

皖南屯溪盆地晚中生代火山岩 成因及其构造意义

胡怡萌, 闫峻, 陶克勤, 徐琳玉, 刘群

合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009



内容提要:皖南屯溪盆地位于江南造山带东段,出露中酸性石岭组火山岩,早阶段主要为流纹质凝灰岩与粗安质角砾岩,锆石 U-Pb 定年结果分别为 150.8 ± 2.8 Ma 和 156.1 ± 2.6 Ma,形成于晚侏罗世,是皖南地区中生代时期最早阶段的岩浆活动。两种岩石均表现出富 Si、K,低 Mg 的特征,为高钾钙碱性系列,稀土元素分布型式为右倾型,呈弱的 Eu 负异常,富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素。同时岩体具有较高的 Sr、Sr/Y 和 $(La/Yb)_N$ 值,为高锶低钇中酸性岩(Adakite,埃达克岩)的特征。 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化范围为 $-6.36 \sim -4.92$,锆石 Ti 温度计得出的两种岩石形成平均温度分别为 763℃ 和 795℃,粗安质角砾岩略高,总平均温度为 785℃。结合岩石地球化学特征和区域地质资料,表明屯溪盆地石岭组火山岩起源于壳幔岩浆混合,壳源岩浆为新元古代沉积岩源区部分熔融的产物,幔源岩浆来源于受到俯冲板块析出物质交代的地幔,与皖南花岗闪长岩存在同期、同源,以及大尺度上同构造单元的耦合关系,广义上属于一套火山—侵入杂岩系统。基于此,皖南地区中生代岩浆活动以石岭组火山岩以及小型中酸性侵入岩为开始,与而后以大岩基形式产出的二长花岗岩体和双峰式火山岩和最后发育的具有 A 型特征的钾长花岗岩构成时间上从早到晚的 3 个阶段,体现了古太平洋板块低角度俯冲、后撤、较低角度俯冲的构造演化过程。

关键词:石岭组火山岩;皖南;屯溪盆地;晚侏罗世;地球化学;Sr—Nd 同位素

岩浆作用的产物包括火山岩和侵入岩。在同一的构造环境和动力学背景下,岩浆是喷发形成火山岩,还是侵入形成侵入岩,受到多种因素控制,包括挤压或拉张的区域应力格局、地壳厚度、地壳热状态、岩浆通量、结晶速率和挥发分含量等(Richards, 2003; Bachmann and Huber, 2016)。对于具有同时、同源和同空间的火山岩和侵入岩,可以定义为火山—侵入杂岩(王德滋等,2000),其中的火山岩和侵入岩之间的成因联系受到广泛关注,存在不同的观点和争议:包括火山岩是穿壳岩浆房晶粥中抽离的熔体喷发形成的,火山岩和侵入岩具有成分上的互补关系(Bachmann and Huber, 2016);火山岩是独立于侵入岩的岩浆喷出形成的,两者之间不存在物质上的成因关系(Glazner et al., 2015)。实际研究表明,这两种情况都存在,东南沿海广泛发育燕山期火山—侵入杂岩系统,广泛存在晶粥—熔体成因的火山—侵入杂岩(Liang Changhong et al., 2022; Shi Hongyang et al., 2022)。而长江中下游地区宁

芜、溧阳火山盆地内火山岩和花岗质侵入岩,虽然同时和同空间产出,但并非同源(Qian Lin et al., 2022)。另外,相对于侵入岩,火山岩发育往往与拉张的构造背景关系更加密切(Brown, 1994; Vigneresse and Tikoff, 1999),这也反映在长江中下游燕山期岩浆活动以从早到晚发育侵入岩、火山岩到侵入岩,火山岩或火山—侵入杂岩总是发育在强烈拉张的背景下(Yan Jun et al., 2015, 2021; 杨文采, 2023)。因此,从同一构造环境下岩浆幕的角度,探讨火山岩与侵入岩之间的时空和成因关系,对理解深部过程和构造背景演化可提供进一步的信息。

下扬子的长江中下游地区发育众多燕山期火山岩盆地,自西向东包括金牛、怀宁、庐枞、繁昌、宁芜、滁州、溧水和溧阳等火山岩盆地,火山活动集中在 132~128 Ma(闫峻等,2009;侯可军和袁顺达,2010; Chen Long et al., 2014;王丽娟等,2014;刘建敏等,2016;薛怀民,2016),而下扬子的江南造山带东段以出露大面积的花岗岩基为特色,火山岩仅在浙西北

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42030801)的成果。

收稿日期:2025-02-11;改回日期:2025-06-09;网络首发:2025-06-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.06.055

作者简介:胡怡萌,女,1999年生,硕士研究生,矿物学岩石学矿床学专业;Email: yimeng1927@126.com。通讯作者:闫峻,男,1966年生,博士,教授;主要从事岩浆岩岩石学和地球化学教学和科研;Email: junyan@hfut.edu.cn。

的天目山盆地较为发育,而在屯溪盆地的火山岩断续残留出露。天目山火山岩喷发时代和长江中下游地区高度统一,集中在 130 Ma 左右,而屯溪盆地中石岭组火山岩赋存于巨厚沉积岩序列中,已有锆石测年结果显示存在两期火山活动,分别为晚侏罗世和早白垩世(Zhao Liang et al., 2016; 汤帅等,2016; 余心起等,2016; 张建芳等,2018),而对应时代的侵入岩均有发育(Yue Qian et al., 2020; 汪相,2022),这为探索本地区燕山期早阶段岩浆作用及其构造背景演化提供了契机。针对目前对屯溪盆地早阶段火山岩成因研究的不足,本次工作对其开展了岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学、全岩和矿物地球化学的综合研究,以期对屯溪盆地火山活动时限、岩石成因以及构造背景演化提供新的制约。

1 地质背景与样品描述

1.1 地质背景

以常州—阳新断裂为界,下扬子划分为北部的长江中下游地区和南部的江南造山带两个构造单元,后者包括皖南地区。江南造山带是由扬子地块和华夏地块在新元古代沿江山—绍兴断裂带拼合形成,其西北侧发育长江中下游火山岩带,东南侧发育东南沿海火山岩带。在造山带北东段(浙西北—皖南地区)发育一系列呈 NE 向分布的中生代火山岩盆地,包括浙西北寿昌盆地、天目山盆地以及皖南屯溪盆地等。由于地壳隆升,大多都遭受剥蚀成为残留盆地(丁炳华等,2008; Zheng Yongfei et al., 2006; 薛怀民等,2010; Zhang Yuzhi et al., 2013; 张建芳等,2018)。皖南屯溪盆地为安徽黄山地区内

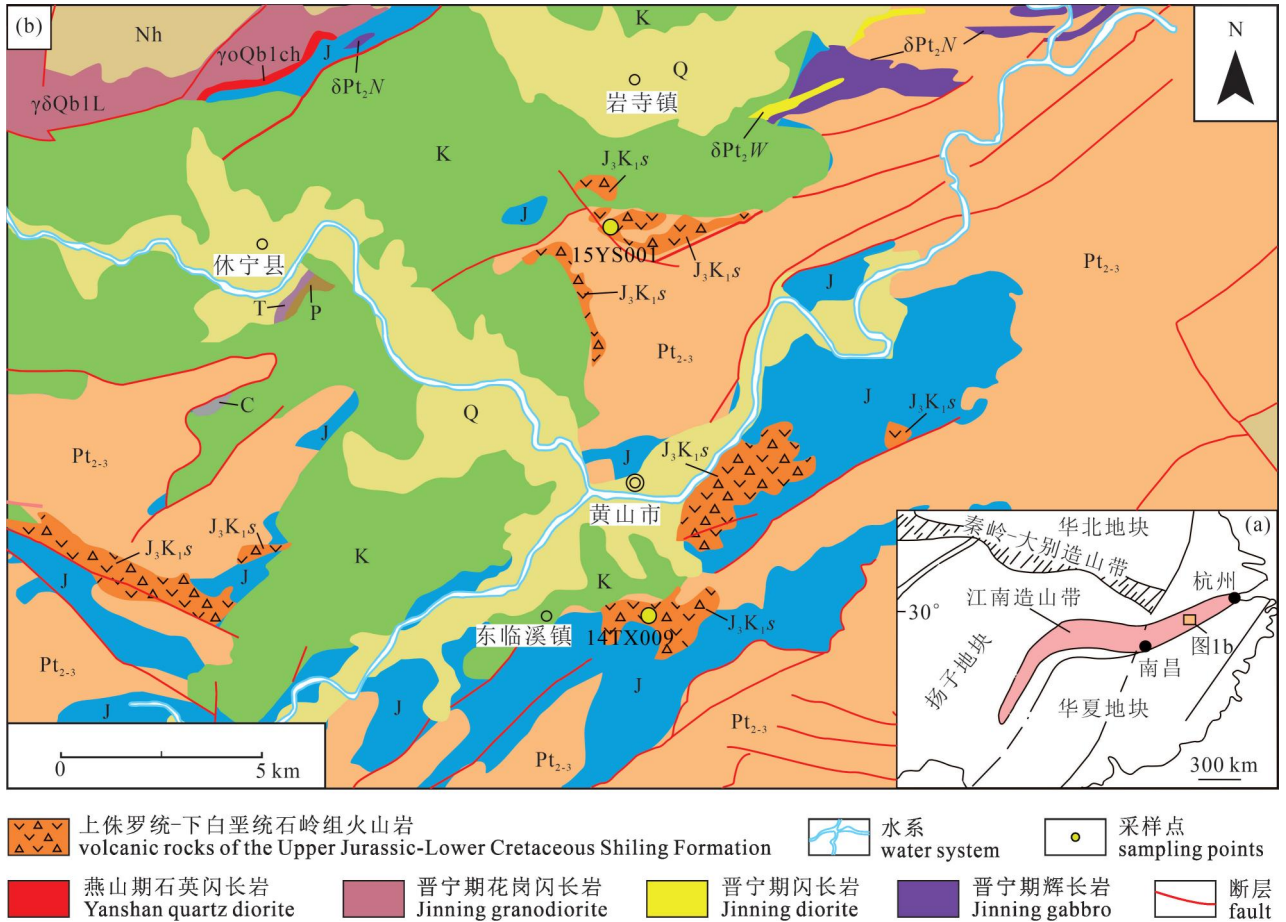


图 1 (a) 区域构造简图(据余心起等,2016 修改);(b) 皖南屯溪盆地地质简图(据 1 : 25 万地质图^①修改)
 Fig. 1 (a) Regional tectonic map (modified from Yu Xinqi et al., 2016&); (b) geological sketch map of the Tunxi Basin in southern Anhui (modified from 1 : 250000 Geological Map^①)
 Q—第四系;K—白垩系;J—侏罗系;T—三叠系;P—二叠系;C—石炭系;Nh—南华系;Pt₂₋₃—中—新元古界
 Q—Quaternary strata; K—Cretaceous strata; J—Jurassic strata; T—Triassic strata; P—Permian strata;
 C—Carboniferous strata; Nh—South China strata; Pt₂₋₃—Meso—Neoproterozoic stratigraphy

的中生代盆地,也被称为屯溪—休宁盆地,面积约为 660 km²,为侏罗纪—白垩纪火山断陷盆地。盆地内出露地层主要由晚中生代沉积岩和火山岩组成,沉积地层包含了侏罗系下侏罗统月潭组、中侏罗统洪琴组、上侏罗统炳丘组,以及白垩系下白垩统岩塘组和徽州组、上白垩统齐云山组和小岩组,均为陆相碎屑岩沉积,地层中火山岩角度不整合于侏罗系之上,称之为上侏罗统一下白垩统石岭组火山岩,残留零星分布于盆地的北部、东南部和西部(图 1)。屯溪盆地周边被新元古界—寒武系所围绕,多呈断层或角度不整合接触(余心起和王德恩,2001)。

屯溪盆地上侏罗统一下白垩统石岭组火山岩主要分布于屯溪东部、岩寺庄屋和休宁黄村一带,分为上、下两段,其间存在沉积间断。上、下两段岩性变化较大,下段主要由安山岩、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,为中性至酸性的火山岩,厚度约 294.6 m;上段主要为流纹岩、流纹质熔结凝灰岩以及基性玄武岩,具有双峰式喷发特征,厚度约 221.2 m(余心起和王德恩,2001;汤帅等,2016;余心起等,2016)。对于区内火山岩喷发时代的定年结果确定了上、下两段火山岩的喷发时限分别为 156~152 Ma 和 139~115 Ma(任鑫鑫等,2015;汤帅等,2016;余心起等,2016)。本次工作针对下段的石岭组早阶段火山岩开展研究。

1.2 样品描述

样品均采自皖南屯溪盆地中(图 1)。

样品(14TX009)采自黄山市榆村至屯溪县道旁,流纹质凝灰岩不整合于上侏罗统炳丘组砂砾岩之上(图 2a,b)。出露岩石遭受较强的风化作用,样品为青灰色—浅紫红色等斑杂色,斑状结构,含有约

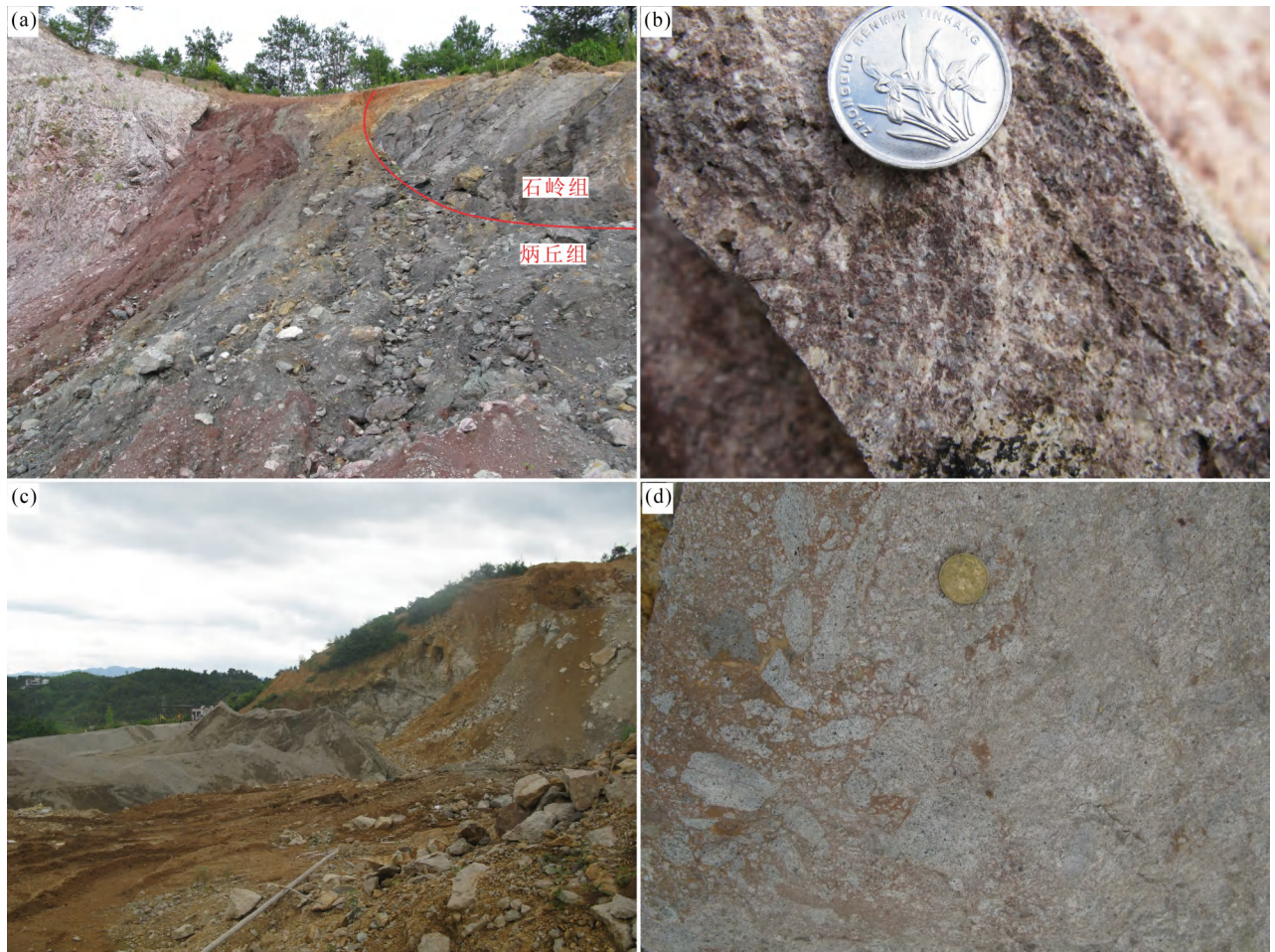


图 2 皖南屯溪盆地上侏罗统石岭组早阶段火山岩野外照片:(a) 流纹质凝灰岩喷发不整合于上侏罗统炳丘组紫红色砂砾岩之上;(b) 斑杂色英安质晶屑熔结凝灰岩;(c) 粗安质角砾岩野外露头;(d) 粗安质角砾岩

Fig. 2 Field photographs of early volcanic rocks of the Upper Jurassic Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui: (a) the rhyolitic tuff eruption is unconformable to the purple conglomerate of the Upper Jurassic Bingqiu Formation; (b) speckled variegated cyanthitic crystalline fused tuff; (c) coarse ankle breccia outcropping in the field; (d) coarse andemic breccia

5%的次棱角状岩屑,岩屑由长石、黑云母和石英组成。斑晶主要为半自形到他形的长石(3%~7%),黑云母(4%~8%)和石英(1%~3%),斑晶黑云母可见溶蚀结构。基质为斜长石(25%~35%)、钾长石(30%~40%)和石英(25%~35%),风化强烈(图3a、b),定名为黑云母晶屑流纹质凝灰岩。

样品(15YS001)采自黄山市岩寺镇西南,露头呈浅灰—紫红斑杂色,含有大量角砾,大小不一,大者直径可达20 cm以上,小者小于1 cm,多在2~8 cm,分布不均,含量在50%~80%,椭圆状为主(图2c、d)。角砾的成分较为单一,基本为细小的英安质,由长石、黑云母和石英组成,斑状结构,斑晶为黑云母和长石。胶结物为流纹质火山灰(图3c、d)。

定名为粗安质角砾岩。

2 分析方法

全岩无污染粉碎在河北诚信地质服务有限公司完成。主量元素和微量元素分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素通过X射线荧光熔片法(XRF)测定,所用仪器为荷兰PANalytical型X-射线荧光光谱仪,各项元素的分析相对误差分别为:SiO₂:0.8%;Al₂O₃:0.5%;Fe₂O₃:0.4%;MgO:0.4%;CaO:0.6%;Na₂O:0.3%;K₂O:0.4%;MnO:0.7%;TiO₂:0.9%;P₂O₅:0.8%。微量元素分析采用HF+HNO₃密封消解法,加入Rh内标溶液后用ICP-MS测定,仪器为PE Elan6000型电感耦合等离子质

