

# 赣北石门寺花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学、Hf 同位素特征及其对成矿的制约

张志辉<sup>1,2</sup>, 胡肇捷<sup>1</sup>, 张 达<sup>1</sup>, 熊光强<sup>3</sup>, 祝新友<sup>4</sup>, 贾文彬<sup>5</sup>, 巩小栋<sup>6</sup>  
ZHANG Zhihui<sup>1,2</sup>, HU Bojie<sup>1</sup>, ZHANG Da<sup>1</sup>, XIONG Guangqiang<sup>3</sup>, ZHU Xinyou<sup>4</sup>,  
JIA Wenbin<sup>5</sup>, GONG Xiaodong<sup>6</sup>

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;  
3. 江西省地质矿产局物化探大队, 江西 南昌 330002; 4. 北京矿产地质研究院, 北京 100124;  
5. 吉林大学, 吉林 长春 130012; 6. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081

1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;  
3. Geophysical and Geochemical Exploration Party, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Nanchang 330002, Jiangxi, China;  
4. Beijing Institute of Geology and Mineral Resources, Beijing 100124, China; 5. Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;  
6. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China

**摘要:**大湖塘钨矿田石门寺矿段钨多金属矿成矿作用与燕山期花岗质岩浆活动密切相关。其中燕山期花岗斑岩与热液隐爆角砾岩关系密切,是重要的成矿地质体。为研究该岩体成岩时代、岩石成因与演化、形成背景,探讨岩体与成矿的关系,对石门寺花岗斑岩开展了系统的岩相学、岩石化学、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素研究。结果表明,花岗斑岩形成年龄为 $154.36 \pm 0.83$  Ma;花岗斑岩为高硅( $\text{SiO}_2$ 含量为 71.90%~76.53%)、过铝质( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为 12.76%~14.76%, A/CNK 值为 1.25~1.39)、高钾钙碱性系列( $\text{K}_2\text{O}$ 含量为 2.58%~5.42%)岩石;富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,稀土元素含量( $49.38 \times 10^{-6} \sim 72.36 \times 10^{-6}$ )较低、LREE/HREE(9.83~16.76)和(La/Yb)<sub>N</sub>值(16.43~39.45)较高,呈明显负 Eu( $\delta\text{Eu}=0.27 \sim 0.65$ )异常;岩石类型为 S 型花岗岩。锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -23.6~-2.9, 二阶段模式年龄为 1.39~2.70 Ga, 表明石门寺花岗斑岩可能为古老地壳部分熔融的产物。岩浆源岩主要为富粘土物质;岩浆演化过程中经历了镁铁质矿物、钛铁矿、斜长石的分离结晶,磷灰石没有发生显著分离结晶作用。结合区内中生代成矿地球动力学背景分析,九岭-鄱公山隆起带存在 2 期重要的成矿作用:①约 150 Ma, 由于太平洋板块俯冲汇聚而产生的挤压构造背景下的成岩成矿作用;②约 135 Ma 以来,处于区域岩石圈伸展减薄背景下的钨多金属成矿作用。

**关键词:**大湖塘钨矿田;石门寺花岗斑岩;锆石 U-Pb 年龄;地球化学;Hf 同位素

**中图分类号:**P588.12<sup>+</sup>1;P597<sup>+</sup>.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)08-1267-18

Zhang Z H, Hu B J, Zhang D, Xiong G Q, Zhu X Y, Jia W B, Gong X D. Zircon U-Pb age, geochemistry and Hf isotope characteristics of Shimensi granite porphyry in northern Jiangxi Province and its constraint on mineralization. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(8): 1267-1284

**Abstract:** The mineralization of tungsten polymetallic ore in the Dahutang tungsten orefield is closely related to the Yanshanian granitic magmatism. The Yanshanian granite porphyry is closely related to the hydrothermal cryptoexplosion breccia and is an important ore-

收稿日期:2019-04-10;修订日期:2020-03-15

资助项目:国家自然科学基金项目《赣东北塔前-赋春推覆构造及其对超大型钨铜成矿作用的控制》(批准号:41772069)和中国地质调查局项目《老矿山找矿技术创新与示范项目》(编号:1212011220737)、《全国重要矿集区找矿预测项目》(编号:DD20160052)、《矿集区矿产调查及深部找矿预测》(编号:DD20190570)、《重要锡、锰等矿集区矿产地质调查》(编号:DD20190166)

作者简介:张志辉(1980-),男,博士,高级工程师,从事矿床学和矿产勘查学等的研究工作。E-mail:zzh1102114@126.com

通讯作者:张达(1967-),男,教授,博士生导师,从事区域成矿学研究。E-mail:zhangda@cugb.edu.cn

forming geological body in this area. In order to study the rock-forming age, genesis, evolution and formation background of the rock mass as well as to discuss the relationship between the rock mass and mineralization, the authors carried out a systematic study in the aspects of petrology, major and trace elements, zircon U-Pb geochronology and Hf isotope for the Shimensi granite porphyry. The research results show that the rock-forming age of granite porphyry is  $154.36 \pm 0.83$  Ma, the granite porphyry has high-silicon (the content of  $\text{SiO}_2$  is 71.90% ~ 76.53%), peraluminous nature (the content of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  being 12.76% ~ 14.76% and the A/CNK value being 1.25 ~ 1.39) and thus belongs to high-potassium-calcium-alkaline series (the content of  $\text{K}_2\text{O}$  is 2.58% ~ 5.42%). The granite porphyry is enriched in LILEs and depleted in HFSEs. The REE content is low ( $49.38 \times 10^{-6}$  ~  $72.36 \times 10^{-6}$ ), LREE/HREE (9.83 ~ 16.76) and  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  (16.43 ~ 39.45) are high, and the granite porphyry has obviously negative  $\delta\text{Eu}$  anomaly (0.27 ~ 0.65). The rock type of granite porphyry is S-type. The  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of zircons are -23.6 ~ -2.9 and the two-stage model ages are 1.39 ~ 2.70 Ga, indicating that the Shimensi granite porphyry may be a product of partial melting of ancient crust. The source rock magma is mainly clay-rich material. During the evolution of magma, the separation and crystallization of mafic minerals, ilmenite and plagioclase occurred, and no significant separation and crystallization of apatite occurred. Combined with the Mesozoic metallogenic tectonic background in this area, there existed two important mineralization events in the Jiuling-Zhanggongshan uplift zone: one occurred at about 150 Ma, as a result of the diagenetic mineralization under the extrusion tectonic background of the subduction of the Pacific plate; the second occurred at about 135 Ma, as a result of tungsten polymetallic mineralization under the background of the lithosphere stretching thinning.

**Key words:** Dahutang tungsten orefield; Shimensi granite porphyry; zircon U-Pb age; geochemistry; Hf isotope

大湖塘钨矿床是中国近年来发现的一个超大型钨矿床,矿床产于赣北钨铜多金属矿集区内的九岭-鄱公山多金属成矿带上,北侧为九江-瑞江(九瑞)铜多金属成矿带,南侧是钦杭结合带的重要组成部分;德兴-东乡铜多金属成矿带和位于华夏板块西北缘的北武夷铜(钼)铅锌多金属成矿带。相关研究表明,九岭-鄱公山多金属成矿带主要经历了古元古代扬子古克拉通的形成、中-新元古代扬子与华夏板块的聚合与裂解、早古生代褶皱的隆升、晚古生代局部的裂陷作用和中生代的板内构造变形作用<sup>[1]</sup>。伴随大规模的构造-岩浆作用,该区发育了一系列钨锡铜金多金属矿床,包括香炉山钨矿、大湖塘钨矿、阳储岭钨钼矿、曾家垅锡矿、村前铜矿、大背坞金矿等。

前人对九岭-鄱公山多金属成矿带主要矿床及成矿岩体的研究表明,该区成岩成矿时代主要集中在140~150 Ma和110~130 Ma<sup>[2-6]</sup>。大湖塘钨矿石门寺矿段和狮尾洞矿段的辉钼矿等时线年龄分别为  $143.7 \pm 1.2$  Ma和  $140.9 \pm 3.6$  Ma<sup>[5]</sup>,矿区似斑状白云母花岗岩岩体的锆石 U-Pb 年龄为  $144.2 \pm 1.3$  Ma<sup>[6]</sup>;与成矿有关的花岗岩为强过铝质的S型花岗岩<sup>[6]</sup>。

矿体的空间分布有3种形式:似斑状花岗岩和新元古代花岗闪长岩的内外接触带(以外接触带为主)是本矿区钨矿体最重要的赋矿部位;细粒花岗岩内外接触带是本矿区钨铜矿体的重要赋矿部位;花岗斑岩的内外接触带(主要在外接触带),特别是

斑岩体前锋位置的爆破角砾岩,是铜矿体和钨铜矿体的重要赋矿部位。矿体与岩体的空间关系表明,花岗斑岩与成矿更密切。

为进一步深化对九岭-鄱公山多金属成矿带成矿作用的研究,本次选取赣北大湖塘钨矿区内与钨、铜、钼成矿密切相关的石门寺花岗斑岩开展了基础地质、岩相学、岩石化学、单颗粒锆石 U-Pb 定年和原位 Hf 同位素研究,并结合区域成矿作用研究成果,进一步探讨其形成的地质背景,为深入揭示九岭-鄱公山成矿带的成矿规律、实现找矿突破提供了理论依据。

## 1 区域地质背景

九岭-鄱公山成矿带是在扬子板块东南缘中-新元古代裂谷及造山作用的基础上,经历古生代拗陷及中生代强烈的挤压隆升作用形成的构造岩浆成矿带(图1)。

区内发育的地层主要为中元古界低绿片岩相变质岩系和下古生界沉积建造;前者为一套巨厚的以泥砂质细碎屑为主的灰色浅变质岩系,上部、下部以凝灰岩为主夹少量细碧岩、石英角斑岩等,具有较高的铜、金、钼等;下古生界为一套含火山喷气或喷发物质的碎屑岩、碳酸盐岩建造,是铜、钨多金属的有利赋矿层位,其中香炉山式超大型钨矿床赋存在寒武系-奥陶系中;岩浆岩主要为中元古代晚期海相细碧角斑岩建造,晋宁期(如九岭大型复式花岗岩岩基)和燕山期中酸性、酸性侵入岩。构

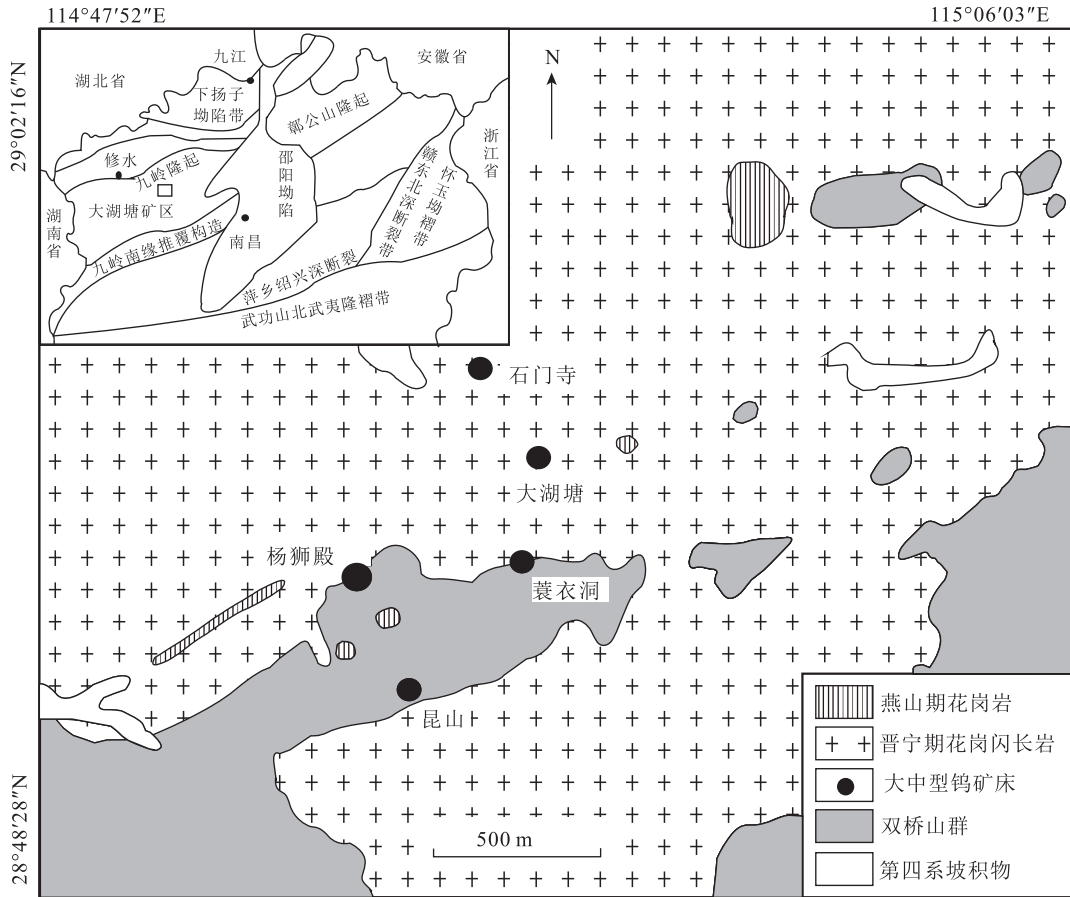


图 1 江西北部大湖塘钨矿区地质简图<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Geological map of the Dahutang tungsten deposit in northern Jiangxi Province

