

雷敏, 吴才来, 秦海鹏, 等. 安徽铜陵地区虎山岩体矿物成分特征及其锆石 U-Pb 年代学[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1274-1292.
Lei Min, Wu Cailai, Qin Haipeng, et al. Mineral composition and zircon U-Pb dating of the Hushan intrusion in Tongling area, Anhui Province[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1274-1292(in Chinese with English abstract).

安徽铜陵地区虎山岩体矿物成分特征 及其锆石 U-Pb 年代学

雷 敏 吴才来 秦海鹏 王 楠 张 昕 陈红杰

(大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 铜陵地区虎山岩体主要由石英二长闪长岩和花岗闪长斑岩组成, 属高钾钙碱性系列中酸性侵入岩。本文对虎山岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 结果表明, 虎山石英二长闪长岩和花岗闪长斑岩侵入时代分别为 (143.2 ± 1.2) Ma 和 (145.3 ± 1.2) Ma, 属晚侏罗—早白垩世, 与中国东部 J-K 岩浆事件相呼应, 并且, 虎山岩体存在两次岩浆侵入活动, 早期形成的花岗闪长斑岩的年龄为 (145.3 ± 1.2) Ma, 与铜陵矿集区瑶山花岗闪长斑岩的年龄 (146.0 ± 0.9) Ma 在误差范围内一致, 晚期形成的石英二长闪长岩为 (143.2 ± 1.2) Ma, 与区内的铜官山和天鹅抱蛋山岩体的年龄 (142 ± 1) Ma 和 (141.7 ± 1) Ma 一致。岩石地球化学及矿物温压计计算结果表明, 岩浆结晶的温度为 $768 \sim 838^\circ\text{C}$, 压力为 $3.44 \times 10^8 \sim 5.42 \times 10^8$ Pa, 虎山岩体属幔源岩浆和壳源岩浆混合成因, 且混合作用发生在 11~18 km 的浅位岩浆房。

关键词: 花岗岩类; 矿物学; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 温压计; 铜陵; 虎山岩体

中图分类号: P588.12; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015)05-1274-19

Mineral composition and zircon U-Pb dating of the Hushan intrusion in Tongling area, Anhui Province

LEI Min, WU Cai-lai, QIN Hai-peng, WANG Nan, ZHANG Xin, CHEN Hong-jie

(State key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences,
Beijing 100037, China)

Abstract: Mesozoic intermediate-acid intrusive rocks in Hushan intrusion of Tongling area belong to the high potassium (K) calc-alkaline series, with main rock types being quartz monzodiorite and granodiorite porphyry. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Hushan intrusion shows that the emplacement age of quartz monzodiorite and granodiorite porphyry are (143.2 ± 1.2) Ma and (145.3 ± 1.2) Ma respectively, belonging to Late Jurassic-Early Cretaceous. These data are consistent with eastern China's J-K magmatic event. In addition, Hushan body has experienced two times of magma intrusion activities. The age of early granodiorite porphyry

收稿日期: 2015-06-29; 改回日期: 2015-07-07

基金项目: 国家专项(SinoProbe-05-05), 公益性行业科研专项课题(201211095-4)和国家自然科学基金项目(40921001、41302266)以及中国地质调查局项目(1212011120160、1212010918007)共同资助。

作者简介: 雷敏, 女, 1980年生, 博士, 助理研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: leiminlm@126.com。

通讯作者: 吴才来, 男, 1960年生, 博士, 研究员, 岩石学专业; E-mail: wucailai@126.com。

(145.3±1.2)Ma is consistent with the age of Yaoshan granodiorite porphyry (146.0±0.9) Ma in the Tongling ore district, and the age of late quartz monzodiorite (143.2±1.2)Ma is consistent with that of Tongguanshan and Tianebaodanshan (142±1)Ma,(141.7±1)Ma). From the study of geochemistry and plagioclase-hornblende thermobarometry, the authors conclude that the magma crystallization temperature and the corresponding pressure varied in the range of 768~838°C and $3.44 \times 10^8 \sim 5.42 \times 10^8$ Pa, respectively. Hushan intrusion was derived from the mixture of the mantle magma and crustal magma, with their corresponding depths being 11~18 km.

Key words: granitoids; mineralogy; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; thermobarometry; Tongling; Hushan intrusion

About the first author: LEI Min, female, born in 1980, doctor and assistant researcher, engages in research on mineralogy, petrology and mineral deposit geology; E-mail: leiminlm@126.com.

About the corresponding author: WU Cai-lai, male, born in 1960, doctor and senior researcher, engages in research on petrology; E-mail: wucailai@126.com.

安徽铜陵矿集区位于长江中下游铁铜等金属成矿带的中部,是我国重要的有色金属基地之一。区内从西到东分布有铜官山矿田、狮子山矿田、新桥矿田、凤凰山矿田和沙滩脚矿田^[1-5]。研究表明,各矿田内各矿床的形成都与中酸性侵入岩密切相关^[6-19]。铜官山矿田位于铜陵市附近,以发育典型的矽卡岩型铜矿床而著称。矿田内主要有天马山金(硫)、铜官山铜(硫)和金口岭铜(金)等矿床。各矿床产出的层位和矿化特点虽不尽相同,但也有许多相似之处,均为层控矽卡岩型^[1],且都与矿田内的中酸性侵入岩密切相关。矿田内主要侵入岩体为铜官山和天鹅抱蛋石英二长闪长岩、虎山花岗闪长斑岩、金口岭和谢家垅花岗闪长岩(图1)。前人对这些岩体开展过较多的岩石学、地球化学、同位素地球化学、锆石U-Pb年代学等研究^[4, 9, 16-17, 20-21],但对虎山岩体的研究较少。至今,虎山岩体的年龄是多少?与矿田内或与铜陵矿集区内其他岩体有何异同?其成因如何?这些问题都不清楚。因此,本文选择铜官山矿田中的虎山岩体开展LA-ICP-MS锆石U-Pb定年、矿物化学和地球化学研究,对上述问题进行讨论。

1 区域地质背景及岩体地质特征

铜陵地区大地构造位置处于扬子板块东北缘下扬子地块的中部(图1)。本地区曾经历过活动—稳定—再活动的构造演变。前南华纪形成基底,南华纪—早三叠世为下扬子海的一部分,处于相对稳定时期,形成海相、滨海—浅海相、海陆交替相的碳酸盐岩—碎屑岩、硅质岩巨厚层沉积盖层,为铜、金、硫等矿化提供了有利的围岩;晚三叠世转入抬升、褶皱阶段,直至中侏罗世,经历了构造挤压—剪切作

用。晚侏罗世—早白垩世,在扬子地块边缘发生陆内断块拉张剪切的环境下,导致了强烈的岩浆活动及其成矿作用。区内主要发育中生代中酸性侵入岩,岩体属中—浅成相,呈北东、北西、南北向分布的小岩株、岩枝和岩墙,总体上构成了东西向铜陵—戴家汇构造—岩浆—成矿带^[7],显示出东西向基底构造及北东向盖层构造的格局^[4]。铜官山矿田位于东西向铜陵—戴家汇构造—岩浆—成矿带的西端,矿田内的铜官山背斜为一北东向“S”型短轴背斜,核部为志留系及泥盆系上统,两翼为石炭系、二叠系及三叠系。背斜枢纽起伏,扭曲如麻花状。依轴面及枢纽产状,背斜可划分为北、中、南三段。北段轴面倾向东南,南段轴面倾向北西,中段两翼正常,轴面近直立。与该背斜伴生的一系列北东向、北北东向、北西向和北北西向断层,具有多期活动的特征,对矿化有明显的控制作用。大部分矿体主要赋存于中石炭统黄龙组底部白云岩与上泥盆统砂页岩过渡带、黄龙组与上石炭统船山组界面以及船山组和下二叠统栖霞组灰岩界面附近,少部分产于上二叠统大隆组或下三叠统殷坑组灰岩与岩体接触带。

虎山岩体位于铜陵市北约1.5 km,铜官山背斜北东倾伏端近轴部,呈不规则椭圆形,为北东—南西向延长的小岩株,面积约0.35 km²,接触面倾向北东(图1)。围岩为二叠系栖霞组、孤峰组灰岩、硅质页岩。岩性主要为花岗闪长斑岩,暗灰色,斑状结构,斑晶为斜长石,呈近长方形状,颗粒大小不均,为2~10 mm不等,方形—长方形,颗粒大小不一,含量变化较大,基质具微粒—显微晶质的长英质矿物集合体。矿物以斜长石为主,其次为石英、碱性长石,少量的黑云母和副矿物及金属矿物。岩体具矽卡岩化、透辉石化、绿泥石化、绿帘石化,在岩体东北部

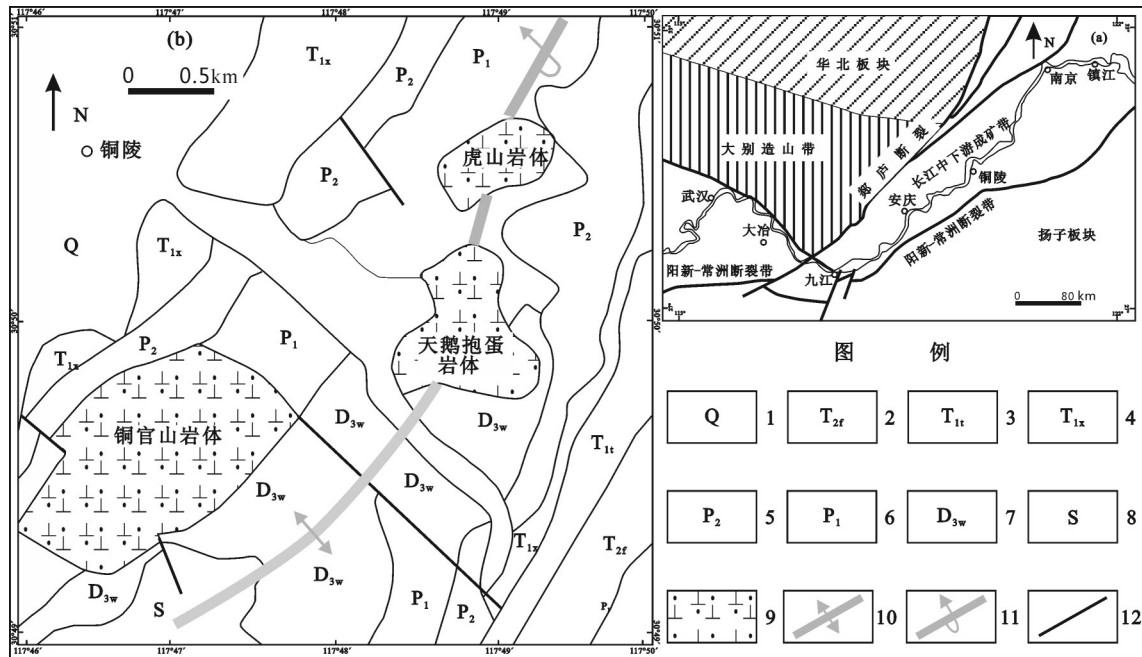


图1 安徽铜陵虎山岩体地质简图^[21]

1—第四系;2—分水岭组;3—塔山组;4—小凉亭组;5—大隆及龙潭组;6—孤峰及栖霞组;7—五通组;8—志留系;9—石英二长闪长岩;
10—背斜;11—倒转背斜;12—断层

Fig.1 Geological sketch map of Hushan intrusion in Tongling, Anhui^[21]