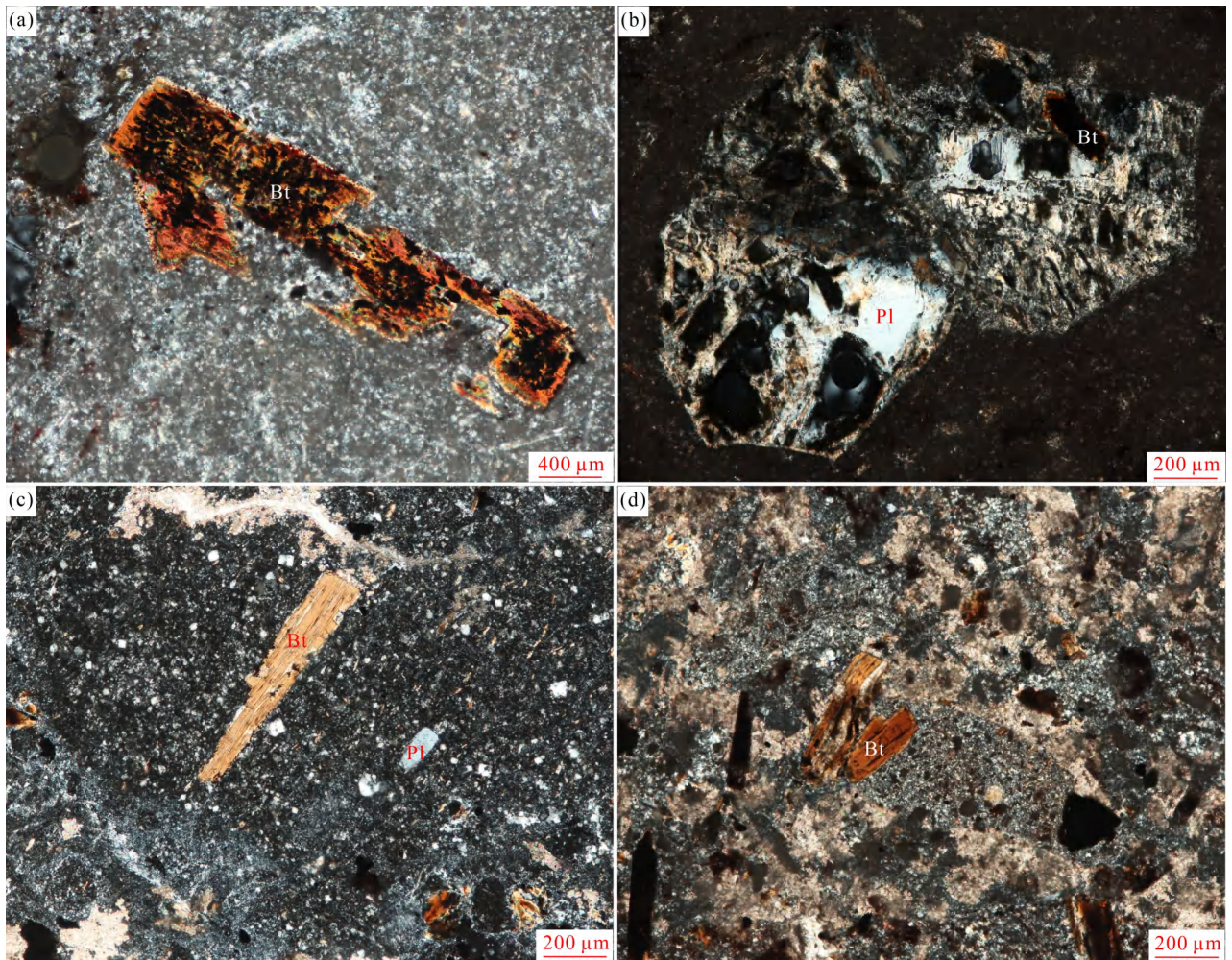


图3 皖南屯溪盆地上侏罗统石岭组早阶段火山岩显微照片:(a) 流纹质凝灰岩,斑状结构,黑云母斑晶,溶蚀结构;(b) 流纹质凝灰岩中岩屑,由长石、黑云母和石英组成;(c)、(d) 粗安质角砾岩,角砾多呈椭圆状,含有黑云母和长石斑晶

Fig. 3 Photomicrographs of volcanic rocks of the early Upper Jurassic Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui: (a) rhyolite tuff, porphyry structure, porphyry biotite, dissolution structure; (b) lithic cuttings in rhyolite tuff, composed of feldspar, biotite, and quartz; (c) (d) coarse andesitic breccia, breccia mostly elliptical, containing biotite and feldspar porphyry

Bt—黑云母;Pl—斜长石 Bt—biotite; Pl—plagioclase

谱仪,分析相对误差小于 10%。全岩 Sr、Nd 同位素比值分析在中国科学技术大学化学地球动力学实验室测定,分析流程参考文献(Foland and Allen, 1991)。黑云母成分分析在合肥工业大学资源与环境工程学院电子探针室完成,所用电子探针仪器型号为 JEOLJXA-8230。实验工作条件为:加速电压 15 kV,束斑尺寸 5 μm ,探针电流 20 nA,检出限为 0.02%。所有元素信号采集时间均为 15 s,背景时间均为 5 s,修正方法 ZAF。经过单矿物分离后,挑选代表性锆石颗粒制靶,阴极发光(CL)照相在中科院地质与地球物理研究所扫描电镜室完成。锆石 U-Pb 定年和微量元素分析在合肥工业大学资源与环境工程学院质谱实验室完成,激光剥蚀系统为 CetacAnalyte HE,等离子质谱仪 ICP-MS 为 Agilent 7900,测试中使用锆石标样 91500 进行同位素分馏校正,测试结果中选取谐和度>90%的测试点进行数据分析,并采用 ICPMSDataCal 9.0 软件和 Isoplot 软件处理数据,绘制谐和图并计算加权平均年龄。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

本次所测样品中锆石颗粒大多数无色透明,自形至半自形,长度在 100~150 μm ,其中部分锆石发育振荡韵律环带(图 4),自形程度较好,为典型岩浆成因锆石,本次研究均选取此类锆石进行测年分析。对流纹质凝灰岩(14TX009)的 28 颗锆石进行了分析,Th 含量为 $113\times 10^{-6}\sim 1239\times 10^{-6}$,U 含量为 $103\times 10^{-6}\sim 1778\times 10^{-6}$,Th/U 值为 0.18~0.57(表 1)。部分锆石测点显示古老的年龄,指示其为继承锆石,4 个测点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 $800\pm 19\text{ Ma}$ ($MSWD=0.14$),另有部分锆石测点偏离谐和曲线。选取 10 个谐和和年龄值较集中的测试点,其 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 $150.8\pm 2.8\text{ Ma}$ ($MSWD=1.7$)。

粗安质角砾岩两个样品分别进行了锆石分选(15YS001-2,15YS001-6),其中前者对 50 颗锆石进

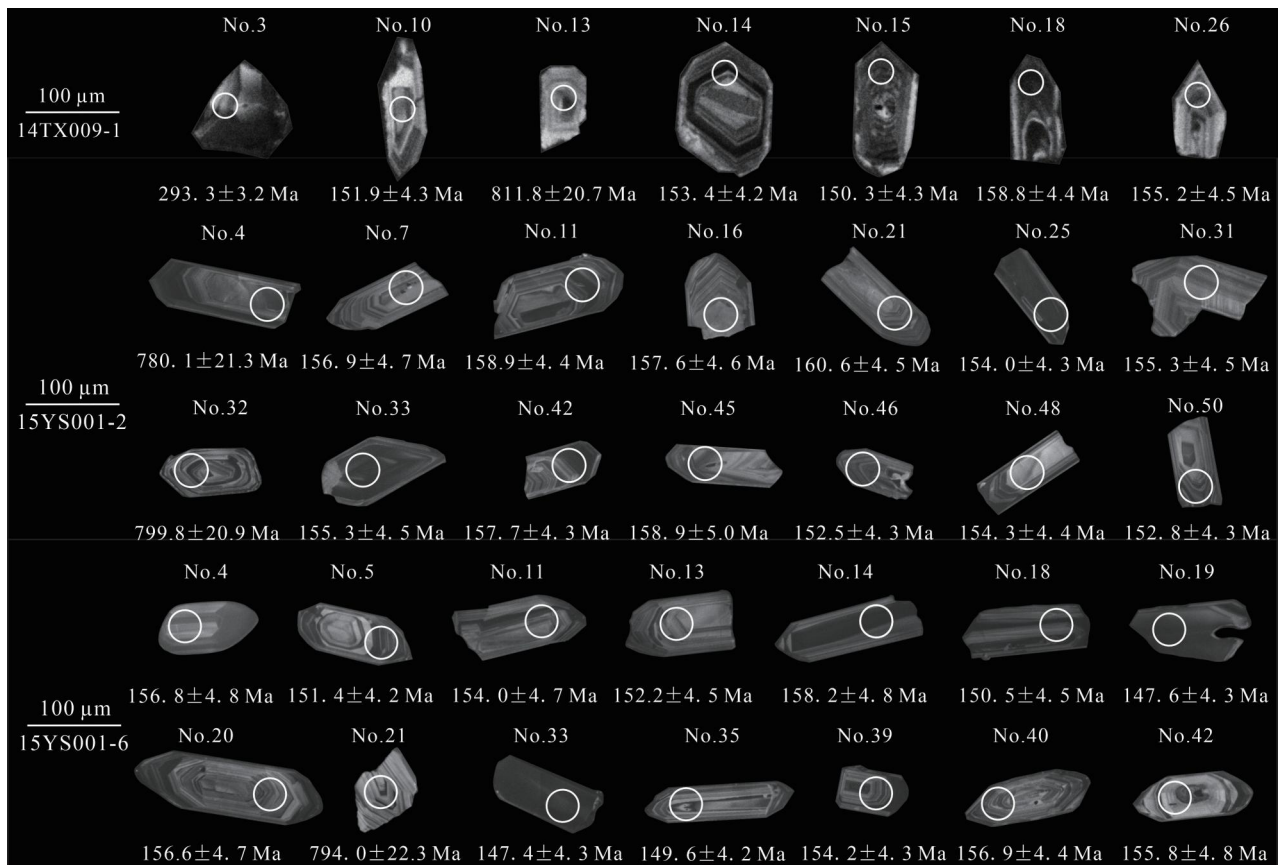


图 4 皖南屯溪盆地石岭组上侏罗统早阶段火山岩部分锆石样品的阴极发光 (CL) 图像
Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) image of a partial zircon samples from the early volcanic rock of the Upper Jurassic Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui

白色圆圈代表 U-Pb 同位素分析点位置,数值为测试结果

The white circles represent the U-Pb isotopic analysis location and the values are the test results

行了分析, Th 含量为 $24 \times 10^{-6} \sim 1239 \times 10^{-6}$, U 含量为 $103 \times 10^{-6} \sim 1535 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.03~1.04。去除部分偏离谐和曲线的锆石测点和继承锆石测点, 选取了 12 个谐和年龄值较集中的测点, 得到 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 $156.1 \pm 2.6 \text{ Ma}$ ($MSWD=0.35$)。其中存在 18 颗继承锆石, 计算得

出 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 $815 \pm 15 \text{ Ma}$ ($MSWD=2.1$)。后者对 41 颗锆石进行了分析, 锆石 Th、U 含量分别为 $33.5 \times 10^{-6} \sim 1293 \times 10^{-6}$ 和 $92.7 \times 10^{-6} \sim 1400 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.03~1.4。选取了 13 个较为集中的谐和年龄值, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 $152.9 \pm 2.5 \text{ Ma}$ ($MSWD=0.67$)。其中

表 1 皖南屯溪盆地石岭组早阶段火山岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircons from the early volcanic rocks of the Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui Province

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)				谐和度 (%)
	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		
				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
石岭组流纹质凝灰岩 14TX009-1, Mean = 150.8 \pm 2.8, MSWD = 1.7, n = 10														
6	220	580	0.38	0.05433	0.00387	0.1914	0.0187	0.02512	0.00079	177.8	15.9	159.9	5.0	89
7	375	886	0.42	0.04912	0.00310	0.1617	0.0111	0.02331	0.00068	152.2	9.7	148.6	4.3	97
10	320	762	0.42	0.04737	0.00290	0.1627	0.0086	0.02384	0.00068	153.1	7.5	151.9	4.3	99
11	395	692	0.57	0.05782	0.00307	0.1861	0.0094	0.02314	0.00065	173.3	8.0	147.4	4.1	83
14	309	1082	0.29	0.04926	0.00240	0.1651	0.0075	0.02409	0.00066	155.1	6.5	153.4	4.2	98
15	258	1406	0.18	0.05434	0.00260	0.1822	0.0083	0.02359	0.00070	169.9	7.1	150.3	4.4	87
18	353	713	0.49	0.05251	0.00286	0.1791	0.0092	0.02494	0.00071	167.3	8.0	158.8	4.4	94
19	809	1778	0.45	0.05403	0.00245	0.1626	0.0072	0.02231	0.00066	152.9	6.3	142.2	4.2	92
20	775	1682	0.46	0.05865	0.00267	0.1762	0.0080	0.02258	0.00070	164.7	6.9	143.9	4.4	86
26	276	648	0.43	0.06205	0.00363	0.1973	0.0100	0.02436	0.00071	182.8	8.5	155.2	4.5	83
石岭组粗安质角砾岩 15YS001-2, Mean = 156.1 \pm 2.6, MSWD = 0.35, n = 12														
7	510	495	1.03	0.05262	0.00523	0.1821	0.0146	0.02463	0.00074	169.8	12.6	156.9	4.7	92
11	24.0	881	0.03	0.04865	0.00274	0.1665	0.0081	0.02495	0.00070	156.4	7.0	158.9	4.4	98
16	62.2	326	0.19	0.05256	0.00362	0.1755	0.0112	0.02475	0.00073	164.2	9.6	157.6	4.6	95
21	133	502	0.26	0.05197	0.00300	0.1790	0.0098	0.02523	0.00072	167.2	8.5	160.6	4.5	96
25	60.6	1535	0.04	0.05886	0.00326	0.1923	0.0087	0.02418	0.00068	178.6	7.4	154.0	4.3	85
31	41.9	389	0.11	0.04821	0.00309	0.1632	0.0094	0.02430	0.00072	153.5	8.2	154.7	4.5	99
33	241	332	0.73	0.05635	0.00435	0.1889	0.0133	0.02438	0.00071	175.7	11.4	155.3	4.5	87
42	184	740	0.25	0.04768	0.00231	0.1615	0.0078	0.02477	0.00069	152.1	6.9	157.7	4.3	96
45	128	510	0.25	0.06191	0.00417	0.2076	0.0115	0.02495	0.00080	191.5	9.7	158.9	5.0	81
46	209	779	0.27	0.05635	0.00331	0.1829	0.0097	0.02395	0.00068	170.5	8.3	152.5	4.3	88
48	703	673	1.04	0.05444	0.00295	0.1783	0.0094	0.02423	0.00069	166.6	8.1	154.3	4.4	92
50	80.5	576	0.14	0.05227	0.00311	0.1677	0.0094	0.02398	0.00068	157.4	8.1	152.8	4.3	96
石岭组粗安质角砾岩 15YS001-6, Mean = 152.9 \pm 2.5, MSWD = 0.67, n = 13														
4	339	368	0.92	0.04865	0.00400	0.1596	0.0120	0.02462	0.00077	150.1	10.5	156.8	4.8	95
5	36.1	1069	0.03	0.06222	0.00362	0.2053	0.0109	0.02376	0.00067	189.6	9.2	151.4	4.2	77
11	34.5	306	0.11	0.05760	0.00481	0.1856	0.0130	0.02418	0.00075	172.8	11.1	154.0	4.7	88
13	71.0	441	0.16	0.04729	0.00338	0.1624	0.0105	0.02390	0.00072	152.8	9.1	152.2	4.5	99
14	870	623	1.4	0.04940	0.00349	0.1718	0.0115	0.02485	0.00076	161.0	10.0	158.2	4.8	98
18	55.5	607	0.09	0.04972	0.00392	0.1866	0.0119	0.02363	0.00071	173.8	10.1	150.5	4.5	85
19	565	575	0.98	0.05520	0.00358	0.1666	0.0098	0.02316	0.00069	156.4	8.5	147.6	4.3	94
20	244	567	0.43	0.05258	0.00392	0.1696	0.0109	0.02459	0.00075	159.0	9.5	156.6	4.7	98
33	855	757	1.13	0.05376	0.00342	0.1709	0.0096	0.02312	0.00068	160.2	8.3	147.4	4.3	91
35	577	551	1.05	0.06186	0.00478	0.1941	0.0121	0.02347	0.00067	180.2	10.3	149.6	4.2	81
39	74.3	564	0.13	0.05965	0.00378	0.2109	0.0107	0.02421	0.00069	194.3	9.0	154.2	4.3	76
40	115	527	0.22	0.05537	0.00368	0.1979	0.0118	0.02464	0.00071	183.4	10.0	156.9	4.4	84
42	47.4	355	0.13	0.05206	0.00364	0.1857	0.0113	0.02447	0.00076	172.9	9.6	155.8	4.8	89

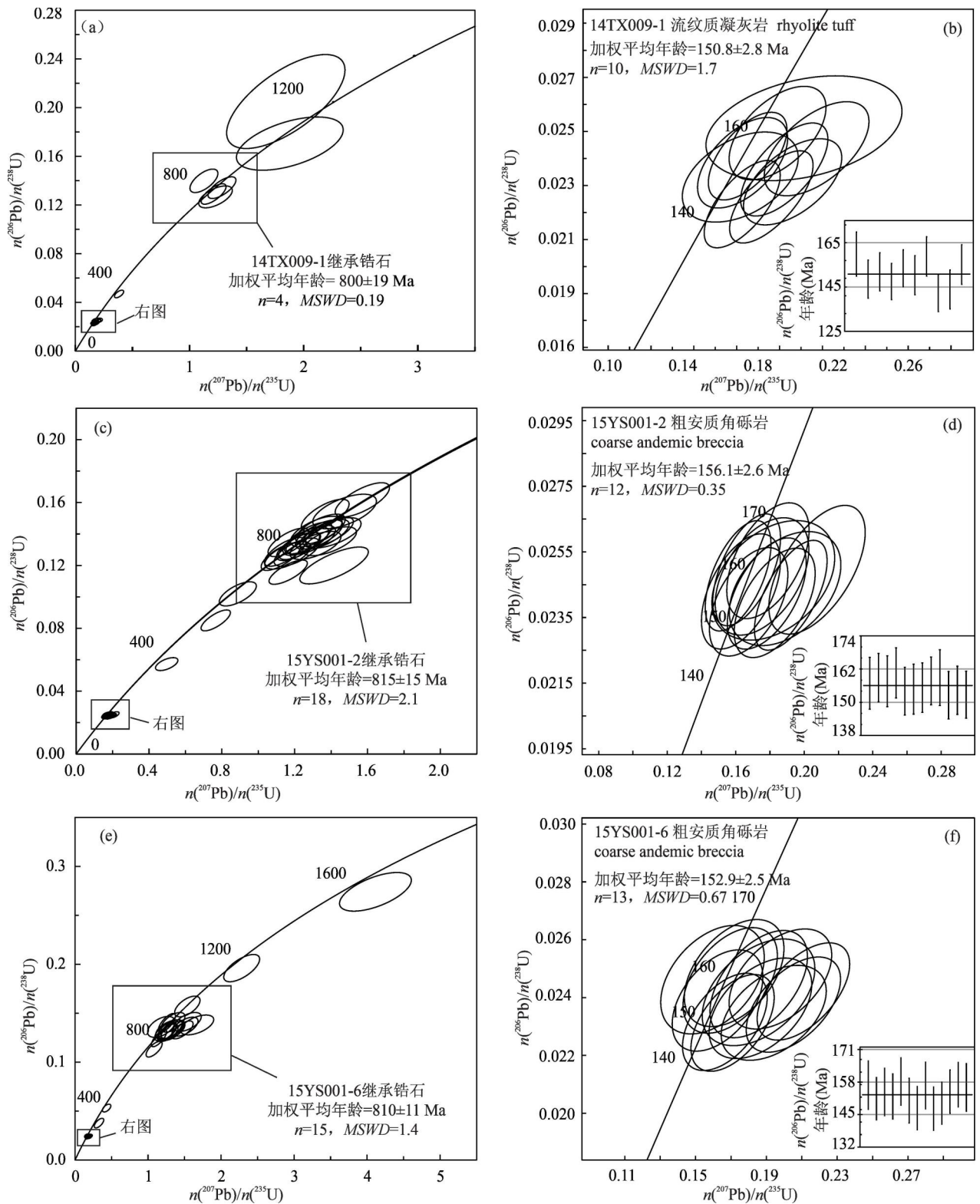


图 5 皖南屯溪盆地上侏罗统石岭组早阶段火山岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordant diagram of the early volcanic rocks of the Upper Jurassic Shiling Formation in Tunxi Basin, southern Anhui

