

doi:10.3799/dqkx.2015.002

桂东大瑶山南缘社山花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征:对区内加里东期成岩成矿作用的制约

李 巍¹, 毕诗健^{2,3*}, 杨 振³, 梁 培⁴, 唐克非^{2,3}

1. 广西壮族自治区地球物理勘察院, 广西柳州 545005
2. 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
3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

摘要: 利用激光剥蚀(LC)-ICP-MS方法对桂东大瑶山南缘的社山钨钼矿床中的花岗岩类进行研究, 精确限定社山黑云母花岗闪长岩(SD256)中锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为 438.7 ± 3.0 Ma(MSWD=0.22), 位于平头背石英砂岩的花岗闪长(斑)岩脉(SD190)形成于 438.1 ± 2.6 Ma(MSWD=0.28); 花岗岩中新生岩浆锆石的 Hf 同位素特征较为一致,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值分布于 0.282 406~0.282 518, 对应的 ϵ_{Hf} (438 Ma)值变化于-3.7~0, 两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})集中在 1 226~1 417 Ma 之间。这表明大瑶山地区社山花岗闪长岩类的形成时间在 438 Ma 左右(加里东期), 成岩成矿作用可能与中元古代新生地壳物质(1.2~1.4 Ga)的部分熔融密切相关。结合区域内已有可靠年龄进行分析, 认为华南加里东期成岩成矿作用应该不是呈简单的北东向分布, 而是呈面状展布, 且该期构造-岩浆-成矿运动可能是引起华南地区在印支期、燕山早期发生大规模的岩浆作用和金属成矿作用的关键原因之一。

关键词: 社山 W-Mo 矿床; 地球化学; 加里东期; 成岩成矿作用; 大瑶山。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2015)01-0017-17

收稿日期: 2014-06-19

Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Characterization of Sheshan Granodiorite in Southern Edge of Dayaoshan, Guidong: Constraints on Caledonian Diagenesis and Mineralization

Li Wei¹, Bi Shijian^{2,3*}, Yang Zhen³, Liang Pei⁴, Tang Kefei^{2,3}

1. Geophysical Exploration Institute of Guangxi, Liuzhou 545005, China
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: In this paper, we present laser ablation (MC)-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopic compositions of zircons from two representative granitoid samples collected from Sheshan W-Mo deposit in the southern edge of the Dayaoshan. Highly precise U-Pb results indicate that zircons from Sheshan biotite granodiorite (SD256) and granodiorite (porphyry) (SD190) which emplaced in the Pingtoubei quartz sandstone yields weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 438.7 ± 3.0 Ma (MSWD=0.22) and 438.1 ± 2.6 Ma (MSWD=0.28), respectively. And the zircons crystallized in the Kwangshian granites yield ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf ratios of 0.282 406 to 0.282 518, ϵ_{Hf} (438 Ma) values ranging from -3.7 to 0 and Hf model ages (T_{DM2}) of 1 226 to 1 417 Ma. Our U-

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41202052); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. CUG120102); 广西壮族自治区地质矿产开发局科研项目(No. 2012026193)。

作者简介: 李巍(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产勘查方面的研究工作。E-mail: liwei6909@163.com

* 通讯作者: 毕诗健, E-mail: Shijianbi_1982@163.com

引用格式: 李巍, 毕诗健, 杨振, 等, 2015. 桂东大瑶山南缘社山花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征: 对区内加里东期成岩成矿作用的制约. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 17-33.

Pb and Hf isotopic data can be interpreted as the crystallization time of granites, and indicate that it was formed in the ~438 Ma (Caledonian) and may have been formed by reworking of Mesoproterozoic juvenile crust (1.2–1.4 Ga) closely related to partial melting. Together with other published geochronological data, it is proposed that the late Early Paleozoic granites predominantly have a similar formation age and exhibit a planar-shaped distribution, rather than a north-east-striking-distribution pattern in the hinterland of the South China. Moreover, the Caledonian tectonic-magmatic-metallogenic movement may be the one of key reasons for the large-scale magmatism and metal mineralization in the following tectonic episodes, such as Indosinian and Yanshanian in the South China.

Key words: Shedong W-Mo deposit; geochemistry; Caledonian; diagenesis and mineralization; Dayaoshan.

0 前言

华南地区经历了不同时代多期次的构造—岩浆—成矿作用,发育有大量多时代、多旋回的花岗岩类和独特的 Cu-Au-Pb-Zn-Ag 和 W-Sn-Mo 等大规模成矿作用(Lu *et al.*, 2003; 孙涛, 2006; 杨明桂等, 2009; Mao *et al.*, 2011, 2013; 毛景文等, 2011; 李光来等, 2014). 前人研究认为,区内成岩成矿作用主要集中在中生代,依次可划分为:晚三叠世(230~210 Ma)与过铝质二云母花岗岩有关的钨锡铋钼等成矿作用;中晚侏罗世(180~150 Ma)的斑岩—矽卡岩型铜矿与花岗岩有关的钨锡多金属成矿作用;白垩世(134~80 Ma)的浅成低温热液型铜金银矿床和花岗岩有关的钨锡多金属矿床等(华仁民, 2005; 毛景文等, 2008). 加里东运动作为华南地区一次强烈而广泛发育的地壳运动,在区内形成了众多花岗岩体,主要分布于武夷山、云开大山、万洋山—诸广山等地区(Li *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 2007; 舒良树等, 2008; Wang *et al.*, 2011, 2013; Chen *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012). 然而,学者们对其成岩成矿作用的研究却十分薄弱(华仁民等, 2013),尽管近年来也获得大量加里东岩体的高精度地球化学、同位素地球化学和定年数据(Wang *et al.*, 2011, 2013; 陈懋弘等, 2012; Chu *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012),但是对于与加里东期岩浆岩密切相关的多金属矿床的研究程度较弱(华仁民等, 2013),尤其是对于加里东期矿床的时空分布特征、成岩源区性质及成矿意义等有待进一步研究.

桂东大瑶山地区作为华南加里东期造山带的重要组成部分,一直是作为广西重要的金矿成矿区带,目前已发现含金石英脉型、破碎带蚀变岩型和斑岩型等众多类型金矿床,如古袍、桃花和龙头山等矿床(崔斌等, 2000; 刘国庆和蔡明海, 2004; 陈富文等, 2008). 随着找矿勘查工作的突破,在大瑶山周缘相继发现了一些与加里东期岩浆岩有关的中—(大)型

W-Mo 矿床(王永磊等, 2011; 陈懋弘等, 2012), 如与黑云母二长花岗岩有关的贺州白石顶钼矿床(李晓峰等, 2009). 李晓峰等(2009)通过对白石顶钼矿床中的赋矿岩体桂岭黑云母二长花岗岩及辉钼矿进行精确的年代学研究,获得其成岩成矿年龄为 424 Ma 左右,明确指出区内志留纪存在钼的富集成矿作用,加里东期的成岩成矿作用值得进一步关注,这对于认识整个华南地区加里东运动的时限及其成岩成矿作用具有重要的科学意义.

本文对新发现的桂东大瑶山南缘的社垌钨钼矿床中的花岗岩类开展了详细的原位锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其 Hf 同位素组成等研究,旨在查明其成岩时代及源区性质,为进一步总结华南地区加里东期成岩成矿的时空分布规律,探讨其成岩成矿作用的意义,并为指导找矿勘查工作等提供科学依据.

1 地质背景

大瑶山地区位于钦杭成矿带西南缘,地处广西中东部,包括大瑶山、大桂山两大 NE 走向的山脉,大致呈 EW 向展布,面积近 18 000 km²(图 1a). 在大地构造位置上位于华南准地台桂中—桂东台陷区的大瑶山隆起(或大瑶山地体),其北接桂北凹陷,西边为桂中凹陷,南与云开隆起岩浆活动带和钦防海槽毗邻(图 1b)(刘国庆和蔡明海, 2004). 区内地层发育比较齐全,从下古生界的寒武系到新生界的第四系均有出露,且以寒武系和泥盆系地层为主(广西苍梧县社垌矿区铜多金属矿普查(中间性)报告, 2011. 广西壮族自治区地球物理勘察院)(图 1c). 其中,寒武系主要为一套总厚 >9 000 m 的类复理石砂泥岩建造,主要岩性有浅变质砂岩、粉砂岩、千枚岩及碳质页岩等,自下而上划分为培地(E_1p)、小内冲(E_2x)和黄洞口(E_3h) 3 个组. 区内泥盆系发育完整,由浅海相碎屑岩、石英砂岩、泥页岩等组成,底部

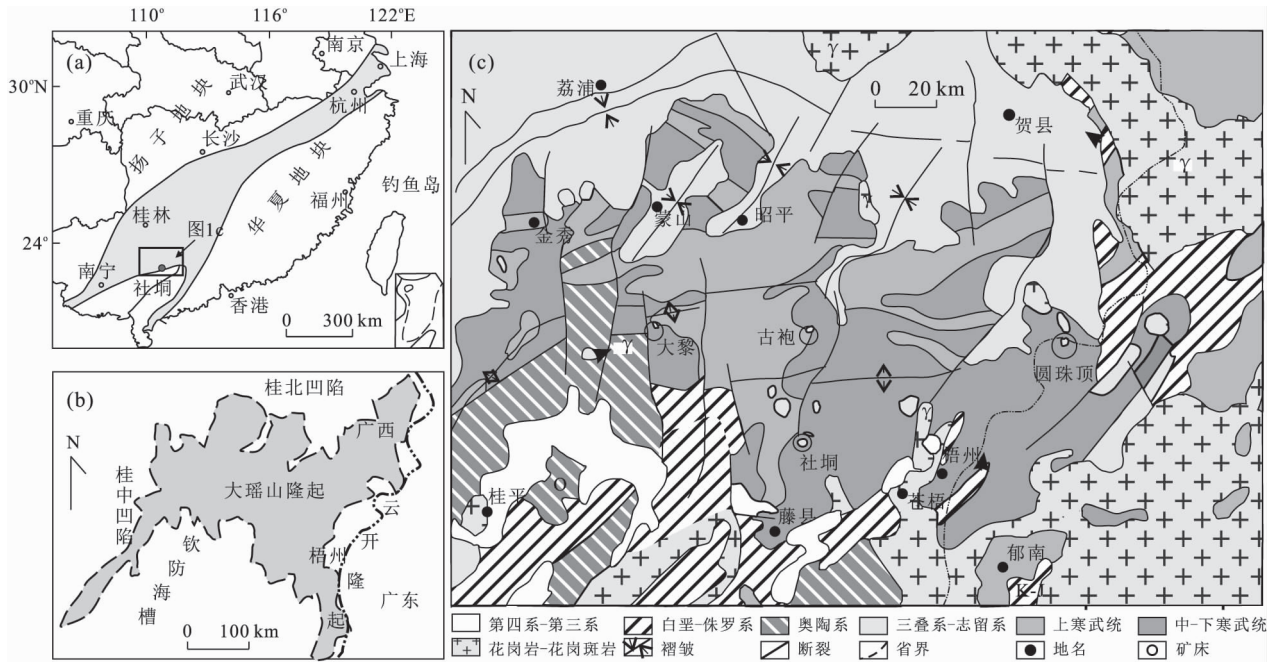


图 1 钦杭成矿带大瑶山地区区域地质图及社洞 W-Mo 矿等矿床分布

Fig. 1 Regional geologic map of the Dayaoshan showing the location of the Shedong W-Mo district and other ore deposits

a. 华南钦杭成矿带地质略图; b. 大瑶山隆起构造单元示意图; c. 钦杭成矿带大瑶山地区区域地质图及矿床分布

为一套厚层状的底砾岩. 区内褶皱、断裂构造非常发育(段瑞春等, 2011), 以 NEE 向的大瑶山复式背斜及凭祥—大黎深大断裂带为构造格架, 叠加上 NE、NW 及 SN 向构造. 区内岩浆活动较强烈, 岩浆岩多呈岩基、岩株、岩筒等产出, 岩性主要由花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、二长花岗岩和花岗斑岩等中—酸性岩浆岩组成(黄惠民等, 2003; 邓军, 2012).

