

陕西蓝田铀矿田控矿因素与成矿作用过程探讨

王江波^{1,2}, 李卫红¹, 赖绍聪²,

(1. 核工业二〇三研究所, 陕西 咸阳 712000;

2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室/地质学系, 陕西 西安 710069)

摘 要: 蓝田铀矿田是我国第一个进行地下堆浸开采的铀矿田, 笔者对其控矿因素进行了系统研究: 空间上位于古近—新近系断陷盆地边缘, 多期多阶段的岩浆活动, 北北东向断裂与北东向复合断裂以及矿区内出露大量的基性岩脉是主要控矿因素。其成矿过程主要分为五个阶段: ① 牧护关岩体第二次主侵入体的形成。② 多期多阶段的岩浆活动使岩体中的铀预富集。③ 伴随基性岩脉涌入的地幔流体使岩体副矿物中的铀活化释放, 并且为铀的迁移提供了丰富的矿化剂 ΣCO_2 。④ 以铀酰碳酸络阴离子的形式运移的铀在适宜的物理化学条件下沉淀富集成矿, ⑤ 潜水氧化淋滤改造叠加成矿作用。

关键词: 控矿因素; 成矿作用; 基性岩脉; 地幔流体; 蓝田铀矿田

中图分类号: P61 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6248(2013)01-0154-08

Discussion on Ore-Control Factors and Mineralization of the Lantian Uranium Field, Shaanxi

WANG Jiang-bo^{1,2}, LI Wei-hong¹, LAI Shao-cong²

(1. Research Institute No. 203, CNNC, Xianyang 712000, China; 2. The Key Laboratory of
Continental/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: This paper studies the ore-control factors of the Lantian uranium field, which is the first underground leaching exploitation in China. The main ore-control factors locating in the margin of fault basin include multiple magmatic activity, compound faults of NNE & NE and mass mafic dikes of the field. The mineralization process includes 5 stages. ① The formation of the γ_5^{2-2} ; ② The preenrichment of U caused by the multiple magmatic activity; ③ Alkali-alternation caused by mantle fluid activate the uranium of the accessory minerals, and the mantle fluid provide abundant ΣCO_2 ; ④ Uranium which is moved as $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ deposit in right physic-chemical circumstance and ⑤ The phase of overprinting and reworked mineralization of oxidation and leaching.

Key words: ore-control factors; mineralization; mafic dikes; mantle fluid; Lantian uranium field

收稿日期: 2012-10-20; **修回日期:** 2012-11-18

基金项目: 中国核工业地质局铀矿地质科研项目“北秦岭成矿带蓝田铀矿田深部成矿规律及外围找矿远景研究”(2010-56)。

作者简介: 王江波 (1982-), 男, 陕西合阳人, 工程师, 2005 年毕业于南京大学地球科学系, 主要从事铀矿地质科研和勘探工作。E-mail: sunshine3426@163.com

度决定着矿体的形态和大小。矿体大小不一,多数矿体长 40~100 m,沿倾向延伸 70~120 m,沿侧伏方向延伸 160~260 m。主矿体沿走向最长达 250 m,沿倾向延伸 170 m,岩侧伏方向可延伸 260 m。主矿体多分布于断裂构造加持收敛端,小矿体则向张开区撒开。

区域构造变形复杂、强烈,以断裂为主,总体构造线为近北西及北东走向。在秦岭巴山地区万源

—高陵地球物理剖面解释图上(图 2)显示铀矿田处于华北地块南缘, F_2 油房沟-皇台大断裂和 F_1 宝鸡-洛南大断裂之间的元古宙地层和花岗岩区,其下部为秦岭杂岩区。该区为断裂构造长期活动的场所,经历了多期、多次的挤压和反复的拉张裂隙,为岩浆的上涌侵位创造了良好的条件。广泛的花岗岩浆活动和多期次的基性岩浆活动,为该区的热点事件活动提供了良好的热源和构造条件。

