

长江中下游铜陵及邻区中生代中酸性侵入岩 地球化学特征及其深部岩浆作用探讨

孟祥金, 吕庆田, 杨竹森, 徐文艺

中国地质科学院矿床资源研究所, 国土资源部成矿作用和资源评价重点实验室, 北京, 100037

内容提要:长江中下游铜陵及其邻区的中生代侵入岩极其发育, 岩石类型多样。本文通过对该区已获得的高精度成岩年龄数据的综合整理, 结合系统的岩石地球化学测试数据, 对长江中下游铜陵地区中生代侵入岩进行了岩带划分并提出了可能的岩浆作用模型。铜陵地区中生代中酸性岩浆侵入活动时间集中分段、空间分带明确, 从北到南依次分为庐枞带、铜陵外带和铜陵内带, 岩浆活动从早到晚为铜陵内带到庐枞带再到铜陵外带。铜陵地区北侧的大别带与南侧的江南带中生代岩浆活动时间与长江中下游铜陵外带相当, 但在其内部岩浆活动的空间分带性与时间周期性还不太明确。系统的岩石化学、微量元素、稀土元素分析对比表明, 各带岩石地球化学特征区别明显, 岩浆演化机制与岩浆成因也不相同。岩浆活动时间的分段性、空间展布的分带性以及岩石地球化学的差异性与深部岩浆作用和构造环境有关。铜陵内带中酸性侵入岩形成于以挤压为主的构造背景下, 庐枞带形成于挤压—拉张转化阶段, 铜陵外带则完全形成于拉张环境。长江中下游铜陵地区广泛发育的中生代中酸性侵入岩是我国东部岩石圈减薄事件的产物。

关键词: 岩浆岩; 中生代; 岩石地球化学; 深部岩浆作用; 长江中下游

长江中下游地区广泛发育中生代中酸性侵入岩, 其研究程度较高。铜陵位于该区的中部, 针对铜陵地区的岩浆岩尤其是与成矿有关的岩浆岩已进行了大量的研究工作, 并对其深部岩浆作用提出了不同的认识(毛建仁等, 1990; 常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 邓晋福等, 1992, 2002; 周珣若等, 1994; 马昌前等, 1994; 邢凤鸣等, 1994, 1996a, 1996b, 1999; 吴才来等, 1997, 2003; 唐永成等, 1998; 吴言昌等, 1999; Chen et al., 2001; 李曙光, 2001; 王强等, 2003; 王元龙等, 2004; 吴淦国等, 2008)。然而, 前人对该区侵入岩的研究多是针对单个岩体、单个矿区, 或矿集区范围, 或者只关注于长江岩浆岩带内, 缺少对长江中下游及其邻区横向上侵入岩的系统对比。笔者在综合整理前人相关资料的基础上, 对长江中下游铜陵地区、庐枞地区以及长江中下游两侧的大别地区和江南隆起地区的中生代中酸性侵入岩进行了较为系统的取样分析。样品分布横跨长江中下游

岩浆带, 构成了一条北西-南东向的廊带(图1)。在所取得的样品中选择有代表性的样品进行系统的测试分析。本文依据岩石测试分析结果, 结合近年来获得的高精度成岩年龄数据, 对长江中下游带铜陵及其邻区的中生代中酸性侵入岩岩浆活动进行了初步划分, 拟通过不同岩浆活动带侵入岩地球化学特征的系统对比分析, 获得更多的深部岩浆活动信息, 了解该地区岩浆作用机制, 并初步提出该区深部岩浆作用模型。

1 岩浆岩带划分与岩石系列

长江中下游地区广泛发育中生代中酸性侵入岩, 毛建仁等(1990)将其划分为长江系列和江南系列, 分属沿江岩浆岩带和江南岩浆岩带。铜陵位于该沿江岩浆岩带的中段, 其南北两侧分别为江南岩浆岩带(江南带)和庐枞火山岩浆带。根据目前已有的岩浆活动年龄数据尤其是近年来得到的高精度年

注: 本文为国家自然科学基金重点基金项目(编号 40930418)、深部矿产资源立体探测技术及实验研究项目(编号 SinoProbe-03-04)、国土资源部专项研究计划(编号 20010103)、国家地质调查专项(编号 1212010012010)资助的成果。

收稿日期: 2010-12-25; 改回日期: 2011-03-03; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 孟祥金, 男, 1966年生。博士, 研究员。矿物学、岩石学、矿床学专业。通讯地址: 100037, 中国地质科学院矿产资源研究所; Email: xjmeng2000@sina.com。

DOI: CNKI: 11-1951/P. 20110511. 1655. 001 网络出版时间: 2011-5-11 16:55:32

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20110511.1655.001.html>

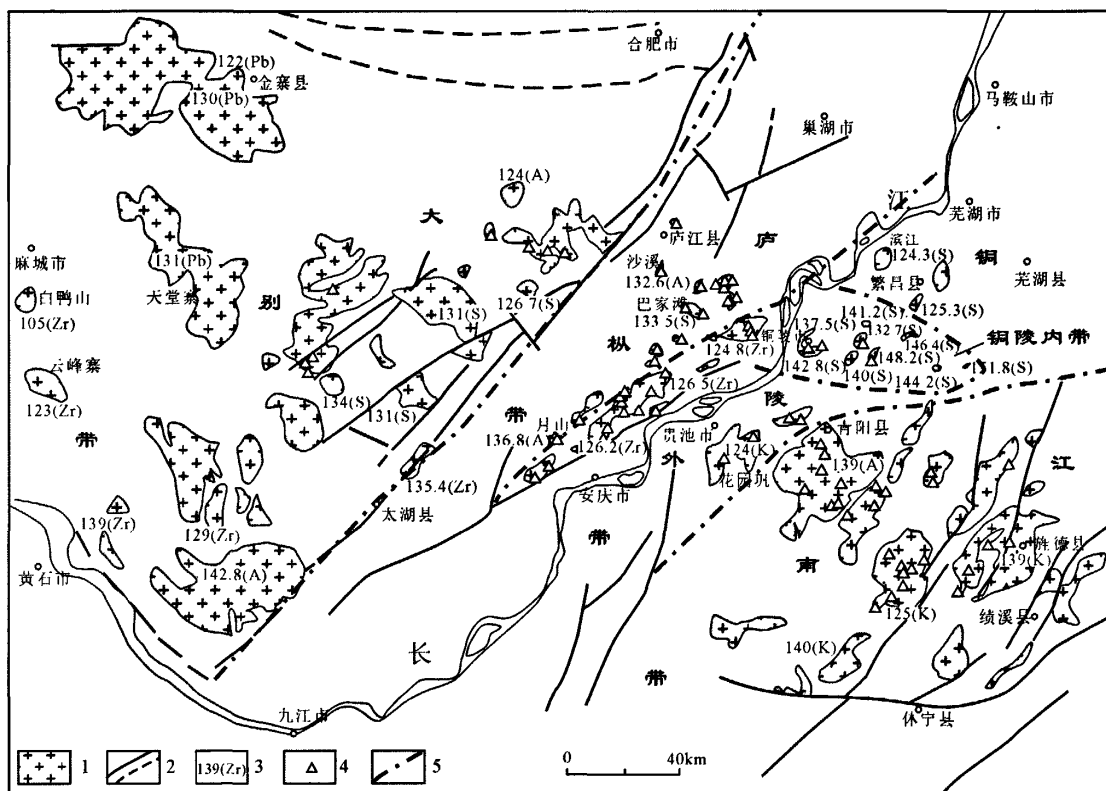


图1 铜陵及邻区中生代中酸性侵入岩分布略图(据张德全等,2002,有改动)

Fig. 1 Sketch map showing the locations of Mesozoic intermediate-acid intrusive rocks in Tongling and adjacent area, Anhui Province(modified from Zhang et al., 2002)

1—中酸性侵入岩;2—断裂构造;3—岩体年龄(测试方法:S—锆石 SHRIMP 法,Zr—锆石 U-Pb 法,A— $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法,K—K-Ar 法,Pb—Pb-Pb 法,R—Rb-Sr 法);4—取样位置;5—岩带界线。年龄数据来自张祖还等,1984;陈道公,1986;陈江峰等,1991;李石等,1991;郑永飞等,1995;王人镜等,1998;路玉林等,1999;张德全等,2002;马昌前等,2003;夏群科等,2003;杜杨松等,2004,2007;王彦斌等,2004a,2004b,2004c;徐夕生等,2004;楼亚儿等,2006;张达等,2006;杨晓勇等,2006;杨小男等,2007;周涛发等,2007;吴淦国等,2008;徐晓春等,2008;范裕等,2008

1—Intermediate-acid magmatic rock; 2—fault; 3—age of the magmatic rock and the technique for the age(S—zircon SHRIMP method; Zr—Zircon U-Pb method; A— $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method; K—K-Ar method; Pb—Pb-Pb method; R—Rb-Sr method); 4—locations of the sample; 5—borderline showing the different magma belt; Date sources from Zhang et al., 1984; Chen,1986; Chen et al., 1991; Li et al., 1991; Zheng et al., 1995; Wang et al., 1998; Lu et al., 1999; Zhang et al., 2002; Ma et al., 2003; Xia et al., 2003; Du et al., 2004, 2007; Wang et al., 2004a,2004b,2004c; Xu et al., 2004; Lou et al., 2006; Zhang et al., 2006; Yang et al., 2006; Yang et al., 2007; Zhou et al., 2007; Wu et al., 2008; Xu et al., 2008; Fan et al., 2008

龄数据、侵入岩的空间展布以及岩石组合等特征,本文将铜陵及两侧地段的中生代中酸性侵入岩划分为三个亚带,即长江南侧的铜陵内带、沿长江两侧分布的铜陵外带及北侧的庐枞带(图1)。庐枞带位于长江北岸,其岩浆侵入活动时间主要集中在132.6~136.8Ma之间。铜陵内带岩浆活动时间范围为132.7~151.8Ma,主要集中在137~150Ma之间,侵入岩仅分布在铜陵一带,大致呈东西向展布。铜陵外带岩浆活动时间为115~126Ma,总体上沿长

江两岸呈北东向展布,分布在铜陵内带外围的繁昌、花园坝及长江北岸的黄梅尖—枞阳一带,与邢凤鸣等(1994)划分的A型花岗岩带的范围大致相同。庐枞带北侧为大别带,其中生代岩浆活动时间为105~142.8Ma。铜陵外带南侧为江南隆起区(江南带),其中生代岩浆活动时间为110~153Ma(张德全等,2002)。从时间上看,岩浆活动从早到晚依次为铜陵内带→庐枞带→铜陵外带。大别和江南两个岩带的岩浆活动时间跨度相对较大,目前在空间上

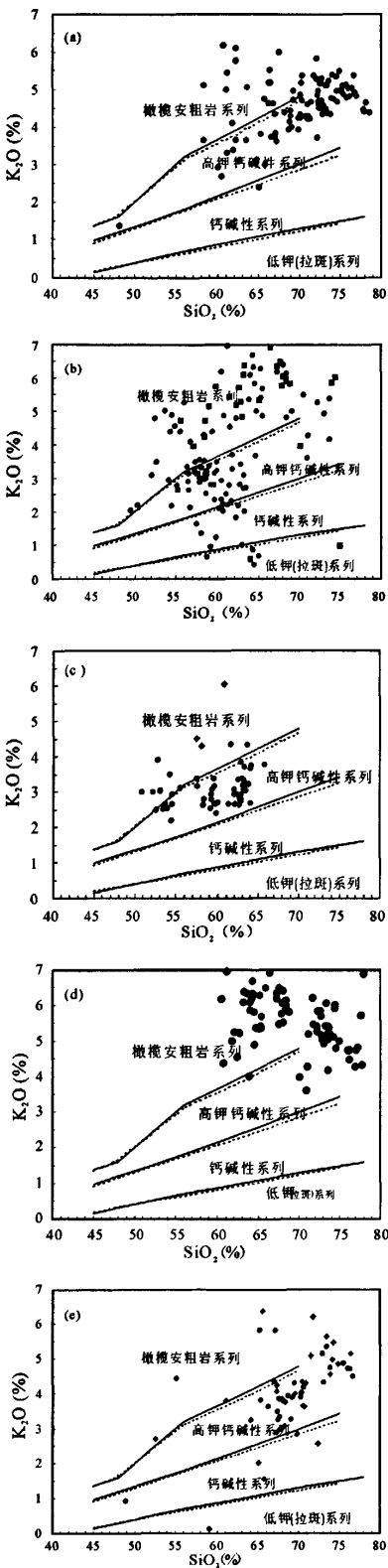


图 2 岩石 K_2O-SiO_2 图解

Fig. 2 K_2O vs. SiO_2 discriminant diagram for the magmatic rocks from Tongling and adjacent area, Anhui Province (a)—大别带; (b)—庐枞带; (c)—铜陵内带; (d)—铜陵外带; (e)—江南带. 除本文数据外, 引用资料有周珣若等, 1994, 邢凤鸣等, 1994, 周涛发等, 2001, 王强等, 2003, 黄顺生等, 2004, 楼亚儿等, 2006, 杨小男等, 2007 (a)—Dabie zone; (b)—Luzong zone; (c)—Tongling inner zone; (d)—Tongling outer zone; (e)—Jiangnan zone. Date sources from Zhou et al., 1994, Xin et al., 1994, Zhou et al., 2001, Wang et al., 2003, Huang et al., 2004, Lou et al., 2006, Yang et al., 2007, and this paper

的分带性研究比较欠缺,与长江中下游铜陵地区侵入岩有所区别。

综合岩石地球化学资料,各岩带的岩石组合及所属的岩石系列明显不同。铜陵内带岩石类型主要为辉石二长闪长岩、石英二长闪长岩、石英二长岩、二长闪长岩、花岗闪长岩等,主要属于高钾钙碱性岩系,有少量的归属于橄辉安粗岩系。铜陵外带则以碱长花岗岩—二长花岗岩、正长岩为主,属于富碱花岗岩。庐枞带有正长岩、二长岩、钾长花岗岩以及闪长岩、花岗闪长岩等岩石类型,分属于橄辉安粗岩与钙碱性—高钾钙碱性岩两个系列。

