doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.02.002

华南早侏罗世花岗质侵入体的岩石成因及构造背景 ——兼论其关键金属成矿作用

贾小辉1,2,李 响1.2,杨文强1

JIA Xiao-Hui^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, YANG Wen-Qiang¹

中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北武汉,430205;
 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心,湖北武汉,430205

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China

Jia X H, Li X and Yang W Q. 2023. Petrogenesis and Tectonic Setting of The Early Jurassic Granitic Plutons in South China: A Discussion on Mineralization of Critical Metals. *South China Geology*, 39(2): 186–202.

Abstract: One of the focuses concerned by geologists is the Early Jurassic granites in South China and their tectonic setting. On basis of systematically collecting the data of spatiotemporal distribution, geological characteristics and geochemical compositions of the Early Jurassic granitic intrusive rocks in South China, we discuss the petrogenesis of these granites, and the contribution of mantle-derived mafic magma in the formation of granitic magma. The results indicate that the Early Jurassic granitic intrusive rocks are generally distributed in a plane shape, and are relatively dense in southern Jiangxi and northern Guangdong, with the mainly formation ages of 185~190 Ma. The granites in South China are dominated by A-type granites, with obvious contributions from mantle-derived materials. They were formed in the post-orogenic extensional environment of the late stage of Indosinian orogeny. Finally, we briefly summarize the mineralization of critical metals, such as uranium, iron-tin and REE-Nb-Ta, related to the intrusive rocks.

Key words: Early Jurassic; granite; petrogenesis; tectonic setting; critical metals; South China

收稿日期:2023-2-7;修回日期:2023-3-21

基金项目:中国地质调查局项目(DD20230204、DD20230206)、珠海市城市地质调查(含信息化)项目(MZCD-2201-008)

第一作者:贾小辉(1980—), 男, 高级工程师, 从事岩石学、地球化学相关研究, E-mail: 269239439@qq.com

早侏罗世一度被认为是华南地区岩浆活动的 "宁静期"(周新民等,2003;Zhou X M et al.,2006)。 近年来,随着对区域岩浆岩研究的逐步深入,尤其 是高精度年代学数据的积累,华南早侏罗世岩浆岩 陆续被报道(陈志刚等,2003;Li X H et al.,2003; Yu X Q et al.,2010;Zhu W G et al.,2010;刘潜等, 2011;刘建清等,2013;Wang L X et al.,2015;Wang K X et al.,2015;汤谨晖等,2016;林小明等,2017; Gan C S et al.,2017,2022;Jiang Y H et al.,2017, 2022;Yu Y S et al.,2018;Zhang D et al.,2018; Zhou Z M et al.,2018;王锦荣等,2020)(图1),被认 为是古特提斯构造域向古太平洋构造域转换的岩石学响应(余心起等,2005;赵正等,2020;Jiang Y H et al., 2022),因此对其深入研究,对于探讨华南早侏罗世的构造背景及其动力学机制具有重要意义。

本文统计并梳理了华南早侏罗世花岗岩的各 类数据资料,概述这些花岗质侵入体的时空分布特 征、地质特征、岩石地球化学及Sr-Nd-Hf同位素组 成,分析其岩石成因类型,重点讨论了高分异花岗岩 的判别和高*e*_{Nd}(*t*)值-*e*_{Hf}(*t*)值花岗岩的成因及其形成 的构造背景,并对其成矿作用进行简要分析。



图1 华南早侏罗世侵入岩时空分布图

Fig. 1 Temporal and spatial distribution diagrams of the Early Jurassic intrusive rocks in South China S-S型花岗岩、I-I型花岗岩、A-A型花岗岩;参考文献同表2

1 地质及岩石学特征

华南早侏罗世花岗质侵入岩总体上呈面状展 布,以赣南-粤北地区为中心,周缘零星呈扇形分 布,相对而言,镁铁质侵入岩主要集中于赣南-粤北 地区(图1)。早侏罗世花岗质侵入体主要呈小岩体 状产出,出露面积多为数十平方千米,个别呈大的 岩基状产出,面积可达数百-数千平方千米(表1), 如,陂头、柯树背、寨背、沩山、光泽等,但岩体多与

			Table 1 Distribution and g	geological characterist	ics of the Early Jurassic granitic rocks		
序号	岩名体称	地 田 王 王	地质背景及特征	主要岩性	造岩矿物	副矿物组合	参考文献
-	柯树背	赣信安南丰远	位于南岭 EW 向构造带东段,赣州上地幔隆起区边 缘,受控于三南一寻乌 EW 向断裂。岩体呈"人"字 形展布,面积 350km ³ ,侵入震旦-寒武纪浅变质岩和 早古生代混合岩中,被晚侏罗世火山岩不整合覆盖。	黑云母二长花岗岩,黑 云母绅长花岗岩	Qtz(20%~30%),Kfs(45%~55%),Pl (15%~25%,An=15~30),Bi(5%~10%)	Zrn,Ap,Xtm,Py	Li Z X and Li X H, 2007; Jiang Y H et al., 2015
7	含湖	赣南	与正长岩、会昌辉绿岩构成中基性含湖杂岩体,内 部含有大量镁铁质暗色微粒包体。	花岗闪长岩	Qtz, Kfs, Pl, Bi, Hb		Yu X Q et al., 2010
3	杨村	纜 漸 困 天	出露面积 22km ² , 岩体侵入震旦纪地层中, 与白垩 纪砂岩、砾岩呈断层接触。	黑云母二长花岗岩	Qtz(26%~31%),Kfs(16%~32%),Pl (28%~44%),Bi(8%~17%)	Zrn,Ap,Tur,Mnz, Rt,Ilm,Mag,Gn	候可军等,2012
4	关西	戀 樹 樹	位于华南加里东褶皱带和隆起区。岩体侵入震旦纪一寒武纪浅变质地层中。	黑云母二长花岗岩	Kfs(30%~44%),Pl(18%~33%),Qtz (24%~34%),Bi(2%~8%)	Zrn、Ap、Mnz、Ilm、 Rt、Mag、Thr、REE	He C et al., 2017
S.	兼	赣定南南	位于南岭 EW 向构造带东段,受控于三南一寻乌斯裂和鹰潭一安远断裂复合部位。处于赣州上地幔隆起区边缘,呈反"L"型展布,面积400km²,岩体侵入寒武纪浅变质岩和早古生代混合岩中,被晚侏罗世火山岩不整合覆盖。	黑云母钾长花岗岩	Kfs(35%~45%),Pl(20%~30%),Qtz (25%~35%),Bi(3%~10%),Mus,Hb (1%)	Mag ,Ilm ,Mnz ,Rt , Zm ,Ap ,Thr ,REE	陈培荣等, 1998; Li X H et al, 2007
6	赅头	戀 友 南	位于南岭花岗岩带的北带。岩体呈岩基状产出,出 露面积400km ² ,岩体侵入震旦-寒武纪、泥盆-二叠 纪地层。	绅长花岗岩	Kfs(50%~55%),Pl(3%~8%),Qtz(28%~ 40%),Bi(3%~6%)	Mag、Ilm、Zrn、Fl、 Tur、Ap、Mnz	范春芳和陈培荣, 2000; Jiang Y H et al., 2022
Г	珠三埠	赣令商	位于会昌盆地西侧,大地构造上处于南岭东西向构造-岩浆岩带的北带,侵入震旦-寒武纪地层中。岩体为晚三叠世、早侏罗世、晚白垩世花岗岩构成的多期多旋回的复式岩基。	黑云母二长花岗岩	Kfs(35%-45%),Pl(25%-35%),Qtz (20%-25%),Bi(3%-5%)	Mag,Zrn,Ap	Jiang Y H et al., 2015
~	石書	赣粤交南北界	位于南岭 EW 向构造带东段,石背穹隆构造。岩体与大顶铁矿关系密切。近圆状展布,出露面积 25km²,侵人晚三叠世大顶群中,岩体具有明显的岩 性分带特征。	黑云母花岗岩	Qtz(30%~40%) ,Kfs(40%~50%) ,Pl(5% ~10%) ,Bi(5%)	Zrn,Mnz,Rt,Ilm	程顺波等, 2016; 林小明等, 2016
6	大宝山	♥ 部 光 光	位于南岭纬向构造带南侧,大东山一贵东东西向构造带和吴川一四会深大断裂构造带的复合部位。岩体与大型铜铅锌钨钼多金属矿床密切相关,花岗斑岩侵入次英安斑岩及侏罗纪地层中。	花岗斑岩	Qtz,Kfŝ,PI,Bi	Mag,llm,Zrn,Ap, Mnz	王磊等, 2010
10	策	粵韶北关	位于南岭三条东西向岩浆岩带之一的大东山-贵东-五里亭岩浆岩带。岩体侵入寒武-奥陶纪前变质岩、泥鱼-石炭纪砂岩、碳酸盐岩。笋洞岩体是贵东复式岩体的组成部分,出露面积90km ² ,与晚三叠世、中晚侏罗世花岗岩构成复式岩基。	二云母花岗岩	Kfs(40%-45%),Pl(15%-20%),Qtz (30%-35%),Bi(2%-3%),Mus(1%- 2%)	Mag、Tur、Ap	凌洪飞等,2004