1—Quaternary;2—Fenshuiling Formation;3—Tashan Formation;4—Xiaoliangting Formation;5—Dalong and Longtan Formation;6—Gufeng and Xixia Formation;7—Wutong Formation;8—Silurian;9—Quartz monzodiorite;10—Anticline;11—Overturned anticline;12—Fault

边缘和南端发育砂卡岩,并有小型铁矿。

2 样品岩相学及地球化学特征

2.1 岩相学特征

在虎山岩体采集两个定年样品,样品号及取样位置分别为10CL523-3(坐标: N30°50.829', E117°49.975', H66m)和10CL523-6(坐标: N30°50.829', E117°49.975', H66m)。各样品特征如下:

样品10CL523-3:石英二长闪长岩,呈浅灰色,半自形粒状不等粒结构(图2-a),块状构造,主要矿物含量为斜长石(55%~65%)、角闪石(8%~10%)、钾长石(10%~12%)、石英(12%~15%)、黑云母(4%~6%),少量副矿物及金属矿物(1%~2%)。斜长石为板状,一般为1.2~2.4 mm,环带构造和聚片双晶发育;部分斜长石中含有针状的磷灰石包裹体,碱性长石周围可见一圈斜长石的反应边,可能反映了岩浆混合作用^[22]。角闪石呈柱状,黑云母呈片状,部分被绿泥石交代;钾长石和石英均为他形粒状,充填于斜长石颗粒之间,钾长石粒度为0.5~1.0 mm,石

英为0.5 mm,副矿物为磷灰石、榍石;金属矿物为磁铁矿、黄铁矿,偶见黄铜矿。

样品10CL523-6:花岗闪长斑岩,暗灰色,斑状结构,斑晶为斜长石,方形—长方形,颗粒大小不一,一般为5~10 mm不等,含量变化较大,基质为微粒—显微晶质的长英质矿物集合体(图2-b)。主要矿物含量为斜长石(35%~50%)、钾长石(15%~20%)、石英(15%~20%)、黑云母(2%~5%),含少量副矿物及金属矿物,为磷灰石、磁铁矿和钛铁矿。呈基质的矿物粒度为0.05~0.1 mm。斜长石斑晶发育绢云母化,部分黑云母被绿泥石交代。除石英外,其余矿物均发生了蚀变,主要为透辉石化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸岩化等。

2.2 定年样品地球化学特征

虎山岩体石英二长闪长岩(10CL523-3)化学分析结果可见: SiO₂ 含量为60.96%,全碱含量为7.36,里特曼指数(s)为2.91, A/CNK=0.85,属准铝质钙碱性系列岩石。在Pecerillo(1976)的SiO₂-K₂O图解上投点(图3),落入高钾钙碱性系列区域^[4,15,23]。该

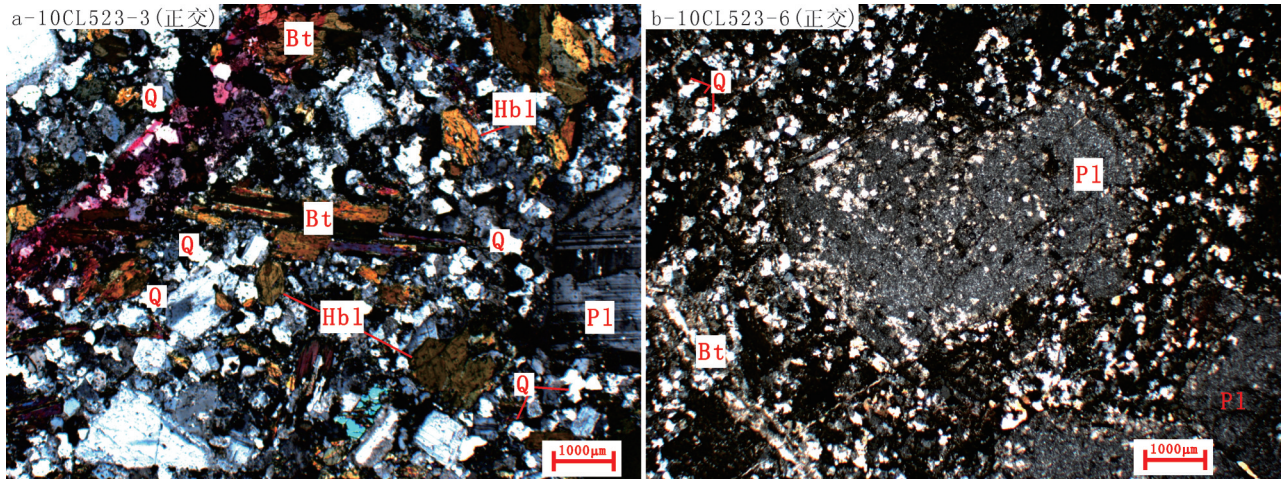


图2 虎山岩体石英二长闪长岩和花岗闪长斑岩显微照片

Q—石英;Pl—斜长石;Bt—黑云母;Hbl—角闪石

Fig.2 Photographs of microtexture of quartz monzodiorite and granodiorite porphyry from Hushan intrusion

Q—Quartz;Pl—Plagioclase;Bt—Biotite;Hbl—Hornblende

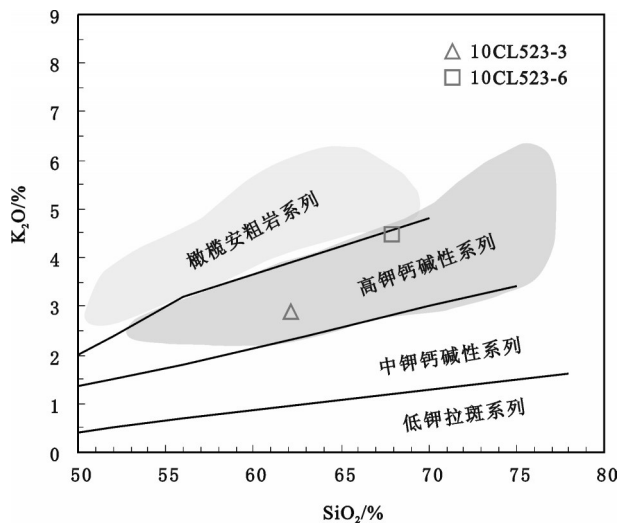


图3 K₂O—SiO₂图解^[25]

图中范围根据参考文献^[4,15,23]

Fig.3 Diagram of K₂O—SiO₂^[25]

The range in the figure is based on the data from references^[4,15,23]

样品稀土元素总量为 124.08×10^{-6} , 轻重稀土元素比值为 7.24, 球粒陨石标准化配分曲线(图 4-a)显示, 轻、重稀土分异不明显, $(La/Sm)_N$ 、 $(La/Yb)_N$ 比值分别为 2.46、5.03; $(Gd/Yb)_N$ 比值为 2.00, 表明重稀土分馏不明显。无明显的正负铕异常($Eu^*=0.93$); 从微量元素蛛网图上看(图 4-b), 岩石富集大离子亲石元

素, 亏损高场强元素, 其中 Sr 的含量为 761×10^{-6} , Sr/Y 比值 35.90, 属高锶花岗岩类^[24]。Nb、Ta 明显负异常, 显示岛弧火山岩的特征。

虎山岩体花岗闪长斑岩(10CL523-6)的化学分析结果具有较高的烧失量, 说明岩体蚀变强烈, 与镜下观察结果吻合。岩石的 SiO₂ 含量较高, 为 62.44%, 全碱含量为 6.96%, 在 TAS 图中落入花岗闪长岩区域, 里特曼指数小于 4(0.92)。在 Pecerrillo (1976) 的 SiO₂-K₂O 图解上(图 3), 该样品投点也落入高钾钙碱性系列区域^[10,15,23], 样品的 A/CNK=0.96, 为准铝质钙碱性系列岩石(表 1)。该样品稀土元素总量为 230.99×10^{-6} , 轻重稀土元素比值为 19.14。球粒陨石标准化配分曲线(图 4-a)显示, 轻、重稀土分异比较明显, $(La/Sm)_N$ 、 $(La/Yb)_N$ 比值分别为 5.03、25.19, 指示轻稀土分馏较强; $(Gd/Yb)_N$ 比值为 2.43, 表明重稀土分馏不明显。Eu* 为 0.54, 具有明显的负异常, 可能是斜长石分离结晶引起的。从样品的微量元素蛛网图(图 4-b)上看, 该样品富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 相对亏损高场强元素, Sr 含量为 96.70×10^{-6} , Sr 和 Ti 明显负异常, 指示了斜长石、磷灰石、钛铁矿的分离结晶作用。与 10CL523-3 类似, Nb、Ta 具有明显负异常, 显示岛弧火山岩的特征。

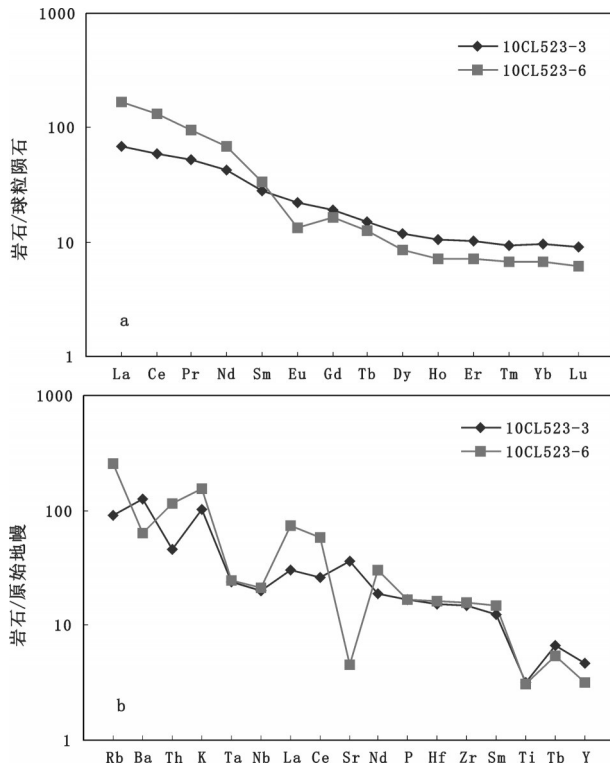


图4 虎山岩体球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)^[26]和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)^[27]

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a)^[26] and primitive mantle-normalized trace element spidergram (b)^[27] of Hushan intrusion

3 分析方法

3.1 全岩化学分析

定年岩石样品的破碎和化学全分析(表1)分别在河北廊坊区调院和河北廊坊物化探研究所(实验室)完成,氧化物用X荧光光谱仪3080E测试,执行标准分别为:Na₂O、MgO、Al₂O₃、SiO₂、P₂O₅、K₂O、CaO、TiO₂、MnO、Fe₂O₃、FeO按GB/T14506.28-1993标准;H₂O+按GB/T14506.2-1993标准;CO₂按GB 9835-1988标准;LOI按LY/T 1253-1999标准。分析的相对标准偏差小于1%。稀土元素La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y和微量元素Cu、Pb、Th、U、Hf、Ta、Sc、Cs、V、Co、Ni用等离子质谱(ICP-MS)Excell测试,执行标准为DZ/T0223-2001;微量元素Sr、Ba、Zn、Rb、Nb、Zr、Ga用X荧光光谱仪2100测试,执行标准JY/T016-1996标准。大多数元素的分析精度可达到10⁻⁸,少量元素

