

·专题研究·

皖南屯溪盆地火山岩的地球化学、年代学及其构造意义

汤 帅^{1,2}, 徐先兵¹, 袁晏明¹

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 江西省核工业地质局 二六六大队, 江西 南昌 330013)

摘要: 安徽南部侏罗至白垩纪屯溪盆地位于 NE 向中下扬子火山岩带和 NNE 向中国东南部火山岩带的交接部位, 其火山岩的年代学和成因研究可以提供华南晚中生代构造演化的信息。4 个火山岩样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其岩石地球化学数据指示屯溪盆地发育两期火山岩: 早期火山岩形成于 156~152 Ma, 为中、高钾钙碱性系列, 稀土元素分布型式为轻稀土元素富集的右倾型, 铕负异常不明显, 富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损高场强元素 Nb、Ti、P; 晚期火山岩形成于 136~130 Ma, 具有双峰式火山岩特征, 其酸性组分属中钾钙碱性系列, 稀土元素分布型式为右倾斜的“V”型, 铕负异常明显, 同样具有富集轻稀土元素、大离子亲石元素及亏损高场强元素 Nb、Ti、P 的特征。皖南屯溪盆地晚侏罗世-早白垩世火山活动类似于中国东南部火山岩带。结合前人资料, 认为屯溪盆地晚侏罗世火山岩形成于挤压构造环境, 而早白垩世火山岩形成于伸展环境, 其成因与晚侏罗至早白垩世古太平洋板块俯冲角度变化和俯冲板片后撤作用有关。

关键词: 火山岩; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 屯溪盆地; 古太平洋板块俯冲

中图分类号: P588.14; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)02-0177-18

Geochemistry and geochronology of the volcanic rocks from Tunxi basin in southern Anhui and their tectonic significance

TANG Shuai^{1,2}, XU Xian-bing¹ and YUAN Yan-ming¹

(1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. No. 266 Geological Party, Nuclear Industry Geological Bureau of Jiangxi Province, Nanchang 330013, China)

Abstract: The Jurassic-Cretaceous Tunxi basin in southern Anhui is located at the junction between the NE-trending Middle-Lower Yangtze volcanic belt and the NNE-trending Southeast China volcanic belt. Geochronological and petrogenetic study of the volcanic rocks can provide information regarding the Late Mesozoic tectonic evolution of South China. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geochemical data of four volcanic rock samples indicate that two volcanic stages are developed in Tunxi basin. The earlier volcanic rocks were formed at 156~152 Ma. These rocks belong to the calc-alkaline series with middle-to-high K content, and are characterized by the REE right-inclined patterns with weak negative Eu anomalies, LILE and LREE enrichment, and HFSE (such as Nb, Ti, P) depletion. In contrast, the late volcanic rocks were formed at 136~130 Ma and are characterized by bimodal volcanic rocks. Acidic components of these rocks belong to the calc-alkaline series with intermediate K content. These rocks exhibit the right-inclined “V” type REE patterns with strong negative Eu anomalies, LILE and LREE enrichment, and HFSE (such as Nb, Ti, P) depletion. Late Jurassic-Early Cretaceous

收稿日期: 2015-05-18; 接受日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41402174)

作者简介: 汤 帅(1990-), 男, 汉族, 硕士研究生, 构造地质学专业, E-mail: shuait9066@163.com; 通讯作者: 徐先兵(1983-), 男, 汉族, 博士, 现从事构造地质和地质调查的教学和科研工作, E-mail: bingge1018@gmail.com, xbxu2011@cug.edu.cn.

volcanism features of Tunxi basin resemble those of Southeast China volcanic belt. Combined with previous studies, Late Jurassic volcanic rocks in Tunxi basin were generated in a compressional tectonic environment, whereas Early Cretaceous ones were generated in an extensional tectonic environment. Both of them were attributed to the subductional angular variation and the rollback of the Paleo-Pacific plate from Late Jurassic to Early Cretaceous.

Key words: volcanic rocks; zircon U-Pb geochronology; geochemistry; Tunxi basin; subduction of the Paleo-Pacific plate

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41402174)

华南东部燕山期火山活动强烈,发育 NNE 向中国东南部火山岩带和 NE 向中下扬子火山岩带(图 1a)(Zhou *et al.*, 2006; 徐夕生, 2008; 周涛发等, 2011)。中国东南部燕山期火山活动可分为两个阶段: ① 燕山早期(J_1 — J_3), 其中, 早侏罗世—中侏罗世火山岩主要呈近 EW 向展布于南岭地区(陈培荣等, 1999, 2002; 谢昕等, 2005), 而晚侏罗世火山岩则主要零星分布于沿海地区(Campbell *et al.*, 2007; 邢光福等, 2008; 徐先兵等, 2014); ② 燕山晚期(K_1 — K_2), 主要呈近 NNE 向分布于东南沿海, 早白垩世时火山活动达到高峰(Zhou and Li, 2000; Xing *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2011)。主流观点认为燕山晚期中国东南大陆边缘为安第斯型活动大陆边缘, 其火山活动与古太平洋板块的俯冲有关(Jahn *et al.*, 1990; Charvet *et al.*, 1994; Lapierre *et al.*, 1997; Zhou and Li, 2000; Zhou *et al.*, 2006; Li and Li, 2007)。而中下扬子火山岩带主要由 8 个呈 NE 向展布的晚中生代火山断陷盆地组成, 大量年代学研究表明火山岩形成于 136~123 Ma (Zhou *et al.*, 2008, 2011; Yan *et al.*, 2009; 禹尧等, 2009; 马芳等, 2011; Xie *et al.*, 2011; Yuan *et al.*, 2011; 闫峻等, 2013; 薛怀民等, 2013)。对于中下扬子火山岩带火山活动的成因, 一部分研究者认为其是古太平洋板块俯冲和后撤的产物(Yan *et al.*, 2008; 王丽娟等, 2014), 另外一部分研究者认为其是洋脊俯冲的结果(Sun *et al.*, 2007; Ling *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2014)。江南隆起地区位于 NE 向中下扬子火山岩带和 NNE 向中国东南部火山岩带的交接部位, 其上发育晚中生代火山岩盆地。目前对该地区火山岩的研究程度较弱(王德恩等, 2014), 缺乏详细的年代学和地球化学制约以及成因的研究。

皖南屯溪盆地是华南地区具有代表性的中生代

盆地之一(余心起等, 2001), 位于江南隆起之上, 对其进行研究有助于进一步了解华南晚中生代的构造演化。本文通过对屯溪盆地中火山岩的岩石地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究, 探讨盆地火山岩期次、形成时代以及构造环境的转变。

1 地质背景

侏罗-白垩纪皖南屯溪盆地发育于江南隆起的东部, 位于 NNE 向中国东南部火山岩带和 NE 向中下扬子火山岩带的交接部位(图 1a)。屯溪盆地北起歙县桂林, 西至黟县渔亭, 东到歙县绍濂, 南至休宁山斗, 面积约为 660 km²(图 1b)。该盆地在侏罗纪时为右旋平移造成的拉分盆地, 但随着后期 SE 向 NW 的逆冲推覆作用, 盆地南缘被新元古代地层逆冲覆盖, 沉积中心向北迁移, 在白垩纪时盆地转变为受盆地北部边界正断层控制沉积的断陷盆地(余心起等, 2001)。盆地内地层主要由晚中生代沉积岩和火山岩组成(图 2), 火山岩与沉积岩为角度不整合接触, 并且两者与下伏中新元古代至早三叠世地层呈断层接触或角度不整合接触。晚中生代沉积地层主要由分布于盆地南部的侏罗纪地层(月潭组、洪琴组、炳丘组、岩塘组)和分布于盆地北部的白垩纪地层(徽州组、齐云山组、小岩组)组成, 岩性主要为泥岩、砂岩、砾岩、砂砾岩等陆相碎屑岩。盆地内晚中生代火山岩主要为晚侏罗世-早白垩世石岭组, 出露面积约为 30.63 km², 基本散布于盆地与新元古代基底接触带附近, 以含砾粉砂岩、砂砾岩为界, 分为上下两段, 呈喷发不整合接触。下段可见中性至酸性的火山岩, 主要由安山岩、英安岩、英安质凝灰岩、英安质火山角砾岩、流纹质熔岩、沉凝灰岩组成; 上段火山岩呈“双峰式”, 岩性主要为酸性流纹岩、流纹质(熔结)凝灰岩以及基性玄武岩(安徽省地质勘

