

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.2-3.019

北秦岭陕西华阳川地区铀矿物质来源

张熊猫^{1,2}, 陈冰^{1*}, 杨蓉³, 陈军¹, 程佳孝¹, 江宏君¹, 李鹏¹, 叶兴超¹, 康清清¹
ZHANG Xiongmao^{1,2}, CHEN Bing^{1*}, YANG Rong³, CHEN Jun¹, CHENG Jiaxiao¹,
JIANG Hongjun¹, LI Peng¹, YE Xingchao¹, KANG Qingqing¹

1. 中陕核工业集团二二四大队有限公司, 陕西 西安 710100;

2. 陕西生态产业有限公司, 陕西 西安 710000;

3. 陕西国际商贸学院, 陕西 西安 712046

1. Geological Party No. 224, China-Shaanxi Nuclear Industry Group, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Ecological Industry Co., Ltd., Xi'an 710000, Shaanxi, China;

3. Shaanxi Institute of International Trade & Commerce, Xi'an 712046, Shaanxi, China

摘要: 华阳川铀矿床位于老牛山岩体与华山岩体夹持部位, 矿体严格受控于 NW—SE 向华阳川脆韧性剪切带, 赋矿岩石以石英碳酸岩为主, 伟晶岩次之。关于华阳川铀矿床的物质来源一直没有较可信的研究成果。系统收集航放、地质、钻探、选冶试验等资料, 采用地表放射性物探、地质、锆石 U—Pb 定年等手段, 计算各地质体(单元)的放射性能谱特征、年龄特征, 研究岩体、脉岩的构造展布规律和放射性元素的迁移规律, 揭示华阳川铀矿的成矿物质来源。地表伽玛能谱特征显示, 华山岩体翁峪花岗岩 U 含量为 $4.82 \times 10^{-6} \sim 6.46 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $23.03 \times 10^{-6} \sim 31.08 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 5.29~6.00; 老牛山岩体主要岩石单元 U 含量为 $9.27 \times 10^{-6} \sim 11.18 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $24.39 \times 10^{-6} \sim 27.72 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 2.64~3.55, 两者均具有高铀、高钍的特征; 地球化学特征显示, 华山岩体与老牛山岩体均具有埃达克质岩的特征, 为不同期次的同源富铀体, 但华山岩体翁峪花岗岩有较明显的铀源体特征; 放射性航空物探特征显示, 华阳川矿区韧性剪切带中具有铀迁入富集特征; 地质年代背景研究显示, 华山岩体翁峪花岗岩与华阳川矿区含石英碳酸岩成岩年龄基本一致, 均形成于 235~200 Ma; 构造背景研究显示, 第一次造陆事件(约 1800 Ma)至印支期形成的多期次脆韧性剪切带底部直接与华山岩体连通, 为活化铀的迁移提供了有利通道。研究表明, 华山岩体翁峪花岗岩中的 U 元素被活化、迁移后, 为华阳川铀矿提供了大量的铀源。

关键词: 华阳川; 华山岩体; 翁峪花岗岩; 铀矿; 物质来源; 脆韧性剪切带; 石英碳酸岩

中图分类号: P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2023)02/03-0420-11

Zhang X M, Chen B, Yang R, Chen J, Cheng J X, Jiang H J, Li P, Ye X C, Kang Q Q. The source of uranium minerals in Huayangchuan area of North Qinling. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(2/3): 420-430

Abstract: The Huayangchuan uranium deposit is located at the sandwiched part of the Laoniushan and the Huashan pluton. The ore body is strictly controlled by the NW—SE-trending Huayangchuan brittle-ductile shear zone. The ore-bearing rocks are mainly quartz carbonatite, followed by pegmatite. There have been no more credible research results on the material source of Huayangchuan uranium deposit. This study systematically collected airborne, geological, drilling, and metallurgical data, and used surface radioactive geophysical prospecting, geology, zircon U—Pb dating and other methods to calculate the radioactive energy spectrum characteristics and age characteristics of each platinid body (unit), study the structure distribution law of rock mass and dyke rock and the migration law of radioactive elements, and reveal the source of ore-forming materials of Huayangchuan uranium deposit. The characteristics of the surface

收稿日期: 2020-07-27; **修订日期:** 2021-01-08

资助项目: 国家重点研发计划项目《典型覆盖区航空地球物理技术示范与处理解释软件平台开发》(编号:2017YFC0602200)和陕西省创新能力支撑计划青年科技新星项目《陕西华阳川铀多金属矿集区成矿时代的精细研究》(编号:2019KJXX-095)

作者简介: 张熊猫(1988-), 男, 工程师, 从事地质调查和铀多金属矿勘查评价工作。E-mail: 343594638@qq.com

*** 通信作者:** 陈冰(1963-), 男, 正高级工程师, 从事地球物理勘查与遥感工作。E-mail: 394192445@qq.com

gamma spectrum show that the content of the Wengyu granite of the Huashan pluton is $4.82 \times 10^{-6} \sim 6.46 \times 10^{-6}$, the thorium content is $23.03 \times 10^{-6} \sim 31.08 \times 10^{-6}$, and the Th/U ratios are 5.29~6.00. The uranium content of the main rock units of the Niushan pluton is $9.27 \times 10^{-6} \sim 11.18 \times 10^{-6}$, the thorium content is $24.39 \times 10^{-6} \sim 27.72 \times 10^{-6}$, the Th/U ratios are 2.64~3.55, both of which have the characteristics of high uranium and thorium. Geochemical characteristics of the Huashan pluton and the Laoniushan pluton are similar to adakitic rocks, which are the same source and rich uranium bodies of different stages. However, the Wengyu granite of the Huashan pluton has obvious uranium source characteristics. Radioactive aerial geophysical characteristics show that the ductile shear zone in Huayangchuan mining area has the characteristics of uranium migration and enrichment. Based on the geochronological background research, the diagenetic age of the Wengyu granite of the Huashan pluton is the same as that of the ore-bearing quartz carbonate in the Huayangchuan mining area, both formed in 235~200 Ma. The bottom of the multi-stage sub-brittle-ductile shear zone which is formed from the first land-making event (ca. 1800 Ma) to the Indosinian period is directly connected to the Huashan pluton, which provides favorable conditions for the migration of activated uranium. Combined the above research, the author believes that after the uranium element in the Wengyu granite of the Huashan Pluton is activated and migrated, it provides a large amount of uranium source for the Huayangchuan uranium deposit.

