

doi:10.3799/dqkx.2015.132

钦杭成矿带大瑶山地区晚白垩世斑岩型铜矿床： 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素制约

毕诗健¹, 杨 振¹, 李 巍², 梁 培³, 唐克非⁴

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 广西壮族自治区地球物理勘察院, 广西柳州 545005

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

4. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610051

摘要: 钦杭成矿带是华南地区重要的斑岩铜成矿带。前人研究表明区内斑岩铜矿床主要形成于中—晚侏罗世(180~155 Ma), 含矿斑岩为壳—幔相互作用的产物。对区内新近发现的钦杭带西南段大瑶山地区的宝山斑岩铜矿床进行研究, 结果表明其成矿时代集中在晚白垩世。其中, 隐伏含矿花岗斑岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 91.1 ± 0.6 Ma(1σ), 出露地表不含矿的两个花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄分别为 91.3 ± 0.8 Ma(1σ) 和 90.1 ± 1.0 Ma(1σ)。含矿斑岩和不含矿斑岩的锆石 Hf 同位素组成相似, 初始 ϵ_{Hf} (91 Ma) 为 $-8.74 \sim -5.13$, 两阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 集中在 $1210 \sim 1394$ Ma。以上 U-Pb-Hf 同位素分析结果表明, 宝山铜矿床是一个晚白垩世早期(约 91 Ma)形成的斑岩型铜矿床, 其含矿斑岩体的成因可能与中元古代地壳物质的部分熔融有关。结合前人的研究成果可知, 钦杭成矿带存在两期斑岩铜矿床成矿作用, 分别为中—晚侏罗世和晚白垩世, 其中晚白垩世成矿作用可能与华南板块边缘后碰撞伸展构造背景有关; 钦杭带西南侧大瑶山及邻区可能广泛发育有与燕山晚期岩浆活动(80~100 Ma)有关的钨—钼—铜(金)多金属矿床。

关键词: 钦杭成矿带; 大瑶山; 宝山铜矿床; 花岗斑岩; 晚白垩世成矿作用; 地球化学。

中图分类号: P618.41

文章编号: 1000-2383(2015)09-1458-22

收稿日期: 2015-05-02

Discovery of Late Cretaceous Baoshan Porphyry Copper Deposit in Dayaoshan, Qinhang Metallogenic Belt: Constraints from Zircon U-Pb Age and Hf Isotope

Bi Shijian¹, Yang Zhen¹, Li Wei², Liang Pei³, Tang Kefei⁴

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Geophysical Exploration Institute of Guangxi, Liuzhou 545005, China

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

4. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, China

Abstract: The Qinzhou Bay-Hangzhou Bay suture zone is an important porphyry copper metallogenic belt in southern China. Previous studies suggest that the ages of regional diagenesis and mineralization are mainly concentrated in the Late-Middle Jurassic (180–155 Ma), and the ore-bearing granite porphyry shows distinctly crust-mantle contamination. The Baoshan copper deposit is a porphyry-type Cu deposit newly discovered in the Dayaoshan region in the southwestern of the Qinhang metallogenic belt in recent years. The granite porphyry is dominated as small stock into Sheshan granodiorite, including two outcropped and one concealed magmatic emplacement. And the copper ore body is all hosted in the Baoshan concealed granite porphyry. In this paper, laser ablation (MC)-ICPMS U-Pb dating and Hf isotopic compositions of zircons from three granite porphyry samples in the Baoshan copper deposit are presented. Highly precise U-Pb results indicate that zircons from one con-

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项目(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: 毕诗健(1982—), 男, 讲师, 博士, 主要从事矿床学研究。E-mail: Shijianbi_1982@163.com

引用格式: 毕诗健, 杨振, 李巍, 等, 2015. 钦杭成矿带大瑶山地区晚白垩世斑岩型铜矿床: 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素制约. 地球科学——中国地质大学学报, 40(9): 1458–1479.

cealed and two outcropped granite porphyries give weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of $91.1 \pm 0.6 \text{ Ma}$ (1σ), $91.3 \pm 0.8 \text{ Ma}$ (1σ) and $90.1 \pm 1.0 \text{ Ma}$ (1σ), respectively. And the zircons crystallized in the late Yanshannian granites give ϵ_{Hf} (91 Ma) values ranging from -8.74 to -5.13 and Hf model ages (T_{DM2}) of $1210-1394 \text{ Ma}$. U-Pb and Hf isotopic data can be interpreted as the crystallization time of these granites and the mineralization age, indicating it was formed in the $\sim 91 \text{ Ma}$ and may be developed by reworking of Mesoproterozoic crust closely related to partial melting. Together with other published geochronological data, it is proposed that the late Yanshannian magmatite and related Cu (Au)-W-Mo deposit are widely developed in the Dayaoshan and its adjacent areas. Moreover, two epochs of porphyry copper mineralization are confirmed in this study, including the Middle-Late Jurassic and the Late Cretaceous, in the Qinhang metallogenic belt, and it is concluded that Late Cretaceous mineralization possibly resulted from the post-collisional crustal extension setting in the continental margin of the South China.

Key words: Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt; Dayaoshan; Baoshan copper deposit; granite porphyry; Late Cretaceous mineralization; geochemistry.

0 引言

钦州湾—杭州湾结合带(简称钦杭带)是位于扬子与华夏两大古陆块间的晚古生代巨型碰撞拼接带。这一碰撞拼合带自广西钦州湾往 NE 经湘东和赣中延伸到浙江杭州湾地区,全长近 2 000 km,宽 100~150 km,总体呈反 S 状弧形展布(杨明桂和梅勇文,1997)。钦杭结合带及其两侧是华南地区重要的 Cu-Au-Pb-Zn-Ag-W-Sn-Mo 等多金属成矿带,已探明众多大型—超大型铜、金、铅锌、铀、钨—锡—钼等矿床,文献中常称其为钦杭成矿带(Lu *et al.*, 2003;杨明桂等,2009;毛景文等,2011;Mao *et al.*, 2011, 2013)。斑岩—矽卡岩型铜多金属矿床是钦杭成矿带的重要矿床类型(毛景文等,2011;周永章等,2012),典型矿床有江西德兴和永平铜矿床、湖南铜山岭铜矿床、湖南宝山铜多金属矿床等。已有研究表明,钦杭成矿带内斑岩铜矿床的成岩成矿时代集中在 150~180 Ma(王岳军等,2001;王强等,2004;路远发等,2006;Wang *et al.*, 2006;李晓峰等,2008;Zhong *et al.*, 2010;Liu *et al.*, 2012;Zhou *et al.*, 2012a;Hou *et al.*, 2013),其成岩成矿与侏罗纪时期太平洋板块的向西俯冲有关(Mao *et al.*, 2011, 2013;Hou *et al.*, 2013)。

位于钦杭带西南段的大瑶山地区是广西重要的金矿成矿带之一,已发现大量含金石英脉型、破碎带蚀变岩型和斑岩型金矿床,如古袍、桃花、龙头山金矿床等(崔彬等,2000;刘国庆和蔡明海,2004;陈富文等,2008)。随着钦杭成矿带研究和找矿工作的深入,近年来在大瑶山地区陆续发现了宝山斑岩铜矿床(广西壮族自治区地球物理勘察院,广西苍梧县宝山矿区普查(阶段性)报告,2012)、大黎斑岩铜—钼矿床等(胡升奇等,2012),在其西侧和南缘也新发现有圆珠顶、南和等大中型斑岩铜—钼矿床(Zhong *et*

al., 2010;虞鹏鹏等,2011;楚克磊等,2013)。Zhong *et al.* (2010)和陈富文等(2012)最近对圆珠顶斑岩铜—钼矿床的锆石 U-Pb 定年和辉钼矿 Re-Os 定年结果表明,其成岩成矿时代为中侏罗世晚期(154~157 Ma),与钦杭成矿带内早先发现的斑岩铜矿床基本一致(王岳军等,2001;Wang *et al.*, 2006;李晓峰等,2008),可能与中—晚侏罗世时期华南岩石圈伸展构造背景有关(毛景文等,2008;Mao *et al.*, 2013)。另一方面,崔彬等(2000)和黄惠民等(2003)研究发现大瑶山地区众多与金成矿作用关系密切的斑岩体形成时代比上述斑岩铜矿床要晚得多,主要为晚白垩世早期。如与龙头山金矿床有关的流纹质斑岩和花岗斑岩体侵位时代为 96~103 Ma,即晚白垩世(朱桂田和朱文凤,2006;陈富文等,2008;段瑞春等,2011)。区内是否存在这一时期的斑岩铜矿床?这是一个值得关注的重要问题。

尽管近年来大瑶山地区与斑岩有关的铜金矿床勘查取得了新的突破,但相关的研究还非常薄弱,对典型矿床的矿床地质特征、成岩成矿时代、成矿动力学背景、与钦杭成矿带内早期探明的斑岩铜矿床的时空和成因关系等认识还很不足。本文精确测定了广西大瑶山地区南侧宝山斑岩铜矿床中花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成,并讨论了含矿斑岩的成因机制,这是首次在钦杭成矿带西南段发现斑岩型铜矿床,可为进一步总结钦杭带斑岩铜矿床的时空分布规律、成矿动力学背景和指导下区内斑岩型铜矿床的下一步找矿工作提供重要的依据。

1 地质背景

大瑶山地区位于钦杭成矿带西南段,地理位置上东起两广边境,西至大明山隆起,南以西江为界,北至蒙山、昭平、贺县等地,包括大瑶山和大桂山两

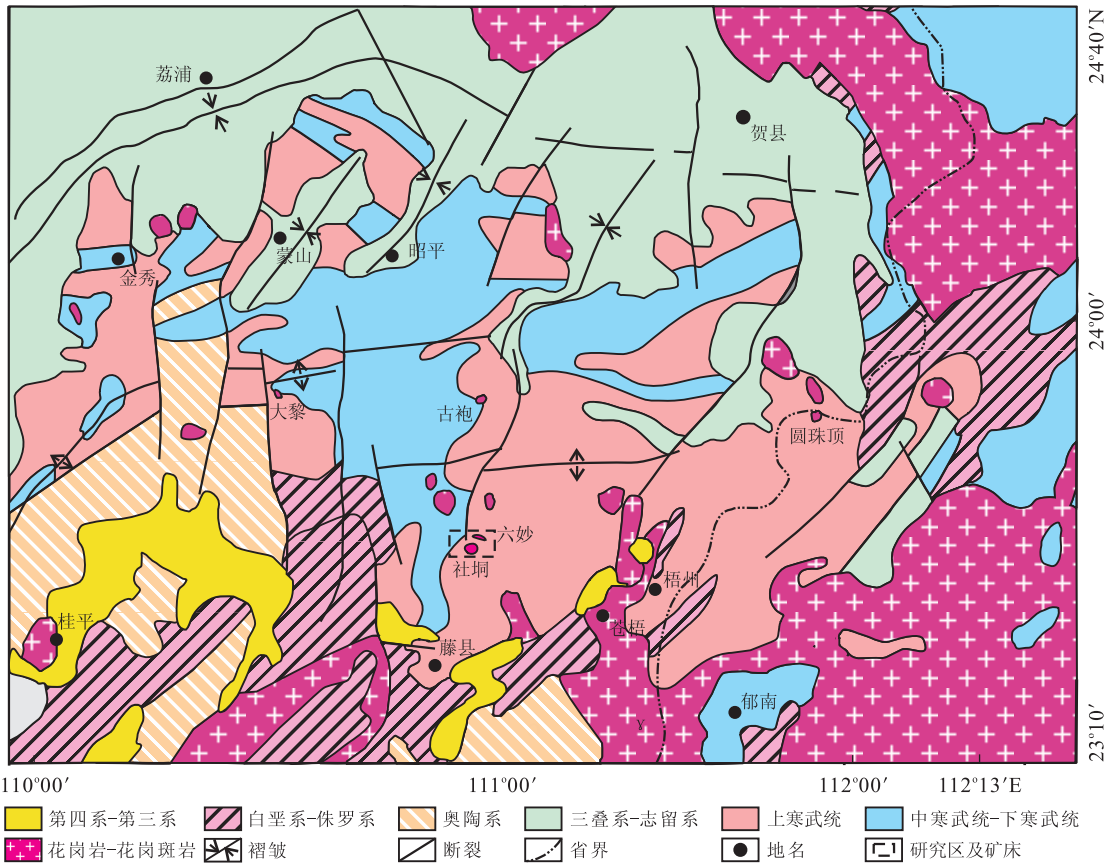


图 1 大瑶山地区区域地质图

Fig. 1 Regional geological sketch of the Dayaoshan district showing the location of the Shedong and Baoshan W-Mo-Cu district and other ore deposits

图据广西壮族自治区地球物理勘察院,广西苍梧县社垌矿区铜多金属矿普查(中间性)报告(2011)修改

大山脉,大致呈 EW 向展布,面积近 18 000 km² (广西壮族自治区地球物理勘察院,广西苍梧县社垌矿区铜多金属矿普查(中间性)报告,2011). 大地构造位置上位于南华准地台桂中—桂东台陷区的大瑶山隆起(或大瑶山山体),其西边为桂中坳陷,北接桂北坳陷,南与云开隆起岩浆活动带和钦防海西地槽毗邻(蔡明海等,2002).

