

doi:10.3799/dqkx.2017.077

# 长江中下游地区燕山晚期基性岩浆活动的记录

孙洋<sup>1</sup>, 马昌前<sup>2,3\*</sup>, 刘彬<sup>1</sup>

1. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:**江苏省宁镇地区位于长江中下游沿江成矿带的最东端,是长江中下游成矿带的重要组成部分,蒋庙岩体是宁镇地区唯一的基性岩体,对此岩体进行了锆石 U-Pb 年代学、矿物化学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究,讨论了其成因及地幔源区性质.岩体主要由橄榄辉长岩、角闪辉长岩和辉石闪长岩组成,其中辉石闪长岩的锆石 LA-ICP-MS(laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry) U-Pb 年龄为  $121 \pm 1$  Ma. 锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于  $-2.9 \sim -6.4$ . 全岩地球化学研究显示岩石样品富钠低钾,富集轻稀土元素,重稀土元素亏损不明显,富集大离子亲石元素(如 K、Ba、Sr 等),亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti、Zr、Hf 等).蒋庙基性侵入岩在长江中下游地区中生代岩浆岩中具有最高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值以及最低的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值,其 Sr-Nd 同位素组成介于软流圈地幔(depleted MORB mantle, DMM)–富集岩石圈地幔(enriched mantle II, EM II)之间.研究认为,蒋庙岩体应来源于软流圈地幔和富集岩石圈地幔的混合组分,可能有少量的俯冲板片物质加入源区,并在成岩过程中经历了一定程度的结晶分异.结合区域地质、年代学、矿物学和地球化学资料,表明蒋庙岩体的形成可能与古太平洋板块俯冲事件密切相关.

**关键词:**蒋庙岩体; 锆石 U-Pb 定年; 岩石学; 地球化学; 宁镇地区.

**中图分类号:** P581

**文章编号:** 1000-2383(2017)06-0891-18

**收稿日期:** 2016-12-02

## Record of Late Yanshanian Mafic Magmatic Activity in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt

Sun Yang<sup>1</sup>, Ma Changqian<sup>2,3\*</sup>, Liu Bin<sup>1</sup>

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The Ningzhen region in Jiangsu Province, representing the easternmost magmatic region within the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic belt, and is an important component of the Middle-Lower Yangtze River magmatic rock belt. The Jiangmiao pluton is the only mafic intrusive body in the Ningzhen region, and its zircon U-Pb dating, petrological, mineralogical and geochemical data were obtained in this paper to constrain its origin and mantle source characteristics. Olivine gabbros, hornblende gabbros and pyroxene diorites are the main rock types of the pluton. The zircons from the pyroxene diorite yield a U-Pb age of  $121 \pm 1$  Ma. The zircon  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values are from  $-2.9$  to  $-6.4$ . The Jiangmiao mafic rocks in the Ningzhen region are sodic, and are characterized by an enriched light rare earth elements(LREEs) pattern. They are enriched in large ion lithophile elements (LIEEs) such as K, Ba, Sr, but depleted in high field strength elements such as Nb, Ta, Ti, Zr and Hf. Jiangmiao mafic intrusive rocks have the highest  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  and the lowest value of  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  values among Mesozoic magmatic rocks in the Middle-Lower reaches of Yangtze River belt. Sr-Nd isotopic data suggest that asthenosphere-lithosphere interaction plays an important role in the generation of the Jiangmiao pluton. The trace element and isotopic data are consistent with crystallization fractionation and there is no significant crustal contamination during magma ascending and

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos.41272079, 41502050); 国家重点基础研究发展计划(No.2012CB416800).

**作者简介:** 孙洋(1985-), 女, 讲师, 博士, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学专业研究. ORCID: 0000-0002-8811-3020. E-mail: 565765032@qq.com

\* **通讯作者:** 马昌前, E-mail: cqma@cug.edu.cn

**引用格式:** 孙洋, 马昌前, 刘彬, 2017. 长江中下游地区燕山晚期基性岩浆活动的记录. 地球科学, 42(6): 891-908.

crystallization. Enriched LREEs and LILEs, together with depleted Nb, Ta, Ti, Zr and Hf, suggest that the mantle sources were metasomatized by slab-derived fluid/melt. Combining with regional geological, geochronological, mineralogical and geochemical data, the Jiangmiao mafic rocks in the Ningzhen region were probably formed in an extensional regime associated with westward subduction of the paleo-Pacific plate.

**Key words:** Jiangmiao pluton; zircon U-Pb chronology; petrology; geochemistry; Ningzhen region.

## 0 引言

长江中下游地区是我国著名的中生代铜铁硫金矿成矿带,成矿作用与晚中生代岩浆活动关系密切。该带位于扬子地块东北缘,紧邻华北地块和大别造山带。长江中下游成矿带自西向东依次分布有鄂东南、九瑞、安庆—贵池、庐枞、铜陵、宁芜和宁镇等 7 个区段(图 1)(Pan and Dong, 1999)。

近年来,前人对长江中下游地区中生代岩浆岩开展了大量的高精度年代学研究,已经基本确定了中生代岩浆活动的时空格架(Li *et al.*, 2010; 周涛发等, 2010, 2012; Sun *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014)。前人研究认为,长江中下游地区中生代岩浆作用活动时间表现出明显的分区性和演化趋势,具有自西向东年代变新的趋势(Sun *et al.*, 2013)。岩浆作用活动时间主体集中于 145~120 Ma(周涛发等, 2010; 毛景文等, 2012),其中 145~135 Ma 的岩浆活动主要发生在断隆区(如铜陵地区等); 135~127 Ma 的岩浆活动主要

发生在断陷区如庐枞盆地和宁芜盆地等(周涛发等, 2012)。长江中下游地区已获得的燕山期最早的岩浆活动记录为大冶地区的殷祖闪长—辉长岩(Li *et al.*, 2009)和铜陵地区的沙滩脚石英二长岩(Di *et al.*, 2005),年龄约为 152 Ma。燕山期最晚的岩浆活动记录为宁镇地区的花岗岩类,年龄约为 109~100 Ma(Sun *et al.*, 2013; 曾键年等, 2013; 刘建敏等, 2014; Wang *et al.*, 2014; 关俊朋等, 2015)。本文研究的蒋庙岩体记录了长江中下游地区燕山晚期的基性岩浆活动,能够为揭示长江中下游地区中生代构造—岩浆演化作用提供重要的岩石学证据。

长江中下游地区中生代基性岩远不如新生代基性岩发育,因此对中生代基性岩的研究也相对缺乏(闫峻等, 2005)。已有的研究成果表明包括长江中下游地区在内的中国东部新生代玄武岩主要起源于软流圈地幔(Xu, 2000; Zou *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2003)。而中国东部中生代基性岩则普遍反映富集岩石圈地幔的特征(闫峻等, 2003; Wang *et al.*, 2006; Yan *et al.*, 2008),新生代玄武岩中仅 Pb 同位素组成反映

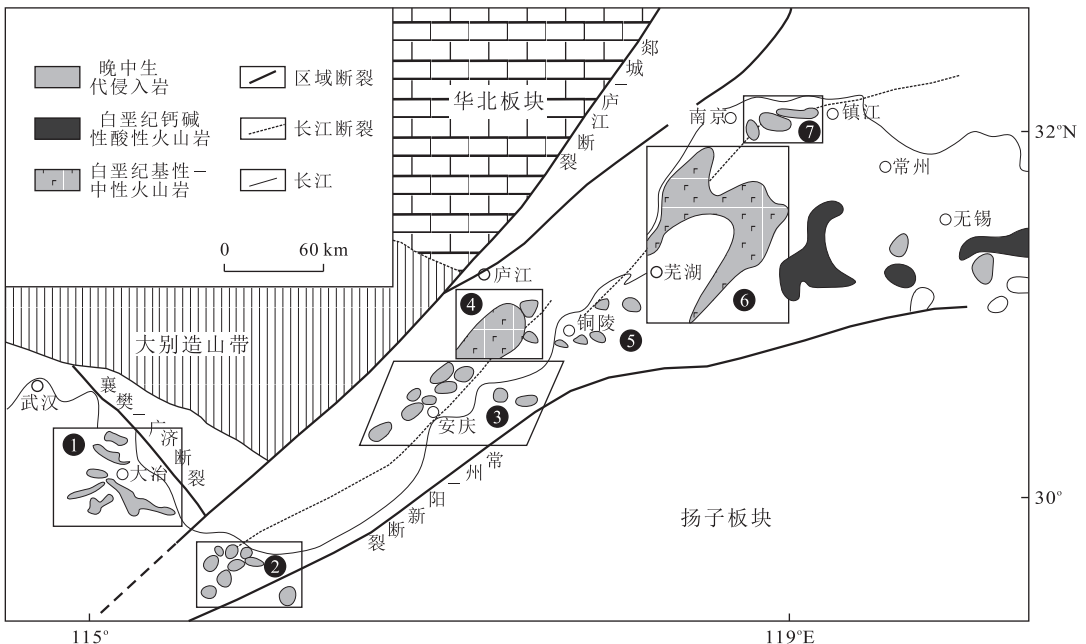


图 1 长江中下游成矿带主要矿集区分布示意

Fig.1 Schematic illustration of the seven magmatic and metallogenic districts of the Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt  
 区段: 1.鄂东南; 2.九瑞; 3.安庆—贵池; 4.庐枞; 5.铜陵; 6.宁芜; 7.宁镇; 据翟裕生等(1992)和薛怀民等(2010)修改

出残留的富集岩石地幔组分的存在(闫峻等,2003)。因此,本区岩石圈地幔从中生代到新生代经历了一个由富集到亏损的转变。对该地区中生代基性岩的进一步研究有助于深入了解这一转变过程及机制。

基性岩浆能反映地幔源区的性质,其形成的物理化学条件和演化过程可以为地壳的底侵或内侵作用以及壳幔岩浆之间的相互作用提供重要约束,而针对宁镇地区蒋庙基性侵入岩的定年、起源和演化过程及其所代表的地质意义等研究不够细致深入,对其成因机制的认识还存在较大的分歧。邢凤鸣(1998,1999)认为,蒋庙岩体的岩浆为上地幔低度部分熔融的碱性玄武质岩浆,侵位后又经历了少量结晶分异和同化混染。Chen *et al.*(2001)汇编了长江中下游地区中生代岩浆岩的 Sr-Nd 同位素数据,其中蒋庙辉长岩表现出同位素亏损的源区特征。闫峻等(2003)通过研究长江中下游地区中生代基性岩的铅同位素认为,其地幔源区为以 EM II(enriched mantle II)为主要特征的岩石圈地幔,并曾受到过俯冲板片析出的流体交代。洪文涛等(2010)通过研究蒋庙岩体的地球化学特征,认为其来源包括亏损的软流圈地幔和富集的岩石圈地幔组分。

总之,关于蒋庙岩体的岩浆源区性质仍存在一定的认识上的差异,因此,本文在详细的野外观察的基础上,对具有代表意义的长江中下游晚中生代蒋庙基性岩体开展了岩石学、年代学、矿物化学、全岩地球化学、Sr-Nd 同位素以及锆石 Hf 同位素研究,并结合前人研究成果,旨在探讨其岩石成因、源区特征及构造背景。

## 1 地质背景及岩石学特征

### 1.1 地质背景

长江中下游成矿带位于扬子地块北东缘,紧邻

华北地块和大别造山带(Pan and Dong,1999)。其北以襄樊—广济断裂(西段)和郟城—庐江断裂(东段)与大别造山带相分割,其东南以常州—阳新断裂为界(图 1)。该成矿带总体上呈北西狭窄,北东宽阔的“V”字型地带(常印佛等,1991;闫峻等,2005),内部发育沿江分布的断裂带和北西向断裂。

