

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.900



# 扬子东南缘新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素:对地壳生长的约束

王艳<sup>1</sup>, 马昌前<sup>2,3\*</sup>, 王连训<sup>2,3</sup>, 刘园园<sup>4</sup>

1. 广东省有色地质勘查院, 广东广州 510080

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

4. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756

**摘要:** 出露于扬子板块东南缘的九宫山片麻状花岗岩侵入于早新元古代双桥山群。通过阴极发光图像分析和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试表明, 九宫山岩体的岩浆结晶年龄为  $830 \pm 8$  Ma; 4 个继承锆石分析点给出加权平均值为  $873 \pm 7$  Ma 的年龄值, 可能记录了新元古代早期扬子与华夏板块碰撞产生的岩浆活动。九宫山岩体具有高  $\text{SiO}_2$  (71.83%~74.20%)、高  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (7.06%~7.90%)、低基性组分 ( $\Sigma \text{TiO}_2 + \text{FeO}^T + \text{MgO} = 2.64\% \sim 4.00\%$ ) 的含量特征, 高  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值 (1.25~1.64), 铝饱和指数 (A/CNK) 为 1.03~1.27, 主要为弱过铝质花岗岩。岩石具有轻稀土富集的右倾模式和明显的 Eu 负异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.35 \sim 0.47$ ), K、Rb、Th、U 等大离子亲石元素富集, Sr、P、Nb、Ta、Ti 等相对亏损。全岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-1.49 \sim +5.24$ , 同岩浆锆石和继承锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分别为  $3.5 \pm 1.0 \sim 11.0 \pm 1.1$ ,  $5.1 \pm 0.9 \sim 12.9 \pm 1.1$ , 指示岩浆源区含有显著的新生地壳物质。九宫山岩体可能形成于陆内裂谷环境, 由类似双桥山群的变质砂屑岩和火山岩部分熔融形成。区域对比表明, 江南造山带新元古代中期花岗岩的 Nd-Hf 同位素组成具有从东向西逐渐降低的特征, 表明该区早新元古代时期新生地壳物质对花岗岩的影响由东向西呈减弱趋势, 这可能是扬子与华夏板块碰撞拼合过程中岛弧岩浆作用由东向西逐渐减弱而使新生地壳物质减少所引起。

**关键词:** 新元古代花岗岩; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; Sr-Nd-Hf 同位素; 新生地壳; 岩石成因; 江南造山带。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2018)03-0635-20

收稿日期: 2017-09-15

## Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes of the Neoproterozoic Granites on the Southeastern Margin of the Yangtze Block: Constraint on Crustal Growth

Wang Yan<sup>1</sup>, Ma Changqian<sup>2,3\*</sup>, Wang Lianxun<sup>2,3</sup>, Liu Yuanyuan<sup>4</sup>

1. Guangdong Nonferrous Metals Geological Exploration Institution, Guangzhou 510080, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

**Abstract:** The Jiugongshan gneissic granites exposed in the southeastern margin of the Yangtze Block, and intruded into the Shuangqiaoshan Group of Early Neoproterozoic. Using the methods of cathodoluminescent images analyzing and LA-ICP-MS

**基金项目:** 国际科技合作计划项目 (No.2007DFA21230); 湖北省自然科学基金重点项目 (No.2009CDA004); 国家自然科学基金重点项目 (No.40334037); 教育部和国家外国专家局高等学校学科创新引智计划 (No.B07039)。

**作者简介:** 王艳 (1985-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事地质矿产勘查工作。ORCID: 0000-0001-9057-251X. E-mail: wangyan\_cug@126.com

\* 通讯作者: 马昌前, E-mail: cqma@cug.edu.cn

**引用格式:** 王艳, 马昌前, 王连训, 等, 2018. 扬子东南缘新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素: 对地壳生长的约束. 地球科学, 43(3): 635-654.

zircon U-Pb dating, we obtained a magma crystallization age of  $830 \pm 8$  Ma for the Jiugongshan intrusion. Four spots of inherited zircons yield a weighted mean at  $873 \pm 7$  Ma. This age might record the magmatic activity related to the collision between the Yangtze and Cathaysia blocks during the period of Early Neoproterozoic. The Jiugongshan granites are characterized by high  $\text{SiO}_2$  (71.83%–74.20%), high  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (7.06%–7.90%), low contents of mafic components ( $\Sigma\text{TiO}_2 + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} = 2.64\% - 4.00\%$ ) and high  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  ratios (1.25–1.64). They mainly belong to weakly peraluminous granites with A/CNK ratios (1.03–1.27). They share similar distribution patterns of REE and trace elements, i.e., enrichment in LREE and large-ion lithophile elements of K, Rb, Th and U, depletion in Sr, P and high-field-strength elements of Nb, Ta and Ti, and pronounced negative Eu anomalies ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.35 - 0.47$ ). On the other hand, they have neutral whole-rock  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values of  $-1.49$  to  $+5.24$  and positive  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of  $3.5 \pm 1.0$  to  $11.0 \pm 1.1$  and  $5.1 \pm 0.9$  to  $12.9 \pm 1.1$  respectively for the coeval magmatic zircon and inherited zircon. This indicates a magmatic source with significant components of the juvenile crust. The Jiugongshan intrusion might be formed in the environment of intracontinent rift and generated by partial melting of metamorphic psammitic and volcanic source. Regional comparison shows that the Nd-Hf isotopic composition of the Middle Neoproterozoic granites along the Jiangnan orogeny has the characteristics of decreased gradually from east to west, and suggests that the effect of the Early Neoproterozoic juvenile crust on granitic magmatism decreased from east to west. This might be caused by the decreasing of arc magmatic components from east to west among the orogenetic process.

**Key words:** Neoproterozoic granites; zircon U-Pb geochronology; geochemistry; Sr-Nd-Hf isotopes; juvenile crust; petrogenesis; the Jiangnan orogen.

## 0 引言

新元古代岩浆岩在华南广泛发育, 主要分布在扬子板块的周缘地区, 而在扬子和华夏板块内部出露较少. 近年来的年代学和岩石地球化学研究表明, 华南新元古代岩浆岩的形成时代多分布在  $830 \sim 740$  Ma (Li *et al.*, 2003a, 2003b, 2005, 2008a; Zheng *et al.*, 2004, 2008; Wang *et al.*, 2006, 2008a; Wu *et al.*, 2006a, 2007, 2016; Zhou *et al.*, 2006a, 2006b; Zhu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2009; Xin *et al.*, 2017), 以发育大量酸性侵入岩和火山岩为特征, 基性—超基性岩相对较少. 随着 Rodinia 超大陆聚合与裂解研究的逐步深入, 以及华南超级地幔柱的提出 (Li *et al.*, 1995, 1999, 2003a, 2003b; Yang *et al.*, 2015), 华南新元古代岩浆岩的成因机制与构造背景成为国内外研究的热点之一. 作为扬子与华夏板块的碰撞拼合带 (Chen *et al.*, 1991; Charvet *et al.*, 1996; Li and McCulloch, 1996; Li *et al.*, 2002, 2007, 2009), 江南造山带对于探讨华南前寒武纪的演化历史有着重要意义. Zheng *et al.* (2007) 通过锆石 Hf 同位素研究, 发现江南造山带西段出露的桂北花岗岩是由古老地壳再造形成, 而东段出露的皖南花岗岩则是由中—新元古代新生地壳物质再造形成 (Wu *et al.*, 2006a; Zheng *et al.*, 2008). 结合蛇绿岩套、双溪坞弧火山岩和岛弧型花岗岩的研究 (Chen *et al.*, 1991; Li *et al.*, 1994, 1997, 2008b, 2009; Li and Li, 2003; Ye *et al.*, 2007; Wang *et al.*,

2015), 江南造山带东段存在大量早新元古代新生地壳物质, 并成为新元古代中期花岗岩的源岩, 而西段仅存在少量新生地壳物质再造的记录 (Wang *et al.*, 2014). 江南造山带新元古代中期花岗岩是否确实存在从西向东受新生地壳物质影响加大的趋势? 原因何在? 理解这些重要的科学问题, 都需要提供江南造山带中段同时代岩浆岩的新证据.

本文以江南造山带中段九宫山西北部片麻状花岗岩为研究对象, 通过系统的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学、全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素分析, 厘定了九宫山岩体的形成时代、岩石成因, 并在区域对比基础上, 探讨扬子板块东南缘新元古代中期岩浆岩的物源特征、活动规律和早新元古代新生地壳的影响.

## 1 地质背景

华南由扬子板块和华夏板块拼合而成 (Chen *et al.*, 1991; Li and McCulloch, 1996; Li *et al.*, 2002, 2009; Wang *et al.*, 2007), 扬子板块由太古代—早新元古代的基底和震旦系—新生代的盖层组成. 宜昌地区的崆岭杂岩是扬子板块出露的最古老岩石, 由太古代—古元古代高级变质的 TTG (英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩) 片麻岩、变质沉积岩和角闪岩组成 (Gao *et al.*, 1999; Qiu *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006a). 近年来的锆石 U-Pb 同位素定年和 Hf 同位素研究表明, 扬子板块可能存

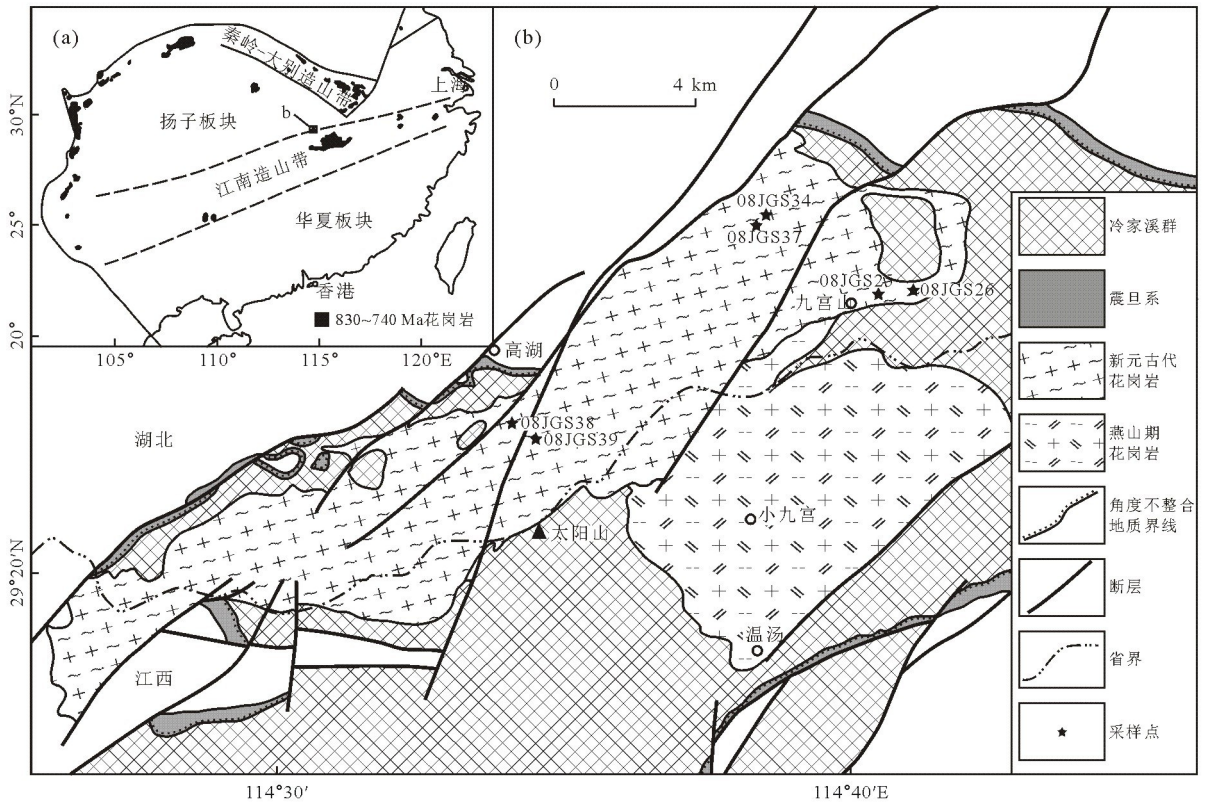


图 1 (a) 华南地质简图及研究区位置; (b) 扬子板块东南缘九宫山岩体地质简图和采样点位置

Fig.1 (a) A geological sketch map of South China, with the location of studying area and (b) simplified geological map showing the distribution of the Jiugongshan intrusions and sampling localities at the southeastern margin of the Yangtze Block

a. 引自 Li *et al.* (2003a); b. 根据 1 : 20 万地质图修改

在大量太古代—古元古代地壳 (Zhang *et al.*, 2006b; Zheng *et al.*, 2006). 晚古元古代—早新元古代的基底岩石主要出露在扬子板块周缘 (Li *et al.*, 2007, 2009), 遭受过不同程度的变形和低级—中级变质作用。

