

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.024>



# 江南造山带东段新元古代登山群年代学及大地构造意义

张继彪, 刘燕学\*, 丁孝忠, 张恒, 石成龙

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

**摘要:** 为探讨江南造山带东段新元古代构造演化机制, 对江南造山带东段登山群砂岩及火山岩进行锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究. SHRIMP 锆石 U-Pb 定年显示登山群高山组凝灰岩年龄为  $855.5 \pm 8.2$  Ma, 叶家组流纹岩年龄为  $798.1 \pm 7.8$  Ma. 地球化学数据显示高山组砂岩物源区为大陆岛弧, 形成于弧后盆地; 叶家组火山岩为双峰式火山岩, 流纹岩轻稀土富集, 重稀土亏损; 高  $\text{FeOt}/(\text{FeOt} + \text{MgO})$  和  $\text{Ga}/\text{Al}$  值、低  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $7.9 \sim 10.9$ , 富集 Ba、Th、U 等大离子亲石元素和高场强元素, 强烈亏损 Sr、P、Ti 的特征显示其为典型的 A 型花岗岩, 来自初生地壳的部分熔融; 玄武岩属拉斑玄武岩系列, 具有 OIB 特征, 富集轻稀土及大离子亲石元素, 来自软流圈地幔的部分熔融. 双峰式火山岩形成于板内伸展背景. 年代学及地球化学结果表明新元古代江南造山带东段扬子与华夏板块拼贴时限为  $855 \sim 800$  Ma 之间. 造山结束之后地幔物质上涌, 华南板块进入裂谷期.

**关键词:** 新元古代; 登山群; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 江南造山带.

中图分类号: P548; P597

文章编号: 1000-2383(2020)06-2011-19

收稿日期: 2019-11-20

## Geochronology of the Dengshan Group in the Eastern Jiangnan Orogen, and Its Tectonic Significance

Zhang Jibiao, Liu Yanxue\*, Ding Xiaozhong, Zhang Heng, Shi Chenglong

*Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

**Abstract:** Detailed researches on Zircon U-Pb chronology and geochemistry of the Dengshan Group in the eastern Jiangnan orogen have been undertaken in this paper in order to figure out the tectonic setting of the eastern Jiangnan orogen in the Neoproterozoic. SHRIMP zircon U-Pb dating of two samples yielded weighted mean ages of  $855.5 \pm 8.2$  Ma and  $798 \pm 7.8$  Ma, respectively. The sandstone rocks are mostly affiliated with a continental arc, in good agreement with the proposed back-arc basin scenario. These rhyolites display LREE enriched REE patterns, with positive  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values, and has high values of  $\text{FeOt}/(\text{FeOt} + \text{MgO})$  and  $\text{Ga}/\text{Al}$ , low contents of  $\text{CaO}$  and  $\text{MgO}$ , and it is enriched in Ba, Th, U and HFSEs, and depleted in Sr, P, and Ti, thus resembling A-type granitoids. These basalts are of tholeiitic basalt, and display ocean island basalt (OIB)-like geochemical signatures, with the enrichment of LREE and large-ion lithophile element relative to HREE. The bimodal volcanic rocks are suggested to be formed during post-collisional extension setting. Combined with the previously data from the Jiangnan orogen, we propose that the Jiangnan orogen leading to the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks took place during  $855 \sim 800$  Ma. This was followed by breakup after the orogenesis which was triggered by mantle upwelling.

**Key words:** Neoproterozoic; Dengshan Group; zircon U-Pb dating; geochemistry; Jiangnan orogen.

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(Nos.DD20190370, 121201111120117).

作者简介: 张继彪(1992-), 男, 在读博士, 主要从事大地构造学研究. ORCID: 0000-0003-0479-1754. E-mail: 13051196998@163.com

\* 通讯作者: 刘燕学, E-mail: 425368369@qq.com

引用格式: 张继彪, 刘燕学\*, 丁孝忠, 等, 2020. 江南造山带东段新元古代登山群年代学及大地构造意义. 地球科学, 45(6): 2011-2029.

## 0 引言

随着对 Rodinia 超大陆研究的深入,越来越多的学者将我国华南板块与超大陆的重建联系在一起(Li, 1999; Li *et al.*, 2007, 2009; Yao *et al.*, 2014, 2015; Zhao, 2015; Wang *et al.*, 2017). 传统观点认为华南由扬子陆块与华夏陆块于新元古代拼贴而成(Li *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013; Zhao, 2015; Wang *et al.*, 2017). 江南造山带作为其重要的拼合带,广泛发育一系列新元古代火山—沉积岩系及各类侵入岩体,是研究华南地区前寒武纪地壳生长与演化机制的理想场所. 众多学者对江南造山带的研究已经取得了丰富的成果,但是对于扬子陆块与华夏陆块的最终拼贴时限以及造山之后的裂谷作用机制仍然存在争议. 一部分学者认为扬子陆块与华夏陆块的拼贴时限为 1 000~900 Ma,属于全球格林维尔造山运动的一部分,860 Ma 由于超级地幔柱的启动,华南地区构造域从造山运动向裂谷转化,是 Rodinia 超大陆裂解在华南地区的响应(Li, 1999; Li *et al.*, 2007, 2009). 另外一部份学者认为江南造山带新元古代(860~820 Ma)的岩浆岩产生于岛弧—弧后盆地环境,呈带状分布,与地幔柱成因的放射状岩浆岩分布特征不同,扬子陆块与华夏陆块最终碰撞拼贴可能发生在 820 Ma 或更晚,不属于全球格林维尔造山范畴(Yao *et al.*, 2013, 2014; Zhao, 2015); 造山作用结束后华南进入裂谷期(Wang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013; Yao *et al.*, 2014). 最新的研究观点认为华夏陆块在新元古代时期由多个微陆块组成,820 Ma 时期导致扬子东南缘弧后盆地关闭的造山事件可能系弧陆拼贴,扬子与华夏陆块并未在该时期碰撞拼贴(Liu *et al.*, 2018; 张克信等, 2018; 唐增才等, 2020). 因此,厘清扬子与华夏陆块的拼贴时限以及新元古代裂谷盆地演化的动力学机制对全面认识华南地区新元古代构造演化过程至关重要.

江南造山带东段登山群地处赣东北断裂带与江山—绍兴断裂带交叉区域,发育一系列火山—沉积岩,是研究板块构造的理想目标,但是其长期以来缺乏高精度的年代学及地球化学数据,所以其精确的年代学制约以及大地构造背景的厘定对认识华南新元古代板块构造演化具有重要意义. 本文以江南造山带东段赣东北地区登山群碎屑岩和火山岩为研究对象,对其开展系统的锆石 U-Pb 年代学、

全岩地球化学和 Hf 同位素研究,以期标定登山群在地层柱中的位置,同时为进一步理解新元古代江南造山带构造演化提供新的材料.

## 1 地质概况

### 1.1 区域地质背景

华南地区由扬子陆块和华夏陆块于新元古代沿江山—绍兴—萍乡断裂带拼贴而成(Li *et al.*, 2003a, 2008, 2009; Zheng *et al.*, 2008; Yao *et al.*, 2014). 扬子陆块前寒武纪基底主要以新元古代岩浆岩和浅变质沉积岩为主,同时出露少量中元古代和太古代地层. 太古代基底主要为扬子北缘崆岭杂岩和鱼洞子杂岩体,崆岭杂岩时代为 3.3~2.6 Ga,后期被 1 850 Ma 圈椅墙花岗岩和 850 Ma 黄陵杂岩体所侵入(Zhao *et al.*, 2018); 鱼洞子杂岩主要包括变沉积岩和 TTG 组合,时代为 2.7 Ga(Zhou *et al.*, 2018). 中元古代地层主要分布在扬子陆块西缘,中元古代晚期地层包括河口群、大红山群及东川群等,时代为 1 700~1 500 Ma(本文中元古界底界以 1 800 Ma 为界),中元古代晚期地层包括会理群、昆阳群等,时代为 1 200~1 000 Ma(Zhao *et al.*, 2018). 华夏陆块前寒武纪基底主要以中元古代地层为主,最老的岩石地层单元是分布在浙江东南部、福建西北部以及南岭地区的八都群(1.9~1.8 Ga)及相当的变质岩系(Yu *et al.*, 2012).

江南造山带是扬子陆块和华夏陆块于新元古代汇聚形成的碰撞造山带,呈 NNE 向展布,宽约 120 km,延伸约 1 500 km(图 1),广泛发育一系列新元古代浅变质火山—沉积岩、酸性及少量基性侵入岩,长期以来是研究华南地区新元古代板块构造演化的热点区域.

以武陵/四堡运动不整合面为界,江南造山带新元古代早—中期地层序列可以分为上下两个地层单元. 下地层单元时代主要集中在 900~820 Ma,普遍发生低绿片岩相变质作用及紧密线状褶皱. 在广西地区被称为四堡群,地层时代为 871~835 Ma,斑脱岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $841 \pm 5$  Ma(Li *et al.*, 2007; 高林志等, 2010),侵入四堡群的镁铁—超镁铁岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $827 \pm 7$  Ma(Li, 1999). 贵州地区被称为梵净山群,地层时代为 874~828 Ma(Zhao *et al.*, 2011),余家沟组晶屑凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $851.3 \pm 4$  Ma(高林志等, 2010),侵入梵净山群中的白云母花岗岩的

