

铜陵舒家店岩体的年代学和地球化学特征研究

王世伟, 周涛发, 袁峰, 范裕, 吕玉琢

合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009

内容提要:舒家店岩体位于长江中下游中部的铜陵断隆区与繁昌断凹区(盆地)的过渡部位, 主要的岩石类型有辉石闪长岩、石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩、闪长岩以及闪长玢岩。本文通过对岩体中主要岩性-辉石闪长岩锆石 LA-ICP MS 精确定年、地球化学组成以及 Pb 同位素的分析, 研究舒家店岩体的年代学、岩浆源区、岩浆演化和构造背景等问题。研究显示, 舒家店岩体的侵入时间为 139.2 ± 2.1 Ma (MSWD = 2.3, $n=12$), 其活动时代同属于铜陵矿集区岩浆岩活动期, 而不属于繁昌火山岩盆地。辉石闪长岩属于高钾钙碱性系列侵入岩, 源区可能为接近于 EMII 型富集地幔的交代地幔, 岩浆演化的过程中, 存在磷灰石、角闪石、辉石、榍石等矿物的结晶分异作用, 同时还受到地壳物质的混染作用, 是在挤压的构造背景下形成的。

关键词:侵入岩年代学; 地球化学; 富集地幔; 地壳混染; 构造背景; 铜陵舒家店岩体

铜陵断隆区位于长江中下游地区的中部(图 1a), 是长江中下游成矿带中最重要的矿集区之一。前人对该区的侵入岩做过详细的研究(Chen et al., 1985; 杨学明等, 1988; 毛建仁等, 1990; 常印佛等, 1991; 邓晋福等, 1992, 2002; 周珣若等, 1994; 马昌前等, 1994; 邢凤鸣等, 1996, 1998, 1999; 吴才来等, 1996, 2003; 杜杨松等, 1997; 唐永成等, 1998; 吴言昌等, 1999; Wu et al., 2000; Chen et al., 2001; 王强等, 2003; 王元龙等, 2004; 周涛发等, 2008)。区内的侵入岩以辉长岩-辉石闪长岩-闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长斑岩类为主, 许多岩体实质上是由基性和中酸性岩组成的杂岩体, 如白芒山、鸡冠山、舒家店、曹山、狮子山等岩体等(王强等, 2003; 周珣若等, 1994; 邢凤鸣等, 1996; 邢凤鸣, 1998; 唐永成等, 1998)。已有研究(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 陶奎元等, 1998; 戚建中等, 2000; 周涛发等, 2005, 2008)表明, 区内燕山期侵入岩与铜金多金属矿床的形成具有密切的关系。繁昌断凹区位于铜陵的东北方向, 是长江中下游成矿带重要的火山岩盆地之一(图 1a, b)。中生代燕山期岩浆活动在盆地内形成了大量中酸性为主的火山岩, 前人对于该区的火山

岩和侵入岩也做过研究(曾普胜等, 2004; 杜杨松等, 2007; 闫峻等, 2009; 黄贻梅等, 2009; 袁峰等, 2010), 岩体的岩性主要有黑云母石英二长岩至花岗岩, 以花岗岩为主(楼亚儿等, 2006), 如板石岭黑云母石英二长岩体、滨江花岗岩体, 岩体与小型矿床和矿化点有关(邢凤鸣等, 1994), 主要为铁矿化。

舒家店辉石闪长岩体位于铜陵地区东部、繁昌盆地的边缘(图 1b), 产出位置属于铜陵断隆区和繁昌火山岩盆地的过渡部位, 岩体内新发现有舒家店斑岩型铜矿床, 具有重要的成矿学研究意义。目前, 关于舒家店岩体是属于铜陵断隆区还是繁昌断凹区还存在争议, 对构造属性、侵位时间、源区、岩浆演化和形成的构造背景缺乏系统研究工作, 制约了对舒家店斑岩矿床成因和研究区成矿规律的认识。为此, 本文对舒家店岩体的主要赋矿岩石-辉石闪长岩进行了岩相学、年代学和地球化学特征等的研究, 以确定舒家店岩体是隶属于铜陵断隆区还是繁昌断凹区的岩浆活动产物, 并阐明其岩浆源区性质、岩浆演化和成岩构造背景等问题, 同时为进一步认识与该岩体有关的斑岩型矿床的成因提供科学依据。

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40830426)、中国地质调查局地质调查工作项目(编号 1212011121115)、安徽省地质公益性地质项目(编号 2009-g-22)和新世纪优秀人才支持计划项目(编号 NCET-10-0324)资助的成果。

收稿日期: 2011-02-20; 改回日期: 2011-04-21; 责任编辑: 郝祥国。

作者简介: 王世伟, 男, 1985 年生。博士, 矿物学岩石学矿床学专业。Email: wangweijian1987@126.com; 通讯作者: 周涛发, 男, 1964 年生。教授, 博导, 矿物学岩石学矿床学专业。Email: tfzhou@hfut.edu.cn。

DOI: CNKI:11-1951/P.20110512.0910.014 网络出版时间: 2011-5-12 9:10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20110512.0910.014.html>