分析精度为10⁻⁶(Zr、Ba)和10⁻⁷(Hf、Nb),其相对标准偏差小于5%。

3.2 电子探针分析

电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所矿物学与微束分析实验室电子探针室完成,仪器型号JXA-8230,电压15kV,电流20nA,束斑直径5μm,标样为天然或合成的矿物和氧化物,主要氧化物分析误差约为1%。

3.3 锆石U-Pb定年分析

野外采集的两个定年样品分别约2 kg,破碎至80-120目,用水淘洗粉尘后,先用磁铁除去磁铁矿等磁性矿物,再用重液选出锆石,最后在双目镜下人工挑出锆石。锆石的分选由河北廊坊区调院完成。然后,在中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室将锆石和标样一起粘在玻璃板上,用环氧树脂浇铸,制成薄片、抛光,并拍摄透反射光照片和阴极发光照片,最后,在中国科学技术大学(合肥)激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)实验室进行锆石的U、Th、Pb同位素含量测定。实验选择的标样为91500,²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄的加权平均值误差为±2σ。U/Pb比值数据处理使用软件LaDating@Zrn,校正Pb同位素处理使用软件ComPb corr#3-18^[28],校正后的数据使用美国Berkeley地质年代学中心Kenneth R. Ludwig编制的ISOPLOT和SQUID程序^[29-30]计算年龄。

4 分析结果

4.1 矿物学特征

(1) 斜长石

铜陵虎山石英二长闪长岩斜长石呈半自形柱状,环带和聚片双晶发育,有轻微的蚀变(图5)。探针测试结果显示(表2),环带发育的斜长石从核部到边部明暗相间,An为45.58、42.72、40.81、39.53,Ab为52.54、55.36、56.91、57.96,Or为1.88、1.92、2.27、2.52;环带不发育的斜长石An为30.43~38.52,Ab为59.15~66.77,Or为2.33~2.80。测试结果表明,虎山石英二长闪长岩的斜长石为中长石。环带不发育的斜长石An变化不明显,表明这类斜长石形成时岩浆的成分变化不大;环带较发育的斜长石从核部到边部,An含量递减,Ab含量递增,表明这类斜长石形成时岩浆成分变化大。这种环带一般是在岩

表1 虎山岩体主量元素(%),微量、稀土元素(10^{-6})分析结果
 Table 1 Geochemical data of major elements (%), trace elements and REE (10^{-6}) of Hushan intrusion

样品号	10CL523-3	10CL523-6	样品号	10CL523-3	10CL523-6	样品号	10CL523-3	10CL523-6
SiO ₂	60.96	62.44	Ni	3.61	4.76	Pr	6.32	11.6
TiO ₂	0.69	0.67	Cu	19.2	12.6	Nd	25.8	41.1
Al ₂ O ₃	16.46	15.36	Zn	54.8	38.5	Sm	5.48	6.54
Fe ₂ O ₃	3.01	3.26	Ga	20.8	21.7	Eu	1.62	0.98
FeO	2.10	2.26	Rb	56.7	163	Gd	4.96	4.22
MnO	0.10	0.19	Sr	761	96.7	Tb	0.71	0.59
MgO	1.90	1.35	Y	21.2	14.5	Dy	3.90	2.81
CaO	5.47	3.70	Zr	165	174	Ho	0.76	0.52
Na ₂ O	4.37	3.47	Hf	4.7	4.97	Er	2.14	1.51
K ₂ O	2.86	3.23	Nb	14.3	14.9	Tm	0.30	0.22
P ₂ O ₅	0.35	0.35	Cs	1.3	8.69	Yb	2.00	1.40
LOI	0.95	3.10	Ba	880	448	Lu	0.29	0.20
Total	99.22	99.38	Ta	0.97	1.02	REE	54	72
Na ₂ O+K ₂ O	7.36	6.96	Pb	11.9	23	(La/Sm)N	2.46	5.03
s(43)	2.91	2.31	Th	3.88	9.65	(Gd/Yb)N	2.00	2.43
A/CNK	0.81	0.96	U	2.27	3.33	Eu*	0.93	0.54
Li	7.90	5.37	La	21.4	52.3	D _{Zr}	3006	2850
Be	1.90	1.79	Ce	48.4	107	T _{Zr} (°C)	737	821

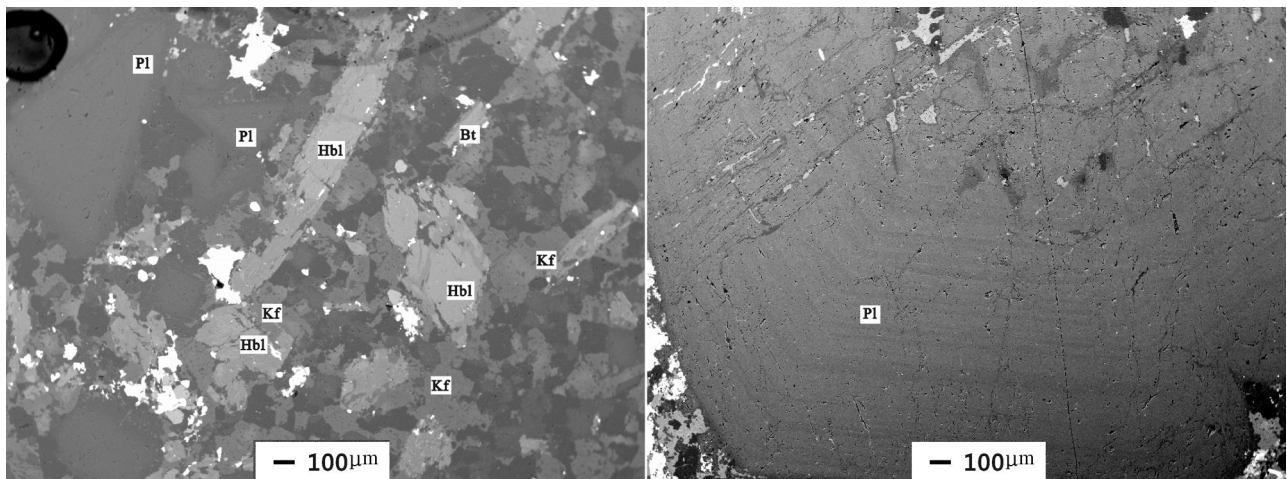


图5 虎山岩体石英二长闪长岩扫描电镜照片

Pl—斜长石; Kf—钾长石; Bt—黑云母; Hbl—角闪石

Fig.5 Scanning electron photomicrograph of quartz monzodiorite from Hushan intrusion

P—Plagioclase; Kf—K-feldspar; Bt—Biotite; Hbl—Hornblende

浆迅速冷却情况下,先晶出较基性的斜长石来不及与残余岩浆完全反应而部分被保留下来,随着温度的下降,依次保留下少量成分比先晶出者要酸性,而比残留岩浆要基性些的斜长石,由此造成了各带成分的差异。斜长石的这种成分环带记录了其生长过程中岩浆成分的变化情况。

(2) 钾长石

不同系列侵入岩具有不同特征的钾长石。石英二长闪长岩的钾长石常为粒状,呈填隙状。根据

电子探针分析结果(表3),该样品中的钾长石均为正长石,第1粒和第3粒Ab为4.77和6.65,Or为95.09和93.06,第2粒和第4粒Ab为23.81和28.47,Or为75.70和71.06,可见,Ab(Na₂O)含量与Or(K₂O)含量成反比,成分变化较大,指示钾长石结晶时岩浆成分有变化。

(3) 角闪石

角闪石是各类型岩石中较丰富的镁铁质矿物,石英二长闪长岩中角闪石呈他形粒状,长柱状。根

表2 电子探针分析的斜长石化学成分(%)
Table 2 Electron microprobe analyses of plagioclase

岩石 样品	10CL523-3								
	无环带					有环带			
	1	2	3	4	5	6-核	7-幔	8-亮边	9-暗边
SiO ₂	58.99	59.99	61.38	62.18	60.59	58.45	59.09	59.44	60.00
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.02
Al ₂ O ₃	25.49	24.77	23.92	23.50	24.34	25.80	25.55	24.91	24.57
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02
FeO	0.20	0.20	0.17	0.18	0.16	0.19	0.15	0.18	0.20
MnO	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.01
MgO	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
CaO	7.49	7.88	6.79	6.21	7.38	9.33	8.64	8.31	7.87
Na ₂ O	6.49	6.69	7.13	7.53	6.72	5.94	6.19	6.40	6.38
K ₂ O	0.40	0.40	0.46	0.48	0.44	0.32	0.33	0.39	0.42
NiO	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02
Σ	99.12	99.98	99.90	100.13	99.67	100.05	100.01	99.71	99.51
Si	2.67	2.70	2.75	2.78	2.73	2.63	2.66	2.68	2.72
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.36	1.31	1.27	1.24	1.29	1.37	1.36	1.32	1.31
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ^T	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.36	0.38	0.33	0.30	0.36	0.45	0.42	0.40	0.38
Na	0.57	0.58	0.62	0.65	0.59	0.52	0.54	0.56	0.56
K	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
Σ	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ab	59.60	59.15	63.72	66.77	60.62	52.54	55.36	56.91	57.96
An	37.99	38.52	33.56	30.43	36.75	45.58	42.72	40.81	39.53
Or	2.40	2.33	2.71	2.80	2.63	1.88	1.92	2.27	2.52

表3 电子探针分析的钾长石化学成分(%)
Table 3 Electron microprobe analyses of K-feldspar

岩石样品	10CL523-3			
	1	2	3	4
SiO ₂	65.89	67.80	66.49	67.22
TiO ₂	0.00	0.02	0.02	0.03
Al ₂ O ₃	17.28	17.53	17.44	17.91
Cr ₂ O ₃	0.22	0.00	0.00	0.01
FeO	0.07	0.10	0.15	0.09
MnO	0.00	0.00	0.02	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.03	0.09	0.06	0.09
Na ₂ O	0.52	2.48	0.72	3.09
K ₂ O	15.86	12.00	15.30	11.71
NiO	0.00	0.01	0.00	0.00
Σ	99.86	100.03	100.19	100.14
Si	3.06	3.12	3.07	3.07
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.94	0.95	0.95	0.96
Cr	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe ^T	0.00	0.00	0.01	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.05	0.22	0.06	0.27
K	0.94	0.70	0.90	0.68
Σ	5.00	5.00	5.00	5.00
Ab	4.77	23.81	6.65	28.47
An	0.14	0.49	0.30	0.46
Or	95.09	75.70	93.06	71.06

据电子探针分析结果(表4),在角闪石的Si-Mg/(Mg+Fe²⁺)分类图上投点(图6)得出,虎山石英二长闪长岩的角闪石属钙质角闪石亚族的镁钙闪石和铁镁钙闪石[Ca_B≥1.50,为1.70~1.81;(Na+K)_A≥0.5,为0.75~0.93;Ti<0.5,为0.16~0.20],角闪石种属为韭闪石(5.5<Si<6.5,Al^{VI}≥Fe³⁺)。角闪石的Al₂O₃和TiO₂之间的关系表明,虎山石英二长闪长岩的物源主要来自于地幔(图7)。这与铜陵地区其他高钾钙碱性系列岩石明显不同,以前的研究表明区内高钾钙碱性系列岩石比橄榄安粗岩系列岩石含有较多的壳源

组分^[31]。马昌前等(1994)据世界各种不同成因角闪石的Si、Ti含量所作出的角闪石成因判别图^[32],结合虎山石英二长闪长岩中角闪石的Si、Ti成分特点得出该岩体角闪石是从基性超基性侵入岩中结晶的角闪石。

