



引文格式: 谢应波, 褚刚, 罗华, 等. 鄂东南铁铜金钨钼多金属矿集区基底属性: 来自继承锆石年龄和 Hf 同位素的约束[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 283–297. DOI: 10.12401/j.nwg.2024059

Citation: XIE Yingbo, CHU Gang, LUO Hua, et al. Basemental Attribution of the Fe-Cu-Au-W-Mo Polymetallic Ore Cluster in the Southeastern Hubei: Constraint from the Ages and Hf Isotopes of the Inherited Zircons[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 283–297. DOI: 10.12401/j.nwg.2024059

鄂东南铁铜金钨钼多金属矿集区基底属性: 来自继承锆石年龄和 Hf 同位素的约束

谢应波¹, 褚刚², 罗华^{1,*}, 郭盼¹

(1. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034; 2. 江西省景德镇市建筑设计院有限公司, 江西 景德镇 333001)

摘要: 长江中下游成矿带鄂东南矿集区的基底存在统一的川中式基底和北部川中式基底、南部江南式基底的争议。笔者对灵乡岩体西段闪长玢岩开展锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析, 结果显示闪长玢岩的锆石具有复杂的组成与来源: 最年轻的 4 颗锆石加权平均年龄为 (141±4) Ma, 结合前人测年结果推测其可作为闪长玢岩的成岩年龄; 其余 16 颗锆石具有较为宽泛的年龄 (217~2550 Ma) 和 Hf 同位素组成 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.2 \sim 11.7$)。进一步结合前人获得的鄂东南矿集区岩浆岩继承锆石数据, 分别对比川中式基底崆岭杂岩、江南式基底梵净山群及下江群的锆石数据, 发现其与崆岭杂岩具有明显差异, 但和梵净山群及下江群具有高度相似性。并且鄂东南矿集区岩浆岩继承锆石和梵净山群、下江群均记录了 ~1.5 Ga 地壳增生事件。结合区域地球物理特征, 笔者认为鄂东南矿集区南部为江南式基底, 北部为川中式基底, 两者的分界线大致为灵乡-大冶-网湖一线。

关键词: 川中式基底; 江南式基底; 继承锆石; 鄂东南矿集区; 长江中下游成矿带

中图分类号: P596

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)05-0283-15

Basemental Attribution of the Fe-Cu-Au-W-Mo Polymetallic Ore Cluster in the Southeastern Hubei: Constraint from the Ages and Hf Isotopes of the Inherited Zircons

XIE Yingbo¹, CHU Gang², LUO Hua^{1,*}, GUO Pan¹

(1. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China; 2. Jingdezhen Architectural Design Institute Co., Ltd., Jingdezhen 333001, Jiangxi, China)

Abstract: There are two different opinions about the basemental attribution of the ore cluster in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt that all attributed to the Chuanshong-type basement or the north part related to Chuanshong-type basement and the south part classified to the Jiangnan-type basement. In this study, zircon U-Pb dating and Hf isotope analysis were conducted for diorite porphyrite in the western Lingxiang pluton. The results indicate that the zircons of diorite porphyrite show complex compositions

收稿日期: 2023-08-30; 修回日期: 2024-03-20; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 湖北省地质局 2022 年矿产地质调查项目“鄂东南矿集区 1:10 万构造建造填图”(KCDZ2022-14)资助。

作者简介: 谢应波(1979-), 男, 本科, 主要从事区域矿产地质调查与研究。E-mail: 513334884@qq.com。

* 通讯作者: 罗华(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事区域矿产地质调查与研究。E-mail: 270132397@qq.com。

and sources. The youngest four zircons yield a mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of $(141\pm 4)\text{Ma}$, which coincide with previous researches and interpreted as the crystallization age of the diorite porphyrite. In addition, The other 16 older zircons have varied ages ($217\sim 2550\text{Ma}$) and Hf isotopic compositions ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.2\sim 11.7$). Combined with the reported ages and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of inherited igneous zircons from the ore cluster in the southeastern Hubei, we compared with the data from Chuanzhong-type and Jiangnan-type basements respectively. The results suggest that they are different from Kongling Complex of the Chuanzhong-type basement, but are similar to the Fanjingshan and XiaJiang Groups of the Jiangnan-type basements. Particularly, the $\sim 1.5\text{Ga}$ crustal accretion both record in the ore cluster in the southeastern Hubei and the Fanjingshan and XiaJiang Groups. Combined with the regional geophysics, bounded by the line from Lingxiang, Daye to Wanghu Lake, the north part of ore cluster in the southeastern Hubei belong to Chuanzhong-type basement and the south part relate to Jiangnan-type basement.

Keywords: Chuanzhong-type basement; Jiangnan-type basement; inherited zircon; ore cluster in the southeastern Hubei; Middle-Lower Yangtze metallogenic belt

鄂东南铁铜金钨钼多金属矿集区是长江中下游成矿带西端的一个以晚中生代内生金属成矿为主的大型矿集区。前人对鄂东南矿集区成矿作用及其相关的岩浆作用进行了大量研究(谭忠福等, 1980; 舒全安等, 1992; 翟裕生等, 1992; 王强等, 2004; 赵新福等, 2006; 谢桂青等, 2008, 2013; Li et al., 2008, 2009; Xie et al., 2011a; Yan et al., 2015; 周涛发等, 2017; Chu et al., 2020; Zhang et al., 2021a)。部分学者认为鄂东南矿集区成矿与基底存在一定关系(曹洛华等, 1987; 董树文等, 2011), 但相比成岩、成矿作用研究, 鄂东南矿集区基底特征的研究却极为薄弱。

区域上, 鄂东南矿集区西侧和东侧有崆岭、钟祥、董岭等地区的太古宙—古元古代基底露头, 南侧有江南造山带的新元古代地层(图1), 二者分属川中式基底、江南式基底。基于区域地质和地球物理特征, 有学者指出长江中下游成矿带北侧为崆岭-董岭式基底, 即川中式基底, 但其南边界位于公安-监利一带, 再往南则为江南式基底, 据此鄂东南矿集区均为川中式基底, (常印佛等, 1996; 董树文等, 2011)。区域磁异常研究表明, 北部的鄂城和铁山岩体为连在一起的正磁异常区, 而南部的岩体则为负异常较多的复杂磁异常区; 在区域布格重力异常中, 北部鄂城和铁山岩体为出重力高异常区, 而南部岩体则为重力低异常区(曹洛华等, 1987; 舒全安等, 1992)。据此, 认为以灵乡-大冶-网湖一线为界, 以北为川中式基底, 以南为江南式基底。因此, 对于鄂东南矿集区基底的认识, 主要争议为整个矿集区是具有单一的川中式基底, 还是具有南北基底差异性, 即北部为川中式基底, 而南部位为江

南式基底。基于地球物理数据的多解性较强, 因此需要采用其他手段来进一步约束鄂东南矿集区的基底特征。

鄂东南矿集区内发育大量晚中生代中酸性侵入体, 这些中酸性岩体的岩浆在上升过程中, 除了形成大量自生的锆石外, 还会携带来自基底的继承锆石, 而这些继承锆石的年龄和 Hf 同位素组成可以为基底性质的判断提供重要的信息(Zheng et al., 2006; 张少兵等, 2007)。目前, 在鄂东南矿集区内的铜鼓山岩体、姜桥岩体、铜绿山岩体等均发现了继承锆石, 其年龄分布在中太古宙到新元古代(Xie et al., 2011a; 颜代蓉等, 2012; 丁丽雪等, 2013, 2016; 黄圭成等, 2013; 夏金龙等, 2013a, 2013b; Zhang et al., 2021b), 这为深入分析鄂东南矿集区的基底特征提供了新的途径。然而, 目前已经报道的继承锆石数据均为针对主岩体研究时偶然发现, 对其空间、时间分布特征尚未开展过专门的统计工作, 对基底的形成和演化过程的指示意义也尚不清楚。笔者以鄂东南灵乡岩体闪长玢岩为研究对象, 对其发育的继承锆石开展了系统的锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素分析, 同时系统收集统计前人在鄂东南矿集区内报道的同类数据, 在此基础上, 探讨鄂东南矿集区前寒武基底的属性, 以期更深入理解该区成岩成矿作用, 促进该区勘查工作。

