

长江中下游成矿带庐枞盆地科学深钻中侵入岩年代学及地球化学研究

张舒^{1,2)}, 周涛发¹⁾, 吴明安²⁾, 张赞赞²⁾, 薛怀民³⁾, 李小东²⁾

1) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009;

2) 安徽省地质调查院, 合肥, 230001;

3) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要: 庐枞盆地科学钻 LZSD-01 是“深部探测与实验研究”专项在庐枞盆地施工的中国大陆科学钻预导孔, 该钻孔终孔深度 3008.29 m, 成功揭露了庐枞盆地的深部地质结构。本次工作对科学钻深部的隐伏正长-二长岩开展了系统的年代学、岩石学及地球化学研究。结果表明, 钱铺隐伏正长-二长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 132.6 ± 1.2 Ma、133.28 ± 0.4 Ma, 属于盆地砖桥火山旋回末期岩浆侵入活动的产物。岩浆岩具有硅近饱和、高铝、高碱富钾、低钛, 富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素的特征, 指示隐伏岩体为橄榄玄粗质岩石。结合 Sr-Nd 同位素特征, 推测岩浆源区可能为 EMI 型富集地幔, 元素的演化趋势显示斜长石、辉石、钛铁矿为主的矿物分离结晶作用可能是岩浆演化的主要机制。岩浆形成于板内伸展拉张的构造背景之下。

关键词: 庐枞火山岩盆地; 科学钻; SinoProbe; 钱铺地区; 隐伏岩体

长江中下游成矿带是我国重要的铁铜多金属成矿带, 自晋宁期以来的构造-岩浆活动造就了隆坳相间的构造格局及类型多样的铁、铜、铅锌、金等多金属矿床(Chang Yinfo et al., 1991; Zhai Yusheng et al., 1992; Yin Jiangning et al., 2016)。区内断隆区主要发育与高钾钙碱性岩浆活动有关的斑岩-矽卡岩型 Cu-Mo-Au 矿床(Wu Ganguo et al., 2008; Zhou Taofa et al., 2008, 2015; Mao Jingwen et al., 2009), 断坳区主要发育与橄榄安粗质岩浆活动有关的玢岩-矽卡岩型 Fe-S-P 矿床(Ningwu Project Group, 1978; Zhou Taofa et al., 2008; Mao Jingwen et al., 2012; Zhang Zhaochong et al., 2014a, 2014b), 庐枞火山岩盆地是断坳区成矿的典型代表(Ren Qijiang et al., 1991; Zhou Taofa et al., 2010; Zhang Shu et al., 2014a)。

近年来, 随着深部找矿及地球物理探测工作的推进(Dong Shuwen et al., 2010; Lü Qingtian et al., 2013, 2014), 庐枞盆地深部被证实存在大规模的正长-二长质侵入岩体^①, 并发现了一系列与正长

质岩浆有关的铁氧化物-铜-铀矿床, 马口铁矿床特有的“磷灰石-阳起石-磁铁矿”矿物组合(Zhou Taofa et al., 2012; Zhang Shu et al., 2014b)、黄梅尖岩体及刘屯 ZK01 孔中的铀矿(化)(Zheng Yongfei et al., 1995; Xiong Xin et al., 2013; Zhang Shu et al., 2014a), 均显示出盆地内部正长质岩浆的成矿潜力。目前, 盆地深部隐伏侵入体的研究较为薄弱, 仅 Fan Yu et al. (2014)、Jia Liqiong et al. (2014) 对少量钻孔揭露的隐伏岩体开展了年代学及地球化学工作, 隐伏岩体在庐枞盆地基底结构中的位置还不清楚, 深部岩体的形成演化过程研究还有待加强。

2013 年, “深部探测与实验研究”专项在庐枞盆地中部钱铺地区施工了中国大陆科学钻庐枞盆地预导孔 LZSD-01, 钻孔终孔深度 3008.29 m, 揭露了盆地中部基底的地质结构, 获得了深部正长-二长质岩浆岩的完整、新鲜岩芯, 为研究盆地深部岩浆活动及盆地基底结构提供了重要的实物资料。本文在钻孔编录的基础上, 对隐伏侵入体开展了岩石学、地球化

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 41320104003)、中国地质调查局地质调查工作项目(编号 12120114038001、1212011120862、12120114039701)、深部探测与实验研究专项(编号 SinoProbe-05-05)、安徽省公益性地质调查项目(编号 2016-g-2-16) 共同资助的成果。

收稿日期: 2015-12-18; 改回日期: 2016-06-12; 责任编辑: 周健。

作者简介: 张舒, 男, 1986 年生。在读博士研究生, 矿物学岩石学矿床学专业。Email: zs-1638610@163.com。通讯作者: 周涛发, 男, 1964 年生。教授, 博士生导师, 矿物学岩石学矿床学专业。Email: tfzhou@hfut.edu.cn。

学及年代学研究,探讨了岩浆成因及演化机制,为构建区域早白垩世岩浆形成演化过程,探讨正长质岩石与成矿的关系提供约束。

1 区域地质背景

庐枞盆地位于扬子陆块北缘、长江中下游断陷带内,为一北东向延伸的不对称耳状盆地(Ren Qijiang et al., 1991)。盆地构造活动强烈,发育有北东、北西和近东西向三组深大断裂体系,控制了盆地中生代构造、岩浆及成矿作用。高精度反射地震的资料证实,北东向的罗河-缺口、黄屯-枞阳基底断裂是盆地最重要的控岩控矿断裂(Dong Shuwen et al., 2010; Lü Qingtian et al., 2014),区内已知的主要铁、铜、铅锌矿床均定位于这两条基底断裂之上。

庐枞盆地中生代火山岩地层之下的岩石地层可划分为两部分:一是震旦纪—中三叠世,为稳定陆表海环境下沉积的陆源碎屑岩及碳酸盐岩;二是晚三叠世—中侏罗世,为大别造山带前陆拗陷区沉积的陆源碎屑岩。晚三叠世—中侏罗世的地层构成了盆地的直接基底,早白垩世形成的火山岩直接覆盖于直接基底之上(Ningwu Project Group, 1978; Ren Qijiang et al., 1993; Liu Hong et al., 2002)。

按照时间顺序,庐枞盆地的火山活动可划分为四个旋回,由老到新分别为龙门院旋回、砖桥旋回、双庙旋回、浮山旋回。平面上,四个旋回的火山岩基本呈同心环状分布,均以爆发相开始,溢流相结束。四个旋回火山岩在地球化学特征上为一套向富碱方向演化的橄榄玄粗质岩石系列。区域出露地表的侵入体岩性包括闪长岩、二长岩、(石英)正长岩、花岗岩,活动起止时间约为134~124 Ma。其中闪长岩、二长岩与正长岩主要形成于砖桥旋回与双庙旋回的喷发间歇期,而石英正长岩及花岗岩形成于浮山旋回之后的区域强烈伸展背景之下(Zhou Taofa et al., 2010)。

2 LSZD-01 钻孔地质特征

科学钻 LZSD-01 位于安徽省枞阳县钱铺乡境内,构造位置上处于庐枞火山岩盆地的中部,东临黄梅尖岩体,西侧为井边铜矿床(图1)。钻孔于2012年5月21日开孔,至2013年6月9日终孔,终孔孔深3008.29 m,是目前庐枞地区,乃至整个长江中下游地区最深的钻孔。LZSD-01 钻孔可分为三个主要岩性层:0~1494.23 m,早白垩世砖桥组地层,岩

性包括(辉石)粗安岩、晶屑凝灰岩、凝灰质角砾岩、熔结凝灰岩等,穿插有后期的安山玢岩及正长斑岩岩脉;1494.23~1651.11 m,为砖桥组地层与下伏正长岩的接触段,岩性仍以粗安质熔岩及凝灰岩为主,但多处有正长岩岩脉穿插,说明正长岩的形成晚于砖桥组地层;1651.11~3008.29 m,为深部隐伏侵入体,自上而下依次为正长岩—二长岩—黑云母辉石二长岩。主要岩性特征描述如下:

早白垩世砖桥组晶屑凝灰岩:灰绿色、青色,凝灰质结构,块状构造(图2a、g、h)。火山碎屑物以晶屑为主,含量约40%,少量岩屑,含量<5%。晶屑成份以斜长石为主,部分斜长石被高岭石交代,残留斜长石长石假象,晶屑大小0.2 mm×0.4 mm~0.5 mm×1 mm,尖棱角状,分布较为均匀(图2g);岩屑成分以早期形成的晶屑凝灰岩为主,可见到其中含有尖棱角状的斜长石晶屑(图2h)。岩石具有硬石膏化和黄铁矿化蚀变,白色—浅肉红色硬石膏与黄铁矿沿裂隙分布(图2a)。

早白垩世砖桥组粗安岩:灰绿色、灰黑色,中细粒斑状结构,块状构造(图2b、i)。斑晶以斜长石、辉石为主,次为钾长石,少量黑云母等,基质为隐晶质。斜长石斑晶呈自形—半自形,粒径约0.1 mm×0.5 mm~1 mm×2 mm,含量30%~35%;辉石呈半自形短柱状,含量<5%,部分辉石被绿泥石交代。

正长岩:肉红色,中粗粒半自形结构,块状构造(图2d、j)。岩石主要由钾长石、石英、少量黑云母等组成。钾长石呈半自形板状,粒径2~3 mm,含量90%左右;石英呈他形粒状,粒径约0.25~1 mm,主要为填隙状产出,含量约5%;黑云母呈片状,1~2 mm,含量小于1%。岩石局部有较强的电气石化,发育有电气石—黄铜矿化脉体(图2k)。

黑云母辉石二长岩:灰黑色,二长结构,块状构造(图2f、l)。岩石主要由斜长石、钾长石、单斜辉石、黑云母等矿物组成。斜长石斑晶呈半自形—他形粒状,粒径0.2~3 mm,含量约为45%;钾长石呈浅灰褐色,自形程度较差,多呈他形,含量约45%,粒径1~4 mm;单斜辉石呈他形粒状,粒径约0.25 mm,含量约5%;黑云母呈片状集合体,含量3%~5%。

3 分析测试方法

3.1 锆石 U-Pb 年龄测定

年龄样品的锆石挑选工作由河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。采用标准重矿物分离技

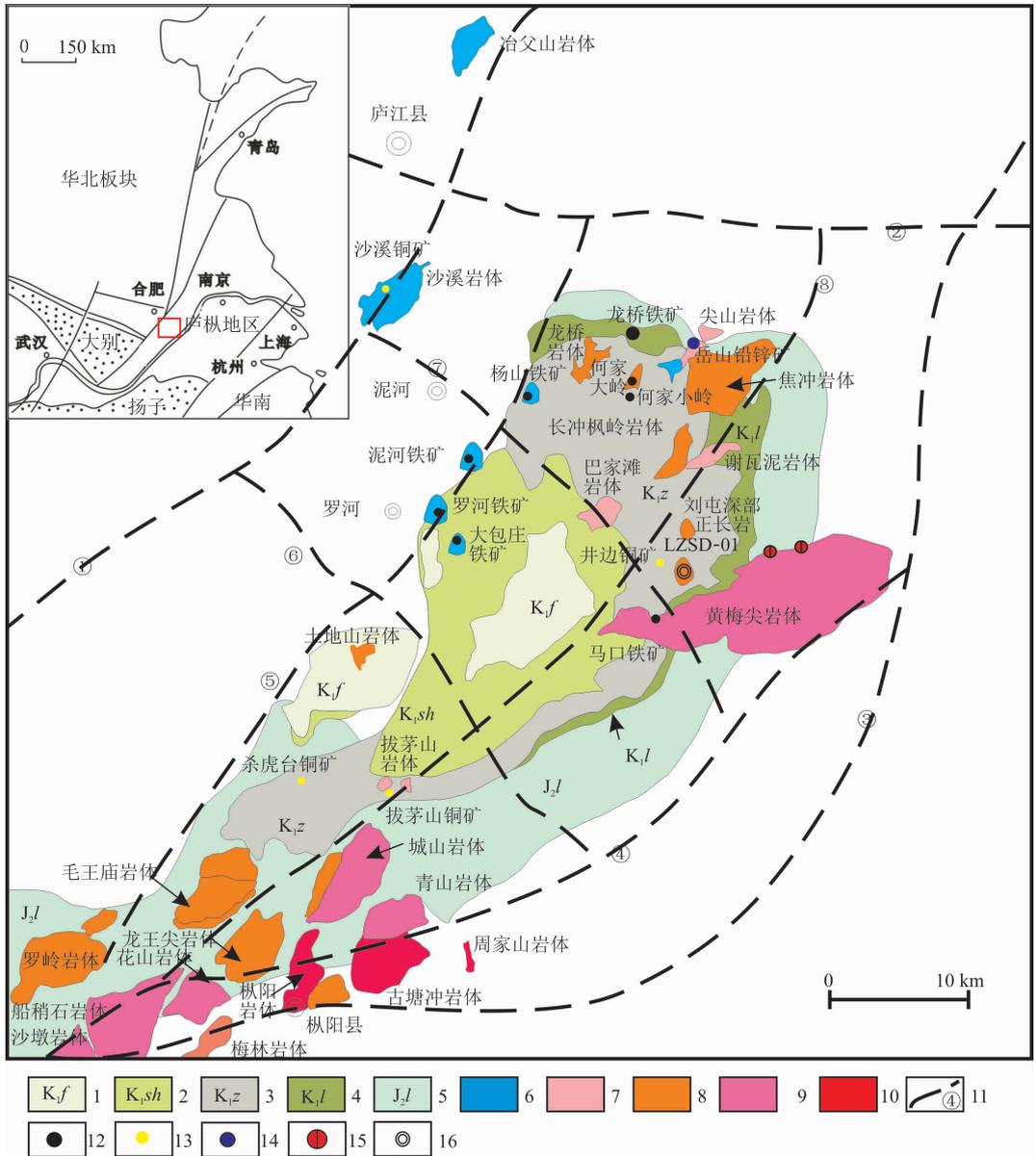


图 1 庐枞地区地质矿产略图(据 Ren Qijiang et al., 1991; Lü et al., 2013 修改)

Fig. 1 The geological map of Luzong basin (after Ren Qijiang et al., 1991; Lü et al., 2013)

1—早白垩世浮山组; 2—早白垩世双庙组; 3—早白垩世砖桥组; 4—早白垩世龙门院组; 5—中侏罗世罗岭组; 6—闪长岩类; 7—二长岩类; 8—正长岩类; 9—具 A 型花岗岩特征的正长岩类; 10—正长花岗岩; 11—基底断裂及编号; 12—铁矿床; 13—铜矿床; 14—铅锌矿床; 15—铀矿床; 16—LZSD-01 钻孔孔位; ①—滁河断裂; ②—庐江-皇姑庵-铜陵拆离断层; ③—沿江断裂带; ④—陶家湾-施家湾断裂; ⑤—罗河-缺口断裂; ⑥—义津-陶家巷断裂; ⑦—塘家园-砖桥断裂; ⑧—枞阳-黄屯断裂

1—Early Cretaceous Fushan Formation; 2— Early Cretaceous Shuangmiao Formation; 3—Early Cretaceous Zhuanqiao Formation; 4—Early Cretaceous Longmenyuan Formation; 5—Middle Jurassic Luoling Formation; 6—diorite; 7—monzonite; 8—syenite; 9—syenite of characteristics of A-type granites; 10—granite; 11—basement fault; 12—iron deposit; 13—copper deposit; 14—lead and zinc deposit; 15—uraniun deposit; 16—location of LZSD-01; ①—Chuhe fault; ②—Lujiang-Huangguzha-Tongling detach fault; ③—Changjiang fault zone; ④—Tanjiawan-Shijiawan fault; ⑤—Luohe-Quekou fault; ⑥—Yijin-Taojixiang fault; ⑦—Tangjiayuan-Zhuanqiao fault; ⑧—Zongyang-Huangtun fault

术, 经过淘洗、重选、磁选和密度分选等流程, 在双目镜下进一步挑选出晶形、透明度和色泽均较好的锆石颗粒。将分选后的锆石颗粒粘贴于环氧树脂靶之上, 打磨抛光, 然后进行锆石靶的阴极发光、透反射

拍照, 根据锆石的形态特征, 确定激光定年的位置。LZSD1-B8 二长岩样品锆石 U-Pb 测试工作在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-