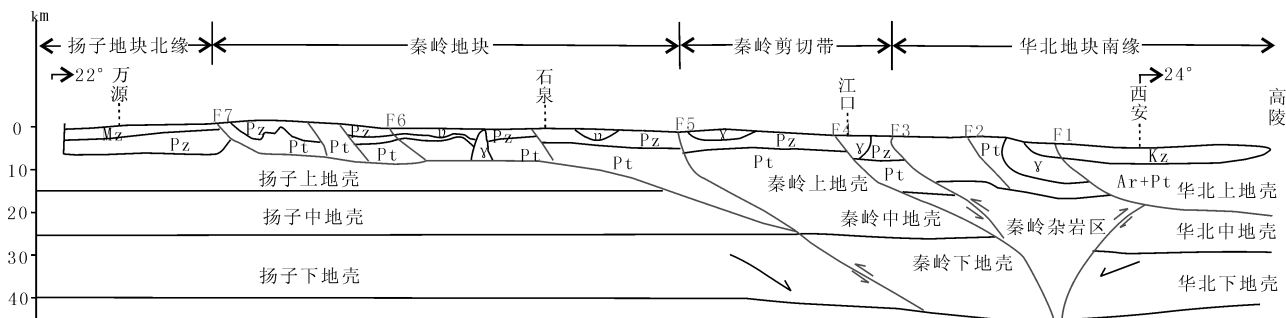


图 2 秦岭巴山地区万源—高陵地质断面示意图

(据刘俊岭等, 1996 修编)

Fig. 2 Constructed profile of Wanyuan-Gaoling in Qinba mountain (Modified after Liu Junling, 1996)

Kz. 新生界; Mz. 中生界; Pz. 古生界; Pt. 元古界; Ar. 太古界; γ . 花岗岩; V. 基性岩; F1. 宝鸡-洛南断裂; F2. 油房沟-皇台大断裂; F3. 商丹断裂; F4. 山阳-凤镇断裂; F5. 栗扎坪-七里峡断裂; F6. 红春坝-曾家坝断裂; F7. 司上-小羊坝断裂

2 控矿因素

2.1 矿田空间定位因素

蓝田铀矿田内已发现魏家沟、小南沟、韩家堡和吊庄 4 个铀矿床及铀矿点若干个,均产于牧护关岩体的西北端,区内酸性岩浆活动频繁,同时出露有大量的基性岩脉(王江波, 2010),赋矿岩体是第二次侵位的二长花岗岩(γ_5^{2-2}),岩体其他部位虽然也有少量铀矿化产出,但均无工业价值。

矿田西边紧邻古近—新近纪断陷盆地,区内由东向西发育一组由 3 条北东—北北东向弧形断裂与近北南向古近—新近纪基缘断裂接触带组成三角形圈闭区,是矿区定位条件,北北东向断裂与北东向断裂复合的锐角区是控制矿床、矿体产出的典型构造组合模式,4 个矿床的空间分布严格受其控制(图 3)。从区域上看,大面积的无盆区均是无矿区,与此类似的一个典型的例子是广东境内的贵东花岗岩体。该岩体近东西向展布,出露面积约 1 000 km²。近 10 个铀矿床均产于岩体东部,这里有白垩纪以来形成的成群的幔源基性岩脉产出(胡

瑞忠等, 1990; 李献华等, 1997),且岩体东南侧还有白垩—古近—新近纪断陷盆地,而岩体西部既无基性脉岩也无白垩—古近—新近纪断陷盆地,与此对应的是迄今未发现具有经济价值的铀矿床(邓平等, 2003)。

2.2 多期多阶段的岩浆活动

牧护关花岗岩体似矩形、呈东西向展布,出露面积约 260 km²,属复式岩基,可划分为 3 次侵入和 4 次补充侵入(图 4)。其中,第一次形成中粗粒似斑状花岗闪长岩基,分布在复式岩体的西南部,出露面积为 72.8 km²;第二次形成中粗粒二长花岗岩基,构成了复式岩体的主体,出露面积为 150.3 km²;第三次形成中细粒黑云母花岗岩株,分布于岩体的中部,出露面积为 24.9 km²;四次补充侵入体形成细粒二云母花岗岩枝或白云母花岗岩枝群,主要集中在岩体西北部,多呈岩枝和岩株状,在矿区外围构成一个半弧形,出露面积为 12.1 km²。多期次的岩浆侵入,在矿区及外围形成一系列的弧形构造,为后期铀的沉淀富集提供了空间。

