

湖南瑶岗仙花岗岩体中包体的地质地球 化学特征与岩浆演化

祝新友¹, 王艳丽², 程细音¹, 田野¹

(1. 北京矿产地质研究院, 北京 100012; 2. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012)

摘要: 湖南瑶岗仙钨矿床与成矿有关的碱长花岗岩岩株中发育多种类型包体, 包括花岗岩、石英闪长斑岩、黑色包体及云英岩析离体等。这些包体的地质地球化学性质不同, 来源和演化路径不同, 记载着瑶岗仙花岗岩成因和岩浆分异演化的历史。对这些包体岩石学、地球化学的研究, 结合岩体本身和区域燕山早期花岗岩基的对比研究, 明确了花岗岩包体(I b)来自深部岩浆房中早期结晶的花岗岩, 性质与区域花岗岩相近; 石英闪长斑岩和黑色包体为前寒武纪变质岩在重熔时的残留; 云英岩析离体是由花岗岩I的岩浆晚期进一步分异形成的浆液过渡态流体结晶沉淀而成; 产于石英斑岩中的细粒黑云母花岗岩包体(III b)捕获自岩浆房中分异的补体或补体上升时初步分异形成的花岗岩。形成瑶岗仙岩体的花岗岩高度富含挥发分, 致使其中的包体强烈同化混染, 并富含萤石、云母、电气石等以及硫化物矿物。瑶岗仙岩体是区域花岗岩基所代表的岩浆房高度分异的岩浆上侵的产物, 石英斑岩岩浆直接来自于岩浆房结晶分异残留岩浆, 而非瑶岗仙岩体的分异产物。建立了瑶岗仙地区燕山早期岩浆演化序列: 岩浆房主体(二长花岗岩)→细粒黑云母花岗岩(补体)→碱长花岗岩岩株→浆液过渡态流体成矿→石英斑岩脉侵入。

关键词: 湖南省; 花岗岩; 钨矿; 捕虏体; 岩浆演化

中图分类号: P588.12⁺1; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)01-0016-17

Geological and geochemical characteristics of xenoliths in Yaogangxian granite, Hunan Province

ZHU Xin-you¹, WANG Yan-li², CHENG Xi-yin¹ and TIAN Ye¹

(1. Beijing Institute of Geology and Mineral Resources, Beijing 100012, China; 2. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

Abstract: There are several types of xenoliths, such as monzonite, quartz diorite porphyry, black rock and greisen schlieren, in the alkali feldspar granite of the Yaogangxian tungsten deposit, Hunan Province. The xenoliths are different in geological and geochemical characteristics, sources and evolution paths, which implies the genesis and magma evolution history of the Yaogangxian granite. In this paper, the authors studied the petrology, geochemistry of the xenoliths, alkali feldspar granite, and monzonite batholiths formed in late Jurassic period. It is detected that the monzonite inclusion (I b) came from early crystallization of deep magma chamber similar to the monzonite batholith. The quartz diorite porphyry and black rock xenoliths seem to have been the residue of Precambrian metamorphic rocks in the melting. The greisen schlieren resulted from the transition from the alkali feldspar granite stage to the magma-hydrothermal stage. The fine biotite granite xenolith (III b) in the quartz porphyry was captured from the supplementary granite which was differentiated from the main magma, or from the granite pluton formed from the supplementary rocks. The granite (I) was rich in volatiles,

收稿日期: 2014-10-14; 接受日期: 2015-08-06

基金项目: 国家科技支撑课题(2011BAB04B08); 全国危机矿山接替资源找矿项目(20089927); 国土资源部公益性行业科研专项(201411024-2); 中国地质调查局项目(12120113086300)

作者简介: 祝新友(1965-), 男, 教授级高工, 长期从事矿床学研究, E-mail: zhuxinyou@outlook.com。

which resulted in strong contamination of the xenoliths, and a certain amount of fluorite, mica, tourmaline and sulfide minerals formed in the xenoliths. The Yaogangxian granite is a product of the intrusion of highly fractionated magma derived from the magma chamber equivalent to monzonite batholith. The quartz porphyry magma directly resulted from the residue of segregation from fractional crystallization of magma chamber, rather than from the alkali feldspar granite of Yaogangxian. It is suggested that the magma evolved in order of magma chamber (main) (coarse monzonite) $\rightarrow$ fine biotite granite (supplementary) $\rightarrow$ alkali feldspar granite $\rightarrow$ magma-hydrothermal transition fluid (tungsten mineralization) $\rightarrow$ quartz porphyry veins.

Key words: Hunan Province; granite; tungsten deposit; xenolith; magma evolution

Fund support: National Science and Technology Support Program (2011BAB04B08); Geological Project for Resource Exhausted Mines of China (20089927); Public Welfare Research Project of the Ministry of Land and Resources of China (201411024-2); China Geological Survey Project (12120113086300)

与钨矿床成矿有关的花岗岩分异演化程度高(王联魁等, 2000; 祝新友等, 2012), 其中常含有多种类型的包体, 以往的研究多关注于其中的镁铁质包体, 获得了大量的幔源岩浆参与的信息(周金城等, 1992; 刘卫明等, 1994; 马铁球等, 2005; 付建明等, 2006; 朱金初等, 2006; 程顺波等, 2009; 刘勇等, 2011; 彭卓伦等, 2011)。这类花岗岩中还含有变质岩、沉积岩围岩以及深部花岗岩的包体(捕虏体), 岩浆晚期进一步分异形成的析离体形似包体, 也作为包体一个特殊的类型。变质岩和沉积岩捕虏体可反映岩浆成因和岩浆迁移路径, 花岗岩包体含有早期岩浆演化的信息, 云英岩析离体反映了岩浆进一步发育的方向。因此, 不同类型包体的研究可揭示岩浆成因、演化路径。瑶岗仙钨矿床是南岭成矿带代表性的矿床, 包括大型石英脉型钨矿和大型矽卡岩型钨矿矿床(徐克勤, 1957), 发育多种花岗岩类型。本文重点研究瑶岗仙花岗岩体中多种类型包体, 以探讨深部黑云母花岗岩岩浆 $\rightarrow$ 碱长花岗岩岩浆以及最终向含矿流体演化的全过程。

1 岩体中的包体、析离体特征

瑶岗仙钨矿区位于湖南宜章县境内, 郴州市东南约 40 km, 中央部位坐标 $N25^{\circ}40'01.9''$, $E113^{\circ}18'53.5''$ 。矿田包括石英脉型和矽卡岩型两个大型钨矿床, 分别位于瑶岗仙花岗岩体的北西侧和东侧接触带。脉型钨矿已开采百年, 矽卡岩型钨矿正在基建开发。瑶岗仙岩体出露面积 1.04 km^2 , 其中发育两类花岗岩, 主体为灰白色中粒(斑状)碱长花岗岩(简称花岗岩 I), 为脉型钨矿的成矿地质体; 在岩体东南角的岩体顶部接触带, 发育小规模浅灰白色

细粒碱长花岗岩(花岗岩 II), 为矽卡岩型钨矿的成矿地质体。石英斑岩脉 NW 向贯穿瑶岗仙矿区, 形成于成矿后。已发现的大部分包体和全部析离体都赋存于花岗岩 I 中, 少量捕虏体赋存于石英斑岩中, 花岗岩 II 内未发现包体或析离体。瑶岗仙岩体年龄资料较多, 结果相近。最近由本课题组测定的花岗岩 I、花岗岩 II 和石英斑岩的年龄分别为 155.4 ± 2.2 、 157.6 ± 2.6 和 $158.4 \pm 2.1 \text{ Ma}$ (锆石 SHRIMP)(李顺庭等, 2011), 都在测定误差范围内, 说明它们属同一岩浆期侵入产物。矿区出露地层包括寒武系浅变质石英砂岩、中泥盆统跳马涧组(D_2t)石英砂岩和棋子桥组(D_2q)灰岩以及上三叠统唐垄组(T_3t)陆相碎屑岩。有关瑶岗仙花岗岩和矿床的地质地球化学特征, 详见陈依壤(1981, 1988)、林新多(1986, 1987)、祝新友等(2013, 2015, 2016)。

岩体中发现的包体主要是捕虏体、云英岩析离体等, 其中, 捕虏体包括早期形成的花岗岩、石英闪长斑岩、暗色富铁质岩石等。

1.1 花岗岩包体

(1) 花岗岩 I 中的黑云母花岗岩包体(Ib)

是花岗岩 I 中的常见包体类型, 大部分可明显分辨, 少量包体很小已遭受强烈同化混杂残留于花岗岩 I 中。包体分布不均匀, 在不同中段及钻孔中均有发现, 分布无规律性。包体直径一般 $< 1 \text{ m}$, 形态不规则, 与碱长花岗岩 I 的界线较清楚(图 1a)。包体多呈斑状中粗粒花岗结构, 斑晶为粗粒钾长石, 粒径 $0.5 \sim 2 \text{ cm}$ 。基质为中粗粒花岗结构, 主要矿物为斜长石、钠长石(斜/钠长石 25% ~ 35%)、钾长石(20% ~ 30%)、石英(30% ~ 35%)、黑云母(5% ~ 10%)等。黑云母遭受不同程度的蚀变, 部分转变为白云母、金红石, 在这些蚀变形成的白云母内或边部

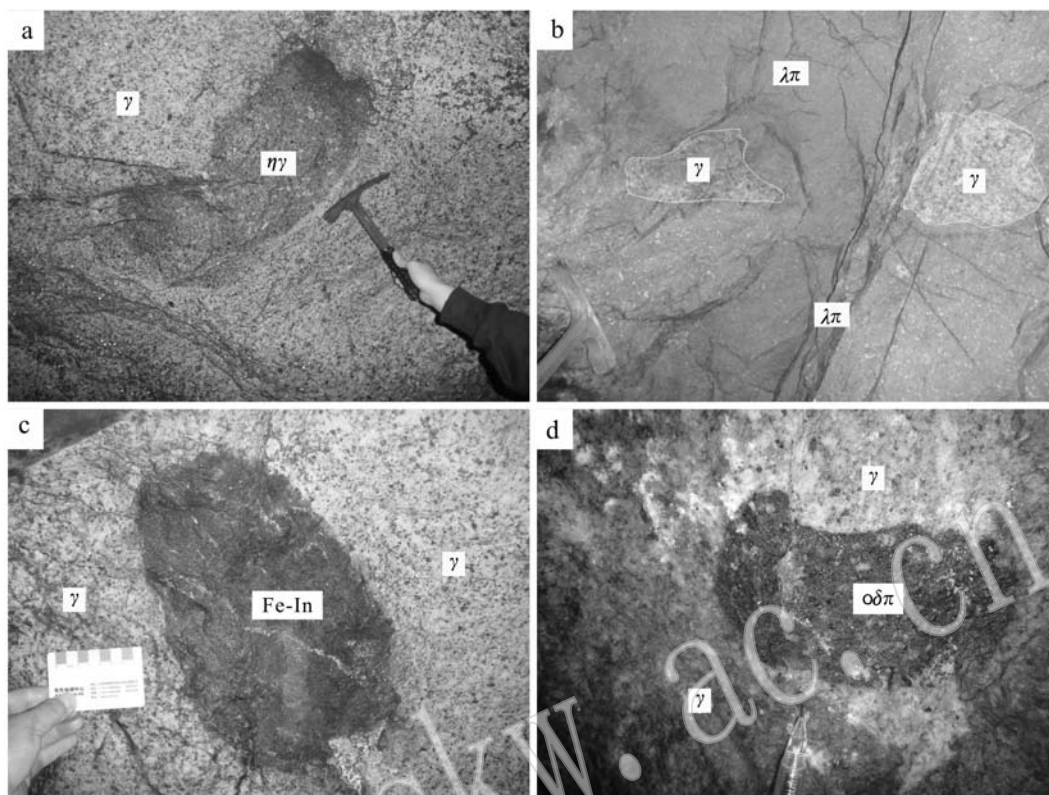


图 1 瑶岗仙钨矿花岗岩中包体特征

Fig. 1 Photograph of the xenoliths from the Yaogangxian tungsten deposit, Hunan Province

a—花岗岩(γ) I 中的二长花岗岩($\eta\gamma$)包体(Ⅰa), 16 中段; b—石英斑岩($\lambda\pi$)中的花岗岩(γ)包体(Ⅲb), 杨梅岭 19 中段;

c—花岗岩 I 中的黑色包体(Fe-In), 23 中段; d—花岗岩 I 中的石英闪长斑岩包体($\sigma\delta\pi$), 17 中段

a—monzogranite inclusion ($\eta\gamma$) in granite I, 16 level tunnel; b—granite inclusion (γ) (Ⅲb) in quartz porphyry ($\lambda\pi$), 19 level tunnel;

c—black inclusion (Fe-In) in granite I, 23 level tunnel; d—quartz diorite porphyry in granite I, 17 level tunnel