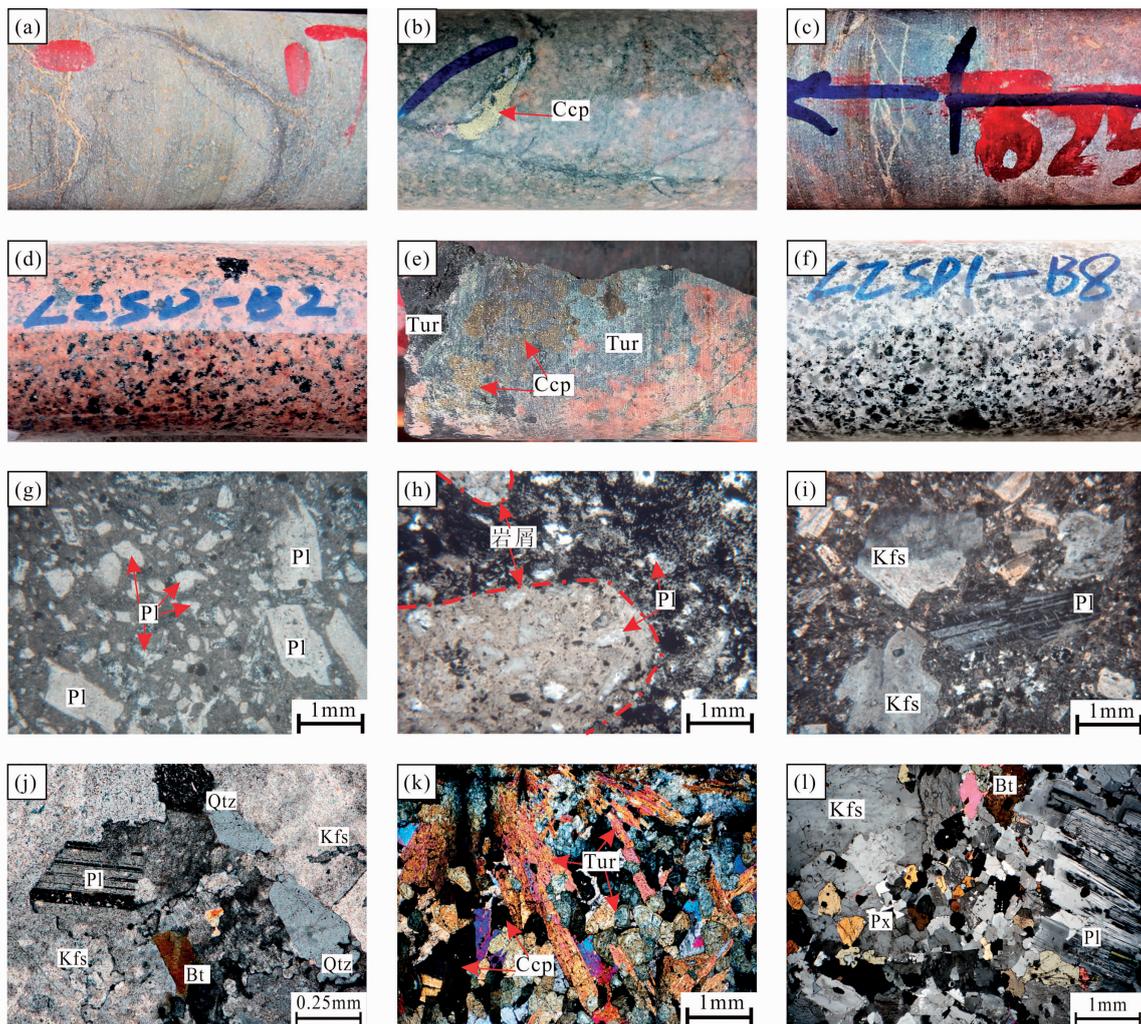


图 2 科学钻 LZSD-01 钻孔典型岩石特征

Fig. 2 The characteristics of typical rocks in Scientific Drilling LZSD-01

(a)—砖桥组晶屑凝灰岩;(b)—砖桥组粗安岩,后期穿插有黄铜矿脉;(c)—砖桥组粗安岩与下伏正长岩的接触界线,粗安岩受到热烘烤并发育硅化;(d)—正长岩;(e)—正长岩中发育的电气石—黄铁矿脉;(f)—黑云母二长岩;(g)——砖桥组晶屑凝灰岩单偏镜下特征,晶屑成分以斜长石为主,尖棱角状;(h)——砖桥组晶屑凝灰岩中含有少量岩屑,成分为早期形成的晶屑凝灰岩,可见到尖棱角状的斜长石晶屑,单偏镜下;(i)——砖桥组粗安岩正交镜下特征,斑状结构,斑晶成分以斜长石、钾长石为主,基质为微晶—隐晶质的长石;(j)——正长岩,矿物成分以斜长石、钾长石、石英、黑云母为主,正交偏光;(k)——正长岩中发育的电气石—黄铁矿脉,正交偏光;(l)——二长岩,辉石呈半自形粒状产出,正交偏光;Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Bt—黑云母;Qtz—石英;Px—辉石;Tur—电气石;Ccp—黄铜矿

(a)—Crystal tuff; (b)—trachyteandesite; (c)—the boundary between trachyteandesite and syenite; (d)—syenite; (e)—the tourmaline-chalcopyrite vein in syenite; (f)—monzonite; (g), (h)—microphotography of crystal tuff; (i)—microphotography of trachyteandesite; (j)—microphotograph of syenite; (k)—microphotography of tourmaline-chalcopyrite vein; (l)—microphotography of monzonite; Pl—plagioclase; Kfs—potash feldspar; Bt—biotite; Qtz—quartz; Px—pyroxene; Tur—tourmaline; Ccp—chalcopyrite

ICP-MS) 上完成。激光剥蚀系统是由美国 Newwave 公司生产的 UP193FX 型 193 nm ArF 准分子系统,激光器由德国 ATL 公司生产,ICP-MS 系统为 Agilent 7500a。激光器波长 193 nm,脉冲宽度 < 4 ns,剥蚀激光斑束直径为 25 μm 。激光剥蚀采样过程以氦气作为载气。采样为单点剥蚀、跳峰采集,每 6 个点插入一组锆石标样,详细分析流程参见 Su Huimin et al. (2013)。样品的同位素比值及

元素含量采用 GLITTER(Ver4.0) 程序处理,普通铅校正采用 Anderson 提出的 ComPbCorrect[#] 3.17 校正程序,U-Pb 谐和图、年龄分布频率图绘制和年龄权重平均计算采用 Isoplot/EX(ver3) 程序完成。

LZSD-B2 正长岩样品锆石 U-Pb 测年在合肥工业大学资源与环境工程学院 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 公司生产的 GeoLasPro 型

激光剥蚀系统。激光剥蚀系统激光斑束直径 32 μm ,以氦气作为载气。样品分析测试流程详见 Fan Yu et al. (2014)。数据处理采用 Liu Yongsheng et al. (2008)编写的 ICPMSDataCal 程序和 Ludwing (1999)编写的 Isoplot 程序进行作图,普通铅校正采用 Anderson(2002)提供的方法。

3.2 主微量元素测定

样品的主量、微量及稀土元素分析工作在核工业北京地质研究所分析测试研究中心完成。挑选钻孔中新鲜的岩石样品,粉碎至 200 目以下。主量元素分析在 Philips PW2404 XRF 上完成,相对误差小于 5%。稀土及微量元素分析采用 Finnigan MAT 制造的 HR-ICP-MS 仪器,元素含量大于 10×10^{-6} 时,分析误差 $< 5\%$;含量小于 10×10^{-6} 时,误差 $< 10\%$ 。

3.3 Sr-Nd 同位素测定

样品铷-锶-钐-钕同位素分析在核工业北京地质研究所分析测试研究中心完成。铷锶同位素分析采用 ISOPROBE-T 热电离子质谱计,单带, M+, 可调多法拉第接收器接收;质量分馏用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 校正,标准测量结果: NBS987 = 0.710250 ± 0.000007 ,实验室流程本底: Rb 为 2×10^{-10} g, Sr 为 2×10^{-10} g。钐钕同位素分析采用 ISOPROBE-T 热电离子质谱计,三带, M+, 可调多法拉第接收器接收;质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正,标准测量结果: JMC 为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512109 \pm 0.000003$,全流程本底 Sm 和 Nd 均小于 50 pg。

4 测试结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

本次工作分别对钻孔中的正长岩(1711 m, 图 2d)和二长岩(2165 m, 图 2f)样品开展了锆石 U-Pb 同位素定年工作(表 1)。样品选自钻孔中新鲜无蚀变的岩芯。分选的锆石为无色透明或略显淡黄色,粒度较大,多数粒径大于 100 μm 。在阴极发光照片(图 3)中可见到明显的单期生长震荡环带特征,无后期变质壳。锆石 Th/U 比值均大于 0.1。上述特征指示本次测试的锆石均为岩浆成因,其形成时代可以代表岩体的侵位年龄。分析结果显示,科学钻中正长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 132.6 ± 1.2 Ma (MSWD=0.36),二长岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 133.28 ± 0.4 Ma (MSWD=0.35)(图 4),两个岩体形成年龄较为接近,属于早白垩世岩浆活动的产物,与地质事实相符。

4.2 主量元素

钱铺地区隐伏正长岩 SiO_2 含量在 58.92%~60.74% 之间,平均 59.92%; TiO_2 含量较低,介于 0.69%~0.75% 之间,平均 0.72%; Al_2O_3 含量在 17.06%~17.16% 之间,平均 17.10%; MgO 含量在 1.40%~2.25% 之间,平均 1.69%; CaO 含量在 1.70%~2.43% 之间,平均 2.09%; Na_2O 含量在 5.01%~5.48% 之间,平均 5.17%; K_2O 含量在 5.29%~6.48% 之间,平均 5.83%(表 2)。

钱铺地区隐伏二长岩 SiO_2 含量在 57.60%~61.90% 之间,平均 59.96%; TiO_2 含量较低,介于 0.52%~0.83% 之间,平均 0.65%; Al_2O_3 含量在 17.15%~18.23% 之间,平均 17.81%; MgO 含量在 0.97%~1.89% 之间,平均 1.36%; CaO 含量在 2.57%~4.1% 之间,平均 3.16%; Na_2O 含量在 4.73%~4.97% 之间,平均 4.89%; K_2O 含量在 5.34%~6.5% 之间,平均 5.96%(表 2)。

在 TAS 分类图中(图 5),钱铺隐伏岩体投点于二长岩与正长岩之间的过渡区域,且在 Ir 线(Irvine et al., 1971)之上的碱性岩石区域。在 SiO_2 - K_2O 图解上,钱铺地区隐伏岩体全部落在钾玄岩岩石系列的区域里。钱铺隐伏正长岩的分异指数 $\text{DI} = 79.82 \sim 82.02$ (平均为 81.22),钱铺隐伏二长岩的分异指数 $\text{DI} = 73.09 \sim 82.69$ (平均为 78.49),说明两者均具有较高的分异程度。

在主量元素 Harker 图解上(图 6),钱铺地区隐伏岩体中的 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO_2 、MgO、CaO、 P_2O_5 随着 SiO_2 含量的增加而减少,表现出负相关性,说明岩浆演化的过程中,可能存在斜长石、磷灰石、辉石、橄榄石、钛铁矿等矿物的分离结晶作用; K_2O 的含量随着 SiO_2 含量的增加而增加; Na_2O 的含量随着 SiO_2 的含量变化保持不变。总体上,钱铺地区隐伏正长岩与二长岩主量元素具有一定的线性相关性,说明两者可能为同源岩浆演化不同阶段的产物。

4.3 稀土元素

钱铺地区隐伏正长岩稀土元素总量为 $381.59 \times 10^{-6} \sim 415.34 \times 10^{-6}$,平均为 397.33×10^{-6} ; LREE/HREE = 11.44~12.41,平均 11.89; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 10.37 \sim 12.45$,平均为 11.48; $\delta\text{Eu} = 0.42 \sim 0.48$,平均为 0.45。隐伏二长岩稀土元素总量为 $272.72 \times 10^{-6} \sim 386.28 \times 10^{-6}$,平均 326.25×10^{-6} ; LREE/HREE = 11.47~13.74,平均 12.88; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 11.65 \sim 16.77$,平均为 14.51; $\delta\text{Eu} = 0.58 \sim 0.70$,平均为 0.64(表 2)。

表 1 钱铺地区科学钻 LZSD-01 隐伏岩体锆石 U-Pb 年代学分析结果

Table 1 Zircon U-Pb dating results of concealed intrusions of Scientific Drilling LZSD-01, Qianpu area

分析点	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Th	U		Ratio	1σ	Ratio	1σ	Ratio	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ
LZSD1-B2-01	549	1148	0.5	0.0481	0.0018	0.1367	0.0063	0.0206	0.0006	102	89	130	6	132	3.6
LZSD1-B2-02	1126	1530	0.7	0.0477	0.0017	0.1403	0.0063	0.0212	0.0006	83.4	81.5	133	6	136	3.5
LZSD1-B2-03	529	1187	0.4	0.0488	0.0018	0.1369	0.0062	0.0203	0.0005	200	82	130	6	130	3.4
LZSD1-B2-04	621	944	0.7	0.0476	0.0018	0.1400	0.0068	0.0213	0.0006	79.7	88.9	133	6	136	3.8
LZSD1-B2-05	956	1710	0.6	0.0486	0.0016	0.1399	0.0066	0.0208	0.0006	128	78	133	6	132	3.5
LZSD1-B2-06	793	1376	0.6	0.0483	0.0017	0.1405	0.0066	0.0211	0.0006	122	79	134	6	134	3.6
LZSD1-B2-07	1071	1653	0.6	0.0470	0.0017	0.1364	0.0065	0.0210	0.0006	50.1	81.5	130	6	134	3.6
LZSD1-B2-08	1056	1661	0.6	0.0479	0.0018	0.1378	0.0068	0.0207	0.0006	98.2	108.3	131	6	132	3.6
LZSD1-B2-09	654	850	0.8	0.0503	0.0021	0.1460	0.0080	0.0208	0.0006	209	96	138	7	133	3.6
LZSD1-B2-10	420	903	0.5	0.0509	0.0021	0.1484	0.0087	0.0210	0.0006	235	66	141	8	134	3.7
LZSD1-B2-11	1256	1909	0.7	0.0492	0.0016	0.1424	0.0069	0.0209	0.0006	167	78	135	6	133	3.5
LZSD1-B2-12	576	1208	0.5	0.0502	0.0019	0.1420	0.0073	0.0205	0.0006	206	89	135	6	131	3.6
LZSD1-B2-13	792	1398	0.6	0.0478	0.0019	0.1354	0.0068	0.0205	0.0006	100.1	88.9	129	6	131	3.6
LZSD1-B2-14	2193	2549	0.9	0.0503	0.0016	0.1440	0.0066	0.0207	0.0006	209	74	137	6	132	3.5
LZSD1-B2-15	2149	2602	0.8	0.0493	0.0015	0.1439	0.0067	0.0211	0.0006	161	64	136	6	134	3.7
LZSD1-B2-16	868	1042	0.8	0.0469	0.0019	0.1353	0.0069	0.0209	0.0006	55.7	83.3	129	6	133	3.6
LZSD1-B2-17	1191	2202	0.5	0.0465	0.0015	0.1388	0.0061	0.0216	0.0006	20	74	132	5	138	3.8
LZSD1-B2-18	993	1745	0.6	0.0491	0.0017	0.1408	0.0062	0.0208	0.0006	154	80	134	6	133	3.6
LZSD1-B2-19	438	923	0.5	0.0501	0.0022	0.1428	0.0077	0.0207	0.0006	198	99	136	7	132	3.8
LZSD1-B2-20	837	1048	0.8	0.0500	0.0019	0.1430	0.0072	0.0207	0.0006	195	87	136	6	132	3.8
LZSD1-B2-21	828	1396	0.6	0.0510	0.0019	0.1436	0.0068	0.0204	0.0006	239	87	136	6	130	3.6
LZSD1-B2-22	956	1837	0.5	0.0491	0.0016	0.1425	0.0064	0.0209	0.0006	150	78	135	6	133	3.7
LZSD1-B2-23	415	925	0.4	0.0490	0.0019	0.1426	0.0069	0.0210	0.0006	150	89	135	6	134	3.7
LZSD1-B2-24	1127	2051	0.5	0.0496	0.0016	0.1497	0.0068	0.0217	0.0006	172	79	142	6	138	3.6
LZSD1-B2-26	496	1066	0.5	0.0494	0.0019	0.1394	0.0069	0.0204	0.0005	165	91	133	6	130	3.4
LZSD1-B2-27	1145	1459	0.8	0.0511	0.0018	0.1458	0.0065	0.0207	0.0005	256	80	138	6	132	3.5
LZSD1-B2-28	1867	2315	0.8	0.0514	0.0017	0.1462	0.0062	0.0206	0.0005	261	78	139	6	131	3.4
LZSD1-B2-29	1012	1585	0.6	0.0487	0.0017	0.1370	0.0061	0.0203	0.0005	200.1	80.5	130	5	130	3.3
LZSD1-B2-30	891	1489	0.6	0.0476	0.0018	0.1347	0.0064	0.0206	0.0005	79.7	88.9	128	6	131	3.4
LZSD1-B2-31	1493	1280	1.2	0.0525	0.0019	0.1467	0.0066	0.0203	0.0005	309	77	139	6	130	3.4
LZSD1-B2-33	1314	1618	0.8	0.0472	0.0017	0.1380	0.0061	0.0210	0.0005	61.2	85.2	131	5	134	3.4
LZSD1-B2-34	583	874	0.7	0.0518	0.0024	0.1446	0.0077	0.0204	0.0006	276	112	137	7	130	3.8
LZSD1-B2-35	785	998	0.8	0.0491	0.0022	0.1405	0.0070	0.0207	0.0006	150	104	133	6	132	3.7
LZSD1-B8-091	497	637	0.8	0.049	0.00161	0.1406	0.00439	0.02081	0.0002	148	55	134	4	133	1
LZSD1-B8-092	616	893	0.7	0.04863	0.00128	0.14053	0.00346	0.02096	0.00017	130	43	134	3	134	1
LZSD1-B8-093	2084	2691	0.8	0.0482	0.00078	0.13883	0.00195	0.0209	0.00014	109	21	132	2	133.3	0.9
LZSD1-B8-094	3175	2063	1.5	0.04935	0.00068	0.14184	0.00162	0.02085	0.00014	164	15	135	1	133	0.9
LZSD1-B8-097	835	930	0.9	0.04881	0.00153	0.14151	0.0042	0.02103	0.00019	139	53	134	4	134	1
LZSD1-B8-099	615	966	0.6	0.0489	0.00174	0.13889	0.00473	0.02061	0.0002	143	62	132	4	132	1
LZSD1-B8-101	647	893	0.7	0.04872	0.0009	0.14023	0.00231	0.02088	0.00015	134	25	133	2	133.2	0.9
LZSD1-B8-102	548	780	0.7	0.04929	0.001	0.14086	0.0026	0.02074	0.00015	162	30	134	2	132.3	0.9
LZSD1-B8-105	744	1646	0.5	0.04768	0.00117	0.13685	0.00312	0.02082	0.00017	83	38	130	3	133	1
LZSD1-B8-106	324	449	0.7	0.04934	0.00133	0.14189	0.0036	0.02087	0.00017	164	44	135	3	133	1
LZSD1-B8-107	1200	2964	0.4	0.04765	0.00062	0.13684	0.00142	0.02084	0.00013	82	13	130	1	133	0.8
LZSD1-B8-109	787	1025	0.8	0.04933	0.00187	0.14424	0.00524	0.02121	0.00022	164	65	137	5	135	1
LZSD1-B8-110	514	781	0.7	0.04847	0.00104	0.13877	0.00274	0.02077	0.00015	122	33	132	2	132.5	0.9
LZSD1-B8-111	280	556	0.5	0.04885	0.00174	0.14089	0.0048	0.02093	0.0002	141	62	134	4	134	1
LZSD1-B8-112	362	1457	0.2	0.04896	0.0008	0.14237	0.002	0.0211	0.00014	146	21	135	2	134.6	0.9
LZSD1-B8-113	831	867	1.0	0.04744	0.00105	0.1381	0.00282	0.02112	0.00016	71	34	131	3	135	1
LZSD1-B8-114	706	1434	0.5	0.04922	0.00108	0.14038	0.00283	0.02069	0.00016	158	33	133	3	132	1
LZSD1-B8-115	267	682	0.4	0.04868	0.0021	0.14161	0.00589	0.0211	0.00023	132	76	134	5	135	1
LZSD1-B8-116	839	1971	0.4	0.04899	0.00112	0.14181	0.00298	0.021	0.00016	147	35	135	3	134	1
LZSD1-B8-117	769	994	0.8	0.04884	0.00087	0.13915	0.00219	0.02067	0.00014	140	24	132	2	131.9	0.9
LZSD1-B8-119	283	817	0.3	0.04955	0.00131	0.14144	0.0035	0.02071	0.00017	174	42	134	3	132	1
LZSD1-B8-120	289	496	0.6	0.04899	0.0012	0.14096	0.00321	0.02087	0.00016	147	39	134	3	133	1

