

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

黄圭成¹ 夏金龙¹ 丁丽雪¹ 金尚刚² 柯于富² 吴昌雄³ 祝敬明³

(1. 武汉地质矿产研究所, 湖北 武汉 430205; 2. 鄂东南地质大队, 湖北 大冶 435100;
3. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034)

摘要: 铜绿山岩体的主要岩石类型为石英正长闪长玢岩, 其次是闪长岩、石英闪长岩和闪长玢岩。利用 LA-ICPMS 和 LA-MC-ICPMS 对岩石中的锆石进行微区原位 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素测定, 结果表明, 该岩体至少有三次以上的侵入活动, 分别为 150 Ma、145 Ma 和 140 Ma, 从西到东、由深到浅侧向迁移侵位, 分别形成鸡冠嘴矿区深部的石英闪长岩和Ⅶ号铜金矿体, 鸡冠嘴矿区较浅部的闪长岩和Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号等铜金矿体, 铜绿山矿区及其周边的石英正长闪长玢岩和铜绿山、鲤泥湖、桃花嘴等铁铜矿床。岩浆锆石和继承锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素等信息显示, 岩体的源区物质为混含有少量亏损地幔成分的古元古代(约 1730 Ma)下地壳物质, 并有中元古代晚期(1100~1200 Ma)和新元古代(800 Ma)地壳物质的加入。不同类型岩石的物源组成有明显差别, 并形成不同的矿床。石英闪长岩和闪长岩形成铜金矿床, 可能与其岩浆源区物质含有地幔成分有关。在继承锆石中获得新太古代、中太古代、古元古代、中元古代晚期和新元古代五组年龄数据, 与宜昌崆岭群 TTG 片麻岩、京山、宁乡、镇远煌斑岩筒, 宜昌莲沱砂岩、石门溇水河组(莲沱组)凝灰岩中的锆石年龄可以对比, 表明鄂东南地区与扬子陆块其他地区的地壳演化历史基本一致, 深部同样存在古元古代和太古宙基底。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄, Hf 同位素, 岩浆的物源, 侵入期次, 铜绿山岩体

中图分类号: P58; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)05-1392-16

长江中下游成矿带是中国重要的矿产资源产地。鄂东南地区位于该成矿带西段, 燕山期岩浆活动强烈, 形成了众多的侵入岩体及火山喷出岩(图 1-a), 自 1970 年代以来是中国地学研究的热点地区。对区内岩浆岩形成时代的研究大致可分为两个阶段: 1970—1990 年代, 采用的测年方法主要是 K-Ar 法、Rb-Sr 法和传统的锆石 U-Pb 法, 取得的年龄数据分布在 240~90 Ma^[1-3], 由于方法本身的局限性, 这些年龄数据的精度和可信度不高。时至 21 世纪, 随着高精度测年方法(如 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 法, 单矿物激光剥蚀 Ar-Ar 法, 硫化物 Re-Os 法)的引进及广泛应用, 对该地区岩浆岩及相关矿床的研究形成新的热潮, 取得了大

量高精度年龄数据, 在成岩与成矿作用研究等方面取得了较大的进展与成果^[4-17]。Li et al.(2009)^[7]利用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法对区内侵入岩进行了精确定年, 结果表明大规模的岩浆活动集中侵位于 152~132 Ma。Xie et al.^[12-17]对区内的岩浆岩研究后, 提出侵入岩主体侵位于 143~126 Ma, 从早到晚存在由中基性向酸性演化的趋势, 而火山岩喷发于 130~125 Ma, 在成分上具有双峰式特征。总体上看, 前人研究的重点是区内大岩体尤其是大岩体的主岩相, 而对大岩体内部各岩相之间以及大岩体与小岩体之间的演化关系研究较薄弱。本文主要通过铜绿山岩体各类岩(相)石中锆石的微区原位 U-Pb 测年和 Lu-Hf 同位素测定, 探讨该岩体的侵

收稿日期: 2012-11-20; 改回日期: 2013-04-01

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(1212011120863)资助。

作者简介: 黄圭成, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 主要从事地质矿产调查与研究; E-mail: hguicheng@163.com。

入活动期次及其物源,探讨鄂东地南地区的基底问题,取得一些新认识,这对与该岩体有关的铜、金矿成矿期次划分、下一步找矿方向具有参考价值。

1 区域地质背景

鄂东南地区地质上位于下扬子陆块西段,北部以襄(樊)—广(济)断裂为界,与桐柏—大别造山带相邻接,南部与江南隆起中段的九岭—幕阜隆起带相接。区内燕山期岩浆活动形成的侵入岩体分布广泛,从北到南依次有鄂城、铁山、金山店、灵乡、殷祖和阳新六个大岩(基)体(图 1),以及铜绿山、铜山口、姜桥、何锡铺、丰山洞等 130 多个小岩体(岩株或岩枝),主要岩石类型有闪长岩、石英闪长岩、闪长玢岩、花岗闪长斑岩、花岗岩、花岗斑岩、石英二长岩等。岩浆活动晚期的火山喷发形成金牛和花马湖两个火山盆地,主要岩石类型包括玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩,以及各类火山碎屑岩。区内震旦系至第四系均有出露(缺失中、下泥盆统和上侏罗统),其中震旦系至志留系主要分布于大冶以南区域,侏罗系及以上地层主要分布于大冶以北的断陷盆地。前震旦纪基底仅在北部的大别山造山带和南部的九岭—幕阜隆起带有出露,前者主要为大别山(岩)群、

桐柏山(岩)群和红安群含火山物质的变质岩系,后者主要包括冷家溪群以陆源沉积为主的浅变质岩系。区内与岩浆活动有关的矿床点众多,有程潮铁矿、铁山(大冶)铁矿、金山店铁矿、铜绿山铁铜矿、铜山口铜矿、鸡冠嘴铜金矿、鸡笼山铜金矿等大型矿床,是中国著名的铁、铜、金矿集区之一。

2 岩体特征

铜绿山岩体位于阳新岩体的西北端(图 1),面积约 11 km²,平面上呈椭圆形,以往称为铜绿山岩株体。地表因被第四系覆盖,基岩出露甚少,岩体边界主要依靠钻孔、磁法和重力等资料推定。岩体的主要岩石类型为石英正长闪长玢岩,其次是闪长岩、石英闪长岩、闪长玢岩等。因第四系覆盖,未能见到各类岩石之间的接触关系。根据野外调查和显微镜下观察,各类岩石的主要特征如下:

石英正长闪长玢岩,分布面积最大,以铜绿山铁铜矿区为典型,灰色—深灰色,块状构造,斑状结构,斑晶占 40%~70%,由斜长石(30%~60%)、角闪石(5%~10%)、少量正长石(0.5%~5%)和石英(1%±)以及微量黑云母组成。斜长石斑晶呈半自形—自形板状,粒径 1~3 mm。角闪石斑晶为他形—半自形粒状或柱状,

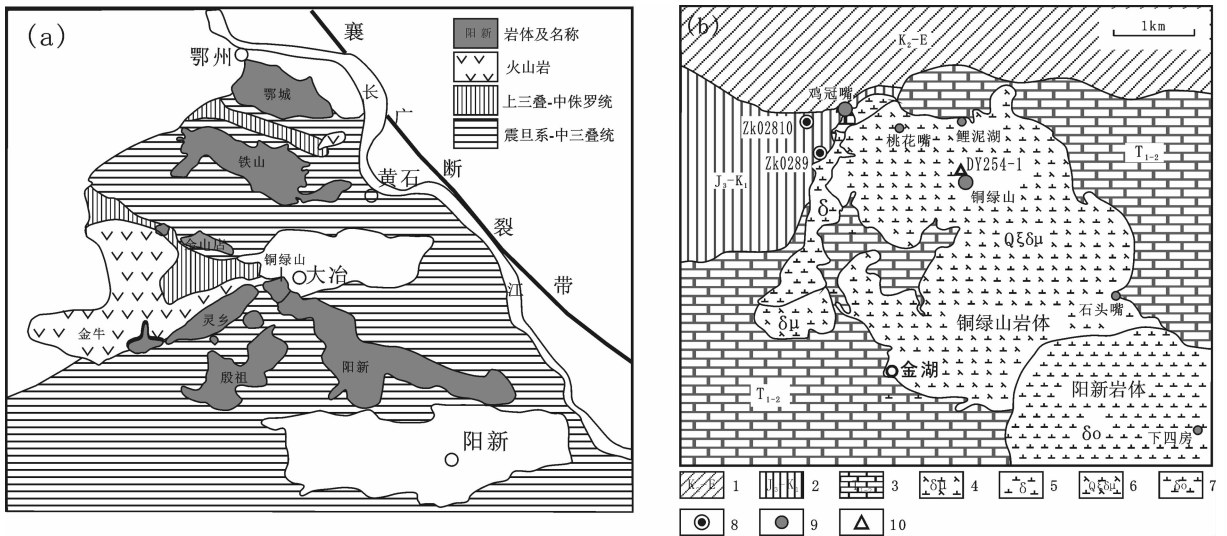


图 1 鄂东南地区岩体分布简图(a)和铜绿山岩体地质图(b)

1—上白垩统—古近系;2—上侏罗—下白垩统;3—下—中三叠统;4—闪长玢岩;5—闪长岩;6—石英正长闪长玢岩;7—石英闪长岩;8—钻孔位置;9—矿床;10—采样位置

Fig. 1 Geological sketch map showing distribution of plutons in southeast Hubei Province (a) and geological map of Tonglushan area (b)

1—Upper Cretaceous—Paleogene rocks; 2—Upper Jurassic—Lower Cretaceous rocks; 3—Lower—Middle Triassic rocks; 4—Diorite porphyry; 5—Diorite; 6— Quartz—orthoclase diorite porphyry; 7—Quartz diorite; 8—Position of drill hole; 9—Ore deposit; 10—Sampling location

粒径 1~3.2 mm,已发生不同程度的绿泥石化、碳酸盐岩化、绿帘石化等蚀变。正长石斑晶为半自形—自形的厚短板状,肉红色,粒径粗大,变化在 1.5~20 mm 之间,常见为 5~12 mm。石英斑晶呈它形粒状,粒径 1~1.5 mm。基质占 30%~60%,主要由斜长石(15%~50%)、角闪石(5%~8%)和石英(8%~15%)组成,粒径一般小于 0.2 mm。虽然正长石含量较少,但以粗大斑晶和显眼的肉红色出现,这与鄂东南地区其他的闪长玢岩类明显不同,故参加命名,以突出其特殊性。

闪长岩,出现于岩体的西部,细粒结构,已强烈蚀变,但原矿物轮廓可辨认,主要为斜长石(75%~80%)、角闪石(15%~20%),以及由蚀变形成的微粒石英(5%)。斜长石呈半自形—自形板状,粒径 0.3~3mm,已发生高岭石化、碳酸盐岩化等蚀变。角闪石为半自形—自形的短柱状、长柱状和针状,粒径 0.2~2 mm,大多已发生绿泥石化、碳酸盐岩化等蚀变。石英呈不规则形状,主要分布于斜长石与角闪石之间,粒径 0.01~0.2 mm。

