

文章编号: 0258-7106(2013)03-0533-12

# 石英脉型钨矿床中云英岩析离体及岩浆液态分异成矿研究

——以湖南瑶岗仙钨矿床为例\*

祝新友<sup>1,2</sup>, 王京彬<sup>1,2,3</sup>, 王艳丽<sup>2</sup>, 程细音<sup>4</sup>, 何鹏<sup>5</sup>, 傅其斌<sup>4</sup>, 李顺庭<sup>2</sup>

(1 中色地科矿产勘查股份有限公司, 北京 100012; 2 北京矿产地质研究院, 北京 100012;

3 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012; 4 昆明理工大学, 云南 昆明 650093;

5 中国地质大学, 北京 100083)

**摘要** 云英岩析离体(包体)常见于南岭地区石英脉型(黑)钨矿床的成矿花岗岩体顶部附近, 这些析离体多呈不规则椭球状, 与寄主岩石花岗岩围岩界线明显, 无与外面连通的脉体或构造, 分布无规律。在湖南瑶岗仙钨矿床, 云英岩析离体赋存于瑶岗仙岩体主体的灰色斑状碱长花岗岩 $\tilde{N}$ 中, 大部分有分带, 外带为云英岩化碱长花岗岩, 富含辉钼矿, 最高达5%以上, 钠长石An平均为0.64; 内核部分为云英岩, 主要矿物组合为白云母、石英、萤石、黄玉、黑钨矿等, 与黑钨矿石英脉相同, 其黑钨矿含量最高达20%以上, 属热液沉淀形成。云英岩析离体整体呈现出浆液过渡态流体作用的特征, 是富Li-F碱长花岗岩浆液态分异作用的产物。与碱长花岗岩围岩相比, 析离体中富集金属元素W、Mo、Bi及Li、Rb等元素, 相对贫Co、Ni、Sr、Ba等元素, Cu、Pb、Zn的含量变化不明显。这种元素富集规律与区域岩浆演化趋势基本一致, 显示岩浆晚期液态分异形成浆液过渡态流体是W等成矿元素富集的重要机制, 但这一机制并不会导致Pb、Zn的富集, 这一点不同于矽卡岩型钨矿床。石英脉型(黑)钨矿床的成矿地质体是灰色斑状碱长花岗岩 $\tilde{N}$ , 云英岩析离体是该岩体岩浆液态分异的结果, 可以作为识别碱长花岗岩含矿性的重要标志(寻找石英脉型钨矿床)。

**关键词** 地球化学; 石英脉型; 岩浆分异; 不混溶; 钨矿; 湖南省

中图分类号: P618.67

文献标志码: A

## Characteristics of greisen inclusions in alkali feldspar granite of Yaogangxian tungsten deposit

ZHU XinYou<sup>1,2</sup>, WANG JingBin<sup>1,2,3</sup>, WANG YanLi<sup>2</sup>, CHENG XiYin<sup>4</sup>, HE Peng<sup>5</sup>,  
FU QiBin<sup>4</sup> and LI ShunTing<sup>2</sup>

(1 Sinotech Mineral Exploration Co. Ltd., Beijing 100012, China; 2 Beijing Institute of Geology and Mineral Resources, Beijing 100012, China; 3 China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China; 4 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 5 China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

### Abstract

The greisen inclusions usually irregularly occur near the top of the grey alkali feldspar granite in the tung-

\* 本文得到全国危机矿山接替资源找矿项目“湘南-粤北地区锡钨多金属矿床成矿规律总结研究”(20089927)、国家科技支撑课题“湖南锡田地区深部成矿岩体空间结构与成矿预测”(2011BAB04B08)、广西“地质工程中心重点实验室建设”项目(11F031-20K2)联合资助

第一作者简介 祝新友, 男, 1965年生, 教授级高工, 主要从事矿床学研究。Email: zhuxinyou@tom.com

收稿日期 2012-02-21; 改回日期 2012-03-11。张绮玲编辑。

sten deposits of the Nanling tungsten belt. They are mostly in irregular ellipsoid form and occur irregularly in the stage  $\tilde{N}$  gray alkali feldspar granite with obviously boundary between them, and there exists no vein or fault as a channel. The outer part of the inclusion is greisenized alkali feldspar granite that contains very rich molybdenite (5%), in which the average An value of the albite is 0.64. The inner core of the inclusion is greisen with the assemblage of quartz, muscovite, fluorite, topaz, wolframite etc., similar to things of the quartz vein formed from hydrothermal solution. The content of the wolframite can be more than 20%. Compared with granite  $\tilde{N}$ , the inclusion is rich in W, Mo, Bi, Li and Rb and poor in Co, Ni, Sr and Ba, with no obvious change of Pb, Zn and Cu. Studies of geology and geochemistry of the inclusions from the Yaogangxian tungsten deposit in Hunan Province show that the greisen inclusions were formed from liquid immiscibility of the LrF alkali feldspar granite magma, which produced magmatic hydrothermal transition state and hydrothermal solution. The liquid immiscibility seems to have been the main mechanism for concentration or mineralization of such elements as W, Mo and Bi, but without concentration of Pb and Zn, which is different from things in the skarr type tungsten deposit. The formation of the veir type tungsten deposit was related to stage  $\tilde{N}$  gray alkali feldspar granite. The greisen inclusions constitute an important indicator for evaluating the granite in search for ore deposits.

**Key words:** geochemistry, quartz veir type, magma separation, liquid immiscibility, tungsten deposit, Hunan Province

湖南瑶岗仙同时发育石英脉型黑钨矿和矽卡岩型白钨矿两个超大型矿床, 20世纪40年代以来开展过大量的研究工作(徐克勤, 1957; 陈依壤, 1988; 林新多等, 1986; 1987)。南岭钨矿化花岗岩以富含 LrF 为特征, 在很多成矿花岗岩中发现过似伟晶岩、细晶岩、云英岩析离体等岩浆液态分异的地质现象(王联魁等, 1983; 1987; 2000; 任云生等, 2003; 朱永峰等, 1995; 彭省临等, 1995; 陈毓川等, 1989), 其中云英岩析离体是岩浆液态分异的重要标志(王联魁等, 2000), 以往也称之为云英岩包体。近年来, 随着瑶岗仙钨矿危机矿山勘查和研究工作, 以及大规模开采揭露出更多的地质现象, 在岩体中发现了多处云英岩析离体, 其中很多富含黑钨矿和辉钼矿。通过这些云英岩析离体的研究, 对钨锡成矿花岗岩的岩浆分异理论的深化以及岩体成矿评价指标都有重要意义。

## 1 瑶岗仙矿床地质特征

瑶岗仙矿区出露地层包括寒武系( $\epsilon$ )槽型沉积的变质石英砂岩、泥盆系跳马涧组( $D_2t$ )中厚层滨海相砂岩、棋梓桥组( $D_2q$ )灰岩夹细碎屑岩及下侏罗统含煤陆相碎屑岩等。寒武系变质石英砂岩和跳马涧组砂岩为岩体的主要直接围岩(图1)。

酸性岩浆活动有3类, 前人称之为3期(也有研究划分为多期), 包括灰色中粒斑状碱长花岗岩

( $\gamma^{\tilde{N}}$ )、淡色细粒斑状碱长花岗岩( $\gamma^{\tilde{O}}$ )及成矿后发育的NW方向石英斑岩脉。灰色碱长花岗岩 $\tilde{N}$ 为岩体的主体, 淡色细粒碱长花岗岩 $\tilde{O}$ 呈楔形状分布于岩体的东南角碱长花岗岩 $\tilde{N}$ 与泥盆系跳马涧组砂岩之间。两类花岗岩成分相似, 前者灰色中粒, 后者浅灰白色细粒。斑晶为钾长石, 铁白云母或白云母含量4%~5%, 发育钾长石、钠长石两种碱性长石, 含量相当, 少量毒砂、石榴子石、闪锌矿、黄铜矿等。其中, 碱长花岗岩 $\tilde{N}$ 的57件钠长石样品, An=0.00~3.58, 平均0.70; 碱长花岗岩 $\tilde{O}$ 的8件钠长石样品, An=0.04~8.08, 平均3.45。石英斑岩脉呈NW向自杨梅岭一带经过, 切断黑钨矿石英脉。锆石SHRIMP U-Pb定年显示3期岩体均在(155~158)Ma, 属燕山早期侵入体。