表1 早侏罗世花岗质岩体展布位置及地质特征表

188

2023 年

参考文献	u W G et al., 2010; 甘成势等, 2016	刘鹏等, 2015 ou Z M et al., 2018	an C S et al., 2022	丁兴等, 2005	汤谨晖等,2016	贾小辉等,2014	刘潜等,2011	ng Y H et al., 2015	ng K X et al., 2015
副矿物组合	Ap , Mag , Zm	Zm ,Ap ,Mag Zh	Ğ			Mnz , Zrn , Ilm , Mag , Tur , Py	Zrn、Mag	Jia	Zm、Mnz、Tur、Ap、 Wa Grt
造岩矿物	Qtz(22%~37%) ,Kfs(52%~60%) ,Pl(5% ~10%) ,Bi(2%~5%) ,Hb(3%~6%)	Kfs(45%~50%),Pl(25%~30%,An=27), Qtz(20%~25%),Bi(3%~5%)	Kfs(30%~34%),Pl(23%~29%),Qtz (34%~39%),Bl(3%~5%)	Qtz(20%~45%) ,Kfs(20%~30%) ,Pl (30%~35%, An=22~37) ,Bi(5%~10%)	Kfs、Pl、Qtz、Bi	Kfis , Pl , Qtz , Bi	斑晶 Qtz(20%-40%)、Kfs(10%-20%)。 基质 40%~70%, Kfs(8%-20%)、Pl(2%- 10%)、Qtz(20%-25%)、Bi(10%-15%)	Kfs , Pl , Qtz , Bi	Kfs、Pl、Qtz、Bi、Mus
主要岩性	角闪石钾长花岗岩	黑云母二长花岗岩	黑云母二长花岗岩	黑云母二长花岗岩	黑云母花岗岩	黑云母二长花岗岩	斑状黑云母钾长花岗 岩	黑云母钾长花岗岩、黑 云母二长花岗岩	二云母花岗岩、斑状黑 云母花岗岩
地质背景及特征	岩体呈带状展布,出露面积 28km ³ 。岩体侵入新元 古代一古生代地层和霞岚基性侵入体中,与中基性 侵入岩构成杂岩体。	位于东南沿海火山岩带与南岭花岗岩带复合部位。 岩体与钨锡铅锌多金属矿床相关,出露面积4~ Skm ³ ,侵入早侏罗世地层中。	侵入早侏罗世地层中	出露面积1240km ² ,为印支期一燕山期的杂岩体。 岩体侵入新元古代一泥盆纪地层中,被晚白垩世地 层覆盖。	位于仁差盆地内。大地构造处于华南加里东褶皱系,永安一梅州晚古生代坳陷带,河源深断裂带东北部。岩体侵入古生代地层中。	大地构造位置上属南华加里东准地合柱中-柱东台陷中的柱东北凹陷海洋山肠褶带南部。岩体出露面积为57 km ³ ,沿银殿山穹窿侵入、栗木-恭城断裂带东缘、平面上呈一长轴正南北向似椭圆状的岩柱。岩体侵入下奥陶统砂岩夹板岩和下泥盆统砂岩、粉砂岩地层中。内部富含MMEs。	位于平潭-东山变质带北段,与早侏罗世火山岩呈 不整合接触。	位于武夷隆起带北部,受控于NE-NNE走向的崇安-石城断裂和光泽-武平断裂。岩体侵入志留纪变质岩中,被侏罗纪地层覆盖,出露面积1320km ³ ,与晚三叠世黑云母花岗岩构成复式岩基。	位于华南内陆,岩体出露面积 271km ³ ,呈透镜状南 北向展布,侵入新元古代板溪群和冷家溪群。岩体 受控于北东向构造带,内部发育多条硅化破碎带。 早侏罗世侵入体仅占少量,与主体印支期花岗岩构 成杂岩体。
地理 位置	● 注 子 亡	粵 漸 州	第 七 子	湘 宁 中 <i>沙</i>	粤平东远		庙 御 御	赣 交闽 界	据 双 峰
治 存 称	温公	田东	高坑	沩山	仁差	圆石山	锦城	光泽	素と三
序号	=	12	13	14	15	16	17	18	19

第 39 卷 第 2 期 贾小辉等:华南早侏罗世花岗质侵入体的岩石成因及构造背景——兼论其关键金属成矿作用 189

_

限。岩体多侵入震旦系、寒武系、泥盆系、二叠系、三 主要集中于185~190 Ma(表2)。

三叠纪、中-晚侏罗世和白垩纪等时期的花岗岩构 叠系等地层中,与围岩侵入接触关系明显,可见角 成复式岩基,其中早侏罗世岩体的出露面积相对有 岩化发育。花岗质侵入岩的形成时代为176~197 Ma,

表2 早侏罗世侵入岩形成时代统计表
 Table 2
 Formation ages of the Early Jurassic intrusive rocks

序号	尝休		时代(Ma)	测试方法	成因米刑	<u>余</u> 老 文 献
花岗岩		白圧	нц // (1 11 4)	MMAIA	风臼大空	シャス国
1	柯树背	黑云母花岗岩	189±3	SH	А	Li Z X and Li X H, 2007
2	柯树背	正长花岗岩	182±2	LA		Jiang Y H et al., 2015
3	桂坑	黑云母花岗岩	182.5±4.9	LA		周新民等,2007
4	大宝山	花岗闪长斑岩	175.8±1.5	LA	Ι	王磊等,2010
5	石背	二长花岗岩	187.5±1.8	LA	Ι	程顺波等,2016
6	石背	花岗闪长岩	186.9±2.0	LA		程顺波等,2016
7	石背	黑云母花岗岩	174.3±3.6	LA	S	林小明等,2016
8	石背	黑云母花岗岩	176.9±4.3	LA		林小明等,2016
9	霞岚	二长花岗岩	196±2	SH	А	Yu X Q et al., 2010
10	温公	二长花岗岩	192±1	SH	А	Zhu W G et al., 2010
11	温公	花岗岩	196.9±4.4	LA	А	甘成势等,2016
12	沩山	花岗岩	187.4±3.5	LA	S	丁兴等,2005
13	沩山	花岗岩	184.5±5.1	LA		丁兴等,2005
14	含湖	花岗闪长岩	193±2	SH	А	
15	含湖	花岗斑岩	186±3	SH		Yu X Q et al., 2010
16	杨村	黑云母二长花岗岩	189.4±1.7	TM		邓必荣和石鉴东,2000
17	杨村	黑云母花岗岩	175.8±1.0	LA		候可军等,2012
18	圆石山	黑云母二长花岗岩	178.5±2.0	LA	А	贾小辉等,2014
19	高坑	黑云母二长花岗岩	186.7±2.5	LA		Gan C S et al., 2022
20	关西	二云母花岗岩	198.8±1.4	LA	А	He C et al., 2017
21	田东	黑云母二长花岗岩	188±1	LA	Ι	Zhou Z M et al., 2018
22	田东	黑云母二长花岗岩	188±2	LA		Zhou Z M et al., 2018
23	田东	黑云母二长花岗岩	191.5±0.9	LA		刘鹏等,2015
24	田东	黑云母二长花岗岩	188.6±1.3	LA		Gan C S et al, 2022
25	寨背	黑云母钾长花岗岩	176±10	RS	А	陈培荣等,1998
26	寨背	黑云母钾长花岗岩	172±5	SH		Li X H et al, 2007
27	锦城	花岗岩	187±1	LA	Ι	刘潜等,2011
28	仁差	花岗岩	179±1	LA		汤谨晖等,2016
29	仁差	花岗岩	186±1	LA		汤谨晖等,2016
30	大坪	花岗斑岩	186.7±1.2	SM	А	王锦荣等,2020
31	大坪	花岗斑岩	190.7±1.1	LA		王锦荣等,2020
32	陂头	黑云母钾长花岗岩	178.15±0.84	RS	А	范春芳和陈培荣,2000
33	陂头	黑云母钾长花岗岩	186.3±11	LA		Chen P R et al., 2005
34	陂头	黑云母钾长花岗岩	177.3±1.4	LA		He Z Y et al., 2010
35	陂头	角闪石钾长花岗岩	178.6±1.5	LA	А	He Z Y et al., 2010
36	陂头	钾长花岗岩	188.1±1.1	LA		Jiang Y H et al., 2022
37	陂头	钾长花岗岩	184.5±0.8	LA	А	Jiang Y H et al., 2022
38	笋洞	二云母花岗岩	189.1±0.7	TM	S	凌洪飞等,2004