造主要为 EW 向修水—德安—波阳断裂及 NNE 向宜丰—景德镇断裂,这 2 条大断裂是九岭隆起带边界断裂、九岭南缘近 EW 向、高台山—鄱公山南东缘 NE—NNE 向及德安弧形推(滑)覆构造等;同时发育武宁—修水、铜鼓—奉新、永修—新建、浮梁—藏湾等韧(脆)性剪切带,且不同程度地控制了区内岩浆作用、钨钼铜等多金属成矿作用。

区内发育的内生金属矿床以钨、锡、金、铜等为主,其次为钼、铅锌、铌钽等,主要在九岭—鄱公山隆起带周缘大规模的花岗杂岩区产出,并在隆起带北侧构成了大湖塘—云山—茅棚店—鄱公山重要的 EW 向钨锡多金属成矿带。

## 2 矿床地质特征

矿床地质研究揭示,大湖塘钨矿区发育的地层为中元古界双桥山群安乐林组、蓟县系双桥山群修水组(J<sub>xx</sub>)。岩浆岩主要是中新元古代黑云母花岗

闪长岩(九岭岩基的一部分,约占矿区总面积的 80%)(图 2)<sup>[8]</sup>,出露面积达 2300 km<sup>2</sup>,呈 EW 向展布;其次是晚侏罗世—早白垩世斑状黑云母二长花岗岩、细粒二云花岗岩和花岗斑岩。黑云母二长花岗岩主要以岩株、岩瘤和岩床形式产出,多分布在石门寺矿段中部,出露面积约 1.7 km<sup>2</sup>;细粒二云花岗岩出露面积约 0.16 km<sup>2</sup>,以小岩株形式产出;花岗斑岩在地表、钻孔中呈脉状产出,与热液隐爆角砾岩型钨钼矿化关系密切(图 3)。地表露头及单个勘查工程中所见花岗斑岩体形态亦极不规则,常呈脉状膨大缩小、分枝复合,厚的几十至二百余米,薄的仅几厘米,倾向不定,倾角陡缓不一。但总体上呈 2 组脉群,一组为走向 NW、倾向 NE,另一组为走向 NE、倾向 NW,倾角均较陡,受成矿期 NW 向和 NE 向 2 个扭性断裂限制。

已有的地质勘探结果显示,石门寺矿段钨矿体呈透镜状、筒状、似层状和脉状分布于燕山中期花岗

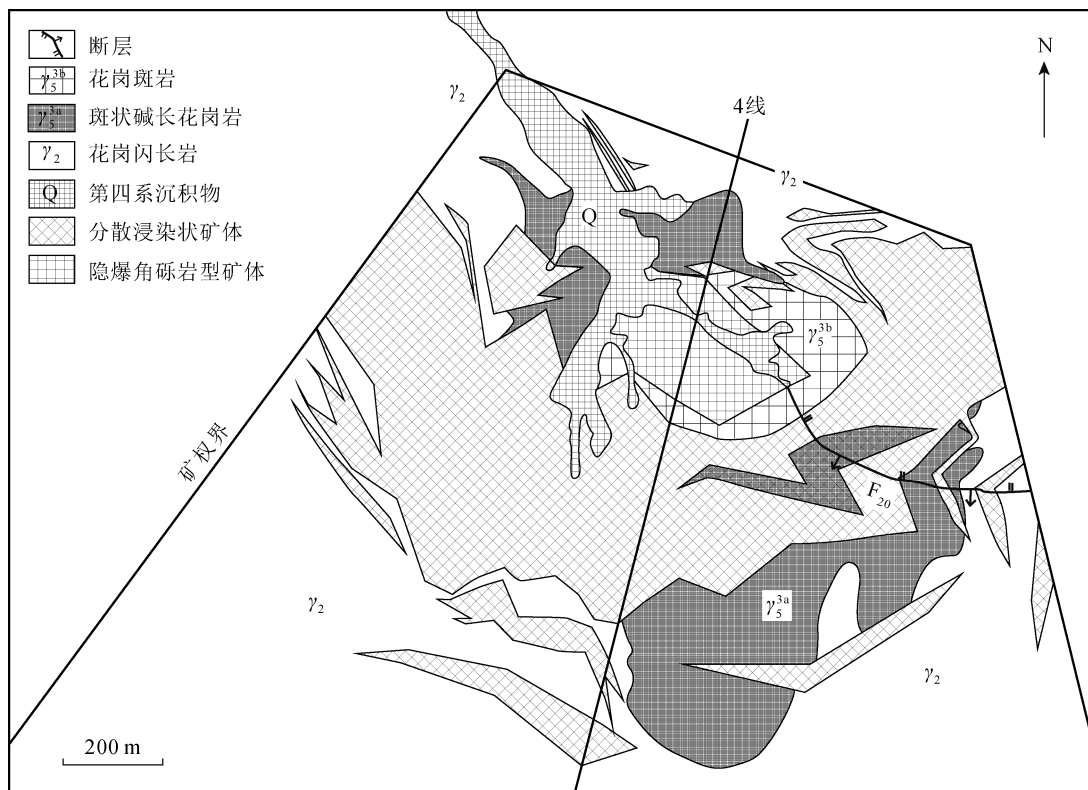


图2 石门寺钨矿床地质简图<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Geological map of the Shimensi tungsten deposit

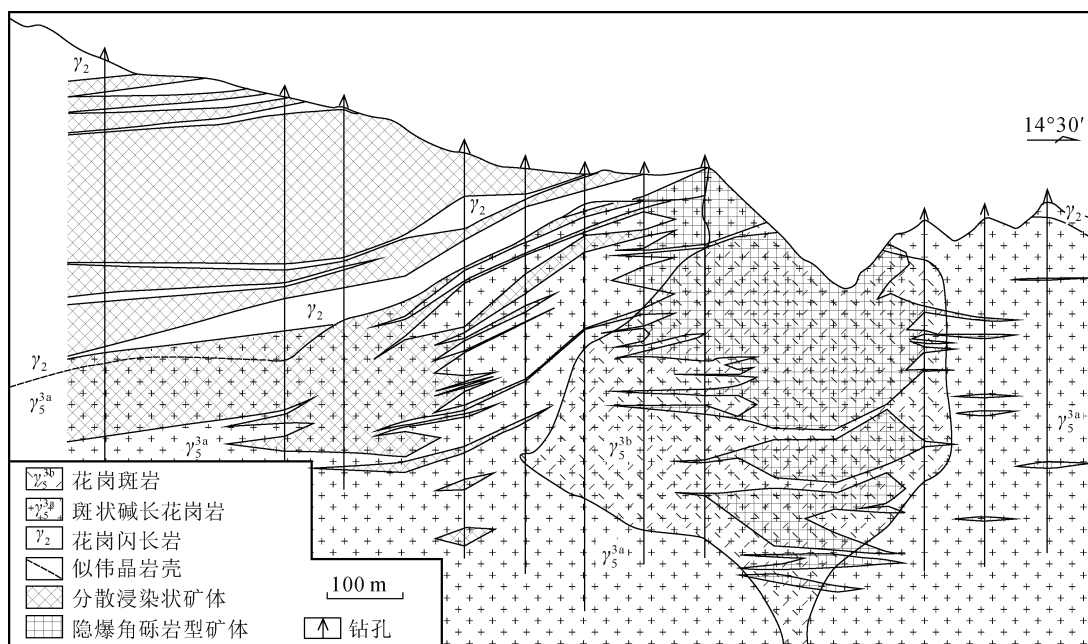


图3 石门寺钨矿4线地质剖面

Fig. 3 Geological section along No.4 line in the Shimensi tungsten deposit



岩体上部及外接触带 300~600 m 范围内。金属矿物主要有黑钨矿、白钨矿、黄铜矿、辉钼矿; 脉石矿物包括方解石、石英。矿石结构主要有交代结构和固溶体分离结构, 矿石构造主要为脉状构造、角砾状构造、浸染状构造等。常见的围岩蚀变主要有云英岩化、钾长石化、黑鳞云母化、绿泥石化、硅化、黄铁矿化, 另外还有少量绢云母化、碳酸盐化。其中, 云英岩化和硅化与钨、钼、铜矿化关系尤为密切。

### 3 采样及测试方法

实验样品采自大湖塘钨矿田石门寺花岗斑岩, 采集地表、坑道出露的新鲜花岗斑岩 (DHB-87、DHB-89、DHC-176、DHC-331、DHC-1), 岩石呈浅灰色, 为斑状结构、块状构造。斑晶以斜长石 (10%~15%) 和石英 (约 20%) 为主; 基质主要为钾长石, 其次为斜长石、石英等 (图 4); 副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石等。

### 3.1 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素

锆石分选在河北省廊坊市区域地质调查研究所完成, 采用常规粉碎、浮选和电磁选方法进行分选, 制靶、阴极发光显微照相、透射光及反射光照相在北京铀年领航科技有限公司完成。锆石 U-Pb 同位素在天津地质调查中心实验室利用 LA-ICP-MS 方法测定, 锆石定年所用仪器为 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪及与之配套的 New wave UP 193 nm 激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS)。利用 193 nm FX 激光器对锆石进行剥蚀, 激光剥蚀的斑束直径为 35  $\mu\text{m}$ , 激光剥蚀样品的深度为 20~40  $\mu\text{m}$ 。锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 为外标, 元素含量采用人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 为外标,  $^{29}\text{Si}$  为内标元素进行校正。数据处理采用 ICP MS Data Cal 程序<sup>[9-10]</sup>和 Isoplot 程序<sup>[11]</sup>进行锆石年龄加权平均值计算及谐和图绘制。

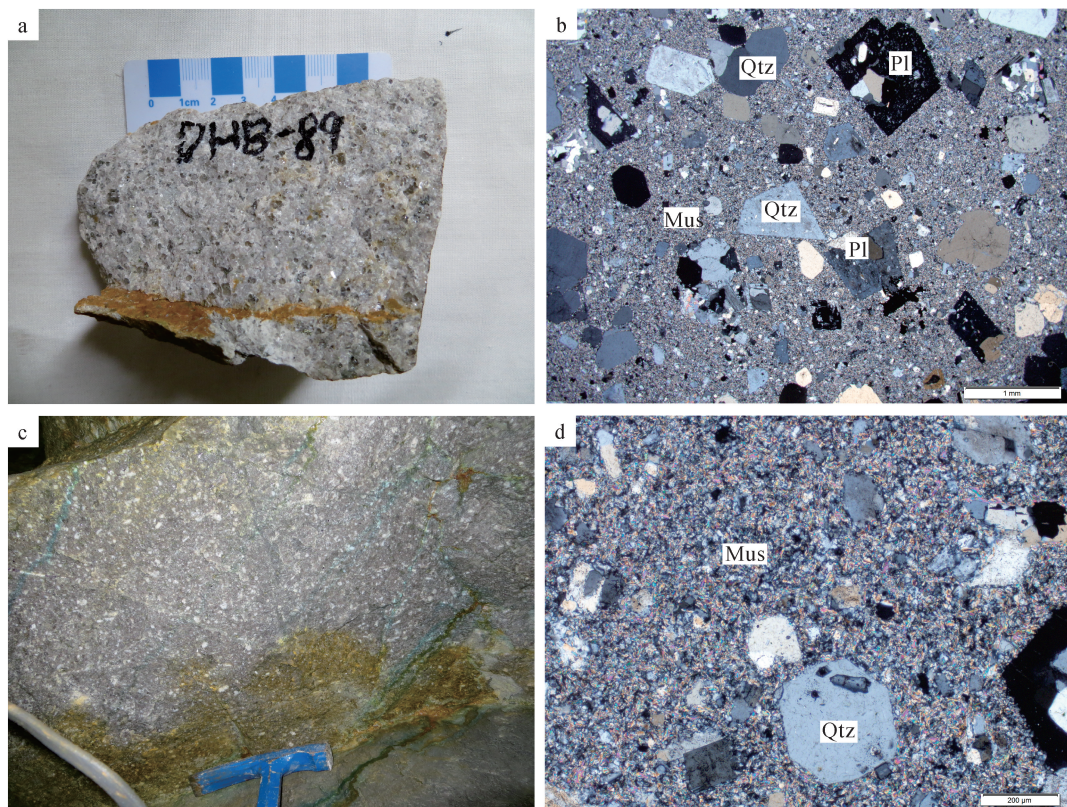


图 4 石门寺花岗斑岩手标本和显微照片

Fig. 4 Photos and microphotographs of the Shimensi granite porphyry

a—花岗斑岩手标本照片; c—花岗斑岩露头照片; b、d—花岗斑岩显微照片, 岩石为斑状结构, 基质为隐晶质白云母和石英斑晶 (正交偏光); Qtz—石英; Pl—斜长石; Mus—白云母