区内地层从早古生界到新生界均有出露,以寒武系和泥盆系为主(图 1). 桂东台陷区主要发育寒武系水口群浅变质砂岩、硅质岩、板岩、千枚岩等,并出露泥盆系石英砂岩、泥质粉砂岩等;桂中台陷区主要出露寒武系黄洞口组浅变质碎屑岩以及泥盆系—石炭系浅海—滨海相碳酸盐岩和碎屑岩(李青等,2009). 受加里东期、印支期和燕山期构造运动的影响,大瑶山地区各种方向、尺度和性质的褶皱、断裂、盆地和穹隆构造非常发育(段瑞春等,2011). 呈 NEE 走向的大瑶山复式背斜及凭祥—大黎深大断裂带组成本区盖层构造的格架,在此基础上叠加

NE、NW 及 SN 向构造,形成较为复杂的网格状构造体系(图 1),后期构造对先存构造的叠加、改造作用较为明显,导致早期构造形迹常不连续. 区内岩浆活动较强烈,从加里东至喜山期均有不同程度的发育,以燕山期岩浆活动最为发育,加里东期次之(黄惠民等,2003;邓军,2012). 燕山期岩浆岩多呈岩株和岩筒产出,主要岩性有闪长岩、花岗岩、二长花岗岩、花岗斑岩等. 加里东期岩浆岩呈岩脉、岩株、岩基等产出,以闪长岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩等为主.

2 矿区地质特征

矿区位于广西壮族自治区东部,梧州市 NW 向 290°方向 58 km 处,位于苍梧县岭脚镇 NWW 方向约 2 km 处. 其中,在社山花岗闪长岩体及其北侧平头背寒武系中,已探明有望达到大型规模的社垌热液脉状钨—钼等多金属矿床(图 2). 宝山斑岩铜矿

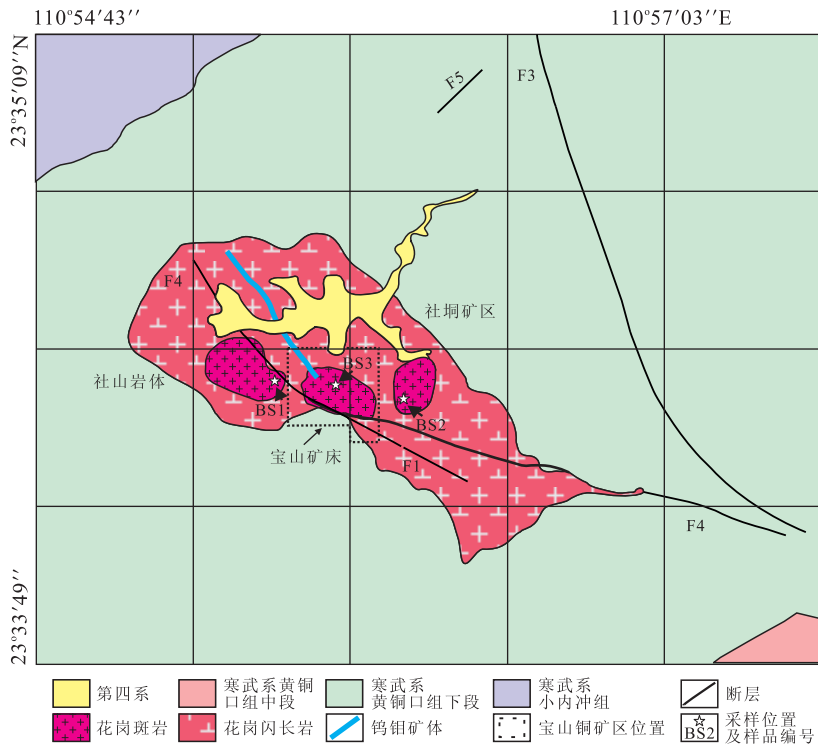


图2 大瑶山社山地区宝山铜矿床区域地质简图

Fig. 2 Geological sketch of the Sheshan district, Dayaoshan, showing the location of the Baoshan porphyry Cu deposit
图据李巍等(2015)

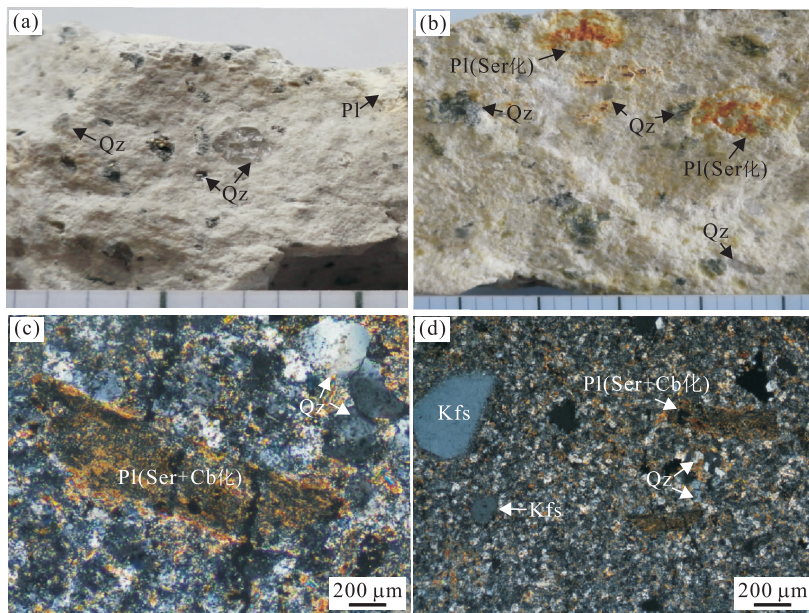


图3 宝山花岗斑岩体显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of the Baoshan porphyritic granite

a. 花岗斑岩中的斜长石和石英斑晶; b. 花岗斑岩中的斜长石发生强烈的绢云母化; c. 花岗斑岩中自形柱状斜长石发生强烈的绢云母化和碳酸盐化, 仅保存斜长石晶形; d. 花岗斑岩中的他形粒状钾长石斑晶和颗粒细小的他形粒状石英基质。Pl. 斜长石; Qz. 石英; Kfs. 钾长石; Ser. 绢云母; Cb. 碳酸盐

床位于社垌钨-钼多金属矿床西南侧, 矿体主要赋存在侵位于社山花岗闪长岩的宝山隐伏花岗斑岩体

内(图2), 是广西境内发现的首例隐伏斑岩型铜矿床(刘仲林等, 2013)。

区内出露地层为寒武系黄洞口组,主要分布在矿区西南部,岩性为灰绿色变质砂岩、石英杂砂岩、泥质粉砂岩夹黑色泥岩等(陈懋弘等,2011).区内断裂和褶皱构造发育,基本构造格局为轴向 NE-SW 的平头背不对称背斜及 NNW 和 NWW 向断层.断层主要有 NW 向 F1、F3、F4、F7 等.矿区岩浆岩主要为社山中一细粒黑云母花岗闪长岩和花岗斑岩(图 2).社山黑云母花岗闪长岩为半自形粒状结构和块状构造,主要造岩矿物有斜长石(约 35%)、钾长石(12%~15%)、石英(25%~30%)等,暗色矿物包括角闪石(8%~10%)、黑云母(约 10%)等.花岗斑岩主要呈小岩株侵位于社山黑云母花岗闪长岩中,包括两个出露地表的斑岩体和一个隐伏斑岩体(亦称宝山斑岩体).

宝山铜矿床赋存于宝山隐伏花岗斑岩体中,岩体为斑状结构,基质为隐晶—微晶粒状结构.斑晶主要由长石(斜长石、钾长石)(约 15%)、石英(约 30%)和黑云母(约 5%)组成(图 3),基质成分与斑晶一致.构成斑晶的长石中,以斜长石为主(图 3a),斜长石晶体大多呈自形一半自形柱状晶形,大部分发生强烈绢云母化或碳酸盐化,但仍保存有长石晶形,部分可见明暗相间的聚片双晶(图 3b 和 3c).钾长石多为他形柱状晶形,常强烈蚀变形成高岭石.构成斑晶的石英多呈他形—较为自形的六方锥形,具有加大变结构,颗粒大小不一;基质中的石英颗粒细小,多为他形粒状结构(图 3d).组成斑晶的黑云母常发生强烈的绿泥石化,形成颗粒状或团块状绿泥

石;基质中的云母常呈细小的条带状分布于石英及长石颗粒间隙中.

3 矿床地质特征

宝山斑岩铜矿床位于社桐钨—钼多金属矿区西南段,矿体主要赋存于宝山花岗斑岩体内.宝山铜矿床由 I 号、II 号、III 号和 IV 号矿体组成,矿体形态以薄板状和透镜状为主,总体倾向 SW,产状陡立,赋存标高为 -100~300 m,沿走向和倾斜方向延伸均较稳定,连续性好,自东向西矿体表现出逐渐变深的趋势(图 4).矿体一般上部较厚,下部分支现象明显,多呈楔形尖灭,但西侧的矿体有复杂的分支复合现象. I 号矿体是宝山铜矿床的主要矿体,深部矿体顶、底板围岩一般为花岗闪长岩、花岗斑岩或变质砂岩. I 号矿体总体倾向 SW,倾角为 $66^{\circ}\sim 82^{\circ}$,矿体控制长度为 327 m,宽度为 1.22~54.95 m,斜深为 90~217 m,赋存标高为 0~345 m,平均厚度为 25.19 m,矿石平均品位为 0.653%,整个块段的矿石品位变化系数为 19.46%,表明矿化较均匀.

