

安徽庐枞盆地隐伏侵入岩的 LA-ICP MS 定年及其构造意义

范裕¹⁾, 邱宏¹⁾, 周涛发¹⁾, 袁峰¹⁾, 张乐骏^{1,2)}

1) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009;

2) Centre of Excellence in Ore Deposit(CODES), University of Tasmania, Private Bag 79, Hobart, Australia

内容提要:庐枞中生代火山盆地位于长江中下游断陷带内,地处扬子板块的北缘。庐枞盆地内火山岩和侵入岩分布广泛,包括龙门院、砖桥、双庙和浮山 4 组火山岩以及 34 个出露地表的侵入岩体。这些侵入岩体的时空格架和岩浆演化等相关研究工作已经广泛开展,但对于盆地新发现深部隐伏岩体的研究尚未开展,制约了对庐枞盆地岩浆作用及深部成矿预测的深入研究。本次工作在详细野外地质工作的基础上,系统对盆地北部清水塘、刘墩、乔冲、牛头山、李家庄 5 个代表性隐伏岩体开展岩石学、地球化学和年代学研究,通过侵入岩详细镜下鉴定和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年等方法,确定其主要岩性为二长岩和正长岩,岩石全碱含量均较高,准铝质或过铝质;稀土含量中等,较强 Eu 亏损,呈略右倾的海鸥型稀土配分模式,成岩时代分别为 133.2 ± 1.4 Ma、 131.3 ± 1.3 Ma、 131.0 ± 1.4 Ma、 131.2 ± 1.2 Ma 和 130.9 ± 1.2 Ma,均形成于早白垩世。通过与庐枞盆地不同侵入岩的系统对比,提出这些岩体与庐枞盆地早期侵入岩时代接近,岩石学特征类似,应为同一岩浆作用的产物,形成于区域岩石圈伸展的构造环境。

关键词:隐伏侵入岩;成岩时代;庐枞盆地;长江中下游成矿带;构造背景

庐枞中生代火山盆地位于长江中下游断陷带内,地处扬子板块的北缘,郟庐断裂带的南段(图 1),是长江中下游成矿带中最重要的中生代火山岩盆地和矿集区之一(常印佛等,1991;翟裕生等,1992;唐永成等,1998;毛景文等,2004;周涛发等,2000,2008a,2010,2012;吕庆田等,2004,2010;董树文等,2007,2010)。盆地内火山岩分布广泛,出露面积约 800km^2 ,出露地表的侵入岩体有 34 个,面积 $0.1 \sim 50\text{km}^2$ 不等。庐枞盆地的地质研究工作始于 20 世纪 60 年代,随着盆地内一系列铁铜多金属矿床的发现和勘探,相关基础地质和成岩成矿作用研究也广泛开展(吴利仁,1984;任启江等,1991;孙冶东等,1994;刘洪等,2002;Wang Q et al., 2006;周涛发等,2007;刘珺等,2007;袁峰等,2008;谢智等,2007;范裕等,2008;周涛发等,2010)。庐枞盆地内火山岩和出露地表侵入岩的研究程度较高,火山—侵入岩时空格架已经建立(周涛发等,2008b,2010),侵入岩的岩石学、地球化学特征及侵入岩的源区、演化、深部过程等方面研究已取得重要进展

(袁峰等,2008;周涛发等,2010)。近年来庐枞盆地开展了系统的深部探测地球物理以及三维地质填图工作,解译结果认为盆地深部可能存在大规模隐伏侵入岩基(董树文等,2010;吕庆田等,2010),盆地多处找矿勘探钻孔和深部科学验证钻孔也证实了火山岩地层之下,可能广泛发育隐伏岩浆岩体。由于受以往勘探深度的限制,这些新发现的深部隐伏岩体的相关研究工作则尚未开展,隐伏侵入岩的精确成岩时代、岩体期次还有待高精度年代学数据制约。同时,盆地内不同旋回火山岩和隐伏侵入岩的时间关系尚缺乏深入系统的年代学研究工作和精确的年代学数据支持,隐伏侵入岩与出露地表侵入岩之间的成因及演化关系尚不清晰,盆地内侵入岩形成的动力学背景,深部过程以及岩浆作用与成矿作用的关系等研究也亟待加强。为此,本文在作者已有相关研究工作的基础上(周涛发等,2010;范裕等,2008),以庐枞盆地内新发现的隐伏侵入岩为主要研究对象,通过对新近施工的钻孔细致编录和采样,确定隐伏岩体的岩石学和地球化学特征,并应用 LA-

注:本文为国家“深部探测技术与实验研究专项计划”专题(编号: SinoProbe-03-02-05)、国家自然科学基金项目(批准号: 41172084, 41172086)、国家重点基础研究发展规划 973 项目(批准号: 2012CB416802)和中国地质调查局地质调查工作项目(项目编号 1212011121115)资助成果。

收稿日期: 2013-10-20;改回日期: 2014-02-26;责任编辑: 黄敏。

作者简介: 范裕,男,1982 年生,博士,副教授,主要从事矿床学和地球化学方面的科研工作。Email: fanyu@hfut.edu.cn。

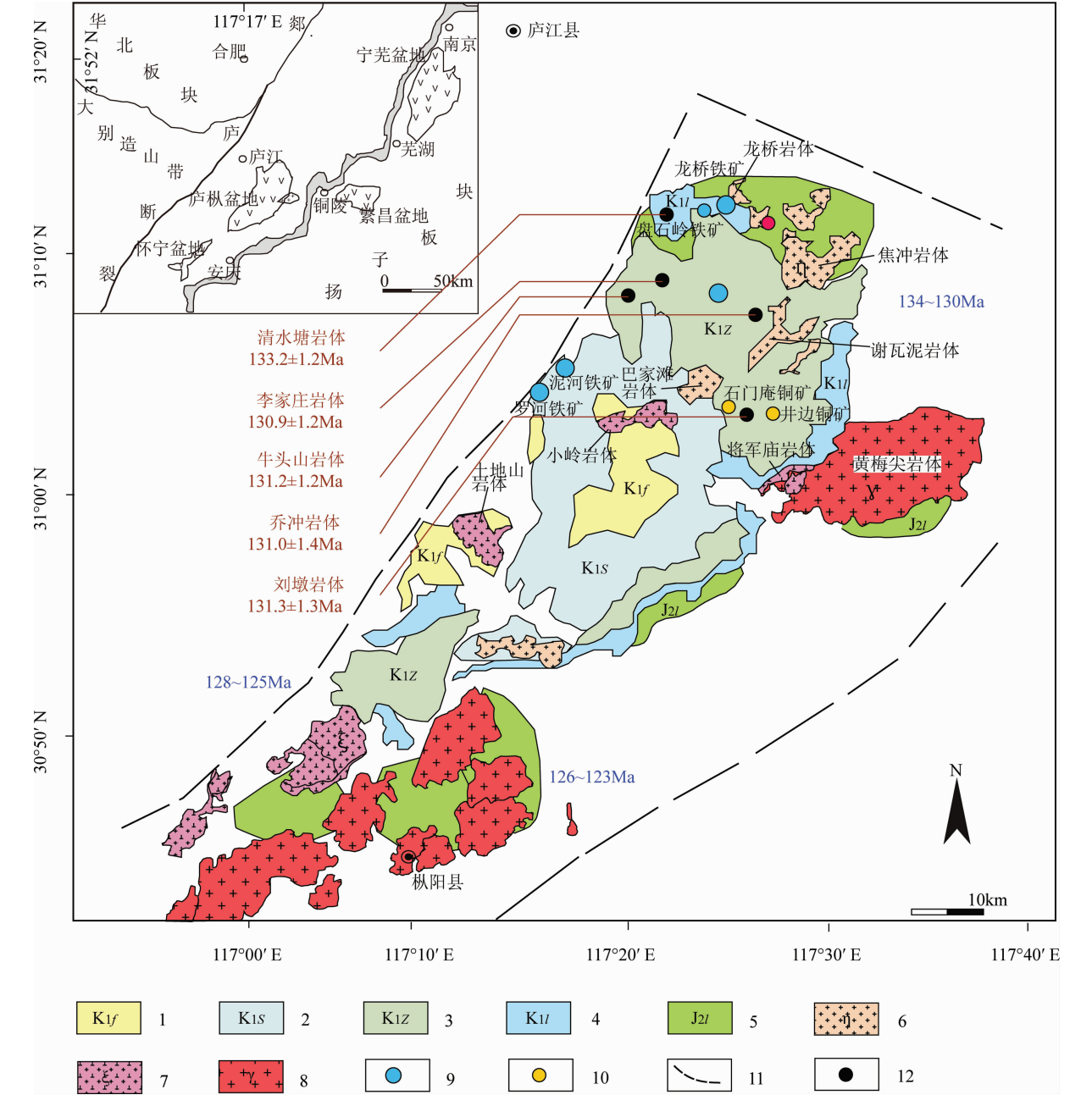


图 1 庐枞盆地地质矿产略图及采样点分布(周涛发等,2010)

Fig. 1 Sketch map of geology and mineral resources in Lu-Zong Basin in which sample point has been noted (Modified after Zhou TF et al. ,2010)

1—浮山组;2—双庙组;3—砖桥组;4—龙门院组;5—罗岭组;6—二长岩、正长岩(134~130Ma);7—正长岩(128~125Ma);
8—A 型花岗岩(126~123Ma);9—铁矿床;10—铜矿床;11—断裂;12—钻孔位置

1—Fushan Group; 2—Shuangmiao Group; 3—Zhuanqiao Group; 4—Longmenyuan Group; 5—Luoling Group; 6—monzonite, syenite(134~130Ma); 7—syenite(128~125Ma); 8—A-type granite(126~123Ma); 9—iron deposits; 10—copper deposits; 11—fault; 12—hole location

ICP MS 同位素测年方法对庐枞盆地内 5 个代表性隐伏侵入岩体进行了锆石 U-Pb 精确定年,与庐枞盆地已有火山—侵入岩时空格架进行对比(周涛发等,2010),进一步完善了庐枞盆地内岩浆岩的时空格架,在此基础上探讨庐枞盆地隐伏侵入岩与出露地表侵入岩的关系,初步分析了隐伏侵入岩与成矿