Key words: Huayangchuan; Huashan pluton; Wengyu granite; uranium material source; material sources; brittle-ductile shear zone; quartz carbonate

华阳川铀矿床是中陕核工业集团公司近年发现和勘查的大型铀矿床,位于秦祁昆成矿域—秦岭—大别成矿省—北秦岭铀成矿带(张金带等, 2012),该矿床具有规模大、品位低、矿种多、易开采、潜力大的特点。矿床成因是与火成碳酸岩有关的岩浆—热液多期次叠加复合成因类型,该类型是国内首次发现的铀矿新类型。近年,中陕核工业集团公司对该矿床进行了进一步勘查和一系列研究,取得了较好的勘查和科研成果(王林军等, 2011; 惠小朝, 2014; 2016; 高成等, 2015; 2017; 武翠莲等, 2015; 何升等, 2016; 康清清等, 2018; 2020; 江宏君等, 2020)。但关于该铀矿成矿物质来源方面的研究始终没有突破性进展,缺乏具有说服力的研究成果。笔者系统收集了已有的航放、航磁、地质、钻探、选冶试验等资料,采用地表放射性物探、地质等手段,通过计算各地质体(单元)的放射性能谱特征,研究岩体与成矿脉岩的空间、时间相互关系,结合构造特征等,揭示华阳川铀矿的成矿物质来源及铀源迁移规律。

1 地质概况

1.1 研究区地质

研究区大地构造位置位于华北地块南缘的太华断隆(图 1),是秦岭造山带北部边缘的重要组成部分,西起陕西老牛山,东至河南灵宝—朱阳盆地西北边缘,北以近 EW 向的太要断裂带为界,南以小河断裂带为界,经历了复杂的岩浆构造演化和变质

作用,也是中国重要的金、钼、铀矿产地之一(张国伟等, 1995; 王瑞廷等, 2021)。区内岩浆活动强烈,代表性岩体主要有老牛山岩体和华山岩体(郭威等, 2008)。华阳川铀矿床位于老牛山岩体与华山岩体夹持部位,2 个岩体都是中生代酸性岩浆岩。赋矿围岩为太古宙 TTG 片麻岩套,包括侯家村片麻岩(Ar_2H)、大月坪片麻岩(Ar_2D)、马驹峪片麻岩(Ar_2M)、武家坪片麻岩(Ar_2W)(图 2),岩性主要有花岗片麻岩、黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩及含辉石角闪斜长片麻岩。经多期次构造变形、变质作用叠加改造与再造,岩体原始构造被彻底置换。由于多期构造叠加改造模糊化、复杂化,片麻岩的原始岩体构造消失殆尽,但或多或少可见残余的侵入接触关系,区内片麻岩总体与区域构造线一致,呈 NW 向展布,倾向 NE,倾角 $40^\circ \sim 60^\circ$,局部陡倾。矿体严格受控于 NW—SE 向华阳川脆韧性剪切带,印支期各类碳酸岩脉沿破碎带上涌形成网状密集带(图 2)。

1.2 研究区构造

研究区构造变形发育,该区构造作用至少经历 6 个期次(D1—D6),D1 期 1800 Ma 第一次造陆事件,D2、D3 期 1000 Ma 寒武纪高压变质事件,D4 对应印支造山运动,D5 对应燕山造山运动,D6 对应白垩纪后造山运动,华阳川铀矿的形成则对应 D4 印支期构造^①。经过上述多期次造山运动,形成了 NW—近 EW 向、长度超过 20 km、宽约 1.6 km 的构造破碎带(图 2)。

