

湖南桃江地区印支期辉绿岩成因 ——地球化学、年代学和Sr-Nd-Pb同位素约束

金鑫鏢^{1,2}, 王磊^{1,2}, 向华³, 刘重芄¹, 段桂玲¹, 李子云³

JIN Xinbiao^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, XIANG Hua³, LIU Zhongpeng¹, DUAN Guiling¹, LI Ziyun³

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

2. 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;

3. 湖南省地质矿产勘查开发局四一三队, 湖南 常德 530023

1. Wuhan Center of Geological Survey, CGS, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, CGS, Wuhan 430205, Hubei, China;

3. Team 413, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Hunan Province, Changde 415000, China

摘要:对湖南桃江地区江石桥辉绿岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,获得的岩浆侵位年龄为 $229 \pm 2.3\text{Ma}$ ($n=8$, MSWD=1.8, 2σ)。其低钾($K_2O/Na_2O=0.14\sim 0.16$),贫碱($K_2O+Na_2O=2.89\%\sim 2.96\%$),富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Th、U),亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti),呈轻稀土元素弱富集,无Eu、Ce异常,富集放射性成因Pb,低($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)(0.706052~0.706437),较低正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (1.54~1.86)的特征,表明岩石来源于下地壳物质和亏损地幔的混合源区。综合前人的研究结果认为,在印支运动造山后的伸展背景下,软流圈上涌导致区域下地壳及部分地幔物质发生熔融,形成辉绿岩岩浆并向上侵位而成。

关键词:辉绿岩;地球化学;年代学;Sr-Nd-Pb同位素;岩石成因;桃江地区

中图分类号:P588.12;P597 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)05-0750-11

Jin X B, Wang L, Xiang H, Liu C P, Duan G L, Li Z Y. Petrogenesis of diabase from Jiangshiqiao in Taojiang City, Hu'nan Province: Constrains from geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Pb isotopes. Geological Bulletin of China, 2017, 36(5):750-760

Abstract: Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for diabase from Jiangshiqiao in Taojiang City of Hu'nan Province yielded an emplacement age of $229 \pm 2.3\text{Ma}$ ($n=8$, MSWD=1.8, 2σ). The diabase is characterized by low values of potassium ($K_2O/Na_2O=0.14\sim 0.16$), and alkali ($K_2O+Na_2O=2.89\%\sim 2.96\%$), enrichment of large ion lithophile elements and LREE and depletion of high field strength elements, low ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ratios (0.70606~0.70644), low positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (1.55~1.87) and enrichment of radioactive Pb, suggesting a mixed source of the depleted mantle (DM) and the lower crustal. In combination with previous studies, the authors hold that the diabase was formed through partial melt of the mantle and lower crustal components by the upwelling asthenosphere during the Indo-sinian post-orogenic lithosphere extension in Hu'nan Province.

Key words: diabase; geochemistry; geochronology; Sr-Nd-Pb isotopes; petrogenesis; Taojiang

扬子和华夏地块沿钦杭结合带(江山-绍兴断裂)于新元古代拼合形成华南板块^[1-5](图1-a)。拼合之后的华南板块经历了多期且复杂的构造演

化^[8-15]。尽管对晚古生代一早中生代时期的印支运动发生机制还存在一定的分歧^[10-18],但华南对印支运动的响应却是不争的事实,主要表现为地层的

收稿日期:2016-09-18;修订日期:2017-03-09

资助项目:中国地质调查局项目《雪峰古陆及邻区金刚石找矿选区评价》(编号:12120113063000)和国家自然科学基金项目《粤北大宝山多金属矿床成因研究》(批准号:41302068)

作者简介:金鑫鏢(1986-),男,硕士,工程师,从事岩石学研究。E-mail:cowboyking@126.com

通讯作者:王磊(1981-),男,博士,副研究员,从事岩石学、矿床学研究。E-mail:cgsleiwang@163.com

整合、岩石的变质变形、大规模的花岗质岩浆活动及少量出露的基性岩^[6,13-15,19-20]。目前许多学者对华南印支期花岗岩及成矿、印支期变质变形、晚古生代—早中生代地层中碎屑锆石等开展了大量的研究^[10-17,21-26],为了解扬子和华夏地块拼合后的演化历史、华南板块与印支地块和华北板块在印支期的碰撞拼合过程提供了诸多证据。

湖南省印支运动表现强烈,由南东往北西,地层不整合面由高角度不整合逐渐变为低角度不整合到整合,岩浆活动也逐渐变弱,但止于鹤峰—来凤断裂^[19-20](图 1-b)。岩浆活动以花岗岩为主,由南东往北西,出露有诸广山、阳明山、塔山、苗儿山、五峰仙、汉背、关帝庙、瓦屋塘、白马山、歇马、洩山、大神山、桃江等岩体^[6],少量的基性—超基性岩以岩墙、岩脉或包体的形式出露,侵入于志留纪、三叠纪花岗岩和古生代、青白口纪地层中,分布在宁远保安圩、

道县虎子岩、江永回龙圩、隆回老屋里、桃江瓦窑冲、醴陵枫林和东冲铺等地^②。前人对上述花岗岩开展了大量的岩石学、地球化学和同位素年代学研究^[14-16,27-33]③,取得了丰硕的成果;但对出露较少的印支期基性—超基性岩的研究相对薄弱^[34-39],制约了对华南印支造山运动的认识。本次利用高精度的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年技术,对湖南桃江地区江石桥辉绿岩的形成年龄进行了精确厘定,并结合全岩主、微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素组成特征,进一步探讨了岩浆源区性质及其形成的构造背景。

