

# 华南东部元古代构造格局及其古位置重建\*

王岳军<sup>1</sup>, 舒良树<sup>2</sup>, 张玉芝<sup>1</sup>,  
CAWOOD A. Peter<sup>3</sup>, 钱鑫<sup>1</sup>, 甘成势<sup>1</sup>, 汪程<sup>1</sup>

1. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室 / 中山大学地球科学与工程学院 /  
南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023

3. School of Earth, Atmosphere and Environment, Monash University, Melbourne VIC 3800, Australia

**摘要:** 包括扬子、华夏和琼西南诸多块体的华南东部保存了与哥伦比亚和罗迪尼亚超大陆聚散有关的丰富地质记录, 是理解东亚前寒武纪动力学演化的关键地区。本文基于琼西南、扬子东部和华夏陆块元古代地层和岩浆记录, 分析并综述了华南东部地区元古代构造过程及其在超大陆的古位置。研究表明, 琼西南地块在中元古代(~1.45 Ga)时期形成于哥伦比亚超大陆内部的非造山裂谷环境, 经历了~1.05 Ga的麻粒岩相高级变质作用。其与扬子西南缘关系紧密, 在~1.30~1.05 Ga期间, 可能作为中元古代Albany-Fraser造山带的一部分。华夏和扬子东部在新元古代早期显示差异的地质特征, 两者因古华南海而分隔。江山-绍兴缝合带以东的华夏陆块发育 $\epsilon_{\text{Hr}}(t)$ 值为负的~1.0~0.9 Ga长英质火山岩, 与江-绍缝合带之西的扬子陆块同期具正 $\epsilon_{\text{Hr}}(t)$ 值的双溪坞弧迥然不同, 他们很可能是响应于原高止大洋俯冲而作为早新元古代(~1.0~0.9 Ga)原华夏造山作用的地质记录。怀玉和江南地区广泛发育~870~830 Ma的火成岩(集中在850~830 Ma), 其碎屑岩含~860~830 Ma碎屑锆石年龄峰值、~980 Ma锆石颗粒较少。相反华夏陆块较少发育同期火成岩, 碎屑岩中~980 Ma碎屑锆石丰富而~860~830 Ma碎屑锆石少见。以裂谷环境为其成因性质的~820~750 Ma板溪群、沥口群和马面山群及同期火成岩广泛见于华夏和怀玉地块及江南造山带, 并以角度不整合经沧水铺群和骆家门砾岩与冷家溪群及其相当岩系分割, 自此使之进入相对稳定的板内沉积演化期。研究认为, 新元古代早期(~1.0~0.9 Ga)在华夏内部武夷-云开一线发育了与印度Eastern Ghats造山带走向相接的增生造山带, 同时在扬子与华夏陆块之间发育了新元古代古华南海, 该大洋向西持续俯冲形成了长寿命的新元古代(~0.97~0.83 Ga)华南沟-弧系统, 相继形成了~0.98~0.88 Ga的双溪坞洋内弧, ~0.87~0.83 Ga怀玉大陆弧及~0.87~0.83 Ga的江南陆内弧后盆地, 可与罗迪尼亚超大陆外缘印度西北的新元古代德里造山带相对比。该系统内双溪坞洋内弧盆在~0.87 Ga关闭而转入~0.87~0.83 Ga的怀玉-江南安第斯型活动大陆边缘, 进而于~830~810 Ma由扬子和华夏陆块沿江南造山带拼合而成古华南陆块, 自810 Ma之后由于罗迪尼亚超大陆裂解及大规模后造山裂谷作用, 造就了板溪群及其相当岩系和同期双峰式火成作用。

**关键词:** 中新元古代构造格局; 哥伦比亚内部; 罗迪尼亚外缘; 古华南海; 扬子-华夏陆块

**中图分类号:** P534.5; P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)02-0001-25

## Proterozoic tectonics of eastern South China and their Paleo-location reconstruction

WANG Yuejun<sup>1</sup>, SHU Liangshu<sup>2</sup>, ZHANG Yuzhi<sup>1</sup>,  
CAWOOD A. Peter<sup>3</sup>, QIAN Xin<sup>1</sup>, GAN Chengshi<sup>1</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>

1. Guangdong Key Lab of Geodynamics and Geohazards / School of Earth Sciences and Engineering,

\* 收稿日期: 2024-02-05

录用日期: 2024-02-23

网络首发日期: 2024-03-16

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0803701); 国家自然科学基金(42330302);

南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)基金(SML2023SP239)

作者简介: 王岳军(1969年生), 男; 研究方向: 华南及东南亚大地构造演化; E-mail: wangyuejun@mail.sysu.edu.cn

*Sun Yat-sen University / Southern Marine Science and Engineering, Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China*

*2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China*

*3. School of Earth, Atmosphere and Environment, Monash University, Melbourne VIC 3800, Australia*

**Abstract:** The Meso- and Neo-proterozoic geological records in eastern South China are the key carriers for understanding the Columbia and Rodinia supercontinent cycles and the geodynamic evolution of East Asia, which are yet uncertain so far. This paper presents an overview of key geological observations for the southwest Hainan, eastern Yangtze, and Cathaysia with respect to Proterozoic tectonics. Our data show that the SW Hainan in the Mesoproterozoic (~1.45 Ga) developed in a non-orogenic rift setting in the Columbia interior which was undergone by the ~1.05 Ga high-grade metamorphism. SW Hainan might be a part of the Mesoproterozoic Albany-Fraser Orogen at ~1.30–1.05 Ga, and, subsequently moved to the margin of Rodinia. Cathaysia and eastern Yangtze display distinct geological signatures in the early Neoproterozoic and Cathaysia remained separated from Yangtze until at least ~1.0 Ga, even ~0.83 Ga. The ~1.0–0.9 Ga felsic igneous rocks in Cathaysia are dominated by negative  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values, and distinct from those in the coeval Shuangxiwu arc with positive  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values. Such signatures might be the response to the subduction of the Proto-Ghats Ocean, herein named the Early Neoproterozoic Proto-Cathaysia Orogen. The ~870–830 Ma (mainly 850–830 Ma) igneous rocks are extensive in the Huaiyu and Jiangnan Orogen but poor in Cathaysia. The Cathaysia Neoproterozoic sedimentary rocks are signed by ~980 Ma detrital grains but dominated by ~860–830 Ma detrital zircons for the Jiangnan and Huaiyu sedimentary rocks. Banxi, Likou and Mamienshan groups and their equivalents are extensively developed in Cathaysia and Huaiyu, and the Jiangnan Orogen, respectively, and are characterized by the rift-related sedimentary rocks and bi-modal igneous rocks with the formation ages of ~810–750 Ma. They are separated from the Cangshuipu and Luojiamen conglomerates across an angular unconformity or unconformably underlain by the Lengjiayi and Xikou groups. In combination with the available data, it is proposed for a long-lived Neoproterozoic (~0.97–0.83 Ga) and westward-subducted Proto-Huanan arc-trench system signed by ~0.98–0.88 Ga Shuangxiwu intra-oceanic arc, 0.87–0.83 Ga Huaiyu continental arc and 0.87–0.83 Ga Jiangnan intra-continental back-arc basin, which switched from an intra-oceanic to a continental Andean margin setting at ~0.87 Ga. Such a system lay along strike from the synchronous Eastern Ghats and South Delhi orogen at the periphery of Rodinia. Our data revealed the united proto-South China being created by the ~830–810 Ma Jiangnan orogenesis in response to the assemblage of the Yangtze with Cathaysia, which was followed by the post-orogenic rifting due to the breakup of Rodinia.

