

# 陕南光石沟伟晶岩型铀矿床黑云母矿物 化学研究及其对铀成矿的启示

陈佑伟<sup>1</sup>, 毕献武<sup>1</sup>, 胡瑞忠<sup>1</sup>, 董少花<sup>1</sup>, 程德进<sup>2</sup>, 冯张生<sup>2</sup>

{ 1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002;  
2. 陕西核工业地质局 224 大队, 陕西 西安 710024 }

**【摘要】** 黑云母是伟晶岩型铀矿床中重要的矿物,它广泛地存在于产铀相关的花岗岩及伟晶岩之中,同时与伟晶岩矿床中主要铀矿物-晶质铀矿的产出有着十分密切的关系。选择与我国光石沟伟晶岩型铀矿床密切相关的灰池子二长花岗岩、大毛沟白岗岩、伟晶岩类中黑云母作为研究对象,系统的电子探针矿物化学分析结果显示:花岗岩、白岗岩和伟晶岩中黑云母均具有富集铁、钛,亏损挥发性组分氟、氯等特征。产铀黑云母伟晶岩中黑云母相对于非产铀黑云母伟晶岩具有富 Mg, Mn, 贫 Al, 低 ACNK 以及氧逸度等特点。研究结果不仅表明白岗岩和伟晶岩并不是由灰池子二长花岗岩分离结晶而来,而且证明了同化混染作用不仅控制了产铀伟晶岩中黑云母的特殊结构构造以及物质组成,更是伟晶岩型铀矿产出的关键因素。

**【关键词】** 伟晶岩型铀矿床;黑云母;矿物化学;同化混染;光石沟

中图分类号:P611.1<sup>+</sup>2 文献标识码:A

文章编号:1001-6872(2013)04-0017-12

## 0 引言

伟晶岩型铀矿床是典型的原生铀矿床,其主要铀矿物为原生晶质铀矿,含矿与否及富集程度均是由晶质铀矿的多少决定的。由于伟晶岩型铀矿床分布较少,目前仅在纳米比亚、印度、挪威、巴西、加拿

大和我国秦岭地区等地有报道,这极大地制约了伟晶岩铀成矿理论等的发展,以至于伟晶岩型铀矿床的相关研究还十分薄弱。

我国是伟晶岩型铀矿床较为发育的少数国家之一,我国伟晶岩型铀矿床主要分布于秦岭造山带北部和华北地台的龙首山地区,其中以秦岭造山带北部的丹凤地区最为发育。丹凤地区位于陕西省南部

丹凤县—商南县,地处北秦岭褶皱带南缘东段,是我国伟晶岩型铀矿勘察程度最高找矿成果最显著的地区。已探明有光石沟和陈家庄两个中-大型伟晶岩型铀矿床,并随着勘探工作的进展,其储量不断扩大。其中以光石沟铀矿床赋存量最大,品位最高(平均品位为0.1%),矿体形态相对简单,具有较好的开采前景,是丹凤地区铀矿找矿勘探的重点矿床。

自20世纪60年代发现光石沟地区铀异常点以来,陕西核工业地质局二二四大队(原核工业西北地勘局二二四队)和北京核工业地质研究院等单位的学者在该地区做了大量的工作<sup>[1,2~6],①</sup>,取得了许多重要的认识,但由于技术手段的限制,以往的研究多侧重于伟晶岩全岩地球化学特征及其与花岗岩关系方面,而对于伟晶岩的矿物化学方面甚少涉及,特别是缺乏对与铀矿产出密切相关的黑云母研究,这极大地制约了对伟晶岩来源、演化及伟晶岩系统中铀富集沉淀规律的认识。

云母类矿物是花岗岩和伟晶岩中常常出现的矿物,因为其化学成分对生长环境较为敏感,可以提供熔体的成分以及物理化学条件等信息,因此在花岗岩和伟晶岩的研究中占有了十分重要的位置。同时,由于伟晶岩矿物颗粒较大,通常具有明显的分带现象,通常难以选择合适的样品能代表伟晶岩全岩,因此常常选择伟晶岩中云母类等单矿物的研究,反映伟晶岩的演化程度和结晶条件等信息<sup>[7~9]</sup>,因此云母类的研究在伟晶岩中显得尤为重要,特别是在伟晶岩型铀矿中,黑云母广泛地存在于产铀相关的花岗岩及伟晶岩之中,并与伟晶岩中主要铀矿物——晶质铀矿的产出有着十分密切的关系。

本次研究将与铀成矿有关的花岗岩、白岗岩和伟晶岩有机地结合起来,以其中广泛分布的黑云母作为研究对象,开展系统的矿物化学研究,揭示黑云母在岩浆演化过程中的晶格替换及成分变化等特征,探讨伟晶岩岩浆的演化规律及源区特征,并进一步深刻揭示伟晶岩型铀矿床的成矿规律及制约因素。

## 1 地质背景

光石沟地区位于华北地台南缘北秦岭加里东褶皱带东段陕豫边界的丹凤三角地区(图1a),区内出露地层为下元古界秦岭群,北以蔡川断裂为界,与北部下古生界云架山群呈断层接触,南以商丹构造带

北部分水岭断裂为界,与南部下古生界丹凤群呈断层接触。秦岭群是北秦岭造山带古老的结晶基底,与伟晶岩型铀矿关系密切,其岩性是一套富含泥质的陆源碎屑岩高级变质岩系,主要岩石类型为含石榴黑云斜长片麻岩、硅线石榴黑云母斜长片麻岩,石榴黑云二长片麻岩夹石榴黑云斜长变粒岩、斜长角闪片岩。其中黑云斜长片麻岩是本区秦岭群最主要的岩石类型,也是产铀伟晶岩脉的重要围岩。

灰池子岩体是北秦岭东段最大的花岗岩岩基,主要岩性是片麻状黑云母二长花岗岩,其锆石年龄约为437 Ma~382 Ma<sup>[10]</sup>,其边部有中粗粒白岗质花岗岩沿岩体接触带侵入,其中最具有代表性的是南部的大毛沟岩株。大毛沟岩株与光石沟铀矿床在空间上和成因上关系密切。在灰池子岩体、大毛沟岩株外接触带及土地岭-牛家台背斜西南翼发育大量黑云母伟晶岩脉。已查明有90余条黑云母伟晶岩脉,含矿伟晶岩脉占20%。已初步查明5条含矿脉体,控制大小矿体24个。自岩体接触带往外大致呈黑云母伟晶岩、富稀有金属元素的二云母伟晶岩、白云母伟晶岩分带现象(图1b)。

## 2 岩石学特征

研究以灰池子黑云母二长花岗岩、大毛沟白岗岩、产铀及不产铀黑云母伟晶岩、二云母伟晶岩作为研究对象,而白云母伟晶岩因不含黑云母未作此项研究。

灰池子黑云母二长花岗岩样品采自灰池子地表露头,花岗岩呈片麻状,与变质岩片麻理基本一致,内部岩性均一,矿物成分简单,主要由石英(30%)、钾长石(20%)、斜长石(35%)、黑云母(15%)构成,中粒花岗结构,副矿物有磷灰石、锆石、独居石、榍石等。黑云母呈细小鳞片状分布。

大毛沟白岗岩样品采自上苍房村附近大毛沟岩株地表露头,岩石整体呈浅肉红色,矿物颗粒较大,成分简单,主要是石英(35%)、钾长石(40%)、斜长石(25%)、以及少量黑云母组成。黑云母通常呈细小鳞片稀疏分布,见少量绿泥石化和白云母化。

黑云母伟晶岩样品选自钻孔ZK001、ZK15001和ZK6801的新鲜岩芯样品。产铀黑云母伟晶岩主要由微斜长石、石英、黑云母组成,常含少量独居石、锆石、晶质铀矿、黄铁矿和磷灰石等副矿物。岩石结构很不均一,常见黑云母、石英、磷灰石等团块,粗粒或巨粒花岗岩结构、局部见交代似斑结构,块状构造,矿物颗粒相对较小,成分较为简单,一般不具有

①罗忠成,陕西省丹凤三角地带铀成矿地质背景、控制因素和成矿远景预测报告,陕西核工业地质局内部资料,1989:7-8.