1 地质背景

桃江地区位于扬子板块东南缘江南造山带中部(图 1-a),出露地层以新元古代青白口系、下古生界及第四系为主(图 1-c)。其中,青白口系冷家溪群为一套岩屑杂砂岩、石英杂砂岩夹板岩、砂质粉

图 1 湖南桃江地区地质图(据参考文献[6-7]①修改)

Fig.1 Geological map of Taojiang area in Hu'nan Province

砂岩;青白口系板溪群为一套条带状板岩、凝灰质板岩、石英砂岩夹凝灰质砂岩。南华系为一套含砾石英砂岩、含砾石英板岩、含炭质板岩夹含锰灰岩、冰碛泥砾岩。寒武系为一套底部由黑色页岩、板岩组成,顶部由纹层状灰岩组成的黑色岩系;上覆的奥陶系为一套含笔石的粉砂质板岩、炭质板岩、硅质板岩、硅质岩组合,二者整合接触;志留系缺失;泥盆系发育一套陆源碎屑岩,以高角度不整合覆盖于下伏的奥陶系之上,岩性以石英砾岩、砂质砾岩、砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩为主;石炭系整合覆盖于泥盆系之上,为一套碳酸盐沉积地层,岩性以灰岩、泥晶灰岩、亮晶灰岩、粉晶灰岩、生物碎屑灰岩为主,局部夹白云质灰岩、灰质白云岩;二叠系大部分缺失,仅零星出露少量灰岩、白云岩;研究区未见三叠系出露;白垩系为一套粒度较粗的砾岩、含砾砂岩为主的碎屑岩沉积;第四系底部为一套冲积物,顶部为一套洪积物。

岩浆活动以晋宁期和印支期为主(图1-c),晋宁期岩浆活动为研究区东北角出露的科马提质玄武岩,时代为825Ma^[40],印支期岩浆活动为研究区北部的桃江岩体和南部的沅山岩体。桃江岩体岩性组合为石英闪长岩-花岗岩-二长花岗岩,时代为211~222Ma^[27,33];沅山岩体岩性为黑云母二长花岗岩,时代为211~216Ma^[28]。此外,还有一些酸性脉侵入于沅山岩体、青白口系冷家溪群及益阳附近的玄武岩中。构造以断裂为主,为一系列北东向、北西向和近东西向的断裂。

除益阳科马提质玄武岩外,研究区基性岩出露较少(图1-c),主要为呈岩脉、岩株产出的辉绿岩、辉绿玢岩、角闪辉长岩。辉绿岩和辉绿玢岩见于研究区南部,以岩脉的形式侵入于三叠纪沅山花岗岩体和青白口系板溪群中;角闪辉石岩见于研究区北部,以小岩株的形式零星出露在志留纪桃江岩体中。该区基性岩年龄未见公开发表的文章报道。

2 样品采集及测试

2.1 样品特征

本次研究的辉绿岩样品(编号JSQ04)采集于湖南省益阳市桃江县江石桥村,共采集1件辉绿岩样品用于锆石U-Pb定年,4件辉绿岩样品用于全岩主量、微量元素和Sr-Nd-Pb同位素分析。岩石整体新鲜,呈灰绿色,沿北北东向呈岩脉状产出(图2-a、

b),侵入于石炭系中。岩脉宽3~5m,出露地表部分约20m,多发育有裂理,沿裂理局部可见黄铁矿化。野外及镜下观察显示(图2-c、d),岩石呈辉绿结构,块状构造,主要由斜长石(约55%)、辉石(约45%)及少量金红石、钛铁矿、磁铁矿、黄铁矿、锆石等组成。斜长石杂乱分布,形成三角状格架,架间充填不规则状的辉石,显示较典型的辉绿结构。斜长石呈较自形板条状,以0.1~0.15mm居多;辉石呈不规则粒状,以0.05~0.1mm者居多,少数发生绿泥石化(图2-c)。

2.2 分析方法

锆石分选由河北省廊坊市诚信地质服务公司完成。锆石的制靶、透射光、反射光拍照及阴极发光(CL)照相在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石微量元素和U-Th-Pb同位素在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(以下简称GPMR)利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)同时分析完成。激光剥蚀系统为GeoLas 2005,ICP-MS为Agilent 7500a。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。每个分析点数据包括20~30s空白信号和50s样品信号。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^[41-42]完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同Liu等^[41-43]。U-Pb年龄计算及谐和图绘制采用软件Isoplot/Ex_ver4.15^[44]。

主量元素分析在武汉综合岩矿测试中心使用Regaku 3080E1光谱仪采用XRF法完成,测定过程中用国家标样监控,分析误差小于2%。微量元素分析在GPMR利用Agilent 7500a ICP-MS分析完成,分析误差小于5%。详细的样品消解处理过程、分析精密度和准确度同Liu等^[41]。

Sr、Nd、Pb同位素分析在武汉地质矿产研究所Triton和MAT261热电离质谱仪上完成。样品化学制备在超净化实验室进行,Rb、Sr、Sm、Nd含量根据同位素稀释法原理计算,Rb、Sr、Sm、Nd、Pb全流程空白分别为 1×10^{-10} g、 2×10^{-10} g、 4.9×10^{-11} g、 1.2×10^{-10} g和 2.5×10^{-9} g。在测试过程中,采用GBW04411、GBW04419和NBS607监控化学制备流程,NBS987、NBS981和JNDI监控仪器状态,标准测定值和推荐值在误差范围内一致。