**Key words:** Meso- and Neo-proterozoic geological records; Columbia interior; Rodinia periphery; Long-lived Proto-Huanan subduction; Yangtze-Cathaysia assemblage

华南陆块作为东亚最大的块体之一, 具有极其复杂的构造演化历史。其北以秦岭-大别-苏鲁造山带为界相接于华北陆块, 南与印支陆块相邻, 西为松潘-甘孜造山带, 向东濒临西太平洋(图1)。现有资料普遍认为华南陆块由具不同前寒武纪基底的扬子和华夏陆块组成, 保留有与哥伦比亚, 罗迪尼亚, 冈瓦纳和潘基亚超大陆聚合和裂解有关的地质记录, 是研究华南陆块大地构造演化、探讨其在超大陆中位置的理想场所。前人的研究

也已经揭示出了华南陆块显生宙的构造过程及其在冈瓦纳和潘基亚超大陆中的位置(Zhao and Cawood, 2012; Rogers and Santosh, 2002; Cawood et al., 2018, 2020; Wang et al., 2019, 2024; Yao et al., 2019; Shu et al., 2021), 但对华南陆块元古代时期在哥伦比亚和罗迪尼亚超大陆中的古地理位置仍存争议, 也相继提出了不同的古地理重建模型, 其中以位于超大陆内部和外缘两种模型最具代表(如 Cawood et al., 2018, 2020; Li et al., 2008, 2023;



2008; Shu et al., 2008, 2021; Zhang et al., 2012a, 2012b, 2013a, 2013b, 2015a; Zhang and Wang, 2016, 2020; Cawood et al., 2018; Li et al., 2002, 2007, 2008, 2023; Greentree et al., 2006; Ye et al., 2007; Wang et al., 2007a, 2007b, 2008, 2010c, 2013a, 2013b, 2013c, 2014a, 2014b, 2018b, 2019)。

近年来,在扬子陆块东部和华夏地区已积累了丰富的元古代构造-岩浆-沉积等及年代学和地球化学资料,对这些资料仍缺乏充分挖掘和综合集成。为此,在作者最新研究成果(Wang et al., 2024)基础上,本文进一步概述了琼西南、华夏和江南造山带等地区的研究成果,综合分析了琼西南、扬子和华夏陆块在哥伦比亚和罗迪尼亚超大陆的古位置及其相互关系,提出了新元古代长寿命古华南的俯冲模式、限定其缝合边界走向及扬子与华夏陆块的聚合拼贴时序等,为深化扬子-华夏陆块元古代构造机制提供了新视野。

## 1 地质背景

华南陆块系扬子和华夏陆块沿江南造山带拼贴而成,其中江南造山带是一条NNE-NE向构造带,宽约数十至百余公里、沿走向延伸超千公里,以往常将其划分为东段(浙西北、皖南和赣东北)、中段(赣西北和湘西)和西段(桂东北和黔东南)(图1)。尽管对各段之间的边界仍不明确,但普遍认为其记录了扬子和华夏陆块新元古代时期的拼合过程(Wang et al., 2018b; Zhang and Wang, 2020; Shu et al., 2021)。通过多维地质资料分析,以往所定义的江南造山带中段和西段具相似的前寒武纪构造演化历史,其新元古代早期地层主要包括以发育紧闭褶皱为特征的冷家溪群(湘西)及其相当的九岭群/双桥山群/筲箕洼组/星子群(赣西北)、四堡群(桂东北)及梵净山群(黔东)和以发育宽缓褶皱为特征的板溪群(湘西)及其相当的丹洲群(桂东北)和修水群(赣西北)(如Shu et al., 2021; Zhang and Wang, 2016; Yao et al., 2019; Wang et al., 2024)。上述地层普遍被新元古代(~825~745 Ma)基性-超基性岩和过铝质花岗岩(如九岭、元宝山等岩体)所侵入(如Li et al., 2002, 2003; Zheng et al., 2008)。相反原定义的江南造山带东段主要指赣东北、皖南和浙西南地区,包括双溪坞、怀玉、樟公山等块体,主要由新元古代赣东北和皖南蛇绿混杂岩带,田里片岩、铁砂街群、双溪坞群、溪口群和上溪群、庙头和山后杂岩、沥口群及相关火成岩

等构成(如舒良树, 2012; Shu et al., 2019; Zhao et al., 2013a, 2013b; Zhao and Cawood, 2012; Yao et al., 2016; Ye et al., 2007; Li et al., 2008; Zheng et al., 2008; Zhang et al., 2013b, 2020; Wang et al., 2014a, 2014b, 2018a, 2024)。在此考虑到原定义的江南造山带东段、中段和西段岩性组合的异同,将江南造山带限定为由广泛分布新元古代变沉积岩和变火成岩的中段和西段构成,而原江南造山带东段重新归入早新元古代双溪坞弧和新元古代早期怀玉弧。值得注意的是,陈蔡群和周潭杂岩传统上被认为是华夏的基底,但碎屑锆石年谱系和~840 Ma的弧前火成岩组合更可能是新元古代扬子东缘的产物,如后所述将其归属为怀玉弧的一部分(如Sun et al., 2017; Wang et al., 2018b; Yan et al., 2021; Yao et al., 2016; Yang et al., 2022)。

江南造山带以西的扬子陆块基底主要由太古宙-古元古代岩石单元组成(如图1; 高林志等, 2011),其元古代地层在东北缘由~1.5~1.0 Ga变沉积岩和变火成岩构成的田里片岩和铁砂街群组成,在其西缘则主要包括由~1.7~1.0 Ga变火山-沉积岩构成的大红山群、东川群、昆阳群和会理群等(图1和图2; Greentree et al., 2006; Ye et al., 2007; Li et al., 2008; Zhao et al., 2013a, 2013b; 高林志等, 2011)。扬子西缘攀西-汉南带则主要由~1.0~0.75 Ga变沉积岩、火山岩及相关侵入岩所组成(如Zhou et al., 2002)。江山-绍兴断裂带东南的华夏陆块由东南沿海中生代火山岩系和武夷-南岭-云开前寒武纪变质岩系所构成,其中武夷-云开前寒武系岩石以早元古代(~1.95~1.73 Ga)和新元古代(~1.00~0.75 Ga)变火山-沉积岩为主要特征,包括八都群(浙西南)和麻源群(闽西北)、鹤子群(赣东南)和云开(粤西南)杂岩,及马面山群(闽东北)、龙泉群(浙西南)和桃溪群(粤东北)等。其中八都群和麻源群(也称杂岩)正长岩和混合岩中含丰富的早古生代锆石(如Wang et al., 2013a; Wan et al., 2007),并部分为~1.93~1.85 Ga的I型和S型、1.82~1.75 Ga的A型花岗岩和~1.80~1.76 Ga裂谷型基性岩所侵入,局部保存有~1.89~1.85 Ga高级变质作用的地质记录,被认为属于古元古代劳伦大陆的地质记录(如Li et al., 2005; Yu et al., 2008, 2012, 2018)。华夏陆块新元古代和早古生代变砂岩中含少量~4.1~3.8 Ga的碎屑锆石(Xu et al., 2007; Xiang and Shu, 2010; Yao et al., 2011; 徐亚军等, 2013),但八都群、麻源群和云开杂岩中的变

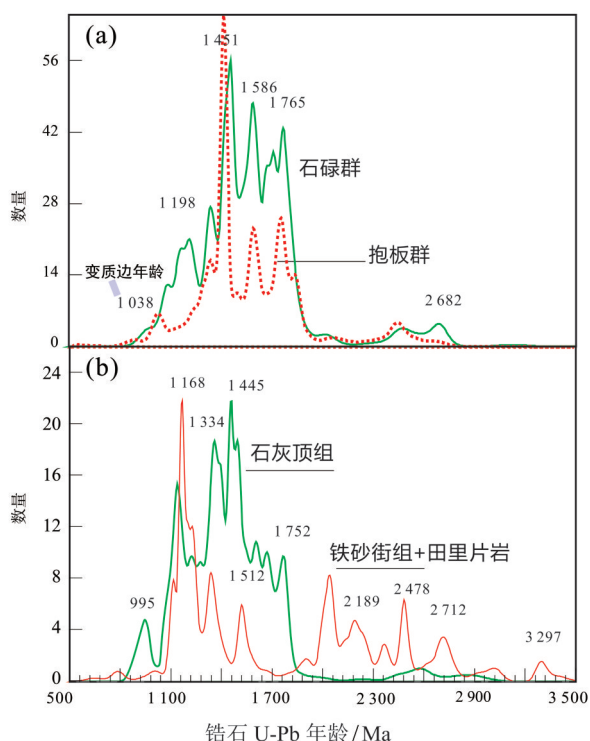


图2 抱板群、石碌群、石灰顶组和铁砂街沉积岩及田里片岩的碎屑锆石年龄谱系(据 Wang et al., 2024 及参考文献)  
Fig. 2 Frequency of detrital zircon U-Pb apparent ages (Ma) for the Baoban, Shilu, Shihuiding and Teishajie meta-sedimentary rocks, as well as the Tianli schist (after Wang et al., 2024 and references therein)