(4) 黑云母

虎山石英二长闪长岩的黑云母成半自形片状,多色性较强,褐色,一组解理发育,部分黑云母沿解理发生绿泥石化和碳酸盐化。黑云母是各岩石中最丰富的镁铁质矿物之一。用阴离子法以氧原子数为11计算出的黑云母阳离子数见表5。在Foster等(1980)的Mg-(Al^{IV}+Fe³⁺+Ti)-(Fe²⁺+Mn)黑云母分类图解中,落入镁质黑云母区域(图8)^[36]。黑云母的MgO-FeO^T/(FeO^T+MgO)图解表明,虎山石英二长闪长岩来源于壳幔混合(图9),这与铜陵地区其他岩体及其包体的Sr同位素研究结果一致^[18,37]。

4.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

虎山岩体LA-ICP-MS 锆石U-Pb 同位素定年数据列于表6,各定年锆石特征如下:

样品10CL523-3(石英二长闪长岩):该样品锆石为自形长柱状,锥面和柱面发育,长宽比在2:1~3:1之间。样品共测定32个点(表6)。在阴极发光照片上显示,所有锆石均具有清晰的振荡环带结构(图10),为典型的岩浆结晶的产物^[39]。所测锆石的U、Th含量变化不大,分别为12.62×10⁻⁶~48.59×10⁻⁶和3.89×10⁻⁶~22.33×10⁻⁶,且锆石的U、Th值具有一般的正相关性(R²=0.4655),锆石的Th/U比值均介于0.13~0.54之间(表6),其中,绝大多数大于0.3。所测定的32颗锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄变化于(135±2)Ma到(153±2)Ma之间,除去5号、29号、32号等不谐和点后,其余锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为(143.2±1.2)Ma(MSWD=0.49, n=29),该年龄为岩浆结晶的年龄(图11-b)。锆石的²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U谐和图中谐和线交点年龄为(141.8±2.1)Ma(图11-a),与²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值(143.2±1.2)Ma在误差范围内基本一致。

样品10CL523-6(花岗闪长斑岩):该样品锆石为自形长柱状,内部结构简单,具有较好的柱面和锥面,长宽比为2:1~3:1,可见清晰的振荡环带结构,为典型的岩浆结晶锆石(图12)。锆石的U含量为14.44×10⁻⁶~59.23×10⁻⁶,Th含量为4.45×10⁻⁶~29.41×

表4 电子探针分析的角闪石化学成分(%)
Table 4 Electron microprobe analyses of hornblende

岩石 样品	10CL523-3								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	42.20	40.15	40.76	41.04	40.65	40.82	40.83	40.77	40.81
TiO ₂	1.76	1.39	1.70	1.62	1.57	1.63	1.61	1.60	1.61
Al ₂ O ₃	12.15	12.24	11.95	12.11	12.10	12.05	12.09	12.08	12.07
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	17.04	19.75	17.90	18.23	18.63	18.25	18.37	18.42	18.35
MnO	0.39	0.45	0.33	0.39	0.39	0.37	0.39	0.38	0.38
MgO	9.70	9.21	9.89	9.60	9.57	9.69	9.62	9.62	9.64
CaO	11.21	10.94	11.03	11.06	11.01	11.03	11.04	11.03	11.03
Na ₂ O	2.02	1.99	2.14	2.05	2.06	2.09	2.07	2.07	2.07
K ₂ O	1.15	1.31	1.48	1.31	1.37	1.39	1.36	1.37	1.37
Si	6.37	6.19	6.25	6.27	6.24	6.25	6.25	6.25	6.25
Al ^{IV}	1.63	1.81	1.75	1.73	1.76	1.75	1.75	1.75	1.75
Al ^{VI}	0.54	0.41	0.41	0.45	0.43	0.43	0.44	0.43	0.43
Ti	0.20	0.16	0.20	0.19	0.18	0.19	0.18	0.18	0.19
Fe ³⁺	0.25	0.04	0.06	0.12	0.07	0.08	0.09	0.08	0.09
Fe ²⁺	1.90	2.51	2.23	2.21	2.32	2.26	2.26	2.28	2.27
Mn	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Mg	2.18	2.12	2.26	2.19	2.19	2.21	2.20	2.20	2.20
Ca	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81
Na	0.59	0.60	0.64	0.61	0.61	0.62	0.61	0.62	0.62
K	0.22	0.26	0.29	0.26	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
Σ	15.75	15.96	15.94	15.88	15.93	15.92	15.91	15.92	15.91
Ca _B	1.81	1.70	1.80	1.79	1.76	1.78	1.78	1.78	1.78
Si _T *	6.37	6.19	6.25	6.27	6.24	6.25	6.25	6.25	6.25
Al _T	1.63	1.81	1.75	1.73	1.76	1.75	1.75	1.75	1.75
Al _C	0.54	0.41	0.41	0.45	0.43	0.43	0.44	0.43	0.43
Fe ³⁺ _C	0.25	0.04	0.06	0.12	0.07	0.08	0.09	0.08	0.09
Ti _C	0.20	0.16	0.20	0.19	0.18	0.19	0.18	0.18	0.19
Mg _C	2.18	2.12	2.26	2.19	2.19	2.21	2.20	2.20	2.20
Fe ²⁺ _C	1.83	2.27	2.08	2.06	2.13	2.09	2.09	2.10	2.10
Fe ²⁺ _B	0.07	0.24	0.16	0.16	0.19	0.17	0.17	0.17	0.17
Mn _B	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Na _B	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca _A	0.00	0.11	0.01	0.02	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03
Na _A	0.53	0.60	0.64	0.61	0.61	0.62	0.61	0.62	0.62
K _A	0.22	0.26	0.29	0.26	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
<i>p</i> /10 ⁸ Pa	5.42	3.50	4.49	5.24	4.19	3.44	3.81	3.90	4.07
<i>H</i> /km	18	12	15	17	14	11	13	13	13
<i>t</i> /°C	768	838	801	777	814	836	826	823	817

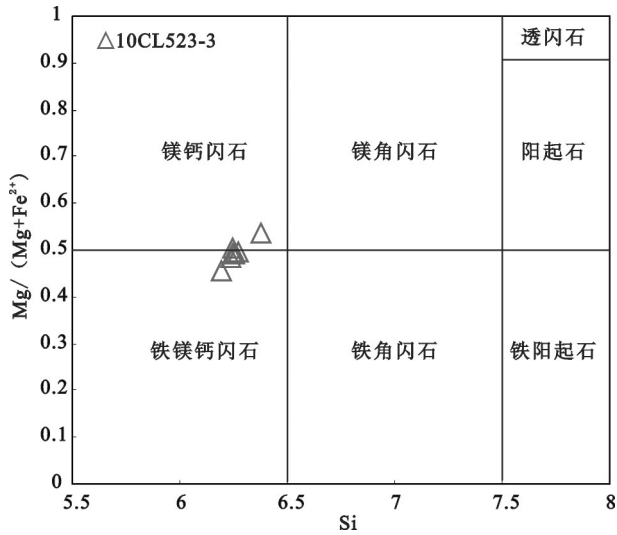


图6 角闪石分类图解^[33]
Fig.6 The classification of hornblende^[33]

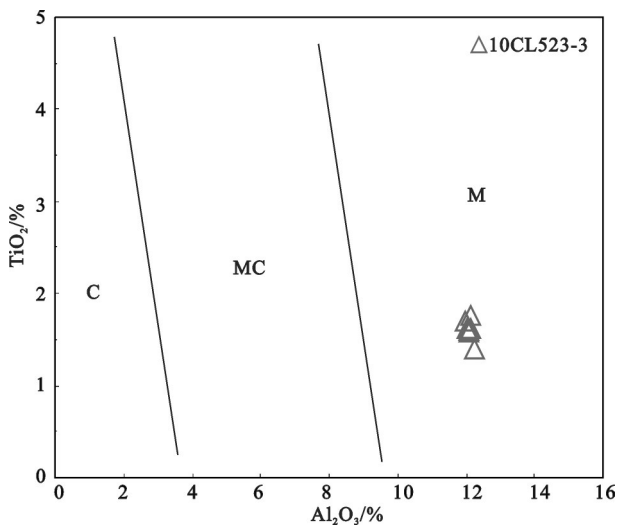


图7 角闪石TiO₂-Al₂O₃图解^[33-34]
Fig.7 TiO₂-Al₂O₃ diagram of hornblendes^[33-34]

表5 电子探针分析的黑云母化学成分(%)

Table 5 Electron microprobe analyses of biotite

岩石 样品	10CL523-3			
	1	2	3	4
SiO ₂	36.85	37.15	36.99	38.04
TiO ₂	3.78	3.35	4.10	4.33
Al ₂ O ₃	14.08	13.98	13.95	13.86
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	17.36	18.30	17.03	18.03
MnO	0.20	0.23	0.27	0.02
MgO	13.74	12.62	13.14	12.01
CaO	0.07	0.07	0.07	0.06
Na ₂ O	0.29	0.31	0.37	0.34
K ₂ O	9.32	9.70	10.06	9.24
Σ	95.69	95.71	95.97	95.93
Si	2.78	2.82	2.79	2.86
Al ^{IV}	1.22	1.18	1.21	1.14
Al ^{VI}	0.03	0.07	0.03	0.09
Ti	0.21	0.19	0.23	0.24
Fe ³⁺	0.15	0.14	0.13	0.25
Fe ²⁺	0.94	1.02	0.94	0.88
Mn	0.01	0.01	0.02	0.00
Mg	1.55	1.43	1.48	1.35
Ca	0.01	0.01	0.01	0.00
Na	0.04	0.05	0.05	0.05
K	0.90	0.94	0.97	0.89
Σ	7.85	7.86	7.87	7.75
Mg*	0.58	0.55	0.58	0.54
Al ^{VI} +Fe ³⁺ +Ti	0.40	0.41	0.40	0.58
Fe ²⁺ +Mn	0.96	1.03	0.96	0.88
Ti/(Mg+Fe+Ti+Mn)	0.07	0.07	0.08	0.09
Al/(Al+Mg+Fe+Ti+Mn+Si)	0.18	0.18	0.18	0.18

10⁻⁶,且锆石的U、Th值具有较好的正相关性($R^2=0.6263$),所有测点的Th/U比值均介于0.20~0.51(表6)。32个测点得出的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄变化于(139±2)Ma到(492±9)Ma,除去具有老的继承性锆石核(28号:年龄为492±9Ma)外,其余锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为(145.3±1.2)Ma(MSWD=1.11, n=31)(图13-b),该年龄为岩浆结晶的时代。锆石²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U谐和图中谐和线的交点年龄为(144.0±1.4)Ma(图13-a),与²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均

值(145.3±1.2)Ma在误差范围内基本一致。

5 温压计

5.1 锆元素在岩浆中的饱和浓度温度计

锆石在花岗岩岩浆体系中结晶较早,其结晶温度接近岩浆起源的温度或代表液相线的温度。因此,可用于估算虎山岩体的岩浆形成的初始温度。前人用不同成分岩石发生部分熔融产生的熔体进

表6 虎山岩体的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年数据
Table 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data from Hushan intrusion