2 矿床地质特征

社洞钨钼矿床位于广西壮族自治区东部, 梧州市 NW290° 方向 58 km 处, 是近两年新发现的一个大型规模的中型钨钼多金属矿床(图 2). 矿区出露地层为寒武系小内冲组、黄洞组, 主要为一套浅海相类复理石砂泥质沉积, 岩性主要为粉砂岩、细砂岩, 其与页岩、炭质页岩互层, 局部夹有灰岩. 各组之间均为连续沉积, 呈整合接触关系. 区内断裂、褶皱构造发育, 基本构造格局为轴向 NE-SW 的平头背不对称背斜以及 NNW、NWW 向的断层, 还发育有许多较小的次级构造. 矿区岩浆岩分布广泛, 与成矿关系密切的为社山复式岩体, 长约 3 km, 宽约 1 km, 长轴走向为 NW300°. 岩石类型主要为浅灰色中—细粒黑云母花岗闪长岩, 其间为 3 个燕山期浅灰色黑云母花岗斑岩侵入.

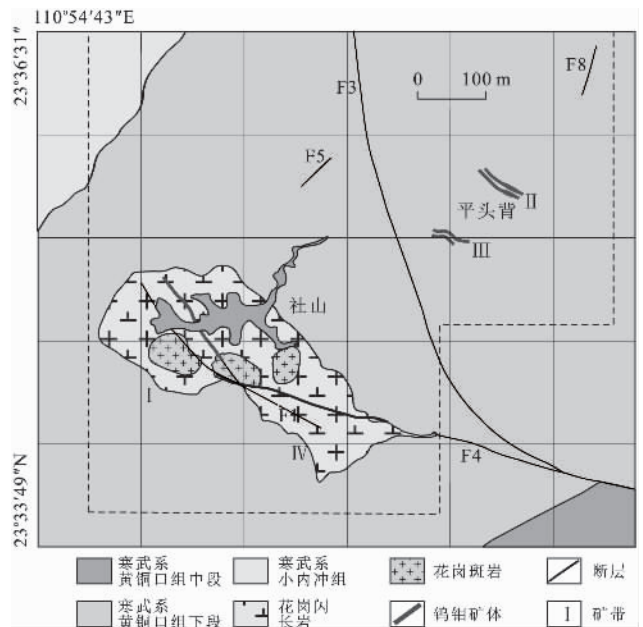


图 2 大瑶山社洞钨钼矿床区域地质简图

Fig. 2 Simplified geologic map of Sheshan district, Dayaoshan, showing the location of Sheshan biotite granodiorite in the Shedong W-Mo deposit

其中, 社山黑云母花岗闪长岩呈灰白色—灰绿色, 多具中细粒结构、半自形不等粒状或似斑状结构, 块状构造. 主要组成矿物为斜长石(35%)、钾长石(15%)、石英(25%)等; 暗色矿物包括角闪石

(10%)、黑云母(10%)等(图 3a 和 3b);另见少量的方解石、绿泥石、绢云母等蚀变矿物(图 3c 和 3d)。其中,斜长石呈半自形粒状,具明显的环带状构造和聚片双晶(图 3a),部分发生强烈地绢云母化(图 3c);角闪石具简单双晶,部分发生绿泥石化、云母化、碳酸盐化(图 3d);黑云母主要呈片状晶形,多色性明显,部分发生绿泥石化(图 3c)。副矿物主要有磷灰石、榍石、锆石等(图 3e 和 3f),多充填于矿物颗粒之间的空隙中。花岗斑岩主要呈小岩株侵位于社山黑云母花岗闪长岩中,地表出露两个斑岩体,表面绢云母化、高岭土化严重,中间还存在一隐伏花岗斑岩体。另外,在平头背地区还赋存有呈 NWW 向展布的花岗闪长(斑)岩脉,蚀变较强烈,且普遍分布有含钨钼矿化的细小石英脉。

矿区内已发现 4 条矿带,以 I、II 和 III 号矿带规模

较大,钨钼矿体主要呈脉状产出,走向均为 300° 左右。其中,I 号和 IV 号矿带中矿体赋存于黑云母花岗闪长岩体中,白钨矿多呈粒状分布在宽约 $1\sim 3$ cm 的石英网脉中,或局部呈稀疏浸染状分布于岩体中。I 号矿化带宽度大于 100 m,单矿体厚 $0.28\sim 1.49$ m, WO_3 品位为 $0.072\%\sim 1.280\%$,最高品位为 2.94% 。II 号和 III 号矿带中矿体赋存于寒武系黄洞口组石英砂岩中。II 号矿带地表见矿长度为 430 m,目前最大控制斜深为 400 m,整个含矿带宽度大于 300 m,大多数矿体赋存于 -300 m 以上标高。其中钨钼矿(化)脉主要有 25 条,总体产状 $210^{\circ}\angle 75^{\circ}$,单矿体厚达 $0.65\sim 5.81$ m, WO_3 品位为 $0.013\%\sim 0.780\%$,Mo 品位为 $0.001\%\sim 0.260\%$ 。III 号矿带见矿长度为 800 m,最大控制斜深 350 m,钨钼矿(化)脉主要有 19 条;矿体倾向 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,倾角

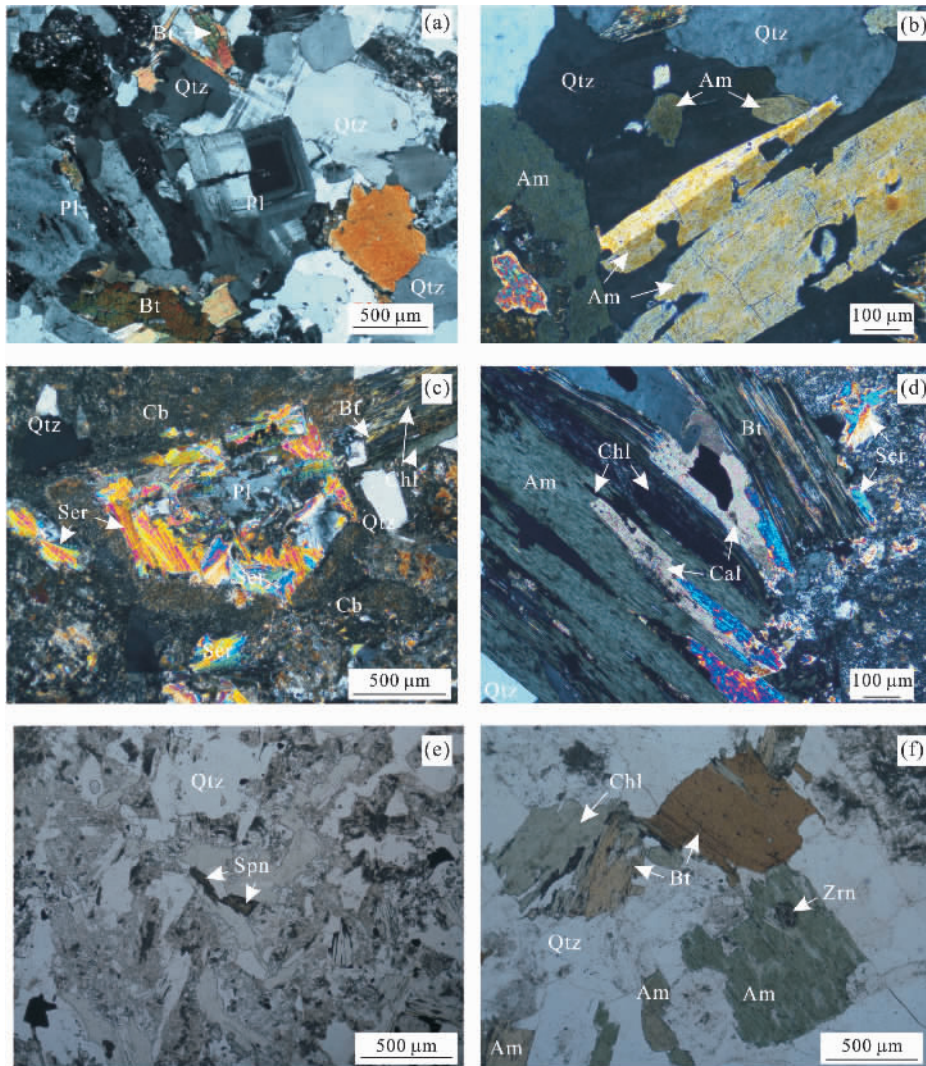


图 3 社山黑云母花岗闪长岩中矿物组成

Fig. 3 Microphotographs of Sheshan biotite granodiorite

Qtz, 石英; Bt, 黑云母; Pl, 斜长石; Am, 角闪石; Ser, 绢云母; Chl, 绿泥石; Cb, 碳酸盐矿物; Spn, 榍石; Zrn, 锆石

41°~80°,厚度 0.49~7.39 m, WO_3 品位为 0.014%~4.630%, Mo 品位为 0.001%~1.210%。矿区常见的矿石类型主要有浸染状白钨矿石、石英脉型钨钼矿石等。其中,浸染状白钨矿石中的白钨矿主要呈斑杂的粉红色或灰白色,粒度在 0.01~0.56 mm 间。金属矿物主要为白钨矿及少量辉钼矿,伴生矿物为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、辉铋矿、磁黄铁矿、白铁矿、脆硫锑铅矿等。非金属矿物主要为石英、石榴子石、绿帘石、绿泥石、方解石、白云石等。石英脉型钨钼矿石中白钨矿多呈分散粒状,结晶粗大,一般粒度 0.5~1.5 cm。辉钼矿多见呈细脉状充填于石英脉两侧及裂隙中。

