

铜陵矿集区中生代侵入岩成因及成矿意义

谢建成^{1,2)}, 杨晓勇¹⁾, 肖益林¹⁾, 杜建国³⁾, 孙卫东^{1, 4)}

- 1) 中国科学技术大学地球和空间科学学院矿产资源研究室, 合肥, 230026; 2) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009; 3) 安徽省地质调查研究院, 合肥, 230011;
4) 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640

内容提要: 安徽铜陵矿集区是我国最著名的铜、金、铁产地之一, 成矿与岩浆作用关系密切。本次对铜陵地区中生代侵入岩进行了系统的矿物学、岩石学和元素地球化学研究。结果表明: ① 本区岩浆岩主要为辉石(二长)闪长岩($\text{SiO}_2 \leq 55\%$)、石英(二长)闪长岩($\text{SiO}_2 55\% \sim 65\%$)和花岗闪长岩($\text{SiO}_2 \geq 65\%$)三种岩石组合, 其矿物成分主要为中长石、正长石、镁质黑云母和直闪石—铝直闪石系列。② 辉石(二长)闪长岩组合岩石主要为碱性和橄榄玄粗岩系列。带有古老俯冲洋壳成分的富集岩石圈地幔分离结晶作用可能是辉石(二长)闪长岩组合岩石产生的最主要原因。③ 花岗闪长岩、石英(二长)闪长岩组合岩石主要属于亚碱性和高钾钙碱性系列, 其某些地球化学特征和埃达克岩的地球化学特征一致。幔源岩浆和壳源岩浆的混合可能是石英闪长岩组合和花岗闪长岩组合岩石的主要形成机制。④ 早白垩世岩浆活动及其相关的铜、金成矿作用可能与古太平洋板块俯冲及其演化过程密切相关。

关键词: 岩石组合; 岩浆混合; 太平洋板块俯冲; 分离结晶; 同化混染; 铜陵矿集区

安徽铜陵地区是我国著名的长江中下游铜、金、铁、多金属成矿带地质工作程度较高的地区之一和国内为数不多的大型铜铁金矿集区之一, 也是“层控矽卡岩型矿床”理论(常印佛等, 1991)的发祥地, 在国际成矿理论研究领域占有一席之地。

铜陵地区岩浆岩与成矿关系密切, 一直以来是地质学者研究的重点内容(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 邢凤鸣等, 1995, 1996; 陈江峰等, 1993; 唐永成等, 1998; 吴才来等, 2003; 王强等, 2003; 汪洋等, 2004; 王元龙等, 2004; 杜杨松等, 2004; Xu et al., 2004; 狄永军等, 2005; 楼亚儿等, 2006; 邓军等, 2006; 李进文等, 2007; 周涛发等, 2008; 吴淦国等, 2008; 谢建成等, 2008; Xie et al., 2009; Ling et al., 2009, 2011; Liu et al., 2010)。虽然前人在岩浆岩研究方面取得了丰硕的成果, 但关于含矿岩体的成因以及金属矿物的来源还一直存有争议。目前, 本区侵入岩成因至少有以

下几种看法: ① 幔壳岩浆混合或幔源岩浆经过 AFC 过程形成, 但古老的地壳物质起了重要的作用(陈江峰等, 1993; Chen et al., 1998; 邓晋福等, 2000); ② 由古老的扬子下地壳熔融形成(杜杨松等, 1997, 2004; 张旗等, 2001; 王元龙等, 2004); ③ 铜陵地区 $\text{SiO}_2 > 55\%$ 的侵入岩可能由幔源岩浆与玄武质下地壳熔融形成的埃达克质岩浆混合形成(王强等, 2003); ④ 铜陵地区侵入岩为三端元岩浆混合作用而成(狄永军等, 2005); ⑤ 幔源岩浆和壳源岩浆的混合(赵乘乘和杨晓勇, 2012), 可能有来自古太平洋板块俯冲带来的混入端元成分(Xie et al., 2007, 2009); ⑥ 俯冲洋壳的部分熔融形成的埃达克质岩浆形成(Ling et al., 2009, 2011; Liu et al., 2010; 孙卫东等, 2010)。

本文以与 Cu-Au 矿床(如铜官山, 狮子山, 凤凰山, 新桥等矿区)有密切相关的侵入体为研究对象, 通过系统的岩石学、矿物学和元素地球化学研究, 来

注: 本文为中国科学院知识创新工程重大项目(编号 KZCX1-YW-15-3)、国家自然科学基金项目(编号 41173057)、高等学校博士学科点专项科研新教师类基金(编号 20100111120012)、合肥工业大学博士专项基金(编号 GDBJ2008-041)和安徽国土资源厅项目“铜陵地区找矿专题”共同资助的成果。

收稿日期: 2010-02-01; 改回日期: 2011-03-11; 责任编辑: 郝梓国, 黄敏。

作者简介: 谢建成, 男, 1973 年生, 博士, 从事岩浆岩与成矿研究。通讯作者: 杨晓勇, 通讯地址: 230026, 安徽合肥中国科学技术大学地球和空间科学学院; 电话: 0551-3606871; Email: xyyang555@163.com。

DOI: CNKI: 11-1951/P. 20120307. 1327. 003 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.20120307.1327.003.html>

探讨该区侵入岩的成因、构造背景及其成矿意义。

1 地质概况

铜陵地区的大地构造位置属扬子板块北缘,为下扬子拗陷中的隆起区(图 1a)。在稳定的前寒武纪基底之上的寒武纪至中三叠世地层形成了巨厚的沉积盖层,为铜、金、铁、硫等矿化的有利围岩,而且在晚石炭世区内相对凹陷部位形成原始矿源层(刘裕庆等, 1991; 常印佛等, 1991)。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(点)分布格局。

铜陵地区沉积盖层除缺失中下泥盆统外,出露志留系一下三叠统的海相碎屑沉积岩、碳酸盐岩和蒸发岩,其上广泛分布中生代沉积-火山盆地(图 1b)(唐永成等, 1998)。与成矿关系密切的地层是石炭系的碳酸盐岩、二叠系石灰岩和黑色页岩以及三叠系的碳酸盐岩和泥岩(安徽省地矿局, 1987; 常印佛等, 1991; 唐永成等, 1998)。

铜陵地区岩浆岩体出露有 70 多个,大多数岩体分布于东西向展布的铜陵-南陵深断裂控制的岩浆成矿带上(常印佛等, 1991; 吴才来等, 2003),控制着区内铜官山矿田、狮子山矿田、新桥矿田、凤凰山矿田、沙滩角矿田等主要铜金(铁)矿床的分布,少数分布于铜陵地区南侧的五贵桥、丁桥一带(图 1 b)。岩浆岩主要岩石类型为辉石二长闪长岩-闪长岩-石英二长闪长岩-二长岩-花岗闪长岩。岩浆侵入活动是铜陵地区铜、金、铁、多金属矿床的主要控矿因素(常印佛等, 1991; 翟裕生, 1992; 唐永成等, 1998)。

2 岩石学特征

铜陵地区侵入岩类型主要有三种岩石组合:辉石闪长岩-辉石二长闪长岩组合、石英闪长岩-石英二长闪长岩组合和花岗闪长岩组合。

2.1 辉石闪长岩-辉石二长闪长岩组合(以下简称辉石闪长岩组合)

主要分布于小铜官山、鸡冠山、白芒山、狮子山、杉木岭、舒家店、湖城涧、余村、老山、斗蓬山、曹山等

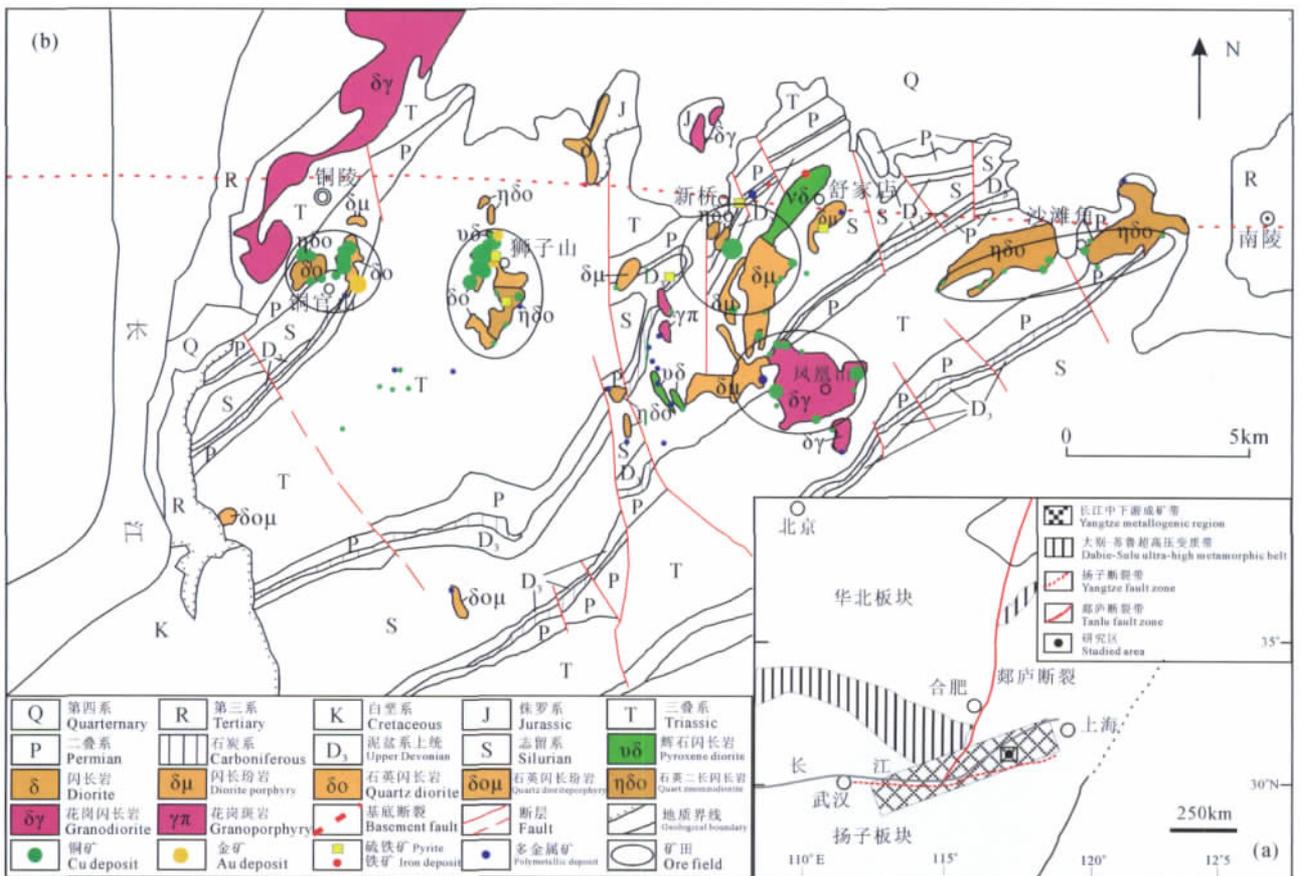


图 1 铜陵矿集区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of the Tongling metallogenic district, East China

地。该组合主要岩石类型为辉石闪长(玢)岩(图 2a)、辉石二长闪长(玢)岩,与本区金、铜矿有着密切的关系。

辉石闪长(玢)岩:灰黑色,不等粒结构—斑状结构,斑晶主要由斜长石、角闪石、黑云母和辉石组成。斜长石,含量 15%,聚片双晶发育,自形板条状,最大者 2 mm×4 mm,一般约 1 mm×2 mm,环带结构发育。碱性长石约 5%,见有卡斯巴双晶。角闪石

斑晶约 10%,棕色,最大者 7 mm×3 mm,一般约 0.5 mm×2 mm,具黑云母反应边,或在黑云母边之外还有辉石和金属矿物反应边,另外含有少量绿色角闪石。黑云母,含量 3%,粒径约 0.5 mm×3 mm,可见黑云母聚斑,中心粒度粗,向边缘粒度变细。辉石含量约 15%,半自形—自形,具环带结构,可见下列现象:辉石具有熔蚀核和熔蚀现象;辉石具黑云母反应边;辉石中的氧化铁包裹体具爆裂现象;辉石大

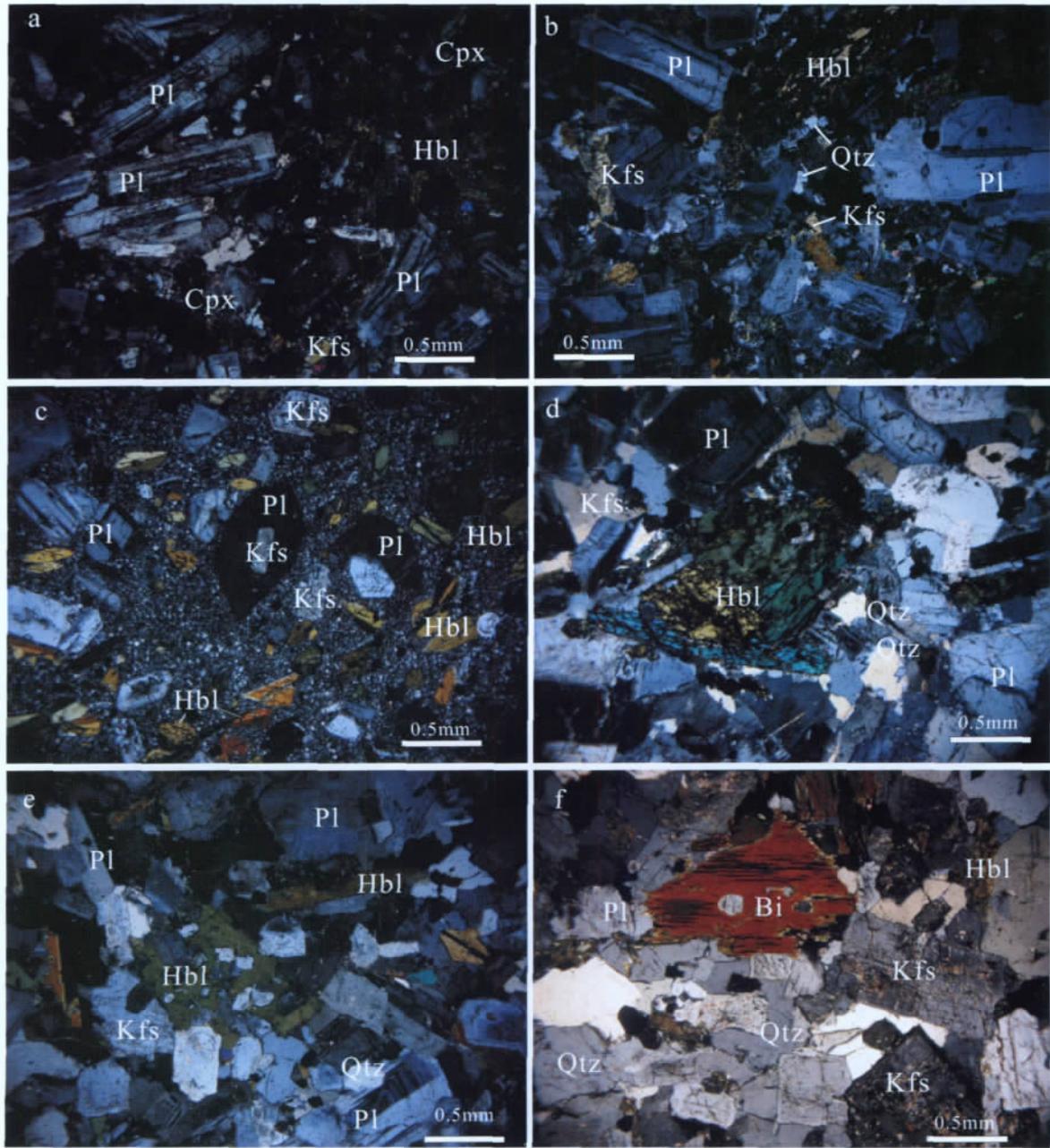


图 2 铜陵地区侵入岩矿物组成和结构显微照片

Fig. 2 Photomicrographs illustrating minerals and textures of the intrusive rocks in Tongling region

Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Qtz—石英; Cpx—单斜辉石; Hbl—角闪石; Bi—黑云母, 正交偏光

Pl—Plagioclase; Kfs—kfeldspar; Qtz—quartz; Cpx—clinopyroxene; Hbl—hornblende; Bi—biotite, all images in cross polarized light

斑晶包裹有角闪石,斜长石呈细脉状沿裂隙或解理交代辉石。基质由细粒斜长石、角闪石和辉石组成,含量约40%。金属矿物含量大,可达17%。在曹山岩体可见碳酸盐、石英和金属矿物细脉充填于裂隙之中。

辉石二长闪长岩:灰色,半自形粒状结构,矿物成分主要为斜长石、碱性长石、单斜辉石、角闪石。不含或含少量的石英。斜长石含量40%~50%,自形板状,发育聚片双晶、卡钠复合双晶和肖钠复合双晶,具环带结构,最大者3 mm×1 mm,一般约1.2 mm×2 mm,包裹有熔蚀长石,具钠化边和熔蚀核。碱性长石20%~25%,它形,发育格子双晶和卡斯巴双晶,高岭石化较强。深绿色角闪石10%,它形,具黑云母、辉石和金属矿物反应边。绿色单斜辉石,15%~20%,它形,可见斜长石包裹绿色单斜辉石现象。少量楣石,磷灰石等副矿物。见于小铜官山岩体和鸡冠山岩体。

2.2 石英闪长岩-石英二长闪长岩组合(以下简称石英闪长岩组合)

该组合主要岩石类型为石英二长闪长岩(图2b,c)、石英闪长岩(图2d,e)、闪长岩和闪长玢岩,沿铜陵-南陵断裂广泛分布,是铜陵地区最主要的岩浆岩(图1),主要与铜金矿关系密切。

石英二长闪长岩:灰色,不等粒结构或似斑状结构。矿物成分:斜长石含量40%,半自形-自形板状,发育聚片双晶、卡钠复合双晶,环带结构发育,斜长石具钠化边,具环带结构,斜长石包裹有熔蚀斜长石,后者同时消光,可见斜长石具碎裂现象;碱性长石含量35%,不规则板状,卡斯巴双晶,具环带结构和钠化边,大颗粒碱性长石嵌晶状包裹着角闪石、斜长石、碱性长石和楣石,还可见碱性长石包裹有黑云母,黑云母又包裹碱性长石;绿色角闪石10%,角闪石包裹有碱性长石、黑云母、磷灰石和金属矿物;石英8%~15%,不规则它形粒状,沿颗粒之间充填;少量金属矿物和楣石。

石英闪长岩:灰色,不等粒结构,矿物成分为斜长石(66%~71%)、碱性长石(3%~6%)、石英(1%~7%)、角闪石(10%~17%)、黑云母(1%~3%)、少量金属矿物磷灰石、锆石和楣石。

此类组合岩石见于凤凰山岩体、东狮子山岩体、新桥岩体、鸡冠山岩体和冬瓜山岩体。薄片可见硅化、黄铁矿化、绿泥石化、绿帘石化、泥化和碳酸盐化。

2.3 花岗闪长岩组合

该组合主要岩石类型为花岗闪长岩(图2f)和

花岗闪长斑岩。其主要与铜矿、多金属矿关系密切。

花岗闪长岩:灰白色或略带肉红色,半自形粒状结构,块状构造。主要矿物为斜长石、角闪石、石英、钾长石和少量黑云母组成。斜长石,含量35%~50%,呈自形-半自形,发育聚片双晶,粒径为0.3~1.0 mm,蚀变强烈,具熔蚀现象及环带结构,可见斜长石被熔蚀成锯齿状,并包裹有熔蚀斜长石。角闪石(5%~10%),呈自形-半自形,长柱状,粒径为0.3~0.8 mm。石英,含量15%~20%,它形,颗粒大小比较均一,粒径约为0.2 mm,具熔蚀现象,呈港湾状或浑圆状。钾长石(10%~15%),呈半自形-它形,颗粒比较小,粒径小于0.2 mm。黑云母(10%左右)呈鳞片状,颗粒较大。副矿物主要为磷灰石、楣石、锆石和磁铁矿。见于凤凰山、金口岭等岩体。

3 分析方法

全岩的主量元素、稀土元素和微量元素分别由安徽省地质实验研究所和中国科学技术大学物理和化学实验中心测定。

全岩的主量元素分析方法为X-射线荧光熔片法,各项元素的分析精度分别如下。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型电感耦合等离子质谱计,具体的操作方法和原理参见Qi等(2000)。REE含量测试误差小于7%,其余微量元素的误差小于10%。

矿物电子探针分析是在德国哥廷根大学Geowissenschaftliches Zentrum电子探针实验室进行,电子探针分析的仪器型号为JEOL JXA-8900RL,电子探针定量分析工作条件为:加速电压15 kV;电子束流为2×10⁻⁸ A;电子束斑5 μm。

4 结果

4.1 矿物地球化学

本区的斜长石和碱性长石分析结果及各类参数的计算结果见表1。

碱性长石在本区远不如斜长石分布广泛,其中Or含量变化较大。从全区的长石的三端元组分投影图(图3a)可以看出:全区岩体中碱性长石的成分

表 1 铜陵地区侵入岩体岩石中长石电子探针分析结果
Table 1 Compositional analyses of feldspars from intrusive rocks in the Tongling region

样号	氧化物含量(%)																	以 24 个氧为基的阳离子数										Ab	Or	An
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SrO	MnO	BaO	NiO	total	Si	Na	Ca	K	Fe	Al	Mg	Ti	Sr	Mn	Ba	Ni	total				
	63.5	9.73	2.3	0.21	2.1	19.79	1.39	0.12	0	0.02	0.04	0.06	99.2	8.6	2.5	0.3	0.04	0.23	3.1	0.28	0.012	0	0.003	0.002	0.006	15.15				
HGS01-1	63.5	9.73	2.3	0.21	2.1	19.79	1.39	0.12	0	0.02	0.04	0.06	99.2	8.6	2.5	0.3	0.04	0.23	3.1	0.28	0.012	0	0.003	0.002	0.006	15.15				
HGS01-2	65	3.77	0.9	10.7	0.4	18.84	0.07	0.04	0.1	0.01	0.33	0.01	100	8.9	1	0.1	1.86	0.04	3	0.01	0.004	0.008	8E-04	0.018	0.001	15.02				
HGS01-3	58.1	8.48	3.5	0.61	1.7	19.47	1.61	0.01	0	0.06	0.03	0	93.5	8.4	2.4	0.5	0.11	0.21	3.3	0.34	0.001	0	0.007	0.001	0	15.23				
HGS01-4	57.9	8.4	3.6	0.61	1.8	19.48	1.62	0.04	0.05	0.05	0.05	0	93.5	8.3	2.3	0.5	0.11	0.21	3.3	0.35	0.004	0.004	0.007	0.003	0	15.23				
HGS01-5	65.1	0.67	0	15.9	0.1	18.64	0.01	0.01	0	0.02	0.1	0	101	9	0.2	0	2.8	0.01	3	0	0.001	0	0.002	0.006	0	15.01				
JGS01-1	63	9.29	4.1	0.4	0.3	22.97	0.02	0.03	0.05	0	0.06	0	100	8.4	2.4	0.6	0.07	0.03	3.6	0	0.003	0.004	0	0.003	0	15.06				
JGS01-2	57.7	6.95	8	0.42	0.4	26.39	0.01	0.01	0.25	0.01	0.11	0.01	100	7.8	1.8	1.1	0.07	0.04	4.2	0	0.001	0.02	0.001	0.006	0.002	15.07				
JGS01-3	56.9	6.58	8.6	0.38	0.4	26.72	0.02	0.04	0.06	0.06	0.04	0.05	99.9	7.7	1.7	1.2	0.06	0.04	4.3	0	0.004	0.005	0.007	0.002	0.005	15.06				
JGS01-4	57.6	6.9	7.9	0.4	0.2	25.94	0.02	0.04	0.29	0	0.06	0.01	99.5	7.8	1.8	1.1	0.07	0.03	4.1	0	0.004	0.023	0	0.003	0.001	15.05				
JGS01-5	56.1	6.18	9.1	0.42	0.3	27.19	0.02	0	0.36	0.01	0.04	0	99.7	7.6	1.6	1.3	0.07	0.03	4.4	0	0	0.029	8E-04	0.002	0	15.06				
JGS01-6	58.3	7.12	7.5	0.54	0.3	25.8	0.02	0	0.37	0	0.13	0	100	7.9	1.9	1.1	0.09	0.03	4.1	0	0	0.029	0	0.007	0	15.07				
JGS01-7	57.7	7.13	7.8	0.3	0.3	25.94	0	0.01	0.27	0.01	0	0	99.6	7.8	1.9	1.1	0.05	0.04	4.1	0	0.001	0.021	0.002	0	0	15.08				
JGS01-8	57.7	7	8	0.21	0.3	26.27	0.03	0.01	0.24	0	0.02	0.06	99.9	7.8	1.8	1.2	0.04	0.04	4.2	0.01	0.001	0.019	0	0.001	0.006	15.06				
JGS01-9	58.8	7.64	6.1	0.33	0.5	24.69	0.54	0.04	0.21	0	0.07	0	98.9	8	2	0.9	0.06	0.06	4	0.11	0.004	0.016	0	0.004	0	15.07				
JGS01-10	54.2	5.27	11	0.32	0.3	28.7	0.02	0.02	0.29	0.01	0.1	0	100	7.4	1.4	1.6	0.06	0.03	4.6	0	0.002	0.023	0.002	0.005	0	15.06				
JGS01-11	56.5	6.29	8.8	0.51	0.3	26.83	0	0.05	0.23	0	0.15	0	99.7	7.7	1.7	1.3	0.09	0.03	4.3	0	0.005	0.018	0	0.008	0	15.05				
JGS01-12	58.6	7.16	7.2	0.67	0.2	25.43	0.02	0.03	0.12	0.02	0.04	0	99.5	7.9	1.9	1	0.12	0.03	4.1	0	0.003	0.009	0.002	0.002	0	15.05				
JGS01-13	57.3	6.68	7.3	0.49	0.5	25.32	0.32	0	0.13	0.03	0.02	0.01	98.1	7.9	1.8	1.1	0.09	0.06	4.1	0.07	0	0.01	0.004	0.001	0.001	15.03				
JGS01-14	55.1	6.09	7.6	0.24	1.2	24.19	2.29	0.02	0.22	0.02	0.01	0	97	7.7	1.6	1.1	0.04	0.14	4	0.48	0.002	0.018	0.002	6E-04	0	15.15				
JGS01-15	55.9	6.08	9.3	0.38	0.3	27.36	0.04	0.04	0.17	0	0.04	0	99.6	7.6	1.6	1.3	0.07	0.04	4.4	0.01	0.004	0.013	0	0.002	0	15.05				
JGS01-16	58.1	6.97	7.7	0.52	0.4	25.98	0.03	0.01	0.27	0.05	0.14	0	100	7.8	1.8	1.1	0.09	0.04	4.1	0.01	0.001	0.021	0.005	0.008	0	15.06				
JGS01-17	59.2	7.38	5.6	0.95	0.6	25.09	0.5	0.01	0.06	0	0.11	0.02	99.6	8	1.9	0.8	0.16	0.07	4	0.1	0.001	0.005	0	0.006	0.002	15.06				
JGS01-18	65.2	9.91	2.1	0.46	0.5	20.83	0.41	0.02	0	0.06	0	0.03	99.5	8.7	2.6	0.3	0.08	0.05	4	0.08	0.002	0	0.007	0	0.003	15.01				
JGS01-19	61.2	8.25	1.1	2.71	0.5	24.53	0.27	0	0	0.05	0.04	0	98.6	8.3	2.2	0.2	0.47	0.05	4	0.06	0	0	0.006	0.002	0	15.09				
JGS01-20	64.4	0.91	0	15.4	0.2	18.56	0	0.01	0	0	0.05	0	99.5	9	0.2	0	2.74	0.02	4	0	0.001	0	0	0.003	0	15.01				
JKL01-1	62.3	9.11	4.3	0.35	0.1	23.1	0	0.01	0.04	0	0	0	99.4	8.3	2.4	0.6	0.06	0.02	4	0	9E-04	0.003	0	0	0	15.05				
JKL01-2	61.5	8.53	5	0.43	0.2	23.58	0.03	0.03	0.1	0	0.06	0.02	99.5	8.3	2.2	0.7	0.07	0.03	4	0.01	0.003	0.008	0	0.003	0.003	15.03				
JKL01-3	61.2	8.41	5.3	0.44	0.2	23.78	0	0	0.15	0.02	0.05	0.01	99.6	8.2	2.2	0.8	0.08	0.02	4	0	0	0.012	0.003	0.003	0.001	15.04				
JKL01-4	60.9	8.33	5.6	0.47	0.2	24.12	0	0.03	0.1	0	0.15	0	99.9	8.2	2.2	0.8	0.08	0.02	4	0	0.003	0.008	0	0.008	0	15.05				
JKL01-5	60.5	8.24	5.5	0.49	0.1	24.17	0	0.02	0.26	0.01	0.16	0.01	99.6	8.1	2.2	0.8	0.08	0.02	4	0	0.002	0.021	0.001	0.008	0.001	15.06				
JKL01-6	59.9	7.76	6.4	0.44	0.2	24.82	0	0.03	0.26	0	0.12	0	99.9	8	2	0.9	0.07	0.02	4	0	0.004	0.021	0	0.006	0	15.04				
JKL01-7	60.3	8.1	5.9	0.53	0.2	24.44	0.01	0.05	0.12	0.01	0.06	0.01	99.8	8.1	2.1	0.9	0.09	0.02	4	0	0.005	0.009	0.002	0.003	9E-04	15.06				
JKL01-8	60.3	8.06	5.7	0.56	0.2	24.31	0	0	0.2	0	0.07	0.01	99.4	8.1	2.1	0.8	0.1	0.02	4	0	0	0.016	0	0.004	0.001	15.05				
JKL01-9	59.5	7.74	6.5	0.45	0.2	24.94	0.01	0.02	0.21	0	0.07	0	99.6	8	2	0.9	0.08	0.02	4	0	0.002	0.016	0	0.004	0	15.05				