样品号 及分析点号	含量/10 ⁻⁶				Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma						
	Pb	Th	U	Th/U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	σ			
10CL523-3-1	0.65	11.26	27.51	0.41	0.04761	0.00274	0.14706	0.00843	0.02276	0.00039	80	95	139	7	145	2
10CL523-3-2	0.30	3.89	13.31	0.29	0.04874	0.00390	0.14772	0.01203	0.02293	0.00053	135	140	140	11	146	3
10CL523-3-3	0.72	13.09	30.06	0.44	0.05071	0.00271	0.15861	0.00835	0.02270	0.00037	228	91	149	7	145	2
10CL523-3-4	0.50	7.15	22.34	0.32	0.05047	0.00318	0.15428	0.00940	0.02263	0.00042	216	106	146	8	144	3
10CL523-3-5	1.09	22.33	48.59	0.46	0.05142	0.00226	0.15153	0.00671	0.02133	0.00033	260	73	143	6	136	2
10CL523-3-6	0.34	5.72	14.69	0.39	0.04820	0.00356	0.14555	0.01050	0.02244	0.00050	109	119	138	9	143	3
10CL523-3-7	0.49	9.94	20.95	0.47	0.05279	0.00453	0.15674	0.01283	0.02264	0.00049	320	147	148	11	144	3
10CL523-3-8	0.53	10.02	23.10	0.43	0.04770	0.00325	0.14141	0.00935	0.02251	0.00041	84	112	134	8	144	3
10CL523-3-9	0.58	10.22	23.94	0.43	0.05274	0.00348	0.16203	0.01022	0.02324	0.00045	318	108	152	9	148	3
10CL523-3-10	0.56	9.78	24.01	0.41	0.04785	0.00275	0.15017	0.00902	0.02277	0.00044	92	98	142	8	145	3
10CL523-3-11	0.69	12.35	29.72	0.42	0.04686	0.00212	0.14619	0.00687	0.02268	0.00035	42	73	139	6	145	2
10CL523-3-12	0.62	9.74	27.16	0.36	0.04994	0.00229	0.14997	0.00681	0.02228	0.00034	192	77	142	6	142	2
10CL523-3-13	0.45	6.41	20.79	0.31	0.04924	0.00233	0.14743	0.00712	0.02196	0.00037	159	81	139	6	140	2
10CL523-3-14	0.35	4.72	15.40	0.31	0.04640	0.00271	0.14684	0.00860	0.02279	0.00040	18	93	139	8	145	3
10CL523-3-15	0.49	5.18	23.07	0.22	0.04764	0.00221	0.14190	0.00672	0.02172	0.00033	81	77	135	6	139	2
10CL523-3-16	0.87	16.98	35.57	0.48	0.05144	0.00199	0.16135	0.00646	0.02306	0.00033	261	65	152	6	147	2
10CL523-3-17	0.48	7.48	20.97	0.36	0.04548	0.00219	0.14407	0.00715	0.02276	0.00038	-30	74	137	6	145	2
10CL523-3-18	0.88	7.03	41.67	0.17	0.05024	0.00217	0.15180	0.00670	0.02207	0.00032	206	75	143	6	141	2
10CL523-3-19	0.69	12.82	29.60	0.43	0.04649	0.00202	0.14697	0.00668	0.02273	0.00034	23	69	139	6	145	2
10CL523-3-20	0.61	5.90	28.27	0.21	0.05072	0.00246	0.15532	0.00768	0.02224	0.00036	228	84	147	7	142	2
10CL523-3-21	0.61	11.50	25.66	0.45	0.05095	0.00228	0.15780	0.00697	0.02274	0.00035	239	74	149	6	145	2
10CL523-3-22	0.78	18.16	33.57	0.54	0.05172	0.00221	0.15397	0.00675	0.02175	0.00032	273	73	145	6	139	2
10CL523-3-23	0.53	8.31	23.68	0.35	0.04937	0.00235	0.15070	0.00732	0.02230	0.00034	166	84	143	6	142	2
10CL523-3-24	0.60	11.01	25.99	0.42	0.04594	0.00193	0.14188	0.00612	0.02239	0.00034	-5	62	135	5	143	2
10CL523-3-25	0.44	5.89	20.06	0.29	0.04645	0.00225	0.14055	0.00684	0.02210	0.00058	21	58	134	6	141	4
10CL523-3-26	0.53	5.16	24.28	0.21	0.04835	0.00257	0.14591	0.00749	0.02243	0.00036	117	87	138	7	143	2
10CL523-3-27	0.74	4.64	35.01	0.13	0.05112	0.00221	0.15669	0.00683	0.02264	0.00033	246	73	148	6	144	2
10CL523-3-28	0.53	9.47	22.79	0.42	0.04979	0.00229	0.15327	0.00722	0.02245	0.00035	185	81	145	6	143	2
10CL523-3-29	0.68	7.70	24.17	0.32	0.10578	0.00450	0.34975	0.01581	0.02409	0.00038	1728	60	305	12	153	2
10CL523-3-30	0.63	13.28	26.94	0.49	0.04736	0.00209	0.14316	0.00629	0.02226	0.00033	67	70	136	6	142	2
10CL523-3-31	0.57	8.77	25.45	0.34	0.04877	0.00220	0.14940	0.00717	0.02227	0.00034	137	82	141	6	142	2
10CL523-3-32	0.28	4.69	12.62	0.37	0.05037	0.00316	0.14455	0.00902	0.02117	0.00038	212	110	137	8	135	2
10CL523-6-1	0.54	9.82	23.64	0.42	0.05118	0.00336	0.15509	0.01050	0.02216	0.00040	249	122	146	9	141	3
10CL523-6-2	0.95	8.99	43.57	0.21	0.04594	0.00207	0.14527	0.00709	0.02251	0.00027	-5	81	138	6	144	2
10CL523-6-3	0.54	6.74	24.66	0.27	0.04727	0.00281	0.14586	0.00860	0.02226	0.00036	63	99	138	8	142	2

续表6

样品号 及分析点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma							
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					
					1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ						
10CL523-6-4	0.73	8.30	33.91	0.24	0.05200	0.00321	0.15601	0.00987	0.02223	0.00031	120	147	9	142	2	
10CL523-6-5	0.61	9.85	25.91	0.38	0.04901	0.00284	0.14992	0.00820	0.02281	0.00041	148	142	7	145	3	
10CL523-6-6	0.49	8.44	21.68	0.39	0.05386	0.00306	0.16387	0.00926	0.02224	0.00039	365	154	8	142	2	
10CL523-6-7	0.43	7.55	18.24	0.41	0.05307	0.00361	0.16005	0.01061	0.02292	0.00041	332	119	9	146	3	
10CL523-6-8	0.58	10.91	23.58	0.46	0.04845	0.00271	0.15307	0.00835	0.02338	0.00038	121	145	7	149	2	
10CL523-6-9	0.51	8.74	21.30	0.41	0.04905	0.00322	0.15638	0.01065	0.02324	0.00039	150	122	148	148	2	
10CL523-6-10	0.37	4.46	16.70	0.27	0.04464	0.00306	0.13463	0.00945	0.02250	0.00042	-38	117	128	8	143	3
10CL523-6-11	0.74	7.01	34.56	0.20	0.04723	0.00202	0.14488	0.00640	0.02242	0.00032	61	70	137	6	143	2
10CL523-6-12	0.53	6.25	22.93	0.27	0.05376	0.00296	0.17220	0.00937	0.02325	0.00040	361	92	161	8	148	3
10CL523-6-13	0.80	14.76	33.35	0.44	0.04938	0.00236	0.15610	0.00760	0.02282	0.00031	166	87	147	7	145	2
10CL523-6-14	0.59	12.08	25.01	0.48	0.05014	0.00322	0.15215	0.00947	0.02225	0.00032	202	115	144	8	142	2
10CL523-6-15	0.53	10.47	21.24	0.49	0.05189	0.00327	0.16611	0.01034	0.02323	0.00047	281	105	156	9	148	3
10CL523-6-16	0.33	4.92	14.44	0.34	0.05116	0.00417	0.14924	0.01153	0.02262	0.00042	248	141	10	144	3	
10CL523-6-17	0.52	8.42	21.41	0.39	0.04958	0.00339	0.16187	0.01069	0.02385	0.00041	175	118	152	9	152	3
10CL523-6-18	0.56	5.49	25.44	0.22	0.04711	0.00296	0.14502	0.00907	0.02276	0.00034	55	109	138	8	145	2
10CL523-6-19	0.63	9.46	26.35	0.36	0.05408	0.00290	0.17090	0.00882	0.02362	0.00033	375	91	160	8	150	2
10CL523-6-20	0.53	8.60	22.12	0.39	0.05159	0.00337	0.16298	0.01032	0.02322	0.00041	267	113	153	9	148	3
10CL523-6-21	0.41	7.50	18.25	0.41	0.05290	0.00345	0.15457	0.00953	0.02185	0.00043	324	104	146	8	139	3
10CL523-6-22	0.45	7.72	19.19	0.40	0.04732	0.00293	0.15084	0.00938	0.02292	0.00045	65	100	143	8	146	3
10CL523-6-23	0.33	4.45	14.57	0.31	0.05583	0.00383	0.16117	0.01057	0.02219	0.00041	445	113	152	9	142	3
10CL523-6-24	0.94	17.91	37.78	0.47	0.04661	0.00211	0.15070	0.00668	0.02374	0.00034	29	68	143	6	151	2
10CL523-6-25	0.55	8.24	23.62	0.35	0.04616	0.00296	0.14163	0.00854	0.02362	0.00039	6	99	134	8	151	2
10CL523-6-26	0.48	9.11	19.75	0.46	0.05189	0.00312	0.16190	0.00951	0.02299	0.00033	280	109	152	8	146	2
10CL523-6-27	1.37	29.41	59.23	0.50	0.04806	0.00195	0.14510	0.00609	0.02194	0.00025	102	74	138	5	140	2
10CL523-6-28	2.22	11.05	24.98	0.44	0.05808	0.00554	0.63559	0.05937	0.07937	0.00153	533	217	500	37	492	9
10CL523-6-29	0.74	12.92	32.11	0.40	0.04832	0.00246	0.14647	0.00690	0.02255	0.00034	115	79	139	6	144	2
10CL523-6-30	0.60	10.86	25.94	0.42	0.05260	0.00336	0.15697	0.00980	0.02254	0.00041	312	109	148	9	144	3
10CL523-6-31	0.88	17.35	34.98	0.50	0.05042	0.00270	0.16195	0.00853	0.02370	0.00036	214	94	152	7	151	2
10CL523-6-32	0.57	11.92	23.57	0.51	0.04345	0.00270	0.14367	0.00935	0.02290	0.00044	-99	106	136	8	146	3

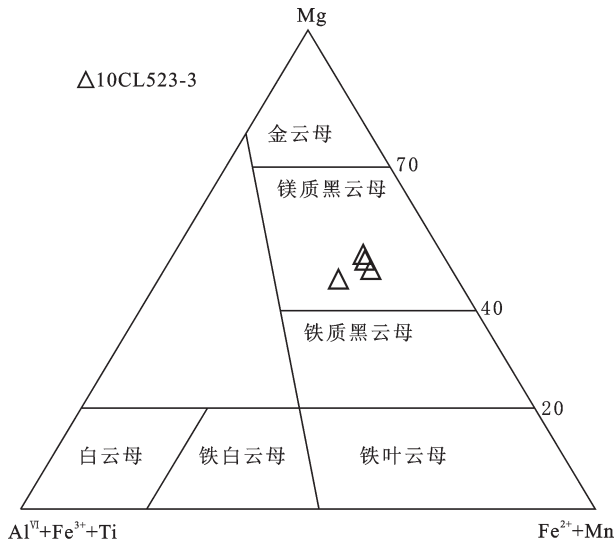


图8 黑云母成分分类图^[36]
Fig.8 The classification of biotite^[36]