3 样品处理及分析方法

3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

黑云母花岗闪长岩(SD256)及平头背花岗闪长(斑)岩脉(SD190)的岩石样品采用常规方法粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。将锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石核心暴露。锆石的阴极发光(CL)显微照相在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)的电子探针实验室完成。锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素年龄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(GPMR)的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,激光器为 193 nm ArF 准分子激光器,ICP-MS 为 Agilent 7500a,激光剥蚀斑束直径为 32 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度(Hu *et al.*, 2008)。另外,激光剥蚀系统配置了一个信号平滑装置,即使激光脉冲频率低达 1 Hz,采用该装置后也能获得光滑的分析信号(Hu *et al.*, 2012a)。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。

锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用多个 USGS 参考玻璃(BCR-2G 和 BIR-1G)作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算(Liu *et al.*, 2010a)。这些 USGS 玻璃中元素含量的推荐值据 GeoReM 数据库 (<http://georem>。

[mpch-mainz.gwdg.de/](http://www.mpch-mainz.gwdg.de/))。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正(Liu *et al.*, 2010a)。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck *et al.* (1995)。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2010a)完成,获得的数据采用 Andersen (2002)的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通 Pb 的影响。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al.* (2008, 2010a, 2010b)。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Iso-plot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成。

3.2 锆石 LA-MC-ICP-MS Hf 同位素分析

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR) Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)及 193 nm 激光取样系统上进行。该系统配备了本实验室自主研发的信号平滑装置。采用该装置即使激光脉冲频率降到 1 Hz,还可以获得平稳的信号(Hu *et al.*, 2012a)。测试过程中,采用单点剥蚀模式,激光束斑直径为 44 μm ,激光剥蚀时间约 50 s,激光束脉冲实际输出能量密度为 5.3 J/cm²。详细仪器操作条件和分析方法可参照 Hu *et al.* (2012b)。

测定时采用锆石国际标样 91500 作为外标,通过 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu 和 ¹⁷⁶Yb/¹⁷²Yb 进行同量异位校正计算测定样品的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值。研究表明, Yb 的质量分馏系数(β_{Yb}) 在长期测试过程中并不是一个固定值,而且通过溶液进样方式测试得到的 β_{Yb} 并不适用于激光进样模式中的锆石 Hf 同位素干扰校正(Woodhead *et al.*, 2004)。 β_{Yb} 的错误估算会明显地影响 ¹⁷⁶Yb 对 ¹⁷⁶Hf 的干扰校正,进而影响 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值的准确测定。在本次试验中,笔者实时获取了锆石样品自身的 β_{Yb} 用于干扰校正。¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf=0.732 5 和 ¹⁷³Yb/¹⁷¹Yb=1.130 17 (Segal *et al.*, 2003)被用于计算 Hf 和 Yb 的质量分馏系数 β_{Hf} 和 β_{Yb} 。使用 ¹⁷⁶Yb/¹⁷³Yb=0.793 81 (Segal *et al.*, 2003)来扣除 ¹⁷⁶Yb 对 ¹⁷⁶Hf 的同量异位干扰,使用 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu=0.026 56 来扣除干扰程度相对较小的 ¹⁷⁶Lu 对 ¹⁷⁶Hf 的同量异位干扰。由于 Yb

和 Lu 具有相似的物理化学属性,因此在本实验中采用 Yb 的质量分馏系数 β_{Yb} 来校正 Lu 的质量分馏行为。

对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、同位素质量分馏校正、同位素比值计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2010a)完成。其中, $\epsilon_{Hf}(t)$ 计算采用的 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001), 模式年龄计算中球粒陨石现今 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282772$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0332$ 。亏损地幔 Hf 模式年龄(T_{DM1})计算采用的现今亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0384$ (Griffin *et al.*, 2000)进行计算;二阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})采用平均大陆壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ (Griffin *et al.*, 2002)进行计算。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

阴极发光 CL 图像显示,岩体中大部分锆石颗粒具有强烈振荡韵律环带的结构面貌,显示典型岩浆成因锆石特征,部分颗粒具有继承锆石核。本次研究主要对环带结构清晰的锆石颗粒进行 U-Pb 同位素年代学研究,岩体样品中锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果见表 1。

黑云母花岗闪长岩(SD256)中选取的锆石多为无色透明柱状晶体,粒度多为 $50\sim 150 \mu\text{m}$ (图 4)。分析的 18 个样品点中, Th 含量变化于 $116\sim 1522 \mu\text{g/g}$, U 含量变化于 $191\sim 1562 \mu\text{g/g}$, Th/U 比值为 $0.2\sim 1.3$ (平均值为 0.7),显示典型岩浆成因锆石特征。SD256-10、SD256-11 和 SD256-17 分别给出了 $930\pm 10 \text{ Ma}$ 、 $925\pm 10 \text{ Ma}$ 和 $1347\pm 11 \text{ Ma}$ 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄,对应于锆石的 CL 图像,上述 3 个分析点均位于锆石颗粒核部,推测应为残留锆石或继承锆石年龄(图 4c、4f 和 4g)。其他 14 个分析点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄图解上均位于谐和线上及附近(图 5a),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $438.7\pm 3.0 \text{ Ma}$ (95%的置信度,MSWD=0.22)。

平头背花岗闪长(斑)岩脉(SD190)中分析的 20 个锆石样品点,17 个分析点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄图解上均位于谐和线上及附近(图 5b),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $438.1\pm 2.6 \text{ Ma}$ (95%的置信度,MSWD=0.28)。另外,SD190-3、SD190-

11 和 SD190-12 分别给出了 $914\pm 10 \text{ Ma}$ 、 $2642\pm 20 \text{ Ma}$ 和 $1173\pm 10 \text{ Ma}$ 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄,显示残留锆石或继承锆石年龄特征。

4.2 锆石 Hf 同位素特征

在锆石 U-Pb 定年的基础上,对黑云母花岗闪长岩(SD256)和平头背花岗闪长(斑)岩脉(SD190)中锆石进行原位 Hf 同位素分析(表 2)。其中,花岗闪长岩(SD256)中 Hf 同位素分析结果显示,所有颗粒锆石均具有较低的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$,其中 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于 0.002,表明锆石在结晶之后放射性成因 Hf 的积累极少。16 个锆石颗粒点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.282430\sim 0.282518$,对应的 $\epsilon_{Hf}(438 \text{ Ma})$ 值变化于 $-2.7\sim 0$,两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})集中于 $1226\sim 1366 \text{ Ma}$,加权平均年龄为 $1306\pm 19 \text{ Ma}$ 。另外,捕获的锆石颗粒 SD256-6、SD256-15 和 SD256-17 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值较低,分布于 $0.282016\sim 0.282299$,对应的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值分别为 $+3.1$ 、 $+3.2$ 和 $+2.4$,两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})分别为 1813 Ma 、 1461 Ma 和 1848 Ma 。平头背花岗闪长(斑)岩脉(SD190)中 Hf 同位素分析结果显示,所有颗粒锆石均具有较低的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ ($0.023063\sim 0.068240$) 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ($0.000576\sim 0.001897$),其中 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于 0.002,表明锆石在结晶之后具有少量的放射性成因 Hf 的积累。15 个锆石颗粒点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.282406\sim 0.282502$,对应的 $\epsilon_{Hf}(438 \text{ Ma})$ 值变化于 $-3.7\sim -0.4$,两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})集中于 $1251\sim 1417 \text{ Ma}$,加权平均年龄为 $1308\pm 19 \text{ Ma}$ 。另外,捕获的锆石颗粒 SD190-4、SD190-6 和 SD190-13 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值较低,分布于 $0.280991\sim 0.282342$,对应的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值分别为 $+4.3$ 、 $+4.5$ 和 -5.1 ($\epsilon_{Hf}(2642 \text{ Ma})$),两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})分别为 2119 Ma 、 1386 Ma 和 3266 Ma 。

5 讨论

(1) 桂东大瑶山南缘加里东岩体的分布及意义。高精度 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示,社山花岗闪长岩形成于 $438.7\pm 3.0 \text{ Ma}$ (MSWD=0.22),侵位于平头背石英砂岩的花岗闪长(斑)岩脉形成于 $438.1\pm 2.6 \text{ Ma}$ (MSWD=0.28),这表明桂东大瑶山南缘社山花岗闪长岩的形成时间在 438 Ma 左右,相当于早志留世早期—早泥盆世中期,上述岩体的

表 1 社垌花岗岩闪长岩 (SD190 和 SD256) 锆石的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data for zircons (SD190 and SD256) from the Shedong granodiorite