黑钨矿石英脉分布于岩体西北侧内外接触带附近, 达百余条, 主要呈NWW-NW向分布, 陡倾, 穿切岩体、寒武系变质细砂岩、 $D_2t$ 砂岩以及三叠系陆相碎屑岩。矿脉最大延深>1300m。远离岩体的杨梅岭一带的黑钨矿石英脉中富含辉钼矿, 矿田外围地区出现铅锌银矿-白钨矿。矽卡岩型钨矿床位于矿田东侧, 产于淡色细粒碱长花岗岩 $\tilde{O}$ 外接触带的 $D_2t$ 砂岩与 $D_2q$ 灰岩间, 主要矿物为石榴子石、符山石、透辉石等矽卡岩矿物以及白钨矿、辉钼矿、锡石、辉铋矿等。黑钨矿矿床和白钨矿矿床的辉钼矿Re-Os等时线年龄分别为158Ma和160Ma, 大体与岩体侵入年龄一致。

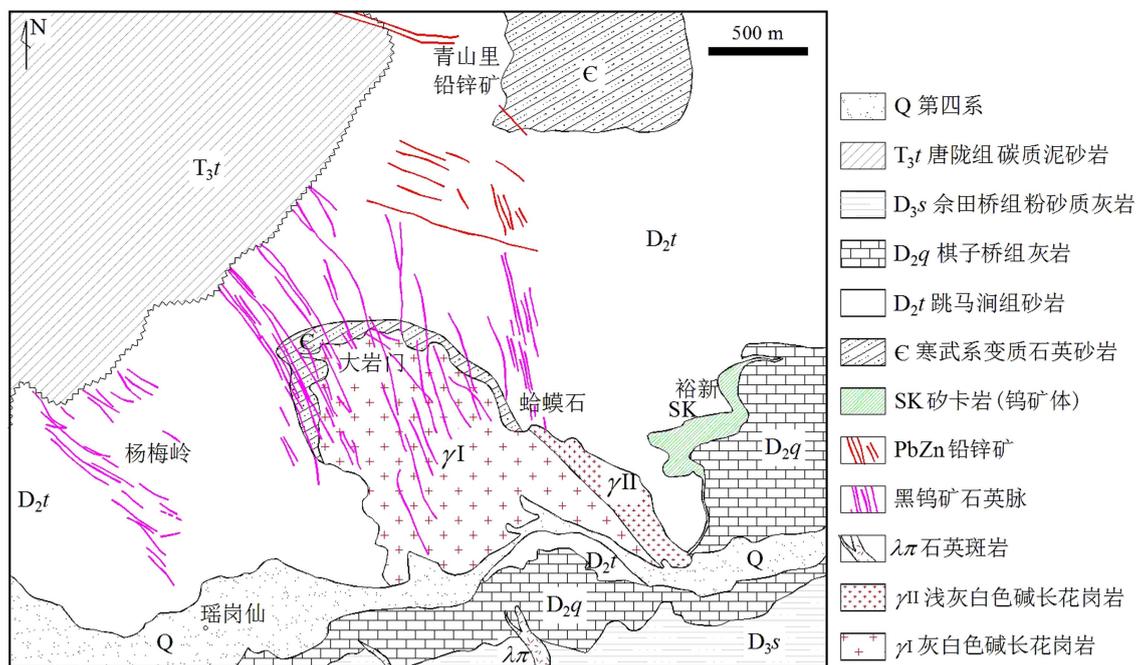


图 1 瑶岗仙钨矿区矿产地质简图

Fig. 1 Geological map of the Yao gangxian tungsten ore district, Hunan Province

## 2 瑶岗仙矿床中云英岩析离体的地质特征

瑶岗仙矿床中发育有 4 类云英岩, 一种是分布于黑钨矿石英脉边部的云英岩化, 属花岗岩围岩蚀变的结果; 另一种是黑钨矿矿床下部中段与石英脉共生的云英岩脉, 分布于矿床深部, 显示黑钨矿石英脉在深部向云英岩过渡; 第三种是花岗岩顶部出现的花岗云英岩脉, 花岗岩结构-热液交代结构过渡类型; 第四种是不规则分布于岩体中的云英岩析离体。本文重点阐述最后一种——云英岩析离体。

在瑶岗仙矿床, 云英岩析离体大部分见于岩体中上部 16 中段及以上, 共发现 10 处, 除一处产于细晶岩脉中外, 其余几处全部产于碱长花岗岩  $\tilde{N}$  中。这些云英岩析离体分布无规律性, 析离体之间孤立、无联系, 在花岗岩内, 无断裂裂隙或细脉的连通, 大部分远离含矿石英脉。云英岩析离体形态多呈椭球状(图 2a、c、e、f)、少部分呈不规则状(图 2b), 长轴方向多呈 NE 方向。析离体直径一般  $< 1$  m, 少量达到 2 m 以上, 在 16 中段, 最大的析离体直径  $> 20$  m, 富含辉钨矿、黑钨矿矿化形成钨钼富矿包(已采空), 以往矿山及地质部门将之称为岩体型矿化。析离体与

花岗岩围岩界线明显, 迅速过渡, 边部的花岗岩新鲜, 无明显的热液蚀变, 与析离体内的强烈热液蚀变形成反差。大部分析离体呈灰白色, 在 23 中段碱长花岗岩  $\tilde{N}$  中发现一处灰黑色析离体(或包体), 直径约 30 cm, 其中含钠长石、钾长石、石英以及较多的黑磷云母、绿泥石, 富含硫化物矿物, 总量  $> 5\%$ , 主要有磁黄铁矿、白铁矿以及少量闪锌矿、黄铜矿等。云英岩析离体的形成早于黑钨矿石英脉, 被石英脉切断(图 2a), 析离体的分布与石英脉的分布也不存在明显的空间关系。云英岩析离体分布无规律性, 析离体在岩体中是独立的, 与花岗岩围岩界线明显, 花岗岩围岩无蚀变, 这些特点足以说明, 云英岩析离体是岩浆分异的产物, 而非花岗岩蚀变的结果。

析离体富含锂云母和钨钼矿化, 颜色明显暗于花岗岩围岩。内部结构简单, 大部分析离体可见矿物成分分带现象(图 2e、f), 除少量析离体外, 大部分析离体内带、外带界线不明显。

析离体内带为富含白云母、黄玉的云英岩, 占析离体的 1/2 左右(直径), 属热液交代结构, 白云母含量  $> 50\%$ , 部分可达到 80% 或更高, 半自形晶, 粒状(图 3a), 粒径 2~5 mm。主要矿物白云母、石英、萤石(图 3a)、黄玉、方解石、白云石、电气石、黑钨矿等, 少量锡石、毒砂及黄铁矿、闪锌矿(图 3b、c)、黝铜