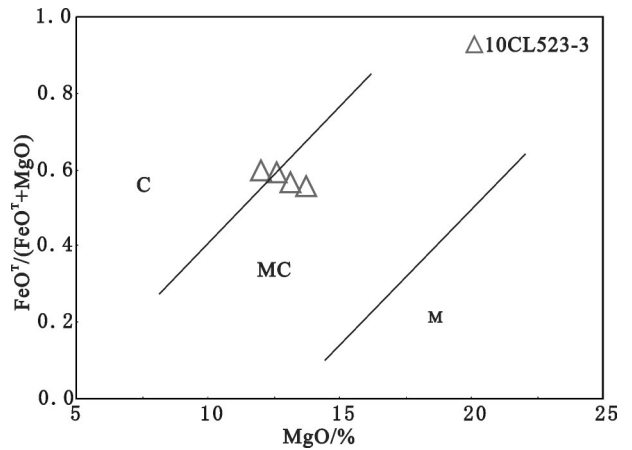


图9 黑云母 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T+\text{MgO})-\text{MgO}$ 图解^[37]
Fig.9 Diagram of $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T+\text{MgO})-\text{MgO}$ ^[37]



图10 虎山石英二长闪长岩(10CL523-3)锆石阴极发光图像
Fig. 10 Cathodoluminescence images of zircon of quartz monzodiorite (10CL523-3)

行锆溶解度实验,结果表明锆石的饱和程度取决于岩浆温度和岩浆成分^[40-42]。虎山岩体各样品锆石的阴极发光照片和锆石核部测年结果(存在古老的继承性锆石年龄或混合年龄)表明,花岗闪长斑岩中存

在残留锆石,表明岩浆在开始结晶时已经达到Zr饱和,因此所测得的锆石饱和温度可以反映岩浆源区的初始温度;而在石英二长闪长岩的锆石阴极发光图像上则未见残留锆石,它们的锆石饱和温度反映

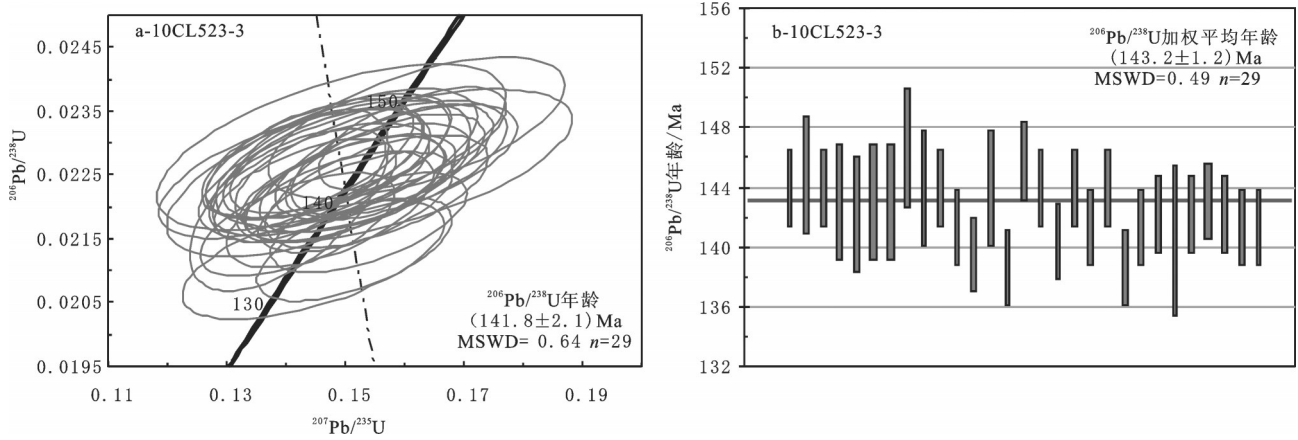


图11 虎山石英二长闪长岩(10CL523-3)锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U - ²⁰⁷Pb/²³⁵U谐和图
 Fig. 11 Zircon ²⁰⁶Pb/²³⁸U - ²⁰⁷Pb/²³⁵U concordia diagram of quartz monzodiorite (10CL523-3)

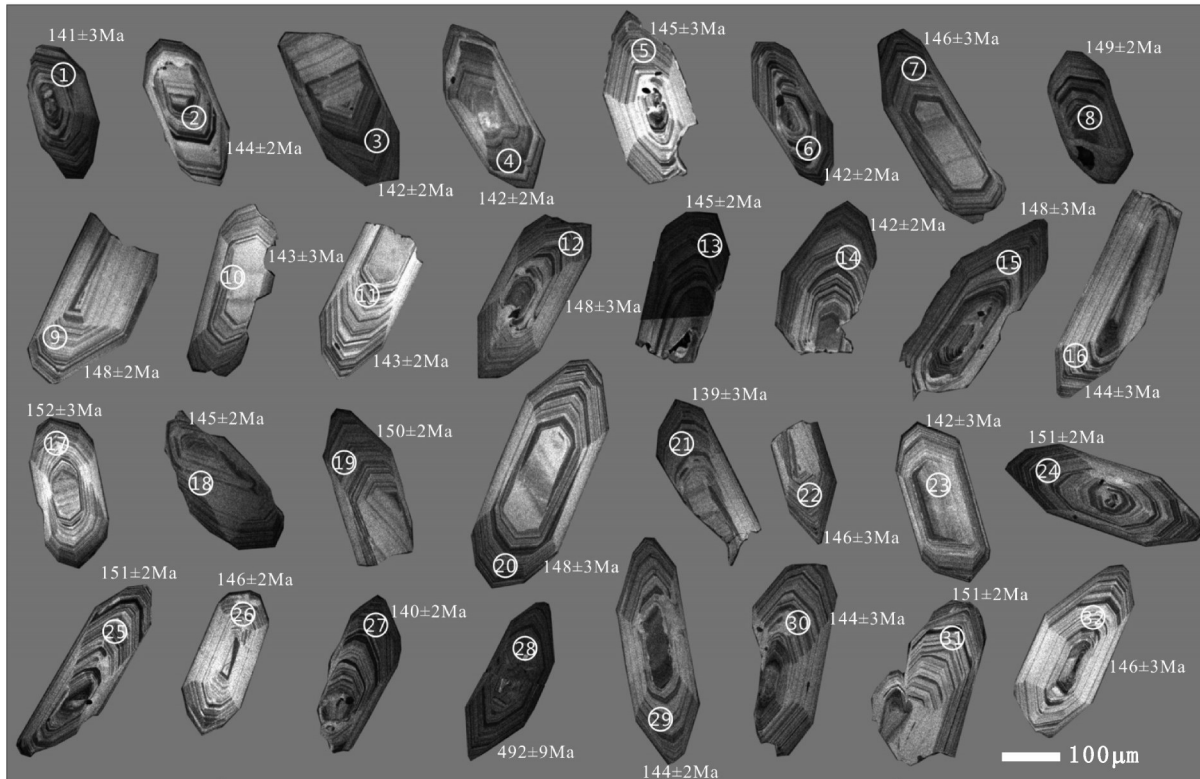


图12 虎山花岗闪长斑岩(10CL523-6)锆石阴极发光图像
 Fig.12 Cathodoluminescence images of zircon of granodiorite porphyry (10CL523-6)

了岩浆源区的最低温度^[43-47]。根据岩浆的主要成分和锆的含量,利用公式 $t_{Zr}(^{\circ}C) = 12900 / [\ln D_{Zr} + 0.85M + 2.95] - 273.15$ 来计算锆饱和温度, D_{Zr} 为元素 Zr 在熔体和锆石中的分配系数,如果不做锆石中 Zr 和 Hf 的校正,则锆石中的 Zr 可用纯锆石中的 Zr 含量

496000×10^{-6} 来代替,而锆石作为副矿物其 Zr 含量对全岩 Zr 含量的影响几乎可以忽略,所以可以近似地用全岩 Zr 含量(10^{-6})来代替熔体中的 Zr 含量。因此 $D_{Zr} = 496000 / \text{全岩 Zr 含量}$; 而 M 是 $(2Ca + K + Na) / (Si \times Al)$ 阳离子含量的比值。那么,结合以上计算得出,

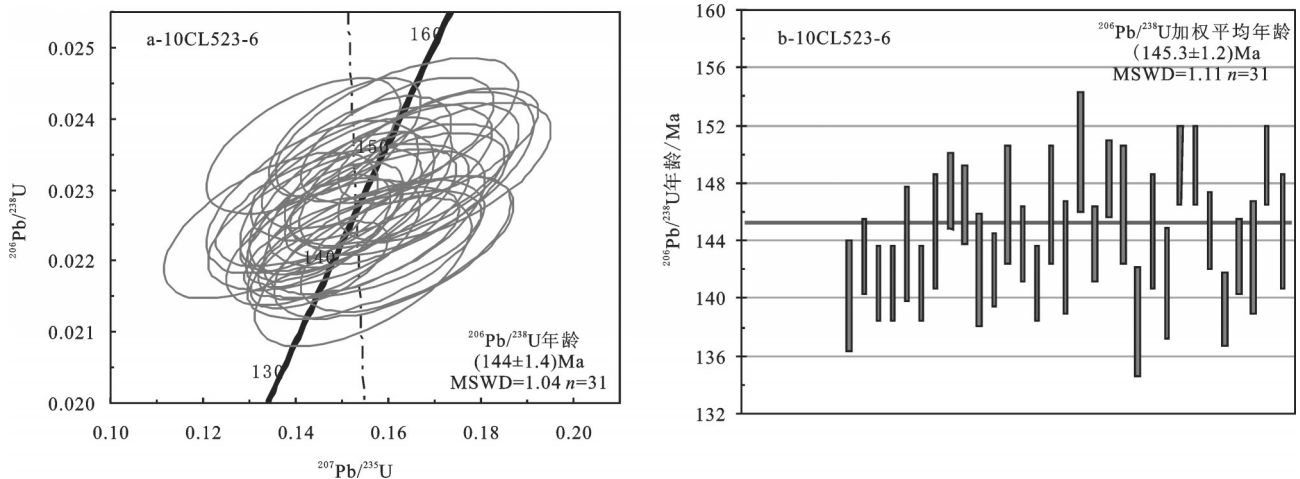


图 13 虎山花岗闪长斑岩(10CL523-6)锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图
Fig.13 Zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ concordia diagram of granodiorite porphyry (10CL523-6)

石英二长闪长岩中锆石饱和温度为 737°C (表 1), 反应岩浆源区的最低温度; 而花岗闪长斑岩中锆石饱和温度为 821°C (表 1), 代表岩浆源区的初始温度, 结合野外地质发现, 虎山岩体及区内其他岩体中普遍存在大量暗色基性微粒包体, 暗示岩体形成过程中有幔源岩浆的加入, 这可能是导致其具有较高锆石饱和温度的原因之一。