测试点号	含量(μg/g)		U-Th-Pb 同位素比值										年龄(Ma)			
	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	σ	
SD190																
SD190-1	1 395	2 727	0.5	0.059 4	0.001 7	0.582 6	0.015 6	0.071 0	0.001 1	583	61	466	10	442	6	
SD190-2	2 586	4 848	0.5	0.056 0	0.002 1	0.543 6	0.020 8	0.070 0	0.001 0	454	118	441	14	436	6	
SD190-3	821	943	0.9	0.068 6	0.001 6	1.445 8	0.034 5	0.152 3	0.001 7	888	49	908	14	914	10	
SD190-4	1 621	3 325	0.5	0.055 1	0.001 4	0.540 2	0.014 1	0.070 4	0.000 6	417	53	439	9	439	4	
SD190-5	929	1 523	0.6	0.057 7	0.002 3	0.563 5	0.020 2	0.071 0	0.001 1	520	90	454	13	442	7	
SD190-6	617	1 322	0.5	0.056 0	0.002 4	0.551 4	0.023 7	0.071 0	0.000 9	450	98	446	16	442	6	
SD190-7	534	1 008	0.5	0.055 5	0.002 0	0.535 7	0.018 6	0.070 2	0.000 9	432	80	436	12	438	5	
SD190-8	1 499	2 034	0.7	0.056 9	0.001 4	0.554 5	0.013 4	0.070 6	0.000 7	487	56	448	9	440	4	
SD190-9	3 886	6 830	0.6	0.058 4	0.001 4	0.568 6	0.014 4	0.070 0	0.000 6	546	49	457	9	436	4	
SD190-10	698	2 429	0.3	0.066 1	0.001 8	0.647 9	0.020 4	0.070 6	0.001 2	809	57	507	13	440	7	
SD190-11	699	2 267	0.3	0.179 2	0.003 5	12.580 7	0.272 6	0.506 5	0.006 1	2 656	32	2 649	20	2 642	26	
SD190-12	280	1 087	0.3	0.074 7	0.001 7	2.062 5	0.045 9	0.199 5	0.001 8	1 061	46	1 136	15	1 173	10	
SD190-13	4 106	10 072	0.4	0.056 1	0.001 2	0.542 4	0.011 7	0.069 6	0.000 7	457	44	440	8	434	4	
SD190-14	2 586	3 211	0.8	0.054 7	0.001 6	0.526 5	0.015 6	0.070 4	0.001 7	398	67	429	10	439	10	
SD190-15	1 145	1 792	0.6	0.056 1	0.001 7	0.544 8	0.014 8	0.070 8	0.000 9	457	65	442	10	441	5	
SD190-16	296	387	0.8	0.056 0	0.004 2	0.542 2	0.040 6	0.070 6	0.001 6	450	170	440	27	440	9	
SD190-17	388	497	0.8	0.055 6	0.003 1	0.542 7	0.031 1	0.070 7	0.001 2	435	124	440	20	440	7	
SD190-18	1 359	2 562	0.5	0.066 9	0.006 9	0.611 2	0.029 7	0.071 0	0.001 8	835	216	484	19	442	11	
SD190-19	1 262	5 343	0.2	0.066 7	0.002 0	0.649 8	0.021 3	0.070 0	0.001 2	828	69	508	13	436	8	
SD190-20	834	1 609	0.5	0.055 7	0.001 8	0.533 5	0.015 6	0.069 7	0.000 8	443	77	434	10	434	5	
SD256																
SD256-1	297	458	0.6	0.053 3	0.002 4	0.516 9	0.024 7	0.070 0	0.000 8	343	104	423	17	436	5	
SD256-2	394	679	0.6	0.053 2	0.002 4	0.520 4	0.023 2	0.071 0	0.001 2	345	100	425	15	442	7	
SD256-3	333	588	0.6	0.060 8	0.002 1	0.593 6	0.020 5	0.070 8	0.000 8	632	76	473	13	441	5	
SD256-4	441	655	0.7	0.055 7	0.002 0	0.540 4	0.018 4	0.070 4	0.000 9	443	80	439	12	438	5	
SD256-5	307	375	0.8	0.060 5	0.003 6	0.592 3	0.036 5	0.070 6	0.001 4	620	130	472	23	440	8	
SD256-6	274	405	0.7	0.058 1	0.002 6	0.563 3	0.024 6	0.070 2	0.001 0	532	98	454	16	437	6	
SD256-7	569	597	1.0	0.056 3	0.002 2	0.543 4	0.020 1	0.070 7	0.001 0	465	85	441	13	441	6	
SD256-8	233	322	0.7	0.055 9	0.002 5	0.540 9	0.026 0	0.070 5	0.001 0	456	102	439	17	439	6	
SD256-9	285	534	0.5	0.065 7	0.003 3	0.622 8	0.032 7	0.068 0	0.000 9	798	107	492	20	424	6	
SD256-10	275	1 143	0.2	0.072 0	0.001 5	1.547 1	0.035 2	0.155 2	0.001 9	985	43	949	14	930	10	
SD256-11	116	191	0.6	0.070 7	0.002 5	1.505 0	0.031 6	0.154 3	0.001 8	950	72	932	21	925	10	
SD256-12	236	336	0.7	0.056 2	0.003 3	0.546 5	0.030 3	0.071 7	0.001 5	457	130	443	20	447	9	
SD256-13	1 522	1 134	1.3	0.052 8	0.001 7	0.512 3	0.016 9	0.070 6	0.001 4	320	74	420	11	440	9	
SD256-14	402	483	0.8	0.054 7	0.002 0	0.529 2	0.018 8	0.070 2	0.000 8	398	81	431	13	437	5	
SD256-15	250	1 562	0.2	0.056 2	0.001 5	0.546 8	0.015 0	0.070 0	0.000 7	457	61	443	10	436	4	
SD256-16	282	379	0.7	0.055 4	0.002 3	0.541 3	0.021 7	0.070 7	0.000 9	428	93	439	14	441	5	
SD256-17	488	1 036	0.5	0.091 4	0.002 0	2.965 0	0.063 2	0.232 3	0.002 1	1 457	42	1 399	16	1 347	11	
SD256-18	256	375	0.7	0.064 0	0.003 2	0.609 8	0.028 3	0.070 0	0.001 1	743	112	483	18	436	6	

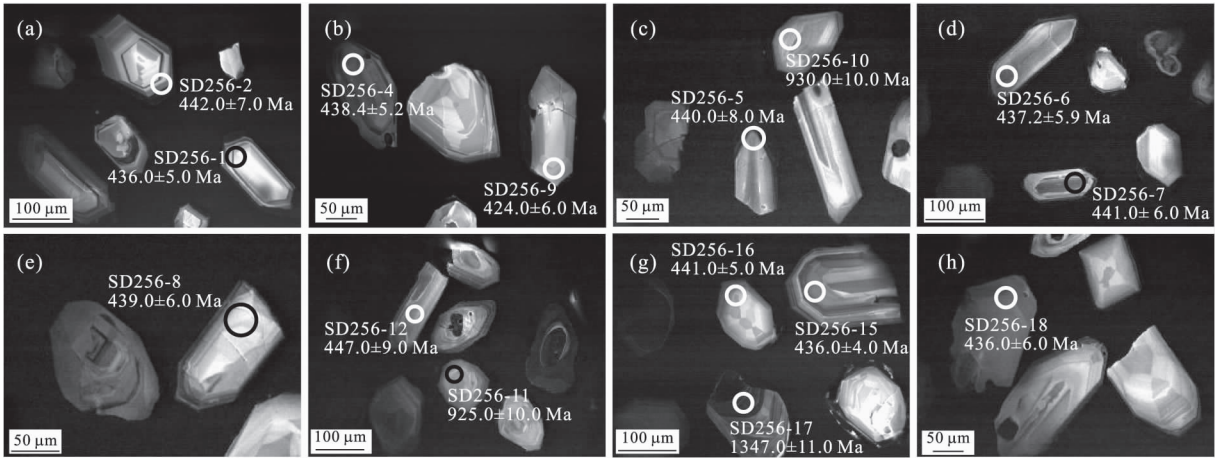


图 4 社垌钨钼矿床黑云母花岗闪长岩(SD256)中锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 4 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons for biotite granodiorite in the Shedong W-Mo deposit
圆圈标准为分析点位置及²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,圆圈直径为 32 μm

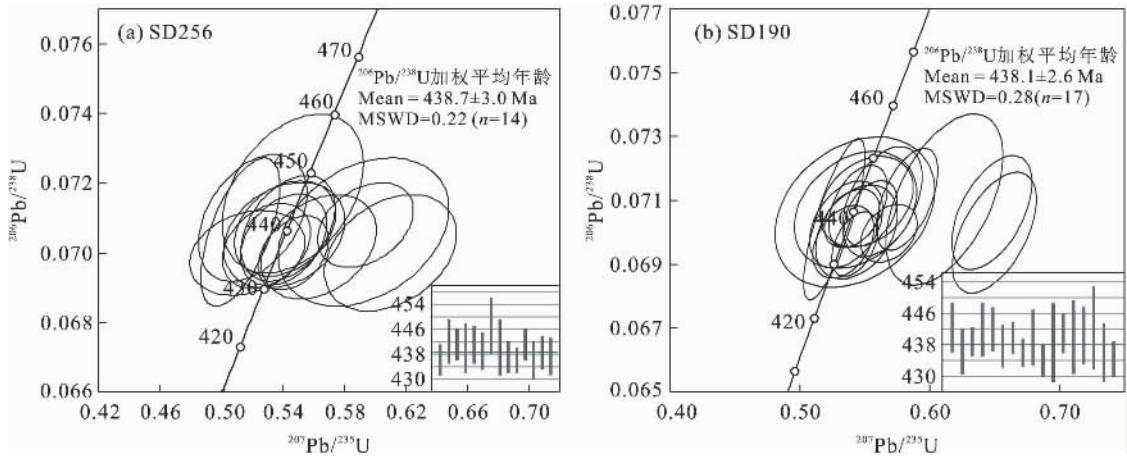


图 5 社垌地区花岗闪长岩(SD256)、花岗闪长(斑)岩脉(SD190)中锆石 U-Pb 谐和曲线

Fig. 5 Concordia diagrams of LA-ICPMS zircons U-Pb data from biotite granodiorite (SD-256) and biotite (porphyry) granodiorite (SD190) in the Shedong W-Mo deposit

年代学资料为研究该区花岗岩时空分布及其与地质构造、成矿作用之间的成因联系提供了精确的年代学约束。

前人的研究表明,华南早古生代晚期花岗岩体主要分布于武夷山和云开大山地区、江西武功山、湖南八面山以及万洋山—诸广山等地区(Li *et al.*, 1989; 舒良树等, 2008; Wang *et al.*, 2011, 2013; Chen *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012). 其中,华南内陆地区东侧以武夷山—云开大山一带为代表的、被认为属深熔半原地型具流化特征的同褶皱片麻状花岗岩体(王德滋和沈渭州, 2003)形成时代集中在 420~460 Ma 区间(楼法生等, 2005; Wang *et al.*, 2007, 2011, 2013; 张菲菲等, 2010), 对应于晚奥陶世早期—中志留世晚期。如 Wang *et al.* (2007, 2011)

对武夷山—武功山—云开地区大量片麻状花岗岩或花岗片麻岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 结果表明以明月山(445.0 ± 8.0 Ma)、池峒岩体(423.0 ± 7.0 Ma)、河坝铺岩体(429.6 ± 5.2 Ma)、松旺岩体(440.7 ± 5.6 Ma)为代表的众多片麻状花岗岩体年龄集中在 410~457 Ma。楼法生等(2005)对武夷山和武功山地区的山庄、张佳坊、武功山等片麻状花岗岩体获得的锆石 U-Pb 年龄集中在 427.9 ± 1.2~462.3 ± 2.3 Ma 之间。另外, 江西慈竹片麻状岩体形成年龄为 432 ± 2 Ma(张菲菲等, 2010)。而广布于华南内陆、被认为是经部分熔融形成的壳源型块状结构花岗岩, 如湘东—赣西地区的板杉铺岩体(418 ± 2 Ma)、宏夏桥岩体(432 ± 6 Ma)、张佳坊岩体(440 ± 2 Ma)、丰顶山岩体(402 ± 2 Ma)、山庄岩

表 2 社垌花岗岩闪长岩(SD190 和 SD256)锆石的 LA-ICPMS 锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 Hafnium isotope analyses of zircons (SD190 and SD256) from the Shedong granodiorite