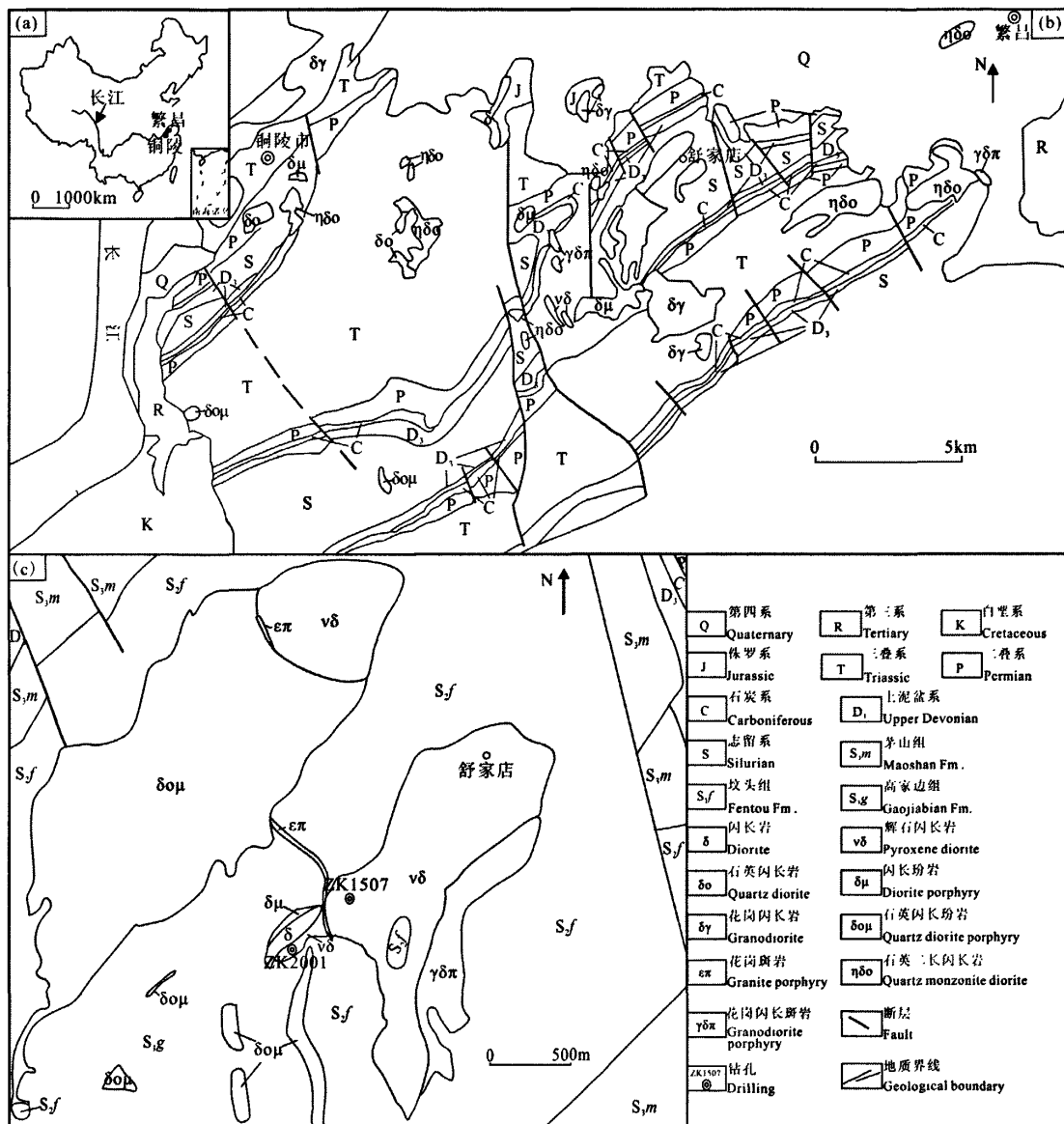


图 1 研究区地质略图

Fig. 1 sketch geological map of the study area

(a)—中国略图; (b)—铜陵—繁昌地区地质略图(据常印佛等, 1991 修改);

(c)—舒家店矿区地质略图(据华东冶金地质勘查研究院内部资料修改)

(a)—sketch map of China; (b)—sketch geological map of Tongling-Fangchang area(modified after Chang et al., 1991);

(c)—sketch geological map of Shujiadian intrusion

1 岩体地质特征

舒家店岩体位于铜陵市东约 10 km 处(图 1b), 区内出露的地层主要有志留系茅山组、坟头组、高家边组砂岩, 区内的西北和东北部也有泥盆系、石炭系

和二叠系地层出露(图 1c)。区内褶皱、断裂发育, 主要的褶皱构造为舒家店短轴背斜(图 1b), 地层产状一般北西翼地层倾角较缓, 为 20°~55°, 南东翼地层倾角较陡, 约 70°左右, 部分地段有倒转现象, 北东外倾转折端因受断裂影响产状较为零乱。区内的

断裂有北东向、北西向两组最发育,北东向主要为压性冲断裂及破碎带,北西向主要为横切背斜的断裂(图1b、c)。区内的岩浆岩主要为闪长岩类侵入岩,出露面积约为4 km²,岩性从中偏基性到中酸性,岩体总体呈岩株、岩墙、岩枝、岩脉形状产出,多分布在背斜NW翼近轴部的坟头组砂页岩中,岩体轴向约为NE40°(王彪,2010)。岩体为总体较规则长圆形,倾向北西,局部南西,呈岩株状产出,出露面积约为2 km²,侵位于舒家店背斜NW翼近轴部的坟头组砂页岩中。岩体的岩石类型有辉石闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、闪长岩等(图1c),其中,辉石闪长岩是岩体中的主要岩石类型,也是舒家店斑岩型铜矿床的赋矿岩石。

辉石闪长岩呈灰黑色,不等粒结构和斑状结构,斑晶主要由斜长石、角闪石和辉石组成。斜长石,半自形—自形板条状,含量约65%,聚片双晶发育。角闪石斑晶约15%,黄绿色,强多色性,半自形长条状,具两组解理(图2a)。辉石含量约10%,半自形—自形,有的辉石部分蚀变为黑云母(图2b)。

舒家店矿床产于舒家店岩体与志留系砂岩接触带内侧的辉石闪长岩和闪长岩中,矿床中铜的平均品位为0.465%,主要金属矿物为黄铜矿,次要矿物有黄铁矿、磁铁矿、镜铁矿及少量辉钼矿、闪锌矿、磁黄铁矿、硫铋铜矿、斑铜矿、辉铜矿、赤铁矿、褐铁矿,脉石矿物有石英和方解石等。矿石呈浸染状及细脉状分布。围岩蚀变类型主要有钾长石化、钠长石化、硅化、绢云母化、伊利石化、高岭土化、绿泥石化、石榴石化等。

2 岩体年代学测定

用于测试分析的辉石闪长岩样品采于ZK2001,深度1032m处,样号:ZK2001-19,采样位置如图(图1c)所示。在岩石学研究基础上,将样品送至河北省廊坊区调研究所实验室进行破碎,经重液分离和磁选对锆石单矿物分选,再在双目镜下选出晶形完好的锆石作为测年的对象,部分锆石的阴极发光图像如图3所示。锆石的LA-ICP MS U-Pb同位素测年分析在澳大利亚塔斯马尼亚州立大学国家优秀矿床研究中心(CODES of Excellence, University of Tasmania)进行,采用HP4500四级ICP MS和213 nm新型激光器进行测定。本次测试共有12个数据点,锆石LA-ICP MS定年的具体分析数据见下表1。锆石的U-Pb年龄谱和图见图4,样品的加权平均年龄为139.2±2.1 Ma(MSWD=2.3, n=12)。

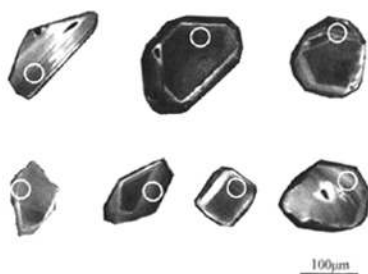


图3 辉石闪长岩部分锆石阴极发光图像(CL)

Fig.3 CL images of partial zircons from the pyroxene diorite

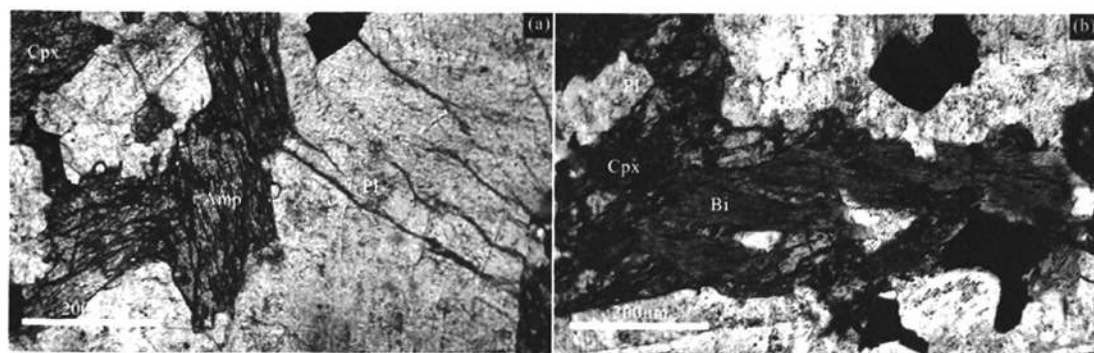


图2 舒家店辉石闪长岩薄片鉴定(单偏光;10×10)