依据矿石产状及矿物组合特征,宝山斑岩铜矿床的矿石构造有团块状、斑杂状、浸染状或稠密浸染状、细脉状和网脉状铜矿石(图 5a~5c).团块状和斑杂状构造矿石中,黄铜矿、黄铁矿等硫化物集合体形状各异且分布疏密不均.浸染状和稠密浸染状矿石构造是最重要的矿石类型,黄铜矿、黄铁矿等金属硫化物多呈稀疏星散状或稠密浸染状,可见黄铜矿

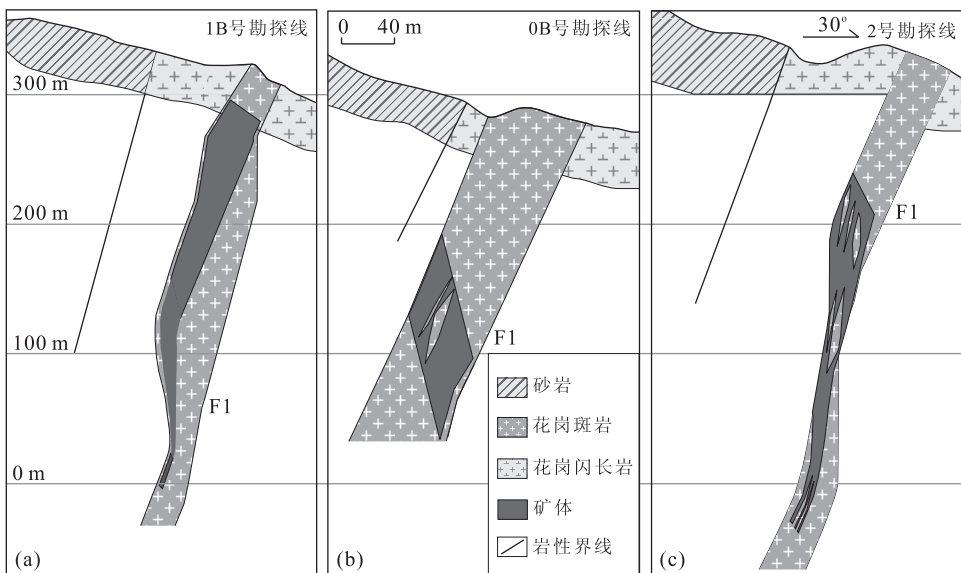


图 4 宝山斑岩型铜矿床勘探线剖面

Fig. 4 Cross sections of the Baoshan porphyry Cu orebody

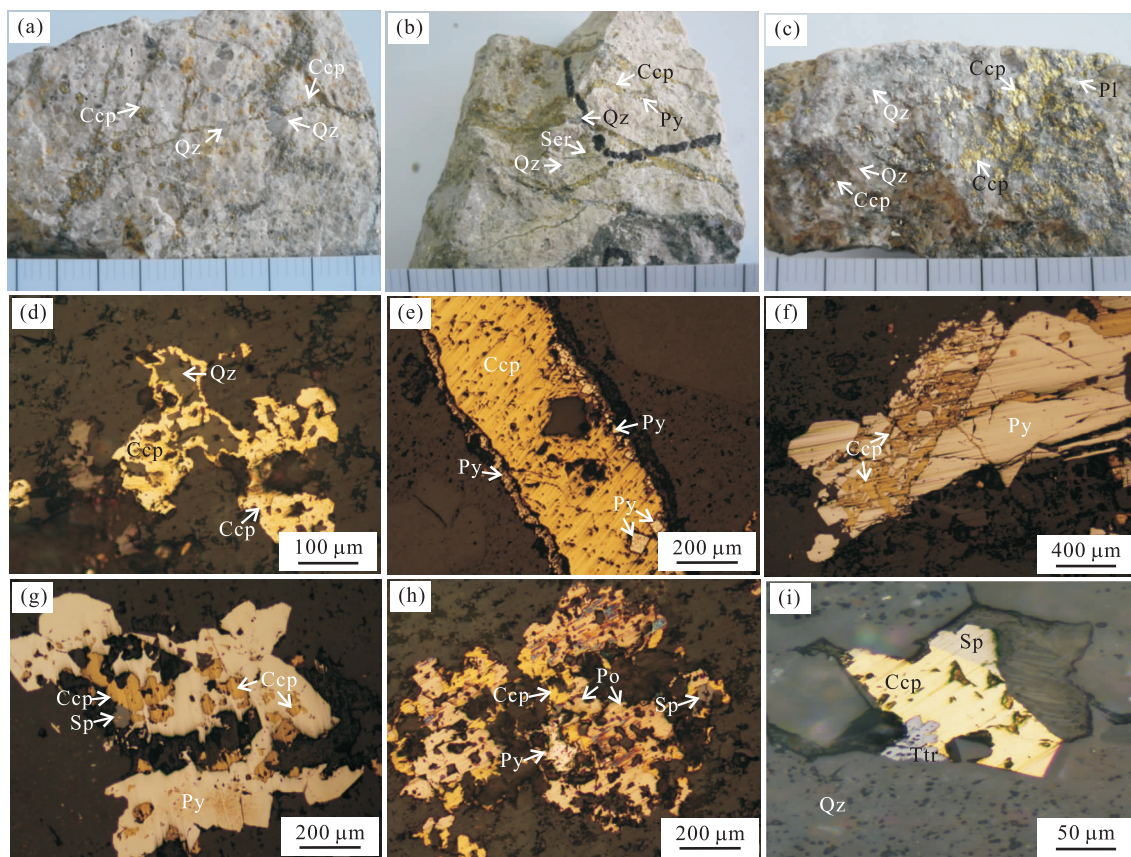


图 5 宝山斑岩铜矿床的矿物组成和结构特征

Fig. 5 Photographs and micrographs showing mineralogy and texture of copper ores from the Baoshan porphyry Cu deposit

a. 交错细脉状黄铜矿脉矿石; b. 网脉状的石英-黄铁矿-黄铜矿脉矿石; c. 稠密浸染状黄铜矿矿石; d. 黄铜矿交代早期石英形成镶边结构; e. 黄铜矿、黄铁矿呈脉状穿插; f. 黄铜矿呈网脉状交代穿插早期形成的黄铁矿; g. 黄铜矿与黄铁矿、闪锌矿密切共生; h. 磁黄铁矿交代黄铜矿形成的交代残余结构, 并与黄铁矿和闪锌矿共生; i. 黝铜矿与黄铜矿、闪锌矿密切共生。Qz. 石英; Ser. 绢云母; Pl. 斜长石; Py. 黄铁矿; Ccp. 黄铜矿; Sp. 闪锌矿; Po. 磁黄铁矿; Ttr. 黝铜矿

交代早期石英形成镶边结构(图 5c 和 5d)。黄铜矿、黄铁矿等金属矿物常与石英构成交错细脉状和网脉状构造, 脉宽一般为 0.1~1.0 cm(图 5a, 5b 和 5e)。

宝山斑岩型铜矿床中金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、磁黄铁矿、黝铜矿等(图 5f~5i)。根据金属矿物的共生关系, 可以分为黄铜矿-黄铁矿-闪锌矿(图 5f~5g)、黄铜矿-磁黄铁矿-黄铁矿-闪锌矿(图 5h)、黄铜矿-黝铜矿-闪锌矿(图 5i)等矿物共生组合。黄铜矿是宝山铜矿床最重要的金属矿物, 常呈他形粒状结构与黄铁矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黝铜矿等共生, 也可穿插交代成矿早期结晶的石英、黄铁矿等矿物, 呈现出交代残余结构(图 5d 和 5f)。黄铁矿常呈半自形-他形粒状结构, 与黄铜矿、磁黄铁矿等密切共生, 且由于后期热液流体的交代作用, 黄铁矿局部呈蠕虫状结构(图 5g 和 5h)。闪锌矿呈他形粒状, 常与黄铜矿形成乳浊状结构、共结边结构等(图 5h 和 5i)。磁黄铁矿常呈浸染状分布, 与

黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿等共生(图 5h)。黝铜矿常呈白色带有蓝色色调, 与黄铜矿共生(图 5i)。

4 实验方法

4.1 锆石 U-Pb 同位素分析

从矿区及外围 3 个斑岩体中各选取一个样品进行锆石分选和 U-Pb 同位素分析。不含矿花岗斑岩体的样品编号分别为 BS1 和 BS2, 含矿花岗斑岩样品编号为 BS3(图 2)。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。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部暴露。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、氙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(氙气+氦气)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, 使激光脉冲频率低至 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(引自 <http://georem.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 Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成.

4.2 锆石 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 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)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 , 激光剥蚀时间约为 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/¹⁷¹Hf=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, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算采用的 ¹⁷⁶Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001), 模式年龄计算中现今的球粒陨石 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.282 772 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.033 2. 亏损地幔 Hf 模式年龄(T_{DM1})计算采用的现今亏损地幔 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.283 25 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.038 4(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 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.015(Griffin *et al.*, 2002)进行计算.

5 分析结果

5.1 锆石 U-Pb 年龄

阴极发光图像显示, 岩体中大部分锆石颗粒具有明显的振荡韵律环带, 与典型岩浆锆石的结构特征一致. 部分颗粒具有继承锆石核, 并在边部存在窄的增生边(图 6). 本次研究主要对环带结构发育的锆石颗粒进行 U-Pb 同位素分析, 分析结果见表 1.

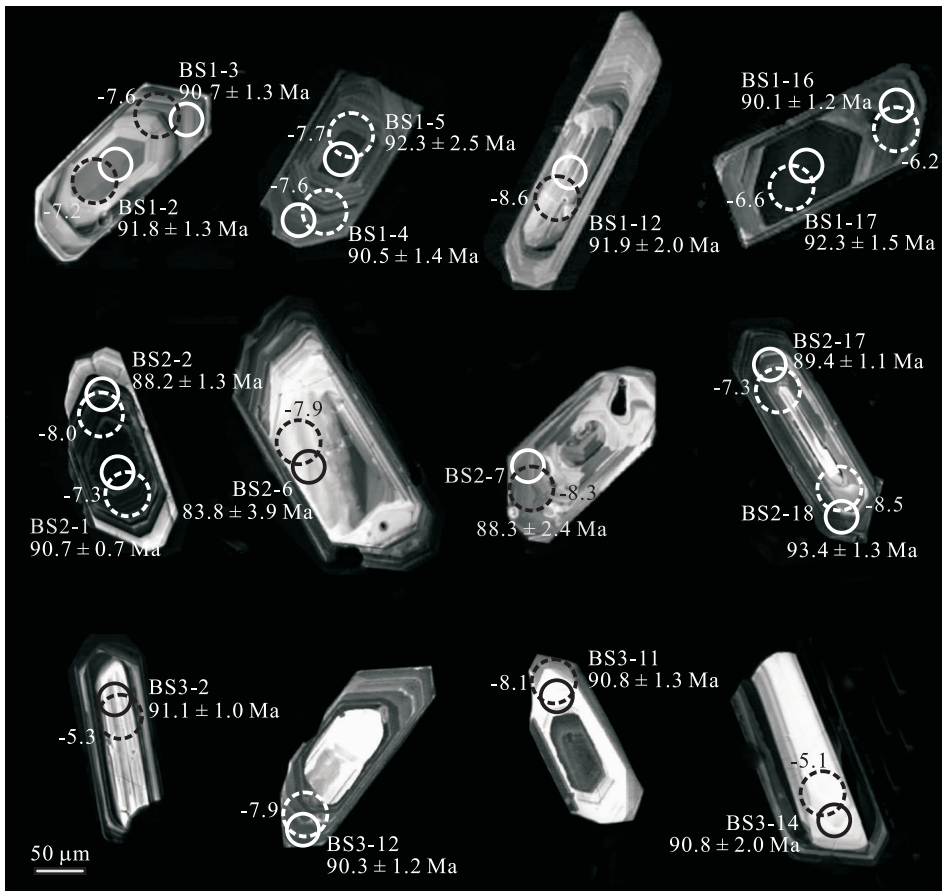


图 6 社山地区花岗斑岩中锆石阴极发光图像

Fig. 6 Representative cathodoluminescence images of zircons for granite porphyry in the Sheshan district

实线圆圈为 U-Pb 同位素分析点位置, 圆圈直径为 32 μm; 虚线圆圈为 Hf 同位素分析点位置, 圆圈直径为 44 μm, 旁侧数据为 ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$ 表观年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

5.1.1 不含矿的花岗斑岩(样品 BS1) 该样品中的锆石多为无色透明长柱状晶体, 粒度多为 50~200 μm, 少数可达 400 μm(图 6a 和 6d). 对 12 个颗粒进行了 18 个点的分析. 锆石的 Th 含量为 322~1 519 μg/g, U 含量为 613~1 826 μg/g, 相应的 Th/U 比值为 0.5~0.8. 一个分析点(BS1-18)偏离谐和线太远而未参与加权平均年龄计算. 其他 17 个点在 ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$ - ${}^{207}\text{Pb}/{}^{235}\text{U}$ 谐和图解上均位于谐和线上或其附近(图 7a), 其 ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 91.3 ± 0.8 Ma(1σ; MSWD=0.56).

5.1.2 不含矿的花岗斑岩(样品 BS2) 锆石多为无色透明长柱状晶体, 粒度为 40~180 μm, 少数可达 300 μm(图 6e~6h). 对 13 个颗粒进行了 18 个点的分析. 锆石 Th 含量为 342~3 183 μg/g, U 含量为 604~27 123 μg/g, 相应的 Th/U 比值为 0.1~0.7. 该样品中普通铅含量较高, 笔者采用 Andersen (2002) 的方法进行同位素比值校正以扣除普通 Pb, 其中由于 BS2-11、BS2-12 和 BS2-13 这 3 个点偏离

谐和线太远而未进行加权年龄计算. BS2-9 分析点中 Pb 含量达 1 393.2 μg/g, ${}^{207}\text{Pb}/{}^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2 440 ± 33 Ma, 表明斑岩岩浆侵位过程中捕获了新太古代末或古元古代初的岩浆锆石. 其他 14 个点在 ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$ - ${}^{207}\text{Pb}/{}^{235}\text{U}$ 谐和图解上均位于谐和线上或其附近(图 7b), 其 ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 90.1 ± 1.0 Ma(1σ; MSWD=1.6).