印支期华阳川地区主要发生勉略洋的闭合和

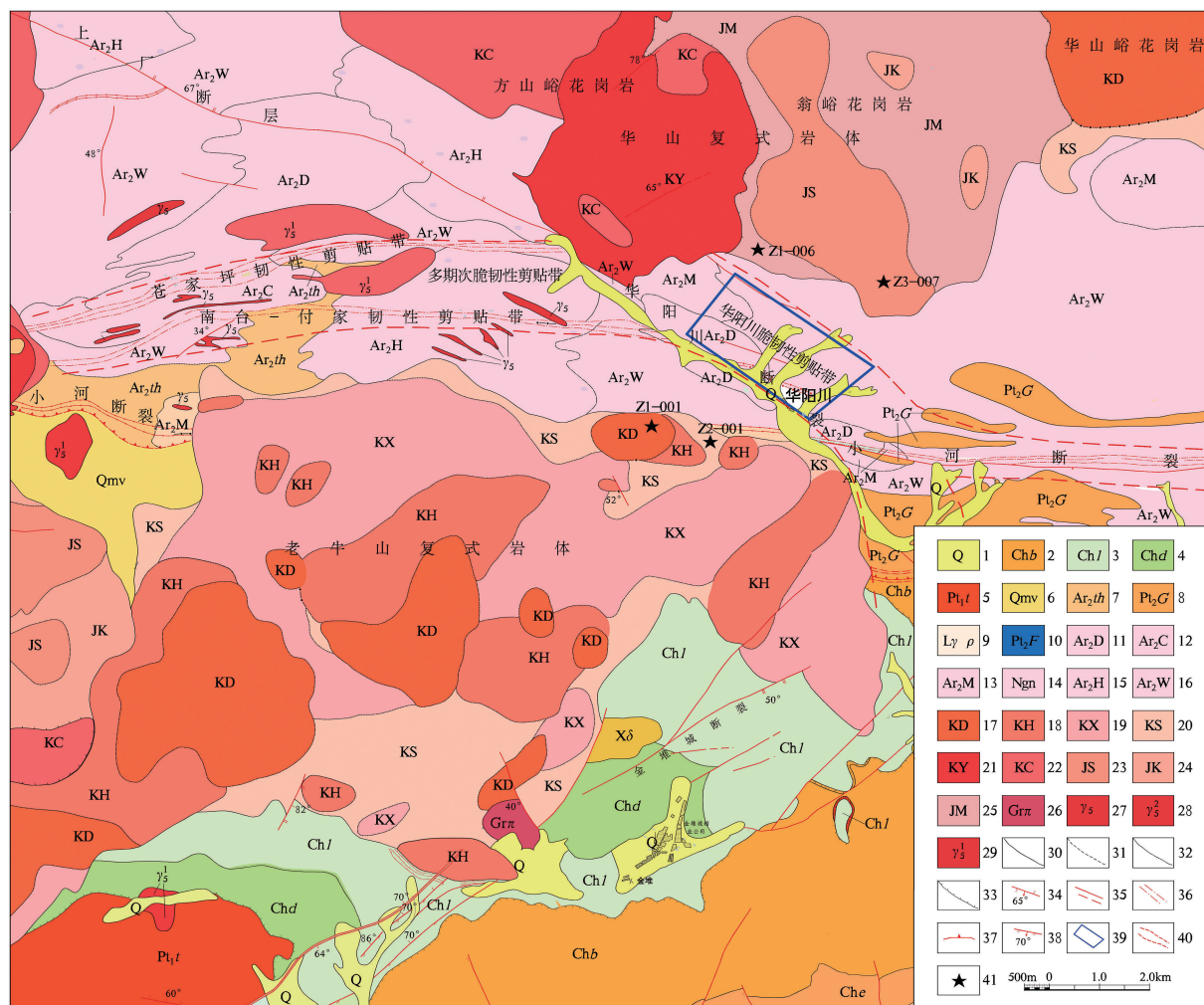
图2 研究区地质简图^④

Fig. 2 Simplified geological map of the study area

1—第四系沉积物;2—元古宙高山河群暨盖子组;3—元古宙熊耳群洛源组;5—元古宙代铁铜沟组;6—太古宙太华群秋盆绿岩;7—太古宙太华群;8—元古宙甘沟单元;9—元古宙罗斑花岗伟晶岩;10—元古宙佛头崖单元;11—太古宙大月坪片麻岩;12—太古宙长沟口片麻岩;13—太古宙马驹峪片麻岩;14—太古宙宁家源片麻岩;15—太古宙候家村片麻岩;16—太古宙武家坪片麻岩;17—东涧峪单元;18—黄狗峪单元;19—西牛峪单元;20—水池沟单元;21—雨家河单元;22—葱峪单元;23—赛华山单元;24—康家坪单元;25—沫沫盆单元;26—甘江口花岗斑岩;27—印支—燕山期花岗岩;28—燕山期花岗岩;29—印支期花岗岩;30—实测地质界线;31—推测地质界线;32—脉动侵入地质界线;33—角度不整合地质界线;34—实测正断层及产状;35—实测逆断层;36—韧性剪切带;37—推覆构造;38—走滑断层;39—华阳川钼矿床范围;40—多期次脆韧性剪切带;41—岩体年龄样取样点

行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 获得年龄加权平均值分别为 233 ± 1.4 Ma、 132 ± 0.6 Ma; 中国科学院广州地球化学研究所^①对华山岩体翁峪花岗岩进行 SIMS 锆石 U-Pb 测年, 显示其形成于印支期, 约 216 Ma。

本次研究对华山岩体翁峪花岗岩取样(图 2), 采用锆石 U-Pb 测年确定华山岩体沫沫岔单元(JM)细粒含角闪黑云二长花岗岩成岩年龄为 200.6 ± 3.0 Ma(图 4-a; 表 1), 赛华山单元(JS)中粒

含角闪二长花岗岩成岩年龄为 206 ± 2.4 Ma (图 4-b; 表 1), 两者形成时代均为早燕山期。

研究结果显示, 华山岩体至少经历了 2 期侵入事件: ①晚印支期—早燕山期 (235~200 Ma) 翁峪花岗岩侵入; ②燕山期 (140~130 Ma) 大夫峪岩体、华山峪岩体侵入。

2.2 老牛山岩体年龄

老牛山复式岩体位于华北地块南缘(齐秋菊

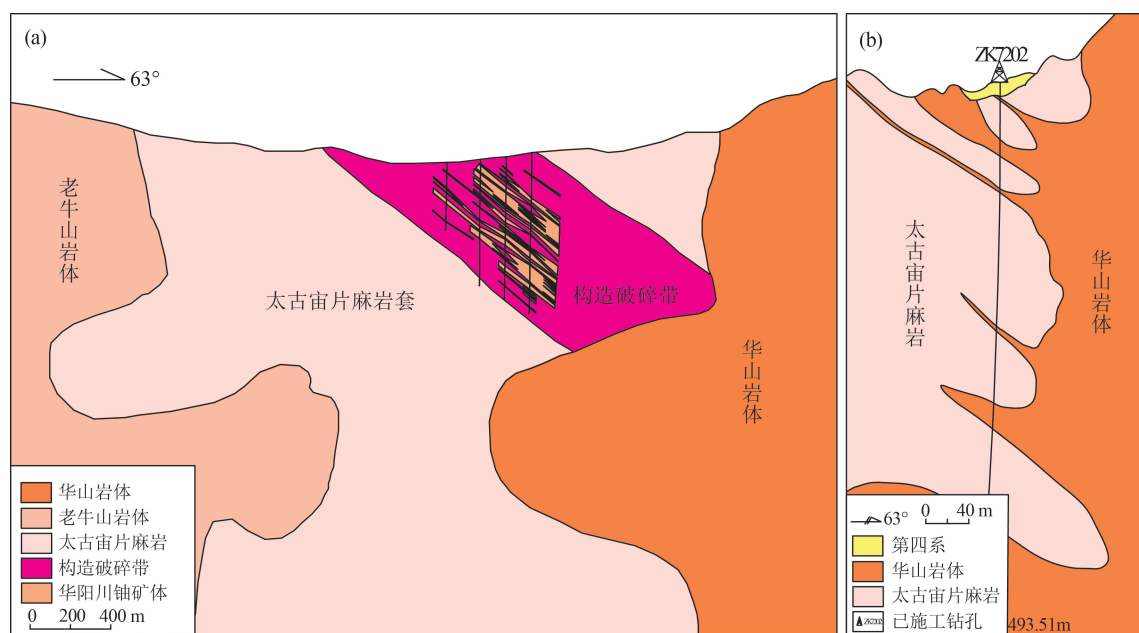


图3 华阳川地区地层与岩体展布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of strata and rock mass in Huayangchuan area

a—华阳川矿体、破碎带与岩体空间展布示意图;b—华阳川 72 线剖面地质简图

等,2012),华阳川矿区南部,岩体总体呈 NE 约 70° 方向展布,出露面积大于 400 km^2 ,为多期次侵位岩体。早期以中细粒角闪二长花岗岩为主,位于岩体外侧西北边部;中期以中细粒黑云二长花岗岩为主,位于岩体西部中心部位;晚期以中细粒含斑黑云二长花岗岩为主,位于岩体东部中心部位^②。前人测得老牛山岩体的侵入年龄为 $223 \sim 146 \text{ Ma}$ ($146 \pm 1 \text{ Ma/U-Pb}$ (朱赖民等,2008); $146 \pm 4 \text{ Ma/U-Pb}$ (郭波等,2009); $223 \pm 1 \text{ Ma/U-Pb}$ (齐秋菊等,2012); $152 \pm 1 \text{ Ma/U-Pb}$ (齐秋菊等,2012),Yang et al.(2019)对老牛山北部岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得年龄加权平均值分别为 146 Ma 、 152 Ma 及 163 Ma ;中国科学院广州地球化学研究所^①对老牛山岩体进行了 SIMS 锆石 U-Pb 测年,显示其形成于燕山期(约 140 Ma),即晚侏罗世—早白垩世。

本次研究对老牛山复式杂岩体北部边缘东涧峪单元(KD)、水池沟单元(KS)花岗岩取样(图2),采用锆石 U-Pb 测年确定成岩年龄为 $142.3 \pm 1.9 \text{ Ma}$ (图4-c;表1)、 $143.7 \pm 2.4 \text{ Ma}$ (图4-d;表1)。

老牛山岩体北部样品的年龄基本在 $163 \sim 140 \text{ Ma}$ 之间,主体形成时间晚于华阳川火成碳酸岩形成时间,因此与华阳川火成碳酸岩的形成无直接联系,但其可能在华阳川铀钼铅矿后期的热液叠加成