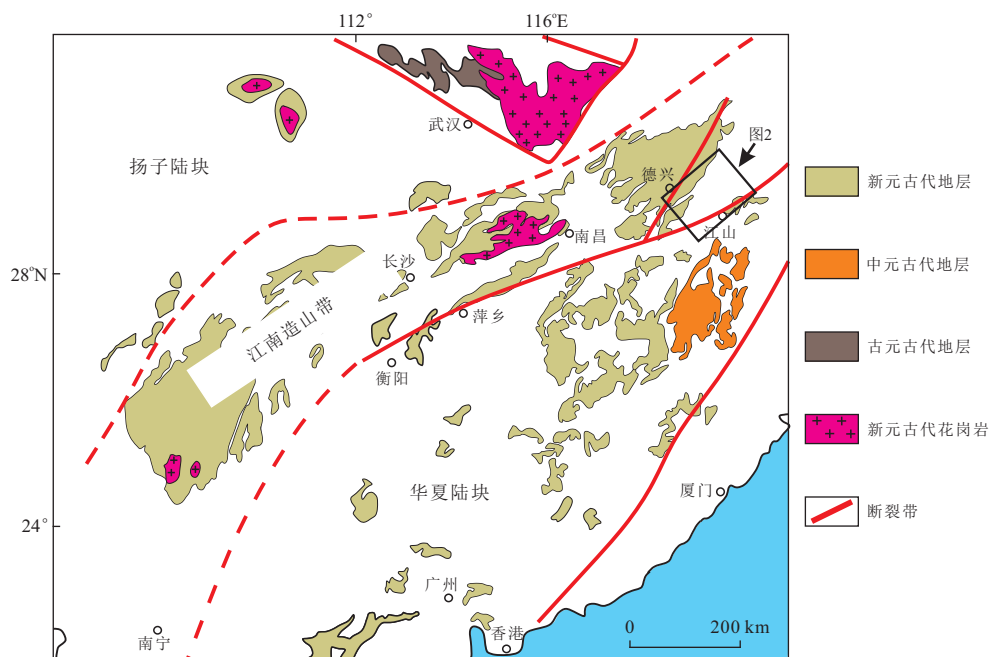


图1 江南造山带东段区域构造简图

Fig.1 Tectonic map of the eastern Jiangnan orogen

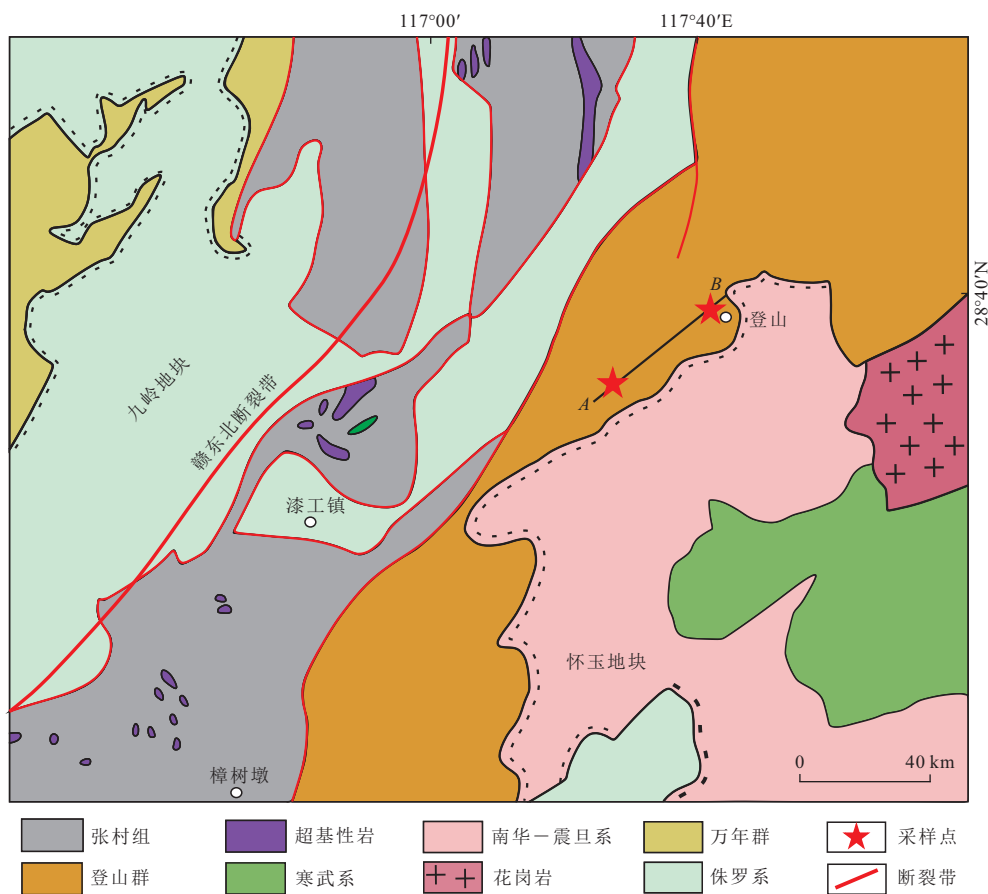


图2 华南地区江南造山带东段登山群区域地质简图

Fig.2 Geological sketch map of the Dengshan area in the eastern Jiangnan orogen, South China

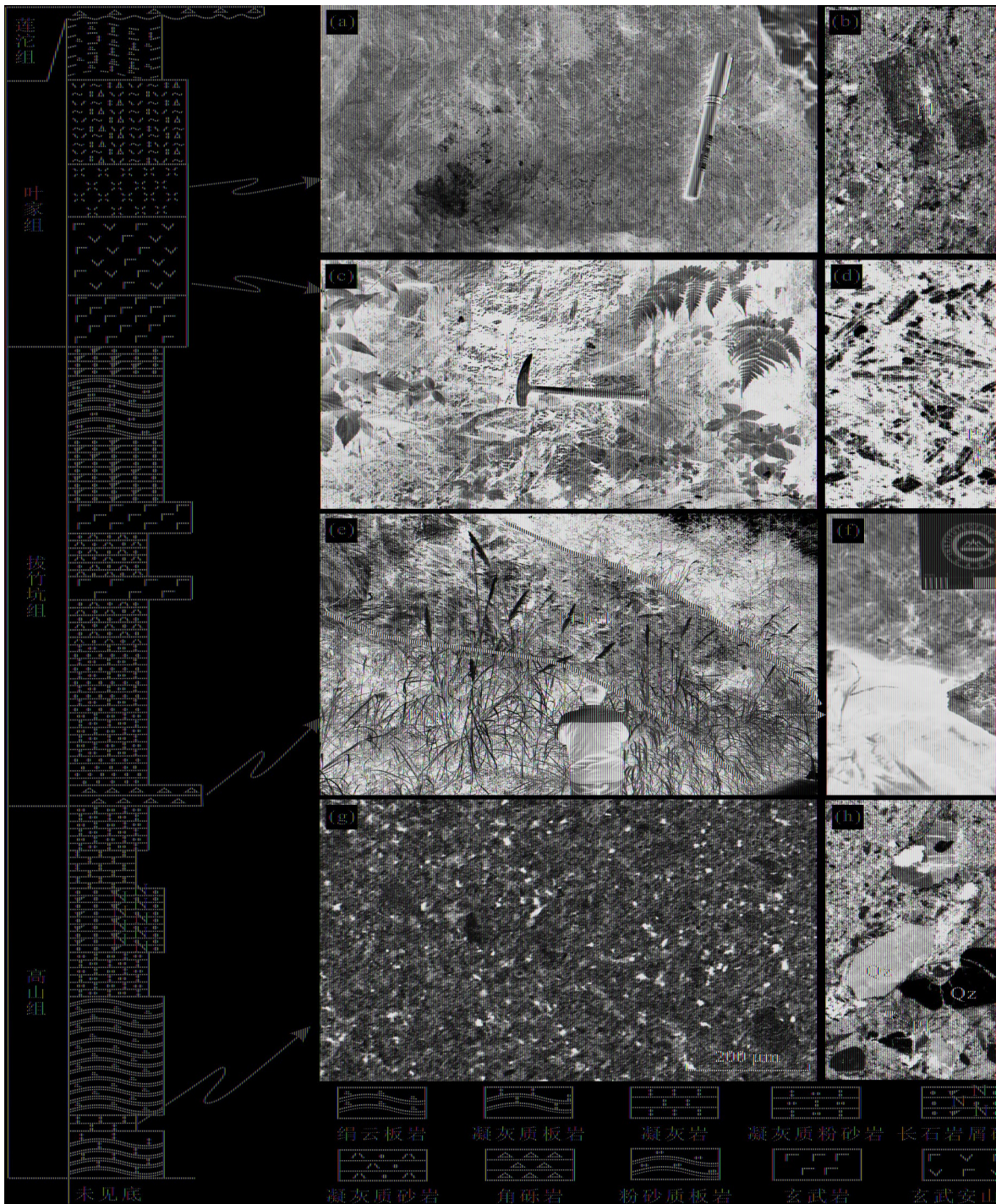


图3 登山群综合柱状图、野外及显微照片

Fig.3 Stratigraphy, field photos and section photomicrograph of the Dengshan Group

a、b. 叶家组流纹岩及镜下特征;c、d. 叶家组玄武岩及镜下特征;e、f. 拔竹坑组底部砾岩;g. 高山组凝灰岩镜下特征;h. 高山组岩屑砂岩镜下特征;Qz. 石英;Pl. 长石;Bt. 黑云母;Py. 辉石;Mt. 磁铁矿

SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $835\pm5$  Ma (王敏, 2011). 湖南地区为冷家溪群, 时代为 879~823 Ma (Wang *et al.*, 2007). 江西地区为双桥山群, 地层形成时代为 879~828 Ma (高林志等, 2008, 2014). 安徽地区为溪口群, 时代为 866~826 Ma (高林志等,

2014). 浙江地区为双溪坞群, 其时代较老 (955~865 Ma) (Li *et al.*, 2009; 高林志等, 2014), 侵入双溪坞群底部平水组的桃红岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $913\pm15$  Ma (Li *et al.*, 2009). 上地层单元主要为板溪群及相关地层, 不整合于下地层单元之

上,地层时代主要集中在820~760 Ma,代表华南新元古代的裂谷沉积.江南造山带西段主要包括广西地区丹洲群,时代为819~765 Ma(高林志等,2014);贵州地区下江群地层时代为814~744 Ma(高林志等,2014);湖南地区的板溪群及高洞群,时代分别为821~768 Ma、821~782 Ma(高林志等,2014).江南造山带东段主要包括安徽地区的历口群,时代为820~777 Ma(Zheng *et al.*, 2008),其中铺岭组主要包括安山岩、凝灰岩及少量凝灰质砂岩;浙西地区为上墅组,时代为800~760 Ma,岩性主要为玄武岩、玄武安山岩、英安岩、流纹岩和凝灰岩(Wang *et al.*, 2012),被780 Ma的石耳山花岗岩侵入(Li *et al.*, 2003).上地层单元同样经历了低绿片岩相变质,褶皱变形形态比较宽缓,被新元古代晚期粗碎屑岩不整合覆盖.

## 1.2 登山群概况及样品特征

登山群一名首见于江西区调队《1:5万德兴幅地质图说明书》中.创名地为江西省弋阳县漆工镇登山村.自下而上划分为高山组、拔竹坑组和叶家组,高山组分别与张村岩组、侏罗系呈断层接触,为一套青灰、灰绿色条带状细粒岩屑砂岩、条带状粉砂绢云板岩、板岩之沉积;拔竹坑组下段为紫红、灰紫色复成分砾岩—含砾岩斑质凝灰岩—含砾凝灰质粗粒岩屑砂岩夹凝灰质板岩,底部发育一套角砾岩,可能与下伏高山组为不整合接触;上段灰绿、灰黄色变余凝灰质细砂岩、凝灰质粉砂岩、细屑沉凝灰岩,中下部夹多层细碧岩、碱性玄武岩,上部夹少量中酸性熔岩;叶家组下部以细碧岩,玄武岩为主夹流纹斑岩,上部以熔结凝灰岩、流纹质凝灰岩、流纹岩为主,偶夹玄武岩或基性熔岩,属裂谷式海相火山岩,上被连沱组粗碎屑岩不整合覆盖(江西省地质矿产局,2017).

采样位置位于江西省弋阳县登山村.年代学样品20161103-12和20161104-9分别为高山组下部的凝灰岩及叶家组流纹岩(图3a, 3g).凝灰岩(20161103-12)镜下观察为凝灰结构(图3g, 3h),岩石由玻屑、火山尘组成.玻屑主呈弧面棱角状、鸡骨状等,混杂分布,已脱玻为隐晶状长英质并具轻微粘土化.流纹岩(20161104-9)岩石为灰褐色,块状构造,斑状结构.斑晶主要为斜长石和石英,斜长石为半自形宽板状、板柱状,聚片双晶纹较细密,石英呈他形粒状,基质主要由斜长石和黑云母组成(图3a, 3b).

地球化学测试样品采自高山组岩屑砂岩(1103-2、1103-6、1103-9、1103-10、1103-11),叶家组流纹岩(1102-9、1102-10、1105-15、1105-17、1105-18)和玄武岩(1103-14、1103-18、1103-19).砂岩镜下可见大量岩屑成分,主要为火山岩岩屑;矿物颗粒主要为斜长石和石英;粒度大小不一,磨圆较差(图3h).玄武岩呈深灰绿色,致密块状构造.镜下观察岩石主要组成矿物为基性斜长石、普通辉石和磁铁矿.斜长石呈规则条板状,表面不干净,格架中充填辉石和磁铁矿颗粒(图3c, 3d),一部分辉石蚀变为绿泥石和绿帘石.

## 2 分析方法

锆石挑选工作在河北廊坊区调所实验室完成,阴极发光图像拍照在北京离子探针中心HITACHI S-3000N扫描电镜上完成,锆石U-Pb定年于中国地质科学院北京离子探针中心SHRIMP-II上进行.仪器的质量分辨率为5 000(1%峰高),一次流 $O^{2-}$ 强度为4~6 nA.一次流束斑直径为23  $\mu\text{m}$ ,每个测点均扫描5次.元素间的分馏校正及U含量标定采用标准锆石TEM来进行;TEM具有U-Pb谐和年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $416.8 \pm 1.1$  Ma,但U、Th及Pb含量不均一.采用Ludwig博士编写的Squid和Iso-plot程序进行原始数据处理和锆石U-Pb谐和图绘制.普通铅校正使用 $^{204}\text{Pb}$ 进行.年龄误差为1 $\sigma$ 绝对误差,同位素比值的误差为1 $\sigma$ 相对误差; $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为95%的置信度误差.

全岩主微量分析测试工作在国家地质实验测试中心进行.主量元素分析测试使用X射线荧光光谱仪(XRF-1500),其分析精度高于5%.微量以及稀土元素测试分析使用等离子质谱仪(PE300D),分析结果以 $10^{-6}$ 为单位.

锆石微区原位Lu-Hf同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行.使用的仪器为193 nm准分子激光剥蚀系统(RESOLUTION M<sup>-50</sup>, ASI).能量密度为6 J/cm<sup>2</sup>,频率5 Hz,斑束44  $\mu\text{m}$ ,使用高纯氦气作为载气,为280 mL/min. Lu-Hf同位素分析采用的是多接收等离子体质谱(Nu Plasma II MC-ICP-MS),具有16个Faraday Cup和5个电子倍增器.Zoom电子光学透镜系统可在不同同位素之间快速切换.分馏校正使用指数法则, $^{176}\text{Lu}$ 和 $^{176}\text{Yb}$ 对 $^{176}\text{Hf}$ 的干扰用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.026\ 56$ 以及 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}=0.786\ 96$ 的比值消除.Hf和Lu同位

素比值采用 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.732\ 5$ 进行仪器质量歧视效应校正,仪器的质量歧视效应使用 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}=1.123\ 46$ 来校正.分析时,采用标准锆石 91500 和 Mudtank 作为监控样品.