作用的联系,为探讨庐枞盆地等断凹区以及长江中下游成矿带岩浆岩及金属矿床的时空分布规律及其与深部过程的耦合关系研究提供了新的证据。

1 庐枞盆地地质概况

庐枞盆地位于安徽省庐江县和枞阳县之间,为

4 组深大断裂控制(图 1),盆地基底东浅西深,属于继承式的中生代陆相盆地(任启江等,1991)。出露的沉积地层主要为中侏罗统罗岭组(J_2l)陆相碎屑沉积岩,与橄榄安粗岩系火山岩呈不整合接触。火山岩在空间上大致呈同心环状分布,自盆地边缘至中心由老到新依次出露龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组,各组之间均为喷发不整合接触(任启江等,1991;周涛发等,2008a),构成 4 个旋回。各旋回的火山活动均由爆发相开始,随之溢流相逐渐增多,最后以火山沉积相结束,喷发方式由裂隙—中心式向典型的中心式喷发演化(图 1)。庐枞盆地内部有 34 个侵入岩岩体出露(安徽省地勘局 327 地质队,1981,1985,1988,1994),这些岩体按岩性可分为二长岩、正长岩和正长花岗岩。庐枞盆地内产出一系列铁、硫、铜、铅锌、明矾石、金、铀矿床,大中型铁矿床包括罗河矿床、龙桥矿床、泥河矿床和大岭铁矿床。

2 样品地质特征

庐枞盆地近年来开展了大量超过 1km 的深部钻探工作,钻孔中常揭露几百米厚侵入岩岩芯,且在同一矿区相邻若干钻孔深部均揭露相同岩性岩芯,可以认为庐枞盆地深部存在若干隐伏岩体。本次工作对庐枞盆地内新近施工的钻孔开展系统的岩芯编录,采集了盆地内新发现的清水塘岩体、刘墩岩体、乔冲岩体、牛头山岩体和李家庄岩体 5 个代表性隐伏岩体的新鲜岩石样品,通过室内系统岩矿鉴定确定其岩石学特征,并开展岩石地球化学特征和锆石定年工作。上述 5 岩体的空间分布特征见图 1,岩体地质特征简述如下。

2.1 清水塘岩体

清水塘岩体位于庐枞盆地北部,矾山镇西北约 1.8km,龙桥岩体西约 2km,隐伏侵位于砖桥组火山岩中,产于深度 0.8km 以下。清水塘岩体样品(编号 ZK42-1040)采集于清水塘矿区钻孔 ZK42 内 1.040km 深度岩芯,钻孔坐标为 3443841,538200。清水塘岩体主要岩性为辉石二长岩,岩石呈灰黑色,中细粒结构,块状构造。岩石的主要矿物为正长石(40%)、斜长石(40%)、辉石(15%)、黑云母(3%)、石英(2%)。正长石呈半自形—他形粒状结构,粒径大小 1~2mm 左右,双晶少见,发生弱的碳酸盐化、粘土化。斜长石为更一中长石(An 为 28-30),自形一半自形板状,粒径 0.5~2mm 左右,发育聚片双晶,具较弱的绢云母化,粘土化;辉石为普通辉石,自形一半自形短柱状,粒径 1~2mm 左右。黑云母

为镁质黑云母,自形一半自形片状,多为原生黑云母。石英主要呈他形,粒径约 0.2~0.5mm,填充在长石、暗色矿物间隙中。自形程度较高的斜长石被他形钾长石所包裹,呈典型的二长结构(图 2 a、2b)。

2.2 刘墩岩体

刘墩岩体位于庐枞盆地中部庐江县砖桥镇刘墩乡石桥村石桥小学附近,巴家滩岩体东南约 3km,黄梅尖岩体北部约 1km,石门庵铜矿附近,岩体隐伏于地下 1.6km 以下,穿切侵入砖桥组火山岩。刘墩岩体样品(编号 ZK01-1625)采集于庐枞盆地 2km 科学验证钻孔 ZK01 内 1.625km 深度岩芯,钻孔坐标为 3431500,545800。刘墩岩体的主要岩性为二长岩,岩石呈浅红色,中细粒结构,块状构造。岩石的主要矿物为正长石(50%)、斜长石(40%)、黑云母(5%)、石英(<5%)。正长石呈半自形—他形,粒径大小 0.5~2mm 左右,双晶少见,发生较强烈的碳酸盐化、粘土化。斜长石为钠长石(An 为 2),自形一半自形板状,粒径 1~2mm 左右,发育聚片双晶,具较强的粘土化。黑云母为镁质黑云母,自形一半自形片状,多为原生黑云母。石英主要呈他形粒状,粒径约 0.2 mm~0.5mm,填充在长石、暗色矿物间隙中(图 2 c、2d)。

2.3 乔冲岩体

乔冲岩体位于庐枞盆地北部庐江县,谢瓦泥岩体西北约 1.2km,焦冲岩体西南约 3km,岩体隐伏于地下 0.8km 以下,穿切侵入砖桥组火山岩。乔冲岩体样品(编号 ZK0001-1056)采集于乔冲钻孔 ZK0001 内 1.056km 深度岩芯,钻孔坐标为 3437168;545988。乔冲岩体的主要岩性为正长岩。岩石呈浅红色,中细粒结构,块状构造。岩石的主要矿物成分为正长石(85%)、斜长石(10%)、黑云母(1%)、石英(<5%)。正长石呈他形粒状分布,粒径 0.5~2mm,双晶少见,发生较强烈的粘土化;斜长石含量较少,粒径 0.5~1mm,自形一半自形板状,发育聚片双晶,具较强的粘土化;黑云母为镁质黑云母,自形一半自形片状,多为原生黑云母。石英呈他形颗粒,粒径 0.2~0.8mm,充填于长石颗粒间隙中(图 2 e、2f)。

2.4 牛头山岩体

牛头山岩体位于庐枞盆地北部矾山镇西南约 4.5km,岩体隐伏于地下 0.6km 以下,穿切侵入砖桥组火山岩。牛头山岩体样品(编号 ZK01-779)采集于牛头山矿区钻孔 ZK01 内 779m 深度岩芯,钻孔坐标为 3438891;535912。牛头山岩体的主要岩性为正长岩。岩石呈肉红色,中细粒结构,块状构

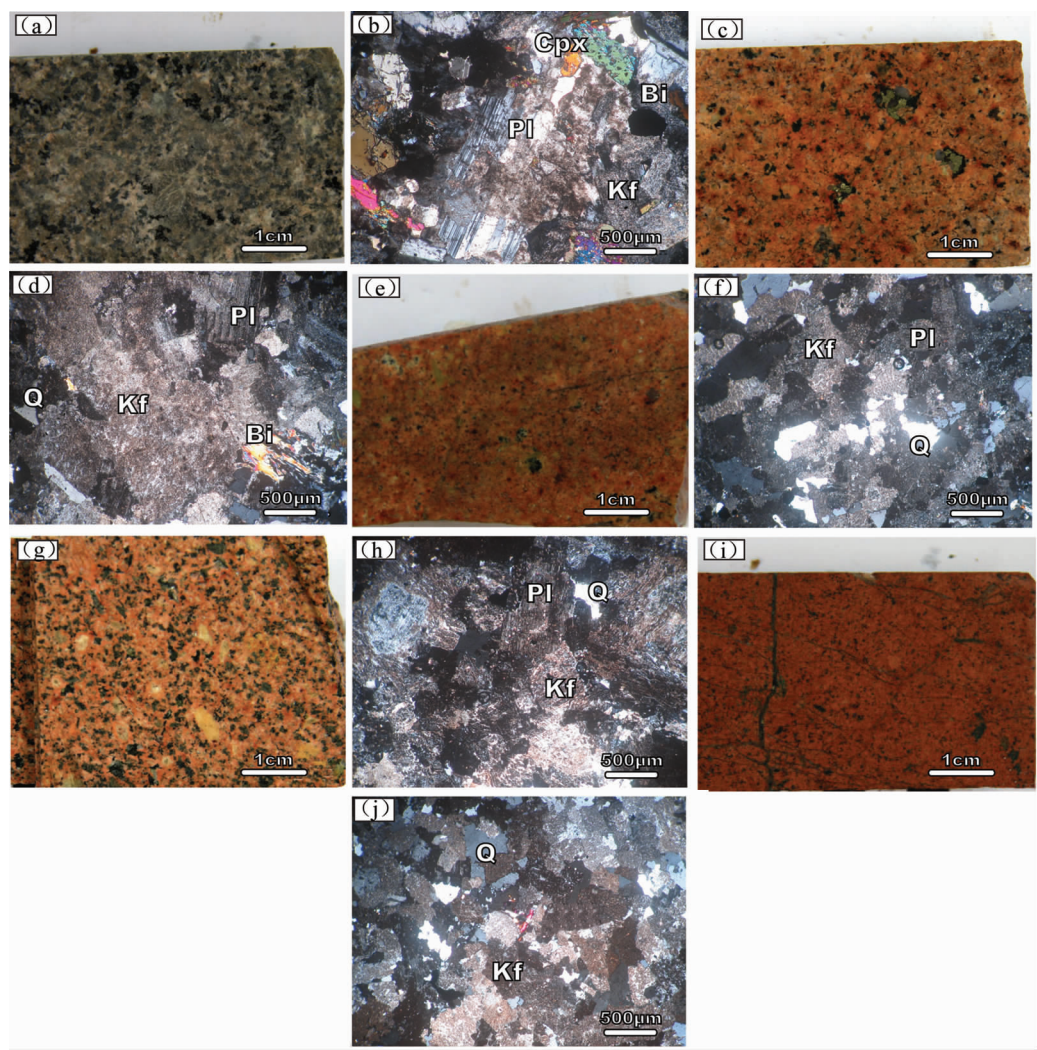


图 2 庐枞盆地隐伏岩体锆石定年样品的手标本及显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of hidden intrusion samples for isotopic dating in Lu-Zong Basin

(a, b)—清水塘辉石二长岩;(c, d)—刘墩二长岩;(e, f)—乔冲正长岩;(g, h)—牛头山正长岩;(i, j)—李家庄正长岩;缩写:

Q—石英;Cpx—辉石;Bi—黑云母;Pl—斜长石;Kf—钾长石

(a, b)—Qingshitang intrusion;(c, d)—Liudun intrusion;(e, f)—Qiaochong intrusion;(g, h)—Niutoushan intrusion;

(i, j)—Lijiazhuang intrusion; Abbreviation: Q—quartzes; Cpx—pyroxene; Bi—biotite; Pl—plagioclase; Kf—potash feldspar