常见毒砂、黄铜矿、闪锌矿等硫化物矿物,多沿蚀变黑云母解理分布。包体边部的黑云母蚀变更加强烈,大部分已变成白云母。电子探针分析显示(蚀变)黑云母 MgO 0.1%~8.31%,平均 1.18%,FeO 0.42%~18.56%,平均 7.35%(自测)。

(2) 石英斑岩中的花岗岩包体(Ⅲb)

仅见于杨梅岭矿段 19 中段(700 m),直径 15~40 cm,浑圆状(图 1b),与石英斑岩界线清楚。灰白色,细粒花岗结构,主要矿物有钠长石、钾长石、石英、黑云母等。碎裂状,多级碎裂,至少可见三级角砾,早期角砾以长石为主,晚世代胶结物以石英为主(图 2)。萤石、毒砂含量少,只见于晚世代胶结物中。

1.2 石英闪长斑岩包体

主要分布于 17 中段(780 m)坑口附近,大量深灰色包体不规则分布,浑圆状,直径一般<30 cm,界线明显(图 1d)。斑状结构,斑晶为斜长石,粒径 1~

3 cm,基质为微细粒结构,粒径 0.1~0.3 mm,主要矿物有斜长石、黑云母、石英等。斜长石呈长板状自形晶,具中性斜长石光性特点,粒间分布石英。

钠长石、萤石、毒砂分布不规则,交代黑云母、斜长石等。其中,钠长石在包体边部更多,毒砂浸染状,主要交代黑云母。

1.3 黑色包体

仅发现 1 个包体,见于 23 中段(540 m)主穿巷,直径 30 cm(图 1c),大体分布于碱长花岗岩 I 的中部。包体呈灰黑色,块状,细粒结构,隐约可见不规则条带。主要矿物为石英、萤石、绿泥石、电气石、金红石,含少量钠长石。富含硫化物,主要硫化物矿物包括白铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿,硫砷钴矿、辉钼矿、闪锌矿等(王艳丽等,2014),白铁矿交代磁黄铁矿。探针分析显示,磁黄铁矿的 S/Fe 值(mol 比)为 1.009~1.168,平均 1.071,闪锌矿中含 FeS

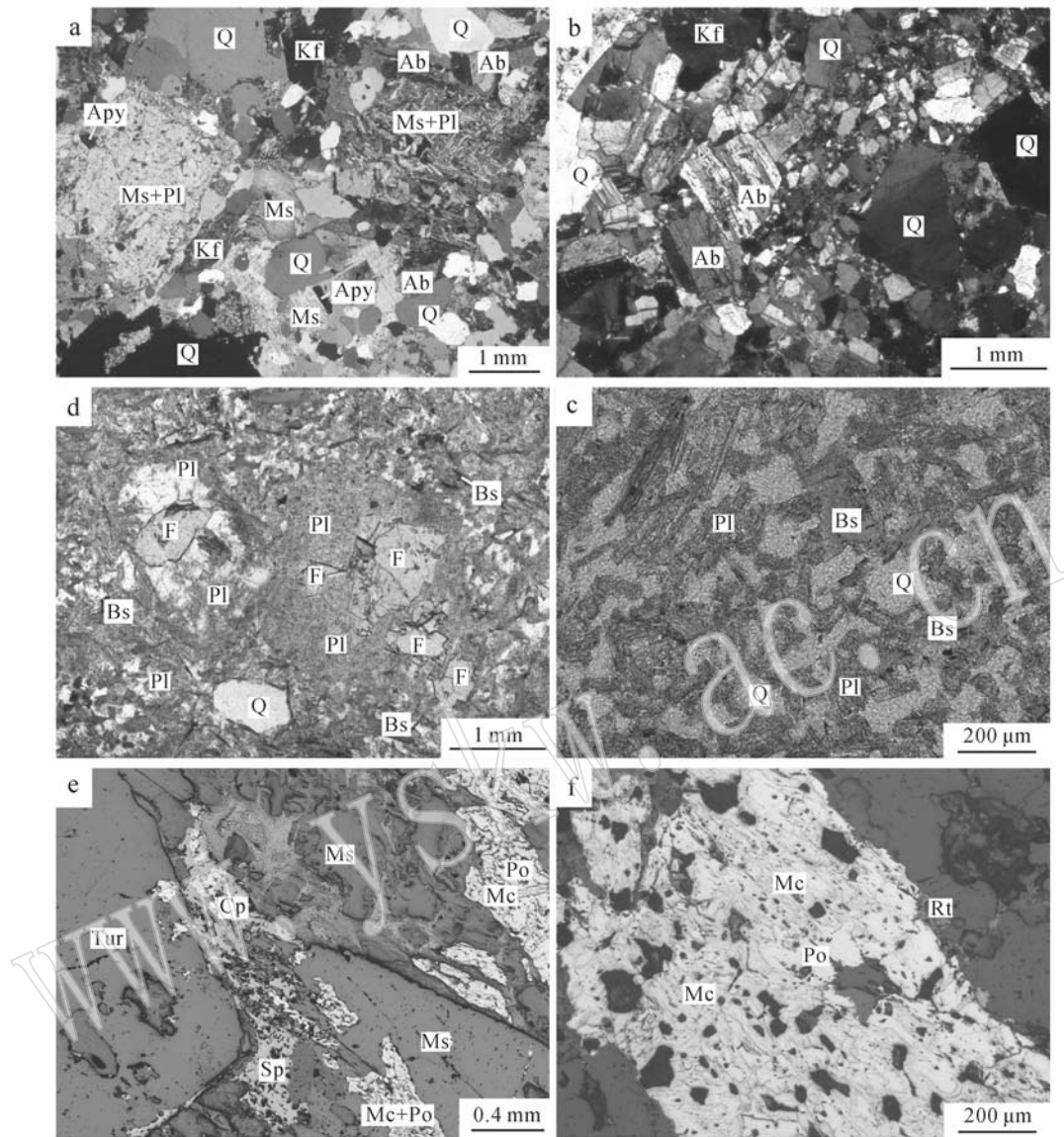


图 2 瑶岗仙钨矿花岗岩中包体的显微结构特征

Fig. 2 Microphotograph of xenoliths in the granite, the Yaogangxian tungsten deposit, Hunan Province

a—花岗岩包体(I a),斜长石(Pl)和钾长石(Kf)被白云母(Ms)化,基质中新形成的矿物包括钠长石(Ab)、石英(Q)、白云母和毒砂(Apy),正交偏光; b—花岗岩包体(III b),碎裂状结构,细粒物中石英更多,正交偏光; c—石英闪长斑岩包体的斑状结构,斜长石中出现萤石(F),基质粒度细小,单偏光; d—石英闪长斑岩的基质,交织结构,主要矿物斜长石、黑云母(Bs)、石英,单偏光; e—黑色包体,电气石(Tur)、白云母粒间,闪锌矿(Sp)与黄铜矿(Cp)共生,白铁矿(Mc)交代磁黄铁矿(Po),反射单偏光; f—黑色包体中,白铁矿交代磁黄铁矿,共生金红石(Rt),反射单偏光

a—granite inclusion (I a), plagioclase (Pl) and K-feldspar (Kf) altered by muscovite (Ms), albite (Ab), with quartz (Q), muscovite (Ms) and arsenopyrite (Apy) in the matrix, crossed nicols; b—granite inclusion (III b), fragmented texture, more quartz in the matrix, crossed nicols; c—quartz diorite porphyry, fluorite (F) replacing plagioclase, plainlight; d—interlace texture of matrix at quartz diorite porphyry, plagioclase, biotite (Bs) and quartz, plainlight; e—black inclusion, sphalerite (Sp) and chalcopyrite (Cp) distributed in tourmaline (Tur) and muscovite grain, marcasite (Mc) replacing pyrrhotite (Po), reflective plainlight; f—black inclusion, marcasite replacing pyrrhotite, associated with rutile (Rt), reflective plainlight

14%~18%(本文测定)。

1.4 云英岩析离体

云英岩析离体是分布于岩体顶部附近形成于岩

浆晚期的富挥发分岩浆析出物,严格意义上讲,并不属于包体或捕虏体。瑶岗仙云英岩析离体已有文献做深入阐述(祝新友等,2013),这里仅做补充说明。

云英岩析离体分布于岩体上部,大部分分布于 16 中段(820 阶段 m)以上。呈不规则浑圆状无规律分布于花岗岩 I 中,直径一般 $<1\text{ m}$,个别可达 10 m 以上,形成矿囊。析离体与花岗岩 I 界线分明,但围岩(花岗岩)无蚀变、无裂隙连通通道。析离体内,核部为云英岩,主要矿物为白云母、石英、萤石、黄玉,富含黑钨矿,含少量毒砂、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等;外侧为花岗岩,长石部分云英岩化,与核部云英岩呈过渡状,主要矿物为钾长石、钠长石、石英、白云母,富含辉钼矿等。析离体往往发育 1 cm 的富石英云英岩边。各带中均含少量锡石、毒砂、辉铋矿、黄铜矿、黝锡矿、闪锌矿、方铅矿等。

2 元素地球化学特征

全面开展了瑶岗仙矿区花岗岩和其中各类包体的矿物学、主量、微量元素分析测试工作,获得了大量的分析数据。

花岗岩样品取自瑶岗仙岩体的中细粒斑状碱长花岗岩(I),包括 10 中段(1 070 m)~26 中段(420

m)以及多个钻孔中,具有较好的代表性。花岗岩包体样品 I b 取自 16 中段、23 中段、26 中段等;黑色包体取自 23 中段;石英闪长岩包体取自 17 中段。云英岩析离体样品主要取自 16 中段。石英斑岩及其中的包体 III b 取自杨梅岭矿段 19 中段。区域花岗岩样品,骑田岭岩体取自芙蓉,九峰岩体取自白云仙南部。样品成分分析在核工业北京分析测试中心完成,主量成分分析方法为 X 荧光光谱法(固体样),仪器型号为 AB104-L X 射线荧光光谱仪,执行标准 GB/T14506.14-2010;氧化亚铁含量测定执行标准 GB/T14506.28-2010。微量元素成分分析方法为 ICP-MS,王水溶样,执行标准 GB/T14506.30-2010。电子探针分析设备为 JXA-8100 电子探针分析仪,执行标准 GB/T 15074-2008。