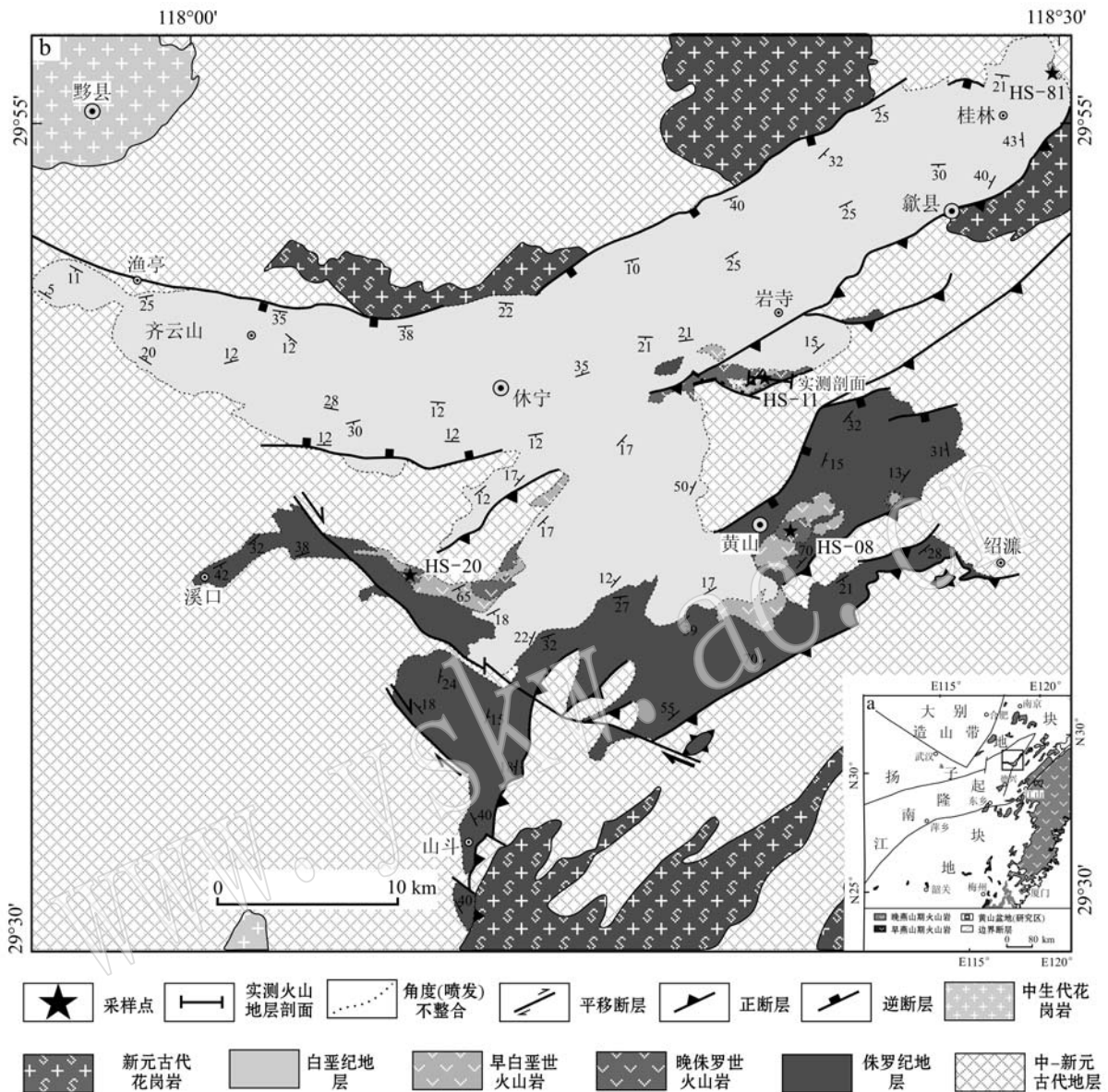


图 1 屯溪盆地地质简图和采样位置[a 据 Zhou 等(2006)修改, b 据安徽省地质勘查局三三二地质队(1997)^①]
 Fig. 1 Sketch geological map of the Tunxi basin showing sampling locations (a modified after Zhou *et al.*, 2006; b after No. 332 Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Exploration, 1997^①)

查局三三二地质队, 1997)^①。

2 采样位置与岩石学特征

为了探讨皖南屯溪盆地中火山活动的时代以及构造环境,在盆地内火山岩出露面积较大的地区采集了 4 个具有代表性的火山岩样品(图 1)。详细的采样位置及层位(其中样品 HS-11 见图 2)如表 1 所示。

HS-08: 流纹质晶屑沉凝灰岩(图 3a)。沉凝灰岩结构,层理构造。岩石主要由晶屑、泥质胶结物组成。晶屑主要为石英(50%,粒径主要为 0.06 mm 左右)、长石(15%,粒径主要为 0.06 mm 左右,手标本上可见少量大粒径长石中有些因风化剥落在岩石中产生孔洞)、黑云母(5%,粒径为 0.5 mm 左右)。火山灰和泥质胶结物总含量约为 30%,粒度细小,成分不易辨认,充填于晶屑之间。

① 安徽省地质勘查局三三二地质队, 1997. 1:50 000 兰田、休宁县、屯溪幅区域地质调查报告。

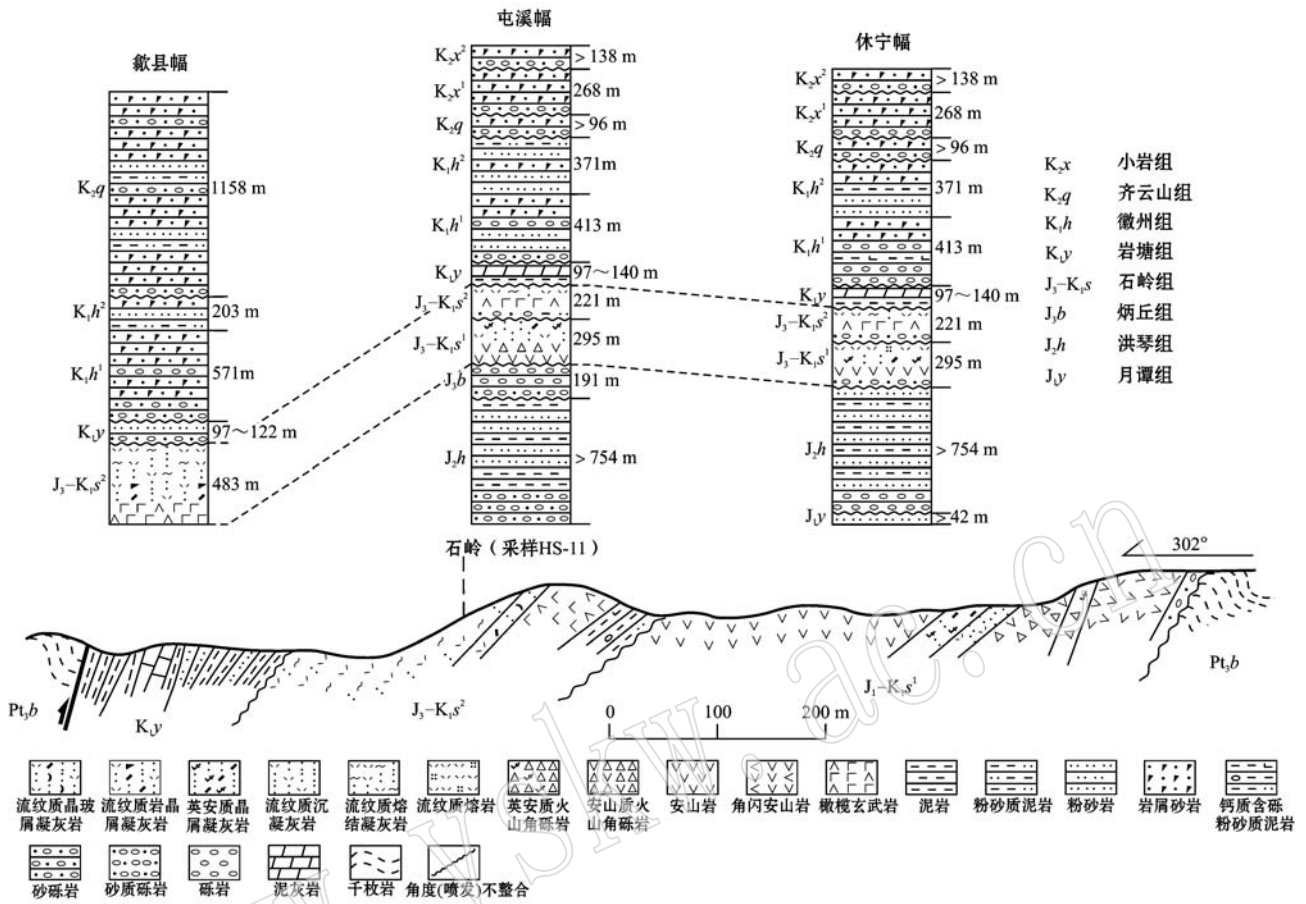


图 2 屯溪盆地侏罗-白垩纪地层柱状图和徽州区石岭村石岭组实测地层剖面图(据安徽省地质勘查局三三二地质队, 1997)^①

Fig. 2 Stratigraphic column of Jurassic-Cretaceous strata in Tunxi basin and measured stratigraphic section of Shiling Formation in Shiling Village, Huizhou District (after No. 332 Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Exploration, 1997)^①

表 1 屯溪盆地火山岩采样位置与层位
Table 1 Sampling locations and layer of rocks in Tunxi basin

样品编号	采样位置	经纬度	采样层位	岩石名称	年龄/Ma
HS-08	安徽省黄山市屯溪区尤溪村	N29°42.535' E118°20.799'	原石岭组下段	流纹质晶屑凝灰岩	155.8 ± 1.2
HS-11	安徽省黄山市笔架山采石场	N29°47.259' E118°19.721'	原石岭组上段	流纹质熔结凝灰岩	130.4 ± 1.8
HS-20	安徽省黄山市海阳镇上里村	N29°41.313' E118°7.426'	原石岭组下段	流纹岩	152.3 ± 1.3
HS-81	安徽省黄山市歙县山边村	N29°56'46" E118°29'45"	原石岭组上段	流纹质岩屑晶屑凝灰岩	135.9 ± 1.1

HS-11: 流纹质熔结凝灰岩(图 3b)。熔结结构, 块状构造。岩石中可见少量刚性岩屑和塑性岩屑, 成分主要为凝灰岩, 总含量约为 5%。晶屑呈炸碎棱角状, 部分尖角已熔融圆化, 大小在 0.2~2 mm

不等, 成分主要为石英、长石、黑云母, 含量约为 20%。其余为火山灰物质, 其中玻屑含量约为 40%, 单偏光镜下可见其呈鸡骨状、弧面状等形状。

HS-20: 流纹岩(图 3c)。斑状结构, 流纹构造(在

① 安徽省地质勘查局三三二地质队, 1997. 1:50 000 兰田、休宁县、屯溪幅区域地质调查报告.