同时多期次的岩浆活动导致岩体的强烈的自变

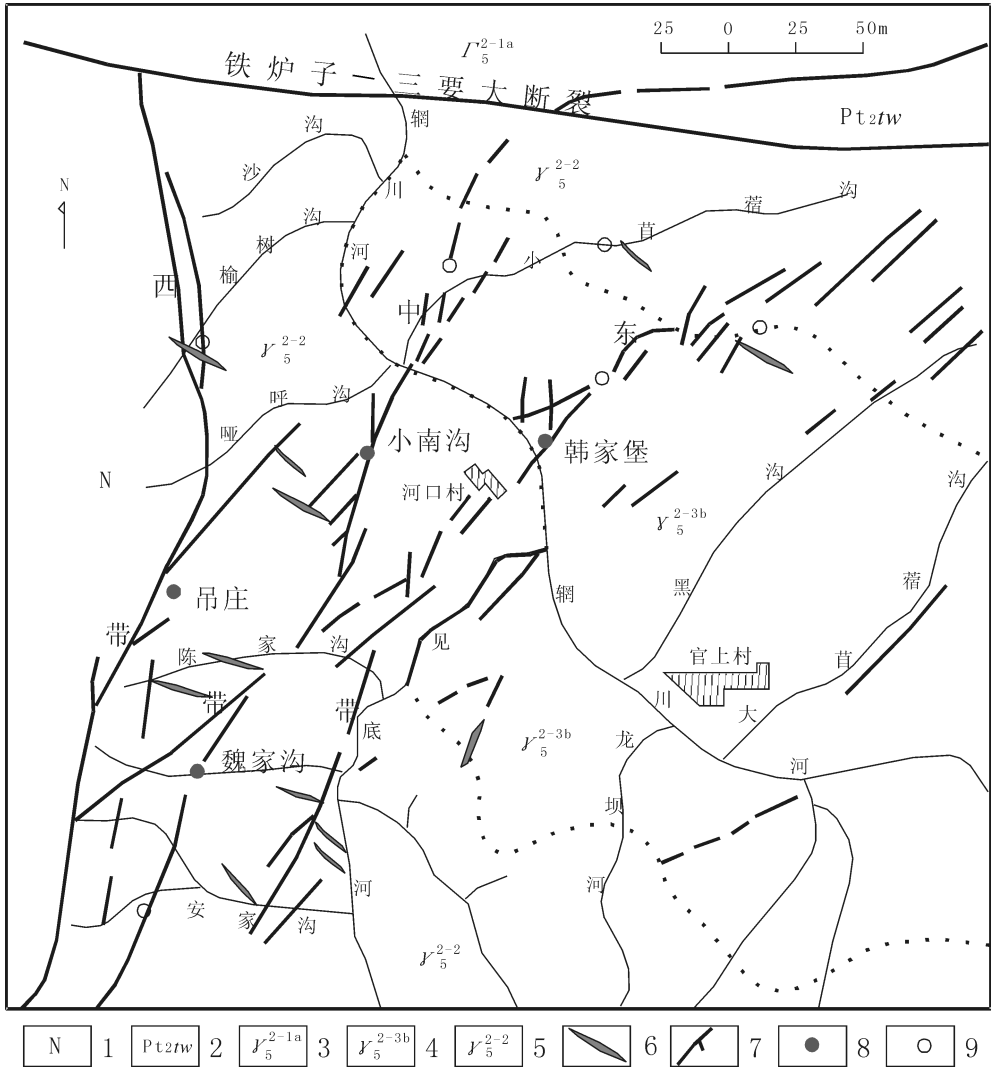


Fig. 3 Geologic sketch map of the 401 ore filed

1. 古近—新近系砂砾岩; 2. 中元古界陶湾群; 3. 燕山期蓝田花岗岩; 4. 牧护关岩体补体分布区黑云母二长花岗岩; 5. 牧护关第二主体花岗岩、二长花岗岩; 6. 基性岩脉; 7. 断裂带; 8. 铀矿床; 9. 铀矿点

