

湖南彭公庙岩体地球化学特征、时代及钨锡成矿潜力

于玉帅^{1,2,3}, 周云^{1,2}, 牛志军¹, 安志辉¹, 刘阿睢^{1,2}

(1. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质调查局 花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205; 3. 东华理工大学, 江西 南昌 330013)

摘要: 南岭成矿带加里东期大花岗岩基的钨锡成矿潜力是近年来地质学家关注的热点。本文以湖南省彭公庙岩体为研究对象, 精确厘定了产于彭公庙岩体内部的石牛仙钨矿的形成时代, 同时厘定了彭公庙岩体中粗粒黑云母花岗岩闪长岩形成时代, 分析了其地球化学特征, 并与典型的成钨锡矿花岗岩进行对比, 以此评估其钨锡成矿潜力。黑云母花岗岩闪长岩 LA-ICP-MS 锆石和独居石 U-Pb 年龄分别为 436.1 ± 2.5 Ma (MSWD = 1.9, $n = 19$) 和 436.8 ± 2.8 Ma (MSWD = 2.7, $n = 20$), 指示其侵位于早志留世。石牛仙钨矿床白云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 同位素坪年龄为 150.2 ± 1.2 Ma (MSWD = 0.42), 成矿时代与彭公庙成岩时代明显不同。彭公庙岩体分异程度不高, 成矿元素 W 和 Sn 含量低, 主要来源于上地壳贫粘土的变质砂岩, 与南岭典型的成钨、成锡花岗岩分异程度高, 成矿元素含量高、来源于富粘土的上地壳物质部分熔融区别明显, 说明其成矿潜力有限。最后, 在综合前人研究成果的基础之上, 指出应综合地球物理、地球化学、构造蚀变信息等资料, 重点评价彭公庙岩体内部及周缘晚期晚侏罗世花岗岩岩脉或岩株成矿潜力。

关键词: 钨锡矿; 地球化学; 成岩-成矿时代; 成矿潜力; 彭公庙岩体

中图分类号: P588.12¹; P618

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)04-0695-19

Geochemical characteristics, age and W-Sn metallogenic potential of Penggongmiao pluton, Hunan Province

YU Yu-shuai^{1,2,3}, ZHOU Yun^{1,2}, NIU Zhi-jun¹, AN Zhi-hui¹ and LIU A-sui^{1,2}

(1. Wuhan Center of Geology survey, CGS, Wuhan 430205, China; 2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, CGS, Wuhan 430205, China; 3. East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In recent years, geologists have paid more and more attention to the potential of tungsten and tin metallogenic of Caledonian batholith in Nanling metallogenic belt. In order to evaluate the tungsten and tin metallogenic potential of the Penggongmiao pluton in Hunan Province, mineralization age of the Shiniuxian tungsten deposit, diagenetic age and geochemical characteristics of biotite granodiorite from the Penggongmiao pluton are analyzed in this paper. The LA-ICP-MS zircon and monazite U-Pb ages of the coarse-grained biotite granodiorite of the Penggongmiao pluton are 436.1 ± 2.5 Ma (MSWD = 1.9, $n = 19$) and 436.8 ± 2.8 Ma (MSWD = 2.7, $n = 20$), respectively, while the muscovite $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ isotopic dating of the Shiniuxian tungsten deposit has a plateau age of 150.2 ± 1.2 Ma (MSWD = 0.42). The results show that the diagenesis of rocks occurred in Early Silurian, while the mineralization

收稿日期: 2021-12-20; 接受日期: 2022-03-21; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0702700); 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心开放基金项目(PMGR202013); 中国地质调查局二级项目(DD20190811)

作者简介: 于玉帅(1985-), 男, 汉族, 高级工程师, 主要从事地质调查与矿床学研究, E-mail: shuaiyuy1103@163.com。

of tungsten is dated to late Jurassic, and there are the products of different magmatic activities. Compared to the typical tungsten-tin granite in Nanling metallogenic belt, the Penggongmiao granite has low degree of differentiation and low content of ore-forming elements. In addition, the Penggongmiao granites are mainly derived from the poor-clay metasandstone of the upper crust, while the typical tungsten-tin granites are usually derived from the rich-clay of the upper crust material. The above evidences indicate that the mineralization potential of the Caledonian Penggongmiao pluton is limited. Finally, on the basis of comprehensive previous research results, the authors point out that the metallogenic potential of the Late Jurassic granite dikes or stocks in and around the Penggongmiao batholith should be evaluated by integrating geophysical, geochemical, structural and alteration information.

Key words: tungsten tin deposit; geochemistry; diagenetic and mineralization age; metallogenic potential; Penggongmiao pluton

Fund support: National Key Research and Development Program of China (2018YFA0702700); Open Fund of the Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey (PMGR202013); Project of China Geological Survey (DD20190811)

华南不同期次花岗岩的成矿专属性研究表明, 华南早古生代花岗岩可能不具有钨、锡、稀有金属矿床成矿潜力(徐克勤等, 1963)。彭公庙岩体位于湖南省东南部、南岭成矿带中部(图1), 出露面积约750 km², 是典型的早古生代花岗岩大岩基。据不完全统计, 彭公庙岩体内部及周缘发育5处钨(锡)矿床(点)。其中, 杨梅坑和圳口钨矿床产于岩体南缘震旦系下统正园岭组浅变质碎屑岩中; 近年来发现的张家垄钨矿床达到大型规模, 两个矿段分别产于彭公庙岩体中粗粒黑云母花岗闪长岩和正园岭组浅变质碎屑岩中(郭爱民, 2011; 郭爱民等, 2017); 石牛仙钨矿体赋矿围岩为中细粒二云母二长花岗岩; 两江口钨锡矿点矿(化)体赋存于彭公庙岩体北部花岗闪长斑岩体中。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年表明张家垄钨矿床中粗粒似斑状黑云母花岗岩形成于436.2±3.1 Ma, 坑道内的含白钨矿细晶岩脉形成于426.5±2.5 Ma(张文兰等, 2011)。结合矿体主要产于黑云母花岗闪长岩和围岩地层中的地质事实, 研究者认为彭公庙岩基南部钨矿床为早古生代成矿, 且与早古生代彭公庙大花岗岩基有密切的成因关系(乔玉生等, 2011; 李时谦等, 2013)。在南岭成矿带西侧, 早古生代钨锡矿找矿也取得较大的找矿突破, 例如越城岭-苗儿山地区的平滩钨矿床、落家冲钨锡多金属矿床和独石岭钨铜多金属矿床(陈文迪等, 2016; 杜云等, 2017; Chen *et al.*, 2019)。因此, 部分学者开始重新审视早古生代岩浆活动与钨锡成矿的关系(华仁民等, 2013; 陈骏等, 2014; 盛丹等, 2020)。那么, 这是否意味着应该在早古生代大花岗岩基中寻找钨锡矿床呢? 本文以彭公庙岩体

为切入点, 对其进行了详细的年代学和地球化学分析, 并与典型的成矿花岗岩对比, 以此评估与早古生代岩浆活动有关的钨锡成矿潜力, 同时指出彭公庙地区下一步找矿方向。

1 地质背景

彭公庙岩体位于南岭成矿带中部, 诸广山-万洋山复式岩体西侧(夏金龙等, 2021), 出露面积约700 km²。区内地层齐全, 除志留系外, 从南华系到第四系均有出露, 尤以晚古生代地层最为发育。南华系-寒武系为复理石、类复理石建造, 主要岩性为变质陆源碎屑岩夹少量硅质岩、碳酸盐岩, 变质程度为低绿片岩相; 泥盆系-中三叠统为浅海相碳酸盐岩夹陆源碎屑岩; 上三叠统-古近系为陆相含煤建造和陆相红盆沉积; 第四系主要为河流冲积层和山麓前缘残坡积层。彭公庙岩体侵入于震旦系-奥陶系浅变质砂岩中, 与上覆泥盆系跳马涧组不整合接触, 结合 K-Ar 同位素测年结果(385 Ma, 李璞等, 1963), 确定其是一个典型的早古生代花岗岩大岩基。

彭公庙岩体可详细划分为汤市、马脑下、兰溪、香树垄和恩垄5个单元(柏道远等, 2006)。汤市单元和恩垄单元主要岩性分别为黑云母花岗闪长岩和二云母二长花岗岩, 其余单元主要由粒度不等的黑云母二长花岗岩组成。彭公庙岩体主体为黑云母二长花岗岩, 黑云母花岗闪长岩和二云母二长花岗岩分布在岩体南(东)和北(西), 出露面积约500、100和100 km²(图2), 不同岩性之间主要呈突变接触。高

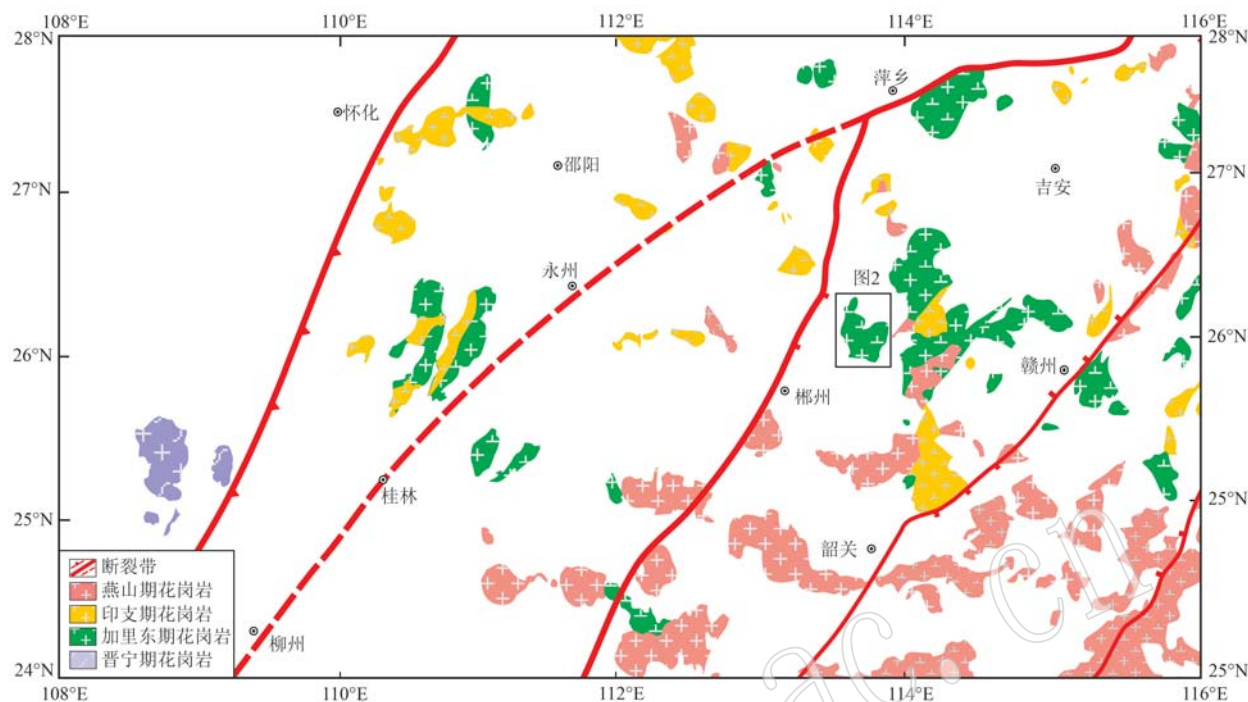


图1 南岭地区构造-岩浆简图(据徐先兵等, 2021; Yu *et al.*, 2022)

Fig. 1 Structure-magmatic diagram of Nanling area (modified after Xu Xianbing *et al.*, 2021; Yu *et al.*, 2022)

精度年代学研究表明, 黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩的成岩时代分别为 $441.3 \pm 2.4 \sim 435.3 \pm 2.7$ Ma (张文兰等, 2011; Yuan *et al.*, 2018a) 和 $436 \pm 4 \sim 433 \pm 3$ Ma, 它们在误差范围内一致 (Xu and Xu, 2015; 徐文景, 2017)。黑云母花岗闪长岩具有中粗粒花岗结构、块状构造, 主要由斜长石(40%)、钾长石(20%)、石英(30%)、角闪石(5%)、黑云母(3%~5%)组成。角闪石呈浅黄绿色, 自形-半自形, 发育典型的闪石式解理; 黑云母呈浅黄色, 多色性明显, 自形-半自形片状或集合体出现, 发育一组完全解理(图 3a、3b); 石英多呈他形粒状; 长石为半自形-他形。