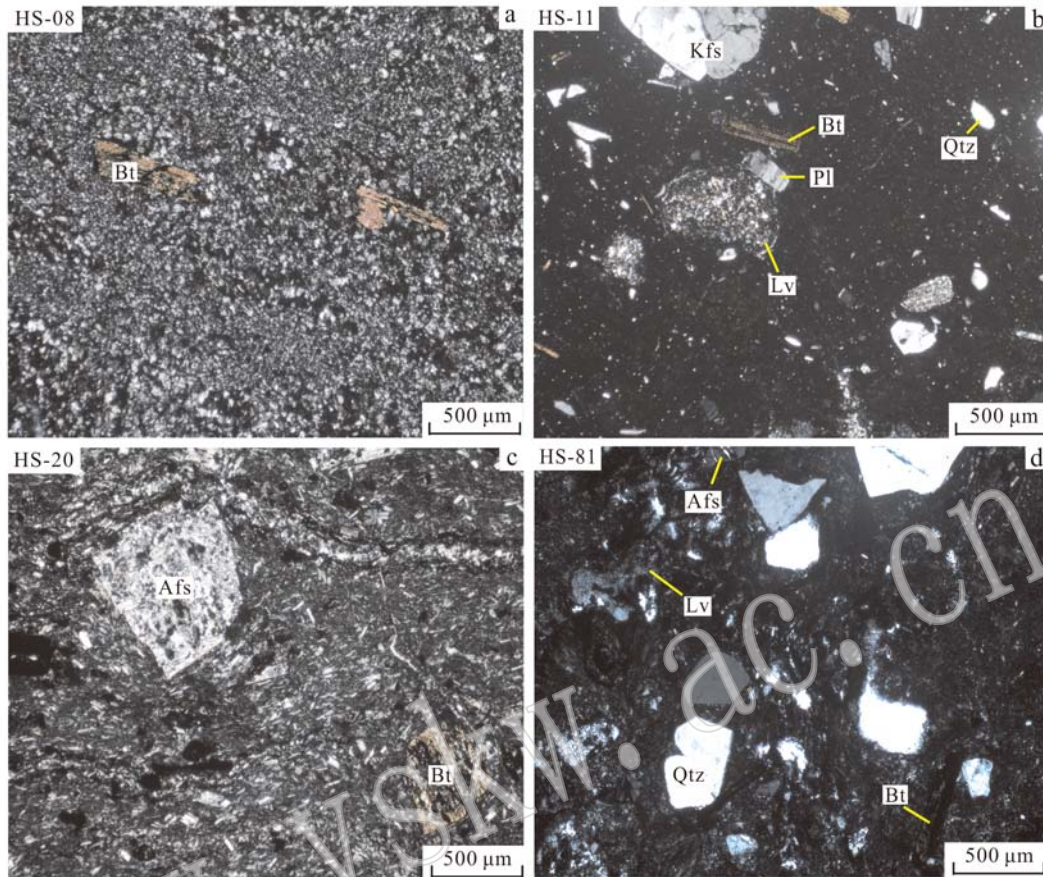


图 3 屯溪盆地火山岩显微照片(正交偏光)

Fig. 3 Photomicrographs of volcanic rocks in Tunxi basin (crossed nicols)

Bt—黑云母; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Qtz—石英; Afs—碱性长石; Lv—火山岩岩屑

Bt—biotite; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Qtz—quartz; Afs—alkali feldspar; Lv—volcanic lithic fragment

岩石表面亦可见少量气孔)。斑晶主要为碱性长石(10%)、石英(5%)、黑云母(2%)。其余为基质,具隐晶-玻璃质结构,由长英质矿物和玻璃质组成。

HS-81: 流纹质岩屑晶屑凝灰岩(图 3d)。凝灰结构,块状构造。岩屑含量约为 5%,大小为 2 mm 左右,成分主要为流纹质凝灰岩。晶屑呈炸碎棱角状,部分尖角已熔融圆化,大小在 0.2~2 mm 不等,成分主要为石英(15%)、黑云母(5%)、碱性长石(5%)。火山灰呈点状紧密堆积于岩屑和晶屑之间,整体呈紫红色。

3 分析方法

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析

锆石样品粉碎后进行标准磁选和重选,再在双目镜下进行挑纯。将挑选出的锆石颗粒用环氧树脂

胶结,待固结后细磨至锆石颗粒核部出露,抛光制靶以待分析。锆石首先在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)进行了阴极发光(CL)图像和透射光图像的拍摄,目的是了解锆石的内部结构并作为锆石年龄测试选点的依据。样品(HS-08、HS-11、HS-20)的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,其激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010a)完成,详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu 等(2008, 2010a, 2010b)。样品(HS-81)的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室进行,测试使用和

Agilent 7500s ICP-MS 连接起来的 New Wave 213nm 激光取样系统完成。U-Pb 年龄和 U、Th、Pb 的计数由 GLITTER 软件在线获得。详细的分析方法和流程类似于 Griffin 等 (2004) 与 Jackson 等 (2004) 中描述, 使用嵌入 Excel 的 ComPbCorr # 3-15G 程序 (Andersen, 2002)。初始年龄谱和图生成及年龄加权平均计算采用 Isoplot 程序来完成 (Ludwig *et al.*, 2003), 年龄计算误差采取 2σ 。

3.2 全岩地球化学分析

将用于主量和微量元素以及稀土元素分析的新鲜样品完全粉碎至 ≤ 200 目。主量元素、微量元素以及稀土元素分析是在国土资源部武汉矿产资源监督检测中心 (武汉综合岩矿测试中心) 完成的。主量元素分析是在 X 荧光光谱仪 (XRF-1800) 上完成的 (FeO 用化学法测定), 分析精度优于 1%。微量和稀土元素是在电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 上完成的, 分析精度一般优于 10%, 详细的实验方法和流程见参考文献 (高剑锋等, 2003)。

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学

详细的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试分析数据见表 2。部分锆石阴极发光图像如图 4 所示, U-Pb 谱和年龄图见图 5。

HS-08: 锆石无色透明, 晶形以自形为主, 少量为半自形至它形, 长为 $50 \sim 200 \mu\text{m}$, 长宽比为 $1:1 \sim 1:4$ 。锆石发育震荡韵律环带, 部分锆石含有继承核, 核部较暗, 边部较亮。对 24 颗锆石进行了分析, Th 含量为 $52 \times 10^{-6} \sim 1208 \times 10^{-6}$, U 含量为 $193 \times 10^{-6} \sim 1783 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.27 \sim 0.89$, 为典型的岩浆锆石。24 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $145 \sim 1799 \text{ Ma}$ 之间, 主要集中在 $145 \sim 169 \text{ Ma}$ 之间 (图 5a)。因部分锆石为继承锆石或者偏离和谐曲线无地质意义, 因此只选取了 7 个年龄较集中、靠近谐和曲线的年轻锆石。该 7 颗谐和锆石的加权平均年龄为 $155.8 \pm 1.2 \text{ Ma}$, 由于样品岩性为沉凝灰岩, 所测年龄可能代表火山喷发的时间, 也可能代表源区的形成年龄, 需在下文进一步探讨。

HS-11: 锆石无色透明, 晶形为半自形至自形, 长为 $100 \sim 250 \mu\text{m}$, 长宽比为 $1:1 \sim 1:3$ 。锆石发育震荡韵律环带, 少量锆石含有继承核, 核部较暗, 边部较亮。对 18 颗锆石进行了分析, Th 含量为 $87 \times$

$10^{-6} \sim 202 \times 10^{-6}$, U 含量为 $159 \times 10^{-6} \sim 467 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.47 \sim 0.67$, 极个别小于 0.4, 为典型的岩浆锆石。18 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $124 \sim 145 \text{ Ma}$ 之间 (图 5b), 其中有 3 颗锆石 (#3、#5、#13) 偏离谐和曲线, 没有地质意义。从剩下的 15 颗锆石中选取 12 个年龄相对集中的锆石, 其加权平均年龄为 $130.4 \pm 1.8 \text{ Ma}$, 解释为流纹质熔结凝灰岩的形成时代。

HS-20: 锆石无色透明, 晶形为半自形至自形, 长为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$, 长宽比为 $1:1 \sim 1:3$ 。锆石发育震荡韵律环带, 少量锆石含有继承核, 核部较暗, 边部较亮。对 18 颗锆石进行了分析, Th 含量为 $34.3 \times 10^{-6} \sim 415 \times 10^{-6}$, U 含量为 $199 \times 10^{-6} \sim 822 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.13 \sim 0.67$, 少数小于 0.4, 为典型岩浆锆石。18 颗锆石中有 3 颗锆石年龄分别为 $1161 \pm 15 \text{ Ma}$ (#15)、 $836 \pm 9 \text{ Ma}$ (#08)、 $302 \pm 8 \text{ Ma}$ (#16), 为继承锆石。其它 15 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $142 \sim 165 \text{ Ma}$ 之间, 虽然整体呈沿近水平方向漂移的特征 (图 5c), 不会对定年结果造成显著影响, 但还是只选取了 7 个年龄较集中、靠近谐和曲线的年轻锆石。该 7 颗谐和锆石的加权平均年龄为 $152.3 \pm 1.3 \text{ Ma}$, 能代表流纹岩的形成时代。

HS-81: 锆石无色透明, 晶形以自形为主, 少量为半自形至它形, 长为 $100 \sim 250 \mu\text{m}$, 长宽比为 $1:1 \sim 1:3$ 。锆石发育震荡韵律环带, 少量锆石含有继承核, 核部较暗, 边部较亮。20 颗锆石的 Th 含量为 $672 \times 10^{-6} \sim 1956 \times 10^{-6}$, U 含量为 $956 \times 10^{-6} \sim 2424 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.66 \sim 1.05$, 为典型岩浆锆石。20 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $134 \sim 141 \text{ Ma}$ 之间 (图 5d), 除去 1 颗相对偏离谐和曲线的锆石 (#07), 剩下 19 颗锆石的加权平均年龄为 $135.9 \pm 1.1 \text{ Ma}$, 解释为流纹质晶屑凝灰岩的形成时代。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素

从主量元素的测试结果 (表 3) 来看, 两个火山岩样品都富 SiO_2 ($67.53\% \sim 73.71\%$, 平均为 71.13%), 贫 MgO ($0.21\% \sim 0.60\%$, 平均为 0.41%)、 TiO_2 ($0.14\% \sim 0.60\%$, 平均为 0.36%)、 P_2O_5 ($0.02\% \sim 0.17\%$, 平均为 0.09%)、 MnO ($0.02\% \sim 0.05\%$, 平均为 0.04%)。按照国际地科联推荐的火山岩 TAS 分类法, 在扣除挥发分和烧失量重新换算成 100% 后投图, 早期火山岩 (HS-20) 和晚期火山岩 (HS-11) 均落在流纹岩区域内 (图 6)。

表 2 屯溪盆地火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb zircon analytical results for volcanic rocks in Tunxi basin