大别带的岩浆岩较为复杂,二长岩、二长花岗岩、正长岩与闪长岩、花岗岩等较为发育,橄辉安粗岩系和钙碱性岩系均有。江南带则以高钾钙碱性岩系的花岗闪长岩、花岗岩为主,有少量的二长岩类出露。

2 岩石地球化学特征

本次工作分别对大别带、庐枞带、铜陵内带、铜陵外带以及江南带部分侵入岩体进行了主量元素、微量元素和稀土元素分析(表 1,表 2,表 3)。岩石化学分析在国家地质测试中心进行。结合前人部分资料分析,各带岩石地球化学一般特点如下。

2.1 主量元素

铜陵内带岩石 SiO_2 含量为 57.46%~65.42% (表 1)。岩石富 Al, Al_2O_3 为 15.52%~17.42%, K_2O 2.62%~6.04%, TiO_2 0.36%~0.72%, Na_2O+K_2O 为 2.26%~9.43%。在 SiO_2-K_2O 图解中,主要落在高钾钙碱性系列范围,次为橄辉安粗岩系列(图 2c)。

铜陵外带岩石的 SiO_2 、 K_2O 和 Na_2O+K_2O 含量明显高于铜陵内带, SiO_2 55.28%~77.70%之间, K_2O 和 Na_2O+K_2O 分别为 2.64%~6.90%与 6.21%~12.27%, Al_2O_3 为 12.30%~17.75%, 而 TiO_2 含量较低(0.31%~0.96%),属于A型花岗岩类(邢凤鸣等,

表 1 铜陵及邻区中生代中酸性侵入岩岩石化学分析结果(%)

Table 1 Petrochemical compositions of Mesozoic intermediate-acid magmatic rocks in Tongling and adjacent area, Anhui Province

区带	样品号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	总和	K ₂ O+Na ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O
大别带	H1122-1	花岗岩	65.82	0.32	17.79	1.34	1.35	0.06	0.81	3.52	5.22	2.98	0.46	0.26	99.93	8.20	0.57
	H1122-2-2	二长花岗岩	74.50	0.13	13.37	0.41	0.52	0.03	0.15	0.95	3.68	4.96	0.03	0.24	98.97	8.64	1.35
	H1122-2-3	二长花岗岩	74.90	0.09	13.63	0.51	0.36	0.02	0.11	0.70	3.78	5.49	0.02	0.32	99.93	9.27	1.45
	Y1123-4-2	二长花岗岩	73.11	0.26	13.59	0.92	0.88	0.03	0.40	1.25	3.37	5.10	0.07	0.44	99.42	8.47	1.51
	Y1124-3-1	正长岩	62.22	0.62	18.08	1.81	1.06	0.07	0.66	1.89	6.13	6.09	0.14	0.60	99.37	12.22	0.99
	Y1124-4	石英二长岩	67.61	0.48	15.59	1.32	0.95	0.06	0.50	1.38	4.43	5.99	0.10	0.70	99.11	10.42	1.35
	T1126-2-1	花岗闪长岩(脉)	64.72	0.61	16.41	1.66	2.39	0.05	1.63	3.33	4.13	3.11	0.22	1.12	99.38	7.24	0.75
	T1126-4	二长花岗岩	68.17	0.53	14.90	1.54	1.65	0.06	1.10	2.06	3.97	4.38	0.22	1.12	99.70	8.35	1.10
	T1126-5	正长斑岩	76.11	0.09	12.89	0.29	0.34	0.03	0.07	0.24	3.78	4.82	0.02	0.40	99.08	8.60	1.28
	Y1124-6	二长花岗岩	70.10	0.31	14.47	0.17	1.71	0.06	0.41	1.54	3.95	4.80	0.12	0.96	98.60	8.75	1.22
	Y1124-8	石英二长花岗岩	58.36	0.98	15.90	2.33	3.57	0.10	3.00	4.00	4.51	3.63	0.40	1.74	98.52	8.14	0.80
	Y1125-1	二长花岗岩	73.56	0.22	13.86	0.85	0.51	0.05	0.27	0.66	4.16	5.23	0.04	0.32	99.73	9.39	1.26
	Y1125-3-1	花岗闪长岩	68.78	0.48	14.65	1.44	1.56	0.05	1.55	2.39	4.07	3.92	0.19	0.66	99.74	7.99	0.96
	Y1125-4-1	石英二长岩	66.27	0.69	15.54	2.16	1.78	0.06	1.10	2.22	4.24	5.16	0.22	0.48	99.92	9.40	1.22
	Y1125-6	二长花岗岩	75.68	0.20	12.41	0.73	0.47	0.03	0.25	0.70	3.18	5.12	0.04	0.40	99.21	8.30	1.61
	Y1125-7-2	石英闪长岩	48.14	1.34	15.43	3.89	6.02	0.15	7.37	9.21	3.04	1.37	1.13	2.80	99.89	4.41	0.45
	Y1125-7-3	花岗岩	72.11	0.23	13.67	0.96	1.10	0.02	0.52	0.92	2.90	5.82	0.08	0.55	98.88	8.72	2.01
	T1126-6	二长花岗岩	74.60	0.17	13.31	0.78	0.40	0.05	0.21	0.69	4.15	4.67	0.04	0.22	99.29	8.82	1.13
庐枞带	L1128-2-2	石英二长岩	58.97	0.81	16.03	3.37	2.51	0.08	2.80	4.08	4.08	5.16	0.51	0.64	99.04	9.24	1.26
	L1129-4	石英二长斑岩	58.48	0.56	16.61	3.13	1.49	0.10	1.86	4.93	4.68	3.09	0.27	3.02	98.22	7.77	0.66
	L1129-8	正长斑岩	61.44	0.65	20.06	1.74	0.70	0.01	0.35	0.17	6.65	5.42	0.08	1.56	98.83	12.07	0.82
	L1130-4-1	二长岩	62.24	0.91	19.48	1.83	0.31	0.03	0.50	1.33	6.64	5.20	0.04	1.36	99.87	11.84	0.78
	L1130-5-1	二长岩	55.65	0.95	17.29	3.94	3.61	0.14	2.82	5.11	3.91	4.74	0.50	0.86	99.52	8.65	1.21
	L1202-2	石英二长斑岩	57.12	0.85	17.29	4.05	3.34	0.19	2.09	4.66	4.52	3.95	0.42	1.14	99.62	8.47	0.87
	L1202-4	石英二长斑岩	62.57	0.75	17.14	5.00	0.66	0.03	0.85	1.07	4.40	5.71	0.41	1.34	99.93	10.11	1.30
	L1202-5	石英二长岩	62.77	0.64	16.44	2.40	2.16	0.11	1.58	3.18	4.06	5.30	0.28	0.48	99.40	9.36	1.31
	L1202-6	石英二长斑岩	59.77	0.60	15.84	3.00	1.65	0.09	1.87	3.92	4.30	5.74	0.32	0.90	98.00	10.04	1.33
	L1202-9-2	石英二长岩	58.54	0.70	16.99	3.45	2.53	0.24	2.23	3.88	4.22	4.73	0.35	1.48	99.34	8.95	1.12
	L1204-7	石英闪长玢岩	57.54	0.86	17.03	7.15	0.56	0.12	2.51	2.80	5.73	3.14	0.48	1.66	99.58	8.87	0.55
	Z1205-6	二长斑岩	62.94	0.71	16.52	2.76	1.56	0.10	1.57	2.50	4.97	4.84	0.28	1.00	99.75	9.81	0.97
	Z1205-7	碱长花岗岩	74.95	0.23	14.70	0.66	0.38	0.02	0.32	0.32	6.48	0.99	0.07	0.94	100.06	7.47	0.15
	Z1206-9	石英二长岩	58.42	0.90	15.68	2.86	3.02	0.10	3.64	4.42	4.83	4.24	0.55	0.78	99.44	9.07	0.88
	Z1206-10-1	闪长玢岩	64.00	0.49	17.10	0.78	1.28	0.02	1.95	3.42	8.18	0.59	0.25	1.04	99.10	8.77	0.07
	Z1206-11	二长闪长岩	59.46	0.79	17.32	2.59	2.08	0.04	2.84	4.31	6.65	2.82	0.42	0.84	100.16	9.47	0.42
	Z1206-15-1	二长花岗岩	70.14	0.30	15.06	0.86	1.28	0.05	0.73	2.09	3.88	3.96	0.11	0.78	99.24	7.84	1.02

续表 1

区带	样品号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	总和	K ₂ O+Na ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O
沿江带	Z1205-3	石英正长岩	67.92	0.58	14.52	2.00	1.02	0.11	0.52	1.14	4.88	5.76	0.10	0.66	99.21	10.64	1.18
	Z1205-4	二长岩	63.28	0.78	17.47	2.28	1.02	0.06	0.68	1.56	5.58	6.37	0.14	0.56	99.78	11.95	1.14
	Z1205-14	石英正长岩	68.07	0.54	14.82	2.05	0.86	0.12	0.41	0.94	5.14	6.05	0.07	0.86	99.93	11.19	1.18
	Z1205-15	钾长花岗岩	74.43	0.33	12.76	1.57	0.23	0.03	0.26	0.42	3.13	6.01	0.03	0.98	100.18	9.14	1.92
	Z1206-3	黑云母二长岩	63.17	0.83	17.75	2.24	1.20	0.12	0.83	1.19	5.87	6.08	0.22	0.66	100.16	11.95	1.04
	Z1206-12-1	石英二长闪长岩	55.28	0.87	15.64	2.78	4.62	0.13	5.32	6.71	3.57	2.64	0.63	1.45	99.64	6.21	0.74
	Z1207-1	黑云石英二长岩	65.13	0.96	15.50	2.25	1.53	0.12	1.09	1.94	5.11	5.34	0.27	0.54	99.78	10.45	1.05
	T1214-1	石英碱长正长岩	66.47	0.44	16.87	2.49	0.16	0.08	0.11	0.42	5.37	6.90	0.07	0.68	100.06	12.27	1.28
	T1214-2-1	石英碱长正长岩	67.68	0.42	16.38	2.05	0.23	0.02	0.12	0.54	5.15	6.48	0.05	0.84	99.96	11.63	1.26
	T1214-2-2	石英碱长正长岩	67.38	0.46	16.14	2.46	0.22	0.10	0.07	0.33	5.31	6.34	0.05	0.72	99.58	11.65	1.19
	T1214-3	石英碱长正长岩	68.95	0.40	16.83	1.60	0.25	0.01	0.07	0.20	5.53	5.82	0.05	0.52	100.23	11.35	1.05
	Q1209-2-1	钾长花岗岩	74.96	0.18	12.75	0.75	0.29	0.02	0.10	0.39	4.47	5.00	0.02	0.38	99.31	9.47	1.12
	Q1209-3	石英二长岩	62.42	0.93	16.63	2.18	2.14	0.11	1.41	2.69	4.90	4.55	0.39	1.36	99.71	9.45	0.93
	Q1209-8	钾长花岗斑岩	76.28	0.16	12.50	0.97	0.38	0.11	0.07	0.35	4.27	4.47	0.01	0.40	99.97	8.74	1.05
	Q1209-13	钾长花岗岩	71.80	0.32	14.74	1.19	0.23	0.03	0.09	0.27	5.18	5.47	0.02	0.40	99.74	10.65	1.06
	Q1210-9	钾长花岗岩	74.41	0.19	13.41	0.81	0.16	0.01	0.02	0.21	3.50	5.91	0.01	0.56	99.20	9.41	1.69
	Q1210-10	钾长花岗岩	77.70	0.11	12.30	0.47	0.36	0.02	0.05	0.09	3.29	5.70	0.01	0.38	100.48	8.99	1.73
铜陵带	T1215-1-1	石英二长岩	57.46	0.73	16.75	1.38	2.62	0.18	2.36	6.00	3.98	4.52	0.31	1.64	97.93	8.50	1.14
	T1215-1-2	二长花岗斑岩	65.42	0.36	16.13	1.31	1.54	0.07	1.24	2.29	2.10	5.16	0.15	3.36	99.13	7.26	2.46
	T1215-3-1	石英二长岩	60.84	0.60	15.52	0.40	4.02	0.08	1.53	5.28	3.39	6.04	0.24	0.78	98.72	9.43	1.78
	T1215-4	二长岩	58.08	0.80	17.23	1.00	2.42	0.09	2.08	6.72	4.68	4.30	0.35	1.41	99.16	8.98	0.92
	T1216-1-1	石英二长闪长岩	62.63	0.62	17.42	1.46	1.98	0.09	1.76	5.72	4.88	2.62	0.31	0.24	99.73	7.50	0.54