矿阶段起到了富矿的作用。

2.3 碳酸岩成岩年龄

邱家骧等(1993)获得华阳川碳酸岩内长石的 K-Ar 年龄为 $206 \sim 204 \text{ Ma}$,喻学惠(1992)获得华阳川碳酸岩中金云母 K-Ar 年龄为 181 Ma ,中国科学院广州地球化学研究所和中陕核工业集团公司合作项目对碳酸岩中榍石和独居石进行 LA-ICP-MS U-Pb 测年,获得年龄为 $235 \sim 215 \text{ Ma}$ ^①,表明华阳川火成碳酸岩形成于晚印支期—早燕山期。华山岩体翁峪花岗岩形成时代与区内火成碳酸岩形成时代相近,可能是同一构造背景下不同岩浆的产物。

3 地表能谱特征

3.1 华山岩体能谱特征

能谱剖面测量数据统计发现,华山岩体 U 含量均值为 $4.82 \times 10^{-6} \sim 5.77 \times 10^{-6}$,Th 含量均值为 $16.45 \times 10^{-6} \sim 31.08 \times 10^{-6}$,Th/U 平均值为 4.76。对岩体各单元进行能谱特征分析(表2):其中沫沫盆单元(JM)、赛华山单元(JS)及康家坪单元(JK)Th/U 平均值均大于 5,且均呈高铀、高钍的特征。特别是 Th 含量远高于一般地质体的平均值,有较明显的铀源(铀迁出)特征。

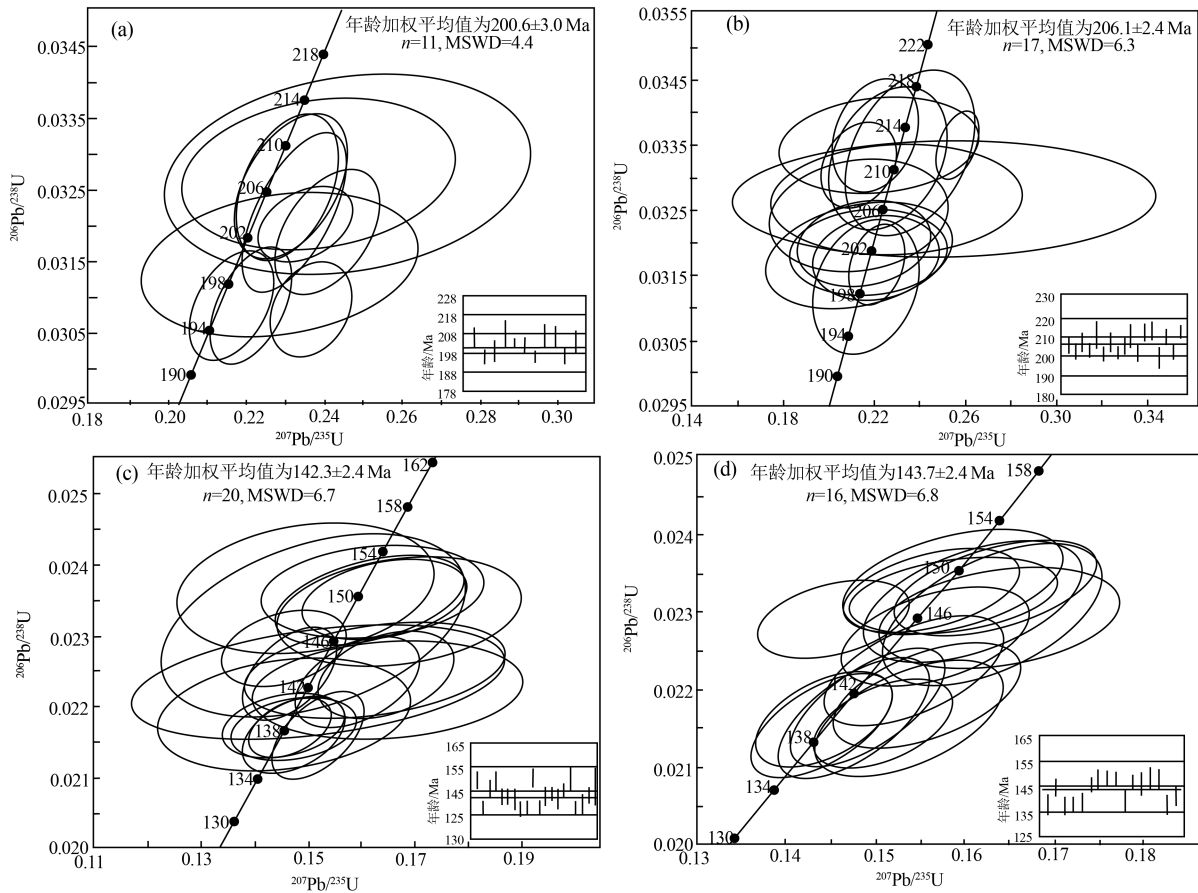


图 4 岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb ages concordia diagrams from the Pluton

a—华山岩体沫沫盆单元(JM);b—华山岩体赛华山单元(JS);c—老牛山岩体东涧峪单元(KD);d—老牛山岩体水池沟单元(KS)

3.2 老牛山岩体能谱特征

对华阳川矿床南侧老牛山岩体中几个较大的地质单元进行能谱统计表明, U 含量均值为 $9.27 \times 10^{-6} \sim 11.18 \times 10^{-6}$, Th 含量均值为 $24.39 \times 10^{-6} \sim 27.72 \times 10^{-6}$, 也都呈现高铀、高钍的特征, 整体 Th/U 平均值为 3.07 (表 2), 接近地质体的 Th/U 平均值 (2~4), 铀的迁移特征相对不明显。

对比华山岩体与老牛山岩体主要岩石单元地表剖面能谱特征 (图 5) 发现, 2 个岩体的 Th 含量基本一致, 但华山岩体 U 含量较老牛山岩体明显偏低, Th/U 值明显高于老牛山岩体, 相比较而言, U 元素流失迁移的可能性较大, 具备典型铀源体的特征。

3.3 古铀量及活性铀量特征

U 元素复杂多变, 在还原条件下为 4 价铀, 不可溶, 活动性也不强, 在氧化条件下为 6 价铀, 可被溶

解或吸附而发生迁移, 而 Th 始终为 4 价, 不随氧化或还原环境的变化而迁移或富集。因此可以通过现今的 Th 含量及 Th/U 值表征原始铀的多少, 从而达到间接推算岩石的古铀含量的目的。

结合 2 个岩体的能谱特征分析, 华山岩体和老牛山岩体均呈现高铀、高钍的特征, 二者的 Th 含量接近, 但华山岩体比老牛山岩体 U 含量低近一倍 (表 3), Th/U 值比老牛山岩体高 55%。相比较而言, U 元素流失迁移的可能性较大, 具备典型铀源体的特征。

老牛山岩体 4 个单元的 Th/U 平均值可能更接近原岩的 Th/U 值, 故可采用老牛山岩体的 Th/U 平均值代表研究区岩体的还原 Th/U 平均值, 分析该地区古铀量及活性铀量特征。

从古铀量看, 除距离矿床较远的葱峪单元 (KC)、雨家河单元 (KY) 较低外, 其他单元的古铀

表 1 华山岩体与老牛山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb data for the Huashan and Laoniushan plutons

