

DOI: 10.12401/j.nwg.2023002

小秦岭华阳川地区铀矿综合找矿方法研究

李普涛^{1,2,3}, 辜平阳^{1,2}, 何世平^{1,2}, 李永军³, 庄玉军^{1,2}, 陈锐明^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 华阳川铀矿位于华北板块南缘小秦岭构造带西部, 是一个以铀、钼共生为主, 并伴生铅、稀土的多金属矿床。华阳川地区铀矿类型多样、成因复杂, 具有较好的铀成矿条件和资源潜力。由于深处秦岭北坡, 地形陡峻、覆盖严重, 开展地表找矿工作十分困难。已往铀找矿工作采用水化学法圈定放射性异常+地面伽玛测量圈定矿化体的方法组合, 一直受限于地形陡峻和地表覆盖的困扰, 找矿效果不佳、效率低下。本次工作在对已有研究成果和地质资料预研究的基础上, 采取以航空伽玛测量快速发现异常, 以活性炭及坑内伽玛测量准确定位矿化带, 以不同比例尺的专项地质填图进行矿化体检查, 辅以遥感解译、激电测深及磁法测量, 最后通过探矿工程验证, 探索出适应华阳川地区这种高山峡谷覆盖区硬岩型铀矿快速定位的技术方法组合。通过找矿实践, 在华阳川地区圈定出找矿远景区 1 个、找矿靶区 3 个和重要找矿线索 6 个, 并在黄家沟一带发现大量铀矿床(点)。笔者通过系统总结采用的各类铀找矿技术方法, 为今后同类地区铀找矿工作提供经验和借鉴。

关键词: 小秦岭; 华阳川; 铀矿; 找矿技术方法

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0245-15

Study on Exploration Methods Combination for Uranium Deposit in the Periphery of Huayangchuan Area, Xiaoqinling Mountains

LI Putao^{1,2,3}, GU Pingyang^{1,2}, HE Shiping^{1,2}, LI Yongjun³, ZHUANG Yujun^{1,2}, CHEN Ruiming^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Orogen Research Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Chang'an University, School of Earth Science and Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Huayangchuan uranium is a polymetallic deposit of uranium and niobium associated with lead and rare earth elements in the west of Xiaoqinling tectonic belt on the southern margin of North China craton. The uranium deposits have various types and complex genesis, and have good uranium metallogenic conditions and resource potential. Because Huayangchuan area is located on the north slope of Qinling Mountains, with steep terrain and serious coverage, it is very difficult to carry out surface prospecting. The combination of hydrochemical method and ground gamma survey were used to delineate mineralized bodies in the past, the exploration effect is poor and the efficiency is low due to the topography and vegetation. Based on the previous research re-

收稿日期: 2022-05-11; 修回日期: 2022-09-23; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 中国地质调查局项目“秦岭文康-凤太地区地质矿产调查”(DD20160014), “商丹-大柴旦地区区域地质调查”(DD20190069)和“西北地区区域基础地质调查”(DD20221636)联合资助。

作者简介: 李普涛(1982-), 男, 高级工程师, 从事铀矿地质调查与研究工作。E-mail: Liputao@126.com。

sults and existing geological data, this study adopts airborne gamma spectrum measurement to quickly find anomalies, activated carbon and pit gamma measurement to accurately identify the mineralized zone, special geological mapping with different scale to carry out mineralized body inspection, supplemented by remote sensing interpretation, IP sounding and magnetic measurement, and finally passes the verification of exploration engineering, a combination of technical methods suitable for the rapid positioning of hard rock type uranium deposits in the coverage area of high mountains and valleys in Huayangchuan area is explored. Through the prospecting practice, we have selected 7 favorable areas, 3 target areas and 6 important clues for ore prospecting, and a large number of uranium deposits (or prospecting target area) have been found in Huangjiagou area outside Huayangchuan uranium mining area. This paper systematically summarizes the various uranium prospecting techniques and methods adopted, so as to provide experience and reference for uranium prospecting in similar areas in the future.

Keywords: Xiaoqinling; Huayangchuan; Uranium deposit; prospecting methods

华阳川铀矿位于华北板块南缘小秦岭构造带西部(陕西境内),发现于20世纪50年代,目前已经形成一个以铀、钍共生为主,伴生铅、稀土的多金属矿床(喻学惠,1992;王林均等,2011;惠小朝,2014,2017;高成等,2017)。华阳川铀矿找矿工作大体可划分为2个阶段(陈冰等,2018)。第一阶段找矿工作:在20世纪50~70年代,相关单位在华阳川地区开展了矿点调查评价、普查、详查等工作,圈定了铀多金属矿体,估算了铀多金属矿的共伴生矿产资源量。在找矿过程中,主要采用了水化学+地面伽玛+地质填图为主的找矿方法组合。第二阶段找矿工作:自2008年起,矿权单位在划定的普查区范围内进行了1:2.5万土壤测量,圈定了多处U异常,并进一步缩小了详查区范围,估算了铀钍铅资源量,同时施工了大量探矿工程,控制了矿体的分布延伸范围。2016年以来,在华阳川铀矿区深部及外围投入了大量铀多金属找矿工作,采取了(区域及专项)地质填图结合综合物探方法(遥感影像解译、航空伽玛能谱及磁法测量、活性炭及坑内伽玛测量、激电测深及磁法剖面测量和地面伽玛测量等)、探矿工程验证等找矿方法组合,取得了较好的找矿效果。如发现在华阳川主矿区深部千米以下仍然存在较大厚度的富铀碳酸岩脉密集带、在华阳川矿区西部及外围发现大量古元古代含铀伟晶岩(细晶岩脉、花岗岩脉)、以及在华阳川矿区及外围靠近华山岩体的太华岩群破碎带中发现与构造-岩浆-热液有关的叠加改造型铀矿。找矿结果表明华阳川地区铀矿类型多样、成因复杂,具有良好的铀成矿条件和资源潜力。

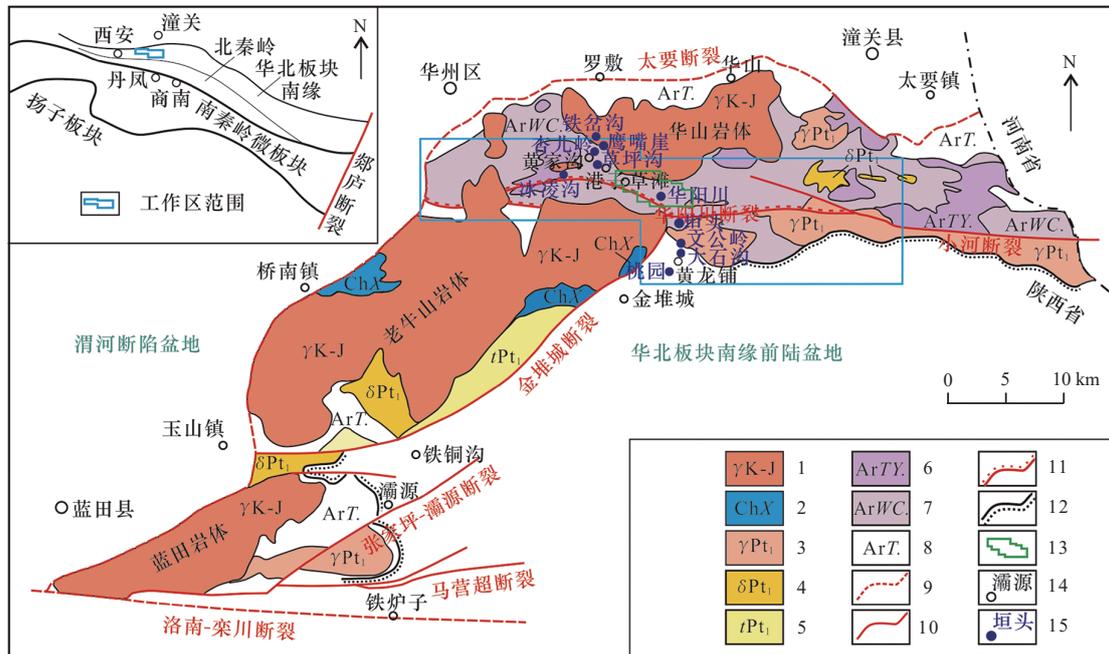
华阳川地区处于秦岭北坡,地形切割强烈,属于

高山峡谷、覆盖严重地区,开展地表找矿工作十分困难。已往采用水化学法圈定放射性异常+地面伽玛测量圈定铀矿化体的找矿方法组合,一直受限于地形陡峻和地表覆盖的困扰。笔者对2016年以来在华阳川地区投入的找矿工作进行研究,探索出适合华阳川这种高山峡谷覆盖区硬岩型铀矿快速定位的技术方法组合,以期为今后在秦岭地区的铀多金属找矿工作提供经验和借鉴。

1 成矿地质背景

华阳川地区所处的小秦岭构造带是一个变质核杂岩-拆离构造(图1),变质核杂岩范围由山前断裂(太要断裂)、山后断裂(由金堆城断裂、华阳川断裂、小河断裂等相接构成)和洛南-栾川断裂等3个深大边界断裂带限制(李乃志等,2006;冯建之等,2011)。边界断裂控制了变质核杂岩的出露范围(胡正国等,1994;张进江等,2003;牛树银等,2009)。不同时代的各类岩浆岩和脉体侵入到变质核杂岩中,使得华阳川地区的铀矿成为一个由“古老基底+深大断裂+岩浆作用”耦合形成的多种类型、复杂成因铀矿床。