续表 1

区带	样品号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	总和	K ₂ O+Na ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O
江南带	Q1208-3	二长花岗岩	70.46	0.37	14.85	1.53	1.06	0.08	0.68	1.77	3.80	4.36	0.14	0.64	99.74	8.16	1.15
	Q1208-4-1	二长花岗岩	74.17	0.18	13.18	0.60	0.52	0.06	0.24	0.90	3.69	4.99	0.05	0.64	99.22	8.68	1.35
	Q1208-5	含斑花岗岩闪长岩	70.75	0.41	14.32	1.29	1.48	0.06	0.93	2.46	3.59	3.64	0.14	0.52	99.59	7.23	1.01
	Q1208-6	含斑花岗岩闪长岩	69.57	0.38	14.77	1.09	1.60	0.06	1.00	2.64	3.58	4.03	0.14	0.50	99.36	7.61	1.13
	Q1208-12-2	花岗闪长岩	68.31	0.57	14.23	0.81	2.91	0.09	1.54	3.19	2.86	3.09	0.17	1.72	99.49	5.95	1.08
	Q1208-14-1	二长花岗岩	65.76	0.70	15.67	1.28	3.84	0.10	2.02	3.72	2.97	1.57	0.24	1.68	99.55	4.54	0.53
	Q1208-15	花岗闪长岩	65.09	0.72	15.55	2.13	2.93	0.10	1.92	4.28	3.24	2.03	0.24	1.52	99.75	5.27	0.63
	Q1209-12	中粒石英正长岩	65.57	0.62	16.67	1.66	0.98	0.14	0.46	1.18	5.27	6.38	0.09	0.48	99.50	11.65	1.21
	Q1210-1-1	花岗闪长岩	68.37	0.45	15.27	1.70	1.72	0.07	1.34	3.17	3.54	3.77	0.18	0.66	100.24	7.31	1.06
	Q1210-2-3	二长花岗岩	73.88	0.18	12.92	0.34	0.86	0.07	0.38	1.17	4.06	4.57	0.03	0.80	99.26	8.63	1.13
	Q1210-4-1	钾长花岗岩	74.81	0.20	12.87	1.03	0.31	0.13	0.12	0.41	4.33	4.86	0.02	0.52	99.61	9.19	1.12
	Q1210-6	花岗闪长岩	69.85	0.24	14.70	0.83	0.88	0.19	0.56	2.01	5.61	2.87	0.06	1.34	99.14	8.48	0.51
	Q1211-1-1	石英二长岩	52.60	1.28	14.69	4.80	4.11	0.14	5.73	6.72	3.50	2.71	0.50	2.36	99.14	6.21	0.77
	Q1211-2-1	二长花岗岩	67.34	0.54	14.55	2.09	1.74	0.08	1.69	3.04	3.42	4.10	0.19	0.70	99.48	7.52	1.20
	Q1211-3	花岗闪长岩	64.11	0.70	15.45	2.46	2.76	0.11	2.08	3.98	3.13	3.26	0.24	1.02	99.30	6.39	1.04
	T1213-4	二长花岗岩	73.46	0.15	14.24	0.44	0.20	0.02	0.26	1.26	3.15	5.65	0.08	0.24	99.15	8.80	1.79
	T1213-9	二长花岗岩	67.35	0.56	15.05	1.85	2.17	0.07	1.64	3.42	2.93	4.26	0.15	0.28	99.73	7.19	1.45
	T1213-12	含斑二长花岗岩	70.89	0.38	14.38	0.71	1.85	0.06	0.66	2.34	3.12	4.32	0.13	0.26	99.10	7.44	1.38
	T1213-15	二长花岗岩	67.94	0.49	15.22	1.51	1.96	0.06	0.98	2.88	3.35	3.88	0.17	0.58	99.02	7.23	1.16
	T1213-16	二长花岗岩	67.03	0.52	15.50	1.56	1.98	0.07	1.15	3.21	3.20	4.38	0.16	0.40	99.16	7.58	1.37
	T1212-1-1	二长花岗岩	67.15	0.59	14.25	1.21	2.71	0.07	0.65	2.08	2.82	5.83	0.18	1.20	98.74	8.65	2.07
	T1212-12	二长花岗岩	71.51	0.24	14.98	0.69	1.04	0.05	0.47	1.70	3.49	5.10	0.08	0.36	99.71	8.59	1.46
	T1213-1	花岗闪长斑岩	72.41	0.19	14.00	0.65	0.48	0.03	0.38	2.06	4.44	2.57	0.06	1.32	98.59	7.01	0.58
	T1213-3	石英二长闪长岩	59.07	0.64	18.02	2.24	2.14	0.09	1.57	3.92	8.96	0.13	0.22	1.74	98.74	9.09	0.01
	T1212-4	正长花岗岩	71.76	0.18	14.20	0.70	1.01	0.04	0.14	0.95	3.53	6.22	0.03	0.14	98.90	9.75	1.76
	T1212-5	石英正长岩	61.06	0.82	18.34	0.97	4.44	0.14	2.13	0.68	4.71	3.82	0.26	2.22	99.59	8.53	0.81
	T1212-7	正长岩	76.44	0.09	12.53	0.59	0.20	0.01	0.02	0.61	3.30	5.17	0.02	0.45	99.43	8.47	1.57
	T1212-8	二长花岗岩	70.54	0.40	14.61	1.56	1.11	0.06	0.86	3.01	3.31	3.66	0.13	0.30	99.55	6.97	1.11
	T1212-9	二长花岗岩斑岩	74.35	0.21	12.77	1.19	0.61	0.03	0.17	0.27	3.14	5.48	0.05	0.56	98.83	8.62	1.75

表 2 铜陵及邻区中生代中酸性侵入岩微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)
Table 2 Trace element concentrations($\times 10^{-6}$) of Mesozoic intermediate-acid magmatic rocks in Tongling
and adjacent area, Anhui Province

区带	样品号	样品名	Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	Sr	Nd	Zr	Hf	Y
大别带	H1122-1	花岗岩	66.4	1299	9.18	1.4	0.94	7.11	609	31.7	249	7.44	34.6
	H1122-2-2	二长花岗岩	235	594	28.5	5.89	2.92	19.6	148	25.4	85.9	3.51	30.7
	H1122-2-3	二长花岗岩	229	338	28.9	5.39	2.96	17.9	98.7	19.1	79.3	3.79	26.4
	Y1123-4-2	二长花岗岩	222	1233	25.5	2.52	1.65	14.7	350	45.7	167	5.3	24
	Y1124-6	二长花岗岩	202	871	29.7	2.93	2.36	22.7	243	56.8	328	8.31	32
	Y1125-1	二长花岗岩	227	424	32	2.55	2.66	30.3	116	32.8	166	5.93	25.6
	Y1125-3-1	花岗闪长岩	124	1490	15.8	2.91	1.47	13.3	618	40.3	187	5.44	15.3
	Y1125-4-1	石英二长岩	122	1482	18.8	1.68	3.03	31.7	445	83.1	420	11.6	43.2
	Y1125-6	二长花岗岩	211	261	30.1	2.58	2.24	24.3	111	33.3	129	4.29	19.2
	Y1125-7-2	二长闪长岩	40.3	829	4.86	0.58	0.67	12.3	898	110	376	8.42	53.4
	T1126-2-1	二长闪长岩	42	2313	7	0.52	0.64	7.54	925	44.2	212	5.52	15.9
	T1126-4	二长花岗岩	128	1194	34.7	5.72	2.1	19.3	466	54.4	271	7.87	31.4
	T1126-5	二长花岗岩	230	106	29	3.2	1.84	26	71.8	7.99	67.2	3.01	10.6
	T1126-6	二长花岗岩	207	390	33.4	2.98	1.36	21	145	25.8	124	4.52	15.3
	Y1124-3-1	二长岩	81.1	873	13.2	0.77	2.91	31.4	208	104	585	14.9	67.5
	Y1124-4	石英二长岩	149	754	22.1	2.56	3.5	35.7	246	86.1	344	10.4	65
	Y1125-7-3	石英二长岩	84.9	4210	26.1	0.33	0.47	5.22	732	63.7	180	4.54	6.99
庐枞带	L1128-2-2	石英二长岩	136	2726	32.1	4.64	1.65	22.6	921	81.3	383	9.75	31
	L1128-4-1	石英二长岩	125	561	0.35	0.34	0.3	7.6	316	0.99	35.7	0.89	1.2
	L1129-8	二长岩	154	385	9.79	2.5	2.36	26.5	330	43.5	291	6.34	24.4
	L1130-4-1	二长闪长岩	148	1175	34.1	6.57	1.84	30.7	875	44	221	6.24	33.1
	L1130-5-1	二长岩	223	511	30.5	8.22	1.96	22.5	743	46.1	265	7.43	30
	L1202-2	石英二长斑岩	117	582	8.79	2.37	1.06	12.6	864	37.9	213	5.84	37.2
	L1202-4	石英二长斑岩	146	998	19.3	6.39	1.22	14.9	595	38.5	234	6.58	25.9
	L1202-5	石英二长岩	305	535	65.8	32.1	3.53	39.6	608	49.9	514	13.6	32.2
	L1202-6	石英二长斑岩	167	1088	23.3	5.11	1.49	17.5	782	47.3	198	5.51	34.1
	L1202-9-2	石英二长岩	234	621	45.4	11.1	2.65	31.1	786	42.7	338	8.88	28.2
	Z1205-6	石英二长岩	175	721	21.8	4.81	2.16	24.5	630	33.8	352	8.78	25.7
	Z1205-7	碱长花岗岩	46.3	71.7	28	4.15	2.1	16.6	260	37	149	4.3	18.5
	Z1206-9	二长闪长岩	140	858	58.5	21.7	3.1	32.9	1147	53.5	272	8.15	19.4
	Z1206-10-1	石英闪长玢岩	15.8	258	4.85	0.98	0.5	7.1	921	24	129	3.46	10.3
	L1129-4	石英二长斑岩	63.9	1403	3.39	0.92	0.49	4.94	738	21	72.5	2.24	11.6
	L1204-7	石英闪长玢岩	82.4	860	6.41	1.28	0.9	11.1	1094	34.7	174	4.68	25.9
	Z1206-11	二长闪长岩	39.8	790	8.97	1.5	0.8	9.98	1115	37.1	130	3.84	16.7
	Z1206-15-1	二长花岗岩	90.6	1424	10.7	1.63	1.12	9.76	494	22.8	137	3.91	13.3
沿江带	Z1205-3	石英二长岩	232	264	35.4	5.12	4.2	58.1	142	83.5	709	17.7	76.3
	Z1205-4	二长岩	185	825	31.2	5.47	3.38	45.3	366	62	534	13.3	45.6
	Z1205-14	石英二长岩	208	179	26.4	3.7	3.63	49.2	88	85.4	738	17.6	78.2
	Z1205-15	二长花岗岩	339	217	64.8	4.19	4.8	69.4	63.3	41.6	448	14.6	37.3
	Z1206-3	二长岩	134	642	19.8	2.81	2.72	35.5	272	60.1	668	15	48.3
	Z1207-1	石英二长岩	188	615	21.9	3.87	2.74	39	277	94.9	699	18.2	78.7
	T1214-1	石英二长岩	339	97.8	21.7	6.2	4.93	57.9	40.9	55.4	481	14.7	39.4
	T1214-2-1	石英二长岩	317	80.5	51.7	8.53	6.06	83.5	30.5	75	695	21.6	59
	T1214-2-2	石英二长岩	317	40.7	47.8	11.7	6.38	76	18.3	69.6	641	18.7	54.7
	T1214-3	石英二长岩	316	67.9	53.5	8.99	8.02	88.2	26.6	59.3	526	15.1	48.5
	Z1206-12-1	石英二长闪长岩	69.6	545	10.6	1.68	0.97	11.6	620	54.2	289	7.49	56.1
	Q1209-2-1	二长花岗岩	260	56.8	34	8.38	3.28	44.6	21.1	24.2	179	6.87	37.2
	Q1209-8	二长花岗岩斑岩	272	12.3	62	8.09	4	53.3	7.76	19.4	249	10.5	43.2
	Q1210-10	二长花岗岩	303	25.2	37.3	5.18	3.95	56.3	9.68	9.91	114	5.2	28.9
	Q1209-3	石英二长岩	159	1105	14.8	2.74	1.91	28.3	426	56.6	322	8.18	47
	Q1209-13	二长花岗岩	203	19.9	17.3	2.87	3.56	45.9	3.96	60.7	369	10.7	113
	Q1210-9	二长花岗岩	302	89.4	38.7	6.7	3.88	46.9	20.7	32	164	6.2	42.9

