

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.09.002

# 湘东光明萤石矿黑云母花岗岩地球化学特征及其对萤石成矿的启示

龚雪婧<sup>1,2</sup>, 孟贵祥<sup>1,2\*</sup>, 汤贺军<sup>1,2</sup>, 张雄<sup>3</sup>, 阮帅<sup>1,2</sup>, 文亭<sup>3</sup>, 朱文卿<sup>4</sup>

GONG Xuejing<sup>1,2</sup>, MENG Guixiang<sup>1,2\*</sup>, TANG Hejun<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiong<sup>3</sup>, RUAN Shuai<sup>1,2</sup>,  
WEN Ting<sup>3</sup>, ZHU Wenqing<sup>4</sup>

1. 中国地质科学院, 北京 100037;

2. 中国地质调查局—中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037;

3. 湖南省水文地质环境地质调查监测所, 湖南 长沙 410131;

4. 湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南 长沙 410114

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. China Deep Exploration Center—SinoProbe Center, China Geological Survey & Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Hunan Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Changsha 410131, Hunan, China;

4. Hunan Institute of Geophysics and Geochemistry, Changsha 410114, Hunan, China

**摘要:**光明萤石矿产出于湘东锡田岩体北部,为探究矿区内地质学研究,并利用 LA-(MC)-ICP-MS 对黑云母花岗岩中锆石开展了 U-Pb 年代学、微量元素及 Hf 同位素地球化学研究。结果显示,黑云母花岗岩具有高硅 ( $\text{SiO}_2 = 72.62\% \sim 77.34\%$ )、高碱 ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.03\% \sim 8.66\%$ )、富铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.02\% \sim 13.83\%$ ) 特征,  $\text{A/CNK}$  值介于 1.07~1.14 之间, 为过铝质花岗岩。3 个样品低 U 锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值在 215~218 Ma 之间, 指示花岗岩侵位于印支期。矿区黑云母花岗岩印支期—燕山期锆石年龄为 237~133 Ma, 在 230~210 Ma、190~170 Ma、150~130 Ma 存在 3 个较集中的年龄峰期, 暗示岩浆侵位后受到热事件影响, 推测矿区岩浆活动具有多阶段性。黑云母花岗岩岩体有较强的负 Eu 异常, 且富集大离子亲石元素 Rb、Th、U, 亏损 Ba、Nb 等元素; 萤石具有中等程度的负 Eu 异常, Rb、Ba、Nb、Hf 相对亏损, U、La、Nd、Zr、Y 相对富集。按照燕山期成矿岩浆活动时间 (133 Ma) 估算, 岩体  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -11.2 \sim -10.6$ , 二阶段模式年龄为 1793~1837 Ma; 萤石  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -11.3 \sim -10.0$ , 二阶段模式年龄为 1741~1848 Ma, 二者具有较一致的 Nd 同位素组成。岩体锆石 Hf 同位素测定值具有较大的变化范围,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282234 \sim 0.282420$ ,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -16.7 \sim -8.5$ ,  $T_{\text{DM2}} = 1756 \sim 2214$  Ma, 显示古—中元古代地壳模式年龄。综合研究发现, 光明萤石矿多阶段岩浆活动起源于成熟地壳白云母的脱水熔融, 经历了印支期—燕山期多期次的岩浆补给和较强的结晶分异。萤石矿石与矿区内地质学研究, 并有少量大气降水加入。

**关键词:**燕山期花岗岩; 萤石; 锡田岩体; 湘东; 华南

中图分类号:P619.21<sup>+5</sup>; P588.12<sup>+1</sup> 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2023)09-1432-21

**Gong X J, Meng G X, Tang H J, Zhang X, Ruan S, Wen T, Zhu W Q. Geochemical characteristics of biotite granite in the Guangming fluorite deposit in eastern Hunan, China: Implications to fluorite mineralization. Geological Bulletin of China, 2023, 42(9): 1432–1452**

收稿日期:2023-03-09; 修订日期:2023-05-29

资助项目:中国地质科学院项目《湖南省关键非金属矿产成矿规律及靶区优选研究》(编号:HX2021-10)、湖南省地质院项目(编号:HNGSTP-202103)和贵州省科技计划项目《黔西北三维深部电性结构与区内热液矿产控制关系研究》(编号:黔科合支撑[2023]一般172)

作者简介:龚雪婧(1988-),女,博士,副研究员,从事矿床学、岩石地球化学研究。E-mail:xuejinggong@cags.ac.cn

\*通信作者:孟贵祥(1968-),男,研究员,从事资源勘查研究。E-mail:mgxlw@126.com

**Abstract:** Guangming fluorite deposit is located in the north of Xitian granite pluton in the eastern Hunan. Aiming to investigate the correlationship between the biotite granite and fluorite mineralization in the mining district, systematic geochemical studies of the rock mass and the orebody, as well as zircon LA-(MC)-ICP-MS U-Pb age, trace element and Hf isotopic characteristics of the biotite granite have been carried out. Biotite granite in the Guangming deposit is characterized by elevated SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and total alkali contents, with A/CNK ratios of 1.07~1.14, showing peraluminous. Low-U zircons from three samples yield weighted average <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ages from 215 Ma to 218 Ma, indicative of Indosinian emplacement. The granite has zircon ages ranging from 237 Ma to 133 Ma, yielding three relatively concentrated age peaks at 230~210 Ma, 190~170 Ma and 150~130 Ma, indicating the influence of multi-stage magmatic activity. The biotite granite has strong Eu negative anomaly with weak positive Ce anomaly, being enriched in LILE(Rb, Th, U) and depleted in Ba, Nb, etc. The fluorite has moderate negative Eu anomaly with relatively depletion of Rb, Ba, Nb, Sm, Hf, Eu and enrichment of U, La, Nd, Zr, Y. The granite has  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  values of -11.2 to -10.6 and the corresponding  $T_{\text{DM2}} = 1793 \sim 1837$  Ma, while the fluorite has  $\varepsilon_{\text{Nd}}(133 \text{ Ma})$  values of -11.3 to -10.0 and the corresponding  $T_{\text{DM2}} = 1741 \sim 1848$  Ma. Hafnium isotope compositions showing a large variation,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282234 \sim 0.282420$ ,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(133 \text{ Ma}) = -16.70 \sim -8.45$ ,  $T_{\text{DM2}} = 1756 \sim 2214$  Ma, indicating the crustal model age of Paleo-Mesoproterozoic. The comprehensive analysis suggests that the biotite granite in the Guangming deposit originated from the dehydration melting of muscovite in the mature crust, experienced multiple magmatic activities from Indosinian to Yanshanian. The biotite granite experienced strong differentiation and finally formed in an environment with low oxygen fugacity. The Yanshanian granite and the fluorite have similar characteristics of rare earth and trace elements, as well as the identical Nd isotopic compositions, different from Indosinian biotite granite, suggesting that fluorite mineralization in the Guangming deposit is related to the Yanshanian magmatism in the area. The ore-forming fluid is dominated by magmatic hydrothermal with minor addition of meteoric water.

**Key words:** Yanshanian granitoid; fluorite; Xitian granite complex; eastern Hunan; South China

萤石是非常重要的非金属资源,传统用于冶金、玻璃、陶瓷、水泥等化学工业,近年来被广泛应用于新能源、新材料、国防军工等领域(方贵聪等,2020),是战略新兴产业不可替代的矿物原料。全球范围内,超过40%的萤石矿床产出于环太平洋地区,仅中国华南就占据了其中超过13.5%的储量(USGS,2019)。华南的萤石矿床普遍产出于中生代高演化花岗岩及其接触带附近(曹俊臣,1997;王吉平等,2015),矿化样式主要为矽卡岩型和热液脉型。其中,矽卡岩型萤石矿床因普遍与其他金属伴生,近年来得到了较充分的研究,如湖南柿竹园钨-锡-钼-铋-萤石矿床(Lu et al., 2003)、骑田岭锡-钨-铅-锌-萤石矿床(Yuan et al., 2008; Xie et al., 2015)、界牌岭锡-铍-萤石矿床(Yuan et al., 2015; 沈宏飞等,2022)、桃林铅-锌-萤石-重晶石矿床(张鲲等,2012)等。研究普遍认为,成矿物质由中生代高演化花岗岩提供(Lu et al., 2003; Yuan et al., 2008; 2015; 张鲲等,2012; Xie et al., 2015)。热液脉型萤石矿床因产出规模较小,常作为单独矿种产出,其成因研究较薄弱并存在较大争议。前人研究多认为其形成于低温热液流体对围岩的淋滤,围岩中的Ca和F活化、迁移并最终成矿,赋矿花岗岩仅作为主要的热源(曹俊臣,1997; 刘道荣等,2012);近年来有学者提出花岗岩体可能也是

重要的成矿物质来源(杨世文等,2019; 方贵聪等,2020)。

锡田岩体是南岭中段一个由多期侵入花岗岩体组成的复式岩体,前人研究认为其经历了较高程度的演化(Zhou et al., 2015; 何苗等,2018)。锡田矿区发育钨-锡和萤石矿化,其中已探明钨锡资源量达 $32 \times 10^4$ t,吸引了众多学者的目光(刘国庆等,2008; 付建明等,2009; 2012; 蔡杨等,2011; 周云等,2013; 刘飚等,2022),因此研究程度较高。虽然锡田岩体周围发育多个萤石矿床,但是相关研究缺乏,限制了对萤石成矿作用的认识及找矿勘查。光明萤石矿产出于锡田岩体北部,是正在开采的热液脉型萤石矿床,已探明资源量 $89.3 \times 10^4$ t,为探索锡田矿区的萤石成矿潜力提供了新的支点。在前人研究的基础上,笔者对矿区内的黑云母花岗岩进行了系统的岩石地球化学与Nd同位素地球化学研究,并利用LA-(MC)-ICP-MS方法对其中的锆石开展了U-Pb测年、微量元素及Hf同位素地球化学研究,同时,对萤石开展了微量、稀土元素与Nd同位素地球化学分析,初步厘清了矿区出露的锡田花岗岩形成与演化机制,获得了光明萤石矿的成矿物质来源特征,为进一步认识锡田矿区萤石成矿作用提供了新的证据。

## 1 地质概况与样品特征

锡田岩体位于湖南省茶陵县高陇、谭家湾、宁冈县泥湖一带,出露面积约 $230\text{ km}^2$ ,外形似哑铃状,长轴呈NNW向展布,与奥陶系、石炭系、泥盆系、二叠系呈侵入接触关系。岩体北部可见上白垩统,与岩体呈沉积接触关系,接触界线弯曲,岩性以红色石英砂岩、泥岩、泥质粉砂岩为主。锡田岩体主体为印支期中细粒斑状黑云母二长花岗岩,呈岩基产出;补体为燕山期中细粒二云母花岗岩、中细粒黑云母花岗岩,主要呈岩株、岩枝侵入印支期花岗岩及沉积岩中,地表出露面积小,但分布广泛。

光明萤石矿位于锡田岩体东北部,矿区出露的岩浆岩主要为燕山早期似斑状中粗粒黑云母花岗岩,未见沉积地层出露(图1-a)。区内主要构造为分布在矿区北部NEE向的断裂(图1-a),局部近EW向,倾向SE,倾角75°左右,地表出露宽度0.5~5m,沿走向延伸约3km,部分地段表现为含萤石硅化破碎带(图1-b)。近矿围岩蚀变以硅化为主,其次为绢云母化、绿泥石化、叶腊石化。其中硅化与

成矿关系密切,矿体在空间上与硅化破碎带融为一体。矿体多呈脉状产出,中部膨大向两端收缩尖灭,萤石脉与花岗岩的界线清晰,切穿花岗岩,萤石脉两侧发育显著的蚀变作用(图版I-a,b)。区内圈定萤石矿体2个,矿体I为主矿体,受区内NEE向断裂控制,呈脉状产出,走向82°左右,倾向近S向,倾角76°左右,总体较稳定,矿体厚度为1.35~3.15m,品位29.40%~41.29%,呈中间厚两端薄的楔体形态;矿体II为一条未出露地表的支脉,走向NEE67°左右,倾向S,倾角76°左右,厚度为0.94~5.04m,品位25.17%~66.55%。

本次研究的黑云母花岗岩样品采自光明萤石矿竖井-50m中段(GM-E-2-1;GM-W-3-3)及钻孔岩心中(ZK302-1)(图1-b)。黑云母花岗岩呈中粗粒似斑状结构,主要矿物组成为钾长石(35%~40%)、石英(30%~35%)、斜长石(20%~30%)、黑云母(3%~5%),其中钾长石以条纹长石为主,多见卡氏双晶;斜长石发育聚片双晶,偶见环带结构;黑云母部分蚀变为绿泥石(图版I-c,e)。岩体靠近萤石矿体部位蚀变较强,尤以钾化发育,钾长石含量升高至45%左右,黑云母普遍发生蚀变。副矿物

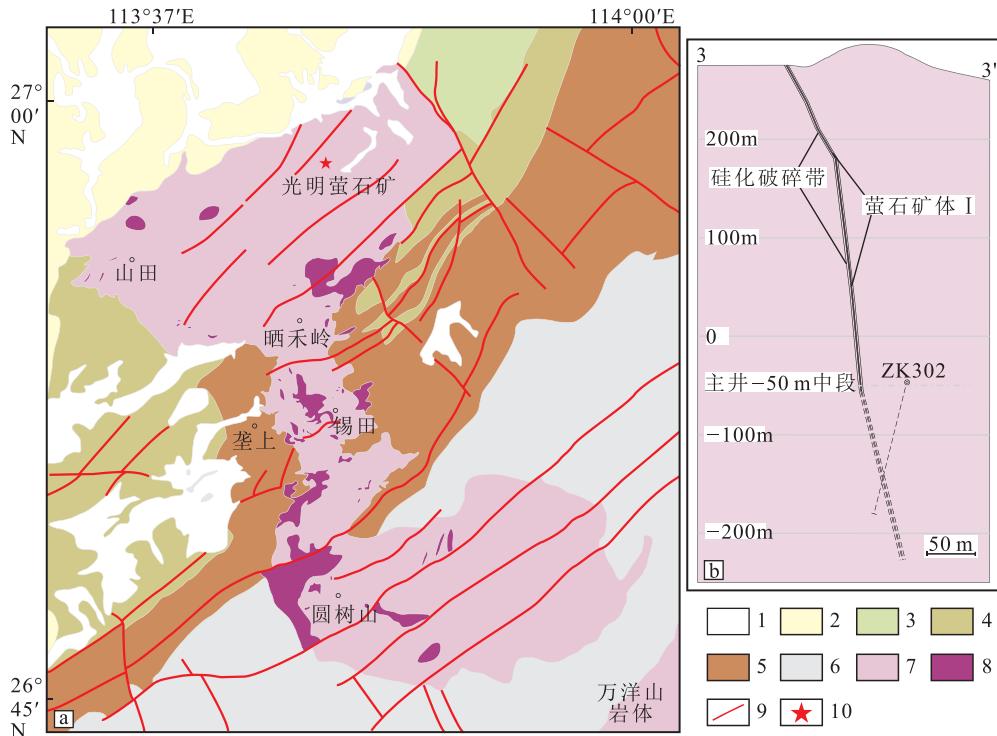
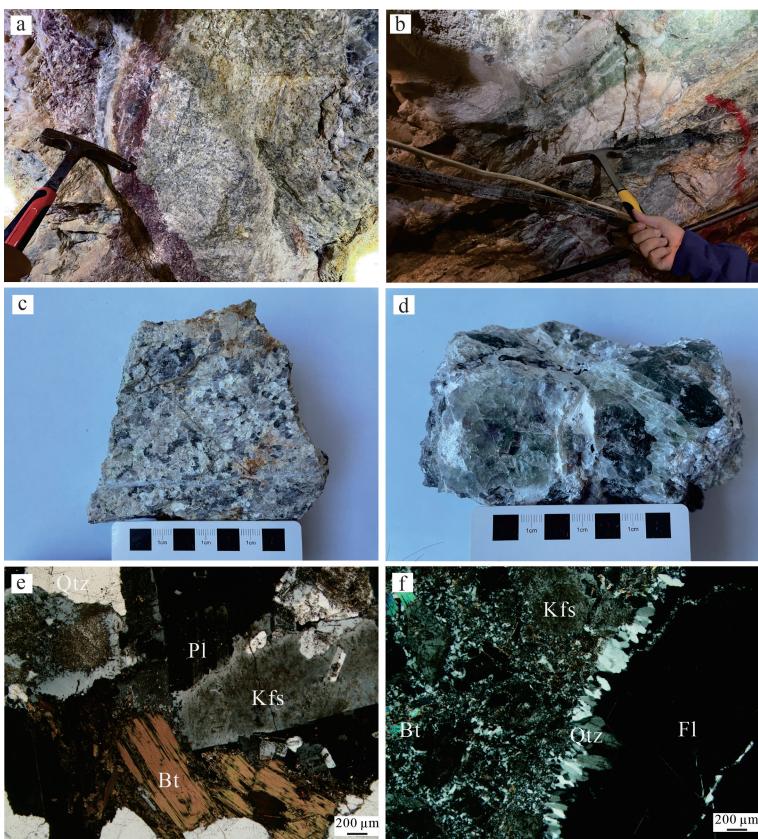


图1 锡田岩体和光明萤石矿地质简图(a)(据苏红中等,2015修改)与3线地质剖面(b)

Fig. 1 Geological map of the Xitian granite and Guangming fluorite deposit (a) and geological profile of Line 3 (b)