测试点	$\tau_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					
HS-08															
HS-08-01	935	1 783	0.52	0.0697	0.0018	0.2293	0.0060	0.0238	0.0002	210	5	152	1		
HS-08-02	334	708	0.47	0.0496	0.0016	0.1693	0.0058	0.0247	0.0003	159	5	157	2		
HS-08-03	258	561	0.46	0.0702	0.0026	0.2387	0.0081	0.0247	0.0003	217	7	158	2		
HS-08-04	304	452	0.67	0.0762	0.0017	1.1958	0.0279	0.1137	0.0011	799	13	694	6		
HS-08-05	572	1 086	0.53	0.0725	0.0021	0.2308	0.0065	0.0231	0.0002	211	5	147	1		
HS-08-06	185	231	0.80	0.0656	0.0016	1.1528	0.0279	0.1276	0.0012	779	13	774	7		
HS-08-07	596	1 153	0.52	0.0505	0.0015	0.1694	0.0056	0.0241	0.0003	159	5	154	2		
HS-08-08	202	420	0.48	0.0625	0.0020	0.6676	0.0221	0.0771	0.0008	519	13	479	5		
HS-08-09	532	1 060	0.50	0.0494	0.0015	0.1667	0.0049	0.0244	0.0002	157	4	155	1		
HS-08-10	334	546	0.61	0.1011	0.0037	0.3441	0.0125	0.0248	0.0003	300	9	158	2		
HS-08-11	52	193	0.27	0.1138	0.0020	5.0694	0.0949	0.3219	0.0031	1 831	16	1 799	15		
HS-08-12	438	906	0.48	0.0535	0.0024	0.1935	0.0091	0.0261	0.0004	180	8	166	2		
HS-08-13	359	731	0.49	0.0619	0.0024	0.3219	0.0118	0.0376	0.0005	283	9	238	3		
HS-08-14	851	1 401	0.61	0.0711	0.0019	0.2237	0.0060	0.0227	0.0002	205	5	145	1		
HS-08-15	145	288	0.50	0.0531	0.0024	0.2128	0.0092	0.0294	0.0004	196	8	187	2		
HS-08-16	256	727	0.35	0.1013	0.0028	1.0949	0.0334	0.0780	0.0013	751	16	484	8		
HS-08-17	250	554	0.45	0.0524	0.0021	0.1763	0.0071	0.0245	0.0003	165	6	156	2		
HS-08-18	310	750	0.41	0.0516	0.0022	0.1726	0.0072	0.0244	0.0003	162	6	155	2		
HS-08-19	277	607	0.46	0.0533	0.0019	0.1823	0.0064	0.0248	0.0003	170	6	158	2		
HS-08-20	520	1 039	0.50	0.0630	0.0018	0.2143	0.0062	0.0247	0.0002	197	5	157	1		
HS-08-21	1 208	1 351	0.89	0.0710	0.0012	1.1711	0.0201	0.1193	0.0009	787	9	726	5		
HS-08-22	268	654	0.41	0.0837	0.0040	0.3553	0.0182	0.0306	0.0004	309	14	194	2		
HS-08-23	135	364	0.37	0.0545	0.0023	0.1814	0.0072	0.0243	0.0003	169	6	155	2		
HS-08-24	311	708	0.44	0.0534	0.0023	0.1950	0.0078	0.0266	0.0003	181	7	169	2		
HS-20															
HS-20-01	195	448	0.44	0.0525	0.0023	0.1729	0.0078	0.0239	0.0003	162	7	152	2		
HS-20-02	254	777	0.33	0.1459	0.0052	0.4988	0.0171	0.0247	0.0003	411	12	158	2		
HS-20-03	193	598	0.32	0.0528	0.0035	0.1627	0.0105	0.0223	0.0003	153	9	142	2		
HS-20-04	415	822	0.51	0.0926	0.0041	0.3138	0.0140	0.0245	0.0003	277	11	156	2		
HS-20-05	339	729	0.47	0.0522	0.0020	0.1723	0.0063	0.0241	0.0003	161	5	153	2		
HS-20-06	294	681	0.43	0.0551	0.0027	0.1805	0.0085	0.0238	0.0003	168	7	152	2		
HS-20-07	157	427	0.37	0.0520	0.0021	0.1843	0.0074	0.0258	0.0004	172	6	164	2		

续表 2-1
Continued Table 2-1

测试点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				1 σ	1 σ	1 σ	1 σ				
HS-20-08	155	232	0.67	0.0017	1.2833	0.0346	0.1384	838	15	836	9
HS-20-09	171	305	0.56	0.0025	0.1724	0.0079	0.0241	161	7	153	2
HS-20-10	114	240	0.48	0.0044	0.1905	0.0138	0.0238	177	12	152	2
HS-20-11	220	392	0.56	0.0026	0.1702	0.0080	0.0240	160	7	153	2
HS-20-12	34.3	199	0.17	0.0039	0.2308	0.0137	0.0259	211	11	165	4
HS-20-13	330	680	0.48	0.0047	0.3103	0.0133	0.0233	274	10	149	2
HS-20-14	133	261	0.51	0.0030	0.2137	0.0105	0.0255	197	9	162	2
HS-20-15	108	322	0.34	0.0017	2.5110	0.0546	0.1972	1275	16	1161	15
HS-20-16	68	520	0.13	0.0016	0.3824	0.0153	0.0480	329	11	302	8
HS-20-17	111	259	0.43	0.0031	0.1872	0.0101	0.0247	174	9	157	2
HS-20-18	273	787	0.35	0.0017	0.1666	0.0055	0.0237	156	5	151	1
HS-11											
HS-11-01	158	235	0.67	0.0029	0.1516	0.0075	0.0204	143	7	130	2
HS-11-02	202	365	0.55	0.0029	0.1373	0.0077	0.0201	131	7	129	2
HS-11-03	192	357	0.54	0.0052	0.3247	0.0141	0.0211	285	11	135	2
HS-11-04	144	248	0.58	0.0027	0.1441	0.0072	0.0205	137	6	131	2
HS-11-05	143	233	0.61	0.0051	0.2320	0.0142	0.0206	212	12	131	2
HS-11-06	163	333	0.49	0.0069	0.1758	0.0206	0.0216	164	18	138	2
HS-11-07	87	159	0.55	0.0051	0.1777	0.0150	0.0226	166	13	144	5
HS-11-08	147	278	0.53	0.0032	0.1447	0.0083	0.0195	137	7	124	2
HS-11-09	151	251	0.60	0.0027	0.1437	0.0077	0.0203	136	7	129	2
HS-11-10	200	373	0.54	0.0022	0.1409	0.0065	0.0205	134	6	131	2
HS-11-11	180	330	0.54	0.0027	0.1397	0.0073	0.0204	133	6	130	2
HS-11-12	112	184	0.61	0.0037	0.1441	0.0098	0.0203	137	9	130	2
HS-11-13	115	213	0.54	0.0044	0.2151	0.0114	0.0206	198	10	132	2
HS-11-14	174	260	0.67	0.0025	0.1461	0.0065	0.0206	139	6	132	2
HS-11-15	93	171	0.55	0.0060	0.1505	0.0143	0.0213	142	13	136	4
HS-11-16	124	199	0.63	0.0036	0.1614	0.0108	0.0227	152	9	145	3

续表 2-2
Continued Table 2-2

测试点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	1 σ				
HS-11-17	99	168	0.59	0.063 5	0.004 3	0.186 2	0.011 4	0.022 2	0.000 5	173	10	142	3
HS-11-18	195	417	0.47	0.049 5	0.002 0	0.139 0	0.005 6	0.020 4	0.000 2	132	5	130	1
HS-81													
HS-81-01	1 593	2 424	0.66	0.047 44	0.000 92	0.137 73	0.002 86	0.021 06	0.000 30	131	3	134	2
HS-81-02	1 130	1 243	0.91	0.049 47	0.001 25	0.146 11	0.003 80	0.021 42	0.000 32	138	3	137	2
HS-81-03	1 950	2 066	0.94	0.050 27	0.001 04	0.145 26	0.003 18	0.020 96	0.000 30	138	3	134	2
HS-81-04	1 535	1 950	0.79	0.049 10	0.001 04	0.143 33	0.003 20	0.021 17	0.000 30	136	3	135	2
HS-81-05	1 956	2 381	0.82	0.050 36	0.001 36	0.143 84	0.003 94	0.020 72	0.000 32	136	3	132	2
HS-81-06	1 327	1 514	0.88	0.047 92	0.001 15	0.145 76	0.003 63	0.022 06	0.000 32	138	3	141	2
HS-81-07	1 464	1 395	1.05	0.055 15	0.001 76	0.160 87	0.005 12	0.021 16	0.000 34	151	4	135	2
HS-81-08	1 244	1 646	0.76	0.049 58	0.001 09	0.144 95	0.003 35	0.021 21	0.000 31	137	3	135	2
HS-81-09	873	1 271	0.69	0.049 66	0.001 26	0.147 46	0.003 86	0.021 54	0.000 32	140	3	137	2
HS-81-10	1 841	2 334	0.79	0.049 25	0.000 95	0.144 12	0.002 98	0.021 23	0.000 30	137	3	135	2
HS-81-11	1 652	2 183	0.76	0.048 86	0.000 97	0.145 02	0.003 09	0.021 53	0.000 31	138	3	137	2
HS-81-12	672	959	0.70	0.048 69	0.001 42	0.141 71	0.004 21	0.021 11	0.000 32	135	4	135	2
HS-81-13	1 259	1 578	0.80	0.049 31	0.001 12	0.141 65	0.003 37	0.020 84	0.000 30	135	3	133	2
HS-81-14	1 276	1 471	0.87	0.048 49	0.001 14	0.144 80	0.003 55	0.021 66	0.000 32	137	3	138	2
HS-81-15	1 076	1 456	0.74	0.050 61	0.001 17	0.150 60	0.003 63	0.021 59	0.000 32	142	3	138	2
HS-81-16	1 137	1 287	0.88	0.049 41	0.001 12	0.147 46	0.003 72	0.021 65	0.000 32	140	3	138	2
HS-81-17	1 208	1 567	0.77	0.049 18	0.001 12	0.141 79	0.003 38	0.020 92	0.000 31	135	3	133	2
HS-81-18	983	1 349	0.73	0.048 04	0.001 11	0.144 74	0.003 51	0.021 86	0.000 32	137	3	139	2
HS-81-19	1 513	1 723	0.88	0.050 21	0.001 04	0.147 75	0.003 25	0.021 35	0.000 31	140	3	136	2
HS-81-20	1 601	2 172	0.74	0.048 00	0.000 94	0.140 70	0.002 96	0.021 27	0.000 30	134	3	136	2