Fig.2 Identification slices of pyroxene diorite of Shujiadian (transmitte light; 10×10)

(a)—新鲜的辉石闪长岩,角闪石发育两组解理;(b)—辉石部分蚀变为黑云母;Amp—角闪石;Pl—斜长石;Cpx—辉石;Bi—黑云母

(a)—fresh pyroxene diorite, amphibole have two sets of cleavage; (b)—pyroxene partly alter to biotite;

Amp—amphibole; Pl—plagioclase; Cpx—pyroxene; Bi—biotite

表 1 舒家店辉石闪长岩锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 U-Pb dating for the zircon from the pyroxene diorite of Shujiadian intrusion

分析 点号	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U age (207cor.) (1σ)		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U(1σ)		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th(1σ)		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb(1σ)		Pb (×10 ⁻⁶)	Th (×10 ⁻⁶)	U (×10 ⁻⁶)	Th/U
1	133	2	0.0213	0.0182	0.0067	0.0332	0.0658	0.0588	14	846	434	1.95
2	136	3	0.0217	0.0183	0.0076	0.0328	0.0664	0.0662	7	349	241	1.45
3	137	2	0.0215	0.0134	0.0069	0.0248	0.0526	0.0423	14	769	458	1.68
4	137	2	0.0223	0.0155	0.0071	0.0255	0.0757	0.0508	11	692	334	2.07
5	138	2	0.0217	0.0160	0.0068	0.0258	0.0533	0.0490	13	718	411	1.75
6	139	2	0.0218	0.0135	0.0071	0.0236	0.0487	0.0477	14	793	471	1.68
7	139	2	0.0219	0.0130	0.0071	0.0197	0.0513	0.0381	20	1235	607	2.04
8	140	2	0.0223	0.0126	0.0074	0.0205	0.0621	0.0371	22	1361	653	2.08
9	141	2	0.0221	0.0141	0.0069	0.0245	0.0508	0.0533	13	744	439	1.69
10	144	3	0.0231	0.0209	0.0072	0.0362	0.0658	0.0703	6	334	176	1.90
11	145	3	0.0227	0.0228	0.0062	0.0409	0.0471	0.1039	14	773	442	1.75
12	147	2	0.0232	0.0164	0.0076	0.0339	0.0530	0.0629	8	328	274	1.20

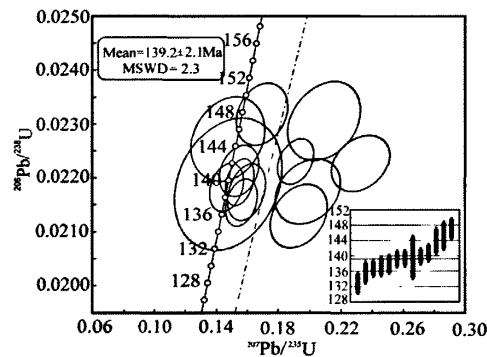


图 4 辉石闪长岩锆石 U-Pb 一致曲线图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram of the zircons from the pyroxene diorite

3 岩石地球化学特征

对舒家店岩体的主要岩石类型—辉石闪长岩的主量元素、稀土元素和微量元素的含量(表 2),以及铅同位素进行了测定(表 3)。样品来自钻孔 ZK2001 和 ZK1507(图 1c)。常量元素、稀土元素和微量数据是由澳实分析检测集团—澳实矿物实验室测试,常量元素采用 ME-XRF06 法,由 X 荧光光谱仪测定;稀土元素采用 ME-MS81 法,由等离子体质谱测定;微量元素采用 ME-MS61 法,由等离子体质谱测定。Pb 同位素数据由中科院地质与地球物理研究所测试,用 MAT262 质谱仪分析。样品的采集过程中尽量选择新鲜样品,同时送测样品尽量避免蚀变等,以避免或减少蚀变作用的影响。

3.1 主量元素特征

辉石闪长岩的主量元素分析结果列于表 2,其

中 SiO₂ 含量在 49.51%~55.17%, Al₂O₃ 含量在 16.77%~17.80% 之间, CaO 含量在 5.77%~10.26% 之间, Na₂O 含量在 3.44%~4.53% 之间, K₂O 含量在 2.34%~3.57% 之间, K₂O+Na₂O 含量在 6.11%~7.81% 之间。

在侵入岩 TAS 图(图 5)上,舒家店岩体主要落于二长辉长岩、二长闪长岩的区域,所有的样品落于碱性与钙碱性的界线附近,主体落于碱性区域。在 SiO₂-K₂O 图解(图 6)显示,辉石闪长岩落于钾玄岩系列和高钾钙碱性系列的界线附近,主体落于钾玄岩系列区域。log(w(Zr)/w(TiO₂))-SiO₂(图 7)显示,舒家店辉石闪长岩落于亚碱性玄武岩与安山岩区域,对应于亚碱性辉长岩与闪长岩区域。

在侵入岩的哈克图解(图 8)中,舒家店辉石闪长岩 SiO₂ 与 Fe₂O₃、CaO、MgO、P₂O₅ 和 TiO₂ 具有一定的负相关性,表明伴随着岩浆的演化,岩浆中的磷灰石、角闪石、辉石、榍石等矿物逐渐发生沉淀结晶分离,即岩浆演化过程中发生有结晶分异作用。另外,随着 SiO₂ 的变化,Al₂O₃ 基本不变。而 Na₂O、K₂O 则与 SiO₂ 表现出一定的正相关性。

3.2 稀土元素特征

舒家店辉石闪长岩 ΣREE 范围在 173.80×10⁻⁶~232.75×10⁻⁶, 均值 210.92×10⁻⁶; δEu 范围为 0.82~0.91, 均值 0.87, Eu 具有弱负异常; LREE/HREE 比值范围为 10.63~14.69, 均值 10.36, HREE 相对于 LREE 强烈亏损。w(La)/w(Yb)平均值为 28, 轻重稀土分馏明显, 轻稀土相对富集, REE 模式图呈现陡右倾趋势(图 9)。

3.3 微量元素特征

从舒家店辉石闪长岩微量元素球粒陨石标准化

表 2 舒家店岩体主量元素组成(%)、微量元素组成($\times 10^{-6}$)、稀土元素组成($\times 10^{-6}$)
Table 2 Chemical compositions(%), REE elements compositions($\times 10^{-6}$) and trace elements compositions
($\times 10^{-6}$) of Shujiadian intrusion