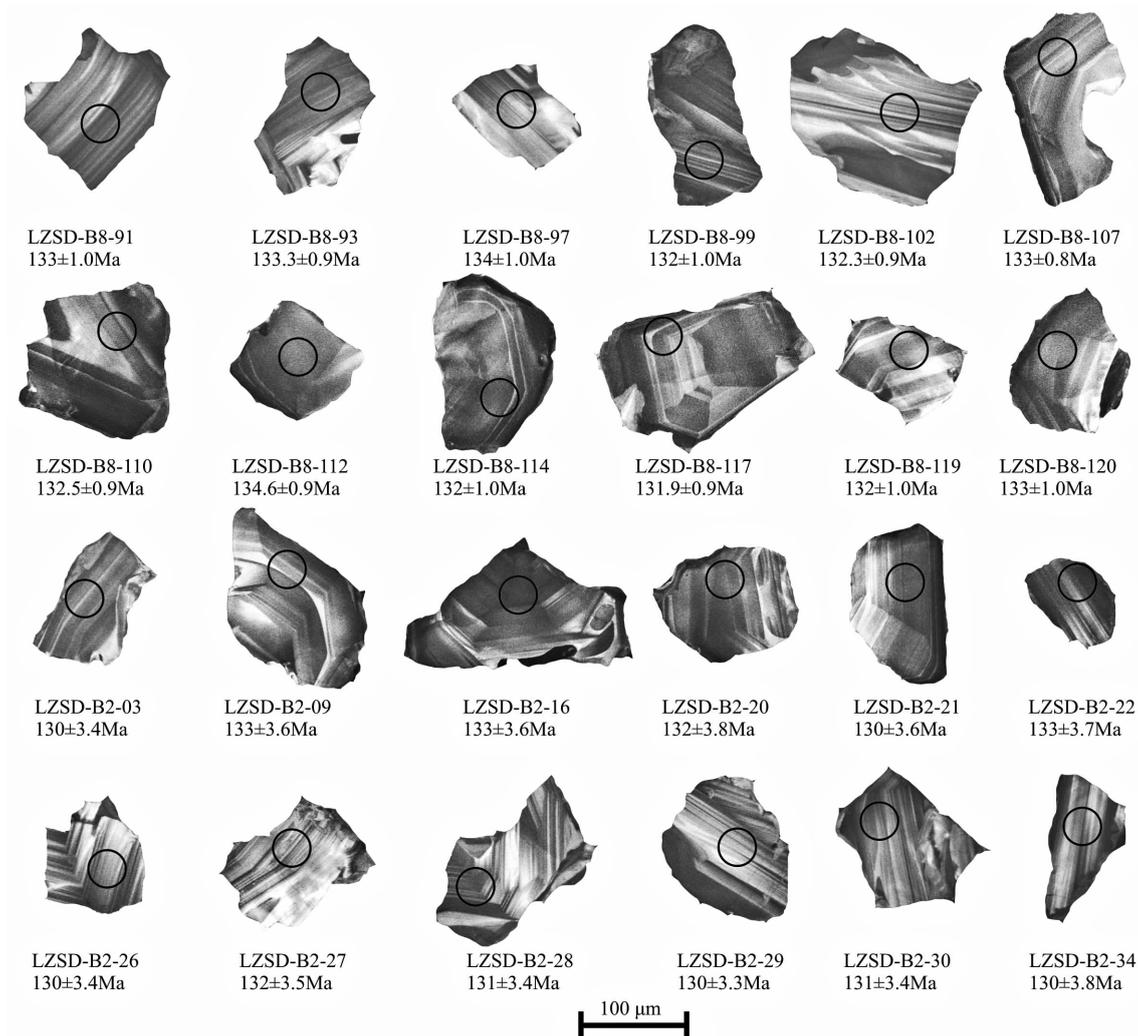


图 3 科学钻 LZSD-01 深部侵入岩锆石阴极发光照片及测试点位

Fig. 3 Cathodoluminescence images and dating positions of the zircons of intrusions in Scientific Drilling LZSD-01

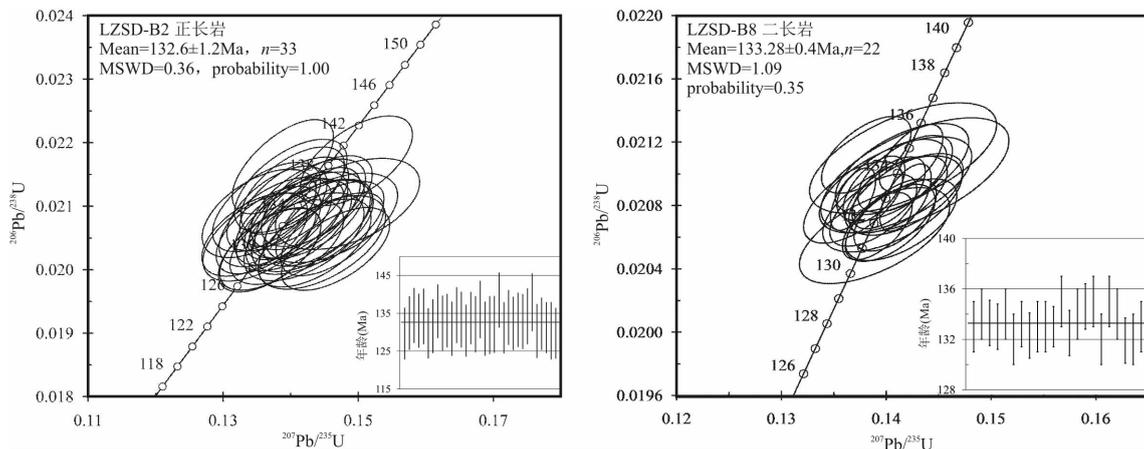


图 4 科学钻 LZSD-01 深部侵入岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram of the intrusions in Scientific Drilling LZSD-01

钱铺地区隐伏岩体总体具有较高的稀土元素含量, LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 比值较高, 表明轻重

稀土分异明显, 重稀土元素相对亏损, 轻稀土元素相对富集, 标准化曲线也表现出右倾的趋势(图 7a);

表 2 庐枞盆地钱铺地区隐伏岩体主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 2 The major elements (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) analytical results of concealed intrusions in Qianpu area, Luzong basin

样品号	LZSD1-B1	LZSD1-B2	LZSD1-B3	LZSD1-B4	LZSD1-B7	LZSD1-B8	LZSD1-B9	LZSD1-B14	LZSD1-B15	LZSD1-B16	LZSD1-B17
岩性	正长岩			二长岩							
SiO ₂	60.09	58.92	60.74	58.40	57.60	59.05	59.52	61.62	61.90	61.64	59.92
TiO ₂	0.69	0.75	0.74	0.83	0.72	0.73	0.78	0.54	0.54	0.56	0.52
Al ₂ O ₃	17.06	17.16	17.08	17.56	18.09	18.23	17.15	18.07	18.04	17.84	17.49
Fe ₂ O ₃	3.38	2.79	3.43	3.00	3.57	2.98	2.98	1.31	1.67	1.43	0.95
FeO	1.56	2.26	1.84	2.65	2.01	2.06	2.39	2.19	1.75	2.16	2.41
MnO	0.05	0.08	0.08	0.14	0.10	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12	0.10
MgO	1.40	2.25	1.41	1.89	1.83	1.51	1.67	1.00	0.97	1.05	0.99
CaO	2.14	1.70	2.43	4.02	4.10	3.61	3.04	2.68	2.57	2.63	2.59
Na ₂ O	5.48	5.02	5.01	4.91	4.82	4.97	4.93	4.92	4.93	4.94	4.73
K ₂ O	5.29	5.73	6.48	5.12	5.34	5.58	5.38	6.32	6.33	6.50	6.29
P ₂ O ₅	0.27	0.31	0.27	0.40	0.38	0.34	0.34	0.20	0.19	0.20	0.19
LOI	2.19	2.74	0.28	0.78	1.21	0.57	1.42	0.71	0.81	0.69	3.52
total	99.60	99.71	99.78	99.69	99.76	99.75	99.71	99.67	99.80	99.75	99.71
DI	81.83	79.82	82.02	73.09	73.47	75.76	77.18	81.7	82.69	82.39	81.6
SI	8.23	12.48	7.79	10.78	10.47	8.86	9.64	6.34	6.18	6.53	6.43
Li	24.3	22.4	18.4	53.7	19.3	46.4	40	47.4	43.6	46.9	40.6
Be	17.3	13.9	15.4	9.53	6.52	7.9	11.1	6.24	5.38	5.94	5.97
Sc	6.51	7.83	7.83	8.84	9.46	8	8.39	5.91	5.68	6.8	6.1
V	52	70.8	68.5	109	107	84.8	92.9	55.8	51.1	60.6	52.7
Cr	8.6	7.37	6.41	7.71	5.24	7.01	2.66	2.41	1.88	1.74	1.53
Co	10.5	8	12.6	12.9	12.6	9.59	12.8	5.24	4.75	5.66	6.69
Ni	4.25	4.06	4.69	7.56	5.61	5.11	5.72	2.15	1.38	1.59	1.43
Cu	16.1	71.9	303	107	83.5	40.2	78.8	14.8	6.95	9.25	79.1
Zn	39.6	82.4	63.1	89.1	80.3	63.9	69.4	59.1	57.4	65.6	60.2
Ga	24.5	26.1	27.1	24.7	24.5	24.6	27.3	22	19.9	21	22.6
Rb	349	367	485	311	277	290	366	284	276	297	277
Sr	253	197	329	671	842	663	532	584	562	581	580
Y	38.7	38.6	40.2	33	31.6	37.2	40.1	27.5	24.7	27.1	28.7
Nb	98.6	90.9	83.1	54	34.7	47.4	65.8	35	38.8	39.9	38.7
Mo	9.66	10.5	5.26	11	5.76	4.43	25.1	7.35	5.96	7.85	10.1
Cd	0.34	0.394	0.427	0.224	0.241	0.218	0.313	0.134	0.094	0.187	0.251
In	0.075	0.071	0.128	0.06	0.06	0.068	0.046	0.055	0.047	0.046	0.046
Sb	0.744	0.915	0.769	0.878	0.622	0.585	0.822	0.938	0.795	0.775	0.656
Cs	11.1	7.85	15.7	19.6	14	17.6	24.6	20.6	17.2	17.6	16.2
Ba	447	340	390	581	820	704	506	708	634	700	648
La	81.4	87.3	94.4	81.1	71.5	91.8	78.6	78.1	65	71.2	73.6
Ce	170	172	183	153	137	168	158	138	120	130	130
Pr	19.5	19.8	20.7	17.3	15.8	18.8	18.5	15	13.3	14	14.5
Nd	67.9	71.9	73.1	62.9	58.5	66.7	68.7	55.4	46.8	49.4	52.2
Sm	10.7	11.6	11.5	9.95	9.6	10.9	11.1	8.54	7.54	7.76	8.28
Eu	1.41	1.62	1.67	1.92	2.04	1.91	1.95	1.62	1.54	1.63	1.56
Gd	9.28	9.36	9.45	8.25	7.63	8.82	8.83	7.09	5.95	6.53	6.9
Tb	1.35	1.45	1.41	1.28	1.21	1.33	1.41	0.98	0.852	0.905	0.963
Dy	6.85	7.1	7.05	6.27	5.93	6.54	7.11	5.31	4.54	4.87	5.01
Ho	1.28	1.36	1.35	1.11	1.05	1.23	1.32	0.993	0.875	0.949	0.954
Er	4.54	4.5	4.55	3.72	3.5	4.13	4.31	2.86	2.54	2.8	2.8
Tm	0.826	0.788	0.794	0.626	0.59	0.706	0.746	0.49	0.431	0.49	0.512
Yb	5.63	5.39	5.44	4.19	3.74	4.64	4.84	3.34	2.91	3.33	3.4
Lu	0.926	0.886	0.921	0.658	0.591	0.772	0.8	0.527	0.444	0.517	0.542
Ta	7.55	6.29	5.99	3.69	2.3	3.13	4.57	2.63	2.85	3.03	2.87
W	10.2	21.5	4.27	5.53	6.36	3.31	2.18	3.91	3.1	3.2	2.55
Re	<0.002	0.003	0.005	0.003	0.003	0.002	0.005	0.007	0.005	0.005	0.009