### 3 结果

#### 3.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

样品 20161103-12 和 20161104-9 的锆石虽然具有不同的形态,但是在阴极发光图像下都显示出典型的岩浆生长震荡环带与韵律结构.进行定年的锆石晶型完好,颜色较浅,呈透明或半透明钝圆形或者不规则状,粒度变化范围为 $50\sim 200\ \mu\text{m}$ .所有锆石的分析点均位于明显的岩浆环带位置(图 4).

对样品 20161103-12 的 18 颗锆石进行 U-Pb 定年,获得 18 组数据和对应的锆石年龄,其 U 含量为 $56\times 10^{-6}\sim 545\times 10^{-6}$ ,Th 含量为 $31\times 10^{-6}\sim 723\times 10^{-6}$ ,Th/U 比值为 $0.46\sim 2.05$ ,为岩浆成因.其中测点 3.1 和 5.1 年龄明显偏大,可能为捕获锆石,测点

6.1 年龄明显偏小,根据 CL 图可以看到,测点在核与边的结合部,可能为混合年龄.剔除年龄较大的数据点(3.1、5.1)和年龄明显偏小的数据点(6.1),其余 15 数据点均位于谐和线上或附近,且年龄值比较集中(图 5),它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为 $(855.5\pm 8.2)\ \text{Ma}$ ,MSWD=1.3,该年龄代表高山组凝灰岩年龄.

对样品 20161104-9 的 18 颗锆石进行 U-Pb 定年,获得 18 组数据和对应的锆石年龄,其 U 含量为 $165\times 10^{-6}\sim 2074\times 10^{-6}$ ,Th 含量为 $52\times 10^{-6}\sim 762\times 10^{-6}$ ,Th/U 比值为 $0.24\sim 0.51$ ,指示他们为岩浆成因.其中有 3 个测点(7.1、13.1、17.1)年龄明显偏小,可能是后期变质作用导致.测点 3.1 年龄明显偏大,可能是因为分析点靠近核部,数据代表混合年龄.剔除年龄较大的数据点(3.1)和年龄明显偏小的数据点(7.1、13.1、17.1),其余 14 个数据点全部位于谐和线或附近,且年龄值比较集中(图 5),它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为 $798.1\pm 7.8\ \text{Ma}$ ,MSWD=1.7,该年龄代表了叶家组流纹岩年龄.

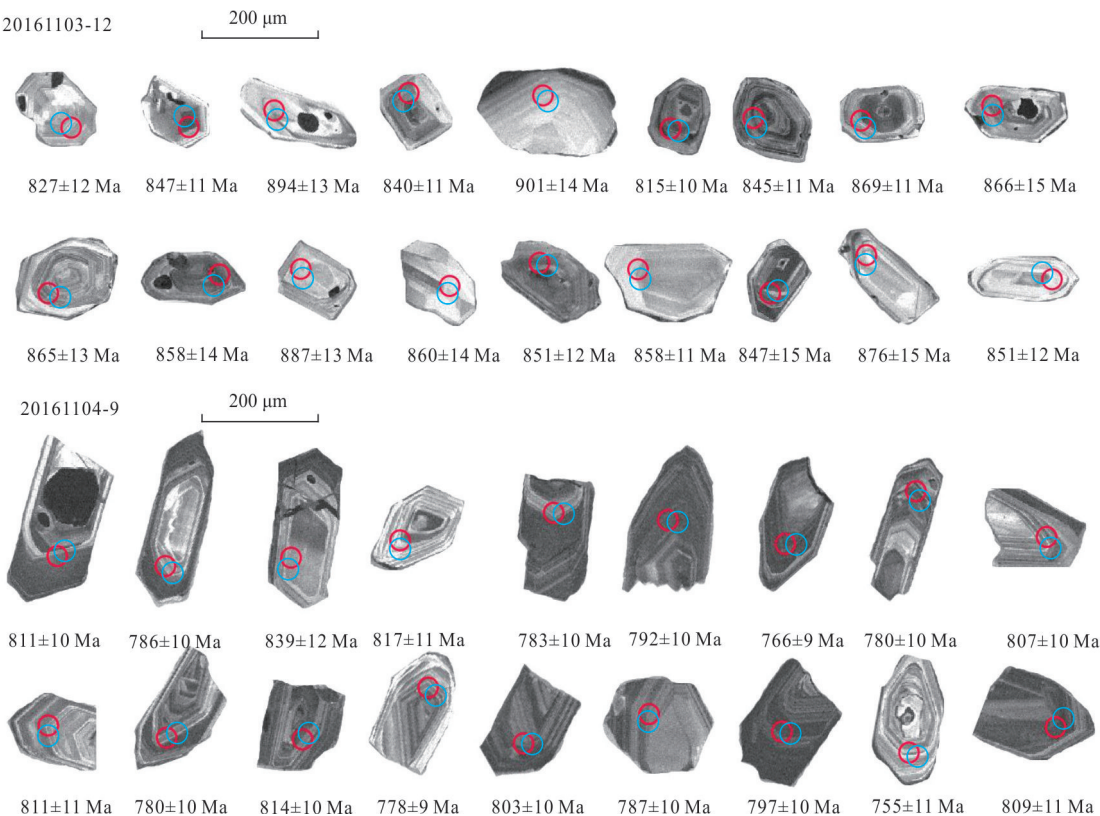


图 4 凝灰岩和流纹岩锆石 CL 图像

Fig.4 Cathodoluminescence images of the zircons from tuff and rhyolites  
红色圆圈为锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分析点,蓝色圆圈为锆石 Hf 同位素分析点

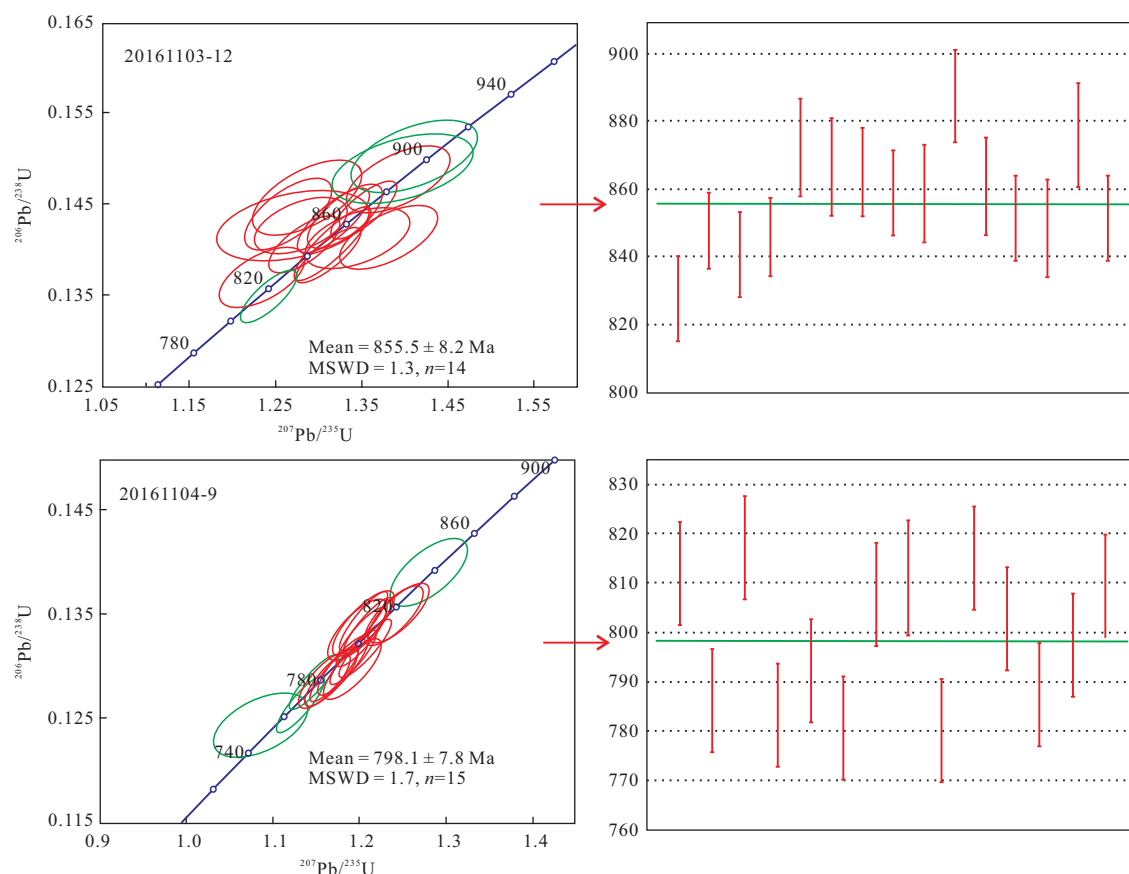


图5 高山组凝灰岩和叶家组流纹岩U-Pb年龄谱和图

Fig.5 U-Pb concordia plots for zircons from Gaoshan and Yeji Formations

### 3.2 地球化学特征

高山组砂岩  $\text{SiO}_2$  含量为 64.02%~72.63%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量中等—偏高(10.98%~16.46%),  $\text{CaO}$  含量为 0.04%~1.87%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量中等(5.71%~7.39%);  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 1.20%~3.55%;  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 0.09%~3.79%;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  含量较低,说明样品钾长石含量较低而斜长石含量较高;  $\text{MgO}$  含量为 0.52%~2.14%;  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量为 0.08%~0.87%。高山组主量元素  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14%)、 $\text{MgO}$  (1.7%)、 $\text{Na}_2\text{O}$  (2.1%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  (0.2%)、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  (1.2%) 和  $\text{FeOt}+\text{MgO}$  (4.0%) 的平均值与大陆岛弧和活动大陆边缘具有一致性(Bhatia and Crook, 1986)。

叶家组流纹岩  $\text{SiO}_2$  含量较高,为 73.02%~78.00%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 3.53%~5.04%;  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 0.80%~5.01%;  $\text{MgO}$  含量为 0.17%~0.24%;  $\text{TiO}_2$  含量为 0.04%~0.44%。样品发生了不同程度的蚀变,化学性质较活泼的元素(例如 Na、Rb、Sr 等)可能发生迁移,我们用相对不活泼的元素(高场强元素和 REE)比值进行岩石类型判别,在  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ -Nb/Y 图解中,样品落入流纹岩范围(图 6a);在  $\text{SiO}_2$ -

$\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$  图解中,样品落入铁质系列范围(图 6d),与典型 A 型花岗岩相似(Eby, 1992);在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解中,样品落入高钾钙碱性范围(图 6c)。叶家组流纹岩属于高钾钙碱性铁质流纹岩系列。样品具有较高的稀土含量,  $\Sigma\text{REE}=106\times 10^{-6}\sim 213\times 10^{-6}$ ,轻、重稀土元素中等分异( $\text{LREE}/\text{HREE}=2.55\sim 6.88$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N=1.4\sim 7.22$ )。球粒陨石标准化曲线呈较平滑的右倾型, Eu 具有明显负异常( $\delta\text{Eu}=0.03\sim 0.74$ )(图 7a)。在原始地幔微量元素蛛网图中(图 7b),相比高场强元素,流纹岩更富集大离子亲石元素,并且具有明显的 Nb、Sr、P 和 Ti 负异常,稀土及微量元素配分模式与江南造山带东段 800~760 Ma 的酸性岩一致(图 7a, 7b)。

叶家组玄武岩  $\text{SiO}_2$  含量为 51.42%~53.03%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 0.90%~2.57%;  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 2.70%~3.16%;  $\text{MgO}$  含量为 2.17%~2.38%;  $\text{TiO}_2$  含量为 2.52%~2.63%。在  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ -Nb/Y 图解中,样品落入亚碱性玄武岩范围(图 6a);在  $\text{SiO}_2$ - $\text{FeOt}/\text{MgO}$  图解中,样品落入拉斑系列,属于拉斑玄武岩系列。玄武岩稀土含量较高,  $\Sigma\text{REE}=282\times 10^{-6}\sim 307\times 10^{-6}$ ,