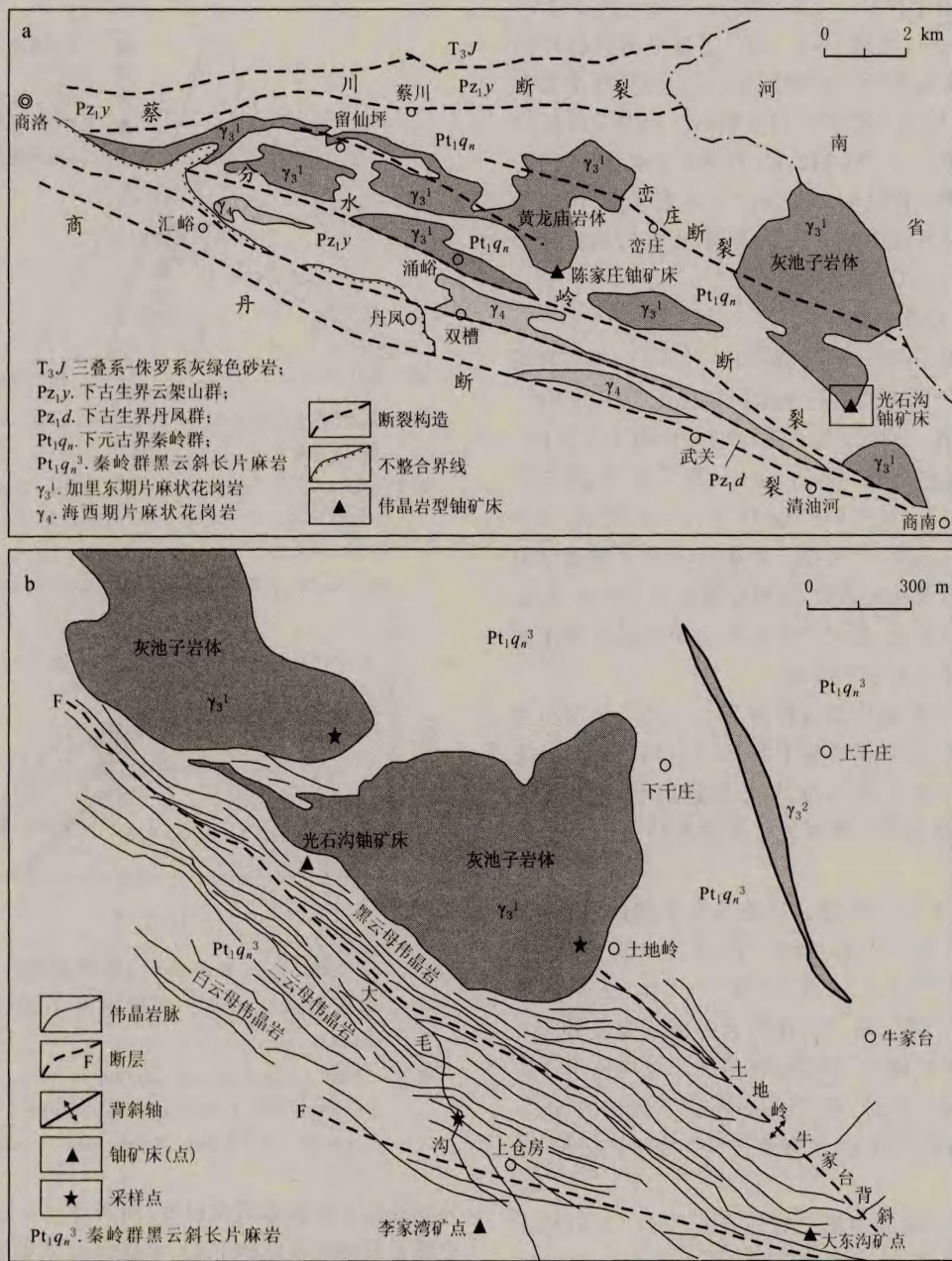


图 1 丹凤三角地区及光石沟铀矿床地质简图(据左文乾等, 2010<sup>[6]</sup> 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of Danfeng triangle area and Guangshigou uranium deposit

文象结构和矿物分带现象。其中黑云母多呈鳞片状, 形成团块分布, 边部常分布细小鳞片状次生白云母分布。晶质铀矿通常以单个晶体存在于副矿物、脉石矿物的晶体内部或颗粒之间, 但多富集于大量鳞片状黑云母富集团块中。不产铀的黑云母伟晶岩其结构较为均一, 黑云母较少, 呈自形片状均匀分布于岩石之中。

二云母伟晶岩取自富水村附近野外露头。主要由微斜长石、石英、斜长石、黑云母、白云母, 副矿物常含石榴子石、锆石、磷灰石等。结构较为均一, 矿

物颗粒较大, 具有少量简单的矿物分带现象和文象结构, 黑云母多呈自形片状均匀分布于岩石之中。

### 3 分析方法和结果

将样品磨成厚度适当的薄片, 在偏光显微镜下进行镜下鉴定, 然后圈定其中新鲜未蚀变的黑云母样品, 对薄片表面进行喷碳后进行电子探针分析。电子探针分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。仪器型号为 JEOL JXA-

8800M 型电子探针。工作环境为:工作电压 25 kV, 电流 10.0 nA, 束斑 10.0  $\mu\text{m}$ 。定量分析的标样均为美国国家标准局的矿物标样, 采用的标样主要有黑云母、角闪石、磷灰石、铍方钠石。用黑云母标样测试样品中的 Si, Al, Mg, K, Ti, Fe 元素含量, 用角闪石标样测试样品中 Ca, Mn, Na 元素含量, 用磷灰石标样测试样品中的 F 元素含量, 用铍方钠石标样测试样品中的 Cl 元素含量。

### 3.1 黑云母成分特征

由于电子探针无法区别  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$ , 本文利用林文蔚等<sup>[11]</sup>的方法进行本次研究黑云母中的  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  估算。同时, 电子探针也无法测出  $\text{Li}_2\text{O}$  含量, 本次研究利用 Tischendorf 等<sup>[12]</sup>提出的方法 ( $\text{Li}_2\text{O} = [2.1 / (0.356 + \text{MgO})] - 0.088$ ) 进行  $\text{Li}_2\text{O}$  含量估算。以 22 个氧原子为基础, 计算了黑云母的阳离子系数及相关参数, 所得结果如表 1 所示, 由表中数据可以看出, 花岗岩及伟晶岩中的黑云母在主要元素组成上有如下特征:

(1) 所有样品中黑云母的  $\text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$  为 0.46~0.66, 且各类样品中的  $\text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$  都比较均一, 表明黑云母均未受到后期流体的改造<sup>[13]</sup>。因此其成分特征能代表岩浆结晶时黑云母的成分特征。

(2) 所有样品中黑云母均具有富铁的特征, 其  $\text{FeO}^i$  为 18.96%~25.86%,  $\text{Mg}^\#$  为 0.31~0.49。在  $\text{Mg}-(\text{Al}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti})-(\text{Fe}^{2+} + \text{Mn})$  三角图解上, 除灰池子黑云母二长花岗岩的部分黑云母落入镁质黑云母区域外, 大部分样品黑云母均位于铁质黑云母区域(图 2), 在 Tischendorf<sup>[15]</sup>提出的  $\text{mgli}-\text{feal}$  云母分类图解上, 所有黑云母均属于铁云母(图 3)。

(3) 所有样品中黑云母还具富  $\text{TiO}_2$  (2.51%~4.11%), 贫挥发性组分 Cl (0~0.03%), F (0~0.12%) 等特点。

(4) 白岗岩和伟晶岩中黑云母的  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 15.64%~18.60%,  $w(\text{MgO})$  为 6.15%~10.58%,  $w(\text{TiO}_2)$  为 1.65%~4.10%,  $w(\text{FeO}^i)$  为 18.96%~25.86%, 铝饱和指示 ACNK 为 1.46~1.91, 而灰池子花二长岗岩中黑云母的  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 15.10%~16.05%,  $w(\text{MgO})$  为 9.72%~11.39%,  $w(\text{TiO}_2)$  为 2.70%~3.99%,  $w(\text{FeO}^i)$  为 19.92%~21.43%, 铝饱和指示 ACNK 为 1.41~1.55 可以看出相对于白岗质花岗岩和伟晶岩, 灰池子花岗岩中黑云母具有较高  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  含量, 较低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  以及铝饱和指数, 暗示其源岩中含有较多的基性成

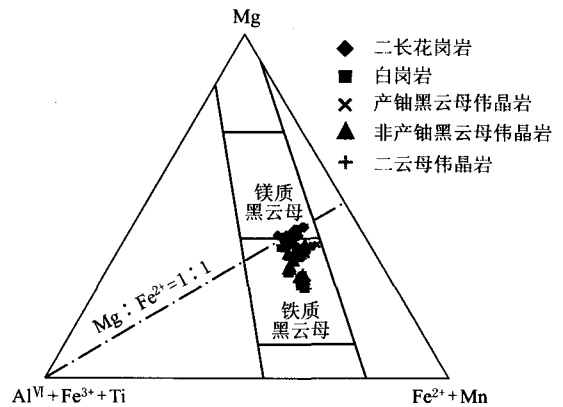


图 2 黑云母的  $\text{Mg}-(\text{Al}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti})-(\text{Fe}^{2+} + \text{Mn})$  图解(底图据 Foster M D, 1960<sup>[14]</sup>)  
Fig. 2  $\text{Mg}-(\text{Al}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti})-(\text{Fe}^{2+} + \text{Mn})$  ternary diagram of biotite (after Foster M D, 1960<sup>[14]</sup>)