2.1 斜/钠长石成分特征

共开展了矿区 50 余件样品(标本)208 个点的分析,表 1 为花岗岩 I 及包体中斜/钠长石成分分析结果,长石 An 值的分布特点见图 3。分析结果显示,花岗岩及不同类型包体矿物组合不同,成因不同,斜/钠长石成分也不相同。

表 1 瑶岗仙矿区包体(析离体)中斜/钠长石类矿物电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of plagioclases from granites and xenoliths (schlieren), the Yaogangxian tungsten deposit

岩性名称	测点	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	总量	Ab	An	Or
1 碱长花岗岩 I	77	0.14	11.62	0.25	19.22	68.22	99.45	98.37	0.76	0.87
2 花岗岩包体 I b	38	0.12	11.04	0.85	19.97	67.35	99.33	94.80	4.40	0.80
3 黑色包体	11	0.06	11.25	0.13	18.63	68.82	98.89	98.90	0.72	0.38
4 石英闪长斑岩包体	16	0.14	10.80	1.55	20.31	66.27	99.07	90.74	8.38	0.87
5 石英斑岩	4	0.12	11.73	0.05	18.87	69.12	99.89	98.96	0.28	0.76
6 花岗岩包体 III b	5	0.10	11.53	0.15	19.23	67.87	98.88	98.53	0.84	0.63
7 云英岩析离体	55	0.13	11.45	0.08	19.25	68.51	99.42	98.72	0.42	0.86

花岗岩 I 的钠长石 $An < 3.6$,大部分样品 <1 ,平均 0.76。由于花岗岩 I 中的二长花岗岩包体含量较多,大小不一,分布不均匀,其中很多包体呈残留状,有时不易辨别,因此, An 值 >1 的一些样品,也有可能与这些残留的包体有关。花岗岩 I 本身的钠长石 An 值很低。

黑云母花岗岩包体(I b),斜/钠长石的 An 值范围变化很大,大部分样品 <5 ,少量值 >10 ,最高达 46.5,即中长石。对部分包体进行了深入解剖,斜切典型包体的小剖面显示,包体中心 $\rightarrow$ 边部, An 值有逐渐降低的趋势。边部的斜/钠长石基本上都为钠长石,且与花岗岩 I 大体相同。对中心部分斜/钠长石颗粒解剖也显示,核部常残留有斜长石。这些特

点显示出花岗岩包体遭受到花岗岩 I 岩浆的强烈同化混染作用。

石英闪长斑岩包体,基质中的细粒长柱状长石主要是中基性长石, An 值范围广,0.68~42.27,平均 8.38,明显背离原岩斜长石的特点。这种斜长石 An 值的降低以及大量钠长石的出现,与包体受到碱长花岗岩岩浆(花岗岩 I)的同化混染作用有关。

黑色包体中长石含量少,钠长石 $An = 0.00 \sim 1.95$,平均 0.72。

云英岩析离体中的钠长石 An 值非常低,除少量样品点 $An > 1$ 外,大部分样品 $An < 1$,平均 0.42。石英斑岩基质的钠长石 $An = 0.06 \sim 0.46$,平均 0.28。细粒花岗岩包体(III b)的钠长石 $An = 0.15 \sim$

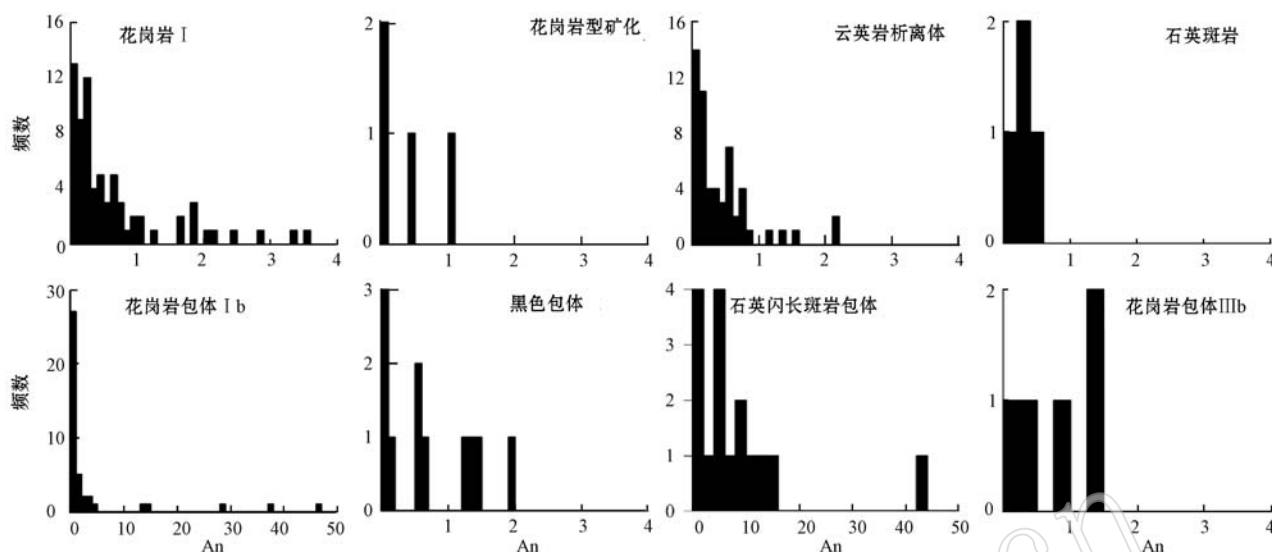


图3 花岗岩及包体中斜/钠长石 An 值分布直方图

Fig. 3 Histogram of the An value of plagioclase in granites and inclusions

1.47, 平均 0.84, 略高于石英斑岩和花岗岩 I。

2.2 主量元素特征

表 2 为花岗岩 I、石英斑岩及各类包体的主量、微量元素数据。其中区域花岗岩为九峰、骑田岭岩体主体的平均值, 岩性为斑状黑云母二长花岗岩。

花岗岩 I 及其包体 I b 和 III b 的 SiO_2 含量较高, 石英斑岩略低。黑色包体和石英闪长岩的 SiO_2 含量最低, TiO_2 、 MnO 、 FeO(T) 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 含量均较高。与花岗岩 I 相比, 其中的包体 (I b) SiO_2 含量略低, Al_2O_3 、 TiO_2 、 MnO 、 FeO(T) 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 含量略高。 K_2O 、 Na_2O 含量变化情况较复杂, 与花岗岩 I 相比, 花岗岩包体 I b、黑色包体更加富 K_2O 贫 Na_2O 。云英岩析离体的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值也很高, 与其中大量出现白云母有关。花岗岩包体 III b 的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.05$, 明显不同于石英斑岩。

在硅碱图解中(略), 花岗岩及包体 I b、III b 均落入花岗岩的范围内, 偏碱性; 石英闪长斑岩落在花岗闪长岩与闪长岩之间, 富铁质黑色包体 SiO_2 含量很低, 碱度较高。

在哈克图解(图 4)中, 花岗岩 I、包体 I b、包体 III b 样品点分布较集中, 它们与区域花岗岩(粗粒二长花岗岩)构成线性关系。云英岩析离体的样品点分散, 呈线性分布, 与花岗岩 I 的分布交汇, 显示二者的成因联系。但该线性分布特点明显不同于区域花岗岩-花岗岩 I 的线性关系, 后者为岩浆房→岩株的演化过程, 前者为岩浆→热液的演化过程。石英

斑岩富含 K_2O 贫 Na_2O , 样品点分布与花岗岩 I 及区域花岗岩间存在较密切的关系, 但并不在其演化曲线上。

相比之下, 在哈克图解中, 石英闪长斑岩包体、黑色包体与花岗岩 I 及上述包体性质完全不同, 其源区和演化完全不同于区域花岗岩、花岗岩 I 等。

2.3 微量元素地球化学特征

对各类包体地质地球化学研究显示, 不同包体性质、来源及演化历史不同。由于大部分包体产于花岗岩 I 中, 因此, 不同包体元素含量平均值以花岗岩 I 的元素含量作标准化进行比较是有意义的, 结果如图 5。黑色包体和石英闪长斑岩包体的元素组合较相似, 明显富集碱土金属 Be、Mg、Ca、Sr、Ba 和铁族金属元素 Co、Ni、Ti、Cr 和元素 V, 高场强元素 (HFSE) 含量相对低。二者的成矿元素与亲硫元素表现不同, 黑色包体富 Cu、Zn、W, 其中见大量浸染状黄铜矿, 少量闪锌矿, 而石英闪长斑岩明显贫这些元素。

花岗岩包体 (I b) 具有与花岗岩 I 最接近的成分, 元素富集和亏损程度很小, 显示二者紧密的亲缘联系。碱金属和碱土金属中, 稍富集 Li、Ce、Mg, 贫 Be; 成矿元素中, 贫 Cu、W 富集 Mo; 铁族元素中, 富 Ti 贫 Cr。与 I b 相比, 产于石英斑岩中的花岗岩包体 (III b) 元素组合特点不同, 变化幅度明显大于 I b, 亏损碱金属元素, 富集碱土金属元素, 亏损成矿元素 Cu、Zn、Bi, 轻微亏损 Co、Ni、Ti, 略富集 W。

表 2 瑶岗仙矿区花岗岩及包体(析离体)主量($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)含量

Table 2 Element values of granites and xenolith (schlieren), the Yaogangxian tungsten deposit