续表 2

样品号	LZSD1-B1	LZSD1-B2	LZSD1-B3	LZSD1-B4	LZSD1-B7	LZSD1-B8	LZSD1-B9	LZSD1-B14	LZSD1-B15	LZSD1-B16	LZSD1-B17
岩性	正长岩			二长岩							
Tl	0.978	1.05	1.11	0.961	0.906	0.751	0.966	0.838	0.783	0.808	0.815
Pb	12.1	21.5	23.4	29.2	30.5	19.5	17	28.1	25.2	29.3	29.6
Bi	0.433	0.34	0.32	0.168	0.248	0.146	0.636	0.365	0.124	0.142	0.115
Th	196	168	118	102	59.6	98.8	148	56.3	56.1	56.8	59.8
U	68.7	56	46	32.8	19.3	27.4	54.3	27.3	31.9	71.2	80.7
Zr	1054	1229	1219	425	447	729	1391	409	350	421	436
Hf	2.98	32.8	30.9	12.4	11.4	18.7	34.5	10.6	9.62	11	11.8
ΣREE	381.59	395.05	415.34	352.27	318.68	386.28	366.22	318.25	272.72	294.38	301.22
LREE/HREE	11.44	11.81	12.41	12.50	12.15	12.71	11.47	13.74	13.71	13.44	13.29
La _N /Yb _N	10.37	11.62	12.45	13.88	13.71	14.19	11.65	16.77	16.02	15.34	15.53
δEu	0.42	0.46	0.48	0.63	0.70	0.58	0.58	0.62	0.68	0.68	0.61

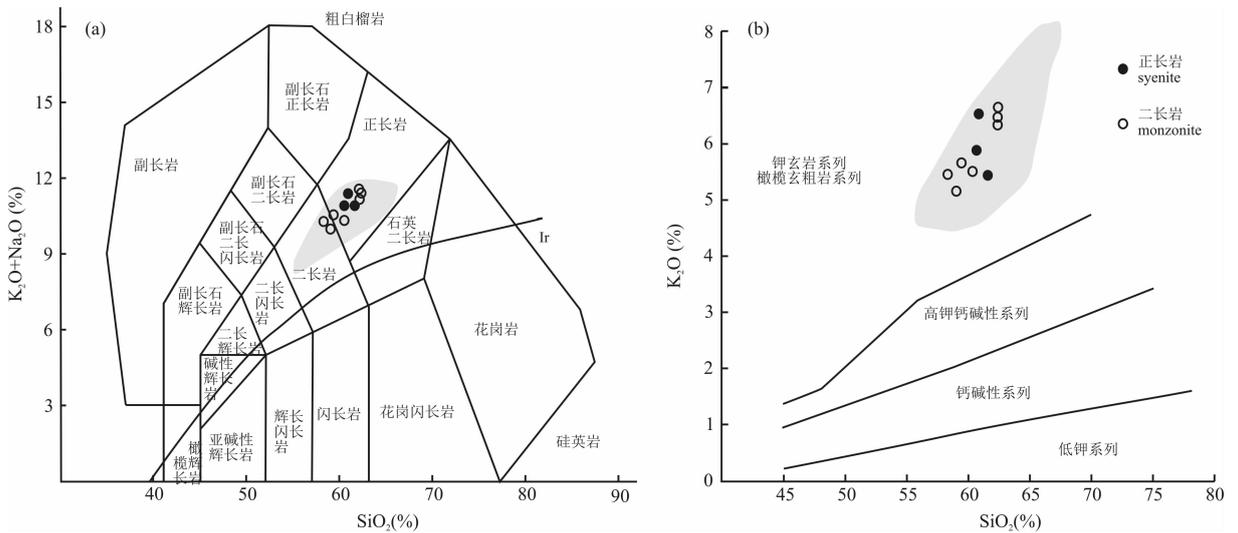


图 5 科学钻 LZSD-01 深部侵入岩分类图解

Fig. 5 The classification diagrams of the intrusions in Scientific Drilling LSZD-01

(a)—TAS 分类图(底图据 Wilson, 1989);(b)—K₂O-SiO₂ 图解(底图据 Middlemost, 1985);阴影区域为庐枞盆地正长-二长岩样品分布范围,数据据 Fan Yu et al., 2014;Jia Liqiong et al., 2014;安徽省地质调查院,2015[●];Duan Chao, 2009

(a)—TAS diagram of the intrusions in LZSD-01 (after Wilson, 1989);(b)—The K₂O-SiO₂ diagram of intrusions in LZSD-01 (after Middlemost, 1985); The shadow regions are the distributions of the syenite and monzonite in Luzong basin. The statistics are after Fan Yu et al., 2014;Jia Liqiong et al., 2014;the unpublished papers of Geological Survey of Anhui Province[●];Duan Chao, 2009

正长岩与二长岩均具有较为明显的 δEu 负异常,说明岩浆源区可能有斜长石的残留,或者岩浆在演化过程中存在斜长石的分离结晶作用,正长岩 δEu 的负异常要稍大于二长岩,这与二长岩中斜长石含量较高有一定关系;δEu 随着 SiO₂ 的增加而减少,说明在岩浆演化过程中出现了斜长石的分离结晶作用(图 6)。总体上,钱铺地区隐伏正长岩与二长岩之间具有较为一致的稀土元素配分曲线形态,显示出两类岩石的同源性与岩浆作用过程的一致性,轻稀土富集、重稀土亏损、中等 δEu 负异常的右倾平滑配分曲线,说明岩石的源区不可能为原始地幔或亏损地幔。

4.4 微量元素

钱铺地区隐伏正长岩与二长岩的不相容元素表现出较为一致的富集和亏损的特征。在原始地幔微量元素标准化图上(图 7b),岩石富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素,富集 Th、U、Zr、Hf 等高场强元素,亏损 Ba、Sr 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,P 元素具有明显的负异常(表 2)。

钱铺隐伏岩体中 Co、Sc、Ni、Cr 等过渡族元素普遍含量较低,这与岩石中橄榄石、辉石及角闪石含量较少有关,且随着 SiO₂ 的增加,Cr 并没有减少或增加的趋势,说明在岩浆演化过程中,橄榄石等暗色矿物的分离结晶作用并不明显。大离子亲石元素

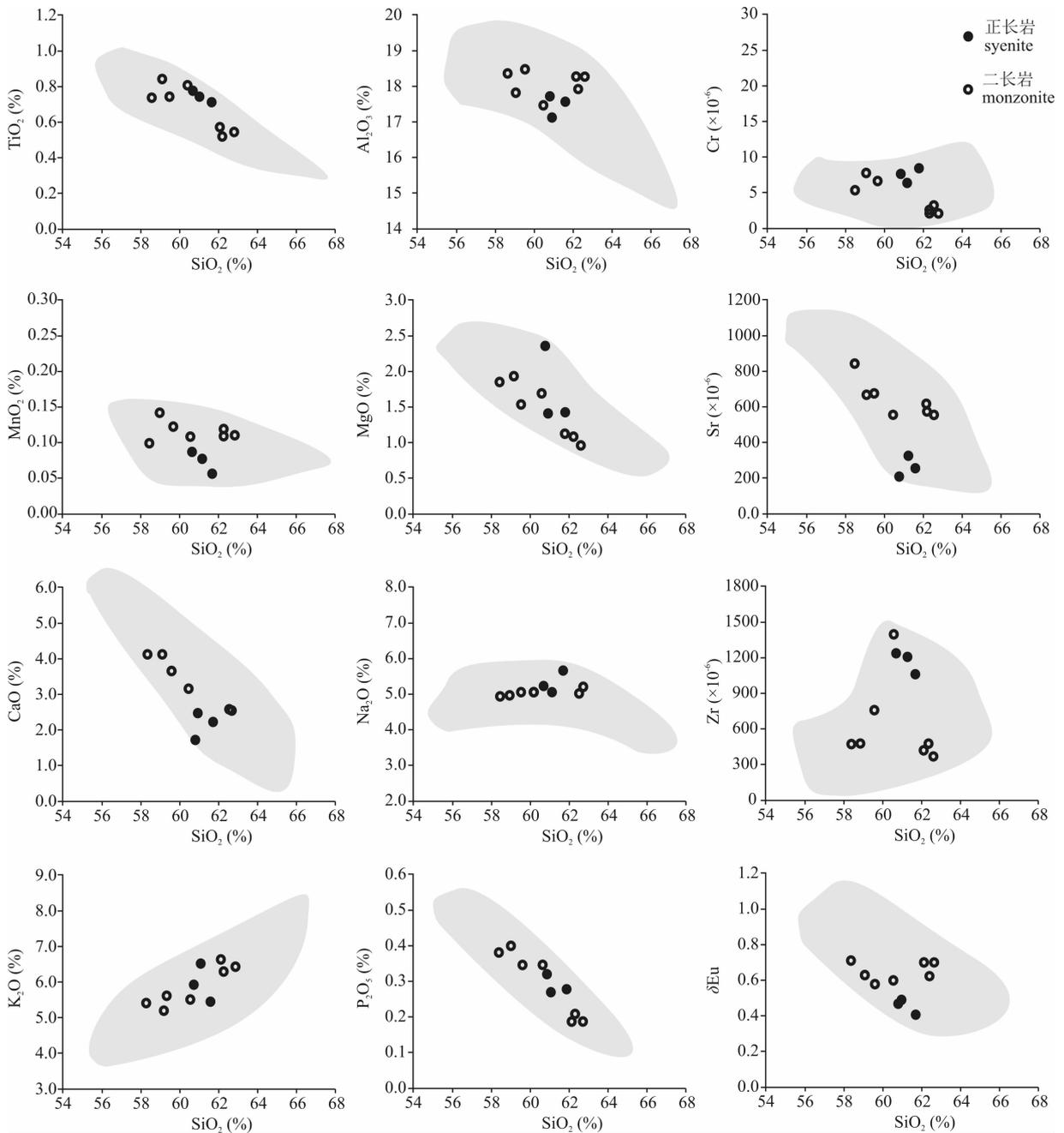


图6 科学钻 LZSD-01 深部侵入岩 Harker 图解

Fig. 6 Harker diagram of intrusions in Scientific Drilling LZSD-01

阴影区域为庐枞盆地正长-二长岩样品分布范围,数据据 Fan Yu et al., 2014; Jia Liqiong et al., 2014; 安徽省地质调查院, 2015; Duan Chao, 2009

The shadow regions are the distributions of the syenite and monzonite in Luzong basin. The statistics are after Fan Yu et al., 2014; Jia Liqiong et al., 2014; the unpublished papers of Geological Survey of Anhui Province; Duan Chao, 2009

Sr 随着岩浆的演化表现出递减的趋势, 高场强元素 Zr 随着 SiO_2 增加并未发生明显的富集, 暗示壳源物质较少地参与到岩浆演化的过程中(图 6)。

4.5 Sr-Nd 同位素

钱铺地区隐伏正长岩 Sr 初始值 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.70466 ~ 0.70540, 平均 0.70491; Nd 初始值

($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i = 0.51205 ~ 0.51208, 平均 0.51206; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.22 \sim -7.60$, 平均 -7.88。二长岩 Sr 初始值 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.70544 ~ 0.70578, 平均 0.70557; Nd 初始值 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i = 0.51193 ~ 0.51207, 平均 0.51203; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -10.46 \sim -7.69$, 平均 -8.46(表 3)。总体上, 正长岩与二长岩的 Sr-

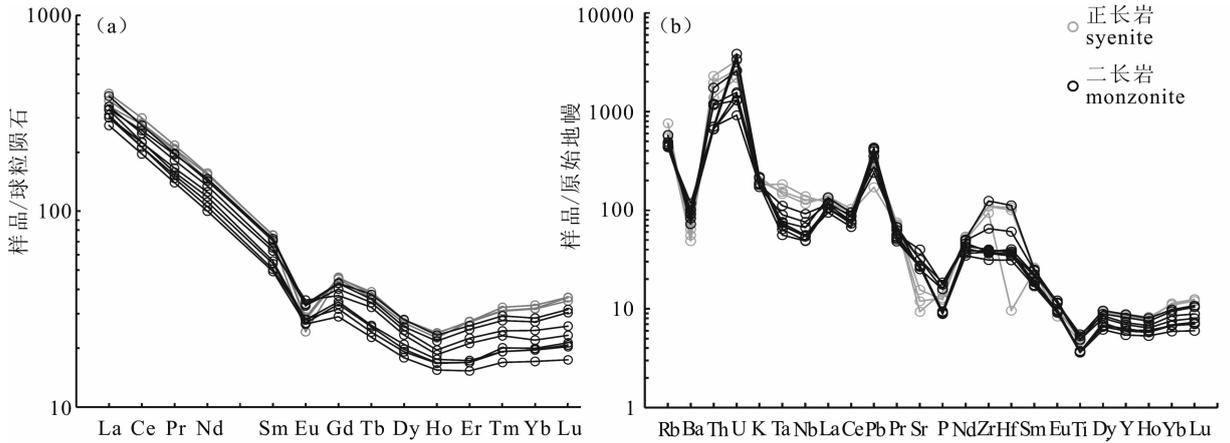


图 7 科学钻 LZSD-01 深部侵入岩稀土元素(a)及微量元素(b)标准化图解(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
 Fig. 7 Normalized patterns of REE (a) and trace elements (b) of intrusions in Scientific Drilling LZSD-01
 (the normalized data after Sun and McDonough, 1989)

表 3 庐枞盆地钱铺地区隐伏岩体 Rb-Sr-Sm-Nd 同位素组成

Table 3 Rb-Sr-Sm-Nd isotopic compositions of concealed intrusions in Qianpu area, Luzong basin

样品号	LZSD1-B1	LZSD1-B2	LZSD1-B3	LZSD1-B4	LZSD1-B7	LZSD1-B8	LZSD1-B9	LZSD1-B14	LZSD1-B15	LZSD1-B16	LZSD1-B17
岩性	正长岩	正长岩	正长岩	二长岩	二长岩	二长岩	二长岩	二长岩	二长岩	二长岩	二长岩
Rb($\times 10^{-6}$)	401	406	507	328	265	293	364	294	314	293	315
Sr($\times 10^{-6}$)	308	270	382	842	957	829	570	626	583	577	607
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	3.7688	4.3597	3.8365	1.1294	0.8003	1.0232	1.8462	1.3602	1.5596	1.4719	1.5037
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.712499	0.71288	0.71192	0.707593	0.706955	0.707404	0.709012	0.708354	0.708504	0.708517	0.708464
Sm($\times 10^{-6}$)	9.94	10.1	9.7	8.46	7.82	9.11	9.29	7.54	7.38	7.5	7.1
Nd($\times 10^{-6}$)	62.8	62	62.1	52.4	47.9	57.6	56.6	47.6	46.6	47.2	44.2
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.0957	0.0984	0.0944	0.0977	0.0987	0.0957	0.0992	0.0959	0.0958	0.0961	0.0971
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512129	0.512163	0.512149	0.512105	0.512143	0.512131	0.5121	0.512144	0.512014	0.512148	0.512157
$\epsilon_{\text{Sr}}(0)$	113.54	118.95	105.32	43.90	34.85	41.22	64.05	54.71	56.83	57.02	56.27
$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	14.93	4.53	4.90	15.76	15.55	15.93	16.63	20.36	17.13	19.67	18.06
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.705396	0.704663	0.704689	0.705454	0.705439	0.705466	0.705515	0.705777	0.705550	0.705729	0.705615
$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	-9.93	-9.27	-9.54	-10.40	-9.66	-9.89	-10.49	-9.64	-12.17	-9.56	-9.38
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-8.22	-7.60	-7.81	-8.72	-7.99	-8.17	-8.84	-7.92	-10.46	-7.85	-7.69
$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	1.5	1.3	1.3
$T_{2\text{DM}}(\text{Ga})$	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.8	1.6	1.5
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512046	0.512078	0.512067	0.512020	0.512057	0.512048	0.512013	0.512060	0.511930	0.512064	0.512072

Nd 同位素组成较为接近, 指示两者的岩浆源区和岩浆作用过程具有相似性。

庐枞盆地内部火山岩及地表出露的侵入岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值主要介于 $-3.1 \sim -10.8$ 之间, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = $0.70511 \sim 0.70726$ (Liu Hong et al., 2002; Xie Zhi et al., 2007; Yuan Feng et al., 2008; Xue Huaimin et al., 2010a; Zhang Lejun et al., 2011; Chen Long et al., 2014), 钱铺地区隐伏岩体具有与其较为一致的 Sr-Nd 同位素组成, 暗示了隐伏岩体可能与盆地内部的火山-侵入体之间存在成因联系。包括钱铺隐伏岩体在内的庐枞盆地火山-潜火山岩 Sr-Nd 同位素组成, 主要位于扬子板块岩石圈地幔范围附近, 且与 EMI 型富集地幔有一定的交