样号	2001-54	2001-50	2001-46	2001-38(2)	2001-29	2001-23	2001-19	2001-01	1507-24	1507-12	1507-03
SiO ₂	52.25	50.22	49.51	53.09	52.38	53.68	50.95	52.04	54.85	55.17	54.24
Al ₂ O ₃	17.58	17.33	17.78	16.77	17.44	17.62	17.05	17.80	17.54	17.20	17.47
Fe ₂ O ₃	6.75	8.76	8.19	8.05	7.23	7.10	7.73	6.39	6.70	3.90	6.19
CaO	7.07	9.25	8.47	5.77	8.17	7.71	6.87	8.49	7.97	10.26	7.08
MgO	2.90	3.51	3.67	2.79	3.15	3.00	2.70	2.95	2.76	2.80	2.64
Na ₂ O	4.06	3.77	3.44	3.89	3.96	3.96	3.84	4.02	4.24	3.96	4.53
K ₂ O	2.92	2.34	3.00	3.13	2.77	3.36	3.13	2.92	3.57	3.09	3.23
TiO ₂	0.98	1.08	1.07	1.00	0.97	0.96	0.96	1.00	0.94	0.93	0.93
MnO	0.12	0.14	0.15	0.12	0.17	0.15	0.12	0.14	0.16	0.15	0.12
P ₂ O ₅	0.43	0.54	0.42	0.42	0.44	0.39	0.40	0.42	0.40	0.39	0.40
LOI	4.54	1.32	2.96	2.90	1.96	1.25	4.31	3.46	0.70	0.79	2.63
Total	99.84	98.47	98.86	98.12	98.84	99.40	98.24	99.82	100.05	98.92	99.65
Ba	730	690	590	760	720	830	730	760	860	1410	750
Rb	73	65	52	87	54	66	58	59	61	52	62
Sr	1290	1235	1195	908	1015	976	983	949	1025	1050	952
Y	18	20	18	18	20	18	17	20	17	18	18
Zr	61	52	55	65	41	33	35	39	105	118	42
Nb	13	13	10	11	13	14	13	15	14	17	16
Th	7	7	5	6	7	9	7	7	10	11	10
Ni	4	4	4	9	4	4	7	5	7	3	7
V	156	183	172	148	152	148	157	132	143	130	122
Cr	4	3	4	3	2	4	5	4	15	4	4
Hf	2	2	2	2	2	1	1	2	3	4	2
Ta	0.66	0.63	0.54	0.56	0.73	0.75	0.58	0.84	0.87	0.87	0.89
Co	19.2	15.6	13.2	35.7	19.8	20.2	22.9	20.2	18.1	11.5	26.2
U	1.5	1.8	0.9	1.9	1.4	1.8	1.8	1.5	2.4	3.1	2.7
La	51.2	50.6	36.7	42.8	51.9	46.7	46.0	51.6	48.5	41.8	54.9
Ce	95.2	98.2	71.8	81.4	98.2	88.9	84.4	99.6	90.8	85.0	102.0
Pr	10.65	11.55	8.51	9.31	11.45	9.90	9.57	11.30	10.30	9.56	11.15
Nd	39.30	44.30	33.70	36.10	42.50	36.80	36.50	41.70	37.80	35.30	41.20
Sm	6.83	7.84	6.40	6.52	7.47	6.43	6.40	7.12	6.47	6.08	6.85
Eu	1.94	2.10	1.75	1.74	2.06	1.75	1.74	2.07	1.72	1.54	1.82
Gd	6.13	6.99	5.70	5.80	6.58	5.65	5.89	6.53	5.56	5.14	5.75
Tb	0.78	0.88	0.79	0.82	0.88	0.77	0.76	0.87	0.70	0.67	0.71
Dy	3.53	3.94	3.56	3.65	3.83	3.56	3.40	3.92	3.45	3.49	3.52
Ho	0.72	0.80	0.74	0.66	0.78	0.73	0.67	0.81	0.64	0.65	0.66
Er	1.97	2.12	1.91	1.89	2.08	1.98	1.90	2.13	1.95	2.03	2.06
Tm	0.31	0.33	0.29	0.32	0.29	0.28	0.30	0.32	0.26	0.27	0.26
Yb	1.71	1.76	1.68	1.43	1.77	1.73	1.58	1.84	1.59	1.81	1.61
Lu	0.28	0.28	0.27	0.25	0.29	0.28	0.28	0.31	0.24	0.27	0.26
La _N /Yb _N	20.23	19.43	14.76	20.23	19.81	18.24	19.67	18.95	20.61	15.61	23.04
δEu	0.90	0.85	0.87	0.85	0.88	0.87	0.85	0.91	0.86	0.82	0.86

蛛网图(图 10)可见,Sr、Ba、K 等大离子亲石元素富集,Rb 元素亏损,Th、Ce、P、Sm、Y 等高场强元素富集,Nb、Ta、Zr、Hf、Ti、Yb 等高场强元素亏损。相对亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,可能是地壳物质的混染造成的(任康绪等,2005)。曲线整体右倾,岩体整体亏损 HFSE,富集 LILE。

3.4 Pb 同位素

辉石闪长岩的 Pb 同位素分析结果见表 3,其中 Pb²⁰⁶/Pb²⁰⁴ 范围在 18.6149~19.2416 之间,平均值为 18.9605;Pb²⁰⁷/Pb²⁰⁴ 范围在 15.6068~15.6453,平均值为 15.6335;Pb²⁰⁸/Pb²⁰⁴ 范围在 38.5827~39.2833,平均值为 38.9599。可见其 Pb 同位素数值相对集中。