岩石类型	花岗岩 I	花岗岩包体 I b	黑色包体	石英闪长 斑岩包体	云英岩析 离体	石英斑岩	花岗岩包体 III b	区域 花岗岩
样品数	70	13	2	1	36	5	1	5
SiO ₂	74.77	74.45	51.24	63.13	64.69	72.07	75.17	69.69
TiO ₂	0.04	0.06	0.67	0.59	0.05	0.11	0.02	0.52
Al ₂ O ₃	13.25	13.39	15.73	15.55	19.69	13.95	13.12	13.59
MnO	0.15	0.18	0.19	0.21	0.87	0.34	0.14	0.08
Fe ₂ O ₃	0.30	0.51	4.59	0.80	1.06	0.83	0.42	0.83
FeO	0.76	0.72	8.70	4.18	2.01	0.88	0.80	3.14
MgO	0.10	0.17	1.95	2.99	0.20	0.25	0.12	1.16
CaO	0.90	1.01	2.27	3.14	1.14	0.71	0.78	1.70
Na ₂ O	3.70	2.90	1.94	3.49	1.48	1.34	4.10	2.31
K ₂ O	5.04	5.24	5.73	3.65	6.49	7.83	4.59	5.09
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.08	0.22	0.02	0.03	0.02	0.18
lost	0.86	1.21	5.82	1.56	1.97	1.44	0.61	1.25
F	0.34	0.00	0.29		0.61	0.26	<0.04	0.10
总量	99.78	99.85	99.03	99.50	99.71	100.08	99.90	99.65
Alk	8.59	8.14	7.66	7.14	7.97	9.17	8.69	7.40
Cu	28.6	11.8	1028	4.16	176	23.0	6.08	13
Pb	86.2	71.0	48.0	28.2	511	92.7	90.4	43
Zn	87.1	97.9	288	179	799	170	16.4	89
W	38.8	16.3	80.2	11.8	21887	33.3	109	25
Bi	7.50	7.33	8.06	4.62	275	1.19	2.69	2.12
Mo	6.67	24.6	87.1	2.58	413	3.90	11.6	5.22
Cd	2.19	1.09	0.95	0.35	42.09	2.91	0.13	0.65
Rb	780	969	580	1492	1636	839	632	397
Sr	10.5	9.52	76.3	303	6.70	77.3	28.6	128
Ba	45.1	50.6	891	879	31.1	872	110	498
Cs	40.8	61.5	60.8	118	112	25.8	21.6	38
Li	233	380	600	1543	919	68.6	51.4	116
Be	9.65	4.84	12.8	34.0	36.3	40.3	30.7	9.0
Nb	38.6	36.8	32.5	30.1	303	19.7	30.8	25.3
Ta	11.0	9.12	2.07	3.69	44.0	2.35	12.7	4.95
Hf	6.03	5.16	2.37	5.16	6.12	7.31	9.20	4.79
U	20.6	20.4	7.92	12.2	18.9	8.23	25.2	13.8
Th	20.8	27.5	14.8	16.5	17.4	21.28	21.0	33.7
Y	81.8	67.8	56.7	241	82.3	31.2	86.1	42.8
La	9.52	12.4	74.6	38.3	9.12	40.5	8.88	45.8
Ce	22.4	28.1	131.5	71.8	22.4	77.6	22.1	90.2
Pr	3.18	4.00	16.7	9.42	3.47	9.14	3.24	11.4
Nd	13.9	16.8	63.6	35.1	15.9	34.9	13.9	40.4
Sm	6.27	6.69	11.9	8.58	7.59	6.89	6.79	8.37
Eu	0.12	0.14	1.42	0.84	0.07	1.14	0.34	1.11
Gd	6.48	5.74	9.81	9.62	6.26	5.63	7.68	8.11
Tb	1.77	1.50	1.69	3.02	1.71	1.02	2.00	1.37
Dy	11.8	9.53	8.73	22.2	11.0	5.65	13.3	8.51
Ho	2.37	1.80	1.60	4.51	2.06	1.04	2.62	1.65
Er	7.54	5.60	4.65	15.1	6.78	3.11	8.13	4.95
Tm	1.48	1.08	0.78	3.27	1.48	0.52	1.55	0.75
Yb	10.2	7.48	4.67	21.6	11.7	3.48	11.0	4.95
Lu	1.58	1.11	0.70	3.14	1.86	0.55	1.66	0.75
ΣREE	98.56	101.98	332.15	246.50	101.34	191.22	103.19	228
LREE/HREE	1.28	2.01	9.19	1.99	1.36	8.11	1.15	6.35
Eu/Eu*	0.05	0.07	0.39	0.28	0.03	0.55	0.14	0.41

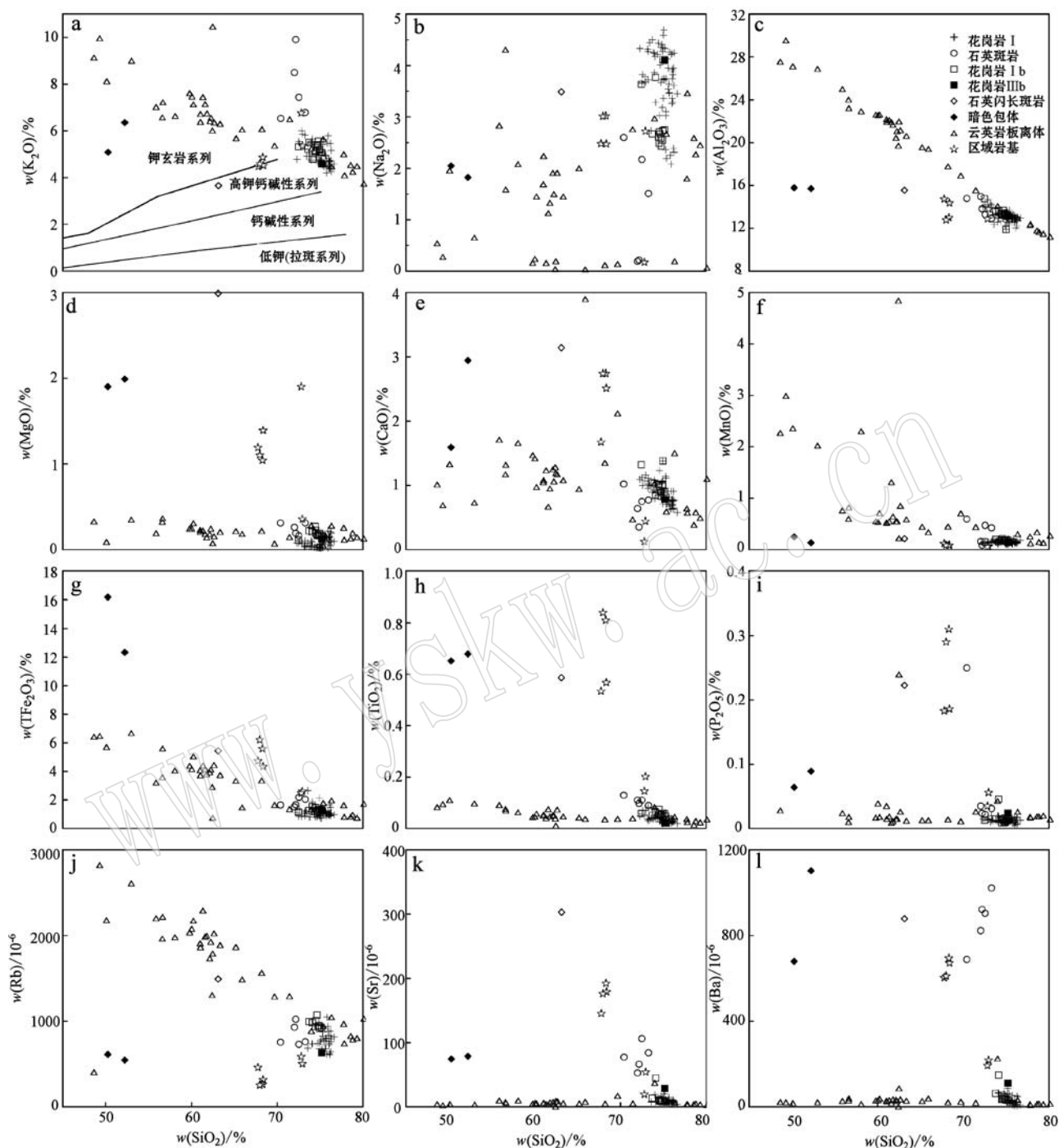


图 4 瑶岗仙钨矿花岗岩及包体的哈克图解

Fig. 4 Harker diagrams for granites and xenoliths in the Yaogangxian tungsten deposit, Hunan Province

云英岩析离体的变化特点明显不同于上述包体(捕虏体),大部分元素的亏损富集趋势甚至完全相反。在云英岩析离体中,强烈富集 Li、Br、Ce、Be、Mg,富集成矿元素 Cu、Pb、Zn、W、Bi、Mo 和高场强元素 Nb、Ta,相对贫 Na、Sr、Ba、Cr 等元素。

在 Rb - Sr - Ba、LREE/HREE - Rb/Sr 图解(图 6a、6b)中,高 Rb、Rb/Sr 值和低 LREE/HREE 值代表了岩浆的高演化方向,云英岩析离体演化程度最高;其次是花岗岩 I;花岗岩包体(I b)与花岗岩 I 有较大的重叠空间,部分样品分异程度差;石英斑岩

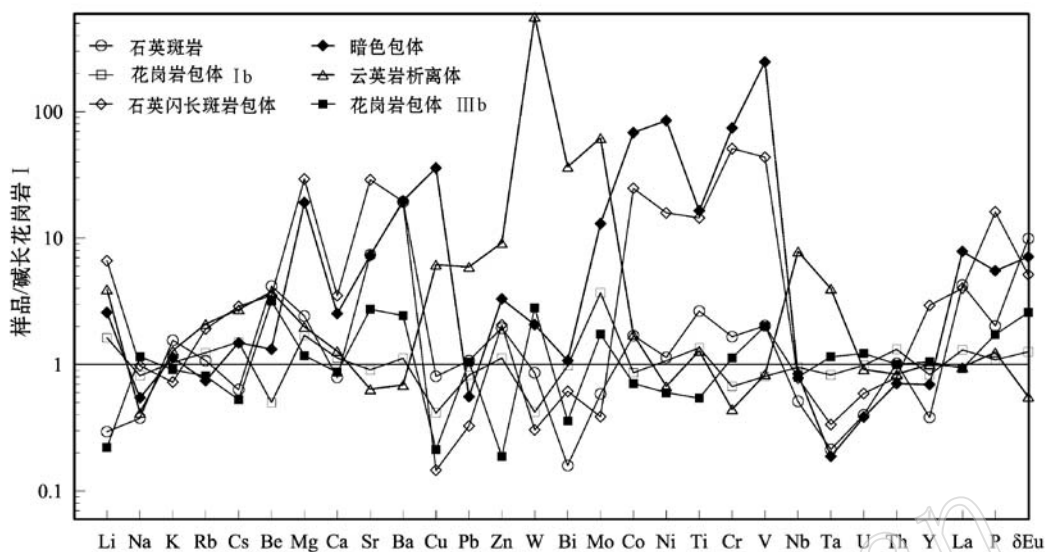


图 5 瑶岗仙钨矿花岗岩中包体成分基于花岗岩 I 标准化的图解

Fig. 5 Diagram of minor elements standard by granite I, the Yaogangxian tungsten deposit

