

doi:10.3799/dqkx.2013.S1.010

安徽姚家岭锌金多金属矿区花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义

刘绍锋^{1,3}, 杜杨松², 付水兴¹, 钟宏³, 曹毅³

1. 北京矿产地质研究院, 北京 100012

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

3. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550002

摘要: 姚家岭锌金多金属矿床位于铜陵矿集区东部, 其形成与小青塘花岗闪长斑岩密切相关. 然而, 前人对该岩体的研究仍较少, 为了深入认识姚家岭矿区的成矿作用, 利用岩石地球化学的方法, 对花岗闪长斑岩及锆石特征进行研究, 结果表明: 花岗闪长斑岩具有较高的 SiO_2 , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.68~1.02, 为 I 型花岗岩, 属于高钾钙碱性系列; 锆石具有明显的环带结构, Th/U 比值为 0.34~1.20, 为典型的岩浆锆石; 锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 141.0 ± 1.7 Ma, 说明花岗闪长斑岩形成于早白垩世; 锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-22.5 \sim -9.2$, Hf 同位素两阶段模式年龄为 1639~2620 Ma, 表明形成花岗闪长斑岩的岩浆是古元古代地壳岩石部分熔融的产物. 此外, 研究还表明, 花岗闪长斑岩的结晶温度为 558~739°C, 成岩压力为 50~250 MPa.

关键词: 花岗闪长斑岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地质年代学; Hf 同位素; 姚家岭矿床; 安徽铜陵.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2013)S1-0091-12

收稿日期: 2012-11-12

U-Pb Age and Hf Isotopic Characteristics of Zircons from Granodiorite Porphyry in the Yaojialing Zn-Au-Polymetallic Mine, Anhui Province and Their Geological Significance

LIU Shao-feng^{1,3}, DU Yang-song², FU Shui-xing¹, ZHONG Hong³, CAO Yi³

1. China Non-Ferrous Metal Resources Geological Survey, Beijing 100012, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China

Abstract: The formation of the Yaojialing Zn-Au-polymetallic deposit located in the eastern of Tongling ore deposit concentration area is closely related with the granodiorite porphyry. However, the previous studies on the rock is still less, in order to further understand the diagenesis and mineralization of the Yaojialing deposit, this paper carried the analysis of the characteristics of granodiorite porphyry and the study zircon, and shows that the granodiorite porphyry belongs to high-K calc-alkaline series with relatively higher content of SiO_2 (67.08%–68.57%), and it is of I-type granite (the ratios of $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ are 0.68–1.02). The zircons display oscillatory zoning with ratios of Th/U at 0.34–1.20, which suggests they are zircons of magmatic origin. The weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age for the zircons is 141.0 ± 1.7 Ma, which shows that the granodiorite porphyry was formed in early Cretaceous. Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are -22.5 to -9.2 , indicating that the magma of the granodiorite porphyry was derived from partial melting of the rock in the crust. The zircons Hf isotopic two-stage model ages are 1639–2620 Ma, showing the time of the differentiation of crustal rock from the mantle is Paleoproterozoic. In addition, our study finds that the crystallization temperature and the diagenetic pressure of the granodiorite porphyry are 558–739 °C and 50–250 MPa respectively.

Key words: granodiorite porphyry; zircon U-Pb ages; geochronology; Hf isotope; Yaojialing deposit; Tongling of Anhui.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40672045); 中国地质调查局项目 (No. 20089938); 教育部科学技术研究重大项目 (No. 308006).
作者简介: 刘绍锋 (1983—), 男, 博士后, 主要从事矿物岩石矿床学专业研究工作. E-mail: 13581505182@163.com

姚家岭锌金多金属矿床是近年来铜陵地区普查新发现的大型矿产地,矿区位于铜陵矿集区东部的沙滩角矿田内。矿床的形成与小青塘花岗闪长斑岩密切相关,矿体主要产在隐爆斑岩体内灰岩捕虏体上下接触带及层间裂隙带和角砾状花岗闪长斑岩体中。截至 2010 年 10 月,矿区共获得 333 类锌矿资源总量达 122.08 万 t,平均品位 3.64%,金矿资源量 3 2247.61 kg,平均品位 5.19 g/t,达到了大型锌金矿床规模(蒋其胜等, 2010)。姚家岭矿床的发现,突破了铜陵矿集区乃至长江中下游成矿带以铜、金、铁为主的多金属矿床类型模式,突破了该区以矽卡岩型和层控叠加改造型两个传统的成矿模式(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992),体现了姚家岭矿床在成矿元素和成矿模式上均有别于区内的其他矿床,在本区的成矿作用中具有显著的特殊性。对姚家岭锌金多金属矿床开展科学研究,不仅对铜陵矿集区北缘与繁昌火山岩盆地的交接地带,而且对长江中下游成矿带寻找同类型的矿床都具有重要的指导意义。

然而,目前针对姚家岭锌金多金属矿床的研究工作仍较少,前人仅就矿床地质特征(蒋其胜等, 2008)和成矿流体特征(文春华等, 2011)进行了初步总结和分析;而对于成矿作用密切相关的花岗闪长斑岩仍未进行相关性研究工作,这在一定程度上制约了对姚家岭矿区成岩成矿作用的认识。在姚家岭矿区,与成矿有关的花岗闪长斑岩的成岩时代、岩石成因和物质来源等一系列问题指引着本文开展了相关工作,对矿区内的花岗闪长斑岩进行了岩石学、锆石年代学和地球化学研究,试图为姚家岭矿区的岩石成因提供约束条件。

1 地质背景

1.1 区域地质

姚家岭锌金多金属矿床所属的铜陵矿集区位于扬子准地台下扬子台坳、贵池—繁昌拗断褶束中段(常印佛等, 1991)。区域地质演化历经前震旦纪基底形成阶段、震旦纪—中三叠世盖层形成阶段和晚三叠世—新生代的板内变形阶段(翟裕生等, 1992)。在铜陵矿集区内,北东向的复式褶皱及近东西向的基底断裂为区内的主要构造格局,区内的主要褶皱构造有铜官山、舒家店—永村桥、戴公山三大背斜和顺安、新屋里两大向斜。铜陵地区岩浆活动强烈,主要为燕山期侵入岩,岩浆岩类型主要为辉石二长闪长岩、花岗闪长岩和石英二长闪长岩(谢建成等,

2008),大体以铜官山、狮子山、舒家店、新桥头、凤凰山、沙滩角为中心组成若干岩体群,呈近东西向排列。铜陵矿集区内的矿床类型主要为矽卡岩型和层控改造型硫化物矿床,成矿元素以铜、硫、金为主,由西向东构成了铜官山、狮子山、凤凰山和沙滩角等矿田,这些矿床的形成与区内中生代中酸性岩浆活动有关(毛景文等, 2009)。

1.2 矿区地质

姚家岭矿区位于铜陵至南陵多金属成矿带东段边缘的沙滩角矿田内,处于戴公山背斜东北倾伏端附近。矿区内出露最老的为志留系地层,从志留系至第四系层序齐全,发育较为完整。区内褶皱主要为戴公山背斜,断裂构造主要为北东向、北西向和近南北向三组,其中以与区域构造方向近乎一致的北东向断层为主。矿区内岩浆岩主要有小青塘花岗闪长斑岩体和青山花岗闪长斑岩体,二者岩性特征基本相同,据物探资料反映这两个岩体在深部相连(蒋其胜等, 2010)。本区与成矿作用相关的小青塘花岗闪长斑岩体位于矿区中部,东西向长约 2.5 km,北东向宽约 0.65 km,面积为 1.65 km²,与沙滩角石英二长闪长岩体相邻,中间被一条近南北向的花岗斑岩岩墙隔开(图 1)。该岩体是含矿岩体,在岩体及其围岩附近矿化蚀变作用强烈,广泛发育有钾长石化、绿泥石化、矽卡岩化、碳酸盐化、硅化,以及黄铁矿化、黄铜矿化、闪锌矿化和方铅矿化等。

