

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.04.002

扬子陆块南部新元古代煌斑岩锆石 U-Pb 年龄及构造背景

段其发^{1,2}, 曹 亮^{1,2}, 周 云^{1,2}, 吴年文^{1,2}, 邹先武^{1,2}, 方喜林³

DUAN Qi-Fa^{1,2}, Cao Liang^{1,2}, ZHOU Yun^{1,2}, WU Nian-Wen^{1,2}, ZOU Xian-Wu^{1,2}, FANG Xi-Lin³

1. 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;

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. 湖北省地质局第二地质大队, 湖北 恩施 445000

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

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

3. Second Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Enshi 445000, Hubei, China

摘要: 鹤峰煌斑岩大地构造上位于江南造山带北缘、扬子陆块南部, 是鄂西南地区唯一的岩体, 本文采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及微量元素测试方法对其形成时代进行厘定, 并利用锆石微量元素探讨其形成构造环境。结果表明: (1) 岩体 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 839 ± 5 Ma (MSWD=2.1, n=24), 形成时代为新元古代; (2) 岩体锆石都具有较高稀土元素总量、重稀土元素 (HREE) 富集、轻稀土元素 (LREE) 亏损、强烈的 Ce 正异常和 Eu 负异常特征, 与岩浆锆石的特征一致; 在 Y-U/Yb 图中显示形成于靠近洋壳的陆壳锆石区域, 在锆石微量元素构造环境判别图解中, 大部分样品点落入火山弧环境区域, 少量样品点落入板内环境区域。综合分析认为, 鹤峰煌斑岩形成于晋宁期弧后盆地伸展环境, 可能与华夏陆块向扬子陆块俯冲过程中发生俯冲板片的折断、拆沉引发深部地幔上涌的动力学机制有关。

关键词: 煌斑岩; 锆石; U-Pb 年代学; 微量元素; 新元古代; 扬子陆块

中图分类号: P534.3

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2022)04-0583-13

Duan Q F, Cao L, Zhou Y, Wu N W, Zou X W and Fang X L. 2022. Zircon U-Pb Geochronology and Tectonic Settings of Neoproterozoic Lamprophyre in Southern Yangtze Block. *South China Geology*, 38(4): 583–595.

Abstract: Hefeng lamprophyre, as the only intrusion in southwestern Hubei province, is tectonically located in the northern margin of the Jiangnan orogenic belt and the southern part of the Yangtze Block. LA-ICP-MS U-Pb dating and trace element testing on zircons of Hefeng lamprophyre are used to determine its formation age and discuss its tectonic environment in this paper. The results show that: (1) The $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age of the intrusion is 839 ± 5 Ma (MSWD=2.1, n=24), indicating it had intruded in Neoproterozoic; (2) The zircons in intrusion are characterized by high total rare earth elements, enrichment of heavy rare earth elements (HREE), depletion of light rare earth elements (LREE), strong positive Ce anomalies and negative Eu anomalies, which are consistent with the characteristics of magmatic zircons. The Y-U/Yb diagram shows that it was formed in the continental crust zircon area near the oceanic crust. In the zircon trace element tectonic environment discrimination diagram, most rock samples fall into the volcanic arc environment area,

收稿日期: 2022-9-1; 修回日期: 2022-10-30

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160029, DD20221695)

第一作者: 段其发 (1966—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事区域地质和矿产地质调查研究工作, Email: 443775100@qq.com

while a small number of samples into the intraplate environment area. Comprehensive analysis shows that Hefeng lamprophyre was formed in the extension environment of the Jinning Period back arc basin, which may be related to the dynamic mechanism of deep mantle upwelling caused by the fracture and delamination of subduction plates during the subduction of the Cathaysian Block to the Yangtze block.

Key words: lamprophyre; zircon; U-Pb chronology; Trace elements; Neoproterozoic; Yangtze block

新元古代是华南重要的地质发展演化时期,经历了从洋壳俯冲、弧-陆碰撞到洋-陆俯冲、弧后盆地打开、造山后伸展的构造演化过程(王孝磊等, 2017)。在新元古代沿扬子陆块周缘分布有大量岩浆岩。其中, 880~820 Ma 期间的岩浆岩分布最广, 岩性以花岗岩、花岗闪长岩为主(冯定犹和李志昌, 1991; Wang X L et al., 2006, 2014; 高维和张传恒, 2009; 周金城等, 2009; 薛怀民等, 2010; 柏道远等, 2011; 王敏等, 2011; 张世涛等, 2016; 陕亮等, 2017; 王艳等, 2018; 谭清立等, 2019); 其次为基性-超基性岩(蛇绿岩)、辉绿岩(陆慧娟等, 2006, 2007; 丁炳华等, 2008; 张春红等, 2009; Zhou J C et al., 2009; 周效华等, 2014)、中酸性火山岩及细碧-角斑岩、玄武岩、高镁安山岩(董树文等, 2010; 薛怀民等, 2010; 张玉芝等, 2011, 2015; 高林志等, 2012; 卓皆文等, 2017)、熔结火山集块岩(张传恒等, 2014), 并在同时代地层(冷家溪群、梵净山群、四堡群等)中普遍发育火山凝灰岩(孙海清等, 2012; 高林志等, 2010, 2014)。已有的研究认为该时期的岩浆岩多形成于拉张构造环境, 并对其深部动力学机制提出了两种观点: 一是板块俯冲模式, 认为新元古代早中期岩浆岩受控于西缘的攀西-汉南弧和东南缘的江南岛弧岩浆作用(Zhou M F et al., 2002, 2006; Zhao G C, 2015; 徐丽娟等, 2021), 由于俯冲板片的折断、拆沉引发深部地幔上涌、地壳拉张形成基性-超基性岩浆侵位或喷发, 并使基底岩石部分熔融而形成花岗(闪长)岩(Wang X L et al., 2006; 周金城等, 2009; 柏道远等, 2011; 赖绍聪和朱毓, 2020), 与之相伴发生弧后小洋盆的扩张(丁炳华等, 2008; 张彦杰等, 2011); 二是地幔柱模式, 认为它们的形成与地幔柱上升诱发岩石圈伸展的张性构造有关(Li Z X et al., 1999, 2003; 葛文春等, 2001a, 2001b; 李献华等, 2001, 2002, 2008, 2012; Li X H et al., 2003)。

煌斑岩常以岩脉的形式分布于不同构造环境中, 因其主要来源于地幔深部, 在探讨岩石圈地幔富集、同化混染、岩浆混合作用以及地球各圈层物质循环等方面具有重要的指示意义(Rock et al., 1991)。此外, 很多煌斑岩与一些大型-超大型金矿床有着密切的时空关系(Rock et al., 1991), 暗示其可能与金及多金属成矿作用有关。因此, 煌斑岩的研究受到越来越多学者的关注(Owen, 2008; Mahéo et al., 2009; Niu Y L et al., 2011; 和文言等, 2014; Ma L et al., 2014)。扬子陆块煌斑岩主要分布在川滇西部盐源-丽江、湖北大洪山、湖南宁乡、贵州镇远-凯里以及桂北罗城、融水等地区, 以钾镁煌斑岩为主, 形成于古生代-中生代(罗会文和杨光树, 1989; 沈发奎等, 1990; 叶德隆等, 1991; 李子云和马文运, 1992; 刘观亮等, 1995, 1997; 方维萱等, 2002; 林玮鹏等, 2009; 王新宇等, 2013; 王磊等, 2015; 郭智超等, 2019; 林木森等, 2019)。前古生代煌斑岩的研究成果尚无报道。

鄂西南地区以大面积分布震旦纪-早三叠世碳酸盐岩地层为特点, 仅在鹤峰走马坪背斜核部出露少量新元古代早中期地层, 并在其中出露有一条长约百余米的煌斑岩脉, 为区内唯一的岩浆活动记录, 为了解鄂西南地区新元古代地幔源区性质及深部地质过程提供了窗口。但是, 目前对其地球化学特征、形成时代和形成环境等了解均不明确。本文利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及微量元素测试技术, 对鹤峰煌斑岩的形成年龄进行了精确厘定, 并利用锆石微量元素含量探讨其形成环境, 为区域构造-热事件的研究提供参考。