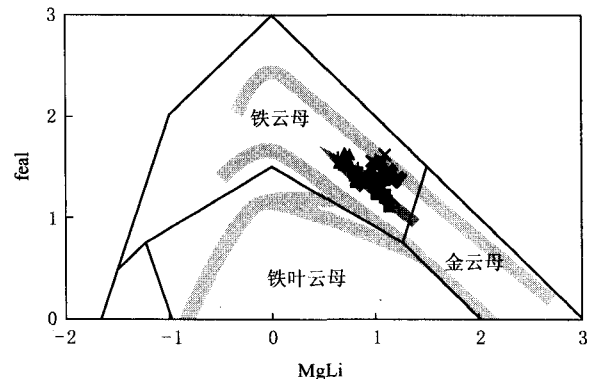


图 3 云母的  $\text{Mg}-\text{Li}$  分类图解, 图中阴影部分为云母理论演化曲线。图例同图 2(底图据 Tischendorf G, et al, 2007<sup>[15]</sup>)  
Fig. 3  $\text{Mg}-\text{Li}$  classification diagram of mica, shadows showing the theory evolution curve of micas, symbols as for Fig. 2 (after Tischendorf G, et al, 2007<sup>[15]</sup>)

分或经历了更低的演化程度, 而灰池子二长花岗岩中黑云母相对较低的  $\text{FeO}^i$  可能是由于灰池子花岗岩中少量角闪石结晶时占用了岩浆中部分 Fe 所致。

(5) 产铀黑云母伟晶岩黑云母的  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 15.64%~16.60%, 铝饱和指数 ACNK 为 1.46~1.63,  $w(\text{MgO})$  为 8.99%~9.89%,  $w(\text{MnO})$  为 0.32%~0.42%, 而非产铀黑云母伟晶岩中黑云母的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 16.04%~18.60%, 铝饱和指数 ACNK 为 1.49~1.83,  $w(\text{MgO})$  为 6.34%~9.73%,  $w(\text{MnO})$  为 0.12%~0.44%, 可以看出, 产铀黑云母伟晶岩相对于非产铀黑云母伟晶岩具有更高的  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}_2$  含量, 低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 ACNK, 暗示产铀黑云母伟晶岩中黑云母结晶时岩浆具有更多的基性

表 1 黑云母的氧化物成分、w(B)/% 及其阳离子计算结果

Table 1 Oxide composition (in percentage) of biotite and its cationic calculation results

分析参数	灰池子二长花岗岩															大毛沟白岗岩										
	3-1	3-2	3-3	3-4	3-7	3-8	3-11	3-12	3-13	3-14	1-3	1-4	1-5	1-10	1-11	1-14	1-15	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	3-1	3-2	3-5	
SiO <sub>2</sub>	36.89	37.08	36.94	36.86	36.91	37.37	37.20	37.03	37.19	36.76	36.78	36.31	36.90	37.11	35.92	36.66	37.30	36.43	36.95	36.25	36.76	36.50	37.34	37.67	37.70	
TiO <sub>2</sub>	3.99	3.79	3.98	3.56	3.34	3.35	3.67	3.78	3.60	3.64	3.92	3.01	3.20	2.74	2.70	3.70	3.67	3.42	3.49	3.16	3.45	3.84	2.96	2.93	3.11	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.99	15.97	15.68	15.75	15.97	16.05	15.87	15.83	15.48	15.58	15.86	15.35	15.23	15.60	15.63	15.46	15.10	17.16	17.28	16.61	17.02	16.90	17.43	16.82	16.96	
FeO <sup>1</sup>	20.82	21.07	19.92	20.92	21.29	20.93	20.49	20.61	20.71	21.43	20.00	20.48	20.33	20.67	21.02	20.67	20.40	20.17	19.83	20.37	19.88	19.62	18.96	19.69	20.34	
MnO	0.42	0.42	0.43	0.47	0.44	0.42	0.42	0.51	0.50	0.50	0.58	0.39	0.44	0.49	0.50	0.42	0.42	0.57	0.56	0.50	0.47	0.52	0.46	0.42	0.48	
MgO	10.26	10.58	10.48	10.62	9.72	10.29	10.71	10.37	10.55	10.83	10.15	10.86	11.07	11.18	11.39	10.63	10.96	9.57	9.47	9.66	9.41	10.05	10.58	10.50	10.47	
CaO	0.02	0.00	0.69	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.06	0.08	0.00	0.02	0.00	0.10	0.12	0.02	0.02	0.00	0.00	0.07	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	
Na <sub>2</sub> O	0.11	0.11	0.06	0.15	0.13	0.10	0.10	0.08	0.14	0.09	0.06	0.07	0.06	0.05	0.01	0.11	0.14	0.09	0.15	0.15	0.07	0.11	0.11	0.09	0.14	
K <sub>2</sub> O	10.10	10.00	8.98	9.92	10.12	10.03	9.95	10.14	9.74	9.41	9.92	9.66	9.64	9.59	9.19	9.28	9.64	9.92	10.00	9.86	10.03	9.76	9.92	9.97	9.80	
Cl	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.04	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	
F	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.10	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.13	0.04	0.07	0.04	0.00	0.01	0.01	0.07	0.02	0.01	0.00	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	
Total	98.64	99.06	97.18	98.28	97.96	98.56	98.46	98.37	98.08	98.34	97.30	96.19	96.96	97.60	96.69	97.00	97.76	97.39	97.76	96.65	97.14	96.44	97.83	98.17	99.04	
L <sub>ig</sub> Ocal	0.11	0.10	0.11	0.10	0.12	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.12	0.13	0.12	0.13	0.11	0.10	0.11	0.11	
FeOcal	18.06	18.34	16.84	18.30	18.58	18.14	17.73	17.88	17.91	18.65	17.14	17.99	17.67	18.07	18.63	17.77	17.61	17.30	16.88	17.67	16.94	16.87	16.13	16.82	17.42	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> cal	3.07	3.04	3.42	2.91	3.01	3.10	3.07	3.04	3.11	3.09	3.18	2.77	2.95	2.90	2.66	3.22	3.11	3.18	3.28	3.01	3.27	3.06	3.15	3.19	3.25	
Si	5.44	5.45	5.48	5.46	5.50	5.51	5.48	5.48	5.51	5.44	5.48	5.49	5.52	5.52	5.42	5.48	5.53	5.42	5.46	5.45	5.47	5.47	5.48	5.53	5.49	
Al <sup>IV</sup>	2.56	2.55	2.52	2.54	2.50	2.49	2.52	2.52	2.49	2.56	2.52	2.51	2.48	2.48	2.58	2.52	2.47	2.58	2.54	2.55	2.53	2.53	2.52	2.47	2.51	
T-site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	
VIAl	0.23	0.22	0.22	0.21	0.30	0.30	0.24	0.23	0.22	0.16	0.26	0.23	0.21	0.26	0.20	0.20	0.18	0.43	0.47	0.39	0.46	0.46	0.50	0.44	0.41	
Ti	0.44	0.42	0.44	0.40	0.37	0.37	0.41	0.42	0.40	0.41	0.44	0.34	0.36	0.31	0.31	0.42	0.41	0.38	0.39	0.36	0.39	0.32	0.33	0.32	0.34	
Fe <sup>2+</sup>	2.23	2.25	2.09	2.27	2.31	2.24	2.18	2.21	2.22	2.31	2.13	2.28	2.21	2.25	2.35	2.22	2.18	2.15	2.09	2.22	2.11	2.12	1.98	2.07	2.12	
Fe <sup>3+</sup>	0.34	0.34	0.38	0.32	0.34	0.34	0.34	0.34	0.35	0.34	0.36	0.31	0.33	0.32	0.30	0.36	0.35	0.36	0.36	0.34	0.37	0.35	0.35	0.35	0.36	
Mn	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.06	
Mg	2.26	2.32	2.32	2.35	2.16	2.26	2.35	2.29	2.33	2.39	2.25	2.45	2.47	2.48	2.56	2.37	2.42	2.12	2.09	2.16	2.09	2.25	2.32	2.30	2.27	
M-site	5.55	5.60	5.51	5.61	5.54	5.56	5.58	5.55	5.58	5.67	5.52	5.66	5.64	5.68	5.79	5.62	5.59	5.52	5.46	5.54	5.46	5.55	5.53	5.53	5.56	
Ca	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04
K	1.90	1.88	1.70	1.87	1.92	1.89	1.87	1.91	1.84	1.78	1.89	1.86	1.84	1.82	1.77	1.77	1.83	1.88	1.88	1.89	1.90	1.87	1.86	1.87	1.82	
Li	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	
A-site	2.00	1.97	1.89	1.98	2.03	1.99	1.96	2.00	1.95	1.88	1.97	1.95	1.92	1.91	1.85	1.87	1.93	1.98	2.00	2.02	2.00	1.97	1.96	1.96	1.93	
Fe/(Fe+Mg)	0.50	0.49	0.47	0.49	0.52	0.50	0.48	0.49	0.49	0.49	0.49	0.48	0.47	0.48	0.48	0.48	0.47	0.50	0.50	0.51	0.50	0.48	0.46	0.47	0.48	
Mg#	0.47	0.47	0.48	0.47	0.45	0.47	0.48	0.47	0.48	0.47	0.47	0.49	0.49	0.49	0.49	0.48	0.49	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.50	0.49	0.48	
Mglt(a. f. u)	1.10	1.13	1.13	1.14	1.04	1.10	1.15	1.11	1.13	1.16	1.09	1.19	1.21	1.21	1.25	1.15	1.18	1.02	1.00	1.04	1.00	1.09	1.13	1.12	1.10	
Feal(a. f. u)	1.42	1.42	1.37	1.42	1.39	1.35	1.37	1.40	1.41	1.48	1.37	1.38	1.37	1.34	1.41	1.43	1.41	1.27	1.22	1.30	1.23	1.19	1.11	1.18	1.24	
ACNK	1.44	1.45	1.50	1.43	1.43	1.45	1.45	1.43	1.43	1.50	1.46	1.45	1.44	1.48	1.55	1.51	1.41	1.58	1.56	1.51	1.55	1.57	1.59	1.54	1.56	