续表 1

样号	氧化物含量(%)														以 24 个氧为基的阳离子数											Ab	Or	An		
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SrO	MnO	BaO	NiO	total	Si	Na	Ca	K	Fe	Al	Mg	Ti	Sr	Mn	Ba	Ni				total	
	57.1	6.77	8.1	0.3	0.2	26.48	0	0	0.3	0.04	0	0.06	99.3	7.7	1.8	1.2	0.05	0.02	4	0	0	0	0.024	0.004	0				0.007	15.05
JKL01-10	57.1	6.77	8.1	0.3	0.2	26.48	0	0	0.3	0.04	0	0.06	99.3	7.7	1.8	1.2	0.05	0.02	4	0	0	0	0.024	0.004	0	0.007	15.05	0.59	0.02	0.39
JKL01-11	56.7	6.78	8.3	0.31	0.2	26.47	0.01	0	0.29	0	0.04	0	99.1	7.7	1.8	1.2	0.05	0.02	4	0	0	0	0.023	0	0.002	0	15.07	0.59	0.02	0.4
JKL01-12	58.6	7.2	7.4	0.35	0.1	25.62	0.01	0.02	0.28	0.01	0	0.04	99.6	7.9	1.9	1.1	0.06	0.01	4	0	0.002	0.022	0.001	0	0.004	0	15.03	0.63	0.02	0.35
JKL01-13	58.8	7.38	7.1	0.38	0.1	25.28	0	0	0.23	0.03	0	0	99.3	7.9	1.9	1	0.06	0.02	4	0	0	0.018	0.003	0	0	0	15.04	0.64	0.02	0.34
JKL01-14	59.7	7.75	6.4	0.45	0.2	25.21	0	0.04	0.13	0	0	0.04	99.9	8	2	0.9	0.08	0.02	4	0	0.004	0.01	0	0	0.004	0	15.04	0.67	0.03	0.31
JKL01-15	60.3	8.04	5.8	0.52	0.1	24.42	0.02	0	0.27	0	0	0.02	99.5	8.1	2.1	0.8	0.09	0.01	4	0	0	0.021	0	0	0.003	0	15.05	0.69	0.03	0.28
JKL01-16	60.6	8.2	5.6	0.54	0.1	23.98	0.01	0.01	0.27	0.02	0.08	0	99.4	8.2	2.1	0.8	0.09	0.01	4	0	0.001	0.021	0.003	0.004	0	0	15.05	0.7	0.03	0.27
JKL01-17	60.7	8.02	5.6	0.49	0.1	24.24	0	0.04	0.13	0.03	0.03	0	99.4	8.2	2.1	0.8	0.08	0.01	4	0	0.004	0.011	0.003	0.002	0	0	15.01	0.7	0.03	0.27
JKL01-18	60.5	8	5.8	0.48	0.1	24.37	0.01	0	0.43	0	0.08	0	99.7	8.1	2.1	0.8	0.08	0.01	4	0	0	0.034	0	0.004	0	0	15.03	0.69	0.03	0.28
JKL01-19	60.4	7.97	6	0.52	0.1	24.38	0.02	0.01	0.12	0.01	0.02	0.02	99.6	8.1	2.1	0.9	0.09	0.01	4	0	0.001	0.01	0.001	0.001	0.002	0	15.03	0.69	0.03	0.28
JKL01-20	60.1	7.98	6	0.51	0.1	24.61	0.01	0.01	0.22	0.02	0	0	99.6	8.1	2.1	0.9	0.09	0.01	4	0	0.001	0.018	0.002	0	0	0	15.05	0.69	0.03	0.28
JKL01-21	60.4	8.23	5.8	0.52	0.1	24.21	0	0	0.37	0.01	0.05	0	99.7	8.1	2.1	0.8	0.09	0.01	4	0	0	0.029	0.001	0.003	0	0	15.08	0.7	0.03	0.27
JKL01-22	60.2	8.11	5.7	0.48	0.1	24.45	0	0.01	0.29	0.03	0.03	0	99.4	8.1	2.1	0.8	0.08	0.01	4	0	0.001	0.022	0.004	0.001	0	0	15.06	0.7	0.03	0.27
JKL01-23	60.2	8.1	5.9	0.54	0.1	24.44	0	0	0.39	0.04	0.01	0.01	99.8	8.1	2.1	0.9	0.09	0.01	4	0	0	0.03	0.005	5E-04	0.001	0	15.07	0.69	0.03	0.28
JKL01-24	60.3	7.99	5.7	0.55	0.1	24.43	0.01	0.05	0.24	0.02	0	0	99.4	8.1	2.1	0.8	0.09	0.01	4	0	0.005	0.019	0.002	0	0	0	15.03	0.69	0.03	0.27
JKL01-25	59.9	7.99	6.1	0.53	0.1	24.46	0	0	0.31	0	0.06	0	99.5	8.1	2.1	0.9	0.09	0.01	4	0	0	0.024	0	0.003	0	0	15.07	0.68	0.03	0.29
JKL01-26	60.2	7.97	6	0.51	0.2	24.44	0.01	0	0.17	0.02	0.03	0.03	99.5	8.1	2.1	0.9	0.09	0.02	4	0	0	0.013	0.003	0.002	0.004	0	15.04	0.69	0.03	0.28
JKL01-27	59.6	7.77	6.2	0.49	0.1	24.46	0.01	0.01	0.18	0.02	0.03	0.02	98.9	8.1	2	0.9	0.08	0.01	4	0	0.001	0.014	0.002	0.002	0.002	0	15.04	0.67	0.03	0.3
JKL01-28	60.5	8.09	5.8	0.51	0.1	24.42	0	0	0.33	0.02	0	0.02	99.8	8.1	2.1	0.8	0.09	0.02	4	0	0	0.026	0.002	0	0.002	0	15.05	0.7	0.03	0.28
JKL01-29	60.1	7.92	6	0.52	0.1	24.43	0	0	0.29	0.05	0.13	0.02	99.6	8.1	2.1	0.9	0.09	0.01	4	0	0	0.023	0.006	0.007	0.002	0	15.05	0.68	0.03	0.29
JKL01-30	60.1	7.91	6	0.36	0.2	24.53	0	0.01	0.15	0	0.07	0	99.3	8.1	2.1	0.9	0.06	0.02	4	0	0.001	0.012	0	0.004	0.001	0	15.02	0.69	0.02	0.29
JKL01-31	60.1	7.98	6	0.48	0.1	24.48	0.02	0	0.22	0	0	0	99.3	8.1	2.1	0.9	0.08	0.01	4	0	0	0.017	0	0	0	0	15.05	0.69	0.03	0.28
JKL01-32	60	8.03	5.9	0.46	0.1	24.47	0	0	0.32	0.01	0.1	0	99.4	8.1	2.1	0.9	0.08	0.01	4	0	0	0.025	0.001	0.005	0	0	15.06	0.69	0.03	0.28
JKL01-33	60.8	8.1	5.8	0.5	0.1	24.29	0	0	0.17	0	0.08	0	99.8	8.1	2.1	0.8	0.09	0.01	4	0	0	0.013	0	0.004	0	0	15.03	0.7	0.03	0.28
JKL01-34	60.6	8.11	5.9	0.58	0.1	24.3	0.01	0	0.1	0.01	0	0	99.7	8.1	2.1	0.9	0.1	0.01	4	0	0	0.007	0.001	0	0	0	15.05	0.69	0.03	0.28
JKL01-35	60.4	7.87	5.7	0.51	0.1	24.2	0	0.02	0.29	0	0	0	99.2	8.1	2.1	0.8	0.09	0.01	4	0	0.003	0.022	0	0	0	0	15	0.69	0.03	0.28
JKL01-36	60.5	8.16	5.6	0.5	0.1	24.34	0.02	0	0.27	0	0.03	0	99.6	8.1	2.1	0.8	0.08	0.02	4	0	0	0.021	0	0.002	0	0	15.05	0.7	0.03	0.27
JKL01-37	60.9	8.17	5.5	0.6	0.1	23.93	0	0	0.2	0	0	0	99.3	8.2	2.1	0.8	0.1	0.01	4	0	0	0.016	0	0	0	0	15.03	0.71	0.03	0.26
JKL01-38	61	8.22	5.4	0.57	0.1	24	0	0	0.19	0	0	0	99.6	8.2	2.1	0.8	0.1	0.01	4	0	0	0.015	0	0	0	0	15.03	0.71	0.03	0.26
JKL01-39	60.4	7.98	6.2	0.5	0.1	24.39	0.02	0	0.26	0	0.09	0	99.9	8.1	2.1	0.9	0.09	0.01	4	0	0	0.021	0	0.005	0	0	15.05	0.68	0.03	0.29
JKL01-40	59.8	7.84	6.5	0.44	0.1	25.03	0.01	0	0.27	0.01	0.06	0.04	100	8	2	0.9	0.08	0.01	4	0	0	0.021	8E-04	0.003	0.005	0	15.06	0.67	0.02	0.3
JKL01-41	58.3	7.12	7.6	0.35	0.2	25.93	0.03	0.01	0.09	0.02	0	0.04	99.7	7.9	1.9	1.1	0.06	0.02	4	0.01	0.001	0.007	0.003	0	0.004	0	15.04	0.62	0.02	0.36
JKL01-42	57.5	6.86	8	0.37	0.2	26.21	0	0.02	0.28	0	0.07	0	99.5	7.8	1.8	1.2	0.06	0.02	4	0	0.002	0.022	0	0.004	0	0	15.05	0.6	0.02	0.38
JKL01-43	58	7.05	7.7	0.32	0.2	25.93	0	0	0.06	0.03	0.04	0	99.4	7.8	1.9	1.1	0.05	0.02	4	0	0	0.005	0.004	0.002	0	0	15.04	0.61	0.02	0.37
JKL01-44	60.4	7.82	6.1	0.41	0.2	24.84	0	0.05	0.1	0.02	0.04	0.02	100	8.1	2	0.9	0.07	0.02	4	0	0.005	0.008	0.002	0.002	0.002	0	15.01	0.68	0.02	0.29

续表 1

样品号	氧化物含量(%)													以 24 个氧为基的阳离子数												Ab	Or	An	
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SrO	MnO	BaO	NiO	total	Si	Na	Ca	K	Fe	Al	Mg	Ti	Sr	Mn	Ba	Ni				total
JKL01-45	57.7	6.98	8.1	0.31	0.2	26.3	0	0.01	0.25	0	0	0	99.9	7.8	1.8	1.2	0.05	0.03	4	0	0.001	0.02	0	0	0	15.06	0.6	0.02	0.38
JKL01-46	59.5	7.65	6.3	0.43	0.2	24.77	0	0.01	0.11	0.01	0.15	0.02	99.1	8	2	0.9	0.08	0.02	4	0	0.001	0.009	0.001	0.008	0.003	15.03	0.67	0.03	0.31
JKL01-47	61.1	8.33	5.2	0.55	0.2	23.79	0	0	0.19	0.03	0.09	0.03	99.5	8.2	2.2	0.7	0.09	0.02	4	0	0	0.015	0.003	0.005	0.003	15.04	0.72	0.03	0.25
JKL01-48	60.7	8.23	5.7	0.46	0.2	24.37	0.01	0.01	0.1	0.03	0.12	0	99.9	8.1	2.1	0.8	0.08	0.03	4	0	0.002	0.008	0.003	0.006	0	15.06	0.7	0.03	0.27
JKL01-49	61.3	8.43	5.4	0.42	0.2	23.76	0	0	0.05	0	0.1	0	99.6	8.2	2.2	0.8	0.07	0.02	4	0	0	0.004	0	0.005	0	15.04	0.72	0.02	0.25
JKL01-50	62.9	9.09	4.1	0.23	0.1	23.07	0	0.03	0	0	0.03	0	99.6	8.4	2.3	0.6	0.04	0.01	4	0	0.003	0	0.002	0	15	0.79	0.01	0.2	
JKL01-51	62.1	2.43	0.1	11.8	0.2	19.83	0.02	0.08	0.15	0	3.65	0.01	100	8.7	0.7	0	2.11	0.02	4	0	0.009	0.013	0	0.201	0.002	15.02	0.24	0.76	0
JKL01-52	64.7	2.18	0.1	13.8	0.1	18.56	0	0.02	0.08	0	0.03	0	99.5	9	0.6	0	2.43	0.01	4	0	0.003	0.007	0	0.002	0	15.03	0.19	0.8	0
TEBD02-1	59.7	8.08	6	0.36	0.2	24.29	0.01	0	0.19	0.01	0.01	0	98.9	8.1	2.1	0.9	0.06	0.02	4	0	0	0.015	0.001	7E-04	0	15.06	0.69	0.02	0.29
TEBD02-2	60.1	7.74	6.3	0.51	0.2	24.51	0	0.02	0.07	0	0.05	0	99.5	8.1	2	0.9	0.09	0.03	4	0	0.002	0.005	0	0.002	0	15.02	0.67	0.03	0.3
TEBD02-3	60.6	8.08	5.8	0.47	0.2	24.18	0.02	0.01	0.12	0.01	0.05	0	99.5	8.1	2.1	0.8	0.08	0.02	4	0	0.001	0.009	9E-04	0.002	0	15.03	0.7	0.03	0.27
TEBD02-4	59.3	7.53	6.9	0.49	0.2	25.08	0.01	0	0.23	0	0.08	0.01	99.9	8	2	1	0.08	0.02	4	0	0	0.018	0	0.004	0.001	15.06	0.65	0.03	0.33
TEBD02-5	58.6	7.37	7.2	0.47	0.2	25.2	0.03	0.04	0.32	0.01	0.13	0.04	99.6	7.9	1.9	1	0.08	0.02	4	0.01	0.004	0.025	9E-04	0.007	0.005	15.07	0.63	0.03	0.34
TEBD02-6	58.5	7.33	7.2	0.44	0.2	25.14	0	0	0.12	0	0	0	98.9	7.9	1.9	1	0.08	0.02	4	0	0	0.009	0	0	0	15.05	0.63	0.02	0.34
TEBD02-7	55.9	5.93	9.6	0.29	0.2	27.86	0	0	0.19	0.01	0.05	0	100	7.6	1.6	1.4	0.05	0.03	4	0	0	0.015	0.001	0.003	0	15.03	0.52	0.02	0.46
TEBD02-8	56	6.06	9.5	0.33	0.2	27.37	0	0.04	0.13	0	0.01	0.02	99.7	7.6	1.6	1.4	0.06	0.03	4	0	0.004	0.01	0	7E-04	0.002	15.04	0.53	0.02	0.45
TEBD02-9	57.2	6.74	8.3	0.38	0.3	26.48	0	0.05	0.19	0.02	0.03	0	99.7	7.7	1.8	1.2	0.07	0.03	4	0	0.006	0.015	0.002	0.001	0	15.06	0.58	0.02	0.4
TEBD02-10	58.6	7.3	7.2	0.48	0.3	25.57	0.01	0.02	0.14	0	0.08	0	99.8	7.9	1.9	1	0.08	0.04	4	0	0.002	0.011	0	0.004	0	15.06	0.63	0.03	0.34
TEBD02-11	59.5	7.49	6.8	0.56	0.2	25.1	0.01	0.01	0.2	0	0.06	0	99.9	8	2	1	0.1	0.03	4	0	0.001	0.016	0	0.003	0	15.04	0.65	0.03	0.32
TEBD02-12	59.3	7.49	7	0.59	0.3	25.13	0.02	0	0.15	0	0	0	99.9	8	2	1	0.1	0.03	4	0	0	0.012	0	0	0	15.06	0.64	0.03	0.33
TEBD02-13	56.5	6.29	8.9	0.36	0.2	26.83	0.01	0.01	0.25	0.01	0.05	0	99.5	7.7	1.7	1.3	0.06	0.03	4	0	0.001	0.02	0.001	0.003	0	15.04	0.55	0.02	0.43
TEBD02-14	54.9	5.66	10	0.25	0.2	28.05	0	0.03	0.08	0	0.04	0	99.4	7.5	1.5	1.5	0.04	0.03	4	0	0.004	0.006	0	0.002	0	15.04	0.49	0.01	0.49
TEBD02-15	54.9	5.56	11	0.15	0.2	28.13	0	0	0.26	0	0	0	99.9	7.5	1.5	1.6	0.03	0.02	4	0	0	0.021	0	0	0	15.04	0.48	0.01	0.51
TEBD02-16	64.3	0.94	0	15.7	0.1	18.48	0.01	0	0.01	0.01	0.27	0.04	99.9	8.9	0.3	0	2.78	0.01	4	0	0	8E-04	0.001	0.015	0.004	15.06	0.08	0.91	0
TEBD02-17	53.8	5.18	11	0.23	0.2	28.72	0.02	0.02	0.3	0	0.11	0	99.8	7.3	1.4	1.6	0.04	0.03	4	0	0.002	0.024	0	0.006	0	15.06	0.45	0.01	0.54
TEBD02-18	54	5.18	11	0.24	0.2	28.59	0	0.01	0.15	0.02	0.03	0	99.4	7.4	1.4	1.6	0.04	0.03	4	0	0.001	0.012	0.002	0.002	0	15.03	0.46	0.01	0.53
TEBD02-19	52.8	4.52	12	0.22	0.3	29.45	0	0	0.1	0	0	0.03	99.3	7.2	1.2	1.8	0.04	0.03	4	0	0	0.008	0	0	0.003	15.02	0.4	0.01	0.59
TEBD02-20	52.5	4.55	12	0.21	0.3	29.74	0.02	0.02	0.21	0	0.05	0	99.8	7.2	1.2	1.8	0.04	0.03	4	0	0.002	0.016	0	0.003	0	15.05	0.4	0.01	0.59
TEBD02-21	52.7	4.55	12	0.23	0.3	29.74	0.01	0	0.25	0.02	0.1	0	99.9	7.2	1.2	1.8	0.04	0.04	4	0	0	0.02	0.003	0.005	0	15.04	0.4	0.01	0.59
TEBD02-22	52.9	4.56	12	0.21	0.3	29.58	0	0.01	0.3	0.03	0	0.01	99.9	7.2	1.2	1.8	0.04	0.03	4	0	0.001	0.024	0.004	0	0.002	15.03	0.4	0.01	0.58
TEBD02-23	55.2	5.42	10	0.3	0.3	28.08	0	0.02	0.27	0	0.04	0	99.7	7.5	1.4	1.5	0.05	0.03	4	0	0.002	0.021	0	0.002	0	14.99	0.49	0.02	0.5
TEBD02-24	55.5	5.71	10	0.3	0.3	28.11	0	0.01	0.25	0	0.14	0	100	7.5	1.5	1.4	0.05	0.03	4	0	0.001	0.019	0	0.007	0	15.04	0.5	0.02	0.48
TEBD02-25	54.3	5.43	11	0.27	0.2	28.48	0.01	0.01	0.17	0	0	0.04	99.6	7.4	1.4	1.6	0.05	0.02	4	0	0.001	0.013	0	0	0.004	15.06	0.47	0.02	0.51
TEBD02-26	54	5.25	11	0.25	0.2	28.78	0	0.03	0.35	0	0	0.04	99.7	7.4	1.4	1.6	0.04	0.02	4	0	0.003	0.027	0	0	0.004	15.04	0.46	0.01	0.52
TEBD02-27	53	4.75	12	0.24	0.3	29.53	0	0	0.17	0	0	0.01	99.8	7.2	1.3	1.7	0.04	0.03	4	0	0	0.014	0	0	0.001	15.05	0.42	0.01	0.57