质作用和热液蚀变，早期蚀变对岩体的改造是对岩体中铀的存在形式的大调整、再分配，自变质作用导致铀背景值增高。在此基础上，其后的热液蚀变作用是对岩石、矿物中铀的存在形式又一次调整和再分配，活性铀再加大。

2.3 构造控矿

矿田内控矿构造主要有三组：北东、北北东、北西向。北东向断裂构造带，由闫家村-吊庄、韩家堡-长梁断裂带组成。构造带长 6 000 余米，宽 700 余米，西侧被古近—新近系砂砾岩覆盖。总体走向 3°~60°，自南而北，由北东向向北东东向偏

转，倾向 310°~336°，倾角 45°~76°。北北东向断裂构造带，发育有东、中、西 3 条断裂带，走向为北北东向，以北东 10°~20°为主，沿走向呈波状弯曲，倾向北西，倾角 50°~83°，并有自西带至东带倾角由缓变陡之势，空间上呈等距分布，间距 400 m 左右。北西向断裂带，长 600 余米，宽 3~30 m，走向北西，倾向 45°，倾角 70°左右，断裂经历了张性—左行张扭性—压性活动过程。

东西向控岩断裂与北东向弧形断裂带和近南北向古近—新近纪盆缘接触带，组合成三角形圈闭区，矿田定位于三角形圈闭区内；北北东向与北东

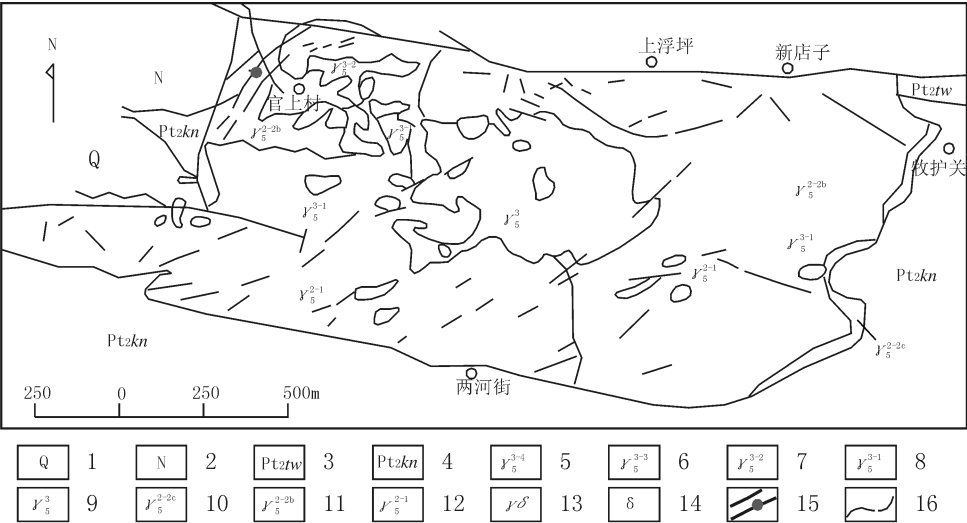


图 4 牧护关岩体地质略图

Fig. 4 Geologic sketch map of Muhuguan rock body

1. 第四系; 2. 古近—新近系; 3. 陶湾组; 4. 宽坪组; 5~8. 第一—第四次补体; 9. 第三次主侵入体;
10. 第二次主侵入体边缘相; 11. 第二次主侵入体过渡相; 12. 第一次侵入体; 13. 前燕山期花岗岩闪长岩;
14. 前燕山期闪长岩; 15. 断裂构造/蓝田铀矿田; 16. 地质界线及相变界线