续表 1 (Continue Table 1)

分析参数	产轴黑云母伟晶岩										非产轴黑云母伟晶岩												
	1-1	1-2	1-3	1-7	1-8	3-1	3-2	3-4	68-1	68-3	68-4	68-6	1-1	1-2	1-4	1-5	1-10	1-11	51-1	51-2	51-3	51-4	51-7
SiO <sub>2</sub>	35.15	34.86	35.58	35.49	35.70	35.26	35.59	35.45	34.62	35.58	35.88	35.63	35.11	34.90	34.59	34.85	34.63	34.75	36.03	36.95	35.45	36.18	35.34
TiO <sub>2</sub>	2.85	2.93	3.08	3.38	3.45	3.07	2.82	3.01	2.65	3.04	3.20	2.76	3.53	3.53	3.53	3.62	3.54	3.73	3.56	3.78	2.51	3.18	3.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.09	16.08	15.82	15.99	16.07	15.64	15.84	16.11	15.81	15.73	16.60	16.53	18.37	18.18	18.23	18.60	18.46	18.58	17.32	17.17	16.04	16.68	16.43
FeO*	22.66	22.76	23.07	22.49	23.08	23.06	23.15	23.11	23.90	22.90	21.99	21.72	22.68	22.82	22.22	22.30	22.48	23.05	21.57	21.79	21.95	22.01	22.25
MnO	0.36	0.32	0.38	0.42	0.40	0.38	0.40	0.39	0.40	0.33	0.41	0.34	0.15	0.18	0.12	0.16	0.17	0.17	0.42	0.41	0.31	0.34	0.38
MgO	9.25	9.49	9.17	9.38	8.99	9.63	9.77	9.57	9.89	9.44	9.32	9.46	7.93	7.77	8.03	7.65	7.66	7.59	8.80	9.00	9.73	9.41	8.86
CaO	0.00	0.00	0.11	0.03	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.12	0.06	0.12	0.10	0.14	0.06	0.10	0.09	0.08	0.05	0.07	0.06	0.10	0.10	0.12	0.11	0.04	0.07	0.17	0.16	0.08	0.09	0.11
K <sub>2</sub> O	9.59	9.86	9.36	9.56	9.85	9.72	9.63	9.79	8.83	9.89	10.06	10.10	9.92	9.63	9.66	9.82	9.95	9.28	9.78	9.68	9.86	9.93	10.04
Cl	0.04	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
F	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10	0.02	0.12	0.05	0.12	0.06	0.07	0.12	0.01	0.11	0.00	0.09	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.09	0.11	0.08	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	96.24	96.41	96.86	96.90	97.84	96.91	97.46	97.64	96.22	97.10	97.53	96.70	97.86	97.16	96.56	97.14	96.97	97.27	97.76	99.04	96.05	97.93	96.86
Li <sub>2</sub> Oeal	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.17	0.17	0.16	0.17	0.17	0.18	0.14	0.14	0.12	0.13	0.14
FeOeal	20.32	20.74	20.44	19.89	20.54	20.88	20.94	20.90	21.71	20.60	19.45	19.39	19.77	19.83	19.34	19.30	19.59	19.84	18.64	18.63	19.79	19.33	19.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> cal	2.60	2.25	2.92	2.88	2.82	2.42	2.45	2.45	2.43	2.57	2.83	2.59	3.22	3.32	3.19	3.32	3.21	3.57	3.25	3.51	2.41	2.98	2.75
Si	5.39	5.35	5.41	5.38	5.39	5.38	5.39	5.37	5.32	5.41	5.39	5.41	5.26	5.26	5.24	5.24	5.23	5.22	5.37	5.42	5.43	5.41	5.37
Al <sup>IV</sup>	2.61	2.65	2.59	2.62	2.61	2.62	2.61	2.63	2.68	2.59	2.61	2.59	2.74	2.74	2.76	2.76	2.77	2.78	2.63	2.58	2.57	2.59	2.63
T-site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
V <sub>1</sub> Al	0.29	0.25	0.25	0.24	0.24	0.19	0.22	0.24	0.19	0.23	0.33	0.37	0.50	0.49	0.50	0.54	0.52	0.51	0.42	0.40	0.32	0.35	0.32
Ti	0.33	0.34	0.35	0.39	0.39	0.35	0.32	0.34	0.31	0.35	0.36	0.31	0.40	0.40	0.40	0.41	0.40	0.42	0.40	0.42	0.29	0.36	0.38
Fe <sup>2+</sup>	2.60	2.66	2.60	2.52	2.59	2.66	2.65	2.65	2.79	2.62	2.44	2.46	2.48	2.50	2.45	2.43	2.48	2.49	2.33	2.29	2.53	2.42	2.51
Fe <sup>3+</sup>	0.30	0.26	0.33	0.33	0.32	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29	0.32	0.30	0.36	0.38	0.36	0.38	0.36	0.40	0.36	0.39	0.28	0.33	0.31
Mn	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05
Mg	2.11	2.17	2.08	2.12	2.02	2.19	2.21	2.16	2.27	2.14	2.09	2.14	1.77	1.75	1.81	1.72	1.72	1.70	1.96	1.97	2.22	2.10	2.01
M-site	5.68	5.72	5.66	5.65	5.62	5.73	5.74	5.72	5.88	5.68	5.60	5.62	5.53	5.54	5.54	5.49	5.51	5.55	5.52	5.51	5.68	5.60	5.58
Ca	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.04	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.05	0.05	0.02	0.03	0.03
K	1.88	1.93	1.82	1.85	1.90	1.89	1.86	1.89	1.73	1.92	1.93	1.96	1.89	1.85	1.87	1.88	1.92	1.78	1.86	1.81	1.93	1.89	1.95
Li	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.09	0.08	0.07	0.08	0.09
A-site	1.99	2.02	1.95	1.96	2.02	1.98	1.97	1.99	1.83	2.01	2.03	2.05	2.03	1.99	2.00	2.02	2.04	1.91	2.00	1.94	2.02	2.00	2.07
Fe/(Fe+Mg)	0.55	0.55	0.56	0.54	0.56	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.54	0.53	0.58	0.59	0.57	0.59	0.59	0.59	0.54	0.54	0.53	0.54	0.56
Mg#	0.42	0.43	0.41	0.43	0.41	0.43	0.43	0.42	0.42	0.42	0.43	0.44	0.38	0.38	0.39	0.38	0.38	0.37	0.42	0.42	0.44	0.43	0.42
Mg/(a.f.u)	1.02	1.05	1.00	1.02	0.97	1.06	1.07	1.04	1.10	1.03	1.00	1.03	0.83	0.82	0.86	0.81	0.81	0.80	0.94	0.94	1.07	1.01	0.96
Feal(a.f.u)	1.49	1.52	1.54	1.53	1.55	1.58	1.54	1.54	1.62	1.54	1.42	1.37	1.38	1.40	1.37	1.35	1.37	1.41	1.36	1.37	1.41	1.40	1.47
ACNK	1.52	1.49	1.52	1.52	1.47	1.47	1.49	1.50	1.63	1.46	1.51	1.50	1.68	1.72	1.71	1.72	1.70	1.83	1.59	1.60	1.48	1.53	1.49