有 15 个锆石测点获得了年龄集中的古老年龄,继承锆石的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 810 ± 11

Ma ($MSWD=1.4$)。两个样品的测试结果在误差范围内一致。在粗安质角砾岩两件样品中所获得的大

量具有新元古代年龄的锆石,因其年龄集中,可确定其为源区部分熔融残留继承的锆石。

3.2 主量和微量元素

10件样品的主微量元素测试结果见表2。

4件流纹质凝灰岩样品的主量元素组成较为接近,富Si(SiO_2 : 74.91%~76.12%),低Mg(MgO : 0.43%~0.77%),全碱含量中等($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.40\% \sim 7.66\%$),轻微富K($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.93 \sim 1.25$),在TAS图解上全部落入流纹岩区域(图6a),属于高钾钙碱性系列(图6b), Al_2O_3 含量在13.68%~14.36%之间, $A/\text{NK} = 1.32 \sim 1.42$,铝饱和指数 $A/\text{CNK} = 1.16 \sim 1.23$,指示其为过铝质岩石(图6c)。6件粗安质角砾岩给出变化较大的主量元素组成,这与角砾含量不同以及遭受较为强烈的风化作用(烧失量=3.89%~6.89%)有关。与流纹质凝灰岩相比,粗安质角砾岩的Si含量稍低(SiO_2 :

67.56%~71.96%),全碱含量相似($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 3.10\% \sim 7.85\%$),但更为富K($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.66 \sim 3.14$),在TAS图解上也大多数落入流纹岩区域,少数落入英安岩区域(图6a),主体为高钾钙碱性系列(图6b)。粗安质角砾岩的 Al_2O_3 含量14.59%~16.43%之间,其 $A/\text{NK} = 1.63 \sim 3.58$, $A/\text{CNK} = 1.01 \sim 1.66$,主体也表现为过铝质岩石性质。在高场强元素分类图解中(图6d),两件样品均落入粗面安山岩区域,其中流纹质凝灰岩样品处于流纹岩与粗面安山岩区域之间。

流纹质凝灰岩和粗安质角砾岩样品均表现出相似的LREE富集的右倾型式,以及轻微的负Eu异常(图7a),两者的LREE/HREE值分别为14.64~16.52和11.77~16.62, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值分别为19.88~25.01和20.28~32.79, δEu 值分别为0.67~0.78和0.73~0.93。两者的HREE也有一定程度的分

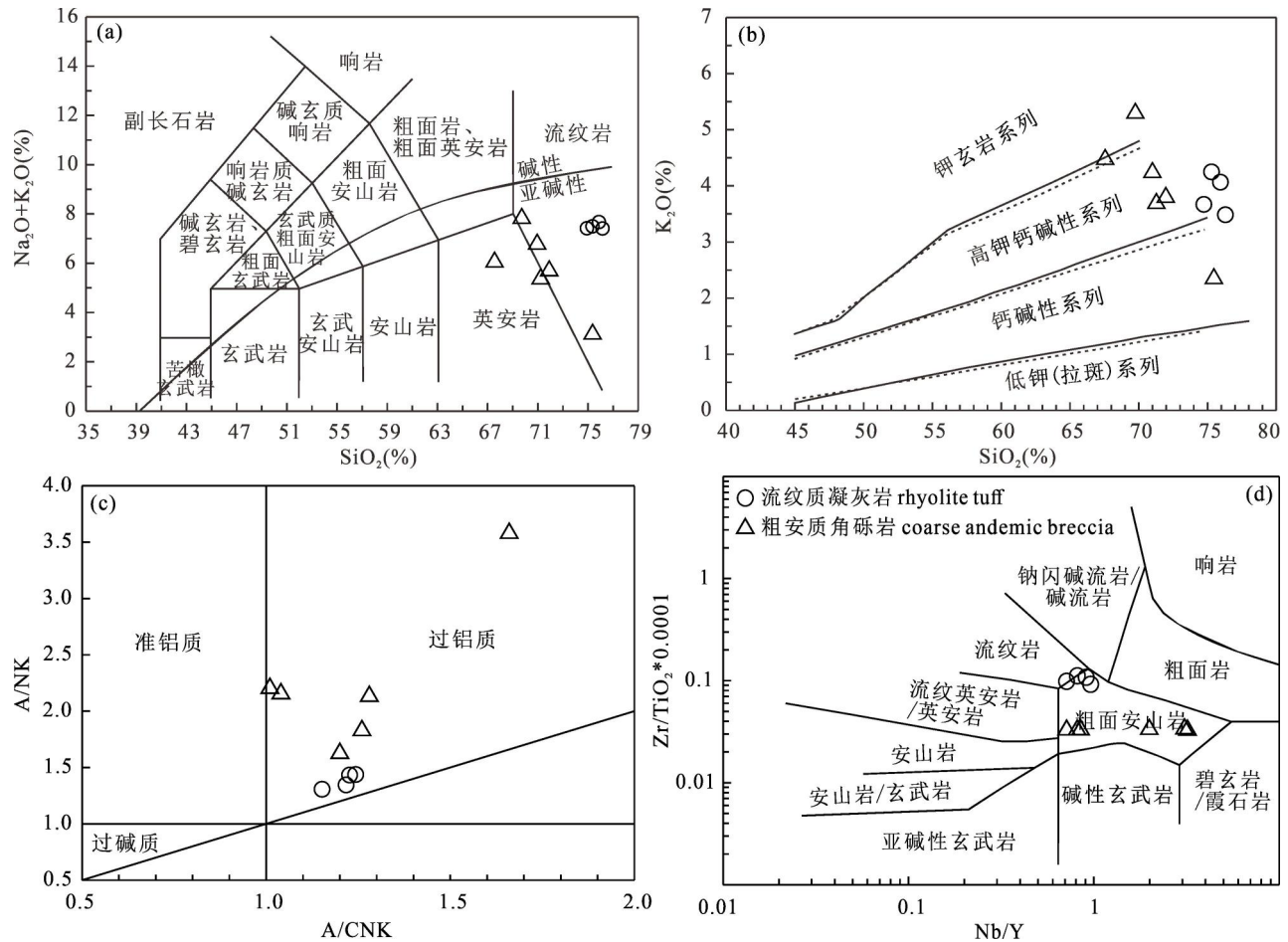


图6 皖南屯溪盆地上侏罗统石岭组早阶段火山岩(a) TAS图解;(b) SiO_2 — K_2O 相关图解;
(c) 铝饱和图解;(d) 10000 Zr/TiO_2 — Nb/Y 分类图解

Fig. 6 Early volcanic rocks of the Upper Jurassic Shiling Formation in the Tunxi Basin of southern Anhui (a) TAS diagram;
(b) SiO_2 — K_2O diagram; (c) Aluminium saturation diagram; (d) Diagram of 10000 Zr/TiO_2 — Nb/Y classification

异,其 $(Dy/Yb)_N$ 值分别为 1.29 ~ 1.39 和 1.52 ~ 2.09。总体的稀土配分型式与同时代的皖南东源花岗闪长岩体非常相似。与该地区 130 Ma 时期火山岩以及临近的浙西北天目山火山岩相比,后者更富

集稀土元素,具有更加强烈的 Eu 负异常。

流纹质凝灰岩和粗安质角砾岩均具有富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、亏损高场强元素 Nb 的特征,也与同时代的东源花岗闪长岩基本一致,而与屯溪

表 2 皖南屯溪盆地石岭组早阶段火山岩主量(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)测试结果

Table 2 Major elements (%), trace and rear earth elements ($\mu\text{g/g}$) analyze results of the early volcanic rocks from the Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui Province

样号	14TX009-1	14TX009-2	14TX009-3	14TX009-4	15YS001-1	15YS001-2	15YS001-3	15YS001-4	15YS001-5	15YS001-8
岩性	流纹质凝灰岩				粗安质角砾岩					
SiO ₂	73.85	74.68	73.36	74.74	66.11	68.01	62.24	69.72	68.05	67.33
TiO ₂	0.12	0.12	0.12	0.11	0.38	0.44	0.43	0.35	0.42	0.45
Al ₂ O ₃	13.93	13.47	14.06	13.51	13.53	15.42	15.14	12.49	14.62	15.62
TFe ₂ O ₃	1.32	1.29	1.27	1.26	2.59	2.60	3.47	3.81	2.58	2.63
MnO	0.03	0.02	0.03	0.03	0.06	0.05	0.07	0.05	0.03	0.04
CaO	0.83	0.77	0.89	0.63	3.69	2.10	4.48	2.22	2.51	1.88
MgO	0.46	0.42	0.75	0.51	1.48	0.65	0.86	1.08	0.97	0.95
K ₂ O	4.08	3.96	3.64	3.51	3.42	4.06	4.12	2.17	3.59	5.11
Na ₂ O	3.26	3.58	3.62	3.76	1.56	2.45	1.46	0.69	1.80	2.47
P ₂ O ₅	0.04	0.05	0.05	0.04	0.12	0.13	0.13	0.10	0.13	0.14
BaO	0.11	0.11	0.15	0.09	0.07	0.09	0.08	0.04	0.07	0.08
SrO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03
烧失	1.89	1.42	1.93	1.67	6.59	3.92	6.89	6.18	5.18	3.89
总和	99.91	99.89	99.86	99.86	99.44	99.84	99.12	98.63	99.85	100.53
Ba	1025	1010	1395	849	668	914	695	413	641	728
Cr	<10	10	<10	<10	10	10	10	10	10	10
Cs	9.89	7.48	7.08	3.09	4.45	4.42	6.07	4.62	5.92	4.66
Ga	16.1	16.3	17.2	16.4	19.5	20.8	21.7	21.7	20.5	21.2
Hf	3.50	3.60	4.00	3.60	3.70	4.30	4.30	3.50	4.10	4.00
Nb	7.70	7.30	7.60	7.20	26.8	7.80	34.2	6.20	17.5	7.40
Rb	182	176	131	142	132	153	156	87.1	144	183
Sn	2.00	2.00	2.00	2.00	1.00	1.00	1.00	2.00	1.00	2.00
Sr	217	216	228	239	271	296	199	173	302	295
Ta	0.80	0.80	0.80	0.70	9.80	0.70	13.6	0.60	5.40	0.60
Th	13.7	13.5	14.1	13.2	7.32	8.00	7.67	6.73	7.83	8.47
U	1.96	1.88	2.91	1.30	1.70	2.79	1.89	2.28	1.90	2.65
V	5.00	5.00	11.0	5.00	47.0	42.0	52.0	53.0	55.0	44.0
W	1.00	1.00	1.00	1.00	5.00	4.00	6.00	4.00	3.00	2.00
Y	8.30	9.90	9.30	8.10	8.70	9.20	10.7	8.70	8.80	9.10
Zr	113	119	131	117	128	145	141	115	140	148
La	24.2	25.5	27.5	25.8	21.0	25.0	22.9	19.8	25.6	27.3
Ce	45.5	48.3	50.1	47.2	41.5	48.9	45.7	38.3	48.6	53.4
Pr	4.69	5.00	5.40	4.97	4.88	5.83	5.33	4.60	5.73	5.97
Nd	16.1	17.1	19.7	17.4	17.3	20.6	19.4	16.4	21.3	22.5
Sm	2.69	2.82	3.28	2.81	3.21	3.28	3.65	2.88	3.22	4.04
Eu	0.60	0.66	0.65	0.61	0.75	0.94	0.93	0.75	0.74	0.94
Gd	1.89	2.19	2.45	2.11	2.97	2.75	3.21	2.70	2.55	3.04
Tb	0.29	0.34	0.32	0.28	0.30	0.37	0.38	0.33	0.29	0.36
Dy	1.55	1.78	1.87	1.54	1.84	1.71	2.18	1.74	1.66	1.63
Ho	0.29	0.33	0.33	0.32	0.34	0.33	0.38	0.29	0.34	0.30
Er	0.84	0.96	0.90	0.76	0.81	0.90	1.18	0.91	0.79	0.83
Tm	0.12	0.14	0.14	0.12	0.06	0.07	0.10	0.07	0.09	0.08
Yb	0.76	0.92	0.92	0.74	0.59	0.72	0.81	0.68	0.56	0.72
Lu	0.11	0.13	0.12	0.11	0.04	0.05	0.08	0.06	0.05	0.09

盆地中生代晚阶段以流纹岩为主的火山岩以及天目山盆地火山岩差别较大,后两者显示出一致的稀土配分和微量元素组成特征,更加显著的 Ba、Sr 和 Eu 的负异常(图 7b)。粗安质角砾岩的部分样品具有较高的 Ta 含量,具有低的 Nb/Ta 值(3 个样品的 Nb/Ta=2.5~3.2),这种现象在高分异花岗岩中常见(于志琪等,2023),由角闪石、黑云母、榍石和金红石等矿物结晶分异所导致。但对于石岭组粗安质角砾岩,其演化程度较低,更可能是由于角砾含量的不均,导致各样品中黑云母含量差别较大,使得低黑云母含量的样品具有低的 Nb/Ta 值。

3.3 全岩 Sr—Nd 同位素

Sr—Nd 同位素分析结果见表 3。流纹质凝灰岩和粗安质角砾岩的 $n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$ 值在 1.72~2.43 和 1.46~1.80 之间,两者的 Sr—Nd 同位素组成变化范围较窄,其 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值分别为 0.7096~0.7105 和 0.7098~0.7106, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 -5.19~-4.92 和 -6.36~-5.74,粗安质角砾岩的 Sr—Nd 同位素富集程度略高(图 8)。对应的单阶段 Nd 模式年龄 (T_{DM1}) 分别为 1.15~1.16 Ga 和 1.18~1.31 Ga。相比邻近的天目山火山岩,其 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值为 0.7069~0.7075, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值范围在 -6.24~-2.5,平均为 -4.89(Zhao Liang et al., 2016; 张建芳等, 2016), Sr—Nd 同位素富集程度略低。而同期的东源花岗闪长岩体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值范围在 -9.07~-5.46,平均为 -6.54, $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i$ 值范围在 0.7113~0.7160(张正, 2018; Zhang Aiping et al., 2021), Sr—Nd 同位素组成

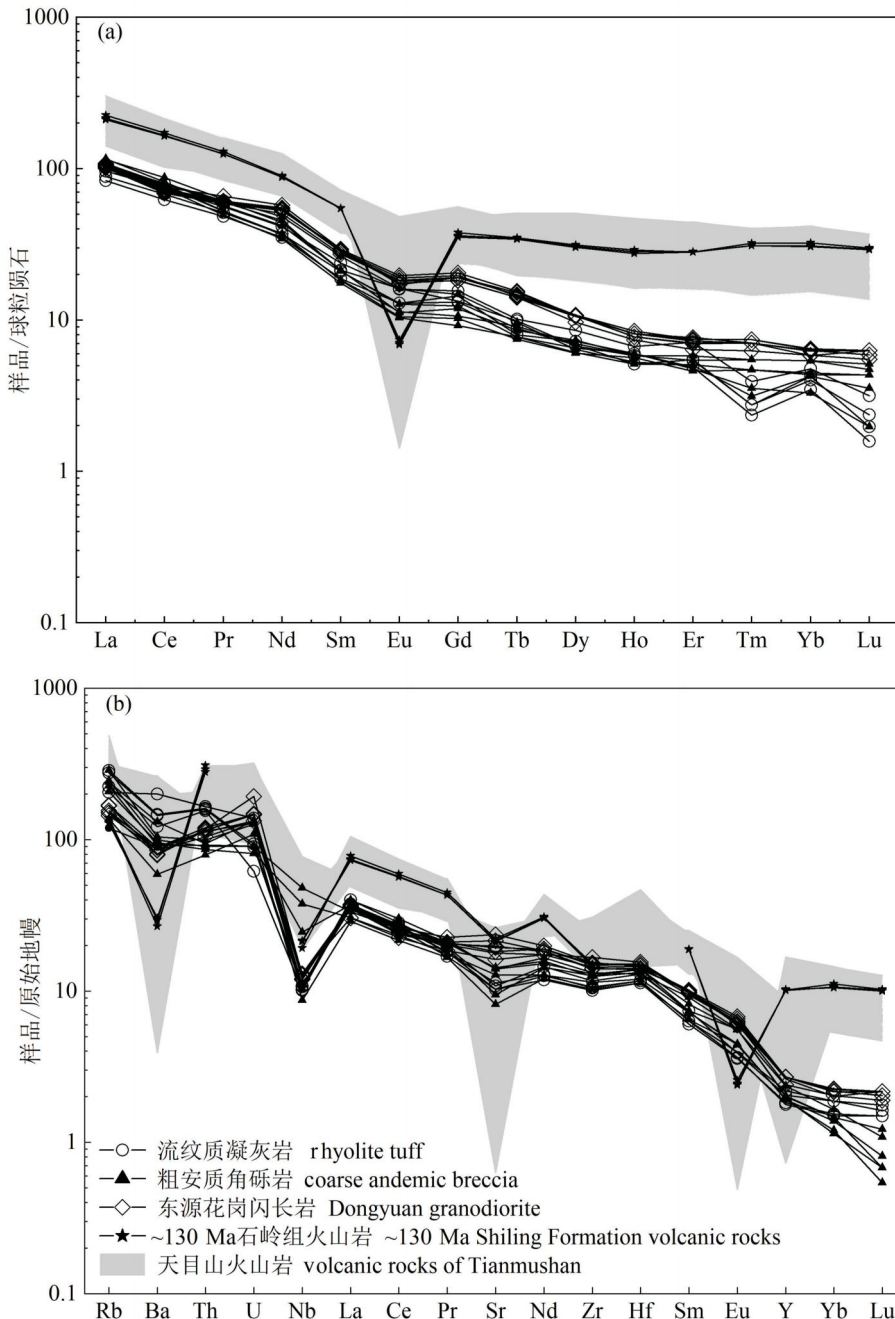


图 7 皖南屯溪盆地上侏罗统石岭组早阶段火山岩稀土元素配分图 (a) 与微量元素蛛网图 (b)