1 地质背景

鄂东南矿集区位于长江中下游晚中生代成矿带西端, 大地构造环境为扬子板块北缘, 北邻秦岭-大别

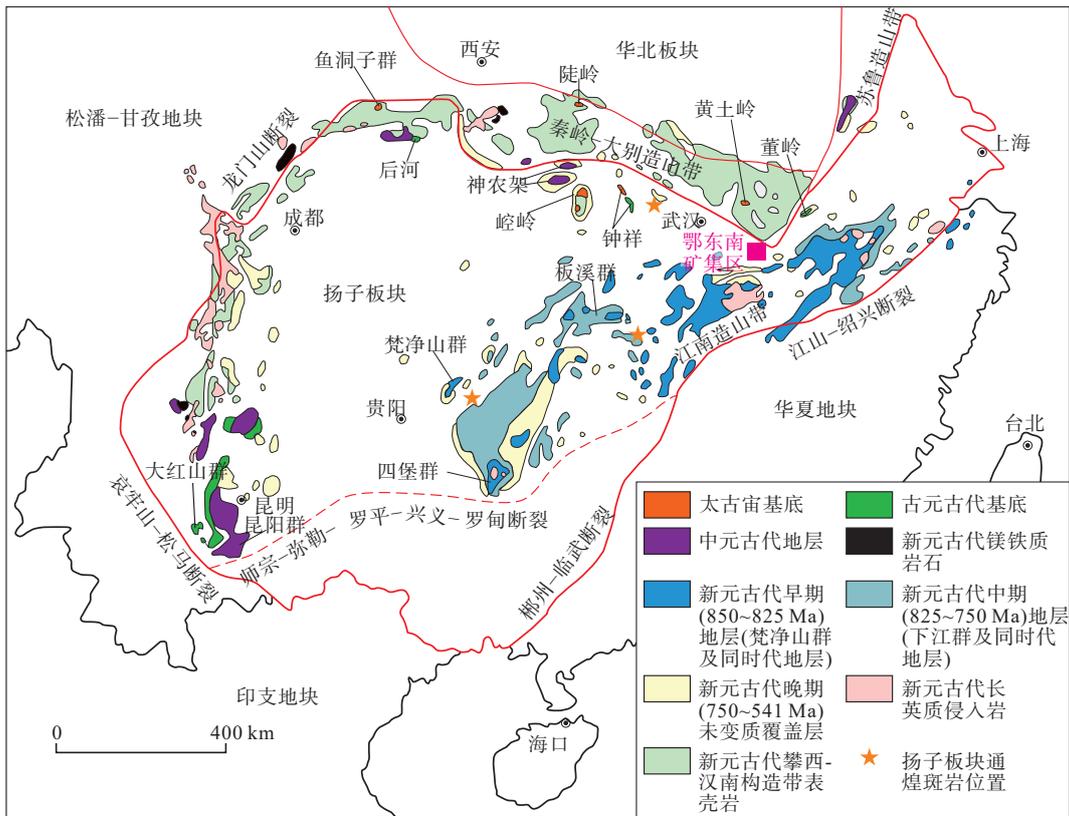


图1 扬子板块前寒武基底露头空间分布

Fig. 1 Geologic map showing the distribution of Precambrian rocks in the Yangtze Plate

造山带(图 1)。矿集区内自北向南发育鄂城、铁山、金山店、灵乡、阳新和殷祖 6 大岩体,此外有铜绿山、铜山口、姜桥、丰山洞等众多小岩体(图 2)。岩体的分布受构造控制,总体上 NWW 向呈带状展布、NNE 向呈串状展布(蔡恒安等, 2020)。岩性组成上,大岩体多为多期侵入体构成的复式岩体,主体岩性为闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩、花岗岩等。岩体侵入时代较为集中,为 150~127 Ma(Xie et al., 2011a; 丁丽雪等, 2017)。火山岩主要产于火山岩盆地中,自北向南分布有花马湖火山岩盆地、灵乡火山岩盆地、金牛火山岩盆地,其中金牛盆地火山岩的年龄为 130~125 Ma(Xie et al., 2011b),岩性为一套安山岩、流纹岩、英安岩为主的中酸性火山岩。

鄂东南矿集区除前寒武纪基底地层未有出露之外,从古生代到中生代地层俱有发育,以古生界和中生界为主。寒武系至泥盆系为浅海台地到浅海碎屑和滨海粗碎屑沉积岩,石炭系为一套海湾蒸发-浅海相过渡的沉积碎屑岩和生物碎屑灰岩,二叠系为一套沉积碎屑岩、生物碎屑灰岩和含煤质岩等,三叠系为一套碎岩岩-碳酸盐岩-碎屑岩的交替沉积,侏罗系为

一套砂岩和含煤砂页岩沉积,白垩系发育陆相火山岩(舒全安等, 1992; 谢桂青等, 2016)。鄂东南矿集区的成矿作用主要为与晚中生代中酸性岩体相关的内生铁、铜(金)、钨、钼等金属矿床,矿床类型为矽卡岩型和斑岩型为主,与成矿相关的地层主要为石炭系、二叠系和三叠系碳酸盐岩。

灵乡岩体位于南部隆起区与火山盆地过渡带,岩体平面呈 NE 向长条状出露地表,NE 方向长约为 25 km,中部及东部主岩体宽度为 2~4 km,西部最窄处约为 0.3 km,出露面积约为 52 km²。岩体东缘向南东倾斜,倾角约为 60°,侵位于三叠系地层;岩体西缘上部盖有白垩系火山岩地层,岩体侵入时代为早白垩世(Li et al., 2009)。灵乡岩体主要由闪长岩类组成,东段为黑云母二长闪长岩,西段主要为闪长玢岩。黑云母二长闪长岩是灵乡岩体东段的主要岩性,为灰黑色,细粒结构,块状构造(图 3a),主要矿物成分有斜长石(约 60%)、钾长石(约 20%)、黑云母(约 10%)、角闪石(约 5%)、石英(约 5%)。闪长玢岩呈灰-灰黑色,块状构造,斑状结构,斑晶占 25% 左右,由斜长石(约 15%)、钾长石(约 5%)和角闪石(约 5%)组成(图 3b)。斜长

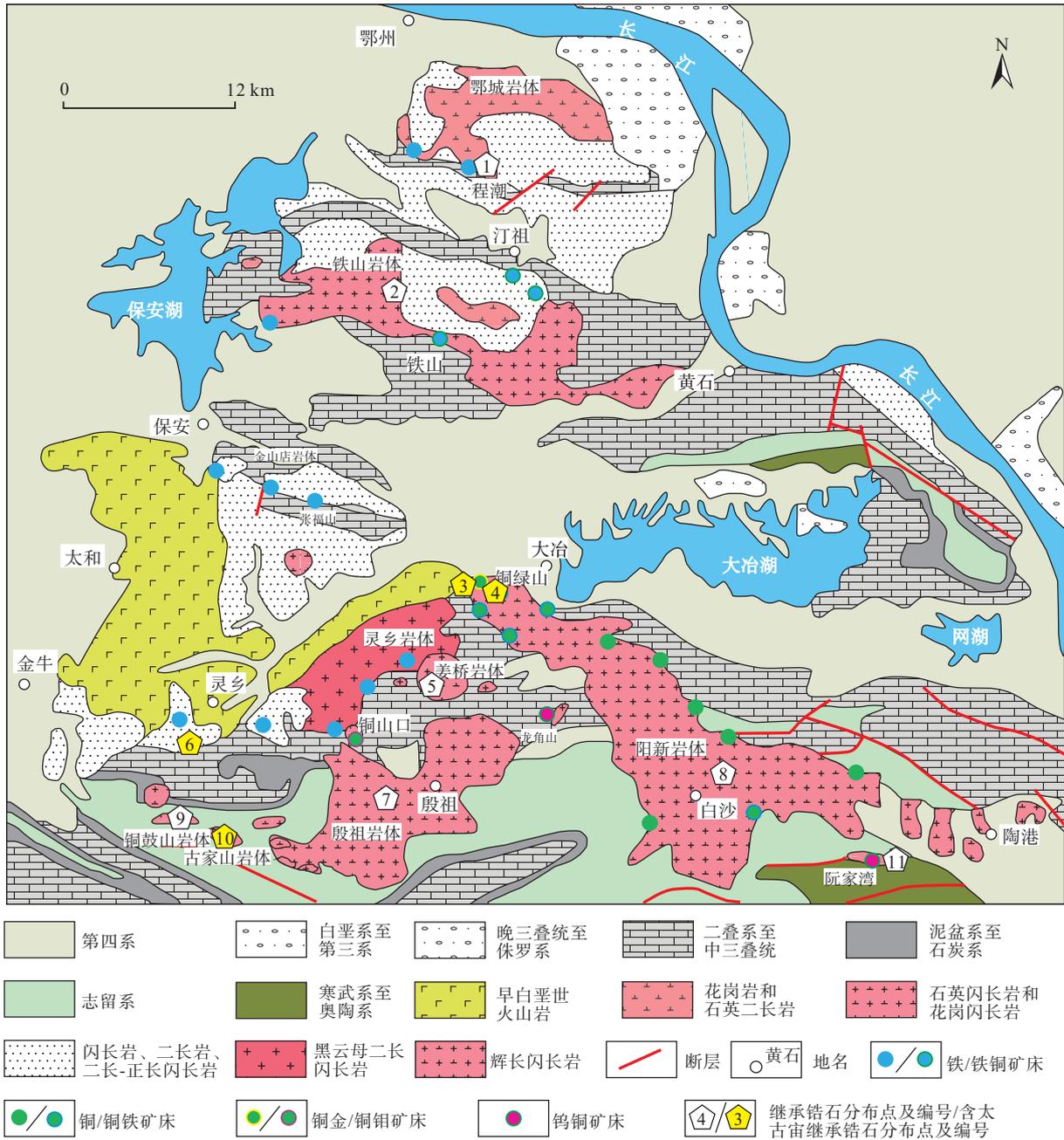


图2 鄂东南地区岩浆岩和矿床分布简图(据 Li et al., 2014a 修改)

Fig. 2 Distribution of igneous rocks and mineral deposits in southeastern Hubei Province

石斑晶呈半自形-自形板状, 粒径 0.3~1 mm; 钾长石斑晶呈半自形粒状, 粒径 0.5~1 mm; 角闪石斑晶半自形粒状; 粒径 0.5~1 mm。基质约占 75%, 主要为斜长石、角闪石、钾长石、石英等。该岩体整体蚀变较严重, 主要为碳酸盐化、绿泥石化等。

