

## 小秦岭华阳川铀钼铅矿床蚀变矿化期次研究

江宏君<sup>1,2</sup>, 高成<sup>2,3\*</sup>, 康清清<sup>2</sup>, 陈华勇<sup>1</sup>, 郑慧<sup>1</sup>, 陈冰<sup>2</sup>,  
董强强<sup>2</sup>, 张熊猫<sup>2</sup>, 李鹏<sup>2</sup>, 李雷<sup>2</sup>, 刘宽厚<sup>4</sup>, 何世平<sup>4</sup>

(1.中国科学院广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2.中陕核工业集团二二四大队有限公司, 陕西 西安 710100; 3.东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 4.中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710154)

**摘要:** 华阳川铀钼铅矿床位于华北克拉通南缘小秦岭西段, 是一个以铀钼为主, 并伴生有铅的超大型综合矿床。根据含矿脉体的穿插关系、蚀变矿物组合及矿物共生关系, 将华阳川铀钼铅矿床的成矿过程划分为伟晶岩期、碳酸岩期和碳酸盐化-硫化物期。伟晶岩期可细分为褐帘石阶段和钾长石-黑云母-角闪石化阶段; 碳酸岩期可细分为霓辉石-磁铁矿阶段、角闪石-榍石-磷灰石阶段和独居石-褐帘石阶段; 碳酸盐化-硫化物期可细分为黄铁矿-磁铁矿化阶段和方铅矿化阶段。铀钼矿化主要发育在伟晶岩期和碳酸岩期, 铅矿化主要发育在碳酸盐化-硫化物期, 晚于铀钼矿化形成。其中, 伟晶岩期的钾长石-黑云母-角闪石组合、碳酸岩期的角闪石-榍石-磷灰石组合和独居石-褐帘石组合为矿区主要的富铀钼矿化组合, 可作为富铀钼矿的找矿标志。结合华阳川含矿钾长石伟晶岩的锆石 U-Pb 定年研究和前人关于碳酸岩的年代学研究成果, 推测华阳川存在两期铀钼成矿作用, 分别为 1.8 Ga 和 220 Ma±。

**关键词:** 小秦岭; 华阳川; 铀钼铅矿; 成矿期次

**中图分类号:** P612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2020)03-0404-018

### 0 引言

华阳川铀钼铅矿床位于西安市北东约 100 km 处, 具有大规模、低品位、多矿种、易开采、潜力大的特征。近年来, 随着中陕核工业集团二二四大队在华阳川地区普查、详查工作的推进, 该区铀矿找矿勘查工作取得重大突破, 引起国内外学者的高度关注, 对其开展了广泛的研究, 并在矿化蚀变特征以及矿石矿物学特征方面取得了一些认识(喻学惠, 1992; 惠小朝等, 2014; 高成等, 2015; 武翠莲等,

2015)。然而, 该矿床在基础地质研究方面仍然存在一些问题, 如矿区除了主体存在的碳酸岩型矿石, 还可见伟晶岩型矿石, 而且二者的矿物共生组合特征明显不同; 又如铀、钼、铅矿化并非同时生成, 铀钼矿化和铅矿化的形成存在先后关系。本文在前人的研究基础上, 通过野外调查、钻孔编录、手标本的描述与分析、岩相学鉴定等手段, 根据脉体间穿插关系、蚀变矿物组合及矿物共生关系, 重新划分和厘定了矿床的成矿期次, 并结合前人的研究成果分析了成矿特征。

收稿日期: 2018-11-07; 改回日期: 2019-12-17

项目资助: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0602200、2017YFC0602205、2017YFC0602300、2017YFC0602304)、东华理工大学科研基金项目(DHBK2019310)、陕西省创新能力支撑计划青年科技新星项目(2019KJXX-095)、中国地质调查局西安地质调查中心科技部专项子项目(0617-1611FZ206)和陕西省自然科学研究计划面上基金项目(2016JM4009)联合资助。

第一作者简介: 江宏君(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事矿床学研究和铀多金属矿勘查评价工作。Email: jhj120210@163.com

通信作者: 高成(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事构造地质研究和铀矿勘查评价工作。Email: gorden01104106@163.com

# 1 区域地质

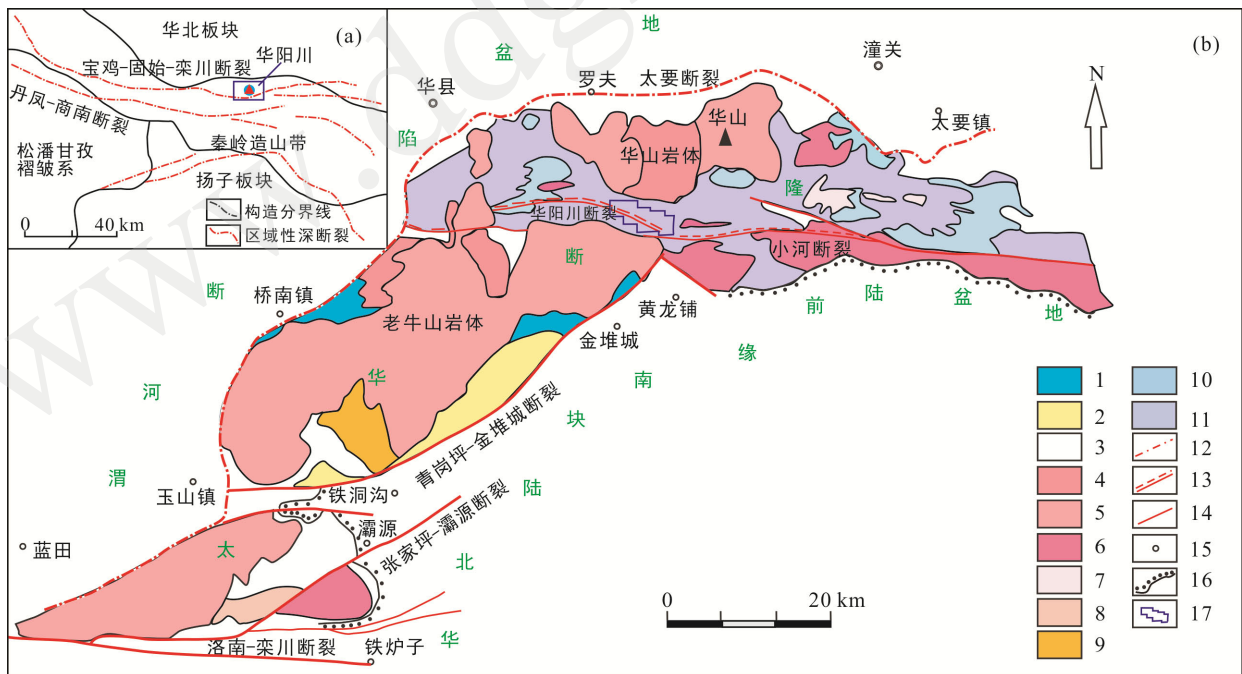
小秦岭地区位于华北板块与秦岭造山带的接触部位, 经历了复杂的岩浆构造演化和变质作用, 并伴随着一系列的成矿作用, 是我国重要的金、钼、铀矿产区之一(图 1a, 张国伟等, 1995; 武翠莲等, 2015)。

小秦岭出露地层主要有太古宇太华群(高级变质表壳岩系)、元古宇熊耳群(火山-沉积岩系)和铁洞沟组(变质碎屑岩系)(图 1b; 郭威等, 2008; 时毓等, 2011; 惠小朝, 2014; 高成等, 2017)。区内断裂构造发育, 主体呈近 EW 向展布, 主要为多期次的韧性剪切带; 其次为 NWW 向、NW 向、NE 向的断裂构造带(图 1b)。近 EW 向断裂由于受到不同方向多次构造应力的作用, 往往表现出多种性质叠加的现象(惠小朝, 2014)。区内岩浆侵入活动频繁、强烈, 岩浆作用贯穿本区整个地质演化历史, 其中燕山期岩浆活动最为强烈, 代表性岩体有华山岩体和老牛山岩体(图 1b)。伴随强烈岩浆活动, 区内成矿作用也极为发育, 代表性矿产有华山岩体外接触带及以东的小秦岭金矿田和老牛山岩体外接触带金堆城-黄龙

铺钼矿田, 其中黄龙铺矿床为印支期碳酸岩型钼矿床(Xu et al., 2010; 王江波等, 2015; 高成等, 2017)。

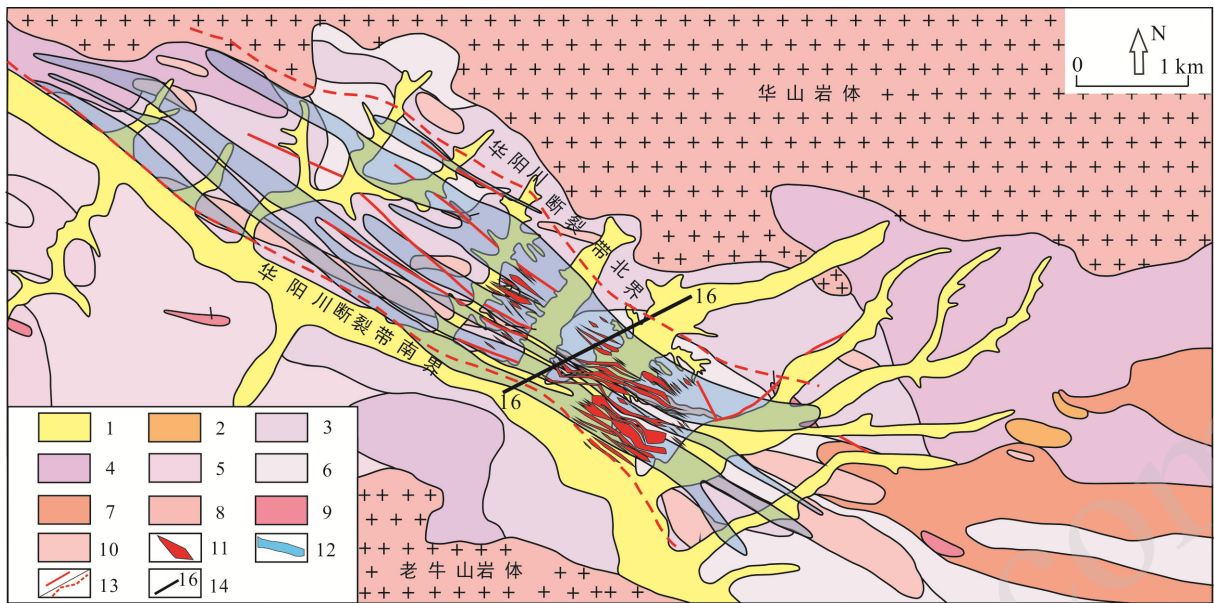
# 2 矿区地质

华阳川铀钼铅矿床位于小秦岭构造带西段, 夹持于华山岩体和老牛山岩体之间, 是一个以铀、钼、铅为主并伴生有三稀元素的超大型多金属矿床(惠小朝, 2014)。矿区主要出露一套太古宙灰色 TTG 片麻岩套, 包括武家坪片麻岩、侯家村片麻岩、马驹峪片麻岩和大月坪片麻岩(图 2), 岩性主要以英云闪长质的片麻岩为主, 包括黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩、含辉石角闪斜长片麻岩以及花岗片麻岩。武家坪黑云斜长片麻岩和大月坪花岗片麻岩是主要的赋矿围岩。太古宇太华群变质岩系(石英岩、石英片岩)仅在矿区东部局部地段呈俘虏体或地层残片出露。矿区内断裂构造极其发育, 以北西向的华阳川断裂带为代表, 出露长度约 6000 m, 宽 500~1000 m, 总体走向 100°~110°, 倾向北东, 倾角 30°~65°。前人研究表明华阳川断裂带是由构造片岩、眼球状片麻岩组成的深层次韧性剪切带, 具有逆冲兼左行走滑的斜冲特征, 形成于 419 Ma 左右的