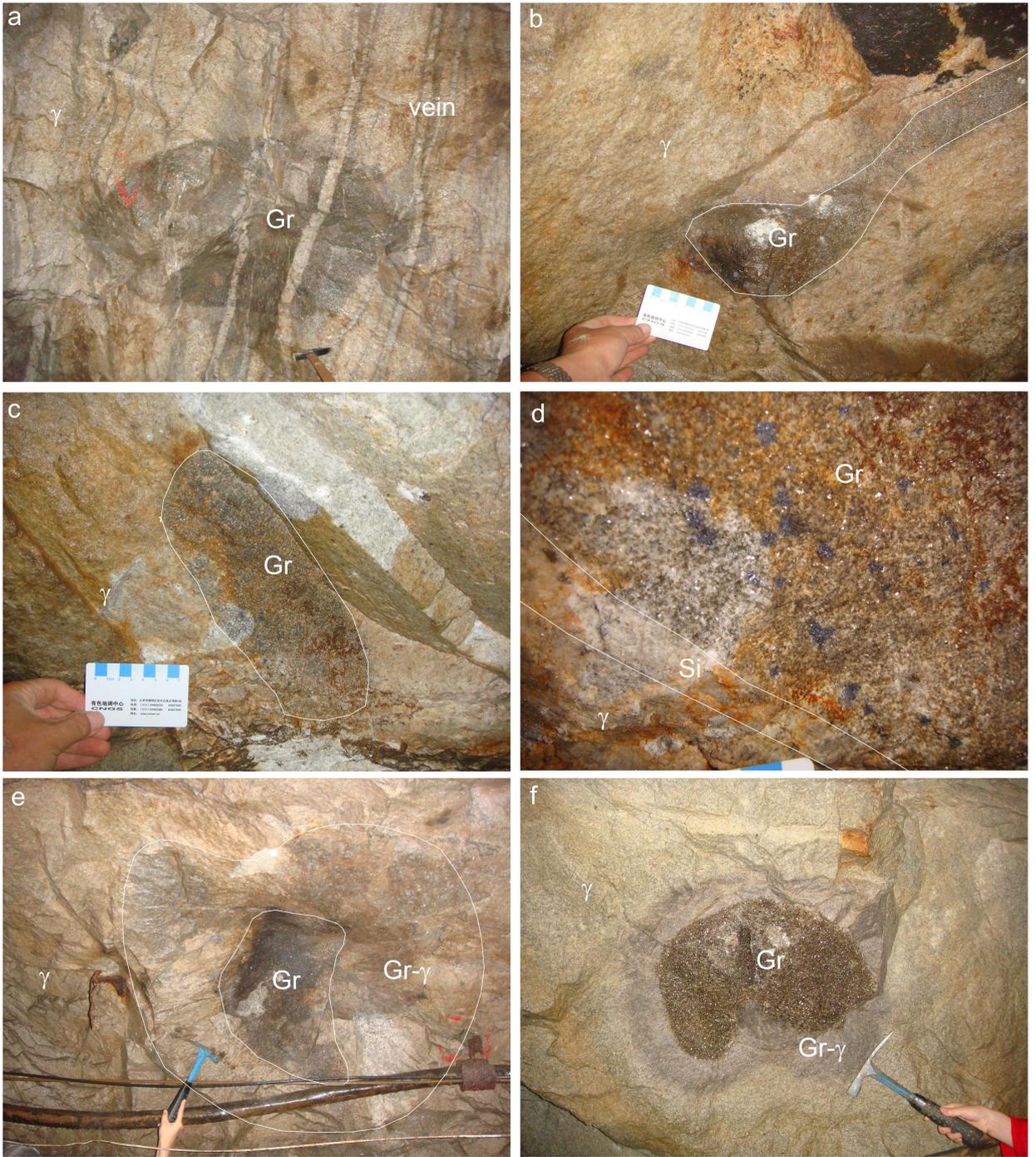


图2 瑶岗仙钨矿床的云英岩析离体形态特征

a. 灰色云英岩析离体(Gr)被黑钨矿石英脉(vein)切割; b. 云英岩析离体(Gr)呈不规则状; c. 细晶岩脉( $\gamma$ )中的云英岩析离体(Gr); d. 照片c的局部放大,析离体(Gr)中富含浸染状辉钼矿(灰色斑点),边部发育石英壳(Si); e. 析离体发育环带,内部为富锂云母云英岩(Gr),外带为云英岩化碱长花岗岩(Gr $\gamma$ ); a~e, 瑶岗仙16中段; f. 云英岩析离体发育环带,内带主要由云母构成(Gr),外带为硅化碱长花岗岩(Gr $\gamma$ ),石人嶂

Fig. 2 Photograph of greisen inclusion in granite I, the Yaogangxian tungsten deposit

a. Greisen inclusion (Gr) cut by quartz vein (vein); b. Irregularly shaped inclusion; c. Inclusion in aplite vein ( $\gamma$ ); d. Enlarged part of photo c, the inclusion (Gr) contains abundant Mo (gray), quartz shell (Si) occurs at the margin. e. The core of the inclusion is greisen (Gr), and the outer zone is greisen-alkali feldspar granite (Gr $\gamma$ ); a~e, Ore pit at level 16, the Yaogangxian deposit. F. Zoning of the inclusion, the core (Gr) is rich in muscovite, the outside is greisen-alkali feldspar granite, the Shirenzhang W deposit

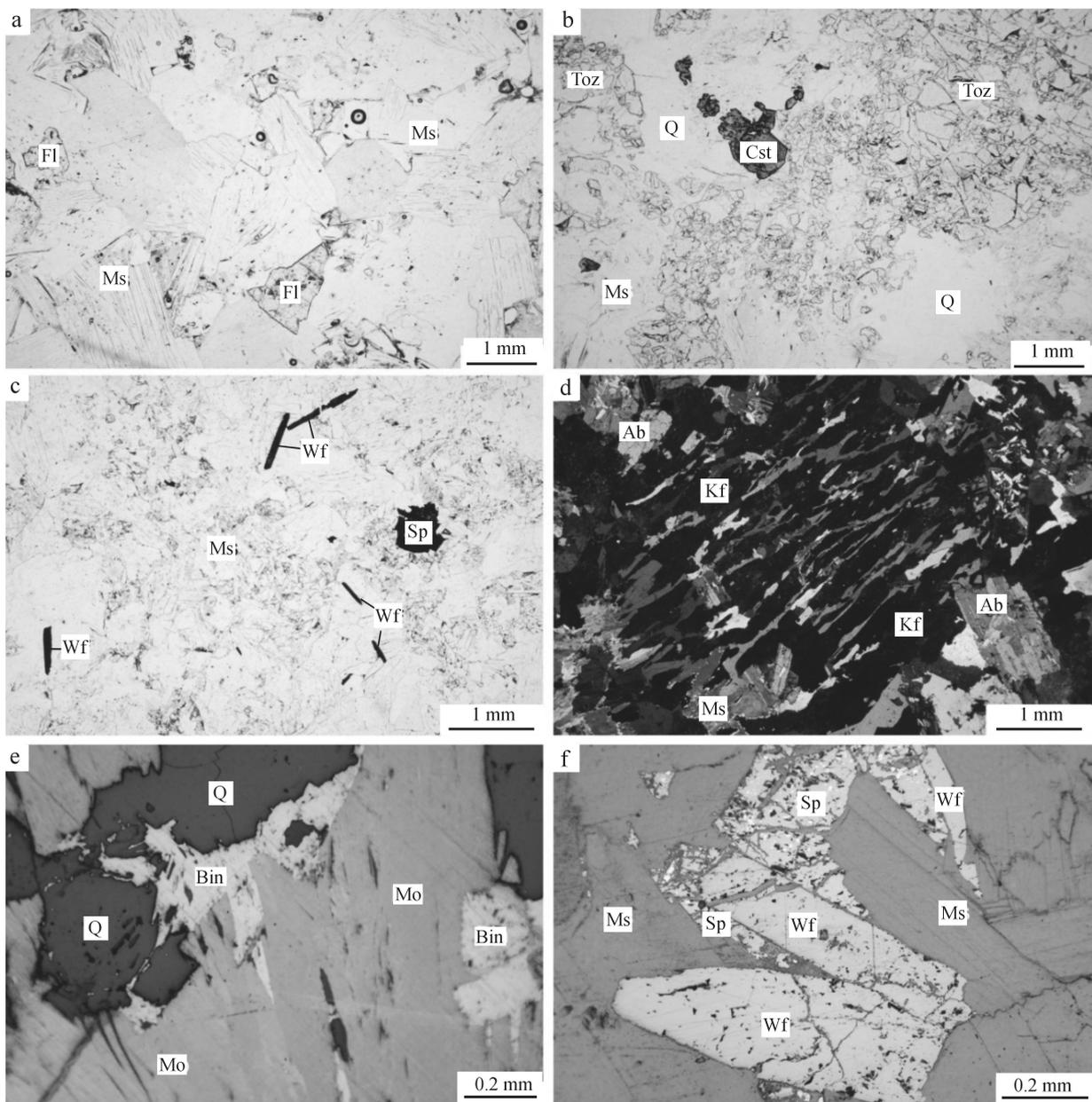


图 3 云英岩析离体矿物组合特征

a. 云英岩析离体核部以白云母(Ms)为主, 常见萤石(Fl); b. 锡石(Cst)、黄玉(Toz)、石英(Q)共生; c. 云英岩中分散的黑钨矿(Wf)、闪锌矿(Sp)和白云母(Ms)共生; d. 钾长石(Kf)与钠长石(Ab)形成的条纹长石, 白云母(Ms)化; e. 辉钼矿(Mo)、辉铋矿(Bin)与石英(Q)共生; f. 闪锌矿(Sp)与黑钨矿(Wf)共生, 闪锌矿中含乳滴状黄铜矿、黝铜矿。a~c: 透射光, 单偏光; d: 透射光, 正交偏光; e、f: 反射光, 单偏光

Fig. 3 Microphoto of the greisen inclusion

a. Core of the inclusion, main mineral: muscovite (Ms) and fluorite (Fl); b. Quartz (Q), cassiterite (Cst) and topaz (Toz) are common minerals; c. Dispersed wolframite, the sphalerite coexists with muscovite; d. Perthite, altered by muscovite; E. Molybdenite and bismuthinite coexist with quartz; f. Wolframite, sphalerite with chalcopyrite and tetrahedrite inclusion, coexistent with muscovite. a~c. Transmitted light, plainlight; d. Transmitted light, crossed nicols; e and f. Reflected light, plainlight

