

陕西丹凤三角地区花岗伟晶岩铀-稀有元素 矿化特征及成矿作用分析

朱焕巧, 李卫红, 惠争卜, 赵如意, 王江波, 龚奇福

(核工业二〇三研究所, 陕西 咸阳 712000)

摘要:重点对北秦岭丹凤三角地带花岗伟晶岩的地质矿化特征及铀-稀有元素成矿作用进行了研究分析,认为花岗伟晶岩是在岩浆演化晚期,富含挥发分的残余岩浆进一步分异演化的结果,花岗伟晶岩主要侵位于加里东中晚期花岗岩体的内外接触带及秦岭岩群中,多沿背斜轴部和断裂、裂隙分布,多平行于区域构造线延伸方向。花岗伟晶岩的岩石类型有:黑云母伟晶岩、二云母伟晶岩、白云母伟晶岩、白云母钠长石伟晶岩、锂云母钠长石伟晶岩,是由交代分异作用引起的。花岗伟晶岩的成岩、成矿作用可划分为后岩浆、伟晶作用、气成作用和热水溶液4个阶段。花岗伟晶岩具明显的多元素矿化特征,富含U、Th、Nb、Ta、L等稀有金属和绿柱石、云母、钾长石等非金属矿产。

关键词:伟晶岩;岩石类型;矿化特征;成矿作用

中图分类号:P588.3

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2015)01-0172-07

Mineralization Characteristics and Metallogensis of Granitic Pegmatite Uranium and Other Rare Metals in the Danfeng Triangle Area, Shaanxi

ZHU Huanqiao, LI Weihong, HUI Zhengpu, ZHAO Ruyi, WANG Jiangbuo, GONG Qifu

(No. 203 Research Institute, CNNC, Xianyang 712000, Shaan xi, China)

Abstract: This paper focuses on geological characteristics of granitic pegmatite and mineralization of uranium and other rare elements in the Danfeng triangle area of North Qinling. According to the study, the granite pegmatite is produced by further differentiation of volatile-rich residual magma during late magmatic evolution. The granitic pegmatite mainly emplaced in Qinling rock group as well as the inner and outer contact zone of the mid-late Caledonian granite, distributing along the anticlinal axis and fracture, and parallel to the extension of structural lineament. Because of the metasomatic differentiation, the granite pegmatite has a broad category including biotite pegmatite, two mica pegmatite, muscovite pegmatite, muscovite Na-spar pegmatite and mica Li-spar pegmatite. The diagenesis and mineralization of granitic pegmatite can be divided into four stages, i. e. subsequent magmatism, germination, pneumatolysis and hydrothermal solution. With obvious multi-element mineralization characteristics, the granitic pegmatite is rich in rare metals such as U, Th, Nb, Ta and L, as well as other non-metallic mineral like beryl, mica, potassium feldspar etc.

收稿日期:2014-10-18;修回日期:2015-01-15

基金项目:中国地质调查局“陕西1:5万龙驹寨、峦庄街幅区调”(1212011120567、1212011220375)

