doi:10.3799/dqkx.2010.074

浙东南怀溪铜金矿床与曹门碱性花岗岩体成因关系的年代学制约

李艳军[1],魏俊浩[1],姚春亮[1],鄢云飞[2],谭 俊[1],彭丽娜[1],肖广玲[1],叶泽富[3]

1.中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074
2.紫金矿业集团股份有限公司,福建上杭 364200
3.浙江省第十一地质大队,浙江温州 325006

摘要: 怀溪铜金矿床位于浙东南政和—大埔大断裂和长乐—南澳大断裂间坳陷区,为典型的热液脉状充填型Cu-Au多金属矿床.曹门钾长花岗斑岩为矿区内最主要的侵入体,化学成分显示为钾玄质岩系,具高硅、富碱和铁、贫钙和镁的特征,SiO_2含量为75.64%~78.00%,K_2O为5.38%~5.92%,K_2O/Na_2O比值为1.94~2.72;富集Ga、Rb、Th、U等元素,亏损Ba、Nb、Sr、P和Ti,REE具明显的负Eu异常,总体呈现右倾"V"型配分模式.矿物组成及地球化学特征与浙闽沿海晚白垩世碱性花岗岩一致.曹门钾长花岗斑岩体锆石LA-ICP-MS U-Pb年代为102±1 Ma(MSDW=1.3),而怀溪铜金矿床的石英流体包裹体Rb-Sr等时线年龄为101±2 Ma,成岩成矿时代一致.成岩成矿时代的确定为成岩成矿具有密切成因关系提供了重要的年代学制约,表明怀溪铜金矿床是东南沿海晚白垩世后碰撞弧后拉张构造—热事件的产物,为华南中生代第3次大规模成矿的一部分.

关键词: 锆石LA-ICP-MS U-Pb定年;地质年代;碱性花岗岩;怀溪铜金矿床;浙江.

中图分类号: P597 **文章编号:** 1000-2383(2010)04-0585-12 **收稿日期:** 2009-11-06

Genetic Relationship of the Huaixi Copper-Gold Deposit and the Caomen Alkaline Granite, Southeastern Zhejiang Province, China: Constraint from Geochronologies

LI Yan-jun[1], WEI Jun-hao[1], YAO Chun-liang[1], YAN Yun-fei[2], TAN Jun[1], PENG Li-na[1], XIAO Guang-ling[1], YE Ze-fu[3]

1. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*
2. *Zijin Mining Group Co., Ltd, Shanghang* 364200, *China*
3. *No.11 Geological Team of Zhejiang Burean of Geology and Mineral Resources, Wenzhou* 325006, *China*

Abstract: The Huaixi copper-gold deposit, located in depression area between the Zhenghe-Dapu and Changle-Nan'ao deep faults in southeastern Zhejiang Province, is a typical hydrothermal vein filling-metasomatic Cu-Au polymetallic deposit. The Caomen K-feldspar granite porphyry pulton is the dominant intrusion in the deposit. Petrography and chemical compositions show that it belongs to shoshonite series characterized by high silicon, and it is enriched in alkali and iron but depleted in phosphorus and titanium. Its SiO_2 contents range from 75.64% to 78.00%, while K_2O and K_2O/Na_2O ratios vary from 5.38% to 5.92% and 1.94 to 2.72 respectively. Ga, Rb, Th, U and Pb elements are enriched in the intrusion while Ba, Nb, Sr, P and Ti are depleted. REE is characterized with obvious negative anomalies with Eu/Eu* 0.06-0.13 and exhibits right-dipping "V" patterns with LREE enrichment. Its mineralogy and geochemistry are consistent with those of Late Cretaceous alkaline granites in the coastal areas of Zhejiang-Fujian. This study offers the first highly precise dating of the diagenesis and mineralization in the deposit. The dating of zircon from the Caomen alkaline granite pulton determined by LA-ICP-MS yields age of 102±1 Ma (MSDW=1.3), while Rb and Sr isotopic dating of fluid inclusions in quartz of the Huaixi copper-gold deposit yields isochron

基金项目: 教育部创新团队发展计划(IRT0755);全国危机矿山接替资源找矿项目(No. 2006020035);中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室基金.

作者简介: 李艳军(1982-),男,在读博士研究生,主要从事矿床地球化学及成矿规律与成矿预测研究工作. E-mail: liyanjun21023@163.com

age of 101±2 Ma. The results suggest that Cu-Au mineralization was consistent with granite crystallization. The ages of diagenesis and mineralization provide an important chronological constraint for the close genetic relationship of the deposit and the Caomen intrusion. The Huaixi Cu-Au deposit, originated from back-arc extensional tectonic-heat event related to high angle subduction of the ancient Pacific plate, caused by northward movement of the Indian plate, is corresponding to the time of the third large-scale mineralization regionally in the Mesozoic.

Key words: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochronology; alkaline granite; Huaixi copper-gold deposit; Zhejiang Province.

碱性岩与 Cu-Au 矿床的关系是近年来矿床学家关注的热点问题之一. Mineralium Deposita 杂志曾在 2002 年第 1 期刊出专刊,用于探讨两者的成因关系. 一些世界级的 Cu-Au 矿床与碱性岩密切相关,如巴布亚新几内亚的 Ladolan 和 Perogera Au 矿床(Müller *et al.*, 2002)、美国的 Cripple Creek Au 矿床(Kelley and Ludington, 2002)、澳大利亚的 Cadia 斑岩 Cu-Au 矿床(Blevin, 2002; Holliday *et al.*, 2002). 在我国,如东坪、归来庄(赵振华等,2002)和水泉沟(江思宏和聂凤军,2000)等 Cu-Au 矿床也与碱性岩有关. 浙闽沿海地区是我国重要的碱性岩带之一(赵振华等,2002),区内相继有青田(董传万和彭亚鸣,1994)、桃花岛(邱检生等,1996,1999)、魁歧(邱检生等,1999)和瑶坑(邱检生等,2000a;肖娥等,2007)等碱性花岗岩报道,但迄今未见关于与碱性花岗岩有成因关系的 Cu-Au 矿床的论文发表.

怀溪铜金矿床位于浙闽沿海碱性花岗岩带的北中段,属于典型的热液脉状充填型 Cu-Au 多金属矿床(胡永和等,1994). 前人对该矿床的成矿物化条件和成矿流体进行了初步研究,成矿温度范围为200~300 ℃,成矿压力变化于(126.25~295.5)×10^5 Pa,属浅成中温热液矿床;成矿液体 pH 值为 4.5~6.0,*Eh* 值为−0.43~+0.37(陶奎元等,1998),且成矿流体为岩浆水和大气降水的混合(胡永和和李长江,1990;浙江省第十一地质大队,1993,浙江省平阳县怀溪地区铜矿普查—预测地质报告). 但该矿床的成岩成矿时代及其成因关系等尚不明了,在一定程度上制约了该矿床的成因研究和找矿工作. 为此,本文首次应用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 和石英流体包裹体 Rb-Sr 法厘定了该矿床的成岩成矿时代,从而为怀溪铜金矿床与曹门碱性花岗岩的成因关系提供了重要的时间证据.

