

doi: 10.12029/gc20190315

杨海, 赵廷严, 李诗珺, 贾志业, 金久强, 梁秀娟. 2019. 秦岭华阳川地区航空伽马能谱异常特征及铀找矿方向[J]. 中国地质, 46(3): 651-661.
Yang Hai, Zhao Tingyan, Li Shijun, Jia Zhiye, Jin Jiuqiang, Liang Xiujuan. 2019. Anomaly characteristics of airborne gamma-ray spectrometric survey and uranium prospecting direction in Huayangchuan, Qinling[J]. Geology in China, 46(3): 651-661(in Chinese with English abstract).

秦岭华阳川地区航空伽马能谱异常特征及铀找矿方向

杨海^{1,2}, 赵廷严¹, 李诗珺¹, 贾志业¹, 金久强¹, 梁秀娟¹

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083)

摘要: 华阳川铀钼铅矿床是北秦岭造山带内一种类型特殊的铀多金属矿床。为了实现在外围快速找矿的目的, 在矿床及其周边开展了 1:1 万高精度航空磁放测量, 获得高精度的航空放射性数据, 通过对航放数据的解释, 对下一步找矿勘探工作的部署有重要意义。通过对宏观上放射性元素的分布特征的研究, 认为铀、钾异常分布特征相似, 在测区西部有大面积分布, 东部无成规模异常, 钍异常在测区中部形成东西向异常带, 与韧性剪切带的位置一致。铀异常有明显受北西向和北东向两组断裂控制, 且在华阳川断裂北东盘异常面积大, 强度高, 但南西盘太古宙地层却无明显铀异常。本次研究计算了钍钾比、钍铀比、铀钾比、古铀含量、活性铀含量等参数, 掌握了元素在不同地层单元的迁移富集规律。根据航空放射性异常, 开展地面验证工作, 圈定 3 条铀矿化带, 达到了快速找矿的目的, 对铀矿等战略性矿产的成矿规律研究及找矿勘查有积极意义。

关键词: 航空伽马能谱; 铀矿; 北秦岭; 异常特征

中图分类号: P631.2'23 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)03-0651-11

Anomaly characteristics of airborne gamma-ray spectrometric survey and uranium prospecting direction in Huayangchuan, Qinling

YANG Hai^{1,2}, ZHAO Tingyan¹, LI Shijun¹, JIA Zhiye¹, JIN Jiuqiang¹, LIANG Xiujuan¹

(1. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: The Huayangchuan uranium-niobium-lead ore deposit is a unique type of uranium polymetallic deposit in North Qinling orogenic belt. For the purpose of rapid mineral exploration, 1:10000 airborne magnetic and gamma-ray spectrometric measurement was conducted in the peripheral area to obtain high-precision airborne radioactive data. The explanation of these data is of great significance to the deployment of future exploration work. The distribution of radioactive elements shows that potassium and uranium anomalies are similarly located in the western part of the survey area, but there are no anomalies in the east. Thorium anomalies have formed an EW-trending anomaly belt at the center of the survey area, which is consistent with the ductile shear

收稿日期: 2018-03-26; 改回日期: 2018-09-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0602200, 2017YFC0602205)与中国地质调查项目(202012000000180102)与自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室航遥青年创新基金(2016YFL05)联合资助。

作者简介: 杨海, 男, 1987 年生, 工程师, 从事航空地球物理勘查及综合解释工作; E-mail: yanghai@agrs.cn。

通讯作者: 赵廷严, 男, 1984 年生, 工程师, 从事航空物探数据综合解释工作; E-mail: zhaotingyan@agrs.cn。

zone. The uranium anomalies are controlled by NW- and NE-trending faults. They are obviously distributed in the northeast plate with large area and high anomaly intensity, but there are no anomalies in Archean metamorphic rocks of southwest plate. The ratios of Th/K, Th/U and U/K, original U and active U were calculated in this study to understand the migration and enrichment of radioactive elements in different strata. According to the airborne gamma-ray spectrometry anomalies, ground verification work delineated three uranium mineralization zones, thus achieving the purpose of rapid mineral exploration. The result obtained by the authors can play a guiding role in the study of ore-forming process and the prospecting for uranium minerals and other strategic minerals.

Key words: airborne gamma-ray spectrometry; uranium ore deposit; North Qinling; anomaly characteristics

About the first author: YANG Hai, male, born in 1987, engineer, majors in the aero geophysical survey and interpretation; E-mail: yanghai@agrs.cn.

About the corresponding author: ZHAO Tingyan, male, born in 1984, engineer, majors in the aero geophysical data processing and interpretation; E-mail: zhaotingyan@agrs.cn.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program (No. 2017YFC0602200, No. 2017YFC0602205) and China Geological Survey (No. 20201200000180102) and Project from Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural Resources (No. 2016YFL05).

1 引言

近年来,中国确定24种矿产为战略性矿产并加强了对其找矿勘查力度,全力支持中国能源资源安全保障。铀矿作为地壳中极稀有的战略性金属矿产,引起了广大地质工作者的关注,在鄂尔多斯盆地、二连盆地、松辽盆地等地区取得了新的突破(金若时等,2017;王思力等,2018;赵岳等,2018)。北秦岭华阳川铀钍铅矿床具有类型独特、大矿量、多矿种、易开采、潜力大的特点,自20世纪60年代起,已有大量的学者进行了地面调查和研究工作(郭威等,2008;王林均等,2011;高成等,2013;惠小朝,2014,2015,2016;何升等,2016)。但由于多矿种复合叠加成矿,后期变形复杂,碳酸岩脉成因不明等因素导致矿床成因有较大的争议,给后期勘探工作带来了较大的难度。并且,矿区外围地形复杂,切割较深,植被覆盖较厚,地面勘探工作开展难度较大。航空伽马能谱测量具有快速高效、不受地形限制的特点,在铀矿的找矿勘探有非常广泛的应用(Asfahani et al., 2008, 2012;柯丹等,2009;车永飞,2015; Maacha et al., 2017; Youssef et al., 2017; Elkhadragey et al., 2017)。本次研究采用航空伽马能谱测量,历时一个月,完成普查面积约460 km²,旨在通过大比例尺的航空伽马能谱测量技术,迅速锁定外围找矿靶区。

2 地质概况

研究区大地构造位置位于华北地块南缘之太

华断隆(图1)。太华断隆北以秦岭山前活动断裂(太要断裂)为界,南以小河断裂、青岗坪—金堆城断裂及太古宙TTG片麻岩套与长城纪高山河组不整合面为界。区内出露的太古宙太华岩群及其TTG片麻岩套、古元古代铁铜沟组具有典型的变质结晶基底特征。印支—燕山期的构造—热事件在该区表现强烈,导致碱性—碳酸岩和中酸性—酸性岩浆侵入,伴随着强烈的滑脱及推覆构造活动。

3 岩矿石物性特征

掌握测区不同类型岩(矿)石放射性特征是进行航放资料推断解释的前提条件,本次研究采用GR-320伽马能谱仪实测岩(矿)石物性点80处,经过统计分析,北秦岭华阳川地区各类岩(矿)石放射性特征规律如下:

(1)测区中部主要出露太古宙TTG片麻岩套,岩性主要为黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩和花岗片麻岩。该套地层总体无放射性异常,K元素含量为 $3.0 \times 10^{-2} \sim 7.3 \times 10^{-2}$,平均值为 4.1×10^{-2} ;U元素含量为 $1.1 \times 10^{-6} \sim 7.7 \times 10^{-6}$,平均值为 3.3×10^{-6} ;Th元素含量 $6.4 \times 10^{-6} \sim 69.0 \times 10^{-6}$,平均值为 24.3×10^{-6} ;但局部地区,由于地层破碎,沿裂隙侵入大量碳酸岩脉,使地层放射性元素含量升高,K元素含量为 $3.4 \times 10^{-2} \sim 7.8 \times 10^{-2}$,平均值为 4.8×10^{-2} ;U元素含量为 $12.8 \times 10^{-6} \sim 112.0 \times 10^{-6}$,平均值为 44.4×10^{-6} ;Th元素含量为 $19.6 \times 10^{-6} \sim 98.6 \times 10^{-6}$,平均值为 35.0×10^{-6} 。

(2)金堆城—黄龙铺一带为该区域主要的钼矿

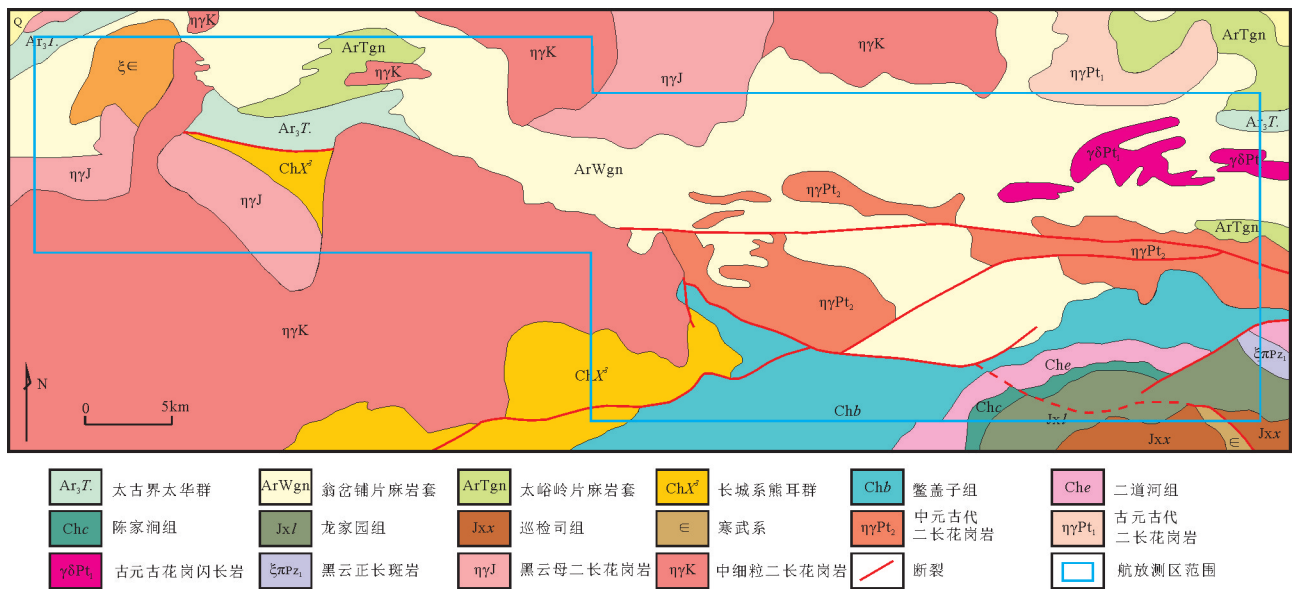


图1 北秦岭华阳川地区简化地质图(据陕西省地质调查院,2008修改^①)
 Fig.1 Simplified geological map of Huayangchuan, North Qinling (modified from reference^①)

矿集区,主要含矿层位为长城系熊耳群,岩性为一套中基性和中酸性双峰火山岩夹陆源碎屑与火山碎屑所组成的裂谷型火山-沉积岩系,该套地层无放射性异常,K元素含量为 $2.2 \times 10^{-2} \sim 6.7 \times 10^{-2}$,平均值为 4.7×10^{-2} ;U元素含量为 $1.5 \times 10^{-6} \sim 4.7 \times 10^{-6}$,平均值为 2.9×10^{-6} ;Th元素含量 $5.6 \times 10^{-6} \sim 17.5 \times 10^{-6}$,平均值为 10.6×10^{-6} 。但该套地层中局部穿插了大量的碳酸岩脉,具有较高的放射性元素异常,与钼矿区的位置十分吻合,K元素含量为 $2.0 \times 10^{-2} \sim 9.4 \times 10^{-2}$,平均值为 5.1×10^{-2} ;U元素含量为 $27.1 \times 10^{-6} \sim 50.6 \times 10^{-6}$,平均值为 36.3×10^{-6} ;Th元素含量 $10.2 \times 10^{-6} \sim 17.3 \times 10^{-6}$,平均值为 15.2×10^{-6} 。

(3) 蓟县系高山河岩群和洛南群主要分布在测区东南部,出露地层为鳌盖子组、二道河组、陈家涧组和龙家园组,岩性主要为石英砂岩、板岩、千枚岩和白云岩,K元素含量为 $0.2 \times 10^{-2} \sim 10.8 \times 10^{-2}$,平均值为 4.8×10^{-2} ;U元素含量为 $0.7 \times 10^{-6} \sim 10.7 \times 10^{-6}$,平均值为 4.9×10^{-6} ;Th元素含量 $1.8 \times 10^{-6} \sim 29.3 \times 10^{-6}$,平均值为 15.2×10^{-6} 。

(4) 华山岩体K元素含量为 $3.5 \times 10^{-2} \sim 6.7 \times 10^{-2}$,平均值为 5.1×10^{-2} ;U元素含量为 $3.3 \times 10^{-6} \sim 19.3 \times 10^{-6}$,平均值为 7.3×10^{-6} ;Th元素含量为 $19.1 \times 10^{-6} \sim 33.8 \times 10^{-6}$,平均值为 20.8×10^{-6} 。老牛山岩体K元素

含量为 $4.6 \times 10^{-2} \sim 6.1 \times 10^{-2}$,平均值为 5.3×10^{-2} ;U元素含量为 $1.8 \times 10^{-6} \sim 13.0 \times 10^{-6}$,平均值为 5.4×10^{-6} ;Th元素含量为 $5.8 \times 10^{-6} \sim 29.0 \times 10^{-6}$,平均值为 18.8×10^{-6} 。

