

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

薛怀民¹ 马 芳² 关海燕³ 王一鹏³

(1. 中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 3. 内蒙古自治区克什克腾旗国土资源局, 内蒙古 克什克腾 025350)

摘要: 怀宁盆地是长江中下游地区晚中生代发育的一系列断陷型火山岩盆地中的一个, 盆地内的火山岩主体以高钾和相对富碱为特征, 属典型的橄榄玄粗岩系列。但晚期出现玄武质—流纹质双峰式火山岩组合。盆地内的火山岩均表现出明显富集 Rb、Th、U、K 等强不相容元素和轻稀土元素, 亏损高场强元素 Nb 和 Ta 的地球化学特征。本文分别测得怀宁盆地早期彭家口组粗安岩的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 (129.4 ± 1.6) Ma 和 (131.6 ± 0.6) Ma, 晚期江镇组双峰式火山岩的酸性端元——流纹岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (122.3 ± 0.7) Ma。区域对比表明, 怀宁盆地内火山作用的时间总体与庐枞盆地等长江中下游地区其他火山岩盆地中岩浆活动的时代类似, 但火山活动结束的时间要晚于其他盆地约 6 Ma。怀宁盆地内的火山岩与长江中下游地区其他橄榄玄粗岩系列火山岩盆地相比具有更广泛的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化范围和相对更低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 这与其所处的构造位置紧邻大别造山带, 有更多地壳物质的参与有关, 显示怀宁火山岩盆地内的岩浆主要来自富集型地幔的部分熔融, 但不同程度地混染了古老的地下壳物质。

关键词: 橄榄玄粗岩系列; 双峰式火山岩; 锆石 U-Pb 定年; 岩浆成因; 怀宁火山岩盆地; 长江中下游

中图分类号: P588.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)03-0694-20

长江中下游地区在晚中生代(早白垩世)发育了一系列断陷型的火山岩盆地, 自西而东依次为金牛盆地、怀宁盆地、庐枞盆地、繁昌盆地、滁州盆地、宁芜盆地、溧水盆地和溧阳盆地(图 1-a), 怀宁盆地是其中规模较小、研究程度最低的一个, 到目前为止尚未见到有关怀宁盆地中生代火山岩研究成果的报道。但该盆地所处的构造位置特殊(紧邻大别山造山带和郟庐断裂带)、火山岩类型特殊(主体为一套别具特色的橄榄玄粗岩系列, 晚期发育双峰式火山岩), 这在长江中下游地区的火山岩盆地中既具有一定的代表性又具独特性。通过对比同处郟庐断裂带旁侧, 但空间上与大别山造山带的密疏关系又明显不同的怀宁盆地和庐枞盆地, 对于了解区内岩浆作用

动力学环境的变迁、大别山造山带与前陆地区晚中生代岩浆作用之间的异同性及内在联系等都具有重要意义。本文利用 SHRIMP 和 LA-ICP MS 法分别测定了怀宁盆地不同类型火山岩的锆石 U-Pb 年龄, 并系统测定了盆地内火山岩的元素地球化学和 Sr、Nd 同位素组成, 结合与长江中下游其他橄榄玄粗岩系列火山岩盆地(尤其是临近的庐枞盆地)及大别造山带内晚中生代花岗岩类侵入岩的对比, 探讨了岩浆成因。

1 地质背景

1.1 构造背景与盆地下伏构造层

怀宁盆地位于扬子克拉通的北缘, 大别—苏鲁

收稿日期: 2013-01-27; 改回日期: 2013-04-23

基金项目: 深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-05-05)、中国地质调查局地质调查项目(1212010711814)和地质矿产调查评价专项(1212011121116)共同资助。

作者简介: 薛怀民, 男, 1962年生, 研究员, 岩石学专业; E-mail: huaiminx@sina.com。

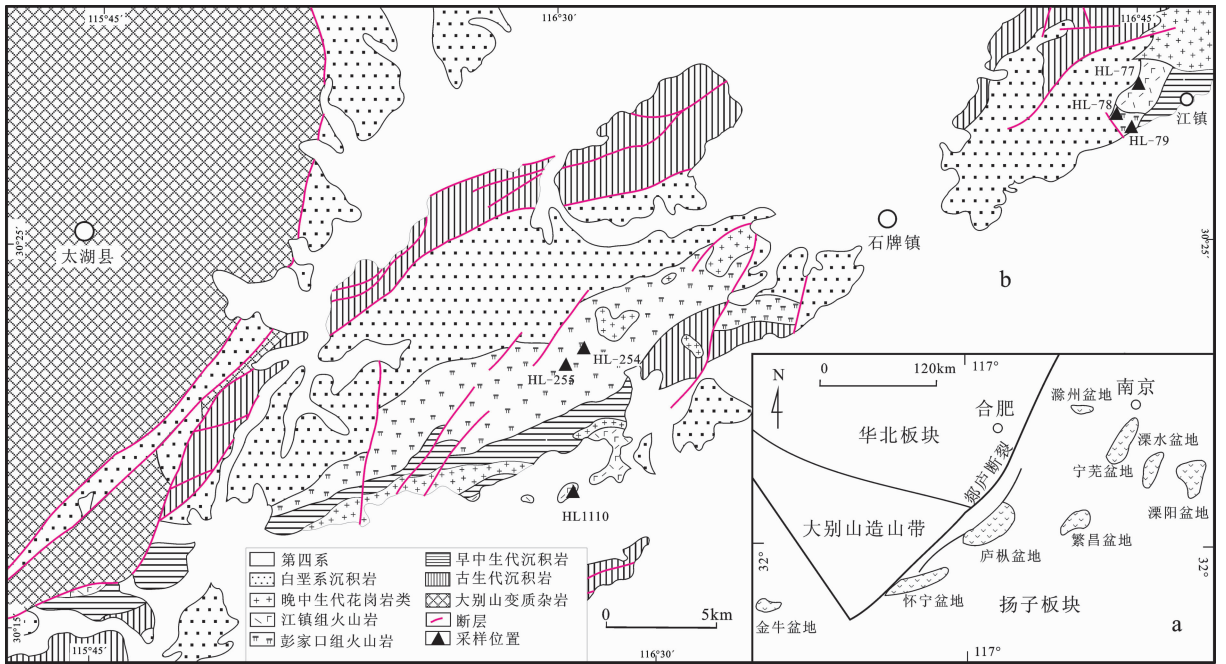


图 1 怀宁火山岩盆地地质简图

Fig.1 Diagrammatic geological map of Huaining volcanic basin

印支(早中生代)造山带的前陆地区,以郟庐断裂带为界与北西侧的大别造山带紧邻。盆地受与郟庐断裂带呈小角度相交的次级断裂控制,呈北东东向延伸。该盆地是在早中生代拗陷基础上发育起来的一个陆相断陷型火山岩盆地,属“继承式”火山岩盆地。

怀宁盆地所处的扬子克拉通东部(下扬子地区),晚中生代火山活动前的构造层包括克拉通基底和震旦纪以来的沉积盖层两部分。其中克拉通基底不仅包含中、新元古代的浅变质褶皱基底,可能还包含太古宙—古元古代的深变质结晶基底。虽然扬子克拉通范围内太古宙岩石目前仅见于湖北省宜昌附近的崆岭地区^[1-4],但一些火山岩中捕获的锆石、岩浆岩/变质岩中的锆石继承核、沉积岩中碎屑锆石的 U-Pb 年龄以及新元古代以来花岗岩类侵入岩(及中酸性火山岩)普遍具有 1.8~2.2 Ga 的 Nd 同位素模式年龄似乎都暗示,扬子克拉通内广泛存在着太古宙,尤其是古元古代的基底^[3,5-7]。但大量的资料证明,700~825 Ma 的新元古代是扬子克拉通所经历过的一次最强烈的构造-岩浆-热事件,形成了大量的岩浆岩^[8-17]。扬子克拉通之上的沉积盖层也包括两套,一是震旦纪到中三叠世,在较稳定的陆表海环境下沉积的一套巨厚的陆源碎屑岩和碳酸盐,厚度达 8~10 km;另外是在大别山造山带的前陆拗陷带内,

局部沉积的一套(晚三叠世—中侏罗世)陆相碎屑岩。怀宁盆地火山岩的直接基底为中侏罗统罗岭组的陆相碎屑沉积建造。

1.2 火山地质

怀宁火山岩盆地呈长条带状展布,长轴北东东向。盆地由东、西两部分构成,其间相隔约 15 km,为早白垩世末期形成的砾岩—砂砾岩不整合覆盖,从砾石中含大量怀宁盆地的火山物质推测其为就近剥蚀堆积的产物。西部火山岩出露的规模相对较大,长约 26 km,宽 1~5 km 不等,面积约 80 km²;而东段的出露面积很小,仅约 4 km²。盆地内中生代火山岩的分布明显受到古地形的制约,在盆地南东侧的早中生代基底隆起区,火山岩的厚度很薄(图 1-b),向西北侧则明显增厚。火山作用的产物在东、西两部分虽略有差异,如东部以爆发相的火山碎屑岩更发育,而西部则以溢流相的熔岩占优势,但无论在火山活动产物的层序、岩石组合面貌,还是地球化学性质上,两地都具有一定的可比性,推测它们是在同一动力学背景下,从同一岩浆房的不同通道中(或/和岩浆房不同层位)喷发形成的。

对于盆地内的晚中生代火山岩,按其形成的先后和较大喷发间断的存在,自下而上分为彭家口组和江镇组,两者之间局部有数十米厚的泥岩—粉砂

岩夹层,指示其间有明显的火山喷发间断。其中彭家口组以爆发相的火山碎屑岩开始,继之为溢流相,最后以火山沉积相而告终,构成了一个完整的火山喷发旋回。火山岩的成分以粗面质为主,初期出现低硅流纹质-石英粗面质,晚期则出现粗安质,岩石的酸度(SiO_2 含量)随时间有降低的趋势,指示可能为成分分带的岩浆房逐层排出的产物。江镇组出露较局限,主要见于盆地的东部地区,而西部仅在基底隆起区的南侧有零星分布(图 1-b)。该组下部主要为粗面岩、粗安岩,顶部见粗面玄武岩与流纹岩共生而显示双峰式组合的特点。

盆地内及其边部潜火山岩/浅成侵入岩发育。岩性主要有两类,一类为钾长花岗斑岩,其成因可能与彭家口组的火山岩有联系;另一类为辉绿玢岩、辉石闪长玢岩,与江镇组双峰式火山岩的基性端元可能属同源异相的产物。

2 样品与分析方法

2.1 主要样品描述

晶屑凝灰岩(样品 HL-79、HL-253):主要分布在彭家口组的下部,以斜长石晶屑为主,其次为石英晶屑及少量黑云母,晶屑总量达 50%左右。基质主要为玻屑和火山灰。

粗面岩(样品 HL-73、HL-78、HL-252、HL-253、HL-254、HL-255):是彭家口组中、上段的主要岩石类型,构成了彭家口组的主体。岩石呈粗面结构、斑状结构,斑晶含量为 20%~30%,以钾长石为主,基质也主要由细小的长石组成。岩石中含少量针状的角闪石,目前多已暗化。

粗安岩(样品 HL-74、HL-76、HL1110):主要分布在江镇组的下部,在彭家口组的上部也有少量发育。岩石呈斑状结构,斑晶主要为斜长石,含量约 15%,其次为角闪石。基质为显微晶质,主要由细小的长石组成。

流纹岩(样品 HL-77):主要分布在江镇组的上部,与杏仁状玄武岩构成双峰式组合。岩石呈斑状结构,但斑晶的含量很少,仅约 5%,主要为斜长石斑晶。基质为隐晶质,局部有脱玻化而呈霏细结构。岩石中流纹构造发育。

辉绿玢岩、辉石闪长玢岩(样品 HL-75):往往呈小岩株产出,多见于盆地的东部地区,主要作为中央侵入体出露。岩石呈斑状结构,斑晶主要为斜长石,

少量透辉石斑晶。基质为辉绿结构,长石呈细小的长柱状,总体定向排列。暗色矿物(成分因颗粒太细小而不清楚)呈细小的粒状充填在长石空隙中。

2.2 分析方法

用作全岩成分分析的样品尽可能保证新鲜,但部分熔岩(如样品 HL-76)和基性潜火山岩(如样品 HL-75)中含有大量的碳酸盐杏仁体,对于这部分样品,先破碎到直径约 1~2 cm 的小块,尽可能去除杏仁体,再粉碎到 200 目以下。

全岩成分是在北京国家地质测试分析中心分析的,其中主元素用 X 荧光光谱法(XRF)完成,所用仪器为日本理学 3080,误差 $<0.5\%$;微量元素 Zr、Sr、Ba、Zn、Rb 和 Nb 也是用 X 荧光光谱法完成,所用仪器为 Rigaku-2100,误差分别为 Ba=5%,其他元素 $<3\%$;稀土元素及 V、Cr、Ni、Co、Cu、Pb、U、Th、Ta 和 Hf 用 TJA-PQ-ExCell 等离子体光谱仪分析,误差 $<5\%$ 。

对于全岩的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素组成分析,样品 HL-73、HL-74、HL-75 和 HL-78 是在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室完成的,样品 HL-252a、HL-252b、HL-253、HL-254 和 HL-255 是在中国地质科学院地质研究所同位素实验室完成的,分析流程及实验条件与 Cohen et al.^[18]、Chavagnac 和 Jahn^[19]及 Jahn et al.^[20]所描述的类似。