图2 桃江地区江石桥辉绿岩野外和显微照片

Fig. 2 Photograph and photomicrographs of the diabase from Jiangshiqiao in the Taojiang area

Pl—斜长石;Px—辉石;Chl—绿泥石

3 锆石 U-Pb 定年

样品JSQ04中的锆石颗粒绝大部分较自形,

少数为碎块或有缺损,以长柱状或椭圆状为主,恢复形貌后长 100~200 μm ,宽 50~80 μm ,长宽比 2:1~4:1。CL 图像显示(图 3),大部分锆石具有较

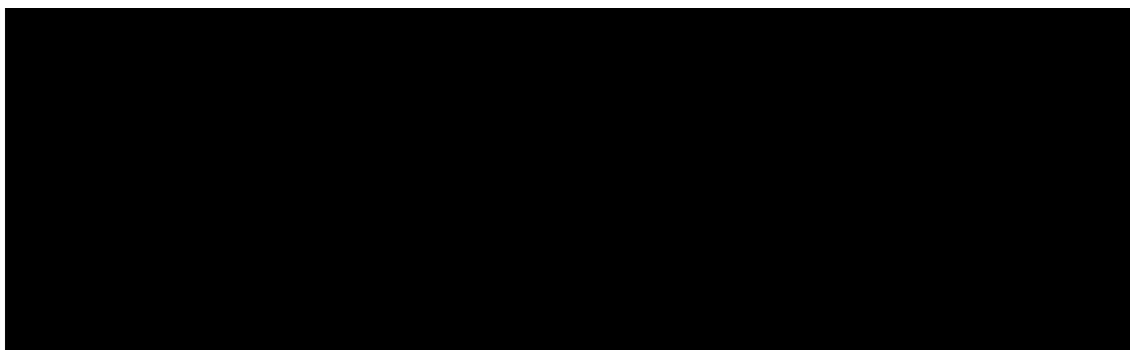


图3 桃江地区江石桥辉绿岩中典型锆石阴极发光图像

Fig. 3 Representative cathodoluminescence (CL) images for zircons of the diabase from Jiangshiqiao in the Taojiang area

明显的岩浆韵律环带,环带多数较宽缓,与辉绿岩中结晶出的锆石较一致。对其中22颗锆石进行了22个点的测年(表1;图4),这些锆石均具有较宽的Th、U含量($\text{Th}=20\times 10^{-6}\sim 1160\times 10^{-6}$, $\text{U}=44\times 10^{-6}\sim 3623\times 10^{-6}$)和较高的Th/U值(0.26~1.37)。上述22个分析点基本位于谐和线上及其附近(图4-a),年龄较分散,最年轻且谐和的8个分析点给出了 $229.9\pm 2.2\text{Ma}$ (MSWD=1.9)的交点年龄(图4-b),与这8个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 $229.0\pm 2.3\text{Ma}$ (MSWD=1.8)(图4-c)一致。其余14个分析点中,2个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $641\pm 5\text{Ma}$ 和 $653\pm 7\text{Ma}$,6个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为768~874Ma,6个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $1082\pm 36\text{Ma}$ 、 $1281\pm 38\text{Ma}$ 、 $1391\pm 24\text{Ma}$ 、 $1579\pm 29\text{Ma}$ 、 $1715\pm 30\text{Ma}$ 和 $1974\pm 33\text{Ma}$ 。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

桃江江石桥辉绿岩主量元素分析结果见表2。其中 SiO_2 含量为49.65%~50.55%, K_2O 含量为0.36%~0.41%, Na_2O 含量为2.53%~2.56%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量为2.89%~2.96%,在TAS图解中样品点落入碱性辉长岩区域(图5-a),在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解中落入低钾和钙碱性系列区域(图5-b)。 Al_2O_3 含量较高,为16.99%~17.16%, TiO_2 含量较低,为0.12%。 Fe_2O_3 、 FeO 含量变化较大,分别为2.39%~7.73%和1.97%~6.75%, MgO 含量为7.42%~7.90%,且 $\text{Mg}^\#$ 值较集中,为56.37~58.58。

4.2 稀土及微量元素

桃江江石桥辉绿岩微量元素分析结果见表2。

表1 桃江地区江石桥辉绿岩LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotope analyses of zircons from the diabase from Jiangshiqiao in the Taojiang area