5.1.3 含矿的隐伏花岗斑岩(样品 BS3) 锆石多为无色透明长柱状晶体, 粒度为 50~200 μm(图 6i~6l). 对 18 个颗粒进行了 18 个点的分析. 锆石 Th 含量为 134~2 027 μg/g, U 含量为 381~7 470 μg/g, 相应的 Th/U 比值为 0.2~0.8(平均值为 0.5). 其中, BS3-1、BS3-7 和 BS3-15 的 ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$ 表观年龄分别为 437.7 ± 6.4 Ma、800.1 ± 10.8 Ma 和 691.4 ± 10.0 Ma. 上述 3 个分析点均位于锆石颗粒核部, 表明其为残留锆石或继承锆石年龄. 其他 15 个分析点在 ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$ - ${}^{207}\text{Pb}/{}^{235}\text{U}$ 谐和图解上均位于谐和线上或其附近(图 7c), 其 ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$ 年龄

表 1 社垌地区花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data for zircons from the granite porphyry in the Shedong area

测试点号	Th (10 ⁻⁶)	U (10 ⁻⁶)	Th/U	207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U		207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ
BS1															
BS1-1	337	613	0.55	0.071 6	0.005 7	0.140 3	0.011 3	0.014 4	0.000 4	975.9	161.1	133.4	10.1	92.3	2.5
BS1-2	493	995	0.50	0.061 1	0.003 6	0.116 7	0.006 2	0.014 3	0.000 2	642.6	129.6	112.1	5.6	91.8	1.3
BS1-3	558	1 099	0.51	0.058 9	0.003 3	0.112 6	0.006 0	0.014 2	0.000 2	564.9	124.1	108.4	5.5	90.7	1.3
BS1-4	583	1 071	0.54	0.059 3	0.004 9	0.111 2	0.007 5	0.014 1	0.000 2	588.9	177.8	107.0	6.9	90.5	1.4
BS1-5	766	946	0.81	0.086 4	0.007 3	0.165 2	0.012 3	0.014 4	0.000 4	1 346.3	164.0	155.3	10.7	92.3	2.5
BS1-6	481	618	0.78	0.078 5	0.006 9	0.157 6	0.013 6	0.014 7	0.000 4	1 159.0	175.2	148.6	12.0	93.8	2.2
BS1-7	806	1 529	0.53	0.048 7	0.002 5	0.093 6	0.004 4	0.014 3	0.000 2	131.6	123.1	90.8	4.1	91.7	1.3
BS1-8	1 003	1 460	0.69	0.055 7	0.003 3	0.105 5	0.006 1	0.013 9	0.000 2	442.6	133.3	101.8	5.6	88.9	1.4
BS1-9	322	644	0.50	0.085 4	0.006 5	0.159 0	0.010 3	0.014 4	0.000 3	1 324.1	147.7	149.8	9.0	92.0	2.2
BS1-10	792	1 322	0.60	0.068 5	0.006 3	0.129 8	0.011 1	0.014 2	0.000 3	883.3	190.0	123.9	9.9	90.7	1.6
BS1-11	349	622	0.56	0.064 3	0.005 1	0.123 8	0.009 4	0.014 4	0.000 3	753.7	166.7	118.5	8.5	91.9	2.0
BS1-12	650	894	0.73	0.070 4	0.006 1	0.135 3	0.011 0	0.014 4	0.000 3	942.6	180.1	128.8	9.9	91.9	2.0
BS1-13	394	705	0.56	0.062 8	0.003 9	0.122 4	0.007 1	0.014 3	0.000 3	701.9	133.3	117.2	6.4	91.7	1.8
BS1-14	885	1 288	0.69	0.047 7	0.002 8	0.093 1	0.005 4	0.014 3	0.000 2	87.1	133.3	90.4	5.0	91.4	1.6
BS1-15	358	657	0.55	0.067 6	0.004 6	0.134 2	0.009 1	0.014 6	0.000 3	857.4	141.5	127.9	8.1	93.4	1.7
BS1-16	701	1 381	0.51	0.048 6	0.002 3	0.092 4	0.004 1	0.014 1	0.000 2	127.9	112.9	89.7	3.8	90.1	1.2
BS1-17	1 519	1 826	0.83	0.050 0	0.003 4	0.098 8	0.006 7	0.014 4	0.000 2	194.5	159.2	95.6	6.2	92.3	1.5
BS1-18	448	801	0.56	0.059 1	0.004 0	0.118 9	0.007 7	0.015 1	0.000 5	572.3	152.8	114.1	7.0	96.7	3.3
BS2															
BS2-1	2 566	27 123	0.09	0.047 4	0.002 7	0.094 1	0.005 3	0.014 2	0.000 1	77.9	120.4	91.3	5.0	90.7	0.7
BS2-2	2 255	8 496	0.27	0.043 3	0.010 0	0.090 7	0.020 0	0.013 8	0.000 2	—	—	88.2	18.6	88.2	1.3
BS2-3	882	1 913	0.46	0.012 0	0.010 8	0.068 0	0.030 3	0.014 6	0.000 3	—	—	66.8	28.9	93.5	1.9
BS2-4	3 183	11 639	0.27	0.033 8	0.012 4	0.153 0	0.044 7	0.013 8	0.000 4	—	—	144.6	39.3	88.3	2.7
BS2-5	1 894	2 894	0.65	0.052 6	0.013 0	0.111 3	0.025 6	0.013 9	0.000 3	322.3	468.5	107.2	23.4	88.7	2.0
BS2-6	1 135	1 688	0.67	0.012 6	0.017 6	0.023 1	0.028 9	0.013 1	0.000 6	—	—	23.2	28.7	83.8	3.9
BS2-7	378	615	0.61	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.013 8	0.000 4	—	—	0.0	0.0	88.3	2.4
BS2-8	2 651	4 314	0.61	0.063 2	0.004 2	0.130 5	0.007 9	0.014 4	0.000 3	716.7	141.5	124.5	7.1	91.9	1.6
BS2-9	465	2 481	0.19	0.158 5	0.003 1	10.232 9	0.233 2	0.465 5	0.007 3	2 439.8	32.7	2 456.1	21.1	2 463.6	31.9

续表 1

测试点号	Th (10 ⁻⁶)	U (10 ⁻⁶)	Th/U	207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U		207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ
BS2-10	1967	10925	0.18	0.0595	0.0127	0.1406	0.0233	0.0141	0.0003	587.1	474.0	133.6	20.8	90.0	1.8
BS2-11	342	604	0.57	0.0459	0.0079	0.1774	0.0302	0.0267	0.0010	—	—	165.8	26.1	169.9	6.1
BS2-12	463	943	0.49	0.0584	0.0067	0.1334	0.0211	0.0160	0.0005	542.6	251.8	127.1	18.9	102.2	3.2
BS2-13	382	607	0.63	0.0606	0.0073	0.1251	0.0146	0.0156	0.0005	633.4	262.9	119.6	13.1	100.0	2.9
BS2-14	2488	14683	0.17	0.0613	0.0054	0.1237	0.0111	0.0140	0.0002	650.0	186.1	118.4	10.1	89.9	1.0
BS2-15	2735	12755	0.21	0.0479	0.0087	0.0933	0.0175	0.0138	0.0002	94.5	381.4	90.6	16.3	88.2	1.2
BS2-16	2475	10765	0.23	0.0696	0.0066	0.1405	0.0140	0.0139	0.0002	918.2	196.3	133.4	12.4	89.1	1.3
BS2-17	3103	23741	0.13	0.0600	0.0088	0.1268	0.0189	0.0140	0.0002	603.4	320.8	121.2	17.0	89.4	1.1
BS2-18	1889	3484	0.54	0.0446	0.0041	0.0925	0.0084	0.0146	0.0002	—	—	89.8	7.8	93.4	1.3
BS3															
BS3-1	590	1044	0.57	0.0579	0.0019	0.5594	0.0182	0.0703	0.0011	527.8	71.1	451.1	11.9	437.7	6.4
BS3-2	1246	3368	0.37	0.0481	0.0019	0.0942	0.0034	0.0142	0.0002	105.6	90.7	91.4	3.1	91.1	1.0
BS3-3	1205	3952	0.30	0.0489	0.0015	0.0955	0.0028	0.0142	0.0001	142.7	67.6	92.6	2.6	90.8	0.9
BS3-4	961	1435	0.67	0.0484	0.0030	0.0931	0.0056	0.0141	0.0002	120.5	137.0	90.4	5.2	90.2	1.1
BS3-5	1595	1955	0.82	0.0493	0.0026	0.0976	0.0053	0.0143	0.0003	161.2	124.1	94.6	4.9	91.4	1.9
BS3-6	742	1019	0.73	0.0614	0.0044	0.1235	0.0093	0.0144	0.0003	653.7	149.1	118.2	8.4	92.3	1.6
BS3-7	138	416	0.33	0.0682	0.0021	1.2347	0.0384	0.1321	0.0019	875.9	64.8	816.5	17.5	800.1	10.8
BS3-8	551	2072	0.27	0.0490	0.0020	0.0979	0.0041	0.0144	0.0002	150.1	93.5	94.8	3.8	92.1	1.0
BS3-9	467	889	0.53	0.0557	0.0031	0.1052	0.0054	0.0142	0.0002	438.9	122.2	101.6	5.0	90.9	1.5
BS3-10	782	3053	0.26	0.0522	0.0019	0.1035	0.0038	0.0144	0.0002	294.5	89.8	100.0	3.5	92.0	1.2
BS3-11	602	2071	0.29	0.0505	0.0024	0.0986	0.0047	0.0142	0.0002	216.7	111.1	95.5	4.3	90.8	1.3
BS3-12	1442	7470	0.19	0.0488	0.0015	0.0956	0.0030	0.0141	0.0002	139.0	74.1	92.7	2.7	90.3	1.2
BS3-13	1089	3337	0.33	0.0453	0.0016	0.0878	0.0031	0.0140	0.0002	—	—	85.5	2.9	89.4	1.2
BS3-14	204	381	0.53	0.0946	0.0067	0.1731	0.0108	0.0142	0.0003	1520.7	134.4	162.1	9.4	90.8	2.0
BS3-15	876	1522	0.58	0.0800	0.0017	1.2618	0.0317	0.1132	0.0017	1198.2	42.6	828.7	14.2	691.4	10.0
BS3-16	941	1412	0.67	0.0482	0.0030	0.0939	0.0058	0.0142	0.0002	109.4	144.4	91.1	5.4	91.2	1.2
BS3-17	356	604	0.59	0.0591	0.0036	0.1126	0.0065	0.0144	0.0003	568.6	131.5	108.4	5.9	92.2	1.9
BS3-18	2027	2789	0.73	0.0484	0.0022	0.0957	0.0043	0.0143	0.0002	116.8	83.3	92.8	4.0	91.8	1.1