作者简介:朱焕巧(1961-),女,本科,高级工程师,主要从事铀矿勘查及区域地质调查工作。E-mail: 1459496151@qq.com

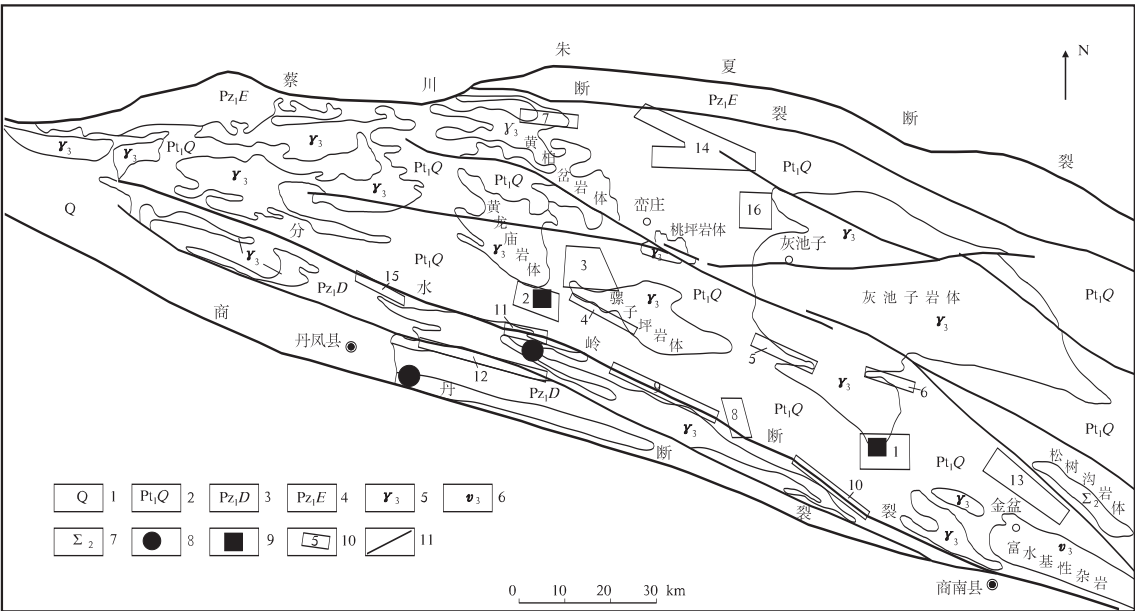
Keywords: pegmatite; rock type; mineralization characteristics; metallogenesis

秦岭造山带东部丹凤三角地带是我国花岗伟晶岩较为发育的地区之一,因含有丰富的放射性金属(U、Th、K)、稀有及非金属矿产资源,在很长一段时间内成为不少研究者和地质工作的重点研究对象。该区伟晶岩分布范围大、数量多、矿化好、地质勘查工作和研究程度较高。近年来,笔者参与了丹凤三角地区“龙驹寨、栾庄街幅 1:5 万区域地质填图”工作,以此研究资料为依据,分析研究了区内花岗伟晶岩的地质矿化特征及成矿作用(卢欣祥等,2010;万吉等,1992;核工业二〇三研究所,1992;核工业西北地质勘探局二二四大队,1988)。

1 区域地质背景

丹凤三角地带位于秦岭造山带的东部,夹持于中国华南与华北两大板块之间的板块结合带,有长达 30 多亿年的构造演化历史,经历了前造山(Ar—Pt₂)、主造山(Pt₃—T₂)和后造山(T₃—Q)三大构造演化阶段(张国伟等,1996,2001)。主造山期,自新元古代至中三叠世,经历了晋宁运动、加里东运动和印支运动,板块的多次俯冲,发育了各

类岩浆岩,尤其加里东期的花岗岩和花岗伟晶岩丹凤三角地带极为发育。丹凤三角地带是由商丹及朱夏两大断裂夹持的古元古界秦岭岩群和下古生界丹凤岩群分布区(张成立等,2004;张国伟等,2001;张宗清等,1994)。秦岭岩群是一套由黑云斜长片麻岩、大理岩和斜长角闪岩组成的中深变质岩系,出露面积广,分布于分水岭断裂以北,时代为古元古代($1\ 987 \pm 49$) Ma ~ ($2\ 267 \pm 173$) Ma, Sm—Nd, U—Pb。(张宗清,1994)。丹凤岩群则主要由基性火山岩构成的蛇绿构造混杂岩构成,沿商丹断裂北侧和分水岭断裂南侧分布,时代为早古生代。区内岩浆岩主要有元古宙早期的岩浆岩,分布于秦岭岩群片麻岩中,属于类似 TTG 岩套的片麻状二长花岗岩。而元古宙晚期的岩浆岩主要为基性-超基性岩,其中有松树沟纯橄岩等。但更广泛发育的则是古生代加里东期的花岗岩和花岗伟晶岩,构成了丹凤三角地带加里东构造岩浆岩带。花岗岩体规模较大的有灰池子岩体、骡子坪岩体、黄龙庙岩体、桃坪岩体等,围绕这些岩体的内外接触带及断裂分布着大量的花岗伟晶岩密集区(图 1)。