(5) 测量3处含金石英脉放射性元素含量,远观韧性剪切带的潼关金矿矿石K元素含量为 3.0×10^{-2} ,U元素含量为 1.5×10^{-6} ,Th元素含量为 19.6×10^{-6} ;而韧性剪切带上的火龙湾金矿K元素含量为 $4.9 \times 10^{-2} \sim 5.4 \times 10^{-2}$,U元素含量为 $15.8 \times 10^{-6} \sim 17.6 \times 10^{-6}$,Th元素含量为 $26.7 \times 10^{-6} \sim 28.7 \times 10^{-6}$ 。

(6) 煌斑岩脉风化强烈,十分破碎,见大量碳酸岩脉穿插其中,U、Th元素含量较高,U元素含量为 $68.6 \times 10^{-6} \sim 88.5 \times 10^{-6}$ 。

(7) 含铀碳酸岩脉U元素含量均较高,K、Th元素变化较大,U元素含量为 $27.1 \times 10^{-6} \sim 129.4 \times 10^{-6}$,平均值为 67.4×10^{-6} ;K元素含量为 $1.9 \times 10^{-2} \sim 8.3 \times 10^{-2}$,平均值为 5.4×10^{-2} ;Th元素含量为 $17.4 \times 10^{-6} \sim 55.3 \times 10^{-6}$,平均值为 31.1×10^{-6} 。

(8) 对上河钼矿和下河银矿的尾矿坝的放射性进行了测定,矿石大都遭受了较强的热液作用,U含量均值为 26.98×10^{-6} 。华阳乡附近土壤中也具有较高的U元素含量,U元素含量均值为 112.60×10^{-6} 。

综上所述,铀异常主要是由侵入地层的碳酸岩脉引起,并没有严格的地层专属性。

4 航空伽马能谱异常特征

对全区不同地层的放射性元素含量进行了系统的统计,总计数率为 19.17 Ur ,钾含量为 3.09×10^{-2} (地壳克拉克值 2.04×10^{-2}),铀含量为 4.10×10^{-6} (地壳克拉克值 1.70×10^{-6}),钍含量为 15.41×10^{-6} (地壳克拉克值 5.8×10^{-6}),铀/钍为0.29,铀/钾为 $1.38 \times$