锆石 Hf 同位素分析是在锆石 U-Pb 定年测试的基础上,针对获得的谐和年龄原位测试 Lu-Hf 同位素。实验在天津地质调查中心实验室 LA-MC-ICP-MS 上完成,使用的激光束斑直径为 50  $\mu\text{m}$ ,激光剥蚀时间为 26 s,采用锆石 GJ-1 标准,详细测试流程、仪器运行条件等见参考文献[12]。测试中 GJ-1 的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值分别为  $0.281988 \pm 18 (2\sigma, n=19)$  和 0.0003,在误差范围内一致<sup>[13]</sup>。

### 3.2 全岩地球化学

将新鲜样品在无污染状态下,粉碎至 200 目以下(约 150 g),测试分析工作在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。主量元素使用 AB-104L, PW2404X 射线荧光光谱仪测定;微量和稀土元素使用 ELEMENT XR 等离子体质谱分析仪进行测定。详细的样品消解处理过程、分析精密度和准确度据参考文献[14]。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年龄

本次获得的锆石形态大小不等,所测锆石以自形椎柱状为主,长宽比为 1:1~3:1,具有较明显的振荡环带结构,基本属于岩浆锆石特征(图 5)。20 颗锆石的 U-Pb 同位素数据均在谐和线上或其附近,年龄变化于 151~158 Ma 之间(表 1),年龄加权平均值为  $154.36 \pm 0.83 \text{ Ma} (n=20, \text{MSWD}=4.1)$ (图 6),代表了该岩体的岩浆结晶年龄。

### 4.2 岩石地球化学特征

#### 4.2.1 主量元素

大湖塘钨矿石门寺矿段花岗斑岩岩体的 5 件全岩样品的主量元素分析结果如表 2 所示,烧失量均小于 3%。

5 件样品的  $\text{SiO}_2$  含量为 71.90%~76.53%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 12.76%~14.76%,  $\text{MgO}$  含量为 0.26%~0.59%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 2.58%~5.42%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 1.97%~3.36%;全碱含量( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ )较高,为 5.94%~7.87%,整体上  $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ ,其中 4 件样品的  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值为 0.45~0.67,相对富钾,另有 1 件样品的  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值为 1.3,相对富钠。

在 TAS 图解(图 7-a)上,石门寺花岗斑岩样品点主要落在碱性-亚碱性系列曲线(图 7-b)下方的花岗岩区域。由硅钾图(图 7-c)可知,样品属于高钾钙碱性-钙碱性系列。石门寺花岗斑岩的铝饱和指数( $A/\text{CNK} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ )为 1.25~1.39,指示其为强过铝质花岗岩(图 7-d)。

总体上,石门寺花岗斑岩的岩石化学成分表现为高硅、富碱、强过铝质的酸性岩特征,岩石系列上主要属于高钾钙碱性系列。

#### 4.2.2 微量和稀土元素

对石门寺花岗斑岩样品的微量和稀土元素分别进行原始地幔和球粒陨石标准化处理。

根据微量元素原始地幔标准化蛛网图,石门寺花岗斑岩样品富集 Cs、Rb、U、Pb、Th、K 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素和大离子

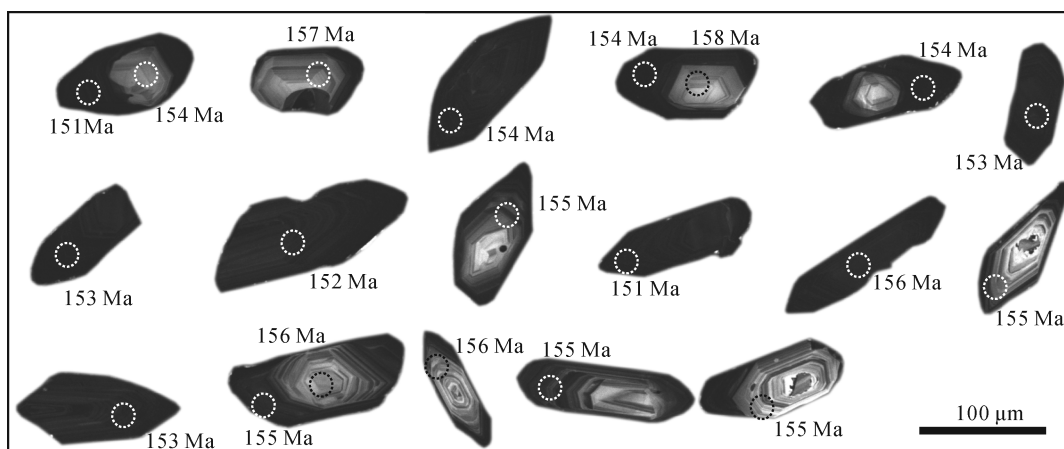


图 5 石门寺花岗斑岩锆石阴极发光图像

Fig. 5 Zircon cathodoluminescence images of Shimensi granite porphyry

表 1 石门寺花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素数据  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating results for the Shimensi granite prophyry

| 样品号 | 含量/ $10^{-6}$ |       | 同位素比值                            |           |                                  |           |                                   |           |                                  |           |                                  |           | 年龄/Ma                            |           |                                   |           |     |    |
|-----|---------------|-------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----|----|
|     | Pb            | U     | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ |     |    |
| 1   | 12            | 446   | 0.0242                           | 0.0001    | 0.1647                           | 0.0020    | 0.0494                            | 0.0007    | 0.0072                           | 0.0010    | 0.6112                           | 0.0009    | 154                              | 1         | 155                               | 2         | 166 | 31 |
| 2   | 190           | 8640  | 0.0237                           | 0.0001    | 0.1627                           | 0.0024    | 0.0499                            | 0.0008    | 0.0271                           | 0.0006    | 0.0196                           | 0.0004    | 151                              | 1         | 153                               | 2         | 188 | 36 |
| 3   | 55            | 2227  | 0.0246                           | 0.0001    | 0.1692                           | 0.0019    | 0.0498                            | 0.0006    | 0.0204                           | 0.0007    | 0.1336                           | 0.0007    | 157                              | 1         | 159                               | 2         | 187 | 29 |
| 4   | 184           | 8130  | 0.0242                           | 0.0001    | 0.1623                           | 0.0038    | 0.0487                            | 0.0012    | 0.0225                           | 0.0002    | 0.0360                           | 0.0003    | 154                              | 1         | 153                               | 4         | 135 | 55 |
| 5   | 24            | 983   | 0.0248                           | 0.0001    | 0.1683                           | 0.0024    | 0.0493                            | 0.0007    | 0.0072                           | 0.0020    | 0.2853                           | 0.0015    | 158                              | 1         | 158                               | 2         | 163 | 32 |
| 6   | 409           | 18255 | 0.0241                           | 0.0001    | 0.1626                           | 0.0023    | 0.0489                            | 0.0007    | 0.0437                           | 0.0016    | 0.0137                           | 0.0003    | 154                              | 1         | 153                               | 2         | 142 | 35 |
| 7   | 206           | 9043  | 0.0242                           | 0.0001    | 0.1675                           | 0.0027    | 0.0502                            | 0.0008    | 0.0405                           | 0.0004    | 0.0213                           | 0.0001    | 154                              | 1         | 157                               | 2         | 202 | 38 |
| 8   | 130           | 4641  | 0.0240                           | 0.0001    | 0.1622                           | 0.0021    | 0.0489                            | 0.0007    | 0.0086                           | 0.0024    | 0.8061                           | 0.0016    | 153                              | 1         | 153                               | 2         | 144 | 32 |
| 9   | 185           | 8102  | 0.0240                           | 0.0001    | 0.1661                           | 0.0022    | 0.0502                            | 0.0007    | 0.0403                           | 0.0006    | 0.0281                           | 0.0008    | 153                              | 1         | 156                               | 2         | 203 | 33 |
| 10  | 111           | 5013  | 0.0238                           | 0.0001    | 0.1611                           | 0.0029    | 0.0491                            | 0.0009    | 0.0083                           | 0.0020    | 0.0682                           | 0.0003    | 152                              | 1         | 152                               | 3         | 151 | 43 |
| 11  | 54            | 2193  | 0.0244                           | 0.0001    | 0.1661                           | 0.0027    | 0.0494                            | 0.0009    | 0.0251                           | 0.0010    | 0.1180                           | 0.0011    | 155                              | 1         | 156                               | 3         | 168 | 40 |
| 12  | 116           | 5247  | 0.0238                           | 0.0002    | 0.1639                           | 0.0030    | 0.0500                            | 0.0008    | 0.0167                           | 0.0010    | 0.0342                           | 0.0002    | 151                              | 1         | 154                               | 3         | 197 | 36 |
| 13  | 85            | 3392  | 0.0245                           | 0.0001    | 0.1670                           | 0.0027    | 0.0494                            | 0.0008    | 0.0536                           | 0.0013    | 0.0569                           | 0.0003    | 156                              | 1         | 157                               | 2         | 167 | 35 |
| 14  | 44            | 1834  | 0.0244                           | 0.0001    | 0.1647                           | 0.0019    | 0.0489                            | 0.0006    | 0.0254                           | 0.0004    | 0.0941                           | 0.0009    | 155                              | 1         | 155                               | 2         | 144 | 29 |
| 15  | 124           | 5614  | 0.0240                           | 0.0001    | 0.1654                           | 0.0046    | 0.0499                            | 0.0014    | 0.0092                           | 0.0003    | 0.0416                           | 0.0001    | 153                              | 1         | 155                               | 4         | 192 | 66 |
| 16  | 15            | 605   | 0.0245                           | 0.0001    | 0.1670                           | 0.0025    | 0.0495                            | 0.0007    | 0.0078                           | 0.0004    | 0.4135                           | 0.0034    | 156                              | 1         | 157                               | 2         | 171 | 34 |
| 17  | 80            | 3458  | 0.0244                           | 0.0001    | 0.1665                           | 0.0024    | 0.0495                            | 0.0008    | 0.0106                           | 0.0016    | 0.1120                           | 0.0007    | 155                              | 1         | 156                               | 2         | 170 | 36 |
| 18  | 20            | 802   | 0.0245                           | 0.0002    | 0.1709                           | 0.0036    | 0.0505                            | 0.0009    | 0.0145                           | 0.0007    | 0.1976                           | 0.0005    | 156                              | 1         | 160                               | 3         | 219 | 43 |
| 19  | 54            | 2266  | 0.0243                           | 0.0001    | 0.1650                           | 0.0023    | 0.0492                            | 0.0007    | 0.0142                           | 0.0020    | 0.1413                           | 0.0010    | 155                              | 1         | 155                               | 2         | 158 | 35 |
| 20  | 73            | 3131  | 0.0244                           | 0.0001    | 0.1651                           | 0.0029    | 0.0491                            | 0.0009    | 0.0146                           | 0.0004    | 0.0806                           | 0.0009    | 155                              | 1         | 155                               | 3         | 152 | 42 |