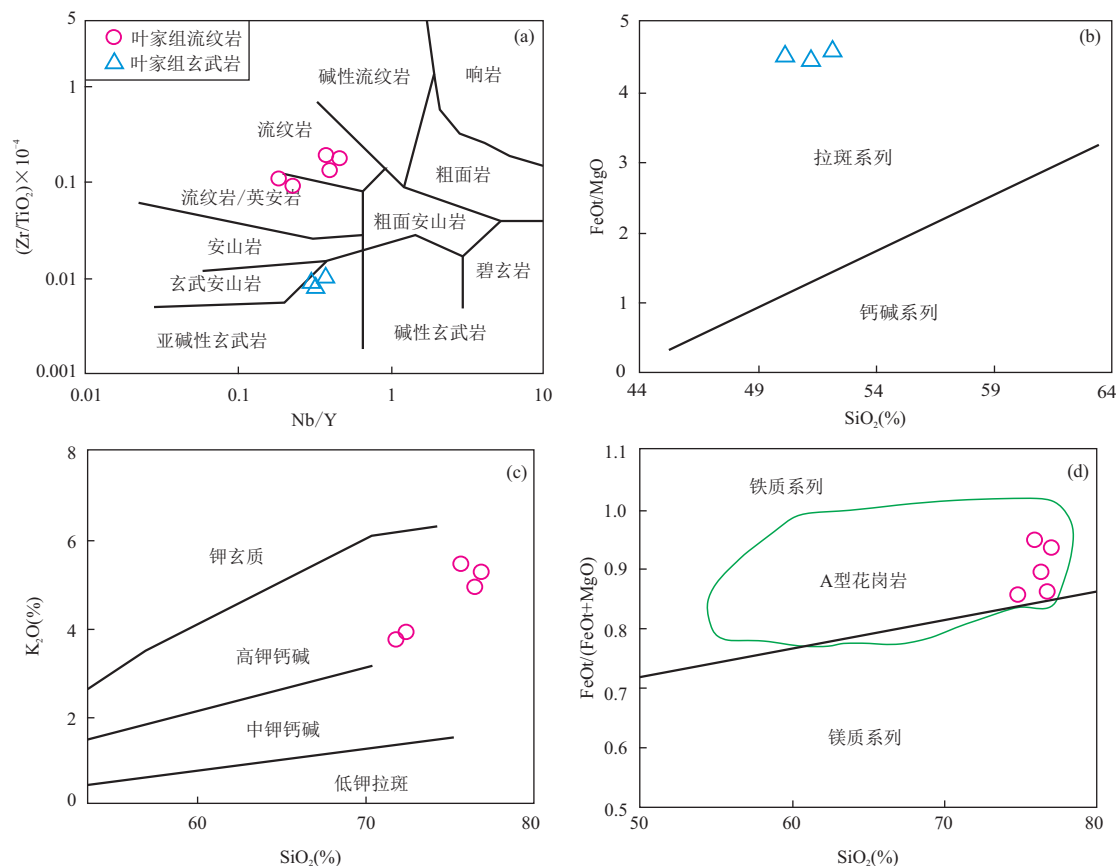


图 6 叶家组流纹岩石分类图解

Fig.6. Rock classification diagram of the rhyolites in the Yeji Formation

a.  $\text{Nb}/\text{Y}-(\text{Zr}/\text{TiO}_2) \times 10^{-4}$  分类图解 (Winchester and Floyd, 1976); b.  $\text{SiO}_2\text{-FeOt}/\text{MgO}$  分类图解; c.  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  分类图解; d.  $\text{SiO}_2\text{-FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$  分类图解

轻、重稀土元素分异明显 ( $\text{LREE}/\text{HREE}=4.07\sim 4.58$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=3.73\sim 4.23$ ). 球粒陨石标准化曲线呈右倾型, Eu 具有轻微负异常 ( $\delta\text{Eu}=0.71\sim 0.85$ ) (图 7c). 在原始地幔微量元素蛛网图中 (图 7d), 样品具有明显的 Nb、Ta、Sr、和 Ti 负异常, Zr、Hf 无明显正异常.

### 3.3 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素分析在用于 U-Pb 定年的锆石上进行, 样品 20161103-12 锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  初始比值为  $0.281\,916\sim 0.282\,716$ ;  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化范围较大, 为  $-12.3\sim 12.9$ , 绝大部分为负值 (图 8); 两阶段 Hf 模式年龄 ( $T_{\text{DM}2}$ ) 为  $1\,102\sim 2\,518$  Ma. 说明凝灰岩主要来自古—中元古代的古老基底, 部分来自中元古代俯冲洋壳再循环形成的新生岛弧. 样品 20161204-9 锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  初始比值为  $0.282\,474\sim 0.282\,615$ ;  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  全部为正值 ( $6.1\sim 11.2$ ) (图 8); 两阶段 Hf 模式年龄 ( $T_{\text{DM}2}$ ) 为  $996\sim 1\,199$  Ma. 说明叶家组流纹岩来自中元古代晚期—新元古代早期的初生地壳.

## 4 讨论

### 4.1 地层时代

随着测年方法的不断更新, 武陵/四堡运动不整合面上、下地层已经获得大量年龄数据, 对武陵/四堡运动的时限以及地层对比进行了有效的约束. 但是江南造山带东段登山群出露范围有限, 目前为止只有陈思本和徐祖丰 (1988) 在叶家组顶部英安岩测得了  $817.6\pm 83$  Ma 的 Rb-Sr 全岩等时线年龄; Yao *et al.* (2015) 通过碎屑锆石 LA-ICP-MS 年龄获得登山群最大沉积年龄为 810 Ma, 基于此, 前人将登山群划归到不整合面上部地层单元. 但是由于登山群下部缺少直接定年结果, 并且 Rb-Sr 同位素体系容易受到后期构造热事件的叠加干扰, 所以登山群地层时代需要重新进行厘定.

前人已于江南造山带新元古代地层中获得大量高精度年代学数据: (1) 贵州地区梵净山群余家沟组晶屑凝灰岩锆石 U-Pb 年龄为  $851.3\pm 4$  Ma; 不

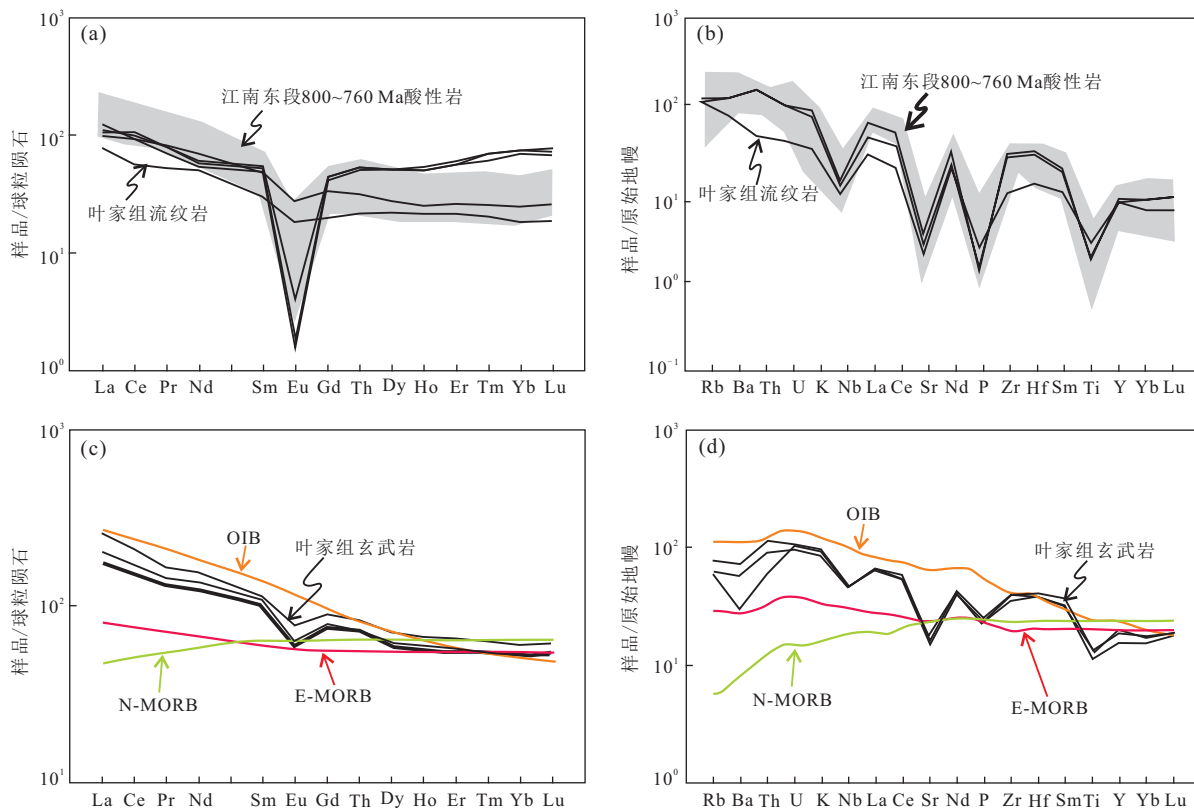


图7 叶家组流纹岩及玄武岩稀土元素配分曲线及微量元素蛛网图

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns and trace elements spider diagram of rhyolites and basalts of Yejia Formation  
据 McDonough and Sun(1995)

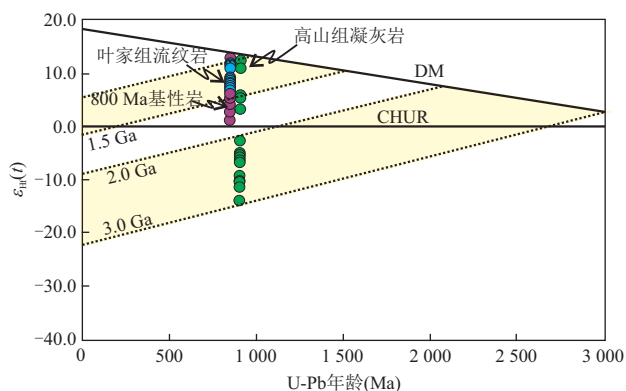


图8 高山组凝灰岩和叶家组流纹岩锆石Hf同位素演化图解  
Fig.8 Plots of  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -age for zircon grains from the tuff in the Gaoshan Formation and rhyolite in the Yejia Formation  
800 Ma基性岩数据引自邓奇(2016)

整合面之上的下江群甲路组中一基性熔岩年龄为  $815 \pm 5$  Ma(曾雯等, 2005), 凝灰岩定年结果为  $814 \pm 6$  Ma(高林志等, 2010). (2) 黔桂交界处四堡群斑脱岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $841 \pm 5$  Ma; 上部丹洲群合桐组二段凝灰岩夹层年龄为  $801 \pm 4$  Ma, 三门街组英安岩年龄为  $765 \text{Ma} \pm 14$  Ma(崔

晓庄等, 2014; 高林志等, 2014). (3) 湖南冷家溪群碎屑岩最大沉积年龄为 862 Ma, 顶部安山质熔岩年龄为  $823 \pm 6$  Ma(Wang *et al.*, 2007); 上部板溪群五强溪组凝灰岩年龄为  $809 \pm 8.4$  Ma(张世红等, 2008). (4) 浙江地区双溪坞群章村组流纹岩年龄为  $891 \pm 12$  Ma, 北坞组流纹岩年龄为  $926 \pm 15$  Ma(Li *et al.*, 2009), 侵入双溪坞群粒玄岩年龄为  $849 \pm 7$  Ma(Li *et al.*, 2008); 其上河上镇群骆家门组底部花岗质砾岩年龄为  $879 \pm 4.5$  Ma(高林志等, 2014)、凝灰岩年龄为  $868 \pm 6.4$  Ma(未发表数据), 虹赤村组火山岩年龄为  $797 \pm 11$  Ma(Li *et al.*, 2003), 上墅组凝灰岩时代为  $767 \pm 5$  Ma、 $792 \pm 11$  Ma(高林志等, 2008; Li *et al.*, 2008). (5) 江西地区双桥山群横涌组和安乐林组斑脱岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $831 \pm 5$  Ma、 $829 \pm 5$  Ma(高林志等, 2008).