10^{-4} ,钍/钾为 4.86×10^{-4} 。全区测量结果显示,铀含量和钍含量明显高于地壳克拉克值,显示了测区富钍、铀的特点(图2~图5)。

4.1 总道含量特征

航放总道含量可反映不同岩石层体总体放射性强弱。由图2可见,华阳川地区总体含有较高的放射性背景,呈东西向分布,高异常区主要位于华

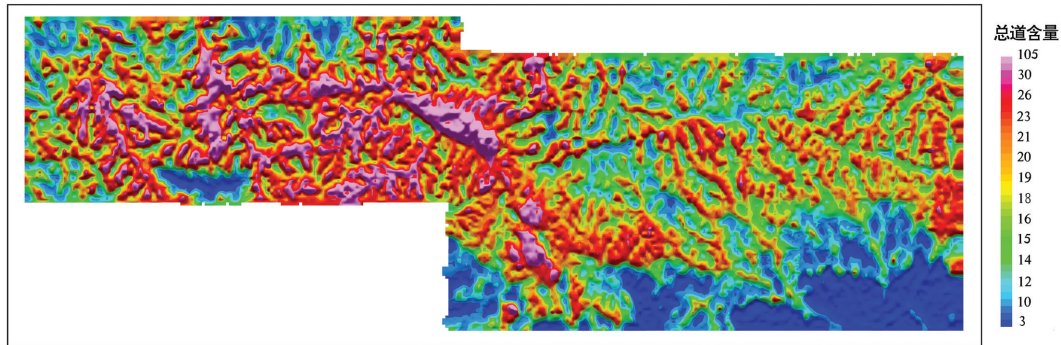


图2 华阳川地区总道含量影像图

Fig.2 Map of total channel content of gamma ray in Huayangchuan area

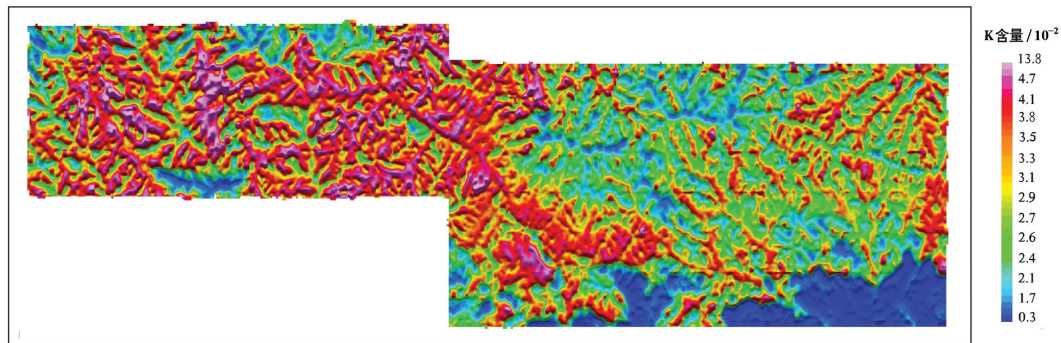


图3 华阳川地区钾含量影像图

Fig.3 Map of potassium channel content of gamma ray in Huayangchuan area

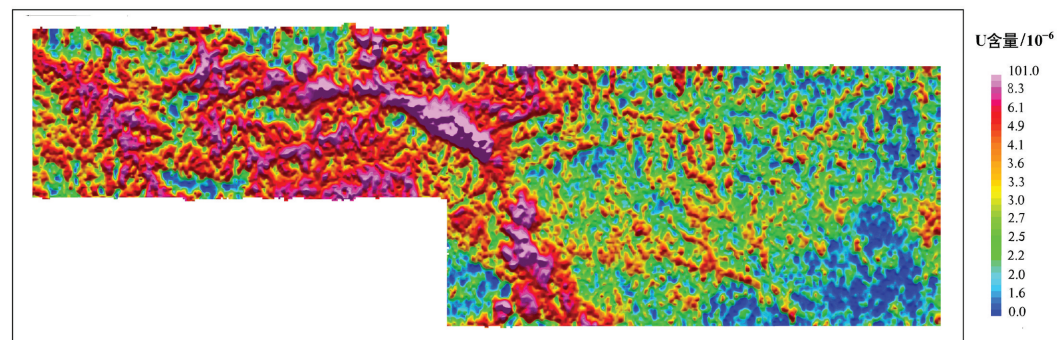


图4 华阳川地区铀含量影像图

Fig.4 Map of uranium channel content of gamma ray in Huayangchuan area

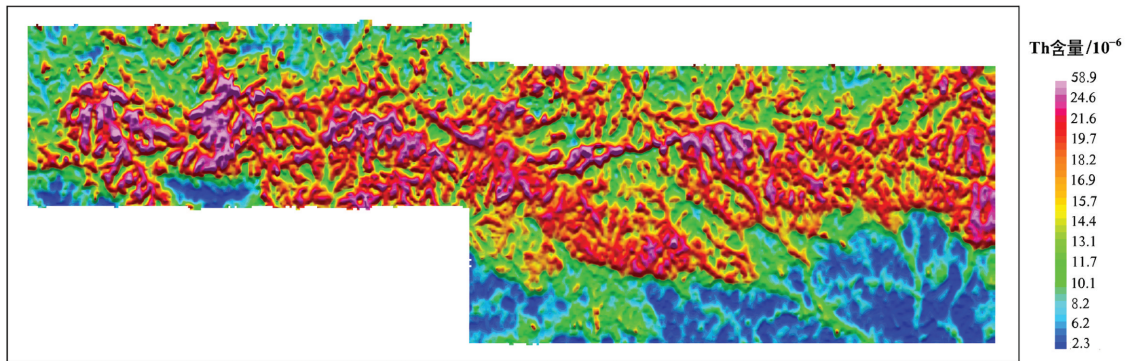


图5 华阳川地区钍含量影像图

Fig.5 Map of thorium channel content of gamma ray in Huayangchuan area

阳川、黄龙铺以西,弱异常主要位于测区南部。该放射性异常分布特征反映了测区两大构造单元的特点。南部为蓟县系的沉积建造,其放射性元素含量总体偏低,形成较明显的弱放射性异常。而北部为太古宙片麻岩,有多条韧性剪切带通过,岩石较破碎,周边侵入有大量燕山期中酸性侵入体,由于其放射性本底较高,形成区域性的高放射性背景。华阳川—黄龙铺以西有大量碳酸岩脉沿裂隙侵入老地层或岩体内部,导致放射性元素的局部富集,形成了有一定走向的高异常区。

4.2 铀、钍、钾含量区域分布特征

通过全区测量数据统计分析,可以看出总道含量与钾、钍的相关性较好,铀次之,相关系数分别为0.850, 0.790, 0.775;铀与钾、钍元素的相关性都较差,相关系数分别为0.473和0.329。这说明钾、钍的来源及迁移富集方式有相似之处,与铀元素不同。

钾、铀元素异常主要分布在测区西部,出露的地层主要为太古宙片麻岩以及中生代二长花岗岩,异常分布有沿水系呈枝杈状分布的特征,测区东部地层同为太古宙和元古宙的老地层,却不发育铀、钾异常,而钍元素高异常区在东部也有大面积分布,呈现出了贯穿测区东西的钍元素异常带。

在港子—华阳乡一带,铀元素异常规模及强度明显大于钾、钍异常。该地区主要出露太古宙片麻岩,野外露头观测岩石十分破碎,含有大量碳酸岩脉侵入,脉体发育的地区,通常具有较高的铀含量。铀异常有明显受构造控制的特征。在黄龙铺—文公岭地区,有明显的钾、铀异常,却没有钍异常。该区出露地层主要为长城系熊耳群蚀变安山岩和太古宙、元古宙变质岩,岩石破碎,碳酸岩脉

发育。

就异常形态来看,钾、铀异常形态较为相似,而与钍异常有较大差异,这一差异主要体现在测区东部出现了大面积的钍异常,而钾、铀并无异常。

5 航空伽马能谱数据计算

根据测量采集的铀、钍、钾元素含量计算了钍钾比、钍铀比、铀钾比、古铀含量、活性铀含量等参数,对研究测区地层沉积环境和铀元素富集规律有重要意义。

通常利用钍/钾比划分沉积相的一般规律(郭春杰等,2013):(1) $Th/K < 3$, 陆相沉积;(2) $3 < Th/K < 5$, 滨海海相或海陆过渡相沉积;(3) $Th/K > 5$, 海相沉积。本研究区主要出露太古宙、元古宙变质岩和中生代侵入岩,只在测区东南部出露元古宙蓟县系的沉积建造,该套建造主要有3种沉积相,二道河组为陆相沉积,鳖盖子组为滨海海相或海陆过渡相沉积,陈家涧组和龙家园组为海相沉积。总体来看,钍钾比较高的地区主要产于测区中部太古宙变质岩,与韧性剪切带有密切关系(图6)。

据B.B. 谢尔宾纳研究,钍与铀的比值一般是3.5~3.3,若某岩体的 $Th/U = 2 \sim 0.7$ (经常为0.7)时,一般形成单铀矿床; $Th/U = 2.5 \sim 4$, 形成铀钍混合矿床; $Th/U > 5 \sim 8$, 形成单钍矿床(王剑锋等,1986)。华阳川地区华山岩体和老牛山岩体的钍铀比值为0.5~204,平均3.7,这与火成岩中钍铀比值的范围较一致($Th/U = 3.5 \sim 4$)。而全区钍铀比值0.2~625,平均5.0,说明华阳川地区铀成矿以铀、钍伴生为主(图7)。通常也利用钍/铀比分析沉积环境与沉积相的一般规律(张松扬等,2006;阳孝法等,2010;

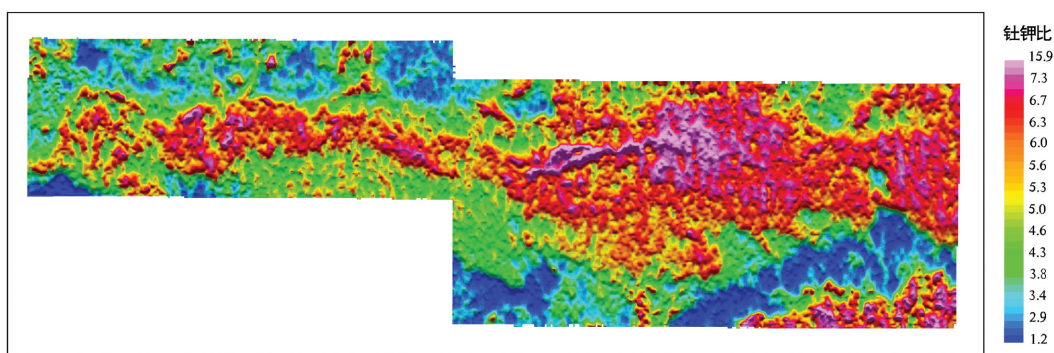


图6 北秦岭华阳川地区航放钍钾比值等值线图

Fig.6 Map of Th/K ratio in Huayangchuan area

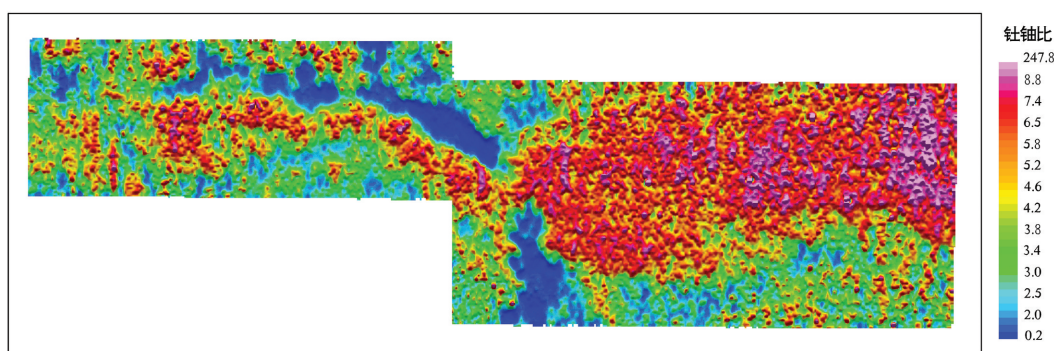


图7 北秦岭华阳川地区钍铀比值等值线图

Fig.7 Map of Th/U ratio in Huayangchuan area

郭春杰等, 2013): (1) $Th/U < 2$, 属还原环境, 海相沉积; (2) $2 < Th/U < 7$, 属于还原到氧化过渡环境, 滨海海相或海陆过渡相沉积; (3) $Th/U > 7$, 属氧化环境, 陆相沉积。本区东南部蓟县系地层均属于还原到氧化过渡环境。