出露于鄂赣边界地区的九宫山新元古代花岗岩体位于扬子板块东南缘江南造山带中段, 赣西北九岭新元古代花岗岩基西北约 30 km 处, 出露面积约 80 km<sup>2</sup> (图 1)。岩体总体上呈北东—南西向带状展布, 发育明显的片麻理构造 (图 2a, 2b), 片麻理产状与北东向断层的产状一致, 断层附近的岩石变形作用较其他部位更为强烈, 并在岩体西北侧见沿断层充填的大型石英脉为岩体边界, 表明岩体的变形和分布特征受北东向构造的控制和改造。岩体侵位于双桥山群/冷家溪群浅变质岩系中 (在鄂东南和赣北分别称为冷家溪群和双桥山群), 该岩系主要由砂岩、粉砂岩、板岩、千枚岩及火山岩组成, 其时代已由原先认为的中元古代 (秦松贤等, 2002; Wang *et al.*, 2004) 重新确认为早新元古代 (Wang *et al.*,

2007, 2008b; Zhou *et al.*, 2009), 并被晚新元古代的震旦系地层不整合覆盖。岩体西北侧局部与早古生代地层呈断层接触, 东南侧被燕山期花岗岩体侵入。岩体与围岩双桥山群/冷家溪群的侵入界线较清楚, 接触带部位具有强烈的混染现象, 常发育几米宽的混染岩带, 并使围岩产生热液接触变质作用。岩体边缘局部含有较多暗色微粒包体 (图 2c) 及少量围岩捕虏体, 部分微粒包体定向排列。

九宫山岩体的岩性为黑云二长花岗岩、黑云正长花岗岩, 在 Q-A-P 岩石分类图解上 (Streckeisen, 1974), 落入正长花岗岩、二长花岗岩区域内 (图 3)。岩石呈灰白色, 具有似斑状结构, 基质为细粒—中粗粒花岗结构 (图 2a, 2b, 2d), 从岩体边部到内部基质由细粒逐渐变为中粗粒, 具有明显的片麻状构造。斑晶主要为钾长石及少量斜长石, 含量为 5%~10%, 多破碎圆化或呈不规则状, 并具有一定的定向性。基质的矿物成分主要为斜长石 (为更长石, 15%~25%)、钾长石 (多为条纹长石和微斜长石, 30%~35%)、石英 (30%~40%) 和黑云母 (5%~10%), 在

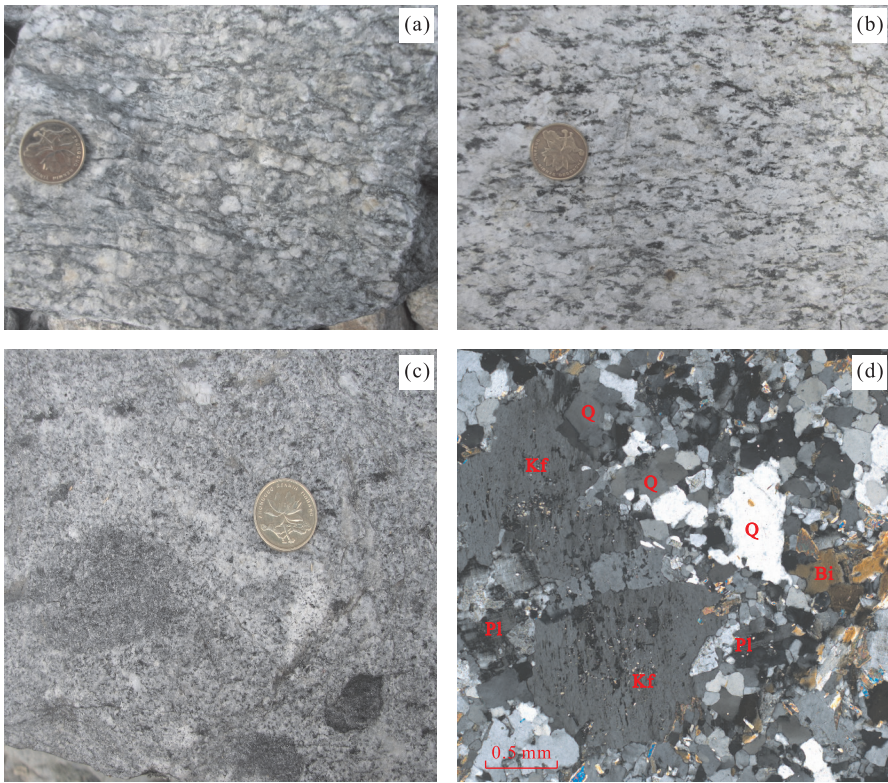


图 2 九宫山岩体野外和显微照片

Fig.2 Field photographs and photomicrographs of the rocks from the Jiugongshan intrusion

a.九宫山岩体野外照片,岩石片麻状构造显著;b.九宫山岩体野外照片,岩石片麻状构造明显;c.斑状细粒二长花岗岩中暗色微粒包体野外照片;d.正交偏光下斑状细粒二长花岗岩显微照片.Kf.钾长石;Pl.斜长石;Q.石英;Bi.黑云母

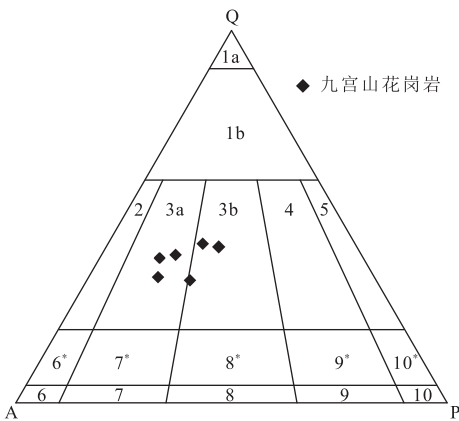


图 3 九宫山岩体 Q-A-P 图解

Fig.3 Q-A-P diagram for the Jiugongshan intrusion

1a.石英岩;1b.富石英花岗岩;2.碱性长石花岗岩;3a.正长花岗岩;3b.二长花岗岩;4.花岗闪长岩;5.英云闪长岩;6\*.石英碱性长石正长岩;7\*.石英正长岩;8\*.石英二长岩;9\*.石英二长闪长岩/石英二长辉长岩;10\*.石英闪长岩/石英辉长岩/石英斜长岩;6.碱性长石正长岩;7.正长岩;8.二长岩;9.二长闪长岩/二长辉长岩;10.闪长岩/辉长岩/斜长岩;引自 Streckeisen(1974)

黑云母定向排列,形成片麻理;石英发育明显的波状消光和变形纹,并见有亚颗粒构造,显示了后期构造运动对岩体的影响。

九宫山岩体的围岩(双桥山群/冷家溪群)较老, Wang *et al.*(2007)通过碎屑锆石定年获得四堡群/冷家溪群的最大沉积年龄是 Ca. 860 Ma, Wang *et al.*(2008b)通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得双桥山群下部火山岩的结晶年龄为 878 ~ 879 Ma,因此依据野外关系难以判断九宫山岩体的侵位时代.在 1 : 5 万港口幅地质资料中,用 K-Ar 同位素测年法给出九宫山片麻状花岗岩的形成年龄为 126~131 Ma(章泽军等, 1995),并认为其形成时代比相邻的未变形花岗岩要晚(章泽军等, 1995; 李金平等, 1999).因此,需要对九宫山花岗岩体进行精确的同位素年代学研究。

本研究所用样品的采样点位置见图 1.进行锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析的样品为中粗粒斑状黑云正长花岗岩,样品号为 08JGS34,地理坐标为 29°25'30"N, 114°38'27"E.

斑状细粒黑云二长花岗岩中还含有少量白云母.副矿物有锆石、磷灰石、榍石、Fe-Ti 氧化物等.岩石内

## 2 分析方法

### 2.1 锆石 U-Pb 年代学

样品在机械破碎后,经淘洗、磁选和重液分选,然后在双目镜下挑纯,锆石的分选工作在廊坊市诚信地质服务有限公司利用标准技术进行。在双目镜下挑选出晶形完好、具有代表性的锆石颗粒,将选用的锆石颗粒置于环氧树脂浇铸的样品靶上,之后经磨蚀、抛光和镀金。将待测锆石进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相,以分析锆石的内部结构。锆石阴极发光(CL)图像分析在中国地质科学院矿产资源研究所的 JEOL JXA-8900RL 型电子探针上完成。

锆石 U-Pb 年代学测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)分析完成。实验使用的 ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a,激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas 2005,分析所用的激光束斑直径为 32  $\mu\text{m}$ ,实验过程中采用氦气作载气。锆石 U-Pb 同位素定年中采用标准锆石 91500 作外标进行同位素分馏校正,详细的分析流程和仪器参数见文献 Liu *et al.* (2010a, 2010b)。锆石测试点的 U-Th-Pb 元素含量、同位素比值和年龄计算采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2010a)完成。采用 ComPbCorr # 3\_151 的 Excel 程序(Andersen, 2002)对测试数据进行普通 Pb 校正,并采用 Isoplot/Ex 3.23(Ludwig, 2003)程序进行谐和曲线绘制和加权平均年龄计算。

### 2.2 全岩主量和微量元素

经过岩相学分析后,选出用于全岩地球化学分析的新鲜岩石样品,并无污染粉碎至 200 目以下。主量元素分析在国土资源部武汉矿产资源监督检测中心(武汉综合岩矿测试中心)利用 Regaku 3080E1 型 X 射线荧光(XRF)光谱仪完成,详细的分析方法见文献 Gao *et al.* (1991),分析精度优于 5%。微量、稀土元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 Agilent 7500a 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析完成。首先称取粉碎至 200 目的岩石粉末样品 50 mg 于 Teflon 溶样弹中,用 1.5 mL  $\text{HNO}_3$  + 1.5 mL HF 使 Teflon 溶样弹中的样品在 195  $^\circ\text{C}$  条件下消解 48 h;然后将样品在 115  $^\circ\text{C}$  条件下蒸干,加入 1 mL  $\text{HNO}_3$  再次蒸干后,用 3 mL 30%  $\text{HNO}_3$  将样品在 195  $^\circ\text{C}$  条件下再次消解 12 h;最后用 2%  $\text{HNO}_3$  将样品稀释到

~100 g,定容于干净的聚乙烯塑料瓶中,待 ICP-MS 测定。分析流程用国际标样 AGV-2、BHVO-2、G-2 和 RGM-1 进行检测。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.* (2008)。

### 2.3 全岩 Sr-Nd 同位素

全岩 Sr-Nd 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 Finnigan Triton 型热电离同位素质谱仪(TIMs)完成。首先称取 50~100 mg 岩石粉末样品于 Teflon 溶样弹中,加入 3 mL  $\text{HNO}_3$  + HF 的混合酸使 Teflon 溶样弹中的样品在 195  $^\circ\text{C}$  条件下消解 48 h,将样品在 115  $^\circ\text{C}$  条件下蒸干。然后采用 Dowex AG50WX12 阳离子交换树脂分离 Rb、Sr 和 REE,再用 Eichrom Ln-Spec 树脂分离 Sm 和 Nd,待同位素质谱仪测定 Sr、Nd 同位素比值。仪器的准确度分别用国际标样 SRM NBS987 和 La Jolla 进行检测。测得的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值分别用  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$  和  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$  进行标准化。详细的实验步骤和分析方法见文献 Ling *et al.* (2009)。计算所用 Rb、Sr 和 Sm、Nd 元素的含量为 ICP-MS 方法测得。

### 2.4 锆石 Hf 同位素

锆石原位 Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所多通道等离子质谱实验室利用配有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子质谱仪(LA-MC-ICPMS)完成。锆石 Lu-Hf 同位素分析点与 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年分析点的位置相同。分析时所用的激光束斑直径为 60  $\mu\text{m}$  或 50  $\mu\text{m}$ ,激光脉冲频率为 8~10 Hz,激光束脉冲能量为 100  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,激光剥蚀时间为 26 s。详细的仪器运行条件、分析原理及流程等参见文献 Wu *et al.* (2006b) 和徐平等(2004)。实验过程中,获得标准锆石 91500 的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值与文献报道的数值(Griffin *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2006b)在误差范围内一致。在  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值计算中,球粒陨石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  和  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分别采用 0.033 200 和 0.282 772(Blichert-Toft and Albarède, 1997),在单阶段亏损地幔模式年龄( $T_{\text{DM1}}$ )计算中,亏损地幔的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  分别使用 0.283 25 和 0.038 40(Griffin *et al.*, 2000), $^{176}\text{Lu}$  的衰变常数  $\lambda$  采用  $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$  (Söderlund *et al.*, 2004)。

### 3 分析结果

#### 3.1 锆石 U-Pb 年代学

对样品 08JGS34 的 23 颗锆石进行了 23 个分析点的年龄测定, U-Pb 同位素分析结果列于表 1. 分析样品中的锆石主要为无色透明—浅黄色的自形—半自形晶体, 晶形为短柱状或长柱状, 部分锆石含有较多的矿物包裹体, 晶体粒度变化于 50~200  $\mu\text{m}$ , 长宽比为 1:1~4:1. CL 图像显示大多数自形锆石具有较清晰的振荡环带(图 4), 少数具有扇形分带, 为典型岩浆锆石的内部结构 (Corfu *et al.*, 2003). 部分锆石颗粒发育核—边结构, 可见浑圆状的锆石核. 少数锆石具有变弱的阴极发光边和熔蚀边现象, 可能受后期变质作用的影响.