1—第四系松散堆积层;2—白垩系;3—二叠系;4—石炭系;5—泥盆系;6—奥陶系;7—印支期花岗岩;8—燕山期花岗岩;9—断裂;10—矿床位置

图版 I Plate I



a.萤石矿脉与黑云母花岗岩接触界线;b.萤石脉与石英脉;c.黑云母花岗岩手标本;d.萤石手标本;e.黑云母花岗岩镜下特征;f.黑云母花岗岩中石英的单向固结结构。Kfs—钾长石;Qtz—石英;Pl—斜长石;Bt—黑云母;Fl—萤石

组合主要有锆石、磷灰石、榍石等。矿石呈块状、条带状或环带状构造,矿石矿物主要为萤石,脉石矿物主要为石英(图版 I -d,f)。萤石样品同样采自竖井-50 m 中段(GM-C-2-1;GM-W-3-1),主要呈绿色,次为无色及紫色,透明或半透明,半自形—自形粒状结构。

## 2 测试方法

样品由廊坊市拓轩岩矿检测服务有限公司进行破碎和分选,并对挑选出的单颗粒锆石进行制靶和显微照相(透射光、反射光和阴极发光)。黑云母花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和微量元素测试、LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素测定、全岩与萤石主量、微量元素、Nd 同位素分析均在南京聚谱检测科技有限公司完成。

### (1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和微量元素测试

根据透射光、反射光和阴极发光图像,选择锆

石内部无包裹体、无裂纹、结构均匀的部位进行测试分析。采用 ASI RESOnetics 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统和 Agilent 7700x 四极杆型电感耦合等离子体质谱仪联机,以 33 μm 束斑、6 Hz 频率测试。测试过程中以标准锆石 91500 为外标,校正仪器质量歧视与元素分馏;以标准锆石 GJ-1 与 Plešovice 为盲样,检验 U-Pb 定年数据质量;以 NIST SRM 610 为外标、Si 为内标,标定锆石中的微量元素含量。测试数据由软件 ICPMSDataCal 处理(Liu et al., 2010)。

### (2) LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素测试

锆石原位 Hf 同位素测点与 U-Pb 年龄测点位置一致,以确保获得的 Hf 同位素值与年龄值一一对应。实验仪器为 ASI RESOnetics 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统和 Nu Plasma II 电感耦合等离子体质谱仪。实验采用氦气作为剥蚀物质载气,束斑直径 50 μm, 测试过程中每隔 15 颗样品锆石,交替测试标住锆石(包括 GJ-1、91500、Plešovice、Mud Tank、Penglai),以检验锆石 Hf 同位素比值的数据质量。

### (3) 全岩与萤石主量和微量元素分析

岩石样品粉碎至 200 目以下粉末。主量元素含量将样品溶解后采用湿法在 Agilent 5110 型 ICP-OES 上测定,分析相对误差低于 5%;微量元素采用 Agilent 7700X 型等离子质谱(ICP-MS)测定,分析相对误差低于 10%。

### (4) 全岩与萤石 Nd 同位素分析

将待测样品溶解后,采用 Biorad AG50W-X8 阳离子交换柱和 Ln 树脂分离提纯后,将稀硝酸溶解提纯的 Nd 上机测试,经 Cetac Aridus II 膜去溶系统引入,在 Nu Plasma II MC-ICP-MS 上测定 Nd 同位素比值。测试过程中,采用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  内部校正仪器质量分馏,Nd 同位素国际标准物质 JNd-1 作为外标校正仪器漂移。

## 3 分析结果

### 3.1 黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄、微量元素与 Hf 同位素

对光明萤石矿 3 件黑云母花岗岩样品(ZK302-

1, GM-W-3-3, GM-E-2-1) 中的 75 颗锆石开展了原位 U-Pb 年龄、微量元素与 Hf 同位素测试, 测试结果见表 1—表 3。所测锆石为无色透明至浅棕色, 多数呈短柱状。锆石 Th 和 U 含量变化较大, 分别为  $16.9 \times 10^{-6}$ ~ $2811 \times 10^{-6}$  和  $225 \times 10^{-6}$ ~ $18840 \times 10^{-6}$ 。

样品 ZK302-1 测定的 25 个年龄数据中, 23 个点落于谐和线附近, 年龄分布范围较大, 为 221.8~77.7 Ma, 1 个点年龄为 291.9 Ma, 且偏离谐和线较大, 另 1 个点年龄为 572.2 Ma, 推测为岩浆上升侵位过程中捕获的围岩或源区继承锆石。锆石年龄明显受到 U 含量的影响, U 含量大于  $10000 \times 10^{-6}$  的年龄明显偏低, 显示锆石受到后期热事件影响而发生铅丢失, 破坏了 U-Pb 同位素体系(吴福元等, 2017)。U 含量小于  $10000 \times 10^{-6}$  的 6 颗具有近谐和的年龄, 年龄加权平均值为  $215 \pm 11$  Ma (MSWD = 19)(图 2)。

样品 GM-W-3-3 测定的 25 个年龄数据中, 21 个锆石年龄集中于 236.9~204.3 Ma 之间, 并获得了  $217.9 \pm 4.1$  Ma (MSWD = 11.8) 的年龄加权平均值(图 2); 获得 3 个较年轻的年龄分别为 186.9 Ma、152.2 Ma 和 134.9 Ma, 推测为晚期岩浆活动结晶的锆石; 此外 1 个点的锆石年龄为 2847.7 Ma, 为捕获

的老基底样品。

样品 GM-E-2-1 测定的 25 个年龄数据中, 21 个锆石年龄分布于 233.3~144.7 Ma 之间; 此外, 获得 1 个锆石年龄为 71.9 Ma, 推测其为 Pb 丢失造成, 不代表岩浆结晶时间; 获得 3 个较老的锆石年龄分别为 838.0 Ma、516.6 Ma 和 316.5 Ma, 推测其为岩浆侵位过程中的捕获锆石。与 ZK302-1 相似, 锆石具有较高的 U 含量, 容易受到后期岩浆活动的影响。U 含量小于  $10000 \times 10^{-6}$  的 15 颗锆石具有近谐和的年龄, 年龄加权平均值为  $214.9 \pm 6.7$  Ma (MSWD = 16)(图 2)。

由于受到锆石高 U 含量的影响, 3 件样品均未得到较好的谐和年龄(图 2)。所测锆石年龄分布范围大(237~133 Ma), 但存在 230~210 Ma、190~170 Ma、150~130 Ma 三个较集中的年龄峰期(图 3-a), 与锡田复式岩体多期次岩浆活动时间一致。获得的 1 颗年龄为 2848 Ma 的捕获锆石, 推测其来自华南地块结晶基底, 这也与湘东北地区存在 3100~1800 Ma 的早前寒武纪结晶基底的认识一致(谢玲琳等, 2000; 郭乐群等, 2003; 唐晓珊等, 2004)。3 件样品较低 U 含量锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值介于 215~218 Ma 之间, 在误差范围内一致, 应为光

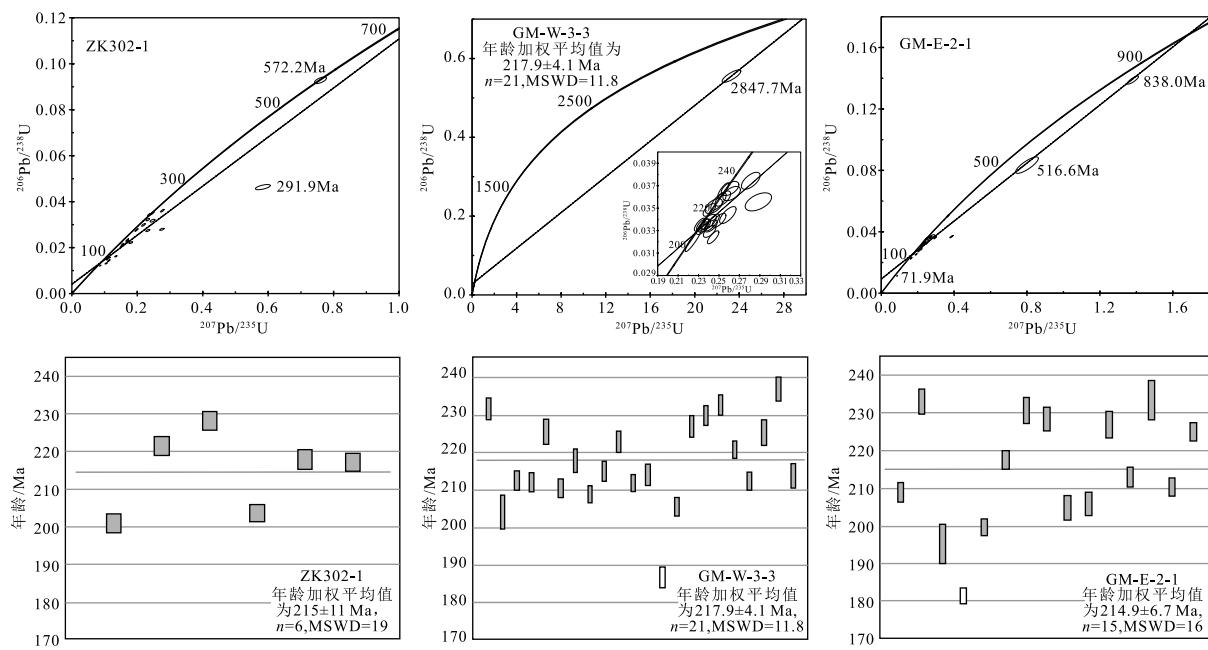


图 2 锡田黑云母花岗岩锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和图和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均图

Fig. 2 Zircon  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  concordia and weighted average  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age diagrams of the Xitian biotite granite samples

表1 光明萤石矿区黑云母花岗岩 LA-ICP-MS 锌石 U-Th-Pb 分析结果  
 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb results of biotite granite in the Guangming fluorite deposit

| 测点号        | 含量/ $10^{-6}$ |       | 同位素比值 |                                   |           |                                  |           |                                   | 年龄/Ma     |                                   |           |                                  |           |                                   |           |       |      |
|------------|---------------|-------|-------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-------|------|
|            | Th            | U     | Th/U  | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $1\sigma$ |       |      |
| ZK302-1-01 | 719           | 10965 | 0.07  | 0.0525                            | 0.0006    | 0.1690                           | 0.0028    | 0.0233                            | 0.0003    | 0.0085                            | 0.0001    | 158.6                            | 2.4       | 148.5                             | 2.2       | 170.3 | 2.8  |
| ZK302-1-02 | 1687          | 14600 | 0.12  | 0.0517                            | 0.0007    | 0.0868                           | 0.0013    | 0.0121                            | 0.0001    | 0.0046                            | 0.0001    | 84.5                             | 1.3       | 77.7                              | 0.9       | 92.3  | 1.4  |
| ZK302-1-03 | 1524          | 10782 | 0.14  | 0.0522                            | 0.0007    | 0.1078                           | 0.0017    | 0.0149                            | 0.0002    | 0.0050                            | 0.0001    | 103.9                            | 1.6       | 95.6                              | 1.3       | 101.8 | 1.6  |
| ZK302-1-04 | 1193          | 3146  | 0.38  | 0.0713                            | 0.0012    | 0.2750                           | 0.0045    | 0.0280                            | 0.0003    | 0.0121                            | 0.0002    | 246.7                            | 3.6       | 177.7                             | 2.0       | 242.8 | 4.4  |
| ZK302-1-05 | 749           | 7827  | 0.10  | 0.0509                            | 0.0005    | 0.2466                           | 0.0033    | 0.0350                            | 0.0004    | 0.0120                            | 0.0002    | 223.8                            | 2.7       | 221.8                             | 2.4       | 242.0 | 3.5  |
| ZK302-1-06 | 1402          | 11571 | 0.12  | 0.0529                            | 0.0006    | 0.1522                           | 0.0031    | 0.0209                            | 0.0004    | 0.0066                            | 0.0002    | 143.9                            | 2.8       | 133.0                             | 2.6       | 133.7 | 3.3  |
| ZK302-1-07 | 1139          | 18840 | 0.06  | 0.0572                            | 0.0008    | 0.1117                           | 0.0019    | 0.0141                            | 0.0002    | 0.0098                            | 0.0004    | 107.5                            | 1.7       | 90.4                              | 1.3       | 196.4 | 7.1  |
| ZK302-1-08 | 770           | 13986 | 0.06  | 0.0575                            | 0.0009    | 0.1048                           | 0.0022    | 0.0131                            | 0.0002    | 0.0108                            | 0.0004    | 101.2                            | 2.0       | 84.1                              | 1.2       | 217.2 | 7.9  |
| ZK302-1-09 | 2811          | 8457  | 0.33  | 0.0610                            | 0.0008    | 0.2322                           | 0.0040    | 0.0274                            | 0.0003    | 0.0049                            | 0.0002    | 212.0                            | 3.3       | 174.4                             | 2.0       | 99.0  | 3.2  |
| ZK302-1-10 | 1172          | 9037  | 0.13  | 0.0503                            | 0.0006    | 0.2393                           | 0.0034    | 0.0344                            | 0.0004    | 0.0111                            | 0.0002    | 217.8                            | 2.8       | 218.0                             | 2.6       | 224.0 | 3.2  |
| ZK302-1-11 | 1015          | 13859 | 0.07  | 0.0569                            | 0.0008    | 0.1139                           | 0.0021    | 0.0145                            | 0.0002    | 0.0084                            | 0.0003    | 109.5                            | 1.9       | 92.5                              | 1.1       | 169.6 | 5.3  |
| ZK302-1-12 | 760           | 4906  | 0.16  | 0.0498                            | 0.0006    | 0.2364                           | 0.0034    | 0.0343                            | 0.0004    | 0.0122                            | 0.0002    | 215.5                            | 2.8       | 217.3                             | 2.4       | 245.0 | 3.8  |
| ZK302-1-13 | 147           | 456   | 0.32  | 0.0591                            | 0.0008    | 0.7595                           | 0.0121    | 0.0928                            | 0.0009    | 0.0270                            | 0.0004    | 573.7                            | 7.0       | 572.2                             | 5.5       | 538.5 | 7.9  |
| ZK302-1-14 | 1498          | 8735  | 0.17  | 0.0518                            | 0.0006    | 0.1976                           | 0.0031    | 0.0276                            | 0.0004    | 0.0059                            | 0.0001    | 183.1                            | 2.6       | 175.7                             | 2.4       | 119.9 | 2.6  |
| ZK302-1-15 | 587           | 9824  | 0.06  | 0.0554                            | 0.0006    | 0.2765                           | 0.0037    | 0.0361                            | 0.0004    | 0.0313                            | 0.0006    | 247.9                            | 2.9       | 228.3                             | 2.4       | 622.7 | 10.8 |
| ZK302-1-16 | 951           | 9954  | 0.10  | 0.0524                            | 0.0006    | 0.1554                           | 0.0023    | 0.0214                            | 0.0003    | 0.0100                            | 0.0002    | 146.7                            | 2.0       | 136.8                             | 1.8       | 201.8 | 3.2  |
| ZK302-1-17 | 626           | 2046  | 0.31  | 0.0521                            | 0.0007    | 0.2320                           | 0.0036    | 0.0322                            | 0.0004    | 0.0112                            | 0.0002    | 211.8                            | 3.0       | 204.0                             | 2.2       | 224.5 | 3.5  |
| ZK302-1-18 | 562           | 10704 | 0.05  | 0.0598                            | 0.0008    | 0.1344                           | 0.0023    | 0.0162                            | 0.0002    | 0.0154                            | 0.0005    | 128.0                            | 2.1       | 103.7                             | 1.2       | 309.3 | 9.0  |
| ZK302-1-19 | 717           | 11187 | 0.06  | 0.0496                            | 0.0014    | 0.1499                           | 0.0022    | 0.0220                            | 0.0003    | 0.0083                            | 0.0002    | 141.8                            | 2.0       | 140.4                             | 1.9       | 167.5 | 3.4  |
| ZK302-1-20 | 519           | 9576  | 0.05  | 0.0585                            | 0.0009    | 0.1802                           | 0.0037    | 0.0221                            | 0.0003    | 0.0193                            | 0.0010    | 168.2                            | 3.2       | 141.2                             | 1.8       | 385.5 | 19.7 |
| ZK302-1-21 | 2525          | 5587  | 0.45  | 0.0529                            | 0.0007    | 0.2188                           | 0.0037    | 0.0299                            | 0.0004    | 0.0087                            | 0.0001    | 200.9                            | 3.1       | 189.7                             | 2.5       | 175.7 | 2.3  |
| ZK302-1-22 | 2149          | 10613 | 0.20  | 0.0531                            | 0.0006    | 0.1145                           | 0.0017    | 0.0156                            | 0.0002    | 0.0052                            | 0.0001    | 110.1                            | 1.5       | 99.6                              | 1.1       | 104.6 | 1.4  |
| ZK302-1-23 | 2215          | 5998  | 0.37  | 0.0544                            | 0.0007    | 0.1699                           | 0.0031    | 0.0226                            | 0.0003    | 0.0064                            | 0.0001    | 159.3                            | 2.7       | 143.9                             | 2.2       | 129.0 | 2.9  |
| ZK302-1-24 | 930           | 3578  | 0.26  | 0.0560                            | 0.0009    | 0.2463                           | 0.0050    | 0.0317                            | 0.0004    | 0.0119                            | 0.0002    | 223.6                            | 4.1       | 201.3                             | 2.5       | 239.1 | 4.2  |