续表 1 (Continue Table 1)

分析参数	非产铀黑云母伟晶岩														二云母伟晶岩						
	51-8	51-9	51-10	51-11	51-12	2-1	2-2	2-7	2-8	2-11	2-13	2-14	2-15	2-16	2-17	2-18	6-3	6-4	7-2	7-3	7-6
SiO <sub>2</sub>	35.62	35.79	36.26	35.76	35.79	34.85	34.95	34.85	34.96	35.83	35.02	34.06	34.99	34.99	35.00	35.07	33.70	33.91	33.56	34.01	34.21
TiO <sub>2</sub>	3.38	3.34	3.32	3.27	3.29	3.18	3.71	3.50	3.58	3.04	3.41	3.41	3.27	3.32	3.94	4.10	3.55	3.53	2.80	3.35	3.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.89	16.84	16.81	16.75	17.04	17.26	16.61	16.92	17.11	17.59	17.13	17.12	17.73	17.60	16.68	16.37	17.44	17.67	18.20	18.33	18.11
FeO <sup>1</sup>	22.44	22.67	22.93	22.00	21.78	23.91	23.99	24.38	24.11	24.61	23.75	23.62	24.67	24.11	24.02	24.07	24.21	24.13	24.01	23.77	23.45
MnO	0.39	0.41	0.34	0.40	0.40	0.30	0.28	0.26	0.27	0.32	0.29	0.33	0.41	0.44	0.38	0.33	0.47	0.46	0.43	0.46	0.49
MgO	8.77	8.84	8.86	8.20	8.84	6.96	6.88	6.86	6.46	7.25	6.86	6.71	6.34	6.70	7.15	6.71	6.15	6.91	7.66	7.33	7.14
CaO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.12	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.05	0.08	0.10	0.07	0.09	0.13	0.13	0.09	0.09	0.20	0.25	0.27	0.13	0.10	0.13	0.11	0.08	0.07	0.16	0.10	0.09
K <sub>2</sub> O	9.92	9.74	9.75	9.98	9.95	9.89	9.72	9.71	9.71	8.86	9.60	9.22	9.94	9.69	9.92	9.89	10.03	10.01	8.57	9.27	10.08
Cl	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.04	0.07	0.08	0.12	0.03	0.01	0.02	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03
F	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.08	0.04	0.09	0.01	0.11	0.00	0.08	0.01	0.00	0.08	0.03	0.02	0.00	0.06	0.00	0.06	0.00	0.05	0.00	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.01
Total	97.55	97.83	98.43	96.54	97.21	96.65	96.33	96.71	96.36	97.77	96.59	95.11	97.53	96.99	97.30	96.69	95.78	96.72	95.48	96.67	97.27
LigOcal	0.14	0.14	0.14	0.16	0.14	0.20	0.20	0.20	0.22	0.19	0.20	0.21	0.23	0.21	0.19	0.21	0.24	0.20	0.17	0.19	0.19
FeOcal	19.72	19.87	20.05	19.14	19.03	21.12	21.00	21.43	20.98	21.25	20.79	20.74	21.73	21.07	21.15	21.02	21.56	21.59	21.16	20.87	20.81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> cal	3.02	3.10	3.20	3.18	3.06	3.10	3.32	3.28	3.48	3.74	3.28	3.20	3.26	3.37	3.20	3.39	2.94	2.82	3.16	3.22	2.93
Si	5.36	5.37	5.40	5.43	5.38	5.34	5.36	5.34	5.35	5.37	5.35	5.29	5.32	5.32	5.33	5.37	5.24	5.21	5.18	5.19	5.21
Aliv	2.64	2.63	2.60	2.57	2.62	2.66	2.64	2.66	2.65	2.63	2.65	2.71	2.68	2.68	2.67	2.63	2.76	2.79	2.82	2.81	2.79
T-site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
VAl	0.36	0.35	0.35	0.42	0.40	0.45	0.36	0.39	0.44	0.48	0.43	0.42	0.49	0.48	0.32	0.32	0.44	0.41	0.49	0.48	0.45
Ti	0.38	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37	0.43	0.40	0.41	0.34	0.39	0.40	0.37	0.38	0.45	0.47	0.42	0.41	0.33	0.38	0.41
Fe <sup>2+</sup>	2.48	2.49	2.50	2.43	2.39	2.71	2.69	2.74	2.69	2.66	2.66	2.69	2.76	2.68	2.69	2.69	2.80	2.77	2.73	2.66	2.65
Fe <sup>3+</sup>	0.34	0.35	0.36	0.36	0.35	0.36	0.38	0.38	0.40	0.42	0.38	0.37	0.37	0.39	0.37	0.39	0.34	0.33	0.37	0.37	0.34
Mn	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Mg	1.97	1.98	1.97	1.86	1.98	1.59	1.57	1.57	1.47	1.62	1.56	1.55	1.44	1.52	1.62	1.53	1.42	1.58	1.76	1.67	1.62
M-site	5.58	5.60	5.59	5.49	5.55	5.51	5.48	5.51	5.45	5.58	5.46	5.49	5.48	5.50	5.50	5.44	5.49	5.56	5.73	5.62	5.53
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.06	0.07	0.08	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02	0.05	0.03	0.03
K	1.91	1.86	1.85	1.93	1.91	1.93	1.90	1.90	1.90	1.70	1.87	1.83	1.93	1.88	1.93	1.93	1.99	1.96	1.69	1.80	1.96
Li	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.13	0.14	0.13	0.12	0.13	0.14	0.12	0.11	0.11	0.12
A-site	2.01	1.97	1.97	2.05	2.02	2.09	2.07	2.05	2.06	1.87	2.09	2.07	2.10	2.04	2.08	2.09	2.16	2.10	1.84	1.95	2.10
Fe/(Fe+Mg)	0.56	0.56	0.56	0.57	0.55	0.63	0.63	0.64	0.65	0.62	0.63	0.63	0.66	0.64	0.62	0.64	0.66	0.64	0.61	0.62	0.62
Mg#	0.41	0.41	0.41	0.40	0.42	0.34	0.34	0.33	0.32	0.34	0.34	0.34	0.31	0.33	0.35	0.33	0.31	0.34	0.36	0.35	0.35
MgI(a.f.u)	0.94	0.95	0.94	0.88	0.95	0.73	0.72	0.72	0.67	0.75	0.72	0.71	0.65	0.70	0.75	0.70	0.64	0.73	0.83	0.78	0.75
FeII(a.f.u)	1.45	1.46	1.46	1.40	1.38	1.51	1.59	1.58	1.55	1.49	1.51	1.54	1.53	1.51	1.62	1.64	1.59	1.58	1.50	1.50	1.50
ACNK	1.56	1.58	1.57	1.53	1.56	1.58	1.54	1.59	1.60	1.78	1.57	1.62	1.62	1.65	1.53	1.50	1.59	1.61	1.91	1.80	1.64

成分。而产铀黑云母伟晶岩中黑云母相对于非产铀黑云母伟晶岩具有较低的  $\text{FeO}^*$  和  $\text{TiO}_2$ 。

### 3.2 晶格替换特征

研究表明,八面体中的  $\text{Al}^{3+}$  可以被  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Li}^+$  等离子通过等价或不等价替换,而等价替换带来的电荷差又常常被四面体位中  $\text{Al}^{3+}$  替换  $\text{Si}^{4+}$  所平衡,这些离子间的替换可以提供云母结晶时的信息<sup>[16]</sup>。

所有样品中黑云母的八面体位占位值(M)较高,为 5.44~5.88,说明样品中黑云母均属于三八面体云母( $>5$ )<sup>[17]</sup>,又明显偏离了三八面体的理论趋势(图 4),说明黑云母的组成元素间存在着离子