1. 元古宇熊耳群; 2. 元古宇铁洞沟组; 3. 太古宇太华群; 4. 白垩纪二长花岗岩; 5. 侏罗纪二长花岗岩; 6. 元古宙二长花岗岩; 7. 元古宙花岗闪长岩; 8. 元古宙花岗岩; 9. 元古宙闪长岩; 10. 太峪岭片麻岩套; 11. 翁盆铺片麻岩套; 12. 地壳拼贴断裂; 13. (脆)韧性剪切带; 14. 一般区域性断裂; 15. 地名; 16. 不整合界线; 17. 矿区。

图 1 小秦岭地区构造-岩黄简图(修改自高成等, 2017)  
Fig.1 Simplified regional tectonic-magma map of the Lesser Qinling area



1. 第四系; 2. 太华岩群; 3. 大月坪片麻岩; 4. 马驹峪片麻岩; 5. 侯家村片麻岩; 6. 武家坪片麻岩; 7. 干沟单元; 8. 花岗岩(华山岩体/老牛山岩体); 9. 花岗伟晶岩脉; 10. 花岗斑岩脉; 11. 铀钨铅矿体; 12. 含矿脉岩带; 13. (推测)断裂; 14. 勘探线(16号)。

图 2 华阳川铀钨铅矿床矿区地质简图

Fig.2 Geological map of the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit

秦岭加里东事件(图 2; 郭威等, 2008)。矿区内广泛发育脉岩, 主要包括花岗斑岩、伟晶岩和火成碳酸岩等, 其主要分布在华阳川断裂带内。花岗斑岩规模较大, 呈条带状沿华阳川断裂带南北边界分布; 伟晶岩规模较小, 呈细脉状分布于华阳川断裂带中, 北西向展布; 碳酸岩单脉规模不大, 一般宽几厘米到几米, 通常呈脉岩带产出, 与华阳川断裂带展布特征基本一致。根据脉体间的穿插关系可知, 伟晶岩脉形成稍晚于花岗斑岩, 碳酸岩形成最晚。

### 3 矿体地质

经过前人系统的地质勘查工作, 根据铀钨铅综合圈矿指标圈定同体矿体一个(图 3), 初步落实铀资源量 XX 吨, 品位一般在 0.01%~0.0319%之间, 平均品位 0.0159%; 五氧化二钨资源量数十万吨, 品位一般在 0.0125%~0.0258%, 平均品位 0.0189%; 铅资源量数百万吨, 品位一般在 0.5%~0.85%, 平均品位 0.55%。矿体铀、钨、铅品位总体较低, 局部出现相对富集现象, 但富集程度不高, 是一个可综合利用的超大型矿床。

矿体主要赋存于矿区中部武家坪黑云斜长片麻岩和大月坪花岗片麻岩中。铀钨矿化主要与伟晶岩脉、碳酸岩脉紧密共生, 方铅矿化则主要与含沸石的方解石石英细网脉紧密共生。含矿伟晶岩脉可细

分为花岗伟晶岩脉和钾长石伟晶岩脉(钾化花岗伟晶岩脉); 含矿碳酸岩脉可细分为长石霓辉石石英方解石脉、含霓辉石石英重晶石方解石脉、含黑云母和少量霓辉石的石英重晶石方解石脉等。碳酸岩脉强烈改造早期形成的伟晶岩脉, 含沸石的方解石石英脉则呈细网脉状充填于伟晶岩脉和碳酸岩脉的裂隙中, 不同期次、不同类型的脉岩形成密集的网状脉群(康清清等, 2018)。矿体严格受碳酸岩、伟晶岩等组成的脉岩群控制, 矿体产状与脉岩群总体产状一致, 倾向北东  $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ , 倾角  $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。脉体分布密度愈大, 范围愈广, 矿体规模则愈大; 反之, 脉体分布稀疏, 范围小, 则矿体规模小, 矿带宽 500~1000 m, 长度大于 6000 m。剖面上矿体中心地段形态简单, 呈厚大板状; 靠近顶底板及倾向延伸部位矿体形态复杂, 多呈平行分布的薄板状(图 3)。

根据含矿主岩类型, 矿床的铀矿石可分为伟晶岩型矿石和碳酸岩型矿石。伟晶岩型矿石的矿石矿物主要为铀钨铀矿和晶质铀矿等; 脉石矿物主要为钾长石、斜长石和石英, 其次有褐帘石、绿帘石、角闪石、黑云母和磁铁矿等。碳酸岩型矿石的矿石矿物主要为铀钨铀矿、晶质铀矿、钍铀矿、(含铀)长白矿、(含铀)褐钨铀矿和铀钍石等, 脉石矿物主要为方解石、石英、霓辉石和钾长石, 其次有重晶石-锶重晶石、天青石-钡天青石、褐帘石、角闪石、

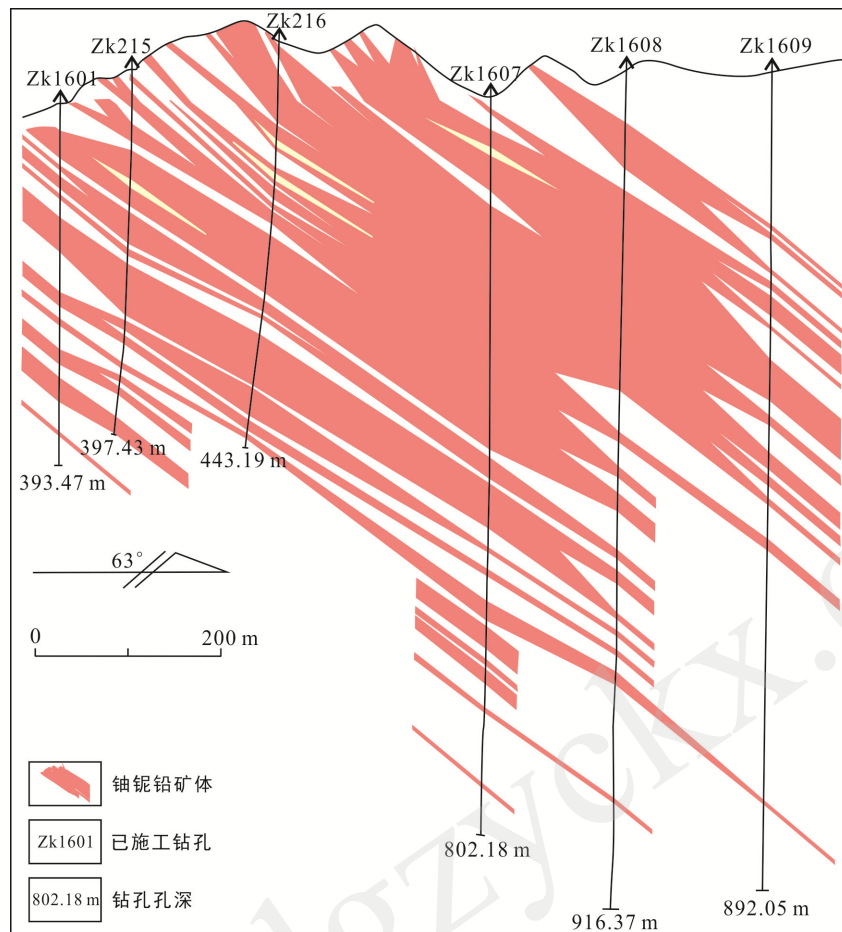


图3 华阳川铀钼铅矿床16号勘探线剖面简图

Fig.3 Cross-section along the No.16 prospecting line in the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit

黑云母、独居石、磷灰石、榍石、磁铁矿和黄铁矿等。铅矿化主要赋存于晚期含沸石方解石石英脉中,呈细网脉状充填于伟晶岩及碳酸岩的裂隙中,该脉体内可见方铅矿呈粒状、浸染状与沸石、菱锆矿、方解石、石英共生。由于不同期次的含矿脉相互交切、混杂,空间上铀、钼、铅矿化常常表现出同体特征,但地质现象表明铅矿化往往晚于铀、钼矿化(康清清等,2018)。钼钽铀矿是该矿床最主要的含铀、钼矿物,方铅矿是最主要的含铅矿物。钼钽铀矿主要呈它形粒状、半自形-自形粒状分布,方铅矿则主要呈它形粒状集合体、细脉状以及团块状分布。

#### 4 成矿期次

在详细的野外考察基础上,笔者对矿床已有钻孔原始编录资料进行了总结凝练,并重点对多个钻孔近10000 m岩心进行编录,取样460块,鉴定光薄片276块。研究表明矿床的含矿脉体发育有广泛的

围岩蚀变作用,其中伟晶岩脉以发育褐帘石化、钾化、黑云母化、角闪石化以及磁铁矿化为特征;碳酸岩脉以发育霓长岩化作用为特征,形成的矿物主要有霓辉石、角闪石、磁铁矿、榍石、磷灰石、独居石、褐帘石和黑云母等。

在此基础上,根据脉体穿插关系、蚀变矿物组合及矿物共生关系,并结合前人研究成果重新划分了华阳川铀钼铅矿床的成矿期次。将矿床的成矿阶段依次划分为伟晶岩期、碳酸岩期和碳酸盐化-硫化物期,铀钼矿化主要发育在伟晶岩期的钾长石-黑云母-角闪石化阶段以及碳酸岩期的霓辉石-磁铁矿化阶段、角闪石-榍石-磷灰石阶段和独居石-褐帘石阶段,铅矿化主要发育在碳酸盐化-硫化物期(图4)。此外进行矿物电子探针分析时,还发现了少量钽铀矿、(含铀)长白矿、(含铀)褐钨铀矿、钽钽石等其他含铀、钼矿物,由于这些矿物含量较低,仅在局部呈细粒状分布于钼钽铀矿颗粒中,肉眼及镜下难以识别和鉴定,因此在本次成矿期次划分表中未体现。



图 4 华阳川铀钼铅矿床蚀变矿化期次表

Fig.4 Alteration and mineral paragenesis of the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit

#### 4.1 伟晶岩期蚀变矿物组合及特征

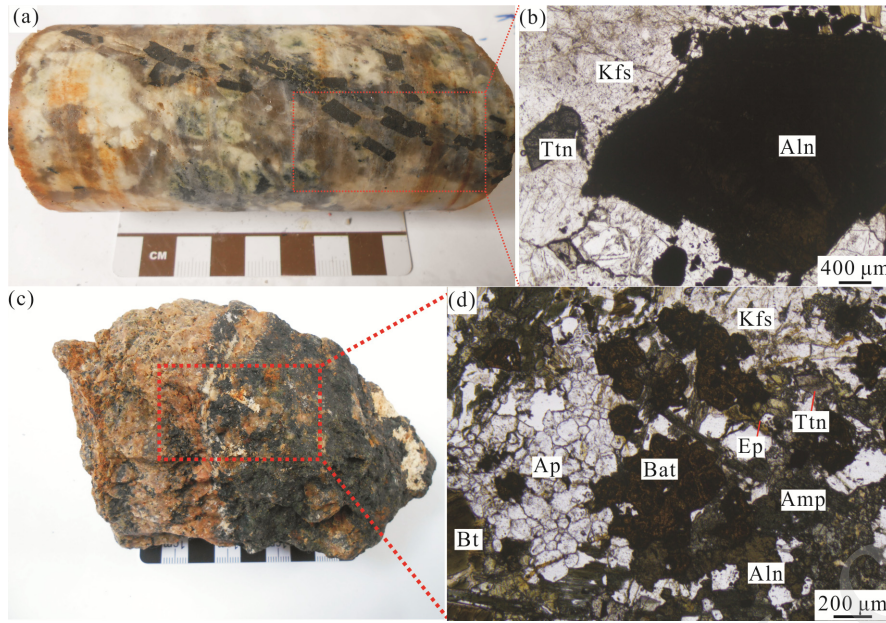
伟晶岩期可细分为褐帘石阶段和钾长石-黑云母-角闪石化阶段。褐帘石阶段主要发育褐帘石、黑云母和磁铁矿。褐帘石常呈粒柱状分布于花岗伟晶岩脉中,部分位置呈定向排列(图 5a),黑云母则呈片状集合体分布于伟晶岩脉中,其内部发育有磁铁矿(图 5c),镜下观察表明磁铁矿常常呈粒状分布在褐帘石的边部以及黑云母的内部,此外局部还见有少量的榍石(图 5b、d);钾长石-黑云母-角闪石化阶段是(富)铀矿化的第一阶段,发育有钾长石、角闪石、黑云母、铌钽铀矿、粒状的磷灰石以及少量的褐帘石和榍石。角闪石和黑云母呈弥散状分布于钾化的花岗伟晶岩脉中(图 6a、d),在脉体与围岩的接触部位角闪石和黑云母常呈团块状集合体产出(图 6g)。铌钽铀矿呈棕黄色不规则粒状,表面粗糙斑杂,见有角闪石、黑云母沿其粒间和内部交代(图 6b、e、

f、h),局部还可见部分铌钽铀矿呈球粒状分布于黑云母中,沿铌钽铀矿边部可见褐黄色的放射晕圈(图 6i),角闪石、褐帘石以及铌钽铀矿的边部常见有绿帘石化(图 6e、f)。此外还可见磷灰石和少量的褐帘石交代黑云母和角闪石(图 6c、f、i),指示铌钽铀矿、黑云母、角闪石可能稍早于褐帘石、磷灰石以及榍石和绿帘石形成。该阶段铌钽铀矿常呈粒状不规则的集合体产出,放射性异常明显,铀含量较高。