续表 1-1

| 测点号         | 含量/ $10^{-6}$ |       | 同位素比值 |                                   |           |                                  |           |                                   | 年龄/Ma     |                                   |           |                                  |           |                                   |           |        |      |
|-------------|---------------|-------|-------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|--------|------|
|             | Th            | U     | Th/U  | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $1\sigma$ |        |      |
| ZK302-1-25  | 756           | 1247  | 0.61  | 0.0906                            | 0.0017    | 0.5838                           | 0.0150    | 0.0463                            | 0.0007    | 0.0225                            | 0.0006    | 466.9                            | 9.6       | 291.9                             | 4.5       | 450.5  | 11.8 |
| GM-W-3-3-01 | 867           | 3101  | 0.28  | 0.0503                            | 0.0006    | 0.2543                           | 0.0036    | 0.0366                            | 0.0004    | 0.0113                            | 0.0002    | 230.1                            | 2.9       | 231.7                             | 2.7       | 227.4  | 3.3  |
| GM-W-3-3-02 | 458           | 4245  | 0.11  | 0.0506                            | 0.0006    | 0.2252                           | 0.0054    | 0.0322                            | 0.0007    | 0.0114                            | 0.0002    | 206.2                            | 4.5       | 204.3                             | 4.4       | 229.0  | 3.9  |
| GM-W-3-3-03 | 363           | 2586  | 0.14  | 0.0499                            | 0.0006    | 0.2313                           | 0.0035    | 0.0355                            | 0.0004    | 0.0110                            | 0.0002    | 211.2                            | 2.9       | 212.6                             | 2.4       | 220.5  | 3.2  |
| GM-W-3-3-04 | 427           | 2221  | 0.19  | 0.0509                            | 0.0007    | 0.2357                           | 0.0041    | 0.0334                            | 0.0004    | 0.0110                            | 0.0002    | 214.9                            | 3.3       | 212.1                             | 2.4       | 221.4  | 3.2  |
| GM-W-3-3-05 | 244           | 1296  | 0.19  | 0.0506                            | 0.0008    | 0.2495                           | 0.0050    | 0.0356                            | 0.0005    | 0.0115                            | 0.0002    | 226.2                            | 4.0       | 225.5                             | 3.2       | 230.6  | 3.9  |
| GM-W-3-3-06 | 455           | 2890  | 0.16  | 0.0509                            | 0.0007    | 0.2337                           | 0.0038    | 0.0332                            | 0.0004    | 0.0108                            | 0.0002    | 213.3                            | 3.1       | 210.6                             | 2.3       | 217.3  | 3.4  |
| GM-W-3-3-07 | 222           | 684   | 0.33  | 0.0545                            | 0.0009    | 0.2587                           | 0.0053    | 0.0344                            | 0.0005    | 0.0118                            | 0.0002    | 233.6                            | 4.3       | 217.9                             | 3.1       | 236.7  | 4.8  |
| GM-W-3-3-08 | 280           | 1467  | 0.19  | 0.0530                            | 0.0008    | 0.2409                           | 0.0040    | 0.0329                            | 0.0004    | 0.0109                            | 0.0003    | 219.1                            | 3.3       | 208.9                             | 2.2       | 220.0  | 5.0  |
| GM-W-3-3-09 | 760           | 2124  | 0.36  | 0.0534                            | 0.0008    | 0.2502                           | 0.0044    | 0.0339                            | 0.0004    | 0.0093                            | 0.0002    | 226.7                            | 3.6       | 215.1                             | 2.5       | 186.7  | 4.7  |
| GM-W-3-3-10 | 515           | 498   | 1.03  | 0.0506                            | 0.0011    | 0.2449                           | 0.0055    | 0.0352                            | 0.0004    | 0.0106                            | 0.0003    | 222.4                            | 4.5       | 222.9                             | 2.7       | 213.0  | 6.2  |
| GM-W-3-3-11 | 817           | 11192 | 0.07  | 0.0564                            | 0.0007    | 0.1646                           | 0.0022    | 0.0212                            | 0.0002    | 0.0101                            | 0.0003    | 154.7                            | 1.9       | 134.9                             | 1.4       | 203.3  | 6.7  |
| GM-W-3-3-12 | 184           | 324   | 0.57  | 0.3018                            | 0.0035    | 23.3042                          | 0.5551    | 0.5554                            | 0.0105    | 0.1313                            | 0.0050    | 3239.7                           | 23.3      | 2847.7                            | 43.5      | 2493.3 | 90.0 |
| GM-W-3-3-13 | 404           | 1644  | 0.25  | 0.0525                            | 0.0008    | 0.2419                           | 0.0042    | 0.0334                            | 0.0004    | 0.0109                            | 0.0004    | 220.0                            | 3.4       | 211.9                             | 2.2       | 218.5  | 9.0  |
| GM-W-3-3-14 | 484           | 11618 | 0.04  | 0.0551                            | 0.0007    | 0.1810                           | 0.0043    | 0.0239                            | 0.0005    | 0.0161                            | 0.0007    | 168.9                            | 3.7       | 152.2                             | 3.3       | 323.3  | 14.8 |
| GM-W-3-3-15 | 496           | 1244  | 0.40  | 0.0514                            | 0.0009    | 0.2398                           | 0.0050    | 0.0338                            | 0.0004    | 0.0086                            | 0.0004    | 218.3                            | 4.1       | 214.1                             | 2.8       | 173.5  | 7.9  |
| GM-W-3-3-16 | 355           | 1228  | 0.29  | 0.0559                            | 0.0010    | 0.2261                           | 0.0047    | 0.0294                            | 0.0004    | 0.0104                            | 0.0005    | 207.0                            | 3.9       | 186.9                             | 2.8       | 210.1  | 9.1  |
| GM-W-3-3-17 | 1178          | 2666  | 0.44  | 0.0548                            | 0.0008    | 0.2443                           | 0.0037    | 0.0324                            | 0.0004    | 0.0083                            | 0.0003    | 222.0                            | 3.0       | 205.6                             | 2.4       | 167.0  | 6.7  |
| GM-W-3-3-18 | 345           | 775   | 0.44  | 0.0514                            | 0.0009    | 0.2539                           | 0.0050    | 0.0359                            | 0.0004    | 0.0111                            | 0.0004    | 229.7                            | 4.0       | 227.1                             | 2.8       | 222.4  | 7.3  |
| GM-W-3-3-19 | 216           | 520   | 0.42  | 0.0524                            | 0.0011    | 0.2624                           | 0.0057    | 0.0363                            | 0.0004    | 0.0118                            | 0.0004    | 236.6                            | 4.6       | 229.9                             | 2.6       | 236.4  | 7.1  |
| GM-W-3-3-20 | 404           | 497   | 0.81  | 0.0515                            | 0.0011    | 0.2609                           | 0.0057    | 0.0368                            | 0.0004    | 0.0102                            | 0.0003    | 235.4                            | 4.6       | 232.7                             | 2.6       | 205.2  | 5.1  |
| GM-W-3-3-21 | 173           | 1225  | 0.14  | 0.0501                            | 0.0008    | 0.2406                           | 0.0040    | 0.0348                            | 0.0004    | 0.0115                            | 0.0003    | 218.9                            | 3.3       | 220.8                             | 2.3       | 231.2  | 5.7  |
| GM-W-3-3-22 | 715           | 1836  | 0.39  | 0.0505                            | 0.0007    | 0.2341                           | 0.0039    | 0.0335                            | 0.0004    | 0.0107                            | 0.0002    | 213.5                            | 3.2       | 212.5                             | 2.3       | 215.1  | 3.9  |
| GM-W-3-3-23 | 383           | 737   | 0.52  | 0.0585                            | 0.0015    | 0.2886                           | 0.0085    | 0.0356                            | 0.0005    | 0.0120                            | 0.0002    | 257.4                            | 6.7       | 225.3                             | 3.3       | 240.2  | 4.8  |
| GM-W-3-3-24 | 253           | 665   | 0.38  | 0.0542                            | 0.0010    | 0.2811                           | 0.0060    | 0.0374                            | 0.0005    | 0.0121                            | 0.0002    | 251.5                            | 4.8       | 236.9                             | 3.1       | 242.2  | 4.6  |

续表 1-2

| 测点号         | 含量/ $10^{-6}$ |       | 同位素比值 |                                   |           |                                  |           |                                   |           |                                   | 年龄/Ma     |                                  |           |                                  |           |                                   |           |
|-------------|---------------|-------|-------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
|             | Th            | U     | Th/U  | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $1\sigma$ |
| GM-W-3-25   | 727           | 2314  | 0.31  | 0.0522                            | 0.0007    | 0.2436                           | 0.0045    | 0.0337                            | 0.0005    | 0.0087                            | 0.0001    | 221.3                            | 3.7       | 213.8                            | 3.1       | 175.8                             | 2.9       |
| GM-E-2-1-01 | 170           | 508   | 0.34  | 0.0659                            | 0.0013    | 0.7998                           | 0.0412    | 0.0834                            | 0.0035    | 0.0289                            | 0.0012    | 596.7                            | 23.2      | 516.6                            | 21.0      | 575.2                             | 23.7      |
| GM-E-2-1-02 | 736           | 950   | 0.78  | 0.0519                            | 0.0008    | 0.2369                           | 0.0042    | 0.0329                            | 0.0004    | 0.0110                            | 0.0002    | 215.9                            | 3.5       | 208.9                            | 2.5       | 221.1                             | 3.1       |
| GM-E-2-1-03 | 533           | 11878 | 0.04  | 0.0525                            | 0.0005    | 0.3658                           | 0.0056    | 0.0503                            | 0.0007    | 0.0465                            | 0.0006    | 316.5                            | 4.2       | 316.5                            | 4.2       | 917.9                             | 11.6      |
| GM-E-2-1-04 | 868           | 9886  | 0.09  | 0.0757                            | 0.0008    | 0.3857                           | 0.0061    | 0.0368                            | 0.0005    | 0.0631                            | 0.0015    | 331.2                            | 4.4       | 233.0                            | 3.2       | 1237.3                            | 28.3      |
| GM-E-2-1-05 | 1876          | 1984  | 0.95  | 0.0527                            | 0.0009    | 0.2245                           | 0.0071    | 0.0307                            | 0.0008    | 0.0094                            | 0.0002    | 205.7                            | 5.9       | 195.2                            | 5.1       | 188.9                             | 3.1       |
| GM-E-2-1-06 | 1191          | 3519  | 0.34  | 0.0554                            | 0.0007    | 0.2188                           | 0.0032    | 0.0286                            | 0.0003    | 0.0073                            | 0.0001    | 200.9                            | 2.6       | 181.5                            | 2.0       | 147.8                             | 2.2       |
| GM-E-2-1-07 | 1092          | 3617  | 0.30  | 0.0535                            | 0.0007    | 0.2327                           | 0.0035    | 0.0315                            | 0.0003    | 0.0098                            | 0.0002    | 212.5                            | 2.9       | 199.8                            | 2.1       | 198.0                             | 3.2       |
| GM-E-2-1-08 | 1715          | 12849 | 0.13  | 0.0559                            | 0.0007    | 0.0864                           | 0.0014    | 0.0112                            | 0.0002    | 0.0044                            | 0.0001    | 84.1                             | 1.3       | 71.9                             | 1.0       | 88.8                              | 1.7       |
| GM-E-2-1-09 | 679           | 2632  | 0.26  | 0.0505                            | 0.0006    | 0.2398                           | 0.0038    | 0.0343                            | 0.0004    | 0.0110                            | 0.0002    | 218.3                            | 3.1       | 217.7                            | 2.5       | 220.2                             | 3.2       |
| GM-E-2-1-10 | 291           | 755   | 0.39  | 0.0533                            | 0.0009    | 0.2689                           | 0.0060    | 0.0364                            | 0.0006    | 0.0117                            | 0.0002    | 241.8                            | 4.8       | 230.8                            | 3.5       | 235.3                             | 4.7       |
| GM-E-2-1-11 | 367           | 9215  | 0.04  | 0.0594                            | 0.0007    | 0.2958                           | 0.0045    | 0.0361                            | 0.0005    | 0.0333                            | 0.0009    | 263.1                            | 3.5       | 228.5                            | 3.0       | 661.5                             | 17.9      |
| GM-E-2-1-12 | 881           | 2315  | 0.38  | 0.0519                            | 0.0007    | 0.2311                           | 0.0040    | 0.0323                            | 0.0005    | 0.0085                            | 0.0002    | 211.1                            | 3.3       | 204.7                            | 3.1       | 171.0                             | 3.1       |
| GM-E-2-1-13 | 1303          | 5338  | 0.24  | 0.0557                            | 0.0006    | 0.2494                           | 0.0041    | 0.0325                            | 0.0005    | 0.0134                            | 0.0002    | 226.1                            | 3.3       | 205.9                            | 3.0       | 269.7                             | 4.3       |
| GM-E-2-1-14 | 683           | 11034 | 0.06  | 0.0505                            | 0.0005    | 0.1791                           | 0.0027    | 0.0257                            | 0.0003    | 0.0147                            | 0.0002    | 167.3                            | 2.3       | 163.5                            | 2.0       | 295.3                             | 4.6       |
| GM-E-2-1-15 | 470           | 10638 | 0.04  | 0.0503                            | 0.0005    | 0.2458                           | 0.0032    | 0.0354                            | 0.0004    | 0.0131                            | 0.0002    | 223.1                            | 2.6       | 224.0                            | 2.2       | 263.1                             | 3.4       |
| GM-E-2-1-16 | 163           | 225   | 0.72  | 0.0528                            | 0.0016    | 0.2595                           | 0.0083    | 0.0358                            | 0.0005    | 0.0108                            | 0.0002    | 234.2                            | 6.7       | 226.9                            | 3.4       | 216.8                             | 3.7       |
| GM-E-2-1-17 | 686           | 8464  | 0.08  | 0.0526                            | 0.0007    | 0.1642                           | 0.0029    | 0.0227                            | 0.0004    | 0.0094                            | 0.0002    | 154.4                            | 2.6       | 144.7                            | 2.4       | 188.8                             | 3.4       |
| GM-E-2-1-18 | 325           | 1198  | 0.27  | 0.0532                            | 0.0009    | 0.2173                           | 0.0036    | 0.0296                            | 0.0003    | 0.0104                            | 0.0002    | 199.7                            | 3.0       | 188.3                            | 2.0       | 209.5                             | 3.3       |
| GM-E-2-1-19 | 895           | 719   | 1.24  | 0.0541                            | 0.0010    | 0.2519                           | 0.0058    | 0.0336                            | 0.0004    | 0.0102                            | 0.0001    | 228.1                            | 4.7       | 213.0                            | 2.5       | 205.9                             | 2.9       |
| GM-E-2-1-20 | 395           | 1092  | 0.36  | 0.0537                            | 0.0008    | 0.2783                           | 0.0094    | 0.0368                            | 0.0008    | 0.0121                            | 0.0002    | 249.3                            | 7.5       | 233.3                            | 5.2       | 243.6                             | 4.7       |
| GM-E-2-1-21 | 172           | 1016  | 0.17  | 0.0506                            | 0.0008    | 0.2321                           | 0.0045    | 0.0332                            | 0.0004    | 0.0116                            | 0.0002    | 211.9                            | 3.7       | 210.3                            | 2.4       | 232.7                             | 4.1       |
| GM-E-2-1-22 | 1290          | 8723  | 0.15  | 0.0542                            | 0.0006    | 0.2058                           | 0.0038    | 0.0274                            | 0.0004    | 0.0097                            | 0.0001    | 190.0                            | 3.2       | 174.6                            | 2.8       | 194.4                             | 3.0       |
| GM-E-2-1-23 | 17            | 841   | 0.02  | 0.0720                            | 0.0009    | 1.3805                           | 0.0205    | 0.1388                            | 0.0018    | 0.0468                            | 0.0014    | 880.7                            | 8.8       | 838.0                            | 9.9       | 923.8                             | 28.0      |
| GM-E-2-1-24 | 1008          | 6387  | 0.16  | 0.0547                            | 0.0007    | 0.1914                           | 0.0032    | 0.0253                            | 0.0003    | 0.0086                            | 0.0001    | 177.8                            | 2.7       | 160.9                            | 2.2       | 173.0                             | 2.7       |
| GM-E-2-1-25 | 596           | 12662 | 0.05  | 0.0508                            | 0.0006    | 0.2496                           | 0.0032    | 0.0355                            | 0.0004    | 0.0160                            | 0.0002    | 226.2                            | 2.6       | 225.1                            | 2.5       | 320.3                             | 4.7       |

