

# 南秦岭上高家庄航空物探异常地质成因和找矿潜力

朱宏伟<sup>1)</sup>, 朱卫平<sup>1)</sup>, 徐璐平<sup>1)</sup>, 米耀辉<sup>1)</sup>, 张迪硕<sup>1)</sup>, 李海疆<sup>2)</sup>

1) 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京, 100083; 2) 中国地质大学(北京), 北京, 100083

**内容提要:**为探索和改进综合航空物探深部找矿模式, 在南秦岭研究区最新航空数据基础上, 结合岩性、构造及周边矿化点等特征, 按一定条件优选出上高家庄磁、放综合异常进行重点研究。所选异常位于陕西省安康市石泉县北, 经地面磁力、 $\gamma$ 能谱、岩(矿)石物性等剖面测量及基础地质工作, 知异常东北侧主要岩性为变质砂岩, 西南侧多为云母石英片岩。铀元素放射性含量在两类岩性交界面的变质砂岩一侧最高, 地表测得的最高含量超过  $70 \times 10^{-6}$  eU。推测铀异常主要为变质砂岩造成, 磁异常由一定埋深的区域变质片岩(原岩为火山岩)引起。以样品鉴定的矿化迹象为佐证, 此处具有形成铁、铜、铀等矿产的前景。由空中数据优选异常, 进而有效聚焦至地面重点区域, 通过数据分析、实地测量、采样等验证手段, 探究异常成因, 是一种研究隐伏矿体, 圈定找矿远景区的高效工作模式。

**关键词:**南秦岭; 航放综合异常; 异常优选; 剖面测量; 隐伏矿体

自古以来, 人类对地表矿的勘探和开采一直是矿产开发的主要形式。随着我国经济的快速发展和产业升级, 对矿产资源的需求更为迫切, 但产于平坦地形或浅部的矿产已基本勘探殆尽, 故针对探寻隐伏矿床的理论研究及找矿预测方法是当前的重点。目前的研究重心必然要转向中西部地区、复杂地形的中高山区以及矿体埋深较大的地区。20世纪80年代开始, 我国逐步对隐伏矿床的成矿预测进行理论方法研究, 并在找矿实践中不断总结和发展。欧美国家主要从地质条件和成矿规律出发, 结合新思路、新技术、新方法对隐伏矿床进行有针对性的预测。目前的成矿预测主要是进行相似类比、寻找地质异常、构建矿床模式和成矿模型、总结成矿系统和成矿系列, 以及利用综合信息进行成矿预测等。在隐伏矿产成矿预测过程中, 地质学方法和地球物理及非常规方法相结合很有必要。今后还应在理论与方法间加强衔接和转化, 丰富成矿预测理论和勘查技术方法, 提高多源信息数据集成(程红军等, 2017)。

南秦岭地区位于一复合型、多次旋回的大陆造山带中, 长期受到地学界关注(张国伟等, 1987, 1995)。现普遍认为其是扬子板块与华北板块在多

期造山运动及构造热事件的共同作用结果, 引起区域内发生了一系列成矿作用(Zhang Wei et al., 2019)。航空物探方法具有效率高、单位成本低、受地貌条件限制小、大面积工作精确度比较均一等优势, 适合在地形条件较困难的地区快速完成工作, 在寻找多金属矿及放射性铀矿等勘探过程中有着广泛应用(Asfahani et al., 2008; Asfahani, 2018; Golynsky et al., 2013; Elkhadragy et al., 2017; Maacha et al., 2017; Dantas de Araújo et al., 2019)。结合构造岩浆活动背景、已知矿床(点)地质特征及其航空磁放异常特征、成矿环境等成矿条件的综合分析, 采用航空磁、放与成矿地质环境、地球化学背景等多源信息相结合的综合类比定性分析方法, 可以进行铁、铜、金、铀、铅锌等金属矿产资源找矿预测区的分析和圈定。

本文以2018年开展直升机磁、放测量工作的陕西省南秦岭洋县、宁陕县及周边为主要研究区, 以测量所得的1:5万高精度综合航空物探数据为基础, 经数据处理、信息提取等工作, 获得了丰富的航磁 $\Delta T$ 异常和航放异常等信息。在与已知矿点和异常的数据对比后, 证实综合航空物探所反映的异常定位准确, 信息可靠。综合航空磁、放数据显示的诸异常

注: 本文为国家重点研发计划课题(编号:2017YFC0602106, 2017YFC0602201)、中国地质调查项目(编号:121201203000160006)的成果。

收稿日期: 2020-06-04; 改回日期: 2020-12-10; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.01.002

作者简介: 朱宏伟, 男, 1984年生, 毕业于中国科学院研究生院, 理学博士, 自然地理学专业; 高级工程师, 主要从事航空地球物理与遥感综合解释研究; Email: zhuhongwei@mail.cgs.gov.cn。通讯作者: 朱卫平, 男, 1980年生, 毕业于中国地质大学(北京), 硕士, 构造地质学专业; 高级工程师, 主要从事航空地球物理地质解释研究; Email: 474538785@qq.com。

特点,结合构造特征、成矿地质条件等因素,再由野外踏勘、岩矿石物性实测,按给定原则对初步圈定出的异常进行优选。再对选定的上高家庄重点异常进行物探、化探、综合地质等剖面测量,探明异常成因,对航空磁、放异常反映的岩性、构造和局部异常与矿产之间关系等问题进行了综合研究,取得了新认识。本研究成果可为找矿远景区的圈定提供新的依据。

## 1 地质背景

研究区位于安康市石泉县北,地处陕西省东南,川、陕、鄂、渝四省市交界附近,南邻大巴山北麓,北靠秦岭主脉,汉江自西向东贯穿河谷盆地,地貌大致为“两山夹一川”(研究区范围及周边地质构造纲要如图1)。本地属亚热带气候区,雨量充沛,林木茂盛,物种多样,矿产、水力、生物、旅游资源丰富,还是国家“南水北调”中线工程主要水源地。区内地质构造复杂,属秦岭板块和扬子板块的交汇地带,成矿条件优越,矿产资源种类多种多样,已发现金属、非金属矿产多达65种,初步查明资源储量的矿产32种,矿产地700余处,矿点以上规模的矿产地300余处。其中金、汞、锑、铅、锌、重晶石、瓦板岩等存在大型矿床,在陕西省和全国位居前列的有汞矿、毒重石、瓦板岩、重晶石、锑矿、锌矿、珍稀矿泉水等(安康市国土资源局<sup>①</sup>,2003;高卫华,2007;张俊良等,2013)。在构造划分上,研究区属于北西西走向的秦岭微板块,即南秦岭构造带,夹峙于天水—丹凤—商南缝合带和文县—玛曲—勉县—略阳缝合带之间,是秦岭造山带的重要组成部分。其内部断裂发育,南北分别被华北板块和扬子板块所夹,构造演化经历原特提斯洋和古特提斯洋打开和闭合的过程(陈虹等,2014)。该区域在早古生代之前属扬子地块的北部陆缘区,但在晚古生代因勉略局限洋盆的打开,使其与扬子地块分离,故有别于其两侧的板块而独具特色。其突出特点是存在众多古老基底抬升的穹形构造,控制了内部的沉积古地理环境和构造变形。如以临潭—宕县—凤镇—山阳区域性深断裂为界,还可进一步划分为两个次级构造单元:南秦岭北部晚古生代裂陷带和南秦岭南部晚古生代隆升带(王梦玺等,2012;吴勘等,2015;王东升等,2016;田辉等,2017)。在成矿区带和成矿背景方面,研究区处于秦岭—大别造山带成矿省南秦岭成矿带和扬子成矿省北扬子成矿带北缘交汇处附近,分别由东西走向的秦岭构造带和北西走向的大巴山构造带复合交接组成,存在重要的铁、钒、铅—锌、金、汞、锑等多

金属含矿岩系,非金属矿产也较普遍。它是重要的多金属成矿区,有铁多金属及铀等放射性矿产成矿的地质条件和找矿潜力(任四清,2008;代军治等,2015,2016;高雅宁等,2016;王强等,2018;朱鹏飞等,2018;赵东红等,2019)。与其他成矿带的成矿模式相比,有其自身特点(周涛发等,2017)。

所优选的异常处于南秦岭造山带岛弧构造环境中,具有铁、金、铜、银、铀、锰、石墨等成矿条件,构造方向以近北西和北东向为主,其中北西、近东西向断裂构造发育,规模大,延伸远,磁放区域场特征明显,构成其附近区域的主体构造格架。其次为北东向断裂构造,规模一般,往往错动近北西走向断裂,为较晚期形成的断裂构造。铁、铜矿化与这两组断裂关系密切,它们基本上控制了成矿作用的范围,成为区域控矿的主要构造地质条件。区内已发现的矿床、矿点分布表明,基本具有沿北西、近东西和北东走向断裂构造带状展布的规律。上高家庄磁、放异常正处于上述两个不同走向断裂构造带的交汇部位,矿化现象更趋显著,对于寻找隐伏金属矿具有更好的前景。