续表2						
序号	岩体	岩性	时代(Ma)	测试方法	成因类型	参考文献
39	紫云山	二云母花岗岩	181.9±2.4	LA	S	Wang K X et al., 2015
40	珠兰埠	正长花岗岩	189±2	LA	А	Jiang Y H et al., 2015
41	光泽	钾长花岗岩	189±5	LA	А	Jiang Y H et al., 2015
42	新兴	花岗岩	184	—		凌洪飞等,2006
43	大茅山	黑云母花岗岩	180			Shen W Z et al., 1999
44	遂川	黑云母花岗岩	185			Shen W Z et al., 1999
45	江背	黑云母花岗岩	180			Shen WZ et al., 1999
46	新丰江	黑云母花岗岩	175			Shen WZ et al., 1999
基性侵	入岩					
1	含湖	辉长辉绿岩	196±1	SH		Yu X Q et al, 2010
2	苦竹坑	辉长岩	198±1	SH		Wang L X et al., 2015
3	苦竹坑	辉绿岩	193±4	SH		Wang L X et al., 2015
4	黄埠	正长岩	179.3±1.0	LA		贺振宇等,2007
5	黄埠	正长岩	195.8±1.6	SIMS		Yang J H et al., 2021
6	黄埠	正长岩	196.3±1.4	LA		Yang J H et al., 2021
7	黄埠	正长岩	197.8±1.4	LA		Yang J H et al., 2021
8	乘龙	辉长岩	197.4±2.3	LA		Jiang Y H et al., 2015
9	车步	辉长岩	175.5±1.9	LA		贺振宇等,2007
10	车步	辉长岩	182.3±1.0	LA		He Z Y et al., 2010
11	车步	辉长岩	191.3±1.6	LA		Jiang Y H et al., 2015
12	车步	辉长岩	188.9±2.2	SIMS		Yang J H et al., 2021
13	车步	辉长岩	186.7±1.6	LA		Yang J H et al., 2021
14	霞岚	辉长岩	195±4	SH		余心起等,2009
15	霞岚	辉长岩	194±1	SH		Zhu W G et al., 2010
16	霞岚	角闪辉长岩	196.0±2.7	SIMS		Gan C S et al., 2017
17	隘高	辉绿岩脉	189±4	SIMS		Zhang D et al., 2018
18	塔背	正长岩	188.6±2.2	TIMS		陈培荣等,2004

贾小辉等:华南早侏罗世花岗质侵入体的岩石成因及构造背景——兼论其关键金属成矿作用

191

注:SH-SHRIMP 锆石 U-Pb、LA-LAICPMS 锆石 U-Pb、TM-TIMS 锆石 U-Pb、SM-SIMS 锆石 U-Pb、RS-全岩 Rb-Sr

岗岩、黑云母二长花岗岩、二云母花岗岩、花岗闪长 斑岩等,同时期发育少量流纹岩、流纹英安岩、粗面 岩、玄武岩等火山岩,于赣南-粤北等地构成双峰式 侵入岩或双峰式火山岩组合,如粤北霞岚和赣南余 田等(余心起等,2009;冀春雨和巫建华,2010)。野 外观测结果显示,与花岗岩共生的同期次镁铁质岩 常呈岩脉(岩墙群)展布于花岗岩中。

第39卷第2期

黑云母(二长)花岗岩主要造岩矿物为钾长石 (条纹长石)、斜长石、石英和黑云母,角闪石偶见 (图 2a、b),有时可见钾长石斑晶。副矿物组合为独 云母花岗岩主要造岩矿物为钾长石、斜长石、石英、

华南早侏罗世花岗岩的主要岩性为黑云母花 黑云母和白云母,有时可见钾长石斑晶(图 2c、d)。 副矿物组合为独居石、锆石、磷灰石、磁铁矿、电气 石和石榴子石等(凌洪飞等,2004; Wang K X et al., 2015)。个别花岗岩体中常见镁铁质暗色微粒包体, 为闪长质-花岗闪长质,呈灰色-灰黑色,较寄主岩 深,常与寄主岩界限不明显。包体与寄主岩常见淬 冷边、有时可见反向脉,于镜下还可见少量针状 磷灰石。少量碱性花岗岩,如陂头花岗岩含碱性 暗色矿物钠闪石和霓石(陈培荣等,2002),主要 造岩矿物有石英、钾长石、斜长石、黑云母和角闪 石(钠闪石),副矿物组合为磁铁矿、钛铁矿、锆 居石、锆石、钛铁矿、磁铁矿、电气石和黄铁矿等。二 石、褐帘石、磷灰石和独居石,一般磁铁矿含量远 大于钛铁矿。



图2 早侏罗世花岗岩(a、b-温公;c-紫云山;d-锦城)镜下矿物特征 Fig. 2 Microscopic characteristics of minerals in the Early Jurassic granitic rocks (a, b-Wengong; c-Ziyunshan; d-Jincheng) 温公、紫云山和锦城岩体资料分别引自甘成势等(2016)、Wang K X et al.(2015)和刘潜等(2011). Qz-石英;Kf-钾长石;Pl-斜长石;Bt-黑云母;Mus-白云母;Hb-角闪石

2 地球化学特征

总体而言,早侏罗世花岗质侵入岩的硅含量变 化较大且普遍较高(SiO₂=68%~78%),在TAS图解 上,岩石样品主要投影于花岗岩图区,少量位于石 英二长岩、花岗闪长岩图区(图3a);以准铝质-弱过 铝质为主(A/CNK=0.9~1.7,平均值为1.0),少量样 品为强过铝质;相对富铁而贫镁(FeO^T=1.6%~4.5%, FeO^T/MgO 平均值大于10);岩石多富碱、富钾 (Na₂O+K₂O=5.2%~10.0%,K₂O/Na₂O=0.5~2.8),多 投影于高钾钙碱性或钾玄质系列岩石区(图3b)。





a图底图据Middlemost(1994);b图底图据Peccerillo and Taylor(1976)

A型花岗岩数据引自李献华等(2007)、Yu X Q et al.(2010)、Zhu W G et al.(2010)、贾小辉等(2014)、甘成势等(2016)、Jiang Y H et al. (2022);高分异 A 型花岗岩数据引自 He C et al.(2017)、王锦荣等(2020);I型花岗岩数据引自刘潜等(2011)、Zhou Z M et al.(2018)、 Gan C S et al.(2022);S型花岗岩数据引自 Wang K X et al.(2015);高分异 S 型花岗岩数据引自凌洪飞等(2004)