在 20 世纪 80 年代, 就有印度科学家将 U/K 比值作为铀矿化存在标志, 通过不同岩石 U/K 比值的计算, 认为高铀钾比值通常指示铀矿化的存在。在华阳川和黄龙铺等地区(图 8), 铀钾比与地表已知矿化吻合较好。在后期找矿工作中, 应注意高铀钾比地区。

5.1 古铀含量分布规律

铀的化学性质较活泼, 在氧化环境下易迁移。航空伽马能谱测量的铀含量, 是地表岩土中的铀经化学迁移、机械迁移后残余的铀, 其铀含量的多少已不能代表原岩中铀的多少。原岩中铀的高低是铀矿成矿规律研究的重要参数, 因此确定原岩中铀含量意义重大。鉴于钍的化学性质较稳定, 钍的高

低往往代表原岩的放射性状态, 在内生作用中钍和铀密切伴生, 且具有正相关关系, 不同岩石中钍铀比值较为恒定。根据不同岩石中钍、铀元素的平均含量计算的 Th/U 比值如表 1 所示。因此, 可以根据现今钍含量高低及钍铀比值来恢复原始铀的多少, 从而达到间接推算岩石的古铀含量的目的。

根据测区不同地层单元的岩性, 按表 1 确定了计算采用的 Th/U 比值, 其中第四系所覆盖地层为太古宇、元古宙片麻岩, 因此, 按照其出露地层确定 Th/U 比值, 具体如表 2 所示。经古铀含量的计算, 编制了测区古铀含量影像图(图 9)。

古铀含量的分布特征清晰显示了测区地质单元界线, 寒武纪二长花岗岩、变质火山岩, 元古宙熊耳群蚀变火山岩, 元古宙和古生代沉积建造都具有很低的古铀含量; 中生代二长花岗岩、元古宙二长花岗岩和花岗伟晶岩具有较高的古铀含量; 太古宙片麻岩古铀含量普遍较高, 呈东西向分布, 与区域上韧性剪切带的位置较为吻合。韧性剪切带可能

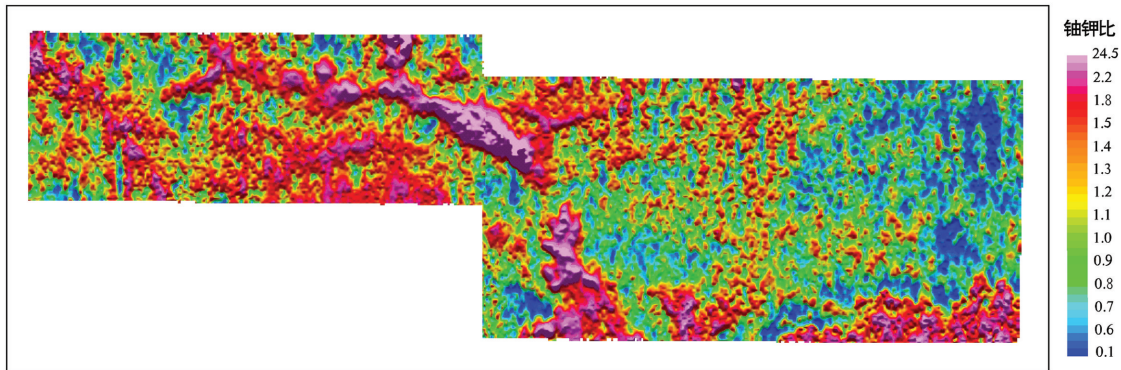


图8 北秦岭华阳川地区铀钾比值等值线图
Fig.8 Map of U/K ratio in Huayangchuan area

表1 不同种类岩石 Th/U 比值
Table1 Ratio of Th/U in different rocks

岩性	U 含量均值/ 10^{-6}	Th 含量均值/ 10^{-6}	Th/U
酸性喷出岩	4.1	11.9	2.9
酸性侵入岩	4.5	25.7	5.7
中性喷出岩	1.1	2.4	2.2
中性侵入岩	3.2	12.2	3.8
基性喷出岩	0.8	2.2	2.8
基性侵入岩	0.8	2.3	2.9
超基性岩	0.3	1.4	4.7
碱性似长石中性喷出岩	29.7	138.9	4.7
碱性似长石基性侵入岩	55.8	132.6	2.4
碱性似长石基性喷出岩	2.4	8.2	3.4
碱性似长石基性侵入岩	2.3	8.4	3.7
化学沉积岩	3.6	14.9	4.1
碳酸盐	2	1.3	0.7
碎屑沉积岩	4.8	12.4	2.6
变质火山岩	4	14.8	3.7
变质沉积岩	3	12	4.0

注:U、Th 含量均值引自程业勋等(2005)。

与铀元素的迁移富集有密切的关系。

5.2 活性铀含量分布规律

活性铀是古铀含量与实测铀含量的差值(图10),活性铀大于零,说明地层或岩体铀缺失、亏损。而活性铀小于零,说明地层或岩体有铀的迁入,铀有富集现象。

总体来看,测区东部铀元素以迁出为主,南部元古界、古生界沉积建造有少量铀迁入。西部有明显的铀元素迁入,以华阳川—黄龙铺一带最为明显。中生代侵入岩也有一定程度的铀元素迁入。测区太古代片麻岩有大面积的铀元素迁出,并且在

测区中部富集,形成弧形铀异常带,在华阳川一带异常规模最大。太古宙地层铀元素最大迁出量为 10.45×10^{-6} ,在华阳川地区最大迁入量为 94.38×10^{-6} 。

6 找矿远景预测

本区铀成矿主要与热液活动有关,在通过航放异常进行成矿预测的过程中主要考虑两个因素,一是断裂构造分布;二是地层中铀异常分布。通过航磁、航放异常的分布,对测区中的断裂构造进行了推断,作为本次远景区划的重要依据(图11)。

为了确定测区内铀成矿有利层体,将高于测区铀含量平均值的地层及岩体按铀含量值高低、偏度值大小、变异系数及峰度值大小进行了筛选排序统计,在测区15个地层统计单元中,铀含量高于测区平均值的地层有6个。在测区18个岩体统计单元中,铀含量高于测区平均值的岩体单元有10个。按照铀成矿有利地质层体确定原则,筛选出变异系数、偏度、峰度较大的地层及岩体,最终确定铀成矿有利地层有5套,铀成矿有利岩体有2类,见表3。