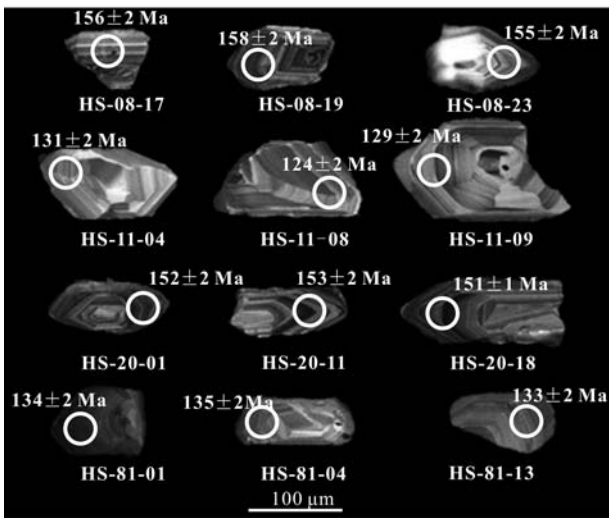


图 4 屯溪盆地火山岩样品锆石 CL 图像、测试位置以及年龄
Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images, analysis location and ages of volcanic rocks in Tunxi basin

两期火山岩的铝饱和指数 $A/CNK > 1$, 里特曼指数 $\delta < 3.3$ (表 3), 显示属于过铝质钙碱性火山岩。同时, $K_2O - SiO_2$ 含量关系图显示, 早期火山岩为中、高钾钙碱性系列, 晚期为中钾钙碱性系列 (图 6)。

4.2.2 稀土元素

早期火山岩 (HS-20) 的 ΣREE 为 $(136.36 \sim 137.92) \times 10^{-6}$, 平均值为 137.20×10^{-6} , $LREE/HREE$ 的值为 $15.75 \sim 16.64$, 平均值为 16.25 , 稀土元素分布型式为轻稀土元素富集的右倾型 (图 7a)。样品轻稀土元素分馏比较明显, 而重稀土元素分馏则比较弱, $(La/Sm)_N$ 值为 $4.03 \sim 4.76$, 平均值为 4.30 ; $(Gd/Yb)_N$ 值为 $3.52 \sim 3.84$, 平均值为 3.68 。 δEu 值为 $0.77 \sim 0.81$, 平均值为 0.79 , 铕负异常不明显。

晚期火山岩 (HS-11) 的 ΣREE 比早期火山岩高,

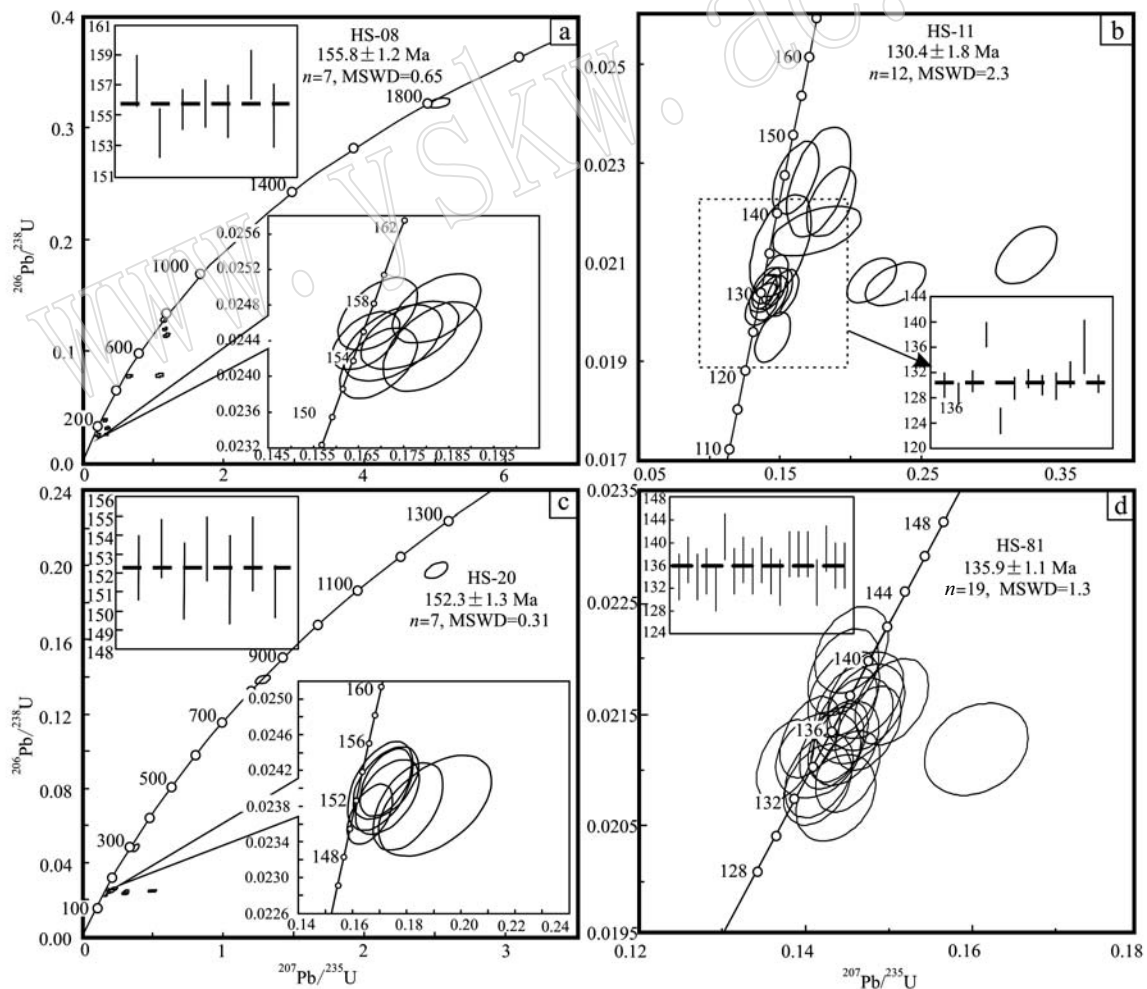


图 5 屯溪盆地火山岩样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄图
Fig. 5 Zircon LA-ICP-MS U-Pb concordia diagrams for volcanic rocks in Tunxi basin

表 3 屯溪盆地火山岩主量元素 ($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素 ($w_B/10^{-6}$) 测试结果
 Table 3 Major elements ($w_B/\%$), trace elements and REE ($w_B/10^{-6}$) values of the volcanic rocks in Tunxi basin

岩性	样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	A/CNK
流纹质熔结 凝灰岩 (晚期)	HS-11-2	73.23	0.15	12.74	0.29	0.47	0.03	0.25	1.53	4.27	2.21	0.02	4.79	99.84	1.04
	HS-11-3	73.71	0.14	12.65	0.49	0.50	0.03	0.32	1.10	4.23	2.04	0.02	4.62	99.82	1.13
	HS-11-4	73.55	0.15	12.50	0.30	0.43	0.03	0.21	1.39	4.34	2.23	0.02	4.80	99.83	1.03
	HS-20-2	67.53	0.60	16.68	3.44	0.18	0.02	0.51	0.50	4.97	3.74	0.17	1.37	99.72	1.27
流纹岩 (早期)	HS-20-3	68.83	0.58	16.18	3.29	0.28	0.05	0.60	0.51	4.97	2.68	0.16	1.72	99.82	1.35
	HS-20-4	69.92	0.55	14.94	2.17	0.90	0.05	0.59	1.30	4.81	2.17	0.16	2.20	99.84	1.18
岩性	样品编号	δ	Rb	Ba	Th	Nb	Sr	Y	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
流纹质熔结 凝灰岩 (晚期)	HS-11-2	1.39	87.96	204.6	26.29	13.68	467.9	46.72	164.3	53.49	105.4	12.30	41.94	8.39	0.40
	HS-11-3	1.28	81.32	212.2	23.72	15.18	450.30	46.29	169.80	49.98	100.40	11.90	40.94	8.41	0.41
	HS-11-4	1.41	87.63	186.80	24.73	15.31	453.60	45.92	163.50	50.89	101.60	11.87	41.18	8.35	0.43
	HS-20-2	3.09	93.12	1281	6.60	9.79	267.40	8.75	188.00	29.68	60.12	7.38	26.61	4.76	1.14
流纹岩 (早期)	HS-20-3	2.27	55.45	596.90	4.60	7.96	162.80	8.34	177.20	30.42	59.32	7.34	26.60	4.77	1.09
	HS-20-4	1.81	75.82	397.50	9.77	6.49	176.00	9.11	179.30	32.05	59.71	6.87	24.53	4.35	0.99
岩性	样品编号	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δ Eu	Σ REE	LREE/ HREE	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	
流纹质熔结 凝灰岩 (晚期)	HS-11-2	7.28	1.28	7.70	1.56	4.66	0.79	5.19	0.74	0.15	251.12	7.60	4.12	1.16	
	HS-11-3	7.76	1.31	7.95	1.64	4.66	0.82	5.50	0.76	0.15	242.48	6.98	3.84	1.17	
	HS-11-4	7.41	1.30	7.81	1.60	4.68	0.79	5.24	0.75	0.16	243.86	7.24	3.93	1.17	
	HS-20-2	3.52	0.46	2.06	0.36	0.81	0.12	0.79	0.11	0.81	137.92	15.75	4.03	3.67	
流纹岩 (早期)	HS-20-3	3.34	0.44	1.96	0.32	0.79	0.12	0.72	0.10	0.79	137.33	16.64	4.12	3.84	
	HS-20-4	3.28	0.43	1.96	0.34	0.83	0.13	0.77	0.11	0.77	136.36	16.36	4.76	3.52	

A/CNK = $\text{mol}[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$; $\delta = [\text{w}(\text{N}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / \text{w}(\text{SiO}_2) - 43]$.

