长江中下游溧水盆地中基性次火山岩-侵入岩的锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素

王丽娟^{①②③*}, 黄建平^①, 于津海^{②③}, GRIFFIN W.L.^③, 王汝成^②, 张少琴^①, 杨颖鹤^①

① 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏省地质调查研究院, 南京 210018;

② 内生金属矿床成矿机制国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093;

③ ARC Centre of Excellence for Core to Crust Fluid Systems (CCFS) and GEMOC Key Centre, Department of Earth and Planetary Science, Macquarie University, NSW 2109, Australia

* 联系人, E-mail: wang_lujuan@126.com

2013-12-18 收稿, 2014-02-21 接受, 2014-04-25 网络版发表

国家自然科学基金(41102123, 41330208)和国家地质调查项目(1212011120864)资助

摘要 对溧水盆地 8 件典型的中生代次火山岩-侵入岩进行了详细的锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素研究. 结果显示, 老虎头角闪闪长玢岩年龄为 130.5 ± 1.6 Ma, 大铜山角闪闪长玢岩年龄为 136.0 ± 3.4 Ma, 大魏庄角闪闪长玢岩年龄为 132.7 ± 2.7 Ma, 野山凹粗安斑岩年龄为 127.0 ± 1.9 Ma, 砚瓦桥石英闪长玢岩年龄为 129.4 ± 1.7 Ma, 西北山辉石闪长玢岩年龄为 133.2 ± 2.1 Ma, 长山头黑云母安山玢岩年龄为 131.1 ± 2.3 Ma, 尖山黑云母粗安斑岩年龄为 127.4 ± 1.8 Ma. 所有岩体均为早白垩世产物, 指示了溧水盆地岩浆活动的峰期时代. 岩浆岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 $-3.54 \sim -9.11$, 其中大多数变化于 $-3.54 \sim -5.93$, 与长江中下游其他火山岩盆地中同时代火山岩和侵入岩的锆石 Hf 同位素组成相似, 表明它们具有相似的源区组成. 在分析长江中下游地区以及邻区同时代岩浆特征的基础上, 提出俯冲太平洋板块后撤模式来解释中国东部晚中生代岩浆活动. 侏罗纪中晚期-白垩纪早期(170~135 Ma), 太平洋板块向欧亚大陆俯冲, 总体处于挤压背景, 岩浆活动呈现出由沿海向内陆年轻化的趋势, 且多具壳源特征; 白垩纪早期(~135 Ma)之后, 太平洋板块的俯冲作用减弱, 俯冲板片发生后撤, 研究区总体转变为拉张背景, 从而形成了一系列火山盆地, 造成大量富集地幔和较少量古老地壳物质的熔融, 形成大量中基性岩浆岩.

关键词

长江中下游
溧水盆地
锆石 U-Pb 年龄
锆石 Hf 同位素
板块后撤

长江中下游地区是中国东部一个重要的多金属成矿区, 位于扬子地块北缘. 自新元古代以来, 该区受特提斯构造域和太平洋构造域等构造体制控制, 形成了断隆区和断陷区的次级构造及丰富的铁、铜、金多金属等矿床组合. 从西向东依次分布有鄂东、九瑞、安庆、庐枞、铜陵、宁芜和宁镇等 7 个大型矿集区^[1~3]. 同时, 沿长江深大断裂发育有串珠状分布的断陷火山盆地. 由北东向西南依次有溧阳、溧水、宁

芜、繁昌、庐枞和金牛盆地等. 其中出露最好、矿化最强的庐枞盆地和宁芜盆地具有较高的研究程度, 而溧水盆地的研究程度相对薄弱(图 1). 近年来, 随着同位素定年技术的发展, 已获得长江中下游成矿带中主要盆地(如宁芜、庐枞等)岩浆岩的一系列高质量同位素年代学数据^[4~10], 使得区内岩浆岩的年代学格架逐渐清晰. 然而, 对溧水地区火山岩-次火山岩-侵入岩精确的同位素年龄鲜有报道. 但是, 近年来

引用格式: 王丽娟, 黄建平, 于津海, 等. 长江中下游溧水盆地中基性次火山岩-侵入岩的锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素. 科学通报, 2014, 59: 1305-1317

英文版见: Wang L J, Huang J P, Yu J H, et al. 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. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-010-0180-9

图 1 长江中下游火山岩盆地分布(a)和漂水盆地地质图(b)

溧水盆地的找矿工作有了新的进展,新发现了一批与次火山岩-侵入岩有关的铁、铜、锑、金、电气石等矿床,如后房村大型锑矿、东岗铁铜矿、观山-金驹山铜金矿、太尉庄电气石矿等。因此,开展溧水地区次火山岩-侵入岩的年代学研究,理清溧水盆地岩浆活动与周边火山盆地的关系,建立整个长江中下游火山活动的时空分布格架,是探讨矿集区内大地动力学背景和成岩成矿作用关系的重要一环。

前人对溧水盆地火山岩曾进行过 K-Ar 和 Rb-Sr 等同位素测年工作,但由于传统的 K-Ar 和 Rb-Sr 等同位素测年方法的分析精度较低,且易受后期构造热事件的影响,因此往往无法准确限定其形成时代。本次研究在细致的野外工作基础上,采集 8 件代表性的中基性次火山岩-侵入岩样品,应用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法和 LA-MC-ICPMS 法 Lu-Hf 同位素分析方法,对溧水盆地岩浆岩进行了精确的同位素分析,试图确定溧水盆地岩浆活动的时代及与其他火山岩盆地岩浆活动的关系以及岩浆源区特征,进而为探讨长江中下游火山岩盆地形成的地球动力学过程提供新的证据。