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)	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm(2\sigma)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$\pm(2\sigma)$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$\pm(2\sigma)$
SD190													
SD190-1	0.044 935 52	0.001 324 30	0.282 406 11	0.000 015	438	-12.9	-3.7	0.5	1 207	41	-0.96	1 417	65
SD190-2	0.040 712 57	0.001 230 67	0.282 456 70	0.000 008	438	-11.2	-1.9	0.3	1 132	24	-0.96	1 324	38
SD190-3	0.053 265 91	0.001 579 14	0.282 463 86	0.000 008	438	-10.9	-1.7	0.3	1 133	22	-0.95	1 316	35
SD190-4	0.048 118 83	0.001 172 81	0.281 799 21	0.000 009	1 800	-34.4	4.3	0.3	2 050	24	-0.96	2 119	38
SD190-5	0.036 316 18	0.001 056 90	0.282 455 20	0.000 008	438	-11.2	-1.9	0.3	1 129	22	-0.97	1 324	34
SD190-6	0.032 305 30	0.000 823 22	0.282 342 14	0.000 019	914	-15.2	4.5	0.7	1 280	54	-0.98	1 386	86
SD190-7	0.068 240 39	0.001 739 39	0.282 454 79	0.000 008	438	-11.2	-2.1	0.3	1 151	24	-0.95	1 335	37
SD190-8	0.036 433 23	0.000 991 43	0.282 475 99	0.000 010	438	-10.5	-1.1	0.3	1 098	27	-0.97	1 286	43
SD190-9	0.037 868 21	0.001 101 48	0.282 486 88	0.000 010	438	-10.1	-0.8	0.4	1 086	29	-0.97	1 268	46
SD190-10	0.067 226 42	0.001 897 32	0.282 472 59	0.000 010	438	-10.6	-1.5	0.3	1 130	27	-0.94	1 305	42
SD190-11	0.065 442 61	0.001 823 17	0.282 501 99	0.000 008	438	-9.5	-0.4	0.3	1 085	23	-0.95	1 251	36
SD190-12	0.043 078 66	0.001 246 56	0.282 460 48	0.000 008	438	-11.0	-1.7	0.3	1 127	22	-0.96	1 317	35
SD190-13	0.030 755 78	0.000 759 26	0.280 991 24	0.000 008	2 642	-63.0	-5.1	0.3	3 125	21	-0.98	3 266	34
SD190-14	0.033 015 37	0.000 913 23	0.282 476 82	0.000 008	438	-10.4	-1.1	0.3	1 095	22	-0.97	1 283	34
SD190-15	0.047 833 10	0.001 402 05	0.282 484 15	0.000 007	438	-10.2	-1.0	0.3	1 099	21	-0.96	1 277	33
SD190-16	0.034 894 80	0.001 043 74	0.282 458 40	0.000 007	438	-11.1	-1.8	0.2	1 124	19	-0.97	1 318	29
SD190-17	0.023 063 44	0.000 576 34	0.282 431 17	0.000 008	438	-12.1	-2.6	0.3	1 148	23	-0.98	1 360	38
SD190-18	0.029 836 34	0.000 863 23	0.282 465 79	0.000 008	438	-10.8	-1.5	0.3	1 109	23	-0.97	1 302	36
SD256													
SD256-1	0.046 444 63	0.001 173 92	0.282 472 11	0.000 007	438	-10.6	-1.3	0.2	1 109	19	-0.96	1 295	30
SD256-2	0.037 723 07	0.000 969 01	0.282 467 68	0.000 008	438	-10.8	-1.4	0.3	1 109	22	-0.97	1 300	34
SD256-3	0.032 043 59	0.000 822 65	0.282 430 11	0.000 007	438	-12.1	-2.7	0.3	1 157	20	-0.98	1 366	32
SD256-4	0.035 601 91	0.000 906 33	0.282 451 52	0.000 006	438	-11.3	-2.0	0.2	1 130	18	-0.97	1 329	29
SD256-5	0.042 877 74	0.001 138 94	0.282 541 23	0.000 007	438	-8.2	1.1	0.2	1 010	19	-0.97	1 170	30
SD256-6	0.027 126 83	0.000 650 53	0.282 028 91	0.000 009	1350	-26.3	3.1	0.3	1 707	23	-0.98	1 813	38
SD256-7	0.045 593 09	0.001 130 31	0.282 472 26	0.000 007	438	-10.6	-1.3	0.3	1 107	20	-0.97	1 295	32
SD256-8	0.048 209 95	0.001 299 46	0.282 483 81	0.000 007	438	-10.2	-0.9	0.3	1 096	20	-0.96	1 276	32
SD256-9	0.040 046 41	0.000 990 62	0.282 470 67	0.000 007	438	-10.7	-1.3	0.2	1 106	19	-0.97	1 295	30
SD256-10	0.021 988 48	0.000 555 98	0.282 441 11	0.000 008	438	-11.7	-2.2	0.3	1 134	22	-0.98	1 342	36
SD256-11	0.055 172 58	0.001 442 48	0.282 439 77	0.000 007	438	-11.7	-2.5	0.3	1 163	21	-0.96	1 358	32
SD256-12	0.089 617 62	0.002 156 19	0.282 518 35	0.000 008	438	-9.0	0.0	0.3	1 072	22	-0.94	1 226	34
SD256-13	0.048 509 61	0.001 244 39	0.282 463 14	0.000 007	438	-10.9	-1.7	0.3	1 124	20	-0.96	1 313	32
SD256-14	0.050 665 35	0.001 276 48	0.282 460 51	0.000 009	438	-11.0	-1.8	0.3	1 128	26	-0.96	1 318	40
SD256-15	0.033 574 02	0.000 858 93	0.282 299 32	0.000 008	925	-16.7	3.2	0.3	1 341	22	-0.97	1 461	36
SD256-16	0.036 693 87	0.000 913 54	0.282 456 14	0.000 008	438	-11.2	-1.8	0.3	1 124	23	-0.97	1 320	37
SD256-17	0.038 378 21	0.000 931 29	0.282 016 34	0.000 007	1350	-26.7	2.4	0.2	1 737	19	-0.97	1 848	31
SD256-18	0.023 497 64	0.000 601 59	0.282 482 43	0.000 006	438	-10.2	-0.8	0.2	1 078	18	-0.98	1 268	28
SD256-19	0.028 049 05	0.000 712 34	0.282 463 74	0.000 007	438	-10.9	-1.5	0.2	1 107	20	-0.98	1 304	32

体(424±3 Ma)、安乐岩体(414±6 Ma)(张菲菲等, 2010)、麦斜岩体(434±2 Ma 和 437±2 Ma)(农军年等, 2012)、付坊岩体(433~443 Ma)(张芳荣等, 2010)、湘东—赣南地区湖南洞岩体(447.2±1.8 Ma)(王永磊等, 2012)、汤湖岩体(434±1.6 Ma)(Li *et al.*, 1989)、阳埠岩体(461.1±1.3 Ma)(赵芝等, 2012)、贵溪塘湾(436.1±5.7 Ma)、宜黄界口(440.6±4.0 Ma)、黎川(435.9±6.2 Ma)、金溪(441.9±3.1 Ma)(张苑等, 2011)和闽西北—浙西南地区玮埔岩体(427.4±4.0 Ma; 429.9±3.0

Ma; 446.3±4.0 Ma; 447.1±4.7 Ma; 440.8±3.4 Ma)(陈正宏等, 2008; 徐先兵等, 2009; 张爱梅等, 2010)、真峰顶岩体(429.3±15.6 Ma)(陈正宏等, 2008)、宁化岩体(438.2±9.5 Ma; 448.2±2.5 Ma)(陈正宏等, 2008; 张爱梅等, 2010)以及万洋山—诸广山花岗岩复式岩体(414~443 Ma)(沈渭洲等, 2008), 其形成时代跨越 400~460 Ma 区间。这表明华南内陆地区早古生代晚期片麻状花岗岩和块状花岗岩可能具有相似的形成时代, 即主体在 400~450 Ma 之间(图 6), 这与即郴州—临武断裂以东泥盆纪

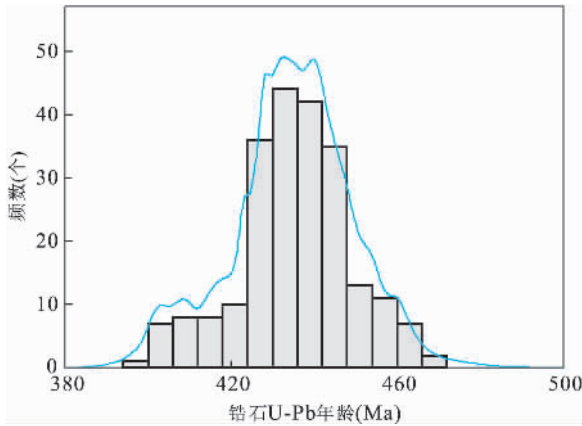


图 6 华南早古生代早期花岗岩体锆石 U-Pb 年龄的概率分布曲线

Fig. 6 Frequency of zircon U-Pb ages for the Early Paleozoic granites in the South China block

数据主要来源于舒良树等, 2008; Wang *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012 及本文

地层角度不整合于中奥陶世地层之上, 安化—新化—邵阳一带为中泥盆统地层角度不整合于下志留统地层之上所获得沉积接触关系的地质信息是相吻合的。

通过对桂东大瑶山—大明山地区早古生代不整合面上、下寒武纪和泥盆纪地层中的碎屑锆石进行 U-Pb 年代学研究, 同位素年龄显示区内缺乏加里东期的岩浆作用, 于是李青等(2009)认为加里东期的岩浆事件在区内不甚发育。然而, 研究表明, 在大瑶山—大明山地区发育众多加里东期的花岗岩体, 其中包括苗儿山岩体 (412 ± 4 Ma) (Chu *et al.*, 2012)、桂东岩体 (427 ± 3 Ma; 438 ± 3 Ma) (Chu *et al.*, 2012)、桂西钦甲岩体 (412.4 ± 1.8 Ma; 434.8 ± 1.7 Ma; 442.4 ± 1.8 Ma) (王永磊等, 2011)、桂北牛塘界岩体 (421.8 ± 2.4 Ma) (杨振, 2013) 等。结合大瑶山南缘社山岩体的 U-Pb 年龄, 可见加里东期花岗岩体展布范围涉及到湘桂粤赣闽等省。更为显著的是, 华南早古生代晚期的花岗岩体并不呈简单的北东向分布, 而是呈面状展布, 其不越过安化—溆浦—靖县(宜丰)断裂(王磊等, 2013), 与华南中生代早期(印支期)花岗岩分布范围基本相似, 并不同于洋陆造山带岩浆活动成带状展布的特征。

(2) 社垌加里东期岩体的源区性质。社垌加里东期黑云母花岗岩闪长岩和平头背花岗岩闪长(斑)岩脉中新生岩浆锆石的 Hf 同位素特征较为一致, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.282406 \sim 0.282518$,

对应的 ϵ_{Hf} (438 Ma) 值变化于 $-3.7 \sim 0$, 两阶段 Hf 模式年龄 ($T_{\text{DM}2}$) 集中在 $1226 \sim 1417$ Ma 之间, 分布于亏损地幔演化线之下, 指示岩浆源于中元古代下地壳物质的部分熔融 (Vervoort *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2004)。结合区内中生代花岗斑岩岩浆锆石的 Hf 同位素特征的研究(毕诗健, 未发表资料), 其 ϵ_{Hf} (91 Ma) 具有明显的负值 ($-8.74 \sim -5.13$), 二阶段 Hf 模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 集中在 $1210 \sim 1394$ Ma 之间, 表明区内花岗岩中锆石的 Hf 同位素模式年龄集中在 $1.2 \sim 1.4$ Ga, 不同时期的岩体可能具有一致的源区。