石英闪长岩,隐伏于鸡冠嘴矿区的深部-800 m 以下,从 25、26 勘探线侵位于-800m±,至 30 线侵位于-1200m±,即从南西向北东方向由下往上侵入。岩石呈细粒结构,已强烈蚀变,主要矿物成分为斜长石(70%~80%)、角闪石(10%~15%)和石英(10%~15%)。斜长石呈他形—半自形板状,粒径一般为 0.3~1 mm,少数可达 1.4~2.3 mm,因高岭石化、碳酸盐岩化、绢云母化等蚀变,晶体轮廓较模糊。角闪石为他形—半自形粒状或柱状,因绿泥石化、绢云母化、碳酸盐岩化等蚀变而轮廓不清晰。石英呈他形粒状,粒径 0.02~0.2 mm,少数较大者可达 0.7 mm。

闪长玢岩,在大青山、猴头山等地出露,鸡冠嘴矿区深部也有出现。岩石呈斑状结构,已中等程度蚀变。斑晶占 50%~60%,其中斜长石斑晶占 45%~50%,粒径一般为 0.8~2 mm,最大可达 4 mm;角闪石斑晶占 5%~10%,粒径一般为 0.3~0.8 mm。基质占 40%~50%,矿物颗粒细小,而且比斑晶发生了更强的蚀变,推测以斜长石为主,另有约 5%的石英,呈细小不规则状,为蚀变作用形成。

3 样品采集与分析方法

分别采集与成矿关系密切的石英正长闪长玢岩(DY254-1)、闪长岩(ZK0289-2)、石英闪长岩(ZK02810-6)3个样品,具体位置为(图 1~2):

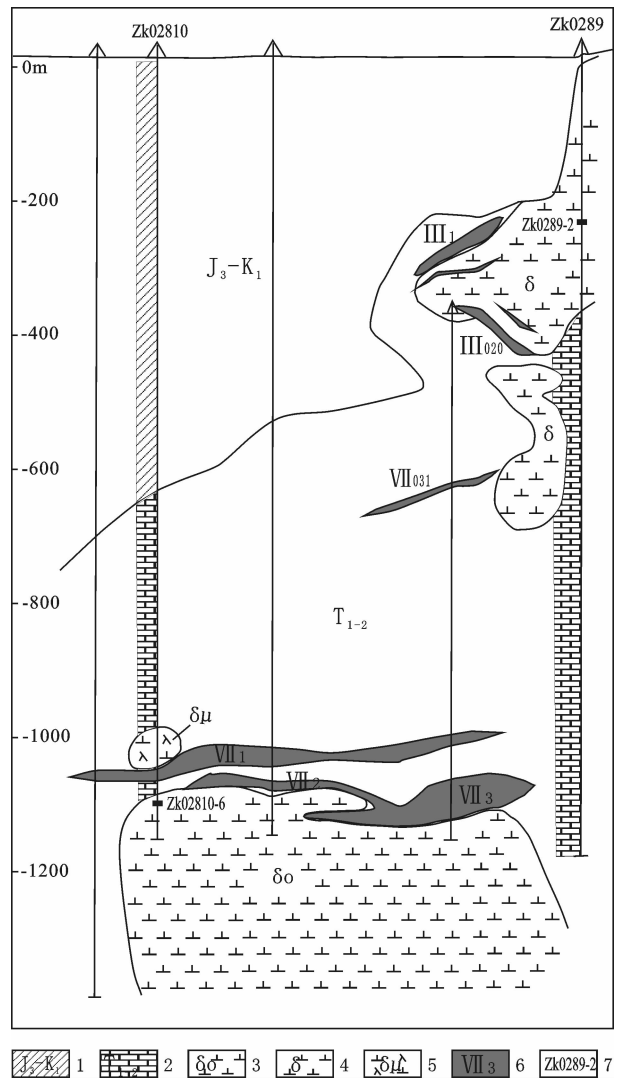


图 2 鸡冠嘴矿区 28 勘探线简图
 1—上侏罗—下白垩统;2—下—中三叠统;3—石英闪长岩;
 4—闪长岩;5—闪长玢岩;6—矿体编号;7—采样位置及编号
 Fig.2 Geological cross section along No. 28 exploration line in the Jiguanzui mine
 1—Upper Jurassic—Lower Cretaceous rocks; 2—Lower—Middle Triassic rocks; 3—Quartz diorite; 4—Diorite; 5—Diorite porphyry; 6—Serial number of ore body; 7—Sampling location and its serial number

DY254-1 铜绿山铁铜矿区露采场北采坑东边坡,坐标 N30°05.030',E114°56.169';ZK0289-2 鸡冠嘴铜金矿区 ZK0289 钻孔 251 m 深处,孔口坐标 N30°05.271',E114°55.027';ZK02810-6 鸡冠嘴铜金矿区 ZK02810 钻孔 1112 m 深处,孔口坐标 N30°05.589',E114°54.892'。各岩石样品重约 8 kg,从中分选出纯净的锆石,挑选形态较好的晶粒制作样靶。

制靶以及阴极发光照像(CL)、U-Pb 年龄测定、Lu-Hf 同位素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。CL 照像在配备有 Gatan CL3+型 CL 探头的 Quanta 400FEG 型场发射扫描电镜上进行。U-Pb 年龄测定在 LA-ICPMS 仪器上进行,分析点束斑直径为 30 μm,详细的实验流程见 Yuan (2004,2008)^[18-19]。普通 Pb 校正采用 Anderson(2002)^[20]的方法,年龄计算及谐和图绘制采用 ISOPLOT 程序^[21]。Lu-Hf 同位素分析在 Neptune 型 LA-MC-ICPMS 仪器上进行,分析点束斑直径为 42 μm,实验流程参见徐平等(2004)^[22]和 Yuan 等(2008)^[19]。计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ 、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 T_{DMI} 、 T_{DM2} 、 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值所采用的球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282772$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0332$; 亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28325$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0384$, $f_{\text{Lu/Hf}}=0.16$; 平均地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}=-0.55$; ^{176}Lu 的衰变系数采用 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

DY254-1 的锆石总体较粗大,浅褐色,透明,长

柱状,柱面长,锥面较小,两头较钝,振荡环带密集发育,宽度较一致(图 3-a),为典型的岩浆锆石。晶体长 80~250 μm,宽 40~120 μm,长宽比为 2:1~3:1。其中发现两颗继承锆石(DY254-1-13、21),内部晶核大小分别为 50 μm×90 μm 和 55 μm×110 μm,外部被晚期岩浆锆石包裹;其中 DY254-1-13 晶核具隐约的振荡环带,可以确定为老的岩浆锆石。共测定 21 个颗粒,结果见表 1。继承锆石 DY254-1-13、21 的 Th、U 含量相对较低,Th/U 值分别为 2.06 和 0.63,表面年龄分别为 (799±16)Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$)和 (1127±20)Ma ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$),属于新元古代和中元古代晚期。其余 19 个点为岩浆锆石,在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上均落在谐和线或其邻近(图 4-a),其中 18 个点的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(DY254-1-18 年龄不谐和,舍弃)为 (140±2) Ma (MSWD=2.6),代表石英正长闪长玢岩的形成年龄,它们的 Th/U 值为 0.46~1.22,平均 0.82,与常见岩浆锆石的 Th/U 比值相似。据研究,岩浆锆石的 Th/U 比值较大(一般>0.4),通常接近于 1^[23-24,28,32]。

ZK02810-6 锆石较复杂,浅黄褐色,透明,大致

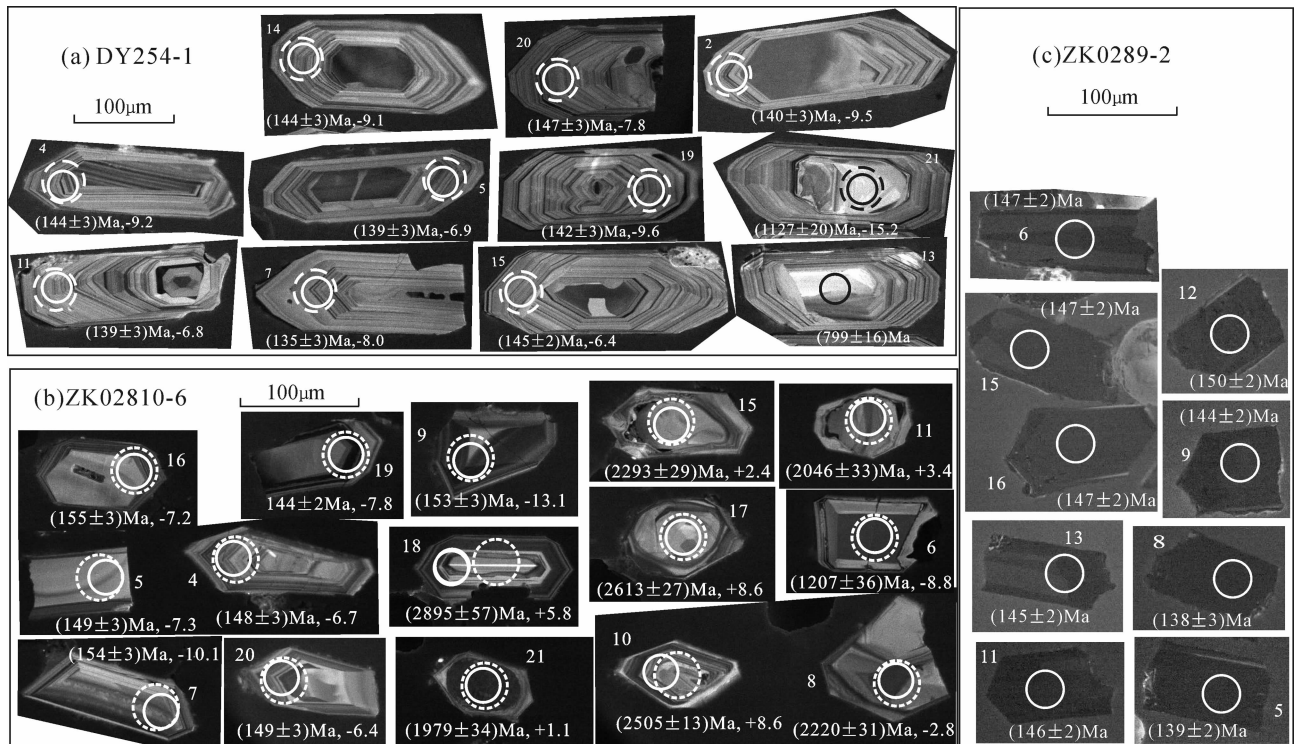


图 3 样品中代表性锆石的阴极发光照像(CL)及其 U-Pb 年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值
Fig.3 Representative CL images of zircons with U-Pb ages and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values