Fig. 7 REE pattern (a) and spider diagram (b) of trace elements of the early volcanic rocks of the Upper Jurassic Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui, and comparison with magmatic rocks in adjacent areas

天目山火山岩数据来源于 Zhao Liang et al., 2016; 张建芳等, 2018; 东源岩体数据来源于张正, 2018; 下白垩统石岭组晚阶段火山岩数据来源于汤帅等, 2016

The data of volcanic rocks in Tianmushan are from Zhao Liang et al., 2016; Zhang Jianfang et al., 2018; The data of Dongyuan rock mass are from Zhang Zheng., 2018; And the data of late stage volcanic rocks of the Lower Cretaceous Shiling Formation are from Tang Shuai et al., 2016

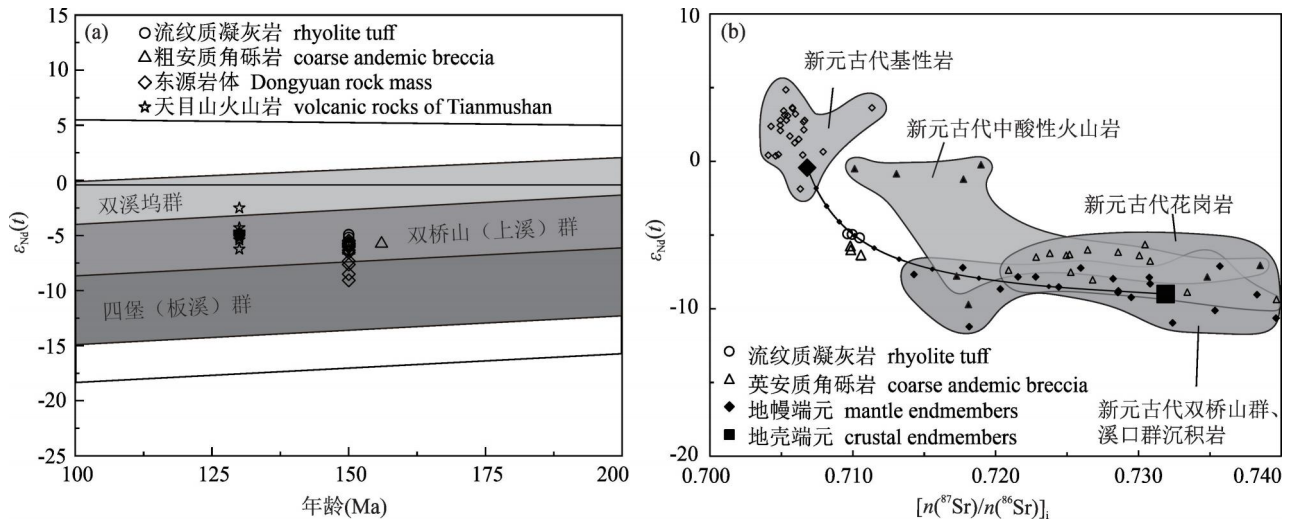


图 8 皖南屯溪盆地上侏罗统石岭组早阶段火山岩 $t(\text{Ma})-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) 与 $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (b) 图解
 Fig. 8 Diagram of $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) and $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (b) of early volcanic rocks of the Upper Jurassic

Shiling Formation in Tunxi Basin, southern Anhui

天目山火山岩数据来源于张建芳等, 2016; 东源岩体数据来源于张正, 2018; Zhang Aiping et al., 2021; 地幔端元为江南造山带晚中生代岩石圈地幔, 由璜茅辉长岩的平均值确定。地壳端元为江南造山带东段新元古代基底。用于混合计算的端元有江南造山带东段晚中生代岩石圈地幔, $\text{Sr}=574 \times 10^{-6}$, $\text{Nd}=20 \times 10^{-6}$, $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i=0.7068$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-0.43$ (Wang Sinuo et al., 2021); 江南造山带东段新元古代基底(上溪群和双桥山群浅变质岩和新元古代岩浆岩), $\text{Sr}=132 \times 10^{-6}$, $\text{Nd}=35 \times 10^{-6}$, $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i=0.7319$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-9$ (张彦杰等, 2012; 邢凤鸣等, 1991)

The data of volcanic rocks in Tianmushan are from Zhang Jianfang et al., 2016& and the data of Dongyuan granodiorite are from Zhang Zheng, 2018& and Zhang Aiping et al., 2021; the endmembers of the mantle is the Late Mesozoic lithospheric mantle of the Jiangnan Orogenic Belt, which is determined by the average value of the Huangmao gabbro. The endmembers of the crust is the Neoproterozoic basement of the eastern section of the Jiangnan Orogenic Belt. The endmembers used for hybrid calculation are the Late Mesozoic lithospheric mantle in the eastern part of the Jiangnan Orogenic Belt with $\text{Sr}=574 \times 10^{-6}$, $\text{Nd}=20 \times 10^{-6}$, $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i=0.7068$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-0.43$ (Wang Sinuo et al., 2021); Neoproterozoic basement in the eastern section of the Jiangnan Orogenic Belt (epimetamorphic rocks and Neoproterozoic magmatic rocks of Shangxi Group and Shuangqiaoshan Group) with $\text{Sr}=132 \times 10^{-6}$, $\text{Nd}=35 \times 10^{-6}$, $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i=0.7319$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-9$ (Zhang Yanjie et al., 2012& Xing Fengming et al., 1991&)

变化范围较大但总体类似于石岭组早阶段火山岩。

3.4 锆石 Ti 饱和温度和氧逸度

锆石微量元素分析结果见表 4。锆石阴极发光图像显示屯溪盆地石岭组早阶段火山岩中的锆石大

多数呈现自形到半自形长柱状、短柱状, 部分锆石具有典型的岩浆锆石振荡环带, 且 Th/U 值多大于 0.4, 具有岩浆锆石特征。其锆石结晶温度和氧逸度可以反应当时岩浆温度和氧逸度。流纹质凝灰岩和

表 3 皖南屯溪盆地石岭组早阶段火山岩全岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 Analytic result of Sr-Nd isotope of early volcanic rocks of shiling formation from Tunxi Basin in southern Anhui Province

样号	年龄 (Ma)	Rb	Sr	$\frac{n(^{87}\text{Rb})}{n(^{86}\text{Sr})}$	$\frac{n(^{87}\text{Sr})}{n(^{86}\text{Sr})}$	$[\frac{n(^{87}\text{Rb})}{n(^{86}\text{Sr})}]_i$	Sm	Nd	$\frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})}$	$\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})}$	$[\frac{n(^{143}\text{Nd})}{n(^{144}\text{Nd})}]_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	T_{DM1}	T_{DM2}
		($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)				($\times 10^{-6}$)			(Ma)	(Ma)			
14TX009-1	150	182	217	2.42688	0.714813	0.70964	2.69	16.1	0.101027	0.512292	0.512193	-4.92	1161	1340
14TX009-2	150	176	216	2.35774	0.714982	0.70995	2.82	17.1	0.099716	0.512289	0.512191	-4.95	1152	1343
14TX009-4	150	142	239	1.71920	0.714134	0.71047	2.81	17.4	0.097649	0.512275	0.512179	-5.19	1150	1362
15YS001-2	156	153	296	1.49567	0.713143	0.70983	3.28	20.6	0.096276	0.512241	0.512143	-5.74	1180	1411
15YS001-4	150	87	173	1.45516	0.713669	0.71057	2.88	16.4	0.106184	0.512223	0.512119	-6.36	1313	1457
15YS001-8	150	183	295	1.79501	0.713685	0.70986	4.04	22.5	0.108570	0.512244	0.512137	-6.01	1314	1428

表 4 皖南屯溪盆地石岭组早阶段火山岩锆石微量元素质量分数 ($\times 10^{-6}$) 及相关计算结果
 Table 4 Rear earth elements mass fraction ($\times 10^{-6}$) and related calculation results of the zircons from
 the early volcanic rocks in the Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui Province

样品号	锆石类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	t ($^{\circ}\text{C}$)	T (K)	$\lg(f_{\text{O}_2})$	ΔFMQ
流纹质凝灰岩																				
14TX009-06	岩浆锆石	0.09	24.8	0.13	1.71	3.78	1.92	24.6	9.21	112	43.9	199	43.3	408	80.3	953	752	1025	-15.1	0.7
14TX009-07	岩浆锆石	0.04	44.5	0.15	1.96	5.04	2.18	32.8	12.1	150	59.1	257	56.4	532	101	1255	763	1037	-14.3	1.2
14TX009-10	岩浆锆石	0.02	26.9	0.08	1.11	4.18	2.07	29.0	10.9	131	51.0	224	47.9	454	86.7	1069	735	1008	-15.5	0.8
14TX009-11	岩浆锆石	0.23	48.6	0.38	4.11	8.07	3.29	42.8	14.4	169	64.0	278	57.4	545	103	1338	835	1108	-13.0	1.0
14TX009-14	岩浆锆石	0.00	17.8	0.02	0.65	2.77	0.73	18.7	7.52	98.0	38.1	176	38.6	376	71.2	846	677	950	-17.4	0.3
14TX009-15	岩浆锆石	0.04	13.0	0.05	0.60	2.16	0.80	20.4	9.07	124	50.1	230	49.8	488	91.1	1079	683	956	-18.1	-0.5
14TX009-18	岩浆锆石	0.43	35.9	1.44	11.4	12.3	4.03	40.0	12.7	146	53.8	234	50.8	483	93.1	1179	759	1033	-14.6	1.1
14TX009-19	岩浆锆石	2.81	73.4	1.19	7.65	10.3	4.40	68.2	25.1	305	114	483	97.6	886	159	2238	793	1066	-13.6	1.2
14TX009-20	岩浆锆石	3.42	153	2.88	18.9	13.2	4.04	45.7	13.5	141	50.0	199	40.7	361	63.8	1110	773	1046	-12.6	2.7
14TX009-26	岩浆锆石	0.07	47.7	0.17	2.39	5.05	2.22	28.7	11.4	138	55.2	252	53.5	509	97.9	1203	857	1130	-12.7	0.9
14TX009-02	继承锆石	11.4	69.8	4.70	33.1	25.4	0.69	112	39.0	469	179	759	151	1311	239	3405	734	1007	-14.2	2.1
14TX009-04	继承锆石	0.12	10.1	0.17	3.89	8.66	1.45	54.5	19.9	243	91.1	387	78.6	705	131	1735	835	1108	-15.0	-1.0
14TX009-13	继承锆石	0.01	13.8	0.05	2.14	5.06	0.73	34.7	12.9	161	62.4	270	54.1	488	88.9	1193	717	990	-16.2	0.4
14TX009-22	继承锆石	0.14	5.15	0.23	4.69	9.04	2.14	54.7	18.8	218	82.9	343	66.8	596	108	1510	771	1044	-16.7	-1.3
14TX009-27	继承锆石	0.06	11.5	0.08	1.08	3.12	0.46	20.7	8.23	104	42.7	188	40.1	370	69.4	860	765	1038	-15.6	-0.1
粗安质角砾岩																				
15YS001-2-7	岩浆锆石	0.05	37.8	0.39	6.69	13.7	6.44	63.5	19.7	218	73.5	302	58.6	534	93.0	1428	850	1123	-13.0	0.7
15YS001-2-11	岩浆锆石	0.01	1.69	0.02	0.27	0.77	0.87	10.4	5.17	70.0	26.1	115	23.9	227	40.8	523	683	956	-21.3	-3.7
15YS001-2-16	岩浆锆石	0.01	8.73	0.05	0.94	2.46	1.67	19.8	7.82	97.5	35.5	153	32.7	303	55.1	717	778	1051	-16.1	-0.8
15YS001-2-21	岩浆锆石	0.01	11.5	0.03	0.90	3.35	1.95	23.5	9.24	113	41.8	180	37.4	346	65.3	834	768	1042	-16.1	-0.7
15YS001-2-25	岩浆锆石	0.02	4.18	0.11	1.24	3.30	3.15	41.4	22.9	332	132	564	114	982	164	2364	723	996	-19.5	-3.0
15YS001-2-31	岩浆锆石	0.02	6.43	0.04	0.46	2.01	0.88	10.7	4.21	49.4	18.0	77.6	16.8	164	29.3	380	716	989	-17.6	-0.9
15YS001-2-33	岩浆锆石	0.01	28.0	0.14	3.58	7.96	3.80	39.9	11.6	121	41.5	159	32.6	286	49.9	785	744	1017	-14.6	1.5
15YS001-2-42	岩浆锆石	0.01	14.1	0.05	1.30	3.56	2.60	29.0	11.1	135	47.8	206	42.6	387	69.5	950	789	1062	-15.8	-0.8
15YS001-2-45	岩浆锆石	0.01	13.2	0.08	0.91	3.67	2.59	29.4	10.7	124	45.9	193	41.0	379	69.8	914	800	1074	-15.4	-0.7
15YS001-2-46	岩浆锆石	0.03	19.1	0.04	1.19	4.87	3.05	32.2	12.1	139	48.3	199	40.4	357	62.8	920	802	1075	-15.2	-0.5
15YS001-2-48	岩浆锆石	0.03	40.8	0.28	8.09	24.8	11.9	141	46.7	516	169	621	113	919	140	2750	864	1137	-12.9	0.5
15YS001-2-50	岩浆锆石	0.00	6.23	0.00	0.64	1.97	1.17	14.6	6.05	77.8	30.6	135	29.5	284	54.3	643	745	1018	-17.6	-1.6
15YS001-2-03	继承锆石	0.59	29.5	0.48	4.38	7.33	0.62	41.7	13.9	164	60.3	259	52.4	477	84.6	1196	784	1057	-14.4	0.7
15YS001-2-04	继承锆石	0.05	20.4	0.15	2.20	6.71	2.43	38.9	13.7	159	61.5	278	60.1	623	119	1386	770	1044	-15.3	0.1
15YS001-2-06	继承锆石	0.76	3.56	0.52	5.60	7.06	0.29	42.0	16.1	205	82.2	374	79.7	751	136	1703	935	1208	-15.7	-3.6
15YS001-2-08	继承锆石	0.00	8.33	0.12	2.26	5.82	0.91	35.6	12.9	164	61.6	276	56.6	528	94.5	1246	802	1075	-15.7	-1.0
15YS001-2-09	继承锆石	0.01	11.5	0.04	1.11	2.61	0.30	21.8	9.35	126	52.2	250	55.4	557	101	1189	688	961	-17.8	-0.3
15YS001-2-12	继承锆石	0.02	179	0.18	2.94	10.7	1.97	66.7	25.3	314	120	528	106	961	164	2480	752	1025	-10.9	4.9
15YS001-2-17	继承锆石	0.02	14.7	0.16	2.63	6.83	2.39	44.5	14.8	168	61.5	253	49.7	453	82.7	1155	743	1017	-15.8	0.2
15YS001-2-19	继承锆石	55.6	137	19.1	98.7	24.6	1.07	35.1	8.04	78.2	26.3	111	22.6	209	38.8	865	825	1098	-9.9	4.4
15YS001-2-22	继承锆石	0.02	15.5	0.07	0.94	1.81	0.65	7.8	2.72	38.2	15.7	83.2	21.2	245	54.3	487	730	1003	-15.4	1.0
15YS001-2-23	继承锆石	0.03	5.71	0.12	2.83	5.94	0.58	34.9	13.4	168	65.5	287	60.4	559	103	1306	771	1044	-16.5	-1.1
15YS001-2-26	继承锆石	0.01	10.9	0.07	1.02	2.79	1.00	18.3	6.05	77.5	30.2	145	34.0	358	74.5	760	705	978	-17.3	-0.3
15YS001-2-27	继承锆石	0.01	9.66	0.01	0.76	2.24	0.72	14.2	5.20	69.9	28.9	139	32.3	336	69.8	709	700	973	-17.4	-0.3
15YS001-2-30	继承锆石	0.03	37.1	0.11	2.39	4.44	0.73	33.2	12.3	161	64.3	313	73.5	734	143	1579	737	1010	-14.7	1.5
15YS001-2-32	继承锆石	0.03	10.0	0.07	1.45	2.94	0.93	19.2	6.57	84.8	33.5	161	37.8	398	82.3	839	706	979	-17.3	-0.4
15YS001-2-36	继承锆石	0.03	13.6	0.10	1.97	5.69	2.51	40.4	13.7	167	64.6	298	64.4	623	120	1416	864	1137	-14.6	-1.2
15YS001-2-37	继承锆石	0.00	13.6	0.06	0.86	2.41	0.67	16.3	5.78	76.0	31.8	157	36.9	395	80.9	817	670	943	-17.8	0.2
15YS001-2-41	继承锆石	0.02	9.33	0.05	0.99	2.34	0.70	14.9	5.53	72.9	29.0	145	34.3	357	74.0	745	707	980	-17.3	-0.3
15YS001-2-49	继承锆石	0.00	51.8	0.20	3.26	10.3	4.32	66.1	23.3	288	113	490	101	939	171	2261	799	1072	-12.3	2.4
粗安质角砾岩																				
15YS001-6-4	岩浆锆石	0.14	30.8	0.62	10.8	20.2	9.68	83.3	22.0	196	58.7	228	46.1	425	82.1	1213	875	1148	-12.8	0.5
15YS001-6-5	岩浆锆石	0.02	1.52	0.09	0.24	0.86	0.68	7.5	2.97	47.2	20.8	114	29.2	311	63.8	600	744	1018	-20.6	-4.6