1 矿床地质概况

怀溪铜金矿床位于浙江省平阳县怀溪乡,大地构造属于浙东南政和—大埔大断裂和长乐—南澳大断裂间坳陷区(图 1a). 矿床产于山门火山洼地的次级火山机构——双尖山破火山与南田火山穹窿的交汇部位(浙江省第十一地质大队,1993,浙江省平阳县怀溪地区铜矿普查—预测地质报告). 矿区内出露地层主要是下白垩统和第四系(图 1b). 其中下白垩统朝川组(K_1c)为陆相中酸性、酸性熔岩、火山碎屑岩夹沉积层,与其下伏地层为整合接触关系. 根据岩性组合自下而上可分为 2 个岩性段:第一岩性段(K_1c^1)为英安质含角砾凝灰岩、英安玢岩、流纹质凝灰岩、流纹(斑)岩,上部为薄层状紫红色凝灰质粉砂岩;第二岩性段(K_1c^2)为英安质凝灰岩、流纹质凝灰岩,顶部为沉凝灰岩. 矿区内断裂构造发育,以 NW 向为主,其次为 NE 向、近 EW 向(图 1b). NW 向断裂总体走向 290°~315°,呈相间平行、近等距展布,间距 200~400 m,产状 185°~230°∠65°~82°,经历了多期次活动,早期为压扭性,后期转为张扭性,总体显示压扭性特征(浙江省第十一地质大队,1993,浙江省平阳县怀溪地区铜矿普查—预测地质报告),

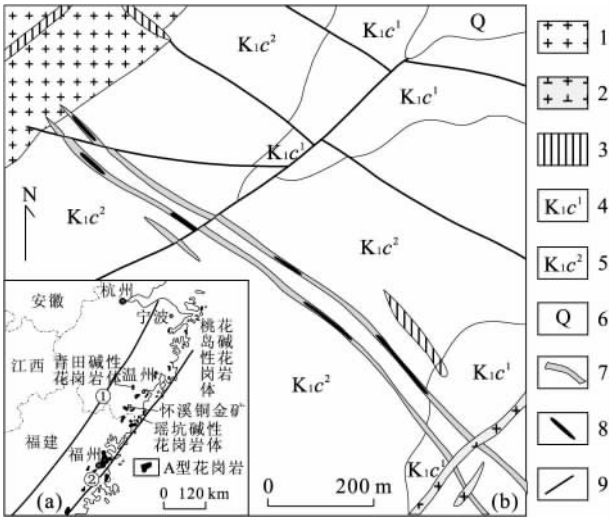

图 1 怀溪铜金矿床地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of the Huaixi copper-gold deposit

a 图据邱检生等(1999)和肖娥等(2007)修改;b 图据陶奎元等(1998)修改;1. 钾长花岗斑岩;2. 斑状碱长花岗岩;3. 辉绿玢岩;4. 朝川组第一岩性段;5. 朝川组第二岩性段;6. 第四系;7. 矿化带;8. 矿体;9. 断裂;①政和—大埔大断裂;②长乐—南澳大断裂

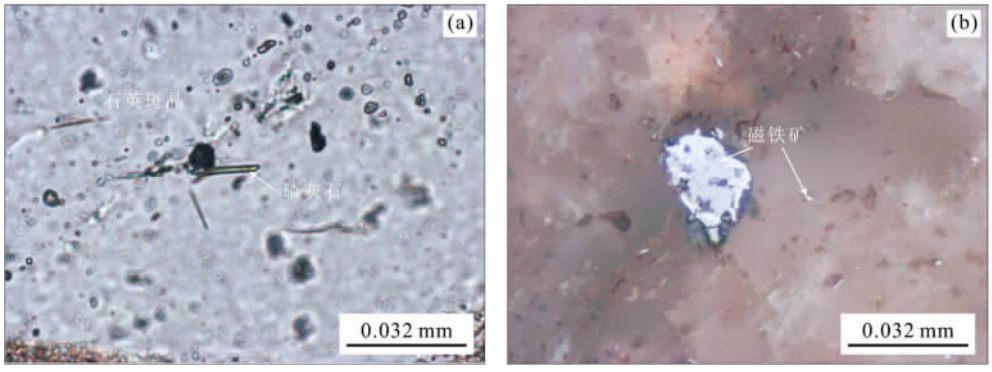

图 2　曹门钾长花岗斑岩体副矿物磷灰石(a. 透射单偏光)和磁铁矿(b. 反射光)显微照片

Fig. 2　Microphotographs of apatite (a) and magnetites (b) in the Caomen intrusion

是主要的控矿构造. NE 向、近 EW 向断裂形成较晚，切穿矿化带. 矿区岩浆岩主要为曹门钾长花岗斑岩，后期发育斑状碱长花岗岩脉和辉绿玢岩脉.

钾长花岗斑岩体呈岩株产出，从曹门延伸至张基，地表出露面积约 12 km^2，岩性较均一，相带分异不明显. 岩石呈浅肉红色，块状构造，镜下鉴定为斑状结构，斑晶为条纹长石、石英及少量的黑云母. 斑晶条纹长石呈半自形－自形、长柱状，粒径 0.5～3.0 mm，最大可达 5 mm，含量 15%～20%，并可见网脉状条纹结构；石英斑晶以他形为主，粒径 0.4～2.5 mm，可见波状消光，局部被基质熔蚀，暗示为浅成环境，含量 10%～15%；黑云母片状，含量 2%～5%，局部绿泥石化. 基质为隐晶质结构，矿物组成为微晶碱性长石(40%～45%)和石英(20%～25%). 副矿物包括锆石、磷灰石(图 2a)、磁铁矿(图 2b)等. 矿物组成与浙闽沿海晚白垩世的瑶坑(邱检生等，2000a；肖娥等，2007)、青田(董传万和彭亚鸣，1994)、桃花岛(邱检生等，1996，1999)和魁岐(邱检生等，1999)等碱性花岗岩基本一致. 斑状碱长花岗岩脉和辉绿玢岩脉穿切矿化带，侵位晚于成矿.

怀溪矿区共发现 5 个铜、金矿化带，已圈出 7 个矿体，全部产于断裂构造中. 水平方向上，矿体呈透镜状赋存于断裂中，走向与断裂构造一致；垂直方向上，矿体呈脉状、透镜状、串珠状，尖灭再现和膨缩现象明显. 产状与控矿断裂一致，倾向南西，均向南东侧伏，侧伏角为 10°～20°. 矿石矿物以黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿(金以脉状形式充填于其裂隙中)为主，另可见脆硫锑铅矿、砷铜矿、辉铜矿、铜蓝和孔雀石. 脉石矿物以石英为主，次为方解石、绿帘石、绿泥石和绢云母等，矿石结构主要有脉状交代结构、交代残余结构、脉状充填结构、固溶体分离结构、镶边结构等；矿石构造主要为块状构造、斑杂状构造和浸染状构造. 近矿围岩蚀变发育，有硅化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化和粘土化等，以硅化和绢云母化为主，次为绿泥石化和粘土化，并伴随黄铁矿化，无明显的蚀变界线. 根据矿物组合、结构构造及矿物生成顺序，怀溪铜金矿可划分为内生期和表生期 2 个成矿期，内生期进一步划分为黄铁矿－石英阶段、多金属硫化物阶段和碳酸盐阶段 3 个成矿阶段.

2　分析方法

锆石 U-Pb 年代学样品(120°9′36″E，27°39′59.7″N，海拔 170 m)在廊坊区域地质矿产调查研究所实验室利用标准技术进行了分选. 锆石制靶后，磨蚀至锆石核部出露，然后进行锆石阴极发光(CL)照相，以观察锆石的内部结构. 锆石 U-Pb 年龄在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 方法测定，所用激光束斑直径为 32 μm. 实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气，锆石 91500 作为外标，NIST610 作为内标，分析方法及仪器参数详见 Yuan *et al*. (2004). 锆石测定点的同位素比值、U-Pb 表面年龄和 U-Th-Pb 含量计算采用 GLITTER 程序. 采用 Andersen(2002)方法对普通 Pb 进行校正，并用 ISOPLOT 程序进行锆石谐和图的绘制，采用年龄为 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄，误差为 2σ.