表 1 锆石的 LA-ICPMS 定年结果
Table 1 Results of U-Th-Pb LA-ICPMS analyses of zircons

样品及分析点	元素含量/ 10^{-9}		Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		年龄/Ma		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		谱和度/%		
	Th	U		1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ			
DY254-1																
DY254-1-01	242	234	1.04	0.04877	0.00206	0.1488	0.0049	0.02212	0.00038	137	46	141	4	141	2	100
DY254-1-02	145	163	0.89	0.04882	0.00273	0.1483	0.0072	0.02203	0.00042	139	77	140	6	140	3	100
DY254-1-03	149	188	0.79	0.04879	0.00301	0.1442	0.0079	0.02143	0.00043	138	89	137	7	137	3	100
DY254-1-04	289	279	1.04	0.04889	0.00237	0.1518	0.0061	0.02252	0.00040	143	61	144	5	144	3	100
DY254-1-05	165	168	0.98	0.05320	0.00262	0.1594	0.0066	0.02173	0.00040	337	60	150	6	139	3	108
DY254-1-06	141	175	0.80	0.04767	0.00289	0.1436	0.0078	0.02185	0.00043	83	84	136	7	139	3	98
DY254-1-07	166	202	0.82	0.04420	0.00285	0.1288	0.0075	0.02114	0.00041	-60	89	123	7	135	3	91
DY254-1-08	60	129	0.46	0.05231	0.00380	0.1575	0.0105	0.02183	0.00048	299	112	148	9	139	3	106
DY254-1-09	83	111	0.75	0.05295	0.00327	0.1624	0.0089	0.02225	0.00045	327	88	153	8	142	3	108
DY254-1-10	164	207	0.79	0.05195	0.00268	0.1621	0.0071	0.02263	0.00042	283	66	144	6	144	3	106
DY254-1-11	190	223	0.85	0.05046	0.00316	0.1514	0.0085	0.02175	0.00044	216	92	143	7	139	3	103
DY254-1-12	217	264	0.82	0.05183	0.00249	0.1598	0.0064	0.02235	0.00040	278	58	151	6	142	3	106
DY254-1-14	262	295	0.89	0.05139	0.00243	0.1600	0.0062	0.02258	0.00041	258	56	151	5	144	3	105
DY254-1-15	66	124	0.53	0.04860	0.00314	0.1523	0.0089	0.02275	0.00046	129	94	144	8	145	3	99
DY254-1-16	1041	851	1.22	0.05031	0.00222	0.1409	0.0050	0.02031	0.00036	209	49	134	4	130	2	103
DY254-1-17	115	211	0.55	0.05043	0.00289	0.15528	0.0078	0.02233	0.00043	215	81	147	7	142	3	104
DY254-1-18	216	295	0.73	0.06508	0.00398	0.1643	0.0088	0.01830	0.00041	777	74	154	8	117	3	132
DY254-1-19	253	292	0.87	0.05243	0.00262	0.1615	0.0068	0.02234	0.00041	304	62	152	6	142	3	107
DY254-1-20	173	250	0.69	0.04523	0.00345	0.1436	0.0101	0.02302	0.00050	-8	112	136	9	147	3	93
Dx254-1-13c	49	24	2.06	0.07549	0.00436	1.374	0.070	0.1320	0.0028	1082	68	878	30	799	16	110
Dx254-1-21c	69	109	0.63	0.07724	0.00260	1.951	0.041	0.1831	0.0028	1127	20	1099	14	1084	15	104
ZK0289-2																
ZK0289-2-01	3807	1429	2.66	0.05160	0.00172	0.1669	0.0036	0.02344	0.00038	268	23	157	3	149	2	105
ZK0289-2-02	3355	1089	3.08	0.06192	0.00219	0.2100	0.0051	0.02459	0.00040	671	26	194	4	157	3	124
ZK0289-2-03	10562	2531	4.17	0.05400	0.00174	0.1754	0.0034	0.02354	0.00037	371	20	164	3	150	2	109
ZK0289-2-04	4735	1817	2.61	0.04605	0.00231	0.1446	0.0068	0.02279	0.00038	108	108	137	6	145	2	94
ZK0289-2-05	4190	1357	3.09	0.04605	0.00251	0.1387	0.0072	0.02184	0.00037	118	118	132	6	139	2	95
ZK0289-2-06	2954	933	3.16	0.05371	0.00187	0.1709	0.0040	0.02307	0.00037	359	26	160	3	147	2	109
ZK0289-2-07	14842	3132	4.74	0.05503	0.00172	0.1690	0.0031	0.02226	0.00035	413	18	159	3	142	2	112
ZK0289-2-08	4501	1543	2.92	0.04818	0.00488	0.1433	0.0143	0.02157	0.00041	108	226	136	13	138	3	99
ZK0289-2-09	8950	2184	4.10	0.05007	0.00159	0.1565	0.0030	0.02266	0.00036	198	20	148	3	144	2	103
ZK0289-2-10	16027	3223	4.97	0.05133	0.00161	0.1626	0.0030	0.02296	0.00036	256	19	153	3	146	2	105

续表 1

样品及分析点	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谱和度 /%		
	Th	U		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ			
ZK0289-2-11	15668	3143	4.99	0.05160	0.00162	0.1634	0.00330	0.02296	0.00036	268	19	154	3	146	2	105
ZK0289-2-12	4601	1461	3.15	0.05430	0.00179	0.1770	0.0037	0.02362	0.00038	384	22	165	3	150	2	110
ZK0289-2-13	13883	2903	4.78	0.05304	0.00331	0.1667	0.0037	0.02279	0.00036	331	19	157	3	145	2	108
ZK0289-2-14	15035	3247	4.63	0.07053	0.00227	0.2168	0.0043	0.02228	0.00036	944	23	199	4	142	2	140
ZK0289-2-15	3972	1087	3.65	0.05451	0.00184	0.1729	0.0038	0.02300	0.00037	392	18	162	3	147	2	110
ZK0289-2-16	4792	1415	3.39	0.05031	0.00172	0.1600	0.0036	0.02306	0.00037	209	25	151	3	147	2	103
ZK0289-2-17	3227	1103	2.93	0.05230	0.00203	0.1651	0.0048	0.02289	0.00038	299	37	155	4	146	2	106
ZK0289-2-18	3801	1201	3.16	0.04997	0.00574	0.1454	0.0165	0.02111	0.00043	193	255	138	15	135	3	102
ZK0289-2-19	3563	1076	3.31	0.05318	0.00179	0.1637	0.0036	0.02231	0.00036	336	24	154	3	142	2	108
ZK0289-2-20	10774	2379	4.53	0.05042	0.00169	0.1597	0.0034	0.02297	0.00037	214	24	150	3	146	2	103
ZK02810-6																
ZK02810-6-01	70	89	0.79	0.05225	0.00483	0.1685	0.0147	0.02339	0.00058	296	152	158	13	149	4	106
ZK02810-6-02	93	99	0.95	0.04720	0.00461	0.1536	0.0146	0.02361	0.00052	59	214	145	13	150	3	97
ZK02810-6-03	53	64	0.83	0.04645	0.00502	0.1518	0.0160	0.02370	0.00057	21	220	143	14	151	4	95
ZK02810-6-04	124	177	0.70	0.04605	0.00300	0.1480	0.0092	0.02330	0.00044		143	140	8	148	3	95
ZK02810-6-05	156	156	1.00	0.04932	0.00312	0.1592	0.0091	0.02341	0.00047	163	93	150	8	149	3	101
ZK02810-6-07	60	85	0.71	0.05386	0.00337	0.1792	0.0100	0.02412	0.00049	365	89	167	9	154	3	108
ZK02810-6-09	110	108	1.01	0.05384	0.00362	0.1784	0.0109	0.02403	0.00050	364	100	167	9	153	3	109
ZK02810-6-12	52	76	0.68	0.04842	0.00660	0.1508	0.0202	0.02258	0.00060	120	272	143	18	144	4	99
ZK02810-6-13	145	151	0.96	0.05360	0.00357	0.1816	0.0109	0.02457	0.00051	354	98	169	9	156	3	108
ZK02810-6-14	134	150	0.89	0.04867	0.00396	0.1575	0.0124	0.02347	0.00047	132	184	149	11	150	3	99
ZK02810-6-16	135	142	0.95	0.05351	0.00365	0.1797	0.0112	0.02435	0.00052	350	101	168	10	155	3	108
ZK02810-6-19	1916	676	2.83	0.05097	0.00206	0.1592	0.0049	0.02265	0.00039	239	40	150	4	144	2	104
ZK02810-6-20	308	205	1.50	0.05199	0.00254	0.1679	0.0068	0.02342	0.00042	285	60	158	6	149	3	106
ZK02810-6-06c	133	170	0.78	0.08042	0.00329	2.455	0.097	0.2213	0.00666	1207	36	1259	28	1289	35	94
ZK02810-6-08c	53	133	0.40	0.1394	0.0056	7.900	0.303	0.4110	0.0123	2220	31	2220	35	2219	56	100
ZK02810-6-10c	67	139	0.48	0.1648	0.0051	10.09	0.17	0.4442	0.0073	2505	13	2443	16	2369	32	106
ZK02810-6-11c	96	164	0.59	0.1263	0.0052	6.355	0.251	0.3650	0.0109	2046	33	2026	35	2006	51	102
ZK02810-6-15c	79	76	1.04	0.1454	0.0055	8.582	0.314	0.4280	0.0127	2295	29	2295	33	2297	57	100
ZK02810-6-17c	67	97	0.69	0.1757	0.0065	12.55	0.45	0.5178	0.0153	2613	57	2646	33	2690	65	97
ZK02810-6-18c	103	95	1.08	0.2087	0.0072	12.43	0.36	0.4321	0.0082	2895	27	2638	27	2315	37	125
ZK02810-6-21c	158	466	0.34	0.1215	0.0051	5.698	0.231	0.3400	0.0102	1979	34	1931	35	1887	49	105

注:谱和度= $(^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U})$ 年龄值/ $(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$ 年龄值,当使用 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄值时,谱和度= $(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})$ 年龄值/ $(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$ 年龄值。分析点号带有“c”者为继承锆石。

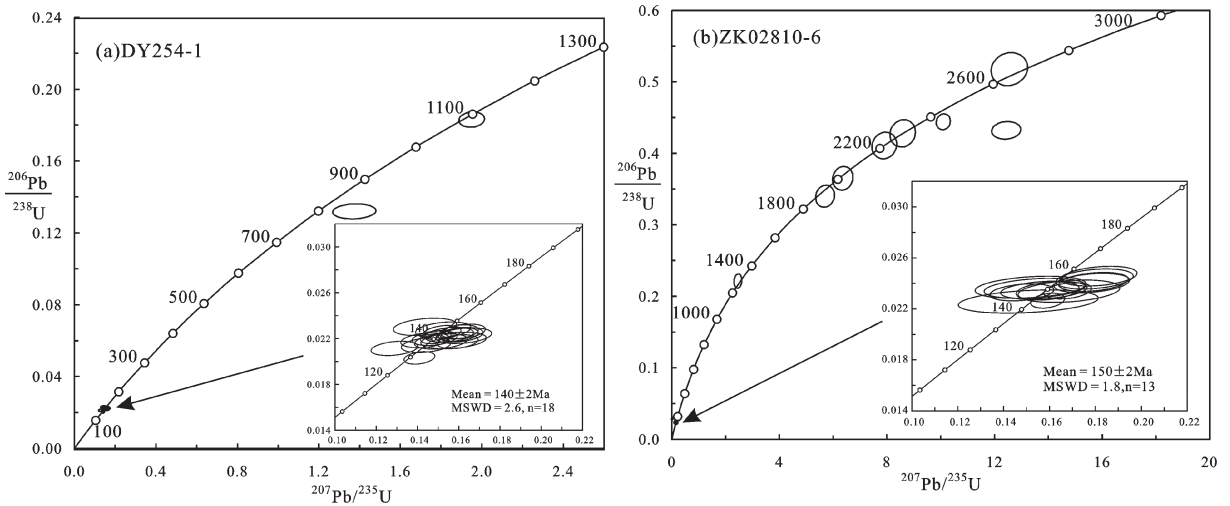


图4 石英正长闪长玢岩(a)和石英闪长岩(b)的锆石 U-Pb 谐和图

Fig.4 Zircon U - Pb concordia diagrams of quartz orthoclase diorite porphyry (a) and quartz diorite (b)