本文获得的登山群高山组下部凝灰岩年龄为  $855.5 \pm 8.2$  Ma, 叶家组流纹岩年龄为  $798.1 \pm 7.8$  Ma, 对比前人获得的年龄数据, 登山群高山组层位与梵净山群及同时期地层相当(图9), 属于武陵/四堡运动不整合面下部的构造地层单元; 而

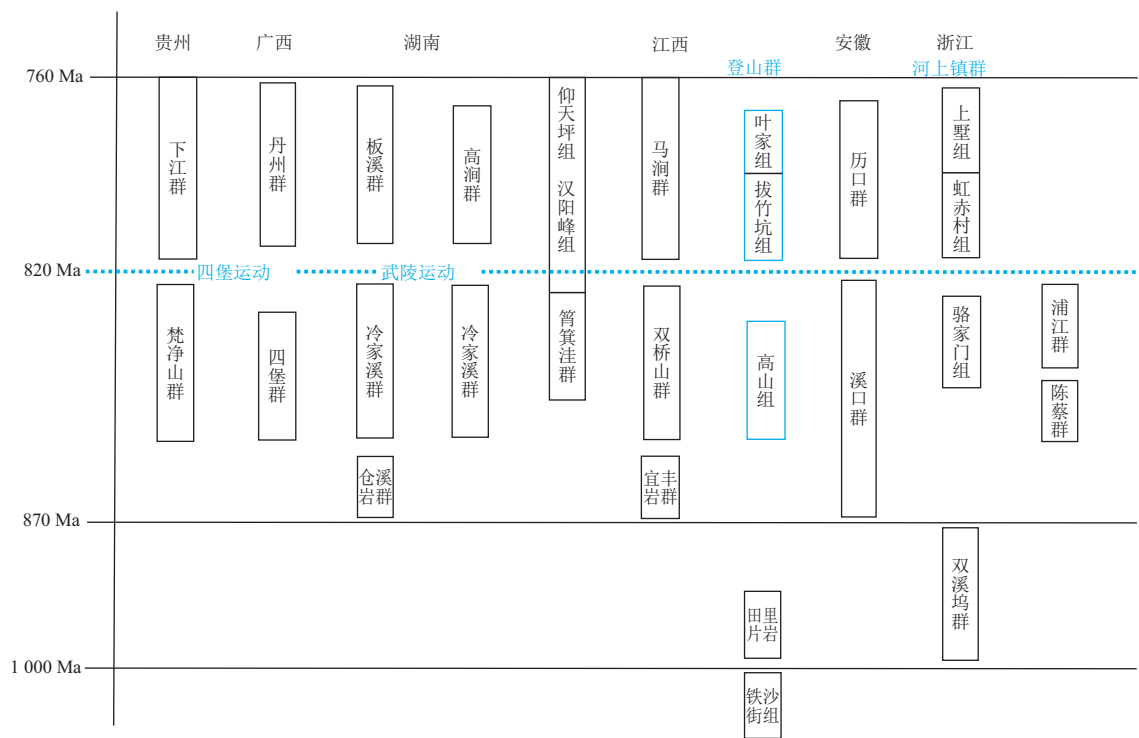


图9 江南造山带中、新元古代地层对比  
Fig.9 Correlation of Meso - Neoproterozoic strata in the Jiangnan orogenic belt  
据高林志等(2014)修改

叶家组层位与板溪群及同时期地层相当(图9),值得注意的是,高山组与拔竹坑组之间发育的砾岩(图3),可能代表了二者之间存在的构造不整合面,拔竹坑组与叶家组应属于不整合面之上的上构造地层单元,与浙西地块上的河上镇群沉积及构造序列演化一致(高林志等,2008)(图9).

4.2 岩石成因及构造背景

4.2.1 高山组砂岩 化学蚀变指数 CIA (chemical index of alteration) 是分析碎屑岩物源的风化程度的重要指标 (Fedo *et al.*, 2003). 高山组 CIA 值为 59.9~80.7, 大部分样品 CIA 值小于 70, 说明砂岩经历了中等程度的风化作用. Th、Sc 元素分别富集在酸性、基性岩中, Th/Sc 比值不会随着沉积再循环而发生变化; Zr 主要存在于稳定性强的锆石中, 并且会随着再循环作用在沉积物中富集, 因此 Zr/Sc 可以代表再循环作用的程度 (McLennan *et al.*, 1995). 在 Th/Sc-Zr/Sc 判别图中, 砂岩沿岩浆演化趋势分布, 其原岩介于花岗岩和安山岩之间 (图 10a). 在 TiO<sub>2</sub>-Ni 判别图解中, 高山组砂岩落在上地壳和酸性岩范围 (图 10b). 因此, 高山组砂岩物源主要以中性和酸性岩为主, 沉积分选和再循环作用影响不大, 成熟度高的沉积岩在其物源区分布相对较少.

高山组岩屑砂岩含较多火山岩屑; 矿物碎屑主要为石英和长石, 长石含量较高, 碎屑颗粒大小不一, 分选磨圆差 (图 3h); 在 La-Th-Sc、Th-Sc-Zr/10 判别图解中 (图 11), 高山组砂岩落入大陆岛弧区域及附近. 以上特征说明砂岩为一套近源沉积, 其物源区应为岛弧火山岩. 登山群地处江山-绍兴断裂带与赣东北断裂带交叉部位, 南部为代表岩浆弧的双溪坞群, 其时代为 960~850 Ma (Li *et al.*, 2009; 高林志等, 2014); 北侧为代表华南分支的赣东北蛇绿岩带. 综合岩相学及构造古地理格局, 高山组应属于弧后盆地陆表海沉积.

4.2.2 叶家组流纹岩 长期以来关于花岗岩的分类方案不断出现, 目前为止可以划分为 I、S、M 和 A 型 4 种花岗岩 (Pitcher, 1983). 叶家组流纹岩富集大离子亲石元素, 具有明显的 Nb、Sr、P 和 Ti 负异常 (图 7b), Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O、FeOt/(FeOt+MgO) 和 Ga/Al 值较高, 与 A 型花岗岩的地球化学特征吻合, 在 Zr-10 000×Ga/Al 和 Nb-10 000×Ga/Al 判别图解中, 样品落入 A 型花岗岩范围 (图 12). 高分异 I 型花岗岩与 A 型花岗岩具有相似的地球化学特征 (King *et al.*, 2001), 因此需要排除高分异 I 型花岗岩的可能性. A 型花岗岩相对于 I 型花岗岩的 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O,

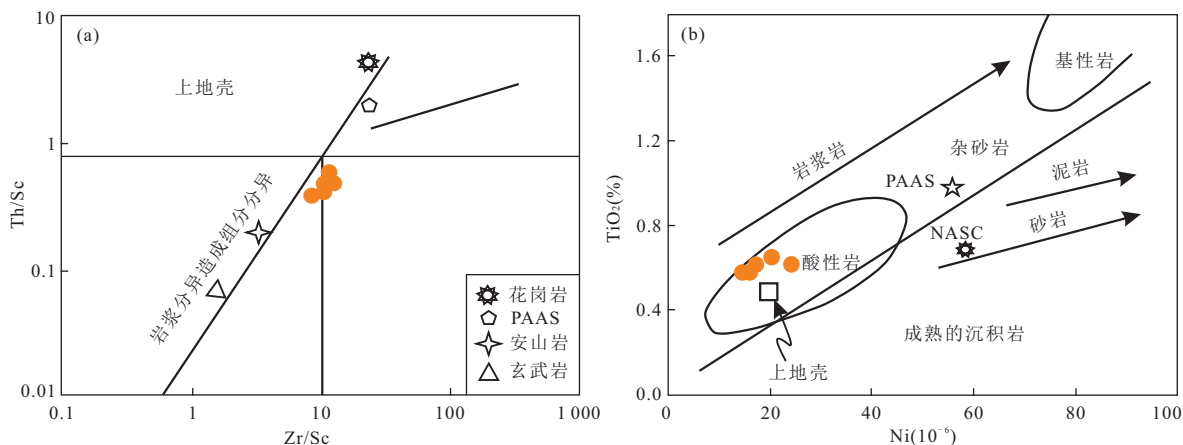
图10 高山组砂岩 Th/Sr-Zr/Sc(a)和  $\text{TiO}_2$ -Ni(b)物源判别图解

Fig. 10 Source rock discrimination diagrams plots for the Gaoshan Formation sediments. (a) Th/Sr-Zr/Sc diagram, (b)  $\text{TiO}_2$ -Ni plot

据 Floyd *et al.* (1989)

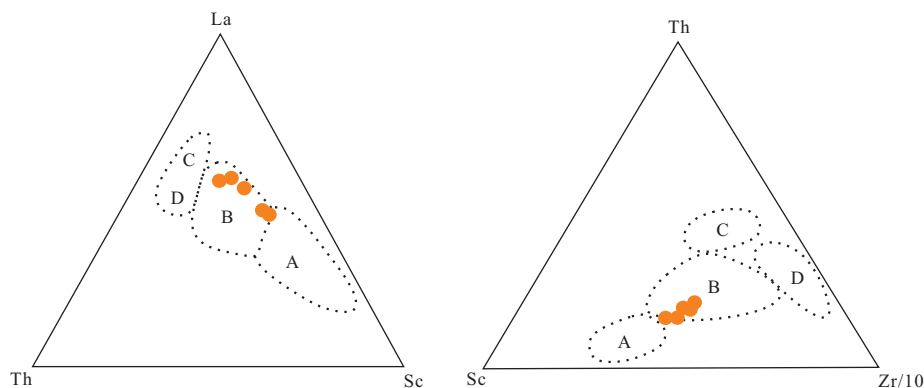


图11 高山组砂岩 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 判别图解

Fig. 11 La-Th-Sc and Th-Sc-Zr/10 diagram of Gaoshan Formation sediments

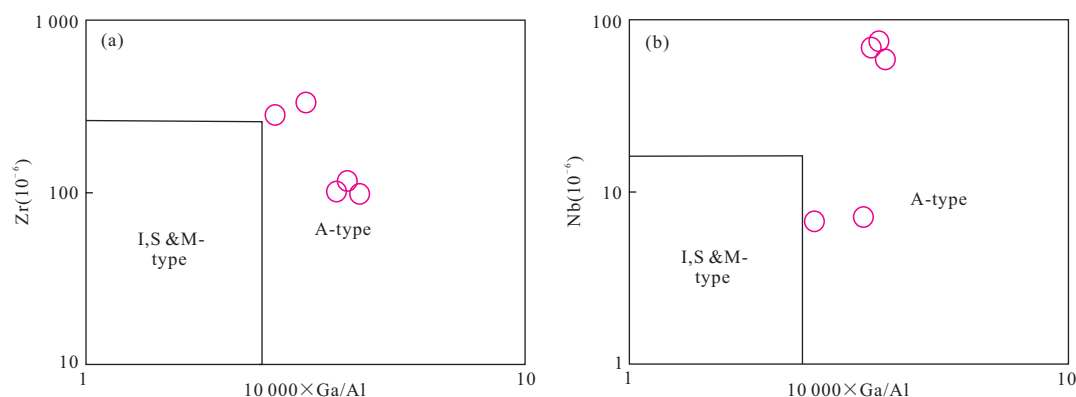
据 Bhatia and Crook (1986); A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动陆缘; D. 被动陆缘

Fe/Mg 和 Ga/Al 值更高,同时 CaO 和 Sr 含量较低 (Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992),因此叶家组流纹岩属于典型的 A 型花岗岩系列。

关于 A 型花岗岩的成因主要包括:(1)幔源玄武质岩浆的分离结晶;(2)幔源基性岩浆和壳源岩浆的混合;(3)地壳物质的部分熔融 (Whalen *et al.*, 1987; Turner *et al.*, 1992)。笔者认为,叶家组流纹岩不可能来自幔源玄武质岩浆分离结晶或者壳幔混染作用。叶家组流纹岩与区域上同时期的基性岩在主微量元素组成上没有相关性(图 13),因此直接来自地幔熔体分离结晶的可能性较小 (Takagi *et al.*, 1999);另外高  $\text{SiO}_2$  以及低 MgO ( $<0.17\%$ ) 说明叶家组流纹岩不可能直接来自地幔物质的低程度部分熔融。江南造山带新元古代岩浆岩主要以中酸性岩为主,假设上述岩浆岩直接来自地幔物质或者有

地幔物质参与,这就需要大量的基性岩浆来作为“母源”,但是江南造山带东段基性岩所占比例较少。叶家组流纹岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为正,二阶段模式年龄与成岩年龄相近,并且  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值与江南造山带  $\sim 800$  Ma 的基性岩相近(图 8),因此叶家组流纹岩最有可能来源于早期初生地壳的部分熔融。另外,流纹岩 MgO 含量较低,这可能与富集 MgO 的矿物的分离结晶有关, Eu 和 Sr 的负异常与斜长石的分离结晶作用有关, Ti 的负异常说明存在钛铁矿的分离结晶,以上说明分离结晶在成岩过程中也发挥了重要作用。

在 Nb-Y 构造判别图解中 (Pearce, 1996), 叶家组流纹岩落在 WPG (板内花岗岩) 区域(图 14b), 说明流纹岩形成于裂谷环境下。Eby (1992) 将 A 型花岗岩分为 A1 和 A2 两个亚类, A1 型花岗岩为非造山型花岗岩, 来自地幔物质并且发育于非造山环境,

图 12 叶家组流纹岩判别图解(据 Whalen *et al.*, 1987)Fig.12 Geochemical discrimination diagrams of Whalen *et al.*(1987) for the rhyolites in the Yejia Formation

如大陆裂谷或者其他板内环境. A2型花岗岩为后造山型花岗岩, 来源大陆地壳重熔. 在 Nb - Y - Ce 判别图解中(图 14a), 叶家组流纹岩全部落在 A2 型花岗岩范围, 说明叶家组流纹岩形成于造山作用之后的板内裂谷环境, 该时期江南造山带以伸展构造体制为主. 值得注意的是, 叶家组流纹岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为正值, 暗示了华南地区 800 Ma 的裂谷作用可能由于造山结束后的地幔物质上涌导致.

