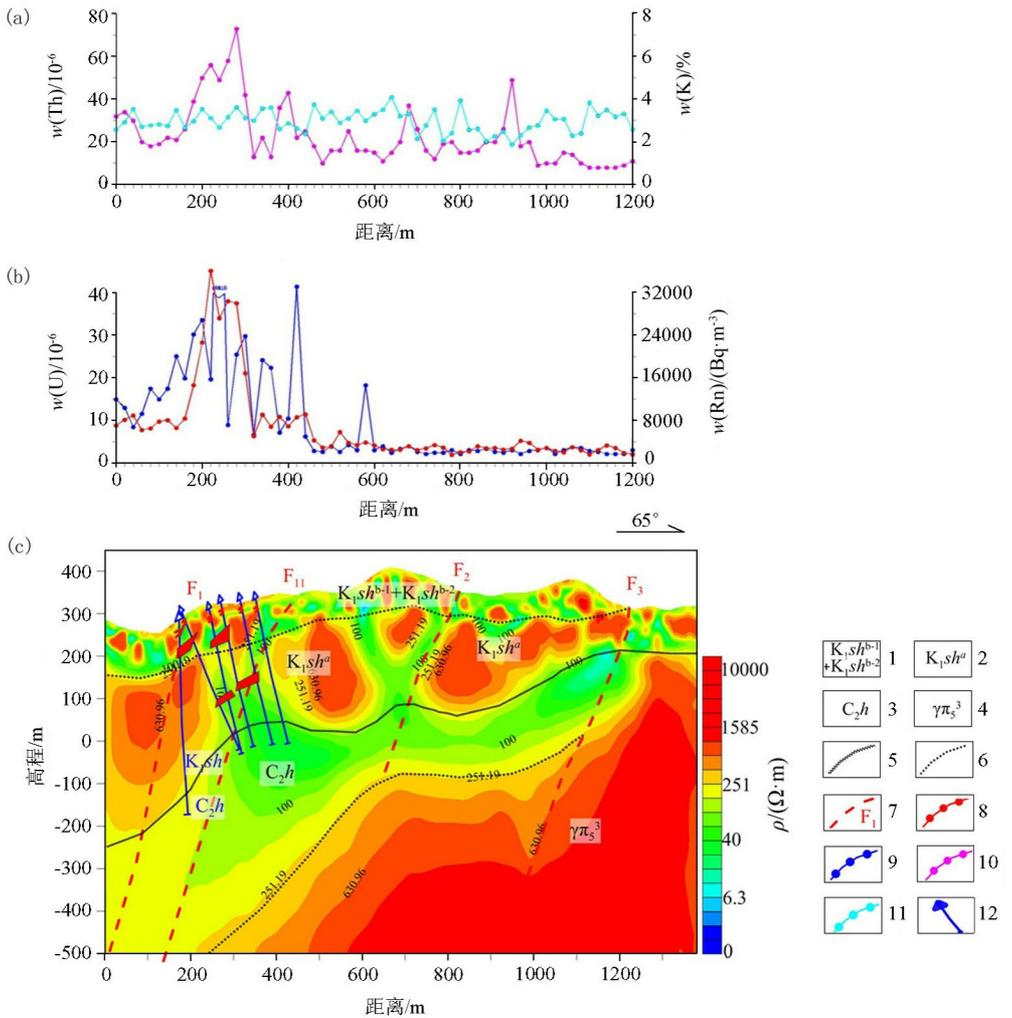
+K1+Rn2 复合异常晕的 AMT 测线 G16Y04 线和地面伽马能谱、土壤氡测量线 L05 线,结合收集的钻孔资料来做简单的分析。地面伽马能谱和土壤氡测量测线完全重合,编号 L05,线长 1 200 m,与 G16Y04 线 0~1 200 m 完全重合。

由 L05 线 U、K、Th 含量及 Rn 浓度剖面 and G16Y04 线反演电阻率断面综合解释图(图 8)可见, U1+K1+Rn2 复合异常晕在 10~23 号点浓集程度最高,U 含量最大值约 45×10^{-6} ,K 含量最大值约 8% 左右,Rn 浓度最大值约 33 000 Bq/m³,均达到异常晕的标准,显示出较好的相关性。

在相同位置的 AMT 断面图中发育赋矿岩层石帽山群,该区段的石帽山群发育一小型背斜,为铀矿的富集提供了空间,存在容矿构造,且对应位置发育有断裂 F_1 和 F_{11} ,这两条断裂为控矿、导矿构造。

U、K、Rn 复合异常晕对浅部及深部含矿信息具

为分析综合物探方法的应用效果,选择穿过 U1



1—石帽山群凝灰质砂岩;2—石帽山群安山岩;3—黄龙组;4—花岗斑岩;5—推断不整合接触界线;6—推断岩性接触界线;7—推断断裂及编号;8—铀含量曲线;9—氡浓度曲线;10—钾含量曲线;11—钍含量曲线;12—钻孔
 1—tuffaceous sandstone of Shimaoshan group; 2—andesite of Shimaoshan group; 3—Huanglong formation; 4—granite porphyry; 5—inferred unconformity contact boundary; 6—inferred lithology contact boundary; 7—inferred fault and number; 8—uranium content curve; 9—radon concentration curve; 10—potassium content curve; 11—thorium content curve; 12—borehole

