安徽铜陵凤凰山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征

王次松[1)],吴才来[2)],郑坤[2)],吴迪[3)],单士锋[1)],李翔[1)],古全德[1)]

1) 安徽省地质矿产勘查局321地质队,安徽铜陵,244033;

2) 自然资源部深地动力学重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京,100037;

3) 中国地质科学院地质力学研究所,北京,100081

内容提要:安徽铜陵是我国著名的铜—金多金属矿集区,区内广泛出露与成矿作用有着密切关系的中酸性侵入岩,其中,凤凰山岩体是区内出露面积最大的岩体,岩体周围分布着许多重要的铜、金、钼等金属矿床。为了探讨凤凰山岩体的成因及构造意义,本文对该岩体开展了岩石学、锆石U-Pb年代学、岩石地球化学等方面的研究。研究结果表明,该岩体主要由花岗闪长岩和石英二长闪长岩组成,锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄分别为140.6~144.7 Ma和142.2~143.4 Ma,反映岩体侵位时代为140.6~144.7 Ma。岩石主要由斜长石、石英、碱性长石组成,其次含角闪石、黑云母,副矿物为磷灰石、锆石等,岩体内部常见闪长质微粒包体。岩石的铝饱和指数A/CNK<1.1,$Na_2O>K_2O$,具I型花岗岩特征。岩石的轻稀土元素富集而重稀土元素亏损,Eu呈较弱的负异常,富集Rb、Ba、Th、U、K等大离子亲石元素,相对亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素,反映其源岩可能主要为壳幔混合源,形成岩体的岩浆是由古老地壳部分熔融形成的长英质岩浆与起源于富集地幔的富碱玄武质岩浆混合后形成。

关键词:锆石U-Pb年代学;岩石地球化学;岩石成因;构造意义;凤凰山岩体;铜陵

铜陵位于安徽省的长江南岸,是长江中下游多金属成矿带中重要的铜金多金属矿集区,是我国重要的有色金属基地之一,享有中国"古铜都"之称。区内近1000 km^2的范围内,已发现200多个矿床,获得铜矿资源储量5 Mt,金200 t,铅锌2.5Mt,钼20 kt(Wu Cailai et al.,2014,2017;瞿泓滢等,2010),成为名符其实的矿集区。这些矿床的形成与区内中生代中酸性侵入岩有着密切的成因联系(常印佛等,1991)。铜陵地区的中酸性侵入岩主要形成于晚侏罗世—早白垩世(152~126 Ma),吴才来等(2013)将本区侵入岩划分为橄榄安粗岩系列和高钾钙碱性系列。橄榄安粗岩系列主要岩石类型有辉石二长闪长岩、二长岩、石英二长岩,约占全区侵入岩的20%,与金矿成矿关系密切;高钾钙碱性系列侵入岩主要岩石类型为辉长闪长岩类、石英二长闪长岩类、花岗闪长岩类,约占全区侵入岩的80%,与铜矿成矿关系密切(Wu Cailai et al.,2014,2017)(图1)。凤凰山岩体为铜陵地区出露面积最大的岩体,岩石属高钾钙碱性系列,岩体周围存在众多的Cu、Au、Mo、Fe、Pb、Zn矿床。已有一些学者对该岩体开展了年代学研究,获得了岩体中花岗闪长岩和石英二长闪长岩锆石U-Pb年龄(张达等,2006;吴才来等,2010;瞿泓滢等,2010),但对岩体成因仍有争议。凤凰山岩体是何成因?产于何种构造环境?为解决以上问题,本文在岩石学、锆石U-Pb年代学、岩石地球化学研究的基础上,着重探讨凤凰山岩体形成时代、成因及其构造意义。

1 地质背景及岩体地质

铜陵地区位于中国东部扬子板块的北缘,华北克拉通和秦岭—大别造山带的东南缘,地处马鞍山—贵池隆起带中部,西北部以郯城—庐江断裂带和襄樊—广济断裂带为界,与华北板块和大别山造山带相邻,南部则为阳新—常州断裂。本区自中生代以来构造活动频繁,区内断裂构造发育,主要呈北东向和北西向。区内基底岩石出露较少,主要由

注:本文为国家自然科学基金资助项目(批准号:41472063)的成果。

收稿日期:2018-07-13;改回日期:2018-08-20;责任编辑:章雨旭。Doi:10.16509/j.georeview.2018.05.015

作者简介:王次松,男,1966年生。高级工程师,主要从事地质矿产勘查及研究。Email:wcisong@126.com。通讯作者:吴才来,男,1960年生。研究员。主要从事火成岩岩石学研究。Email:wucailai@126.com。

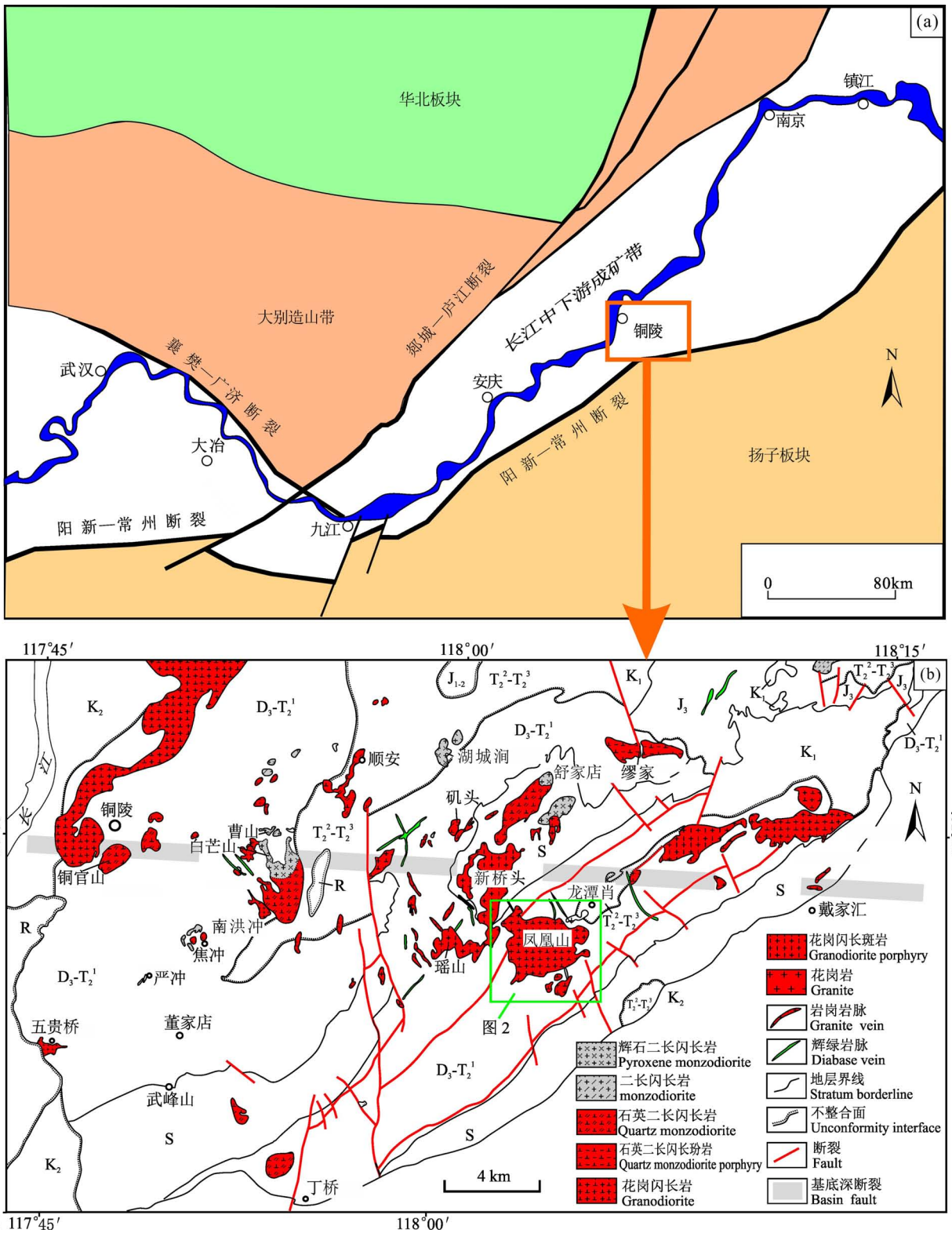


图 1 铜陵地区地质简图(据 Wu Cailai et al.,2014)

Fig. 1 Geological sketch map ofTongling area(after Wu Cailai et al.,2014)

R—古近系—新近系; K_2—上白垩统;K_1—下白垩统; J_3—上侏罗统; J_{1-2}—中—下侏罗统;

T_2^2—T_2^3—中三叠统; D_3—T_2^1—上泥盆—中三叠统; S—志留系

R—Paleogene—Neogene; K_2—Upper Cretaceous;K_1—Lower Cretaceous; J_3—Upper Jurassic; J_{1-2}—Middle and Lower Jurassic; T_2^2—T_2^3—Middle Triassic; D_3—T_2^1—Upper Devonian—Middle Triassic; S—Silurian