点号	Pb/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/ U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	178	707	2357	0.30	0.055	0.002	0.27	0.01	0.0356	0.0004	409	60	244	8	225	2
2	311	1164	3556	0.33	0.061	0.001	0.30	0.01	0.0359	0.0003	640	36	270	5	227	2
3	125	377	1238	0.30	0.072	0.002	0.36	0.01	0.0360	0.0003	974	46	310	7	228	2
4	175	728	2256	0.32	0.051	0.001	0.25	0.01	0.0360	0.0004	239	42	230	5	228	2
5	164	690	1799	0.38	0.053	0.001	0.27	0.01	0.0362	0.0003	318	39	239	5	229	2
6	262	978	2256	0.43	0.064	0.001	0.32	0.01	0.0364	0.0003	740	34	285	6	231	2
7	182	629	2301	0.27	0.056	0.001	0.29	0.01	0.0366	0.0003	458	39	255	5	232	2
8	142	630	1449	0.43	0.052	0.001	0.27	0.01	0.0371	0.0005	280	38	240	6	235	3
9	112	140	532	0.26	0.063	0.002	0.92	0.03	0.1046	0.0009	717	44	660	13	641	5
10	39	60	133	0.45	0.061	0.002	0.90	0.04	0.1066	0.0012	637	69	649	20	653	7
11	54	86	68	1.27	0.073	0.003	1.27	0.05	0.1265	0.0015	1027	64	832	24	768	9
12	74	111	155	0.71	0.075	0.003	1.34	0.05	0.1299	0.0013	1064	55	861	21	787	7
13	86	127	129	0.99	0.068	0.003	1.21	0.04	0.1298	0.0015	866	56	807	20	787	9
14	139	184	224	0.82	0.072	0.002	1.41	0.04	0.1403	0.0013	997	39	891	16	846	7
15	98	96	330	0.29	0.077	0.002	1.54	0.04	0.1442	0.0012	1124	39	948	16	868	7
16	17.1	21.3	46	0.46	0.065	0.004	1.29	0.07	0.1453	0.0021	760	95	841	32	874	12
17	377	431	554	0.78	0.084	0.002	1.95	0.05	0.1688	0.0017	1281	38	1098	18	1006	9
18	214	246	284	0.87	0.076	0.002	1.87	0.05	0.1794	0.0014	1082	36	1071	16	1063	7
19	279	181	527	0.34	0.088	0.002	2.99	0.06	0.2437	0.0020	1391	24	1404	15	1406	11
20	266	203	207	0.98	0.098	0.002	3.70	0.08	0.2740	0.0023	1579	29	1572	18	1561	12
21	181	138	170	0.81	0.105	0.002	4.32	0.10	0.2972	0.0023	1715	30	1698	19	1677	11
22	636	352	441	0.80	0.121	0.003	6.51	0.16	0.3864	0.0031	1974	33	2047	22	2106	14

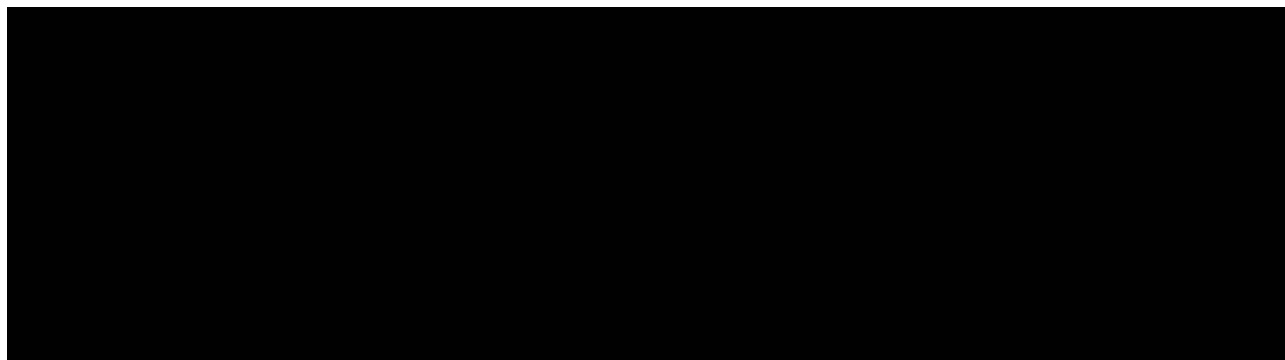


图 4 桃江地区江石桥辉绿岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams for zircons of the diabase from Jiangshiqiao in the Taojiang area

样品的稀土元素总量(Σ REE)较低,为 $67.32 \times 10^{-6} \sim 70.73 \times 10^{-6}$, LREE/HREE=3.06~3.19, (La/Yb)_N值为3.45~3.62,轻、重稀土元素分馏较明显,稀土元素配分模式呈略右倾的轻稀土元素富集型(图6-a)。所有样品不存在Ce异常(δ Ce=1.02~1.04)和Eu异常(δ Eu=0.98~1.03),反映在岩浆演化过程中无明显的斜长石分离结晶作用。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图6-b)中,各样品均表现为大离子亲石元素Ba、Th、U富集,高场强元素Ta、Nb、Ti亏损,P弱亏损,其中Ti亏损程度最高。Ti的亏损可能与金红石、钛铁矿的分离结晶有关,P的亏损可能与磷灰石的分离结晶有关。

4.3 Sr-Nd-Pb 同位素

桃江江石桥辉绿岩的Sr-Nd-Pb同位素分析结果见表3。辉绿岩样品的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.090~0.139, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.70645~0.70673,略高于原始地幔现代值(0.7045)^[47], $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值为0.1558~0.1574, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为0.512656~0.512675,略低于原始地幔现代值(0.512638)^[48]。根据本次所测辉绿岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 $t=229\text{Ma}$ 进行计算,其 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值介于0.70606~0.70644之间, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为1.55~1.87。Nd二阶段模式年龄(t_{DM^2})值为0.76~0.78Ga。总体上, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为较低的正值, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值较低,反映相对亏损的地幔源区或有亏

图 5 辉绿岩 TAS 分类图(a,底图据参考文献[45])和 SiO₂-K₂O 图解(b)