对华南地区地壳生长、演化及再造等研究发现, 区内重要的地壳生长期发生在新太古代 ($2.5 \sim 2.6$ Ga) 和中元古代早期 (~ 1.8 Ga) (李献华等, 2001; 于津海等, 2007)。然而, 对华南中—新元古代、古生代岩浆作用的研究表明, 华夏地块存在中元古代 Grenvillian 时期形成的新生地壳物质 (Li *et al.*, 2001, 2002)。王丽娟等(2008)对新元古代赣南鹤仔寻乌群黑云斜长片麻岩的研究发现, 其锆石中具有较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 ($0.282229 \sim 0.282401$) 和正的 ϵ_{Hf} 值 ($+1.1 \sim +8.0$), 认为其源岩可能为中元古代中期 ($1.2 \sim 1.4$ Ga) 的新生地壳。通过对华南地区元古代变质岩、古生代(浅变质)沉积岩和花岗岩的 Sr-Nd 同位素研究, 结果表明这些岩石具有明显的 Nd 模式年龄峰值 (~ 1.4 Ga), 且 T_{DM} 值从 1.8 Ga 急剧降低至约 1.3 Ga。吴福元等(1998)认为这种 Nd 模式年龄峰值的出现一般难以用各个时代地壳组分的随机混合来解释, 很有可能代表真实的地壳形成年龄 (Gilder *et al.*, 1996), 来指示中元古晚期是区内又一次重要的地壳增长期, 有大量新的幔源物质加入 (王德滋和沈渭州, 2003)。另外, 在扬子地块南部和华夏地块的武夷山、南岭和云开等地区的新元古代沉积岩中也发现有一定数量 1.4 Ga 左右的碎屑锆石具有正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (Yu *et al.*, 2008, 2010; Liu *et al.*, 2010c; 杨振等, 2014), 也显示华南板块东南部存在增生的中元古代地壳。上述表明, 中元古代可能是华南地区重要的地壳生长期, 并且这些中元古代地壳物质可能为该区古生代、中生代等岩浆岩提供了重要的物质来源。

(3) 加里东期成岩成矿作用及其意义。华南地区经历了不同时代多期次的构造—岩浆—成矿作用, 其中以中生代的成岩成矿作用尤为强烈 (Lu *et al.*, 2003; 杨明桂等, 2009; Mao *et al.*, 2011, 2013; 毛景文等, 2011), 而加里东期的岩浆岩、矿床在强度和广

度上仅次于燕山期(孙涛,2006;华仁民等,2013),因此可以认为是华南地质演化历史中一次较重大的岩浆—热液—成矿热事件。

但过去对于加里东期花岗岩类与成矿关系的研究一直较少,随着近年来越来越多精确的成岩成矿年代学研究数据的报道,一致表明区内存在加里东期的成矿作用。其中,李晓峰等(2009)获得桂北姑婆山地区的桂岭岩体中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 424.4 ± 5.6 Ma,以石英辉钼矿脉产出于其中的白石顶钼矿中辉钼矿 Re-Os 同位素加权平均年龄为 424.6 ± 5.7 Ma;对越城岭地区牛塘界砂卡岩型钨矿床进行年代学研究,获得黑云母花岗岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 429.6 ± 4.3 Ma,白钨矿 Sm-Nd 等时线年龄为 431 ± 12 Ma(李晓峰等,2012)。王永磊等(2010,2011)获得桂西南地区德保砂卡岩型铜锡矿床中的钦甲黑云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $412 \sim 442$ Ma,7 件辉钼矿的 Re-Os 同位素模式年龄为 $429.5 \pm 5.9 \sim 440.0 \pm 6.9$ Ma。王彦斌等(2010)对湖南益将风化壳型 REE-Sc 矿床中的赋矿母岩石英闪长岩体进行 SHRIMP 锆石定年,获得其 U-Pb 年龄为 424 ± 3 Ma。陈懋弘等(2012)获得大瑶山南缘武界钨钼矿点中与成矿有关的花岗闪长岩侵位年龄为 434.5 ± 0.8 Ma,辉钼矿的 Re-Os 加权平均年龄为 438.4 ± 3.3 Ma。结合本文社山黑云母花岗岩闪长岩的锆石 U-Pb 年龄及陈懋弘等(2011)获得的社垌钨钼矿床中的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 437.8 ± 3.4 Ma,均表明华南地区加里东期成岩成矿作用具有密切的成因联系,加里东期花岗岩在岩浆结晶晚期阶段可以形成 W-Sn-Cu-Mo 等矿床。另外,值得注意的是,加里东期花岗岩与后期中生代成矿作用也存在较密切的关联。如赣南石雷钨矿床的赋矿围岩石英闪长岩的侵位年龄为 430.4 ± 0.6 Ma(李光来等,2010;翟伟等,2010),其成矿作用同期形成的白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 155.9 ± 0.6 Ma(翟伟等,2010)。因此,华仁民等(2013)认为加里东期的花岗闪长岩体可以直接成矿,也可能为晚期花岗岩的成矿提供物质来源。

加里东期的大地构造背景,如加里东期洋—陆俯冲碰撞造山(郭令智等,1984;彭松柏等,2006)、古生代多岛海(殷鸿福等,1999)、陆内褶皱造山带(任纪舜,1990)等,对此国内学术界至今仍有争议(舒良树等,2008;Faure *et al.*,2009;郝义等,2010;李聪等,2010;张芳荣等,2010),本文不做深入探讨。然而,值得肯定的是,华南加里东运动是华夏、扬子等

陆块碰撞拼贴、形成华南板块的一次重要的构造运动,其基本奠定了华南古生代以来的构造格局,并伴随着广泛、强烈且在区内呈面状展布的花岗质岩浆活动(舒良树,2006;Wang *et al.*,2007),同时伴随着成矿元素的富集而形成加里东期的 W-Mo 等成矿作用。另外,华南地区自加里东期开始至印支期、燕山早期的花岗岩主要是陆壳重熔型花岗岩类,多呈复式花岗岩体且表现出多旋回、多期次、多阶段和有规律的演化,这大大促使 W、Sn、Mo、Bi 等亲石成矿元素在地壳中不断富集,体现花岗岩中的金属含量直接与陆壳演化密切相关。据此,可以认为华南加里东期的陆内构造运动及其伴随的花岗质岩浆活动有利于推进区内地壳的演化和日趋成熟,其可能是引起华南地区在印支期、燕山早期发生大规模的金属成矿作用的关键原因之一(华仁民等,2013)。因此,正确认识加里东期的构造—岩浆—成矿活动对于探讨华南地区中生代的大规模成岩成矿作用具有重要的意义,也有助于更全面深入地理解华南大花岗岩省及大规模成矿作用的原因和实质。

6 结论

华南地区加里东期成岩成矿作用越来越受到研究者的重视。本文通过对钦杭成矿带西南缘桂东大瑶山地区新发现的社垌 W-Mo 矿床进行锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征等研究,取得的初步认识如下:

(1)高精度 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果显示,桂东大瑶山南缘社山花岗闪长岩的形成时间在 438 Ma 左右(438.7 ± 3.0 Ma 和 438.1 ± 2.6 Ma);结合前人已有数据,可知华南加里东期成岩成矿作用应该不是呈简单的北东向分布,而是呈面状展布。(2)社垌地区加里东期岩浆岩中新生岩浆锆石的 Hf 同位素特征指示岩浆源于中元古代下地壳物质的部分熔融;中元古代可能是华南地区重要的地壳生长期。(3)加里东期成岩成矿作用是华南地质演化历史中一次较重大的岩浆—热液—成矿热事件;加里东期岩浆岩可以直接成矿,也可能为华南中生代大规模成矿作用提供必要的成矿物质。

致谢:野外工作得到广西壮族自治区地球物理勘察院陈康副院长、黄智忠高级工程师等的大力支持和帮助,成文过程中胡明安教授和匿名审稿人对文章提出了宝贵的修改建议,在此致以衷心的感谢。

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192:59–79.
- Chen, F. W., Li, H. Q., Mei, Y. P., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Chronology of Diagenetic Mineralization of the Longtoushan Porphyry Gold Orefield, Gui County, Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 82(7):921–926 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Guo, Y. Q., Liang, B., et al., 2012. Emplaced and Metallogenetic Ages of Wujie Tungsten and Molybdenum Occurrence and Geochemical Characteristics of Granodiorite in Cangwu. *Journal of Guilin University of Technology*, 32(1):1–13 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Mo, C. S., Huang, Z. Z., et al., 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages of Granitoid Rocks and Molybdenite Re-Os Age of Shedong W-Mo Deposit in Cangwu County of Guangxi and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, (30)6:963–978 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. H., Lee, C. Y., Hsieh, P. S., et al., 2008. Approaching the Age Problem for Some Metamorphosed Precambrian Basement Rocks and Phanerozoic Granitic Bodies in the Wuyishan Area; The Application of EMP Monazite Age Dating. *Geological Journal of China Universities*, 14(1):1–15 (in Chinese with English abstract).
- Chu, Y., Faure, M., Lin, W., et al., 2012. Tectonics of the Middle Triassic Intracontinental Xuefengshan Belt, South China; New Insights from Structural and Chronological Constraints on the Basal Decollement Zone. *International Journal of Earth Sciences*, 101(8):2125–2150. doi:10.1007/s00531-012-0780-5
- Cui, B., Zhai, Y. S., Meng, Y. F., et al., 2000. Au-Ag Ore-Forming System in Dayaoshan-Xidamingshan, Guangxi, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(4):352–355, 396 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J., 2012. Mineralization Regularity of the Copper-Gold Polymetallic Deposits in Dayaoshan, Guangxi, China. *Geology and Resources*, 21(3):302–307 (in Chinese with English abstract).
- Duan, R. C., Ling, W. L., Li, Q., et al., 2011. Correlations of the Late Yanshanian Tectonomagmatic Events with Metallogenesis in South China: Geochemical Constraints from the Longtoushan Gold Ore Deposit of the Dayaoshan Area, Guangxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 85(10):1644–1658 (in Chinese with English abstract).
- Faure, M., Shu, L. S., Wang, B., et al., 2009. Intracontinental Subduction: A Possible Mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China. *Terra Nova*, 21(5):360–368. doi:10.1111/j.1365-3121.2009.00888.x
- Gilder, S. A., Gill, J., Coe, R. S., et al., 1996. Isotopic and Paleomagnetic Constraints on the Mesozoic Tectonic Evolution of South China. *Journal of Geophysical Research*, 101(B7):16317–16154. doi:10.1029/96JB00662
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle; LAM-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1):133–147. doi: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. doi:10.1016/S0024-4937(02)00082-8
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton; U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3–4):231–282. doi:10.1016/j.precamres.2003.12.011
- Guo, L. Z., Shi, Y. S., Ma, R. S., et al., 1984. Tectonostratigraphic Terranes of Southeast China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 20(4):732–739 (in Chinese with English abstract).
- Hao, Y., Li, S. Z., Jin, C., et al., 2010. Caledonian Structural Characteristics and Mechanism in Hunan-Jiangxi-Guangxi Provinces. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(2):166–180 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. C., Gao, S., Liu, Y. S., et al., 2008. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23:1093–1101. doi:10.1039/B804760J
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012a. A “Wire” Signal Smoothing Device for Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Analysis. *Spectrochimica Acta*, 78(1):50–57. doi:10.1016/j.sab.2012.09.007
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012b. Improved In-Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27:1391–1399. doi:10.