TTG 片麻岩和变质表壳岩组成,主要出露的地层为志留系—三叠系浅海相碳酸盐岩及少量的半深海相硅质岩和海陆交互相的碎屑岩,印支期构造运动使这些地层形成了一系列北东向的褶皱构造。本区广泛出露中生代中酸性侵入岩,可分为橄榄安粗岩系列和高钾钙碱性系列(吴才来等,2013 ;Wu Cailai et al.,2014,2017),主要分布在近东西向宽约 25 km 的铜陵—戴家汇构造—岩浆成矿带上(常印佛等,1991;瞿泓滢等,2010;Wu Cailai et al.,2014,2017),形成了铜官山、狮子山、焦冲、新桥、舒家店、凤凰山、沙滩脚等七个侵位中心,呈近东西向串珠状排列。区内出露的岩体约 70 余个,单个岩体出露面积通常为 1~3 km^2(图 1)。

凤凰山岩体为铜陵地区出露面积最大的侵入岩体,出露面积约 10 km^2,呈近圆形分布于新屋里—凤凰山一带,属中—浅成相,受到轻微至中等程度的剥蚀。岩体呈岩株状产于新屋里复向斜南西端近核部,其围岩为上泥盆统至中三叠统的碳酸盐岩,以中—下三叠统灰岩为主(图 2)。岩体与围岩的接触变质作用强烈,围绕岩体形成宽 0.5~1.4 km 的变质晕圈,主要为大理岩化、少量角岩化,内侧断续发育矽卡岩带,宽 0~30 m。在岩体周围,产出药园山铜矿床、朱家山铜矿床、铁山头铜矿床、龙潭肖金矿床、清水塘铜矿床等,主要赋矿层位为南陵湖组(T_1n),其次为中二叠统孤峰组(P_2g)和栖霞组(P_2q)。

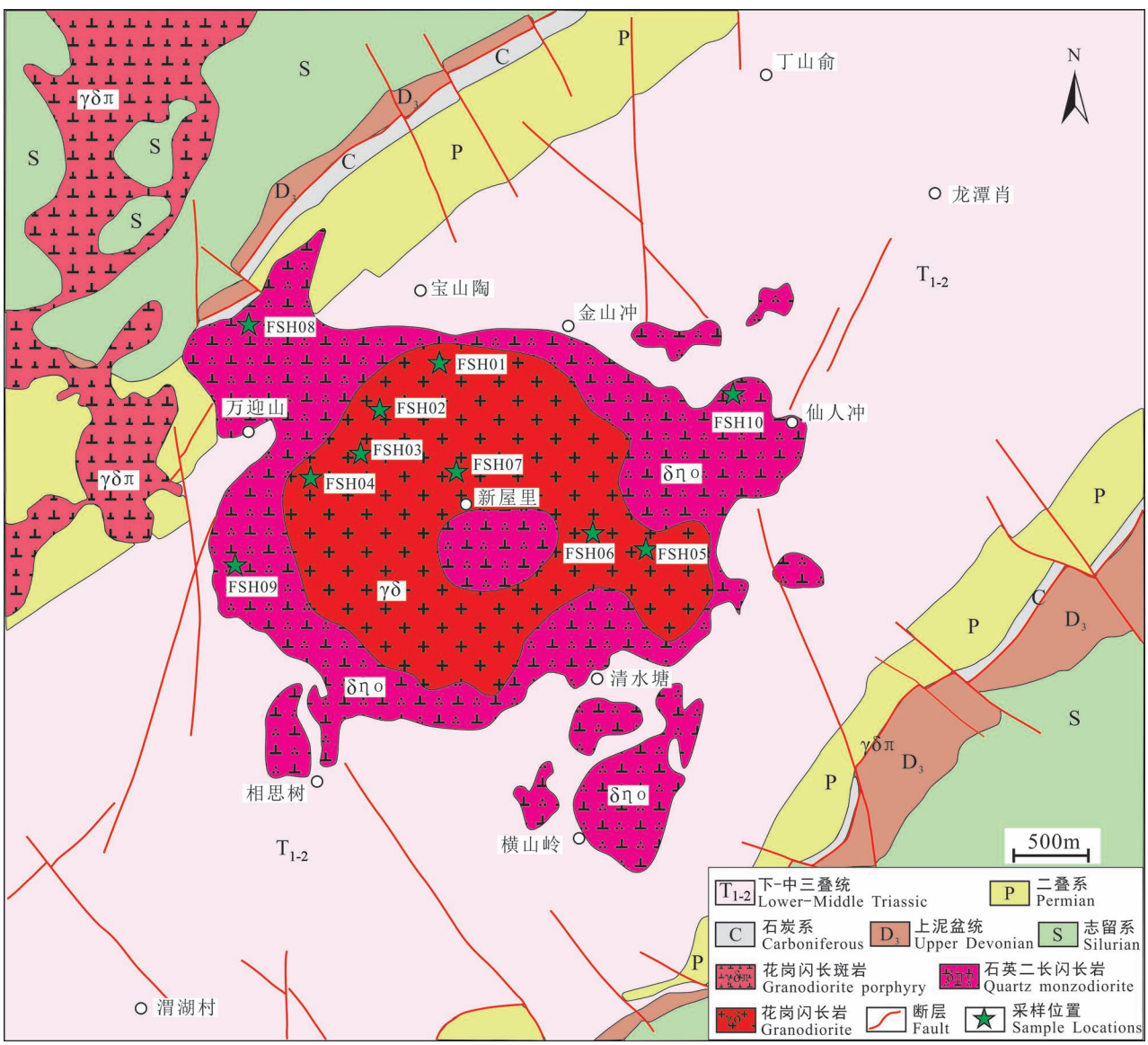


图 2 铜陵凤凰山岩体地质图

Fig. 2 Geological sketch map of Fenghuangshan pluton in Tongling area

凤凰山岩体主要岩石类型为花岗闪长岩和石英二长闪长岩,前者主要分布在岩体中心,后者分布在岩体边缘及花岗闪长岩顶部,两种岩石类型之间没有明显的界线,呈渐变过渡。另外,岩体内部常见有暗色闪长质微粒包体,反映存在岩浆混合作用(吴才来等,2013;Wu Cailai et al.,2014,2017)。两种岩石的岩相学特征分述如下:

花岗闪长岩(图 3a):浅灰白色、浅肉红色,半自形中细粒花岗结构,主要由斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母等矿物组成。斜长石含量 40%~50%左右,有时见绢云母化;钾长石大多数晶形不规则,含量约占 15%~20%,黏土化明显;石英呈他形粒状,含量 20%~25%;黑云母含量约占 10%,呈片状他形晶;角闪石自形程度较好,含量约 5%。

石英二长闪长岩(图 3b):浅灰—灰白色,似斑状结构—不等粒结构,斑晶主要为斜长石、钾长石等,基质主要由细粒的斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母等组成,常见钾长石化、钠长石化、硅化、绢云母化以及碳酸盐化。斜长石含量约占 50%~60%,常作为斑晶出现,也是基质的主要组成矿物;钾长石含量约 15%~20%,大多数作为基质矿物,少量作为斑晶出现,有黏土化现象,在钾化强烈的岩石中,钾长石含量较高;石英主要作为基质矿物,含量为 10%~15%左右;角闪石含量约占 10%,呈绿色,有时可见黑云母化、绿泥石化;黑云母含量约占 5%,在钾化强烈的岩石中,黑云母含量可大幅度增高。

2 分析测试方法

2.1 锆石 U-Pb 测年

定年测试样品采自凤凰山岩体,所采岩石样品均比较新鲜,选取了 6 个样品用于锆石 U-Pb 定年测试,其中样品 FHS02、FHS03、FHS04、FHS06 取自岩体中心部位,为花岗岩闪长岩样品。而样品 FHS08、FHS10 采自岩体的边部,为石英二长闪长岩(图 2)。

锆石分选在廊坊诚信地质服务公司完成,按常规的重力和磁选方法对锆石单矿物进行分离。然后在双目镜下选出晶形完好的锆石颗粒,将其粘贴在双面胶上,灌入环氧树脂等待其冷却凝固后,打磨抛光露出锆石的表面,阴极发光图像(CL)在北京锆年领航科技有限公司完成。

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年工作在合肥工业大学 LA-ICP-MS 实验室完成,采用激光探针等离子体质谱法(LA-ICP-MS),由 ICP-MS 和激光剥蚀系统联机完成。采用 Agilient 公司的 Agilient 7500a ICPMS 和 MicroLas 公司的 GeoLas200M(193nm)激光器进行测定,采用 He 气作为剥蚀物质的载气,通过 PVC 管将剥蚀物质传送到 ICP-MS,并在进入 ICP-MS 之前与 Ar 气混合,形成混合气。数据处理采用 ICP-MS DataCal 软件(Liu Yongsheng et al.,2010),年龄