续表 1

样号	氧化物含量(%)														以 24 个氧为基的阳离子数										Ab	Or	An			
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SiO	MnO	BaO	NiO	total	Si	Na	Ca	K	Fe	Al	Mg	Ti	Sr	Mn	Ba				Ni	total	
	50.8	3.82	14	0.14	0.2	30.97	0.01	0.04	0.15	0.03	0.02	0	99.9	7	1	2	0.03	0.03	4	0	0.004	0.012	0.004	9E-04				0	15.06	0.33
TEBD02-28	50.8	3.82	14	0.14	0.2	30.97	0.01	0.04	0.15	0.03	0.02	0	99.9	7	1	2	0.03	0.03	4	0	0.004	0.012	0.004	9E-04	0	15.06	0.33	0.01	0.66	
TEBD02-29	51.6	4.09	13	0.16	0.3	30.6	0	0	0.15	0.01	0.02	0.03	100	7	1.1	1.9	0.03	0.03	4	0	0	0.012	0.001	0.001	0.001	0.004	15.05	0.36	0.01	0.63
TEBD02-30	53.4	4.95	11	0.22	0.2	29.02	0.01	0	0.18	0.01	0.04	0	99.5	7.3	1.3	1.7	0.04	0.03	4	0	0	0.014	0.001	0.002	0	15.04	0.43	0.01	0.55	
TEBD02-31	53.5	5.18	11	0.22	0.3	29.31	0.01	0.03	0.31	0	0.01	0.05	100	7.3	1.4	1.6	0.04	0.03	4	0	0.003	0.024	0	7E-04	0.006	15.08	0.45	0.01	0.54	
TEBD02-32	53.9	5.15	11	0.26	0.2	28.7	0.01	0.05	0.11	0.03	0	0.03	99.4	7.4	1.4	1.6	0.05	0.03	4	0	0.005	0.009	0.004	0	0.003	15.04	0.45	0.01	0.53	
TEBD02-33	55.7	5.98	9.6	0.33	0.2	27.66	0.02	0	0.27	0	0.02	0	99.8	7.6	1.6	1.4	0.06	0.02	4	0	0	0.021	0	0.001	0	15.05	0.52	0.02	0.46	
TEBD02-34	52.8	4.62	12	0.21	0.3	29.88	0.03	0.03	0.18	0.03	0	0	100	7.2	1.2	1.8	0.04	0.04	4	0.01	0.003	0.015	0.004	0	0	15.05	0.4	0.01	0.58	
TEBD02-35	52.4	4.36	12	0.21	0.3	29.9	0.01	0.03	0.13	0	0.05	0	99.8	7.2	1.2	1.8	0.04	0.03	4	0	0.003	0.01	0	0.003	0	15.03	0.38	0.01	0.6	
TEBD02-36	52.4	4.54	12	0.18	0.3	29.83	0	0.02	0.28	0	0.06	0.01	99.8	7.2	1.2	1.8	0.03	0.04	4	0	0.002	0.022	0	0.003	9E-04	15.05	0.4	0.01	0.59	
TEBD02-37	53.1	4.76	12	0.21	0.3	29.78	0.01	0	0.21	0	0.02	0	100	7.2	1.3	1.7	0.04	0.03	4	0	0	0.017	0	9E-04	0	15.05	0.41	0.01	0.57	
TEBD02-38	53.4	4.97	11	0.23	0.3	29.33	0.01	0.02	0.15	0	0.02	0.04	99.9	7.3	1.3	1.7	0.04	0.03	4	0	0.003	0.011	0	0.001	0.004	15.05	0.44	0.01	0.55	
TEBD02-39	53.2	4.88	12	0.2	0.3	29.3	0.04	0.03	0.22	0.07	0.05	0	100	7.2	1.3	1.7	0.03	0.04	4	0.01	0.003	0.017	0.008	0.003	0	15.06	0.42	0.01	0.56	
TEBD02-40	53.3	4.68	12	0.21	0.3	29.58	0.03	0.06	0.28	0.01	0.02	0.06	100	7.2	1.2	1.7	0.04	0.03	4	0.01	0.006	0.022	0.001	0.001	0.007	15.03	0.41	0.01	0.58	
TEBD02-41	53.8	5.01	11	0.22	0.3	29.09	0	0	0.1	0.02	0.04	0	100	7.3	1.3	1.7	0.04	0.03	4	0	0	0.008	0.003	0.002	0	15.04	0.44	0.01	0.55	
TEBD02-42	57	6.36	8.8	0.37	0.3	27.01	0.01	0.02	0.16	0	0.08	0.03	100	7.7	1.7	1.3	0.06	0.03	4	0	0.002	0.013	0	0.004	0.003	15.03	0.56	0.02	0.42	
TEBD02-43	58.1	6.93	7.9	0.42	0.2	26.23	0	0.01	0.18	0	0	0	100	7.8	1.8	1.1	0.07	0.03	4	0	0.001	0.014	0	0	0	15.04	0.6	0.02	0.38	
TEBD02-44	58	6.89	8	0.42	0.2	26.4	0	0.04	0.21	0.02	0.06	0	100	7.8	1.8	1.1	0.07	0.02	4	0	0.005	0.016	0.002	0.003	0	15.04	0.6	0.02	0.38	
TEBD02-45	57.1	6.56	8.5	0.35	0.3	26.84	0.01	0	0.27	0.02	0.2	0.05	100	7.7	1.7	1.2	0.06	0.03	4	0	0	0.021	0.003	0.01	0.005	15.05	0.57	0.02	0.41	
TEBD02-46	56.2	6.07	9.5	0.3	0.2	27.56	0.01	0.02	0.19	0.01	0.01	0	100	7.6	1.6	1.4	0.05	0.02	4	0	0.002	0.015	0.001	5E-04	0	15.03	0.53	0.02	0.46	
TEBD02-47	59.1	7.45	7.2	0.38	0.2	25.76	0	0.03	0.21	0	0.07	0.02	100	7.9	1.9	1	0.06	0.02	4	0	0.003	0.016	0	0.004	0.002	15.05	0.64	0.02	0.34	
TEBD02-48	59.5	7.74	6.6	0.37	0.3	25.15	0.01	0.01	0.17	0.04	0.02	0	99.9	8	2	1	0.06	0.03	4	0	0.001	0.013	0.004	0.001	0	15.06	0.66	0.02	0.32	
TEBD02-49	60	7.86	6.5	0.37	0.2	25.17	0	0.01	0.1	0.03	0.07	0	100	8	2	0.9	0.06	0.03	4	0	0.001	0.008	0.004	0.004	0	15.05	0.67	0.02	0.31	
TEBD02-50	62.2	8.68	5	0.47	0.2	23.9	0	0.01	0.08	0.02	0.03	0.02	101	8.2	2.2	0.7	0.08	0.02	4	0	0.001	0.006	0.002	0.002	0.003	15.04	0.74	0.03	0.24	
FHS01-1	59.8	7.91	6.4	0.22	0.2	25.03	0.02	0.02	0.16	0	0.06	0.02	99.8	8	2.1	0.9	0.04	0.02	4	0	0.002	0.012	0	0.003	0.002	15.05	0.68	0.01	0.31	
FHS01-2	58.8	7.65	7.3	0.18	0.2	25.82	0	0.01	0.21	0	0.05	0	100	7.9	2	1	0.03	0.02	4	0	0.001	0.016	0	0.003	0	15.08	0.65	0.01	0.34	
FHS01-3	59.4	7.73	6.9	0.24	0.2	24.64	0	0.03	0.21	0	0	0.03	99.4	8	2	1	0.04	0.02	4	0	0.003	0.016	0	0	0.004	15.05	0.66	0.01	0.33	
FHS01-4	60.5	8.36	5.8	0.19	0.2	24.33	0.01	0.01	0.14	0	0	0	99.6	8.1	2.2	0.8	0.03	0.02	4	0	9E-04	0.011	0	0	0	15.06	0.71	0.01	0.28	
FHS01-5	60.9	8.45	5.6	0.32	0.2	24.06	0	0	0.11	0	0	0	99.6	8.2	2.2	0.8	0.05	0.02	4	0	0	0.008	0	0	0	15.06	0.72	0.02	0.26	
FHS01-6	63.3	9.12	4.2	0.29	0.2	22.76	0	0.04	0.04	0.01	0	0	99.9	8.4	2.4	0.6	0.05	0.02	4	0	0.004	0.003	8E-04	0	0	15	0.79	0.02	0.2	
FHS01-7	59.3	7.33	6.9	0.38	0.3	25.41	0.02	0	0.2	0	0.11	0.06	100	8	1.9	1	0.06	0.03	4	0	0	0.016	0	0.006	0.006	15.02	0.64	0.02	0.34	
FHS01-8	59.7	7.68	6.6	0.4	0.2	24.99	0	0	0.24	0	0.01	0	99.8	8	2	1	0.07	0.02	4	0	0	0.019	0	3E-04	0	15.04	0.66	0.02	0.31	
FHS01-9	59.4	7.59	6.8	0.31	0.3	25.14	0.01	0.06	0.25	0.01	0.09	0.03	99.9	8	2	1	0.05	0.03	4	0	0.006	0.019	0.001	0.005	0.003	15.04	0.66	0.02	0.33	
FHS01-10	60.8	7.96	4.5	1.11	0.2	24.88	0.02	0.01	0.14	0	0	0	99.6	8.1	2.1	0.6	0.19	0.02	4	0	9E-04	0.011	0.001	0	0	15.02	0.71	0.07	0.22	
FHS01-11	63.6	9.38	3.6	0.37	0.2	22.19	0	0.03	0.01	0	0.01	0.03	99.4	8.5	2.4	0.5	0.06	0.02	4	0	0.003	8E-04	0	6E-04	0.003	15.01	0.81	0.02	0.17	
FHS01-12	59.6	7.7	6.3	0.48	0.2	24.61	0	0.03	0.24	0	0	0.01	99.1	8.1	2	0.9	0.08	0.02	4	0	0.003	0.019	0	0	0.001	15.03	0.67	0.03	0.3	

续表 1

样号	氧化物含量(%)														以 24 个氧为基的阳离子数											Ab	Or	An	
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SiO	MnO	BaO	NiO	total	Si	Na	Ca	K	Fe	Al	Mg	Ti	Sr	Mn	Ba	Ni				total
FHS01-13	58.9	7.08	5	1.47	0.4	25.82	0.05	0	0.15	0	0.02	0.02	98.9	8	1.9	0.7	0.25	0.04	4	0.01	0	0.012	0	0.001	0.003	15.02	0.65	0.09	0.26
FHS01-14	64.9	0.23	0	16.1	0.1	18.57	0.02	0	0.08	0.02	0.4	0	100	9	0.1	0	2.85	0.01	4	0	0	0.007	0.002	0.022	0	14.97	0.02	0.98	0
FHS01-15	59.5	7.7	6.8	0.29	0.3	25.24	0.01	0.01	0.19	0	0.06	0.01	100	8	2	1	0.05	0.03	4	0	0.001	0.015	0	0.003	9E-04	15.05	0.66	0.02	0.32
FHS01-16	57.7	6.81	8	0.28	0.2	26.36	0.01	0.01	0.13	0.02	0.06	0.02	99.6	7.8	1.8	1.2	0.05	0.02	4	0	0.002	0.01	0.003	0.003	0.002	15.02	0.6	0.02	0.39
FHS01-17	64.4	9.96	3.1	0.13	0	21.9	0.01	0	0.26	0	0	0	99.7	8.6	2.6	0.4	0.02	0	4	0	0	0.02	0	0	0	15.03	0.85	0.01	0.14
FHS01-18	63.9	9.77	3.4	0.14	0.1	22.34	0	0	0.11	0.02	0	0	99.7	8.5	2.5	0.5	0.02	0.01	4	0	0	0.008	0.002	0	0	15.03	0.83	0.01	0.16
FHS01-19	58.7	7.42	7.3	0.21	0.2	25.25	0.02	0.03	0.19	0.01	0.05	0.03	99.4	7.9	1.9	1.1	0.04	0.02	4	0	0.003	0.015	0.001	0.003	0.003	15.04	0.64	0.01	0.35
FHS01-20	65.9	10.8	1.8	0.09	0.1	21.04	0.01	0.01	0.08	0.03	0	0	99.8	8.7	2.8	0.2	0.01	0.01	4	0	0.001	0.006	0.003	0	0	15.04	0.91	0	0.08
FHS01-21	60.3	7.87	6.3	0.35	0.3	24.69	0	0.01	0.13	0	0.06	0	99.9	8.1	2	0.9	0.06	0.03	4	0	0.001	0.01	0	0.003	0	15.03	0.68	0.02	0.3
FHS01-22	58.1	7.2	7.6	0.2	0.4	25.86	0.12	0	0.27	0	0	0	99.8	7.8	1.9	1.1	0.04	0.04	4	0.02	0	0.021	0	0	0	15.06	0.62	0.01	0.36
FHS01-23	63.6	9.75	3.4	0.33	0.1	22.19	0.01	0.03	0.13	0.01	0	0.01	99.6	8.5	2.5	0.5	0.06	0.02	4	0	0.003	0.01	0.002	0	0.002	15.06	0.82	0.02	0.16
FHS01-24	59.6	7.7	6.4	0.29	0.2	24.89	0.02	0.07	0.29	0.02	0.01	0	99.5	8	2	0.9	0.05	0.02	4	0	0.007	0.023	0.002	4E-04	0	15.02	0.67	0.02	0.31
FHS01-25	59.9	7.81	6.6	0.29	0.2	24.96	0.01	0.03	0.23	0	0.02	0	100	8	2	0.9	0.05	0.03	4	0	0.003	0.018	0	9E-04	0	15.04	0.67	0.02	0.31
FHS01-26	62.9	9.29	4.2	0.18	0.2	22.93	0	0	0	0.01	0.08	0.01	99.7	8.4	2.4	0.6	0.03	0.02	4	0	0	0	9E-04	0.004	0.002	15.04	0.79	0.01	0.2
FHS01-27	63.6	0.93	0.4	15.6	0.1	18.13	0.02	0	0.08	0	0.23	0.02	99.1	8.9	0.3	0.1	2.79	0.01	4	0	0	0.007	0	0.013	0.002	15.08	0.08	0.9	0.02
FHS01-28	64.3	0.85	0	15.9	0.1	18.3	0.02	0.05	0.05	0.02	0.07	0	99.7	9	0.2	0	2.83	0.01	4	0	0.005	0.004	0.002	0.004	0	15.06	0.07	0.93	0
FHS01-29	64.2	1.41	0.1	15.1	0.1	18.49	0.01	0.02	0.05	0	0.14	0.03	99.7	8.9	0.4	0	2.67	0.02	4	0	0.002	0.004	0	0.008	0.003	15.07	0.12	0.87	0
FHS01-30	64.1	1.07	0	15.7	0.1	18.52	0	0.02	0	0.01	0.35	0	99.8	8.9	0.3	0	2.79	0.01	4	0	0.002	0	8E-04	0.019	0	15.09	0.09	0.91	0
FHS01-31	64.6	1.03	0.1	15.5	0.1	18.51	0	0	0.01	0	0.03	0	99.8	9	0.3	0	2.74	0.01	4	0	0	0	0	0.002	0	15.03	0.09	0.9	0

注: xE-04 代表 0.000x。样品来源:HS01—虎山岩体,石英二长闪长岩,石英二长闪长岩;JGS01—鸡冠石岩体,石英闪长岩;JKL01—金口岭岩体,花岗闪长岩;TEBD02—天鹤抱蛋岩体,石英闪长岩;FHS01—凤凰山岩体,花岗闪长岩。

主要集中在正长石和歪长石；斜长石成分有下列四个种属：①拉长石($An = 53\% \sim 68\%$)，主要见于辉石闪长岩组合岩石中；②中长石($An = 30\% \sim 47\%$)，主要见于石英闪长岩组合岩石中(如闪长岩、石英闪长岩、石英二长闪长岩)和花岗闪长岩组合岩石中；③更长石($An = 20\% \sim 29\%$)，主要见于花岗闪长岩组合岩石(如花岗闪长岩和花岗岩)中；④钠长石，主要为中长石、更长石的净边出现。

铜陵地区的侵入岩中黑云母、角闪石电子探针分析结果及各类参数的计算结果见表 2、3。铜陵地区酸性侵入岩中黑云母的成分单一，所有样品黑云母成分投影点均落在镁质黑云母区域内(图 3b)，这与毛建仁等(1990)、周珣若等(1994)研究者所得出的长江中下游地区花岗岩类黑云母为镁质黑云母的认识相一致。在角闪石分类图解上(据 Leake, 1978)铜陵地区侵入岩岩石中角闪石除一个样品落在亚铁铝直闪石内，均属于直闪石—铝直闪石系列(图 3c)。

吕志成等(2003)研究认为岩石中黑云母的镁质率 $[M = n(Mg)/n(Mg + Fe^{2+} + Mn)]$ 是区分深源系列和浅源系列花岗岩的一个判别标志。本区 2 个岩体中黑云母的镁质率为：焦冲辉石闪长岩(TLJC-06) $M = 0.72 \sim 0.78$ 、金口岭石英闪长岩(TLJKL01) $M = 0.60$ 。3 个侵入体的黑云母的镁质率均 > 0.45 ，表明岩体属于深源系列。将分析结果(表 2)投在 $FeO/(FeO + MgO) - MgO$ 图解(图 4)(周作侠, 1986)上，金口岭石英闪长岩样品成分点落在壳-幔混源区域内，而焦冲辉石闪长岩大部分样品成分点落在幔源区域内，只有四个成分点落在壳-幔混源区域内(图 4)，这与前人所得到的结论相一致(陈江峰等, 1993; Chen et al., 1998; 邢凤鸣等, 1996; 唐永成等 1998; Xie et al., 2007, 2009)。

4.2 岩石化学

4.2.1 主量元素

表 4 列出了本区侵入岩体的主量元素分析结果。从表中可以看出铜陵地区侵入岩体的 SiO_2 含量变化范围为 $47.6\% \sim 76.5\%$ 。全碱含量($Na_2O + K_2O$)除两个样品外，其余都在 $4.4\% \sim 10.95\%$ 之间，其中 K_2O 含量变化范围在 $1.3\% \sim 4.7\%$ 。区内各类岩石的全碱含量绝大多数高于中国同酸度岩石的全碱平均含量，说明本区侵入岩具有富碱的特点。

在硅碱图上(图 5a)可以看出本区侵入岩为碱性和亚碱性两大系列。其中辉石闪长岩组合岩石主

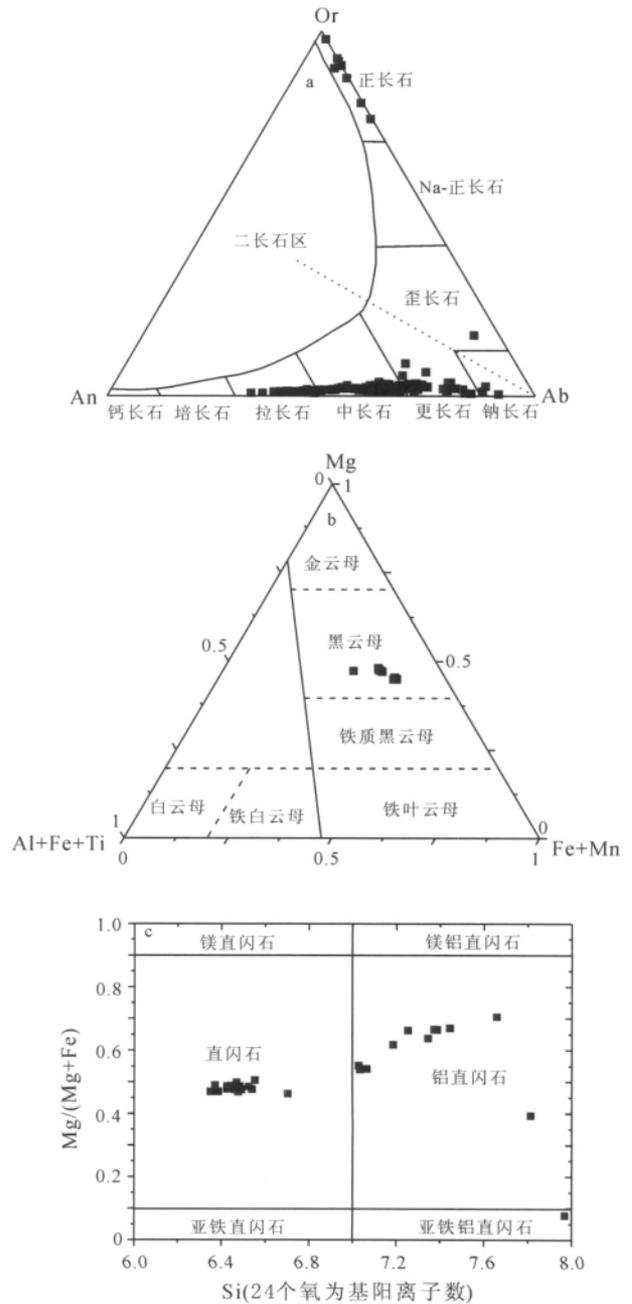


图 3 铜陵地区侵入岩中矿物分类图

Fig. 3 Classification of minerals from the intrusive rocks in the Tongling region

- (a) — 长石; (b) — 黑云母, 底图据 Foster, 1960;
- (c) — 角闪石, 底图据 Leake, 1978
- (a) — feldspars; (b) — biotites, after Foster, 1960;
- (c) — amphiboles, after Leake, 1978

要落在碱性系列，石英闪长岩组合岩石小部分样品落在碱性系列中，大部分样品落在亚碱性系列中，而花岗闪长岩组合岩石样品全都落在亚碱性系列中。辉石闪长岩组合岩石样品 $Na_2O + K_2O$ 含量随 SiO_2 含量的增加而增加；除个别样品外，石英闪长岩组合

表 2 铜陵地区侵入岩体岩石中黑云母电子探针分析结果
Table 2 Compositional analyses of biotites from intrusive rocks in the Tongling region

样号	氧化物含量(%)														以 24 个氧为基的阳离子数											Mg/ (Mg+Fe) Fe+Mn+Ti	Fe/(Mg+ Fe+Mn+Ti)	
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SrO	MnO	BaO	NiO	total	Si	Na	Ca	K	Fe	Al	Mg	Ti	Sr	Mn	Ba	Ni			total
JC06-1	40.2	1.88	12.3	2.1	9.49	14.3	14.63	2.44	0.12	0.12	0.08	0	97.7	6.2	0.6	2.04	0.41	1.2	2.6	3.4	0.28	0.01	0.02	0.01	0	16.7	0.73	0.25
JC06-2	36.6	0.75	0.02	9.33	9.45	17	19.09	2.89	0.06	0.07	0.27	0.01	95.6	5.8	0.2	0	1.89	1.3	3.2	4.5	0.35	0.01	0.01	0	0	17.3	0.78	0.20
JC06-3	36.2	0.75	0.06	9.19	9.45	16.8	19.12	2.84	0	0.06	0.28	0	94.8	5.8	0.2	0.01	1.88	1.3	3.2	4.6	0.34	0	0.01	0	0	17.3	0.78	0.20
JC06-4	36.4	0.64	0.18	8.49	9.58	16.9	18.77	2.74	0.05	0.09	0.2	0.07	94.1	5.9	0.2	0.03	1.74	1.3	3.2	4.5	0.33	0	0.01	0.01	0.01	17.2	0.78	0.21
JC06-5	36.5	0.7	0.06	8.87	9.59	16.8	19.06	2.78	0.09	0.05	0.25	0.02	94.8	5.8	0.2	0.01	1.81	1.3	3.2	4.5	0.34	0.01	0.01	0	0	17.3	0.78	0.21
JC06-6	36.6	0.63	0.02	9.42	9.42	16.9	19.3	2.83	0.07	0.02	0.15	0.05	95.4	5.8	0.2	0	1.91	1.3	3.2	4.6	0.34	0.01	0	0.01	0.01	17.3	0.78	0.20
JC06-7	36.3	0.64	0.09	9.06	9.42	16.9	19.1	2.78	0.17	0.05	0.2	0.06	94.7	5.8	0.2	0.02	1.85	1.3	3.2	4.6	0.34	0.02	0.01	0.01	0.01	17.3	0.78	0.20
JC06-8	33.9	0.39	0.42	5.68	10.6	17.8	20.15	2.76	0.06	0.15	0.14	0.08	92.1	5.5	0.1	0.07	1.18	1.4	3.4	4.9	0.34	0.01	0.02	0.01	0.01	17.1	0.77	0.22
JC06-9	36.9	0.65	0.04	9.31	9.45	17	19.34	2.81	0.05	0.07	0.35	0.05	96	5.8	0.2	0.01	1.88	1.3	3.2	4.6	0.34	0	0.01	0.02	0.01	17.3	0.78	0.20
JC06-10	36.3	0.7	0.05	9.42	9.48	17.1	19.15	2.82	0	0.08	0.38	0.03	95.6	5.8	0.2	0.01	1.91	1.3	3.2	4.6	0.34	0	0.01	0.02	0	17.3	0.78	0.20
JC06-11	36.8	0.73	0.03	9.54	9.42	16.8	19.09	2.81	0.07	0.03	0.28	0.06	95.6	5.9	0.2	0.01	1.94	1.3	3.1	4.5	0.34	0.01	0	0.02	0.01	17.3	0.78	0.20
JC06-12	36.5	0.72	0.06	9.29	9.45	17	18.79	2.77	0	0.09	0.22	0.05	94.9	5.8	0.2	0.01	1.9	1.3	3.2	4.5	0.33	0	0.01	0.01	0.01	17.3	0.78	0.21
JC06-13	36.4	0.75	0.01	9.13	9.33	17	18.94	2.84	0.02	0.09	0.32	0.06	94.9	5.8	0.2	0	1.87	1.3	3.2	4.5	0.34	0	0.01	0.02	0.01	17.3	0.78	0.20
JC06-14	36.9	0.69	0.03	9.38	9.45	17.1	19.01	2.8	0	0.09	0.3	0.06	95.9	5.8	0.2	0.01	1.9	1.3	3.2	4.5	0.33	0	0.01	0.02	0.01	17.3	0.78	0.21
JC06-15	36.5	0.72	0.02	9.59	9.52	16.8	19.16	2.85	0	0.1	0.28	0.01	95.5	5.8	0.2	0	1.95	1.3	3.2	4.6	0.34	0	0.01	0.02	0	17.4	0.78	0.21
JC06-16	36.6	0.68	0.02	9.57	9.49	16.9	19.13	2.9	0.03	0.09	0.3	0.06	95.9	5.8	0.2	0	1.94	1.3	3.2	4.5	0.35	0	0.01	0.02	0.01	17.3	0.78	0.21
JC06-17	36.4	0.71	0.04	9.44	9.39	16.8	19.11	2.86	0.05	0.06	0.31	0.07	95.2	5.8	0.2	0.01	1.93	1.3	3.2	4.6	0.34	0	0.01	0.02	0.01	17.3	0.78	0.20
JC06-18	40.4	2	12	2.05	9.78	14.6	14.03	2.37	0.03	0.11	0.02	0.06	97.4	6.2	0.6	1.99	0.4	1.3	2.6	3.2	0.28	0	0.01	0	0.01	16.7	0.72	0.26
JC06-19	40	1.92	12.1	2.05	9.89	14.4	14.56	2.45	0.01	0.11	0.06	0.04	97.5	6.2	0.6	2	0.4	1.3	2.6	3.4	0.29	0	0.01	0	0	16.7	0.72	0.26
JC06-20	40.2	1.87	12.1	2.08	9.98	14.4	14.36	2.51	0	0.07	0.12	0.03	97.7	6.2	0.6	1.99	0.41	1.3	2.6	3.3	0.29	0	0.01	0.01	0	16.7	0.72	0.26
JKL01	36.9	0.09	0.02	9.44	16.5	13.1	14.25	3.57	0	0.44	0.16	0.03	94.5	6.2	0	2.01	2.3	2.6	3.5	0.45	0	0.06	0.01	0	17.1	0.61	0.36	

注:JC06—焦冲岩体,辉石闪长岩;JKL01—金口岭岩体,花岗闪长岩。

表 3 铜陵地区侵入岩体岩石中角闪石电子探针分析结果
Table 3 Compositional analyses of amphiboles from intrusive rocks in the Tongling region

