

doi: 10.12029/gc20210518

张志辉, 张达, 贺晓龙, 胡肇捷, 祝新友, 杜泽忠, 贾文彬, 巩小栋. 2021. 江西九岭杂岩体中黑云母花岗闪长岩年龄及对扬子和华夏板块碰撞拼合时间限定[J]. 中国地质, 48(5): 1562–1579.

Zhang Zhihui, Zhang Da, He Xiaolong, Hu Bojie, Zhu Xinyou, Du Zezhong, Jia Wenbin, Gong Xiaodong. 2021. Biotite granodiorite age of Jiuling complex in Jiangxi Province and its limitation on the collision and splicing time of the Yangtze and Cathay plates [J]. Geology in China, 48(5): 1562–1579(in Chinese with English abstract).

江西九岭杂岩体中黑云母花岗闪长岩年龄及对扬子 和华夏板块碰撞拼合时间限定

张志辉^{1,2}, 张达¹, 贺晓龙¹, 胡肇捷¹, 祝新友³, 杜泽忠², 贾文彬⁴, 巩小栋⁵

(1. 中国地质大学(北京), 北京 10083; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 3. 北京矿产地质研究院, 北京 100012; 4. 吉林大学, 吉林 长春 130012; 5. 成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:为探讨赣北地区九岭岩体的岩浆成因和构造属性, 本文选取作为九岭岩基重要组成部分的大湖塘黑云母花岗闪长岩进行了年代学、地球化学及锆石 Lu–Hf 同位素研究。LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年结果表明黑云母花岗闪长岩形成于 (835.6 ± 1.5) Ma, 属于钾–高钾钙碱性过铝质花岗岩系列, 具有典型的 S 型花岗岩的特点, 其形成与中元古界双桥山群的熔融密切相关。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主要为正值 (2.8~8.2), 表明形成花岗岩的岩浆来源于元古宙地壳物质的再循环。大湖塘黑云母花岗闪长岩形成的构造环境背景很可能是同碰撞向后碰撞转换的阶段, 结合前人研究, 我们认为扬子板块和华夏板块碰撞拼合的时间上限应为 835 Ma 左右。

关键词: 锆石 U–Pb 年龄; 地球化学; Lu–Hf 同位素; 九岭杂岩体; 地质调查工程; 江西省
中图分类号: P588.12; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2021)05–1562–11

Biotite granodiorite age of Jiuling complex in Jiangxi Province and its limitation on the collision and splicing time of the Yangtze and Cathay plates

ZHANG Zhihui^{1,2}, ZHANG Da¹, HE Xiaolong¹, HU Bojie¹, ZHU Xinyou³,
DU Zezhong², JIA Wenbin⁴, GONG Xiaodong⁵

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3. Beijing Institute of Geology and Mineral Resources, Beijing 100012, China; 4. Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China; 5. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: In order to explore the magmatic origin and tectonic setting of the Jiuling pluton in northern Jiangxi, a combined study of geochronology, geochemistry and zircon Lu–Hf isotope was carried out for the Dahutang biotite granodiorite. LA–ICP–MS zircon

收稿日期: 2019–10–11; 改回日期: 2019–11–29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772069) 及中国地质调查局项目 (1212011220737、121201004000150015、DD20190570) 联合资助。

作者简介: 张志辉, 1980 年生, 男, 博士生, 主要从事矿床学和矿产勘查学等方面的研究工作; E-mail: zzh1102114@126.com。

通信作者: 张达, 1967 年生, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事区域成矿学研究; E-mail: zhangda@cugb.edu.cn。

U-Pb dating of biotite granodiorite suggests it was formed at (835.6 ± 1.5) Ma. Geochemistry analysis shows it belongs to the series of potassium-high potassium calcium alkaline peraluminous granite. It has the typical characteristics of S-type granite and it was derived from the melting of the Neoproterozoic Shuangqiaoshan Group. The positive zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value (2.8–8.2) suggests that the magma forming the granite was originated from the recycling of Proterozoic crustal material. The Dahutang biotite granodiorite was formed in a tectonic background of transition stage from syn-collision to post-collision. Combining with previous studies, it is inferred that the upper time limit of collision between the Yangtze and Cathaysia plate should be about 835 Ma.

Key words: U-Pb geochronology; geochemistry; Lu-Hf isotopes; Jiuling pluton; zircon; geological survey engineering; Jiangxi Province

About the first author: ZHANG Zhihui, born in 1980, male, doctor candidate, engaged in mineral deposits and mineral exploration. E-mail: zzh1102114@126.com.

About the corresponding author: ZHANG Da, male, born in 1967, doctoral supervisor, professor, engaged in regional metallogeny research; E-mail: zhangda@cugb.edu.cn

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41772069) and the project of China Geological Survey (No.1212011220737, No.121201004000150015, No.DD20190570).

1 前言

花岗岩作为大陆地壳最重要的组分之一,记录了板块汇聚和地幔物质上涌过程中地壳的形成和演化(Huppert and Sparks, 1988; Chappell and White, 1992)。华南地区江南造山带中大范围出露新元古代花岗岩类,包括东段皖南地区休宁、许村和歙县岩体,中段赣北地区九岭岩体,西段桂北地区三防、本洞和元宝山岩体等(Wang et al., 2014; Sun et al., 2017)。这些岩浆岩的性质和成因对于揭示扬子和华夏板块碰撞的机制以及江南造山带的形成过程具有重大意义(图1a),在解决Rodinia超大陆聚合和解体的问题中也变得尤为关键(Li, 1999a; Li et al., 2003; Wu et al., 2006; Zhao et al., 2011)。基于对江南造山带出露的一些新元古代花岗岩类的年代学和地球化学的研究,前人曾提出这些花岗岩是超级地幔柱活动导致下地壳重熔的产物(Li et al., 1999b; Li et al., 2003, 2008, 2010; Wang et al., 2007)。事实上,新元古代花岗岩呈带状分布,这一特点很难用地幔柱活动的模型来解释,且华南地区缺乏标志地幔柱活动的大陆溢流玄武岩及放射状岩墙群(孙克克等, 2017)。基于对新元古代花岗岩微量元素组成的进一步研究,越来越多的学者倾向于认为它们的起源与岛弧岩浆系统更为密切,是洋壳俯冲消减于扬子板块下引起的造山运动晚期后碰撞和造山后岩浆活动的产物(Zhou et al., 2002; Zhou et al., 2004; Wang et al., 2004; Wu et al., 2006;

Zhao et al., 2011)。但是,对于扬子板块与华夏板块拼合的时间以及江南造山带中新元古代花岗岩的构造属性仍然存在巨大争议,目前尚缺乏定论。

一方面,基于层序地层学的研究,有学者提出扬子和华夏的拼合时间可持续到830 Ma甚至更晚,而不是前人认为的850 Ma前就已经拼合(Wang et al., 2014)。另一方面,区内大量同位素测年的研究表明,江南造山带主要由990~810 Ma的岩石组合构成,包括与汇聚板块边缘有关的火成岩和沉积岩;而800~750 Ma的岩浆岩则是陆内成因(Shi et al., 1994; 马铁球等, 2009; 董树文等, 2010; 高林志等, 2011; 项新葵等, 2012; Zhao and Cawood, 2012; Yao et al., 2015; 徐先兵等, 2015; Sun et al., 2017; 段政等, 2019)。这些工作对于揭示岩石组合形成的背景有重要意义,但却难以回答江南造山带的构造演化问题,这将制约该区成矿作用研究和某些超大型矿床的成因研究。Sylvester(1998)将造山运动细分为活动边缘大洋板块的俯冲、同碰撞和后碰撞三个阶段。那么,江南造山带形成演化过程中的俯冲-同碰撞-后碰撞的转换时间可否进一步厘定?综上所述,前人对华南新元古代花岗岩的研究获得了较多的年龄数据,但花岗岩形成的时间和与之对应的构造环境仍存在较大争议,尤其在造山运动过程中洋壳俯冲、同碰撞和后碰撞之间的转换时间。

九岭杂岩体位于扬子板块东南缘,是华南板块中出露面积最大($> 2500 \text{ km}^2$)的新元古代花岗质岩体。位于九岭杂岩体附近的大湖塘钨矿田是中国

迄今为止发现的储量最大的超大型钨矿床之一,发育在赣北钨铜多金属矿集区内的九岭—鄱公山多金属成矿带上(图1b),北侧为九江—瑞江(九瑞)铜多金属成矿带,南侧为钦杭结合带重要组成部分的德兴—东乡铜多金属成矿带以及位于华夏板块西北缘的北武夷铜(钼)铅锌多金属成矿带。区域地质研究揭示,九岭—鄱公山多金属成矿带主要历经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,伴随着中生代强烈的构造作用,区内发生了大规模岩浆作用(杨明桂和王昆,1994;Sun et al.,

2017),使得该区成为钨—锡—铜—金多金属矿床广泛发育的成岩成矿区。大湖塘矿区中晋宁期黑云母花岗闪长岩平面面积占比达80%(项新葵等,2012),亦是燕山期成矿作用发生的赋矿围岩,研究它的岩浆起源并判别其构造属性对于探究陆壳生长演化和江南造山带的构造演化具有重大意义,而精细的年代学研究将进一步刻画该区构造属性的时空演化,进而对超大型矿床形成的背景提供信息。

本文选取九岭杂岩体中作为大湖塘钨铜矿床赋矿围岩的黑云母花岗闪长岩开展了地质学、岩相学、岩石地球化学及单颗粒锆石U—Pb定年和原位Hf同位素等方面研究,并结合前人对华南新元古代

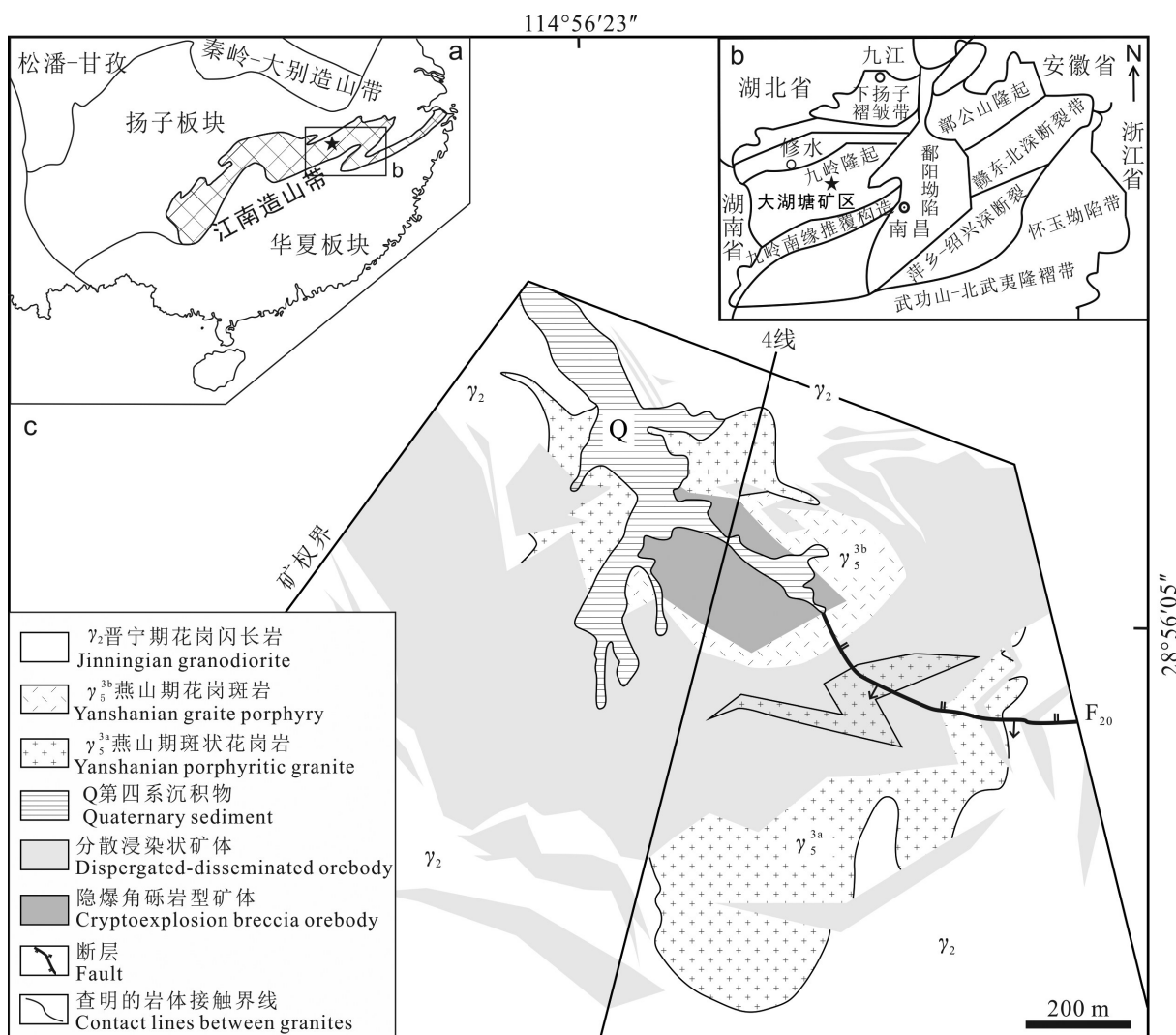


图1 赣北大湖塘钨多金属矿床在华南(a)和江西省(b,据黄兰椿和蒋少涌,2012)的大地构造位置及其地质简图(c,据项新葵等,2012)