2 样品特征与分析方法

2.1 样品特征

岩石样品(QTY)采自姚家岭小青塘岩体,采样位置坐标为 30° 55′ 45″ N, 118° 11′ 50″ E。样品为灰白色的蚀变花岗闪长斑岩,具有斑状结构(图 2a)。斑晶含量约为 60%,原由长石矿物(50%)、石英(5%)、黑云母(2%)和角闪石(3%)组成。斑晶长石呈长板状,自形一半自形;斑晶石英为浑圆粒状,见有熔蚀结构。暗色矿物黑云母和角闪石为自形一半自形结构,均已被绢云母所交代(图 2b)。岩石基质主要由长英质矿物组成,但已发生硅化、方解石化和高岭土化。此外,岩石样品中还见有强烈的黄铁矿化。副矿物锆石由于抗蚀变能力强,在蚀变岩中常能保存下来,并以包裹体的形式保留在绢云母化的黑云母和角闪石斑晶中,或以松散颗粒的形式分布在岩石基质中。

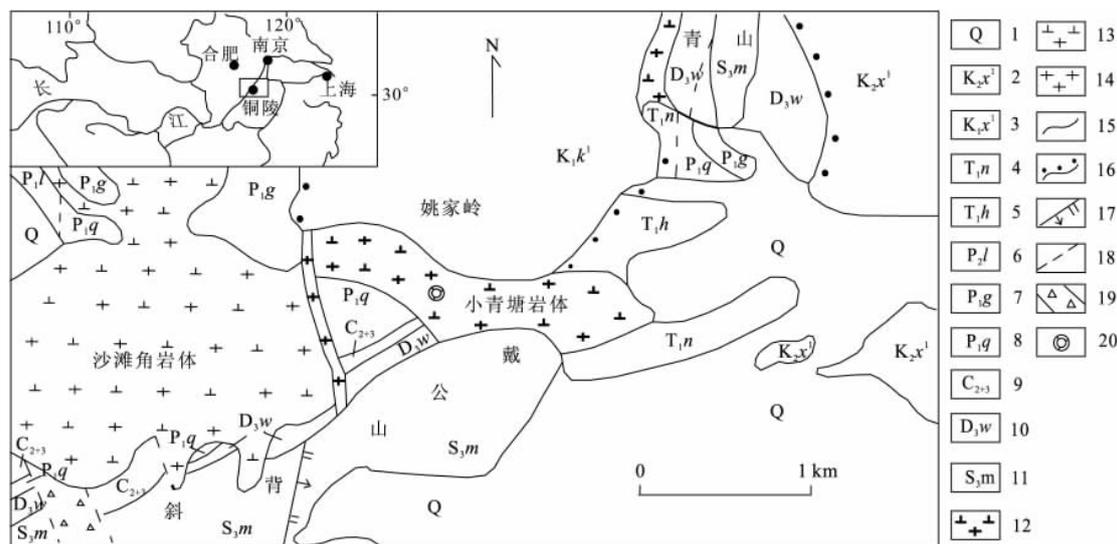


图 1 姚家岭矿区地质图(蒋其胜等, 2008)

Fig. 1 Geological map of the Yaojialing ore field

1. 第四系粘土岩; 2. 上白垩统宣南组下段粉砂岩; 3. 下白垩统蝌蚪山组下段凝灰质粉砂岩; 4. 下三叠统南陵湖组灰岩; 5. 下三叠统和龙山组灰岩; 6. 上二叠统龙潭组页岩和砂岩; 7. 下二叠统孤峰组页岩和灰岩; 8. 下二叠统栖霞组灰岩; 9. 中上石炭统含生物碎屑灰岩; 10. 上泥盆统五通组石英砂岩; 11. 上志留统茅山组砂岩; 12. 花岗闪长斑岩; 13. 花岗闪长岩; 14. 花岗岩; 15. 地质界线; 16. 不整合地质界线; 17. 正断层; 18. 推测断层; 19. 破碎带; 20. 采样位置

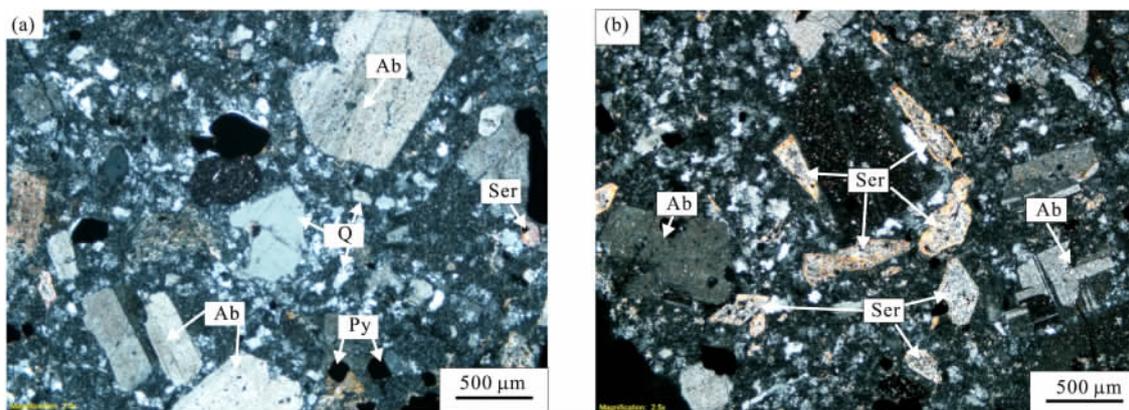


图 2 QTY 样品的岩相学特征

Fig. 2 Petrography of the sample QTY

- a. 花岗闪长斑岩具有斑状结构, 斜长石斑晶已发生钠长石化, 基质发生了硅化、高岭土化等; b. 花岗闪长斑岩中斑晶角闪石等暗色矿物已发生绢云母化, 并呈其假象产出。Ab. 钠长石; Q. 石英; Ser. 绢云母; Py. 黄铁矿

岩石地球化学特征表明(表 1), 花岗闪长斑岩具有较高的 SiO₂ (67.08%~68.57%) 和 Al₂O₃ (16.18%~16.74%) 含量, 中等程度的全碱含量 (6.46%~7.93%), 低 CaO (0.45~0.61%)、低 MgO (1.16%~1.84%) 和低 FeO^T (1.47%~3.20%) 含量的特征。里特曼指数 δ 值为 1.71~2.46, A/CNK 比值介于 2.00~2.37 之间, 为过铝质岩石。在 SiO₂-K₂O 图解上, 岩石样品点落入高钾钙碱性区域(图 3)。K₂O/Na₂O 比值为 0.68~1.02, 在 K₂O-Na₂O 图解中, 岩石样品落入 I 型花岗岩区

域(图 4)。

2.2 分析方法

样品粉碎至能全部通过 0.3 mm 孔径筛, 再用浮选和电磁选方法进行分离, 然后在双目镜下挑选出透明度和晶形较好的锆石颗粒, 最后将这些锆石颗粒用环氧树脂固定于样品靶上, 抛光后进行透射光、反射光和阴极发光显微照相。锆石阴极发光 (CL) 显微照相在中国地质科学院地质与地球物理研究所电子探针室完成, 分析电压为 15 kV, 电流为 4 nA。