表2 光明矿区黑云母花岗岩锆石元素分析结果

Table 2 Contents of element in zircon grains for the biotite granite in the Guangming fluorite deposit

| 测试点        | La   | Ce   | Pr    | Nd   | Sm   | Eu   | Gd   | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm   | Yb   | Lu   | Y    | Ti   | Zr/Y% | Hf/Y% | Zr/Hf | Eu/Eu <sup>*</sup> | ΔFMQ  | T <sub>NI</sub> /°C |
|------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|--------------------|-------|---------------------|
| ZK302-1-01 | 3.92 | 24.0 | 2.06  | 10.4 | 8.91 | 0.65 | 48.5 | 22.9 | 342  | 140  | 765  | 183  | 1816 | 345  | 4614 | 3.35 | 45.5  | 1.94  | 23.5  | 0.10               | -1.32 | 653                 |
| ZK302-1-02 | 4.73 | 40.8 | 3.13  | 15.9 | 15.3 | 1.12 | 80.2 | 32.6 | 441  | 171  | 872  | 196  | 1841 | 343  | 5474 | 7.80 | 45.4  | 1.70  | 26.7  | 0.10               | -1.39 | 720                 |
| ZK302-1-03 | 115  | 291  | 32.8  | 135  | 56.2 | 1.57 | 122  | 38.4 | 443  | 158  | 780  | 175  | 1642 | 306  | 5217 | 19.6 | 45.5  | 1.59  | 28.7  | 0.06               | 1.49  | 804                 |
| ZK302-1-04 | 3.94 | 60.2 | 3.66  | 21.1 | 17.4 | 25.3 | 51.7 | 16.3 | 185  | 64   | 298  | 63   | 564  | 105  | 2073 | 5.91 | 47.6  | 1.24  | 38.5  | 2.58               | 0.86  | 697                 |
| ZK302-1-05 | 2.06 | 23.1 | 1.92  | 12.3 | 10.3 | 0.46 | 48.1 | 19.1 | 260  | 105  | 547  | 123  | 1180 | 225  | 3375 | 4.76 | 47.1  | 1.72  | 27.4  | 0.06               | -1.40 | 680                 |
| ZK302-1-06 | 3.02 | 26.0 | 1.82  | 10.1 | 10.4 | 0.45 | 58.3 | 25.3 | 361  | 146  | 767  | 174  | 1671 | 315  | 4769 | 6.07 | 45.5  | 1.77  | 25.7  | 0.06               | -1.75 | 699                 |
| ZK302-1-07 | 13.8 | 76.1 | 8.77  | 46.3 | 33.3 | 1.13 | 129  | 54.3 | 759  | 300  | 1579 | 360  | 3510 | 651  | 9860 | 17.9 | 43.5  | 1.88  | 23.1  | 0.05               | -1.24 | 795                 |
| ZK302-1-08 | 13.4 | 69.6 | 7.92  | 40.9 | 25.1 | 0.89 | 88.8 | 37.1 | 528  | 209  | 1142 | 282  | 2906 | 552  | 7007 | 18.9 | 44.5  | 2.04  | 21.8  | 0.06               | -1.19 | 800                 |
| ZK302-1-09 | 7.54 | 62.4 | 8.87  | 45.3 | 36.8 | 1.89 | 102  | 35.9 | 445  | 164  | 837  | 194  | 1916 | 365  | 5310 | 23.2 | 45.6  | 2.00  | 22.8  | 0.09               | -1.12 | 821                 |
| ZK302-1-10 | 1.33 | 23.6 | 1.34  | 8.37 | 10.2 | 0.33 | 52   | 21.1 | 286  | 112  | 572  | 128  | 1212 | 230  | 3560 | 5.09 | 46.3  | 1.60  | 28.9  | 0.04               | -1.55 | 685                 |
| ZK302-1-11 | 20.8 | 101  | 13.73 | 71.8 | 44.0 | 1.48 | 114  | 43.0 | 580  | 225  | 1191 | 290  | 2963 | 559  | 7413 | 35.4 | 44.3  | 1.97  | 22.4  | 0.06               | -1.46 | 918                 |
| ZK302-1-12 | 4.16 | 25.4 | 1.93  | 10.6 | 8.5  | 0.23 | 46.8 | 18.8 | 251  | 97   | 488  | 108  | 1009 | 190  | 3077 | 2.36 | 47.6  | 1.52  | 31.3  | 0.03               | -0.22 | 628                 |
| ZK302-1-13 | 0.02 | 1.77 | 0.02  | 0.28 | 0.81 | 0.37 | 5.11 | 1.77 | 22.3 | 7.64 | 33.7 | 6.59 | 55.8 | 10.0 | 246  | 3.86 | 49.0  | 1.13  | 43.3  | 0.56               | -3.21 | 664                 |
| ZK302-1-14 | 8.79 | 61.6 | 7.63  | 42.2 | 31.1 | 0.98 | 90.6 | 32.7 | 405  | 150  | 764  | 175  | 1711 | 327  | 4774 | 15.2 | 45.4  | 1.81  | 25.1  | 0.06               | -0.80 | 779                 |
| ZK302-1-15 | 3.10 | 27.7 | 2.55  | 13.5 | 11.4 | 0.32 | 52.9 | 24.1 | 356  | 143  | 796  | 207  | 2190 | 425  | 4759 | 8.06 | 45.6  | 2.20  | 20.8  | 0.04               | -1.75 | 722                 |
| ZK302-1-16 | 2.94 | 33.5 | 3.66  | 14.5 | 13.8 | 0.82 | 58.8 | 25.4 | 354  | 138  | 729  | 172  | 1709 | 324  | 4469 | 7.87 | 45.9  | 1.75  | 26.2  | 0.09               | -1.40 | 720                 |
| ZK302-1-17 | 52.1 | 149  | 20.31 | 92.8 | 25.5 | 0.59 | 39.4 | 9.9  | 109  | 39   | 186  | 40   | 378  | 71.0 | 1189 | 14.1 | 47.4  | 1.23  | 38.4  | 0.06               | 2.06  | 772                 |
| ZK302-1-18 | 10.5 | 59.7 | 7.85  | 41.5 | 28.8 | 1.05 | 97.4 | 41.6 | 581  | 229  | 1231 | 303  | 3187 | 619  | 7682 | 23.1 | 44.7  | 2.19  | 20.4  | 0.06               | -1.40 | 820                 |
| ZK302-1-19 | 1.66 | 18.6 | 1.49  | 7.99 | 8.66 | 0.27 | 49.5 | 24.3 | 372  | 153  | 841  | 210  | 2189 | 409  | 5043 | 5.33 | 45.4  | 2.03  | 22.4  | 0.04               | -2.19 | 689                 |
| ZK302-1-20 | 3.37 | 23.8 | 2.62  | 14.0 | 10.5 | 0.44 | 46.1 | 21.8 | 323  | 132  | 737  | 190  | 2025 | 394  | 4388 | 6.42 | 45.3  | 2.18  | 20.8  | 0.06               | -1.78 | 703                 |
| ZK302-1-21 | 2.61 | 38.9 | 1.87  | 10.9 | 12.1 | 1.11 | 55.1 | 20.9 | 271  | 103  | 512  | 114  | 1056 | 193  | 3216 | 23.8 | 43.6  | 1.32  | 32.9  | 0.13               | -1.60 | 823                 |
| ZK302-1-22 | 10.8 | 67.0 | 6.51  | 31.9 | 24.2 | 3.32 | 83.7 | 31.2 | 391  | 142  | 684  | 151  | 1381 | 249  | 4518 | 15.6 | 44.3  | 1.36  | 32.6  | 0.22               | -0.85 | 781                 |
| ZK302-1-23 | 3.8  | 61.6 | 4.05  | 25.5 | 28.4 | 1.64 | 96.9 | 32.8 | 393  | 137  | 651  | 140  | 1280 | 233  | 4295 | 17.8 | 45.3  | 1.20  | 37.6  | 0.10               | -0.61 | 794                 |
| ZK302-1-24 | 2.74 | 39.7 | 3.30  | 21.6 | 21.0 | 1.00 | 76.9 | 24.5 | 289  | 103  | 485  | 103  | 930  | 172  | 3258 | 26.1 | 45.3  | 1.26  | 36.0  | 0.08               | -1.26 | 833                 |
| ZK302-1-25 | 11.0 | 34.2 | 2.18  | 12.4 | 9.84 | 2.87 | 32.2 | 9.84 | 114  | 42   | 207  | 45.1 | 423  | 81.5 | 1359 | 137  | 42.9  | 1.00  | 42.8  | 0.49               | -2.05 | 1039                |

续表2-1

| 测试点         | $L_a$ | $C_e$ | $Pr$ | $Nd$ | $Sm$ | $Eu$ | $Gd$ | $Tb$ | $Dy$ | $Ho$ | $Er$ | $Tm$  | $Yb$ | $Lu$ | $Y$  | $Ti$ | $Zr/\%$ | $Hf/\%$ | $Zr/Hf$ | $Eu/Eu^*$ | $\Delta FMQ$ | $T_{\text{tr}}/^\circ\text{C}$ |
|-------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|---------|---------|---------|-----------|--------------|--------------------------------|
| GM-W-3-3-01 | 0.46  | 17.9  | 0.40 | 3.36 | 5.65 | 0.28 | 28.5 | 10.7 | 137  | 50   | 248  | 53.8  | 501  | 93.9 | 1597 | 4.37 | 47.9    | 1.28    | 45.9    | 0.13      | -0.80        | 692                            |
| GM-W-3-3-02 | 0.70  | 12.6  | 0.66 | 4.11 | 4.88 | 0.20 | 26.0 | 10.6 | 150  | 61   | 324  | 75.4  | 741  | 143  | 1995 | 4.22 | 47.3    | 1.52    | 44.6    | 0.17      | 0.74         | 714                            |
| GM-W-3-3-03 | 0.00  | 6.82  | 0.01 | 0.54 | 2.17 | 0.10 | 17.1 | 7.26 | 107  | 44   | 239  | 55.0  | 540  | 108  | 1425 | 2.01 | 43.7    | 1.36    | 21.7    | 0.02      | -1.50        | 606                            |
| GM-W-3-3-04 | 0.00  | 8.86  | 0.03 | 0.72 | 2.64 | 0.09 | 18.9 | 7.34 | 101  | 40   | 201  | 45.1  | 429  | 82.6 | 1249 | 2.28 | 44.1    | 1.32    | 25.4    | 0.02      | -2.54        | 843                            |
| GM-W-3-3-05 | 0.00  | 7.14  | 0.01 | 0.38 | 1.29 | 0.20 | 10.3 | 3.97 | 55   | 23   | 120  | 28.0  | 276  | 55.8 | 714  | 2.75 | 48.4    | 1.26    | 43.4    | 0.07      | -0.11        | 745                            |
| GM-W-3-3-06 | 0.15  | 9.43  | 0.12 | 1.02 | 3.20 | 0.15 | 21.5 | 8.74 | 123  | 50   | 266  | 60.7  | 591  | 116  | 1611 | 2.68 | 46.2    | 1.35    | 34.8    | 0.08      | -1.42        | 735                            |
| GM-W-3-3-07 | 2.09  | 15.5  | 0.84 | 4.99 | 2.84 | 0.43 | 11.0 | 3.52 | 45   | 18   | 90   | 20.6  | 201  | 39.5 | 553  | 3.74 | 46.3    | 1.27    | 34.9    | 0.10      | -2.24        | 841                            |
| GM-W-3-3-08 | 3.20  | 15.5  | 1.35 | 6.36 | 3.70 | 0.33 | 14.2 | 5.45 | 73   | 29   | 152  | 34.5  | 335  | 65.7 | 892  | 2.28 | 42.6    | 1.32    | 27.2    | 0.22      | -1.43        | 995                            |
| GM-W-3-3-09 | 1.16  | 20.3  | 0.86 | 5.17 | 6.02 | 0.63 | 25.4 | 9.61 | 122  | 45   | 225  | 49.6  | 458  | 85.9 | 1392 | 5.16 | 47.0    | 1.23    | 36.6    | 0.06      | -1.22        | 634                            |
| GM-W-3-3-10 | 0.28  | 36.0  | 0.64 | 9.08 | 14.4 | 2.09 | 59.6 | 17.5 | 197  | 68   | 302  | 58.7  | 505  | 91.4 | 2026 | 8.09 | 47.0    | 1.00    | 42.5    | 0.09      | -2.41        | 761                            |
| GM-W-3-3-11 | 3.84  | 34.5  | 5.83 | 40.3 | 51.5 | 2.54 | 110  | 42.9 | 530  | 192  | 1003 | 241   | 2468 | 462  | 6016 | 35.5 | 43.9    | 2.09    | 17.7    | 0.03      | -3.46        | 635                            |
| GM-W-3-3-12 | 0.08  | 12.1  | 0.11 | 1.38 | 2.15 | 0.41 | 10.3 | 3.49 | 43   | 17   | 90   | 20.3  | 202  | 43.2 | 567  | 11.0 | 46.7    | 1.02    | 38.1    | 0.10      | -0.84        | 683                            |
| GM-W-3-3-13 | 5.40  | 21.0  | 1.83 | 8.40 | 5.74 | 0.31 | 24.7 | 8.76 | 115  | 44   | 220  | 47.4  | 449  | 86.2 | 1380 | 4.72 | 45.2    | 1.22    | 26.2    | 0.08      | 0.57         | 678                            |
| GM-W-3-3-14 | 0.55  | 9.53  | 0.38 | 1.69 | 4.93 | 0.07 | 42.2 | 23.2 | 366  | 151  | 861  | 226.2 | 2507 | 492  | 5082 | 2.18 | 44.0    | 2.22    | 21.5    | 0.02      | 2.75         | 654                            |
| GM-W-3-3-15 | 0.86  | 16.7  | 0.66 | 4.14 | 5.12 | 0.46 | 21.1 | 7.57 | 93   | 34   | 163  | 34.2  | 313  | 58.6 | 1002 | 5.96 | 44.8    | 1.18    | 21.8    | 0.01      | -2.75        | 646                            |
| GM-W-3-3-16 | 0.50  | 16.0  | 0.53 | 3.92 | 5.23 | 0.56 | 21.1 | 7.29 | 90   | 33   | 167  | 36.4  | 339  | 65.7 | 1018 | 4.46 | 47.5    | 1.26    | 46.3    | 0.16      | -0.96        | 764                            |
| GM-W-3-3-17 | 5.79  | 44.9  | 4.83 | 27.4 | 28.2 | 2.12 | 87.9 | 30.2 | 338  | 111  | 500  | 98.8  | 850  | 151  | 3286 | 15.9 | 43.4    | 1.18    | 27.0    | 0.10      | -1.34        | 717                            |
| GM-W-3-3-18 | 0.01  | 11.9  | 0.12 | 1.86 | 3.83 | 0.45 | 18.2 | 5.77 | 74   | 28   | 142  | 30.8  | 290  | 56.7 | 878  | 6.3  | 47.9    | 1.18    | 38.9    | 0.12      | -1.43        | 800                            |
| GM-W-3-3-19 | 5.55  | 48.9  | 2.80 | 15.2 | 7.58 | 0.98 | 19.6 | 5.43 | 64   | 23   | 112  | 24.0  | 224  | 44.5 | 705  | 11.9 | 47.3    | 1.11    | 46.4    | 0.21      | 0.72         | 785                            |
| GM-W-3-3-20 | 0.08  | 15.8  | 0.35 | 4.96 | 6.96 | 1.43 | 31.8 | 9.27 | 107  | 38   | 182  | 37.6  | 342  | 65.6 | 1167 | 10.3 | 47.4    | 1.00    | 42.1    | 0.09      | -0.96        | 710                            |
| GM-W-3-3-21 | 0.01  | 5.53  | 0.01 | 0.26 | 0.87 | 0.12 | 7.21 | 2.99 | 44   | 19   | 105  | 25.0  | 254  | 51.1 | 606  | 2.29 | 47.5    | 1.35    | 35.9    | 0.06      | -1.19        | 629                            |
| GM-W-3-3-22 | 0.12  | 20.2  | 0.23 | 3.53 | 6.97 | 0.80 | 32.8 | 11.2 | 142  | 53   | 264  | 56.5  | 520  | 99.1 | 1667 | 2.92 | 44.7    | 1.22    | 29.2    | 0.05      | -1.95        | 700                            |
| GM-W-3-3-23 | 0.87  | 12.5  | 0.78 | 8.24 | 11.8 | 0.85 | 51.0 | 15.1 | 175  | 62   | 288  | 57.8  | 515  | 96.5 | 1916 | 13.6 | 47.3    | 1.02    | 34.6    | 0.25      | -5.94        | 678                            |
| GM-W-3-3-24 | 15.9  | 50.9  | 5.35 | 24.2 | 7.22 | 0.46 | 17.9 | 5.33 | 65   | 24   | 116  | 24.5  | 225  | 43.5 | 727  | 19.5 | 44.8    | 1.09    | 29.4    | 0.08      | -1.55        | 698                            |
| GM-E-2-1-01 | 0.08  | 9.05  | 0.15 | 2.23 | 4.37 | 0.42 | 23.1 | 7.46 | 95   | 36   | 172  | 36.2  | 336  | 68.7 | 1070 | 5.59 | 46.9    | 1.04    | 36.8    | 0.07      | -0.97        | 602                            |