江苏省宁镇地区位于长江中下游沿江成矿带的最东端,是长江中下游成矿带的重要组成部分。宁镇地区地层层序基本完整,从震旦系到第四系均有分布。地质构造复杂,其中褶皱构造—“宁镇褶皱束”近 EW 向展布,由一系列近 EW 向大致平行的“三背二向”复式褶皱组成。断裂构造主要由近 EW 向纵向断裂、NW 向、NE 向、NNW 向、NNE 向断裂组成(关俊朋等,2015)。宁镇地区广泛分布燕山期侵入岩,自西向东主要由 7 个同源杂岩体组成,分别是板仓、其林门、安基山、高资、新桥、石马和谏壁杂岩体(图 2)。侵入岩类型齐全,从基性岩至酸性岩均有分布,其中中酸性侵入岩分布范围最广,约占侵入岩总面积的 80%;基性岩占 3%,仅在板仓、解放桥两地分布(夏嘉生,2000)。区内侵入岩具有明显的线状和带状分布特征,这主要是由于其严格受到区域构造和断裂带的控制。单个杂岩体的长轴方向多为 EW 向,个别为 NE 或 NW 向。

板仓杂岩体的主体为蒋庙岩体。蒋庙岩体(图 3)是宁镇地区唯一的基性岩体,位于南京市紫金山以北,零星出露于南京市近郊的樱驼村、航空基地和蒋庙等地,面积约为 0.94 km<sup>2</sup>。岩体受 EW 向和 NE 向两组断裂控制,呈 NNE 向展布。岩体南、北接触面均向南倾,并侵入于三叠纪黄马青组砂页岩中,引起大片围岩变质,岩石风化很强,新鲜露头较少。岩体分异良好,有 3 个结晶分异中心,分别是:樱驼村(角闪

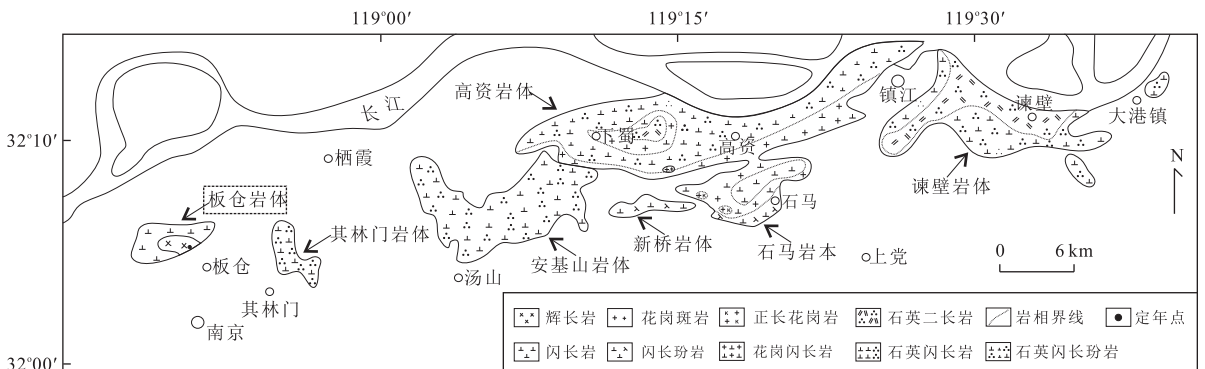


图 2 宁镇地区燕山期侵入岩分布

Fig.2 The distribution of Mesozoic intrusive rocks in the Ningzhen region

据夏嘉生(2000)修改

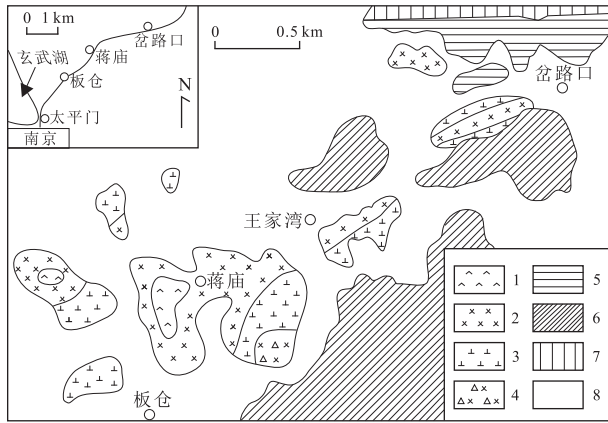


图 3 蒋庙岩体地质简图

Fig.3 Sketch geological map of the Jiangmiao intrusion  
1.角闪橄榄辉长岩相;2.辉长岩相;3.闪长岩相;4.碱性交代—混染岩相;5.青龙群( $T_{1-2}$ );6.黄马青组( $T_3$ );7.象山群( $J_{1-2}$ );8.第四系(Q);据周新民(1964)修改

橄榄辉长岩)、南京林学院(橄榄辉长岩)和航空公墓(辉长岩),自结晶分异中心向外过渡为辉长岩、(辉石)闪长岩,表现为以辉长岩为主体,边部变为细粒辉石闪长岩—闪长岩。近年来随着南京城市化水平的提高,寻找采样点越来越困难。目前蒋庙岩体的出露区已大部分被建筑物覆盖,只在明岐阳王陵园中的小山包上和航空公墓地尚有较好的采样点。

## 1.2 岩石学特征

本次研究蒋庙岩体采集的岩石样品主要有橄榄

辉长岩、角闪辉长岩和辉石闪长岩,主要采样点位于明岐阳王陵园中的小山包上和航空公墓地(图 4a)。

橄榄辉长岩手标本呈灰黑色、深灰色,块状构造。岩石具辉长结构(图 4b)、包含结构(图 4c)和反应边结构(图 4d),由斜长石(60%)、单斜辉石(20%)、斜方辉石(5%)、橄榄石(7%)、普通角闪石(3%)、磁铁矿和钛铁矿(4%)以及少量黑云母组成。斜长石呈半自形—自形板柱状,大小一般为  $0.2\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ ,发育聚片双晶和卡钠复合双晶,少量斜长石可产于橄榄石或辉石中。辉石呈半自形—他形柱粒状,以普通辉石为主,粒度为  $0.3 \sim 1.5\text{ mm}$ ,斜消光,干涉色多达二级。可见席勒构造,也可见辉石发育聚片双晶和简单双晶。橄榄石呈他形不规则粒状,或单独分布于斜长石中,或被辉石包裹,粒度为  $0.3 \sim 1.2\text{ mm}$ ,表面有不规则的裂纹。普通角闪石呈棕色,半自形—自形柱状,常沿辉石边缘和解理分布。黑云母具深褐—黄色多色性,分布于辉石、橄榄石和磁铁矿的边缘。

角闪辉长岩手标本为深灰色,块状构造。岩石具辉长结构,由斜长石(50%)、辉石(30%)、角闪石(10%)、少量黑云母和橄榄石等组成。副矿物主要有磷灰石、磁铁矿、钛铁矿和锆石等。斜长石呈半自形—自形板柱状,大小一般为  $0.2\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$ ,发育聚片双晶。单斜辉石多呈半自形—自形柱状,斜消

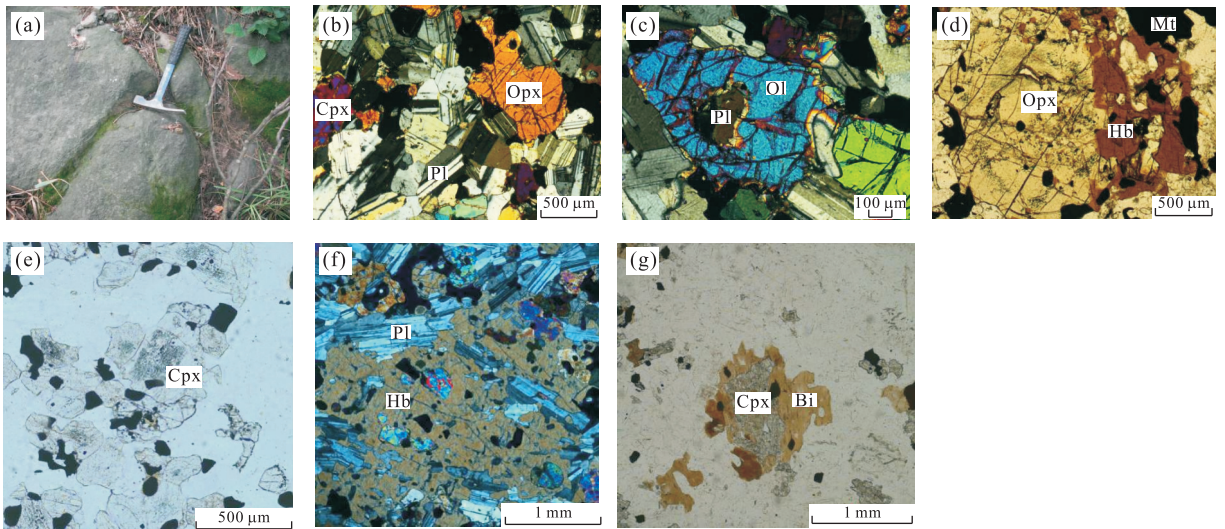


图 4 蒋庙岩体野外及镜下照片

Fig.4 Field photographs and photomicrographs of the Jiangmiao intrusion

a.航空公墓辉石闪长岩野外露头;b.蒋庙橄榄辉长岩辉长结构(正交偏光);c.蒋庙橄榄辉长岩中斜长石呈嵌晶产于橄榄石中(正交偏光);d.蒋庙橄榄辉长岩中斜方辉石外的角闪石反应边(单偏光);e.蒋庙角闪辉长岩中辉石的席勒构造(单偏光);f.蒋庙角闪辉长岩中角闪石包裹辉石、斜长石和磁铁矿产出(正交偏光);g.蒋庙辉石闪长岩中黑云母包裹辉石产出(单偏光);Opx.斜方辉石;Cpx.单斜辉石;Ol.橄榄石;Hb.普通角闪石;Bi.黑云母;Pl.斜长石;Mt.磁铁矿

光,干涉色多达二级,具席勒构造(图 4e),大小为 $(0.1 \times 0.2 \sim 0.5 \times 0.8) \text{ mm}^2$ ,可见辉石包裹角闪石和磁铁矿产出。角闪石呈半自形—自形柱状,多色性明显,淡褐色—棕褐色变化。可见角闪石包裹辉石、斜长石和磁铁矿产出(图 4f)以及角闪石颗粒中残留的辉石核。

辉石闪长岩手标本为灰黑色,块状构造。岩石具中细粒结构,主要由单斜辉石(10%~15%)、斜长石(65%~75%)、黑云母(6%)及少量角闪石、斜方辉石等组成,副矿物主要包括磷灰石、磁铁矿、钛铁矿和锆石等。薄片斜长石为半自形—自形板条状,发育聚片双晶和环带结构,可见绢云母化、泥化和碳酸盐化等。辉石呈他形—半自形粒状,粒度较小,一般为 $0.05 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ ,较大可达 $0.3 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ ,部分蚀变为绿帘石。黑云母呈半自形片状,具深褐色—黄色多色性,部分蚀变成绿泥石,可见黑云母包裹辉石产出(图 4g)以及黑云母颗粒中残留的辉石核。

## 2 分析方法

### 2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析

先对大约 3~5 kg 的岩石样品通过常规的人工破碎、研磨、重砂和电磁分选手段进行粗选;再在双目显微镜下根据颜色、自形程度和形态等特征对锆石进行分类,挑选出代表性的锆石;之后将选用的锆石颗粒置于环氧树脂浇铸的样品靶上磨蚀、抛光和镀金。通过阴极发光(cathodoluminescence, CL)图像分析,确定锆石颗粒的内部结构。锆石的反射光和透射光显微照相以及阴极发光(CL)显微照相均在北京离子探针中心扫描电镜实验室完成。阴极发光(CL)显微照相采用的设备为美国 GATAN 公司产 Chroma 阴极发光探头和日本产 HITACHIS300-N 型扫描电子显微镜。