1. 第四系;2. 古元古界秦岭岩群;3. 下古生界丹凤岩群;中基性火山岩、碎屑岩、石英及斜长角闪片岩;4. 下古生界二郎坪岩群;细碧角斑岩;5. 加里东期花岗岩;6. 基性岩;7. 超基性岩;8. 热液型铀矿床;9. 花岗伟晶岩型铀矿床;10. 花岗伟晶岩密集区及编号;11. 断裂

图 1 丹凤三角地区花岗伟晶岩脉密集区分布示意图

Fig. 1 Granitic pegmatite distribution diagram map intensive in Triangle of Danfeng

2 花岗伟晶岩的地质特征

根据龙驹寨、峦庄街幅 1:5 万区域地质填图及前人的综合研究成果,得出丹凤三角地区的花岗伟晶岩具有以下地质特征。

2.1 空间分布特征

丹凤三角地区的花岗伟晶岩主要侵位于加里东中晚期花岗岩或秦岭岩群中,岩体内部及丹凤岩群中也有少量分布。一般多呈脉状、分枝状、囊状产出。长度在 100~1 000 m,一般为几十—几百米,宽 1~5 m。岩脉产状陡,倾角多在 60°左右。伟晶岩脉多沿背斜轴部和断裂、层间裂隙、片理面侵位,多平行于区域构造线延伸方向。与围岩呈明显的侵入接触关系,分布在岩体内部的伟晶岩脉与中粗粒花岗岩呈涌动(渐变过渡)接触关系,围绕灰池子、黄龙庙、骡子坪、桃坪岩体及构造的延伸方向分布有

16 个伟晶岩密集区(图 1),尤其峦庄和金盆一带伟晶岩脉分布密度更大,平均密度可达 18.9~33.0 条/km²。

2.2 岩石类型及岩石学特征

伟晶岩岩石类型包括:黑云母微斜长石伟晶岩、二云母微斜长石伟晶岩、白云母微斜长石伟晶岩、白云母微斜长石钠长石伟晶岩、锂云母微斜长石钠长石伟晶岩等(表 1)。由表 1 可见,黑云母微斜长石伟晶岩比例最大,其次为白云母微斜长石伟晶岩,锂云母微斜长石钠长石伟晶岩比例最少。从黑云母微斜长石伟晶岩到白云母微斜长石伟晶岩主要矿物组合特点是微斜长石和更长石共生,随挥发分增加,黑云母逐渐被白云母代替,微斜长石和石英按一定比例交生,形成文象结构;从白云母微斜长石钠长石伟晶岩至锂云母微斜长石钠长石伟晶岩,其主要矿物组合特点是钠长石取代更长石,白云母逐步被锂云母取代。

表 1 花岗伟晶岩脉岩石学特征
Tab.1 Petrography of the granitic pegmatite veins

伟晶岩 岩石类型	比例 (%)	主要矿物成分	结构构造
黑云母微斜长石伟晶岩	40	黑云母、钾长石、微斜长石、石英、更长石,少量电气石、磷灰石	中、粗粒伟晶结构,少数为块体结构
二云母微斜长石伟晶岩	20	黑云母、白云母、微斜长石、更长石、石英,岩性特征是白云母交代黑云母,二者含量相当	中、粗粒伟晶结构,少数为块体结构
白云母微斜长石伟晶岩	30	白云母、微斜长石、更长石、石英、少量电气石,岩性特征是白云母交代长石,形成石英白云母带	中、粗粒伟晶结构,文象结构
白云母微斜长石钠长石伟晶岩	3	白云母、微斜长石、钠长石、石英,少量电气石、钠长石取代更长石,出现钠长石带和石英钠长石带	中、粗粒伟晶结构,文象结构
锂云母微斜长石钠长石伟晶岩	0.5	锂云母、锂辉石、钠长石、石英,锂云母交代白云母形成石英锂云母带,钠长石化发育,交代块体微斜长石带。	细、中粒伟晶结构