沉积岩大多给出了 2.5~0.4 Ga 的碎屑锆石年龄谱系 (Wang et al., 2007, 2013; Wan et al., 2007; Yu et al., 2008, 2018)。华夏陆块最古老岩浆岩(如混合岩、花岗片麻岩和角闪岩)仅出露于武夷山北部, 被定年在 1.93~1.75 Ga (图 1; 如 Li, 1998; Yu et al., 2008, 2012, 2018)。

在华南地区还有一个很特殊的块体, 即琼西南地块。海南岛一直被认为属于华夏陆块的最南端(图 1, Li et al., 2002, 2008)。但近期在琼东北识别出石炭纪榴辉岩、在海南中部识别有石炭-二叠纪岛弧火山岩和弧后盆地火山岩, 因而有研究者提出海南岛至少有一部分在晚古生代与印支陆块具亲缘性。但迄今为止, 前石炭纪海南地区与华南或印支等陆块的构造配置则未有定论, 不同的观点被相继提出, 如有人认为琼东北和琼西南地区分属华夏和澳大利亚两个不同构造单元, 也有人提出琼西南为印支或扬子的一部分、而琼东北与华夏陆块关系密切(如 Zhang et al., 2018, 2019; Cawood et al., 2020)。近来, 也有人认为海南是一个统一块体, 与印支地块南部的昆嵩地体一起具

有澳大利亚西缘的属性(Zhang et al., 2023)。但事实上只有琼西南发育了中元古代抱板杂岩、石碌群和石灰顶组等, 在华夏陆块缺失同期变火成岩和变沉积岩(图 1; 如 Zhang et al., 2018, 2019)。

## 2 琼西南、华夏及江南造山带的元古代岩石组合及其特征

### 2.1 琼西南中元古代(~1.45~1.05 Ga)地质记录

#### 抱板杂岩(~1.45 Ga)及其~1.05 Ga 变质作用:

抱板杂岩(也称抱板群)是琼西南最古老的岩石单元, 由下段戈枕村组变火成岩和上段峨文岭组变沉积岩组成(如 Zhang et al., 2018, 2019; Xu et al., 2020)。戈枕村组变火成岩由正长岩、混合岩、基性岩、流纹岩、英安岩和凝灰岩组成, 其中基性岩以透镜体、豆荚、夹层或岩脉等形式出露于海南公爱、戈枕、冲卒岭等地, 它们的锆石 U-Pb 年龄变化范围为 1.46~1.42 Ga(图 2a)。相应锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和  $T_{\text{DM}}$  模式年龄分别介于 +9.3 与 +12.7 之间和 1.55 与 1.43 Ga 之间(如 Zhang et al., 2020; Xu et al., 2020; Wang et al., 2024)。基性岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 48.71%~50.71%(常量氧化物含量均为质量分数, 下同),  $\text{MgO}$  为 6.06%~8.46%,  $\text{TiO}_2$  为 1.02%~3.36%, 呈现出类似 OIB 和 E-MORB 型的微量元素特征,  $(\text{Nb}/\text{La})_n$  比值变化范围为 0.51~1.37,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于 +5.1 与 +6.9 之间(如 Li et al., 2003; Zhang et al., 2018)。变长英质火成岩形成于 1.44~1.42 Ga, 主要出露于昌江、公爱和冲卒岭等地区, 呈现 I 型和 A 型花岗岩特征, 其  $\text{SiO}_2=65.97\%\sim72.74\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5=0.04\%\sim0.12\%$ ,  $\text{A}/\text{CNK}=1.02\sim1.14$ , 富集大离子亲石元素、亏损高场强元素,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于 -2.6 与 +0.9 之间(如 Zhang et al., 2019)。其~1.45 Ga 结晶锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于 -0.3 与 +6.9,  $\delta^{18}\text{O}$  值介于 6.1‰ 与 8.6‰ 之间, 具较高的饱和温度(704~921 °C), 类似于西劳伦~1.45 Ga 裂谷型花岗岩-流纹岩省(如 Zhang et al., 2018, 2019)。

Wang et al. (2024) 在琼西南识别出呈透镜体形式出露于抱板杂岩中的石榴石斜长角闪岩, 该斜长角闪岩具 E-MORB 型地球化学特征。其矿物组合以石榴石、斜长石、角闪石、钾长石和石英为特征, 发育“白眼球”结构, 形成年龄变化于 1.43~1.45 Ga、变质年龄变化于 1.05~1.04 Ga(图 1)。Li et al. (2008) 也报道了抱板杂岩中 0.93~1.0 Ga 的高级变质作用。这些资料揭示了抱板杂岩存在 ~1.05 Ga 的变质事件, 这与罗迪尼亚超大陆汇聚相

关的中元古代 Albany-Fraser 造山带构造-岩浆与变质事件相耦合(Morrissey et al., 2017)。

抱板杂岩中上段的峨文岭组主要由副片麻岩、片岩和石英岩组成, 含少量大理岩, 其主要成分  $\text{SiO}_2=64.25\%\sim 72.18\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3=14.17\%\sim 16.64\%$ ,  $\text{Zr/Sc}=11.4\sim 35.1$ ,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于 -4.8 与 -4.1 之间, 被认为来源于高粘土含量的上地壳长英质岩石源区(Zhang et al., 2019)。其碎屑锆石年龄主要集中于 2.70~2.2 Ga, 1.90~1.73 Ga (峰值为 1.77 Ga), 1.70~1.53 Ga (峰值为 1.59 Ga) 和 1.50~1.43 Ga (峰值为 1.43 Ga) 等 4 个段, 相应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分别为 -5.7~-2.9, -6.5~+4.5, -6.9~+8.7 和 -2.6~+4.9 (Zhang et al., 2019)。最年轻碎屑锆石年龄与抱板群变火成岩形成年龄 (~1.43 Ga) 相似, 表明其沉积时代不早于 ~1.43 Ga (如 Li et al., 2008; Zhang et al., 2018, 2019; Xu et al., 2020)。因此抱板杂岩形成于中元古代 (~1.43 Ga), 经历了 1.05 Ga 的高级变质作用, 相当于西劳伦 Lower Belt-Purcell Supergroup (如 Goodge et al., 2006, 2017)。

**中元古代晚期 (~1.2~1.0 Ga) 石碌群和石灰顶组:** 石碌群和石灰顶组仅出露于琼西南的石碌矿区, 其中石碌群以硅质碎屑岩和大理岩为主, 夹少量变火山岩, 被认为其上覆于抱板杂岩, 其顶部为以石英岩和石英云母片岩为主的石灰顶组不整合覆盖 (如 Li et al., 2008, 2023; Zhang et al., 2019)。

石碌群沉积岩具较低 Co/Th 和 Zr/Sc, 较高 La/Sc 和 Th/Sc, 类似于大陆弧或活动大陆边缘的地球化学指标 (Zhang et al., 2018, 2019)。Li et al. (2008) 曾在石碌群第五层凝灰质夹层获得了锆石 U-Pb 年龄为  $1\,439\pm 9$  Ma, 但最新研究显示第五层碎屑锆石 U-Pb 年龄集中于 ~1.47、~1.75、~1.61 和 ~1.19 Ga 共 4 个峰值。第三和第四层碎屑锆石 U-Pb 年龄主要集中于 ~2.63~1.05 Ga, 最年轻峰值为 1.16~1.10 Ga (如 Zhang et al., 2018, 2019)。因此, 石碌群碎屑锆石年龄主要峰值在 ~1.77、~1.59、~1.45 和 ~1.19 Ga, 次要峰值为 ~2.68 Ga (图 2a)。石灰顶组曾被认为属于前陆盆地沉积层序, 但 Zhang et al. (2018, 2019) 发现石灰顶组样品具有被动大陆边缘沉积岩的地球化学属性, 大于 1.05 Ga 的碎屑锆石具与石碌群第三-第五层相似的碎屑年龄谱系, 1.2~1.0 Ga 的碎屑锆石大部分具正  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 但石灰顶组还发育有 ~1.0 Ga 的年龄峰值 (图 2b, 如 Zhang et al., 2018, 2019; Wang et al., 2024)。因此, 结合相