1 区域地质背景及岩石学特征

1.1 区域地质背景

研究区位于湖北省西南部鹤峰县走马坪地区,

大地构造位置处于扬子陆块南缘宜都-鹤峰复式背斜中段走马坪背斜(湖南称东山峰背斜),靠近江南造山带北缘断裂带。本区地壳演化大致经历了晋宁期、加里东期、海西-印支期、燕山-喜马拉雅期4个阶段,构造线呈北北东向至北东向;区内出露地层主要有南华系-奥陶系。南华系为一套杂色碎屑岩与冰碛岩,夹黑色含锰碳泥质岩系,震旦系-下寒武统以碳酸盐岩为主,夹碳质泥岩、硅质泥岩,中寒武统-奥陶系以碳酸盐岩为主,缺失志留系-下泥盆统,上泥盆统-下三叠统主体为碳酸盐岩。上述地层

总体上组成一背斜构造,在背斜核部出露的最老地层为新元古界青白口系冷家溪群,面积约2 km²,岩性为浅灰绿、灰色浅变质细砂岩、粉砂质板岩、板岩,夹凝灰质粉砂质板岩,具有弧后盆地岩石组合特征(顾雪祥等,2003;孙海清等,2012;陈建书等,2020;杨风丽等,2020;柏道远等,2021),在邻区湖南杨家坪冷家溪群小木坪组顶部沉凝灰岩锆石U-Pb年龄为845±12 Ma(柏道远等,2011);与上覆南华系下统莲沱组呈角度不整合接触。煌斑岩呈脉状产于冷家溪群粉砂质板岩中(图1)。

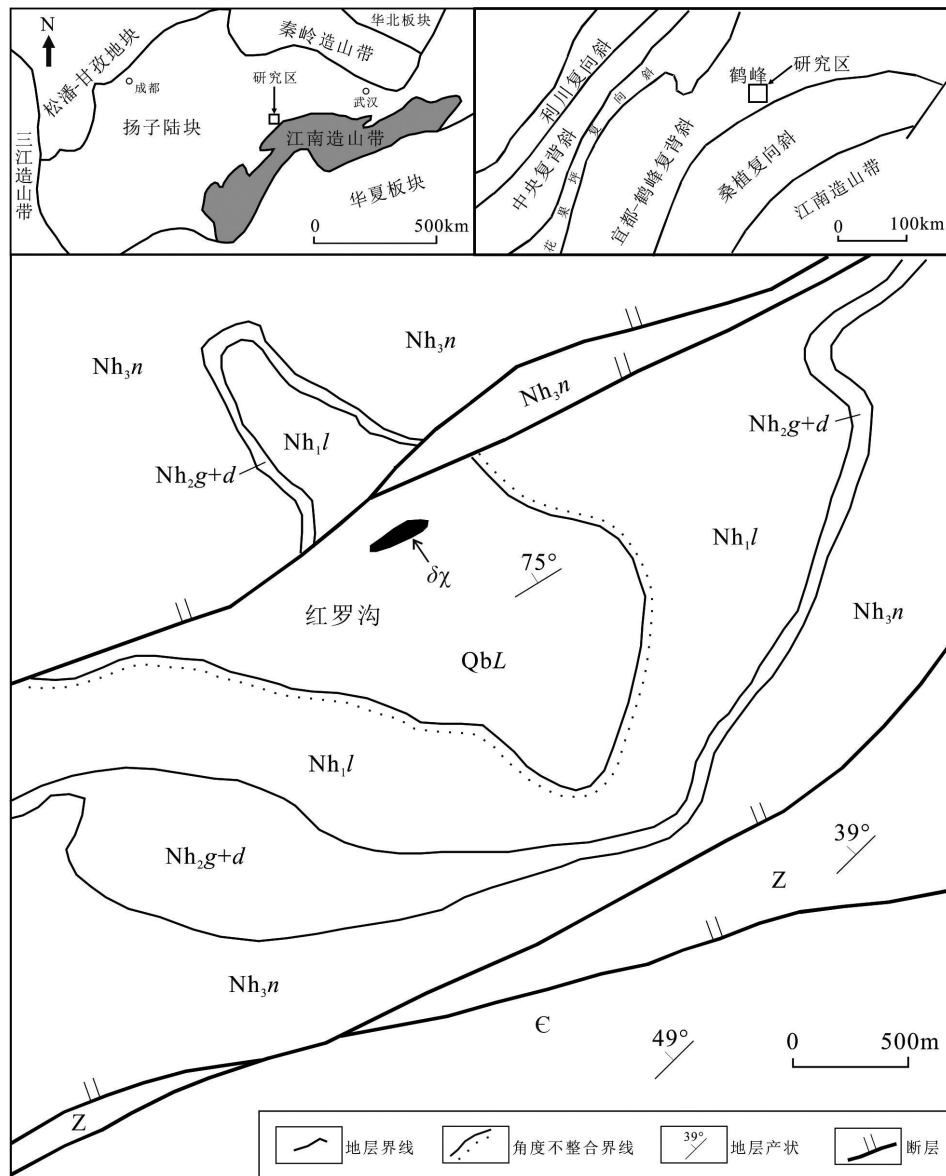


图1 鹤峰地区地质图(底图据陈林等,2018;王登等,2020)

Fig. 1 Geological sketch map of the Hefeng district (after Chen L et al., 2018; Wang D et al., 2020)
QbL-冷家溪群, Nh₁l-莲沱组, Nh₂g+d-古城组+大塘坡组, Nh₃n-南沱组, Z-震旦系, C-寒武系, δχ-煌斑岩

1.2 岩石学特征

煌斑岩呈脉状产于鹤峰背斜核部红罗沟一带,顺层侵入冷家溪群(图 2a),走向北东向,倾角近直立,与地层产状一致,与围岩接触界线清晰可见。岩脉出露厚度约 6m,因植被覆盖沿走向出露较差。新鲜煌斑岩颜色为灰、浅灰绿色,块状构造(图 2b),具典型的煌斑结构(图 2c, d)。斑晶主要为角闪石(3%~5%)(图 2c),粒径为 0.5~2.0 mm,偶见斜长石斑晶,二者多呈自形-半自形柱状结构;基质主要为斜

长石(30%~42%)、角闪石(25%~42%),少量钠长石(2%~6%)、钾长石(1%~3%)等,粒度为 0.01~0.30 mm,主体属闪斜煌斑岩;副矿物有磷灰石、黄铜矿、黄铁矿及褐铁矿,偶见锆石和钛铁矿。岩石多发生蚀变,蚀变矿物有方解石(1%~10%)、绿帘石(3%~8%)、绿泥石(5%~18%)及少量绢云母(图 2d)。岩石 SiO₂ 含量为 54.11%~55.64%,K₂O+Na₂O 为 5.50%~5.84%,K₂O/Na₂O 为 0.14~0.18,具有低钾富钠特征。