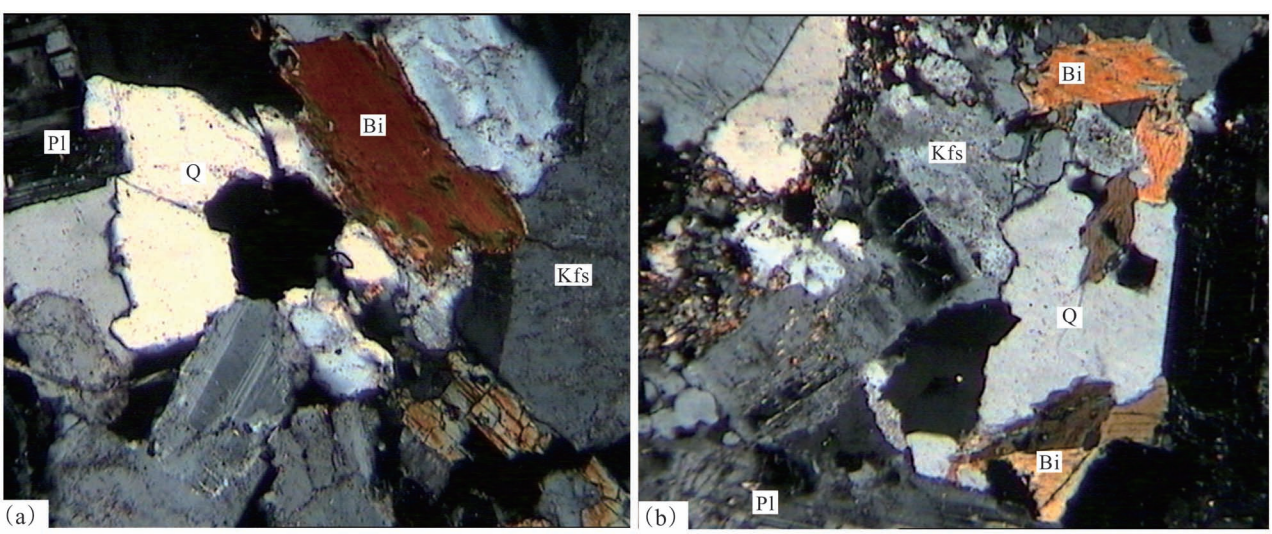


图 3 铜陵凤凰山岩体显微照片:(a) 花岗闪长岩半自形粒状结构;(b) 石英二长闪长岩不等粒结构

Fig. 3 The ranular texture microphoto of granodiorite(a) and the heterogranular texture microphoto of quartz monzodiorite (b) from Fenghuangshan pluton, Tongling area

Q—石英;Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Bi—黑云母

Q—quartz;Pl—plagioclase;Kfs—K-feldspar;Bi—biotite

计算采用 ISOPLOT(3.00 版)软件(Ludwig,2003)。

2.2　全岩化学分析

选取较新鲜样品并磨制薄片,在显微镜下对所选岩石样品薄片进行观察,挑选出新鲜的样品。将样品研磨至 200 目以下,用于全岩主、微量元素分析,全岩粉末样制备由廊坊诚信地质服务公司完成。

样品主量元素、稀土元素和微量元素的测试工作在广州澳实矿物实验室完成,主量元素分析采用 X 射线荧光熔片法完成,分析精度分别为:SiO_2:0.8%; Al_2O_3:0.5%; Fe_2O_3:0.4%; MgO:0.4%; CaO:0.6%; Na_2O:0.3%; K_2O:0.4%; MnO:0.7%; TiO_2:0.9%; P_2O_5:0.8%。微量元素分析采用 HF + HNO_3 溶解样品,加入 Rh 内标溶液后转化为 1% HNO_3,用 Peelan6000 型 ICP MS 完成测定,REE 含量相对标准偏差 7%以下,其余微量元素的相对标准偏差低于 10%。

3　分析结果

3.1　锆石 U-Pb 年代学

样品均来自凤凰山岩体,选取了 6 个样品进行锆石 U-Pb 定年测试,其中 FHS02、FHS03、FHS04、FHS06 为花岗岩闪长岩样品,而 FHS08、FHS10 为石英二长闪长岩。测试方法为 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年。测年数据列于表 1。

花岗闪长岩样品(FHS02、FHS03、FHS04、FHS06):这 4 件岩石样品的锆石均呈长柱状,阴极发光图像(CL)上都具有明显的岩浆振荡环带,测点的 Th/U 值均大于 0.30,分别为 0.30~1.11、0.51~0.83、0.54~1.06、0.40~0.98,为典型的岩浆锆石(Corfu,2003;Wu Yuanbao et al.,2004)。各样品的测点投点主体落在谐和线及其附近,除去偏离谐和线较远的测点,其余测点的加权平均年龄分别为 141.0±2.4 Ma、140.7±2.5 Ma、144.7±3.3 Ma、140.6±2.9 Ma,解释为岩体的结晶年龄(表 1,图 4a、4b、4c、4d),在误差范围内基本一致。

石英二长闪长岩样品(FHS08 和 FHS10):这两个样品的锆石呈长柱状,CL 图像上具明显的岩浆振荡环带,测点的 Th/U 值分别为 0.30~0.90、0.50~0.82,为典型的岩浆锆石(Corfu, 2003;Wu Yuanbao et al.,2004)。各样品投点主体落在谐和线及其附近,除去少数偏离谐和线较远的测点,其余测点的加权平均年龄分别为 143.4±2.1 Ma,、142.2±3.5 Ma,代表其结晶年龄(表 1,图 4e、4f)。

3.2　岩石地球化学特征

花岗闪长岩:SiO_2 含量变化较小,为 64.68%~66.76%,全铁含量 TFe_2O_3 为 2.91%~3.40%,MgO 为 0.79%~1.54%,TiO_2 为 0.53% ~0.59%,Na_2O 为 3.77% ~4.55%,K_2O 为 2.73%~4.57%,全碱 K_2O+Na_2O 为 6.98%~8.34%,Na_2O/K_2O 值为 0.82~1.67。Al_2O_3 为 15.76%~16.42%,岩石铝饱和指数 A/CNK 为 0.86~1.07,平均为 0.94,属准铝质—弱过铝质岩石,样品在 K_2O—SiO_2 图解中均落入高钾钙碱性系列区域,以上特征表明该岩石为高钾钙碱性准铝质—弱过铝质花岗岩类(表 2,图 5a,5b)。岩石的稀土总量(∑REE)为 147.6×10^{-6}~175.08×10^{-6},轻、重稀土比值(LREE/HREE)为 10.7~12.8,轻稀土富集而重稀土亏损,轻重稀土元素分馏明显,稀土配分模式呈右倾型,Eu 呈微弱的负异常,δEu 为 0.87~0.96(表 2,图 6a)。微量元素以富集 Rb、Ba、Th、U、K 等相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等为特征(表 2,图 6b)。

石英二长闪长岩:SiO_2 含量相对较低,为 60.6%~62.29%,全铁 TFe_2O_3 含量为 2.86% ~3.43%,MgO 为 0.89%~1.72%,TiO_2 为 0.51% ~0.58%,Na_2O 为 1.64% ~3.79%,K_2O 为 2.43% ~7.18%,全碱 K_2O+Na_2O 为 6.62%~8.82%,Na_2O/K_2O 值为 0.23~1.56。Al_2O_3 含量为 15.48%~17.12%,岩石铝饱和指数 A/CNK 为 0.76~1.05,属准铝质—弱过铝质,样品在 K_2O—SiO_2 图解中均落入高钾钙碱性系列,可见,石英二长闪长岩与花岗闪长岩的岩石地球化学特征类似,也属高钾钙碱性准铝质—弱过铝质岩石(表 2,图 5a, 5b)。岩石的稀土总量(REE)为 108.58×10^{-6} ~ 175.7×10^{-6},轻、重稀土比值(LREE/HREE)为 11.2~14.7,轻稀土富集而重稀土亏损,轻重稀土元素分馏明显,稀土配分模式呈右倾型,Eu 呈微弱的负异常,δEu 为 0.90~0.92(表 2,图 6a)。微量元素以富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、U、K 等和相对亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 等为特征(表 2,图 6b)。

4　讨论

4.1　岩体形成时代及岩石成因类型

凤凰山岩体主要由花岗闪长岩和石英二长闪长岩两种岩石类型组成,两者呈渐变过渡关系。近期,我们对两种类型的岩石进行取样,进行了锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年分析,分析结果表明花岗闪长岩形成年龄为140.6~144.7Ma,石英二长闪长岩年龄

表 1 铜陵凤凰山岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试结果

Table 1 LA-ICM-MS zircon U-Pb isotopic data of Fenghuangshan pluton, Tongling area

