

铜陵舒家店岩体年代学、岩石地球化学特征及成矿意义

赖小东¹⁾, 杨晓勇¹⁾, 孙卫东²⁾, 曹晓生³⁾

1) 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥, 230026; 2) 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640; 3) 华东冶金资源勘查局, 合肥, 230026

内容提要:本文对铜陵舒家店辉石闪长岩开展了年代学和地球化学的系统研究。结果表明,舒家店辉石闪长岩的侵入年龄为 140.5 ± 1.4 Ma, 低于铜陵地区花岗闪长岩年龄。辉石闪长岩是矿床赋矿岩石, 据此推测成矿时代也应该同为 140.5 Ma 左右, 或稍晚于岩浆岩侵位的时代。舒家店辉石闪长岩的地球化学特征表明其 SiO_2 含量为 50% 左右, 属于稍偏基性的岩类, 并且具有大离子亲石元素 (LILE: Ba, Sr, Th, Pb) 的富集, 而相对亏损高场强元素 (HFSE: Zr, Nb, Hf), 反映出该侵入岩的原始岩浆可能来源于受到了板片俯冲作用改造的富集地幔。舒家店岩体及铜金矿床形成的大地构造背景可能与古太平洋板块俯冲密切相关, 位于大陆边缘岩浆弧的内陆一侧环境, 它可能是俯冲洋壳部分熔融形成的熔体或流体交代地幔楔并使地幔楔发生部分熔融而形成的玄武质岩浆侵位到地壳浅部过程中混染了大量地壳物质而成。

关键词: 锆石年代学; 辉石闪长岩, 铜金矿化; 舒家店; 铜陵矿集区

长江中下游地区是我国著名的中生代铜、铁、硫、金矿成矿带, 成矿作用与岩浆岩活动密切相关。安徽铜陵地区是该带内的一个重要成矿区, 是我国乃至世界矽卡岩成矿的典型地区, 备受中外地质学家重视 (常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; Zhai Y S et al., 1996; 李文达等, 1998; 唐永成等, 1998; Pan Y et al., 1999; Xu G et al., 2000, 2001; 邓晋福等, 2002)。铜陵地区岩浆岩与成矿关系密切, 一直以来是地质学家重点研究的对象 (邢凤鸣等, 1995, 1999; Zhou X M et al., 2000; Wu C L et al., 2000; 吴才来等, 2003; 杜杨松等, 2007; 李进文等, 2007; Ling M X et al., 2009; Yang X Y et al., 2011a, 2011b)。研究表明, 铜陵地区的矿床与区内的中酸性侵入岩关系密切。然而对于侵入岩的年龄尚存异议, 不同作者、不同方法所得到的年龄差别较大 (周泰禧等, 1987; 吴才来等, 1996; 曾普胜等, 2004)。

对于侵入岩成因问题也一直有争议, 其所处的

大地构造背景未达成统一的认识。铜陵地区侵入岩成因至少有以下几种看法: ①幔源岩浆经过 AFC 过程形成, 有古老的扬子下地壳物质加入 (陈江峰等, 1993, 1994, 2003; Wu C L et al., 2000; 邓晋福等, 2001; 毛建仁等, 1990; 邢凤鸣等, 1996; 邢凤鸣, 1998; 唐永成等, 1998); ②古老的扬子下地壳熔融形成埃达克质岩石 (张旗等, 2001; 王强等, 2003; 汪洋等, 2004; 王元龙等, 2004); ③三端元岩浆混合作用而成 (狄永军等, 2005; 谢建成等, 2008; Xie J C et al., 2009); ④洋脊俯冲过程中洋壳部分熔融加陆壳混染 (Ling M X et al., 2009)。

近年来, 安徽华东冶金地勘局在铜陵矿集区东部的舒家店岩体深部取得了斑岩型铜金矿床的找矿突破, 作为铜陵矿集区第一个斑岩型铜金矿床, 这一发现具有重要的成矿学意义。本文对铜陵地区舒家店矿区的辉石闪长岩进行了元素地球化学和 LA-ICP-MS 锆石年代学研究, 进而对岩石成因及其成矿意义进行探讨。

注: 本文为中国科学院知识创新项目 (编号 KZCX1-YW-15-3, KZCX2-YW-QN509)、国家自然科学基金项目 (编号 41173057, 40921002, 41090372) 和安徽省公益性地质调查管理中心科技项目共同资助的成果。

收稿日期: 2011-03-30; 改回日期: 2011-05-11; 责任编辑: 郝梓国, 黄敏。

作者简介: 赖小东, 男, 博士研究生。通讯作者: 杨晓勇, 教授, 博士生导师, 矿床地球化学专业。通讯地址: 安徽合肥中国科学技术大学地球和空间科学学院, 230026。电话: 0551-3606871。Email: xyyang555@163.com。

DOI: CNKI: 11-1951/P. 20120307. 1327. 005 网络出版时间: 2012-3-7 13:27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20120307.1327.005.html>

1 区域地质背景及岩相学

铜陵地区的大地构造位置属扬子板块北缘,是下扬子拗陷中的相对隆起区。前人根据地层接触关系、沉积建造、变质作用、构造变形等特征,将区域大地构造分为三个发展阶段:基底形成阶段;沉积盖层发育阶段;板内变形阶段。每个阶段都有其独特的地层沉积、构造运动、岩浆活动与成矿作用(常印佛等,1983,1991;翟裕生等,1992;唐永成等,1998)。南华纪为基底发育阶段;从震旦纪至中三叠世为盖层沉积阶段,属相对稳定时期,形成了巨厚的沉积盖层,并成为铜、金、硫、铁等矿化的有利围岩,而且于晚石炭世在区内相对凹陷部位形成的原始矿源层(刘裕庆等,1984,1991;常印佛等,1991)成为层控矽卡岩型矿床形成的“基预”(裴荣富等,1998);中三叠世,扬子板块与华北板块发生碰撞(李锦秩,2001;Li S G et al.,1993),之后本区再次活动,即为板内变形阶段。印支-燕山运动使本区沉积盖层发生褶皱隆起,形成一系列北东向“S”形褶皱,并伴有断裂拗陷。燕山期强烈的中酸性岩浆-热液作用及其对原始矿源层的叠加,最终形成铜陵矿集区目前的矿床分布格局。

舒家店矿区位于铜陵市区东约20 km(图1)的舒家店短轴背斜轴部脊轴转折部位。本区志留系地层出露广泛,下统高家边组(S_1g)以笔页岩为主,中统坟头组(S_2f)和上统茅山组(S_3m)为含介壳相化石的细砂岩、粉砂质泥岩及石英砂岩。矿区出露的主要侵入岩可分为3个岩体6种岩相带,总体呈岩株状产于背斜NW翼近轴部的坟头群中,主要包括花岗闪长岩体(由中心相花岗闪长岩和边缘相花岗闪长斑岩组成)、石英闪长斑岩体(可穿插于花岗闪长岩体中,亦可被辉石闪长岩、闪长岩穿插或包裹)和辉石闪长岩体(由中心相辉石闪长岩、过渡相闪长岩及边缘相闪长玢岩组成)。在南北方向力的作用下,矿区产生了北东向压性断裂,岩浆岩即沿此通道上升(王彪,2010)。矿体主要产于岩浆岩与志留系砂页岩北西接触带的岩体内侧闪长岩、辉石闪长岩中,岩体外接触带常发生矽卡岩化、角岩化和大理岩化等。

舒家店矿区辉石闪长岩呈灰黑色,不等粒结构,主要由斜长石、角闪石、辉石和黑云母组成。斜长石含量高,聚片双晶发育(图2a,2b),呈自形板条状。辉石呈短柱状,半自形—自形(图2a),有时候和黑云母共生(图2b)。辉石闪长岩中有时候有石英脉

发育(图2c),脉周围矿化不明显,表明后期热液成矿的可能性小。主要金属矿物黄铜矿、斑铜矿和磁黄铁矿(图2d),有时也见有黄铁矿。本论文研究的所有样品采自舒家店钻孔ZK2001辉石闪长岩,岩石较新鲜。

2 分析方法

2.1 主量元素、稀土元素和微量元素分析

将选出的全岩样品破碎到<1cm大小的碎块,挑选其中新鲜的、无风化面和裂隙的碎块,用2M的HCl溶液浸泡2~3h,然后用蒸馏水洗净,待完全干燥后,用无污染玛瑙球磨机研磨至200目以下,用来进行元素分析。

全岩的主量元素、微量元素和稀土元素分析在广州澳实矿物实验室完成。将按要求制备的定量样品(0.2g),加入到0.90gLiBO₂熔剂中,混合均匀,在1000℃的熔炉中熔化。熔液冷却后,溶解于100mL4%的硝酸中,然后用质谱仪分析。其中主量元素的分析方法为X-射线荧光熔片法,各项元素的分析精度分别为:SiO₂,0.8%;Al₂O₃,0.5%;Fe₂O₃,0.4%;MgO,0.4%;CaO,0.6%;Na₂O,0.3%;K₂O,0.4%;MnO,0.7%;TiO₂,0.9%;P₂O₅,0.8%。微量元素和稀土元素分析采用HF+HNO₃密封溶解,加入Rh内标溶液后转化为1%HNO₃介质,以ICP-MS测定。使用的仪器是PE Elan6000型电感耦合等离子体质谱计,微量元素分析精度为:Ba,2.7%;Ta,2.1%;Nb,1.6%;Zr,2.2%;Hf,2.1%;Th,2.1%;U,3.4%;Pb,3.2%;Ga,1.9%;Cr,5.3%;Co,0.8%;Ni,11%;Cu,3.5%;Rb,2.1%;Sr,1.7%;Sc,4.2%;V,3.2%;Zn,3.0%。

稀土元素分析采用阳离子交换分离-电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES),其元素分析精度为:La,4.7%;Ce,5.2%;Pr,1.8%;Sm,4.7%;Eu,1.2%;Gd,1.4%;Tb,3.2%;Dy,4.3%;Ho,2.4%;Er,3.9%;Tm,4.8%;Yb,4.3%;Lu,3.9%;Y,1.8%。

2.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

双目镜下将分选好的锆石根据颜色、自形程度、形态等特征初步分类,挑选出具有代表性的锆石用环氧树脂制靶、打磨和抛光,在阴极发光上进行照相。锆石的CL图像拍照在中国科学技术大学理化科学实验中心扫描电镜实验室完成,采用FEI公司Sirion200型电镜进行内部结构显微照相分析。