样号	氧化物含量(%)														以 24 个氧为基的阳离子数										Mg/(Mg+Fe)		
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	StO	MnO	BaO	NiO	total	Si	Na	Ca	K	Fe	Al	Mg	Ti	Sr	Mn	Ba		Ni	total
HS01-1	41	2	11	1.07	17	11.94	9.8	2	0.03	0.55	0.05	0	96.7	6.55	0.62	1.93	0.22	2.28	2.25	2.34	0.24	0.003	0.07	0.003	0	16.5	0.51
HS01-2	47.4	1.24	11	0.69	14	6.47	13.9	1.1	0.02	0.86	0.05	0	97.2	7.34	0.37	1.9	0.14	1.82	1.18	3.2	0.13	0.002	0.11	0.003	0	16.2	0.64
HS01-3	48.4	1.24	11	0.57	13	5.71	14.9	1	0	0.75	0.1	0.01	97.2	7.45	0.37	1.89	0.11	1.68	1.04	3.41	0.11	0	0.1	0.006	0.001	16.2	0.67
HS01-4	45.9	1.34	11	0.76	14	8.38	12.9	1	0.03	0.58	0	0	96.1	7.19	0.41	1.85	0.15	1.86	1.55	3.01	0.11	0.003	0.08	0	0	16.2	0.62
HS01-5	45.7	2.87	8.8	0.92	15	12.9	9.65	0.9	0	0.45	0	0	96.8	7.06	0.86	1.46	0.18	1.88	2.35	2.22	0.1	0	0.06	0	0	16.2	0.54
HS01-6	45.6	2.79	8.8	0.93	15	13.06	9.69	1	0	0.47	0	0.03	97.1	7.03	0.83	1.45	0.18	1.9	2.37	2.23	0.11	0	0.06	0	0.004	16.2	0.54
HS01-7	37.5	1.61	9.7	1.08	16	11.56	8.38	2.6	0.02	0.42	0	0	89.2	6.49	0.54	1.79	0.24	2.38	2.36	2.17	0.34	0.002	0.06	0	0	16.4	0.48
HS01-8	45.1	3.29	8	0.82	14	13.44	9.4	1.4	0	0.32	0.05	0.03	95.4	7.03	1	1.33	0.16	1.78	2.47	2.18	0.16	0	0.04	0.003	0.004	16.2	0.55
HS01-9	59.5	7.59	6.7	0.46	0.4	25.34	0.02	0	0.29	0.02	0.1	0	100	7.97	1.97	0.97	0.08	0.04	4	0	0	0.022	0	0.005	0	15.1	0.08
HS01-10	43	3.19	9.8	1.01	16	14.27	7.8	1.9	0.1	0.45	0.02	0	97.7	6.7	0.97	1.64	0.2	2.1	2.62	1.81	0.22	0.009	0.06	0.001	0	16.3	0.46
HS01-11	39.6	2.12	11	1.17	18	13.25	9.12	1.9	0	0.43	0	0.01	97.3	6.35	0.66	1.95	0.24	2.46	2.5	2.18	0.23	0	0.06	0	0.001	16.6	0.47
HS01-12	40.1	2	11	1.17	18	12.77	9.26	1.8	0.12	0.47	0.05	0	96.3	6.47	0.63	1.91	0.24	2.37	2.43	2.23	0.21	0.011	0.06	0.003	0	16.5	0.48
HS01-13	40.2	2.11	11	1.17	18	12.95	9.33	1.7	0.02	0.43	0	0.03	97.3	6.43	0.65	1.92	0.24	2.43	2.44	2.23	0.2	0.002	0.06	0	0.003	16.6	0.48
HS01-14	40.4	2	11	1.17	18	12.65	9.28	1.7	0.11	0.42	0.07	0.07	97.1	6.46	0.62	1.91	0.24	2.44	2.39	2.22	0.21	0.01	0.06	0.005	0.01	16.6	0.48
HS01-15	40.5	2.03	11	1.29	18	12.78	9.42	1.6	0	0.45	0	0.01	97.2	6.47	0.63	1.89	0.26	2.42	2.41	2.25	0.19	0	0.06	0	0.001	16.6	0.48
HS01-16	40.5	1.95	11	1.24	18	12.58	9.58	1.5	0.06	0.36	0.08	0	97.1	6.48	0.6	1.9	0.25	2.42	2.38	2.29	0.19	0.006	0.05	0.005	0	16.6	0.49
HS01-17	40.4	2.05	11	1.22	18	12.7	9.7	1.7	0.07	0.39	0	0	97.5	6.44	0.63	1.91	0.25	2.42	2.39	2.3	0.2	0.007	0.05	0	0	16.6	0.49
HS01-18	40.5	2.04	11	1.23	18	12.5	9.58	1.6	0.09	0.42	0.02	0.05	97.3	6.47	0.63	1.92	0.25	2.41	2.36	2.28	0.2	0.008	0.06	0.001	0.006	16.6	0.49
HS01-19	40.6	2.03	11	1.21	18	12.5	9.93	1.8	0.01	0.42	0	0.01	97.3	6.47	0.63	1.89	0.25	2.37	2.35	2.36	0.21	0.001	0.06	0	0.001	16.6	0.50
HS01-20	40.6	1.98	11	1.05	18	12.72	9.48	1.8	0.08	0.47	0.08	0.02	97.2	6.48	0.61	1.85	0.21	2.42	2.39	2.26	0.22	0.007	0.06	0.005	0.003	16.5	0.48
HS01-21	39.7	2.09	12	1.12	18	12.39	9.4	1.8	0	0.47	0	0.01	96.2	6.43	0.65	2	0.23	2.39	2.36	2.27	0.22	0	0.06	0	0.002	16.6	0.49
HS01-22	39.5	1.91	10	1.14	19	13.35	9.98	1.4	0	0.37	0.06	0.04	96.4	6.37	0.6	1.74	0.23	2.5	2.54	2.4	0.17	0	0.05	0.004	0.005	16.6	0.49
HS01-23	39.9	1.93	11	1.3	18	12.77	8.91	1.5	0	0.41	0.04	0	95.8	6.48	0.61	1.93	0.27	2.44	2.44	2.16	0.18	0	0.06	0.003	0	16.6	0.47
HS01-24	41.4	2	11	1.22	18	12.94	9.37	1.4	0	0.45	0.09	0	98.1	6.54	0.61	1.84	0.25	2.43	2.41	2.21	0.17	0	0.06	0.005	0	16.5	0.48
HS01-25	41.2	2	11	1.25	18	12.66	9.62	1.5	0	0.39	0	0.01	97.9	6.53	0.61	1.88	0.25	2.41	2.36	2.27	0.18	0	0.05	0	0.002	16.5	0.49
HS01-26	40.6	1.98	11	1.14	18	13.14	9.33	1.7	0	0.44	0	0	97.5	6.45	0.61	1.89	0.23	2.4	2.46	2.21	0.21	0	0.06	0	0	16.5	0.48
HS01-27	40.2	2.07	11	1.13	18	13.67	9.15	1.6	0	0.52	0.03	0	97.9	6.39	0.64	1.89	0.23	2.44	2.56	2.17	0.19	0	0.07	0.002	0	16.6	0.47
HS01-28	57.2	7.15	7.3	0.49	1.4	24.97	0.5	0.1	0.19	0.03	0	0	99.3	7.81	1.89	1.06	0.09	0.16	4.02	0.1	0.01	0.015	0	0	0	15.2	0.39
FHS01-1	46.7	1.4	12	0.67	13	6.85	14.4	1.2	0	0.65	0	0.04	96.5	7.25	0.42	1.94	0.13	1.7	1.25	3.33	0.14	0	0.09	0	0.005	16.3	0.66
FHS01-2	50.5	1.05	12	0.44	12	4.57	15.7	0.8	0	0.65	0	0.07	97.4	7.66	0.31	1.93	0.08	1.49	0.82	3.56	0.09	0	0.08	0	0.008	16	0.71
FHS01-3	48.1	1.24	12	0.62	13	5.96	14.8	1.3	0	0.7	0	0.03	97.7	7.37	0.37	1.92	0.12	1.7	1.08	3.39	0.15	0	0.09	0	0.004	16.2	0.67
FHS01-4	48.2	1.32	12	0.61	13	5.86	14.9	1.2	0.01	0.59	0.04	0	97.7	7.39	0.39	1.91	0.12	1.72	1.06	3.4	0.14	0.001	0.08	0.002	0	16.2	0.66

注: HS01—虎山岩体, 石英二长闪长岩; FHS01—凤凰山岩体, 花岗闪长岩。

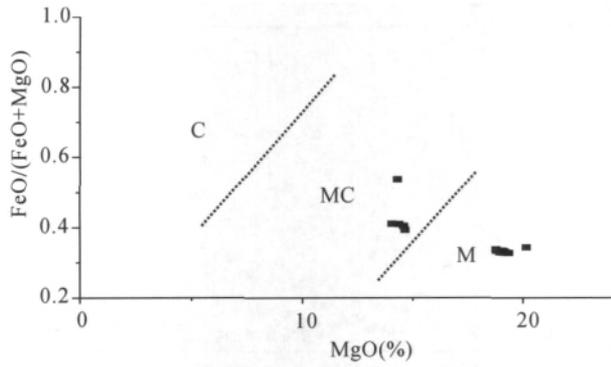


图 4 铜陵地区侵入岩中黑云母的 FeO/(FeO+MgO)-MgO 图(底图据周作侠, 1986)

Fig. 4 FeO/(FeO+MgO)-MgO diagram of biotites from the intrusive rocks in the Tongling region (after Zhou, 1986)

C—壳源; MC—壳幔混源; M—幔源
C—Crust source; MC—mixing of crust and mantle;
M—mantle source

和花岗闪长岩组合岩石样品 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量随 SiO_2 含量的增加却没有增加的趋势, 总体上呈一个平缓的负相关趋势(图 5a)。这种特征反映出辉石闪长岩组合岩石和中酸性岩石(石英闪长岩组合和花岗闪长岩组合)之间的演化关系有差异。

从 AFM 图上(图 5b)可以看出, 铜陵地区侵入岩样品均落在 AF 一侧, 远离 FM 一侧。除一个样品(辉石闪长岩组合岩石)落在拉斑系列中, 其余样品均落在钙碱性系列范围之内。辉石闪长岩组合岩石样品比石英闪长岩组合和花岗闪长岩组合岩石具富铁富镁的趋势, 总体上本区侵入岩向着富碱的趋势演化。

在硅钾图上(图 5c), 本区的侵入岩样品除少数样品落在中钾钙碱性系列外, 主要落在高钾钙碱性系列和橄榄玄粗岩系列。辉石闪长岩组合样品普遍富钾, 大部分落于橄榄玄粗岩系列范围, 其余的样品也落于高钾钙碱性系列范围。Meen(1990)的实验岩石学研究表明, 玄武质岩浆在高压下($>1 \text{ GPa}$)结晶时, 晶出的辉石量多, 橄榄石相当少, 最终导致熔体中钾的高度富集, 而 SiO_2 并没有明显增加。石英闪长岩组合岩石除一个样品具有相当高的氧化钾含量($>8\%$), 其余样品相对集中, 而花岗闪长岩岩石样品氧化钾含量变化大, 造成这种现象可能与本区岩石蚀变作用(钾化)有关。

在 Harker 图解中(图 6)三类侵入岩组合总体反映出几个明显一致的特征:(1) 除少量样品外, 大多样品具有高 Al_2O_3 ($>15.0\%$) 和富 Na ($\text{Na}_2\text{O}/$

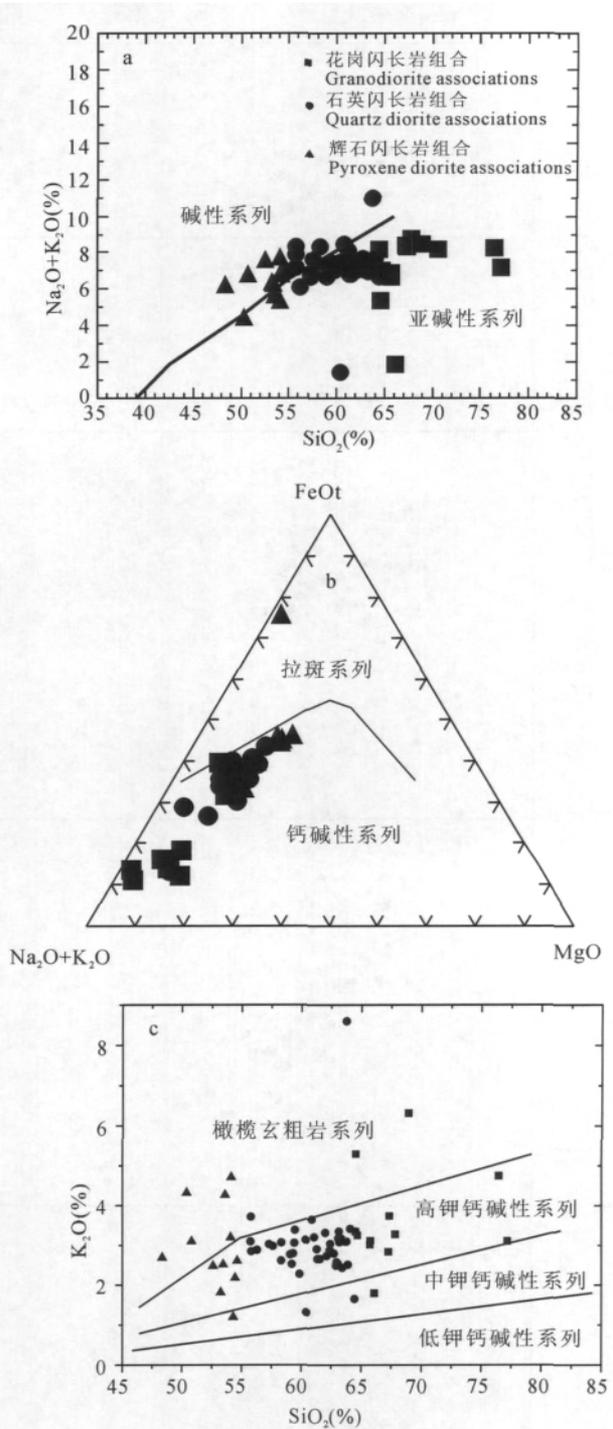


图 5 铜陵地区侵入岩岩石系列判别图解

Fig. 5 Rock series diagrams of the intrusive rocks in Tongling region

(a)— $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 图解; (b)— $\text{FeOt} - \text{MgO} - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 图解; (c)— $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解
(a)— $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ diagram; (b)— $\text{FeOt} - \text{MgO} - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ diagram; (c)— $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ diagram

$\text{K}_2\text{O} > 1.0$) 特征(图 6 a, b); (2) SiO_2 含量和 FeOt 、 TiO_2 、 CaO 、 MgO 、 P_2O_5 含量具有明显的负相关关系

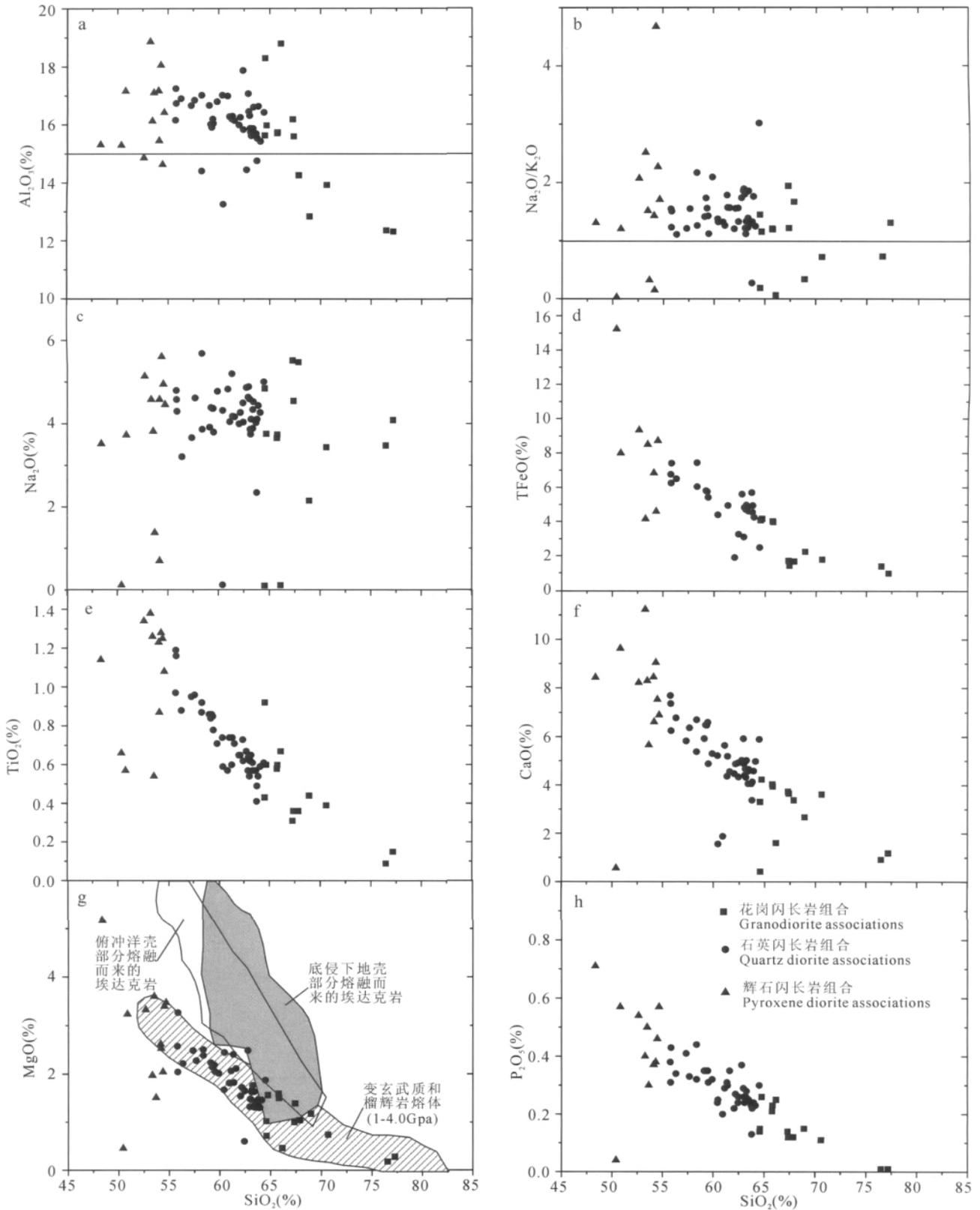


图 6 铜陵地区侵入岩哈克图解

Fig. 6 Harker variation diagrams for the intrusive rocks from Tongling area

(图 6d, e, f, g, h); (3) SiO₂ 含量和 Na₂O、K₂O 含量整体无明显线性关系(图 6c, 5c)。在 K₂O、Na₂O

氧化物对 SiO₂ 含量的图解中(图 5c, 6c),反映出三种趋势:在 SiO₂ 含量小于 55%,它们与 SiO₂ 含量呈正相关;在 SiO₂ 含量变化为 55%~65%,在 K₂O-SiO₂ 图解中呈正相关,在 Na₂O-SiO₂ 图解中为负相关;在 SiO₂ 含量大于 65%,K₂O-SiO₂ 图解和 Na₂O-SiO₂ 图解均反映负相关。这些特征可能反映出本区岩浆来源和演化的复杂性。

4.2.2 稀土元素特征

铜陵地区侵入岩的稀土元素分析结果见表 4。本区含矿侵入岩的稀土总量变化于 27.2×10⁻⁶~386.72×10⁻⁶ 之间,平均值为 162.12×10⁻⁶,其中辉石闪长岩组合、石英闪长岩组合和花岗闪长岩组合岩石的稀土总量平均值分别为 218.08×10⁻⁶、157.13×10⁻⁶ 和 126.19×10⁻⁶;LREE/HREE 比值变化于 4.00~27.53,平均为 12.22。本区侵入岩

石的轻重稀土分异明显,(La/Yb)_N 在 2.63~49.22 之间,平均值为 16.97,(Ce/Yb)_N 值普遍大于 8。除两个辉石闪长岩组合岩石样品外,其余各侵入岩体稀土总量皆低于世界花岗岩质岩石的稀土平均含量(290×10⁻⁶, Taylor et al., 1986)。与上、下地壳(Taylor et al., 1986)相比,本区岩石 HREE 和 Y 明显亏损,(La/Yb)_N 比值偏高,从而排除了铜陵地区侵入岩体源于下地壳部分熔融的可能性,亦非完全上地壳源的产物。

球粒陨石标准化稀土配分模式显示从偏基性岩到偏酸性岩(即辉石闪长岩到花岗闪长岩),本区侵入岩的稀土配分模式一致,均为向右倾斜的轻稀土富集型,反映了同源岩浆的特点(图 7a, b, c),有别于那些下地壳岩石的配分模式(Rudnick et al., 2003)。辉石闪长岩和石英闪长岩组合岩石中各有

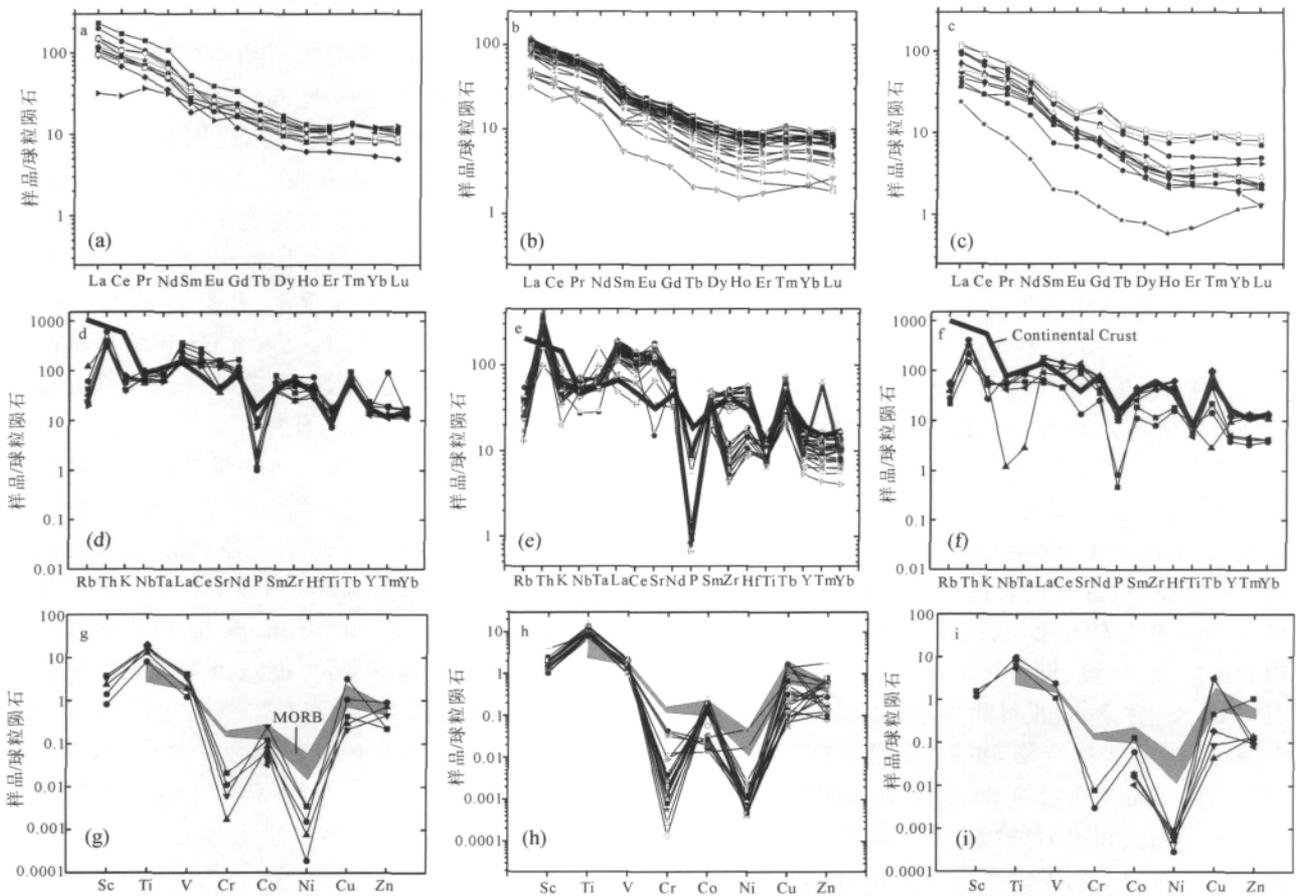


图 7 铜陵地区侵入岩稀土元素模式图(a, b, c)和微量元素蜘蛛图(d, e, f, g, h, i)

Fig.7 The rare earth elements patterns (a, b, c) and the trace element spider diagrams (d, e, f, g, h, i) of the intrusive rocks in Tongling area

(a), (d), (g)—辉石闪长岩组合样品; (b), (e), (i)—石英闪长岩组合样品; (c), (f), (h)—花岗闪长岩组合样品
 (a), (d), (g)—Samples of pyroxene diorite association; (b), (e), (i)—samples of quartz diorite association; (c), (f), (h)—samples of granodiorite association

一个样品具有明显的正 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=1.53$ 和 $\delta\text{Eu}=1.62$), 指示可能发生过斜长石的堆晶作用, 但这两类其它样品的 δEu 值分别在 $0.73\sim 0.99$ 和 $0.77\sim 1.24$ 范围内, 无明显的 Eu 异常; 而花岗闪长岩组合岩石的 δEu 值在 $0.71\sim 1.17$, 亦无明显的 Eu 异常; 这些特征反映这些岩石基本上未发生斜长石的分离结晶作用。总体上, 从偏基性岩到偏酸性岩稀土总量逐渐减小, 与正常岩浆演化相悖, 暗示了本区可能存在至少两种岩浆混合作用的特征。

4.2.3 微量元素特征

铜陵地区侵入岩的微量元素分析结果见表 4。从表中可以看出三类侵入岩体具有较高浓度的大离子亲石元素 (LILE: Rb, Ba, Sr, Th), 具有相对低含量的高场强元素 (HFSE: Zr, Nb, Hf, Y), 过渡金属含量变化规律较大, 但都明显地富集铜元素。辉石闪长岩组合岩石的 Sr 含量为 $264\times 10^{-6}\sim 1183\times 10^{-6}$, 平均为 854×10^{-6} ; 石英闪长岩组合岩石的 Sr 含量为 $111\times 10^{-6}\sim 1307\times 10^{-6}$, 平均为 858×10^{-6} ; 花岗闪长岩组合岩石的 Sr 含量为 $98\times 10^{-6}\sim 1010\times 10^{-6}$, 平均为 707×10^{-6} 。高 Sr 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)。本区辉石闪长岩和石英闪长岩组合侵入岩高 Sr, 暗示其原始岩浆可能以幔源碱性玄武岩浆为主。

本区侵入岩不仅富集 Sr, 而且也富集 Ba, 但 Rb 偏低。Ba 的主要载体矿物为钾长石和黑云母, Sr 的主要载体矿物为富钙斜长石、磷灰石等, 可见, 本区侵入岩 Ba、Sr 的富集与岩石富钙富碱的特征是一致的。Rb 的亏损表现为 K/Rb 比值高, 而 Rb/Sr 比值低, 岩浆作用中 Rb 在含钾矿物中可以形成广泛的类质同象, 但由于元素在一定物理化学条件下迁移与富集的性质不同, 在结晶分异过程中, 含 K 矿物的种类及相当数量皆可影响 Rb 的分配, 本区岩石的 Ba、Sr 含量高, 很可能属原始岩浆的固有性质。壳型花岗岩类 Ba、Sr 含量低, Rb 含量高, 而幔源型或壳幔同熔型花岗岩的 Ba、Sr 含量高, 且贫 Rb。

本区三类侵入岩的配分曲线具有相似的型式, 总体表现为一平缓型。在大离子亲石元素图谱上, 后部分 (图 7 d, e, f) 与陆壳的配分曲线相似。其中辉石闪长岩组合岩石具有 Th、La、Ce、Sm、Zr、Hf 和 Tb 等元素正异常, 亏损 K、Nb、Ta、P 及 Ti 元素, 而 Sr 具有较大的变化 (图 7 d); 石英闪长岩组合岩石多数样品具有 Th、La、Sr、Sm 和 Tb 等元素正异常, 亏损 K、Nb、Ta、P 及 Ti 元素, Zr、Hf 两元素表现出