可以分为两类:一是内部结构简单的岩浆锆石,长柱状,柱面长,锥面小,边缘有较窄的振荡环带(图3-b);晶体长 $90\sim 160\mu\text{m}$,宽 $45\sim 55\mu\text{m}$,长宽比为 $2:1\sim 3:1$ 。二是继承锆石(有晶核),短柱状,晶体长 $80\sim 120\mu\text{m}$,宽 $40\sim 60\mu\text{m}$,长宽比小于 $2:1$ 。晶体有薄的生长边,与内核不协调,多数内核具有宽窄不一的振荡环带,少数内核色调混杂。本次共测定21个点(表1),其中13个岩浆锆石的Th/U比值为 $0.68\sim 2.83$,平均1.06, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(150\pm 2)\text{Ma}$ (MSWD=1.8),代表石英闪长岩的形成年龄,在谐和图上落在谐和线上或其邻近(图4-b)。另外8个点为继承锆石,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,可进一步分为3个组:一是ZK02810-6-6,年龄为 $(1207\pm 36)\text{Ma}$,属于中元古代晚期;二是ZK02810-6-8、ZK02810-6-11、ZK02810-6-15、ZK02810-6-21,4个点的年龄分别为 $(2220\pm 31)\text{Ma}$ 、 $(2046\pm 33)\text{Ma}$ 、 $(2293\pm 29)\text{Ma}$ 、 $(1979\text{Ma}\pm 34)\text{Ma}$,属于古元古代;三是ZK02810-6-10和ZK02810-6-17,年龄分别为 $(2505\pm 13)\text{Ma}$ 和 $(2613\pm 27)\text{Ma}$,属于新太古代。此外,ZK02810-6-18年龄为 $(2895\pm 57)\text{Ma}$,属于中太古代,是唯一位于谐和线下方较远的一个点,在晚期的地质事件中有铅丢失,从其CL图像的内部结构看应是一颗捕获锆石。这些继承锆石的Th/U比值变化于 $0.34\sim 1.08$,属于岩浆锆石的特征。

ZK0289-2 锆石(曲晶石化)呈褐色,透明—半透明,长柱状,锥面简单而且较钝;阴极发光极弱,CL图像呈黑色(图3-c),少数颗粒见隐约的板状、放射

状振荡环带,内部结构简单,长 $70\sim 150\mu\text{m}$,宽 $40\sim 65\mu\text{m}$,长宽比为 $(2\sim 2.5):1$ 。本次测定20个点(表1),舍弃不谐和的ZK0289-2-2和ZK0289-2-14点,其余18个点加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(145\pm 2)\text{Ma}$ (MSWD=3.0),均落在谐和线上或其邻近(图5),代表闪长岩的形成年龄。锆石的Th、U含量非常高,Th= $2954\times 10^{-6}\sim 16027\times 10^{-6}$,平均 7662×10^{-6} ;U= $933\times 10^{-6}\sim 3247\times 10^{-6}$,平均 1913×10^{-6} ;Th/U比值也相当高,为 $2.81\sim 4.99$,平均3.70,接近于平均地壳物质中的Th/U比值(约为4)^[23,24]。极高的Th、U含量是CL图像呈黑色的原因之一^[25-28]。

4.2 锆石稀土元素

在利用LA-ICPMS进行U-Pb年龄测定的同时,获得锆石的稀土元素(REE)含量(表2)。DY254-1、ZK02810-6、Zk0289-2三个样品岩浆锆石的共同特点是:HREE强烈富集(LREE/HREE平均值分别为0.10、0.06、0.12),Ce出现极高的正异常(δCe 平均值分别为132.69、54.56、28.80),Eu中等负异常(δEu 平均值分别为0.53、0.68、0.56),它们的球粒陨石标准化分布曲线都向左陡倾,在Ce位置形成很高的尖峰(图6-a,b,c)。但是三个样品之间在REE含量和分布曲线等方面存在较大的差别。ZK0289-2的 $\sum\text{REE}$ 很高(平均 6604.10×10^{-6}),是DY254-1(平均 308.57×10^{-6})的21倍、ZK02810-6(平均 713.61×10^{-6})的9倍;同时具有极高的Yb(平均 2379×10^{-6})和Lu(平均 393×10^{-6})含量,是DY254-1的Yb(平均 142×10^{-6})和Lu(平均 30×10^{-6})含量的

表 2 锆石的 LA-ICPMS 稀土元素分析结果(10⁻⁶)
Table 2 Results of REE LA-ICPMS analyses of zircons (10⁻⁶)

样品及分析点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	δEu	δCe
DY254-1	0.010	37.90	0.057	1.320	2.250	0.996	10.07	3.18	37.72	14.12	71.06	16.27	180.02	36.96	411.93	42.53	369.40	0.12	0.54	177.18
DY254-1-01	0.278	23.97	0.076	0.713	1.032	0.490	5.71	1.71	19.99	7.67	39.86	9.18	101.60	21.66	233.94	26.56	207.38	0.13	0.49	38.11
DY254-1-02	0.025	24.13	0.044	0.542	1.060	0.356	5.73	1.98	22.75	9.03	45.49	10.46	114.93	24.53	260.05	26.16	233.90	0.11	0.35	130.89
DY254-1-03	0.012	38.43	0.060	1.240	2.380	1.129	11.78	3.69	43.79	16.96	83.22	19.24	212.80	44.45	479.18	43.25	435.93	0.10	0.53	170.28
DY254-1-04	0.013	19.61	0.043	0.654	1.138	0.613	5.62	1.88	21.64	8.31	41.44	9.67	113.73	24.67	249.03	22.07	226.96	0.10	0.61	117.55
DY254-1-05	0.102	26.80	0.067	0.776	1.390	0.624	7.49	2.45	29.35	11.61	58.50	13.71	155.03	31.94	339.84	29.76	310.08	0.10	0.47	72.96
DY254-1-06	0.006	28.24	0.029	0.702	1.432	0.650	6.97	2.47	29.99	12.07	60.89	14.57	161.71	33.09	352.82	31.06	321.76	0.10	0.52	260.39
DY254-1-07	0.385	7.70	0.036	0.185	0.205	0.126	1.55	0.46	5.99	2.62	15.29	4.10	54.88	14.60	107.80	8.31	99.49	0.08	0.49	11.72
DY254-1-08	0.007	17.51	0.035	0.602	1.282	0.443	6.22	2.02	22.79	8.45	39.84	8.85	95.29	18.75	222.09	19.88	202.21	0.10	0.39	135.35
DY254-1-09	0.008	11.43	0.008	0.204	0.549	0.355	3.02	1.01	13.12	5.41	28.35	7.67	95.58	22.01	188.72	12.55	176.17	0.07	0.67	330.48
DY254-1-10	0.008	11.43	0.008	0.204	0.549	0.355	3.02	1.01	13.12	5.41	28.35	7.67	95.58	22.01	188.72	12.55	176.17	0.07	0.67	330.48
DY254-1-11	0.014	25.55	0.032	0.634	1.401	0.640	6.67	2.33	28.00	11.09	53.64	13.12	149.45	29.88	322.45	28.27	294.18	0.10	0.53	197.71
DY254-1-12	0.040	25.35	0.031	0.604	1.430	0.548	6.36	2.25	27.13	10.65	52.73	12.59	144.95	29.51	314.17	28.00	286.17	0.10	0.47	156.95
DY254-1-14	0.219	22.51	0.089	0.812	1.350	0.678	6.54	2.23	26.97	11.31	56.94	14.42	172.41	38.64	355.12	25.66	329.46	0.08	0.57	37.74
DY254-1-15	0.007	9.500	0.009	0.323	0.470	0.273	2.23	0.86	11.45	4.98	27.19	6.99	88.09	20.16	172.53	10.58	161.95	0.07	0.67	248.09
DY254-1-16	0.328	50.59	0.299	2.440	2.800	1.168	10.77	3.65	44.57	17.68	91.91	23.73	284.90	61.21	596.05	57.63	538.42	0.11	0.57	34.37
DY254-1-17	0.006	11.43	0.008	0.204	0.549	0.355	3.02	1.01	13.12	5.41	28.35	7.67	95.58	22.01	188.72	12.55	176.17	0.07	0.67	330.48
DY254-1-18	4.840	35.21	0.461	2.310	1.690	0.816	8.14	2.72	33.30	13.29	66.06	16.30	185.37	39.71	410.21	45.33	364.89	0.12	0.55	4.45
DY254-1-20	3.900	25.77	0.700	2.550	1.064	0.569	4.87	1.65	19.01	7.94	40.95	10.17	122.38	27.88	269.40	34.55	234.85	0.15	0.64	3.42
Dy254-1-13c	5.390	34.17	1.810	13.08	12.70	7.840	44.14	12.80	133.51	45.39	186.94	38.51	361.47	64.26	962.01	74.99	887.02	0.08	0.90	2.56
Dy254-1-21c	0.057	11.90	0.053	1.230	2.210	0.253	10.11	4.28	52.98	20.58	91.72	19.92	193.28	34.42	442.97	15.68	427.29	0.04	0.14	51.00
ZK0289-2	1.214	358.16	1.860	28.70	47.08	19.71	220.22	72.47	827.24	302.07	1347.31	264.10	2562.83	425.25	6478.21	456.72	6021.49	0.08	0.49	44.33
ZK0289-2-01	2.218	759.57	4.670	55.37	73.77	26.97	288.29	89.12	976.57	329.53	1419.28	265.01	2473.19	399.95	7163.51	922.57	6240.94	0.15	0.49	39.56
ZK0289-2-03	0.405	511.87	1.472	21.86	42.59	17.81	219.04	75.65	906.28	342.83	1561.73	308.87	2990.25	495.11	7495.77	596.01	6899.76	0.09	0.45	90.29
ZK0289-2-04	2.261	352.99	5.540	58.22	71.15	28.31	245.75	76.40	827.52	285.34	1251.12	246.56	2376.23	394.5	6221.89	518.47	5703.42	0.09	0.59	15.83
ZK0289-2-05	2.738	335.00	8.00	90.69	106.87	41.45	359.14	88.98	1016.13	331.13	1411.95	269.32	2608.21	427.18	7086.99	584.75	6502.24	0.09	0.61	10.63
ZK0289-2-06	1.851	795.95	5.660	71.25	88.75	32.42	304.78	88.24	896.52	285.89	1187.48	221.57	2073.45	330.04	6383.83	995.86	5387.97	0.18	0.54	35.92
ZK0289-2-07	0.757	378.51	1.720	24.15	39.17	17.15	183.67	62.46	734.05	274.21	1228.74	245.37	2353.41	399.12	5942.49	461.46	5481.03	0.08	0.51	54.12
ZK0289-2-08	1.467	509.96	4.740	58.47	73.16	28.26	247.18	73.89	892.04	260.06	1116.61	216.35	2061.00	337.83	5770.96	676.06	5094.90	0.13	0.58	27.61
ZK0289-2-09	1.508	812.01	6.160	81.24	100.86	36.60	346.3	98.88	992.04	313.85	1307.12	239.81	2323.62	357.15	6926.15	1038.38	5887.77	0.18	0.54	34.58
ZK0289-2-10	1.908	851.27	6.990	86.75	107.43	39.86	348.52	99.32	995.78	312.60	1203.97	236.57	2197.33	347.91	6926.21	1094.21	5832.00	0.19	0.57	31.64
ZK0289-2-11	1.569	377.69	4.530	54.52	67.47	27	247.07	76.84	846.23	293.60	1307.55	253.64	2463.34	414.67	6455.72	532.78	5902.94	0.09	0.56	21.14
ZK0289-2-12	3.720	812.75	9.200	97.40	112.84	44.4	356.11	104.23	1048.83	328.93	1368.34	249.96	2344.64	375.22	7256.57	1080.31	6176.26	0.17	0.62	21.98
ZK0289-2-13	2.675	359.46	8.030	90.72	103.91	40.35	326.82	95.05	965.18	313.15	1337.06	252.11	2394.57	399.57	6688.84	605.15	6083.69	0.10	0.61	11.40
ZK0289-2-14	3.250	313.93	3.930	43.24	50.73	20.89	183.21	57.44	625.19	219.26	964.47	194.51	1871.70	327.88	4879.63	435.97	4443.66	0.10	0.59	17.48
ZK0289-2-16	1.919	310.42	5.230	62.43	75.18	29.94	258.39	78.66	844.19	245.12	1269.51	245.12	2349.33	403.72	6221.10	485.12	5735.98	0.08	0.59	14.95
ZK0289-2-17	1.952	432.83	6.560	75.71	95.03	36.85	330.06	99.39	1050.11	349.41	1501.90	284.10	2728.63	455.36	7447.87	648.91	6798.96	0.10	0.57	17.02
ZK0289-2-18	4.460	370.66	10.61	102.72	111.49	43.65	333.48	91.75	1007.76	329.40	1469.33	267.97	2543.84	428.18	7061.30	643.59	6417.71	0.10	0.64	8.65
ZK0289-2-19	2.204	602.66	7.260	82.52	95.19	38.24	309.67	90.10	917.45	296.06	1249.12	234.57	2202.40	359.31	6486.75	828.07	5658.68	0.15	0.62	21.35