矿、黄铜矿、方铅矿等, 大部分析离体核部不含长石, 白云母富锂, 部分呈浅绿色, 含少量 Cr。黑钨矿主要富集于析离体的内带, 部分析离体中, 内带云英岩的

黑钨矿含量可达 10% 以上(图 3c), 原生钨矿物为黑钨矿, 不含原生白钨矿, 部分析离体中含浸染状白钨矿, 这种白钨矿中一般含有黑钨矿残留, 或保留有黑

钨矿的板状晶形,或发育于蚀变黑钨矿边部。

析离体外带为云英岩化花岗岩,细粒花岗结构为主,以岩浆结晶结构为特征。主要矿物为钠长石( $A_n < 2$ )、钾长石、石英、少量黄玉、萤石等,富含辉钼矿、毒砂等硫化物。钾长石他形粒状,含量10%~35%,部分为条纹长石(图3d),钠长石结晶较早,被钾长石、石英交代。白云母含量变化较大,5%~20%,向核部逐渐增高,交代钾长石和钠长石,自形细粒片状,部分保留有长石的外形。外带中的黑钨矿含量相对低,但大部分析离体富含辉钼矿,部分析离体辉钼矿含量达到10%以上,呈细粒浸染状分布(图2d,3e)。在析离体边缘,常发育有1~3cm的石英壳(图2d、f)。闪锌矿呈分散浸染状,常见与黑钨矿共生(图3f)。

云英岩析离体中萤石及石英内富含流体包裹体,花岗结构的外带长石、石英中含有熔融包裹体,

内带云英岩的萤石中常见三相富 $CO_2$ 流体包裹体,特点与黑钨矿石英脉相似。

### 3 云英岩析离体地球化学特征

#### 3.1 钠长石成分

析离体中的长石均为碱性长石,与灰色碱长花岗岩 $\tilde{N}$ 相似。电子探针分析(表1)显示,析离体外带云英岩化花岗岩中的钠长石的 $A_n = 0.00 \sim 2.19$ ,平均0.64,  $O_r$ 值平均0.98,较碱长花岗岩更加富钠,  $K_2O$ 略高。灰色碱长花岗岩中,钠长石 $A_n = 0.00 \sim 3.58$ ,平均1.08,  $O_r$ 平均0.85。显示出云英岩析离体较灰色碱长花岗岩分异更加深化。白云母 $w(Fe)$ 为0.5%~7.5%,变化较大,稍低于碱长花岗岩 $\tilde{N}$ 。

#### 3.2 主量及微量元素地球化学

云英岩析离体成分差异很大,析离体中分异程

表1 云英岩析离体中钠长石电子探针分析

Table 1 Electron microprobe analyses of albite in greisen inclusion

标本号	$w(B)/\%$						分子式	Ab	An	Or
	$Na_2O$	$SiO_2$	CaO	$K_2O$	$Al_2O_3$	总和				
云英岩析离体										
YGB331	11.990	67.300	0.160	0.110	19.680	99.24	$K_{0.006}Na_{0.891}Ca_{0.008}Al_{1.033}Si_{2.997}O_8$	98.47	0.84	0.69
YGB331	11.950	67.580	0.090	0.190	19.790	99.60	$K_{0.011}Na_{0.888}Ca_{0.004}Al_{1.035}Si_{2.998}O_8$	98.33	0.48	1.19
YGB331	11.440	66.490	0.210	0.180	19.630	97.95	$K_{0.010}Na_{0.860}Ca_{0.010}Al_{1.042}Si_{2.996}O_8$	97.67	1.15	1.17
YGB349	11.760	67.650	0.110	0.140	19.180	98.84	$K_{0.008}Na_{0.876}Ca_{0.005}Al_{1.009}Si_{3.020}O_8$	98.51	0.59	0.90
YGB349	11.640	67.760	0.120	0.190	19.640	99.35	$K_{0.011}Na_{0.863}Ca_{0.006}Al_{1.027}Si_{3.008}O_8$	98.13	0.65	1.22
YGB349	11.376	68.436	0.287	0.195	19.703	100.00	$K_{0.011}Na_{0.837}Ca_{0.014}Al_{1.023}Si_{3.014}O_8$	97.15	1.57	1.27
YGB349	9.063	70.726	0.000	0.069	19.407	99.27	$K_{0.004}Na_{0.660}Ca_{0.000}Al_{0.998}Si_{3.086}O_8$	99.42	0.00	0.58
YGB349	10.358	68.819	0.091	0.160	19.104	98.53	$K_{0.009}Na_{0.767}Ca_{0.004}Al_{0.999}Si_{3.054}O_8$	98.29	0.55	1.16
YGB350	11.090	69.565	0.025	0.083	18.795	99.56	$K_{0.005}Na_{0.815}Ca_{0.001}Al_{0.975}Si_{3.068}O_8$	99.29	0.14	0.57
YGB350	11.590	68.240	0.070	0.200	19.640	99.74	$K_{0.011}Na_{0.855}Ca_{0.003}Al_{1.023}Si_{3.015}O_8$	98.32	0.38	1.30
YGB350	11.690	66.820	0.250	0.180	19.650	98.59	$K_{0.010}Na_{0.875}Ca_{0.012}Al_{1.038}Si_{2.994}O_8$	97.51	1.34	1.15
YGB350	11.140	67.488	0.137	0.236	19.302	98.30	$K_{0.013}Na_{0.833}Ca_{0.007}Al_{1.018}Si_{3.021}O_8$	97.65	0.77	1.58
YGB350	11.885	67.410	0.000	0.103	19.172	98.57	$K_{0.006}Na_{0.888}Ca_{0.000}Al_{1.011}Si_{3.018}O_8$	99.34	0.00	0.66
YGB437	11.610	68.100	0.410	0.180	19.790	100.09	$K_{0.010}Na_{0.855}Ca_{0.019}Al_{1.028}Si_{3.003}O_8$	96.66	2.19	1.15
YGB437	11.900	67.530	0.030	0.050	19.790	99.30	$K_{0.003}Na_{0.883}Ca_{0.001}Al_{1.036}Si_{3.001}O_8$	99.52	0.16	0.32
YGB437	11.670	68.260	0.000	0.090	19.410	99.43	$K_{0.005}Na_{0.868}Ca_{0.000}Al_{1.013}Si_{3.023}O_8$	99.41	0.00	0.59
YGB437	11.600	67.630	0.000	0.170	19.430	98.83	$K_{0.010}Na_{0.864}Ca_{0.000}Al_{1.021}Si_{3.016}O_8$	98.89	0.00	1.11
云英岩										
ygzk6014	9.704	69.483	0.260	0.315	19.412	99.17	$K_{0.018}Na_{0.713}Ca_{0.012}Al_{1.006}Si_{3.057}O_8$	95.97	1.65	2.38
ygzk6014	11.288	67.827	0.328	0.186	19.436	99.07	$K_{0.011}Na_{0.838}Ca_{0.016}Al_{1.019}Si_{3.016}O_8$	96.97	1.81	1.22
黑色细粒析离体										
YGB437	11.198	68.706	0.126	0.216	19.421	99.67	$K_{0.012}Na_{0.825}Ca_{0.006}Al_{1.010}Si_{3.031}O_8$	97.85	0.71	1.44
YGB437	10.351	70.589	0.090	0.099	19.381	100.51	$K_{0.005}Na_{0.750}Ca_{0.004}Al_{0.992}Si_{3.068}O_8$	98.73	0.55	0.72

分析单位:核工业北京分析测试中心,2011。

度不同, 有些析离体内带以云英岩为主, 部分以云英岩化花岗岩为主, W、Mo 矿化水平差别更大。与瑶

岗仙矿区 3 期花岗岩成分(表 2) 相比, 云英岩析离体成分 K<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、F、ACKN 值等更高, 尤其是析离体

表 2 瑶岗仙矿床云英岩析离体及碱长花岗岩主量、微量元素含量

Table 2 Major and trace element content of greisen inclusions and alkali feldspar granite in the Yaogangxian deposit