锆石是按常规方法分选,并在双目镜下仔细挑纯。将锆石与一片 RSES 参考样 SL13 及数粒 TEMORA 置于环氧树脂中,然后磨至约一半,使锆石内部暴露。分析点的选择首先根据锆石反射和透射照片进行初选,再与阴极发光照片反复对比,力求避开矿物包裹体和裂隙等缺陷。

SHRIMP 定年测试是在中国地质科学院北京离子探针中心虚拟网络实验室利用澳大利亚 Curtin 理工大学的 SHRIMP II 离子探针仪完成的。仪器条件和数据采集参见 Williams^[21]的有关描述。靶径约 20 μm ,数据通过 5 个循环收集。测试是在二次离子流强度约为 4.5 nA,质量分辨率约 5000。应用 RSES 参考锆石 TEMORA (417 Ma)进行元素间的分馏校正,Pb-U 校正公式采用 $\text{Pb}/\text{U}=\text{A}(\text{UO}/\text{U})^2$ ^[22]。用 ²⁰⁴Pb 校正普通 Pb。应用另一 RSES 参考样 SL13(年龄为 572 Ma, U 含量为 238 $\mu\text{g/g}$) 标定所测锆石的 U、Th 和 Pb 含量。数据处理应用 Ludwig^[23]的 Isoplot 程序。

LA-ICP-MS 定年测试是在北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室进行。激光剥蚀使用的是德国相干公司(Coherent)准分子激光器 COMPex Pro102, 激光条件为: 激光束斑 $32\ \mu\text{m}$, 激光能量密度 $20\ \text{J}/\text{cm}^2$, 频率 $5\ \text{Hz}$, 使用纯度为 99.999% 的 He 作为载气将激光剥蚀出来的物质带入等离子体质谱。质谱分析采用美国安捷伦科技有限公司电感耦合等离子体质谱仪 Agilent ICP-MS 7500ce, 功率 $1500\ \text{W}$, 冷却气 $15\ \text{l}/\text{min}$, 辅助气 $1\ \text{l}/\text{min}$, 载气 $0.96\ \text{l}/\text{min}$, 积分时间 ^{49}Ti 、 ^{207}Pb 为 $50\ \text{ms}$, ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{208}Pb 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 为 $20\ \text{ms}$, 其余同位素为 $10\ \text{ms}$ 。信号采集时间共 $75\ \text{s}$, 采集信号前先用激光剥蚀 $3\ \text{s}$ 以去除样品表面可能存在的污染, 在进行 $15\ \text{s}$ 的空白信号采集后开始触发激光采集样品信号。每 4 个未知样测试 1 个 TEMORA 锆石标样和 NIST 610 玻璃标样。数据处理先应用西澳大学的 Glitter 软件获得微量元素含量及 U-Pb 同位素比值, 微量元素的含量以 Si 元素为内标, 以 NIST 610 为外标; U-Pb 同位素比值的确定采用 TEMORA 锆石标样($417\ \text{Ma}$)进行元素间的分馏校正, 由于锆石中 ^{204}Pb 的含量极低, 因此未进行普通铅的校正。

3 分析结果

表 1 为怀宁盆地部分火山岩样品的主量元素和微量元素丰度及 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素组成, 表 2 和表 3 分别是 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 法的锆石 U-Pb 定年结果。

3.1 岩石化学和微量元素地球化学特征

怀宁盆地内的火山岩以中酸性偏碱性为主, 在 TAS 图上主要位于粗面岩和粗面英安岩区域, 少数落在粗安岩、流纹岩及响岩区域(图 2-a)。在 SiO_2 - K_2O 关系图上, 除晚期形成的双峰式火山岩属高 K 钙碱性系列外, 绝大多数岩石属橄榄玄粗岩系列(图 2-b)。这些火山岩样品在地球化学上表现出富集轻稀土元素和亏损重稀土元素的特征, 轻、重稀土元素的分馏程度强($(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 $8.97\sim 30.54$), 除早期喷发的流纹质凝灰岩中有明显的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.55$) 外, 总体无明显的 Eu 异常(弱的负 Eu 异常到弱的正 Eu 异常), 稀土元素球粒陨石标准化曲线呈比较平滑的右倾型(图 2-c, e)。另外, 同为彭家口组, 出露于盆地东部的粗面岩其稀土元素总量明显高于盆

地西部的同类岩石, 而轻、重稀土元素的分馏程度则弱于西部的同类岩石(表 1)。

在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上, 怀宁盆地内的火山岩表现出明显富集 Rb、Ba、Th、U 等不相容元素的特征, Sr 除在晚期侵位的辉绿玢岩中呈正异常外, 其他均表现出特征性的负异常(图 2-d, f)。高场强元素的行为发生了分化, 其中 Nb 和 Ta 显示出一定程度的亏损, 而 Zr、Hf 则具明显正异常。

3.2 Sr-Nd 同位素组成

怀宁盆地内火山岩/潜火山岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化范围很广, 为 $-5.33\sim -19.23$, 其中 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较高的那些样品类似于富集型的扬子克拉通岩石圈地幔的 Nd 同位素组成^[7], 而 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低的那些样品则类似于大别造山带内燕山期花岗岩类侵入体的 Nd 同位素组成(一般认为是由先存的古元古代地壳物质部分熔融的产物^[26-27]), 但大多数样品的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于两者之间($-9.36\sim -12.08$), 暗示富集的岩石圈地幔和古老的地壳物质都参与了怀宁盆地内岩浆的成因。空间上, 同为彭家口组, 产于盆地东部火山岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-5.33\sim -5.52$) 明显高于盆地西部的火山岩($-10.04\sim -19.23$), 基于盆地西部紧邻大别造山带, 而东部相对远离造山带的空间格局, 可能指示盆地西部的岩浆受到明显的地壳混染, 而盆地东部的岩浆可能直接来自富集型岩石圈地幔的部分熔融(可能还经历过分异演化)。时间上, 以盆地东部为例, 由早(彭家口组)到晚(江镇组), 岩石的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值显著变小, 可能意味着随着岩浆在高位岩浆房中驻留的时间延长, 地壳物质混染的程度显著增加。

怀宁盆地内的火山岩/潜火山岩由于普遍具有高的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 导致部分样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值因校正过度而出现不合理的数值 (≤ 0.700 , 表 1), 但从几个 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值比较小的样品可以看出, 怀宁盆地内火山岩/潜火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初时比值主要介于 $0.7047\sim 0.7069$ 。彭家口组早期喷发的流纹质凝灰岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初时比值高达 0.7097 , 结合其很低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-19.23), 主要反映壳源的特点(详见后面的讨论)。

3.3 锆石 U-Pb 年龄

3.3.1 彭家口组

本次研究共对 3 个采自彭家口组的火山岩样品进行了锆石 U-Pb 年龄测试, 其中对样品 HL-79 和 HL-78 采用的是 LA-ICP-MS 法, 对样品 HL-

表 1 怀宁盆地火山岩的常量(%)、微量元素($\mu\text{g/g}$)含量及 Rb - Sr、Sm - Nd 同位素组成
 Table 1 Major element (%), trace element ($\mu\text{g/g}$) and Nd - Sr isotopic compositions of volcanic rocks from Huaining basin

盆地方位 地层(组)	西部						东部				
	彭家口组			江镇组			彭家口组		江镇组		
样号	HL-253	HL-252a	HL-252b	HL-254	HL-255	HL-1110	HL-73	HL-78	HL-74	HL-76	HL-75
岩性	凝灰岩	石英粗面岩	粗面岩	粗面岩	粗面岩	流纹英安岩	粗面岩	粗面岩	粗安岩	粗安岩	辉石闪长玢岩
SiO ₂	70.51	68.46	66.12	61.7	64.14	68.64	65.11	62.72	61.28	62.00	55.80
TiO ₂	0.47	0.52	0.56	0.65	0.51	0.47	0.66	0.76	0.71	0.90	1.43
Al ₂ O ₃	14.52	14.28	15.93	17.26	16.43	15.85	16.80	18.14	17.23	16.91	16.64
Fe ₂ O ₃	2.7	3.82	4.17	3.89	2.66	2.89	2.25	2.88	2.79	4.77	5.70
FeO	0.31	0.09	0.09	0.16	0.45	0.15	0.45	0.36	0.79	1.47	3.45
MnO	0.03	0.02	0.02	0.01	0.04	0.07	0.06	0.06	0.04	0.21	0.14
MgO	0.27	0.17	0.19	0.06	0.18	0.33	0.14	0.42	0.59	1.09	2.68
CaO	0.87	0.3	0.04	0.28	1.01	0.82	0.39	1.16	2.83	0.26	3.28
Na ₂ O	2.87	0.22	0.08	0.1	0.94	5.17	0.92	1.12	2.12	1.59	4.41
K ₂ O	4.83	10.75	10.8	15.69	12.02	4.06	12.85	10.95	7.79	6.55	2.41
P ₂ O ₅	0.17	0.19	0.1	0.2	0.17	0.18	0.15	0.14	0.25	0.39	0.62
H ₂ O ⁺	1.56	1.06	1.52	0.26	1.22	0.88	0.58	1.08	1.72	2.86	2.74
CO ₂	0.4	0.21	0.09	0.14	0.1	0.19	0.20	0.28	2.34	0.67	0.30
总量	99.51	100.09	99.71	100.4	99.87	99.70	100.56	100.07	100.48	99.68	99.60
Sc	2.82	4.25	3.25	2.92	2.87	5.59	5.19	7.36	6.59	12.7	18.2
Cr	16.5	16.2	15.7	30.8	9.52	8.39	2.56	3.08	2.12	75.7	123
Co	3.54	5.37	5.85	2.55	2.36	7.07	4.19	1.94	7.99	15.4	33.8
Ni	10.5	9.89	11.3	14.2	4.59	7.44	39.8	5.91	17.6	51.4	93.3
Rb	97.7	252	240	315	223	105	346	323	171	163	66.2
Sr	200	60.7	42.9	38.9	174	680	33.9	59.2	149	93.9	1061
Ba	1347	935	1342	2270	1724	1236	843	3934	791	842	778
Zr	200	232	247	225	351	412	549	780	290	290	250
Hf	4.94	5.6	5.94	5.52	7.55	9.93	11.8	16.9	7.01	6.57	5.24
U	0.83	2.29	1.35	2.14	1.36	3.55	3.88	4.91	2.20	1.62	1.37
Th	3.85	9.48	8.87	6.3	8.6	16.4	16.0	22.5	13.1	10.4	6.11
Nb	9.03	12.4	14.6	12.6	13.8	15.1	25.7	37.6	15.3	17.3	14.8
Ta	0.71	0.93	1.06	0.93	0.89	1.34	1.64	2.36	1.22	1.16	0.90
Ga	20.3	19.4	20.4	15.1	17.3	16.9	17.5	27.6	23.3	22.6	20.9
Y	8.83	10.4	10.1	11.1	12.4	19.6	26.4	38.1	18.8	19.8	23.5
La	33.9	36.3	37.3	26.5	38	50.5	39.7	80.9	34.0	47.1	45.5
Ce	68	71.2	72.3	52.8	77.9	83.4	91.0	162	76.1	96.9	93.5
Pr	5.75	6.29	6.49	4.82	7.09	8.98	10.5	18.0	9.08	11.5	10.8
Nd	20.1	21.5	21.9	17.2	24.8	30.0	40.6	64.4	33.6	41.6	42.2
Sm	3.23	3.59	3.64	2.99	4.06	5.22	7.66	11.6	6.19	7.33	7.59
Eu	0.76	0.88	0.88	0.98	0.94	1.12	1.78	1.76	1.51	1.70	2.18
Gd	2.36	2.87	2.74	2.39	3.08	3.89	4.96	7.04	3.77	4.39	5.02
Tb	0.28	0.34	0.36	0.33	0.38	0.64	0.79	1.13	0.57	0.64	0.76
Dy	1.49	1.87	1.94	1.8	2.03	3.43	4.61	6.78	3.35	3.80	4.31
Ho	0.28	0.37	0.39	0.37	0.43	0.59	0.92	1.38	0.65	0.74	0.86
Er	0.81	1.08	1.11	1.08	1.28	2.26	2.66	4.08	1.81	2.00	2.40
Tm	0.11	0.16	0.16	0.17	0.2	0.31	0.43	0.65	0.28	0.29	0.35
Yb	0.75	1.03	1.17	1.13	1.4	2.44	2.99	4.42	1.91	1.94	2.35
Lu	0.09	0.15	0.19	0.18	0.22	0.39	0.47	0.70	0.28	0.28	0.36
REE	137.91	147.63	150.57	112.74	161.81	193.17	209.06	364.84	173.10	220.21	218.18
(La/Yb) _{Nd}	12.37	13.08	16.41	23.82	15.85	13.99	8.97	12.03	21.54	30.54	18.34
Eu/Eu*	0.55	1.02	0.85	0.81	1.09	0.73	0.83	0.89	0.82	0.81	0.78
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.0713	15.2110	12.7640	29.2250	4.3700		31.2465	18.2695	3.8881		0.2057
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.709822	0.728523	0.725058	0.741623	0.713075		0.750549	0.737384	0.713905		0.707277
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _{Nd}	0.709685	0.699203	0.700455	0.685290	0.704652		0.690320	0.702168	0.706926		0.706908
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1005	0.0962	0.0964	0.1037	0.0925		0.1023	0.1032	0.1021		0.1067

注: $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Sm})_{\text{样品}} / ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Sm})_{\text{球粒陨石}} - 1$; $({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{球粒陨石}} = 0.512638$; $({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Sm})_{\text{球粒陨石}} = 0.1967$; $({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{亏损地幔}} = 0.513151$; $({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Sm})_{\text{亏损地幔}} = 0.2134$ 。