集, 说明岩石源区可能为富集型扬子板块岩石圈地幔(图 8)。

5 讨论

5.1 庐枞盆地隐伏侵入岩成岩时代

近年来随着庐枞盆地深部找矿工作的推进, 发现盆地火山岩盖层之下分布有大量的正长-二长质深成侵入体。Jia Liqiong et al. (2014) 对盆地中部刘屯地区隐伏正长岩及二长岩进行了锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年工作, 获得正长岩及黑云母二长岩成岩年龄为 $131.0 \pm 0.6 \text{ Ma}$ 、 $130.1 \pm 0.4 \text{ Ma}$; Fan Yu et al. (2014) 分别测得清水塘、刘屯、乔冲、牛头山、李家庄五个地区隐伏二长-正长质侵入体锆

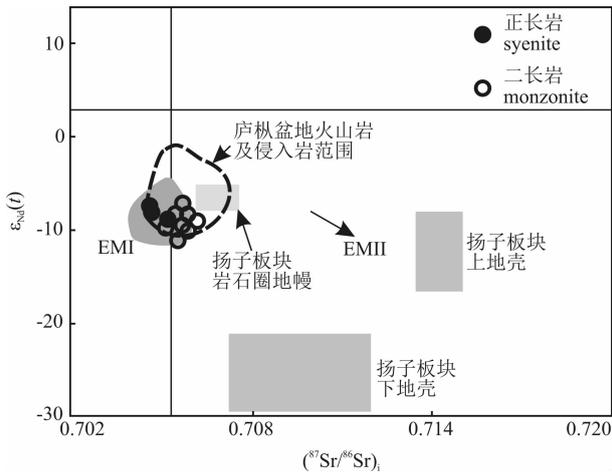


图 8 科学钻 LZSD-01 深部侵入岩 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解 (底图及庐枞盆地岩浆岩数据据 Liu Hong et al., 2002; Xie Zhi et al., 2007; Yuan Feng et al., 2008; Xue Huaimin et al., 2010a; Zhang Lejun et al., 2011; Chen Long et al., 2014)

Fig. 8 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ diagram of intrusions in Scientific Drilling LZSD-01(after Liu Hong et al., 2002; Xie Zhi et al., 2007; Yuan Feng et al., 2008; Xue Huaimin et al., 2010a; Zhang Lejun et al., 2011; Chen Long et al., 2014)

石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 133.2 ± 1.4 Ma、 131.3 ± 1.3 Ma、 131 ± 1.4 Ma、 131.2 ± 1.2 Ma、 130.9 ± 1.2 Ma; Zhou Taofa et al. (2011) 测得盆地北缘龙桥地区隐伏正长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 131.1 ± 1.5 Ma。

钱铺地区隐伏正长岩与二长岩 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄加权平均值分别为 132.6 ± 1.2 Ma 和 133.3 ± 0.4 Ma。

庐枞盆地中生代岩浆活动主要集中在早白垩世, 岩浆分布范围广、活动强度大、持续时间短, 大量的同位素年龄数据证实区域岩浆活动时限集中在 $124 \sim 136$ Ma (图 9)。盆地内四个旋回火山岩活动时间集中在 $127 \sim 135$ Ma 之间 (图 9a; Zhou Taofa et al., 2008; Xue Huaimin et al., 2012; Jia Liqiong et al., 2014; Chen Long et al., 2014); 盆地地表出露的侵入岩浆活动时限集中在 $123 \sim 135$ Ma 之间 (闪长质岩浆为 $132 \sim 134$ Ma, 二长质岩浆为 $131 \sim 133$ Ma, 正长质岩浆为 $127 \sim 132$ Ma, A 型花岗岩为 $123 \sim 127$ Ma) (图 9c; Wang Qiang et al., 2005; Zhou Taofa et al., 2007, 2010, 2012; Fan Yu et al., 2008; Xue Huaimin et al., 2010b; Wu Fuyuan et al., 2012; Chen Zhihong et al., 2013)。盆地中隐伏的正长-二长质侵入岩的成岩年龄集中

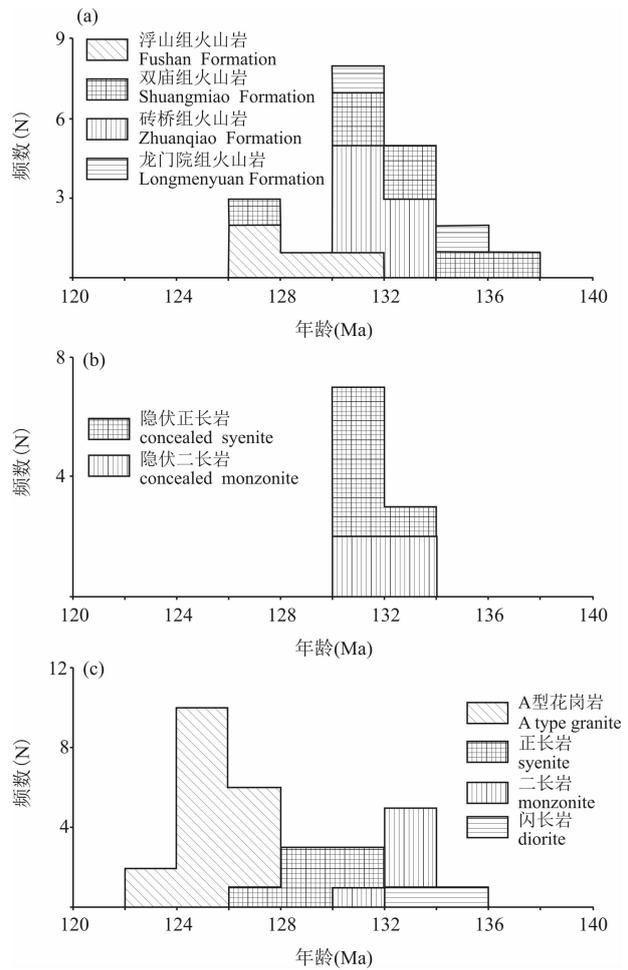


图 9 庐枞地区岩浆活动年龄分布直方图 (数据据 Wang Qiang et al., 2005; Zhou Taofa et al., 2007, 2010, 2011, 2012; Fan Yu et al., 2008, 2014; Xue Huaimin et al., 2010b, 2012, 2016; Wu Fuyuan et al., 2012; Chen Zhihong et al., 2013; Jia Liqiong et al., 2014; Chen Long et al., 2014)

Fig. 9 Age histogram of magmatic rocks in Luzong basin (statistics after Wang Qiang et al., 2005; Zhou Taofa et al., 2007, 2010, 2011, 2012; Fan Yu et al., 2008, 2014; Xue Huaimin et al., 2010b, 2012, 2016; Wu Fuyuan et al., 2012; Chen Zhihong et al., 2013; Jia Liqiong et al., 2014; Chen Long et al., 2014)
(a) 庐枞盆地火山岩年龄; (b) 庐枞盆地隐伏正长-二长岩年龄;
(c) 庐枞盆地地表侵入岩年龄
(a) — Ages of volcanic rocks in Luzong basin; (b) — ages of concealed syenite and monzonite in Luzong basin;
(c) — ages of intrusions outcropped in Luzong basin

在 $130 \sim 133$ Ma, 其中正长岩年龄约为 $130 \sim 132$ Ma, 二长岩年龄约为 $131 \sim 133$ Ma, 两者形成时间较为接近, 且与盆地地表出露的正长-二长岩时代相对应, 暗示隐伏侵入体与地表出露岩体之间可能源于同一岩浆作用, 可归属于砖桥旋回晚期火山-侵入

活动的产物 (Fan Yu et al., 2014; Jia Liqiong et al., 2014)。

5.2 庐枞盆地隐伏侵入岩空间分布

前人利用地球物理探测手段,对庐枞盆地隐伏侵入岩的空间分布进行了大量的研究工作:Ren Qijiang et al. (1993)利用庐枞地区重力及地磁资料,进行了正反演研究,推断火山岩之下存在一个大的隐伏岩体,顶板距地表约为 1~4 km,岩体的形态和分布范围与火山岩盆地大体相当;Dong Shuwen et al. (2010)、Gao Rui et al. (2010)、Lü Qingtian et al. (2014)、Xiao Xiao et al. (2014)通过高精度反射地震、大地电磁测深等手段,对盆地地壳结构进行了研究,认为火山岩盖层之下存在侵入岩。近年来,安徽省地勘单位在本区施工了大量的超过 1000 m 钻孔,在盆地北部多处发现了火山岩盖层之下分布有正长-二长质侵入体,

证实了地球物理工作者对盆地基底的推测(表 4)。钻孔位置及地质结构见图 10、11。

庐枞盆地出露地表的岩体以正长-二长岩为主,集中分布在盆地的北部区域,包括矾山镇及其周围出露的石马滩正长岩,黄屯一大安山地区出露的黄屯闪长玢岩、岳山二长岩、尖山二长岩及焦冲正长岩,寨基山地区出露的长冲枫岭正长岩、谢瓦泥二长岩,盆地中部巴家滩地区的二长岩及黄梅尖地区出露的正长岩。

矾山镇西侧的清水塘地区,钻孔 qsZK42 在 -960 m 之下揭露了隐伏二长岩体;矾山镇西南侧矾山地区,钻孔 fZK01 在 -768 m 之下揭露了隐伏的正长-二长岩岩体;矾山镇东南侧张家和小岭地区,钻孔 zjZK03 和 xlZK56 分别在 -560 m 和 -527.8 m 揭露了隐伏的正长-二长岩岩体;矾山镇和

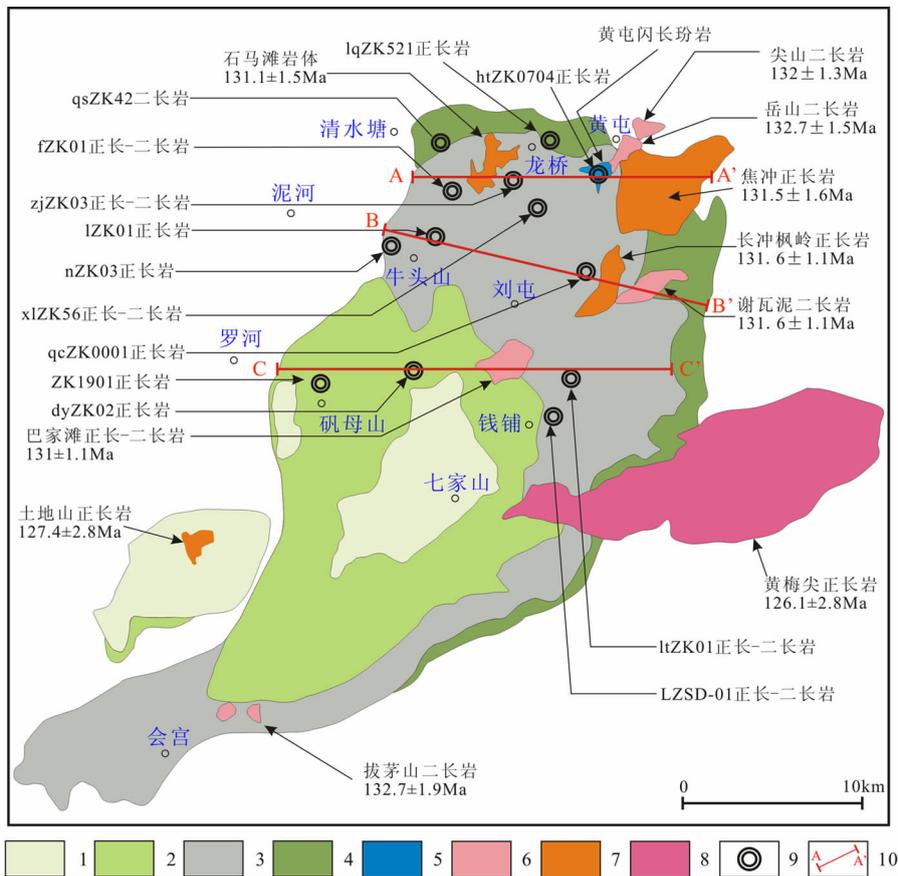


图 10 庐枞盆地岩体分布及揭露到隐伏岩体钻孔位置图(钻孔数据引用见表 4)

Fig. 10 Distribution of intrusions and drillings which expose the concealed intrusions in Luzong basin (the statistics of drilling after Table 4)

- 1—浮山组; 2—双庙组; 3—砖桥组; 4—龙门院组; 5—闪长岩; 6—二长岩; 7—正长岩; 8—A 型花岗岩; 9—钻孔孔位; 10—剖面位置及编号
- 1—Early Cretaceous Fushan Formation; 2—Early Cretaceous Shuangmiao Formation; 3—Early Cretaceous Zhuangqiao Formation;
- 4—Early Cretaceous Longmenyuan Formation; 5—diortite; 6—monzonite; 7—syenite; 8—A-type granites;
- 9—location of drillings; 10—the location of geological sections

表4 庐枞盆地钻孔地质概况简表

Table 4 Geological features of drillings in Luzong basin

序号	孔号	位置	孔深(m)	地质概况	隐伏岩体采样位置及年龄	资料来源
1	LZSD-01	钱铺地区	3008.29	0~1494.23 m 为砖桥组火山岩; 1494.23~1651.11 m 为砖桥组地层与下伏正长岩的接触段, 两者为侵入接触关系; 1651.11~3009.29 m 为深部侵入体, 自上而下依次为正长岩—二长岩—黑云母辉石二长岩, 为渐变过渡关系	正长岩, 1711 m, 132.6±1.2 Ma; 二长岩, 2165 m, 133.3±0.4 Ma	本文
2	ltZK01	刘屯地区	2012.35	0~1469.81 m 主要为砖桥组火山岩, 穿插少量后期脉岩; 1488.84~1603.35 m 为砖桥组火山岩地层与下伏岩体的侵入接触带; 1603.35~2012.35 m 为岩体, 自上而下依次为石英正长岩—石英二长岩—黑云母石英二长岩, 相互之间为渐变过渡关系	正长岩, 1708.44 m, 131.0±0.6 Ma; 二长岩, 1998.95m, 131.0±0.4 Ma	Jia Liqiong et al., 2014
3	qsZK42	清水塘地区	1043.42	0~963.35 m 为龙门院组火山岩; 963.35~1043.42 m 为辉石二长岩, 本层与上覆火山岩为侵入接触的关系	二长岩, 1040 m, 133.2±1.4 Ma	
4	qcZK0001	乔冲地区	1265.2	0~806.13 m 为砖桥组火山岩; 806.13~1265.2 m 为二长岩, 与上覆火山岩为侵入接触的关系	二长岩, 1065 m, 131±1.4 Ma	
5	nZK03	牛头山地区	1311.2	0~1254.39 m 为砖桥组火山岩; 1254.39~1311.2 m 为正长岩, 与上覆火山岩为侵入接触关系	牛头山相邻钻孔 ZK01 测得隐伏正长岩 131.2±1.2 Ma	
6	lZK01	李家庄地区	1253	0~1176.71 m 为砖桥组火山岩; 1176.71~1253 m 为正长岩, 与上覆火山岩为侵入接触关系	正长岩, 1200 m, 130.9±1.2 Ma	
7	dyZK02	东边院地区	1400.61	0~211.78 m 为双庙组火山岩; 211.78~994.44 m 为砖桥组火山岩; 994.44~1400.61 m 为正长岩, 与上覆火山岩为侵入接触关系	—	安徽省地质调查院, 2015 ^① ; Fan Yu et al., 2014
8	fZK01	矾山地区	1109.72	0~768.27 m 为砖桥组火山岩; 768.27~1109.72 m 为深成侵入体, 岩性以正长岩、二长岩为主, 两者为渐变过渡关系, 与上覆火山岩呈侵入接触关系	正长岩、二长岩年龄 132~133 Ma ^①	
9	xlZK56	小岭地区	700.18	0~527.8 m 为砖桥组火山岩; 527.8~616.49 m 为二长岩, 616.49~700.18 m 为正长岩, 两者呈渐变过渡关系, 与上覆火山岩呈侵入接触的关系	正长岩、二长岩年龄 131~132 Ma ^①	
10	htZK0704	黄屯地区	672.01	0~619.98 m 为龙门院组火山岩; 619.98~672.01 m 为正长岩, 与上覆火山岩呈侵入接触的关系	隐伏正长岩 130.8±1.7 Ma ^①	
11	zjZK03	张家地区	>1000	0~560 m 为龙门院组火山岩; 560 m~孔底为深成侵入体, 岩性以正长岩、二长岩为主, 两者为渐变过渡关系, 与上覆火山岩呈侵入接触关系	正长岩、二长岩年龄 133~134 Ma ^①	
12	ZK1901	矾母山地区	1321.06	0~1200 m 为砖桥组火山岩; 1200~1321.06 m 为正长岩, 与上覆火山岩为侵入接触关系	—	
13	lqZK521	龙桥地区	752.43	0~441 m 为龙门院组火山岩; 441~574 m 为中三叠统周冲村组地层, 与上覆火山岩呈角度不整合关系; 574~752.43 m 为正长岩, 与上覆地层为侵入接触关系	龙桥含矿正长岩, 131.1±1.5 Ma	Zhou Taofa et al., 2010