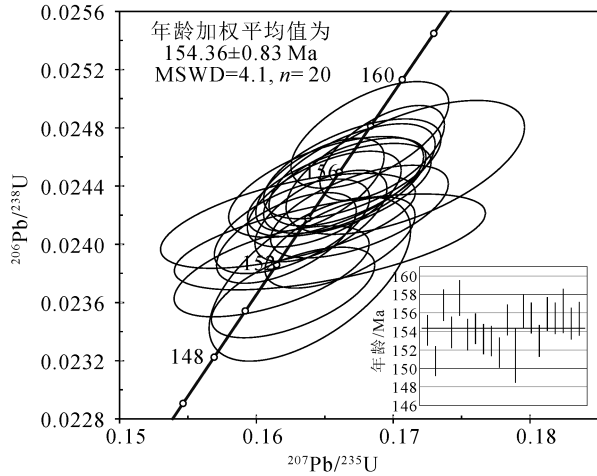


图6 石门寺花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄谱和图  
Fig. 6 Zircon U-Pb age concordia diagram of Shimensi granite porphyry

亲石元素 Ba、Sr(表2;图8-a)。

本文样品的稀土元素总量( $\Sigma REE$ )为  $49.38 \times 10^{-6} \sim 72.36 \times 10^{-6}$ (表2),轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)

为 9.83~16.76,平均值为 13.94,  $(La/Yb)_N > 1$ ,变化于 16.43~39.45 之间,平均值为 27.7。轻、重稀土元素分馏明显,在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上呈明显的右倾型特征(图8-b); $\delta Eu$  值为 0.27~0.65,表现出明显的负 Eu 异常。

与前人在石门寺矿区花岗斑岩、似斑状黑云母花岗岩、细粒黑云母花岗岩的分析数据进行对比,表明花岗斑岩与似斑状黑云母花岗岩、细粒黑云母花岗岩的微量和稀土元素配分模式存在很高的一致性,说明石门寺矿区花岗斑岩、似斑状黑云母花岗岩、细粒黑云母花岗岩可能具有相同的岩浆源区,并经历了相似的岩浆演化。

4.3 锆石 Hf 同位素特征

原位锆石 Hf 同位素分析数据显示(表3),本次所测锆石的  $^{176}Yb/^{177}Hf$  和  $^{176}Lu/^{177}Hf$  值分别为 0.008623~0.084368 和 0.000257~0.002050,  $^{176}Lu/^{177}Hf$  值只有一个值大于 0.002,其余均小于 0.002;计算的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值介于 -23.6~-2.9 之间、单阶段模式年龄( $T_{DM1}$ )值为 0.94~1.72 Ga,平均值为 1.19 Ga,二

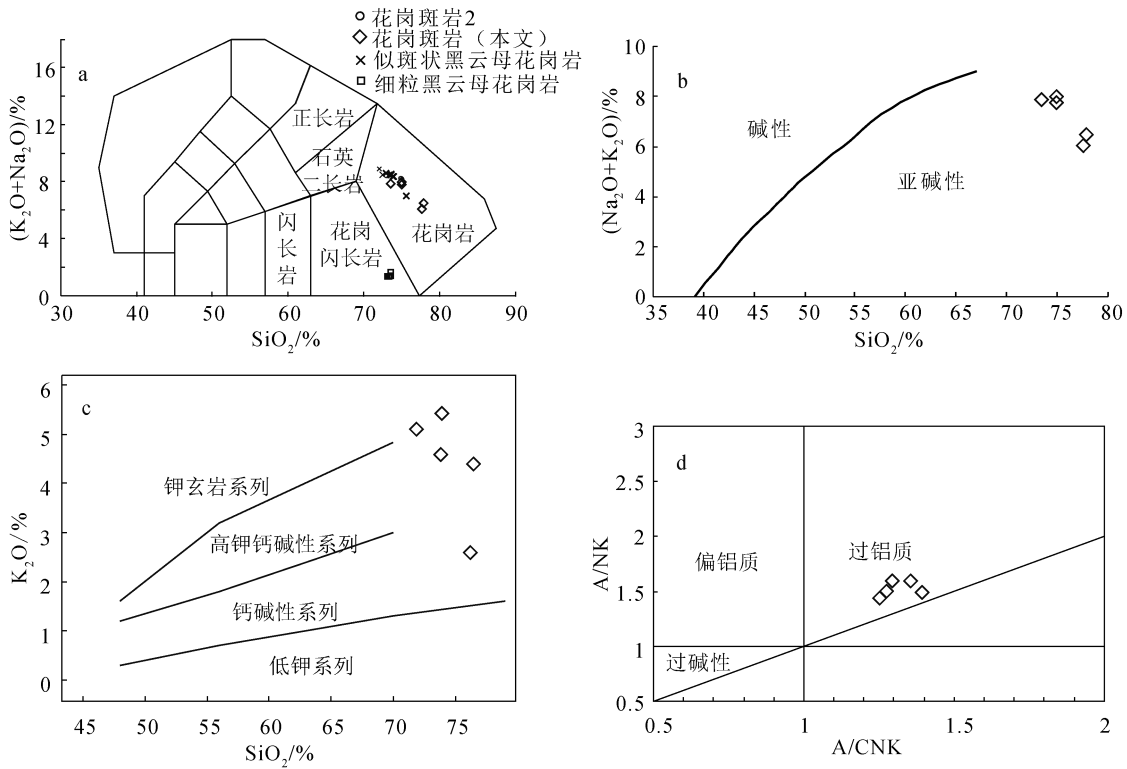


图7 石门寺钨矿花岗岩类主要元素相关图解

Fig. 7 Diagrams of major elements of granitoids in the Shimensi tungsten deposit

a—TAS 图解<sup>[15]</sup>; b—碱性-亚碱性系列判别图解; c— $SiO_2-K_2O$  关系图解<sup>[16]</sup>; d—A/CNK-A/NK 图解



表 2 石门寺花岗斑岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace elements and REE compositions of Shimensi granite porphyry

| 样号                                 | DHB-87 | DHB-89 | DHC-176 | DHC-331 | DHY-1  | 样号                   | DHB-87 | DHB-89 | DHC-176 | DHC-331 | DHY-1  |
|------------------------------------|--------|--------|---------|---------|--------|----------------------|--------|--------|---------|---------|--------|
| SiO <sub>2</sub>                   | 76.53  | 76.27  | 73.86   | 73.90   | 71.90  | K                    | 36360  | 21417  | 37937   | 44994   | 42171  |
| TiO <sub>2</sub>                   | 0.13   | 0.16   | 0.12    | 0.12    | 0.23   | Sr                   | 45.60  | 52.50  | 37.60   | 47.30   | 71.80  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 12.76  | 13.27  | 14.42   | 14.74   | 14.76  | P                    | 567.35 | 436.42 | 785.56  | 741.92  | 523.70 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 0.40   | 0.25   | 0.17    | 0.40    | 0.49   | Zr                   | 59.20  | 77.70  | 53.90   | 55.80   | 104.00 |
| FeO                                | 0.80   | 0.73   | 0.87    | 0.65    | 1.00   | Hf                   | 2.28   | 2.88   | 2.20    | 2.26    | 3.35   |
| MnO                                | 0.05   | 0.03   | 0.05    | 0.05    | 0.05   | Ti                   | 779.15 | 958.95 | 719.21  | 719.21  | 1378.4 |
| MgO                                | 0.27   | 0.31   | 0.27    | 0.26    | 0.59   | La                   | 14.60  | 15.70  | 11.70   | 11.00   | 15.70  |
| CaO                                | 0.79   | 1.06   | 0.82    | 0.38    | 0.97   | Ce                   | 28.90  | 32.60  | 24.40   | 22.90   | 30.80  |
| Na <sub>2</sub> O                  | 1.97   | 3.36   | 3.08    | 2.45    | 2.62   | Pr                   | 3.20   | 3.64   | 2.73    | 2.50    | 3.27   |
| K <sub>2</sub> O                   | 4.38   | 2.58   | 4.57    | 5.42    | 5.08   | Nd                   | 11.70  | 14.00  | 9.86    | 8.48    | 12.90  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | 0.13   | 0.10   | 0.18    | 0.17    | 0.12   | Sm                   | 2.12   | 2.58   | 1.96    | 1.58    | 2.49   |
| 烧失量                                | 1.21   | 1.28   | 1.00    | 0.92    | 1.64   | Eu                   | 0.27   | 0.33   | 0.16    | 0.14    | 0.52   |
| 总计                                 | 98.21  | 98.12  | 98.41   | 98.54   | 97.81  | Gd                   | 1.80   | 2.06   | 1.65    | 1.30    | 2.38   |
| K <sub>2</sub> O+NaO               | 6.35   | 5.94   | 7.65    | 7.87    | 7.70   | Tb                   | 0.22   | 0.22   | 0.22    | 0.17    | 0.35   |
| Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O | 0.45   | 1.30   | 0.67    | 0.45    | 0.52   | Dy                   | 0.94   | 1.05   | 1.21    | 0.69    | 1.75   |
| σ                                  | 1.20   | 1.06   | 1.90    | 2.00    | 2.05   | Ho                   | 0.15   | 0.18   | 0.20    | 0.11    | 0.32   |
| A/CNK                              | 1.36   | 1.30   | 1.25    | 1.39    | 1.28   | Er                   | 0.37   | 0.43   | 0.46    | 0.25    | 0.88   |
| A/NK                               | 1.60   | 1.60   | 1.44    | 1.49    | 1.51   | Tm                   | 0.05   | 0.06   | 0.06    | 0.03    | 0.12   |
| 锆饱和温度/℃                            | 726.03 | 742.77 | 708.25  | 718.9   | 759.72 | Yb                   | 0.33   | 0.36   | 0.39    | 0.20    | 0.77   |
| Cs                                 | 138.00 | 85.20  | 125.00  | 100.00  | 158.00 | Lu                   | 0.05   | 0.05   | 0.05    | 0.03    | 0.11   |
| Rb                                 | 497.00 | 418.00 | 548.00  | 574.00  | 426.00 | Y                    | 3.79   | 4.51   | 5.12    | 2.38    | 8.42   |
| Ba                                 | 98.70  | 72.40  | 50.70   | 64.70   | 229.00 | ∑REE                 | 64.70  | 73.26  | 55.06   | 49.38   | 72.36  |
| Th                                 | 10.40  | 11.40  | 8.07    | 7.94    | 12.60  | ∑LREE/∑HREE          | 15.56  | 15.62  | 11.96   | 16.76   | 9.83   |
| U                                  | 10.70  | 11.00  | 13.60   | 6.37    | 6.09   | (La/Yb) <sub>N</sub> | 31.74  | 31.28  | 21.52   | 39.45   | 14.63  |
| Nb                                 | 13.30  | 14.60  | 15.60   | 12.80   | 9.05   | δEu                  | 0.42   | 0.44   | 0.27    | 0.30    | 0.65   |
| Ta                                 | 2.14   | 2.81   | 3.22    | 2.21    | 1.58   | (Gd/Yb) <sub>N</sub> | 4.51   | 4.73   | 3.50    | 5.38    | 2.56   |

注: A/CNK = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O); A/NK = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O); 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10<sup>-6</sup>

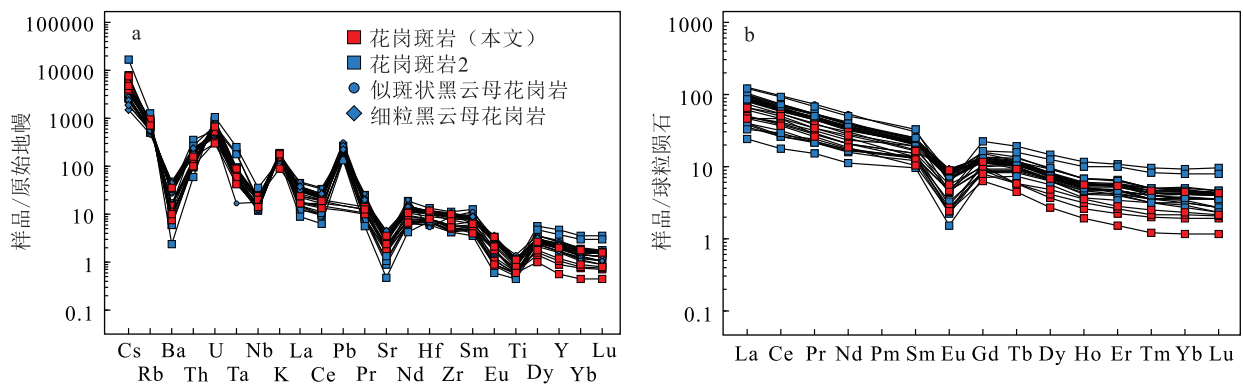


图 8 石门寺钨矿花岗岩类微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(b)  
(原始地幔和球粒陨石标准化数据分别据参考文献[17][18])