## 2 异常优选

本次研究异常优选的原则:在详细分析航空物探综合测量数据的基础上,根据需要进行必要的处理,结合异常特征、成矿条件、以往工作程度等条件,从而初步筛选出有助于地质成因解释和有利于成矿的异常进行地质踏勘,这样可大大缩小关注范围。再综合踏勘结果,优选出重点异常,开展详细成因研究,可更好地有的放矢,提高工作效率。

初步筛选踏勘异常时重点留意了以下几种情况:①与研究区及周边已知典型矿床及矿点对比,具有相同或相似成矿地质环境和找矿标志,及在航空磁、放异常图上的形态、幅值、梯度及所处的地质构造特征类似的磁、放异常;②处于断裂构造发育、岩性出露相对较好及岩体分布区域的航空磁、放异常;③负磁背景场中的局部正磁异常,或孤立高值铀异常;④航空磁、放异常等值线平面图上为独立磁、放异常,异常剖面平面图上多条测线上均有显示,且峰值尖锐、梯度较陡;⑤化探元素异常区,一般具有Fe、Ti、V、Ni、U、Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo等元素异常显示的异常。

地质研究表明,矿床的形成和分布,总是与地壳运动的发生、发展和演化密切相关,与一定地质背景包括大地构造背景、沉积建造、岩浆活动、构造活动

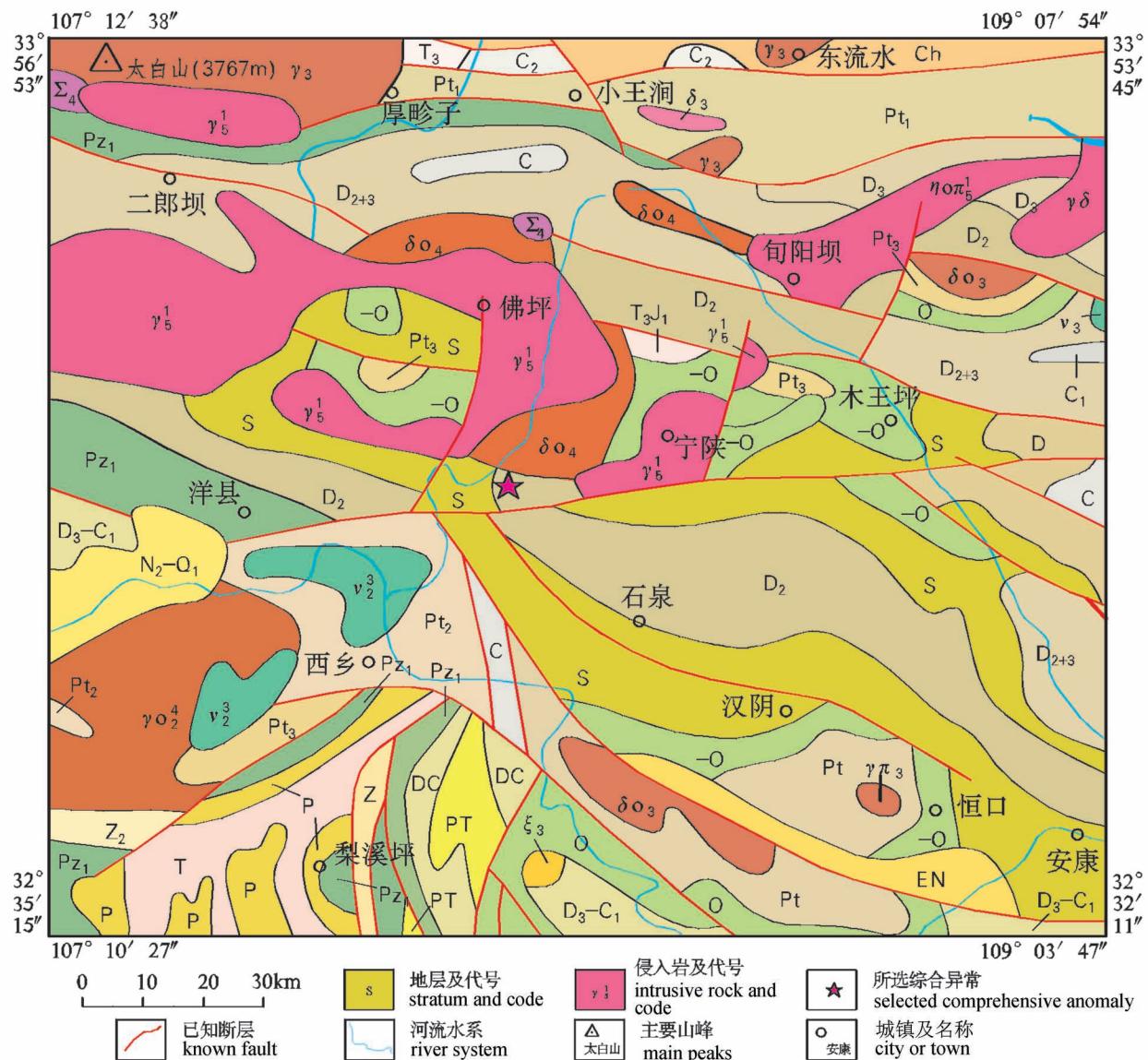


图 1 南秦岭地区地质构造略图(根据 1 : 500 万国际亚洲地质图修改,任纪舜等, 2013, 图幅号: IGMA5000, 编号: 42502020120183870659, 地质云, 中国地质科学院地质研究所)

Fig. 1 Geological structure sketch map of southern Qinling Mountains (Modified from 1 : 5 million International geological map of Asia, Ren Jishun etc. 2013, Sheet number: IGMA5000, No.: 42502020120183870659, GeoCloud, Institute of Geology CAGS)   
 $N_2$ — $Qp^1$ —上新统一下更新统并层, 泥沙质冲积物; EN—古近系—新近系, 碎屑岩;  $T_3J_1$ —上三叠统一下侏罗统并层; T—三叠系, 复理石、火山岩; P—二叠系, 碳酸盐岩, 过渡相含煤系; C—石炭系, 碳酸盐岩;  $D_3-C_1$ —上泥盆统一下石炭统并层, 海陆交替相碎屑岩、碳酸盐岩;  $D_{2+3}$ —中—上泥盆统, 碎屑岩、硅质岩;  $D_2$ —中泥盆统, 碳酸盐岩、硅质岩; S—志留系, 泥沙质复理石; O 或 -O—奥陶系, 碎屑岩、火山岩;  $Pz_1$ —下古生界并层; Z—新元古界震旦系, 碎屑岩、碳酸盐岩; Ch—中元古界长城系; Pt—元古宇;  $\gamma$ —花岗岩;  $\gamma\alpha$ —斜长花岗岩;  $\gamma\pi$ —花岗斑岩;  $\gamma\delta$ —花岗闪长岩;  $\eta\pi\pi$ —石英二长斑岩;  $\xi$ —正长岩;  $\delta\alpha$ —石英闪长岩;  $\delta$ —闪长岩;  $\nu$ —辉长岩;  $\Sigma$ —超基性岩(铁镁质岩)  
 $N_2$ — $Qp^1$ —Pliocene—lower Pleistocene, muddy and sandy sediment; EN—Paleogene—Neogene, clastic rock;  $T_3J_1$ —Upper Triassic—Lower Jurassic; T—Triassic, flysch and volcanic rock; P—Permian, carbonate rock and transitional coal measures; C—Carboniferous, carbonate rock;  $D_3-C_1$ —Upper Devonian—Lower Carboniferous, clastic rock and carbonate rock of alternating marine and continental facies;  $D_{2+3}$ —Middle—Upper Devonian, clastic rock and siliceous rock;  $D_2$ —middle Devonian, carbonate and siliceous rocks; S—Silurian, argillaceous flysch; O or -O—Ordovician, clastic rock and volcanic rock;  $Pz_1$ —Lower Paleozoic layer; Z—Neoproterozoic Siniyan ( $\approx$  Ediacaran) System, clastic rock and carbonate rock; Ch—Mesoproterozoic Changcheng System; Pt—Proterozoic;  $\gamma$ —granite;  $\gamma\alpha$ —plagioclase granite;  $\gamma\pi$ —granite porphyry;  $\gamma\delta$ —granodiorite;  $\eta\pi\pi$ —quartz monzonite porphyry;  $\xi$ —syenite;  $\delta\alpha$ —quartz diorite;  $\delta$ —diorite;  $\nu$ —gabbro;  $\Sigma$ —ultrabasic rock (mafic rock)