根据区内铀成矿规律,与铀成矿关系密切的地质体主要有太华岩群、华阳川断裂带、老牛山花岗岩体及华山花岗岩体等。太华岩群作为基底“变质核杂岩”,按岩性可分为“表壳岩系”和“TTG岩套”,形成年代相对集中在~2.8 Ga、~2.5 Ga(Diwu et al., 2013; 万渝生等, 2017)和2.0~1.8 Ga等3个阶段(倪志耀等, 2003; Wan et al., 2006; Liu et al., 2009),为区内各类成岩成矿事件提供了物质来源和赋矿空间。华



1. 侏罗纪—白垩纪花岗岩; 2. 长城系熊耳群; 3. 古元古代花岗岩; 4. 古元古代闪长岩; 5. 古元古代铁铜沟组; 6. 太峪岭片麻岩套; 7. 翁翁铺片麻岩套; 8. 太华岩群; 9. 构造单元分界断裂; 10. 一般断裂; 11. 韧性剪切带; 12. 不整合界面; 13. 华阳川铀矿区; 14. 地名; 15. 铀矿床/矿(化)点

图 1 小秦岭华阳川地区地质简图(据高成等, 2017)

Fig. 1 Sketch geological map of the Huanyangchuan area, Xiaoqinling Mountains

华阳川断裂带是一个具有韧性剪切带性质的深大断裂, 它的一系列次级断裂控制了区内铀矿化带的分布范围和铀矿体的产出形态。华阳川断裂带内构造片岩的黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为(419±0.6)Ma, 代表了加里东时期的主导构造变形事件(郭威等, 2008; 牛树银等, 2009)。华阳川矿区外围的华山和老牛山花岗岩的主体形成时代为印支期(223~205 Ma)和燕山期(152~131.9 Ma)(朱赖民等, 2008; 郭波等, 2009; 王晓霞等, 2011, 2015; 齐秋菊等, 2012; 张兴康等, 2015), 代表了东秦岭造山带印支期、燕山期 2 次重要的花岗岩浆活动, 为后期 U 元素的叠加改造成矿提供了流体和驱动力。

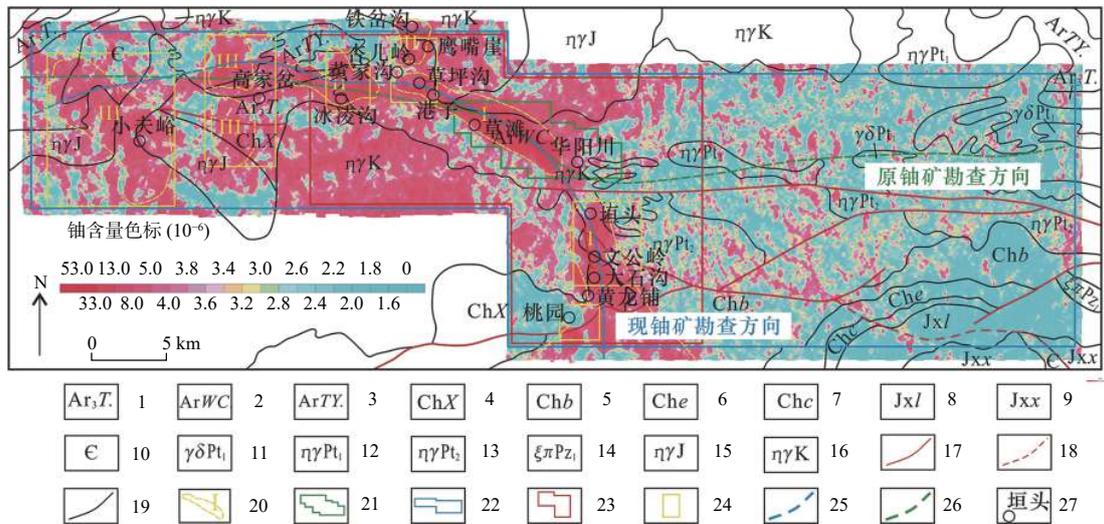
2 找矿方法及其效果

在对华阳川地区地质演化特征详细研究和系统分析已有物、化探资料的基础上, 采取(区域及专项)地质填图结合综合物探方法(遥感影像解译、航空伽玛能谱及磁法测量、活性炭及坑内伽玛测量、激电及磁法剖面测量以及地面伽玛测量)、探矿工程验证等找矿方法组合, 在本区取得了较好的找矿效果。

2.1 航空伽玛能谱及磁法测量

由于华阳川地区的铀矿主要赋存在基底太华岩群中, 因此太华岩群是找矿工作的主要目标地质体。航空伽玛能谱及磁法测量具有快速高效、不受地形限制的特点, 能为面积性铀矿异常提供定位依据(柯丹等, 2009; 车永飞, 2015)。在选择航空伽玛能谱测量范围时, 主要考虑了太华岩群东西向展布的特征(图 1)。本文涉及的航空物探工作采用 1:1 万航空伽玛能谱测量, 同步辅助 1:1 万航空磁法测量。全区测网控制实际密度 100 m, 采用随地形起伏的飞行方式测量, 实际平均飞行高度为 136 m, 均优于目标要求。由于镭元素的放射性周期较短, 在地表中存留较少, 可以忽略不计。因此, 1:1 万航空伽玛能谱主要测量 U、Th、K 等放射性元素的伽玛能谱和磁异常, 最后根据异常数据总结出区域性铀成矿规律和控矿因素(杨海等, 2019)。

根据 1:1 万航空伽玛能谱测量成果(图 2), 发现华阳川地区的 U 异常有明显沿华山岩体和老牛山岩体边缘分布的趋势, 故后续工作及时将找矿方向由先前的向东部太华岩群分布区延伸改变为向南部围绕老牛山、华山岩体边部延伸的方向(杨海等, 2019)。



1. 太古界太华岩群; 2. 太古界翁岔铺片麻岩套; 3. 太古界太峪岭片麻岩套; 4. 古元古界长城系熊耳群; 5. 古元古界长城系鳖盖子组;
6. 古元古界长城系二道河组; 7. 古元古界长城系陈家涧组; 8. 中元古界蓟县系龙家园组; 9. 中元古界蓟县系巡检司组; 10. 寒武系;
11. 古元古代花岗岩闪长岩; 12. 古元古代二长花岗岩; 13. 中元古代二长花岗岩; 14. 早古生代正长斑岩; 15. 侏罗纪二长花岗岩;
16. 白垩纪二长花岗岩; 17. 一般断裂; 18. 推测断裂; 19. 地质界线; 20. 1:1万航空伽玛异常区及级别; 21. 华阳川铀矿区;
22. 1:1万航空伽玛测量区; 23. 1:2.5万专项地质填图区; 24. 航空伽玛异常检查区; 25. 原铀矿勘查方向;
26. 现铀矿勘查方向; 27. 地名

图2 1:1万航空伽玛能谱测量成果图(底图据杨海等, 2019)

Fig. 2 1:10 000 achievement map of airborne gamma spectrum measurement

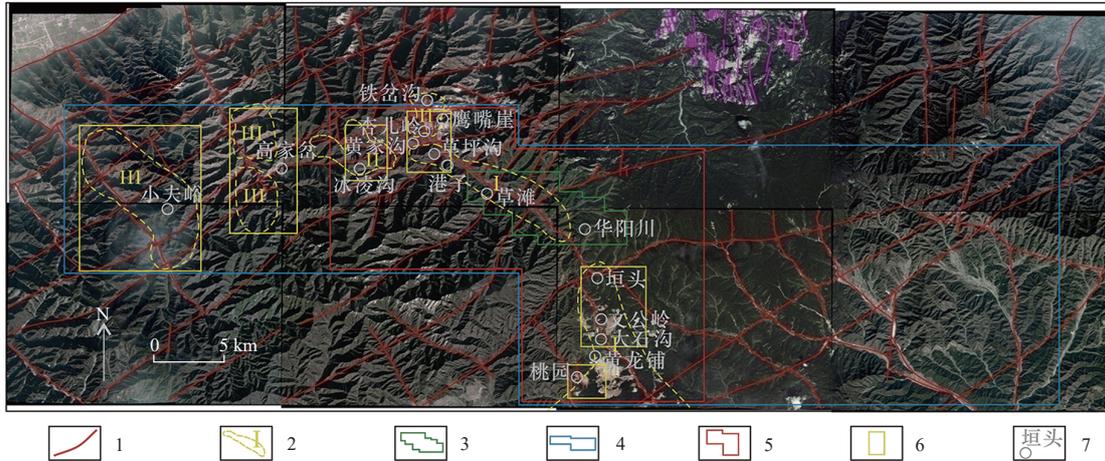
根据1:1万航空伽玛能谱及磁异常综合成果最终圈定出3类、7个铀异常区(图2),选择其中的小夫峪、高家岔、冰凌沟、垣头和桃园等地的5个可工作区作为重点异常检查区。根据“从已知到未知”的找矿原则,选择与华阳川矿区U异常相连接的外围铀异常区域,连片部署了1:2.5万专项地质填图工作(图2)。