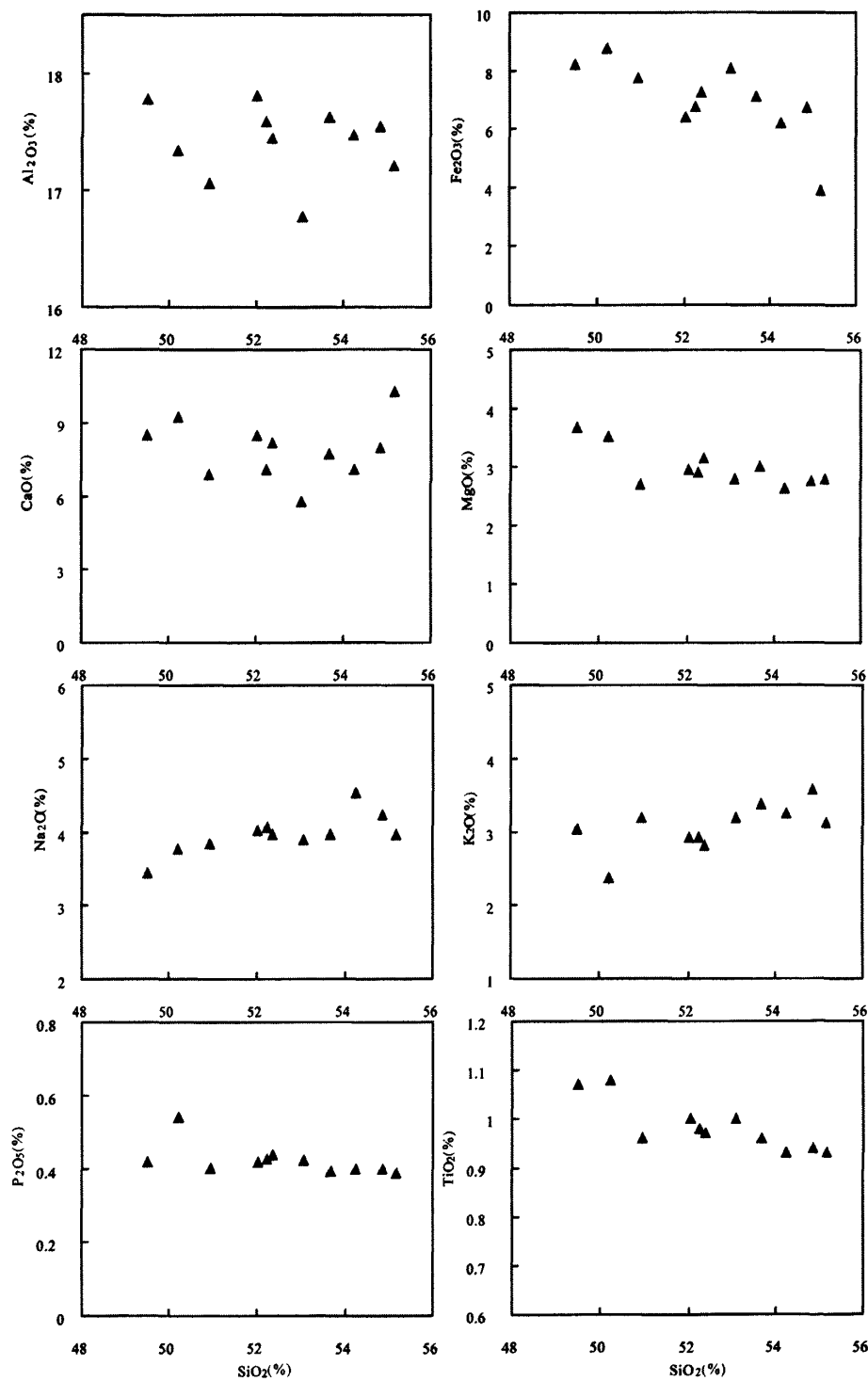


图 8 舒家店岩体哈克图解
Fig. 8 Harker diagram of Shujiadian intrusion

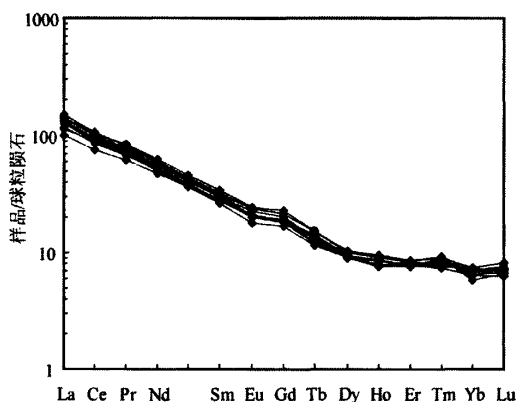


图9 侵入岩稀土元素配分曲线(球粒陨石标准值据 Taylor et al., 1985)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of intrusive rocks (The chondrite data are after Taylor et al. (1985))

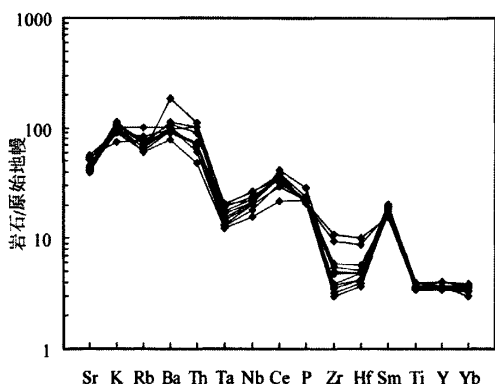


图10 原始地幔标准化的侵入岩微量元素蛛网图(原始地幔标准值据 Wood, 1979)

Fig. 10 Primitive mantle normalized spidergrams of intrusive rocks (The primitive mantle data are after Wood(1979))

体的侵位时间相近。周涛发等(2008)认为长江中下游成矿带的铜陵等断隆区的岩浆活动主要发生在145~135 Ma, 繁昌等断陷区的岩浆活动发生在135~127 Ma。可见, 舒家店岩体应属于铜陵地区(断隆区)的岩浆活动的产物, 而非繁昌火山岩盆地中岩浆活动的产物。

4.2 岩石系列

对于铜陵地区的侵入岩系列, 前人做过许多的研究, 大多认为属高钾钙碱性系列(常印佛等, 1991; 唐永成等, 1998; 邢凤鸣和徐祥, 1999; 高庚等, 2006), 但吴才来等(2003)认为铜陵地区具有高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列(钾玄岩系列)侵入岩。

由上述舒家店岩体辉石闪长岩 TAS 图解(图 5)和 SiO_2 - K_2O 图解(图 6)可知, 辉石闪长岩都落于碱性岩区域和钙碱性区域或钾玄岩系列和高钾钙碱性系列的界线附近, 主体落于碱性区域和钾玄岩系列区域, 显示具有富钾、富碱的特征, 与赵会民等(2004)对白芒山岩体的研究结果相似。但在辉石闪长岩微量元素 $\log(\text{Zr}/\text{TiO}_2)$ - SiO_2 图解中(图 7), 舒家店辉石闪长岩却均落于亚碱性区域。造成上述矛盾现象的原因是岩石中 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 偏高造成的, 尽管包括舒家店岩体在内的铜陵地区燕山期中酸性侵入岩具有富碱或富钾的特征, 前人称之为高钾钙碱性系列(常印佛等, 1991), 但 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 过高、且同一岩体甚至是相同岩性的样品碱含量变化大, 导致岩体部分或全部岩石样品(如本次研究的舒家店岩体)在有关岩石化学图解上落入钾玄岩系列或碱性岩区域, 这是不正常的现象, 也与侵入岩岩石化学特征相矛盾。造成这种现象的原因是岩石结晶后发生了钾(碱质)交代作用。根据岩相学观察, 舒家店岩体普遍发生了程度不等的黑云母化(图 2b)、绢云母化和钾长石化, 这些斑岩型矿床围岩钾质蚀变增加了侵入岩岩石中钾或碱的含量。徐晓春等(2009)在总结前人所做的铜陵白芒山辉石二长闪长岩岩石化学数据时, 也发现了这一现象的存在, 白芒山岩体部分数据也落入钾玄岩系列区域。因此, 舒家店岩体蚀变造成岩石钾含量升高, 导致样品投点在图 5, 图 6 中主体落入碱性区域或钾玄岩区域, 但岩石仍然应属于高钾钙碱性系列岩石, 正如图 7 所反映的结果那样。因此推测, 铜陵地区很可能不存在钾玄岩系列(或橄榄安粗岩等)等碱性系列的侵入岩。

4.3 源区性质

许多学者研究认为, 晚中生代长江中下游地区与成矿作用密切相关的中酸性岩是一种壳幔物质混合过程的产物, 且陆下地幔具有富集特征, 为扬子型岩石圈地幔与软流圈地幔混合的产物(常印佛等, 1991; 邢凤鸣等, 1999; 唐永成等, 1998; 陈江峰等, 2001; 周涛发, 1993; 周涛发等, 2005)。

源于岩石圈地幔(CLM)或受其混染后的岩浆 La/Ta 比值则迅速增加, 一般在 25 以上, 但 La/Sm 比值变化不大, 但如果是混染了地壳物质, 则 La/Sm 比值迅速增高, 一般在 5 以上(Lassiter et al., 1997)。舒家店辉石闪长岩的 La/Ta 比值范围 48.05~80.32, 平均值为 67.44, 远大于 25, 同时, La/Sm 比值范围 5.73~8.01, 平均值为 7.03, 变化范围很大且大于 5, 因此, 岩石的 La/Ta 、 La/Sm 比