续表 2

样品及分析点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	δEu	δCe
ZK02810-6	0.007	8.590	0.037	0.687	1.551	1.057	7.94	2.51	26.29	8.82	38.82	8.25	88.12	17.18	209.86	11.93	197.93	0.06	0.74	62.09
ZK02810-6-01	0.019	20.78	0.096	1.670	3.420	1.740	16.00	5.23	62.83	23.98	114.29	24.96	262.48	49.82	587.32	27.73	559.59	0.05	0.60	57.63
ZK02810-6-03	0.031	14.70	0.095	1.470	3.110	1.875	15.49	5.13	60.48	22.55	106.21	23.20	245.84	47.04	547.22	21.28	525.94	0.04	0.67	39.51
ZK02810-6-04	0.042	18.28	0.038	0.576	1.150	0.657	7.06	2.59	33.49	13.97	73.97	18.20	214.87	44.80	429.69	20.74	408.95	0.05	0.54	98.10
ZK02810-6-05	0.014	32.52	0.193	3.370	5.700	3.370	28.49	9.72	118.94	46.95	235.61	54.21	595.18	119.00	1253.27	45.17	1208.10	0.04	0.66	46.95
ZK02810-6-07	0.014	18.43	0.085	1.720	3.020	1.869	15.40	5.22	64.47	25.04	123.39	27.93	303.39	60.06	650.04	25.14	624.90	0.04	0.68	58.93
ZK02810-6-09	0.240	13.84	0.091	1.154	2.400	1.649	13.72	3.87	35.66	10.10	37.16	7.07	68.50	12.65	208.10	19.37	188.73	0.10	0.69	21.97
ZK02810-6-12	0.859	9.78	0.129	0.705	1.440	0.863	7.82	3.02	40.27	17.24	90.06	21.70	250.39	53.98	498.26	13.78	484.48	0.03	0.62	6.23
ZK02810-6-13	0.050	19.54	0.205	3.280	6.090	3.690	26.96	9.03	104.69	41.02	199.14	46.09	512.57	106.62	1078.97	32.85	1046.12	0.03	0.74	25.03
ZK02810-6-14	0.020	33.72	0.080	1.420	3.480	2.101	20.69	7.31	85.72	32.4	150.88	33.15	347.10	67.00	785.07	40.82	744.25	0.05	0.58	110.47
ZK02810-6-16	0.007	19.82	0.067	1.340	2.790	1.552	13.22	4.39	51.79	19.39	94.67	21.43	240.33	48.86	519.65	25.57	494.08	0.05	0.65	84.19
ZK02810-6-19	1.439	64.74	3.390	25.72	22.73	11.62	51.70	15.10	141.08	41.58	169.27	36.40	383.84	70.83	1039.44	129.64	909.80	0.14	1.00	4.72
ZK02810-6-20	0.013	61.96	0.185	3.720	9.890	6.670	61.62	19.15	207.10	70.03	293.79	58.97	574.87	102.08	1470.05	82.44	1387.61	0.06	0.63	93.42
ZK02810-6-06c	0.045	17.36	0.454	7.110	11.24	1.997	53.88	18.10	207.29	75.34	315.27	62.11	565.01	97.73	1432.94	38.21	1394.73	0.03	0.20	10.56
ZK02810-6-08c	0.025	1.352	0.019	0.188	0.447	0.035	2.29	0.91	11.44	4.83	23.00	5.63	61.07	13.15	124.38	2.07	122.32	0.02	0.09	13.58
ZK02810-6-10c	0.009	11.74	0.043	1.460	2.450	0.246	12.63	4.24	49.86	18.06	79.87	16.45	158.39	28.08	383.53	15.95	367.58	0.04	0.11	71.71
ZK02810-6-11c	1.889	10.07	0.902	6.040	5.450	1.122	19.10	6.27	67.72	25.37	109.14	23.12	216.47	39.87	552.53	25.47	507.06	0.05	0.30	1.79
ZK02810-6-15c	0.037	21.19	0.171	2.750	4.170	1.517	16.92	5.38	57.46	21.20	100.09	23.00	243.44	50.00	547.33	29.84	517.49	0.06	0.48	32.83
ZK02810-6-17c	25.35	70.48	7.760	35.74	9.310	0.879	17.65	4.86	47.09	15.98	68.06	14.46	138.65	25.35	481.62	149.52	352.10	0.45	0.21	1.17
ZK02810-6-21c	21.04	60.31	8.080	39.98	15.00	0.331	30.28	9.13	92.89	29.89	121.83	25.51	240.43	42.68	737.38	144.74	592.64	0.24	0.05	1.08

注:分析点号带有“c”者为继承锆石。

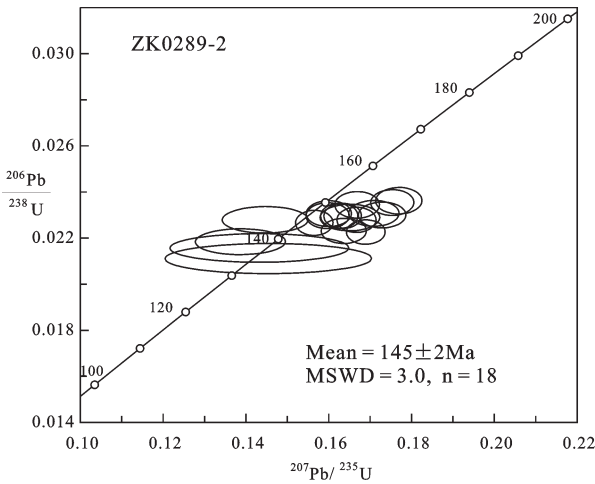


图 5 闪长岩 (Zk0289-2) 的锆石 U - Pb 谐和图
Fig.5 Zircon U - Pb concordia diagrams of diorite (Zk0289-2)

16 倍和 13 倍以上,是 ZK02810-6 的 Yb(平均 314×10^{-6})和 Lu(平均 61×10^{-6})含量的 7 倍和 6 倍以上。ZK0289-2 的分布模式曲线一致性好,集中在较窄

的范围之内;而 DY254-1 和 ZK02810-6 有较宽的分布范围, δCe (3.42~330.48, 4.72~110.47) 和 δEu (0.35~0.67, 0.54~1.0) 值变化大。DY254-1 的两颗继承锆石之间 REE 特征各不相同(图 6-d), 与岩浆锆石之间也不同。ZK02810-6 的 8 个继承锆石都有强的负 Eu 异常, δEu 值 < 0.38 (ZK02810-6-15 为 0.48), 分布曲线有明显的 V 型谷(图 6-e)。根据曲线形态进一步分为 3 个组, 一组曲线较平缓(ZK02810-6-17 和 ZK02810-6-21), 无 Ce 异常; 二组曲线左倾且较平滑(ZK02810-6-11), 有弱的 Ce 正异常; 三组曲线左倾而且有较强的 Ce 正异常。

ZK0289-2 锆石中 REE、尤其是 Yb 和 Lu 含量很高,也是导致阴极发光很弱,CL 图像呈黑色的原因之一[25-28]。

4.3 锆石 Hf 同位素

在 U-Pb 年龄测定之后, 选择部分锆石颗粒在原位进行 Hf 同位素测定(表 3)。样品 ZK0289-2 因干扰元素 Yb、Lu 含量过高, 分析结果失信而未列出。样品 DY254-1 的 11 个岩浆锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比