为评价航空伽玛能谱及航空磁法测量工作的有效性,对1:1万航空伽玛能谱测量数据按1:5万比例尺进行了抽稀。结果表明:在对铀异常的控制程度上,1:5万航空伽玛能谱测量数据也可以满足本区寻找面积性铀异常区的需求。因此,为降低工作成本、提高找矿效率,今后在华阳川地区乃至秦岭等同类地区可尝试采用1:2.5~1:5万等小比例尺航空伽玛能谱测量来圈定面积性铀异常范围。由于工作区内分布的太华岩群岩性主要为“表壳岩系”和“TTG岩套”,与华山、老牛山等印支期—燕山期花岗岩体同属中酸性侵入岩类,物质成份十分接近,若无构造、矿化蚀变等现象,磁性都普遍较弱且差异不明显,导致航空磁法测量在控制铀异常方面受到了限制。但是由于磁法测量成本较低、方法简单,可以作为辅助工作部署,为区域尺度上的圈定岩体边界和判别控矿断裂深部产状提供有利信息。

2.2 遥感影像解译

华阳川地区处于秦岭腹地,地形陡峻、地面植被和覆盖物较厚,是典型的“高山峡谷覆盖区”。为掌握与铀成矿有关的区域性断裂构造、变质地层、侵入岩及矿化蚀变信息等方面信息,为研究区域成矿规律、圈定控矿构造、缩小工作范围提供依据,采用遥感地质解译是区内开展地质矿产调查工作的必要手段。本次工作采用1:2.5万遥感影像解译,工作范围以1:5万华山幅和华阳川幅等2幅区域地质图为底图来确定,数据来源为wordview-2高分辨率遥感影像。中新太古代—古元古代太华岩群是区内的结晶基底,也是铀矿赋存的主要围岩,岩性主要为条带状和混合岩化发育的中—高深变质岩,可达到高角闪岩相和麻粒岩相。wordview-2高分辨率遥感影像数据,适用于矿物组分的蚀变提取,适合于太华岩群这种中—高深变质岩区的地质解译。wordview-2遥感影像的多光谱波段空间分辨率为1.8 m,全色空间分辨率达到0.46 m,且提供8个分布比较连续的彩色波段,能够有效提高目标解译的准确度。

根据1:2.5万遥感影像解译成果,在图幅内识别出北西—南东向(早期)、北东—南西(中期)和近南北向断裂(晚期)3组规模较大的区域性断裂(图3)。根据



1. 1 : 2.5 万遥感影像解译的断裂; 2. 1 : 1 万航空伽玛异常区及级别; 3. 华阳川铀矿区; 4. 1 : 1 万航空伽玛测量区; 5. 1 : 2.5 万专项地质填图区; 6. 航空伽玛异常检查区; 7. 地名

图 3 1 : 2.5 万 wordview-2 遥感影像解译的区域断裂系统

Fig. 3 1 : 25 000 regional fault system interpreted by wordview-2 remote sensing image

1 : 2.5 万遥感影像解译的断裂体系发育特征(结合 1 : 1 万航空伽玛能谱异常和地质填图获得的铀矿化线索的配套关系), 认为遥感解译出的近南北向断裂(晚期)为区内铀控矿构造和铀矿化带的延伸方向, 这一认识为后续找矿工作部署(如路线方向和工程部署)提供了重要指导。1 : 2.5 万遥感影像解译工作与 1 : 1 万航空伽玛能谱及磁法测量工作的开展, 并与大比例尺专项地质填图工作互相指导和验证。由于 1 : 2.5 万遥感影像解译初步达到较好的效果, 建议今后本区或同类型地质工作可尝试更大比例尺的 wordview-2 多光谱遥感数据解译, 以探索效果更好的工作尺度, 更有利于高效指导找矿。

2.3 活性炭及坑内伽玛测量

活性炭测量是铀矿勘查的重要手段, 对覆盖区矿体展布特征具有显著的指示作用。活性炭测量的工作原理是通过测量土层中被活性炭吸附氮的衰变子体的 γ 强度, 反映出地下氢浓度的分布, 以氢的异常间接反映出铀的异常, 进而达到圈定铀矿化异常地段的目的(王勇等, 2017)。根据对前期航空伽玛能谱测量和遥感解译圈定的铀异常区的检查结果, 铀控矿地质体(矿化带)的宽度可达数十米, 长度可延伸至上百米, 延伸方向总体呈近南北向。因此, 本次活性炭及坑内伽玛测量网度设计点距为 10 m、线距为 50 m, 控制比例可达到 1 : 2000。同时, 考虑到华阳川区内铀矿(化)带向矿区西北及外围的延伸方向, 将活性炭及坑内伽玛测量的重点工作区部署在黄家沟-草坪沟

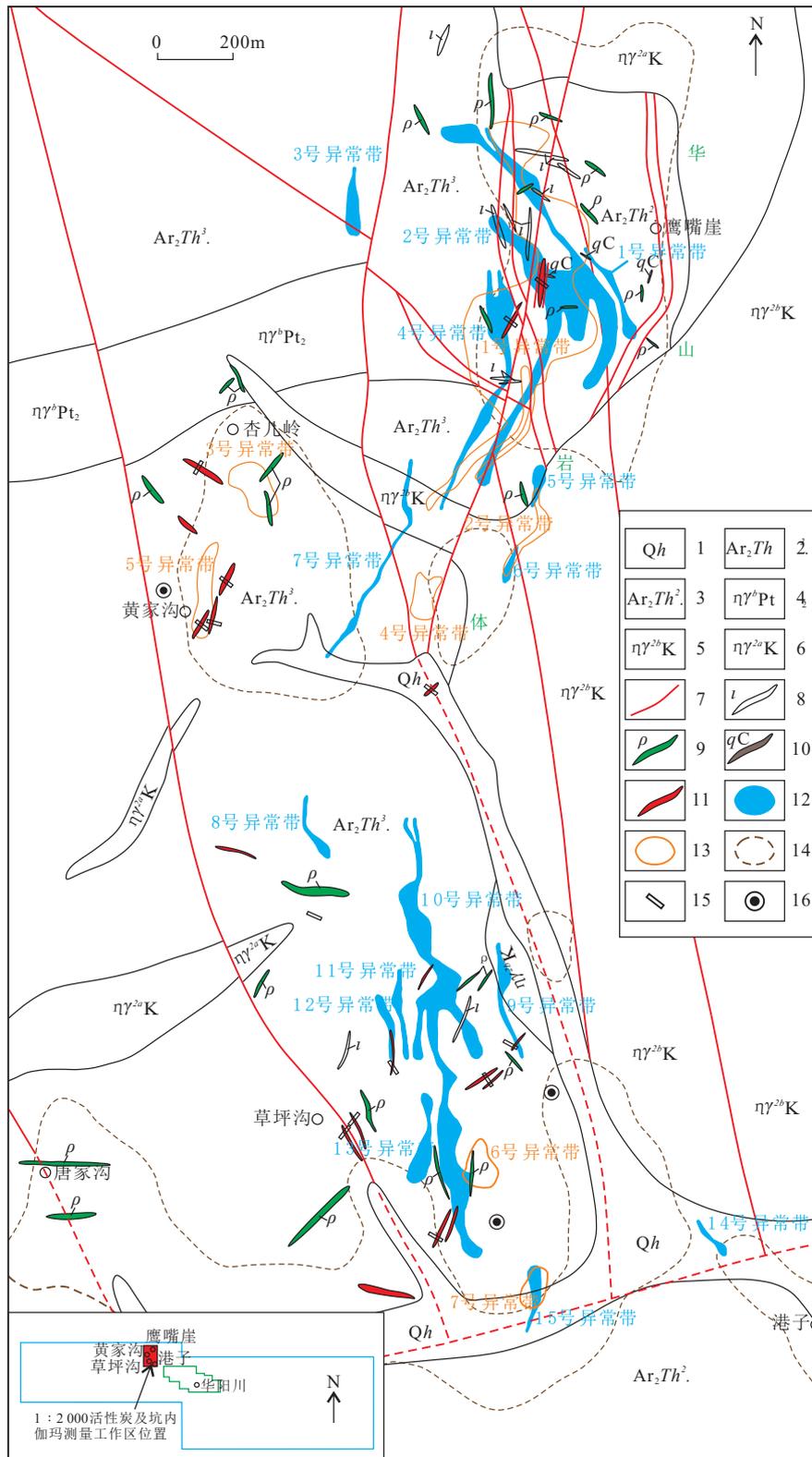
一带(图 4)。

根据活性炭及坑内伽玛测量结果, 在草坪沟-黄家沟一带圈定出 2 处放射性异常区(图 4)。综合活性炭氢异常和坑内伽玛异常的形态、范围及空间展布, 分析放射性异常与铀矿化带的关系, 为后续 1 : 1 万激电测深及磁法剖面测量、地质填图、探矿工程部署等提供依据。在方法实践中, 考虑到放射性异常呈带状分布, 对测量网度的线距进行了抽稀, 将更多的工作量用于扩大测量面积, 结果表明是行之有效的。因此, 根据铀矿化带的规模和产出特征, 灵活采用不同比例尺的活性炭及坑内伽玛测量, 能够达到控制铀矿化带分布特征的效果。