续表 2-2

| 测试点         | La   | Ce     | Pr    | Nd   | Sm   | Eu   | Gd   | Tb   | Dy  | Ho  | Er   | Tm   | Yb   | Lu   | Y    | Ti   | Zr/Hf | Hf/% | Zr/Eu | Eu/Eu* | ΔFMQ  | T <sub>tr</sub> /°C |
|-------------|------|--------|-------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|---------------------|
| GM-E-2-1-02 | 0.30 | 34.37  | 0.58  | 8.04 | 12.1 | 1.40 | 52.0 | 15.2 | 174 | 60  | 273  | 53.9 | 469  | 85.8 | 1846 | 7.33 | 46.3  | 1.06 | 30.5  | 0.05   | -1.82 | 670                 |
| GM-E-2-1-03 | 4.06 | 16.02  | 1.91  | 8.25 | 7.13 | 0.11 | 43.3 | 22.5 | 355 | 148 | 828  | 207  | 2121 | 400  | 4915 | 1.7  | 47.1  | 2.01 | 34.7  | 0.05   | -1.81 | 617                 |
| GM-E-2-1-04 | 1.64 | 33.07  | 1.83  | 9.67 | 9.33 | 0.14 | 51.2 | 22.9 | 330 | 133 | 709  | 167  | 1618 | 307  | 4299 | 28.7 | 47.4  | 1.74 | 35.9  | 0.04   | -1.33 | 626                 |
| GM-E-2-1-05 | 0.09 | 36.39  | 0.49  | 8.19 | 13.3 | 0.60 | 59.2 | 17.1 | 198 | 67  | 302  | 60.6 | 531  | 94.0 | 2026 | 10.5 | 47.8  | 1.11 | 38.0  | 0.16   | -1.40 | 639                 |
| GM-E-2-1-06 | 1.12 | 21.54  | 1.66  | 8.61 | 13.2 | 0.72 | 51.8 | 22.3 | 292 | 103 | 512  | 110  | 998  | 186  | 3242 | 9.38 | 47.3  | 1.33 | 35.0  | 0.06   | -1.60 | 637                 |
| GM-E-2-1-07 | 1.94 | 23.63  | 1.29  | 8.74 | 13.2 | 0.89 | 60.4 | 23.4 | 307 | 110 | 531  | 110  | 990  | 183  | 3463 | 28.3 | 47.7  | 1.33 | 37.7  | 0.24   | 0.23  | 661                 |
| GM-E-2-1-08 | 28.5 | 133.96 | 17.64 | 66.9 | 48.5 | 5.59 | 121  | 51.9 | 677 | 239 | 1230 | 281  | 2705 | 493  | 7927 | 101  | 47.3  | 1.57 | 35.8  | 0.14   | 0.00  | 626                 |
| GM-E-2-1-09 | 0.01 | 10.9   | 0.04  | 1.05 | 3.36 | 0.16 | 21.0 | 8.20 | 109 | 41  | 208  | 45.7 | 421  | 80.8 | 1300 | 2.56 | 46.6  | 1.28 | 37.7  | 0.15   | -0.57 | 686                 |
| GM-E-2-1-10 | 0.13 | 6.50   | 0.27  | 3.97 | 8.05 | 0.53 | 39.0 | 12.6 | 153 | 55  | 260  | 53.0 | 463  | 89.9 | 1706 | 12.5 | 47.4  | 1.11 | 47.3  | 0.22   | 1.30  | 723                 |
| GM-E-2-1-11 | 0.22 | 5.66   | 0.19  | 1.41 | 4.37 | 0.12 | 33.3 | 18.6 | 287 | 115 | 660  | 179  | 1994 | 395  | 3910 | 2.58 | 43.6  | 2.48 | 20.9  | 0.10   | -2.76 | 866                 |
| GM-E-2-1-12 | 1.11 | 17.7   | 0.56  | 3.31 | 5.36 | 0.40 | 28.5 | 11.3 | 154 | 58  | 289  | 63.5 | 376  | 108  | 1753 | 4.94 | 47.9  | 1.23 | 46.9  | 0.27   | -0.50 | 750                 |
| GM-E-2-1-13 | 2.74 | 58.7   | 2.62  | 14.5 | 12.9 | 0.65 | 46.4 | 18.1 | 245 | 96  | 507  | 121  | 1181 | 230  | 3120 | 4.67 | 47.6  | 1.72 | 38.8  | 0.08   | -0.21 | 679                 |
| GM-E-2-1-14 | 56.0 | 253    | 31.7  | 121  | 31.5 | 0.28 | 63.2 | 25.2 | 364 | 144 | 804  | 206  | 2175 | 423  | 4806 | 3.38 | 43.7  | 2.05 | 19.8  | 0.02   | -2.61 | 623                 |
| GM-E-2-1-15 | 0.23 | 9.93   | 0.22  | 1.54 | 4.75 | 0.05 | 42.3 | 22.9 | 367 | 156 | 876  | 216  | 2191 | 420  | 5125 | 3.04 | 47.5  | 2.05 | 40.3  | 0.14   | -0.56 | 697                 |
| GM-E-2-1-16 | 0.08 | 8.34   | 0.19  | 2.75 | 5.30 | 0.58 | 22.2 | 6.29 | 73  | 25  | 111  | 22.3 | 197  | 37.2 | 723  | 12.9 | 47.8  | 1.03 | 37.9  | 0.16   | -0.38 | 675                 |
| GM-E-2-1-17 | 3.70 | 31.5   | 2.60  | 11.6 | 12.6 | 0.86 | 53.4 | 25.4 | 370 | 148 | 786  | 183  | 1757 | 329  | 4769 | 7.57 | 46.6  | 1.61 | 39.4  | 0.13   | -0.36 | 783                 |
| GM-E-2-1-18 | 3.50 | 17.7   | 1.04  | 3.98 | 3.12 | 0.27 | 14.6 | 5.36 | 71  | 27  | 142  | 31.5 | 300  | 60.0 | 875  | 8.9  | 47.5  | 1.23 | 40.3  | 0.17   | -0.79 | 702                 |
| GM-E-2-1-19 | 1.85 | 44.0   | 1.40  | 15.7 | 19.3 | 2.53 | 72.7 | 20.0 | 216 | 71  | 313  | 60.3 | 504  | 93.2 | 2191 | 16.2 | 47.3  | 1.02 | 42.8  | 0.25   | 1.46  | 756                 |
| GM-E-2-1-20 | 0.03 | 13.5   | 0.16  | 2.79 | 5.45 | 0.36 | 29.0 | 9.62 | 117 | 42  | 200  | 42.4 | 389  | 74.2 | 1297 | 6.94 | 47.4  | 1.13 | 47.2  | 0.29   | -0.34 | 744                 |
| GM-E-2-1-21 | 0.01 | 6.64   | 0.03  | 0.32 | 1.19 | 0.07 | 8.47 | 3.45 | 48  | 20  | 103  | 23.4 | 226  | 45.7 | 611  | 2.38 | 47.4  | 1.32 | 35.0  | 0.15   | -1.64 | 626                 |
| GM-E-2-1-22 | 0.87 | 20.2   | 1.00  | 5.73 | 8.66 | 0.37 | 49.9 | 22.3 | 315 | 121 | 622  | 138  | 1284 | 236  | 3841 | 6.15 | 46.8  | 1.53 | 38.3  | 0.16   | 0.05  | 643                 |
| GM-E-2-1-23 | 0.02 | 0.55   | 0.04  | 0.35 | 0.74 | 0.18 | 6.31 | 3.61 | 56  | 22  | 116  | 26.8 | 260  | 50.9 | 702  | 4.65 | 47.2  | 1.37 | 46.3  | 0.11   | -1.33 | 769                 |
| GM-E-2-1-24 | 1.30 | 21.5   | 1.46  | 7.05 | 10.1 | 0.55 | 47.4 | 21.3 | 290 | 111 | 560  | 126  | 1170 | 217  | 3446 | 5.99 | 47.3  | 1.52 | 43.2  | 0.12   | 0.88  | 803                 |
| GM-E-2-1-25 | 0.06 | 7.90   | 0.03  | 0.74 | 4.32 | 0.04 | 44.1 | 24.9 | 392 | 157 | 897  | 241  | 2684 | 532  | 5278 | 1.59 | 46.5  | 2.31 | 37.1  | 0.14   | -0.34 | 732                 |

注:除Zr和Hf外,其他元素单位均为10<sup>-6</sup>

表 3 光明矿区黑云母花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the biotite granite in the Guangming fluorite deposit

| 测试点        | 年龄/Ma  | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $\pm 1\sigma$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | $\pm 1\sigma$ | $T_{\text{DM}}/\text{Ma}$ | $T_{\text{DM2}}/\text{Ma}$ |
|------------|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|---------------------------|----------------------------|
| ZK302-1-01 | 77.7   | 0.109563                          | 0.003218                          | 0.282345                          | 0.000007      | -13.99                       | 0.23          | 1360                      | 1994                       |
| ZK302-1-02 | 95.6   | 0.112632                          | 0.003343                          | 0.282329                          | 0.000006      | -14.23                       | 0.21          | 1390                      | 2023                       |
| ZK302-1-03 | 148.5  | 0.108219                          | 0.003287                          | 0.282321                          | 0.000006      | -13.45                       | 0.23          | 1399                      | 2014                       |
| ZK302-1-04 | 177.7  | 0.052182                          | 0.001538                          | 0.282358                          | 0.000009      | -11.35                       | 0.30          | 1281                      | 1906                       |
| ZK302-1-05 | 221.8  | 0.075239                          | 0.002341                          | 0.282362                          | 0.000006      | -10.37                       | 0.22          | 1303                      | 1879                       |
| ZK302-1-06 | 133.0  | 0.100715                          | 0.003117                          | 0.282356                          | 0.000006      | -12.50                       | 0.22          | 1340                      | 1943                       |
| ZK302-1-07 | 90.4   | 0.158253                          | 0.004829                          | 0.282297                          | 0.000007      | -15.55                       | 0.25          | 1499                      | 2101                       |
| ZK302-1-08 | 84.1   | 0.111703                          | 0.003640                          | 0.282346                          | 0.000009      | -13.87                       | 0.31          | 1376                      | 1992                       |
| ZK302-1-09 | 174.4  | 0.111799                          | 0.003516                          | 0.282358                          | 0.000006      | -11.64                       | 0.23          | 1353                      | 1922                       |
| ZK302-1-10 | 218.0  | 0.070187                          | 0.002153                          | 0.282401                          | 0.000009      | -9.04                        | 0.31          | 1240                      | 1793                       |
| ZK302-1-11 | 92.5   | 0.109851                          | 0.003486                          | 0.282319                          | 0.000006      | -14.66                       | 0.21          | 1410                      | 2047                       |
| ZK302-1-12 | 217.3  | 0.070914                          | 0.002128                          | 0.282393                          | 0.000009      | -9.35                        | 0.33          | 1251                      | 1811                       |
| ZK302-1-13 | 572.2  | 0.008371                          | 0.000251                          | 0.282493                          | 0.000009      | 2.34                         | 0.32          | 1052                      | 1353                       |
| ZK302-1-14 | 175.7  | 0.103485                          | 0.003315                          | 0.282362                          | 0.000009      | -11.44                       | 0.32          | 1338                      | 1910                       |
| ZK302-1-15 | 228.3  | 0.102071                          | 0.003316                          | 0.282329                          | 0.000007      | -11.57                       | 0.24          | 1389                      | 1959                       |
| ZK302-1-16 | 136.8  | 0.092679                          | 0.002887                          | 0.282372                          | 0.000007      | -11.84                       | 0.24          | 1308                      | 1905                       |
| ZK302-1-17 | 204.0  | 0.035416                          | 0.001144                          | 0.282400                          | 0.000009      | -9.26                        | 0.32          | 1209                      | 1795                       |
| ZK302-1-18 | 103.7  | 0.139388                          | 0.004624                          | 0.282284                          | 0.000010      | -15.74                       | 0.34          | 1511                      | 2123                       |
| ZK302-1-19 | 140.4  | 0.094020                          | 0.002984                          | 0.282354                          | 0.000008      | -12.41                       | 0.27          | 1339                      | 1944                       |
| ZK302-1-20 | 141.2  | 0.104102                          | 0.003539                          | 0.282342                          | 0.000008      | -12.85                       | 0.28          | 1377                      | 1971                       |
| ZK302-1-21 | 189.7  | 0.091367                          | 0.002798                          | 0.282381                          | 0.000011      | -10.41                       | 0.38          | 1291                      | 1857                       |
| ZK302-1-22 | 99.6   | 0.084885                          | 0.002493                          | 0.282363                          | 0.000007      | -12.88                       | 0.25          | 1307                      | 1941                       |
| ZK302-1-23 | 143.9  | 0.110712                          | 0.003594                          | 0.282290                          | 0.000014      | -14.65                       | 0.49          | 1457                      | 2086                       |
| ZK302-1-24 | 201.3  | 0.067915                          | 0.002060                          | 0.282378                          | 0.000008      | -10.19                       | 0.27          | 1270                      | 1852                       |
| ZK302-1-25 | 291.9  | 0.065459                          | 0.002014                          | 0.282389                          | 0.000009      | -7.89                        | 0.33          | 1252                      | 1778                       |
| GMW33-01   | 231.7  | 0.075950                          | 0.002295                          | 0.282328                          | 0.000013      | -11.38                       | 0.45          | 1351                      | 1950                       |
| GMW33-02   | 204.3  | 0.087788                          | 0.002935                          | 0.282343                          | 0.000008      | -11.49                       | 0.27          | 1352                      | 1935                       |
| GMW33-03   | 212.6  | 0.069982                          | 0.002219                          | 0.282377                          | 0.000009      | -10.01                       | 0.31          | 1277                      | 1849                       |
| GMW33-04   | 212.1  | 0.047604                          | 0.001568                          | 0.282386                          | 0.000010      | -9.63                        | 0.35          | 1243                      | 1825                       |
| GMW33-05   | 225.5  | 0.057594                          | 0.001924                          | 0.282351                          | 0.000010      | -10.62                       | 0.34          | 1304                      | 1897                       |
| GMW33-06   | 210.6  | 0.041625                          | 0.001381                          | 0.282416                          | 0.000016      | -8.55                        | 0.57          | 1193                      | 1756                       |
| GMW33-07   | 217.9  | 0.036130                          | 0.001201                          | 0.282404                          | 0.000012      | -8.82                        | 0.42          | 1205                      | 1779                       |
| GMW33-08   | 208.9  | 0.032407                          | 0.001109                          | 0.282383                          | 0.000018      | -9.72                        | 0.62          | 1230                      | 1828                       |
| GMW33-10   | 222.9  | 0.052691                          | 0.001615                          | 0.282348                          | 0.000011      | -10.73                       | 0.38          | 1297                      | 1902                       |
| GMW33-12   | 2847.7 | 0.026759                          | 0.000941                          | 0.281255                          | 0.000035      | 9.00                         | 1.23          | 2780                      | 2739                       |
| GMW33-13   | 211.9  | 0.048844                          | 0.001581                          | 0.282362                          | 0.000007      | -10.48                       | 0.26          | 1277                      | 1878                       |
| GMW33-14   | 152.2  | 0.128569                          | 0.003918                          | 0.282285                          | 0.000007      | -14.71                       | 0.25          | 1479                      | 2096                       |
| GMW33-15   | 214.1  | 0.046583                          | 0.001505                          | 0.282411                          | 0.000019      | -8.68                        | 0.69          | 1204                      | 1767                       |