2 样品采集和分析方法

本次研究所用样品采自灵乡岩体西段的闪长玢

岩, 采样点位置如图 2 中 6 号点所在位置, 样品编号为 D020-3-1, 具体坐标为 N 29°59'47.8", E 114°43'7.08"。样品采集好后, 切去表面风化层, 首先切制薄片进行了鉴定, 然后进行了锆石分选和 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析。

锆石分选在广州拓岩检测技术有限公司完成, 依次采用破碎、重选、磁选、精淘、提纯程序完成。锆石阴极发光图像(CL)拍摄、U-Pb 同位素定年和微量元素分析、锆石 Hf 同位素分析在武汉上谱分析科技有

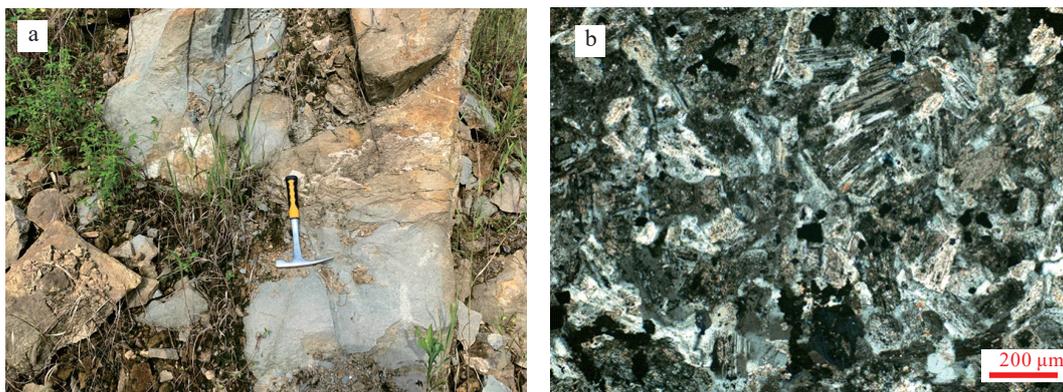


图3 灵乡岩体闪长玢岩野外(a)和镜下(b, 正交光)照片

Fig. 3 (a)The photographs of field and (b) microscope (under transmitted plane-polarized light) of the dioritic porphyrite from the Lingxiang pluton

限责任公司完成。CL 仪器为高真空扫描电子显微镜 (JSM-IT100), 配备有 GATAN MINICL 系统。锆石定年采用 LA-ICP-MS 分析, 详细的仪器参数和分析流程见 Zong 等(2017)。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPex-Pro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 5 Hz。U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal(Liu et al., 2008)完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成。锆石 Hf 利用激光剥蚀多接收等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为 Geolas HD, MC-ICP-MS 为 Neptune Plus。采用单点剥蚀模式, 斑束固定为 44 μm , 详细仪器操作条件和分析方法可参照(Hu et al. 2012)。

分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal(Liu et al., 2008)完成。计算锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 时采用的衰变常数 $\lambda^{176}\text{Lu}=1.867\times 10^{-11}$ (Söderlund et al., 2004), 球粒陨石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0336$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.0282785$ (Bouvier et al., 2008); 计算模式年龄时, 采用的亏损地幔 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0384$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28325$ (Griffin et al., 2000), 平均地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ (Griffin et al., 2002)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

用于锆石 U-Pb 定年的灵乡闪长玢岩样品 D020-3-1 的锆石形态较为复杂, 大部分为半自形, 长宽比为 1:1~1:3, 粒径总体较小, 大部分小于 100 μm , 少数颗粒较大者可至 160 μm 。锆石环带发育, 反映较为明显的岩浆锆石特征(图 4)。总计对 20 颗锆石进行了分析, 结果见表 1。20 颗锆石的 Th/U 值为 0.3~2.1, 总体较高, 显示岩浆成因锆石特征(吴元保等, 2004)。

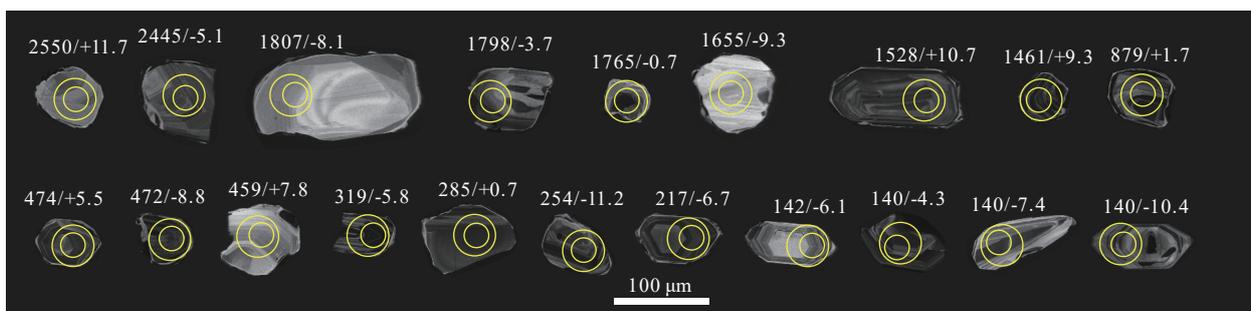


图4 灵乡岩体闪长玢岩锆石 CL 图像(内圈代表年龄分析点, 外圈代表 Hf 同位素分析点)

Fig. 4 Zircon CL images of the Lingxiang diorite porphyrite (The outer circle represents the age analysis and the inner circle represents the Hf isotope analysis)

对于小于 1 000 Ma 的分析点,笔者采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,对于大于 1 000 Ma 的分析点,为了消除 Pb 丢失影响,文中采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。20 颗锆石的年龄谐和度除 D20-3-1-03 点较低(87%)之外,其余 19 个点的谐和度范围为 92%~103%,说明年龄质量总体较高。年龄值变化范围为 140~2 550 Ma,其中最年轻的 4 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 140 Ma 左右,加权平均年龄为

(140.7±3.5) Ma(MSWD=0.062)(图 5),与前人发表的灵乡闪长玢岩年龄(141.1±0.7 Ma)(Li et al., 2009)在误差范围内一致,可以代表岩体的形成年龄。其余 16 颗锆石则沿谐和曲线分布,分布在 217~319 Ma、459~474 Ma、879 Ma、1 461~1 528 Ma、1 655~1 765 Ma、1 798~1 807 Ma 和 2 445~2 550 Ma 几个不连续区间,均大于成岩年龄,说明这 16 颗锆石均为继承锆石。

表 1 灵乡闪长玢岩锆石年龄数据

Tab. 1 Zircon U-Pb age data of Lingxiang dioritic porphyrite

分析点	Th (10^{-6})	U (10^{-6})	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)						误差 (%)
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	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	
D020-3-1-01	47	32	1.5	0.110 5	0.005 2	5.115 1	0.233 3	0.336 4	0.007 0	1807	86.4	1839	38.8	1869	33.7	103
D020-3-1-02	56	44	1.3	0.101 7	0.005 5	4.222 7	0.230 9	0.299 1	0.005 9	1 655	101.1	1 678	44.9	1 687	29.3	102
D020-3-1-03	1 014	599	1.7	0.094 9	0.003 2	3.039 1	0.096 8	0.229 7	0.002 6	1 528	62.7	1 417	24.3	1 333	13.7	87
D020-3-1-04	250	287	0.9	0.159 0	0.004 8	9.253 7	0.265 4	0.418 2	0.004 8	2 445	50.8	2 363	26.3	2 252	21.9	92
D020-3-1-06	200	220	0.9	0.054 5	0.006 2	0.160 2	0.015 2	0.021 9	0.000 7	391	252.7	151	13.3	140	4.6	93
D020-3-1-07	230	184	1.3	0.108 0	0.004 3	4.291 6	0.168 9	0.286 0	0.004 2	1 765	72.2	1 692	32.4	1 621	21.0	92
D020-3-1-09	554	881	0.6	0.054 4	0.002 4	0.390 0	0.027 7	0.050 8	0.002 6	387	98.1	334	20.2	319	15.8	96
D020-3-1-10	363	561	0.6	0.047 6	0.002 9	0.146 0	0.009 2	0.022 0	0.000 4	79.7	140.7	138	8.1	140	2.6	102
D020-3-1-11	199	193	1.0	0.109 9	0.003 3	5.099 3	0.165 1	0.333 0	0.005 2	1 798	54.5	1836	27.5	1853	25.2	103
D020-3-1-12	515	737	0.7	0.091 7	0.002 8	3.165 0	0.094 1	0.247 8	0.003 0	1 461	52.9	1 449	23.0	1 427	15.4	98
D020-3-1-13	293	562	0.5	0.058 8	0.002 5	0.622 2	0.026 1	0.076 0	0.001 0	567	94.4	491	16.3	472	5.9	96
D020-3-1-14	241	205	1.2	0.051 0	0.005 2	0.158 0	0.016 4	0.022 2	0.000 5	243	218.5	149	14.4	142	3.0	95
D020-3-1-15	255	743	0.3	0.054 5	0.002 7	0.257 0	0.012 3	0.034 2	0.000 5	391	113.0	232	9.9	217	3.2	93
D020-3-1-16	313	401	0.8	0.055 2	0.002 2	0.583 9	0.023 6	0.076 4	0.000 9	420	92.6	467	15.1	474	5.5	102
D020-3-1-17	2 820	1 631	1.7	0.050 8	0.005 2	0.158 5	0.018 8	0.021 9	0.000 9	232	218.5	149	16.5	140	5.9	93
D020-3-1-18	135	64	2.1	0.056 4	0.007 0	0.558 9	0.059 2	0.073 8	0.001 8	478	275.9	451	38.6	459	10.9	102
D020-3-1-19	437	757	0.6	0.057 1	0.002 8	0.313 4	0.014 4	0.040 1	0.000 7	494	107.4	277	11.1	254	4.1	92
D020-3-1-20	384	565	0.7	0.071 6	0.002 8	1.440 7	0.059 5	0.146 1	0.002 6	976	79.6	906	24.8	879	14.4	97
D020-3-1-21	113	96	1.2	0.169 0	0.005 7	10.770 9	0.381 8	0.462 5	0.006 7	2 550	57.6	2 504	33.0	2 451	29.6	96
D020-3-1-22	139	204	0.7	0.057 1	0.003 7	0.352 4	0.022 3	0.045 2	0.000 7	494	142.6	307	16.8	285	4.4	93