早侏罗世花岗质侵入岩不同岩体的稀土总量 (ΣREE)变化大,平均值由175×10⁶变化到680×10⁶。 不同类型花岗岩在稀土元素配分图解上均表现为 右倾轻稀土弱富集型〔(La/Yb)_N值多小于10〕(图 4), Eu 负异常明显(δ_{Eu}<0.6, 大多数小于0.3)。在微 量元素蛛网图解上,花岗岩表现为富集大离子亲石 元素(LILE)(如 Rb、K 和 Th 等),亏损高场强元素 (HFSE)(如Nb、Ta、Zr、Hf、P、Ti)和Sr、Ba等元素 (图4),大部分岩体的过渡族元素(Cr、Co、Ni、V)相 对较高。此外,花岗岩具有富Ga(13.6×10⁻⁶~84.0×10⁻⁶)



球粒陨石及原始地幔标准化数据据Sun and McDonough(1989)

I-I型花岗岩;A-A型花岗岩;S-S型花岗岩;HFA-高分异A型花岗岩;HFS-高分异S型花岗岩;数据来源同图3

和高的10⁴×Ga/A1比值(2.8~3.9),样品的Zr+Nb+ Ce+Y含量普遍较高(多数样品变化于226×10⁶~ 1067×10⁶之间,平均值为440×10⁶)。

早侏罗世花岗岩 Sr-Nd 同位素组成变化大, *I*_{sr} = 0.6991~0.7995, *ε*_{Nd}(190 Ma) = -12.8~ +1.6,集中 于-9~-2,个别高达+3.0,相应的 Nd 同位素两阶段 模式年龄 *T*_{DM2} = 0.85~2.02 Ga,显示了部分岩体具 有显著的幔源组分参与的特征(图5)。其中田东花 岗岩和柯树背花岗岩具有高的*ε*_{Nd}(190 Ma) 值(-0.5~ +1.6)和低的*T*_{DM2}值(0.85~ 0.97 Ga)。 在*T*(Ma)-*ε*_{Nd}(190 Ma)值图解上,花岗岩样品主体投 影于中元古代地壳演化域与球粒陨石均一储库 (CHUR)区域(图5c)。

据目前所收集的早侏罗世花岗岩Hf同位素组 成来看,其变化范围相对较大:(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i = 0.28263~0.28289,平均值为0.28277; $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ =-1.6~+ 7.8,平均值为+3.5;相应的Hf同位素两阶段模式年 龄分别为 $T_{\rm DM2}$ = 0.8~1.4 Ga,平均值为1.1 Ga。在 $T({\rm Ga})$ - $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 图解上(图略),早侏罗世花岗岩投影于 亏损地幔和平均地壳之间,靠近亏损地幔。

3 岩石成因类型判别及壳--幔相互作用

3.1 岩石成因类型

前人研究结果表明,早侏罗世花岗质侵入岩主 要为A型(LiZX and LiXH, 2007;余心起等, 2009;YuXQ et al., 2010;ZhuWG et al., 2010;JiangYH et al., 2015, 2017, 2022;甘成势等,2016;王 锦荣等,2020),少量I型(刘潜等,2011;程顺波等, 2016;ZhouZM et al., 2018)和S型(凌洪飞等, 2004;刘建清等,2015;WangKX et al., 2015;林小 明等,2016)。

早侏罗世A型花岗质侵入岩的判别证据主要 包括:(1)富硅、碱,贫钙、镁、铝,富Rb、Th、Ga、Y, 贫Sr、Ba、P、Ti等;(2)具有显著的负Eu异常,高 $10^4 \times Ga/Al 值和Zr+Nb+Ce+Y含量;(3)全铁(FeO^T)$ 含量高,一般大于2.0%;(4)多具有较高的锆石饱和温度,750~950℃,平均为820℃;(5)在A型花岗岩判别图解上,大部分早侏罗世中酸性侵入岩投影于A型花岗岩图区(图 6a、b);(6)在



DM-亏损地幔;MORB-洋中脊玄武岩;PREMA-原始地幔; OIB-洋岛玄武岩;HIMU-异常高³³⁸U/⁹⁰⁴Pb地幔;BSE-地球总成分; EMI-I型富集地幔;EMII-II型富集地幔;CHUR-球粒陨石均一储库

SiO₂-Fe*[FeO^T/(FeO^T+MgO)]值图解上(图略),大 多数花岗岩样品落于铁质系列岩图区,与A型花岗 岩一致(邓中林和杨晓聪,2017;吕昭英等,2019)。 而在进一步的Nb-Y图解上,花岗岩样品大多数投 影于A₂区及其附近(图略)。区内很多早侏罗世花 岗岩,如柯树背、陂头、寨背、圆石山、温公(Li Z X and Li X H, 2007; Zhu W G et al., 2010; 贾小辉等, 2014; 甘成势等, 2016; Jiang Y H et al., 2015, 2017, 2022)等岩体已被学者厘定为A型花岗岩。刘潜等(2011)报道了福建锦城花岗岩(194 Ma),其具有高SiO₂、偏碱、高FeO^T等特征,属于高钾钙碱性系列。 岩石相对富集轻稀土,亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素, 富集 Ba、Sr 等大离子亲石元素, 具高 Rb/Sr (1.31~1.93)比值及低 Rb/Ba 值(0.26~0.29)、Eu/Eu* (0.30~0.56)、La/Yb_N(5.69~18.39)和Sr/Y(2.24~2.29) 比值,具有典型I型花岗岩的特征。笋洞(凌洪飞等, 2004)和紫云山花岗岩(Wang K X et al., 2015)中含 有电气石和/或石榴子石等富铝矿物,具有富硅、富 碱、过铝-强过铝质和低CaO/Na₂O比值,富集Rb、 Th、U、Ce、Sm和Y,而亏损Ba、Sr、P、Ti等,以及高 的 I_{sr} 值(0.7295~0.7495)和 δ^{18} O值(10.2~12.7),低的 $\varepsilon_{Na}(t)$ 值(-12.8~9.3)及 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(-8.1~-2.9)等,具有典 型的S型花岗岩特征。



a、b底图据Whalen et al. (1987);c、d底图据李献华等(2007);图例及数据来源同图3

值得注意的是一些高分异花岗岩的岩石成因 类型的判别存在争议,如大坪花岗岩。王锦荣等 (2020)根据大坪花岗岩具有高的FeO^T/MgO值 (4.0~25.3)、10⁴×Ga/Al值(4.9~6.7)和Zr+Nb+Ce+Y 含量(162×10⁶~412×10⁶)等特征,将其厘定为A型 花岗岩。事实上,该岩体仅有一个岩石样品的Zr+ Nb+Ce+Y含量为412×10⁶,其余均小于339×10⁶,且 锆石饱和温度偏低(680~760℃),与A型花岗岩特 征不尽相符。其高硅(SiO₂= 72.8%~76.4%)和高的 Rb含量(408×10⁶~1200×10⁶)等则表现为高分异花 岗岩的地球化学特征。