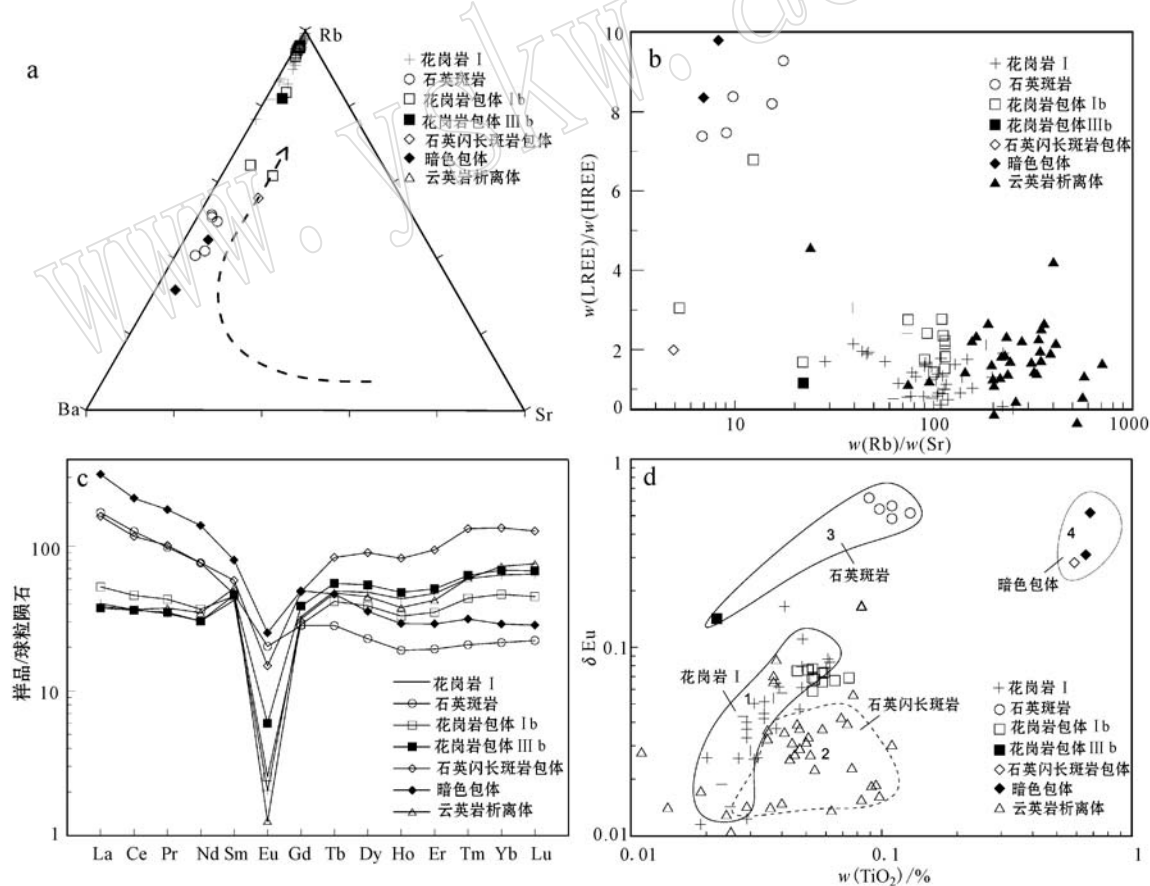


图 6 瑶岗仙钨矿花岗岩中包体的微量及稀土元素图解(球粒陨石值引自 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 6 Diagrams of trace elements and REE of granites and xenoliths in the Yaogangxian tungsten deposit, Hunan Province (chondrite values from McDonough and Sun, 1995)

中的花岗岩包体(Ⅲb)与Ⅰb相似,分异程度差;分异程度最差的是石英斑岩。黑色包体和石英闪长斑岩包体具有很低的 Rb/Sr 值,可能与花岗岩成因不同,并不在同类样品的演化路径上。

2.4 包体的稀土元素特征

花岗岩及包体的 REE 组成特征有相似性,差异也较大。花岗岩Ⅰ、包体Ⅰb、Ⅲb 的 ΣREE 平均 $98 \times 10^{-6} \sim 103 \times 10^{-6}$,而石英闪长斑岩、黑色包体以及石英斑岩的 ΣREE 明显高得多, ΣREE 平均 $191 \times 10^{-6} \sim 332 \times 10^{-6}$ 。

花岗岩Ⅰ呈现出华南地区钨矿有关花岗岩较典型的 REE 配分曲线,呈“V”字型, $\text{LREE}/\text{HREE} = 1.28$,强烈亏损 Eu ($\delta\text{Eu} = 0.05$),具四分组效应(图 6c)。与此对比,花岗岩包体Ⅰb 的 REE 特征非常相似, LREE/HREE 略高, Eu 负异常稍弱 ($\delta\text{Eu} = 0.07$),显示出深部分异相对低的岩浆岩与花岗岩Ⅰ强烈混染的特点。

石英斑岩的分异明显差,具有较高的 $\text{LREE}/\text{HREE}(8.11)$, Eu 异常也最弱 ($\delta\text{Eu} = 0.55$),它代表的是成矿后来自深部岩浆房的相对弱分异岩浆,地球化学特点类似于区域大花岗岩基。其中的细粒花岗岩包体Ⅲb 的 $\text{LREE}/\text{HREE} = 1.15$, $\delta\text{Eu} = 0.14$,分异程度介于花岗岩Ⅰ与石英斑岩之间,明显强于石英斑岩,显示出包体Ⅲb 并非石英斑岩分异的结果,而是石英斑岩岩浆上侵过程中捕获的早期结晶花岗岩,这些花岗岩分异程度较高,甚至高于花岗岩包体Ⅰb。

石英闪长斑岩包体和黑色包体均具有较高的 δEu 值,但石英闪长斑岩包体 $\text{LREE}/\text{HREE} = 1.99$,远低于黑色包体 9.19。云英岩析离体具有非常低的 LREE/HREE 和 δEu 值,是花岗岩Ⅰ进一步分异演化的产物。

高分异花岗岩往往具有强的负 Eu 异常和低 TiO_2 含量,因此在 $\delta\text{Eu}-\text{TiO}_2$ 图解(图 6d)中不同成因类型的花岗岩范围明显不同。花岗岩Ⅰ Eu 负异常强, TiO_2 含量低。花岗岩Ⅰ中的花岗岩包体(Ⅰb)的样品与花岗岩Ⅰ重叠,但 Eu 负异常相对弱, TiO_2 含量明显高,反映二者密切的成因联系,也显示出花岗岩包体(Ⅰb)遭受花岗岩Ⅰ岩浆的强烈混染,在花岗岩包体Ⅰb 中,尤其是边部存在大量的钠长石,其中的黑云母大部分遭受蚀变。云英岩析离体的 δEu 比花岗岩Ⅰ略低, TiO_2 含量明显增高,其中常见细粒

金红石。

石英斑岩 δEu 值、 TiO_2 含量均较高,明显不同于花岗岩Ⅰ及其中的包体。石英斑岩中的包体花岗岩Ⅲb TiO_2 含量也很低,但 δEu 值高。显示出石英斑岩与花岗岩Ⅰ具有不同的演化历史,石英斑岩分异弱,其中的花岗岩包体分异程度相对高。

2.5 花岗岩包体Ⅰb 的解剖

针对 16 中段的一个二长花岗岩包体Ⅰb 做了详细的剖面采样,共采集 12 件样品,分析其中的主量、微量元素以及斜/钠长石电子探针成分,结果如图 7。图中,左图为切割样品位置,右图为地球化学剖面。

每件样品内分析斜/钠长石探针点 2~4 个,其平均值与最高值的规律是相似的。图 7b 中的 An 值取各样品的最大值。包体内 An 值变化较大, $\text{An} = 0.14 \sim 10.26$,单个点最高为 28.03,花岗岩Ⅰ为 0.08,包体的 An 值明显高于花岗岩Ⅰ。包体内部 An 高,边部 An 低。

包体的主量元素含量也明显不同于花岗岩Ⅰ, SiO_2 低于围岩,且自花岗岩Ⅰ→包体边部向中央逐渐降低(图 7)。 K_2O 、 CaO 、 TiO_2 、 MnO (图 7,未列出 MnO)明显增高,其中包体的 K_2O 整体高于花岗岩Ⅰ, CaO 、 TiO_2 、 MnO 含量向包体内逐渐增高。

稀土元素特征值 LREE/HREE 值和 δEu 值向包体内逐渐升高,包体内部 REE 分异程度逐渐降低。

3 讨论

3.1 包体的成因与来源

众多的研究已经揭示,南岭地区燕山早期花岗岩形成于板内伸展条件下前寒武纪变质岩的重熔(Xu *et al.*, 1984; 陈毓川等, 1989; 王德滋等, 2003; 王德滋, 2004; 周新民等, 2007),属 S 型花岗岩或 A 型花岗岩(朱金初等, 2008; 蒋少涌等, 2008),有大量幔源物质参与,在区域花岗岩岩基中,常见幔源镁铁质包体(马铁球等, 2005; 朱金初等, 2006; 付建明等, 2006; 蒋少涌等, 2008; 刘勇等, 2011)。矿区高分异花岗岩岩株中,包体多为深部花岗岩、变质岩或沉积岩。这些不同性质的包体来源和成因演化不同。

(1) 花岗岩包体Ⅰb

似斑状结构,斑晶粗大,基质中粗粒,富含黑云

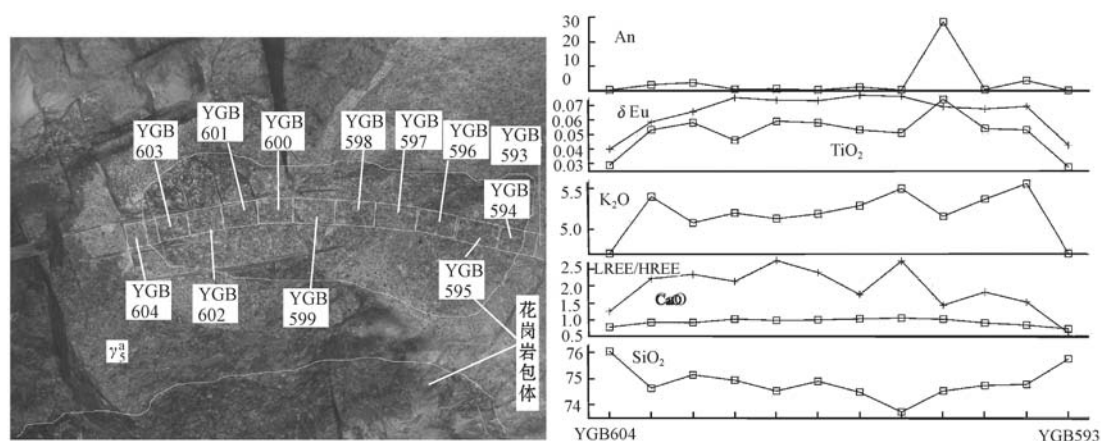


图 7 瑶岗仙花岗岩体中花岗岩包体 I b 的小剖面

Fig. 7 Geochemical section across a granite xenolith, the Yaogangxian tungsten deposit, Hunan Province

母(部分蚀变)。地质特点相似于燕山早期区域大花岗岩岩基的主体成分,岩性为中粗粒斑状黑云母花岗岩或二长花岗岩,也可能为印支期或更早的花岗岩。有关燕山早期花岗岩岩基如骑田岭(李晓敏等, 2010)、九峰(尹征平等, 2010)、大东山(张敏等, 2003;黄会清等, 2008)等岩体的地质地球化学研究较多,本文对骑田岭、九峰岩体中主体的粗粒斑状黑云母二长花岗岩测定的主要地球化学特征值如表 3(自测),斜长石主要是更长石和中长石, CaO 、 TiO_2 含量高, REE 曲线呈右倾型, $\text{LREE}/\text{HREE} > 5$, $\delta\text{Eu} = 0.3 \sim 0.5$, 分异弱。与这些岩体的主体相比,花岗

岩包体 I b 中残留有 An 值较高的斜长石,同时出现大量钠长石,主要成分 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 等含量以及 LREE/HREE 值、 δEu 值介于区域岩基与花岗岩 I 之间。

这些燕山早期的区域性花岗岩岩基结晶年代与矿区花岗岩相近(朱金初等, 2009; 李顺庭等, 2011),代表了南岭地区燕山早期深部大岩浆房的特征。包体 I b 的地质地球化学性质显示,其最初可能来自于这些岩浆房中已经结晶的花岗岩,岩性主要是粗粒斑状黑云母二长花岗岩,但被形成花岗岩 I 的富挥发分岩浆强烈同化混染。