锆石的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-

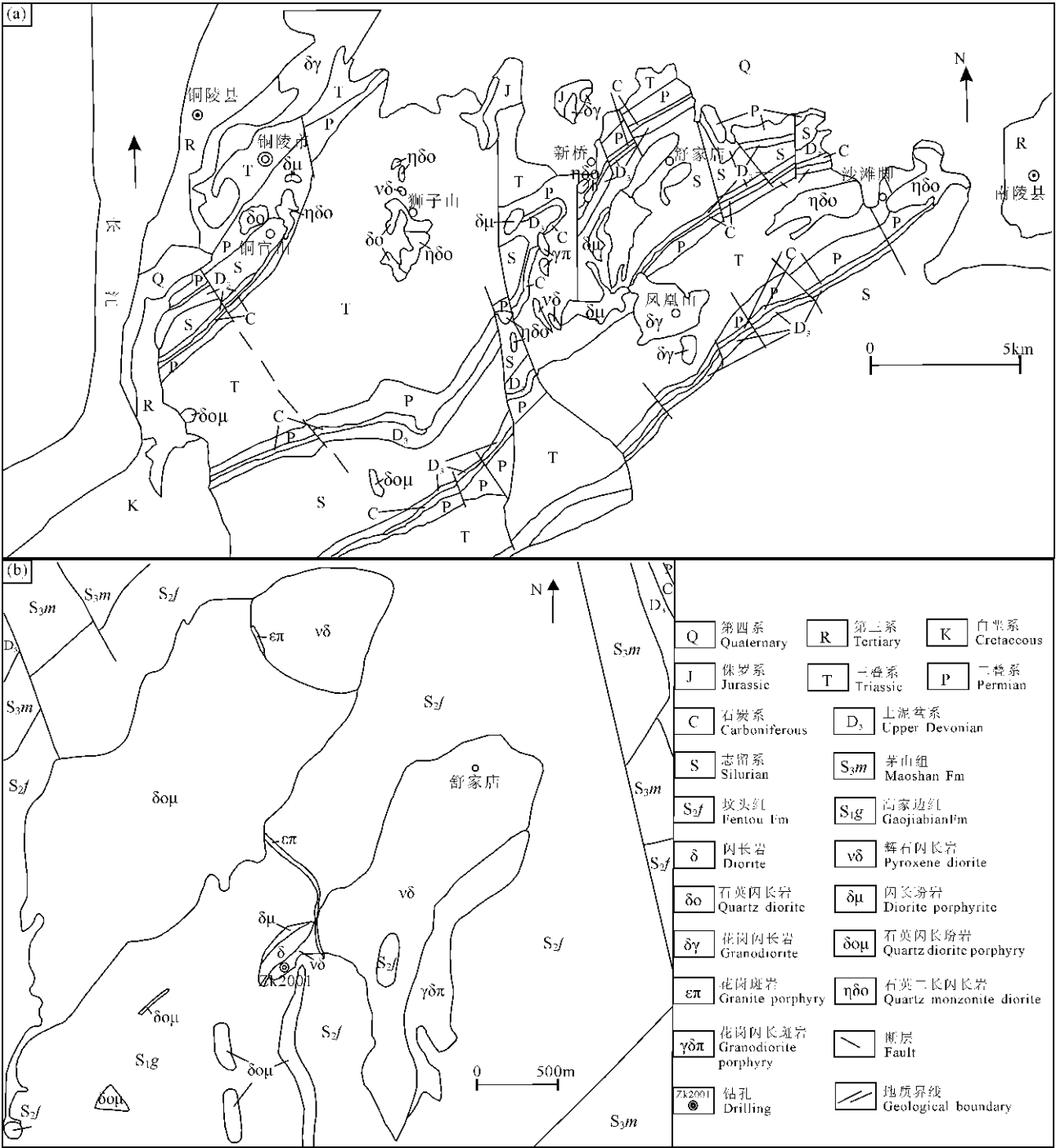


图 1 研究区地质略图

Fig. 1 The geological sketch map of the study area

(a)—铜陵地区地质略图 (据常印佛等, 1991 修改); (b)—舒家店矿区地质略图 (据王世伟等, 2011 修改)

(a)—Geological sketch map of the Tongling area (modified after Change Yinbo et al., 1991);

(b)—geological sketch map of Shujiadian orefield (modified after Wang Shiwei et al., 2011)

ICP-MS)原位 U-Pb 定年在中国科学技术大学中国科学院壳幔物质与环境重点实验室完成。数据处理采用 GLITTER(ver 4.0, Macyuarie University)程序, 年龄计算采用 ISOPLOT (3.00 版) 软件 (Ludwig, 2003) 进行。

3 测定结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

样品 ZK2001-7 辉石闪长岩锆石相对均一, 无色透明, 部分为淡黄色, 晶体较大, 虽然有些锆石破

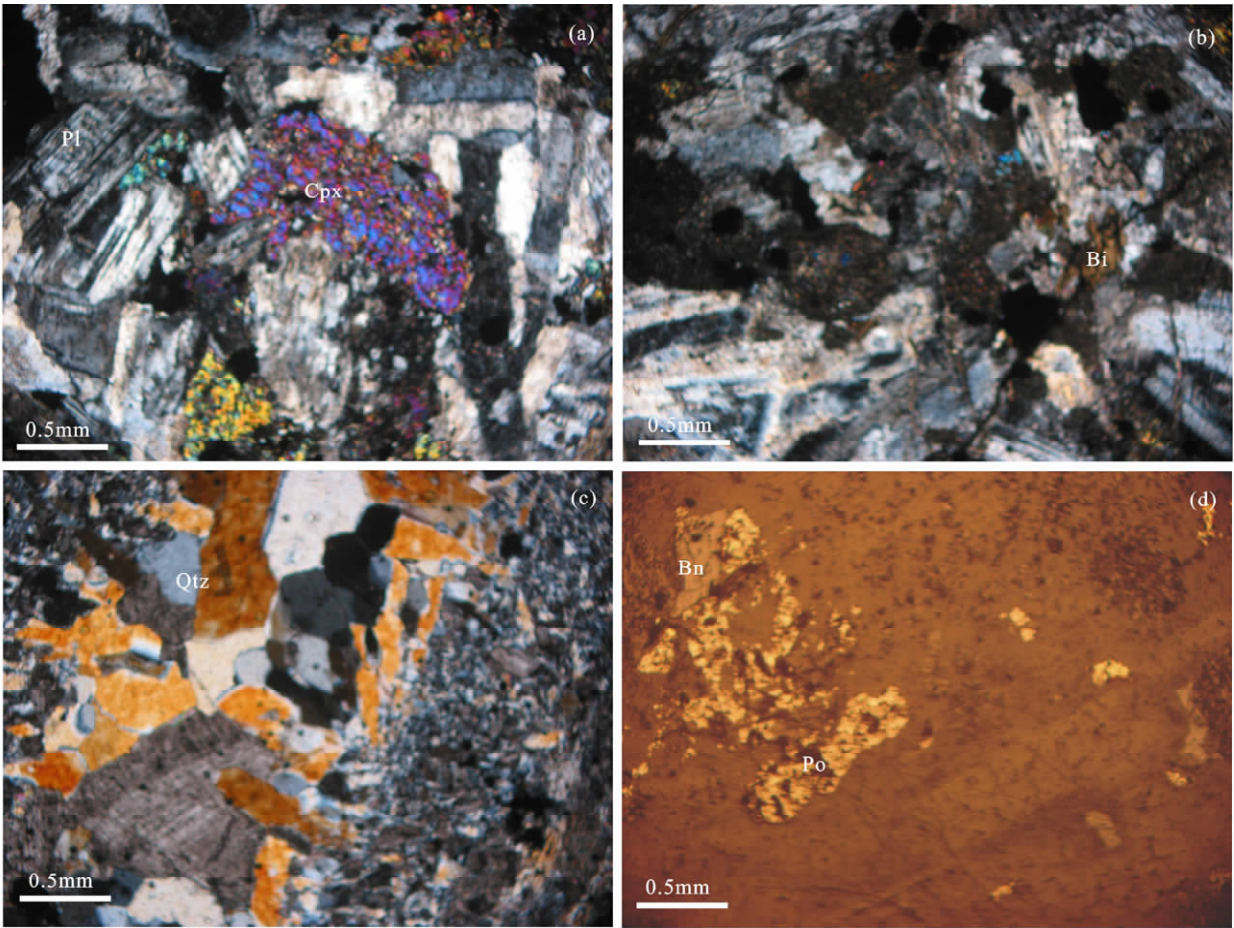


图 2 铜陵舒家店辉石闪长岩部分薄片观察结果

Fig. 2 The petrographic diagrams of Shujiadian pyroxene diorite in Tongling

(a)—辉石闪长岩;(b)—含黑云母辉石闪长岩;(c)—含石英脉辉石闪长岩;(d)—磁黄铁矿-斑铜矿矿化辉石闪长岩;

Cpx—辉石;Pl—长石;Bi—黑云母;Qtz—石英;Po—磁黄铁矿;Bn—斑铜矿

(a)—Pyroxene diorite; (b)—biotite pyroxene diorite; (c)—pyroxene diorite with quartz vein; (d)—pyrrhotite and bornite mineralization pyroxene diorite; Cpx—pyroxene; Pl—plagioclase; Bi—biotite; Qtz—quartz; Po—pyrrhotite; Bn—bornite

碎,但仍保留了部分较好的晶面和晶形,有的显示较宽的振荡环带(图 3)。在样品 17 颗锆石上共测定 17 个点,测试结果列于表 1。

17 个锆石分析点获得的锆石 Th 和 U 含量较低,分别为 $29.46 \times 10^{-6} \sim 173.57 \times 10^{-6}$ 和 $25.38 \times 10^{-6} \sim 82.13 \times 10^{-6}$, Th/U 比值变化范围不大,为 1.07~2.26,表明这些锆石为典型的岩浆锆石(Hoskin et al., 2000a)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $137 \pm 3 \sim 144 \pm 3\text{Ma}$ 之间,全部分布在谐和线 140Ma 附近(图 4a),加权平均年龄为 $140.5 \pm 1.4\text{Ma}$ (MSWD=0.57)(图 4b)。

3.2 主量元素

表 2 列出了舒家店辉石闪长岩的主量元素分析结果。从表中可以看出舒家店矿区辉石闪长岩的

SiO_2 含量较低,为 50.01%~53.53%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 在 5.89%~7.57% 范围内变化,大多数辉石闪长岩样品的 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 。样品都具有高 Al_2O_3 (>15.0%) 和富碱特征,TAS 岩石分类图显示样品落入碱性区域(图 5)。

岩石随着 SiO_2 的增加, Fe_2O_3 、 TiO_2 和 MgO 减少,这些特征反映了斜长石和角闪石等富钙矿物、镁铁矿物及其 Fe-Ti 氧化物是岩浆在演化过程中较早的主要分异结晶相(Dupont et al., 2002; 王岳军等, 2003),可能暗示存在着分离结晶作用。 P_2O_5 含量随 SiO_2 含量增高而降低,说明岩浆演化过程中存在含磷矿物(磷灰石)的分离结晶作用。由于磷灰石一般具有 Eu 负异常(Watson et al., 1981; Hoskin et al., 2000b),磷灰石的分离可抵消因斜长石等矿