对于高分异花岗岩而言,当它们经历高度分异 结晶作用之后,其矿物组成和化学成分都趋近于低 共结的花岗岩,从而使得它们岩石成因类型的鉴定

出现困难(吴福元等,2007)。矿物组成特征上,大坪 花岗岩暗色矿物以黑鳞云母为主,未发育角闪石、 电气石、石榴子石和碱性暗色矿物等标志性矿物。 通常而言,I型和S型花岗岩偏重于其源区组分的 反演,而A型花岗岩则侧重于花岗岩本身,如,碱 性、高温、无水、非造山等。贾小辉等(2022)依据形 成温度和特征元素指标梳理了高分异A型花岗岩 的典型特征,主要表现在:(1)锆石饱和温度,其估 算温度代表了岩浆经历高度分异后残余熔体的结 晶温度,相对于岩浆初始形成温度要低得多。A型 花岗岩(包括高分异特征)通常具有高的锆石饱和 温度(>800℃),而大坪花岗岩锆石饱和温度相对较 低,与A型花岗岩不同,至少不能作为A型花岗岩 的厘定标准;(2)随着岩浆分异演化,A型花岗岩的 Ga/Al比值及Zr含量逐渐降低,具有如图7b所示的 演化趋势,而I型和S型花岗岩则与之相反,随着分 异的程度增高,其Ga/Al比值逐渐升高(吴福元等, 2017)。大坪花岗岩样品投影于I/S型分异型花岗岩 图区内(图6b)。此外,在Rb-Y图解和Rb-Th图解 (图 6c、d)中,大坪花岗岩与S型花岗岩演化趋势相 近。大坪高分异花岗岩具有高的Ga/Al比值(4.9~ 6.7),其原因在于,花岗岩在经历斜长石高度分异 结晶的过程中,由于Al倾向进入晶出的斜长石中, 熔体中Al含量相对降低(Dahlquist et al., 2014),同 时随着岩浆分异,熔体中F的含量增加,Ga与F生 成更为稳定的GaF³⁻,使得熔体中Ga/Al比值增加。 因此,我们倾向于将大坪花岗岩厘定为高分异S型 花岗岩,而非A型花岗岩。

3.2 高 $\epsilon_{\rm Nd}(t)$ 值- $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值花岗岩及壳-幔相互作用

近年来,一些学者在对华南早侏罗世花岗岩的 研究中,将一些具有高εма(t)值和εна(t)值的岩体认定 为亏损型源区(source-depleted)花岗岩,强调它们 源区组成为新生地壳物质(Gan C S et al., 2022)。 如Zhou Z M et al.(2018)通过对粤东北田东花岗岩 (188 Ma)的系统研究,认为其具有 I型花岗岩的地 球化学特征,具有相对低的 Isr值(0.7032~0.7040)、 高的εма(t)值(+1.1~+1.5)和εна(t)值(+6~+13),同时 Nd-Hf同位素组成具解耦现象,进而认为田东花岗 岩是新生地壳岩石部分熔融的产物。Gan C S et al. (2022)则系统研究了粤北温公(193 Ma)、高坑 (187 Ma)及田东(茶背)(187 Ma)等早侏罗世花岗 岩,发现它们普遍具有相对低的 I_{sr} 值(0.7025~ 0.7111)、锆石 δ^{18} O值(5.1~7.3‰)、高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值 (-2.9~+1.5)和 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(+1.8~+16.3),亦认为它们源 自新生地壳的部分熔融。

华南早侏罗世花岗岩普遍具有相对低的Ist值、 锆石 δ^{18} O值和高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值、 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值等特征,暗示它 们不能单独源自华南基底岩石的部分熔融(Gan C S et al., 2022)。一般而言,花岗岩很难直接源于地 幔源区,源自亏损地幔源区岩浆的分异结晶通常形 成低硅系列岩石、且常以中性岩为主(Sisson et al., 2005)。田东地区没有发育同期次的镁铁质岩,同 时,中性岩的缺失可以排除由亏损地幔岩浆直接分 离结晶的可能性(Zhou Z M et al., 2018)。这些花岗 岩高 $\varepsilon_{\rm Nd}(t)$ 值- $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 值的获得更可能经由以下几种途 径:①源自先期玄武质岩浆形成的镁铁质新生地壳 物质的部分熔融;②由成熟的长英质下地壳(古老 的结晶基底)夹杂了镁铁质-超镁铁质岩的部分熔 融;③源自地幔的玄武质岩浆与壳源长英质岩浆的 混合作用。Zhou Z M et al. (2018)认为田东花岗岩 更可能源自新生壳源物质的部分熔融,且这种新生 镁铁质地壳的母岩浆可能源自亏损地幔(~95%)和 富集岩石圈地幔(EMII,~5%)的混合,其理由包括: 出露面积小(<5 km²);岩性简单、未见镁铁质暗色 微粒包体; $\varepsilon_{\rm Nd}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\rm Hr}(t)$ 值相对高且均一。Gan C S et al. (2022) 也认为这些高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值花岗岩 (温公、高坑、田东等)源自新生壳源物质的部分熔 融,且其母岩浆可能源自亏损地幔和富集岩石圈地 幔的镁铁质岩石、华南结晶基底的混合。由于田东 花岗岩中未发育针状磷灰石及镁铁质暗色微粒包 体,初步排除源自地幔的玄武质岩浆与壳源长英质 岩浆的混合作用的可能性。然而,花岗岩具有变化 范围相对较大的氧化物含量和ε_m(t)值,则暗示着一 定量的地壳沉积物的参与。因此,由成熟的长英 质下地壳(古老的结晶基底)夹杂了镁铁质-超镁 铁质岩的部分熔融的可能性不能完全排除。这种 下地壳成分可能是先期玄武质岩浆形成的基性 (镁铁质)岩石,也可能是成熟度较低的地壳物质, 即由成熟的长英质下地壳夹杂了镁铁质-超镁铁质 杂岩。

同时,前人的讨论多侧重于花岗岩的源岩—— 新生镁铁质地壳及其幔源母岩浆的论述,而忽视了 同期次基性岩浆在花岗质岩浆形成过程中的作用, 包括物源和热源的影响。事实上,华南早侏罗世发 育相当数量的镁铁质岩,可以单独形成岩体、或与 花岗岩共生呈岩脉(岩墙群)产出;镁铁质岩具有 变化较大的Sr-Nd-Hf同位素组成范围(图5b);大 部分早侏罗世花岗岩的Nd-Hf同位素组成并不均 一,个别甚至存在异常高值,如陂头花岗岩的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值变化于-10.6~+3.0(Jiang Y H et al., 2022);一些 岩体中发育大量的镁铁质暗色微粒包体及特征矿 物针状磷灰石,甚至是反向脉,如圆石山(贾小辉 等,2014)。上述地质现象及特征暗示幔源岩浆在早 侏罗世花岗岩的形成过程中的物源贡献不可忽略。 花岗岩的锆石饱和温度计算结果显示,早侏罗世花 岗岩具有相对高的锆石饱和温度(750~950℃,平均 820℃),表明其在初始部分熔融时温度较高。通常而 言,地壳物质放射性热源及减压环境不足以形成大规 模的花岗质岩浆作用(Sandiford and Hand, 1998), 需要额外的热源贡献。尤其是这种镁铁质新生下地 壳源自更加基性的亏损地幔源区时,需要更高的热 量方能形成大规模的花岗质岩浆,这种额外的热可 由同期次的底侵玄武质岩浆来提供(Dufek and Bergantz, 2005; Zhou X M et al., 2006)。因此, 早侏 罗世基性岩浆在花岗岩的形成和演化过程中,对于 其物源和热源均具有显著的贡献,一定程度上决定 了花岗质岩浆的物质组分和形成规模。由于早侏罗 世基性岩规模小而少,导致同期次花岗岩规模也较 小,但该时期的壳-幔相互作用却较为强烈,在花岗 岩中留下了明显的幔源物质印记。

4 构造背景

200~180 Ma时期,华南发育A型花岗岩、双峰 式侵入岩、双峰式火山岩和碱性玄武岩、碱性正长 岩、基性岩墙群等岩石组合,指示该时期总体处于 伸展的构造背景,这种伸展-拉张环境也得到了普 遍的认同(Li X H et al., 2003, 2004, 2007; 陈培荣 等, 2004; 谢昕等, 2005; Zhou X M et al., 2006; Jiang Y H et al., 2015, 2022; Gan C S et al., 2022)。 但导致区内早侏罗世时期伸展作用的动力学机制, 仍存在较大争议。目前,关于区内早侏罗世花岗岩 形成的构造背景仍然存在较大争议,有的学者认为 其与古太平洋板块俯冲无关或受后者的影响不大, 更主要是一种板内造山作用的延续,是印支造山运 动后的后造山伸展(陈培荣等,1998,2002;Wang L X et al., 2015; Gan C S et al., 2017), 或由软流圈地 幔上涌引发的强烈的板内伸展环境(Zhang D et al., 2018);古太平洋板块对华南板块的小角度俯冲 作用及其对莫霍面以下深部挤压造成的板内伸展 作用(Zhou X M et al., 2006); Li Z X and Li X H (2007)认为自早二叠世以来,华南地区已受古太平 洋板块的俯冲影响,进而提出了平板俯冲模型,而 ~190 Ma可能是俯冲板片折断(break-off)的开始。 最近, Jiang Y H et al. (2015, 2017, 2022)在对早保 罗世花岗岩、镁铁质岩系统研究的基础上,提出 了华南中生代受控于古太平洋板块的多次俯冲-后撤,而早侏罗世处于板片俯冲后撤及其拆离的 构造背景。