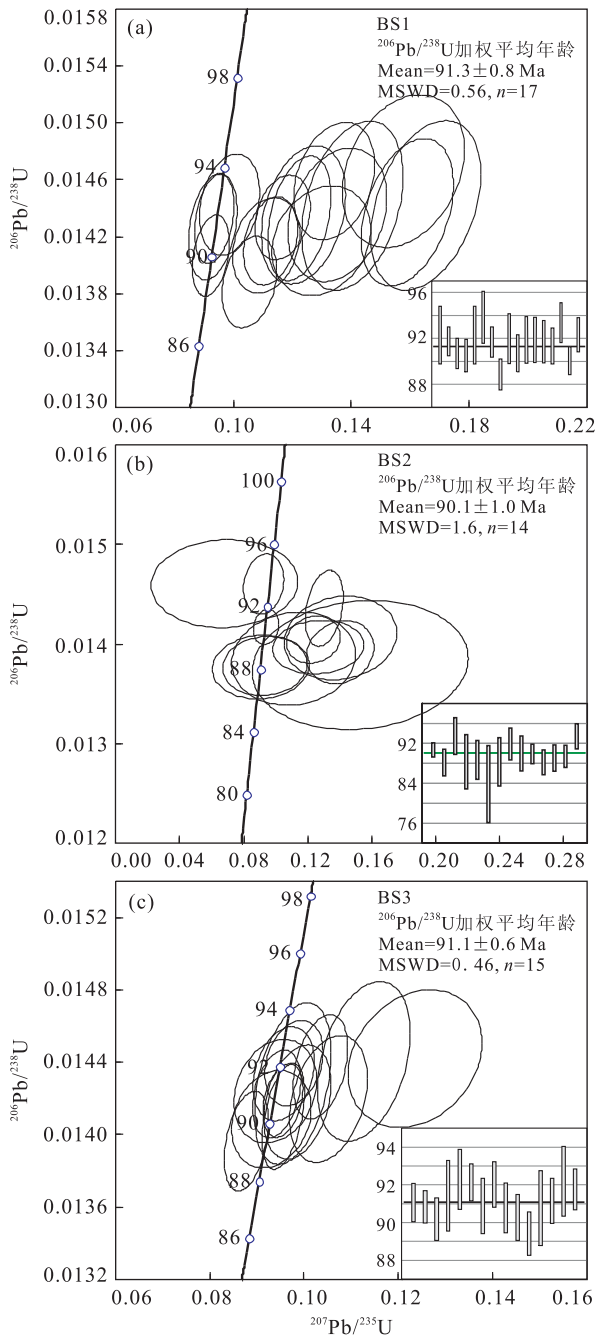


图 7 社垌地区花岗斑岩锆石 U-Pb 谱和曲线

Fig. 7 Concordia relationships of LA-ICPMS zircons U-Pb data from granite porphyry in the Shedong district

的加权平均值为 91.1 ± 0.6 Ma (1σ ; MSWD = 0.46).

5.2 锆石 Hf 同位素

花岗斑岩的锆石 Hf 同位素分析结果列于表 2. 所有锆石均具有较低的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$, 其中 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值绝大多数小于 0.002, 表明锆石结晶后仅有少量放射性成因的 Hf 积累 (Amelin *et al.*, 1999).

5.2.1 不含矿的花岗斑岩(样品 BS1) 对花岗斑岩样品(BS1)共进行了 12 个点的 Lu-Hf 同位素分析. 12 个锆石点的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.018 353~0.056 052, 平均值为 0.035 841, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000 439~0.001 249, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 472~0.282 543. 计算的 ϵ_{Hf} (91.3 Ma) 为 $-8.6 \sim -6.1$, 平均值为 -7.2 (图 8a), 单阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM1}) 集中于 1 004~1 092 Ma, 两阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM2}) 集中于 1 262~1 389 Ma, 平均值为 $1 317.7 \pm 41$ Ma (图 8b).

5.2.2 不含矿的花岗斑岩(样品 BS2) 对花岗斑岩样品(BS2)共进行了 13 个点的 Lu-Hf 同位素分析. 其中 12 个点为新生岩浆锆石, 另 1 个点(BS2-9)为继承锆石核(其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2 440 \pm 33$ Ma). 新生岩浆锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.025 658~0.167 285, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000 630~0.003 590, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 471~0.282 515, 计算的 ϵ_{Hf} (90.1 Ma) 为 $-8.74 \sim -7.32$, 平均值为 -8.05 (图 8c). 计算的单阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM1}) 集中于 1 058~1 146 Ma, 两阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM2}) 集中于 1 321~1 394 Ma, 平均值为 $1 358.7 \pm 30$ Ma (图 8d). 继承锆石(BS2-9)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.280 971, 对应的 ϵ_{Hf} (2 440 Ma) 为 -11.6 , 单阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM1}) 为 $3 215 \pm 16$ Ma, 两阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM2}) 为 $3 421 \pm 26$ Ma.

5.2.3 含矿的隐伏花岗斑岩(样品 BS3) 对隐伏花岗斑岩样品(BS3)共进行了 16 个点的 Lu-Hf 同位素分析, 其中 15 个点为新生岩浆锆石, 另 1 个点(BS3-1)为继承锆石核(其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 437.7 ± 6.4 Ma). 新生岩浆锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.027 288~0.095 609, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000 636~0.002 263, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 488~0.282 573. 计算的 ϵ_{Hf} (91.1 Ma) 为 $-8.08 \sim -5.13$, 平均值为 -6.97 (图 8e), 单阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM1}) 集中于 978~1 080 Ma, 两阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM2}) 集中于 1 210~1 361 Ma, 平均年龄为 $1 304.6 \pm 38.5$ Ma (图 8f). 继承锆石颗粒(BS3-1)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 422, 对应的 ϵ_{Hf} (437.7 Ma) 为 -3.0 , 单阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM1}) 为 $1 170 \pm 21$ Ma, 两阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM2}) 为 $1 381 \pm 34$ Ma.

表 2 杜垌地区花岗岩中锆石 LA-MC-ICP-MS HF 同位素分析结果

Table 2 Hf isotope analyses of zircons from the granite porphyry in the Shedong area

测试点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	年龄(Ma)	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2s$	$T_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$\pm 2s$	U-Pb 分析点
BS1														
BS1-1	0.029 585 206	0.000 681 074	0.282 511 663	0.282 511 663	0.000 010	91.8	-9.2	-7.2	0.3	1.039	1.319	-0.98	44	2
BS1-2	0.018 353 393	0.000 439 082	0.282 503 085	0.282 503 085	0.000 010	90.7	-9.5	-7.6	0.3	1.045	1.334	-0.99	43	3
BS1-3	0.026 595 537	0.000 613 363	0.282 502 159	0.282 502 159	0.000 009	90.5	-9.5	-7.6	0.3	1.051	1.336	-0.98	42	4
BS1-4	0.030 467 614	0.000 698 217	0.282 499 691	0.282 499 691	0.000 010	92.3	-9.6	-7.7	0.3	1.057	1.340	-0.98	43	5
BS1-5	0.046 862 822	0.001 048 963	0.282 543 741	0.282 543 741	0.000 008	91.7	-8.1	-6.1	0.3	1.004	1.262	-0.97	38	7
BS1-6	0.052 766 262	0.001 174 678	0.282 540 928	0.282 540 928	0.000 009	92.0	-8.2	-6.2	0.3	1.012	1.267	-0.96	39	9
BS1-7	0.029 535 598	0.000 685 796	0.282 499 960	0.282 499 960	0.000 009	90.7	-9.6	-7.7	0.3	1.056	1.340	-0.98	42	10
BS1-8	0.030 360 205	0.000 710 995	0.282 526 147	0.282 526 147	0.000 009	91.9	-8.7	-6.7	0.3	1.020	1.293	-0.98	41	11
BS1-9	0.026 972 516	0.000 625 810	0.282 472 657	0.282 472 657	0.000 009	91.9	-10.6	-8.6	0.3	1.092	1.389	-0.98	41	12
BS1-10	0.043 962 504	0.001 021 778	0.282 480 508	0.282 480 508	0.000 009	91.4	-10.3	-8.4	0.3	1.093	1.376	-0.97	40	14
BS1-11	0.056 051 719	0.001 249 261	0.282 542 123	0.282 542 123	0.000 010	90.1	-8.1	-6.2	0.4	1.012	1.266	-0.96	44	16
BS1-12	0.044 915 100	0.001 002 886	0.282 529 647	0.282 529 647	0.000 008	92.3	-8.6	-6.6	0.3	1.023	1.287	-0.97	37	17
BS2														
BS2-1	0.029 504 654	0.000 674 539	0.282 511 666	0.282 511 666	0.000 009	90.7	-9.2	-7.3	0.3	1.039	1.319	-0.98	39	1
BS2-2	0.167 285 140	0.003 589 543	0.282 498 292	0.282 498 292	0.000 008	88.2	-9.7	-8.0	0.3	1.146	1.352	-0.89	36	2
BS2-3	0.138 222 098	0.002 863 177	0.282 500 751	0.282 500 751	0.000 007	93.5	-9.6	-7.7	0.3	1.119	1.344	-0.91	33	3
BS2-4	0.037 655 113	0.000 902 188	0.282 470 560	0.282 470 560	0.000 005	88.3	-10.7	-8.8	0.2	1.103	1.395	-0.97	23	4
BS2-5	0.027 330 229	0.000 663 376	0.282 494 248	0.282 494 248	0.000 006	88.7	-9.8	-7.9	0.2	1.063	1.351	-0.98	29	5
BS2-6	0.025 658 337	0.000 629 880	0.282 497 614	0.282 497 614	0.000 007	88.8	-9.7	-7.9	0.2	1.058	1.346	-0.98	31	6
BS2-7	0.048 157 929	0.001 088 349	0.282 484 063	0.282 484 063	0.000 006	88.3	-10.2	-8.3	0.2	1.090	1.371	-0.97	29	7
BS2-8	0.027 024 475	0.000 682 325	0.282 477 141	0.282 477 141	0.000 006	91.9	-10.4	-8.5	0.2	1.087	1.381	-0.98	28	8
BS2-9	0.069 965 101	0.001 519 036	0.280 971 270	0.280 971 270	0.000 006	2 463.6	-63.7	-11.1	0.2	3.215	3.415	-0.95	26	9
BS2-10	0.137 161 931	0.002 965 278	0.282 497 768	0.282 497 768	0.000 006	89.9	-9.7	-7.9	0.2	1.126	1.351	-0.91	28	14
BS2-11	0.080 257 895	0.001 584 024	0.282 495 144	0.282 495 144	0.000 008	88.2	-9.8	-8.0	0.3	1.088	1.352	-0.95	34	15
BS2-12	0.157 061 829	0.003 447 804	0.282 514 917	0.282 514 917	0.000 007	89.4	-9.1	-7.3	0.3	1.116	1.321	-0.90	32	17
BS2-13	0.083 185 298	0.001 713 157	0.282 477 905	0.282 477 905	0.000 006	93.4	-10.4	-8.5	0.2	1.117	1.382	-0.95	26	18
BS3														
BS3-1	0.038 334 603	0.000 874 628	0.282 422 136	0.282 422 136	0.000 008	437.7	-12.4	-3.0	0.3	1.170	1.381	-0.97	34	1
BS3-2	0.095 609 284	0.002 248 220	0.282 569 603	0.282 569 603	0.000 008	91.1	-7.2	-5.3	0.3	1.000	1.219	-0.93	37	2
BS3-3	0.095 243 013	0.002 262 837	0.282 560 071	0.282 560 071	0.000 008	90.8	-7.5	-5.6	0.3	1.014	1.236	-0.93	37	3
BS3-4	0.040 223 513	0.000 949 194	0.282 500 233	0.282 500 233	0.000 008	90.2	-9.6	-7.7	0.3	1.063	1.341	-0.97	34	4
BS3-5	0.032 618 561	0.000 782 086	0.282 516 584	0.282 516 584	0.000 007	91.4	-9.0	-7.1	0.2	1.035	1.310	-0.98	31	5
BS3-6	0.080 545 969	0.001 922 978	0.282 533 529	0.282 533 529	0.000 009	92.3	-8.4	-6.5	0.3	1.043	1.283	-0.94	39	6
BS3-7	0.042 903 161	0.001 025 361	0.282 521 673	0.282 521 673	0.000 008	92.1	-8.9	-6.9	0.3	1.035	1.302	-0.97	35	8
BS3-8	0.037 522 736	0.000 876 529	0.282 514 342	0.282 514 342	0.000 009	90.9	-9.1	-7.2	0.3	1.041	1.315	-0.97	38	9
BS3-9	0.029 839 358	0.000 710 579	0.282 512 016	0.282 512 016	0.000 009	92.0	-9.2	-7.2	0.3	1.040	1.318	-0.98	38	10
BS3-10	0.043 303 571	0.000 974 822	0.282 488 628	0.282 488 628	0.000 010	90.8	-10.0	-8.1	0.3	1.080	1.362	-0.97	44	11
BS3-11	0.027 287 773	0.000 635 586	0.282 493 117	0.282 493 117	0.000 008	90.3	-9.9	-7.9	0.3	1.064	1.353	-0.98	37	12
BS3-12	0.031 453 080	0.000 743 271	0.282 488 159	0.282 488 159	0.000 008	89.4	-10.0	-8.1	0.3	1.074	1.362	-0.98	37	13
BS3-13	0.071 859 173	0.001 627 517	0.282 573 233	0.282 573 233	0.000 009	90.8	-7.0	-5.1	0.3	0.978	1.211	-0.95	41	14
BS3-14	0.044 186 948	0.001 033 210	0.282 497 419	0.282 497 419	0.000 010	91.2	-9.7	-7.8	0.4	1.069	1.346	-0.97	46	16
BS3-15	0.041 845 850	0.000 971 087	0.282 515 080	0.282 515 080	0.000 009	92.2	-9.1	-7.1	0.3	1.043	1.313	-0.97	41	17
BS3-16	0.039 798 846	0.000 905 322	0.282 497 919	0.282 497 919	0.000 010	91.8	-9.7	-7.7	0.4	1.065	1.344	-0.97	45	18