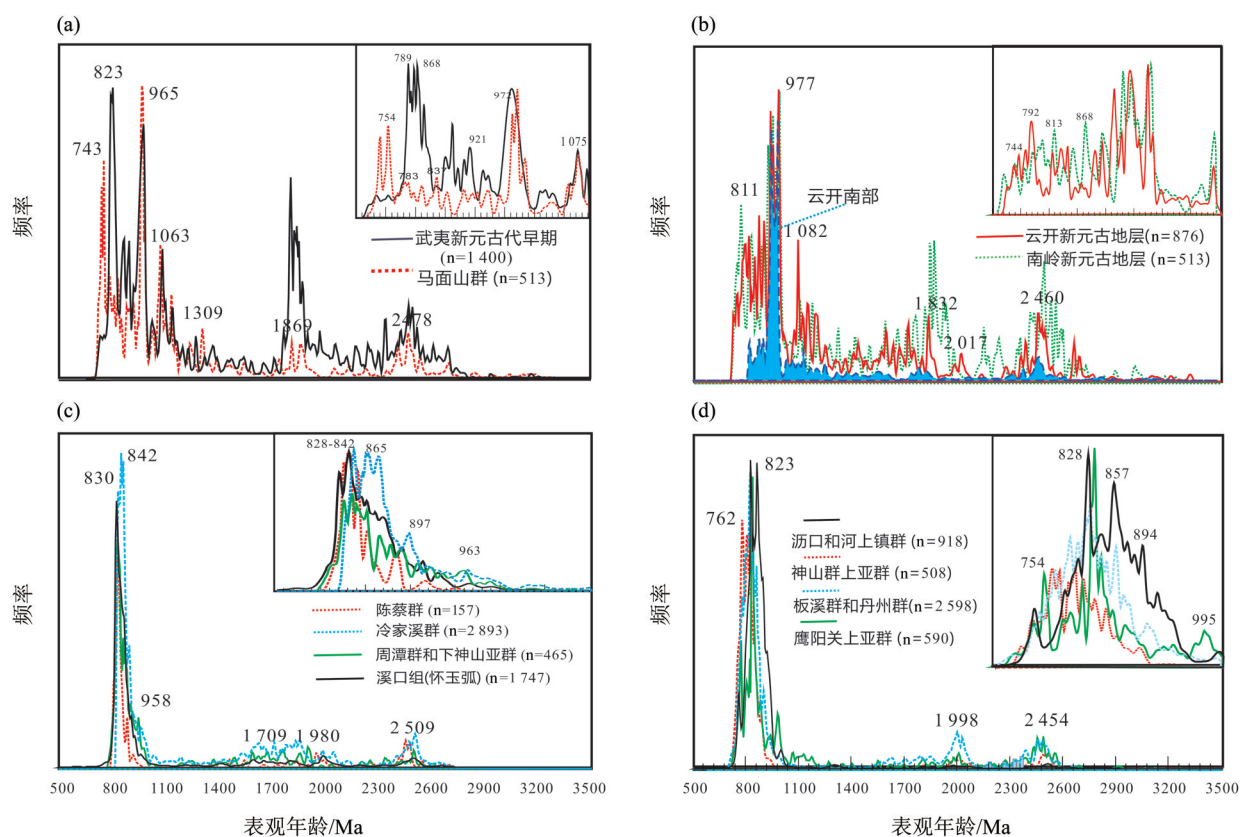
关资料认为石碌群和石灰顶组很可能分别沉积于 ~1.10~1.05 和 ~1.0 Ga, 琼西南经历了 ~1.45 Ga 裂谷到 ~1.05 Ga 汇聚环境的转换, 并中元古代末期 (~1.05 Ga) 发生了一次区域造山作用。

## 2.2 华夏陆块新元古代岩石组合

华夏陆块前寒武纪岩石出露有限, 除少量元古代岩石以外, 以新元古代岩石广泛发育为特征 (图 1; 如 Wan et al., 2007; Shu et al., 2008; Wang et al., 2013b, 2014b)。在武夷地区, 元古代岩石主要由八都群、麻源杂岩和马面山群组成。其中以八都群和麻源群等为典型代表的前寒武纪岩石单元常被定义为变质杂岩, 其中至少包含 ~2.50~1.95 和 ~0.98 Ga 或者更年轻的沉积岩, 以及 ~1.95~1.73 Ga 和 ~460~400 Ma 火成岩 (如 Wan et al., 2007; Wang et al., 2013b)。其碎屑锆石年龄峰值主要为 ~2.5、~1.81 和 ~0.98 Ga (图 3a; 如 Wan et al., 2007; Yu et al., 2012, 2018; Chen et al., 2018; Yang and Jiang, 2019)。需要说明的是八都群和麻源杂岩中小于 10 亿年的年龄也很可能是后期变质锆石 (如 Yao et al., 2017; Yan et al., 2019)。

新元古代马面山群及其相当地层主要由变沉积岩夹双峰式变火山岩组成, 其锆石形成年龄为 ~820~723 Ma, 主要集中于 796~756 Ma, 与江南造山带板溪群及同期岩浆岩形成时代一致。其中变火山岩中的基性端元以碱性玄武岩为代表, 占比高于 90%, 具类似 OIB 型微量元素特征, 且  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于 +0.1 与 +4.4 之间 (如 Li et al., 2005; Wan et al., 2007; Zhang et al., 2012a)。其酸性端元以流纹岩为特征, 具有与 A 型花岗岩相似的地球化学特征、富集 Th、Ta、Nb、REEs 和 Y 以及亏损 Sr、P、Eu 和 Ti, 具类似华夏基底岩石的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (-11.3~-3.8)。该套双峰式火山岩的发育表明华夏陆块在 ~818~750 Ma 已处于裂谷背景 (如 Zhou et al., 2002; Li et al., 2005; Shu et al., 2011; Wan et al., 2007; Xu et al., 2007; Chen et al., 2018)。值得注意的是, 在武夷地区马面山群和龙泉群变沉积岩的碎屑锆石年龄具 ~0.97 Ga 和 ~0.74 Ga 的主要峰值, 一些砂岩样品最年轻碎屑锆石年龄在 ~0.61~0.53 Ga, 也就是说这些岩石至少包含有一部分形成于早古生代, 因此下一步详细解体武夷地区古老岩石单元可能是另外一个重要科学问题。

分布于华夏陆块西段的云开杂岩由变火山-沉积岩组成, 不整合于天堂山群之下, 曾被认为是古元古代至中元古代产物。其下段以绿片岩、杂



(a~b) 武夷-南岭和云开地区; (c) 陈蔡群、冷家溪群及其相当的周潭群、溪口群及神山群下亚群;  
(d) 板溪群、沥口群及其相当的河上镇群、神山群上亚群和鹰阳关群上亚群。

图3 华南东部新元古代不同构造单元的沉积岩碎屑锆石年龄谱系 (数据源自 Wang et al. (2024) 及其参考文献)

Fig. 3 Frequency of detrital zircon U-Pb apparent ages (Ma) for the Neoproterozoic sedimentary rocks from different tectonic units in the eastern South China (Data are from Wang et al. (2024) and references therein)

砂岩、副片麻岩、石英岩、混合岩和大理岩为主, 含基性-超基性透镜体和豆荚体; 上段主要为粉砂岩、千枚岩和石英片岩。近年的年代学研究显示, 以往被划属云开群的混合岩和片麻状花岗岩大多具奥陶-志留纪年龄 (~460~410 Ma; 如 Wang et al., 2013b)。云开杂岩的变沉积岩以分选差的岩屑砂岩为特征, 碎屑锆石年龄峰值在 ~2.46、~1.83、~0.98 和 ~0.81 Ga, 与武夷-南岭地区新元古代地层相似 (图 3b)。但在云开南部, 碎屑锆石年龄峰值集中在 ~0.98 Ga。同时这些岩屑砂岩含棱角状-次棱角状石英、斜长石、燧石和火山碎屑, 可解释为弧前或弧后环境复理石堆积 (如 Wang et al., 2013c, 2014b; Zhang et al., 2012a)。