2.4 激电测深及磁法剖面测量

激电测深及磁法剖面测量的目的了解控矿构造和铀矿化带的深部产状及延伸情况, 结合地质填图(矿化带追索)的结果, 为探矿工程(探槽和钻孔)部署提供指导。因此, 在黄家沟和草坪沟等圈定的 2 处活性炭及坑内伽玛异常较好的地带, 选择铀地表矿化较好的位置部署了 4 条 1 : 1 万激电测深及磁法剖面。剖面设计为东西向, 测点点距为 10 m, 编号自南向北分别为 L01、L02、L03 和 L04(图 5)。

由 4 条激电测深剖面的视电阻率(ρ_s)、视极化率(η_s)拟断面图(图 5)可以看出, 视电阻率和视极化率在反映构造破碎带或岩性界线上具有较好的指示效果。如: L01 剖面在 42~44 点显示的东倾的视电阻率高值带指示了地表控矿破碎带在深部的延伸状况;



1. 冲洪积层; 2. 太华岩群第三岩性段; 3. 太华岩群第二岩性段; 4. 片麻状中粗粒黑云二长花岗岩; 5. 中粒黑云二长花岗岩; 6. 细粒黑云二长花岗岩; 7. 断层; 8. 推测断层; 9. 花岗伟晶岩脉; 10. 石英方解石脉; 11. 含钠伟晶岩脉; 12. 活性炭异常区; 13. 坑内伽玛总量异常区; 14. 航空伽玛异常区; 15. 已施工探槽; 16. 已施工钻孔

图4 黄家沟一带 1 : 2 000 活性炭及坑内伽玛综合成果图

Fig. 4 1 : 2 000 comprehensive achievement map of activated carbon and gamma ray measurement in Huangjiagou

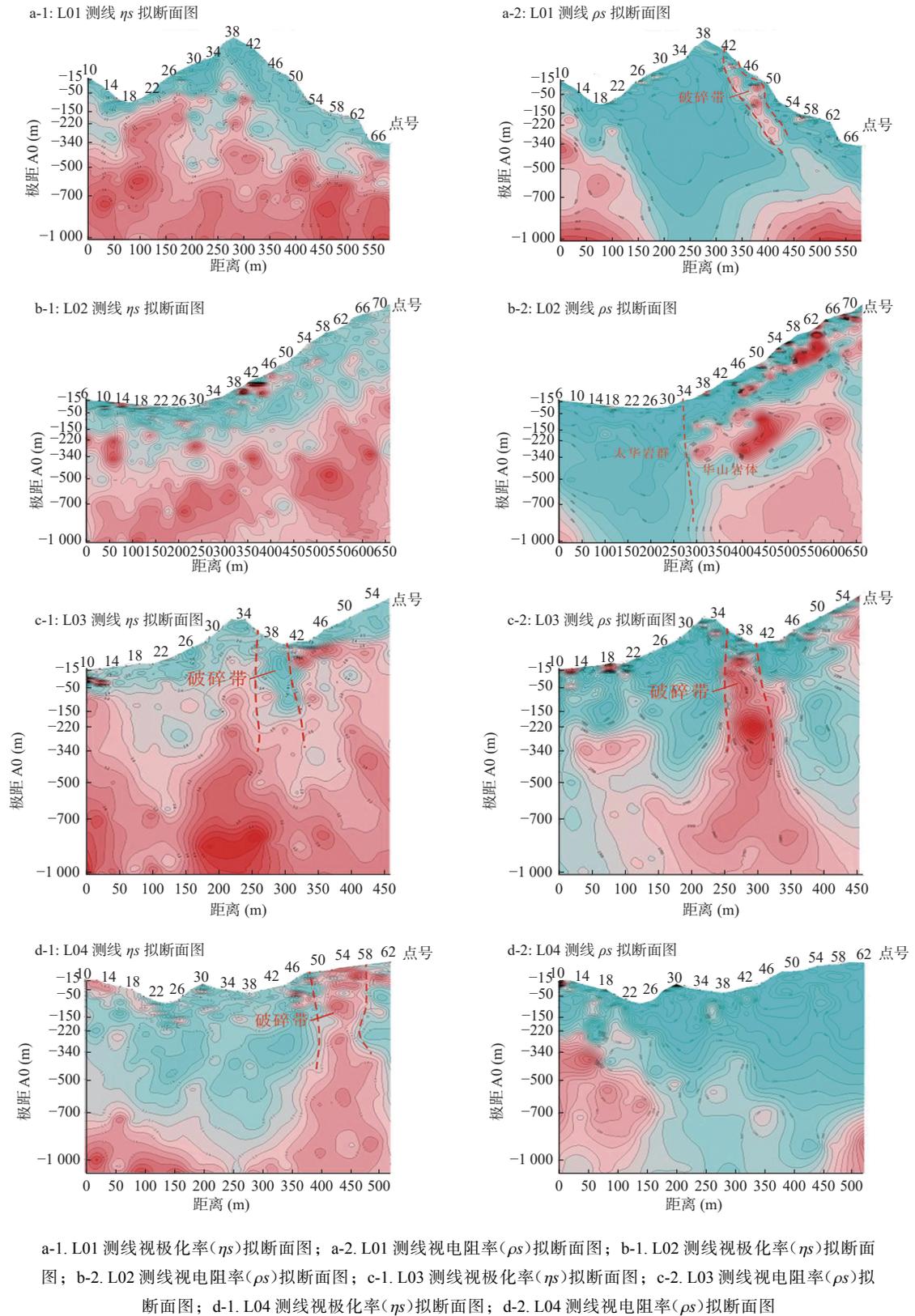


图 5 1 : 1 万激电测深视极化率(η_s)和视电阻率(ρ_s)拟断面图

Fig. 5 Apparent chargeability (η_s) and apparent resistivity (ρ_s) pseudosection of 1 : 10 000 induced polarization sounding

L02 剖面在 32 点东西 2 侧的视电阻率高、低阻的深部延伸状态指示了华山岩体和太华岩群的侵入接触界

线的产状; L03 剖面在 36~40 点的视极化率低值和视电阻率高值同时指示了地表矿化破碎带在深部的延

伸状况; L04剖面在48~56点的视极化率高值则指示了地表矿化破碎带在深部的延伸状况。上述特征表明工作区内: 低电阻率反映古老破碎地层(如太华岩群中的破碎带), 高电阻率对应岩体(如燕山期的华山岩体)或变质岩体(如古元古代的侵入岩脉)的视电阻率, 以及矿化破碎带具有高极化率的特征。

根据4条激电剖面的视电阻率、视极化率拟断面图特征(图5), 判断异常区内的控矿破碎带总体呈南北延伸、倾向向东的特征。结合地质填图工作, 确定后续探矿工程的勘查线方向为近东西向(105°), 并将施工钻孔的孔斜设计为西倾($70^{\circ}\sim 80^{\circ}$)。磁法测量作为辅助工作, 剖面位置及测点与激电测深重合。总体来看, 磁测剖面仅在具有蚀变现象的断裂破碎带附近显示出低于围岩的较低异常值, 能为综合解译提供一些弱指示信息, 推测原因可能为区内岩石物性差异较小所致。

2.5 区域及专项地质填图

地质填图工作是开展地面找矿工作的主要手段。根据工作目的大体可划分为3个阶段, 分别为1:2.5万、1:1万和大比例尺矿化体追索(1:2000~1:100)等3个尺度。1:2.5万地质填图属于区域性填图工作, 部署在1:1万航空伽玛能谱及磁法测量和1:2.5万遥感影像解译工作之后, 目的是对获得的区域性构造、地层、岩浆岩及矿化蚀变信息进行测量和检查。考虑到华阳川铀矿区外围, 沿华山和老牛山岩体边缘, 集中分布着冰凌沟、黄家沟、垣头、桃园等4个铀异常区, 是华阳川矿区铀成矿带的延伸(图2、图3), 具有较好的铀成矿地质条件, 故将1:2.5万地质填图的工作范围连片部署在华阳川铀矿区的外围区域(图6)。在已有1:5万区调成果的基础上, 1:2.5万地质填图工作重点关注与成矿有关的地质体, 对区内的地层、岩性、构造、岩浆岩等成矿地质体进行了细化, 对区内的铀成矿规律、控矿因素、典型矿床矿点进行了类比研究(图6)。结合其他工作方法手段的综合成果, 1:2.5万地质填图工作最终选择矿化显示较好的黄家沟-草坪沟铀异常区作为重点工作区(图6), 为下一步1:1万专项地质填图及大比例尺矿化带(体)追索、活性炭及坑内伽玛测量、激电测深及磁法剖面测量等找矿工作部署提供支撑。1:1万专项地质填图及大比例尺矿化带(体)追索工作部署在活性炭及坑内伽玛测量工作之后(图6), 起到对活性炭及坑内伽玛异常所圈定的矿化带(体)的

测量和检查作用。对1:1万专项地质填图所控制的矿化带(体)采用大比例尺追索填图(1:2000~1:100), 测量地表产状、规模和分布特征, 为探矿工程部署提供依据。在整个填图过程中, 地面伽玛顺检辅助使用, 可以为U异常位置判断、铀矿化带(体)定位提供有效指示。