Fig.1 Tectonic location of the Dahutang tungsten polymetallic deposit in South China (a) and Jiangxi Province (b, from Huang and Jiang, 2012) and its Sketch geological map (c, from Xiang et al., 2012)

花岗岩的研究成果,拟进一步论证其形成的地质背景及意义。

2 区域地质背景

江南造山带位于扬子板块东南缘,近NE向延伸达1500 km,宽80~200 km,其形成经历了元古宙期间的洋壳俯冲、关闭以及扬子与华夏板块间的碰撞/拼接(舒良树,2012;Li et al., 2016)。中新元古代至早新元古代期间发生的洋壳俯冲可代表两个板块之间的汇聚,弧-陆碰撞或陆-陆碰撞体系得到众多学者的认可(Charvet et al., 1996; Li and Li, 2003; Zhao and Cawood, 2012)。江绍断裂作为新元古代扬子和华夏板块之间的缝合带,同样也被认为是江南造山带的南界(舒良树,2012)。江南造山带主要由元古宙浅变质岩褶皱基底、覆于不整合界面之上的古生代盖层和岩浆岩组成(Zhao and Cawood, 2012)。基底地层包括双溪坞群、溪口群、双桥山群、四堡群、冷家溪群和板溪群等,主要为一套绿片岩相变质片岩和泥质岩,夹长英质凝灰岩,细碧岩和基性-超基性岩石的复理石建造。大量年代学研究表明这些岩石均形成于新元古代,例如,双溪坞群形成于980~890 Ma(Li et al., 2009),双桥山群形成于880~809 Ma(Gao et al., 2008; 霍海龙等, 2018),溪口群形成晚于840 Ma(张彦杰等, 2010),冷家溪群形成于860~820 Ma,板溪群形成晚于820 Ma(孟庆秀等, 2013)。岩浆岩包括大量的过铝质花岗岩,以及少量的镁铁质-超镁铁质岩和硅质玄武岩(Wang and Li, 2003)。过铝质花岗岩类主要为新元古代的侵入体,例如江南造山带西段的本洞、三防和元宝山岩体,中段的九岭杂岩体,东段的许村、歙县和休宁岩体。九岭杂岩体作为华南出露面积最大的新元古代岩体,侵入到中元古代双桥山群安乐林组和修水组地层中,岩性主要为一套巨厚的、以泥砂质细碎屑为主的浅变质岩,上部、下部均含有以凝灰岩为主、夹少量细碧岩、石英角斑岩等,经历了强烈的变形和绿片岩相变质作用,具有较高的铜、金、钼等多金属丰度;其上又被晚新元古代铜门组长石石英砂岩不整合覆盖^①。

九岭-鄣公山成矿带是在扬子板块东南缘之一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而形成构造岩

浆成矿带(图1a;杨明桂和王昆,1994;Sun et al., 2017)。区内构造主要是作为九岭隆起带边界断裂的EW向修水-德安-波阳断裂及NNE向宜丰-景德镇断裂、高台山-鄣公山南东缘NE-NNE向以及德安弧形推(滑)覆构造等;同时发育着武宁-修水、铜鼓-奉新、永修-新建、浮梁-藏湾等韧性剪切带;它们不同程度地控制了区内岩浆作用和与之相关的成矿作用。区内发育的内生金属矿床以钨、锡、金和铜矿等为主,其次为钼、铅锌、铋钼矿等,它们主要在九岭-鄣公山隆起带周缘的大规模花岗杂岩区产出。

3 矿床地质特征

大湖塘钨矿区发育的地层是中元古界双桥山群安乐林组和修水组,主要为一套巨厚灰白-灰绿色绢云母千枚岩、砂质千枚岩及变砂岩韵律式沉积,局部夹火山碎屑岩等火山物质(张志辉等, 2020)。岩浆岩主要是作为九岭岩基一部分的新元古代黑云母花岗闪长岩,呈EW向展布,约占矿区总面积的80%(项新葵等, 2012)。其次是晚侏罗世一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;斑状黑云母二长花岗岩主要以岩株、岩瘤和岩床状产出,多分布在石门寺矿段中部,出露面积约1.7 km²;细粒二云花岗岩出露面积约0.16 km²,以小岩株产出;花岗斑岩在地表、钻孔中呈极不规则的脉状产出,常见膨大缩小、分枝复合,厚的几十至二百余米,薄的仅几厘米,倾向受成矿期NW和NE向两组扭性断裂所限制常呈NE和NW向,倾角均较陡。野外的观察表明,花岗斑岩与热液隐爆角砾岩体型钨钼矿化关系密切(图1c,图2),且明显穿切于矿区斑状黑云母二长花岗岩、细粒二云花岗岩,接触界面清楚截然(图3a、b)。

目前地质勘探结果显示,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岩体上部及外接触带300~600 m的范围内。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、角砾状构造和浸染状构造等。常见的围岩蚀变主要有云英岩化、钾化、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

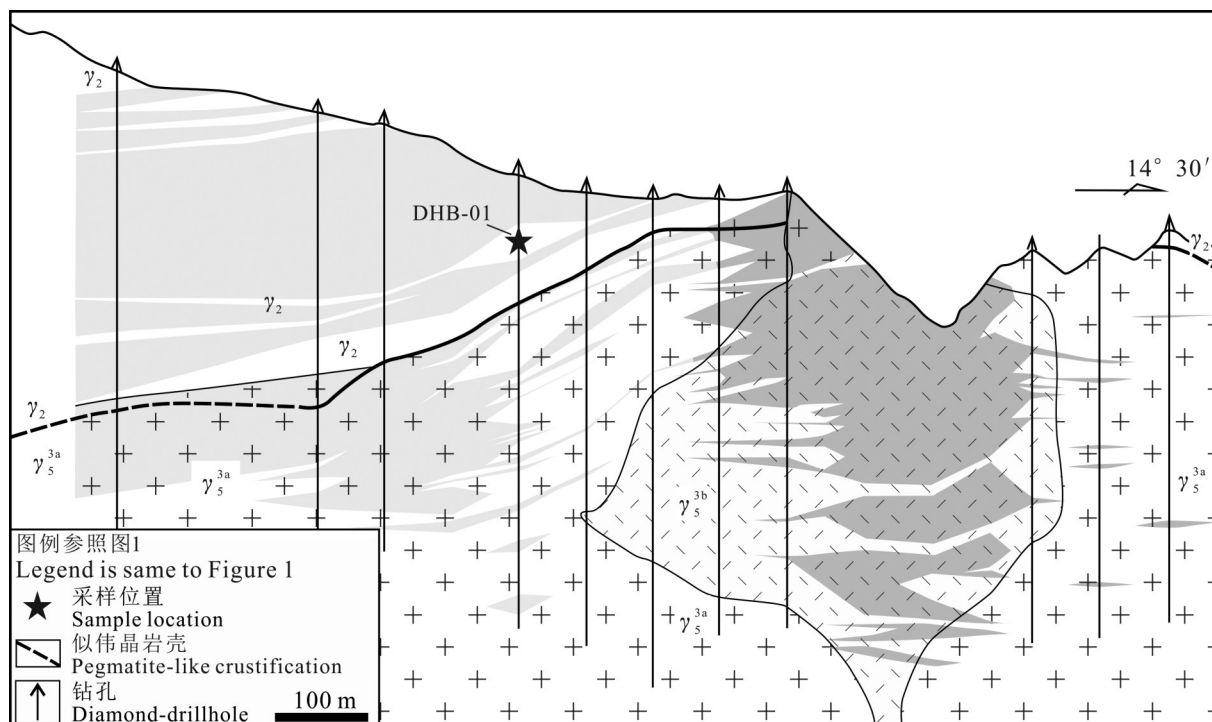


图2 大湖塘石门寺钨矿段4线地质剖面图

Fig. 2 Geological section of line 4 in the Shimensi Wu deposit, Dahutang

钨、钼、铜矿化关系尤为密切。

4 采样及测试方法

实验样品采自大湖塘钨矿田石门寺矿段出露的新鲜黑云母花岗闪长岩(DHB-01、DHB-06、DHB-08、DHB-180、DHB-297、DHB-305),岩石呈灰黑色,粗粒花岗结构,斑杂状构造。主要由斜长石、石英、黑云母组成,石英约占20%、斜长石约占60%、黑云母约占12%、白云母约占5%,副矿物为磷灰石、榍石等。显微镜下,岩石呈粗粒花岗结构,整体弱蚀变,斜长石蚀变较强,已部分或全部绢云母化(图3)。其中斜长石呈自形至半自形的长板状或宽板状,颗粒大小2~3 mm,可见蚀变后的骸晶结构,部分仍可见聚片双晶(图3c、d)。石英呈他形粒状,一级灰或一级黄白干涉色,颗粒大小1~2 mm。黑云母呈棕红色,假六方柱片状集合体,自形程度高,二级蓝干涉色但常被自色所干扰,颗粒大小1 mm左右(图3d)。黑云母花岗闪长岩中常含有众多灰黑色的深源捕虏体,一般呈圆形或椭圆形,少数为不规则状,大小几厘米到几十厘米,分布零乱,常见者成分为细粒二云斜长花岗岩,偶见深灰色具细

粒变晶结构和已揉褶片麻理的片麻岩捕虏体。在矿区北部的路堑上尚见有数处已角岩化、具斑点状构造的中元古代浅变质岩系组成的浅源捕虏体。

4.1 锆石U-Pb同位素定年

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工作在北京锆年领航科技有限公司完成。锆石U-Pb同位素测定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,激光剥蚀的斑束为35 μm ,激光剥蚀样品的深度为20~40 μm 。锆石年龄计算采用国际标准锆石91500作为外标,元素含量采用人工合成硅酸盐玻璃NIST SRM610作为外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。数据处理采用ICP MS Data Cal程序(Liu et al., 2008a, 2010)和Isoplot程序(Ludwig, 2003)进行锆石加权平均年龄计算及谐和图的绘制。