续表3

| 测试点        | 年龄/Ma | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $\pm 1\sigma$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | $\pm 1\sigma$ | $T_{\text{DM}}/\text{Ma}$ | $T_{\text{DM2}}/\text{Ma}$ |
|------------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|---------------------------|----------------------------|
| GMW33-16   | 186.9 | 0.079904                          | 0.002483                          | 0.282305                          | 0.000016      | -13.12                       | 0.56          | 1390                      | 2023                       |
| GMW33-17   | 205.6 | 0.106696                          | 0.003257                          | 0.282268                          | 0.000024      | -14.16                       | 0.86          | 1476                      | 2103                       |
| GMW33-18   | 227.1 | 0.035354                          | 0.001148                          | 0.282370                          | 0.000009      | -9.80                        | 0.33          | 1251                      | 1847                       |
| GMW33-19   | 229.9 | 0.035796                          | 0.001210                          | 0.282372                          | 0.000012      | -9.69                        | 0.42          | 1250                      | 1843                       |
| GMW33-20   | 232.7 | 0.025720                          | 0.000860                          | 0.282404                          | 0.000011      | -8.45                        | 0.38          | 1194                      | 1767                       |
| GMW33-21   | 220.8 | 0.022977                          | 0.000802                          | 0.282379                          | 0.000009      | -9.56                        | 0.30          | 1226                      | 1827                       |
| GMW33-22   | 212.5 | 0.044409                          | 0.001405                          | 0.282368                          | 0.000008      | -10.23                       | 0.27          | 1262                      | 1862                       |
| GMW33-23   | 225.3 | 0.050889                          | 0.001689                          | 0.282329                          | 0.000011      | -11.37                       | 0.39          | 1327                      | 1944                       |
| GMW33-24   | 236.9 | 0.031680                          | 0.001017                          | 0.282371                          | 0.000012      | -9.55                        | 0.42          | 1245                      | 1839                       |
| GMW33-25   | 213.8 | 0.063082                          | 0.002097                          | 0.282342                          | 0.000011      | -11.21                       | 0.39          | 1323                      | 1925                       |
| GME-2-1-01 | 516.6 | 0.031990                          | 0.001196                          | 0.282315                          | 0.000017      | -5.53                        | 0.60          | 1330                      | 1804                       |
| GME-2-1-02 | 208.9 | 0.046352                          | 0.001514                          | 0.282354                          | 0.000010      | -10.80                       | 0.34          | 1285                      | 1895                       |
| GME-2-1-03 | 316.5 | 0.118779                          | 0.004223                          | 0.282271                          | 0.000007      | -12.05                       | 0.23          | 1513                      | 2056                       |
| GME-2-1-04 | 233.0 | 0.062348                          | 0.002145                          | 0.282352                          | 0.000007      | -10.46                       | 0.26          | 1310                      | 1893                       |
| GME-2-1-05 | 195.2 | 0.122612                          | 0.004076                          | 0.282282                          | 0.000010      | -13.98                       | 0.37          | 1490                      | 2083                       |
| GME-2-1-06 | 181.5 | 0.115470                          | 0.003891                          | 0.282283                          | 0.000013      | -14.21                       | 0.45          | 1481                      | 2087                       |
| GME-2-1-07 | 199.8 | 0.084925                          | 0.002608                          | 0.282360                          | 0.000007      | -10.94                       | 0.24          | 1316                      | 1897                       |
| GME-2-1-08 | 71.9  | 0.182906                          | 0.006059                          | 0.282102                          | 0.000027      | -22.85                       | 0.94          | 1868                      | 2539                       |
| GME-2-1-09 | 217.7 | 0.063458                          | 0.002110                          | 0.282345                          | 0.000013      | -11.04                       | 0.47          | 1320                      | 1917                       |
| GME-2-1-10 | 230.8 | 0.054088                          | 0.001859                          | 0.282354                          | 0.000023      | -10.42                       | 0.81          | 1298                      | 1888                       |
| GME-2-1-11 | 228.5 | 0.089284                          | 0.003200                          | 0.282283                          | 0.000011      | -13.15                       | 0.40          | 1451                      | 2057                       |
| GME-2-1-12 | 204.7 | 0.084999                          | 0.002554                          | 0.282356                          | 0.000009      | -10.96                       | 0.33          | 1319                      | 1903                       |
| GME-2-1-13 | 205.9 | 0.099748                          | 0.003253                          | 0.282324                          | 0.000009      | -12.18                       | 0.33          | 1393                      | 1979                       |
| GME-2-1-14 | 163.5 | 0.098653                          | 0.003537                          | 0.282319                          | 0.000012      | -13.22                       | 0.44          | 1411                      | 2012                       |
| GME-2-1-15 | 224.0 | 0.126375                          | 0.004774                          | 0.282293                          | 0.000009      | -13.14                       | 0.32          | 1503                      | 2053                       |
| GME-2-1-16 | 226.9 | 0.024166                          | 0.000840                          | 0.282362                          | 0.000015      | -10.03                       | 0.54          | 1251                      | 1861                       |
| GME-2-1-17 | 144.7 | 0.123112                          | 0.004257                          | 0.282234                          | 0.000010      | -16.70                       | 0.34          | 1571                      | 2214                       |
| GME-2-1-18 | 188.3 | 0.029116                          | 0.000990                          | 0.282420                          | 0.000016      | -8.86                        | 0.58          | 1176                      | 1759                       |
| GME-2-1-19 | 213.0 | 0.061467                          | 0.002038                          | 0.282369                          | 0.000028      | -10.28                       | 0.98          | 1283                      | 1866                       |
| GME-2-1-20 | 233.3 | 0.039615                          | 0.001215                          | 0.282295                          | 0.000009      | -12.34                       | 0.32          | 1358                      | 2010                       |
| GME-2-1-21 | 210.3 | 0.027236                          | 0.000927                          | 0.282393                          | 0.000014      | -9.33                        | 0.48          | 1211                      | 1805                       |
| GME-2-1-22 | 174.6 | 0.128474                          | 0.003948                          | 0.282343                          | 0.000013      | -12.20                       | 0.46          | 1391                      | 1956                       |
| GME-2-1-23 | 838.0 | 0.033263                          | 0.001033                          | 0.282038                          | 0.000039      | -8.28                        | 1.39          | 1710                      | 2224                       |
| GME-2-1-24 | 160.9 | 0.105005                          | 0.003191                          | 0.282324                          | 0.000014      | -13.07                       | 0.49          | 1390                      | 2000                       |
| GME-2-1-25 | 225.1 | 0.118336                          | 0.003862                          | 0.282320                          | 0.000009      | -12.02                       | 0.32          | 1423                      | 1984                       |

明萤石矿黑云母花岗岩的侵位时间。

光明萤石矿黑云母花岗岩印支期—燕山期的  
锆石Y含量介于 $553 \times 10^{-6} \sim 6016 \times 10^{-6}$ 之间,Zr含

量介于43.4%~48.4%之间,Hf含量介于1.00%~  
2.48%之间。计算得到Zr/Hf值为17.7~47.4,Eu/  
Eu<sup>\*</sup>值为0.01~0.29。利用Loucks et al.(2020)提出

的锆石氧逸度计算方法,得到  $\Delta\text{FMQ}$  变化范围为  $-3.46\sim2.75$ ,且随锆石年龄由老至新, $\Delta\text{FMQ}$  逐渐降低;利用 Watson et al.(2006)提出的计算方法,估算出锆石结晶温度为  $602\sim866^\circ\text{C}$ ( $\alpha_{\text{SiO}_2}=1$ ;  $\alpha_{\text{TiO}_2}=0.7$ )。

光明萤石矿区黑云母花岗岩印支期—燕山期的锆石 Hf 同位素测定值具有较大的变化范围,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282234\sim0.282420$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-16.7\sim-8.5$ , 利用平均地壳  $f_{\text{Lu/Hf}}=-0.5$ ,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$  计算对应的二阶段模式年龄为  $1756\sim2214\text{ Ma}$ , 且在  $1900\sim1950\text{ Ma}$  间较集中(图 3-b),显示物质源区为古—中元古代地壳。

### 3.2 黑云母花岗岩主量、微量元素特征

光明萤石矿黑云母花岗岩主量、微量及稀土元素分析结果见表 4。岩体具有高硅( $\text{SiO}_2=72.62\%\sim77.34\%$ )、高碱( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.03\%\sim8.66\%$ )、富铝( $\text{Al}_2\text{O}_3=12.02\%\sim13.83\%$ )的特征。在岩浆/火山岩系统全碱-硅(TAS)分类图解(图 4-a)上,样品点均位于花岗岩区,结合岩石手标本及镜下观察将其定名为黑云母花岗岩。 $\text{K}_2\text{O}$  含量较高,为  $5.02\%\sim5.88\%$ ;  $\text{Na}_2\text{O}$  含量( $0.15\%\sim3.16\%$ )远小于  $\text{K}_2\text{O}$  含量,在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图解(图 4-b)中,样品点落于高钾钙碱性-钾玄岩系列,反映出样品富钾的特征。样品 A/CNK 值介于  $1.07\sim1.14$  之间,在全岩 A/CNK-A/NK 图解(图 4-c)中,样品点落入弱过铝质—过铝质区域。岩体的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  及  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量均较低(表 4),指示岩浆可能经历了较

高程度的演化。

光明萤石矿内黑云母花岗岩的稀土元素总量较低( $\sum\text{REE}=161\times10^{-6}\sim194\times10^{-6}$ ),相对富集轻稀土元素,LREE/HREE 值介于  $6.86\sim7.56$  之间,在稀土元素球粒陨石标准化配分图中表现为右倾的平行曲线簇(图 5-a),轻、重稀土元素分馏明显,  $(\text{La/Yb})_N=6.47\sim7.24$ ,有较强的负 Eu 异常( $\delta\text{Eu}=0.13\sim0.15$ )和微弱的正 Ce 异常( $\delta\text{Ce}=1.01\sim1.13$ ),与已报道的新鲜印支期花岗岩的配分模式相似,而显著不同于燕山期花岗岩的稀土元素配分。整体上,岩石富集大离子亲石元素 Rb、Th、U,亏损 Ba、Nb 等元素(图 5-b),且具有较高的 Rb 含量( $359\times10^{-6}\sim612\times10^{-6}$ )和 Rb/Sr 值( $7.69\sim14.5$ ),以及较低的 Nb/Ta 值( $6.21\sim7.75$ )。

### 3.3 萤石稀土与微量元素

萤石样品的稀土与微量元素含量及特征参数见表 4。2 个萤石样品的稀土元素总量均较低( $\sum\text{REE}=34.6\times10^{-6}\sim44.6\times10^{-6}$ ),在稀土元素球粒陨石标准化配分图中表现为轻稀土元素略富集的平坦型曲线(图 5-a),  $(\text{La/Yb})_N=1.13\sim2.15$ 。轻稀土元素之间分馏较明显,  $(\text{La/Sm})_N=1.55\sim2.18$ , 中、重稀土元素分异不大,  $(\text{Gd/Yb})_N=0.72\sim0.84$ , 配分模式整体上与燕山期花岗岩相似,而与印支期花岗岩和矿区黑云母花岗岩不同(图 5)。2 个样品均具有中等程度的负 Eu 异常( $\delta\text{Eu}=0.44\sim0.50$ ),以及非常微弱的负 Ce 异常( $\delta\text{Ce}=0.96\sim0.97$ )。萤石样品的微量元素特征整体上较一致,相对亏损

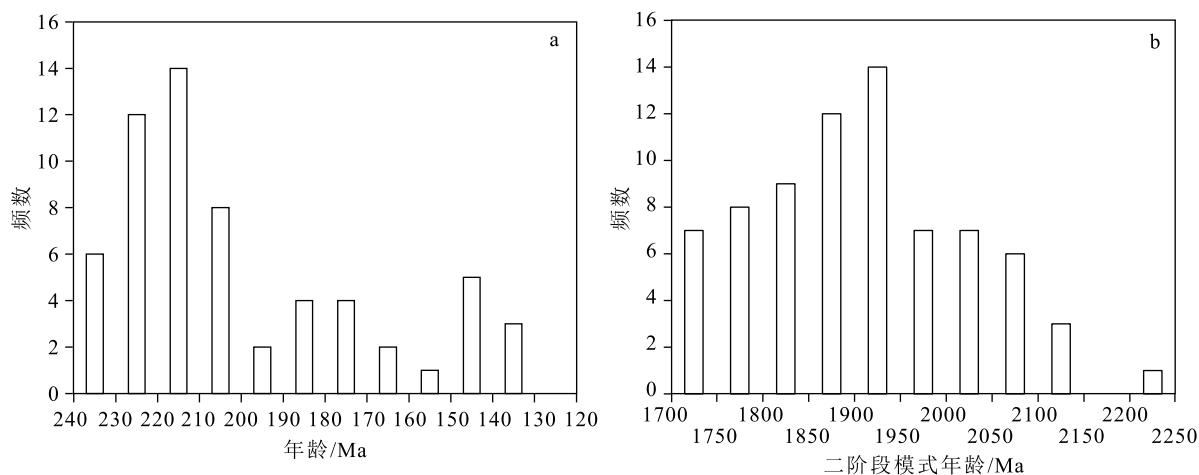


图 3 锡田黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄(a)与  $T_{\text{DM2}}$ (b)分布频谱图

Fig. 3 Frequency diagrams of zircon U-Pb ages (a) and  $T_{\text{DM2}}$  (b) from the Xitian granite

表4 光明矿区黑云母花岗岩和萤石主量、稀土及微量元素分析结果

Table 4 Results of major, rare earth and trace element compositions of biotite granite and fluorite in the Guangming deposit

| 样品号                                | ZK302-1 | GM-E- | GM-W- | GM-C- | GM-W- | 样品号                  | ZK302-1 | GM-E- | GM-W- | GM-C- | GM-W- |
|------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|----------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
|                                    |         | 2-1   | 3-3   | 2-1   | 3-1   |                      |         | 2-1   | 3-3   | 2-1   | 3-1   |
| 样品类型                               | 花岗岩     | 花岗岩   | 花岗岩   | 萤石    | 萤石    | 样品类型                 | 花岗岩     | 花岗岩   | 花岗岩   | 萤石    | 萤石    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 13.83   | 12.02 | 12.46 | /     | /     | Ga                   | 17.1    | 14.4  | 18.7  | 0.67  | 0.75  |
| CaO                                | 0.59    | 0.31  | 2.76  | /     | /     | As                   | 4.18    | 6.25  | 3.83  | 0.70  | 1.58  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 1.33    | 1.12  | 1.15  | /     | /     | Se                   | 1.25    | 1.00  | 1.30  | 0.47  | 0.53  |
| K <sub>2</sub> O                   | 5.50    | 5.02  | 5.88  | /     | /     | Rb                   | 382     | 359   | 612   | 0.72  | 0.57  |
| MgO                                | 0.23    | 0.18  | 0.71  | /     | /     | Sr                   | 49.7    | 37.9  | 42.2  | 68.2  | 74.0  |
| MnO                                | 0.05    | 0.04  | 0.07  | /     | /     | Y                    | 39.3    | 30.4  | 43.0  | 35.3  | 64.7  |
| Na <sub>2</sub> O                  | 3.16    | 2.73  | 0.15  | /     | /     | Zr                   | 103     | 88.5  | 89.6  | 1.11  | 0.80  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | 0.04    | 0.03  | 0.03  | /     | /     | Nb                   | 18.1    | 16.7  | 17.0  | 0.07  | 0.06  |
| TiO <sub>2</sub>                   | 0.13    | 0.11  | 0.11  | /     | /     | Mo                   | 0.46    | 0.34  | 0.45  | 0.55  | 0.21  |
| SiO <sub>2</sub>                   | 73.75   | 77.34 | 72.62 | /     | /     | Sn                   | 14.3    | 17.7  | 18.6  | <LOD  | <LOD  |
| 烧失量                                | 0.86    | 0.78  | 3.65  | /     | /     | Cs                   | 17.7    | 19.3  | 63.6  | 0.07  | 0.08  |
| 总计                                 | 99.47   | 99.69 | 99.60 | /     | /     | Ba                   | 105     | 65.9  | 101   | 3.67  | 2.96  |
| K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O | 8.66    | 7.76  | 6.03  | /     | /     | Hf                   | 3.63    | 3.23  | 3.39  | 0.02  | 0.02  |
| A/CNK                              | 1.13    | 1.14  | 1.07  | /     | /     | Ta                   | 2.33    | 2.62  | 2.73  | 0.01  | 0.03  |
| A/NK                               | 1.24    | 1.21  | 1.88  | /     | /     | Yb                   | 3.76    | 2.87  | 4.00  | 1.71  | 3.22  |
| Li                                 | 76.0    | 32.8  | 40.2  | 0.69  | 1.08  | Pb                   | 99.4    | 82.7  | 54.0  | 0.29  | 0.17  |
| Be                                 | 4.59    | 6.97  | 7.26  | 0.23  | 0.44  | Th                   | 45.5    | 37.5  | 39.4  | 0.13  | 0.16  |
| Sc                                 | 3.17    | 2.79  | 4.53  | 0.09  | 0.08  | U                    | 28.3    | 24.2  | 25.5  | 0.13  | 0.15  |
| Ti                                 | 797     | 674   | 671   | 4.89  | 3.81  | Nb/Ta                | 7.75    | 6.38  | 6.21  | 4.59  | 1.98  |
| V                                  | 7.05    | 5.95  | 6.03  | 0.65  | 0.52  | Zr/Hf                | 28.3    | 27.4  | 26.5  | 53.2  | 42.4  |
| Cr                                 | 2.42    | 1.50  | 7.12  | 2.78  | 16.5  | ΣREE                 | 193     | 161   | 194   | 34.6  | 44.6  |
| Mn                                 | 348     | 281   | 624   | 21.4  | 7.84  | δEu                  | 0.15    | 0.13  | 0.14  | 0.50  | 0.44  |
| Co                                 | 1.16    | 0.95  | 0.94  | 0.14  | 0.25  | δCe                  | 1.04    | 1.13  | 1.01  | 0.96  | 0.97  |
| Ni                                 | 2.15    | 1.05  | 3.42  | 2.18  | 8.42  | (La/Nd) <sub>N</sub> | 2.19    | 2.24  | 2.18  | 2.00  | 1.65  |
| Cu                                 | 0.34    | 0.83  | 0.74  | 0.17  | 0.42  | (La/Sm) <sub>N</sub> | 3.10    | 3.27  | 3.08  | 2.18  | 1.55  |
| Zn                                 | 33.8    | 30.6  | 34.8  | <LOD  | <LOD  | (La/Yb) <sub>N</sub> | 6.78    | 7.24  | 6.47  | 2.15  | 1.13  |
|                                    |         |       |       |       |       | (Gd/Yb) <sub>N</sub> | 1.37    | 1.39  | 1.31  | 0.84  | 0.72  |

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为  $10^{-6}$ ; “/”表示无数据; <LOD 表示低于检出限

Rb、Ba、Nb、Sm、Hf、Eu, 相对富集 U、La、Nd、Zr, 具明显的正 Y 异常。在微量元素原始地幔标准化图解(图 5-b)中, 萤石样品总体上显著低于岩体, 但 Cr、Ni、Sr、Y 含量整体大于岩体。萤石具有较高的 Y/Ho 值(59.9~60.3), 显著高于岩体(28.4~31.7), 指示了强烈的流体活动(Veksler et al., 2005)。

### 3.4 黑云母花岗岩与萤石 Nd 同位素

Sm-Nd 同位素分析结果(表 5)显示, 3 件黑云

母花岗岩样品的 Sm 含量为  $5.94 \times 10^{-6} \sim 7.83 \times 10^{-6}$ , Nd 含量为  $26.7 \times 10^{-6} \sim 34.0 \times 10^{-6}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值为 0.512016~0.512045。2 件萤石样品的 Sm 含量分别为  $1.58 \times 10^{-6}$  和  $2.20 \times 10^{-6}$ , Nd 含量分别为  $5.29 \times 10^{-6}$  和  $6.32 \times 10^{-6}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值分别为 0.512113 和 0.512071。黑云母花岗岩样品的 Nd 同位素组分分别按照 218 Ma 和 133 Ma 估算, 得出  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值分别为 -10.5~-10.0 和 -11.2~-10.6,  $T_{\text{DM2}}$