点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
华山岩体沫沱盆单元(JM)													
Z1-006-01	586	2928	0.20	0.0512	0.0011	0.2308	0.0056	0.0325	0.0004	211	4.6	206	2.5
Z1-006-02	673	3018	0.22	0.0506	0.001	0.2165	0.0046	0.0309	0.0003	199	3.8	196	1.9
Z1-006-03	619	2972	0.21	0.0507	0.0026	0.229	0.0145	0.0314	0.0004	209	11.9	199	2.7
Z1-006-04	538	1975	0.27	0.052	0.0033	0.2482	0.0182	0.0327	0.0006	225	14.8	208	3.5
Z1-006-08	1220	3114	0.39	0.0533	0.0011	0.236	0.0049	0.0319	0.0002	215	4.0	203	1.5
Z1-006-10	647	2762	0.23	0.0546	0.0014	0.2413	0.0059	0.0319	0.0003	219	4.8	202	2.1
Z1-006-12	846	3431	0.25	0.0553	0.0012	0.2364	0.0049	0.0308	0.0002	215	4.0	196	1.5
Z1-006-15	490	2204	0.22	0.051	0.0029	0.2368	0.0152	0.0326	0.0005	216	12.5	207	2.9
Z1-006-16	474	1890	0.25	0.0516	0.0013	0.232	0.006	0.0325	0.0004	212	4.9	206	2.6
Z1-006-17	1064	3937	0.27	0.0517	0.001	0.2212	0.0046	0.0309	0.0003	203	3.8	196	2.0
Z1-006-18	706	2891	0.24	0.0522	0.0011	0.2325	0.0057	0.0321	0.0005	212	4.7	204	2.9
华山岩体赛华山单元(JS)													
Z3-001-01	5868	30324	0.19	0.0514	0.0009	0.2307	0.0045	0.0324	0.0003	211	3.7	205	1.8
Z3-001-02	11576	24586	0.47	0.0484	0.0031	0.2186	0.0147	0.0319	0.0003	201	12.2	202	1.6
Z3-001-03	6738	23801	0.28	0.0486	0.0045	0.2302	0.0225	0.0327	0.0004	210	18.6	207	2.2
Z3-001-04	6677	34458	0.19	0.0491	0.0007	0.2177	0.0034	0.032	0.0003	200	2.9	203	1.6
Z3-001-05	3625	17371	0.21	0.0501	0.0023	0.2387	0.0123	0.0333	0.0005	217	10.1	211	3.3
Z3-001-06	12710	32492	0.39	0.0504	0.0011	0.2216	0.0053	0.0317	0.0003	203	4.4	201	1.6
Z3-001-07	21184	48784	0.43	0.0501	0.0081	0.251	0.038	0.0326	0.0004	227	30.9	207	2.5
Z3-001-08	4576	19712	0.23	0.0505	0.0025	0.2211	0.0113	0.0318	0.0003	203	9.4	202	1.7
Z3-001-10	1394	7511	0.19	0.0461	0.0033	0.2138	0.016	0.0324	0.0003	197	13.4	206	2.1
Z3-001-11	2455	11288	0.22	0.0493	0.0025	0.2277	0.0126	0.0332	0.0004	208	10.4	211	2.7
Z3-001-12	1666	12087	0.14	0.0465	0.0034	0.2126	0.0164	0.0318	0.0003	196	13.8	201	2.0
Z3-001-13	18303	38722	0.47	0.0467	0.0037	0.2224	0.0178	0.0335	0.0003	204	14.8	212	1.9
Z3-001-15	7629	42928	0.18	0.0481	0.0019	0.222	0.0081	0.0336	0.0004	204	6.8	213	2.2
Z3-001-17	8707	37544	0.23	0.0492	0.002	0.2172	0.0107	0.0313	0.0004	200	9.0	199	2.5
Z3-001-18	8620	48223	0.18	0.0469	0.0017	0.2149	0.0077	0.0332	0.0003	198	6.4	210	1.6
Z3-001-19	237	4010	0.06	0.0488	0.0027	0.2166	0.0121	0.0319	0.0003	199	10.1	203	1.8
Z3-001-20	5939	14260	0.42	0.0552	0.0008	0.2564	0.004	0.0335	0.0002	232	3.2	212	1.3
老牛山岩体东洞峪单元(KD)													
Z1-001-01	335	536	0.63	0.051	0.002	0.1647	0.0063	0.0235	0.0003	155	5.5	150	1.6
Z1-001-02	1362	2138	0.64	0.049	0.0012	0.1463	0.0035	0.0216	0.0002	139	3.1	138	1.3
Z1-001-03	1022	1128	0.91	0.0523	0.002	0.167	0.0058	0.0229	0.0002	157	5.0	146	1.5
Z1-001-04	178	399	0.44	0.0517	0.0029	0.167	0.0095	0.0234	0.0003	157	8.2	149	2.0
Z1-001-05	384	1008	0.38	0.0533	0.0017	0.1649	0.0053	0.0224	0.0002	155	4.6	143	1.5
Z1-001-06	726	1219	0.6	0.0516	0.0015	0.1595	0.0048	0.0224	0.0002	150	4.2	143	1.6
Z1-001-07	100	138	0.72	0.0543	0.0037	0.1643	0.0102	0.0222	0.0003	154	8.9	141	2.0
Z1-001-08	915	2208	0.41	0.051	0.0012	0.1521	0.0038	0.0216	0.0002	144	3.3	138	1.5
Z1-001-09	975	1550	0.63	0.0492	0.0012	0.1478	0.0037	0.0217	0.0002	140	3.2	139	1.2
Z1-001-10	202	304	0.66	0.0501	0.0027	0.1624	0.0084	0.0236	0.0003	153	7.3	150	1.8
Z1-001-11	647	1439	0.45	0.0482	0.0013	0.1445	0.0041	0.0217	0.0002	137	3.6	138	1.3
Z1-001-12	213	240	0.89	0.0519	0.003	0.1632	0.01	0.0224	0.0003	153	8.7	143	1.9
Z1-001-13	526	1175	0.45	0.0478	0.0013	0.1489	0.0039	0.0226	0.0002	141	3.5	144	1.3
Z1-001-14	281	296	0.95	0.049	0.0049	0.1539	0.0148	0.0222	0.0003	145	13.0	142	2.0
Z1-001-15	413	1214	0.34	0.0464	0.0015	0.1459	0.0048	0.0228	0.0002	138	4.3	145	1.5
Z1-001-16	195	138	1.41	0.0469	0.0033	0.15	0.0097	0.0236	0.0004	142	8.6	151	2.5