表 3 骑田岭、九峰、大东山花岗岩(主体)地球化学特征值

Table 3 Geochemical values of Qitianling, Jiufeng and Dadongshan granites

	样数	斜长石 An	SiO_2	Al_2O_3	CaO	TiO_2	$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	Rb/Sr	L/HREE	δEu
骑田岭	2	35	68.10	12.90	2.74	0.83	1.57	1.49	7.89	0.49
九峰	4	12.7	70.47	13.94	1.19	0.36	2.69	4.69	5.40	0.34

骑田岭岩体样品取自芙蓉,九峰岩体样品取自白云仙南部,岩性均为粗粒斑状黑云母二长花岗岩。

(2) 细粒黑云母花岗岩包体 III b

石英斑岩中的细粒黑云母花岗岩包体 III b, 结晶细,斜长石 An 值明显低于花岗岩包体 I b 及区域花岗岩,但明显高于瑶岗仙花岗岩 I (祝新友等, 2016)。富含细粒黑云母,这一点明显不同于花岗岩 I,因此不大可能捕获自花岗岩 I,而是直接来自于深部。岩性及地球化学特征明显不同于石英斑岩, Rb/Sr 、 Rb/Ba 明显低于花岗岩 I,与包体 I b 更接近(图 5b); REE 配分曲线表现为强烈分异的“V”型,四分组效应明显,与包体 I b 相似,较 I b 的 $\text{LREE}/$

HREE 略小,分异更强(图 5c)。在 $\delta\text{Eu} \sim \text{TiO}_2$ 图解中又明显不同于花岗岩 I, δEu 偏高。包体 III b 的矿物学及地球化学特点介于区域花岗岩或二长花岗岩包体 I b 与瑶岗仙岩体之间,非常类似于区域花岗岩岩基中的补体细粒黑云母花岗岩。它可能来自于岩浆房分异形成的补体或脱离岩基的花岗岩柱体下部,由补体岩浆或岩浆房中的岩浆带上来。这些补体广泛见于南岭燕山期花岗岩岩基中(吴俊奇等, 1998; 汪传胜等, 2004; 王炯辉等, 2014)。多数学者认为补体是主体分离结晶的产物(顾晟彦等, 2006;

周新民, 2007)。

(3) 石英闪长斑岩包体

具有火山岩或次火山岩的结构, 元素地球化学特点明显不同于花岗岩 I 或其他类型的包体, 其成因与花岗岩 I 关系不大, 原岩应为中性火山岩或次火山岩。这类火山岩在湘东南地区下古生界中并不发育, 可能来自于前寒武纪古老变质岩, 在变质岩重熔过程中残留下来。

(4) 黑色包体

不具有火成岩结构, 也明显不同于幔源镁铁质包体, 目前仍无法确定其原岩。黑色包体中长石含量低, 斜/钠长石的 $An < 2$, 显示其原岩不大可能为中性火山岩。地球化学性质明显不同于花岗岩 I 或其他类型包体, 与花岗岩 I 无直接成因联系。原岩中可能不含长石类矿物, 而富含铁质, 因此可能为富铁的变质岩在重熔过程中的残留, 最初的原岩可能为富铁沉积岩, 其中隐约残留有条带。有意思的是, 包体中含有大量绿泥石、白铁矿。白铁矿一般出现于低温热液矿床中, 绿泥石大部分情况下形成于中低温热液作用或低级区域变质作用。黑色包体中大量绿泥石、白铁矿的存在说明花岗岩 I 的岩浆最终结晶温度可能很低, 有关这方面还待做进一步的研究。

(5) 云英岩析离体

是岩浆晚期经液态分异形成的析出物(祝新友等, 2013; 傅其斌, 2013; 王京彬, 1991), 其中更加富含成矿物质和挥发分。云英岩析离体的外带花岗岩为花岗结构, 内带云英岩为热液交代结构, 其中发现丰富的熔流包裹体(于志峰等, 2015)。云英岩析离体代表碱长花岗岩岩浆晚期进一步演化的结果, 是介于形成岩浆与石英脉的岩浆-热液过渡态流体作用的产物, 代表花岗岩 I 进一步演化发展的方向。

总之, 包体具有多来源与多成因, 主要来自于深部早期结晶的花岗岩, 部分来自于前寒武纪变质岩重熔的残留, 云英岩析离体是岩浆进一步分异的结果。

3.2 岩浆中挥发分的分离效果

瑶岗仙岩体 I 中的各类包体, 包括花岗岩包体 I b、石英闪长斑岩、黑色包体等, 虽然保留一些原岩的成分和结构, 但均遭受碱长花岗岩岩浆的强烈影响, 它们具有一些共同特点:

(1) 遭受岩浆强烈同化混染

无论是二长花岗岩包体(I b), 还是石英闪长斑

岩包体, 其中都含有大量钠长石, 尤其是包体边部, 钠长石明显多于更长石。包体 I b 的微剖面也显示, 包体边部 CaO 、 TiO_2 、 MnO 含量、斜/钠长石 An 值以及 $LREE/HREE$ 值、 δEu 值降低, SiO_2 含量升高, 向围岩花岗岩 I 逐渐过渡。包体中央部分的黑云母相对新鲜, 蚀变相对弱。这些特点正是二长花岗岩包体遭受碱长花岗岩岩浆同化混染的结果。

(2) 富含萤石、黄玉、硫化物等富含挥发分的矿物

花岗岩包体 I b、石英闪长斑岩包体和黑色包体中均富含萤石、黄玉、硫化物等富含挥发分的矿物, 其中萤石含量一般 $> 2\%$, 远高于花岗岩 I。在石英闪长斑岩包体中还含有 $1\% \pm$ 的电气石。这些矿物呈细粒浸染状交代原岩的长石、黑云母等。

(3) 包体铁质含量越高, 硫化物越多

在 I b 中, $TFe(Fe_2O_3 + FeO) = 1.23\%$, 略高于花岗岩 I 的 1.06% , 主要含铁矿物为黑云母。黑云母遭受白云母蚀变时, 内部及旁侧常出现很多细粒硫化物, 包括毒砂、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿等。石英闪长斑岩包体的 $Fe_2O_3 + FeO = 4.98\%$, 硫化物矿物 $> 5\%$, 主要为磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿、黄铜矿等, 硫化物主要交代黑云母。黑色包体的 $TFe = 13.29\%$, 硫化物矿物 $> 10\%$, 主要为磁黄铁矿、磁黄铁矿、白铁矿、黄铜矿等, 其他含铁矿物为绿泥石。

花岗岩 I 中的各类包体高度富含挥发分矿物, 包体边缘与花岗岩 I 发生大量物质交换, 遭受花岗岩 I 岩浆的强烈同化混染作用。而云英岩析离体中的这些富挥发分矿物含量更高, 析离体核部主要矿物为白云母、石英、萤石、黄玉等, 富含硫化物。这些特点都显示出形成花岗岩 I 的岩浆高度富含挥发分、硫等物质。同时, 这些硫化物、挥发分矿物富集于这些包体中, 且在花岗岩 I 中广泛发育分散浸染状细粒硫化物、富挥发分矿物等, 也同样说明这些挥发分、S 等物质不能自岩浆中有效分离。这与祝新友等(2014)提出的脉型钨矿床成矿系统相对封闭的结论一致。

3.3 石英斑岩的成因与岩浆来源

已经开展的瑶岗仙花岗岩地质地球化学研究显示(另文论述), 花岗岩 I、花岗岩 II 的地质地球化学特征具有密切的演化关系, 其主量、微量元素含量的差异也较小, 且自花岗岩 I $\rightarrow$ 花岗岩 II, CaO 、 TiO_2 、 Rb/Sr 、 $LREE/HREE$ 、 δEu 均发生一系列的规律性的变化, 岩浆向更高分异程度的方向演化。石英斑岩晚于瑶岗仙花岗岩体, 形成于成矿之后。但石英斑

岩的岩浆分异程度明显低于花岗岩 I, CaO 、 TiO_2 含量和 LREE/HREE 、 δEu 值高, Rb/Sr 值低。这些特点显示出石英斑岩与花岗岩 I $\rightarrow$ 花岗岩 II 的演化方向完全不一致。石英斑岩的主、微量元素成分和 REE 配分特点完全不同于瑶岗仙岩体, 而更加接近于南岭区域花岗岩。它可能直接来自于深部岩浆房, 其岩浆可能未经历过深度分异演化, 直接沿深大断裂上侵。南岭地区与之类似的侵入岩还有分布于柿竹园地区的花岗斑岩, 呈 NE 向岩墙状分布于新田岭-千里山一带。

石英斑岩中的细粒花岗岩包体 III b 的地球化学性质明显不同于石英斑岩, 较石英斑岩分异演化程度更高, 不可能是石英斑岩分异的结果。它可能来自于岩浆房分异形成的补体或脱离岩基的花岗岩柱体下部, 由补体岩浆或岩浆房中的岩浆带上来。南岭地区燕山早期花岗岩岩基中普遍发育补体花岗岩, 主要岩性为细粒黑云母花岗岩、细粒钾长花岗岩等, 在主体(粗粒似斑状黑云母二长花岗岩)中呈不规则脉状或岩株(张敏等, 2003; 刘善宝等, 2007)。补体的地球化学性质大体介于主体(粗粒斑状黑云母二长花岗岩)与矿区碱长花岗岩之间。补体可能为主体花岗岩浆液态分离的产物, 也可能是岩浆房结晶的残余(张敏等, 2003; 汪传胜等, 2004)。

石英斑岩可能来自未结晶的深部岩浆房, 但晚于花岗岩 I, 如果花岗岩 I 来自岩浆房中补体的进一步分异演化, 那么, 岩浆房中补体与主体的分异就更可能以液态分异为主, 补体可能非岩浆房的结晶残留岩浆。同时, 石英斑岩较区域花岗岩 K_2O 含量高得多, 分异程度也明显高于区域花岗岩, 它更有可能是深部岩浆房结晶的残余岩浆上侵产物。

3.4 瑶岗仙碱长花岗岩的成因

鉴于粗粒花岗岩包体 I b 来自深部岩浆房中早结晶的花岗岩, 瑶岗仙花岗岩 I 中广泛分布的此类包体说明矿区花岗岩株与深部岩浆房的密切联系。在瑶岗仙矿区的深部, 存在着与区域花岗岩岩性相似性质的花岗岩岩基, 岩性主要为粗粒黑云母二长花岗岩。

区域重力测量也发现, 钨矿区碱长花岗岩株的深部往往发育有大规模花岗岩岩基。图 8 是瑶岗仙地区区域重力异常图, 能清晰显示瑶岗仙-界牌岭一

带深部存在着大型花岗岩岩基, 矿区碱长花岗岩岩体是该岩基分异出的上侵岩柱, 其中高度富含挥发份和成矿物质(图 8 中, 瑶岗仙、界牌岭分别为钨矿、钨锡萤石矿)。这一观点也在以往大量的花岗岩模型图解中得到体现(陈毓川等, 1989)。