造。岩石的主要矿物成分为正长石(80%)、斜长石(10%)、黑云母(<5%)、石英(<5%)。正长石呈半自形~他形,粒径1~2mm左右,双晶少见,发生较强烈的粘土化。斜长石为钠长石(An为1~2),自形一半自形板状,粒径0.5~1.5mm,发育聚片双晶,具不同程度的钾化、绢云母化,粘土化;黑云母含量极少,自形一半自形片状,多为原生黑云母。石英主要呈他形粒状,粒径约0.5~1mm,充填于长石颗粒间隙中(图2g、h)。

2.5 李家庄岩体

李家庄岩体位于庐枞盆地北部矾山镇西南约3km,岩体隐伏于地下1.1km以下,穿切侵入砖桥组火山岩。李家庄岩体样品(编号ZK01-1200)采集

于李家庄矿区钻孔ZK01内1200m深度岩芯,钻孔坐标为3438955;537824。李家庄岩体的主要岩性为正长岩,岩石呈肉红色,中细粒结构,块状构造。岩石的主要矿物为正长石(85%)、斜长石(10%)、石英(<5%)。正长石呈半自形~他形,粒径大小0.5~1.5mm左右,双晶少见,发生较强烈的碳酸盐化、粘土化。斜长石呈自形一半自形板状,粒径0.25~1mm左右,发育聚片双晶,具较强的粘土化。石英主要呈他形粒状,粒径约0.2~0.5mm,填充在长石颗粒间隙中(图2i、2j)。

3 岩体地球化学特征

上述5个岩体的常量元素、稀土元素和微量元

素分析结果见表 1。从表 1 中可见,清水塘岩体、刘墩岩体、乔冲岩体、牛头山岩体和李家庄岩体的硅含量和全碱含量均较高, SiO₂ 含量在 56.19%~69.46%之间, K₂O 含量在 4.63%~6.08%之间, Na₂O 含量在 3.69%~5.50%之间, ALK(K₂O+

表 1 庐枞盆地隐伏岩体常量元素(%)和微量元素(×10⁻⁶)分析结果

Table 1 Analytical results of major(%) and trace elements (×10 ⁻⁶) for the hidden intrusions in Lu-Zong Basin					
样品号	ZK42-1040	ZK01-1625	ZK0001-1056	ZK01-779	ZK01-1200
岩体名称	清水塘	刘墩	乔冲	牛头山	李家庄
SiO ₂	56.19	67.54	69.46	63.29	63.98
TiO ₂	0.87	0.32	0.41	0.51	0.47
Al ₂ O ₃	17.77	16.61	15.53	16.71	16.96
Fe ₂ O ₃	7.04	3.58	3.20	4.35	4.31
MnO	0.18	0.08	0.11	0.15	0.09
MgO	2.74	0.71	0.76	0.92	0.89
CaO	5.45	1.18	1.12	2.49	1.98
Na ₂ O	4.29	5.13	3.69	4.81	5.50
K ₂ O	4.81	4.63	5.58	6.08	5.33
P ₂ O ₅	0.47	0.09	0.10	0.15	0.15
总量	100.00	99.94	100.00	99.53	99.73
Ba	674.26	264.74	379.15	326.19	324.96
Ce	130.01	77.79	132.35	143.09	121.35
Cr	20.16	10.18	10.22	10.26	10.28
Cs	7.55	3.87	4.60	2.72	1.37
Dy	4.83	3.15	3.72	6.76	4.15
Er	2.77	2.25	2.22	4.29	2.56
Eu	1.89	0.63	1.01	1.09	1.10
Ga	23.68	31.36	22.28	25.34	22.83
Gd	6.35	3.29	4.66	7.71	5.25
Hf	12.50	29.63	13.49	23.39	20.57
Ho	0.92	0.64	0.71	1.33	0.82
La	66.52	40.83	71.54	60.11	58.10
Lu	0.43	0.54	0.44	0.78	0.51
Nb	26.41	45.52	43.64	85.65	37.95
Nd	54.73	29.02	46.30	61.96	47.82
Pr	14.11	8.05	13.29	16.41	13.11
Rb	217.70	287.14	284.11	288.24	225.21
Sm	9.90	5.05	7.44	11.18	7.98
Sn	3.02	3.05	3.07	5.13	3.09
Sr	951.42	292.23	159.43	307.73	252.98
Ta	2.02	5.70	3.27	7.39	2.98
Tb	0.92	0.53	0.68	1.19	0.75
Th	52.71	241.32	72.25	187.20	80.01
Tl	<0.5	0.51	0.61	0.62	<0.5
Tm	0.41	0.39	0.37	0.69	0.42
U	15.27	76.67	25.34	47.08	25.91
V	165.29	67.20	31.68	44.11	37.02
W	4.03	5.09	7.15	4.10	8.23
Y	25.10	19.04	21.26	37.85	22.21
Yb	2.84	3.12	2.74	4.99	3.16
Zr	524.09	865.50	521.21	923.19	884.39

注:分析者为澳实分析检测(广州)有限公司。

Na₂O)总量在 9.10%~10.89%之间。5 个岩体的 Fe₂O₃ (3.20%~7.04%), MnO(0.08%~0.18%), MgO(0.71%~2.74%), CaO(1.12%~5.45%), TiO₂ (0.32%~0.87%) 和 P₂O₅ (0.09%~0.47%) 含量均较低。5 个岩体的 Al₂O₃ 含量在 15.53%~17.77%之间, 碱铝比[NK/A=(K₂O+Na₂O)/Al₂O₃, mol]在 0.69~0.87 之间, 铝过饱和度 A/CNK 值[Al₂O₃/((CaO+K₂O+Na₂O), mol]在 0.80~1.10 之间, 为准铝质或过铝质。侵入岩 TAS 分类图解中, 庐枞盆地北部隐伏岩体主要落入碱性岩区域, 分布于二长岩、正长岩区域。侵入岩 K₂O-SiO₂ 图解显示, 庐枞盆地北部隐伏岩体全部分布于钾玄岩系列区域。从表 1 中可见, 5 个岩体的 ΣREE 范围在 175.28×10⁻⁶~321.58×10⁻⁶; δEu 范围 0.34~0.68, LREE/HREE 比值范围 10.59~17.50, 表现为 Eu 亏损, 分配图呈略右倾的海鸥型(图 3), 标准化数据见 McDonough 等(1995)。

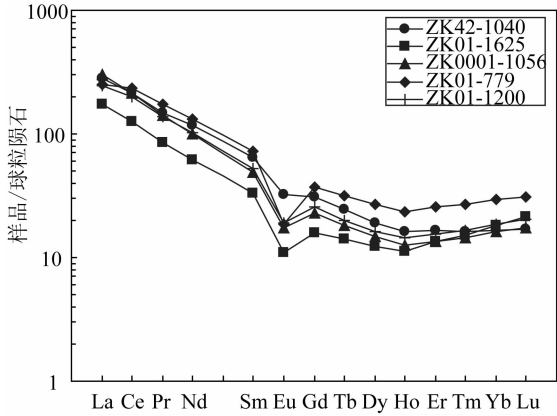


图 3 庐枞盆地隐伏岩体球粒陨石标准化稀土配分模式图
Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns for the hidden intrusions in Lu-Zong Basin

4 测试方法及定年结果

4.1 测试方法

用于锆石年代学测试的样品首先经过破碎, 通过浮选和电磁选等方法挑选出单颗粒锆石, 然后在双目镜下挑纯, 选样工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。手工挑出晶形完好、透明度和色泽度好的锆石, 粘于环氧树脂表面, 经抛光后进行透射光和反射光照相, 据此选择晶体特征良好的锆石阴极发光(CL)分析(部分图像如图 4 所示), 最后根据阴极发光照射结果选择典型的岩浆锆石进行 LA-ICP MS 测年分析, 锆石的 CL 图像在北京锆年领航科技有限公司完成, U-Pb 年龄测定在安徽省