续表 2

区带	样品号	样品名	Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	Sr	Nd	Zr	Hf	Y
铜 陵 带	T1215-1-1	二长岩	130	678	9.16	2.11	1.27	13.6	703	33	207	5.29	25.8
	T1215-1-2	二长花岗岩斑岩	191	944	13.1	4.22	1.41	13.2	296	19.5	165	4.55	11.7
	T1215-3-1	石英二长岩	189	247	10.9	2.81	1.42	14.4	1244	30.7	169	5.11	21.8
	T1215-4	二长闪长岩	137	854	9.27	2.22	1.24	14.6	1202	31.6	166	4.72	19.4
	T1216-1-1	石英二长闪长岩	71.9	931	6.36	1.46	0.94	12.5	1107	30.6	173	5.13	14.6
江 南 带	Q1208-3	二长花岗岩	169	531	27.9	4.18	2.24	18.2	401	20.5	108	3.35	11.7
	Q1208-4-1	二长花岗岩	131	424	17.8	1.69	0.89	11.4	144	28.4	147	4.47	15.6
	Q1208-5	花岗闪长岩	139	583	16.7	4.7	1.75	15.4	447	22.9	140	4.33	13.2
	Q1208-6	二长花岗岩	143	505	24.3	4.11	1.48	13.3	438	32.2	152	4.7	29
	Q1208-12-2	花岗闪长岩	105	695	13.7	3.5	1.63	15.7	366	33.7	144	4.47	30.6
	Q1208-14-1	花岗闪长岩	103	425	11	3.38	2.56	17.6	480	27.6	171	4.89	26.6
	Q1208-15	花岗闪长岩	66.2	475	15.7	2.19	1.87	19.4	466	40.9	162	5.03	27
	Q1210-1-1	花岗闪长岩	123	580	10.8	3.05	1.31	13.1	478	22.9	155	4.55	16.3
	Q1210-2-3	二长花岗岩	412	34.1	58.6	16.5	5.02	59.3	24.2	12.4	126	6.02	23.6
	Q1210-4-1	二长花岗岩	293	140	56.1	8.87	4.49	56.4	15.8	25	214	7.57	51.6
	Q1210-6	花岗闪长岩	128	520	8.3	1.51	1.04	11.1	263	14.9	115	3.45	9.23
	Q1211-1-1	二长闪长岩	65.1	644	7.64	1.8	1	12.1	858	41.6	154	4.46	32.1
	Q1211-2-1	二长花岗岩	134	723	17.8	4.13	1.61	13.7	486	25.2	143	4.21	21.2
	Q1211-3	花岗闪长岩	105	870	13.6	2.86	1.48	14.9	453	31	171	5.07	29.5
	T1212-5	石英二长岩	143	965	14.1	2.37	1.57	14.8	359	36.1	191	5.97	24.5
	T1212-7	二长花岗岩	329	36	26	20.7	1.63	11.2	49	6.58	63.7	3.52	5.53
	T1212-8	花岗闪长岩	171	442	21.8	6.78	1.37	11.3	322	25	125	4.25	16.7
	T1212-9	二长花岗岩	323	257	51.5	6.82	3.64	31.1	92	58.3	153	5.79	66.4
	T1212-12	二长花岗岩	272	501	13.3	8.47	2.08	12.5	212	14.2	89.3	3.43	15.4
	T1213-1	花岗闪长斑岩	128	250	9.17	4.1	1.51	11.6	162	18.1	73.9	3	15.8
	T1213-3	石英二长闪长岩	10.1	55	12.3	1.71	1.32	11.6	421	26.6	143	4.85	20.5
	T1213-4	二长花岗岩	235	356	8.92	6.52	3.19	12.4	151	11.1	66.2	2.56	15.9
	T1213-9	二长花岗岩	163	526	21.5	4.28	1.64	12.5	318	29.2	122	4.52	30.5
	T1213-12	二长花岗岩	185	360	17.5	5.45	1.67	12	210	25.8	116	4.16	14.9
	T1213-15	二长花岗岩	138	717	16.1	4.22	1.3	10.3	330	26.6	141	4.8	15.4
	T1213-16	二长花岗岩	164	813	18.5	5.74	1.55	13	351	27.4	153	5.2	19.7
	T1212-1-1	二长花岗岩	200	748	20.3	3.43	2.1	23	216	67.3	355	10.7	43.6
	T1212-4	二长花岗岩	401	324	50.1	8.93	3.99	31.9	82.7	65.6	173	6.15	83.1
	Q1209-12	石英二长岩	115	597	13.5	2.6	3.42	36.6	146	137	731	17.8	137

1994;楼亚儿等,2006)。在 SiO₂-K₂O 图解中, SiO₂ <70% 部分主要落在橄榄安粗岩系范围内(图 2d)。

庐枞带岩石的 SiO₂ 含量变化范围较大, 在 55.65% ~ 74.95% 之间, Al₂O₃ (14.70% ~ 20.06%)、K₂O (0.59% ~ 7.28%) 及 Na₂O + K₂O (7.47% ~ 12.07%) 含量较高, 而 TiO₂ 含量相对较低(0.12% ~ 0.96%)。在 SiO₂-K₂O 图解中(图 2b), 落在钙碱性、高钾钙碱性及橄榄安粗岩范围内, 少量落在低钾(拉斑)系列范围, 显示庐枞带岩浆岩石具有一定的复杂性。

大别带与江南带内侵入岩的 SiO₂ 含量高且其变化幅度大, 分别为 48.14% ~ 76.11% 和 52.60% ~ 76.44%, K₂O 分别 1.37% ~ 6.09% 与 0.13% ~ 6.38%, Na₂O + K₂O 4.41% ~ 12.22% 和 4.54% ~ 11.65%, TiO₂ 的含量均不高, 除个别外绝大多数都

小于 1%。在 SiO₂-K₂O 图解中, 大别带岩石分属于高钾钙碱性系列与橄榄安粗岩系两个组合, 而江南带岩石主要属于高钾钙碱性岩石系列, 少量属橄榄安粗岩系(图 2a、e)。

2.2 微量元素

铜陵地区及其邻区中生代中酸性侵入岩微量元素含量(表 2)及其原始地幔标准化后的微量元素分布曲线见图 3。

铜陵内带岩石微量元素分布曲线比较一致, 略微富集大离子亲石元素(LILE)K、Rb、Sr, 弱亏损高场强元素(HFSE)Ti、P、Ta、Nb。铜陵外带岩石微量元素分布曲线特征相当一致, Ba、Sr、Ti、P 明显亏损, 而富集 Rb、Th、U、Nd、Zr、Hf 元素。庐枞带岩石微量元素分布曲线不太一致, 较多岩石明显富集的元素有 Nd、Zr、Hf, 亏损 Sr、Ti, 部分岩石亏损

表 3 铜陵及邻区中生代中酸性侵入岩稀土元素分析结果 ($\times 10^{-6}$)

Table 3 Rare earth element concentrations ($\times 10^{-6}$) of Mesozoic intermediate-acid magmatic rocks in Tongling and adjacent area, Anhui province

区带	样品号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE/HREE	δ Eu	L_{AN}/Yb_N
大别带	H1122-1	花岗岩	44.7	78.1	8.66	31.7	5.88	1.37	5.42	0.88	4.95	0.98	2.92	0.42	2.61	0.41	189	9.17	0.73	11.55
	H1122-2-2	二长花岗岩	39.3	71.6	7.82	25.4	5.05	0.62	4.41	0.71	4.31	0.87	2.8	0.45	2.97	0.48	166.79	8.81	0.39	8.92
	H1122-2-3	二长花岗岩	23.2	46.4	5.55	19.1	4.39	0.45	3.56	0.59	3.54	0.74	2.41	0.43	3.12	0.53	114.01	6.64	0.34	5.01
	Y1123-4-2	二长花岗岩	77	136	14.3	45.7	7.41	1.02	5.77	0.79	4.12	0.79	2.31	0.33	2.04	0.31	297.89	17.10	0.46	25.45
	Y1124-3-1	二长岩	118	247	29.2	104	18.2	2.49	14.6	2.12	11.8	2.25	6.3	0.81	4.79	0.63	562.19	11.98	0.45	16.61
	Y1124-4	石英二长岩	109	213	24.7	86.1	16.1	1.9	12.8	1.96	10.7	2.06	6.07	0.84	5.02	0.69	490.94	11.23	0.39	14.64
	Y1124-6	二长花岗岩	74.4	141	15.6	56.8	9.57	2.15	7.4	1.03	5.46	1.03	2.99	0.41	2.64	0.39	320.87	14.03	0.75	19.00
	Y1125-1	二长花岗岩	66.3	108	11	32.8	5.38	0.56	4.41	0.64	3.76	0.73	2.39	0.36	2.43	0.39	239.15	14.83	0.34	18.39
	Y1125-3-1	花岗闪长岩	61.5	111	11.9	40.3	6.41	1.56	4.62	0.55	2.59	0.46	1.36	0.18	1.18	0.18	243.79	20.92	0.84	35.14
	Y1125-4-1	石英二长岩	132	234	25	83.1	13.6	2.18	10.1	1.41	7.47	1.4	4.06	0.57	3.54	0.49	518.92	16.87	0.55	25.14
	Y1125-6	二长花岗岩	64.8	110	11.1	33.3	5.1	0.63	3.88	0.56	2.81	0.57	1.76	0.27	1.8	0.27	236.85	18.87	0.42	24.27
	Y1125-7-2	二长闪长岩	89	196	25.4	110	24	6.56	20.2	2.5	11	1.77	4.39	0.51	2.93	0.44	494.7	10.31	0.89	20.48
	Y1125-7-3	二长花岗岩	160	236	21.5	63.7	6.28	1.62	3.99	0.35	1.34	0.22	0.68	0.08	0.55	0.09	496.4	67.00	0.93	196.13
	T1126-2-1	二长闪长岩	62.3	112	12.4	44.2	6.87	1.82	5.01	0.62	2.95	0.53	1.47	0.19	1.19	0.18	251.73	19.74	0.91	35.30
	T1126-4	二长花岗岩	86.6	155	16.1	54.4	8.35	1.56	6.57	0.89	4.98	0.97	3.04	0.46	2.96	0.48	342.36	15.82	0.62	19.72
	T1126-5	二长花岗岩	21	33.1	3.14	7.99	1.05	0.12	0.95	0.15	0.99	0.25	0.98	0.19	1.53	0.28	71.72	12.48	0.36	9.25
	T1126-6	二长花岗岩	63.5	96.5	8.75	25.8	3.62	0.57	2.78	0.38	2.07	0.43	1.39	0.24	1.65	0.28	207.96	21.56	0.53	25.95
庐枞带	L1128-2-2	石英二长岩	134	229	23.9	81.3	12.1	2.63	8.81	1.09	5.33	0.99	2.91	0.39	2.51	0.38	505.34	21.55	0.74	35.99
	L1129-4	石英二长斑岩	21.7	43.7	5.34	21	3.77	1.29	3	0.39	2.03	0.38	1.07	0.15	0.92	0.14	104.88	11.98	1.14	15.90
	L1129-8	二长岩	57	116	12.8	43.5	7.58	1.56	5.65	0.8	4.25	0.82	2.5	0.36	2.31	0.35	255.48	13.99	0.70	16.64
	L1130-4-1	二长闪长岩	39.5	86.1	11.4	44	8.65	2.02	7.22	1.02	5.59	1.09	3.12	0.45	2.84	0.39	213.39	8.82	0.76	9.38
	L1130-5-1	二长岩	57.3	113	12.6	46.1	8.19	1.8	6.67	0.94	4.9	0.95	2.86	0.41	2.65	0.42	258.79	12.07	0.72	14.58
	L1202-2	石英二长斑岩	42	83.1	9.9	37.9	7.55	1.58	6.47	1.01	5.89	1.21	3.7	0.54	3.5	0.54	204.89	7.96	0.67	8.09
	L1202-4	石英二长斑岩	49.6	99.8	10.8	38.5	6.57	1.54	5.54	0.76	4.11	0.8	2.41	0.35	2.27	0.35	223.4	12.47	0.76	14.73
	L1202-5	石英二长岩	71.1	130	14.4	49.9	8.39	1.41	6.69	0.91	5.06	0.99	3.09	0.46	3.14	0.5	296.04	13.21	0.56	15.27
	L1202-6	石英二长斑岩	48.2	108	12.9	47.3	8.56	2	7.13	0.99	5.57	1.08	3.17	0.47	3.04	0.45	248.86	10.36	0.76	10.69
	L1202-9-2	石英二长岩	57.8	111	12	42.7	7.32	1.55	6.06	0.86	4.58	0.91	2.73	0.41	2.69	0.42	251.03	12.45	0.69	14.49
	L1204-7	石英闪长玢岩	37.4	76.9	9.15	34.7	6.43	1.6	5.38	0.75	4.2	0.83	2.52	0.35	2.29	0.34	182.84	9.97	0.81	11.01
	Z1206-9	二长闪长岩	71.2	134	14.9	53.5	8.81	2.14	6.3	0.75	3.45	0.6	1.67	0.22	1.46	0.23	299.23	19.38	0.84	32.88
	Z1206-10-1	石英闪长玢岩	27.7	53.2	6.35	24	4.05	1.21	2.88	0.37	1.75	0.33	0.92	0.13	0.75	0.12	123.76	16.07	1.03	24.90
	Z1206-11	二长闪长岩	44.3	83.9	9.76	37.1	6.35	1.73	4.75	0.59	2.92	0.55	1.57	0.21	1.27	0.19	195.19	15.20	0.92	23.52
	Z1205-6	石英二长岩	47.5	89.2	9.65	33.8	5.91	1.38	4.74	0.69	3.87	0.79	2.38	0.35	2.39	0.37	203.02	12.03	0.77	13.40
	Z1205-7	碱长花岗岩	75.6	93.1	11.9	37	5.39	0.91	4.26	0.58	3.07	0.58	1.79	0.26	1.69	0.27	236.4	17.91	0.56	30.16
	Z1206-15-1	二长花岗岩	43.9	70.3	7.18	22.8	3.66	0.8	2.89	0.39	2.13	0.41	1.24	0.17	1.1	0.17	157.14	17.49	0.73	26.91