2.6 伽玛辅助测量

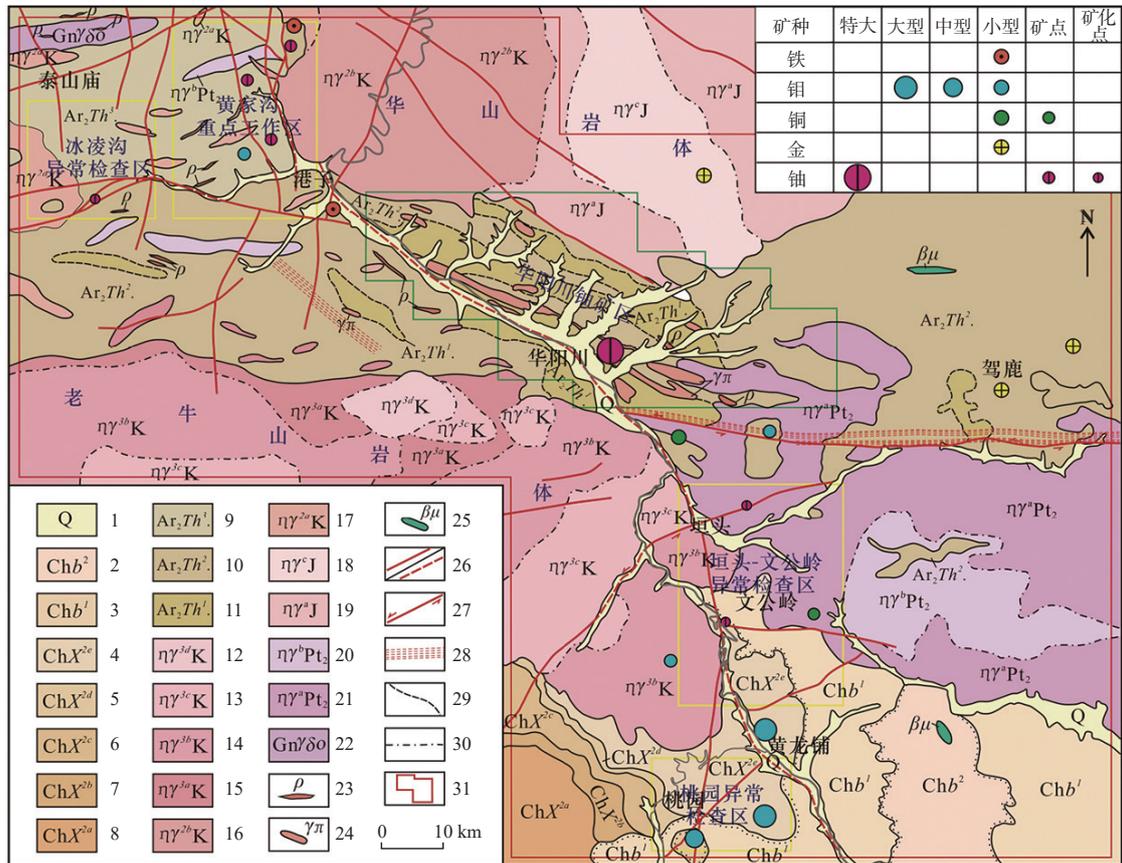
铀矿作为放射性矿产资源, 除了采取传统的找矿方法外, 伽玛辅助测量(如地面伽玛、坑内伽玛、井内伽玛以及岩芯伽玛等)是十分重要的找矿手段, 贯穿于找矿过程的各个阶段, 能为铀矿化信息的判断提供指示, 甚至可以作为铀矿品位确定的依据。伽玛辅助测量, 在不同的工作阶段, 采用不同的仪器和工作方法, 为不同的工作目的服务。如配套1:2.5万地质填图的地面伽玛顺检目的是圈定矿化异常区; 配套1:1万专项地质填图的地面伽玛顺检目的是圈定矿化带; 配套矿化带(体)追索填图的地面伽玛顺检目的是确定矿化体地表延伸情况; 配套剥土刻槽工程的伽玛编录目的是为采样和圈定矿化体边界; 配套钻孔伽玛测量分为井中测量和岩芯测量, 目的是为圈定矿(化)体边界、采样和掌握U元素含量及品位。伽玛辅助测量能有效的指导地质工作开展, 并且与其他方法手段找矿工作成果的对应性较好, 是放射性矿产勘查必不可少的工作方法。

2.7 探矿工程

探矿工程的目的是了解矿(化)体的地表和深部延伸情况, 同时通过岩矿取样研究矿(化)体地质特征。本次探矿工程主要部署在黄家沟和草坪沟一带的重点异常区, 考虑到绿色勘查的因素, 探矿工程采用揭露较少的剥土和钻探工程。剥土工程用于了解矿(化)体地表产状和延伸情况, 依据大比例尺矿(化)体追索填图结果部署。钻探工程用于了解矿(化)体深部产状和延伸情况, 依据剥土工程的见矿情况, 同时参照活性炭测量、矿(化)体追索填图和激电测量结果部署钻探工程。虽然矿化带走向受区域大断裂控制, 但在局部矿(化)体产状则受次级小断裂控制, 且由于区内风化层覆盖严重, 难以从地表判断矿(化)体产状, 故剥土刻槽采用十字型采样方案, 样品采集按照岩性、相变、伽玛异常、构造带、脉体及工业指标等因素综合确定。根据样品化验结果, 在部署的16个剥土工程中, 见矿率达到90%以上, 3个施工的钻孔中见矿率达到100%, 表明前期找矿方法取得了较好的效果。

根据找矿结果和相关研究成果,最终确认在华阳川地区至少存在 3 种铀矿类型,分别是伟晶岩脉(细晶岩

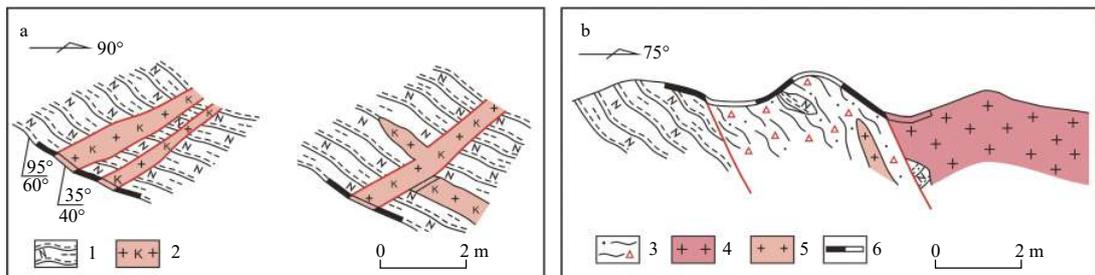
脉、花岗岩脉)型铀矿、碳酸岩脉型铀矿和叠加改造(破碎带蚀变岩)型铀矿(图 7、图 8)。根据铀矿分布



1. 冲洪积层; 2. 长城系整盖子组上段; 3. 长城系整盖子组下段; 4. 长城系熊耳群上段第 5 岩性段; 5. 长城系熊耳群上段第 4 岩性段;
6. 长城系熊耳群上段第 3 岩性段; 7. 长城系熊耳群上段第 2 岩性段; 8. 长城系熊耳群上段第 1 岩性段; 9. 太华岩群第 3 岩性段; 10. 太华岩群第 2 岩性段;
11. 太华岩群第 1 岩性段; 12. 中粗粒含斑黑云二长花岗岩; 13. 中粒含斑黑云二长花岗岩; 14. 中细粒含斑黑云二长花岗岩;
15. 细粒含斑黑云二长花岗岩; 16. 中粒黑云二长花岗岩; 17. 细粒黑云二长花岗岩; 18. 中细粒角闪二长花岗岩; 19. 细粒含角闪二长花岗岩;
20. 片麻状中粗粒黑云二长花岗岩; 21. 片麻状细粒黑云二长花岗岩; 22. 英云闪长片麻岩; 23. 花岗质伟晶岩脉; 24. 花岗斑岩;
25. 辉绿岩脉; 26. 断层/推测断层; 27. 实测平移断层; 28. 韧性剪切带; 29. 片麻理接触界线; 30. 脉动接触界线; 31. 1:2.5 万专项地质填图范围

图 6 专项地质填图成果图

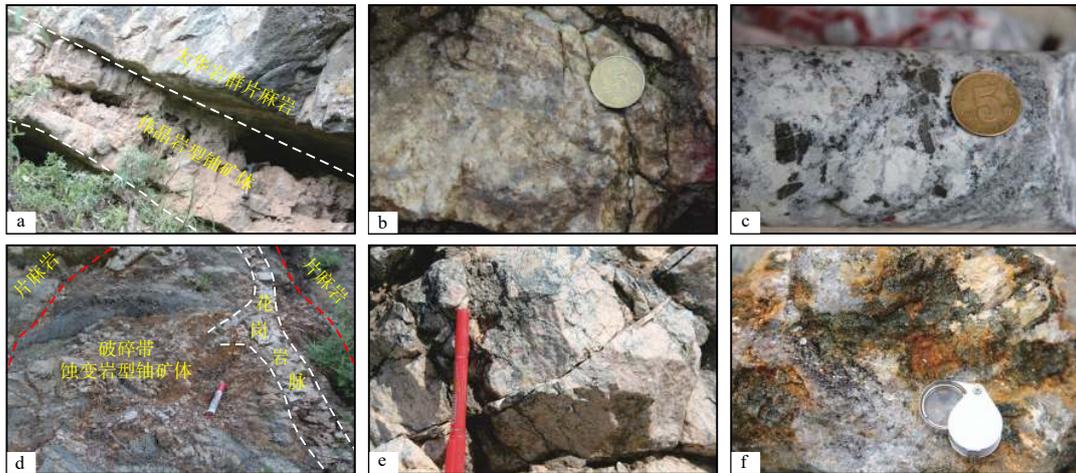
Fig. 6 Achievement map of special geological survey