2.3 岩浆(热液)分异特征

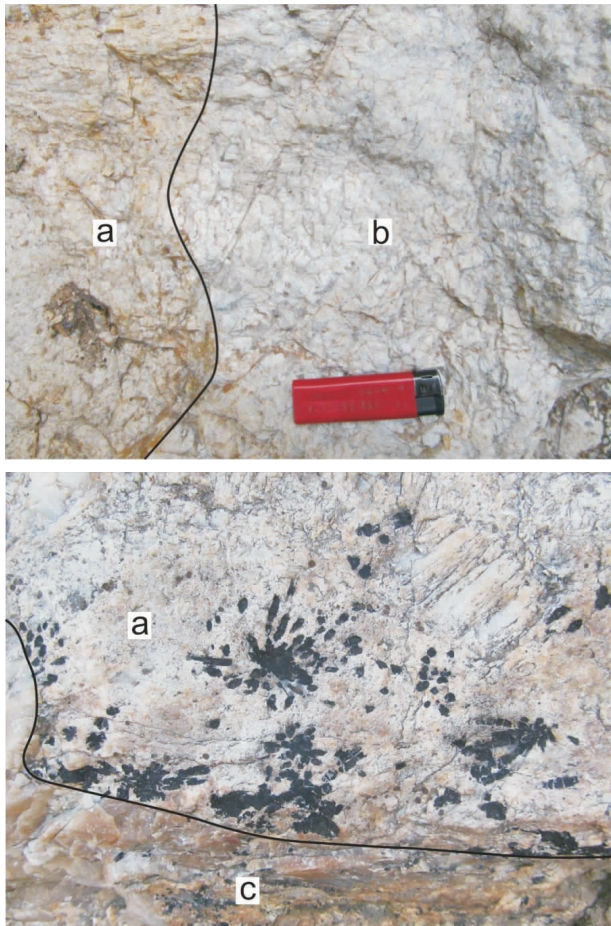
花岗伟晶岩的分异作用主要体现在花岗伟晶岩矿物组合的水平分带及花岗伟晶岩的结构分带 2 个方面。

花岗伟晶岩的分带表现在从早到晚,自花岗岩体向外、或者从密集区内带向外带花岗岩伟晶岩类型发生规律性的替变,形成极为特征的分带现象。一般情况下表现为从黑云母微斜长石型伟晶岩—锂云母微斜长石钠长石型伟晶岩的连续演化系列。在

灰池子岩体外围主要分布的黑云母伟晶岩,向外到峦庄一带的 14 号密集区主要分布白云母伟晶岩,再向外到金盆一带出现了锂云母伟晶岩(富水基性杂岩中的伟晶岩有紫晶玉产出,紫晶玉为锂云母的集合体),而密集区 1、2、3、4、5、6、7 则基本为肉红色或灰白色黑云母伟晶岩。这种演化系列反映出伟晶岩化学成分从早到晚,基性元素 Fe、Mg、Ca 减少,而 Ai、Na 等增加,挥发分组分及稀有元素含量增高。揭示了花岗伟晶岩的演化历史和整个伟晶岩由低级

向高级的连续演化过程。

花岗岩伟晶岩脉的结构分带多为四带型:从岩脉边部向岩脉中心一般可分为细粒花岗结构(边缘带)带(图 2)、伟晶结构带(外侧带)、文象结构带(中间带)和长石、石英块体(内核带)带,在同一脉体中常对称出现。一般情况下,每一条伟晶岩脉仅发育上述结构带的一部分,而不是每条伟晶岩脉中都可见到所有的结构带,发育完整的是极个别现象。



a. 伟晶结构带; b. 文象结构带; c. 长石、石英块体(内核带)带

图 2 花岗伟晶岩脉体结构分带

Fig. 2 The map of granitic pegmatite veins

2.4 稀土元素及同位素特征

丹凤三角地带,一般情况下花岗岩或相关的伟晶岩的共同特点是 Σ REE 较低, Eu 亏损很小,强烈富集了轻稀土元素,致使 Σ Ce/ Σ Y 及 La/Sm、La/Yb 值都很大,同时伟晶岩的 Σ REE 及主要特征值均低于同源花岗岩(表 2)。这表明随着岩浆由偏基性向酸、碱性演化,稀土元素是逐渐减少的。稀土元