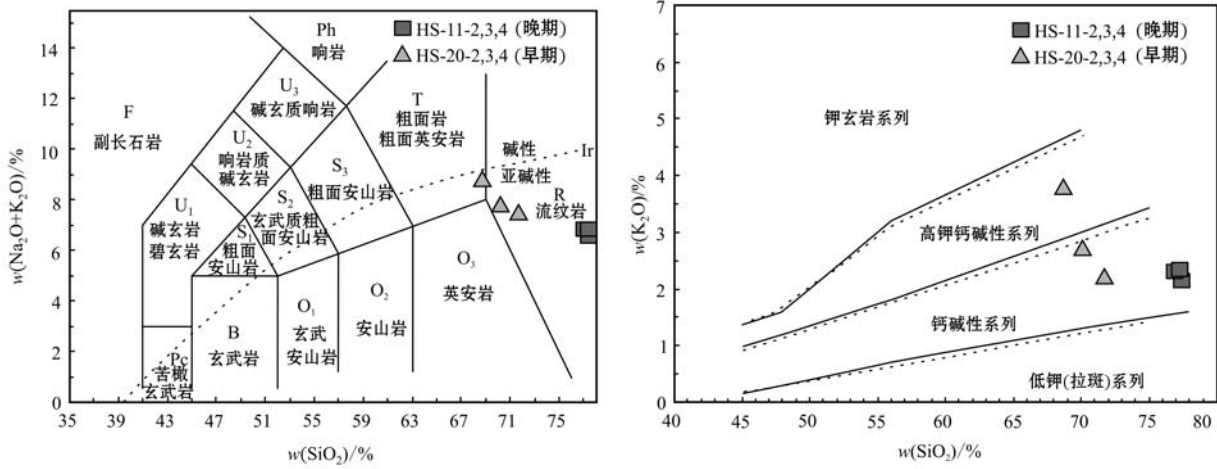


图 6 屯溪盆地火山岩的 TAS 分类图(据 Le Maitre, 1989)和 K_2O-SiO_2 图解(据 Peccerillo 和 Taylor, 1976)
 Fig. 6 TAS classification diagram (after Le Maitre, 1989) and K_2O-SiO_2 diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976) of volcanic rocks in Tunxi basin

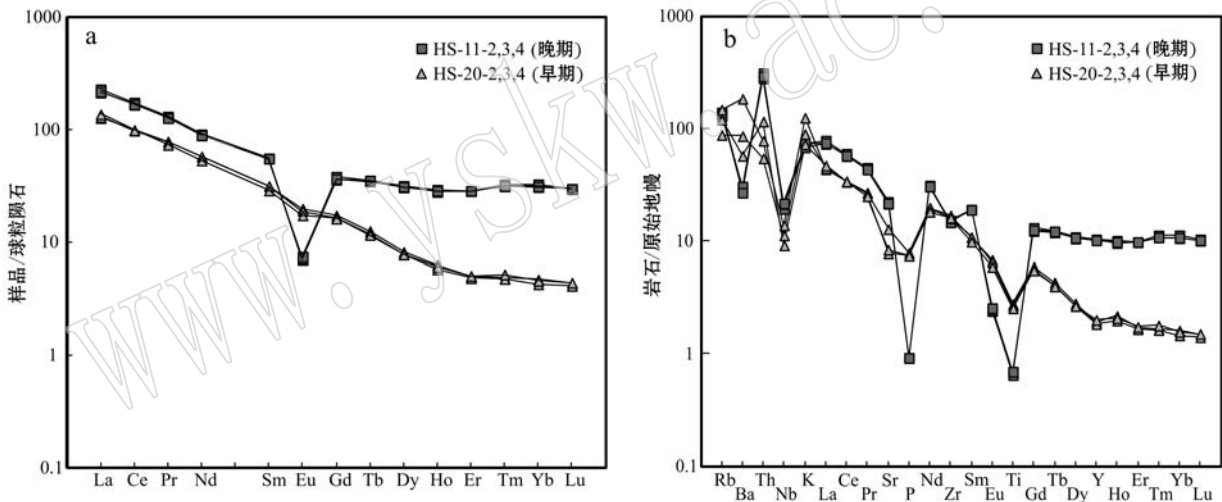


图 7 屯溪盆地火山岩稀土元素配分曲线以及微量元素蛛网(标准化数据来自 Sun 和 McDonough, 1989)
 Fig. 7 REE patterns and trace element spider diagram of volcanic rocks in Tunxi basin (after Sun and McDonough, 1989)

并且稀土元素分布型式为轻稀土元素较富集的平缓右倾型(图 7),其 ΣREE 为 $(242.48 \sim 251.12) \times 10^{-6}$, 平均值为 245.82×10^{-6} ; $LREE/HREE$ 值为 $6.98 \sim 7.60$, 平均值为 7.27 。 $(La/Sm)_N$ 值为 $3.84 \sim 4.12$, 平均值为 3.96 , $(Gd/Yb)_N$ 值为 $1.16 \sim 1.17$, 平均值为 1.17 , 说明样品轻稀土元素分馏比重稀土元素相对明显,但分馏程度都较弱。 δEu 值为 $0.15 \sim 0.16$, 平均值为 0.16 , 钕负异常明显,反映在稀土元素分布图上形成右倾斜的“V”型分布模式,并且指示岩浆演化过程中发生了较强的斜长石分离结晶作用。

4.2.3 微量元素

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7b)中,

可以看出两期火山岩整体相对富集大离子亲石元素和轻稀土元素,强烈亏损高场强元素 Nb、P、Ti。其中元素 P 的强烈亏损可能指示岩浆在演化过程中发生了较强的磷灰石的分离结晶作用。

5 讨论

5.1 屯溪盆地火山活动期次

根据 1:50 000 兰田、休宁县、屯溪幅区域地质调查报告,屯溪盆地中出露的晚中生代火山岩主要为时代跨越晚侏罗—早白垩世的石岭组。目前对该盆地火山岩的年代学研究,主要为安徽省地质勘查局

三三二地质队(1997)^①对该盆地3个火山岩样品采取的全岩和黑云母单矿物 K-Ar 测年法,测得年龄分别为 139.4 ± 1.6 Ma、 130.3 ± 1.3 Ma、 115.8 ± 1.2 Ma,并且以沉积含砾粉砂岩、砂砾岩的火山休眠期为界,将石岭组分为上下两段。本文对该盆地火山岩采取 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,样品 HS-08 的岩性为沉凝灰岩,所测年龄 155.8 ± 1.2 Ma 可能代表火山喷发的时间,也可能代表源区的形成年龄。由于样品 HS-08 的锆石以自形为主,磨圆差,且岩石薄片上未见搬运过程中卷入的其它岩石的岩屑,说明该岩石是由火山物质落入盆地中直接成岩而成,而未经过剥蚀、搬运、再沉积作用。同时结合样品 HS-20 所测年龄为 152.3 ± 1.3 Ma,认为样品 HS-08 所测年龄为火山喷发的时间。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果指示屯溪盆地中发育两期火山岩,分别形成于晚侏罗世(156~152 Ma)和早白垩世(136~130 Ma)。本文酸性火山岩具有不同的地球化学特征与构造背景(见下文)也很好地区佐证了屯溪盆地中发育两期火山岩活动。考虑到这两期火山活动时间相差 20 Ma 以上,并且屯溪盆地又是个小盆地,建议原石岭组应该解体。

5.2 与区域上火山活动的对比

区域上,位于江南隆起的江西德兴银山地区中侏罗世火山岩盆地和天目山盆地中酸性火山岩锆石 U-Pb 年龄分别为 176~166 Ma 和 135~133 Ma (Wang *et al.*, 2012; 王德恩等,2014)。结合屯溪盆地中发育的晚侏罗世和早白垩世火山岩,认为江南隆起上存在中侏罗世、晚侏罗世以及早白垩世 3 期火山岩活动。

皖南屯溪盆地位于 NE 向中下扬子火山岩带和 NNE 向中国东南部火山岩带的交接部位,其火山活动是类似于中下扬子火山岩带还是中国东南部火山岩带值得进一步讨论。首先,从火山活动期次方面来看,中下扬子火山岩带只发生过 136~123 Ma 一期短暂的白垩纪火山活动,而江南隆起上却发生了 176~166 Ma、~150 Ma 和 ~130 Ma 的 3 期火山活动,对应于中国东南部火山岩带在侏罗纪至早白垩世的多期火山活动。其次,从火山活动的时代来看,屯溪盆地发生了 ~150 Ma 这期火山活动,根据目前的研究资料这期火山活动仅发生于东南沿海地

区,例如在赣南东坑盆地流纹岩为 ~160 Ma (Shu *et al.*, 2009a),福建福安市社口南园组为 162~150 Ma (Li *et al.*, 2009),福建沿海为 ~155 Ma (徐先兵等,2014),广东都凌组火山岩年龄为 168~145 Ma (Guo *et al.*, 2012),香港大屿山组为 164~159 Ma (Davis *et al.*, 1997; Campbell *et al.*, 2007)。再者,从火山岩系列上来看,长江中下游火山岩多为高钾钙碱性系列(金牛、繁昌、滁州、溧阳盆地)和橄榄安粗岩系列(怀宁、庐枞、宁芜、溧水盆地),并且宁芜盆地的娘娘山组为碱性系列 (Wang *et al.*, 2006; 高晓峰等,2007; 禹尧等,2009; 周世卿等,2009; 薛怀民等,2010, 2013; Yuan *et al.*, 2011; 刘春等,2012),而本文火山岩却与中国东南沿海火山岩类似,主要为中、高钾钙碱性系列(周建等,2012)。因此,皖南屯溪盆地火山活动类似于中国东南部火山岩带。

5.3 火山活动的构造背景及其意义

由于两个火山岩样品富 SiO_2 (67.53% ~ 73.71%, 平均为 71.13%), 因此对样品进行了 Nb-Y 和 Rb-(Y+Nb) 构造环境判别投图 (Pearce *et al.*, 1984), 由图 8 可以看出, 年龄值为 ~150 Ma 的火山岩(样品 HS-20) 投于火山弧花岗岩区, 年龄值为 ~130 Ma 的火山岩(样品 HS-11) 投于火山弧花岗岩和板内花岗岩的边界上。此外, 两个火山岩样品都具有富集大离子亲石元素和轻稀土元素、强烈亏损高场强元素 Nb、Ti 的微量元素特征。这些地球化学特征可能指示屯溪盆地火山岩类似于中国东南部火山岩带, 受到太平洋板块俯冲作用的影响 (Hawkesworth *et al.*, 1995)。但是, 由于江南造山带是新元古代的大陆边缘弧, 沿着江南造山带存在新元古代洋壳的俯冲作用, 并且屯溪盆地火山岩基本上散布于盆地与新元古代地层接触带附近, 因此, 这些地球化学特征也可能说明该盆地火山岩与位于江南隆起的江西德兴银山地区火山岩类似, 火山岩的岩浆源区是新元古代新生地壳 (Wang *et al.*, 2012)。但无论是何种情况, 由于华南地区在中生代由特提斯构造域转换为太平洋构造域 (邢光福等, 2008; 张岳桥等, 2009; 徐先兵等, 2009; 舒良树, 2012), 对区域上的沉积作用、岩浆活动、变质作用、构造变形以及成矿过程等都产生了重大影响 (吴淦国等, 2000; Li *et al.*, 2010; Cui *et al.*, 2013), 因