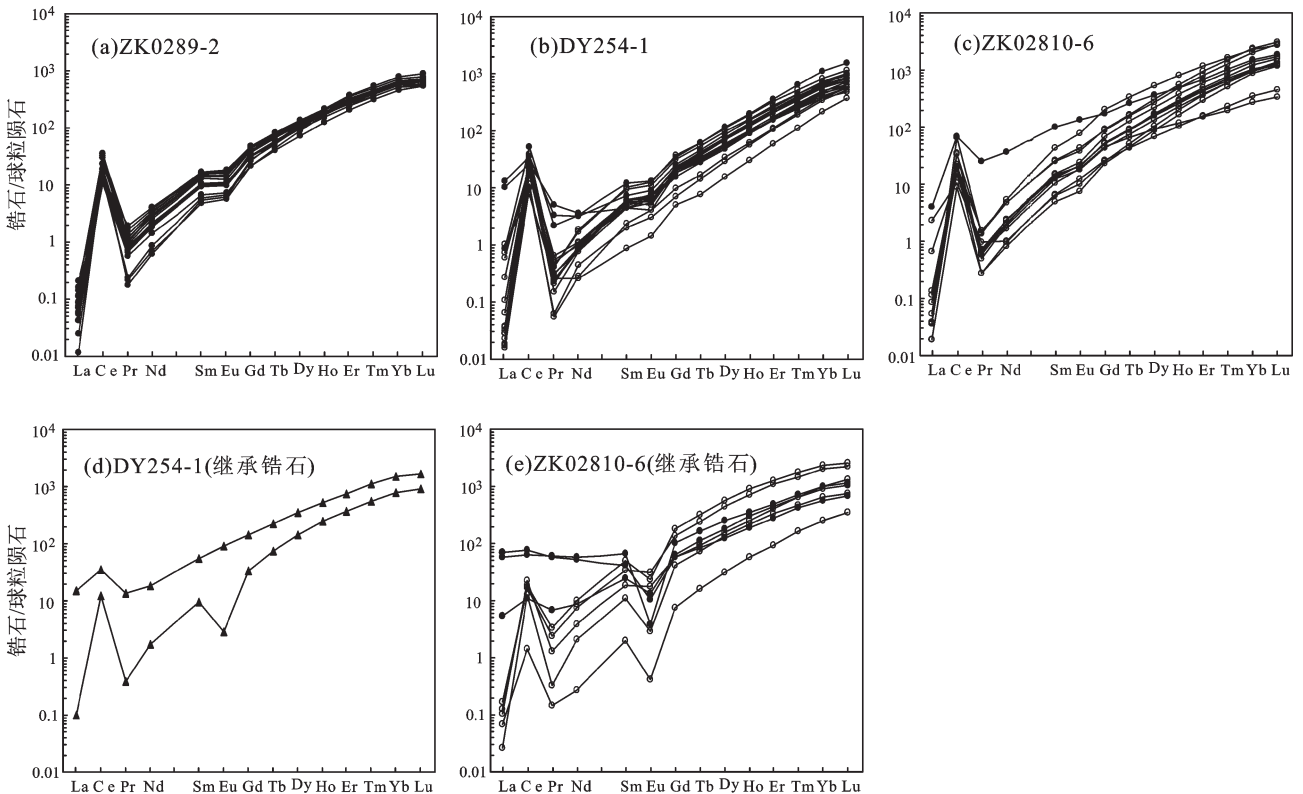


图 6 锆石稀土元素球粒陨石标准化分布模式图
Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from Tonglushan pluton

表3 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 3 LA-MC-ICPMS Lu-Hf isotope data of zircons

样品及分析点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2s$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	t/Ma	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2s$	T_{DM1}/Ma	$\pm 2s$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	T_{DM2}/Ma	$\pm 2s$
Dy254-1													
Dy254-1-02	0.282417	0.000022	0.000466	0.009514	-12.6	140	-9.54	0.8	1165	60	-0.99	1795	96
Dy254-1-04	0.282427	0.000071	0.000649	0.014827	-12.2	140	-9.19	2.5	1156	196	-0.98	1773	315
Dy254-1-05	0.282493	0.000024	0.000706	0.013770	-9.9	140	-6.88	0.9	1067	67	-0.98	1626	108
Dy254-1-07	0.282461	0.000024	0.000579	0.012834	-11.0	140	-7.97	0.8	1107	65	-0.98	1695	105
Dy254-1-08	0.282436	0.000030	0.000648	0.015222	-11.9	140	-8.88	1.1	1144	84	-0.98	1753	135
Dy254-1-11	0.282492	0.000025	0.000467	0.009424	-9.9	140	-6.87	0.9	1061	69	-0.99	1626	111
Dy254-1-14	0.282429	0.000025	0.000439	0.008544	-12.1	140	-9.09	0.9	1147	69	-0.99	1766	112
Dy254-1-15	0.282507	0.000024	0.000380	0.007657	-9.4	140	-6.35	0.8	1038	65	-0.99	1593	105
Dy254-1-17	0.282390	0.000025	0.000717	0.015432	-13.5	140	-10.51	0.9	1210	69	-0.98	1856	110
Dy254-1-19	0.282416	0.000020	0.000264	0.004947	-12.6	140	-9.56	0.7	1161	56	-0.99	1796	91
Dy254-1-20	0.282465	0.000022	0.000521	0.009975	-10.8	140	-7.82	0.8	1099	62	-0.98	1686	100
Dy254-1-21c	0.281658	0.000026	0.000521	0.012767	-39.7	1127	-15.23	0.9	2221	71	-0.98	2890	114
ZK02810-6													
ZK02810-6-04	0.282493	0.000023	0.000781	0.016641	-9.9	150	-6.67	0.8	1069	65	-0.98	1620	103
ZK02810-6-05	0.282479	0.000034	0.002756	0.063478	-10.3	150	-7.34	1.2	1147	101	-0.92	1662	153
ZK02810-6-07	0.282397	0.000025	0.001252	0.029004	-13.3	150	-10.11	0.9	1218	71	-0.96	1838	112
ZK02810-6-09	0.282309	0.000026	0.000270	0.006498	-16.4	150	-13.11	0.9	1307	73	-0.99	2027	118
ZK02810-6-16	0.282476	0.000026	0.001034	0.023122	-10.5	150	-7.29	0.9	1099	73	-0.97	1659	116
ZK02810-6-19	0.282460	0.000020	0.001191	0.028702	-11.0	150	-7.87	0.7	1126	56	-0.96	1696	89
ZK02810-6-20	0.282503	0.000032	0.002320	0.058649	-9.5	150	-6.44	1.1	1098	92	-0.93	1606	142
ZK02810-6-06c	0.281803	0.000030	0.001548	0.038793	-34.3	1207	-8.82	1.0	2065	83	-0.95	2553	130
ZK02810-6-08c	0.281295	0.000026	0.000148	0.003394	-52.2	2220	-2.82	0.9	2672	70	-1.00	2956	115
ZK02810-6-10c	0.281453	0.000027	0.000530	0.012959	-46.7	2505	8.65	1.0	2486	74	-0.98	2475	119
ZK02810-6-11c	0.281627	0.000025	0.001271	0.031467	-40.5	2046	3.43	0.9	2294	69	-0.96	2438	109
ZK02810-6-15c	0.281435	0.000022	0.001036	0.022398	-47.3	2293	2.42	0.8	2543	60	-0.97	2691	95
ZK02810-6-17c	0.281383	0.000027	0.000535	0.013494	-49.1	2613	8.63	1.0	2580	73	-0.98	2560	118
ZK02810-6-21c	0.281578	0.000019	0.000603	0.015608	-42.2	1979	1.12	0.7	2321	51	-0.98	2529	82
ZK02810-6-18c	0.281175	0.000024	0.001459	0.037035	-56.5	2895	5.83	0.9	2930	66	-0.96	2950	103

注:分析点号带有“c”者为继承锆石。

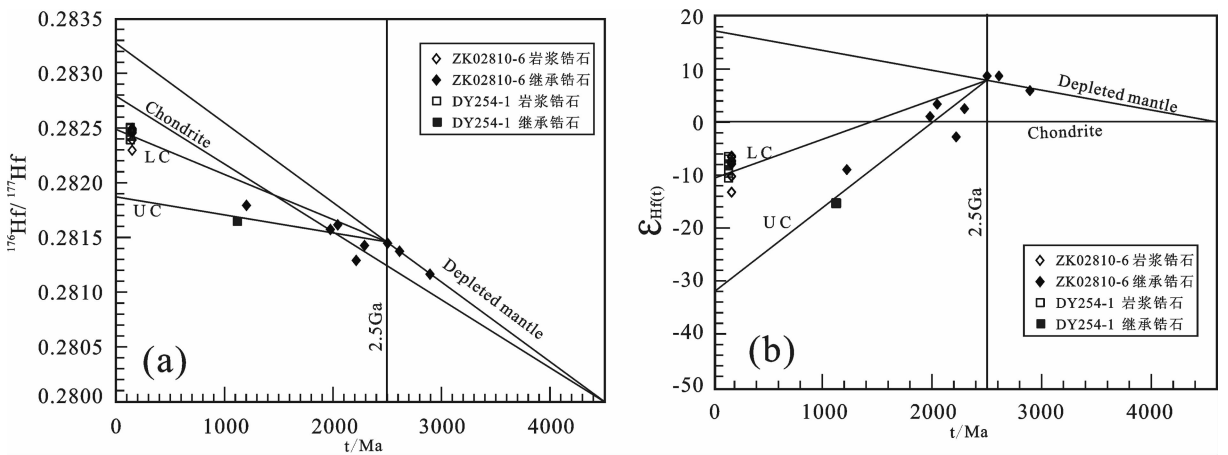


图7 锆石的 Hf 同位素组成
Fig.7 Hf isotopic composition of zircons

值非常一致,集中在 0.28239~0.28250,平均值为 0.28245, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -6.4~-10.5,平均 -8.4,位于下地壳

演化线上(图7),Hf 两阶段模式年龄为 1593~1856 Ma,加权平均为 1722 Ma,属于古元古代;继承锆石

(DY254-1-21)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.28165)和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-15.2)都要小得多,位于上地壳演化线上,Hf 两阶段模式年龄为 2890 Ma。

ZK02810-6 的岩浆锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值集中在 0.28230~0.28250 之间,平均为 0.28244, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -6.4~-13.1, 平均-8.4, 也位于下地壳演化线上,与 DY254-1 基本重叠(图 7);Hf 两阶段模式年龄为 1606~2027 Ma,加权平均为 1732 Ma,在误差范围内与 DY254-1 一致,同属于古元古代。继承锆石的情况较为复杂, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值比岩浆锆石低许多(0.28117~0.28180), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的变化与三组年龄相对应,第一组((1207±36)Ma)的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-8.8,Hf 两阶段模式年龄为 2553 Ma,第二组 4 个点(1979~2293 Ma)为-2.8~+3.4,Hf 两阶段模式年龄为 2438~2956 Ma,第三组 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为较大的正值,ZK02810-6-10 (2505 Ma)和 ZK02810-6-17(2613Ma)的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 都为+8.6,Hf 两阶段模式年龄为 2475 Ma 和 2560 Ma;ZK02810-6-18(2895Ma)的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为+5.8,Hf 两阶段模式年龄为 2950 Ma,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值最低,为 0.28117。

5 讨论

5.1 岩体的侵入期次

由于无法直接观察到各类岩石的侵入关系,岩浆活动的期次只能依靠同位素年龄来确定。有关铜绿山岩体的同位素年龄数据较多,以前采用 K-Ar 等方法测定取得的全岩年龄数值为 118~133 Ma,黑云母和长石的年龄为 152~157 Ma^[1],不同样品测定结果差别较大,数据的可信度较低。最近几年来采用高精度的 SHRIMP、LA-ICPMS、SIMS 方法取得的年龄数值为 139~146 Ma^[8,9,11,12,14]。本文在进行详细野外观察和室内岩石显微镜研究的基础上,利用 LA-ICPMS 测定的年龄值为铜绿山矿区石英正长闪长玢岩(DY254-1)(140±2)Ma、鸡冠嘴矿区浅部闪长岩(ZK0289-2)(145±2)Ma 和深部石英闪长岩(ZK02810-6)(150±2)Ma。其中 DY254-1 与 Li(2010)^[12]和 Xie(2011)^[14]所报道的样品位置和年龄数值一致,说明本文所测数据可靠。如前所述,三种岩石中的锆石形态和内部结构特征,REE、Th、U 含量特征等均有较大差别,表明它们的结晶生长环境不同^[33,35];闪长岩中没有发现继承锆石,石英正长闪长玢岩中有少量新元古代和中元古代晚期的继承锆