替换。相对于金云母-铁云母固溶体的理论趋势 $[\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2-\text{KAl}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_2(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_2]$ ,样品中黑云母  $\text{Al}_{\text{tot}}$  较高,暗示离子间可能主要存在着以下耦合置换: ${}^{\text{IV}}\text{Al}^{3+} + {}^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} - {}^{\text{VI}}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})^{2+} + {}^{\text{IV}}\text{Si}^{4+}$ 。同时还可能存在着少量如下置换 ${}^{\text{IV}}\text{Ti}^{4+} + {}^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} - {}^{\text{IV}}\text{Al}^{3+} + {}^{\text{IV}}\text{Si}^{4+}$ ,  ${}^{\text{VI}}(\text{Mg}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+}) + 2 * {}^{\text{IV}}\text{Si}^{4+} - 2 * {}^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} + {}^{\text{IV}}\text{Ti}^{4+}$ (如图 5 所示),但灰池子二长花岗岩以及产铀黑云母伟晶岩中黑云母投影点均位于大毛沟白岗岩-非产铀黑云母伟晶岩-二云母伟晶岩组成的趋势线之外(图 5),表明其离子间替换方式又有所区别,暗示黑云母结晶时其源岩成分或环境具有

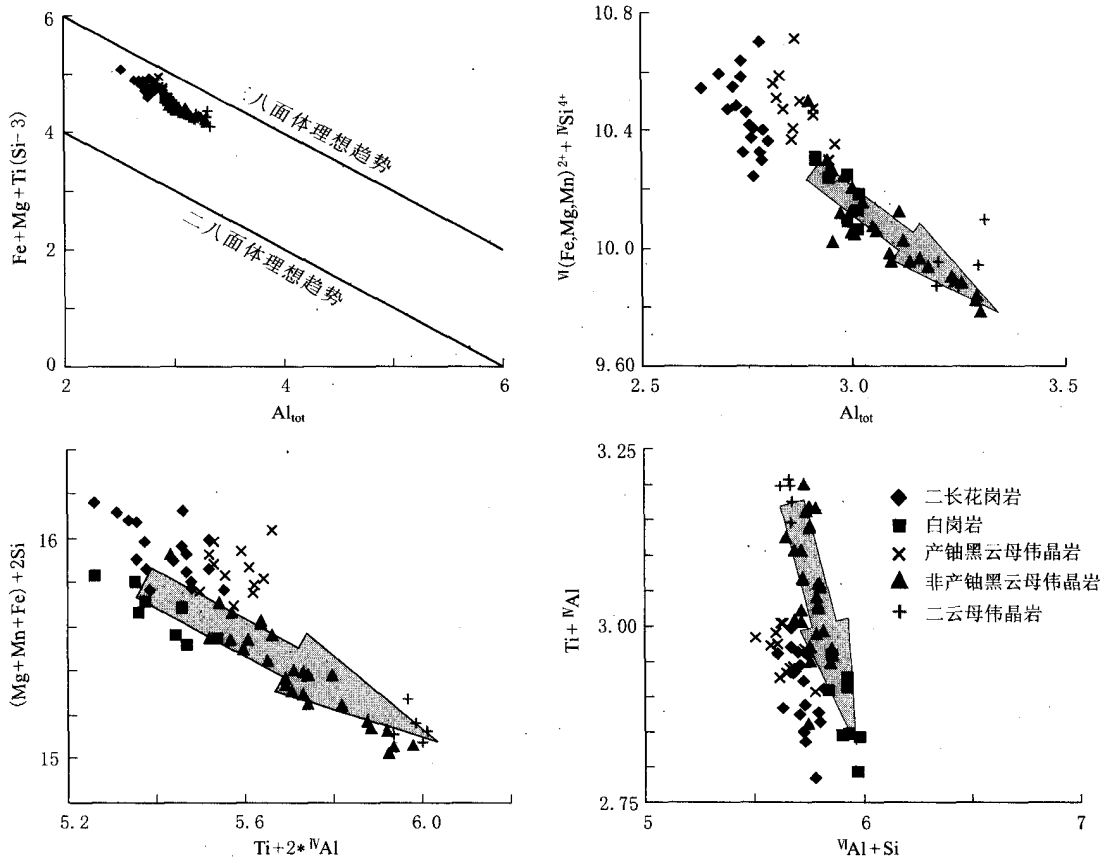


图 4 黑云母的离子替换图解

Fig. 4 Ion substitution diagrams of biotite

明显差异。

### 3.3 氧逸度特征

氧逸度是研究岩浆演化过程中物理化学条件的重要参数之一。研究表明文象伟晶岩通常在矿物呈分带和未分带伟晶岩之间,代表了转变为蒸汽相饱和的状态<sup>[18]</sup>,而黑云母伟晶岩和二云母伟晶岩没有文象状结构和矿物分带现象,而文象结构和矿物分带现象在演化更晚期的白云母伟晶岩阶段才出现,因此本次研究中的黑云母伟晶岩和二云母伟晶岩应该在水未饱和的情况下结晶的,可以将其中的黑云

母视为岩浆原生黑云母,因此可以利用黑云母矿物化学估算云母结晶时岩浆的氧逸度。

本研究利用 Wones 和 Eugster<sup>[19]</sup>提出的  $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$  三角图解来估计岩浆的氧逸度。可以看出在图解上(图 5),所有样品的黑云母投影点均接近 NNO 缓冲剂附近,但产铀黑云母伟晶岩中黑云母的投影点明显更靠近 NNO 缓冲线(部分投影点还位于 NNO 缓冲线之下),暗示其黑云母结晶时岩浆具有更低的氧逸度。另一方面,相对于不产铀黑云母伟晶岩,产铀黑云母伟晶岩中黑云母 Mg 的富



集,也暗示了更低氧逸度环境,这可能是由于同化或重熔了更多的变质沉积物<sup>[20]</sup>。

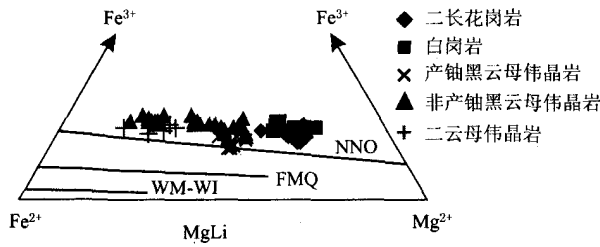


图 5 黑云母的氧逸度图解(底图据 Wones D, et al. 1965<sup>[19]</sup>)

Fig. 5  $Fe^{2+}$ - $Fe^{3+}$ -Mg ternary diagram for the estimation of redox conditions of biotites. Lines represent  $f_{O_2}$  buffers (after Wones D, et al 1965<sup>[19]</sup>)

## 4 讨论

### 4.1 岩浆演化及源区特征

伟晶岩与花岗岩类在结构构造、地球化学特征、空间产出等方面具有密切的关系,因此有关花岗岩与伟晶岩的关系的研究一直是伟晶岩研究中重要的一个环节。产铀伟晶岩类与相关花岗岩类之间的关系同样存在着不小的争议<sup>[2,5,21,22]</sup>。本研究区有关伟晶岩围绕着花岗岩与伟晶岩之间的关系目前的认识主要有两种:一种认识基于灰池子片麻状花岗岩类与伟晶岩的产出具有密切的空间关系等地质事实,认为伟晶岩类与花岗岩类具有直接的成因联系,大毛沟白岗质岩株及伟晶岩是由灰池子二长花岗岩的分离结晶演化而来<sup>[2,5]</sup>。另一种认识基于元素地球化学研究,认为灰池子二长花岗岩与大毛沟岩株及伟晶岩不存在分离结晶关系,可能是由别的地质体演化而来,花岗岩与伟晶岩类可能仅是热源相同<sup>[3,4]</sup>。

通过本次研究,我们认为花岗岩与白岗岩和伟晶岩不存在分离结晶关系,同时我们还发现产铀黑云母伟晶岩与大毛沟白岗岩、不产铀黑云母伟晶岩及二云母伟晶岩也不能用简单的演化关系来解释。原因如下:

(1)研究表明黑云母的成分可以反映岩浆性质<sup>[23-25]</sup>,在 Abdel-Rahman<sup>[23]</sup>提出的图解(图 6)上,尽管灰池子花岗岩、大毛沟白岗岩以及产铀伟晶岩位于钙碱性区,而不产铀黑云母伟晶岩及二云母伟晶岩则完全位于过铝质区,暗示灰池子花岗岩、大毛沟白岗岩和产铀伟晶岩岩浆可能具有更多的基性组分。