用于石英流体包裹体 Rb-Sr 定年的样品取自余坑和怀溪段不同标高平硐中的黄铁矿－石英阶段含矿石英脉，破碎至粒径为 0.25～0.50 mm，用超声波清洗掉附在石英表面和裂隙中的 Rb、Sr，然后在双目镜下挑纯至 95%以上. 样品测试在宜昌地质矿产研究所同位素地球化学研究室 MAT-262 固体质谱计上完成. 将样品放置在石英杯中，加 1∶1 盐酸，在

低温电热板上煮沸60 min以除去硫化物等杂质，再用去离子水冲洗数次至近中性，在120～160 ℃的条件下，采用热爆－超声洗涤法除去次生包裹体，然后准确称取0.1～1.0 g样品并置于聚四氟封闭熔样器中，熔样加入适量的($^{87}Rb+^{86}Sr$)混合稀释剂，用$HF+HClO_4$在微波炉中分解样品后以盐酸溶液为介质用阳离子交换柱分离Rb和Sr(李华芹等，1993).化学流程本底Rb、Sr为2×10^{-10}，$^{87}Rb/^{86}Sr$比值的测定误差在1%～2%之间.

全岩组成分析样品，清洗烘干，无污染粉碎至200目以上.主量元素组成在宜昌地质矿产研究所岩矿测试室采用湿化学方法分析完成，分析精度优于1.4%；微量元素组成在GPMR用ICP-MS方法测定获得，精度优于5%.用于硫同位素测试的硫化物样品取自余坑和怀溪段不同标高平硐中的多金属硫化物阶段矿脉，破碎至粒径为0.25～0.50 mm，用超声波清洗烘干，然后在双目镜下挑纯至95%以上.样品测试在宜昌地质矿产研究所同位素地球化学研究室MAT-262固体质谱计上完成.

3 分析结果

3.1 岩石地球化学

曹门钾长花岗斑岩体的主量元素、微量元素(包括稀土元素)分析结果列于表1.曹门岩体SiO_2变化范围为75.64%～78.00%(平均值76.63%)，K_2O为5.38%～5.92%，K_2O+Na_2O为7.96%～8.82%，K_2O/Na_2O为1.94～2.72.铝含量较低(11.13%～12.39%)，P_2O_5含量为0.01%～0.02%，随SiO_2增加而降低；CaO含量低，变化于0.08%～0.17%.富铁，FeO^T($FeO+0.9\times Fe_2O_3$)含量为1.34%～3.31%，MgO为0.05%～0.13%，$FeO^T/(FeO^T+MgO)$变化于0.91～0.97.CIPW标准矿物计算显示样品出现了刚玉分子，碱性长石含量明显高于钙长石.岩体总体具高硅、富碱和铁、贫钙和镁特征，与浙江沿海同期碱性花岗岩(董传万和彭亚鸣，1994；邱检生等，1996，1999；肖娥等，2007)具有极为相似的化学成分组成.

微量元素组成上，曹门岩体富Rb、Th、U、Pb，贫Ba、Nb、Sr、P和Ti(图3a).Pearce(1982)Ta/Yb－Th/Yb图解显示该岩体为钾玄质岩(图4).10 000×Ga/Al比值为2.58～3.81，与A型花岗岩平均值3.75(Whalen *et al.*，1987)一致，与瑶坑、青田和桃花岛等碱性花岗岩体同属A型花岗岩(图5).R_1-10^4 Ga/Al和Nb-Y-Ce图解(图6)进一步表明其属于PA(Hong *et al.*，1996)或A2(Eby，1992)型花岗岩，即侵位于板块碰撞后或后造山张性构造环境.稀土元素总量(∑REE)为$(248.0\sim428.7)\times10^{-6}$，轻重稀土分异较明显，LREE/HREE=7.16～8.23，$(La/Yb)_N=6.54\sim10.54$.Eu/Eu*为0.06～0.13(平均值0.08)(表1)，具明显负Eu异常.球粒陨石标准化的稀土元素模式为轻

表1 曹门钾长花岗斑岩体主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果

Table 1 Major and trace element compositions of the Caomen K-feldspar granite-porphyry pulton

样品号	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	灼失	总量	K_2O/Na_2O
HX-1	76.51	0.92	12.39	0.51	0.08	0.13	5.92	2.90	0.18	0.01	0.04	0.19	99.81	2.04
HX-3	78.00	1.19	11.13	0.84	0.08	0.05	5.82	2.14	0.12	0.01	0.07	0.27	99.73	2.72
CM-2	75.64	1.48	11.69	1.98	0.17	0.09	5.38	2.77	0.15	0.02	0.08	0.02	99.48	1.94
CM-3	76.36	0.85	11.14	2.50	0.15	0.13	5.78	2.42	0.15	0.02	0.07	<0.01	99.56	2.39

样品号	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
HX-1	16.91	226.84	52.74	41.87	258.04	27.08	90.71	48.97	106.14	12.01	44.92	8.75	0.36	7.35
HX-3	21.63	219.40	42.22	62.09	533.53	40.61	93.83	62.70	138.93	14.85	54.08	10.89	0.19	9.10
CM-2	22.38	215.12	65.36	73.26	634.84	41.67	111.31	67.55	155.09	16.89	63.61	12.43	0.37	11.21
CM-3	22.47	212.41	51.85	81.51	662.80	42.07	123.46	103.84	154.73	22.81	80.84	15.80	0.31	14.34
CM-3-2	22.34	210.23	50.87	80.32	665.11	42.94	121.06	100.67	149.58	22.02	79.21	15.18	0.33	13.88

样品号	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	∑REE	Eu/Eu*
HX-1	1.19	7.12	1.42	4.22	0.65	4.28	0.65	7.95	1.72	10.30	23.63	4.30	248.02	0.13
HX-3	1.57	9.99	2.15	6.68	1.02	6.89	1.02	15.08	2.59	9.91	29.54	6.37	320.07	0.06
CM-2	1.80	12.00	2.54	7.26	1.10	7.22	1.02	15.71	2.57	39.58	30.02	6.76	360.10	0.09
CM-3	2.27	14.12	2.83	7.56	1.12	7.07	1.04	15.79	2.53	15.25	29.10	6.72	428.70	0.06
CM-3-2	2.23	13.75	2.78	7.40	1.10	7.07	1.01	15.68	2.54	14.04	27.80	6.51	416.21	0.07

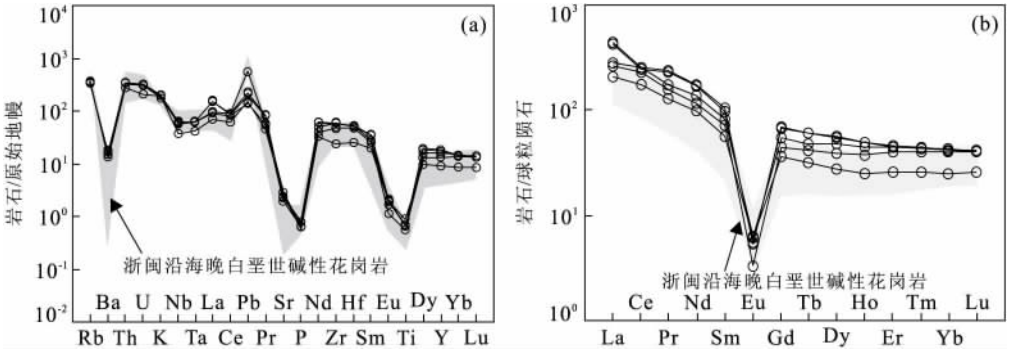

图 3　曹门岩体原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)及球粒陨石标准化稀土配分曲线(b)

Fig. 3　Primitive mantle normalized trace element distributions (a) and chondrite normalized REE patterns (b) of the Caomen intrusion