素特征还显示它们是地壳深熔岩浆形成的,并可能反映了流体对稀土元素的富集作用。只有含铀较高的岩体及含铀伟晶岩 Σ REE 很高, Eu 亏损很很大,强烈富集轻稀土元素,标准化球粒陨石配分模式为右倾型, Eu 谷很深(表 2)。这说明伟晶岩的形成有可能不是一期的,有待进一步研究。

丹凤三角地带伟晶岩的氧同位素: $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) 为: 8.48‰ ~ 11.38‰, 锶的同位素值 ($\text{Sr}^{87} / \text{Sr}^{86}$) 为 0.718 8~0.804 8, 伟晶岩与花岗岩相似。证明二者的同源性。同时也揭示其壳源属性。

表 2 丹凤三角地带花岗岩及同源伟晶岩稀土元素特征值

Tab. 2 The homologous granite and pegmatite REE values in the Danfeng triangle area

岩石名称	测定样品	Σ REE (10^{-6})	Eu/ Eu *	Σ Ce / Σ Y	La/Sm	La/Yb
灰池子花岗岩	全岩	99.97	0.94	18.03	12.6	77.6
二云母微斜长石伟晶岩	长石	1.31	0.83	10.65	5.67	34.0
骡子坪灰白色花岗岩	全岩	111.83	0.12	1.34	1.55	6.56
纸房沟含铀伟晶岩	全岩	652.78	0.06	1.33	2.22	5.38

注:据卢欣祥等修改。

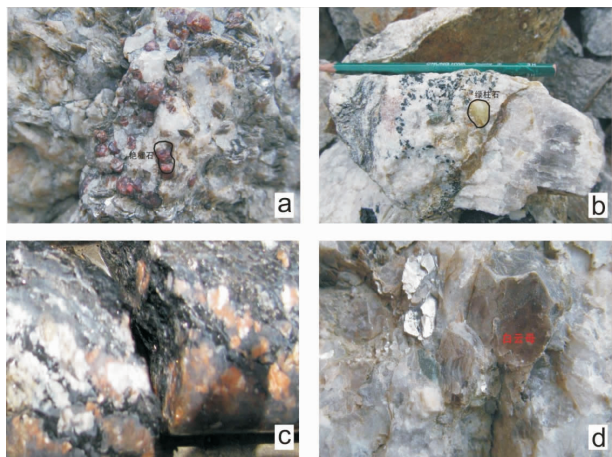
3 丹凤三角地带花岗伟晶岩的矿化特征

3.1 具多矿种矿化特征

丹凤三角地带花岗伟晶岩矿化作用明显,伟晶岩内蕴着丰富的矿产资源。主要以铀矿化为主,近年来已查明中型铀矿床 4 处及多处铀矿点、矿化点。其次为稀有金属矿产 Nb、Ta、Be、Rb、Li、Cs 等。即发育有产铀花岗伟晶岩,含铍、铷花岗伟晶岩,含铈钽花岗伟晶岩,含锂、铍花岗伟晶岩,含锂、铈花岗伟晶岩,含铯榴石花岗伟晶岩(陈西京,1981)及含稀有元素伟晶岩(Be、Rb、Li、Cs)等。并有非金属(钾长石、白云母、石英)等矿产(图 3)。

主要矿物有绿柱石、白云母、钾长石、锂云母、电气石、铯榴石、铈钽铁矿、黑稀金矿 黑云母等。有工业价值的矿物有绿柱石、白云母,钾长石、电气石、锂云母等,在峦庄地区的伟晶岩中见到结晶完好的六

方柱状绿柱石及呈放射状集合体产出的电气石。白云母以片大(图 3)、质纯为特色,工业品级 4 号以上的白云母到处可见,区内已查明的 2 处白云母矿床已开采利用。此外伟晶岩脉中稀有金属矿产资源也有一定的经济价值,可以进行综合开发利用(陈西京,1981;杨福新等,1998)。