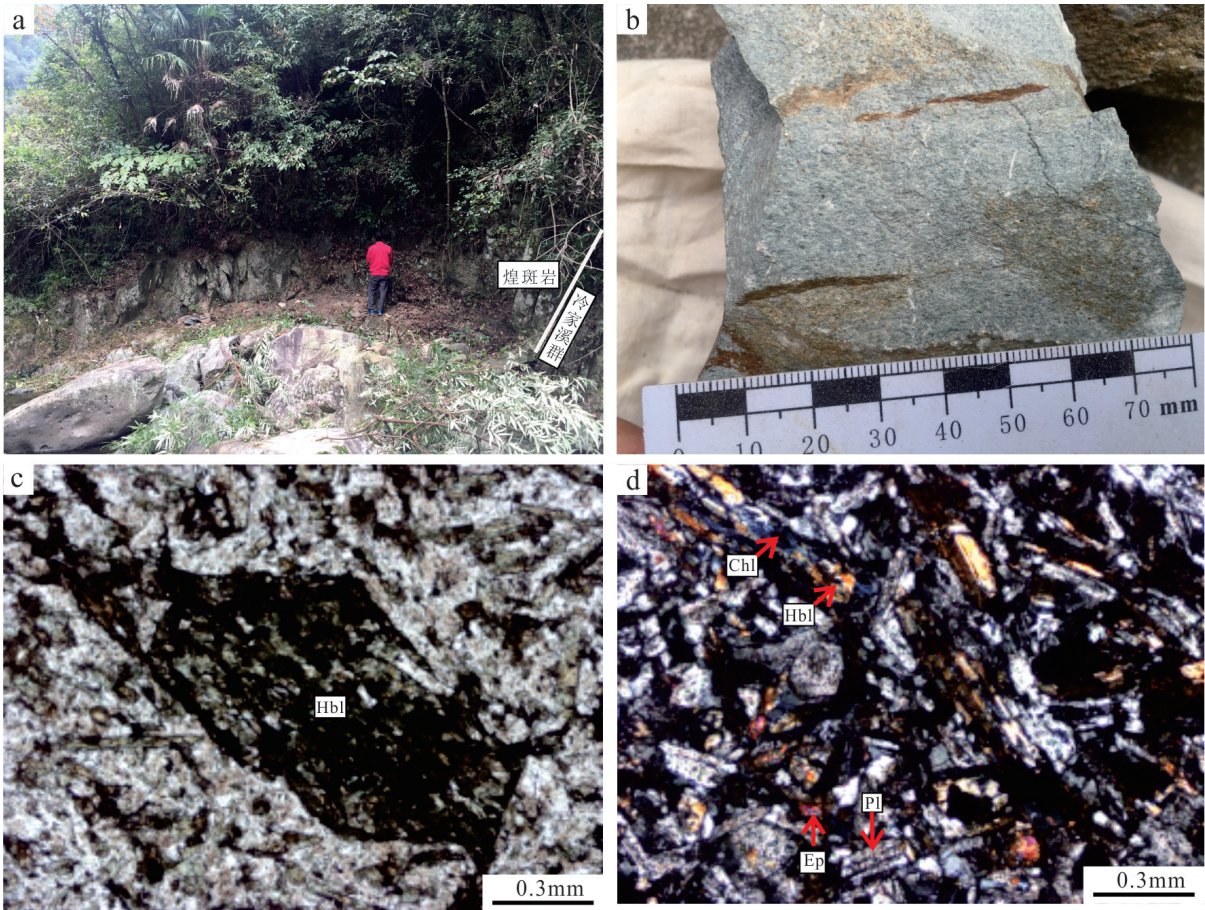


图2 鹤峰煌斑岩露头、手标本及显微照片

Fig. 2 The outcrop(a), hand-specimen(b) and micrograph (c, d) of the lamprophyre in the Hefeng district
a-野外露头;b-块状煌斑岩;c-方解石绿泥石化闪斜煌斑岩,斑状结构;d-绿帘石绿泥石化斜闪煌斑岩,斑状结构;Chl-绿泥石;Hbl-角闪石;Ep-绿帘石;Pl-斜长石

2 分析方法

用于分选锆石的煌斑岩采自湖北省鹤峰县红

罗沟,坐标 110°22' 48" E,31°58' 36" N,样品重约 25 kg。锆石挑选在廊坊宇能矿物分选综合实验室完成,将分选出的锆石和标样一同置于环氧树脂中制靶,并打磨抛光至锆石中心部位暴露出来进行

透射光、反射光照相,据此选出晶体特征良好的锆石在武汉上谱分析科技有限责任公司拍摄阴极发光(CL)图像和进行LA-ICP-MS测年分析。用于测年的设备为Agilent 7700电感耦合等离子体质谱仪,激光剥蚀系统使用GeoLas Pro 193 nm激光器,使用的激光束斑直径为32 μm ,频率5 Hz。测定时,采用标准锆石91500作为外部标样,用以校正锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。以GJ-1作为内部标样,用以校正锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄。微量元素含量采用NIST SRM610作为外标, ^{29}Si 作为内标。具体分析流程详见Liu Y S et al.(2008, 2010)。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用ICPMSDataCAL 10.7程

序,年龄计算及谐和图采用ISOPLLOT(3.0)软件完成(Ludwig, 2003)。

3 分析结果

3.1 锆石阴极发光(CL)图像及微量元素特征

煌斑岩中的锆石多为无色透明,少数带浅黄色色调。晶形多为长柱状、椭圆状,长50~130 μm ,长宽比为1:1~2:1,多数锆石的柱面及两端双锥发育完整,自形程度高,部分锆石两端双锥不发育而呈短柱状。阴极发光图像如图3所示,大多数锆石具有明显的振荡生长环带,少数锆石核心与外围的环

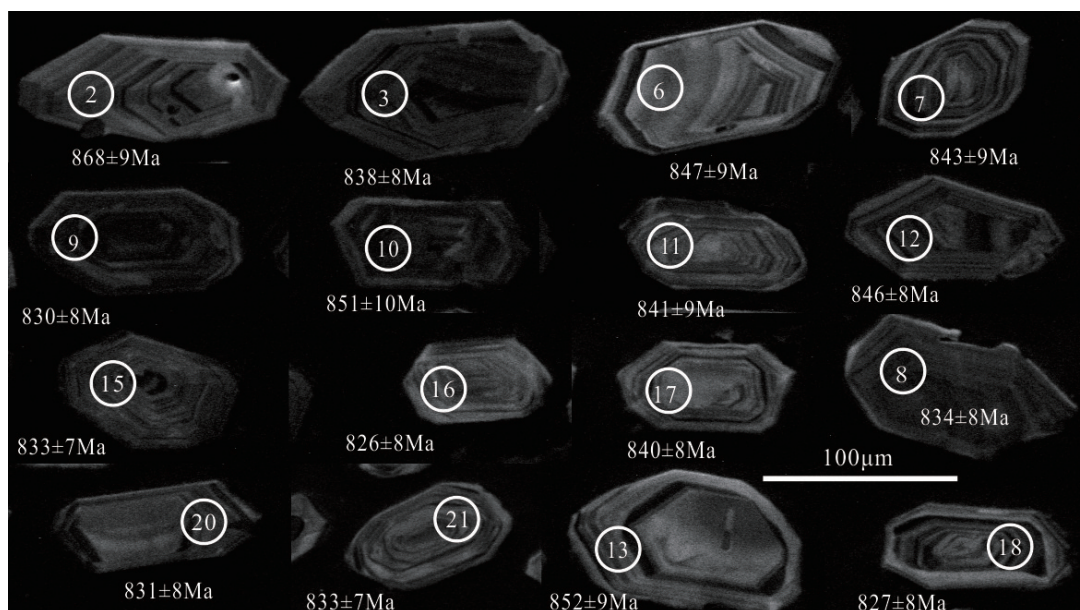


图3 鹤峰煌斑岩锆石阴极发光照片

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircon grains from the lamprophyre in the Hefeng district

带发育程度有所差异,边部熔蚀或重结晶不明显,晶内颜色较为均一,继承性核少见。锆石分析结果见表1,各样品的Th、U含量变化介于 $(66.5 \sim 446.0) \times 10^{-6}$ 和 $(82 \sim 610) \times 10^{-6}$ 之间,Th/U比值均大于0.4(0.4~1.1),与典型岩浆锆石具有高Th/U比值的特征一致(Hoskin and Schaltegger, 2003)。