锆石的 LA-ICP-MS(laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry)年代学测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行,采用 Agilent 7500a 的 ICP-MS 仪器与装配有 193 nm 气体激光的 GeoLas 2005 激光剥蚀系统联机进行,测试采用 He 作为剥蚀物质的载气,激光束斑直径为 32  $\mu\text{m}$ 。同位素分馏利用锆石标样 GJ-1 作为外标进行校正,采用国际标准锆石 91500 外部校正法对锆石进行分析。微量元素含量采用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 作为外标,<sup>29</sup>Si 作为内标元

素进行校正。数据处理利用 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008a) 完成,年龄计算和成图采用 Ludwig (2003) 的 ISOPLLOT(ver 3.0) 程序完成。所测锆石单点数据的误差均为 1 $\sigma$ ,加权平均年龄具有 95% 的置信度。仪器参数和详细的分析流程参见文献(Zong *et al.*, 2010)。

### 2.2 锆石 Lu-Hf 同位素分析

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,所用仪器为英国 Nu Instruments 公司生产的 Nu Plasma HR 多接收电感耦合等离子体质谱仪(multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry, MC-ICP-MS),激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas 2005,激光束斑直径为 44  $\mu\text{m}$ ,激光剥蚀时间约 50 s,剥蚀频率为 10 Hz,脉冲能量为 80 mJ。测定时采用锆石 91500、MON-1 和 GJ-1 作外标,本实验获得的上述 3 个标样的  $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$  比值分别为  $0.282\ 298 \pm 0.000\ 008$  ( $n = 32, 2\sigma$ )、 $0.282\ 729 \pm 0.000\ 006$  ( $n = 20, 2\sigma$ ) 和  $0.282\ 032 \pm 0.000\ 011$  ( $n = 14, 2\sigma$ )。详细的分析方法和参数见 Yuan *et al.* (2008)。在  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值的计算中,采用 Blichert-Toft and Albarède(1997) 所推荐的球粒陨石值,亏损地幔模式年龄( $t_{\text{DM}}$ ) 计算采用 Griffin *et al.* (2000) 的推荐值。源区二阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ ) 计算采用  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$  的平均大陆壳值。

### 2.3 矿物电子探针分析

矿物电子探针主量元素分析在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使用 JEOL JXA-8100 电子探针仪完成,实验均选取新鲜的矿物晶体做分析。实验条件为:加速电压 15 kV、束电流  $2 \times 10^{-8}$  A、束斑直径 5  $\mu\text{m}$ 。主要氧化物的分析误差约为 1%。

### 2.4 全岩主量、微量和稀土元素分析

将用于全岩主微量元素分析的样品在无污染条件下粉碎至 200 目以下。主量元素分析在湖北省地质实验室研究所武汉综合岩矿测试中心完成,采用 Regaku 3080 E1 型光谱仪进行 X 射线荧光氟化法(X-ray fluorescence, XRF)。其中 H<sub>2</sub>O 采用重量法测定,CO<sub>2</sub> 采用非水滴定法测定,FeO 采用湿化学法测定。分析误差在 2% 以内。全岩稀土和微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用 Agilent 7500a ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry) 分析方法。详细的样品前处理、实验测定精度和准确度

详见文献(Liu *et al.*, 2008b).

## 2.5 全岩 Sr-Nd 同位素分析

全岩 Sr-Nd 同位素测定主要在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用热电离同位素质谱仪(thermal ionization mass spectrometry, TIMS; Triton T1)完成. 仪器的准确度通过标样 NBS987 和 La Jolla 进行监测. 详细的测试方法和具体的实验流程等详见文献(Gao *et al.*, 2004).

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 定年结果

蒋庙辉石闪长岩(09NJ09)采自南京市近郊的航空墓地, 采样点的地理坐标为  $32^{\circ}05'20.6''N$ ,  $118^{\circ}50'21.2''E$ . 辉石闪长岩中的锆石以浅褐色为主, 因具高 U 含量而变得较浑浊. 从代表性锆石颗粒的 CL 图像(图 5)来看, 该样品中的锆石较为均一, 长度在  $80\sim 120\ \mu\text{m}$ , 长宽比为  $1:1\sim 3:1$ . 锆石晶形多呈板状, 部分具扇形结构. 大部分锆石发育较宽的岩浆韵律环带, 与基性岩浆成因的锆石特征一致.

实验过程中, 共对 19 个锆石颗粒进行了年龄测定, 测试结果列于表 1. 锆石 Th、U 含量变化较大, 变化范围分别为  $362\times 10^{-6}\sim 2\ 298\times 10^{-6}$ 、 $385\times 10^{-6}\sim 1\ 886\times 10^{-6}$ , Th/U 比值介于  $0.59\sim 1.82$ , 表明其为岩浆成因锆石. 19 个样品点均投影在谐和线上或附近(图 6), 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值为  $119\sim 124\ \text{Ma}$ , 变化范围较小, 加权平均年龄为  $121\pm 1\ \text{Ma}$  (MSWD 为 2.0). 该年龄应代表了蒋庙辉石闪长岩

的结晶年龄.

### 3.2 锆石 Hf 同位素

在进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析的同时, 笔者也对蒋庙辉石闪长岩样品(09NJ09)相同的锆石进行了原位 Hf 同位素分析(CL 图像见图 5), 分析结果列于表 2. 测试结果表明, 所有锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值均小于 0.002, 显示锆石在形成以后具有极低的放射性成因 Hf 的积累. 蒋庙辉石闪长岩(09NJ09)共进行了 19 个点的测试, 锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-2.9\sim -6.4$ , 对应的二阶段 Hf 模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )为  $1.36\sim 1.58\ \text{Ga}$ , 平均年龄为  $1.49\ \text{Ga}$ .

### 3.3 矿物学研究

笔者对蒋庙橄榄辉长岩的主要暗色矿物(辉石)进行了电子探针主量元素分析(分析结果见表 3), 并采用电价差值法(郑巧荣, 1983)对  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  值进行调整. 根据国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会推荐的辉石族矿物分类和命名法(Morimoto, 1988), 蒋庙橄榄辉长岩中的辉石为 Ca-Mg-Fe 辉石组成员, 属单斜晶系, 主要为普通辉石. 从电子探针分析结果来看, 蒋庙橄榄辉长岩中的辉石均为富钙辉石(CaO 含量在  $19.27\%\sim 22.16\%$ ). 辉石的  $\text{SiO}_2$  含量变化较小, 多数在  $50\%\sim 52\%$ .  $\text{Mg}^{\#}$  值变化范围窄, 集中在  $76\sim 81$ .  $\text{FeO}$  含量均小于  $10\%$ , 介于  $6.18\%\sim 8.93\%$ .

### 3.4 地球化学特征

如表 4 所示, 蒋庙岩体的  $\text{SiO}_2$  含量变化较大, 为  $44.25\%\sim 57.14\%$ , 属于基性—中基性成分. 全碱含量变化范围较大,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  含量介于  $2.51\%\sim$

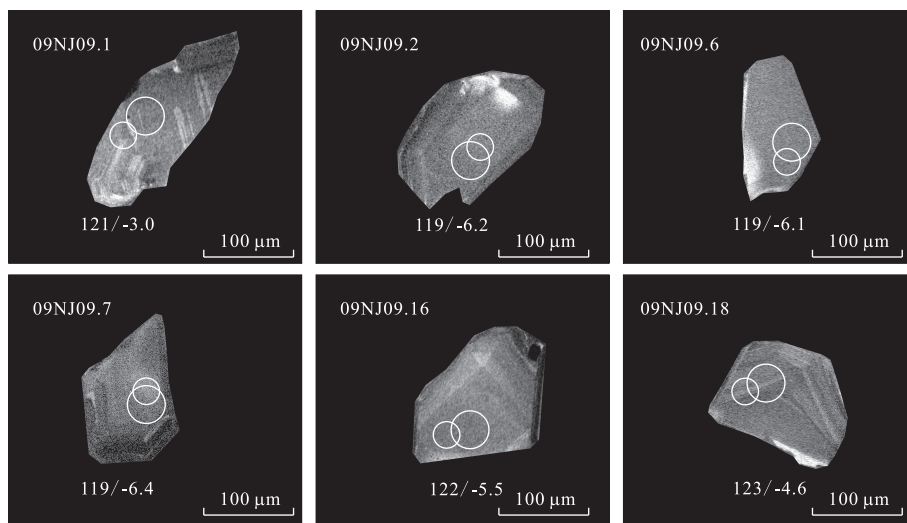


图 5 蒋庙辉石闪长岩(09NJ09)中代表性锆石的 CL 图像及分析点位

Fig.5 Cathodoluminescence (CL) images and analysis position for the representative zircons from Jiangmiao pyroxene diorite

表 1 蒋庙辉石闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Jiangmiao pyroxene diorite

点号	Th		U		Pb <sub>Total</sub>		Th/U		207Pb <sub>i</sub> /206Pb		207Pb <sub>i</sub> /235U		206Pb <sub>i</sub> /238U		208Pb <sub>i</sub> /232Th		207Pb <sub>i</sub> /235U		206Pb <sub>i</sub> /238U		年龄 (Ma)
	U	Pb <sub>Total</sub>	Th/U	Th/U	207Pb <sub>i</sub> /206Pb	207Pb <sub>i</sub> /235U	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	
1	542	14.69	1.11	1.11	0.048 53	0.001 69	0.127 14	0.004 53	0.018 96	0.000 17	0.006 04	0.000 11	122	4	121	1	1				
2	618	24.15	0.60	0.60	0.047 17	0.001 21	0.121 71	0.003 15	0.018 69	0.000 14	0.005 74	0.000 10	117	3	119	1	1				
3	2 198	1 417	42.32	1.55	0.048 55	0.001 06	0.127 67	0.002 88	0.019 04	0.000 15	0.005 86	0.000 08	122	3	122	1	1				
4	2 267	1 886	52.94	1.20	0.049 59	0.001 11	0.132 67	0.003 16	0.019 33	0.000 16	0.006 14	0.000 10	126	3	123	1	1				
5	2 298	1 418	43.45	1.62	0.047 62	0.001 16	0.127 66	0.003 21	0.019 39	0.000 17	0.005 91	0.000 10	122	3	124	1	1				
6	919	738	20.23	1.25	0.048 05	0.001 49	0.123 92	0.003 92	0.018 66	0.000 16	0.005 74	0.000 10	119	4	119	1	1				
7	638	904	22.04	0.71	0.049 90	0.001 31	0.128 20	0.003 36	0.018 64	0.000 15	0.005 91	0.000 10	122	3	119	1	1				
8	617	625	16.57	0.99	0.050 35	0.001 56	0.131 96	0.004 23	0.019 04	0.000 20	0.006 05	0.000 11	126	4	122	1	1				
9	2 001	1 595	44.21	1.25	0.050 63	0.001 14	0.131 34	0.003 07	0.018 79	0.000 14	0.005 92	0.000 08	125	3	120	1	1				
10	786	1 324	31.33	0.59	0.048 98	0.001 21	0.126 12	0.003 17	0.018 66	0.000 14	0.005 73	0.000 10	121	3	119	1	1				
11	1 599	1 436	39.74	1.11	0.050 33	0.001 15	0.133 93	0.003 07	0.019 34	0.000 17	0.006 20	0.000 11	128	3	123	1	1				
12	635	851	21.55	0.75	0.049 69	0.001 38	0.131 71	0.003 59	0.019 31	0.000 18	0.006 33	0.000 11	126	3	123	1	1				
13	1 931	1 059	32.59	1.82	0.050 43	0.001 34	0.129 93	0.003 39	0.018 69	0.000 14	0.005 77	0.000 09	124	3	119	1	1				
14	451	607	14.79	0.74	0.047 69	0.001 57	0.124 50	0.003 96	0.018 96	0.000 16	0.005 91	0.000 11	119	4	121	1	1				
15	538	532	13.78	1.01	0.050 14	0.001 79	0.131 28	0.004 48	0.019 06	0.000 18	0.005 99	0.000 13	125	4	122	1	1				
16	362	385	9.90	0.94	0.052 06	0.002 11	0.138 19	0.005 50	0.019 27	0.000 19	0.005 95	0.000 14	131	5	123	1	1				
17	708	854	21.59	0.83	0.050 29	0.001 28	0.134 35	0.003 67	0.019 27	0.000 16	0.006 01	0.000 10	128	3	123	1	1				
18	561	664	16.83	0.85	0.048 87	0.001 68	0.129 86	0.004 54	0.019 25	0.000 17	0.005 93	0.000 12	124	4	123	1	1				
19	365	502	12.46	0.73	0.045 98	0.002 06	0.121 69	0.005 39	0.019 27	0.000 22	0.006 18	0.000 14	117	5	123	1	1				