254 采用的是 SHRIMP 法。

样品 HL-79 采自盆地的东部、彭家口组的底部 (坐标: N30°27.796', E116°45.028'), 该样品中的锆石形态和内部结构复杂, 但大多数锆石以短柱状为主,

内部发育有疏、密不均的生长环带 (图 3-a~h), 指示其岩浆成因锆石的特点; 部分锆石颗粒具明亮的外圈, 内部色深且有圆化 (图 3-c 左侧, 图 3-e 左下颗粒) 或熔蚀现象 (图 3-d 右侧中间颗粒), 意味着内核

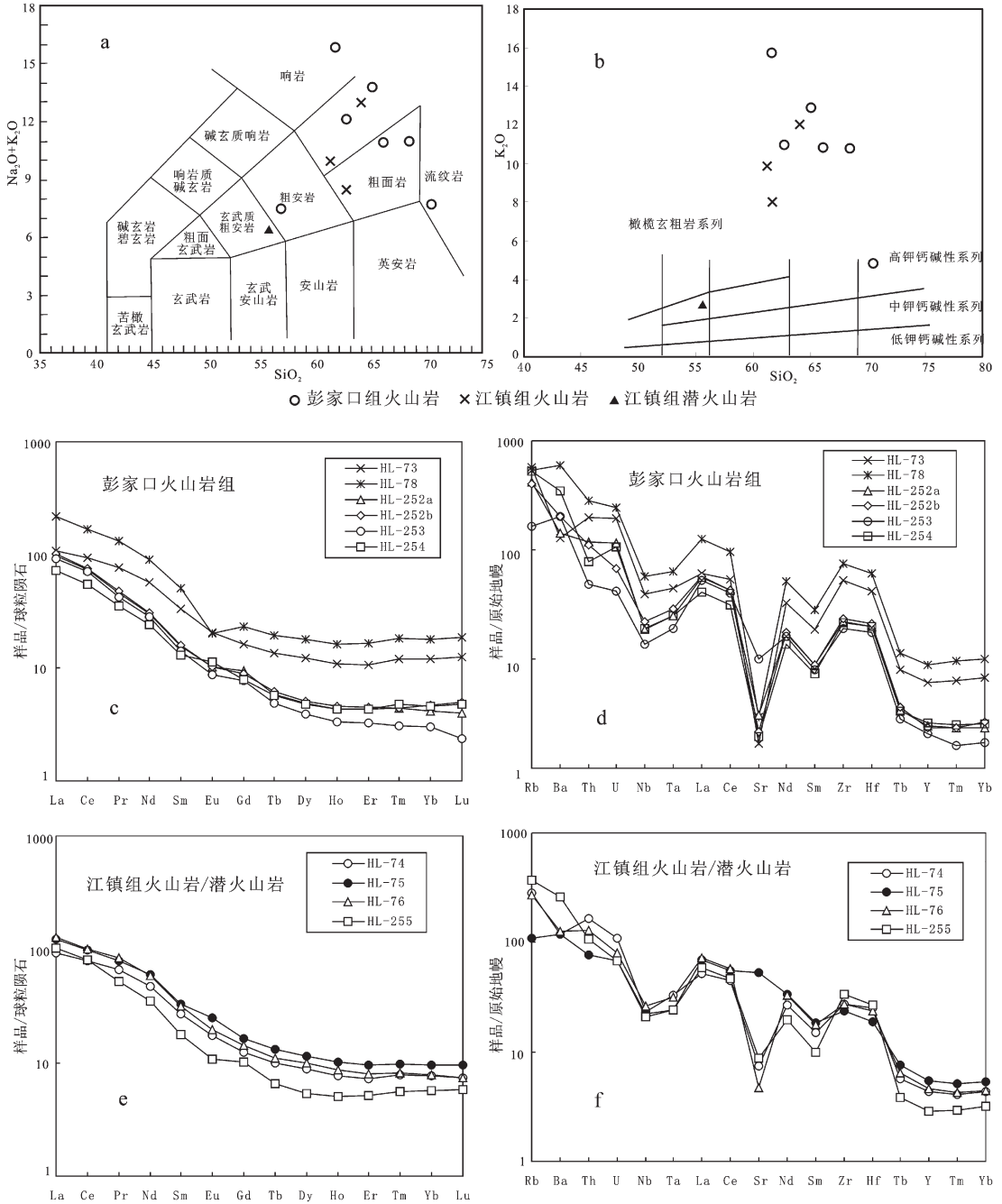
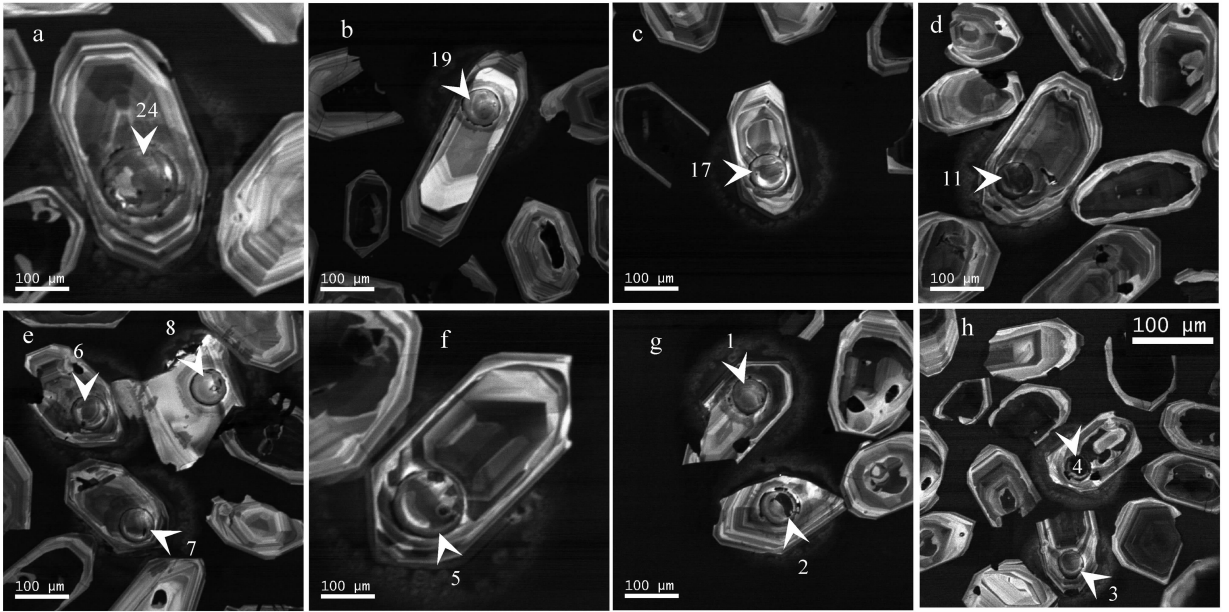


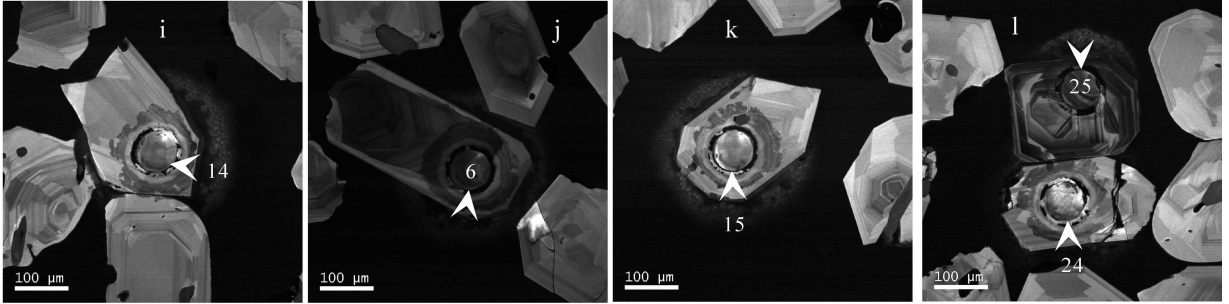
图 2 怀宁盆地火山岩样品的 TAS 分类图^[24](a); SiO₂ - K₂O 分类图^[25](b); 稀土元素球粒陨石标准化曲线 (c, e) 和不相容元素原始地幔标准化蛛网图 (d, f)

Fig. 2 Geochemical compositions of representative volcanic rock samples from Huaining volcanic basin a-TAS classification diagram (Le Base et al., 1986); b-SiO₂ - K₂O classification diagram (after Peccerillo & Taylor, 1976); c, e-Chondrite-normalized REE-patterns; d, f-Primitive mantle normalized incompatible element patterns

HL-79



HL-78



HL-254

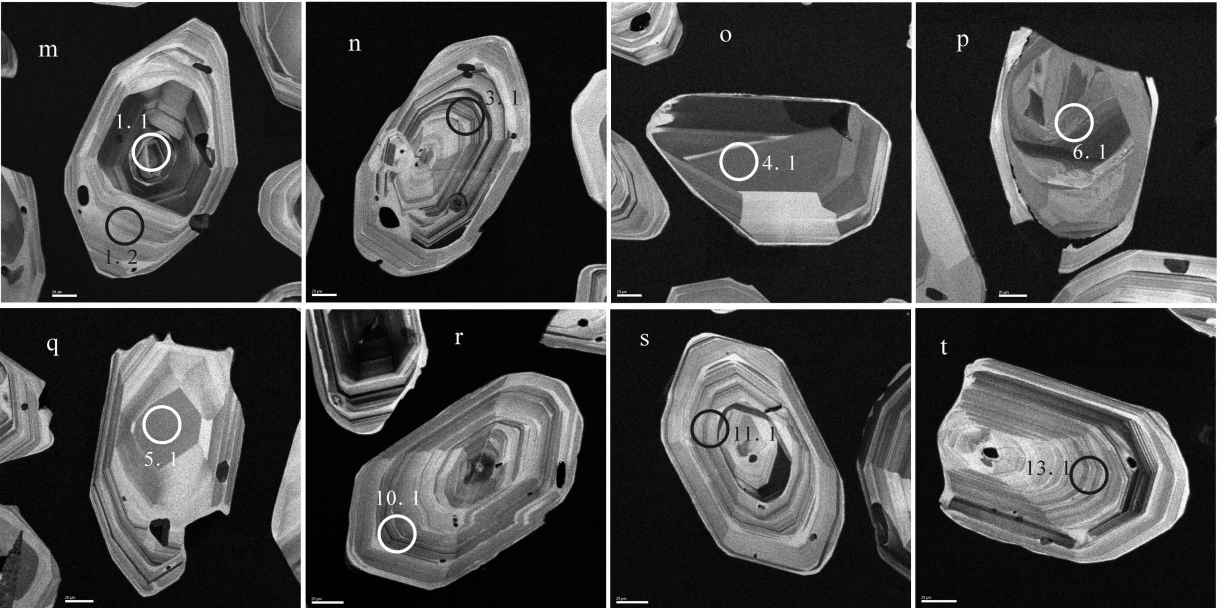


图3 怀宁盆地彭家口火山岩中部分锆石的阴极发光照片(CL)

Fig.3 CL images of dated zircon crystals from volcanic rocks of Pengjiakou Formation

和外环可能形成于不同的时期, 其中核心部分可能属于继承或俘获的锆石。本次研究共对该样品中的 24 个锆石颗粒进行了年龄测定, 所获得的年龄归为 3 组(图 4-a): 第一组为新元古代, 如分析点 10 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 (788 ± 5) Ma, 该年龄与扬子克拉通北缘广泛分布的新元古代花岗岩类的侵位时间非常类似, 可能为岩浆上升过程中捕获的扬子克拉通基底构造层中的锆石; 第二组颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄从 415 Ma 到 427 Ma (分析点 5、8、16、17、24), 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (424 ± 3) Ma; 第三组颗粒占了绝大多数, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄很集中, 介于 383~387 Ma 之间(表 2), 其加权平均年龄为 (383 ± 2) Ma (图 4-b)。这三组锆石均为继承或俘获的锆石颗粒, 由于区内缺少早古生代的岩浆事件, 第二组和第三组锆石确切的地质含义尚需进一步探讨。但相邻的庐枞盆地初期喷发的火山岩中也包含大量早古生代的岩浆锆石^[28], 也许暗示加里东期的岩

浆事件在本区也存在, 只是岩浆作用的产物未出露地表。

样品 HL-78 也采自盆地的东部、彭家口组中部(坐标: $\text{N}30^{\circ}27.995'$, $\text{E}116^{\circ}43.113'$), 该样品中的锆石以短柱状为主, 长/宽比一般为 1/1~1/2(图 3-i~3-l)。锆石晶体内部的环带总体不发育, 部分锆石晶体的内部有稀疏的环带(图 3-j、3-l)。从锆石形态和内部结构可以认定这些锆石均属于岩浆成因的锆石。本次研究共对 25 个颗粒进行了年龄测定, 其中分析点 17、21、24、25 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄明显高于大多数分析点, 分析点 3、16 不谐和, 其余 19 个颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄很集中, 介于 130~134 Ma 之间(表 2), 且都位于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线上或其附近(图 4-c), 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (131.6 ± 0.6) Ma, 该年龄可代表彭家口组火山岩的形成时代。