计算年龄所用24颗锆石的微量元素分析结果见表2,其中Ti含量为 $(0.27 \sim 21.2) \times 10^{-6}$,Nb含量为 $(0.40 \sim 8.76) \times 10^{-6}$,Ta含量为 $(0.20 \sim 2.62) \times 10^{-6}$,均在岩浆锆石相应元素含量正常范围(Hoskin and Ire-

land, 2000),Y含量为 $(466 \sim 3176) \times 10^{-6}$,Hf含量为 $(8641 \sim 11394) \times 10^{-6}$ 。除HLG-01和HLG-02样品的La含量太低未达检出限外,其余样品稀土元素含量变化明显。稀土元素总量(ΣREE)为 $(419.81 \sim 2125.83) \times 10^{-6}$,LREE为 $(10.35 \sim 123.19) \times 10^{-6}$,HREE为 $(403.95 \sim 2093.99) \times 10^{-6}$,LREE/HREE为0.015~0.217,平均为0.045,显示轻、重稀土元素分异明显; $(\text{Lu}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为75~374, $(\text{Yb}/\text{Gd})_{\text{N}}$ 为13.21~46.50(平均为30.35),HREE内部分异程度较高。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图4)中,除

表1 鹤峰煌斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U- Pb dating results of zircons from Hefeng lamprophyre

点号	Th U		Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度/%
	($\times 10^{-6}$)			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
HLG01	105	82	1.3	0.0683	0.0020	1.3614	0.0408	0.1442	0.0014	877	62	872	18	868	8	99
HLG02	113	163	0.7	0.0688	0.0019	1.3648	0.0368	0.1441	0.0017	894	57	874	16	868	9	99
HLG03	236	326	0.7	0.0682	0.0016	1.3103	0.0299	0.1389	0.0014	874	44	850	13	838	8	98
HLG04	87	217	0.4	0.0674	0.0017	1.3023	0.0309	0.1396	0.0013	850	52	847	14	842	7	99
HLG05	182	160	1.1	0.0704	0.0025	1.3414	0.0464	0.1374	0.0014	939	72	864	20	830	8	96
HLG06	66.5	136	0.5	0.0688	0.0022	1.3380	0.0427	0.1404	0.0017	894	62	862	19	847	9	98
HLG07	176	211	0.8	0.0690	0.0019	1.3338	0.0364	0.1397	0.0015	898	57	861	16	843	9	97
HLG08	167	336	0.5	0.0683	0.0016	1.3068	0.0302	0.1380	0.0014	880	50	849	13	834	8	98
HLG09	284	450	0.6	0.0678	0.0015	1.2921	0.0293	0.1375	0.0013	865	46	842	13	830	8	98
HLG10	446	610	0.7	0.0668	0.0016	1.3020	0.0313	0.1412	0.0017	831	48	847	14	851	10	99
HLG11	149	193	0.8	0.0668	0.0018	1.2853	0.0363	0.1393	0.0015	831	57	839	16	841	9	99
HLG12	193	298	0.6	0.0696	0.0018	1.3490	0.0362	0.1402	0.0014	917	53	867	16	846	8	97
HLG13	165	210	0.8	0.0681	0.0019	1.3251	0.0375	0.1413	0.0016	872	58	857	16	852	9	99
HLG14	347	413	0.8	0.0673	0.0015	1.2761	0.0301	0.1372	0.0012	856	48	835	13	829	7	99
HLG15	217	357	0.6	0.0672	0.0016	1.2782	0.0312	0.1379	0.0013	843	49	836	14	833	7	99
HLG16	238	318	0.7	0.0655	0.0017	1.2341	0.0323	0.1367	0.0013	791	56	816	15	826	8	98
HLG17	166	224	0.7	0.0669	0.0018	1.2856	0.0353	0.1391	0.0013	835	56	839	16	840	8	99
HLG18	211	330	0.6	0.0669	0.0017	1.2642	0.0319	0.1369	0.0014	833	49	830	14	827	8	99
HLG19	113	238	0.5	0.0674	0.0020	1.3231	0.0394	0.1418	0.0014	852	68	856	17	855	8	99
HLG20	300	451	0.7	0.0605	0.0020	1.1577	0.0328	0.1377	0.0014	620	74	781	15	831	8	93
HLG21	100	151	0.7	0.0647	0.0018	1.2350	0.0330	0.1380	0.0013	765	57	817	15	833	8	97
HLG22	98	175	0.6	0.0647	0.0022	1.2354	0.0366	0.1376	0.0013	765	69	817	17	831	7	98
HLG23	122	155	0.8	0.0676	0.0020	1.2812	0.0377	0.1370	0.0016	855	60	837	17	828	9	98
HLG24	216	252	0.9	0.0666	0.0016	1.2740	0.0316	0.1379	0.0012	833	52	834	14	833	7	99

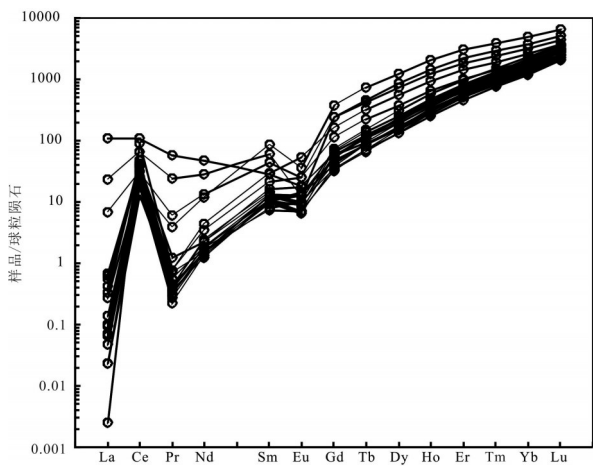


图4 鹤峰煌斑岩锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(标准化值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from Hefeng lamprophyre(The Chondrite normalizing values are from Taylor and McLennan, 1985)

HLG-12在轻稀土部分出现不协调外,其余样品具有相似的HREE明显富集的左倾配分曲线,均显示强烈的Ce正异常(δCe 为1.37~2039.76)、强烈到中等程度的Eu负异常(δEu 为0.10~0.78),与典型岩浆锆石稀土配分模式一致。因此,其锆石定年结果可用于限定煌斑岩的结晶年龄。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

本次获得24个锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中在826~868 Ma(表2),且分布于谐和线上或附近(图5a),加权平均年龄为 $839\pm 5\text{Ma}$ (MSWD=2.1, n=24)(图5b),表明煌斑岩形成于新元古代中期。

4 讨论

本次获得鹤峰煌斑岩锆石 U-Pb 年龄为 $839\pm$

表2 鹤峰煌斑岩锆石微量元素含量($\times 10^{-6}$)

Table 2 Trace element compositions ($\times 10^{-6}$) of zircons from Hefeng lamprophyre