续表 1

点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
Z1-001-17	544	1571	0.35	0.0493	0.0016	0.1475	0.0047	0.0217	0.0002	140	4.2	138	1.3
Z1-001-18	115	160	0.72	0.0485	0.0035	0.1458	0.0097	0.0218	0.0003	138	8.6	139	2.0
Z1-001-19	819	1843	0.44	0.0472	0.0012	0.1468	0.004	0.0225	0.0003	139	3.5	143	1.6
Z1-001-20	64	66	0.97	0.051	0.0051	0.1519	0.0117	0.0231	0.0006	144	10.4	147	3.6
老牛山岩体水池沟单元(KS)													
Z2-001-01	940	2388	0.39	0.0513	0.0013	0.1538	0.0043	0.0216	0.0003	145	3.8	138	1.9
Z2-001-02	549	1615	0.34	0.0499	0.0013	0.1568	0.0044	0.0227	0.0003	148	3.8	145	1.6
Z2-001-03	1445	2617	0.55	0.0484	0.001	0.1442	0.0033	0.0215	0.0003	137	2.9	137	1.7
Z2-001-04	1519	2337	0.65	0.0499	0.0017	0.1476	0.0046	0.0216	0.0003	140	4.0	138	1.6
Z2-001-07	848	2619	0.32	0.0495	0.001	0.1492	0.0035	0.0218	0.0003	141	3.1	139	1.9
Z2-001-08	556	1470	0.38	0.0461	0.0011	0.1454	0.0035	0.0229	0.0002	138	3.1	146	1.3
Z2-001-09	591	1612	0.37	0.0502	0.0013	0.1609	0.0049	0.0231	0.0003	151	4.3	147	2.1
Z2-001-10	647	1496	0.43	0.0487	0.0012	0.1564	0.004	0.0232	0.0002	148	3.5	148	1.5
Z2-001-11	471	1141	0.41	0.0494	0.0014	0.1589	0.0047	0.0232	0.0002	150	4.2	148	1.3
Z2-001-13	767	2304	0.33	0.0513	0.0013	0.1559	0.0043	0.0219	0.0003	147	3.8	140	1.8
Z2-001-15	411	787	0.52	0.0515	0.0017	0.1638	0.0055	0.0229	0.0002	154	4.8	146	1.6
Z2-001-16	906	2157	0.42	0.0511	0.0014	0.1633	0.005	0.0229	0.0004	154	4.4	146	2.3
Z2-001-17	566	974	0.58	0.0491	0.0015	0.1591	0.0049	0.0234	0.0003	150	4.3	149	1.8
Z2-001-18	715	879	0.81	0.0506	0.0014	0.1636	0.0047	0.0232	0.0003	154	4.1	148	1.7
Z2-001-19	1172	2719	0.43	0.0494	0.0012	0.1481	0.0037	0.0216	0.0003	140	3.2	138	1.9
Z2-001-20	988	2340	0.42	0.0502	0.0013	0.1546	0.0041	0.0222	0.0003	146	3.6	142	1.9

表 2 华山岩体与老牛山岩体 U、Th 含量及 Th/U 值特征

Table 2 Values of U,Th and Th/U in Huashan and Laoniushan plutons

岩体	组段	代号	测点数	U 平均值/ 10^{-6}	Th 平均值/ 10^{-6}	Th/U 平均值
华山岩体	葱峪单元	KC	166	4.85	17.47	4.66
	雨家河单元	KY	104	5.74	16.45	3.29
	沫沫岔单元	JM	92	5.77	31.08	6.00
	赛华山单元	JS	107	4.82	23.03	5.29
	康家坪单元	JK	18	6.46	30.56	5.44
老牛山岩体	水池沟单元	KS	140	9.27	24.9	3.55
	西牛峪单元	KX	107	10.14	24.39	3.35
	东涧峪单元	KD	272	10.03	26.68	3.05
	黄狗峪单元	KH	218	11.18	27.72	2.64

量基本接近,且还原后的岩体单元都呈富铀特征。从活性铀量看,华山岩体的沫沫岔单元(JM)、赛华山单元(JS)、康家坪单元(JK)均明显高于其他岩体单元。活性铀量特征较好地指示了矿床北侧华山岩体沫沫岔单元、赛华山单元的铀源体特征。

4 讨 论

4.1 成岩成矿时代

锆石 U-Pb 年代学研究表明,华山岩体至少经历了 2 期岩浆活动,第一期晚印支期—早燕山期(235~200 Ma)翁峪花岗岩侵入和第二期燕山期(140~130 Ma)大夫峪岩体、华山峪岩体侵入;老牛山北部的岩体侵入主要为燕山期,时代集中于 140~163 Ma,稍早于第二期华山岩体的侵入。结合前人关于华阳川碳酸岩年代学的研究,可知其也形成于晚印支期—早燕山期(235~200 Ma),稍晚于或与第一期华山岩体同时侵入,推测其可能是同一构造背景下不同岩浆房的产物,主体形成时间早于燕山期的华山岩体和老牛山岩体。

江宏君等(2020)通过含铀伟晶岩的锆石 U-Pb 测年获得伟晶岩成岩年龄为 1790 ± 15 Ma,结合伟晶岩矿化蚀变特征,推测华阳川矿床在 1800 Ma 左右发生了第一期铀成矿事件,这与前人研究结果(王文广等,1991;辛存林等,2013)华北克拉通在 1800 Ma 左右形成了广泛分布的一期铀矿化吻合。高龙刚等(2019)利用电子探针分析(EMPA)获得华阳川碳酸岩中晶质铀矿化学年龄,分为 2 期,早期为 201 Ma(印支期—燕山期),晚期为 129 Ma(燕山期);

表 3 各岩体单元古铀量及活性铀量特征

Table 3 Characteristics of paleo-uranium and active uranium contents in each small pluton

岩体	单元	代号	测点数	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	Th/U	古铀量/10 ⁻⁶	活性铀量/10 ⁻⁶
华山岩体	葱峪单元	KC	166	4.85	17.47		6.8	1.95
	雨家河单元	KY	104	5.74	16.45		6.4	0.66
	沫沫岔单元	JM	92	5.77	31.08	4.27	12.09	6.32
	赛华山单元	JS	107	4.82	23.03		8.96	4.14
	康家坪单元	JK	18	6.46	30.56		11.89	5.43
老牛山岩体	水池沟单元	KS	140	9.27	24.9		9.69	0.42
	西牛峪单元	KX	107	10.14	24.39	2.57	9.49	-0.65
	东涧峪单元	KD	272	10.03	26.68		10.38	0.35
	黄狗峪单元	KH	218	11.18	27.72		10.79	-0.39