值指示形成舒家店辉石闪长岩的岩浆源于岩石圈地幔,并受到地壳物质的混染。

袁峰等(2008)通过对庐枞盆地中生代火山岩 Sr、Nb 和 Pb 同位素的研究,认为庐枞盆地火山岩源于富集的交代地幔,交代地幔源区的性质接近于 EMI 型富集地幔。闫峻等(2003)通过对于 Pb 同位素的研究,认为长江中下游地区晚中生代中基性岩的原始岩浆来源于富集的岩石圈地幔,具有 EMI 和 EMII、且以 EMII 为主的特征。舒家店岩体辉石闪长岩 Pb 同位素(表 3;图 11)均处于亏损地幔(DMM)、EMI 和 EMII 端元之间,偏于 EMII 端元。由于长江中下游地区侵入岩均具有 Nd 同位素富集的特点(Chen et al., 2001),指示了 DMM 端元对铜陵地区侵入岩源区的贡献不明显。因此,舒家店辉石闪长岩源区应具有富集岩石圈地幔的性质,可能更近于 EMII 型富集地幔。

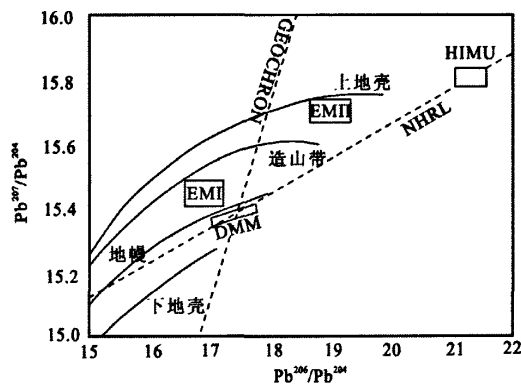


图 11 侵入岩 Pb 同位素演化图解

Fig. 11 Pb isotopes diagram of intrusive rocks

DMM—亏损地幔端元;EM(I, II)—地幔端元(据 Zindler et al., 1986);Geochron—零等时线;NHRL—北半球参考线(据 Hart, 1984);HIMU—高 μ 值地幔端元;中国大陆地幔、下地壳和上地壳界线据李龙等(2001)

DMM—depleted mantle component, EM(I, II)—enriched mantle components(after Zindler et al., 1986); Geochron—zero isochron line, NHRL—north hemisphere reference line(after Hart, 1984); HIMU—High μ value mantle component; the lines of mantle, lower crust and upper crust of Chinese continent are after Li et al. (2001)

4.4 岩浆演化

总分配系数相同或很相近的元素比值不受分离结晶作用和部分熔融程度的影响,不同元素比值之间的相关变化可以灵敏地反映是否存在同化混染作用(Campbell et al., 1993; Barker et al., 1997; Macdonald et al., 2001),岩石 La/Yb-Nb-Ta、

Th/Nb-Ce/Nb、Ce/Pb-La/Nb、Ta/Yb-Th/Yb 有明显的正相关性则存在同化混染作用(袁峰等,2010)。舒家店岩体辉石闪长岩的 La/Yb-Nb-Ta、Th/Nb-Ce/Nb 具有水平的线性关系, Ce/Pb-La/Nb、Ta/Yb-Th/Yb 有明显的正相关性(图 12),说明形成舒家店岩体的岩浆受到同化混染作用的影响,与前述由 La-Ta、La/Sm 比值特征得出的结论一致。

另外,侵入岩的哈克图解(图 8)显示,舒家店岩体岩浆演化过程中发生有磷灰石、角闪石、辉石、榍石等矿物的结晶分异作用。因此,舒家店辉石闪长岩的原始岩浆在上升过程中,不仅发生有结晶分异作用,同时也受到了地壳物质的混染作用。

4.5 成岩构造背景

中国东南大陆岩石圈的构造环境在 176~150 Ma 处于挤压状态、145 Ma 由挤压向伸展扩张的转换、125~105 Ma 的扩张增强、92 Ma 左右进入裂解阶段(李文达等,1998)。邓晋福等(2000)和杜建国等(2003)认为长江中下游地区燕山期岩浆的深部背景为 137 Ma 之前地壳收缩加厚,处于挤压的背景;区域在 131 Ma 进入典型的伸展拉张背景(周涛发等,2007)。朱光等(2004,2005)认为中生代太平洋板块向西俯冲,郯庐断裂带在早白垩世初(143 Ma)发生大规模的左行平移,持续时间不超过 6 Ma,随后转入伸展作用阶段。周涛发等(2007)、袁峰等(2008)通过对庐枞盆地火山岩的研究,认为庐枞盆地大约在 130.5 Ma 为典型张性背景。繁昌盆地在早白垩世存在与庐枞盆地同样的构造转换特征(黄贻梅等,2009)。吕庆田等(2003,2004)认为铜陵矿集区晚中生代岩浆活动处于伸展构造环境。本文研究的舒家店辉石闪长岩形成于 139.2 ± 2.3 Ma,因此,该岩体可能形成于挤压或挤压向拉张过渡的构造背景。

为了进一步确定舒家店辉石闪长岩体形成的构造背景,利用花岗岩微量元素构造环境判别图解(图 13)对其进行了判定。由图 13 可见,在 Yb-Ta 和 (Yb+Ta)-Rb 图解上,舒家店岩体样品点均落于 VAG 区域(火山弧花岗岩),指示了辉石闪长岩体形成于挤压的构造环境,这与上述推测一致。另外,大洋脊花岗岩(ORG)、板内花岗岩(WPG)、火山弧花岗岩(VAG)和同碰撞花岗岩(Syn-COLG)都继承了各自源岩玄武岩的特征,岛弧花岗岩的源岩为岛弧拉斑玄武岩(IAT),由其部分熔融形成的花岗岩(VAG)必然也继承了其源岩 IAT 强烈亏损 HFSE 和富集 LILE 的特征(张旗等,2008)。这也与舒家