表 1 姚家岭花岗闪长斑岩的地球化学组成

Table 1 Geochemical composition of granodiorite porphyry in Yaojialing district

	09XQT001	09XQT004	09XQT007	09XQT008	09XQT011	09XQT013	09XQT015	09XQT017
SiO ₂	68.57	67.78	67.55	67.46	67.75	67.47	67.72	67.08
TiO ₂	0.45	0.51	0.50	0.47	0.50	0.47	0.46	0.53
Al ₂ O ₃	16.74	16.18	16.19	16.42	16.30	16.22	16.25	16.29
Fe ₂ O ₃	1.65	3.48	3.10	3.60	3.35	3.31	3.42	3.44
MnO	0.02	0.05	0.07	0.08	0.06	0.05	0.09	0.06
CaO	0.45	0.61	0.60	0.48	0.51	0.50	0.50	0.57
MgO	1.18	1.16	1.76	1.7	1.38	1.72	1.68	1.84
K ₂ O	4.00	3.12	3.04	2.61	2.89	2.94	3.20	2.85
Na ₂ O	3.93	3.87	4.27	3.85	3.81	3.91	3.56	4.19
P ₂ O ₅	0.20	0.21	0.22	0.20	0.20	0.22	0.21	0.23
L. O. I	2.10	2.36	2.01	2.49	2.55	2.53	2.22	2.24
总量	99.29	99.31	99.30	99.36	99.31	99.33	99.29	99.32
K ₂ O+ Na ₂ O	7.93	6.99	7.31	6.46	6.70	6.85	6.76	7.04
里特曼指数 δ	2.46	1.97	2.18	1.71	1.81	1.92	1.85	2.06
A/CNK	2.00	2.13	2.05	2.37	2.26	2.21	2.24	2.14
K ₂ O/Na ₂ O	1.02	0.81	0.71	0.68	0.76	0.75	0.90	0.68

注:数据来源于蒋其胜等(2010),常量元素单位为%。

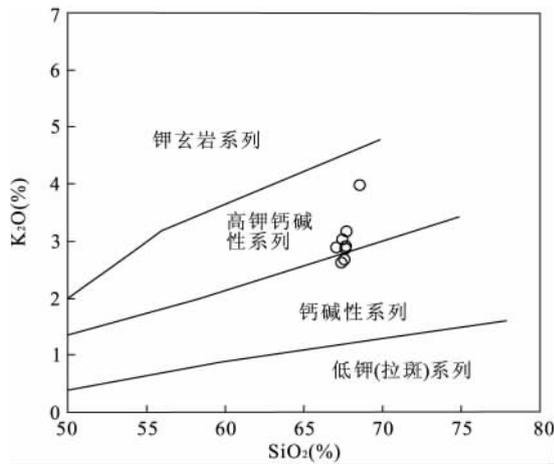


图 3 姚家岭花岗闪长斑岩的 SiO₂-K₂O 图解

Fig. 3 Plot of SiO₂-K₂O of the Yaojialing granodiorite porphyry

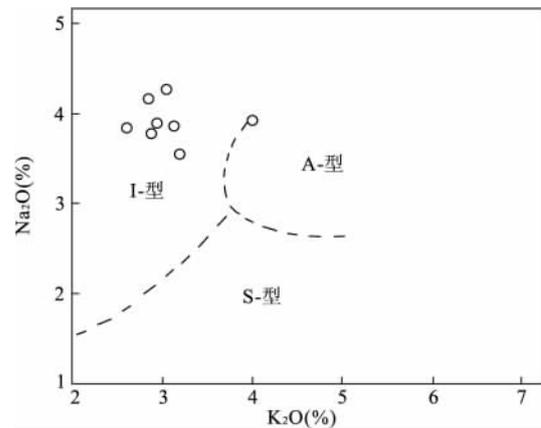


图 4 姚家岭花岗闪长斑岩的 K₂O-Na₂O 图解

Fig. 4 Plot of K₂O-Na₂O of the Yaojialing granodiorite porphyry

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄分析及其微量稀土元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,激光剥蚀系统为 GeoLas2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a, 激光剥蚀斑束直径为 32 μm, 激光剥蚀深度为 20~40 μm. 锆石年龄计算外标为国际通用标准锆石 91500, 元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标元素进行标定. 原始数据处理和年龄计算分别用 Glitter 程序 (Jackson *et al.*, 2004) 和 ISOPLOT 程序 (Ludwig, 2003) 完成.

锆石原位 Lu-Hf 同位素测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 采用了 Nu Plasma

HR (Wrexham UK) 多接收电感耦合等离子体质谱仪进行实验 (MC-ICP-MS), 实验的激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M 型激光剥蚀系统, 剥蚀斑束为 44 μm, 频率为 7 Hz, 350 次. 在实验过程中, 采用的锆石 Hf 同位素分析点与 U-Pb 年龄的分析点位于同一颗粒锆石中, 尽量使得两个分析点相邻, 这样保证分析点的 Hf 同位素值和 U-Pb 年龄基本对应. 计算中,¹⁷⁶Lu 的衰变常数采用 1.867 × 10⁻¹¹ a⁻¹ (Söderlund *et al.*, 2004; 吴福元等, 2007), 球粒陨石 ¹⁷⁶Hf / ¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Lu / ¹⁷⁷Hf 的比值分别为 0.282 772 和 0.033 2 (Blichert-Toft and Albarete, 1999), 亏损地幔的 ¹⁷⁶Hf / ¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Lu / ¹⁷⁷Hf 的比值分别为 0.283 25 和 0.038 4 (Griffin *et al.*, 2000), 上地壳和下地壳的 ε_{Lu/Hf} 值分别为

-0.72 和 -0.34 (Amelin *et al.*, 1999; 吴福元等, 2007).

3 分析结果

3.1 锆石 CL 图像特征

锆石内部结构的分析结果是合理解释所测年龄的重要依据,而阴极发光(CL)影像是揭示锆石内部结构的有效手段 (Vavra *et al.*, 1999; 吴元保等, 2003). 对样品 QTY 中锆石进行阴极发光(CL)实验 (图 5), 结果表明, 锆石晶形较完整, 大多为长柱状, 少量为短柱状, 长度一般为 130~170 μm 不等, 宽度为 70~100 μm 不等, 长宽比值多为 2:1~3:1. 其中, 03、15、17 和 21 号等锆石内部结构清晰, 阴极发光图像表现出典型的生长震荡环带结构, 属于岩浆结晶产物 (吴元保等, 2003). 与此不同的是, 06、08 和 12 号等锆石为面形结构. 此外, 22 号锆石的核部是面形结构, 而边部则为岩浆环带结构, 说明它们属于不同阶段结晶的产物.

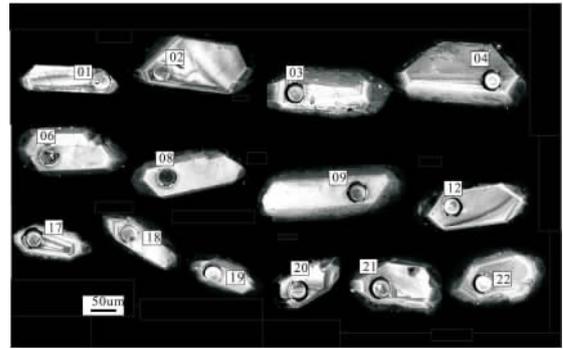


图 5 QTY 样品中锆石的阴极发光图像

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from sample QTY

3.2 锆石 U-Pb 年龄

样品 QTY 中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据列于表 2. 由表中数据可知, 锆石 Th、U 含量均较低, Th 为 $19.83 \times 10^{-6} \sim 417.97 \times 10^{-6}$, 均值为 164.28×10^{-6} , U 为 $64.49 \times 10^{-6} \sim 500.66 \times 10^{-6}$, 均值为 277.54×10^{-6} , Th/U 比值大多数为 0.34~1.20, 指示了岩浆成因的锆石 (Belousova *et al.*, 2002).