5.2 角闪石-斜长石温压计

角闪石-斜长石温压计中温度主要依据 Blundy (1990) 和 Holland (1994) 提出的实验温度计^[46,47], 该温度计适用于所有含石英的中酸性火山岩, 且岩石斜长石 $\text{An} \leq 92$, 角闪石的 $\text{Si} \leq 7.8$, 误差为 $\pm 311\text{K}$ 。经多次校正后公式为: $T = (0.677p - 48.98) / (-0.0429 - 0.0083144 \ln\{[(\text{Si}-4)/(8-\text{Si})]X_{\text{Ab}}^{\text{Pl}}\})$, 式中 Si 是角闪石中硅原子数, $X_{\text{Ab}}^{\text{Pl}}$ 是斜长石中的钠长石百分比, 压力 p 的单位为 0.1GPa 。结合新的压力计公式^[48,49,50]: $p = -3.01 + 4.76\text{Al}_{\text{tot}} - [(t-675)/85][0.53\text{Al}_{\text{tot}} + 0.005294(t-675)]$ (误差为 $\pm 0.6\text{GPa}$), 其中 $\text{Al}_{\text{tot}} = \text{Al}_\text{I} + \text{Al}_\text{C}$, 计算出斜长石结晶时的岩浆温度为 $768\sim 838^\circ\text{C}$, 压力为 $3.44 \times 10^8 \sim 5.42 \times 10^8 \text{ Pa}$, 如果按 33 km/GPa 估算, 虎山花岗岩类的岩浆侵位深度为 $11\sim 18 \text{ km}$ (表 4)。

6 讨 论

6.1 岩体年代及岩浆侵位期次

前人对区内的侵入岩做过大量的年代学工作, 特别是用多种测年方法对侵入岩开展的年代学研究表明, 不同方法所测年龄存在较大差异, 如 Ar-Ar

法获得铜官山岩体年龄为 $(136.9 \pm 1.4)\text{Ma}$ ^[51]; Ar-Ar 法和 K-Ar 法获得金口岭岩体和天鹅抱蛋山岩体年龄分别为 $(137.3 \pm 1.4)\text{Ma}$ 和 $(136.5 \pm 0.9)\text{Ma}$; 而用锆石 U-Th-Pb 测得天鹅抱蛋山岩体年龄则偏大, 为 153 Ma ^[12]; 近年来, 一些学者用锆石 SHRIMP U-Pb 法对铜官山岩体测得的年龄为 $(141.7 \pm 1.4)\text{Ma}$, 比用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法所测得的岩体的年代略偏大 $(138.9 \pm 3.1)\text{Ma}$ ^[17, 19-21, 23, 52-56]。可见, 同一岩体出现不同年龄值, 不仅与定年方法的不同有关, 而且受仪器的稳定状态及操作者的水平等因素影响。近期的研究表明, 铜官山矿田内的铜官山、天鹅抱蛋山石英二长闪长岩的锆石 U-Pb 年龄几乎相同, 分别为 $(142 \pm 1)\text{Ma}$ 、 $(141.7 \pm 1)\text{Ma}$ ^[21], 而虎山岩体的年龄为 $(143.2 \pm 1.2)\text{Ma}$ 、 $(145.3 \pm 1.2)\text{Ma}$, 前者为石英二长闪长岩, 后者为具有斑状结构的花岗闪长斑岩。前者在误差范围内与铜官山岩体和天鹅抱蛋山岩体的年龄相同。这一特征与整个铜陵地区具有斑状结构的侵入岩年龄普遍大于无斑结构的侵入岩, 如瑶山花岗闪长斑岩为 $(146.0 \pm 0.9)\text{Ma}$, 新桥头花岗闪长斑岩为 $(147.2 \pm 1.5)\text{Ma}$, 而凤凰山铁山头花岗闪长岩为 $(142.8 \pm 1.3)\text{Ma}$ 。因此, 虎山岩体存在两次岩浆侵入活动, 早期形成的花岗闪长斑岩的年龄为 $(145.3 \pm 1.2)\text{Ma}$, 与铜陵矿集区瑶山花岗闪长斑岩的年龄相同, 晚期形成的石英二长闪长岩与区内的铜官山和天鹅抱蛋山岩体的年龄相同。

6.2 岩浆来源及成因

据磁异常特征推测, 铜官山矿田内的金口岭、

谢家垅、铜官山、天鹅抱蛋山、虎山岩体在深部可能相连,均来自同一岩浆源区^[2,5,57]。研究表明,铜官山岩体中继承性锆石核的年龄不但有古元古代的(2461±13)Ma,还有新元古代的(842.9±5.9)Ma、(789.2±9.6)Ma。这3颗继承性锆石核的Th/U比值分别为1.16、1.04和1.32,锆石内部具有扇状和环带结构,说明它们是岩浆结晶形成的。王彦斌等^[53]研究得出,铜官山石英二长闪长岩的继承性锆石核的年龄变化于(2025±9)Ma到(2598±13)Ma之间,徐夕生等(2004)还发现了该岩体中存在新太古代残留的锆石(约2.7 Ga)^[17]。在天鹅抱蛋岩体中,也发现了新太古代的继承性锆石核,年龄为(2606±7)Ma^[21],同时,还发现了新元古代的锆石,年龄分别为(936.6±6.2)Ma、(837.3±6.3)Ma、(778.7±4.7)Ma,它们的Th/U比值分别为0.41、1.39、1.18、2.19,说明它们都是岩浆型锆石^[21]。以上特征均表明了古老的地壳参与了岩浆的形成过程,太古宙和古元古代以及新元古代的基底岩石可能是其熔融源区的重要组成之一。

铜官山矿田的侵入岩属高钾钙碱性系列^[15,23], Sr、Nd同位素研究表明,该系列侵入岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.7068~0.7105, $\epsilon_{Nd}(t) = -9.16 \sim -16.55$, $T_{DM} = 1.50 \sim 2.19$ Ga^[58-60],表明岩浆源区来自富集地幔,同时,又混入了地壳的成分。这与根据岩石中发现的古老残留岩浆锆石做出的推断是一致的。从矿物学特征来看,虎山岩体石英二长闪长岩的角闪石Al₂O₃-TiO₂投点落入地幔源区(图7),黑云母MgO-FeO^T/(FeO^T+MgO)投点落入壳幔混合源区(图9),均指示该岩体花岗岩具有壳幔混源的特征。另外,虎山岩体及铜官山矿田内其他岩体中均含有岩浆混合作用形成的暗色闪长质微粒包体,岩浆结晶条件为:平均温度为811°C(768~838°C)、平均压力为4.23×10⁸Pa(3.44×10⁸~5.42×10⁸ Pa),对应的深度为11~18 km,说明岩浆混合作用可能发生在11~18 km的浅位岩浆房。根据锆石Lu-Hf同位素研究结果,本区高钾钙碱性系列侵入岩岩浆来自壳幔混合源^[21,55]。虎山岩体与铜官山岩体、天鹅抱蛋山岩体同处于铜官山背斜上,岩石学特征与它们的相似,岩体形成年龄也相同,地球物理研究表明它们在深部可能相连,因此,虎山岩体与铜官山背斜上其它岩体具有相同的成因。据此,笔者认为,铜官山矿田深部存在一个浅位岩浆房,岩浆早期侵入地壳浅部形成虎山花岗岩闪长斑

岩,时代约为145 Ma,而后岩浆侵入活动强烈,形成了虎山、铜官山、天鹅抱蛋石英二长闪长岩。

7 结 论

(1)LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果表明,虎山岩体的石英二长闪长岩和花岗闪长斑岩的形成年龄分别为(143.2±1.2)Ma和(145.3±1.2)Ma,属晚侏罗—早白垩世,与中国东部J-K岩浆事件相呼应。

(2)锆饱和温度计计算结果表明,虎山石英二长闪长岩中锆石饱和温度为737°C,反应岩浆源区的最低温度;花岗闪长斑岩中锆石饱和温度为821°C,代表岩浆源区的初始温度;石英二长闪长岩角闪石-斜长石温压计计算结果表明,其形成的平均温度为811°C、平均压力为4.23×10⁸Pa,结合区内岩体特征、矿物学特征和地球化学特征显示,虎山岩体中石英二长闪长岩和花岗闪长斑岩均为高钾钙碱性系列侵入岩,属岩浆混合成因,并且混合作用可能发生在11~18 km的浅位岩浆房。

参考文献(References):

- [1] 常印佛, 刘学圭. 铜陵地区层控砂卡岩矿床研究[J]. 矿床地质, 1983, 2(1): 11-20.
Chang Yinfo, Liu Xuegui. Stratabound skarn type deposits——a case study of Lower Yangtzi depression within Anhui province [J]. Mineral Deposits, 1983, 2 (1): 11-20 (in Chinese with English abstract).
- [2] 周珣若, 吴才来, 黄许成, 等. 铜陵中酸性侵入岩中同源包体及岩浆动力学[J]. 岩石矿物学杂志, 1993, 12(1): 20-31.
Zhou Xenruo, Wu Cailai, Huan Xucheng, et al. Characteristics of Cognate Inclusions in Intermediate-acid intrusive rocks of Tongling area and their magmatic dynamics [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1993, 12(1): 20-31 (in Chinese with English abstract).
- [3] 邢凤鸣, 徐祥. 安徽铜陵地区高钾钙碱性侵入岩[J]. 地球化学, 1996, 25(1): 29-38.
Xing Fengming, Xu Xiang. High-potassium calc-alkaline intrusive rocks in Tongling area, Anhui province [J]. Geochemica, 1996, 25(1): 29-38 (in Chinese with English abstract).
- [4] 吴才来, 郭祥焱, 王次松, 等. 铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩锆石U-Pb年代学及其地质意义[J]. 地球化学, 2013, 42(1): 11-28.
Wu Cailai, Guo Xiangyan, Wang Cisheng, et al. Zircon U-Pb dating of High-K calc-alkaline intrusive rocks from Tongling: Implications for the tectonic setting [J]. Geochimica, 2013, 42(1): 11-28 (in Chinese with English abstract).
- [5] 陈沪生. 扬子准地台下扬子盆地HQ-13地球物理-地质综合解