① 安徽省地质勘查局三三二地质队, 1997. 1:50 000 兰田、休宁县、屯溪幅区域地质调查报告。

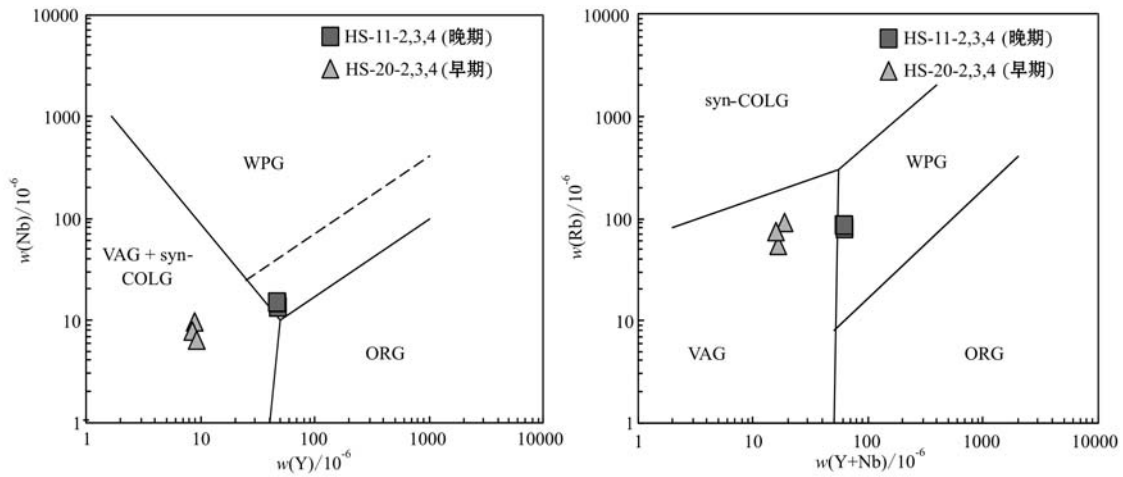


图 8 屯溪盆地火山岩的构造环境判别图(据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 8 Discrimination diagram for tectonic environment of volcanic rocks in Tunxi basin (after Pearce *et al.*, 1984)

WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩

WPG—intraplate granites; VAG—volcanic arc granites; syn-COLG—syn-collisional granites; ORG—ocean-ridge granites

此该盆地火山活动的构造环境应该与古太平洋板块的俯冲作用有关,只不过前者是受古太平洋板块俯冲的直接影 响,后者是受古太平洋板块俯冲的远场应力影响。

燕山早期由于古太平洋板块的俯冲作用,中国东部进入了挤压造山阶段,使区域上发育北东-北北东向褶皱(Dong *et al.*, 2007; 邢光福等,2008; 张岳桥等,2009),在屯溪盆地的东南缘发育北东向的边界逆冲断层和构造窗(图 1b),在野外地质调查中,可见新元古代板岩逆冲推覆于中侏罗统洪琴组紫红色砂泥岩之上,新元古代变质岩挠曲也指示逆冲作用(图 9a)。结合晚侏罗世(165~150 Ma)岩浆杂岩包含一些标志地壳增厚的强过铝质 S 型花岗岩(崔建军等,2013),推测屯溪盆地~150 Ma 的火山活动可

能形成于挤压环境。晚燕山期华南进入了后造山阶段,区域上广泛发育基性岩脉、A 型花岗岩、玄武岩浆底侵、双峰式火山岩等岩石学伸展构造标志和断陷盆地与正断层等伸展构造变形(Li, 2000; Li *et al.*, 2014; Xing *et al.*, 2004; 胡瑞忠等, 2007; Shu *et al.*, 2009b)。屯溪盆地的北部边界为正断层(图 1b),控制着白垩纪地层的沉积,并且在盆地北部的下白垩统徽州组紫红色中厚层粉砂岩内发育大量正断层(图 9b)。此外,原石岭组上段火山岩呈“双峰式”(安徽省地质调查局三三二地质队, 1997)^①,因此,屯溪盆地~130 Ma 的火山活动应形成于伸展环境。屯溪盆地挤压体制向伸展体制的转换,可能是古太平洋板块俯冲角度变化和俯冲板片后撤的结果(Zhou and Li, 2000; Li *et al.*, 2014)。

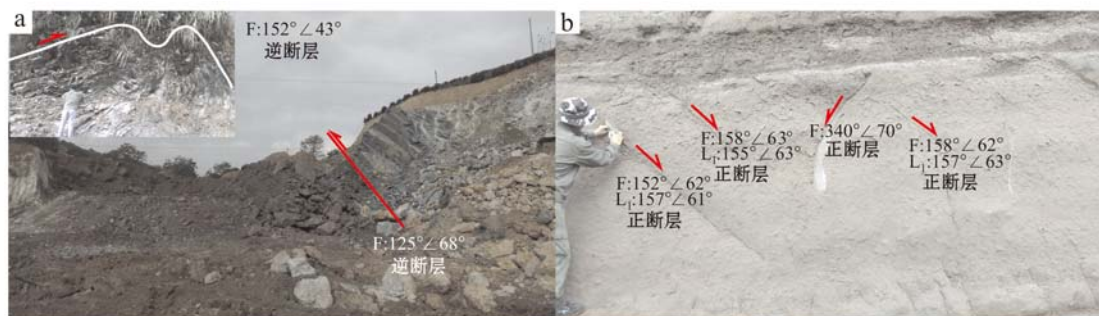


图 9 屯溪盆地中的正、逆断层

Fig. 9 Normal faults and thrust faults in Tunxi basin

① 安徽省地质调查局三三二地质队, 1997. 1:50 000 兰田、休宁县、屯溪幅区域地质调查报告.

6 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究表明皖南屯溪盆地发育两期火山岩: 早期形成于 156~152 Ma; 晚期形成于 136~130 Ma。

(2) 结合前人的资料, 认为皖南屯溪盆地的火山活动特征与中国东南部火山岩带类似, 由于古太平洋板块的俯冲角度变化和俯冲板片后撤作用, 盆地内两期火山活动分别形成于挤压和伸展的构造环境。

致谢 安徽省地质勘查局三三二地质队王德恩高级工程师在野外地质工作中给予大力协助, 匿名审稿人提出客观的、建设性的意见, 提高了本文质量, 作者受益颇深, 在此一并致谢!

References

- Andersen T. 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.
- Campbell S D G, Sewell R J, Davis D W, *et al.* 2007. New U-Pb age and geochemical constraints on the stratigraphy and distribution of the Lantau Volcanic Group, Hong Kong[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(2): 139~152.
- Charvet J, Lapiere H and Yu Y. 1994. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of southeastern China[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 387~396.
- Chen Peirong, Hua Renmin, Zhang Bangtong, *et al.* 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region—Petrological constraints and geodynamic settings[J]. *Science in China (series D)*, 32(4): 279~289(in Chinese).
- Chen Peirong, Kong Xinggong, Wang Yinxi, *et al.* 1999. Rb-Sr isotopic dating and significance of early Yanshanian bimodal volcanic-intrusive complex from south Jiangxi Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(4): 378~383 (in Chinese with English abstract).
- Cui Jianjun, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, *et al.* 2013. Zircon U-Pb geochronology of the Mesozoic metamorphic rocks and granitoids in the coastal tectonic zone of SE China: Constraints on the timing of Late Mesozoic orogeny[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 237~252.
- Cui Jianjun, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, *et al.* 2013. Late Mesozoic orogenesis along the coast of Southeast China and its geological significance[J]. *Geology in China*, 40(1): 86~105 (in Chinese with English abstract).
- Davis D W, Sewell R J and Campbell S D G. 1997. U-Pb dating of Mesozoic igneous rocks from Hong Kong[J]. *Journal of the Geological Society*, 154(6): 1067~1076.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, *et al.* 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the "Yanshan Movement"[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 334~347.
- Gao Jianfeng, Lu Jianjun, Lai Mingyuan, *et al.* 2003. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 39(6): 844~850 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xiaofeng, Guo Feng, Li Chaowen, *et al.* 2007. The genesis of two types of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin, Lower Yangtze valley[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, *et al.* 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons[J]. *Precambrian Research*, 131(3~4): 231~282.
- Guo Feng, Fan Weiming, Li Chaowen, *et al.* 2012. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces[J]. *Lithos*, 150: 62~84.
- Hawkesworth C J, Turner S, Gallagher K, *et al.* 1995. Calc-alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the Basin and Range[J]. *Journal of Geophysical Research*, 100: 10271~10286.
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, *et al.* 2007. Some Problem Concerning Relationship between Mesozoic-Cenozoic Lithospheric Extension and Uranium Metallogenesis in South China[J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 139~152 (in Chinese with English abstract).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, *et al.* 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1~2): 47~69.
- Jahn B M, Zhou X H and Li J L. 1990. Formation and tectonic evolution of Southeastern China and Taiwan: isotopic and geochemical constraints[J]. *Tectonophysics*, 183(1~4): 145~160.
- Lapiere H, Jahn B M, Charvet J, *et al.* 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China