Fig. 5 TAS classification (a) and SiO₂-K₂O (b) diagrams of diabase

表2 桃江地区江石桥辉绿岩主量、微量和稀土元素含量
Table 2 Major, trace and rare earth elements composition of the diabase from Jiangshiqiao in the Taojiang area

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O+	CO ₂	Σ	Sc	V
JSQ04-1	50.18	0.12	16.99	2.39	7.42	6.75	0.14	9.13	2.56	0.40	0.14	2.78	0.55	99.55	34.5	206
JSQ04-2	49.65	0.12	17.02	3.10	7.91	6.05	0.13	9.29	2.53	0.41	0.14	2.89	0.28	99.52	32.9	205
JSQ04-3	50.55	0.12	17.16	2.56	7.53	5.95	0.14	9.43	2.54	0.40	0.15	2.82	0.42	99.77	34.1	206
JSQ04-4	49.94	0.12	17.08	7.73	7.90	1.97	0.14	8.97	2.53	0.36	0.14	2.80	0.14	99.82	34.4	203
样品号	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Rb	Ba	U	Th	Pb	Nb	Ta	Zr	Hf	La
JSQ04-1	289	47.3	159	80.8	72.1	259	10.8	163	0.32	2.17	4.43	4.54	0.30	115	2.76	9.73
JSQ04-2	293	47.0	157	78.2	71.6	253	12.1	165	0.32	1.98	3.83	4.31	0.27	112	2.69	9.39
JSQ04-3	296	47.1	152	79.2	72.0	248	8.90	131	0.33	2.19	4.03	4.56	0.31	114	2.82	10.1
JSQ04-4	296	48.0	153	82.0	69.6	250	7.44	191	0.29	2.08	6.56	4.31	0.27	110	2.65	9.39
样品号	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y		
JSQ04-1	22.4	2.92	12.8	3.27	1.16	3.99	0.68	4.61	0.92	2.82	0.39	2.72	0.42	26.6		
JSQ04-2	22.1	2.81	12.6	3.18	1.21	3.99	0.68	4.46	0.92	2.81	0.39	2.73	0.40	26.5		
JSQ04-3	23.2	2.98	13.1	3.31	1.20	4.08	0.70	4.69	0.97	2.81	0.41	2.79	0.42	26.9		
JSQ04-4	21.8	2.89	12.4	3.11	1.20	4.13	0.69	4.55	0.94	2.78	0.40	2.69	0.40	26.0		

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素为10⁻⁶

损地幔源区的加入。在⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd图(图7-a)中,样品投影点在亏损地幔(DM)的演化线上,但也靠近全球硅酸盐地球(BSE)平均值区域。辉绿岩样品的²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb值为38.507~38.805,

²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb值为15.561~15.839,²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb值为18.262~18.329。在²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb图(图7-b)中,3个样品投影点位于下部大陆地壳区域,具有比MORB(大洋中脊玄武岩)高的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb和

表3 桃江地区江石桥辉绿岩素Sr、Nd、Pb同位素组成
Table 3 Sr, Nd and Pb isotopic compositions of the diabase from Jiangshiqiao in the Taojiang area

样品号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(2σ)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd(2σ)	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd(t)}	t _{DM} /Ga	t _{DM} ^c /Ga
JSQ04-1	0.122	0.70645±4	0.157071	0.512666±7	0.706054	0.512431	1.71	1.30	0.77
JSQ04-2	0.139	0.70663±8	0.157235	0.512669±3	0.706179	0.512433	1.76	1.30	0.77
JSQ04-3	0.104	0.70660±7	0.155812	0.512656±3	0.706262	0.512422	1.55	1.30	0.78
JSQ04-4	0.090	0.70673±4	0.157441	0.512675±6	0.706438	0.512439	1.87	1.29	0.76
样品号	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb(2σ)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb(2σ)	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb(2σ)	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb				
JSQ04-1	38.805±7	15.625±2	18.329±3	2.117	0.852				
JSQ04-2	38.589±13	15.563±6	18.266±6	2.113	0.852				
JSQ04-3	38.521±12	15.839±5	18.259±6	2.110	0.867				
JSQ04-4	38.507±10	15.561±4	18.262±4	2.109	0.852				

注:⁸⁷Rb/⁸⁶Sr和¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd值据同位素稀释法测试的Rb、Sr、Sm、Nd含量和Sr、Nd同位素组成计算;球粒陨石均一储库(CHUR)组成:⁸⁷Rb/⁸⁶Sr=0.0827,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.7045,¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.1967,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512638;亏损地幔(DM)取值:¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.2137,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.51315;大陆地壳(CC)取值:¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.118,*t*_{Rb}=1.42×10⁻¹¹·a⁻¹,*t*_{Sm}=6.54×10⁻¹²·a⁻¹;同位素初始比值为*t*=100Ma时比值;(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i和(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i分别代表初始Sr和Nd同位素比值

图 6 桃江地区江石桥辉绿岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化值据参考文献[46])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b) of the diabase from Jiangshiqiao in the Taojiang area

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值,说明其岩浆源区为下地壳物质。

5 讨论

5.1 岩浆活动时代

本次研究采用高精度的 LA-ICP-MS 法对湖南桃江地区江石桥辉绿岩进行锆石 U-Pb 定年,22 个分析点基本均位于谐和线上及其附近,8 个锆石分析点给出的交点年龄为 $229.9 \pm 2.2\text{Ma}$,与它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 $229.0 \pm 2.3\text{Ma}$ 一致,其阴