石牛仙钨矿点位于彭公庙岩体南端与地层接触部位, 矿体赋存于中细粒二云母二长花岗岩中(图 4), 矿化类型分为石英脉型(地表、老窿)和云英岩化型(钻孔)两种。地表发现含钨石英脉 35 条, 脉宽 5~50 cm, 走向延伸约 5~10 m, 倾向主要为北西, 次为南东, 倾角 $41^\circ \sim 87^\circ$ 。在石英脉密集区钻孔揭露到 3~5 层含钨云英岩化带, 真厚度 0.75~1.07 m, 平均品位 0.21%~0.54%, 初步估算 WO_3

(334?) 为 4 116.24 吨(湖南省地质调查院, 2015)^①。主要金属矿物有白钨矿、黄铁矿、毒砂, 非金属矿物主要为石英、斜长石、绢云母、白云母、钾长石等, 白钨矿多呈浸染状、团块状和细脉状等(图 3c、3d)。

2 分析方法

采集彭公庙岩体南部张家垄矿区新鲜中粒黑云母花岗闪长岩和石牛仙矿区含白钨矿石英脉样品送至河北省廊坊市拓轩岩矿检测服务有限公司, 花岗闪长岩去皮后粉碎 200 目进行锆石和独居石挑选, 含白钨矿石英脉样品进行白云母的分选。

2.1 全岩地球化学测试方法

薄片进行详细的显微观察, 粉末送至自然资源部中南矿产资源监督检测中心进行全岩主量元素、微量元素和稀土元素分析。其中, 主量元素采用熔片-X 荧光光谱法测定, 仪器为波长色散 X 射线荧光光谱仪, 分析精度 0.1%~1.0%。微量元素和稀土元素采用混合酸溶矿制样, 由 Thermo X series 2 型电感耦合等离子质谱仪测定, 分析精度 1.0%。

① 湖南省地质调查院. 2015. 湖南茶陵-宁岗地区矿产远景调查成果报告.

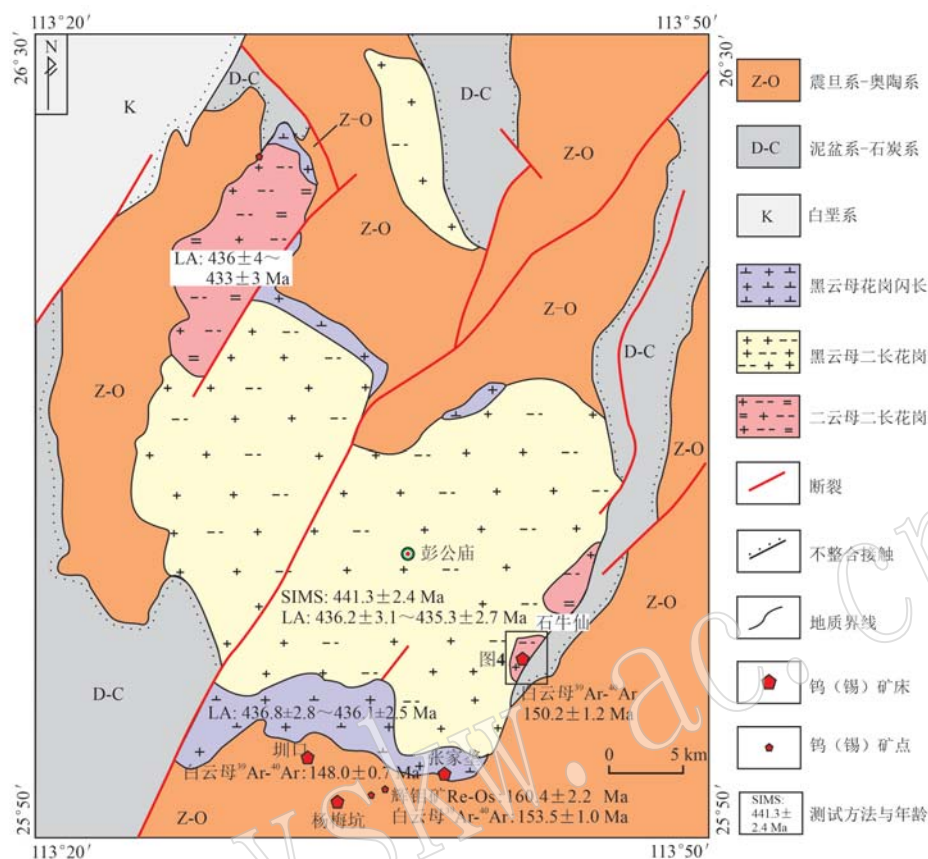


图2 湖南彭公庙岩体地质简图[据柏道远等(2006)、李时谦等(2013)修改]

Fig. 2 Geologic sketch map of the Penggongmiao pluton, Hunan Province (modified after Bai Daoyuan *et al.*, 2006; Li Shiqian *et al.*, 2013)

黑云母二长花岗岩年龄引自 Yuan 等(2018a)、张文兰等(2011); 二云母二长花岗岩年龄引自 Xu 和 Xu(2015)、徐文景(2017); 黑云母花岗闪长岩年龄为本文实测; 张家垅钨辉钼矿 Re-Os 年龄和白云母 Ar-Ar 年龄引自 Yuan 等(2018a); 圳口钨矿白云母 Ar-Ar 年龄引自严宸等(2019); 石牛仙钨矿白云母 Ar-Ar 年龄为本文实测

The age of biotite monzogranite is quoted from Yuan *et al.*, 2018a; Zhang Wenlan *et al.*, 2011; The age of the two-mica monzogranite is quoted from Xu and Xu, 2015; Xu Wenjing, 2017; The age of biotite granodiorite age is measured in this paper; The Re-Os age of molybdenite and Ar-Ar age of muscovite of Zhangjialong tungsten deposit are from Yuan *et al.*, 2018a; The Ar-Ar age of muscovite of Zhenkou tungsten deposit is quoted from Yan Chen *et al.*, 2019; The Ar-Ar age of Muscovite in Shiniuxian tungsten deposit is measured in this paper

2.2 全岩 Sr-Nd 同位素分析

全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析都在自然资源部中南矿产资源监督检测中心使用热电离质谱仪 TRITON 完成。其中,在 Rb-Sr 同位素分析过程中,用 NBS987、NBS607 和 GBW04411 标准物质分别对仪器和分析流程进行监控,在 Sm、Nd 同位素分析过程中,用 NBS987、NBS607 和 GBW04411 标准物质分别对仪器和分析流程进行监控,同位素含量及比值采用同位素稀释法公式计算得到。分析样品制备的全过程均在超净化实验室内完成,全流程 Rb、Sr 空白分别为 3×10^{-10} 和 7×10^{-10} 。

2.3 锆石和独居石 LA-ICP-MS 微区原位 U-Pb 定年和微量元素分析

锆石和独居石原位 U-Pb 同位素定年在武汉上

谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 分析完成,测试过程中激光束斑直径分别为 32 μm 和 16 μm ,频率分别为 5 Hz 和 2 Hz。数据处理采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010)完成,其中锆石 U-Pb 同位素定年处理使用标准锆石 91500 和玻璃标样 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正,独居石 U-Pb 同位素定年使用标准独居石 44069 和玻璃标样 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。使用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003)软件进行 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算。

2.4 白云母 Ar-Ar 定年方法

将清洗后的白云母封进石英瓶中,送至中国核动力研究设计院 HFETR 反应堆中进行中子辐照 50

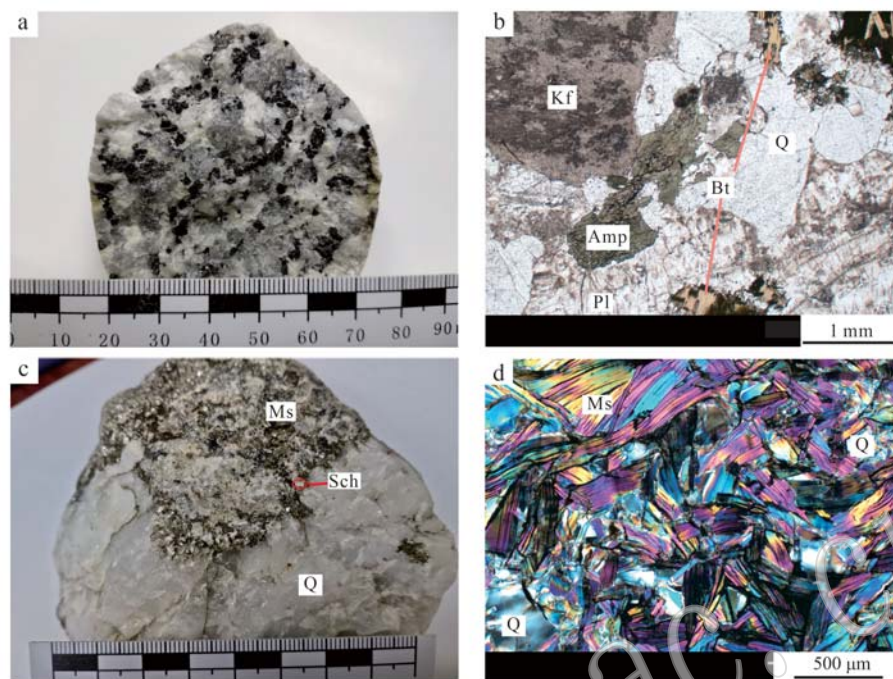


图3 黑云母花岗闪长岩手标本(a)、镜下照片(b, 单偏光)和含钨石英脉手标本(c)、镜下照片(d, 正交偏光)

Fig. 3 Hand specimens(a) and photomicrograph (b, plane light) of biotite granodiorite, hand specimens(c) and photomicrograph (d, crossed nicols) of tungsten-bearing quartz vein

Amp—角闪石; Bt—黑云母; Ms—白云母; Q—石英; Sch—白钨矿

Amp—amphibole; Bt—biotite; Ms—muscovite; Q—quartz; Sch—Scheelite

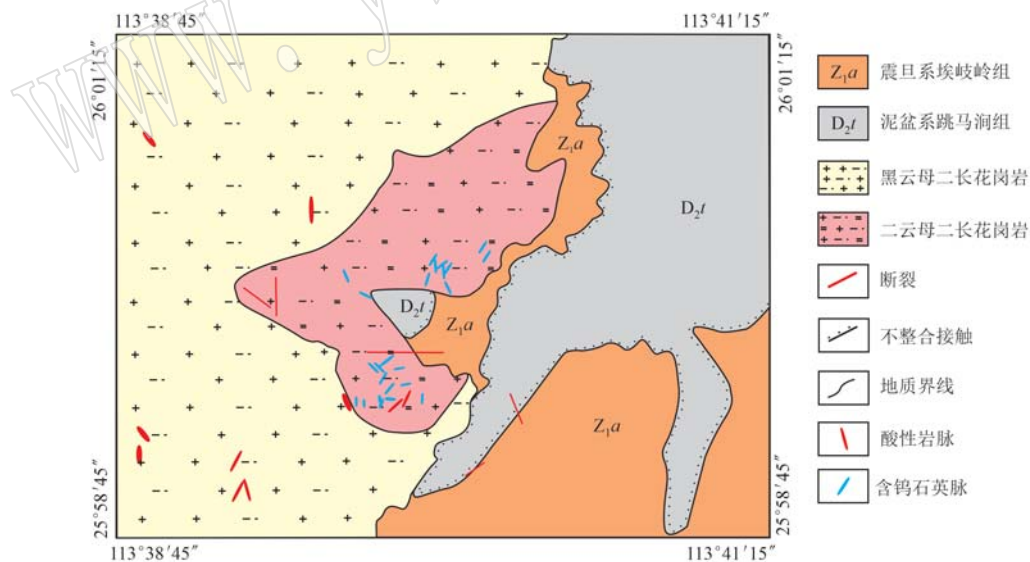


图4 石牛仙钨矿床地质简图(湖南省地质调查院, 2015)^①

Fig. 4 Geologic sketch map of the Shiniuxian tungsten deposit(Geological Survey of Hunan Province, 2015)^①

小时, 冷却至安全放射剂量范围后进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温测年。分析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成, 采用双真空钽片加热炉阶段

升温法(温度范围为 $800\sim 1\,400^{\circ}\text{C}$)释放样品中气体, 使用稀有气体质谱仪 Argus VI 进行 Ar 同位素组成的测试。通过测试大气中的氩同位素组成获得

① 湖南省地质调查院. 2015. 湖南茶陵-宁岗地区矿产远景调查成果报告.