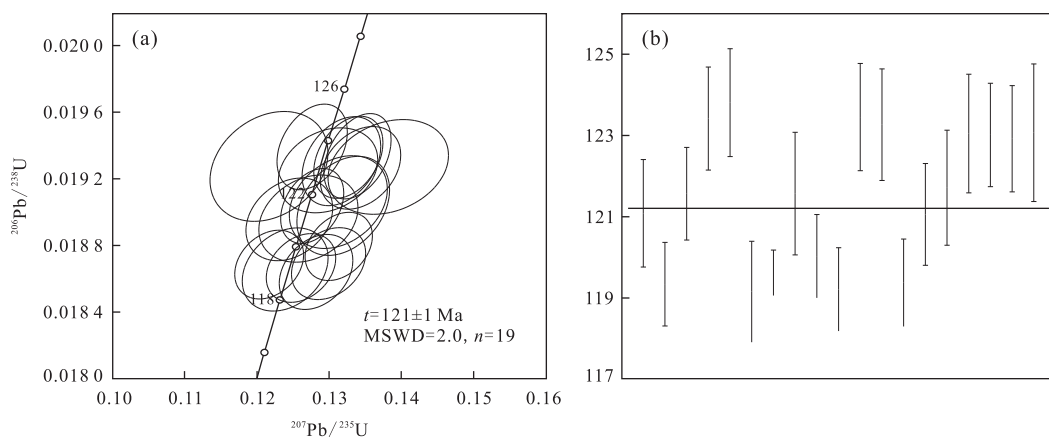


图 6 蒋庙辉石闪长岩(09NJ09)(a)锆石 U-Pb 谐和图和(b)年龄误差分析

Fig.6 (a) Zircon U-Pb concordia diagram and (b) weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age for the Jiangmiao pyroxene diorite

表 2 蒋庙辉石闪长岩的锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopes for the Jiangmiao pyroxene diorite

点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$2\sigma$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$2\sigma$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	0.027 591	0.001 063	0.282 615	0.000 013	0.282 276	-3.0	0.5	904	36	1 365	57	-0.97
2	0.038 367	0.001 453	0.282 524	0.000 013	0.282 298	-6.2	0.5	1 043	37	1 571	58	-0.96
3	0.023 648	0.000 946	0.282 605	0.000 012	0.282 281	-3.3	0.4	916	34	1 388	55	-0.97
6	0.045 574	0.001 701	0.282 528	0.000 013	0.282 297	-6.1	0.5	1 044	38	1 563	60	-0.95
7	0.041 393	0.001 612	0.282 521	0.000 015	0.282 283	-6.4	0.5	1 052	42	1 579	66	-0.95
8	0.033 299	0.001 295	0.282 572	0.000 011	0.282 241	-4.5	0.4	971	31	1 462	48	-0.96
9	0.048 941	0.001 900	0.282 529	0.000 011	0.282 257	-6.1	0.4	1 048	32	1 562	49	-0.94
10	0.050 310	0.001 982	0.282 529	0.000 013	0.282 274	-6.1	0.5	1 051	39	1 563	60	-0.94
11	0.036 302	0.001 439	0.282 574	0.000 011	0.282 192	-4.5	0.4	972	31	1 460	49	-0.96
12	0.033 546	0.001 274	0.282 532	0.000 012	0.282 292	-5.9	0.4	1 027	35	1 553	55	-0.96
14	0.024 261	0.000 945	0.282 616	0.000 014	0.282 279	-2.9	0.5	900	39	1 363	63	-0.97
15	0.017 886	0.000 724	0.282 593	0.000 013	0.282 221	-3.7	0.5	927	36	1 414	57	-0.98
16	0.034 840	0.001 324	0.282 544	0.000 014	0.282 285	-5.5	0.5	1 011	41	1 525	65	-0.96
17	0.032 442	0.001 260	0.282 570	0.000 012	0.282 313	-4.6	0.4	973	33	1 467	52	-0.96
18	0.033 450	0.001 281	0.282 569	0.000 011	0.282 198	-4.6	0.4	975	31	1 471	49	-0.96
19	0.031 932	0.001 254	0.282 551	0.000 016	0.282 297	-5.3	0.6	999	46	1 509	73	-0.96

6.66%，平均为 4.55%， $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值介于 0.05~0.73。岩石的  $\text{Mg}^\#$  较高，均大于 40，个别样品  $\text{Mg}^\#$  很高，可能是由于铁钛氧化物的分离结晶作用使  $\text{FeO}_i$  含量偏低所致。

在 Harker 图解中(图 7)，随着  $\text{SiO}_2$  含量增加， $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{FeO}_i$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量逐渐降低， $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量则逐渐增加。表明在岩浆演化过程中可能存在橄榄石、辉石、磷灰石和钛铁矿的分离结晶作用。

在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 8a)上，蒋庙岩体稀土元素配分曲线均呈右倾型，富集轻稀土元素，重稀土元素分异不显著，Eu 呈弱负异常—正异常( $\delta\text{Eu}$  介于 0.91~1.08)。在微量元素原始地幔标准化的蛛网图(图 8b)中，蒋庙岩体富集大离子亲石

元素(如 Ba、Sr 等)；具有明显的高场强元素(如 Nb、Ta、Zr、Hf)的负异常，以及 Ti、P 元素的亏损。

蒋庙岩体的 Sr 和 Nd 同位素组成见表 4。笔者引用洪文涛等(2010)发表的蒋庙岩体 Sr-Nd 同位素实验数据，其中铈初始比值( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值计算中的时间  $t$  采用本文所测蒋庙辉石闪长岩的侵位年龄 121 Ma。结合本次同位素研究结果可知，宁镇地区蒋庙岩体的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化范围较小，分别为 0.704 6~0.705 1 和 -2.23~0.10。蒋庙基性侵入岩在长江中下游地区中生代岩浆岩中，具有最高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值以及最低的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值。在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  相关图解中(图 9)，蒋庙岩体的 Sr-Nd 同位素组成位于软流圈地幔(depleted MORB mantle, DMM) — 富集岩石圈地



表 3 蔣庙橄辉长岩中辉石的电子探针分析结果(%)  
Table 3 Chemical compositions of the clinopyroxenes from the Jiangmiao olivine gabbros

样品编号	09NZ44-1	09NZ44-2	09NZ44-3	09NZ44-4	09NZ44-5	09NZ44-6	09NZ44-7	09NZ44-8	09NZ44-9	09NZ44-10	10NZ07-1	10NZ07-2	10NZ07-3	10NZ07-4	10NZ07-5	10NZ07-6	10NZ07-7
SiO <sub>2</sub>	50.86	52.11	53.04	51.94	50.96	51.62	47.54	49.91	51.27	50.78	51.77	51.49	51.52	51.92	51.25	52.00	52.07
TiO <sub>2</sub>	1.03	0.58	0.31	0.72	0.67	0.69	0.70	0.53	0.72	0.66	0.46	0.41	0.60	0.48	0.60	0.37	0.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.83	2.18	1.35	2.42	2.63	2.52	2.73	2.15	2.37	2.45	1.48	1.57	2.09	1.67	2.22	1.58	1.64
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.00	0.00	0.05	0.09	0.04	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.04
FeO	7.76	7.61	7.72	7.77	8.32	7.69	6.50	6.18	7.79	7.64	8.64	8.78	8.28	8.69	8.74	8.93	8.72
MnO	0.24	0.30	0.38	0.29	0.33	0.25	0.23	0.24	0.24	0.35	0.44	0.39	0.38	0.39	0.38	0.33	0.39
MgO	13.86	15.51	15.32	15.21	14.74	14.88	14.33	15.24	14.94	15.08	14.94	14.79	14.74	15.58	15.39	15.47	15.19
CaO	21.60	22.01	20.94	21.84	21.98	21.11	19.27	20.60	21.92	21.96	21.48	21.88	22.16	20.90	21.04	20.89	21.52
Na <sub>2</sub> O	0.39	0.39	0.36	0.34	0.43	0.37	0.34	0.30	0.36	0.39	0.40	0.43	0.30	0.38	0.36	0.38	0.38
K <sub>2</sub> O	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Total	99.60	100.70	99.41	100.57	100.19	99.17	91.70	95.16	99.62	99.32	99.63	99.75	100.06	100.03	99.99	99.99	100.29
Mg#	76.10	78.42	77.97	77.72	75.96	77.53	79.72	81.46	77.38	77.88	75.52	75.01	76.04	76.18	75.84	75.54	75.64
Si	1.894	1.908	1.971	1.908	1.882	1.924	1.909	1.927	1.902	1.887	1.925	1.912	1.908	1.918	1.895	1.924	1.921
Al(IV)	0.104	0.078	0.027	0.082	0.100	0.071	0.085	0.067	0.085	0.095	0.060	0.069	0.079	0.067	0.088	0.061	0.063
Al(VI)	0.064	0.017	0.032	0.024	0.016	0.040	0.044	0.032	0.019	0.013	0.005	0.001	0.013	0.007	0.010	0.008	0.009
Ti	0.029	0.016	0.009	0.020	0.018	0.019	0.021	0.015	0.020	0.018	0.013	0.011	0.017	0.013	0.017	0.010	0.009
Cr	0.001	0.000	0.000	0.001	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Fe <sup>3+</sup>	0.227	0.150	0.234	0.179	0.146	0.212	0.181	0.160	0.167	0.131	0.183	0.163	0.179	0.182	0.167	0.190	0.179
Fe <sup>2+</sup>	0.015	0.085	0.006	0.061	0.113	0.028	0.038	0.040	0.076	0.108	0.088	0.113	0.080	0.089	0.106	0.089	0.092
Mn	0.008	0.009	0.012	0.009	0.010	0.008	0.008	0.008	0.007	0.011	0.014	0.012	0.012	0.012	0.012	0.010	0.012
Mg	0.769	0.847	0.849	0.833	0.812	0.827	0.857	0.877	0.826	0.835	0.828	0.819	0.814	0.858	0.848	0.853	0.836
Ca	0.862	0.863	0.834	0.860	0.870	0.843	0.829	0.852	0.871	0.874	0.856	0.871	0.879	0.827	0.833	0.828	0.851
Na	0.028	0.028	0.026	0.024	0.031	0.027	0.026	0.023	0.026	0.028	0.029	0.031	0.021	0.027	0.026	0.027	0.027
K	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Wo	45.83	44.18	43.10	44.27	44.58	43.96	43.33	43.97	44.72	44.60	43.47	44.04	44.79	42.03	42.39	42.03	43.19
En	40.90	43.33	43.88	42.90	41.60	43.11	44.82	45.28	42.42	42.63	42.08	41.41	41.45	43.61	43.14	43.32	42.42
Fs	13.27	12.49	13.02	12.82	13.82	12.93	11.85	10.74	12.86	12.77	14.45	14.55	13.76	14.37	14.48	14.65	14.39

注:单斜辉石阳离子数以 4 个氧原子为基础计算出, Fe<sup>3+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> 利用电价差值法求得, Mg<sup>#</sup> = 100 × molarMgO / (MgO + FeO)。

表 4 蒋庙岩体主量元素(%)、微量元素( $10^{-6}$ )及 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Major (%), trace element ( $10^{-6}$ ) and Sr-Nd isotopic compositions of the Jiangmiao intrusion