原始地幔和球粒陨石标准据 Sun and McDonough(1989);**浙闽沿海晚白垩世铝质** A **型花岗岩据董传万和彭亚鸣**(1994)、**邱检生等**(1999, 2000b)**和肖娥等**(2007),**共** 12 **个样品点**

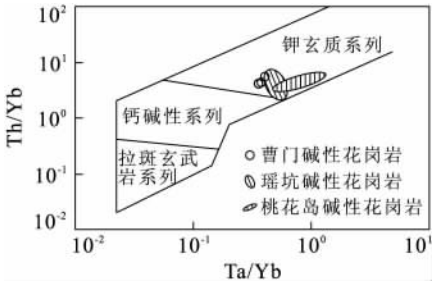

图 4　曹门岩体的 Ta/Yb-Th/Yb **图解(据** Pearce,1982)

Fig. 4　Ta/Yb vs Th/Yb diagram of the Caomen intrusion

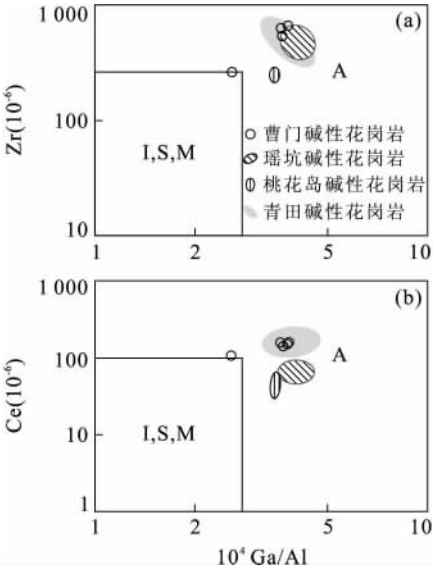

图 5　曹门岩体 A 型花岗岩判别图解

Fig. 5　A-type granite discrimination diagram of the Caomen intrusion

S、I、M **与** A **型花岗岩划分,据** Whalen et al. (1987);**青田碱性花岗岩体据董传万和彭亚鸣**(1994);**桃花岛碱性花岗岩体据邱检生等**(1996);**瑶坑碱性花岗岩体据肖娥等**(2007)

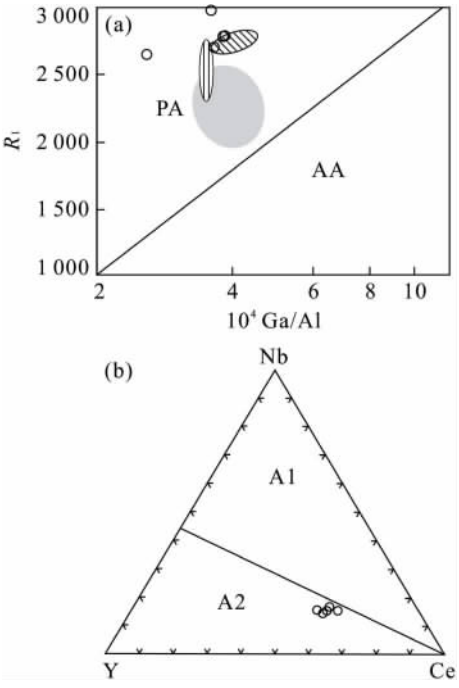

图 6　曹门岩体的 R_1-10^4 Ga/Al (a) **和** Nb-Y-Ce (b) **图解(图例同图** 5)

Fig. 6　R_1-10^4 Ga/Al (a) and Nb-Y-Ce (b) diagrams of the Caomen intrusion

稀土富集的右倾"V"形配分模式(图 3b),**与浙闽沿海晚白垩世碱性花岗岩配分曲线类似.**

3.2　成岩年代学

曹门钾长花岗斑岩的锆石多为浅黄色,次为无色,颗粒以长柱状和短柱状为主,也见棱角状及不规则状,所测锆石^{238}U **和**^{232}Th **含量分别为**(81.41～557.28)×10^{-6}**和**(102.79～996.15)×10^{-6},Th/U **比值为** 0.59～3.53(**表** 2),**明显大于变质锆石** Th/U **比值**(<0.1, Hoskin and Black, 2000; Griffin *et al.*,

表 2 曹门岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for the Caomen intrusion

样号	组成(10^{-6})		Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		$^{207}Pb/^{235}U$(Ma)		$^{206}Pb/^{238}U$(Ma)		$^{208}Pb/^{232}Th$(Ma)		ρ_r
	^{232}Th	^{238}U		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	
CM-1	211.92	304.71	0.70	0.046 59	0.002 47	0.099 99	0.005 23	0.015 57	0.000 23	0.004 97	0.000 12	97	5	100	1	100	2	0.9
CM-2	996.15	282.18	3.53	0.044 83	0.002 60	0.096 31	0.005 53	0.015 58	0.000 23	0.004 68	0.000 06	93	5	100	1	94	1	0.9
CM-3	237.48	354.45	0.67	0.048 52	0.002 40	0.108 30	0.005 29	0.016 19	0.000 23	0.004 92	0.000 11	104	5	104	1	99	2	0.9
CM-4	317.40	242.26	1.31	0.051 08	0.005 84	0.112 50	0.012 71	0.015 97	0.000 34	0.005 04	0.000 19	108	12	102	2	102	4	0.9
CM-5	180.61	177.07	1.02	0.048 08	0.003 40	0.104 99	0.007 34	0.015 84	0.000 26	0.004 90	0.000 12	101	7	101	2	99	2	0.9
CM-6	594.37	455.13	1.31	0.053 83	0.007 61	0.119 50	0.016 64	0.016 10	0.000 39	0.005 04	0.000 08	115	15	103	2	102	2	0.9
CM-7	386.77	241.21	1.60	0.047 11	0.003 64	0.103 64	0.007 91	0.015 95	0.000 28	0.004 88	0.000 09	100	7	102	2	98	2	0.9
CM-8	678.45	472.24	1.44	0.048 75	0.001 99	0.107 30	0.004 34	0.015 96	0.000 22	0.004 82	0.000 08	103	4	102	1	97	2	0.9
CM-9	138.60	143.46	0.97	0.051 60	0.004 85	0.109 95	0.010 22	0.015 45	0.000 29	0.005 04	0.000 15	106	9	99	2	102	3	0.9
CM-10	275.32	380.70	0.72	0.049 28	0.002 61	0.108 45	0.005 66	0.015 96	0.000 24	0.004 71	0.000 12	105	5	102	2	95	2	0.9
CM-11	247.55	423.15	0.59	0.046 72	0.002 13	0.103 81	0.004 70	0.016 11	0.000 22	0.004 85	0.000 11	100	4	103	1	98	2	0.9
CM-12	141.46	81.41	1.74	0.090 65	0.019 71	0.214 86	0.046 08	0.017 19	0.000 61	0.005 07	0.000 12	198	39	110	4	102	2	0.9
CM-13	237.15	216.71	1.09	0.046 50	0.003 30	0.099 59	0.007 00	0.015 53	0.000 24	0.005 16	0.000 11	96	6	99	2	104	2	0.9
CM-14	643.58	557.28	1.15	0.048 71	0.001 95	0.106 17	0.004 20	0.015 81	0.000 21	0.004 86	0.000 08	102	4	101	1	98	2	0.9
CM-15	328.06	245.57	1.34	0.051 84	0.004 31	0.113 03	0.009 22	0.015 81	0.000 32	0.005 23	0.000 14	109	8	101	2	105	3	0.9
CM-16	102.79	111.92	0.92	0.054 17	0.006 41	0.121 33	0.014 10	0.016 24	0.000 42	0.004 98	0.000 24	116	13	104	3	100	5	0.9

表 3 曹门岩体锆石稀土元素分析结果(10^{-6})