表 2 QTY 样品中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb data for the zircons from sample QTY

分析点	^{232}Th	^{238}U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
	(10^{-6})	(10^{-6})		比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄(Ma)	1 σ	年龄(Ma)	1 σ	年龄(Ma)	1 σ	年龄(Ma)	1 σ
QTY-1	146	278	0.52	0.050	0.002	0.151	0.007	0.022	0.000	0.007	0.000	195	117	143	6	140	2	154	15
QTY-2	144	350	0.41	0.047	0.002	0.139	0.006	0.021	0.000	0.006	0.000	65	119	133	6	139	2	139	4
QTY-3	133	285	0.47	0.050	0.002	0.150	0.007	0.022	0.000	0.007	0.000	198	115	143	6	140	2	149	5
QTY-4	118	211	0.56	0.057	0.003	0.178	0.010	0.022	0.000	0.007	0.000	506	131	167	9	146	2	159	6
QTY-5	258	412	0.63	0.048	0.002	0.142	0.006	0.021	0.000	0.006	0.000	98	100	135	6	137	1	139	4
QTY-6	406	370	1.10	0.160	0.017	0.854	0.144	0.026	0.001	0.016	0.001	2 461	182	627	79	166	7	325	23
QTY-7	89.6	212	0.42	0.056	0.002	0.166	0.008	0.021	0.000	0.006	0.000	457	113	156	7	137	2	131	6
QTY-8	39.3	294	0.13	0.062	0.002	0.726	0.043	0.079	0.004	0.027	0.001	680	78	555	25	490	24	541	34
QTY-9	19.8	236	0.08	0.052	0.002	0.161	0.008	0.022	0.000	0.008	0.000	306	129	152	8	142	2	161	11
QTY-10	90.9	268	0.34	0.044	0.002	0.134	0.007	0.022	0.000	0.007	0.000	error		128	7	142	2	155	6
QTY-11	102	280	0.36	0.052	0.002	0.164	0.009	0.022	0.000	0.006	0.000	320	113	154	8	141	2	138	5
QTY-12	103	117	0.88	0.069	0.002	0.908	0.050	0.090	0.004	0.029	0.001	928	81	656	27	556	27	589	30
QTY-13	114	131	0.87	0.050	0.003	0.147	0.010	0.021	0.000	0.006	0.000	228	154	140	9	136	2	131	5
QTY-14	411	344	1.20	0.069	0.004	0.214	0.012	0.022	0.000	0.007	0.000	920	123	198	11	143	2	153	6
QTY-15	141	312	0.45	0.048	0.002	0.149	0.008	0.022	0.000	0.007	0.000	124	126	142	7	144	2	153	5
QTY-16	266	280	0.95	0.101	0.004	0.331	0.015	0.023	0.000	0.010	0.000	1659	81	291	11	150	2	205	6
QTY-17	418	501	0.83	0.046	0.001	0.146	0.005	0.022	0.000	0.007	0.000	56	144	139	5	145	2	148	3
QTY-18	225	302	0.74	0.053	0.002	0.164	0.007	0.022	0.000	0.006	0.000	367	111	155	7	144	2	135	4
QTY-19	70.7	104	0.68	0.064	0.003	0.194	0.011	0.022	0.000	0.007	0.000	754	130	181	10	142	3	154	6
QTY-20	189	312	0.61	0.050	0.002	0.158	0.007	0.022	0.000	0.007	0.000	209	108	150	7	145	2	146	5
QTY-21	159	295	0.54	0.051	0.002	0.157	0.007	0.022	0.000	0.007	0.000	256	111	148	7	143	2	143	5
QTY-22	31.4	64.5	0.49	0.158	0.003	9.660	0.194	0.439	0.004	0.126	0.002	2 444	33	2 403	19	2 348	21	2407	52
QTY-23	147	427	0.34	0.053	0.002	0.168	0.008	0.023	0.000	0.007	0.000	332	109	159	7	148	2	154	6

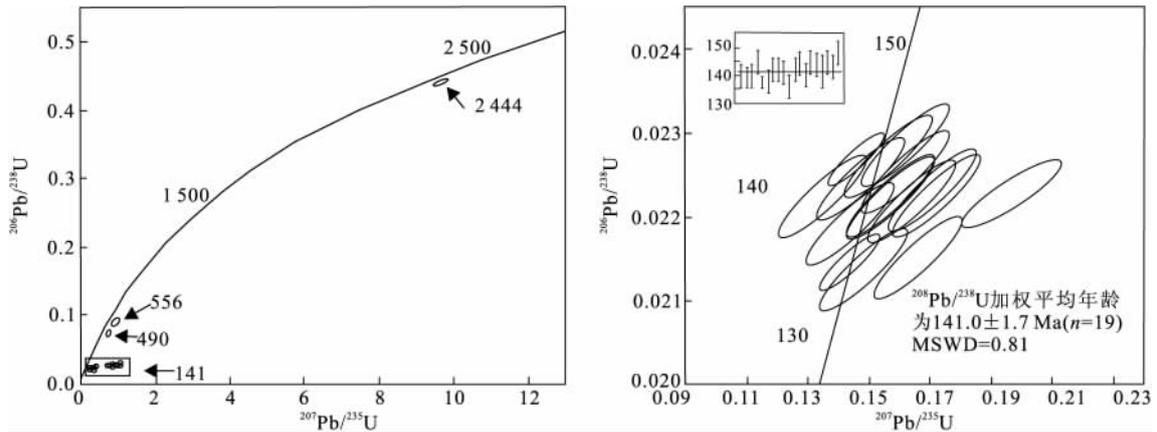


图 6 QTY 样品中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谱和图

Fig. 6 LA-ICP-MS U-Pb Concordia diagrams for the zircons from sample QTY

本次锆石的 U-Pb 年龄取值采用大于 1 000 Ma 的为锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 而小于 1 000 Ma 的则为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄. 由表 2 可知, QTY-6 锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(166 \pm 7)\text{Ma}$, 与其他锆石的 U 含量 $104 \times 10^{-6} \sim 302 \times 10^{-6}$ 相比, QTY-6 具有略高的 U 含量 370×10^{-6} , 给出了较老的年龄. 图 5 显示, 分析点 QTY-6 位于靠近锆石核部的位置, 介于老的继承核和新的增生锆石之间, 应为一个混合年龄. 点 QTY-8 和 QTY-12 测试所得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $490 \pm 24\text{Ma}$ 和 $556 \pm 27\text{Ma}$, 反映该锆石形成时间为早古生代和新元古代, 点 QTY-22 所得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2444 \pm 21\text{Ma}$, 说明该锆石的核部形成于古元古代, 以上 3 组年龄视为矿区岩浆热活动的继承锆石年龄, 均未参与平均年龄计算. 除此之外, 其余 19 个点的分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图 6), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $141.0 \pm 1.7\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.81$), 表明这些锆石的形成时间为早白垩世, 可作为姚家岭小青塘花岗闪长斑岩体的成岩年龄.

3.3 锆石微量元素特征

表 3 列出了 QTY 样品中分析锆石的微量元素数据结果. 由表可知, 锆石的稀土元素总量(REE)为 $316.23 \times 10^{-6} \sim 978.19 \times 10^{-6}$, 重稀土总量(HREE)为 $288.57 \times 10^{-6} \sim 917.78 \times 10^{-6}$, 轻稀土总量(LREE)除了 QYT-6 和 QYT-12 号锆石表现较高(分别为 98.78×10^{-6} 和 111.74×10^{-6})外, 其他的均介于 $20.29 \times 10^{-6} \sim 45.44 \times 10^{-6}$ 之间. LREE/HREE 比值介于 0.02~0.17 之间, $(\text{La})_{\text{N}}/(\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值除了 QYT-6(0.01)和 QYT-12(0.04)锆石外, 其他锆石分析点的比值都接近为零. 在锆石

的稀土元素配分特征图中, QYT-6 和 QYT-12 号锆石表现为较平坦的曲线图, 而包括 QYT-8 和 QYT-22 号继承锆石在内的其他锆石则表现为明显的轻稀土亏损、重稀土富集的特征(图 7).

锆石中的 δEu 大部分介于 0.25~0.77 之间, δCe 则大多数介于 20.65~293.58 之间, 均值为 87.90, 少数锆石点 δCe 低, 如点 QYT-6 为 4.45, 点 QYT-12 为 1.27, 但总体上锆石均表现为明显的 Eu 负异常和 Ce 正异常(图 7), 落入壳源锆石的范围内(Li *et al.*, 2000; Belousova *et al.*, 2002; 吴元保等, 2003). Nb 值为 $0.81 \times 10^{-6} \sim 7.60 \times 10^{-6}$ 之间, 均值为 2.80×10^{-6} , Ta 值介于 $0.15 \times 10^{-6} \sim 1.63 \times 10^{-6}$, 均值为 0.55×10^{-6} , Nb/Ta 值为 3.05~6.96, 总体上锆石中的 Nb、Ta 值和 Nb/Ta 比值均较低. 结合显微镜下观察发现, 锆石和金红石以共生组合体产出, 金红石强烈富集 Nb 和 Ta, 这可能是致使锆石 Nb、Ta 含量低的原因(Rudnick *et al.*, 2000; 吴元保等, 2002).