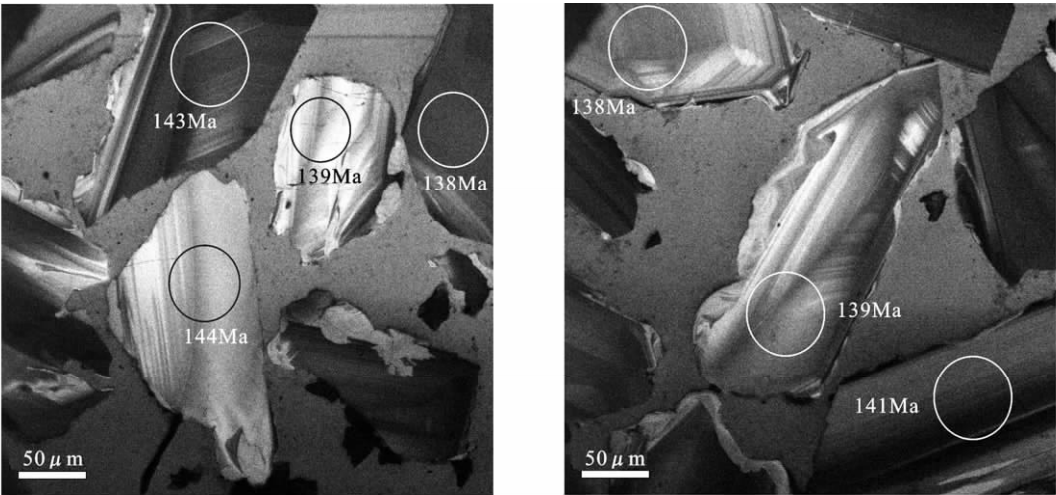


图 3 舒家店辉石闪长岩锆石阴极发光图像
Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from Shujiadian pyroxene diorite

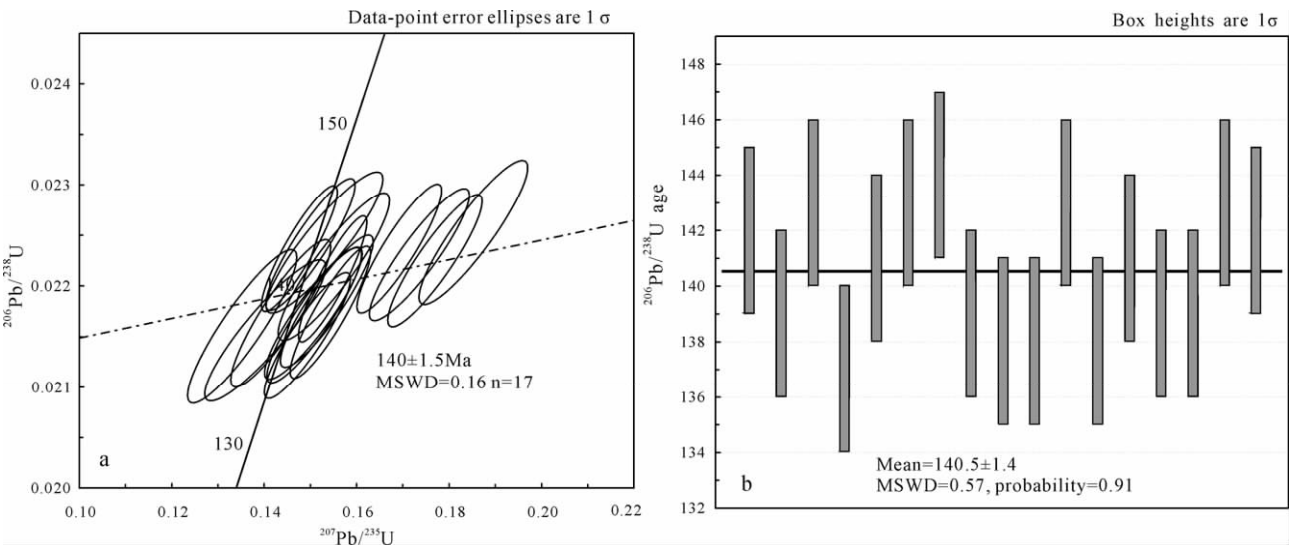


图 4 铜陵舒家店辉石闪长岩的锆石²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 谐和曲线(a)和平均年龄(b)

Fig. 4 Zircon ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U Concordia diagram (a) and averaged age (b) of pyroxene diorite from Shujiadian, Tongling

物相分离而产生的 Eu 亏损。

3.3 稀土和微量元素

舒家店辉石闪长岩的稀土和微量元素分析结果见表 3。本区含矿侵入岩的稀土总量变化于 $172 \times 10^{-6} \sim 249 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 220×10^{-6} ; LREE/HREE 比值较稳定, 变化于 4.76~6.99 之间, 平均为 5.77; 轻重稀土分异明显, (La/Yb)_N 值在 14.38~23.7 之间, 平均值为 19.37。球粒陨石标准化稀土配分模式显示舒家店辉石闪长岩属向右倾斜的轻稀土富集型(图 6), 相似于下地壳岩石的配分模式。 δEu 值分别在 0.81~0.90 范围内, 具有弱的 Eu 负异常。

球粒陨石标准化蛛网图显示(图 6), 舒家店辉

石闪长岩具有较高浓度的大离子亲石元素(LILE: Ba, Sr, Th, Pb), 相对低含量的高场强元素(HFSE: Zr, Nb, Hf, Ti)。辉石闪长岩的平均 Sr 含量为 1160×10^{-6} , 高 Sr 是埃达克岩的特征(Defant et al., 1990), 也是幔源金伯利岩、大陆碱性玄武岩和橄榄玄武岩等高钾岩石的特征(邢凤鸣等, 1995, 1996)。考虑其它地球化学特征, 如高 Al_2O_3 , 低 Y 等, 及本区埃达克岩普遍发育, 上述辉石闪长岩可能和板块俯冲作用有关。舒家店辉石闪长岩不仅富集 Sr, 而且也富集 Ba, 但 Rb 偏低, 和幔源型或壳幔同熔型花岗岩的特征一致(袁峰等, 2006), 表明其深源性。

表 1 铜陵舒家店辉石闪长岩 LA-ICP-MS 锆石分析数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon analytical data for the Shujiadian pyroxene diorite

	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	^{207}Pb / ^{206}Pb	1σ	^{207}Pb / ^{235}U	1σ	^{206}Pb / ^{238}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	1σ
09ZK2001-7-1	29.46	25.38	1.16	0.05784	0.00195	0.18005	0.00674	0.02265	0.00043	142	3
09ZK2001-7-2	41.91	29.41	1.43	0.05134	0.00165	0.15689	0.00574	0.02211	0.00043	139	3
09ZK2001-7-3	60.02	40.42	1.49	0.04790	0.00137	0.14996	0.00542	0.02273	0.00041	143	3
09ZK2001-7-4	44.15	34.65	1.27	0.05038	0.00169	0.15158	0.00614	0.02184	0.00041	137	3
09ZK2001-7-5	156.20	82.13	1.90	0.05058	0.00109	0.15686	0.00488	0.02237	0.00041	141	3
09ZK2001-7-6	138.99	67.22	2.07	0.05413	0.00144	0.17133	0.00604	0.02266	0.00042	143	3
09ZK2001-7-7	27.92	26.01	1.07	0.05937	0.00238	0.18739	0.00776	0.02280	0.00047	144	3
09ZK2001-7-8	66.14	41.84	1.58	0.05049	0.00218	0.15188	0.00698	0.02191	0.00043	139	3
09ZK2001-7-9	37.48	28.58	1.31	0.04527	0.00231	0.13622	0.00779	0.02176	0.00050	138	3
09ZK2001-7-10	74.21	47.85	1.55	0.05067	0.00208	0.15178	0.00676	0.02186	0.00044	138	3
09ZK2001-7-11	68.63	43.64	1.57	0.04992	0.00247	0.15377	0.00834	0.02254	0.00046	143	3
09ZK2001-7-12	52.71	33.13	1.59	0.04703	0.00273	0.14065	0.00864	0.02163	0.00046	138	3
09ZK2001-7-13	56.01	39.74	1.41	0.05013	0.00228	0.15540	0.00795	0.02225	0.00048	141	3
09ZK2001-7-14	46.84	41.50	1.13	0.04823	0.00225	0.14365	0.00713	0.02175	0.00048	139	3
09ZK2001-7-15	124.32	58.31	2.13	0.05082	0.00190	0.15348	0.00662	0.02185	0.00043	139	3
09ZK2001-7-16	173.57	76.72	2.26	0.04867	0.00176	0.14982	0.00637	0.02239	0.00043	143	3
09ZK2001-7-17	40.14	29.44	1.36	0.05680	0.00214	0.17320	0.00713	0.02227	0.00043	142	3

表 2 舒家店辉石闪长岩主量元素分析结果(%)

Table 2 The result of the major chemical compositions of Shujiadian pyroxene diorite(%)

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI	总量
09ZK2001-01	50.01	16.58	9.4	7.72	4	2.81	3.83	1.3	0.09	0.441	3.6	99.98
09ZK2001-03	51.42	17.05	7.72	9.75	3.04	3.88	2.05	1.06	0.08	0.447	1.91	98.62
09ZK2001-04	51.1	16.93	8.2	8.68	2.9	3.88	2.4	1.03	0.08	0.42	2.49	98.32
09ZK2001-05	52.77	17.22	6.12	8.64	3.07	3.68	3.04	1.09	0.08	0.458	2.27	98.69
09ZK2001-06	53.53	16.74	5.99	8.11	3.02	3.6	3.23	1.04	0.08	0.444	2.15	98.15
09ZK2001-07	53.02	16.39	5.47	8.64	2.72	3.38	2.88	0.98	0.09	0.488	4.03	98.28
09ZK2001-08	53.34	17.18	6.77	8.36	2.86	3.56	3.14	1.04	0.08	0.478	2.47	99.51
09ZK2001-10	51.01	17.09	10.36	6.99	3.06	3.71	2.25	1.02	0.08	0.447	3.13	99.34
09ZK2001-18	51.31	17.53	7.24	8.35	3.13	3.69	2.67	1.14	0.08	0.447	2.35	98.16
09ZK2001-19	51.01	17.26	8.03	7.81	2.89	3.46	3.14	0.98	0.08	0.445	2.7	98.06
09ZK2001-20	53.29	16.7	5.16	8.45	2.84	3.24	4.33	0.99	0.09	0.443	2.26	98.05
09ZK2001-21	52.95	16.93	6.75	6.81	2.75	3.79	3.44	1	0.08	0.426	3.04	98.22
09ZK2001-24	50.69	17.65	7.16	8.29	3.11	3.55	2.84	1.13	0.11	0.507	3.48	98.73
09ZK2001-25	51.47	16.75	6.24	10.74	2.74	3.81	2.08	0.95	0.12	0.465	2.82	98.38
09ZK2001-26	51.82	17.47	7.23	7.75	2.94	3.33	3.53	1.04	0.09	0.494	3.48	99.4
09ZK2001-30	52.42	17.29	5.79	9.03	3.12	3.42	3.09	1.05	0.08	0.503	2.05	98.08
09ZK2001-35	51.2	17.56	8.46	8.57	3.15	3.87	2.35	1.05	0.12	0.508	1.76	98.79
09ZK2001-37	51.19	17.5	8.78	8.16	3.03	4.04	2.36	1.06	0.13	0.531	1.6	98.57
09ZK2001-39	52.9	17.82	6.71	7.72	2.95	4.07	2.67	1.03	0.1	0.459	3.09	99.74