(2)Tischendorf 等<sup>[15]</sup>利用大量的云母数据拟合出了岩浆云母的理论演化曲线。从图 6 上非产铀

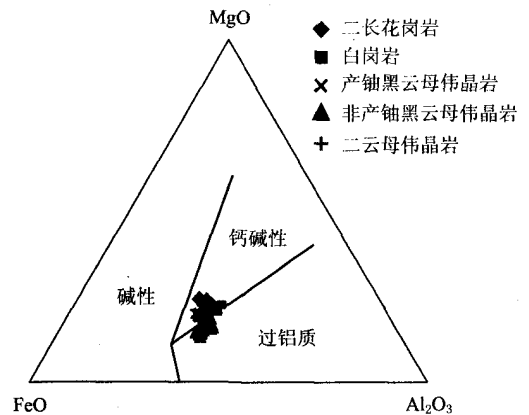
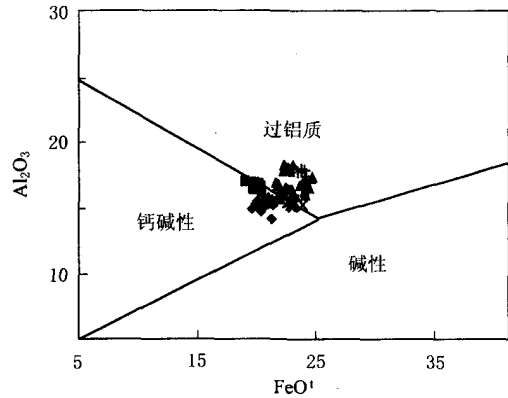


图 6 岩浆性质判别图(底图据 Lalonde A E, et al<sup>[24]</sup>)

Fig. 6 Discrimination diagram for the magma character (after Lalonde A E, et al<sup>[24]</sup>)

伟晶岩与大毛沟白岗质岩株以及二云母伟晶岩构成一条平行于理论演化路径的演化线,暗示其均位于同一个演化趋势上,而灰池子二长花岗岩和产铀伟晶岩均位于这个趋势之外,暗示灰池子二长花岗岩和产铀黑云母伟晶岩不属于该岩浆演化,其源岩或结晶环境可能有较大差异。

(3)云母类的置换跟岩浆成分及结晶环境等有关。尽管本次研究的所有云母的原子的置换的方式总体上是一致的。在离子替换关系图解上(图 4),大毛沟白岗岩-非产铀黑云母-二云母伟晶岩的趋势大体上一致,代表了伟晶岩演化过程的置换方式是一致的。但是,这些图解中灰池子二长花岗岩和产铀黑云母伟晶岩明显偏离了这个趋势,表明灰池子二长花岗岩和产铀黑云母伟晶岩置换方式与大毛沟白岗岩-非产铀黑云母-二云母伟晶岩又有所差别,暗示黑云母结晶时其源岩成分或环境具有明显差异。

因此,认为二长花岗岩与白岗岩、伟晶岩不存在明显的分离结晶关系,同时产铀伟晶岩与大毛沟白岗岩、不产铀伟晶岩及二云母伟晶岩不完全属于演化关系。但空间和成分上产铀伟晶岩与非产铀伟晶岩又较为相似,因此又不能排除它们之间确实存在成分或演化上的联系。

## 4.2 对铀成矿的启示

野外地质观察和显微镜下鉴定均表明,伟晶岩型铀矿床中黑云母与晶质铀矿的产出具有很密切的关系:晶质铀矿常与黑云母密切共生,相镶入其内或紧临其边,但并不是所有的黑云母伟晶岩均为产铀黑云母伟晶岩;产铀黑云母伟晶岩与非产铀黑云母伟晶岩在矿物组成上没有太大区别,但产铀黑云母伟晶岩中黑云母通常呈现大面积团块状聚集,而非产铀伟晶岩中黑云母通常呈自形颗粒均匀分布于伟晶岩中。本次研究还发现产铀伟晶岩中的黑云母相对于非产铀伟晶岩,具有富 Mg, Mn, 贫 Al 以及低 ACNK 等特点。那么造成黑云母结构和成分上这种差异性的原因是什么? 解决这个问题对于伟晶岩型铀矿的成因研究和找矿勘查有着重要的作用。

研究表明岩浆源中生岩浆矿物成分的变化主要通过 3 种方式:分离结晶、岩浆混合以及同化混染作用<sup>[26]</sup>。然而,无论是分离结晶还是岩浆混合,均无法解释唯有产铀黑云母伟晶岩中黑云母明显偏离了伟晶岩类中黑云母的演化特征范围,同时也无法解释产铀伟晶岩中黑云母大量团块状的产出原因。基于本次研究,我们认为伟晶岩与围岩的同化混染作用可能是控制产铀黑云母伟晶岩产出的关键所在,证据如下:

首先,黑云斜长片麻岩围岩对产铀伟晶岩的产出具有控制作用。大量的地质现象表明无论是在光石沟还是在别的伟晶岩型铀矿床中,侵入到富黑云母的片麻岩中的伟晶岩往往富集黑云母。产铀黑云母多呈脉状和团块状产出于伟晶岩与黑云斜长片麻岩的接触带附近,常表现出混合状,国外也常称为“复杂”黑云母伟晶岩,这种复杂伟晶岩具有较高的铀含量<sup>[27]</sup>。光石沟铀矿化主要产在伟晶状花岗岩内外接触带中,在伟晶状花岗岩与片麻状花岗岩及混合岩三种岩性接触处的混染带上矿化最富。同时在靠近片麻岩的产铀黑云母伟晶岩中我们也观察发现捕虏晶产出,但在远离片麻岩的时捕虏晶逐渐消失。以上这些现象均表明富黑云母的片麻岩对于产铀伟晶岩的产出具有重要的控制作用。

其次,产铀伟晶岩中黑云母呈团块状聚集也是由同化混染反应造成。研究表明矿物的结构特征不仅可以反应晶体的生长环境,还可能记录了溶解或变形事件,矿物集合体的大量富集可能代表岩浆同化了围岩富集而成<sup>[28,29]</sup>。手标本和薄片下云母、角闪石等矿物呈团块状等集合体大量产出可能是代表主岩与围岩同化反应未完成的标志<sup>[28]</sup>。在光石沟铀矿床中,非产铀伟晶岩多远离围岩,其中黑云母

通常呈自形小颗粒均匀分布,这可能代表了正常伟晶岩浆结晶出的黑云母;而产铀黑云母伟晶岩多出于黑云母伟晶岩与围岩接触部位,其中黑云母通常呈现大面积团块状聚集,这可能代表了伟晶岩与围岩——黑云母斜长片麻岩的同化反应的结果,同时也暗示了这种同化反应对铀成矿的控制作用。

最后,产铀与非产铀黑云母伟晶岩中黑云母的成分特征差异可能是由同化混染反应导致。Erdmann 等<sup>[30]</sup>的实验研究表明,主岩的温度或组成决定了围岩的同化混染的方式。当温度在 700 °C 以下时,同化混染主要通过矿物的选择性分解的方式进行<sup>[31]</sup>,本次研究中伟晶岩的温度低于 700 °C (二长石温度计),因此同化混染反应发生时,围岩中的黑云母、角闪石等易分解矿物会首先发生分解<sup>[28]</sup>,生成的 Mg, Fe, Mn 等元素大多进入新生成的黑云母或铁镁矿物之中,造成新生的黑云母具有富 Mg, Fe, Mn, 贫 Al 等特点,然而本次研究发现产铀伟晶岩中黑云母边上(特别是有晶质铀矿床产出时)常具有自形黄铁矿(FeS)产出,这可能代表围岩中黑云母分解生成的 Fe 大部分进入到黄铁矿中,这可能是产铀伟晶岩中黑云母相对于非产铀黑云母 Fe 含量不高的主要原因。另一方面,同化混染反应的速度取决于温度、熔体的组成和粘度、熔体中的化学扩散速度等,后续的伟晶岩由于温度较低,离子的化学扩散速度降低且远离围岩等原因,并未同黑云斜长片麻岩发生大规模的同化混染反应,加上之前结晶出了大量晶质铀矿,导致岩浆中 U 元素大量减少,因此后续的伟晶岩不产出伟晶岩型铀矿床。

综上所述,通对产铀与非产铀黑云母伟晶岩中黑云母在产出部位、结构构造以及成分上的对比研究,我们认为产铀伟晶岩是由大毛沟白岗岩演化晚期的残余岩浆与围岩黑云斜长片麻岩发生了同化混染作用形成的。而正是这种混染反应造成了产铀伟晶岩中黑云母的团块状集合体大规模产出,造成氟含量的大量减少,同时由于岩浆温度、氧逸度等降低,形成化学效应差,铀大量向混合部分岩浆聚集,导致晶质铀矿大量产出,形成了伟晶岩型铀矿床。