3.4 锆石 Hf 同位素特征

在锆石 U-Pb 年龄分析的基础上, 本文又对它们分别进行了 Hf 同位素分析, 分析结果见表 4. 从表中可知, 这些锆石的 $N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$ 初始值除了继承锆石 QTY-22 较低(0.281 073)外, 其他锆石的比值均较高(0.282 049~0.282 426). 继承锆石 QTY-8、QTY-12 和 QTY-22 的两阶段模式年龄值分别为 1 967 Ma、1 639 Ma 和 3 364 Ma, 它们的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为 -7.7、-2.0 和 -6.7. 在形成年龄 t 对 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解上, 这些继承锆石的投点较分散(图 8), 表明继承锆石的来源比较复杂, 同时也说明这些继承锆石是来自于先存的地壳. 此外, 除了混合年龄

表 3 QTY 样品中锆石微量元素含量(10^{-6})

Table 3 Trace element concentrations of zircons from sample QTY (10^{-6})

元素	QTY-1	QTY-2	QTY-3	QTY-4	QTY-5	QTY-6	QTY-7	QTY-8	QTY-9	QTY-10	QTY-11	QTY-12
Ti	3.98	4.49	3.67	2.19	2.91	4.28	1.32	5.96	4.16	1.28	2.44	8.98
Ta	0.36	0.38	0.43	0.30	0.52	0.50	0.35	0.36	0.53	0.28	0.30	0.56
Nb	2.01	2.63	2.56	1.30	3.06	3.08	1.80	1.97	3.61	1.51	1.91	1.71
La	0.23	0.28	0.03	0.00	0.00	3.58	0.27	0.03	0.02	0.00	0.01	20.10
Ce	21.97	18.43	23.58	18.25	33.20	59.69	18.09	8.47	5.93	14.47	17.57	52.18
Pr	0.14	0.09	0.06	0.10	0.03	2.64	0.09	0.04	0.00	0.04	0.04	4.46
Nd	1.50	0.89	0.67	1.58	0.93	16.10	0.70	1.03	0.40	1.20	0.65	22.05
Sm	1.98	2.12	1.79	3.04	2.21	11.82	1.46	1.99	1.61	2.37	1.29	9.37
Eu	1.05	1.14	1.00	1.18	1.30	4.95	0.68	1.42	1.15	1.05	0.74	3.58
Gd	10.04	11.32	11.18	12.68	13.32	29.54	7.87	12.34	12.16	10.04	8.95	33.89
Th	3.15	3.45	3.40	3.70	4.10	7.84	2.59	4.07	3.95	3.14	2.85	9.75
Dy	36.92	40.24	39.13	38.74	47.46	77.08	30.04	50.21	46.63	37.86	34.51	102.64
Ho	14.45	14.86	15.91	14.04	17.36	25.31	12.03	20.48	16.79	14.83	14.01	36.49
Er	72.60	73.84	79.28	65.36	84.31	110.20	59.84	101.78	78.24	74.76	72.08	161.79
Tm	17.17	17.39	18.52	14.60	19.44	24.22	14.18	23.19	16.92	17.62	17.62	34.39
Yb	187.33	189.18	202.58	151.17	200.19	241.77	156.06	233.64	166.32	192.78	191.85	328.69
Lu	44.15	43.49	47.94	33.72	45.17	52.59	36.61	48.94	32.15	44.29	45.43	66.91
Y	539.79	560.00	579.81	487.52	632.53	870.62	430.66	726.33	581.97	531.76	506.71	1110.78
$t(^{\circ}C)$	666	675	660	623	643	671	590	697	669	588	631	732
Σ REE	412.67	416.72	445.09	358.16	469.01	667.31	340.51	507.63	382.27	414.46	407.60	886.29
LREE	26.86	22.94	27.13	24.16	37.67	98.78	21.29	12.99	9.10	19.14	20.29	111.74
HREE	385.81	393.78	417.95	334.01	431.34	568.53	319.22	494.64	373.16	395.33	387.30	774.55
LREE/HREE	0.07	0.06	0.06	0.07	0.09	0.17	0.07	0.03	0.02	0.05	0.05	0.14
δ Eu	0.58	0.57	0.52	0.50	0.56	0.77	0.49	0.67	0.57	0.56	0.49	0.54
δ Ce	28.51	27.96	100.71	54.72	293.58	4.45	27.38	48.70	228.75	99.05	121.51	1.27

元素	QTY-13	QTY-14	QTY-15	QTY-16	QTY-17	QTY-18	QTY-19	QTY-20	QTY-21	QTY-22	QTY-23
Ti	5.63	4.51	2.98	8.94	7.06	9.78	4.83	3.98	3.66	4.82	3.54
Ta	0.32	0.57	0.45	0.40	1.63	1.12	0.15	0.57	0.46	1.31	0.89
Nb	1.37	3.31	2.22	2.35	7.60	5.87	0.81	3.00	2.46	4.00	4.17
La	0.14	0.37	0.01	0.89	0.02	0.03	0.00	0.03	0.06	0.03	0.02
Ce	26.61	49.96	24.17	37.21	62.47	46.75	22.69	31.21	27.07	15.45	23.41
Pr	0.33	0.38	0.04	0.39	0.10	0.13	0.13	0.08	0.07	0.07	0.02
Nd	3.86	4.00	0.87	2.28	2.14	2.74	1.24	0.99	0.69	1.21	0.74
Sm	5.65	5.63	1.84	3.29	4.55	6.63	2.33	2.70	1.86	3.34	1.99
Eu	2.65	1.94	0.89	1.39	2.32	4.13	1.28	1.38	0.96	0.71	1.02
Gd	21.98	22.92	9.67	13.53	25.42	40.96	10.96	14.30	10.56	15.77	12.42
Th	6.06	6.74	3.06	4.16	7.96	12.72	3.13	4.57	3.28	5.12	4.32
Dy	65.61	72.77	38.68	43.97	91.23	141.90	34.71	49.60	39.50	55.22	54.79
Ho	23.23	26.22	15.22	15.69	32.93	49.50	12.53	18.77	15.42	19.73	22.69
Er	104.46	116.01	77.15	68.00	149.54	203.95	56.16	87.38	72.93	83.35	110.36
Tm	22.90	25.35	18.53	14.76	32.20	41.00	12.95	19.83	17.03	16.21	26.71
Yb	231.09	248.04	203.64	145.08	317.81	360.49	129.99	204.77	181.16	149.84	276.30
Lu	48.36	53.12	48.10	29.53	63.67	67.26	28.14	44.66	40.65	28.82	61.32
Y	794.17	824.13	549.24	523.14	1082.67	1502.39	433.43	630.00	519.51	573.74	741.15
$t(^{\circ}C)$	693	676	645	731	711	739	681	666	660	681	657
Σ REE	562.94	633.44	441.88	380.15	792.36	978.19	316.23	480.27	411.23	394.88	596.11
LREE	39.24	62.28	27.82	45.44	71.60	60.41	27.67	36.38	30.70	20.81	27.20
HREE	523.69	571.16	414.05	334.71	720.76	917.78	288.57	443.88	380.53	374.07	568.91
LREE/HREE	0.07	0.11	0.07	0.14	0.10	0.07	0.10	0.08	0.08	0.06	0.05
δ Eu	0.63	0.45	0.52	0.55	0.52	0.59	0.64	0.54	0.52	0.25	0.48
δ Ce	20.65	28.56	149.03	15.12	183.47	101.57	53.02	107.73	85.29	55.50	269.04