向弧形断裂复合的锐角区是控制矿床、矿体的典型组合形式（图 5）。

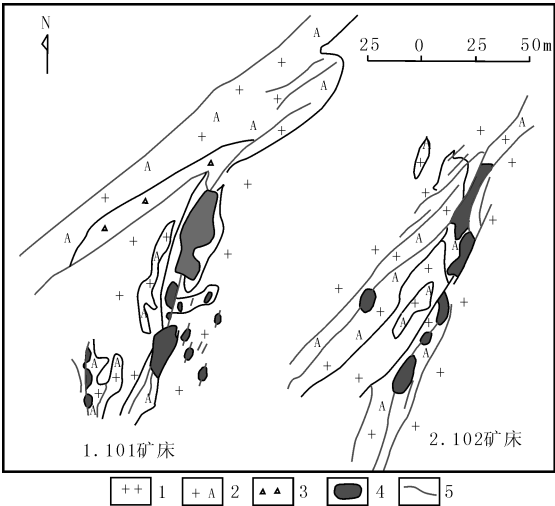


图 5 101（魏家沟）、102（小南沟）矿床地质构造示意图

Fig. 5 Tectonic sketch map of 101& 102

1. 花岗岩; 2. 碎裂花岗岩; 3. 角砾岩; 4. 铀矿体; 5. 断裂构造

矿田内断裂构造具有北东东向成行，北东东向成列，北散南敛的格局。在平面上主要沿北北东向主断裂带分布，北北东向断裂与北东向断裂复合的锐角区的控制；在倾向上矿体则受北北东向和北东

向两组构造交轨迹线或北北东向主断裂及其旁侧次级裂隙带的制约。如矿田内各矿床主要受三条北东、北北东向弧形断裂带所控制。东带有韩家堡矿床；中带有魏家沟和小南沟矿床；西带规模最大，恰好复合于秦北大断裂之上，控制了吊庄矿床。

2.4 基性岩脉控矿

矿区内出露的基性岩脉主要为煌斑岩脉和细晶岩脉，均是沿张性断裂展布，矿床、矿点分布区与基性岩脉密集区基本一致。暗色岩脉的贯入是大区域地壳减薄，拉张伸张构造开始的重要标志，也是地幔流体上涌的通道，产生大规模碱交代岩并成矿（杜乐天，2011）。

野外调查发现基性岩脉的分布区，紧邻基性岩脉的花岗岩往往受到一定的碱质交代作用的改造，形成明显的钾长石化、钠长石化、白云母化等现象。反映出矿区碱质交代作用与煌斑岩脉活动有明显的成因关系。

魏家沟矿床东南部、小南沟矿床西部均分布有大量基性岩脉，危机矿山项目在吊庄矿床深部的基性岩脉脉同时揭露到富大工业铀矿体，地表的苜蓿沟矿点和榆树沟矿点均产在煌斑岩脉旁侧。该区铀矿化的空间产出与基性岩脉的出露极为密切。

从西矿带 104 矿床 11 中段穿过细晶岩脉附近的花岗岩钻孔岩心化学分析结果（表 1）显示，与基性岩脉接触的花岗岩围岩（LTZ13-7、LTZ13-

10） $K_2O + Na_2O$ 含量增加， SiO_2 含量减少（去硅），说明受基性岩脉等幔源流体的影响，其附近的花岗岩受到了明显的碱质交代作用。

表 1 蓝田铀矿田基性岩脉附近花岗岩化学成分分析结果（%）

Tab. 1 Chemical contents of granite near the mafic dikes in Lantian uranium field（%）

样品编号	岩性	分 析 结 果											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	总量	K ₂ O+ Na ₂ O
LTZ13—7	花岗岩	71. 57	15. 50	0. 27	0. 24	0. 88	5. 65	4. 58	0. 06	0. 12	0. 04	100. 30	10. 23
LTZ13—8	细晶岩	48. 39	14. 16	8. 25	2. 90	7. 14	3. 95	0. 13	0. 38	1. 10	0. 49	100. 19	4. 08
LTZ13—10	花岗岩	69. 11	16. 49	0. 56	0. 24	1. 46	5. 52	4. 75	0. 06	0. 15	0. 07	100. 13	10. 27
LT6—25 (矿区围岩)	花岗岩	70. 60	15. 19	1. 01	0. 48	2. 08	4. 13	4. 08	0. 18	0. 20	0. 11	100. 43	8. 21
γ ₅ ²⁻² (92 件)*	花岗岩	74. 12	13. 15	1. 08	0. 44	1. 96	4. 55	3. 50	0. 05	0. 14	0. 07		8. 05