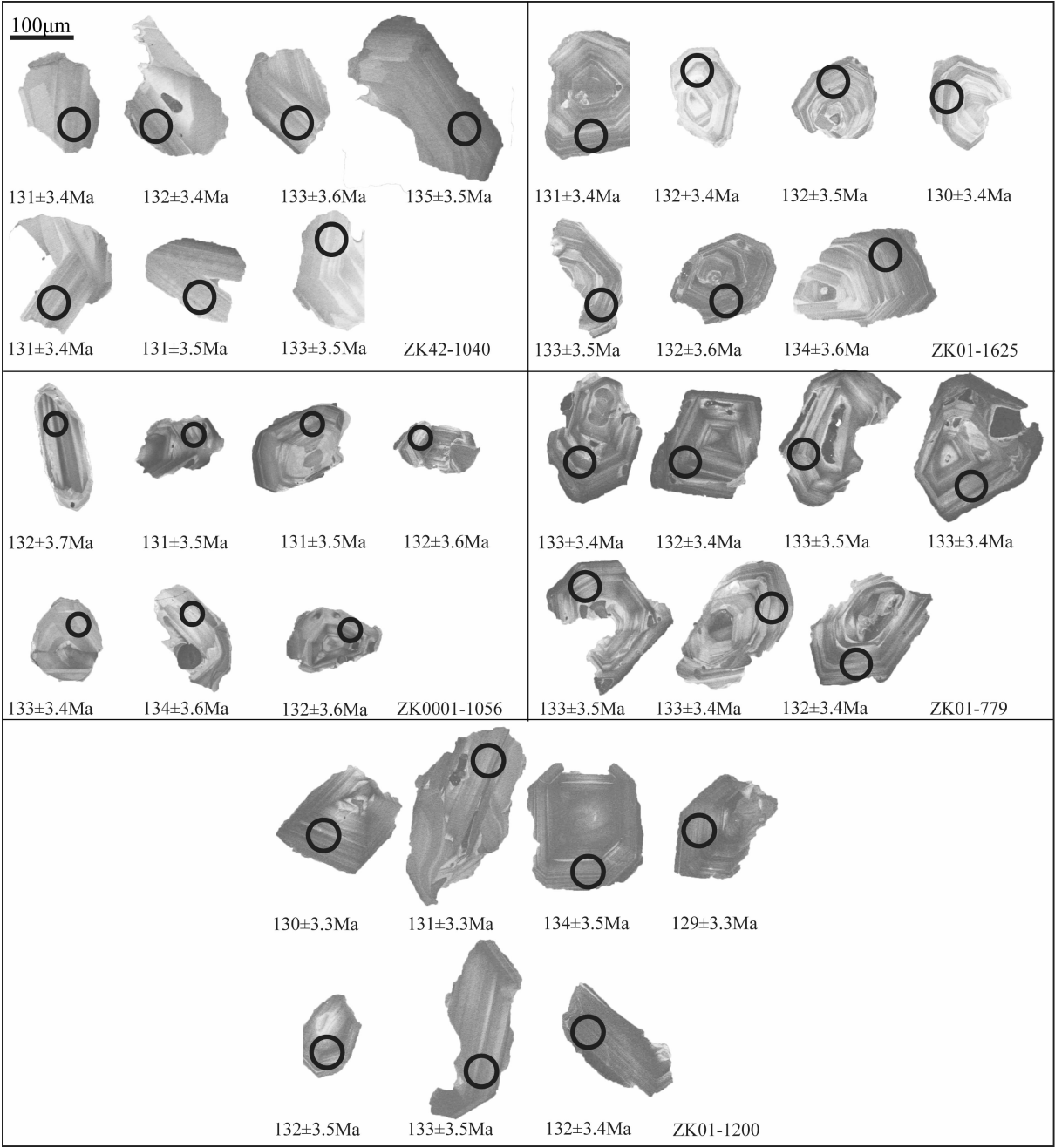


图 4 庐枞盆地隐伏岩体样品部分阴极发光(CL)图像及测试位置

Fig. 4 Cathodoluminescence(CL) images of selected zircons for the hidden intrusions from Lu-Zong Basin

合肥工业大学资源与环境工程学院电子探针分析室和 LA-ICP MS 实验室完成。分析仪器为美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a 和美国 Coherent Inc. 公司生产的 GeoLasPro 型激光剥蚀系统。采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化。

锆石 U-Pb 年龄分析采用的光斑直径为 32 μ m, 并采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质,外标校正方法为每隔 4~5 个样品分析点测一次标准, 保证标准和样品的仪器条件完全一致。样品的同位素数据处理采用中国地质大学(武汉)刘勇胜教授编写的 ICPMSDataCal 软件(Liu YS et al., 2008a, 2010a), 普通铅校正采用 Andersen 的方法(Andersen, 2002), 年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot(3. 23 版)进行(Ludwig, 2003), 测试中的误差标准为 1 σ , 实验详细的流程参见 Black 等(2004)。本次实验除去古老锆石及异常的锆石年龄(未在表中列出), 有效的测试数据为 136 个, 具体分析结果见表 2。

Table 2 LA-ICP MS zircon U-Pb dating data for the hidden intrusions from Lu-Zong Basin

分析点	质量分数($\times 10^{-6}$)			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{208}\text{Pb})/n(^{232}\text{Th})$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		
	Th	U	Th/U	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
ZK42-1040																		
ZK42-1040-01	834	977	0.85	0.0487	0.0019	0.1373	0.0056	0.0205	0.0005	0.0063	0.0002	131	5.0	131	3.4	127	3.5	
ZK42-1040-02	444	689	0.64	0.0509	0.0021	0.1465	0.0062	0.0211	0.0006	0.0066	0.0002	139	5.5	134	3.5	133	4.0	
ZK42-1040-03	654	979	0.67	0.0488	0.0018	0.1395	0.0056	0.0207	0.0005	0.0065	0.0002	133	5.0	132	3.4	130	3.6	
ZK42-1040-05	335	523	0.64	0.0518	0.0024	0.1493	0.0075	0.0209	0.0006	0.0063	0.0002	141	6.6	133	3.5	128	4.0	
ZK42-1040-06	373	616	0.60	0.0513	0.0024	0.1545	0.0079	0.0219	0.0006	0.0065	0.0002	146	6.9	139	3.6	132	4.2	
ZK42-1040-07	371	481	0.77	0.0497	0.0023	0.1431	0.0072	0.0209	0.0006	0.0062	0.0002	136	6.4	133	3.6	125	3.9	
ZK42-1040-08	367	522	0.70	0.0490	0.0023	0.1377	0.0068	0.0206	0.0006	0.0065	0.0002	131	6.1	131	3.6	131	4.1	
ZK42-1040-09	464	500	0.93	0.0497	0.0025	0.1461	0.0076	0.0215	0.0006	0.0068	0.0002	138	6.7	137	3.7	138	4.0	
ZK42-1040-10	737	1057	0.70	0.0495	0.0018	0.1452	0.0060	0.0212	0.0006	0.0065	0.0002	138	5.3	135	3.5	131	3.7	
ZK42-1040-11	296	546	0.54	0.0493	0.0023	0.1394	0.0071	0.0204	0.0005	0.0066	0.0002	133	6.3	130	3.4	132	4.1	
ZK42-1040-12	285	548	0.52	0.0489	0.0021	0.1368	0.0064	0.0203	0.0005	0.0063	0.0002	130	5.7	129	3.4	126	4.2	
ZK42-1040-13	327	466	0.70	0.0470	0.0023	0.1344	0.0069	0.0210	0.0006	0.0065	0.0002	128	6.1	134	3.6	132	4.4	
ZK42-1040-14	756	1231	0.61	0.0492	0.0017	0.1471	0.0058	0.0216	0.0006	0.0068	0.0002	139	5.1	138	3.6	136	3.9	
ZK42-1040-15	564	674	0.84	0.0463	0.0022	0.1311	0.0065	0.0206	0.0006	0.0065	0.0002	125	5.9	131	3.481	131	3.81	
ZK42-1040-16	1186	1351	0.88	0.0477	0.0018	0.1447	0.0062	0.0219	0.0006	0.0066	0.0002	137	5.5	140	3.7	133	3.6	
ZK42-1040-17	769	956	0.80	0.0493	0.0019	0.1398	0.0060	0.0206	0.0005	0.0066	0.0002	133	5.3	131	3.4	134	3.7	
ZK42-1040-18	613	1117	0.55	0.0489	0.0019	0.1376	0.0060	0.0204	0.0005	0.0065	0.0002	131	5.4	130	3.3	131	3.7	
ZK42-1040-19	272	350	0.78	0.0496	0.0026	0.1378	0.0074	0.0205	0.0006	0.0062	0.0002	131	6.6	131	3.6	126	4.2	
ZK42-1040-21	680	1203	0.57	0.0497	0.0018	0.1478	0.0057	0.0217	0.0006	0.0069	0.0002	140	5.1	138	3.6	139	4.0	
ZK42-1040-24	295	418	0.70	0.0507	0.0025	0.1438	0.0074	0.0206	0.0006	0.0069	0.0002	136	6.5	131	3.6	139	4.5	
ZK42-1040-25	361	472	0.76	0.0495	0.0026	0.1389	0.0073	0.0205	0.0006	0.0068	0.0002	132	6.6	131	3.5	137	4.1	
ZK42-1040-26	356	539	0.66	0.0503	0.0022	0.1478	0.0069	0.0212	0.0006	0.0071	0.0002	140	6.1	135	3.6	142	4.5	
ZK42-1040-27	756	1096	0.69	0.0508	0.0019	0.1419	0.0055	0.0203	0.0005	0.0069	0.0002	135	4.9	130	3.3	138	3.8	
ZK42-1040-28	687	1148	0.60	0.0512	0.0017	0.1497	0.0054	0.0212	0.0006	0.0068	0.0002	142	4.8	135	3.5	137	3.9	
ZK42-1040-29	472	793	0.59	0.0532	0.0019	0.1529	0.0060	0.0208	0.0005	0.0072	0.0002	144	5.3	133	3.5	145	4.3	
ZK42-1040-30	402	557	0.72	0.0488	0.0024	0.1388	0.0070	0.0206	0.0006	0.0071	0.0002	132	6.2	131	3.5	142	4.2	
ZK01-1625																		
ZK01-1625-01	1016	2220	0.46	0.0475	0.0016	0.1359	0.0044	0.0208	0.0005	0.0068	0.0002	129	3.9	132	3.4	137	4.1	
ZK01-1625-02	2208	3179	0.69	0.0482	0.0015	0.1369	0.0044	0.0205	0.0005	0.0065	0.0002	130	3.9	131	3.4	131	3.8	
ZK01-1625-03	1992	3077	0.65	0.0489	0.0015	0.1359	0.0042	0.0201	0.0005	0.0061	0.0002	129	3.8	128	3.3	124	3.5	
ZK01-1625-04	1824	1876	0.97	0.0474	0.0016	0.1345	0.0045	0.0205	0.0005	0.0065	0.0002	128	4.0	131	3.4	130	3.9	
ZK01-1625-05	1455	2752	0.53	0.0478	0.0015	0.1337	0.0044	0.0203	0.0005	0.0064	0.0002	127	4.0	129	3.4	128	3.9	