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	δEu	δCe	Nb	Ta	Hf	Ti
HLG01	-	16.8	0.038	0.28	1.33	0.41	7.4	2.77	37.4	16.0	86	20.7	226	55.8	529			0.87	0.42	11127	2.43
HLG02	-	44.2	0.049	1.16	3.40	1.04	21.6	8.43	107.0	46.9	243	56.2	566	126.0	1496			3.39	0.90	9810	0.27
HLG03	0.0156	14.7	0.03	0.72	1.52	0.40	11.0	4.15	57.3	25.1	134	32.3	339	81.4	814	0.30	165.59	1.71	0.75	10740	2.55
HLG04	0.0222	12.2	0.029	0.67	1.86	0.74	10.5	3.98	50.2	21.6	113	27.4	300	76.1	728	0.51	118.37	0.86	0.23	9502	3.47
HLG05	1.5589	18.3	0.565	6.21	6.57	1.46	48.1	15.30	185.0	69.8	299	59.7	531	109.0	2082	0.25	4.77	1.18	0.53	9357	21.2
HLG06	0.1599	23.5	0.066	0.70	1.92	0.59	15.2	5.44	76.3	31.9	158	38.2	382	88.8	1010	0.33	56.18	1.67	0.37	10882	2.83
HLG07	0.0781	25.2	0.034	0.56	1.58	0.75	8.3	3.12	39.6	16.9	84	20.7	219	51.2	533	0.63	120.01	1.02	0.30	11297	3.18
HLG08	0.0054	7.7	0.042	0.68	1.58	0.40	11.2	4.29	56.5	24.3	127	29.9	315	75.5	790	0.29	123.92	1.05	0.56	10495	4.64
HLG09	0.0163	19.1	0.053	0.86	1.56	0.51	11.7	4.02	54.0	21.7	103	24.5	243	55.0	686	0.36	159.46	2.75	1.34	11125	4.54
HLG10	5.5407	39.5	2.274	13.10	9.21	0.72	49.0	16.9	213.0	80.8	363	73.0	633	129.0	2303	0.10	2.73	8.76	2.62	9996	2.97
HLG11	0.0641	12.9	0.038	0.80	1.65	0.41	6.7	2.43	33.4	14.3	75	18.9	202	51.2	466	0.38	63.96	0.75	0.47	10746	4.26
HLG12	0.0977	29.0	0.035	0.85	1.57	0.82	9.4	3.23	42.0	17.7	91	22.8	233	56.7	584	0.65	121.20	1.84	0.74	10215	4.57
HLG13	25.0534	65.3	5.446	22.00	4.34	1.07	11.9	3.50	47.0	20.1	107	26.5	280	70.8	672	0.46	1.37	0.95	0.42	9731	4.89
HLG14	0.0235	10.8	0.372	5.52	13.10	2.09	76.4	26.70	308.0	116.0	493	96.0	818	161.0	3176	0.20	28.24	1.35	0.56	8641	6.86
HLG15	0.1329	24.0	0.035	0.72	1.21	0.57	6.9	2.60	37.4	15.9	90	23.5	260	69.7	569	0.60	86.96	1.79	0.43	10934	2.4
HLG16	0.0055	10.6	0.021	0.61	1.45	0.38	7.7	3.17	41.2	18.6	96	23.6	247	59.8	592	0.34	239.5	0.95	0.49	10607	5.39
HLG17	0.0055	11.6	0.039	1.13	2.21	0.49	14.0	5.16	63.5	27.0	133	30.4	307	68.8	861	0.27	195.27	0.87	0.44	11054	5.21
HLG18	0.0226	23.3	0.026	0.65	1.40	0.53	10.3	4.09	57.2	24.9	134	33.1	359	86.5	812	0.43	237.00	2.20	0.89	11274	3.99
HLG19	0.0328	15.7	0.071	1.58	3.20	1.44	23.1	8.22	94.0	35.9	162	35.8	333	74.2	1142	0.51	79.85	2.48	0.73	11004	4.30
HLG20	0.0006	53.7	0.071	2.04	4.39	3.04	32.4	11.50	142	51.2	233	47.9	439	92.2	1632	0.78	2039.76	7.68	1.47	10464	4.10
HLG21	0.0153	10.8	0.053	0.84	1.82	0.54	8.7	3.26	41.5	16.8	87	21.4	228	56.4	545	0.42	92.97	0.40	0.20	11394	3.27
HLG22	0.0110	11.3	0.036	0.80	1.10	0.40	6.5	2.61	33.5	15.1	83	21.5	237	63.4	506	0.46	139.59	0.73	0.48	11046	4.07
HLG23	0.0165	14.6	0.039	1.02	2.47	1.02	12.6	4.47	56.7	23.3	121	28.8	301	73.3	783	0.56	140.67	0.97	0.28	10301	8.63
HLG24	0.1485	22.3	0.114	1.01	2.01	0.74	13.4	4.56	52.9	21.7	110	25.9	270	63.0	715	0.43	42.05	1.03	0.58	11106	3.95

注:“-”表示未检出

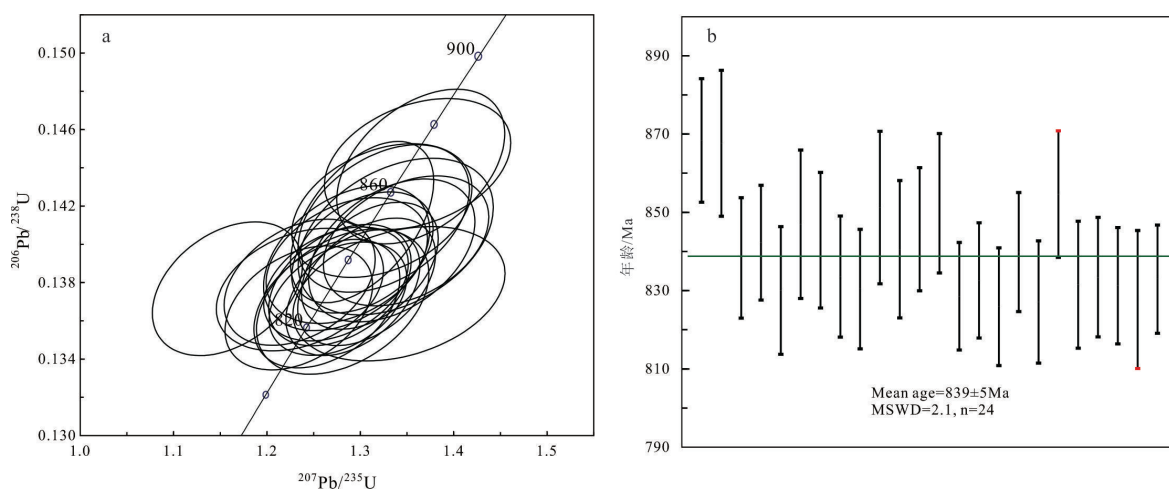


图5 鹤峰煌斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图和加权平均年龄

Fig. 5 U-Pb Concordia diagram(a) and weighted average age of zircon grains from lamprophyre in the Hefeng district

5 Ma, 属新元古代青白口纪。与该年龄相同或相近的岩浆岩广泛分布于扬子陆块周缘(陆慧娟等, 2006; Wang X L et al., 2006, 2014; 张春红等, 2009; Zhou J C, et al., 2009; 董树文等, 2010; 薛怀民等, 2010; 王敏等, 2011; 高林志等, 2012, 2014; 张传恒等, 2014; 张玉芝等, 2015; 张世涛等, 2016; 陕亮等, 2017; 王艳等, 2018; 谭清立等, 2019), 即便是位于扬子陆块内部的黄陵地区也发育同时期岩浆岩(冯定犹和李志昌, 1991; 高维和张传恒, 2009), 这些表明了新元古代早期扬子陆块发育区域性岩浆活动, 鹤峰地区也受到了该期岩浆作用影响。

锆石的微量元素对示踪岩浆成因和成岩过程有独特的优越性(Belousova et al., 2002; Griffin et al., 2002; Hoskin and Schaltegger, 2003; Hanchar and Westrenen, 2007; 吴福元等, 2007), 其微量元素比值可以反映岩浆形成环境(Schulz et al., 2006; Grimes et al., 2007, 2015)。鹤峰煌斑岩的锆石稀土元素均出现 Ce 的正异常, 说明锆石是在相对氧化条件下结晶形成的(韩吟文等, 2003), 稀土元素配分曲线呈现明显的 Ce 峰和弱 Eu 谷, 类似于壳源岩浆锆石(Li X H, et al., 2000; 吴元保等, 2003); 负 Eu 异常可能与斜长石的分离结晶作用或者在部分熔融作用中斜长石残留在源区有关, 在 δCe - δEu 协变图(图 6)中, 二者存在一定程度的正相关性, 表明锆

石形成前或者近于同时有斜长石分离结晶, 在岩石组成中样品表现出斜长石含量较高。少数样品表现为弱 Ce 正异常(δCe 为 1.37)和较低的 La 含量, 反映源区可能有幔源物质参与了岩浆过程(Belousova et al., 1998)。锆石的 U/Yb 比值(0.29 ~ 1.85)指示岩浆形成于大陆弧岩浆环境(0.1 ~ 4.0)(Grimes et al., 2015)。在 Y-U/Yb 图解上(图 7), 大多数样品点落在陆壳锆石区域, 少数落入洋壳与陆壳过渡区域, 暗示源区可能受到了洋壳物质的影响。Th/U 值为 0.40~1.14, Lu/Hf 值为 0.0045 ~ 0.0186, 在 Y-Th/U 图和 Y-Lu/Hf 图上(图 8a, b), 大多数样品点落在火山弧区域内, 只有少量样品点落在或靠近板内区域, 显示岩浆源区受到了明显的俯冲(弧岩浆)作用影响。