样品号	10NZ07	09NZ44	09NZ45	09NJ09	09NZ46
SiO <sub>2</sub>	46.09	44.25	53.67	57.14	55.16
TiO <sub>2</sub>	1.33	1.71	1.01	0.90	0.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.46	17.74	16.88	17.13	16.98
FeO <sub>T</sub>	11.84	12.95	8.25	7.06	3.28
MnO	0.20	0.22	0.15	0.13	0.05
MgO	6.52	6.17	4.26	3.13	5.29
CaO	11.03	10.53	7.25	6.26	12.94
Na <sub>2</sub> O	2.33	3.09	3.49	3.84	3.92
K <sub>2</sub> O	0.18	0.32	2.56	2.82	0.2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.79	1.21	0.45	0.41	0.18
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	1.19	0.76	1.24	0.56	0.89
CO <sub>2</sub>	0.15	0.08	0.06	0.08	0.06
LOI	0.71	0.04	0.88	—	0.89
Total	99.82	99.07	100.15	99.46	100.49
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	12.94	9.66	1.36	1.36	19.60
Mg <sup>#</sup>	50	46	48	44	74
Be	6.57	2.68	16.50	13.20	9.87
Sc	0.49	0.97	1.36	1.97	0.81
Cr	30.6	26.0	19.1	16.3	28.7
V	398	383	224	184	127
Ni	43.50	20.20	40.00	9.59	55.20
Co	53.9	49.4	24.2	20.3	11.0
Cu	36.2	28.1	22.4	11.0	22.2
Zn	169.0	25.0	182.0	72.0	38.5
Ga	106.0	140.0	86.7	81.2	17.3
Rb	21.4	24.6	20.0	21.0	17.3
Sr	1.70	2.56	79.30	104.00	2.49
Y	1633	1345	870	853	896
Zr	21.8	32.5	19.2	21.4	13.4
Nb	14.0	25.8	148.0	215.0	52.8
Cs	0.70	3.94	11.80	16.60	2.24
Ba	0.63	0.23	2.20	3.98	0.16
La	429	604	862	985	123
Ce	34.10	53.50	37.00	44.20	8.36
Pr	72.1	105.0	67.6	79.4	17.1
Nd	9.28	13.30	7.78	8.95	3.01
Sm	41.4	57.6	31.1	34.5	14.0
Eu	8.63	11.3	6.30	6.44	3.40
Gd	2.85	2.92	1.74	1.76	0.89
Tb	7.13	9.59	5.17	5.49	3.22
Dy	0.89	1.21	0.71	0.76	0.48
Ho	4.49	6.09	3.83	4.11	2.64
Er	0.79	1.06	0.72	0.77	0.51
Tm	1.89	2.76	1.97	2.12	1.34
Yb	0.24	0.34	0.27	0.31	0.20
Lu	1.48	2.04	1.80	2.04	1.24
Hf	0.22	0.28	0.25	0.32	0.19
Ta	0.62	1.05	3.96	5.44	1.71
Pb	0.08	0.22	0.63	0.92	0.19
Th	2.40	7.63	10.90	18.70	4.30
U	0.32	1.62	9.41	14.90	1.23
Sr/Y	0.07	0.37	2.15	4.04	0.16
(La/Yb) <sub>N</sub>	74.9	41.4	45.3	39.9	66.8
δEu	16.5	18.8	14.8	15.6	4.8
δEu	1.08	0.83	0.91	0.88	0.81
<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	—	0.005 5	0.263 7	—	—
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr(2σ)	—	0.704 591(6)	0.705 065(4)	—	—
<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	—	0.118 9	0.122 3	—	—
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd(2σ)	—	0.512 581(9)	0.512 487(5)	—	—
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr( <i>t</i> )	—	0.704 582	0.704 612	—	—
ε <sub>Nd</sub> ( <i>t</i> )	—	0.1	-1.8	—	—

注: FeO<sub>T</sub> 表示全铁; “—”处表示未测试或计算; Mg<sup>#</sup> = 100 × Mg<sup>2+</sup> / (Mg<sup>2+</sup> + Fe<sub>T</sub><sup>2+</sup>), *t* = 121 Ma.

幔(EMII)之间。

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

**4.1.1 结晶分异作用** 蒋庙岩体的 SiO<sub>2</sub> 含量低至 45%, 其原生岩浆应直接来自地幔。不过蒋庙岩体与原生地幔熔体 (Ni = (90 ~ 670) × 10<sup>-6</sup>, Co = (27 ~ 80) × 10<sup>-6</sup>) 相比, 具有较低的 Ni ((11 ~ 36) × 10<sup>-6</sup> 和 Co ((1 ~ 54) × 10<sup>-6</sup> 含量, 表明蒋庙岩体并不能代表地幔熔融形成的原生岩浆, 而是经历了一定程度的结晶分异或同化混染作用。Harker 图解是判断岩浆结晶分异作用的有效手段之一, 前述 SiO<sub>2</sub> 对主要氧化物关系图解 (图 7) 显示, SiO<sub>2</sub> 与 MgO、TiO<sub>2</sub>、CaO、FeO<sub>T</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 都具有一定的相关性, 表明结晶分异在岩浆演化过程中具有重要作用。

**4.1.2 陆壳混染作用** 蒋庙岩体富集大离子亲石元素, 暗示其原生岩浆在上升的过程中可能受到地壳的混染或经历过结晶分异作用, 但是下述一系列的证据却表明地壳的混染并不显著: 图 10 有助于判别岩浆演化过程中是否经历了 AFC 过程 (杨堂礼和蒋少涌, 2015)。在图 10a 中, 蒋庙岩体的成分点没有体现出明显的负相关性, 表明在岩浆上升过程中没有明显的地壳物质混染。蒋庙岩体的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 变化范围较小, 为 0.704 6 ~ 0.704 9。在图 10b 中, 也没有混合的趋势。上地壳物质有显著的负 Eu 异常, 而蒋庙岩体几乎没有 Eu 的异常。锆石 ε<sub>Hf</sub>(*t*) 值为 -2.9 ~ -6.4。另外在锆石的 CL 图像上 (图 5), 没有发现核幔结构和古老的年龄, 仅表现出岩浆锆石的特征。这些均表明蒋庙岩体在形成过程中没有明显的地壳物质加入, 其微量元素和同位素组成应能反映其地幔源区的地球化学特征。类似的, 基性岩的同位素在长江中下游地区中每一个特定的成矿区并没有表现出差异性的变化也排除了地壳混染的存在, 更可能代表的是源区的不均一性 (Yan *et al.*, 2008)。

**4.1.3 岩浆源区特征** 对长江中下游中生代基性侵入岩的地球化学研究资料认为, 该地区中生代地幔可能是亏损的软流圈地幔 (DMM) 和富集岩石圈地幔 (EMII) 的混合 (Chen *et al.*, 2001; Yan *et al.*, 2008)。Zou *et al.* (2000) 对扬子地块新生代玄武岩的研究表明, 其物源区有残留的 EMII 信息。从中生代到新生代, 扬子地块东部岩石圈地幔经历了一个由富集到亏损的置换或转换过程, 反映了软流圈物质的显著加入 (谢智等, 2007; 洪文涛等, 2010)。Yan

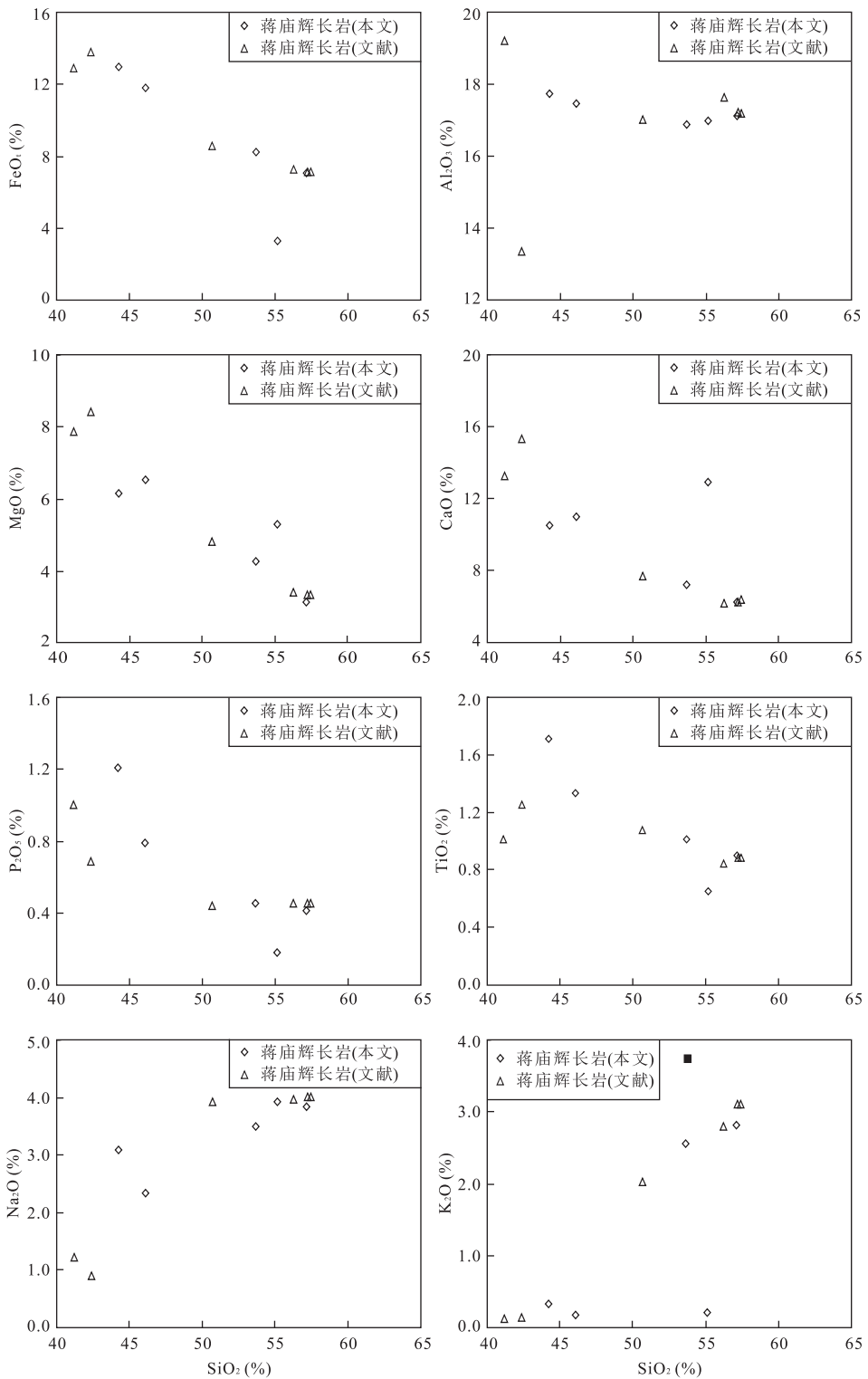


图 7 蒋庙岩体 Harker 图

Fig.7 Harker diagram for Jiangmiao intrusion

文献引自洪文涛等(2010)

et al.(2008)得到的蒋庙辉长岩的 Pb 同位素组成位于 DMM-EMII 之间,洪文涛等(2010)根据蒋庙岩体的 Nd 同位素两端员混合计算结果,认为其岩浆源