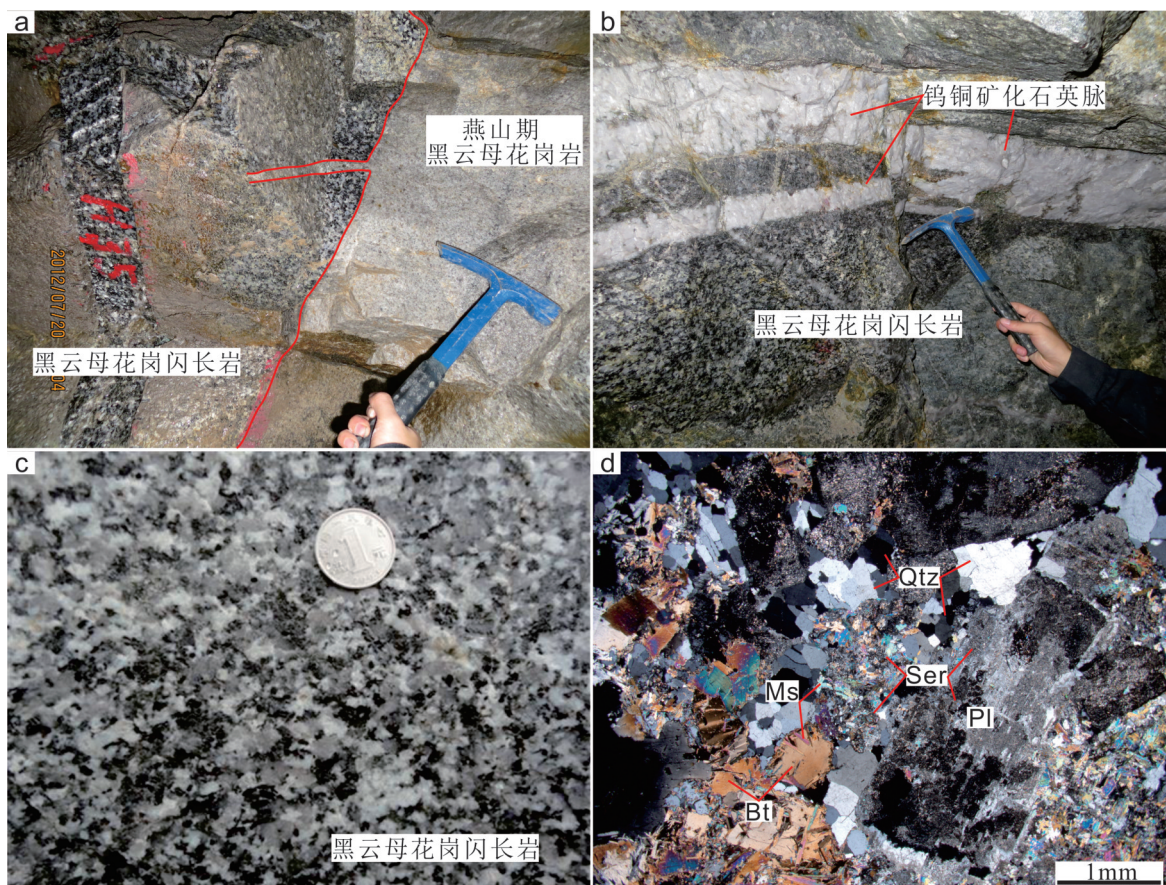


图3 大湖塘黑云母花岗闪长岩产出特征及岩石标本照片

a—燕山期黑云母花岗岩侵入黑云母花岗闪长岩;b—钨铜矿化石英脉穿切黑云母花岗闪长岩;c—黑云母花岗闪长岩(正交偏光);Qtz—石英;Pl—斜长石;Ms—白云母;Bt—黑云母;Ser—绢云母

Fig.3 Occurrence and photos of the Dahutang biotite granodiorite

a—The biotite granite cross-cutting the biotite granodiorite; b—W—Cu mineralized quartz veins of later stage cross-cutting the biotite granodiorite; c—Biotite granodiorite; d—Biotite granodiorite (cross-polarized light); Qtz—Quartz; Pl—Plagioclase; Ms—Muscovite; Bt—Biotite; Ser—Sericite

4.2 锆石 Hf 同位素分析

该项分析是在锆石 U—Pb 定年测试的基础上,针对获得谐和年龄的锆石进行原位 Lu—Hf 同位素分析,实验在天津地质调查中心 LA—MC—ICP—MS 实验室完成,使用的激光束斑直径为 50 μm ,激光剥蚀时间为 26 s,测试时采用锆石 GJ—1 标准,详细测试流程以及仪器运行条件等参见文献(耿建珍等, 2011),测试中 GJ—1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 的值分别为 $0.281988 \pm 18 (2\sigma, n=19)$ 和 0.0003,与文献报道值在误差范围内一致(Morel et al., 2008)。

4.3 全岩氧化物和微量、稀土元素

全岩分析首先将新鲜样品在无污染状态下,粉碎至 200 目以下,重量约 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;微量元素、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同文献(Liu et al., 2008b)所述。

5 分析结果

5.1 锆石 LA—ICP—MS 定年

从图 4 和表 1 可知,本次获得的锆石形态大小相对均匀。分析点大部分选在晶形相对较好、以自形柱状为主的锆石颗粒上,锆石内部的振荡环带清晰,部分环带不清晰是由于锆石的变形所导致的,锆石的长宽比主要为 1:1,部分比值为 2:1,属于典型的岩浆锆石(图 4)。锆石具有较高的 Th、U 含量而致使阴极发光照片颜色较深,振荡环带不明显

表 1 黑云母花岗闪长岩(DHB-01)LA-ICP-MS 锆石定年分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon dating result for the biotite granodiorite

样品号	含量/ 10^{-6}		同位素比值										年龄/Ma					
DHB-01 黑云母花岗闪长岩																		
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
1	72	544	0.1385	0.0008	1.2782	0.0173	0.0669	0.0009	0.0440	0.0018	0.1025	0.0005	836	5	836	11	836	29
2	72	514	0.1386	0.0008	1.2785	0.0164	0.0669	0.0009	0.0405	0.0015	0.3389	0.0043	837	5	836	11	835	29
3	67	507	0.1386	0.0008	1.2786	0.0171	0.0669	0.0009	0.0383	0.0014	0.0937	0.0028	837	5	836	11	835	28
4	101	767	0.1384	0.0008	1.2777	0.0238	0.0669	0.0013	0.0384	0.0013	0.1103	0.0001	836	5	836	16	836	40
5	24	176	0.1387	0.0008	1.2797	0.0175	0.0669	0.0010	0.0404	0.0011	0.2119	0.0012	837	5	837	11	835	30
6	59	429	0.1389	0.0008	1.2831	0.0151	0.0670	0.0009	0.0386	0.0022	0.2372	0.0012	838	5	838	10	838	26
7	87	666	0.1388	0.0008	1.2849	0.0185	0.0671	0.0010	0.0382	0.0015	0.0900	0.0002	838	5	839	12	842	32
8	75	576	0.1375	0.0007	1.2651	0.0158	0.0667	0.0009	0.0384	0.0010	0.1012	0.0003	830	4	830	10	830	28
9	61	445	0.1386	0.0008	1.2801	0.0152	0.0670	0.0009	0.0394	0.0009	0.2685	0.0004	837	5	837	10	837	27
10	84	644	0.1387	0.0008	1.2845	0.0194	0.0672	0.0011	0.0395	0.0010	0.0866	0.0007	838	5	839	13	842	33
11	63	475	0.1383	0.0008	1.2760	0.0145	0.0669	0.0008	0.0406	0.0025	0.1660	0.0054	835	5	835	9	835	26
12	80	611	0.1385	0.0007	1.2804	0.0161	0.0671	0.0009	0.0464	0.0013	0.0878	0.0005	836	4	837	11	840	28
13	81	618	0.1388	0.0008	1.2824	0.0170	0.0670	0.0010	0.0462	0.0014	0.0836	0.0002	838	5	838	11	838	30
14	63	478	0.1387	0.0007	1.2820	0.0189	0.0670	0.0010	0.0449	0.0018	0.0902	0.0002	837	4	838	12	839	32
15	58	423	0.1384	0.0007	1.2786	0.0165	0.0670	0.0009	0.0456	0.0012	0.2180	0.0005	836	4	836	11	838	29
16	69	523	0.1380	0.0008	1.2728	0.0317	0.0669	0.0017	0.0401	0.0011	0.1167	0.0003	833	5	834	21	834	53
17	28	216	0.1375	0.0007	1.2658	0.0155	0.0668	0.0009	0.0397	0.0010	0.0628	0.0001	831	4	831	10	830	28
18	63	477	0.1377	0.0007	1.2707	0.0158	0.0669	0.0009	0.0387	0.0010	0.1311	0.0001	832	4	833	10	836	28
19	60	454	0.1383	0.0007	1.2767	0.0175	0.0669	0.0010	0.0390	0.0012	0.0994	0.0004	835	4	835	11	836	31
20	43	330	0.1384	0.0008	1.2780	0.0297	0.0670	0.0016	0.0387	0.0009	0.0763	0.0002	836	5	836	19	837	48
21	30	188	0.1381	0.0008	1.2774	0.0165	0.0671	0.0009	0.0339	0.0010	1.1061	0.0026	834	5	836	11	840	29
22	72	550	0.1383	0.0008	1.2815	0.0206	0.0672	0.0011	0.0329	0.0019	0.1278	0.0002	835	5	838	13	843	35
23	39	288	0.1379	0.0008	1.2719	0.0162	0.0669	0.0009	0.0319	0.0010	0.2404	0.0006	833	5	833	11	835	29
24	58	441	0.1385	0.0007	1.2757	0.0154	0.0668	0.0009	0.0298	0.0009	0.1092	0.0003	836	4	835	10	832	27
25	111	835	0.1377	0.0007	1.2721	0.0204	0.0670	0.0011	0.0295	0.0009	0.2418	0.0003	832	4	833	13	838	35
26	32	230	0.1387	0.0007	1.2834	0.0162	0.0671	0.0009	0.0284	0.0010	0.4551	0.0065	837	4	838	11	841	28
27	73	563	0.1378	0.0008	1.2720	0.0170	0.0669	0.0009	0.0281	0.0010	0.1101	0.0005	832	5	833	11	836	29
28	62	475	0.1381	0.0007	1.2765	0.0176	0.0670	0.0010	0.0256	0.0012	0.1677	0.0001	834	4	835	12	839	30
29	66	487	0.1381	0.0007	1.2697	0.0193	0.0667	0.0010	0.0249	0.0013	0.3244	0.0013	834	4	832	13	828	32
30	49	352	0.1411	0.0008	1.3176	0.0218	0.0678	0.0011	0.0234	0.0022	0.4450	0.0009	851	5	853	14	861	34
31	63	472	0.1387	0.0007	1.2811	0.0170	0.0670	0.0009	0.0290	0.0017	0.1864	0.0006	838	4	837	11	837	29
32	64	488	0.1389	0.0007	1.2841	0.0159	0.0670	0.0009	0.0372	0.0011	0.1010	0.0009	839	4	839	10	839	28
33	74	552	0.1383	0.0007	1.2779	0.0165	0.0670	0.0009	0.0347	0.0011	0.1862	0.0005	835	4	836	11	838	29
34	52	395	0.1380	0.0007	1.2737	0.0220	0.0669	0.0012	0.0370	0.0010	0.1068	0.0012	833	4	834	14	836	37
35	40	253	0.1378	0.0007	1.2718	0.0165	0.0669	0.0009	0.0350	0.0016	1.0701	0.0011	832	4	833	11	835	29