表 3 舒家店辉石闪长岩微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 Trace element concentrations of Shujiadian pyroxene diorite ($\times 10^{-6}$)

样品	Ba	Co	Cs	Cu	Ga	Hf	Nb	Pb	Rb	Sr	Ta	Th	U	Zn	Zr
09ZK2001-01	766	13.6	3.34	646	22.5	4.6	12	17	108	924	0.6	7.94	2.37	69	179
09ZK2001-03	713	49.2	1.33	1630	21.7	4.2	13.1	12	58.3	1225	0.7	7.9	2.61	72	158
09ZK2001-04	759	36.9	1.37	1270	21.1	4.7	10	21	58.3	1135	0.6	8.4	2.6	36	191
09ZK2001-05	1030	28.7	1.8	4590	22.6	3.9	13.4	13	87.5	1125	0.6	7.46	2.6	310	146
09ZK2001-06	766	24.1	1.78	3170	19.8	3.2	15.3	11	84.3	918	0.5	6.91	2.63	429	127
09ZK2001-07	694	22.5	2.74	4960	23	4.5	26.6	13	107	999	0.8	8.91	3.68	290	173
09ZK2001-08	941	23	2.43	2950	22.3	4	15.2	11	105	1165	0.6	8.06	3.43	151	158
09ZK2001-10	709	33.8	2.89	1450	22	4.5	11.3	11	113.5	1170	0.7	8.57	2.55	67	179
09ZK2001-18	808	23.4	2.48	1150	24.6	5.1	15.2	14	79.6	1285	0.7	11.7	2.98	71	213
09ZK2001-19	999	29.3	2.1	1170	22	4.6	12.7	13	91.4	1370	0.7	9.03	2.4	56	186
09ZK2001-20	1160	24.3	2.06	1960	21.1	4.3	13.5	10	131	1250	0.6	10.05	3.4	116	168
09ZK2001-21	1170	29.2	2.57	5980	22.8	4.6	14.3	15	112	1170	0.7	9.99	3.21	392	184
09ZK2001-24	792	25.2	3.57	2060	24	4.3	11.3	13	105.5	1145	0.6	8.09	2.74	122	183
09ZK2001-25	700	25.6	4.12	5960	21.5	4.6	18.8	15	87	1110	0.7	9.26	4.21	199	178
09ZK2001-26	867	35.1	1.92	5010	22	3.8	10	16	117.5	1220	0.4	5.32	1.98	177	157
09ZK2001-30	957	25.5	2.05	5440	22.1	4.4	13.1	11	118	1250	0.6	10.55	3.78	217	174
09ZK2001-35	647	17.7	1.56	636	24	4.2	11.5	14	65.6	1265	0.6	8.52	2.28	85	168
09ZK2001-37	612	18.5	1.73	72	23.4	4.7	10.8	59	57.6	1170	0.5	9.17	2.42	86	189
09ZK2001-39	740	16.4	2.02	403	23.8	5	15.4	16	84	1150	0.8	11.7	3.4	40	196

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δEu
09ZK2001-01	34.9	72.6	8.79	35.1	6.6	1.73	5.91	0.77	3.62	0.69	2.14	0.3	1.74	0.26	18.1	193.25	159.72	33.53	4.76	14.38	0.85
09ZK2001-03	38.6	77.0	8.88	33.5	6.17	1.66	5.56	0.72	3.35	0.61	1.89	0.28	1.58	0.23	16.4	196.43	165.81	30.62	5.42	17.52	0.87
09ZK2001-04	37.8	76.3	8.94	33.3	6.19	1.62	5.33	0.67	3.2	0.74	1.96	0.29	1.51	0.24	17.1	195.19	164.15	31.04	5.29	17.96	0.86
09ZK2001-05	39.1	77.2	8.98	34.1	6.32	1.67	5.63	0.73	3.25	0.64	1.79	0.27	1.49	0.24	16.8	198.21	167.37	30.84	5.43	18.82	0.86
09ZK2001-06	34.0	68.0	7.83	29.2	5.27	1.46	4.66	0.64	2.89	0.55	1.6	0.19	1.32	0.21	14.3	172.12	145.76	26.36	5.53	18.48	0.90
09ZK2001-07	41.6	81.3	9.40	34.8	6.24	1.59	5.71	0.76	3.33	0.64	1.77	0.26	1.59	0.25	17.0	206.24	174.93	31.31	5.58	18.77	0.81
09ZK2001-08	46.0	92.0	10.6	39.5	6.78	1.82	6.1	0.78	3.51	0.66	1.89	0.26	1.63	0.24	17.5	229.27	196.7	32.57	6.04	20.24	0.86
09ZK2001-10	40.9	80.7	9.58	36.1	6.51	1.77	5.99	0.73	3.5	0.68	1.96	0.26	1.64	0.25	17.7	208.27	175.56	32.71	5.37	17.89	0.87
09ZK2001-18	48.0	92.0	10.7	39.8	7.13	1.95	6.22	0.78	3.56	0.68	2.00	0.26	1.69	0.26	18.2	233.23	199.58	33.65	5.93	20.37	0.90
09ZK2001-19	44.2	87.8	10.45	39.7	6.77	1.83	6.24	0.83	3.71	0.68	1.91	0.26	1.68	0.24	18.1	224.4	190.75	33.65	5.67	18.87	0.86
09ZK2001-20	51.6	99.6	11.4	41.4	6.83	1.85	6.43	0.79	3.53	0.66	1.94	0.24	1.62	0.24	17.3	245.43	212.68	32.75	6.49	22.85	0.85
09ZK2001-21	47.8	94.0	10.75	40.8	7.04	1.92	6.34	0.77	3.53	0.69	2.01	0.26	1.82	0.24	18	235.97	202.31	33.66	6.01	18.84	0.88
09ZK2001-24	52.3	99.0	11.45	42.4	7.39	2.05	6.58	0.83	3.79	0.7	1.97	0.26	1.72	0.24	18.5	249.18	214.59	34.59	6.20	21.81	0.90
09ZK2001-25	49.2	95.0	10.4	37.2	5.96	1.72	5.89	0.69	3.08	0.57	1.61	0.2	1.49	0.21	14.8	228.02	199.48	28.54	6.99	23.69	0.89
09ZK2001-26	42.9	84.9	10.15	39.4	6.89	1.93	6.53	0.79	3.62	0.67	1.99	0.23	1.65	0.23	17.8	219.68	186.17	33.51	5.56	18.65	0.88
09ZK2001-30	49.4	96.0	11.0	40.5	6.85	1.9	6.52	0.78	3.63	0.68	1.99	0.25	1.69	0.26	17.6	239.05	205.65	33.4	6.16	20.97	0.87
09ZK2001-35	43.4	87.4	10.6	41.3	7.59	2.01	6.68	0.78	3.77	0.68	2.07	0.24	1.71	0.26	18.4	226.89	192.3	34.59	5.56	18.21	0.86
09ZK2001-37	45.8	90.9	10.95	42.9	7.42	2.04	6.61	0.81	3.91	0.72	2.13	0.25	1.68	0.21	18.5	234.83	200.01	34.82	5.74	19.55	0.89
09ZK2001-39	48.8	92.8	10.7	41.2	6.88	1.91	6.64	0.81	3.64	0.69	2.03	0.25	1.73	0.25	18.2	236.53	202.29	34.24	5.91	20.23	0.86

4 讨论

4.1 成岩和成矿年龄

有关铜陵地区岩浆岩的地质年代学研究开展较早(Chen J F et al. , 1985; 陈江峰等, 1993; 周泰禧等, 1987), 获得的年龄结果表明铜陵地区中酸性侵入岩的年龄峰值主要在 135~145Ma 之间(王彦斌等, 2004a, 2004b, 2004c; Xu X S et al. , 2004; Di Y J et al. , 2005; 张达等, 2006; 杜松杨等, 2007;

陆三明等, 2007; 杨小男等, 2007, 2008; 谢建成等, 2008)。部分研究者认为铜陵地区岩浆的侵入期次从早到晚为正常演化序列, 即辉石(二长)闪长岩—石英(二长)闪长岩—花岗闪长岩, 也有部分研究者认为是逆演化序列(常印佛等, 1991), 即从花岗闪长岩—石英(二长)闪长岩—辉石(二长)闪长岩依次侵入, 吴才来等(2008)通过研究也得出相同的结论, 而谢建成^①通过研究认为侵入顺序为花岗闪长岩—辉石(二长)闪长岩—石英(二长)闪长岩。对

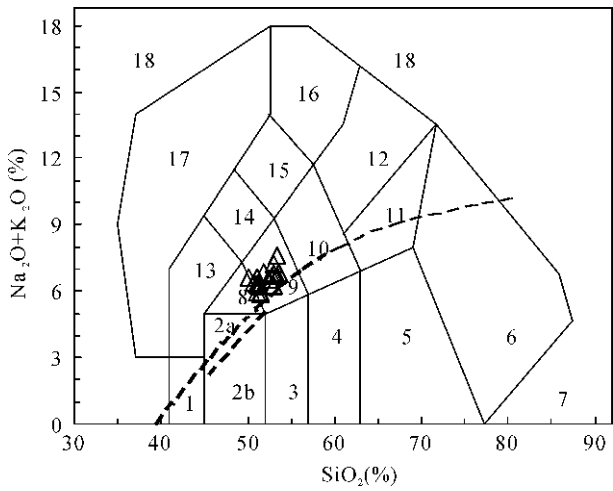


图 5 舒家店辉石闪长岩 SiO_2 -Alk 图解
(据 Middlemost, 1994)
Fig. 5 SiO_2 -Alk diagram for pyroxene diorite from Shujiadian(after Middlemost, 1994)

1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗闪长岩; 6—花岗岩; 7—石英岩; 8—二长辉长岩; 9—二长闪长岩; 10—二长岩; 11—石英二长岩; 12—正长岩; 13—副长石辉长岩; 14—副长石二长闪长岩; 15—副长石二长正长岩; 16—副长正长岩; 17—副长深成岩; 18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩
1—Olivine gabbro; 2a—essexite; 2b—sub-alkali gabbro; 3—pyroxne diorite; 4—diorite; 5—granodiorite; 6—granite; 7—quartzolite; 8—monzogabbro; 9—monzodiorite; 10—monzonite; 11—quartz monzonite; 12—syenite; 13—foid gabbro; 14—foid monzodiorite; 15—foid monzosyenite; 16—foid syenite; 17—foid plutonite; 18—tawite /urtite /italite