区中明显有软流圈地幔物质的贡献.蒋庙岩体的 Sr-Nd 同位素组成位于软流圈地幔(DMM)-富集岩石圈地幔(EMII)之间(图 9),在长江中下游地区中

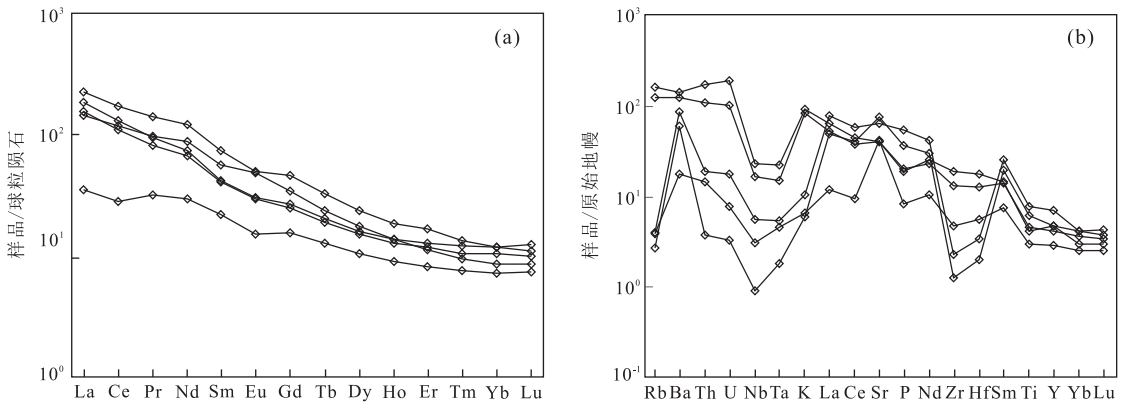


图 8 蒋庙岩体的(a)稀土配分图解和(b)微量元素蛛网图

Fig.8 (a) Chondrite-normalized REE patterns and (b) primitive mantle normalized element spider diagram for the Jiangmiao intrusion  
球粒陨石标准值和原始地幔标准值均引自 Sun and McDonough(1989)

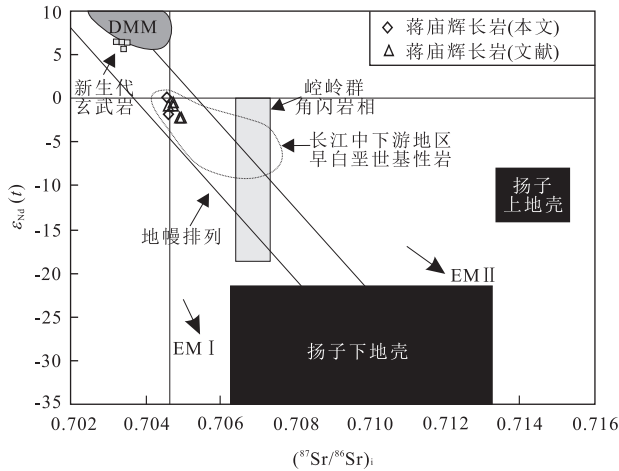


图 9 蒋庙岩体的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图

Fig.9 Initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  diagram of the Jiangmiao intrusion

DMM, 亏损地幔单元; EM(I, II), 富集地幔单元引自 Zindler and Hart(1986); 角闪岩相元古代崆岭群引自 Ma *et al.* (2000) 和 Ames *et al.* (1996); 长江中下游地区早白垩世基性岩引自 Yan *et al.* (2008); 新生代玄武岩数据引自 Zou *et al.* (2000); 上地壳引自 Taylor and McLennan(1985); 扬子下地壳引自 Jahn *et al.* (1999); 文献引自洪文涛等(2010)

生代岩浆岩中, 蒋庙基性岩具有最高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值以及最低的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值。

研究表明, Ti、Zr、Nb 等不相容元素由于活动性很小, 对岩石所经历的交代、蚀变和风化等作用反应不灵敏, 可提供源区地幔成分和性质的相关信息。在图 11a 中, 蒋庙岩体显示由亏损地幔向富集地幔过渡的特点。在图 11b 中, 蒋庙岩体具有从亏损地幔向富集地幔扩展的分布趋势, 也体现了这两种地幔端员混合的成因。

蒋庙岩体在微量元素蛛网图(图 8)上表现出富

集大离子亲石元素(如 K、Ba、Sr 等)、亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti、Zr、Hf 等), 以及球粒陨石标准化稀土元素显示富含轻稀土元素(LREE)的特点。这样的微量元素特征可能是来自和俯冲作用相关的富集岩石圈地幔部分熔融造成的(Pearce and Peate, 1995; Münker *et al.*, 2004; 彭松柏等, 2016)。蒋庙岩体的锆石 Hf 同位素研究结果也指示了类似的地幔源区。蒋庙岩体的 Sr 含量( $853 \times 10^{-6} \sim 1633 \times 10^{-6}$ )显著高于地幔值( $17.8 \times 10^{-6}$ ; Taylor and McLennan, 1985), 也指示岩浆源区并不是单一来自地幔, 可能受到围岩混染或者俯冲板片流体交代作用的影响, 使其 Sr 含量增高(McCulloch and Gamble, 1991)。此外角闪石是蒋庙岩体的重要组成矿物之一, 也表明其地幔源区是比较富集流体相的。长江中下游燕山期成矿相关埃达克质岩、钾玄质安山岩和基性岩均具有岛弧特征岩浆岩的地球化学性质, 这也证明了长江中下游地区的岩石圈地幔是一个经历过大洋俯冲板块来源的流体或熔体交代后的富集源区(Yan *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2011; Xie *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014)。

综上所述, 蒋庙岩体的地球化学特征综合显示其来源于岩石圈地幔, 但显示了富集岩石圈地幔与亏损的软流圈地幔混合的特征。该富集地幔与俯冲板片脱水后的流体交代富集有关。蒋庙岩体在成岩过程中没有明显的地壳物质混染, 但是经历了结晶分异作用。

#### 4.2 成岩时代和构造意义

蒋庙辉石闪长岩的锆石自形程度较高, 内部结构均匀, Th/U 比值较高介于 0.59~1.82, 表现出岩浆结晶成因锆石的特征, 锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果应代表岩浆结晶的年龄。19 个样品的加权

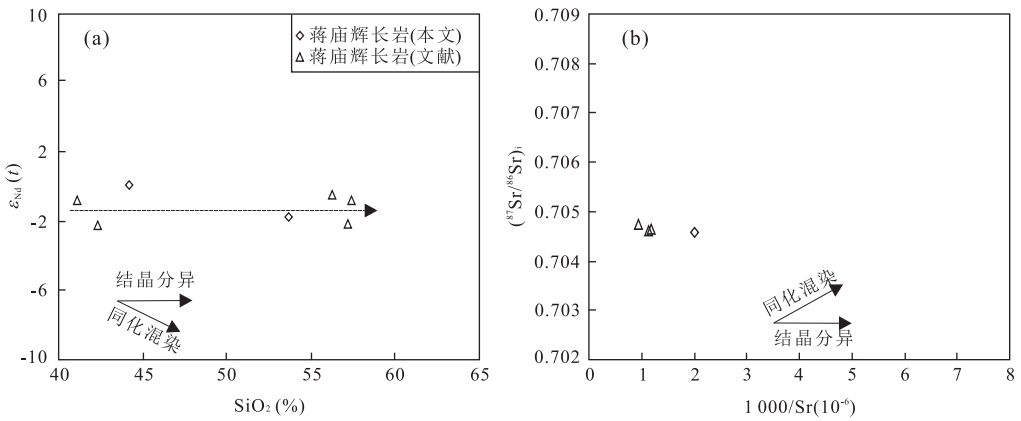


图 10 蒋庙岩体(a)SiO<sub>2</sub>-ε<sub>Nd</sub>(t)和(b)(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i-1</sub>-1 000/Sr 关系

Fig.10 (a) SiO<sub>2</sub> vs. ε<sub>Nd</sub>(t) and (b) (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i-1</sub>-1 000/Sr diagram of the Jiangmiao intrusion

文献引自洪文涛等(2010)

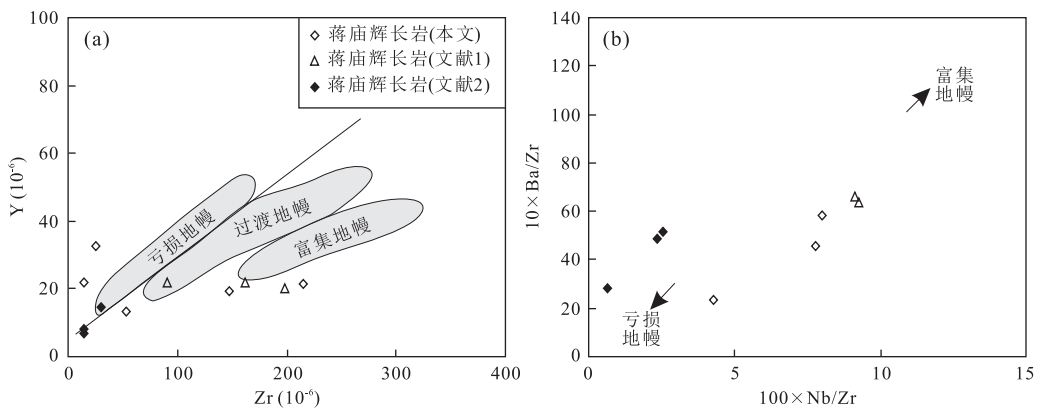


图 11 蒋庙岩体(a)Y-Zr 图解和(b)10×Ba/Zr-100×Nb/Zr 图解

Fig.11 (a) Y versus Zr and (b) 10×Ba/Zr vs. 100×Nb/Zr diagram of the Jiangmiao intrusion

文献 1 引自洪文涛等(2010);文献 2 引自李顺庭(2008);据李昌年(1992)

平均年龄为 121±1 Ma,这表明蒋庙岩体的侵位结晶时代为早白垩世。

综合以往研究资料,长江中下游地区晚中生代岩浆岩的持续时间较长,在 152~100 Ma,岩浆活动可分为 4 期(Sun *et al.*, 2013):第 1 期为 152~135 Ma,主要为分布在鄂东南、铜陵、庐枞等地区的高钾钙碱性闪长岩类,绝大多数为埃达克质岩,代表整个长江中下游地区一次显著的岩浆活动(Xie *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2010);第 2 期为 135~127 Ma,主要为分布在繁昌盆地、庐枞盆地、宁芜盆地及溧水盆地的一套富碱、高钾的粗安岩、粗面岩、安山岩及玄武岩等火山岩(Wang *et al.*, 2006; 袁峰等, 2008; 闫峻等, 2009; 周涛发等, 2010);第 3 期为 127~118 Ma,规模较小,主要为分布在繁昌盆地、宁芜盆地及其附近的 A 型花岗岩和富 Na 基性岩(洪文涛等, 2010; 周涛发等, 2010; Li *et al.*, 2012);

第 4 期为 109~100 Ma,主要为宁镇地区高钾钙碱性的花岗岩类(Sun *et al.*, 2013; 曾键年等, 2013; 刘建敏等, 2014; Wang *et al.*, 2014; 关俊朋等, 2015)。

包括宁镇地区在内的长江中下游地区中生代侵入岩形成的构造背景仍存在较大的争论,制约了对该地区成岩成矿机制的深入理解.近年来,板块俯冲作用对中国东部的影响日益受到重视(Li and Li, 2007; Sun *et al.*, 2007).最近的研究通过对比长江中下游地区与其南侧郟庐断裂带及大别山同时代埃达克质岩 Hf-O 同位素以及 Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup> 和 Eu/Eu\* 计算出的氧逸度,认为长江中下游地区成矿斑岩的成因可能与俯冲大洋板片有关(Liu *et al.*, 2010, 2012; Ling *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013, 2014)。