3.2 锆石 Hf 同位素

在锆石 U-Pb 定年基础上,对 20 颗锆石进行了 Lu-Hf 同位素分析,分析结果见表 2。结果显示 20 个分析点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 457~0.002 842, $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.016 213~0.092 366,总体均较低,说明 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 的干扰较小。4 颗 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄约为 140 Ma 的锆石,

基于年龄值计算后的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值为 0.282 404~0.282 576, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -4.3~-10.4,两阶段 Hf 模式年龄为 1 433~1 815 Ma,位于 Xie 等(2011a)报道的鄂东南地区晚中生代侵入岩范围内。其余 16 颗继承锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值为 0.281 072~0.282 717, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -11.2~11.7,两阶段 Hf 模式年龄为 916~3 280 Ma。

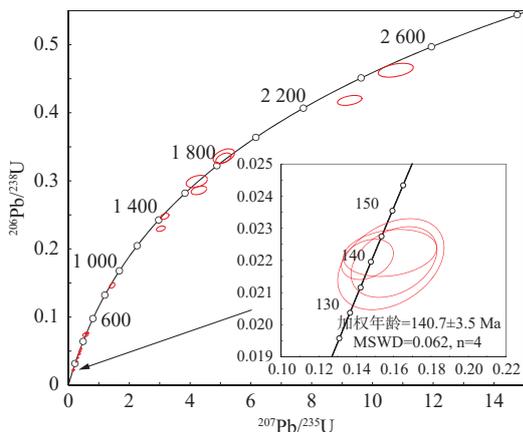


图 5 灵乡岩体闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄谐和曲线图

Fig. 5 Zircon U-Pb age concordia diagram of the Lingxiang diorite porphyrite

4 讨论

4.1 鄂东南矿集区继承锆石的成因

由于继承锆石的来源可能比较复杂,在进一步讨论之前首先要判断继承锆石的成因,尤其是变质作用,会改变锆石的年龄和 Hf 同位素组成(吴元保等, 2004;

张少兵等, 2007)。目前区分岩浆锆石和变质锆石最常用的指标为锆石的 Th/U 值,岩浆锆石的 Th/U 值一般大于 0.1,且平均值接近于 1;而变质锆石的 Th/U 值一般小于 0.1(Belousova et al., 2002; 吴元保等, 2004)。本研究所收集的 95 个继承锆石数据显示 Th/U 值范围为 0.1~2.2(表 3, 图 6),平均值为 0.9,显示出明确的岩浆锆石特征(李平等, 2024; 冉亚洲等, 2024)。而且继承锆石的年龄值与 Th/U 值不存在相关性,也指示不存在变质作用的影响。因此,所收集的这些继承锆石均为岩浆上升过程中自围岩中捕获,可以用来讨论深部隐伏地质体特征,尤其是具有前寒武纪古老年龄的继承锆石,可以用来讨论基底特征。

夏金龙等(2013a)基于铜鼓山岩体的继承锆石年龄特征,明确提出鄂东南矿集区存在古元古代—太古宙基底,之后在古家山岩体(夏金龙等, 2013b)、姜桥岩体(丁丽雪等, 2013)、铜绿山岩体(黄圭成等, 2013)、铜绿山煌斑岩(Zhang et al., 2021b)等多处位置均发现了较多古元古代—太古宙继承锆石。实际上,在更早的研究也发现了少量继承锆石数据,如 Li 等(2010)在殷祖岩体中发现了 1 颗古元古代继承锆石, Xie 等

表 2 灵乡闪长玢岩锆石 Hf 同位素数据

Tab. 2 Zircon Hf isotope data of Lingxiang dioritic porphyrite

样品编号	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	年龄 (Ma)	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	T_{DM} (Ma)	$T_{2\text{DM}}$ (Ma)
D20-3-1-1	0.000 570	0.000 005	0.281 424	0.000 009	0.021 425	0.000 240	1807	0.281 404	-8.1	2 526	2 964
D20-3-1-2	0.000 663	0.000 013	0.281 489	0.000 010	0.025 059	0.000 457	1 655	0.281 468	-9.3	2 443	2 921
D20-3-1-3	0.001 057	0.000 021	0.282 144	0.000 011	0.038 954	0.000 827	1 528	0.282 113	10.7	1 564	1 585
D20-3-1-4	0.000 600	0.000 006	0.281 100	0.000 008	0.022 012	0.000 191	2 445	0.281 072	-5.1	2 963	3 280
D20-3-1-6	0.002 287	0.000 044	0.282 495	0.000 036	0.071 227	0.001 076	140	0.282 489	-7.4	1 108	1 627
D20-3-1-7	0.001 532	0.000 027	0.281 691	0.000 023	0.050 118	0.000 749	1 765	0.281 640	-0.7	2 218	2 477
D20-3-1-9	0.001 994	0.000 048	0.282 431	0.000 026	0.064 281	0.001 985	319	0.282 419	-5.8	1 191	1 670
D20-3-1-10	0.001 281	0.000 031	0.282 579	0.000 013	0.050 481	0.000 824	140	0.282 576	-4.3	959	1 433
D20-3-1-11	0.000 457	0.000 015	0.281 549	0.000 013	0.016 213	0.000 459	1 798	0.281 534	-3.7	2 348	2 687
D20-3-1-12	0.001 862	0.000 045	0.282 169	0.000 018	0.062 988	0.001 202	1 461	0.282 118	9.3	1 561	1 617
D20-3-1-13	0.001 463	0.000 028	0.282 251	0.000 010	0.049 887	0.000 612	472	0.282 238	-8.8	1 429	1 975
D20-3-1-14	0.002 842	0.000 031	0.282 530	0.000 031	0.092 366	0.000 907	142	0.282 522	-6.1	1 074	1 552
D20-3-1-15	0.001 126	0.000 022	0.282 463	0.000 009	0.037 917	0.000 721	217	0.282 459	-6.7	1 119	1 646
D20-3-1-16	0.002 427	0.000 064	0.282 664	0.000 013	0.075 969	0.001 666	474	0.282 642	5.5	866	1 075
D20-3-1-17	0.000 989	0.000 032	0.282 407	0.000 015	0.032 420	0.000 913	140	0.282 404	-10.4	1 193	1 815
D20-3-1-18	0.001 332	0.000 025	0.282 729	0.000 016	0.055 075	0.000 864	459	0.282 717	7.8	748	916
D20-3-1-19	0.002 403	0.000 101	0.282 322	0.000 015	0.086 403	0.003 255	254	0.282 310	-11.2	1 364	1 952
D20-3-1-20	0.001 155	0.000 023	0.282 295	0.000 016	0.040 620	0.000 626	879	0.282 276	1.7	1 356	1 635
D20-3-1-21	0.000 745	0.000 029	0.281 511	0.000 020	0.028 769	0.000 946	2 550	0.281 475	11.7	2 418	2 338
D20-3-1-22	0.001 094	0.000 019	0.282 632	0.000 012	0.042 042	0.000 667	285	0.282 626	0.7	880	1 230

注: $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 < 1 000 Ma 时, $\text{Con}\% = (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄} / ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \text{ 年龄}) \times 100\%$; $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 > 1 000 Ma 时, $\text{Con}\% = (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄} / ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \text{ 年龄}) \times 100\%$ 。

表3 鄂东南矿集区内继承锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素数据汇总表

Tab. 3 Inherited zircon age and Hf isotope data of intrusions in the Southeastern Hubei Province