测点号	元素含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)				谐和度
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
FHS02-01	12.78	309	452	0.68	0.04586	0.00252	0.14135	0.00809	0.02220	0.00067	134.2	7.2	141.6	4.2	94%
FHS02-02	15.97	413	557	0.74	0.04719	0.00226	0.14469	0.00697	0.02224	0.00069	137.2	6.2	141.8	4.4	96%
FHS02-03	13.41	435	456	0.96	0.04775	0.00246	0.14167	0.00721	0.02187	0.00074	134.5	6.4	139.5	4.7	96%
FHS02-04	6.80	126	252	0.50	0.04863	0.00336	0.14859	0.00984	0.02245	0.00079	140.7	8.7	143.1	5.0	98%
FHS02-05	14.55	372	517	0.72	0.04861	0.00261	0.14693	0.00758	0.02217	0.00072	139.2	6.7	141.4	4.6	98%
FHS02-06	32.70	1188	1066	1.11	0.04647	0.00199	0.14303	0.00644	0.02220	0.00073	135.7	5.7	141.6	4.6	95%
FHS02-07	27.07	317	1063	0.30	0.04698	0.00205	0.14477	0.00644	0.02218	0.00068	137.3	5.7	141.4	4.3	97%
FHS02-09	18.71	528	671	0.79	0.04943	0.00239	0.14841	0.00701	0.02175	0.00068	140.5	6.2	138.7	4.3	98%
FHS02-10	11.07	293	399	0.73	0.04754	0.00271	0.14534	0.00836	0.02219	0.00074	137.8	7.4	141.5	4.6	97%
FHS02-11	16.55	369	569	0.65	0.04956	0.00266	0.16285	0.00903	0.02384	0.00075	153.2	7.9	151.9	4.7	99%
FHS02-12	9.00	170	352	0.48	0.05242	0.00311	0.15585	0.00919	0.02175	0.00069	147.1	8.1	138.7	4.3	94%
FHS02-13	11.76	264	482	0.55	0.04478	0.00286	0.12395	0.00698	0.02085	0.00075	118.6	6.3	133.0	4.8	88%
FHS02-14	15.19	352	569	0.62	0.05013	0.00258	0.14830	0.00749	0.02160	0.00064	140.4	6.6	137.8	4.1	98%
FHS02-15	7.80	176	292	0.60	0.04386	0.00324	0.13404	0.00970	0.02254	0.00076	127.7	8.7	143.7	4.8	88%
FHS03-01	10.98	288	379	0.76	0.05239	0.00270	0.16032	0.00792	0.02227	0.00069	151.0	6.9	142.0	4.4	93%
FHS03-02	9.80	220	365	0.60	0.04675	0.00270	0.14357	0.00839	0.02228	0.00070	136.2	7.5	142.1	4.4	95%
FHS03-03	8.76	232	298	0.78	0.04502	0.00298	0.14515	0.00920	0.02327	0.00074	137.6	8.2	148.3	4.6	92%
FHS03-05	11.46	272	430	0.63	0.05047	0.00269	0.15114	0.00784	0.02169	0.00069	142.9	6.9	138.4	4.3	96%
FHS03-06	14.99	383	553	0.69	0.04615	0.00224	0.13965	0.00683	0.02184	0.00070	132.7	6.1	139.3	4.4	95%
FHS03-07	11.65	268	417	0.64	0.04966	0.00253	0.15632	0.00829	0.02250	0.00072	147.5	7.3	143.5	4.5	97%
FHS03-09	14.60	421	531	0.79	0.05089	0.00253	0.14736	0.00697	0.02119	0.00066	139.6	6.2	135.2	4.2	96%
FHS03-10	12.37	304	439	0.69	0.05455	0.00293	0.16922	0.00941	0.02262	0.00075	158.7	8.2	144.2	4.8	90%
FHS03-11	3.96	87.2	151	0.58	0.06057	0.00503	0.17198	0.01279	0.02161	0.00078	161.1	11.1	137.8	4.9	84%
FHS03-12	14.36	375	506	0.74	0.04603	0.00230	0.14128	0.00692	0.02229	0.00072	134.2	6.2	142.1	4.5	94%
FHS03-13	13.24	386	465	0.83	0.04974	0.00292	0.14756	0.00799	0.02176	0.00070	139.8	7.1	138.8	4.4	99%
FHS03-15	8.68	168	331	0.51	0.04686	0.00254	0.13850	0.00750	0.02158	0.00074	131.7	6.7	137.6	4.7	95%
FHS04-01	8.08	180	331	0.54	0.04784	0.00257	0.14182	0.00811	0.02169	0.00083	134.7	7.2	138.3	5.2	97%
FHS04-03	13.32	374	474	0.79	0.04682	0.00256	0.15364	0.00877	0.02348	0.00081	145.1	7.7	149.6	5.1	96%
FHS04-04	10.93	286	408	0.70	0.04674	0.00249	0.14405	0.00757	0.02248	0.00078	136.6	6.7	143.3	4.9	95%
FHS04-05	11.43	246	426	0.58	0.04618	0.00260	0.14703	0.00839	0.02353	0.00083	139.3	7.4	149.9	5.2	92%
FHS04-06	9.10	330	313	1.06	0.04292	0.00327	0.12752	0.00798	0.02331	0.00085	121.9	7.2	148.5	5.3	80%
FHS04-07	17.51	616	636	0.97	0.04814	0.00232	0.14150	0.00674	0.02167	0.00073	134.4	6.0	138.2	4.6	97%
FHS04-08	15.35	453	553	0.82	0.04720	0.00247	0.14529	0.00760	0.02246	0.00076	137.7	6.7	143.2	4.8	96%

测点号	元素含量(×10⁻⁶)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)				谐和度
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
FHS04-09	13.65	357	502	0.71	0.04860	0.00286	0.15051	0.00865	0.02278	0.00080	142.4	7.6	145.2	5.1	98%
FHS04-10	6.98	164	259	0.63	0.05281	0.00345	0.16206	0.00990	0.02332	0.00087	152.5	8.6	148.6	5.5	97%
FHS06-01	7.50	158	284	0.56	0.04578	0.00230	0.13895	0.00678	0.02206	0.00072	132.1	6.0	140.6	4.5	93%
FHS06-02	7.39	147	291	0.51	0.04907	0.00269	0.14952	0.00841	0.02180	0.00067	141.5	7.4	139.0	4.2	98%
FHS06-03	10.27	311	386	0.81	0.04517	0.00236	0.13226	0.00670	0.02124	0.00065	126.1	6.0	135.5	4.1	92%
FHS06-04	10.14	348	355	0.98	0.05195	0.00268	0.15276	0.00745	0.02159	0.00069	144.3	6.6	137.7	4.3	95%
FHS06-05	10.11	231	387	0.60	0.05214	0.00246	0.15718	0.00778	0.02178	0.00070	148.2	6.8	138.9	4.4	93%
FHS06-06	7.49	174	274	0.64	0.05179	0.00342	0.16374	0.01089	0.02293	0.00076	154.0	9.5	146.2	4.8	94%
FHS06-07	10.78	329	395	0.83	0.04636	0.00231	0.13551	0.00639	0.02174	0.00073	129.0	5.7	138.7	4.6	92%
FHS06-09	6.88	107	265	0.40	0.04370	0.00288	0.13919	0.00853	0.02340	0.00077	132.3	7.6	149.1	4.9	88%
FHS06-10	8.92	159	350	0.45	0.04759	0.00277	0.14400	0.00806	0.02246	0.00072	136.6	7.2	143.2	4.5	95%
FHS08-01	6.04	135	246	0.55	0.05068	0.00250	0.15664	0.00771	0.02300	0.00067	147.8	6.8	146.6	4.2	99%
FHS08-02	14.00	393	566	0.69	0.04885	0.00212	0.14525	0.00634	0.02170	0.00062	146.3	4.9	144.1	4.1	98%
FHS08-03	12.75	318	526	0.61	0.05014	0.00174	0.15502	0.00558	0.02260	0.00064	138.8	5.0	142.2	3.9	97%
FHS08-04	14.91	445	598	0.74	0.05012	0.00214	0.15104	0.00630	0.02200	0.00063	141.8	5.0	147.0	4.2	96%
FHS08-05	5.06	124	191	0.65	0.04931	0.00186	0.15334	0.00603	0.02249	0.00064	160.2	7.6	154.1	4.7	96%
FHS08-06	10.48	228	427	0.53	0.04817	0.00216	0.14650	0.00664	0.02220	0.00065	147.1	5.6	143.7	3.9	97%
FHS08-07	11.06	191	451	0.42	0.04788	0.00181	0.14648	0.00563	0.02230	0.00062	146.9	5.0	142.5	3.9	96%
FHS08-08	14.05	410	588	0.70	0.05009	0.00196	0.15590	0.00635	0.02255	0.00062	137.7	5.6	138.4	3.9	99%
FHS08-09	10.40	317	430	0.74	0.04736	0.00172	0.14992	0.00561	0.02307	0.00066	142.8	5.6	140.3	4.0	98%
FHS08-10	6.55	158	278	0.57	0.05325	0.00291	0.17091	0.00873	0.02419	0.00075	152.3	7.1	142.5	4.0	93%
FHS08-11	67.10	240	2703	0.89	0.05066	0.00187	0.15563	0.00567	0.02235	0.00062	144.9	5.3	143.4	4.0	98%
FHS08-12	39.67	496	1649	0.30	0.04729	0.00210	0.14860	0.00664	0.02276	0.00069	140.7	5.9	145.1	4.4	96%
FHS08-13	74.11	2771	3085	0.90	0.04735	0.00212	0.14270	0.00668	0.02194	0.00064	138.8	5.9	141.6	4.1	98%
FHS08-14	64.64	2078	2698	0.77	0.05288	0.00267	0.16186	0.00811	0.02236	0.00064	135.4	5.9	139.9	4.1	96%
FHS08-15	43.90	1140	1775	0.64	0.04434	0.00247	0.13862	0.00853	0.02260	0.00071	131.8	7.6	144.1	4.5	91%
FHS10-04	4.27	98.3	161	0.61	0.05224	0.00422	0.15227	0.01110	0.02160	0.00075	143.9	9.8	137.8	4.7	95%
FHS10-09	7.41	185	260	0.71	0.05660	0.00384	0.17238	0.01064	0.02217	0.00075	161.5	9.2	141.4	4.7	86%
FHS10-10	4.98	125	173	0.73	0.05472	0.00369	0.16759	0.01068	0.02269	0.00084	157.3	9.3	144.6	5.3	91%
FHS10-11	6.00	155	208	0.75	0.05150	0.00410	0.16300	0.01245	0.02313	0.00079	153.3	10.9	147.4	5.0	96%
FHS10-13	12.40	357	437	0.82	0.05289	0.00255	0.15907	0.00775	0.02170	0.00066	149.9	6.8	138.4	4.1	92%
FHS10-14	5.63	108	217	0.50	0.05447	0.00382	0.16187	0.01071	0.02220	0.00077	152.3	9.4	141.6	4.8	92%
FHS10-20	4.26	94.3	152	0.62	0.05553	0.00446	0.17050	0.01230	0.02302	0.00079	159.9	10.7	146.7	5.0	91%