在锆石 U-Pb 年龄谐和图(图 5)上, 4.1、6.1、9.1、18.1 与 23.1 号分析点位于谐和线之下,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $771\pm 6\sim 789\pm 6$  Ma, 13.1 号分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $802\pm 6$  Ma, 它们的年龄显著低于其余分析点, 且比较分散, 在 CL 图像上显示弱分带或者具有熔蚀边, 可能受后期变质事件的影响而丢失放射性成因铅引起的. 其余分析点的 U 含量为  $(81\sim 505)\times 10^{-6}$ , Th 含量为  $(51\sim 328)\times 10^{-6}$ , Th/U 比值为 0.13~1.27, 属于岩浆锆石. 20.1 和 22.1 号分析点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄分别为  $1\ 820\pm 15$  Ma 和  $1\ 866\pm 14$  Ma,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分别为  $1\ 722\pm 15$  Ma 和  $1\ 702\pm 11$  Ma, 以单个锆石颗粒存在, 具有成分环带, 可能为捕虏晶. 其余锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄明显分为两组, 一组的加权平均值为  $873\pm 7$  Ma (95% Conf., MSWD=0.3,  $n=4$ ), 除 11.1 号分析点外均为继承锆石核, 且锆石核多具有熔蚀结构, 代表继承锆石年龄; 另一组锆石的加权平均值为  $830\pm 8$  Ma (95% Conf., MSWD=3.0,  $n=11$ ), 代表岩浆结晶年龄.

#### 3.2 元素地球化学

九宫山西北部片麻状花岗岩 6 个全岩样品的主量、微量元素分析结果列于表 2. 这些样品的总体特征为高硅 ( $\text{SiO}_2=71.83\%\sim 74.20\%$ )、富碱 ( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.06\%\sim 7.90\%$ ), 高  $\text{K}_2\text{O}$  含量 ( $3.97\%\sim 4.69\%$ ) 和高  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值 ( $1.25\sim 1.64$ ), 较低的基性组分含量 ( $\sum \text{TiO}_2+\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO}=2.64\%\sim 4.00\%$ ). 样品的铝饱和指数 (A/CNK 值) 为 1.03~1.27, 大多数小于 1.1, 主要为弱过铝质花岗岩(图 6), 所有样品都具有高钾钙碱性特征. 九宫山岩体的分异指数 DI 为 88~92, CIPW 标准矿物中出现了

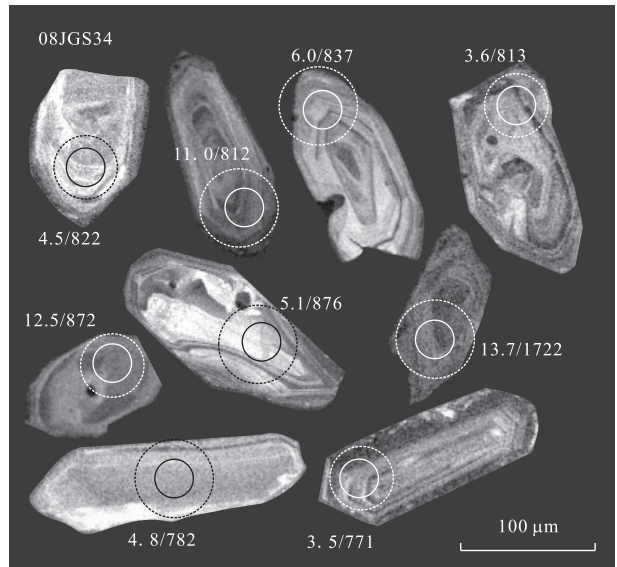


图 4 九宫山岩体代表性锆石的阴极发光 (CL) 图像及 U-Pb 年龄 (Ma)、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值

Fig. 4 Representative CL images with U-Pb ages (Ma) and  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of zircons from the Jiugongshan pluton

实线圆表示 U-Pb 年龄分析点, 虚线圆表示 Hf 同位素分析点, 旁边数字分别代表  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄

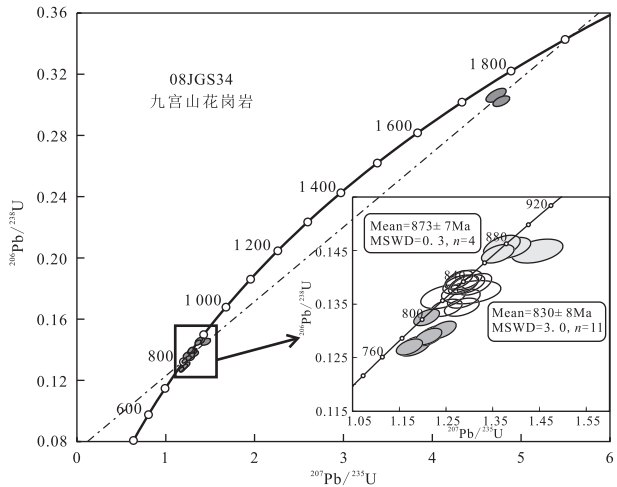


图 5 九宫山岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图  
Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram for the Jiugongshan pluton

刚玉分子, 但除样品 08JGS25 (刚玉含量为 2.3%) 外, 其含量较低 ( $0.53\%\sim 1.27\%$ ). 随着  $\text{SiO}_2$  含量的增加,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Sr}$  和  $\text{Zr}$  含量减少,  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Rb}$  含量增加, 而  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ba}$  和  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  则无明显变化趋势.

所分析样品具有相似的球粒陨石标准化稀土元素分布型式(图 7a), 为轻稀土 (LREE) 富集的右倾模

表 1 九宫山片麻状花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope analytical results for the Jiugongshan gneissic granites

分析点	元素含量( $10^{-6}$ )			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
08]GS34																
1.1	51.7	76	316	0.24	0.067 06	0.001 09	1.286 25	0.021 21	0.138 62	0.001 20	840	20	840	9	837	7
2.1	36.1	74	215	0.35	0.067 58	0.001 26	1.295 95	0.023 60	0.138 73	0.001 15	856	24	844	10	837	6
3.1	66.4	54	430	0.13	0.067 24	0.001 21	1.249 75	0.022 14	0.134 30	0.001 06	845	24	823	10	812	6
4.1	64.0	63	435	0.14	0.067 17	0.001 30	1.181 82	0.022 63	0.127 17	0.001 23	843	24	792	11	772	7
5.1	43.1	63	243	0.26	0.069 05	0.001 40	1.388 54	0.027 40	0.145 50	0.001 29	900	26	884	12	876	7
6.1	91.3	84	608	0.14	0.068 96	0.001 08	1.242 20	0.019 13	0.130 17	0.001 07	897	19	820	9	789	6
7.1	28.6	143	144	0.99	0.068 59	0.001 37	1.310 37	0.024 19	0.138 68	0.001 32	886	23	850	11	837	7
8.1	16.3	66	81	0.82	0.072 23	0.001 84	1.444 51	0.036 19	0.144 89	0.001 47	992	34	908	15	872	8
9.1	63.7	64	426	0.15	0.067 98	0.001 10	1.216 35	0.019 82	0.129 08	0.001 23	868	19	808	9	783	7
10.1	46.9	171	258	0.66	0.068 36	0.001 27	1.287 21	0.023 11	0.136 00	0.001 16	880	23	840	10	822	7
11.1	46.1	59	265	0.22	0.068 03	0.001 21	1.359 83	0.023 10	0.144 39	0.001 15	869	22	872	10	869	6
12.1	60.1	65	363	0.18	0.066 08	0.001 03	1.276 40	0.019 58	0.139 52	0.001 15	809	19	835	9	842	6
13.1	101.1	236	617	0.38	0.065 78	0.000 99	1.207 81	0.018 20	0.132 49	0.001 01	799	19	804	8	802	6
14.1	65.9	191	363	0.53	0.066 63	0.001 31	1.279 29	0.024 55	0.138 65	0.001 17	826	26	837	11	837	7
15.1	39.9	51	240	0.21	0.066 14	0.001 85	1.243 35	0.032 05	0.136 34	0.001 46	811	60	820	15	824	8
16.1	91.3	322	505	0.64	0.068 93	0.001 27	1.282 73	0.024 46	0.134 40	0.001 12	897	26	838	11	813	6
17.1	62.8	208	315	0.66	0.067 88	0.001 27	1.368 55	0.026 11	0.145 77	0.001 37	865	24	876	11	877	8
18.1	157.7	1100	792	1.39	0.066 62	0.001 03	1.170 75	0.018 57	0.126 99	0.000 99	826	20	787	9	771	6
19.1	48.8	289	227	1.27	0.066 73	0.001 27	1.287 91	0.025 20	0.139 49	0.001 20	830	26	840	11	842	7
20.1	105.2	83	278	0.30	0.111 23	0.001 58	4.713 81	0.074 78	0.306 20	0.003 03	1 820	15	1 770	13	1 722	15
21.1	25.1	55	145	0.38	0.068 87	0.002 33	1.303 20	0.041 93	0.137 23	0.001 43	895	71	847	18	829	8
22.1	89.0	78	232	0.34	0.114 12	0.001 55	4.771 64	0.063 50	0.302 22	0.002 23	1 866	14	1 780	11	1 702	11
23.1	87.0	646	409	1.58	0.067 82	0.001 01	1.211 58	0.018 72	0.128 94	0.001 02	863	19	806	9	782	6

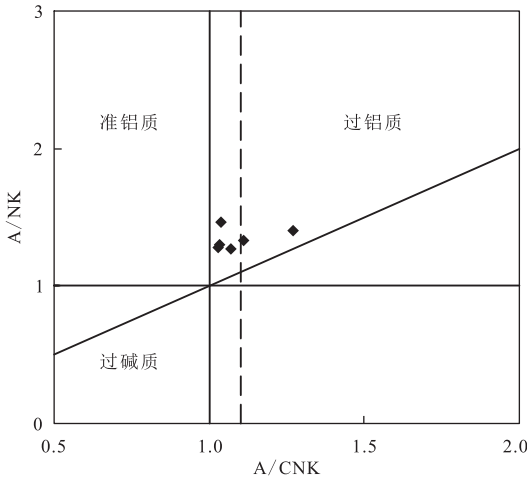


图 6 九宫山岩体 A/NK-A/CNK 图解

Fig.6 A/NK vs. A/CNK diagram for the Jiugongshan pluton

引自 Maniar and Piccoli, 1989

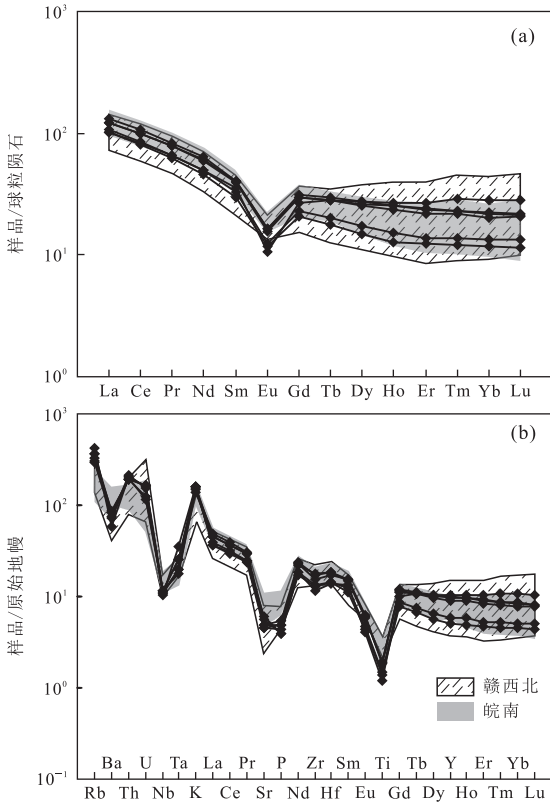


图 7 九宫山岩体 (a) 球粒陨石标准化稀土元素分布型式和 (b) 原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 7 (a) Chondrite-normalized REE patterns and (b) primitive mantle-normalized trace element spidergrams for the Jiugongshan pluton

球粒陨石 REE 值引自 Sun and McDonough (1989); 原始地幔微量元素值引自 McDonough and Sun (1995); 赣西北花岗岩长岩数据引自 Li *et al.* (2003a); 皖南花岗岩长岩数据引自 Li *et al.* (2003a), Wu *et al.* (2006a)

表 2 九宫山片麻状花岗岩的主量元素 (%) 和微量元素 ( $10^{-6}$ ) 分析结果

Table 2 Major (%) and trace element ( $10^{-6}$ ) data for the Jiugongshan gneissic granites