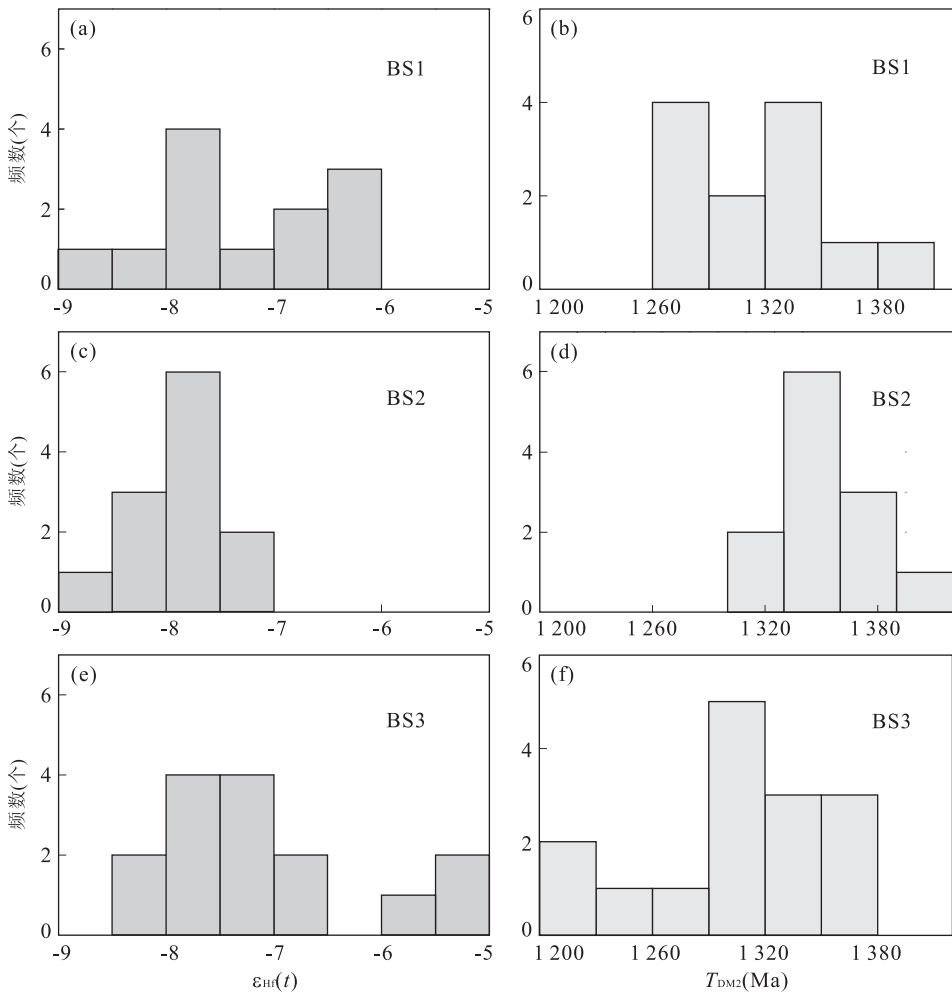


图 8 社垌地区燕山晚期花岗斑岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和两阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 直方图

Fig. 8 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and two-stage Hf model ages (T_{DM2}) of zircons from granite porphyry stocks in the Shedong district

6 讨论

6.1 晚白垩世岩浆活动

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示,宝山斑岩铜矿床的含矿花岗斑岩体侵位时代为 91.1 ± 0.6 Ma. 另外两个相邻的花岗斑岩体侵位时代分别为 91.3 ± 0.8 Ma 和 90.1 ± 1.0 Ma, 与含矿斑岩的侵位时代在误差范围内完全一致. 可见社山地区除加里东期的岩浆活动以外(陈懋弘等, 2011; 王新宇等, 2013; 李巍等, 2015), 还存在晚白垩世早期(约 91 Ma)的花岗斑岩岩浆活动.

实际上, 华南东南缘地区晚白垩世岩浆作用活动强烈, 岩石类型包括中酸性岩浆岩、基性岩、I 型和 A 型花岗岩等(王德滋和沈渭洲, 2003). 其中, 华南东南缘闽浙沿海、琼南地区不同类型的岩浆岩侵位时间集中在 $80 \sim 101$ Ma (Martin *et al.*, 1994; 王强等, 2005). 如福建北东沿海地区的南镇、大层山、

三沙、大京等高分异 I 型花岗岩的年龄集中在 $91 \sim 96$ Ma, 与其空间上紧密相伴的基性岩脉侵位时间为 $76 \sim 92$ Ma (邱检生等, 2008). 再如, 浙闽沿海小雄破火山正长斑岩和石牛山破火山正长花岗斑岩的年龄分别为 87.9 ± 1.2 Ma 和 93.8 ± 1.3 Ma; 浙江桃花岛、瑶坑和大和山等碱性花岗岩和普陀山晶洞花岗岩的侵位年龄为 $86 \sim 94$ Ma (邱检生等, 1999; 王强等, 2005; 肖娥等, 2007). 琼南地区的雅亮、千家等花岗岩的成岩年龄为 $90.1 \sim 101.3$ Ma, 叉河、三亚等地区的基性岩墙群的成岩年龄为 93 Ma 左右(唐立梅等, 2010). 另外, 在华南腹地滇东南—桂西地区晚白垩世岩浆作用也较发育. 蔡明海等(2006)对广西大厂锡矿田不同类型中—酸性侵入岩进行了系统的定年研究, 获得龙箱盖含斑黑云母花岗岩、斑状花岗岩、石英闪长玢岩脉和花岗斑岩脉的成岩年龄分别为 93 ± 1 Ma、 91 ± 1 Ma、 91 ± 1 Ma 和 91 ± 1 Ma. 云南个旧地区的神仙水、白沙冲、龙岔河等花岗岩及

薄竹山、老君山等地区花岗岩和花岗斑岩的侵位年龄集中在 83~93 Ma(程彦博等, 2008, 2009; Cheng *et al.*, 2013). 桂西昆仑关花岗岩和车河花岗岩的形成时代分别为 93±1 Ma(李水如等, 2008; 谭俊等, 2008) 和 86.3±0.7 Ma(罗金海等, 2009).

综上所述,晚白垩世(80~100 Ma)是华南东南部晚中生代重要的构造—岩浆事件. 该期侵入岩体出露地表的面积均不大,可能反映了剥蚀深度较浅,笔者推测深部存在相关的大岩基. 已有大量研究表明,华南地区在燕山晚期处于强烈的张性构造环境,发育有广泛的 A 型花岗岩、碱性岩、双峰式岩浆岩(同时代的中酸性及基性岩浆岩)及一系列的伸展断陷盆地(Li, 2000; 杨振等, 2014). 因此,笔者认为区内广泛的燕山晚期岩浆作用是华南地区晚白垩世岩石圈大规模伸展作用的响应(Gilder *et al.*, 1996; 王强等, 2005; Zhou *et al.*, 2006).

6.2 晚白垩世成矿作用及其意义

斑岩型矿床的成岩时间与成矿时代在误差范围内基本相近,因此可通过含矿斑岩的结晶年龄来间接限定矿床的形成时代(侯增谦, 2004; Cooke *et al.*, 2005; Lang *et al.*, 2013). 如冈底斯成矿带斑岩型铜(钼)矿床中含矿斑岩的锆石 U-Pb 年龄主要集中在 13~17 Ma, 辉钼矿的 Re-Os 年龄为 14~16 Ma(王立强, 2013), 成岩成矿年龄与侯增谦等(2012)的研究结果基本一致. 最近 Zhou *et al.* (2012a)获得德兴铜矿床富家坞、铜厂矿区内的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 170.4±1.8 Ma~172.3±2.3 Ma, 与含矿斑岩锆石 U-Pb 年龄(170.16±0.88 Ma~172.5±0.5 Ma)在误差范围内完全相近(Wang *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2012), 显示其成岩成矿作用均形成于中侏罗世早期. 基于本文获得的含矿花岗岩体锆石 U-Pb 定年结果,笔者认为大瑶山地区宝山斑岩铜矿床形成于晚白垩世(91 Ma 左右).

越来越多的数据显示,钦杭成矿带西南侧的大瑶山及其邻区广泛发育有与晚白垩世岩浆岩(80~100 Ma)有关的钨—钼—铜(金)矿床. 李水如等(2008)获得位于大瑶山西南侧的广西大明山钨矿床中辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 95.4±1.0 Ma; 马岭钨矿床中辉钼矿 Re-Os 年龄与白云母³⁹Ar/⁴⁰Ar 坪年龄集中在 95.0~98.0 Ma(王登红等, 2010); 大明山王社斑岩 W-Mo-(Cu)矿床中的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 93.8±4.6 Ma(蔺志永等, 2008), 与成矿有关的黑云母花岗岩的年龄(93±1 Ma)一致

(李水如等, 2008). 广西龙头山金矿黄铁矿化斑岩的侵位年龄为 96.1±3.0~100.3±1.4 Ma(陈富文等, 2008; 段瑞春等, 2011), 与区内邻近的平天山侵入岩体年龄(96.2±0.4 Ma)相同. 结合大瑶山地区宝山斑岩铜矿床晚白垩世的成岩成矿作用,笔者认为区内存在较广泛的燕山晚期岩浆活动及成矿作用.

华南地区燕山晚期 W-Sn-Cu-Au 多金属成矿作用在华南东南沿海、华南西缘滇桂等地区均有广泛分布. 其中,华南西缘滇桂地区 W-Sn 矿床的成矿时代集中在晚白垩世,与区内不同类型岩浆岩的侵位年龄基本一致. 王登红等(2004)获得广西大厂锡多金属矿床中的透长石和石英流体包裹体的³⁹Ar/⁴⁰Ar坪年龄分别为 91.4±2.9 Ma 和 94.5±0.3~94.6±0.5 Ma. Cheng *et al.* (2013)获得云南个旧地区老厂、卡房、马拉格等 W-Sn 矿田中的绢云母、金云母³⁹Ar/⁴⁰Ar坪年龄为 77.4±0.6~95.3±0.7 Ma, 与卡房矿床中辉钼矿 Re-Os 年龄(83.4±2.1 Ma)一致(杨宗喜等, 2008). 东南沿海地区众多浅成低温热液型铜—金—银等矿床的成矿时代也集中在 100 Ma 左右(毛景文等, 2008). 值得注意的是,燕山晚期的叠加成矿作用在华南地区也较为广泛. 如南岭钨锡成矿带内的珊瑚 W-Sn 矿床中白云母³⁹Ar/⁴⁰Ar坪年龄为 100.8~102.0 Ma. 德兴斑岩铜矿是钦杭成矿带最大的铜矿床,其成矿时代为 170~172 Ma(Wang *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2012a), 但最近 Zhou *et al.* (2012b)通过德兴斑岩铜矿床含矿石英脉中热液锆石的 U-Pb 定年发现,德兴矿区存在白垩世时期(100.9±3.5~106.6±0.9 Ma)的叠加成矿作用.