**4.2.3 叶家组玄武岩** 分离结晶和地壳混染在幔源玄武质岩浆上升及成岩过程中发挥着不可忽视的作用, 因此在分析岩石成因及构造背景之前需要评估分离结晶与围岩混染作用的程度. 叶家组玄武岩 FeO<sub>t</sub> 与 MgO 为正相关关系(图略), 说明存在橄榄石的分离结晶; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 与 MgO 为正相关关系, 说明岩浆经历了单斜辉石的分离结晶; TiO<sub>2</sub> 与 MgO 为正相关关系, 不存在 Fe-Ti 氧化物分离结晶; Eu 存在负异常, 说明经历了斜长石的分离结晶. 地壳物质亏损 Nb、Ta, 富集 Zr、Hf, 所以幔源岩浆受到地壳混染后必然会出现 Nb-Ta 负异常以及 Zr-Hf 正异常. 叶家组玄武岩无明显 Zr-Hf 正异常(图 7d), 暗示没有经历地壳物质混染或者混染程度微弱. 另外, 研究区内及邻区 800 Ma 基性岩锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值均大于零, 也反应了不存在地壳物质的混染(图 8).

叶家组玄武岩具有 OIB 特征, 主要证据如下: (1) 稀土元素配分模式与 OIB 相似, 富集轻稀土和大离子亲石元素; (2) Nb/Ta (15.2~15.9) 和 Zr/Hf (36~39.6) 比值与 OIB 接近 (Nb/Ta=17, Zr/Hf=36; Hofmann, 1997); (3) 在 Ti/1 000-V 图解中, 样品全部落在 OIB 范围(图 14c).

OIB 主要来自地幔柱 (Sobolev and Nikogosian, 1994) 或者软流圈地幔 (Hofmann, 1997). 叶家组玄

武岩具有较高的 TiO<sub>2</sub> 含量, Zr-Hf 无明显负异常, 高场强元素含量与 OIB 接近. 同时较低的 La/Yb 值以及较高的 Nb/La 值暗示了玄武岩源区为软流圈地幔. 另外, 江南造山带新元古代岩浆岩主要以酸性岩为主, 而基性—超基性岩分布范围有限, 并且  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  几乎全部为正值, 与地幔柱成因的岩浆岩具有较大区别 (Yao *et al.*, 2014). 综上所述, 笔者认为叶家组玄武岩应来自软流圈地幔的部分熔融. 在 Zr-Zr/Y 判别图解中(图 14d), 样品落入 WPB 范围及附近, 说明叶家组玄武岩形成于板内伸展环境. 综上所述, 叶家组玄武岩应来自伸展背景下的上涌的软流圈地幔部分熔融, 岩浆上升及成岩过程中经历了不同程度的分离结晶作用, 无明显的地壳混染作用.

### 4.3 构造背景

江南造山带新元古代早—中期构造演化过程长期以来存在争议. 一种观点认为扬子与华夏陆块之间的洋陆俯冲于 900 Ma 左右结束, 860~740 Ma 华南地区发育持续的裂谷作用及大范围的板内非造山岩浆活动 (Li *et al.*, 2008). 另外一种观点认为扬子与华夏陆块碰撞拼贴时限晚至 820 Ma, 造山作用结束后华南裂谷盆地启动 (Wang *et al.*, 2012; Zhao, 2015). 另有部分学者提出扬子东南缘洋—陆俯冲持续至古生代, 扬子与华夏陆块新元古代时期并未发生碰撞拼贴 (张克信等, 2018; 唐增才等, 2020).

#### 4.3.1 新元古代岛弧—弧后盆地 (860~830 Ma) Li

(1999) 提出与 Rodinia 超大陆汇聚有关的江南造山带形成于 900 Ma 左右, 860~740 Ma 期间由于地幔柱活动导致 Rodinia 超大陆裂解. 该模式认为江南造山带新元古代中期岩浆活动与地幔柱相关. 根据前人研究, 江南造山带 860~830 Ma 的岩浆岩具有带

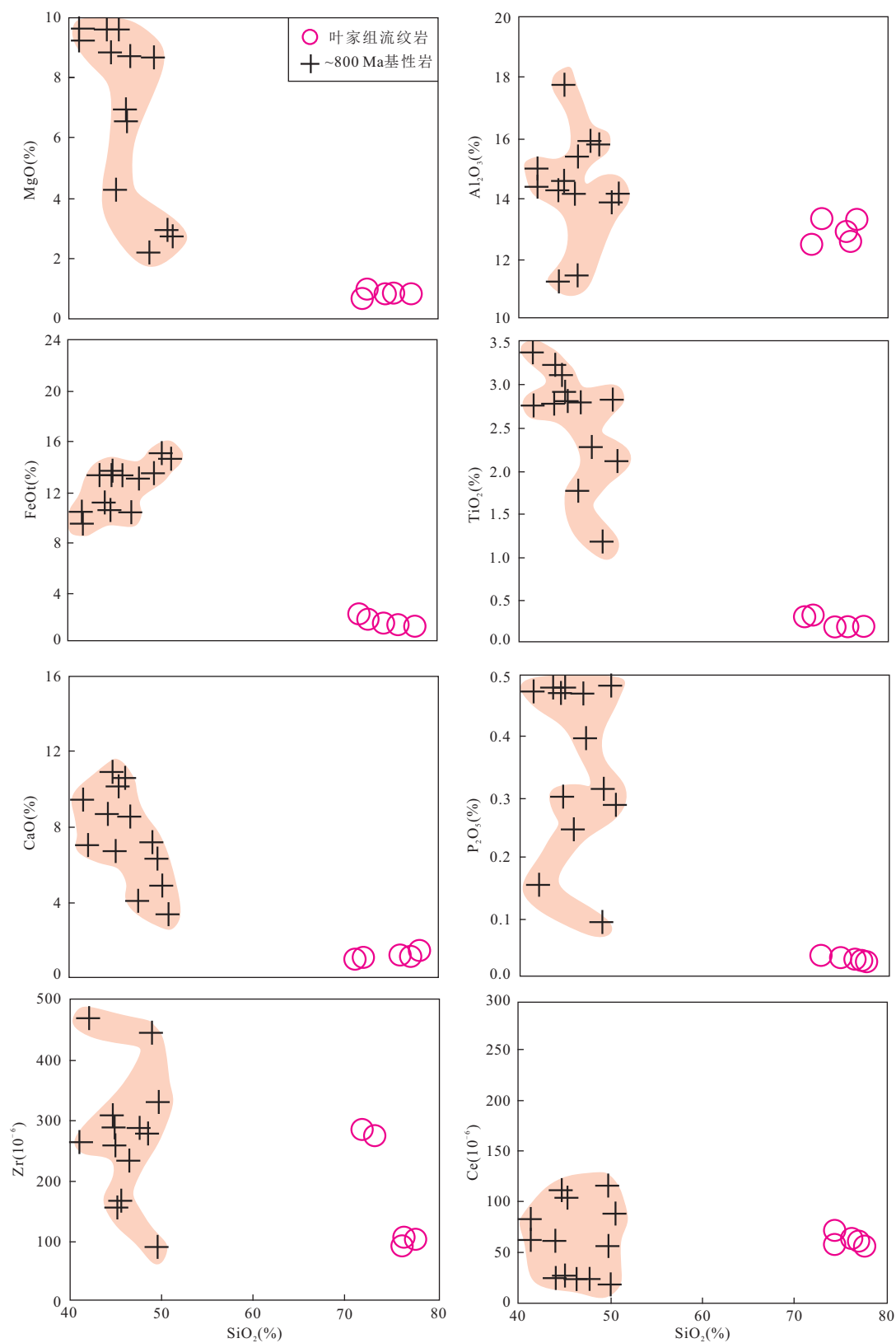


图 13 叶家组流纹岩及同时期基性岩主微量元素哈克图解

Fig.13 Harker diagrams of the rhyolites in the Yejia Formation

800 Ma 基性岩数据引自夏林圻等(2009)

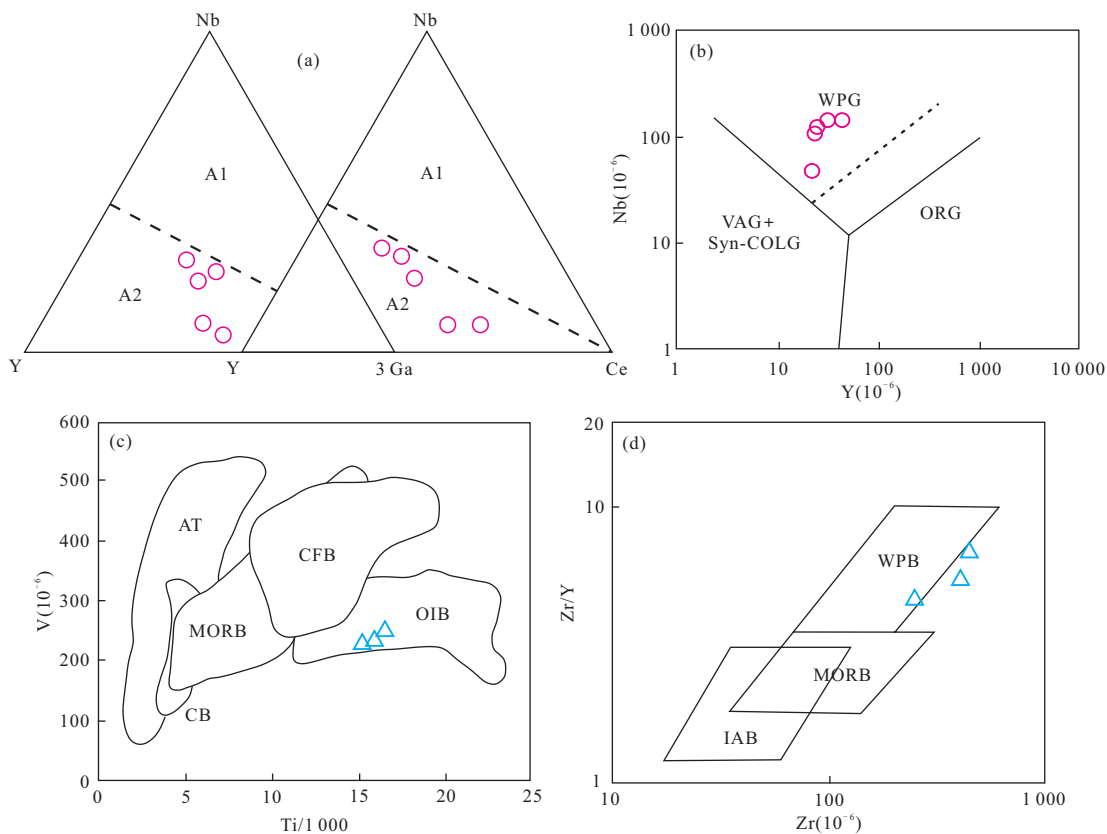


图 14 叶家组流纹岩和玄武岩构造背景判别图解

Fig.14 Plots of the rhyolites and basalts from Yejia Formation

(1) Nb-Y-Ga, Nb-Y-Ce 图解 (Eby, 1992); (b) Nb-Y 图解 (Pearce *et al.*, 1984); (c) Ti/1 000-V 图解; (d) Zr-Zr/Y 图解

状分布的特征,与地幔柱成因的岩浆岩呈放射状分布特征不同;地幔柱模式成立的前提是华南地区地幔柱活动至少要持续 120 Ma(860~740 Ma),这显然不符合地幔柱成因的岩浆活动持续时间较短的特点(Ernst and Desnoyers, 2004; Yao *et al.*, 2014).