质谱的质量歧视校正因子, ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/\text{a}$ (Steiger and Jager, 1977)。使用 ArArCALC 2.40 软件进行数据处理 (Koppers, 2002), 坪年龄误差为 2σ 。

3 分析结果

3.1 锆石和独居石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年

彭公庙中粗粒黑云母花岗闪长岩 (ZJL19-4) 中锆石晶体呈自形长柱状 (图 5a), 锆石颗粒粒径约 $100 \sim 200 \mu\text{m}$, 长宽比约为 $2:1 \sim 3:1$ 。少数锆石颗粒核部可见浑圆状的继承锆石, 边部发育密集的震荡

环带, 部分见有黑色的增生边 (图 5a)。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果 (表 1) 显示, Th 含量为 $86 \times 10^{-6} \sim 350 \times 10^{-6}$, U 含量为 $197 \times 10^{-6} \sim 953 \times 10^{-6}$, 两者呈正相关关系, Th/U 值为 $0.25 \sim 0.66$, 指示锆石为典型岩浆成因。20 个分析数据得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $455.9 \pm 3.8 \sim 430.5 \pm 3.4 \text{ Ma}$, 除去一个较老的离群年龄外, 其余 19 颗锆石加权平均为 $436.1 \pm 2.5 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.9, $n = 19$), 在 U-Pb 年龄谐和图上样品分布在谐和线或其附近 (图 6a, 6b), 显示较好的谐和性, 说明锆石形成以后 U、Pb 同位素体系是封闭的。 $436.1 \pm 2.5 \text{ Ma}$ 代表黑云母花岗闪长岩结晶年龄。

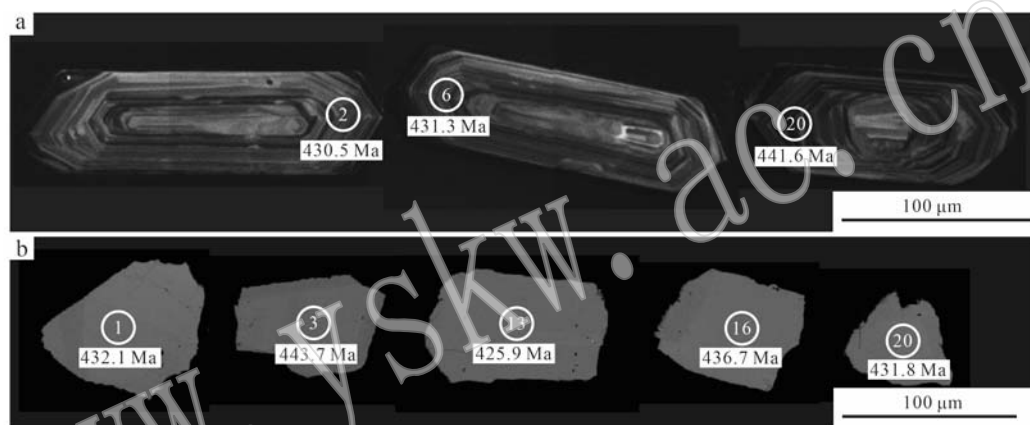


图 5 彭公庙黑云母花岗闪长岩锆石阴极发光(a)和独居石背散射(b)图像

Fig. 5 Zircon CL (a) and monazite BSE (a) images of the Penggongmiao biotite granodiorite

中粗粒黑云母花岗闪长岩 (ZJL19-4) 独居石晶体为半自形-自形, 粒径约 $50 \sim 100 \mu\text{m}$, BSE 图像显示独居石为均匀的灰白色 (图 5b)。选择 20 颗独居石进行 LA-ICP-MS U-Pb 测试, 结果表明 Th、U 含量较高且变化范围大, 分别为 $33 \sim 156 \times 10^{-6}$ 和 $434 \times 10^{-6} \sim 7 \sim 258 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $11.44 \sim 131.32$ (表 2)。20 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $445.8 \pm 3.4 \sim 425.9 \pm 4.2 \text{ Ma}$, 所有分析点均分布在由 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 构筑的谐和曲线 (图 6c、6d), 说明独居石形成后 U、Pb 同位素体系是封闭的, 加权平均年龄 $436.8 \pm 2.8 \text{ Ma}$ 可代表黑云母花岗闪长岩结晶年龄。

3.2 岩石地球化学

中粗粒黑云母花岗闪长岩的主量、微量和稀土元素含量见表 3。

岩石 SiO_2 含量为 $68.80\% \sim 72.65\%$, Al_2O_3 含量为 $13.19\% \sim 15.11\%$; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 $6.52\% \sim$

7.46% , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 $1.50 \sim 1.74$; $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量为 $3.05\% \sim 3.95\%$; MgO 含量为 $0.86\% \sim 1.17\%$; CaO 、 TiO_2 和 P_2O_5 含量分别为 $2.03\% \sim 2.37\%$ 、 $0.50\% \sim 0.67\%$ 和 $0.12\% \sim 0.15\%$ 。样品 K_2O 含量较高, 属高钾钙碱性系列花岗岩 (图 7a); A/CNK 为 $1.08 \sim 1.13$, A/NK 为 $1.51 \sim 1.62$, 刚玉分子含量为 $1.03\% \sim 1.73\%$, 显示弱过铝-强过铝质花岗岩特征 (图 7b)。

黑云母花岗闪长岩的稀土元素总量为 $185.93 \times 10^{-6} \sim 214.56 \times 10^{-6}$, δEu 值为 $0.41 \sim 0.54$, 具有中等程度 Eu 负异常, LREE/HREE 值为 $5.73 \sim 6.71$, 稀土元素球粒陨石标准化图右倾 (图 8a)。Eu 负异常说明源区有斜长石残留或岩浆演化过程经历了斜长石分离结晶。微量元素富集 Rb、Th、U、Pb、Nd、Zr、Hf 等大离子亲石元素, 亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti 等高场强元素 (图 8b), Rb/Sr、Zr/Hf、Nb/Ta 值分别为 $1.47 \sim 2.22$ 、 $32.85 \sim 34.21$ 和 $8.68 \sim 10.39$ 。根据 Miller

表 1 彭公庙黑云母花岗岩闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年数据
Table 1 In-situ zircon LA-ICP-MS U-Pb data of the Penggongmiao biotite granodiorite

样品号	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma						谐和度
	Pb	Th	U			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
ZJL-19-4-01	15.84	86	197		0.44	0.054 3	0.001 6	0.534 0	0.016 7	0.071 0	0.000 7	383.4	63.9	434.5	11.1	442.1	4.2	98%
ZJL-19-4-02	40.14	232	511		0.45	0.056 9	0.001 2	0.544 4	0.012 4	0.069 1	0.000 6	487.1	80.5	441.3	8.1	430.5	3.4	97%
ZJL-19-4-03	25.21	197	299		0.66	0.055 6	0.001 8	0.529 3	0.016 2	0.068 9	0.000 7	438.9	70.4	431.4	10.7	429.4	4.1	99%
ZJL-19-4-04	18.88	101	224		0.45	0.057 3	0.001 9	0.580 5	0.017 6	0.073 3	0.000 6	505.6	72.2	464.8	11.3	455.9	3.8	98%
ZJL-19-4-05	72.90	283	953		0.30	0.057 1	0.001 1	0.553 3	0.011 1	0.070 0	0.000 6	494.5	44.4	447.1	7.3	436.4	3.5	97%
ZJL-19-4-06	37.73	174	487		0.36	0.056 9	0.001 3	0.544 3	0.012 1	0.069 2	0.000 5	487.1	50.0	441.3	8.0	431.3	3.3	97%
ZJL-19-4-07	20.28	115	256		0.45	0.057 5	0.001 7	0.549 7	0.016 2	0.069 2	0.000 6	509.3	64.8	444.8	10.6	431.4	3.7	96%
ZJL-19-4-08	61.10	252	791		0.32	0.057 9	0.001 2	0.561 1	0.011 7	0.070 1	0.000 5	527.8	46.3	452.3	7.6	436.5	3.3	96%
ZJL-19-4-09	59.99	223	785		0.28	0.057 7	0.001 2	0.558 2	0.011 2	0.069 9	0.000 5	516.7	44.4	450.4	7.3	435.8	3.2	96%
ZJL-19-4-10	18.30	98	230		0.42	0.055 8	0.001 9	0.545 4	0.018 9	0.070 8	0.000 7	442.6	77.8	442.0	12.4	441.0	4.2	99%
ZJL-19-4-11	44.92	155	598		0.26	0.058 3	0.001 4	0.564 3	0.014 4	0.069 9	0.000 7	542.6	53.7	454.4	9.4	435.5	4.3	95%
ZJL-19-4-12	27.70	127	359		0.35	0.057 9	0.001 6	0.555 8	0.015 2	0.069 4	0.000 7	527.8	61.1	448.8	9.9	432.8	4.0	96%
ZJL-19-4-13	27.35	92	364		0.25	0.057 8	0.001 6	0.552 1	0.014 8	0.069 2	0.000 6	520.4	63.9	446.4	9.7	431.3	3.7	96%
ZJL-19-4-14	26.84	103	343		0.30	0.058 0	0.001 4	0.569 2	0.014 5	0.071 0	0.000 8	527.8	53.7	457.5	9.4	442.4	4.7	96%
ZJL-19-4-15	45.85	150	599		0.25	0.055 8	0.001 2	0.551 1	0.013 0	0.071 5	0.000 7	442.6	54.6	445.7	8.5	444.9	4.5	99%
ZJL-19-4-16	23.62	97	298		0.32	0.056 6	0.001 5	0.562 3	0.016 1	0.071 7	0.000 8	476.0	91.7	453.0	10.5	446.4	4.6	98%
ZJL-19-4-17	69.30	350	879		0.40	0.057 6	0.001 1	0.554 2	0.011 4	0.069 5	0.000 6	522.3	44.4	447.7	7.5	433.2	3.3	96%
ZJL-19-4-18	31.22	133	403		0.33	0.055 3	0.001 3	0.529 8	0.012 8	0.069 3	0.000 6	433.4	53.7	431.6	8.5	432.1	3.7	99%
ZJL-19-4-19	31.46	138	393		0.35	0.056 1	0.001 6	0.550 9	0.015 0	0.071 2	0.000 6	453.8	63.0	445.6	9.8	443.3	3.9	99%
ZJL-19-4-20	69.50	317	867		0.37	0.055 3	0.001 2	0.542 1	0.011 1	0.070 9	0.000 6	433.4	50.9	439.8	7.3	441.6	3.5	99%

表 2 彭公庙黑云母花岗岩闪长岩独居石 LA-ICP-MS U-Pb 测年数据
Table 2 In-situ monazite LA-ICP-MS U-Pb data of the Penggongmiao biotite granodiorite