- 释纲要[C]//陈沪生主编. 中国南方油气勘查新领域探索论文集(第二辑). 北京: 地质出版社, 1988: 65-73.
- Chen Husheng. Outline of comprehensive demonstration for geophysical and geological data from HQ-13 line in the Lower Yangtze Basin, Yangtze Metaplatform[C]//Chen Husheng, (ed.). No.2 Proceedings of Exploring in New Fields of gas and Oil Surveying in South China. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 65-73(in Chinese).
- [6] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 159-171.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. The Ways of Investigation on Granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 159-171(in Chinese).
- [7] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铁铜成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 138-190.
- Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. The Iron-Copper Ore-Forming Belt of Middle-Lower Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 138-190(in Chinese).
- [8] 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 安徽沿江地区铜多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1998:60-85.
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, et al. Geology of Copper-gold polymetallic deposits in the Along-Changjiang area of Anhui province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:60-85(in Chinese).
- [9] 吴才来, 董树文, 郭祥焱, 等著. 中国铜陵中酸性侵入岩[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-148.
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Guo Xiangyang, et al. Intermediate-acid intrusive rocks from Tongling, China[M]. Beijing: Geological Publishing, 2013: 1-148(in Chinese).
- [10] 郭晓东, 王治华, 王梁, 等. 云南马厂箐岩体(似)斑状花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 610-622.
- Guo Xiaodong, Wang Zhihua, Wang Liang, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of porphyritic granite in Machangqing complex of Yunnan Province and their geological significance[J]. Geology in China, 2011, 38(3): 610-622(in Chinese with English abstract).
- [11] 周真. 铜陵马山金矿床成因的研究[J]. 地质论评, 1984, 30(5): 467-476.
- Zhou Zhen. Research on the genesis of the Mashan gold deposit in Tongling, southern Anhui [J]. Geological Review, 1984, 30(5): 467-476 (in Chinese with English abstract).
- [12] 周泰禧, 李学明, 赵俊深, 等. 安徽铜陵铜官山矿田火成岩的同位素地质年龄[J]. 中国科学技术大学学报, 1987, 17(3): 403-407.
- Zhou Taixi, Li Xueming, Zhao Junshen, et al. Geochronology of igneous rocks from the Tongguanshan ore area of Anhui Province [J]. Journal of China University of Science and Technology, 1987, 17(3): 403-407 (in Chinese with English abstract).
- [13] 杨学明, 林文通. 铜官山火山杂岩体成岩机理研究[J]. 地质论评, 1988, 34(1): 25-35.
- Yang Xueming and Lin Wentong. Research on the petrogenic mechanism of the Tongguanshan igneous complex, Anhui Province[J]. Geology Review, 1988, 34(1): 25-35 (in Chinese with English abstract).
- [14] 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩的包体岩石学研究[J]. 地球学报, 1997, 18(2): 182-191.
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, et al. Enclave petrology of intermediate-acid intrusive rocks in Tongling district, Anhui[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(2):182-191.
- [15] 吴才来, 陈松永, 史仁灯, 等. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 41-48.
- Wu Cailai, Chen Songyong, Shi Rendong, et al. Origin and features of the Mesozoic intermediate-acid intrusive in Tongling area, Anhui, China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24 (1): 41-48(in Chinese with English abstract).
- [16] Wu Cailai, Dong Shuwen, Paul T.Robinson, et al. Petrogenesis of high-K, calc-alkaline and shoshonitic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province(eastern China), and their tectonic implications[J]. GSA Bulletin, 2014, 126(1/2): 78-102.
- [17] 徐夕生, 范钦成, O'Reilly S Y, 等. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石 U-Pb 定年与成因探讨[J]. 科学通报, 2004, 49(18): 1883-1891.
- Xu Xisheng, Fan Qincheng, O'Reilly S Y, et al. Zircon U-Pb Dating of the quartz diorite and its enclaves in Tongguanshan, Anhui province: Discussion on the petrologic genesis[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(18): 1883-1891(in Chinese).
- [18] 杜杨松, 秦新龙, 李铨具, 等. 安徽铜陵地区中生代幔源岩浆底侵作用——来自矿物巨晶和岩石包体的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(2): 109-116.
- Du Yangsong, Qin Xinlong and Lee Honju, et al. Mesozoic mantle-derived magma underplating in Tongling, Anhui Province: evidence from megacrysts and xenoliths [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2004, 23(2): 109-116 (in Chinese with English abstract).
- [19] 杜杨松, 李顺庭, 曹毅, 等. 安徽铜陵铜官山矿区中生代侵入岩的形成过程——岩浆底侵、同化混染和分离结晶[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 71-77.
- Du Yangsong, Li Shunting, Cao Yi, et al. UAF-Related Origin of the Late Jurassic to Early Cretaceous Intrusions in the Tongguanshan Ore Field, Tongling, Anhui Province, East China[J]. Geoscience, 2007, 21(1): 71-77 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的年代——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 地球学报, 2004, 25(4): 423-427.
- Wang Yinbin, Liu Deyi, Zeng Pusheng, et al. SHRIMP U-Pb Geochronology of Gabbro-diorite in the Chaoshan Gold Deposit and Its Geological Significance [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(4): 423-427 (in Chinese with English abstract).

- [21] 吴才来, 高前明, 国和平, 等. 铜陵地区铜官山矿田侵入岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1746-1758.
Wu Cailai, Gao Qianming, Guo Heping, et al. Zircon SHRIMP dating of intrusive rocks from the Tongguanshan ore-field in Tongling, Anhui, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(12): 1746-1758 (in Chinese with English abstract).
- [22] Hibbard M J. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid system[C]//Didier J, Barbarin B (eds.). Enclaves and Granite Petrology: Developments in Petrology, 13. Elsevier, Amsterdam, 1991: 431-444.
- [23] 吴才来, 董树文, 国和平, 等. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1801-1812.
Wu Cailai, Dong Shouwen, Guo Hoping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of intrusive rocks and hypomagmatic process from Shizishan, Tongling[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8) : 1801-1812 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘红涛, 孙世华, 刘建明, 等. 华北克拉通北缘中生代高锆花岗岩类: 地球化学与源区性质[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 257-274.
Liu Hongtao, Sun Shihua, Liu Jianming, et al. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Geochemistry and source region [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18 (3) :257 - 274 (in Chinese with English abstract).
- [25] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1976, 58: 63-81.
- [26] Taylor S R, McClennan S. The continental crust: Composition and Evolution [J]. Blackwell Scientific Publications, 1985, 54: 209-230.
- [27] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[M]// Sunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins, Special Publications, London, 1989, 42:313-345.
- [28] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [29] Ludwig K R. Squid 1.02: A user's manual: Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2, 2001, 15-35.
- [30] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel: Berkeley Geochronology Center Special Publication No.4, 2003: 1-70.
- [31] 雷敏, 吴才来, 高前明, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩及其包体的成因和矿物温压计的应用[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(3): 271-288.
Lei Min, Wu Cailai, Gao Qianming, et al. Petrogenesis of intermediate-acid intrusive rocks and enclaves, and application of mineral thermobarometry [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(3): 271-288 (in Chinese with English abstract).
- [32] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994: 1-260 (in Chinese).
Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua, et al. Magma-Dynamics of Granitoids: Theory, Method and A Case Study of the Eastern Hubei Granitoids. Wuhan: Chinese University of Geosciences Press, 1994: 1-260.
- [33] Leake B E, Wooley A R, Arps C E S, et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names[J]. Canadian Mineralogist. 1997, 35 (1): 219-246
- [34] 姜常义, 安三元. 火成岩中钙质角闪石化学特征和他们的成因意义[J]. 矿物岩石. 1988, 4(3): 1-9.
Jiang Changying, An Sanyuan. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significancs[J]. Minerals and Rocks. 1988, 4(3): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- [35] 伍光英, 肖庆辉, 陈辉明, 等. 湘南多金属矿集区燕山期成矿花岗岩的造岩矿物特征及其成因意义[J]. 中国地质, 2008, 35(5): 888-901.
Wu Guangying, Xiao Qinghui, Chen Huiming, et al. Features of rock-forming minerals of Yanshanian mineralized granite in the polymetallic deposit concentration zone in southern Hunan and their implications for granite generation[J]. Geology in China, 2008, 35(5): 888-901(in Chinese with English abstract).
- [36] Foster M D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas[A]. U.S. Geol. Survey Prof. Paper[C]. 1980, 4 345-B.
- [37] 高庚, 徐兆文, 杨小男, 等. 安徽铜陵朝山金矿床地质特征及成因研究[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21 (3): 162-167.
Gao Geng, Xu Zhaowen, Yang Xiaonan, et al. Geological characteristics and genesis of Chaoshan gold deposit in Tongling district, Anhui Province [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2006, 21 (3): 162 - 167(in Chinese with English abstract).
- [38] 周作侠. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. 岩石学报, 1986, 2(1): 59-70.
Zhou Zuoxia. The origin of intrusive mass in Fengshandong, Hubei province [J]. Acta Petrologica Sinica, 1986, 2(1): 59-70(in Chinese with English abstract).
- [39] Pidgeon R T, Nemchin A A and Hitchen G J. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1998, 132 (3): 288-299.
- [40] Watson E B and Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 64(2):295-304.
- [41] Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance [J]. Geology, 2003, 31(6):529-532.

- [42] Montel J M. A model for monazite/melt equilibrium and the application to the generation of granitic magmas [J]. *Chemical Geology*, 1993, 110(1-3):127-146.
- [43] Chappell B W, Bryant C J, Wybon D, White A R J and Williams I S. High and low temperature I type granites[J]. *Resource Geology*, 1998, 48(4):225-235.
- [44] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types: 25 years later [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48(4): 489 - 499.
- [45] Chappell B W, White A J R, Williams I S, et al. Low and high-temperature granites [J]. *Trans Roy Soc Edinb- Earth Sci.* 2004, 95(1/4):125-140.
- [46] Blundy J D, Holland T. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole- plagioclase geothermometer [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1990, 104(2): 208-224.
- [47] Holland T, Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole- plagioclase thermometry [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1994, 116(4): 433-447.
- [48] Anderson J L, Smith D R. The effects of temperature and oxygen fugacity on the Al-in-hornblende barometry [J]. *Amer. Mineral.* 1995, 80: 549-559.
- [49] Johnson M C, Rutherford M J. Experimental calibration of an aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks [J]. *Geology*, 1989, 17: 837-841.
- [50] Schmidt M W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1992, 110(2/3): 304-310.
- [51] Chen J F, Foland K A, Zhou T X. Mesozoic granitoids of the Yangtze foldbelt, China. Isotopic constrains on the magma sources[C]//Wu L R, Yang T M, Yuan K R, et al, (eds.). *The Crust—the Significance of Granites- gneisses in the Lithosphere*. Athens: Theophrastus, 1985: 217-237.
- [52] 吴才来, 周珣若, 黄许成, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 1996, 15(4): 299-306.
Wu Cailai, Zhou Xenruo and Huang Xucheng, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology of intermediate- acid intrusive rocks from Tongling [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1996, 15 (4): 299-306 (in Chinese with English abstract).
- [53] 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的年龄及其成因指示[J]. *岩石矿物学杂志*, 2004, 23 (4): 298-304.
Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, et al. SHRIMP U-Pb geochronology of Xiaotongguanshan quartz-dioritic intrusions in Tongling district and its petrogenetic implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2004, 23(4): 298-304 (in Chinese with English abstract).
- [54] 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义[J]. *中国地质*, 2004, 32(2): 169-173.
Wang Yanbin, Liu Dunyi, Meng Yifeng, et al. SHRIMP U-Pb geochronology of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling ore district, Anhui[J]. *Geology in China*, 2004, 32(2): 169-173 (in Chinese with English abstract).
- [55] Di Y J, Wu G G, Zhang D, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Xiaotongguanshan and Shatanjiao intrusions and its petrological implications in the Tongling area, Anhui[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 795-802.
- [56] 吴淦国, 张达, 狄永军, 等. 铜陵矿集区侵入岩锆石 U-Pb 年龄及深部动力学背景[J]. *中国科学(D 辑)*, 2008, 38(5): 630-645.
Wu Ganguo, Zhang Da, Di Yongjun, et al. Zircon U-Pb dating and dynamics of intrusive rocks in Tongling ore district [J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 38(5): 630-645(in Chinese with English abstract).
- [57] 吕庆田, 侯增谦, 赵金华, 等. 深地震反射剖面揭示的铜陵矿集区复杂地壳结构形态[J]. *中国科学(D 辑): 地球科学*, 2003, 33(5): 442-449.
Lü Qingtian, Hou Zengqian, Zhao Jinhua, et al. Crustal structure in Tongling ore district revealed by deep seismic reflection image [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(5): 442-449 (in Chinese).
- [58] 陈江峰, 周泰禧, 李学明, 等. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区锶、钕同位素制约[J]. *地球化学*, 1993, 9(3): 261-268.
Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, Li Xueming, et al. Sr and Nd, isotopic constraints on source regions of the intermediate and acid intrusions from southern Anhui Province[J]. *Geochimica*, 1993,9(3):261-268 (in Chinese with English abstract).
- [59] 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(4): 323-334
Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province, China and their constraint to geodynamic process [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(4): 323-334(in Chinese).
- [60] 杨小男, 徐兆文, 徐夕生, 等. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 U-Pb 年龄意义[J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 510-516.
Yang Xiaonan, Xu Zhaowen, Xu Xisheng, et al. Zircon U-Pb geochronology and its implication for the temperature of Yanshanian magma in Tongling, Anhui Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(4): 510-516 (in Chinese with English abstract).