岩体	点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	年龄(Ma)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$T_{2\text{DM}}(\text{Ma})$	数据来源
鄂城	CC375-16-5	—	—	—	1 569	-0.5	2 040	2 311	Xie et al., 2011a
铁山	TS3-7	399	596	0.7	1 871	-0.7	2 299	2 558	
灵乡	D20-3-1-1	47	32	1.5	1 807	-8.1	2 526	2 964	—
	D20-3-1-2	56	44	1.3	1 655	-9.3	2 443	2 921	—
	D20-3-1-3	1 014	599	1.7	1 528	10.7	1 564	1 585	—
	D20-3-1-4	250	287	0.9	2 445	-5.1	2 963	3 280	—
	D20-3-1-7	230	184	1.3	1 765	-0.7	2 218	2 477	—
	D20-3-1-9	554	881	0.6	319	-5.8	1 191	1 670	文中
	D20-3-1-11	199	193	1.0	1 798	-3.7	2 348	2 687	—
	D20-3-1-12	515	737	0.7	1 461	9.3	1 561	1 617	—
	D20-3-1-13	293	562	0.5	472	-8.8	1 429	1 975	—
	D20-3-1-15	255	743	0.3	217	-6.7	1 119	1 646	—
	D20-3-1-16	313	401	0.8	474	5.5	866	1 075	—
	D20-3-1-18	135	64	2.1	459	7.8	748	916	—
	D20-3-1-19	437	757	0.6	254	-11.2	1 364	1 952	—
	D20-3-1-20	384	565	0.7	879	1.7	1 356	1 635	—
	D20-3-1-21	113	96	1.2	2 550	11.7	2 418	2 338	—
	D20-3-1-22	139	204	0.7	285	0.7	880	1 230	—
铜绿山	ZK02810-6-06c	133	170	0.8	1 207	-8.9	2 063	2 549	—
	ZK02810-6-08c	53	133	0.4	2 220	-2.6	2 670	2 953	—
	ZK02810-6-10c	67	139	0.5	2 505	8.9	2 483	2 470	—
	ZK02810-6-11c	96	164	0.6	2 046	3.6	2 292	2 435	—
	ZK02810-6-15c	79	76	1.0	2 293	2.6	2 541	2 688	黄圭成等, 2013
	ZK02810-6-17c	67	97	0.7	2 613	8.9	2 578	2 556	—
	ZK02810-6-21c	158	466	0.3	1 979	1.2	2 318	2 526	—
	ZK02810-6-18c	103	95	1.1	2 895	6.2	2 927	2 946	—
	Dy254-1-13c	49	24	2.0	799	—	—	—	—
	Dy254-1-21c	69	109	0.6	1 127	-15.0	2 205	2 861	—
	TLS801-103-3	31	22	1.4	1 820	-7.0	2 494	2 909	—
	TLS801-103-4	172	286	0.6	751	-6.0	1 543	2 015	—
	TLS801-103-6	113	194	0.6	2 613	-1.4	2 974	3 188	—
	TLS801-103-8	114	92	1.2	2 061	—	—	—	—
	TLS801-103-9	41	61	0.7	1 732	-7.1	2 421	2 846	—
	TLS801-103-14	202	155	1.3	299	-12.1	1 400	2 043	—
	TLS801-103-15	147	139	1.1	850	—	—	—	—
	TLS801-103-16	187	344	0.5	1 862	-0.2	2 276	2 521	—
	TLS801-103-21	160	180	0.9	2 457	5.8	2 562	2 627	—
	TLS801-103-22	316	426	0.7	1 132	—	—	—	—
TLS801-103-30	462	435	1.1	320	—	—	—	—	
TLS801-103-32	491	382	1.3	263	—	—	—	—	
TLS801-103-34	313	168	1.9	830	—	—	—	—	

续表 3

岩体	点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	年龄(Ma)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$T_{2\text{DM}}(\text{Ma})$	数据来源
铜绿山煌斑岩	TLS803-159-1	185	85	2.2	837	-20.6	2 203	2 982	-
	TLS803-159-2	108	136	0.8	323	11.5	480	572	Zhang et al., 2021a
	TLS803-159-3	30	61	0.5	1 632	-9.0	2 411	2 885	-
	TLS803-159-14	251	397	0.6	836	-	-	-	-
	TLS803-159-15	545	563	1.0	997	-	-	-	-
	TLS803-159-16	140	201	0.7	2 498	-	-	-	-
	TLS803-159-17	335	352	0.9	423	-	-	-	-
	TLS803-159-18	143	248	0.6	2 345	-	-	-	-
	TLS803-159-19	50	149	0.3	2 567	-	-	-	-
	TLS803-159-20	264	424	0.6	427	-	-	-	-
	TLS803-159-21	71	110	0.6	784	-	-	-	-
	TLS803-159-22	216	291	0.7	880	-	-	-	-
	TLS803-159-23	121	115	1.1	2 147	-	-	-	-
	TLS803-159-24	332	388	0.9	835	-	-	-	-
	TLS803-159-25	195	148	1.3	421	-	-	-	-
	TLS803-159-26	89	411	0.2	1 950	-	-	-	-
	TLS803-159-27	373	641	0.6	437	-	-	-	-
	TLS803-159-28	436	612	0.7	444	-	-	-	-
	TLS803-159-29	30	44	0.7	2 469	-	-	-	-
阳新	YX2-7	377	170	2.2	1 117	-4.9	1 812	2 229	Xie et al., 2011a
	Dy116-06	872	1 008	0.9	614	-7.6	1 490	2 006	丁丽雪等, 2016
	Dy116-15	184	253	0.7	422	-	-	-	-
姜桥	Dy311-01	51	303	0.2	2 258	-3.6	2 738	3 040	-
	Dy311-03	27	226	0.1	1 713	-7.0	2 408	2 823	-
	Dy311-06	53	70	0.8	1 158	-0.7	1 685	2 002	-
	Dy311-10	11	27	0.4	2 117	-14.4	3 019	3 588	-
	Dy311-13	120	143	0.8	1 111	-	-	-	丁丽雪等, 2013
	Dy311-15	101	114	0.9	1 127	-	-	-	-
	Dy311-18	326	315	1.0	1 124	-	-	-	-
	Dy311-19	68	122	0.6	1 182	-	-	-	-
Dy311-21	58	149	0.4	2 032	-	-	-	-	
殷租*	08YZ38.1@6	227	117	1.9	2 424	-	-	-	Li et al., 2010
铜鼓山	Dy314-13inh	77	107	0.7	1 846	-	-	-	-
	Dy314-15	96	281	0.3	313	-	-	-	-
	Dy314-20	117	275	0.4	306	-	-	-	-
	Dy314-21inh	56	27	2.0	1 798	-23.2	3 100	3 869	-
	Dy314-22inh	161	126	1.3	1 809	-23.2	3 103	3 881	夏金龙等, 2013a
	Dy314-23inh	282	189	1.5	1 884	-23.0	3 173	3 924	-
	Dy314-24inh	222	127	1.8	1 888	-	-	-	-
	Dy314-25inh	50	61	0.8	1 728	-	-	-	-
	Dy314-26inh	51	50	1.0	1 574	-	-	-	-
	DY145-1inh	19	46	0.4	2 959	3.1	3 101	3 188	-
	DY145-2inh	98	89	1.1	1 785	-14.6	2 769	3 344	-

续表 3

岩体	点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	年龄(Ma)	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$T_{2\text{DM}}(\text{Ma})$	数据来源
古家山	DY145-5inh	72	83	0.9	1 803	-	-	-	-
	DY145-8inh	92	60	1.5	1 746	-18.1	2 857	3 526	-
	DY145-11inh	324	526	0.6	2 499	-	-	-	夏金龙等, 2013b
	DY145-12inh	107	109	1.0	1 847	-1.0	2 292	2 558	-
	DY145-13inh	77	107	0.7	2 342	-	-	-	-
	DY145-19inh	102	165	0.6	2 036	1.1	2 377	2 583	-
	DY145-20inh	117	275	0.4	1 929	-	-	-	-
阮家湾	XNS1-6	180	215	0.8	2 358	-	-	-	-
	XNS1-7	40	136	0.3	2 379	-	-	-	颜代蓉等, 2012
	XNS1-16	168	374	0.4	2 337	-	-	-	-
	XNS17-15	109	657	0.2	1 816	-	-	-	-

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和模式年龄值均按照本文提供的参数重新计算。

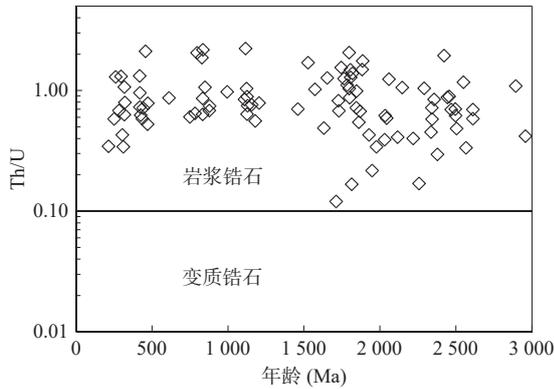


图6 鄂东南矿集区继承锆石 Th/U 值

Fig. 6 Th/U ratios for the inherited zircons from the Southeastern Hubei Province ore deposit cluster

(2011a)在程潮、铁山、阳新岩体中各发现1颗继承锆石,年龄为中元古代到古元古代;颜代蓉等(2012)报道了阮家湾岩体-犀牛山岩体中存在4颗早元古代继承锆石。但可能由于继承数量较少,早期的研究未开展深入讨论。本研究在所获得的灵乡闪长玢岩16颗继承锆石U-Pb年龄和Hf同位素基础上,系统收集了前人针对区内岩体开展锆石U-Pb定年和Hf同位素分析中所发现的继承锆石数据,汇总于表3中,总计获得95个继承锆石年龄数据,其年龄分布统计直方图见图7a。同时获得51个继承锆石Hf同位素数据,利用笔者研究方法中提供的参数,统一计算获得的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化为范围为-23.2~11.7。将区内所有继承锆石的年龄和Hf同位素组成按照地质时代,投于图8中,可系统反映鄂东南矿集区不同时代继承锆石Hf同位素的分布规律。值得强调的是,所收集的95个数据中,仅有两个数据点来自于矿集区北部的鄂城