续表 2

ZK01-1625-06	1831	2952	0.62	0.0493	0.0016	0.1385	0.0045	0.0204	0.0005	0.0064	0.0002	132	4.0	130	3.4	128	3.8
ZK01-1625-07	639	1497	0.43	0.0493	0.0016	0.1403	0.0046	0.0207	0.0005	0.0069	0.0002	133	4.1	132	3.5	138	4.2
ZK01-1625-08	2292	3164	0.72	0.0505	0.0016	0.1429	0.0046	0.0205	0.0005	0.0065	0.0002	136	4.1	131	3.4	130	3.7
ZK01-1625-09	1632	2405	0.68	0.0506	0.0016	0.1377	0.0044	0.0197	0.0005	0.0061	0.0002	131	3.9	126	3.3	124	3.5
ZK01-1625-10	1991	2837	0.70	0.0514	0.0016	0.1468	0.0046	0.0207	0.0005	0.0066	0.0002	139	4.0	132	3.4	133	3.8
ZK01-1625-11	1480	2816	0.53	0.0497	0.0016	0.1359	0.0044	0.0198	0.0005	0.0065	0.0002	129	3.9	126	3.3	130	3.8
ZK01-1625-12	616	821	0.75	0.0508	0.0018	0.1456	0.0052	0.0207	0.0006	0.0074	0.0002	138	4.6	132	3.5	149	4.5
ZK01-1625-15	1236	1229	1.01	0.0507	0.0018	0.1389	0.0050	0.0198	0.0005	0.0066	0.0002	132	4.4	127	3.4	132	4.1
ZK01-1625-16	903	927	0.97	0.0478	0.0018	0.1392	0.0052	0.0211	0.0006	0.0073	0.0002	132	4.7	134	3.6	148	4.6
ZK01-1625-17	753	1279	0.59	0.0485	0.0016	0.1359	0.0045	0.0203	0.0005	0.0071	0.0002	129	4.1	129	3.4	143	4.3
ZK01-1625-18	1160	1467	0.79	0.0498	0.0017	0.1382	0.0047	0.0200	0.0005	0.0070	0.0002	131	4.2	128	3.4	141	4.1
ZK01-1625-19	1566	2512	0.62	0.0488	0.0016	0.1333	0.0042	0.0198	0.0005	0.0064	0.0002	127	3.8	127	3.3	129	3.7
ZK01-1625-20	782	1586	0.49	0.0472	0.0016	0.1328	0.0045	0.0204	0.0005	0.0069	0.0002	127	4.0	130	3.4	140	4.1
ZK01-1625-21	898	1730	0.52	0.0490	0.0016	0.1406	0.0048	0.0208	0.0006	0.0071	0.0002	134	4.3	133	3.5	143	4.2
ZK01-1625-22	1504	3826	0.41	0.0479	0.0015	0.1413	0.0044	0.0214	0.0006	0.0071	0.0002	134	4.0	136	3.6	144	4.3
ZK01-1625-23	1019	1136	0.90	0.0464	0.0016	0.1388	0.0048	0.0218	0.0006	0.0074	0.0002	132	4.3	139	3.7	148	4.4
ZK01-1625-24	361	486	0.74	0.0483	0.0021	0.1431	0.0064	0.0215	0.0006	0.0070	0.0002	136	5.7	137	3.7	141	4.5
ZK01-1625-25	618	1397	0.44	0.0479	0.0017	0.1367	0.0051	0.0208	0.0006	0.0074	0.0002	130	4.5	132	3.6	148	4.8
ZK01-1625-27	986	1837	0.54	0.0481	0.0017	0.1412	0.0050	0.0214	0.0006	0.0071	0.0002	134	4.4	136	3.6	144	4.2
ZK01-1625-29	400	710	0.56	0.0497	0.0018	0.1447	0.0053	0.0212	0.0006	0.0072	0.0002	137	4.7	135	3.7	144	4.7
ZK01-1625-30	1883	3359	0.56	0.0493	0.0016	0.1410	0.0046	0.0207	0.0006	0.0068	0.0002	134	4.1	132	3.5	137	4.1
ZK0001-1056																	
ZK0001-1056-01	241	339	0.71	0.0487	0.0021	0.1348	0.0064	0.0201	0.0006	0.0064	0.0002	128	5.7	129	3.5	129	3.9
ZK0001-1056-03	241	360	0.67	0.0499	0.0022	0.1409	0.0069	0.0205	0.0006	0.0065	0.0002	134	6.2	131	3.5	131	3.9
ZK0001-1056-04	207	291	0.71	0.0489	0.0022	0.1374	0.0070	0.0202	0.0006	0.0067	0.0002	131	6.3	129	3.5	135	4.0
ZK0001-1056-05	234	305	0.77	0.0507	0.0023	0.1433	0.0071	0.0207	0.0006	0.0062	0.0002	136	6.3	132	3.5	126	3.8
ZK0001-1056-06	2338	2019	1.16	0.0488	0.0014	0.1415	0.0051	0.0210	0.0005	0.0068	0.0002	134	4.5	134	3.4	137	3.6
ZK0001-1056-07	551	1352	0.41	0.0510	0.0016	0.1394	0.0051	0.0198	0.0005	0.0065	0.0002	133	4.5	126	3.2	130	3.6
ZK0001-1056-08	110	163	0.67	0.0490	0.0028	0.1383	0.0084	0.0207	0.0006	0.0069	0.0002	132	7.5	132	3.7	139	5.0
ZK0001-1056-09	372	382	0.98	0.0483	0.0023	0.1332	0.0065	0.0202	0.0005	0.0066	0.0002	127	5.9	129	3.4	132	3.7
ZK0001-1056-10	1009	1767	0.57	0.0503	0.0016	0.1374	0.0049	0.0198	0.0005	0.0065	0.0002	131	4.4	126	3.3	130	3.5
ZK0001-1056-11	971	1405	0.69	0.0504	0.0016	0.1445	0.0051	0.0208	0.0005	0.0066	0.0002	137	4.5	133	3.4	133	3.6
ZK0001-1056-12	168	242	0.69	0.0526	0.0026	0.1523	0.0078	0.0212	0.0006	0.0068	0.0002	144	6.9	136	3.7	138	4.3
ZK0001-1056-14	305	624	0.49	0.0542	0.0020	0.1586	0.0067	0.0213	0.0006	0.0077	0.0002	150	5.8	136	3.5	154	4.4
ZK0001-1056-15	206	282	0.73	0.0545	0.0025	0.1564	0.0080	0.0210	0.0006	0.0068	0.0002	148	7.0	134	3.6	136	4.3
ZK0001-1056-16	165	248	0.66	0.0515	0.0027	0.1424	0.0079	0.0202	0.0006	0.0067	0.0002	135	7.0	129	3.5	135	4.3

续表 2

ZK0001-1056-17	219	284	0.77	0.0548	0.0025	0.1529	0.0076	0.0205	0.0006	0.0067	0.0002	144	6.7	131	3.5	136	4.0
ZK0001-1056-19	330	327	1.01	0.0514	0.0020	0.1450	0.0063	0.0205	0.0006	0.0067	0.0002	138	5.6	131	3.6	136	4.0
ZK0001-1056-20	545	636	0.86	0.0505	0.0019	0.1387	0.0059	0.0199	0.0005	0.0065	0.0002	132	5.2	127	3.3	131	3.6
ZK0001-1056-21	521	1323	0.39	0.0493	0.0015	0.1391	0.0050	0.0205	0.0005	0.0067	0.0002	132	4.4	131	3.3	135	3.7
ZK0001-1056-22	141	228	0.62	0.0512	0.0024	0.1444	0.0072	0.0206	0.0006	0.0069	0.0002	137	6.4	131	3.6	139	4.8
ZK0001-1056-23	158	477	0.33	0.0485	0.0019	0.1364	0.0057	0.0206	0.0005	0.0068	0.0002	130	5.1	131	3.5	137	4.5
ZK0001-1056-24	194	332	0.58	0.0489	0.0020	0.1387	0.0063	0.0206	0.0006	0.0070	0.0002	132	5.6	131	3.5	141	4.6
ZK0001-1056-26	145	258	0.56	0.0504	0.0025	0.1431	0.0078	0.0206	0.0006	0.0067	0.0002	136	7.0	132	3.6	136	4.6
ZK0001-1056-27	559	836	0.67	0.0496	0.0018	0.1433	0.0061	0.0209	0.0006	0.0068	0.0002	136	5.4	134	3.6	136	3.7
ZK0001-1056-29	179	232	0.77	0.0507	0.0026	0.1392	0.0075	0.0206	0.0008	0.0062	0.0002	132	6.7	131	5.1	126	4.2
ZK0001-1056-30	273	356	0.77	0.0489	0.0023	0.1396	0.0068	0.0208	0.0006	0.0067	0.0002	133	6.1	133	3.6	134	4.1
ZK01-779																	
ZK01-779-01	1106	2043	0.54	0.0477	0.0014	0.1364	0.0046	0.0208	0.0005	0.0061	0.0002	130	4.1	133	3.4	123	3.3
ZK01-779-02	1046	1059	0.99	0.0505	0.0017	0.1432	0.0053	0.0206	0.0005	0.0062	0.0002	136	4.7	132	3.4	126	3.3
ZK01-779-03	2979	2804	1.06	0.0491	0.0014	0.1390	0.0045	0.0205	0.0005	0.0060	0.0002	132	4.0	131	3.3	121	3.1
ZK01-779-04	620	1339	0.46	0.0494	0.0015	0.1416	0.0049	0.0208	0.0005	0.0061	0.0002	134	4.3	133	3.5	123	3.4
ZK01-779-05	1725	1908	0.90	0.0487	0.0015	0.1381	0.0048	0.0205	0.0005	0.0061	0.0002	131	4.3	131	3.3	124	3.2
ZK01-779-06	407	560	0.73	0.0512	0.0018	0.1511	0.0058	0.0214	0.0006	0.0067	0.0002	143	5.1	137	3.6	134	3.8
ZK01-779-07	797	808	0.99	0.0497	0.0018	0.1437	0.0055	0.0209	0.0005	0.0066	0.0002	136	4.9	133	3.4	133	3.5
ZK01-779-08	683	937	0.73	0.0526	0.0018	0.1509	0.0056	0.0207	0.0005	0.0069	0.0002	143	5.0	132	3.4	139	3.9
ZK01-779-09	535	939	0.57	0.0479	0.0016	0.1378	0.0051	0.0209	0.0006	0.0065	0.0002	131	4.5	133	3.5	130	3.6
ZK01-779-11	952	1226	0.78	0.0489	0.0016	0.1360	0.0051	0.0201	0.0005	0.0066	0.0002	129	4.5	128	3.3	133	3.6
ZK01-779-12	863	1111	0.78	0.0501	0.0016	0.1442	0.0055	0.0209	0.0006	0.0067	0.0002	137	4.9	133	3.5	136	3.8
ZK01-779-13	5439	3101	1.75	0.0471	0.0014	0.1330	0.0045	0.0205	0.0005	0.0064	0.0002	127	4.0	131	3.3	129	3.3
ZK01-779-14	1566	1372	1.14	0.0464	0.0015	0.1311	0.0051	0.0205	0.0005	0.0064	0.0002	125	4.5	131	3.3	130	3.4
ZK01-779-15	1920	1569	1.22	0.0481	0.0014	0.1306	0.0049	0.0197	0.0005	0.0061	0.0002	125	4.4	125	3.2	122	3.2
ZK01-779-16	2185	1737	1.26	0.0471	0.0014	0.1312	0.0048	0.0202	0.0005	0.0063	0.0002	125	4.3	129	3.3	128	3.4
ZK01-779-17	2901	2594	1.12	0.0472	0.0014	0.1330	0.0046	0.0204	0.0005	0.0062	0.0002	127	4.1	130	3.3	126	3.3
ZK01-779-18	1326	1488	0.89	0.0468	0.0014	0.1332	0.0047	0.0207	0.0005	0.0065	0.0002	127	4.2	132	3.4	130	3.4
ZK01-779-19	1494	1428	1.05	0.0486	0.0015	0.1389	0.0050	0.0207	0.0005	0.0064	0.0002	132	4.4	132	3.4	128	3.5
ZK01-779-20	1370	1434	0.96	0.0482	0.0015	0.1355	0.0048	0.0205	0.0005	0.0065	0.0002	129	4.3	131	3.3	131	3.5
ZK01-779-21	731	976	0.75	0.0474	0.0016	0.1366	0.0053	0.0209	0.0005	0.0069	0.0002	130	4.7	134	3.4	138	3.8
ZK01-779-22	3466	2311	1.50	0.0490	0.0014	0.1376	0.0048	0.0204	0.0005	0.0064	0.0002	131	4.3	130	3.3	128	3.3
ZK01-779-23	1761	2270	0.78	0.0488	0.0014	0.1377	0.0047	0.0204	0.0005	0.0066	0.0002	131	4.2	130	3.3	132	3.5
ZK01-779-24	1650	1380	1.20	0.0528	0.0016	0.1496	0.0055	0.0206	0.0005	0.0066	0.0002	142	4.9	131	3.4	133	3.9
ZK01-779-25	740	907	0.82	0.0493	0.0017	0.1371	0.0056	0.0202	0.0005	0.0062	0.0002	130	5.0	129	3.3	125	3.4