表 2 安徽铜陵凤凰山岩体主量元素(%)和微量元素($\times10^{-6}$)含量表

Table 2 Contents of Major(%) and trace elements ($\times10^{-6}$) in the Fenghuangshan pluton, Tongling, Anhui

样号	FHS01	FHS02	FHS03	FHS04	FHS05	FHS06	FHS07	FHS08	FHS09	FHS10
SiO_2	65.56	65.56	64.68	66.76	66.22	65.62	64.98	60.60	60.28	62.29
TiO_2	0.59	0.54	0.55	0.53	0.53	0.54	0.53	0.54	0.58	0.51
Al_2O_3	16.42	15.98	16.20	16.18	15.76	15.77	15.77	17.12	15.73	15.48
Fe_2O_3	1.33	1.99	2.53	2.31	2.25	2.45	2.12	2.34	1.55	1.81
FeO	1.42	1.39	2.04	1.32	1.98	1.94	2.07	2.69	1.69	0.95
MnO	0.06	0.06	0.15	0.06	0.06	0.09	0.08	0.11	0.09	0.06
MgO	1.54	0.79	1.41	1.06	1.34	1.40	1.36	1.72	1.07	0.89
CaO	4.75	3.43	4.30	2.22	3.62	3.95	3.62	4.10	6.01	5.30
Na_2O	4.55	4.06	4.17	3.77	3.97	4.01	3.84	3.79	3.21	1.64
K_2O	2.73	3.50	2.81	4.57	3.24	3.33	3.63	2.43	4.10	7.18
P_2O_5	0.26	0.22	0.23	0.24	0.22	0.22	0.23	0.22	0.23	0.21
烧失	0.44	2.05	0.35	0.92	0.62	0.73	1.18	3.94	3.86	2.82
TFe_2O_3	2.91	3.53	4.79	3.78	4.45	4.60	4.42	5.33	3.43	2.86
K_2O+Na_2O	7.28	7.56	6.98	8.34	7.21	7.34	7.47	6.22	7.31	8.82
Na_2O/K_2O	1.67	1.16	1.48	0.82	1.23	1.20	1.06	1.56	0.78	0.23
A/CNK	0.86	0.96	0.91	1.07	0.95	0.91	0.94	1.05	0.76	0.77
La	37.7	28.2	37.5	32.1	34.6	36.3	34.8	20.6	35.5	39.2
Ce	79.6	65.5	68.6	69.3	69.4	73.3	69.7	50.1	81.4	72.2
Pr	8.47	6.86	7.29	6.77	7.49	7.57	7.28	5.57	8.50	7.10
Nd	28.3	23.3	25.1	23.1	25.3	26.1	25.4	20.6	28.9	23.8
Sm	5.49	4.22	4.71	4.50	4.70	4.80	4.82	3.64	5.57	4.43
Eu	1.48	1.23	1.31	1.17	1.32	1.32	1.33	1.17	1.39	0.93
Gd	4.66	3.37	4.13	3.27	3.87	3.92	3.72	2.83	4.36	4.01
Tb	0.64	0.49	0.60	0.51	0.55	0.55	0.57	0.37	0.66	0.57
Dy	3.46	2.47	3.30	2.61	2.92	2.84	2.79	1.73	3.64	3.09
Ho	0.69	0.49	0.69	0.51	0.58	0.56	0.57	0.28	0.71	0.62
Er	1.98	1.39	2.10	1.58	1.74	1.70	1.74	0.77	2.13	1.82
Tm	0.31	0.22	0.33	0.27	0.27	0.26	0.26	0.11	0.35	0.31
Yb	1.98	1.42	2.01	1.66	1.64	1.67	1.66	0.70	2.23	1.99
Lu	0.32	0.22	0.32	0.25	0.27	0.26	0.27	0.11	0.36	0.33
Y	20.8	15.0	21.0	15.7	17.4	17.8	18.4	9.2	23.0	19.9
ΣREE	175.08	139.38	157.99	147.60	154.65	161.15	154.91	108.58	175.70	160.40
LR/HR	11.47	12.84	10.72	12.85	12.06	12.70	12.38	14.74	11.17	11.59
δEu	0.87	0.96	0.89	0.89	0.92	0.90	0.92	1.07	0.83	0.66
La/Yb	19.04	19.86	18.66	19.34	21.10	21.74	20.96	29.43	15.92	19.70
Cs	1.41	3.06	2.10	3.57	1.66	2.26	3.87	5.81	4.97	6.20
Rb	91.5	122.5	108.5	196.0	102.5	117.5	157.0	94.6	168.5	310
Ba	760	870	850	870	830	830	810	650	920	1000
Th	11.40	8.62	9.96	9.29	11.10	9.60	8.47	3.77	10.20	11.80
U	3.4	2.0	2.4	2.6	2.2	2.7	3.6	1.3	4.6	3.7
Ta	1.12	0.96	1.13	0.88	0.95	0.95	0.95	0.68	1.56	1.24
Nb	14.1	12.2	13.3	13.9	12.7	12.9	13.1	10.7	16.7	15.1
Sr	764	636	720	590	732	731	720	557	732	561
Hf	5.0	4.7	4.6	4.8	4.8	5.0	4.8	3.7	5.2	4.9
Zr	188	178	178	190	186	194	194	151	207	190
Y	20.8	15.0	21.0	15.7	17.4	17.8	18.4	9.2	23.0	19.9
Li	13.7	11.7	16.3	13.2	14.2	11.6	12.5	23.5	16.3	21.3
Be	2.35	1.95	2.19	2.04	2.02	1.94	2.09	1.70	2.49	2.31
Pb	10.5	11.8	11.1	13.1	8.7	8.5	8.3	5.5	28.4	29.1
Rb/Sr	0.11	0.18	0.14	0.33	0.14	0.16	0.22	0.16	0.23	0.54
Nb/Ta	11.75	12.20	12.09	12.64	12.70	11.73	13.10	17.83	11.13	10.79
Zr/Hf	37.60	37.87	38.70	39.58	38.75	38.80	40.42	40.81	39.81	38.78