于铜陵地区侵入岩的侵入先后顺序问题目前还存在较大的争论(陆三明等, 2007; 李进文等, 2007)。

关于铜陵地区辉石(二长)闪长岩年龄的报道不多,王彦斌等(2004c)应用锆石 SHRIMP 定年方法获得朝山辉石闪长岩的年龄为 $142.9 \pm 1.1\text{Ma}$,陆三明等(2007)对白芒山辉石二长闪长岩进行 SHRIMP 定年得到年龄为 $139 \pm 2\text{Ma}$,王建中等(2008)应用角闪石 Ar-Ar 定年方法测定了朝山辉石闪长岩的坪年龄为 $139.7 \pm 0.3 \sim 138.3 \pm 0.6\text{Ma}$ 。本次获得的舒家店辉石闪长岩样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $140.5 \pm 1.4\text{Ma}$,比吴才来等(1996)运用黑云母 Ar-Ar 同位素定年方法得到的年龄($138.2 \pm 4.6\text{Ma}$)和王世伟等(2011)运用锆石 LA-ICP-MS 方法获得的年龄($139.2 \pm 2.1\text{Ma}$)稍高,但在误差范围内是十分接近的。从锆石的 U-Pb 同位素 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄结果表明,舒家店辉石闪长岩的侵入年龄为 $140.5 \pm 1.4\text{Ma}$,整个铜

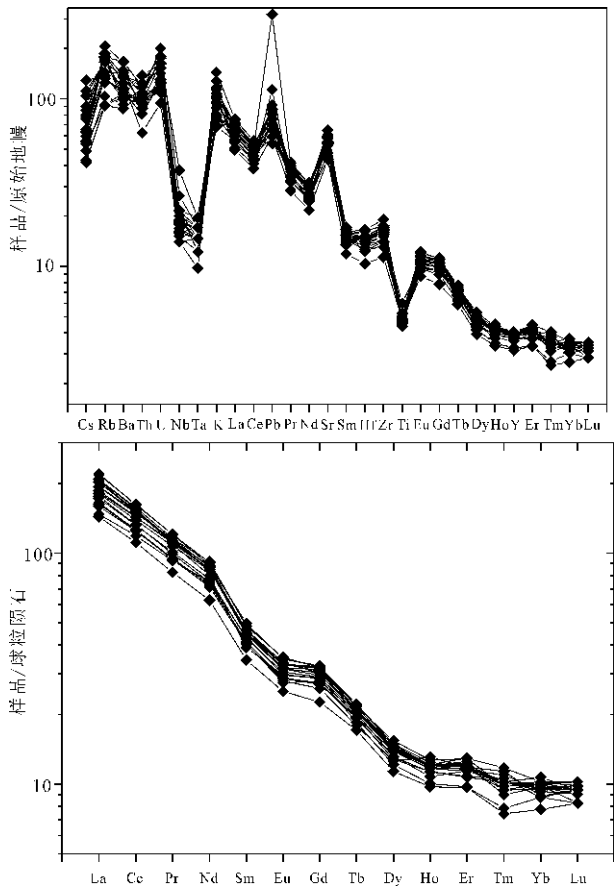


图 6 舒家店辉石闪长岩的球粒陨石标准化图解
(标准化数值取自 Sun et al., 1989)
Fig. 6 The chondrite normalized distribution patterns of the Shujiadian pyroxene diorite (normalized standard from Sun et al., 1989)

陵的辉石(二长)闪长岩年龄主要在 $138.3 \sim 142.9\text{Ma}$ 之间,低于谢建成等(2008)统计的花岗闪长岩年龄($140 \sim 144\text{Ma}$)。

运用 Re-Os 同位素方法,蒙义峰等(2004)对金口岭 Cu-Au 矿床中的辉钼矿进行了精确的年龄测定,获得等时线年龄为 $137.0 \pm 0.19\text{Ma}$;毛景文等(2004)对铜陵地区大团山、沙滩脚和南阳山的矽卡岩型层状矿体中的辉钼矿进行精确定年,得到等时线年龄为 $138.0 \pm 3.2 \sim 141.9 \pm 0.4\text{Ma}$,谢建成^①对新桥铜矿中的黄铁矿进行精确定年,获得等时线年龄为 $126 \pm 11\text{Ma}$;梅燕雄等(2005)对大团山层状矽卡岩型矿体中的辉钼矿进行定年,获得等时线年龄为 $139.1 \pm 2.7\text{Ma}$;Sun W D 等(2003)获得龙虎山辉钼矿的 Os-Os 年龄为 $138.0 \pm 2.5\text{Ma}$ 。这些年龄变化于 $126 \sim 141.9\text{Ma}$,可代表铜陵地区的大致成矿年龄。

舒家店矿体属于斑岩型矿床,矿石为硫化物型,

可细划分为含铜辉石闪长岩矿石、含铜闪长岩矿石、含铜闪长玢岩矿石 3 种自然类型。辉石闪长岩是岩体中的主要岩石类型,也是斑岩型铜矿床的赋矿岩石。虽然还没有舒家店矿床成矿年龄的直接结果,但从上面的讨论可以看出,前人所做的铜陵其他矿区的成矿年龄和舒家店辉石闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄大体一致,并且锆石 CL 图像并没有显示成矿过程中受到明显的热液活动影响,说明成矿和成岩的时间是一致的或稍晚。因此,舒家店矿区的成矿时代应该为 140.5Ma 左右,稍晚于岩浆岩侵位的时代。

4.2 岩石成因

对于长江中下游以及中国东部(从大兴安岭至华北和华南)晚侏罗世—早白垩世中酸性火成岩的

形成环境长期存在争论,众多学者认为与古太平洋板块向西的俯冲作用有关,中国东部属于太平洋与东亚大陆碰撞汇聚活动陆缘环境(吴利仁, 1985; Jahn et al., 1990; Lapierre et al., 1997; Chen J F et al., 1998; Faure et al., 1996; Davis et al., 1996, 2001; Menzies et al., 1998; 周新民等, 2000; 邓晋福等, 2000; Zhou M F et al., 2006; Sun W D et al., 2007)。有人主张俯冲+板内(或弧后)拉张的模式,认为受太平洋板块俯冲和陆内拉张作用的双重影响或早期与俯冲有关,晚期叠加了伸展作用的影响(邓晋福等, 1996, 2000; 徐志刚等, 1999)。近来有人认为长江中下游在早白垩纪发生了洋脊俯冲(Ling M X et al., 2009)。已有的研究表明,约 125Ma 之前,太平洋板块向南西方向

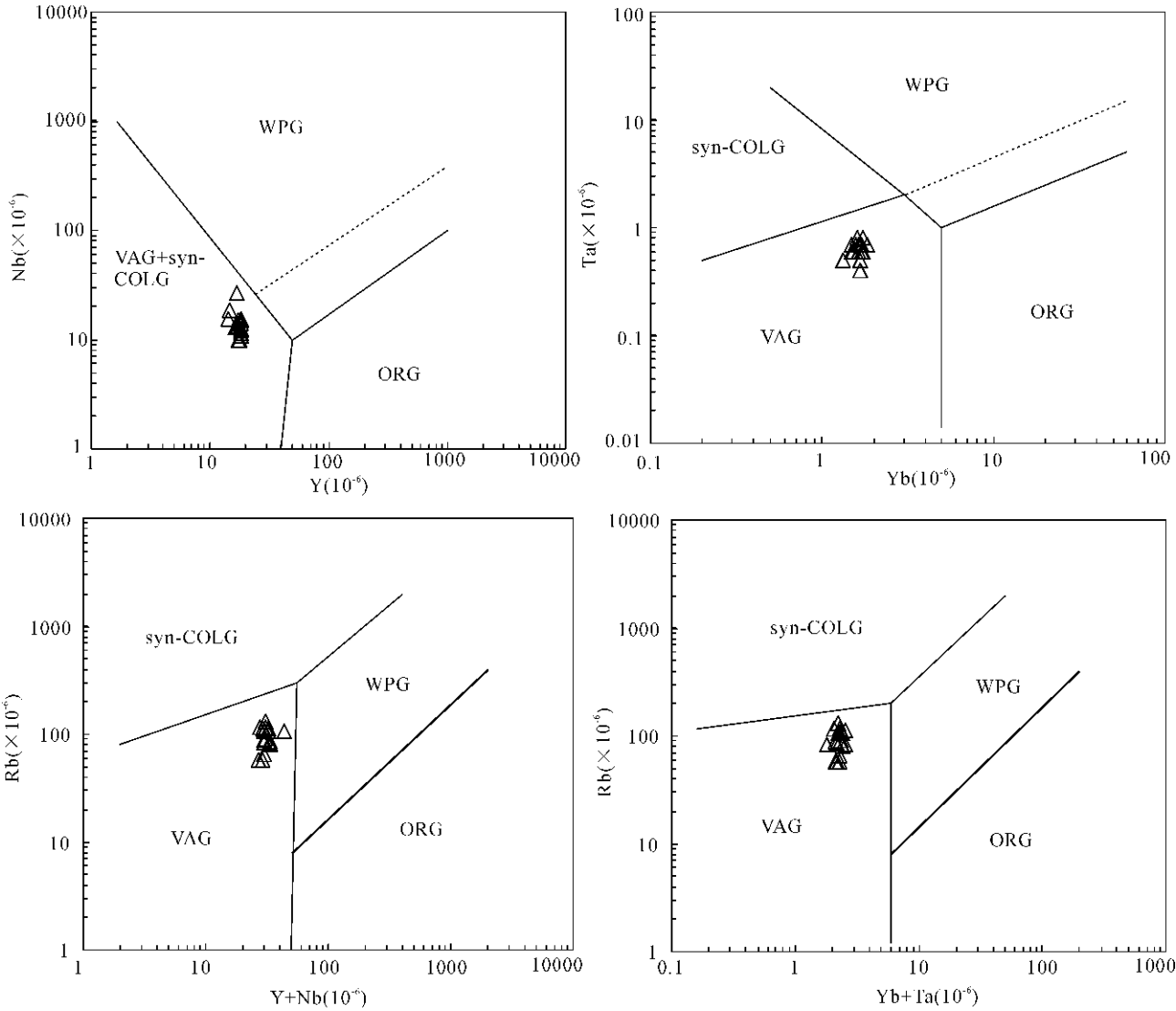


图 7 舒家店辉石闪长岩大地构造环境判别图解(据 Pearce et al., 1984)

Fig. 7 Tectonic environmental discriminaion diagrams of the Shujiadian pyroxene diorite (after Pearce et al., 1984)

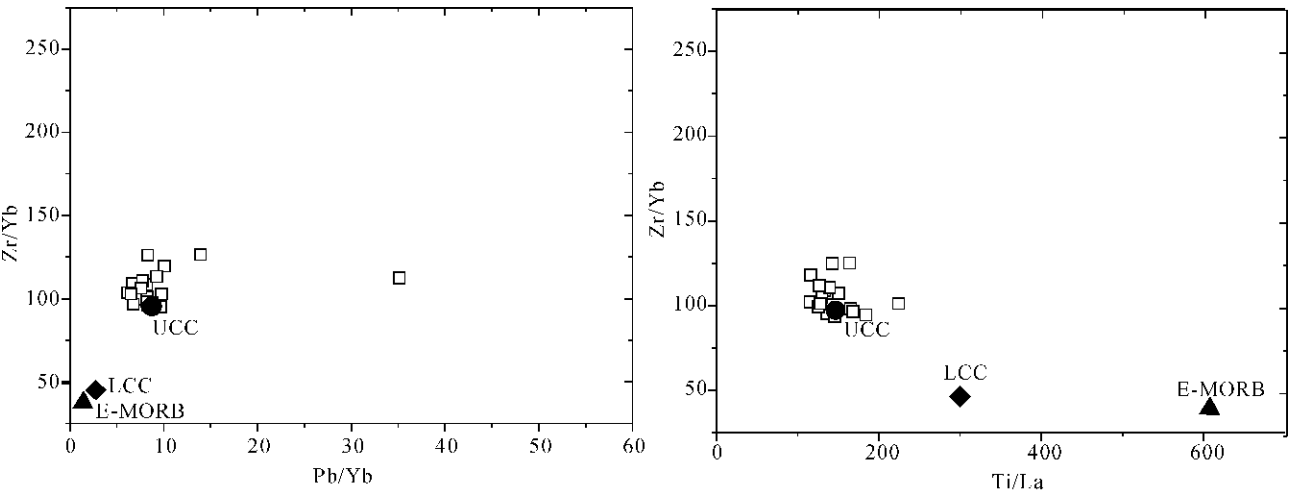


图 8 舒家店辉石闪长岩的 Pb/Yb-Zr/Yb 和 Ti/La-Zr/Yb 图
Fig. 8 The Zr/Yb-Pb/Yb and Ti/La-Zr/Yb diagram of pyroxene diorite in Shujiadian