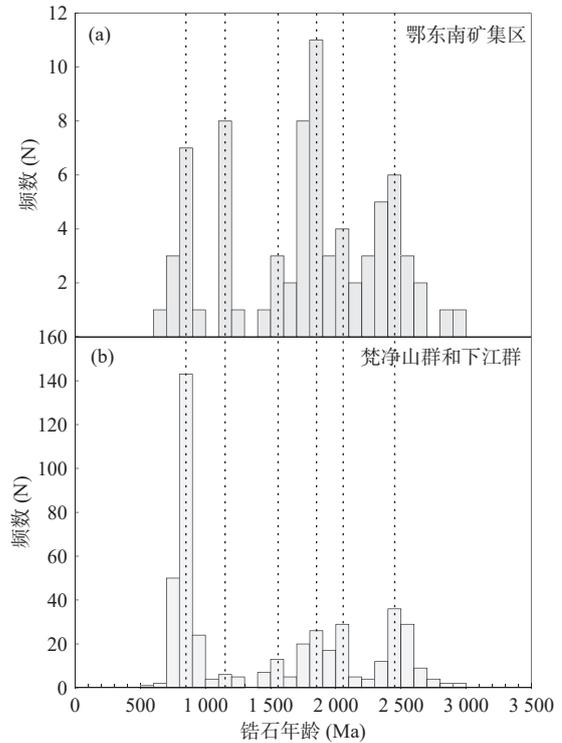


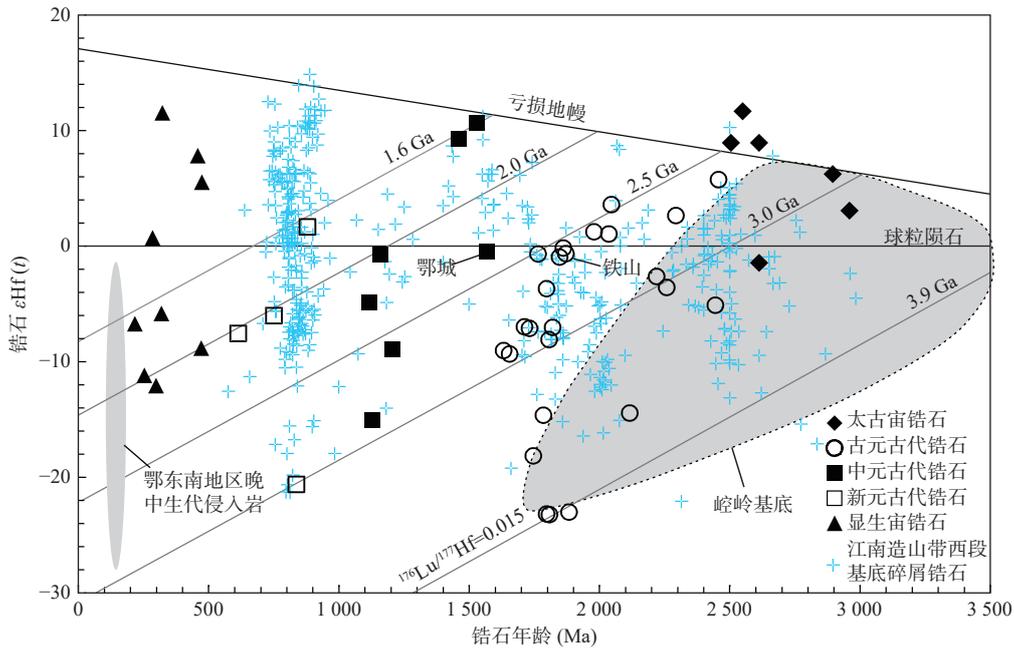
图7 鄂东南矿集区继承锆石(a)与梵净山群和下江群碎屑锆石年龄统计直方图(b)

Fig. 7 (a) Statistical histograms of inherited zircons from the southeastern Hubei Province ore deposit cluster and (b) detrital zircons from the Fanjingshan and Xiajiang Groups

和铁山岩体,其余数据均来自矿集区南部的岩体。

4.2 鄂东南矿集区继承锆石的时空分布和源区信息

在空间分布上,鄂东南矿集区北部的鄂城和铁山岩体,各自产出1颗继承锆石,年龄分别为中元古代和古元古代(图8)。南部的灵乡岩体、铜绿山岩体(含煌斑岩),产出有自太古宙至显生宙的继承锆石,



图中黑色数据点均为鄂东南矿集区继承锆石数据, 数据来源见表 3; 江南造山带西段基底碎屑锆石数据引自 Wang et al.,(2010); 崆岭杂岩数据范围据邱啸风等 (2014)、Li 等(2014b)、Guo 等(2015); 鄂东南地区晚中生代侵入岩范围据 Xie 等(2011a)

图 8 鄂东南矿集区继承锆石 Hf 同位素组成及其与江南造山带西段基底碎屑锆石和崆岭杂岩锆石 Hf 同位素对比

Fig. 8 Inheritance zircon Hf isotopic composition in the southeastern Hubei mineral district and its comparison with the Hf isotopic compositions of detrital zircons from the western segment of the Jiangnan Orogen and zircons from the Kongling Complex

在数量上占据主导, 共计 58 颗; 阳新岩体产出 3 颗继承锆石, 年龄为中元古代至显生宙; 姜桥岩体产出有 9 颗继承锆石, 年龄为中元古代至古元古代; 殷祖岩体产出 1 颗继承锆石, 年龄为古元古代; 铜鼓山、古家山、阮家湾 3 个小岩体, 合计产出有 22 颗继承锆石, 年龄分布为太古宙至显生宙。

在时间分布上, 鄂东南矿集区共计 95 颗继承锆石的年龄变化范围为 217~2959 Ma(表 3), 其中 76 颗前寒武纪继承锆石的年龄峰值主要分布在~800 Ma、~1100 Ma、~1500 Ma、~1800 Ma、~2000 Ma、~2400 Ma 几个区间内(图 7a)。其中古元古代年龄(1600~2500 Ma)的继承锆石数量为 44 颗, 占据主体地位, 分布于鄂城岩体之外的所有岩体中。太古宙继承锆石(年龄>2500 Ma)锆石总计 7 颗, 局限分布于铜绿山岩体、灵乡岩体西段、古家山岩体几个位置。中元古代年龄(1000~1600 Ma)继承锆石数量为 13 颗, 分布于程潮、灵乡、铜绿山、姜桥、阳新、铜鼓山几个岩体中, 分布范围也较为广泛。新元古代年龄(541~1000 Ma)继承锆石数量为 12 颗, 分布在 3 个岩体中, 除灵乡和阳新岩体各 1 颗外, 其余 10 颗均产于铜绿山岩体, 并且主要在其中的煌斑岩脉中(Zhang et al., 2021b)。

Hf 同位素组成上可进一步反映出锆石源区的重要信息。太古宙继承锆石年龄为 2.5~3.0 Ga, 虽然数量较少, 但大部分沿具有较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 且锆石年龄和模式年龄极为接近或一致(表 3), 在 Hf 同位素投图中沿着亏损地幔演化线分布(图 8), 指示源区为新生地壳特征(吴福元等, 2007)。而古元古代继承锆石, 夏金龙等(2013a)基于铜鼓山体该时期继承锆石的低 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 特征和较老模式年龄, 认为古元古代继承锆石所反映的基底可能来自太古宙基底的再造。从区内所有古元古代继承锆石的 Hf 同位素组成和模式年龄来看(图 8), 古元古代锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 具有较大的变化范围, 但总体随具有年龄变轻而降低的趋势, 说明确实具有再造地壳特征, 其模式年龄大致为 2.5~3.9 Ga, 指示鄂东南矿集区古元古代继承锆石的源区为更古老的太古宙地壳物质部分熔融形成。这也可能暗示扬子克拉通东部的深部存在始太古宙的古老基底岩系(邱啸风, 2022)。中—新元古代继承锆石数量也较少, 但 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值具有较大的变化范围。文中数据反映的两颗年龄约为~1.5 Ga 的继承锆石(D20-3-1-3 和 D20-3-1-12)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 10.7 和 9.3, 位于亏损地幔演化线附近(图 8), 反映了源区具有新生地壳特征; 其余中—新元古代继承锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主体为负值, 也具有

随时间演化而降低的特征,反映出再造地壳特征,其模式年龄为1.6~3.0 Ga,说明来源于古元古代和太古宙地壳物质的部分熔融。显生宙继承锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值则具有较大的变化范围(图8),暗示了壳幔共同作用。

4.3 鄂东南矿集区基底的类型划分

对于扬子克拉通的基底来说,存在川中式、江南式和昆阳式3种类型(曹洛华等,1987)。川中式基底指的是以太古宙—古元古代的TTG岩系为特征,以崆岭杂岩为代表的基底,物性表现为高密度、中等磁性特征;江南式基底是一套巨厚的海相浊积复理石沉积岩系,包括冷家溪群、四堡群、双桥山群、上溪群、双溪坞群等,主要为新元古代地层(Zhao et al., 2011; 王敏等, 2012; 高林志等, 2014),物性表现为低密度、弱磁性特征;昆阳式基底指的是在神农架地区出露的一套中-新元古代沉积地层,岩性以碳酸盐岩为主,包括神农架群和马槽园群等,物性表现为高密度、无磁性特征(常印佛等, 1996; 董树文等, 2011; 梁学堂等, 2020)。