1 地质概况及样品描述

溧水盆地中生代火山活动强烈,火山岩种类繁多。与宁芜盆地火山旋回对应,溧水盆地的火山岩根据岩性和相互关系也分成 4 个火山活动旋回,即龙王山、大王山、观山、甲山旋回等,但观山和甲山旋回地表未见,仅在少量钻孔中鲜有发现。龙王山组主要出露于盆地中、北部,呈北西向带状分布,在盆地周边的东岗、杭村也有零星出露。该组火山岩由下部凝灰岩、火山角砾岩、角闪安山岩和上部粗面岩、玄武岩、安山质含集块角砾岩、粗面安山岩等组成。大王山组沿夏家边-东芦山-观山-双尖山呈环带状分布。下部由辉石粗玄岩组成;中部为紫色的粗安岩,局部见有凝灰质粉砂岩透镜体;上部主要为灰红色、浅灰色粗面岩。龙王山、大王山、观山和甲山旋回火山活动形成对应的基性、中性、碱性及酸性次火山岩,其中尤其以中性偏碱性岩最为发育(图 1)。溧水盆地次火山岩-侵入岩广泛分布于火山岩盆地内部及西北缘横山地区。区内已发现大小次火山岩体百余个,规模大小不一。岩体形态不规则,且多呈岩床、岩株、岩枝、岩墙、岩颈等产出,大部分侵入于火山岩地层中,部分侵入于火山基底的地层内,主要岩石类型有玄

武玢岩(或辉绿玢岩)、闪长玢岩、粗安斑岩和流纹斑岩等,以角闪闪长玢岩为主,这些岩体与区域内铁矿、铜矿的成矿作用关系密切。

本次研究主要是针对区内与成矿作用相关的次火山岩,在岩石化学成分上为中基性(SiO_2 含量 51%~63%)。根据野外地质和岩石出露情况,采集了 8 件典型的闪长玢岩及斑岩样品进行同位素定年。样品 LS12-1 角闪闪长玢岩采自老虎头铁矿成矿母岩体。该岩体侵入侏罗纪朱村组,岩石呈斑状结构,基质柱粒状微晶结构。斑晶含量约 30%~40%,主要是斜长石,少量角闪石。斜长石斑晶半自形板柱状,聚片双晶发育,部分具有环带构造。角闪石斑晶柱状,具暗化现象。基质矿物成分相似于斑晶组合。样品 LS14-1 角闪闪长玢岩采自大铜山岩体,岩体侵入西横山地层。岩石斑状结构,斜长石斑晶含量约 80%,半自形板柱状,聚片双晶发育,部分具有环带构造;角闪石含量约 20%。样品 LS15-1 角闪闪长玢岩采自大魏庄岩体,侵入于龙王山组火山岩地层,斑状结构,基质交织结构,斑晶含量约 30%~40%,主要为斜长石和角闪石,斜长石斑晶,半自形板柱状,聚片双晶发育,部分具有环带构造;角闪石斑晶长柱状自形,部分绿泥石化。基质成分基本同斑晶组合。样品 LS16-1 粗安斑岩采自野山凹岩体,侵入于龙王山组火山岩地层,斑状结构,斑晶含量约 20%~30%,主要为斜长石,少量黑云母和角闪石。斜长石斑晶他形-半自形板柱状,发育聚片双晶,黑云母斑晶片状,角闪石斑晶柱状,但往往蚀变为碳酸盐集合体,仅保留其晶形假象。基质主要是为柱状微晶斜长石和填隙状他形碱性长石。样品 LS17-1 石英闪长玢岩采自硃瓦桥岩体,侵入于龙王山组。岩石呈斑状结构,斑晶含量约 20%~30%,主要为斜长石和石英,少量黑云母。斜长石斑晶他形-半自形板柱状,聚片双晶发育,绢云母化、泥化。石英斑晶他形粒状,具有熔蚀边。基质为长英质,粒状石英微晶镶嵌包裹长石微晶。样品 LS19-1 辉石闪长玢岩采自西北山岩体,侵入大王山组。岩石斑状结构,基质交织结构,斑晶含量约 30%,主要为斜长石,次为黑云母,少量辉石。斜长石斑晶他形-半自形板柱状,聚片双晶发育,部分有环带构造,大部分具有自碎斑结构的特征。辉石斑晶短柱状,但多被交代蚀变为碳酸盐集合体假象。基质主要由柱状微晶斜长石组成,交织结构。样品 LS28-1 黑云母安山玢岩采自长山头岩体,侵入大王

山组. 岩石斑状结构, 斑晶含量约 20%~30%, 为斜长石和黑云母. 斜长石斑晶呈他形-半自形板柱状, 几乎都有碎裂现象, 形成自碎斑结构, 聚片双晶发育; 黑云母斑晶全部暗化, 部分呈撕裂状. 基质蚀变主要是泥化、硅化、绢云母化. 样品 LS29-1 黑云母粗安斑岩采自尖山岩体, 侵入大王山组. 岩石斑状结构, 交织结构, 斑晶含量约 20%, 为斜长石和黑云母. 斜长石斑晶他形-半自形板柱状, 聚片双晶发育, 大部分斑晶具有钾质反应边. 基质主要由柱状微晶斜长石组成, 斜长石微晶大部分具有不规则的边缘并向填隙物过渡.

2 分析测试方法

锆石分选采用传统的重砂方法完成, 首先将 2~4 kg 岩石样品破碎到 80~100 目, 再经浮选和电磁选, 分选出无磁性重矿物样品, 在 Nikon 双目显微镜下仔细挑选表面平整光洁且具不同柱锥面特征和不同颜色的锆石颗粒, 然后将分选出的锆石颗粒排列在双面胶上, 用混合有固化剂的环氧树脂胶结. 待环氧树脂固化后, 抛光至锆石颗粒中心露出, 制成样品靶. 对样品靶的锆石进行显微镜下透射光和反射光的观察和照相, 以及阴极发光(CL)图像分析(图 2). CL 图像分析在南京大学成矿作用国家重点实验室 JEOLJXA-8100 电子探针仪上完成. 锆石 U-Pb 定年是在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 带激光熔蚀装置的 Agilent HP 7500 ICP-MS 分析仪上进行, 采用 He 气作为剥蚀物质的载气, 通过直径 3 mm 的 PVC 管将剥蚀物质传送到 ICP-MS, 并在进入 ICP-MS 之前与 Ar 气混合, 形成混合气. 激光仪器工作参数为: 波长 213 nm, 激光脉冲重复频率 5 Hz, 脉冲能量为 10~20 J/cm², 熔蚀直径为 30 μm, 剥蚀时间 60 s, 背景测量时间 40 s. 样品同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER (Ver4.0, Macquarie University) 程序获得, 普通 Pb 校正采用 Andersen 的方法^[11]进行, 校正后年龄计算及谐和图的绘制用 Isoplot 程序完成^[12]. 锆石 Lu-Hf 同位素原位分析也在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室带有 Merchantek/New Wave Research 213 nm 激光溶蚀探针的 Nu Plasma MC-ICP-MS 机上进行, 实验以 He 作为载气, 激光束斑直径为 60 μm, 溶蚀时间为 60 s, 溶蚀深度约为 40 μm, 剥蚀频率为 5 Hz, 实验采用 MT 作为外部标样, MT 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf

比值为 0.282530±30. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算采用的 ¹⁷⁶Lu 的衰变常数为 1.865×10^{-11} ^[13], 球粒陨石 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282772, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0332^[14]. 亏损地幔 Hf 模式年龄(t_{DM1})采用 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.283251, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.0384 计算^[15], 二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})采用平均大陆壳 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.015 计算^[16].

3 锆石定年结果

样品中大多锆石呈浅黄色-无色, 晶型较完整, 颗粒多呈长柱状或板柱状, 也见少量不规则状或磨圆状, 可能为继承锆石或捕获锆石. 锆石 CL 图片显示样品中锆石绝大多数具有韵律环带, 指示岩浆稳定结晶的环境(图 2).

锆石 U-Pb 定年分析结果列于表 S1, 年龄谐和图见图 3. 部分岩浆岩中的锆石给出较老的结晶年龄, 可能是继承锆石或在岩浆侵入过程中的捕获锆石. 锆石中的 Th/U 比值可以指示锆石的成因类型. 一般认为, Th/U 比值大于 0.4 为岩浆成因锆石, Th/U 比值小于 0.1 为变质成因锆石. 本次研究中锆石的 Th/U 比值绝大多数都大于 0.5, 属于典型的岩浆成因锆石. 部分锆石由于 U 含量太高或普通 Pb 丢失, 给出不谐和年龄, 在计算中被剔除.

8 件岩体样品中年轻锆石大多位于谐和线上(图 3). LS12-1 老虎头角闪闪长玢岩中除 2 颗较老的 1.8~1.9 Ga 残留锆石外, 其他谐和年龄多集中于 125~140 Ma 之间, 谐和年龄 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 130.5±1.6 Ma($n=15$, MSWD = 1.08). LS14-1 大铜山角闪闪长玢岩中年轻的锆石谐和年龄 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均为 136.0±3.4 Ma($n=7$, MSWD = 0.16), 另含少量三叠纪年龄约 220 Ma、新元古代年龄 650~740 Ma 以及古元古代年龄约 1826 Ma 和太古代年龄约 2527 Ma 的残留锆石. LS15-1 大魏庄角闪闪长玢岩中多数锆石谐和年龄 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 132.7±2.7 Ma($n=6$, MSWD = 0.48), 另有少量新元古代年龄 650~950 Ma 及太古代年龄的残留锆石. LS16-1 野山凹粗安斑岩中锆石的谐和年龄 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 127.0±1.9 Ma($n=16$, MSWD = 2.5), 另有 1 颗残留锆石的谐和年龄为 431±6 Ma. LS17-1 砚瓦桥石英闪长玢岩中锆石的谐和年龄 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 129.4±1.7 Ma($n=12$, MSWD = 1.6), 另有 4 颗稍老一些的锆石年龄为 138~139 Ma, 可能记录了较早期的岩浆活动. LS19-1 西北山辉石闪长玢岩中锆石

图 2 溧水盆地岩浆岩锆石 CL 照片

图 3 溧水盆地岩浆岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

的谐和年龄 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 133.2 ± 2.1 Ma ($n=18$, MSWD = 3.4). LS28-1 长山头黑云母安山玢岩中锆石的谐和年龄 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 131.1 ± 2.3 Ma ($n=12$, MSWD = 2.5). LS29-1 尖山黑云母粗安斑岩中锆石的谐和年龄 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 127.4 ± 1.8 Ma ($n=9$, MSWD = 1.17). 所有岩浆岩均为早白垩世产物。

4 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石 Hf 同位素分析结果显示, 除了样品中那些残留的老锆石外, 白垩纪年龄锆石的 Hf 同位素组成相对均一(表 S2 和图 4). LS12-1 样品中~130 Ma 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围是 $-1.55 \sim -5.55$. 样品 LS14-1 中 133~143 Ma 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围 $-3.35 \sim -12.5$, 多数在 -10 左右. 一颗 218 Ma 残留锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -26.0 , 一颗 1826 Ma 残留锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -6.42 , 一颗 2527 Ma 残留锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+1.28$. 样品 LS15-1 中 129~141 Ma 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围 $-3.21 \sim -9.69$. LS16-1 样品中生代锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 $-2.04 \sim -5.24$, 一颗 431 Ma 残留锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -2.47 . 样品 LS17-1 中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围是 $-1.64 \sim -6.3$, 多数集中于 $-1 \sim -4$. LS19-1 样品中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围 $-3.72 \sim -12.4$, 多数集中于 $-8 \sim -10$. 样品 LS28-1 中锆

石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 $-2.9 \sim -6.8$. LS29-1 样品中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围是 $-4.94 \sim -8.2$. Hf 同位素分析结果显示, 多数样品中年龄约 130 Ma 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围集中在 $-2 \sim -5$ 之间, 样品 LS14-1, LS15-1 和 LS19-1 中 135~140 Ma 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值稍低, 多在 $-7 \sim -9$ 之间, 说明不同时期岩浆在源区性质上有所差异。