俯冲,而依泽纳吉板块则快速向北北西方向俯冲 (Maruyama et al. , 1997; Sun W D et al. , 2007; Ling M X et al. , 2009)。此时,两个板块之间的洋脊正对着欧亚大陆,而且漂移方向显示很可能发生了洋脊俯冲(Ling M X et al. , 2009)。另一种意见认为中国东部岩浆作用是陆内拉张作用的产物,与太平洋板块的俯冲无关(陶奎元等, 1999; 鲍亦刚等, 1995; 谢家莹等, 1996; 陆志刚等, 1997; 李锦铁, 1998; Li X H, 2000; 张旗等, 2001)。

在构造环境判别图解中(图 7),辉石闪长岩样品都落在火山弧花岗岩范围内。前人研究表明,弧岩浆岩具有成分极性 (Sakuyama et al. , 1986; Wilson, 1989)。在空间上,从海沟向内陆岩浆岩碱

度增高;随时间演化,岩浆岩组合整体碱度增高。Wilson (1989) 指出,与大洋岛弧岩浆岩相比,活动大陆边缘岩浆岩成分以高钾质为主要特征。舒家店地区侵入岩显示了亏损 Nb, Zr, Hf 等高场强元素,富集 Th, Ba, Sr 等大离子亲石元素的配分模式(图 6),不同于富集高场强元素的板内环境火成岩,而与板块消减带火成岩的地球化学特征相容。根据长江中下游地区及其邻区的区域地质构造、早白垩世岩浆岩的岩石-地球化学特征和岩浆活动的时空演变特征,吕庆田等(2004)结合地球物理资料推断该区在早白垩世早期处于大陆边缘岩浆弧内陆一侧,相应的岩浆活动与古太平洋板块的斜向俯冲作用有关;晚期由于俯冲的岩片变陡,而发育具有弧后环境

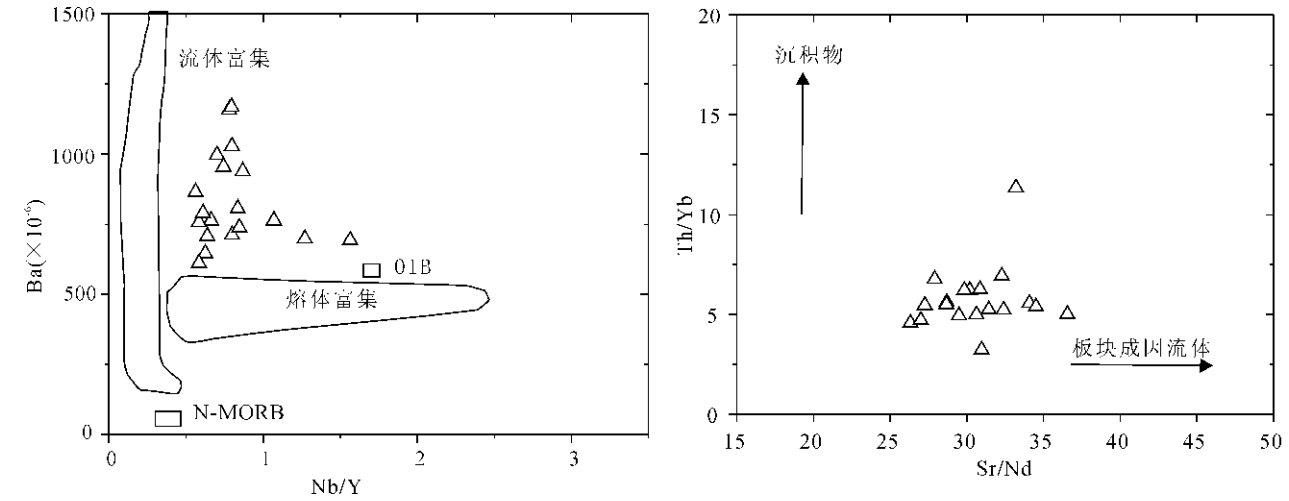


图 9 舒家店辉石闪长岩 Nb/Y-Ba 和 Sr/Nd-Th/Yb 图(据 Kepezhinskias et al. , 1997)

Fig. 9 The Nb/Y-Ba and Sr/Nd-Th/Yb diagram of Shujiadian pyroxene diorite (after Kepezhinskias et al. , 1997)

特征的岩浆岩。岩石地球化学特征表明本区岩浆岩形成的地构造背景,应该是与古太平洋板块俯冲密切相关的大陆边缘岩浆弧的内陆一侧环境。

图 8 显示的是舒家店和金口岭的 $Zr/Yb-Pb/Yb$ 和 $Ti/La-Zr/Yb$ 图,其中 E-MORB 数据引自 Sun 等(1989),上、下地壳数据引自 Rudnick 等(2003)。Zr 是中等不相容元素,Pb 是不相容元素,Yb 是相容元素,从图 8 可以看出,舒家店辉石闪长岩中混染了大量的地壳物质。

近来研究表明,Ba 是俯冲板块释放的流体中最活泼的不相容元素,而 Th 一般在俯冲板块形成的熔体中富集,利用 Ba 和 Th 的相关图解可以判断金属源区和流体来源(Bedard, 1999; Seghedi et al., 2001)。从 Nb/Y-Ba 图(图 9)可以看出,舒家店辉石闪长岩的 Ba 含量变化较大,样品几乎都落入流体富集和熔体富集之间,因此可能是二者共同作用的结果。在 Sr/Nd-Th/Yb 图解中,舒家店辉石闪长岩的 Sr/Nd 比值变化较大,样品沿着板块来源的流体演化线分布,说明舒家店辉石闪长岩的成因和板块流体密切相关。

常印佛等(1991)、唐永成等(1998)认为铜陵地区侵入岩原生岩浆起源于上地幔,是上地幔局部熔融产生的。铜陵舒家店辉石闪长岩富碱、铝,贫镁,富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素,明显富集 Sr、Ba,但 Rb 稍偏低,这些特征反映出该地区侵入岩的原始岩浆可能来源于岩石圈地幔,且岩石圈地幔源区可能受到了板块俯冲作用的改造,也可能岩浆上升过程中经受了地壳混染。

4.3 成矿意义

大量研究证实板块俯冲汇聚边界附近的岩浆作用与大规模铜(金)成矿作用有密切的关系(Richards, 1990; Mueller et al., 1993; Sillitoe, 1997; Ulrich et al., 1999; Sun W D et al., 2004)。但是铜金矿床富集沉淀成矿,还主要取决于熔体和流体以及围岩的性质(McInnes et al., 1999; Mueller et al., 2001; Sun W D et al., 2004; Levresse et al., 2006; Niiranen et al., 2007)。在众多的控矿因素中,氧逸度对铜金矿床有着十分重要的意义(Hedenquist et al., 1994; Sillitoe, 1997; Mungall, 2002; Sun W D et al., 2004; Ballard et al., 2002; Ling M X et al., 2009)。首先,高氧逸度可以使地幔中的硫化物被氧化为硫酸根,从而释放出额外的亲硫元素,同时可以使岩浆中的硫在岩浆演化过程中保持不饱和(Sun W D et al., 2004;

Wyborn et al., 1994),有利于形成大型和超大型斑岩 Cu-Au 矿床。大量的研究已经证实,世界上的主要铜金矿床大都形成于板块汇聚边界的高氧逸度环境(Sillitoe, 1997; Mungall, 2002; Sun W D et al., 2004)。

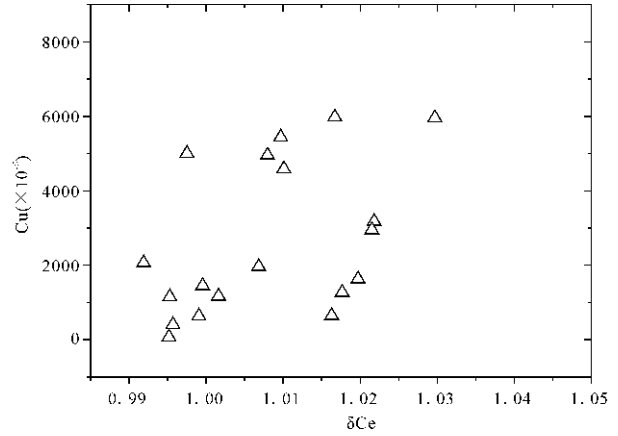


图 10 舒家店辉石闪长岩 Ce-Cu 相关图

Fig. 10 Ce-Cu diagram of Shujiadian pyroxene diorite

俯冲板片洋壳部分直接熔融产生的埃达克岩熔体,或高温高压条件下释放的超临界流体富含 Fe_2O_3 而具高氧逸度(Bureau et al., 1999)。舒家店辉石闪长岩中,虽然总体看没有 Ce 的异常,但从图 10 可以看出,δCe 和 Cu 含量存在一个正相关的趋势。须知高氧逸度时 Ce 易被氧化成+4 价而与系统分离,因此显示 Ce 的负异常(王中刚等, 1989)。δCe 和 Cu 含量存在一个正相关的趋势,说明在氧逸度稍低的时候,Cu 的含量稍高点,表明辉石闪长岩岩浆结晶时具有良好的成矿条件。已有的研究工作显示,铜金矿床往往有大量的幔源物质加入(侯增谦, 2004; 侯增谦等, 2007),这主要是因为岩浆演化到酸性岩时铜金会大量丢失,因此以酸性岩为主体的陆壳铜金丰度较低(Sun W D et al., 2004)。上述特征说明舒家店辉石闪长岩应属岩浆演化到酸性岩之前的一个状态。在这种状态下,岩浆没有演化到酸性而没有大量的铜丢失,因此即使没有矽卡岩化,铜(金)仍可富集,从而形成斑岩铜(金)矿床。

在铜陵地区的岩浆岩,其 Cu、Au 等成矿元素可能来源于俯冲洋壳脱水形成的热液或熔体,其岩浆不管是以哪种方式向酸性演化(地壳混染或分离结晶)都会使岩浆中的铜金含量丢失,因此需要额外的作用使铜金再次富集成矿,这种作用以矽卡岩化最为重要。因此和铜陵其他矿区的岩浆岩相比,舒家店辉石闪长岩硅含量较低,且成斑岩型铜矿床,因而