#### 4.2 碳酸岩期蚀变矿物组合及特征

碳酸岩期可细分为霓辉石-磁铁矿阶段、角闪石-榍石-磷灰石阶段和独居石褐帘石阶段。碳酸岩常呈脉状沿大月坪花岗片麻岩和武家坪黑云斜长片麻岩的节理和裂隙充填交代,亦可见碳酸岩脉穿切交代早期的花岗伟晶岩脉和钾化的花岗伟晶岩脉以及伟晶岩期的石英(图 7)。

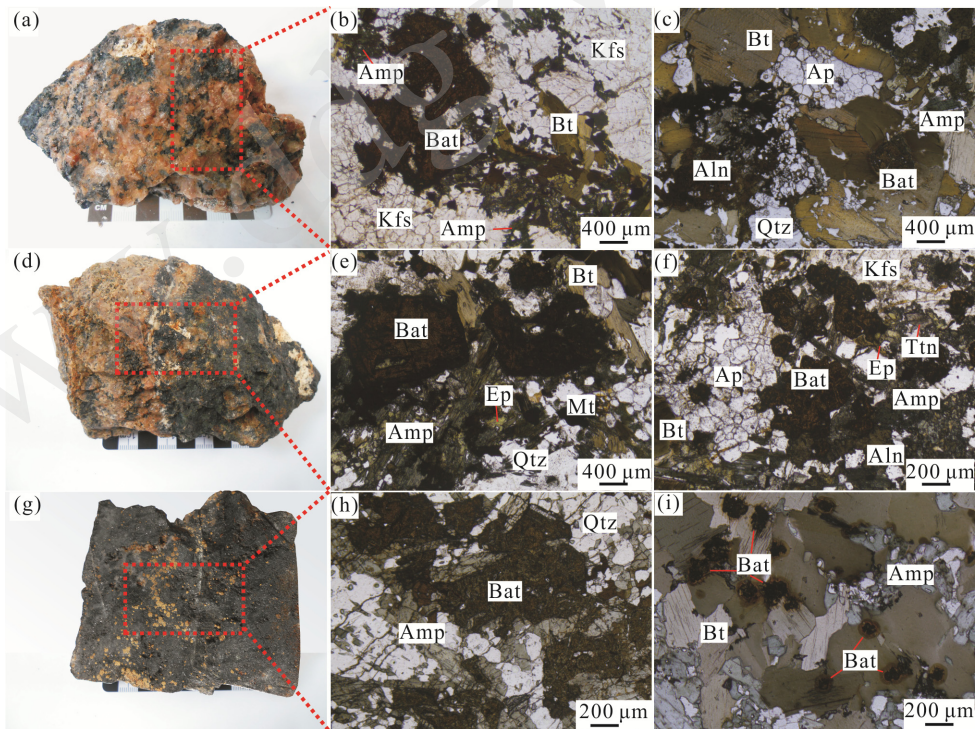
霓辉石-磁铁矿阶段为弱铀矿化阶段,发育有



(a) 花岗伟晶岩脉中分布有定向排列的粒柱状褐帘石; (b) 花岗伟晶岩脉中的褐帘石; (c) 花岗伟晶岩脉中分布有粒柱状的褐帘石和片状的黑云母集合体; (d) 花岗伟晶岩脉中的褐帘石黑云母。矿物代号: Aln. 褐帘石; Ttn. 榧石; Kfs. 钾长石; Bt. 黑云母; Mt. 磁铁矿; Ep. 绿帘石; Bat. 铌钛铀矿; Ap. 磷灰石; Amp. 角闪石。

图 5 华阳川铀钼铅矿床伟晶岩期褐帘石化阶段矿物特征

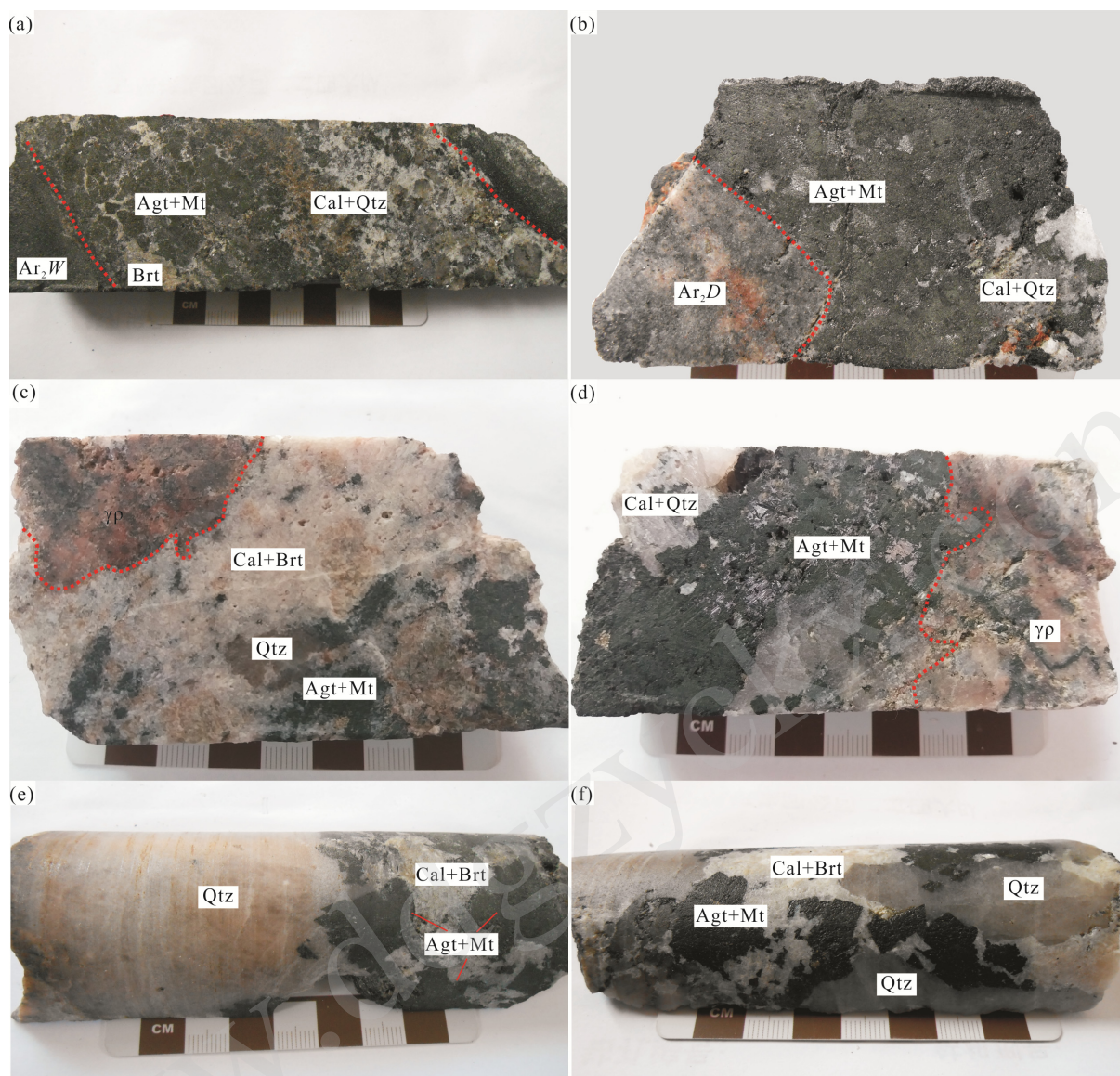
Fig.5 Mineral assemblage of the early stage (allanite) pegmatite from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit



(a~c) 花岗伟晶岩脉发生钾化, 黑云母化以及少量的角闪石化, 并见有铌钛铀矿以及褐帘石和磷灰石; (d~f) 花岗伟晶岩脉发生钾化、角闪石化以及黑云母化, 并见有铌钛铀矿、磷灰石、褐帘石和少量榧石, 角闪石、榧石边部见有绿帘石化; (g~i) 黑云母角闪石蚀变带, 内见铌钛铀矿, 部分铌钛铀矿分布于黑云母中, 见有黄色的放射晕。矿物代号: Aln. 褐帘石; Ttn. 榧石; Ap. 磷灰石; Kfs. 钾长石; Qtz. 石英; Amp. 角闪石; Bt. 黑云母; Ep. 绿帘石; Mt. 磁铁矿; Bat. 铌钛铀矿。

图 6 华阳川铀钼铅矿床伟晶岩期钾长石-角闪石-黑云母阶段矿物特征

Fig.6 Mineral assemblage of the late stage (K-feldspar-biotite-amphibole) pegmatite from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit



(a) 含霓辉石重晶石石英方解石脉交代武家坪黑云斜长片麻岩; (b) 含霓辉石重晶石石英方解石脉交代大月坪花岗片麻岩; (c) 含霓辉石石英方解石脉交代钾长石伟晶岩; (d) 含霓辉石石英方解石脉交代花岗伟晶岩; (e, f) 含霓辉石重晶石石英方解石脉交代花岗岩伟晶岩岩浆演化后期团块状石英。Ar<sub>2</sub>W. 武家坪黑云斜长片麻岩; Ar<sub>2</sub>D. 大月坪花岗片麻岩; γp. 花岗伟晶岩、钾长石伟晶岩。矿物代号: Agt. 霓辉石; Mt. 磁铁矿; Brt. 重晶石; Cal. 方解石; Qtz. 石英。