样品号	锆石类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	t ($^{\circ}\text{C}$)	T (K)	$\lg(f_{\text{O}_2})$	ΔFMQ
15YS001-6-11	岩浆锆石	0.00	4.31	0.04	0.35	1.94	1.26	13.3	5.19	64.7	24.0	108	23.5	230	43.3	519	734	1008	-17.9	-1.6
15YS001-6-13	岩浆锆石	0.05	5.77	0.01	0.34	1.48	1.13	11.1	4.83	62.6	25.2	121	28.3	303	63.4	629	746	1019	-17.5	-1.5
15YS001-6-14	岩浆锆石	0.03	81.9	0.65	15.1	34.8	18.4	168	51.8	581	210	914	192	1798	330	4395	872	1145	-11.6	1.7
15YS001-6-18	岩浆锆石	0.16	5.25	0.10	0.74	2.28	1.63	17.7	8.08	112	44.7	201	41.8	393	70.3	899	750	1023	-17.9	-2.0
15YS001-6-19	岩浆锆石	0.06	50.8	0.64	10.6	20.4	12.4	94.7	30.0	344	131	591	129	1261	244	2920	902	1176	-12.0	0.7
15YS001-6-20	岩浆锆石	0.07	21.3	0.36	4.54	7.35	4.61	32.1	10.2	118	43.7	198	43.9	437	82.1	1004	815	1088	-14.5	-0.1
15YS001-6-33	岩浆锆石	0.22	88.2	1.97	32.5	49.3	21.5	170	48.4	477	155	597	114	1018	175	2948	882	1155	-11.5	1.6
15YS001-6-35	岩浆锆石	0.17	48.3	0.34	7.90	16.9	11.4	90.5	25.5	258	88.8	350	68.3	630	110	1706	865	1138	-12.5	1.0
15YS001-6-39	岩浆锆石	0.00	8.78	0.02	0.62	2.97	2.13	27.3	11.1	143	53.8	236	48.3	462	80.4	1076	785	1059	-16.4	-1.4
15YS001-6-40	岩浆锆石	0.75	16.0	0.49	4.24	5.50	3.05	32.9	11.9	149	54.4	234	47.4	442	78.6	1080	893	1166	-14.0	-1.1
15YS001-6-42	岩浆锆石	0.06	7.11	0.17	0.99	3.71	2.50	29.0	12.8	168	64.9	281	56.7	515	88.1	1230	736	1009	-17.6	-1.4
15YS001-6-01	继承锆石	0.01	11.9	0.04	0.55	2.34	0.55	14.4	5.39	70.0	29.4	140	32.9	328	68.6	704	706	979	-17.2	-0.3
15YS001-6-02	继承锆石	19.2	62.0	5.83	31.4	12.0	1.11	41.1	13.3	147	55.1	239	48.8	449	79.7	1205	802	1075	-12.0	2.7
15YS001-6-03	继承锆石	0.03	0.88	0.08	1.59	5.70	0.17	42.6	19.5	266	107	485	102	962	174	2167	797	1070	-19.5	-4.7
15YS001-6-07	继承锆石	2.78	13.5	1.39	17.6	32.4	1.46	209	76.3	909	337	1411	278	2395	399	6083	797	1070	-15.7	-0.9
15YS001-6-09	继承锆石	0.12	110	0.77	13.2	27.0	14.4	119	34.5	350	119	467	88.5	764	134	2243	807	1081	-10.1	4.5
15YS001-6-10	继承锆石	0.00	11.8	0.05	0.58	2.42	0.92	18.0	6.34	79.0	31.3	153	34.8	362	75.0	776	721	994	-16.9	-0.3
15YS001-6-12	继承锆石	0.02	12.2	0.05	0.85	2.58	0.64	18.1	6.91	81.9	34.2	162	37.1	375	76.5	808	707	980	-17.5	-0.5
15YS001-6-15	继承锆石	2.19	27.7	0.92	4.20	5.55	0.46	27.6	10.4	141	55.9	256	56.1	539	101	1229	716	989	-15.7	1.0
15YS001-6-21	继承锆石	0.13	45.2	0.31	3.41	6.89	2.79	41.0	13.4	166	65.0	298	67.0	702	137	1548	769	1042	-13.2	2.2
15YS001-6-26	继承锆石	0.24	3.45	0.32	5.75	11.5	4.40	54.9	16.0	180	63.2	256	50.4	468	88.9	1202	788	1061	-16.8	-1.8
15YS001-6-27	继承锆石	2.69	26.2	1.24	7.92	6.91	0.73	35.8	13.4	169	66.6	299	62.2	601	105	1398	730	1003	-14.6	1.7
15YS001-6-32	继承锆石	7.19	59.5	1.66	30.9	5.98	1.32	24.1	8.55	103	41.9	197	44.5	466	91.4	1083	748	1021	-14.0	1.9
15YS001-6-37	继承锆石	0.00	7.65	0.05	1.79	3.30	0.90	20.6	7.66	96.6	39.0	189	43.2	453	90.2	953	665	938	-18.5	-0.4

粗安质角砾岩中锆石的稀土配分模式均表现为轻稀土亏损、富集重稀土,并且具有明显的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.23 \sim 0.78$, 平均为 0.52), 强烈的 Ce 正异常 ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 4.64 \sim 207.5$, 平均 $\text{Ce}/\text{Ce}^* = 49.51$), ΣREE 为 $379 \times 10^{-6} \sim 4395 \times 10^{-6}$ (表 4)。锆石的 Ti 含量为 $2.73 \times 10^{-6} \sim 25.5 \times 10^{-6}$, 应用锆石 Ti 温度计 (Watson and Harrison, 2005) 计算出两种岩石中锆石的结晶温度分别为 $676 \sim 857^{\circ}\text{C}$ 和 $682 \sim 902^{\circ}\text{C}$, 平均值分别为 763°C 和 795°C , 粗安质角砾岩略高。采用 (Loucks et al., 2020) 岩浆氧逸度估算方法, 得到流纹质凝灰岩锆石结晶时的岩浆氧逸度 ΔFMQ 值为 $-0.51 \sim +2.74$ (平均值为 $+0.94$), 多分布在 FMQ 线上部 (图 9b), 粗安质角砾岩锆石的 ΔFMQ 值为 $-4.62 \sim 1.73$ (平均值为 -0.73), 多分布在 FMQ 线下部 (图 9b), 指示流纹质凝灰岩的氧逸度更高。根据 (Ge Rongfeng et al., 2023) 建立的锆石氧逸度—湿度计, 利用锆石和全岩成分数据计算得出流纹质凝灰岩以及粗安质角砾岩原始岩浆中的水含量范围分别在 $5.53\% \sim 9.50\%$ 和 $5.18\% \sim 7.75\%$, 平均值为 7.45% 和 $6.44\text{ wt}\%$, 显示出两件样品具有相对较高的岩浆水含量, 且流纹质凝灰岩更富水。在前人的研究中, 东源花岗闪长岩的全岩锆石饱和温度为 $737 \sim 913^{\circ}\text{C}$, 平均温度在 793°C , 与火山岩的锆石饱

和温度相近 (王德恩等, 2011)。另外, 前文提到两件样品中存在继承锆石, 采取相同方法计算了其温度、氧逸度与水含量。流纹质凝灰岩与粗安质角砾岩的继承锆石结晶温度分别为 $717 \sim 835^{\circ}\text{C}$ 与 $665 \sim 807^{\circ}\text{C}$, 平均值分别为 764°C 与 756°C 。流纹质凝灰岩锆石结晶时的岩浆氧逸度 ΔFMQ 值为 $-1.27 \sim +2.09$ (平均值为 $+0.03$), 粗安质角砾岩 ΔFMQ 值为 $-4.68 \sim +4.93$ (平均值为 $+0.4$)。在利用继承锆石相关数据计算岩浆水含量时, 采用了皖南地区新元古代花岗岩的全岩数据 (吴荣新等, 2005), 取其均值进行计算, 得到的结果显示流纹质凝灰岩与粗安质角砾岩中继承锆石所反映的岩浆水含量的范围分为 $4.34\% \sim 6.71\%$ 与 $3.36\% \sim 7.85\%$, 平均值分别为 5.73% 和 5.84% 。可以看出, 一方面, 两类火山岩中继承锆石具有基本一致的年龄、结晶温度、氧逸度和水含量, 结合前文 Sr—Nd 同位素数据指示新元古代的增生地壳为两者的共同岩浆源区, 另一方面继承锆石所反映出的原始岩浆水含量明显低于岩浆锆石, 表明石岭组早阶段火山岩岩浆中有更加富水的物质加入。锆石中 Hf 含量随 Ti 的降低而增加 (图 9c), Th/U 值随 Hf 含量增加而降低 (图 9d)。Sm/Yb 和 Zr/Hf 值与 δEu 值均存在大致的正相关性 (图 9e、f), 指示了存在钛铁矿、磷灰石和斜长石等矿物

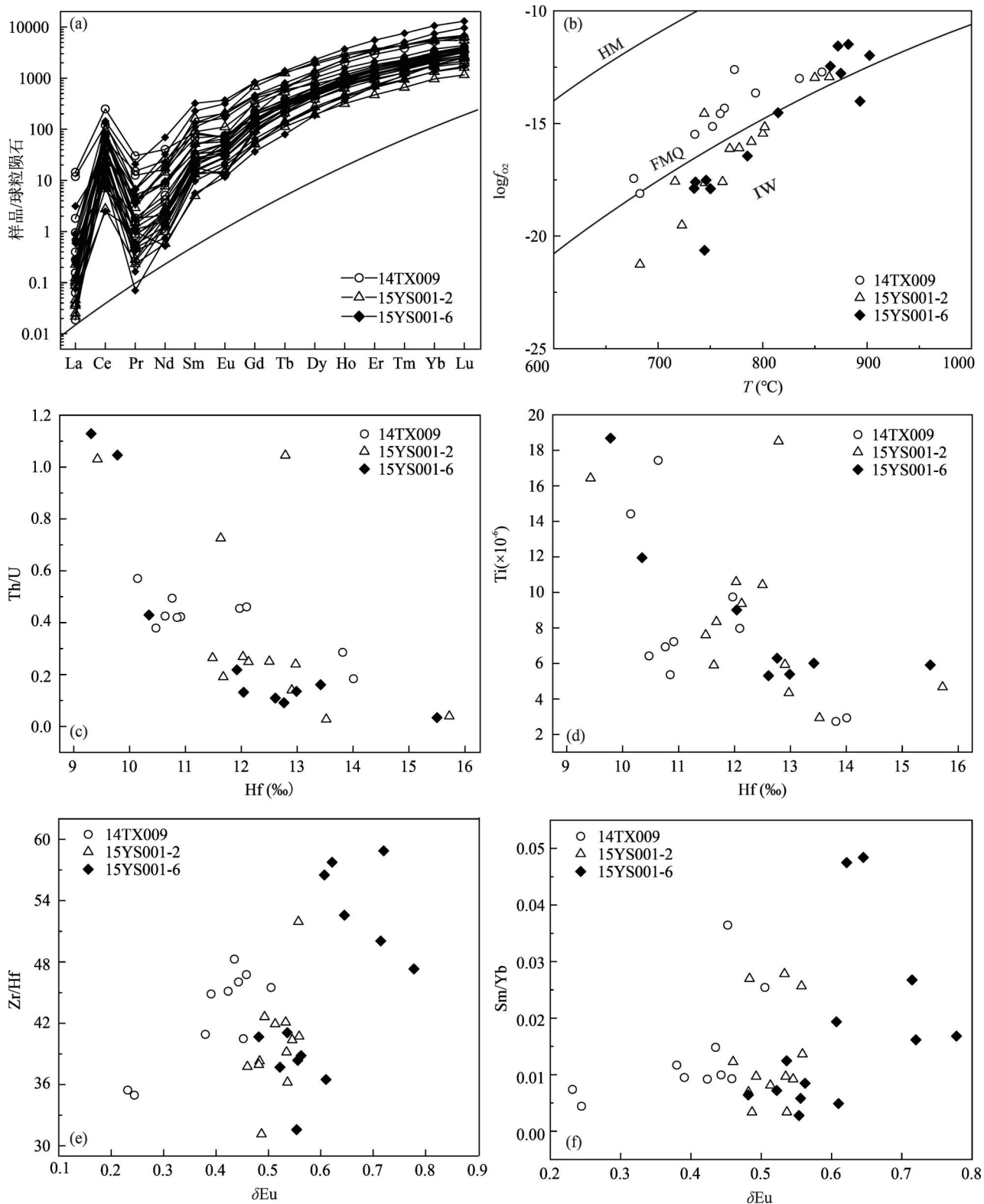


图9 皖南屯溪盆地上侏罗统石岭组早阶段火山岩锆石微量稀土元素配分图解 (a) 以及锆石 $\lg f_{O_2}-t$ (b)、

Hf—Ti (c)、Hf—Th/U (d)、 $\delta Eu-Zr/Hf$ (e)、 $\delta Eu-Sm/Yb$ (f) 图解

Fig. 9 REE spider diagram (a), $\lg f_{O_2}-t$ (b), Hf—Ti (c), Hf—Th/U (d), $\delta Eu-Zr/Hf$ (e) and $\delta Eu-Sm/Yb$ (f) diagrams

of the zircons from early volcanic rocks in the Upper Jurassic Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui

的分离结晶。

3.5 黑云母矿物化学

黑云母电子探针分析结果见表 5。石岭组早阶段火山岩普遍发育黑云母斑晶。流纹质凝灰岩中,黑云母的 FeO 含量为 9.99%~10.83%,MgO 含量为 16.84%~19.83%,TiO₂ 含量为 3.83%~4.3%,F、Cl 含量变化范围分别为 5.14%~6.15% 和 0.02%~0.08%。粗安质角砾岩中测试的黑云母为角砾中黑

云母,FeO 含量为 17.83%~20.15%,MgO 含量为 10.78%~13.29%,TiO₂ 含量为 3.61%~4.05%,F、Cl 含量变化范围分别为 0.65%~1.58% 和 0.03%~0.11%。两件样品的黑云母探针数据均表现出富 Mg、Ti、Fe 的特征,对比来看流纹质凝灰岩更加富 Mg,而粗安质角砾岩更富 Fe,且前者的 F 含量明显高于后者,这说明流纹质凝灰岩中的黑云母结晶环境更加富 Mg、温度更高。

在黑云母 $n(\text{Mg})-n(\text{Ti})-n(\text{Fe})+n(\text{Mn})+n(\text{Ti})-n(\text{Al}^{\text{IV}})$ 分类图中,粗安质角砾岩中黑云母投点落在镁质黑云母区域(图 10a),流纹质凝灰岩中黑云母大部分落在金云母区域。应用黑云母 Ti 温度计(Henry et al., 2005)计算得到流纹质凝灰岩中的黑云母结晶温度为 780~791℃(均值 785℃),粗安质角砾岩中黑云母结晶温度为 714~734℃(均值 724℃),结果显示前者具有更高的黑云母结晶温度(图 10c)。黑云母主量元素特征在一定程度上可以指示花岗岩的成因类型、物质来源等。周作侠(1986)研究中提出可以用黑云母 $\sum \text{FeO}/(\sum \text{FeO}+\text{MgO})-\text{MgO}$ 图解判别花岗岩物质来源。结果显示,石岭组早阶段火山岩两件样品均位于壳幔混源区域,但其具有富集程度略低的 Sr—Nd 同位素组成的特征一致。

4 讨论

4.1 江南造山带东段晚中生代火山岩年代学格架

江南造山带东段广泛发育晚中生代岩浆岩,包括不同规模、类型的花岗质侵入岩,以及断陷火山盆地内火山岩。结合大量的年代学研究,前人将侵入

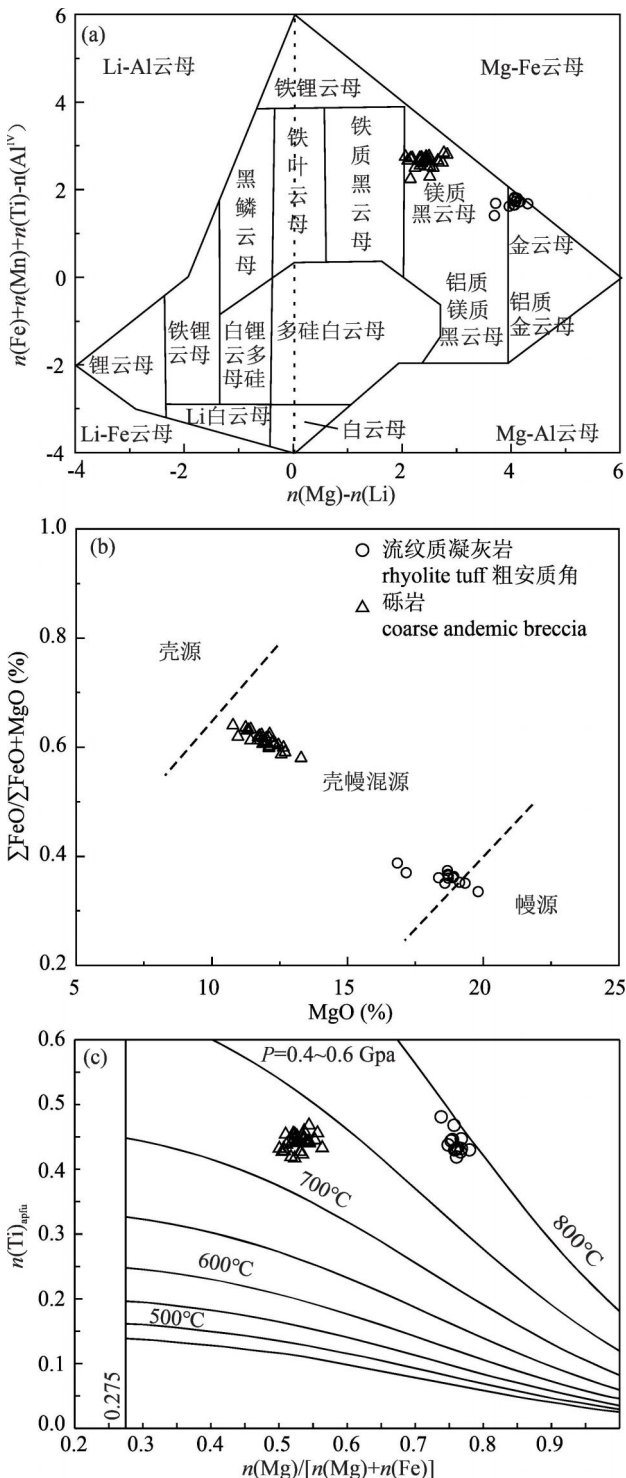


图 10 皖南屯溪盆地上侏罗统石岭组早阶段火山岩黑云母 $n(\text{Mg})-n(\text{Ti})-n(\text{Fe})+n(\text{Mn})+n(\text{Ti})-n(\text{Al}^{\text{IV}})$ 图解 (a)、 $\sum \text{FeO}/(\sum \text{FeO}+\text{MgO})-\text{MgO}$ 图解 (b) (据周作侠, 1986)、 $n(\text{Ti})-n(\text{Mg})/[n(\text{Mg})+n(\text{Fe})]$ 图解 (c) (apfu = atoms per formula unit, 据 Henry et al., 2005)

Fig. 10 $n(\text{Mg})-n(\text{Ti})-n(\text{Fe})+n(\text{Mn})+n(\text{Ti})-n(\text{Al}^{\text{IV}})$ diagram (a), $\sum \text{FeO}/(\sum \text{FeO}+\text{MgO})-\text{MgO}$ (b) (after Zhou Zuoxia, 1986) and $n(\text{Ti})-n(\text{Mg})/[n(\text{Mg})+n(\text{Fe})]$ plots (c) (apfu = atoms per formula unit, after Henry et al., 2005) of biotites from early volcanic rocks in the Upper Jurassic Shiling Formation in the Tunxi Basin, Southern Anhui

表5 皖南屯溪盆地石岭组早阶段火山岩黑云母电子探针成分分析结果

Table 5 Electron microprobe analyses results of representative biotites from the early volcanic rocks in the Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui Province