样号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和度				
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
ZJL19-4(MZ)-01	1 238	50 214	4 324	11.61	0.056 7	0.001 2	0.541 3	0.010 9	0.069 3	0.000 5	479.7	48.1	439.3	7.2	432.1	3.3	98%
ZJL19-4(MZ)-02	2 047	89 136	5 100	17.48	0.055 4	0.001 1	0.546 5	0.011 7	0.071 4	0.000 5	431.5	46.3	442.7	7.7	444.6	3.2	99%
ZJL19-4(MZ)-03	855	39 942	1 341	29.79	0.058 5	0.002 2	0.573 8	0.021 3	0.071 2	0.000 7	546.3	84.2	460.5	13.8	443.7	3.9	96%
ZJL19-4(MZ)-04	1 227	51 803	3 272	15.83	0.054 9	0.001 3	0.541 9	0.012 7	0.071 6	0.000 6	405.6	51.8	439.7	8.4	445.8	3.4	98%
ZJL19-4(MZ)-05	972	45 423	2 068	21.96	0.056 4	0.001 6	0.535 2	0.015 3	0.068 8	0.000 5	477.8	30.6	435.3	10.1	428.8	3.3	98%
ZJL19-4(MZ)-06	1 120	56 977	434	131.32	0.055 8	0.003 1	0.532 8	0.027 8	0.069 8	0.001 0	442.6	121.3	433.6	18.4	435.1	5.9	99%
ZJL19-4(MZ)-07	2 681	113 253	7 258	15.60	0.055 8	0.001 0	0.539 6	0.009 0	0.070 2	0.000 5	442.6	38.9	438.2	5.9	437.1	2.9	99%
ZJL19-4(MZ)-08	2 305	101 561	4 706	21.58	0.053 8	0.001 2	0.528 7	0.011 4	0.071 4	0.000 5	361.2	51.8	431.0	7.6	444.4	3.1	96%
ZJL19-4(MZ)-09	823	37 514	1 649	22.74	0.055 6	0.001 7	0.528 2	0.016 4	0.068 8	0.000 7	435.2	70.4	430.6	10.9	428.9	4.1	99%
ZJL19-4(MZ)-10	1 161	47 558	3 566	13.34	0.055 4	0.001 4	0.529 8	0.012 7	0.069 4	0.000 6	427.8	53.7	431.7	8.4	432.8	3.7	99%
ZJL19-4(MZ)-11	692	34 374	474	72.52	0.056 5	0.003 0	0.536 7	0.027 4	0.069 8	0.000 9	477.8	118.5	436.2	18.1	435.2	5.1	99%
ZJL19-4(MZ)-12	819	38 829	1 190	32.63	0.057 4	0.002 1	0.552 6	0.019 5	0.070 2	0.000 7	505.6	75.0	446.7	12.8	437.2	4.5	97%
ZJL19-4(MZ)-13	781	37 282	1 299	28.69	0.056 0	0.001 9	0.528 3	0.018 6	0.068 3	0.000 7	453.8	75.9	430.7	12.4	425.9	4.2	98%
ZJL19-4(MZ)-14	1 590	63 487	5 548	11.44	0.055 6	0.001 1	0.535 5	0.010 2	0.069 8	0.000 5	438.9	44.4	435.5	6.7	435.2	3.0	99%
ZJL19-4(MZ)-15	1 593	69 656	3 805	18.31	0.054 3	0.001 2	0.520 9	0.011 5	0.069 5	0.000 5	383.4	50.0	425.8	7.7	433.4	3.3	98%
ZJL19-4(MZ)-16	1 408	58 045	4 589	12.65	0.056 8	0.001 5	0.548 2	0.014 3	0.070 1	0.000 6	483.4	54.6	443.8	9.4	436.7	3.6	98%
ZJL19-4(MZ)-17	1 110	51 919	1 961	26.48	0.054 0	0.001 8	0.528 8	0.017 1	0.070 8	0.000 7	368.6	71.3	431.0	11.3	441.2	4.1	97%
ZJL19-4(MZ)-18	1 189	50 381	3 453	14.59	0.057 5	0.001 3	0.552 3	0.012 4	0.069 8	0.000 6	509.3	51.8	446.5	8.1	434.8	3.5	97%
ZJL19-4(MZ)-19	1 742	76 081	4 176	18.22	0.053 6	0.001 2	0.526 9	0.012 3	0.071 2	0.000 6	353.8	51.8	429.8	8.2	443.7	3.4	96%
ZJL19-4(MZ)-20	698	33 156	1 090	30.42	0.057 6	0.002 1	0.548 7	0.019 7	0.069 3	0.000 7	522.3	77.8	444.1	12.9	431.8	4.1	97%

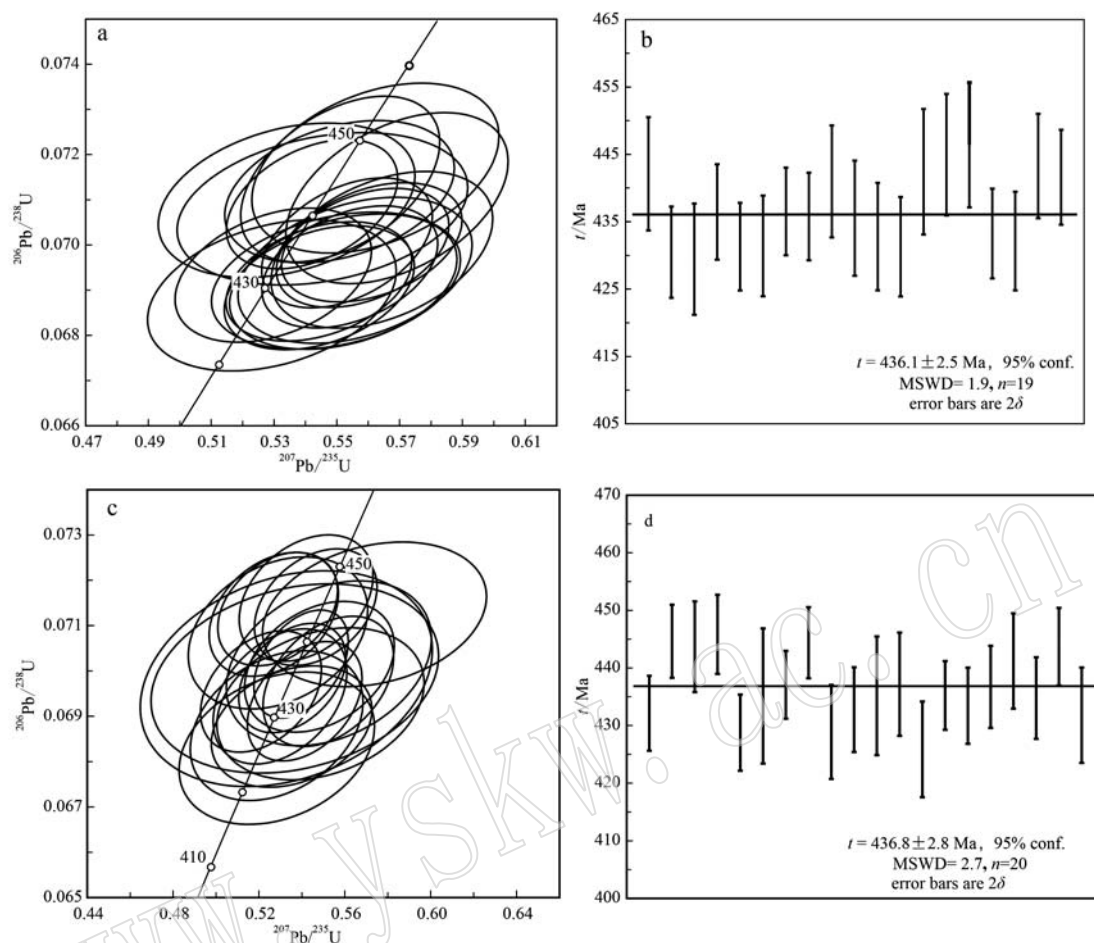


图6 彭公庙黑云母花岗闪长岩锆石(a,b)和独居石(c,d)U-Pb年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams of zircon (a, b) and monazite (c, d) grains of the Penggongmiao biotite granodiorite

等(2003)计算公式得到锆石饱和温度为772~799℃, 平均786℃。

以本次实测的436.1 Ma进行中粗粒黑云母花岗闪长岩初始Sr和Nd计算, 2件样品($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值为0.711 300 1~0.717 229 6, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为0.512 014~0.512 020, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为-8.60~-8.28, 二阶段Nd模式年龄为1.87~1.84 Ga(表4)。与彭公庙岩体黑云母二长花岗岩[($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i=0.712 30~0.718 31, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为0.511 989~0.511 992, $\varepsilon\text{Nd}(t)=-8.7\sim-8.3$, $t_{\text{DM}2}=1.87\sim1.84$ Ga(柏道远等, 2006)]和二云母二长花岗岩[($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i=0.715 840~0.717 284, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为0.511 981~0.512 078, $\varepsilon\text{Nd}(t)=-8.7\sim-7.3$, $t_{\text{DM}2}=1.88\sim1.77$ Ga(Xu and Xu, 2015; 徐文景, 2017)]具有一致的Sr-Nd同位素特征。

3.3 白云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 同位素测年

石牛仙钨矿床白云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 同位素测年结果

列于表5。样品ZK19-1在1 050~1 300℃的5个加热阶段具有66%的 ^{39}Ar 释放量, 坪年龄为 150.2 ± 1.2 Ma(图9a), 等时线年龄为 151.1 ± 1.5 Ma, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为 312.3 ± 10.5 (图9b), 与现代大气氩比值在误差范围内一致(295.5, Qiu and Wijbrans, 2006), 说明白云母自结晶以来对钾和氩保持封闭体系, 150.2 ± 1.2 Ma代表了白云母的结晶年龄。

4 讨论

4.1 彭公庙岩体及区内钨矿形成时代

彭公庙岩体内部及南缘发育杨梅坑、圳口、张家垄、石牛仙、两江口等5个钨矿床(点)。前人研究认为彭公庙岩体南部杨梅坑和圳口钨矿床为早古生代成矿, 可能与彭公庙大花岗岩基有密切的成因关系(乔玉生等, 2011; 李时谦等, 2013)。彭公庙张家垄

表 3 彭公庙黑云母花岗闪长岩主量元素 ($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果

Table 3 Major ($w_B/\%$), REE and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of the Penggongmiao biotite granodiorite

样号	ZJL19-1	ZJL19-2	ZJL19-3	ZJL19-4
SiO ₂	72.65	71.12	69.46	68.80
TiO ₂	0.50	0.61	0.50	0.67
Al ₂ O ₃	13.19	13.54	15.11	14.58
Fe ₂ O ₃ ^T	3.08	3.63	3.05	3.95
MnO	0.06	0.07	0.06	0.08
MgO	0.86	1.02	0.89	1.17
CaO	2.03	2.37	2.36	2.31
Na ₂ O	2.51	2.49	2.73	2.76
K ₂ O	4.27	4.03	4.74	4.14
P ₂ O ₅	0.12	0.14	0.12	0.15
LOI	0.22	0.32	0.38	0.63
Total	99.48	99.34	99.40	99.23
Na ₂ O+K ₂ O	6.78	6.52	7.47	6.90
K ₂ O/Na ₂ O	1.70	1.62	1.74	1.50
A/NK	1.51	1.60	1.57	1.62
A/CNK	1.08	1.09	1.11	1.13
DI	82	79	79	77
C(刚玉)	1.03	1.12	1.49	1.73
Rb	213	184	191	296
Sr	96	106	130	150
Y	39.2	43.0	34.3	38.9
Zr	156	159	135	183
Nb	11.3	13.0	10.6	14.5
Cs	32.4	27.6	39.0	62.0
Ba	496	432	548	526
La	43.9	43.0	40.0	37.3
Ce	83.7	82.8	75.5	71.3
Pr	10.10	10.00	8.99	8.51
Nd	38.2	38.5	34.5	32.7
Sm	8.14	8.43	7.31	7.22
Eu	1.07	1.16	1.26	1.26
Gd	7.67	7.98	6.88	7.10
Tb	1.31	1.41	1.15	1.23
Dy	7.71	8.45	6.98	7.70
Ho	1.56	1.72	1.38	1.59
Er	4.29	4.77	3.69	4.22
Tm	0.68	0.74	0.57	0.69
Yb	4.32	4.94	3.80	4.51
Lu	0.57	0.66	0.52	0.60
Hf	4.56	4.84	4.00	5.45
Ta	1.09	1.30	1.02	1.67
W	1.36	7.14	1.23	2.85
Pb	31.7	31.4	27.4	26.1
Th	24.0	25.6	20.1	19.6
U	4.45	5.56	4.47	5.48
ΣREE	213.22	214.56	192.53	185.93
LREE/HREE	6.59	6.00	6.71	5.73
(La/Yb) _N	7.29	6.24	7.55	5.93
δEu	0.41	0.43	0.54	0.54
Zr/Hf	34	33	34	34
Nb/Ta	10	10	10	9
Rb/Sr	2.22	1.74	1.47	1.97
t _z /°C	787	787	772	799