曹洛华等(1987)基于鄂东南矿集区地球物理场的差异性特征,提出大致以灵乡-大冶-网湖为界(图2),矿集区北部属于川中式基底,而南部为江南式基底。常印佛等(1996)和董树文等(2011)基于区域地球物理场特征,认为鄂东南矿集区的基底均为川中式基底。夏金龙等(2013a, 2013b)基于铜鼓山、古家山等岩体存在古元古代—太古宙继承锆石,由此认为鄂东南矿集区存在古元古代—太古宙古老基底,并且认为扬子陆块古元古代—太古宙基底可能从四川盆地、鄂西崆岭群和郧西地区向东延伸至鄂东南地区,也就是认同鄂东南矿集区基底属于川中式。因此,对于鄂东南矿集区基底的认识,主要争议为整个矿集区是具有单一的川中式基底,还是具有南北基底差异性,即北部为川中式基底,而南部位为江南式基底。而对于昆阳式基底来说,由于该类基底的无磁性特征与鄂东南矿集区基底所具有的正磁异常和复杂磁异常特征具有明显差异,前人研究中均未提及鄂东南矿集区存在昆阳式基底的可能性。

笔者针对前人关于鄂东南矿集区基底类型划分存在的争议,尝试利用继承锆石年龄和Hf同位素进行讨论。对于继承锆石来说,发现古元古代-太古宙年龄的继承锆石,并不意味着必然存在该时期的基底,因为继承锆石的来源可能较为复杂,比如矿集区附近武汉地区志留系碎屑沉积岩中也可以产出大量年龄分布广泛的碎屑锆石(邱啸风, 2022),而且该志留系

碎屑沉积岩层位在鄂东南矿集区也广泛发育。当晚中生代岩体上侵时,完全可以从这些较为年轻的地层中捕获更为古老的碎屑锆石。所以,基于继承锆石判断基底性质,可能从继承锆石年龄和Hf同位素组成的总体分布模式来判断更为可靠。

在锆石Hf同位素图解上(图8),鄂东南矿集区的岩体继承锆石Hf同位素组成与崆岭群杂岩的锆石Hf同位素数据范围相差较大,主体并不位于崆岭杂岩的数据范围内。主要表现为鄂东南矿集区继承锆石所反映的地壳增生最早发生在2.5~3.0 Ga,而改造主要发生在古元古代,但崆岭地区地壳的主要生长主要发生于3.2~3.6 Ga,而改造则主要发生在中太古宙和古元古代(张少兵等, 2007; 邱啸风等, 2014),明显比鄂东南矿集区继承锆石所反映的演化历史更为古老。这说明鄂东南矿集区的基底,尤其是南部基底,可能并不是崆岭杂岩所代表的川中式基底。

在此基础上,笔者进行鄂东南矿集区继承锆石与Wang等(2010)报道的江南造山带西段梵净山群和下江群碎屑锆石的对比分析。首先在锆石年龄分布上,可见鄂东南矿集区的继承锆石,尽管年龄数据相对较少,但鄂东南矿集区的继承锆石年龄分布和江南造山带西段的梵净山群和下江群的碎屑锆石年龄分布较为相似,尤其峰值区间高度一致,均具有~800 Ma、~1100 Ma、~1500 Ma、~1800 Ma、~2000 Ma、~2400 Ma几个峰值区间(图7)。在Hf同位素图解上,鄂东南矿集区的继承锆石与梵净山群和下江群碎屑锆石的Hf同位素组成也体现出高度相似性(图8)。在~2.5 Ga地壳增生和古元古代地壳再造记录吻合的基础上,本研究发现的鄂东南矿集区两颗~1.5 Ga的继承锆石所指示的地壳增生事件,在梵净山群和下江群里也有对应的锆石数据记录。其余中-新元古代锆石所指示的地壳再造事件,也能够较好对应。由于梵净山群和下江群所发现的反映~1.5 Ga新生地壳事件的锆石在为扬子克拉通首次发现(Wang et al., 2010),可作为一个鉴别性特征,结合锆石年龄分布的总体相似性,综合指示鄂东南矿集区的南部基底应属于江南式基底。值得注意的是,梵净山群和下江群Hf同位素数据中存在的大量~800 Ma的数据点(图8b),对应于新元古代扬子板块再造事件(张少兵等, 2007),而在笔者统计的鄂东南矿集区Hf同位素数据中,该时期数据点明显较少,但主要原因并非该时期的继承锆石较少(图7a),而是该时期的继承锆石大部分未测

试Hf同位素数据(表3)。

结合区内的岩体岩石特征对以及金属矿化的选择性,对区内的岩浆演化进行了论述,初步认为鄂东南地区位于处于坳隆过渡区,在印支期形成基底构造,大致在灵乡-大冶-网湖一带形成基底缝合线,燕山期的岩体即是在此基础上形成的。同时考虑到矿集区北部的地球物理场与南部存在明显差异,且北部的地球物理场所体现出的正磁异常和高重力异常特征,前人一致解释为川中式基底特征(曹洛华等,1987;常印佛等,1996;董树文等,2011),本研究支持前人认识。

5 结论

(1)鄂东南矿集区灵乡岩体闪长玢岩的锆石具有复杂的组成与来源,最年轻锆石指示岩体形成年龄为(140.7±3.5) Ma,与前人发表的锆石年龄一致。

(2)继承锆石具有较为宽泛的年龄和Hf同位素组成,鄂东南矿集区南部岩体携带的继承锆石和江南造山带西段梵净山群和下江群的碎屑锆石具有年龄和Hf同位素分布的高度相似性,而与崆岭杂岩的锆石年龄和Hf同位素组成具有明显差异性。

(3)鄂东南矿集区的基底存在空间差异性,大致以灵乡-大冶-网湖一线为界,以南为江南式基底,以北为川中式基底。

致谢:项目开展过程中得到了武钢资源集团程潮矿业有限公司、武钢资源集团大冶铁矿有限公司等单位的大力支持,在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

蔡恒安,徐江嫵,陈松林,等.鄂东南矿集区深部找矿进展及下一步找矿思路[J].资源环境与工程,2020,34(4):501-505+511.

CAI Heng'an, XU Jiangyan, CHEN Songlin, et al. Deep Prospecting Progress and Next Prospecting Thoughts of Southeast Hubei Mining Area[J]. Resources Environment and Engineering, 2020, 34(4): 501-505+511.

曹洛华,葛宗侠.鄂东深部地质初步探讨[J].湖北地质,1987,1(1):47-59.

CAO Luohua, GE Zongxia. A Preliminary Approach to the Deep-Seated Geology of Eastern Hubei[J]. Geology of Hubei, 1987, 1(1): 47-59.

常印佛,董树文,黄德志.论中-下扬子“一盖多底”格局与演化[J].火山地质与矿产,1996,17(1-2):1-15.

CHANG Yinbo, DONG Shuwen, HUANG Dezhi. On Tectonics of 'Poly-Basement with One Cover' in Middle-Lower Yangtze

Carton China[J]. Volcanology and Mineral Resources, 1996, 17(1-2): 1-15.

丁丽雪,黄圭成,夏金龙.鄂东南地区阳新复式岩体成因:LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素证据[J].高校地质学报,2016,22(3):443-458.

DING Lixue, HUANG Guicheng, XIA Jinlong. Petrogenesis of the Yangxin Complex in Southeast Hubei Province: Constraints from LA-ICP-MS U-Pb Ages and Hf Isotopes of Zircon[J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(3): 443-458.

丁丽雪,黄圭成,夏金龙.鄂东南地区殷祖岩体的成因及其地质意义:年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素证据[J].地质学报,2017,91(2):362-383.

DING Lixue, HUANG Guicheng, XIA Jinlong. Petrogenesis and Implications of the Yinzu Pluton in Southeast Hubei Province: Evidence from Geochronology, Geochemistry, and Sr-Nd-Hf Isotopes[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(2): 362-383.

丁丽雪,黄圭成,夏金龙,等.鄂东南地区姜桥花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J].岩石矿物学杂志,2013,32(3):275-290.

DING Lixue, HUANG Guicheng, XIA Jinlong, et al. U-Pb Ages and Hf Isotope Characteristics of Zircon from Jiangqiao Granodiorite in Southeastern Hubei Province and Their Geological Implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2013, 32(3): 275-290.

董树文,马立成,刘刚,等.论长江中下游成矿动力学[J].地质学报,2011,85(5):612-625.

DONG Shuwen, MA Licheng, LIU Gang, et al. On Dynamics of the Metallogenic Belt of Middle-Lower Reaches of Yangtze River, Eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 612-625.

高林志,陈建书,戴传固,等.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,2014,33(7):949-959.

GAO Linzhi, CHEN Jianshu, DAI Chuan'gu, et al. Shrimp Zircon U-Pb Dating of Tuff in Fanjingshan Group and Xiajiang Group from Guizhou and Hunan Provinces and its Stratigraphic implications[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(7): 949-959.

黄圭成,夏金龙,丁丽雪,等.鄂东南地区铜绿山岩体的侵入期次和物源:锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J].中国地质,2013,40(5):1392-1408.

HUANG Guicheng, XIA Jinlong, DING Lixue, et al. Stage Division and Origin of Tonglushan Pluton in Southeast Hubei Province: Evidence from Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1392-1408.

梁学堂,李义,徐元璋,等.鄂西地区基底构造特征新认识——基于重磁场特征的判别[J].工程地球物理学报,2020,17(4):432-440.

LIANG Xuetao, LI Yi, XU Yuanzhang, et al. New Perspectives on the Basement Tectonic Features in Western Hubei: Based on the Discrimination of Gravity and Magnetic Fields Characteristics[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(4): 432-440.

李平,朱涛,吕鹏瑞,等.西天山早寒武世夏特辉长岩:南天山洋早期俯冲的岩浆记录[J].西北地质,2024,57(3):44-58.