极发光图像(图 3)显示,锆石具有较宽的韵律环带,为典型的辉绿岩中结晶出的锆石。因此,将 $229.0 \pm 2.3\text{Ma}$ 解释为该辉绿岩的侵位年龄。较老年龄的 14 颗锆石应为源区继承和/或侵位过程中捕获的锆石。江石桥辉绿岩形成年龄与桃江瓦窑冲地区三叠纪花岗岩中残留的角闪辉长岩 (223Ma)^①、道县虎子岩基性岩包体 ($220 \pm 9\text{Ma}$ 、 $230 \pm 8\text{Ma}$ 和 $233 \pm 5\text{Ma}$)^[36]、宜章长城岭辉绿岩 ($227.0 \pm 4.2\text{Ma}$)^[38] 年龄在误差范围内一致,略老于

图 7 桃江地区江石桥辉绿岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (a)和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b)图解(底图据参考文献[49])

Fig. 7 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (a) and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) diagrams of the diabase from Jiangshiqiao in the Taojiang area

DM—亏损地幔;BSE—全硅酸盐地球;EM I 和 EM II—富集地幔;HIMU—具有高 U/Pb 值的地幔;PREMA—经常观测到的普通地幔;MORB—大洋中脊玄武岩;NHRL—北半球参考线

宁远保安圩碱性玄武岩($212.3 \pm 1.7\text{Ma}$ 和 $205.5 \pm 3.0\text{Ma}$)^[37]年龄,也与其侵入早石炭世地层的地质事实吻合。湖南桃江地区及其附近的印支期花岗岩(图1-b)岩浆活动也属于该时期,大神山岩体为 224Ma ^[32]和 215Ma ^[27],桃江岩体为 222Ma ^[33]和 211Ma ^[27],洩山岩体为 $216 \sim 211\text{Ma}$ ^[28],白马山岩体不同单元年龄范围为 $243 \sim 204\text{Ma}$ ^[16,28,30-31],歇马岩体为 214Ma ^[29],瓦屋塘岩体为 $216 \sim 215\text{Ma}$ ^[33],关帝庙岩体为 239Ma ^[31]。

5.2 源区性质

桃江地区江石桥辉绿岩MgO含量(7.42%~7.90%)和Mg[#]值较高且集中(56.37~58.58),说明岩浆未经历明显的分离结晶作用。K₂O和Na₂O含量随MgO含量的变化不存在明显变化,也基本无Eu异常($\delta\text{Eu}=0.98 \sim 1.03$),表明岩浆演化早期没有经历明显的分离结晶作用。P的弱亏损可能表明岩浆演化过程中,仅存在较低程度的磷灰石分离结晶作用;Ti的亏损可能与金红石、钛铁矿分离结晶有关。

从稀土元素配分模式和微量元素标准化蛛网图(图6)可见,辉绿岩样品的配分模式与下地壳较一致。其Nb/U值(13.5~14.7)远低于MORB和OIB(洋岛玄武岩)值(Nb/U=47)^[50],低于下地壳值(Nb/U=25)^[51],高于上地壳值(Nb/U=4.44)^[51],说明源区以地壳物质为主。Nb/Ta值为14.6~16.3(略低于原始地幔值 17.5 ± 2.0),Zr/Hf值为40.2~41.6(略高于原始地幔值 36.27 ± 2.0),均高于陆壳的相应比值(Nb/Ta=11.4, Zr/Hf=35.7)^[51],表现出壳幔混合源区的特点。低的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i值(0.706058~0.706441)、低正值的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(1.54~1.86),结合⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd和²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb图解(图7),也显示辉绿岩为下地壳物质和亏损地幔的混合源区。

湖南省同时期的基性岩中,仅道县虎子岩基性岩包体做过Sr-Nd同位素测试^[36,39],将其数据投影到⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd图(图7-a)中,投影落点较分散,但与江石桥辉绿岩基本均位于亏损地幔演化线上及其附近,几乎都未投影到富集地幔区域。Dai等^[36]测试计算的虎子岩基性岩包体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-6.9~3.3(主要为-2.2~3.3),结合Hf同位素正负值变化较大的特征,认为是亏损地幔和古老地壳的混合源区;杨金豹等^[39]测试计算的虎子岩基性岩包体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-3.1~-0.8,将其解释为EM II

型富集地幔源区,但在⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd图(图7-a)中并未落入富集地幔区域,笔者认为,解释为壳幔混合源区更合适。刘勇等^[38]的锆石Hf同位素研究结果表明,宜章长城岭辉绿岩也为下地壳和亏损地幔的混合来源。综合上述研究结果,笔者认为,湖南印支期基性岩可能均为下地壳和亏损地幔的混合源区。