	云英岩析离体		析离体边部	析离体核部	云英岩析离体	灰色斑状中粒碱长花岗岩(N)	白色细粒斑状碱长花岗岩(O)	石英脉
	YGC223	YGC231	YGC233	YGC232	XYG 22	18 件平均	10 件平均	YGG 234
<i>w</i> (B) / %								
SiO <sub>2</sub>	62.48	62.14	75.36	48.63	43.07	74.69	75.28	83.76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.97	20.44	12.87	27.56	25.75	12.93	13.24	8.59
MgO	0.07	0.18	0.05	0.33	0.41	0.08	0.05	0.30
CaO	1.19	1.25	0.59	1.01	8.24	0.95	0.45	0.74
Na <sub>2</sub> O	0.19	1.91	2.67	0.54	0.31	2.84	3.10	0.12
K <sub>2</sub> O	10.47	6.41	5.65	9.14	9.09	5.26	4.55	2.95
MnO	0.22	0.55	0.15	2.27	0.35	0.18	0.13	0.14
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.05	0.02	0.08	0.18	0.04	0.03	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.02	0.02	0.03	0.17	0.07	0.07	0.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.54	0.05	1.42	1.46	0.45	0.35	0.05
FeO	0.55	3.05	1.55	4.50	2.25	1.08	1.08	1.20
F	0.38	0.82	0.28	0.94	1.64	0.39	0.10	0.45
烧失量	2.19	2.92	0.71	3.09	7.52	1.03	1.23	1.57
总量	100.1	100.28	99.97	99.54	100.44	99.99	99.66	99.91
Alk	10.66	8.32	8.32	9.68	9.40	8.10	7.64	3.07
ACNK	1.59	1.65	1.11	2.18	1.01	1.10	1.33	1.81
<i>w</i> (B) / 10 <sup>-6</sup>								
Cu	5.49	76.00	95.90	34.20	4.55	70.72	11.01	
Pb	32.50	80.40	2998	81.30	32.70	85.76	89.76	
Zn	47.90	588	159	275	109	127.39	43.21	
W	366	105	439	9489	36.70	90.32	8.26	
Bi	7.35	4.06	1177	28.80	2.53	11.02	7.65	
Mo	26.80	1.04	1818	1549	16.10	14.07	1.06	
Rb	1788	1733	943	406	1652	785	790	
Sr	8.98	7.33	6.54	4.27	42.40	7.38	5.54	
Ba	85.80	32.00	19.70	22.80	203	78.37	102.87	
Li	115	1134	222	1327	957	266	211	
Nb	33.20	29.20	42.20	220	51.10	36.31	32.86	
Ta	12.70	10.60	29.90	83.50	11.70	9.71	15.04	
Hf	12.50	8.50	11.60	11.30	20.80	7.14	8.63	
U	24.70	20.50	23.70	27.10	69.30	21.52	17.04	
Th	17.30	25.30	19.90	15.50	104	21.36	17.26	
La	8.26	6.99	7.76	14.90	63.50	8.56	7.18	
Ce	22.60	18.00	21.40	41.20	130	21.70	14.68	
Pr	3.29	2.75	3.40	6.43	17.30	2.97	2.50	
Nd	16.00	13.30	15.70	29.90	69.20	12.96	11.23	
Sm	7.90	7.03	8.62	13.50	18.00	5.65	6.08	
Eu	0.07	0.06	0.05	0.06	0.57	0.13	0.09	
Gd	7.47	6.86	7.72	10.10	15.20	6.23	7.98	
Tb	1.99	1.65	1.94	2.74	2.85	1.62	2.30	
Dy	12.50	9.75	11.10	18.60	15.30	10.39	15.21	
Ho	2.38	1.80	2.02	3.81	2.86	2.16	3.22	
Er	7.62	5.58	6.18	14.10	8.70	7.15	10.72	
Tm	1.47	0.99	1.18	3.46	1.50	1.32	2.07	
Yb	10.90	6.94	8.18	30.10	10.30	8.95	14.28	
Lu	1.66	1.11	1.22	5.19	1.69	1.46	2.31	
ΣREE	104.11	82.81	96.47	194.09	356.97	91.26	99.84	
La/Yb*	0.51	0.68	0.64	0.33	4.16	0.74	0.33	
Eu/Eu*	0.03	0.03	0.02	0.02	0.10	0.07	0.04	

分析单位: 核工业北京分析测试中心。比值单位为 1。两期花岗岩为平均值, 样品数分别为 18 件和 10 件。

核部富白云母部分。有些云英岩析离体虽然含大量云母,但矿化很弱,如取自石人嶂的样品 YGC-22。

云英岩析离体分布于灰色碱长花岗岩  $\tilde{N}$  中,以灰色碱长花岗岩  $\tilde{N}$  为标准化的云英岩样品元素分配曲线如图 4。虽然云英岩析离体的主量及微量元素含量差异较大,碱金属中强烈贫 Na, 略富 Li、K、Rb, 在析离体外带, 钠长石含量明显少于钾长石, 内带云英岩中不含长石; 碱土金属中, 多数样品略富集 Ca, Sr 变化不大, 强烈贫 Ba, 导致 Sr/Ba 比值在析离体中明显高于碱长花岗岩; 部分样品富集 F; 亲硫元素中, 强烈亏损 Cu, 不同样品 Pb、Zn 情况不同, 差异较大, 总体上 Pb、Zn 富集程度较差, 个别样品析离体外带花岗岩强烈富集 Pb, 析离体内带云英岩的 Pb 无变化; 析离体中一般富集主要成矿元素 W、Mo、Bi, 部分析离体中这些元素含量非常高, 且析离体内带更加富 W, 外带更加富 Mo。稀有分散元素 Nb、Ta、Hf、U 等都有不同程度的富集, Th 含量变化不大; 稀土元素多变化不大, 但 Eu 进一步亏损。

在各种微量元素图解(图 5)中, 瑶岗仙三类碱长花岗岩的投点都有不同程度的差异, 尤其是石英斑岩。与此相比, 云英岩析离体与灰色碱长花岗岩  $\tilde{N}$

的投点范围更加靠近, 这也显示二者的关系更为密切。

### 3.3 稀土元素地球化学

云英岩析离体稀土元素组成与碱长花岗岩大体相似, 均以强烈 Eu 亏损贫轻稀土元素为特点(图 6), 并显示出明显的“M”型“四分组”效应。碱长花岗岩  $\tilde{O}$  较碱长花岗岩  $\tilde{N}$  分异更强, 轻稀土元素含量更低而重稀土元素含量略高。除石人嶂的样品外, 瑶岗仙矿床云英岩析离体更加亏损 Eu, REE 配分形态与灰色碱长花岗岩  $\tilde{N}$  更加接近。同一析离体中, 云英岩核部(YGC-232)较边部(YGC-233)稀土元素总量更高, LREE/HREE 更低, 稀土元素配分曲线表现为左低右高的不对称 V 形形态, 四分组效应也更加明显, 显示出岩浆分异更加强烈。

这些特点显示云英岩析离体与碱长花岗岩  $\tilde{N}$  的密切关系, 是碱长花岗岩  $\tilde{N}$  进一步分异的产物。形成云英岩析离体的岩浆不同于作为围岩的灰色碱长花岗岩  $\tilde{N}$ , 受岩浆中挥发分的影响更大, 是介于岩浆与热液之间的过渡态流体。同时, 云英岩析离体显著的稀土元素四分组效应也说明, 岩浆/热液体系中发生了强烈的熔体与富含挥发分流体的相互作用,

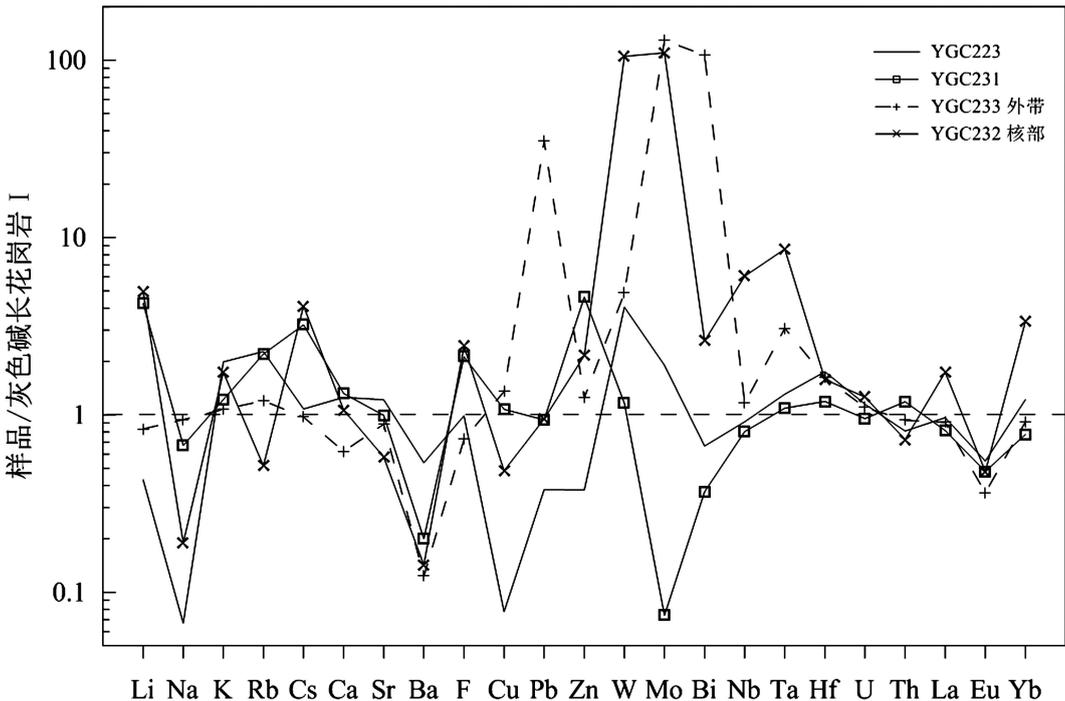


图 4 云英岩以灰色碱长花岗岩  $\tilde{N}$  标准化后的元素图解

Fig. 4 Granite  $\tilde{N}$  normalized element pattern for the greisen inclusion, the Yaogangxian tungsten deposit