续表 2

ZK01-779-26	988	1338	0.74	0.0494	0.0015	0.1384	0.0055	0.0203	0.0005	0.0067	0.0002	132	4.9	130	3.3	135	3.6
ZK01-779-27	1198	1102	1.09	0.0489	0.0016	0.1361	0.0054	0.0202	0.0005	0.0065	0.0002	130	4.9	129	3.3	130	3.5
ZK01-779-28	760	812	0.94	0.0479	0.0017	0.1394	0.0055	0.0212	0.0006	0.0066	0.0002	133	4.9	135	3.5	132	3.6
ZK01-779-29	642	819	0.78	0.0506	0.0019	0.1451	0.0058	0.0208	0.0005	0.0065	0.0002	138	5.1	133	3.4	132	3.6
ZK01-779-30	1793	2156	0.83	0.0492	0.0015	0.1396	0.0047	0.0206	0.0005	0.0068	0.0002	133	4.2	131	3.4	136	3.6
ZK01-1200																	
ZK01-1200-01	1129	1517	0.74	0.0476	0.0015	0.1318	0.0049	0.0201	0.0005	0.0066	0.0002	126	4.4	128	3.3	133	3.6
ZK01-1200-02	1583	1549	1.02	0.0480	0.0016	0.1343	0.0049	0.0203	0.0005	0.0064	0.0002	128	4.3	130	3.3	130	3.4
ZK01-1200-03	828	1686	0.49	0.0487	0.0015	0.1400	0.0051	0.0208	0.0005	0.0066	0.0002	133	4.5	133	3.5	132	3.6
ZK01-1200-04	1098	1297	0.85	0.0490	0.0016	0.1398	0.0052	0.0207	0.0005	0.0067	0.0002	133	4.6	132	3.4	135	3.7
ZK01-1200-05	3193	2811	1.14	0.0478	0.0014	0.1354	0.0049	0.0205	0.0005	0.0064	0.0002	129	4.4	131	3.3	129	3.4
ZK01-1200-06	1032	1580	0.65	0.0491	0.0016	0.1362	0.0051	0.0201	0.0005	0.0064	0.0002	130	4.5	128	3.3	129	3.4
ZK01-1200-07	1257	1691	0.74	0.0484	0.0015	0.1389	0.0051	0.0208	0.0005	0.0066	0.0002	132	4.6	133	3.4	133	3.5
ZK01-1200-08	1006	1221	0.82	0.0480	0.0016	0.1353	0.0051	0.0205	0.0005	0.0064	0.0002	129	4.6	131	3.4	129	3.5
ZK01-1200-09	2360	2162	1.09	0.0489	0.0015	0.1350	0.0049	0.0200	0.0005	0.0063	0.0002	129	4.4	128	3.3	126	3.3
ZK01-1200-10	810	1060	0.76	0.0504	0.0018	0.1458	0.0060	0.0210	0.0006	0.0068	0.0002	138	5.3	134	3.5	136	3.7
ZK01-1200-11	1441	1611	0.89	0.0485	0.0016	0.1359	0.0052	0.0203	0.0005	0.0067	0.0002	129	4.6	130	3.3	135	3.6
ZK01-1200-12	2377	2405	0.99	0.0482	0.0015	0.1370	0.0049	0.0207	0.0005	0.0066	0.0002	130	4.3	132	3.4	133	3.5
ZK01-1200-13	1022	1676	0.61	0.0501	0.0016	0.1399	0.0050	0.0202	0.0005	0.0065	0.0002	133	4.4	129	3.3	131	3.6
ZK01-1200-14	1833	1923	0.95	0.0479	0.0016	0.1329	0.0049	0.0201	0.0005	0.0065	0.0002	127	4.4	128	3.3	130	3.4
ZK01-1200-15	1332	1702	0.78	0.0507	0.0016	0.1386	0.0051	0.0198	0.0005	0.0063	0.0002	132	4.5	126	3.2	127	3.4
ZK01-1200-16	650	929	0.70	0.0494	0.0017	0.1461	0.0057	0.0215	0.0006	0.0069	0.0002	138	5.0	137	3.6	138	3.9
ZK01-1200-17	1154	1591	0.73	0.0506	0.0017	0.1480	0.0055	0.0211	0.0006	0.0071	0.0002	140	4.9	135	3.5	143	4.0
ZK01-1200-18	497	677	0.73	0.0476	0.0017	0.1385	0.0054	0.0212	0.0006	0.0071	0.0002	132	4.8	135	3.5	143	4.2
ZK01-1200-19	1573	1844	0.85	0.0489	0.0016	0.1393	0.0048	0.0208	0.0006	0.0066	0.0002	132	4.3	132	3.5	133	3.6
ZK01-1200-20	1644	3233	0.51	0.0498	0.0014	0.1463	0.0048	0.0213	0.0005	0.0065	0.0002	139	4.3	136	3.5	132	3.5
ZK01-1200-21	1002	2313	0.43	0.0484	0.0015	0.1319	0.0046	0.0198	0.0005	0.0063	0.0002	126	4.1	126	3.2	127	3.4
ZK01-1200-22	319	580	0.55	0.0463	0.0019	0.1318	0.0058	0.0208	0.0006	0.0064	0.0002	126	5.2	133	3.5	129	3.9
ZK01-1200-23	1621	2305	0.70	0.0485	0.0014	0.1362	0.0046	0.0204	0.0005	0.0064	0.0002	130	4.1	130	3.3	128	3.5
ZK01-1200-24	491	756	0.65	0.0495	0.0017	0.1434	0.0058	0.0210	0.0005	0.0068	0.0002	136	5.2	134	3.5	136	3.8
ZK01-1200-25	374	1149	0.33	0.0510	0.0016	0.1474	0.0057	0.0210	0.0006	0.0071	0.0002	140	5.1	134	3.5	144	4.3
ZK01-1200-26	1008	1354	0.74	0.0488	0.0016	0.1362	0.0056	0.0202	0.0005	0.0067	0.0002	130	5.0	129	3.3	135	3.6
ZK01-1200-27	1630	1767	0.92	0.0500	0.0016	0.1407	0.0054	0.0204	0.0005	0.0066	0.0002	134	4.8	130	3.3	134	3.6
ZK01-1200-28	1333	2964	0.45	0.0492	0.0014	0.1338	0.0047	0.0197	0.0005	0.0063	0.0002	127	4.2	126	3.2	127	3.4
ZK01-1200-29	806	1243	0.65	0.0501	0.0017	0.1423	0.0054	0.0206	0.0005	0.0068	0.0002	135	4.8	132	3.4	137	3.8
ZK01-1200-30	3209	2368	1.35	0.0503	0.0015	0.1409	0.0050	0.0203	0.0005	0.0067	0.0002	134	4.5	130	3.3	134	3.5

4.2 锆石 U-Pb 同位素定年结果

庐枞盆地隐伏岩体中锆石为无色透明或浅黄色,结晶较好,呈典型的长柱状晶形。锆石中的 Th/U 比值可以指示锆石的成因(表 2),岩浆锆石的 Th/U 比值一般大于 0.1,而变质锆石的 Th/U 比值一般小于 0.1(Belousova et al., 2002)。庐枞盆地隐伏岩体锆石中 Th/U 比值变化范围在 0.33~1.56 之间,均大于 0.1,属于典型的岩浆成因锆石。由锆石的阴极发光图像可以看出,所有的锆石均具有清晰的内部结构和典型的岩浆震荡环带,不具有核-幔结构,无后期变质壳,表明这些锆石是岩浆结晶形成,应代表岩浆冷却结晶及岩体侵位的时代。

锆石定年结果表明(图 5),清水塘岩体(ZK01-1040,辉石二长岩) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $133.2 \pm 1.4\text{Ma}$ (1σ , MSWD=0.75, $n=26$);刘墩岩体(ZK01-1625,二长岩) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $131.3 \pm 1.3\text{Ma}$ (1σ , MSWD=0.98, $n=26$);乔冲岩体(ZK0001-1056,正长岩) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $131.0 \pm 1.4\text{Ma}$ (1σ , MSWD=0.55, $n=25$);牛头山岩体(ZK01-779,正长岩) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $131.2 \pm 1.2\text{Ma}$ (1σ , MSWD=0.43, $n=29$);李家庄岩体(ZK01-1200,正长岩) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $130.9 \pm 1.2\text{Ma}$ (1σ , MSWD=0.75, $n=30$),上述年龄均代表了这些岩体的侵位时代。