- a. 伟晶岩型铀矿剥土素描图; b. 破碎带蚀变岩型铀矿剖面素描图; 1. 黑云母斜长片麻岩; 2. 钾长石伟晶岩; 3. 破碎带蚀变带;
4. 花岗岩体; 5. 花岗岩脉; 6. 样品采集位置

图 7 华阳川地区的伟晶岩型和破碎带型铀矿体素描图

Fig. 7 Sketch maps of pegmatite type and fracture zone type uranium ore bodies in Huayangchuan area



a. 伟晶岩型铀矿体; b. 伟晶岩型铀矿石; c. 伟晶岩型铀矿岩芯; d. 破碎带蚀变岩型铀矿体;
e. 破碎带蚀变岩型铀矿体中侵入的花岗伟晶岩脉; f. 破碎带蚀变岩型铀矿石

图8 华阳川地区新发现的2种类型铀矿体及矿石照片

Fig. 8 Photographs of uranium ore bodies and ores in the periphery of Huayangchuan area

规律,伟晶岩脉型铀矿(细晶岩脉、花岗岩脉)主要分布在黄家沟一带的太华岩群中,叠加改造(破碎带蚀变岩)型铀矿分布在黄家沟-草坪沟一带的华山岩体外围的太华岩群破碎带中。

3 找矿方法组合及其成果

3.1 找矿方法组合

找矿工作遵循地质可靠程度逐渐提高的原则,采取从“矿化异常区→成矿有利区→矿化带→矿化体→矿体地表延伸→矿体深部延伸”的工作途径。找矿方法的选择遵循与成矿地质条件和工作目的相适应原则,在消化吸收前人已有的地质资料和研究成果的基础上,选择工作范围、明确目标地质体、优选找矿方法和制定实施方案(图9)。在找矿过程中,1:1万航空伽玛能谱及磁法测量、1:2.5万遥感影像解译和1:2.5万地质填图等面积性工作,主要用于铀矿化异常区和铀成矿有利区等工作范围的选择。1:2000活性炭及坑内伽玛测量用于圈定铀矿化带,并通过1:1万地质填图进行检查。对出露较好的铀矿化体可采用大比例追索填图以控制其地表延伸情况,并为探矿工程部署提供依据。1:1万激电测深及磁法剖面测量为钻探部署提供指导。在上述地面工作开展时,辅以伽玛顺检,为铀异常判断提供参考。

找矿方法的实施具有一定的探索性。在提高找矿效率、降低找矿风险和控制找矿成本的原则下,总

结出适合华阳川地区铀矿的找矿方法组合及建议(图9),提出各类方法的部署和实施建议(图10)。总之,以航空伽玛能谱测量快速发现异常,以活性炭及坑内伽玛测量准确定位矿化带,以不同比例尺度的专项地质填图为基础,辅以遥感解译、激电测深及磁法测量,最后通过探矿工程验证,是实现华阳川地区这种高山峡谷覆盖区硬岩型铀矿快速定位的核心技术方法组合。在找矿实践中,各种方法之间逐层递进、互相验证,实现最优化组合,为本区及同类型找矿工作提供了经验和借鉴。

3.2 找矿方向

1:1万航空伽玛能谱测量成果(图2),发现华阳川地区的铀异常有明显沿华山岩体和老牛山岩体边缘分布的趋势(杨海等,2019),为后续找矿工作部署指明了方向。又根据本次找矿成果,认为华阳川地区有伟晶岩脉(细晶岩脉、花岗岩脉)型铀矿、碳酸岩脉型铀矿和叠加改造(破碎带蚀变岩)型铀矿(图7、图8)等3种类型铀矿化,并显示出不同的分布规律。如伟晶岩脉(细晶岩脉、花岗岩脉)型铀矿主要分布在华阳川矿区西部及外围草坪沟-黄家沟一带的太华岩群中;碳酸岩脉型铀矿大量集中分布在华阳川矿区东南部的华阳川断裂带上盘破碎带中;叠加改造(破碎带蚀变岩)型铀矿在分布在草坪沟-黄家沟一带的华山岩体外围的太华岩群破碎带中。根据相关研究成果,伟晶岩脉(细晶岩脉、花岗岩脉)型铀矿形成于古元古代(2.0~1.8 Ga)华北克拉通南

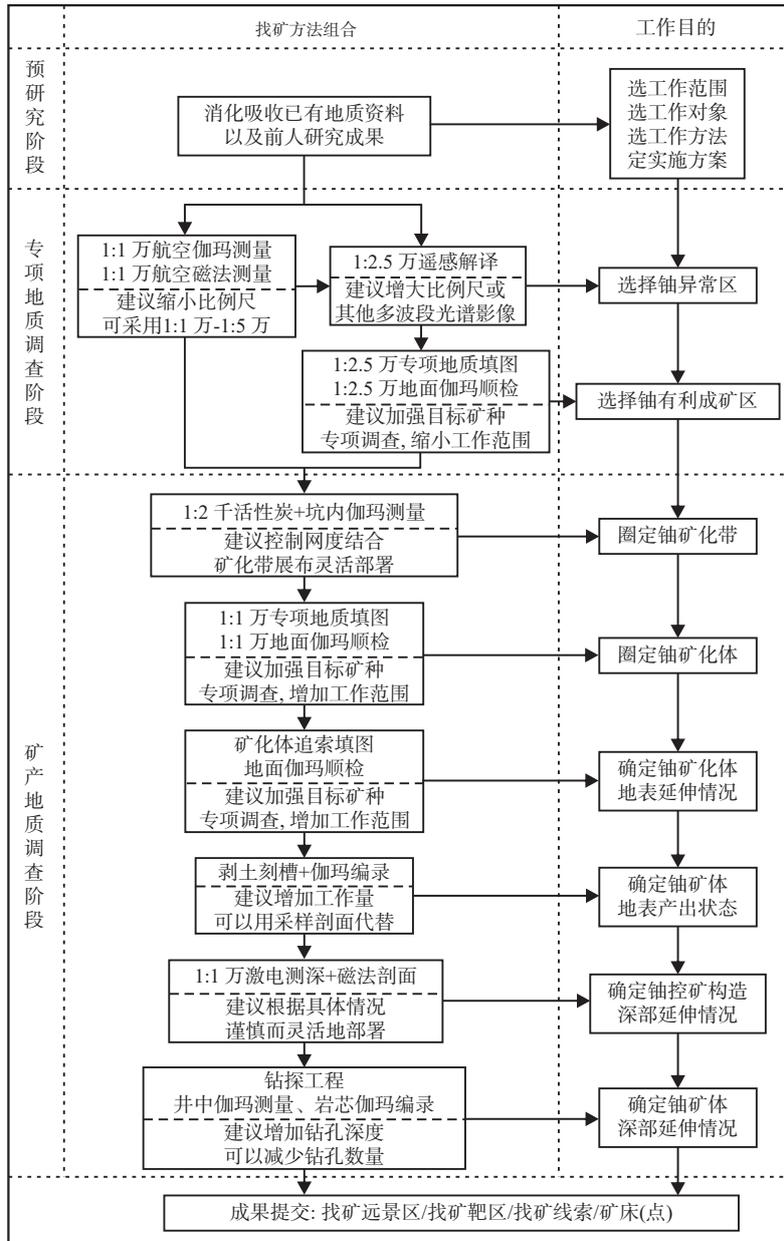


图 9 华阳川地区铀矿找矿方法组合及目的

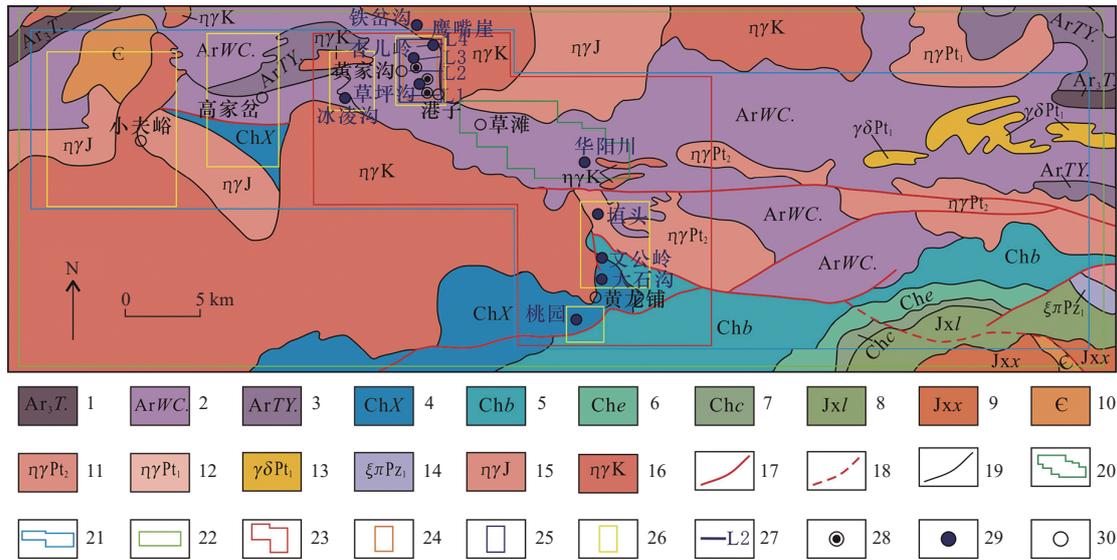
Fig. 9 Prospecting methods and purpose for uranium deposits in Huayangchuan area