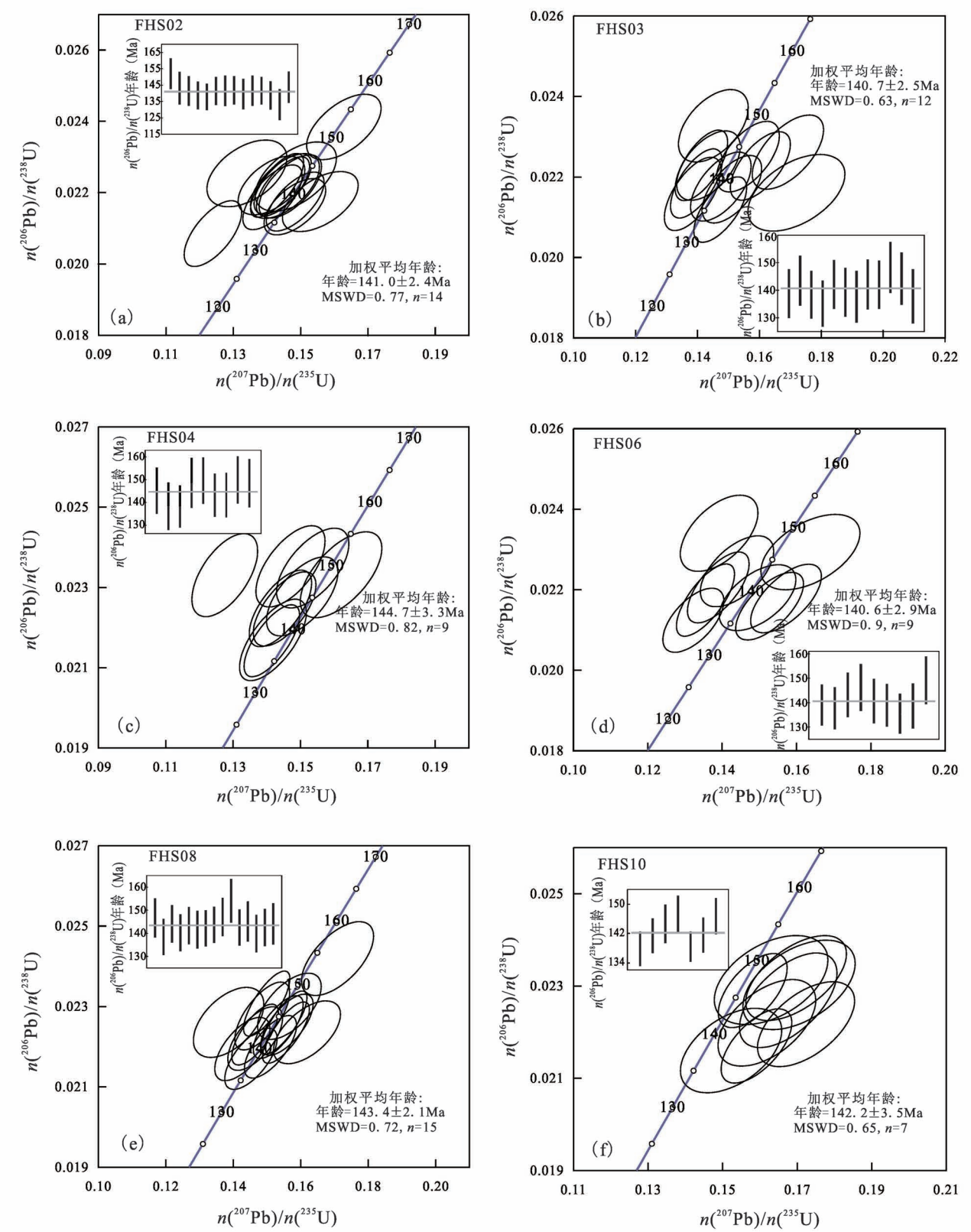


图 4 凤凰山岩体花岗闪长岩和石英二长闪长岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia plot ofthe granodiorite and quartz monzodiorite from Fenghuangshan pluton

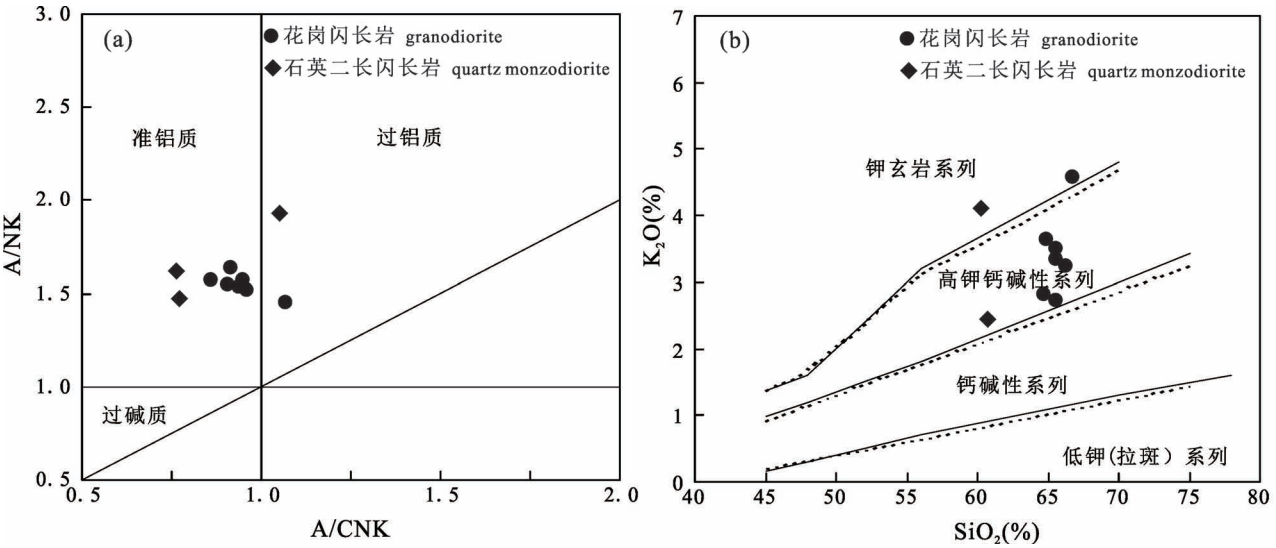


图 5 铜陵凤凰山岩体花岗闪长岩和石英二长闪长岩的 A/CNK—A/NK 图解(a)和 K_2O— SiO_2 图解(b)

(图 a 据 Maniar and Piccoli,1989;图 b 据 Rickwood,1989)

Fig. 5 A/CNK—A/NK diagram(a) and K_2O— SiO_2 plots(b) of the granodiorite and quartz monzodiorite from Fenghuangshan pluton in Tongling area (a, after Maniar and Piccoli, 1989;b, after Rickwood, 1989)

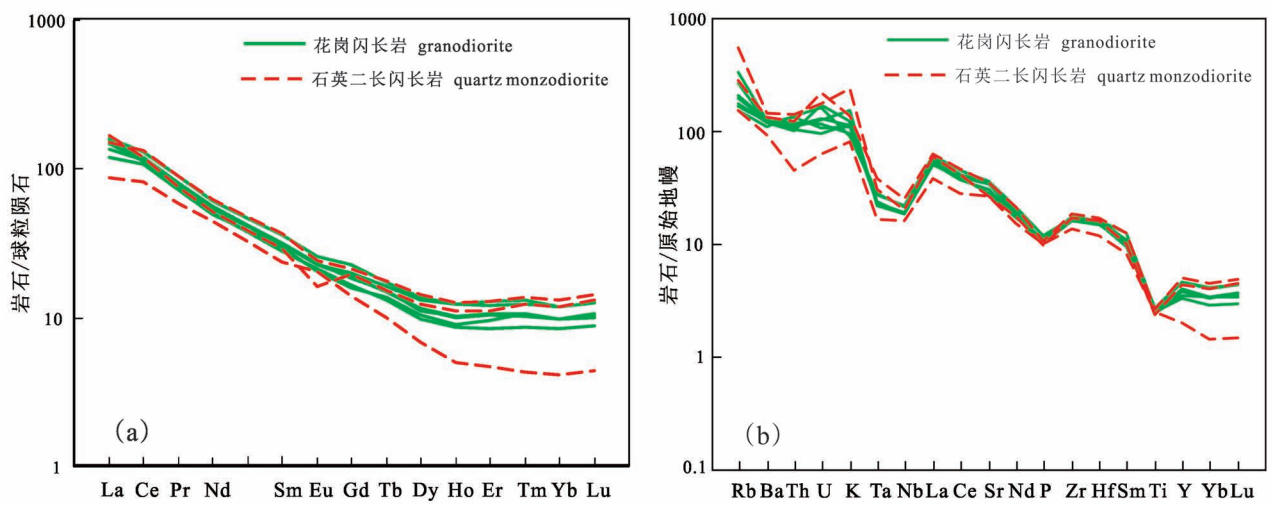


图 6 稀土元素球粒陨石标准化配分模式和微量元素蛛网图(据 Sun and McDonough,1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and trace element spider diagram (after Sun and McDonough, 1989)

为 142.2~143.4 Ma,两者形成年龄在误差范围内基本一致,表明凤凰山岩体侵位时代为 140.6~144.7 Ma,与整个铜陵地区高钾钙碱性系列岩浆活动的时间一致(Wu Cailai et al.,2014,2017)。

目前,中外地质学家已经提出多种花岗岩成因分类方案,比较常用的仍然是 I、S、M、A 型分类。A 型花岗岩中常见碱性暗色矿物,岩石高硅、富碱、富铁、低镁, REE 含量较高,K_2O 含量高 4%~6%(吴锁平等,2007;张旗等,2012;吴才来等,2016)。凤凰山岩体岩石中不含碱性暗色矿物,SiO_2 含量低(60.28%~66.76%),REE 总量(108.6×10^{-6}~175.7×10^{-6})并不高,K_2O 含量较低,暗示该岩体不具 A 型花岗岩特征。在 S 型花岗岩中,常含有石榴子石、白云母、堇青石等富铝矿物,岩石呈过铝质 A/CNK>1.1,且 $K_2O>Na_2O$(Sylvester,1998)。而在 I 型花岗岩,常出现角闪石、磷灰石、榍石等矿物, A/CNK 通

常小于 1.1,$Na_2O>K_2O$。凤凰山岩体岩石中没有出现富铝矿物,而含有角闪石、磷灰石等矿物,铝饱和指数 A/CNK<1.1,$Na_2O>K_2O$,具有 I 型花岗岩的岩石学和地球化学特征,属高钾钙碱性系列侵入岩。可见,凤凰山岩体花岗闪长岩和石英二长闪长岩均为 I 型花岗岩类。