续表 3

区带	样品号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE	δEu	La _N /Yb _N
铜陵 外带	Z1205-3	石英二长岩	110	225	24.5	83.5	15.1	1.76	12.6	1.96	11.6	2.36	7.53	1.12	7.55	1.15	505.73	10.03	0.38	9.82
	Z1205-4	二长岩	87.8	173	18.5	62	10.3	2.04	8.32	1.23	7.06	1.42	4.48	0.68	4.5	0.71	382.04	12.45	0.65	13.15
	Z1205-14	石英二长岩	107	219	25.1	85.4	15.4	1.73	13	2.1	12	2.47	7.73	1.14	7.61	1.15	500.83	9.61	0.36	9.48
	Z1205-15	二长花岗岩	93.1	133	14.4	41.6	6.16	0.64	5.08	0.78	4.7	1.03	3.58	0.64	4.69	0.84	310.24	13.54	0.34	13.38
	Z1206-3	二长岩	89.8	167	17.9	60.1	9.98	2.2	8.32	1.24	6.95	1.44	4.56	0.71	4.72	0.75	375.67	12.09	0.72	12.83
	Z1206-12-1	石英二长闪长岩	50.1	106	13.3	54.2	11.6	2.54	10.9	1.62	9.31	1.85	5.21	0.72	4.53	0.68	272.56	6.83	0.68	7.46
	Z1207-1	石英二长岩	129	243	26.9	94.9	17.2	3.36	14.7	2.22	12.6	2.49	7.39	1.08	6.89	1.04	562.77	10.63	0.63	12.62
	T1214-1	石英二长岩	78.4	159	16.7	55.4	10.1	0.97	7.66	1.34	7.36	1.47	4.38	0.66	4.48	0.69	348.61	11.43	0.32	11.80
	T1214-2-1	石英二长岩	120	235	23.8	75	12.9	0.59	10	1.78	10.1	2.05	6.27	0.97	6.64	1.06	506.16	12.02	0.15	12.18
	T1214-2-2	石英二长岩	96.3	190	20.5	69.6	12.7	0.59	9.96	1.71	9.83	1.96	6.01	0.92	6.24	0.95	427.27	10.37	0.15	10.40
	T1214-3	石英二长岩	80.1	103	17.4	59.3	11.1	0.71	8.76	1.54	8.77	1.74	5.34	0.83	5.71	0.87	305.17	8.09	0.21	9.46
	Q1210-9	二长花岗岩	59.3	74.7	10.2	32	5.6	0.5	5.13	0.9	5.66	1.21	4.19	0.73	5.29	0.85	206.26	7.61	0.28	7.56
	Q1210-10	二长花岗岩	27.5	41.5	3.94	9.91	1.49	0.08	1.46	0.34	2.75	0.74	2.98	0.59	4.63	0.8	98.71	5.91	0.16	4.00
	Q1209-13	二长花岗岩	53.5	122	16.3	60.7	14.9	0.61	14.4	2.79	18.1	3.83	11.6	1.64	9.76	1.34	331.47	4.22	0.13	3.70
	Q1209-2-1	二长花岗岩	48.8	85	8.08	24.2	4.08	0.3	3.67	0.69	4.57	1.06	3.71	0.64	4.59	0.76	190.15	8.66	0.23	7.17
	Q1209-3	石英二长岩	69.4	138	15.7	56.6	10	2.3	8.71	1.3	7.61	1.49	4.63	0.67	4.31	0.67	321.39	9.94	0.74	10.86
	Q1209-8	二长花岗岩	45.5	75.9	6.94	19.4	3.19	0.19	3.16	0.62	4.4	1.08	4.15	0.79	6.09	1.09	172.5	7.07	0.18	5.04
内带	T1215-1-1	二长岩	41.4	76.9	8.78	33	6.4	1.55	5.38	0.83	4.56	0.91	2.64	0.39	2.51	0.39	185.64	9.54	0.79	11.12
	T1215-1-2	二长花岗岩	34.5	58.6	5.86	19.5	3.14	0.84	2.46	0.38	2.01	0.41	1.33	0.21	1.42	0.23	130.89	14.49	0.89	16.38
	T1215-3-1	石英二长岩	39.4	75.9	8.34	30.7	5.63	1.39	4.57	0.72	3.96	0.82	2.36	0.35	2.21	0.35	176.7	10.52	0.81	12.02
	T1215-4	二长闪长岩	40.1	75.5	8.46	31.6	5.71	1.63	4.51	0.68	3.64	0.72	2.02	0.28	1.84	0.29	176.98	11.66	0.95	14.69
	T1216-1-1	石英二长闪长岩	36.3	69.3	8.02	30.6	5.59	1.56	4.32	0.61	2.98	0.53	1.49	0.19	1.23	0.19	162.91	13.12	0.94	19.90

续表 3

区带	样品号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE	δEu	La _N /Yb _N
江南带	Q1209-12	石英二长岩	106	255	35	137	29.6	2.6	26.5	4.46	25.6	4.9	13.3	1.8	10.3	1.44	653.5	6.40	0.28	6.94
	Q1208-3	二长花岗岩	30.7	57	6.14	20.5	3.26	0.75	2.52	0.33	1.88	0.36	1.09	0.16	1.06	0.17	125.92	15.63	0.77	19.53
	Q1208-4-1	二长花岗岩	40.6	75.4	8.16	28.4	5.03	1.05	3.77	0.51	2.61	0.46	1.42	0.19	1.28	0.19	169.07	15.21	0.71	21.38
	Q1208-5	花岗闪长岩	32.2	57.9	6.36	22.9	4.02	0.95	3.12	0.42	2.22	0.41	1.16	0.16	1.07	0.17	133.06	14.24	0.79	20.29
	Q1208-6	二长花岗岩	33.7	68.7	8.37	32.2	6.72	1.45	5.73	0.86	4.91	0.94	2.74	0.38	2.38	0.34	169.42	8.27	0.70	9.55
	Q1208-12-2	花岗闪长岩	35.6	73.6	8.82	33.7	6.73	1.52	6.15	0.91	5.08	0.95	2.83	0.39	2.44	0.36	179.08	8.37	0.71	9.84
	Q1208-14-1	花岗闪长岩	29.5	60.4	7.21	27.6	5.86	1.5	5.4	0.78	4.33	0.81	2.42	0.33	2.18	0.35	148.67	7.96	0.80	9.12
	Q1208-15	花岗闪长岩	56.9	106	11.6	40.9	7.08	1.62	5.87	0.82	4.46	0.87	2.54	0.35	2.22	0.34	241.57	12.83	0.75	17.28
	Q1210-1-1	花岗闪长岩	30	56.6	6.23	22.9	4.08	1.02	3.3	0.47	2.62	0.49	1.39	0.2	1.3	0.21	130.81	12.11	0.82	15.56
	Q1210-2-3	二长花岗岩	47.7	71.1	5.28	12.4	1.62	0.17	1.56	0.27	1.87	0.49	2.13	0.46	4.26	0.8	150.11	11.68	0.32	7.55
	Q1210-4-1	二长花岗岩	70.2	112	9.2	25	4.27	0.35	4.15	0.79	5.27	1.27	4.51	0.8	5.71	0.91	244.43	9.44	0.25	8.29
	Q1210-6	花岗闪长岩	22.3	39.7	4.2	14.9	2.47	0.65	1.98	0.27	1.34	0.25	0.72	0.1	0.67	0.11	89.66	15.48	0.87	22.44
	Q1211-1-1	二长闪长岩	43.2	81.7	10.5	41.6	7.89	2.1	6.7	0.91	5.09	0.96	2.8	0.39	2.44	0.36	206.64	9.52	0.86	11.94
	Q1211-2-1	二长花岗岩	35.4	66	7.05	25.2	4.48	1.03	3.79	0.56	3.2	0.63	1.88	0.29	1.8	0.28	151.59	11.20	0.75	13.26
	Q1211-3	花岗闪长岩	37.4	71.1	8.22	31	6.02	1.35	5.39	0.82	4.75	0.92	2.77	0.4	2.57	0.4	173.11	8.61	0.71	9.81
	T1212-1-1	二长花岗岩	79.8	160	18.4	67.3	12.4	1.87	9.91	1.65	8.88	1.7	4.85	0.68	4.25	0.64	372.33	10.44	0.50	12.66
	T1212-4	二长花岗岩	79.7	153	18.6	65.6	13.9	0.85	12.1	2.32	14.2	2.9	8.85	1.34	8.51	1.25	383.12	6.44	0.20	6.31
	T1212-5	石英二长岩	43.3	83.6	9.64	36.1	6.93	1.39	5.7	0.93	4.72	0.92	2.4	0.34	2.06	0.32	198.35	10.41	0.66	14.17
	T1212-7	二长花岗岩	12.5	22.1	2.14	6.58	1.07	0.17	0.85	0.13	0.78	0.16	0.54	0.09	0.85	0.18	48.14	12.45	0.53	9.91
	T1212-8	花岗闪长岩	32.9	62.6	6.91	25	4.66	1.07	3.77	0.58	3.06	0.59	1.64	0.24	1.53	0.24	144.79	11.43	0.76	14.50
	T1212-9	二长花岗岩	62.5	140	15.9	58.3	12.9	0.69	11.4	2.08	12.4	2.47	7.17	1.04	6.55	0.94	334.34	6.59	0.17	6.43
	T1212-12	二长花岗岩	16.4	32.9	3.84	14.2	2.89	0.66	2.51	0.43	2.33	0.46	1.39	0.21	1.51	0.25	79.98	7.80	0.73	7.32
	T1213-1	花岗闪长斑岩	19.2	38.8	4.61	18.1	4.46	0.95	3.76	0.6	2.97	0.55	1.44	0.2	1.2	0.18	97.02	7.90	0.69	10.79
	T1213-3	石英二长闪长岩	29.9	60	6.95	26.6	5.34	1.23	4.57	0.74	3.84	0.74	2.07	0.29	1.82	0.28	144.37	9.06	0.74	11.08
	T1213-4	二长花岗岩	13	26.1	3.02	11.1	2.77	0.57	2.65	0.51	2.96	0.53	1.42	0.21	1.25	0.19	66.28	5.82	0.63	7.01
	T1213-9	二长花岗岩	34.8	67.6	7.93	29.2	6.09	1.2	5.31	0.89	5.18	1.06	3.28	0.51	3.3	0.53	166.88	7.32	0.63	7.11
	T1213-12	二长花岗岩	29.6	60	6.76	25.8	5.12	0.89	4.05	0.62	2.96	0.52	1.42	0.2	1.2	0.19	139.33	11.48	0.58	16.63
	T1213-15	二长花岗岩	28.2	57.7	6.88	26.6	5.55	1.22	4.45	0.65	3.15	0.55	1.44	0.19	1.16	0.19	137.93	10.71	0.73	16.39
	T1213-16	二长花岗岩	27	57.9	7.11	27.4	5.58	1.25	4.55	0.72	3.79	0.72	2.03	0.29	1.82	0.29	140.45	8.88	0.74	10.00

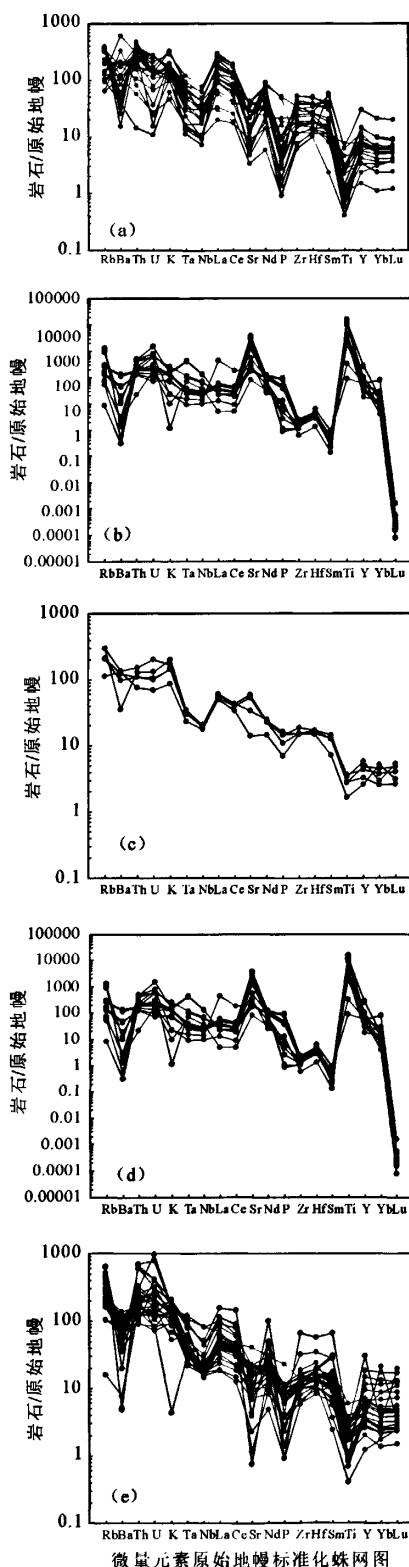


图3 微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig 3 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for magmatic rocks from Tongling and adjacent area, Anhui Province

(a)—大别带; (b)—庐枞带; (c)—铜陵内带; (d)—铜陵外带;

(e)—江南带; 始地幔标准化数据据 Sun and McDonough, 1989

(a)—Dabie zone; (b)—Luzong zone; (c)—Tongling inner zone; (d)—Tongling outer zone; (e)—Jiangnan zone; The primitive mantle data after Sun and McDonough, 1989

Ba, P。大别带与江南带岩石的微量元素分布较为分散,大别带岩石 La、Ce、Nd、Zr、Hf、K 相对富集而 Nb、Ta、Sr、Ti、P 相对亏损,江南带岩石具有 Th、U、Nd 富集而 Ba、Sr、Ti、P 亏损的特征。各带岩石微量元素分布曲线特征的不同反映了岩石的岩浆起源或演化历史的差异。

2.3 稀土元素

铜陵地区及其邻区中生代中酸性侵入岩稀土元素含量与特征参数列于表 3 中。结合前人资料,可以看出各带岩石的稀土特征也有很大的不同。

大别带内岩石稀土含量较高且具有很大的变化范围, ΣREE 为 $71.72 \times 10^{-6} \sim 562.19 \times 10^{-6}$ 。明显富集轻稀土, LREE/HREE 比值为 $6.64 \sim 67$, 多数大于 14。轻、重稀土分馏程度强, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ $5.01 \sim 196.13$ 。球粒陨石标准化曲线呈明显的右倾型(图 4a), 具有中等至弱的铕负异常, δEu 为 $0.34 \sim 0.93$ 。

庐枞带稀土含量(ΣREE)为 $104.88 \times 10^{-6} \sim 505.34 \times 10^{-6}$, 富集轻稀土, LREE/HREE $7.96 \sim 19.38$, 主要在 $9 \sim 12$ 之间。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ $8.09 \sim 35.99$, 轻、重稀土分馏程度较强, 重稀土富集程度不一。铕异常不明显, δEu $0.56 \sim 1.14$, 大多数在 $0.9 \sim 1$ 之间, 球粒陨石标准化曲线呈明显的右倾型但 HREE 较为平坦(图 4b)。

铜陵内带岩石稀土总量较低, 总体上 ΣREE $130.89 \times 10^{-6} \sim 185.64 \times 10^{-6}$, 富集轻稀土, LREE/HREE $9.54 \sim 14.49$ 。轻、重稀土分馏程度中等, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ $11.12 \sim 19.90$, 球粒陨石标准化曲线呈明显的右倾型(图 4c), 具有弱铕负异常, δEu $0.79 \sim 0.95$ 。