1039/C2JA30078H

- Hua, R. M., 2005. Differences between Rock-Forming and Related Ore-Forming Times for the Mesozoic Granitoids of Crust Remelting Types in the Nanling Range, South China, and Its Geological Significance. *Geological Review*, 51(6): 633–639 (in Chinese with English abstract).
- Hua, R. M., Zhang, W. L., Chen, P. R., et al., 2013. Relationship between Caledonian Granitoids and Large-Scale Mineralization in South China. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H. M., He, Z. J., Cui, B., 2003. Metallogenic Series of Granite in Dayaoshan of Guangxi. *Geology and Prospecting*, 39(4): 12–16 (in Chinese with English abstract).
- Li, C., Chen, S. Y., Zhang, P. F., et al., 2010. Research of South China Caledonian Intracontinental Tectonic Attribute. *Journal of China University of Petroleum*, 34(5): 18–24 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. L., Hua, R. M., Hu, D. Q., et al., 2010. Petrogenesis of Shilei Quartz Diorite in Southern Jiangxi: Constraints from Petrochemistry, Trace Elements of Accessory Minerals, Zircon U-Pb Dating, and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 903–918 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. L., Hua, R. M., Wei, X. L., et al., 2014. Re-Os Isotopic Ages of Two Types of Molybdenite from Zhangdongkeng Tungsten Deposit in Southern Jiangxi Province and Their Geologic Implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(2): 165–173 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Duan, R. C., Ling, W. L., et al., 2009. Detrital Zircon U-Pb Geochronology of the Early Paleozoic Strata in Eastern Guangxi and Its Constraint on the Caledonian Tectonic Nature of the Cathaysian Continental Block. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 189–202 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. F., Feng, Z. H., Li, R. S., et al., 2009. Silurian Mo Mineralization at Baishiding Molybdenum Deposit in Northern Guangxi: Constraints from Zircon SHRIMP U-Pb and Molybdenite Re-Os Ages. *Mineral Deposits*, 28(4): 403–412 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. F., Feng, Z. H., Xiao, R., et al., 2012. Spatial and Temporal Distribution and the Geological Setting of the W-Sn-Mo-Nb-Ta Deposit at the Northeast Guangxi, South China. *Acta Geologica Sinica*, 86(11): 1713–1725 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, Z. X., Ge, W. C., et al., 2001. U-Pb Zircon Ages of the Neoproterozoic Granitoids in South China and Their Tectonic Implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 271–273 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Tatsumoto, M., Premo, W. R., et al., 1989. Age and Origin of the Tanghu Granite, Southeast China: Results from U-Pb Single Zircon and Nd Isotopes. *Geology*, 17(5): 395–399. doi: 10.1130/0091-7613(1989)017<0395:AA00TT>2.3.co;2
- Li, Z. X., Li, X. H., Wang, J., et al., 2001. South China in Rodinia—An Update. *Gondwana Research*, 4(4): 685–686.
- 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. doi: 10.1130/0091-7613(2002)
- Liu, G. Q., Cai, M. H., 2004. Ore-Forming Condition and Genetic Analysis on the Gold Deposit in Dayaoshan Region, Eastern Guangxi. *Geological Science and Technology Information*, 23(2): 37–44 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- 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. doi: 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. doi: 10.1007/s11434-010-3052-4
- Liu, R., Zhou, H. W., Zhang, L., et al., 2010c. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope Compositions of the Mayuan Migmatite Complex, NW Fujian Province, Southeast China: Constraints on the Timing and Nature of a Regional Tectonothermal Event Associated with the Caledonian Orogeny. *Lithos*, 119(3–4): 163–180. doi: 10.1016/j.lithos.2010.06.004
- Lou, F. S., Shen, W. Z., Wang, D. Z., et al., 2005. Zircon U-

- Pb Isotopic Chronology of the Wugongshan Dome Compound Granite in Jiangxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 79 (5): 636 — 644 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Z., Liu, Y. M., Wang, C. L., et al., 2003. Mineralization and Fluid Inclusion Study of the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo-F Skarn Deposit, Hunan Province, China. *Economic Geology*, 98(5): 955—974. doi:10. 2113/gsecongeo. 98. 5. 955
- Ludwig, K. R., 2003. Users Manual for Isoplot 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, 4: 1—71.
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Guo, C. L., et al., 2008. Spatial-Temporal Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Metallogenic Settings. *Geological Journal of China Universities*, 14 (4): 510 — 526 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Chen, M. H., Yuan, S. D., et al., 2011. Geological Characteristics of the Qinhang(or Shihang) Metallogenic Belt in South China and Spatial-Temporal Distribution Regularity of Mineral Deposits. *Acta Geologica Sinica*, 85 (5): 636 — 658 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Cheng, Y. B., Chen, M. H., et al., 2013. Major Types and Time-Space Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Geodynamic Settings. *Mineral Deposita*, 48 (3): 267 — 294. doi: 10. 1007/s00126—012—0446—z
- Mao, J. W., Zhang, J. D., Pirajno, F., et al., 2011. Porphyry Cu-Au-Mo-Epithermal Ag-Pb-Zn-Distal Hydrothermal Au Deposits in the Dexing Area, Jiangxi Province, East China—A Linked Ore System. *Ore Geological Reviews*, 43 (1): 203 — 216. doi: 10. 1016/j. oregeorev. 2011. 08. 005
- Nong, J. N., Zhong, Y. F., Liu, L., et al., 2012. Petrogenesis of the Maixie Pluton in Northwest Jiangxi Province: Constraints from Petrochemistry, Zircon U-Pb Chronology and Hf Isotope. *Geological Science and Technology Information*, 31 (2): 9 — 18 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. B., Jin, Z. M., Liu, Y. H., et al., 2006. Petrochemistry, Chronology and Tectonic Setting of Strong Peraluminous Anatectic Granitoids in Yunkai Orogenic Belt, Western Guangdong Province, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31 (1): 110—120 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. S., 1990. On the Geotectonics of Southern China. *Acta Geologica Sinica*, (4): 275 — 288 (in Chinese with English abstract).
- Scherer, E., Muenker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *Science*, 293 (5530): 683 — 687. doi:10. 1126/science. 1061372
- Segal, I., Halicz, L., Platzner, I. T., 2003. Accurate Isotope Ratio Measurements of Ytterbium by Multiple Collection Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Applying Erbium and Hafnium in an Improved Double External Normalization Procedure. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 18: 1217 — 1223. doi: 10. 1039/B307016F
- Shen, W. Z., Zhang, F. R., Shu, L. S., et al., 2008. Formation Age, Geochemical Characteristics of the Ninggang Granite Body in Jiangxi Province and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2244—2254 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L. S., 2006. Predevonian Tectonic Evolution of South China: From Cathaysian Block to Caledonian Period Folded Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418—431 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L. S., Yu, J. H., Jia, D., et al., 2008. Early Paleozoic Orogenic Belt in the Eastern Segment of South China. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1581—1593 (in Chinese with English abstract).
- Sun, T., 2006. A New Map Showing the Distribution of Granites in South China and Its Explanatory Notes. *Geological Bulletin of China*, 25 (3): 332 — 335 (in Chinese with English abstract).
- Vervoort, J. D., Patchett, P. J., Albarede, F., et al., 2000. Hf-Nd Isotopic Evolution of the Lower Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 181(1—2): 115 — 129. doi:10. 1016/S0012—821X(00)00170—9
- Wang, D. Z., Shen, W. Z., 2003. Genesis of Granitoids and Crustal Evolution in Southeast China. *Earth Science Frontiers*, 10 (3): 209 — 220 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Long, W. G., Zhou, D., 2013. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Age of Caledonian Granites from Precambrian Basement in Yunkai Area and Its Geological Implications. *Geology in China*, 40 (4): 1016 — 1029 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. J., Yu, J. H., O'Reilly, S. Y., et al., 2008. Grenvillian Orogeny in the Southern Cathaysia Block: Constraints from U-Pb Ages and Lu-Hf Isotopes in Zircon from Metamorphic Basement. *Chinese Science Bulletin*, 53(14): 1680—1692 (in Chinese).
- Wang, Y. B., Wang, D. H., Han, J., et al., 2010. U-Pb Dating and Hf Isotopic Characteristics of Zircons from

- Quartz-Diorite in the Yijiang REE-Sc Deposit, Rucheng County, Hunan, Constraints on the Timing of Caledonian Magmatic Activity in South China. *Geology in China*, 37(4): 1062—1070 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. L., Wang, D. H., Zhang, C. Q., et al., 2010. Molybdenite Re-Os Isochron Age of Debao Cu-Sn Deposit in Guangxi and Relation to Caledonian Mineralization. *Mineral Deposits*, 29(5): 881—889 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. L., Wang, D. H., Zhang, C. Q., et al., 2011. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Qinjia Granite in Guangxi Province and Its Geologic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 475—481 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. L., Chen, Z. Y., Chen, Z. H., et al., 2012. Zircon U-Pb Dating of the Hunandong-Gtanite and Its Caledonian Tectonic Significance, South Jiangxi-East Hunan Province. *Rock and Mineral Analysis*, 31(3): 525—529 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhao, G. C., et al., 2007. Zircon U-Pb Geochronology of Gneissic Rocks in the Yunkai Massif and Its Implications on the Caledonian Event in the South China Block. *Gondwana Research*, 12(4): 404—416. doi:10.1016/j.gr.2006.10.003
- Wang, Y. J., Zhang, A. M., Fan, W. M., et al., 2011. Kwan-gian Crustal Anatexis within the Eastern South China Block: Geochemical, Zircon U-Pb Geochronological and Hf Isotopic Fingerprints from the Gneissoid Granites of Wugong and Wuyi-Yunkai Domains. *Lithos*, 127(1—2): 239—260. doi:10.1016/j.lithos.2011.07.027
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhang, G. W., et al., 2013. Phanerozoic Tectonics of the South China Block: Key Observations and Controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273—1305. doi:10.1016/j.gr.2012.02.019
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1—23. doi:10.1111/j.1751—908X.1995.tb00147.x
- Woodhead, J., Hergt, J., Shelley, M., et al., 2004. Zircon Hf-Isotope Analysis with an Excimer Laser, Depth Profiling, Ablation of Complex Geometries, and Concomitant Age Estimation. *Chemical Geology*, 209(1—2): 121—135. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.04.026
- Wu, F. Y., Sun, J. P., Zhang, X. Z., 1998. The Nd Isotopic Evidence for Late Paleozoic Oceanic Crust in Southern Margin of Yangtze Block. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 22—33 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. B., Zhang, Y. Q., Jia, D., et al., 2009. Early Mesozoic Geotectonic Processes in South China. *Geology in China*, 36(3): 573—593 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. G., Huang, S. B., Lou, F. S., et al., 2009. Lithospheric Structure and Large-Scale Metallogenic Process in Southeast China Continental Area. *Geology in China*, 36(3): 528—543 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Liu, R., Wang, X. Y., et al., 2014. Petrogenesis and Tectonic Significance of Late Yanshanian Granites in Yunkai Area, Southeast China: Evidence from Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(9): 1258—1276 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zhang, W. L., Wang, R. C., et al., 2013. Geochronology and Geochemical Characteristics of Metallogenic Pluton in the Youmaling Tungsten Mining Area, Northern Guangxi Province, and Its Geological Significance. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 159—172 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Wu, S. B., Du, Y. S., et al., 1999. South China Defined as Part of Tethyan Archipelagic Ocean System. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. H., O'Reilly, S. Y., Wang, L. J., et al., 2008. Where was South China in the Rodinia Supercontinent? Evidence from U-Pb Geochronology and Hf Isotopes of Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 164(1—2): 1—15. doi:10.1016/j.precamres.2008.03.002
- Yu, J. H., O'Reilly, S. Y., Wang, L. J., et al., 2010. Components and Episodic Growth of Precambrian Crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from U-Pb Ages and Hf Isotopes of Zircons in Neoproterozoic Sediments. *Precambrian Research*, 181(1—4): 97—114. doi:10.1016/j.precamres.2010.05.016
- Zhai, W., Sun, X. M., Wu, Y. S., et al., 2010. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Buried Granodiorite and Muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Mineralization and Geological Implications of Meiziwo Tungsten Deposit, Northern Guangdong Province, China. *Geological Journal of China Universities*, 16(2): 177—185 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, A. M., Wang, Y. J., Fan, W. M., et al., 2010. LA-ICPMS Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Composition of Caledonian Granites from the Qingliu