4.2　岩体成因及构造环境

凤凰山岩体岩石中 Nb、Ta 的亏损,显示陆壳属性(Thompson et al.,1984),反映其成岩物质部分来自壳源。然而,岩石中 Sr 的含量较高,为 557×10^{-6} ~764×10^{-6},大于 400×10^{-6},属高 Sr 花岗岩,明显高于陆壳岩石(约 300×10^{-6}),Rb/Sr 值平均为 0.24,高于陆壳比值(0.15),暗示形成岩体的岩浆又含有幔源物质。但 Sm/Nd 值(0.18~0.19)与陆壳(0.17~0.25)相近(Rudnick and Gao,2003),Nb/Ta 值为 10.8~17.8,平均 12.6,低于幔源岩石的 Nb/Ta 值(约为 17.5 ±2),略高于陆壳(约 11)(Taylor and Mclennan,1985),上述岩石地球化学特征表明,凤凰山岩体的源岩既有壳源成分,又有幔混成分,可能是壳幔混合源。从岩石的主量元素来看,CaO/Na_2O 值主要受控于源岩,比值介于 0.3~1.5 的来源于变杂砂岩或火成岩熔融(Jung and Pfänder,2007),凤凰山岩体 CaO/Na_2O 为 0.6~3.2,平均为 1.25,反映岩浆可能来自变杂砂岩或火成岩的部分熔融。A/MF—C/MF 源岩判别图解(图 7a)暗示其源岩可能主要为基性岩石,其次为变杂砂岩,结合其地球化学

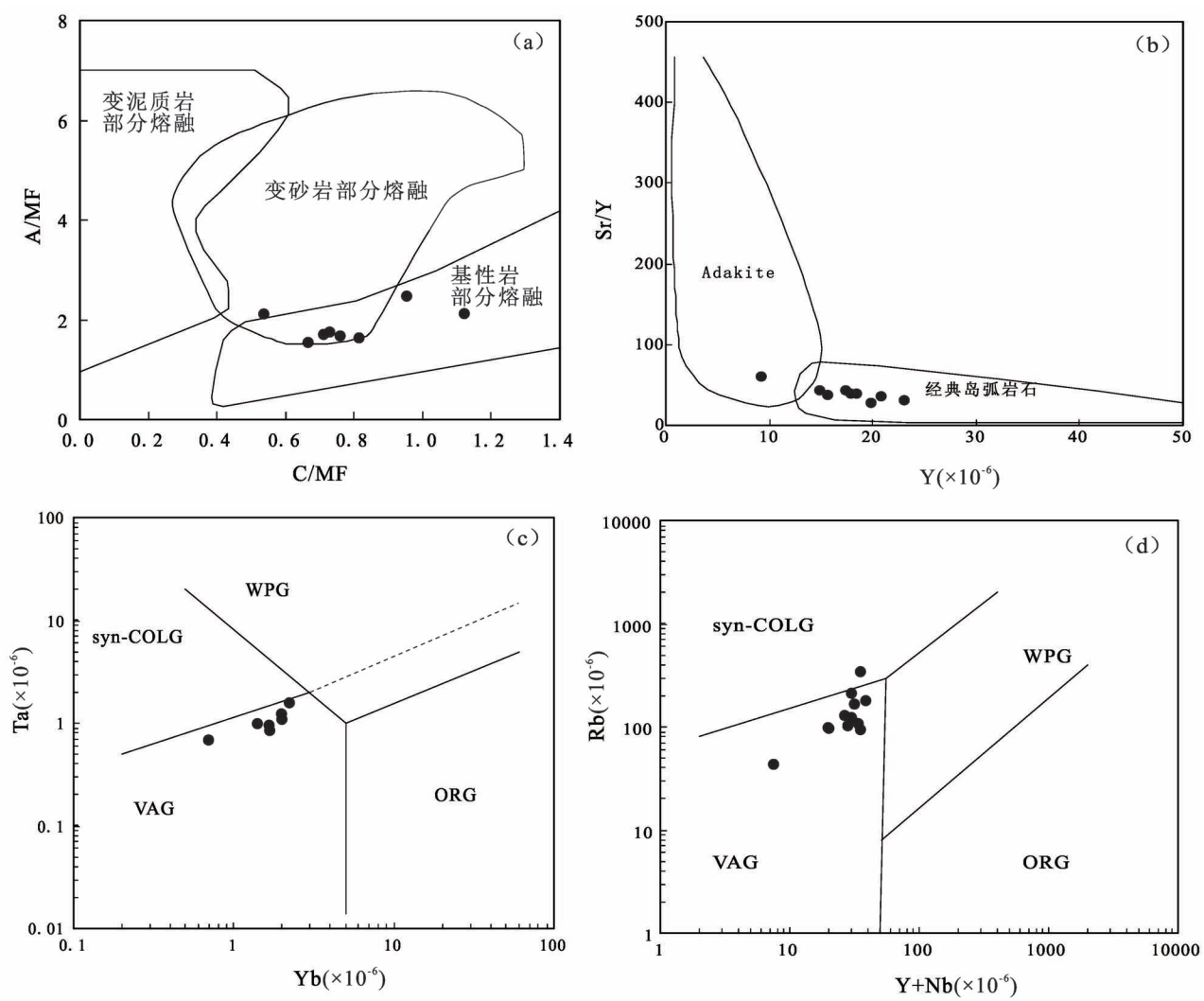


图 7 C/MF—A/MF 源岩判别图解和构造环境判别图解(图 a 据 Altherr et al.,2000;图 b 据 Defant and Drummond,1990;图 c、d 据 Pearce et al.,1984)

Fig. 7 Geochemical diagrams of C/MF—A/MF and tectonic discrimination diagrams(a, after Altherr et al., 2000; b, after Defant and Drummond, 1990; c、d, after Pearce et al.,1984)

特征,我们认为岩体形成过程中有幔源岩浆的加入。另外,岩体中常见闪长质暗色微粒包体,也佐证了幔源岩浆参与成岩作用。研究表明,源区以石榴子石为主要残留相时,来源该源区的岩浆岩具向右倾斜的 HREE 配分模式,Y/Yb 明显大于 10;而以角闪石为主要残留相时,岩浆岩则具较平坦的 HREE 配分模式,Y/Yb 接近 10(Sisson,1994),本文所测样品 Y/Yb 值为 9.5~13.1,平均值为 10.7,比较接近 10,因此,我们认为形成凤凰岩体的岩浆源区残留相可能以角闪石为主,岩石中 Eu 呈微弱的负异常也反应了源区可能含有很少量或无斜长石的残留。

凤凰山岩体富集 Rb、Ba、Th、U、K 等大离子亲石元素,而亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素,显示陆壳或弧岩浆的特征(Thompson et al.,1984);在 Sr/Y—Y 图解中,各样品投点落入经典的岛弧岩石区(图 7b);在 Pearce 构造环境判别图解中,各样品主要落入火山弧区域(图 7c、d),表现出类似弧型花岗岩的特征。但花岗岩成分主要受控于源岩成分,并受多种因素的影响,因此不能将花岗岩化学成分简单地与构造环境相对应,而需要结合岩体产出的区域地质构造特征,综合分析花岗岩形成的构造环境问题。众所周知,铜陵地区处下扬子板块的北缘,既不在太平洋板块俯冲的区域内,也不在华南板块内部,而处在扬子板块的北部边缘(常印佛等,1991)。因此,从大地构造位置来看,凤凰山岩体离太平洋俯冲带较远,并非产于岛弧环境。铜陵地区侵入岩可分为橄榄安粗岩系列和高钾钙碱性系列(吴才来等,2013),前人根据岩石学、地球化学及同位素方面的研究,认为铜陵地区的高钾钙碱性岩起源于富集地幔(Müller and Groves,1993;Li Jianwei et al.,2009)。另一方面,铜陵地区侵入岩中含有大量老的继承锆石,反映源于古老地壳(王彦斌等,2004;Wu Cailai et al.,2014)。Wu Cailai 等(2017)认为区内的高钾钙碱性侵入体,是起源于富集地幔的原始岩浆结晶后的残余岩浆与古老地壳熔融形成的长英质岩浆发生混合而形成,可能是中生代古太平洋板块斜向俯冲,形成郯城—庐江左行走滑断裂,而岩石圈的折沉作用导致富集地幔部分熔融形成富碱的玄武质岩浆,岩浆上升到莫霍面附近形成深位岩浆房,岩浆发生分异结晶作用,形成尖晶石辉石堆积岩和角闪堆积岩沉淀,同时,深位岩浆房本身的热量和结晶潜热使得中上地壳低熔点成分发生部分熔融,形成长英质浅位岩浆房,来自深位岩浆房分异的岩浆上升到浅位岩浆房,发生岩浆混合,形成高钾钙碱性系列石英二长闪长岩和花岗闪长岩(Wu Cailai et al.,2014,2017)。铜陵地区的高钾钙碱性岩浆活动从 152 Ma 持续到 138 Ma(Wu Cailai et al.,2014,2017),而凤凰山岩体地球化学特征显示为高钾钙碱性系列,形成时代为 140.6~144.7 Ma,与区内高钾钙碱性岩浆活动一致,其地球化学特征显示为壳幔混源,可能为古老地壳熔融形成的长英质岩浆与起源于富集地幔的岩浆发生混合而形成。

5 结论

(1)铜陵凤凰山岩体主要由花岗闪长岩和石英二长闪长岩组成,两者形成时代基本一致,锆石 U-Pb 年龄分别为 140.6~144.7 Ma 和 142.2~143.4 Ma,表明岩体侵位时代为 140.6~144.7 Ma,与铜陵地区整个高钾钙碱性系列侵入岩侵位时代一致。

(2)花岗闪长岩和石英二长闪长岩中含有角闪石、磷灰石等矿物,两者地球化学特征比较相似,铝饱和指数 A/CNK<1.1,具 I 型花岗岩特征。轻稀土富集而重稀土亏损,富集 Rb、Ba、Th、U、K 等元素,相对亏损 Nb、Ta、P、Ti 等元素,岩体中含有暗色闪长质微粒包体,岩体可能为古老地壳熔融形成的长英质岩浆与起源于富集地幔的深部岩浆发生混合而形成。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带.北京:地质出版社.