样品号	08JGS25	08JGS26	08JGS34	08JGS37	08JGS38	08JGS39
SiO <sub>2</sub>	74.20	72.89	72.36	72.47	73.99	71.83
TiO <sub>2</sub>	0.28	0.30	0.38	0.37	0.24	0.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.45	13.74	13.33	13.55	13.04	13.75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	1.67	1.98	2.34	2.36	1.71	2.49
MnO	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
MgO	0.87	0.89	0.61	0.62	0.50	0.85
CaO	0.57	1.14	1.41	1.51	1.04	2.14
Na <sub>2</sub> O	2.80	3.43	3.33	3.27	3.16	3.09
K <sub>2</sub> O	4.58	4.30	4.53	4.63	4.69	3.97
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.08	0.10	0.11	0.10	0.08
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.96	0.71	0.93	0.58	0.92	0.85
CO <sub>2</sub>	0.15	0.15	0.22	0.07	0.22	0.11
总量	99.65	99.65	99.59	99.59	99.66	99.60
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.64	1.25	1.36	1.42	1.48	1.28
A/CNK	1.27	1.11	1.03	1.03	1.07	1.04
Mg <sup>#</sup>	45.50	41.90	29.50	29.70	31.90	35.40
Sc	6.26	6.33	7.38	7.12	5.79	8.05
V	31.60	29.80	32.70	33.60	22.40	41.10
Cr	15.00	14.50	9.40	10.20	9.00	15.10
Co	3.96	4.78	4.60	5.03	3.43	6.37
Ni	6.78	7.32	5.55	5.86	5.04	8.67
Ga	18.40	16.20	17.00	16.70	15.20	16.30
Rb	218.00	216.00	180.00	196.00	251.00	174.00
Sr	90.50	120.80	89.80	96.40	95.80	112.00
Y	22.00	25.00	43.00	41.80	45.20	38.60
Zr	134.00	139.00	186.00	163.00	121.00	181.00
Nb	7.70	7.73	7.55	7.36	6.85	7.04
Cs	22.30	13.70	9.20	19.30	22.20	14.50
Ba	542.00	475.00	554.00	574.00	379.00	499.00
La	24.00	25.10	29.00	29.20	24.00	31.00
Ce	49.70	52.30	60.30	61.40	51.10	64.90
Pr	5.92	6.23	7.39	7.53	6.17	7.83
Nd	21.70	23.00	27.60	28.80	23.20	29.70
Sm	4.54	5.00	6.09	6.23	5.36	6.22
Eu	0.67	0.73	0.89	0.95	0.62	0.94
Gd	4.27	4.66	6.12	6.48	5.49	6.17
Tb	0.66	0.75	1.07	1.12	1.06	1.05
Dy	3.81	4.39	6.68	6.91	6.95	6.44
Ho	0.72	0.86	1.44	1.45	1.53	1.34
Er	2.05	2.28	3.88	4.05	4.49	3.61
Tm	0.31	0.35	0.59	0.58	0.74	0.55
Yb	2.00	2.26	3.84	3.69	4.78	3.46
Lu	0.29	0.34	0.55	0.54	0.71	0.52
Hf	4.02	4.12	5.15	4.91	3.97	5.27
Ta	0.96	0.95	0.66	0.72	1.30	0.74
Pb	30.30	19.00	29.30	29.30	98.80	28.10
Th	15.00	15.70	15.40	15.40	16.40	16.80
U	2.49	2.33	3.37	3.40	3.28	3.08
Eu/Eu <sup>*</sup>	0.47	0.46	0.45	0.46	0.35	0.47
(La/Yb) <sub>N</sub>	8.62	7.94	5.42	5.68	3.60	6.42
M	1.12	1.31	1.41	1.42	1.33	1.42
T <sub>Zr</sub> (°C)	791.00	780.00	799.00	786.00	767.00	796.00

注: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 为全铁; A/CNK = 摩尔 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O); Mg<sup>#</sup> = 100 × Mg<sup>2+</sup> / (Mg<sup>2+</sup> + TF<sup>e2+</sup>); Eu/Eu<sup>\*</sup> = Eu<sub>N</sub> / (Sm<sub>N</sub> × Gd<sub>N</sub>)<sup>1/2</sup>; 下标 N 表示球粒陨石标准化数据, 球粒陨石标准化数值引自 Sun and McDonough (1989); M = (Na + K + 2 × Ca) / (Al × Si) (Watson and Harrison, 1983); T<sub>Zr</sub> = 12 900 / [2.95 + 0.85M + ln(496 000/Zr<sub>melt</sub>)] (Miller *et al.*, 2003); Zr<sub>melt</sub> 为熔体中 Zr 含量。



表 3 九宫山片麻状花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 Whole-rock Sr and Nd isotopic compositions for the Jiugongshan gneissic granites

样品号	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	±(2σ)	( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>i</sub>	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	±(2σ)	ε <sub>Nd</sub> ( <i>t</i> )	T <sub>DM1</sub> (Ga)	T <sub>DM2</sub> (Ga)
08JGS25	7.010 9	0.766 963	0.000 006	0.683 843	0.126 7	0.512 525	0.000 005	5.24	1.09	1.07
08JGS26	5.212 7	0.772 582	0.000 005	0.710 782	0.131 5	0.512 207	0.000 004	-1.49	1.74	1.62
08JGS34	5.840 5	0.776 020	0.000 006	0.706 777	0.133 2	0.512 309	0.000 009	0.33	1.59	1.47
08JGS37	5.922 6	0.777 223	0.000 007	0.707 006	0.131 0	0.512 394	0.000 004	2.23	1.39	1.32
08JGS38	7.638 3	0.789 728	0.000 005	0.699 170	0.140 0	0.512 474	0.000 005	2.83	1.40	1.27
08JGS39	4.518 9	0.762 827	0.000 007	0.709 252	0.126 5	0.512 308	0.000 003	1.01	1.47	1.42

注:(1)<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 和 <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd 比值用全岩 Rb、Sr、Sm 和 Nd 含量(表 2)计算;(2)(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>=(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>s</sub>+(<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr)<sub>s</sub>×(e<sup>λt</sup>-1),λ=1.42×10<sup>-11</sup>a<sup>-1</sup>;(3)ε<sub>Nd</sub>(*t*)=[(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>s</sub>/(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub>(*t*)-1]×10<sup>4</sup>,(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub>(*t*)=0.512 638-0.196 7×(e<sup>λt</sup>-1);(4)T<sub>DM1</sub>=1/λ×ln{1+[(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>s</sub>-(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub>]/[(<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>s</sub>-(<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub>]};T<sub>DM2</sub>=1/λ×ln{1+[(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>s</sub>-(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub>-(<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>s</sub>-(<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>C</sub>]/[(<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>C</sub>-(<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub>]};公式中的下标 S、CHUR、DM、C 分别表示样品测量值、球粒陨石值、亏损地幔值、大陆地壳平均值,(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub>=0.513 15,(<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub>=0.213 7,(<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>C</sub>=0.118;λ<sub>Sm-Nd</sub>=6.54×10<sup>-12</sup>a<sup>-1</sup>;t 代表岩浆结晶年龄为 830 Ma。

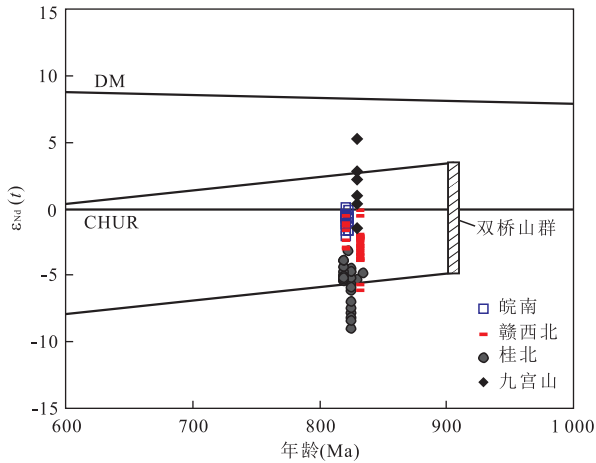


图 8 九宫山岩体全岩 ε<sub>Nd</sub>(*t*)值-年龄图解

Fig.8 Whole-rock ε<sub>Nd</sub>(*t*) values vs.ages diagram for the Jiugongshan pluton

数据来源:皖南花岗岩引自 Li *et al.*(2003a),Wu *et al.*(2006a);赣西北花岗岩闪长岩引自 Li *et al.*(2003a),钟玉芳(2007);桂北花岗岩引自 Li *et al.*(2003a),Wang *et al.*(2006);双桥山群引自 Chen and Jahn(1998),张海洋等(2000)

式,轻、重稀土分异程度中等,(La/Yb)<sub>N</sub>=3.60~8.62,重稀土(HREE)较平坦,具有明显的 Eu 负异常(Eu/Eu<sup>\*</sup>=0.35~0.47),LREE 较为一致,HREE 则有一定范围的变化,样品 08JGS38 的 HREE 值明显增加,可能与岩石中含有较多的锆石、磷灰石有关.在原始地幔标准化微量元素“蛛网图”上(图 7b),大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、U、K 富集,Sr、P 和高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti 呈明显负异常.

根据锆石阴极发光图像和 U-Pb 定年结果,九宫山片麻状花岗岩的锆石样品中含有锆石核及单颗粒的继承锆石,说明花岗岩熔体中达到了元素锆饱和.根据 Zr 含量及主量元素含量,可计算出花岗岩

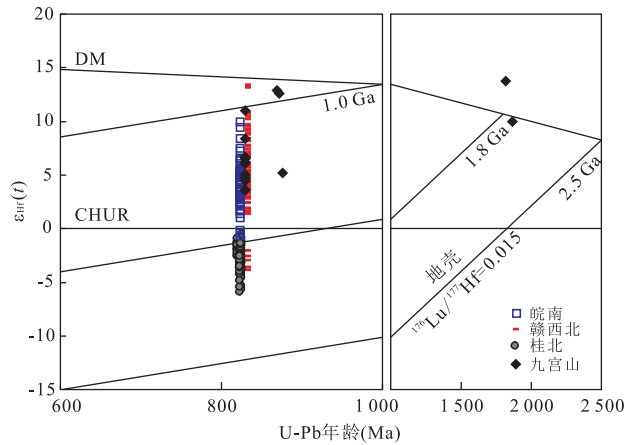


图 9 九宫山岩体锆石 U-Pb 年龄-ε<sub>Hf</sub>(*t*)值图解

Fig.9 Zircon ε<sub>Hf</sub>(*t*) values vs. U-Pb ages diagram for Jiugongshan pluton

数据来源:皖南花岗岩引自 Wu *et al.*(2006a);赣西北花岗岩闪长岩引自钟玉芳(2007);桂北花岗岩引自王孝磊等(2006),Zheng *et al.*(2007);亏损地幔演化曲线用<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf=0.283 25 和<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf=0.038 4(Griffin *et al.*,2000)来计算;地壳增生曲线用平均地壳的<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf比值 0.015(Griffin *et al.*,2002)来计算

熔体的锆石饱和温度 T<sub>Zr</sub>(Watson and Harrison, 1983;Miller *et al.*,2003).根据样品全岩地球化学和元素 Zr 含量分析结果,计算得到的锆石饱和温度为 767~799 °C(表 2).