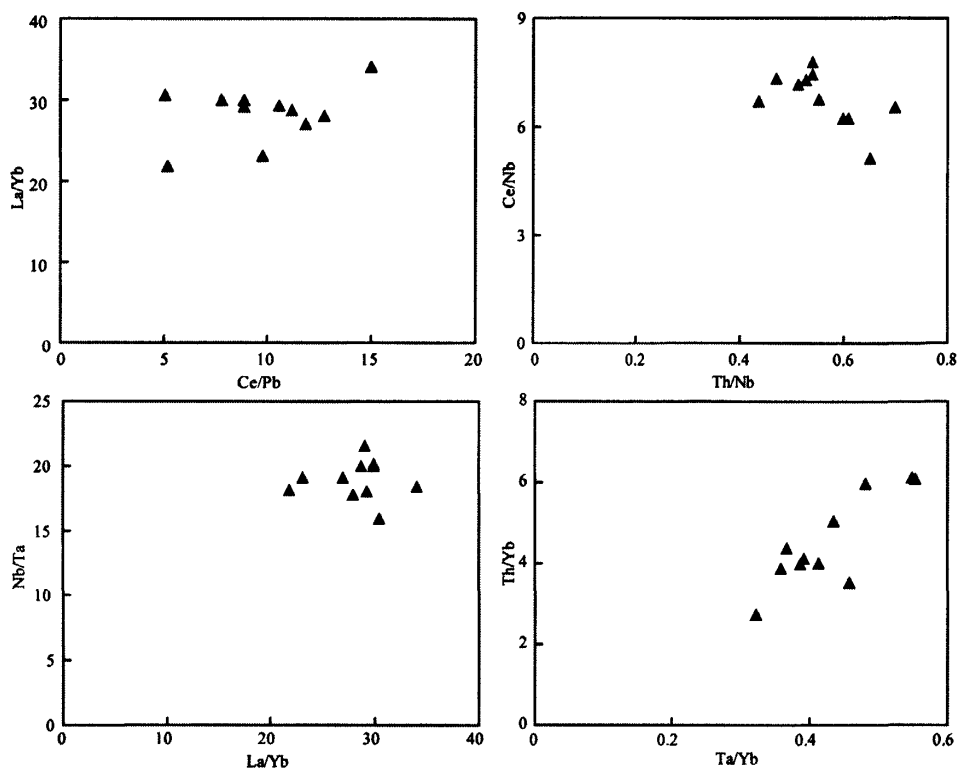


图 12 岩浆同化混染的地球化学判别图解
Fig. 12 Geochemical discriminate diagram of contamination

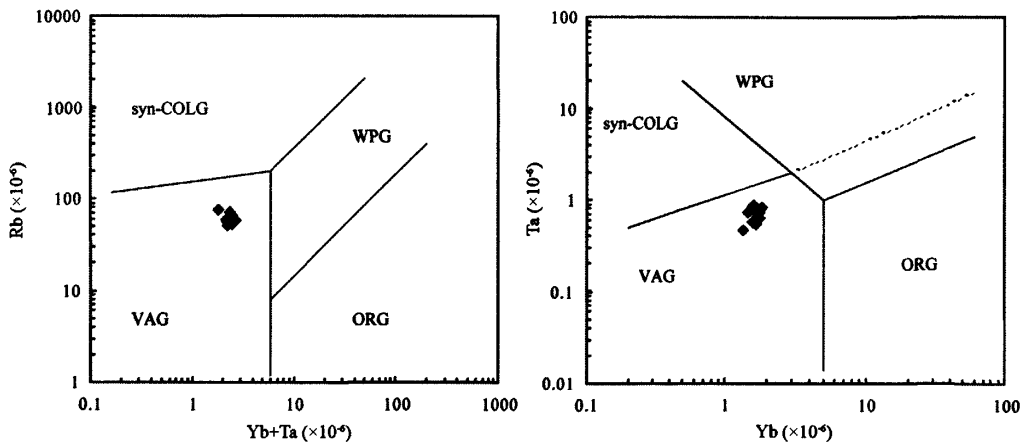


图 13 舒家店岩体构造环境判别图解(Pearce et al., 1984)
Fig. 13 Tectonic setting discriminant diagram of Shujiadian intrusion (after Pearce et al., 1984)
Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—大洋中脊花岗岩
ORG—Ocean ridge granite; WPG—intraplate granite; VAG—volcanic arc granite; syn-COL G—syn-collisional granite

店辉石闪长岩微量元素亏损 HFSE 和富集 LILE 的特征(图 10)相符。

5 结论

(1)舒家店岩体的侵位时间为 139.2 ± 2.1 Ma, 属于铜陵断隆区而非繁昌断凹区的岩浆活动的产物。

(2)舒家店岩体辉石闪长岩属于高钾钙碱性系列侵入岩。在硅-碱图上落于钾玄岩区域是由于钾(碱)质蚀变作用造成的。铜陵地区很可能不存在钾玄岩系列(或橄榄安粗岩等)等碱性系列的侵入岩。

(3)舒家店岩体辉石闪长岩岩浆的源区为更近于EMI型富集地幔的交代地幔。在岩浆上升演化的过程中,发生了磷灰石、角闪石、辉石、榍石等矿物的结晶分异作用,并受到地壳物质的混染作用。

(4)舒家店岩体形成于挤压的构造背景。

致谢:本文的研究工作得到了华东冶金研究院王彪院长、曹晓生教授等人的支持和帮助,Pb同位素测试得到中科院地质与地球物理研究所李向辉研究员等的支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

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,1~379.
- 陈江峰,谢智,张翼,周泰禧.2001.安徽的地壳演化: Sr-Nd 同位素证据.安徽地质,11(2): 123~130.
- 邓晋福,叶德隆,赵海玲,汤德平,等.1992.下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成.武汉:中国地质大学出版社,1~184.
- 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(1): 41~50.
- 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: 317~322.
- 杜建国,戴圣潜,莫宜学,邓晋福,许卫.2003.安徽沿江地区燕山期火成岩成矿地质背景.地学前缘,10(4): 551~561.
- 杜杨松,李学军.1997.安徽铜陵典型矿区岩石包体研究及其岩浆—成矿作用过程探讨.高校地质学报,3: 171~180.
- 杜杨松,曹毅,袁万明,楼亚儿,李顺庭,鲁鑫.2007.安徽沿江地区中生代碰撞后到造山后岩浆活动和壳幔相互作用——来自火山—侵入杂岩和岩石包体的证据.岩石学报,23(06): 1294~1302.
- 高庚,徐兆文,杨小男,等.2006.安徽铜陵白芒山辉石闪长岩体的成因: Sr-Nd-Pb-O 同位素制约.南京大学学报(自然科学),42(3): 269~279.
- 黄贻梅,袁峰,周涛发,范裕.2009.繁昌盆地中生代火山岩的地球化学特征及其意义.矿物学报(sup): 15~16.
- 李龙,郑永飞,周建波.2001.中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型.岩石学报,17(1): 61~68.
- 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,1~156.
- 楼亚儿,杜杨松.2006.安徽繁昌中生代侵入岩的特征和锆石

SHRIMP 测年.地球化学,35(4): 333~345.

- 吕庆田,侯增谦,赵金花,史大年,吴宜志,常印佛,裴荣富,黄东定,匡朝阳.2003.深地震反射剖面揭示的铜陵矿集区复杂地壳结构形态.中国科学(D辑),33(5): 442~449.
- 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.
- 马昌前,杨坤光,唐仲华.1994.花岗岩类岩浆动力学—理论方法及鄂东花岗岩类例析.武汉:中国地质大学出版社,1~249.
- 毛建仁,苏郁香,陈三元.1990.长江中下游中酸性侵入岩与成矿.北京:地质出版社,1~191.
- 戚建中,刘红樱,姜耀辉.2000.中国东部燕山期俯冲走滑体制及其对成矿定位的控制.火山地质与矿产,21(4): 244~266.
- 任康绪,阎国翰,牟保磊,蔡剑辉,童英,李凤棠,赵凤三,古丽冰,杨斌,储著银.2005.阿拉善断块富碱侵入岩岩石地球化学和 Nd、Sr、Pb 同位素特征及其富碱意义.地学前缘,12(2): 292~302.
- 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,1~349.
- 陶奎元,毛建仁,杨祝良,赵宇,邢光福,薛怀民.1998.中国东南部中生代岩石构造组合和复合动力学过程的记录.地学前缘,5(4): 183~192.
- 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岩的成因及其对深部动力学过程的制约.中国科学,33(4): 323~334.
- 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.
- 吴才来,周若,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.矿物岩石学杂志,15(4): 299~306.
- 吴才来,陈松永,史仁灯,郝美英.2003.铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因.地球学报,24(1): 41~48.
- 吴言昌,曹奋扬,常印佛.1999.初论安徽沿江地区成矿系统的深部构造岩浆控制.地学前缘,6: 285~296.
- 邢凤鸣,徐祥.1994.安徽两条 A 型花岗岩带.岩石学报,10(4): 357~369.
- 邢凤鸣,徐祥.1996.AFC 混合与铜陵地区侵入岩的成因.岩石矿物学杂志,15: 1~9.
- 邢凤鸣,徐祥.1996.铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩.地球化学,25(1): 29~38.
- 邢凤鸣.1998.扬子岩带东段基性岩地球化学.地球化学,27(3): 258~268.
- 邢凤鸣,徐祥.1998.安徽沿江地区橄榄安粗岩系的特点和成因: 大陆橄榄安粗岩系一例.安徽地质,8(2): 8~20.
- 邢凤鸣,徐祥.1999.安徽扬子岩带与成矿.合肥:安徽人民出版社,1~170.
- 徐晓春,楼金伟,尹滔,石磊,鞠林雪.2009.论安徽铜陵地区侵入岩的岩石系列.矿物学报,29(sup): 34~35.
- 闫峻,陈江峰,喻钢,钱卉,周泰禧.2003.长江中下游晚中生代中基性岩的铅同位素特征: 富集地幔的证据.高校地质学报,9(2): 195~206.