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram(a) and chondrite-normalized REE patterns(b) for granitoids in the Shimensi tungsten deposit

阶段年龄 ( $T_{DM2}$ ) 为 1.39~2.70 Ga, 平均值为 1.80 Ga,  $f_{Lu/Hf}$  平均值在 -0.94~-0.99 之间。这种特征表明, 所测锆石在形成以后, 仅具有较少放射成因 Hf 的积累, 可以用初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值代表锆石形成时的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值<sup>[19]</sup>。该样品的  $f_{Lu/Hf}$  平均值在 -0.94~-0.99 之间, 明显小于镁铁质地壳的  $f_{Lu/Hf}$  值 (-0.34)<sup>[20]</sup> 和硅铝质地壳的  $f_{Lu/Hf}$  值 (-0.72)<sup>[21]</sup>, 在  $t-\epsilon_{Hf}(t)$  图解 (图 9) 上, 样品点均分布于亏损地幔线及球粒陨石演化线之下, 表现出壳源岩浆的特征。

## 5 讨论

### 5.1 岩石类型

目前, 被大多数学者认同的花岗岩分类方案为

ISAM 方案, 根据源区划分为 I 型、S 型和 M 型花岗岩, 以及具独特矿物组成并能反映特殊构造背景的 A 型花岗岩<sup>[22]</sup>。其中, M 型较罕见, 自然界中花岗岩的成因类型主要为 I 型、S 型和 A 型。

钨锡矿是中国的优势矿种, 而谈到中国的钨锡成矿作用就不得不提南岭地区。钨锡多金属矿床被认为是南岭地区南侧的特色矿床, 其成因长期被认为与地壳重融、高演化花岗岩密切相关, 但越来越多的资料显示, 钦-杭成矿带中生代燕山期花岗岩包含幔源端元信息是十分确切的<sup>[23-24]</sup>。在南岭中西段, 发育一条延伸达 250 km 以上的 NE 向燕山早期含钨锡 A 型花岗岩带, 包括花山、姑婆山、九嶷山、骑田岭等花岗质岩基和周边岩株<sup>[25]</sup>。

表 3 石门寺花岗斑岩 Lu-Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Shimensi granite porphyry

| 测点 | 年龄/Ma | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $\pm 2\sigma$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $\epsilon_{Hf}(0)$ | $\epsilon_{Hf}(t)$ | $T_{DM1}/\text{Ma}$ | $T_{DM2}/\text{Ma}$ | $f_{Lu/Hf}$ |
|----|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| 1  | 154   | 0.065863                          | 0.001465                          | 0.282471                          | 0.000022      | 0.282467                          | -10.6              | -7.4               | 1117                | 1675                | -0.96       |
| 2  | 151   | 0.032894                          | 0.000754                          | 0.282533                          | 0.000016      | 0.282531                          | -8.5               | -5.2               | 1011                | 1534                | -0.98       |
| 3  | 157   | 0.050259                          | 0.001407                          | 0.282159                          | 0.000019      | 0.282155                          | -21.7              | -18.4              | 1557                | 2370                | -0.96       |
| 4  | 154   | 0.044646                          | 0.001226                          | 0.282502                          | 0.000019      | 0.282498                          | -9.6               | -6.3               | 1068                | 1606                | -0.96       |
| 5  | 158   | 0.054137                          | 0.001346                          | 0.282516                          | 0.000014      | 0.282512                          | -9.0               | -5.7               | 1050                | 1571                | -0.96       |
| 6  | 154   | 0.079034                          | 0.001541                          | 0.282501                          | 0.000017      | 0.282496                          | -9.6               | -6.4               | 1078                | 1610                | -0.95       |
| 7  | 154   | 0.029697                          | 0.000684                          | 0.282500                          | 0.000020      | 0.282498                          | -9.6               | -6.3               | 1055                | 1606                | -0.98       |
| 8  | 153   | 0.008623                          | 0.000258                          | 0.282009                          | 0.000022      | 0.282009                          | -27.0              | -23.6              | 1715                | 2698                | -0.99       |
| 9  | 153   | 0.049818                          | 0.001250                          | 0.282491                          | 0.000017      | 0.282488                          | -9.9               | -6.7               | 1083                | 1629                | -0.96       |
| 10 | 152   | 0.084368                          | 0.001862                          | 0.282562                          | 0.000018      | 0.282556                          | -7.4               | -4.3               | 1000                | 1476                | -0.94       |
| 11 | 155   | 0.058163                          | 0.001300                          | 0.282497                          | 0.000016      | 0.282493                          | -9.7               | -6.4               | 1076                | 1615                | -0.96       |
| 12 | 151   | 0.056192                          | 0.001565                          | 0.282601                          | 0.000017      | 0.282596                          | -6.1               | -2.9               | 936                 | 1386                | -0.95       |
| 13 | 156   | 0.068215                          | 0.002050                          | 0.282565                          | 0.000021      | 0.282559                          | -7.3               | -4.1               | 1001                | 1468                | -0.94       |
| 14 | 155   | 0.026493                          | 0.000716                          | 0.282495                          | 0.000016      | 0.282493                          | -9.8               | -6.5               | 1063                | 1616                | -0.98       |
| 15 | 153   | 0.035462                          | 0.001068                          | 0.282519                          | 0.000014      | 0.282515                          | -9.0               | -5.7               | 1039                | 1567                | -0.97       |
| 16 | 156   | 0.030660                          | 0.000905                          | 0.282516                          | 0.000017      | 0.282514                          | -9.0               | -5.7               | 1038                | 1569                | -0.97       |
| 17 | 155   | 0.008637                          | 0.000257                          | 0.282049                          | 0.000021      | 0.282048                          | -25.6              | -22.2              | 1661                | 2609                | -0.99       |
| 18 | 156   | 0.028899                          | 0.000846                          | 0.282398                          | 0.000016      | 0.282395                          | -13.2              | -9.9               | 1202                | 1835                | -0.97       |
| 19 | 155   | 0.043227                          | 0.001495                          | 0.282356                          | 0.000067      | 0.282352                          | -14.7              | -11.5              | 1281                | 1932                | -0.95       |
| 20 | 155   | 0.008651                          | 0.000259                          | 0.282029                          | 0.000022      | 0.282028                          | -26.3              | -22.9              | 1688                | 2654                | -0.99       |

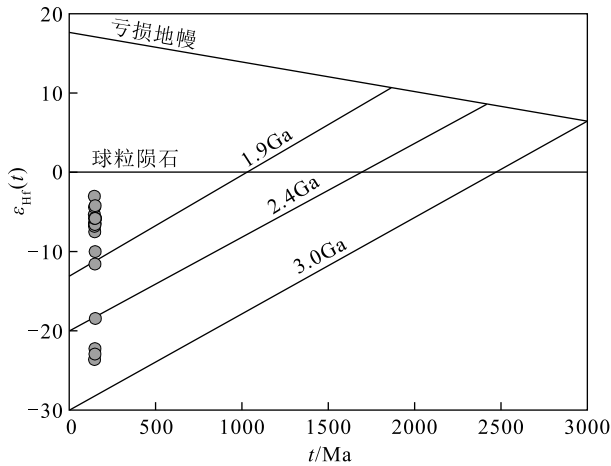


图 9 石门寺花岗斑岩  $t-\epsilon_{Hf}(t)$  图解

Fig. 9 The  $t-\epsilon_{Hf}(t)$  diagram of the Shimensi granite porphyry

但石门寺花岗斑岩不符合 A 型花岗岩的特征。A 型花岗岩具有富碱, 高 Fe/Mg 值和高 Zr、Nb、Ga、Y、Ce 含量的特征; 通常情况下, 以出现碱性暗色矿物(钠闪石-钠铁闪石、霓石-霓辉石、铁橄榄石等)作为鉴定 A 型花岗岩的重要矿物学标志<sup>[26]</sup>; 同时, Ga/Al 和 Zr+Nb+Ce+Y 的相关图解是较有效的方法<sup>[22]</sup>。在 Zr+Nb+Ce+Y 与  $FeO^*/MgO$ 、 $(Na_2O+K_2O)/CaO$  的关系图解(图 10)上, 石门寺花岗岩类的投点主要落在 I&S 型花岗岩范围, 位于分异的 I&S 型花岗岩和未分异的 I&S 型花岗岩分界线附近,

明显不符合 A 型花岗岩特征。

另外, A 型花岗岩的形成温度较高, 其中部分岩石形成的压力较低<sup>[22]</sup>。以华南白垩纪岩背锡矿的成矿斑岩(高分异的铝质 A 型花岗岩)为例, 其锆饱和温度为  $807\sim 817^\circ C$ <sup>[27]</sup>。而本文根据岩石化学数据计算得到的石门寺花岗斑岩的全岩锆饱和温度为  $708\sim 760^\circ C$ , 平均值为  $731^\circ C$ (具体计算过程据参考文献[28]), 代表石门寺花岗斑岩岩浆的温度上限, 表现出明显有别于 A 型花岗岩的特征。

对于 I 型和 S 型花岗岩的区分, 早期主要根据铝饱和指数( $A/CNK=Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ )作为划分依据<sup>[29]</sup>, I 型花岗岩的  $A/CNK < 1.1$ , 而 S 型花岗岩的  $A/CNK > 1.1$ 。之后的研究表明,  $SiO_2-P_2O_5$  相关关系、Th、Ba、Rb 是划分 I 型和 S 型花岗岩更可靠的指标<sup>[30]</sup>。在准铝质/弱过铝质 ( $A/CNK < 1.1$ ) 和过碱性花岗岩浆中, 磷灰石的溶解度很低, 且随温度的降低和  $SiO_2$  含量的增加而降低; 而在强过铝质花岗岩浆中, 磷灰石的溶解度很高, 磷灰石主要呈不饱和状态, 故而 S 型花岗岩的  $P_2O_5$  含量会随  $SiO_2$  含量的增加而增加或不变。通过对不同区域典型 I 型和 S 型花岗岩的岩石化学数据的总结, 相关学者<sup>[30-31]</sup> 得出了类似的结论, 即典型 I 型花岗岩的  $SiO_2-P_2O_5$  相关关系呈现出很好的负相关关系, 而 S 型花岗岩的  $SiO_2-P_2O_5$  相关关系并没有很明显的正相关或负相关关系。在准铝质和过铝质

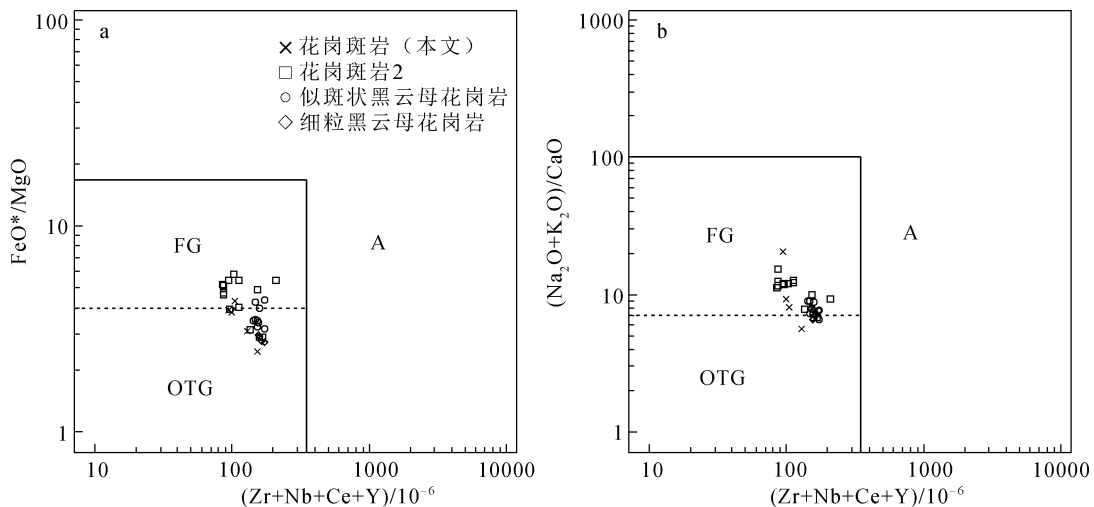


图 10 石门寺矿区花岗岩类  $(Zr+Nb+Ce+Y)-FeO^*/MgO$  (a) 和与  $(Zr+Nb+Ce+Y)-(Na_2O+K_2O)/CaO$  (b) 关系图解