图8 L05线U、K、Th、Rn浓度剖面(a)(b)和G16Y04线反演电阻率及推断解释断面(c)
 Fig.8 Comprehensive interpretation map of U, K, Th, Rn concentration profile of line L05 (a) (b) and inversion resistivity profile of line G16Y04 (c)

有一定的指示作用,能快速圈定铀成矿的远景地段,AMT测量在攻深找盲阶段具有较好的应用效果。本次综合测量中,U1+K1+Rn2复合异常晕所在平面位置,结合AMT断面图推断的控矿断裂构造古石背断裂及储矿的低阻空间,是推测的成矿最有利区段。该区段施工了6个钻孔,海拔约150~300m位置揭露的岩性以石帽山群凝灰质砂岩为主,其中4个钻孔岩石破碎、裂隙发育,揭露到铀矿体;海拔约0~150m位置揭露的岩性以石帽山群安山岩为主,其中4个钻孔岩石破碎、裂隙发育,揭露到铀矿体;钻孔深部揭露到黄龙组砂砾岩。该有利区段和钻孔中

揭露的铀矿体位置大致吻合,证实了以土壤氡、地面伽马能谱以及AMT测量相结合的方法在火山岩类型的铀矿勘查中具有很好的应用效果。

6 结论

通过综合物探研究工作得出了以下几点结论,

- 1) 受古石背断裂和洋头里断裂控制,研究区中部 $FU < 0$, 处于淋失状态;东部和西部 $FU > 0$, 处于叠加富集期,富集区呈条带状分布。
- 2) 铀矿主要赋存的石帽山群在研究区广泛发

育,主要分布在浅部,由西向东呈阶梯状厚度递减,受断裂 F₁、F₁₁、F₂ 和 F₃ 控制,厚度 30~580 m。

3) 建立了研究区的找矿标志,矿体多分布于 FU>0 的铀叠加富集区,表现为 U、K、Rn 的异常复合区,且浓集程度高,分布于石帽山群岩层中,受断裂控制明显,岩石电阻率表现为相对低阻特征,本次圈定的 U1+K1+Rn2、U2+Rn1 异常复合区浓集程度高,且其分布受导矿、含矿断裂古石背断裂的控制明显,具有较好的成矿前景。

4) 以土壤氡、地面伽马能谱以及 AMT 测量相结合的方法在火山岩类型的铀矿勘查中具有很好的应用效果。

参考文献 (References) :

[1] 林东燕,陈郑辉.福建上杭拉分盆地与紫金山铜金矿床成矿关系. [J].西安科技大学学报,2011,31(4):438-441.
Lin D Y, Chen Z H. Metallogenic relationship between Shanghang pull apart basin and Zijinshan copper gold deposit, Fujian Province[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology. 2011, 31(4): 438-441.

[2] 王善雄,林东燕.福建中西部断裂活动与断陷盆地演化的初步研究——以上杭盆地为例[J].福建地震,1998,14(4):37-39.
Wang S X, Lin D Y. A preliminary study on the fault activity and the evolution of fault basin in the central and Western Fujian Province[J]. Fujian Earthquake, 1998, 14(4): 37-39.

[3] 潘天望,袁远,吕勇,等.福建紫金山矿田早白垩世以来构造演化 and 成岩成矿时空格架[J].地质力学学报,2019,25(1):61-76.
Pan T W, Yuan Y, Lyu Y, et al. The early-cretaceous tectonic evolution and the spatial-temporal framework of magmatism-mineralization in Zijinshan ore-field, Fujian province[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(1): 61-76.

[4] 曹秋义,山亚,张恩,等.地面伽马能谱测量在铀矿找矿中的应用研究——以黑龙江省嘉荫县磨石山地区为例[J].物探与化探,2016,40(4):701-704.
Cao Q Y, Shan Y, Zhang E, et al. Application of ground gamma spectrometry measurements of uranium prospecting[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(4): 701-704.

[5] 杜化宇,李晓禄,伍显红.放射性测量方法在马鬃山地区铀金找矿中的应用效果[J].物探与化探,2018,42(4):697-702.
Du H Y, Li X L, Wu X H. The effect of radioactive measurement for uranium and gold prospecting in Mazong Mountain area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 697-702.

[6] 高峰,张寿庭,邹灏,等.地面伽马能谱测量在内蒙古林西地区萤石矿找矿中的应用[J].物探与化探,2013,37(2):206-211.
Gao F, Zhang S T, Zou H, et al. The application of field gamma ray spectrometry to the prospecting for fluorite deposits in LingXi area of inner Mongolia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 42(4): 206-211.