DI 和刚玉分子计算方法参见路远发等(2021)。

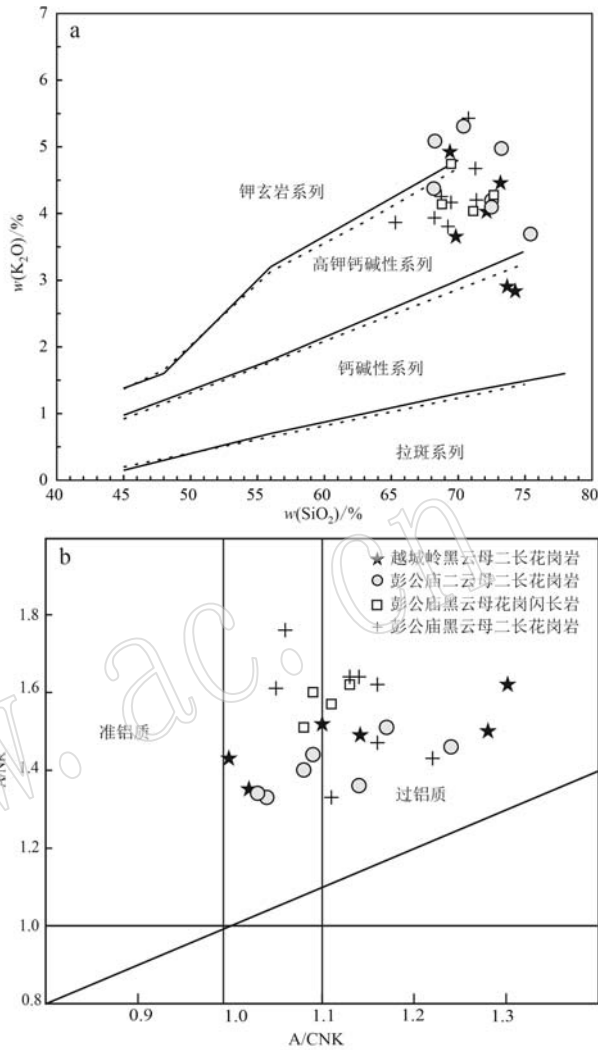


图 7 彭公庙黑云母花岗闪长岩主量元素的 K₂O-SiO₂ (a, 据 Peccerillo 和 Taylor, 1976) 和 A/NK-A/CNK (b, 据 Maniar 和 Piccoli, 1989) 地球化学图解

Fig. 7 K₂O-SiO₂ diagram (a, after Peccerillo and Taylor, 1976) and A/NK-A/CNK diagram (b, after Maniar and Piccoli, 1989) of the Penggongmiao biotite granodiorite

越城岭黑云母二长花岗岩数据引自 Chen 等(2019); 彭公庙二云母二长花岗岩数据引自柏道远等(2006)、Xu 和 Xu(2015)、徐文景(2017); 彭公庙黑云母二长花岗岩数据引自柏道远等(2006) The data of Yuechengling biotite monzogranite are quoted from Chen *et al.*, 2019; Penggongmiao mica monzogranite are quoted from Bai Daoyuan *et al.*, 2006; Xu and Xu, 2015; Xu Wenjing, 2017; Penggongmiao biotite monzogranite are quoted from Bai Daoyuan *et al.*, 2006

钨矿含白钨矿细晶岩脉形成于 426.5 ± 2.5 Ma 的确定(张文兰等, 2011)、越城岭-苗儿山地区的独石岭钨铜多金属矿床(白钨矿 Sm-Nd 等时线年龄 417 ± 35 Ma, 热液榴石 U-Pb 年龄 425 ± 12 Ma, 成矿花岗岩

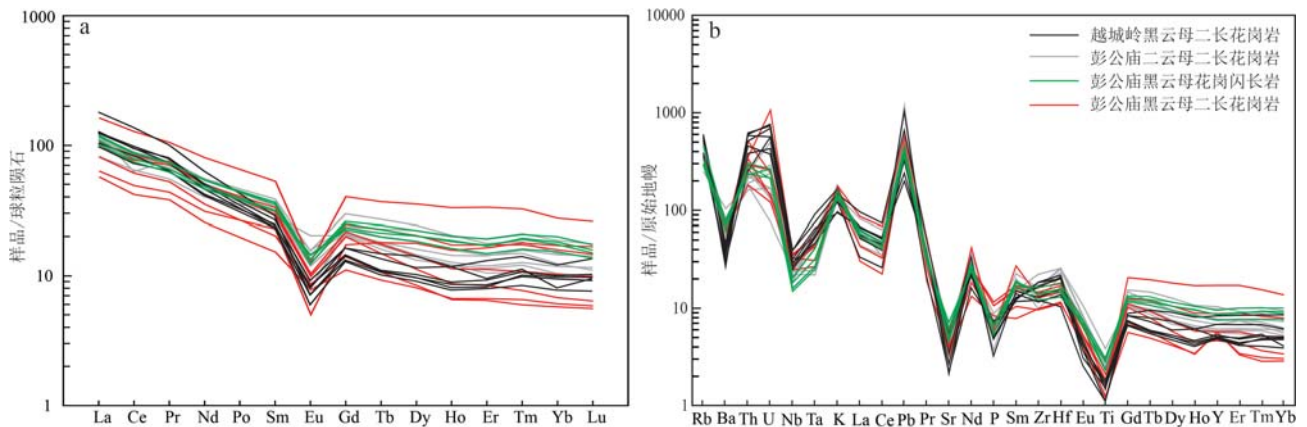


图8 彭公庙黑云母花岗闪长岩稀土元素配分模式图和微量元素蛛网图

Fig. 8 Chondrite-normalized rare earth element patterns and primitive mantle-normalized trace spider diagram of the Penggongmiao biotite granodiorite

球粒陨石标准化值据 Taylor 和 McLennan (1985); 原始地幔标准化值据 Sun 和 McDonough (1989); 数据来源同图 7
chondrite normalization values after Taylor and McLennan, 1985; primitive mantle normalization values after Sun and McDonough, 1989;
data are the same as Fig. 7

表4 彭公庙黑云母花岗闪长岩 Sr、Nd 同位素数据
Table 4 Sr and Nd isotope concentrations of the Penggongmiao biotite granodiorite

样号	ZJL19-1	ZJL19-2
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\pm 2\sigma)$	0.751 339 ($\pm 0.000\ 009$)	0.748 489 ($\pm 0.000\ 010$)
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(\pm 2\sigma)$	0.512 020 ($\pm 0.000\ 004$)	0.512 014 ($\pm 0.000\ 005$)
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.711 300 1	0.717 229 6
$\varepsilon\text{Nd}(t)$	-8.28	-8.60
t_{DM2}/Ga	1.84	1.87

备注: 初始 Sr 和 Nd 同位素校正年龄为 436.1 Ma, 计算方法与相关参数数据文献 Keto 和 Jacobsen (1987)。

年龄 420~423 Ma, 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 423 ± 4 Ma; 陈文迪等, 2016)、平滩钨矿床 (成矿花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 430.8 ± 2.4 Ma, 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 432 ± 15 Ma, Chen *et al.*, 2019) 以

及落家冲钨锡多金属矿床 (成矿花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 408.3 ± 3.5 Ma, 白钨矿 Sm-Nd 等时线年龄 401.5 ± 9.4 Ma, 杜云等, 2017 和未刊资料) 的相继发现, 使得重新评价加里东期大花岗岩基的成矿潜力变得非常有必要。

彭公庙岩体侵入于震旦系-奥陶系浅变质的砂岩中, 与上覆泥盆纪跳马涧组不整合接触, 主要由黑云母花岗闪长岩、二云母二长花岗岩和黑云母二长花岗岩组成。本文利用 LA-ICP-MS 锆石和独居石 U-Pb 定年获得黑云母花岗闪长岩年龄分别为 436.1 ± 2.5 Ma (MSWD = 1.9, $n = 19$) 和 436.8 ± 2.8 Ma (MSWD = 2.7, $n = 20$), 与黑云母二长花岗岩 SIMS 锆石 U-Pb 年龄 441.3 ± 2.4 Ma (Yuan *et al.*, 2018a) 和

表5 彭公庙地区石牛仙钨矿白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温测年数据Table 5 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ stepwise heating analytical data for muscovite of the Shiniuxian tungsten deposit

温度/°C	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{40}\text{Ar}^*/\%$	$F(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar})$	$^{39}\text{Ar}/10^{14}\text{ mol}$	$^{39}\text{Ar}/\%$	年龄/Ma	$\pm 1\sigma/\text{Ma}$
800	71.930 2	0.167 5	0.000 647 0	25.78	18.54	8.44	10.41	196.7	10.5
900	14.234 8	0.003 4	0.000 164 0	92.40	13.17	8.35	11.16	141.8	1.0
1 000	16.153 8	0.008 4	0.000 133 0	83.48	13.50	6.93	10.52	145.3	1.1
1 050	21.361 2	0.022 8	0.000 031 0	65.97	14.11	4.13	5.97	150.5	1.8
1 100	21.893 6	0.024 0	0.000 052 8	65.03	14.25	5.21	7.52	152.1	1.9
1 150	19.151 7	0.015 9	0.000 039 7	73.47	14.09	7.75	10.2	150.3	1.5
1 200	17.640 0	0.011 3	0.000 039 4	79.66	14.07	8.18	11.52	150.1	1.3
1 250	16.695 9	0.008 3	0.000 053 5	84.21	14.07	13.6	18.22	150.2	1.2
1 300	16.311 3	0.007 4	0.000 053 9	85.62	13.98	9.70	12.57	149.2	1.1
1 400	17.267 3	0.009 6	0.000 498 0	82.23	14.22	0.78	1.91	151.6	1.8

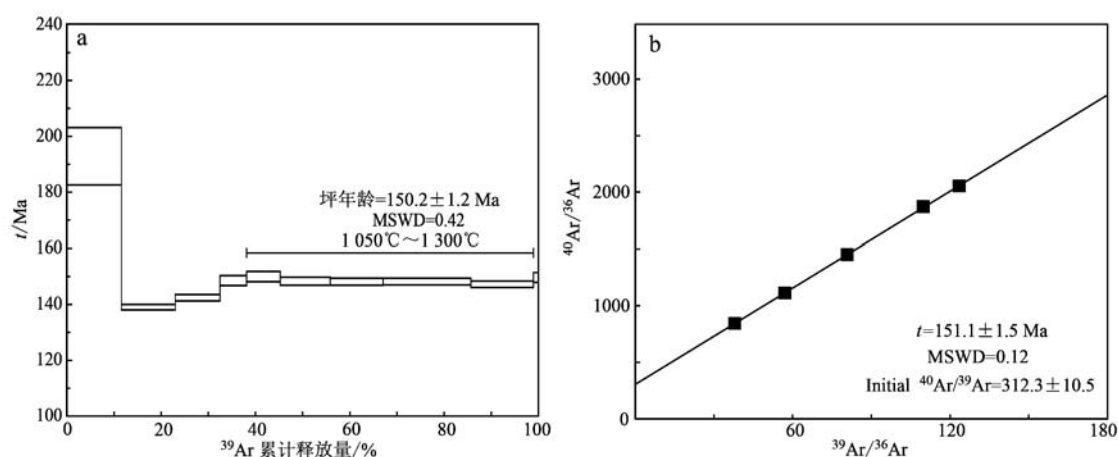


图9 石牛仙钨矿床白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄(a)和等时线年龄图(b)

Fig. 9 Plateau(a), isochron(b) ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of muscovite for Shiniuxian tungsten deposit

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 $436.2 \pm 3.1 \sim 435.3 \pm 2.7$ Ma (张文兰等, 2011) 相吻合, 也与二云母二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 $436 \pm 4 \sim 433 \pm 3$ Ma 在误差范围内一致 (Xu and Xu, 2015; 徐文景, 2017), 表明彭公庙大花岗岩基为早志留世岩浆活动的产物。

石牛仙钨矿床位于张家垄钨矿床北面, 矿体产于二云母二长花岗岩中, 主要矿化类型为石英脉型和云英岩型, 含钨石英脉白云母 ^{39}Ar - ^{40}Ar 坪年龄 150.2 ± 1.2 Ma, 与 Yuan 等 (2018a) 获得的张家垄钨矿床云英岩型钨矿脉辉钨矿 Re-Os 等时线年龄 160.4 ± 2.2 Ma、白云母 ^{39}Ar - ^{40}Ar 坪年龄 153.5 ± 1.0 Ma 一致, 也与圳口钨矿床白云母 148.0 ± 0.7 Ma 的 ^{39}Ar - ^{40}Ar 坪年龄相似 (严宸等, 2019)。此外, 矿

床东部产于桂东早古生代岩体中的竹园里钨铋矿床和流源锡矿床白云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 坪年龄分别为 151.6 ± 1.0 Ma 和 153.1 ± 1.0 Ma (Yuan *et al.*, 2018b)。精确的年代学数据表明, 区内钨锡矿床形成于晚侏罗世, 成矿年龄远小于彭公庙岩体形成时代 (张文兰等, 2011; Yuan *et al.*, 2018a, 2018b; 本文), 不支持钨成矿作用与在古生代岩浆活动存在成因联系。