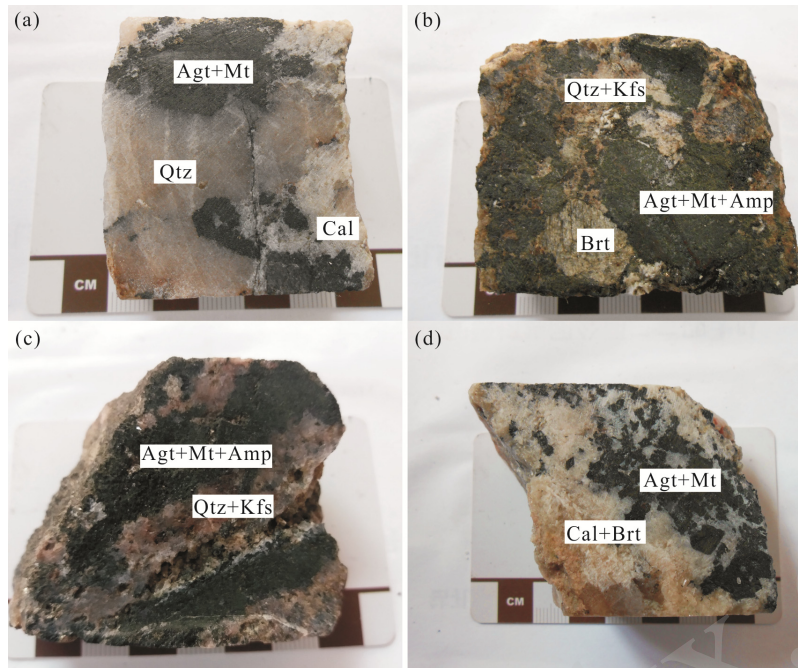
图 7 华阳川铀钨铅矿床碳酸岩期碳酸岩交代围岩

Fig.7 Carbonatite replacement of the host carbonatite from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit

霓辉石、磁铁矿、钾长石、重晶石、方解石、石英以及铌钽铀矿和少量的榍石、锆石(图 8、9)。霓辉石呈团块状或不规则粒状分布于石英方解石脉中,磁铁矿呈粒状嵌布于霓辉石中(图 9a),钾长石、石英、重晶石以及方解石沿霓辉石的粒间分布,少量粒状自形的榍石和锆石分布于霓辉石以及方解石的粒间(图 9b、c),并见有后期的角闪石充填交代霓辉石和磁铁矿(图 9d-f),铌钽铀矿呈红棕色自形粒状分布于方解石的粒间以及方解石与霓辉石的接触部位,部分位置还见有少量的黑云母(图 9g、h),此外还可见后

期粒状磷灰石分布于铌钽铀矿的粒间和内部(图 9i)。

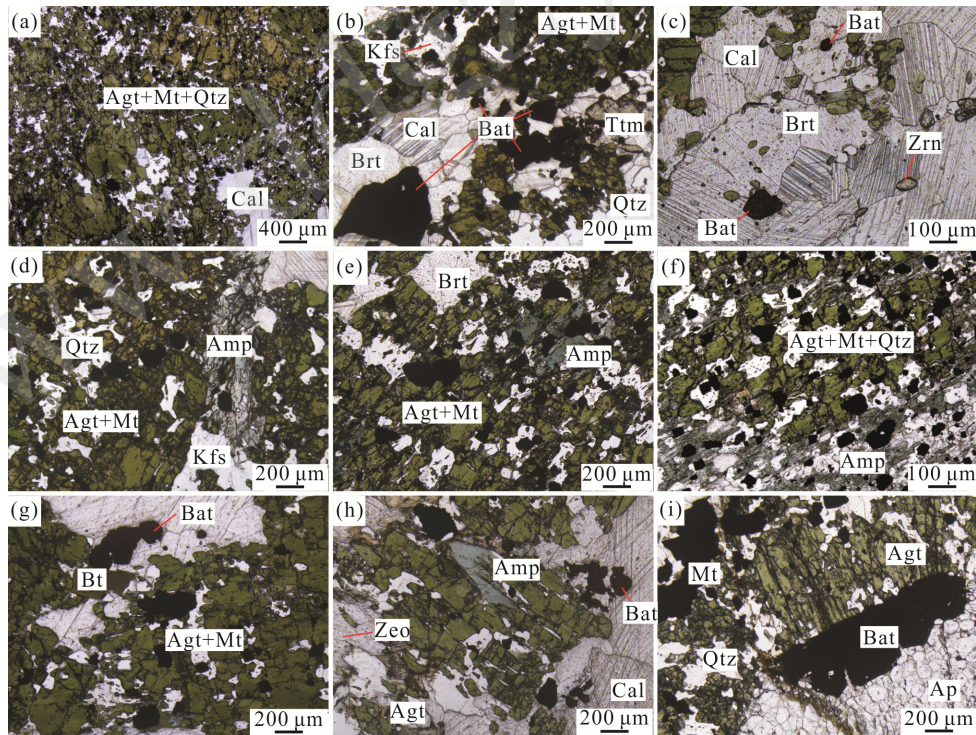
角闪石-榍石-磷灰石阶段是(富)铀矿化的第二阶段,发育有角闪石、黑云母、重晶石、方解石、石英以及铌钽铀矿、榍石、磷灰石和少量的霓辉石等,该阶段矿物通常与霓辉石-磁铁矿阶段矿物共同组成含霓辉石石英方解石脉,较少呈单独的脉体出现(图 10)。角闪石呈长柱状和纤维状集合体,榍石呈不规则粒状交代早阶段的霓辉石和磁铁矿(图 11a),榍石呈自形粒状与角闪石共生产出(图 11b),部分位置还可见榍石呈自形粒状与角闪石、铌钽铀矿呈似脉



(a) 含霓辉石石英方解石脉; (b) 钾长石霓辉石重晶石石英方解石脉; (c) 钾长石霓辉石石英方解石脉; (d) 含霓辉石重晶石石英方解石脉。矿物代号: Agt. 霓辉石; Amp. 角闪石; Mt. 磁铁矿; Brt. 重晶石; Cal. 方解石; Qtz. 石英; Kfs. 钾长石。

图 8 华阳川铀钼铅矿床碳酸岩期霓辉石-磁铁矿阶段脉岩手标本照片

Fig.8 Photographs of hand specimens of aegirite augite-magnetite veins in the carbonatite from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit

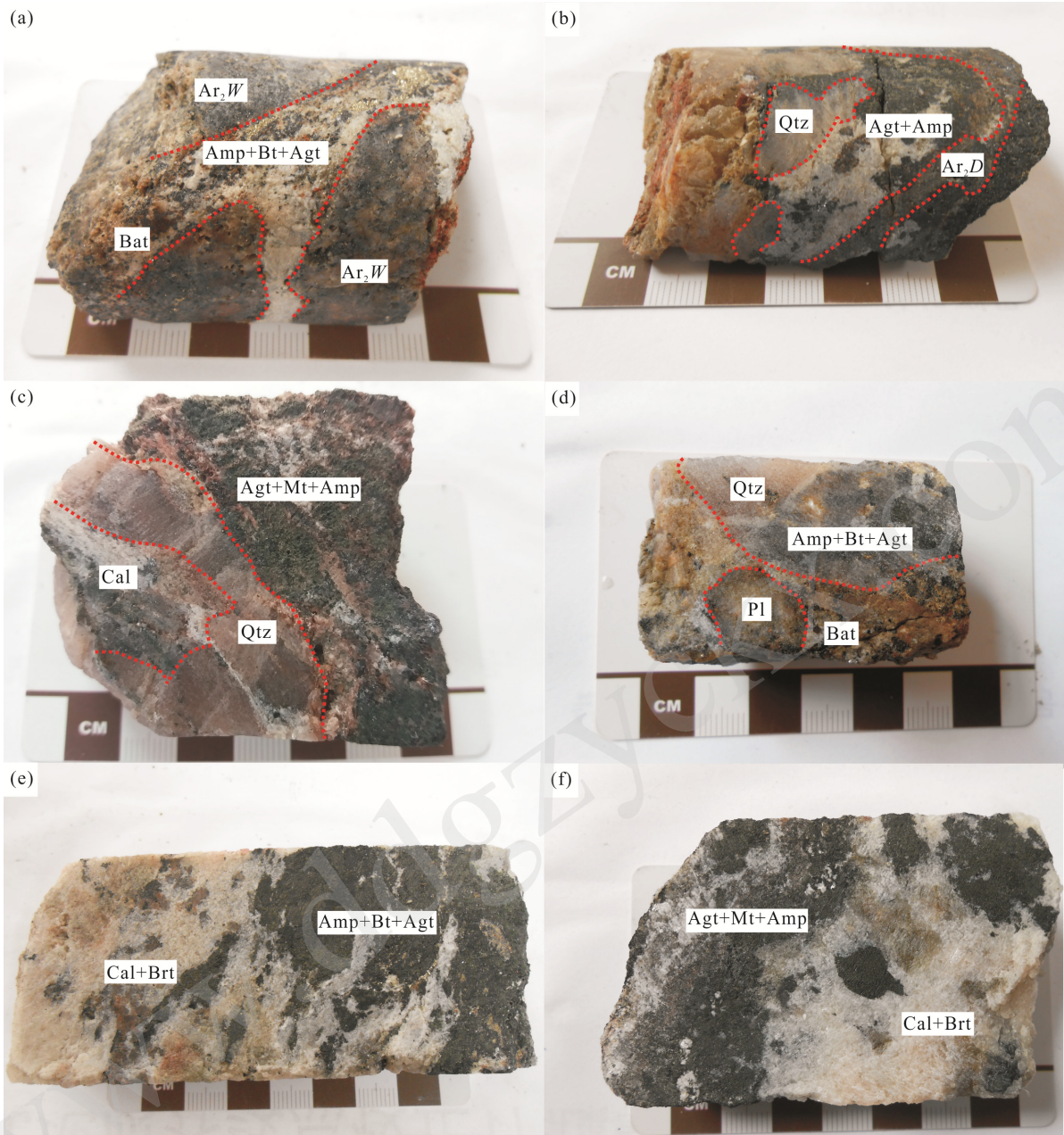


(a) 霓辉石、粒状磁铁矿组合; (b, c) 霓辉石、粒状磁铁矿组合见有铌钽铀矿以少量的榍石和锆石; (d~f) 霓辉石、粒状磁铁矿组合被后期角闪石交代; (g~i) 霓辉石、粒状磁铁矿组合中见自形粒状的铌钽铀矿以及少量黑云母, 并被后期的磷灰石交代。矿物代号: Agt. 霓辉石; Amp. 角闪石; Mt. 磁铁矿; Brt. 重晶石; Kfs. 钾长石; Bt. 黑云母; Cal. 方解石; Qtz. 石英; Ap. 磷灰石; Ttm. 榍石; Bat. 铌钽铀矿; Zrn. 锆石; Zeo. 沸石。

图 9 华阳川铀钼铅矿床碳酸岩期霓辉石-磁铁矿阶段矿物组合镜下特征

Fig.9 Microphotographs of aegirite augite-magnetite veins in carbonatite from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit





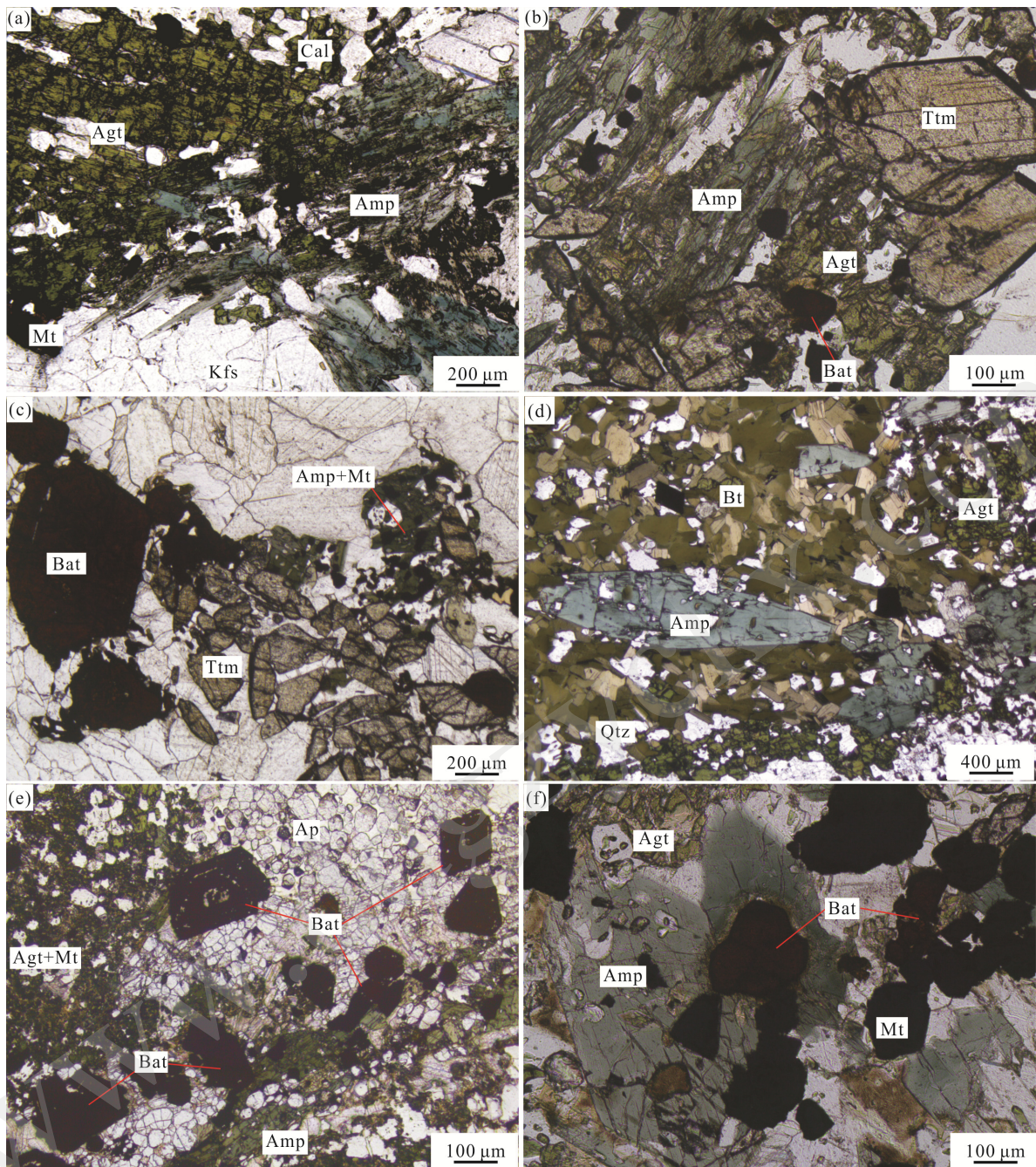
(a, b) 含角闪石霓辉石石英方解石脉交代围岩; (c, d) 含角闪石霓辉石石英方解石脉交代伟晶岩以及伟晶岩演化后期的石英; (e, f) 含角闪石霓辉石重晶石石英方解石脉。矿物代号: Agt. 霓辉石; Mt. 磁铁矿; Amp. 角闪石; Pl. 斜长石; Bt. 黑云母; Brn. 重晶石; Cal. 方解石; Qtz. 石英; Bat. 铌钽铀矿; Ar<sub>2</sub>W. 武家坪黑云斜长片麻岩; Ar<sub>2</sub>D. 大月坪花岗岩片麻岩。

图 10 华阳川铀钽铅矿床碳酸岩期角闪石-榴石-磷灰石阶段脉体特征

Fig.10 Photos of the amphibole-titanite-apatite veins in the carbonatite from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit

状集合体分布于石英方解石脉中(图 11c)。黑云母呈鳞片状集合体交代早阶段的霓辉石和磁铁矿, 见有角闪石和榴石沿黑云母的内部充填交代, 指示黑云母可能稍早于角闪石和榴石生成(图 11d)。磷灰石呈粒状以及粒状集合体交代早阶段生成的霓辉石和磁铁矿, 磷灰石发育部位铌钽铀矿较为发育, 其常呈自形粒状或粒状集合体分布于粒状磷灰石集合体中

及其与霓辉石、磁铁矿的接触部位, 部分铌钽铀矿的生长环带有磷灰石交代, 局部还可见有粒状磷灰石分布于长柱状角闪石的内部(图 11e), 指示磷灰石形成可能稍晚于角闪石、铌钽铀矿。此外, 一些角闪石呈六边形, 角闪石式解理发育, 其内见有粒状铌钽铀矿分布, 并可见有黄色的放射晕(图 11f), 指示铌钽铀矿与角闪石共生或稍晚于其形成。



(a) 角闪石、榍石等交代霓辉石、粒状磁铁矿组合; (b) 榍石呈自形粒状与角闪石共生产出交代霓辉石、粒状磁铁矿组合; (c) 榍石呈自形粒状与角闪石、铌钽铀矿呈似脉状分布于石英方解石脉中; (d) 角闪石沿黑云母的内部充填交代, 指示黑云母可能稍早于角闪石生成; (e) 粒状自形铌钽铀矿与磷灰石、角闪石共生; (f) 角闪石中发育粒状铌钽铀矿, 并见有黄色的放射晕。矿物代号: Agt. 霓辉石; Amp. 角闪石; Mt. 磁铁矿; Brt. 重晶石; Kfs. 钾长石; Bt. 黑云母; Cal. 方解石; Qtz. 石英; Ap. 磷灰石; Ttm. 榍石; Aln. 褐帘石; Bat. 铌钽铀矿。

图 11 华阳川铀钼铅矿床碳酸岩期角闪石-榍石-磷灰石阶段矿物组合特征

Fig.11 Microphotographs of the amphibole-titanite-apatite veins in the carbonatite from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit

独居石-褐帘石阶段为(富)铀矿化第三阶段, 发育有独居石、褐帘石、黑云母、铌钽铀矿以及少量的角闪石、榍石、磷灰石和辉钼矿。该阶段矿物常呈单独细脉产出, 交代大月坪花岗片麻岩、武家坪

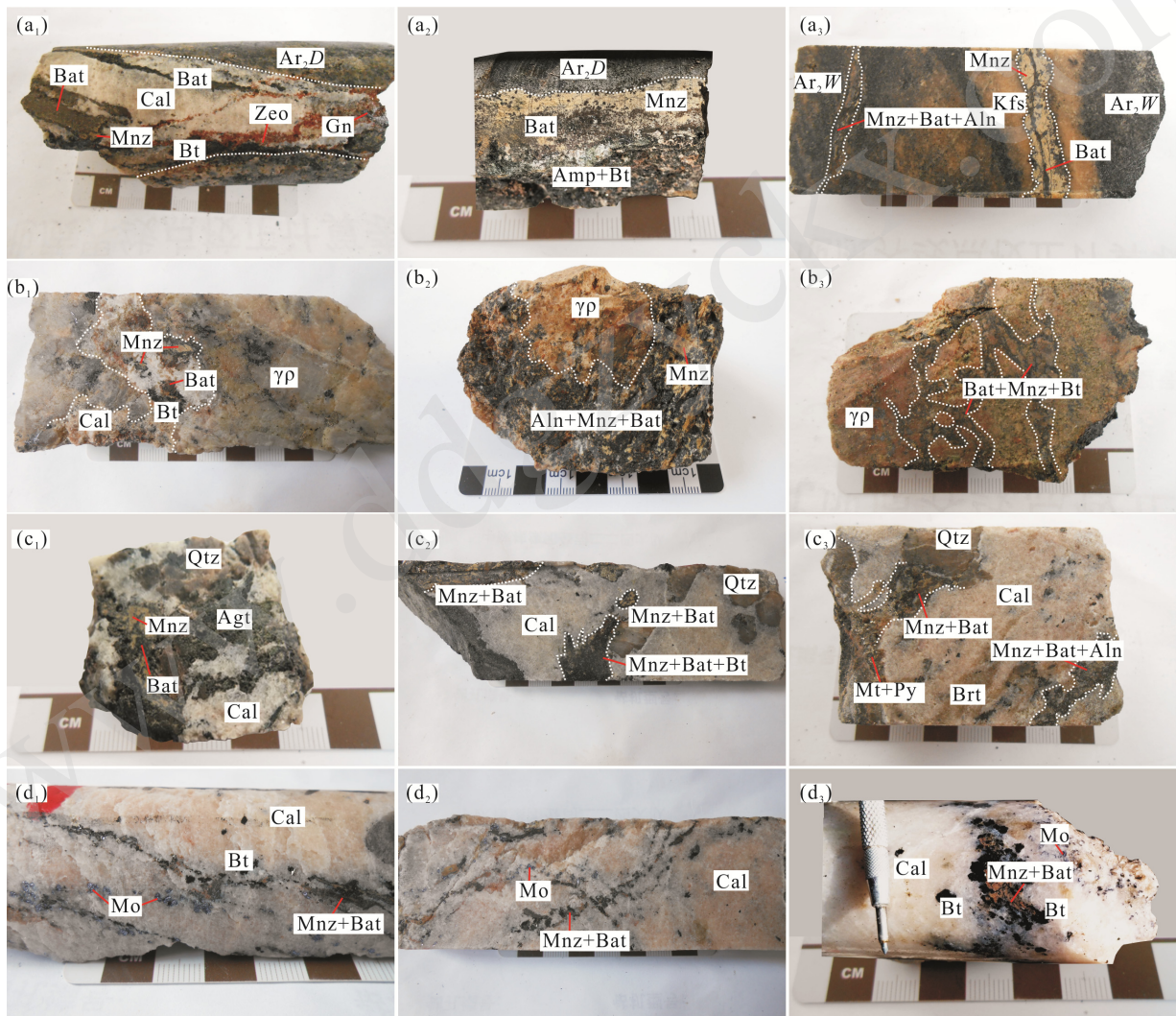
黑云斜长片麻岩、花岗伟晶岩脉和钾化花岗伟晶岩脉(图 12a<sub>1</sub>~a<sub>3</sub>, 12b<sub>1</sub>~b<sub>3</sub>), 以及碳酸岩期的霓辉石-磁铁矿阶段矿物和角闪石-榍石-磷灰石阶段矿物, 部分呈细脉状、浸染状以及团块状集合体分布于石英

方解石脉中,此外局部还见有细脉状和浸染状的辉钼矿与之伴生(图 12c<sub>1</sub>~c<sub>3</sub>, 12d<sub>1</sub>~d<sub>3</sub>)。黑云母、独居石、铌钽铀矿以及磷灰石和少量的角闪石、榍石呈细脉状交代花岗伟晶岩脉和石英方解石脉,细脉中可见角闪石和黑云母被独居石、铌钽铀矿、褐帘石以及磷灰石交代,独居石和褐帘石沿黑云母的解理以及内部分布,一些黑云母呈碎片状(图 13a、b、c),表明细脉中黑云母和角闪石形成稍早于铌钽铀矿、独居石、褐帘石、磷灰石。该阶段铌钽铀矿极为发育,其与独居石关系密切,呈自形粒状分布于独居石中,沿其生长边界见有独居石交代充填,部分位

置可见独居石交切自形铌钽铀矿使其碎裂,指示铌钽铀矿稍早于独居石形成,而且沿独居石和铌钽铀矿的粒间以及矿物裂隙见有褐帘石呈胶状充填,表明褐帘石形成稍晚于独居石和铌钽铀矿(图 13d、e、f)。此外,在细脉的部分位置发育有鳞片状的辉钼矿集合体,可见辉钼矿集合体沿黑云母的解理交代,并切穿方解石颗粒(图 13g、h、i),指示辉钼矿形成稍晚于黑云母和方解石。