及变质作用等相联系(代军治等,2016;高雅宁等,2016;程红军等,2017;赵东红等,2019)。最新航空磁、放测量所反映的构造特征表明:研究区内两个主要方向上的深大断裂两侧还发育有与之近乎平行的次级断裂,它们与深大断裂一起构成了北西、近东西和北东向的断裂带,它们是区内构造最为复杂的地区,也是矿产资源分布最集中的地带。铁、铜矿化与这两组断裂关系密切,它们基本上控制了成矿作用的范围,成为控矿的主要构造地质条件。矿床、矿点分布表明,矿化基本沿北西、近东西和北东走向断裂构造呈带状展布,不同走向断裂构造交汇部位,矿化更趋于强烈。根据本次航放测量数据及处理结果,并对比地质资料,在研究区西乡县—洋县—石泉县范围内,贯穿东西的近北西向,呈“S”形弯曲的条带状寒武系、奥陶系、志留系岩层,较广泛地分布有 $\gamma$ 能谱异常,尤其是U、K含量(此含量指该放射性核素在所测量处自然体中的质量占总质量的相对份额)本底较高。据前人化探资料,本区带内的放射性核素含量远超周围的背景值(任四清,2008)。本文所优选的重点研究异常应聚焦在北西向和北东向两大主构造交接处。

结合野外岩矿石物性测量和物性特征分析等工作,实地验证了该区域U、K含量偏高的点位。对研究区及周边的主要放射性异常分布特征及成因预先进行了定性分析,如在上高家庄至东南向延伸的红卫乡及大河镇一线广泛分布的铀异常基本对应下古生界寒武系—志留系砂岩、片岩及石墨大理岩等,

属于有找矿意义的矿化带。再经地面踏勘,按优选条件确定对上高家庄磁、放综合异常(陕U-2018-51与陕C-2018-201接近重合)开展剖面测量和基础地质工作。该异常地处陕西省安康市石泉县北,两河镇东部上高家庄村,距两河镇约3.5 km,中心位置:E108°07'17", N33°17'23"。由最新航磁数据推断的构造展布情况分析,其位于北北西向展布的大型断裂带腹地,紧邻与近东西向断裂的交汇地带(如图2所示)。

### 3 异常分析

由布格重力资料(地质矿产部第二综合物探大队<sup>②</sup>),该磁、放综合异常位于近东西向展布的重力梯度带南部边缘,所在地等值线较平直且梯度不大,梯度带走向近东西,北侧为明显的布格重力低值区,对应秦岭高山区。异常西南侧紧邻一布格重力的高值区,呈卵圆形,长轴方向近南北,长度大于20 km,极大值高于北侧背景值,达 $400 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>。

在航磁 $\Delta T$ 原始剖面上表现为靠近一负背景场上突起的高值单峰,曲线规整光滑,梯度适中,两翼近对称,且多条相邻线均有类似特征。经化磁极处理的航磁 $\Delta T$ 等值线平面图上,异常走向呈近NW向,所围成的形态似“椭圆”状,受其产生于较低区域性负磁背景场的影响,磁异常的极大值显得并不是很高,为261.6 nT。在能谱U含量方面,可见其位于较大面积、较高强度正背景场中,周围还分布有

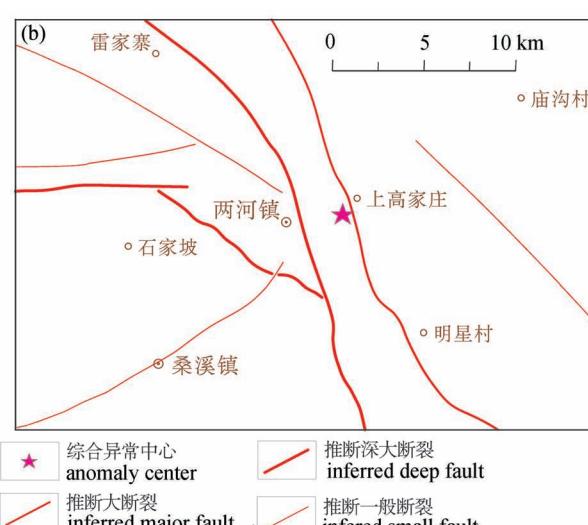
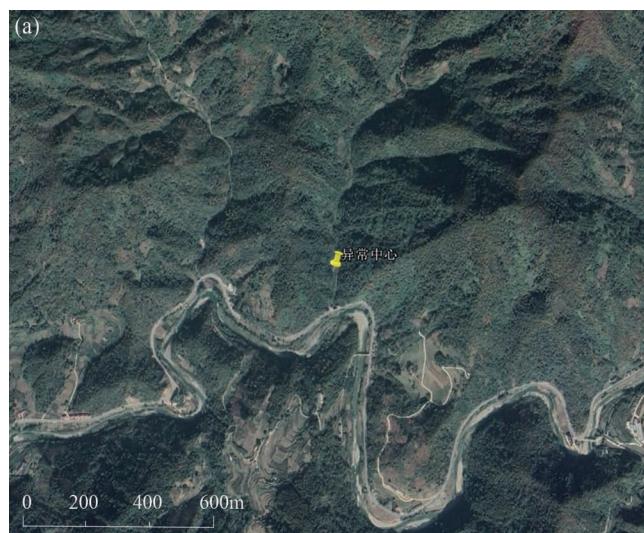


图2 陕西石泉县上高家庄综合异常区的遥感图像及构造推断图

Fig. 2 Remote sensing map and structure inference graph at comprehensive anomaly and its surroundings, Shanggaojia Village, Shiquan County, Shaanxi

其他大大小小若干正异常,但幅度均不及本异常。U 含量剖面曲线隆起明显,异常峰值附近曲线梯度很大,光滑无尖刺,两翼对称;从等值线图可知,异常呈卵圆形,大致走向近南北,峰值约 12.4 Ur(由每秒计数率  $s^{-1}$  转换的放射性含量单位),主体规模约  $1.6 \text{ km} \times 1.0 \text{ km}$ 。现场采集的岩矿石标本中,发现多金属(铜、铁)矿化,且存在铀矿富集的岩性条件

(图 3)。

在遥感影像上观察此综合异常所在位置具备的地形特征,其位于高地形影像带,周边沟壑纵横,并有一定的围绕异常放射状分布的规律,说明核心部分相对抗风化。其南侧紧邻一条河流,流向自西向东,且在异常东南侧转向南流,疑似附近构造活动、断裂存在的反映。因异常区分布有铀化探异常,当