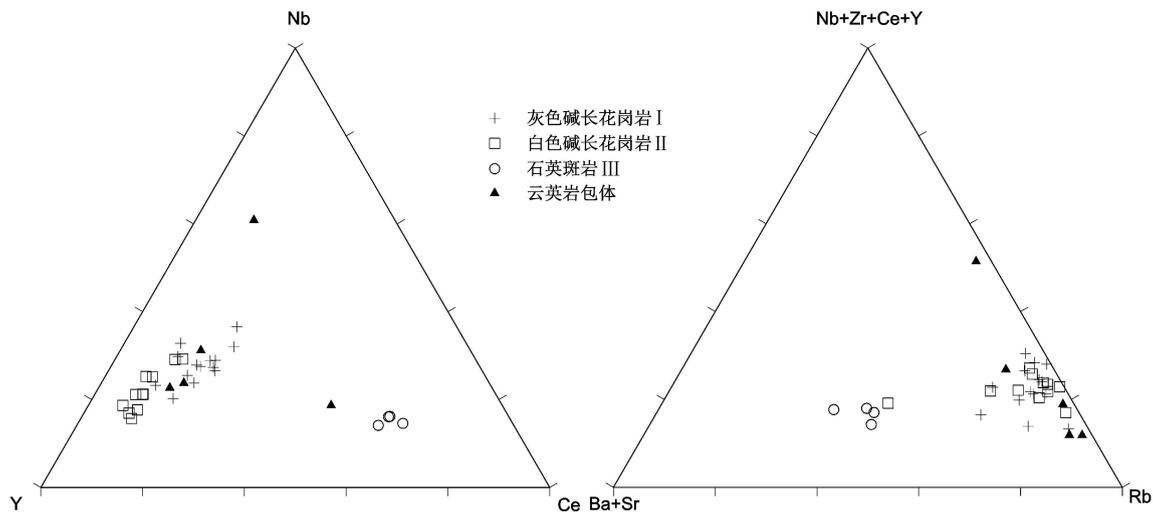


图 5 瑶岗仙花岗岩及云英岩 Nb Ce Y 和 (Nb+ Zr+ Ce+ Y)- (Ba+ Sr)- Rb 图解

Fig. 5 Diagram of Nb- Y- Ce and (Nb+ Zr+ Ce+ Y)- (Ba+ Sr)- Rb of the Yaogangxian tungsten deposit, Hunan Province

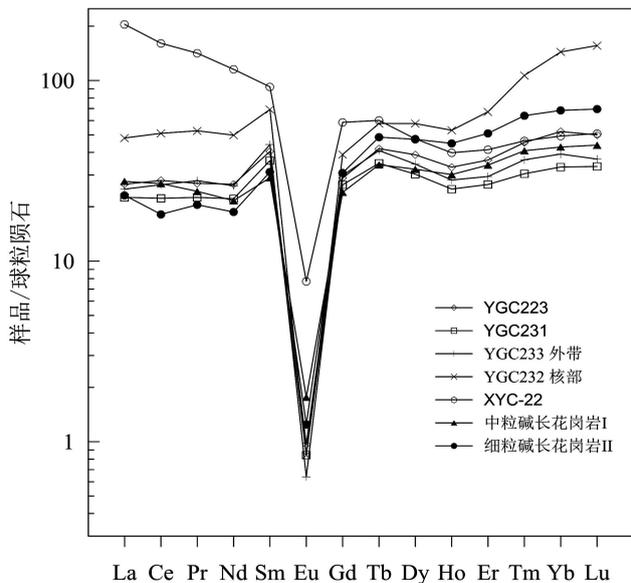


图 6 瑶岗仙花岗岩及云英岩 REE 配分图解

Fig. 6 Chondrite normalized REE patterns of the Yaogangxian tungsten deposit, Hunan Province

这种流体富含 F、B、H<sub>2</sub>O 等组分, 体系已进入似水流体系统 (aqueous like fluid system) 阶段 (赵振华等, 1999; 2010), 即浆液过渡态流体阶段。

## 4 云英岩析离体成因及其对钨矿成矿的意义

### 4.1 云英岩析离体是岩浆液态分异演化的结果, 液态分异可能是高位 U<sup>+</sup> F 岩浆的主要分异机制有关锡钨多金属矿的成因, 传统观点主要认为

南岭花岗岩的多样性主要是结晶分异的结果, 成矿热液为岩浆通过强烈结晶分异的产物, 成矿金属物质富集于晚期残余热液中 (陈骏等, 2008; 朱金初等, 1996; 王汝成等, 2008), 岩浆结晶分异可形成浆液过渡态流体 (朱金初等, 2002; 王汝成等, 2008)。也有研究认为, 堆晶作用只见于基性、超基性岩石中, 花岗岩质岩浆由于黏性大, 长石、石英等矿物与熔浆的比重差别小等原因, 几乎不可能发生结晶分异 (张旗等, 1997)。

瑶岗仙矿床的云英岩析离体结构较完整, 析离体内带具有热液作用的结构和矿物组合, 矿物组合以石英、白云母、萤石等矿物为主, 一般不含长石, 显示出一种富含挥发分、高温热液作用特点。析离体外带则不同, 虽然发育白云母化和硅化, 但钾长石、钠长石以及花岗结构等特点显示出岩浆结晶成岩的性质。析离体与花岗岩围岩界线清楚, 属于两个明显不同的相态结晶的产物。析离体的形成经历了低温熔浆阶段和高温热液阶段, 兼具浆液和浆液过渡态特点, 是富含挥发分的熔浆或浆液过渡态流体结晶的产物, 这种富挥发分熔浆与花岗岩岩浆具有不混溶性质。相比之下, 黑钨矿石英脉的矿物组合和结构构造显示其形成于高温热液作用。云英岩析离体正是介于花岗岩与黑钨矿石英脉演化过程之间, 兼具岩浆、热液作用的特性。云英岩析离体内带、外带比例不同, 黑钨矿及硫化物含量差别很大, 这种差异性可能说明岩浆液态分异的多样性。

云英岩析离体常见于南岭地区的与黑钨矿矿床有关的碱长花岗岩中, 包括江西大吉山 (朱焱岭等,

1981; 孙恭安等, 1989)、广西栗木(林德松, 1996)、湖南道县正冲稀有金属矿-湘源锡矿(王京彬, 1990a; 1990b)、邓阜仙(王联魁等, 2000)等地均有发现, 笔者在广东石人嶂钨矿灰色花岗岩中也发现类似的云英岩析离体(图 2e)。析离体的成分和结构大体相似, 有些研究已经认识到, 云英岩析离体属于岩浆演化过程中形成的富含挥发分的析离体, 是岩浆液态分异的体现(王联魁等, 1983; 1987; 2000; 王京彬, 1990a)。析离体的成分尤其是核部矿物组合与黑钨矿石英脉相同, 主要为白云母+石英+萤石+黄玉+方解石+黑钨矿+黄铁矿+毒砂+辉钼矿+辉铋矿, 流体富 CO<sub>2</sub> 的特点也与黑钨矿石英脉一致, 显示其与石英脉型钨矿密切的成因联系。相比之下, 矽卡岩型矿床中虽然也发育强烈的液态分异作用, 但很少出现云英岩析离体。