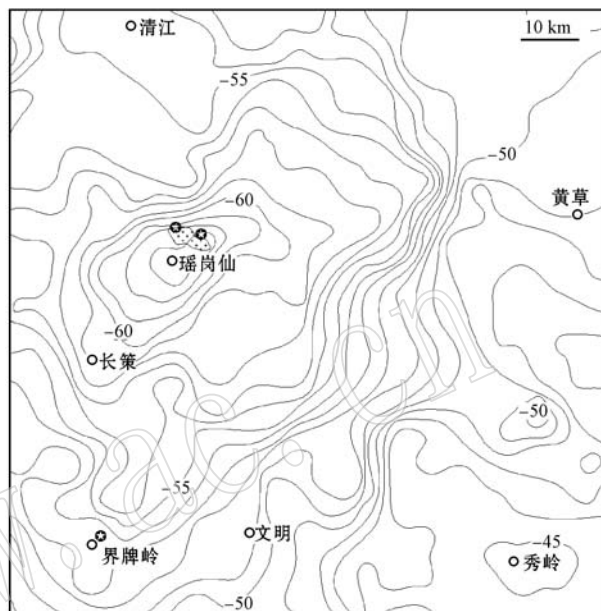


图 8 湖南瑶岗仙-文明一带剩余重力布格异常图(引自湖南省地质矿产局, 1990)^①

Fig. 8 Residual gravity Bouguer anomaly of Yaogangxian-Wenming in Hunan (modified after BGMR of Hunan Province, 1990)^①

3.5 与瑶岗仙钨矿有关的花岗岩岩浆演化轨迹

瑶岗仙岩体及其中包体地质地球化学特征、包体来源等研究揭示出瑶岗仙地区岩浆时空演化序列。燕山早期区域岩浆活动, 在瑶岗仙地区深部形成大规模岩浆房, 形成粗粒斑状二长花岗岩(隐伏岩基), 以花岗岩包体 I b 为代表。岩浆房就位后, 其中分异出分异程度明显高的补体, 岩性主要是细粒黑云母花岗岩, 部分为细粒黑云母碱长花岗岩, 以包体 III b 为代表。这些补体性质的岩浆一部分脱离主体上侵, 形成侵入岩株或岩柱, 上侵过程中进一步分异, 岩浆中 SiO_2 含量、 Rb/Sr 值升高, CaO 、 MnO 、 TiO_2 含量以及 LREE/HREE 值、 δEu 值降低, 直至成矿部位形成碱长花岗岩岩株, 以瑶岗仙花岗岩 I 为代表。就位后的花岗岩进一步分异, 在岩浆岩体

① 湖南省地质矿产局. 1990. 中华人民共和国区域地质调查报告(比例尺 1:50 000), 瑶岗仙幅(G-49-95-B).

的顶部形成更加富含挥发分的浅色细粒花岗岩,即瑶岗仙花岗岩Ⅱ。整个演化过程中,挥发分、成矿物质不断富集,聚集于岩体顶部附近。随温度、压力的降低,花岗岩Ⅰ中挥发分和成矿物质自岩浆中分异出来,形成富含成矿物质和挥发分的熔浆(浆液过渡态流体),在岩体顶部附近冷凝形成云英岩析离体,大部分脱离熔浆或花岗岩,形成云英岩型矿化以及进一步演化形成的含钨石英脉等。花岗岩Ⅱ代表的富含挥发分和成矿物质的岩浆与碳酸盐岩围岩作用,形成矽卡岩型钨矿床。

成矿后,深部岩浆房结晶分异的残余岩浆沿NW向断裂上升,形成石英斑岩脉。其中含有较多挥发分, K_2O 含量明显高于岩浆房以及瑶岗仙岩体,但分异差,上升过程中捕虏了补体或花岗岩柱中下部的细粒黑云母花岗岩。

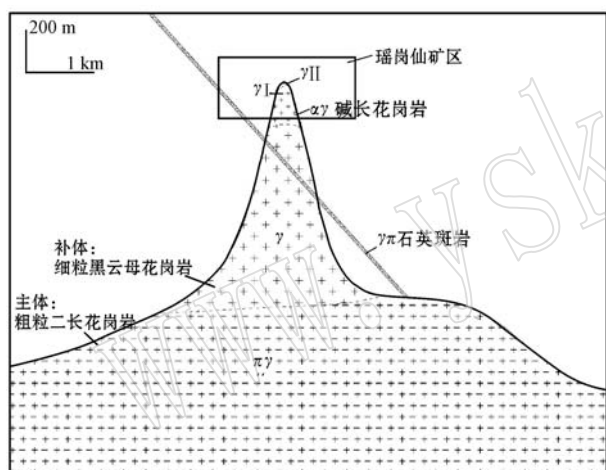


图9 瑶岗仙地区花岗岩浆演化模型示意图

Fig. 9 The evolution model of granite in the Yaogangxian area

4 结论

瑶岗仙花岗岩中发育多种不同地质地球化学性质的包体(捕虏体或析离体),碱长花岗岩(Ⅰ)中的二长花岗岩包体(Ⅰb)来自深部岩浆房中早期结晶的花岗岩,性质与区域花岗岩相近;石英闪长斑岩和黑色包体为前寒武纪变质岩在重熔时的残留;云英岩析离体是花岗岩Ⅰ的岩浆晚期进一步分异形成的浆液过渡态流体结晶沉淀而成。产于石英斑岩中的细粒黑云母花岗岩包体(Ⅲb)捕获自岩浆房中分异的补体或补体上升时初步分异形成的花岗岩。

形成瑶岗仙岩体的花岗岩浆高度富含挥发分和

成矿物质,致使其中的包体强烈同化混染,包体边部含大量来自碱长花岗岩浆的物质,富含萤石、云母、电气石等以及硫化物矿物。

瑶岗仙岩体是区域花岗岩基所代表的岩浆房高度分异的岩浆上侵的产物,上侵过程中不断分异。石英斑岩岩浆直接来自于岩浆房结晶分异残留岩浆,而非瑶岗仙碱长花岗岩的岩浆进一步分异的产物。

建立了瑶岗仙地区燕山早期岩浆演化序列:深部大规模的岩浆房,其主体以区域黑云母二长花岗岩为代表;其中分异出不规则分布的补体,岩性主要为细粒黑云母花岗岩;补体的岩浆部分脱离岩浆房上侵,上侵过程中不断分异,最终形成碱长花岗岩岩株。这类高度演化富含挥发分和成矿物质的碱长花岗岩岩浆,进一步分异出高度富含成矿物质的浆液过渡态流体成矿,以云英岩析离体为代表。这类流体在岩体顶部附近以石英脉的形式成矿,或与围岩作用形成矽卡岩型矿床。之后,深部岩浆房结晶残余的岩浆沿断裂上侵,形成石英斑岩脉。

致谢 野外地质工作中得到湖南瑶岗仙钨矿陈依壤、何小平、喻平等同志的指导和大力帮助,在此表示感谢。

References

- Chen Yirang. 1981. Geological characteristics and prospecting criteria of Yaogangxian vein-tungsten deposit[J]. *Geology and Prospecting*, 17(1): 25~30(in Chinese).
- Chen Yirang. 1988. Geological and geochemical characteristics and diagenetic-mineragenetic processes of Yaogangxian granite[J]. *Mineral Resource and Geology*, 2(1): 62~72(in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Zhang Hongliang, et al. 1989. The Geology of Nonferrous and Rare Metal Deposits Related to Mesozoic Granitoids in the Nanling Region, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 414~463(in Chinese with English abstract).
- Cheng Shunbo, Fu Jianming, Xu Deming, et al. 2009. Geochemical characteristics and petrogenesis of Xuehuading granitic batholith and its enclaves, South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(4): 588~597(in Chinese with English abstract).
- Fu Jianming, Xie Caifu, Peng Songbe, et al. 2006. Geochemistry and crust-mantle magmatic mixing of the Qitianling granites and their

- dark micro-granular enclaves in Hunan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(6): 557~569 (in Chinese with English abstract).
- Fu Qibin. 2013. The Characteristic of the Greisen Inclusion in the Alkali Feldspar Granite in Yaogangxian Tungsten Deposit, Hunan Province[D]. Yunnan: Kunming University of Science and Technology Master Thesis(in Chinese with English abstract).
- Gu Shengyan, Hua Renmin and Qi Huawen. 2006. Geochemistry and petrogenesis of the Yanshanian Huashan-Guposhan granites in Guangxi[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(2): 97~109 (in Chinese with English abstract).
- Hsu Keechin. 1957. Discovery of pyrometasomatic scheelite deposits near a wolframite-producing district in southern China, and a discussion about the origin of these two classes of deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 37(2): 117~151(in Chinese with English abstract).
- Huang Huiqing, Li Xianhua, Li Wuxian, *et al.* 2008. Age and origin of the Dadongshan granite from the Nanling Range: SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 317~333(in Chinese with English abstract).
- Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Jiang Yaohui, *et al.* 2008. Characteristics and genesis of Mesozoic A-type granites and associated mineral deposits in the southern Hunan and northern Guangxi provinces along the Shi-Hang belt, South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 496~509 (in Chinese with English abstract).
- Li Fuchun, Zhu Jinchu, Rao Bing, *et al.* 2003. Experimental evidence for presence of magmatic Fe- and Li-muscovite in the Li-F-rich granite[J]. *Geochimica*, 32(1): 75~80 (in Chinese with English abstract).
- Li Shunting, Wang Jingbing, Zhu Xinyou, *et al.* 2011. Chronological characteristics of the Yaogangxian composite pluton in Hunan Province[J]. *Geology and Exploration*, 47(2): 143~150(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoming, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, *et al.* 2010. Geochemistry and tin metallogenic potential for Qitianling granite mass in southern Hunan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(1): 80~92(in Chinese with English abstract).
- Lin Xinduo, Zhang Chuanling and Zhang Dehui. 1987. Vertical zonation of tungsten-bearing quartz veins and mineralizations in Yaogangxian, Hunan[J]. *Geological Review*, 33(6): 539~546(in Chinese with English abstract).
- Lin Xinduo, Zhang Dehui and Zhang Chuanling. 1986. A discussion on the property of ore-forming fluid of the wolframite quartz-vein in the Yaogangxian tungsten deposit, Yizhang County, Hunan Province[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 11(2): 153~160(in Chinese with English abstract).
- Liu Shanbao, Wang Denghong, Chen Yuchuan, *et al.* 2007. SHRIMP dating of Tianmenshan granite pluton and granite-porphyry dyke in southern Jiangxi province, eastern Nanling region, and its significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 972~978(in Chinese with English abstract).
- Liu Weiming. 1994. Discussion on enclave characteristics and rock-forming material source in Dajishan rock body[J]. *Journal of Southern Institute of Metallurgy*, 15(3): 155~160(in Chinese with English abstract).
- Liu Yong, Li Tingdong, Xiao Qinghui, *et al.* 2011. Qitianling granite magma mixing origin: the host rock and its micro-granular dioritic enclaves of zircon U-Pb dating and Hf isotope evidence[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(2): 19~27(in Chinese with English abstract).
- Ma Tieqiu, Wu Guangying, Jia Baohua, *et al.* 2005. Middle- Late Jurassic granite magma-mixing in the middle segment of the Nanling mountains, South China: Evidence from mafic micro-granular enclaves[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(6): 506~512(in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120: 223~253.
- Peng Zhuolun, Rodney G, Zhuang Wenming, *et al.* 2011. Genesis of mafic micro-granular enclaves in granites in SE China[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 82~88 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chuansheng, Wang Xiang and Yao Xiaojuan. 2004. Petrogenetic models of the composite granitic plutons in the mid-western Nanling Region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(3): 203~213(in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi. 2004. The study of granitic rocks in south China: looking back and forward. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 305~314(in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi and Shen Weizhou. 2003. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 209~220(in Chinese with English abstract).
- Wang Jingbin. 1991. Geochemical feature and structural implication of Huziyan basalt rock mass and its xenolith in Dao county[J]. *Hunan Geology*, 10(1): 54~60(in Chinese with English abstract).
- Wang Jionghui, Ma Xinghua, Li Yi, *et al.* 2014. Petrogenesis of granitic complexes and implications for the W-Mo mineralization: a case study from the Younipo pluton, Guangxi province[J]. *Acta Geologica Sinica*