5.3 构造背景

印支运动在华南地区的表现形式主要为地层的不整合、岩石的变质变形、大规模的花岗质岩浆活动及少量出露的基性岩。Wang等^[15]对华南印支期岩体形成时代及变质作用年龄统计结果表明,印支期大规模的花岗质岩浆活动及变质作用主要集中在250~200Ma之间,峰值为239Ma和220Ma。印支期基性岩浆活动除本次获得的江石桥辉绿岩229Ma的年龄外,高精度的年龄还有道县虎子岩基性岩包体(220~233Ma)^[36]、宁远保安圩碱性玄武岩(206~212Ma)^[37]、宜章长城岭辉绿岩(227Ma)^[38],桃江瓦窑冲残留的角闪辉长岩(223Ma)^①,上述基性岩的发现暗示,206~233Ma期间这些地区发生了软流圈的上涌、玄武质岩浆的底侵及岩石圈的伸展减薄作用。Wang等^[15]、王岳军等^[52-53]和柏道远等^[33]认为,印支期陆壳的叠置加厚(造山运动)及随后基性岩浆的底侵作用(造山后伸展背景下),导致地壳含水矿物相熔融,是印支期构造岩浆活动的主要因素。尽管印支造山运动的机制是源于二叠纪开始的太平洋板块西向俯冲^[16-17],还是华南周缘多块体碰撞的远程效应^[13-15,54-57]还存在争议,但在印支期造山后的伸展背景下,软流圈上涌及玄武质岩浆的底侵可能促使地壳物质发生熔融,形成大量的花岗岩及桃江江石桥辉绿岩、道县虎子岩玄武岩、宜章长城岭辉绿岩等基性岩。

6 结论

湖南桃江地区江石桥辉绿岩形成于晚三叠世 $229.0 \pm 2.3\text{Ma}$,岩石为下地壳和亏损地幔混合来源;在印支运动造山后的伸展背景下,软流圈上涌促使下地壳及地幔物质发生熔融,形成桃江江石桥辉绿岩、道县虎子岩玄武岩、宁远保安圩玄武岩、宜章长城岭辉绿岩等基性岩。

致谢:锆石U-Pb同位素和全岩微量元素分析分别得到了中国地质大学(武汉)地质过程与矿产

资源国家重点实验室胡兆初研究员和陈海红老师的帮助, Sr-Nd同位素测试得到了中国地质调查局武汉地质调查中心梅玉萍工程师的帮助, 湖南省地质矿产勘查开发局四一三队熊安本工程师参与了野外工作, 审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见, 在此一并致谢。

参考文献

- [1] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from northern Guangxi, south China: Implications for tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2006, 145: 111-130.
- [2] Li Z X, Zhang L H, Powell C M. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? [J]. *Geology*, 1995, 23: 407-410.
- [3] Zhao G C, Cawood P A. Tectonothermal evolution of the Mayuan assemblage in the Cathaysia Block: new evidence for Neoproterozoic collision-related assembly of the South China craton[J]. *American Journal of Science*, 1999, 299: 309-339.
- [4] Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, et al. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. *Precambrian Research*, 2007, 59: 117-131.
- [5] Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, et al. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny[J]. *Geology*, 2011, 39: 299-302.
- [6] 孙涛, 刘昌实, 丁兴. 江西三标岩体成因及其地质意义[C]//2004年全国岩石学与地球动力学研讨会. 2004.
- [7] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2006, 145: 111-130.
- [8] 任纪舜. 论中国南部的大地构造[J]. *地质学报*, 1990, 64(4): 3-16.
- [9] Faure M, Sun Y, Shu L S, et al. Extensional tectonics within a subduction-type orogen. The case study of the Wugongshan dome (Jiangxi Province, southeastern China) [J]. *Tectonophysics*, 1996, 263: 77-106.
- [10] Lin W, Wang Q C, Chen K. Phanerozoic tectonics of south China block: New insights from the polyphase deformation in the Yunkai massif[J]. *Tectonics*, 2008, 27: 1-16.
- [11] Shu L S, Faure M, Wang B, et al. Late Palaeozoic-Early Mesozoic geological features of South China: Response to the Indosinian collision events in Southeast Asia[J]. *C. R. Geoscience*, 2008, 340: 151-165.
- [12] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(7): 1035-1052.
- [13] Wang Y J, Zhang Y, Fan W, et al. Structural signatures and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China Block[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(6): 985-998.
- [14] Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, et al. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, South China: Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints[J]. *Tectonics*, 2007, 26: 1-21.
- [15] Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, et al. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1273-1305.
- [16] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 2007, 35: 179-182.
- [17] Chu Y, Faure M, Lin W, et al. Tectonics of the Middle Triassic intracontinental Xuefengshan Belt, South China: new insights from structural and chronological constraints on the basal de'collement zone[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2012, 101: 2125-2150.
- [18] Lepvrier C, Faure M, Nguyen V V, et al. North-directed Triassic nappes in Northeastern Vietnam (East Bac Bo) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 56-68.
- [19] 金宠. 雪峰陆内构造系统逆冲推滑体系[D]. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 2010.
- [20] 陈世悦. 江南-雪峰地区加里东期和印支期不整合分布规律[J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1212-1219.
- [21] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(4): 335-343.
- [22] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(4): 510-526.
- [23] 张怀峰, 陆建军, 王汝成, 等. 广西栗木大岐岭隐伏花岗岩的成因及其构造意义: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. *中国科学(D辑)*, 2014, 44(5): 901-918.
- [24] 梁新权, 周云, 蒋英, 等. 二叠纪东吴运动的沉积响应差异: 来自扬子和华夏板块吴家坪组或龙潭组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄研究[J]. *岩石学报*, 2013, 29(10): 3592-3606.
- [25] Hu L S, Cawood P A, Du Y S, et al. Detrital records for Upper Permian-Lower Triassic succession in the Shiwandashan Basin, South China and implication for Permo-Triassic (Indosinian) orogeny[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 98: 152-166.
- [26] 张东亮, 黄德志, 张宏法, 等. 湘中盆地基底的时代格架: 来自锡矿山碎屑锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. *岩石学报*, 2016, 32(11): 3456-3468.
- [27] 续海金, 马昌前, 钟玉芳, 等. 湖南桃江、大神山花岗岩的锆石 SHRIMP 定年: 扬子与华夏拼合的时间下限[C]//2004年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要集. 2004.
- [28] 丁兴, 陈培荣, 陈卫峰, 等. 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)*, 2005, 35(7): 606-616.
- [29] 彭冰霞, 王岳军, 范蔚茗, 等. 湖南中部和广东西部3个典型花岗岩岩体的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及其成岩意义[J]. *地质学报*, 2006, (10): 1597-1597.