因此,笔者认为华南地区存在强烈的晚白垩世(80~100 Ma)成岩成矿作用,有关的侵入岩、W-Mo-Cu-Au 矿床等遍布华南大部分地区,且主要集中在华南沿海大陆边缘,其腹部地区也有分布(图 9),如大瑶山地区,这对区内寻找燕山晚期与岩浆作用密切相关的成矿作用具有一定的指示意义.

6.3 钦杭成矿带两期斑岩铜矿成矿作用的时空分布及成矿差异

钦杭结合带及其两侧是华南地区重要的 Cu-Au-Pb-Zn-Ag 和 W-Sn-Mo 多金属成矿带,广泛发育一批与晚侏罗世花岗岩有关的钨—锡多金属矿床、中晚侏罗世斑岩—矽卡岩—热液脉状铜多金属矿床、白垩纪与次火山活动有关的浅成低温热液型金—银—铅—锌矿床等(Lu *et al.*, 2003; 杨明桂

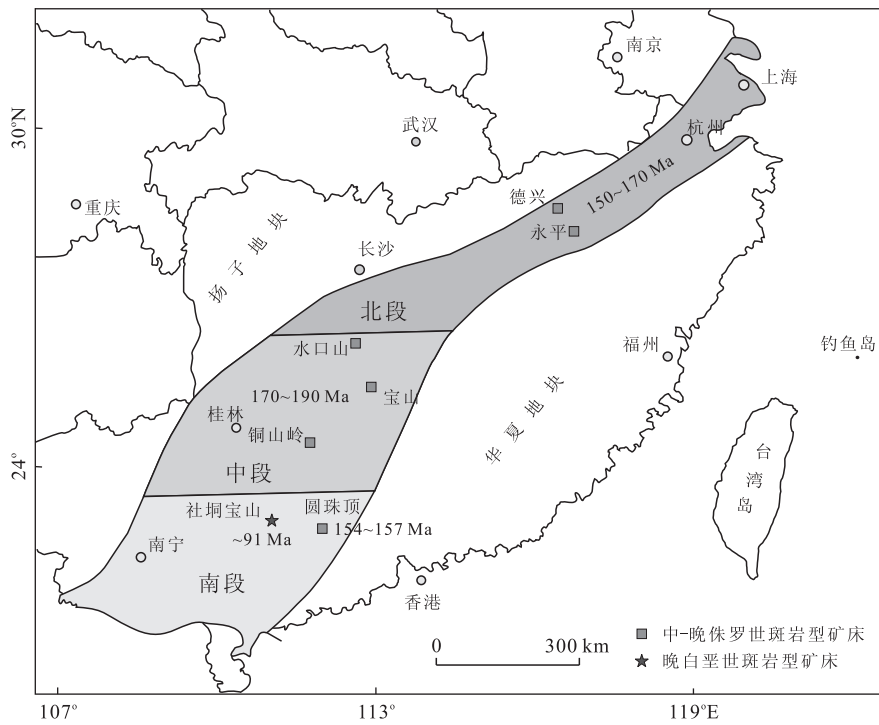


图 10 钦杭成矿带中一晚侏罗世和晚白垩世斑岩铜矿床的时空分布特征

Fig. 10 The spatial and temporal distribution of the Middle-Late Jurassic and the late Cretaceous porphyry copper deposits in the Qinhang metallogenic belt

据周永章等(2012)

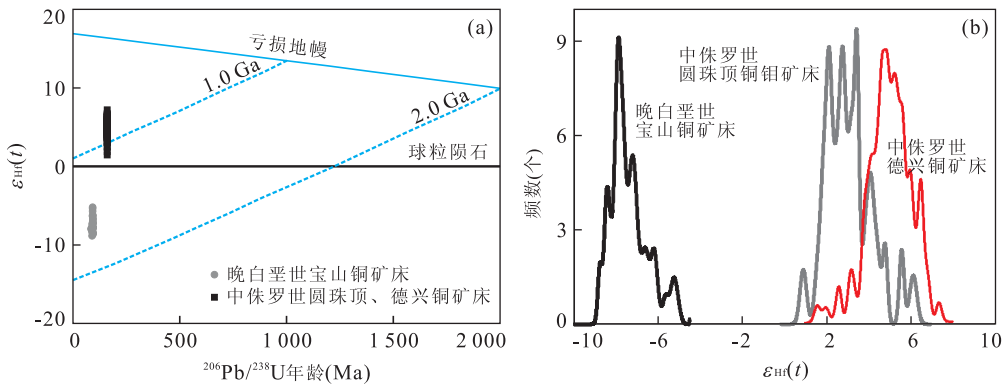


图 11 宝山、德兴和圆珠顶斑岩矿床含矿花岗岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解(a)和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 频谱图(b)

Fig. 11 Plot of zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values versus U-Pb ages (a) and the diagram of probability distribution of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (b) for granite porphyry samples from Baoshan, Dexing and Yuanzhuding porphyry deposits

7 结论

高精度 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 钦杭成矿带西南缘大瑶山地区花岗斑岩的形成时间及斑岩铜矿的成矿时间在 91 Ma 左右(晚白垩世早期), 指示华南腹地(钦杭成矿带西南缘)存在晚白垩世岩浆作用及与之有关的一期斑岩铜成矿事件. 宝山斑岩铜矿床的花岗斑岩中岩浆锆石的 Hf 同位素组成特征暗示含矿斑岩体的成因可能与中元古代地

壳物质的部分熔融有关. 结合区内中一晚侏罗世(180~155 Ma)斑岩铜矿床的研究成果, 笔者认为钦杭成矿带存在中晚侏罗世和晚白垩世两期斑岩铜成矿作用. 钦杭带西南侧大瑶山地区及其邻区可能广泛发育有与燕山晚期岩浆岩(80~100 Ma)有关的钨-钼-铜(金)矿床, 该期斑岩铜矿床的成矿作用可能与华南板块边缘晚白垩纪陆内后碰撞伸展构造背景有关.

References

- Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., et al., 1999. Nature of the Earth's Earliest Crust from Hafnium Isotopes in Single Detrital Zircons. *Nature*, 399(6733): 252—255. doi: 10. 1038/20426
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1—2): 59—79. doi: 10. 1016/S0009—2541(02)00195—X
- Cai, M. H., He, L. Q., Liu, G. Q., et al., 2006. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Intrusive Rocks in the Dachang Tin-Polymetallic Ore Field, Guangxi and Their Geological Significance. *Geological Review*, 52(3): 409—414 (in Chinese with English abstract).
- Cai, M. H., Meng, X. J., Liu, G. Q., 2002. Studies of Mineralogical Epoch of Gold Mineralization Belt in Dayaoshan Area. *Mineral Deposits*, 21(Suppl.): 945—948 (in Chinese).
- 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, F. W., Li, H. Q., Wang, D. H., et al., 2012. Geological Characteristics and Diagenetic-Metallogenic Chronological Study of the Yuanzhuding Porphyry Cu-Mo Deposit, Western Guangdong Province. *Acta Geologica Sinica*, 86(8): 1298—1305 (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).
- Cheng, Y. B., Mao, J. W., Chang, Z. S., et al., 2013. The Origin of the World Class Tin-Polymetallic Deposits in the Gejiu District, SW China: Constraints from Metal Zoning Characteristics and ^{40}Ar - ^{39}Ar Geochronology. *Ore Geology Reviews*, 53(1): 50—62. doi: 10. 1016/j. oregeorev. 2012. 12. 008
- Cheng, Y. B., Mao, J. W., Xie, G. Q., et al., 2008. Petrogenesis of the Laochang-Kafang Granite in the Gejiu Area, Yunnan Province: Constraints from Geochemistry and Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1478—1493 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y. B., Mao, J. W., Xie, G. Q., et al., 2009. Zircon U-Pb Dating of Granites in Gejiu Superlarge Tin Polymetallic Orefield and Its Significance. *Mineral Deposits*, 28(3): 297—312 (in Chinese with English abstract).
- Chu, K. L., Mao, J. W., Chen, M. H., et al., 2013. Source of Metallogenic Materials and Ore-Forming Fluids, and Metallogenic Mechanism of the Yuanzhuding Porphyry Cu-Mo Deposit, Western Guangdong Province, South China. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 115—125 (in Chinese with English abstract).
- Cooke, D. R., Hollings, P., Walshe, J. L., 2005. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls. *Economic Geology*, 100(5): 801—818. doi: 10. 2113/gsecongeo. 100. 5. 801
- 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).
- Ding, X., Jiang, S. Y., Ni, P., et al., 2005. Zircon SIMS U-Pb Geochronology of Host Granitoids in Wushan and Yongping Copper Deposits, Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 383—389 (in Chinese with English abstract).
- Duan, R. C., Ling, W. L., Li, Q., et al., 2011. Correlations of the Late 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).
- Glaser, S. A., Coe, R. S., Zhao, X., et al., 1996. Isotopic and Paleomagnetic Constraints on the Mesozoic Tectonic Evolution of South China. *Journal of Geophysical Research*, 101(B7): 16137—16154. doi: 10. 1029/96JB00662
- 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
- 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. 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
- Hou, Z. Q., 2004. Porphyry Cu-Mo-Au Deposits; Some New Insights and Advances. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 131-144 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Pan, X. F., Li, Q. Y., et al., 2013. The Giant Dexing Porphyry Cu-Mo-Au Deposit in East China; Product of Melting of Juvenile Lower Crust in an Intracontinental Setting. *Mineralium Deposita*, 48(8): 1019-1045.
- Hou, Z. Q., Zheng, Y. C., Yang, Z. M., et al., 2012. Metallogenic of Continental Collision Setting; Part I. Gangdese Cenozoic Porphyry Cu-Mo Systems in Tibet. *Mineral Deposits*, 31(4): 647-670 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. Q., Zhou, G. F., Peng, S. B., et al., 2012. Chronology and Geochemical Characteristics of Quartz Monzonite (Porphyry) in the Dali Copper-Molybdenum Deposit and Its Geological Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(1): 23-37 (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(8): 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(9): 1391-1399. doi: 10.1039/C2JA30078H
- 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).
- Lang, J. R., Gregory, M. J., Rebagliati, C. M., et al., 2013. Geology and Magmatic-Hydrothermal Evolution of the Giant Pebble Porphyry Copper-Gold-Molybdenum Deposit, Southwest Alaska. *Economic Geology*, 108(3): 437-462. doi: 10.2113/econgeo.108.3.437
- 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, S. R., Wang, D. H., Liang, T., et al., 2008. Metallogenic Epochs of the Damingshan Tungsten Deposit in Guangxi and Its Prospecting Potential. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 873-879 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Bi, S. J., Yang, Z., et al., 2015. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Characterization of the Sheshan Granodiorite in the Southern Edge of the Dayaoshan, Guidong: Constraints on the Caledonian Diagenesis and Mineralization. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(1): 17-33 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. F., Watanabe Y., Hua, R. M., et al., 2008. Mesozoic Cu-Mo-W-Sn Mineralization and Ridge/Triple Subduction in South China. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 625-640 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., 2000. Cretaceous Magmatism and Lithospheric Extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293-305. doi: 10.1016/S1367-9120(99)00060-7
- Liang, J., Zhou, Y. Z., Li, H. Z., et al., 2012. Geological Characteristics and Genesis of Porphyry Copper Deposits in Qinzhou-Hangzhou Suture Zone, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3361-3372 (in Chinese with English abstract).
- Lin, Z. Y., Wang, D. H., Li, S. R., 2008. Re-Os Isotopic Age of Molybdenite from the Wangshe Copper-Tungsten Deposit in Guangxi Province and Their Implications. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1565-1571 (in Chinese with English abstract).
- 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, X., Fan, H. R., Santosh, M., et al., 2012. Remelting of Neoproterozoic Relict Volcanic Arcs in the Middle Jurassic: Implication for the Formation of the Dexing Porphyry Copper Deposit, Southeastern China. *Lithos*, 150(Suppl.): 85-100. doi: 10.1016/j.lithos.