5 讨论

5.1 庐枞盆地隐伏侵入岩的形成时代

庐枞盆地构造研究表明,盆地内岩浆活动受构造体系所控制,构造变动、岩浆活动和矿化作用在时间上往往紧密伴随,在空间上往往构成一定型式的构造-岩浆岩-矿化带(王连忠, 1983),庐枞盆地北部出露地表的正长岩类、二长岩类碱性侵入岩体,集中于杨山-矾山-黄屯东西向岩浆构造带内(图 1),显示东西向构造带控制了庐枞盆地北部岩浆岩的分布,本次研究的 5 个隐伏岩体也位于此东西向构造-岩浆岩带内,因此,隐伏和出露的岩浆岩可能受同一岩浆-构造体系控制。

近年来庐枞盆地开展的深部探测专项(Sinoprobe)地球物理工作(董树文等, 2010;高锐等, 2010),认为庐枞盆地火山岩之下为正长岩岩基,正长岩存在若干个隆起,如小岭硫铁矿和龙桥铁矿对应于两个侵入岩隆起,隆起中间的凹陷区可能为盆地火山机构或基底断层的产出部位。庐枞盆地不同矿区的钻探结果均表明,许多钻孔在超过 1000m

深度均揭露出正长岩和二长岩侵入体,因此,我们可以推测盆地内地表出露的岩体在深部很可能是彼此相连或部分相连,实际可能是深部大岩体顶部的突起部分或分枝。

周涛发等(2008a)通过锆石 LA-ICP MS 定年获得庐枞盆地内 4 组火山岩龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组的形成时间分别为 $134.8 \pm 1.8\text{Ma}$ 、 $134.1 \pm 1.6\text{Ma}$ 、 $130.5 \pm 0.8\text{Ma}$ 和 $127.1 \pm 1.2\text{Ma}$ 。周涛发等(2007, 2010)、范裕等(2008)通过对庐枞盆地内出露地表侵入岩体的同位素年代并结合火山岩和侵入岩的相互侵入地质关系,将庐枞盆地内侵入岩划分成早晚两期,其中早期侵入岩主要为正长岩和二长岩类,以黄屯岩体、巴家滩岩体、焦冲岩体、龙桥岩体、谢瓦泥岩体、尖山岩体和拔茅山岩体为代表,成岩时代为 $134 \sim 130\text{Ma}$,分布在庐枞盆地北部,岩体侵位受砖桥组火山结构和东西向构造联合控制。早期岩体的成岩时代($134 \sim 130\text{Ma}$)与早期火山岩浆活动(砖桥旋回和龙门院旋回)的时间($134 \sim 130\text{Ma}$)一致或相近,说明早期侵入岩浆活动与龙王门院和砖桥旋回火山岩浆活动基本对应,二者应为同一岩浆活动不同形式的产物。本次工作测得清水塘、刘墩、乔冲、牛头山、李家庄 5 个代表性隐伏岩体成岩时代分别为 $133.2 \pm 1.4\text{Ma}$ 、 $131.3 \pm 1.3\text{Ma}$ 、 $131.0 \pm 1.4\text{Ma}$ 、 $131.2 \pm 1.2\text{Ma}$ 和 $130.9 \pm 1.2\text{Ma}$,岩性为二长岩和正长岩,穿切砖桥组火山岩,与庐枞盆地早期正长岩和二长岩类岩体的成岩时代(周涛发等, 2010)相近,其岩性也可以大致对比,空间上也处于同一构造-岩浆岩带内。综合以上证据,庐枞盆地北部隐伏岩体的成岩时代应为 $130 \sim 133\text{Ma}$,形成于早白垩世早期,是砖桥旋回晚期火山-侵入岩浆活动的产物。

5.2 隐伏岩体与成矿作用的关系

庐枞盆地内产出一系列与岩浆岩有关的铁、铜、金、铅、锌、铀矿床,单个矿床的地质特征、成因及成矿模式已有较多的研究工作(任启江等, 1991;吴明安等, 1996;黄清涛, 1984;周涛发等, 2008a, 2011),综合这些研究,庐枞盆地内的成矿作用主要发生在砖桥旋回,形成铁、铜、铅、锌成矿系列,主要包括 3 类矿床:Ⅰ热液脉型铅锌矿床,如岳山铅锌矿床;Ⅱ玢岩型铁矿床,包括 4 类玢岩型铁矿床:①龙桥式铁矿床,如龙桥铁矿床、马鞭山铁矿床;②罗河式铁矿床,如罗河铁矿床;③泥河式铁矿床,如泥河铁矿床;④盘石岭式铁矿床,如盘石岭铁矿床;Ⅲ热液脉型(及高硫型)铜成矿系列,如井边铜矿床、拔茅山铜矿

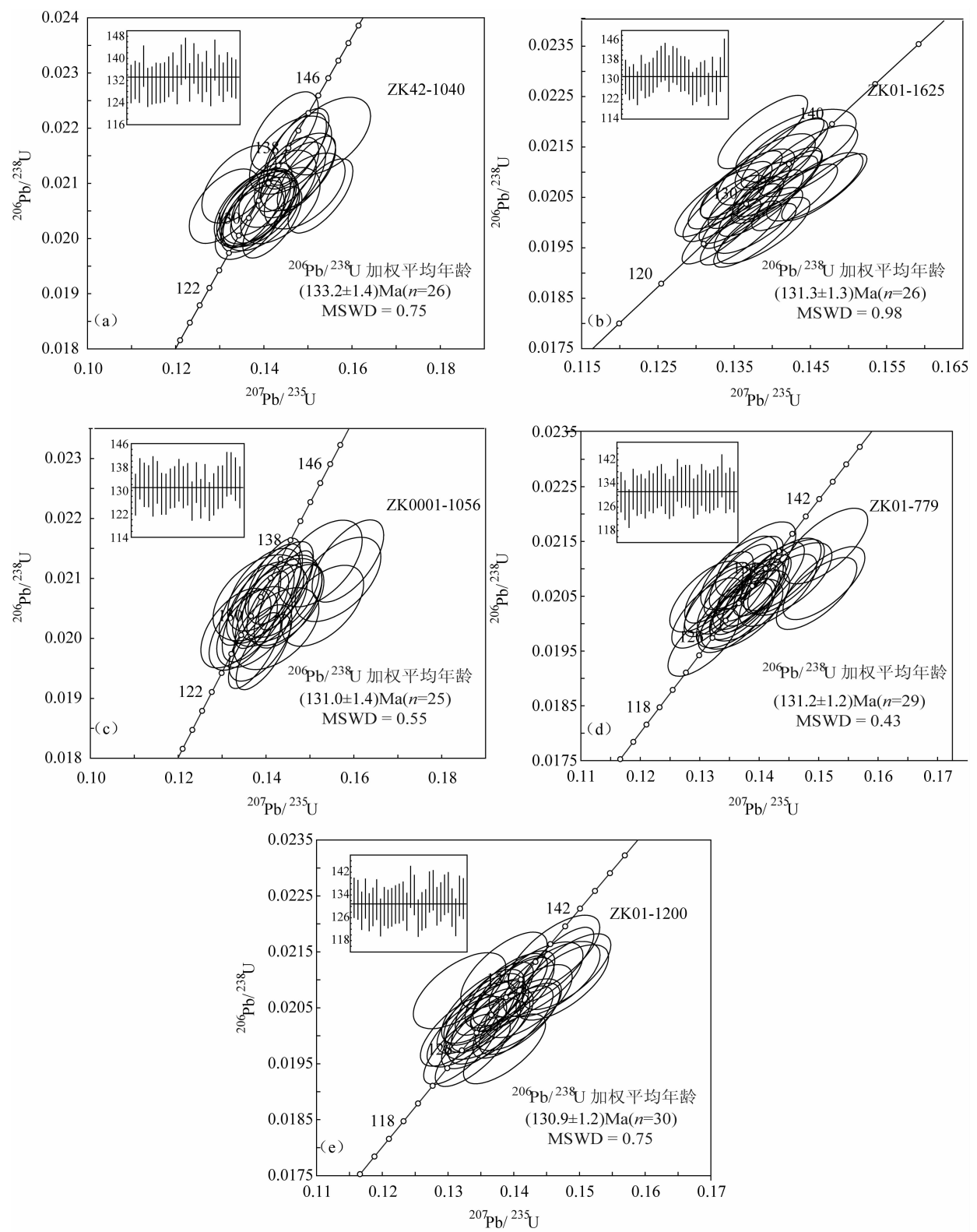


图 5 庐枞盆地隐伏岩体 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 LA-ICP MS zircon U-Pb concordia diagram of the hidden intrusions from the Lu-Zong Basin

(a) —清水塘岩体; (b) —刘墩岩体; (c) —乔冲岩体; (d) —牛头山岩体; (e) —李家庄岩体

(a) —Qingshitang intrusion; (b) —Liudun intrusion; (c) —Qiaochong intrusion; (d) —Niutoushan intrusion; (e) —Lijiazhuang intrusion

床和矾山明矾石矿床。

本次开展研究工作的 5 个隐伏岩体属于砖桥旋回晚期岩浆活动的产物,但其岩性与盆地内与玢岩型铁矿床关系密切的闪长岩差别很大,而与泥河矿区和罗河矿区内成矿期后穿切矿体的正长岩—二长岩脉相似,且本次采样的 5 个矿区均未发现玢岩型铁矿床。因此,可以推测庐枞盆地北部的正长岩—二长岩与玢岩型铁成矿作用可能无直接的成因联系,它们应为铁成矿作用后的岩浆侵入活动的产物。

5.3 区域成岩时代对比及地球动力学背景

长江中下游地区岩浆活动在时空上表现出明显的分区性和演化趋势。145~136Ma 的岩浆活动主要发生在次级隆起区(或称断隆区,如铜陵、安庆地区等),是矽卡岩—斑岩型铜金矿化的主要时期(毛景文等,2004;周涛发等,2000;王彦斌等,2004;张达等,2006;徐夕生等,2004;张乐骏等,2008;Xie G Q, 2008; Li JW, 2009ab; 蒋少涌等, 2010); 而 135~127Ma 的岩浆活动主要发生在次级凹陷区(或称断凹区,如庐枞盆地,宁芜盆地等),是铁矿化的主要时期(周涛发等,2008a,2008b),之后的 A 型花岗岩集中形成于 126~123Ma,既可以产出于断隆区,又可以产出于断凹区(范裕等,2008;周涛发等,2008),与铀、金矿化有关。因此,长江中下游地区岩浆岩的形成时代分别集中在 145~136Ma、135~127Ma、126~123Ma 等 3 个时期(周涛发等,2008a,2010)。本次工作确定的庐枞盆地中隐伏岩体的成岩时代为 130~133Ma 左右,属于长江中下游成矿带第二期岩浆作用产物。长江中下游地区橄榄安粗岩系列火山—侵入岩的形成时代稍晚(134~127Ma),地球化学特征显示它们形成于软流圈上涌和岩石圈伸展—减薄环境(王元龙等,2001;Xie G Q et al., 2008;袁峰等,2008;周涛发等,2008a)。因此,包括庐枞盆地在内的长江中下游成矿带在 134~127Ma 期间已进入快速伸展时期,导致了区内一系列 NNE 向断陷盆地的形成和强烈的岩浆活动及其岩浆热液成矿作用,庐枞盆地中的隐伏侵入岩正是这一地球动力背景下深源岩浆活动的产物。