5 讨论

5.1 溧水盆地次火山岩-侵入岩形成时代

以往在溧水盆地没有发现很有价值的矿床, 所以对溧水盆地火山岩-次火山岩的研究非常薄弱^[17,18], 几乎没有精确的同位素年代学资料. 近年来, 随着在溧水盆地的东岗、观山、爱景山、卧龙山、后房村等地区 Fe、Cu-Pb-Au、Sr 等小-大型矿床的发现, 人们开始重视溧水盆地火山-次火山岩及其相关矿床的研究^[19~23]. 但精确的同位素年龄资料依然难见报道, 特别是关于次火山岩-侵入岩岩体的形成时代. 禹尧等人^[21]曾对溧水盆地龙王山组一个粗面岩进行过锆石 U-Pb 定年, 获得其年龄为 128.7 ± 1.8 Ma. 此年龄年轻于繁昌、庐枞和宁芜等火山岩盆地中对应火山旋回的年龄(大多集中于 135~131 Ma)^[3,4,24~27]. 梁业恒等人^[23]曾利用绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法对溧水盆地观山矿床

图4 溧水盆地岩浆岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图

近矿蚀变围岩粗安斑岩进行定年, 得到的年龄分别为 120.8 ± 1.0 和 116.0 ± 1.3 Ma. 由于这些绢云母蚀变很可能与成矿作用有关, 因此这些年龄应该代表该矿床的成矿年龄, 推测成矿时代晚于岩浆活动峰期.

对宁芜盆地火山岩和侵入岩的年代学研究显示, 该盆地中侵入岩不仅在成分上与火山岩相似, 而且形成时代也相似^[10]. 其中偏中基性的次火山岩和侵入岩与火山喷发时代几乎一致, 而酸性侵入岩岩浆活动的时代稍晚. 本次研究对溧水盆地中的 8 个典型的次火山岩或浅层侵入岩进行了锆石 U-Pb 定年, 获得的年龄变化于 136~127 Ma(表 S1), 指示了溧水盆地岩浆(火山)活动的峰期时代. 岩性与形成时代的对比显示, 溧水盆地偏中基性的侵入岩形成时代较早, 而偏中酸性的活动时代稍晚(表 S1), 如野山凹粗安斑岩和尖山黑云母粗安斑岩. 这种现象符合岩浆演化的规律, 暗示它们有可能是同源岩浆演化的产物.

长江中下游发育了多个中生代火山盆地. 前人的研究认为从西向东(庐枞盆地-繁昌盆地-宁芜盆地-溧水盆地)火山盆地中的火山活动显示了逐渐年轻化的趋势^[9,21]. 然而, 根据本次定年研究和近来发表的大量精确的锆石 U-Pb 定年结果, 长江中下游各火山盆地中各火山旋回的活动时代是基本一致的(图 5). 最早的岩浆活动都大致发生在 135 Ma 左右, 而较晚的火山活动发生在 125 Ma 左右. 只有像宁芜盆地娘娘山组火山岩中特别碱性的火山岩和一些酸性的侵入岩可以晚于 125 Ma. 同样, 作为与火山作用相关的侵入岩和次火山岩的活动时代也基本一致(图 5). 因此, 作为一个整体, 长江中下游各火山盆地的火山作用(岩浆活动)是在相同的构造背景下同时发生的.

5.2 锆石 Hf 同位素组成指示成岩成矿作用

本次研究对 8 个样品进行了锆石 Hf 同位素分析, 这些岩浆岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化于 -3.54 到 -9.11, 平均 -5.16; 其中大多数变化于 -3.54 到 -5.93. 这些锆石 Hf 同位素组成相似于宁芜盆地同时代火山岩-次火山岩的锆石 Hf 同位素组成(-2.5~-5.0)^[10], 也与长江中下游其他盆地中同时代火山岩和侵入岩的锆石 Hf 同位素组成相似^[28,29], 表明它们具有相似的源区组成. 但是仔细分析发现, 不同时代的锆石存在一些细微的变化, 即从老到新锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 略有升高以及微弱的发散趋势(图 4), 但还是以升高的趋势为主, 指示岩浆源区存在一定的不均一性. 这种由老到新同位

图 5 长江中下游及附近岩浆岩年龄谱图

素的变化规律也见于宁芜、繁昌等地区火山岩^[28-31]和大别山花岗岩中^[30]. 王元龙等人^[32]研究显示, 宁芜火山岩随着年轻化(从大王山到姑山), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值变小(从 0.7082~0.7076 到 0.7052~0.7055), 而 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 增大(从 -6.9~-7.3 到 -3.4~-4.0). 闫峻等人^[29]将繁昌地区金牛盆地火成岩分成 3 个阶段, 从第一阶段到第二阶段, Sr-Nd 同位素也显示出 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值降低而

$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 增高的趋势。而续海金等人^[31]发现北大别山早期变形花岗岩具有低的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-30.5~-20.9), 而晚期未变形花岗岩具有高的且变化大的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-25.2~+7.4)。显然, 这些变化不能用同一期岩浆的 AFC 作用来解释, 除非深源岩浆具有更富集的同位素组成, 而混染的浅部地壳组分具有相对亏损的同位素组成。这显然与地质事实不符。因此, 一种可能的解释是每期岩浆活动都是独立从地幔源区或深部地壳形成, 而不同期岩浆源区中含有的地壳成分存在差异, 其中早期岩浆的源区含有较多的古老地壳组分, 而晚期岩浆的源区含有较多的新生地壳组分。这与早期火山岩中有较多残留锆石而晚期缺乏的事实相吻合(未发表数据)。这个解释同样适用于花岗质岩石, 不同时代形成的地壳发生部分熔融, 其中相对新生地壳对晚期岩浆作用的贡献越来越大。