Table 3 Zircon trace elements for the Caomen intrusion

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Eu/Eu*	Ce/Ce*
CM-1	15.68	86.46	5.32	30.18	20.81	0.48	82.19	26.10	277.80	92.52	366.49	68.14	586.11	95.89	0.01	8.23
CM-2	1.01	222.53	0.99	12.79	18.23	4.11	86.56	24.67	261.16	87.40	346.23	66.40	603.76	104.85	0.08	222.42
CM-3	3.89	40.43	1.48	9.31	9.54	0.30	47.02	16.75	191.21	67.27	272.80	50.99	438.19	69.89	0.01	15.06
CM-4	0.15	76.76	0.23	3.22	7.06	0.70	37.32	14.15	174.39	68.35	319.25	68.89	666.04	120.04	0.03	402.62
CM-5	0.02	69.38	0.08	1.97	4.46	0.60	25.94	10.16	126.54	48.83	222.13	46.72	448.30	81.34	0.04	1 320.27
CM-6	26.46	191.86	7.84	36.92	18.46	1.14	70.75	26.44	321.03	120.34	522.27	105.05	948.73	157.23	0.03	11.19
CM-7	0.02	113.17	0.25	4.15	7.88	1.12	39.32	13.64	160.25	61.17	278.72	59.59	593.15	112.45	0.05	841.10
CM-8	15.37	133.50	4.77	17.44	10.71	0.71	50.67	18.36	219.79	81.58	361.78	74.79	701.91	125.96	0.02	13.26
CM-9	2.21	74.57	0.83	5.06	4.52	0.58	22.77	8.79	113.39	45.76	216.07	47.88	469.30	87.13	0.04	49.09
CM-10	23.30	85.57	7.40	36.53	15.02	0.35	51.86	17.38	191.19	65.85	266.83	49.06	422.06	67.62	0.01	5.57
CM-11	10.98	53.12	3.86	22.55	16.11	0.28	71.07	24.38	284.18	98.48	403.56	76.02	659.51	106.43	0.01	7.16
CM-12	46.00	90.27	13.72	53.02	23.24	3.58	53.39	14.72	147.92	49.94	207.30	41.51	400.54	77.11	0.09	3.02
CM-13	2.97	83.45	0.82	4.21	4.33	0.51	21.67	8.22	104.43	41.94	201.66	45.13	458.48	84.58	0.04	44.10
CM-14	14.26	99.65	4.61	28.19	24.15	0.59	102.28	31.54	328.57	106.55	413.99	74.50	627.71	102.86	0.01	10.56
CM-15	204.21	252.97	55.70	187.37	44.96	1.85	68.14	19.49	217.93	78.45	347.12	71.74	678.84	119.24	0.03	1.95
CM-16	<0.014 6	59.68	0.10	1.71	4.34	0.71	23.23	8.55	102.91	39.71	184.47	40.99	412.86	77.61	0.05	

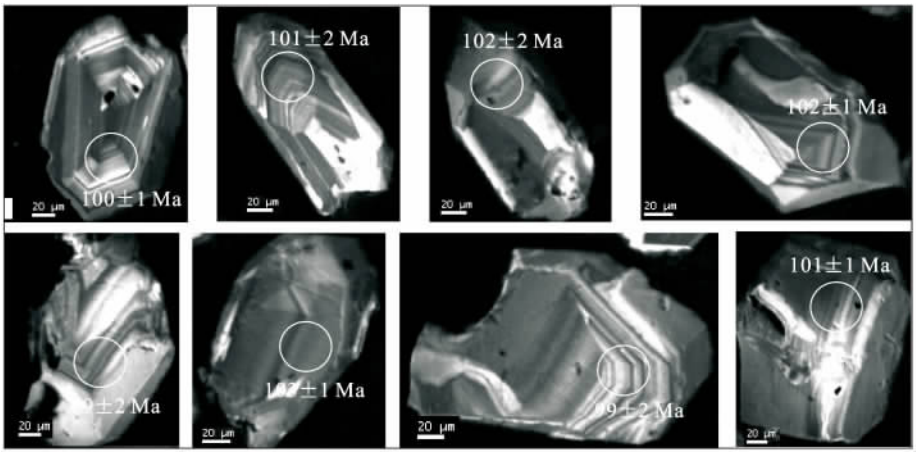

图 7　曹门钾长花岗斑岩体锆石形态和阴极发光(CL)图像

Fig. 7　Typical zircon morphology and CL images of the Caomen intrusion

圆圈表示分析点位，圈外年龄示 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄

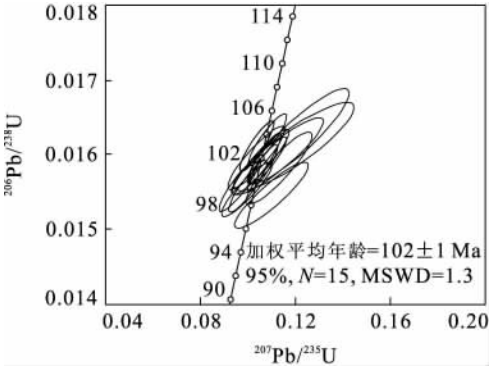

图 8　曹门钾长花岗斑岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 8　Concordia plots for zircons from the Caomen intrusion

2004)，为典型的岩浆成因锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003). 此外，锆石稀土元素球粒陨石标准化模式图总体显示 HREE 富集、LREE 亏损和 Ce 正异常的特点(表 3). 12 和 15 号测点 LREE 相对富集，而 HREE 与其他测点一致，估计与后期地质事件扰动时 LREE 优先进入锆石晶格有关(Wu and Zheng, 2004)，锆石阴极发光图像都显示明显的振荡韵律环带(图 7)，也显示有后期的干扰. 但总体岩浆锆石 HREE 并未出现亏损的现象，不同于源区存在榴辉岩相锆石的稀土元素组成(Wu and Zheng, 2004; Chen *et al.*, 2007).

选择韵律环带明显的岩浆锆石，进行了 16 个点的定年分析(表 2). 所有数据点都位于谐和线上或稍偏谐和线，构成非常集中的锆石群(图 8)，表明这些颗粒形成后 U-Pb 同位素体系是封闭的，基本没有 U 或 Pb 同位素的丢失或加入. 15 颗锆石(CM-12 除外)的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄变化于 99±2 Ma～104±1 Ma之间，$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 102±1 Ma (MSDW=1.3)，该年龄代表了曹门钾长花岗斑岩侵位年龄.

3.3　成矿年代学

5 件样品的 Rb 为(0.869～1.409)×10^{-6}，Sr 为(2.068～5.881)×10^{-6}，含量均极低(表 4)，而 $^{87}Rb/^{86}Sr$ (0.620 6～1.212 0)和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.710 25～0.711 13)分布较分散，符合 Rb-Sr 同位素的等时线要求. 各样品无异常显示，该成矿阶段的成矿流体保持一个相对封闭的体系，流体中同位素达到了均一化，流体包裹体的 Rb-Sr 年龄直接记录了该矿床的成矿作用时代. 5 个样品构成了一条很好的石英流体包裹体等时线(图 9)，依据所构成的等时线斜率可得该阶段成矿年龄为 101±2 Ma，I_{Sr}为0.709 38±0.000 01.