具有其独特的特点,这种特征或许就是洋壳俯冲重融作用的指示,其形成也许不一定全部来自俯冲洋壳直接部分熔融,而可能是俯冲洋壳脱水形成的熔体或流体交代地幔楔,从而使地幔楔发生部分熔融形成的玄武质岩浆侵位到地壳浅部过程中混染了大量地壳物质,而形成了舒家店辉石闪长岩组合侵入岩,同时洋壳中相对陆壳含有更为丰富的铜金等贵金属元素融入了岩体,从而富集成矿(孙卫东等, 2010;Sun W D et al. , 2004)。

5 结论

(1) 高质量的锆石 U-Pb 谐和年龄和²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄结果表明,铜陵舒家店辉石闪长岩的侵入年龄为 140.5±1.4Ma,略低于在铜陵地区广泛分布的 140~144Ma 之间的花岗闪长岩年龄。舒家店斑岩型铜金矿床的成矿时代也为 140.5Ma,或稍晚于岩浆岩侵位的时代。

(2) 舒家店辉石闪长岩岩石地球化学特征指示原始岩浆可能来源于受到了板片俯冲作用改造的富集地幔,所形成的大地构造背景,应该是与古太平洋板块俯冲密切相关的大陆边缘岩浆弧的内陆一侧环境。其可能是俯冲洋壳脱水形成的熔体或流体交代地幔楔并使地幔楔发生部分熔融形成的玄武质岩浆侵位到地壳浅部过程中混染了大量地壳物质,形成了辉石闪长岩组合侵入岩,洋壳中丰富的铜金等贵金属元素随岩浆结晶富集成矿。

致谢:衷心感谢导师常印佛院士的亲切关怀和指导!

注 释

① 谢建成. 2008. 安徽铜陵地区中生代岩浆岩成岩和成矿作用研究. 中国科学技术大学博士论文. 合肥:中国科学技术大学.

参 考 文 献

鲍亦刚,白志民,葛世伟,刘澄. 1995. 北京燕山期火山地质及火山岩. 北京:地质出版社,1~164.
常印佛,刘学圭. 1983. 关于层控式矽卡岩型矿床——以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例. 矿床地质, 2(1): 11~20.
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,1~238.
陈江峰,周泰禧,李学明,Forland K A,黄承义,卢伟. 1993. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区锶、钕同位素制约. 地球化学, 22(3): 261~268.
陈江峰,周泰禧,邢凤鸣,徐祥,徐立华. 1994. 长江中下游岩带含铜岩体 Pb、Sr、Nd 的同位素特征. 地球学报, (1-2): 111~116.
陈江峰,喻钢. 2003. 安徽沿江地区铜矿床的物质来源:Pb 同位素

组成的制约. 安徽地质, 13(1): 27~33.
邓晋福,刘厚祥,赵海玲. 1996. 燕辽地区燕山期火山岩与造山模型. 现代地质, 10: 137~148.
邓晋福,赵国春,赵海玲,罗照华,戴圣潜,李凯明. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山-深部过程. 地质论评, 46: 41~48.
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.
邓晋福,戴圣潜,赵海玲,杜建国. 2002. 铜陵 Cu-Au(Ag)成矿区岩浆-流体-成矿系统和亚系统的识别. 矿床地质, 21(4): 317~322.
狄永军,赵海玲,吴金国,张达,臧文栓,刘清华. 2005. 铜陵地区燕山期侵入岩成因与三端元岩浆混合作用. 地质论评, 51(5): 528~538.
杜杨松,李顺庭,曹毅,秦新龙,楼亚儿. 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.
侯增谦. 2004. 斑岩 Cu-Mo-Au 矿床:新认识与新进展. 地学前缘, 11(1): 131~144.
侯增谦,潘小菲,杨志明,曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿. 现代地质, 21(2): 332~351.
李锦铁. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. 地质论评, 44: 474~480.
李锦秩. 2001. 中朝地块与扬子地块碰撞的时限与方式——长江中下游地区震旦纪-侏罗纪沉积环境的演化. 地质学报, 75(1): 25~34.
李进文,裴荣富,张德全,梅燕雄,臧文栓,孟贵祥,曾普胜,李铁军,狄永军. 2007. 铜陵矿集区燕山期中酸性侵入岩地球化学特征及其地质意义. 地球学报, 28(1): 11~22.
李文达,毛建仁,朱云鹤,谢华光. 1998. 中国东南部中生代火成岩与矿床. 北京:地震出版社,1~159.
刘裕庆,刘兆廉,杨成兴. 1984. 铜陵地区冬瓜山铜矿的稳定同位素研究. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1: 47~114.
刘裕庆,刘兆廉. 1991. 铜陵地区层状铜(铁、硫)矿床同位素地球化学和矿床成因研究. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1: 70~101.
吕庆田,侯增谦,杨竹森,史大年. 2004. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式:来自地球物理资料的约束. 中国科学(D 辑), 34(9): 783~794.
陆三明,徐晓春,谢巧勤. 2007. 铜陵狮子山铜金矿田成矿流体成分及稳定同位素地球化学. 岩石学报, 23(1): 177~184.
陆志刚,陶魁元,谢家莹,谢窠克,王文斌,陈鹤年,袁慰顺,岳书仓,薛怀明. 1997. 中国东南大陆火山地质及矿产. 北京:地质出版社,1~431.
毛建仁,苏郁香,陈三元,岳元珍,赵曙良,程启芬. 1990. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿. 北京:地质出版社,1~191.
毛景文, Holly S, 杜安道,周涛发,梅燕雄,李永峰,臧文栓,李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示. 地质学报, 78(1): 121~131.
梅燕雄,毛景文,李进文,杜安道. 2005. 安徽铜陵大团山铜矿床层状矽卡岩矿体中辉钼矿 Re-Os 年龄测定及其地质意义. 地球学报, 26(4): 327~331.

蒙义峰, 杨竹森, 曾普胜, 徐文艺, 王训威. 2004. 铜陵矿集区成矿流体系统时限的初步厘定. 矿床地质, 23(3): 271~280.

裴荣富, 吕凤翔, 范继璋, 方如恒, 齐朝顺. 1998. 华北地块北缘及其北侧金属矿床成矿系列与勘查. 北京: 地质出版社. 91~106.

孙卫东, 凌明星, 杨晓勇, 范蔚茗, 丁兴, 梁华英. 2010. 洋脊俯冲与斑岩铜金成矿. 中国科学(D辑), 40(2): 127~137.

唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1~351.

陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 赵宇. 1999. 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发. 矿床地质, 18(4): 316~322.

王彪. 2010. 舒家店铜矿床地质地球化学特征及成因分析. 合肥工业大学学报(自然科学版), 33(6): 906~910.

王世伟, 周涛发, 袁峰, 范欲, 吕玉琢. 2011. 铜陵舒家店岩体的年代学和地球化学特征研究. 地质学报, 85(5): 849~861.

王建中, 李建威, 赵新福, 钱壮志, 马昌前. 2008. 铜陵地区朝山砂卡岩型金矿床及含矿岩体的成因:⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄、元素地球化学及多元同位素证据. 岩石学报, 24(8): 1875~1888.

汪洋, 邓晋福, 姬广义. 2004. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义. 岩石学报, 20(2): 297~314.

王强, 许继峰, 赵振华, 熊小林, 包志伟. 2003. 安徽铜陵地区燕山期侵入体的成因及其对深部动力学过程的制约. 中国科学(D辑), 33(4): 323~334.

王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004a. 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. 中国地质, 31(2): 169~173.

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

王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004c. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的时代——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年. 地球学报, 25(4): 423~427.

王元龙, 王焰, 张旗, 贾秀琴, 韩松. 2004. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿-地球动力学意义. 岩石学报, 20(02): 325~338.

王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 彭头平. 2003. 北大别晚中生代火山岩的地球化学特征及对北大别构造属性的启示. 地学前缘, 10(4): 529~538.

王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社.

吴才来, 周珣若, 黄许陈, 张成火, 黄文明. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究. 岩石矿物学杂志, 15(4): 299~307.

吴才来, 陈松年, 史仁灯, 郝美英. 2003. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征与成因. 地球学报, 24(1): 41~48.

吴才来, 董树文, 国和平, 郭祥炎, 高前明, 刘良根, 陈其龙, 雷敏, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C. 2008. 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. 岩石学报, 24(8): 1801~1812.

吴利仁. 1985. 中国东部中生代花岗岩类. 岩石学报, 1(1): 1~10.

谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 孙卫东. 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, 23: 120~138.

谢家莹, 陶奎元, 尹家衡, 毛建仁, 谢芳贵, 阮宏宏, 黄光昭, 薛怀民, 郑济林, 沈加林, 冯宗帜, 俞云文. 1996. 中国东南大陆中生代火山地质及火山-侵入杂岩. 北京: 地质出版社, 1~277.

邢凤鸣, 徐祥. 1995. 安徽沿江地区中生代岩浆岩的基本特点. 岩石学报, 11(4): 409~422.

邢凤鸣, 徐祥. 1996. 铜陵地区高钾钙碱系列侵入岩. 地球化学, 25(1): 29~38.

邢凤鸣. 1998. 安徽沿江地区岩浆岩的深部构造信息. 中国区域地质, 2: 84~89.

邢凤鸣, 徐祥. 1999. 安徽扬子岩浆岩带与成矿. 合肥: 安徽人民出版社, 1~170.

徐志刚, 盛继福, 孙善平. 1999. 关于“橄榄玄粗岩系列(组合)”特征及某些问题的讨论. 地质论评, 45(增刊): 43~62.

杨小男, 徐兆文, 张军, 王云健, 徐夕生, 蒋少涌, 凌洪飞, 刘良根, 陈达源. 2007. 安徽狮子山矿田南洪冲岩体形成时代及成因机制研究. 岩石学报, 23(6): 1543~1551.

杨小男, 徐兆文, 徐夕生, 凌洪飞, 刘苏明, 张军, 李海勇. 2008. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 U-Pb 年龄意义. 地质学报, 82(4): 510~516.

袁峰, 周涛发, 范裕, 岳书仓, 朱光, 侯明金. 2006. 江南隆起带皖赣相邻区燕山期岩浆岩 Nd-Sr 同位素特征. 地质科学, 41(1): 133~142.

曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 裴荣富, 王彦斌, 王训诚, 徐文艺, 田世洪, 姚孝德. 2004. 安徽铜陵矿集区燕山期岩浆流体系统时空结构及成矿. 矿床地质, 23(3): 298~309.

翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 1~237.

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

张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236~244.

周泰禧, 李学明, 赵家深, 张富陶. 1987. 安徽铜陵铜官山矿田火成岩的同位素地质年龄. 中国科学技术大学学报, 17(3): 403~407.

周新民, 李显武. 2000. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式. 自然科学进展, 10(3): 240~247.