因此, 从现有资料来看, 无论是八都群、麻源群和云开杂岩, 亦或是马面山群及其相当地层单元, 普遍包含 ~1.20~0.90 Ga 碎屑锆石 (峰值为 ~0.98 Ga), 对应  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  峰值主要介于 +2.7 与 -4.7 之

间 (图 4a; 如 Xu et al., 2020; Yao et al., 2016)。但是, ~0.98 Ga 的变火成岩仅零星出露在武夷-云开地区, 且长英质火成岩大多具负锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 (峰值为 -2.5; 图 4b; Shu et al., 2008; Zhang et al., 2012a; Wang et al., 2013c, 2014b)。这表明华夏陆块早新元古代碎屑组分至少有一部分具异源性。

在华夏陆块内部之武夷-云开地区保存有少量 ~1.0~0.9 Ga 的变玄武岩和长英质火成岩 (图 1; Shu et al., 2008, 2011; Wang et al., 2013c; Zhang et al., 2012a), 其中变基性岩主要由斜长角闪岩、变辉长岩和辉绿岩组成, 他们以透镜状和豆荚状的形式产出, 曾被认为是蛇绿岩套的一部分。Wang et al. (2013c) 和 Zhang et al. (2012a) 的研究表明他们的  $\text{SiO}_2$  含量变化于 44.0%~52.2%,  $\text{MgO}$ =3.9%~12.4%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ =11.8%~18.6% (图 5a), 地球化学性质上可划属为 N-MORB 型、E-MORB 型、弧型、富 Nb 和高 Nb 玄武岩 (Wang et al., 2024)。其  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$

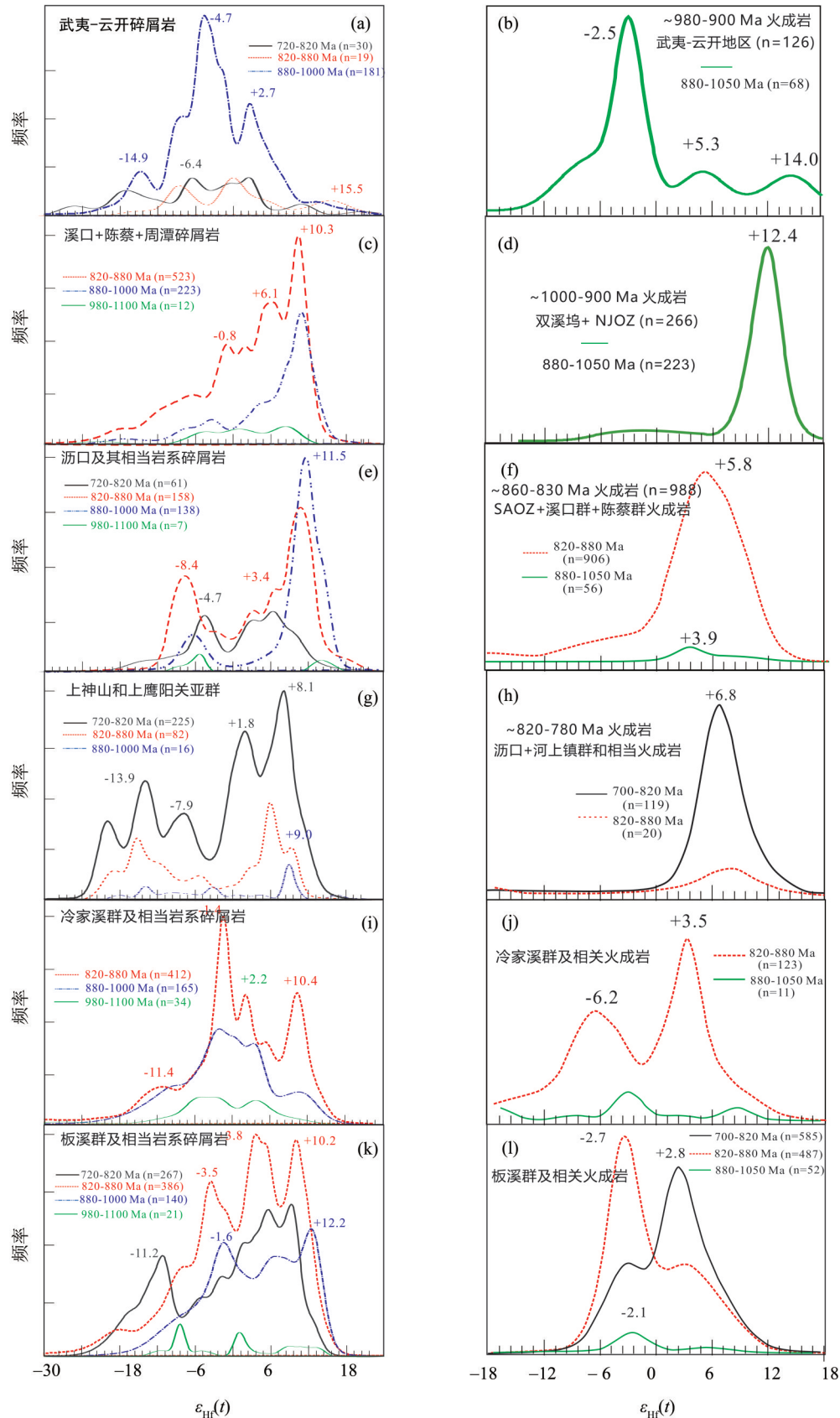


图4 华南东部不同构造单元新元古代沉积岩碎屑锆石及火成岩主要年龄区段  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值频率图(据 Wang et al., 2024 及其参考文献)

Fig. 4 Zircon  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values for the Neoproterozoic sedimentary detrital zircons and main igneous ages from different tectonic units in the eastern South China (after Wang et al., 2024 and references therein)

值介于+2.3与+7.0之间, 锆石U-Pb年龄变化范围为1013~902 Ma(集中于997~955 Ma), 锆石原位 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为+4.5~+15.3, Hf模式年龄为0.92~1.42 Ga, 其源区为活动大陆边缘受板片衍生组分改造的地幔(图5b)。变长英质火成岩为过铝质S型花岗岩(图5a-b), A/CNK值变化范围为1.15~1.48,  $\text{SiO}_2$ 为65.6%~77.2%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为11.3%~16.6%,  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=4.0\% \sim 7.2\%$ 。具较低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-9.5~-3.8)、较高 $\text{TiO}_2+\text{FeO}_1+\text{MgO}$  (5.8%~10.2%) 和  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+$

$\text{CaO})$ (2.36~4.28), 年龄变化于1060~909 Ma(集中于963~909 Ma), 指示岩浆源区为变泥质岩和火成岩, 含少量新生物质加入。在判别图解上, 变长英质火成岩落入弧和同碰撞花岗岩区域, 是武夷-云开弧后盆地~0.95 Ga闭合或后碰撞背景下部分熔融的产物(Wang et al., 2013c, 2014b)。另外南颐(1994)也曾南岭地区报道过940~910 Ma的英安质斑岩。以上资料为武夷-云开地区存在早新元古代岩浆事件提供了有力证据。