## 5 结 论

5.1 光石沟铀矿床中相关花岗岩和伟晶岩类中黑云母均具有富铁、钛,贫挥发性组分氟、氯等特征,均属于铁云母。

5.2 产铀黑云母伟晶岩中黑云母相对于非产铀黑云母伟晶岩具有更高的 Mg、Mn, 低的 Al 和 AC-

NK, 暗示其岩浆具有更多的基性成分。

5.3 所有样品的黑云母投影点均位于 NNO 缓冲剂附近, 产铀黑云母伟晶岩具有更低的氧逸度。

5.4 灰池子二长花岗岩与白岗岩、伟晶岩不存在分离结晶关系, 白岗岩和伟晶岩并不是由灰池子二长

花岗岩分离结晶而来。

5.5 伟晶岩与围岩黑云斜长片麻岩之间的同化混染作用不仅控制了产铀伟晶岩中黑云母独特的结构构造以及物质组成, 更是伟晶岩型铀矿产出的关键因素。

## 参考文献

- [1] 栾世伟, 秦东稀有元素花岗伟晶岩某些地球化学特征[J]. *地球化学*, 1979, 4: 322-330.
- [2] 万吉, 高立宝, 王莲香, 商丹三角地区伟晶岩花岗岩型铀成矿环境研究及远景评价[J]. *铀矿地质*, 1992, 8(5): 257-263.
- [3] 曾令交, 金景福. 光石沟花岗岩伟晶岩的成岩物质来源和形成方式定量模拟[J]. *西北地质*, 1994a, 15(04): 16-20.
- [4] 冯明月, 戎嘉树, 孙志富, 等. 北秦岭伟晶岩型铀矿[M]. 北京: 原子能出版社, 1996: 135-240.
- [5] 沙亚洲, 左文乾. 光石沟铀矿床含矿与非含矿伟晶岩差异性研究[J]. *西北铀矿地质*, 2007, 33(01): 24-31.
- [6] 左文乾, 沙亚洲, 陈冰, 等. 丹凤地区光石沟铀矿床大毛沟岩株锆石 U-Pb 同位素定年及其地质意义[J]. *铀矿地质*, 2010, 26(4): 222-227
- [7] Cerny P, Burt D M. Paragenesis, crystallochemical characteristics, and geochemical evolution of the micas in granite pegmatites[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1984, 13(1): 257-297.
- [8] Roda-Robles E, Pesquera P A, Roldan F V. Micas of the muscovite-lepidolite series from the Fregeneda pegmatites (Salamanca, Spain)[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1995, 55(1): 145-157.
- [9] Brigatti M F, Frigieri P, Ghezzi C, et al. Crystal chemistry of Al-rich biotites coexisting with muscovites in peraluminous granites[J]. *American Mineralogist*, 2000, 85(3-4): 436-448.
- [10] 李伍平, 王涛, 王晓霞, 等. 北秦岭灰池子复式岩体单颗粒锆石年龄[J]. *中国区域地质*, 2000, 19(2): 172-174.
- [11] 林文蔚, 彭丽君. 由电子探针分析数据估算角闪石, 黑云母中的 Fe~(3+), Fe~(2+)[J]. *长春地质学院学报*, 1994, 24(02): 155-162.
- [12] Tischendorf G, Rieder M, Forster H J, Gottesmann B and Guidotti CV. A new graphical presentation and subdivision of potassium micas [J]. *Mineralogical Magazine*, 2004, 68(4): 649-667.
- [13] Stone D. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River area, northwest Superior Province, Ontario, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2000, 38(2): 455-470.
- [14] Foster M D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. Geological survey professional paper 354-B. 1960.
- [15] Tischendorf G, Forster H J, Gottesmann B and Rieder M. True and brittle micas; composition and solid-solution series[J]. *Mineralogical Magazine*, 2007, 71(3): 285-320.
- [16] Brigatti M F, Guggenheim S. Mica crystal chemistry and the influence of pressure, temperature, and solid solution on atomistic models[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 46(1): 1-97.
- [17] Rieder M, Cavazzini G, D'yakonov Y S, et al. Nomenclature of the micas[J]. *Mineralogical Magazine*, 1999, 63(2): 267-279.
- [18] Lentz D, Fowler A. A dynamic model for graphic quartz-feldspar intergrowths in granitic pegmatites in the southwestern Grenville Province 这[J]. *Canadian Mineralogist*, 1992, 30: 571-585.
- [19] Wones D, Eugster H. Stability of biotite: experiment, theory and application[J]. *American Mineralogist*, 1965, 50: 1228-1273.
- [20] Shabani A T, Lalonde A E, J B. Composition of biotite from granitic rocks of the Canadian appalachian orogen; a potential tectonomagmatic indicator? [J]. *Canadian Mineralogist*, 2003, 41(6): 1 381-1 396.
- [21] Martin H, Porada H. The intracratonic branch of the Damara Orogen in South West Africa II. Discussion of relationships with the Pan-African mobile belt system[J]. *Precambrian Research*, 1977, 5(4): 339-357.
- [22] Sen J, Ranganath N, Rathaiah Y V, et al. Petrography and geochemistry of uranium mineralised Precambrian granitic-pegmatitic rocks of Mawlait, West Khasi Hills district, Meghalaya[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2009, 74(5): 639-645.
- [23] Lalonde A E, Bernard P. Composition and color of biotite from granites; two useful properties in characterization of plutonic suites from the Hepburn internal zone of Wopmay Orogen, Northwest Territories[J]. *Canadian Mineralogist*, 1993, 31: 203-217.
- [24] Abdel-Rahman AFM. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 1994, 35(2): 525-541.
- [25] Machev P, Klain L, Hecht L. Mineralogy and chemistry of biotites from the Belogradchik pluton - some petrological implications for granitoid magmatism in North-West Bulgaria[J]. *Annual Scientific Conference, Geology*, 2004, 16-17.
- [26] Davies G R, Halliday A N. Development of the Long Valley rhyolitic magma system; strontium and neodymium isotope evidence from glasses and individual phenocrysts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(21-22): 3 561-3 574.
- [27] Lentz D. U, Mo and REE mineralization in late-tectonic granitic pegmatites, southwestern Grenville Province, Canada[J]. *Ore Geology Reviews*, 1996, 11(4): 197-227.
- [28] Beard J S, Ragland P C, Crawford M L. Reactive bulk assimilation: A model for crust-mantle mixing in silicic magmas[J]. *Geology*, 2005, 33

(8);681-684.

- [29] Clarke D B. Assimilation of xenocrysts in granitic magmas: principles, processes, proxies, and problems[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2007, 45(1):5-30.
- [30] Erdmann S, London D, Morgan G B, *et al.* The contamination of granitic magma by metasedimentary country-rock material: an experimental study[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2007, 45(1):43-61.
- [31] Farris D W, Paterson S R. Contamination of silicic magmas and fractal fragmentation of xenoliths in Paleocene plutons on Kodiak Island, Alaska[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2007, 45(1):107-129.

## MINERAL CHEMISTRY OF BIOTITE AND ITS IMPLICATIONS FOR URANIUM MINERALIZATION IN GUANGSHIGOU PEGMATITE-TYPE URANIUM DEPOSIT, SOUTH SHAANXI PROVINCE

CHEN You-wei<sup>1</sup>, BI Xian-wu<sup>1</sup>, HU Rui-zhong<sup>1</sup>, DONG Shao-hua<sup>1</sup>  
CHENG De-jin<sup>2</sup>, FENG Zhang-sheng<sup>2</sup>

1. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;*  
2. *No. 224 Geologic Group of Shaanxi Provincial Geological Bureau of Nuclear Industry, Xi'an 710024, China*

**Abstract:** Biotite is one of the important minerals in the pegmatite-type uranium deposits. It not only exists in the pegmatites and granites which have close relationship with uranium mineralization, but also is closely related with the main uranium mineral in the deposit. Biotite in the granites, alaskites and pegmatites closely related with the Guangshigou pegmatite-type uranium deposit is selected as the research subject. Based on the mineral chemistry of biotite analyzed by EMPA, it is showed that all the biotites are characterized by rich in Mg and Mn, deplete in Ca and the volatile constituents F and Cl. The biotite in U-bearing biotite pegmatites is characterized by higher content in Mg, Mn and lower in Al, ACNK and oxygen fugacity, compared to other biotite pegmatite. The results show that the alaskites and pegmatites are not from the fractional crystallization of the Huichizhi monzonite granite. It is also evidenced that the assimilation between the pegmatites and wall rock not only control the special structure and composition of biotite in U-bearing pegmatites, but also the key factor in forming of pegmatite-type uranium deposit.

**Key words:** pegmatite-type uranium deposit; biotite; mineral chemistry; contamination; Guangshigou