液态不混溶(Fluid immiscibility)是成矿流体演化的常见现象(Roedder, 1992)。岩石学研究表明, 液态不混溶(液态分异)不仅见于基性-超基性岩浆中(Rajamani et al., 1978; Brugmann et al., 2000), 富 Li-F 碱长花岗岩的形成与深度演化常出现液态分异(Veksler, 2004; Costi et al., 2009; Dolejs et al., 2007a; 2007b; Keppler et al., 1991; Badanina et al., 2004; 王联魁等, 2000), 大体按富 K、富 Na、富 Si 三端元演化(王联魁等, 1987; 朱永峰等, 1995), 形成富硅酸盐岩浆与富挥发分的岩浆, W、Sn、Mo、Nb 和 Ta 等金属物质强烈富集于富含 Li-F 等挥发分的岩浆中。在南岭很多锡钨矿床的花岗岩中, 这种岩浆液态分异现象普遍存在, 如瑶岗仙、柿竹园、邓阜仙、栗木、淘锡坑、大吉山等, 个旧锡(钨)矿卡房矿区的花岗岩中也较明显, 包括不同花岗质岩浆的不混溶, 也包括酸性岩浆与似伟晶岩间的不混溶、花岗岩浆与云英岩或云英岩析离体间的不混溶、花岗岩浆与浆液过渡态流体间的不混溶等。云英岩析离体只是这些不同类型液态分异中的一种表现形式, 析离体更多的富集挥发分和成矿物质。

黑钨矿矿床碱长花岗岩中的云英岩析离体、似伟晶岩、细晶岩等的存在显示, 岩浆侵位后的分异可能是以液态分异作用为主, 其分异的效果远大于结晶分异。

在一些花岗岩体顶部可能出现块状或脉状云英岩, 如柿竹园的块状云英岩、白云仙(汝城)钨矿天门岭矿床花岗云英岩脉等, 这些块状云英岩、脉状云英岩的矿物成分和结构构造与云英岩析离体具有一些

相似的特征, 它们可能反映了云英岩析离体所代表的分离熔体向上迁移至岩体顶部聚集的结果, 是花岗质岩浆液态分异过程的一部分。

虽然也有学者认为黑钨矿石英脉属岩浆液态分异的结果(张德会, 1988), 甚至在其中的绿柱石中发现岩浆熔融包裹体, 但石英脉主体仍表现为热液成矿特征。赋存石英脉的断裂呈张扭性, 切断花岗岩深达数百米, 显示其形成于岩体结晶固化之后。云英岩析离体所显示的浆液过渡态流体以及其与花岗岩、石英脉密切的联系, 说明石英脉是浆液过渡态流体进一步分异的热液沉淀的产物, 但云英岩析离体被石英脉切断, 显示二者间的演化并不连续, 有关这一点仍有待进一步的研究。

#### 4.2 液态分异过程中成矿物质的富集

无论是与中国花岗岩平均丰度还是南岭地区花岗岩元素平均含量相比, 瑶岗仙碱长花岗岩都强烈富集 Cu、Pb、Zn、W、Mo、Bi、Sn 及 Li、Rb、Cs、Nb、Ta 等元素, 相对贫 Co、Ni、Sr、Ba 等元素。在黑钨矿的成矿岩体——灰色斑状碱长花岗岩体中常见浸染状分散分布的细粒黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、黝锡矿、辉钼矿、辉铋矿等硫化物以及黑钨矿、锡石等矿物, 闪锌矿中也富含乳滴状黄铜矿, 这些硫化物一部分明显是原生的, 一部分与云母的退变质有关, 分布于退变质云母内或边部, 研究已经显示, 这种云母的退变质发生于岩浆作用的晚期, 并非后期热液蚀变的结果, 属于岩浆过程的一部分(章邦桐等, 2010)。

岩浆液态分异过程中, W、Mo、Bi、Sn 等物质大量进入富挥发分熔浆, 在析离体中形成异常高含量的黑钨矿、辉钼矿、辉铋矿和锡石、黝锡矿等矿物。这种元素分配规律的特点也体现在成矿作用方面, 黑钨矿石英脉以及矽卡岩型钨矿体中也强烈富集这些矿物, 形成矿床。实验岩石学实验发现, W 在熔浆与流体间的分配差异不明显, 甚至更多倾向于熔浆(Bai et al., 1999; Minning et al., 1984; Keppler et al., 1991), 这明显与云英岩析离体所反映的地质现象不符, 黑钨矿主要集中于云英岩析离体内带热液形成的云英岩中, 相比之下, 辉钼矿更多地浸染状分布于云英岩析离体外带的细粒花岗质岩石中, W、Mo 强烈富集于浆液过渡态流体中, 且 W 较 Mo 更倾向于在流体中聚集。这种地质现象与实验结果的矛盾反映出岩浆晚期的液态分异形成浆液过渡态流体的过程对 W 的富集极其重要, W 的富集机制并非

岩浆结晶分异的浆/液配分过程。同时,云英岩析离体作为一个相对独立的体系,其中异常高含量的 W 说明这类浆液过渡态流体溶解着高含量的 W。由于云英岩析离体与黑钨矿石英脉相似的矿物组合,及密切的空间分布关系与成因联系,有理由质疑黑钨矿石英脉是否是由中温热液作用沉淀形成的传统观点,就如夏卫华(1985)所质疑的那样,形成黑钨矿石英脉的有可能是一类粘稠的浆液。

铌、钽往往富集于岩体顶部的钠长石花岗岩中,如栗木、邓阜仙等矿床,这种钠长石花岗岩也是岩浆液态分异的结果。但云英岩析离体中 Nb、Ta 的富集系数并不高,表明 Nb、Ta 的富集主要发生于岩浆演化阶段,析离体所代表的浆液过渡态流体中无显著富集。

相比之下,云英岩析离体所代表的液态分异过程中,Pb、Zn 分异较差,Cu 多表现为在析离体中贫化。在湘南粤北地区矽卡岩型钨矿床外围,往往存在大规模的铅锌矿化,如黄沙坪、柿竹园等,但在黑钨矿石英脉中,闪锌矿、方铅矿虽然常见,但不形成独立的铅锌矿体,尤其是在矿脉中下部,闪锌矿、方铅矿含量一般很低。显示出形成云英岩析离体的浆液分异过程并未导致 Pb、Zn 的富集,而矽卡岩矿床有所不同,矽卡岩的强烈的浆液分异可能与石英脉型钨矿床中的岩浆分异有所不同,矽卡岩矿床所对应的花岗岩中也很少见到云英岩析离体。

研究显示,与矽卡岩型钨矿床相比,黑钨矿石英脉形成于相对封闭的环境中,成矿过程中无显著外来水体(大气降水)的加入。矽卡岩演化过程中大量外来水体的加入,成矿阶段明显,可能是导致 Pb、Zn 在成矿晚期富集成矿的一个重要原因。

#### 4.3 云英岩析离体——评价花岗岩钨矿含矿性的重要指标

在瑶岗仙钨矿,云英岩析离体仅见于灰色碱长花岗岩  $\tilde{N}$  中,黑钨矿石英脉发育于该岩体的北、西侧,石英脉中黑钨矿成分围绕该岩体发生明显分带。岩体  $\rightarrow$  云英岩析离体  $\rightarrow$  黑钨矿石英脉的演化关系显示出黑钨矿石英脉的成矿花岗岩是灰色碱长花岗岩  $\tilde{N}$ 。大量研究也显示,矽卡岩矿床与淡色碱长花岗岩  $\tilde{O}$  有关。

云英岩析离体是碱长花岗岩岩浆液态分异的结果,析离体的存在显示成矿花岗岩富含 Li、F 挥发分和成矿物质,且这些物质能有效分异聚集,有利于 W-Sn 等物质的成矿,因而成为黑钨矿矿床成矿的重

要指标,可作为岩体含矿性的评判标志之一(任云生等,2003;王京彬,1990a)。但由于云英岩析离体的分布无规律性,且有些析离体不易识别,因此准确辨别岩体中的云英岩析离体对评价岩体含矿性或成矿作用具有重要意义。

云英岩析离体出现于中粒碱长花岗岩  $\tilde{N}$  中,与之具有共同成因特点的是分布于岩体顶部的块状云英岩,其中富含黑钨矿化,是云英岩析离体上浮至岩体顶部接触面聚集的产物。云英岩析离体与岩体顶部的块状云英岩均是评价岩体形成黑钨矿矿床的重要指标。另一方面,块状云英岩分布于岩体顶部、云英岩析离体靠近岩体顶部,黑钨矿石英脉往往分布于岩体顶部接触带上下,块状云英岩或云英岩析离体的大量出现也显示岩体剥蚀状况,上部分布于外接触带的石英脉可能已剥蚀。