4.2 彭公庙岩体岩石成因及成矿潜力

彭公庙岩体黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩和二云母花岗岩 SiO_2 与 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 等呈负相关关系, 与 K_2O 和 Na_2O 呈正相关关系 (图 10), 表明它们可能为同一岩浆演化的产物。刚玉分子含量为 0.67%~3.11%, A/NCK 大于 1.0~1.24,

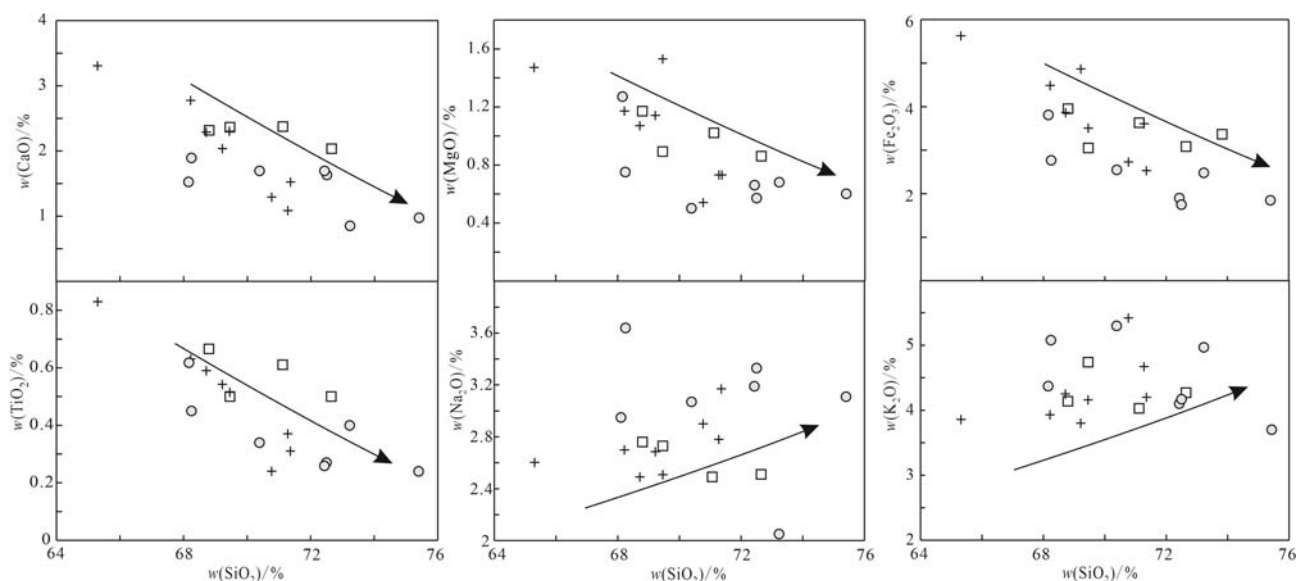


图10 彭公庙岩体 Harker 图解 (图例与数据来源同图 7)

Fig. 10 Harker diagrams of Penggongmiao pluton (legends and data are the same as Fig. 7)

显示弱过铝-强过铝质花岗岩(图 7b)和 S 型花岗岩特征(图 11a)。不同岩性侵入岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 变化范围较大, 为 0.711 130~0.718 310(平均 0.715 474), 较大陆地壳平均值 0.719 略小(Faure, 1986), $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 为 -8.7~-7.3(平均 -8.3), 与壳源 S 型花岗岩同位素特征相符(图 11b)。但是三者都具有相对较高的形成温度, 分别为 772~800℃(平均 786℃)、763~815℃(平均 793℃)和 758~805℃(平均 780℃), 明显高于 S 型花岗岩的平均温度 764℃, 而与 I 型花岗岩平均温度 781℃(King *et al.*, 1997)相符。

黑云母花岗闪长岩手标本和显微镜下均可见约 10% 的角闪石, 且角闪石自形程度较高, 也指示其具有 I 型花岗岩的性质(吴福元等, 2007; 张招崇等, 2009)。越城岭平滩加里东期钨矿床成矿花岗岩也普遍含有刚玉分子, A/NCK 值为 1.0~1.28, 形成温度平均为 802℃, 不含角闪石等矿物, 为典型的 S 型花岗岩(Chen *et al.*, 2019)。其实, 南岭绝大部分的成钨花岗岩都兼具 S 和 I 型花岗岩的地球化学特征(秦拯纬等, 2022)。

彭公庙花岗岩与越城岭早古生代成钨花岗岩一

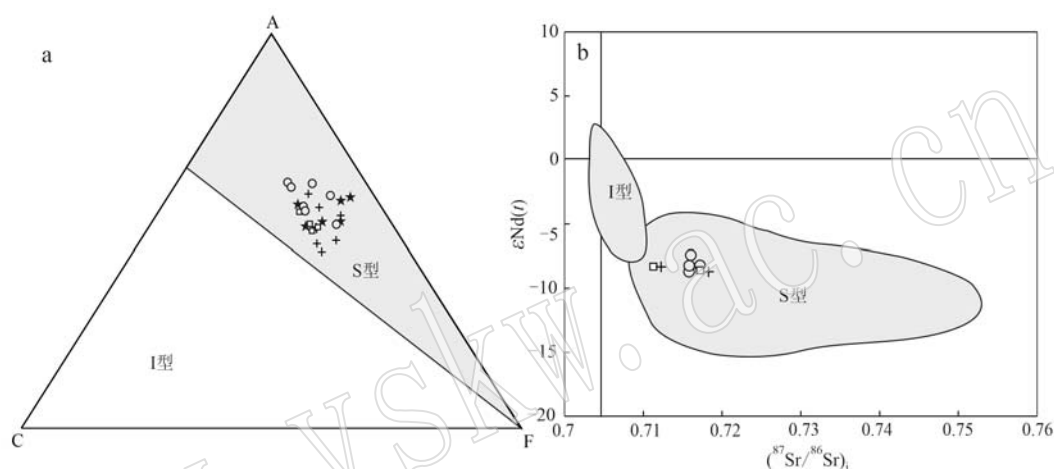


图 11 彭公庙岩体成因类型判别图解(图例与数据来源同图 7)

Fig. 11 Genetic type discrimination diagrams of the Penggongmiao biotite granodiorite (legends and data are the same as Fig. 7)

a—ACF 图解[据 Hine 等(1978)]; b— $\varepsilon\text{Nd}(t)$ —($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图解(据凌洪飞等, 2005)

a—ACF diagram (after Hine *et al.*, 1978); b— $\varepsilon\text{Nd}(t)$ —($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i diagram (after Ling Hongfei *et al.*, 2005)

样, 均有稀土元素球粒陨石标准化图解呈“右倾式”分配特征, LREE/HREE 分别为 4.32~10.52(平均 7.27)和 7.55~18.11(平均 12.56), 中等强度的 Eu 负异常, δEu 值分别为 0.25~0.84(平均 0.46)和 0.33~0.43(平均 0.38), 但这与南岭地区中生代典型的与钨锡矿床有关的花岗岩具有强烈的稀土元素海鸥式分配特征(平均 LREE/HREE=4.2~5.3)和强烈的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.10\sim0.30$)区别明显。在微量元素方面, 虽然彭公庙岩体、越城岭早古生代成钨花岗岩与南岭地区中生代成锡和成钨花岗岩具有富集 Rb、Th、U、Pb、Zr 等元素, 亏损 Sr、Ba、P、和 Ti 等元素等特征, 但在富集和亏损程度上前者与后者也存在较大的差距。

彭公庙岩体分异指数 $\text{DI}=69\sim90$, 较高的 Zr 含量($108\times10^{-6}\sim249\times10^{-6}$)、Nb/Ta=5~17(平均 11)和 Zr/Hf=20~42(平均 30)以及上述微量元素特征

都指示岩浆演化过程经历了一定程度的结晶分异, 中等强度的 Eu 负异常指示可能仅经历较弱的斜长石的结晶分离。但与南岭成矿带中生代典型的成钨和成锡花岗岩相比, 彭公庙岩体分异程度偏弱(图 12a、12b)。具体而言, 二云母花岗岩分异程度明显更充分, 主要表现在更高的分异指数(DI)(82~90, 平均 87)、CaO/(Na₂O+K₂O)值, 更低的 Rb/Sr 值和 δEu 值, 与越城岭早古生代成钨花岗岩相对较高的分异程度相似。

彭公庙岩体不同岩性侵入岩 Rb/Sr 值为 1.18~5.23(平均 2.61), Sm/Nd 值为 0.19~0.24(平均 0.20), Ti/Y 值为 26~197(平均 86), Ti/Zr 值为 8~23(平均 18), 与来源于地壳的岩浆岩具有一致的地球化学性质(Rb/Sr>0.5, Sm/Nd<0.3, Ti/Y<100, Ti/Zr<20, Tischendorf and Paelchen, 1985; 陈德潜等, 1990), 指示岩浆可能来源于地壳物质。而相对均

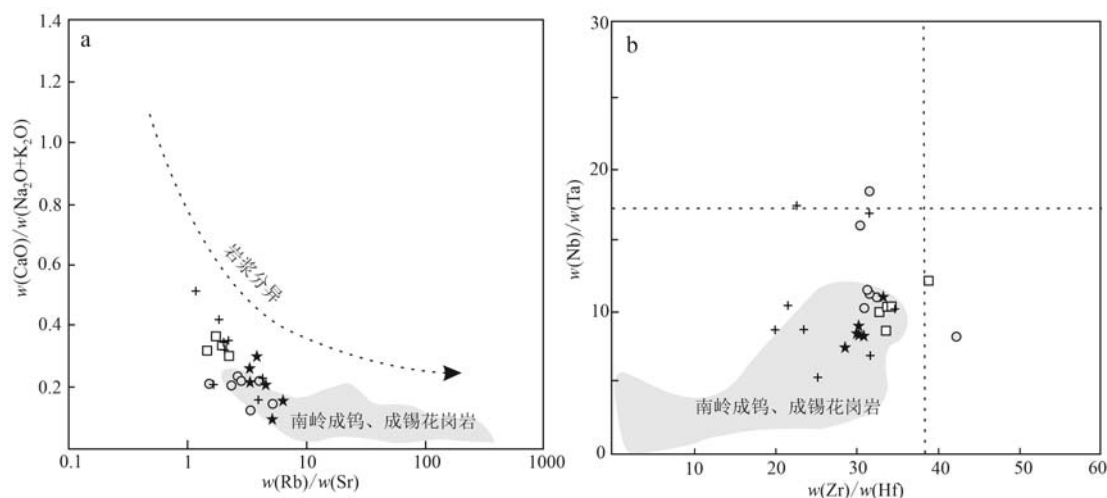


图 12 彭公庙岩体分异程度 $\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{Rb}/\text{Sr}$ (a)和 $\text{Nb}/\text{Ta}-\text{Zr}/\text{Hf}$ (b)图解(南岭成钨、成锡花岗岩区域引自秦拯纬等, 2022; 图例与数据来源同图 7)

Fig. 12 Diagrams of $\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{Rb}/\text{Sr}$ (a) and $\text{Nb}/\text{Ta}-\text{Zr}/\text{Hf}$ (b) of the Penggongmiao biotite granodiorite (tungsten and tin granites of Nanling metallogenic belt after Qin Zhengwei *et al.*, 2022; legends and data are the same as Fig. 7)

一的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值 ($-8.7 \sim -7.3$) 和 t_{DM2} 值 ($1.88 \sim 1.77$ Ga), 与南岭中生代成钨花岗岩较低的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值 ($-12 \sim -8$, 平均值为 -8.9) 和较古老的 t_{DM2} 值 ($1.9 \sim 1.5$ Ga, 平均值为 1.68 Ga) 相似, 且样品都位于华南前寒武纪基底演化线内(图 13a), 说明它们的源岩主要来源于古元古代地壳物质的部分熔融。磷灰石 Sr-Nd 和锆石 Hf-O-Li 等同位素研究表明, 南岭中生代成钨花岗岩主要来源于成熟度较高的上地壳物质的部分熔融 (Zhang *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2018), 彭公庙岩体 Sr-Nd 同位素沿着上地壳演化线分布, 指示其也是来源于上地壳(图 13b)。