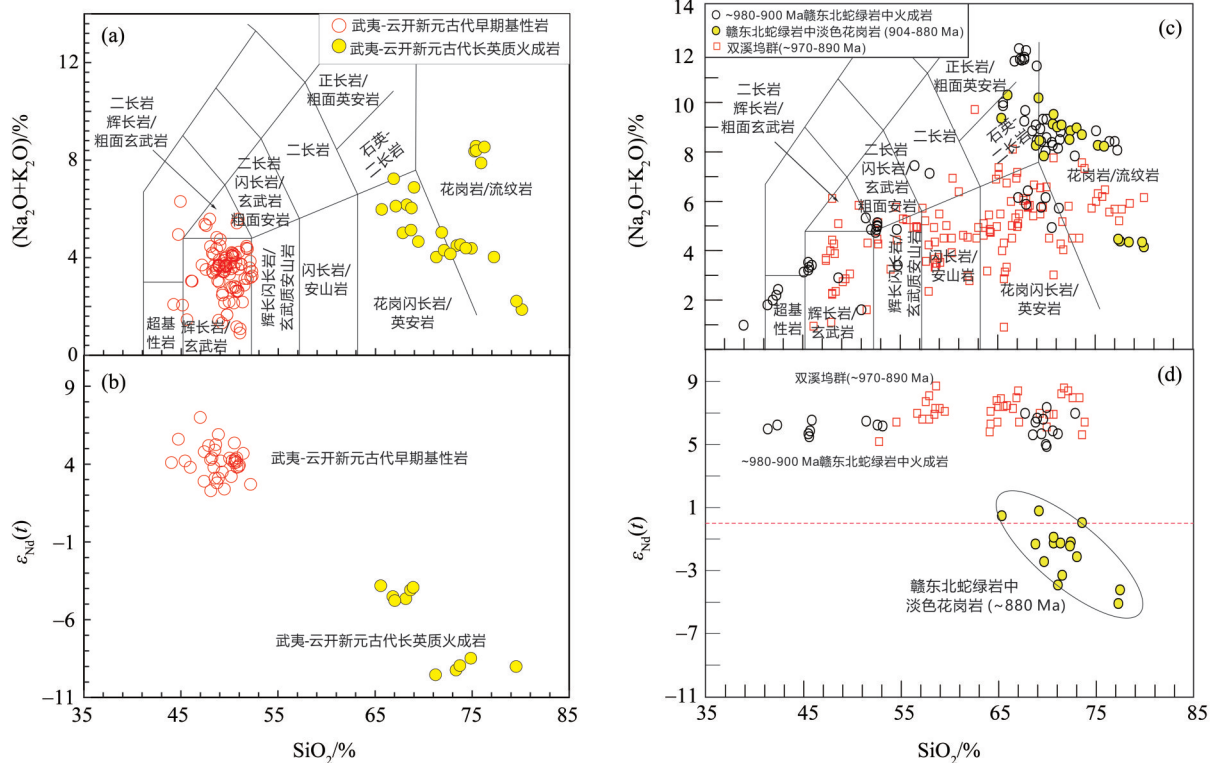


图5 华夏武夷-云开地区和双溪坞群和赣东北蛇绿混杂岩带早新元古代(~1.05~0.90 Ga)火成岩的 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(据Wang et al., 2024及参考文献)

Fig. 5  $\text{SiO}_2$  versus  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  and  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  diagrams for the the Earliest Neoproterozoic (~1.05~0.90 Ga) igneous rocks from the Wuyi-Yunkai area, Shuangxiwu Group and NE Jiangxi ophiolite (after Wang et al., 2024 and references therein)

### 2.3 双溪坞群及赣东北和皖南蛇绿混杂岩带

原划属江南造山带东段的新元古代地层主要有田里片岩、铁砂街群、双溪坞群, 也保存有赣东北和皖南蛇绿混杂岩带(图6)。其中赣东北和皖南蛇绿混杂岩属于扬子东南缘前寒武纪蛇绿岩带, 被认为是扬子陆块东南缘璋公山地体与怀玉地体的缝合带(图1), 与溪口群及其相当地层呈构造接触(Shu and Charvet, 1996)。区内新元古代花岗岩体以许村、歙县和休宁为代表, 岩浆锆石U-Pb测年值为~850~820 Ma(Shu et al., 2011, 2019)。

田里片岩的地球化学特征与琼西南抱板变沉

积岩和扬子西南缘昆阳群和会理群相似, 被认为形成于~1.50~1.10 Ga, 遭受了~1.10~1.05 Ga的变质作用(Li et al., 2013a, 2013b)。铁砂街群主要由双峰式变流纹岩、变玄武岩、变粉砂岩和千枚岩组成, 火山岩年龄为~1.05 Ga(图2b; 如Li et al., 2013a, 2013b; Wang et al., 2018a)。

双溪坞群出露于浙东北之双溪坞地区, 曾被认为形成于中元古代晚期至新元古代早期(Wu et al., 2006; Ye et al., 2007; Zheng et al., 2008; Shu et al., 2019)。该群主要由~968~913 Ma的平水玄武岩-安山岩、~908~879 Ma的北坞和庄村等安山岩、英安岩、

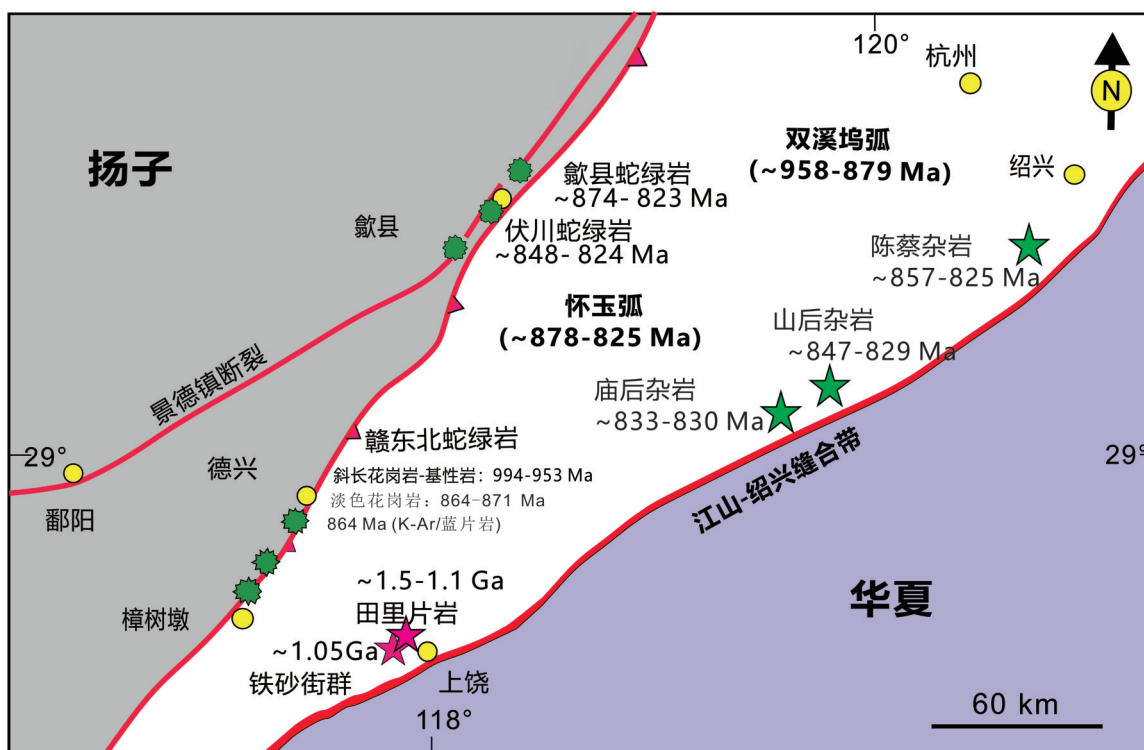


图6 双溪坞、怀玉弧以及赣东北和皖南蛇绿岩带蛇绿混杂岩地质简图

(据 Zhang et al., 2013a, 2013b; Shu et al., 2021; Wang et al., 2024; 丁炳华等, 2008 修改)

Fig. 6 Simplified geological map showing the Shuangxiwu, Huaiyu, NE Jiangxi, and South Anhui ophiolite suture zones (revised after Zhang et al., 2013a, 2013b; Shu et al., 2021; Wang et al., 2024; Ding et al., 2008)