前人已对江南造山带 860~830 Ma 的岩浆岩进行了详细的研究:Yao *et al.*(2013)获得双溪坞群的弧前盆地沉积年龄为 860 Ma.Li *et al.*(2008, 2009)认为双溪坞群形成于活动大陆边缘弧.Yao *et al.*(2014)通过分析浙西道林山 860 Ma 的辉绿岩地球化学特征认为江南造山带东段在 860 Ma 发育一系列岩浆弧.Zhang *et al.*(2013)在江南造山带东段九岭地体识别出与俯冲作用相关的岩石组合.前人研究表明 860 Ma 左右仍存在明显的洋陆俯冲.浙西地块河上镇群骆家门组地层时代为 868~824 Ma(高林志等, 2008 及未发表数据),沉积学及地球化学特征指示骆家门组为弧前盆地深海一半深海沉积序列.Zhang *et al.*(2013)在皖南伏川地区获得 847、838 Ma 的基性岩年龄,地球化学数据显示其具有 N-MORB 特征,形成于弧后盆地环境,此时扬子和华

夏两陆块尚未碰撞拼合,江南造山作用应该发生在此之后.

本文获得登山群高山组沉积时限在 855 Ma 左右,碎屑岩地球化学特征显示高山组为弧后盆地沉积.以上证据阐明江南造山带东段 860~830 Ma 期间存在岛弧—弧后盆地系统,扬子与华夏陆块并未碰撞拼贴.近期研究表明,江南造山带发育大量 830~820 Ma 的 S 型花岗岩,包括桂北的寨滚岩体、本洞岩体、三防岩体、元宝山岩体(Li, 1999);黔东南的梵净山岩体(王敏等, 2011; Zhao *et al.*, 2011);湘东北的张邦源岩体、罗里岩体、葛藤岭岩体、张坊岩体(邓奇等, 2016);赣北的九岭岩体和皖南的许村岩体、歙县岩体、休宁岩体(Li *et al.*, 2003b),上述花岗岩侵入到江南造山带新元古代早期地层中,岩石普遍出现堇青石或白云母,与造山作用相关,代表了扬子东南缘弧后盆地的关闭(邓奇等, 2016).

**4.3.2 新元古代大陆边缘裂谷(<800 Ma)** 新元古代晚期南华/康滇裂谷活动是华南地区继晋宁期造山运动后的又一重大地质事件.裂谷系发生于晋宁期华南海洋消亡、扬子陆块与华夏陆块拼贴后的青白口

纪晚期,时代约为810 Ma(杨明桂等,2012).裂谷开启初期至南华纪底界这个时段内形成的地层,前人将其称为板溪期地层,即晋宁不整合构造面之上的地层单元(杨明桂等,2012),该套地层与下伏地层为区域性角度不整合接触,并被莲沱组平行不整合覆盖.裂谷盆地早期主要发育有粗碎屑沉积岩、双峰式火山岩、气孔状玄武岩和流纹岩.Li *et al.* (2009)在浙西地区上墅组获得~800 Ma的玄武岩和流纹岩年龄,代表裂谷盆地早期的岩浆活动.Wang *et al.* (2012)于赣东北及皖南地区获得805~760 Ma的双峰式火山岩年龄,认为形成于后造山伸展环境.Yao *et al.* (2014)于浙西道林山地区获得790 Ma的A型花岗岩年龄,认为其形成于造山运动结束后的板内裂谷环境.以上证据说明江南造山带东段裂谷作用于造山作用结束后开始(Wang *et al.*, 2012),800 Ma达到峰期,随后裂谷盆地持续扩张,发育以冰碛岩为主的南华纪盖层沉积(杨明桂等, 2012).

本文获得的798 Ma的登山群流纹岩和玄武岩为双峰式火山岩组合,形成于板内伸展环境,与江南造山带东段800~760 Ma的双峰式岩浆活动相吻合,代表造山作用结束之后的早期裂谷系.上述岩浆活动是华南地区新元古代南华/康滇裂谷早期构造活动的响应,同时也是Rodinia超大陆早期裂解的响应.

结合前人对新元古代江南造山带东段年代学、地球化学的研究成果,本文认为华南新元古代扬子与华夏陆块的拼贴时限晚至855~800 Ma之间,而非前人所认为的1 000~900 Ma或者古生代(460~440 Ma)(Li, 1999; Liu *et al.*, 2018).值得注意的是,碰撞造山带普遍存在高级变质作用,如发育一系列高压变质岩,但是除Shu *et al.* (1994)报导的866 Ma的西湾蓝片岩外,江南造山带再无高级变质作用的发现.Zhao(2015)据此提出扬子与华夏陆块在新元古代的碰撞拼贴可能属于“软碰撞”造山作用.造山作用结束后由于俯冲板片拆沉,造山带垮塌(Wang *et al.*, 2012),构造机制由俯冲造山转为陆内裂谷.江南造山带东段发育的一系列800~760 Ma双峰式火山岩、基性岩墙群等(邓奇等, 2016)是华南进入裂谷期的标志.江南造山带东段新元古代早—中期构造演化模式如下:(1)860~830 Ma,华夏陆块持续向扬子陆块之下俯冲,扬子东南缘发育岛弧—弧后盆地系统;(2)830~800 Ma之间,扬子与华夏陆

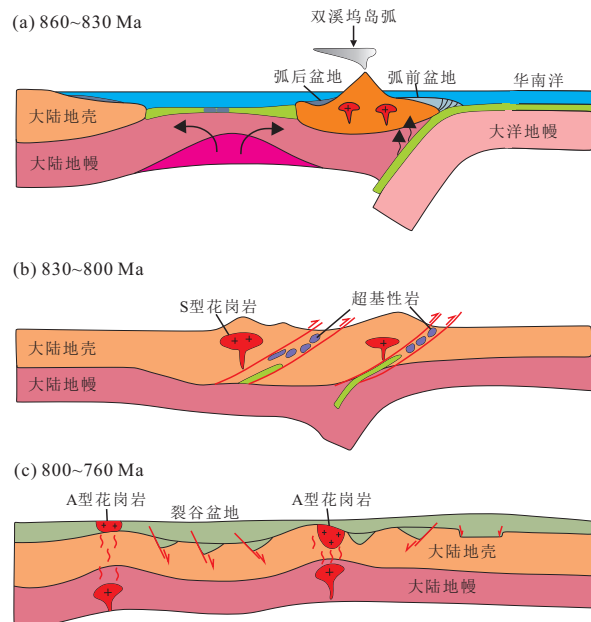


图15 江南造山带东段860~760 Ma构造演化模式

Fig.15 Simplified cartoon model for the evolution of the eastern Jiangnan orogen from 860~760 Ma

据 Yao *et al.* (2014)修改

块逐渐发生碰撞拼贴,弧后盆地关闭,发育一系列同碰撞花岗岩;(3)800~760 Ma,华南发生大规模的裂谷活动(图15).

## 5 结论

(1)江南造山带东段登山群高山组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $855.5 \pm 8.2$  Ma,叶家组流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $798.1 \pm 7.8$  Ma.高山组属于晋宁运动不整合面之下的构造单元,拔竹坑组、叶家组属于不整合面之上的构造单元.

(2)高山组砂岩含大量火山碎屑,矿物分选磨圆差,为一套近源沉积,物源区应为大陆岛弧火山岩;叶家组火山岩为双峰式火山岩组合,流纹岩具有A型花岗岩特征,  $\epsilon_{\text{HF}}(t)$  值为7.9~10.9,来自初生地壳的部分熔融;玄武岩具有OIB特征,富集轻稀土及大离子亲石元素,来自软流圈地幔的部分熔融.

(3)登山群高山组形成于弧后盆地,是扬子与华夏板块早期拼合阶段弧后拉张的产物;叶家组双峰式火山岩形成于大陆裂谷,该时期以扬子板块青白口纪造山运动后伸展构造体制控制为主.

(4)新元古代扬子与华夏板块拼贴时间晚至855~800 Ma之间,与格林威尔造山运动无关;新元古代造山作用结束之后华南板块进入裂谷期.

致谢:北京离子探针中心杨淳、江南和谢士稳博士在样品接收、制样、仪器调试监控和数据处理方面提供了帮助,在此致以衷心的感谢。

## References

- BGMRJX(Bureau of Geology and Mineral Resources Jiangxi Province), 2017. Regional Geology of Jiangxi Province. Geology Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Bhatia, M.R., Crook, K.A.W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181–193. <https://doi.org/10.1007/bf00375292>
- Chen, S.B., Xu, Z.F., 1988. U-Pb Zircon Geochronology of Presinian Meta Volcanic Rocks in Northeastern Jiangxi Province, and Its Tectonic Implications. *Regional Geology of China*, 7(2):91–92(in Chinese).
- Cui, X.Z., Jiang, X.S., Wang, J., et al., 2014. Filling Sequence and Evolution Model of the Neoproterozoic Rift Basin in Central Yunnan Province, South China: Response to the Breakup of Rodinia Supercontinent. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(3): 399–409(in Chinese with English abstract).
- Deng, Q., Wang, J., Wang, Z.J., et al., 2016. Middle Neoproterozoic Magmatic Activities and Their Constraints on Tectonic Evolution of the Jiangnan Orogen. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 753–771(in Chinese with English abstract).
- Eby, G.N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20(7):641–644.
- Ernst, R.E., Desnoyers, D.W., 2004. Lessons from Venus for Understanding Mantle Plumes on Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146(1–2): 195–229. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2003.10.012>
- Fedo, C.M., Sircombe, K.N., Rainbird, R.H., 2003. Detrital Zircon Analysis of the Sedimentary Record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 277–303. <https://doi.org/10.2113/0530277>
- Floyd, P.A., Winchester, J.A., Park, R.G., 1989. Geochemistry and Tectonic Setting of Lewisian Clastic Metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland. *Precambrian Research*, 45(1–3): 203–214. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(89\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0301-9268(89)90040-5)
- Gao, L.Z., Dai, C.G., Liu, Y.X., et al., 2010. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Tuff Bed of the Sibao Group and Implication for Its Stratigraphic Significance. *Geological Bulletin of China*, 29(9):1259–1268(in Chinese with English abstract).
- Gao, L.Z., Yang, M.G., Ding, X.Z., et al., 2008. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of Tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangshen Groups in South China—Constraints on the Evolution of the Jiangnan Neoproterozoic Orogenic Belt. *Geological Bulletin of China*, 27(10):1744–1758(in Chinese with English abstract).
- Gao, L.Z., Zhang, H., Ding, X.Z., et al., 2014. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Jiangshan-Shaoxing Faulted Zone in Zhejiang and Jiangxi. *Geological Bulletin of China*, 33(6):763–775(in Chinese with English abstract).
- Hofmann, A.W., 1997. Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism. *Nature*, 385:219–229. <https://doi.org/10.1038/385219a0>
- King, P.L., Chappell, B.W., Allen, C.M., et al., 2001. Are A-Type Granites the High-Temperature Felsic Granites? Evidence from Fractionated Granites of the Wangra Suite. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 501–514. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00881.x>
- Li, X.H., 1999. U-Pb Zircon Ages of Granites from the Southern Margin of the Yangtze Block: Timing of Neoproterozoic Jinning Orogeny in SE China and Implications for Rodinia Assembly. *Precambrian Research*, 97(1–2):43–57. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(99\)00020-0](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(99)00020-0)
- Li, X.H., Li, W.X., Li, Z.X., et al., 2008. 850–790 Ma Bimodal Volcanic and Intrusive Rocks in Northern Zhejiang, South China: A Major Episode of Continental Rift Magmatism during the Breakup of Rodinia. *Lithos*, 102(1–2): 341–357. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.04.007>
- Li, X.H., Li, W.X., Li, Z.X., et al., 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb Zircon Ages, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes of the Shuangxiwu Volcanic Rocks. *Precambrian Research*, 174(1–2): 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.07.004>
- Li, X.H., Li, Z.X., Ge, W.C., et al., 2003a. Neoproterozoic Granitoids in South China: Crustal Melting above a Mantle Plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Research*, 122(1–4): 45–83. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(02\)00207-3](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00207-3)
- Li, Z.X., Li, X.H., Kinny, P.D., et al., 2003b. Geochronology of Neoproterozoic Syn-Rift Magmatism in the Yangtze Craton, South China and Correlations with other Continents: Evidence for a Mantle Superplume that Broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122(124): 85–109. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00208-5)