表 4 QTY 样品中锆石 Hf 同位素分析数据

Table 4 Hf isotopic data of zircons from sample QTY

分析点	年龄 (Ma)	$N(^{176}\text{Hf})/N(^{177}\text{Hf})$		$N(^{176}\text{Yb})/N(^{177}\text{Hf})$		$N(^{176}\text{Lu})/N(^{177}\text{Hf})$		$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}^{C} (Ma)	$f(\text{Lu}/\text{Hf})$
		比值	2σ	比值	2σ	比值	2σ				
QTY-1	140	0.282 297	0.000 014	0.011 682	0.000 038	0.000 537	0.000 002	-16.8	-13.8	2 068	-0.98
QTY-2	139	0.282 387	0.000 012	0.006 880	0.000 167	0.000 307	0.000 007	-13.6	-10.6	1 867	-0.99
QTY-3	140	0.282 383	0.000 013	0.010 700	0.000 094	0.000 492	0.000 004	-13.7	-10.7	1 874	-0.99
QTY-4	146	0.282 365	0.000 011	0.008 730	0.000 268	0.000 361	0.000 009	-14.4	-11.2	1 912	-0.99
QTY-5	137	0.282 417	0.000 014	0.012 623	0.000 142	0.000 566	0.000 006	-12.5	-9.6	1 801	-0.98
QTY-6	166	0.282 335	0.000 011	0.012 009	0.000 193	0.000 560	0.000 007	-15.5	-11.9	1 967	-0.98
QTY-7	137	0.282 360	0.000 013	0.011 958	0.000 181	0.000 542	0.000 008	-14.6	-11.6	1 930	-0.98
QTY-8	490	0.282 254	0.000 016	0.014 051	0.000 451	0.000 607	0.000 020	-18.3	-7.7	1 949	-0.98
QTY-9	142	0.282 361	0.000 010	0.016 682	0.000 237	0.000 641	0.000 009	-14.5	-11.5	1 923	-0.98
QTY-10	142	0.282 356	0.000 011	0.010 340	0.000 066	0.000 482	0.000 003	-14.7	-11.6	1 934	-0.99
QTY-11	141	0.282 049	0.000 025	0.015 460	0.000 239	0.000 632	0.000 006	-25.6	-22.5	2 620	-0.98
QTY-12	556	0.282 378	0.000 012	0.023 091	0.000 167	0.000 887	0.000 005	-13.9	-2.0	1 639	-0.97
QTY-13	136	0.282 394	0.000 013	0.020 507	0.000 079	0.000 845	0.000 003	-13.4	-10.5	1 856	-0.97
QTY-14	143	0.282 359	0.000 010	0.009 091	0.000 085	0.000 421	0.000 004	-14.6	-11.5	1 926	-0.99
QTY-15	144	0.282 213	0.000 016	0.015 808	0.000 246	0.000 701	0.000 009	-19.8	-16.7	2 253	-0.98
QTY-16	150	0.282 404	0.000 012	0.024 327	0.000 869	0.000 952	0.000 029	-13.0	-9.8	1 825	-0.97
QTY-17	145	0.282 365	0.000 014	0.029 999	0.000 149	0.001 221	0.000 005	-14.4	-11.3	1 917	-0.96
QTY-18	144	0.282 243	0.000 021	0.022 651	0.000 099	0.000 914	0.000 004	-18.7	-15.6	2 188	-0.97
QTY-19	142	0.282 426	0.000 024	0.011 146	0.000 031	0.000 495	0.000 001	-12.2	-9.2	1 777	-0.99
QTY-20	145	0.282 378	0.000 020	0.015 106	0.000 052	0.000 669	0.000 002	-13.9	-10.8	1 884	-0.98
QTY-21	143	0.282 378	0.000 021	0.015 049	0.000 177	0.000 699	0.000 008	-13.9	-10.9	1 886	-0.98
QTY-22	2 444	0.28 1073	0.00 0023	0.02 1655	0.000 097	0.000 824	0.000 004	-60.1	-6.7	3 364	-0.98
QTY-23	148	0.282 416	0.000 012	0.012 133	0.000 077	0.000 558	0.000 004	-12.6	-9.4	1 796	-0.98

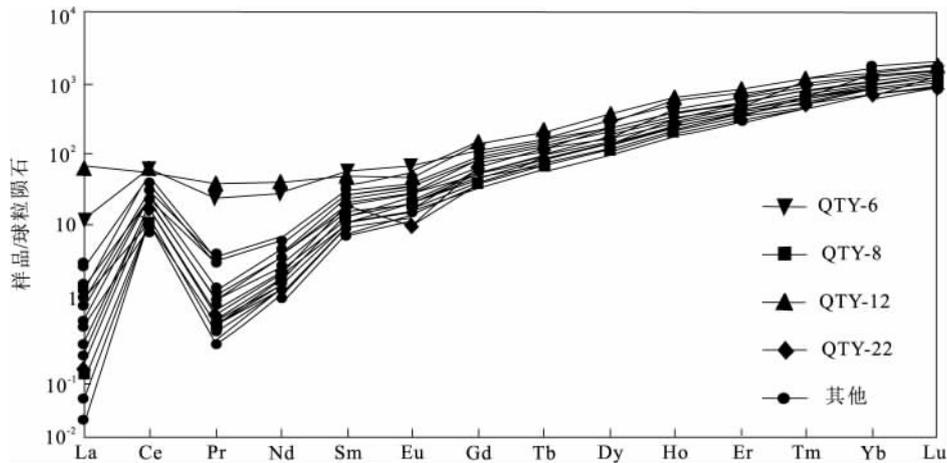


图 7 样品 QTY 中锆石的稀土元素配分型式(球粒陨石值据 Boynton, 1984)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of the zircons from sample QTY

龄点 QTY-6 外,其他的 19 个岩浆锆石点的两阶段模式年龄为 1 777~2 620 Ma,并主要集中在 1 900~2 000 Ma 之间(图 9). 它们的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 要比继承锆石的小,为 -22.5~-9.2. 在形成年龄 t 对 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解

上,这些岩浆锆石的投点发散(图 8),表明它们来源复杂,源区同位素不均一,但同时也指出,它们都来自于地壳,说明姚家岭花岗闪长斑岩是地壳岩石部分熔融的产物.

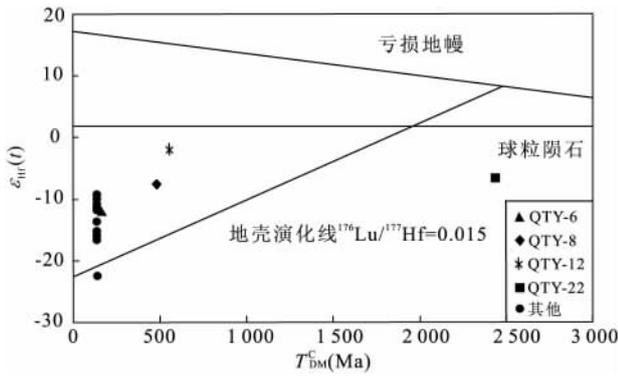


图 8 样品 QTY 中锆石 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ 图解

Fig. 8 Plot of $\epsilon_{Hf}(t)-t$ for zircons from sample QTY

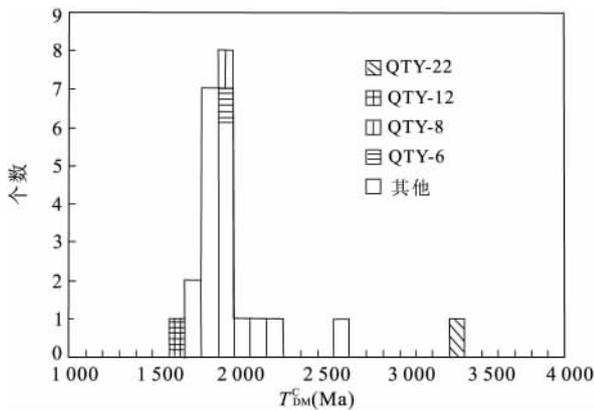


图 9 样品 QTY 中锆石 Hf 两阶段模式年龄直方图

Fig. 9 Histogram of the Hf two-stage model ages of zircons from sample QTY

4 讨论

4.1 成岩时代

铜陵地区岩浆活动强烈,地表出露的大小岩体达到 70 余个,多呈中—浅成岩产出.前人对这些岩体进行了锆石 SHRIMP U-Pb 和 LA-ICP-MS U-Pb 的年龄研究,并获得了它们的形成年龄为 $137.5 \pm 1.1 \text{ Ma} \sim 151.8 \pm 2.6 \text{ Ma}$ 之间(杜杨松等, 2007; 吴淦国等, 2008; 谢建成, 2008).本次实验所获得的姚家岭矿区花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $141.0 \pm 1.7 \text{ Ma}$,表明该岩体的形成时代为早白垩世,与铜陵矿集区中生代主要成矿岩体的年龄一致.同时,姚家岭花岗闪长斑岩中锆石的 Hf 同位素两阶段模式年龄显示,继承锆石 QTY-22 分析点的年龄为 3 364 Ma,表明该区存在古太古代从亏损地幔分异形成的地壳岩石.与分析点 QTY-22 相比,其他锆石分析点的 Hf 同位素两阶段模式年龄均较小,分布于 1 639~2 620 Ma