### 4.3 碳酸盐化-硫化物期蚀变矿物组合及特征

碳酸盐化-硫化物期可细分为黄铁矿-磁铁矿化阶段和方铅矿化阶段。黄铁矿、磁铁矿、方铅矿以



(a<sub>1</sub>~a<sub>3</sub>) 独居石-褐帘石-铌钽铀矿组合交代地层围岩; (b<sub>1</sub>~b<sub>3</sub>) 独居石-褐帘石-铌钽铀矿以及黑云母组合矿组合交代花岗伟晶岩脉和钾长石伟晶岩脉; (c<sub>1</sub>~c<sub>3</sub>) 独居石-褐帘石-铌钽铀矿组合交代含霓辉石石英方解石脉和含重晶石石英方解石脉; (d<sub>1</sub>~d<sub>3</sub>) 独居石-褐帘石-铌钽铀矿以及黑云母组合和少量辉钼矿交代含重晶石石英方解石脉。Ar<sub>2</sub>W. 武家坪黑云斜长片麻岩; Ar<sub>2</sub>D. 大月坪花岗片麻岩;  $\gamma$ P. 花岗伟晶岩、钾长石伟晶岩。矿物代号: Agt. 霓辉石; Amp. 角闪石; Mt. 磁铁矿; Brt. 重晶石; Kfs. 钾长石; Bt. 黑云母; Cal. 方解石; Qtz. 石英; Ap. 磷灰石; Ttm. 榍石; Aln. 褐帘石; Mnz. 独居石; Bat. 铌钽铀矿; Gn. 方铅矿; Mo. 辉钼矿; Zeo. 沸石。

图 12 华阳川铀钼矿床碳酸岩期独居石-褐帘石阶段矿物特征

Fig.12 Mineral assemblages of the monazite-allanite veins in the carbonatite from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit

及沸石呈细脉交代花岗伟晶岩脉(图 14a)、钾化花岗伟晶岩脉(图 14b)、碳酸岩脉(图 14c~i)。可见黄铁矿、磁铁矿以及方铅矿和沸石等组合呈细脉浸染状分布于粒状霓辉石集合体和石英方解石脉中,沸石边部还发育有刀片状的方解石(图 14c~f),并见有方铅矿和沸石细脉穿切独居石-褐帘石-铌钽铀矿组合(图 14g~i)。

黄铁矿和磁铁矿接触界线较为平直,黄铁矿边部和内部见有磁铁矿,磁铁矿边部和内部多见有黄铁矿,且在黄铁矿的内部还见有乳滴状的黄铜矿,表明三者可能为共生关系(图 15a~c)。此外手标本观察表明在磁铁矿和黄铁矿的边部常常发育有绿帘石化,指示其可能与磁铁矿和黄铁矿为共生关系。沿着黄铁矿和磁铁矿的接触部位常发育有细脉状方铅矿(图 15d~f),表明方铅矿形成可能稍晚于黄铁矿和磁铁矿。此外还可见有方铅矿和沸石呈细脉状交代重晶石和方解石(图 15g~i),部分位置还可见有少量针柱状的菱锶矿,表明三者可能共生产出,指示方铅矿化晚于碳酸岩脉产出。

#### 4.4 不同期次蚀变矿物组合的宏观表现

宏观野外展布的不同类型的脉岩,表现出不同期次的蚀变矿物组合。如花岗伟晶岩脉和钾长石伟晶岩脉(钾化花岗伟晶岩脉)分别对应伟晶岩期的褐帘石阶段和钾长石-黑云母-角闪石化阶段;长石霓辉石石英方解石脉和含霓辉石石英方解石重晶石脉对应于碳酸岩期的霓辉石-磁铁矿阶段;含黑云母或少量霓辉石的方解石重晶石脉对应于角闪石-榍石-磷灰石阶段;含沸石方解石石英脉则对应于碳酸盐化-硫化物期;独居石-褐帘石阶段矿化在矿区通常呈细脉产出,结合其产状及与碳酸岩的关系,推测其为碳酸岩期演化后阶段的产物。此外,矿区断裂系统发育且矿化过程存在多期次、多阶段的特征,因此后阶段脉岩会叠加复合在早阶段脉岩之上,形成复杂的复合脉体。

## 5 蚀变与成矿

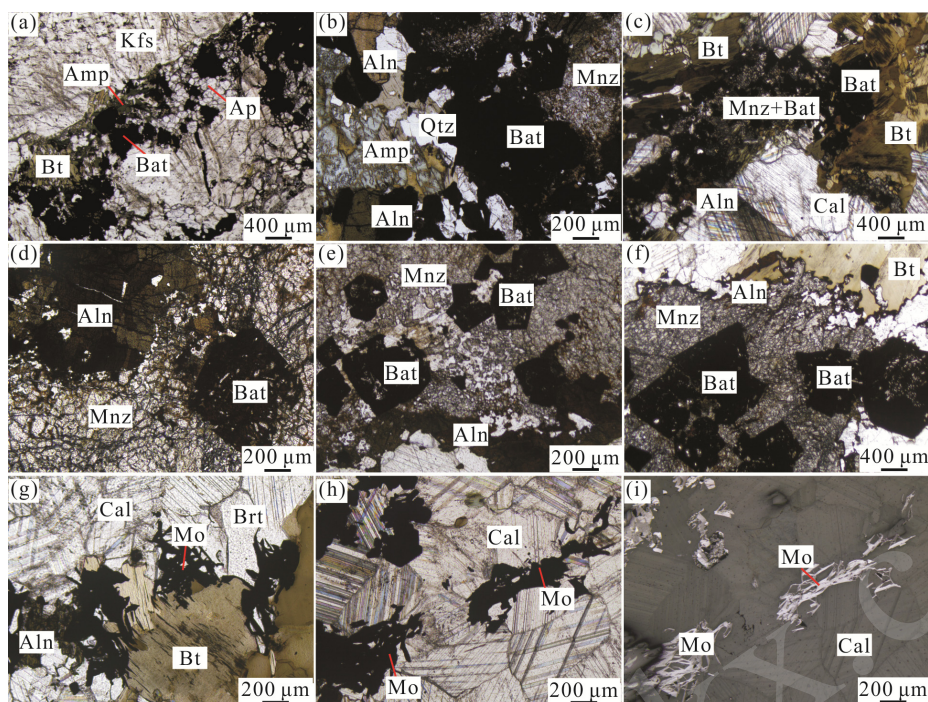
根据前文可知,铀钼矿化主要发育在伟晶岩期、碳酸岩期,铅矿化主要发育在碳酸盐化-硫化物期。与铀钼矿化相关的蚀变矿化组合可分为四类,分别为伟晶岩期的钾长石-黑云母-角闪石化组合以及碳酸岩期的霓辉石-磁铁矿化组合、角闪石-榍石-磷灰石组合和独居石-褐帘石组合,与铅矿化相关的蚀变矿化组合主要为石英-方解石-沸石等。其中,

钾长石-黑云母-角闪石化组合中的铌钽铀矿呈棕黄色,不规则粒状,表面粗糙斑杂不均匀;角闪石-榍石-磷灰石组合和独居石-褐帘石组合中铌钽铀矿呈红褐色,半自形、自形粒状以及粒状集合体,表面光滑平整。这三类组合中铌钽铀矿的含量均较高,放射性异常明显,铀钼矿化较强,为矿区主要的富铀铌矿化组合,但目前在矿区分布范围较小,仅在局部位置发现。而霓辉石-磁铁矿化组合中铌钽铀矿仅在局部位置呈红褐色、自形粒状产出,放射性异常相对较弱,铀钼含量也较低,为矿区的弱铀矿化组合,在矿区的分布范围较广。综合以上研究,在今后的勘查和研究工作中加强对钾长石-黑云母-角闪石蚀变组合、角闪石-榍石-磷灰石蚀变组合以及独居石-褐帘石组合的寻找和识别将对提高华阳川铀钼铅矿床的综合品位和储量具有重要的意义。

## 6 成岩成矿时代

根据以上成矿期次研究,可知华阳川铀钼铅矿床的铀矿化主要产于伟晶岩期和碳酸岩期。为了限定伟晶岩期的成岩成矿时代,本次选取含矿钾长石伟晶岩脉样品(HY-7)进行锆石 U-Pb 定年研究。锆石分选在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司采用浮选和电磁选方法完成。锆石制靶、阴极发光、显微照相和 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。CL 图像采集在装有 Oxford INCA IE 350 能谱仪和 Gatan Mono CL3+ 阴极发光探头的 Quanta 400FEG 场发射环境扫描电镜上完成。激光剥蚀系统为 Geo Las 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。所使用的斑束为 32  $\mu\text{m}$ , 频率 6 Hz, 能量 75 mJ, 外标和内标分别为国际标准锆石 91500 和锆石 GJ-1。详细的仪器操作条件和数据处理方法见文献(Liu et al., 2008, 2010)。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMS Data Cal(Liu et al., 2008, 2010)完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和加权平均年龄计算采用 Isoplot/Ex\_ver3(Ludwig, 2003)完成。

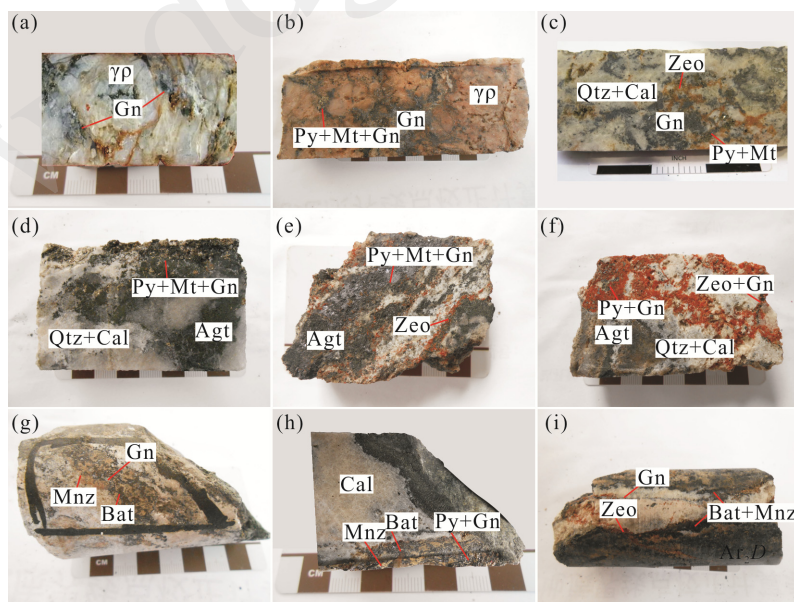
含矿钾长石伟晶岩(HY-7)样品的锆石阴极发光图像显示大多数锆石为黑色,少量可见振荡环带,锆石颗粒较大,粒径 100~500  $\mu\text{m}$  不等,长宽比为 1:1~5:1,部分锆石具有晶格破坏和后期热液蚀变特征(图 16a)。锆石(谐和度大于 95%)微量元素分析结果见表 1,在球粒陨石标准化稀土元素分配图解



(a~c) 角闪石、黑云母、独居石、铌钽铀矿、褐帘石以及磷灰石和少量榍石组合，见有独居石和褐帘石沿黑云母的解理以及内部分布，部分位置黑云母呈碎片状；(d~f) 铌钽铀矿与独居石关系密切，呈自形粒状分布于独居石中，沿其生长边界见有独居石交代充填，部分位置可见独居石交切自形铌钽铀矿使其碎裂，而且沿独居石和铌钽铀矿的粒间以及矿物裂隙见有褐帘石呈胶状充填；(g~i) 鳞片状的辉钼矿集合体沿黑云母的解理交代，并切穿方解石颗粒。矿物代号：Amp. 角闪石；Brt. 重晶石；Kfs. 钾长石；Bt. 黑云母；Cal. 方解石；Qtz. 石英；Ap. 磷灰石；Ttm. 榍石；Aln. 褐帘石；Mnz. 独居石；Bat. 铌钽铀矿；Gn. 方铅矿；Mo. 辉钼矿。