样品 HL-254 采自盆地的西部、彭家口组上部

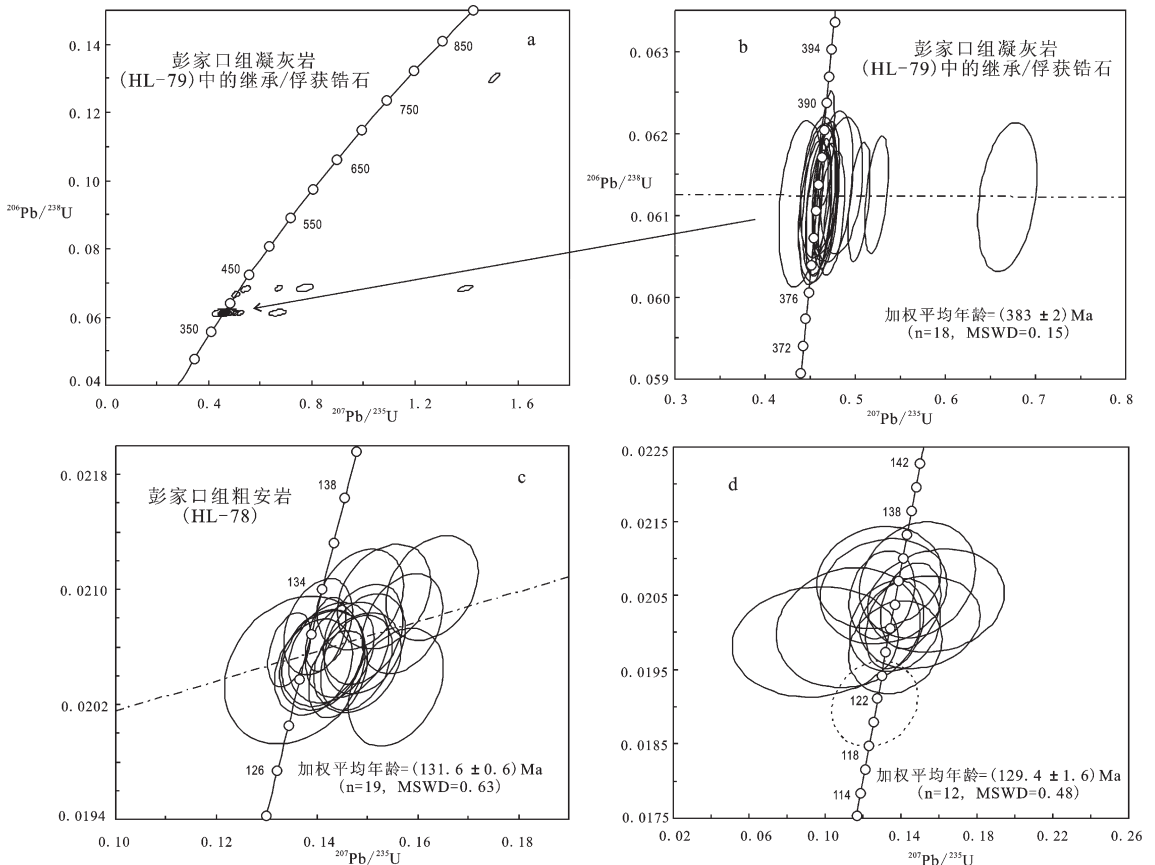


图 4 怀宁盆地内彭家口组火山岩中锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图

Fig.4 Concordia diagrams of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ for zircons from volcanic rocks of Pengjiakou Formation in Huaining volcanic basin

表 2 怀宁盆地火山岩中锆石的 LA-ICP-MS 分析结果
Table 2 LA-ICP-MS analytical results of zircons from Huaining volcanic basin

	含量($\mu\text{g/g}$)		比值										年龄/Ma			
	Th	U	Pb	Th/U	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$	$\pm 1\sigma$	$\text{Pb}^{207}/\text{U}^{235}$	$\pm 1\sigma$	$\text{Pb}^{206}/\text{U}^{238}$	$\pm 1\sigma$	$\text{Pb}^{208}/\text{Th}^{232}$	$\pm 1\sigma$	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$	$\text{Pb}^{207}/\text{U}^{235}$	$\text{Pb}^{206}/\text{U}^{238}$	$\text{Pb}^{208}/\text{Th}^{232}$
凝灰岩(HL-79)																
HL79-01	207	2582	896	0.80	0.05412	0.00147	0.45540	0.01180	0.06103	0.00058	0.01903	0.00038	375.7±59.9	381.0±8.3	381.9±3.6	380.9±7.5
HL79-02	105	1495	922	0.71	0.05449	0.00150	0.45960	0.01210	0.06118	0.00060	0.01954	0.00042	391.3±60.3	384.0±8.4	382.8±3.7	391.0±8.3
HL79-03	163	2551	983	0.64	0.06200	0.00108	0.52360	0.00850	0.06125	0.00047	0.02114	0.00033	674.2±36.8	427.6±5.7	383.2±2.9	422.9±6.4
HL79-04	348	441	89	0.79	0.05489	0.00079	0.46789	0.00621	0.06182	0.00046	0.01933	0.00026	407.9±31.8	389.7±4.3	386.7±2.8	387.0±5.1
HL79-05	1588	2359	121	0.67	0.07123	0.00120	0.67206	0.01050	0.06843	0.00053	0.02633	0.00039	964.1±33.9	522.0±6.4	426.7±3.2	525.3±7.7
HL79-06	237	321	95	0.74	0.05979	0.00103	0.50413	0.00811	0.06116	0.00048	0.02062	0.00030	595.3±37.6	414.5±5.5	382.6±2.9	412.5±6.0
HL79-07	299	366.55	91.00	0.81	0.05459	0.00120	0.45934	0.00961	0.06103	0.00051	0.01965	0.00032	395.4±48.3	383.8±6.7	381.9±3.1	393.3±6.4
HL79-08	63	106	131	0.60	0.08190	0.00243	0.77407	0.02181	0.06855	0.00075	0.02777	0.00076	1243.0±56.9	582.1±12.5	427.4±4.5	553.6±14.9
HL79-09	100	117	89	0.86	0.05729	0.00191	0.48467	0.01574	0.06136	0.00055	0.01903	0.00038	502.2±72.2	401.3±10.8	383.9±3.3	381.0±7.5
HL79-10	177	337	177	0.53	0.08407	0.00087	1.50765	0.01350	0.13007	0.00091	0.03894	0.00050	1294.0±20.0	933.5±5.5	788.3±5.2	772.1±9.7
HL79-11	296	440	89	0.67	0.05484	0.00083	0.46329	0.00651	0.06127	0.00044	0.01934	0.00026	405.9±33.3	386.5±4.5	383.3±2.7	387.1±5.1
HL79-12	123	217	92	0.57	0.05444	0.00177	0.45899	0.01433	0.06115	0.00064	0.01934	0.00051	389.0±70.5	383.6±10.0	382.6±3.9	387.1±10.2
HL79-13	179	260	91	0.69	0.05527	0.00122	0.46745	0.00978	0.06134	0.00053	0.01964	0.00036	422.9±48.0	389.4±6.8	383.8±3.2	393.0±7.1
HL79-14	150	248	90	0.61	0.05430	0.00102	0.45782	0.00807	0.06115	0.00050	0.01948	0.00033	383.3±41.8	382.7±5.6	382.6±3.0	390.0±6.5
HL79-15	88	162	97	0.54	0.05432	0.00160	0.45940	0.01306	0.06134	0.00057	0.02060	0.00046	384.2±64.6	383.8±9.1	383.8±3.4	412.1±9.1
HL79-16	94	216	105	0.44	0.05776	0.00135	0.54282	0.01207	0.06816	0.00060	0.02242	0.00049	520.5±50.7	440.3±8.0	425.1±3.6	448.1±9.6
HL79-17	72	145	96	0.50	0.05514	0.00121	0.50575	0.01057	0.06653	0.00055	0.02049	0.00040	417.7±47.6	415.6±7.1	415.2±3.3	410.0±7.9
HL79-18	155	237	91	0.65	0.05631	0.00121	0.47375	0.0097	0.06102	0.00050	0.01961	0.00033	463.9±47.34	393.8±6.7	381.8±3.0	392.5±6.6
HL79-19	68	66	93	1.03	0.05216	0.00198	0.43965	0.01618	0.06114	0.00067	0.01991	0.00042	292.3±84.3	370.0±11.4	382.5±4.1	398.6±8.3
HL79-20	349	346	91	1.01	0.05552	0.00115	0.46782	0.00913	0.06111	0.00051	0.01966	0.00030	433.1±45.0	389.7±6.3	382.4±3.1	393.5±6.0
HL79-21	100	146	109	0.68	0.07922	0.00263	0.66871	0.02147	0.06122	0.0006	0.02318	0.00053	1177.8±64.2	519.9±13.1	383±3.7	463.2±10.4
HL79-22	71	136	96	0.52	0.05628	0.00175	0.47606	0.01424	0.06135	0.00061	0.02039	0.00048	462.6±67.7	395.4±9.8	383.8±3.7	408.1±9.4
HL79-23	297	390	88	0.76	0.05539	0.00107	0.46694	0.00854	0.06115	0.00047	0.01908	0.00028	427.5±41.9	389.1±5.9	382.6±2.9	382.1±5.7
HL79-24	233	295	182	0.79	0.14816	0.00254	1.39613	0.01946	0.06835	0.00062	0.03997	0.00061	2324.7±26.873	887.3±8.3	426.2±3.7	792.2±11.8

续表 2

粗面岩(HL-78)	含量(μg/g)				比值						年龄/Ma					
	Th	U	Pb	Th/U	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	±1σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	±1σ	Pb ²⁰⁸ /Th ²³²	±1σ	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	±1σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁵	Pb ²⁰⁸ /Th ²³²		
HL78-01	113	113	3	1.00	0.05240	0.00209	0.14805	0.00571	0.02049	0.00023	0.00726	0.00016	303.1±88.3	140.2±5.1	130.8±1.4	146.1±3.2
HL78-02	53	74	2	0.72	0.04810	0.00335	0.13555	0.00921	0.02044	0.00034	0.00792	0.00031	104.3±157.0	129.1±8.2	130.4±2.2	159.4±6.2
HL78-03	264	208	7	1.27	0.09283	0.00194	0.26642	0.00515	0.02082	0.00020	0.00834	0.00014	1484.3±39.3	239.8±4.1	132.8±1.2	167.9±2.8
HL78-04	683	360	12	1.90	0.04969	0.00098	0.14178	0.00263	0.02069	0.00017	0.00680	0.00010	180.7±45.3	134.6±2.3	132±1.1	137±2.0
HL78-05	93	101	3	0.91	0.04984	0.00203	0.14094	0.00555	0.02051	0.00023	0.00744	0.00018	187.7±92.0	133.9±4.9	130.9±1.5	149.8±3.5
HL78-06	218	334	9	0.65	0.04739	0.00104	0.13445	0.00280	0.02058	0.00017	0.00699	0.00013	68.2±51.9	128.1±2.5	131.3±1.1	140.9±2.5
HL78-07	129	126	4	1.02	0.05259	0.00194	0.14950	0.00532	0.02062	0.00023	0.00689	0.00016	311.2±82.0	141.5±4.7	131.6±1.5	138.7±3.2
HL78-08	129	164	4	0.78	0.05232	0.00174	0.14778	0.00471	0.02049	0.00022	0.00733	0.00017	299.4±73.8	140.0±4.2	130.7±1.4	147.7±3.8
HL78-09	90	103	3	0.88	0.05150	0.00204	0.14859	0.00570	0.02093	0.00023	0.00691	0.00017	263.4±88.5	140.7±5.0	133.5±1.5	139.1±3.5
HL78-10	108	112	3	0.97	0.05144	0.00198	0.14596	0.00543	0.02058	0.00022	0.00681	0.00016	260.8±85.8	138.3±4.8	131.3±1.4	137.1±3.2
HL78-11	82	89	3	0.92	0.05308	0.00220	0.15328	0.00614	0.02095	0.00024	0.00678	0.00018	332.1±91.1	144.8±5.4	133.6±1.6	136.6±3.6
HL78-12	107	110	3	0.98	0.05231	0.00189	0.14921	0.00520	0.02069	0.00023	0.00704	0.00017	299.2±80.3	141.2±4.6	132±1.4	141.9±3.3
HL78-13	114	102	3	1.12	0.05621	0.00217	0.16285	0.00605	0.02101	0.00024	0.00733	0.00017	460.0±84.1	153.2±5.3	134±1.5	147.6±3.5
HL78-14	100	108	3	0.93	0.05040	0.00203	0.14285	0.00558	0.02056	0.00023	0.00707	0.00018	213.5±90.9	135.6±5.0	131.2±1.5	142.5±3.5
HL78-15	107	110	3	0.97	0.04939	0.00187	0.13932	0.00511	0.02046	0.00022	0.00669	0.00016	166.2±86.2	132.4±4.6	130.6±1.4	134.7±3.2
HL78-16	112	118	3	0.95	0.06503	0.00208	0.18525	0.00565	0.02066	0.00022	0.00763	0.00018	775.5±65.9	172.6±4.8	131.8±1.4	153.6±3.6
HL78-17	73	85	3	0.87	0.07234	0.00271	0.23572	0.00842	0.02363	0.00030	0.01019	0.00027	995.6±74.4	214.9±6.9	150.6±1.9	205.0±5.5
HL78-18	143	159	4	0.90	0.04904	0.00164	0.14024	0.0045	0.02074	0.00022	0.00699	0.00017	149.9±76.5	133.3±4.0	132.3±1.4	140.8±3.4
HL78-19	165	157	5	1.05	0.05556	0.00233	0.15569	0.00624	0.02032	0.00027	0.00703	0.0002	434.6±90.7	146.9±5.5	129.7±1.7	141.6±4.0
HL78-20	107	111	3	0.97	0.04990	0.00195	0.14116	0.00533	0.02052	0.00022	0.00696	0.00017	190.5±88.3	134.1±4.8	130.9±1.4	140.1±3.5
HL78-21	58	76	2	0.76	0.09162	0.00426	0.27255	0.01195	0.02158	0.00036	0.00944	0.00035	1459.4±86.1	244.7±9.5	137.6±2.3	189.9±7.0
HL78-22	138	129	4	1.07	0.05484	0.00192	0.15700	0.00528	0.02076	0.00023	0.00740	0.00018	405.9±76.0	148.1±4.6	132.5±1.5	149.0±3.7
HL78-23	218	237	7	0.92	0.05123	0.00144	0.14415	0.00387	0.02041	0.00020	0.00725	0.00016	251.4±63.3	136.7±3.4	130.2±1.2	146.0±3.3
HL78-24	97	98	4	0.99	0.14611	0.00375	0.48037	0.01137	0.02385	0.00027	0.01326	0.00031	2300.8±43.5	398.3±7.8	151.9±1.7	266.2±6.2
HL78-25	216	363	10	0.60	0.04923	0.00118	0.14858	0.00338	0.02189	0.00020	0.00828	0.00018	158.9±55.2	140.7±3.0	139.6±1.2	166.7±3.69