Fig. 10 Diagrams of relationship between  $(Zr+Nb+Ce+Y)-FeO^*/MgO$  (a) and  $(Zr+Nb+Ce+Y)-(Na_2O+K_2O)/CaO$  (b)

of granitoids in the Shimensi mining area

FG—分异的 M、I 和 S 型花岗岩; OTG—未分异的 M、I 和 S 型花岗岩; A—A 型花岗岩

岩浆中的演化过程中,由于富集 Th、Y 的矿物相(如独居石)结晶时间不同,导致随着岩浆结晶分异演化 Th、Y 含量发生变化;分异 S 型花岗岩的 Th、Y 含量低,并与 Rb 含量呈负相关关系,Rb 含量大于  $200 \times 10^{-6}$ ;分异 I 型花岗岩的 Th、Y 含量高,并与 Rb 含量呈正相关关系。

石门寺花岗斑岩的 A/CNK 值为 1.25~1.39,表现出强过铝质的特征,这也得到岩相学证据的支持。镜下鉴定(图 4)显示存在白云母,表明岩浆已达到铝饱和,表现出 S 型花岗岩的特征。再者,对石门寺矿区花岗岩类岩石(花岗斑岩、似斑状黑云母花岗岩、细粒黑云母花岗岩数据据参考文献[32])的岩石化学数据(图 11)分析表明, $\text{SiO}_2$  与  $\text{P}_2\text{O}_5$  表现出弱正相关关系,明显不同于 I 型花岗岩的特征。另外,石门寺矿区花岗岩类岩石的 Rb 含量普遍高于  $200 \times 10^{-6}$ ,在 Rb-Th 和 Rb-Y 相关性图解(图 12)中,均表现出 Th、Y 含量与 Rb 含量呈明显的负相关关系,具有 S 型花岗岩的特征。综上所述,石门寺花岗斑岩表现出明显的 S 型花岗岩特征。

## 5.2 岩浆源区与岩浆演化

石门寺花岗斑岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 71.90%~76.53%、A/CNK 主要介于 1.25~1.39 之间、 $\text{SiO}_2$ - $\text{P}_2\text{O}_5$  相关关系为弱正相关关系、Rb 含量高于  $200 \times 10^{-6}$ 、Th 和 Y 含量的变化与 Rb 含量变化呈明显的负相关关系,可能为高分异 S 型花岗岩。S 型花岗岩的过铝质特征继承自源岩,其源岩为经历过表壳风化作用的沉积岩,在长石风化形成粘土的过程中,Na、Ca、Sr 发生丢失使沉积岩表现为过铝质。Rb/Sr-Rb/Ba 图解也表明,石门寺花岗斑岩的源岩是富粘土矿物的沉积岩(图 13)。同时,Hf 同位素分析结果显示,石门寺花岗斑岩的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于

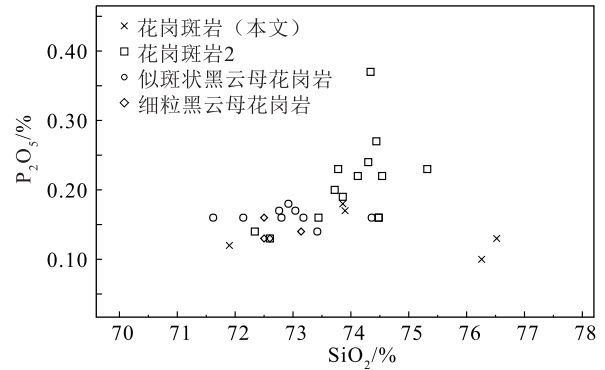


图 11 石门寺钨矿花岗岩类  $\text{SiO}_2$ - $\text{P}_2\text{O}_5$  关系图解

Fig. 11 Diagram of relationship between  $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{SiO}_2$  of granitoids in the Shimensi tungsten deposit

-23.6~-2.9 之间,其二阶段模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ )集中在 1.39~1.67 Ga,少数为 1.84~2.37 Ga 和 2.61~2.70 Ga,表明岩浆源区物质主要为壳源物质,但  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  和二阶段模式年龄的不“集中”分布,暗示其源区并非由单一组分组成。

无论是上地壳、中地壳、下地壳或整体地壳都表现出明显的 Nb、Ta 等高场强元素亏损和 Pb 富集,有别于洋壳 Pb 亏损和 Nb 富集的特征;其中,大陆上地壳具明显的负 Eu 异常,而大陆下地壳通常具正 Eu 异常<sup>[34]</sup>。总体上,石门寺花岗斑岩的微量元素组成与大陆上地壳的特征相似,且其 Zr/Hf (24.50~31.04)、Nb/Ta (4.84~6.21) 和 Ba/La 值 (4.33~14.59) 与陆壳相应平均值 (Zr/Hf=33.33, Nb/Ta=11.00 和 Ba/La=15.63)<sup>[18]</sup> 较接近,也说明岩浆为陆壳碎屑岩或陆壳部分熔融的产物。

Nb、Ta、Ti 的亏损,是岛弧型岩浆的典型特征,但本区的洋陆俯冲和板块拼合作用发生在新元古

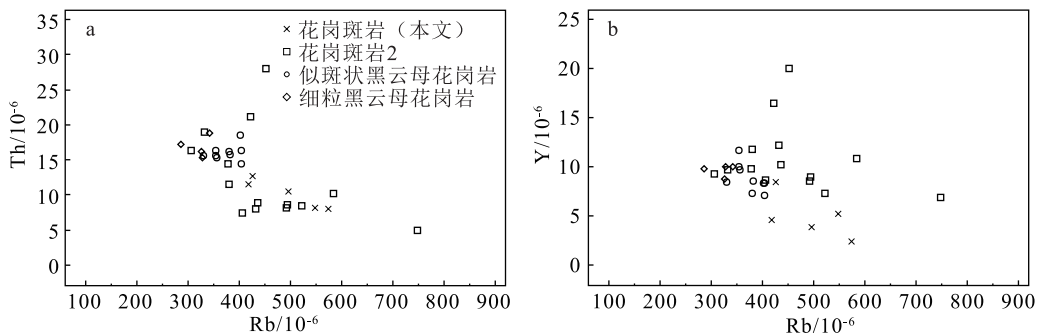


图 12 石门寺钨矿花岗岩类 Rb-Th(a) 和 Rb-Y(b) 关系图解

Fig. 12 Diagrams of relationship Rb-Th(a) and Rb-Y(b) of granitoids in the Shimensi tungsten deposit



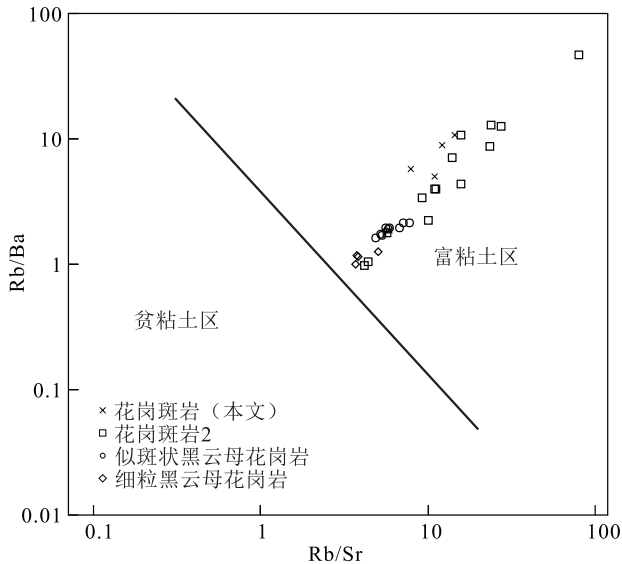


图 13 石门寺花岗斑岩 Rb/Sr-Rb/Ba 关系图解<sup>[33]</sup>

Fig. 13 Diagram of relationship between Rb/Ba and Rb/Sr of the Shimensi granite porphyry

代,中生代并不发育俯冲岩浆岛弧<sup>[35]</sup>,故 Nb、Ta、Ti 的亏损应该是继承了源岩的微量元素组成特征,可能反映了区域地壳的普遍性特征,因为俯冲带是地壳横向生长的重要场所,而江南造山带地区曾是扬子地块和华夏地块拼合的结合带,新生的地壳组成具有岛弧的部分特征。因此,石门寺花岗岩类岩石化学组成中 Nb、Ta、Ti 亏损的特征,反映其源区对早期古老陆壳物质的继承性。

石门寺地区花岗岩类的微量和稀土元素特征表明,几种岩性具有同源、相似演化的特征,根据该认识,将几种岩性的相关元素数据进行双变量分析。相关分析结果显示(图 14),MgO、TFeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、TiO<sub>2</sub>、Sr 与 SiO<sub>2</sub>表现出较明显的负相关关系,Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 与 SiO<sub>2</sub>没有明显的相关性,反映岩浆演化过程中可能发生了镁铁质矿物、钛铁矿、斜长石的分离结晶。这也解释了石门寺花岗斑岩亏损 Sr、Ba 的原因,一方面可能由于源岩经历过表壳风化作用而丢失了部分 Sr,另一方面,源岩部分熔融形成岩浆并进一步发生分异演化的过程中,作为 Sr、Ba 的重要载体矿物的斜长石发生分离结晶,进一步导致了 Sr、Ba 的亏损。前文对 SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(图 11)的分析已表明,由于岩浆铝饱和的特征,磷灰石没有发生显著的分异结晶作用。

### 5.3 构造背景与区域成岩成矿作用

大量的研究揭示,九岭-鄱公山隆起带所属的扬子板块东南缘在中、新元古代受到扬子与华夏板块相互作用的深远影响,奠定了该区基本的构造格局;而该区大规模岩浆与成矿作用主要始于中生代,与中—晚侏罗世以陆内俯冲和陆内造山为特征的东亚多向汇聚即“东亚汇聚”<sup>[36]</sup>有关。这种大规模的板块运动引起了中国大陆及周缘地带产生强烈的构造变形及相应的岩浆与成矿作用。扬子板块东南缘下扬子拗陷带、九岭-鄱公山隆起带、钦杭结合带浙赣段、华夏板块西北部的北武夷山隆起带等东南沿海地区也都受到强烈的构造变形改造;由于汇聚作用造成的构造变形作用在不同部位的形成时限不同,造成了不同区域的岩浆及成矿作用时代也存在一定的差异。

在 Pearce 图解(图 15)中,石门寺矿区的中生代花岗岩均显示出同碰撞花岗岩的特征。

本文通过总结华南中生代成矿作用时限及其可能的地球动力学背景,得出自中侏罗世晚期—晚侏罗世(165±5 Ma)随着板块进一步汇聚,岩石圈地壳总体处于持续挤压状态,地壳增厚作用波及钦杭结合带浙赣段南侧的华夏地块。在华夏地块西北缘北武夷冷水坑至永平一带产生相应的花岗岩浆侵入作用及与之有关的成矿作用。如冷水坑矿床与成矿相关的花岗斑岩形成年代为 162.0±2 Ma (SHRIMP 锆石 U-Pb),矿化年龄为 162.8±1.6 Ma (绢云母的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar)<sup>[38]</sup>;永平铜矿含矿花岗斑岩锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 160±2.3 Ma (SIMS)<sup>[39]</sup>;而位于华夏地块腹地的闽西南早侏罗世火山盆地中的花岗岩浆侵入作用也导致形成永定山口钨矿(Re-Os 等时线年龄为 165.3±3.5 Ma)<sup>[40]</sup>(表 4)。

进入晚侏罗世中晚期(150±5 Ma),古太平洋板块俯冲作用的影响范围逐步扩大,标志着特提斯向环太平洋构造域的转换达到高峰(表 4),大规模的岩浆及成矿作用不仅发生在钦杭结合带两侧<sup>[38,40-50]</sup>,在浙闽粤沿海一带、武夷山隆起带、闽西南拗陷周缘、长江中下游九瑞及铜陵矿集区同样发生。区域成岩成矿年代学研究表明,不论是位于九岭-鄱公山隆起带以北的长江中下游铜陵、九瑞矿集区,还是位于其南的钦杭结合带及东南沿海一带都存在大规模的的岩浆作用及成矿作用。九岭-鄱公山隆起带在这一阶段与华南其他地区一样具有较强烈的挤