中国东部一些地区的晚中生代火山-侵入岩具有与研究区以及宁芜、庐枞、繁昌等盆地火山-侵入岩不同的同位素组成。邱检生等人^[33]对比了大别-苏鲁造山带南北两侧晚中生代富钾火山岩的地球化学特征, 发现北侧富钾火山岩稀土总量更高, 轻、重稀土分异更明显, 且 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值更高, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值显著偏低。他们认为南北两侧源区地幔的富集机制存在差异, 南侧富集地幔的形成主要与俯冲洋壳析出流体的交代作用有关, 而北侧富集地幔的形成除受到俯冲洋壳析出流体的交代作用外, 更大程度上主要起因于俯冲的扬子陆壳析出流体的交代作用。但是作为大别造山带南侧的鄂东地区发育与 Cu-Au-Fe 多金属成矿有关的 133~127 Ma 闪长岩和花岗岩也具有很低的 Hf 同位素组成, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 -28.2~-6.4^[34]。这些低的 Hf 同位素组成被解释为起源于富集岩石圈地幔的岩浆与古老下地壳岩浆混合的结果, 因为鄂东地区靠近扬子地块最古老基底出露的崆岭地区, 而崆岭群古老的地壳组成具有非常低的 Hf 同位素组成^[35]。因此, 长江中下游不同地区的基底组成控制了火山盆地中火山-侵入岩的地球化学差异。

5.3 地球动力学背景

在中国东部的长江中下游、大别山(包括北缘)到胶东地区, 晚中生代岩浆活动极其强烈, 且与成矿作用密切相关^[36,37]。对于这些岩浆的成因和动力学背景不同学者提出了不同的观点。赵子福和郑永飞^[38]

认为大别-苏鲁造山带这些中生代岩浆岩的形成与华南陆块俯冲/折返之后的碰撞后造山带构造垮塌有关, 其中花岗质岩石是俯冲大陆地壳在碰撞造山带根部部分熔融的产物, 而镁铁质岩石则是俯冲地壳衍生熔体与华北克拉通地幔橄榄岩在大陆俯冲隧道反应所形成的超镁铁质交代体部分熔融的产物^[39]。陈江峰等人^[9]提出, 晚侏罗世以来的突发性岩石圈去根作用以及太平洋板块向西俯冲导致了扬子与华北间的岩石圈边界的南北向拉张, 引发地幔上涌, 并进一步导致地壳熔融和大规模的复杂的岩浆和成矿作用。一些学者认为, 长江中下游岩浆岩无论早期还是晚期都是形成于岩石圈减薄的背景下^[32,40], 而另外一些学者认为它们与郯庐断裂和长江断裂的活动有关^[19,22,41]。有的研究设想, 在 125~140 Ma, 太平洋板块向西南方向俯冲, 依泽纳吉板块则向北北西方向俯冲, 造成中国东部岩石圈减薄, 软流圈卸载上涌, 发生减压部分熔融。在此期间, 两板块之间的洋中脊很可能在长江中下游地区发生俯冲, 形成了这一时期相关的岩浆岩和矿产的分带。在大约 125 Ma, 太平洋板块漂移方向发生了大幅度转折, 在中国东部形成安第斯式的俯冲挤压, 岩石圈减薄停止, 减压部分熔融停止, 出现了岩浆宁静期^[42~47]。此外, 还有学者提出用平板俯冲模式解释长江中下游地区埃达克质岩浆活动, 认为大约 200 Ma 的印支造山后发生向北的平板俯冲, 俯冲洋壳开始交代地幔, 以板片中心向外发生放射状岩浆活动; 170~140 Ma 大别造山带以东也开始发生类似的岩浆活动; 140 Ma 以后, 板片与陆壳分离, 从而形成一系列钙碱性岩浆岩^[48]。

为了正确揭示长江中下游火山盆地火山-侵入岩的成因, 我们对周边相关地区(大别山-蚌埠隆起-鲁西-胶东)的晚中生代岩浆岩的形成时代、岩石类型、和地球化学(包括同位素)特征进行了分析, 发现了一些规律。胶东-鲁西-大别山-长江中下游的晚中生代岩浆岩可以分为早晚两期, 其中早期(135~165 Ma)以侵入岩为主, 晚期(100~135 Ma)以火山作用为特征, 并伴随有同时代的浅成侵入岩。早期的岩浆活动以花岗质-闪长质为主, 且普遍具有埃达克质岩石地球化学特征^[38,49,50], 很少有基性岩浆活动; 而晚期既有花岗质岩浆活动, 也有大量基性-中性火山岩形成。这些火山-侵入岩以高钾钙碱性-橄榄安粗岩系岩石化学为特征。

在空间上, 早期的花岗质岩浆活动从胶东地区

到长江中下游有年轻化的趋势(图 5). 在胶东地区早期的岩浆活动主要发生在 150~167 Ma(图 5)^[50~52], 在长江中下游的鄂东、九瑞和铜陵地区, 早期的花岗质岩浆活动主要发生在 136~150 Ma(图 5)^[53], 而位于二地区之间的蚌埠地区其早期的荆山花岗岩形成于 156 Ma^[54]. 与之相反, 晚期岩浆活动呈现出从长江中下游到胶东地区年轻化的趋势(图 5). 前人曾认为长江中下游多个盆地的火山作用存在从西向东变年轻化的趋势^[9,21]. 但是本次研究的定年结果以及对近年来精确的锆石定年资料的整理发现, 整个长江中下游的各个火山盆地以及大别山北缘北淮阳盆地的火山岩几乎同时形成(峰期在~130 Ma, 图 5). 另外, 有学者认为从鲁西到鲁东富钾火山岩的活动也具有年轻化的现象^[55,56]. 但是另外一些学者认为这种趋势不明显^[57,58]. 然而与长江中下游各火山盆地火山作用的峰期时间相比, 鲁西-鲁东富钾火山岩的活动时间明显年轻(图 5).

不同地区的火山-侵入岩(如大别-苏鲁造山带南北二侧)的元素和同位素组成的差异已被人们认识. 有人认为白垩纪大别山地区埃达克岩的岩浆源区与长江中下游地区存在差异, 大别山地区埃达克岩由下地壳熔融形成, 而长江中下游地区则是俯冲洋中脊的熔融产物^[59]. 邱检生等人^[33]认为, 这些差异是地幔源区的不同造成的. 但是, 值得注意的是在同一地区, 如胶东、庐枞-铜陵-繁昌和鄂东-九瑞地区等, 早期和晚期的岩浆活动除了上述岩石类型和元素地球化学的区别外, 还表现出 Sr-Nd-Hf 同位素组成的差别. 如在胶东, 著名的玲珑花岗岩属于早期岩浆活动产物, 它们具有高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值(0.7097~0.7125)、低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-17.7~-20.3)和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-22.2~-8.7)^[50]. 而属于晚期的文登长山南花岗闪长岩具有低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值(0.7079~0.7082)、相对高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-15.1~-15.6)和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-11.9~-16.2)^[60]; 鲁东的青山群火山岩也是晚期岩浆作用产物, 它们普遍具有低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值(0.7058~0.7095)和相对高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-16.8~-7.8)^[58,61].