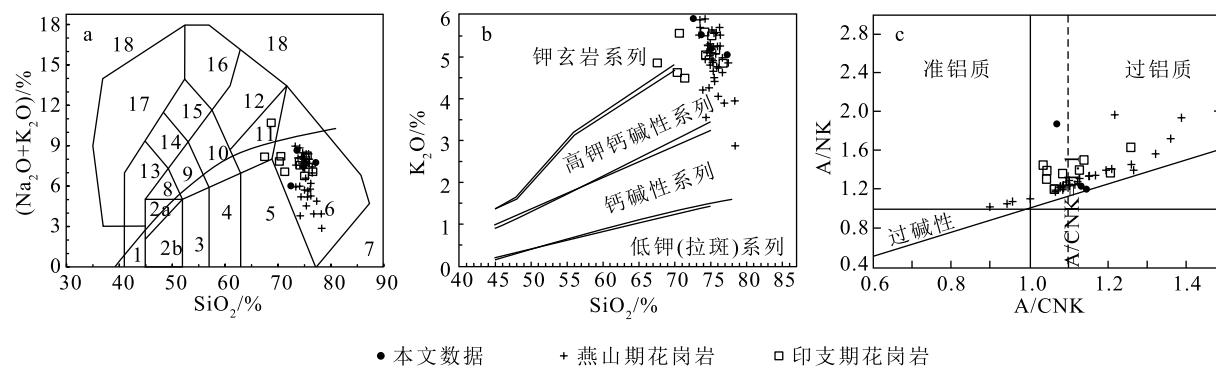


图4 锡田岩体岩石类型和系列划分图解

(燕山期花岗岩数据据 Zhou et al., 2015;印支期花岗岩数据据何苗等,2018;图5、图6、图8中相关数据来源同此图)

Fig. 4 Classification and series diagrams of the Xitian granitoids

a— $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  图解(底图据 Wilson, 1989) (1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗闪长岩; 6—花岗岩; 7—硅英岩; 8—二长辉长岩; 9—二长闪长岩; 10—二长岩; 11—石英二长岩; 12—正长岩; 13—副长石辉长岩; 14—副长石二长闪长岩; 15—副长石二长正长岩; 16—副长石正长岩; 17—副长石深成岩; 18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩); b— $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图解(底图据 LeMaitre, 2002); c—A/CNK-A/NK 图解

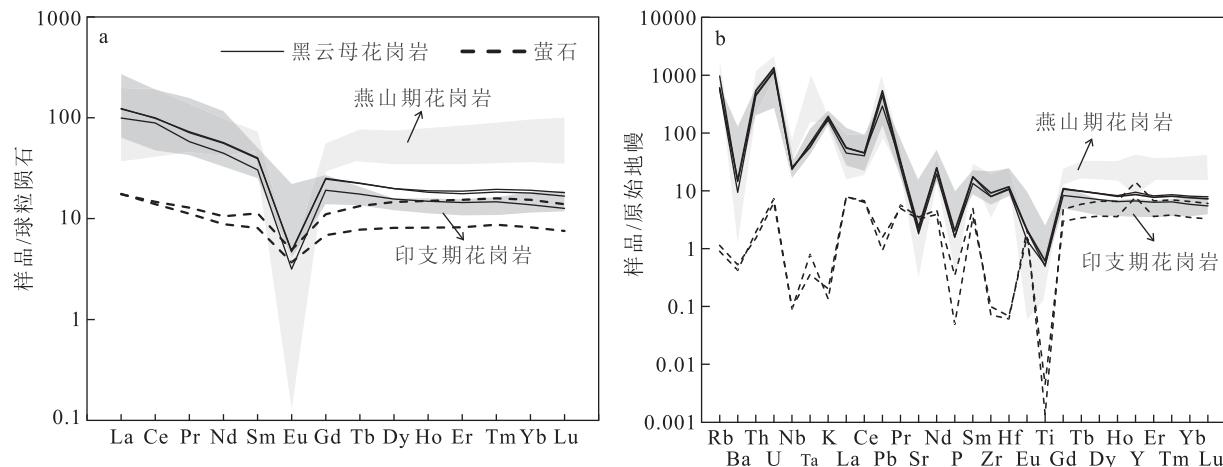


图5 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化配分曲线图(b)

(球粒陨石、原始地幔数据据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b)

表5 光明矿区黑云母花岗岩和萤石 Nd 同位素分析结果

Table 5 Results of Nd isotope compositions in biotite granite and fluorite from the Guangming deposit

| 样品号      | 样品类型 | 含量/ $10^{-6}$ |      | $^{147}\text{Sm}/$ | $(^{143}\text{Nd}/$ | $\pm 1\sigma$ | $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ | $T_{\text{DM2}}/\text{Ma}$ | $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ | $T_{\text{DM2}}/\text{Ma}$ |
|----------|------|---------------|------|--------------------|---------------------|---------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
|          |      | Sm            | Nd   | $^{144}\text{Nd}$  | $^{144}\text{Nd})t$ |               | (133 Ma)                     | (218 Ma)                   |                              |                            |
| ZK302-1  | 花岗岩  | 7.66          | 33.4 | 0.1385             | 0.512016            | 0.000003      | -11.15                       | 1837                       | -10.5                        | 1855                       |
| GM-E-2-1 | 花岗岩  | 5.94          | 26.7 | 0.1347             | 0.512024            | 0.000003      | -10.93                       | 1819                       | -10.3                        | 1834                       |
| GM-W-3-3 | 花岗岩  | 7.83          | 34.0 | 0.1391             | 0.512045            | 0.000004      | -10.60                       | 1793                       | -10.0                        | 1811                       |
| GM-C-2-1 | 萤石   | 1.58          | 5.29 | 0.1801             | 0.512113            | 0.000006      | -9.97                        | 1741                       |                              |                            |
| GM-W-3-1 | 萤石   | 2.20          | 6.32 | 0.2102             | 0.512071            | 0.000002      | -11.29                       | 1848                       |                              |                            |

为1811~1855 Ma,皆与锆石Hf同位素获得的二阶段模式年龄(1756~2214 Ma)一致;萤石样品的Nd同位素组成按照燕山期花岗岩年龄(即可能的成矿年龄133 Ma)估算,结果与黑云母花岗岩相似, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -11.3 \sim -10.0$ ,  $T_{\text{DM2}} = 1741 \sim 1848$  Ma,指示二者源区类似且可能为古—中元古代成熟地壳。

#### 4 光明萤石矿黑云母花岗岩起源与演化

前人对锡田岩体已获得的年龄数据进行了详细统计(苏红中等,2015),认为其成岩作用集中于3个主要阶段,即印支期阶段(226~225 Ma)、燕山期第一阶段(166~158 Ma)和燕山期第二阶段(152~142 Ma),整体看,燕山期岩浆活动年龄范围较大。本次对光明矿区3个黑云母花岗岩样品开展的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测试没有得到较好的谐和年龄,所测锆石年龄介于237~133 Ma之间,但从年龄分布频谱图(图3-a)看,印支期年龄在230~210 Ma之间出现明显的峰值。3个样品中低U锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为215~218 Ma,在误差范围内一致,暗示侵位年龄为印支期。此外,3个黑云母花岗岩的稀土元素配分图和微量元素蛛网图均与已报道的印支期花岗岩相似,而与燕山期岩

体不同,也支持形成时代为印支期。

前人研究认为,单个侵入体从岩浆形成到锆石U-Pb同位素体系封闭的时间一般不超过1 Ma(Petford et al., 2000; Coleman et al., 2004; Glazner et al., 2004),而光明矿区出露的锡田岩体内岩浆锆石结晶年龄存在100 Ma左右的时间差,这可能与岩浆多期次活动、补给有关(Chamberlain et al., 2014; Yan et al., 2018; 2020),这一猜想也得到锆石Ti温度估算与Hf同位素特征的支持。利用锆石Ti含量估算温度值、氧逸度等与锆石结晶年龄进行投图(图6),发现印支期—燕山期锆石结晶温度和氧逸度变化较大,可能经历了多次岩浆注入或热液活动的影响。且黑云母花岗岩的稀土元素配分型式与前人报道的印支期花岗岩非常相似,而不同于燕山期花岗岩。因此,结合前人研究结果、岩石结构、锆石U-Pb定年结果与全岩主量、微量元素特征,笔者认为光明矿区黑云母花岗岩主体形成于印支期,但其中锆石可能受到燕山期岩浆活动的影响,最年轻的锆石年龄133 Ma可能代表了最晚岩浆/热液活动时间。

单个岩体5个单位以上的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化可能由岩浆多期次快速上升补给造成的Hf同位素不均一

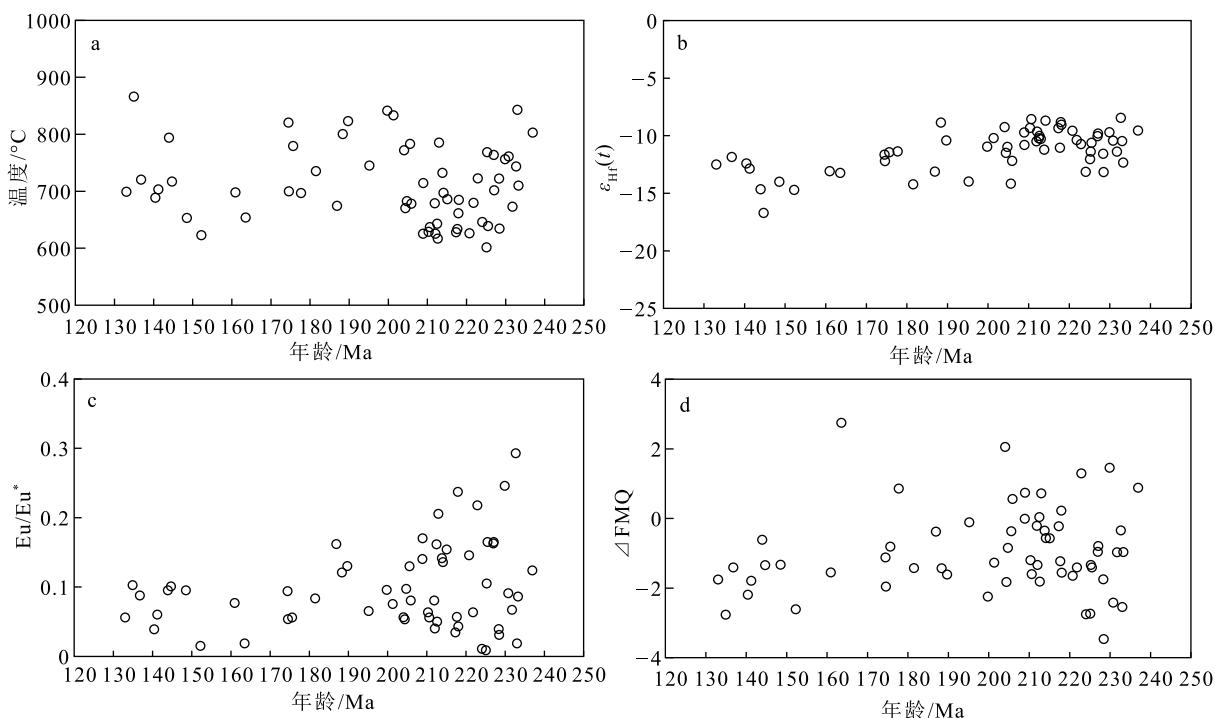


图6 锆石特征值与年龄关系图解

Fig. 6 Diagrams of zircon characteristic values vs. U-Pb age

导致(Tang et al., 2014)。本次研究获得的花岗岩锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于  $-16.7 \sim -8.5$  之间, 相差 8 个  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  单位。但印支期与燕山期锆石具有相似的 Hf 同位素比值(表 3), 且两者的 Hf 同位素二阶段模式年龄呈现明显的单峰分布特征(图 3-b), 暗示二者具有相似的岩浆源区。因此, 较大的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  差值, 可能受控于源区矿物间不平衡的 Hf 同位素特征, 以及 Lu-Hf 同位素体系的演化, 而非不同源区(苏红中等, 2015)。结合其与华夏基底相似的明显的负  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 推测光明萤石矿黑云母花岗岩起源于华夏陆块古—中元古代的古老地壳(于津海等, 2005; 2007; 何苗等, 2018)。

光明矿区黑云母花岗岩具有高硅、低镁、富钾的特征, 为弱过铝质—过铝质花岗岩(图 4), 指示其形成于地壳物质的部分熔融(陈小明等, 2002; 包志伟等, 2003; Li et al., 2007; 徐夕生等, 2007; 陈璟元等, 2015), 这也与其富集的 Nd 同位素特征( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -10.5 \sim -10.0$ )吻合。在 CMF-AMF 花岗岩源区判别图解(图 7-a)中, 2 个新鲜黑云母花岗岩样品点均落入变泥质岩部分熔融源区; 利用 Rb-Ba-Sr 体系进行花岗岩源区判别(图 7-b), 所有样品点均落入富泥质的源区。因此, 笔者倾向性地认为, 光明矿区黑云母花岗岩起源于华夏陆块古—中元古代成熟地壳变泥质岩的部分熔融。

结合本文与前人对锡田岩体的地球化学组成研究, 印支期与燕山期花岗岩在主量元素哈克图解(图 8)上并未呈现明显的演化关系, 暗示二者虽然起源于相同的岩浆源区, 但具有不同的演化程度。

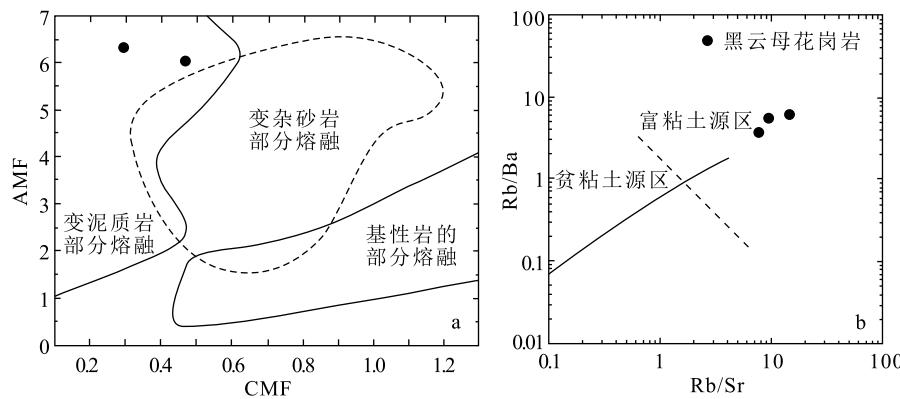


图 7 花岗岩 CMF-AMF 源区判别图解(a, 底图据 Rainier et al., 2000)

和花岗岩 Rb/Sr-Rb/Ba 源区判别图解(b, 底图据 Paul, 1998)

(AMF=摩尔  $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{MgO} + \text{TFeO})$ ; CMF=摩尔  $\text{CaO} / (\text{MgO} + \text{TFeO})$ )

Fig. 7 CMF vs. AMF diagram(a) and Rb/Sr vs. Rb/Ba diagram(b) of the granite

整体上, 燕山期花岗岩具有更高的  $\text{SiO}_2$  含量与更强烈的负 Eu 异常, 暗示其岩浆演化程度更高。在锆石特征值与年龄关系图解(图 6)中, 燕山期锆石具有普遍低的  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  和  $\Delta \text{FMQ}$ , 同样指示燕山期黑云母花岗岩经历了较强的结晶分异, 且具有更低的氧逸度。整体上, 光明矿区黑云母花岗岩与锡田印支期花岗岩具有较一致的元素含量范围与变化特征(图 4、图 5、图 8), 样品的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Ti}_2\text{O}$  及  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量均较低, 结合其较高的 Rb 含量( $359 \times 10^{-6} \sim 612 \times 10^{-6}$ )、 $\text{Rb}/\text{Sr}$  值( $7.69 \sim 14.5$ )和较低的  $\text{Nb}/\text{Ta}$  值( $6.21 \sim 7.75$ ), 指示岩浆可能经历了较高程度的分异。此外, 全岩低的  $\text{Zr}/\text{Hf}$  值( $26.5 \sim 28.3$ ), 低于球粒陨石的组成(约 34.3, Münker et al., 2003)和大陆地壳的平均值(约 36.7, Rudnick et al., 2004), 同样指示其演化过程中发生了明显的分异。

## 5 对萤石成矿的启示

普遍认为, 与稀有、稀土矿床相伴生的萤石成矿作用与高 F 岩浆岩密切相关(Bailey, 1977; Huang et al., 2007; Graupner et al., 2015; Xie et al., 2015)。而常作为单独矿种产出的热液脉型萤石矿床成因尚存争议, 部分学者认为其成矿作用源于低温热液流体对围岩中 Ca 和 F 的淋滤, 赋矿花岗岩主要提供成矿所需的热量(曹俊臣, 1997; 刘道荣等, 2012), 近年来逐渐有研究者提出花岗岩体可能也提供了主要的成矿物质(杨世文等, 2019; 方贵聪等, 2020)。岩浆热液中的稀土元素往往能继承岩浆的稀土元素组成特征。本次研究发现, 虽然萤石稀土元素含量低于花岗岩, 但光明矿床萤石矿石稀土与微量元素配分型式与燕山期花岗岩相似(图 5), 暗示萤石成矿可能与矿区内的燕山期岩浆活动具有密切的成因联系(曹俊臣, 1995)。