古太平洋平板俯冲的模型(LiZX and LiXH, 2007)对于理解华南内陆绵延数千公里的中生代岩 浆作用提供了新的研究思路,但这一模式难以解释 该时期岩浆活动产物年龄相近,且呈东西向展布, 绵延长达500 km的分布规律(谢昕等,2005)。另 外,俯冲板片折断和拆沉带来的软流圈上涌,其能 量能否导致中国东南部燕山早期大面积分布的岩 浆岩,其中幔源岩浆活动产物为何类似OIB的微量 元素组成,而明显缺乏与俯冲板片熔融或脱水作用 有关的证据等仍存在疑问(Li X H et al., 2003, 2004;谢昕等,2005)。刘潜等(2011)认为福建锦城 花岗岩具有火山弧花岗岩的地球化学特征,古太平 洋板块的俯冲很可能自早侏罗世开始,俯冲作用及 其对中国东南部莫霍面以下深部挤压造成了区内 板内伸展作用。然而,区内缺失典型岛弧岩浆岩及 其组合(尤其是岛弧火山岩系列),且花岗岩对构造 背景的判别具有较大局限性也掣肘了上述观点的 信服度。因此,华南早侏罗世伸展背景是否由古太 平洋板块俯冲所控制仍有待进一步研究。不论是平 板俯冲还是低角度俯冲,即便是俯冲板块所影响的 岩浆活动范围可达上千公里,仍然难以影响到如桂 北、湘西及其他广大内陆地区;而俯冲板块的远程 效应本身就是一个模糊用语,其影响范围及程度也 不得而知,由俯冲引发的俯冲应力传递到华南内陆 也相当模糊(丁兴等,2005),这种伸展应力亦不能 形成南岭地区东西向的岩浆岩带。早侏罗世时期, 华南及其邻区发育A型花岗岩、基性火山/侵入岩 以及碱性岩,构成了一个比较典型的板内非造山火 成岩组合(李献华等,2007)。后造山伸展模式可以 较好地解释在同一时空条件下,多种类型火成岩的 共生。因此,我们认为早侏罗世时期的华南内陆不 太可能受控于古太平洋板块俯冲作用,而更可能受 印支运动之后的"后造山"伸展作用的影响。区内早 侏罗世花岗岩的构造环境判别图解也支持这一观 点,在花岗岩构造背景判别图解上,早侏罗世A型 花岗岩样品落入板内或后造山伸展环境(图7),在 Eby(1990)A型花岗岩判别图解上绝大部分样品落 入A₂(即后碰撞)图区(图略)。因此,华南早侏罗世 花岗岩可能与大多数印支晚期花岗岩一样形成于 板内伸展环境,受控于印支运动晚阶段的"后造山" 伸展作用。



5 成矿作用

相对于中-晚侏罗世而言,华南早侏罗世岩浆 岩较匮乏,同期成矿事件亦较为稀少,与早侏罗世 岩浆岩相关的成矿类型主要包括:铀矿、铁锡多金 属矿和REE-Nb-Ta矿等关键金属矿产。其中铀矿与 印支期花岗岩和早侏罗世基性岩密切相关(娄峰 等,2011;Wang L X et al., 2015)、与铁锡多金属矿 相关的侵入岩为A型花岗岩(Zhao P L et al., 2019),而REE-Nb-Ta矿相关的侵入岩则为高分异 A型花岗岩(He C et al., 2017)。

华南是重要的产铀区,与早侏罗世岩浆岩相关

的铀矿主要分布于粤北下庄和赣南隘高等地(邓平 等,2003;娄峰等,2011)。赣南隘高铀成矿花岗岩形 成于早三叠世早期(249 Ma),岩性为二云母正长花 岗岩,基性岩脉主要为辉绿岩,形成时代为189 Ma。 粤北下庄铀矿床位于贵东杂岩体的东部,铀矿年龄 则为~135 Ma、~115 Ma 和~105 Ma,与之相关的基 性岩则形成于早侏罗世(198~193 Ma),主要岩性 为辉长岩和闪长岩,以脉岩产出,镜下可见沥青铀 矿(Wang L X et al., 2015)。含铀花岗岩通常富集 铀,被认为是铀矿床的成矿源区(邓平等,2003;娄 峰等,2011),而铀的迁移与富集则与早侏罗世的基 性岩具有内在的成因联系,如凌洪飞(2011)认为印 支期富铀的过铝质浅色花岗岩是铀源岩,燕山期的 构造伸展-地壳拉张作用和基性岩(脉)岩浆活动为 含铀成矿热液的形成提供了热源和源自地表的高 氧逸度水体下渗循环的裂隙系统,这种热液流体浸 取印支期富铀花岗岩中的铀,成为含铀热液,然后 在还原部位沉淀成矿;Hu R Z et al.(2008)认为基 性岩脉的侵入引发了幔源富 CO₂热液的循环,从花 岗岩围岩中萃取铀;Wang L X et al.(2015)和 Zhang D et al.(2018)则认为基性岩脉主要提供了 有利于铀沉淀的物化条件。总之,印支期花岗质岩 浆作为铀的矿源层,而早侏罗世基性岩浆对于成矿 元素的萃取、迁移及富集成矿具有重要意义。

大顶矿床是赣南 - 粤北地区的一个大型矽卡 岩型铁锡矿床,其铁锡成矿作用与矿区石背岩体密 切相关(邓景,1979)。石背岩体岩性主要有中粒斑 状二长花岗岩,中细粒少斑 - 斑状二长花岗岩和正 长花岗岩,大顶铁锡矿床主要产于石背岩体南部与 壶天组碳酸盐岩的接触带及附近的有利部位。石背 花岗岩形成时代为187~189 Ma,铁锡矿石中金云 母⁴⁰Ar/³⁹Ar等时线年龄为185 Ma(程顺波等,2016; Zhao P L et al., 2019)。石背岩体具有 A₁型花岗岩的 地球化学特征,被认为源自低成熟度地壳物质的部 分熔融,这种地壳源区由早期地壳岩石和新生的类 OIB 的玄武质岩浆组成。同时,玄武质岩浆带来了 大顶铁锡矿的成矿元素(Zhao P L et al., 2019),但 具体的成矿机理仍需深入研究。

赣南关西A型花岗岩是区内少有的与离子吸 附型稀土矿床有关的早侏罗世岩体,闽西南大坪花 岗岩则与Nb-Ta矿关系密切。关西花岗岩形成于早 侏罗世(199 Ma),具有A型花岗岩特征(He C et al., 2017)。而大坪花岗岩主体岩性为花岗斑岩,具 有高分异花岗岩的地球化学特征,Nb-Ta矿体产出 于岩体中心部位,铌铁矿、钽铌铁矿、钽铌锰矿等铌 钽矿物发育(王锦荣等,2020)。风化过程中稀土元 素的迁移活性和浓度变化是制约REE成矿的关键 因素,而母岩中的富稀土矿物和风化壳中矿物是目 前稀土矿成因研究的重点对象。花岗岩中的Nb-Ta 富集与岩浆体系的高度演化关系密切(Dostal et al., 2000),富F溶液体系中Nb-Ta可与F形成络合 物而被稳定迁移(Timofeev et al., 2017)。大坪和关 西花岗岩具有高分异花岗岩的特征,岩石中包含了 较高的F含量,Nb-Ta的富集可能受控于岩浆-热液 过程。岩石高程度演化是成矿元素以及挥发组份高 度富集的重要控制因素,而晚期富氟的流体出熔及 向上迁移对稀有金属再次富集及Nb-Ta分异意义 重大(王锦荣等,2020)。