图 13 华阳川铌钽铅矿床碳酸岩期独居石-褐帘石阶段矿物组合显微镜下特征

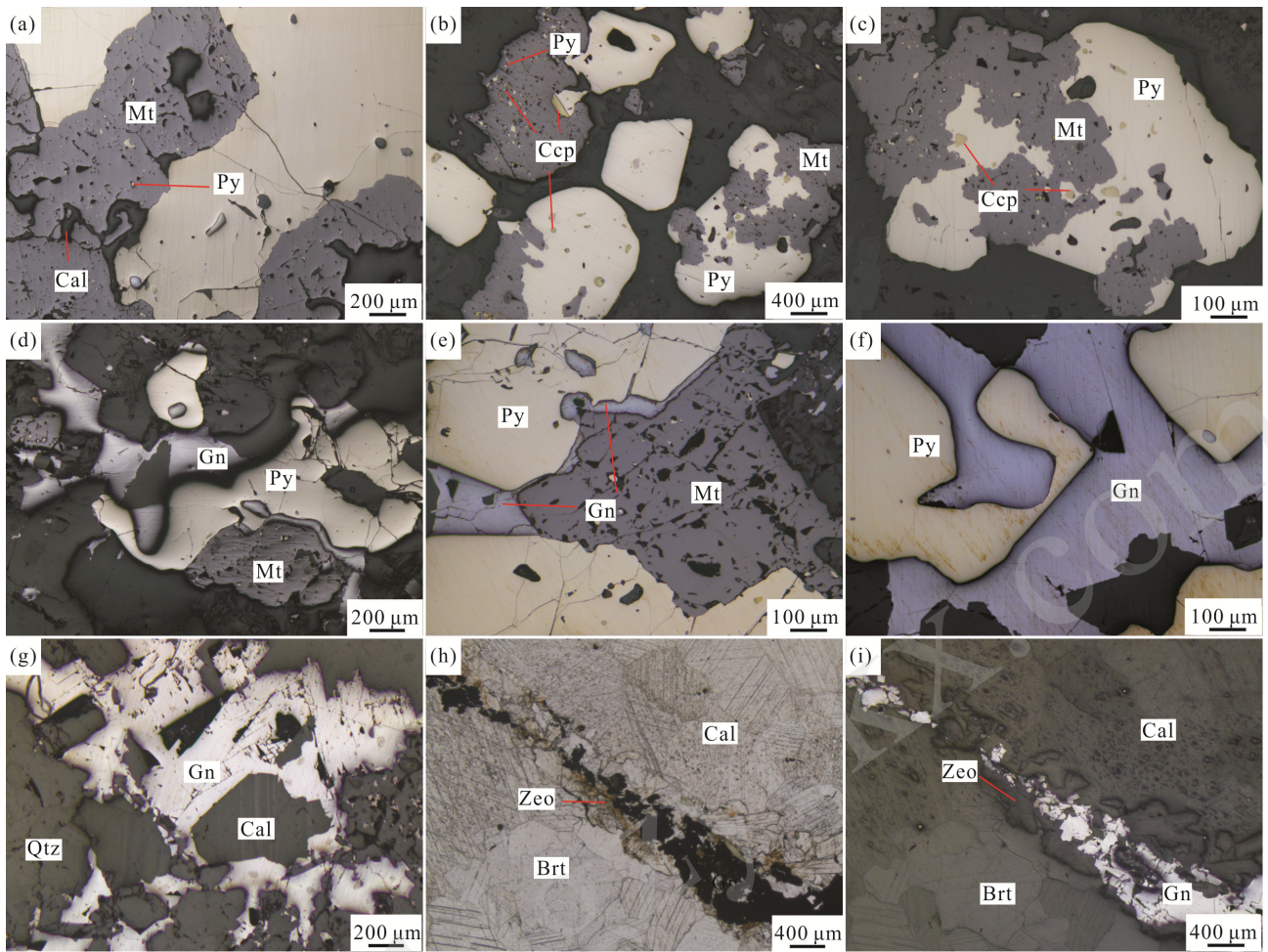
Fig.13 Mineral assemblages of the monazite-allanite veins in the carbonatite from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit



(a) 黄铁矿、磁铁矿、方铅矿以及沸石呈细脉交代花岗岩伟晶岩脉；(b) 黄铁矿、磁铁矿、方铅矿以及沸石呈细脉交代钾花岗岩伟晶岩脉；(c~f) 黄铁矿、磁铁矿、方铅矿以及沸石呈细脉交代碳酸岩脉；(g~i) 黄铁矿、磁铁矿、方铅矿以及沸石呈细脉交代独居石-褐帘石-铌钽铀矿组合。γp. 花岗岩伟晶岩、钾长石伟晶岩。矿物代号：Agt. 霓辉石；Mnz. 独居石；Bat. 铌钽铀矿；Qtz. 石英；Cal. 方解石；Py. 黄铁矿；Mt. 磁铁矿；Gn. 方铅矿；Zeo. 沸石。

图 14 华阳川铌钽铅矿床碳酸盐化-硫化物期矿物特征

Fig.14 Mineral assemblages of the carbonate-sulfide veins from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit



(a-c) 黄铁矿和磁铁矿接触界线较为平直, 黄铁矿的边部和内部见有磁铁矿, 磁铁矿的边部和内部多见有黄铁矿, 且在黄铁矿的内部还见有乳滴状的黄铜矿; (d-f) 沿着黄铁矿和磁铁矿的接触部位常发育有细脉状的方铅矿; (g-i) 方铅矿和沸石细脉交代重晶石和方解石。矿物代号: Qtz. 石英; Cal. 方解石; Brt. 重晶石; Py. 黄铁矿; Mt. 磁铁矿; Gn. 方铅矿; Ccp. 黄铜矿; Zeo. 沸石。

图 15 华阳川铀钼铅矿床碳酸盐化-硫化物期矿物显微镜下特征

Fig.15 Microphotographs of the carbonate-sulfide veins from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit

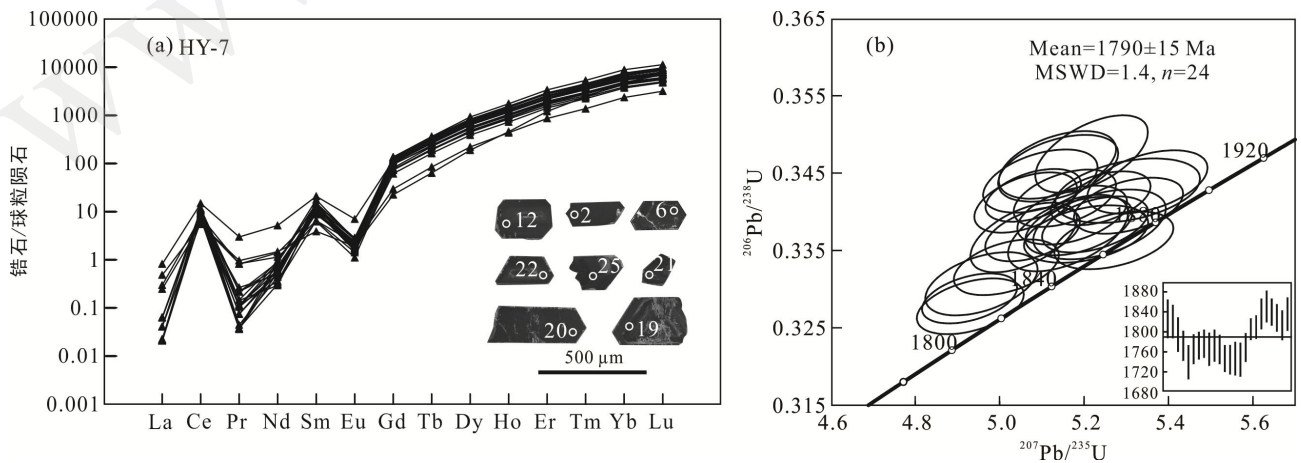


图 16 华阳川 U-Nb-Pb 矿床含矿钾长石伟晶岩脉中锆石 REE 配分曲线图(a, 球粒陨石值据 Sun and McDonough, 1989) 和 U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig.16 Chondrite-normalized REE pattern (a) and U-Pb concordia diagram (b) for zircon from ore-bearing K-feldspar pegmatite from the Huayangchuan U-Nb-Pb deposit

中有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常, 轻稀土元素亏损, 重稀土元素富集(图 16a), 显示了岩浆锆石的特征(吴元保和郑永飞, 2004)。锆石普遍具有较高的 U 含量和较低的 Th 含量(表 2), 其 Th/U 值为 0.07~0.18 (除 5 个值小于 0.1 外, 其余均大于 0.1), 24 个有效分析点  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄介于 1739~1850 Ma 之间(表 2, 图 16b), 加权平均年龄为  $1790\pm 15$  Ma(MSWD=1.4,  $n=24$ ), 代表了含矿钾长石伟晶岩的成岩年龄。指示华阳川含矿钾长石伟晶岩形成于早元古代, 结合华阳川伟晶岩期的铀矿化特征, 推测华阳川矿床在 1.8 Ga 左右发生了第一期铀成矿事件。这与前人研究结果华北克拉通在 1.8 Ga 左右形成了广泛分布的一期铀矿化, 包括辽宁连山关铀矿床、凤城翁泉沟铀-铁-硼矿床、营口六块地铀-黄铁矿矿床、山西平陆 405 铀矿和甘肃红石泉铀矿床等的成矿时代相吻合(王文广和王驹, 1991; 辛存林等, 2013; 蔡煜琦等, 2015)。

此外根据邱家骧等(1993)获得的华阳川碳酸岩内长石的 K-Ar 年龄为 204~206 Ma; 另外中国科学

院广州地球化学研究所和中核工业集团公司(2017)通过对碳酸岩脉中榍石和独居石的原位激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS) U-Pb 定年结果显示榍石和独居石的形成年龄为 215~235 Ma, 表明华阳川火成碳酸岩形成于印支期。结合矿床中铀矿化与榍石和独居石的紧密共生关系, 指示矿床在印支期可能发生了第二次铀成矿事件。

## 7 结 论

(1) 华阳川铀钍铅矿床的矿化主要产于与碳酸岩有关的脉体和伟晶岩脉内, 主要含矿脉岩有早期的花岗伟晶岩脉、钾长石伟晶岩脉; 中期的含霓辉石、方解石、重晶石的各种脉岩, 包括长石霓辉石英方解石脉、含霓辉石石英重晶石方解石脉、含少量霓辉石和黑云母石英重晶石方解石脉; 晚期的含沸石石英方解石脉。主要矿石类型有伟晶岩型和碳酸岩型, 不同的矿石类型具有不同的蚀变矿物组合特征。

表 1 华阳川含矿钾长石伟晶岩脉的锆石稀土元素组成( $\mu\text{g/g}$ )  
Table 1 Trace element concentrations ( $\mu\text{g/g}$ ) of zircon from the ore-bearing K-feldspar pegmatite