铜陵地区具有埃达克特征的侵入岩有高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值(0.7067~0.7095), 低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-11.2~-15.7)^[62,63](图 6). 图 6 显示, 铜陵地区早期的花岗闪长岩-辉石二长闪长岩等大多具有低的 Nd 同位素组成, 明显不同于相邻的繁昌-庐枞盆地中的火山岩和晚期侵入岩. 同样, 这一地区的早期岩浆岩也具有低

图 6 长江中下游早白垩世岩浆岩 Sr-Nd 同位素组成

修改自徐晓春等人^[64], 补充的数据包括: 宁芜^[21], 铜陵^[62], 庐枞^[65], 繁昌^[25,66], 溧水盆地^[19,20], 金牛盆地和鄂东^[39,40]. 图中第一期和第二期岩浆岩同位素范围引自闫峻等人^[29]

的 Hf 同位素组成. 如庐枞盆地的月山闪长岩形成于 139.3 Ma, 其锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -6.9 \sim -9.1$ ^[67]. 狮子山花岗闪长岩-石英二长闪长岩-辉石二长闪长岩形成于 136~139 Ma, 它们的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -19.8 \sim -8.5$ ^[68], 而临区繁昌盆地的晚期(125~126 Ma)花岗岩-石英二长岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 是 $0 \sim -7.9$ ^[29].

金牛盆地位于长江中下游的最西端, 其中的火山岩具有低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值和高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值^[39], 而附近的鄂东地区早期侵入岩具有相对低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和大的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 变化^[40](图 6). 同样, 鄂东早期(138 Ma)的铁山石英闪长岩具有锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 $-17.4 \sim -8.3$, 而形成于晚期(128.6 Ma)的金山店石英闪长岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化于 $-7.81 \sim -3.46$ ^[69]. 金牛盆地的流纹斑岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 是 $-10.7 \sim -2.5$ ^[28], 都高于早期岩浆岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值.

另外, 蚌埠隆起 156 Ma 荆山花岗岩为 S 型花岗岩特征, 具有很低的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-17.5 \sim -18.2$)^[54]. 大别山南部张榜花岗岩是早期岩浆活动的产物(150.3 Ma), 具有极其低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-27.9 \sim -31.0$)^[70]. 续海金等人^[31]对北大别二期花岗岩的研究显示, 早期变形花岗岩(~132 Ma)具有低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-30.5 \sim -20.9$), 而晚期未变形花岗岩(~128 Ma)具低的和变化大的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(变化于 $-25.2 \sim +7.4$), 指示岩浆源区由不同时代生长的地壳组成, 在成岩过程中有相对新生的地壳加入岩浆作用.

基于以上地质事实, 认为前人提出的一些地球动力学模式不能完全解释苏鲁-大别-长江中下游地

区的同位素年代学分布特征及放射成因同位素特征。比如,单纯的太平洋俯冲模式不能解释晚期岩浆岩从长江中下游向胶东地区逐渐变新的时代分布格架,华南陆块俯冲模式不能解释长江中下游地区岩浆岩源区为富集地幔的特征等。因此,本研究提出了一个新的构造动力学模式来解释长江中下游-大别山-苏鲁地区晚中生代的岩浆活动。即侏罗纪中晚期-早白垩纪(170~135 Ma),太平洋板块向欧亚大陆俯冲(根据岩浆岩时代分布推测可能为 SW 方向),这时研究区总体处于挤压背景,造成了地壳或整个岩石圈的加厚,形成的岩石具有埃达克质的地球化学特征。而这时期的岩浆源区主要是加厚的下地壳组分,幔源组分很少^[50],因此同位素组成上显示出更多的古老地壳信息(初始 Sr 同位素比值更高,初始 Nd 同位素比值更低)。由于胶东地区靠近俯冲带,最早受到俯冲作用的影响,而鄂东-九瑞地区最远,受俯冲的影响较晚。因此,早期的岩浆活动呈现出向内陆年轻化的趋势。当然,伴随着挤压背景存在局部拉张环境,也有可能少量基性岩浆侵入。而且最西端的九瑞地区,随着俯冲深度加大,新生地壳加入的强度增高,造成一些早期岩浆岩具有高的 Nd-Hf 同位素组成^[71,72]。

大约在 135 Ma,太平洋板块的俯冲作用减弱,俯冲板片发生了后撤(rollback),研究区总体转变为拉张背景,开始有少量中基性火山岩(如龙王山组)的喷发,大约在 130 Ma 为拉张背景的峰期,火山作用

最强烈,从而形成了一系列火山岩盆地,且此时的富集地幔物质也开始部分熔融^[39],在火山盆地中形成大量基性和中性的火山岩、次火山岩。因此这期的壳源岩浆活动也往往表现出更强烈的新生地壳部分熔融,造成晚期岩浆岩初始 Sr 同位素比值的降低和初始 Nd-Hf 同位素比值的升高(图 6)。

随着俯冲板片朝 E-NE 向的后撤,大陆岩石圈拉张也可能朝 E-NE 方向演化。因此,晚期岩浆的活动时代表现出从长江中下游到胶东地区逐渐年轻化。在俯冲板片后撤过程中,一些早期加厚的下地壳也会随之拆沉。因此,一些晚期的岩浆也具有埃达克质岩浆特征,如宁镇山脉的安基山花岗闪长岩等。由于其是拆沉于加厚下地壳深部发生部分熔融的,因此它们具有较高的 Sr/Yb 比值;由于新生地壳物质在晚期岩浆源区的加入,结果表现出不太富集的放射成因同位素组成^[73]。