压背景,应该存在时代相同或相近的岩浆作用与成矿作用,因此 Re-Os 同位素年龄为  $150.4 \pm 1.4$  Ma<sup>[62]</sup> 的石门寺钨矿床可以作为这一特殊构造背景下的典型矿床,矿床的形成与中生代以来侵入于九岭岩体的中细粒黑云母花岗岩关系密切。而九岭复式岩体系统的同位素年代学研究结果指示,该复式岩体中细粒-细粒黑云母花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb

年龄为  $151.4 \pm 2.4$  Ma<sup>[63]</sup>,本次研究与热液隐爆角砾岩关系密切的花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $154.36 \pm 0.83$  Ma,与该矿床成矿 Re-Os 同位素年龄  $150.4 \pm 1.4$  Ma<sup>[62]</sup> 吻合。因此,大湖塘钨矿床的形成时代代表了华南地区一期重要的成矿作用,其与南岭钨矿带成矿时代<sup>[51-61]</sup>较一致,也为在九岭-鄱公山隆起带寻找同时代的矿床提供了重要线索。

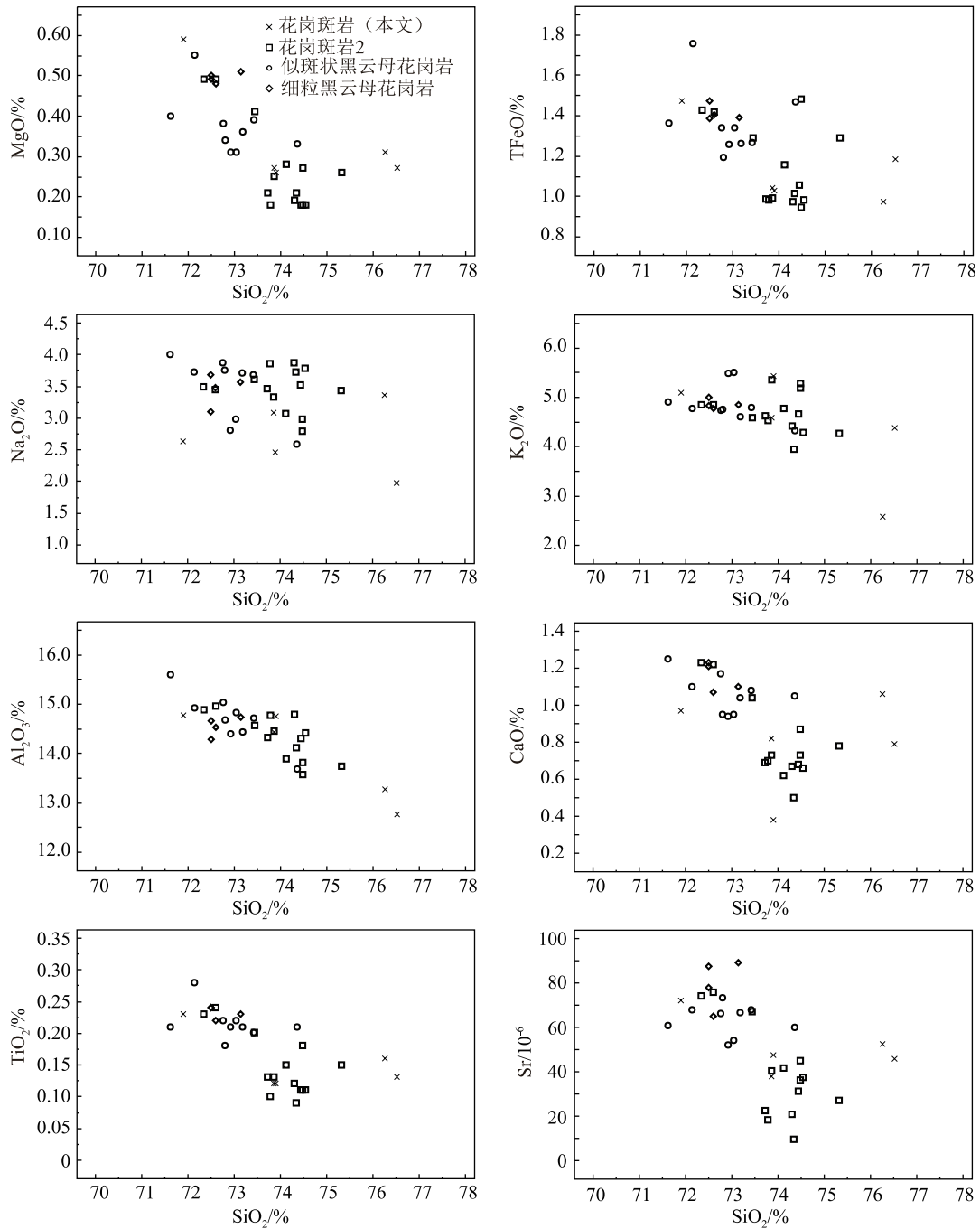


图 14 石门寺钨矿花岗岩类主量和微量元素双变量图解

Fig. 14 Bivariate diagrams of major and trace elements of granitoids from the Shimensi tungsten deposit

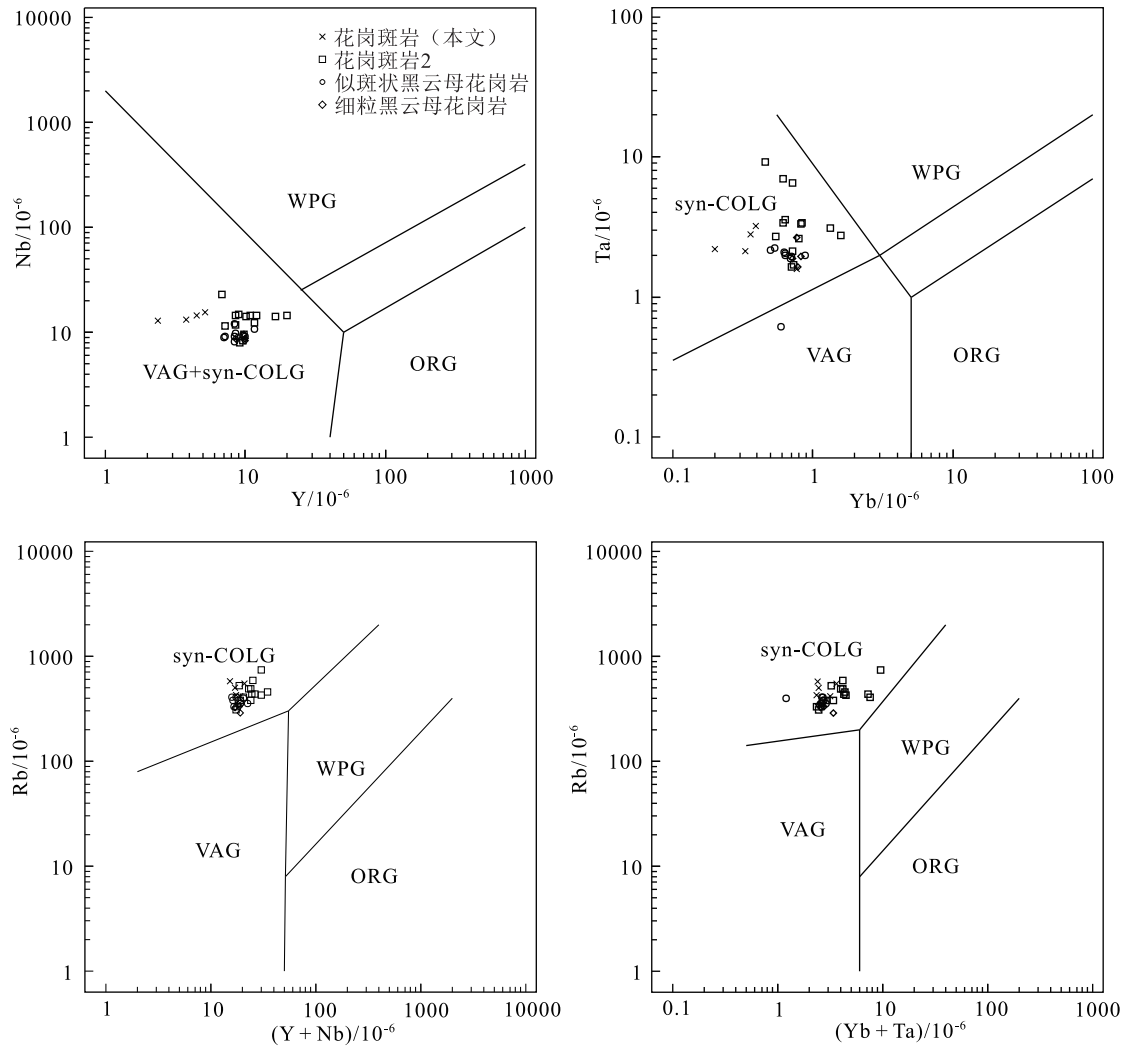


图 15 石门寺钨矿花岗岩类形成时的构造环境判别图<sup>[37]</sup>

Fig. 15 Discriminant diagram of the tectonic setting during the formation of granitoids in the Shimensi tungsten deposit  
syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩

综上所述,赣北石门寺钨矿床所在的九岭-鄱公山隆起带与相邻区带的中生代岩浆与成矿作用时代对比研究表明,九岭-鄱公山隆起带自中侏罗世以来经历了太平洋板块俯冲导致的持续挤压及其后期岩石圈伸展减薄过程,形成了以石门寺隐爆角砾岩型矿床、香炉山钨矿等为代表的 2 期不同成岩成矿构造背景下的重要成矿作用。

## 6 结论

(1) 石门寺花岗斑岩为高硅、富碱、强过铝质的分异 S 型花岗岩,岩石系列上主要属于高钾钙碱性系列。

(2) 石门寺花岗斑岩是古老地壳部分熔融的产物,源区为富粘土的砂泥质沉积物。岩浆在演化过程中经历了镁铁质矿物、钛铁矿、斜长石的分离结晶,磷灰石没有发生显著的分离结晶作用。

(3) 石门寺矿段与热液隐爆角砾岩关系密切的花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $154.36 \pm 0.83$  Ma,与隐爆角砾岩矿体成矿时代一致,表明大湖塘钨矿区还存在 150 Ma 左右的一期成矿活动,可能对应了华南中生代大规模成矿作用的一期重要成矿作用或其中一次重要的岩浆与成矿事件。