续表 2

	含量($\mu\text{g/g}$)				比值						年龄/Ma				
	Th	U	Pb	Th/U	$\text{Pb}^{207}/\text{U}^{235}$	$\pm 1\sigma$	$\text{Pb}^{206}/\text{U}^{238}$	$\pm 1\sigma$	$\text{Pb}^{208}/\text{Th}^{232}$	$\pm 1\sigma$	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$	$\text{Pb}^{207}/\text{U}^{235}$	$\text{Pb}^{206}/\text{U}^{238}$	$\text{Pb}^{208}/\text{Th}^{232}$	
流纹岩(HL-77)															
HL77-01	96	78	29	1.22	0.04892	0.00636	0.12645	0.01625	0.01875	0.00038	0.00027	144.0±279.3	120.9±14.7	119.7±2.41	116.8±5.5
HL77-02	167	257	180	0.65	0.06675	0.0009	1.16656	0.01446	0.12676	0.00091	0.00053	83.0±28.0	78.5±6.8	769.3±5.2	784.5±10.4
HL77-03	554	190	29	2.92	0.04818	0.00188	0.12516	0.00475	0.01884	0.00020	0.00009	108.1±89.8	119.7±4.3	120.3±1.2	124.7±1.8
HL77-04	402	150	28	2.68	0.04875	0.00233	0.12849	0.00599	0.01912	0.00023	0.00010	135.7±108.8	122.7±5.4	122.1±1.4	122±2.0
HL77-05	138	94	30	1.48	0.04894	0.00323	0.12609	0.00817	0.01869	0.00025	0.00015	145.1±147.9	120.6±7.4	119.3±1.6	125.2±3.0
HL77-06	269	215	365	1.25	0.12229	0.00120	5.22562	0.04367	0.30991	0.00017	0.00096	1990.0±17.3	1856.8±7.1	1740.3±10.7	1599±17.9
HL77-07	51	37	32	1.38	0.04862	0.01184	0.12841	0.03116	0.01916	0.00040	0.00024	129.4±490.5	122.7±28.0	122.3±2.6	131.9±4.8
HL77-08	118	125	29	0.94	0.05021	0.00240	0.13337	0.00621	0.01927	0.00023	0.00016	204.8±107.3	127.1±5.6	123.0±1.4	122.8±3.1
HL77-09	69	66	35	1.05	0.05030	0.00581	0.13413	0.01535	0.01934	0.00032	0.00020	209±247.4	127.8±13.7	123.5±2.0	145.6±4.1
HL77-10	80	73	32	1.10	0.04838	0.00573	0.12828	0.01507	0.01923	0.00031	0.00025	117.7±257.6	122.6±13.6	122.8±2.0	132.7±4.9
HL77-11	124	119	185	1.05	0.42271	0.00621	2.14829	0.02534	0.03686	0.00037	0.00056	3991.9±211.8	1164.5±8.2	233.3±2.3	809.9±11.0
HL77-12	120	112	32	1.07	0.05913	0.00308	0.15638	0.00788	0.01918	0.00027	0.00019	571.9±109.3	147.5±6.9	122.5±1.7	132.5±3.9
HL77-13	59	62	34	0.96	0.04902	0.00745	0.13225	0.01999	0.01957	0.00034	0.00034	148.8±321.5	126.1±17.9	124.9±2.2	134.8±6.8
HL77-14	723	520	29	1.39	0.04917	0.00169	0.12856	0.00432	0.01897	0.00017	0.00010	155.8±78.6	122.8±3.9	121.1±1.1	126.1±1.9
HL77-15	37	123	361	0.30	0.11069	0.00139	3.89701	0.04378	0.25536	0.00197	0.00147	1810.7±222.6	1613.1±9.1	1466.1±10.1	1558.9±27.6
HL77-16	509	269	30	1.89	0.04979	0.00239	0.13162	0.00618	0.01917	0.00021	0.00011	185.2±108.1	125.6±5.5	122.4±1.4	127.5±2.3
HL77-17	394	176	32	2.24	0.05004	0.00316	0.13570	0.00842	0.01967	0.00025	0.00012	196.8±140.4	129.2±7.5	125.6±1.6	136.6±2.5
HL77-18	98	73	33	1.34	0.05407	0.00839	0.14470	0.02228	0.01941	0.00039	0.00030	373.8±316.0	137.2±19.8	123.9±2.5	134.3±6.0
HL77-19	119	87	32	1.37	0.04921	0.00664	0.13001	0.01744	0.01916	0.0003	0.00020	157.7±288.3	124.1±15.7	122.4±1.9	135.1±4.0
HL77-20	332	212	31	1.56	0.05504	0.00275	0.14727	0.0072	0.01941	0.00021	0.00068	413.9±107.6	139.5±6.4	123.9±1.3	134.6±2.4
HL77-21	280	147	32	1.90	0.04933	0.00523	0.13148	0.01377	0.01933	0.00034	0.00017	163.4±230.7	125.4±12.4	123.4±2.1	133.9±3.5
HL77-22	139	110	32	1.26	0.06235	0.00370	0.15948	0.00923	0.01855	0.00027	0.00017	686.3±122.0	150.3±8.1	118.5±1.7	134.3±3.5
HL77-23	179	120	30	1.50	0.05758	0.00609	0.14468	0.01508	0.01822	0.00035	0.00021	513.5±217.2	137.2±13.4	116.4±2.2	124±4.1
HL77-24	253	261	30	0.97	0.05133	0.00201	0.13545	0.00517	0.01914	0.00019	0.00013	255.5±87.6	129±4.6	122.2±1.2	130.3±2.6



图 5 怀宁盆地江镇组顶部流纹岩 HL-77 中部分锆石的阴极发光照片(CL)

Fig.5 CL images of zircon crystals from rhyolite samples of Jiangzhen Formation in Huaining basin

(坐标: $N30^{\circ}21.903'$, $E116^{\circ}30.513'$), 该样品中的锆石形态也为短柱状, 这些锆石从 CL 图像可分为两类: 一类锆石颗粒的内部发育有密切的震荡生长环带, 并显示沙钟构造(图 3-n, r, s, t); 另一类锆石颗粒的内部环带不发育(图 3-o, q)。两类锆石都属于典型的岩浆成因锆石。另外还有少数锆石颗粒具有结构明显不协调的环边和内核二元结构(图 3-p), 可能表明两者形成于不同的时代 (或岩浆演化的不同阶段)。本次研究共对 14 个锆石颗粒进行了年龄测定, 其中分析点 7.1 为继承/俘获的锆石颗粒 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 (2033 ± 30) Ma), 分析点 13.1 的年龄明显低于其他分析点, 其余 12 个颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 $126 \sim 132$ Ma(表 3), 且都位于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线上, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (129.4 ± 1.6) Ma (图 4-d), 该年龄与样品 HL-78 的

年龄在误差范围内一致, 可代表彭家口组火山活动结束的时间。

3.3.2 江镇组

样品 HL-77 采自盆地的东部、江镇组顶部(坐标: $N30^{\circ}28.032'$, $E116^{\circ}44.633'$)。该样品中的锆石形态主要分两类: 一类为长柱状, 内部环带不发育, 仅见有稀疏的直纹; 另一类为短柱状, 环带较发育(图 5)。本次研究共对 24 个颗粒进行了年龄测定, 其中分析点 2、6、11、15 为继承/俘获的锆石, 分析点 23 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄明显低于其他颗粒。其余 19 个颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 $116 \sim 126$ Ma (表 2), 且都位于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线上或其附近, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (122.3 ± 0.7) Ma (图 6), 该年龄可代表江镇组顶部双峰式火山岩的形成时代。

表3 怀宁盆地彭家口组火山岩(样品 HL-254)中锆石的 SHRIMP 分析结果

Table 3 SHRIMP analytical results of zircons from Pengjiakou Formation in Huaining volcanic basin

点	$f^{206}\text{Pb}_c$ /%	含量($\mu\text{g/g}$)			$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	年龄($\pm 1\sigma$)/Ma			比值($\pm\%$)		
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
1	1.02	330	715	5.84	2.24	129.9 \pm 2.4	271 \pm 160	129.2 \pm 3.5	0.0517(7.0)	0.145(7.2)	0.02036(1.9)
1	3.46	100	94	1.83	0.97	131.2 \pm 2.9	4 \pm 400	107 \pm 10	0.0461(17)	0.131(17)	0.02056(2.3)
1	2.55	101	108	1.79	1.10	128.1 \pm 3.4	-311 \pm 570	103.8 \pm 9.9	0.0406(22)	0.112(22)	0.02006(2.6)
1	2.27	192	239	3.40	1.29	128.5 \pm 2.6	369 \pm 310	107.5 \pm 7.2	0.0540(14)	0.150(14)	0.02014(2.0)
1	1.93	178	334	3.13	1.94	128.3 \pm 2.6	168 \pm 260	111.7 \pm 5.9	0.0494(11)	0.137(11)	0.02010(2.0)
1	3.83	78	123	1.38	1.64	126.9 \pm 3.1	-739 \pm 850	122.9 \pm 7.3	0.035(30)	0.095(30)	0.01987(2.5)
1	0.03	431	228	137	0.55	2033 \pm 30	1968 \pm 17	1969 \pm 39	0.1208(0.96)	6.17(2.0)	0.3707(1.7)
1	1.63	57	70	1.04	1.25	132.1 \pm 3.2	290 \pm 300	134.0 \pm 7.8	0.0521(13)	0.149(14)	0.02071(2.5)
1	1.00	224	380	3.91	1.75	128.3 \pm 2.5	163 \pm 170	125.0 \pm 3.7	0.0493(7.1)	0.137(7.4)	0.02010(1.9)
.1	1.34	313	685	5.58	2.27	130.9 \pm 2.5	-4 \pm 210	122.1 \pm 3.5	0.0460(8.6)	0.130(8.8)	0.02051(1.9)
.1	1.61	139	174	2.48	1.29	130.4 \pm 2.9	464 \pm 330	137.3 \pm 9.9	0.0563(15)	0.159(15)	0.02043(2.2)
.1	1.96	144	177	2.62	1.27	132.3 \pm 2.9	-64 \pm 410	127.9 \pm 7.0	0.0448(17)	0.128(17)	0.02074(2.2)
.1	2.18	251	397	4.20	1.64	121.6 \pm 2.4	102 \pm 280	125.4 \pm 4.7	0.0481(12)	0.126(12)	0.01904(2.0)
.1	1.52	147	179	2.54	1.26	126.4 \pm 2.6	204 \pm 270	124.1 \pm 5.9	0.0502(12)	0.137(12)	0.01980(2.1)

注:误差为 1σ , Pb* 为放射性成因 Pb, $f^{206}\text{Pb}_c\%$ 为普通 Pb 占全 Pb 的百分比。

4 讨论

4.1 区内火山作用的年代格架

长江中下游地区在晚中生代发育了一系列断陷型的火山岩盆地,其中岩石系列与怀宁盆地类似,主要发育橄榄玄粗岩系列(shoshorite)的还有庐枞盆地^[7, 29-33]、宁芜盆地^[34, 35]、溧水盆地^[36-38],另外几个盆地(金牛盆地、繁昌盆地、滁州盆地、溧阳盆地)内的火山岩则属于高钾钙碱性系列。对于这些盆地内火山活动的时代,近几年陆续有了一些高精度的年龄资料发表,为我们勾画区内火山作用的年代格架提供了可能。

其中橄榄玄粗岩系列的火山岩盆地中以庐枞盆地的年龄资料最为丰富,如周涛发等^[39]测得盆地内四个旋回火山岩(龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为(134.8 \pm 1.8) Ma、(134.1 \pm 1.6) Ma、(130.5 \pm 0.8) Ma 和 (127.1 \pm 1.2) Ma, 薛怀民等^[28]测得这四个旋回火山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为(131 \pm 1) Ma、(133 \pm 1) Ma、(130 \pm 1) Ma 和(127 \pm 1) Ma。另外,庐枞盆地内的潜火山岩/浅成侵入岩的年龄与火山喷发的时代类似,也主要介于 127~134 Ma^[40-45]。至于宁芜盆地,张旗等^[6]曾测得盆地内火山活动早期形成的龙王山组和大王山组的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为(131 \pm 4) Ma 和(127 \pm 3) Ma,侯可军等^[46]测得大王山