6 结论

(1)华南早侏罗世花岗质侵入岩形成时代为 176~197 Ma,集中分布于赣南-粤北等地,常与基性 岩构成双峰式侵入岩。

(2)早侏罗世花岗质侵入岩以A型花岗岩为 主,幔源物质贡献明显,可能是印支运动晚阶段的 后造山伸展环境下玄武质岩浆底侵作用的产物。

(3)华南早侏罗世铀成矿和铁锡多金属成矿与 幔源基性岩浆具有内在成因联系,REE-Nb-Ta矿则 与分异型花岗岩密切相关。

参考文献:

- 陈培荣,章邦桐,孔兴功,蔡笔聪,凌洪飞,倪琦生.1998.赣南寨 背A型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意 义[J].岩石学报,14(3):289-298.
- 陈培荣,华仁民,章邦桐,陆建军,范春方.2002.南岭燕山早期 后造山花岗岩类:岩石学制约和地球动力学背景[J].中 国科学(D辑),32(4):279-289.
- 陈培荣,周新民,张文兰,李惠民,范春方,孙涛,陈卫锋,张 敏.2004.南岭东段燕山早期正长岩 – 花岗岩杂岩的成 因和意义[J].中国科学(D辑),34(6):493-503.
- 陈志刚,李献华,李武显,刘敦一.2003.赣南全南正长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对华南燕山早期构造背 景的制约[J].地球化学,32(3):223-229.
- 程顺波,付建明,马丽艳,卢友月,王晓地,夏金龙.2016.南岭地 区早侏罗世成矿作用——来自粤北大顶铁锡矿床 LA-ICP-MS和Ar-Ar年代学证据[J].地质学报,90(1): 163-176.
- 邓必荣,石鉴东.2000.兴国杨村岩体特征及侵位机制探讨[J]. 华东地质学院学报,23(2):141-145.
- 邓景.1979.广东连平大顶富铁矿床成因探讨[J].大地构造与 成矿学,(2):35-50.
- 邓平,舒良树,谭正中.2003.诸广-贵东大型铀矿聚集区富铀 矿成矿地质条件[J].地质论评,49(5):486-493.
- 邓中林,杨晓聪.2017.粤东秀才堂铝质A型花岗岩体

LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].华南地质, 33(2):101-110.

- 丁 兴,陈培荣,陈卫锋,黄宏业,周新民.2005.湖南沩山花岗岩 中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年:成岩启示和意义[J].中国 科学(D辑),35(7):606-616.
- 范春方,陈培荣.2000.赣南陂头A型花岗岩的地质地球化学 特征及其形成的构造环境[J].地球化学, 29(4):358-366.
- 甘成势,王岳军,蔡永丰,刘汇川,张玉芝,宋菁菁,郭小飞.2016. 南岭地区温公岩体的岩石成因及其构造指示[J].地球 科学,41(1):17-34.
- 李献华,李武显,李正祥.2007.再论南岭燕山早期花岗岩的成 因类型与构造意义[J].科学通报,52(9):981-991.
- 贺振宇,徐夕生,陈荣,邢光福.2007.赣南中侏罗世正长岩-辉长岩的起源及其地质意义[J].岩石学报,23(6): 1457-1469.
- 侯可军,陈振宇,王登红,陈郑辉,赵正.2012.赣南兴国杨村岩 体锆石 U-Pb 年龄测定及其地质意义[J].岩矿测试,31 (3):549-553.
- 冀春雨,巫建华.2010.江西南部余田群长英质火山岩 SHRIMP锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].东华理工大 学学报(自然科学版),33(2):131-138.
- 贾小辉,王晓地,杨文强,牛志军.2014.桂北圆石山早侏罗世 A型花岗岩的岩石成因及意义[J].地球科学——中国 地质大学学报,39(1):21-36.
- 贾小辉,王晓地,杨文强.2022.广西大瑶山地区大进早古生代 高分异A型花岗岩的厘定及成因[J].地球科学与环境 学报,44(2):171-190.
- 林小明,李宏卫,黄建桦,娄峰.2016.广东连平大顶铁矿区石 背岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及地质意义[J].中山 大学学报(自然科学版),55(1):131-136.
- 林小明,李宏卫,林杰春,黄建桦,黄孔文.2017.粤北新丰雷公 寨早侏罗世火山岩的厘定及其形成构造环境[J].华南 地质,33(1):34-46.
- 凌洪飞,沈渭洲,邓平,蒋少涌,高剑峰,叶海敏,濮巍,谭正 中.2004.粤北笋洞花岗岩的形成时代、地球化学特征与 成因[J].岩石学报,20:413-424.
- 凌洪飞,沈渭洲,孙涛,蒋少涌,姜耀辉,倪培,高剑峰,黄国龙, 叶海敏,谭正中.2006. 广东省22个燕山期花岗岩的源 区特征及成因:元素及Nd-Sr同位素研究[J].岩石学报, 22(11):2687-2703.
- 凌洪飞.2011.论花岗岩型铀矿床热液来源——来自氧逸度 条件的制约[J].地质论评,57(2):193-206.
- 刘 潜,于津海,苏 斌,王 勤,唐红峰,许 海,崔 翔.2011.福建锦 城187 Ma花岗岩的发现——对华南沿海早侏罗世构

造演化的制约[J].岩石学报,27(12):3575-3589.

- 刘 鹏,程彦博,毛景文,王小雨,姚 薇,陈叙涛,曾晓剑.2015.粤 东田东钨锡多金属矿床花岗岩锆石U-Pb年龄、Hf同位 素特征及其意义[J].地质学报,89(5):1244-1257.
- 刘建清,谢 渊,赵 瞻,林家善,冯伟明,黄学平.2013.湖南雪峰 山地区白马山花岗岩年代学特征及构造意义[J].地学 前缘,20(5):25-35.
- 娄峰,李宏卫,陈光明,敖文波,赖中信,卢映新,杨燕娜.2011. 花岗岩演化与铀钍元素富集的关系:以粤北贵东岩体 为例[J].地学前缘,18(1):110-117.
- 吕昭英,陈沐龙,胡在龙,傅杨荣,魏昌欣,袁勤敏,常振宇,黄武 轩.2019.琼北翁田铝质A型花岗岩的锆石U-Pb年代 学、地球化学特征及其地质意义[J].华南地质,35(3): 306-316.
- 汤谨晖,娄峰,甘炳艳,黄文生.2016.粤东北仁差盆地早侏罗 世花岗岩基底LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意 义[J].地质通报,35(6):989-997.
- 王 磊,胡明安,杨 振,陈开旭,夏金龙.2010.粤北大宝山矿区花 岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意 义[J].地球科学,35(2):175-185.
- 王锦荣,张哲坤,凌明星,吕新彪,陈斌.2020.南岭早侏罗世稀 有金属成矿作用研究——以闽西南大坪花岗斑岩为 例[J].岩石学报,36(1):125-140.
- 吴福元,李献华,杨进辉,郑永飞.2007.花岗岩成因研究的若 干问题[J].岩石学报,23(6): 1217-1238.
- 吴福元,刘小驰,纪伟强,王佳敏,杨 雷.2017.高分异花岗岩的 识别与研究[J].中国科学:地球科学,47:745-765.
- 谢 昕,徐夕生,邹海波,蒋少涌,张 明,邱检生.2005.中国东南 部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J₂早期玄武岩[J].中 国科学(D辑),35(7):587-605.
- 余心起,吴淦国,张达,狄永军,臧文拴,张祥信,汪群峰.2005. 中国东南部中生代构造体制转换作用研究进展[J].自 然科学进展,15(10):1167-1174.
- 余心起,狄永军,吴淦国,张达,郑勇,代堰锫.2009.粤北存在
 早侏罗世的岩浆活动——来自霞岚杂岩 SHRIMP 锆石
 U-Pb年代学的证据[J].中国科学(D辑),52(4):468-480.
- 赵正,陈毓川,王登红,李建康,刘善宝,陈振宇,郭春丽,王平 安.2020.华南中生代动力体制转换与钨锡锂铍铌钽稀 土矿床成矿系列的叠加演化[J].岩石学报,38(2): 301-322.
- 周新民.2003.对华南花岗岩研究的若干思考[J].高校地质学报,9(4):556-565.
- 周新民.2007.南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力 学演化[M].北京:科学出版社, 576-595.