侯家村片麻岩(Ar_2H)、马驹峪片麻岩(Ar_2M)、大月坪片麻岩(Ar_2D)、长城系熊耳群($Chxe$)等老地层铀含量均高于测区平均值,且有较大的变异系数、偏度和峰度,说明铀元素在地层中的分布并不均匀,是铀成矿的有利层位。寒武系沉积建造主要岩性为砂岩、砾岩、灰岩。其铀含量也高于测区平均值,但变异系数较小(<0.6),通过野外物性测量,认为该套地层具有较低的放射性元素含量。因此,引起铀含量偏高的主要原因是零星出露的下伏长城系熊耳群($Chxe$)。该套地层中产有大量钼矿床,

表2 北秦岭华阳川地区不同岩性Th/U比值

Table 2 Th/U ratio of different rocks in Huangyangchuan area

地层代号	地层/岩性	Th/U	地层代号	地层/岩性	Th/U
$\gamma\pi$	花岗伟晶岩	5.7	Jxe	二道河组	2.6
$\gamma\delta$	花岗岩脉	5.7	Jxd	杜关组	4.1
γ	花岗岩脉	5.7	Jxch	陈家涧组	2.6
Qmv	变质火山岩	3.7	Jxb	鳖盖子组	2.6
Q	第四系	5.7	JS	侏罗纪二长花岗岩	5.7
Pt ₂ H	后沟二长花岗岩	5.7	JM	侏罗纪二长花岗岩	5.7
Pt ₂ G	甘沟二长花岗岩	5.7	JK	侏罗纪二长花岗岩	5.7
Ngn	宁家源片麻岩	5.7	Chxe	熊耳群	3.7
L γ p	花岗伟晶岩	5.7	Ar ₂ W	武家坪片麻岩	3.7
KY	白垩纪二长花岗岩	5.7	Ar ₂ th	太华岩群	3.7
KX	白垩纪二长花岗岩	5.7	Ar ₂ M	马驹峪片麻岩	3.7
KS	白垩纪二长花岗岩	5.7	Ar ₂ H	侯家村片麻岩	3.7
KH	白垩纪二长花岗岩	5.7	Ar ₂ D	大月坪片麻岩	3.7
KD	白垩纪二长花岗岩	5.7	Ar ₂ C	长沟口片麻岩	3.7
KC	白垩纪二长花岗岩	5.7	ϵ Q	寒武纪二长花岗岩	5.7
Jxx	巡检寺组	4.1	ϵ C	寒武纪二长花岗岩	5.7
Jxl	龙家园组	4.1	ϵ	寒武系	4.1

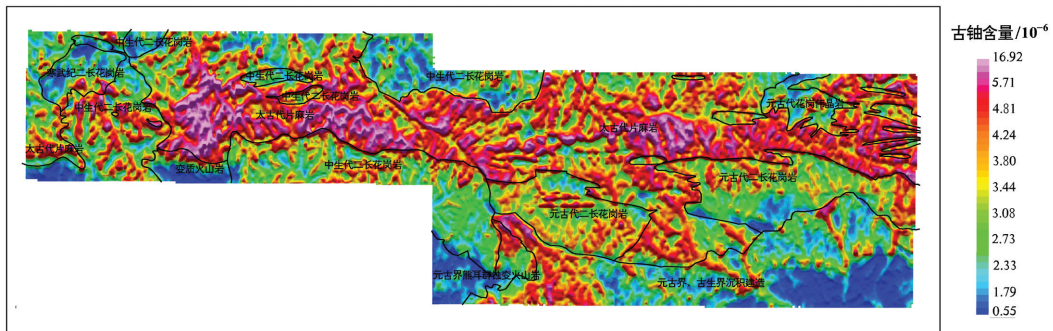


图9 华阳川地区古铀含量分布图
Fig.9 Distribution of ancient uranium in Huangyangchuan area

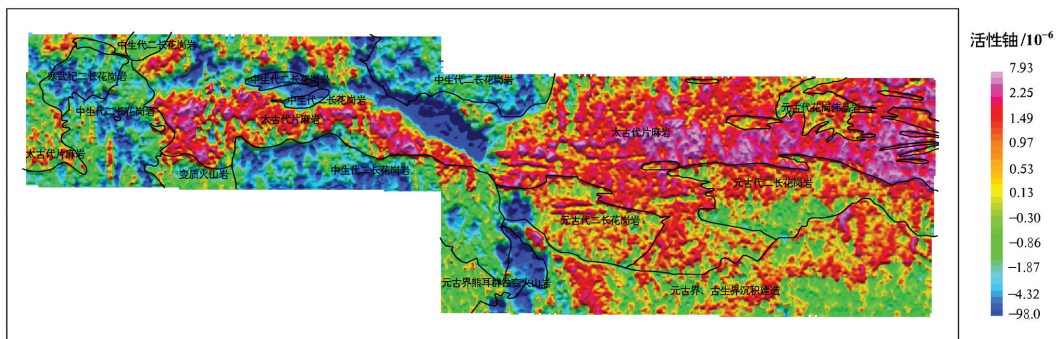


图10 华阳川地区活性铀含量分布图
Fig.10 Distribution of migrated uranium in Huangyangchuan area

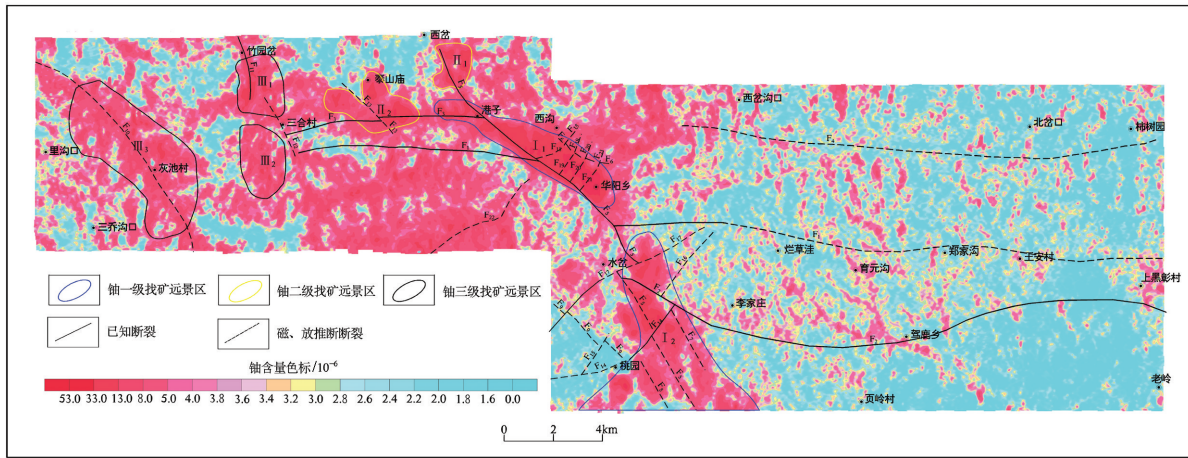


图 11 北秦岭华阳川地区铀成矿远景区划

Fig.11 Delineation of uranium metallogenic prospects in Huangyangchuan area

表 3 测区铀矿成矿有利地层、岩体放射性参数统计

Table 3 Statistics of favorable strata and intrusive rocks for uranium mineralization