长江中下游地区中生代侵入岩岩浆活动总体有自西向东年代变新的趋势.这种时空分布特征也被

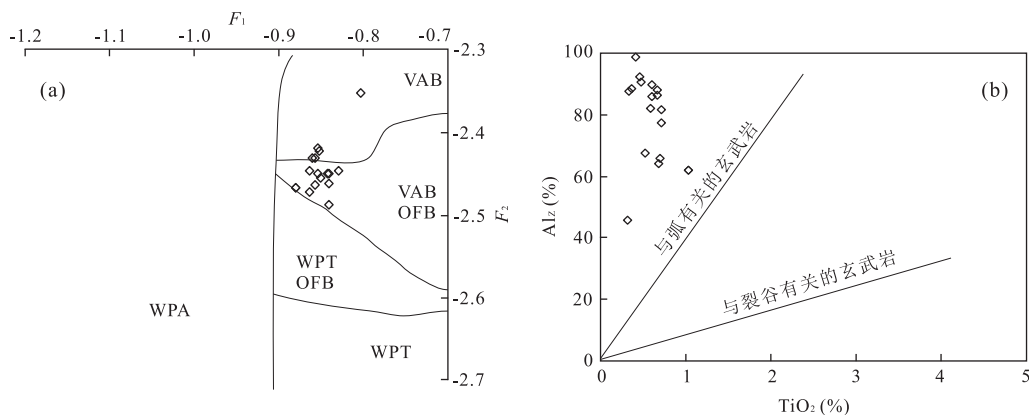


图 12 (a)单斜辉石  $F_1$ - $F_2$  图解和(b)单斜辉石  $Al_2$ - $TiO_2$  图解

Fig.12 (a)  $F_1$  versus  $F_2$  diagram of clinoproxenes and (b)  $Al_2$  versus  $TiO_2$  diagram of clinoproxenes

图 a 中 WPT.板内拉斑玄武岩;WPA.板内碱性玄武岩;VAB.岛弧玄武岩;OFB.洋底玄武岩;图 b 中  $Al_2$  是指单斜辉石中进入四面体位置的 Al 占全铝的百分比;图 a 据 Nisbet and Pearce(1977);图 b 据 Loucks(1990); $F_1 = -0.012 0SiO_2 - 0.080 7TiO_2 + 0.002 6Al_2O_3 - 0.001 2FeO - 0.062 6MnO + 0.008 7MgO - 0.012 8CaO - 0.041 9Na_2O$ ;  $F_2 = -0.046 9SiO_2 - 0.081 8TiO_2 - 0.021 2Al_2O_3 - 0.004 1FeO - 0.143 5MnO - 0.002 9MgO + 0.008 5CaO + 0.016 0Na_2O$

认为与古太平洋板块俯冲有关.长江中下游地区中生代各阶段岩浆岩的成因呈现出一定的演化趋势,从第 1 期高钾钙碱性的侵入岩,到第 2 期富碱高钾的火山岩,再到第 3 期的 A 型花岗岩和富 Na 基性岩.指示长江中下游地区构造背景从挤压转为拉张后,至第 2 期和第 3 期,进入典型的弧后拉张环境(Yan *et al.*, 2008; Xie *et al.*, 2011; 刘建敏等, 2014).本文研究的宁镇地区蒋庙岩体形成于长江中下游地区晚中生代岩浆作用的第 3 期,其来源包括软流圈地幔和富集的岩石圈地幔组分,在成岩过程中没有明显的地壳物质的混染,同时存在受到大洋俯冲板块来源的流体或熔体交代形成的富集地幔的物质贡献.源区有俯冲板片析出物质的贡献明确地指示了其所处的构造背景应以俯冲带为主.

单斜辉石是蒋庙岩体的主要组成矿物,其化学成分对判断岩体所处的大地构造环境也具有重要指示意义(Nisbet and Pearce, 1977).在  $F_1$ - $F_2$  构造环境判别图中(图 12a),单斜辉石的成分部分投影在岛弧玄武(VAB)区,部分投影在岛弧玄武岩和洋底玄武岩(VAB+OFB)区.与弧有关的玄武岩和与裂谷有关的玄武岩中单斜辉石 Al/Ti 比值有明显的区别(Loucks, 1990).在  $Al_2$  与  $TiO_2$  的相关图解中(图 12b),蒋庙橄榄辉长岩中的单斜辉石均落在与弧有关的玄武岩区域,因此其形成可能与俯冲环境相关.此外宁镇地区蒋庙基性岩的地球化学特征也表现出大离子亲石元素富集和高场强元素亏损,具明显的 Nb、Ta 负异常,显示岩体具岛弧岩浆的特点.结合

区域地质、年代学、矿物学和地球化学的资料分析,宁镇地区蒋庙岩体的形成可能与古太平洋板块俯冲事件密切相关.

## 5 结论

笔者通过对江苏宁镇地区中生代蒋庙岩体开展详细的锆石 U-Pb 年代学、矿物学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究,并结合区域地质、年代学和地球化学的资料分析,获得了如下结论:(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究表明:宁镇地区的蒋庙岩体形成于 121 Ma.(2) 宁镇地区蒋庙岩体的地球化学特征表明:其来源包括软流圈地幔和富集岩石圈地幔组分,在成岩过程中没有明显的地壳物质混染,但是经历了结晶分异作用.源区可能有与俯冲相关的物质加入.(3) 宁镇地区蒋庙岩体的形成可能与古太平洋板块俯冲事件密切相关.

致谢:测试分析得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室、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和中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室相关工作人员的协助,野外采样过程中得到了刘园园、范淑花、王燕和刘劲松等的帮助;匿名审稿人给出建议和意见,在此一并表示衷心的感谢!

## References

Ames, L., Zhou, G. Z., Xiong, B. C., 1996. Geochronology and

- Isotopic Character of Ultrahigh-Pressure Metamorphism with Implications for Collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons, Central China. *Tectonics*, 15(2): 472–489. doi: 10.1029/95TC02552
- Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 243–258. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00040-X
- Chang, Y. F., Liu, X. P., Wu, C. Y., 1991. The Copper-Iron Metallogenic Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Geological Publishing House, Beijing, 379 (in Chinese).
- Chen, J. F., Yan, J., Xie, Z., et al., 2001. Nd and Sr Isotopic Compositions of Igneous Rocks from the Lower Yangtze Region in Eastern China: Constraints on Sources. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9–10): 719–731. doi: 10.1016/S1464-1895(01)00122-3
- Chen, L., Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., 2014. Origin of Andesitic Rocks: Geochemical Constraints from Mesozoic Volcanics in the Luzong Basin, South China. *Lithos*, 190–191: 220–239. doi: 10.1016/j.lithos.2013.12.011
- Di, Y. J., Wu, G. G., Zhang, D., et al., 2005. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Xiaotongguanshan and Shatanjiao Intrusions and Its Petrological Implications in the Tongling Area, Anhui. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 795–802. doi: 10.3321/j.issn:1000-9515.2005.06.010
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892–897. doi: 10.1038/nature03162
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LA-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147. doi: 10.1016/S0016-7037(99)00343-9
- Guan, J. P., Wei, F. B., Sun, G. X., et al., 2015. Zircon U-Pb Dating of Intermediate-Acid Intrusive Rocks in the Middle Section of Ningzhen District and Their Metallogenic Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(2): 344–354 (in Chinese with English abstract).
- Hong, W. T., Xu, X. S., He, Z. Y., et al., 2010. Geochronology and Geochemistry of the Jiangmiao Intrusion in Nanjing: Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1577–1588 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Lo, C. H., et al., 1999. Crust-Mantle Interaction Induced by Deep Subduction of the Continental Crust: Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence from Post-Collisional Mafic-Ultramafic Intrusions of the Northern Dabie Complex, Central China. *Chemical Geology*, 157(1–2): 119–146. doi: 10.1016/S0009-2541(98)00197-1
- Li, C. N., 1992. Trace Element Petrology of Igneous Rocks. China University of Geosciences Press, Wuhan, 195 (in Chinese).
- Li, H., Ling, M. X., Li, C. Y., et al., 2012. A-Type Granite Belts of Two Chemical Subgroups in Central Eastern China: Indication of Ridge Subduction. *Lithos*, 150(10): 26–36. doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.021
- Li, J. W., Zhao, X. F., Zhou, M. F., et al., 2009. Late Mesozoic Magmatism from the Daye Region, Eastern China: U-Pb Ages, Petrogenesis, and Geodynamic Implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3): 383–409. doi: 10.1007/s00410-008-0341-x
- Li, S. T., 2008. Characteristics and Petrogenesis of the Jiangmiao and Gushan Intrusions in the Ningwu Basin, Eastern China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 34 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, W. X., Wang, X. C., et al., 2010. SIMS U-Pb Zircon Geochronology of Porphyry Cu-Au-(Mo) Deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, Eastern China: Magmatic Response to Early Cretaceous Lithospheric Extension. *Lithos*, 119(3–4): 427–438. doi: 10.1016/j.lithos.2010.07.018
- Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1 300 km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35(2): 179. doi: 10.1130/G23193a.1
- Ling, M. X., Wang, F. Y., Ding, X., et al., 2011. Different Origins of Adakites from the Dabie Mountains and the Lower Yangtze River Belt, Eastern China: Geochemical Constraints. *International Geology Review*, 53(5–6): 727–740. doi: 10.1080/00206814.2010.482349
- Liu, J. M., Yan, J., Li, Q. Z., et al., 2014. Zircon LA-ICPMS Dating of the Anjishan Pluton in Nanjing-Zhenjiang Area and Its Significance. *Geological Review*, 60(1): 190–200 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. A., Li, S. G., Guo, S. S., et al., 2012. The Cretaceous Adakitic-Basaltic-Granitic Magma Sequence on South-Eastern Margin of the North China Craton: Implications for Lithospheric Thinning Mechanism. *Lithos*, 134–135: 163–178. doi: 10.1016/j.lithos.2011.12.015
- Liu, S. A., Li, S. G., He, Y. S., et al., 2010. Geochemical Contrasts between Early Cretaceous Ore-Bearing and Ore-Barren High-Mg Adakites in Central-Eastern China: Implications for Petrogenesis and Cu-Au Mineralization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(24): 7160–7178. doi: 10.1016/j.gca.2010.09.003

- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008a. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, Y.S., Zong, K.Q., Kelemen, P.B., et al., 2008b. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole; Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1–2): 133–153. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.10.016
- Loucks, R. R., 1990. Discrimination of Ophiolitic from Nonophiolitic Ultramafic-Mafic Allochthons in Orogenic Belts by the Al/Ti Ratio in Clinopyroxene. *Geology*, 18(4): 346. doi: 10.1130/0091-7613(1990)018<0346:doofnu>2.3.co;2
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, 71.
- Ma, C.Q., Ehlers, C., Xu, C.H., et al., 2000. The Roots of the Dabieshan Ultrahigh-Pressure Metamorphic Terrane: Constraints from Geochemistry and Nd-Sr Isotope Systematics. *Precambrian Research*, 102(3–4): 279–301. doi: 10.1016/s0301-9268(00)00069-3
- Mao, J.W., Duan, C., Liu, J.L., et al., 2012. Metallogeny and Corresponding Mineral Deposit Model of the Cretaceous Terrestrial Volcanic-Intrusive Rocks—Related Polymetallic Iron Deposits in Middle-Lower Yangtze River Valley. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- McCulloch, M.T., Gamble, J.A., 1991. Geochemical and Geodynamical Constraints on Subduction Zone Magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3–4): 358–374. doi: 10.1016/0012-821x(91)90029-h
- Morimoto, N., 1988. Nomenclature of the Pyroxene. *Acta Mineralogica Sinica*, 8(4): 289–305 (in Chinese).
- Münker, C., Wörner, G., Yogodzinski, G., et al., 2004. Behaviour of High Field Strength Elements in Subduction Zones: Constraints from Kamchatka-Aleutian Arc Lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(3–4): 275–293. doi: 10.1016/j.epsl.2004.05.030
- Nisbet, E. G., Pearce, J. A., 1977. Clinopyroxene Composition in Mafic Lavas from Different Tectonic Settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 149–160. doi: 10.1007/bf00398776
- Pan, Y.M., Dong, P., 1999. 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 Geology Reviews*, 15(4): 177–242. doi: 10.1016/s0169-1368(99)00022-0
- Pearce, J.A., Peate, D.W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251–285. doi: 10.1146/annurev.ea.23.050195.001343
- Peng, S.B., Liu, S.F., Lin, M.S., et al., 2016. Early Paleozoic Subduction in Cathaysia(II): New Evidence from the Dashuang High Magnesian-Magnesian Andesite. *Earth Science*, 41(6): 931–947 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. doi: 10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Sun, W. D., Ding, X., Hu, Y. H., et al., 2007. The Golden Transformation of the Cretaceous Plate Subduction in the West Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3–4): 533–542. doi: 10.1016/j.epsl.2007.08.021
- Sun, W.D., Ling, M.X., Chung, S.L., et al., 2012. Geochemical Constraints on Adakites of Different Origins and Copper Mineralization. *The Journal of Geology*, 120(1): 105–120. doi: 10.1086/662736
- Sun, Y., Ma, C. Q., Liu, Y. Y., 2013. The Latest Yanshanian Magmatic and Metallogenic Events in the Middle-Lower Yangtze River Belt: Evidence from the Ningzhen Region. *Chinese Science Bulletin*, 58(34): 4308–4318. doi: 10.1007/s11434-013-6015-8
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution; An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Wang, F.Y., Liu, S.A., Li, S.G., et al., 2013. Contrasting Zircon Hf-O Isotopes and Trace Elements between Ore-Bearing and Ore-Barren Adakitic Rocks in Central-Eastern China: Implications for Genetic Relation to Cu-Au Mineralization. *Lithos*, 156–159: 97–111. doi: 10.1016/j.lithos.2012.10.017
- Wang, F. Y., Liu, S. A., Li, S. G., et al., 2014. Zircon U-Pb Ages, Hf-O Isotopes and Trace Elements of Mesozoic High Sr/Y Porphyries from Ningzhen, Eastern China: Constraints on Their Petrogenesis, Tectonic Implications and Cu Mineralization. *Lithos*, 200–201: 299–316. doi: 10.1016/j.lithos.2014.05.004
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2006. Petrogenesis of Cretaceous Adakitic and Shoshonitic Igneous Rocks in the Luzong Area, Anhui Province (Eastern China): Implications for Geodynamics and Cu-Au Mineralization. *Lithos*, 89