两种变化趋势, 一种表现为 Zr 亏损 Hf 富集, 一种表现为 Zr 和 Hf 均富集, 其分布曲线在局部具有较大差异且出现个别穿切现象, 可能是其复杂成因的反映 (图 7 e); 花岗闪长岩组合岩石样品具有 Th、La 和 Tb 等元素正异常, 亏损 K、P、Nb、Ta 及 Ti 元素, Zr、Hf 两元素也表现出两种变化趋势, Sr 元素总体表现为富集 (图 7 f)。P 和 Ti 元素负异常是由于磷灰石和钛铁矿的进一步分离结晶, 使 P 和 Ti 明显降低造成的。可见, 这三类岩石组合既有某种亲缘关系, 其物源又有一定差别。三类岩石组合的过渡金属元素配分曲线均具有 Ti、Co 和 Cu 正异常, 亏损 Cr 和 Ni 的配分形式 (图 7 g, h, i), 与 MORB 模式相似。另外, 相对于地幔岩, Sc、Ti、V 具正异常, Cr 和 Ni 为负异常; 与大洋拉斑玄武岩相比, 过渡元素偏低, 而与高铝玄武岩相比, Ni、V、Cr 偏高。这些特征表明铜陵地区侵入岩的原始岩浆来源于上地幔, 且经受了地壳混染。

本区侵入岩样品除微量元素 Nb 与 SiO_2 含量具有较明显的相关关系外 (图 8 a), 其它三个元素均无明显的相关关系 (图 8 b, c, d), 说明在岩浆分异中这些元素的载体矿物没有发生早期结晶相分离, 或者即使为早期结晶相, 其数量也十分有限。虽然在单个图解中略有差异, 但总体本区三类岩浆岩组合均具有较明显的两种性质: 一种具有低 Zr、Sr、Co 含量, 另一种具有高 Zr、Sr、Co 含量, 反映出本区岩浆来源和演化的复杂性, 意味着本区侵入体可能存在至少两种以上岩浆混合作用。

亲铜元素 Cu、Zn 与 SiO_2 含量具有较相似的变化趋势, 即 Cu、Zn 含量先随 SiO_2 含量增加而增加, 大约 SiO_2 含量为 62%~63% 时达到最大, 然后又随着 SiO_2 含量的降低而降低 (图 8 e, f)。考虑到亲铜元素挥发性不同, 如 Cu、S、Zn、Fe, 所以本区亲铜元素这种独特的变化特征, 可能是由于硫化物结晶作用 (Muller et al., 2001) 和/或分离作用。亲铜元素这种变化特征在石英闪长岩组合中表现的最突出, 也佐证了本区主要 Cu、Au 矿床与石英闪长岩组合岩石密切相关。

5 讨论

5.1 大地构造背景

对于铜陵及长江中下游地区中酸性火成岩的形成环境长期存在争论, 一种观点认为与古洋壳俯冲作用有关 (Faure et al., 1996; Zhou et al., 2000; 邓晋福等, 2000; 汪洋等, 2004; Zhou et al.,

表 4 铜陵地区侵入岩主量和微量元素成分
Table 4 Major and trace elements compositions of the intrusive rocks in the Tongling region

样品	JC06	JC01	MJ1	MS1	JGS2	JGS4	JGS6	JGS7	t-10	XDGS01	BMS1	JGS01	BC1	STJ1	FHS5	XQT1	TEBD02	HS01	WLS1	FHS01	TGS16	JKL01	HC1
	主量氧化物 (%)																						
SiO ₂	48.35	53.62	54.13	54.63	50.4	53.25	54.09	54.3	50.81	57.29	57.61	59.07	59.46	59.83	60.41	60.87	61.07	61.54	62.11	62.41	63.02	63.41	64.08
TiO ₂	1.14	0.54	0.87	1.09	0.66	1.38	1.23	1.28	1.21	0.93	0.98	0.89	0.77	0.75	0.59	0.61	0.71	0.74	0.62	0.65	0.56	0.54	0.61
Al ₂ O ₃	15.31	17.11	15.45	16.41	15.29	18.86	17.17	18.05	17.16	16.66	16.85	16.67	16.05	16.81	13.26	16.99	16.28	16.14	16.26	15.83	16.32	16.61	15.43
Fe ₂ O ₃	7.72	4.30	6.07	5.22	14.91	2.87	2.87	2.22	2.72	6.17	6.41	6.45	5.40	5.27	13.76	6.46	5.15	5.76	5.22	4.91	4.57	4.74	3.25
FeO	0.14	0.10	0.22	0.10	0.015	0.13	0.17	0.087	0.15	0.09	0.14	0.13	0.07	0.09	0.05	0.07	0.11	0.10	0.08	0.08	0.09	0.07	0.06
MnO	5.19	1.54	2.55	3.48	0.48	2	2.64	2.07	3.26	2.53	2.33	2.28	2.06	2.04	2.47	1.87	2.07	2.17	1.76	1.70	1.52	1.45	1.48
MgO	8.44	5.66	6.61	6.89	0.56	11.24	8.45	9.05	9.63	5.84	6.35	5.91	4.94	5.34	1.57	1.86	5.67	4.55	4.87	4.32	4.41	4.67	4.52
CaO	3.52	1.38	0.70	4.46	0.11	4.58	4.58	5.61	3.73	3.68	4.64	3.94	3.80	4.79	0.12	4.85	4.06	4.16	4.28	4.05	4.63	4.53	4.26
Na ₂ O	2.69	4.27	4.71	2.62	4.32	1.82	3.2	1.2	3.10	3.05	2.97	2.80	3.35	2.30	1.32	3.66	3.23	2.66	2.74	3.05	2.56	2.43	3.41
K ₂ O	0.71	0.30	0.37	0.58	0.04	0.4	0.37	0.38	0.57	0.38	0.35	0.32	0.35	0.31	0.25	0.21	0.26	0.34	0.26	0.27	0.25	0.23	0.24
H ₂ O ⁺					3.32	1.25	0.55	1.4	0.31														
CO ₂									0.76														
LOI					10.92	1.3	0.45	2.45															
Total	93.21	88.82	91.68	95.48	99.73	99.59	99.95	99.58	98.96	96.62	98.63	98.46	96.25	97.53	93.80	97.45	98.61	98.16	98.20	97.27	97.93	98.68	97.34
	微量元素 (×10 ⁻⁶)																						
Be	2.31	3.74	1.88	2.12					1.99	1.43	1.44	1.44	2.18	2.12	1.8	1.57	1.97	2.07	1.77	2.33	2.45	1.95	1.73
Sc	22.1	4.77	13.6	18.9					14.6	11.9	12.1	12.1	12.5	12.4	8.91	8.22	11.3	10.4	12.3	9.17	7.7	7.6	23.3
V	203	59.7	94.4	163					108	99.2	107	107	101	74.6	89	67.5	69.7	73.3	76.2	66.2	46.7	48.7	86.7
Cr	47.6	28.7	3.9	13.9					182.5	0.316	0.619	0.619	4.38	6.71	7.83	21	6.53	1.32	3.01	9.15	3.76	2.81	3.22
Co	55.7	28.7	40.8	117					25.1	84.7	83.6	82.4	82.4	78.4	56.1	65.4	93.9	91.3	90.5	77.7	88.2	76.3	135
Ni	33.6	1.82	7.34	34.7					30.2	4.43	3.87	3.87	5.23	7.03	18.9	25.3	9.19	4.2	4.46	11.7	4.87	4.3	7.16
Cu	48.7	121	33.4	24					14.7	28.6	25.6	25.6	164	126	6.68	23.2	20	10.4	11.6	199	11.6	9.16	164
Zn	76.1	313	247.7	155.3					364.7	79.1	103.9	103.9	185	227.4	276.9	241.6	181.8	98.31	281.7	35.84	43.51	133.1	634.2
Rb	99	142	280	49.7					76.2	185.3	57.5	77.8	94.5	30.7	58.5	74.9	87.8	73.3	68.9	128	52.7	40.2	51.2
Sr	1055	339	264	1183					89.3	878	880	813	801	959	247	483	884	876	907	111	958	1092	708
Y	37.4	29.7	21.8	30.8					25.3	24.7	25.9	25.9	24	19.7	10.2	8.52	25.2	26.4	19.3	22.4	13.7	14.4	23.6
Zr	138	289	95.9	100					25.9	113	24.2	24.2	29.5	18	38.6	24.4	34.3	42.8	47.7	20.8	28.5	16	170
Nb	18	24.2	13.6	17.5					15.7	17	13.1	13.1	14.9	17.7	12.4	12.4	16.1	16.7	14.9	15.9	14.2	13.8	15.5
Mo	4.44	3.02	0.47	2.12					1.6	2.45	0.89	1.61	0.66	2.58	1.05	3.27	0.56	3.22	0.91	1.17	4.61	1.27	2.09
Ag	0.02	0.44		0.045					0.4	0.011							0.01		0.007	0.6			0.06
Ba	793	827.5	935.3	662.9					743.2	830.3	640.1	800.3	800.3	741.5	1059	1116	990.6	923.1	944.3	93.15	907.2	952.4	1277.3
Hf	4.46	7.84	3.83	3.01					1.56	3.74	1.35	1.54	1.54	0.947	1.7	1.15	1.72	1.97	1.99	1.15	1.49	1.07	5.53
Ta	1.1	1.2	0.876	1.24					0.963	0.943	0.782	1.03	1.03	0.981	0.736	1.36	1.02	1.01	1.02	0.975	0.705	0.781	2.33

续表 4

样品	JC06	JC01	MJ1	MS1	JGS2	JGSH4	JGSH6	JGSH7	t _H -10	XDGS01	BMS1	JGS01	BC1	STJ1	FHS5	XQTI	TEBD02	HS01	WLS1	FHS01	TGS16	JKL01	HC1
Au	0.859	5.81	0.202	0.136					24.6	0.476			5.15		0.536	0.092	1.06		0.328	2.49	0.925	0.135	0.852
Pb	11.2	240	4.86	36.37					27.2	8.81	12.13	8.84	8.99	6.56	10.9	2.65	19.76	9.82	28.74	4.92	6.42	11.25	11.33
Th	11.3	17.6	10.2	9.23					11.4	9.24	10.1	9.3	9.35	5.11	7.27	2.84	8.5	8.08	7.22	6.95	6.01	6.19	8.01
U	3.95	4.56	1.96	2.18					5	1.96	2.63	2.15	2.1	1.95	1.18	0.712	1.58	1.93	1.79	1.88	1.63	1.56	2.32
As	4.93	5.51	5.29	4.8						4.41	4.99	3.87	4.62	4.16	5.1	3.37	5.27	4.5	4.38	3.73	3.51	3.77	8.31
S	20459	14291	212	15010						11622	2570	123.4	10462	2382	291	90.8	687	251.6	688.7	595	171	125.8	3167
La	85	73.1	38	40.8	33.9	53	11.7	56.7	55.1	35.8	40.4	37.9	31.6	27.2	18.2	11.7	38.5	43.7	31.2	36.6	27	28.8	16.7
Ce	164	132	77	81.2	64.7	88.4	28.2	105	102.4	76.9	77.1	70.8	70.3	54.6	37.8	21.5	74.4	84.1	60.1	63.3	45.3	58	37.3
Pr	19.2	14.5	9.01	9.59	6.81	9.33	4.97	13.61	13.35	9.27	8.75	8.22	8.53	7.94	4.02	3.52	8.69	10.1	7.22	8.27	5.83	6.84	4.05
Nd	77	54.2	35.4	38.8	25.1	34	22.4	51.3	46.09	37.9	35	32.9	33.8	32.8	15.4	15.4	34.6	40.1	28.5	32.3	24.7	27.7	16.4
Sm	12.2	8.38	5.8	6.56	4.3	5.84	5.54	8.95	8.68	6.48	6	5.62	5.77	5.71	2.68	2.89	6.04	6.6	4.96	5.35	4.05	4.69	2.85
Eu	3.38	2.52	1.71	1.98	1.99	1.73	1.28	1.9	2.26	2.06	1.87	1.78	1.66	1.67	0.947	1.45	1.78	1.95	1.62	1.64	1.43	1.56	1.1
Gd	10.17	7.19	5	5.66	3.63	5.02	5.02	7.08	5.93	5.71	5.1	4.99	4.97	4.73	2.24	2.59	5.18	5.71	4.21	4.57	3.34	3.79	2.58
Tb	1.32	0.995	0.686	0.831	0.52	0.73	0.86	1.07	0.98	0.835	0.731	0.712	0.725	0.67	0.29	0.334	0.736	0.807	0.576	0.656	0.427	0.516	0.355
Dy	6.43	5.09	3.61	4.62	2.62	3.81	5.36	5.89	4.94	4.36	3.99	3.95	3.92	3.52	1.59	1.71	4	4.38	3.09	3.47	2.27	2.59	2.02
Ho	1.12	0.932	0.671	0.897	0.52	0.78	0.97	1.01	0.99	0.795	0.741	0.755	0.724	0.64	0.304	0.28	0.74	0.81	0.567	0.647	0.378	0.448	0.387
Er	3.07	2.72	1.99	2.65	1.51	2.34	2.83	2.93	2.31	2.26	2.23	2.18	2.13	1.83	0.933	0.763	2.25	2.36	1.65	1.89	1.054	1.29	1.2
Tm	0.486	0.463	0.336	0.455					2.32	0.365	0.348	0.363	0.363	0.287	0.165	0.112	0.354	0.396	0.265	0.312	0.166	0.191	0.199
Yb	2.94	2.95	2.14	2.82	1.32	2.57	3	2.9	2.32	2.23	2.3	2.36	2.26	1.8	1.1	0.694	2.3	2.44	1.71	2.04	1.07	1.3	1.43
Lu	0.408	0.441	0.298	0.392	0.19	0.36	0.48	0.44	0.35	0.298	0.319	0.331	0.332	0.238	0.16	0.08	0.323	0.337	0.242	0.274	0.138	0.176	0.198
Σ	386.7	305.5	181.7	197.3	147.1	207.9	92.61	258.8	248	185.3	184.88	172.9	167.1	143.6	85.83	63.023	179.9	203.8	145.9	161.32	117.15	137.891	86.769
LREE/	13.91	13.7	11.33	9.764	13.27	12.32	4.001	11.14	11.31	9.993	10.732	10.05	9.833	9.473	11.66	8.6028	10.33	10.82	10.85	10.64	12.248	12.38618	9.36791
HREE	19.54	16.74	12	9.777					16.05	10.85	11.87	10.85	9.449	10.21	11.18	11.392	11.31	12.1	12.33	12.124	17.052	14.97045	7.89162
(La/Yb) _N	0.93	0.99	0.97	0.99	1.54	0.98	0.74	0.73	0.96	1.03	1.03	1.03	0.95	0.98	1.18	1.62	0.97	0.97	1.08	1.01	1.19	1.13	1.24
δEu	28.21	11.41	12.11	38.41					46.55	34.70	35.63	31.39	33.38	48.68	24.22	56.69	35.08	33.18	46.99	4.96	69.93	75.83	30.00
Sr/Y	4.56	5.31	6.94	8.03					8.01	8.01	6.46	6.09	7.10	9.08	10.51	17.42	10.19	8.65	8.32	8.46	8.71	8.85	6.68
Nb/U	16.36	20.17	15.53	14.11					16.30	18.03	18.03	16.75	14.47	18.04	16.85	9.12	15.78	16.53	14.61	16.31	20.14	17.67	6.65
Nb/Ta	0.13	0.24	0.27	0.23					0.21	0.26	0.25	0.25	0.30	0.19	0.40	0.24	0.22	0.18	0.23	0.19	0.22	0.21	0.48
Th/La	0.01	0.02	0.02	0.03					0.00	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.12	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.14
Ta/La	3.84	5.97	4.77	3.27					4.91	4.14	4.39	3.94	4.14	2.84	6.61	4.09	3.70	3.31	4.22	3.41	5.62	4.76	5.60
Th/Yb	13.70	6.25	7.46	30.49					24.66	23.17	25.14	24.71	23.70	29.24	16.04	31.36	25.55	21.85	31.82	3.44	38.79	39.42	43.17
Sr/Nd	0.48	0.81	0.62	0.57					0.00	0.62	0.69	0.51	0.62	0.90	1.22	1.46	0.64	0.63	0.77	0.71	1.04	0.96	0.66
Nb/Y	0.13	0.08	0.14	0.18					0.61	0.61	0.15	0.54	0.51	0.98	0.32	0.51	0.47	0.39	0.31	0.76	0.50	0.86	0.09
Nb/Zr	5.75	2.86	9.75	6.63					28.69	28.69	7.35	26.45	27.13	41.19	27.44	45.74	28.88	21.57	19.80	4.48	31.83	59.53	7.51

续表 4

样品	JC06	JC01	MJ1	MS1	JGS2	JGSH4	JGSH6	JGSH7	tl-10	XDGS01	BMS1	JGS01	BC1	STJ1	FHS5	XQT1	TEBD02	HS01	WLS1	FHS01	TGS16	JKL01	HCl
微量元素 ($\times 10^{-6}$)																							
Ba/Nb	44.06	34.19	68.77	37.88					47.34	48.84	48.86	53.71	41.89	85.40	90.00	61.53	55.28	63.38	5.86	63.89	69.01	82.41	
Ce/Pb	14.64	0.55	15.84	2.23				3.76	8.73	6.36	8.01	7.82	8.32	3.47	8.11	3.77	8.56	2.09	12.87	7.06	5.16	3.29	
La/Nb	4.72	3.02	2.79	2.33					2.28	2.38	2.89	2.12	1.54	1.47	0.94	2.39	2.62	2.09	2.30	1.90	2.09	1.08	
Ce/Yb	55.78	44.75	35.98	28.79	49.02	9.40	36.21		34.48	33.52	30.00	31.11	30.33	34.36	30.98	32.35	34.47	35.15	31.03	42.34	44.62	26.08	
La/Yb	28.91	24.78	17.76	14.47	25.68	3.90	19.55		16.05	17.57	16.06	13.98	15.11	16.55	16.86	16.74	17.91	18.25	17.94	25.23	22.15	11.68	
Th/La	0.13	0.24	0.27	0.23	0.00	0.00	0.00	0.21	0.26	0.25	0.25	0.30	0.19	0.40	0.24	0.22	0.18	0.23	0.19	0.22	0.21	0.48	
Ta/La	0.01	0.02	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.12	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.14	
Mg [#]					20.87	55.87	38.26	44.42	37.00														
Zr/Ba	0.17	0.35	0.10	0.15					0.03	0.14	0.04	0.04	0.02	0.04	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.22	0.03	0.02	0.13
样品	TLM1	TLM4	JGS1	JGSH1	JGSH2	JGSH3	JGSH5	XTGS3	tl-7	tl-8	tl-9	QTY1	FHS2	TLM2	TLM3	TLM5	JGS3	XTGS1	XTGS2	XTGS4			
主量氧化物 (%)																							
SiO ₂	61.28	63.74	62	62.37	60.35	55.73	55.77	62.94	63.66	63.35	63.77	64.52	66.10	67.26	67.84	68.9	64.55	70.6	77.18	76.47			
TiO ₂	0.6	0.41	0.65	0.73	0.74	0.97	1.19	0.64	0.57	0.57	0.49	0.45	0.67	0.31	0.36	0.44	0.92	0.39	0.15	0.09			
Al ₂ O ₃	16.2	14.76	15.99	17.87	17.02	16.16	17.25	16.46	15.69	15.87	15.53	15.63	18.79	16.19	14.26	12.84	18.29	13.93	12.32	12.36			
Fe ₂ O ₃	2.21	0.49	2.32	1.2	1.97	3.82	3.44	2.25	1.82	2.12	2.23	2.88	2.12	0.47	0.31	0.95	3.85	0.36	0.65	0.32			
FeO	2.56	1.46	2.32	2.18	2.63	3.33	3.16	2.8	4.07	2.98	2.94		1.29	1.39	1.38	0.62	1.46	0.38	1.1				
MnO	0.046	0.036	0.067	0.048	0.075	0.13	0.13	0.095	0.12	0.09	0.07	0.05	0.02	0.032	0.028	0.033	0.014	0.041	0.018	0.017			
MgO	2.43	1.5	1.57	0.63	1.7	2.6	2.07	1.51	1.43	1.34	1.33	1.06	0.49	1.03	1.07	1.21	0.74	0.77	0.31	0.21			
CaO	4.37	3.38	4.48	4.93	5.23	7.69	7.36	4.89	4.06	4.06	4.14	3.33	1.61	3.74	3.38	2.68	0.43	3.62	1.19	0.92			
Na ₂ O	5.2	2.35	4	4.5	4.32	4.8	4.58	4.89	4.03	4.34	4.11	4.85	0.11	5.52	5.48	2.15	0.1	3.44	4.09	3.48			
K ₂ O	2.91	8.6	3.32	2.88	3.14	3.1	3.72	2.58	3.10	3.12	3.10	3.37	1.80	2.84	3.28	6.32	5.3	4.75	3.11	4.75			
P ₂ O ₅	0.31	0.13	0.22	0.24	0.24	0.38	0.31	0.26	0.23	0.25	0.22	0.17	0.25	0.14	0.12	0.15	0.15	0.11	0.01	0.01			
H ₂ O ⁺	0.78	0.5	1.4	1.05	1.1	2.28	0.83	0.23	0.55	1.09	0.82	0.82	0.25	0.39	0.43	1.08	3.99	0.11	0.43	0.13			
CO ₂									0.76	0.97	0.92												
LOI	1.25	2.82	2.46	1.38	2.01	0.5	0.53	0.17					0.78	1.33	2.39	4.54	0.14	0.14	0.41	0.07			
Total	99.65	99.84	99.66	100.4	99.72	99.58	99.86	99.8	100.1	100.2	99.68	96.31	91.96	99.74	99.46	99.59	99.5	99.77	99.82	99.92			
微量元素 ($\times 10^{-6}$)																							
Be									6	6.4	6.3	2.06	1.61										
Sc									66.5	70.9	64.9	9.08	6.76										
V									99.4	92.1	76.1	17.7	116										
Cr									12.5	9.1	10.8	62.6	29										
Co									11.1	10.2	10.3	6.89	2.76										
Ni									36.9	211.9	8	52.6	346										
Cu									96.6	50.6	38.9	370.3	43.5										
Zn																							

续表 4

样品	JC06	JC01	MJ1	MS1	JGS2	JGSH4	JGSH6	JGSH7	t1-10	XDGS01	BMSI	JGS01	BC1	STJ1	FHS5	XQTI	TEBD02	HS01	WLSI	FHS01	TGS16	JKL01	HC1								
									微量元素 ($\times 10^{-6}$)																						
Rb										1128		51	64.2																		
Sr	36.7	15.5	38.4	28.8	38.1	33.5	44.5	15.6	765.7	720.4		637	97.7																		
Y	72	30.5	65.6	51.7	71.9	63.7	75.2	32.4	14.7	14.99		7.56	6.11																		
Zr	8.32	3.87	7.37	5.92	7.39	9.1	7.97	2.99		45.1		7.56	6.11																		
Nb	32.3	15.3	27.4	22.6	27.3	34.7	29.5	10.2		14.4		14.4	19.3																		
Mo	5.69	2.78	4.68	3.98	4.86	6.3	5.02	1.27	2.5	2.28		2.28	305																		
Ag	1.48	0.7	1.46	1.21	1.4	1.5	1.51	0.4	0.1	0		0	0																		
Ba	4.53	2.09	3.82	3.35	4.19	5.19	4.41	1.11	871.3	759.4		721.1	700																		
Hf										1.96		1.96	1.7																		
Ta										0.836		0.836	1.19																		
Au									3.7	7																					
Pb									19.2	16.1		6.54	6.58																		
Th									10.8	10.2		4.19	11.7																		
U									4.4	3.5		1.33	2.38																		
As												6.81	3.77																		
S												8144	1462																		
La				28.8	38.1	33.5	44.5	15.6	34.92	39.86		13.5	15.4	26.1	17	19.9	36.5	25.6	35.5	8.7											
Ce				51.7	71.9	63.7	75.2	32.4	65.67	75.24		27.9	28.3	50.4	37.6	39.7	66.9	50	62.9	12											
Pr				7.37	7.39	9.1	7.97	2.99	7.45	8.58		4.03	3.13	5.6	4.52	4.88	6.8	6.21	8.17	1.18											
Nd				22.6	27.3	34.7	29.5	10.2	26.75	30.44		16.6	11.6	20.7	17.5	18.7	24.3	21.1	30	3.4											
Sm				3.98	4.86	6.3	5.02	1.27	5.1	5.76		2.9	1.73	3.56	3.02	3.18	3.54	3.52	5.14	0.47											
Eu				1.21	1.4	1.5	1.51	0.4	1.32	1.37		0.88	0.587	0.95	0.88	0.74	0.74	0.84	1.29	0.16											
Gd				3.35	4.19	5.19	4.41	1.11	3.47	3.84		2.34	1.57	2.6	2.17	2.4	2.4	2.53	3.87	0.38											
Tb				0.48	0.65	0.8	0.65	0.12	0.64	0.6		0.308	0.202	0.34	0.28	0.32	0.27	0.36	0.56	0.05											
Dy				2.3	3.21	4.52	3.34	0.73	2.73	3.43		3	1.11	1.46	1.31	1.39	1.05	1.97	2.86	0.3											
Ho				0.46	0.69	0.77	0.7	0.13	0.54	0.62		0.26	0.196	0.26	0.23	0.26	0.18	0.3	0.44	0.05											
Er				1.32	2.01	2.25	2.02	0.44	1.35	1.65		0.725	0.583	0.7	0.61	0.74	0.56	0.93	1.26	0.17											
Tm									1.34	1.68		0.108	0.085																		
Yb				1.37	2.16	2.39	2.22	0.55	1.32	1.72		0.717	0.658	0.63	0.46	0.63	0.5	1.05	1.17	0.29											
Lu				0.19	0.32	0.37	0.33	0.1	0.21	0.28		0.089	0.084	0.08	0.05	0.09	0.08	0.16	0.19	0.05											
Σ	167.9	73.68	155.4	123.7	164.2	165.1	177.4	66.04	152.8	175.1		71.9	65.24	113.4	85.63	92.93	143.8	114.6	153.4	27.2											
LREE/ HREE	13.7	13.65	13.84	12.06	11.41	9.134	11.98	19.77	12.17	11.67		10.81	13.54	17.68	15.76	14.94	27.54	14.69	13.82	20.085											
(La/Yb) ^N									17.88	15.66		12.72	15.82																		
δ Eu	0.89	0.89	1.06	1.01	0.95	0.80	0.98	1.03	0.96	0.89		1.03	1.09	0.95	1.05	0.82	0.78	0.86	0.88	1.16											
Sr/Y									52.09	66.05		84.26	15.99																		