缘基底拼接过程中的构造花岗岩浆活动(李普涛等, 2019, 2022; 江宏君等, 2020); 碳酸脉型铀矿为三叠纪扬子板块俯冲碰撞华北板块南缘(+南秦岭微地块)造山过程中构造碳酸岩浆活动形成的(陈衍景等, 2009, 2010; 许成等, 2009, 2017); 叠加改造(破碎带蚀变岩)型铀矿可能与中生代以来东秦岭构造花岗岩浆活动对已有富铀地质体的叠加改造有关(李普涛等, 2019, 2022)。因此, 伟晶岩脉(细晶岩脉、花岗岩脉)型铀矿找矿应重点关注基底太华岩群中的古元古代各类岩脉; 碳酸岩脉型铀矿应重点关注

三叠纪岩浆活动发育地区的断裂破碎带; 叠加改造(破碎带蚀变岩)型铀矿应重点关注受已有富铀地质体分布区内断裂及中生代以来各类岩浆岩分布区。

3.3 找矿成果

通过对小秦岭-北秦岭地区的成矿地质背景分析、矿产分布规律研究, 并结合本次工作进展情况, 在秦岭三级成矿带(Ⅲ-63 华北陆块南缘 Fe-Cu-Au-Mo-W-Pb-Zn-U-REE-铝土矿-硫铁矿-萤石-煤成矿带)中, 圈定出“华阳川-洛南铀钨铅钼稀土找矿远景区”



1. 太古界太华岩群; 2. 太古界翁盆铺片麻岩套; 3. 太古界太峪岭片麻岩套; 4. 古元古界长城系熊耳群; 5. 古元古界长城系整盖子组; 6. 古元古界长城系二道河组; 7. 古元古界长城系陈家涧组; 8. 中元古界蓟县系龙家园组; 9. 中元古界蓟县系巡检司组; 10. 寒武系; 11. 古元古代花岗闪长岩; 12. 古元古代二长花岗岩; 13. 中元古代二长花岗岩; 14. 早古生代正长斑岩; 15. 侏罗纪二长花岗岩; 16. 白垩纪二长花岗岩; 17. 断裂; 18. 推测断裂; 19. 地质界线; 20. 华阳川铀矿区; 21. 1:1万航空伽玛/磁法测量区(找矿远景区); 22. 1:2.5万遥感影像解译区; 23. 1:2.5万专项地质填图区; 24. 1:1万专项地质填图区(找矿靶区); 25. 1:2000活性炭及坑内伽玛测量区; 26. 航空伽玛异常检查区(重要找矿线索区); 27. 1:1万激电测深/磁法剖面; 28. 已施工钻孔; 29. 铀矿床/矿(化)点; 30. 地名

图 10 找矿方法实施及找矿成果图

Fig. 10 Implementation of prospecting method and prospecting results

(图 10)。该找矿远景区内已发现多个大型铀钼矿床, 及众多铀钼铅稀土矿(化)点。

在“华阳川-洛南铀钼铅钼稀土找矿远景区”的基础上, 围绕优势矿种及主攻矿种, 通过对面积性铀异常(航空伽玛/磁法、地面活性炭/坑内伽玛等异常)的地面检查(激电/磁法剖面、地质地化剖面、剥土及钻探工程等手段), 在位于华阳川铀矿区西部外围的黄家沟一带(鹰嘴崖、杏儿岭及草坪沟等地)圈出 3 个铀多金属找矿靶区(图 10)。该找矿靶区内的铀矿(化)体在地表和深部均具一定规模的延伸。

重要找矿线索共发现 6 个: 位于小夫峪、高家岔的 2 个面积性铀异常(航空伽玛异常)(图 10), 因工作受限未进行地面检查工作, 但该区铀成矿地质条件良好, U 异常面积大强度高, 可作为重要的铀矿找矿线索; 位于冰凌沟、垣头-文公岭-大石沟、桃园的 3 个面积性 U 异常(航空伽玛异常)(图 10), 通过地面检查(追索填图、地质地化剖面、剥土连续捡块样等), 获得较好的找矿信息, 可作为下一步重点工作地段。位于铁岔沟附近的面积性 U 异常(航空伽玛异常), 属于黄家沟一带(草坪沟-杏儿岭-鹰嘴崖找矿靶区)的外围延伸地段, 后续工作可合并进行。

4 结论

(1)以航空伽玛能谱测量快速发现异常, 以活性炭及坑内伽玛测量准确定位矿化带, 以不同比例尺的专项地质填图为基础, 辅以遥感解译、激电测深及磁法测量, 并通过探矿工程验证, 是实现华阳川地区这种高山峡谷覆盖区硬岩型铀矿快速定位的核心技术方法组合。

(2)1:1万航空伽玛能谱测量抽稀至 1:5万比例尺仍能满足圈定异常的目标; Wordview-2 遥感影像解译可尝试较大比例尺度的解译; 1:1万航空磁法或地面磁法剖面测量在控制 U 异常方面受到了限制, 可能与工作区内以花岗岩质岩为主的岩性有关; 活性炭及坑内伽玛测量的网度可根据铀矿化异常带的分布方向灵活设计; 作为放射性元素, 伽玛测量是铀矿勘查是必不可少的工作手段, 也是铀矿勘查区别其他非放射性矿产勘查的主要特征。

(3)华阳川地区至少存在伟晶岩脉(细晶岩脉、花岗岩脉)型铀矿、碳酸岩脉型铀矿和叠加改造(破碎带蚀变岩)型铀矿等 3 种类型铀矿, 显示出不同的分布

规律。伟晶岩脉(细晶岩脉、花岗岩脉)型铀矿找矿应重点关注基底太华岩群中的古元古代各类岩脉;碳酸岩脉型铀矿应重点关注三叠纪岩浆活动发育地区的断裂破碎带;叠加改造(破碎带蚀变岩)型铀矿应重点关注已有富铀地质体分布区内断裂及中生代以来各类岩浆岩分布区。

(4)在秦岭三级成矿带(Ⅲ-63华北陆块南缘Fe-Cu-Au-Mo-W-Pb-Zn-U-REE-铝土矿-硫铁矿-萤石-煤成矿带)中,圈定出“华阳川-洛南铀钨钼钽稀土找矿远景区”。在位于华阳川铀矿区西部外围的黄家沟一带(鹰嘴崖、杏儿岭及草坪沟等地)圈出3个铀多金属找矿靶区。在小夫峪、高家岔、冰凌沟、垣头-文公岭-大石沟、桃园及铁岔沟等地发现6个重要找矿线索。

参考文献(References):

- 车永飞,张云龙,赵英俊,等.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*,2015,31(1):44-51.
- CHE Yongfei, ZHANG Yunlong, ZHAO Yingjun, et al. Application of airborne spectrometry data to the exploration of Calcrete-hosted uranium deposit in Yilgarn area Western Australia[J]. *Uranium Geology*, 2015, 31(1): 44-51.
- 陈冰,高成,郭艳伟,等.北秦岭华阳川铀矿成矿规律研究及深部资源预测实施方案[R].西安:陕西核工业地质局224大队,2018.
- CHEN Bing, GAO Cheng, GUO Yanwei, et al. Study on metallogenic regularity of Huayangchuan uranium deposit in North Qinling and implementation scheme of deep resource prediction[R]. Xi'an: 224 Team of Northwest Geological Survey of Nuclear Industry, 2018.
- 陈衍景,翟明国,蒋少涌.华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J].*岩石学报*,2009,25(11):2695-2726.
- CHEN Yanjing, ZHAI Mingguo, JIANG Shaoyong. Significant achievements and issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China Continent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(11): 2695-2726.
- 陈衍景.秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J].*中国地质*,2010,37(7):854-865.
- CHEN Yanjing. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling orogen, Central China[J]. *Geology in China*, 2010, 37(7): 854-865.
- 冯建之,孙卫志,牛树银,等.华熊亚热柱-幔枝构造体系及其控矿作用[J].*地质找矿论丛*,2011,26(2):143-150.
- FENG Jianzhi, SUN Weizhi, NIU Shuyin, et al. Huashan-Xionger-shan sub-mantle plume branch structure system and its control on ore[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2011, 26(2): 143-150.
- 高成,康清清,江宏君,等.秦岭造山带发现新型铀多金属矿:华阳川伟晶岩脉和碳酸岩脉有关的超大型铀-钨-钼-铅-稀土矿床[J].*地球化学*,2017,46(5):446-455.
- GAO Cheng, KANG Qingqing, JIANG Hongjun, et al. A unique uranium polymetallic deposit discovered in the Qinling orogenic belt: The Huayangchuan super-large U-Nb-Pb-REE deposit associated with pegmatites and carbonatites[J]. *Geochimica*, 2017, 46(5): 446-455.
- 郭波,朱赖民,李舜,等.华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成与成岩动力学背景[J].*岩石学报*,2009,25(2):265-281.
- GUO Bo, ZHU Laimin, LI Ben, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite plutons at the Southern Margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(2): 265-281.
- 郭威,周鼎武,任军锋,等.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*,2008,27(6):823-828.
- GUO Wei, ZHOU Dingwu, REN Junfeng, et al. Characteristics of the Huayangchuan ductile shear zones in the Xiaolinling Mountains, Shaanxi, China, and its regional tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(6): 823-828.
- 胡正国,钱壮志.小秦岭西段拆离-变质核杂岩构造[J].*地质找矿论丛*,1994,9(2):58-66.
- HU Zhengguo, QIAN Zhuangzhi. Detachment-Metamorphic complex core structure configuration[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1994, 9(2): 58-66.
- 惠小朝,蔡煜琦,何升,等.陕西省华阳川铀钨钼钽矿床碳酸岩岩石学及地球化学特征[J].*现代地质*,2017,31(2):246-257.
- HUI Xiaochao, CAI Yuqi, HE Sheng, et al. Petrologic and geochemical characteristics of carbonatites in Huayangchuan U-Nb-Pb deposit, Shaanxi Province[J]. *Geoscience*, 2017, 31(2): 246-257.
- 惠小朝.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,2014:1-134.