注：分析单位为核工业 203 研究所分析测试中心，* 据《中国北西部铀矿地质》。

3 成矿作用过程探讨

第一阶段：富铀的牧护关岩体第二次主侵入体（ γ_5^{2-2} ）的形成。

牧护关岩体的平均铀丰度并不高，平均铀含量为 2.9×10^{-6} ，钍含量平均为 20×10^{-6} ，Th/U 值为 6.9，铀浸出率为 29%。而矿区岩石比岩体铀含量平均值高 1.59 倍，为 4.6×10^{-6} ，钍含量低 1.67 倍，为 12×10^{-6} ，Th/U 值为 2.6，铀浸出率达 44%。牧护关岩体周围的陶湾群和宽坪群中均未发现有经济价值的矿床和矿点。矿区矿石中化学成份、微量元素和稀土元素与第二次主侵入体基本一致，显示蓝田矿田的铀源主要来自于牧护关岩体第二次主侵入体 γ_5^{2-2} 的活性铀。

第二阶段：多期多阶段的岩浆活动。

牧护关岩体具有多期多阶段性，多期次的岩浆活动对铀成矿的作用主要体现在两个方面：①四次补体主要分布在牧护关岩体的西北部，整体上在矿区及外围内构成一个半弧形，形成一系列的弧形断裂，为铀的沉淀富集提供了空间。如前所述，矿床和矿体的定位均受北北东向和北东向弧形断裂复合的楔形锐角区控制。②多期多阶段的岩浆活动引起的强烈的自变质作用和广泛的围岩蚀变使岩体中的铀活化出来。多旋回构造运动带来多旋回的成矿作用，促使铀和其他元素的不断迁移和富集。早期蚀变起到了破坏岩石物理性质和化学平衡的作用，使区域化学场发生变化，使铀元素再活化，向有利的

物理、化学场迁移，为其后铀转入含铀介质富集成矿提供更有利的条件。如岩体西北部发育线型自变质带和早期蚀变带的叠加，形成一个定向、持续导流的通道，为后期断裂构造和热液蚀变创造了有利的物、化环境。

第三阶段：伴随基性岩脉涌入的地幔流体引起矿区大范围的碱交代作用，使副矿物中的铀活化释放出来，同时地幔流体的涌入为铀的迁移提供了丰富的矿化剂 CO₂。

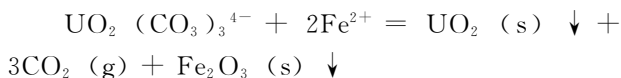
碱交代作用则是成矿作用最核心的一个机制，地幔流体相对富含 K、Na 等碱金属和硅质（刘从强等，2001），普遍发育的碱交代岩所需的大量 Na、K 是地壳物质无法供应的，而地幔流体（HACONS）则为碱交代所需的大量的 Na、K 提供了保障（杜乐天，2002）。牧护关岩体中约有 40.3%~48.0% 的铀是赋存于含量仅为 0.7%~1.6% 的副矿物中。对花岗岩蚀变前后主要造岩矿物中的铀含量对比发现在钠长石化、白云母化等强烈碱交代作用中，原造岩矿物中的铀基本未活化释放出来。但是在经过强烈碱交代蚀变后，副矿物总量由 1.01% 降低为 0.33%（刘埃平等，1994），也就是说 2/3 的副矿物被改造消失，其内赋存的铀也被全部活化释放出来，这部分铀约占全岩铀的 1/3，这部分铀才是矿床最直接的铀源。

矿区的水文资料表明，矿区水中 HCO₃⁻ 为 442.0×10^{-6} ；水中 UO₂（CO₃）₂²⁻ 占 60%~70%；UO₂（CO₃）₃⁴⁻ 占 20%~40%（陈振昌等，