续表 4

样品	JC06	JC01	MJ1	MS1	JGS2	JGSH4	JGSH6	JGSH7	tl-10	XDGS01	BMS1	JGS01	BC1	STJ1	FHS5	XQT1	TEBD02	HS01	WLS1	FHS01	TGS16	JKL01	HCl	
Nb/U												10.83	8.11											
Nb/Ta												17.22	16.22											
Th/La									0.31	0.30	0.29	0.31	0.76											
Ta/La									0.00	0.00	0.00	0.06	0.08											
Th/Yb									8.18	6.86	6.89	5.84	17.78											
Sr/Nd									28.62	37.04	27.22	38.37	8.42											
Nb/Y									0.00	0.00	0.00	1.90	3.16											
Nb/Zr												0.32	0.62											
Ba/Zr												15.99	22.44											
Ba/Nb									3.42	3.90	4.08	50.08	36.27											
Ce/Pb												4.27	4.30											
La/Nb												0.94	0.80											
Ce/Yb	54.14	58.65	46.52	37.74	33.29	26.65	33.87	58.91	49.75	43.74	44.40	38.91	43.01	80.00	81.74	63.02	133.80	47.62	53.76	41.38				
La/Yb	27.59	29.81	27.23	21.02	17.64	14.02	20.05	28.36	26.45	23.17	23.38	18.83	23.40	41.43	36.96	31.59	73.00	24.38	30.34	30.00				
Th/La	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.30	0.29	0.31	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Ta/La	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Mg#	48.70	50.68	40.36	22.42	39.26	43.84	39.58	35.03	26.00	31.02	31.15			44.40	43.50	46.72	54.41	34.53	44.93	16.03				
Zr/Ba												0.06	0.04											

微量元素 ($\times 10^{-6}$)

注:JGS1-3, TLM1-5, JGSH1-7, XTGS1-4 引自③, 其余的样品本文测试。JC01, 06 焦冲岩体, 辉石闪长岩; MJ1 缪家岩体, 闪长玢岩; MS01 马山岩体, 二长岩; JGS1-3, JGS01 鸡冠石岩体, 石英闪长岩; JGSH1-7 鸡冠石岩体, 石英二长闪长岩; TLM1-5 一塔里牧岩体, 花岗闪长岩; XTGS1-4 一小铜官山岩体, 花岗闪长岩; XDGS01 小冬瓜山岩体, 二长闪长岩; BMS1 白马山岩体, 二长闪长岩; BC1 一包村岩体, 石英闪长岩; STJ1 沙滩角岩体, 石英闪长岩; XQT1 新桥头岩体, 石英二长闪长岩; HS01 一虎山岩体, 石英二长闪长岩; JKL01 一金口岭岩体, 花岗闪长岩; TEBD02 天鹅抱蛋岩体, 石英闪长岩; FHS01, 2 凤凰山岩体, 花岗闪长岩; WLS1 乌栗山岩体, 石英二长闪长岩; TGS16, tl-7~9 铜官山岩体, 石英闪长岩; HCl 胡村岩体, 花岗闪长岩; QTY1 桥头杨岩体, 花岗闪长岩; tl-10 朝山岩体, 辉石闪长岩。

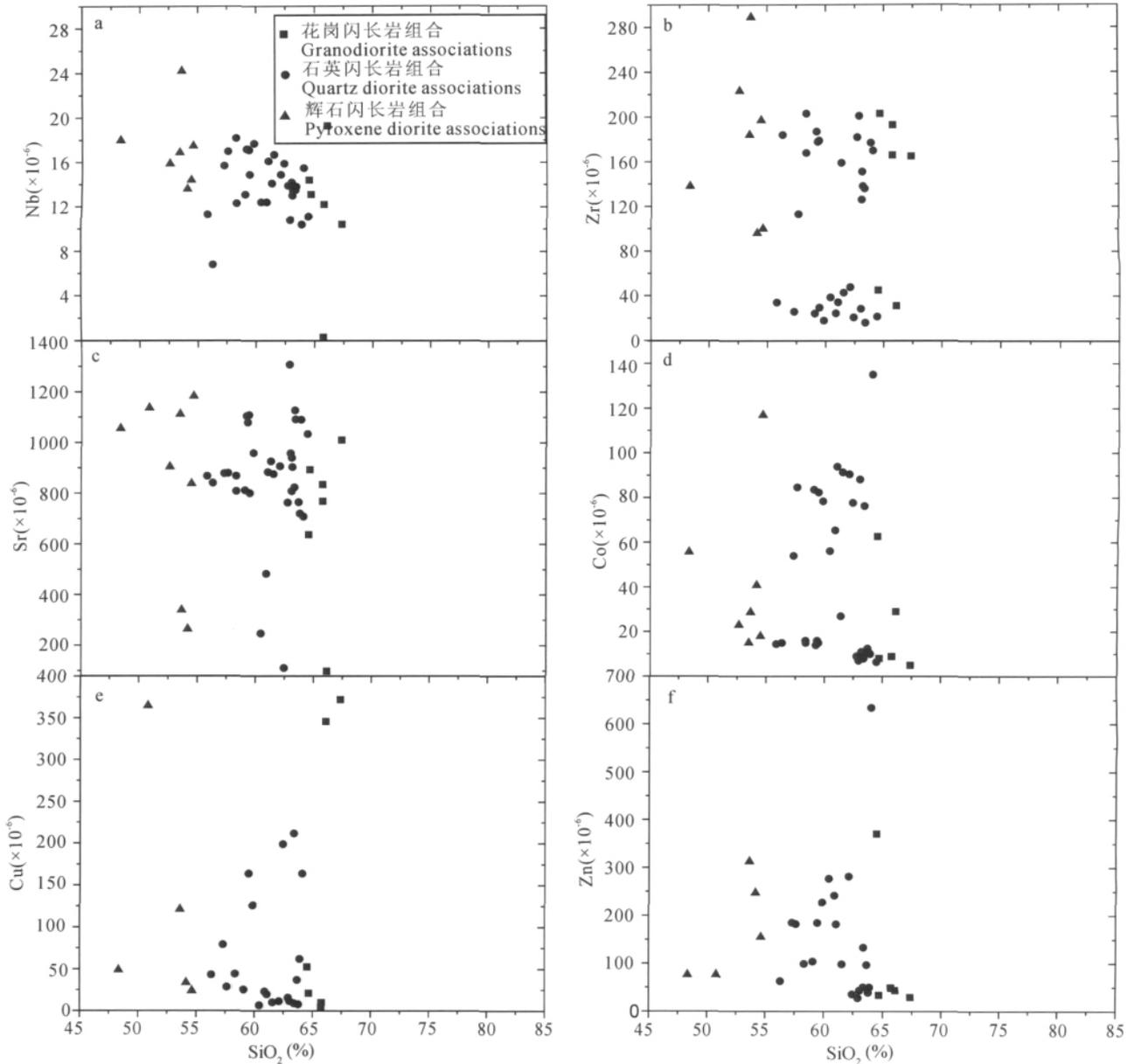


图 8 铜陵地区侵入岩微量元素与 SiO_2 含量相关图解

Fig. 8 SiO_2 (%) versus trace elements diagrams of the intrusive rocks from Tongling region

2006; Sun et al., 2007; Li et al., 2007); 另一种意见认为是陆内拉张引发底侵岩浆作用的产物, 与洋壳的俯冲无关(张旗等, 2001; 王元龙等, 2004; 王强等, 2003; Wang et al., 2004a, 2004b, 2006, 2006a; Yan et al., 2008; 侯增谦等, 2007; Xie et al., 2008; 周涛发, 2008; Li et al., 2009)。最近, Ling 等(2009)认为太平洋板块和依泽纳吉板块之间的洋脊俯冲控制着长江中下游成矿带埃达克岩的分布, 得到了地球化学方面的支持(Liu et al., 2010)。

铜陵地区中酸性侵入岩岩石化学成分在 R_1 - R_2

图解中(图 9a, Betchelor et al., 1985) 投点主要落在碰撞后抬升的构造环境, 根据 Betchelor 等(1985) 的总结, 这种构造环境下产出的岩石组合主要为高钾钙碱性花岗质岩石, 这与本区侵入岩体主要岩石学特征基本一致。在 $\text{K}_2\text{O}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$ 图解中(图 9b), 辉石闪长岩组合岩石样品主要落在板内玄武岩和 MORB 重叠区域, 为拉斑质。在 $\text{Hf}-\text{Rb}-\text{Ta}$ 花岗岩判别图解中, 本区中酸性侵入岩样品主要落在火山弧花岗岩、板内花岗岩和碰撞晚期—碰撞后花岗岩范围三者交汇区域(图 9c)。在 $\text{MgO}-\text{FeO}t-\text{Al}_2\text{O}_3$ 三角图解中(图 9d), 辉石闪长岩组合岩石样

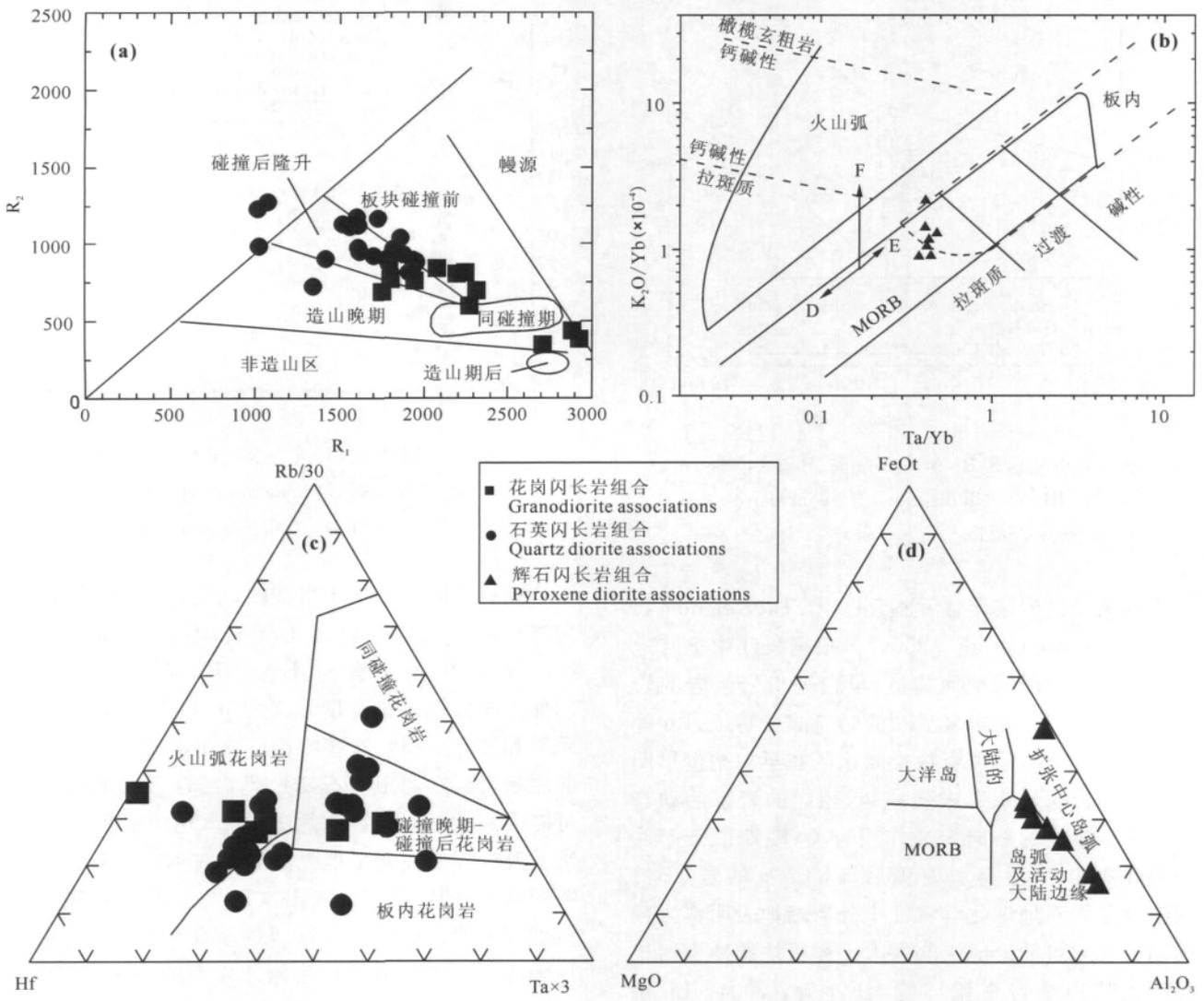


图 9 铜陵地区侵入岩体构造判别图解

Fig. 9 Tectonic discrimination diagrams of the intrusive rocks from Tongling area

a—R1-R2 图解 (Betchelor, 1985); b—K₂O/Yb-Ta/Yb 图解 (Pearce, 1982); c—Hf-Rb/30-Ta×3 图解

(Harris et al., 1986); d—MgO-FeOt-Al₂O₃ 图解 (Pearce, 1977)

a—R1-R2 diagram (Betchelor, 1985); b—K₂O/Yb-Ta/Yb diagram (Pearce, 1982); c—Hf-Rb/30-Ta×3 diagram

(Harris et al., 1986); d—MgO-FeOt-Al₂O₃ diagram (Pearce, 1977)

品主要落在岛弧及活动大陆边缘弧区域内,相当一部分样品位于扩张中心岛屿与岛弧及活动大陆边缘弧交汇处。

在 Rb-Y+Nb 图解中,本区所有样品均落在火山弧花岗岩中(图 10)。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。铜陵地区侵入岩显示了亏损 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等高场强元素,富集

Th、U、La、Ce 等大离子亲石元素的配分模式(图 7),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。铜陵地区三类侵入岩组合岩石明显的 Ti、Nb 和 Ta 负异常,表明其具有明显的岛弧岩浆岩特征,大多数样品的 Ce/Pb 值(3.0~6.0)也与全球岛弧岩浆岩平均值相近。亏损 Ti、Nb 和 Ta 是典型的俯冲带岩浆岩特征,主要形成于地幔交代作用。其最可能原因是当俯冲物质进入地幔楔受流体交代作用发生部分熔融的过程中,金红石及榍石作为残留相(深度小于 150km)使 Ti、Nb、Ta 主要保留于残留相中,造成所

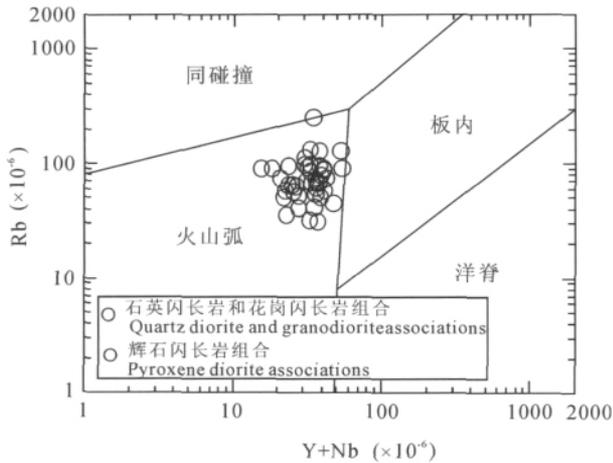


图 10 铜陵地区 Rb-Y+Nb 图解(Pearce, 1984)

Fig. 10 Rb-Y+Nb diagram of the intrusive rocks from Tongling region(Pearce, 1984)

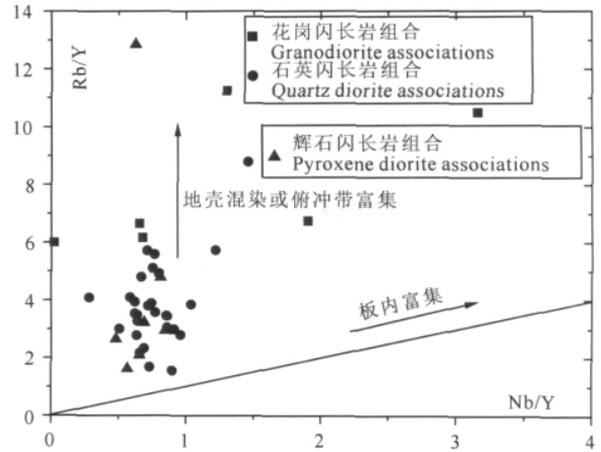


图 11 铜陵地区侵入岩 Rb/Y-Nb/Y 图解

Fig. 11 Rb/Y-Nb/Y diagram of the intrusive rocks from Tongling area

形成的钙碱性岩浆熔体亏损 Ti、Nb、Ta (Kelemen et al., 2003; Xiao et al., 2006)。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, Lu 等 (2005) 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特征的岩浆岩。铜陵地区岩石地球化学特征十分清晰地表明本区燕山期火成岩可能形成于与古太平洋板块俯冲密切相关的大陆边缘岩浆弧环境 (汪洋等, 2004; Lu et al., 2004, 2005)。

5.2 岩石成因

5.2.1 岩浆源区

源于软流圈地幔的岩浆以高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (约为 +8)、低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 (约为 0.703) 和相对恒定的 La/Nb 比值 (约 0.7) 为特征, 而源于岩石圈的岩浆则以低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (约为 -9 ± 2)、高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 (0.7073~0.7097) 和变化的 La/Nb 比值为特征 (DePaolo et al., 2000); 同样 Zr/Ba 比值也是判别岩浆来源的重要参数, 大于 0.2 的岩浆被认为来自软流圈地幔 (或混有软流圈的组分), 小于 0.2 的岩浆则来自岩石圈地幔 (Ormerod et al., 1988)。本区侵入岩岩石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.7067~0.7101、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-7 \sim -17$, La/Nb 比值变化较大, 为 0.8~4.7, Zr/Ba 值在 0.02~0.35 之间 (大多数小于 0.2), 这些特征均反映其源区为岩石圈地幔 (DePaolo et al., 2000; Ormerod et al., 1988)。

铜陵地区侵入岩相当富碱, 富钾、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 Nb、Ta、Ti, 明显富集 Sr、Ba, 但 Rb 偏低, 具有相似的稀土配分模式和微量元素配分模式 (大离子亲石元素和过渡金属), 这些特征反映出铜陵地区侵入岩的原始岩浆来源于岩石圈地幔, 且岩石圈地幔源区可能受到了板片俯冲作用的改造, 也可能反映出岩浆上升过程中经受了地壳混染。在 Rb/Y-Nb/Y 相关图解中 (图 11) 可以看出本区侵入岩样品基本上沿着地壳混染或俯冲带富集的演化线分布, 反映出地幔源区可能受到了板片俯冲作用的改造, 或可能在岩浆上升过程中经受了地壳混染。上述岩石地球化学特征或许就是俯冲作用的标志。利用不相容元素对比值与 Sr 同位素的相互关系可进一步证明这一认识 (Osamu et al., 2003; Petron et al., 2002; Ryuichi et al., 2000; Kepezhinskas et al., 1997; Turner et al., 1997; 李曙光, 1994)。

相容微量元素 Sc (图 12a) 和不相容微量元素 Nb、Ce、Yb、Y、Pb、U 等与 SiO_2 含量呈负相关关系 (图 8a; 图 12d, e, f), 不相容元素 Rb、Ba、Zr、Hf、La 等与 SiO_2 含量无明显的相关关系 (图 12b, c)。铜陵地区侵入岩样品好的相关性表明可能为相似的岩浆源区和演化历史, 但不相容元素表现的无相关性又暗示本区岩浆源区和演化历史的复杂性。上述一些微量元素一般在汇聚边界岩浆岩中富集, 如 Ba、Pb 和 U, 在某种情况下俯冲洋壳部分熔融脱水作用也可以引起这些元素富集。Nb、Y、Yb 等元素亏损是在俯冲过程中由于其为不相容元素而保留在俯冲板片中 (Kay, 1984; Johnson et al., 1999;

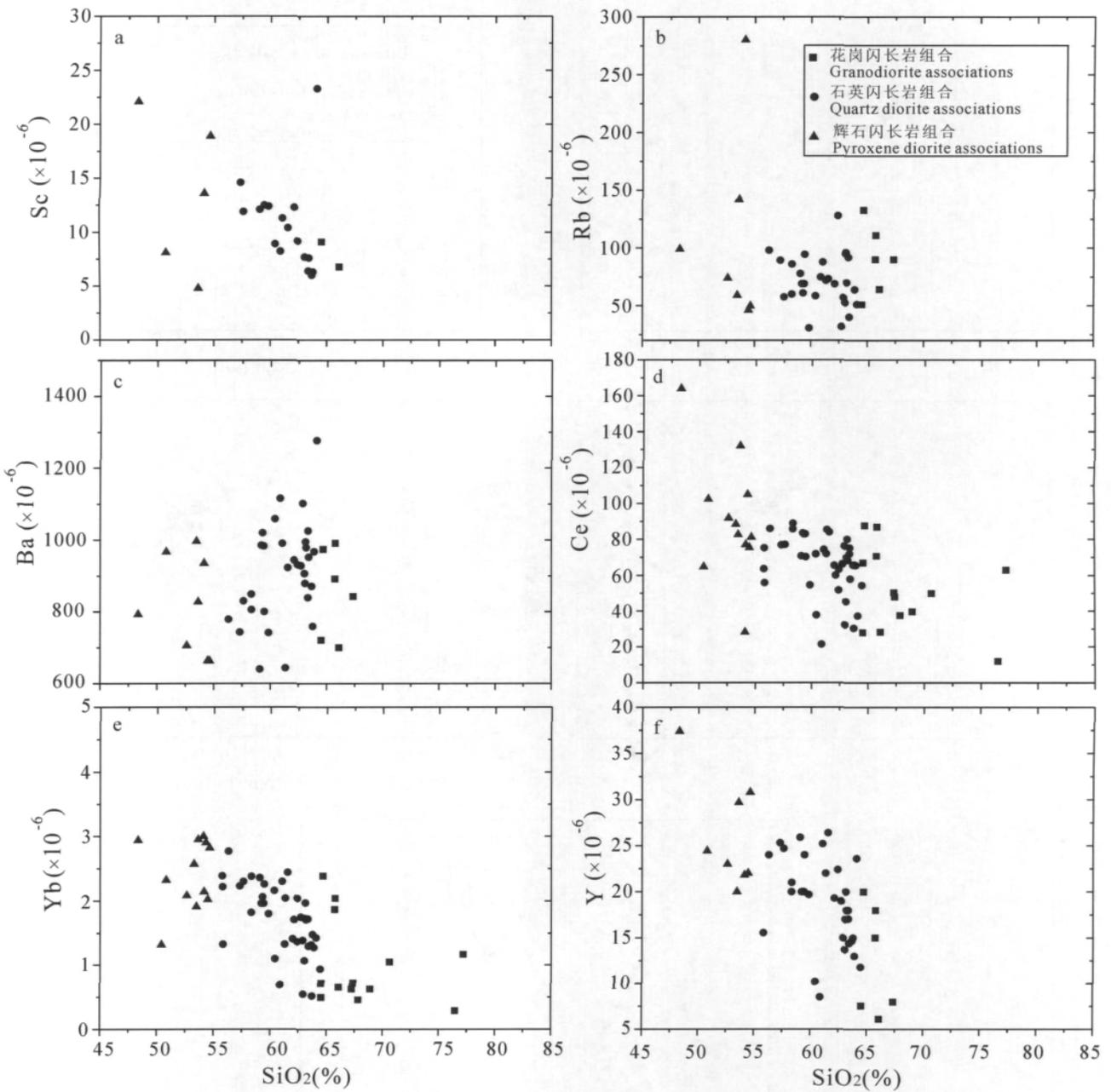


图 12 铜陵地区侵入岩 SiO₂与微量元素相关图解

Fig. 12 Diagrams of SiO₂ % versus trace elements for the intrusive rocks from Tongling region

McCulloch et al., 1991; Pearce et al., 1995)。SiO₂含量和不活泼元素的负相关关系说明本区侵入岩可能为俯冲释放的流体或熔体与地幔岩浆混合而成(图 12a, d, e, f)。

N-MORB 标准配分模式中富集 Cs、Rb、Ba、Th、U、Pb, 亏损 Nb、Ta 是俯冲相关岩石的典型特征(Pearce et al., 1995)。相对于 Ti 和 Eu, 在 N-MORB 模式中这些微量元素与其相邻元素具有相似的性质, 即为较明显的负相关关系, 显示出 Ce 比

Pb、Nb 比 U、Nb 比 Ta 的更不相容性, 这与前人研究的结果相一致(Sun et al., 1989)(图 13), 暗示这些微量元素特定的组分来自于岩浆源区, 而不是在岩浆演化中产生的。

所有这些 log(X/Y)-log(Y)图解(图 13)显示亏损的微量元素和两侧的富集微量元素具有相似的不相容性, 例如 Nb 对 U, 表明这些特定的特征源于岩浆源区。这也表明铜陵地区的地幔源区经过俯冲而得到富集。SiO₂含量与活泼、不活泼微量元素很