表4 华南地区部分矿床和岩体同位素年龄

Table 4 Age compilation of some igneous plutons and related ore deposits in South China

| 区域  | 矿床    | 方法                              | 年龄/Ma       | 参考文献    | 相关岩体         | 方法       | 年龄/Ma       | 参考文献    |
|-----|-------|---------------------------------|-------------|---------|--------------|----------|-------------|---------|
| 北武夷 | 冷水坑   | $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | 162.8±1.6   | [38]    | 花岗斑岩         | 锆石 U-Pb  | 162.0±2     | [38]    |
| 闽西南 | 永定口   | 辉钼矿 Re-Os                       | 165.3±3.5   | [40]    |              |          |             |         |
| 北武夷 | 金溪熊家山 | 辉钼矿 Re-Os                       | 152         | [41]    |              |          |             |         |
| 粤东  | 厚婆坳锡  | Rb-Sr                           | 149.99±7.04 | [42]    |              |          |             |         |
|     |       | $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ | 145.8±1.43  |         |              |          |             |         |
| 浙江  | 治岭头   |                                 | 135~145     | [43-46] |              |          |             |         |
| 武夷山 | 行洛坑   | 辉钼矿 Re-Os                       | 156.3±4.8   | [47]    |              |          |             |         |
|     |       | Rb-Sr                           | 147.5±2.9   |         |              |          |             |         |
| 铜陵  |       |                                 |             |         | 高钾钙碱性花岗岩     | 锆石 U-Pb  | 151~142     | [48-50] |
| 湘南  | 黄沙坪   | 辉钼矿 Re-Os                       | 154.8±1.9   | [51]    | 黄沙坪花岗斑岩      | 锆石 U-Pb  | 161.6±1.1   | [51]    |
| 湘南  | 锡田    | 辉钼矿 Re-Os                       | 150±2.7     | [52]    | 锡田细粒含斑黑云母花岗岩 | 全岩 Rb-Sr | 151.0±24    | [52]    |
| 湘南  | 大坳    | 辉钼矿 Re-Os                       | 151.4±2.4   | [53]    | 金鸡岭花岗岩       | 锆石 U-Pb  | 156.0±2     | [53]    |
| 湘东南 | 邓阜仙   | 辉钼矿 Re-Os                       | 150.5±5.2   | [54]    | 邓阜仙二云母花岗岩    | 锆石 U-Pb  | 154.4±2.2   | [54]    |
| 赣南  | 摇篮寨   | 辉钼矿 Re-Os                       | 155.8±2.8   | [55]    | 摇篮寨花岗岩体      | 锆石 U-Pb  | 156.1±1.7   | [55]    |
| 赣南  | 木梓园   | 辉钼矿 Re-Os                       | 151.1±8.5   | [56]    | 木梓园花岗岩体      | 锆石 U-Pb  | 153.3±1.9   | [56]    |
| 赣南  | 漂塘    | 白云母 Ar-Ar                       | 152±1.9     | [56]    | 漂塘黑云母花岗岩     | 锆石 U-Pb  | 161.8±1.0   | [56]    |
| 赣南  | 浒坑    | 辉钼矿 Re-Os                       | 150.2±2.2   | [57]    | 浒坑白云母花岗岩     | 锆石 U-Pb  | 151.6±2.6   | [58]    |
| 赣南  | 西华山   | 白云母 K-Ar                        | 149±4.9     | [59]    | 黑云母花岗岩       |          | 150.6±6.7   | [59]    |
| 赣南  | 淘锡坑   | 辉钼矿 Re-Os                       | 154         | [60]    |              |          |             |         |
| 赣南  | 洪水寨   | 辉钼矿 Re-Os                       | 156.3±1.3   | [61]    | 九龙脑岩体        | 锆石 U-Pb  | 155.8±1.2   | [61]    |
| 赣北  | 大湖塘   | 辉钼矿 Re-Os                       | 143.7±1.2   | [5]     | 似斑状白云母花岗岩    | 锆石 U-Pb  | 144.2±1.3   | [6]     |
|     |       | 辉钼矿 Re-Os                       | 140.9±3.6   |         |              |          |             |         |
|     | 石门寺   | 辉钼矿 Re-Os                       | 150.4±1.4Ma | [62]    | 花岗斑岩         | 锆石 U-Pb  | 154.36±0.83 | 本文      |

**致谢:**江西省地质矿产勘查开发局九一六大队项新葵教授级高工、刘永红高级工程师对石门寺矿区的野外工作给予了多方面的帮助,吉林大学孙景贵教授提出了宝贵意见,天津地质调查中心实验室韩伟老师对样品的测试给予了大力支持,审稿专家对文章结构和内容提出了诸多重要建议,在此一并表示感谢。

## 参考文献

- [1] 杨明桂,王昆.江西省地质构造格架及地壳演化[J].江西地质,1994,8(4):239-251.
- [2] 张家菁,梅玉萍,王登红,等.赣北香炉山白钨矿床的同位素年代学研究及其地质意义[J].地质学报,2008,82(7):927-931.
- [3] 满发胜,王小松.阳储岭斑岩型钨钼矿床同位素地质年代学研究[J].矿产与地质,1998,2(1):61-67.
- [4] 陈柏林,董法先,王平,等.江西大背坞金矿床成因探讨[J].江西地质,1997,11(3):7-15.
- [5] 丰成友,张德全,项新葵,等.赣西北大湖塘钨矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其意见[J].岩石学报,2012,28(12):3858-3868.
- [6] 黄兰椿,蒋少涌.江西大湖塘钨矿床似斑状白云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因研究[J].岩石学报,2012,28(12):3887-3900.
- [7] 张志辉.江西武宁县大湖塘钨多金属矿田成矿作用研究[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2014.
- [8] 项新葵,陈茂松,詹国年,等.赣北石门寺矿区钨多金属矿床成矿地质条件[J].地质找矿论丛,2012,27(2):143-155.
- [9] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J].Chemical Geology,2008,257:34-43.
- [10] 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,2010,55:1535-1546.
- [11] Ludwig K R. Isoplot/Ex version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication,2003,4:1-70.



- [12] 耿建珍,李怀坤,张健,等. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. 地质通报, 2011, 30(10): 1508-1513.
- [13] Morel M L A, Nebel O, Nebel J Y J, et al. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2008, 255(1/2): 231-235.
- [14] Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, et al. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 133-153
- [15] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [16] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1976, 58(1): 63-81.
- [17] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 223-253.
- [18] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [19] 吴福元,李献华,郑永飞,等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185-220.
- [20] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. Early-middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 4205-4225.
- [21] Vervoort J D, Pachelt P J, Gehrels G E, et al. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes [J]. *Nature*, 1996, 379: 624-627.
- [22] 吴福元,李献华,杨进辉,等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [23] 陈骏,王汝成,朱金初,等. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44: 111.
- [24] 赵葵东,蒋少涌,朱金初,等. 桂东北花山-姑婆山侵入杂岩体和暗色包体的锆石微区 Hf 同位素组成及其成岩指示意义[J]. *科学通报*, 2009, 54: 3716-3725.
- [25] 朱金初,陈骏,王汝成,等. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带[J]. *高校地质学报*, 2008, 14: 474-484.
- [26] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407-419.
- [27] 梁鹤. 华南白垩纪岩背斑岩锡矿成矿斑岩的成因及其成矿意义[D]. 中国科学院大学硕士学位论文, 2017.
- [28] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in variety of crustal magma types[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295-304.
- [29] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. *Pac. Geol.*, 1974, 8: 173-174.
- [30] 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.
- [31] Chappell B W. Aluminium saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46: 535-551.
- [32] Mao Z H, Liu J J, Mao J W, et al. Geochronology and geochemistry of granitoids related to the giant Dahutang tungsten deposit, middle Yangtze River region, China: Implications for petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization[J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(2): 816-836.
- [33] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 1998, 45: 29-44.
- [34] 张宏飞,高山. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [35] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [36] 董树文,张岳桥,陈宣华,等. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征[J]. *地球学报*, 2008, 29(3): 306-317.
- [37] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [38] 左力艳,侯增谦,孟祥金,等. 冷水坑斑岩型银铅锌矿床含矿岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J]. *中国地质*, 2010, 37(5): 1450-1456.
- [39] 丁昕,蒋少涌,倪培,等. 江西武山和永平铜矿含矿花岗岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 383-389.
- [40] 罗锦昌,陈郑辉,屈文俊. 福建省永定山口钨矿辉钨矿铷-钐同位素定年及其地质特征[J]. *岩矿测试*, 2009, 28(3): 254-258.
- [41] 孟祥金,侯增谦,董光裕,等. 江西金溪熊家山钨矿床特征及其 Re-Os 年龄[J]. *地质学报*, 2007, 81(7): 946-950.
- [42] 徐晓春,岳书仓,潘成荣. 中国东南沿海金属矿床时空分布的控制因素[J]. *安徽地质*, 1999, 9(1): 42-44.
- [43] 李长江,徐步台,胡永和,等. 浙东南金银铅锌区域成矿作用的若干问题探讨[J]. *地质与勘探*, 1990, 26(6): 1-8.
- [44] 陈好寿,徐步台. 浙江主要金银矿床的成矿时代[J]. *科学通报*, 1996, 41(12): 1107-1110.
- [45] 陈好寿,徐步台. 浙江主要金、银矿同位素示踪与找矿评价研究[J]. *地质学报*, 1997, 71(1): 54-64.
- [46] 梅建明. 浙江遂昌冶岭头金矿床的石英标型[J]. *现代地质*, 2001, 15(2): 222-225.
- [47] 张家菁,陈郑辉,王登红,等. 福建行洛坑大型钨矿的地质特征、成矿时代及其找矿意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(1): 92-97.
- [48] 王彦斌,刘敦一,曾普胜,等. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的年代-朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年[J]. *地球学报*, 2004, 25(4): 423-427.
- [49] Wu G G, Zhang D, Di Y J, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Intrusives in the Tongling Metallogenic Cluster and Its Dynamic Setting[J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 51(7): 911-928.
- [50] 张达,吴淦国,狄永军,等. 铜陵凤凰山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约[J]. *地球科学*, 2006, (6): 823-829.
- [51] 姚军明,华仁民,屈文俊,等. 湘南黄沙坪铅锌钨钼多金属矿床辉钨矿的 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(4): 471-477.

[52] 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.

[53] 付建明,李华芹,屈文俊,等.湘南九嶷山大坳钨锡矿的 Re-Os 同位素定年研究[J].中国地质,2007,34(4): 651-656.

[54] 蔡杨,马东升,陆建军,等.湖南邓阜仙钨矿辉钼矿铼-钨同位素定年及硫同位素地球化学研究[J].岩石学报,2012,28(12): 3798-3808.

[55] 丰成友,丰耀东,徐建祥,等.赣南张天堂地区岩体型钨矿晚侏罗世成岩成矿的同位素年代学证据[J].中国地质,2007,24(4): 542-650.

[56] 张文兰,华仁民,王汝成,等.赣南漂塘钨矿花岗岩成岩年龄与成矿年龄的精确测定[J].地质学报,2009,83(5): 659-670.

[57] 刘珺,叶会寿,谢桂青,等.江西省武功山地区浒坑钨矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J].地质学报,2008,82(11): 1572-1579.

[58] 刘珺,毛景文,叶会寿,等.江西省武功山地区浒坑花岗岩的锆石 U-Pb 定年及元素地球化学特征[J].岩石学报,2008,24(8): 1813-1822.

[59] 穆治国,黄福生,卢德揆.华南某些含钨花岗岩的 K-Ar 年龄[J].岩石矿物学杂志,1988,7(2): 109-118.

[60] 陈郑辉,王登红,屈文俊,等.赣南崇义地区淘锡坑钨矿的地质特征与成矿时代[J].地质通报,2006,25(4): 496-501.

[61] 丰成友,黄凡,曾载淋,等.赣南九龙脑岩体及洪水寨云英岩型钨矿年代学[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(1): 111-121.

[62] 项新葵,王朋,孙德明,等.赣北石门寺钨多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J].地质通报,2013,32(11): 1824-1831.

[63] 毛景文,谢桂青,郭春丽,等.南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用:成矿时限及地球动力学背景[J].岩石学报,2007,23(10): 2329-2338.

《地质通报》第 39 卷第 9 期要目预告

内蒙古北山造山带时空结构与古亚洲洋演化 ..... 辛后田等

北山造山带百合山 SSZ 型蛇绿岩的地球化学特征、年代学研究及其大地构造意义 ..... 牛文超等

北山造山带百合山地区 350Ma 石英闪长岩的岩石成因及地质意义 ..... 段连峰等

内蒙古北山造山带洋-陆转换进程的新思考:来自大红山南泥盆纪弧花岗岩的证据 ..... 闫 涛等

内蒙古北山北带地区晚古生代地层时空格架的建立 ..... 卫彦升等

北山造山带额勒根蛇绿岩的发现:红石山-百合山蛇绿岩带东延的证据 ..... 张正平等

内蒙古北山地区小红山 TTG 岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学和岩石成因及其对百合山构造带性质的制约 ..... 杨五宝等

内蒙北山造山带双峰式岩浆岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义 ..... 张国震等

北山造山带小红山地区三叠纪花岗岩的岩石成因:来自锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的约束 ..... 李 敏等

内蒙古北山地区志留系小红山岩组的建立及其时代和构造环境的探讨 ..... 刘 畅等

内蒙古北山地区白云山蛇绿混杂岩带的厘定及其构造意义 ..... 田 健等

内蒙古北山中带石板井地区 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 ..... 陈 超等

内蒙北山老洞沟金-多金属矿床闪长玢岩年代学、地球化学及其地质意义 ..... 张国震等

洗肠井结合带南侧三个井组玄武岩岩石学、地球化学和同位素年代学研究及其构造意义 ..... 程先钰等

阿拉善地块北缘雅布赖地区埃达克岩锆石 U-Pb 年龄、岩石成因和构造背景 ..... 王凯垒等

内蒙古梅劳特乌拉蛇绿岩中早二叠世埃达克岩与古亚洲洋东段洋内俯冲 ..... 董培培等