黄屯之间的龙桥和朱岗地区, 钻孔 lqZK521 和 htZK0704 分别在 -574 m 和 -619 m 揭露了隐伏的正长岩体。清水塘—矾山—龙桥—焦冲东西向区

域内, 地表出露及隐伏岩体形成时代较为接近, 岩性一致, 推测可能为一东西向分布的构造岩浆带, 局部有岩体出露地表, 深部可能彼此相连, 属于同一个大

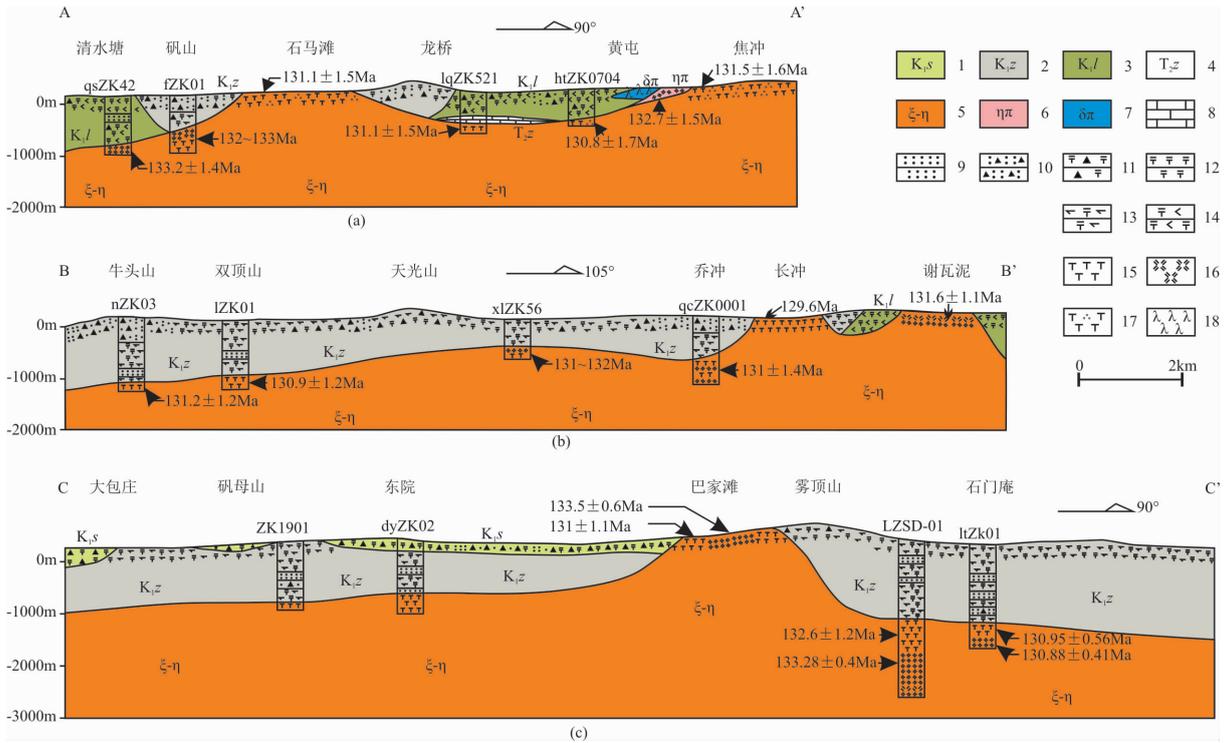


图 11 庐枞盆地地质剖面图(剖面位置见图 10; 钻孔数据据表 4)

Fig. 11 The geological sections of Luzong basin (the locations of the sections in Fig. 10; the statistics of the drillings after Table 4)
 1—早白垩世双庙组; 2—早白垩世砖桥组; 3—早白垩世龙门院组; 4—中三叠世周冲村组; 5—正长-二长岩; 6—二长斑岩; 7—闪长玢岩; 8—碳酸盐岩; 9—凝灰岩; 10—角砾凝灰岩; 11—角砾熔岩; 12—粗安岩; 13—辉石粗安岩; 14—角闪粗安岩; 15—正长岩; 16—二长岩; 17—石英正长岩; 18—闪长玢岩

1— Early Cretaceous Shuangmiao Formation; 2—Early Cretaceous Zhuanqiao Formation; 3—Early Cretaceous Longmenyuan Formation; 4—Middle Triassic Zhouchongchun Formation; 5—syenite-monzonite; 6—ivernite; 7—diorite porphyrite; 8—carbonate rocks; 9—tuff; 10—breccia tuff; 11—breccia lava; 12—trachyteandesite; 13—pyroxene trachyteandesite; 14—hornblende trachyteandesite; 15—syenite; 16—monzonite; 17—quartz syenite; 18—diorite porphyrite

型岩基(图 11a)。焦冲向南与寨基山之间的区域, 也有钻孔资料显示火山岩下部存在深成侵入体^①, 推断寨基山地区的正长-二长岩体在深部可能与北侧的焦冲岩体相连。牛头山地区的钻孔 nZK03 和 lZK01 分别在 -1254 m 和 -1176 m 分别揭露了隐伏的正长岩, 结合牛头山地区圆形的高磁异常形态^②, 推测区域可能存在一个大型的隐伏岩体; 牛头山向东的小岭地区钻孔 xlZK56 于 -527 m 之下揭露了隐伏的正长-二长岩体; 长冲枫岭正长岩体西侧的乔冲地区钻孔 qcZK0001 于 -806 m 之下分布有隐伏的二长岩体。牛头山—双顶山—天光山—乔冲—长冲枫岭东西向区域内, 地表出露及隐伏岩体亦具有一致的岩性及相同的成岩年龄, 推测其深部存在一个正长-二长质岩基(图 11b)。庐枞盆地中部巴家滩岩体东西两侧的东院—矾母山和钱铺—虎栈地区, 均有钻孔在 -1000~ -1400 m 揭露了深部

的正长-二长岩体, 说明矾母山—东院—巴家滩—钱铺地区可能也存在一个北东向延伸的构造岩浆带, 该岩浆带在深部不与东侧的黄梅尖岩体相连接。

综合钻孔及地球物理资料(Dong Shuwen et al., 2010, Gao Rui et al., 2010, Lü Qingtian et al., 2014, Xiao Xiao et al., 2014), 庐枞盆地北部(罗河—东院—钱铺—一线以北区域)火山岩之下可能为大范围分布的正长-二长岩侵入体, 火山岩直接与隐伏侵入体接触, 而并非之前所认为的中三叠统一中侏罗统地层。隐伏侵入体多分布于 -1000 m 以浅的区域, 在深大断裂附近(如罗河-缺口断裂东侧的牛头山地区)及盆地中部地区(如钱铺地区)侵入体分布较深(> -1000 m), 而在盆地边部(如龙桥地区)隐伏岩体则分布较浅(< 600 m)。盆地内隐伏岩体与地表分布的正长-二长岩形成时代相近, 可能为同一期岩浆活动的产物, 它们在深部相连, 一部

分隆起至地表形成岩体,一部分形成隐伏隆起,控制了隐伏矿床的分布。

5.3 钱铺科学钻深部侵入岩成因

5.3.1 岩石系列

前人针对庐枞盆地早白垩世岩浆活动开展了大量的岩石学研究,认为其属于一套橄榄玄粗质火山-侵入岩石组合(Yu Xueyuan and Bai Zhenghua, 1981; Wu Liren et al., 1982; Yang Rongyong et al., 1993; Sun Yedong et al., 1994; Wang Dezi et al., 1996; Liu Jun et al., 2007; Xue Huaimin et al., 2010a, 2015; Zhou Taofa et al., 2010; Jia Liqiong et al., 2014)。橄榄玄粗岩(Shoshonite)最早是由 Iddings(1895)提出,用于描述美国黄石公园含正长石的玄武岩。随后,橄榄玄粗岩的定义被扩大,并应用到不同构造环境中的玄武质至粗面质岩石组合(Joplin, 1968; Morrison, 1980; Gill and Whelan, 1989; Turner et al., 1996; Gill et al., 2004)。Morrison (1980)系统总结了橄榄玄粗岩的地球化学特征,明确其具有高铝、高氧化、硅近饱和、富集大离子亲石元素、低钛、贫铁的特征;Gill et al. (2004)也指出,不同构造环境的橄榄玄粗岩应具有富集大离子亲石元素、中等到很高的 Ce/Yb 比值、显著的 Nb、Ta、Ti 负异常和 Pb 正异常的特征。

钱铺地区深部侵入体为正长岩-二长岩的岩石组合,地球化学特征上表现为硅近饱和、高铝(Al_2O_3 含量为 14.84%~18.72%)、高碱富钾($Na_2O+K_2O=9.12\% \sim 11.55\%$; $K_2O/Na_2O=0.78 \sim 2.46$)、低钛($TiO_2=0.32\% \sim 0.87\%$)、富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,上述特征均与橄榄玄粗岩系的标准一致。在 K_2O-SiO_2 图解中,岩石均投点于橄榄玄粗岩(钾玄岩)的区域,说明钱铺隐伏岩体可能属于橄榄玄粗岩石系列。

庐枞盆地内火山岩与侵入岩(包括本文所涉及的隐伏侵入体)形成时代相近(图 9)、空间关系密切(图 10、11),具有较为一致的地球化学特征(图 5、6、8),说明区域早白垩世岩浆活动源区相同、演化过程相似,为同源岩浆不同演化阶段的产物,属于同一套橄榄玄粗岩石系列(Xue Huaimin et al., 2010a; Jia Liqiong et al., 2014; Fan Yu et al., 2014)。

5.3.2 源区特征

Yu Xueyuan and Bai Zhenghua(1981)认为富含金云母的岩石圈地幔可能为庐枞早白垩世岩浆岩的源区,金云母分解所产生的 K、Al 和水可以使得固相地幔出溶出富碱偏中性的熔体;Liu Hong et al. (2002)

认为庐枞富钾火山岩起源于受俯冲板片析出流体交代作用所形成的 EMI 型富集地幔,初始岩浆在上升过程中并未受到壳源物质的混染;Xie Zhi et al. (2007)指出 EMII 型富集地幔可能是庐枞橄榄安粗岩系的源区,岩浆演化受到扬子下地壳物质的显著影响;Xue Huaimin et al. (2010a)对庐枞盆地火山-潜火山岩的研究显示,母岩浆主要来源于富集地幔的部分熔融,高压下的分离结晶作用是岩浆分异演化的重要机制,上地壳物质对盆地内岩浆演化影响不大;Deng Jinfu et al. (2011)认为 AFC 机制可以解释庐枞地区火山岩的形成,强调富碱富硅的地壳组分在岩浆演化过程中的作用。综上,源区特征及壳源物质的混染,是区域岩浆成因的争论焦点。

橄榄玄粗岩的岩浆源区可能为含金云母或 K-Na 透闪石的富集型岩石圈地幔或成分相当的年轻下地壳(Rock and Bowes, 1991; Liegeois et al., 1998)。钱铺地区隐伏侵入岩在微量元素特征上,相对于原始地幔富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素,富集 Th、U、Zr、Hf 等高场强元素,亏损 Ba、Sr 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,这一特征可能与流体交代地幔作用有关,也可能由幔源岩浆在上升过程中同化壳源物质获得。Jia Liqiong et al. (2014)针对刘屯地区隐伏正长-二长岩的 Hf 同位素研究,也显示岩浆源区可能为富集地幔或受到过地壳物质的混染。

Nb/U 比值是判断壳源物质混染的良好证据,钱铺地区隐伏侵入体 Nb/U 比值集中分布在 0.48~3.11 之间,明显低于亏损地幔(Nb/U=7, Hofmann et al., 1986)和陆壳上地壳(Nb/U=9, Taylor and McLennan, 1985),接近俯冲带释放流体 Nb/U 的比值(Nb/U=0.22, Ayers, 1998),说明与俯冲作用有关的洋壳板片流体对岩石圈地幔的交代作用是岩浆源区具有壳源特征的主导因素。大离子亲石元素 Sr 随着岩浆的演化表现出递减的趋势,高场强元素 Zr 随着 SiO_2 增加并未发生明显的富集,也支持上地壳物质可能没有参与到岩浆演化的过程中(图 6)。Munker(1998)研究表明,地壳混染岩石的 Nb/Ta 与 La/Yb 具有负相关性,钱铺地区隐伏岩体的 Nb/Ta 与 La/Yb 不具有负相关性特征(图 12a),说明岩石不具有地壳混染的特征。在 $1/Sr-(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 关系图上(图 12b),钱铺地区隐伏侵入体样品点近水平分布,这一特征同样指示岩浆演化过程中不存在显著的同化混染作用。综上,钱铺地区隐伏侵入体地球化学特征直接反映了源区的属

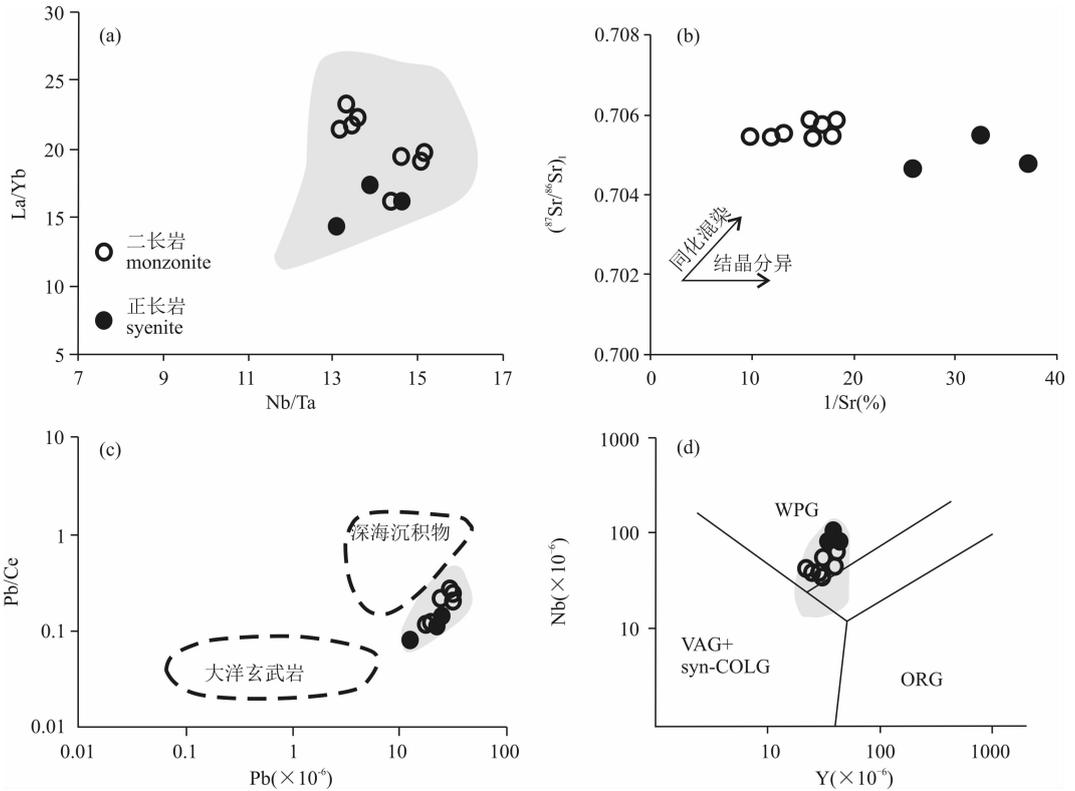


图 12 科学钻 LZSD-01 深部侵入微量元素分类图解

Fig. 12 The classification diagrams of trace elements of intrusions in Scientific Drilling LZSD-01

(a)—Nb/Ta-La/Yb 图解; (b)—1/Sr-(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 关系图; (c)—Pb-Pb/Ce 图解(底图据 Othman et al., 1989); (d)—Y-Nb 图解(底图据 Pearce et al., 1984); 阴影区域为庐枞盆地正长-二长岩样品分布范围, 数据据 Fan Yu et al., 2014; Jia Liqiong et al., 2014; 安徽省地质调查院, 2015; Duan Chao, 2009; WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; ORG—洋脊花岗岩

(a)—Nb/Ta-La/Yb diagram; (b)—1/Sr-(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i diagram (after Othman et al., 1989); (c)—Pb-Pb/Ce diagram (after Pearce et al., 1984); The shadow regions are the distributions of the syenite and monzonite in Luzong basin. The statistics are after Fan Yu et al., 2014; Jia Liqiong et al., 2014; the unpublished papers of Geological Survey of Anhui Province; Duan Chao, 2009; WPG—within plate granites; VAG—volcanic arc granites; syn-COLG—syn-collision granites; ORG—ocean ridge granite