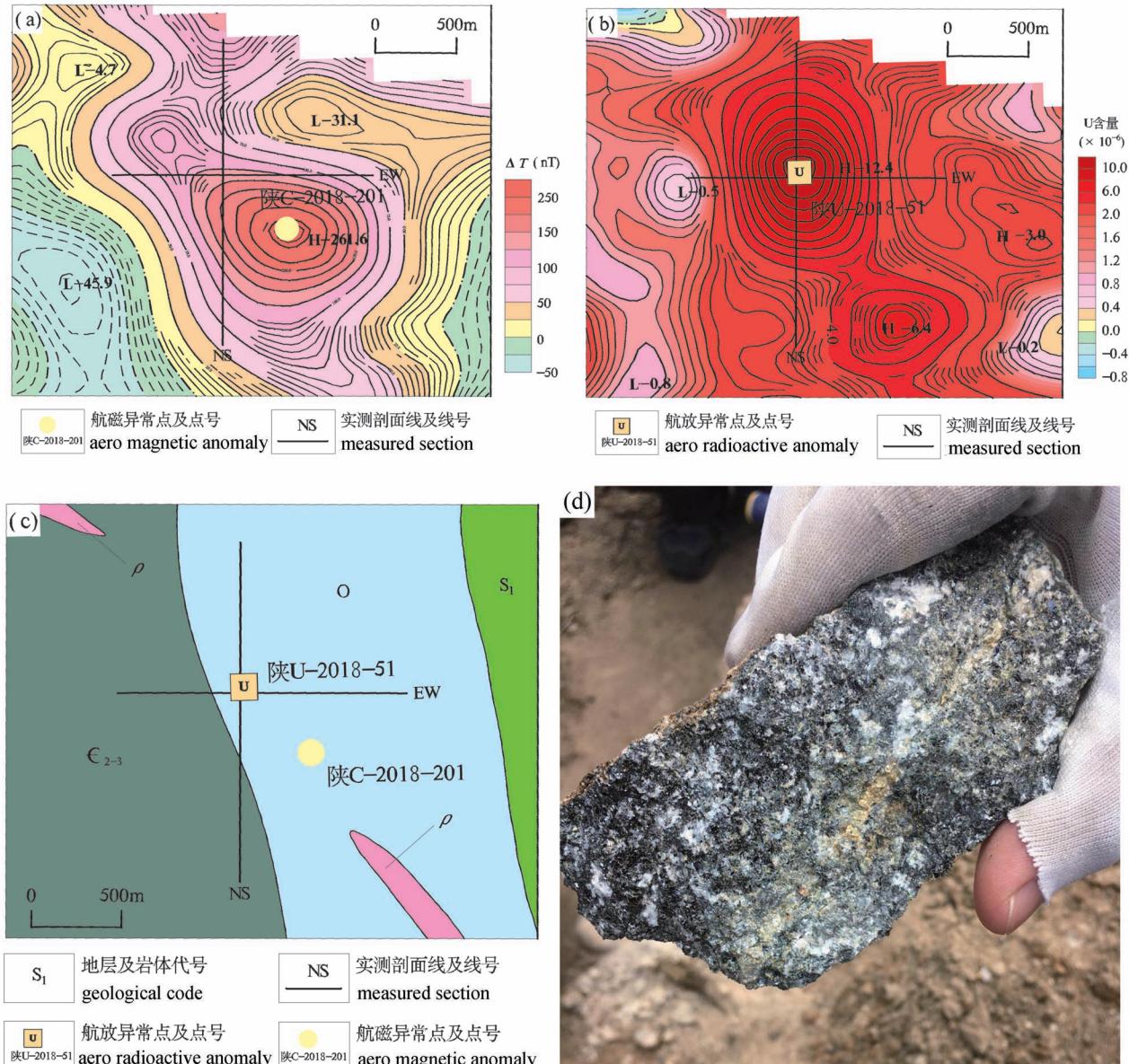


图 3 陕西石泉县上高家庄地区磁放综合异常对比图:(a) 航磁  $\Delta T$  化磁极等值线平面图;  
 (b) 航空  $\gamma$  能谱 U 含量等值线平面图;(c) 地质图;(d) 手标本照片

Fig. 3 Comparison charts of aero magnetic and radioactive comprehensive anomalies in Shanggaojia village area, Shiquan County, Shaanxi: (a) contour map of aeromagnetic  $\Delta T$  after reduction to the pole; (b) contour map of airborne gamma spectrum on uranium content; (c) geological map; (d) rock sample

图(c) 地层代号: $\epsilon_{2-3}$ —中—上寒武统;O—奥陶系;S<sub>1</sub>—下志留统; $\rho$ —酸性岩脉

The stratigraphic codes in Fig. (c):  $\epsilon_{2-3}$ —Middle—Upper Cambrian; O—Ordovician; S<sub>1</sub>—Lower Silurian;  $\rho$ —acidic dyke

表 1 南秦岭安康市石泉县上高家庄及周边地区实测地层及岩体磁化率及放射性参数背景统计表  
Table 1 Background statistics of measured mass magnetic susceptibility and radioactive parameters of the sedimentary and intrusive rocks in Shanggaojia village area, Shiquan County, Ankang, south Qinling Mountains

地层(或侵入岩)		磁化率( $\times 10^{-5}$ SI)						放射性参数											
年代	代号	岩性			测点数			总道( $\times 10^{-6}$ )			K (%)			U( $\times 10^{-6}$ )			Th( $\times 10^{-6}$ )		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
下—中更新统	Qp <sup>1+2</sup>	土壤、风化残坡积物	2	1	639	1.15	2	3.65	17.04	10.35	0.41	2.07	1.24	1.15	3.16	2.16	2.09	14.19	8.14
古近系	E	泥岩、砂岩、砾砾岩、砾岩	2	4	100	37	2	16.24	17.58	16.91	2.01	2.53	2.27	2.45	3.12	2.79	12.20	13.38	12.79
下志留统	S <sub>1</sub>	变质砂岩、变质石英砂岩	5	1	130	39	6	23.02	43.06	32.62	1.74	7.68	4.12	3.91	19.28	9.88	8.47	22.65	16.76
		二云母片岩	3	7	114	35	7	21.41	62.18	36.30	2.21	6.33	3.94	4.61	15.65	9.74	10.98	52.95	26.27
奥陶系	O	炭质云母石英片岩	9	2	555	38	11	13.83	34.30	25.74	0.48	5.05	3.29	1.76	16.31	6.17	3.06	23.49	16.11
		云母石英片岩	19	1	455	37	20	22.18	34.50	29.06	2.99	5.49	4.16	2.12	8.74	4.45	11.88	25.79	20.42
寒武系—奥陶系	(E—O) dh	变质砂岩、灰岩	8	1	171	32	18	8.02	50.93	33.99	0.48	4.85	2.75	1.41	45.62	18.32	3.91	23.12	12.06
		炭质石英片岩	8	3	353	36	7	19.89	44.85	29.07	0.53	4.93	2.49	2.42	41.31	15.03	3.46	19.98	10.60
奥陶系	O <sup>b</sup>	云母石英片岩	5	1	158	42	5	9.88	34.96	26.53	1.31	5.17	3.80	4.04	5.33	4.76	3.28	23.74	18.08
		变质石英砂岩	7	1	604	39	8	12.91	63.91	34.85	0.58	4.13	1.61	4.70	62.57	25.73	2.08	15.91	6.76
寒武系—奥陶系	(E—O) dh	(二)云母石英片岩、石英片岩	10	1	587	39	13	8.53	56.00	27.96	0.52	4.62	2.47	3.98	32.70	14.14	1.86	21.23	9.42
		灰岩、砂岩	3	1	95	34	4	9.74	42.64	21.52	0.35	3.12	1.86	1.35	26.09	11.33	2.05	12.48	7.09
寒武系	E <sub>1</sub>	炭质片岩	6	4	116	35	6	9.95	38.68	22.74	0.65	3.74	2.06	2.67	21.04	11.04	5.72	13.30	9.27
		钙质片岩	3	10	96	37	12	9.15	24.54	18.00	0.76	3.47	2.55	2.29	5.53	3.99	2.78	18.27	11.62
寒武系	E <sub>2-3</sub>	(二)云母石英片岩	9	11	2558	111	10	10.89	31.84	19.56	1.09	4.83	2.55	1.29	17.61	5.20	4.07	22.88	11.21
		灰岩、千枚岩、炭质板岩、砂岩	8	0	252	46	7	6.55	52.98	15.85	0.44	4.11	1.36	1.43	45.03	8.32	1.97	13.51	5.62
寒武系	E <sub>2-3</sub>	黑色砂岩、砂岩	7	2	128	29	11	13.62	51.51	26.55	1.43	5.98	3.08	2.15	22.96	9.05	7.79	18.87	13.87
		石英片岩	3	1	263	36	6	25.89	37.21	31.21	2.83	4.20	3.58	6.48	15.59	10.71	11.45	18.15	16.31
寒武系	E <sub>2-3</sub>	矽质石英片岩	14	2	433	47	16	20.91	105.22	35.10	1.21	5.57	4.26	2.14	72.08	9.84	6.50	25.48	20.54
		云母石英片岩	22	4	1747	64	23	7.62	33.21	26.64	0.68	5.20	3.87	2.24	9.92	4.02	6.53	25.47	18.95
侵入岩	$\rho$	白云母伟晶花岗岩脉	3	2	108	20	6	23.47	51.42	31.35	4.27	7.56	5.53	0.88	23.34	8.24	3.30	10.19	6.68

注:因测得磁化率常有极端值出现,为更好反映该岩类的实际磁性范围,所求平均值为假尾平均数(trimmed mean),即去掉最高值和最低值,由剩余数据参与计算的测点数。

结合现场地质考察结果,在该异常附近,地表出露有寒武系大寨沟组砂岩、粉砂岩、砂质页岩等,以及奥陶系的云母石英片岩,周边还广泛分布有志留系的云母石英片岩、碳质片岩及变质砂岩等(图3)。

综合异常的航空磁力、 $\gamma$ 能谱特征以及地质图如图3所示,图中黑色实线标出了地面两条测线NS、EW的布设位置。在异常附近采集的手标本上,可见变质砂岩中明显黄铁矿化和黄铜矿化。

据研究区的踏勘结果,异常附近所测得的岩矿石磁化率最低为 $9 \times 10^{-5}$  SI,最高 $297 \times 10^{-5}$  SI,平均 $42.19 \times 10^{-5}$  SI,与研究区内周边区域出露的同时代、同类型岩石所测结果相若,异常地表所测到的岩石磁性并不突出。地面 $\gamma$ 能谱在异常附近测得的总道平均值: $26.5 (\times 10^{-6} \text{ Ueq})$ ,K含量均值: $3.5 (\%)$  K,U含量均值: $5.9 (\times 10^{-6} \text{ eU})$ ,Th含量均值: $16.7 (\times 10^{-6} \text{ eTh})$ ,相较周边而言也不算高(其中,Ueq、eU、eTh 和% K 分别代表转化的铀当量含量、铀含量、钍含量和放射性钾含量)。周边磁化率及放射性背景值统计详见表1。