之间,主体为 1 900~2 000 Ma(图 9),说明该区地壳岩石从亏损地幔分异出来的时间主体为古元古代,指示该区在古元古代发生过一次较为强烈的壳幔分异事件(吴福元等, 2007).

4.2 成岩温压条件

近年来,逐渐发展起来的依据锆石-金红石饱和度的地质温度计方法在探讨成岩温度方面得到了广泛应用.通过对锆石中 Ti 含量的分析,可以计算出岩石形成的温度(Watson and Harrison, 2005; Watson *et al.*, 2006; Anderson, 2008).在姚家岭矿区,蚀变的花岗闪长斑岩中存在有大量的锆石-金红石,它们多以共生组合体产于绢云母化的黑云母和角闪石中(图 2b),或分布于岩石基质中,因此可以利用锆石-金红石饱和温度计对岩石的形成温度进行研究.计算公式为:

$$t = \frac{5\,080 \pm 30}{(6.01 \pm 0.03) - \ln c(\text{Ti})} - 273.$$

计算结果见表 3.由表中数据可知,样品 QTY 中的继承性锆石 QTY-8、QTY-12 和 QTY-22 的 Ti 温度分别为 671℃、732℃和 681℃,分别代表了这些继承锆石的结晶温度.此外,除了混合年龄点 QTY-6,其余 19 个岩浆锆石的 Ti 温度为 558~739℃,峰值为 640~700℃(图 10),平均值为 663℃,代表了在姚家岭矿区与成矿作用密切相关的花岗闪长斑岩体的结晶温度.

在研究花岗质岩石的形成物理条件方面,地质学家除了分析岩石的形成温度外,还利用岩石 CIPW 标准矿物在 Q-Ab-Qr 相图上的分布情况来确定岩浆的侵位深度.通过对姚家岭花岗闪长斑岩的标准矿物在 Q-Ab-Qr 相图上的投点可知(图 11),投影点位于 50~250 MPa 处,集中于 50 MPa

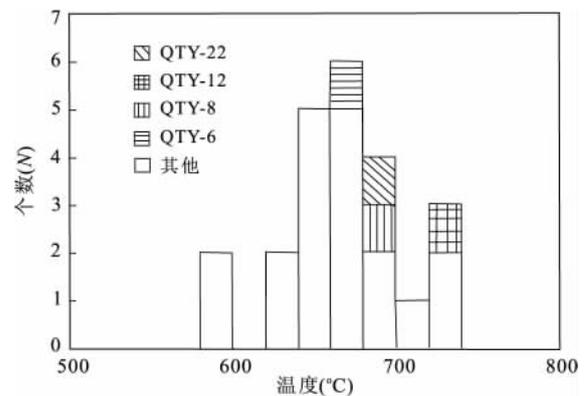


图 10 样品 QTY 中锆石 Ti 温度直方图

Fig. 10 Histogram of Ti temperature for zircons from sample QTY

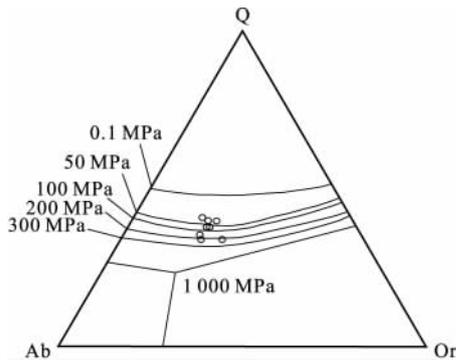


图 11 姚家岭花岗闪长斑岩在 Ab-Qr-Q 相图上的分布
Fig. 11 The distribution of Yaojialing granodiorite porphyry in Ab-Qr-Q phase diagram

左右,依此可以获得姚家岭花岗闪长斑岩岩浆所处的深度为 1.65~8.25 km,主体为 1.65 km,说明姚家岭花岗闪长斑岩体为浅成-超浅成相。此外,图 11 还显示,投影点位于相图的低温槽处,据此可以判断形成该岩体的岩浆应该是富水的低温岩浆(King and White,2004)。

4.3 岩石成因

通过对样品 QTY 所测锆石的 Hf 同位素分析可知,包括继承锆石在内的所有分析点的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-2.0~-22.5)都小于零,并且都远离同时期的亏损地幔 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,表明这些岩浆锆石都来源于地壳。同时,在稀土元素方面,这些锆石均具有明显的 Eu 负异常和 Ce 正异常(图 7),同样指示了它们具有壳源锆石的特征(Li *et al.*,2000; Belousova *et al.*,2002;吴元保等,2003),说明姚家岭矿区与成矿有关的花岗闪长斑岩是地壳岩石部分熔融的产物。值得注意的是,QTY 样品中见有继承锆石,年龄为 490 ± 24 Ma、 556 ± 27 Ma 和 2344 ± 21 Ma,分别代表了早古生代、新元古代和古元古代的岩浆锆石,说明花岗闪长斑岩的成岩物质来源比较广泛,有中下地壳物质参与到岩浆作用中,并暗示了中下地壳可能是岩浆源区。

在铜陵地区,有关中生代中酸性侵入岩的岩石成因研究,众多学者认为它们是壳幔相互作用的直接产物(吴福元和孙德有,1999;邓晋福和吴宗絮,2001;杜杨松等,2007)。姚家岭花岗闪长斑岩的形成时代为早白垩世,与铜陵矿集区中生代侵入岩的年龄一致,说明姚家岭花岗闪长斑岩的成岩作用是在壳幔相互作用的统一动力学背景下进行的。软流圈上涌(吴福元和孙德有,1999;邓晋福和吴宗絮,2001),幔源岩浆底侵(杜杨松等,2007),地壳岩石

的部分熔融,是形成姚家岭花岗闪长斑岩岩浆的重要机制。

5 结论

姚家岭小青塘花岗闪长斑岩具有较高的 SiO_2 (67.08%~68.57%) 含量, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.68~1.02,为 I 型花岗岩,属于高钾钙碱性系列。锆石具有明显的环带结构, Th/U 比值为 0.34~1.20,为典型的岩浆锆石。锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 141.0 ± 1.7 Ma,说明花岗闪长斑岩形成于早白垩世。锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -22.5~-9.2, Hf 同位素两阶段模式年龄为 1639~2620 Ma,表明形成花岗闪长斑岩的岩浆是古元古代地壳岩石部分熔融的产物。此外,研究还表明,花岗闪长斑岩的结晶温度为 558~739 °C,成岩压力为 50~250 MPa。

致谢:野外工作得到了蒋其胜总工的大力支持和帮助,锆石实验得到了中国地质大学(武汉)胡兆初老师和西北大学张红老师的帮忙。论文撰写过程中,罗照华教授和周新民教授提供了宝贵建议,使作者受益匪浅。同时,评审专家对本文的审阅并提出建设性的修改意见,在此一并表示诚挚的感谢!