- ca, 88(7): 1 219~1 235(in Chinese with English abstract).
- Wang Liankui and Huang Zhilong. 2000. Liquid Immiscibility of Li-F Granite Magma: Characteristic and Experiment[M]. Beijing: Science Press, 1~236 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanli, Zhu Xinyou, Peng Qiming, *et al.* 2014. Dark inclusion in the Yaogangxian granite, Hunan province and its geochemical characteristics[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 33(3): 299~308 (in Chinese with English abstract).
- Wu Junqi, Min Maozhong, Zhai Jianping, *et al.* 1998. Alkali metasomatic alteration of the granite in middle Chuguang mountain, south China[J]. Acta Petrologica Sinica, 14(1): 90~98(in Chinese with English abstract).
- Xu Keqin, Sun Nai, Wang Dezi, *et al.* 1984. Petrogenesis of the granitoids and their metallogenetic relations in south China[A]. Xu Keqin and Tu Guangzhi. Geology of granites and their metallogenetic relations[C]. Proceedings of the international symposium, Nanjing University. Beijing: Science Press, 1~31.
- Yin Zhengping, Ling Hongfei, Huang Guolong, *et al.* 2010. Research on geochemical characteristics and genesis of Jiufeng rock mass in northern Guangdong province[J]. Journal of East China Institute of Technology, 33(1): 15~21(in Chinese with English abstract).
- Yu Zhifeng, Xu H, Zhu X Y, *et al.* 2015. Characteristics and evolution of ore-forming fluids in Yaogangxian tungsten deposit, Hunan[J]. Mineral Deposits, 34(2): 309~320 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Min, Chen Peirong, Zhang Wenlan, *et al.* 2003. Geochemical characteristics and petrogenesis of Dadongshan granite pluton in mid Nanling Range[J]. Geochemica, 32(6): 529~539 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jincheng and Xu Xisheng. 1992. Microgranitoid enclaves and related diffusion and liquid immiscibility of magmas—evidence from the Guidong and Shangbao pluton[J]. Geological Review, 38(3): 197~209(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin. 2007. Petrogenesis of the Late Mesozoic Granitoids in the Nanling Range and Geodynamic Evolution of Lithosphere [M]. Beijing: Science Press, 1~690(in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Chen Jun, Wang Rucheng, *et al.* 2008. Early Yanshanian NE trending Sn/W-bearing A-type granites in the western-middle part of the Nanling Mts region[J]. Geological Journal of China Universities, 14(4): 474~484 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Wang Rucheng, Zhang Peihua, *et al.* 2009. Zircon U-Pb geochronological framework of Qitianling granite batholith, middle part of Nanling Range, South China[J]. Sci. China Ser. D-Earth Sci., 52: 154~157.
- Zhu Jinchu, Zhang Peihua, Xie Caifu, *et al.* 2006. Magma mixing origin of the mafic enclaves in Lisong Granite, NE Guangxi, western Nanling mountains[J]. Geochemica, 35(5): 506~516(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yanli, *et al.* 2012. Characteristics of alkali feldspar granite in tungsten (tin) deposits of Nanling region[J]. Geology in China, 39(2): 359~381(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yanli, *et al.* 2013. Characteristics of greisen inclusions in alkali feldspar granite of Yaogangxian tungsten deposit[J]. Mineral Deposits, 32(3): 533~544(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yanli, *et al.* 2014. Relative closed ore-forming in the Tungsten-Bearing quartz Vein: a case study of the Yaogangxian, Hunan Province[J]. Acta Geologica Sinica, 88(5): 825~835(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Yanli, Cheng Xiyin, *et al.* 2015. The metallogenic system of quartz vein-type tungsten deposit, Yaogangxian, Hunan province[J]. Mineral Deposits, 34(5): 874~894(in Chinese with English abstract) (in press).
- Zhu Xinyou, Wang Yanli, Cheng Xiyin, *et al.* 2016. The granite magma evolution and enrichment mechanism of W-Sn: Yaogangxian tungsten deposit as an example, Hunan province[J]. Geological Review(in Chinese with English abstract) (in press).

附中文参考文献

- 陈依壤. 1981. 瑶岗仙脉钨矿床地质特征与找矿标志[J]. 地质与勘探, 17(1): 25~30.
- 陈依壤. 1988. 瑶岗仙花岗岩地质地球化学特征与成岩成矿作用[J]. 矿产与地质, 2(1): 62~72.
- 陈毓川, 裴荣富, 张宏良, 等. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 414~463.
- 程顺波, 付建明, 徐德明, 等. 2009. 湖南雪花顶花岗岩及其包体的地质地球化学特征和成因分析[J]. 大地构造与成矿学, 33(4): 588~597.
- 付建明, 谢才富, 彭松柏, 等. 2006. 湖南骑田岭花岗岩及其暗色微粒包体的地球化学与壳幔岩浆的混合作用[J]. 地球学报, 27(6): 557~569.
- 傅其斌. 2013. 湖南瑶岗仙钨矿云英岩析离体研究(硕士研究生论文)[D]. 昆明理工大学.
- 顾晨彦, 华仁民, 戚华文. 2006. 广西花山-姑婆山燕山期花岗岩的地球化学特征及成因研究[J]. 岩石矿物学杂志, 25(2): 97~109.

- 黄会清, 李献华, 李武显, 等. 2008. 南岭大东山花岗岩的形成时代与成因——SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学[J]. 高校地质学报, 14(3): 317~333.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 等. 2008. 十杭带湘南—桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论[J]. 高校地质学报, 14(4): 496~509.
- 李顺庭, 王京彬, 祝新友, 等. 2011. 湖南瑶岗仙复式岩体的年代学特征[J]. 地质与勘探, 47(2): 143~150.
- 李晓敏, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 2010. 湘南骑田岭花岗岩岩体地球化学特征及锡成矿潜力[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(1): 80~92.
- 林新多, 张德会, 章传玲. 1986. 湖南宜章瑶岗仙黑钨矿石英脉成矿流体性质的探讨[J]. 地球科学, 11(2): 153~160.
- 林新多, 章传玲, 张德会. 1987. 初论湖南瑶岗仙含钨矿脉及矿化的垂直分带[J]. 地质论评, 33(6): 539~546.
- 刘勇, 肖庆辉, 耿树方, 等. 2011. 骑田岭花岗岩体的岩浆混合成因: 寄主岩及其暗色闪长质微细粒包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 地质科技情报, 30(2): 19~28.
- 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 等. 2007. 南岭东段赣南地区天门山花岗岩体及花岗岩斑岩脉的 SHRIMP 定年及其意义[J]. 地质学报, 81(7): 972~978.
- 刘卫明. 1994. 大吉山岩体中包体特征及成岩物质来源的探讨[J]. 南方冶金学院学报, 15(3): 155~160.
- 马铁球, 伍光英, 贾宝华, 等. 2005. 南岭中段郴州一带中、晚侏罗世花岗岩浆的混合作用——来自镁铁质微粒包体的证据[J]. 地质通报, 24(6): 506~512.
- 彭卓伦, Rodney Grapes, 庄文明, 等. 2011. 华南花岗岩暗色微粒包体成因研究[J]. 地学前缘, 18(1): 82~88.
- 汪传胜, 汪相, 姚晓娟. 2004. 南岭中西段若干复式花岗岩体的成因模式研究[J]. 岩石矿物学杂志, 32(3): 203~213.
- 王德滋. 2004. 华南花岗岩研究的回顾与展望[J]. 高校地质学报, 10(3): 305~314.
- 王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地学前缘, 10(3): 209~220.
- 王京彬. 1991. 道县虎子岩岩体及其包体的地球化学特征和构造意义[J]. 湖南地质, 10(1): 54~60.
- 王炯辉, 马星华, 李毅, 等. 2014. 花岗质复式岩体成因及其与 W-Mo 成矿的关系——以广西油麻坡岩体为例[J]. 地质学报, 88(7): 1219~1235.
- 王联魁, 黄智龙. 2000. Li-F 花岗岩液态分离作用与实验[M]. 北京: 科学出版社, 1~236.
- 王艳丽, 祝新友, 彭齐鸣, 等. 2014. 湖南瑶岗仙钨矿花岗岩中暗色包体的发现及其地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 33(3): 299~308.
- 吴俊奇, 闵茂中, 翟建平, 等. 1998. 华南诸广山复式岩体中段花岗岩的碱交代蚀变[J]. 岩石学报, 14(1): 90~98.
- 徐克勤. 1957. 湘南钨铁锰矿区矽卡岩型钙钨矿的发现, 并论两类矿床在成因上的联系[J]. 地质学报, 37(2): 117~151.
- 尹征平, 凌洪飞, 黄国龙, 等. 2010. 粤北九峰岩体的地球化学特征与成因研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 33(1): 15~21.
- 于志峰, 许虹, 祝新友, 等. 2015. 湖南瑶岗仙钨矿床成矿流体演化特征研究[J]. 矿床地质, 34(3): 309~320.
- 张敏, 陈培荣, 张文兰, 等. 2003. 南岭中段大东山花岗岩体的地球化学特征和成因[J]. 地球化学, 529~539.
- 周金城, 徐夕生. 1992. 微花岗岩类包体与岩浆的扩散作用和熔离作用——以诸广山桂东、土堡岩体为例[J]. 地质论评, 38(3): 197~209.
- 周新民. 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社, 1~690.
- 朱金初, 陈骏, 王汝成, 等. 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带[J]. 高校地质学报, 17(4): 474~484.
- 朱金初, 王汝成, 张佩华, 等. 2009. 南岭中段骑田岭花岗岩基的锆石 U-Pb 年代学格架[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 39(8): 1112~1127.
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 等. 2006. 桂东北里松花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因[J]. 地球化学, 35(5): 506~516.
- 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 2012. 南岭锡钨多金属矿区碱长花岗岩的厘定及其意义[J]. 中国地质, 39(2): 359~381.
- 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 2013. 黑钨矿矿床中云英岩析离体及岩浆液态分异成矿研究——以湖南瑶岗仙钨矿为例[J]. 矿床地质, 32(3): 533~544.
- 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 2014. 论石英脉型钨矿成矿系统的相对封闭性[J]. 地质学报, 88(5): 825~835.
- 祝新友, 王艳丽, 程细音, 等. 2015. 湖南瑶岗仙石英脉型钨矿床成矿系统. 矿床地质, 34(5): 874~894.
- 祝新友, 王艳丽, 程细音, 等. 2016. 湖南瑶岗仙花岗岩地质地球化学特征与成矿物质分离富集规律[J]. 地质论评(待刊).