6 结论

(1)庐枞盆地北部 5 个主要隐伏岩体清水塘岩体、刘墩岩体、乔冲岩体、牛头山岩体、李家庄岩体的成岩时代分别为 133.2 ± 1.4 Ma、 131.3 ± 1.3 Ma、 131.0 ± 1.4 Ma、 131.2 ± 1.2 Ma 和 130.9 ± 1.2 Ma,为砖桥旋回晚期的产物。

(2)清水塘岩体、刘墩岩体、乔冲岩体、牛头山岩体和李家庄岩体的岩性主要为二长岩和正长岩,岩石全碱含量均较高,准铝质或过铝质;稀土含量中等,较强 Eu 亏损,呈略右倾的海鸥型稀土配分模式,上述隐伏岩体的岩石学特征和地球化学特征与盆地内早期侵入岩类似,应为同一岩浆作用的产物。

(3)庐枞盆地北部的隐伏正长岩—二长岩与玢岩型铁成矿作用可能无直接的成因联系。

注 释

- ① 安徽省地勘局 327 地质队. 1981. 矾山镇幅、将军庙幅 1:50000 区域地质调查报告,内部资料。
- ② 安徽省地勘局 327 地质队. 1985. 义津桥幅、枞阳县幅、汤沟镇幅 1:50000 区域地质调查报告,内部资料。
- ③ 安徽省地勘局 327 地质队. 1988. 盛桥幅、槐林咀幅、石涧埠幅、庐江县幅、开城桥幅. 1:50000 区域地质报告,内部资料。
- ④ 安徽省地勘局 327 地质队. 1994. 牛埠幅、周潭幅 1:50000 区域地质报告,内部资料。

参 考 文 献

- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京:地质出版社,71~76.
- 董树文,张岳桥,龙长兴,杨振宇,季强,王涛,胡建民,陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报,81(11): 1449~1461.
- 董树文,项怀顺,高锐,吕庆田,李建设,战双庆,卢占武,马立成. 2010. 长江中下游庐江—极阳火山岩矿集区深部结构与成矿作用. 岩石学报,26(9):2529~2542.
- 范裕,周涛发,袁峰,钱存超,陆三明,David R C. 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(8):1715~1724.
- 高锐,卢占武,刘金凯,匡朝阳,鄧少英,李朋武,张季生,王海燕. 2010. 庐—枞金属矿集区深地震反射剖面解释结果—揭露地壳精细结构,追踪成矿深部过程. 岩石学报,26(9):2543~2552.
- 黄清涛. 1984. 论罗河铁矿床地质特征及矿床成因. 矿床地质,3(4): 15~36.
- 蒋少涌,孙岩,孙明志,边立曾,熊永根,杨水源,罗兰,曹钟清,吴亚民. 2010. 长江中下游成矿带九瑞矿集区叠合断裂系统和叠加成矿作用. 岩石学报,26(9):2751~2767.
- 刘洪,邱检生,罗清华,徐夕生,凌文黎,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.
- 刘珣,周涛发,袁峰,范裕,吴明安,陆三明. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的岩石地球化学特征及成因. 岩石学报,23(10):561~572.
- 吕庆田,侯增谦,杨竹森,史大年. 2004. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式:来自地球物理资料的约束. 中国科学(D 辑),34(9):783~794.
- 吕庆田,韩立国,严加永,廉玉广,史大年,颜廷杰. 2010. 庐枞矿集区火山气液型铁、硫矿床及控矿构造的反射地震成像. 岩石学报,

26(9):2598~2612.

毛景文, Holly S, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 藏文栓, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示. 地质学报, 78(1): 121~131.

任启江, 刘孝善, 徐兆文, 胡受奚, 胡文瑛. 1991. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用. 北京: 地质出版社, 1~206.

孙冶东, 杨荣勇, 任启江, 刘孝善. 1994. 安徽庐枞地区中生代火山岩系的特征及其形成的构造背景. 岩石学报, 10(1): 94~103.

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, 60~85.

王连忠. 1983. 罗河铁矿床的控矿构造和庐枞地区控矿构造体系的初步分析. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 4: 123~137.

王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004. 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, 25(2): 87~91.

王元龙, 张旗, 王焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及意义. 岩石学报, 17(4): 565~575.

吴利仁. 1984. 华东及邻区中、新生代火山岩. 北京: 科学出版社, 1~287.

吴明安, 张千明, 汪祥云. 1996. 安徽庐江龙桥铁矿. 北京: 地质出版社, 1~192.

谢智, 李全忠, 陈江峰, 高天山. 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义. 高校地质学报, 13(2): 235~249.

徐夕生, 范钦成, O'Reilly S Y, 蒋少涌, Griffin W L, 王汝成, 邱检生. 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(18): 1883~1891.

袁峰, 周涛发, 范裕, 陆三明, 钱存超, 张乐骏, 段超, 唐敏慧. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景. 岩石学报, 24(8): 1691~1702.

翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜矿床. 北京: 地质出版社, 1~120.

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): 823~830.

张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 安徽月山岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. 岩石学报, 24(8): 1725~1732.

周涛发, 袁峰, 岳书仓, 刘晓东. 2000. 长江中下游两个系列铜、金矿床及其成矿流体系统的氢、氧、硫、铅同位素研究. 中国科学(D 辑), 30(增刊): 122~128.

周涛发, 宋明义, 范裕, 袁峰, 刘珏, 吴明安. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的年代学研究及其意义. 岩石学报, 23(10): 583~591.

周涛发, 范裕, 袁峰. 2008a. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8): 1665~1678.

周涛发, 范裕, 袁峰, 陆三明, 尚世贵, David R C, Sebastien M, 赵国春. 2008b. 安徽庐枞(庐江—枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义. 中国科学(D 辑), 38(11): 1342~1353.

周涛发, 范裕, 袁峰, 宋传中, 张乐骏, 钱存超, 陆三明, David R C. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约. 岩石学报, 26(9): 2694~2714.

周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 马良, 钱兵, 谢杰. 2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用. 地质学报, 85(5): 712~730.

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. Chemical Geology, 192: 59~79.

Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y and Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contribution to Mineralogy & Petrology, 143: 602~622.

Black L P, Kamo S L and Allen C M. 2004. Improved ²⁰⁶Pb/²³⁸U microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. Chemical Geology, 205(1): 115~140.

Li J W, Zhao X F, Zhou M F. 2009a. Late mesozoic magmatism from Daye region, Eastern China: U-Pb ages, petrogenesis and geodynamic implications. Contributions to Mineralogy and Petrology, 157(3): 383~409.

Li J W, Deng X D, Zhou M F, Lin Y S, Zhao X F, Guo J L. 2009b. Laser ablation ICP-MS titanite U-Th-Pb dating of hydrothermal ore deposits: A case study of the Tonglushan Cu-Fe-Au skarn deposit, SE Hubei Province, China. Chemical geology, 270(1~4): 56~67.

Liu Y S, Gao S, Hu Z, Gao C, Zong K & Wang D. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51: 537~571.

Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G & Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP MS without applying an internal standard. Chemical Geology, 257: 34~43.

Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1~70.

McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth. Chemical Geology, 120: 223~253.

Wang Q, Derek A W, Xu J F, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L, Bao Z W, Li C F and Bai Z H. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rock in the Lu-Zong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. Lithos, 89(3~4): 424~446.

Xie G Q, Mao J W, Li R L and Bierlein F P. 2008. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Mid-dle-Lower Yangtze River belt, eastern China: Petrogenesis and tectonic setting. Lithos, 104: 216~230.

LA-ICP MS Zircon U-Pb Dating for the Hidden Intrusions in
the Lu-Zong Basin and Its Tectonic Significance

FAN Yu¹⁾, QIU Hong¹⁾, ZHOU Taofa¹⁾, YUAN Feng¹⁾, ZHANG Lejun^{1,2)}

1) *School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009;*
2) *Centre of Excellence in Ore Deposit(CODES),University of Tasmania, Private Bag 79,Hobart,Australia*

Abstract

The Luzong Mesozoic Volcanic Basin is located in the Middle-Lower Yangtze River fault-depression zone, which is located on the northern margin of the Yangtze Block. The volcanic and intrusive plutons occur widely in Luzong basin, including four groups of volcanic rocks, such as Longmenyuan Group, Zhuanqiao Group, Shuangmiao Group and Fushan Group and 34 intrusive plutons. Based on former geochronology research of outcropped plutons, LA-ICP MS zircon U-Pb dating for the hidden intrusions such as Qingshuitang, Liudun, Qiaochong, Niutoushan and Lijiazhuang intrusions in the north of the Lu-Zong basin was carried out in this paper. These intrusions consist of monzonite and quartz syenite which contain a lot of K-feldspar. LA-ICP MS zircon U-Pb dating yield the ages of 133.2 ± 1.4 Ma, 131.3 ± 1.3 Ma, 131.0 ± 1.4 Ma, 131.2 ± 1.2 Ma and 130.9 ± 1.2 Ma for five intrusions, respectively. The results indicate that all the hidden intrusions in the north of Lu-Zong basin formed in the Early Cretaceous. These intrusions are characterized by relative high silica and alkalis, ascribed to metaluminous or peraluminous, moderate REE and strong Eu depletion with a slightly right-inclined sea-gull REE patterns. These data, together with other accuracy dating data of volcanic rocks and intermediate-acid high-K calc-alkalic plutons in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area, support the hidden intrusions formed in a within-plate tensional tectonic environment. The results of the study are important for discussing the geodynamic settings of the hidden intrusions in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area.

Key words: hidden intrusions; LA-ICPMS zircon U-Pb dating; the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River; Lu-Zong basin; tectonic background