石,石英闪长岩含有较多的从中元古代晚期到中太古代的继承锆石,反映其物源成分较为复杂。由此推定,铜绿山岩体是一个复式岩体,至少有三次侵入活动,分别为 150 Ma、145 Ma 和 140 Ma,从西到东、由深到浅侧向迁移侵位,各岩相之间并非简单的岩浆分异演化关系。第一次形成深部的石英闪长岩,就位于鸡冠嘴矿区-800 m 以下,并形成Ⅶ号铜金矿体;第二次形成鸡冠嘴矿区较浅部的闪长岩和相关的 I、II、III 号等铜金矿体;第三次形成石英正长闪长玢岩,以及相关的铜绿山、鲤泥湖、桃花嘴等铁铜矿。

5.2 岩体的物质来源

通过锆石的稀土和微量元素特征可以判断其寄主岩石的成因类型和物质来源^[28],幔源岩石中的锆石与壳源岩石中的锆石在 REE 含量和分布模式曲线有明显的差别,而不同成因的壳源岩石中锆石的 REE 含量和分布模式曲线却可以具有相似的特征^[29,30]。已有研究表明,从超基性岩到基性岩,再到花岗质岩石,其中的锆石的 REE 含量有不断增加的趋势:金伯利岩的锆石中平均含量一般低于 50×10^{-6} ,碳酸岩和煌斑岩中上升为 $600 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$,基性岩中可达 2000×10^{-6} ,而在花岗质岩石和伟晶岩中的含量可高达百分比级,这种趋势反映了岩浆的分异程度^[31,32]。铜绿山岩体的闪长岩(ZK0289-2)中锆石 $\sum\text{REE}$ 极高(表 3),平均达到 6604.10×10^{-6} ,而石英闪长岩(ZK02810-6)和石英正长闪长玢岩(DY254-1)分别为 713.61×10^{-6} 和 308.57×10^{-6} ,从中性岩到中偏酸性岩锆石中的 REE 含量不升反而大幅降低。ZK0289-2 的分布模式曲线一致性好,基本上重叠在一起,而 ZK02810-6 和 DY254-1 变化范围宽而且曲线特征不同。

如前所述,ZK0289-2 锆石的 Th、U 含量非常高(表 2),Th 平均为 7662×10^{-6} ,是 ZK02810-6、DY254-1 的几十倍;U 平均为 1913×10^{-6} ,是 ZK02810-6、DY254-1 的 10 倍左右;Th/U 比值(平均 3.70)也比 ZK02810-6(平均 1.06)、DY254-1(平均 0.82)高许多。

DY254-1 中两颗继承锆石的年龄、Th、U、REE 含量特征均不同,反映寄主岩石的物源中包含有新元古代(799 Ma)和中元古代晚期(1127 Ma)两个时代的物质。ZK02810-6 的继承锆石更为复杂,反映其寄主岩石的物源有中元古代晚期(1207 Ma)、古元古代(1979~2293 Ma)、新太古代(2505 Ma、2613

Ma)和中太古代(2895 Ma)四个时代的物质,它们的REE分布型式也有多种,而且同一时期的锆石分布型式不相同,不同时期的锆石却可以相一致。例如ZK02810-6-17(2613 Ma)和ZK02810-6-21(1979 Ma)的曲线都较平缓,无Ce异常,具强的负Eu异常,形成明显的V型谷。

REE、Th、U含量特征的差别和继承锆石年龄不同,反映出上述三个锆石样品的寄主岩石的物源成分有差别^[33],岩石(相)之间并非同一岩浆分异演化的关系。

最近十年以来,Lu-Hf同位素地球化学示踪在解决岩石成因有关的地质问题的研究和应用方面取得许多重要成果。研究表明,锆石具有较高的Hf含量,但Lu的含量又极低,从而导致其¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf具有非常低的比值,在形成以后基本没有明显的放射性成因Hf的积累,测定所得的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值基本代表了其形成时体系的Hf同位素组成^[34],因而成为Lu-Hf同位素示踪研究的重要矿物。本文测定的锆石¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf比值很低,变化范围为0.000148~0.002756,其中DY254-1样品平均值为0.000530,ZK02810-6的平均值为0.001116,显示其在形成后基本没有明显的放射性成因Hf的积累,测得的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值可以代表锆石结晶时岩浆体系的Hf同位素组成。

在Hf同位素组成图上(图6),ZK02810-6(7颗)和DY254-1(11颗)的岩浆锆石基本重叠,都位于下地壳演化线上, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-6.4~-13.1,属于地壳物质的特征,他们的两阶段模式年龄加权平均分别为1732 Ma和1722 Ma,在误差范围内一致,暗示他们的寄主岩浆来源于古元古代1730 Ma左右的下地壳物质的部分熔融。然而,继承锆石的Hf同位素特征要复杂得多。

ZK02810-6样品8个继承锆石中ZK02810-6-10、ZK02810-6-17、ZK02810-6-18各自的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄和Hf单阶段、两阶段模式年龄在误差范围内一致,分别约为2500 Ma、2600 Ma、2900 Ma,三者的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为+8.64、+8.63、+5.83,属于幔源物质的特征,在Hf同位素组成图上均落在亏损地幔演化线上(图6),这些特征反映这3颗继承锆石(晶核)形成于新太古代和中太古代源自亏损地幔的物质^[34]。ZK02810-6-6的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-8.8,位于上地壳演化线上,明显属于壳源物质的特征;Hf两阶段模式

年龄为(2553±130)Ma,暗示其在1207 Ma形成于地壳物质的部分熔融。其余4个的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-2.8~+3.4,具有壳、幔源物质混合的特点,在Hf同位素组成图上位于球粒陨石、上地壳、下地壳三者交叉区域附近,Hf两阶段模式年龄为2438~2956 Ma,与ZK02810-6-10、ZK02810-6-17、ZK02810-6-18的形成年龄基本一致,暗示其在古元古代由来源于新—中太古代(2500~2900 Ma)亏损地幔与地壳物质的部分熔融作用形成。

DY254-1样品中只有1颗继承锆石(1127±20 Ma)分析了Lu-Hf同位素,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-15.2,具有壳源物质特征,位于上地壳演化线上,Hf两阶段模式年龄为(2890±114)Ma,暗示其来源于中太古代地壳物质的重熔再造。

上述锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和Hf两阶段模式年龄等信息显示铜绿山岩体的物源主要为古元古代1730 Ma左右的下地壳物质,继承锆石的U-Pb年龄、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和Hf模式年龄等信息又显示物源中含有亏损地幔的成分。因此,铜绿山岩体的物源可能是混含有少量亏损地幔成分的古元古代(约1730 Ma)下地壳物质,其最初源自新太古代(2500 Ma、2600 Ma)和中太古代(2900 Ma)亏损地幔,经历古元古代(1730~2290 Ma)多次构造热事件改造后仍然保留有少部分幔源物质。此外,还有部分为中元古代晚期(1100~1200 Ma)和新元古代(800 Ma)的地壳物质加入。岩体中不同类型岩石的物源成分有所差别。石英正长闪长玢岩的物源主要为古元古代下地壳,并有新元古代和中元古代晚期的地壳物质加入。石英闪长岩更为复杂,其物源主要也为古元古代下地壳,但还混含有少量新太古代和中太古代的幔源物质,同时也有中元古代晚期地壳物质加入。遗憾的是,闪长岩因没有可靠的Hf同位素数据未能加以分析讨论。物源组成的差别,导致不同类型岩石形成不同的矿床。石英闪长岩、闪长岩形成铜金矿床,可能与其源区物质含有地幔成分有关。

5.3 鄂东南地区的基底

鄂东南地区大地构造上属于扬子陆块,位于桐柏—大别造山带与九岭—幕阜隆起带夹持的三角地带内,地表浅部没有发现古老基底岩石出露。

最近几年来的研究发现,扬子陆块出露最古老的岩石是分布于宜昌北部的崆岭群TTG片麻岩,形成年龄约为2.9 Ga^[36-38],其中最老的岩浆锆石年龄

为 (3218 ± 13) Ma,由 >3.6 Ga 的冥太古代地壳物质部分熔融作用形成^[39]。在宜昌莲沱组砂岩中发现最老的碎屑锆石 U-Pb 年龄为 3.8 Ga,对应的 Hf 模式年龄为 4 Ga,说明存在晚冥太古代的地壳残片^[40,41]。Zheng et al.(2006)^[42]在湖北京山、湖南宁乡、贵州镇远的煌斑岩筒中发现了大量古老的捕获锆石,年龄主要分布在 2.9~2.8 Ga 和 2.6~2.5 Ga,说明太古代基底在扬子陆块的分布非常广泛。

在上述崆岭、莲沱、京山、宁乡、镇远地区,以及湖南石门渚水河组(莲沱组)凝灰岩中,也获得大量古元古代和新元古代锆石微区分析 U-Pb 年龄数据,分布在 1786~2364 Ma 和 718~876 Ma^[36,37,40,42-45],记录了扬子陆块地壳古元古代的多次再造事件,以及新元古代地壳生长和再造与岩浆活动事件,Hf 同位素分析表明其源区物质为各种太古代岩石^[42]。

位于鄂东南地区中部的铜绿山岩体的继承锆石 U-Pb 年龄可以分为中太古代(2900 Ma)、新太古代(2500 Ma、2600 Ma)、古元古代(1979~2293 Ma)、中元古代晚期(1100~1200 Ma)和新元古代(800 Ma)五组,与崆岭群 TTG 片麻岩,京山、宁乡、镇远煌斑岩筒以及宜昌莲沱砂岩、湖南石门渚水河组(莲沱组)凝灰岩中的锆石各阶段年龄可以对比,表明鄂东南地区在元古代及以前的地壳演化历史与扬子陆块其他地区基本一致,深部同样存在有古元古代和太古宙基底,进一步证明了扬子陆块各地广泛存在有古元古代和太古宙基底。

6 结论

铜绿山岩体锆石的形态和内部结构,Th、U、REE 含量、REE 分布模式曲线以及 U-Pb 年龄等证据表明,至少有三次以上的侵入活动,侵位时间分别为 150 Ma、145 Ma 和 140 Ma,从西到东、由深到浅侧向迁移侵位,三者并非同一岩浆分异演化关系。第一次形成鸡冠嘴矿区深部的石英闪长岩和Ⅶ号铜金矿体;第二次形成鸡冠嘴矿区较浅部的闪长岩和Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号等铜金矿体;第三次形成石英正长闪长玢岩,以及铜绿山、鲤泥湖、桃花嘴等铁铜矿。第一、二次侵入活动形成铜金矿床,可能与其岩浆源区物质含有较多的地幔成分有关。

岩浆锆石和继承锆石的 U-Pb 年龄、Hf 同位素等信息显示,铜绿山岩体的物源为混含有少量亏损地幔成分的下地壳物质,其最初源自新太古代(2500

Ma、2600 Ma)和中太古代(2900 Ma)亏损地幔,经历古元古代(1730~2290 Ma)多次构造热事件改造后仍然有少量幔源物质残余。此外,还有部分为中元古代晚期(1100~1200 Ma)和新元古代(800 Ma)的地壳物质加入。