6 结论

确定了溧水盆地中生代典型次火山岩-岩体的成岩时代为 136~127 Ma,锆石 Hf 同位素组成与长江中下游其他火山岩盆地的同时代岩浆岩相似,指示其来源于交代的富集地幔源区,或古老与新生地壳的混合物。结合周边地区同时代岩浆岩特征,提出太平洋板块俯冲后撤模式解释中国东部晚中生代的岩浆活动。

致谢 在野外工作期间,得到了江苏省地质调查研究院夏明飞高工和陈冬、胡森林工程师的大力支持和帮助,在实验阶段得到了南京大学研究生蔡杨的热心帮助,在此一并致谢。

参考文献

- 1 常印佛,刘湘培,吴昌言.长江中下游地区铜铁成矿带.北京:地质出版社,1991.1-379
- 2 Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, et al. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications. *Ore Geol Rev*, 2006, 29: 307-324
- 3 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.中国科学 D 辑:地球科学,2008,38:1342-1353
- 4 张旗,简平,刘敦一,等.宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义.中国科学 D 辑:地球科学,2003,33:309-314
- 5 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.岩石学报,2007,23:583-591
- 6 周涛发,范裕,袁峰,等.庐枞盆地侵入岩的时空格架和对成矿制约.岩石学报,2010,26:2694-2714
- 7 范裕,周涛发,袁峰,等.安徽庐江-一阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 定年及其地质意义.岩石学报,2008,24:1715-1724
- 8 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,2010,26:2715-2728
- 9 陈江峰,喻钢,杨刚,等.安徽沿江江南中生代岩浆-成矿年代学格架.安徽地质,2005,15:161-170
- 10 侯可军,袁顺达.宁芜盆地火山岩-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,2010,26:888-902
- 11 Andersen T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 2002, 192: 59-79
- 12 Ludwig K R. ISOPLOT 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Centre: Special Publication, 2001, 1: 1-58

- 13 Scherer E, Munker C, Mezger K. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 2001, 293: 683–687
- 14 Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148: 243–258
- 15 Vervoort J D, Blichert-Toft J. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochim Cosmochim. Acta*, 1999, 63: 533–556
- 16 Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon geochemistry and magma mixing, SE China: *In-situ* analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 2002, 61: 237–269
- 17 周金城, 赵太平, 陈克荣. 溧水中生代橄榄安粗岩系产出的构造环境及演化关系分析. *南京大学学报*, 1994, 30: 504–510
- 18 赵太平, 周金城, 陈克荣, 等. 江苏溧水中生代火山杂岩岩系划分及成因讨论. *南京大学学报*, 1994, 6: 252–258
- 19 李超文, 郭锋, 李晓勇, 等. 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. *地球化学*, 2004, 33: 361–371
- 20 高晓峰, 郭锋, 李超文, 等. 溧水盆地两类晚中生代中酸性火山岩的岩石成因. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26: 1–12
- 21 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*, 2009, 34: 105–116
- 22 梁业恒, 孙晓明, 翟伟, 等. 江苏溧水盆地次火山岩元素地球化学. *矿物学报*, 2009, 29(S1): 63–65
- 23 梁业恒, 孙晓明, 翟伟, 等. 江苏溧水观山高硫型铜铅金矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义. *高校地质学报*, 2010, 16: 143–148
- 24 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用. *地质学报*, 2011, 85: 712–729
- 25 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 安徽繁昌盆地中生代火山岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄及其意义. *岩石学报*, 2010, 26: 2805–2817
- 26 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. *地质学报*, 2012, 86: 1569–1583
- 27 Chen L, Zhao Z F, Zheng Y F. Origin of andesitic rocks: Geochemical constraints from Mesozoic volcanics in the Luzong basin, South China. *Lithos*, 2014, 190–191: 220–239
- 28 李瑞玲, 朱乔乔, 侯可军, 等. 长江中下游金牛盆地花岗岩斑岩和流纹斑岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. *岩石学报*, 2012, 28: 3347–3360
- 29 闫峻, 彭戈, 刘建敏, 等. 下扬子繁昌地区花岗岩成因: 锆石年代学和 Hf-O 同位素制约. *岩石学报*, 2012, 28: 3209–3227
- 30 Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, et al. Rapid eruption of the Ningwu volcanics in eastern China: Response to Cretaceous subduction of the Pacific plate. *Geochem Geophys Geosyst*, 2013, 14: 1703–1721
- 31 续海金, 叶凯, 马昌前. 北大别早白垩纪花岗岩类的 Sm-Nd 和锆石 Hf 同位素及其构造意义. *岩石学报*, 2008, 24: 84–103
- 32 王元龙, 张旗, 王焰. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义. *岩石学报*, 2001, 17: 565–575
- 33 邱检生, 蒋少涌, 张晓琳, 等. 大别-苏鲁造山带南北两侧晚中生代富钾火山岩的成因: 微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素制约. *地球学报*, 2004, 25: 255–262
- 34 Xie G Q, Mao J W, Zhao H J. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Late Mesozoic intrusions in the southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt (MLYRB) East China. *Lithos*, 2011, 125: 693–710
- 35 Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China. *Precambrian Res*, 2006, 151: 265–288
- 36 Pan Y M, Dong P. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. *Ore Geol Rev*, 1999, 15: 177–242
- 37 Yang X Y, Yang X M, Zhang Z W, et al. A porphyritic copper (gold) ore-forming model for the Shaxi-Changpushan district, Lower Yangtze metallogenic belt, China: Geological and geochemical constraints. *Int Geol Rev*, 2011, 53: 580–611
- 38 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. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 888–909
- 39 Zhao Z F, Dai L Q, Zheng Y F. Postcollisional mafic igneous rocks record crust-mantle interaction during continental deep subduction. *Sci Rep*, 2013, 3: 3413
- 40 Xie G Q, Mao J W, Li L R, et al. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei province, Middle-Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting. *Lithos*, 2008, 104: 216–230
- 41 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. *Lithos*, 2006, 89: 424–446
- 42 Sun W D, Yang X Y, Fan W M, et al. Mesozoic large scale magmatism and mineralization in South China: Preface. *Lithos*, 2012, 150: 1–5
- 43 孙卫东, 凌明星, 汪方跃, 等. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27: 218–225
- 44 Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 262: 533–542
- 45 Li H, Ling M X, Li C Y, et al. A-type granite belts of two chemical subgroups in central eastern China: Indication of ridge subduction. *Lithos*, 2012, 150: 26–36
- 46 Ling M X, Wang F Y, Ding X, et al. Cretaceous Ridge Subduction Along the Lower Yangtze River Belt, Eastern China. *Econ Geol*, 2009, 104: 303–321