结合航磁异常相对宽缓而非尖锐的形态,推断应由隐伏或半隐伏的具较高磁性的地质体造成。能谱方面,可初步推测航空U异常可能为有一定埋深,或出露范围小的砂岩、变质石英岩引起。

为进一步查明综合异常成因和多金属矿产,尤其是铀的形成层位和找矿潜力,部署以陕U-2018-51异常为中心,东西向(EW)和南北向(NS)两条物探测量剖面,并开展基础地质工作(朱卫平等<sup>③</sup>)。本次测量使用2台GSM-19T质子旋进磁力仪、1台GS512iy能谱仪、1台ZH-1磁化率仪,以及3台GPS手持机等设备,并进行岩矿石、土壤等采样。

物探剖面如图4、图5中的(a)、(b)两幅图所示。磁力测量结果表明,EW测线中部可见明显“双峰”,形态完整,幅值差异不大,最高均在500 nT左右。NS测线同样存在两个高值,其中南侧的更强,超过600 nT,对应主异常稍偏北位置,北端的相对较小,约400 nT左右,对应另一磁异常,中部有明显负异常伴生。经对比,可见地面磁剖面形态特征与航磁数据对应程度高,且呈现出更多细节信息。地面磁力与出露岩石所测磁化率几乎无相关关系,经计算两参数间的相关系数在两条剖面上分别为-0.084和0.018,结合当地露头岩性复杂、成分不均一等特征,推测磁力异常主要由隐伏岩矿石引起。由 $\gamma$ 能谱U含量曲线,可见EW测线上,900 m处有一处明显高值,达 $50 \times 10^{-6}$  eU,附近还有一处超过

$30 \times 10^{-6}$  eU左右的次高值;NS测线上,中部附近存在两处高值,最高可超过 $70 \times 10^{-6}$  eU。而K含量及Th含量在剖面上的特征不突出,趋势不如U明显。以上剖面曲线特征与航空 $\gamma$ 能谱测量结果符合程度高。

根据地面查证,现场岩性识别及部分岩石样品鉴定结果,异常处多为变质砂岩、云母石英片岩等所组成,地层大体倾向北东东,至少有三处酸性岩体出露,均为白云母伟晶花岗岩,山上植被茂密,坡陡,第四系沉积物分布较广,但厚度多数不大。发现多处断层,异常中心附近存在的一高角度正断层相对最为明显,擦痕、阶步清晰,倾向近北东,倾角介于 $70^\circ \sim 80^\circ$ ,除此以外,断距、深度均不大。地质剖面如图4、5中的(c)图所示。

## 4 讨论

根据最新航空磁、放解释成果,并结合区域地质资料,研究区及周边断裂发育,岩浆活动频繁,侵入岩主要有基性—超基性侵入岩和中—酸性侵入岩。前者形成时代主要为古元古代,后者形成时代从古元古代—中生代经历多个时期。其中,中生代中酸性岩体主要岩性为细—中粒花岗岩、黑云母花岗岩、花岗斑岩及伟晶花岗岩等,主要分布在南秦岭造山带汉阴北部牛山岩体、石泉两河镇附近(覆盖本异常)以及洋县北部。由之形成的直接或间接的找矿异常丰富,它们能为区内寻找Fe、Cu、Au、U等金属矿产提供了重要信息(朱卫平等<sup>③</sup>)。

由地面查证,异常东北部分岩性主要为变质砂岩,西南部分多为云母石英片岩,能谱测量结果显示,U元素含量在变质砂岩一侧明显偏高,最高值出现在两类岩性交界处的变质砂岩一侧。岩层基本呈北东倾,倾角多介于 $45^\circ \sim 75^\circ$ ,地层中未见明显不整合接触关系。山体中发现数个小规模侵入岩体出露,应为岩株,基本为白云母伟晶花岗岩。受多期次构造运动改造,此处断层发育,区域变质作用程度较深,叠加局部动力变质作用影响,异常及周边岩石的重结晶作用显著,片理构造普遍,岩石重结晶成矿条件较为有利。

分析研究区的岩性及形成历史,其具备海相沉积型铀矿的生成条件。推测为沉积—热液叠加或沉积—热液—淋积叠加类型,一般赋矿层位主要为碳硅质泥岩型建造,如硅岩类、炭板岩类、硅灰岩类、片岩类,含矿构造主要为破碎带、断层角砾岩带、碎裂岩带等。因U以吸附形式为主,如在蛋白石、水铝

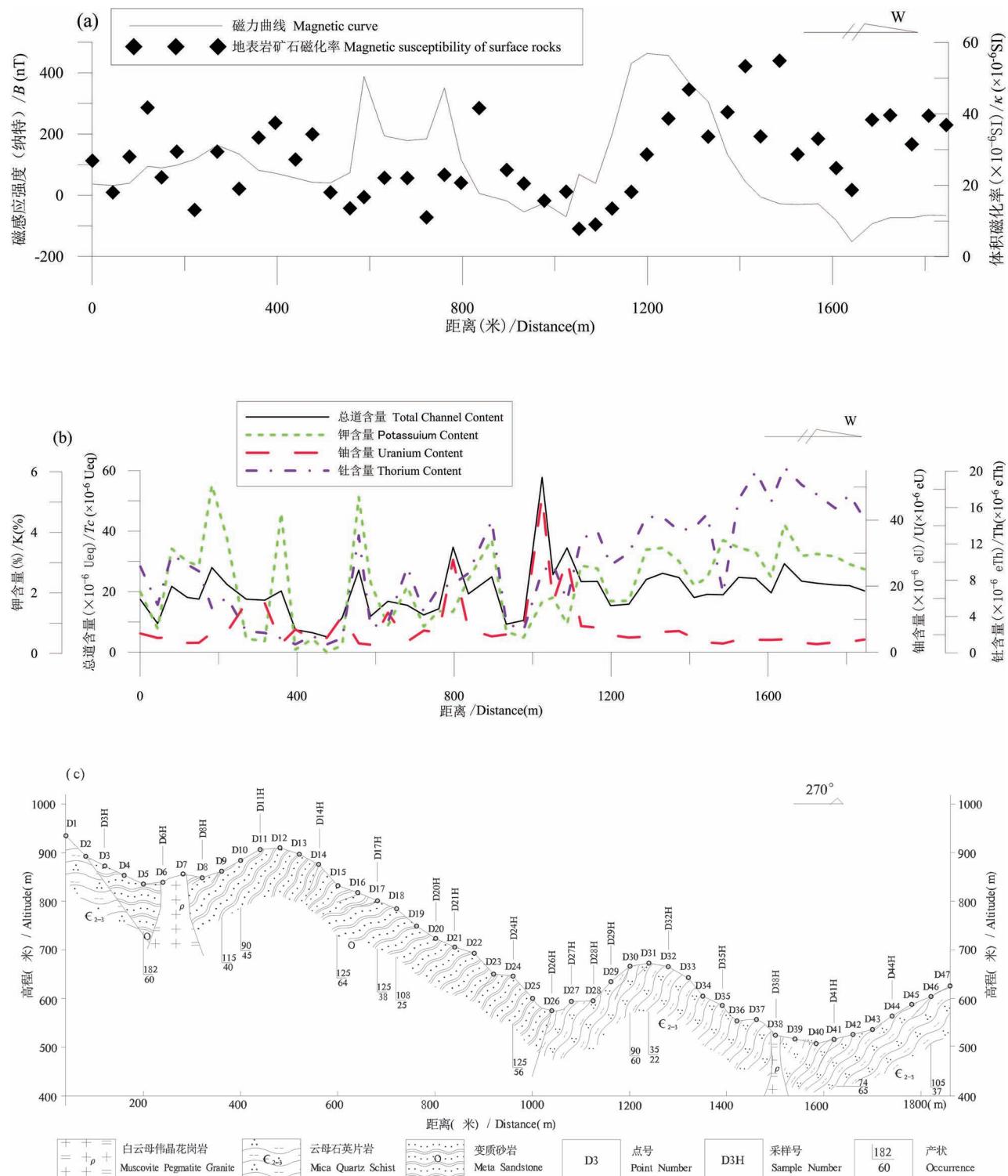


图4 陕西石泉县上高家庄地区EW测线物探、地质综合剖面图: (a) 磁力和磁化率曲线; (b) 放射性总道、K、U、Th含量曲线; (c) 根据磁性及放射性数据结合实地考查结果推断的地质剖面图

Fig. 4 Geophysical and geological profile, EW survey line in Shanggaojia village area, Shiquan County, Shaanxi: (a) curves of magnetic and susceptibility; (b) curves of content of total channel, K, U and Th; (c): geological section based on the magnetic and radioactive data and the results of field investigation