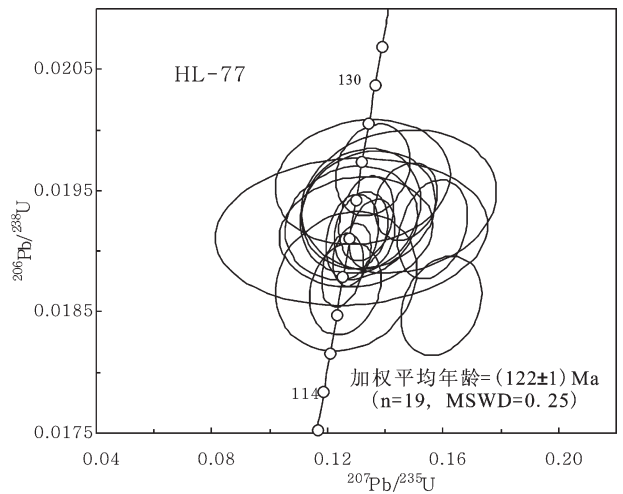


图6 怀宁盆地江镇组顶部流纹岩中锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图

Fig.6 Concordia diagrams showing LA-ICP-MS analytical points for zircons from rhyolite samples of Jiangzhen Formation in Huaining volcanic basin

组粗安岩和姑山组英安岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为(130.3 \pm 0.9) Ma 和(128.2 \pm 1.3) Ma, 闫峻等^[47]测得该盆地最晚期形成的娘娘山组火山岩(属碱性系列)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(130.6 \pm 1.1) Ma。至于宁芜盆地内与成矿有关的(大王山组)潜火山岩的形成时代,总体与火山岩类似,也介于 128~131 Ma^[43, 46, 48]。对于另一个橄榄玄粗岩系列火山岩盆地——溧水盆地,禹尧和徐夕生^[49]测得

火山活动早期形成的龙王山组粗面岩的 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄为(128.7±1.8) Ma。本次研究获得怀宁盆地橄榄玄粗岩系列火山活动的时间介于 129~132 Ma, 总体与宁芜盆地的下火山岩系(龙王山组和大王山组)和庐枞盆地的下火山岩系(龙门院组和砖桥组)相当。但怀宁盆地内末期双峰式(属高钾钙碱性系列)火山活动的时间较晚(约 122 Ma), 在整个长江中下游地区没有发现与其时代相当的火山活动, 代表着区域火山活动的结束。

至于高钾钙碱性系列火山岩盆地, 其中火山活动的时代与橄榄玄粗岩系列火山岩盆地非常类似, 如滁州盆地, 马芳等^[50]测得其中黄石坝组粗安岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(128±1) Ma, 谢成龙等^[51]用 LA-ICP MS 法测得该盆地内火山岩中锆石的 U-Pb 年龄介于 132~116 Ma; 繁昌盆地, 袁峰等^[52]测得盆地内中分村组粗安岩、赤沙组黑云母粗安斑岩、蝌蚪山组流纹岩及山梁山组黑云母粗面岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄分别为 (134.4±2.9) Ma、(131.3±1.8) Ma、(130.8±2.2) Ma 和 (128.1±3.1) Ma, 闫峻等^[47]测得蝌蚪山组火山的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(130.7±1.1) Ma; 金牛盆地, 谢桂青等^[53]测得其中大寺组英安岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(128±3) Ma; 溧阳盆地, 最近笔者测得其中大王山组火山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(129.1±1.1) Ma (尚未发表资料)。

由此可见, 长江中下游地区晚中生代众多火山岩盆地中岩浆活动的时间非常类似, 持续的时间很短。对于包括长江中下游地区在内的整个中国东部晚中生代岩浆作用, 目前多认为形成于中国大陆东部晚中生代—新生代软流圈上涌和岩石圈减薄的动力学背景下^[54-63], 减薄机制主要包括拆沉模式和热侵蚀模式两种观点, 前者强调岩石圈重物质的“突发性”下沉, 后者则强调软流圈轻物质“逐渐地”上涌。基于整个长江中下游地区的火山—潜火山岩是在很短的时间内形成的, 意味着“突发性的”机械拆沉可能是区内岩浆作用的主要机制。

4.2 岩浆成因

对于长江中下游地区橄榄玄粗岩系列岩浆的成因, 前人主要针对庐枞盆地、宁芜盆地以及溧水盆地作了探讨, 多数学者认为与富集型地幔的部分熔融有关^[7, 29-38], 所形成的岩浆在上升过程中总体受地壳成分混染的程度不大, 但结晶分异作用明显^[7, 32-34]。对

于造成上地幔源区富集的机制和过程, 目前还存在不同的认识。刘洪等^[31]认为富集地幔是由古太平洋板块在中生代向亚洲大陆俯冲, 将深海沉积物及洋壳带入地幔, 俯冲板片发生脱水产生上升流体, 交代上覆地幔楔形成的, 性质相当于 EM I; 谢智等^[32]认为是拆沉的下地壳物在地幔源区发生混合导致其具有同位素富集的特征, 成分相当于 EM II; 闫峻等^[64]也认为富集地幔的形成与大洋沉积物释放的流体/熔体交代上覆地幔有关, 但流体/熔体的来源可能与中生代以前的华夏向扬子地块俯冲有关。前两个观点暗示地幔的富集作用发生在中生代, 这与岩石中较高的放射性成因 Nd 和 Sr 及远老于其实际侵位年龄的 Nd 同位素模式年龄是不相容的。后一个观点似乎暗示地幔的富集作用发生在华夏板块与扬子板块碰撞的新元古代, 但盆地所处的长江中下游地区远离华夏板块与扬子板块之间的缝合线(一般认为江山—绍兴断裂), 更何况华夏板块与扬子板块之间的拼合可能主要表现为一种“软碰撞”, 也许并没有发生过明显的深俯冲作用。

包括怀宁盆地在内的长江中下游地区橄榄玄粗岩系列火山岩/潜火山岩的 Nd 同位素模式年龄(TDM)介于 1.1~1.9 Ga, 大多数位于 1.3 Ga 左右^[731-333538], 远早于它们实际的定位年龄(约 0.13 Ga)。由于 TDM 值代表其源区物质与亏损地幔发生分离的加权平均时间, 若考虑到区内的火山岩/潜火山岩中可能包含一定比例(晚中生代)直接来自软流圈地幔的物质, 其源区的 Nd 同位素模式年龄应接近于全球范围内壳—幔分异的主要时期(1.8~2.1 Ga, 如 Frost 和 O’Nions^[65-67]), 也许意味着扬子克拉通岩石圈地幔的富集作用主要发生在古元古代, 对应着壳—幔分异和扬子克拉通基底的主要形成时期。最近, 笔者对扬子克拉通北缘新元古代橄长质岩床群的研究(薛怀民等, 尚未发表资料)表明, 新元古代时期的扬子克拉通岩石圈地幔早已具有了富集型的特征。

与长江中下游其他橄榄玄粗岩系列火山岩盆地相比, 怀宁盆地内的火山岩具有宽广得多的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值变化范围, 其高值约为 -5.5, 与庐枞盆地、宁芜盆地及溧水盆地内火山岩/潜火山岩的 Nd 同位素组成类似(图 7), 且处于扬子克拉通北缘富集型的岩石圈地幔范围内, 指示其母岩浆的成因可能主要是由富集型地幔部分熔融形成的。而盆地西部早期喷发的流纹质凝灰岩其 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值低达 -19.23, 类似于大

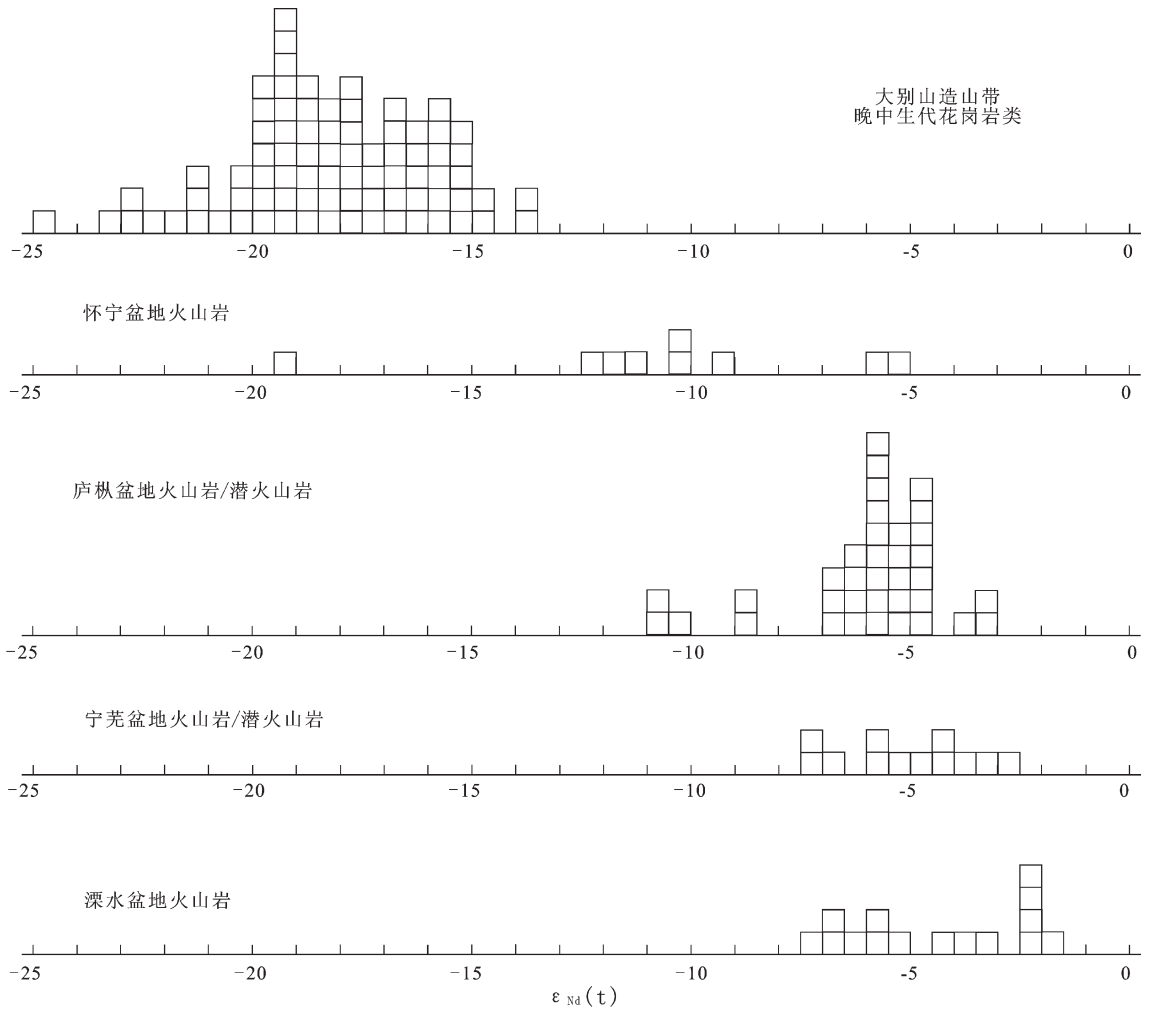


图7 怀宁盆地内火山岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值与长江中下游其他橄榄玄粗岩系列火山岩盆地内火山岩/潜火山岩及大别山造山带内晚中生代花岗岩类的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值对比图

(资料来源:本文、王强等^[7]、魏春景等^[78]、葛宁洁等^[79]、刘洪等^[31]、李超文等^[38]、徐晓军等^[80]、谢智等^[32]、赵新福等^[81]、周红升等^[82]、薛怀民等^[7]、Ma 等^[84]、Chen 等^[68,83]、Zhang 等^[85]、Wang 等^[33])

Fig.7 Histogram of $\epsilon_{Nd}(t)$ values of volcanic rocks in Huaining basin in comparison with data from other shoshonitic series volcanic basins as well as Late Mesozoic granitoid rocks in the Dabie orogenic belt

(Date sources: This paper; Wang Q, et al. ^[7]; Wei C J, et al. ^[78]; Ge N J, et al. ^[79]; Liu H, et al. ^[31]; Li C W, et al. ^[38]; Xu X J, et al. ^[80]; Xie Z, et al. ^[32]; Zhao X F, et al. ^[81]; Zhou H S, et al. ^[82]; Xue H M, et al. ^[7]; Ma C Q, et al. ^[84]; Chen J F, et al. ^[68,83]; Zhang H F, et al. ^[85]; Wang Q, et al. ^[33])

别造山带内的晚中生代花岗岩类侵入体的 Nd 同位素组成(图 7),后者普遍认为是由古老的下地壳物质部分熔融形成的^[68-76]。结合该流纹质凝灰岩样品具高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初时比值(0.7097),指示其受到过强烈的地壳物质混染。盆地内大多数样品的 Nd 同位素组成介于其间,可以推测,怀宁盆地内的晚中生代火山岩浆的成因主要是由富集型地幔部分熔融形成的母岩浆,在上升过程中及在浅部岩浆房中经历过一定程度的分异演化和地壳物质的混染,且地壳的混染程度在时间和空间上存在着明显的差异。表现在空间上,不同部位的岩浆受地壳物质混染的程度差

别很大,西部靠近大别造山带,地壳物质的混染程度较强,而东部远离造山带,地壳物质的混染作用相对微弱。时间上,随着岩浆在地壳浅部岩浆房中滞留的时间延长,地壳物质混染的程度有增加的趋势。