地球化学研究也显示,碱长花岗岩 Cu、Pb、Zn、W、Mo、Bi、Sn 及 Li、Rb、Cs、Nb、Ta 等元素较富,相对贫 Co、Ni、Sr、Ba 也是其含矿性的评价标志。

## 5 结 论

云英岩析离体是碱长花岗岩液态分异的产物,析离体外带表现为花岗结构的岩浆结晶特点,内带表现为热液交代特点,显示出浆液过渡态的性质。云英岩析离体的地质特点介于花岗岩岩浆与形成黑钨矿石英脉的含矿热液之间,石英脉是云英岩析离体代表的富含挥发分和成矿物质的熔浆进一步演化的结果。碱长花岗质岩浆液态分异可能是高侵位 Li-F 岩浆的主要分异机制。

碱长花岗岩  $\tilde{N}$  云英岩析离体所代表的岩浆演化过程,大部分元素的分配性质与区域花岗岩  $\tilde{O}$  成矿岩体的演化趋势相同,显示形成云英岩析离体的液态分异机制可能在更大尺度上存在,深部花岗岩浆房  $\tilde{O}$  成矿碱长花岗岩岩株的分异作用可能也是以液态分异作用为主。岩浆晚期液态分异形成的浆液过渡态流体是 W 等成矿元素富集的重要机制,但云英岩析离体所代表的液态分异最终形成黑钨矿石英脉,仅此并不足以导致 Pb、Zn 的富集,这一点不同于矽卡岩型钨矿床。

石英脉型(黑)钨矿的成矿地质体是灰色斑状碱长花岗岩  $\tilde{N}$ ,云英岩析离体是该岩体岩浆液态分异的结果,云英岩析离体及块状云英岩均是寻找与碱长花岗岩有关的石英脉型黑钨矿的重要指示标志。

## 参考文献/References

- 陈骏, 陆建军, 陈卫锋, 王汝成, 马东升, 朱金初, 张文兰, 季峻峰. 2008. 南岭地区钨锡铋钽花岗岩及其成矿作用[J]. 高校地质学报, 14(4): 459-473.
- 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, 林新多, 白 鸽, 李崇佑, 胡永嘉, 刘垢群, 洗柏琪. 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. 1-506.
- 林德松. 1996. 华南富钽花岗岩矿床[M]. 北京: 地质出版社. 42-48.
- 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.
- 彭省临, 陈子龙, 陈 旭, 杨 牧. 1995. 钨、锡液态分异成矿作用的新证据[J]. 中南工业大学学报, 26(2): 143-146.
- 任云生, 刘连登, 张辉煌. 2003. 黑钨矿矿囊熔离成因综述[J]. 世界地质, 22(4): 357-360.
- 孙恭安, 史明魁, 张宏良. 1989. 大吉山花岗岩体岩石学、地球化学及成矿作用的研究[A]. 见: 宜昌地质矿产研究所, 南岭地质矿产科研报告集[C]. 武汉: 中国地质大学出版社. 326-363.
- 王京彬. 1990a. 湘源锡矿床的特征及其成因探讨[J]. 地质与勘探, 26(9): 17-20.
- 王京彬. 1990b. 湖南道县正冲稀有金属云英斑岩的特征和成因[J]. 地质论评, 36(6): 534-539.
- 王联魁, 朱为方, 张绍立. 1983. 液态分异—南岭花岗岩分异方式之一[J]. 地质论评, 29(2): 365-373.
- 王联魁, 卢家烂, 张绍立, 杨文金, 徐立新. 1987. 南岭花岗岩液态分离实验研究[J]. 中国科学(B), (1): 79-87.
- 王联魁, 黄智龙. 2000. Li-F花岗岩液态分异作用与实验[M]. 北京: 科学出版社. 1-236.
- 王汝成, 朱金初, 张文兰, 谢 磊, 于阿朋, 车旭东. 2008. 南岭地区钨锡花岗岩的成矿矿物学: 概念与实例[J]. 高校地质学报, 14(4): 485-495.
- 夏卫华. 1985. 矿床研究中一些值得探讨的问题[J]. 地质科技情报, 4(1): 150-154.
- 徐克勤. 1957. 湘南钨铁锰矿矿区中矽噁岩型钙钨矿的发现, 并论两类矿床在成因上的关系[J]. 地质学报, 37(2): 117-151.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 陈培荣. 2010. 花岗岩中原生与次生白云母的鉴别特征及其地质意义——以赣南富城强过铝质花岗岩体为例[J]. 岩石矿物学杂志, 29(3): 225-234.
- 张德会. 1988. 试论石英脉型黑钨矿床的液态分异成因[J]. 地质与勘探, 24(7): 15-20.
- 张 旗, 潘国强, 李承东, 金惟俊, 贾秀勤. 1997. 花岗岩结晶分离作用问题——关于花岗岩研究的思考之二[J]. 岩石学报, 23(6): 1239-1251.
- 赵振华, 熊小林, 韩小东. 1999. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨——以千里山和巴尔哲花岗岩为例[J]. 中国科学(D辑), 29(4): 331-338.
- 赵振华, 包志伟, 乔玉楼. 2010. 一种特殊的“M”与“W”复合型稀土元素四分组效应: 以水泉沟碱性正长岩为例[J]. 科学通报, 55(15): 1474-1488.
- 朱金初, 李人科, 周凤英, 王汝成, 熊小林, 许红忠. 1996. 广西栗木水溪庙不对称层状伟晶岩——细晶岩岩脉的成因讨论[J]. 地球化学, 25(1): 1-8.
- 朱金初, 饶 冰, 熊小林, 李福春, 张佩华. 2002. 富锂氟含稀有矿化花岗质岩石的对比和成因思考[J]. 地球化学, 31(2): 141-152.
- 朱焱岭, 李崇佑, 林运淮. 1981. 赣南钨矿地质[M]. 南昌: 江西人民出版社. 167-270.
- 朱永峰, 曾贻善, 艾永富. 1995. 长英质岩浆中液态不混溶与成矿作用关系的实验研究[J]. 岩石学报, 11(1): 1-7.
- Bai T B and Koster A F. 1999. The distribution of Na, K, Rb, Se, Al, Ge, Cu, W, Mo, La and Ce between granitic melts and coexisting aqueous fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(7/8): 1117-1131.
- Badanina E V, Veksler I V, Thomas R, Syritso L F and Tumbull R B. 2004. Magmatic evolution of Li-F, rare metal granites: A case study of melt inclusions in the Khanglay complex, Eastern Transbaikalia (Russia) [J]. *Chemical Geology*, 210: 113-133.
- Brugmann G E, Hanski E J, Naldrett, A J and Smolkin V F. 2000. Sulphide segregation in Feropticrites from the Pechenga complex, Kola Peninsula, Russia[J]. *Petrology*, 41: 1721-1742.
- Costi H T T, Agnol R D, Pichavant M and Ramo O T. 2009. The peralkaline tin mineralized Madera cryolite-bite rich granite of Pitanga, Amazonian craton, Brazil: Petrography, mineralogy and crystallization processes[J]. *Can. Mineral.*, 47: 1301-1327.
- Dolejš D and Baker D R. 2007a. Liquidus Equilibria in the System  $K_2O-Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-F_2O-H_2O$  to 100 MPa: I. Silicate-Fluoride Liquid Immiscibility in Anhydrous Systems[J]. *J. Petrology*, 48: 785-806.
- Dolejš D and Baker D R. 2007b. Liquidus Equilibria in the System  $K_2O-Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-F_2O-H_2O$  to 100 MPa: II. Differentiation Paths of Fluorosilicic Magmas in Hydrous Systems[J]. *J. Petrology*, 48: 807-828.
- Keppler H and Wyllie P J. 1991. Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U, and Th between melt and aqueous fluid in the systems haplogranite  $H_2O-HF$  [J]. *Contrib. Mineral. Petro.*, 109: 139-150.
- Manning D A C and Henderson P. 1984. The behavior of tungsten in granitic melt vapour systems[J]. *Contrib. Mineral. Petro.*, 86: 286-293.
- Rajamani V and Naldrett A J. 1978. Partitioning of Fe, Co, Ni, and Cu between sulfide liquid and basaltic melts and the composition of Ni-Cu sulfide deposits[J]. *Econ. Geol.*, 73(1): 82-93.
- Roedder D. 1992. Fluid inclusion evidence for immiscibility in magmatic differentiation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 5-20.
- Veksler I V. 2004. Liquid immiscibility and its role at the magmatic hydrothermal transition: A summary of experimental studies [J]. *Chemical Geology*, 210: 7-31.