Ballard J R, Palin J M, Campbell I H. 2002. Oxidized magmas associated with porphyry copper deposits in northern Chile: Inferences based on Ce (IV) /Ce (III) in zircon. Contrib. Mineral. Petrol., 144: 347~364.

Bedard J A. 1999. Petrogenesis of boninites from the Betts Cove ophiolite, New foundland, Canada: identification of subducted source components. Journal of Petrology, 40: 1853~1889.

Bureau H, Keppler H. 1999. Copmplete miscibility between silicate melts and hydrous fluids in the upper mantle: experimental

- evidence and geochemical implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 165: 187~196.
- Chen J F, Foland K A, Zhou T X. 1985. Mesozoic granitoids of the Yangtze fold belt, China: Isotopic constrains on the magma sources. In: L. R. Wu, et al. (eds.). *The crust-the significance of granites gneisses in lithosphere*. Theophrastus, Athens, 217~237.
- Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of Southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284: 101~133.
- Davis G A, Qian X, Zheng Y, Yu H, Wang C, Tong H M, Gehrels G E, Shafiquallah M, Fryxell J E. 1996. Mesozoic deformation and pluonsim in the Yunmeng Shan: A Chinese metamorphic coore complex north of Beijing, China. In: Yin A and Harrison T M (eds.). *The Tectonics Evolution of Asia*. Cambrige University Press, 253~280.
- Davis G A, Zheng Y, Wang C, Darby B J, Zhang C H. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In: Hendrix M S, Davis G A (eds.). *Paleozoic and Mesozoic Tectonics of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation*. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 171~197.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662~665.
- Di Y J, Wu G G, Zhang D, Song B, Zang W S, Zhang Z Y, Li J W. 2005. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Xiaotongguanshan and Shatanjiao Intrusions and Its Petrological Implications in the Tongling Area, Anhui. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 795~802.
- Dupont A, Vander A J, Pin C, Marincea S, Berza T. 2002. Trace element and isotope (Sr, Nd) geochemistry of porphyry- and skarn-mineralising Late Cretaceous intrusions from Banat, western South Carpathians, Romania. *Mineralium Deposita*, 37: 568~586.
- Faure M, Sun Y, Shu L, Monie P, Charvel J. 1996. Extensional tectonics within a subduction-type orogen: the case study of the Wugongshan Dome (Jiangxi province, southeastern China). *Tectonophysics*, 263: 77~106.
- Hedenquist J W, Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370: 519~527.
- Hoskin P W O, Black L P. 2000a. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J. Meta. Geol.*, 18: 423~439.
- Hoskin P W O, Kinny P D, Wyborn D, Chappell B W. 2000b. Identifying accessory mineral saturation during differentiation in granitoid magma: an integrated approach. *Journal of Petrology*, 41: 1365~1396.
- Jahn B M, Zhou X H, Li J L. 1990. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints. *Tectonophysics*, 183: 145~160.
- Kepezhinskas P, McDermott F, Defant M J, Hochstaedter A, Drummond M S, Hawkesworth C J, Koloskov A, Maury R C, Bellon J. 1997. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kammchatka Arc petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 577~600.
- Lapierre H, Jahn B M, Charvet J, Yu Y W. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China. *Tectonophysics*, 274: 321~338.
- Levresse Gilles, Tritlla Jordi, Villareal Janet, Gonzalez-Partida Eduardo. 2006. The “El Pilote” fluorite skarn: A crucial deposit in the understanding and interpretation of the origin and mobilization of F from northern Mexico deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 89: 205~209.
- Ling M X, Wang F Y, Ding X, et al. 2009. Cretaceous ridge subduction along the lower yangtze river belt, eastern china. *Economic Geology*, 104: 303~321.
- Li S G, Xiao Y L, Liu D L, Chen Y Z, Ge N J, Zhang Z Q, Sun S S, Cong B L, Zhang R Y, Stanley R H, Wang S S. 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites, timing and processes. *Chemical Geology*, 109: 89~111.
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 293~305.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3. 00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1~70.
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750? Ma to the present. *Isl. Arc.*, 6: 121~142.
- McInnes B I A, McBride J S, Evans N J, Lambert D D, Andrew A S. 1999. Osmium isotope constraints on ore metal recycling in subduction zones. *Science*, 286: 512~516.
- Menzies M, Xu Y. 1998. Geodynamics of the North China Craton, in: Flower M, Chung S L, Lo C H, Lee T Y. (eds.) *Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia*. Washington D C: Am. Geophys. Union Geodynamic, 27: 155~165.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Review*, 37(3-4): 215~224.
- Mueller D, Groves D I. 1993. Direct and indirect associations between potassic igneous rocks, shoshonites and gold-copper deposits. *Ore Geology Reviews*, 8: 383~406.
- Mueller D, Franz L, Herzig P M, Hunt S. 2001. Potassic igneous rocks from the vicinity of pithermal gold mineralization, Lihir Island, Papua New Guinea. *Lithos*, 57: 163~186.
- Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30: 915~918.

- Niiranen Tero, Poutiainen Matti, Mänttari Irmeli. 2007. Geology, geochemistry, fluid inclusion characteristics, and U-Pb age studies on iron oxide-Cu-Au deposits in the Kolari region, northern Finland. *Ore Geology Reviews*, 30:75~105.
- Pan Y, Dong P. 1999. The lower Chang jiang (Yangtze /Yangtze River) metallogenic belt, east center China: intrusion and wallrock hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. *Ore Geology Reviews*, 15: 177~242.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25: 956~983.
- Richards J P. 1990. Petrology and geochemistry of alkaline intrusives at the Porgera gold deposit, Papua New Guinea. *Journal of Geochemical Exploration*, 35: 141~199.
- Rudnick R L, Gao Shan. 2003. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1~64.
- Sakuyama M, Nesbitt R W. 1986. Geochemistry of Quaternary volcanic rocks of the northeast Japan arc. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 29: 413~450.
- Seghedi I, Downes H, Pecskey Z, Thirlwall M F, Szakas A, Prychodko M, Matthey D. 2001. Magmagenesis in a subduction-related post-collisional volcanic arc segment: the Ukrainian Carpathians. *Lithos*, 57: 237~262.
- Sillitoe R H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits in the circum-Pacific region. *Aust. J. Earth Sci.*, 44: 373~388.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication*, Trans. R. Soc. London, Ser. A, 310: 535~547.
- Sun W D, Xie Z, Chen J F, Zhang X, Chai Z F, Du A D, Zhao J S, Zhang C H, Zhou T F. 2003. Os-Os Dating of copper and molybdenum deposits along the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, China. *Economic Geology*, 98 (1): 175~180.
- Sun W D, Arculus R J, Kamenetsky V S, Binns R A. 2004. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization. *Nature*, 431:976~978.
- Sun W D, Ding X, Hu Y H, Li X H. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262: 533~542.
- Ulrich T, Guether D, Heinrich C A. 1999. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits. *Nature*, 399: 676~679.
- Watson E B, Capobianco C J. 1981. Phosphorus and the rare earth elements in felsic magmas: an assessment of the role of apatite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45: 2349~2358.
- Wilson M. 1989. Igneous petrogenesis: a global tectonic approach. Unwin and Hyman, London, 1~466.
- Wu C L, Wang F S, Hao M Y, et al. 2000. Geochronology of intermediate-Acid Intrusive Rocks from Tongling, Anhui. *Continental Dynamics*, 5(1): 15~23.
- Wyborn D, Sun S S. 1994. Sulphur-undersaturated magmatism - A key factor for generating magma-related copper-gold deposits. *AGS Research Newsletter*, 21: 7~8.
- Xie Jiancheng, Yang Xiaoyong, Sun Weidong, Du Jianguo, Xu Wei, Wu Libin, Wang Keyou, Du Xiaowei. 2009. Geochronological and geochemical constraints on formation of the Tongling metal deposits, middle Yangtze metallogenic belt, east-central China. *International Geology Review*, 51(5): 388~421.
- Xu G, Lin X. 2000. Geology and geochemistry of the Changlongshan skarn iron deposit, Anhui Province, China. *Ore Geology Reviews*, 16(1-2): 91~106.
- Xu G, Zhou J. 2001. The Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the tongling mineral district, China: synorogenic remobilization of a stratiform sulfide deposit. *Ore Geology Reviews*, 18(1-2): 77~94.
- Xu Xisheng, Fan Qincheng, O'Reilly S Y, Jiang Shaoyong, Griffin W. L., Wang Rucheng, Qiu Jiansheng. 2004. U-Pb dating of zircons from quartz diorite and its enclaves at Tongguanshan in Anhui and its petrogenetic implication. *Chinese Science Bulletin*, 49(19): 2073~2082.
- Yang X Y, Lee I S. 2011a. Review of stable isotopes geochemistry of Mesozoic igneous rocks and Cu - Au deposits along the Middle-Lower Yangtze Metallogenic belt, China. *International Geology Reviews*, 53(5-6):741~757.
- Yang X Y, Yang X M, Zhang Z W, Chi Y Y, Yu L F, Zhang Q M. 2011b. A porphyritic copper (gold) ore-forming model for the Shaxi-Changpushan district, Lower Yangtze metallogenic belt, China: Geological and geochemical constraints. *International Geology Reviews*, 53(5-6):580~611.
- Zhai Y S, Xiong Y L, Yao S Z, Lin X D. 1996. Metallogeny of copper and iron deposits in the Eastern Yangtze Craton, east-central China. *Ore Geol. Rev.*, 11: 229~248.
- Zhou M F, Yan D P, Wang C L, Qi L, Allen K. 2006. Subduction-related origin of the 750Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 248: 271~285.
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magma. *Tectonophysics*, 326: 269~278.

**Chronological-Geochemical Characteristics of the Shujiadian Intrusion,
Tongling Ore Cluster Field : Its Significance to Metallogenesis**

LAI Xiaodong ¹⁾, YANG Xiaoyong ¹⁾, SUN Weidong²⁾, CAO Xiaosheng ³⁾

1) *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026;*

2) *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640;*

3) *Exploration Bureau of East China Metallurgical Resources, Hefei, 230026*

Abstract

The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results reveal that the Shujiadian pyroxene dioritic intrusion is 140.5 ± 1.4Ma, which is younger than the granodiorite in the Tongling region. The metallogenetic epoch of the Shujiadian pyroxene diorite is slightly younger than 140.5Ma, showing that the tectonic setting of the Shujiadian pyroxene dioritic intrusion should be closely related to the paleo-Pacific plate subduction of the continental margin. Geochemical characteristics present that SiO₂ contents of the Shujiadian pyroxene diorite are c. a. 50%, belonging rather basic classification, the trace elements have features of LILE enrichments such as Ba, Sr, Th, Pb and depletions of HFSE, such as Zr, Nb, Hf. From these geochemical characteristics, we proposed that the magma of the Shujiadian pyroxene dioritic intrusion was possibly due to ascend and emplacement of magmatic evolution derived from mantle wedge with partial melting and melt metasomatism caused by subducted oceanic slab, during which the mantle source magma might have been transformed with crustal contaminations.

Key words: Zircon geochronology; pyroxene diorite; Cu-Au mineralization; Shujiadian; Tongling ore-cluster field