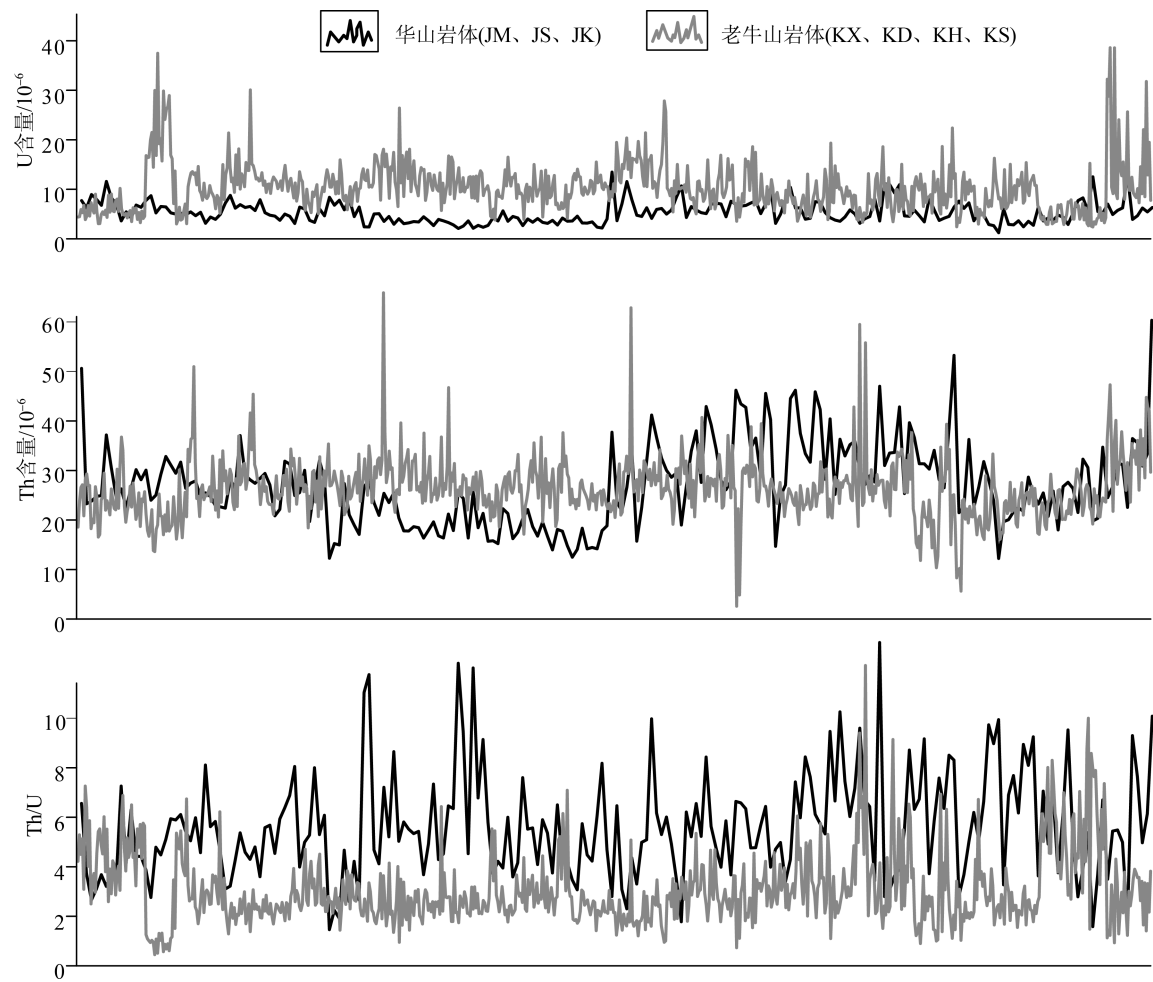


图 5 华山岩体与老牛山岩体主要岩石单元地表剖面 U、Th 含量及 Th/U 对照图

Fig. 5 Comparison of U, Th and Th/U in the surface sections of the main rock units of the Huashan and Laoniushan plutons

黄卉等(2020)利用电子探针 U-Th-Pb 测年获得 2 期晶质铀矿年龄,第一期为 221.9±5.1 Ma,第二期为 137.1±2.0 Ma;Zheng et al.(2020)对华阳川碳酸岩中 铌钽铀矿共伴生矿物榍石进行 LA-ICP-MS U-Pb 测 年,表明形成年龄为 209±2.9 Ma。

华阳川铀矿床铀矿物主要以铌钽铀矿的形式

产出,其次为晶质铀矿。铌钽铀矿与晶质铀矿紧密共生(高龙刚等,2019)。前人关于华阳川晶质铀矿化年龄和与铌钽铀矿共伴生矿物年龄的研究发现,华阳川地区至少经历了3期铀成矿事件:第一期为伟晶岩期(约1800 Ma);第二期为碳酸岩期(221~201 Ma),为主成矿期,伴随有大量早期蚀变的铌钽铀矿产出,形成于岩浆-高温热液体系;第三期为碳酸岩硫化物期(137~129 Ma),为次成矿期,形成于高温热液体系,可能与区域内强烈的燕山期岩浆热液交代作用有关。

4.2 成矿机理及成矿物质来源

本次研究发现,除华阳川矿区外,华阳川西部华县西沟和东南部黄龙铺、桃园地区等均具有铀矿化异常点,其铀矿化局部富集,但总体规模较小。赋矿围岩主要为伟晶岩脉及碳酸岩脉,伟晶岩多具有一定铀矿化且局部富集,U品位最高可达1%以上^②,伟晶岩中的锆石普遍具有较高的U含量(江宏君等,2020;李普涛等,2022),锆石U-Pb年龄表明伟晶岩形成于古元古代,后经长期风化、剥蚀、搬运、沉积作用,在勉略洋盆形成碳酸盐岩沉积物,印支期随着俯冲作用,原先沉积的碳酸盐岩发生部分熔融形成火成碳酸岩,火成碳酸岩继承U、Th等元素形成具有成矿潜力的母岩浆^①。碳酸岩岩浆沿着华阳川深大断裂侵入、结晶分异,形成具一定铀矿化的碳酸岩脉。研究区出露的伟晶岩规模太小,不足以华阳川超大型铀矿提供充足铀源,仅可能在局部地方富集。这也说明除华阳川矿区外,其他地区出现含矿碳酸岩脉,但总体铀矿化规模较小。

华阳川矿区北部与华山岩体翁峪花岗岩直接接触,地表能谱测量表明,华山和老牛山2个岩体的Th含量基本一致,但华山岩体U含量较老牛山岩体明显偏低,Th/U值明显高于老牛山岩体,相比较而言,U元素流失迁移的可能性较大,其中沫沫岔单元(JM)、赛华山单元(JS)及康家坪单元(JK)三者的Th/U值均大于5,具备典型的铀源体特征。结合其形成时代及与华阳川矿床较近的空间位置,碳酸岩岩浆在沿华阳川深大断裂侵入的过程中,分泌出的流体中Ca、Nb元素与 F^- 、 PO_4^{3-} 等阴离子形成复杂络合物,在合适的环境下分解沉淀形成原生的烧绿石($CaNb_2O_6F$)等矿物(郑惠等,2019),而稍早于其形成的华山岩体中U元素沿构造裂隙迁入,并与烧绿石中的 Ca^{2+} 发生类质同象替换,形成复杂