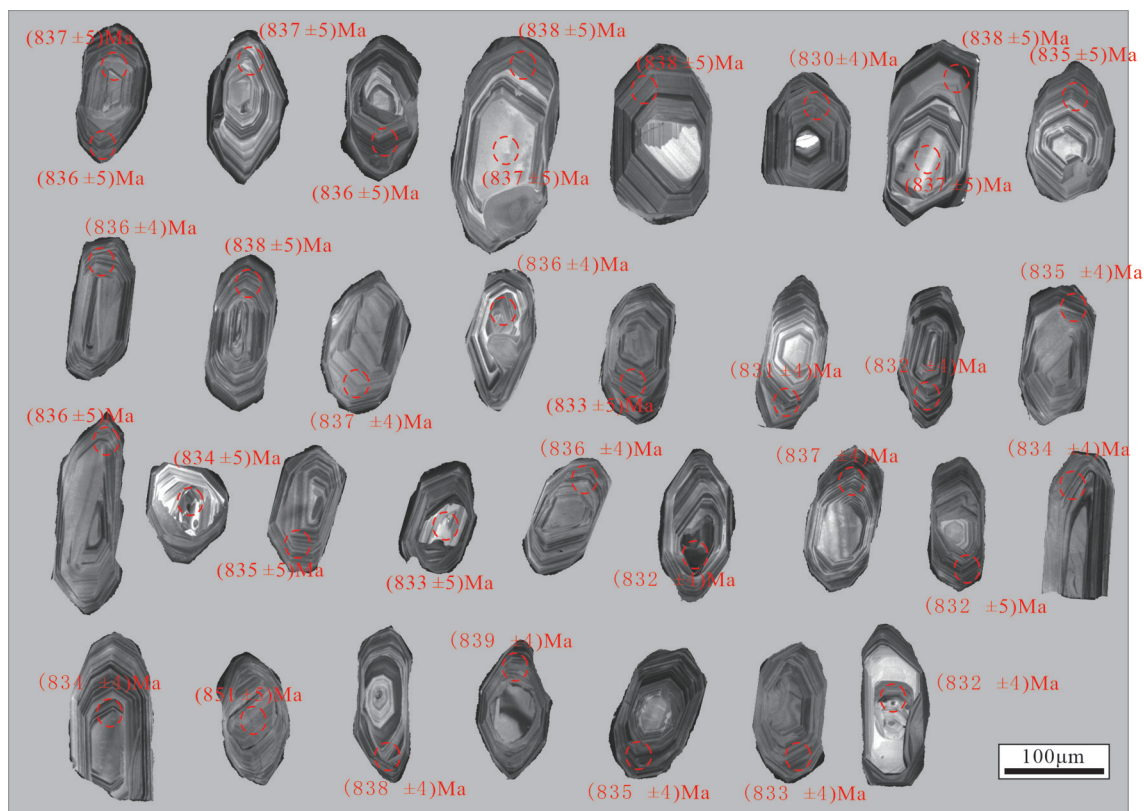


图4 大湖塘黑云母花岗闪长岩锆石阴极发光图像

Fig.4 Cathodoluminescence images of the zircons from the Dahutang biotite granodiorite

且较窄,因可能受到放射性损伤,导致部分颗粒表面呈筛孔状结构。锆石中U含量均在 700×10^{-6} 以下,远低于 2500×10^{-6} ,因此本次测定的U-Pb年龄不会受到高U含量(2500×10^{-6})的影响(Williams and Hergt, 2000)。35颗锆石的U-Pb同位素分析结果显示,它们均在谐和线上或谐和线附近,年龄变化于831~838 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值为 $(835.6 \pm 1.5)\text{Ma}$,MSWD=0.58(图5),代表了该岩体的岩浆结晶年龄。

5.2 地球化学特征

5.2.1 主量元素

6件全岩氧化物分析结果(表2)显示:(1) SiO_2 含量为66.26%~68.42%,平均67.24%,低于世界花岗岩类的平均水平(Nocklods, 1954; Le Maitre, 1976; 黎彤等, 1998);(2) Al_2O_3 含量偏高,为14.19%~15.93%,平均15.19%,A/CNK值为1.318~1.529,与全球花岗岩类相比(A/CNK为1.10)(黎彤等, 1998)偏高,A/NK值为1.78~2.3,在A/NK-A/CNK图解(图6b)中,黑云母花岗闪长岩投影点位于铝质过饱和范围内;(3)碱含量:($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)为5.19%~

7.00%,平均6.01%,低于中国花岗岩类和全球花岗岩类的平均值(分别为7.86%、7.59%)(黎彤等, 1998); K_2O 含量为3.39%~4.54%,平均3.97%; Na_2O 含量为0.97%~2.53%,平均2.05%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.38\sim 4.35$,平均1.94,样品 K_2O 的含量大于 Na_2O 含量,属钾质—高钾质类型岩石(图6d),在TAS侵入岩判别图中,岩石全部落入花岗闪长岩区域(图6a),与野外对该岩石的定名相一致;(4)本次研究的黑云母花岗闪长岩的镁、钛、磷等含量较高;(5)在 SiO_2 - K_2O 判别图上,黑云母花岗闪长岩样品落入高钾钙碱性系列中,其中有2个点落入钾玄岩系列中(图6e);(6)碱度率 $AR=1.94\sim 2.32$,平均为2.09,也表明花岗闪长岩属于钙碱性系列(图6c);(7)在FAM判别图中,黑云母花岗闪长岩也落入钙碱性趋势区域(图6f)。综上所述,主量元素的分析表明大湖塘黑云母花岗闪长岩属于钾—高钾钙碱性过铝质花岗岩系列。

5.2.2 微量元素和稀土元素

微量元素原始地幔标准化蛛网图(表2,图7a)显示,晋宁期黑云母花岗闪长岩富集Rb、U、Th、K

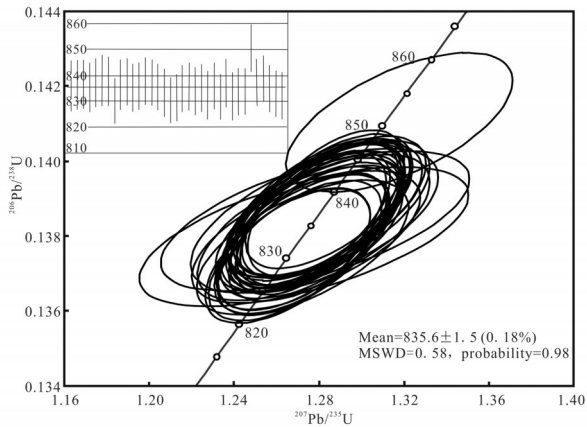


图5 大湖塘黑云母花岗闪长岩锆石U-Pb年龄谐和图
Fig.5 U-Pb zircon concordia plots of the Dahutang biotite granodiorite

等大离子亲石元素,相对亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素,与陆源弧型中酸性岩浆岩微量元素分布特征类似(Drummond et al., 1996)。Rb/Sr比值为2.3~16.4,平均6.4,表明岩浆物源以壳源为主,显示出陆壳重熔花岗岩的特征;Rb/Ba比值为0.47~2.74,平均值1.28,显著高于原始地幔的平均值0.09、而更接近陆壳的平均值0.11;Sr/Ba比值为0.17~0.38,平均值0.25,明显低于原始地幔的平均值3.01、而更接近陆壳的平均值0.70(Rudnick and Gao, 2004)。

黑云母花岗闪长岩的REE总量为 162.21×10^{-6} ~ 213.24×10^{-6} (表2),平均 182.55×10^{-6} ,低于世界平均水平(Nocklods, 1954; Le Maitre, 1976; 黎彤等, 1998);LREE/HREE为4.69~8.66,平均7.24,LREE相对HREE更为富集,表现 $(La/Yb)_N > 1$,其变化于4.23~10.52,平均7.98; δEu 为0.47~0.88,平均0.665,为Eu的中等负异常,表明岩浆结晶分异过程中斜长石分异较明显。在稀土元素球粒陨石标准化稀土图谱上(图7b),本次研究的6件花岗闪长岩样品的球粒陨石标准化稀土配分曲线总体表现为“右倾斜型”,其中重稀土Ho-Lu表现为平坦型,轻稀土元素分馏程度明显。上述微量稀土元素特征反映出形成黑云母花岗闪长岩的岩浆源自陆壳但经历了一定程度的分异演化,具有S型花岗岩的特点。

5.3 锆石Hf同位素特征

黑云母花岗闪长岩(DHB-01)样品的锆石原位Hf同位素测试结果列于表3。 $^{176}Yb/^{177}Hf$ 和 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值范围分别为0.0249~0.1094和

表2 黑云母花岗闪长岩主量元素(%)、微量元素(10^{-6})分析结果
Table 2 Major (%) and trace (10^{-6}) elements compositions of the biotite granodiorite

样号	DHB-01	DHB-06	DHB-08	DHB-180	DHB-297	DHB-305
SiO ₂	67.24	67.66	66.26	66.64	67.21	68.42
Al ₂ O ₃	15.43	14.89	15.93	15.38	15.29	14.19
Fe ₂ O ₃	0.80	0.74	0.54	0.94	0.92	0.82
FeO	3.85	4.37	4.17	4.30	3.25	3.40
CaO	1.48	1.69	1.72	1.92	1.80	2.05
MgO	1.79	1.95	1.81	2.04	1.38	1.60
K ₂ O	3.39	3.66	4.54	3.48	4.51	4.22
Na ₂ O	2.27	2.30	2.46	2.53	1.75	0.97
TiO ₂	0.64	0.73	0.68	0.78	0.52	0.59
P ₂ O ₅	0.13	0.14	0.17	0.14	0.32	0.47
MnO	0.09	0.10	0.09	0.10	0.14	0.12
烧失量	2.19	0.96	0.90	1.04	2.35	2.46
总量	99.30	99.19	99.27	99.29	99.44	99.31
La	34.7	38.0	35.2	35.0	29.8	34.3
Ce	73.5	82.3	76.1	72.6	66.7	74.4
Pr	8.13	9.34	8.67	8.76	7.58	8.34
Nd	32.7	37.1	34.1	36.8	29.7	32.9
Sm	6.81	7.70	6.82	7.40	6.10	6.39
Eu	1.85	1.27	1.64	1.39	1.18	1.26
Gd	6.00	8.79	5.98	6.97	5.56	5.72
Tb	0.99	1.48	0.88	1.00	0.91	0.85
Dy	5.72	9.88	5.05	5.51	6.07	5.08
Ho	1.23	2.23	0.98	1.10	1.23	0.99
Er	3.39	6.72	2.72	2.91	3.26	2.67
Tm	0.51	1.00	0.38	0.40	0.48	0.38
Yb	3.35	6.44	2.40	2.67	3.17	2.57
Lu	0.52	0.99	0.37	0.40	0.47	0.37
Rb	305	233	259	222	830	656
Ba	312	313	549	353	303	313
Th	16.5	17.7	15.2	16.8	12.4	15.1
U	3.32	7.34	1.71	2.34	1.85	3.39
K	28142	30383	37688	28889	37439	35032
Ta	0.92	1.11	0.79	1.01	1.79	1.05
Nb	11.4	13.0	12.0	13.6	17.4	14.2
Sr	119.0	92.9	115.0	95.2	50.6	52.1
P	567.3	610.9	741.9	610.9	1396.5	2051.1
Zr	196	204	166	218	164	168
Hf	6.18	6.59	5.25	7.02	5.17	5.49
Ti	3835.7	4375.2	4075.5	4674.8	3116.5	3536.1
Y	29.1	59.5	24.9	27.6	33.5	26.2

0.0011~0.0031, $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值除 0.0022、0.0031、0.0022 以及 0.0023 四个点外,其余均小于 0.002,表明这些锆石在形成以后,仅具有较少的放射成因Hf的积累,因而可以用初始 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值(陈好寿和徐步台,1996)。31