4　讨论

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析表明，曹门碱性花岗岩体形成于 102±1 Ma，与同构造带上的浙江青田碱性花岗岩(101.2±2.1 Ma，邱检生等，1999)、瑶坑碱性花岗岩(91.3±2.5 Ma，肖娥等，2007)、桃花岛碱性花岗岩(92.9±0.6 Ma，邱检生等，1999)及福建魁歧碱性花岗岩(93±5 Ma，Martin *et al.*, 1994)等形成时间基本一致，均属于晚白垩世岩浆活动产物. 根据前人对东南沿海中生代 A 型花岗岩的研究，其形成时代集中于 86～101 Ma(邱检生等，1999, 2000b；王强等，2005；肖娥

表 4 怀溪铜金矿床含矿石英脉流体包裹体 Rb-Sr 同位素组成

Table 4 Rb-Sr isotopic compositions of fluid inclusions in metal-bearing quartz vein from the Huaixi Cu-Au deposit

样品号	测试矿物	采样地点	Rb(10^{-6})	Sr(10^{-6})	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr(2\sigma)$
HXI-8	石英	余坑矿段	1.287	3.993	0.929 1	0.710 71±0.000 04
HXI-10	石英	余坑矿段	1.409	4.376	0.928 8	0.710 71±0.000 07
HXI-11	石英	余坑矿段	1.359	5.881	0.666 4	0.710 34±0.000 02
HXI-12	石英	余坑矿段	1.118	5.195	0.620 6	0.710 25±0.000 03
HXI-13	石英	怀溪矿段	0.869	2.068	1.212 0	0.711 13±0.000 03

注：$\lambda^{87}Rb=1.42\times10^{-11}a^{-1}$.

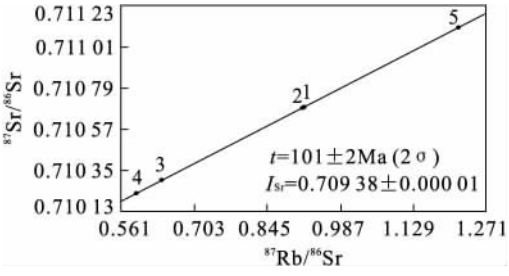

图 9 怀溪铜金矿床石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线

Fig. 9 Rb-Sr isochron diagram of fluid inclusions in quartz from the Huaixi copper-gold deposit

等，2007）. 曹门碱性花岗岩体的侵位属于这一时期.

曹门岩体在岩相特征、化学成分及微量元素组成（含稀土）（图 3，4）上均与晚白垩世同构造带的碱性花岗岩（董传万和彭亚鸣，1994；邱检生等，1996，1999；肖娥等，2007）一致，且同处于 NE、NW 等多组断裂的交汇部位（图 1b）（董传万和彭亚鸣，1994；邱检生等，2000a；肖娥等，2007）. 因此，曹门碱性花岗岩体与浙闽沿海地区晚白垩世碱性花岗岩具有相似的成岩构造背景. 近年研究表明，华南中生代经历过多阶段伸展活动，岩石圈引张裂解可能始于早侏罗世（约 190 Ma）（吴淦国等，2000；Li *et al.*，2007）. 区内 A 型花岗岩的产出是岩石圈阶段性张性活动的重要指示，具有特殊的地球动力学意义（王强等，2005）. 受晚白垩世古太平洋板块高角度俯冲的影响（100 Ma 左右），浙闽沿海处于一种弧后拉张的构造环境（Maruyama and Send，1986；Geng *et al.*，2006），且俯冲作用可能受到了印度板块北向漂移（Jaeger *et al.*，1989；Gilder *et al.*，1996，1999；谭俊等，2008）的影响. 据详细的应力值数据分析，从 135 Ma 开始（原文中定为四川期，135～52 Ma），中国大陆构造应力场是以 NNE-SSW 向近水平挤压为主要特征，动力源来自于西南方向，与印度板块快速北移及特提斯洋的缩小有关（万天丰，2004）. 这种应力场也符合该时期沿海 NE 向断裂（如长乐－南澳带）左旋走滑（图 1a）（舒良树和周新民，2002）的特征. 受其影响，晚白垩世古太平洋板块的俯冲作用可能逐渐减弱（王强等，2005）并出现反转（Tatsumi *et al.*，1990；Flower *et al.*，1998；Ren *et al.*，2002），同时并导致俯冲角度变大，岛弧岩浆变弱，形成一种弧后引张环境. 从而导致福建魁岐（95 Ma）（Martin *et al.*，1994）及浙江桃花岛（93 Ma）、青田（101 Ma）（邱检生等，1999）及曹门等一系列碱性花岗岩的形成.

石英流体包裹体 Rb-Sr 同位素定年结果表明，怀溪铜金矿床的形成时间为 101±2 Ma，与浙东同构造带内的毫石银矿床成矿时代（104±5.6 Ma，徐步台等，1994a）在误差范围内基本一致，尽管怀溪铜金矿属于典型的热液脉状充填型 Cu-Au 多金属矿床（胡永和等，1994），闪锌矿流体包裹体的均一温度为 230～271 ℃，表明其为中温环境（李艳军，2008），且矿化带延伸至岩体内部（图 1b）. 从实际地质作用的时序上考虑，矿石的形成应稍晚于花岗岩，但因不同同位素定年方法技术的制约和精度的差别，目前要精确地分辨出这一时间上的细微差异还是有困难的. 因此，怀溪铜金矿床的成矿时代与曹门碱性花岗岩的成岩时代一致，两者是同期地质事件的产物. 上述定年结果及岩石地球化学特征表明它们是晚白垩世东南沿海弧后拉张构造－热事件的产物，为华南中生代第 3 次大规模成矿（110～80 Ma，毛景文等，2004）的一部分.

近年来的研究表明，与成矿有关的碱性岩具高 K、高的氧逸度和富含挥发份特征（Sillitoe，1997；Holliday *et al.*，2002；Kelley and Ludington，2002；赵振华等，2002），如形成 Cripple Creek 金矿床最重要的因素是相对氧化的富含挥发份的碱性岩浆侵位到近地表（Kelley and Ludington，2002）. 曹门碱性花岗岩为钾玄质系列，成岩较浅且存在表征高氧逸度的磁铁矿（Jensen and Barton，2000）和富含挥发份的磷灰石（图 2），符合上述条件. 那么该岩体是否与怀溪铜金矿床有成因联系呢？矿石中石英

表 5　怀溪铜金矿床硫化物硫同位素组成

Table 5　Sulfur isotopic compositions of sulfides from Huaixi Cu-Au deposit

样品	取样位置	测试矿物	$\delta^{34}S$(‰)
HXⅠ-4	余坑段Ⅰ号脉	黄铁矿	3.85
HXⅠ-5	余坑段Ⅰ号脉	黄铁矿	2.18
HXⅠ-6	余坑段Ⅰ号脉	黄铁矿	−0.01
HXⅠ-7	余坑段Ⅰ号脉	黄铁矿	−2.14
HXⅠ-15	怀溪段Ⅰ号脉	黄铁矿	2.31
浙江省第十一地质大队，1989（内部资料）		黄铁矿（3 件）	1.30～4.14
		方铅矿	2.30
		闪锌矿	2.20

δD_{H_2O} 为 −42.60‰～−60.20‰，$\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 −0.89‰～−1.98‰（胡永和和李长江，1990），介于岩浆水与浙东南中生代大气降水（δD=−65‰，$\delta^{18}O$=−9.4‰，徐步台等，1994b）之间，显示成矿流体为岩浆水与大气降水的混合来源，花岗岩浆提供了成矿的流体保障. 8 件黄铁矿的硫同位素 $\delta^{34}S$ 值为 −2.14‰～+4.14‰（表 5），极差为 6.28‰，平均值为 +1.67‰，方铅矿和闪锌矿的 $\delta^{34}S$ 值（分别为 2.30‰和 2.20‰）与黄铁矿相近. 硫同位素组成符合岩浆流体的硫同位素组成特征. 上述几方面资料从物质组成的角度，提供了怀溪铜金矿床与曹门碱性花岗岩有成因关系的佐证.