样品编号	质量分数 w (%)												P (MPa)	t ($^{\circ}\text{C}$)
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总和	F	Cl		
石岭组流纹质凝灰岩														
TX1-1	37.66	3.90	14.39	10.02	0.15	18.59	0.08	0.65	9.33	97.99	5.46	0.07	103	786
TX1-2	37.59	3.90	14.74	10.39	0.14	19.14	0.08	0.61	9.40	99.39	5.69	0.07	113	784
TX1-3	36.72	4.01	14.56	10.83	0.10	18.71	0.06	0.54	9.18	97.99	5.53	0.05	116	785
TX1-4	38.11	3.95	14.57	10.65	0.14	18.89	0.08	0.62	9.35	99.69	5.71	0.04	101	783
TX1-5	37.14	3.98	14.76	11.14	0.13	18.68	0.00	0.72	9.26	99.30	5.92	0.05	119	781
TX1-6	38.04	3.95	15.02	10.33	0.20	18.36	0.15	0.64	9.38	99.29	5.56	0.02	126	783
TX1-7	37.43	4.10	14.98	10.44	0.12	19.35	0.07	0.62	9.40	99.85	5.71	0.06	122	790
TX1-8	37.44	4.30	14.67	10.65	0.14	16.84	0.10	0.61	8.97	96.73	5.14	0.06	127	788
TX1-9	36.74	3.92	15.12	9.99	0.17	19.83	0.03	0.62	9.24	99.32	6.15	0.08	135	790
TX5-1	37.59	3.83	15.17	10.50	0.21	18.72	0.04	0.64	9.20	99.28	5.77	0.07	135	780
TX5-2	37.34	4.27	14.87	10.71	0.13	18.72	0.02	0.60	9.35	99.32	5.66	0.05	121	791
TX5-3	38.21	4.07	16.08	10.06	0.19	17.18	0.05	0.54	9.38	98.96	5.44	0.06	179	784
TX5-4	37.40	3.93	15.07	10.77	0.10	18.92	0.00	0.62	9.44	99.67	5.83	0.05	130	782
石岭组粗安质角砾岩														
YS01-1	33.78	4.05	16.23	18.90	0.18	12.65	0.01	0.38	8.95	95.72	0.92	0.08	236	734
YS01-2	33.54	3.61	16.58	20.15	0.13	12.13	0.03	0.32	8.12	95.15	0.85	0.08	262	714
YS01-3	35.43	3.74	15.44	19.17	0.09	10.78	0.10	0.29	8.68	94.46	1.18	0.08	195	716
YS01-4	34.70	3.97	16.13	19.28	0.17	11.76	0.07	0.39	8.85	96.03	1.08	0.11	224	726
YS01-5	34.91	3.82	15.38	18.51	0.09	11.70	0.07	0.33	8.39	94.08	1.42	0.06	196	725
YS01-6	35.83	3.85	14.57	18.08	0.14	12.11	0.08	0.45	8.63	94.66	1.46	0.09	142	727
YS01-7	34.53	3.86	16.23	19.49	0.16	11.83	0.02	0.34	8.76	95.90	1.12	0.05	231	723
YS01-8	36.08	3.77	15.40	19.67	0.17	11.25	0.01	0.41	8.83	96.19	0.88	0.05	176	715
YS01-9	34.16	4.00	17.21	18.26	0.14	11.88	0.06	0.34	8.67	95.45	1.19	0.05	285	730
YS01-10	33.77	3.66	16.98	19.02	0.08	12.26	0.12	0.31	8.48	95.16	0.65	0.07	278	719
YS01-13	34.46	3.77	16.12	19.30	0.12	11.31	0.10	0.38	8.10	94.35	1.03	0.10	236	719
YS01-14	36.01	3.95	16.34	18.30	0.09	12.12	0.02	0.39	8.70	96.89	1.58	0.08	216	726
YS01-15	35.55	3.99	15.87	19.45	0.13	11.35	0.12	0.29	8.36	95.93	1.22	0.05	204	724
YS01-16	34.63	3.87	16.45	19.13	0.17	11.89	0.12	0.28	8.10	95.57	1.53	0.05	243	724
YS01-17	34.69	3.96	16.90	18.46	0.20	11.90	0.11	0.26	8.07	95.38	1.39	0.03	264	728
YS01-18	35.32	3.95	15.92	18.41	0.19	11.95	0.09	0.27	8.67	95.69	1.53	0.05	209	728
YS02-1	35.18	3.92	15.76	19.17	0.08	11.77	0.05	0.42	8.90	95.77	0.80	0.06	202	724
YS02-2	35.47	4.00	16.14	19.25	0.19	12.00	0.02	0.30	8.84	96.75	0.86	0.06	211	726
YS02-3	35.44	3.93	15.95	18.95	0.13	12.45	0.02	0.40	9.01	96.84	0.81	0.06	200	726
YS02-4	35.29	3.94	15.91	18.97	0.13	12.34	0.04	0.36	9.00	96.62	0.97	0.08	202	727
YS02-5	35.18	3.85	15.94	18.35	0.14	13.29	0.06	0.29	9.21	97.29	1.46	0.10	200	728
YS02-6	34.54	3.90	16.39	18.32	0.12	12.70	0.02	0.40	8.91	95.82	0.79	0.09	235	730
YS02-7	35.49	3.75	15.68	18.81	0.15	11.95	0.00	0.42	9.06	95.88	0.93	0.05	194	720
YS03-1	35.20	4.03	16.31	17.86	0.16	12.57	0.00	0.34	9.01	96.27	1.25	0.11	224	734
YS03-2	35.35	3.78	16.52	18.67	0.16	11.92	0.01	0.43	8.78	96.34	1.09	0.10	234	720
YS03-3	34.80	3.96	16.16	19.02	0.14	11.71	0.00	0.37	8.92	95.69	0.96	0.06	226	726
YS03-4	35.74	3.80	16.12	19.76	0.16	11.44	0.01	0.37	8.81	96.86	0.99	0.11	210	716
YS03-5	34.64	3.89	16.78	19.49	0.13	12.11	0.00	0.37	8.77	96.89	1.05	0.08	251	723
YS03-6	35.28	3.65	17.31	17.83	0.15	10.97	0.05	0.41	8.10	94.37	0.91	0.10	287	715
YS03-7	35.61	3.89	17.29	18.05	0.17	11.43	0.00	0.29	8.60	96.03	1.06	0.10	278	724

岩浆活动分为3个阶段:181~167 Ma,呈小规模侵入体分布于江西德兴地区(Wang Guoguang et al., 2012; Zhou Qing et al., 2012);153~137 Ma,岩性以

花岗闪长岩为主,出露广泛(薛怀民等,2009;周翔等,2012;刘园园等,2012;周洁等2015;Yue Qian et al., 2020);135~122 Ma,主要为碱长花岗岩—正长

花岗岩,分布于东部地区(薛怀民等,2009;Yan Jun et al., 2017;薛怀民,2021;汪相,2022)。江南造山带东段的火山岩盆地主要为浙西北天目山火山盆地、皖南屯溪盆地和江西德兴银山火山岩盆地。这些火山岩同样可以分为 3 个阶段:176~166 Ma,分布于江西德兴银山火山岩盆地(Wang Guoguang et al., 2012);156~151 Ma,发育在皖南屯溪盆地的石岭组早阶段火山岩;139~115 Ma,包括皖南屯溪盆地石岭组晚阶段火山岩以及浙西北天目山盆地火山岩(王德恩等,2014;张建芳等,2018;余心起等,2016)。本次确定的流纹质凝灰岩和粗安质角砾岩的喷发时代(156~151 Ma),表明屯溪盆地发育江南造山带东段,乃至包括长江中下游地区唯一该时期的火山岩,表明下扬子侏罗纪晚期,在挤压转为拉张的背景下(杨文采,2022,2023),因缺乏断裂通道,普遍发育侵入岩的情况下,依然在局部地区存在岩石圈薄弱带,形成火山喷发。

华南中生代大规模火山岩带,自西向东包括南岭地区近 EW 向火山岩带,长江中下游火山岩带,中国东南沿海近 NNE 向火山岩带。针对三大火山岩带的年代学研究显示了其火山活动时限分别为 179~139 Ma(许美辉,1992;陈培荣等,1999;徐夕生和谢昕,2005;徐夕生,2008)、132~128 Ma(Zhou Taofa et al., 2011;薛怀民等,2013;闫峻等,2013;Chen

Long et al., 2014;薛怀民等,2016)和 157~81 Ma(Liu Lei et al., 2012;Zhou Xiaoming and Li Wuxian., 2000;Xing Guangfu et al., 2010;Xu Xianbing et al., 2011;刘磊,2015;王学寅等,2012;段政等,2013;王加恩等,2016)。显示出华南晚中生代火山岩活动从南岭,向东北方向经江南造山带东段,到长江中下游地区,再向东南方向迁离的趋势。

4.2 屯溪盆地石岭组早阶段火山岩成因

皖南屯溪盆地石岭组早阶段火山岩属于高钾钙碱性系列,富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素,具有高的 Sr、Sr/Y 和 $(La/Yb)_N$ 值,表现高铽低钇的地球化学特征,在 $(La/Yb)_N$ — Yb_N 图解中(图 11),全部样品都落在高铽低钇中酸性岩(adakite, 埃达克岩)区域。而邻近的天目山火山岩和石岭组晚阶段火山岩均具有较高的 Yb 含量,表现为正常岛弧火山岩的特征。

这种高铽低钇岩石的成因主要包含以下四种:增厚镁铁质的下地壳熔融(Wen Daren et al., 2008;管琪等,2010);玄武质岩浆的分异结晶作用(Macpherson et al., 2006);玄武质岩浆和长英质岩浆的混合作用(Streck et al., 2007);俯冲洋壳的部分熔融(Defant and Drummond et al., 1990;张旗等,2024)。

原意上的埃达克岩为年轻俯冲洋壳部分熔融形

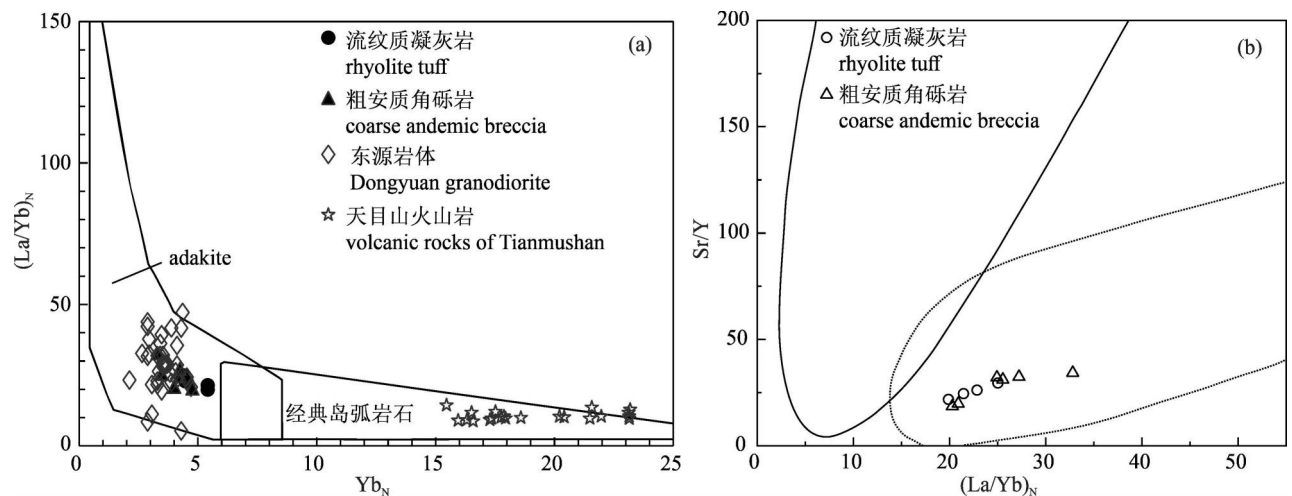


图 11 皖南屯溪盆地上侏罗统石岭组早阶段火山岩 $(La/Yb)_N$ — Yb_N 图解 (a) (皖南东源岩体数据源于王德恩等,2011;Wang Yangyang et al., 2017;天目山火山岩数据源于 Zhao Liang et al., 2016);高铽低钇中酸性岩 $(La/Yb)_N$ —Sr/Y 图解 (b) (图源自 Ling Mingming et al., 2013)

Fig. 11 $(La/Yb)_N$ — Yb_N diagram (a) (the data of Dongyuan intrusive rocks in southern Anhui are from Wang Deen et al., 2011 and Wang Yangyang et al., 2017; the volcanic rock data of Tianmu Mountains are from Zhao Liang et al., 2016); adakite $(La/Yb)_N$ —Sr/Y diagram (b) (after Ling Mingming et al., 2013) of early volcanic rocks in the Upper Jurassic Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui

成,具有亏损的 Sr—Nd 同位素组成 ($\epsilon_{Nd}(t) > 6$, $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i < 0.7045$, Defant and Drummond et al., 1990)。石岭组早阶段火山岩中等富集的 Sr—Nd 同位素组成显然排除这种成因的可能性。玄武质岩浆分离结晶作用主要通过基性岩浆在低压条件下经过角闪石的分离结晶,导致 Yb 和 Y 的降低,同时不能出现斜长石的大量结晶分异,以保持岩浆中足够高的 Sr;或在高压条件下经过石榴子石等矿物分离结晶,以降低岩浆中 Y 等重稀土的含量,形成这一类高铽低钇 (adakite, 埃达克岩) 的岩石。但石岭组早阶段火山岩表现为“右倾型”稀土配分模式,缺乏角闪石分离结晶所产生的典型“勺子”状的稀土配分型式(支倩等, 2024)。石榴子石的高压分离结晶作用将导致岩浆中的 SiO_2 与 Al_2O_3 具有负相关关系,同时 Sr/Y 与 La/Y 会随着 SiO_2 含量的增加而升高 (Macpherson et al., 2006), 这些特征均未在石岭组早阶段火山岩中显现。且高压条件下的玄武质岩浆结晶分异作用使 Dy/Yb 与 SiO_2 之间呈正相关关系, 低压条件下则相反, 而石岭组火山岩样品的 SiO_2 含量与 Dy/Yb 并没有显示出相关性, 并不符合此成因模式的特征。

流纹质凝灰岩和粗安质角砾岩中的继承锆石多具有新元古代年龄, 表明了岩石的源区主要为新元古代地壳。但两件岩石具有比江南造山带东段新元古代基性岩更加富集的 Sr—Nd 同位素组成 (图 8b), 说明其并非新元古代基性下地壳重熔的产物。同时, 两种岩石的 Sr—Nd 同位素组成也不同于江南造山带东段新元古代沉积岩与花岗岩, 而位于本地区新元古代沉积岩和晚中生代基性岩之间, 指示石岭组早阶段火山岩更可能为壳幔混源的产物。另外, 两种岩石中黑云母成分也显示出不同比例壳幔混合的特征 (图 10b)。屯溪盆地石岭组早阶段火山岩的 T_{DM2} 模式年龄为 1.34~1.46 Ga, 与东源岩体的 T_{DM2} 模式年龄 (1.38~1.70 Ga) 以及天目山火山岩 T_{DM2} 模式年龄 (1.30~1.43 Ga) 相近, 并与江南造山带东段广泛分布的双桥山群一致 (周洁等, 2015; 张建芳等, 2018; 张正, 2018; Zhang Aiping et al., 2021)。因此, 通过选取江南造山带东段新元古代双桥山群沉积岩的 Sr—Nd 同位素数据, 取其均值作为地壳端元, 与江南造山带东段中生代岩石圈地幔进行混合模拟, 可以发现屯溪石岭组早阶段火山岩样品投点处于该演化线上, 结合上述证据, 可以认为其源区岩浆为新元古代沉积岩基底部分熔融, 同时受到江南造山带东段中生代岩石圈地幔的混染

形成。

粗安质角砾岩和流纹质凝灰岩基本一致的继承锆石类型、Sr—Nd 同位素组成、微量元素特征, 表明两者具有类似的源区, 均为晚中生代时期幔源基性岩浆和新元古代沉积岩地壳深熔岩浆的混合, 但混合比例不同, 且各自演化程度不同。继承锆石较低的氧逸度和水含量, 确切地表明了地幔岩浆更加富水和高氧逸度, 来源于受到俯冲大洋板块析出流体/熔体的交代地幔 (Wang Sinuo et al., 2021; Wang Sinuo and Yan Jun, 2021)。锆石定年结果表明, 粗安质角砾岩的喷发稍早于流纹质凝灰岩, 具有较低的氧逸度和水含量, 一方面反映了幔源岩浆混合的比例较低, 另一方面也反映了演化程度较低, 这也表现在两种岩石黑云母的组成上。粗安质角砾岩中黑云母更加接近壳源岩浆成分 (图 10b)、具有更低的结晶温度。

在矿物结晶分异图解中显示了一定的黑云母、斜长石和钾长石的结晶分异趋势 (图 12)。锆石的微量元素也显示出广泛的相关性, 锆石中 Hf 含量随 Ti 的降低而增加, Th/U 值随 Hf 含量增加而降低。Sm/Yb 和 Zr/Hf 值与 δEu 值均存在大致的正相关性 (图 9), 反应了钛铁矿、磷灰石、锆石和斜长石等矿物在岩浆演化过程中的分离结晶。而在 Rb—V 图解中, 两件火山岩样品点的分布趋势与 X 轴近乎平行, 符合部分熔融控制特点。综合来看, 石岭组早阶段火山岩样品的地球化学特征主要受部分熔融过程控制, 演化过程中也存在一定程度的分离结晶作用, 其中, 流纹质凝灰岩具有更高的 SiO_2 含量指示其经历了更程度的结晶分异。

综上所述, 石岭组早阶段火山岩起源于壳幔岩浆混合, 壳源岩浆为新元古代沉积岩源区部分熔融的产物, 而幔源岩浆来源于受到俯冲板块析出物质交代的地幔。幔源岩浆带来了更高的水等挥发份含量, 以及更高的温度和氧逸度。且从 156 Ma 至 150 Ma 期间, 岩浆房中幔源岩浆的贡献增加。

4.3 与侵入岩的关系及其构造指示意义

在屯溪盆地周边地区, 发育多个同时期侵入岩体, 包括东源岩体、逍遥岩体和竹溪岭岩体, 这些侵入岩均为花岗闪长岩, 形成时代介于 152~148 Ma (秦燕等, 2010; 周翔等, 2011; 王德恩等, 2011; 张正, 2018; 孔志岗等, 2018; Su Qiangwei et al., 2018; Zhang Aiping et al., 2021; 叶龙翔, 2023), 是大型斑岩型、矽卡岩型 W—Mo 矿的成矿岩体。这些侵入岩与石岭组早阶段火山岩表现出一致的地球化学特