研究表明, 新元古代时期扬子陆块周缘岩浆作用是板内拉张环境的产物, 可能与古华南洋持续向扬子陆块俯冲消减过程中, 伴随弧后小洋盆扩张(唐增才等, 2018)或者是碰撞后伸展作用有关(王孝磊等, 2006; 周金城等, 2009; 李献华等, 2012; 薛怀民等, 2012; 代雅然等, 2019; 程进雄和李武显, 2021); 该时期的大部分火成岩具有岛弧特征的地球化学组成, 可能与早期 Greenville 造山过程中俯冲交代作用有关(Zheng Y F et al., 2007, 2008)。因此, 鹤峰煌斑岩所显示的弧岩浆岩地球化学特征是源区受到早期俯冲作用的反映。鹤峰

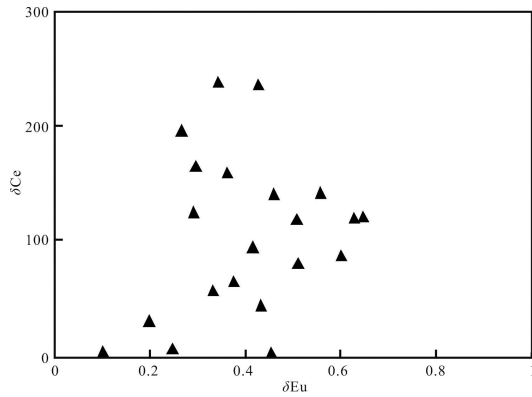
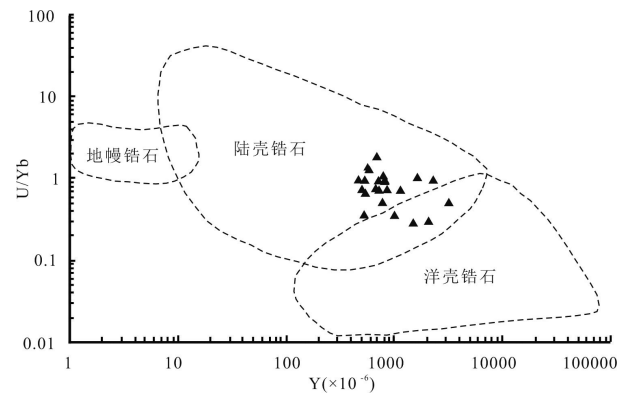
图6 鹤峰煌斑岩锆石 δCe - δEu 协变图Fig. 6 δCe - δEu covariant diagrams for zircons of Hefeng lamprophyre

图7 锆石Y-U/Yb图(底图据Grimes et al., 2007)

Fig. 7 Y- U/Yb diagrams for zircons of Hefeng lamprophyre (after Grimes et al., 2007)

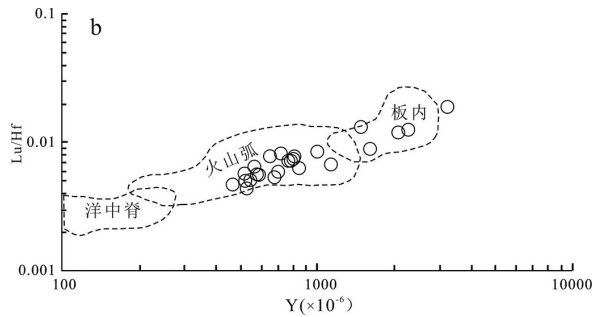
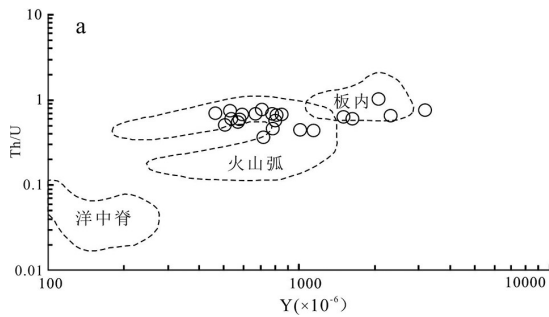


图8 锆石微量元素构造环境判别图

Fig. 8 Trace element discriminant diagrams of zircons in different tectonic setting

(a) Y-Th/U图;(b) Y-Lu/Hf图(底图据Schulz et al., 2006)

煌斑岩产于江南造山带北西侧弧后盆地(顾雪祥等, 2003; 孙海清等, 2012; 陈建书等, 2020; 杨凤丽等, 2020; 柏道远等, 2021); 谭满堂等(2022)认为沿江南造山带第二阶段(870 ~ 820 Ma)俯冲增生开始, 弧后盆地开启, 伴随基性-超基性岩侵位和海相火山岩喷发, 在区域上形成皖南伏川基性-超基性岩(蛇绿岩)、赣东北泗州辉绿岩、鄣源地区具有初始洋壳特征的基性岩以及湘西隘口基性-超基性岩墙(陆慧娟等, 2006, 2007; 丁炳华等, 2008; 周效华等, 2014)。据此认为鹤峰煌斑岩形成于弧后盆地拉张环境, 受控于江南造山带及其北西部弧后盆地伸展构造作用, 可能与华夏陆块向北西俯冲过程中俯冲板片的折断、拆沉引发深部地幔上涌的动力学机制有关。

5 结论

(1) 鹤峰煌斑岩产于扬子陆块南缘走马坪背斜核部冷家溪群中, 首次获得该岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 839 ± 5 Ma, 为新元古代青白口纪岩浆活动的产物。

(2) 岩体锆石微量元素特征显示 LREE 亏损、HREE 强烈富集的左倾稀土元素配分型式。岩石具有明显的弧岩浆岩特征, 岩浆起源于受洋壳影响的陆壳区域。岩石形成于弧后盆地拉张环境, 即鄂西南地区在新元古代中期经历了弧后扩张的构造演化过程, 可能与俯冲板片的折断、拆沉引发深部地幔上涌的动力学机制有关。

野外工作过程中得到了湖北省地质局第二地质大队陈林总工的帮助;成文过程中武汉地质调查中心邱啸飞研究员、王磊副研究员提出了很多建设性意见和建议,在此深表感谢!

参考文献:

- 柏道远,贾宝华,钟响,贾朋远,刘耀荣,马铁球. 2011. 雪峰造山带新元古代构造演化框架[J]. 沉积与特提斯地质, 31(3):78-87.
- 柏道远,蒋启生,李彬,姜文,李银敏. 2021. 湘东北冷家溪群沉积岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科技通报, 40(1):1-13.
- 陈林,王红军,方喜林,曹文胜. 2018. 湖北省鹤峰县走马地区南华系“大塘坡式”锰矿的发现及其地质意义初探[J]. 资源环境与工程, 32(3):345-350.
- 陈建书,代雅然,唐烽,彭成龙,张嘉玮,朱和书,陈兴,王文明,龚桂源. 2020. 扬子地块周缘中元古代末—新元古代主要构造运动梳理与探讨[J]. 地质论评, 66(3):533-554.
- 程进雄,李武显. 2021. 赣中地区周潭群斜长角闪岩年龄、成因及对华南新元古代构造演化的地质意义[J]. 地球化学, 50(6):537-549.
- 代雅然,张嘉玮,彭松柏,叶太平,王敏,戴传固,张慧,陈建书. 2019. 贵州梵净山地区新元古代拉伸纪岩浆演化时序[J]. 地质通报, 38(2-3):360-370.
- 丁炳华,史仁灯,支霞臣,郑磊,陈雷. 2008. 江南造山带存在新元古代~850Ma俯冲作用——来自皖南SSZ型蛇绿岩锆石 SHRIMP-U-Pb 年龄证据[J]. 岩石矿物学杂志, 27(5):375-388.
- 董树文,薛怀民,项新葵,马立成. 2010. 赣北庐山地区新元古代细碧-角斑岩系枕状熔岩的发现及其地质意义[J]. 中国地质, 37(4):1021-1033.
- 方维萱,胡瑞忠,苏文超,肖加飞,漆亮,蒋国豪. 2002. 贵州镇远地区钾镁煌斑岩类的侵位时代[J]. 科学通报[J]. 47(4):307-312.
- 冯定犹,李志昌. 1991. 黄陵花岗岩类岩基南部岩体侵入时代和同位素特征[J]. 湖北地质, 5(2):1-12.
- 高林志,陈建书,戴传固,丁孝忠,王雪华,刘燕学,王敏,张恒. 2014. 黔东南地区梵净山群与下江群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 33(7):949-959.
- 高林志,戴传固,刘燕学,王敏,王雪华,陈建书,丁孝忠,张传恒,曹茜,刘建辉. 2010. 黔东南-桂北地区四堡群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地层学意义[J]. 地质通报, 29(2):1259-1267.
- 高林志,黄志忠,丁孝忠,刘燕学,张传恒,毛自强,庞建峰,韩坤英. 2012. 庐山筲箕洼组与星子岩群年代地层关系及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄的制约[J]. 地球学报, 33(3):295-304.
- 高维,张传恒. 2009. 长江三峡黄陵花岗岩与莲沱组凝灰岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造地层意义[J]. 地质通报, 28(1):45-50.
- 葛文春,李献华,李正祥,周汉文,李寄岷. 2001a. 桂北新元古代两类过铝花岗岩的地球化学研究[J]. 地球化学, 30(2):24-34.
- 葛文春,李献华,梁细荣,王汝成,李正祥,周汉文. 2001b. 桂北元宝山宝坛地区约 825 Ma 镁铁-超镁铁岩的地球化学及其地质意义[J]. 地球化学, 30(2):123-130.
- 顾雪祥,刘建明, Schulz O, Vavtar F, 郑明华. 2003. 江南造山带雪峰隆起区元古宙沉积岩沉积构造背景的地球化学制约[J]. 地球化学, 32(5):406-426.
- 郭智超,时毓,王新宇,付伟,刘希军,覃康乐,刘磊. 2019. 桂北罗城垚洞煌斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 桂林理工大学学报, 38(3):208-216.
- 韩吟文,马振东,张宏飞,张本仁,李方林,高山,鲍征宇. 2003. 地球化学[M]. 北京:地质出版社, 189-197.
- 和文言,莫宣学,喻学惠,董国臣,和中华,黄雄飞,李小伟,姜丽莉. 2014. 滇西北衙煌斑岩的岩石成因及动力学背景:年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 30(11):3287-3300.
- 赖绍聪,朱毓. 2020. 扬子板块西缘新元古代典型中酸性岩浆事件及其深部动力学机制:研究进展与展望[J]. 地质力学学报, 26(5):759-790.
- 李献华,李武显,何斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解——观察、解释与检验[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(6):543-559.
- 李献华,李正祥,葛文春,周汉文,李武显,刘颖. 2001. 华南新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(3):271-273.
- 李献华,李正祥,周汉文,刘颖,梁细荣. 2002. 川西新元古代玄武质岩浆岩的锆石 U-Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究:岩石成因与地球动力学意义[J]. 地学前缘, 9(4):329-338.
- 李献华,王选策,李武显,李正祥. 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义:从造山运动到陆内裂谷[J]. 地球化学, 37(4):382-398.
- 李子云,马文运. 1992. 宁乡县云影窝含金刚石钾镁煌斑岩地质特征[J]. 湖南地质, 12(4):221-225.

- 林木森, 彭松柏, 吴长锋, 王新宇, 吴祥珂. 2019. 桂北融水地区钾镁煌斑岩 Ar-Ar 年代学、地球化学特征及其构造意义 [J]. 地质学报, 93(8):1985-1997.
- 林玮鹏, 丘志力, 李子云, 陈炳辉, 李榴芬, 龚盛玮. 2009. 湖南宁乡 V 号岩管煌斑岩的岩石地球化学特征 [J]. 资源调查与环境, 30(3):180-187.
- 刘观亮, 李志昌, 张自超. 1997. 扬子地台钾镁煌斑岩 Nd、Sr、Pb 同位素特征 [J]. 地球学报, 18(增刊):21-23.
- 刘观亮, 张自超, 李志昌, 简平, 刘灵燕. 1995. 湖南宁乡钾镁煌斑岩中火山微球粒的初步研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 14(3):242-251.
- 陆慧娟, 华仁民, 毛光周, 龙光明. 2006. 江西德兴泗洲辉绿岩体锆石 LA-ICP-MS 定年及其地质意义 [J]. 地质学报, 80(7):1017-1025.
- 陆慧娟, 华仁民, 毛光周, 龙光明. 2007. 德兴地区新元古代镁铁-超镁铁岩的地球化学特征及其地质意义 [J]. 矿物学报, 27(2):153-160.
- 罗会文, 杨光树. 1989. 贵州省镇远地区钾镁煌斑岩岩石特征 [J]. 岩石矿物学杂志, 8(2):97-109.
- 陕亮, 柯贤忠, 庞迎春, 刘家军, 赵辛敏, 王晶, 康博, 张鲲. 2017. 湘东北栗山地区新元古代岩浆活动及其地质意义: 锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素证据 [J]. 地质科技情报, 36(6):32-42.
- 沈发奎, 袁蔺平, 杨七文, 薛康成. 1990. 川滇西部地区钾质煌斑岩特征及其成因 [J]. 矿物岩石, 10(1):69-78.
- 孙海清, 黄建中, 郭乐群, 陈俊. 2012. 湖南冷水溪群划分及同位素年龄约束 [J]. 华南地质与矿产, 18(1):20-26.
- 谭满堂, 龙文国, 魏运许, 邓新, 田洋, 王晶, 金巍, 徐大良, 徐扬, 黄皓. 2022. 湘东北仓溪岩群锆石 U-Pb 年龄及新元古代弧盆系演化 [J]. 华南地质, 38(1):120-134.
- 谭清立, 王岳军, 张玉芝, 杨雪, 苟琪钰, 周永智, 张立敏. 2019. 江南造山带东段陈蔡地区新元古代高硅埃达克质花岗闪长岩的发现及其构造启示 [J]. 岩石学报, 35(6):1907-1923.
- 唐增才, 陈忠大, 胡开明, 周汉文, 吴小勇, 董学发, 赵旭东, 余盛强. 2018. 浙西开化地区新元古代(828 Ma)弧后盆地扩张——来自类复理石和辉绿岩墙的年代学和地球化学证据 [J]. 地球科学, 43(S2):1-15.
- 王登, 余江浩, 陈威. 2020. 鄂西鹤峰地区上二叠统大隆组页岩储层特征及资源潜力 [J]. 华南地质与矿产, 36(1):9-18.
- 王磊, 金鑫鏢, 王新宇, 吴祥珂, 刘重芑, 段桂玲. 2015. 桂北罗城坳煌斑岩形成过程: 地球化学、年代学和 Sr-Nd-Pb 同位素约束 [J]. 地质科技情报, 34(1):10-19.
- 王敏, 戴传固, 王雪华, 陈建书, 马会珍. 2011. 贵州梵净山白云母花岗岩锆石年代、铪同位素及对华南地壳生长的制约 [J]. 地学前缘, 18(5):213-223.
- 王孝磊, 周金城, 邱检生, 张文兰, 柳小明, 张桂林. 2006. 桂北新元古代强过铝花岗岩的成因: 锆石年代学和 Hf 同位素制约 [J]. 岩石学报, 22(2):326-342.
- 王孝磊, 周金城, 陈昕, 张凤凤, 孙梓铭. 2017. 江南造山带的形成与演化 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(5):714-735.
- 王新宇, 彭松柏, 吴祥珂, 陆刚. 2013. 桂北地区钾镁煌斑岩的发现及找矿意义 [J]. 地质科技情报, 31(3):93.
- 王艳, 马昌前, 王连训, 刘园园. 2018. 扬子东南缘新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素: 对地壳生长的约束 [J]. 地球科学, 43(3):635-654.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. 岩石学报, 23:185-220.
- 吴元保, 陈道公, 夏群科, 涂湘林, 程昊, 杨晓志. 2003. 大别山黄土岭麻粒岩中锆石 LA-ICP-MS 微区微量元素分析和 Pb-Pb 定年 [J]. 中国科学(D辑), 33(1):20-28.
- 徐丽娟, 李萍, 刘铮, 王国昌. 2021. 扬子地块西缘峨山新元古代 A₂ 型花岗闪长岩的成因及构造意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 40(2):383-394.
- 薛怀民, 马芳, 宋永勤. 2012. 江南造山带西南段梵净山地区镁铁质-超镁铁质岩: 形成时代、地球化学特征与构造环境 [J]. 岩石学报, 28(9):3015-3030.
- 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 谢亚平. 2010. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束 [J]. 岩石学报, 26(11):3215-3244.
- 杨凤丽, 周晓峰, 胡虞杨, 杨瑞青, 彭韵心. 2020. 新元古代扬子克拉通 TSM 盆地原型分析 [J]. 石油实验地质, 42(5):742-755.
- 叶德隆, 王群, 杨金香, 任迎新. 1991. 湖北大洪山南段的金伯利岩和钾镁煌斑岩 [J]. 地质科技情报, 10(增刊):37-44.
- 张传恒, 高林志, 史晓颖, 韩瑶, 刘耀明. 2014. 梵净山群火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其年代地层学意义 [J]. 地学前缘, 21(2):139-143.
- 张春红, 范蔚茗, 王岳军, 彭头平. 2009. 湘西隘口新元古代基性-超基性岩墙年代学和地球化学特征: 岩石成因及其构造意义 [J]. 大地构造与成矿学, 33(2):283-293.
- 张世涛, 马东升, 陆建军, 章荣清, 蔡杨, 丁超超. 2016. 桂北平英花岗岩锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素、地球化学特征及其地质意义 [J]. 高校地质学报, 22(1):92-104.