- 同峻, 刘海泉, 宋传中, 徐夕生, 安亚军, 刘佳, 戴立群. 2009. 长江中下游繁昌—宁芜火山盆地火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 科学通报, 12: 1716~1724.
- 杨学明, 林文通. 1988. 铜官山火山杂岩体成岩机理研究. 地质评论, 34: 25~35.
- 姚志刚, 高珊, 王永东, 余刚. 2010. 北祁连东段西、南华山中酸性侵入岩地球化学特征. 西安石油大学学报(自然科学版), 25(5): 37~42.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 陆三明, 钱存超, 张乐骏, 段超, 唐敏慧. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景. 岩石学报, 24(08): 1691~1702.
- 袁峰, 周涛发, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 2010. 东天山自然铜矿化带玄武岩的起源、演化及成岩构造背景. 岩石学报, 26(02): 533~546.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 黄贻梅, 张乐骏. 2010. 安徽繁昌盆地中生代火山岩锆石 LA-ICP MS U-Pb 年龄及其意义. 岩石学报, 26(09): 2805~2817.
- 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.
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇. 中国大地出版社, 210~213.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜矿床. 北京: 地质出版社, 1~120.
- 赵会民, 刘雪松, 祝永军. 2004. 安徽狮子山矿田白芒山岩体地球化学特征及成因机制. 吉林地质, 23(3): 30~35.
- 周涛发. 1993. 安徽月山地区闪长岩类及铜矿床的地球化学研究. 合肥: 合肥工业大学, 1~192.
- 周涛发, 岳书仑, 袁峰. 2005. 安徽月山矿田成岩成矿作用. 北京: 地质出版社, 1~148.
- 周涛发, 宋明义, 范裕, 袁峰, 刘璐, 吴明安. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的年代学研究及其意义. 岩石学报, 23(10): 583~591.
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(08): 1665~1678.
- 周珣若, 任进. 1994. 长江中下游中生代花岗岩. 北京: 地质出版社, 1~119.
- 朱光, 王道轩, 刘国生, 牛漫兰, 宋传中. 2004. 郯庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应. 地质科学, 39(1): 36~49.
- 朱光, 牛漫兰, 刘国生, 王男生, 谢成龙, 李长城. 2005. 郯庐断裂带肥东段走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年. 地质学报, 79(3): 308~316.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an indicator of source rock type. Contrib Mineral Petrol, 143: 602~622.
- Baker J A, Menzies M A, Thirlwall M F and Macpherson C G. 1997. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana'a Yemen: Implication and polybaric melt hybridization. Journal of Petrology, 38: 1359~1390.
- Campbell I H and Griffiths R W. 1993. The evolution of mantle's chemical structure. Lithos, 30: 389~399.
- Chen J F, Foland KA and Zhou TX. 1985. Mesozoic granitoids of the Yangtze fold belt, China: Isotopic constraints on the magma sources. In: Wu LR, et al. (eds). The crust The Significance of Granites Genesis in Lithosphere. Theophrastus, Athens, 217~237.
- Chen J F, Yan J, Xie Z, Xu X, Xing F. 2001. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze region in Eastern China: constraints on sources. Physics and Chemistry of the Earth, 26: 719~731.
- Ewart A. 1982. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesitic-basaltic compositional range. In: R S Thorpe (Editor), Andesites. Wiley, Chichester, 25~87.
- Hart S R. 1984. A large scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. Nature, 309: 753~757.
- Lassiter J C and Depaolo D J. 1997. Plumes/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotope constraints. In: Mahoney J(ed). Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. Geophysical Monography 100, American Geophysical Union, 335~355.
- Macdonald R, Rogers N W and Fitton J G. 2001. Plume-lithosphere interaction in the generation of the basalts of the Kenya rift, east Africa. Journal of Petrology, 42: 877~900.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth-Science Reviews, 37: 215~224.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25: 956~983.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwells Scientific, Oxford, 1~312.
- Wood D A. 1979. A variably veined suboceanic upper mantle genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence. Geology, 7: 499~503.
- Wu Cailai, Wang Zhihong, Qiao Dewu, Hao Meiyang, Shi Rendeng. 2000. Types of enclaves and their features and origins in intermediate-acid intrusive rocks from the Tongling District, Anhui Province, China. Acta Geologica Sinica, 74(1): 54~67 (in Chinese with English abstract).
- Zindler A, Hart S R. 1986. Chemical Geodynamics. Annu. Review Of Earth and Planet Science, 14: 493~571.

Geochronology and Geochemical Characteristics of the Shujiadian Intrusion in Tongling, China

WANG Shiwei, ZHOU Taofa, YUAN Feng, FAN Yu, LÜ Yuzhuo

School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Abstract

The Shujiadian intrusion is located in the transition part between the Tongling faulting uplift and the Fanchang faulting basin in the Middle-Lower reaches of the Yangtze River. The rock types of this intrusion include pyroxene diorite, quartz diorite porphyrite, granodiorite porphyry, diorite and diorite porphyrite. This paper studied LA-ICPMS U-Pb dating data of the zircons from pyroxene diorite, and its geochemical compositions and Pb isotope, so as to probe the geochronology, source and evolution of magmas, and tectonic setting of the Shujiadian intrusion. The results indicate that the age of the Shujiadian intrusion is 139.2 ± 2.1 Ma (MSWD=2.3, n=12), suggesting that it is part of the magmatic system in the Tongling area, but not the Fanchang volcanic basin. Pyroxene diorite belongs to high potassium series. And the Shujiadian intrusion might derive from the metasomatic enriched mantle (EMII). There existed crystal fractionation of minerals such as apatite, amphibole, pyroxene and plagioclase, which also affected by the assimilation of crust materials during the evolution of the magmas. The intrusion formed in a compressional regime.

Key words: geochronology of intrusive rocks; geochemistry; enriched mantle; contamination; Tectonic setting; Shujiadian intrusion, Tongling