- Area, Southwest Fujian. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(3):408–418 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. R., Shu, L. S., Wang, D. Z., et al., 2010. Study on Geochronological, Geochemical Features and Genesis of the Fufang Granitic Pluton in the Jiangxi Province, South China. *Geological Journal of China Universities*, 16(2):161–176 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. F., Wang, Y. J., Fan, W. M., et al., 2010. LA-ICPMS Zircon U-Pb Geochronology of Late Early Paleozoic Granites in Eastern Hunan and Western Jiangxi Provinces, South China. *Geochimica*, 39(5):414–426 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. F., Wang, Y. J., Zhang, A. M., et al., 2012. Geochronological and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Middle Paleozoic (Kwangian) Massive Granites in the Eastern South China Block. *Lithos*, 150:188–208. doi:10.1016/j.lithos.2012.03.011
- Zhang, Y., Shu, L. S., Chen, X. Y., 2011. Geochemistry, Geochronology, and Petro-Genesis of the Early Paleozoic Granitic Plutons in the Central-Southern Jiangxi Province, China. *Science China: Earth Sciences*, 41(8):1061–1079 (in Chinese).
- Zhao, Z., Chen, Z. Y., Chen, Z. H., et al., 2012. Zircon U-Pb Dating, Tectonic Setting and Ore-Bearing Properties Evaluation of the Caledonian Yangbu Pluton in South Jiangxi. *Rock and Mineral Analysis*, 31(3):530–535 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈富文, 李华芹, 梅玉萍, 2008. 广西龙头山斑岩型金矿成岩成矿锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. *地质学报*, 82(7):921–926.
- 陈懋弘, 莫次生, 黄智忠, 等, 2011. 广西苍梧县社洞钨钼矿床花岗岩类锆石 LA-ICP-MS 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. *矿床地质*, 30(6):963–978.
- 陈懋弘, 郭云起, 梁宾, 等, 2012. 广西苍梧县武界钨钼矿点成岩成矿年龄及岩体地球化学特征. *桂林理工大学学报*, 32(1):1–13.
- 陈正宏, 李寄嶠, 谢佩珊, 等, 2008. 利用 EMP 独居石定年法探讨浙闽武夷山地区变质基底岩石与花岗岩的年龄. *高校地质学报*, 14(1):1–15.
- 崔彬, 翟裕生, 蒙义峰, 等, 2000. 广西大瑶山—西大明山金银成矿系统研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(4):352–355, 396.
- 邓军, 2012. 广西大瑶山地区铜金多金属矿床成矿规律研究. *地质与资源*, 21(3):302–307.
- 段瑞春, 凌文黎, 李青, 等, 2011. 华南燕山晚期构造—岩浆事件与成矿作用——来自广西大瑶山龙头山金矿床的地球化学约束. *地质学报*, 85(10):1644–1658.
- 郭令智, 施央申, 马瑞士, 等, 1984. 中国东南部地体构造的研究. *南京大学学报(自然科学版)*, 20(4):732–739.
- 郝义, 李三忠, 金宠, 等, 2010. 湘赣桂地区加里东期构造变形特征及成因分析. *大地构造与成矿学*, 34(2):166–180.
- 华仁民, 2005. 南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩—成矿的时间差及其地质意义. *地质论评*, 51(6):633–639.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 等, 2013. 初论华南加里东花岗岩与大规模成矿作用的关系. *高校地质学报*, 19(1):1–11.
- 黄惠民, 和志军, 崔彬, 2003. 广西大瑶山地区花岗岩成矿系列. *地质与勘探*, 39(4):12–16.
- 李聪, 陈世悦, 张鹏飞, 等, 2010. 华南加里东期陆内构造属性探讨. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 34(5):18–24.
- 李光来, 华仁民, 胡东泉, 等, 2010. 赣南地区石雷石英闪长岩的成因: 岩石化学、副矿物微量元素、锆石 U-Pb 年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素制约. *岩石学报*, 26(3):903–918.
- 李光来, 华仁民, 韦星林, 等, 2014. 赣南樟东坑钨矿两类矿化中辉钼矿的 Re-Os 同位素定年及其地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(2):165–173.
- 李青, 段瑞春, 凌文黎, 等, 2009. 桂东早古生代地层碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学及其对华夏陆块加里东期构造事件性质的约束. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(1):189–202.
- 李献华, 李正祥, 葛文春, 等, 2001. 华南新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4):271–273.
- 李晓峰, 冯佐海, 李容森, 等, 2009. 华南志留纪钼的矿化: 白石顶钼矿锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 年龄证据. *矿床地质*, 28(4):403–412.
- 李晓峰, 冯佐海, 肖荣, 等, 2012. 桂东北钨锡稀有金属矿床的成矿类型、成矿时代及其地质背景. *地质学报*, 86(11):1713–1725.
- 刘国庆, 蔡明海, 2004. 桂东大瑶山地区金矿成矿条件及成因分析. *地质科技情报*, 23(2):37–44.
- 楼法生, 沈渭洲, 王德滋, 等, 2005. 江西武功山穹隆复式花岗岩的锆石 U-Pb 年代学研究. *地质学报*, 79(5):636–644.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等, 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. *高校地质学报*, 14(4):510–526.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等, 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. *地质学报*, 85(5):636–658.
- 农军年, 钟玉芳, 刘磊, 等, 2012. 赣西北麦斜岩体的成因: 地

- 球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素制约. 地质科技情报, 31(2):9-18.
- 彭松柏, 金振民, 刘云华, 等, 2006. 云开造山带强过铝深熔花岗岩地球化学、年代学及构造背景. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1):110-120.
- 任纪舜, 1990. 论中国南部的大地构造. 地质学报, (4):275-288.
- 沈渭洲, 张芳荣, 舒良树, 等, 2008. 江西宁冈岩体的形成时代、地球化学特征及其构造意义. 岩石学报, 24(10):2244-2254.
- 舒良树, 2006. 华南前泥盆纪构造演化:从华夏地块到加里东期造山带. 高校地质学报, 12(4):418-431.
- 舒良树, 于津海, 贾东, 等, 2008. 华南东段早古生代造山带研究. 地质通报, 27(10):1581-1593.
- 孙涛, 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. 地质通报, 25(3):332-335.
- 王德滋, 沈渭洲, 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前缘, 10(3):209-220.
- 王磊, 龙文国, 周岱, 2013. 云开地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 中国地质, 40(4):1016-1029.
- 王丽娟, 于津海, O'Reilly, S. Y., 等, 2008. 华夏南部可能存在 Grenville 期造山作用:来自基底变质岩中锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素信息. 科学通报, 53(14):1680-1692.
- 王彦斌, 王登红, 韩娟, 等, 2010. 湖南益将稀土-钽矿的石英闪长岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征:湘南加里东期岩浆活动的年代学证据. 中国地质, 37(4):1062-1070.
- 王永磊, 陈振宇, 陈郑辉, 等, 2012. 赣南—湘东湖南洞岩体的锆石 U-Pb 年代学研究及其对加里东构造背景的意义. 岩矿测试, 31(3):525-529.
- 王永磊, 王登红, 张长青, 等, 2010. 广西德保铜锡矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及对加里东期成矿的探讨. 矿床地质, 29(5):881-889.
- 王永磊, 王登红, 张长青, 等, 2011. 广西钦甲花岗岩体单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 地质学报, 85(4):475-481.
- 吴福元, 孙加鹏, 张兴洲, 1998. 扬子地块南缘晚古生代洋壳存在的 Nd 同位素证据. 岩石学报, 14(1):22-33.
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等, 2009. 华南早中生代大地构造过程. 中国地质, 36(3):573-593.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 等, 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用. 中国地质, 36(3):528-543.
- 杨振, 刘锐, 王新宇, 等, 2014. 云开地区燕山晚期花岗岩的岩石成因及构造意义:锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素证据. 地球科学——中国地质大学学报, 39(9):1258-1276.
- 杨振, 张文兰, 王汝成, 等, 2013. 桂北油麻岭钨矿区成矿岩体的年代学、地球化学及其地质意义. 高校地质学报, 19(1):159-172.
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等, 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分. 地球科学——中国地质大学学报, 24(1):1-12.
- 于津海, O'Reilly, S. Y., 王丽娟, 等, 2007. 华夏地块古老物质的发现和前寒武纪地壳的形成. 科学通报, 52(1):11-18.
- 翟伟, 孙晓明, 邬云山, 等, 2010. 粤北梅子窝钨矿区隐伏花岗岩闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 成矿年龄及其地质意义. 高校地质学报, 16(2):177-185.
- 张爱梅, 王岳军, 范蔚茗, 等, 2010. 闽西南清流地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究. 大地构造与成矿学, 34(3):408-418.
- 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 等, 2010. 江西付坊花岗岩体的年代学、地球化学特征及其成因研究. 高校地质学报, 16(2):161-176.
- 张菲菲, 王岳军, 范蔚茗, 等, 2010. 湘东—赣西地区早古生代晚期花岗岩体的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年研究. 地球化学, 39(5):414-426.
- 张苑, 舒良树, 陈祥云, 2011. 华南早古生代花岗岩的地球化学、年代学及其成因研究——以赣中南为例. 中国科学:地球科学, 41(8):1061-1079.
- 赵芝, 陈振宇, 陈郑辉, 等, 2012. 赣南加里东期阳埠(垵子下)岩体的锆石年龄、构造背景及含矿性评价. 岩矿测试, 31(3):530-535.