的络合物铌钽铀矿,其矿物成分Nb的变化范围为18.63%~26.58%,平均22.01%;Ti的变化范围为8.70%~12.54%,平均10.84%;U的变化范围为19.96%~25.78%,平均23.51%;Ca的变化范围为2.21%~11.30%,平均7.68%^③。华山岩体提供的铀源与碳酸岩母岩浆中的铀源在华阳川矿区叠加,共同形成华阳川超大型铀矿床。因此,华山岩体中的翁峪花岗岩(沫沫岔单元、赛华山单元、康家坪单元)为华阳川矿床的主要铀源体。

早白垩世(137~129 Ma),华阳川地区再次发生强烈的岩浆热液事件,主要为老牛山岩体和华山岩体大夫峪花岗岩及华山峪花岗岩侵入,早期已形成的铌钽铀矿发生不同程度的热液蚀变,部分铀、铌被再次活化-沉淀,形成少量晶质铀矿和铌钽铀矿。

5 结 论

(1)华山岩体翁峪花岗岩的形成年龄为235~200 Ma,老牛山岩体北部花岗岩的形成年龄为163~142 Ma,华阳川火成碳酸岩的形成年龄为235~200 Ma。华阳川火成碳酸岩的形成年龄与华阳川翁峪花岗岩的形成时代相近,可能为同一构造背景下不同岩浆的产物。

(2)华山岩体与老牛山岩体的Th含量基本一致,华山岩体翁峪花岗岩的Th/U值为5.29~6.00,老牛山岩体主要岩石单元的Th/U值为2.64~3.55,华山岩体翁峪花岗岩具典型的铀源(铀迁出)特征。

(3)华阳川脆-韧性剪切带为多期次形成,其底部与华山岩体直接相连,为铀源迁移提供了有利通道。华山岩体翁峪花岗岩中的U元素被活化、迁移后,为华阳川铀矿提供了大量的铀源。

致谢:野外工作得到华阳川项目组同事的帮助,实验测试在武汉上谱分析科技有限公司完成,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并以最诚挚的感谢。

注释

①陈华勇,许德如,凌明星,等.陕西省华阴市华阳川铀钼铅多金属矿成矿规律与找矿预测结题报告[R].中陕核工业集团二二四大队有限公司,2017.

②康清清,张熊猫,李鹏,等.陕西省华阴市华阳川地区铀矿普查地质报告[R].中陕核工业集团二二四大队有限公司,2017.

③李松清,崔强.陕西华阳川铀多金属矿历年选冶试验成果预研报

告[R].中陕核工业集团二二四大队有限公司.2017.

- ④张熊猫,康清清,叶兴超,等.北秦岭华阳川铀矿规律研究及深部资源预测[R].中陕核工业集团二二四大队有限公司.2020.

参考文献

- Hu J, Jiang S Y, Zhao H X, et al. Geochemistry and petrogenesis of the Huashan granites and their implications for the Mesozoic tectonic settings in the Xiaolinling gold mineralization belt, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 56: 276–289.
- Yang C S, Zhao L D, Zheng H, et al. The multiple granitic magmatism in the giant Huayangchuan uranium polymetallic ore district: Implications for tectonic evolution of the southern margin of North China Craton in the Qinling Orogen [J]. Ore Geology Reviews, 2019, 112: 1–21.
- Yang C S, Chen H Y, Zhao L D, et al. Multiphase magmatic overprinting in the Late Jurassic Laoniushan pluton at the SW margin of the North China Craton: Geochronological and petrogenetic constraints [J]. Geological Journal, 2020, 55(10): 1–17.
- Zheng H, Chen H Y, Li D F, et al. Timing of carbonatite-hosted U-polymetallic mineralization in the supergiant Huayangchuan deposit, Qinling Orogen: Constraints from titanite U–Pb and molybdenite Re–Os dating [J]. Geoscience Frontiers, 2020, 3: 1–12.
- 高成, 康清清, 张熊猫, 等. 华阳川碳酸岩的岩石学特征及铀矿赋存状态 [J]. 陕西地质, 2015, 33(2): 10–13.
- 高成, 康清清, 江宏君, 等. 秦岭造山带发现新型铀多金属矿: 华阳川与伟晶岩脉和碳酸岩脉有关的超大型铀–钼–铅–稀土矿床 [J]. 地球化学, 2017, 46(5): 446–455.
- 高龙刚, 陈佑铎, 毕献武, 等. 陕西华阳川铀钼矿床中铀矿物的年代学与矿物化学研究及其对铀成矿的启示 [J]. 地质学报, 2019, 93(9): 2273–2291.
- 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.
- 郭波, 朱赖民, 李森, 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过程 [J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 265–281.
- 何升, 李子颖, 惠小朝, 等. 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, 2016, 32(3): 159–164.
- 黄卉, 潘家永, 洪斌跃, 等. 陕西华阳川铀–多金属矿床晶质铀矿电子探针 U–Th–Pb 化学定年及其地质意义 [J]. 矿床地质, 2020, 39(2): 351–368.
- 惠小朝, 李子颖, 冯张生, 等. 陕西华阳川铀多金属矿床铀赋存状态研究 [J]. 矿物学报, 2014, 34(4): 573–580.
- 惠小朝, 何升. 华阳川铀多金属矿床碳酸岩脉矿化特征 [J]. 铀矿地质, 2016, 32(3): 94–98.
- 江宏君, 高成, 康清清, 等. 小秦岭华阳川铀钼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.
- 康清清, 江宏君, 李鹏, 等. 陕西华阳川铀钼铅矿床矿石矿物学特征 [J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(2): 111–123.
- 康清清, 张熊猫, 孟华. 小秦岭西段稀土矿特征及找矿远景浅析 [J]. 西北地质, 2020, 53(1): 107–121.
- 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.
- 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.
- 邱家骧, 李昌年, 喻学惠, 等. 秦巴碱性岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- 王林军, 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): 372–379.
- 王瑞廷, 秦西社, 袁海潮, 等. 小秦岭金钼多金属矿集区西部区域地质地球化学特征、成矿模式与找矿方向 [J]. 地质通报, 2021, 40(4): 531–544.
- 王文广, 王驹. 连山关铀矿床特殊的工业铀矿物组合及其特征和意义 [J]. 铀矿地质, 1991, (4): 196–205.
- 武翠莲, 刘志超, 马嘉, 等. 华阳川多金属矿床中铀的赋存状态研究 [J]. 铀矿冶, 2015, 34(1): 30–34.
- 辛存林, 马维云, 安国堡, 等. 甘肃龙首山 207 铀矿床成矿地质特征及其成矿机制探讨 [J]. 地质学报, 2013, 87(4): 577–590.
- 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, 1992, 17(2): 151–158.
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 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 [J]. 岩石学报, 1995, 11(2): 101–114.
- 张金带, 李子颖, 蔡煜琦, 等. 全国铀矿资源潜力评价工作进展与主要成果 [J]. 铀矿地质, 2012, 28(6): 321–326.
- 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): 235–260.
- 郑惠, 陈华勇. 华阳川铀多金属矿床烧绿石特征研究 [C] // 翟裕生等编. 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集. 南京: 中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会, 2019: 204.
- 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.