流纹岩、凝灰岩和凝灰质砂岩等组成(如 Ye et al., 2007; Chen et al., 2009)。他们与相伴产出的英云闪长岩和花岗闪长岩共同构成钙碱性岩浆组合、全岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值均为正(图 5c-d)。锆石结晶年龄为  $\sim 970\sim 879$  Ma, 相应的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于为  $+5.4\sim +15.3$ (图 4d), 具典型洋内弧地球化学属性。双溪坞群被骆家门组砾岩不整合覆盖, 既被  $\sim 900$  Ma 的桃红和西裘花岗岩侵入, 也为  $\sim 849$  Ma 岛弧型神武辉绿岩和  $794\sim 760$  Ma OIB 型基性岩脉所侵入(如 Li et al., 2003)。骆家门组砾岩则主要由一套火山碎屑岩、杂砂岩、砂质板岩和砾岩组成, 其中火山岩砾石的锆石 U-Pb 年龄为  $901\sim 855$  Ma,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  正值。上覆于骆家门组砾岩之上的砂岩中碎屑锆石最年轻年龄集中于  $\sim 830\sim 810$  Ma, 砂岩中凝灰岩夹层年龄 ( $824\pm 5$ ) Ma。上覆于骆家门组砂岩之上的河上镇群含  $\sim 802\sim 767$  Ma 凝灰岩夹层(Li et al., 2008; Wang et al., 2013a)。这些资料表明, 骆家门砾岩及其上覆砂岩的沉积时限极可能类比于沧水铺群林家湾砾岩和银竹坝组。骆家门组砾岩中的火山砾石(正  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值)比林家湾砾岩中的火山砾石(负  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值)更古老, 是骆家门组砾岩中火山岩砾石源自双溪

坞群, 而林家湾组砾岩砾石应源自其下伏冷家溪群所致。河上镇群和沥口群时序上可类比于江南造山带之板溪群及其相当地层单元(如 Zhou et al., 2022)。

**赣东北  $\sim 980\sim 880$  Ma 蛇绿混杂岩带:** 该蛇绿混杂岩带沿北北东方向延伸约  $100\sim 200$  km, 主要出露在樟树墩、西湾、绕二和茅桥等地(图 6; 如 Shu et al., 2019; Wang et al., 2015), 由蛇纹石化橄榄岩、辉长岩、辉绿岩、闪长岩、枕状玄武岩、安山岩和燧石, 及少量斜长花岗岩和淡色花岗岩组成。其形成年龄变化范围为  $\sim 1030\sim 870$  Ma, 主要集中在  $\sim 980$  Ma 和  $\sim 880$  Ma(如 Zhao and Cawood, 2012; Zhang et al., 2015a)。Shu et al. (1994) 报道了西湾蓝片岩中蓝闪石 K-Ar 年龄为  $866\pm 14$  Ma。赣东北蛇绿混杂岩带中蛇纹石化橄榄岩具较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 ( $1.24\%\sim 2.67\%$ ), 较低的 MgO 含量 ( $39.61\%\sim 44.26\%$ ), 其  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  比值为  $0.09\sim 0.29$  和  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比值为  $0.115\ 26\sim 0.121\ 93$ (如 Li and Zhao, 2020)。伴生的辉长岩和辉绿岩锆石 U-Pb 年龄为  $\sim 992\sim 953$  Ma, 具 MORB 型和弧型地球化学特征, 及亏损 Nd-Hf 同位素组成(图 4d 和 5c-d; 如

Wang et al., 2015; Li and Zhao, 2020)。该地区埃达克质岩和斜长花岗岩形成于~1030~968 Ma, 具有高的正  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - \epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(分别介于+6.6与+7.4之间和+10与+17之间), 具幔源锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值(如 Li et al., 2003; Gao et al., 2009; Li and Zhao, 2020)。西湾淡色花岗岩和张村流纹岩年龄为~891~864 Ma,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于-5.1与+0.8之间, 锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值集中于-3.0, 可能代表了再循环沉积岩部分熔融产物(图 5d; Yao et al., 2016, 2019; Shu et al., 2019)。

**皖南蛇绿混杂岩带(~860~825 Ma):** 以伏川蛇绿岩为代表, 沿东北走向出露于歙县和伏川等地区(图 6)。蛇绿岩呈构造碎块卷入溪口群复理石中, 其上被沥口群不整合覆盖, 被 850~820 Ma 的 S 型花岗岩侵入(如 Wu et al., 2006; Li and Zhao, 2020; Shu et al., 2019)。伏川蛇绿岩主要由方辉橄榄岩、纯橄榄岩、橄榄岩、高铝、低铝和高镁玄武岩-辉长岩-辉绿岩-安山岩、闪长岩、花岗岩、正片麻岩等组成, 含燧石、灰岩、砂岩和板岩等组成, 呈构造团块彼此混杂于溪口群复理石基质中(如 Zhang et al., 2012a; Shu et al., 2019; Li and Zhao, 2020)。Shu et al. (2019) 在伏川地区发现华南首例洋壳型斜长岩和浅色花岗岩, 其岩浆锆石 U-Pb 测年值分别为(848±4) Ma 和(840±5) Ma, 斜长岩具  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  正值(2.3~4.2) 和低的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值(0.704 616~0.704 679), 系地幔岩浆结晶分异产物(Shu et al., 2019)。该地区火成岩(如辉长岩、斜长岩和淡色花岗岩)年龄变化于 848~823 Ma, 其中 MORB 型和弧型基性岩具亏损  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - \epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(分别为+2.3~+5.7 和+8~+1), 弧型基性岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于-1.2 与+2.5 之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值多为+3~+12, 是地幔楔部分熔融产物(如 Zhang et al., 2012a; Cui et al., 2017; Shu et al., 2019; 丁炳华等, 2008)。蛇纹石化橄榄岩和辉石岩高 MgO, 低 CaO、低  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 具 Ir 负异常、亏损 Pt-Pd,  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}=0.01\sim 1.08$  和  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}=0.118\ 52\sim 0.128\ 67$ , 明显有别于弧前橄榄岩地球化学特征(如 Li and Zhao, 2020)。此外, 在伏川蛇绿混杂岩带内~825 Ma 的基性岩团块保存了~870 Ma 的捕获锆石, 在~820 Ma 过铝质花岗岩中保存了丰富的~910~880 Ma 继承锆石(如 Li et al., 2003; Zhang et al., 2013a; Cui et al., 2017)。结合同期 I-S 型花岗岩年龄和复理石层序, 皖南蛇绿混杂岩带更可能构造定位于~860~825 Ma, 属于弧后盆地构造背景。值得注意的是在江-绍断裂带和皖南蛇绿混杂岩中均零星保存了~870~855 Ma 的 MORB 型

和弧型基性岩和深海浊积岩岩石组合(如 Shu et al., 2019; Cui et al., 2017)。

#### 2.4 怀玉弧及其南延之新元古代岩石单元

在此将江-绍断裂带和皖南蛇绿混杂岩之间~1.00~0.88 Ga 洋内弧称为双溪坞弧, 而~0.87~0.83 Ga 的大陆弧称为怀玉弧(以往称之为江南造山带东段)。怀玉及其南延新元古代岩石组合主要有陈蔡群、周潭群、庙头和山后杂岩及溪口群、沥口群、神山下亚群和鹰阳关下亚群等(图 1 和图 6; 如 Wang et al., 2024 及相关文献)。从现有的资料来看陈蔡群、周潭群、庙头和山后杂岩、神山群均有蛇绿岩碎块发育, 位于江-绍断裂带的南界或临近南界, 但是鹰阳关群目前尚无蛇绿岩碎块报道, 其沉积建造于陈蔡群也有差别, 以往认为鹰阳关群位于华夏块体内部, 但是根据该群的空间分布, 及如下所述在该群火成岩和碎屑岩的研究进展, 在此暂将其归入周潭群和神山群的南延部分, 期待进一步的研究检验。