- [J]. *Tectonophysics*, 274 (4): 321~338.
- Le Matire R W. 1989. *A classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*[M]. Oxford: Blackwell Sci. Pub., 1~31.
- Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, *et al.* 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 134: 98~136.
- Li L M, Sun M, Xing G F, *et al.* 2009. Two late Mesozoic volcanic events in Fujian Province: constraints on the tectonic evolution of southeastern China[J]. *International Geology Review*, 51(3): 216~251.
- Li Xianhua. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(2000): 293~305.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Wang Xuance, *et al.* 2010. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, eastern China: magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension[J]. *Lithos*, 119(3): 427~438.
- Li Zhengxiang and Li Xianhua. 2007. Formation of the 1 300 km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 35 (2): 179~182.
- Ling Mingxing, Wang Fanyue, Ding Xing, *et al.* 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China [J]. *Economic Geology*, 104(2): 303~321.
- Liu Chun, Yan Jun, Song Chuazhong, *et al.* 2012. Geochronology and geochemistry of the volcanic rocks from Fanchang basin in the Middle Lower Yangtze River: Petrogenesis and geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3 228~3 240 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z, *et al.* 2010a. 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[J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1): 34~43.
- Liu Y S, Hu Z, Gao C, *et al.* 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 535~1 546.
- Ludwig K R. 2003. *User's manual for Isoplot/EX Version 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel* [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1~70.
- Ma Fang and Xue Huaimin. 2011. SHRIMP zircon U-Pb age of late Mesozoic volcanic rocks from the Chuzhou basin, eastern Anhui Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(5): 924~934 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy*, 58(1): 63~81.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1 035~1 053 (in Chinese with English abstract).
- Shu L S, Wang Y, Sha J G, *et al.* 2009a. Jurassic sedimentary features and tectonic settings of southeastern China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(12): 1 969~1 978.
- Shu L S, Zhou X M, Deng P, *et al.* 2009b. Mesozoic Tectonic Evolution of the Southeast China Block: New Insights from Basin Analysis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 376~391.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological, London, Special Publication*, 42(1): 313~345.
- Sun Weidong, Ding Xing, Hu Yanhua, *et al.* 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3~4): 533~542.
- Wang De'en, Zhang Yuanshuo, Gao Ran, *et al.* 2014. Zircon LA-ICP-MS dating of volcanic rocks from Tianmushan basin in the lower Yangtze region and its geological significances[J]. *Resources Survey and Environment*, 35(3): 178~184 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guoguang, Ni Pei, Zhao Kuidong, *et al.* 2012. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic-intrusive complex, SE China: Implications for tectonic evolution and Cu-Au mineralization[J]. *Lithos*, 150: 135~154.
- Wang Lijuan, Huang Jianping, Yu Jinhai, *et al.* 2014. Zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope study of intermediate -mafic sub-volcanic and intrusive rocks in the Lishui Basin in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(14): 1 305~1 317 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Wyman D A, Xu Jifeng, *et al.* 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynam-

- ics and Cu-Au mineralization[J]. *Lithos*, 89(3~4): 424~446.
- Wu Ganguo and Zhang Da. 2000. Southeastern China continental Mesozoic tectonic domain transformation and its relationship with mineralization—a case study in southwestern Fujian Province[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 390~396(in Chinese).
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Xiongwei, *et al.* 2011. Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the Jinniu basin, Middle-Lower Yangtze River Belt (YRB), East China: age, petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 127(1): 144~164.
- Xie Xin, Xu Xisheng, Zou Haibo, *et al.* 2005. The prelude of Mesozoic large magmatic processes in southeast China: early J₂ basalt[J]. *Science in China(series D)*, 35(7): 587~605(in Chinese).
- Xing Guangfu, Lu Qingdi, Chen Rong, *et al.* 2008. Study on the Ending Time of Late Mesozoic Tectonic Regime Transition in South China—Comparing to the Yanshan Area in North China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 451~463(in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Chen Rong, *et al.* 2004. Three stages of Mesozoic bimodal igneous rocks and their tectonic implications on the continental margin of southeastern China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 78(1): 27~39.
- Xu Xianbing, Li Yuan, Xue Dejie, *et al.* 2014. Deformation characteristics and Geochronological constraints of Late Mesozoic Extensional Structures in Quanzhou, Fujian Province[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(1): 45~63(in Chinese with English abstract).
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao and Jia Dong. 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. *Geology in China*, 26(3): 573~593(in Chinese with English abstract).
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, *et al.* 2011. U-Pb dating of volcanic rocks and granites along the Wuyishan Belt: Constraints on tuning of Late Mesozoic tectonic events in Southeast China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 85(1): 130~144.
- Xu Xisheng. 2008. Several problems worthy to be noticed in the research of granites and volcanic rocks in SE China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 283~294(in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen and Ma Fang. 2010. Shoshonitic volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province (eastern China): geochemical and isotopic constraints on Cretaceous lithospheric thinning of the lower Yangtze region[J]. *Chinese Journal of Geology*, 84(5): 664~681 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Ma Fang, Guan Haiyan, *et al.* 2013. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in Huaining basin in comparison with other basins in the middle-lower Yangtze region[J]. *Geology in China*, 40(3): 694~714 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jun, Chen Jiangfeng, Xu Xisheng, *et al.* 2008. Geochemistry of Cretaceous mafic rocks from the Lower Yangtze region, eastern China: characteristics and evolution of the lithospheric mantle[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(3): 177~193.
- Yan Jun, Liu Haiquan, Song Chuanzhong, *et al.* 2009. Zircon U-Pb geochronology of the volcanic rocks from Fanchang-Ningwu volcanic basins in the Lower Yangtze region and its geological implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(16): 2 895~2 904.
- Yan Jun, Shi Lei, Liu Jianmin, *et al.* 2013. Zircon LA-ICPMS Dating of the Volcanic Rocks from Huaining Basin in the Middle-Lower Yangtze Valley[J]. *Geological Review*, 59(6): 1 218~1 226(in Chinese with English abstract).
- Yu Xinqi and Wang De'en. 2001. Jurassic-cretaceous sequence stratigraphy of Huangshan area in south Anhui[J]. *Geoscience*, 15(1): 27~34 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yao and Xu Xisheng. 2009. Cretaceous alkali-rich magmatism in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Earth Science*, 34(1): 105~116(in Chinese with English abstract).
- Yuan Feng, Zhou Taofa, Liu Jun, *et al.* 2011. Petrogenesis of volcanic and intrusive rocks of the Zhuangqiao stage, Luzong Basin, Yangtze metallogenic belt, East China: implications for ore Deposition[J]. *International Geology Review*, 53(5~6): 526~541.
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, *et al.* 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234~247(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jian, Xu Shanfa and Chi Qinghua, *et al.* 2012. Geochemical characteristics of the Mesozoic volcanic belt in southeast coast of China [J]. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 93~100(in Chinese with English abstract).
- Zhou Shiqing, Li Xiongwei and Wang Guohu. 2009. Volcanic rock origin and tectonic environment in Jinniu volcanic rock Basin, Hubei province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 23(4): 383~389(in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Fan Yu and Yuan Feng. 2011. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu Basin of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(2): 185~196.
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, *et al.* 2008. Geochronology of the

- volcanic rocks in the Lu-Zong basin and its significance[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(10): 1470~1482.
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng. 2011. Petrogenesis and Metallogeny Study of the Volcanic Basins in the Middle and Lower Yangtze Metallogenic Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 85(5): 712~730 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin and Li Wuxian. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. Tectonophysics, 326(3~4): 269~287.
- Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, *et al.* 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. Episodes, 29(1): 26~33.
- ### 附中文参考文献
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. 中国科学(D辑), 32(4): 279~289.
- 陈培荣, 孔兴功, 王银喜, 等. 1999. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入杂岩的 Rb-Sr 同位素定年及意义[J]. 高校地质学报, 5(4): 378~383.
- 崔建军, 张岳桥, 董树文, 等. 2013. 华南陆缘晚中生代造山及其地质意义[J]. 中国地质, 40(1): 86~105.
- 高剑锋, 陆建军, 赖鸣远, 等. 2003. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 39(6): 844~850.
- 高晓峰, 郭锋, 李超文, 等. 2007. 溧水盆地两类晚中生代中酸性火山岩的岩石成因[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 1~12.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 等. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. 矿床地质, 26(2): 139~152.
- 刘春, 闫峻, 宋传中, 等. 2012. 长江中下游繁昌盆地火山岩年代学和地球化学: 岩石成因和地质意义[J]. 岩石学报, 28(10): 3228~3240.
- 马芳, 薛怀民. 2011. 皖东滁州盆地晚中生代火山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(5): 924~934.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035~1053.
- 王德恩, 张元朔, 高冉, 等. 2014. 下扬子天目山盆地 LA-IC-PMS 定年及其地质意义[J]. 资源调查与环境, 35(3): 178~184.
- 王丽娟, 黄建平, 于津海, 等. 2014. 长江中下游溧水盆地中基性次火山岩-侵入岩的锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素[J]. 科学通报, 59(14): 1305~1317.
- 吴淦国, 张达. 2000. 中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系——以闽西南地区为例[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 25(4): 390~396.
- 谢昕, 徐夕生, 邹海波, 等. 2005. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J₂ 早期玄武岩[J]. 中国科学(D辑), 35(7): 587~605.
- 邢光福, 卢清地, 陈荣, 等. 2008. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山地区对比[J]. 地质学报, 82(4): 451~463.
- 徐夕生. 2008. 华南花岗岩-火山岩成因研究的几个问题[J]. 高校地质学报, 14(3): 283~294.
- 徐先兵, 李源, 薛德杰, 等. 2014. 福建泉州晚中生代伸展构造变形特征与年代学制约[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 39(1): 45~63.
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 2009. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 26(3): 573~593.
- 薛怀民, 董树文, 马芳. 2010. 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扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的约束[J]. 地质学报, 84(5): 664~681.
- 薛怀民, 马芳, 关海燕, 等. 2013. 怀宁盆地火山岩的年代学, 地球化学及与长江中下游其他火山岩盆地的对比[J]. 中国地质, 40(3): 694~714.
- 闫峻, 史磊, 李全忠, 等. 2013. 长江中下游地区怀宁盆地火山岩锆石 LA-ICPMS 定年[J]. 地质论评, 59(6): 1218~1226.
- 余心起, 王德恩. 2001. 安徽黄山地区侏罗纪-白垩纪层序地层学特征[J]. 现代地质, 15(1): 27~34.
- 禹尧, 徐夕生. 2009. 长江中下游地区白垩纪富碱火山岩浆作用[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 34(1): 105~116.
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录[J]. 地学前缘, 16(1): 234~247.
- 周建, 徐善法, 迟清华, 等. 2012. 东南沿海中生代火山岩带地球化学特征[J]. 地学前缘, 19(3): 93~100.
- 周世卿, 李雄伟, 汪国虎. 2009. 湖北金牛火山岩盆地火山岩成因及构造环境[J]. 资源环境与工程, 23(4): 383~389.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J]. 地质学报, 85(5): 712~730.