研究表明，Cu、Au 在岩浆结晶分异过程中属相容元素，氧逸度较高时，保留在残留熔体中（赵振华等，2002）. 另一方面，高氧逸度的碱性岩浆侵位时，Cu、Au 等成矿元素被氧化从硫化物中释放并进入岩浆熔体（Sillitoe，1997；Kelley and Ludington，2002），与 F、Cl、H_2S 等矿化剂（Müllrer *et al.*，1994）结合形成可溶性配合物而富集于流体中（赵振华等，2002）. 前文指出曹门碱性花岗岩形成于后造山弧后拉张构造环境，其岩浆是高氧化的（Sillitoe，1997），Cu、Au 难以与 S 形成不混溶的硫化物熔体，在岩浆演化晚期阶段形成富 Cu、Au 流体（赵振华等，2002）. 成矿流体沿破碎带迁移，Cu、Au 等成矿元素沉淀，形成怀溪铜金矿床.

5　结论

曹门碱性花岗岩体化学成分显示为钾玄质岩系，具高硅、富碱和铁，贫钙和镁的特征. 富集 Ga、Rb、Th、U 等元素，亏损 Ba、Nb、Sr、P 和 Ti，REE 具明显的负 Eu 异常，总体呈现右倾“V”型配分模式. 矿物组成及地球化学特征与浙闽沿海晚白垩世碱性花岗岩类似. 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示曹门碱性花岗岩体侵位时间为 102±1 Ma，与浙闽沿海碱性花岗岩形成时间一致，形成于后碰撞弧后拉张环境，可能与印度板块北移所引起的古太平洋板块高角度俯冲及俯冲强度减弱有关. 石英流体包裹体 Rb-Sr 同位素定年结果表明怀溪铜金矿床的形成时间为 101±2 Ma，与曹门碱性花岗岩的成岩时代一致，为两者具有密切成因关系提供了重要的年代学制约. 成岩成矿时代的确定表明怀溪铜金矿床是东南沿海晚白垩世弧后拉张构造－热事件的产物，为华南第 3 次大规模成矿的一部分.

致谢：论文得到了匿名审稿专家建设性的修改意见，锆石阴极发光、LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析得到了中国地质大学（武汉）地质过程与矿产资源国家重点实验室郑曙和陈海红老师的大力支持，野外工作中浙江省第十一地质大队给予了极大的帮助，在此一并表示感谢.

References

Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. *Chem. Geol.*, 192(1−2): 59−79. doi: 10.1016/S0009−2541(02)00195−X

Blevin, P. L., 2002. The petrographic and compositional character of variably K-enriched magmatic suites associated with Ordovician porphyry Cu-Au mineralisation in the Lachlan fold belt, Australia. *Mineralium Deposita*, 37(1): 87−99. doi: 10.1007/s00126−001−0232−9

Chen, D. L., Sun, Y., Liu, L., et al., 2007. In situ LA-ICP-MS zircon U-Pb age of ultrahigh-pressure eclogites in the Yukahe area, northern Qaidam basin. *Science in China (Series D)*, 50 (Suppl. 2): 322−330. doi: 10.1007/s11430−007−6001−6

Dong, C. W., Peng, Y. M., 1994. Qingtian composite body—the coexisting of two different types of granites. *Journal of Zhejiang University (Natural Science)*, 28(4): 440−448 (in Chinese with English abstract).

Eby, G. N., 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641−644. doi: 10.1130/0091−7613(1992)020<0641:CSOTAT>2.3.CO;2

Flower, M. F. J., Tamaki, K., Hoang, N., 1998. Mantle extrusion: a model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in East Asia and the western Pacific. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. *Geodynamics*, 27: 67−88.

Geng, H. Y., Xu, X. S., O'Reilly, S. Y., et al., 2006. Cretaceous volcanic-intrusive magmatism in western Guangdong and its geological significance. *Science in China (Series D)*, 49(7): 696－713. doi: 10.1007/s11430－006－0696－7

Gilder, S. A., Gill, J., Coe, R. S., et al., 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China. *Journal of Geophysical Research*, 101 (B7): 16137 － 16154. doi: 10.1029/96JB00662

Gilder, S. A., Leloup, P. H., Courtillot, V., et al., 1999. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data. *Journal of Geophysical Research*, 104(B7): 15365－15390.

Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S., 2004. Crustal evolution in the northern Yilarn craton: U-Pb and Hf isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131: 231－282. doi: 10.1016/j.precamres.2003.12.011

Holliday, J. R., Wilson, A. J., Blevin, P. L., et al., 2002. Porphyry gold-copper mineralisation in the Cadia district, eastern Lachlan fold belt, New South Wales, and its relationship to shoshonitic magmatism. *Mineralium Deposita*, 37 (1): 100 － 116. doi: 10.1007/s00126－001－0233－8

Hong, D. W., Wang, S. G., Han, B. F., et al., 1996. Post-orogenic alkaline granites from China and comparisons with anorogenic alkaline granites elsewhere. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13(1), 13－27. doi: 10.1016/0743－9547(96)00002－5

Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J. Metamorphic Geol.*, 18: 423－439. doi: 10.1046/j.1525－1314.2000.00266.x

Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. O., eds,. Reviews in mineralogy and geochemistry, 53: 27－62. Mineralogical Society of America and Geochemcal Society, Washington, DC. doi: 10.2113/0530027

Hu, Y. H., Li, C. J., 1990. Genesis and minerogenetic model of the gold, silver, and silver (gold)-lead-zinc deposits in volcanic area, eastern Zhejiang Province. *Geology of Zhejiang*, 6(2): 15－25 (in Chinese with English abstract).

Hu, Y. H., Xu, Y. L., Zhu, X. S., 1994. Stable isotopic geochemical features of copper deposits in Zhejiang Province. *Geology of Zhejiang*, 10(2): 52－66 (in Chinese with English abstract).

Jaeger, J. J., Courtillot, V., Tapponnier, P., 1989. Paleontological view of the ages of the Deccan traps, the Cretaceous/Tertiary boundary, and the India-Asia collision. *Geology*, 17(4): 316－319. doi: 10.1130/0091－7613(1989)017<0316:PVOTAO>2.3.CO;2

Jensen, E. P., Barton, M. D., 2000. Gold deposits related to alkaline magmatism. In: Hagemann, S. G., Brown, P. E., eds., Gold in 2000. *Rev. Econ. Geol.*, 13: 279－314.

Jiang, S. H., Nie, F. J., 2000. ^{40}Ar-^{39}Ar geochronology of the Shuiquangou alkaline complex and related gold deposits, northwestern Hebei, China. *Geological Review*, 46(6): 621－627 (in Chinese with English abstract).

Kelley, K. D., Ludington, S., 2002. Cripple Creek and other alkaline-related gold deposits in the southern Rocky Mountains, USA: influence of regional tectonics. *Mineralium Deposita*, 37(1): 38－60. doi: 10.1007/s00126－001－0229－4

Li, H. Q., Liu, J. Q., Wei, L., 1993. Study of fluid inclusion chronology of hydrothermal deposit and their geological application. Geological Publishing House, Beijing, 12－91 (in Chinese).

Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873－1885. doi: 10.1007/s11434－007－0259－0

Li, Y. J., 2008. Metallogenic mechanism and ore forecasting of Huaixi copper-gold deposit, Pingyang County, Zhejiang Province (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

Mao, J. W., Xie, G. Q., Li, X. F., et al., 2004. Mesozoic iarge scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45－55 (in Chinese with English abstract).