### 3.3 全岩 Sr-Nd 同位素

九宫山片麻状花岗岩 6 个全岩样品的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析结果列于表 3,样品的 Rb、Sr 含量分别为(174.0~250.8)×10<sup>-6</sup>、(89.8~120.8)×10<sup>-6</sup>,对应的<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 比值为 4.518 9~7.638 3,变化范围较大,指示花岗质岩浆侵位、结晶后其 Rb-Sr 同位素体系可能受到了外来流体的干扰作用

表 4 九宫山片麻状花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 4 Zircon Hf isotopic compositions for the Jiugongshan gneissic granites

点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm(2\sigma)$	年龄(Ma)	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm(2\sigma)$	$T_{\text{DM1}}$ (Ga)	$T_{\text{DM2}}$ (Ga)	$\pm(2\sigma)$	年龄点
08JGS34												
1	0.122 103	0.004 194	0.282 508	0.000 025	830	0.282 442	6.7	0.9	1.15	1.30	0.11	1.1
2	0.104 305	0.003 471	0.282 478	0.000 027	830	0.282 424	6.0	0.9	1.17	1.34	0.12	2.1
3	0.123 278	0.004 161	0.282 629	0.000 030	830	0.282 564	11.0	1.1	0.96	1.03	0.13	3.1
4*	0.087 263	0.002 854	0.282 417	0.000 025	876	0.282 370	5.1	0.9	1.24	1.43	0.11	5.1
5	0.132 882	0.004 408	0.282 511	0.000 028	830	0.282 442	6.7	1.0	1.15	1.30	0.12	6.1
6	0.083 596	0.002 901	0.282 535	0.000 021	830	0.282 490	8.3	0.8	1.07	1.19	0.10	7.1
7*	0.072 873	0.002 501	0.282 622	0.000 023	872	0.282 581	12.5	0.8	0.93	0.96	0.11	8.1
8*	0.129 814	0.004 245	0.282 662	0.000 031	869	0.282 592	12.9	1.1	0.92	0.94	0.14	11.1
9	0.110 374	0.003 664	0.282 486	0.000 027	830	0.282 429	6.2	0.9	1.17	1.33	0.12	12.1
10	0.094 232	0.003 226	0.282 432	0.000 027	830	0.282 382	4.5	1.0	1.23	1.43	0.12	10.1
11	0.147 145	0.004 766	0.282 471	0.000 028	830	0.282 397	5.1	1.0	1.23	1.40	0.13	13.1
12	0.081 860	0.002 855	0.282 401	0.000 032	830	0.282 356	3.6	1.1	1.27	1.49	0.14	16.1
13	0.091 848	0.003 069	0.282 489	0.000 024	830	0.282 441	6.6	0.9	1.14	1.30	0.11	15.1
14	0.106 146	0.003 382	0.282 407	0.000 029	830	0.282 354	3.5	1.0	1.28	1.49	0.13	18.1
15	0.108 108	0.003 411	0.282 492	0.000 032	830	0.282 439	6.5	1.1	1.15	1.31	0.14	19.1
16*	0.104 312	0.003 471	0.282 131	0.000 031	1820	0.282 011	13.7	1.1	1.69	1.63	0.14	20.1
17	0.162 450	0.005 008	0.282 467	0.000 027	830	0.282 388	4.8	1.0	1.24	1.42	0.12	23.1
18*	0.048 154	0.001 542	0.281 934	0.000 027	1866	0.281 879	10.1	1.0	1.88	1.89	0.12	22.1

注:  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i = (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)$ ;  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 10\,000 \times \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$ ;  $T_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$ ;  $T_{\text{DM2}} = T_{\text{DM1}} - (T_{\text{DM1}} - t) \times [(f_{\text{CC}} - f_s) / (f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}})]$ ;  $f = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$ ; 公式中下标 S、CHUR、DM 分别表示样品测量值、球粒陨石值、亏损地幔值,  $f_{\text{CC}}, f_s, f_{\text{DM}}$  分别为平均地壳、样品和亏损地幔的  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ ;  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772$ ,  $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$  (Blichert-Toft and Albarède, 1997);  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$ ,  $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$ ,  $f_{\text{DM}} = 0.16$  (Griffin *et al.*, 2000);  $f_{\text{CC}} = -0.55$  (Griffin *et al.*, 2002);  $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$  (Söderlund *et al.*, 2004);  $t$  表示年龄, 带上标“\*”的分析点用单个锆石年龄计算, 其余分析点用岩浆结晶年龄(830 Ma)计算。

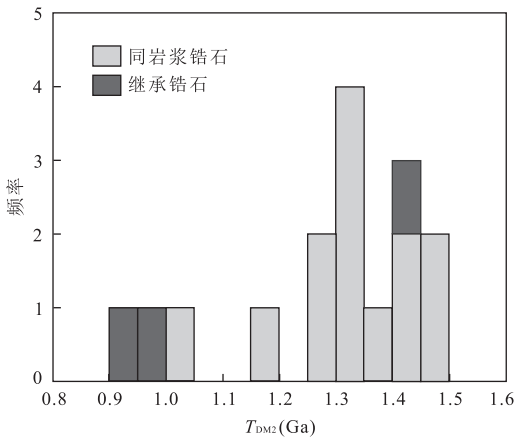
图 10 九宫山岩体锆石 Hf 模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ )柱状图

Fig.10 Histogram of two-stage model Hf ages for the Jiugongshan pluton

(Zheng, 1989). 根据  $t = 830 \text{ Ma}$  计算样品的初始  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  比值, 样品 08JGS25、08JGS38 的初始  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  比值明显偏低(分别为 0.683 843、0.699 170), 可能受外来流体或围岩混染作用的影响, 其余样品的初始  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  比值为 0.706 777~

0.710 782. 样品的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值分别为 0.126 5~0.140 0 和 0.512 207~0.512 525, 根据  $t = 830 \text{ Ma}$  计算的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为  $-1.49 \sim +5.24$ , 变化范围较大(图 8), 对应的单阶段 Nd 模式年龄( $T_{\text{DM1}}$ )为 1.09~1.74 Ga, 由于多数样品的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值大于 0.13, 计算的两阶段 Nd 模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ )为 1.07~1.62 Ga.

### 3.4 锆石 Hf 同位素

对样品 08JGS34 中进行 U-Pb 同位素定年的锆石, 挑选 18 颗进行了 Hf 同位素测定, 锆石 Hf 同位素分析点与 U-Pb 年龄分析点的位置相同, 分析结果见表 4. 它们的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  变化于 0.001 542~0.005 008,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  变化于 0.281 934~0.282 662. 两颗古元古代捕获锆石具有低的初始  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$  比值(分别为 0.281 879、0.282 011), 高的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(分别为  $10.1 \pm 1.0$ 、 $13.7 \pm 1.1$ ) (图 9), 与同时代亏损地幔值相当; 对应的单阶段模式年龄  $T_{\text{DM1}}$  分别为 1.88、1.69 Ga, 二阶段模式年龄  $T_{\text{DM2}}$  分别为  $1.89 \pm 0.12$ 、 $1.63 \pm 0.14 \text{ Ga}$ , 与锆石 U-Pb 同位素年龄基本一致( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄分别为

1.87±0.01、1.82±0.02 Ga)。同岩浆锆石的初始 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 比值变化于 0.282 354~0.282 564;  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化于 3.5±1.0~11.0±1.1(图 9), 加权平均值为 6.3±1.2; 单阶段模式年龄  $T_{\text{DM1}}$  变化于 0.96~1.28 Ga; 二阶段模式年龄  $T_{\text{DM2}}$  变化于 1.03±0.13~1.49±0.14 Ga(图 10), 加权平均值为 1.32±0.07 Ga, 反映其源区以新生地壳物质为主, 可能是由新元古代早期新生地壳物质再造而形成。继承锆石的初始 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 比值变化于 0.282 370~0.282 592;  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化于 5.1±0.9~12.9±1.1(图 9); 单阶段模式年龄  $T_{\text{DM1}}$  变化于 0.92~1.24 Ga; 二阶段模式年龄  $T_{\text{DM2}}$  变化于 0.94±0.14~1.43±0.11 Ga(图 10)。继承锆石多具有高的初始 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 比值、高的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和年轻的  $T_{\text{DM2}}$  值, 其二阶段亏损地幔模式年龄与锆石 U-Pb 同位素年龄较为接近, 表明其源区岩石的形成过程中有明显亏损地幔物质加入。

## 4 讨论

### 4.1 年代学意义

前人对九宫山片麻状花岗岩的定年仅有 K-Ar 法同位素年龄 126~131 Ma(章泽军等, 1995)。本文通过锆石 CL 图像分析和锆石微区原位定年发现, 九宫山片麻状花岗岩中存在大量约 830 Ma 的锆石, 这些锆石为自形晶体, 并具有清晰的岩浆型韵律环带, 因此锆石 U-Pb 年龄 830±8 Ma 代表了九宫山片麻状花岗岩的形成年龄, 说明其形成时代为新元古代中期, 而非早先认为的白垩纪。九宫山岩体的形成年龄与赣西北九岭花岗闪长岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 819±9 Ma、828±8 Ma, Li *et al.*, 2003a; 钟玉芳等, 2005)、皖南许村、歙县、休宁花岗闪长岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 823±8 Ma, Li *et al.*, 2003a; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 824±6 Ma, Wu *et al.*, 2006a) 和桂北本洞、三防、元宝山岩体(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 819±9 Ma、826±10 Ma、824±4 Ma, Li, 1999) 基本一致, 表明扬子板块东南缘江南造山带广泛发育 819~830 Ma 时期的岩浆活动。

此外, 在九宫山岩体中存在部分约 870 Ma 的年龄分析点, 这些分析点主要位于锆石核部, 为残留的继承锆石, U-Pb 年龄 873±7 Ma 为继承锆石的形成年龄。同样, 在赣西北九岭花岗闪长岩样品中也含有较多 870~910 Ma 的锆石(Li *et al.*, 2003a; 钟

玉芳等, 2005), 皖南许村、歙县和休宁花岗闪长岩样品中含有大量 870~890 Ma 的继承锆石(Li *et al.*, 2003a; Wu *et al.*, 2006a)。这些继承锆石的 U-Pb 年龄表明扬子板块东南缘在约 870~910 Ma 发生了广泛的岩浆活动, 可能与扬子和华夏板块之间的弧-陆碰撞作用有关。九宫山岩体的样品中含有  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄分别为 1 820±15 Ma 和 1 866±14 Ma 的两颗锆石, 并为自形晶体, 可能为捕获锆石, 反映扬子板块东南缘存在古元古代的结晶基底。

### 4.2 岩石成因

九宫山岩体的岩性为黑云二长花岗岩、黑云正长花岗岩, 样品中无角闪石, 而在岩体边部的斑状细粒黑云二长花岗岩中含有少量白云母, 类似于富黑云母过铝质花岗岩类(CPG)。岩体具有高的  $\text{SiO}_2$  含量(71.83%~74.20%)、全碱含量( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.06\%\sim7.90\%$ )和 Rb 含量( $174\times 10^{-6}\sim 251\times 10^{-6}$ ), 低的基性组分( $\sum \text{TiO}_2 + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO}=2.64\%\sim 4.00\%$ )和 Sr 含量( $90\times 10^{-6}\sim 121\times 10^{-6}$ ), 高的 A/CNK 值(1.03~1.27)和  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值(1.25~1.64), CIPW 标准矿物计算结果中含有刚玉分子(含量为 0.53%~2.30%), 属于高钾钙碱性弱过铝质花岗岩。岩体的初始 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 比值为 0.706 777~0.710 782(样品 08JGS25、08JGS38 除外), 显示壳源岩浆岩的特征。

本文所研究九宫山片麻状花岗岩与赣西北九岭、皖南新元古代花岗闪长岩具有一致的 LREE 富集的右倾模式、相似的微量元素分布型式(如富集 LILE、亏损 HFSE)(图 7)、偏高的 Nd 同位素组成(图 8)。九岭花岗闪长岩被解释为是由类似双桥山群的变质沉积岩(主要是贫粘土、富斜长石的砂屑岩)部分熔融而形成(Li *et al.*, 2003a), 皖南花岗闪长岩则被解释为由中-新元古代新生地壳再造而形成(Wu *et al.*, 2006a)。九宫山岩体中同岩浆锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值均为正值(3.5±1.0~11.0±1.1), 模式年龄为 1.03±0.13~1.49±0.14 Ga, 显示其源区含有较多早新元古代的新生地壳物质。

九宫山片麻状花岗岩的全岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -1.49~+5.24, Nd 模式年龄为 1.07~1.62 Ga, 与赣北双桥山群变质沉积岩和火山岩的全岩  $\epsilon_{\text{Nd}}$  (830 Ma) 值(-5.29~+2.93) 和 Nd 模式年龄(1.26~1.93 Ga) 具有较好的一致性(图 8)。同时, 花岗岩中继承锆石年龄(873±7 Ma) 与双桥山群火山岩(石英角斑岩和凝灰岩)形成年龄在误差范围内一

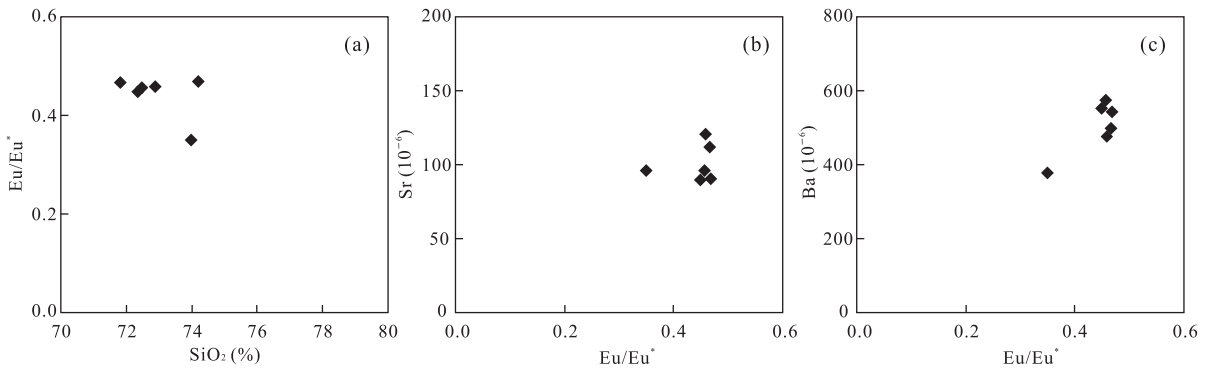


图 11 九宫山岩体(a)Eu/Eu\* -SiO<sub>2</sub>、(b)Sr-Eu/Eu\* 和(c)Ba-Eu/Eu\* 图解

Fig.11 Diagrams of (a) Eu/Eu\* vs. SiO<sub>2</sub>, (b) Sr vs. Eu/Eu\* and (c) Ba vs. Eu/Eu\* for the Jiugongshan pluton