a. 含铯榴石花岗岩伟晶岩;b. 含稀有元素花岗岩伟晶岩;c. 含铀矿化的黑云母花岗岩伟晶岩;d. 巨晶白云母伟晶岩矿石

图 3 花岗伟晶岩的矿化岩石

Fig. 3 Mineralized rocks of granitic pegmatites

3.2 交代分异作用是形成伟晶岩矿化的主要因素

花岗伟晶岩具有岩浆期后分异交代作用,而分异和交代作用是伟晶岩型铀矿化及稀有元素矿化的决定因素,在钾长石化强烈的地段铀矿化非常普遍。在钠长石化、锂云母化强烈地段便可形成有工业意义的稀有元素矿化。从钾长石化—白云母化—钠长石化—锂云母化,这个过程也是一个碱交代的过程,即大离子亲石元素钾被活性强的钠交代,钠又被活性更强的锂交代。随着交代分异作用由弱变强,铀矿化由强变弱,稀有金属矿化由弱变强,稀有元素的富集程度与交代分异演化有关,尤其与钠化阶段有关,稀有元素富集在富含钠长石的伟晶岩中。

3.3 伟晶岩的类型对矿化有控制作用

伟晶岩类型决定了伟晶岩的矿化类型及空间分布位置。例如,U、Th、K 常与黑云母型伟晶岩有关,这种类型的伟晶岩一般分布在花岗岩岩体的内外接触带,在骡子坪岩体、黄龙庙岩体、桃坪岩体内外接触带等都分布有大量的含铀黑云母花岗岩伟晶岩;Be、Th、Nb 等与二云母型伟晶岩有关,这种类型的伟晶岩要比黑云母型伟晶岩远离岩体,多分布在

秦岭岩群中;Li、Be、Nb、Ta、Cs 等发育在白云母型及锂云母型伟晶岩中,这种类型的伟晶岩更加远离岩体及伟晶岩密集中心。伟晶岩的矿化类型和伟晶岩一起,具有围绕同源花岗岩成带状产出的特征(据卢欣祥,2010)。

3.4 F、B 等矿化剂有利于稀有碱金属元素的富集和迁移

矿化流体和挥发分、特别是 F、B 等矿化剂,对稀有碱金属元素的迁移和富集起着重要的作用,不少具工业价值的矿物就形成于交代作用阶段。例如,在交代过程中形成的富含碱金属的铯榴石、电气石、绿柱石、锂云母等。

3.5 伟晶岩矿化的形成时代

从伟晶岩的宏观产出特征、矿物成分及年龄测试结果均可以反映出伟晶岩形成的母岩浆及其形成的时间(表 3)。

分布在黄龙庙、骡子坪、桃坪等岩体中的花岗伟晶岩与中粗粒二长花岗岩呈渐变接触关系(涌动接触)。上述花岗岩岩体与伟晶岩的主要造岩矿物成分相同,并且都含有石榴子石。

表 3 丹凤地区后碰撞花岗岩岩体与含铀花岗伟晶岩年龄一览表

Tab. 3 The age of the after-collision granite and uranium - granite pegmatites in the Danfeng area

样品名称	采样位置	岩性	年龄(Ma)	测试方法	资料来源
骡子坪岩体			412	全岩 Rb - Sr	万吉, 1992
黄龙庙岩体		含榴二长花岗岩	415	锆石 U - Pb	核工业 203 研究所 2013 年区调
含铀伟晶岩	光石沟	花岗伟晶岩	405、412、418	锆石 U - Pb	冯月明, 1996
含铀伟晶岩	陈家庄、光石沟及纸房沟	花岗伟晶岩	414. 5、418. 4	晶质铀矿 U - Pb	万吉, 1992
含铀伟晶岩	陈家庄	花岗伟晶岩	407	晶质铀矿 U - Pb	徐展, 1988

由表 3 可以看出,伟晶岩矿化形成的时间在 410 Ma 左右,与后碰撞花岗岩体(张成立,2004),即骡子坪及黄龙庙岩体形成的时间一致,是在区域应力处于拉张状态下形成的,伟晶岩与花岗岩是同一

母岩浆在不同阶段演化的产物,共同记录了丹凤三角地带加里东晚期的一次大的构造热事件。

4 花岗伟晶岩成岩成矿作用分析

丹凤三角地带与伟晶岩有关的铀-稀有元素矿化的形成过程,是区内加里东期花岗岩岩浆演化晚期岩浆热液作用的产物。是由富含挥发分和稀有、放射性元素的残余岩浆,温度在 $400\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,外压大于内压的封闭系统中缓慢结晶及交代分异的过程中形成的,大概经历了以下几个阶段。