分类	地层符号	地层/岩体	铀含量/ 10^{-6}	铀变异系数	铀偏度	铀峰度
铀成矿有利地层	Ar ₂ H	侯家村片麻岩	4.14	0.76	3.82	26.16
	Ar ₂ M	马驹峪片麻岩	6.79	1.07	1.59	1.48
	Ar ₂ D	大月坪片麻岩	5.29	1.26	3.42	14.17
	Chxe	熊耳群	4.96	1.06	2.25	6.30
	Q	第四系	12.91	1.16	2.65	7.24
铀成矿有利岩体	KY	白垩纪二长花岗岩	5.58	0.59	2.15	7.57
	KC	白垩纪二长花岗岩	4.71	0.68	4.34	40.65

具有明显的铀钼共生的现象。

本次参与统计的第四系沉积物主要位于华阳川乡一带,其平均铀含量高达 12.91×10^{-6} ,为测区最高,这与老地层风化产生的沉积物有密切关系。野外伽马能谱测量显示,华阳川乡以北土壤中铀含量为 $(101.3 \sim 123.9) \times 10^{-6}$,说明第四系覆盖地区风化、剥蚀及搬运等地表作用有利于铀矿化的揭示和次生富集。

本区有 10 个岩体单元的铀含量超过了平均值,以花岗岩脉最高 (6.41×10^{-6}) ,但变异系数、偏度、峰度都较低,是高放射性背景的岩体。其中 KC 和 KY 两个单元铀元素含量变化较大,若局部裂隙发育,有成矿的可能性。

根据推断的断裂和成矿有利地层,对测区内找矿有利地区进行了区划,共划分铀找矿远景区 7 个,其中一级找矿远景区 2 个,二级找矿远景区 2 个,三级找矿远景区 3 个,如图 11 所示。

7 结 论

航空伽马能谱测量以其快速、高效、不受地形限制的特点,可快速锁定异常位置,在寻找铀、钾盐、稀土等矿产时有非常广泛的应用。本次研究结果显示,在铁岔沟、冰凌沟地区存在明显的铀含量异常带,西安地质调查中心开展地面异常检查,在上述地区划分出 3 条铀矿异常带,上述 3 条铀矿异常带与航空伽马能谱铀含量异常分布范围一致,凸显了航空物探工作对地面工作的指导作用。本次研究,从宏观上对钾、铀、钍元素在不同地层单元中的分布特征进行了分析,获得了以下几点认识:

(1) 铀异常总体受北西向构造控制,局部异常长轴为北东向,华阳乡异常区、竹园岔—三合村异常区、灰池村异常区都呈北西向展布,局部叠加北东向异常带。这说明北西向区域断裂是主要的导矿通道,而热液在到达近地表时沿北东向的张裂隙

就位,形成了如此鲜明的控矿格局。

(2)铀异常分布西强东弱的趋势十分明显,华阳乡以东无成规模的铀异常出现,而西部有大规模的铀异常,并且随着华阳乡向西,远离转折端,铀异常强度逐渐减弱。

(3)铀异常产出的地层有太古宙片麻岩、元古宙熊耳群、元古宙甘沟群以及白垩纪二长花岗岩等,说明铀元素富集并无明显的地层专属性,铀矿化主要与热液活动有关。

(4)铀异常有明显沿华山岩体边部分布的趋势,尤其是侏罗纪赛华山单元(JS:K-Ar年龄181 Ma)、白垩纪雨家河单元(KY:100 Ma)、白垩纪葱岭单元(KC:100 Ma)3个岩体单元边部,而在老牛山岩体中铀异常主要在岩体内部呈团块状或北西向带状分布,且岩体局部还出现明显的铀亏损,显示了不同的岩石组合。

(5)测区东部太古宙片麻岩具有较高的钍含量和较低的铀含量,在内生作用中,铀、钍元素通常密切伴生,为何产生富钍亏铀的特征?计算结果显示东部老地层有较高的古铀含量并发生了后期的铀迁移作用。从构造上看该区是向西倾伏的背斜,其铀元素是否发生了后期大规模表生作用,还是遭受了碳酸岩热液的萃取作用,搞清楚铀元素的迁移方式,是该区找矿预测需要解决的问题。

注释

①陕西省地质调查院. 2008. 陕西省1:250000潼关县幅建造构造图.

References

Asfahani J, Al-Hent R, Aissa M. 2008. Aerial gamma spectrometric survey as a tool for evaluating the uranium remobilization degree: Case study from Al-Awabed area, Northern Palmyrides, Syria[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 66, 1262-1274.

Asfahani J, Al-Hent R, Aissa M. 2012. Radioactive and geological analysis of airborne gammas pectrometric data for locating favorable traps for uranium prospecting in the Syrian desert (Area-1), Syria[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 70: 2317-2327.

Che Yongfei, Zhang Yunlong, Zhao Yingjun, Lin Ziyu. 2015. Application of airborne spectrometry data to the exploration of calcrete-hosted uranium deposit in Yilgam Area Western Australia[J]. *Uranium Geology*, 31(1):44-51 (in Chinese with English abstract).

Chen Yexun, Wang Nanping, Hou Shengli. 2005. Nuclear Radiation Field and Radioactive Exploration[M]. Beijing: Geological

Publishing House, 384(in Chinese).

Elkhadragy A A, Ismail A A, Eltarras M M, Azzazy A A. 2017. Utilization of airborne gamma ray spectrometric data for radioactive mineral exploration of G.Abu Had —G.Umm Qaraf area, South Eastern Desert, Egypt[J]. *Nriag Journal of Astronomy and Geophysics*, 6, 148-161.

Gao Cheng, Kang Qingqing, Zhang Xiongmao, Chen Ximin, Hu Jinping. 2015. Uranium occurrences and carbonatite pertology in Huayangchuan[J]. *Shaanxi Geology*, 33(2):10-13 (in Chinese with English abstract).

Guo Chunjie, Wang Di, Wang Baojun. 2013. Application of natural gamma ray spectrometry in research of sedimentary [J]. *World Well Logging Technology*, (1):34-36 (in Chinese with English abstract).

Guo Wei, Zhou Dingwu, Ren Junfeng, Zhou Xiaohu, Sang Haiqing. 2008.Characteristics of the Huayangchuan ductile shear zones in the Xiao-qinling Mountains, Shaanxi, China, and its regional tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(6):823-828 (in Chinese with English abstract).

He Sheng, Li Ziyang, Hui Xiaochao, Guo Jian. 2016. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of biotite in Huayangchuan uranium-polymetallic deposit in Shanxi Province and its geological significance[J]. *Uranium Geology*, 32(3):159-164 (in Chinese with English abstract).