2012. 05. 018

- 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, Z. L., Tang, Z. X., Dong, X. Y., et al., 2013. Geological Characteristics and Prospecting Direction of Porphyry Deposits in Baoshan Mining Area. *Mineral Resources and Geology*, 27(3): 204-210 (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.
- Lu, Y. F., Ma, L. Y., Qu, W. J., et al., 2006. U-Pb and Re-Os Isotope Geochronology of Baoshan Cu-Mo Polymetallic Ore Deposit in Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2483-2492 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. Users Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, 4(1): 1-71.
- Luo, J. H., Che, Z. C., Guo, A. L., et al., 2009. Late Cretaceous Lithospheric Extension in the Nandan-Hechi Tectonic Zone of Northern Guangxi Province and Its Influence on Hydrocarbon Accumulation Conditions. *Oil & Gas Geology*, 30(5): 619-625 (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. *Mineralium Deposita*, 48(3): 267-294. doi:10.1007/s00126-012-0446-z
- 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., 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 Geology Reviews*, 43(1): 203-216. doi:10.1016/j.oregeorev.2011.08.005
- Martin, H., Bonin, B., Capdevila, R., et al., 1994. The Kuqi Peralkaline Granitic Complex (SE China)—Petrology and Geochemistry. *Journal of Petrology*, 35(4): 983-1015.
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., McInnes, B. I. A., 1999. Geochemistry and Petrogenesis of the I- and A-Type Composite Granite Masses in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 237-246 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Xiao, E., Hu, J., et al., 2008. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Coastal Area of Northeastern Fujian Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468-2484 (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(10): 1217-1223. doi:10.1039/B307016F
- Tan, J., Wei, J. H., Li, S. R., et al., 2008. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Kunlunguan A-Type Granite, Guangxi. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 743-754 (in Chinese with English abstract).
- Tang, L. M., Chen, H. L., Dong, C. W., et al., 2010. Late Mesozoic Tectonic Extension in SE China: Evidence from the Basic Dike Swarms in Hainan Island, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1204-1216 (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. H., Chen, Y. C., Chen, W., et al., 2004. Dating the Dachang Giant Tin-Polymetallic Deposit in Nandan, Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 132-139 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Chen, Z. H., Chen, Y. C., et al., 2010. New Data of the Rock-Forming and Ore-Forming Chronology for China's Important Mineral Resources Areas. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 1030-1040 (in Chinese with English abstract).
- 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. Q., 2013. Study on Bangpu-Type Molybdenum Polymetallic Deposit, Tibet and the Metallogenic Regularity of Molybdenum Polymetallic Deposits in the East Section of the Gangdese Metallogenic Belt (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., et al., 2006. Petrogenesis of Adakitic Porphyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China; Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119-144.
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Jian, P., et al., 2004. SHRIMP Zircon Geochronology and Nd-Sr Isotopic Geochemistry of the Dexing Granodiorite Porphyries. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 315-324 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Jian, P., et al., 2005. Geochronology of Cretaceous A-Type Granitoids or Alkaline Intrusive Rocks in the Hinterland, South China; Constraints for Late-Mesozoic Tectonic Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 795-808 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Y., Liu, M. C., Zhou, G. F., et al., 2013. A Correlation Study of Au-Polymetallic Mineralization and Granite-Porphyry Magmatism in the Xinping Mining Area of the Dayaoshan Metallogenic Belt, Eastern Guangxi Province. *Geoscience*, 27(3): 585-592 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Guo, F., et al., 2001. Zircon U-Pb Age and Its Petrogenesis Implication of Mesozoic Granodiorites in Southeastern Hunan Province, South China. *Science in China (Series D)*, 31(9): 745-751 (in Chinese).
- 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
- Xiao, E., Qiu, J. S., Xu, X. S., et al., 2007. Geochronology and Geochemistry of the Yaokeng Alkaline Granitic Pluton in Zhejiang Province; Petrogenetic and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1431-1440 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. C., Lu, J. J., Ma, D. S., et al., 2013. Origin of Granodiorite Porphyry and Mafic Microgranular Enclave in the Baoshan Pb-Zn Polymetallic Deposit, Southern Hunan Province; Zircon U-Pb Chronological, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4186-4214 (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, M. G., Mei, Y. W., 1997. Characteristics of Geology and Metallization in the Qinzhou-Hangzhou Paleoplate Junction. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 52-59 (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. X., Mao, J. W., Chen, M. H., et al., 2008. Re-Os Dating of Molybdenite from the Kafang Skarn Copper (Tin) Deposit in the Gejiu Tin Polymetallic Ore District and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1937-1944 (in Chinese with English abstract).
- Yu, P. P., Liang, J., Chen, X. Y., et al., 2011. The Researching Progress and Significance of Porphyry Copper Deposits. *Journal of the Graduates, Sun Yat-Sen University (Natural Sciences, Medicine)*, 32(4): 30-42 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, L. F., Liu, L. W., Xia, B., et al., 2010. Re-Os

- Geochronology of Molybdenite from Yuanzhuding Porphyry Cu-Mo Deposit in South China. *Resource Geology*, 60(4): 389–396. doi: 10. 1111/j. 1751–3928. 2010. 00143. x
- Zhou, Q., Jiang, Y. H., Zhao, P., et al., 2012a. Origin of the Dexing Cu-Bearing Porphyries, SE China: Elemental and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Constraints. *International Geology Review*, 54(5): 572–592. doi: 10. 1080/00206814. 2010. 548119
- Zhou, Q., Jiang, Y. H., Zhao, P., et al., 2012b. SHRIMP U-Pb Dating on Hydrothermal Zircons: Evidence for an Early Cretaceous Epithermal Event in the Middle Jurassic Dexing Porphyry Copper Deposit, Southeast China. *Economic Geology*, 107(7): 1507–1514.
- Zhou, X. M., Sun, T., Shen, W. Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Eposodes*, 29(1): 26–33.
- Zhou, Y. Z., Zeng, C. Y., Li, H. Z., et al., 2012. Geological Evolution and Ore-Prospecting Targets in Southern Segment of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay Juncture Orogenic Belt, Southern China. *Geological Bulletin of China*, 31(2/3): 486–491 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. T., Zhu, W. F., 2006. On Gold Mineralization in Gulinao and Longtoushan Gold Deposit Related to Postmagmatic Faulting and Its Significance in Searching for Gold Deposit in Dayaoshan, Guangxi. *Mineral Resources and Geology*, 20(3): 214–218 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡明海, 何龙清, 刘国庆, 等, 2006. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义. *地质论评*, 52(3): 409–414.
- 蔡明海, 孟祥金, 刘国庆, 2002. 大瑶山金成矿带成矿时代研究. *矿床地质*, 21(增刊1): 945–948.
- 陈富文, 李华芹, 梅玉萍, 2008. 广西龙头山斑岩型金矿成矿成矿锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. *地质学报*, 82(7): 921–926.
- 陈富文, 李华芹, 王登红, 等, 2012. 粤西圆珠顶斑岩型铜钼矿床成矿地质特征及成矿作用年代学研究. *地质学报*, 86(8): 1298–1305.
- 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.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 等, 2008. 云南个旧老厂一卡房花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束. *地质学报*, 82(11): 1478–1493.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 等, 2009. 与云南个旧超大型锡矿床有关的花岗岩锆石 U-Pb 定年及意义. *矿床地质*, 28(3): 297–312.
- 楚克磊, 毛景文, 陈懋弘, 等, 2013. 广东圆珠顶斑岩型铜钼矿床成矿物质、成矿流体来源和成矿机理研究. *地质前缘*, 20(5): 115–125.
- 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.
- 丁昕, 蒋少涌, 倪培, 等, 2005. 江西武山和永平铜矿含矿花岗岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学. *高校地质学报*, 11(3): 383–389.
- 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.
- 侯增谦, 2004. 斑岩 Cu-Mo-Au 矿床: 新认识与新进展. *地质前缘*, 11(1): 131–144.
- 侯增谦, 郑远川, 杨志明, 等, 2012. 大陆碰撞成矿作用 I: 冈底斯新生代斑岩成矿系统. *矿床地质*, 31(4): 647–670.
- 胡升奇, 周国发, 彭松柏, 等, 2012. 广西大黎铜钼矿石英二长(斑)岩年代学、地球化学特征及其地质意义. *地球学报*, 33(1): 23–37.
- 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.
- 李水如, 王登红, 梁婷, 等, 2008. 广西大明山钨矿区成矿时代及其找矿前景分析. *地质学报*, 82(7): 873–879.
- 李巍, 毕诗健, 杨振, 等, 2015. 桂东大瑶山南缘社山花岗岩闪长岩的锆石 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.
- 李晓峰, Watanabe, Y., 华仁民, 等, 2008. 华南地区中生代 Cu-(Mo)-W-Sn 矿床成矿作用与洋岭/转换断层俯冲. *地质学报*, 82(5): 625–640.
- 梁锦, 周永章, 李红中, 等, 2012. 钦—杭结合带斑岩型铜矿的基本地质特征及成因分析. *岩石学报*, 28(10): 3361–3372.
- 蒯志永, 王登红, 李水如, 2008. 广西王社铜钨矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. *地质学报*, 82(11): 1565–1571.
- 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.
- 刘仲林, 唐朝霞, 董秀英, 等, 2013. 宝山矿区斑岩型矿床地质

- 特征与找矿思路. 矿产与地质, 27(3): 204—210.
- 路远发, 马丽艳, 屈文俊, 等, 2006. 湖南宝山铜—钼多金属矿床成岩成矿的 U-Pb 和 Re-Os 同位素定年研究. 岩石学报, 22(10): 2483—2492.
- 罗金海, 车自成, 郭安林, 等, 2009. 桂北南丹—河池构造带晚白垩世岩石圈伸展作用及其对油气成藏条件的影响. 石油与天然气地质, 30(5): 619—625.
- 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.
- 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.
- 邱检生, 王德滋, McInnes, B. I. A., 1999. 浙闽沿海地区 I 型—A 型复合花岗岩体的地球化学及成因. 岩石学报, 15(2): 237—246.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 等, 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 24(11): 2468—2484.
- 谭俊, 魏俊浩, 李水如, 等, 2008. 广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 33(6): 743—754.
- 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 等, 2010. 中国东南部晚中生代构造伸展作用—来自海南岛基性岩墙群的证据. 岩石学报, 26(4): 1204—1216.
- 王德滋, 沈渭洲, 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地质前缘, 10(3): 209—220.
- 王登红, 陈毓川, 陈文, 等, 2004. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代. 地质学报, 78(1): 132—138.
- 王登红, 陈郑辉, 陈毓川, 等, 2010. 我国重要矿产成岩成矿年代学研究新数据. 地质学报, 84(7): 1030—1040.
- 王立强. 2013. 西藏邦铺式钼多金属矿床—兼论冈底斯成矿带东段钼多金属矿床成矿规律 (博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.
- 王强, 赵振华, 简平, 等, 2004. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学. 岩石学报, 20(2): 315—324.
- 王强, 赵振华, 简平, 等, 2005. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约. 岩石学报, 21(3): 795—808.
- 王新宇, 刘名朝, 周国发, 等, 2013. 桂东大瑶山成矿带新坪矿区花岗斑岩与金多金属成矿作用关系. 现代地质, 27(3): 585—592.
- 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 等, 2001. 湘东南中生代花岗闪长岩锆石 U-Pb 法定年及其成因指示. 中国科学(D 辑), 31(9): 745—751.
- 肖娥, 邱检生, 徐夕生, 等, 2007. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、地球化学及其成因与构造指示意义. 岩石学报, 23(6): 1431—1440.
- 谢银财, 陆建军, 马东升, 等, 2013. 湘南宝山铅锌多金属矿区花岗闪长斑岩及其暗色包体成因: 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 29(12): 4186—4214.
- 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.
- 杨明桂, 梅勇文, 1997. 钦—杭古板块结合带与成矿带的主要特征. 华南地质与矿产, (3): 52—59.
- 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.
- 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘, 等, 2008. 云南个旧卡房矽卡岩型铜(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 岩石学报, 24(8): 1937—1944.
- 虞鹏鹏, 梁锦, 陈宣谕, 等, 2011. 斑岩型铜矿床的研究进展及意义. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 32(4): 30—42.
- 周永章, 曾长育, 李红中, 等, 2012. 钦州湾—杭州湾构造结合带(南段)地质演化和找矿方向. 地质通报, 31(2—3): 486—491.
- 朱桂田, 朱文凤. 2006. 广西大瑶山古里脑和龙头山金矿岩浆期后断裂成矿作用及找矿意义. 矿产与地质, 20(3): 214—218.