1984), 可见大量的活性铀是以碳酸盐络合物的形式搬运的。根据 J. C. Tanger & H. C. Helgeson 的热力学数据和合模拟计算方法, 获得成矿前阶段热液中铀以 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$, $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 和 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 络合离子形式存在, 分别占 81.4%, 10.7% 和 7.8%; 而成矿阶段热液中铀几乎全部为 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 络合离子, 占 99.99% (刘埃平等, 2000)。对矿区碳同位素进行研究发现, 成矿流体的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值在 $-5.09\text{‰} \sim -5.00\text{‰}$, 而矿区元古界大理岩的方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值在 $4.17\text{‰} \sim 5.41\text{‰}$ (刘埃平等, 2000), 两者的碳同位素组成特点明显不同。一般而言, 成矿热液中的碳主要有 3 个可能的来源: 岩浆或地幔、沉积碳酸盐以及各类岩石中的有机碳。很显然, 矿区 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 的分布范围与沉积碳酸盐来源和有机碳来源的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 的正常分布范围有较大差别, 而地幔流体的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值在 $-4\text{‰} \sim -8\text{‰}$ (巫建华等, 2005), 说明这种来自深源的 ΣCO_2 是由地幔流体的涌入带来的。

第四阶段: 主要热液成矿阶段。以碳酸络阴离子的形式运移的铀在适宜的物理化学条件下沉淀成矿, 即北北东向和北东向断裂复合形成的楔形锐角夹持区沉淀富集成矿。

由于成矿热液中 CO_2 浓度远比 F^- 和 SO_4^{2-} 浓度高, 铀矿床中碳酸盐矿物也应比萤石和黄铁矿多, 但事实并非如此, 矿田内热液脉体较不发育, 不论是坑道内还是钻孔中均可见少量发丝状紫黑色萤石脉, 而碳酸盐矿物几乎没有。这是因为成矿阶段控矿断裂的拉张减压作用, 引起热液中 CO_2 发生泡沸作用而逸出, 造成碳酸铀酰离子离解, 铀还原成沥青铀矿沉淀富集, 其化学反应:



这与笔者在野外实地观察的现象一致, 在钻孔和坑道中均发现赤铁矿化与沥青铀矿关系最为密切, 矿体附近总是发现伴随有强烈的赤铁矿化 (图 6、图 7)。

第五阶段: 氧化淋滤改造叠加成矿作用

矿田形成后, 新生代断块差异活动剧烈, 秦岭山地上升, 渭河地堑下降, 古地貌、古气候发生变化。矿田处于负地形和古地貌的汇水区内, 岩体和已形成的矿体遭受强烈剥蚀改造, 在地表水、地下



图 6 平巷道中的赤铁矿化沿笔直的裂缝向两侧发育, 中间细脉状沥青铀矿

Fig. 6 Hematitized both sides of pitchblende vein



图 7 巷道中沥青铀矿沿构造裂隙成“X”状相交, 近矿蚀变为赤铁矿化

Fig. 7 Hematitization nearby “X” crossing vein

水的作用下, 形成渗入型矿化。

氧化带发育深度不等, 数米至数十米, 甚至百米以上, 铀镭平衡破坏, 偏镭或严重偏镭, 铀镭平衡系数 $200\% \sim 2000\%$, 表明矿体中的铀被淋失。被淋失的铀随地表水、地下水迁移至有利部位再富集, 形成新的矿体或叠加在早先形成的矿体之上, 形成富矿段。铀主要以分散吸附方式存在, 同位素年龄为 $12.7 \sim 5 \text{ Ma}$, 说明改期矿化形成于新生代。

4 结论

蓝田铀矿田空间上位于古近—新近系断陷盆地

边缘,多期多阶段的岩浆活动,北北东向断裂与北东向复合断裂以及矿区内出露大量的基性岩脉是主要控矿因素。其成矿作用过程可以概括为5个阶段。

(1) 牧护关岩体第二次主侵入体(γ_5^{2-2})的形成成为铀成矿提供了直接热源。

(2) 多期多阶段的岩浆活动在矿区及外围形成的弧形断裂为铀沉淀富集提供了空间,同时其引起的自变质作用使岩体中的铀大调整和再分配。

(3) 伴随基性岩脉涌入的地幔流体引起矿区大范围的碱交代作用使岩体副矿物中的铀活化释放,并且地幔流体为铀的迁移提供了丰富的矿化剂 ΣCO_2 。

(4) 以铀酰碳酸络阴离子的形式运移的铀在适宜的物理化学条件下沉淀富集成矿。

(5) 潜水氧化淋滤改造叠加成矿作用。

参考文献 (References):

齐文,侯满堂. 陕西铜矿床类型及找矿方向[J]. 西北地质, 2005, 38 (3): 29-40.