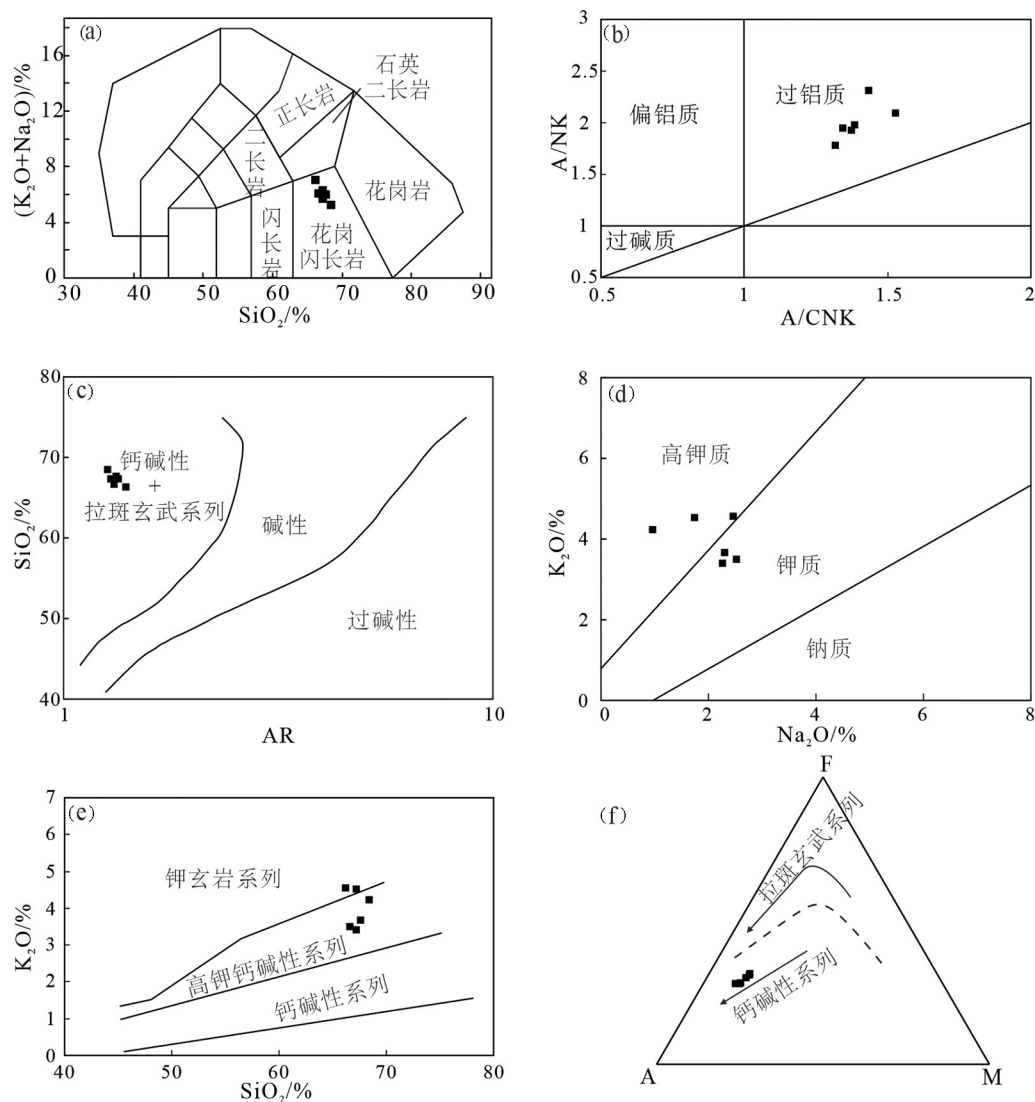


图6 黑云母花岗闪长岩主量元素判别图

Fig.6 Discrimination diagrams of major element of the Dahutang biotite granodiorite

个点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要介于2.7~8.2(除个别负值-1.6),表明黑云母花岗闪长岩的物质来源主要为地壳物质的重融,且可能具有亏损的幔源组分特性(图8)。单阶段模式年龄(T_{DM1})集中在1068~1281 Ma,存在个别更老的年龄1454 Ma;二阶段模式年龄(T_{DM2})集中在1205~1555 Ma,存在个别更老的年龄1825 Ma。

6 讨论

6.1 岩石成因类型、岩浆源区

6.1.1 岩石成因类型

在岩石学成因方面,常用的花岗岩成因分类方案是由提出的ISAM方案,它们基于矿物组成、地球

化学特征及花岗岩源区的不同将花岗岩成因类型划分M型、I型、S型和A型(Chappell and White, 1992),其中,M型较少或不发育,自然界中花岗岩的成因类型主要为I型、S型和A型,且以I型、S型为主。晋宁期黑云母花岗闪长岩地球化学特征显示,岩石具有较高的 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 含量,较低的 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 含量;微量元素中,Rb、Nb、Cs偏高,Sr、Ta、Ba偏低;强不相容元素Rb、K、Th、Ce、Sm明显富集,而高场强元素Nb、Sr、P、Ti明显亏损;轻、重稀土元素分异明显,轻稀土元素富集,具有中等到强的负Eu异常,黑云母花岗闪长岩的 δEu 值为0.47~0.88,表明岩浆物质主要来源于重熔的陆

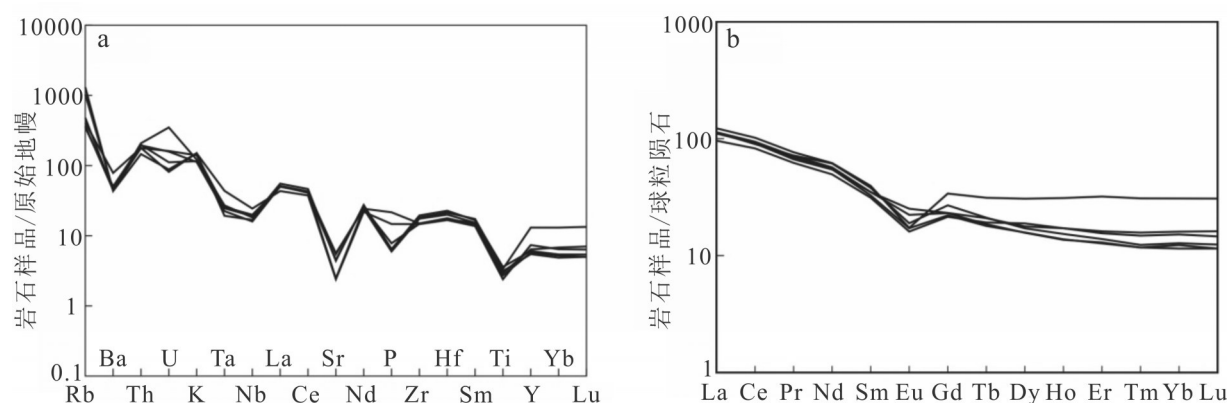


图7 黑云母花岗闪长岩的微量元素蛛网图(a)和稀土元素配分曲线(b)

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace element patterns (a) and chondrite-normalized REE distribution patterns (b) of the biotite granodiorite

表3 大湖塘黑云母花岗闪长岩 Lu-Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotopic composition of the Dahutang biotite granodiorite

序号	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}/Ma	T_{DMC}/Ma	f_{LuHf}
1	838	0.0670	0.0015	0.282465	0.000020	0.282442	-10.9	6.8	1126	1294	-0.96
2	837	0.0694	0.0015	0.282418	0.000020	0.282394	-12.5	5.1	1195	1401	-0.95
3	836	0.0677	0.0015	0.282468	0.000018	0.282444	-10.8	6.9	1124	1290	-0.95
4	838	0.0631	0.0014	0.282379	0.000018	0.282357	-13.9	3.9	1246	1483	-0.96
5	838	0.0643	0.0015	0.282372	0.000016	0.282349	-14.2	3.6	1258	1502	-0.96
6	830	0.0725	0.0016	0.282407	0.000020	0.282383	-12.9	4.6	1212	1431	-0.95
7	838	0.0964	0.0022	0.282400	0.000021	0.282365	-13.2	4.1	1244	1466	-0.93
8	835	0.0713	0.0016	0.282369	0.000021	0.282344	-14.3	3.3	1267	1515	-0.95
9	836	0.0783	0.0017	0.282383	0.000019	0.282356	-13.7	3.8	1251	1486	-0.95
10	837	0.0487	0.0011	0.282398	0.000018	0.282380	-13.2	4.7	1210	1431	-0.97
11	836	0.0774	0.0018	0.282414	0.000021	0.282386	-12.7	4.8	1210	1421	-0.95
12	833	0.0782	0.0018	0.282415	0.000019	0.282387	-12.6	4.8	1207	1419	-0.95
13	831	0.0849	0.0020	0.282393	0.000021	0.282361	-13.4	3.8	1248	1479	-0.94
14	832	0.0642	0.0015	0.282420	0.000020	0.282396	-12.5	5.1	1192	1400	-0.95
15	835	0.0530	0.0014	0.282347	0.000019	0.282326	-15.0	2.7	1290	1555	-0.96
16	836	0.0585	0.0014	0.282385	0.000018	0.282363	-13.7	4.0	1238	1471	-0.96
17	834	0.0551	0.0015	0.282450	0.000020	0.282426	-11.4	6.2	1149	1331	-0.96
18	835	0.0695	0.0018	0.282417	0.000017	0.282389	-12.6	4.9	1204	1413	-0.95
19	833	0.0519	0.0014	0.282505	0.000017	0.282483	-9.4	8.2	1068	1205	-0.96
20	836	0.0350	0.0010	0.282220	0.000022	0.282205	-19.5	-1.6	1454	1825	-0.97
21	832	0.0567	0.0016	0.282396	0.000018	0.282371	-13.3	4.2	1229	1456	-0.95
22	837	0.1094	0.0031	0.282467	0.000019	0.282419	-10.8	6.0	1174	1346	-0.91
23	832	0.0652	0.0019	0.282405	0.000018	0.282376	-13.0	4.4	1224	1444	-0.94
24	834	0.0505	0.0014	0.282354	0.000016	0.282332	-14.8	2.9	1281	1542	-0.96
25	834	0.0790	0.0022	0.282439	0.000020	0.282405	-11.8	5.5	1185	1378	-0.94
26	851	0.0288	0.0009	0.282392	0.000020	0.282378	-13.4	4.9	1211	1429	-0.97
27	838	0.0673	0.0019	0.282402	0.000021	0.282372	-13.1	4.4	1231	1450	-0.94
28	839	0.0402	0.0013	0.282424	0.000018	0.282403	-12.3	5.5	1180	1380	-0.96
29	835	0.0835	0.0023	0.282387	0.000019	0.282350	-13.6	3.5	1267	1501	-0.93
30	833	0.0507	0.0014	0.282373	0.000019	0.282351	-14.1	3.5	1255	1500	-0.96
31	832	0.0249	0.0007	0.282378	0.000020	0.282367	-13.9	4.1	1226	1465	-0.98

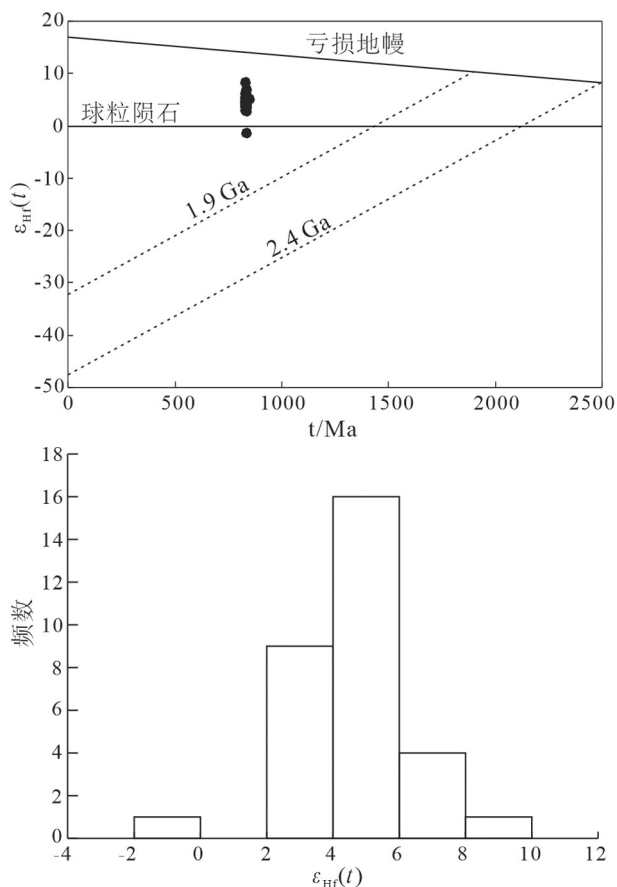


图8 大湖塘黑云母花岗闪长岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ - t 图解
Fig.8 The $\epsilon_{Hf}(t)$ vs t diagram of the Dahutang biotite granodiorite

壳,但经历了一定程度的分异演化。ACF图解清楚地显示出花岗岩富铝的特征(图9a),黑云母花岗闪长岩落入钙长石和富铝黑云母的连线上方S型花岗岩区域,这与黑云母花岗闪长岩的矿物组合(斜长石+黑云母+白云母)也相一致。黑云母花岗岩整体上显示出高钾钙碱性强过铝质S型花岗岩的特征。

实验岩石学表明,在强过铝质岩浆中, P_2O_5 随 SiO_2 变化趋势可以用来区别I型和S型花岗岩(Chappell et al., 1999),研究区晋宁期黑云母花岗闪长岩的 P_2O_5 与 SiO_2 整体上呈正相关关系,与S型花岗岩的变化趋势相符合(图9b)。李献华等(2007)指出在S型花岗岩的Y含量低,并与Rb含量呈负相关关系,而研究区晋宁期黑云母花岗闪长岩表现出Y随Rb的升高而降低的S型花岗岩演化趋势(图9c);如图9d所示,Th也表现出S型花岗岩具有的演化趋势,与Rb含量呈负相关关系。这些特征表明,