- 47 Ling M X, Li Y, Ding X, et al. Destruction of the North China Craton induced by ridge subductions. *J Geol*, 2013, 121: 197–213
- 48 Li X H, Li Z X, Li W X, et al. Revisiting the “C-type adakites” of the Lower Yangtze River Belt, central eastern China: *In-situ* zircon Hf-O isotope and geochemical constraints. *Chem Geol*, 2013, 345: 1–15
- 49 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 等. 鄂东南地区大型矽卡岩型铁矿床金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄及其构造背景初探. *岩石学报*, 2008, 24: 1917–1927
- 50 Ma L, Jiang S Y, Dai B Z, et al. Multiple sources for the origin of Late Jurassic Linglong adakitic granite in the Shandong Peninsula, eastern China: Zircon U-Pb geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 2013, 162–163: 251–263
- 51 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学. *岩石学报*, 2005, 21: 1281–1301
- 52 王世进, 王来明, 万渝生, 等. 鲁东地区侵入岩形成时代和期次划分-锆石 SHR IMP U-Pb 年龄的证据. *山东国土资源*, 2009, 25: 8–25
- 53 Li X H, Li W X, Wang X C, et al. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, eastern China: Magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension. *Lithos*, 2010, 119: 427–438
- 54 Wang X, Chen J, Griffin W L, et al. Two stages of zircon crystallization in the Jingshan monzogranite, Bengbu Uplift: Implications for the syn-collisional granites of the Dabie-Sulu UHP orogenic belt and the climax of movement on the Tan-Lu fault. *Lithos*, 2011, 122: 201–213
- 55 邱检生, 徐夕生, 罗清华. 鲁西富钾火山岩和煌斑岩的 Ar-Ar 定年及源区示踪. *科学通报*, 2001, 46: 1500–1508
- 56 邱检生, 王德滋, 罗清华, 等. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的 Ar-Ar 定年——以五莲分岭火山机构为例. *高校地质学报*, 2001, 7: 351–355
- 57 唐嘉锋, 刘玉琳, 王启飞. 山东中生代火山岩年代学研究. *岩石学报*, 2008, 24: 1333–1338
- 58 匡永生, 庞崇进, 罗震宇, 等. 胶东青山群基性火山岩的 Ar-Ar 年代学和地球化学特征: 对华北克拉通破坏过程的启示. *岩石学报*, 2012, 28: 1073–1091
- 59 Ling M X, Wang F Y, Ding X, et al. Different origins of adakites from the Dabie Mountains and the Lower Yangtze River Belt, eastern China: Geochemical constraints. *Int Geol Rev*, 2011, 53: 727–740
- 60 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 胶东文登长山南花岗闪长岩体的岩浆混合成因: 闪长质包体及寄主岩石的地球化学、Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素证据. *岩石学报*, 2005, 21: 569–586
- 61 闫峻, 陈江峰. 鲁东青山组中性火山岩的地球化学特征: 岩石成因和地质意义. *地球化学*, 2007, 36: 1–10
- 62 谢建成, 陈思, 孙卫东, 等. 安徽铜陵早白垩世埃达克质岩地球化学: 成岩成矿制约. *岩石学报*, 2012, 28: 3181–3196
- 63 Xie J C, Yang X Y, Sun W D, et al. Early Cretaceous dioritic rocks in the Tongling region, eastern China: Implications for the tectonic settings. *Lithos*, 2012, 150: 49–61
- 64 徐晓春, 白茹玉, 谢巧勤, 等. 安徽铜陵中生代侵入岩地质地球化学特征再认识及成因讨论. *岩石学报*, 2012, 28: 3139–3169
- 65 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. *地球化学*, 2002, 31: 129–139
- 66 刘春, 闫峻, 宋传中, 等. 长江中下游繁昌盆地火山岩年代学和地球化学岩石成因和地质意义. *岩石学报*, 2012, 28: 3228–3240
- 67 刘园园, 马昌前, 张超, 等. 安徽月山闪长岩的成因探讨——锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素证据. *地质科技情报*, 2009, 28: 22–30
- 68 Yang X N, Xu Z W, Lu X C, et al. Porphyry and skarn Au-Cu deposits in the Shizishan orefield, Tongling, East China: U-Pb dating and *in-situ* Hf isotope analysis of zircons and petrogenesis of associated granitoids. *Ore Geol Rev*, 2011, 43: 182–193
- 69 瞿泓泓, 王浩琳, 裴荣富, 等. 鄂东南地区与铁山和金山店铁矿有关的花岗质岩体锆石 LA-ICP-MS 年龄和 Hf 同位素组成及其地质意义. *岩石学报*, 2012, 28: 147–165
- 70 张超, 马昌前. 大别山晚中生代巨量岩浆活动的启动: 花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. *矿物岩石*, 2008, 4: 71–79
- 71 蒋少涌, 李亮, 朱碧, 等. 江西武山铜矿区花岗闪长斑岩的地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成及成因探讨. *岩石学报*, 2008, 24: 1679–1690
- 72 李亮, 蒋少涌. 长江中下游地区九瑞矿集区邓家山花岗闪长斑岩的地球化学与成因研究. *岩石学报*, 2009, 25: 2877–2888
- 73 Xu J F, Shinjo R, Defant M J, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of de-laminated lower continental crust. *Geology*, 2002, 30: 1111–1114

补充材料

表 S1 溧水地区岩浆岩锆石 U-Pb 定年结果

表 S2 溧水地区岩浆岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责。