铜陵外带, 稀土含量变化很大, ΣREE $98.71 \times 10^{-6} \sim 506.16 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 较低, 为 $3.70 \sim 13.38$, 说明轻稀土略微富集。轻重稀土分馏程度相对较低 [$(\text{La}/\text{Yb})_N$ $3.7 \sim 10.86$]。具有强烈的铕异常 (δEu $0.13 \sim 0.74$)。球粒陨石标准化曲线呈较平缓的右倾“V”型, HREE 呈平坦型(图 4d), 显示出 A 型花岗岩特性。

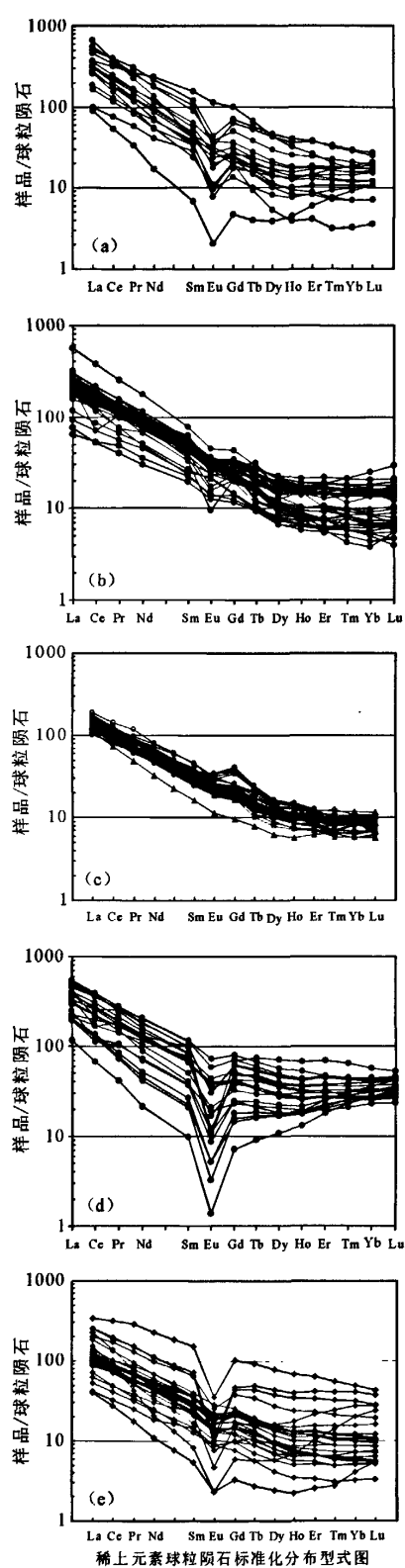


图 4 稀土元素球粒陨石标准化分布图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns for magmatic rocks from Tongling and adjacent area, Anhui Province

(a)—大别带; (b)—庐枞带; (c)—铜陵内带; (d)—铜陵外带; (e)—江南带; 球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough, 1989; 除本文数据外, 还引用李石等, 1991; 杨荣勇等, 1993; 吴才来等, 1998; 王强等, 2003; 黄顺生等, 2004; 杜杨松等 2004; 邱瑞龙, 1992; 周涛发等, 2001; 路玉林等, 1999; 周承福等, 2001; 徐小军等, 2005

(a)—Dabie zone; (b)—Luzong zone; (c)—Tongling inner zone; (d)—Tongling outer zone; (e)—Jiangnan zone; REE Chondrite—normalized from Sun and McDonough, 1989. Date sources from Li et al., 1991; Qiu, 1992; Yang et al., 1993; Wu et al., 1998; Lu et al., 1999; Zhou et al., 2001; Zhou et al., 2001; Wang et al., 2003; Huang et al., 2004; Du et al., 2004; Xu et al., 2005, and this paper

江南带岩石稀土含量变化很大, ΣREE $48.14 \times 10^{-6} \sim 653.5 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 值不太高 (5.82~15.63), 比较分散。轻稀土富集。轻重稀土分馏程度较强 [$(\text{La}/\text{Yb})_N$ 6.31~22.44]。重稀土亏损程度不一。球粒陨石标准化曲线呈右倾型, HREE 较为平坦 (图 4e), 有明显的铕负异常 (δEu 0.17~0.87)。

3 讨论

3.1 岩浆演化及其成因

上述各个岩带中生代酸性侵入岩地球化学特征的差异无疑源于岩浆来源与岩浆演化过程的不同。

已有研究表明, 铜陵内带侵入岩是同源酸性岩类, 起源于地幔的碱性玄武岩, 只是岩浆演化过程与形成机制有所不同而已 (常印佛等, 1991; 毛建仁等, 1990; 邢风鸣等, 1996a; 吴才来等, 2008)。铜陵内带岩石以高钾钙碱性岩系列为主, 少量显示出橄榄安粗岩系特征。在 SiO_2 与其它主元素氧化物关系图上 (图 5), 无论是高钾钙碱性岩系还是橄榄安粗岩系岩石, 均表现出相同的变化趋势, 说明两个岩系的岩石具有一定的成因联系。随 SiO_2 增加, TiO_2 、 FeO^* 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 逐渐减少, 呈现负相关性, Al_2O_3 、 K_2O 基本保持不变, 表明在岩浆演化过程中存在着单斜辉石、磷灰石及钛铁矿等矿物的分离结晶作用。而 SiO_2 与 Na_2O 相关性不明显, 这可能反映了岩浆混合作用的存在, 且参与混合作用的是三种端元岩浆 (狄永军等, 2005)。同时, K、Rb、Sr 弱富集而亏损 Ti、P、Ta、Nb 等元素, 指示可能还存在地壳物质的同化混染作用。Eu 负异常不明显

(δEu 0.79~0.96),说明长石在岩浆演化过程中结晶分异作用不显著或源区岩石中的斜长石已经熔入熔体。结合 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 与 MgO 不具明显相关性这一特性(图6),可以认为斜长石的分异不是引起岩石成分变化的主要原因。然而,铜陵内带的高钾钙碱性岩系与橄榄安粗岩系在岩浆演化过程中仍存在很大的差异,这种差异在岩浆包体属性上显示明显,即高钾钙碱性岩系基本上以部分熔融作用为主,橄榄安粗岩系以分离结晶作用为主(吴才来等,1997;Wu et al., 2000;杜杨松等,2004)。

从已有的资料看,铜陵外带的侵入岩属于A型花岗岩类(邢凤鸣等,1994;唐永成等,1998),岩带内的正长岩、石英正长岩和花岗岩,有较为一致的 I_{Sr} 值和 ϵ_{Nd} (邢凤鸣等,1994),表明它们是同源岩浆分离结晶的产物。在Harker图上 SiO_2 与 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 呈负相关性(图5)。 SiO_2 与 K_2O 有着特殊的相关关系,在岩石 $\text{SiO}_2 < 70\%$ 部分呈正相关,而 $\text{SiO}_2 > 70\%$ 部分相关性不明显。岩石 SiO_2 与其它主元素氧化物的关系表明在岩浆演化过程中存在着单斜辉石、磷灰石、钛铁氧化物以及长石等矿物的分离结晶作用。岩石具有强烈的铕负异常(δEu 0.13~0.74),指示长石在岩浆演化过程中有非常明显的结晶分异作用。岩石明显亏损Ba、Sr、Ti、P(图3),其Sr、Ba亏损指示岩浆演化过程中存在分离结晶作用,Ti、P的相对亏损归因于钛铁氧化物、磷灰石的分离结晶。 MgO 与 TiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 呈明显的正相关性而与 Na_2O 、 K_2O 相关性不明显(图6),进一步说明单斜辉石、钛铁氧化物和斜长石的分离结晶作用在岩浆演化过程中起着重要的作用。这些特征,与邢凤鸣等(1996a)认为铜陵外带岩浆可能是通过幔源碱性玄武岩以分离结晶为主的AFC机制形成的认识一致。同时, SiO_2 与 K_2O 、 Na_2O 之间的关系可能暗示在岩浆演化过程中有部分熔融作用与岩浆混合(混染)作用的发生(狄永军等,2005)。

从图5可以看出,庐枞带岩浆岩石的 SiO_2 与其它主元素的关系同铜陵外带几乎一致,即 SiO_2 与 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 呈负相关,与 Na_2O 、 K_2O 的相关性不明显,说明单斜辉石、角闪石及磷灰石、钛铁氧化物等矿物的分异对岩浆演化起重要作用,并导致岩石亏损Ba、Sr、Ti、P(图3)。 TiO_2 与 SiO_2 之间明显的负相关性,以及 SiO_2 与 MgO 负相关,进一步说明单斜辉石和钛铁氧化物分异结晶作用的存在。然而, Na_2O 和 Al_2O_3 随 MgO 的变化而无明显变化,说明斜长石的分异并不是导致其母岩浆分异

演化的主要机制。铕异常不明显(δEu 多数在 0.9~1 之间)也进一步显示岩浆演化过程中斜长石的分异结晶作用不明显。对庐枞带部分岩体同位素组成研究表明,岩浆起源于富集型地幔,在岩浆演化过程中有壳源物质的混染(孙冶东等,1991;杨勇荣等,1993)。因此,庐枞带侵入岩很可能是由岩浆结晶分异和地壳物质混染共同作用的结果。

大别带与江南带侵入岩浆的演化机制也显示以分异结晶作用为主(图5、图6),而岩石地球化学特征表明,它们的岩浆起源与长江中下游岩浆带具有显著差别。大别带中生代侵入岩不仅活动时间跨度较大,而且岩浆的起源较为复杂,使得该带岩石地球化学特性显示出复杂多样性。本文及前人大量的岩石地球化学与同位素资料显示,大别带中生代侵入岩中I型花岗岩与S型花岗岩均有,岩浆来源于上地幔基性物质,也有地壳物质的重熔,同时还来自于壳幔的混熔(陈跃志等,1989;李石等,1990;张德全等,1990;周承福等,2001;胡雄星等,2002;赵子福等,2004;徐小军等,2005)。大别造山带各地块中燕山期早、晚阶段花岗岩类都具有I型花岗岩类的特征,具有高钾钙碱性系列向钾玄岩系列过渡的岩浆性质(徐启东,1997)。无疑,在大别带岩浆演化过程中不仅有结晶分异作用,而且部分熔融与岩浆混合作用也是岩浆演化的重要机制。

同属于扬子地块的江南带中生代侵入岩,在岩浆起源及岩浆演化方面与庐枞带、铜陵内带侵入岩有很大差异,也与大别带中生代侵入岩明显不同。岩石绝大多数归属于高钾钙碱性系列。岩石微量元素、稀土元素以及同位素资料证实,江南带燕山期花岗岩类多数是由与中元古代地层相似的地壳岩石经部分熔融形成(陈江峰等,1993;沈渭洲等,1999),即来源于中地壳下部或下地壳上部。 SiO_2 及 MgO 与其它主量元素关系表明结晶分异作用在岩浆演化过程中具有重要的意义(图5、图6)。部分熔融作用与岩浆结晶分异作用也是江南带岩浆形成演化的两个重要机制。

3.2 深部岩浆过程与可能的岩浆作用模型

显然,上述各带中生代侵入岩浆成因及其演化机制的不同与其所处的构造背景有关。大别带岩浆岩是大别造山带的产物,江南带中生代岩浆岩是华南花岗岩的一部分,它们与庐枞带、铜陵内带与铜陵外带侵入岩形成的构造背景明显不同。铜陵内带侵入岩微量元素具有负Nb、P及Ti异常,反映了本带侵入岩形成于挤压构造背景。前人资料(邢凤鸣等,

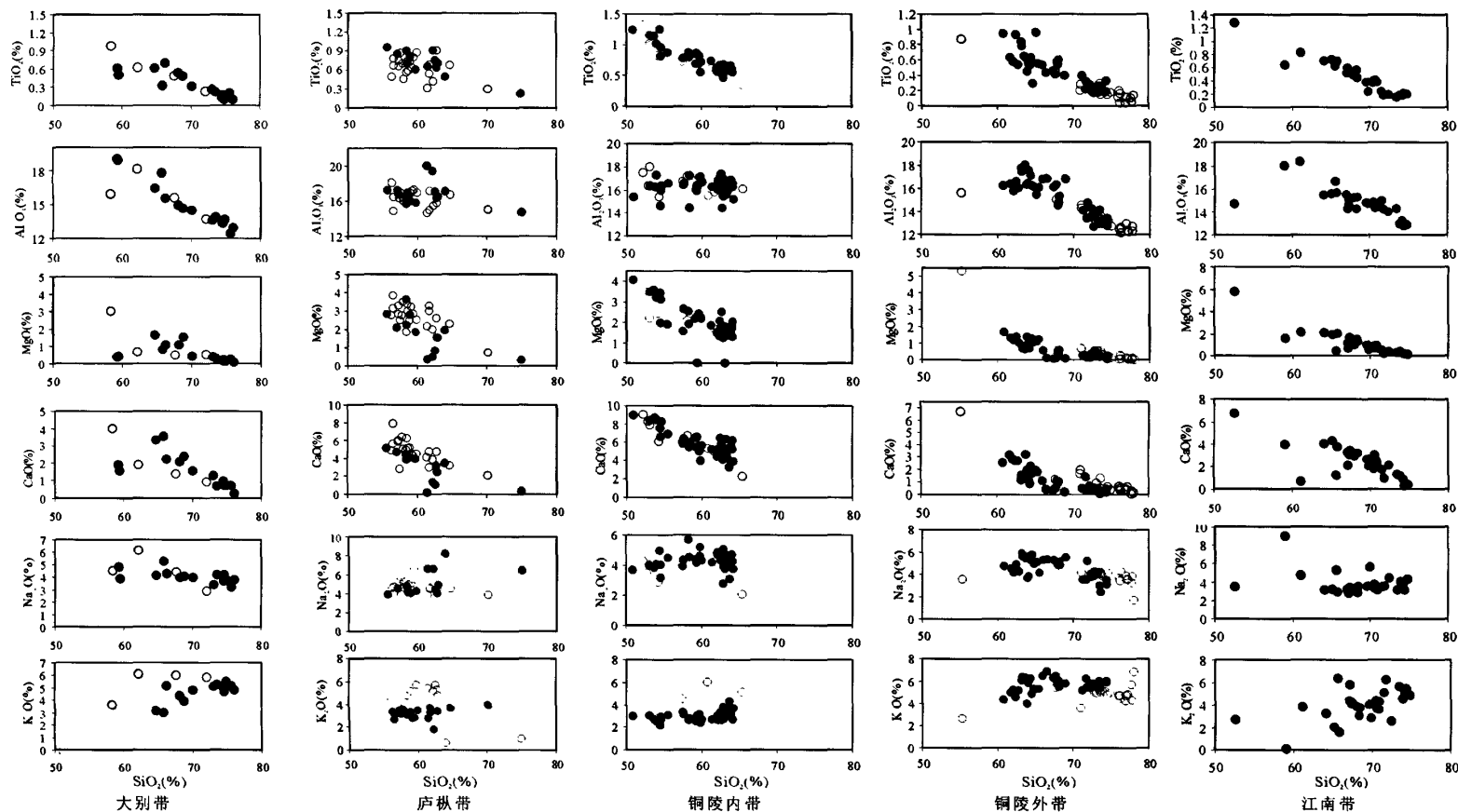


图 5 SiO_2 与主要氧化物关系(Harker)图解

Fig. 5 Harker diagrams of major element oxides for magmatic rocks from Tongling and adjacent area, Anhui province