5 结论

(1) 怀宁盆地内的火山岩以橄榄玄粗岩系列为主,形成于 130 Ma 前后,与整个长江中下游地区火山活动的峰期时间一致。但晚期出现(高钾钙碱性系列)双峰式岩石组合,形成于约 122 Ma,晚于长江中下游其他火山岩盆地内岩浆活动结束的时间约 5 Ma。

(2)怀宁盆地内火山岩的母岩浆来自富集型地幔的部分熔融,在上升定位过程中受到不同比例地壳物质的混染,且地壳的混染程度自东向西、自早到晚有明显增加的趋势。

参考文献(References):

- [1] Gao S, Ling W L, Qiu Y M, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of Rees during crustal anatexis [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, 63(13/14):2071-2088.
- [2] Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of ≥ 3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of South China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics [J]. *Geol.*, 2000, 28:11-14.
- [3] Zhang S B, Zheng Y F, Fu Y B, et al. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China [J]. *Precam. Res.*, 2006, 146:16-34.
- [4] 高山, Qiu Y, 凌文黎, 等. 崧岭高级变质地体单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究——扬子克拉通 >3.2 Ga 陆壳物质的发现 [J]. *中国科学(D)*, 2001, 31(1):27-35.
Gao shan, Qiu Yumin, Ling wenli, et al. SHRIMP single Zircon U-Pb dating of the Kongling high grade metamorphic terrain: Evidence for >3.2 Ga old continental crust in the Yangtze craton [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(4):326-335.
- [5] 张旗, 简平, 刘敦一, 等. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义 [J]. *中国科学(D)*, 2003, 33:309-314.
Zhang Qi, Jian Ping, Liu Dunyi, et al. SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area and its geological implications [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(8):830-837.
- [6] 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化 [J]. *科学通报*, 2007, 52(1):1-10.
Zheng Yongfei, Zhang Shaobing. Formation and evolution of the Precambrian continental crust in the southern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(1):1-10 (in Chinese).
- [7] 薛怀民, 董树文, 马芳. 安徽庐枞火山岩盆地橄榄玄粗岩系的地球化学特征及其对下扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的约束 [J]. *地质学报*, 2010, 84(5):664-681.
Xue Huaimin, Dong Shuwen, Ma Fang. 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]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(5):664-681 (in Chinese with English abstract).
- [8] Ames L, Zhou G, Xiong B. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons, central China [J]. *Tectonics*, 1996, 15:472-489.
- [9] Rowley D B, Xue F, Tucker R D, et al. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon Geochronology [J]. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1997, 151:191-203.
- [10] Xue F, Rowley D B, Tucker R D, et al. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the North Dabie complex, eastern Dabie Shan, China [J]. *J. Geol.*, 1997, 105:744-753.
- [11] Hacker B R, Retschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China [J]. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1998, 161:215-230.
- [12] Zheng Y F, Wu Y B, Chen F K, et al. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2004, 68:4145-4165.
- [13] Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Reworking of juvenile crust: element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China [J]. *Precam. Res.*, 2006, 146:179-21.
- [14] Xue Huaimin, Dong Shuwen, Jian Ping. Zircon U-Pb SHRIMP ages of weakly to unmetamorphosed granitoids of the Yangtze basement outcrop in Dabieshan, central China [J]. *J. Asi. Earth Sci.*, 2006, 27:779-787.
- [15] 李献华. 广西北部新元古代花岗岩锆石 U-Pb 代学及其构造意义 [J]. *地球化学*, 1999, 28(1):1-9.
Li Xianhua. U-Pb zircon ages of granites from northern Guangxi and their tectonic significance [J]. *Geochimica*, 1999, 28(1):1-9 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李献华, 李正祥, 葛文春, 等. 华南新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4):271-273.
Li Xianhua, Li Zhengxiang, Ge Wenchun, et al. U-Pb zircon ages of the Neoproterozoic granitoids in South China and their tectonic implications [J]. *Bull. Miner. Petro. Geochem.*, 2001, 20 (4):271-273 (in Chinese with English abstract).
- [17] 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 大别山东部花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年代学 [J]. *地质科学*, 2002, 37(2):165-174.
Xue Huaimin, Dong Shuwen, Liu Xiaochun. U/Pb Zircon Dating of Granitic Gneisses in Eastern Dabie Mountain, Central China [J]. *Geoscience*, 2002, 37 (2):165-174 (in Chinese with English abstract).
- [18] Cohen A S, O'Nions R K, Siegenthaler R, et al. Chronology of the pressure-temperature history recorded by a granulite terrain [J]. *Contrib. Miner. Petro.*, 1988, 98:303-311.
- [19] Chavagnac V, Jahn B M. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications [J]. *Chem. Geol.*, 1996, 133:29-51.
- [20] Jahn B M, Cornicher J, Cong B, et al. Ultrahigh ϵNd eclogites from an UHP metamorphic terrane of China [J]. *Chem. Geol.*, 1996, 127:61-79.
- [21] Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [C] // Mickibben M A, Shanks III W C, and Ridley W I (eds.).

- Applications of micro analytical techniques to understanding mineralizing processes. *Reviews of Economic Geology*, 1998, 7:1-35.
- [22] Claoue -Long J C, Compston W, Roberts J, et al. Two Carboniferous ages: a comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis [C] // Berggren W A, Kent D V, Aubry M P, Hardenbol J (eds.). *Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation*, SEPM Special Publication, 1995, 5:3-31.
- [23] Ludwig K R. *Users Manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*; Berkeley Geochronology Center [M]. Special Publication No. 1a, 2001, P.1-55.
- [24] Le Bas M, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based total alkali-silica diagram[J]. *J. Petrol.*, 1986, 27:745-750.
- [25] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contrib. Miner. Petro.*, 1976, 58:68-81.
- [26] Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, et al. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, east China and their relationship to lithospheric thinning [J]. *Chem. Geol.*, 2005, 222:200-231.
- [27] 赵子福, 郑永飞. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因[J]. *中国科学(D辑)*, 2009, 39(7):888-909.
Zhao Zifu, Zheng Yongfei. Remelting of subducted continental lithosphere: Petrogenesis of Mesozoic magmatic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt [J]. *Science in China (Series D)*, 2009, 39(7):888-909 (in Chinese).
- [28] 薛怀民, 董树文, 马芳. 长江中下游庐枞盆地火山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄: 对扬子克拉通东部晚中生代岩石圈减薄机制的约束[J]. *地质学报*, 2012, 86(10):1569-1583.
Xue Huaimin, Dong Shuwen, Ma Fang. Zircon SHRIMP U-Pb ages of volcanic rocks in the Luzong basin, Middle and Lower Yangtze River reaches: Constraints on the model of late Mesozoic lithospheric thinning of the eastern Yangtze craton [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(10):1569-1583 (in Chinese with English abstract).
- [29] 杨荣勇, 任启江, 徐兆文, 等. 安徽庐枞地区巴家滩火山-侵入体的岩浆来源[J]. *地球化学*, 1993, 2:197-206.
Yang Rongyong, Ren Qijiang, Xu Zhaowen, et al. The magma source of Bajiatan volcanic-intrusive complex in the Lujiang-Zongyang area, Anhui Province [J]. *Geochimica*, 1993, 2:197-206 (in Chinese with English abstract).
- [30] 孙冶东, 杨荣勇, 任启江, 等. 安徽庐枞中生代火山岩系的特征及其形成的构造背景[J]. *岩石学报*, 1994, 10(1):94-103.
Sun Yedong, Yang Rongyong, Ren Qijiang, et al. Discussion on the characteristics and tectonic setting of the Mesozoic volcanic sequences in Lujiang-Zongyang area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1994, 10(1):94-103 (in Chinese with English abstract).
- [31] 刘洪, 邱检生, 罗清华, 等. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约[J]. *地球化学*, 2002, 31(2):129-140.
Liu Hong, Qiu Jiansheng, Luo Qinghua, et al. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province: Geochemical constraints [J]. *Geochimica*, 2002, 31(2):129-140 (in Chinese with English abstract).
- [32] 谢智, 李全忠, 陈江峰, 等. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(2):235-249.
Xie Zhi, Li Quanzhong, Chen Jiangfeng, et al. The geochemical characteristics of the early Cretaceous volcanics in Luzhong region and their source significances [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(2):235-249 (in Chinese with English abstract).
- [33] Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization [J]. *Lithos*, 2006, 89(3/4):424-446.
- [34] 薛怀民, 陶奎元. 宁芜地区中生代火山岩系列的新认识及其地质意义[J]. *江苏地质*, 1989, (4):9-14.
Xue Huaimin, Tao Kuiyuan. New view on the Mesozoic volcanic sequences in Ning-Wu [J]. *Jiangsu Geology*, 1989, (4):9-14 (in Chinese with English abstract).
- [35] 王元龙, 张旗, 王焰. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4):565-575.
Wang Yuanlong, Zhang Qi, Wang Yan. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4):565-575 (in Chinese with English abstract).
- [36] Zhou J C, Zhao T P, Chen K R. Mesozoic shoshonite series from Lishui in the Lower Yangtze region, China [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1994, 10(3/4):263-277.
- [37] Zhou J C, Zhou J P, Liu J, et al. Copper (gold) and non-metal deposits hosted in Mesozoic shoshonite and K-rich talc-alkaline series from Lishui in the Lower Yangtze region, China [J]. *J. Geochem. Explor.*, 1996, 57:273-283.
- [38] 李超文, 郭锋, 李晓勇. 溧水盆地晚中生代基性火山岩成因与深部动力学过程探讨[J]. *地球化学*, 2004, 33(4):361-371.
Li Chaowen, Guo Feng, Li Xiaoyong. Petrogenesis and geodynamic implications of late Mesozoic mafic volcanic rocks from the Lishui basin of the Lower Yangtze region [J]. *Geochimica*, 2004, 33(4):361-371 (in Chinese with English abstract).
- [39] 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 安徽庐枞(庐江-枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义[J]. *中国科学*, 2008, 38(11):1342-1353.
Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan engF, et al. Geochronology of the volcanic rocks in the Lu-Zong basin and its significance [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2008, 51(10):1470-1482.
- [40] 周涛发, 宋明义, 范裕, 等. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的年代学研究及其意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10):2379-2386.
Zhou Taofa, Song Mingyi, Fan Yu, et al. Chronology of the Bajiantan intrusion in the Luzong basin, Anhui, and its significance

-]]]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10):2379–2386 (in Chinese with English abstract).
- [41] 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约]]]. *岩石学报*, 2010, 26(9):2694–2714.
Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, et al. Temporal–spatial framework of magmatic intrusions in Luzong volcanic basin in East China and their constrain to mineralizations]]]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(9):2694–2714 (in Chinese with English abstract).
- [42] 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 安徽庐江—枞阳地区 A 型盆花岗岩的 LA-ICP MS 定年及其地质意义]]]. *岩石学报*, 2008, 24(8): 1715–1724.
Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, et al. LA-ICP-MS zircon U–Pb ages of the A-type granites in the Lu–Zong (Lujiang–Zongyang) area and their geological significances]]]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (8):1715–1724 (in Chinese with English abstract).
- [43] 薛怀民, 董树文, 马芳. 长江中下游地区庐(江)—枞(阳)和宁(南京)—芜(湖)盆地内与成矿有关潜火山岩体的 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄]]]. *岩石学报*, 2010, 26(9):2653–2664.
Xue Huaimin, Dong Shuwen, Ma Fang. Zircon U–Pb SHRIMP ages of sub-volcanic bodies related with porphyritic Fe–deposits in the Luzong and Ningwu basins, Middle and lower Yangtze River reaches, central China]]]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (9): 2653–2664 (in Chinese with English abstract).
- [44] 张乐骏, 周涛发, 范裕, 等. 安徽庐枞盆地井边铜矿床的成矿时代及其找矿指示意义]]]. *岩石学报*, 2010, 26(9):2729–2738
Zhang Lejun, Zhou Taofa, Fan Yu, et al. Dating of copper mineralization in Jingbian deposit and its prospecting significance in Luzong basin, Anhui Province]]]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (9):2729–2738 (in Chinese with English abstract).
- [45] 曾键年, 覃永军, 郭坤一, 等. 安徽庐枞盆地含矿岩浆岩锆石 U–Pb 年龄及其对成矿时限的约束]]]. *地质学报*, 2010, 84(4):466–478.
Zeng Jiannian, Qin Yongjun, Guo Kunyi, et al. Zircon U–Pb dating of ore-bearing magmatic rocks and its constraint on the formation time of the ore deposits in Luzong basin, Anhui Province]]]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84 (4):466–478 (in Chinese with English abstract).
- [46] 侯可军, 袁顺达. 宁芜盆地火山—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*, 2010, 26 (3):888–902.
Hou Kejun, Yuan Shunda. 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*, 2010, 26(3):888–902 (in Chinese with English abstract).
- [47] 闫峻, 刘海泉, 宋传中, 等. 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*, 2009, 54 (12):1716–1724.
Yan Jun, Liu Haiquan, Song Chuanzhong, et al. Zircon U–Pb geochronology of the volcanic rocks from Fanchang–Ningwu volcanic basins in the Lower Yangtze region and its geological implications]]]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(16):2895–2904.
- [48] 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义]]]. *岩石学报*, 2010, 26(9):2715–2728.
Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, et al. Geochronology of the diorite porphyrites in Ning–Wu basin and their metallogenic significances]]]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(9):2715–2728 (in Chinese with English abstract).
- [49] 禹尧, 徐夕生. 长江中下游地区白垩纪富碱火山岩浆作用]]]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2009, 34(1):105–116.
Yu Yao, Xu Xisheng. Cretaceous alkali-rich magmatism in the Middle and Lower reaches of the Yangtze River]]]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2009, 34(1):105–116 (in Chinese with English abstract).
- [50] 马芳, 薛怀民. 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]]]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(5):924–934.
Ma Fang, Xue Huaimin. SHRIMP Zircon U–Pb age of the late Mesozoic volcanic rock from the Chuzhou basin, eastern Anhui Province, and their geological significances]]]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30 (5):924–934 (in Chinese with English abstract).
- [51] 谢成龙, 朱光, 牛漫兰, 等. 滁州中生代火山岩 LA-ICP MS 锆石 U–Pb 年龄及其构造地质学意义]]]. *地质论评*, 2007, 53(5):642–655.
Xie Chenglong, Zhu Guang, Niu Manlan, et al. LA-ICP MS zircon U–Pb ages of the Mesozoic volcanic rocks from Chuzhou area and their tectonic significances]]]. *Geological Review*, 2007, 53 (5):642–655 (in Chinese with English abstract).
- [52] 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 安徽繁昌盆地中生代火山岩锆石 LA-ICP MS U–Pb 年龄及其意义]]]. *岩石学报*, 2010, 26(9):2805–2817.
Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, et al. LA-ICP MS U–Pb ages of zircons from Mesozoic volcanic rocks and their significance in Fanchang basin, Anhui Province, China]]]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(9):2805–2817 (in Chinese with English abstract).
- [53] 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 等. 长江中下游鄂东南地区大寺组火山岩 SHRIMP 定年及其意义]]]. *科学通报*, 2006, 51:2283–2291.
Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating for volcanic rocks of the Dasi Formation in southeast Hubei Province, middle–lower reaches of the Yangtze River and its implications]]]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 46 (21):1823–1827.
- [54] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部岩石圈去根/去根作用与大陆“活化”]]]. *现代地质*, 1994, 8:349–356.
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, et al. Lithosphere root/de-rooting and activation of the east China continent]]]. *Geoscience*, 1994, 8:349–356 (in Chinese with English abstract).
- [55] 张宏福, 周新华, 范蔚茗, 等. 华北东南部中生代岩石圈地幔性