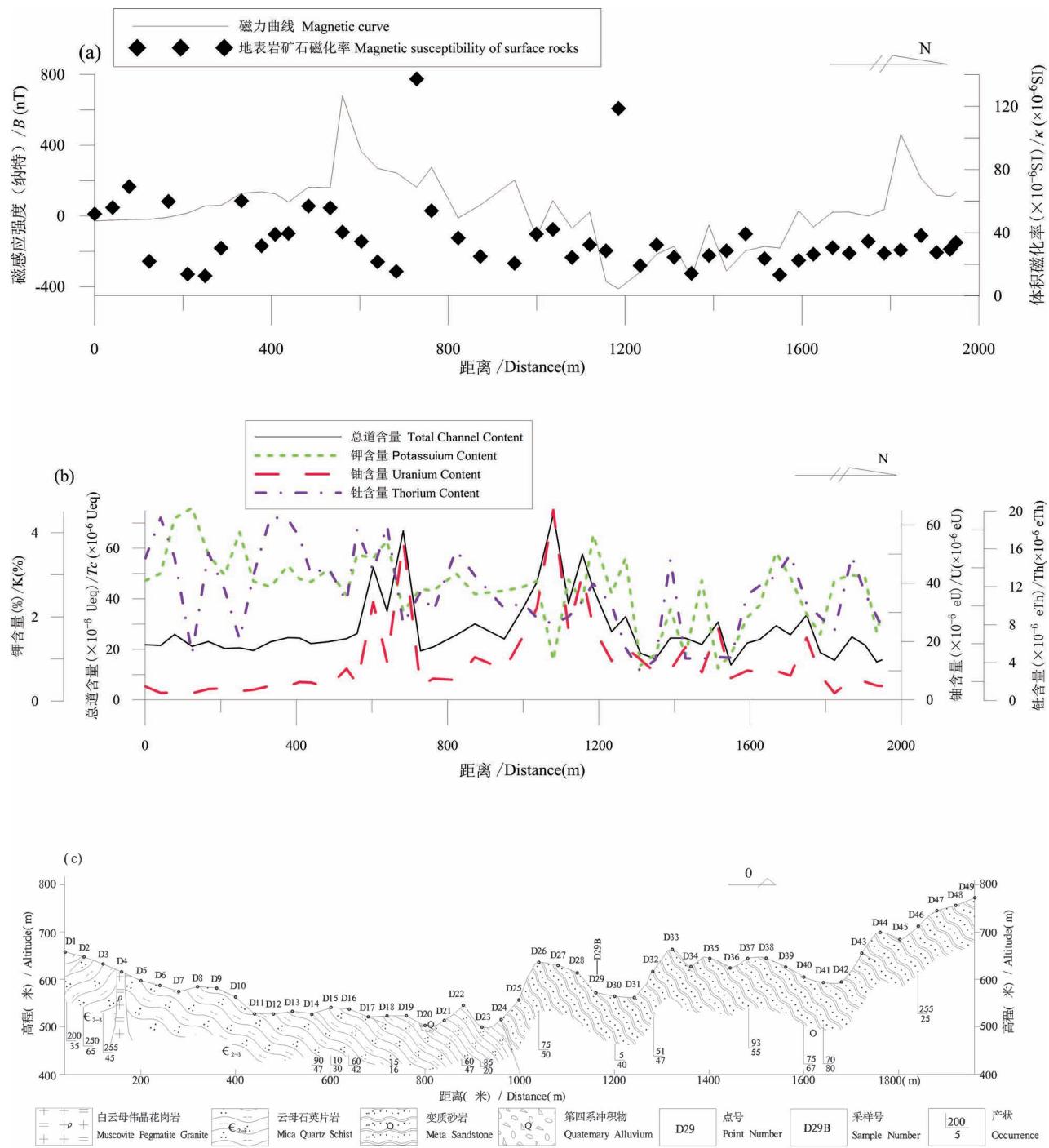


图 5 陕西石泉县上高家庄地区 NS 测线物探、地质综合剖面图: (a) 磁力和磁化率曲线; (b) 放射性总道、K、U、Th 含量曲线; (c) 根据磁性及放射性数据结合实地考查结果推断的地质剖面图

Fig. 5 Geophysical and geological profile, NS survey line in Shanggaojia village area, Shiquan County, Shaanxi: (a) curves of magnetic and susceptibility; (b) curves of content of total channel, K, U and Th; (c) geological section based on the magnetic and radioactive data and the results of field investigation

英石、褐铁矿、炭质及黏土等胶结物中,有时可见少量次生铀矿物,在南秦岭构造带的黑色岩系中已发现有分布(张国伟等,1987,1995;任四清,2008)。

本异常剖面上发现有相似的岩性出露,其由细粒—极细粒一组沉积岩系列组成(黑色泥质岩—黑色硅质砂岩—黑色碳酸盐岩),由于组成物质颗粒细微、

成分复杂、有机质发育,具有多种类型和成因多样化的特点,地层时代主要为寒武系—志留系。因同类砂岩通常不仅有可能是生油、生气的母岩,还可有效存储U元素,另外金属资源也已确定25种与之有密切的成因关系,如金、银、锡、锑、锰、铜、铅、锌、铀、钒、镍、铝、硒、磷、铭、锗、磷、重晶石、毒重石等(彭云彪等,2018)。上述黑色岩系的广泛分布区在航放U道含量上表现高值特征,包括本综合异常在内的西北走向放射性核素U异常高值带是寻找U及其他多金属矿产的重要位置,寻找隐伏矿的潜力大。在石泉县两河镇上高家庄及周边发现了较明显的铁、铜等多金属矿化蚀变迹象,主要发育于奥陶系(O)地层中,岩性为变质砂岩,其中多见黄铁矿、磁黄铁矿、石墨、黄铜矿、褐铁矿等矿物。

异常中心附近所采岩矿石标本产于奥陶系地层(O),送专业岩矿石鉴定,在反射光显微镜下观察。光片鉴定结果显示:岩石含多种金属矿物,主要有黄铁矿5%、磁黄铁矿2%、石墨1%、黄铜矿<1%、褐铁矿1%等,存在它形晶结构、半自形晶结构、立方体结构、填隙结构,浸染状构造,为灰白色石墨矿物化蚀变岩(图6a)。另有采自异常附近岩体的标本,其光片结果表明:其金属矿物含钛铁矿5%,黄铁矿2%,闪锌矿1%,黄铜矿1%,褐铁矿1%,存在它形晶结构、半自形晶结构、立方体结构、假象结构、碎裂结构,浸染状构造,为灰色钛铁矿化混染闪长岩(图6b)。

## 5 结论

(1) 上高家庄综合异常之U异常经地面测量,显示其与变质砂岩存在明显的关系,推测U异常主要为变质砂岩引起。地面磁力与出露岩石所测磁化率几乎无相关关系,推测磁异常由与变质砂岩接触的,有一定埋深的区域变质片岩(云母石英片岩,原岩为火成岩)产生。

(2) 区内分布有造山带中的山间盆地,具备生成砂岩型铀矿的条件。本异常的 $\gamma$ 能谱U含量是研究区内一条近北西向能谱高值带上的两大极值之一,产于近东西走向寒武系—志留系出露岩层中。本套地层是区内放射性矿物矿化的主要存在基础,其间分布的其他若干较弱异常反映了与本异常在地层岩性、地质构造相似的特征,多产于变质砂岩,少量为石英片岩及大理岩。U异常与此时代中砂岩、变质砂岩的对应关系明显,尤以在临近不同走向大断裂、深大断裂的交合处、岩性交界面附近位置的高值异常最值得关注。

(3) 综合异常及附近的环境大多是构造薄弱地区,构造—岩浆活动较为强烈,多期次的构造叠加和岩浆活动为成矿流体的形成、集中、运移、赋存提供了良好的地质条件,与区域成矿关系密切。异常所属的南秦岭造山带岛弧构造环境的特殊性决定了此类异常成矿类型的专属性,具有Fe、Au、Cu、U、石墨等找矿潜力。综合异常上所见的云母伟晶花岗岩一般认为产于中生代,其与围岩接触的蚀变岩中有明