- 高钾钙碱性岩系列; ○—橄辉安粗岩系列。除本文数据外,引用资料同图 2
 ●—High-k calc-alkalic rock series; ○—shoshonite rock series. Date sources as Fig. 2

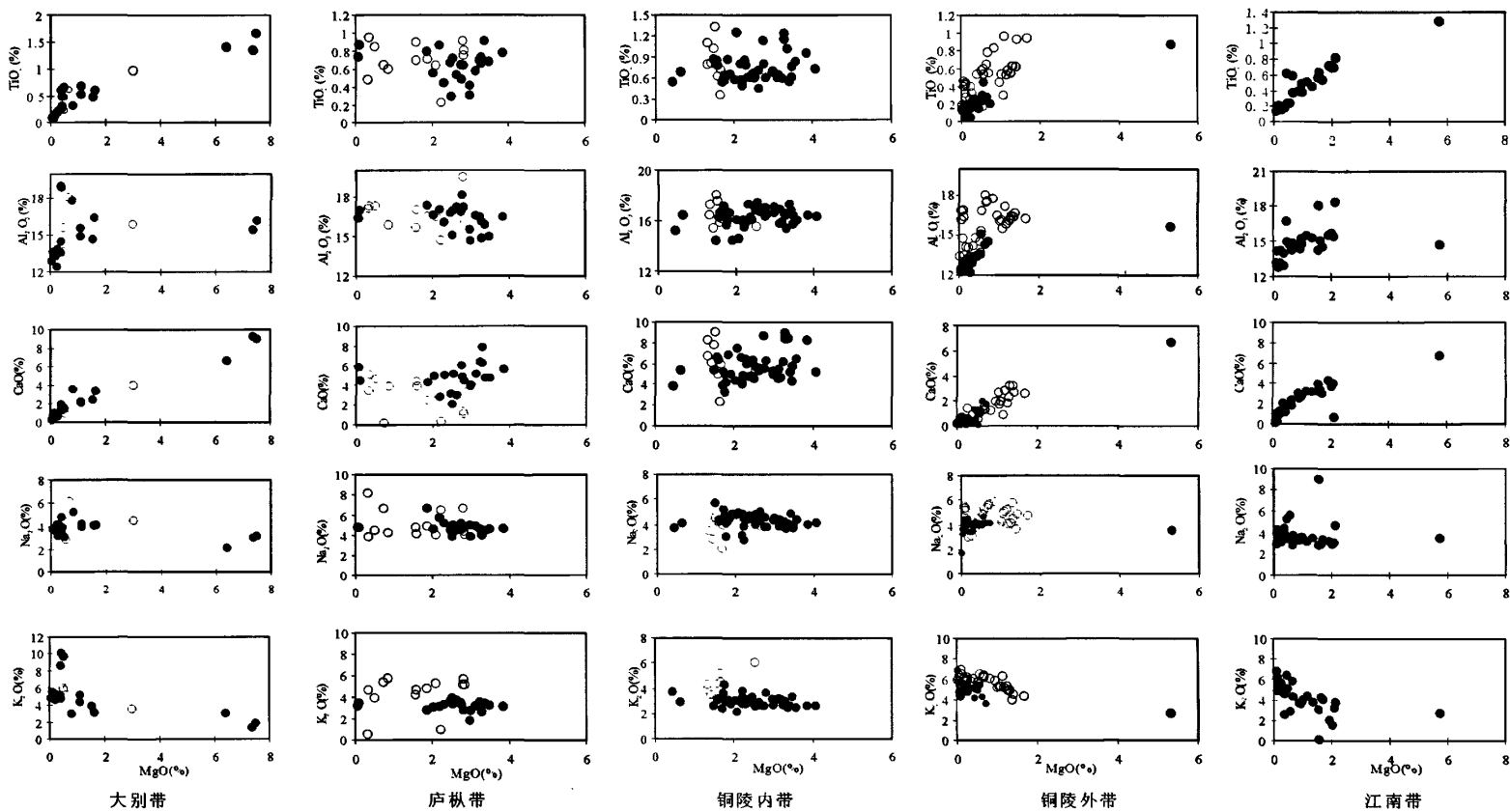


图 6 MgO 与其它氧化物关系图解

Fig. 6 Diagrams of MgO to other major element oxides for magmatic rocks from Tongling and adjacent area, Anhui province

●—高钾钙碱性岩系列; ○—橄辉安粗岩系列。除本文数据外,引用资料同图 2
 ●—High-k calc-alkalic rock series; ○—shoshonite rock series. Date sources as Fig. 2

1994;唐永成等,1998)均表明,铜陵外带中酸性侵入岩为典型的A型花岗岩类,形成于拉张的构造环境。在时间上,庐枞带侵入岩活动介于铜陵内带与铜陵外带之间,同时,这三个岩带在空间上紧密相依,有理由认为庐枞带侵入岩形成于区域上的挤压向拉张过渡这一构造转化期。从岩浆活动时间上可以看出,铜陵地区南侧的江南带(江南隆起区)在中生代的挤压至拉张整个构造运动过程中均有岩浆活动,从而造成该区岩浆活动时间长、岩浆类型多样的局面。

在中国东部,中生代大规模的岩浆活动与岩石圈减薄事件相对应(邓晋福等,2000;吴福元等,2003;张旗等,2009)。前人的研究表明,在 T_3 - J_2 时期(板块碰撞期)即完成了华北与扬子板块之间的碰撞而最终焊接,长江中下游地区随后进入了岩石圈伸展减薄背景下的碰撞后(应力转换期,145~125Ma)和岩石圈拆沉背景下的造山后(断陷期,125~105Ma)大陆岩石圈演化阶段(常印佛等,1991;唐永成等,1998;李兆鼎等,2003;邓晋福等,2004;杜杨松等,2007)。长江中下游岩浆带铜陵地区岩浆活动正是受中国东部统一的地球动力学背景的制约。杜建国等(2003)指出,在安徽沿江地区发生的深部过程可以归为陆壳挤压压缩加厚→玄武质岩浆底侵→岩石圈拆沉减薄等变化过程。长江中下游铜陵地区三个岩带岩浆活动序次与区域构造演化的几个阶段(挤压、挤压—拉张转换、拉张)完全相对应。长江中下游地区中生代中酸性侵入岩形成的深部岩浆作用过程和可能的岩浆作用模型表述如图8。

在铜陵及邻区,陆壳的加厚致使岩石圈也加厚,加厚的岩石圈开始拆沉并导致软流圈物质沿岩石圈开始拆沉的部位上涌。上涌的软流圈减压熔融并底侵到壳幔过渡带附近,使下地壳熔融产生玄武质岩浆,部分形成埃达克质(adakitic)岩浆并沿合适的构造通道上升就位而形成埃达克质岩如庐枞带沙溪和铜陵内带中的极少量岩石。同时幔源岩浆与玄武质岩浆混合形成的岩浆,其中一部分在上升过程中与下地壳物质发生低程度混染并进一步发生分离结晶作用形成橄榄安粗岩系列火成岩,另一部分经过结晶分异作用后在上升过程中与中上地壳物质熔融产生的岩浆混合形成高钾钙碱性系列岩石。正是这一复杂的深部岩浆过程,造成了铜陵内带高钾钙碱性系列岩石、橄榄安粗岩系列岩石和极少部分与高钾钙碱性系列岩石具有过渡关系的埃达克岩(王强等,2003;王元龙等,2004)共存这一特殊局面(图7a)。

在长江中下游铜陵地区因岩石圈大规模拆沉而引起的区域应力调整,致使其构造环境由挤压转向拉张。与铜陵内带不同,庐枞带的岩浆活动时间略微晚于铜陵内带,形成于挤压到拉张转换阶段,其深部岩浆过程与铜陵也略微不同。幔源物质与壳幔过渡带的玄武质岩浆混合而成的混合岩浆更多地与下地壳物质发生了较大程度的混染,从而在火山盆地内出现更多的橄榄安粗岩系列岩石(刘洪等,2002),只有少量的混合岩浆发生结晶分异作用并上侵与熔自中上地壳的岩浆混合形成高钾钙碱性系列岩石(图7b)。

在区域应力由挤压转向拉张之后,部分因底侵作用而使下地壳熔融形成的玄武质岩浆和幔源岩浆混合形成的岩浆,经过分离结晶作用演化成正长质岩浆,这种正长质岩浆在上升过程中通过分离结晶作用与同化混染机制(邢凤鸣等,1996a)形成了铜陵外带的A型花岗岩及相应的碱性岩系列火山岩(图7c)。

毗邻于长江中下游岩浆带的江南带(隆起区),由于早期陆壳挤压导致加厚的下地壳底部出现部分熔融或重熔,形成了以壳源物质为主的钙碱性系列和部分高钾钙碱性系列火成岩。在随后的深部岩浆作用过程中也形成了少量的与壳幔岩浆混合作用有关的岩浆岩石。处于造山带环境的大别带中生代岩浆岩形成的深部构造背景无疑与长江中下游岩浆带截然不同。

由上述铜陵地区深部岩浆作用过程以及岩浆演化途径可以看出,正是由于所处的深部构造背景的不同、壳幔活动的差异以及岩浆演化机制的不同,使得长江中下游铜陵及邻区岩浆活动在时间上具有明确的分段性和在空间上形成分带,也使得源区基本相同的铜陵内带、铜陵外带和庐枞带侵入岩在岩石类型上与成因上即有区别又有联系。

4 结论

长江中下游铜陵及其邻区中生代中酸性侵入岩具有时间分段集中、空间明确分带的特征。从北到南依次分为大别带、庐枞带、铜陵内带、铜陵外带和江南带。各带具有不同的岩石组合与岩石系列。

上述各带侵入岩在岩石化学、微量元素、稀土元素地球化学特征上表现出与时间分段、空间分带相一致的区分性,各带侵入岩的岩浆成因与岩浆演化机制各有特色,深部岩浆作用模型完全不同。构造环境和深部岩浆作用是形成岩浆分带与侵入活动分

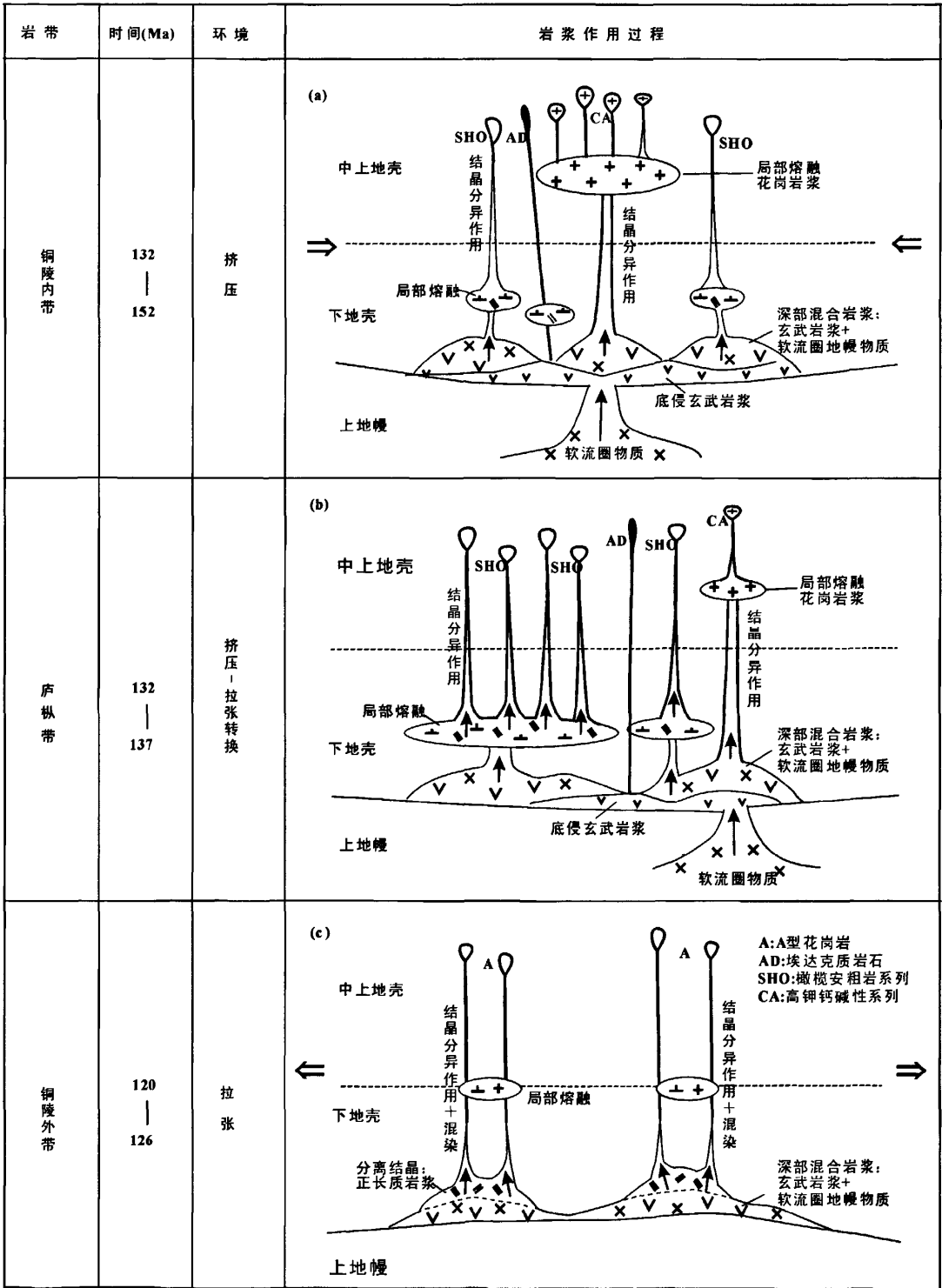


图 7 长江中下游岩浆岩带铜陵地区中生代酸性侵入岩岩浆成因与深部岩浆作用

Fig. 7 Deep-seated magmatism for the Mesozoic intermediate-acid intrusions in the middle and lower reaches of the Yangtze River