[7] 康贤,苟润祥,李耕.地面伽马能谱测量寻找盐湖型钾盐矿的应用研究[J].铀矿地质,2005,21(1):45-51.
Kang X, Gou R X, Li G. Application of ground gamma-ray spectrometric survey to prospecting for salt lake-type potash deposits[J]. Uranium Geology, 2005, 21(1): 45-51.

[8] 刘菁华,王祝文,田钢,等.地面伽马能谱测量在浅覆盖区地质填图中的应用[J].地质与勘探,2003,39(2):61-64.
Liu J H, Wang Z W, Tian G, et al. Application of ground gamma-spectrometry in geological mapping in shallow overburden areas[J]. Geology and Exploration, 2003, 39(2): 61-64.

[9] 叶益信,邓居智,方根显.高频大地电磁测深(EH-4)在热储构造勘查中的试验研究——以抚州地热区为例[J].地质与勘探,2011,47(4):649-653.
Ye Y X, Deng J Z, Fang G X. The test research of high frequency magnetotelluric sounding to reservoir structure survey: taking the Fuzhou geothermal area in Jiangxi province as an example[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4): 649-653.

[10] 席振铎,冯万杰,李瑞雪,等.低阻覆盖层对高频大地电磁测深的影响[J].地质与勘探,2011,47(4):673-678.
Xi Z Z, Feng W J, Li R X, et al. Effect of a low-resistivity cover on high-frequency magnetotelluric sounding[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4): 673-678.

[11] 王斌,陈孝强,樊战军,等. EH-4 连续电导率仪在陕西省镇安县金龙山矿区控矿构造研究中的应用[J].地质与勘探,2014,50(3):564-571.
Wang B, Chen X Q, Fan Z J, et al. Application of EH-4 continuous conductivitymeter to the study of ore-controlling structures in the Jinlongshan gold deposit of Zhen' ancountry, Shaanxi Province[J]. Geology and Exploration, 2014, 50(3): 564-571.

[12] 谭红艳,吕骏超,刘桂香,等. EH-4 音频大地电磁测深方法在鄂东南地区寻找隐伏矿体的应用[J].地质与勘探,2011,47(6):1133-1141.
Tan H Y, Lyu J C, Liu G X, et al. Application of the EH-4 audio-frequency magnetotelluric method to search for concealed ore bodies in southeastern Hubei Province[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(6): 1133-1141.

[13] 柳建新,童孝忠,程云涛,等.有效视电阻率在音频大地测量数据二维反演中的应用[J].地质与勘探,2008,44(3):56-59.
Liu J X, Tong X Z, Cheng Y T, et al. Application of effective apparent resistivity in two-dimensional inversion of EH-4 data[J]. Geology and Exploration, 2008, 44(3): 56-59.

[14] 张作伦,曾庆,刘建明,等. GDP-32II/EH-4 在深部成矿预测中的应用[J].地质与勘探,2010,46(3):470-475.
Zhang Z L, Zeng Q, Liu J M, et al. Application of GDP-32II and EH-4 to prediction of mineralization at depth[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(3): 470-475.

[15] 王少怀,裴荣富,曾宪辉,等.再论紫金山矿田成矿系列与成矿模式[J].地质学报,2009,83(2):145-155.
Wang S H, Pei R F, Zeng X H, et al. Further discussion on metallogenic series and metallogenic model of Zijinshan ore field[J]. Journal of Geology, 2009, 83(2): 145-155.

The application of comprehensive geophysical method to the exploration of uranium deposits in the paleo-Shibei area of Shanghang Basin

LI Ying-Bin^{1,2}, XIE Ming-Hong^{1,2}, ZHANG Zhan-Bin^{1,2}, LI Yi^{1,2}, WEI Bin^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China; 2. Key Laboratory of Uranium Resources Geophysical Exploration Technology, China Nuclear Industry Group Company, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: The paleo-Shibei area has a good geological background of uranium mineralization, and some mineralization spots and uranium anomalies have been found. The previous work was mainly focused on the surrounding and shallow parts of the mineralization spots, and the evaluation of the overall metallogenic environment and the understanding of the deep metallogenic conditions in the study area were insufficient. The authors briefly introduced the working methods of soil radon, ground gamma energy spectrum and audio frequency magnetotelluric survey, analyzed the uranium metallogenic environment in the study area by comprehensive geophysical survey, delineated the approximate position of uranium ore anomaly on the surface by carrying out soil radon and ground gamma energy spectrum survey, and found the paleo-rock back of ore-controlling fault by carrying out audio frequency magnetotelluric survey (AMT). The characteristics of the development of the fault and ore-controlling strata of Shimaoshan Group were determined, and the inferred interpretation data were verified by drilling, which provides a reference for the exploration of this type of uranium deposits.

Key words: AMT; ground gamma spectrum; soil radon; paleo-Shibei area; uranium exploration

(本文编辑:王萌)