致(878±5 Ma 和 879±6 Ma, Wang *et al.*, 2008b), 继承锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(5.1±0.9~12.9±1.1)接近于双桥山群火山岩锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}$ (880 Ma)值(3.3~14.7、7.3~18.8, Wang *et al.*, 2008b), 均具有很高的正值, 表明九宫山片麻状花岗岩可能是由类似于双桥山群的变质砂屑岩和火成岩部分熔融而形成。

九宫山片麻状花岗岩具有明显的 Eu 负异常, 但 Eu/Eu\* 与 SiO<sub>2</sub>、Sr(Ba) 与 Eu/Eu\* 之间并没有明显的相关性(图 11), 表明长石的分异作用在花岗岩形成过程中并不显著, 样品的 Eu 负异常可能是其源岩部分熔融的结果。花岗岩的地球化学特征可以很好的反映其源岩特征, 如九宫山花岗岩与赣北双桥山群岩石具有一致的富集 LILE、亏损 HFSE 等特征, 说明九宫山岩体类似“岛弧岩浆”的特征是从源岩中继承而来的。

#### 4.3 新生地壳对新元古代中期花岗岩的影响

在江南造山带东段, 皖南和赣东北蛇绿岩的 Sm-Nd 同位素年龄约为 970 Ma(Chen *et al.*, 1991; Li *et al.*, 1997); 赣东北蛇绿岩套中埃达克质花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 968±23 Ma(Li *et al.*, 1994); 赣东北蛇绿岩套中逆冲型花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 880±19 Ma(Li *et al.*, 2008b); 赣东北蛇绿岩套中辉长岩的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 993±12~995±22 Ma(Wang *et al.*, 2015); 浙北双溪坞群中部与上部岛弧火山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 926±15 Ma 和 891±12 Ma(Li *et al.*, 2009); 幔源岩浆结晶分异形成的浙北桃红、西裘花岗岩岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 913±15 Ma 和 905±14 Ma(Ye *et al.*, 2007); 浙北板片窗岩浆活动形成的高 Mg 闪长岩、富 Nb 玄武玢岩、斜长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 932±7 Ma、916±6 Ma 和

902±5 Ma(陈志洪等, 2009); 皖南伏川蛇绿岩附近由俯冲板片流体和熔体改造的亏损地幔楔部分熔融形成的辉长-闪长杂岩体的结晶年龄为 870~860 Ma(Cui *et al.*, 2017); 赣东北弋阳地区岛弧成因安山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 864±14~871±7 Ma(Yao *et al.*, 2015)。以上研究结果表明, 早新元古代时期(995~860 Ma)扬子板块东南缘可能处于活动大陆边缘, 在其东段发育广泛的幔源岩浆活动, 产生了大量新生地壳, 这些新生地壳不仅构成了江南造山带东段的重要变质基底, 而且成为新元古代中期花岗岩的主要物源。

据锆石 U-Pb 年代学研究, 桂北、赣西北花岗岩体中含有早新元古代的锆石年龄分析点(Li, 1999; Li *et al.*, 2003a; 钟玉芳等, 2005; Wang *et al.*, 2006; 钟玉芳, 2007), 九宫山岩体中含有少量的早新元古代继承锆石, 指示江南造山带中-西段可能也存在早新元古代的岩浆作用。桂北花岗岩具有较低的全岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-9.03~-2.94, 图 8, Li *et al.*, 2003a; Wang *et al.*, 2006)和锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(-10.6~-0.6, 图 9, 王孝磊等, 2006; Zheng *et al.*, 2007), 模式年龄为古元古代-中元古代早期, 主要由古老地壳物质再造形成, 明显不同于皖南、赣西北九岭花岗闪长岩和九宫山片麻状花岗岩, 反映江南造山带西段与中、东段存在较大差异, 其基底以古老地壳物质为主, 新生地壳组分可能很少。九宫山花岗岩具有高的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(3.5±1.0~11.0±1.1, 图 9)和较高的全岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-1.49~+5.24, 图 8), 继承锆石(Ca, 873 Ma)具有与同时代亏损地幔相当的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(5.1±0.9~12.9±1.1), 指示花岗岩形成的物源主要为新生地壳物质, 研究区可能存在早新元古代幔源岩浆活动。赣西北九岭花岗闪长岩的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值主要为正值(-3.9~13.3, 图 9, 钟玉芳, 2007), 部

分样品的全岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值较高 ( $-0.2 \sim -0.6$ , 图 8, Li *et al.*, 2003a; 钟玉芳, 2007), 接近于零, 与皖南花岗岩类似 (Li *et al.*, 2003a; Wu *et al.*, 2006a), 部分样品的全岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值则较低 ( $-6.2 \sim -2.0$ ), 反映其源区可能既存在新生地壳组分又含有古老地壳物质。上述现象表明, 江南造山带中段变质基底中含有一定组分的早新元古代新生地壳物质, 为新元古代中期岩浆活动提供了重要物源。

综合分析表明, 在江南造山带东段广泛发育早新元古代岛弧岩浆岩, 且存在大量早新元古代新生地壳物质再造的记录, 中段则同时存在新生地壳与古老地壳物质的再造, 而西段只有古老地壳物质再造, 即早新元古代新生地壳物质对江南造山带新元古代中期岩浆作用的影响呈由西向东增大的趋势。江南造山带早新元古代基底岩石的研究同样表明, 从西段桂北四堡群到中段赣北双桥山群以至东段浙北双溪坞群, 存在相似的变化规律, 如四堡群火山岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-8.47 \sim 1.44$  (韩发等, 1994; 李献华, 1996; Zhou *et al.*, 2004), 主要为负值; 双桥山群火山岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-0.20 \sim 3.31$  (Chen and Jahn, 1998); 双溪坞群火山岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $3.42 \sim 8.57$  (沈渭洲等, 1991; 徐步台和邱郁双, 1996; Li *et al.*, 2009) (用  $t=900$  Ma 计算) (图 12)。

对于江南造山带新元古代中期花岗岩以及早新元古代基底岩石 Nd-Hf 同位素组成的变化规律, Wang *et al.* (2014) 认为早新元古代时期在江南造山带东段生成大量新生地壳, 造山带中段和西段逐渐远离东段的岛弧地体, 早新元古代基底岩石沉积成岩期从东段获得的新生地壳物质逐渐变少, 从而引起基底岩石和基底岩石熔融所成新元古代中期花岗岩的全岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值从东向西逐渐降低。然而, 根据近几年的研究成果, 在江南造山带中段陆续发现早新元古代时期新生地壳生长的证据, Zhang *et al.* (2013) 在湘东北、赣西北地区冷家溪群/双桥山群发现结晶年龄分别为  $860 \pm 20$  Ma、 $847 \pm 18$  Ma 的玄武岩、粒玄岩, 其全岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $1.30 \sim 9.36$ ; Yao *et al.* (2014) 在湘东北浏阳地区冷家溪群发现结晶年龄为  $860$  Ma 的粒玄岩。造山带中段冷家溪群/双桥山群玄武岩、粒玄岩的形成时间 (Ca.  $860$  Ma) 稍晚于东段双溪坞群火山岩 (中部、上部岛弧火山岩的形成时间分别为  $926 \pm 15$  Ma、 $891 \pm 12$  Ma, Li *et al.*, 2009)。

因此, 我们认为引起江南造山带新生地壳对新元古代中期花岗岩影响发生变化的原因可能与扬子

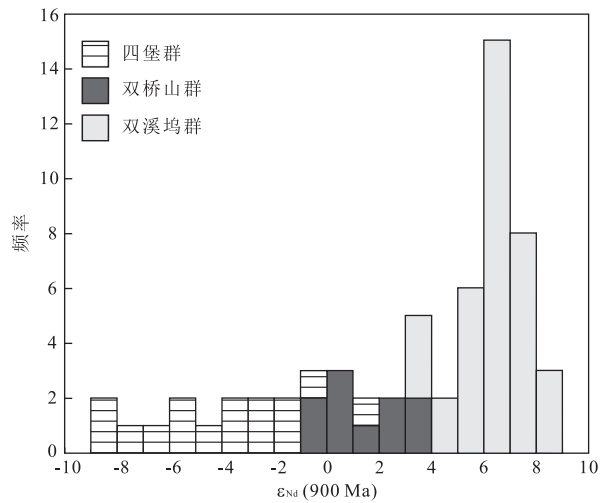


图 12 江南造山带早新元古代火山岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(900 \text{ Ma})$  值柱状图

Fig. 12 Histogram of  $\epsilon_{\text{Nd}}(900 \text{ Ma})$  values for the early Neoproterozoic volcanics at the Jiangnan orogeny

数据来源: 桂北四堡群火山岩引自韩发等(1994), 李献华(1996), Zhou *et al.* (2004); 赣北双桥山群火山岩引自 Chen and Jahn (1998); 浙北双溪坞群火山岩引自沈渭洲等(1991), 徐步台和邱郁双(1996)以及 Li *et al.* (2009)

和华夏板块间的“斜向穿时碰撞”过程有关, 东段最早发生拼合, 随着洋壳的不断斜向俯冲, 扬子与华夏板块间的洋盆由东向西逐渐闭合, 东段岛弧岩浆作用加剧, 中段产生相对较弱的岛弧岩浆作用, 西段岛弧岩浆作用最弱, 使江南造山带早新元古代新生地壳物质由东向西逐渐减少。

#### 4.4 地球动力学背景

目前, 对华南新元古代中期岩浆岩的构造背景仍存在很大争议, 主要有 3 种不同的解释模型: (1) 地幔柱—裂谷模型 (Li *et al.*, 1999, 2003a, 2003b, 2006, 2008a), 认为它们形成于板内非造山环境, 显示  $830 \sim 795$  Ma 和  $780 \sim 745$  Ma 两阶段岩浆活动的特点, 很可能与导致 Rodinia 超大陆裂解的两次地幔柱/超级地幔柱活动有关, 华南在新元古代时期位于劳伦古陆和澳大利亚—东南极大陆之间; (2) 板片—岛弧模型 (Zhou *et al.*, 2002a, 2002b, 2004, 2006a, 2006b, 2009; Wang *et al.*, 2004, 2006; Zhao *et al.*, 2008; Zhao and Zhou, 2013), 认为华南新元古代岩浆岩是与扬子板块周边的洋壳俯冲消减、弧—陆或陆—陆碰撞造山作用有关的大陆边缘岩浆弧, 华南在新元古代时期是被消减大洋岩石圈俯冲带包围起来的孤立陆块或位于 Rodinia 超大陆的边缘; (3) 板块—裂谷模型 (Wu *et al.*, 2006a; Zheng *et al.*, 2007, 2008), 认为华南新元古代岩浆活动是

早期弧—陆碰撞造山带拉张垮塌和晚期大陆裂谷再造的产物。

对扬子与华夏板块的碰撞拼合时间也存在较大争议,一种解释认为在中元古代晚期到新元古代早期(Li *et al.*, 2002, 2006, 2007, 2008b, 2009; Wu *et al.*, 2006a; Zheng, 2008),另一种观点认为在新元古代中期或更晚(Zhou *et al.*, 2002b, 2004; Wang *et al.*, 2004, 2007)。四堡造山变质、变形作用主要在早于 900 Ma 的岩石中有记录(如天里片岩、赣北蛇绿岩套和双溪坞群岛弧岩石等),而在晚于 880 Ma 的岩石中则变形很少、变质程度很低(Chen *et al.*, 1991; Li and Li, 2003; Li *et al.*, 2007, 2009; Ye *et al.*, 2007);沿江南造山带具有岛弧成因的岩浆活动主要分布在 995~860 Ma(Li *et al.*, 1994, 2008b, 2009; Ye *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2015; Yao *et al.*, 2015; Cui *et al.*, 2017)。因此,扬子板块与华夏板块可能在 880~860 Ma 完成碰撞并最终拼合在一起(Li *et al.*, 2008b, 2009)。

浙北上墅组玄武岩—流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $792 \pm 5$  Ma(Li *et al.*, 2008a);浙北道林山花岗岩—辉绿岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $794 \pm 9$  Ma(Li *et al.*, 2008a);赣东北桃源组双峰式火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 Ca.819 Ma(王剑, 2005);华夏板块西北缘马面山群玄武岩—流纹岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $818 \pm 9$  Ma(Li *et al.*, 2005)。上述研究成果表明,在新元古代中期沿江南造山带发育一系列双峰式岩浆活动,指示该区在 820~790 Ma 时期处于伸展构造环境。