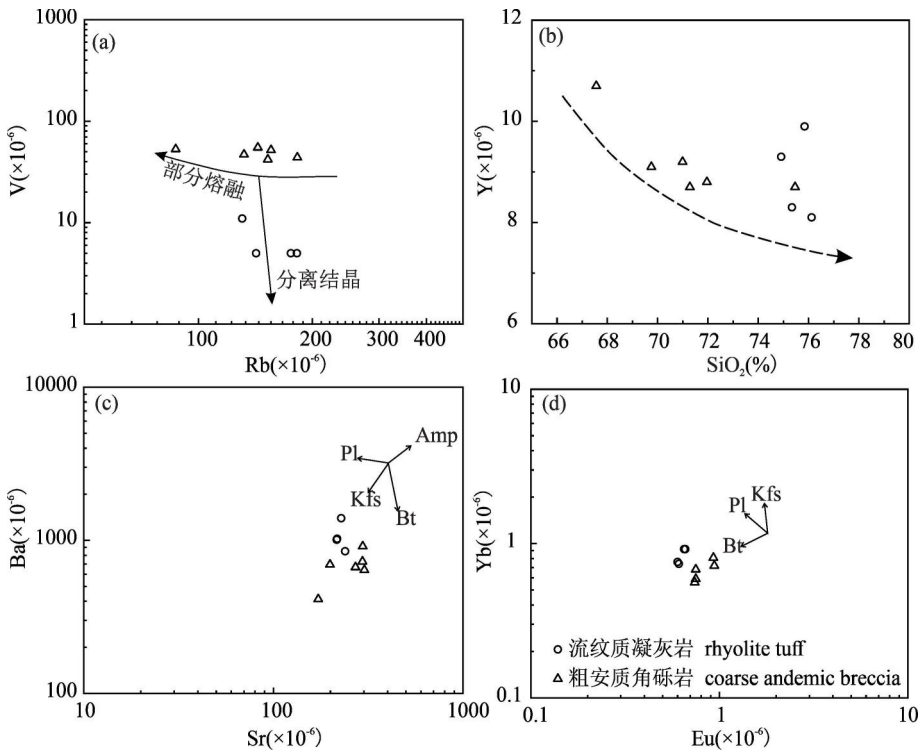


图 12 皖南屯溪盆地上侏罗统石岭组早阶段火山岩

Rb—V(a)、SiO₂—Y(b)、Ba—Sr(c)、Eu—Yb(d)图解

Fig. 12 Rb—V (a), SiO₂—Y (b), Ba—Sr (c), Eu—Yb (d) diagrams of the early volcanic rocks in the Upper Jurassic Shiling Formation in the Tunxi Basin, southern Anhui

Bt—黑云母; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Amp—角闪石

Bt—biotite; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Amp—amphibole

征,均为高钾低镁、富集轻稀土元素、亏损高场强元素、高 Sr 低 Y、弱富集的 Sr—Nd 同位素组成(周翔等,2011;周洁,2013;张正,2018;Su Qiangwei et al., 2018;Zhang Aiping et al., 2021;闫盼盼等,2019)。前人研究表明这些成矿侵入岩均为岩浆混合成因,为江南造山带东段新元古代双桥山群沉积岩与中生代地幔物质的混合(周洁等,2015;张正,2018;Su Qiangwei et al., 2018;叶龙翔,2023)。因此,皖南花岗岩闪长岩与石岭组早阶段火山岩存在同期、同源,以及大尺度上同构造单元的耦合关系,广义上属于一套火山—侵入杂岩系统。

江南造山带东段的皖南地区,中生代岩浆岩的最早开始时期即是石岭组早阶段火山岩以及小型中酸性侵入岩体,表现为壳幔岩浆混合;接着以青阳岩体、旌德岩体、太平岩体等以大岩基形式产出的二长花岗岩体,时代稍晚,主要介于 145~135 Ma (Yue Qian et al, 2020),依然存在壳幔混合的特征,但以地壳为主;最后发育了具有 A 型特征的钾长花岗

岩,时代介于 134~122 Ma,包括以岩基形式产出的黄山岩体、九华山岩体、伏岭岩体、牯牛降岩体等,为壳源高温熔融的产物(Yan Jun et al., 2017; Yue Qian et al., 2020)。因此,从早到晚的三阶段岩浆活动反映了俯冲大洋板块析出物质交代的地幔发生部分熔融、下地壳部分熔融和底侵的基性岩浆混合、软流圈上涌提高地温梯度、中—下地壳加热深熔等一系列深部过程,体现了古太平洋板块低角度俯冲(~160 Ma, 挤压)、后撤(~135 Ma, 拉张)、较低角度俯冲(~120 Ma, 挤压)的构造演化。

5 结论

(1)皖南屯溪盆地石岭组早阶段火山岩的形成时代介于 156~150 Ma,以中酸性岩石为主,与区域同时期侵入岩的岩性基本一致,构成皖南广

义上的火山—侵入杂岩。

(2)皖南屯溪盆地石岭组早阶段火山岩形成于壳幔岩浆混合,分别来源于交代地幔和新元古代沉积岩,且从早到晚,幔源岩浆的贡献增加。混合岩浆的高氧逸度和挥发份含量主要来自于幔源岩浆。

(3)皖南地区晚中生代三阶段岩浆活动反映了古太平洋板块西向俯冲背景下,挤压—拉张—挤压的区域构造演化过程。

注释 / Note

① 江西省地质调查研究院. 2002. 中华人民共和国地质图 1:25 万(景德镇市幅)H50C003003.

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
陈培荣,孔兴功,倪琦生,章邦桐,刘昌实. 1999. 赣南燕山早期双峰式火山岩的厘定和意义. 地质论评, 45(增刊): 734~741.
丁炳华,史仁灯,支霞臣,郑磊,陈雷. 2008. 江南造山带存在新元

- 古代 (~850 Ma) 俯冲作用——来自皖南 SSZ 型蛇绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄证据. 岩石矿物学杂志, 27(5): 375~388.
- 段政, 邢光福, 余明刚, 赵希林, 靳国栋, 陈志洪. 2013. 浙闽边界区晚中生代火山作用时序与过程分析. 地质论评, 59(3): 454~469.
- 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 张亮亮, 刘敏, 李小伟, 于枫, 莫宣学. 2010. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩: 新特提斯洋脊俯冲的产物? 岩石学报, 26(7): 2165~2179.
- 侯可军, 袁顺达. 2010. 宁芜盆地火山一次火山岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. 岩石学报, 26(3): 888~902.
- 孔志岗, 梁婷, 毛景文, 徐生发, 许红兵, 闫盼盼, 金修勇. 2018. 皖南竹溪岭钨多金属矿床花岗岩闪长岩成因、成矿时代及成岩成矿背景研究. 岩石学报, 34(9): 2632~2656.
- 刘建敏, 闫峻, 陈丹丹, 李全忠, 刘晓强, 姚洪忠, 史磊, 陈志洪. 2016. 长江中下游地区繁昌盆地火山岩成因: 锆石 Hf—O 同位素制约. 岩石学报, 32(2): 289~302.
- 刘磊. 2015. 中国东南部晚中生代幕式火山岩浆作用及古太平洋板块俯冲机制. 南京大学, (2): 146.
- 刘园园, 马昌前, 吕昭英, 黄卫平. 2012. 长江中下游贵池矿集区燕山期岩浆作用及其地质意义: 年代学、地球化学及 Sr—Nd—Hf 同位素证据. 岩石学报, 28(10): 3287~3305.
- 秦燕, 王登红, 吴礼彬, 王克友, 梅玉萍. 2010. 安徽东源钨矿含矿斑岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 地质学报, 84(4): 479~484.
- 任鑫鑫, 黄建东, 刘佳, 毕治国. 2015. 皖南屯溪地区发现晚侏罗世火山岩. 安徽地质, 25(4): 241~244.
- 汤师, 徐先兵, 袁晏明. 2016. 皖南屯溪盆地火山岩的地球化学、年代学及其构造意义. 岩石矿物学杂志, 35(2): 177~194.
- 王德恩, 周翔, 余心起, 杜玉雕, 杨赫鸣, 傅建真, 董会明. 2011. 皖南祁门地区东源钨钼矿区花岗岩闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征. 地质通报, 30(10): 1514~1529.
- 王德恩, 张元朔, 高冉, 李全忠, 闫峻, 胡顺利. 2014. 下扬子天目山盆地火山岩锆石 LA-ICP-MS 定年及地质意义. 资源调查与环境, 35(3): 178~184.
- 王德滋, 周金城, 邱检生, 范洪海. 2000. 中国东南部晚中生代花岗岩质火山—侵入杂岩特征与成因. 高校地质学报, 6(4): 487~498.
- 王加恩, 刘远栋, 汪建国, 王振, 陶丽. 2016. 浙江丽水地区磨石山群火山岩时代归属. 华东地质, 37(3): 157~165.
- 王丽娟, 黄建平, 于津海, GRIFFIN W L, 王汝成, 张少琴, 杨颖鹤. 2014. 长江中下游深水盆地中性次火山岩—侵入岩的锆石 U-Pb 定年和 Lu—Hf 同位素. 科学通报, 59(14): 1305~1317.
- 汪相. 2022. 中国东南部黄山运动及其花岗岩岩浆活动与成矿作用. 地质论评, 68(5): 1677~1728.
- 王学寅, 胡文瑄, 胡广, 姚素平, 曹剑, 王小林, 谢小敏. 2012. 浙江石浦下白垩统灰岩微相分析与锆石 U-Pb 年代学研究. 地质论评, 58(4): 614~626.
- 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 2005. 皖南新元古代花岗闪长岩体锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究. 岩石学报, 21(3): 587~606.
- 邢凤鸣, 陈江峰, 徐祥, 周泰禧, Foland K A. 1991. 皖南浅变质岩和沉积岩的钨同位素特点及其大地构造意义. 现代地质, 5(3): 290~299.
- 薛怀民, 汪应庚, 马芳, 汪诚, 王德恩, 左延龙. 2009. 皖南太平—黄山复合岩体的 SHRIMP 年代学: 由钙碱性向碱性转变对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄时间的约束. 中国科学(D辑: 地球科学), 39(7): 979~993.
- 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 谢亚平. 2010. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束. 岩石学报, 26(11): 3215~3244.
- 薛怀民, 马芳, 关海燕, 王一鹏. 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. 中国地质, 40(3): 694~714.
- 薛怀民. 2016. 长江中下游火山岩带东南缘溧阳盆地火山作用的年代学、地球化学及岩浆成因探讨. 地球化学, 45(3): 213~234.
- 薛怀民, 王一鹏, 冀泽阳. 2016. 长江中下游怀宁盆地火山杂岩锆石定年及其地质意义. 地质论评, 62(5): 1166~1184.
- 薛怀民. 2021. 江南造山带东段皖浙交界附近晚中生代花岗岩类的年代学、地球化学与层圈相互作用讨论. 岩石学报, 37(2): 433~461.
- 许美辉. 1992. 福建省永定地区早侏罗世双峰式火山岩及其构造环境. 福建地质, 11(2): 115~125.
- 徐夕生, 谢昕. 2005. 中国东南部晚中生代—新生代玄武岩与壳幔作用. 高校地质学报, 11(3): 318~334.
- 徐夕生. 2008. 华南花岗岩—火山岩成因研究的几个问题. 高校地质学报, 14(3): 283~294.
- 闫峻, 刘海泉, 宋传中, 徐夕生, 安亚军, 刘佳, 戴立群. 2009. 长江中下游繁昌—宁芜火山盆地火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 科学通报, 54(12): 1716~1724.
- 闫峻, 史磊, 李全忠, 刘建敏, 刘晓强, 姜子朝. 2013. 长江中下游地区怀宁盆地火山岩锆石 LA-ICPMS 定年. 地质论评, 59(6): 1218~1226.
- 叶龙翔. 2023. 江南钨矿带砂卡岩型钨—钼矿床和钨—铜矿床成矿作用对比研究. 合肥工业大学, 194.
- 闫盼盼, 梁婷, 徐生发, 鲁麟, 孔志岗, 金修勇. 2019. 皖南竹溪岭花岗岩闪长岩的岩浆源区: 来自矿物学、地球化学证据. 地球科学与环境学报, 41(2): 141~155.
- 杨文采. 2022. 形成闽浙火山岩带的洋陆转换作用. 地质论评, 68(2): 375~384.
- 杨文采. 2023. 长江中下游构造带成因与燕山期的大洋俯冲. 地质论评, 69(5): 1619~1627.
- 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. 现代地质, 15(1): 27~34.
- 余心起, 陈子微, 刘秀, 姬祥, 周木召, 杨鑫朋. 2016. 皖南屯溪地区石岭组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其时代的重新厘定. 地质通报, 35(1): 175~180.
- 于志琪, 刘汇川, 陈希, 李文奇, 王凯, 任威威. 2023. 高分异花岗岩双胞元素解耦与稀土元素四分组效应机制. 地球化学, 52(3): 344~359.
- 支倩, 任蕊, 段丰浩, 黄家瑄, 朱钊, 张新远, 李永军. 2024. 西准噶尔南部晚石炭世中—酸性火山岩成因机制及其对准噶尔洋闭合时限的约束. 地学前缘, 31(3): 40~58.
- 周洁. 2013. 江南造山带东段含钨花岗岩成因研究. 南京大学, (2): 106.
- 周洁, 葛伟亚, 姜耀辉, 徐生发, 傅建真. 2015. 江南造山带东段东源含钨岩体的岩石化学、矿物学特征研究. 地球化学, 44(2): 117~130.
- 张建芳, 朱朝晖, 汪建国, 蔡晓亮, 刘健, 汪隆武, 陈小友, 刘凤龙. 2018. 浙西北天目山盆地火山岩成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr—Nd 同位素证据. 大地构造与成矿学, 42(5): 918~939.
- 张旗, 原杰. 2024. 地球化学研究的危机与机遇. 地质论评, 70(5): 1907~1926.
- 周翔, 余心起, 王德恩, 张德会, 李春麟, 傅建真, 董会明. 2011. 皖南东源含 W、Mo 花岗岩闪长斑岩及成矿年代学研究. 现代地质, 25(2): 201~210.
- 周翔, 余心起, 杨赫鸣, 王德恩, 杜玉雕, 柯宏飙. 2012. 皖南绩溪

- 县靠背尖高 Ba—Sr 花岗岩闪长斑岩年代学及其成因. 岩石学报, 28(10): 3403~3417.
- 张彦杰, 廖圣兵, 周效华, 姜杨, 余明刚, 蒋仁, 赵希林, 陈志洪, 赵玲, 黄文成. 2012. 皖赣相邻鄣公山地区变泥砂质岩石元素组成特征及源区分析. 中国地质, 39(5): 1183~1198.
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨. 岩石学报, (1): 59~70.
- 张正. 2018. 安徽东源与江家斑岩型钨钼矿床地质与成矿岩体地球化学对比研究. 中国地质大学(北京), (6): 75.
- Bachmann O, Huber C. 2016. Silicic magma reservoirs in the Earth's crust. *American Mineralogist*, 101(11): 2377~2404.
- Brown M. 1994. The generation, segregation, ascent and emplacement of granite magma: the migmatite-to-crustally-derived granite connection in thickened orogens. *Earth-Science Reviews*, 36(1): 83~130.
- 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 Peirong, Sun Xingong, Ni Qisheng, Zhang Bangtong, Liu Changshi. 1999. Ascertainment and implication of the early Yianshanian bimodal volcanic associations from south Jiangxi Province. *Geological Review*, 45: 734~741.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662~665.
- Ding Binghua, Shi Rendeng, Zhi Xiachen, Zheng Lei, Chen Lei. 2008. Neoproterozoic (~850 Ma) subduction in the Jiangnan orogen: evidence from the SHRIMP U-Pb dating of the SSZ-type ophiolite in southern Anhui Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(5): 375~388.
- Duan Zheng, Xing Guangfu, Yu Minggang, Zhao Xilin, Jin Guodong, Chen Zhihong. 2013. Time sequence and geological process of late Mesozoic volcanic activities in the area of Zhejiang—Fujian boundary. *Geological Review*, 59(3): 454~469.
- Foland K A, Allen J C. 1991. Magma sources for Mesozoic anorogenic granites of the White Mountain magma series, New England, USA. *Mineralogy and Petrology*. 109: 195~211.
- Ge Rongfeng, Wilde Simon, Zhu Wenbin, Wang Xialei. 2023. Earth's early continental crust formed from wet and oxidizing arc magmas. *Nature*. 623(7986): 1~6.
- Glazner A F, Coleman D S, Mills R D. 2015. The volcanic—plutonic connection [M]// Breiterkreuz C, Rocchi S (eds). *Physical Geology of Shallow Magmatic Systems: Dykes, Sills, and Laccoliths*. New York: Springer International Publishing: 1~22.
- Guan Qi, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Zhang Liangliang, Liu Min, Li Xiaowei, Yu Feng, Mo Xuanxue. 2010. Late Cretaceous adakites in the eastern segment of the Gangdese Belt, southern Tibet: Products of Neo-Tethyan ridge subduction? *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2165~2179.
- Henry J D, Guidotti V C, Thomson A J. 2005. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *American Mineralogist*, 90(2~3): 316~328.
- Hou Kejun, Yuan Shunda. 2010. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the volcanic and sub-volcanic rocks in the Ningwu basin and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 888~902.
- Kong Zhigang, Liang Ting, Mao Jingwen, Xu Shengfa, Xu Hongbing, Yan Panpan, Jin Xiuyong. 2018. Study on perogenesis of granodiorite, metallogenic epoch and petrogenetic—metallogenic setting in the Zhuxiling tungsten polymetallic deposit, southern Anhui Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9): 2632~2656.
- Loucks R R, Fiorentini M L, Henríquez G J. 2020. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon. *Journal of Petrology*, 61(3): ega034~ega034.
- Liang Changhong, Xu Xisheng, He Zhenyu. 2022. Connected volcanic and plutonic association by crystal—melt segregation in the Daiyunshan volcanic field, SE China. *Tectonophysics*, 836: 229409.
- Liu Lei, Xu Xisheng, Zou Haibo. 2012. Episodic eruptions of the Late Mesozoic volcanic sequences insoutheastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and implications for the geodynamics of paleo-Pacific subduction. *Lithos*, 154: 166~180.
- Ling Mingxing, Li Yin, Ding Xing, Teng Fangzhen, Yang Xiaoyong, Fan Weiming, Xu Yigang, Sun Weidong. 2013. Destruction of the North China Craton Induced by Ridge Subductions. *The Journal of Geology*, 121(2): 197~213.
- Liu Jianmin, Yan Jun, Chen Dandan, Li Quanzhong, Liu Xiaoqiang, Yao Hongzhong, Shi Lei, Chen Zhihong. 2016. Petrogenesis of volcanic rocks in Fanchang basin, the Middle—Lower Yangtze River Belt; Zircon Hf—O isotopic constrains. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 289~302.
- Liu Lei. 2015. Late Mesozoic episodic volcanism in SE China: Response to Paleo-Pacific subduction. *Nanjing University*, (2): 146.
- Liu Yuan Yuan, Ma Changqian, Lv Zhaoying, Huang Weiping. 2012. Zircon U-Pb age, element and Sr—Nd—Hf isotope geochemistry of Late Mesozoic magmatism from the Guichi metallogenic district in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Region. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3287~3305.
- Macpherson C G, Dreher S T, Thirlmall M F. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3~4): 581~593.
- Qian Lin, Xie Jiancheng, Huang Shan, Ge Likai, Zhang Xin, Li Quanzhong, Liu Jianmin, Yan Jun, Sun Weidong. 2022. Petrogenesis of Early Cretaceous granitoids in Liyang volcanic basin, eastern China: Geodynamic implications for Paleo-Pacific slab rollback. *Tectonophysics*, 838: 229521.
- Qin Yan, Wang Denghong, Wu Libin, Wang Keyou, Mei Yuping. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the mineralized porphyry in the Dongyuan W deposit in Anhui Province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(4): 479~484.
- Ren Xinxin, Huang Jiandong, Liu Jia, Bi Zhiguo. 2015. Late Jurassic volcanics discovered in the Tunxi area of south Anhui. *Geology of Anhui*, 25(4): 241~244.
- Richards J P. 2003. Tectono—Magmatic Precursors for Porphyry Cu—(Mo—Au) Deposit Formation. *Economic Geology*, 98: 1515~1533.
- Streck M J, Leeman W P, Chealey J. 2007. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt. *Geology*, 35(4): 351~354.
- Shi Hongyang, Xia Yan, Xu Xisheng, Zhu Junyue, He Jianqiang. 2022. Crystal—melt separation of the Cretaceous volcanic—intrusive complex in SE China: High Sr/Y rocks generated by plagioclase accumulation. *Lithos*, 430~431: 106848.
- Su Qiangwei, Mao Jingwen, Wu Shenghua, Zhang Zhaochong, Xu