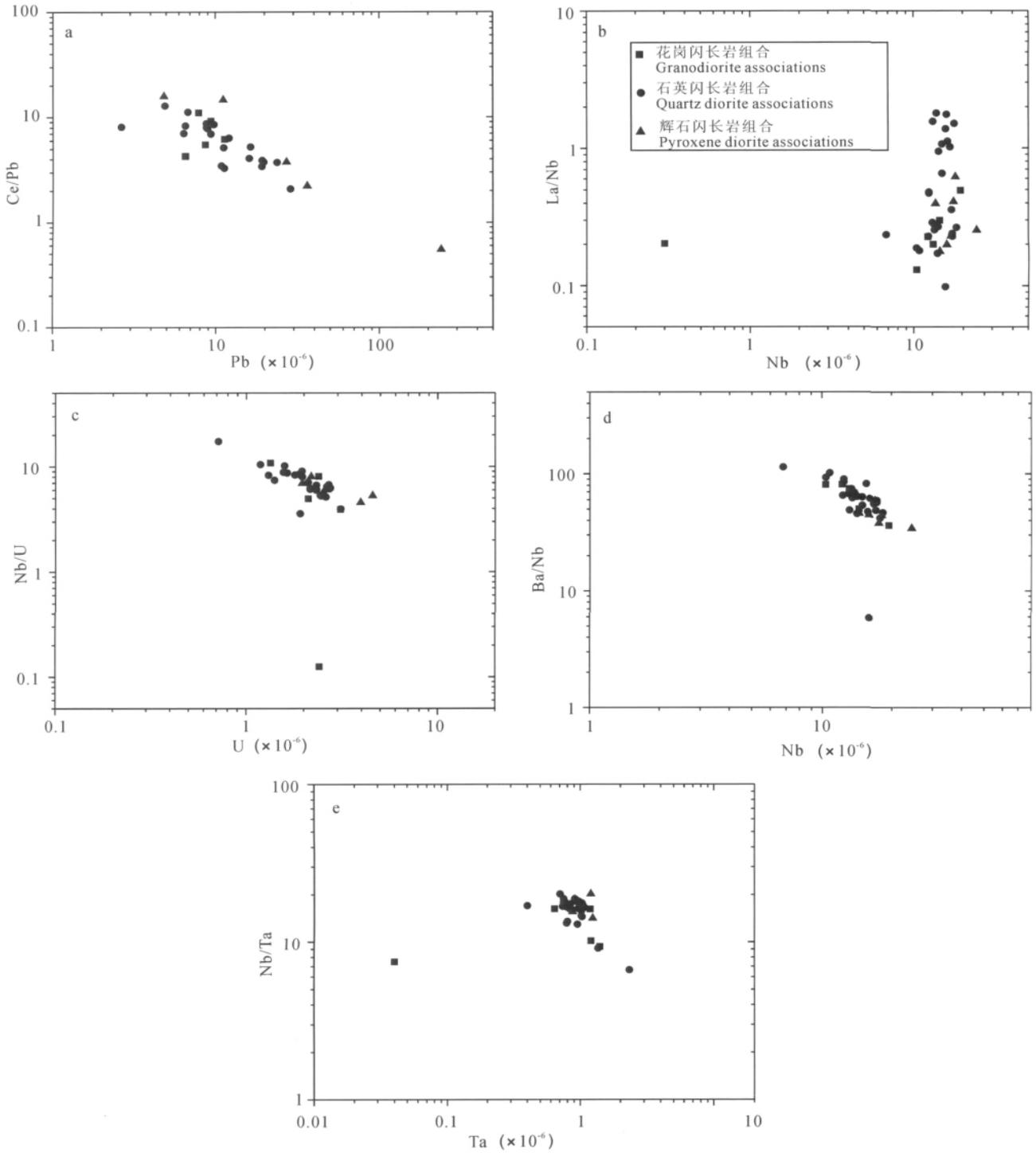


图 13 铜陵地区侵入岩 Log (X / Y) - log (Y)图解

Fig. 13 Log (X / Y) versus log (Y) of the intrusive rocks from Tongling region

好的相关性(图 8a, 图 12)也支持了铜陵地区侵入岩岩浆来自于因俯冲作用释放流体富集熔融的地幔源区^⑨。

5.2.2 岩浆演化、成因及其动力学过程

铜陵地区侵入岩的 Al₂O₃、FeOt、TiO₂、CaO、

MgO 等氧化物以及微量元素 Nb 的含量与 SiO₂ 的含量呈负相关,即随着 SiO₂ 含量的增长(48%~77%)而呈线性降低(图 6a, d, e, f, g; 图 8a),反映了斜长石和角闪石等富钙矿物、镁铁矿物及其 Fe-Ti 氧化物是侵入岩浆在演化过程中较早的主要

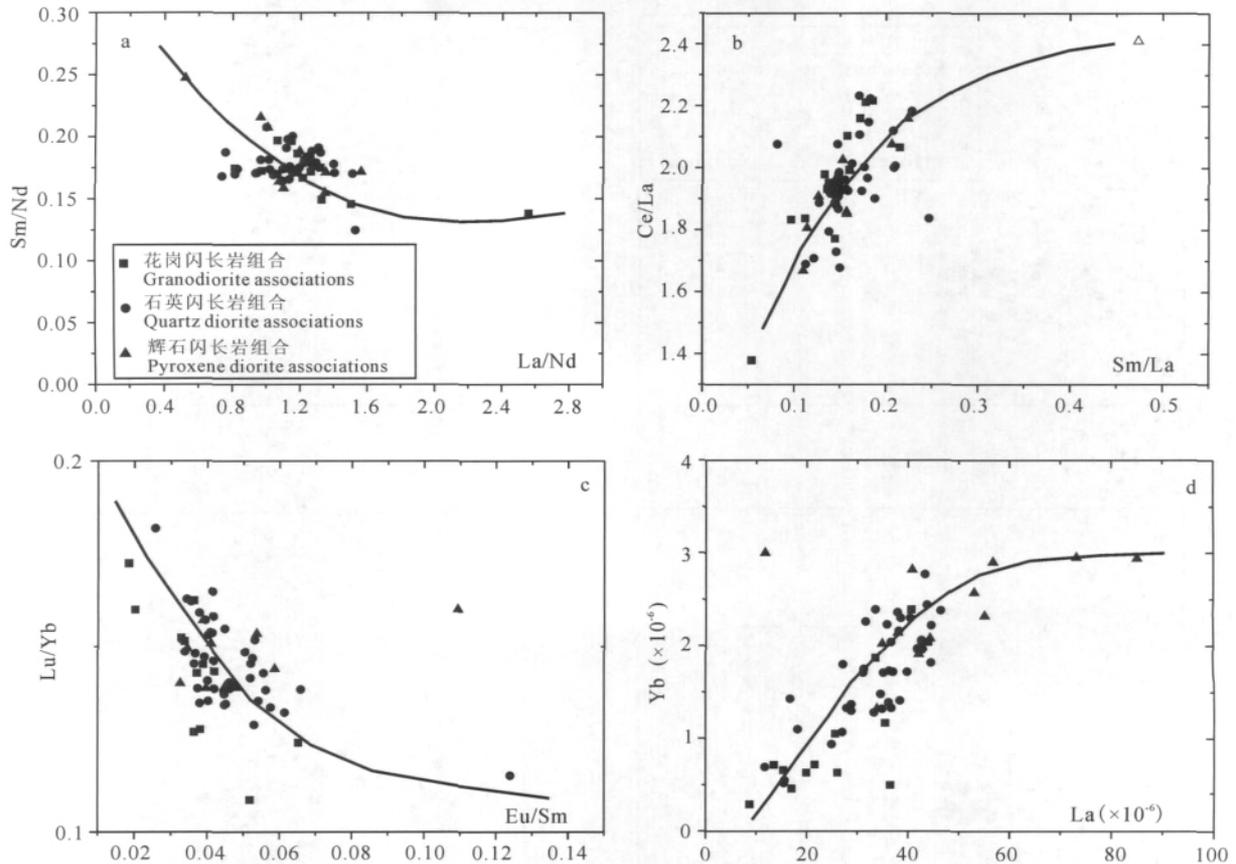


图 14 铜陵地区侵入岩稀土元素协变关系图解

Fig. 14 The REE variation diagrams of the intrusive rocks in Tongling area

分异结晶相 (Dupont et al., 2002; 王岳军等, 2003), 可能暗示从基性到酸性岩浆存在着分离结晶。P₂O₅ 含量随 SiO₂ 含量增高而降低, 表明岩浆演化过程中存在磷灰石的分离 (图 8h), 由于磷灰石一般具有 Eu 负异常 (Watson et al., 1981; Hoskin et al., 2000), 磷灰石的分离可抵消因斜长石等矿物相分离而产生的 Eu 亏损。因此铜陵地区侵入岩 Eu* 值并没随升高而趋于亏损 (图 15f)。铜陵地区侵入岩 Al₂O₃ 和 Na₂O/ K₂O 比值随 SiO₂ 含量增加呈降低趋势, 表明岩浆演化过程中存在斜长石的分离 (图 6a, b)。然而, K₂O、Na₂O、微量元素 Zr、中等不相容元素 Sr 和相容元素 Co 的变化图解 (图 5; 图 6c; 图 8b, c, d) 则暗示仅仅由基性岩浆通过分离结晶形成研究区中酸性含矿侵入岩的可能性较小。在稀土元素协变关系图解中 (图 14), 铜陵地区三类侵入岩组合岩石总体具有相似的变化趋势, 即为曲线相关关系, 表明本区侵入岩体不可能为单一的平衡结晶作用、批式部分熔融作用、聚集熔融作用或混合作用的产物, 而分离结晶和同化混染联合作用过程中稀土元素的行为则遵从这些协变关系, 因此,

AFC 过程可能是本区侵入岩体岩浆演化的主要过程。

在 La/Sm-La 图解上 (图 15a), 除少量的样品外, 铜陵地区侵入岩样品投影点呈一斜线分布, 但斜率较小, 说明本区侵入岩是源区岩石低程度部分熔融形成的产物。由于 Ce 是超亲岩浆元素, Y 属于亲岩浆元素, 在 Ce-Y 图解上 (图 15b), 三类侵入岩岩石组合呈一斜线分布, 暗示为源区岩石部分熔融的产物, 但辉石闪长岩岩石组合的斜率要比石英闪长岩和花岗闪长岩岩石组合的斜率要小, 说明辉石闪长岩岩石组合源区部分熔融的程度要比另外两类低。这些特征暗示本区侵入岩源区岩浆可能为古太平洋板块俯冲到上地幔低程度部分熔融的上地幔玄武质岩浆。在 Ce/Yb-Ce 图解中 (图 15c), 铜陵地区辉石闪长岩组合岩石的成分点与分离结晶趋势线一致, 部分石英闪长岩组合岩石的成分点也与分离结晶趋势线一致, 而花岗闪长岩组合岩石和部分石英闪长岩组合的成分点与分离结晶和同化混染趋势线相一致。在 La/Yb-Yb 图解中 (图 15d), 辉石闪长岩组合岩石的成分点与分离结晶趋势线相一致, 而

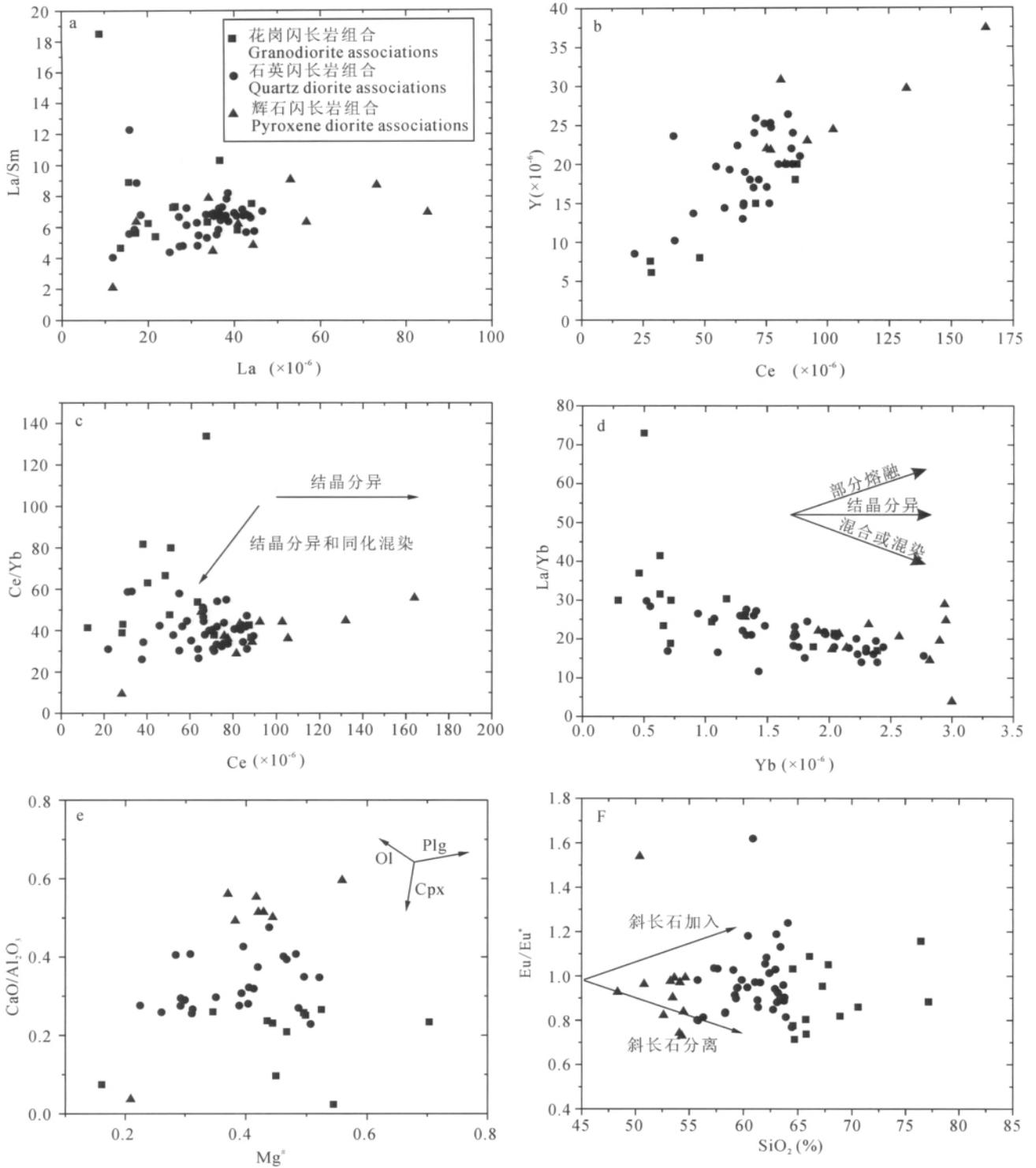


图 15 铜陵地区侵入岩元素变化图解

Fig. 15 The elements variation diagrams of the intrusive rocks in Tongling area

Ol—橄榄石; Plg—斜长石; Cpx—单斜辉石

Ol—Olivine; Plg—plagioclase; Cpx—clinopyroxene

花岗闪长岩组合岩石和石英闪长岩组合的成分点主要表现为混合或混染趋势线相一致。在 $Mg^{\#}$ - CaO/Al_2O_3 图解(图 15e)中,辉石闪长岩和部分石英闪长

岩组合岩石显示出受到斜长石分离结晶的影响,而花岗闪长岩组合的岩石样品点比较分散,没有显示出受到矿物的分离结晶影响。在 SiO_2 - Eu/Eu^* 图解

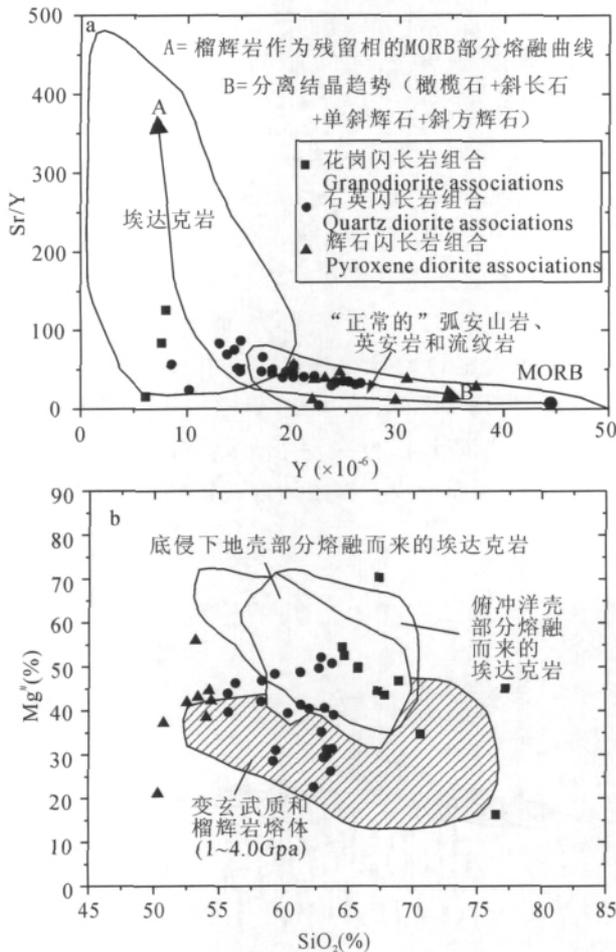


图 16 铜陵地区侵入岩 Sr/Y-Y(a) 和 SiO₂-Mg[#] (b) 图解;俯冲洋壳部分熔融而来的埃达克岩区域据 Defant 等(1992), Kay 等(1993), Aguillón-Robles 等(2001);底侵下地壳部分熔融而来的埃达克岩区域据 Xu 等(2002), Gao 等(2004), Wang 等(2004a, 2004b, 2006a, 2006b);变玄武质和榴辉岩熔体的区域(1~4.0 GPa)据 Rapp 等(1995, 1999, 2002, 2003), Skjerlie 等(2002)

Fig. 16 Sr/Y-Y(a) and SiO₂-Mg[#] (b) diagrams of intrusive rocks from Tongling area; subducted oceanic crust derived adakites are after Defant et al. (1992), Kay et al. (1993), Aguillón-Robles et al. (2001); delaminated lower crust-derived adakitic rocks are from Xu et al. (2002), Gao et al. (2004), Wang et al. (2004a, 2004b, 2006a, 2006b); Metabasaltic and eclogite melts (1~4.0 GPa) are from Rapp et al. (1995), Rapp et al. (1999, 2002, 2003), Skjerlie et al. (2002)

(图 15f)和 Sr/Y-Y 图解(图 16a)中,显示出辉石闪长岩组合和少部分石英闪长岩组合岩石的成分可能受到矿物分离结晶的影响,大多数石英闪长岩组合和花岗闪长岩组合岩石成分变化几乎不受斜长石的分离结晶影响。这些特征表明分离结晶作用可能是

铜陵地区辉石闪长岩组合岩石成分变化的主要原因,而石英闪长岩组合和花岗闪长岩组合岩石成分变化可能受到地壳混染和结晶分异(AFC)过程控制。

铜陵地区侵入岩中石英闪长岩组合和花岗闪长岩组合岩石的某些地球化学特征显示出与埃达克岩(Defant et al., 1990, 2001)一定程度相似的地球化学特征,如高 Sr($>700 \times 10^{-6}$),低 Y($<18 \times 10^{-6}$)等,这些具有某些与埃达克岩相似的地球化学特征说明俯冲洋壳成分对铜陵地区侵入岩的岩浆有一定的贡献。

在 Sr/Y-Y 图解中(图 16a),所有样品显示负相关的趋势,从酸性(花岗闪长岩组合)到基性岩(辉石闪长岩组合),Y 值呈逐渐增大的趋势。本区辉石闪长岩组合岩石样品均落在“正常的”弧安山岩、英安岩、流纹岩区域内,花岗闪长岩组合样品均落在或接近埃达克岩区域范围内,而石英闪长岩组合样品落在“正常的”弧安山岩、英安岩、流纹岩区域比落在埃达克岩区域要略多,并有部分样品落在两者重叠的区域内。石英闪长岩和辉石闪长岩组合岩石样品明显地表现出沿着分离结晶趋势线演化特征,而花岗闪长岩组合样品却比较分散。铜陵地区三类侵入岩组合岩石样品都分布于榴辉岩作为残留相的 MORB 部分熔融曲线附近,暗示本区存在洋壳板块俯冲的现象。以上特征说明本区侵入岩来源不是单一的,至少有两个端元的岩浆混合,这与主量元素、微量元素所得出的结果是一致的。

在 SiO₂-MgO 图解(图 6g)中,除少数样品外,铜陵地区三类侵入岩组合岩石样品均落在变玄武质和榴辉岩熔体的区域内,只有少量样品落在俯冲洋壳部分熔融而来的埃达克岩和底侵下地壳部分熔融而来的埃达克岩区域内。在 SiO₂-Mg[#] 图解(图 16b)中,大部分样品仍位于变玄武质和榴辉岩熔体的区域内,有相当部分石英闪长岩组合岩石样品落在俯冲洋壳部分熔融而来的埃达克岩和底侵下地壳部分熔融而来的埃达克岩区域内,10 个样品中有六个花岗闪长岩样品落在底侵下地壳部分熔融而来的埃达克岩区域内,而有 8 个样品落在或接近俯冲洋壳部分熔融而来的埃达克岩区域内,其中有相当一部分样品落在三者重叠部位。铜陵地区侵入岩的主量和微量元素变化趋势(图 6, 图 8),高 Mg[#] [Mg[#] = MgO/(MgO+FeO) × 100; 图 16b]、低 ε_{Nd}(t) 和高 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值(与庐枞火山岩相比, Wang et al., 2006b) ①, 暗示其不可能由镁质橄榄安粗质岩浆通

过 AFC 过程产生。Mg# 值略高于变玄武质和榴辉岩熔体范围,而且它们的 Sr-Nd 同位素组成明显不同于扬子板块东缘下地壳而来的埃达克岩(Xu et al., 2002; Wang et al., 2004a, 2004b, 2006a, 2006b),暗示它们也不可能由加厚的下地壳部分熔融而成(Atherton et al., 1993)。在 Rb-Y+ Nb 图解中,所有样品均落在火山弧花岗岩中(图 10)。结合本区侵入岩微量元素变化特征(图 12, 图 13)说明铜陵地区这些具有埃达克岩的地球化学特征的侵入岩可能为俯冲洋壳板块俯冲脱水形成的流体或熔体交代地幔楔并使地幔楔发生低程度部分熔融或与地幔熔体混合形成的碱性玄武质岩浆,这种碱性玄武质岩浆与底侵熔融下地壳并部分与之混合而成的二长-闪长质岩浆有关。

铜陵地区侵入岩岩石高精度锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 定年结果和其它相关定年体系的结果表明本区三类侵入岩的年龄基本上是一致的(约 140 Ma),暗示这三类侵入岩组合岩石可能存在时空和成因上的联系,其形成模式可能如图 17 所示:燕山期 Izanagi 板块向欧亚板块俯冲,对中国东部大陆产生挤压,导致地壳加厚。K₆₀(SiO₂ = 60% 时的 K₂O 含量)计算表明本区是加厚的陆壳,平均为 56 km。俯冲洋壳脱水形成的流体或熔体交代地幔楔并使地幔楔发生低程度部分熔融或与地幔岩浆混合形成碱性玄武质岩浆。已有的深地震反射剖面资料显示,安徽铜陵地区在伸展构造环境下于晚中生代发生过强烈而复杂的多层次岩浆底侵作用(吕庆田等, 2003)。来自富集地幔的碱性玄武质岩浆底侵下地壳底部,不仅使地壳加厚,而且其带来的热也可烘烤下地壳使之发生部分熔融,形成深位岩浆房,深位岩浆房的偏酸性岩浆具有某些埃达克岩的特征。少量玄武质岩浆注入到下地壳深位岩浆房与偏酸性岩浆发生混合而形成了闪长质-二长质混合岩浆。大量这种混合岩浆侵位到地壳浅部从而形成了区内分布最广的石英闪长岩组合侵入岩。根据本区侵入岩岩石的显微和电子探针分析,发现铜陵地区侵入岩岩石存在混合结构(如斜长石环带结构、斜长石嵌晶结构、钾长石嵌晶结构、角闪石嵌晶结构以及类环斑结构等)(图 18)。这些岩浆混合结构(Wu et al., 2000; 狄永军等, 2005)是对此过程的真实写照:闪长质岩浆演化过程中受结晶分异作用影响产生了主量元素和微量元素规律性变化,在其侵位时同时受到围岩同化混染影响从而产生一些不明显的变化规律(如不仅使其富碱而且也导致 K、Na 和全碱等)。

随着深位岩浆房部分闪长质-二长质混合岩浆的演化,这种深位岩浆房形成的混合岩浆的高温(1210℃,田世洪等, 2001)可使中上地壳物质部分熔融(中-新元古界浅变质岩系),形成浅位岩浆房,产生花岗质岩浆。侵位到地壳浅部形成本区分布较广的花岗闪长岩组合侵入岩。仅有少量混染程度低的幔源碱性玄武质岩浆能够侵位到浅部,形成了辉石(二长)闪长岩组合侵入岩,从而造成了本区目前三类侵入岩组合的分布格局。约在 140 Ma 时,由于受到古太平洋斜向俯冲加剧,中国东部呈现近南北向拉张,铜陵地区再次发生大规模富含矿物质的岩浆活动,从而形成了铜陵地区独特的成矿条件。

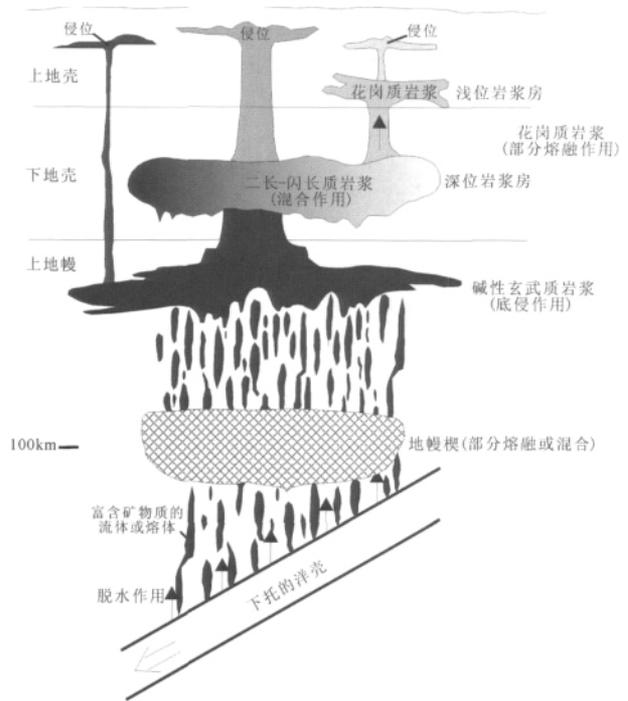


图 17 铜陵地区侵入岩成因模式图

Fig. 17 Genesis model diagram of the intrusive rocks from Tongling region

5.3 成矿意义

火山-岩浆大爆发是中国东部燕山运动中惊天动地的地质事件。燕山期如此大规模的岩浆物质喷发是壳幔物质大循环和以热为主的物理能量大转移,造成了中国地质历史中最具特色的一幕成矿事件。

Wyborn 等(1994)的研究表明岩浆中硫的饱和度是决定能否形成大型和超大型斑岩 Cu-Au 矿床的关键因素。在地幔熔融时,Cu、Au 等趋向集中在硫化物熔体中,只有当地幔熔融源区呈现高氧化态时,硫化物被氧化从而使得 S 元素进入硅酸盐熔体,