- Li, Z.X., Wartho, J.A., Occhipinti, S., et al., 2007. Early History of the Eastern Sibao Orogen (South China) during the Assembly of Rodinia: New Mica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating and SHRIMP U-Pb Detrital Zircon Provenance Constraints. *Precambrian Research*, 159(1–2): 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.05.003>
- Liu, S.F., Peng, S.B., Kusky, T., et al., 2018. Origin and Tectonic Implications of an Early Paleozoic (460–440 Ma) Subduction–Accretion Shear Zone in the Northwestern Yunkai Domain, South China. *Lithos*, 322: 104–128. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.10.006>
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- McLennan, S.M., Hemming, S.R., Taylor, S.R., et al., 1995. Early Proterozoic Crustal Evolution: Geochemical and Nd-Pb Isotopic Evidence from Metasedimentary Rocks, Southwestern North America. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(6): 1153–1177. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00032-u](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00032-u)
- Pearce, J., 1996. Sources and Settings of Granitic Rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125. <https://doi.org/10.18814/epi-ugs/1996/v19i4/005>
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Pitcher, W.S., 1983. Granite Type and Tectonic Environment. *Mountain Building Processes*, 19:40.
- Shu, L.S., Zhou, G.Q., Shi, Y.S., et al., 1994. Study on the High Pressure Metamorphic Blueschist and Its Late Proterozoic Age in the Eastern Jiangnan Belt. *Chinese Science Bulletin*, 39:1200–1204.
- Sobolev, A.V., Nikogosian, I.K., 1994. Petrology of Long-Lived Mantle Plume Magmatism: Hawaii, Pacific and Reunion Island, Indian Ocean. *Petrology*, 2:111–144.
- Takagi, T., Orihashi, Y., Naito, K., et al., 1999. Petrology of a Mantle-Derived Rhyolite, Hokkaido, Japan. *Chemical Geology*, 160(4): 425–445. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(99\)00111-4](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(99)00111-4)
- Tang, Z.C., Wang, F.X., Zhou, H.W., et al., 2020. Neoproterozoic (~800 Ma) Subduction of Ocean-Continent Transition: Constraint from Arc Magmatic Sequence in Kaihua, Western Zhejiang. *Earth Science*, 45(1): 180–193 (in Chinese with English abstract).
- Turner, S.P., Foden, J.D., Morrison, R.S., 1992. Derivation of Some A-Type Magmas by Fractionation of Basaltic Magma: An Example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28(2): 151–179. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(92\)90029-x](https://doi.org/10.1016/0024-4937(92)90029-x)
- Wang, J.Q., Shu, L.S., Santosh, M., 2017. U-Pb and Lu-Hf Isotopes of Detrital Zircon Grains from Neoproterozoic Sedimentary Rocks in the Central Jiangnan Orogen, South China: Implications for Precambrian Crustal Evolution. *Precambrian Research*, 294: 175–188. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.025>
- Wang, M., Dai, C.G., Wang, X.H., et al., 2011. In-Situ Zircon Geochronology and Hf Isotope of Muscovite-Bearing Leucogranites from Fanjingshan, Guizhou Province, and Constraints on Continental Growth of the Southern China Block. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 213–223 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.C., Li, X.H., Li, W.X., et al., 2007. Ca. 825 Ma Komatiitic Basalts in South China: First Evidence for >1 500 °C Mantle Melts by a Rodinian Mantle Plume. *Geology*, 35(12): 1103–1106. <https://doi.org/10.1130/g23878a.1>
- Wang, X.L., Shu, L.S., Xing, G.F., et al., 2012. Post-Orogenic Extension in the Eastern Part of the Jiangnan Orogen: Evidence from ca. 800–760 Ma Volcanic Rocks. *Precambrian Research*, 222–223: 404–423. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.003>
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Winchester, J.A., Floyd, P.A., 1976. Geochemical Magma Type Discrimination: Application to Altered and Metamorphosed Basic Igneous Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 28(3): 459–469. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(76\)90207-7](https://doi.org/10.1016/0012-821x(76)90207-7)
- Xia, L.Q., Xia, Z.C., Li, X.M., et al., 2009. Mid-Neoproterozoic Rift-Related Volcanic Rocks in South China: Geological Records of Rifting and Break-up of the Supercontinent Rodinia. *Northwestern Geology*, 42(1): 1–33 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M.G., Liu, Y.G., Huang, Z.Z., et al., 2012. Subdivision of Meso-Neoproterozoic Strata in Jiangxi and a Correlation with the Neighboring Areas. *Geology in China*, 39(1): 43–53 (in Chinese with English abstract).
- Yao, J.L., Shu, L.S., Santosh, M., et al., 2013. Geochronology and Hf Isotope of Detrital Zircons from Precambrian Sequences in the Eastern Jiangnan Orogen: Constraining the Assembly of Yangtze and Cathaysia Blocks in South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 225–243. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2012.08.010>

- Yao, J.L., Shu, L.S., Santosh, M., et al., 2014. Neoproterozoic Arc-Related Mafic-Ultramafic Rocks and Syn-Collision Granite from the Western Segment of the Jiangnan Orogen, South China: Constraints on the Neoproterozoic Assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Precambrian Research*, 243: 39–62.
- Yao, J.L., Shu, L.S., Santosh, M., et al., 2015. Neoproterozoic Arc-Related Andesite and Orogeny-Related Unconformity in the Eastern Jiangnan Orogenic Belt: Constraints on the Assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China. *Precambrian Research*, 262: 84–100. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.02.021>
- Yu, J.H., O'Reilly, S.Y., Zhou, M.F., et al., 2012. U-Pb Geochronology and Hf-Nd Isotopic Geochemistry of the Badu Complex, Southeastern China: Implications for the Precambrian Crustal Evolution and Paleogeography of the Cathaysia Block. *Precambrian Research*, 222–223: 424–449. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.014>
- Zeng, W., Zhou, H.W., Zhong, Z.Q., et al., 2005. Single Zircon U-Pb Ages and Their Tectonic Implications of Neoproterozoic Magmatic Rocks in Southeastern Guizhou, China. *Geochimica*, 34(6): 548–556 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, W., Zhou, H.W., Zhong, Z.Q., et al., 2005. Single Zircon U-Pb Ages and Their Tectonic Implications of Neoproterozoic Magmatic Rocks in Southeastern Guizhou, China. *Geochimica*, 34(6): 548–556 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.L., Santosh, M., Zou, H.B., et al., 2013. The Fuchuan Ophiolite in Jiangnan Orogen: Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotope and Implications for the Neoproterozoic Assembly of South China. *Lithos*, 179: 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.08.015>
- Zhang, K.X., Xu, Y.D., He, W.H., et al., 2018. Oceanic and Continental Blocks Distribution during Neoproterozoic Early Qingbaikouan Period (1 000–820 Ma) in China. *Earth Science*, 43(11): 3837–3852 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.H., Jiang, G.Q., Dong, J., et al., 2008. SHRIMP Zircon U-Pb Ages and Their Tectonic Implications of Wuqiangxi Formation in Banxi Area, South China. *Science China: Earth Sciences*, 38(12): 1496–1503 (in Chinese).
- Zhang, Y.Z., Wang, Y.J., Geng, H.Y., et al., 2013. Early Neoproterozoic (~850 Ma) Back-Arc Basin in the Central Jiangnan Orogen (Eastern South China): Geochronological and Petrogenetic Constraints from Meta-Basalts. *Precambrian Research*, 231: 325–342. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.03.016>
- Zhao, G.C., 2015. Jiangnan Orogen in South China: Developing from Divergent Double Subduction. *Gondwana Research*, 27(3): 1173–1180. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.09.004>
- Zhao, J.H., Li, Q.W., Liu, H., et al., 2018. Neoproterozoic Magmatism in the Western and Northern Margins of the Yangtze Block (South China) Controlled by Slab Subduction and Subduction-Transform-Edge-Propagator. *Earth-Science Reviews*, 187: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.10.004>
- Zhao, J.H., Zhou, M.F., Yan, D.P., et al., 2011. Reappraisal of the Ages of Neoproterozoic Strata in South China: No Connection with the Grenvillian Orogeny. *Geology*, 39(4): 299–302. <https://doi.org/10.1130/g31701.1>
- Zheng, Y.F., Wu, R.X., Wu, Y.B., et al., 2008. Rift Melting of Juvenile Arc-Derived Crust: Geochemical Evidence from Neoproterozoic Volcanic and Granitic Rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Research*, 163(3–4): 351–383. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.01.004>
- Zhou, G.Y., Wu, Y.B., Li, L., et al., 2018. Identification of ca. 2.65 Ga TTGs in the Yudongzi Complex and Its Implications for the Early Evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 314: 240–263. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.06.011>

#### 附中文参考文献

- 陈思本, 徐祖丰, 1988. 赣东北前震旦纪变质火山岩的同位素年龄及其地质意义. *中国区域地质*, 7(2): 91–92.
- 崔晓庄, 江新胜, 王剑, 等, 2014. 滇中新元古代裂谷盆地充填序列及演化模式: 对 Rodinia 超大陆裂解的响应. *沉积学报*, 32(3): 399–409.
- 邓奇, 王剑, 汪正江, 等, 2016. 江南造山带新元古代中期 (830~750 Ma) 岩浆活动及对构造演化的制约. *大地构造与成矿学*, 40(4): 753–771.
- 高林志, 戴传固, 刘燕学, 等, 2010. 黔东南—桂北地区四堡群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义. *地质通报*, 29(9): 1259–1267.
- 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 等, 2008. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 对江南新元古代造山带演化的制约. *地质通报*, 27(10): 1744–1758.
- 高林志, 张恒, 丁孝忠, 等, 2014. 江绍断裂带构造格局的新元古代 U-Pb 年代学依据. *地质通报*, 35(6): 763–775.
- 江西省地质矿产局, 2017. 江西省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 唐增才, 汪发祥, 周汉文, 等, 2020. 浙西开化地区新元古代

- (~800 Ma)洋陆俯冲来自活动陆缘弧火山岩序列组合的制约.地球科学,45(1):180—193.
- 王敏,戴传固,王雪华,等,2011.贵州梵净山白云母花岗岩锆石年代、铅同位素及对华南地壳生长的制约.地学前缘,18(5):213—223.
- 夏林圻,夏祖春,李向民,等,2009.华南新元古代中期裂谷火山岩系:Rodinia超大陆裂谷化—裂解的地质纪录.西北地质,42(1):1—33.
- 杨明桂,刘亚光,黄志忠,等,2012.江西中新元古代地层的划分及其与邻区对比.中国地质,39(1):43—53.
- 曾雯,周汉文,钟增球,等,2005.黔东南新元古代岩浆岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其构造意义.地球化学,34(6):548—556.
- 张克信,徐亚东,何卫红,等,2018.中国新元古代青白口纪早期(1 000~820 Ma)洋陆分布.地球科学,43(11):3837—3852.
- 张世红,蒋干清,董进,等,2008.华南板溪群五强溪组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学新结果及其构造地层学意义.中国科学:地球科学,38(12):1496—1503.

## 《地球科学》论文“网络首发”的说明

为加快本刊录用稿件发布的速度,提升学术期刊出版能力和质量,促进数字出版转型,《地球科学》与《中国知网》(中国学术期刊光盘版电子杂志社)签订了“网络首发学术期刊合作出版协议”与“合作共建与学术期刊数字出版合作协议”.自 2018 年起,期刊定稿的文章已在中国知网实现数字首发出版.作者的录用稿件将第一时间通过中国知网发布到网上.

网络首发,是指先将论文网络出版,按出版网址和发布时间确认论文首发权,以数字出版方式优先出版学术期刊的单篇论文内容,之后将论文全部在期刊印刷版出版的出版方式.网络首发的稿件可以是录用定稿、排版稿、整期定稿(已确定出版年、卷、期、页),以最早稿件为准赋予每篇文献国际 DOI 编号,按录用定稿、排版稿、整期定稿分别注明引用规范,均可被引,各稿次均在中国知网长期保存.

《地球科学》采用录用定稿方式进行论文网络首发.录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编和编委会终审同意刊用的稿件.录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等.为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改.