性, 排除了地壳物质混染对成分的影响。结合侵入岩负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、略高的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 特征, 可以推断岩浆源区属于富集型岩石圈地幔, 从 $\epsilon_{Nd}(t)$ -(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 图解上看(图 8), 钱铺地区侵入岩样品主要落入了 EMI 型富集地幔的区域。

现有的研究成果也显示长江中下游地区中生代岩石圈地幔具有交代富集的特征, 但对于交代富集作用发生的时间和机制还存在争议。Tatsumoto and Nakamura(1991)、Liu Hong et al. (2002)、Jia Liqiong et al. (2014) 认为中生代古太平洋板块向欧亚板块俯冲, 洋壳脱水所产生的流体交代上覆岩石圈地幔是主导因素; Xie Zhi et al. (2007) 认为拆沉的下地壳与地幔物质混合导致地幔富集; Yan Jun et al. (2005) 强调晚古生代华夏板块向扬子板块的俯冲作用, 大洋沉积物释放的流体交代上覆地幔形成了富集型岩石圈地幔; Nd 同位素模式年龄代表

了岩浆源区与亏损地幔分离的大致年龄, Xue Huaimin et al. (2010a) 通过对 Nd 同位素的研究, 认为扬子克拉通岩石圈地幔富集发生在早古元古代扬子克拉通基底形成主要时期。钱铺隐伏侵入体的 Nd 同位素模式年龄(T_{DM})介于 1.3~1.5 Ga 之间, 支持古老克拉通岩石圈地幔富集的观点。钱铺隐伏岩体微量元素特征上具有与俯冲带释放流体相似的 Nb/U 比值, Pb/Ce 与 Pb 的协变关系也指示深海沉积物对岩浆源区的影响(图 12c), 因此区域岩石圈地幔在中生代可能还存在一次富集过程, 古太平洋板块向欧亚板块俯冲, 洋壳脱水所产生的流体可能对上覆岩石圈地幔产生了交代作用。

5.3.3 岩浆演化机制

包括钱铺隐伏岩体在内, 庐枞盆地的正长-二长岩元素演化特征具有相似性, 表现为 TiO₂、Al₂O₃、MnO₂、MgO、CaO、P₂O₅、 δ Eu 与 SiO₂ 含量具有负相

关性,说明岩浆演化的过程中可能存在斜长石、磷灰石、辉石、橄榄石、钛铁矿等矿物的分离结晶作用。Xue Huaimin et al. (2010a)也指出庐枞盆地火山-潜火山岩 MgO 与 FeO、CaO、Sr、Co、Sc、V 的正相关性,强调单斜辉石、角闪石等分离结晶作用对橄榄玄粗质岩浆演化所起到的重要作用。Sr 的演化趋势也显示(图 12b),随着 Sr 含量的变化,Sr 初始值相对集中,显示了岩浆可能为一个封闭的体系,无外源物质加入。综上推测,以斜长石、辉石、钛铁矿物为主的矿物分离结晶作用可能是钱铺隐伏侵入体的原始岩浆沿深断裂上升至地壳后,在岩浆房中演化的主要机制。

5.3.4 构造背景

橄榄玄粗岩的形成构造背景主要包括岛弧、后碰撞、板内裂谷、大陆边缘等(Morrison et al., 1980; Gill and Whelan, 1989; Davis et al., 1993),均强调伸展的构造应力对岩浆作用的影响。在 Y-Nb 判别图解中(图 12d),庐枞盆地的正长-二长岩均投点于板内环境,指示其形成背景可能为板内的伸展环境。由于受到印支期扬子板块向华北板块的拼贴及古太平洋板块向欧亚板块汇聚作用的影响,中国东部在中、新生带发生了大规模的岩石圈减薄作用,构造体制也存在由挤压向拉张的转变过程(Wu Fuyuan and Sun Deyou, 1999; Zheng Jianping et al., 2006; Wu Ganguo et al., 2008; Pan Guoqiang et al., 2001; Xue Huaimin et al., 2002; Fan et al., 2007)。庐枞盆地中的橄榄玄粗质岩浆正是形成于早白垩世伸展的构造背景下,区域富集岩石圈地幔发生部分熔融产生的碱性岩浆沿着深大断裂上升,并可能于地壳中形成多级岩浆房,部分岩浆快速上升喷出地表形成了橄榄玄粗质火山岩,剩余岩浆在岩浆房中经过分离结晶演化,再逐步侵入浅部地壳,形成侵入体。深部探测项目在庐枞盆地施工了五条高精度反射地震剖面,清晰识别了切穿至 Moho 的深大断裂(Dong Shuwen et al., 2010),其可能为深源岩浆上升的通道;同时发现盆地中浅部地壳存在多个“亮斑”(bright reflectors),为多级岩浆房的存在提供了直接的证据(Lü et al., 2013)。近期,在典型橄榄玄粗质岩浆分布区的美国黄石公园,同样发现在其浅部流纹质岩浆房之下,还存在一个连通深部岩石圈地幔的玄武质岩浆房(深度约 20~45 km)(Huang et al., 2015),也为来源于地幔的橄榄玄粗质岩浆上升演化提供了佐证。

6 结论

(1)庐枞盆地科学钻 LZSD-01 所揭露的隐伏侵入体岩性为正长岩和黑云母辉石-二长岩,岩浆岩锆石 U-Pb 年龄分别为 132.6 ± 1.2 Ma、 133.3 ± 0.4 Ma,属于早白垩世岩浆活动的产物。

(2)Sr-Nd 同位素及微量元素特征指示,岩浆的源区可能为类似于 EMI 型富集地幔,以斜长石、辉石、钛铁矿物为主的矿物分离结晶作用可能是岩浆演化的主要机制。

(3)庐枞盆地中北部(罗河—东院—钱铺一线以北区域)火山岩盖层之下广泛分布有正长-二长质侵入体,隐伏侵入体多分布于-1000 m 以浅的区域,在深大断裂附近及盆地中部钱铺地区侵入体分布较深(约-1400 m),而在盆地边部隐伏岩体则分布较浅(小于-600 m)。

(4)盆地内隐伏岩体形成时代介于 130~133 Ma,与地表分布的正长-二长岩形成时代接近,同属于砖桥旋回晚期岩浆活动的产物,形成于板内伸展拉张的构造背景。

致谢:审稿人仔细审阅并提出了宝贵的修改意见,在此谨表谢忱。

注释

① 安徽省地质调查院. 2015. 安徽庐枞地区构造、岩浆演化与成矿作用关系项目成果报告. 内部资料.

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192:59~79.
- Ayers J. 1998. Trace element modeling of aqueous fluid-peridotite interaction in the mantle wedge of subduction zones. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 132(4):390~404.
- Chang Yinuo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. 1991. The Copper-iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1~359 (in Chinese with English abstract).
- Chen Long, Zhao Zifu, Zheng Yongfei. 2014. Origin of andesitic rocks: Geochemical constraints from Mesozoic volcanics in the Luzong basin, South China. *Lithos*, 190~191:220~239.
- Chen Zhihong, Yan Jun, Li Quanzhong, Chu Xiaoqiang, Peng Ge. 2013. Zircon LA-ICPMS dating of the Bajiatan pluton in Luzong volcanic basin and its significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2(33):19~25 (in Chinese with English abstract).
- Davis J M, Elston W E, Hawkesworth C J. 1993. Basic and intermediate volcanism of the Mogollon-Datil volcanic field: Implications for mid-Tertiary tectonic transitions in southwestern New Mexico, USA. In: Prichard H M,

- Alabaster T, Harris N B W, Neary C R, eds. *Magmatic Processes and Plate Tectonics*, Special Publication 76. Geological Society of London, 469~488.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Dai Shenqian, Du Jianguo, Wu Mingan, Tong Jinsong, Zhou Su, Wu Zongxu, Yao Xiaode, Wu Xuefeng. 2011. Petrology of volcanic rocks and its relationship to Fe-Cu mineralization of Luzong and Chuzhou basin, Anhui Province. *Acta Geologica Sinica*, 85(5):626~635 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Xiang Huaishuan, Gao Rui, L Qingtian, Li Jianshe, Zhan Shuangqing, Lu Zhanwu, Ma Licheng. 2010. Deep structure and ore formation within Lujiang-Zongyang volcanic ore concentrated area in Middle to Lower Reaches of Yangtze River. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9):2529~2542 (in Chinese with English abstract).
- Duan Chao. 2009. Geological and geochemical characteristics and genesis of Longqiao iron deposit in Luzong basin, Anhui, China. Ph. D. Dissertaion of Hefei University of Technology: 25~34.
- Fan Weiming, Guo Feng, Wang Yuejun, Zhang Ming. 2007. Late Mesozoic volcanism in the northern Huaiyang tectono-magmatic belt, central China; partial melts from a lithospheric mantle with subducted continental crust relicts beneath the Dabie orogen? *Chemical Geology*, 209:27~48
- Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, Qian Cunchao, Lu Sanming, David Cooke. 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong (Luangjiang-Zongyang) area and their geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8):1715~1724 (in Chinese with English abstract).
- Fan Yu, Qiu Hong, Zhou Taofa, Yuan Feng, Zhang Lejun. 2014b. LA-ICP MS zircon U-Pb dating for the hidden intrusions in the Lu-Zong basin and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 88(4):532~546 (in Chinese with English abstract).
- Gao Rui, Lu Zanwu, Liu Jinkai, Kuang Chaoyang, Feng Shaoying, Li Pengwu, Zhang Jisheng, Wang Haiyan. 2010. A result of interpreting from deep seismic reflection profile: Revealing fine structure of the crust and tracing deep process of the mineralization in Luzong deposit area. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9):2543~2552 (in Chinese with English abstract).
- Gill J, Whelan P. 1989. Early rifting of an oceanic island arc (Fiji) produced shoshonitic to tholeiitic basalts. *Journal of Geophysical Research*, 94:4561~4578.
- Gill R C O, Aparicio A, Azzouzi M El, Hernandez J, Thirlwall M F, Bourgeois J, Marriner G F. 2004. Depleted arc volcanism in the Alboran Sea and shoshonitic volcanism in Morocco: Geochemical and isotopic constraints on Neogene tectonic processes. *Lithos*, 78:363~388.
- Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, White W M. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1~2):33~45.
- Huang H H, Fan C L, Brandon S, Jamie F, Robert B S, Victor C T. 2015. The Yellowstone magmatic system from the mantle plume to the upper crust. *Science*, DOI: 10. 1126/science. aaa5648.
- Iddings J P. 1895. Absarokjite-shoshonite-banakite series. *The Journal of Geology*, 3: 935~959.
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guild to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8:523~548.
- Jia Liqiong, Xu Wenyi, L Qingtian, Mo Xuanxue, Xiong Xin, Li Jun, Wang Liang. 2014. LA-MC-ICP MS zircon U-Pb geochronology and petrological geochemistry of scientific deep drilling in Zhuanqiao, Lujiang-Zongyang volcanic basin. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4):995~1016 (in Chinese with English abstract).
- Joplin G A. 1968. The shoshonite association: A review. *Journal of the Geological Society of Australia*, 15:275~294.
- Liegeois J P, Navez J, Hertogen J, Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K Calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids: The use of sliding normalization. *Lithos*, 45:1~28.
- Liu Hong, Qiu Jiansheng, Luo Qinghua, Xu Xisheng, Lingwenli. 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province. *Geochemica*, 31(2):129~140(in Chinese with English abstract).
- Liu Jun, Zhou Taofa, Yuan Feng, Fan Yu, Wu Mingan, Lu Sanming, Qian Cunchao. 2007. Rock geochemistry and genesis of the Bajiatan intrusion in the Lujiang-Zongyang volcanic basin, Anhui. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2615~2622 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, G nther D, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 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.
- Lü Qingtian, Yan Jiayong, Shi Dalian, Dong Shuwen, Tang Jingtian, Wu Mingan and Chang Yinuo. 2013. Reflection seismic imaging of the Lujiang-Zongyang volcanic area: An insight into the crustal structure and geodynamics of an ore district. *Tectonophysics*, 606:60~77.
- Lü Qingtian, Dong Shuwen, Shi Dalian, Tang Jingtian, Jiang Guoming, Zhang Yongqian, Xu Tao, SinoProbe-03-CJ Group. 2014. Lithosphere architecture and geodynamic model of Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt: An review from SinoProbe. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4):889~906 (in Chinese with English abstract).
- Ludwing K R. 1999. Using Isoplot/Ex Version2, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Centre Special Publications, 1~47.
- Mao Jingwen, Duan Chao, Liu Jialin, Zhang Chen. 2012. Metallogeny and corresponding mineral deposit model of the Cretaceous terrestrial volcanic-intrusive rocks-related polymetallic iron deposits in middle-lower Yangtze river valley. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1):1~14 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Shao Yongjun, Xie Guiqing, Zhang Jiandong, Chen Yuchuan. 2009. Mineral deposit model for porphyry-skarn polymetallic copper deposit in Tongling ore dense district of Middle-Lower Yangtze. *Mineral Deposits*, 28(2):109~119 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1985. *Magmas and Magmatic Rocks*. London: Longman, 1~266.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13:97~108.
- Munker C. 1998. Nb/Ta fractionation in a Cambrian arc/Back arc system, New Zealand: Source constraints and application of

- refined ICPMS techniques. *Chemical Geology*, 144(1~2):23~45.
- Ningwu Project Group. 1978. *The Porphyrite Iron Deposit of Ningwu*. Beijing: Geological Publishing House, 1~320 (in Chinese).
- Othman D B, White W M, Patchett J. 1989. Geochemistry of marine sediment, island arc magma genesis and crust-mantle recycling. *Earth and Planetary Science Letters*, 94:1~21.
- Pan Guoqiang, Lu Xiancai, Yu Hangbo. 2001. Petrological geochemical characteristics of Mesozoic adakite from Northern Huaiyang and discussion on its genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4):541~550 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25:956~983.
- Ren Qijiang, Liu Xiaoshan, Xu Zhaowen. 1991. Mesozoic Volcano-Tectonic Depression and Its Mineralizing Process in Lujiang-Zongyang Area, Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1~145 (in Chinese).
- Ren Qijiang, Wang Dezi, Xu Zhaowen, Dong Huogeng, Pan Longqian, Yang Rongyong, Fang Changquan, Hu Jinan. 1993. Formation and development of the Mesozoic Lujiang-Zongyang volcanic-structural depression in Anhui Province and their relation to mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 67(2):131~145 (in Chinese with English abstract).
- Rock N M S, Bowes D R. 1991. *Lamprophyres*. Glasgow: Blackie, 1~285.
- Su Huimin, Mao Jingwen, He Xirong, Lu Ran. 2013. The formation age of Tianhuashan basin in north Wuyi mountain; Constrain from geochronology of volcanic and intrusive rocks. *Chinese Science Bulletin*, 43(5):745~759 (in Chinese).
- Sun S S, McDough. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean basins*. Geological Society, 42:313~345.
- Sun Yedong, Yang Rongyong, Ren Qijiang, Liu Xiaoshan. 1994. Discussion on the characteristics and tectonic setting of the Mesozoic volcanic sequences in Lujiang-Zongyang area. *Acta Petrologica Sinica*, 10(1):97~103 (in Chinese with English abstract).
- Tatsumoto M and Nakamura Y. 1991. DUPAL anomaly in the sea of Japan; Pb, Nd and Sr isotopic variation at the eastern Eurasian continental margin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55:3697~3708.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell: Oxford Press, 1~312.
- Turner S, Arnaud N, Liu J, Rogers N, Hawkesworth C, Harris N, Kelley S, Van Calstern P, Deng W. 1996. Postcollision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 37:45~71.
- Wang Dezi, Ren Qijiang, Qiu Jiansheng, Chen Kerong, Xu Zhaowen, Zeng Jiahu. 1996. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite province, eastern China and their metallogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 70(1):23~34 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Jian Ping, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei, Dai Tongmo, Xu Jifeng, Ma Jinlong. 2005. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, South China; Constrains for late-Mesozoic tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):795~808 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis, A Global Tectonic Approach*. London: Oxford University Press, 1~468.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4):313~318 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Ji Weiqiang, Sun Dahai, Yang Yueheng, Li Xianhua. 2012. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province China. *Lithos*, 150:6~25.
- Wu Ganguo, Zhang Da, Di Yongjun, Zang Wenshuan, Zhang Xiangxin, Song Biao, Zhang Zhongyi. 2008. The age of SHRIMP zircon in the intrusion of Tongling ore concentration area and deep geodynamic background. *Science in China (Series D; Earth science)*, 38(5):630~645 (in Chinese).
- Wu Liren, Qi Jingying, Wang Tingdu, Zhang Xiuqi, Xu Yongsheng. 1982. Mesozoic volcanic rocks in the eastern part of China. *Acta Geologica Sinica*, 56(3):223~234 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xiao, Wang Xianyin, Tang Jingtian, Zhou Chong, Wang Yongqing, Chen Xiangbin, Lü Qingtian. 2014. Conductivity structure of the Lujiang-Zongyang ore concentrated area, Anhui Province; Constraints from Magnetotelluric data. *Acta Petrologica Sinica*, 88(4):478~495 (in Chinese with English abstract).
- Xie Zhi, Li Quanzhong, Chen Jiangfeng, Gao Tianshan. 2007. The geochemical characteristics of the early-Cretaceous volcanic in Luzong region and their source significances. *Geological Journal of China Universities*, 13(2):235~249 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xin, Xu Wenyi, Jia Liqiong, L Qingtian, Li Jun. 2013. Modes of occurrence and composition of uranium and thorium minerals in deep drilling program in Zhuanqiao of Lujiang, Anhui Province. *Mineral Deposits*, 32(6):1211~1220 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen, Liu Xiaochun. 2002. U/Pb zircon dating for Cretaceous adakitic volcanic rocks in eastern part of the North Dabie Mountain. *Geochemica*, 31(5):455~463 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen, Ma Fang. 2010a. Geochemistry of shoshonitic volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province (eastern China); Constraints on Cretaceous lithospheric thinning of the lower Yangtze region. *Acta Geologica Sinica*, 84(5):664~681(in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen, Ma Fang. 2010b. Zircon U-Pb SHRIMP ages of sub-volcanic bodies related with porphyritic Fe-deposits in the Luzong and Ningwu basins, Middle and Lower Yangtze River Reaches, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9):2653~2664 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen, Ma Fang. 2012. Lower Yangtze river reaches; Constraints on the model of late Mesozoic lithospheric thinning of the eastern Yangtze craton. *Acta Geologica Sinica*, 86(10):1569~1583 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Ma Fang, Cao Guangyue. 2015. Late Mesozoic