- Shengfa. 2018. Geochronology and geochemistry of the granitoids and ore-forming age in the Xiaoyao tungsten polymetallic skarn deposit in the Jiangnan Massif tungsten belt, China: Implications for their petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization. *Lithos*, 296~299; 365~381.
- Tang Shuai, Xu Xianbing, Yuan Yanming. 2016&. Geochemistry and geochronology of the volcanic rocks from Tunxi basin in southern Anhui and tectonic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(2): 177~194.
- Vigneresse J L, Tikoff B. 1999. Strain partitioning during partial melting and crystallizing felsic magmas. *Tectonophysics*, 312: 117~132
- Wang Yangyang, Kerkhof A V D, Xiao Yilin, Sun He, Yang Xiaoyong. 2017. Geochemistry and fluid inclusions of scheelite-mineralized granodiorite porphyries from southern Anhui Province, China. *Ore Geology Reviews*, 89: 988~1005.
- Wang Guoguang, Ni Pei, Zhao Kuidong, Wang Xiaolei, Liu Jiqiang, Jiang Shaoyong, Chen Hui. 2012. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic—intrusive complex, SE China: Implications for tectonic evolution and Cu—Au mineralization. *Lithos*, 150: 135~154.
- Wang Sinuo, Yan Jun. 2021. Coexisting Early Cretaceous arc-type and OIB-type mafic magmatic rocks in the eastern Jiangnan Orogen, South China Block: Implications for paleo-Pacific plate. *Lithos*, 400~401; 106421.
- Wang Sinuo, Yan Jun, Li Quanzhong, Xie Jiancheng, Yang Chao. 2021. Petrogenesis of the Late Mesozoic gabbros in the eastern Jiangnan Orogen, South China: Characteristics of the lithospheric mantle. *Geological Journal*, 56: 382~404.
- Wang Lijuan, Huang Jianping, Yu Jinhai, Griffin W L, Wang Rucheng, Zhang Shaoqin, Yang Yinghe. 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. *China Sci. Bull.*, 59(14): 1305~1317.
- Wang Deen, Zhang Yuanshuo, Gao Ran, Li Quanzhong, Yan Jun, Hu Shunli. 2014&. Zircon LA-ICP MS dating of volcanic rocks from Tianmushan basin in the lower Yangtze region and its geological significances. *Resources Survey and Environment*, 35(3): 178~184.
- Wang Deen, Zhou Xiang, Yu Xinqi, Du Yudiao, Yang Heming, Fu Jianzhen, Dong Huiming. 2011&. SHRIMP zircon U-Pb dating and characteristics of Hf isotopes of the granodiorite porphyries in the Dongyuan W—Mo ore district, Qimen area, southern Anhui. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1514~1529.
- Wang Dezi, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, Fan Honghai. 2000&. Characteristics and Petrogenesis of Late Mesozoic granitic volcanic intrusive complexes in Southeastern China. *Geological Journal of China Universities*, 6(4): 487~498.
- Wang Jiaen, Liu Yuandong, Wang Jianguo, Wang Zhen, Tao Li. 2016&. Age assignment of the Moshishan Group volcanic rocks in the Lishui area, Zhejiang Province. *East China Geology*, 37(3): 157~165.
- Wang Xiang. 2022&. Huangshan Movement in SE China and its granitic magmatism and mineralization. *Geological Review*, 68(5): 1677~1728.
- Wang Xueyin, Hu Wenxuan, Hu Guang, Yao Suping, Cao Jian, Wang Xiaolin, Xie Xiaomin. 2012&. Microfacies and zircon U-Pb dating of the Lower Cretaceous Shipu limestone in Xiangshan, eastern Zhejiang. *Geological Review*, 58(4): 614~626.
- Watson E B, Harrison T M. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth. *Science*, 308(5723): 841~844.
- Wen Daren, Chung Sunlin, Song Biao, Iizuka Y, Yang Huaijen, Ji Jiangqing, Liu Dunyi, Gallet S. 2008. Late Cretaceous Gangdese intrusions of adakitic geochemical characteristics, SE Tibet: Petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 105(1~2): 1~11.
- Wu Rongxin, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao. 2005&. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic granodiorites in South Anhui. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 587~606.
- Xing Fengming, Chen Jiangfeng, Xu Xiang, Zhou Taixi, Folland K A. 1991&. Nd isotopic characteristics of low grade metamorphic and sedimentary rocks from southern Anhui Province and their significance in tectonics. *Geoscience*, 5(3): 290~299.
- Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Chen Rong, Shen Jialin, Wei Naiyi, Zhou Yuzhang. 2010. Three Stages of Mesozoic Bimodal igneous rocks and their tectonic implications on the continental margin of Southeastern China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 78(1): 27~39.
- Xu Meihui. 1992&. Early Jurassic bimodal volcanic rocks and their structure environment in Yongding county, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 11(2): 115~125.
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Dong Jia, Shu Liangshu. 2011. U - Pb dating of volcanic rocks and granites along the Wuyishan Belt: Constraints on tuning of Late Mesozoic tectonic events in Southeast China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 85(1): 130~144.
- Xu Xisheng, Xie Xin. 2005&. Late Mesozoic—Cenozoic basaltic rocks and crust—mantle interaction, SE China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 318~334.
- Xu Xisheng. 2008&. Several problems worthy to be noticed in the research of granites and volcanic rocks in SE China. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 283~294.
- Xue Huaimin, Wang Yinggen, Ma Fang, Wang Cheng, Wang Deen, Zuo Yanlong. 2009&. Zircon U-Pb SHRIMP ages of the Taiping (calc-alkaline)—Huangshan (alkaline) composite intrusive: Constraints on Mesozoic lithospheric thinning of the southeastern Yangtze craton, China. *China Ser. D—Earth Sci.*, 39(7): 979~993.
- Xue Huaimin, Ma Fang, Song Yongqin, Xie Yaping. 2010&. Geochronology and geochemistry of the Neoproterozoic granitoid association from eastern segment of the Jiangnan orogen, China: Constraints on the timing and process of amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3215~3244.
- Xue Huaimin, Ma Fang, Guan Haiyan, Wang Yipeng. 2013&. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in Huaining basin in comparison with other basins in the middle—lower Yangtze region. *Geology in China*, 40(3): 694~714.
- Xue Huaimin. 2016&. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of volcanism in the Liyang volcanic basin on the southeastern margin of the Middle—Lower Yangtze region. *Geochimica*, 45(3): 213~234.
- Xue Huaimin, Wang Yipeng, Ji Zeyang. 2016&. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the volcanic complex in the Huaining basin, Middle—Lower Yangtze region, and geological significance. *Geological Review*, 62(5): 1166~1184.

- Xue Huaimin. 2021&. Geochronology, geochemistry and stratospheric interactions of Late Mesozoic granitoids near the boundary between Anhui and Zhejiang provinces in the eastern segment of the Jiangnan orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 37(2): 433~461.
- Yan Jun, Liu Haiquan, Song Chuanzhong, Xu Xisheng, An Yajun, Liu Jia, Dai Liqun. 2009#. Zircon U-Pb geochronology of the volcanic rocks from Fanchang—Ningwu volcanic basins in the Lower Yangtze region and its geological implications. *Chinese Sci. Bull.*, 54(12): 1716~1724.
- Yan Jun, Shi Lei, Liu Jianmin, Liu Xiaoqiang, Jiang Zizhao. 2013&. Zircon LA-ICPMS dating of the volcanic rocks from Huaining basin in the middle—lower Yangtze valley. *Geological Review*, 59(6): 1218~1226.
- Yan Jun, Liu Jianmin, Li Quanzhong, Xing Guangfu, Liu Xiaoqiang, Xie Jiancheng, Chu Xiaoqiang, Zhihong Chen. 2015. In situ zircon Hf—O isotopic analyses of late Mesozoic magmatic rocks in the Lower Yangtze River Belt, central eastern China: Implications for petrogenesis and geodynamic evolution. *Lithos*, 227: 57~76.
- Yan Jun, Hou Tianjie, Wang Aiguo, Wang Deen, Zhang Dingyuan, Weng Wangfei, Liu Jianmin, Liu Xiaoqiang, Li Quanzhong. 2017. Petrogenetic contrastive studies on the Mesozoic early stage ore-bearing and late stage ore-barren granites from the southern Anhui Province. *Science China (Earth Sciences)*, 60(11): 1920~1941.
- Yan Jun, Liu Xiaoqiang, Wang Sinuo, Xie Jiancheng, Liu Jianmin. 2021. Metallogenic type controlled by magma source and tectonic regime: Geochemical comparisons of Mesozoic magmatism between the Middle—Lower Yangtze River Belt and the Dabie Orogen, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 133: 104095.
- Yan Panpan, Liang Ting, Xu Shengfa, Lu Lin, Kong Zhigang, Jin Xiuyong. 2019&. Tracer origin of Zhuxiling granodiorite in the southern Anhui, China: Evidence from mineralogical and geochemical characteristics. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(2): 141~155.
- Yang Wencai. 2022&. The ocean—continent transition process on formation of Zhejiang—Fujian volcanic rock belt. *Geological Review*, 68(2): 375~384.
- Yang Wencai. 2023&. Origin of the Mid—Lower-Yangtze tectonic belt and Yanshanian ocean subduction. *Geological Review*, 69(5): 1619~1627.
- Ye Longxiang. 2023&. A comparative study between skarn-type W—Mo and W—Cu mineralization system in Jiangnan tungsten metallogenic belt, China. Hefei University of Technology, 194.
- Yu Xinqi, Chen Ziwei, Liu Xiu, Ji Xiang, Zhou Shuzhao, Yang Xinpeng. 2016&. LA-ICP-MS zircon age of volcanic rock of Shiling Formation in Tunxi area, south Anhui, and redetermination of its epoch. *Geological Bulletin of China*, 35(1): 175~180.
- Yu Xinqi, Wang Deen. 2001&. Jurassic—Cretaceous sequence stratigraphy of Huangshan area in south Anhui. *Geoscience*, 15(1): 27~34.
- Yu Shiqi, Liu Huichuan, Chen Xi, Li Wenqi, Wang Kai, Ren Weiwei. 2023&. Decoupling of twin elements and tetrad effects of rare earth elements in highly fractionated granites. *Geochemica*, 52(3): 344~359.
- Yue Qian, Yan Jun, Liu Jianmin, Xie Jiancheng, Li Quanzhong, Luo Qiankun. 2020. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of the early Cretaceous granitoids in the Jingde—Guangde area, Anhui province, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 190: 104150~104150.
- Zhang Aiping, Sun Tao, Tan Shucheng, Li Wanting, Liu Zheng, Zhou Jiayi, Tang Ming. 2021. Geochronology, geochemistry and oxidation state of the Dongyuan biotite granite in the Jiangnan tungsten ore belt: Implications for the I-type granite-related W mineralization. *Ore Geology Reviews*, 133.
- Zhang Jianfang, Zhu Chaohui, Wang Jianguo, Cai Xiaoliang, Liu Jian, Wang Longwu, Chen Xiaoyou, Liu Fenglong. 2018&. Origin of volcanic rocks in Tianmushan basin in northwest Zhejiang: Evidence from their zircon U-Pb ages, geochemistry and Sr—Nd isotopes. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(5): 918~939.
- Zhang Qi, Yuan Jie. 2024&. The crisis and opportunity of geochemical research. *Geological Review*, 70(5): 1907~1926.
- Zhang Yanjie, Liao Shengbing, Zhou Xiaohua, Jiang Yang, Yu Minggang, Jiang Ren, Zhao Xilin, Chen Zhihong, Zhao Lin, Huang Wencheng. 2012&. Element characteristics and prominence analysis of meta-argillo-arenaceous rocks in Zhanggongshan area, Anhui—Jiangxi border region. *Geology in China*, 39(5): 1183~1198.
- Zhang Yuzhi, Wang Yuejun, Geng Hongyan, Zhang Yanhua, Fan Weiming, Zhong Hong. 2013. Early Neoproterozoic (~850 Ma) back-arc basin in the Central Jiangnan Orogen (Eastern South China): Geochronological and petrogenetic constraints from metabasalts. *Precambrian Research*, 231: 325~342.
- Zhang Zheng. 2018&. Comparative study on geochemistry of geological and metallogenic rocks of Dongyuan and Jiangjia porphyry type tungsten molybdenum ore in Anhui. *China University of Geosciences (Beijing)*, (6): 75.
- Zhao Liang, Guo Feng, Fan Weiming, Zhang Qingwen, Wu Yangming, Li Jingyan, Yan Wen. 2016. Early Cretaceous potassic volcanic rocks in the Jiangnan Orogenic Belt, East China: Crustal melting in response to subduction of the Pacificzanagi ridge? *Chemical Geology*, 437: 30~43.
- Zheng Yongfei, Zhang Shaobing, Zhao Zifu, Wu Yuanbao, Li Zhengxiang, Wu Fuyuan. 2006. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust. *Lithos*, 96(1): 127~150.
- Zhi Qian, Ren Rui, Duan Fenghao, Huang Jiaxuan, Zhu Zhao, Zhang Xinyuan, Li Yongjun. 2024&. Genetic mechanism of Late Carboniferous intermediate acid volcanic rocks in southern West Junggar and its constraints on the closure of the Junggar Ocean. *Earth Science Frontiers*, 31(3): 40~58.
- Zhou Jie. 2013&. Origin of tungsten-bearing granites in the eastern Jiangnan Orogen belt. *Nanjing University*, (2): 106.
- Zhou Jie, Ge Weiya, Jiang Yaohui, Xu Shengfa, Fu Jianzhen. 2015&. Petrochemistry and mineralogy of Dongyuan tungsten-bearing pluton in eastern Jiangnan Orogen. *Geochemica*, 44(2): 117~130.
- Zhou Qing, Jiang Yaohui, Zhao Peng, Liao Shiyong, Jin Guodong. 2012. Origin of the Dexing Cu-bearing porphyries, SE China: Elemental and Sr—Nd—Pb—Hf isotopic constraints. *International Geology Review*, 54(5): 572~592.
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, Zhang Lejun, Qian Bin, Ma Liang, Yang Xifei, David R C. 2011. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu Basin of China. *Science China Earth Sciences*, 54(2): 185~196.
- Zhou Xiaoming, Li Wuxian. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3~4): 269~287.

Zhou Xiang, Yu Xinqi, Wang Deen, Wang Dehui, Li Chunlin, Fu Jianzhen, Dong Huiming. 2011. Characteristics and geochronology of the W, Mo-bearing granodiorite porphyry in Dongyuan, Southern Anhui. *Geoscience*, 25(2): 201~210.

Zhou Xiang, Yu Xinqi, Yang Heming, Wang Deen, Du Yudiao, Ke

Hongbiao. 2012. Petrogenesis and geochronology of the high Ba—Sr Kaobeijian granodiorite porphyry, Jixi County, South Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3403~3417.

Zhou Zuoxia. 1986. The origin of intrusive mass in Fengshandong, Hubei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 59~70.

Genesis and tectonic significance of Late Mesozoic volcanic rocks in the Tunxi Basin of southern Anhui

HU Yimeng, YAN Jun, TAO Keqin, XU Linyu, LIU Qun

School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Abstract: The Tunxi Basin in southern Anhui Province, located in the eastern segment of the Jiangnan Orogenic Belt, exposes intermediate—acidic volcanic rocks of the Shiling Formation. The early-stage volcanism is dominated by rhyolitic tuff and trachyandesitic breccia, with zircon U-Pb ages of 150.8 ± 2.8 Ma and 156.1 ± 2.6 Ma respectively, indicating Late Jurassic volcanic rocks and the earliest stage of magmatic activity in the Mesozoic era in southern Anhui. Both types of rocks exhibit rich Si and K and low Mg characteristics, belonging to the high potassium calcium alkaline series. The distribution pattern of rare earth elements is right skewed, showing weak Eu negative anomalies, enriched with large ion lithophile elements and light rare earth elements, and depleted in high field strength elements. At the same time, the rock mass has high Sr, Sr/Y, and $(La/Yb)_N$ values, which are characteristics of adakite. The range of $\varepsilon_{Nd}(t)$ values is $-6.36 \sim -4.92$. The average formation temperatures of the two types of rocks obtained by zircon Ti thermometers are 763°C and 795°C , respectively. Coarse andesite breccia is slightly higher, with a total average temperature of 785°C . Based on the geochemical characteristics of rocks and regional geological data, this article believes that the volcanic rocks of the Shiling Formation in the Tunxi Basin originated from a mixture of crustal and mantle magma. The crustal magma is a product of partial melting in the Neoproterozoic sedimentary rock source area, while the mantle magma originates from the mantle that has been replaced by material from subducting plates. It has a synchronous, homologous, and large-scale coupling relationship with the granodiorite in southern Anhui, and belongs to a volcanic intrusive complex system in a broad sense. Based on this, the Mesozoic magmatism in southern Anhui initiated with the Shiling Formation volcanics and minor intermediate—acidic intrusions, followed by large batholithic monzogranites and bimodal volcanics, and culminated with A-type K-feldspar granites. This tripartite evolution reflects the tectonic transition from low-angle subduction through slab rollback to renewed low-angle subduction of the Paleo-Pacific Plate.

Keywords: volcanic rocks of the Shiling Formation; southern Anhui; Tunxi Basin; Late Jurassic; geochemistry; Sr—Nd isotopes

Acknowledgements: This article is the result of the National Natural Science Foundation of China funded project (No. 42030801)

First author: HU Yimeng, female, born in 1999, master student; Email: yimeng1927@126.com

Corresponding author: YAN Jun, male, born in 1966, professor, is mainly engaged in teaching and research of magmatic rock petrology and geochemistry; Email: junyan@hfut.edu.cn

Manuscript received on: 2025-02-11; Accepted on: 2025-06-09; Published online on: 2025-06-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.06.055

Edited by: ZHANG Yuxu