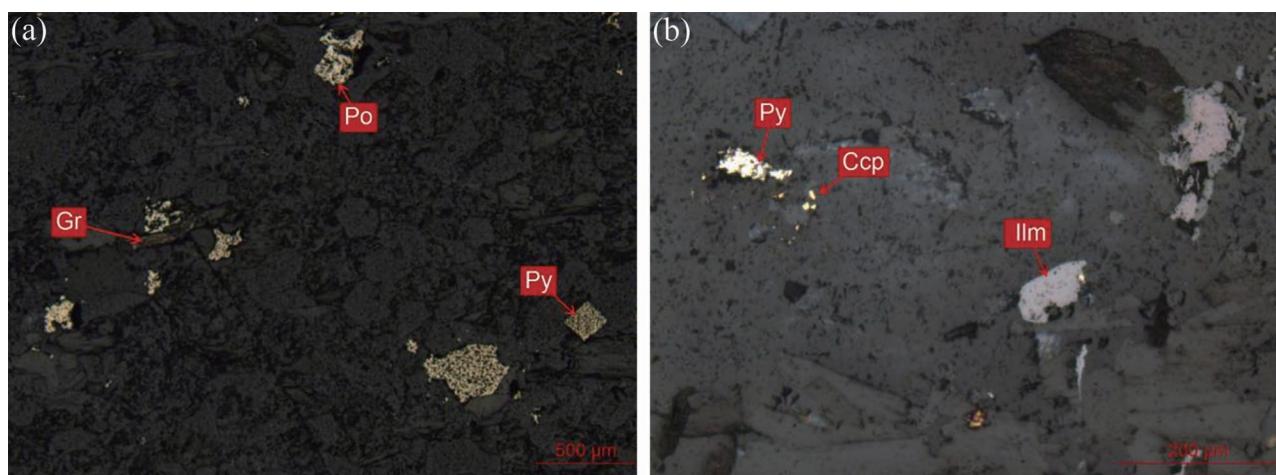


图6 陕西石泉县上高家庄及周边地区岩矿石镜下晶型结构

Fig. 6 Microscopic crystal structure of rocks and ores from Shanggaojia village area, Shiquan County, Shaanxi

Py—黄铁矿; Po—磁黄铁矿; Gr—石墨; Ilm—钛铁矿; Ccp—黄铜矿

Py—pyrite; Po—pyrrhotite; Gr—graphite; Ilm—ilmenite; Ccp—chalcopyrite

显矿化现象,经鉴定有:黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、石墨等。

计划下一步在航空磁、放局部异常解释结果的基础上,细化该地区的控矿因素,结合已知矿床(点)分布、成矿地质环境、化探异常范围等信息,合理划分找矿预测区的范围及边界,并找到确立其边界的依据。

**致谢:**在研究过程中,核工业203研究所杨福新研究员、中国地质调局西安地质调查中心杨忠堂研究员等专家给予了耐心地指导;野外踏勘和异常测量期间,陕西地矿第二综合物探大队的领导和技术人员们鼎力相助;另外,还得到中国自然资源航空物探遥感中心各级领导及同事郭华、韩松,中国地质大学(北京)硕士研究生郑强的大力支持。在此一并表示衷心地感谢。

### 注 释 / Notes

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- ① 安康市国土资源局. 2003. 安康市矿产资源总体规划(2001~2010).
- ② 地质矿产部第二综合物探大队. 1993. 1:20万重力数据. 网格间距: 2 km, 搜索半径: 5 km. 北京: 全国地质资料馆.
- ③ 朱卫平, 徐璐平, 朱宏伟. 2019. 陕西洋县—宁陕地区1:5万航空物探(磁、放)解释成果报告. 北京: 中国自然资源航空物探遥感中心.
- ④ Ankang Land and Resources Bureau. 2003#. General Planning of Mineral Resources in Ankang City (2001~2010).
- ⑤ No. 2 Shaanxi Geological and Mining comprehensive Geophysical Exploration Group. 1993#. 1: 200000 gravity data. Grid spacing: 2 km, Search radius: 5 km. Beijing: National Geological Data Center.
- ⑥ Zhu Weiping, Xu Luping, Zhu Hongwei. 2019#. The interpretation report of aero geophysical survey (magnetic and radioactive) in 1: 50000 scale in Yang County and Ningshan County, Shaanxi Province. Beijing: China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources.

### 参 考 文 献 / References

- 陈虹,田蜜,武国利,胡健民. 2014. 南秦岭构造带内早古生代碱基性岩浆活动:古特提斯洋裂解的证据. 地质论评, 60(6):1437~1452.
- 程红军,陈川,展新忠,常金雨,丁亚龙,库瓦尼西别克·买买提朱马,杨蕤嘉,加娜尔,付翰泽. 2017. 隐伏矿床成矿预测理论与方法新进展. 地质与勘探, 53(3):456~463.
- 代军治,鱼康平,王瑞廷,袁海潮,王磊,张西社,李剑斌. 2015. 南秦岭宁陕地区新铺钼矿地质特征、辉钼矿Re-Os年龄及地质意义. 岩石学报, 31(1):189~199.
- 代军治,张西社,鱼康平,王瑞廷,高菊生,任涛,袁海潮,李剑斌. 2016. 陕西秦岭东部地区中生代钼、铜矿床时空分布规律、控矿因素及找矿潜力分析. 矿床地质, 35(4):809~828.
- 高卫华. 2007. 安康市矿产资源经济综合评价. 导师: 魏合明. 西安: 长安大学硕士学位论文: 5~26.

- 高雅宁, 杨兴科, 杨龙伟, 韩珂. 2016. 南秦岭汉阴北部金矿田控矿要素研究及找矿方向建议. 地质力学学报, 22(2):245~255.
- 彭云彪, 刘波, 秦彦伟, 颜小波. 2018. 二连盆地川井坳陷构造演化对砂岩型铀矿成矿作用的约束. 地质与勘探, 54(5):917~928.
- 任四清. 2008. 南秦岭铀成矿带铀矿化特征与找矿前景. 甘肃地质, 17(4):58~63.
- 田辉, 李怀坤, 周红英, 张健, 张阔, 耿建珍, 相振群, 瞿乐生. 2017. 扬子板块北缘花山群沉积时代及其对Rodinia超大陆裂解的制约. 地质学报, 91(11):2387~2408.
- 王东升, 王宗起, 张英利, 宫江华, 王涛, 林健飞. 2016. 南秦岭增生杂岩带马道地区变泥质岩的变质作用. 现代地质, 30(6):1254~1266.
- 王梦玺, 王焰, 赵军红. 2012. 扬子板块北缘周庵超镁铁质岩体锆石U/Pb年龄和Hf-O同位素特征: 对源区性质和Rodinia超大陆裂解时限的约束. 科学通报, 57(34):3283~3294.
- 王强, 刘振川, 车伟峰, 薛继强, 刘建文. 2018. 安康市紫阳——镇坪钒钛磁铁成矿地质背景及成矿模式. 西部资源, 2018(1):46~48.
- 吴勘, 马强分, 冯庆来. 2015. 扬子板块北缘弧峰组地层划分及空间分布特征. 地层学杂志, 39(1):33~39.
- 张国伟, 梅志超, 周鼎武, 孙勇, 于在平. 1987. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社: 1~47; 86~98; 126~134.
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义. 岩石学报, 11(2):101~114.
- 张俊良, 陈高潮, 王炬川, 张清盛, 孔文年, 任娟刚. 2013. 陕西安康—石泉北部金矿成矿地质背景浅析. 陕西地质, 31(2):47~52.
- 赵东红, 杨忠堂, 李宗会, 王虎, 罗根根, 彭璇. 2019. 秦岭成矿带成矿地质背景及优势矿产成矿规律. 北京: 科学出版社: 1~147; 162~199; 286~327.
- 周涛发, 范裕, 王世伟, White N C. 2017. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式. 岩石学报, 33(11):3353~3372.
- 朱鹏飞, 蔡煜琦, 郭庆银, 刘武生, 李建红, 张明林, 漆富成, 张字龙, 贾立城, 徐浩. 2018. 中国铀矿资源成矿地质特征与资源潜力分析. 地学前缘, 25(3):148~158.
- Asfahani J. 2018. Estimation and mapping of radioactive heat production by aerial spectrometric gamma and fractal modeling techniques in the Syrian desert (Area-1), Syria. Applied Radiation and Isotopes, 142: 194~202.
- 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. Applied Radiation and Isotopes, 66: 1262~1274.
- Chen Hong, Tian Mi, Wu Guoli, Hu Jianmin. 2014&. The early Paleozoic alkaline and mafic magmatic events in Southern Qinling Belt, Central China: Evidences for the break-up of the Paleo-Tethyan Ocean. Geological Review, 60(6):1437~1452.
- Cheng Hongjun, Chen Chuan, Zhan Xinzhong, Chang Jinju, Ding Yalong, Kuwanixibie Ma'maitizhuma, Yang Ruijia, Jia Naer, Fu Hanze. 2017&. New progress in the prediction theory and prospecting method for concealed deposits. Geology and Exploration, 53(3):456~463.
- Dai Junzhi, Yu Kangping, Wang Ruiting, Yuan Haichao, Wang Lei, Zhang Xishe, Li Jianbin. 2015&. Geological characteristics, Re-Os geochronology of Xinpu molybdenum deposit in Ningshan, Southern Qinling and its implications. Acta Petrologica Sinica, 31(1): 189~199.