- 张玉芝, 王岳军, 范蔚茗, 张爱梅, 张菲菲. 2011. 江南隆起带新元古代碰撞结束时间: 沧水铺砾岩上下层位的 U-Pb 年代学证据 [J]. 大地构造与成矿学, 35(1):32-46.
- 张玉芝, 王岳军, 郭小飞, 甘成势, 邢晓婉, 宋菁菁. 2015. 江南中段慈化地区新元古代高镁安山岩的厘定及其构造意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 40(11): 1781-1795.
- 张彦杰, 周效华, 廖圣兵, 余明刚, 蒋仁, 姜杨. 2011. 江南造山带北缘郭源基性岩地质——化学特征及成因机制 [J]. 高校地质学报, 17(3):393-405.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生. 2009. 江南造山带形成过程中若干新元古代地质事件 [J]. 高校地质学报, 15(4):453-459.
- 周效华, 高天山, 马雪, 张彦杰, 廖圣兵, 余明刚, 陈丹丹, 朱延辉. 2014. 江南造山带东段郭源枕状玄武岩的年代学与构造属性研究 [J]. 资源调查与环境, 35(4): 235-244.
- 卓皆文, 江卓斐, 江新胜, 王剑, 蔡娟娟, 熊国庆. 2017. 川西新元古代苏雄组层型剖面 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 地质论评, 63(1):177-188.
- Belousova E A, Griffin W L, Pearson N J. 1998. Trace element composition and cathodoluminescence properties of southern African kimberlitic zircons [J]. Mineralogical Magazine, 62(3): 355-366.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143:602-622.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S, Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. Lithos, 61: 237-269.
- Grimes C B, John B E, Kelemen P B, Mazdab F K, Wooden J L, Cheadle M J, Hanger J K, Schwartz J J. 2007. Trace element chemistry of zircon from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance [J]. Geology, 35(7): 643-646.
- Grimes C B, Wooden J L, Cheadle M J, John B E. 2015. "Fingerprinting" tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 170(5-6): 1-26.
- Hanchar J M, Westrenen W V. 2007. Rare earth element behavior in zircon-melt systems [J]. Elements, 3: 37-42.
- Hoskin P W O, Ireland T R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator [J]. Geology, 28: 627-630.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 27- 62.
- Li X H, Liang X R, Sun M, Liu Y, Tu X G. 2000. Geochronology and geochemistry of single-grain zircons: Simultaneous in-situ analysis U-Pb age and traced elements by LAM-ICP-MS [J]. European Journal of Mineralogy, 12: 1015-1024.
- Li X H, Li Z X, Ge W C, Zhou H W, Li W X, Liu Y, Wingate M T D. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825Ma [J]? Precambrian Research, 122: 45-83.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 173(3): 171-181.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J, Zhang S, Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. Precambrian Research, 122: 85-109.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. Chemical Geology, 257: 34-43.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010. 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, 51: 537-571.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3. 00: A geochronological toolkit for microsoft excel [M]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 4: 1-74.
- Ma L, Jiang S Y, Hofmann A W, Dai B Z, Hou M L, Zhao K D, Chen L H, Li J W, Jiang Y H. 2014. Lithospheric and asthenospheric sources of lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: A consequence of rapid lithospheric thinning beneath the North China Craton? [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 124: 250-271.
- Mahéo G, Blichert-Toft J, Pin C, Guillot S, Pecher A. 2009. Partial melting of mantle and crustal sources beneath

- South Karakorum, Pakistan: Implications for the Miocene geodynamic evolution of the India-Asia convergence zone [J]. *Journal of Petrology*, 50(3): 427-449.
- Niu Y L, Wilson M, Humphreys E R, O'Hara M. 2011. The origin of intra-plate ocean island basalts (OIB): The lid effect and its geodynamic implications [J]. *Journal of Petrology*, 52(7-8): 1443-1468.
- Owen J P. 2008. Geochemistry of lamprophyres from the Western Alps, Italy: Implications for the origin of an enriched isotopic component in the Italian mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(3): 341-362.
- Rock N M S, Bowes D R, Wright A E. 1991. Lamprophyres [M]. Glasgow: Wright-Blackie, 1-285.
- Schulz B, Klemm R, Bratz H. 2006. Host rock compositional controls on zircon trace element signatures in metabasites from the Austroalpine basement [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(3): 697-710.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1-312.
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Zhang W L, Liu X M, Zhang G L. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: implications for petrogenesis and tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 145(1): 111-130.
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Zhao G C, Yu J H, Qiu J S, Zhang Y J, Xing G F. 2014. Geochemical zonation across a Neoproterozoic orogenic belt, Isotopic evidence from granitoids and metasedimentary rocks of the Jiangnan orogen, China [J]. *Precambrian Research*, 242: 154-171.
- Zhao G C. 2015. Jiangnan orogen in South China: Developing from divergent double subduction [J]. *Gondwana Research*, 27(3): 1173-1180.
- Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, Zhang S B, Yuan H L, Wu F Y. 2008. Rift melting of juvenile arc derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanoc and granitic rocks in the Jiangnan orogen, South China [J]. *Precambrian research*, 163(3-4): 351-383.
- Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, Wu Y B, Li X H, Li Z X, Wu F Y. 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes Neoproterozoic granitoids in south China: Implication for growth and reworking of continental crust [J]. *Lithos*, 96(1-2): 127-150.
- Zhou J C, Wang X L, Qiu J S. 2009. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: coeval arc magmatism and sedimentation [J]. *Precambrian Research*, 170: 27-42.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, Li Y Q, Ding J. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc magmatism along the western margin of the Yangtze block, south China [J]. *Earth and Planetary Science letters*, 196(1-2): 51-67.
- Zhou M F, Ma Y X, Yan D P, Xia X, Zhao J H, Sum M. 2006. The Yanbian terrane (southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze block [J]. *Precambrian Research*, 144: 19-38.