研究区晋宁期黑云母花岗闪长岩地球化学特征明显区别于I型花岗岩,具有S型花岗岩特征。

邓晋福等(1994)提出矿物学标志是判别S型花岗岩时最可靠的证据,如白云母、堇青石、石榴子石、刚玉和电气石等。此次研究中,黑云母花岗闪长岩中发现的原生白云母(图3d)也是判别S型花岗岩的重要标志之一。此外,李献华等(2001)也发现赣北九岭岩体和皖南地区的许村、休宁、歙县岩体中均含有堇青石,具有典型的S型花岗岩的特点,很可能是区域中元古宙变质沉积岩重熔而形成。综上所述,研究区九岭杂岩体中的晋宁期黑云母花岗闪长岩为S型花岗岩,岩浆物质主要来源于重熔的陆壳。

6.1.2 源区分析

在微量元素蛛网图中,黑云母花岗闪长岩富集Rb、K等大离子亲石元素和U、Th等放射性元素,相对亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素;Ba元素的亏损可能与岩体经历了与斜长石和黑云母的分异结晶作用有关,P、Ti的亏损说明岩浆经历了含P、Ti矿物的分异结晶作用,地壳岩石一般都亏损P、Ti以及Nb和Ta(图7a)。该岩体的Nb/Ta比值变化为9.7~15.2,平均值12.7,与平均陆壳值非常接近,远低于地幔值(17左右),进一步表明其应该为陆壳重熔岩石。另一方面,Nb-Ta-Ti负异常和低的Nb/La的存在表明其源区或受到了俯冲组分的影响,或者是源区部分熔融过程中存在残留钛酸盐矿物(Fley et al., 1992; Miller et al., 1999)。黑云母花岗闪长岩的岩石稀土元素总量为 $162.21 \times 10^{-6} \sim 213.24 \times 10^{-6}$,稀土元素分配型曲线右倾型, $(La/Yb)_N$ 为4.23~10.52,轻重稀土元素分馏明显,Eu异常为中等负异常,表明斜长石在源区未残留,很可能是在岩浆演化过程中结晶分异造成的。从稀土元素来看,轻稀土元素($(La/Yb)_N$ 为4.23~10.52)具有明显的分馏程度,重稀土元素具有一定的分馏程度($(Gd/Yb)_N$ 为1.12~2.16),这些特征同样暗示着黑云母花岗闪长岩发生了一定程度的结晶分异。在反映花岗岩源区特征的Rb/Sr-CaO/ Na_2O 图解中(图10a),大湖塘晋宁期黑云母花岗闪长岩CaO/ Na_2O 均大于0.3,具有杂砂岩形成的过铝质花岗岩熔体特征;Rb/Sr-Rb/Ba图解(图10b)则表明其源区具有富黏土矿物源岩的特征。

区域内发育的中元古界双桥山群主要为一套

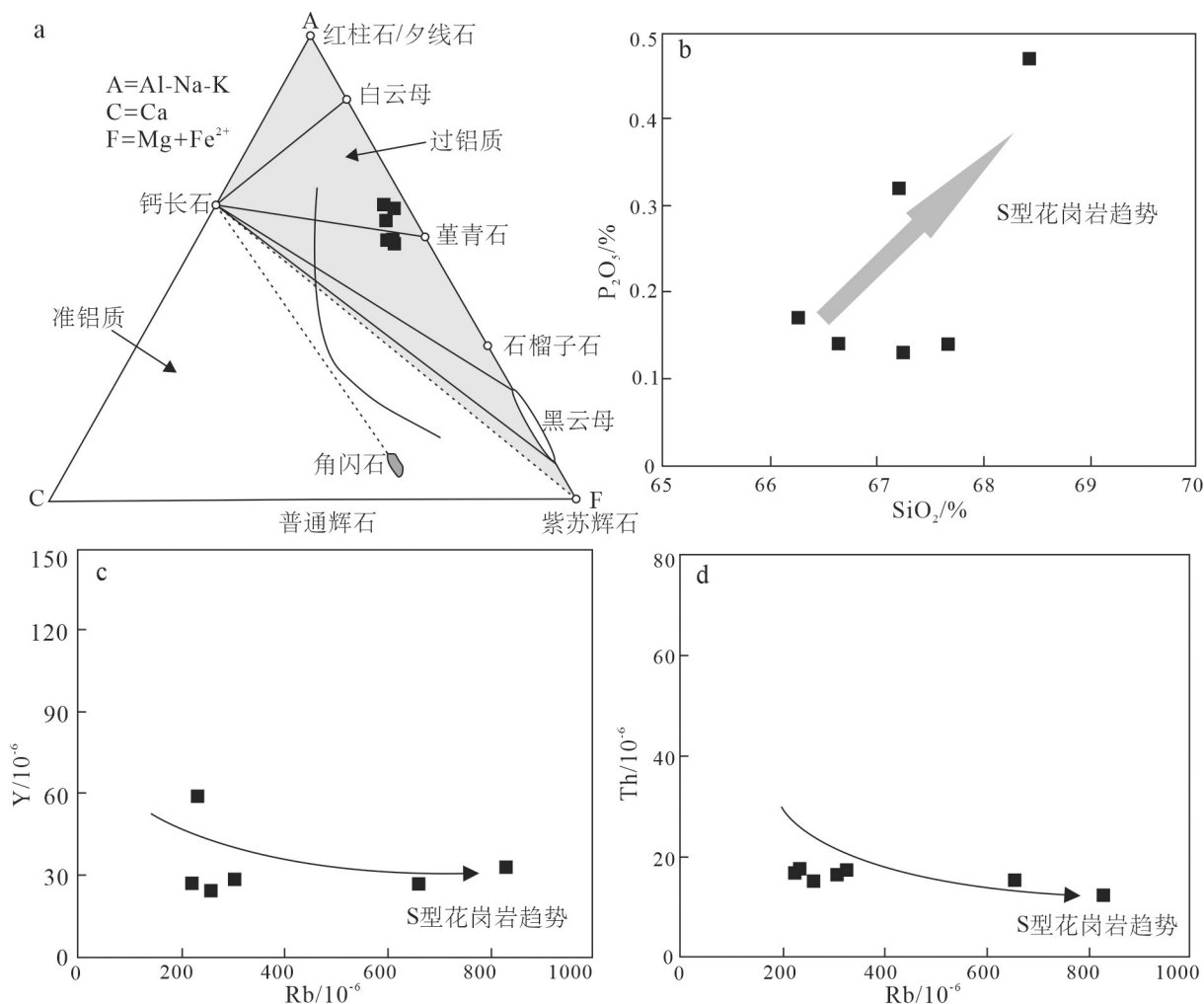


图9 大湖塘黑云母花岗岩成因类型判别图解(a, 据李献华, 1999)

Fig. 9 Genetic type discrimination diagram of the Dahutang biotite granodiorite (a, after Li Xianhua, 1999)

巨厚灰白-灰绿色绢云母千枚岩、砂质千枚岩及变砂岩韵律式沉积,局部夹火山碎屑岩等火山物质。本次研究的黑云母花岗闪长岩的岩石地球化学特征表明其来源于重熔的陆壳,源岩为杂砂岩和富粘土原岩形成的过铝质花岗岩熔体,这些特征表明黑云母花岗闪长岩很可能来源于区内双桥山群的熔融。

前人对江南造山带中的赣北大湖塘和皖南一带钨(多金属)矿床的花岗岩和白钨矿开展了大量Nd-Sr同位素分析(Wu et al., 2006; Song et al., 2014; 黄兰椿和蒋少涌, 2014; Mao et al., 2015; Sun and Chen, 2017; Feng et al., 2018),这些研究表明无论是晋宁期的花岗岩类岩浆活动,还是燕山期发生的岩浆-钨成矿事件,均与双桥山群有着成因上的密切联系。Sun and Chen(2017)对大湖塘石门寺矿

段中产在晋宁期花岗闪长岩中的石英脉型白钨矿和燕山期似斑状花岗岩中的白钨矿进行的微区原位微量元素分析进一步表明,经历了高演化的成矿流体使得赋存在晋宁期黑云母花岗闪长岩中的白钨矿多具有正Eu异常,这种正Eu异常是黑云母花岗闪长岩中斜长石蚀变导致的。成矿物质主要由燕山期似斑状花岗岩岩浆和熔融的双桥山群地层共同提供,成矿过程中强烈的水岩反应使得作为赋矿围岩的黑云母花岗闪长岩中的大量斜长石蚀变成绢云母(图3d),这一过程为白钨矿的形成提供了大量的Ca, Eu和Sr元素。

孙克克等(2017)在九岭岩体内部观察到大量暗色富云包体,地球化学特征表明其很可能是幔源基性岩浆与富K贫Ca下地壳相互作用的产物。本

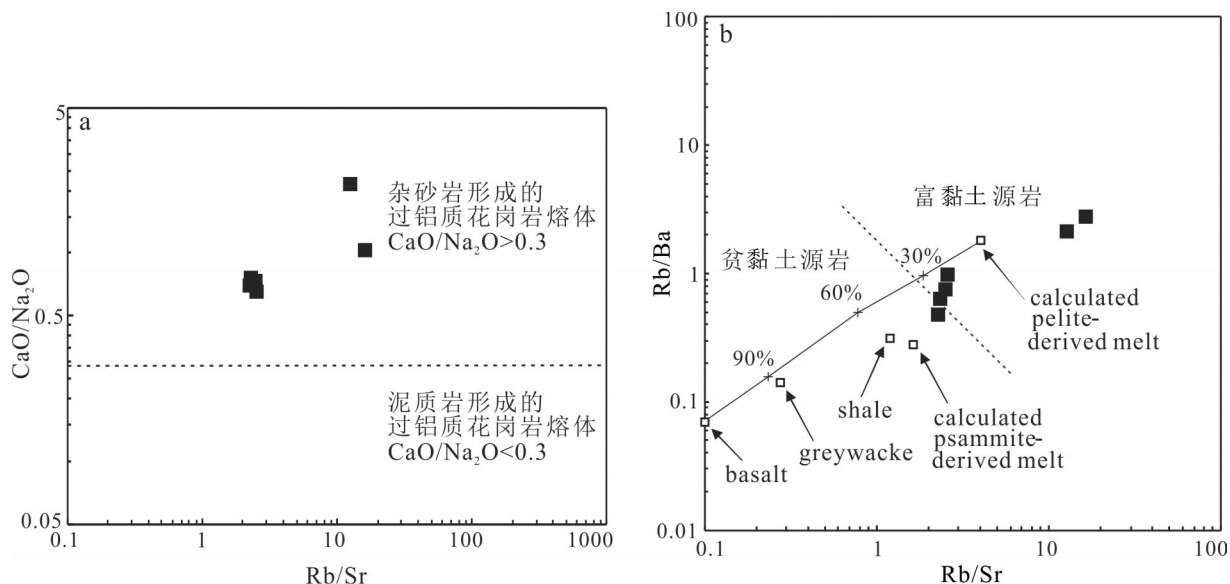


图 10 大湖塘黑云母花岗闪长岩的源岩判别图解(据 Sylvester, 1998)

Fig. 10 Discrimination diagram for the source rock of the Dahutang biotite granodiorite (after Sylvester, 1998)

次研究的黑云母花岗闪长岩锆石 Hf 同位素结果显示, 31 颗锆石中绝大部分的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值, 平均 4.5, 最大达 8.2, 暗示岩浆形成过程中可能有亏损地幔组分的加入(张家辉等, 2020)。

6.2 构造环境分析

强过铝质花岗岩的形成与碰撞造山作用有关, 后碰撞花岗岩的形成于地壳收缩高峰之后的伸展构造环境中 (Vernon, 1984; Sylvester, 1998; Barbarin, 1999)。在 $(\text{Yb}+\text{Ta})-\text{Rb}$ 构造判别图中, 研究区晋宁期黑云母花岗闪长岩基本上落于同碰撞花岗岩区域内 (图 11a), 而在 $(\text{Yb}+\text{Nb})-\text{Rb}$ 构造判别图中则部分落于同碰撞花岗岩区域内, 另一部分则落于后碰撞区域内, 具有同碰撞花岗岩向后碰撞花岗岩转变的特点 (图 11b)。九岭杂岩体中黑云母花岗闪长岩很可能形成于同碰撞向后碰撞转换的阶段。