彭公庙岩体不同岩性侵入岩 Harker 图解显示良好的线性关系(图 10), 相似的稀土元素和微量元素组成(图 8)以及均一的 Sr-Nd 同位素组成(图 11b), 说明它们具有相似的成因, 是同一母岩浆演化的产物。A/MF-C/MF 图解显示彭公庙岩体主体是变质杂砂岩的部分熔融, 但也有部分样品落在变质泥岩和变质中基性岩区域(图 13c), 指示可能存在不同来源的岩浆混合。不同岩性多元素共分母比值均呈现良好的线性关系(柏道远等, 2006)、散乱的 La/Sm-La 关系(柏道远等, 2006)以及 MgO 和 FeO^T 都说明岩浆混合作用控制了岩石的形成(图略)。野外地质调查常见有闪长质包体, 也是不同来源的岩浆混合有力的岩石学证据。前文已经论述了彭公庙岩体经历了较弱的分异演化, 因此 $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ 图解可以大致指示岩浆源区组成, 彭公庙岩体黑云母花

岗闪长岩和黑云母二长花岗岩主要落入了计算的砂质来源熔体附近, 但部分二云母二长花岗岩与越城岭早古生代成钨花岗岩一样都位于富粘土区内(图 13d)。

与钨锡矿床有关的花岗岩主要是上地壳变泥质岩的部分熔融产物, 云母类矿物的脱水熔融并经过结晶分异形成含有钨和锡的高分异岩浆是成矿与否的重要因素(吴显愿等, 2019; Wang *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2022)。前文已述, 彭公庙岩体来源于古元古代地壳物质的部分熔融, 普遍具有较高的形成温度 ($\geq 780^\circ\text{C}$), 且经历了一定程度的分异。但相对于典型的成钨花岗岩, 彭公庙岩体黑云母花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩主要来源于上地壳变质砂岩, 结晶分异程度不高, 而二云母二长花岗岩不论是在源区组成还是在分异程度上都更接近于越城岭早古生代成钨花岗岩, 也与南岭中生代成钨花岗岩相似, 指示二云母花岗岩可能具有钨锡矿潜力。但彭公庙岩体黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩和二云母花岗岩成矿元素含量并不高, W 含量为 $0.84 \times 10^{-6} \sim 26.66 \times 10^{-6}$ (平均 3.51×10^{-6}) (柏道远等, 2006; Xu and Xu, 2015; 徐文景, 2017; 本文), 与华南花岗岩平均含量一致 (3.5×10^{-6} , 中国科学院地球化学研究所, 1979), Sn 含量为 $3.17 \times 10^{-6} \sim 47.5 \times 10^{-6}$ (平均 13.9×10^{-6} , 柏道远等, 2006; 徐文景, 2017), 较华南花岗岩平均含量低 (32×10^{-6} , 中国科学院地球化学研究所,

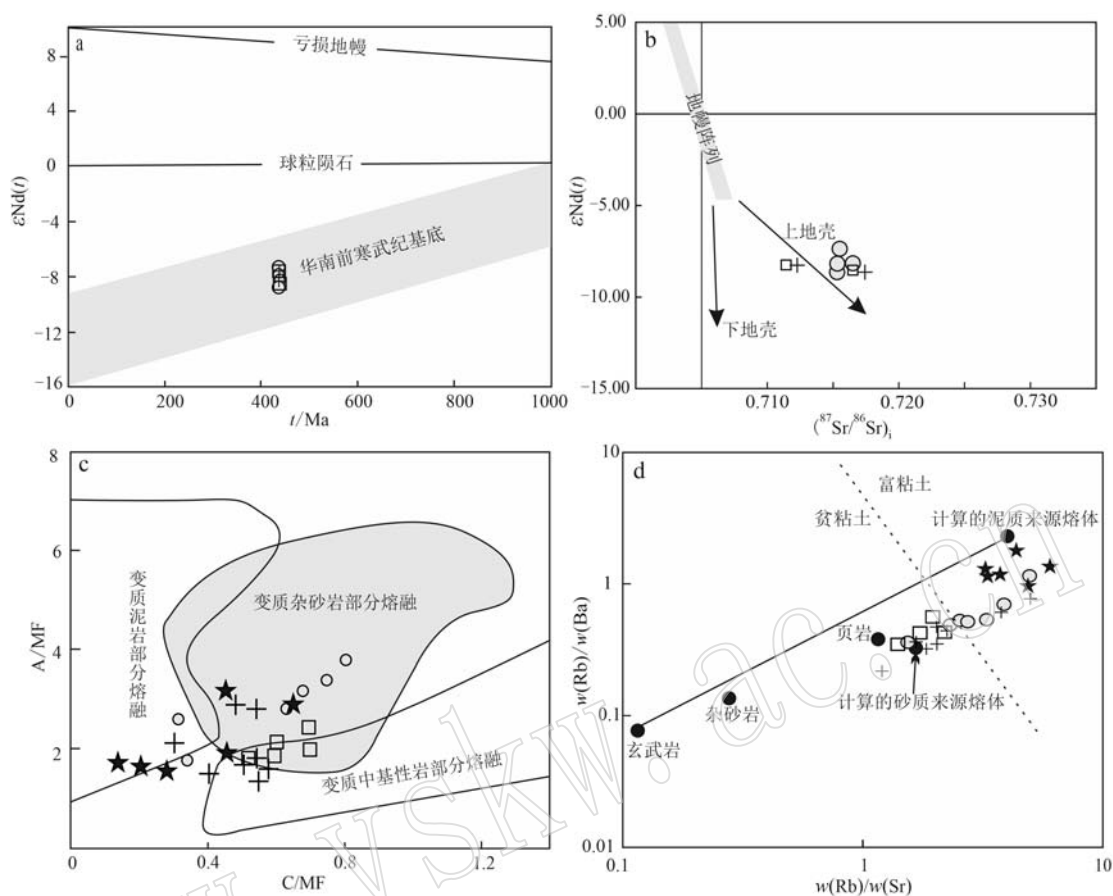


图 13 彭公庙岩体岩浆源区判别图解源区

Fig. 13 The discrimination diagrams of the source nature of the Penggongmiao biotite granodiorite

a—华南前寒武纪基底范围修改自 Yang 等(2018); b—底图据 Rollison (2000); c—底图据 Altherr 等(2000); d—底图据 Sylvester (1998); 图例与数据来源同图 7

a—the range of Precambrian basement range of South China Block after Yang *et al.*, 2018; b—after Rollison, 2000; c—after Altherr *et al.*, 2000; d—after Sylvester, 1998; Legends and data are the same as Fig. 7

1979), 也明显低于越城岭岩体 W 和 Sn 平均含量 ($W = 26.5 \times 10^{-6}$, $Sn = 17.09 \times 10^{-6}$, Chen *et al.*, 2019; 杜云等, 2021), 水系沉积物分析结果也显示苗儿山-越城岭 W、Sn 等元素主要富集在花岗岩中(田磊等, 2021), 进一步表明了其成矿潜力有限。

4.3 彭公庙地区找矿方向

彭公庙岩体是早志留世($441 \pm 2 \sim 433 \pm 3$ Ma)岩浆活动的产物, 岩体内及周缘主要钨锡矿床并非形成于早古生代, 而是形成于晚侏罗世($160.4 \pm 2.2 \sim 148.0 \pm 0.7$ Ma), 说明它们的形成是受控于晚侏罗世岩浆-热液活动。通过对比彭公庙岩体和南岭地区典型的与钨锡成矿有关的花岗岩, 发现彭公庙岩体本身的成矿潜力有限(Yuan *et al.*, 2018a; 本文)。那么彭公庙地区的钨锡找矿工作应如何开展呢?

已有研究指出, 彭公庙岩体及周缘的钨锡矿床可能与深部晚侏罗世隐伏岩体有关(Yuan *et al.*, 2018a, 2018b; 严宸等, 2019)。野外地质调查和梳理资料发现, 彭公庙岩体内部及周缘地层围岩发育丰富的中酸性-中基性岩脉, 主要岩性有细粒花岗岩脉、石英斑岩脉、花岗闪长斑岩、花岗伟晶岩脉、辉绿岩脉和煌斑岩脉等。如彭公庙岩体东北部两江口钨矿区矿(化)体主要赋存在距离彭公庙岩体 1 km 的花岗闪长斑岩脉中, 发育丰富的云英岩化、硅化以及石英脉带, 在长达 50 m 的矿化带中, 发现 4 条厚 1~7 m 不等的钨锡工业矿体; 张家垄和圳口钨矿床也发育有细粒花岗岩、花岗斑岩脉。笔者在 1:5 万彭公庙南缘进行区域地质调查中也发现多处中酸性岩浆岩脉或岩株, 总体呈北东向或北北东向, 岩性主要为细粒黑(二)云母花岗岩和中细粒似斑状黑

云母花岗岩, 初步研究表明, 这些酸性岩脉结晶年龄为 158.7~153.0 Ma, 与南岭中生代钨锡矿床花岗岩具有相似的地球化学性质(未刊资料), 证明区内存在与成矿作用同时的晚侏罗世岩浆活动。因此, 在下一步找矿过程中, 应以晚侏罗世构造-岩浆-成矿事件为调查研究目标, 重点开展彭公庙花岗岩基内部及周缘晚期花岗岩岩脉或岩株调查, 查明它们的分布特征、产状、岩性等, 研究其形成时代、地球化学特征、源区组成、分异演化程度等, 结合区内地球物理、地球化学、构造蚀变信息等, 综合评价成矿潜力。

5 结论

彭公庙中粗粒黑云母花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石和独居石 U-Pb 年龄分别为 436.1 ± 2.5 Ma (MSWD = 1.9, $n = 19$) 和 436.8 ± 2.8 Ma (MSWD = 2.7, $n = 20$), 表明彭公庙大花岗岩基为早志留世岩浆活动的产物。岩体内石牛仙钨矿床白云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 坪年龄为 150.2 ± 1.2 Ma (MSWD = 0.42), 证明彭公庙岩体及周缘钨锡矿床形成于晚侏罗世, 成岩和成矿没有成因联系。地球化学研究表明, 早志留世彭公庙大岩基钨锡成矿潜力有限。应综合地球物理、地球化学、构造蚀变信息等资料, 重点评价岩基内部及周缘晚期(如晚侏罗世)花岗岩岩脉或岩株成矿潜力。

致谢 论文撰写过程中与湖南省地质调查院谭仕敏、陈剑锋高级工程师等进行了有益的讨论, 匿名审稿专家提出了建设性的意见, 在此一并表示衷心的感谢!

References

- Altherr R, Holl A, Hegner E, *et al.* 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 50 (1): 51~73.
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Ma Tieqiu, *et al.* 2006. Geology and geochemistry of the Silurian Penggongmiao granitic pluton in the South-eastern Hunan Province and its implication for tectonic setting [J]. *Geoscience*, 20(1): 130~140 (in Chinese with English abstract).
- Chen Deqian and Chen Gang. 1990. *Applied Rare Earth Element Geochemistry* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~268 (in Chinese).
- Chen Jianfeng, Sheng Dan, Shao Yongjun, *et al.* 2019. Silurian S-type granite-related W-(Mo) mineralization in the Nanling Range, South China: A case study of the Pingtan W-(Mo) deposit [J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 186~200.
- Chen Jun, Wang Rucheng, Zhu Jinchu, *et al.* 2013. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 56: 2 045~2 055.
- Chen Wendi, Zhang Wenlan, Wang Rucheng, *et al.* 2016. A study on the Dushiling tungsten-copper deposit in the Miao'ershan-Yuechengling area, northern Guangxi, China: Implications for variations in the mineralization of multi-aged composite granite plutons [J]. *Science China Earth Sciences*, 59(11): 2 121~2 141.
- Du Yun, Guo Aimin, Lu Youyue, *et al.* 2021. Petrogenesis of the Caledonian granites in the northern part of Miaoershan pluton, southwestern Hunan Province: Evidence from petrology, geochemistry and zircon U-Pb age [J]. *Geology in China*, 48(5): 1 540~1 561 (in Chinese with English abstract).
- Du Yun, Luo Xiaoya, Huang Gefei, *et al.* 2017. Geological features and analysis of prospecting potential of Luojiachong tungsten deposit in Chengbu County, Hunan Province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(5): 177~184 (in Chinese with English abstract).
- Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology* [M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1~592.
- Guo Aimin. 2011. Geological characteristics and prospecting potential of Zhangjialong tungsten deposit in Zixing, Hunan Province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 27(2): 111~117 (in Chinese with English abstract).
- Guo Aimin, Wang Fangyou, Xiao Yingbin, *et al.* 2017. Integrated prospecting model and significance of the Zhangjialong tungsten deposit in the southeastern Hunan [J]. *Mineral Exploration*, 8(5): 858~868 (in Chinese with English abstract).
- Hine R, Williams I S, Chappell B W, *et al.* 1978. Contrasts between I- and S-type granitoids of the Kosciusko Batholith [J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 25(3~4): 219~234.
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Chen Peirong, *et al.* 2013. Relationship between Caledonian granitoids and large-scale mineralization in South China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 1~11.