- 质、组成、富集过程及其形成机理 [J]. 岩石学报, 2005, 21(4): 1271-1280.
- Zhang Hongfu, Zhou Xinhua, Fan Weiming, et al. Nature, composition, enrichment processes and its mechanism of the Mesozoic lithospheric mantle beneath the southeastern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 12:1271-1280 (in Chinese with English abstract).
- [56] 路凤香, 郑建平, 邵济安, 等. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. 地学前缘, 2006, 13(2):87-92.
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Shao Ji'an, et al. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13:87-92 (in Chinese with English abstract).
- [57] 郑建平, 路凤香, Griffin W L, 等. 华北东部橄榄岩与岩石圈减薄中的地幔伸展和侵蚀置换作用[J]. 地学前缘, 2006, 13(2):77-85.
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang, Griffin W L, et al. Lithospheric thinning accompanying mantle lateral spreading, erosion and replacement beneath the eastern part of North China: Evidence from peridotites [J]. Earth Science Front, 2006, 13:77-85 (in Chinese with English abstract).
- [58] 周新华. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究的若干问题 [J]. 地学前缘, 2006, 13(2):50-64.
- Zhou Xinhua. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic-Mesozoic: Review and prospect[J]. Earth Science Front, 2006, 13:50-64 (in Chinese with English abstract)
- [59] 薛怀民, 汪应庚, 汪诚, 等. 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[J]. 中国科学(D 辑), 2009, 39(7): 979-993.
- Xue Huaimin, Wang Yingeng, Ma Fang, et al. Zircon U-Pb SHRIMP ages of the Taiping (calc-alkaline)-Huangshan (alkaline) composite intrusion: Constraints on Mesozoic lithospheric thinning of the southeastern Yangtze Craton, China [J]. Science in China (Series D), 2009, 52(11):1756-1770.
- [60] Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Genesis of young lithospheric mantle in Southeastern China: An LA-ICP MS trace element study[J]. J. Petrol., 2000, 41:111-148.
- [61] Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Achaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism[J]. Phys. Chem. Earth, 2001, 26:747-757.
- [62] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. Nature, 2004, 432: 892-89.
- [63] Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. Earth. Planet. Sci. Lett., 2005, 233: 103-119.
- [64] 闫峻, 陈江峰, 谢智, 等. 长江中下游地区蝌蚪山晚中生代玄武岩的地球化学研究: 岩石圈地幔性质与演化的制约 [J]. 地球化学, 2005, 34(5):455-469.
- Yan Jun, Chen Jiangfeng, Xie Zhi, et al. Geochemistry of Late Mesozoic basalts from Kedoushan in the Middle and Lower Yangtze regions: Constraints on characteristics and evolution of the lithospheric mantle [J]. Geochimica, 2005, 34 (5):455-469 (in Chinese with English abstract).
- [65] Frost C D, O'Nions R K. A Nd isotope investigation of sediments related to crustal development in the British Isles [J]. Earth. Planet. Sci. Lett., 1985, 26(2):515-540.
- [66] Tarney J, Weaver B L. Mineralogy, petrology and geochemistry of the Scourie dykes: Petrogenesis and crystallization processes in dykes intruded at depth [C] // Park R G, Tarney J (eds.). Evolution of the Lewisian and Comparable Precambrian High Grade Terrains[J]. Geol. Soc. Spec. Publ., 1987, 27:217-233.
- [67] Condie K C. Sources of Proterozoic mafic dyke swarms: Constraints from Th/Ta and La/Yb ratios [J]. Precam. Res., 1997, 81:3-14.
- [68] Chen B, Jahn B M, Wei C J. Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex, Central China: Trace element and Nd-Sr isotope evidence[J]. Lithos, 2002, 60:67-88.
- [69] Huang Fang, Li Shuguang, Dong Feng, et al. Recycling of deeply subducted continental crust in the Dabie Mountains, central China [J]. Lithos, 2007, 96:151-169.
- [70] Xu Haijin, Ma Changqian, Ye Kai. Early Cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry [J]. Chem. Geol., 2007, 240:238-259.
- [71] 夏群科, 郑永飞, Deloule E. 大别山碰撞后火山岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成[J]. 高校地质学报, 2003, 9(2):163-171.
- Xia Qunke, Zheng Yongfei, Deloule Etienne. U-Pb ages and oxygen isotope compositions of zircons from Post-collisional volcanic rocks of Dabieshan [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9 (2):163-171 (in Chinese with English abstract).
- [72] 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别—苏鲁造山带为例[J]. 科学通报, 2008, 53(18):2129-2152.
- Zheng Yongfei. A perspective view on ultrahigh-pressure metamorphism and continental collision in the Dabie-Sulu orogenic belt [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53 (18):2129-2152 (in Chinese).
- [73] 桑隆康, 王人镜, 张泽明, 等. 九资河—天堂寨地区燕山晚期花岗岩与大别造山带核部隆升[J]. 地质学报, 2000, 74(3):234-246.
- Sang Longkang, Wang Renjing, Zhang Zeming, et al. Late Yanshanian granites in the Jiuzihe-Tiantangzhai area and uplift of the core of the Dabie orogenic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(3):234-246 (in Chinese with English abstract).
- [74] 戴圣潜, 邓晋福, 吴宗絮, 等. 大别造山带燕山期造山作用的岩浆岩石学证据[J]. 中国地质, 2003, 30(2):159-165.
- Dai Shengqian, Deng Jinfu, Wu Zongxu, et al. Evidence of magmatic petrology for the Yanshanian orogeny in the Dabie orogen [J]. Geology in China, 2003, 30 (2):159-165 (in Chinese

- with English abstract).
- [75] Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, et al. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, east China and their relationship to lithospheric thinning [J]. *Chem. Geol.*, 2005, 222:200–231.
- [76] Huang Jie, Zheng Yongfei, Zhao Zifu, et al. Melting of subducted continent: Element and isotopic evidence for a genetic relationship between Neoproterozoic and Mesozoic granitoids in the Sulu orogen [J]. *Chem. Geol.*, 2006, 229:227–256.
- [77] 王强, 王人镜, 邱家骧, 等. 大别山核部九资河花岗岩体成因 [J]. *地球化学*, 2000, 29(2):120–131.
- Wang Qiang, Wang Renjing, Qiu Jiayang, et al. Petrogenesis of Jiuzihe granities in the core of Dabie Mountains [J]. *Geochimica*, 2000, 29(2):120–131 (in Chinese with English abstract).
- [78] 魏春景, 张立飞, 王式光. 安徽省大别山东段中生代高钾花岗岩及其地质意义 [J]. *中国科学(D辑)*, 2000, 30(4):355–363.
- Wei Chunjing, Zhang Lifei, Wang Shiguang. Mesozoic high-K granitic rocks from the eastern Dabie Mountains, Central China and their geological implications [J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(4):355–363 (in Chinese).
- [79] 葛宁洁, 李惠玉, 侯振辉, 等. 大别造山带白马尖花岗岩体的铷锶同位素地球化学研究 [J]. *地质论评*, 2001, 47(2):184–187.
- Ge Ningjie, Li Huiyu, Hou Zhenhui, et al. Nd-Sr isotope geochemistry of the Baimajian granite in the Dabie orogen [J]. *Geological Review*, 2001, 47(2):184–187 (in Chinese with English abstract).
- [80] 徐小军, 赵子福, 郑永飞, 等. 大别造山带天柱山燕山期中酸性岩浆岩元素和同位素地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(3):607–622.
- Xu Xiaojun, Zhao Zifu, Zheng Yongfei, et al. Element and isotope geochemistry of Mesozoic intermediate-felsic rocks at Tianzhushan in the Dabie orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3):607–622 (in Chinese with English abstract).
- [81] 赵新福, 李建威, 马昌前, 等. 北淮阳古碑花岗岩闪长岩侵位时代及地球化学特征: 对大别山中生代构造体制转换的启示 [J]. *岩石学报*, 2007, 23:1392–1402.
- Zhao Xinfu, Li Jianwei, Ma Changqian, et al. Geochronology and geochemistry of the Gubei granodiorite, north Huaiyang: Implications for Mesozoic tectonic transition of the Dabie orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23:1392–1402 (in Chinese with English abstract).
- [82] 周红升, 马昌前, 陈玲. 大别造山带砵子岗碱性岩体成因及其构造意义: 锆石 U-Pb 年龄和地球化学制约 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(5):1079–1091.
- Zhou Hongsheng, Ma Changqian, Chen Ling. Petrogenesis and tectonic implication of Yanzigang alkali pluton in the Dabie orogenic belt: Constraints from the zircon U-Pb ages and geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(5):1079–1091 (in Chinese with English abstract).
- [83] Chen J F, Yan J, Xie Z. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze region in Eastern China: Constraints on Sources [J]. *Phys. Chem. Earth*, 2001, 26:719–731.
- [84] Ma C Q, Li Z C, Ehlers C, et al. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China [J]. *Lithos*, 1998, 45:431–456.
- [85] Zhang H F, Gao S, Zhong Z Q, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China [J]. *Chem. Geol.*, 2002, 186:281–299.

Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in Huaining basin in comparison with other basins in the middle–lower Yangtze region

XUE Huai–min¹, MA Fang², GUAN Hai–yan³, WANG Yi–peng³

(1. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Hexigten Banner Bureau of Land and Resources, Department of Land and Resources of Inner Mongolian, Hexigten 025350, Inner Mongolia)

Abstract: The volcanic rocks in Huaining basin, one of a series of late Mesozoic volcanic basins developed in the Middle–lower Yangtze region, are characterized by high K and rich alkali and mainly belong to typical shoshonitic series. However, bimodal volcanic association appeared at the late stage of volcanism in Huaining basin. The volcanic rocks in the basin are all depleted in high–field–strong–elements (HFSE) such as Nb and Ta, and enriched in strong incompatible elements such as Rb, Th, U and K as well as light rare earth elements (LREE). In this study, the authors used SHRIMP and LA–ICP–MS zircon U–Pb technique to date the samples from Pengjiakou Formation and early volcanism respectively in Huaining basin, and obtained emplacement ages of 129.4 ± 1.6 Ma and 131.6 ± 0.6 Ma respectively. The age of 122.3 ± 0.7 Ma was also obtained by LA–ICP–MS zircon U–Pb technique for rhyolite from Jiangzhen Formation, which is late volcanism in Huaining basin. Based on a comparison with other volcanic basins in the Middle–lower Yangtze region, the authors found that the ages of volcanism in Huaining basin are similar to those of such other volcanic basins in the Middle–lower Yangtze region as Luzong basin and Ningwu basin; nevertheless, the end of volcanism in Huaining basin occurred about 6 Ma later than other volcanic basins. The volcanic rocks in Huaining basin have wider variation range and lower $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values than other shoshonite volcanic basins in the Middle–lower Yangtze region, which may be related to the fact that their tectonic setting was near the Dabie orogen, and hence more crust materials were added to the magma. The proto magma of Huaining volcanic basin mainly came from partial melting of the enriched mantle, with different degrees of mixture of lower crust materials during the magmatic evolution.

Key words: shoshonite; bimodal volcanic rock; zircon U–Pb dating; magma genesis; Huaining basin; middle–lower Yangtze region

About the first author: XUE Huai–min, male, born in 1963, senior researcher, majors in petrology and geochemistry; E–mail: huaiminx@sina.com.