References

- Anderson, J. L., 2008. Thermometers and Thermobarometers in Granitic Systems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69(1): 121-142. doi: 10.2138/rmg.2008.69.4
- Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., et al., 1999. Nature of the Earth's Earliest Crust from Hafnium Isotopes in Single Detrital Zircons. *Nature*, 399: 252-255. doi: 10.1038/20426
- Belousova, E. A., Griffin, W. L., Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143(5): 602-622. doi: 10.1007/s00410-002-0364-7
- Blichert-Toft, J., Albarede, F., 1999. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00040-X
- Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Element: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 63-114.
- Chang, Y. F., Liu, X. P., Wu, Y. C., 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the

- Changjiang River. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Deng, J. F., Wu, Z. X., 2001. Lithospheric Thinning Event in the Lower Yangtze Craton and Cu-Fe Metallogenic Belt in the Middle and Lower Yangtze River Reaches. *Geology of Anhui*, 11(2): 86—91 (in Chinese with English abstract). doi:1005-6157(2001)02-0086-06
- Du, Y. S., Li, S. T., Cao, Y., et al., 2007. UAFC-Related Origin of the Late Jurassic to Early Cretaceous Intrusions in the Tongguanshan Ore Field, Tongling, Anhui Province, East China. *Geoscience*, 21(1): 71—77 (in Chinese with English abstract). doi:1000-8527(2007)01-0071-07
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle; LAM-MC-ICP MS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlite. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 64: 133-147. doi:10.1016/S0016-7037(99)00343-9
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chem. Geol.*, 211(1-2): 47—69. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
- Jiang, Q. S., Han, C. S., Huang, J. M., et al., 2010. Geological Report of General Survey of the Yaojialing Copper-Lead-Zinc Deposit in Nanling, Anhui Province (in Chinese).
- Jiang, Q. S., Zhao, Z. H., Huang, J. M., 2008. Discovery of the Yaojialing Copper-Lead-Zinc Deposit in Nanlin, Anhui, and Its Significance. *Geology in China*, 35(2): 314—321 (in Chinese with English abstract). doi:1000-3657(2008)02-0314-08
- King, P. L., White, A. J. R., 2004. Granites, Volatile Solubility & Tracking the Formation of Magmatic Fluids. In: *Geoscience Australia, the Ishihara Symposium: Granites and Associated Metallogenesis*, 85—88.
- Li, X. H., Liang, X., Sun, M., et al., 2000. Geochronology and Geochemistry of Single-Grain Zircons; Simultaneous in-situ Analysis of U-Pb Age and Trace Elements by LAM-ICP-MS. *European Journal of Mineralogy*, 12(5): 1015—1024. doi:10.1127/0935-1221/2000/0012-1015
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot /EX Version 3. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 41—70.
- Mao, J. W., Shao, Y. J., Xie, G., Q., et al., 2009. Mineral Deposit Model for Porphyry-Skarn Polymetallic Copper Deposits in Tongling Ore Dense District of Middle-Lower Yangtze Valley Metallogenic Belt. *Mineral Deposits*, 28(2): 109—119 (in Chinese with English abstract). doi:0258-7106(2009)01-0109-11
- Rudnick, R., Barth, M., Horn, I., et al., 2000. Rutile-Bearing Refractory Eclogites; Missing Link between Continents and Depleted Mantle. *Science*, 287(5451): 278—281. doi:10.1126/science.287.5451.278
- Söderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The Lu-176 Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3-4): 311—324. doi:10.1016/S0012-821X(04)00012-3
- Vavra, G., Schmid, R., Gebauer, D., 1999. Internal Morphology, Habit and U-Th-Pb Microanalysis of Amphibolite-to-Granulite Facies Zircons; Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134(4): 380—404. doi:10.1007/s0041000050492
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 2005. Zircon Thermometer Reveals Minimum Melting Conditions on Earliest Earth. *Science*, 308(5723): 841—844. doi:10.1126/science.1110873
- Watson, E. B., Wark, D. A., Thomas, J. B., 2006. Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413-433. doi:10.1007/s00410-006-0068-5
- Wen, C. H., Xu, W. Y., Zhong, H., et al., 2011. Geological Characteristics and Fluid Inclusion Studies of Shallow Mineralization in Yaojialing Zn-Au Polymetallic Deposit, Anhui Province. *Mineral Deposits*, 30(3): 533—546 (in Chinese with English abstract). doi:0258-7106(2011)03-0533-14
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract). doi:1000-0569/2007/023(02)-0185-20
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., 1999. The Mesozoic Magmatism and Lithospheric Thinning in Eastern China. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4): 313—318 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. G., Zhang, D., Di, Y. J., et al., 2008. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Intrusives in the Tongling Metallogenic Cluster and Its Dynamic Setting. *Science in China (Series D)*, 51(7): 630—645. doi:10.1007/s11430-008-0067-7
- Wu, Y. B., Chen, D. G., Xia, Q. K., et al., 2002. Rare Earth Element Analysis of Zircons from Eclogite in Huang-

- zhen, Dabie Mountain; Characteristics of Rare Earth Element in Metamorphic Zircons from Eclogite. *Chinese Science Bulletin*, 47(11): 859—863 (in Chinese).
- Wu, Y. B., Chen, D. G., Xia, Q. K., et al., 2003. LA-ICP-MS Rare Earth Element Analysis and Pb-Pb Dating of Zircon from Granulite in Huangtuling, Dabie Mountain, China. *Science in China (Series D)*, 33(1): 20—28 (in Chinese).
- Xie, J. C., Yang, X. Y., Du, J. G., et al., 2008. Zircon U-Pb Geochronology of the Mesozoic Intrusive Rocks in the Tongling Region; Implications for Copper-Gold Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1782—1800 (in Chinese with English abstract). doi: 1000-0569/2008/024(08)-1782-00
- Zhai, Y. S., Yao, S. Z., Lin, X. D., et al., 1992. Metallogenic Regularities of Iron-Copper (Gold) in the District of the Middle-Lower of the Changjiang River, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌, 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社.
- 邓晋福, 吴宗絮, 2001. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游 Cu-Fe 成矿带. *安徽地质*, 11(2): 86—91. doi: 1005-6157(2001)02-0086-06
- 杜杨松, 李顺庭, 曹毅, 等, 2007. 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. *现代地质*, 21(1): 71—77. doi: 1000-8527(2007)01-0071-07
- 蒋其胜, 韩长生, 黄建满, 等, 2010. 安徽省南陵县姚家岭铜铅锌金银矿床普查地质报告.
- 蒋其胜, 赵自宏, 黄建满, 2008. 安徽南陵姚家岭铜铅锌矿床的发现及意义. *中国地质*, 35(2): 314—321. doi: 1000-3657(2008)02-0314-08
- 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 等, 2009. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型. *矿床地质*, 28(2): 109—119. doi: 0258-7106(2009)01-0109-11
- 文春华, 徐文艺, 钟宏, 等, 2011. 安徽姚家岭锌金多金属矿床地质特征与浅部矿化流体包裹体研究. *矿床地质*, 30(3): 533—546. doi: 0258-7106(2011)03-0533-14
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185—220. doi: 1000-0569/2007/023(02)-0185-20
- 吴福元, 孙德有, 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. *长春科技大学学报*, 29(4): 313—318.
- 吴淦国, 张达, 狄永军, 等, 2008. 铜陵矿集区侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其深部动力学背景. *中国科学(D 辑)*, 38(5): 630—645.
- 吴元保, 陈道公, 夏群科, 等, 2002. 大别山黄镇榴辉岩锆石的微区微量元素分析: 榴辉岩相变质锆石的微量元素特征. *科学通报*, 47(11): 859—863.
- 吴元保, 陈道公, 夏群科, 等, 2003. 大别山黄土岭麻粒岩中锆石 LA-ICP-MS 微区微量元素分析和 Pb-Pb 定年. *中国科学(D 辑)*, 33(1): 20—28.
- 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等, 2008. 铜陵地区中生代侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及 Cu-Au 成矿指示意义. *岩石学报*, 24(8): 1782—1800. doi: 1000-0569/2008/024(08)-1782-00
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等, 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社.