Qi Wen, Hou Mantang. Copper ore deposit types and prospecting direction in Shaanxi province [J]. Northwestern Geology, 2005, 38 (3): 29-40.

刘俊岭. 秦岭巴山地区高陵—达县重磁剖面初步解释[J]. 陕西地质, 1996, 14 (1): 59-69.

Liu Junling. Primitive interpretation of a gravitational-magnetic profile from Gaoling to Daxian in the Qinling-Dabashan region [J]. Geology of Shaanxi, 1996, 14 (1): 59-69.

王江波. 蓝田矿田地质特征及其与资源矿田对比[J]. 西北铀矿地质, 2010, 36 (1): 1-10.

Wang Jiangbo. Geological comparative study on two uranium ore fields exemplified by Lantian and Ziyuan [J]. Uranium Geology of Northwest China, 2010, 36 (1): 1-10.

胡瑞忠, 金景福. 贵东岩体中煌斑岩的成因[J]. 矿物岩石, 1990, 10 (4): 1-7.

Hu Ruizhong, Jin Jingfu. The origin of lamprophyre in Guidong granitic complex [J]. Mineralogy and Petrology, 1990, 10 (4): 1-7.

李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性脉岩的年代学贺地球化学[J]. 地球化学, 1997, 26 (2): 14-31.

Li Xianhua, Hu Ruizhong, Rao Bing. Geochronology and

geochemistry of cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China [J]. Geochimica, 1997, 26 (2): 14-31.

邓平, 舒良树, 谭正中. 诸广—贵东大型铀矿聚集区富铀矿成矿地质条件[J]. 地质论评, 2003, 49 (5): 486-494.

Deng Ping, Shu Liangshu, Tan Zhengzhong. The geological setting for the formation of rich uranium ores in Zhuguang-Guidong large-scale uranium metallogenetic area [J]. Geological Review, 2003, 49 (5): 486-494.

杜乐天. 中国热液铀矿成矿理论体系[J]. 铀矿地质, 2011, 27 (2): 65-68.

Du Letian. On the theory system of hydrothermal uranium metallization in China [J]. Uranium Geology, 2011, 27 (2): 65-68.

刘从强, 黄智龙, 李和平, 等. 地幔流体及其成矿作用[J]. 地学前缘, 2001, 8 (4): 231-243.

Liu Conqiang, Huang Zhailong, Li Heping, et al. The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8 (4): 231-243.

杜乐天. 碱交代岩研究的重大成因意义[J]. 矿床地质, 2002, 21 (增刊): 953-958.

Du Letian. The important significance of alkali-metasomatic rock studies [J]. Mineral Deposits, 2002, 21 (supplement): 953-958.

刘埃平, 金景福. 某贫铀花岗岩体中铀成矿的地球化学研究[J]. 成都理工学院学报, 1994, 23 (3): 53-57.

Liu Aiping, Jin Jingfu. A geochemical research on uranium metallization in a uranium-barren granite [J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1996, 23 (3): 53-57.

刘埃平, 金景福. 401 矿区铀矿床地质地球化学特征及其地下堆浸评价[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27 (2): 172-178.

Liu Aiping, Jin Jingfu. Geological-geochemical characteristics and underground leaching appreciation of uranium deposits in orefield 401 [J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 2000, 27 (2): 172-178.

巫建华, 刘帅, 余达淦, 等. 地幔流体与铀成矿模式[J]. 铀矿地质, 2005, 21 (4): 196-203.

Wu Jianhua, Liu Shuai, Yu Dagan, et al. Mantle geofluid and uranium ore-formation model [J]. Uranium Geology, 2005, 21 (4): 196-203.