瞿泓滢, 裴荣富, 李进文, 王永磊. 2010. 安徽铜陵凤凰山石英二长闪长岩和花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 吉林大学学报(地), 40(3):581~590.

王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 杨竹森, 蒙世峰, 田世洪. 2004. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的 U-Pb 年龄及其成因指示. 岩石矿物学杂志, 23(4):298~304.

吴才来, 高前明, 国和平, 郭祥焱, 刘良根, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏. 2010. 铜陵中酸性侵入岩成因及锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报, 26(9):2630~2652.

吴才来, 董树文, 郭祥焱. 2013. 中国铜陵中酸性侵入岩. 北京:地质出版社.

吴才来, 董树文, 王陆太, 王次松, 雷敏, 吴迪. 2016. 铜陵矿集区舒家店矿区深部发现 126 Ma 的正长花岗岩:来自 3000 m 科学钻探的证据. 中国地质, 43(5): 1495~1513.

吴锁平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及其述评. 岩石矿物学杂志, 26(1):57~66.

张达, 吴淦国, 狄永军, 臧文栓, 邵拥军, 余心起, 张祥信, 汪群峰. 2006. 铜陵凤凰山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约. 地球科学, 31(6):823~829.

张旗, 冉皞, 李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么? 岩石矿物学

杂志, 31(4): 621~626.

Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C, Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-Type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). Lithos, 50(1~3):51~73.

Chang Yinfu, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. 1991#. The Iron—Copper Ore Forming Belt of Middle—Lower Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House.

Corfu F. 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1):469~500.

Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347 (6294):662~665.

Jung S, Pfänder J A. 2007. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids: constraints from CaO/Na_2O, Al_2O_3/TiO_2 and accessory mineral saturation thermometry. European Journal of Mineralogy, 19(6):859~870.

Li Jianwei, Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Ma Changqian, Souza Z S, Vasconcelos P. 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U - Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications. Contributions to Mineralogy and Petrology, 157(3): 383~409.

Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 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 from mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(1~2):537~571.

Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley

Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101(5): 635~643.

Müller D and Groves D. 1993. Direct and indirect associations between potassic igneous rocks, shoshonites and gold - copper deposits. Ore Geology Reviews, 8(5):383~406.

Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25(4):956~983.

Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22(4):247~263.

Qu Hongying, Pei Rongfu, Li Jinwen, Wang Yonglei. 2010&. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Fenghuangshan quartz monzodiorite and granodiorite in Tongling area, Anhui province and its geological implication. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 40 (3): 581~590.

Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the Continental Crust. Treatise on Geochemistry, 1~64.

Sisson T W. 1994. Hornblende—melt trace-element partitioning measured by ion microprobe. Chemical Geology, 117(1~4):331~344.

Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. Lithos, 45(1~4):29~44.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J. eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London, Special Publication, 42(1): 313~345.

Thompson R N, Morrison M A, Hendry G L, Parry S J, Simpson P R, Hutchison R. 1984. An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach [and discussion]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 310(1514):549~590.

Taylor S R, Mclennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publication.

Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, Yang Zhusen, Meng Yifeng, Tian Shihong. 2004&. SHRIMP U-Pb geochronology of Xiaotongguanshan quartz-dioritic intrusions in Tongling district and its petrogenetic implications: Acta Petrologica Et Mineralogica, 23 (4): 298~304.

Wu Cailai, Gao Qianming, Guo Heping, Guo Xiangyan, Liu lianggen, Gao Yuanhong, Lei Ming, Qin Haipeng. 2010&. Petrogenesis of the intermediate—acid intrusive rocks and zircon SHRIMP dating in Tongling, Anhui, China: Acta Petrologica Sinica, 26(9): 2630~2652.

Wu Cailai, Dong Shuwen, Guo Xiangyan. 2013#. Intermediate—Acid intrusive Rocks from Tongling, China. Bejing: Geological Publishing House.

Wu Cailai, Dong Shuwen, Wang Lutai. 2016&. The discovery of the syenogranite with an age of 126 Ma in the depth of Tongling: evidence from 3000 meters scientific drilling. Geology in China, 43 (5): 1495~1513.

Wu Cailai, Dong Shuwen, Robinson P T, Frost B R, Gao Yuanhong, Lei Ming, Chen Qilong, Qin Haipeng. 2014. Petrogenesis of high-K, calc-alkaline and shoshonitic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province (eastern China), and their tectonic implications. Geological Society of America Bulletin, 126(1~2):78~102.

Wu Cailai, Dong Shuwen. Wu Di, Zhang Xin, Ernst W G. 2017. Late Mesozoic high-K calc-alkaline magmatism in Southeast China: the Tongling example. International Geology Review, (1):1~35.

Wu Suoping, Wang Meiying, Qi Kaijing. 2007&. Present situation of researches on A-type granites: a review. Acta Petrologica et Mineralogica, 26(1):57~66.

Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(15): 1554~1569.

Zhang Da, Wu Ganguo, Di Yongjun, Zang Wenshuan, Shao Yongjun, Yu Xinqi, Zhang Xiangxin, Wang Qunfeng. 2006&. Emplacement dynamics of Fenghuangshan pluton (Tongling, Anhui Province): constraints from U-Pb SHRIMP dating of zircons and structural deformation. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 31(6): 823~829.

Zhang Qi, Ran Hao, Li Chendong. 2012&. A-type granite: what is the essence? Acta Petrologica et Mineralogica, 31(4): 621~626.

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages and Geochemical Characteristics of the Fenghuangshan Pluton in Tongling, Anhui

WANG Cisong [1)], WU Cailai[2)], ZHENG Kun[2)], WU Di[3)], SHAN Shifeng[1)], LI Xiang[1)], GU Quande[1)]

1) *The* 321 *Geology Party*, *Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province*, *Tongling*, *Anhui*, 244033;

2) *Key Laboratory of Deep-Earth Dyamics of MNR*, *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing*, 100037;

3) *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing*, 100081

Objectives: Tongling area of Anhui province is a famous copper—gold polymetallic ore concentration area in the middle and lower reaches of Yangtze River of eastern China. The intermediate—acid intrusions related to large-scale mineralization are widely exposed in the area. Fenghuangshan pluton is the largest one with 10 km^2 exposed area in all intermediate—acid plutons from Tongling. Some copper, gold and molybdenum deposits are distributed around the body. Thus, it is of great significance to study petrology, zircon U-Pb chronology and geochemistry of the pluton. This paper is aimed to discuss the petrogenesis and tectonic implications of the Fenghuangshan pluton.

Methods: Based on the field work, through the microscope observation, the whole rock chemical analysis and zircon U-Pb LA- ICP-MS dating of the pluton, we determine the emplacement time and geochemical affinity of the pluton.

Results: Petrologically, the Fenghuangshan pluton is mainly composed of granodiorite and quartz monzodiorite. The zircon U-Pb LA-ICP-MS dating yielded ages of 140.6 ~ 144.7 Ma for the granodiorite, and 142.2 ~ 143.3Ma for the quartz monzodiorite, indicating that the emplacement time of the pluton is from 144.7 Ma to 140.6 Ma. Mineralogically, both kinds of rocks in the pluton are mainly composed of plagioclase, quartz, alkaline feldspar, amphibole and biotite with different contents, and the common accessory minerals are apatite, zircon. In addition, the pluton contains a large amount of microgranular diorite enclaves, showing a magma mixing. Geochemically, the rocks show significant features of I-type granite with aluminum saturation index (A/CNK < 1.1), and $Na_2O > K_2O$. It is also enriched in light rare earth elements (LREE) and large ion lithophile elements (LILE) (such as Rb, Ba, Th, U, K), depleted in heavy rare earth element (HREE) and part of high field strength elements (HFSE) (such as Nb, Ta, P, Ti), and has LREE differentiation to be obvious but HREE, with slightly negative Eu anomaly in REE patterns.

Conclusions: The Fenghuangshan pluton was emplaced at 140.6 ~ 144.7 Ma. Geochemical characteristics indicate that its source rock may be the mixed source of crust and mantle. The pluton may have been formed by the mixing of acidic magma from the partial melting of the ancient crust and alkali-rich basaltic magma from the enriched mantle.

Keywords: zircon U-Pb geochronology; petrochemistry; petrogenesis; tectonic implication; Fenghuangshan pluton; Tongling

Acknowledgements: This study was supported by the Natual Science Foundation of China (No. 41472063)

First author: WANG Cisong, male, Senior Engineer, mainly working on petrology and ore deposits. Email: wcisong@126.com

Corresponding author: WU Cailai, male, professor, mainly working on the scientific research of igneous rocks. Email: wucailai@126.com

Manuscript received on: 2018-07-13; Accepted on: 2018-08-20; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.015