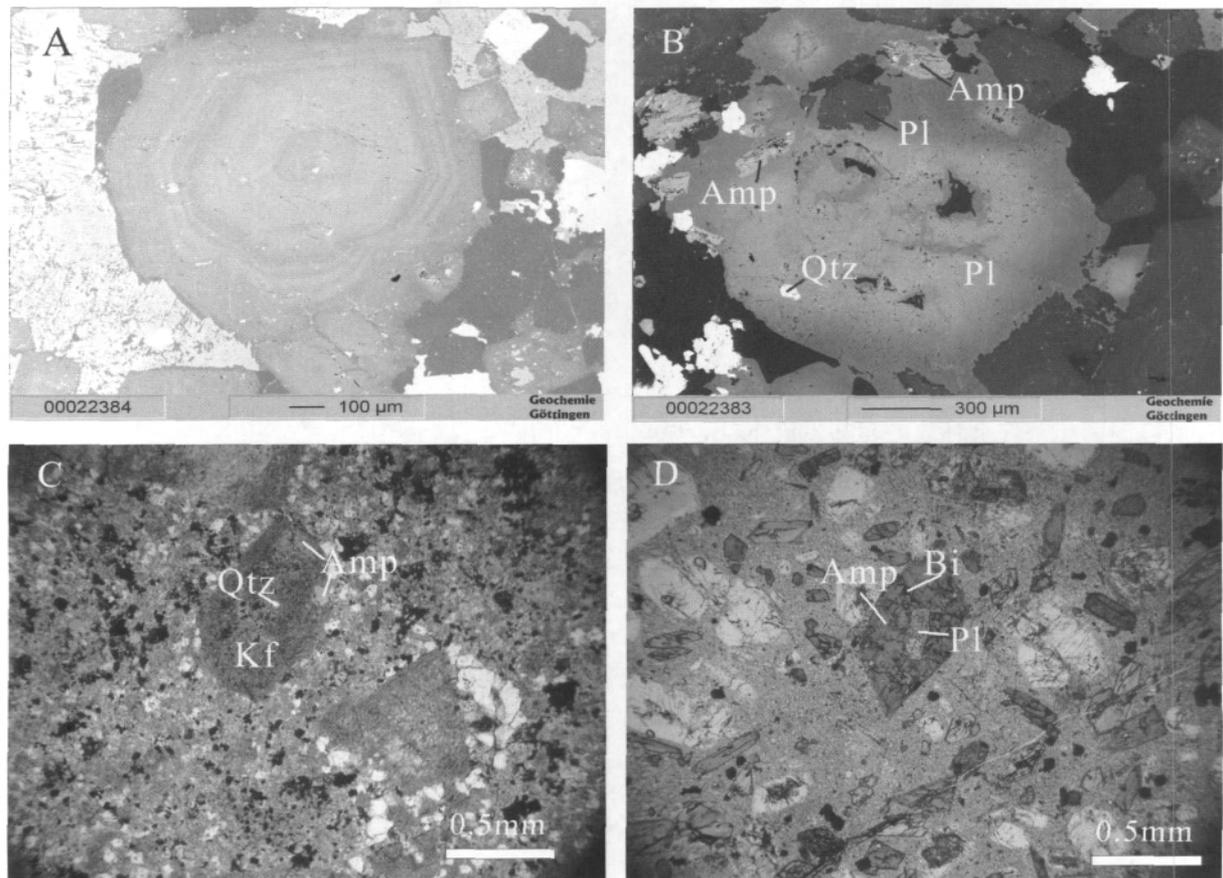


图 18 铜陵地区侵入岩岩石的岩浆混合结构

Fig. 18 Magma mixing texture of the intrusive rocks in the Tongling region

A—斜长石环带结构; B—斜长石嵌晶结构; C—钾长石嵌晶结构; D—角闪石嵌晶结构;

Pl—斜长石; Kf—钾长石; Qtz—石英; Amp—角闪石; Bi—黑云母

A—Plagioclase zoning texture; B—plagioclase poikilitic texture; C—potassic feldspar poikilitic texture; D—amphibole poikilitic texture; Pl—plagioclase; Kf—kfeldspar; Qtz—quartz; Amp—amphibole; Bi—biotite

此时, Cu、Au 等成矿元素才能集中于硅酸盐熔体中。正常的弧岩浆岩地幔源区的氧逸度不够高, 其母岩浆中的 Cu、Au 含量也不高, 所以不能形成大型的 Cu-Au 矿床 (Mungall, 2002)。对于玄武质下地壳熔融产物而言, 其氧逸度也不高 (Carmichael, 1991), 所以, 地壳熔融形成的埃达克质岩浆不一定能导致 Cu、Au 元素的富集。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, 这主要是因为, 在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的丰度较低 (Sun et al., 2004)。相比之下, 由于铜金为中度不相容元素 (Sun et al., 2004), 它们在地幔中的含量较高。所以要形成一定规模的铜(金)矿床, 必须有大量地幔物质成分端元的加入。

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的铜(金)成矿作用有密切的关系

(Richards, 1990; Mueller et al., 1993; Sillitoe, 1997; Ulrich et al., 1999)。但是铜金矿床富集沉淀成矿, 还主要取决于熔体、流体以及围岩的性质 (McInnes et al., 1999; Muller et al., 2001; Sun et al., 2004; Levresse et al., 2006; Niiranen et al., 2007)。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 et al., 2004)。

另一方面, 铜金矿床的形成还明显受控于岩浆的氧化-还原条件 (Mungall, 2002; Sun et al., 2004), 要使得铜金在酸性岩浆中富集成矿, 岩浆中必须有较高的氧逸度 (Sillitoe, 1997; Mungall, 2002; Sun et al., 2004)。例如, Ballard 等 (2002) 在研究智利斑岩铜矿时注意到应用锆石的中稀土变价元素 (Ce^{4+}/Ce^{3+}) 的比值可以做为指示斑岩体的

氧逸度指标之一;Liang等(2006)在研究西藏玉龙斑岩型铜矿中,发现含矿岩体的锆石的(Ce^{4+}/Ce^{3+})比值变化范围大,且平均值远远高于不含矿岩体。谢建成等(2008)、Xie等(2009)研究铜陵地区含矿侵入岩时发现本区侵入岩锆石Ce异常与锆石U-Pb年龄具有相关性,并与成矿事件密切对应,高Ce异常与铜金矿床密切相关(138~140 Ma),低Ce异常与铁硫矿床密切相关(约126 Ma;谢建成等,2009)。

俯冲板片洋壳部分的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(Bureau et al., 1999)则富含 Fe_2O_3 而具高氧逸度,受其影响地幔楔熔融形成富集S等挥发份和Cu、Au等成矿元素的母岩浆(Oyarzun et al., 2001; Mungall, 2002),其与地壳物质混合释放出含Cu、Au的热液,最终形成矿床;而相应的岩浆岩组合往往伴生有碱性系列或橄榄玄粗系列的岩石(Sillitoe, 1997)。

微量元素 $\log(X/Y)-\log(Y)$ 图解(图13)显示亏损的微量元素和两侧的富集微量元素具有相似的不相容性,表明这些特定的特征源于岩浆源区,而非岩浆演化过程中形成的,反映出铜陵地区的地幔源区经过板块俯冲作用而富集S等挥发份和Cu、Au等成矿元素^⑨。 SiO_2 含量和活泼、不活泼微量元素很好的相关性(图12)也支持铜陵地区侵入岩来自因俯冲作用释放的超临界流体熔融地幔楔而形成的母岩浆。近来研究表明Ba是俯冲板块释放流体中最活泼的不相容元素,而Th一般在因板块俯冲形成的熔体中富集。利用Ba和Th相关图解可以判断金属源区和流体来源(Bedard, 1999; Seghedi et al., 2001)。在Ba-Nb/Y图解中(图19a),几乎所有样品都落在与流体有关富集和与熔体有关富集的区域之间,两种演化线排列基本相当,说明本区含矿岩体的金属来源不是流体或熔体单一控制的,可能是二者叠加造成本区独特的成矿条件。但相对而言,辉石闪长岩组合岩石样品成矿物质富集主要与流体密切相关,花岗闪长岩组合岩石样品成矿物质富集主要受熔体控制,而石英闪长岩组合含矿岩体的金属物质来源与这两者都密切相关,也佐证了本区主要铜金矿床形成与石英闪长岩密切相关(图8e, f)。在Th/Yb-Sr/Nd图解中(图19b),Th/Yb比值比较集中,均值在5左右,而Sr/Nd比值变化较大,只有一个样品(花岗闪长岩组合岩石)落在地层演化线上,铜陵地区侵入岩其余样品都沿着板块而来流体演化线分布,说明铜陵地区三类侵入岩的

金属来源与沿板块而来流体密切相关,到后期花岗闪长岩组合岩石有少部分地壳矿物质的加入。结合铜陵侵入岩岩石学、矿物学、地球化学和年代学特征,我们认为铜陵地区早白垩世岩浆活动及其相关的成矿作用可能是与板块俯冲及其演化过程密切伴生的地质过程(Lu et al., 2005; Sun et al., 2007)。

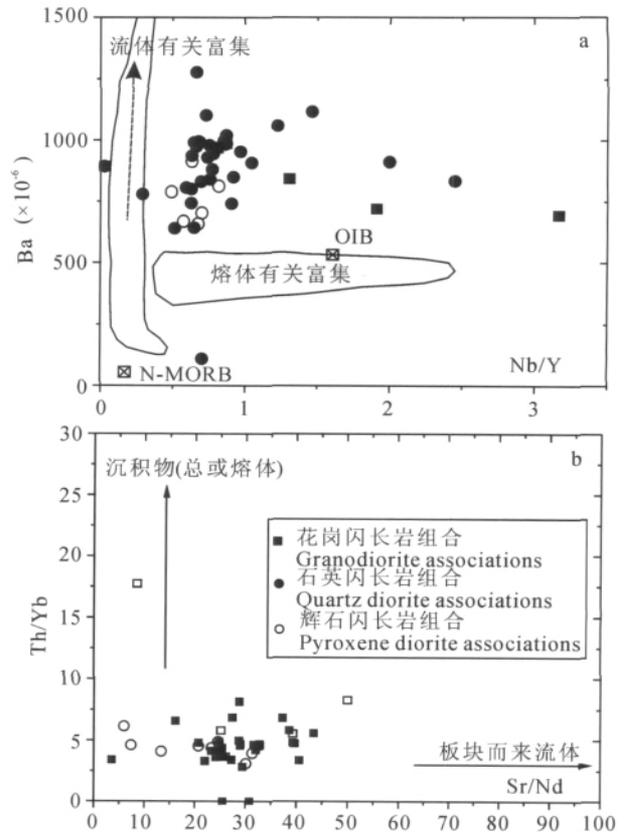


图19 铜陵地区侵入岩Ba-Nb/Y (a)和Th/Yb-Sr/Nd相关图解 (b)

Fig. 19 Ba-Nb/Y (a) and Th/Yb-Sr/Nd diagrams for the intrusive rocks in Tongling area
N-MORB—洋脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩
N-MORB—N-Middle Ocean Range Basalt;
OIB—Ocean Island Basalt

6 结论

(1)铜陵地区中生代岩浆岩主要为辉石(二长)闪长岩、石英(二长)闪长岩和花岗闪长岩三种岩石组合。其矿物成分:斜长石主要为中长石及少量的拉长石和更长石;碱性长石主要为正长石;黑云母成分为镁质黑云母;角闪石为直闪石—铝直闪石系列。

(2)辉石(二长)闪长岩组合岩石主要为碱性和橄榄玄粗岩系列。带有古老俯冲洋壳成分的富集岩石圈地幔分离结晶作用可能是辉石(二长)闪长岩组

合岩石产生的最主要原因,它经历了少量低程度的地壳混染。

(3)花岗闪长岩、石英(二长)闪长岩组合岩石主要属于亚碱性和高钾钙碱性系列,其某些地球化学特征和 Adakite 岩的地球化学特征一致。其成分变化可能受地壳混染和结晶分异(AFC)过程控制。幔源岩浆和壳源岩浆的混合可能是石英闪长岩组合和花岗闪长岩组合岩石形成的主要机制。

(4)铜陵地区燕山期火成岩可能形成于与古太平洋板块俯冲密切相关的大陆边缘岩浆弧构造环境。

(5)铜陵地区侵入岩岩石学、矿物学、地球化学和年代学特征表明铜陵早白垩世岩浆活动及其相关的 Cu-Au 成矿作用可能是与板块俯冲及其演化过程密切相关。

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, 1~213.
- ② Sun W D. 2003. The Subduction Factory: a perspective from rhenic and trace element geochemistry of oceanic basalts and eclogites. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the Australian National University.
- ③ 安徽省地质调查院. 2005. 1:250000 安庆市幅区域地质调查报告, 1~390.

参 考 文 献

安徽省地矿局. 1987. 安徽省区域地质志. 北京:地质出版社, 1~721.

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, 1~239.

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.

邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 罗照华, 戴圣潜, 李凯明. 2000. 中国东部中生代火成岩构造组合与造山-深部过程. 地质论评, 46(1): 41~48.

邓军, 王庆飞, 黄定华, 万黎, 杨立强, 高邦飞. 2006. 铜陵矿集区浅层含矿岩浆输运网络与运移机制. 中国科学 D 辑, 36(3): 252~260.

狄永军, 赵海玲, 吴淦国, 张达, 臧文拴, 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): 528~737.

杜杨松, 秦新龙, 田世洪. 2004. 安徽铜陵铜官山矿区中生代岩浆-热液过程:来自岩石包体及其寄主岩石的证据. 岩石学报, 20(2): 339~50.

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(2): 171~172, 177~182.

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.

李进文, 裴荣富, 张德全, 梅燕雄, 臧文拴, 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.

李曙光. 1994. $\epsilon\text{Nb-La/Nb, Ba/Nb, Nb/Th}$ 图对地幔均一性研究的意义—岛弧火山岩分类及 EM II 端元的分解. 地球化学, 23: 105~114.

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.

楼亚儿, 杜杨松. 2006. 安徽繁昌—铜陵中生代侵入岩的黑云母特征和成因探讨. 矿物学报, 26(2): 175~180.

吕庆田, 侯增谦, 赵金花, 史大年, 吴宣志, 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.

吕志成, 段国正, 董光华. 2003. 大兴安岭中南段燕山期三类不同成矿花岗岩中黑云母的化学成分特征及其成岩成矿意义. 矿物学报, 23(2): 177~184.

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, 1~190.

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矿成矿. 中国科学(D), 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.

田世洪, 杜杨松, 秦新龙, 李钰昌, 金尚中, 尹京武, 李赞熙. 2001. 安徽铜陵地区中酸性侵入岩及其岩石包体中的矿物包裹体研究. 地学前缘, 8(1): 422~428.

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.

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(2): 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.

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.

吴淦国, 张达, 狄永军, 臧文拴, 张祥信, 宋彪, 张忠义. 2008. 铜陵矿集区侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其深部动力学背景. 中国科学(D 辑), 38: 630~645.

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, 24(08): 1782~1800.

谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 杜小伟, 肖益林, 屈文俊, 孙卫东. 2009. 安徽铜陵新桥 Cu-S-Fe-Au 矿床黄铁矿 Re-Os 定年及对成矿的指示意义. 地质科学, 43(1): 183~192.

- 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.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 金福全, 周珣若, 万天丰, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究. 矿床地质, 11(1): 1~12.
- 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.
- 赵乘乘, 杨晓勇. 2012. 铜官山岩体矿物学-矿物化学特征: 岩浆结晶动力学意义. 地质学报(待刊).
- 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): 1665~1778.
- 周珣若, 任进. 1994. 长江中下游中生代花岗岩. 北京: 地质出版社, 47: 71~73.
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨. 岩石学报, 2(1): 59~70.
- Aguillón-Robles A, Caimus T, Bellon H, Maury R C, Cotton J, Bourgeois J, Michaud F. 2001. Late Miocene adakite and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California. *Geology*, 29: 531~534.
- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144~146.
- 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 H. 1999. Petrogenesis of boninites from the Betts Cove ophiolite, New foundland, Canada: identification of subducted source components. *J. Petrol.*, 40: 1853~1889.
- Betchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multication parameters. *Chem. Geol.*, 48: 43~53.
- 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.
- Carmichael I S E. 1991. The redox states of basic and silicic magmas—A reflection of their source regions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106: 129~141.
- Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of Southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284: 101~133.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662~665.
- Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, De Boer J Z, Bellon H, Feigenson M D, Maury R C, Stewart R H. 1992. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview. *J. Geol. Soc. London*, 149: 569~579.
- Defant M J, Kepezhinskas P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS (Transactions, American Geophysical Union)* 82: 65~69.
- DePaolo D J, Daley E E. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. *Chemical Geology*, 169: 157~185.
- Dupont A, Vander A J, Pin C, Marincea S, Berza T. 2002. Trace element and isotope (Sr, Nd) geochemistry of porphyry- and karn-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.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. *Geol Surv Prof Paper*, 354-B: 11~49.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Lin W L, Ayerss J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892~897.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward M P, Reis A C (eds.), *Collision tectonics*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 19: 67~81.
- Hoskin P W O, Kinny P D, Wyborn D, Chappell B W. 2000. Identifying accessory mineral saturation during differentiation in granitoid magma: an integrated approach. *Journal of Petrology*, 41: 1365~1396.
- Johnson M C, Plank T. 1999. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems -G3 (1999GC000014)*.
- Kay R W. 1984. Elemental abundances relevant to identification of magma sources. *Philos.*, 42: 313~345.
- Kay S M, Ramos V A, Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks of slab melting prior to ridge trench collision in southern South America. *J. Geol.*, 101: 703~714.
- Kelemen P B, Hanghoj K, Greene A R (Editors). 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with emphasis on primitive andesite and lower crust. *The Crust*, 3. Elsevier, 593~659 pp.
- Kepezhinskas P, McDermott F, Defant M J, Hochstaedter A, Drummond M S, Hawkesworth C J, Koloskov A, Maury R C, Bellon H. 1997. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(3): 577~600.
- Leake B E. 1978. Nomenclature of yamphibole. *Am. Mineral.*, 67: 1023~1052.
- Levesse G, Tritlla J, Villareal J, Gonzalez-Partida E. 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.
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, Ma C Q, Sergio de Souza Z, Vasconcelos P. 2009. Late Mesozoic magmatism from Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157: 383~409
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35: 179~182.
- Ling M X, Wang F Y, Ding X, Hu Y H, Zhou J B, Zartman R E, Yang X Y, Sun W D. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China. *Economic Geology*, 104: 303~321.
- Ling M X, Wang F Y, Ding X, Zhou J B, Sun W D. 2011. Different origins of adakites from the Dabie Mountains and the Lower Yangtze River belt in eastern China: Geochemical constraints. *International Geology Review*, 53 (5-6): 727~740.
- Liu S A, Li S G, He Y S, Huang F. 2010. Geochemical contrasts between early Cretaceous ore-bearing and ore-barren high-Mg adakites in central-eastern China: Implications for petrogenesis and Cu-Au mineralization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 7160~7178.
- Liang H Y, Campbell I H, Allen C, Sun W D, Liu C Q, Yu H X, Xie Y W, Zhang Y Q. 2006. Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet. *Miner Deposita*, 41: 152~159.
- Lu Q T, Hou Z Q, Yang Z S, Shi D N. 2005. Underplating in the middle-lower Yangtze Valley and model of geodynamic evolution: Constraints from geophysical data. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 48(7): 985~999.
- Lu Q T, Hou Z Q, Zhao J H, Shi D N, Wu X Z, Chang Y F, Pei R F, Huang D D, Kuang C Y. 2004. Deep seismic reflection profiling revealing the complex crustal structure of the Tongling ore district. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 47(3): 193~200.
- McCulloch M T, Gamble A J. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3-4): 358~374.
- 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.
- Meen J K. 1990. Elevation of potassium content of basaltic magma by fractional crystallization: the effect of pressure. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 309~331.
- 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.
- Muller 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 T, Poutiainen M, Mnttari I. 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.
- Ormerod D S, Hawkesworth C J, Rogers N W. 1988. Tectonic and magmatic transition in the Western Great Basin. *Nature*, 333: 349~353.
- Osamu I, Taylor R N, Milton J A, Nesbitt R W. 2003. Fluid-mantle interaction in an intra-oceanic arc: constraints from high-precision Pb isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 211:221~236.
- Oyarzum R, Marquez A, Lillo J, Lopez I, Rivera S. 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36: 794~798.
- Pearce J A, Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251~285.
- Pearce J A, Gorman B E, Birkett T C. 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 24: 419~426.
- 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.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R S ed. *Andests*. Chichester: Wiley, 525~548.
- Petron C M, Francalanci L, Carlson R W, Ferrari L, Conticelli S. 2002. Unusual coexistence of subduction-related and intraplate-type magmatism: Sr, Nd and Pb isotope and trace element data from the magmatism of the San Pedro-Ceboruco graben (Nayarit, Mexico). *Chemical Geology*, 193: 1~24.
- Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 2000, 51:507~513.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust mantle recycling. *J. Petrol.*, 36: 891~931.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. *Nature*, 425: 605~609.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335~356.
- Rapp R P, Xiao L, Shimizu N. 2002. Experimental constraints on

- the origin of potassium-rich adakite in the east China. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 293~311.
- 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 S. 2003. Composition of the continental crust. In Rudnick R L ed. *The Crust Vol. 3* Holland H D, Turekian K K eds. *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier-Perгамon, 1~64.
- Ryuichi S J, Woodhead J D, Hergt J M. 2000. Geochemical variation within the northern Ryukyu Arc: magma source compositions and geodynamic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140: 263~282.
- 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.
- Skjervlie K P, Patño Douce A E. 2002. The Fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 GPa: implications for melting in thickened continental crust and for subduction-zone processes. *J. Petrol.*, 43: 291~314.
- 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, 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 Planet. Sci. Lett.*, 262: 533~542.
- Taylor H P, Sheppard S M F. 1986. Igneous rocks: Processes of isotopic fractionation and isotope systematics. In: T. H. P. a. O. n. J. R. Valley J W (Editor), *Stable isotopes in high temperature geological processes*. *Review in Geology*, pp. 227~271.
- Turner S, Hawkesworth C. 1997. Constraints on flux rates and mantle dynamics beneath island arcs from Tonga-Kermadec lava geochemistry. *Nature*, 389: 568~573.
- 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.
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L, Bao Z W, Li C F, Bai Z H. 2006b. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89: 424~446.
- Wang Q, Xu J F, Jian P, Bao Z W, Zhao Z H, Li C F, Xiong X L, Ma J L. 2006a. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China; Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119~144.
- Wang Q, Xu J F, Zhao Z H, Bao Z W, Xu W, Xiong X L. 2004b. Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: adakites in an extensional tectonic regime within a continent. *Geochemical Journal*, 38: 417~434.
- Wang Q, Zhao Z H, Bao Z W, Xu J F, Liu W, Li C F, Bai Z H, Xiong X L. 2004a. Geochemistry and petrogenesis of the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks and the associated porphyry copper-molybdenum mineralization in southeast Hubei, east China. *Resource Geology*, 54: 137~152.
- 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.
- Xiao Y L, Sun W D, Hoefs J, Simon K, Zhang Z M, Li S G, Hofmann A. W. 2006. Making continental crust through slab melting: Constrains from niobium-tantalum fractionation in UHP metamorphic rutile. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 4770~4782.
- Xie G Q, Mao J W, Li R L, Bierlein F P. 2008. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, Eastern China; Petrogenesis and tectonic setting. *Lithos*, 104: 216~230.
- Xie J C, Yang X Y, Sun W D, Du J G, Xu W, Wang K Y. 2007. Geochemistry of the Mesozoic Intrusive Rocks in the Tongling Cu-Au-Fe district, South Anhui Province, China. 9th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Dublin Ireland, Digging Deeper, Vols(1-2): 1259~1262.
- Xie J C, Yang X Y, Sun W D, Du J G, Xu W, Wu L B, Wang K Y, Du X W. 2009. Geochronological and geochemical constraints on formation of the Tongling metal deposits, middle Yangtze metallogenic belt, east-central China. *International Geology Review*, 51: 388~421.
- Xu J F, Shinjio R, Defant M J, Wang Q, Rapp R. P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China; partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30: 1111~1114.

- Xu X S, Fan Q C, O'Reilly S Y, Jiang S Y, Griffin W L, Wang R C, Qiu J S. 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.
- Yan J, Chen J F, Xu X S. 2008. Geochemistry of Cretaceous mafic rocks from the Lower Yangtze region, eastern China: Characteristics and evolution of the lithospheric mantle. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 177~193.
- 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.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29: 26~33.

Petrogenesis of the Mesozoic Intrusive Rocks From the Tongling Ore Cluster Region: The Metallogenic Significance

XIE Jiancheng^{1,2)}, YANG Xiaoyong¹⁾, XIAO Yilin¹⁾, DU Jianguo³⁾, SUN Weidong^{1,4)}

1) *Research Center of Mineral Resources, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026*; 2) *Department of Resource and Environmental Sciences, Hefei University of Technology, Hefei, 230009*; 3) *Anhui Academy of Geological Survey, Hefei, 230011*; 4) *China CAS Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Guangzhou, 510640*

Abstract

Tongling ore cluster region is one of the most important non-ferrous metal producers where the formation of Cu-Au deposits has close genetic relation to Mesozoic intrusions. Petrology, mineralogy and element geochemistry of these Mesozoic intrusive rocks in the Tongling region were investigated. These results show: ① The intrusive rocks can be divided into three rock associations: pyroxene diorite with $\text{SiO}_2 \leq 55\%$, quartz diorite with $\text{SiO}_2 55\% \sim 65\%$, and granodiorite associations with $\text{SiO}_2 \geq 65\%$. Their mineral components are mainly with characteristics of andesine, orthoclase, Mg-biotite, and anthophyllite-aluminium anthophyllite series. ② Pyroxene diorite association rocks are mainly with characteristics of shoshonite. They were most probably produced by fractional crystallization primarily derived from an enriched mantle which has the material contribution of ancient subducted ocean crust, and experienced assimilation of a little lower crustal material. ③ Quartz diorite and granodiorite association rocks are mainly composed of high potassic calc-alkaline. They were possibly resulted from the crustal assimilation and fractional crystallization (AFC). The mixing of mantle-derived and crust-derived magmas might have been the main mechanism through which quartz diorite and granodiorite association rocks were produced. 4) The early Cretaceous period magmatic activity and related metallogenesis are closely related to the Pacific plate subduction.

Key words: rock associations; magma mixing; subduction of the Pacific plate; fractional crystallization; assimilation; Tongling ore cluster region