- [30]Chen W F, Chen P R, Huang H Y, et al. Chronological and geochemical studies of granite and enclave in Baimashan pluton, Hunan, South China[J]. Science in China (Series), 2007, 50 (11): 1606–1627.
- [31]Wang Y J, Fan W M, Sun M, et al. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: a case study in the Hunan Province[J]. Lithos, 2007, 96: 475–502.
- [32]张龙升, 彭建堂, 张东亮, 等. 湘西大神山印支期花岗岩的岩石学和地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(1): 137–148.
- [33]柏道远, 陈必河, 钟响, 等. 湘西南印支期五团岩体锆石 SHRIMP U–Pb 年龄、地球化学特征及形成背景[J]. 中国地质, 2014, 41 (6): 2002–2018.
- [34]郭锋, 范蔚茗. 湖南省道县虎子岩片麻岩包体的岩石学特征和年代学研究[J]. 长春地质学院学报, 1997, (1): 25–30.
- [35]赵振华, 包志伟, 张伯友. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28: 7–14.
- [36]Dai B Z, Jiang S Y, Jiang Y H, et al. Geochronology, geochemistry and Hf–Sr–Nd isotopic compositions of Huziyan mafic xenoliths, southern Hunan Province, South China: Petrogenesis and implications for lower crust evolution[J]. Lithos, 2008, 102(1): 65–87.
- [37]刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 等. 湘南宁远地区碱性玄武岩形成时代的新证据: 锆石 LA–ICP–MS U–Pb 定年[J]. 地质通报, 2010, 29(6): 833–841.
- [38]刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 等. 湘南宜章地区辉绿岩、花岗斑岩、安山岩的形成时代和成因——锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. 地质通报, 2012, 31(9): 1363–1378.
- [39]杨金豹, 赵志丹, 莫宣学, 等. 湖南道县虎子岩碱性玄武岩及其基性捕虏体成因和地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(5): 1421–1432.
- [40]Wang X C, Li X H, Li W X, et al. Ca. 825 Ma komatiitic basalts in South China: First evidence for >1500 °C mantle melts by a Rodinian mantle plume[J]. Geology, 2007, 35(12): 1103–1106.
- [41]Liu Y S, Hu Z C, Gao S. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34–43.
- [42]Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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 of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51: 537–571.
- [43]Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U–Pb isotope and trace element analyses by LA–ICP–MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55: 1535–1546.
- [44]Ludwig K R. Isoplot 3: a geochronological toolkit for Microsoft excel[M]. Berkeley: Geochronology Centre Special Publication, 2003, 4: 1–74.
- [45]Wilson B M. Igneous petrogenesis[M]. Springer, 1989: 1–457.
- [46]Sun S S, McDoonough W. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes[J]. Geological Society Special Bulletin, 1989, 42: 313–345.
- [47]DePaolo D J, Wasserburg G J. Inferences about magma sources and mantle structure from variations of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ [J]. Geophysical Research Letters, 1979, 3(12): 743–746.
- [48]Jacobson S B, Wasserburg G J. Sm–Nd isotopic evolution of chondrites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 50(1): 139–155.
- [49]Rollison H R. 岩石地球化学[M]. 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜译. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000.
- [50]Hofmann A W, White W M. Mantle plumes from ancient oceanic crust[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1982, 57(2): 421–436.
- [51]Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[C]// Rudnick R L. Treatise on geochemistry: The crust. Oxford: Elsevier–Pergamon, 2003: 1–64.
- [52]王岳军. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成: 岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(6): 491–499.
- [53]王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 等. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及其成因启示[J]. 科学通报, 2005, 50(12): 1259–1266.
- [54]Lepvrier C, Maluski H, Tich V V, et al. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son belt and Kontum massif): Implications for the geodynamic evolution of Indochina[J]. Tectonophysics, 2004, 393: 87–118.
- [55]Cawood P A. Terra Australis Orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and Iapetus margins of Gondwana during the Neoproterozoic and Paleozoic[J]. Earth–Science Reviews, 2005, 69 (3/4): 249–279.
- [56]Carter A, Roques D, Bristow C, et al. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam[J]. Geology, 2001, 29: 211–214.
- [57]Carter A, Clift P D. Was the Indosinian orogeny a Triassic mountain building or thermotectonic reactivation event? [J]. Comptes Rendus Geosciences, 2008, 340: 83–93.
- ①湖南省地质调查院, 益阳幅(H49 C 004003)1:250000 区域地质调查报告. 2002.
- ②湖南省地质调查院, 湖南省区域地质志. 2013.
- ③湖南省地质调查院, 株洲幅(G49 C 003004)1:250000 区域地质调查报告. 2005.