萤石中的稀土元素主要来自成矿流体中的 F-REE 络合物, 因此其 Nd 同位素组成常被用于示踪成矿流体, 尤其是其中 F 的来源(Simonetti et al.,

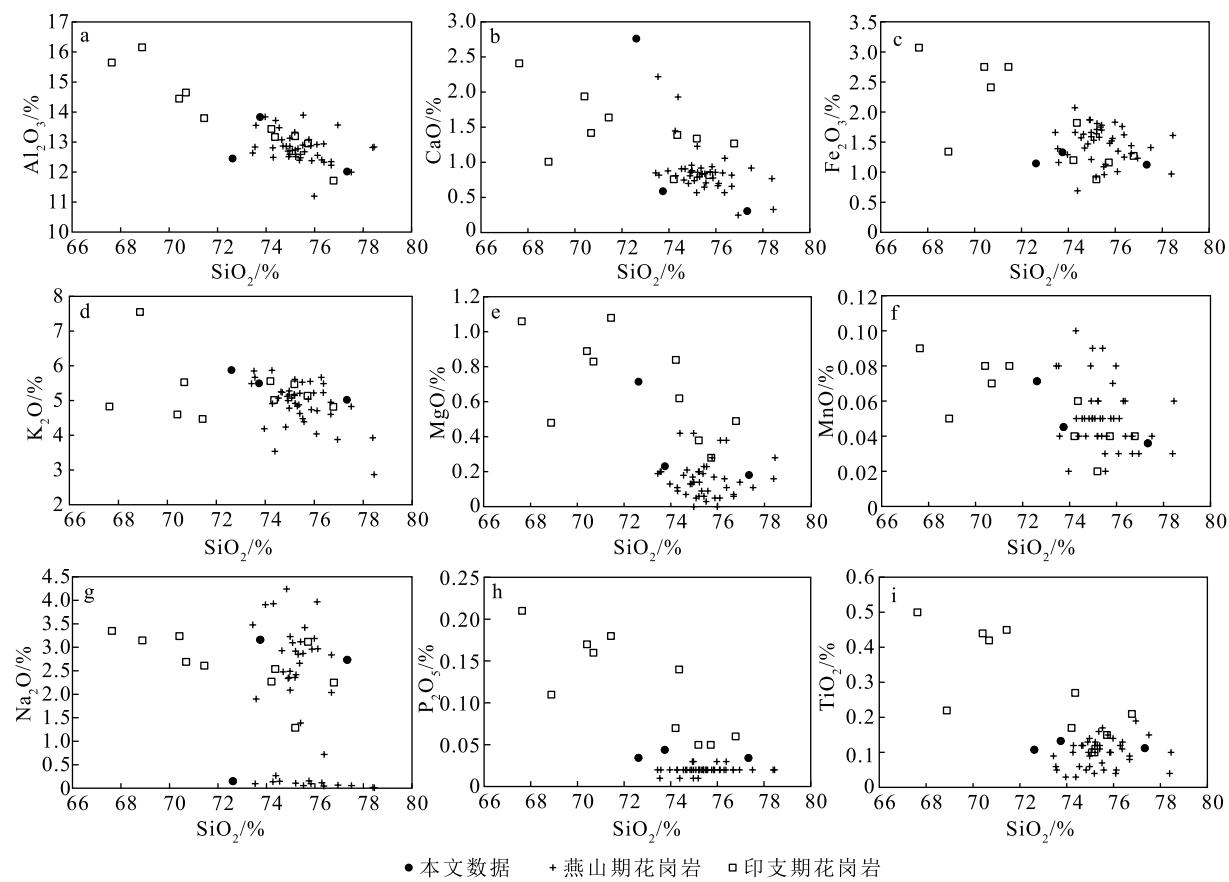


图 8 锡田岩体主量元素哈克图解

Fig. 8 Harker diagrams for the Xitian granite samples

1995)。虽然光明矿区萤石的 Nd 同位素组成与围岩花岗岩基本一致, 锡田岩体的印支期和燕山期花岗岩具有相似的源区, 因此其 Nd 同位素组成也非常接近。萤石和花岗岩具有相同的 Nd 同位素组成仅说明岩浆岩为 F 来源, 而无法区分是印支期还是燕山期的花岗岩。萤石的稀土元素配分图和微量元素蛛网图与围岩花岗岩不一致, 暗示围岩花岗岩不是成矿物质的主要来源。因此, 稀土元素配分模式结合 Nd 同位素组成支持了燕山期岩体是成矿物质的主要来源。此外, 笔者在黑云母花岗岩与萤石矿体接触部位观察到单向固结结构(图版 I-f), 这一特征也表明萤石矿的围岩花岗岩并未参与萤石成矿作用, 光明矿床萤石成矿主要与区内燕山期岩浆活动有关, 成矿流体中主要为燕山期岩浆热液的参与。

微量元素方面, 萤石矿石较岩体具有更高的 Cr、Ni、Sr、Y 含量及 Y/Ho 值, 可能与强烈的流体活

动及流体/萤石的分配系数有关。值得注意的是, 靠近矿体蚀变较强的黑云母花岗岩样品(GM-W-3-3)较新鲜围岩黑云母花岗岩明显具有高的 CaO 含量和低的 Na<sub>2</sub>O 含量, 指示成矿流体相对富集 Ca 元素。萤石形成过程中稀土元素以 F 络合物形式迁移时, 从 LREE→MREE→HREE 与 F 形成的络合物稳定性逐渐增强。流体中 F 含量减少时, 萤石中轻稀土元素趋于亏损, 而中、重稀土元素趋于富集(Möller et al., 1976; McLennan et al., 1979; Bau et al., 1995)。光明矿床萤石样品( $\text{La/Yb}$ )<sub>N</sub>=1.13~2.15, 轻稀土元素略富集, 暗示成矿流体中 F 含量较高, 这与中国南岭地区燕山期花岗岩普遍的高 Li-F 特征一致。此外, 萤石矿体和硅化带紧密伴生, 也暗示成矿流体中高含量的 F 与岩体发生了强烈的相互作用。

Eu 和 Ce 是变价元素。不同价态的离子具有不同的离子半径, 在萤石中的分配系数有很大差异。

因此,在萤石结晶过程中表现出不同富集/亏损特征(曹俊臣,1995;彭建堂等,2002;孙祥等,2008;彭强等,2021)。氧化条件下,Eu呈高价态的Eu<sup>3+</sup>,而更易替代萤石中的Ca<sup>2+</sup>,从而减弱萤石中Eu的亏损,而高价态的Ce<sup>4+</sup>则不易进入萤石晶格,从而增强了Ce的亏损;还原条件下则相反。本次研究的萤石样品具有中等程度的负Eu异常( $\delta\text{Eu} = 0.44 \sim 0.50$ ),以及非常微弱的负Ce异常( $\delta\text{Ce} = 0.96 \sim 0.97$ )。与光明萤石矿黑云母花岗岩相比:①萤石的负Eu异常较弱;②萤石样品具有微弱的负Ce异常,而岩体样品表现出微弱的正Ce异常。这些特征指示成矿流体的氧逸度较岩体高,可能与成矿过程中大气降水的加入有关。因此,笔者认为,光明矿区的萤石成矿作用与锡田岩体燕山期岩浆活动密切相关,成矿流体主要为岩浆热液,成矿流体演化过程中有大气降水加入,矿区印支期主体的黑云母花岗岩为容矿围岩,不是成矿母岩。

**致谢:**野外工作中得到原湖南省地质矿产勘查开发局四一六队工作人员的大力支持,审稿专家提出了许多建设性意见,在此一并表示衷心的感谢。

## 参考文献

- Bailey J C. Fluorine in granitic rocks and melts: a review [J]. Chemical Geology, 1977, 19(1/4): 1–42.
- Bau M, Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviors in fluorine-rich hydrothermal fluids [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1995, 119: 213–223.
- Chamberlain K J, Wilson C J, Wooden J L, et al. New perspectives on the Bishop Tuff from zircon textures, ages and trace elements [J]. Journal of Petrology, 2014, 55(2): 395–426.
- Coleman D S, Gray W, Glazner A F. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California [J]. Geology, 2004, 32: 433–436.
- Glazner A F, Bartley J M, Coleman D S, et al. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? [J]. GSA Today, 2004, 14(4/5): 4–11.
- Graupner T, Mühlbach C, Schwarz-Schampera U, et al. Mineralogy of high-field-strength elements (Y, Nb, REE) in the world-class Vergenoeg fluorite deposit, South Africa [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 583–601.
- Huang Z L, Xu C, Andrew M, et al. REE geochemistry of fluorite from the Maoniuping REE Deposit, Sichuan Province, China: implications for the source of ore-forming fluids [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81: 622–636.
- LeMaitre R W. Igneous rocks: A classification and glossary of terms [M]. Cambridge University Press, 2002: 1–256.
- Li X H, Li W X, Li Z X. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(14): 1873–1885.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535–1546.
- Loucks R R, Fiorentini M L, Henríquez G J. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon [J]. Journal of Petrology, 2020, 61(3): egaa034.
- Lu H Z, Liu Y M, Wang C L, et al. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuoyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan province, China [J]. Economic Geology, 2003, 98: 955–974.
- McLennan S M, Taylor S R. Rare earth element mobility associated with uranium mineralization [J]. Nature, 1979, 282: 247–250.
- Möller P, Parekh P P, Schneider H J. The application of Tb/Ca-Tb/La abundance ratios to problems of fluorite genesis [J]. Mineral Deposita, 1976, (11): 111–116.
- Münker C, Pfänder J A, Weyer S, et al. Evolution of planetary cores and the earth-moon system from Nb/Ta systematics [J]. Science, 2003, 301 (5629): 84–87.
- Paul J S. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos, 1998, 49: 29–44.
- Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, et al. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust [J]. Nature, 2000, 408(6813): 669–673.
- Rainer A, Albert H, Ernst H, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. Lithos, 2000, 50: 51–73.
- Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [C]// Holland H D, Turekian K K. Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2004, 3: 1–64.
- Simonetti A, Bell K. Nd, Pd, and Sr isotope systematics of fluorite at the AmbaDongar carbonatite complex, India: evidence for hydrothermal and crustal fluid mixing [J]. Economic Geology, 1995, 90: 2018–2027.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 1989: 313–345.
- Tang M, Wang X L, Shu X J, et al. Hafnium isotopic heterogeneity in zircons from granitic rocks: geochemical evaluation and modelling of 'zircon effect' in crustal anatexis [J]. Earth Planet Science Letter, 2014, 389: 188–199.
- USGS. Mineral commodity summaries 2019 [M]. USGS, 2019.
- Veksler I V, Dorfman A M, Kamenetsky M, et al. Partitioning of lanthanides and Y between immiscible silicate and fluoride melts, fluorite and cryolite and the origin of the lanthanide tetrad effect in igneous rocks [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(11): 2847–2860.
- Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006,

- 151: 413–433.
- Wilson M. Igneous petrogenesis: A global tectonic approach [M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1–468.
- Xie L, Wang R C, Groat L A, et al. A combined EMPA and LA-ICP-MS study of Li-bearing mica and Sn-Ti oxide minerals from the Qiguling topaz rhyolite (Qitianling District, China): the role of fluorine in origin of tin mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 779–792.
- Yan L L, He Z Y, Beier C, et al. Geochemical constraints on the link between volcanism and plutonism at the Yunshan caldera complex, SE China [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2018, 173: 4.
- Yan L L, He Z Y, Klemd R, et al. Tracking crystal-melt segregation and magma recharge using zircon trace element data [J]. *Chemical Geology*, 2020, 542: 119596.
- Yuan S D, Peng J T, Hu R Z, et al. Characteristics of rare-earth elements (REE), strontium and neodymium isotopes in hydrothermal fluorites from the Bailashui tin deposit in the Furong ore field, southern Hunan Province, China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2008, 27: 342–350.
- Yuan S D, Mao J W, Cook N J, et al. A late cretaceous tin metallogenic event in manling W-Sn metallogenic province: constraints from U-Pb, Ar-Ar geochronology at the Jiepaili Sn-Be-F deposit, Hunan, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 283–293.
- Zhou Y, Liang X Q, Wu S C, et al. Isotopic geochemistry, zircon U-Pb ages and Hf isotopes of A-type granites from the Xitian W-Sn deposit, SE China: Constraints on petrogenesis and tectonic significance [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 105: 122–139.
- 包志伟,赵振华.佛冈铝质A型花岗岩的地球化学及其形成环境初探[J].  
地质地球化学,2003,31: 52–61.
- 蔡杨,马东升,陆建军,等.湖南邓阜仙岩体和锡田岩体的地球化学及成矿差异性对比[J].矿物学报,2011,增刊: 4–5.
- 曹俊臣.华南低温热液脉状萤石矿床稀土元素地球化学特征[J].地球化学,1995,24(3): 225–234.
- 曹俊臣.中国萤石矿床稀土元素地球化学及萤石的矿物物理特征[J].  
地质与勘探,1997,33(2): 18–23.
- 陈璟元,杨进辉.佛冈高分异I型花岗岩的成因:来自Nb-Ta-Zr-Hf等元素的制约[J].岩石学报,2015,31(3): 846–854.
- 陈小明,王汝成,刘昌实,等.广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因[J].高校地质学报,2002,8(3): 293–307.
- 方贵聪,王登红,陈毓川,等.南岭萤石矿床成矿规律及成因[J].地质学报,2020,94(1): 161–178.
- 付建明,伍式崇,徐德明,等.湘东锡田钨锡多金属矿区成岩成矿时代的再厘定[J].华南地质与矿产,2009,3: 1–7.
- 付建明,程顺波,卢友月,等.湖南锡田云英岩-石英脉型钨锡矿的形成时代及其赋矿花岗岩锆石SHRIMP U-Pb定年[J].地质与勘探,  
2012,48(3): 313–320.
- 郭乐群,唐晓珊,彭和求.湖南益阳早前寒武纪镁铁质—超镁铁质火山岩的Sm-Nd同位素年龄[J].华南地质与矿产,2003,2: 46–51.
- 何苗,刘庆,孙金凤,等.湘东地区锡田印支期花岗岩的地球化学特征及其构造意义[J].岩石学报,2018,34(7): 2065–2086.
- 刘懿,吴堑虹,孔华,等.湖南锡田矿田花岗岩时空分布与钨锡成矿关系:来自锆石U-Pb年代学与岩石地球化学的约束[J].地球科学,2022,47(1): 240–258.
- 刘道荣,严生贤,陈荫,等.浙西北岩前高氟岩体地球化学特征及其与新类型萤石矿床成矿关系[J].地质与勘探,2012,48(5): 884–893.
- 刘国庆,伍式崇,杜安道,等.湘东锡田钨锡矿区成岩成矿时代研究[J].  
大地构造与成矿学,2008,32(1): 63–71.
- 彭建堂,胡瑞忠,漆亮,等.晴隆锑矿床中萤石的稀土元素特征及其指示意义[J].地质科学,2002,37(3): 277–287.
- 彭强,江小均,李超,等.云南个旧西凹蚀变花岗岩型铜-锡多金属矿床萤石地球化学特征及其地质意义[J].矿床地质,2021,40(6): 1182–1198.
- 沈宏飞,李立兴,李厚民,等.湘南中生代钨锡大规模成矿控制因素:锆石年龄和微量元素的启示[J].地质通报,2022,41(2/3): 461–485.
- 苏红中,郭春丽,伍式崇,等.锡田印支-燕山期复式花岗岩浆-热液活动时限和物质来源[J].地质学报,2015,89(10): 1853–1872.
- 孙祥,杨子荣,刘敬党,等.义县萤石矿床稀土元素地球化学特征及其指示意义[J].矿床地质,2008,27(5): 579–586.
- 唐晓珊,贾宝华,黄建中.湖南早前寒武纪变质结晶基底的Sm-Nd同位素年龄[J].资源调查与环境,2004,25(1): 55–63.
- 王吉平,商朋强,熊先孝,等.中国萤石矿床成矿规律[J].中国地质,2015,42(1): 18–32.
- 吴福元,刘小驰,纪伟强,等.高分异花岗岩的识别与研究[J].中国科学: 地球科学,2017,47(7): 745–765.
- 谢玲玲,谢文安.从稳定同位素测年信息探讨湖南的结晶基底[J].湖  
南地质,2000,19(4): 219–225.
- 徐夕生,鲁为敏,贺振宇.佛冈花岗岩基及乌石闪长岩-角闪辉长岩体的形成年龄和起源[J].中国科学(D辑),2007,37(1): 27–38.
- 杨世文,丰成友,楼法生,等.赣南隆坪萤石矿床成矿时代及成因初探:  
来自萤石Sm-Nd测年及黑云母电子探针的证据[J].高校地质学报,2019,25(3): 341–351.
- 于津海,周新民,赵蕾,等.壳幔作用导致武平花岗岩形成——Sr-Nd-Hf-U-Pb同位素证据[J].岩石学报,2005,21(3): 651–644.
- 于津海,O'Reilly Y S,王丽娟,等.华夏地块古老物质的发现和前寒武纪地壳的形成[J].科学通报,2007,52(1): 11–18.
- 张鲲,胡俊良,徐德明.湖南桃林铅锌矿区花岗岩地球化学特征及其与成矿的关系[J].华南地质与矿产,2012,28(4): 307–314.
- 周云,梁新权,梁细荣,等.湖南锡田含W-Sn A型花岗岩年代学与地  
球化学特征[J].大地构造与成矿学,2013,37(3): 511–529.