- (3—4): 424—446. doi: 10.1016/j.lithos.2005.12.010
- Xia, J. S., 2000. A Preliminary Division of Lineage Units of Granitoid Rocks in Ning-Zhen Region. *Geology of Jiangsu*, 24 (2): 81 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G. Q., Mao, J. W., Li, R. L., et al., 2008. 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*, 104(1—4): 216—230. doi: 10.1016/j.lithos.2007.12.008
- Xie, G. Q., Mao, J. W., Zhao, H. J., 2011. 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*, 125 (1—2): 693—710. doi: 10.1016/j.lithos.2011.04.001
- Xie, J. C., Yang, X. Y., Sun, W. D., et al., 2012. Early Cretaceous Dioritic Rocks in the Tongling Region, Eastern China: Implications for the Tectonic Settings. *Lithos*, 150: 49—61. doi: 10.1016/j.lithos.2012.05.008
- Xie, Z., Li, Q. Z., Chen, J. F., et al., 2007. The Geochemical Characteristics of the Early-Cretaceous Volcanics in Luzong Region and Their Source Significances. *Geological Journal of China Universities*, 13 (2): 235—249 (in Chinese with English abstract).
- Xing, F. M., 1998. Geochemistry of Basic Rocks from the Eastern Part of the Yangtze Magmatic Rock Belt. *Geochimica*, 27 (3): 258—268 (in Chinese with English abstract).
- Xing, F. M., 1999. The Magmatic Metallogenetic Belt around the Yangtze River in Anhui. *Geology of Anhui*, 9(4): 272—279 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X., 2000. Genesis of Young Lithospheric Mantle in Southeastern China: An LA-ICP-MS Trace Element Study. *Journal of Petrology*, 41(1): 111—148. doi: 10.1093/petrology/41.1.111
- Xu, X. S., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2003. Enrichment of Upper Mantle Peridotite: Petrological, Trace Element and Isotopic Evidence in Xenoliths from SE China. *Chemical Geology*, 198(3—4): 163—188. doi: 10.1016/S0009-2541(03)00004-4
- Xue, H. M., Dong, S. W., Ma, F., 2010. Zircon U-Pb SHRIMP Ages of Sub-Volcanic Bodies Related with Porphyritic Fe-Deposits in the Luzong and Ningwu Basins, Middle and Lower Yangtze River Reaches, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2653—2664 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J., Chen, J. F., Xie, Z., et al., 2005. Geochemistry of Late Mesozoic Basalts from Kedoushan in the Middle and Lower Yangtze Regions: Constraints on Characteristics and Evolution of the Lithospheric Mantle. *Geochimica*, 34(5): 455—469 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J., Chen, J. F., Xu, X. S., 2008. Geochemistry of Cretaceous Mafic Rocks from the Lower Yangtze Region, Eastern China: Characteristics and Evolution of the Lithospheric Mantle. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(3—4): 177—193. doi: 10.1016/j.jseaes.2007.11.002
- Yan, J., Chen, J. F., Yu, G., et al., 2003. Pb Isotopic Characteristics of Late Mesozoic Mafic Rocks from the Lower Yangtze Region: Evidence for Enriched Mantle. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 195—206 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J., Liu, H. Q., Song, C. Z., et al., 2009. Zircon U-Pb Geochronology of the Volcanic Rocks from Fanchang-Ningwu Volcanic Basins in the Lower Yangtze Region and Its Geological Implications. *Chinese Science Bulletin*, 54(12): 1716—1724 (in Chinese).
- Yang, T. L., Jiang, S. Y., 2015. Petrogenesis of Intermediate-Felsic Intrusive Rocks and Mafic Microgranular Enclaves (MMEs) from Dongleiwan Deposit in Jiurui Ore District, Jiangxi Province: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes. *Earth Science*, 40(12): 2002—2020 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, F., Zhou, T. F., Fan, Y., et al., 2008. Source, Evolution and Tectonic Setting of Mesozoic Volcanic Rocks in Luzong Basin, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (8): 1691—1702 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Gao, S., Dai, M. N., et al., 2008. Simultaneous Determinations of U-Pb Age, Hf Isotopes and Trace Element Compositions of Zircon by Excimer Laser Ablation Quadrupole and Multiple-Collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1—2): 100—118. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.10.003
- Zeng, J. N., Li, J. W., Chen, J. H., et al., 2013. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Anjishan Intrusive Rocks in Ningzhen District, Jiangsu, and Its Geological Significance. *Earth Science*, 38(1): 57—67 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S., Yao, S. Z., Lin, X. D., et al., 1992. Fe-Cu-(Au) Metallogeny of the Middle-Lower Changjiang Region. Geological Publishing House, Beijing, 235 (in Chinese).
- Zheng, Q. R., 1983. Calculation of the Fe<sup>3+</sup> and Fe<sup>2+</sup> Contents in Silicate and Ti-Fe Oxide Minerals from EPMA Data. *Acta Mineralogica Sinica*, 3(1): 55—62 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T. F., Fan, Y., Yuan, F., et al., 2010. Temporal-Spatial Framework of Magmatic Intrusions in Luzong Volcanic Basin in East China and Their Constraint to Mineraliza-

- tions. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2694—2714 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T. F., Fan, Y., Yuan, F., et al., 2012. Progress of Geological Study in the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3051—3066 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T. F., Wu, M. A., Fan, Y., et al., 2011. Geological, Geochemical Characteristics and Isotope Systematics of the Longqiao Iron Deposit in the Lu-Zong Volcano-Sedimentary Basin, Middle-Lower Yangtze (Changjiang) River Valley, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 154—169. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.04.004
- Zhou, X. M., 1964. The Differentiation Effect of the Jiangmiao Mafic Intrusion in Nanjing. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 8(4): 559—573 (in Chinese with English abstract).
- Zindler, A., Hart, S., 1986. Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 493—571. doi: 10.1146/annurev. ea.14.050186.002425
- Zong, K. Q., Liu, Y. S., Gao, C. G., et al., 2010. In Situ U-Pb Dating and Trace Element Analysis of Zircons in Thin Sections of Eclogite: Refining Constraints on the Ultra High-Pressure Metamorphism of the Sulu Terrane, China. *Chemical Geology*, 269(3—4): 237—251. doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.09.021
- Zou, H. B., Zindler, A., Xu, X. S., et al., 2000. Major, Trace Element, and Nd, Sr and Pb Isotope Studies of Cenozoic Basalts in SE China: Mantle Sources, Regional Variations, and Tectonic Significance. *Chemical Geology*, 171(1—2): 33—47. doi: 10.1016/S0009—2541(00)00243—6
- 附中文参考文献**
- 常印佛, 刘湘培, 吴昌言, 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 379.
- 关俊朋, 韦福彪, 孙国曦, 等, 2015. 宁镇中段中酸性侵入岩锆石 U-Pb 年龄及其成岩成矿指示意义. *大地构造与成矿学*, 39(2): 344—354.
- 洪文涛, 徐夕生, 贺振宇, 等, 2010. 南京蒋庙岩体的年代学、地球化学及其地质意义. *岩石学报*, 26(5): 1577—1588.
- 李昌年, 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 195.
- 李顺庭, 2008. 宁芜地区蒋庙和姑山岩体的特征和成因 (硕士学位论文). 北京: 中国地质大学, 34.
- 刘建敏, 闫峻, 李全忠, 等, 2014. 宁镇地区安基山岩体锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年及意义. *地质论评*, 60(1): 190—200.
- 毛景文, 段超, 刘佳林, 等, 2012. 陆相火山—侵入岩有关的铁多金属矿成矿作用及矿床模型——以长江中下游为例. *岩石学报*, 28(1): 1—14.
- Morimoto, N., 1988. 辉石命名法. *矿物学报*, 8(4): 289—305.
- 彭松柏, 刘松峰, 林木森, 等, 2016. 华夏早古生代俯冲作用 (II): 大爽高镁—镁质安山岩新证据. *地球科学*, 41(6): 931—947.
- 夏嘉生, 2000. 宁镇地区花岗岩类岩石谱系单位的初步划分. *江苏地质*, 24(2): 81.
- 谢智, 李全忠, 陈江峰, 等, 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义. *高校地质学报*, 13(2): 235—249.
- 邢凤鸣, 1998. 扬子岩浆岩带东段基性岩地球化学. *地球化学*, 27(3): 258—268.
- 邢凤鸣, 1999. 安徽沿江地区岩浆成矿带. *安徽地质*, 9(4): 272—279.
- 薛怀民, 董树文, 马芳, 2010. 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*, 26(9): 2653—2664.
- 闫峻, 陈江峰, 谢智, 等, 2005. 长江中下游地区蝌蚪山晚中生代玄武岩的地球化学研究: 岩石圈地幔性质与演化的制约. *地球化学*, 34(5): 455—469.
- 闫峻, 陈江峰, 喻钢, 等, 2003. 长江中下游晚中生代中基性岩的铅同位素特征: 富集地幔的证据. *高校地质学报*, 9(2): 195—206.
- 闫峻, 刘海泉, 宋传中, 等, 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.
- 杨堂礼, 蒋少涌, 2015. 江西九瑞矿集区东雷湾矿区中酸性侵入岩及其铁镁质包体的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素制约. *地球科学*, 40(12): 2002—2020.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 等, 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景. *岩石学报*, 24(8): 1691—1702.
- 曾键年, 李锦伟, 陈津华, 等, 2013. 宁镇地区安基山侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球科学*, 38(1): 57—67.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等, 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 235.
- 郑巧荣, 1983. 由电子探针分析值计算  $Fe^{3+}$  和  $Fe^{2+}$ . *矿物学报*, 3(1): 55—62.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 等, 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约. *岩石学报*, 26(9): 2694—2714.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 等, 2012. 长江中下游成矿带地质与矿产研究进展. *岩石学报*, 28(10): 3051—3066.
- 周新民, 1964. 南京蒋庙基性侵入岩的分异作用. *南京大学学报(自然科学版)*, 8(4): 559—573.