- (in Chinese with English abstract).
- Keto L S and Jacobsen S B. 1987. Nd and Sr isotopic variations of Early Paleozoic oceans[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 84: 27~41.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38: 371~391.
- Koppers A A P. 2002. ArArCALC - software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age calculations[J]. *Computers and Geosciences*, 28(5): 605~619.
- Li Pu, Dai Hongmo, Qiu Chunyi, *et al.* 1963. Absolute dating K-Ar of some pegmatites and granites in Inner Mongolia and Nanling areas [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 4(1): 1~9(in Chinese).
- Li Shiqian, Lan Xiaoming, Deng Songhua, *et al.* 2013. Metallogenic geological characteristics of Caledonian tungsten deposits in Zhenkou area of Hunan Province and ore-prospecting orientation[J]. *Mineral Deposits*, 32(2): 405~414(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping, *et al.* 2005. Study of geochemistry and petrogenesis of the Maofeng granite, northern Guangdong province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 677~687(in Chinese with English abstract).
- Lu Yuanfa and Li Wenxia. 2021. Calculation method and VBA program of CIPW norm minerals[J]. *South China Geology*, 37(3): 348~360 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. ISOPLLOT 3. 00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 39.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 31(6): 529~532.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63~81.
- Qiao Yusheng, Wang Fangyou, Hou Maosong, *et al.* 2011. Geological characteristics of Zhangjialong tungsten deposit, Hunan Province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 27(2): 125~131(in Chinese with English abstract).
- Qin Zhengwei, Fu Jianming, Cheng Shunbo, *et al.* 2021. The petrogenetic differences among the Middle-Late Jurassic W, Sn, Pb-Zn-Cu-bearing granites in the Nanling Range, South China[J]. *Geology in China*, 49(2): 518~541(in Chinese with English abstract).
- Qiu Huaning and Wijbrans J R. 2006. Paleozoic ages and excess ^{40}Ar in garnets from the Bixiling eclogite in Dabieshan, China: New insights from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating by stepwise crushing[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 2 354~2 370.
- Rollison H R. 2000. Yang Xueming, Yang Xiaoyong and Chen Shuangxi (Trans.) *Petrological Geochemistry* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1~275(in Chinese).
- Sheng Dan, Zhang Jinxun and Chen Jianfeng. 2020. Geochemistry characteristics of Caledonian granites in Hunan and its implications for mineralization[J]. *Land & Resources Herald*, 17(3): 18~24(in Chinese with English abstract).
- Steiger R H and Jäger E. 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 359~362.
- Song Zhentao, Xu Xisheng, Zhou Meifu, *et al.* 2021. A critical review of Early Paleozoic W and Cu mineralized and barren granitoids in Southeast China: Magmatic differentiation, oxygen fugacity, and magmatic sources[J]. *Ore Geology Reviews*, 131: 104025.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society London Special Publications, 313~345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1): 29~44.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Tian Lei, Du Yun, Zou Yuan, *et al.* 2021. Geochemical characteristics of stream sediments and metallogenic orogenesis in the Miaoshan area, southern Hunan Province [J]. *South China Geology*, 37(2): 164~176(in Chinese with English abstract).
- Tischendorf F G and Paelchen. 1985. Zur Klassifikation von granitoiden/classification of granitoids [J]. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 13(5): 615~627.

- Wang Meng, Deng Jun, Hou Tong, *et al.* 2020. Experimental evidence for a protracted enrichment of tungsten in evolving granitic melts: implications for scheelite mineralization[J]. *Mineralium Deposits*, 55(7): 1 299~1 306.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238(in Chinese with English abstract).
- Wu Xianyuan, Zhang Zhiyu, Zheng Yuanchuan, *et al.* 2019. Magmatism, genesis and significance of multi-stage porphyry-like granite in the giant Dahutang tungsten deposit, northern Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(3): 318~338(in Chinese with English abstract).
- Xia Jinlong, Huang Guicheng, Ding Li, *et al.* 2021. Chronological framework of the Zhuguangshan composite batholith in the Nanling Area[J]. *South China Geology*, 37(3): 280~297(in Chinese with English abstract).
- Xu Keqin, Sun Nai, Wang Dezi, *et al.* 1963. Age, lithology, distribution and metallogenic specificity of multicycle granitoids in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 43(1): 1~26(in Chinese).
- Xu Xianbing, Liang Chenghua, Chen Jiaju, *et al.* 2021. Fundamental geological features and metallogenic geological background of Manling tectonic belt[J]. *Earth Science*, 46(4): 1 133~1 150(in Chinese with English abstract).
- Xu Wenjing. 2017. The Petrogenesis of Early Paleozoic Intracontinental Magmatism in the Zhuguang-Wanyang Mts district, Cathaysia Block[D]. Nanjing University, 1~105(in Chinese with English abstract).
- Xu Wenjing and Xu Xisheng. 2015. Early Paleozoic intracontinental felsic magmatism in the South China Block: Petrogenesis and geodynamics[J]. *Lithos*, 234~235: 79~92.
- Yan Chen, Zhao Haijie, Zhao Panlao, *et al.* 2019. Muscovite Ar-Ar isotopic dating of Zhenkou quartz vein type wolframite deposit in southern Hunan Province and its significance for regional exploration[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 1 147~1 158(in Chinese with English abstract).
- Yang Jiehua, Kang Lifang and Peng Jiantang. 2018. In-situ elemental and isotopic compositions of apatite and zircon from the Shuiikoushan and Xihuashan granitic plutons: Implication for Jurassic granitoid-related Cu-Pb-Zn and W mineralization in the Nanling Range, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 93: 382~402.
- Yu Yushuai, Zhou Yun, Dai Pingyun, *et al.* 2022. Triassic tungsten mineralization in Nanling metallogenic belt: A case study of the Zanshi tungsten deposit in the Yajiangqiao area, eastern Hunan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 104710.
- Yuan Shunda, Williams-Jones A E, Mao Jingwen, *et al.* 2018a. The origin of the Zhangjialong tungsten deposit, South China: Implications for W-Sn mineralization in large granite batholiths[J]. *Economic Geology*, 113(5): 1 193~1 208.
- Yuan Yabin, Yuan Shunda, Mao Jingwen, *et al.* 2018b. Recognition of Late Jurassic W-Sn mineralization and its exploration potential on the western margin of the Caledonian Guidong granite batholith, Nanling Range, South China: Geochronological evidence from the Liuyuan Sn and Zhuyuanli W deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 93: 200~210.
- Zhang Wenlan, Wang Rucheng, Lei Zeheng, *et al.* 2011. Zircon U-Pb dating confirms existence of a Caledonian scheelite-bearing aplitic vein in the Penggongmiao granite batholith, South Hunan[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(18): 1 448~1 454(in Chinese).
- Zhang Yang, Yang Jinhui, Chen Jingyuan, *et al.* 2017. Petrogenesis of Jurassic tungsten-bearing granites in the Nanling Range, South China: Evidence from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb and Hf-O isotopes[J]. *Lithos*, 281: 166~180.
- Zhang Zhaochong, Dong Shuyun, Huang He, *et al.* 2009. Geology and geochemistry of the Permian intermediate-acid intrusions in the southwestern Tianshan, Xinjiang, China: Implications for petrogenesis and tectonics[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1 827~1 839(in Chinese with English abstract).
- Zhao Panlao, Xu Chu, Williams-Jones Anthony E, *et al.* 2022. The role of phyllosilicate partial melting in segregating tungsten and tin deposits in W-Sn metallogenic provinces[J]. *Geology*, 50(1): 121~125.

附中文参考文献

- 柏道远, 黄建中, 马铁球, 等. 2006. 湘东南志留纪彭公庙花岗岩体的地质地球化学特征及构造背景[J]. *现代地质*, 20(1): 130~140.
- 陈德潜, 陈刚. 1990. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~268.
- 陈骏, 王汝成, 朱金初, 等. 2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用[J]. *中国科学: 地球科学*, 44(1): 111~121.
- 陈文迪, 张文兰, 王汝成, 等. 2016. 桂北苗儿山-越城岭地区独石岭钨(铜)矿床研究: 对复式岩体多时代差异性成矿的启示[J]. *中国科学: 地球科学*, 46(12): 52~75.

- 杜云, 郭爱民, 卢友月, 等. 2021. 湘西南苗儿山岩体北段加里东期花岗岩成因: 来自岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 中国地质, 48(5): 1 540~1 561.
- 杜云, 罗小亚, 黄革非, 等. 2017. 湖南省城步县落家冲钨矿床地质特征及找矿前景分析[J]. 地质科技情报, 36(5): 177~184.
- 郭爱民. 2011. 湖南资兴张家垄钨矿床地质特征及找矿前景分析[J]. 华南地质与矿产, 27(2): 111~117.
- 郭爱民, 王方有, 肖颖斌, 等. 2017. 湘东南张家垄钨矿床综合找矿模型及其意义[J]. 矿产勘查, 8(5): 858~868.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 等. 2013. 初论华南加里东花岗岩与大規模成矿作用的关系[J]. 高校地质学报, 19(1): 1~11.
- 李璞, 戴樟漠, 邱纯一, 等. 1963. 内蒙和南岭地区某些伟晶岩和花岗岩的钾-氩法绝对年龄测定[J]. 地质科学, 4(1): 1~9.
- 李时谦, 蓝晓明, 邓松华, 等. 2013. 湖南圳口地区加里东期钨矿田成矿地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, 32(2): 405~414.
- 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 等. 2005. 粤北帽峰花岗岩体地球化学特征及成因研究[J]. 岩石学报, 21(3): 677~687.
- 路远发, 李文霞. 2021. CIPW 标准矿物计算方法与程序设计[J]. 华南地质, 37(3): 348~360.
- 乔玉生, 王方有, 侯茂松, 等. 2011. 湖南张家垄矿区钨矿地质特征[J]. 华南地质与矿产, 27(2): 125~131.
- 秦拯纬, 付建明, 邢光福, 等. 2021. 南岭成矿带中-晚侏罗世成钨、成锡、成铅锌(铜)花岗岩的差异性研究[J]. 中国地质, 4(2): 518~541.
- Rollison H R. 2000. 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜译. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1~275.
- 盛丹, 张锦煦, 陈剑锋. 2020. 浅谈湖南省加里东期花岗岩地球化学特征及其成矿作用[J]. 国土资源导刊, 17(3): 18~24.
- 田磊, 杜云, 邹源, 等. 2021. 湘西南苗儿山地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向[J]. 华南地质, 37(2): 164~176.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217~1 238.
- 吴显愿, 张智宇, 郑远川, 等. 2019. 赣北大湖塘超大型钨矿多期似斑状花岗岩岩浆作用、成因及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 38(3): 318~338.
- 夏金龙, 黄圭成, 定立, 等. 2021. 南岭地区诸广山复式岩体年代格架研究[J]. 华南地质, 37(3): 280~297.
- 徐克勤, 孙鼎, 王德滋, 等. 1963. 华南多旋回的花岗岩的侵入时代、岩性特征、分布规律及其成矿专属性的探讨[J]. 地质学报, 43(1): 1~26.
- 徐文景. 2017. 华夏地块诸广-万洋山地区早古生代陆内岩浆作用与岩石成因[D]. 南京大学博士论文, 1~105.
- 徐先兵, 梁承华, 陈家驹, 等. 2021. 南岭构造带基础地质特征与成矿地质背景[J]. 地球科学, 46(4): 1 133~1 150.
- 严宸, 赵海杰, 赵盼撈, 等. 2019. 湘南圳口石英脉型黑钨矿床白云母 Ar-Ar 同位素测年及其对区域找矿勘查的指示[J]. 矿床地质, 38(5): 1 147~1 158.
- 张文兰, 王汝成, 雷泽恒, 等. 2011. 湘南彭公庙加里东期含白钨矿细晶岩脉的发现[J]. 科学通报, 56(18): 1 448~1 454.
- 张招崇, 董书云, 黄河, 等. 2009. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质和地球化学: 岩石成因和构造背景[J]. 地质通报, 28(12): 1 827~1 839.
- 中国科学院地球化学研究所. 1979. 华南花岗岩类的地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1~418.