- Chen P R, Zhou X M, Zhang W L, Li H M, Fan C F, Sun T, Chen W F, Zhang M. 2005. Petrogenesis and significance of early Yanshanian syenite-granite complex in eastern Nanling Range [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 48(7):912-924.
- Dahlquist J A, Alasino P H, Bello C. 2014. Devonian F-rich Peraluminous A-type Magmatism in the Proto-Andean Foreland (Sierras Pampeanas, Argentina): Geochemical Constraints and Petrogenesis from the Weslern-central Region of the Achala Batholith [J]. Mineralogy and Petrology, 108(3):391-417.
- Dostal J, Chatterjee A K. 2000. Contrasting behaviour of Nb/ Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton (Nova Scotia, Canada) [J]. Chemical Geology, 163(1-4): 207-218.
- Dufek J, Bergantz G W. 2005. Lower crustal magma genesis and preservation: a stochastic framework for the evaluation of basalt-crust interaction [J]. Journal of Petrology, 46(11): 2167-2195.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. Lithos, 26:115-134.
- Gan C S, Wang Y J, Zhang Y Z, Zhang J. 2017. The earliest Jurassic A-type granite in the Nanling Range of southeastern South China: Petrogenesis and geological implications [J]. International Geology Review, 59(3): 274-292.
- Gan C S, Wang Y J, Zhang Y Z, Wang Y, Qian X, Sheldrick T C, Liu Z. 2022. Early Jurassic high $\epsilon_{Nd}(t)$ - $\epsilon_{Hf}(t)$ granites in the Southeastern South China Block: Early Jurassic crustal growth or crustal reworking?[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 223:104995.
- He C, Xu C, Zhao Z, Kynicky J, Song W L, Wang L. 2017. Petrogenesis and mineralization of REE-rich granites in Qingxi and Guanxi, Nanling region, South China [J]. Ore Geology Reviews, 81:309-325.
- He Z Y, Xu X S, Niu Y L. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China [J]. Lithos, 119(3-4): 621-641.
- Hu R Z, Bi X W, Peng J T, Liu S, Zhong H, Zhao J H, Jiang G H. 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary [J]. Economic Geology, 103:583-598.

- Li X H, Chen Z G, Liu D Y, Li W X. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: Age, origin and tectonic significance [J]. International Geology Review, 45:898-921.
- Li X H, Chung S L, Zhou H W, Lo C H, Liu Y, Chen C H. 2004. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-eastern Guangxi: ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for the tectonic evolution of SE China [J]. In: Malpas J, Fletcher C J, Aitchison J C. Ali J. (eds.), Aspects of the Tectonic Evolution of China. Geological Society, London, Special Publications, 226:193-216.
- Li X H, Li Z X, Li W X, Liu Y, Yuan C, Wei G J, Qi C S. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab?[J]. Lithos, 96:186-204.
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300 km-wide intra-continental orogen and post-orogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model [J]. Geology, 35:179-182.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth Science Reviews, 37(3): 215-224.
- Jiang Y H, Wang G C, Liu Z, Ni C Y, Qing L, Zhang Q. 2015. Repeated slab-advance-retreat of the Palaeo-Pacific plate underneath SE China [J]. International Geology Review, 57:472-491.
- Jiang Y H, Wang G C, Qing L, Zhu S Q, Ni C Y. 2017. Early Jurassic A-type granites in southeast China: shallow dehydration melting of early Paleozoic granitoids by basaltic magma intraplating [J]. Journal of Geology, 125: 351-366.
- Jiang Y H, Liu Y C, Han B N, Qing L, Du F G. 2022. Contrasting origins of A-type granites in the Late Triassic-Early Jurassic Pitou complex, southern Jiangxi province: Implications for Mesozoic tectonic evolution in South China [J]. Lithos, 426-427:106794.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rock [J]. Journal of Petrology, 25(4):956-983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area,

Northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1):63-81.

- Sandiford M, Hand M. 1998. Australian Proterozoic high-temperature, low-pressure metamorphism in the conductive limit [J]. Geological Society, London, Special Publications, 138(1):109-120.
- Shen W Z, Ling H F, Li W X, Wang D Z, Huang X, Pan J. 1999. The Nd-Sr isotope study of Mesozoic granitoids in Jiangxi province [J]. Chinese Science Bulletin, 44: 1427-1431.
- Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B, Glazner A F. 2005. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 148(6):635-661.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [J]. Geological Society London Special Publications, 42: 313-345.
- Timofeev A, Migdisov A A, Williams-Jones A E. 2017. An experimental study of the solubility and speciation of tantalum in fluoride-bearing aqueous solutions at elevated temperature [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 197: 294-304.
- Wang L X, Ma C Q, Lai Z X, Marks M A W, Zhang C, Zhong Y F. 2015. Early Jurassic mafic dykes from the Xiazhuang ore district (South China): implications for tectonic evolution and uranium metallogenesis [J]. Lithos, 239:71-85.
- Wang K X, Chen W F, Chen P R, Ling H F, Huang H. 2015. Petrogenesis and geodynamic implications of the Xiema and Ziyunshan plutons in Hunan Province, South China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 111: 919-935.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell BW. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407-419.
- Yang J H, Zhang J H, Chen J Y, Sun J F. 2021. Mesozoic con-

tinental crustal rejuvenation of South China: Insights from zircon Hf-O isotopes of early Jurassic gabbros, syenites and A-type granites [J]. Lithos, 402-403:105678.

- Yu Y S, Lou F, Dai P Y, Guo F S, Yang Q D. 2018. First report LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Early Jurassic volcanic rocks from Rencha volcanic basin, northeast Guangdong province, southeastern China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 92(5):2036-2038.
- Yu X Q, Wu G G, Zhao X X, Gao J F, Di Y J, Zheng Y, Dai Y P, Li C L, Qiu J T. 2010. The Early Jurassic tectono-magmatic events in southern Jiangxi and northern Guangdong provinces, SE China: Constraints from the SHRIMP zircon U-Pb dating [J]. Journal of Asian Earth Science, 39(5):408-422.
- Zhang D, Zhao K D, Chen W, Jiang S Y. 2018. Early Jurassic mafic dykes from the Aigao uranium ore deposit in South China: Geochronology, petrogenesis and relationship with uranium mineralization [J]. Lithos, 308-309:118-133.
- Zhao P L, Zhao H J, Yuan S D, Mao J W. 2019. The Early Jurassic Fe-Sn metallogenic event and its geodynamic setting in South China: Evidence from Re-Os, U-Pb geochronology and geochemistry of the Dading magnesian skarn Fe-Sn deposit [J]. Ore Geology Reviews, 111: 102970.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. Episodes, 29(1):26-33.
- Zhou Z M, Ma C Q, Wang L X. Chen S G, Xie C F, Li Y, Liu W. 2018. A source-depleted Early Jurassic granitic pluton from South China: Implication to the Mesozoic juvenile accretion of the South China crust [J]. Lithos, 300: 278-290.
- Zhu W G, Zhong H, Li X H, He D F, Song X Y, Ren T, Chen Z Q, Sun H S, Liao J Q. 2010. The early Jurassic mafic-ultramafic intrusion and A-type granite from northeastern Guangdong, SE China: age, origin, and tectonic significance [J]. Lithos, 119:313-329.