Martin, H., Bonin, B., Capdevila, R., et al., 1994. The Kuiqi peralkaline granitic complex (SE China): petrology and geochemistry. *J. Petrol.*, 35(4): 983－1015. doi: 10.1093/petrology/35.4.983

Maruyama, S., Send, T., 1986. Orogeny and relative plate motions: example of Japanese islands. *Tectonophysics*, 127(3－4): 305－329. doi: 10.1016/0040－1951(86)90067－3

Müllrer, D., Groves, D. I., Heithersay, P., 1994. The shoshonite porphyry Cu-Au association in the Goonumbla district, N. S. W. Australia. *Mineralogy and Petrology*, 51(2－4): 299－321. doi: 10.1007/BF01159734

Müllrer, D., Kaminski, K., Uhlig, S., et al., 2002. The transition from porphyry- to epithermal-style gold mineralization at Ladolam, Lihir Island, Papua New Guinea: a reconnaissance study. *Mineralium Deposita*, 37(1): 61－74. doi:10.1007/s00126－001－0230－y

Pearce, 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R. S., ed., Andesites. Wiley, New York, 525－548.

Qiu, J. S., Kanisawa, S., Wang, D. Z., 2000a. Geochemical characteristics and genetic type of Yaokeng alkali granites in Cangnan County, Zhejiang Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(2): 97－105 (in Chinese with English abstract).

Qiu, J. S., Wang, D. Z., Kanisawa, S., et al., 2000b. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province. *Geochimica*, 29(4): 313－321 (in Chinese with English abstract).

Qiu, J. S., Wang, D. Z., McInnes, B. I. A., 1999. Geochemistry and petrogenesis of the I and A type composite granite masses in the coastal area of Zhejiang and Fujian provinces. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 237－246 (in Chinese with English abstract).

Qiu, J. S., Wang, D. Z., Peng, Y. M., et al., 1996. Petrology, geochemistry and genesis of Taohuadao alkali granite in Zhoushan, Zhejiang Province. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 32(1): 80－89 (in Chinese with English abstract).

Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3－4): 175－205. doi:10.1016/S0040－1951(01)00271－2

Shu, L. S., Zhou, X. M., 2002. Late Mesozoic tectonism of Southeast China. *Geological Review*, 48(3): 249－260 (in Chinese with English abstract).

Sillitoe, R. H., 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3): 373－388. doi: 10.1080/08120099708728318

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, London, Special Publication*, 42: 313－345. doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Tan, J., Wei, J. H., Li, S. R., et al., 2008. Geochemical characteristics and tectonic significance of Kunlunguan A-type granite, Guangxi Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 743－754 (in Chinese with English abstract).

Tao, K. Y., Gao, T. J., Lu, Z. G., et al., 1998. Volcanic basement structures, volcanic intrusion and the relationship with mineralization. Geological Publishing House, Beijing, 54－73 (in Chinese).

Tatsumi, Y., Maruyama, S., Nohda, S., 1990. Mechanism of backarc opening in the Japan Sea: role of asthenospheric injection. *Tectonophysics*, 181(1－4): 299－306. doi: 10.1016/0040－1951(90)90023－2

Wan, T. F., 2004. Tectonics of China. Geological Publishing House, Beijing, 152－162 (in Chinese).

Wang, Q., Zhao, Z. H., Jian, P., et al., 2005. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, South China: constraints for Late-Mesozoic tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 795－808 (in Chinese with English abstract).

Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discriminatuon and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407－419. doi:10.1007/BF00402202

Wu, G. G., Zhang, D., Chen, B. L., et al., 2000. Transformation of Mesozoic tectonic domain and its relation to mineralization in southeastern China: an evidence of southwestern Fujian Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 390－396 (in Chinese with English abstract).

Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554－1569. doi:10.1360/04wd0130

Xiao, E., Qiu, J. S., Xu, X. S., et al., 2007. Geochronology and geochemistry of the Yaokeng alkaline granitic pluton in Zhejiang Province: petrogenetic and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1431－1440 (in Chinese with English abstract).

Xu, B. T., Li, C. J., Chen, H. S., 1994a. Mineralization chronology and isotopic geochemistry of the Haoshi silver deposit in Zhejiang Province. *Mineral Deposits*, 13(3): 271－281 (in Chinese with English abstract).

Xu, B. T., Li, C. J., Chen, H. S., 1994b. Isotope geochemistry of the Xinchang-Yongjia silver (lead, zinc) ore zone in East Zhejiang Province. *Acta Geologica Sinica*, 68(3): 255－267 (in Chinese with English abstract).

Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3):

353－370. doi:10.1111/j.1751－908X.2004.tb00755.x

Zhao, Z. H., Xiong, X. L., Wang, Q., et al., 2002. Alkaline igenous rocks and related large-superlarge gold-copper deposits in China. *Science in China* (*Series D*), 32(Suppl.): 1－10 (in Chinese).

附中文参考文献

董传万，彭亚鸣，1994. 青田复式岩体——两种不同类型花岗岩的复合. 浙江大学学报(自然科学版)，28(4)：440－448.

胡永和，李长江，1990. 浙东沿海火山岩区金、银和含银(金)铅锌矿床的成因及成矿模式探讨. 浙江地质，6(2)：15－25.

胡永和，徐有浪，朱兴盛，1994. 浙江省铜矿床的稳定同位素地球化学特征. 浙江地质，10(2)：52－66.

江思宏，聂凤军，2000. 冀西北水泉沟杂岩体及与其有关金矿床的^{40}Ar-^{39}Ar同位素年代学研究. 地质论评，46(6)：621－627.

李华芹，刘家齐，魏林，1993. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用. 北京：地质出版社，12－91.

李艳军，2008. 浙江省平阳县怀溪铜金矿床成矿机制及成矿预测(硕士学位论文). 武汉：中国地质大学.

毛景文，谢桂青，李晓峰，等，2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘，11(1)：45－55.

邱检生，王德滋，McInnes, B. I. A.，1999. 浙闽沿海地区I型－A型复合花岗岩体的地球化学及成因. 岩石学报，15(2)：237－246.

邱检生，王德滋，彭亚鸣，等，1996. 浙江舟山桃花岛碱性花岗岩的岩石学和地球化学特征及成因探讨. 南京大学学报(自然科学版)，32(1)：80－89.

邱检生，蟹泽聪史，王德滋，2000a. 浙江苍南瑶坑碱性花岗岩的地球化学及其成因类型. 岩石矿物学杂志，19(2)：97－105.

邱检生，王德滋，蟹泽聪史，等，2000b. 福建沿海铝质A型花岗岩的地球化学及岩石成因. 地球化学，29(4)：313－321.

舒良树，周新民，2002. 中国东南部晚中生代构造作用. 地质论评，48(3)：249－260.

谭俊，魏俊浩，李水如，等，2008. 广西昆仑关A型花岗岩地球化学特征及构造意义. 地球科学——中国地质大学学报，33(6)：743－754.

陶奎元，高天钧，陆志刚，等，1998. 东南沿海火山岩基底构造及火山－侵入作用与成矿关系. 北京：地质出版社，54－73.

万天丰，2004. 中国大地构造学纲要. 北京：地质出版社，152－162.

王强，赵振华，简平，等，2005. 华南腹地白垩纪A型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约. 岩石学报，21(3)：795－808.

吴淦国，张达，陈柏林，等，2000. 中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系——以闽西南地区为例. 地球科学——中国地质大学学报，25(4)：390－396.

肖娥，邱检生，徐夕生，等，2007. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、地球化学及其成因与构造指示意义. 岩石学报，23(6)：1431－1440.

徐步台，李长江，陈好寿，1994a. 浙江毫石银矿床成矿年代学和同位素地球化学. 矿床地质，13(3)：271－281.

徐步台，李长江，陈好寿，1994b. 浙东新昌－永嘉银(铅－锌)矿带同位素地球化学研究. 地质学报，68(3)：255－267.

赵振华，熊小林，王强，等，2002. 我国富碱火成岩及有关的大型－超大型金铜矿床成矿作用. 中国科学(D辑)，32(增刊)：1－10.