4.1 后岩浆阶段

当重熔的花岗质岩浆演化到富含挥发分和稀有、放射性元素残余岩浆阶段,在物化条件和挥发组分的作用下,由于地球化学性质不同,U、Th、K首先在花岗岩体内部及岩体外接触带的有利构造空间晶出,主要矿物为钾长石、微斜长石、黑云母、晶质铀矿,以含钾的硅酸盐矿物为主。此阶段形成的伟晶岩脉由于就位的位置距离岩体较近,形成时温度变化不大,脉体中结构分带不明显。形成的伟晶岩中特有的文象结构很少发育,形成的矿化以铀矿为主(已发现多个铀矿床、矿点),可利用矿物主要为钾长石等。同时在远离岩体的一些脉体中形成了花岗伟晶岩脉的边缘带,边缘带的主要矿物为长石和石英。由于围岩温度较低,岩浆温度下降相对较快,因此岩石常具细粒伟晶结构,边缘带一般不连续,不含有用矿物。

4.2 伟晶作用阶段

继边缘带形成之后,岩浆中挥发组分的含量相对增高,温度下降相对减缓,岩浆结晶形成外侧带。外侧带的主要矿物为微斜长石、石英、白云母等,岩石一般具细粒-中粒伟晶结构,当岩浆成分达到石英与长石共结比时,则形成外侧带常见的文象结构(图2)。外侧带一般也不连续,可出现少量绿柱石等矿物,但一般不构成矿体。

4.3 气成阶段

随着边缘带和外侧带硅酸盐矿物的不断结晶,残余岩浆中挥发组分含量不断增加,成岩成矿介质逐渐由岩浆转变为超临界流体,成岩成矿温度在 $600\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$,形成中间带和内核带。该阶段早期,以结晶作用为主,形成的主要矿物为钾长石、微斜长石、石英、白云母,在富含稀有元素和稀土元素的条

件下则还可形成绿柱石、锂辉石及富稀土元素矿物。

随着温度降低、流体成分的改变和水作用的增强等条件的变化,依次发生白云母化、钠长石化及(在富含稀有元素时)稀有金属等多种交代作用,形成交代矿物构成的岩相带和大量具重要工业价值的白云母和锂辉石、锂云母等稀有金属矿物,交代作用可延续到热水溶液阶段。

此阶段形成的中间带(包括叠加的交代产物)主要矿物为钾长石、钾微斜长石、石英、白云母、钠长石,在富稀有、稀土元素条件下还有绿柱石、锂辉石、锂云母等稀有金属矿物及稀土元素矿物,岩石具粗粒伟晶结构、似文象结构及块状伟晶结构、交代结构。中间带一般较连续,是赋矿的有利部位。

内核相带位于伟晶岩体(脉)的中心部位,主要矿物是具块状及巨晶结构的石英,因而又称石英核。内核的发育状况取决于伟晶岩的形态和分异情况,分异完全时可具完好的内核,分异不完全时可不具内核或仅发育于伟晶岩脉膨大部位而呈断续分布。内核是石英(硅石)矿体的产出部位(杨福新 1992),内核中常可见晶洞,是水晶及黄玉等宝石矿物的重要成矿部位。

4.4 热水溶液阶段

此阶段是从温度下降至 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下开始的。由于环境温度已降至水的临界温度以下,成矿介质已由超临界流体转变为热水溶液。此阶段仍有部分矿物在内核及晶洞中结晶以致成矿,如水晶等。另外,还可发生重要的交代作用,继续形成相应的矿物带以及矿体。交代作用多发生于中间带及其与核的过渡部位,是白云母及锂辉石、锂云母等稀有金属的重要成矿部位。

5 结论

(1)伟晶岩与花岗岩是同源的,是受板块俯冲碰撞构造体制的影响形成的花岗岩母岩浆分异、演化的结果。花岗岩伟晶岩的侵位也预示着一个加里东期岩浆旋回的终结。

(2)伟晶岩的分异演化过程,从早到晚是一个完整的碱交代过程。在这个过程中随着岩浆的不断演化,岩浆中钾越来越富集,成为流体物质的重要组成部分,以钾长石化的形式对其他非钾矿物进行交代,形成钾长石交代斑晶,后又被钠交代形成钠长石,然后