- shoshonitic volcanic rocks in the middle and lower Yangtze river reaches: Ages, geochemical and genesis. *Acta Geologica Sinica*, 89(8): 1380~1401 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Ma Fang, Cao Guangyue, Wang Yipeng, Guo Xiuyan. 2016. Petrogenesis of potassic intrusive rocks along the southern margin of the Luzong volcanic basin, Middle and lower Yangtze river reaches, China. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2233~2257 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jun, Chen Jiangfeng, Xie Zhi, Yang Gang, Yu Gang, Qian Hui. 2005. Geochemistry of late Mesozoic basalts from Kedoushan in the Middle and Lower Yangtze region: Constractions on characteristics and evolution of the lithospheric mantle. *Geochimica*, 34(5): 455~469 (in Chinese with English abstract).
- Yang Rongyong, Ren Qijiang, Xu Zhaowen, Sun Yedong, Guo Guozhang, Qiu Jiansheng. 1993. The magma source of Bajiatan volcanic-intrusive complex in the Lujiang-Zongyang area, Anhui Province. *Geochimica*, 22(2): 97~106 (in Chinese with English abstract).
- Yin Jiangning, Xing Shuwen, Xiao Keyan. 2016. Metallogenic characteristics and resource potential analysis of the Middle-Lower Yangtze River Fe-Cu-Au-Pb-Zn metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 90(7):1525~1536 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xueyuan, Bai Zhenghua. 1981. Latitic series in Lujiang-Zongyang region. *Geochemica*, 5(1): 57~65 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, Lu Sanming, Qian Cunchao, Zhang Lejun, Duan Chao, Tang Minhui. 2008. Source, evolution and tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in Luzong basin, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8):1691~1702.
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Lin Xinduo, Zhou Xunruo, Wang Tianfeng, Jin Fuquan, Zhou Zonggui. 1992. Regularities of Metallogenesis for Copper (Gold) Deposits in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Area. Beijing: Geological Publishing House, 12~35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lejun. 2011. Polymetallic mineralization and associated magmatic and volcanic activity in the Luzong basin, Anhui Province, eastern China. Ph. D. Dissertation of Hefei University of Technology, 1~239.
- Zhang Shu, Wu Mingan, Wang Jing, Li Xiaodong, Zhao Wenguang, Wei Guohui. 2014b. The mineralization related with the syenite in Luzong basin, Anhui Province. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 519~531 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shu, Wu Mingan, Zhao Wenguang, Zhang Yiyong, Li Xiaodong, Wang Jing. 2014a. The geochemistry characteristics of Nihe iron deposit in Lujiang, Anhui Province and their constrains to ore genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5):1382~1396 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Li Houmin, Li Jianwei, Zhang Zuoheng and Song Xieyan. 2014a. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5):1189~1204(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Santosh M, Li Houmin, Li Jianwei, Zhang Zuoheng, Song Xieyan, Wang Meng. 2014b. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 57:247~263.
- Zhen Yongfei, Fu Bing, Gong Bing. 1995. The thermal history of the Huangmeijian intrusion in Anhui and its relation to mineralization: isotope evidence. *Acta Geologica Sinica*, 69(4): 337~348 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang, Griffin W L, Yu Chunmei, Zhang Ruisheng, Yuan Xiaoping, Wu Xiuling. 2006. Lithospheric thinning accompanying mantle lateral spreading, erosion and replacement beneath the eastern part of North China: Evidence from peridotites. *Earth Science Frontiers*, 13(2):76~85 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Song Mingyi, Fan Yu, Yuan Feng, Liu Jun, Wu Mingan, Qian Cunchao, Lu Sanming. 2007. Chronology of the Bajiatan intrusion in the Luzong basin, Anhui, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2379~2386 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, Lu Sanming, Shang Shigui, David Cooke, Sebastien Meffre. 2008. The geochronology of the volcanic rocks in Luzong (Lujiang-Zongyang) basin and its significance, Anhui province. *Science in China (Series D: Earth science)*, 38(11):1342~1353 (in Chinese).
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, Song Chuanzhong, Zhang Lejun, Qian Cunchao, Lu Sanming, David R C. 2010. Temporal-spatial framework of magmatic intrusions in Luzong volcanic basin in east China and their constrain to mineralizations. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2694~2714 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Wu Mingan, Fan Yu, Duan Chao, Yuan Feng, Zhang Lejun, Liu Jun, Qian Bing, Franco Pirajno, David R Cooke. 2011. Geological, geochemical characteristics and isotope systematics of the Longqiao iron deposit in the Lu-Zong volcano-sedimentary basin, Middle-Lower Yangtze (Changjiang) River Valley, Eastern China. *Ore Geology Review*, 43: 154~169.
- Zhou Taofa, Wang Biao, Fan Yu, Yuan Feng, Zhang Lejun, Zhong Guoxiong. 2012. Apatite-actinolite-magnetite deposit related to A-type granite in Luzong basin: evidence from Mkou iron deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3087~3098 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Wang Shiwei, Fan Yu, Yuan Feng, Zhang Dayu, White N C. 2015. A review of the intracontinental porphyry deposits in the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 65: 433~456.

参 考 文 献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1~359.
- 陈志洪, 闫峻, 李全忠, 初晓强, 彭戈. 2013. 下扬子庐枞盆地巴家滩岩体锆石 LA-ICPMS 定年及意义. *矿物岩石*, 2(33):19~25.
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 戴圣潜, 杜建国, 吴明安, 童劲松, 周肃, 吴宗絮, 姚孝德, 吴雪峰. 2011. 安徽省庐枞与滁州盆地火山岩岩石学特征与 Fe-Cu 成矿的关系. *地质学报*, 85(5):626~635.

- 董树文, 向怀顺, 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-枞阳火山岩矿集区深部结构与成矿作用. 岩石学报, 26(9):2529~2542.
- 段超. 2009. 安徽庐枞盆地龙桥铁矿床地质地球化学特征和矿床成因研究. 合肥. 合肥工业大学博士学位论文:25~34.
- 范裕, 邱宏, 周涛发, 袁峰, 张乐骏. 2014. 安徽庐枞盆地隐伏侵入岩的 LA-ICP MS 定年及其构造意义. 地质学报, 88(4):532~546.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 钱存超, 陆三明, David Cooke. 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, 鄞少英, 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.
- 贾丽琼, 徐文艺, 吕庆田, 莫宣学, 熊欣, 李骏, 王梁. 2014. 庐枞盆地砖桥地区科学深钻岩浆岩 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学特征. 岩石学报, 30(4): 995~1016.
- 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.
- 刘珺, 周涛发, 袁峰, 范裕, 吴明安, 陆三明, 钱存超. 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):2615~2622.
- 吕庆田, 董树文, 史大年, 汤井田, 江国明, 张永谦, 徐涛, SinoProbe-03-CJ 项目组. 2014. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型——深部探测(SinoProbe)综述. 岩石学报, 30(4):889~906.
- 毛景文, 段超, 刘佳林, 张成. 2012. 陆相火山-侵入岩有关的铁多金属矿成矿作用及矿床模型——以长江中下游为例. 岩石学报, 28(1):1~14.
- 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 张建东, 陈毓川. 2009. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型. 矿床地质, 28(2):109~119.
- 宁芜玢岩铁矿编写组. 1978. 宁芜玢岩铁矿. 北京:地质出版社, 1~320.
- 潘国强, 陆现彩, 于航波. 2001. 北淮阳中生代 adakite 岩石地球化学特征及成因讨论. 岩石学报, 17(4):541~550.
- 任启江, 刘孝善, 徐兆文. 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, 1~145.
- 任启江, 王德滋, 徐兆文, 董火根, 潘龙泉, 杨荣勇, 方长泉, 胡进安. 1993. 安徽庐枞安徽庐枞火山-构造洼地的形成、演化及成矿. 地质学报, 67(2): 131~145.
- 苏慧敏, 毛景文, 何细荣, 卢燃. 2013. 北武夷山天华山盆地形成时限的约束: 来自火山岩-侵入岩的年代学证据. 中国科学(D辑), 43(5):745~759.
- 孙冶东, 杨荣勇, 任启江, 刘孝善. 1994. 安徽庐枞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):97~103.
- 王德滋, 任启江, 邱检生, 陈克荣, 徐兆文, 曾家湖. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. 地质学报, 70(1):23~34.
- 王强, 赵振华, 简平, 熊小林, 包志伟, 戴樟谟, 许继峰, 马金龙. 2005. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约. 岩石学报, 21(3): 795~808.
- 吴福元, 孙德友. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. 长春科技大学学报, 29(4): 313~318.
- 吴淦国, 张达, 狄永军, 臧文栓, 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.
- 吴利仁, 齐进英, 王听渡, 张秀棋, 徐永生. 1982. 中国东部中生代火山岩. 地质学报, 56(3):223~234.
- 肖晓, 王显莹, 汤井田, 周聪, 王永清, 陈向斌, 吕庆田. 2014. 安徽庐枞矿集区大地电磁探测与电性结构分析. 地质学报, 88(4): 478~495.
- 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.
- 熊欣, 徐文艺, 贾丽琼, 吕庆田, 李骏. 2013. 安徽庐江砖桥科学深钻内的轴钼赋存状态研究. 矿床地质, 32(6): 1211~1220.
- 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 2002. 北大别东部白垩纪埃达克质火山岩及其锆石 U-Pb 年代学. 地球化学, 31(5):455~463.
- 薛怀民, 董树文, 马芳. 2010a. 安徽庐枞火山岩盆地橄榄玄粗岩系的地球化学特征及其对下扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的约束. 地质学报, 84(5): 664~681.
- 薛怀民, 董树文, 马芳. 2010b. 长江中下游地区庐(江)-枞(阳)和宁(南京)-芜(湖)盆地内与成矿有关的潜火山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 岩石学报, 26(9): 2653~2664.
- 薛怀民, 董树文, 马芳. 2012. 长江中下游庐枞盆地火山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄: 对扬子克拉通东部晚中生代岩石圈减薄机制的约束. 地质学报, 86(10): 1569~1583.
- 薛怀民, 马芳, 曹光跃. 2015. 长江中下游地区晚中生代橄榄玄粗岩系列火山岩: 年代学格架、地球化学特征及成因讨论. 地质学报, 89(8): 1380~1401.
- 薛怀民, 马芳, 曹光跃, 王一鹏, 郭秀艳. 2016. 长江中下游庐枞火山岩盆地南侧钾质侵入岩带的成因. 地质学报, 90(9): 2233~2257.
- 闫峻, 陈江峰, 谢智, 杨刚, 喻钢, 钱卉. 2005. 长江中下游地区蝌蚪山晚中生代玄武岩的地球化学研究: 岩石圈地幔性质与演化的制约. 地球化学, 34(5): 455~469.
- 杨荣勇, 任启江, 徐兆文, 孙冶东, 郭国章, 邱检生. 1993. 安徽庐枞地区巴家滩火山-侵入岩体的岩浆来源. 地球化学, 22(2):97~106.
- 阴江宁, 邢树文, 肖克炎. 2016. 长江中下游 Fe-Cu-Au-Pb-Zn 多金属成矿带主要地质成矿特征及潜力分析. 地质学报, 90(7): 1525~1536.
- 于学元, 白正华. 1981. 庐枞地区安粗岩系. 地球化学, 5(1): 57~65.
- 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, 周询若, 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.
- 张乐骏. 2011. 安徽庐枞盆地成岩成矿作用研究. 合肥. 合肥工业

大学博士学位论文:1~239.

张舒, 吴明安, 赵文广, 张宜勇, 李小东, 汪晶. 2014a. 安徽庐江泥河铁矿床地球化学特征及其对成因的制约. 岩石学报, 30(5): 1382~1396.

张舒, 吴明安, 汪晶, 李小东, 赵文广, 魏国辉. 2014b. 安徽庐枞盆地与正长岩有关的成矿作用. 地质学报, 88(4):519~531.

张招崇, 侯通, 李厚民, 李建威, 张作衡, 宋谢炎. 2014. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨. 岩石学报, 30(5):1189~1204.

郑建平, 路风香, W. L. Griffin, 余淳梅, 张瑞生, 袁晓萍, 吴秀玲. 2006. 华北东部橄榄岩与岩石圈减薄中的地幔伸展和侵蚀. 地质前缘, 13(2):76~85.

郑永飞, 傅斌, 龚冰. 1995. 安徽黄梅尖岩体热历史其与成矿关系: 同位素证据. 地质学报, 69(4): 337~348.

周涛发, 范裕, 袁峰, 陆三明, 尚世贵, David Cooke, Sebastien Meffre, 赵国春. 2008. 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, 宋明义, 范裕, 袁峰, 刘珺, 吴明安, 钱存超, 陆三明. 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.

周涛发, 王彪, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 钟国雄. 2012. 庐枞盆地与 A 型花岗岩有关的磁铁矿-阳起石-磷灰石矿床——以马口铁矿床为例. 岩石学报, 28(10): 3087~3098.

Geochronology and Petrological Geochemistry of Intrusions in the Lujiang-Zongyang Basin in the Mineralization Belt of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Revealed by Scientific Drilling

ZHANG Shu^{1,2)}, ZHOU Taofa¹⁾, WU Mingan²⁾, ZHANG Zanzan²⁾, XUE Huaimin³⁾, LI Xiaodong²⁾

1) School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009;

2) Geological Survey of Anhui Province, Hefei, 230001;

3) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

Scientific Drilling No.1 in the Lujiang-Zongyang basin is the pilot hole of Chinese Continental Scientific Drilling. The drilling with an end depth of 3008.29 m successfully reveals the internal geological structure of the Luzhong basin. This study carried out a systematic study of geochronology, petrology and geochemistry on the concealed intrusions in LZSD-01. LA-ICPMS zircon U-Pb dating yields the ages of 132.6 ± 1.2 Ma and 133.28 ± 0.4 Ma respectively for concealed syenite and monzonite, suggesting that they were the product of magmatic intrusion at the end of Zhuanqiao volcanic cyclic in this basin. Magmatic rocks are characterized by nearly saturated SiO_2 , high contents of Al_2O_3 and K_2O , and low TiO_2 . The concealed intrusions of LZSD-01 also have relatively high LILEs such as Rb, K, Pb, but depleted HSFES such as Nb, Ta and Ti, indicating that the intrusion should be shoshonitic rock. The Sr-Nd isotopic composition suggests that the primary magma of the concealed intrusions in the Qianpu area may derive from enriched mantle type-I. Elemental evolution trend shows that fractional crystallization of major minerals such as plagioclase, pyroxene and ilmenite may be the leading mechanism and concealed intrusions likely formed in the tectonic setting of intraplate extension.

Key words: Lujiang-Zongyang volcanic basin; scientific drilling; SinoProbe; Qianpu area; concealed intrusion