结合扬子板块东南缘 Ca.850 Ma 期间板内成因双峰式火山岩和碱性岩的研究成果(Li *et al.*, 2010a, 2010b; Lyu *et al.*, 2017),江南造山带的构造体制可能在 860~850 Ma 时期从板块汇聚转变成了陆内裂谷环境。因此,我们认为九宫山西北部片麻状花岗岩可能形成于非造山伸展环境,是陆内裂谷作用的产物,可能与 Rodinia 超大陆的裂解作用有关。

## 5 结论

(1) 九宫山岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $830 \pm 8$  Ma,与江南造山带内出露的皖南、赣西北九岭和桂北岩体的形成年龄基本一致。残余锆石核给出  $873 \pm 7$  Ma 的继承锆石年龄,它们可能为扬子与华夏板块碰撞时的岩浆作用产物。

(2) 九宫山岩体的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值主要为正值,同岩

浆锆石具有不均一的正  $\epsilon_{Hf}(t)$  值,继承锆石具有高的正  $\epsilon_{Hf}(t)$  值,且其模式年龄与 U-Pb 同位素年龄较一致,指示岩浆源区含有显著的新生地壳物质。岩体与赣北双桥山群变质沉积岩、火山岩具有较一致的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值和 Nd 模式年龄,表明九宫山岩体可能是由类似双桥山群的变质砂屑岩和火成岩部分熔融而形成。九宫山岩体可能形成于非造山伸展环境,是陆内裂谷作用的产物,可能与 Rodinia 超大陆的裂解作用有关。

(3) 根据赣西北九岭岩体与九宫山岩体的 Nd-Hf 同位素特征,江南造山带中段变质基底中含有较多早新元古代新生地壳物质。新生地壳对江南造山带新元古代中期花岗岩的影响呈由东向西减弱的趋势,这可能是扬子与华夏板块的碰撞拼合过程中,岛弧岩浆作用由东向西逐渐减弱而使新生地壳物质逐渐减少所引起。

致谢:感谢 3 位匿名审稿人提出了宝贵的意见和建议。锆石阴极发光图像分析得到中国地质大学(武汉)吴元保教授的热心指导;锆石 Hf 同位素测定和数据处理得到中国科学院地质与地球物理研究所杨岳衡老师的热心帮助;锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学测试得到中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室和武汉综合岩矿测试中心相关工作人员的协助;野外工作和论文撰写过程中得到余振兵老师、刘劲松、丁丽雪、李万友、邹慧娟、秦拯纬等的帮助,在此一并致以诚挚的谢意!

## References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192 (1/2): 59 - 79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)
- Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1/2): 243 - 258. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00198-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00198-2)
- Charvet, J., Shu, L.S., Shi, Y.S., et al., 1996. The Building of South China: Collision of Yangzi and Cathaysia Blocks, Problems and Tentative Answers. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13(3/4/5): 223 - 235. [https://doi.org/10.1016/0743-9547\(96\)00029-3](https://doi.org/10.1016/0743-9547(96)00029-3)
- Chen, J.F., Foland, K.A., Xing, F.M., et al., 1991. Magmatism along the Southeast Margin of the Yangtze Block: Precambrian Collision of the Yangtze and Cathaysia Blocks

- of China. *Geology*, 19(8): 8–15. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0815:matsmo>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0815:matsmo>2.3.co;2)
- Chen, J. F., Jahn, B. M., 1998. Crustal Evolution of Southeastern China: Nd and Sr Isotopic Evidence. *Tectonophysics*, 284(1/2): 101–133. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(97\)00186-8](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(97)00186-8)
- Chen, Z. H., Guo, K. Y., Dong, Y. G., et al., 2009. Possible Early Neoproterozoic Magmatism Associated with Slab Window in the Pingshui Segment of the Jiangshan-Shaoxing Suture Zone: Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Geochronology and Geochemistry. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 39(7): 994–1008 (in Chinese).
- Corfu, F., Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. O., et al., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469–500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Cui, X., Zhu, W. B., Fitzsimons, I. C. W., et al., 2017. A Possible Transition from Island Arc to Continental Arc Magmatism in the Eastern Jiangnan Orogen, South China: Insights from a Neoproterozoic (870–860 Ma) Gabbroic-Dioritic Complex near the Fuchuan Ophiolite. *Gondwana Research*, 46: 1–16. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Gao, S., Ling, W. L., Qiu, Y. M., et al., 1999. Contrasting Geochemical and Sm-Nd Isotopic Compositions of Archean Metasediments from the Kongling High-Grade Terrain of the Yangtze Craton: Evidence for Cratonic Evolution and Redistribution of REE during Crustal Anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13/14): 2071–2088. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00153-2](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00153-2)
- Gao, S., Zhang, B. R., Xie, Q. L., et al., 1991. Average Chemical Compositions of Post-Archean Sedimentary and Volcanic Rocks from the Qinling Orogenic Belt and Its Adjacent North China and Yangtze Cratons. *Chemical Geology*, 92(4): 261–282. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(91\)90074-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(91)90074-2)
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E. A., et al., 2006. Comment: Hf-Isotope Heterogeneity in Zircon 91500. *Chemical Geology*, 233(3/4): 358–363. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.03.007>
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3/4): 237–269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)
- Han, F., Chen, J. Z., Nie, F. J., et al., 1994. The Geochronological Studies of Sibao Group in the Southern Margin of Jiangnan Massif. *Acta Geoscientia Sinica*, 15(1–2): 43–50 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. P., Wu, C. R., Chen, L., et al., 1999. Instruction of Geologic Map (Baoshihe Breadth). Hubei Regional Survey of Geology and Mineral Resources, Wuhan, 27–40 (in Chinese).
- Li, W. X., Li, X. H., 2003. Adakitic Granites within the NE Jiangxi Ophiolites, South China: Geochemical and Nd Isotopic Evidence. *Precambrian Research*, 122(1–4): 29–44. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00206-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00206-1)
- Li, W. X., Li, X. H., Li, Z. X., 2005. Neoproterozoic Bimodal Magmatism in the Cathaysia Block of South China and Its Tectonic Significance. *Precambrian Research*, 136(1): 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.09.008>
- Li, W. X., Li, X. H., Li, Z. X., 2010a. Ca. 850 Ma Bimodal Volcanic Rocks in Northeastern Jiangxi Province, South China: Initial Extension during the Breakup of Rodinia? *American Journal of Science*, 310(9): 951–980. <https://doi.org/10.2475/09.2010.08>
- Li, W. X., Li, X. H., Li, Z. X., et al., 2008b. Obduction-Type Granites within the NE Jiangxi Ophiolite: Implications for the Final Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Gondwana Research*, 13(3): 288–301. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2007.12.010>
- Li, X. H., 1996. Sm-Nd Isotopic Systematics of Sibao Group from the Southern Margin of Yangtze Block: Implications for the Crustal Evolution. *Scientia Geologica Sinica*, 31(3): 218–228 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., 1999. 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. *Precambrian Research*, 97(1/2): 43–57. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(99\)00020-0](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(99)00020-0)
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Q. L., et al., 2010b. Petrogenesis and Tectonic Significance of the ~850 Ma Gangbian Alkaline Complex in South China: Evidence from in Situ Zircon U-Pb Dating, Hf-O Isotopes and Whole-Rock Geochemistry. *Lithos*, 114(1/2): 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.07.011>
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., et al., 2008a. 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. *Lithos*, 102 (1/2): 341 – 357. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.04.007>
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., et al., 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. *Precambrian Research*, 174 (1/2): 117 – 128. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.07.004>
- Li, X. H., Li, Z. X., Ge, W. C., et al., 2003a. Neoproterozoic Granitoids in South China: Crustal Melting above a Mantle Plume at Ca. 825 Ma? *Precambrian Research*, 122(1–4): 45 – 83. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00207-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00207-3)
- Li, X. H., Li, Z. X., Sinclair, J. A., et al., 2006. Revisiting the “Yanbian Terrane”: Implications for Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Western Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 151 (1–2): 14 – 30. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.07.009>
- Li, X. H., McCulloch, M. T., 1996. Secular Variation in the Nd Isotopic Composition of Neoproterozoic Sediments from the Southern Margin of the Yangtze Block, Evidence for a Proterozoic Continental Collision in Southeast China. *Precambrian Research*, 76 (1–2): 67 – 76. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00024-0)
- Li, X. H., Zhao, J. X., McCulloch, M. T., et al., 1997. Geochemical and Sm-Nd Isotopic Study of Neoproterozoic Ophiolites from Southeastern China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 81 (1–2): 129 – 144. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(96\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(96)00032-0)
- Li, X. H., Zhou, G. Q., Zhao, J. X., et al., 1994. SHRIMP Ion Microprobe Zircon U-Pb Age and Sm-Nd Isotopic Characteristics of the NE Jiangxi Ophiolite and Its Tectonic Implications. *Chinese Journal of Geochemistry*, 13(4): 317 – 325. <https://doi.org/10.1007/BF02838521>
- Li, Z. X., Li, X. H., Kinny, P. D., et al., 1999. The Breakup of Rodinia: Did It Start with a Mantle Plume beneath South China? *Earth and Planetary Science Letters*, 173 (3): 171 – 181. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00240-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00240-X)
- Li, Z. X., Li, X. H., Kinny, P. D., et al., 2003b. Geochronology of Neoproterozoic Syn-Rift Magmatism in the Yangtze Craton, South China and Correlations with Other Continents: Evidence for a Mantle Superplume That Broke Up Rodinia. *Precambrian Research*, 122 (1–4): 85 – 109. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00208-5)
- Li, Z. X., Li, X. H., Zhou, H. W., et al., 2002. Grenvillian Continental Collision in South China: New SHRIMP U-Pb Zircon Results and Implications for the Configuration of Rodinia. *Geology*, 30(2): 163 – 166. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0163:GCCISC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0163:GCCISC>2.0.CO;2)
- Li, Z. X., Wartho, J. A., Occhipinti, S., et al., 2007. Early History of the Eastern Sibao Orogen (South China) during the Assembly of Rodinia: New Mica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating and SHRIMP U-Pb Detrital Zircon Provenance Constraints. *Precambrian Research*, 159 (1/2): 79 – 94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.05.003>
- Li, Z. X., Zhang, L. H., Powell, C. M., 1995. South China in Rodinia: Part of the Missing Link between Australia-East Antarctica and Laurentia? *Geology*, 23(5): 407 – 410. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0407:scirpo>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0407:scirpo>2.3.co;2)
- Ling, W. L., Duan, R. C., Xie, X. J., et al., 2009. Contrasting Geochemistry of the Cretaceous Volcanic Suites in Shandong Province and Its Implications for the Mesozoic Lower Crust Delamination in the Eastern North China Craton. *Lithos*, 113(3/4): 640 – 658. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.07.001>
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010a. 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 from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537 – 571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010b. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55 (15): 1535 – 1546. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3052-4>
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008. 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. *Chemical Geology*, 247(1/2): 133 – 153. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.016>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *California: Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 1–39.
- Lyu, P. L., Li, W. X., Wang, X. C., et al., 2017. Initial Breakup of Supercontinent Rodinia as Recorded by Ca 860–840 Ma Bimodal Volcanism along the Southeastern Margin of the Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 296: 148 – 167. <https://doi.org/10.13039/>