- LI Ping, ZHU Tao, LÜ Pengrui, et al. Early Cambrian Xiatae Gabbro in Western Tianshan: Magmatic Records of Initial Subduction of the South Tianshan Ocean[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(3): 44–58.
- 邱啸风. 扬子克拉通北部前泥盆纪地壳: 来自碎屑锆石 U-Pb 和 Hf 同位素证据[J]. *地质学报*, 2022, 96(11): 1–25.
- QIU Xiaofeng. Pre-Devonian Crustal Evolution of the Northern Yangtze Craton: Evidence from U-Pb Ages and Hf Isotopes of Detrital Zircons[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(11): 1–25.
- 邱啸风, 凌文黎, 柳小明. 扬子陆核与神农架地块中元古代相互关系: 来自锆石 U-Pb 年代学和 H 同位素的约束[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(2): 1–8.
- QIU Xiaofeng, LING Wenli, LIU Xiaoming. Correlation between the Mesoproterozoic Yangtze Continental Nucleus and the Shennongjia Area: Constraints from Zircon Geochronological and Hf Isotope[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2014, 33(2): 1–8.
- 冉亚洲, 陈涛, 梁文天, 等. 西秦岭郎木寺组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(1): 110–121.
- RAN Yazhou, CHEN Tao, LIANG Wentian, et al. Zircon U-Pb Age of Volcanic Rocks from the Langmusi Formation in the Western Qinling Mountains and Its Tectonic Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(1): 110–121.
- 舒全安, 陈培良, 程建荣. 鄂东铁铜矿产地质[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- 谭忠福, 林玉石, 汤吉方, 等. 鄂东南地区铁铜矿床的构造控制规律及其隐伏矿床的预测问题[J]. *中国地质科学院报宜昌地质矿产研究所分刊*, 1980, 1(2): 1–22.
- TAN Zhongfu, LIN Yushi, TANG Jifang, et al. The Control of Tectonic Systems on the Iron (Copper) Ore Deposits and the Prognosis of Concealed Ore Deposits in Southeastern Hubei, China[J]. *Journal of the Chinese Academy of Geological Sciences, Yichang Institute of Geology and Mineral Resources*, 1980, 1(2): 1–22.
- 王敏, 戴传固, 王雪华, 等. 贵州梵净山群沉积时代——来自原位锆石 U-Pb 测年证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(6): 843–857.
- WANG Min, DAI Chuangu, WANG Xuehua, et al. Sedimentation Age of the Fanjingshan Group in East Guizhou Province: Evidence from In-Situ Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(6): 843–857.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 351–360.
- WANG Qiang, ZHAO Zhenhua, XU Jifeng, et al. The Geochemical Comparison between the Tongshankou and Yinzu Adakitic Intrusive Rocks in Southeastern Hubei: (Delaminated) Lower Crustal Melting and the Genesis of Porphyry Copper Deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(2): 351–360.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185–220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185–220.
- 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589–1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Genetic Mineralogy of Zircon and Its Restriction on U-Pb Age Interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589–1604.
- 夏金龙, 黄圭成, 丁丽雪, 等. 鄂东南地区存在古元古代-太古宙基底——来自铜鼓山岩体锆石 U-Pb-Hf 同位素的证据[J]. *地球学报*, 2013a, 34(6): 691–701.
- XIA Jinlong, HUANG Guicheng, DING Lixue, et al. Paleoproterozoic-Archean Basement Beneath Southeast Hubei Province: Evidence from U-Pb-Hf Isotopes in Zircons from the Tonggushan Pluton[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2013a, 34(6): 691–701.
- 夏金龙, 黄圭成, 丁丽雪, 等. 鄂东南地区古家山岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 对岩浆源区的指示[J]. *华南地质与矿产*, 2013b, 29(2): 116–125.
- XIA Jinlong, HUANG Guicheng, DING Lixue, et al. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope of the Gujiashan Pluton, Southeast Hubei Province: Implications for the Magma Source[J]. *South China Geology*, 2013b, 29(2): 116–125.
- 谢桂青, 李瑞玲, 蒋国豪, 等. 鄂东南地区晚中生代侵入岩的地球化学和成因及对岩石圈减薄时限的制约[J]. *岩石学报*, 2008, 24(8): 1703–1714.
- XIE Guiqing, LI Ruiling, JIANG Guohao, et al. Geochemistry and Petrogenesis of Late Mesozoic Granitoids in Southeastern Hubei Province and Constrains on the Timing of Lithospheric Thinning, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, Eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(8): 1703–1714.
- 谢桂青, 朱乔乔, 李伟, 等. 湖北大冶式铁矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- 谢桂青, 朱乔乔, 姚磊, 等. 鄂东南地区晚中生代铜铁金多金属矿的区域成矿模型探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(4): 418–426.
- XIE Guiqing, ZHU Qiaoqiao, YAO Lei, et al. Discussion on Regional Metal Mineral Deposit Model of Late Mesozoic Cu-Fe-Au Polymetallic Deposits in the Southeast Hubei Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(4): 418–426.
- 颜代蓉, 邓晓东, 胡浩, 等. 鄂东南地区阮家湾和犀牛山花岗岩闪长岩的时代、成因及成矿和找矿意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(10): 3373–3388.
- YAN Dairong, DENG Xiaodong, HU Hao, et al. U-Pb Age and Petrogenesis of the Ruanjiawan Granodiorite Pluton and Xiniushan Granodiorite Porphyry, Southeast Hubei Province: Implications for Cu-Mo Mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(10): 3373–3388.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- 张少兵, 郑永飞. 扬子陆核的生长和再造: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 393–402.
- ZHANG Shaobing, ZHENG Yongfei. Growth and Reworking of the Yangtze Continental Nucleus: Evidence from Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 393–402.
- 赵新福, 李建威, 马昌前. 鄂东南铁铜矿集区铜山口铜(钼)矿床⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学及对区域成矿作用的指示[J]. *地质学报*,

- 2006, 80(6): 849–862.
- ZHAO Xinfu, LI Jianwei, MA Changqian. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of the Tongshankou Cu (Mo) Deposit in the Southeastern Hubei Fe-Cu Province: Implications for Regional Metallogeny[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(6): 849–862.
- 周涛发, 范裕, 王世伟, 等. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J]. *岩石学报*, 2017, 33(11): 3373–3372.
- ZHOU Taofa, FAN Yu, WANG Shiwei, et al. Metallogenic Regularity and Metallogenic Model of the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(11): 3373–3372.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(5): 602–622.
- Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(1-2): 48–57.
- Chu G B, Chen H Y, Falloon T J, et al. Early Cretaceous mantle upwelling and melting of juvenile lower crust in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt: Example from Tongshankou Cu-(Mo W) ore deposit[J]. *Gondwana Research*, 2020, 83: 183–200.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China; in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 2002, 61(3-4): 237–269.
- Guo J L, Wu Y B, Gao S, et al. Episodic Paleoproterozoic (3.3–2.0 Ga) granitoid magmatism in Yangtze Craton, South China: Implications for late Archean tectonics[J]. *Precambrian Research*, 2015, 270: 246–266.
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, et al. 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[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2012, 27: 1391–1399.
- Li J W, Vasconcelos P M, Zhou M F, et al. Longevity of magmatic-hydrothermal systems in the Daye Cu-Fe-Au District, eastern China with implications for mineral exploration [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014a, 57: 375–392.
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, et al. Vasconcelos, P. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2009, 157(3): 383–409.
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, et al. Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, eastern Yangtze craton, Eastern China: geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints[J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43(3): 315–336.
- Li L M, Lin S F, Davis D W, et al. Geochronology and geochemistry of igneous rocks from the Kongling terrane: Implications for Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 2014b, 255: 30–47.
- Li X H, Li W X, Wang X C, et al. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, eastern China: Magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension[J]. *Lithos*, 2010, 119(3-4): 427–438.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. 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(1-2): 34–43.
- Ludwig K R. Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel[J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 2003, 4: 70.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(3-4): 311–324.
- Wang L J, Griffin W L, Yu J H, et al. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks[J]. *Precambrian Research*, 2010, 177(1-2): 131–144.
- Xie G Q, Mao J W, Li X W, et al. Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the Jinniu basin, Middle-Lower Yangtze River Belt (YRB), East China: Age, petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 2011b, 127(1-2): 144–164.
- Xie G Q, Mao J W, Zhao, H. J. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Late Mesozoic intrusions in the southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt (MLYRB), East China[J]. *Lithos*, 2011a, 125(1-2): 693–710.
- Yan J, Liu J M, Li Q Z, et al. In situ zircon Hf-O isotopic analyses of late Mesozoic magmatic rocks in the Lower Yangtze River Belt, central eastern China: Implications for petrogenesis and geodynamic evolution[J]. *Lithos*, 2015, 227: 57–76.
- Zhang S T, Ma Q, Chen H Y, et al. Petrogenesis of Early Cretaceous granitoids and mafic microgranular enclaves from the giant Tonglushan Cu-Au-Fe skarn orefield, Eastern China[J]. *Lithos*, 2021a, 392-393: 106103.
- Zhang S T, Ma Q, Chen H Y, et al. Precambrian crust growth and reworking of the eastern Yangtze Craton: insights from xenocrystic zircons in the lamprophyres from the Middle-Lower Yangtze Belt, China[J]. *Precambrian Research*, 2021b, 355: 106121.
- 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(4): 299–302.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Widespread Archean basement beneath the Yangtze Craton[J]. *Geology*, 2006, 34(6): 417–420.
- Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, et al. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. *Precambrian Research*, 2017, 290: 32–48.