前人曾提出江南造山带中新元古代花岗闪长岩是华南地幔柱的产物 (Li, 1999a; Li et al., 2003), 但江南造山带出露的花岗闪长岩在空间上呈带状分布, 且华南地区缺乏标志地幔柱活动的大陆溢流玄武岩及放射状岩墙群, 此观点有待进一步的验证。九岭花岗闪长岩侵入到已发生明显变形的中元古界双桥山群后, 又被未发生变形的新元古界南华系不整合覆盖, 这两个地层间的不整合界面形成的时间能够制约两个板块碰撞结束的时间。Zhao et al. (2011) 基于对华南新元古代地层年龄的重新评

价将该不整合界面的形成时间限制在 830 Ma, 以此作为江南造山带形成的时间上限, 亦是扬子和华夏板块碰撞拼合的时间上限。Wu et al. (2006) 认为在新元古代早期, 扬子和华夏板块间的演化包括了洋壳的俯冲和岛弧岩浆作用 (约 1100~900 Ma), 弧陆碰撞 (920~880 Ma), 初生地壳熔融、抬升剥蚀及沉积作用 (880~830 Ma), 后碰撞的坍塌和深熔作用以及 S 型花岗岩的岩浆作用 (830~820 Ma)。初生地壳的短期循环再造, 使得江南造山带的花岗闪长岩同时具有了 I 型和 S 型花岗岩的特点。也有学者基于江南造山带中不同地区的变质沉积岩的基底层序对比, 结合对新元古代地壳的全岩 Nd 同位素、碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素等研究提出, 江南造山带的基底地层接收了大量来自造山带以东的弧陆碰撞带经过抬升剥蚀而产生的新生碎屑沉积物, 以及少量来自扬子板块内部的古老碎屑物, 基底形成于弧后盆地的背景, 弧陆碰撞的起始时间为 860 Ma; 在演化的后期, 弧后盆地向弧后前陆盆地的背景转变, 其转变的时间为 825 Ma 左右 (Wang et al., 2014)。整体上而言, 上述研究认为 830~825 Ma 是扬子和华夏板块碰撞拼合的时间, 而后碰撞的构造-岩浆事件则是发生在 830 Ma 以后, 并伴随着坍塌和深熔作用以及 S 型花岗岩岩浆活动。但事实上, 扬子板块和华夏板块的碰撞拼合在南北两端并不是同时进行的 (Li, 1999a; Li et al., 2003; Wu et

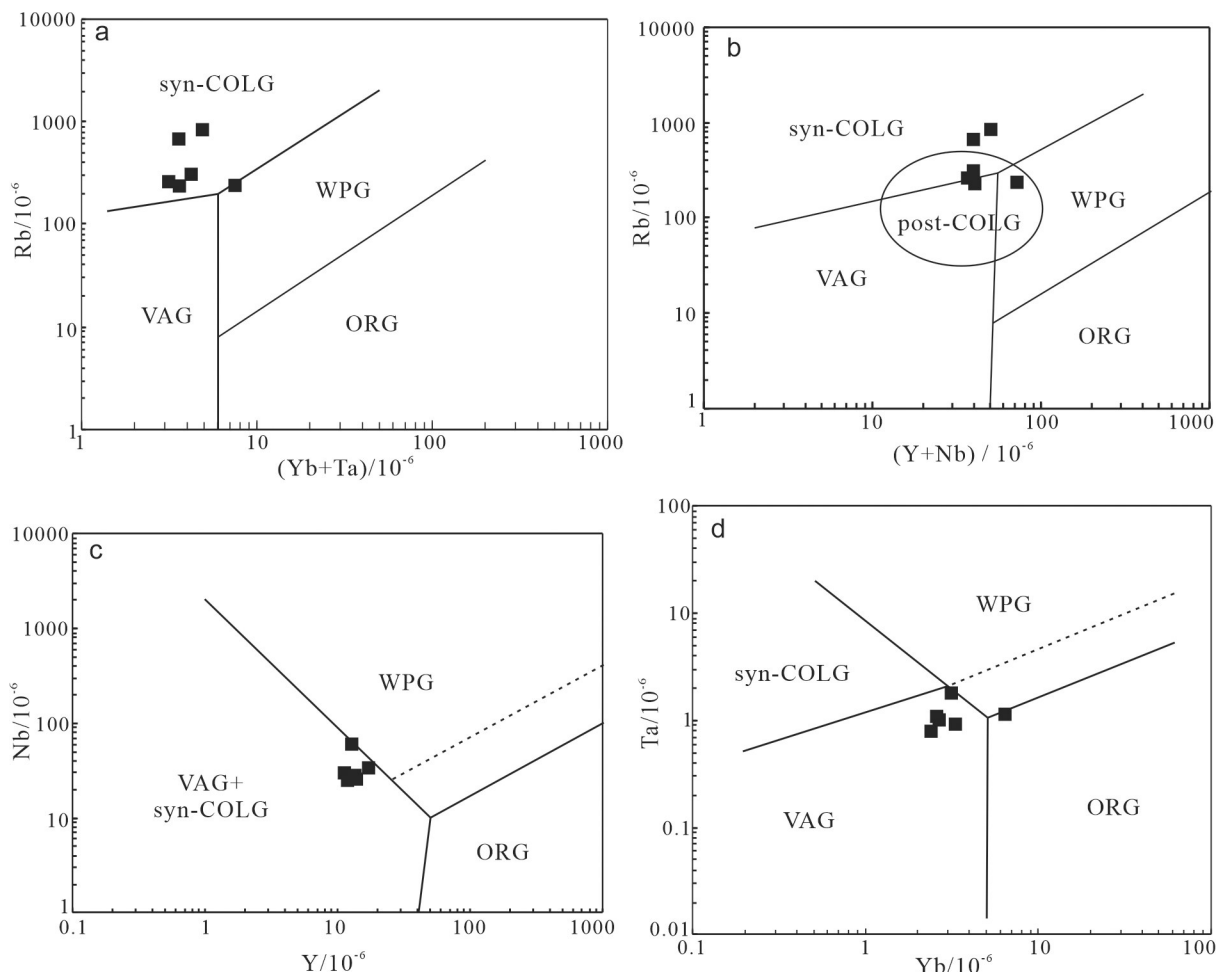


图 11 大湖塘黑云母花岗闪长岩构造环境判别图(底图据 Pearce et al., 1984)

syn-COLG—同碰撞花岗岩; post-COLG—后碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩

Fig.11 Discrimination diagram of tectonic setting for the Dahutang biotite granodiorite (after Pearce et al., 1984)

syn-COLG—Co-collision granite; post-COLG—Post-collision granite; VAG—Volcanic arc granite;

ORG—Ocean ridge granite; WPG—Intraplate granite

al., 2006; Zhao et al., 2011), 且江南造山带的东西两部分经历的构造背景转换在时间上也有所不同。江南造山带中, 湘东北浏阳地区曾报道了(837±6) Ma的花岗闪长岩锆石U-Pb年龄, 桂北地区也报道了(832±5)~(837±7) Ma的花岗闪长岩锆石U-Pb年龄, 这些花岗闪长岩被认为是扬子板块东南缘发生弧陆碰撞后的产物(Wang et al., 2014)。本次研究获得的赣北九岭岩体之大湖塘黑云母花岗闪长岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为(835.6±1.5) Ma, 根据地球化学特征分析其形成的构造环境背景很可能是同碰撞向后碰撞转换的阶段。因此, 在江南造山带中段, 扬子和华夏板块晋宁期碰撞拼合的时间上限应为835 Ma左右, 此时江南造山带的雏形已经形成, 随后

构造环境向后碰撞转换并伴随着具有后碰撞花岗岩特点的岩浆作用。

7 结 论

(1) 赣北大湖塘黑云母花岗闪长岩形成于(835.6±1.5) Ma, 地球化学特征表明其属于钾-高钾钙碱性过铝质花岗岩系列, 具有典型的S型花岗岩的特点, 其形成与中元古界双桥山群的熔融密切相关。

(2) 九岭杂岩体中黑云母花岗闪长岩形成的构造环境背景很可能是同碰撞向后碰撞转换的阶段, 本次测定的年龄可代表同碰撞向后碰撞转换的时间。江南造山带中段, 扬子板块和华夏板块在晋宁期碰撞拼合的时间上限应为835 Ma左右。

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级工程师,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,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,在此一并表示感谢。

References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationship between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46:605–626.
- Chappell B W, Sial A N, Stephens W E, Ferreira V P. 1999. Aluminium saturation in I- and S- type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535–551.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S- type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1–26.
- Charvet J, Shu L S, Shi Y S, Guo L Z, Faure M. 1996. The building of south China: Collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13: 223–235.
- Chen Haoshou, Xu Butai. 1996. The metallogenic epoch of the major gold/silver deposits in Zhejiang Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 41(12): 1107–1110(in Chinese).
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Lai Shaocong, Liu Houxiang, Luo Zhaohua. 1994. Generation of muscovite/two mica granite and intracontinental subduction[J]. *Earth Science*, 19(2): 139–147(in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Xue Huaimin, Xiang Xinkui, Ma L C. 2010. The discovery of Neoproterozoic pillow lava in spilite–ceratophyre of Lushan area, northern Jiangxi Province, and its geological significance[J]. *Geology in China*, 37 (4): 1021–1033 (in Chinese with English abstract).
- Drummond M S, Defant M J and Kepezhinskas P K. 1996. Petrogenesis of slab–derived trondhjemite–tonalite–dacite/adakite magmas[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87(1/22): 205–215.
- Duan Zheng, Liao Shengbing, Chu Pingli, Huang Wencheng, Zhu Yanhui, Shu Xujie, Li Changbo. 2019. Zircon U–Pb ages of the Neoproterozoic Jiuling complex granitoid in the eastern segment of the Jiangnan orogen and its tectonic significance[J]. *Geology in China*, 46(3): 493–516(in Chinese with English abstract).
- Feng Chengyou, Wang Hui, Xiang Xinkui, Zhang Mingyu. 2018. Late Mesozoic granite–related W–Sn mineralization in the northern Jiangxi region, SE China: A review[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 195: 31–48.
- Fley S, Amand N, Liu J. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their orogen[J]. *Lithos*, 28: 181–185.
- Gao Linzhi, Dai Chuangu, Ding Xiaozhong, Wang Min, Liu Yanxue, Wang Xuehua, Chen Jianshu. 2011. SHRIMP U–Pb dating of intrusive alaskite in the Fanjigshan Group and alaskite basal conglomerates: Constraints on the deposition of the Xiajiang Group[J]. *Geology in China*. 38(6): 1413–1420 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Yang Minggui, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, Liu Xun, Ling Lianhai, Zhang Chuanheng. 2008. SHRIMP U–Pb zircon dating of tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangzhen groups in South China: Constraints on the evolution of the Jiangnan Neoproterozoic orogenic belt[J]. *Geologica Bulletin of China*, 27: 1744–1758(in Chinese with English abstract).
- Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, Zhou Hongying, Li Huiming. 2010. Zircon Hf isotope analysis by means of LA–MC–ICP–MS[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508–1513(in Chinese with English abstract).
- Huang Lanchun, Jiang Shaoyong. 2012. Zircon U–Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the porphyric–like muscovite granite in the Dahutang tungsten deposit, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3887–3900(in Chinese with English abstract).
- Huppert H E, Sparks R S J. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust[J]. *Journal of Petrology*, 29(3): 599–624.
- Li Jianhua, Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Zhao Guochun, Johnston S T, Cui Jianjun, Xin Yujia. 2016. New insights into Phanerozoic tectonics of south China: Part 1, polyphase deformation in the Jiuling and Lianyunshan domains of the central Jiangnan Orogen[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121: 3048–3080.
- Li Tong, Yuan Huayu, Wu Shengxi. 1998. On the average chemical composition of granitoids in China and the world[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 22(1): 29–34.
- Li Wuxian, Li Xianhua. 2003. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, South China: Geochemical and Nd isotopic evidence[J]. *Precambrian Research*, 122: 29–44.
- Li X H, Li Z X, Ge W C, Zhou H W, Li W X, Liu Y, Wingate M T D. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca.825 Ma? [J]. *Precambrian Research*, 122: 45–83.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang, Liu Ying. 2008. 850–790 Ma bimodal volcanic and intrusive rocks in northern Zhejiang, South China: A major episode of continental rift magmatism during the breakup of Rodinia[J]. *Lithos*, 102(1): 341–357.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang, Lo C H, Wang Jian, Ye Meifang, Yang Yueheng. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U–Pb zircon ages, geochemistry and Nd–Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks[J]. *Precambrian Research*, 174: 117–128.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang. 2007. Re–discuss the genetic type and tectonic significance of the early Yanshanian granites in nanling[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981–991(in Chinese).

- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Ge Wenchun, Zhou Hanwen, Li Wuxian, Liu Yin. 2001. U–Pb Zircon Ages of the Neoproterozoic granitoids in South China and their tectonic implications[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 271–273(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Zhu Weiguang, Zhong Hong, Wang Xuance, He Defeng, Bai Zhongjie, Liu Feng. 2010. The tongde picritic dikes in the western yangtze block: Evidence for ca. 800–Ma mantle plume magmatism in south China during the breakup of rodinia[J]. *The Journal of Geology*, 118(5): 509–522.
- Li Xianhua. 1999a. U–Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze block: timing of Neoproterozoic Jinning Orogeny in se china and implications for Rodinia assembly[J]. *Precambrian Research*, 97(1): 43–57.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, Wang Jian. 1999b. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? [J]. *Earth and Planet Science Letter*, 173: 171–181.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Gunther D, Xu Juan, Gao Changhui, Cheng Hailong. 2008a. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34–43.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, Gao Changgui, Gao Shan, Xu Juan, Chen Hailong. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U–Pb isotope and trace element analyses by LA–ICP–MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55:1535–1546(in Chinese).
- Liu Yongsheng, Zong Keqing, Kelemen P B, Gao Shan. 2008b. 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*, 247:133–153.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot/Ex version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70.
- Ma Tieqiu, Chen Lixin, Bai Daoyuan, Zhou Kejun, Li Gang, Wang Xianhui. 2009. Zircon SHRIMP dating and geochemical characteristics of Neoproterozoic granites in southeastern Hunan[J]. *Geology in China* 36 (1): 65–73 (in Chinese with English abstract).
- Maitre R W L. 1976. The chemical variability of some common igneous rocks[J]. *Journal of Petrology*, 17(4): 589–598.
- Mao Zhihao, Liu Jiajun, Mao Jingwen, Deng Jun, Zhang Feng, Meng Xuyang, Xiong Bikang, Xiang Xinkui, Luo Xiaohong. 2015. 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*, 28: 816–836.
- Meng Qingxiu, Zhang Jian, Geng Jianzhen, Zhang Chuanlin, Huang Wencheng. 2013. Zircon U–Pb age and Hf isotope compositions of Lengjiaxi and Baxi Groups in middle Hunan Province: implications for the Neoproterozoic tectonic evolution in South China[J]. *Geology in China*, 41(1): 191–216(in Chinese with English abstract).
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, Frank W, Purtscheller F. 1999. Post–collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr–Nd–Pb–O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 40 (9):1399–1424.
- Morel M L A, Nebel O, Nebel J Y J, Miller J S, Vroon P Z. 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ–1 zircon reference material by solution and laser–ablation MC–ICP–MS[J]. *Chemical Geology*, 255 (1/2): 231–235.
- Nockolds S R. 1954. Average chemical compositions of some igneous rocks[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 65(10): 4068–4088.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25: 956–983.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32Kbar: implications for continental growth and crust–mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36: 891–931.
- Shi Y S, Shu Liangshu, Brewer R C, Charvet J, Guo L Z. 1994. Late Proterozoic terrane tectonics in the central Jiangnan belt, South China[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 7 (3/4): 367–375.
- Song Guoxue, Qin Kezhang, Li Guangming, Evans N J, Chen Lei. 2014. Scheelite elemental and isotopic signatures: Implications for the genesis of skarn–type W–Mo deposits in the Chizhou Area, Anhui Province, Eastern China[J]. *American Mineralogist*, 99: 303–317.
- Sun Junjun, Shu Liangshu, Santosh M, Wang Liangshu. 2017. Neoproterozoic tectonic evolution of the Jiuling terrane in the central Jiangnan orogenic belt (South China): Constraints from magmatic suites[J]. *Precambrian Research*, 302: 279–297.
- Sun Keke, Chen Bin. 2017. Trace elements and Sr–Nd isotopes of scheelite: Implications for the W–Cu–Mo polymetallic mineralization of the Shimensi deposit, South China[J]. *American Mineralogist*, 102: 1114–1128.
- Sylvester P J. 1998. Post–collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos* 45, 29–44.
- Vernon R H. 1984. Microgranitoid enclaves in granites–globulen of hybrid magma quenched in a plutonic environment[J]. *Nature*, 309: 438–439.
- Wang Jian, Li Zhengxiang. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break–up[J]. *Precambrian Research*, 122: 141–158.
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, Gao Jianfeng. 2004. Geochemistry of the Meso– to Neoproterozoic basic–acid rocks from Hunan Province, South China: Implications for the evolution of the western Jiangnan orogen[J]. *Precambrian Research*, 135: 79–103.
- Wang Xuance, Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang. 2007. Ca. 825 Ma komatiitic basalts in south china: first evidence for >1500°C

- mantle melts by a rodinian mantle plume[J]. *Geology*, 35(12): 1103–1106.
- Wu Rongxin, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, Zhao Zifu, Zhang Shaobing, Liu Xiaoming, Wu Fuyuan. 2006. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China[J]. *Precambrian Research*, 146: 179–212.
- Xiang Xinkui, Wang Peng, Zhan Guonian, Sun Deming, Zhong Bo, Qian Zhenyi, Tang Rong. 2013. Geological characteristics of Shimensi tungsten polymetallic deposit in northern Jiangxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 32(6): 1171–1187 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xianbing, Tang Shuai, Li Yuan, Zhang Zejun. 2015. Characteristics of Neoproterozoic—Early Mesozoic multiphase orogenic activities of eastern Jiangnan Orogen[J]. *Geology in China*, 42(1): 33–50 (in Chinese with English abstract).
- Yao Junlong, Shu Liangshu, Santosh M, Li Jinyi. 2015. Neoproterozoic arc-related andesite and orogeny-related unconformity in the eastern Jiangnan orogenic belt: Constraints on the assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks in South China[J]. *Precambrian Research*, 262: 84–100.
- Zhang Jiahui, Wang Huichu, Guo Jinghui, Tian Hui, Ren Yunwei, Chang Qingsong, Shi Jianrong, Xiang Zhenqun. 2020. Petrogenesis of the ~2.03Ga meta-garnet granite in the Huai'an Complex of the North China Craton: Further evidence on a Paleoproterozoic rift-related tectonic regime[J]. *Geological Survey and Research*, 42(2): 114–126 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanjie, Zhou Xiaohua, Liao Shengbing, Zhang Xiaodong, Wu bin, Wang Cunzhi, Yu Minggang. 2010. Neoproterozoic Crustal Composition and Orogenic Process of the Zhanggongshan Area, Anhui—Jiangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(10): 1401–1427 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhihui, Hu Bojie, Zhang Da, Xiong Guangqiang, Zhu Xinyou, Jia Wenbin, Gong Xiaodong. 2020. Zircon U–Pb age, geochemistry and Hf isotope characteristics of Shimensi granite porphyry in northern Jiangxi Province and its constraint on mineralization[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(8): 1267–1284 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Guochun, Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. *Precambrian Research*, 222: 13–54.
- Zhao Junhong, Zhou Meifu, Yan Danping, Zheng Jianping, Li Jianwei. 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in south china: No connection with the Grenvillian orogeny[J]. *Geology*, 39(4): 299–302.
- Zhou J C, Wang X L, Qiu J S, Gao J F. 2004. Geochemistry of Meso- and Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks from northern Guangxi, China: Arc or plume magmatism? [J]. *Geochemical Journal*, 38: 139–152.
- Zhou Meifu, Kennedy A K, Sun Min, Malpas J, Leshner C M. 2002. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of south China: Implications for the accretion of Rodinia[J]. *Journal of Geology*, 110(5): 611–618.
- ### 附中文参考文献
- 陈好寿, 徐步台. 1996. 浙江主要金银矿床的成矿时代[J]. *科学通报*, 41(12): 1107–1110.
- 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪, 刘厚祥, 罗照华. 1994. 白云母/二云母花岗岩形成与陆内俯冲作用[J]. *地球科学*, 19(2): 139–147.
- 董树文, 薛怀民, 项新葵, 马立成. 2010. 赣北庐山地区新元古代细碧-角斑岩系枕状熔岩的发现及其地质意义[J]. *中国地质*, 37(4): 1021–1033.
- 段政, 廖圣兵, 褚平利, 黄文成, 朱延辉, 舒徐洁, 李长波. 2019. 江南造山带东段新元古代九岭复式岩体锆石 U–Pb 年代学及构造意义[J]. *中国地质*, 46(3): 493–516.
- 高林志, 戴传固, 丁孝忠, 王敏, 刘燕学, 王雪华, 陈建书. 2011. 侵入梵净山群白岗岩锆石 U–Pb 年龄及白岗岩底砾岩对下江群沉积的制约[J]. *中国地质*, 38(6): 1413–1420.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA–MC–ICP–MS 测定[J]. *地质通报*, 30(10): 1508–1513.
- 黄兰椿, 蒋少涌. 2012. 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*, 28(12): 3887–3900.
- 黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔. 1998. 中国花岗岩类和世界花岗岩类平均化学成分的对比如研究[J]. *大地构造与成矿学*, 22(1): 29–34.
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. *科学通报*, 52(9): 981–991.
- 李献华, 李正祥, 葛文春, 周汉文, 李武显, 刘颖. 2001. 华南新元古代花岗岩的锆石 U–Pb 年龄及其构造意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 271–273.
- 马铁球, 陈立新, 柏道远, 周柯军, 李纲, 王先辉. 2009. 湘东北新元古代花岗岩体锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及地球化学特征[J]. *中国地质*, 36(1): 65–73.
- 孟庆秀, 张健, 耿建珍, 张传林, 黄文成. 2013. 湘中地区冷家溪群和板溪群锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素特征及对华南新元古代构造演化的意义[J]. *中国地质*, 40(1): 191–216.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 31(7): 1035–1053.
- 孙克克, 陈斌, 陈军胜, 项新葵. 2017. 江西大湖塘矿区九岭花岗岩闪长岩的成因及其构造意义[J]. *岩石学报*, 33(3): 907–924.
- 项新葵, 王朋, 詹国年, 孙德明, 钟波, 钱振义, 谭荣. 2012. 赣北石门寺超大型钨多金属矿床地质特征[J]. *矿床地质*, 32(6): 1171–1187.
- 徐先兵, 汤帅, 李源, 章泽军. 2015. 江南造山带东段新元古代至早中生代多期造山作用特征[J]. *中国地质*, 42(1): 33–50.
- 张家辉, 王惠初, 郭敬辉, 田辉, 任云伟, 常青松, 施建荣, 相振群. 2020. 华北克拉通怀安杂岩中 ~2.03 Ga 变质石榴花岗岩的成因其对古元古代裂谷事件的制约[J]. *地质调查与研究*, 43(2): 114–126.
- 张彦杰, 周效华, 廖圣兵, 张晓东, 武彬, 王存智, 余明刚. 2010. 皖赣祁公山地区新元古代地壳组成及造山过程[J]. *地质学报*, 84(10): 1401–1427.
- 张志辉, 胡肇捷, 张达, 熊光强, 祝新友, 贾文彬, 巩小栋. 2020. 赣北石门寺花岗岩岩体锆石 U–Pb 年龄、岩石地球化学、Hf 同位素特征及其对成矿的制约[J]. *地质通报*, 39(8): 1267–1284.