501100002367

- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2)
- McDonough, W. F., Sun, S. S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3/4): 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Miller, C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31(6): 529. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0529:hacgio>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0529:hacgio>2.0.co;2)
- Qin, S. X., Zhang, Z. J., Zhang, Z., et al., 2002. Study on the Behavior of the Low-Grade Metamorphism and High Deformation of the Middle Proterozoic Shuangqiaoshan Group in North Jiangxi and Grenville Phase Orogeny. *Geological Science and Technology Information*, 21(2): 8–12 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, Y. M., Gao, S., McNaughton, N. J., et al., 2000. First Evidence of > 3.2 Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of South China and Its Implications for Archean Crustal Evolution and Phanerozoic Tectonics. *Geology*, 28(1): 11–14. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)028<0011:feogcc>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)028<0011:feogcc>2.3.co;2)
- Shen, W. Z., Zhang, B. T., Ling, H. F., et al., 1991. Nd, Sr and O Isotopic Study on Spilite-Keratophyre in Xiqiu, Zhejiang Province. *Acta Geologica Sinica*, 65(4): 337–346 (in Chinese with English abstract).
- Söderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The <sup>176</sup>Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3/4): 311–324. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00012-3)
- Streckeisen, A., 1974. Classification and Nomenclature of Plutonic Rocks Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geologische Rundschau*, 63(2): 773–786. <https://doi.org/10.1007/bf01820841>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wang, J., 2005. New Advances in the Study of “the Nanhuaan System”—with Particular Reference to the Stratigraphic Division and Correlation of the Nanhuaan System, South China. *Geological Bulletin of China*, 24(6): 491–495 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. L., Zhou, J. C., Griffin, W. L., et al., 2007. Detrital Zircon Geochronology of Precambrian Basement Sequences in the Jiangnan Orogen: Dating the Assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Precambrian Research*, 159(1/2): 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.06.005>
- Wang, X. L., Zhou, J. C., Griffin, W. L., et al., 2014. Geochemical Zonation across a Neoproterozoic Orogenic Belt: Isotopic Evidence from Granitoids and Metasedimentary Rocks of the Jiangnan Orogen, China. *Precambrian Research*, 242: 154–171. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.12.023>
- Wang, X. L., Zhou, J. C., Qiu, J. S., et al., 2004. Geochemistry of the Meso- to Neoproterozoic Basic-Acid Rocks from Hunan Province, South China: Implications for the Evolution of the Western Jiangnan Orogen. *Precambrian Research*, 135(1–2): 79–103. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.07.006>
- Wang, X. L., Zhou, J. C., Qiu, J. S., et al., 2006. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology of the Neoproterozoic Igneous Rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 145(1/2): 111–130. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.11.014>
- Wang, X. L., Zhou, J. C., Qiu, J. S., et al., 2006. Petrogenesis of the Neoproterozoic Strongly Peraluminous Granitoids from Northern Guangxi: Constraints from Zircon Geochronology and Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 326–342 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. L., Zhou, J. C., Qiu, J. S., et al., 2008a. Geochronology and Geochemistry of Neoproterozoic Mafic Rocks from Western Hunan, South China: Implications for Petrogenesis and Post-Orogenic Extension. *Geological Magazine*, 145(2): 215–233. <https://doi.org/10.1017/S0016756807004025>
- Wang, X. L., Zhao, G. C., Zhou, J. C., et al., 2008b. Geochronology and Hf Isotopes of Zircon from Volcanic Rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Eastern Jiangnan Orogen. *Gondwana Research*, 14(3): 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.03.001>
- Wang, X. S., Gao, J., Klemd, R., et al., 2015. Early Neoproterozoic Multiple Arc-Back-Arc System Formation during Subduction-Accretion Processes between the Yangtze and Cathaysia Blocks: New Constraints from the Supra-Subduction Zone NE Jiangxi Ophiolite (South China). *Lithos*, 236–237: 90–105. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.005>

13039/501100001809

- Watson, E.B., Harrison, T.M., 1983. Zircon Saturation Revisited; Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64 (2): 295 — 304. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(83\)90211-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(83)90211-x)
- Wu, R.X., Zheng, Y.F., Wu, Y.B., et al., 2006a. Reworking of Juvenile Crust; Element and Isotope Evidence from Neoproterozoic Granodiorite in South China. *Precambrian Research*, 146 (3/4): 179 — 212. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.01.012>
- Wu, F.Y., Yang, Y.H., Xie, L.W., et al., 2006b. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons and Baddeleyites Used in U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 234 (1-2): 105 — 126. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.05.003>
- Wu, H., Zhang, Y.H., Ling, W.L., et al., 2016. Recognition of Mantle Input and Its Tectonic Implication for the Nature of ~815 Ma Magmatism in the Yangtze Continental Interior, South China. *Precambrian Research*, 279: 17 — 36. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.04.005>
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., Tang, J., et al., 2007. Zircon U-Pb Dating of Water-Rock Interaction during Neoproterozoic Rift Magmatism in South China. *Chemical Geology*, 246 (1/2): 65 — 86. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.09.004>
- Xin, Y.J., Li, J.H., Dong, S.W., et al., 2017. Neoproterozoic Post-Collisional Extension of the Central Jiangnan Orogen; Geochemical, Geochronological, and Lu-Hf Isotopic Constraints from the Ca. 820 — 800 Ma Magmatic Rocks. *Precambrian Research*, 294: 91 — 110. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Xu, B.T., Qiu, Y.S., 1996. Sm-Nd and <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar Ages of Shuangxiwu Group and Their Geological Significance. *Geology of Zhejiang*, 12(1): 46 — 53 (in Chinese with English abstract).
- Xu, P., Wu, F.Y., Xie, L.W., et al., 2004. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons for U-Pb Dating. *Chinese Science Bulletin*, 49(14): 1403 — 1410 (in Chinese).
- Yang, C., Li, X.H., Wang, X.C., et al., 2015. Mid-Neoproterozoic Angular Unconformity in the Yangtze Block Revisited; Insights from Detrital Zircon U-Pb Age and Hf-O Isotopes. *Precambrian Research*, 266: 165 — 178. <https://doi.org/10.13039/501100002855>
- Yao, J.L., Shu, L.S., Santosh, M., 2014. Neoproterozoic Arc-Trench System and Breakup of the South China Craton; Constraints from N-MORB Type and Arc-Related Mafic Rocks, and Anorogenic Granite in the Jiangnan Orogenic Belt. *Precambrian Research*, 247: 187 — 207. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.04.008>
- Yao, J.L., Shu, L.S., Santosh, M., et al., 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. *Precambrian Research*, 262: 84 — 100. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Ye, M.F., Li, X.H., Li, W.X., et al., 2007. SHRIMP Zircon U-Pb Geochronological and Whole-Rock Geochemical Evidence for an Early Neoproterozoic Sibaoan Magmatic Arc along the Southeastern Margin of the Yangtze Block. *Gondwana Research*, 12 (1/2): 144 — 156. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2006.09.001>
- Zhang, H.X., Sun, D.Z., Zhu, B.Q., et al., 2000. Pb, Nd Isotopic Study of Proterozoic Metamorphic Sediments in North Jiangxi and Its Tectonic Significance. *Regional Geology of China*, 19 (1): 66 — 71 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Wu, Y.B., et al., 2006a. Zircon Isotope Evidence for  $\geq 3.5$  Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of China. *Precambrian Research*, 146 (1-2): 16 — 34. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.01.002>
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Wu, Y.B., et al., 2006b. Zircon U-Pb Age and Hf-O Isotope Evidence for Paleoproterozoic Metamorphic Event in South China. *Precambrian Research*, 151 (3-4): 265 — 288. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.08.009>
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., et al., 2009. Origin of TTG-Like Rocks from Anatexis of Ancient Lower Crust; Geochemical Evidence from Neoproterozoic Granitoids in South China. *Lithos*, 113(3/4): 347 — 368. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.024>
- Zhang, Y.Z., Wang, Y.J., Geng, H.Y., et al., 2013. Early Neoproterozoic (~850 Ma) Back-Arc Basin in the Central Jiangnan Orogen (Eastern South China); Geochronological and Petrogenetic Constraints from Meta-Basalts. *Precambrian Research*, 231: 325 — 342. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.03.016>
- Zhang, Z.J., Yin, C.Q., Zeng, Z.X., et al., 1995. Instruction of Geologic Map (Gangkou Town Breadth). Northwest Jiangxi Geology Team, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Jiujiang, 15 — 26 (in Chinese).
- Zhao, J.H., Zhou, M.F., 2013. Neoproterozoic High-Mg Basalts Formed by Melting of Ambient Mantle in South China. *Precambrian Research*, 233: 193 — 205. <https://doi.org/10.13039/501100001809>

- Zhao, J. H., Zhou, M. F., Yan, D. P., et al., 2008. Zircon Lu-Hf Isotopic Constraints on Neoproterozoic Subduction-Related Crustal Growth along the Western Margin of the Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 163(3/4): 189–209. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.11.003>
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2006. Widespread Archean Basement beneath the Yangtze Craton. *Geology*, 34(6): 417–420. <https://doi.org/10.1130/G22282.1>
- Zheng, Y. F., 1989. Influences of the Nature of the Initial Rb-Sr System on Isochron Validity. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 80(1): 1–16. [https://doi.org/10.1016/0168-9622\(89\)90043-2](https://doi.org/10.1016/0168-9622(89)90043-2)
- Zheng, Y. F., Wu, R. X., Wu, Y. B., et al., 2008. Rift Melting of Juvenile Arc-Derived Crust: Geochemical Evidence from Neoproterozoic Volcanic and Granitic Rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Research*, 163(3/4): 351–383. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.01.004>
- Zheng, Y. F., Wu, Y. B., Chen, F. K., et al., 2004. Zircon U-Pb and Oxygen Isotope Evidence for a Large-Scale  $^{18}\text{O}$  Depletion Event in Igneous Rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4145–4165. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.01.007>
- Zheng, Y. F., Zhang, S. B., Zhao, Z. F., et al., 2007. Contrasting Zircon Hf and O Isotopes in the Two Episodes of Neoproterozoic Granitoids in South China: Implications for Growth and Reworking of Continental Crust. *Lithos*, 96(1/2): 127–150. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.10.003>
- Zhong, Y. F., 2007. Petrogenesis and Geological Significance of Jiuling Granitic Complex Batholith in Northern Jiangxi Province (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhong, Y. F., Ma, C. Q., She, Z. B., et al., 2005. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Jiuling Granitic Complex Batholith in Jiangxi Province. *Earth Science*, 30(6): 685–691 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. C., Wang, X. L., Qiu, J. S., 2009. Geochronology of Neoproterozoic Mafic Rocks and Sandstones from Northeastern Guizhou, South China: Coeval Arc Magmatism and Sedimentation. *Precambrian Research*, 170(1/2): 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.11.002>
- Zhou, J. C., Wang, X. L., Qiu, J. S., et al., 2004. Geochemistry of Meso- and Neoproterozoic Mafic-Ultramafic Rocks from Northern Guangxi, China: Arc or Plume Magmatism? *Geochemical Journal*, 38(2): 139–152. <https://doi.org/10.2343/geochemj.38.139>
- Zhou, M. F., Kennedy, A. K., Sun, M., et al., 2002a. Neoproterozoic Arc-Related Mafic Intrusions along the Northern Margin of South China: Implications for the Accretion of Rodinia. *The Journal of Geology*, 110(5): 611–618. <https://doi.org/10.1086/341762>
- Zhou, M. F., Ma, Y. X., Yan, D. P., et al., 2006a. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic Arc Assemblage in the Western Margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 144(1–2): 19–38. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.11.002>
- Zhou, M. F., Yan, D. P., Kennedy, A. K., et al., 2002b. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronological and Geochemical Evidence for Neoproterozoic Arc-Magmatism along the Western Margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1–2): 51–67. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00595-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00595-7)
- Zhou, M. F., Yan, D. P., Wang, C. L., et al., 2006b. Subduction-Related Origin of the 750 Ma Xuelongbao Adakitic Complex (Sichuan Province, China): Implications for the Tectonic Setting of the Giant Neoproterozoic Magmatic Event in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1–2): 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.032>
- Zhu, W. G., Zhong, H., Deng, H. L., et al., 2006. SHRIMP Zircon U-Pb Age, Geochemistry, and Nd-Sr Isotopes of the Gaojiacun Mafic-Ultramafic Intrusive Complex, Southwest China. *International Geology Review*, 48(7): 650–668. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.48.7.650>

## 附中中文参考文献

- 陈志洪, 郭坤一, 董永观, 等, 2009. 江山—绍兴拼合带平水段可能存在新元古代早期板片窗岩浆活动: 来自锆石 LA-ICP-MS 年代学和地球化学的证据. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 39(7): 994–1008.
- 韩发, 沈建忠, 聂凤军, 等, 1994. 江南古陆南缘四堡群同位素地质年代学研究. *地球学报*, 15(1–2): 43–50.
- 李金平, 吴传荣, 陈璘, 等, 1999. 地质图说明书(宝石河幅). 武汉: 湖北省区域地质矿产调查所, 27–40.
- 李献华, 1996. 扬子地块体南缘四堡群 Sm-Nd 同位素体系及其地壳演化意义. *地质科学*, 31(3): 218–228.
- 秦松贤, 章泽军, 张志, 等, 2002. 赣北中元古界双桥山群低变质强变形行为与格林威尔期造山作用. *地质科技情报*, 21(2): 8–12.
- 沈渭洲, 章邦桐, 凌洪飞, 等, 1991. 浙江西裘细碧—角斑岩的 Nd, Sr, O 同位素地质研究. *地质学报*, 65(4): 337–346.
- 王剑, 2005. 华南“南华系”研究新进展——论南华系地层划

- 分与对比.地质通报,24(6):491-495.
- 王孝磊,周金城,邱检生,等,2006.桂北新元古代强过铝花岗岩的成因:锆石年代学和 Hf 同位素制约.岩石学报,22(2):326-342.
- 徐步台,邱郁双,1996.章村-楼塔一带双溪坞群 Sm-Nd 和  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄及地质年代意义.浙江地质,12(1):46-53.
- 徐平,吴福元,谢烈文,等,2004.U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素.科学通报,49(14):1403-1410.
- 张海祥,孙大中,朱炳泉,等,2000.赣北元古代变质沉积岩的铅钨同位素特征.中国区域地质,19(1):66-71.
- 章泽军,印纯清,曾佐勋,等,1995.地质图说明书(港口幅).九江:江西省地矿局赣西北大队,15-26.
- 钟玉芳,2007.赣北地区九岭复式花岗岩基的成因及成岩意义(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 钟玉芳,马昌前,余振兵,等,2005.江西九岭花岗岩类复式岩基锆石 SHRIMP U-Pb 年代学.地球科学,30(6):685-691.