- HUI Xiaochao. Geochemical study on uranium polymetallic mineralization in Huayangchuan, Shaanxi Province [D]. Beijing: Beijing Institute of Geology, Nuclear Industry, 2014: 1-134.
- 江宏君, 高成, 康清清, 等. 小秦岭华阳川铀钨铅矿床蚀变矿化期次研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(3): 404-421.
- JIANG Hongjun, GAO Cheng, KANG Qingqing, et al. Mineralization paragenesis of Huayangchuan U-Nb-Pb deposit in the Lesser Qinling[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(3): 404-421.
- 柯丹, 韩绍阳, 侯惠群, 等. 花岗岩型铀矿勘查中航放信息的提取与综合[J]. *铀矿地质*, 2009, 25(6): 349-354.
- KE Dan, HAN Shaoyang, HOU Huiqun, et al. Aero-radioactive information extraction and integration for the exploration of granite-type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 2009, 25(6): 349-354.
- 李乃志, 于在平, 崔海峰, 等. 变质核杂岩特征及小秦岭地区变质杂岩成因讨论[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(5): 793-798.
- LI Naizhi, YU Zaiping, CUI Haifeng, et al. A review on the characteristics and the genesis of metamorphic core complexes[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2006, 36(5): 793-798.
- 李普涛, 辜平阳, 李永军, 等. 小秦岭华阳川地区吕梁期和燕山期铀成矿作用: 来自含铀伟晶岩年代学的启示[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(2): 191-206.
- LI Putao, GU Pingyang, LI Yongjun, et al. Uranium mineralization of Luliangian and Yanshanian in the Huayangchuan area of Xiaolinling belt, China: Implications from U-Pb geochronology of zircon and monazite from uranium-bearing pegmatite[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(2): 191-206.
- 李普涛, 何世平, 辜平阳, 等. 华阳川铀矿成矿规律综合研究报告[R]. 西安: 中国地质调查局西安地质调查中心, 2019.
- LI Putao, HE Shiping, GU Pingyang, et al. Comprehensive research report on metallogenic regularity of Huayangchuan uranium deposit [R]. Xi'an: Xi'an Center of China Geological Survey, 2019.
- 倪志耀, 王仁民, 童英, 等. 河南洛宁太华岩群斜长角闪岩的锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb和角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄[J]. *地质评论*, 2003, 49(4): 361-366.
- NI Zhiyao, WANG Renmin, TONG Ying, et al. ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb age of zircon and ⁴⁰Ar/³⁹Ar of amphibole from plagioclase amphibolite in the Taihuagroup, Luoning, Henan, China[J]. *Geological Review*, 2003, 49(4): 361-366.
- 牛树银, 孙爱群, 王宝德, 等. 张宣幔枝构造成矿与深部找矿潜力分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(4): 548-555.
- NIU Shuyin, SUN Aiqun, WANG Baode, et al. Study on mineralization and ore potentialities in the depth for Zhangjiakou-Xuanhua mantle branch structure[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(4): 548-555.
- 齐秋菊, 王晓霞, 柯昌辉, 等. 华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf同位素和地球化学新证据[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1): 279-301.
- QI Qiuju, WANG Xiaoxia, KE Changhui, et al. Geochronology and origin of the Laoniushan complex in the Southern Margin of North China Block and their implications: New evidences from zircon dating, Hf isotopes and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(1): 279-301.
- 万渝生, 董春艳, 任鹏, 等. 华北克拉通太古宙TTG岩石的时空分布组成特征及形成演化: 综述[J]. *岩石学报*, 2017, 33(5): 1405-1419.
- WAN Yusheng, DONG Chunyan, Ren Peng, et al. Spatial and temporal distribution, compositional characteristics and formation and evolution of Archean TTG rocks in the North China Craton: Asynthesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(5): 1405-1419.
- 王林均, 许成, 吴敏, 等. 华阳川碳酸岩流体包裹体研究[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3): 374-375.
- WANG Linjun, XU Cheng, WU Min, et al. A study of fluid inclusion from Huayangchuan carbonatite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(3): 374-375.
- 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 等. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1573-1593.
- WANG Xiaoxia, WANG Tao, QI Qiuju, et al. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1573-1593.
- 王晓霞, 王涛, 张成立. 秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 58: 1497-1512.
- WANG Xiaoxia, WANG Tao, ZHANG Chengli. Granitoid magmatism in the Qinling Orogen, Central China and its bearing on orogenic evolution[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58: 1497-1512.

- 王勇, 刘洪军, 范洪海, 等. 钙结岩型铀矿勘查中活性炭吸附测氡方法应用——以纳米比亚欢乐谷南部地区为例[J]. *铀矿地质*, 2017, 33(05): 296–301.
- WANG Yong, LIU Hongjun, FAN Honghai, Wu Guodong. 2017. Application of activated charcoal in measuring radon for the exploration of calcrite-type uranium deposits: A case study in the South of Happy Valley area in Namibia[J]. *Uranium Geology*, 2017, 33(05): 296–301.
- 许成, 曾亮, 宋文磊, 等. 造山带碳酸岩起源与深部碳循环[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(2): 213–221.
- XU Cheng, ZENG Liang, SONG Wenlei, et al. Orogenic carbonatite petrogenesis and deep carbon recycle[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, 36(2): 213–221.
- 许成, 宋文磊, 漆亮, 等. 黄龙铺钼矿田含矿碳酸岩地球化学特征及其形成构造背景[J]. *岩石学报*, 2009, 25(2): 422–430.
- XU Cheng, SONG Wenlei, Qi Liang, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of ore-bearing carbonatites in Huanlongpu Mo ore field[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(2): 422–430.
- 杨海, 赵廷严, 李诗珺, 等. 秦岭华阳川地区航空伽玛能谱异常特征及铀找矿方向[J]. *中国地质*, 2019, 46(3): 651–661.
- YANG Hai, ZHAO Tingyan, LI Shijun, et al. Anomaly characteristics of airborne gamma-ray spectrometry survey and uranium prospecting direction in Huayangchuan, Qinling[J]. *Geology in China*, 2019, 46(3): 651–661.
- 喻学惠. 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*, 1992, 17(2): 156–157.
- YU Xuehui. Geological, petrological-mineralogical characteristics and origin of the carbonatites from Huayangchuan, Shaanxi Province[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1992, 17(2): 156–157.
- 张进江, 郑亚东, 刘树文. 小秦岭金矿田中生代构造演化与矿床形成[J]. *地质科学*, 2003, 38(1): 74–84.
- ZHANG Jinjiang, ZHENG Yadong, LIU Shuwen. Mesozoic tectonic evolution and ore-deposits formation in the gold mine field of Xiaqingling[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(1): 74–84.
- 张兴康, 叶会寿, 李正远, 等. 小秦岭华山复式岩基大夫峪岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学特征[J]. *矿床地质*, 2015, 34(2): 236–260.
- ZHANG Xingkang, YE Huishou, LI Zhengyuan, et al. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic composition and geochemistry of Dafuyu granitoid pluton from Huashan complex batholith in Xiaqingling[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(2): 236–260.
- 朱赖民, 张国伟, 郭波, 等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. *地质学报*, 2008, 82(2): 204–220.
- ZHU Laimin, ZHANG Guowei, GUO Bo, et al. U-Pb (LA-ICP-MS) zircon dating for the large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the East Qinling, China, and its metallogenetic geodynamical setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(2): 204–220.
- Diwu C R, Sun Y, Gao J F, et al. Early Precambrian tectonothermal events of the North China Craton: Constraints from in situ detrital zircon U-Pb, Hf and O isotopic compositions in Tietonggou formation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(31): 3760–3770.
- Liu D Y, Wilde S A, Wan Y S, et al. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the Southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoarchean-Early Neoproterozoic[J]. *Chemical Geology*, 2009, 261(1–2): 140–154.
- Wan Y S, Wilde S A, Liu D Y, et al. Further evidence for ~1.85 Ga metamorphism in the central zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province[J]. *Gondwana Research*, 2006, 9(1–2): 189–197.