段的基础和关键。

参考文献

- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带. 北京:地质出版社,1~56.
- 陈道公. 1986. 安徽青阳花岗岩闪长岩体的 K-Ar 同位素年龄. 岩石学报, 2(2):64~69.
- 陈江峰,李学明,周太喜,等. 1991. 安庆月山岩体的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究. 现代地质, 5(1):91~99.
- 陈江峰,周泰禧,李学明等. 1993. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区锶、钕同位素制约. 地球化学, 22(3):261~268.
- 陈跃志,韩魁,邵桂清,桑宝梁. 1989. 大别山区司空山两类花岗岩体的岩石学和地球化学特征及其成因. 岩石学报, 1:59~66.
- 邓晋福,叶德隆,赵海玲,汤德平等. 1992. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成. 武汉:中国地质大学出版社,1~184.
- 邓晋福,赵国春,赵海玲,罗照华,戴圣潜,李凯明. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山—深部过程. 地质论评, 46(1):41~50.
- 邓晋福,戴圣潜,赵海玲,杜建国. 2002. 铜陵 Cu-Au 成矿区岩浆—流体—成矿系统和亚系统的识别. 矿床地质, 21:317~332.
- 邓晋福,罗照华,苏尚国,莫宜学,于炳松,赖兴运,湛宏伟. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京:地质出版社,1~381.
- 狄永军,赵海玲,吴淦国,张达,臧文控,刘清华. 2005. 铜陵地区燕山期侵入岩成因与三端元岩浆混合作用. 地质论评, 51(5):528~538.
- 杜建国,戴圣潜,莫宜学,邓晋福,许卫. 2003. 安徽沿江地区燕山期火成岩成岩成矿地质背景. 地学前缘, 10(4):551~560.
- 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的证据. 岩石学报, 20(2):339~350.
- 杜杨松,曹毅,袁万明,楼亚儿,李顺庭,鲁鑫. 2007. 安徽沿江地区中生代碰撞后到造山后岩浆活动和壳幔相互作用——来自火山—侵入杂岩和岩石包体的证据. 岩石学报, 23(6):1294~1302.
- 范裕,周涛发,袁峰钱,存超,陆三明,DAVID Cook. 2008. 安徽庐江—枞阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 定年及其地质意义. 岩石学报, 24(08):1715~1738.
- 胡雄星,马东升. 2002. 大别山东部花岗岩类的稀土元素地球化学及其地质意义. 矿产与地质, 16(3):321~327.
- 黄顺生,徐兆文,顾连兴,华明,陆现彩,陆建军,聂桂平,朱士鹏. 2004. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩地球化学特征及成因机制探讨. 高校地质学报, 10(2):218~227.
- 李石. 1990. 湖北大别山天堂寨花岗岩成因类型讨论. 岩石学报, 3:65~71.
- 李石,王彤. 1991. 桐柏山—大别山花岗岩类地球化学. 武汉:中国地质大学出版社.
- 李曙光. 2001. 长江中下游中生代岩浆岩及铜铁成矿带的深部构造背景. 安徽地质, 11(2):118~122.
- 李兆鼎,李之彤,毛建仁,李汉声,吴才来,郝艳丽,张招崇,王碧香,刘焰. 2003. 中国东部中、新生代火成岩及其深部过程. 北京:地质出版社,1~357.
- 刘洪,邱检生,罗清华,徐夕生,凌文犁,王德滋. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约. 地球化学, 31(2):129~140.
- 楼亚儿,杜杨松. 2006. 安徽繁昌中生代侵入岩的特征和锆石 SHEIMP 测年. 地球化学, 35(4):359~366.
- 路玉林,钱存超,贾十军. 1999. 安徽大别山团岭花岗岩体岩石学特征及成因. 安徽地质, 9(3):172~177.
- 马昌前,杨坤光,唐仲华. 1994. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析. 武汉:中国地质大学出版社,1~249.
- 马昌前,杨坤光,明厚利,等. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间:花岗岩的证据. 中国科学(D 辑), 33(9):817~827.
- 毛建仁,苏郁香,陈三元. 1990. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿. 北京:地质出版社,1~191.
- 邱瑞龙. 1992. 安徽月山高钾闪长岩岩石学特征及岩石成因探讨. 地质论评, 38(2):97~108.
- 沈渭洲,凌洪飞,李武显,黄小龙,王德滋. 1999. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究. 高校地质学报, 5(1):22~32.
- 孙治东,刘孝善,褚立明. 1991. 安徽庐枞地区正长岩类稳定同位素研究. 岩石学报, 3:95~97.
- 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,1~120.
- 王强,许继峰,赵振华,熊小林,包志伟. 2003. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约. 中国科学(D 辑), 33(4):324~334.
- 王人镜,王强,何勇. 1998. 大别山造山带核部九资河—天堂寨花岗岩的成因和时代. 矿物岩石地球化学通报, 17(4):2242~228.
- 王彦斌,刘敦一,曾普胜,杨竹森,田世洪. 2004a. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的时代——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年. 地球学报, 25(4):423~427.
- 王彦斌,刘敦一,曾普胜,杨竹森,蒙义峰,田世洪. 2004b. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的 U-Pb 年龄及其成因指示. 岩石矿物学杂志, 23(4):298~304.
- 王彦斌,刘敦一,蒙义峰,曾普胜,杨竹森,田世洪. 2004c. 安徽铜陵新桥铜—硫—铁—金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义. 中国地质, 31(2):169~173.
- 王元龙,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.
- 吴才来,周珣若,黄许陈,张成火,黄文明. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究. 岩石矿物学杂志, 15(4):299~306.
- 吴才来,周珣若,吴言昌. 1997. 铜陵地区中酸性侵入岩体的包体岩石学研究. 地球学报, 18(2):182~191.
- 吴才来,周珣若,黄许陈,张成火,吴元,黄文明. 1998. 安徽茅坦 A 型花岗岩研究. 地质学报, 72(3):237~248.
- 吴才来,陈松永,史仁灯. 2003. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因. 地球学报, 24(1):41~48.
- 吴才来,董树文,国和平,郭祥言,高前明,刘良根,陈其龙,雷敏. 2008. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程. 岩石学报, 24(8):1801~1812.
- 吴福元,葛文春,孙德有,郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究

- 中的几个问题. 地学前缘, 10(3): 51~61.
- 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(5): 630~645.
- 吴言昌, 曹奋扬, 常印佛. 1999. 初论安徽沿江地区成矿系统的深部构造岩浆控制. 地学前缘, 6(2): 582~591.
- 夏群科, 郑永飞, E. Deloule. 2003. 大别山碰撞后火山岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成. 高校地质学报, 9(2): 163~171.
- 邢凤鸣, 徐祥. 1994. 安徽两条 A 型花岗岩带. 岩石学报, 10(4): 357~369.
- 邢凤鸣, 徐祥. 1996a. AFC 混和与铜陵地区侵入岩成因. 岩石矿物学杂志, 15(1): 10~20.
- 邢凤鸣, 徐祥. 1996b. 安徽铜陵地区高钾钙碱性侵入岩. 地球化学, 25(1): 29~38.
- 邢凤鸣, 徐祥. 1999. 安徽扬子岩带与成矿. 合肥: 安徽人民出版社, 1~170.
- 徐启东. 1997. 长江中下游中生代花岗岩类源区的壳-幔混源性. 岩石矿物杂志, 16(2): 120~130.
- 徐夕生, 范钦成, Reilly S Y O, 等. 2004. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石 U-Pb 定年与成因探讨. 科学通报, 49(15): 1883~1891.
- 徐小军, 赵子福, 郑永飞, 魏春生. 2005. 大别造山带天柱山燕山期中酸性岩类元素和同位素地球化学研究. 岩石学报, 21(3): 607~628.
- 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 柏林, 储国正. 2008. 安徽铜陵狮子山矿田岩类锆石 SHRIMP 定年及其成因意义. 地质学报, 82(4): 104~113.
- 杨荣勇, 任启江, 徐兆文, 孙治东, 郭国章, 邱检生. 1993. 安徽庐枞地区巴家滩火山-侵入体的岩浆来源. 地球化学, 2: 197~206.
- 杨小男, 徐兆文, 张军, 王云健, 徐夕生, 蒋少涌, 凌洪飞, 刘良根, 陈达源. 2007. 安徽狮子山矿田南洪冲岩体形成时代及成因机制研究. 岩石学报, 23(6): 1543~1551.
- 杨晓勇. 2006. 鄱庐断裂带南段沙溪含铜斑岩体的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学研究及意义. 矿物岩石, 26(2): 52~56.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 12~35.
- 张达, 吴淦国, 狄永军, 臧文拴, 邵拥军, 余心起, 张祥信, 汪群峰. 2006. 铜陵凤凰山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约. 地球科学, 31(6): 823~829.
- 张德全, 孙桂英. 1990. 大别山地区天堂寨花岗岩的侵位时代及地质意义. 岩石矿物学杂志, 6(1): 31~37.
- 张德全, 徐洪林. 2002. 长江中下游花岗岩类地质地球化学对比研究. 华南地质与矿产, 3: 66~12.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2009. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄: 与大火成岩省的关系. 地学前缘, 16(2): 21~31.
- 张祖还, 沈渭洲, 章邦桐. 1948. 黄梅尖岩体成岩作用的铅同位素研究. 岩石矿物及测试, 3(1): 26~34.
- 赵子福, 郑永飞, 魏春生, 吴元保. 2004. 大别山中生代中酸性岩类锆石 U-Pb 定年、元素和氧同位素地球化学研究. 岩石学报, 20(5): 1151~1174.
- 郑永飞, 傅斌, 龚冰. 1995. 安徽黄梅尖岩体热历史及其与成矿关系同位素证据. 地质学报, 69(4): 337~348.
- 周承福, 华仁民, 马东升, 陆建军, 高剑峰. 2001. 大别山地区三个花岗岩体的地球化学特征及其成因学意义. 地质找矿论丛, 16(2): 81~88.
- 周涛发, 岳书仓, 袁峰, 刘晓东, 赵勇. 2001. 安徽月山岩体地球化学特征及成因机理分析. 高校地质学报, 7(1): 70~80.
- 周涛发, 宋明义, 范裕, 等. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的年代学研究及其意义. 岩石学报, 23(10): 2379~2386.
- 周珣若, 任进. 1994. 长江中下游中生代花岗岩. 北京: 地质出版社, 1~119.
- Chen J F, Yan J, Xie Z, Xu X, Xing F. 2001. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the lower Yangtze region in eastern China: constraints on sources. Phys. Chem. Earth(A), 26: 719~731.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isofopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A. D. and Worrey M. J. (eds.), Magmatism in ocean basins. Geol. Soc. London. Spec. Publ. 42, 313~345.
- Wu C L, Wang Z H, Qiao D W, Li H B, Hao M Y, Shi R D. 2000. Type of enclaves and their feathers and origins in intermediate-acid intrusive rocks from Tongling district, Anhui, China. China Acta Geologica Sinica, 74(1): 54~67.

Geochemical Characteristics of Mesozoic Intermediate-acid Intrusive Rocks in Tongling and Adjacent Area of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River and Its Indication to the Deep-seated Magmatism

MENG Xiangjin, LÜ Qingtian, YANG Zhusen, XU Wenyi

*MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

Abstract

Numerous Mesozoic intermediate-acid intrusions are exposed in Tongling and adjacent area of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. Based on the high precision age dating and geochemical characteristics of the rocks, five zones have been delineated: Dabie zone, Luzong zone, Tongling outer zone, Tongling inner zone, and Jiangnan zone. Major element, trace element and rare earth element geochemistry of the rocks in the zones show that magmatism and magmatic evolution mechanism of the intrusions are distinct different. The Mesozoic intrusions in the Tongling inner zone formed in an extrusional regime, the intrusions in the Tongling outer zone in an extensional regime, and those in the Luzong zone formed during the transition course from extrusional to extensional regime. The Mesozoic intermediate-acid intrusions in the Tongling and adjacent area resulted from the process of the lithospheric thinning occurring in the eastern North China Block.

Key words: magmatic intrusion; Mesozoic; geochemistry; deep-seated magmatism; the Middle and Lower Reaches of Yangtze River