- Dai Junzhi, Zhang Xishe, Yu Kangping, Wang Ruiting, Gao Jusheng, Ren Tao, Yuan Haichao, Li Jianbin. 2016&. Spatial—temporal distribution, ore-controlling factors and prospecting potential of Mesozoic Mo, Cu deposits in East Qinling Mountains, Shaanxi Province. *Mineral Deposits*, 35(4):809~828.
- Dantas de Araújo Alinne Jéssica, Bongiolo Everton Marques, Ávila. Ciro Alexandre 2019. The southern São Francisco Craton puzzle: Insights from aerogeophysical and geological data. *Journal of South American Earth Sciences*, 94: 1~14.
- 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. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6:148 ~ 161.
- Gao Weihua. 2007&. Economic evaluation of mineral resources protection and sustainable development issues in Ankang. Tutor: Wei Heming. Xi'an: Chang'an University, Master's Degree Thesis; 5~26.
- Gao Yaning, Yang Xingke, Yang Longwei, Han Ke. 2016&. Study on ore-controlling factors and mine exploration proposal of the gold ore field in North Hanyin, South Qinling. *Journal of Geomechanics*, 22(2):245~255.
- Golynsky A, Bell R, Blankenship D, Damaske D, Ferraccioli F, Finn C, Golynsky D, Ivanov S, Jokat W, Masolov V, Riedel S, Frese R von, Young D, ADMAP Working Group. 2013. Air and shipborne magnetic surveys of the Antarctic into the 21st century. *Tectonophysics*, 585: 3~12.
- Maacha Lhou, Jaffal Mohammed, Jarmi Abdelmajid, Kchikach Azzouz, Mouguina 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. *Journal of African Earth Sciences*, 134: 389~403.
- Peng Yunbiao, Liu Bo, Qin Yanwei, Yan Xiaobo. 2018&. Constraints of tectonic evolution on sandstone-type uranium metallogenesis in the Chuanjing depression, Erlian basin. *Geology and Exploration*, 54(5): 917~928.
- Ren Siqing. 2008&. Uranium mineralization and prospecting potential of uranium mineralization belt in South Qinling. *Gansu Geology*, 17(4):58~63.
- Tian Hui, Li Huaikun, Zhou Hongying, Zhang Jian, Zhang Kuo, Geng Jianzhen, Xiang Zhenqun, Qu Lesheng. 2017&. Depositional age of the Huashan Group on the northern margin of the Yangtze Plate and its constraints on breakup of the Rodinia Supercontinent. *Acta Geologica Sinica*, 91(11):2387~2408.
- Wang Dongsheng, Wang Zongqi, Zhang Yingli, Gong Jianghua, Wang Tao, Lin Jianfei. 2016&. Metamorphism of metasedimentary rocks in Madao area, South Qinling accretionary complex belt. *Geoscience*, 30(6):1254~1266.
- Wang Mengxi, Wang Yan, Zhao Junhong. 2012&. Zircon U/Pb dating and Hf—O isotopes of the Zhouan ultramafic intrusion in the northern margin of the Yangtze Block, SW China: Constraints on the nature of mantle source and timing of the supercontinent Rodinia breakup. *Chinese Science Bulletin*, 57(34):3283~3294.
- Wang Qiang, Liu Zhenchuan, Che Weifeng, Lin Jiqiang, Liu Jianwen. 2018#. Metallogenic geological background and metallogenic model of vanadium titanium magnetite at Ziyang—Zhenping in Ankang City. *Western Resources*, (1):46~48.
- Wu Kan, Ma Qiangfen, Feng Qinglai. 2015&. Stratigraphic division and spatial distribution of the middle Permian Kuhfeng formation in the Northern Yangtze Block. *Journal of Stratigraphy*, 39(1):33~39.
- Zhang Guowei, Mei Zhichao, Zhou Dingwu, Sun Yong, Yu Zaiping. 1987#. Formation and Evolution of the Qinling Orogenic Belt. Xi'an: Northwest University Press, 1~47, 86~98, 126~134.
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing, Dong Yunpeng. 1995&. Nature of main Tectono—Lithostratigraphic Units of the Qinling orogen: Implications for the tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2):101~114.
- Zhang Junliang, Chen Gaochao, Wang Juchuan, Zhang Qingsheng, Kong Wennian, Ren Juangang. 2013&. Geology of gold deposits in Northern Ankang—Shiquan, Shaanxi Province. *Geology of Shaanxi*, 31(2):47~52.
- Zhang Wei, Chen Wei Terry, Gao Jianfeng, Chen Huakai, Li Jinghui. 2019. Two episodes of REE mineralization in the Qinling Orogenic Belt, Central China: in-situ U—Th—Pb dating of bastnäsite and monazite. *Mineralium Deposita*, 54: 1265~1280.
- Zhao Donghong, Yang Zhongtang, Li Zonghui, Wang Hu, Luo Gengen, Peng Xuan. 2019&. Metallogenic Geological Background and Metallogenic Regularity of Dominant Minerals in Qinling Metallogenic Belt. Beijing: Science Press; 1~147; 162~199; 286~327.
- Zhou Taofa, Fan Yu, Wang Shiwei, White N C. 2017&. Metallogenic regularity and metallogenic model of the Middle—Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3353~3372.
- Zhu Pengfei, Cai Yuqi, Guo Qingyin, Liu Wusheng, Li Jianhong, Zhang Minglin, Qi Fucheng, Zhang Zilong, Jia Licheng, Xu Hao. 2018&. Metallogenic and geological characterization and resource potential assessment of uranium resources in China. *Earth Science Frontiers*, 25(3):148~158.

# Geological analysis and prospecting potential of aero magnetic and radioactive comprehensive anomaly at Shanggaojia village in southern Qinling Mountains

ZHU Hongwei<sup>1)</sup>, ZHU Weiping<sup>1)</sup>, XU Luping<sup>1)</sup>, MI Yaohui<sup>1)</sup>, ZHANG Dishuo<sup>1)</sup>, LI Haiqiang<sup>2)</sup>

1) China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing, 100083;

2) China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083

**Abstract:** The Shanggaojia village comprehensive anomaly (magnetic and radioactive), which is located at the northern part of Shiquan County Ankang City, Shaanxi Province, is optimized for further study based on the latest airborne geophysical data of southern Qinling Mountains research area, in order to find and improve the aero geophysical deep prospecting method. It should be combined with the characteristics of lithology, structure and surrounding mineralized points, and optimized according to certain conditions. It is found that the northeast part of the anomaly is mainly composed of metamorphic sandstone, and the southwest part is mostly mica-quartz schist, by multiple methods surveying on the ground in profile form, including magnetic, gamma-ray spectrum, rock (ore) physical properties, and basic geological work. The Uranium radioactivity content is higher on the side of metamorphic sandstone near two types of lithologic junctions, with the maximum measured on the surface is not less than  $70 \times 10^{-6}$  eU. It is speculated that the Uranium anomaly is mainly caused by metamorphic sandstone, and the magnetic one is caused by metamorphic schist (original rock is volcanic rock) with a relatively larger buried depth. There is positive prospect for the formation of iron, copper, uranium and so on, supported by the mineralization signs found in the collected samples through professional identification. The anomalies are optimized from the aero data, so as to effectively focus on the key areas on the ground. After that, the cause of the anomaly is realized by means of data analysis, field measurement, sampling and other verification methods. It is an efficient working mode to study the concealed deposit and delineate the metallogenic prospect area.

**Keywords:** South Qinling Mountain; comprehensive anomaly of airborne radioactivity; optimized anomaly; profile surveying; concealed deposit

**Acknowledgements:** This research was supported by the national key research and development program (Nos. 2017YFC0602106, 2017YFC0602201), and by the Project of China Geological Survey (No. 121201203000160006). It's a pleasure to acknowledge the help of many scholars who willingly supplied us with information and experiences or whom we have corresponded. That is researcher Yang Fuxin of the No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, researcher Yang Zhongtang of Xi'an Geological Survey Center of China Geological Survey Bureau. The leaders and technical experts of No. 2 Shaanxi Geological and Mining comprehensive Geophysical Exploration Group joined us and made great efforts during the field anomaly investigation. In addition, senior engineer GUO Hua, Dr. HAN Song, and other colleagues of China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, a graduate student ZHENG Qiang of China University of Geosciences (Beijing), they have been strongly supports for our work.

**First author:** ZHU Hongwei, male, born in 1984, graduated from Graduate School of Chinese Academy of Sciences, doctor of science, a senior engineer, major in physical geography; Research areas include the integrated interpretation of aerogeophysics and remote sensing; Email: zhuhongwei@mail.cgs.gov.cn

**Corresponding author:** ZHU Weiping, male, born in 1980, graduated from China University of Geosciences (Beijing), master's degree, a senior engineer, major in structural geology, mainly engaged in aerogeophysical geological interpretation research; Email: 474538785@qq.com

Manuscript received on: 2020-06-04; Accepted on: 2020-12-10; Edited by: ZHANG Yuxu

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2021.01.002