钠又被锂交代形成锂云母;同时,铀及稀有金属元素也得到了不断地富集而成矿。也就是说伟晶岩中铀及稀有金属的成矿是由碱交代作用引起的。

(3)花岗伟晶岩的成岩、成矿作用可划分为后岩浆、伟晶作用、气成作用和热水溶液 4 个阶段,后岩浆阶段主要形成铀矿化,气成阶段是稀有多金属和稀有元素主矿化阶段,热水溶液阶段主要形成锂辉石、锂云母等稀有金属矿化。

致谢:本文在编写中得到了杨福新和权志高两位研究员的热情指导,在此表示衷心的感谢。

参考文献(References):

卢欣祥,祝朝辉,谷德敏,等.东秦岭花岗伟晶岩的基本地质矿化特征[J].地质论评,2010,56(1):21-30.

LU Xinxiang, ZHU Zhaohui, GU Demin, et al. The Main Geological and Metallogenic Characteristics of Granitic Pegmatite in Eastern Qinling Belt [J]. Geological Review, 2010, 56(1): 21-30.

张成立,刘良,张国伟,等.北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义[J].地学前缘,2004,11(3):33-42.

ZHANG Chengli, LIU Liang, ZHANG Guowei, et al. Determination of Neoproterozoic post-collisional granites in the north Qinling Mountains and its tectonic significance[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 33-42.

张国伟,张本仁,袁学成,等.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社,2001.

ZHANG Guowei, ZHANG Benren, YUAN Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing Science Press, 2001.

陈西京.某地铯榴石的形成条件及找矿标志[J].长安大学学报,1981,3(2):47-57.

CHEN Xijing. A colorad gamet formation condititional dynamics[J]. Chang'an University, 1981, 3(2): 47-57.

万吉,高立宝,王莲香.商丹三角区花岗伟晶岩型铀成矿环境研究及远景评价[J].铀矿地质,1992,(5):257-263.

WAN Ji, GAO Libao, WANG Lianxiang. Shangdan Triangle granitic pegmatite - type uranium mineralization Environmental Reseach and Vision Forecast [J]. Uranium Geology, 1992, (5): 257-263.

张宗清,刘敦一,付国民.北秦岭变质地层同位素年代学研究[M].北京:地质出版社,1994.

ZHANG Zongqing, LIU Dunyi, FU Guomin. Geochronology of the North Qinling Metamorphic formations [M]. Beijing: Geologic Press, 1994.

核工业二〇三研究所.陕西丹凤三角地带伟晶岩型铀成矿地质环境及远景评价报告[R].1992.

No. 203 Research Institute of Nuclear industry. The report about metallogenic geological environment and prospect evalution of uranium - pegmatite in the Danfeng triangle area, Shaanxi [R]. 1992.

核工业西北地质勘探局二二四大队.丹凤三角地带陈家庄、纸坊沟、光石沟铀矿化特征控矿因素对比[R].1988.

No. 224 Geologic Group of Northwest. Geological Bureau of Nuclear Industry. The uranium mineralization characteristics and contrast of ore controlling factors in the Chenjiazhuang, Zhifanggou and Guangshigou of Danfeng triangle area [R]. 1988.

杨福新,高立宝.河南省灵宝市花岗石石材资源及地质特征[J].西北地质,1998,19(4):14-20.

YANG Fuxin, GAO Libao. Resources and Geological chaacteristics of Granite Frome the Lingbao, Henen province [J]. Northwestern Geology, 1998, 19(4): 14-20.

杨福新,牟长林,陈宏斌.河南省灵宝市故县石英矿化地质特征及应用[J].西北地质,1998,19(4):21-27.

YANG Fuxin, MOU Changlin, CHEN Hongbin. mineralization geological characteristics and application of quartz frome Lingbao Guxian, Henan province [J]. Northwestern Geology, 1998, 19(4): 21-27.