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
HY-7-01	0.00	4.54	0.02	0.22	1.65	0.16	19.5	10.5	169	72.7	392	92.0	1018	190
HY-7-02	0.07	4.73	0.07	0.63	1.29	0.14	14.5	6.88	117	50.2	282	67.4	759	144
HY-7-03	0.00	6.47	0.02	0.31	1.66	0.15	21.3	9.86	154	66.0	352	83.9	912	172
HY-7-04	0.00	5.93	0.01	0.24	1.87	0.17	21.5	10.8	173	74.6	395	92.5	1002	191
HY-7-06	0.00	5.59	0.01	0.16	1.48	0.13	19.0	8.38	128	54.7	295	68.2	741	141
HY-7-07	0.01	6.69	0.00	0.20	2.04	0.12	26.7	13.2	225	97.4	536	129	1442	275
HY-7-08	0.01	5.63	0.02	0.25	1.87	0.11	23.7	11.1	187	81.3	451	111	1229	235
HY-7-09	0.00	7.06	0.01	0.43	2.10	0.19	26.7	12.7	199	86.5	451	107	1142	212
HY-7-10	0.01	3.75	0.00	0.15	0.96	0.09	12.1	5.89	94.5	40.5	226	53.9	603	116
HY-7-11	0.01	6.22	0.00	0.23	2.21	0.18	24.0	11.5	180	74.2	403	93.1	999	195
HY-7-12	0.00	4.73	0.01	0.27	1.89	0.13	23.2	12.2	192	85.2	468	109	1174	235
HY-7-13	0.00	5.21	0.01	0.28	1.61	0.16	21.4	10.2	167	71.2	392	91.3	989	193
HY-7-14	0.00	5.26	0.00	0.25	1.50	0.10	14.3	6.99	109	46.9	248	58.1	635	121
HY-7-15	0.01	5.61	0.00	0.14	1.76	0.14	20.2	10.9	170	74.4	411	97.7	1079	211
HY-7-16	0.00	6.64	0.00	0.42	2.60	0.17	25.3	12.8	197	82.8	443	102	1087	209
HY-7-17	0.00	5.05	0.01	0.33	1.60	0.11	18.7	8.71	137	58.5	313	73.2	797	149
HY-7-18	0.02	6.60	0.01	0.40	2.17	0.12	26.0	12.8	203	86.1	463	106	1139	222
HY-7-19	0.00	4.23	0.00	0.33	0.91	0.07	14.7	7.21	113	49.7	270	62.3	705	135
HY-7-20	0.01	6.87	0.02	0.40	2.17	0.17	23.9	11.7	182	76.0	401	92.5	988	185
HY-7-21	0.00	4.93	0.00	0.25	1.36	0.12	15.8	8.14	129	56.0	299	71.3	774	145
HY-7-22	0.00	5.51	0.01	0.22	1.88	0.15	20.6	9.55	154	64.6	346	82.6	875	165
HY-7-23	0.00	4.72	0.01	0.13	1.90	0.14	19.9	9.61	154	65.9	363	85.4	913	178
HY-7-24	0.06	3.35	0.07	0.52	0.95	0.15	5.80	3.08	53.6	24.2	138	33.3	383	77.3
HY-7-25	0.19	8.97	0.27	2.34	3.07	0.46	22.8	10.2	163	67.1	365	87.9	957	176

表 2 华阳川含矿钾长石伟晶岩脉(样品 HY-7)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年数据  
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb dating results for zircon from the ore-bearing K-feldspar pegmatite

点号	含量( $\mu\text{g/g}$ )		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$
1	418	3413	0.12	0.1116	0.0023	5.3034	0.1132	0.3427	0.0027	1826	38	1869	18	1900	13
2	249	2245	0.11	0.1113	0.0020	5.2050	0.0971	0.3371	0.0024	1820	33	1853	16	1873	12
3	434	3241	0.13	0.1097	0.0018	5.1720	0.0858	0.3396	0.0025	1794	34	1848	14	1885	12
4	481	3279	0.15	0.1084	0.0018	5.0160	0.0821	0.3328	0.0024	1772	30	1822	14	1852	12
6	425	2384	0.18	0.1064	0.0020	5.0964	0.0895	0.3440	0.0027	1739	34	1836	15	1906	13
7	429	5143	0.08	0.1079	0.0017	5.0570	0.0833	0.3367	0.0030	1765	30	1829	14	1871	14
8	316	4239	0.07	0.1084	0.0016	5.0782	0.0741	0.3371	0.0023	1772	28	1832	13	1873	11
9	577	3638	0.16	0.1085	0.0017	5.1546	0.0800	0.3417	0.0024	1776	28	1845	13	1895	12
10	231	1911	0.12	0.1079	0.0019	4.9569	0.0878	0.3307	0.0027	1765	33	1812	15	1842	13
11	485	3383	0.14	0.1083	0.0019	4.9306	0.0836	0.3278	0.0024	1772	32	1808	14	1828	12
12	492	4006	0.12	0.1079	0.0017	4.9288	0.0743	0.3288	0.0021	1765	29	1807	13	1833	10
13	427	3240	0.13	0.1069	0.0016	5.0798	0.0747	0.3421	0.0022	1747	27	1833	13	1897	11
14	358	2321	0.15	0.1067	0.0017	5.0618	0.0802	0.3412	0.0026	1744	29	1830	14	1892	12
15	347	4165	0.08	0.1068	0.0020	5.1386	0.0939	0.3456	0.0028	1746	33	1843	16	1914	14
16	565	3571	0.16	0.1067	0.0020	5.1370	0.0917	0.3461	0.0029	1744	34	1842	15	1916	14
17	394	2619	0.15	0.1081	0.0017	5.2178	0.0880	0.3475	0.0033	1769	29	1856	14	1922	16
18	672	4079	0.16	0.1104	0.0016	5.2393	0.0780	0.3417	0.0023	1805	22	1859	13	1895	11
19	270	2279	0.12	0.1105	0.0017	5.1877	0.0836	0.3382	0.0025	1809	23	1851	14	1878	12
20	642	3664	0.18	0.1122	0.0019	5.3504	0.0939	0.3438	0.0027	1836	30	1877	15	1905	13
21	352	2595	0.14	0.1131	0.0020	5.2706	0.0930	0.3363	0.0025	1850	32	1864	15	1869	12
22	428	2897	0.15	0.1124	0.0017	5.3053	0.0854	0.3408	0.0024	1839	27	1870	14	1890	12
23	352	2862	0.12	0.1117	0.0017	5.2262	0.0829	0.3384	0.0024	1828	27	1857	14	1879	12
24	116	1267	0.09	0.1108	0.0018	5.1622	0.0938	0.3372	0.0033	1813	30	1846	16	1873	16
25	338	3704	0.09	0.1121	0.0021	5.2368	0.1037	0.3384	0.0030	1835	33	1859	17	1879	14

(2) 华阳川铀钼铅矿床的成矿期次可依次划分为伟晶岩期、碳酸岩期和碳酸盐化-硫化物期。伟晶岩期又可细分为褐帘石阶段和钾长石-黑云母-角闪石化阶段;碳酸岩期又可细分为霓辉石-磁铁矿阶段、角闪石-榍石-磷灰石阶段和独居石-褐帘石阶段;碳酸盐化-硫化物期又可细分为黄铁矿-磁铁矿化阶段和方铅矿化阶段。

(3) 铀钼矿化主要发育在伟晶岩期的钾长石-黑云母-角闪石化阶段以及碳酸岩期的霓辉石-磁铁矿化阶段、角闪石-榍石-磷灰石阶段和独居石-褐帘石阶段;铅矿化主要发育在碳酸盐化-硫化物期的方铅矿化阶段,晚于铀钼矿化形成。其中钾长石-黑云母-角闪石组合、角闪石-榍石-磷灰石组合、独居石-褐帘石组合为主要的富铀矿化组合,可作为富铀矿的找矿标志。

(4) 华阳川铀钼铅矿床的第一期铀矿化发生在 1.8 Ga, 这与华北克拉通内部和北缘广泛发育的一期铀成矿事件相吻合;而第二期铀矿化则主要发育于 220 Ma± 的印支期。

**致谢:** 本文岩矿鉴定工作得到中陕核工业集团分析测试中心杨素红的大力帮助;野外工作得到华阳川铀多金属矿勘查工作所有同事的大力帮助;实验测试在武汉上谱分析科技有限公司完成;匿名审稿专家给本文提出了详实的评审意见和中肯的修改建议,在此一并致以最诚挚的感谢。

#### 参考文献(References):

- 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 郭庆银, 宋继叶, 范洪海, 刘武生, 漆富成, 张明林. 2015. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要. 地质学报, 89(6): 1051-1069.
- 高成, 康清清, 江宏君, 郑惠, 李鹏, 张熊猫, 李雷, 董强强, 叶兴超, 胡小佳. 2017. 秦岭造山带发现新型铀钼多金属矿: 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. 地球化学, 46(5): 446-455.
- 高成, 康清清, 张熊猫, 陈希民, 胡进平. 2015. 华阳川碳酸岩的岩石学特征及铀矿赋存状态. 陕西地质, 33(2): 10-13.
- 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. 地质通报, 27(6): 823-828.
- 惠小朝. 2014. 陕西省华阳川铀多金属成矿作用地球化学研究. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 惠小朝, 李子颖, 冯张生, 程德进. 2014. 陕西华阳川铀多金属矿床铀赋存状态研究. 矿物学报, 34(4): 573-580.
- 康清清, 江宏君, 李鹏, 李雷, 张熊猫, 董强强, 叶兴超, 高成, 张涛, 薛聪聪. 2018. 陕西华阳川铀钼铅矿床矿石矿物学特征. 东华理工大学学报(自然科学版), 41(2): 111-123.
- 邱家骧, 李昌年, 喻学惠, 曾广策, 王顺金. 1993. 秦巴碱性岩. 北京: 地质出版社.
- 时毓, 于津海, 徐夕生, 唐红峰, 邱检生, 陈立辉. 2011. 陕西小秦岭地区太华群的锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成. 岩石学报, 27(10): 3095-3108.
- 王江波, 赖绍聪, 李卫红, 胡渭平. 2015. 北秦岭东段宽坪岩体地质地球化学特征及其与铀成矿关系. 地质与勘探, 51(1): 98-107.
- 王文广, 王驹. 1991. 连山关铀矿床特殊的工业铀矿物组合及其特征和意义. 铀矿地质, 7(4): 196-205.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 武翠莲, 刘志超, 马嘉, 唐宝彬. 2015. 华阳川多金属矿床中铀的赋存状态研究. 铀矿冶, 34(1): 30-34.
- 辛存林, 马维云, 安国堡, 杨国林, 孙现辉. 2013. 甘肃龙首山207铀矿床成矿地质特征及其成矿机制探讨. 地质学报, 87(4): 577-590.
- 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. 地球科学, 17(2): 151-158.
- 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.
- 中国科学院广州地球化学研究所, 中陕核工业集团公司. 2017. 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.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q and Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537-571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257: 34-43.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center: 39
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes // Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313-345.
- Xu C, Kynicky J, Chakhmouradian A R, Liang Q and Wen L S. 2010. A unique Mo deposit associated with carbonatites in the Qinling orogenic belt, central China. *Lithos*, 118: 50-60.

## Mineralization Paragenesis of Huayangchuan U-Nb-Pb Deposit in the Lesser Qinling

JIANG Hongjun<sup>1,2</sup>, GAO Cheng<sup>2,3\*</sup>, KANG Qingqing<sup>2</sup>, CHEN Huayong<sup>1</sup>, ZHENG Hui<sup>1</sup>,  
CHEN Bing<sup>2</sup>, DONG Qiangqiang<sup>2</sup>, ZHANG Xiongmao<sup>2</sup>,  
LI Peng<sup>2</sup>, LI Lei<sup>2</sup>, LIU Kuanhou<sup>4</sup> and HE Shiping<sup>4</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Geological Party No. 224, China-Shaanxi Nuclear Industry Group, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 3. State Key Laboratory of Nuclear Resource and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 4. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The Huayangchuan U-Nb-Pb deposit, located at the western part of the Lesser Qinling in the southern margin of the North China block, is a super-large U-Nb-(Pb) deposit. According to the crosscutting relationships, mineral assemblages and mineral paragenesis, the minerogenesis of the Huayangchuan deposit can be divided into pegmatite period, carbonatite period and carbonate-sulfide period. The pegmatite period can be subdivided into the allanite stage and K-feldspar-biotite-amphibole stage; and the carbonatite period can be subdivided into augite-magnetite stage, amphibole-titanite-apatite stage, and monazite-allanite stage; while the carbonate-sulfide period can be subdivided into pyrite-magnetite stage and galena stage. Uranium and niobium mineralization is mainly developed in the pegmatite and carbonatite periods. Lead mineralization, which postdates uranium and niobium mineralization, mainly occurs in the carbonate-sulfide period. Uranium is mainly enriched in assemblages of K-feldspar-biotite-amphibole, amphibole-titanite-apatite and monazite-allanite, which can be used as prospecting criteria for high grade uranium ores. Combining the zircon U-Pb age of ore-bearing K-feldspar pegmatite as well as the previous chronological results of carbonatites, we inferred that there are two-stages of uranium mineralization in the Huayangchuan deposit, which probably took place at 1.8 Ga and ca. 220 Ma, respectively.

**Keywords:** the Lesser Qinling; Huayangchuan; U-Nb-Pb deposit; mineralization sequence