Hui Xiaochao. 2015. Research of Geochemical Characteristics during Uranium Polymetallic Mineralization Process in Huayangchuan, Shaanxi Province[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 1-146 (in Chinese with English abstract).

Hui Xiaochao, He Sheng. 2016. Mineralization characteristic of carbonatite Veins in Huangyangchuan U-polymetal deposit, Shanxi Province[J]. *Uranium Geology*, 32(2):93-98 (in Chinese with English abstract).

Hui Xiaochao, Li Ziyang, Feng Zhangsheng, Cheng Dejin. 2014. Research on the occurrence state of U in the Huayangchuan U-polymetallic deposit, Shaanxi Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 34(4):573-580 (in Chinese with English abstract).

Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Miao Peisen, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Hongliang, Li Yangfeng, Zhang Tianfu. 2017. Late Mesozoic continental basin "Red and Black beds" coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in northern China[J]. *Geology in China*, 44(2): 205-223 (in Chinese with English abstract).

Ke Dan, Han Shaoyang, Hou Huiqun, Zhao Dan. 2009. Aero-radioactive information extraction and integration for the exploration of granite-type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 25 (6):349-354 (in Chinese with English abstract).

Maacha Lhou, Jaffal Mohammed, Jarni Abdelmajid, Kchikach Azzouz, Mougina El Mostafa, Zouhair Mohamed, Ennaciri Aomar, Saddiqi Omar. 2017. A contribution of airborne magnetic, gamma ray spectrometric data in understanding the structure of the Central

- Jebilet Hercynian massif and implications for mining[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 134: 389–403.
- Wang Jianfeng. 1986. *Uranium Geochemistry Course*[M]. Beijing: Atom Energy Press, 1–572.
- Wang Linjun, Xu Cheng, Wu Min, Song Wenlei. 2011. A study of fluid inclusion from Huayangchuan Carbonatite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3):372–379(in Chinese with English abstract).
- Wang Sili, Nie Fengjun, Yan Zhaobin, He Naishuo, Zhang Yuanyuan, Zhang Pengfei. 2018. Lithologic characteristics and modes of occurrence of uranium of the target strata in the Nalinggou uranium deposit of Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 45(3): 573–590(in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaofa, Lin Changsong, Yang Haijun, Peng Li, Liu Jingyan, Xiao Tianjun, Tong Jianyu, Wang Haiping, Li Huanpu. 2010. Application of natural gamma ray spectrometry in analysis of Late Ordovician carbonate sequence stratigraphicanalysis in middle Tarim Basin [J]. *Oil and Gas Exploration*, 45(3):384–391 (in Chinese with English abstract).
- Youssef Mohamed A S, Sabra Mohamed Elsadek M, Abdeldayem Abdelaziz L, Masoud Alaa A, Mansour Salah A. 2017. Uranium migration and favourable sites of potential radioelement concentrations in Gabal Umm Hammad area, Central Eastern Desert, Egypt[J]. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6, 368–378.
- Yu Xuehui. 1992. Geological, petrol–mineralogical characteristics and origin of the carbonatites from Huayangchuan, Shaanxi Province[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 17(2):151–158(in Chinese with English abstract).
- Zhang Songyang, Fan Yiren, Li Huiyin. 2006. Karst carbonate reservoir division and contrast based on natural gamma ray spectrometry logging in Tahe Oilfield [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 30(6):35–41 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Xu Qiang, Liang Yeping, Zhao Hongsong, Tang Chaomiao, Zheng Cui. 2018. Uranium mineralization characteristics of Cretaceous periodand prospecting direction of the Hurenbuqi depression in Erlian basin, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 45 (1): 168–177(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 车永飞, 张云龙, 赵英俊, 林子瑜. 2015. 航空 γ 能谱测量数据在西澳伊尔岗地区钙结岩型铀矿勘查中的应用[J]. *铀矿地质*, 31(1): 44–51.
- 程业勋, 王南萍, 侯胜利. 2005. *核辐射场与放射性勘查*[M]. 北京: 地质出版社, 384.
- 高成, 康清清, 张熊猫, 陈希民, 胡进平. 2015. 华阳川碳酸岩岩石特征及铀矿赋存状态[J]. *陕西地质*, 33(2): 10–13.
- 郭春杰, 王迪, 王保军. 2013. 自然伽马能谱测井在沉积学中的应用研究[J]. *国外测井技术*, (1): 34–36.
- 郭威, 周鼎武, 任军锋, 周小虎, 桑海清. 2008. 陕西小秦岭华阳川韧性剪切带的特征及其区域构造意义[J]. *地质通报*, 27(6): 823–828.
- 何升, 李子颖, 惠小朝, 郭建. 2016. 陕西华阳川铀多金属矿床黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. *铀矿地质*, 32(3): 159–164.
- 惠小朝. 2015. 陕西省华阳川铀多金属成矿作用地球化学研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 1–146.
- 惠小朝, 李子颖, 冯张生, 程德进. 2014. 陕西华阳川铀多金属矿产铀赋存状态研究[J]. *矿物学报*, 34(4): 573–580.
- 惠小朝, 何升. 2016. 华阳川铀多金属矿床碳酸岩脉矿化特征[J]. *铀矿地质*, 32(2): 93–98.
- 金若时, 程银行, 李建国, 司马献章, 苗培森, 王少轶, 奥琮, 里宏亮, 李艳锋, 张天福. 2017. 中国北方晚中生代陆相盆地红–黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. *中国地质*, 44(2): 205–223.
- 柯丹, 韩绍阳, 侯惠群, 赵丹. 2009. 花岗岩型铀矿勘查中航空放信息的提取与综合[J]. *铀矿地质*, 25(6): 349–354.
- 王剑锋. 1986. *铀地球化学教程*[M]. 原子能出版社, 1–572.
- 王林均, 许成, 吴敏, 宋文磊. 2011. 华阳川碳酸岩流体包裹体研究[J]. *矿物学报*, 31(3): 372–379.
- 王思力, 聂逢君, 严兆彬, 何乃焯, 张媛媛, 张鹏飞. 2018. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床目的层岩石学及铀存在形式[J]. *中国地质*, 45 (3): 573–590.
- 阳孝法, 林畅松, 杨海军, 彭莉, 刘景彦, 肖天君, 佟建宇, 王海平, 李换浦. 2010. 自然伽马能谱在塔中地区晚奥陶世碳酸盐岩层序地层分析中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 45(3): 384–391.
- 喻学惠. 1992. 陕西华阳川碳酸岩地质学和岩石学特征及其成因初探[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 17(2): 151–158.
- 张松扬, 范宜仁, 李会银. 2006. 基于自然伽马能谱测井的岩溶型碳酸盐岩储层层位划分与对比[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 30(6): 35–41.
- 赵岳, 徐强, 梁叶萍, 赵红松, 唐朝苗, 郑翠. 2018. 内蒙古二连盆地呼仁布其凹陷白垩系铀矿化特征与找矿远景[J]. *中国地质*, 45(1): 168–177.