在继承锆石中获得中太古代、新太古代、古元古代、中元古代晚期和新元古代五组年龄数据,与扬子陆块的崆岭群 TTG 片麻岩,京山、宁乡、镇远煌斑岩筒,宜昌莲沱砂岩、湖南石门渚水河组(莲沱组)凝灰岩中的锆石年龄可以对比,表明鄂东南地区在元古宙及以前的地壳演化历史与扬子陆块其他地区相似,深部同样存在古元古代和太古宙基底。

参考文献(References):

- [1] 舒全安,陈培良,程建荣.鄂东铁铜矿产地地质[M].北京:冶金工业出版社,1992:1-532.
Shu Quan'an, Chen Peiliang, Chen Jianrong. Mineral Resources and Geology of Iron and Copper in Eastern Hubei Province, China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992:1-532(in Chinese).
- [2] 苏欣栋,刘陶海.同位素地质在鄂东南铜铁矿床地质研究中的应用[J].地质与勘探,1994,30(1):27-32.
Su Xindong, Liu Taohai. Application of isotopes to the geological study on the iron and copper deposits in southeastern Hubei Province [J]. Geology and Prospecting, 1994, 30 (1): 27-32 (in Chinese with English abstract).
- [3] Pan Y M, Dong P. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, East Central China: Intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits [J]. Ore Geology Reviews, 1999, 15(4):177-242.
- [4] Mao J W, Wang Y T, Bernd L, et al. Molybdenite Re-Os and albite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 2006, 29:307-324.
- [5] Xie G Q, Mao J W, Li R L, et al. Re-Os molybdenite and Ar-Ar phlogopite dating of Cu-Fe-Au-Mo (W) deposits in southeastern Hubei, China [J]. Mineralogy and Petrology, 2007, 90: 249-270.
- [6] 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]. Miner. Deposita, 2008, 43:315-336.
- [7] Li J W, Zhao X F, Zhou M F, et al. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2009, 157: 383-409.
- [8] 梅玉萍,李华芹,陈富文.鄂东铜绿山矿区石英正长闪长玢岩锆

- 石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 地球学报, 2008, 29 (6):805-810.
- Mei Yuping, Li Huaqin, Chen Fuwen. SHRIMP U-Pb zircon dating of the quartz-orthoclase diorite porphyrite from the Tonglushan orefield in eastern Hubei Province and its geological implication [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29 (6):805-810(in Chinese with English abstract).
- [9] 李华芹, 陈富文, 梅玉萍. 鄂东鸡冠嘴矿区成矿岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33 (3):411-417.
- Li Huaqin, Chen Fuwen, Mei Yupin. SHRIMP U-Pb zircon dating of the mineralized intrusion from Jiguanzui orefield in eastern Hubei Province and its geological significance [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33 (3):411-417 (in Chinese with English abstract).
- [10] Li Jianwei, Deng Xiaodong, Zhou Meifu, et al. Laser ablation ICP-MS titanite U-Th-Pb dating of hydrothermal ore deposits: A case study of the Tonglushan Cu-Fe-Au skarn deposit, SE Hubei Province, China [J]. Chemical Geology, 2010, 270:56-67.
- [11] Li Xianhua, Li Wuxian, Wang Xuance, 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, 119:427-440.
- [12] Xie Guiqing, Mao Jingwen, Zhao Haijie. 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, 2011, 125:693-710.
- [13] Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Xiongwei, 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, 2011, 127:144-164.
- [14] Xie Guiqing, Mao Jingwen, Zhao Haijie, et al. Timing of skarn deposit formation of the Tonglushan ore district, southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt and its implications [J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43:62-77.
- [15] Xie Guiqing, Mao Jingwen, Zhao Haijie, et al. Zircon U-Pb and phlogopite ^{40}Ar - ^{39}Ar age of the Chengchao and Jinshandian skarn Fe deposits, southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, China [J]. Miner Deposita, 2012, 47:633-652.
- [16] Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating for volcanic rocks of the Dasi Formation in southeast Hubei Province, middle-lower reaches of the Yangtze River and its implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (24):3000-3009.
- [17] Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, et al. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting [J]. Lithos, 2008, 104(1/4):216-230.
- [18] Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Geost and Newsl., 2004, 28: 353-370.
- [19] Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS[J]. Chem. Geol., 2008, 247:100-118.
- [20] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chem. Geol., 2002, 192:59-79.
- [21] Ludwig K R. Isoplot 3.0-A geochronological toolkit for Microsoft Excel[C]//Berkeley Geochronology Center, Special Publication[C]. 2003, 4:1-70.
- [22] 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. 科学通报, 2004, 49:1403-1410.
- Xu Pin, Wu Fuyuan, Xie Liewen, et al. Hf isotope of U-Pb dating standard zircon [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49: 1403-1410(in Chinese).
- [23] Rowley D B, Xue F, Tucker R D. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology [J]. Earth and Planet Science Letters, 1997, 151:191-203.
- [24] Mojzsis S J, Harrison T M. Establishment of a 3.83 Ga magmatic age for the Akilia tonalite (southern West Greenland) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 202:563-576.
- [25] Hanchar J M, Miller C F. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories [J]. Chemical Geology, 1993, 110:1-13.
- [26] Hanchar J M, Rudnick R L. Revealing hidden structures: The application of cathodoluminescence and back-scatter electrical imaging to dating zircons from lower crustal xenoliths [J]. Lithos, 1995, 36:289-303.
- [27] Crofu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53: 469-495.
- [28] 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 constraint on the interpretation of U-Pb zircon ages[J]. Chinese

- Science Bulletin, 2004, 49(16):1589-1604(in Chinese).
- [29] Hoskin P W O, Ireland T R. Rare earth element chemistry of zircon and it saves as a provenance indicator [J]. *Geology*, 2000, 28:627-630.
- [30] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2003, 53:27-62.
- [31] Belousova E A, Griffin W L, Pearson N J. Trace element composition and catholuminescence properties of Southern African kimberlitic zircons[J]. *Mineral. Mag.*, 1998, 62:355-366.
- [32] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2002, 143:602-622.
- [33] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modelling: Examples from eastern Australian granitoids [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(2):329-353.
- [34] 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(in Chinese with English abstract).
- [35] 汪相, Griffin W L, 王志成, 等. 湖南丫江桥花岗岩中锆石的 Hf 同位素地球化学[J]. *科学通报*, 2003, 48(4):379-382.
- Wang Xiang, Griffin W L, Wang Zhicheng, et al. Hf isotope composition of zircons and implication for the petrogenesis of Yajiangqiao granite, Hunan Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(4): 379-382(in Chinese).
- [36] Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of ≥ 3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of South China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 2000, 28:11-14.
- [37] Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China [J]. *Precambrian Res.*, 2006, 146:16-34.
- [38] Liu X M, Gao S, Diwu C R, et al. Precambrian crustal growth of the Yangtze Craton as revealed by detrital zircon [J]. *American J. Sci.*, 2008, 308: 421-468.
- [39] 焦文放, 吴元保, 彭敏, 等. 扬子板块最古老岩石的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *中国科学(D辑)*, 2009, 39(7):972-978.
- Jiao Wenfang, Wu Yuanbao, Peng Min, et al. The oldest basement rock in the Yangtze Craton revealed by zircon U-Pb age and Hf isotope composition [J]. *Science in China (Ser. D)*, 2009, 39(7): 972-978(in Chinese).
- [40] Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for 3.8 Ga crustal remnant and episodic reworking of Archean crust in South China [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, 252:56-71.
- [41] 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化[J]. *科学通报*, 2007, 52(1):1-10.
- Zheng Yongfei, Zhang Shaobing. Formation and evolution of Precambrian continental crust in South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(1):1-10(in Chinese).
- [42] 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(in Chinese with English abstract).
- [43] Zheng J P, Criffin W L, et al. Widespread Archean basement beneath the Yangtze craton[J]. *Geology*, 2006, 34:417-420.
- [44] Zhang S B, Zheng Y E, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China[J]. *Precambrian Res.*, 2006, 151:265-288.
- [45] 尹崇玉, 刘敦一, 高林志, 等. 南华系底界与古城冰期的年龄: SHRIMP II 定年证据[J]. *科学通报*, 2003, 48(16):1721-1725
- Yin Chongyu, Liu Dunyi, Gao Linzhi, et al. Lower boundary age of the Nanhua system and the Gucheng glacial stage: Evidence from SHRIMP II dating [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48 (16):1721-1725(in Chinese).

Stage division and origin of Tonglushan pluton in southeast Hubei Province: Evidence from zircon U–Pb ages and Hf isotopes

HUANG Gui–cheng¹, XIA Jin–long¹, DING Li–xue¹, JIN Shang–gang², KE Yu–fu²,
WU Chang–xiong³, ZHU Jing–ming³

(1. Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Geological Party of Southeast Hubei Province, Daye 435100, Hubei, China; 3. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China)

Abstract: The Tonglushan pluton is mainly composed of quartz–orthoclase diorite porphyry, together with diorite, quartz diorite and diorite porphyry. In this paper, zircon U–Pb ages and Lu–Hf isotopic data were obtained by using LA–ICPMS and LA–MC–ICPMS analysis. The results show that there existed at least three times of intrusive activities in the Tonglushan complex, which occurred at 150 Ma, 145 Ma and 140 Ma, respectively. These magmatic activities successively occurred from west to east and from the depth to the shallow part and formed quartz diorite and VII Cu–Au ore body at the depth of the Jiguanzui mining area, the diorite and I, II, III Cu–Au ore bodies in the shallow part of the Jiguanzui ore district, as well as the quartz–orthoclase diorite porphyries in and around the Tonglushan mining area and the Tonglushan Fe–Cu deposit, the Jiguanzui Fe–Cu deposit and the Taohuazui Fe–Cu deposit, respectively. The U–Pb ages and Hf isotopic data of igneous zircons and inherited zircons indicate that the Tonglushan complex was mainly derived from Paleoproterozoic (Ca.1730Ma) lower crust with a little depleted mantle components, with the involvement of variable amounts of the Late Mesoproterozoic (1100~1200Ma) and Neoproterozoic (800 Ma) crustal materials. Different rock units had different magmatic sources and were related to different ore–forming processes. The quartz diorite and diorite were associated with Cu–Au mineralization, which probably resulted from the involvement of mantle components in the magma source. The age data of inherited zircons, which include Neoproterozoic, Mesoarchean, Paleoproterozoic, Late Mesoproterozoic and Neoproterozoic, are comparable with zircon ages of the Kongling Group TTG gneiss in Yichang, lamprophyre pipes in Jingshan, Ningxiang and Zhenyuan, sandstones of Liantuo Formation in Yichang, and tuffs of Xieshuihe Formation (Liantuo Formation) in Shimen, indicating that the crustal evolution of southeast Hubei Province was basically in accordance with that of the other areas in the Yangtze block, and Paleoproterozoic and Archean basement might also exist in the deep crust of southeast Hubei Province.

Key words: zircon U–Pb dating; Hf isotopes; magma source; the stage of intrusion; Tonglushan pluton

About the first author: HUANG Gui–cheng, male, born in 1963, doctor, senior researcher, mainly engages in geological survey and research; E–mail: hguicheng@163.com.