##### ~870~830 Ma 陈蔡群和周潭群及其相当岩系:

陈蔡群和周潭群含超镁铁岩和枕状熔岩碎块, 主要分布在江-绍断裂带西部的诸暨陈蔡和石角、龙游白石山头和六连岗、上饶董团、南城白土和新余岭上等地(舒良树, 2012; Yao et al., 2014; Wang et al., 2017), 由变火山岩-沉积岩组成, 同期之庙头和山后杂岩主要由辉长岩、闪长岩、花岗岩及其伴生沉积岩组成, 曾被认为是中元古代和新元古代蛇绿岩或是华夏基底的一部分(如 Yao et al., 2016; Wang et al., 2019; 姜杨等, 2015)。上述杂岩中火成岩化学成分从钙碱系列的超镁铁质变化到流纹质之间(图 7a), 形成年龄变化于 857~825 Ma, 集中在 845~830 Ma, 与皖南蛇绿混杂岩、冷家溪群及其同期地层形成时间相近(如 Shu et al., 2006, 2011; Li et al., 2007; Wang et al., 2018b; 姜杨等, 2015)。

陈蔡群中的火成岩在地球化学上可分为 MORB 型和弧型玄武岩/安山岩、高镁中性岩、高硅埃达克岩、高铌和富铌基性岩, 类似于弧前活动大陆边缘背景岩石组合, 其岩浆源区经过了板片和再循环沉积组分的交代改造(图 7a, Shu et al., 2011; Wang et al., 2018b)。陈蔡群变火成岩和周潭群基性岩大多数锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为正值(峰值为+5.8, 图 4f)。现有的资料显示周潭杂岩和神山群下亚群~840 Ma 弧型高镁安山岩-英安岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  分别为 39~68 和 -3.1~-8.8, 地球化学上相似于江南造山带冷家溪群同期高镁安山岩-英安岩

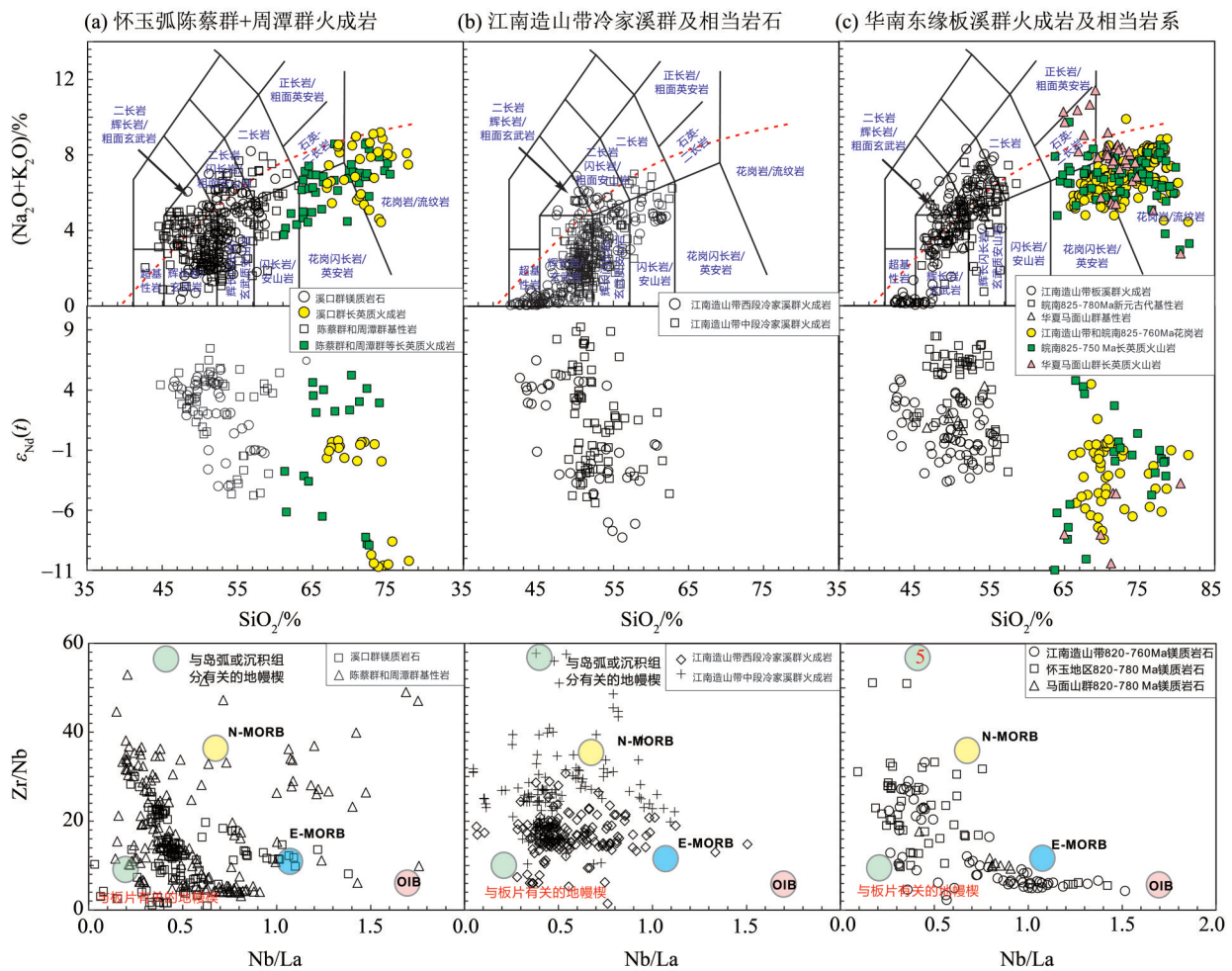


图7 怀玉弧陈蔡-周潭群和江南冷家溪群及其相当岩系(a-b), 华南东部板溪群、马面山群及其相当岩系(c) 新元古代火成岩的 $\text{SiO}_2$ - $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 、 $\text{SiO}_2$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\text{Nb/La}$ - $\text{Zr/Nd}$ 图解(据Wang et al., 2024及其参考文献)

Fig. 7  $\text{SiO}_2$  versus  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$  versus  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ , and  $\text{Nb/La}$  versus  $\text{Zr/Nd}$  diagrams for the Neoproterozoic igneous rocks of the Chencai-Zhoutan Group of Huaiyu arc (a-b), Bangxi and Mamianshan groups and equivalents (c) in the eastern South China (after Wang et al., 2024 and references therein)

(如Tian et al., 2020; Yang et al., 2022)。另外在江-绍断裂带以西的怀玉地区(如德兴和安庆)也发现岩浆锆石U-Pb年龄为871~826 Ma、具相似元素-同位素组成特征的镁铁质和长英质火成岩(图7a; 如Yao et al., 2016)。鹰阳关群出露在广西, 湖南和广东交界, 由板岩、千枚岩、大理岩、片岩和变火山岩组成。以往研究认为鹰阳关群属于与裂谷有关的晚新元古代火山-沉积序列(Wang and Li, 2003)。但最近Tian et al. (2020)在鹰阳关群下亚群安山岩和上亚群流纹岩中分别获得了~822~816 Ma和~765 Ma的锆石U-Pb年龄。安山岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化范围为-7.3~-0.9, 地球化学特征与冷家溪高镁安山岩类似(Zhang et al., 2012a; Sun et al., 2017)。陈蔡群变沉积岩及其同期的溪口群(浙西南)和双桥山群(赣东北)岩石中均含火山岩屑, 其碎屑分选

差、石英较少(如Wang et al., 2013a, 2014b, 2018b, 2019), 部分学者认为它们形成于重力流搬运和滨海沉积环境, 但也有学者认为其形成于半深海-深海环境。该层序被~820 Ma或更年轻I型花岗岩(如歙县、许村和休宁)所侵入(如Wang et al., 2007b, 2008, 2010a, 2010b, 2010c, 2013a, 2014a, 2017, 2018b, 2019; Shu et al., 2019)。这些地层的碎屑锆石年龄具明显的~0.83 Ga的主要峰值, ~1.9和~2.5 Ga的次要峰值(图3c; 如Li et al., 2003; Yin et al., 2013; Wang et al., 2014a, 2017, 2018b, 2019)。周潭杂岩和神山群下亚群变沉积岩主要为浅海-深海复理石砂岩和杂砂岩, 并伴有千枚岩、板岩和笔石页岩(Yu et al., 2012, 2018)。碎屑锆石确定有~832 Ma的主要峰值及少量新太古代和古元古代锆石年龄值, 与溪口组和陈蔡组及其相当地层相

似(图3c)。而新元古代早期锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值大多数为正值(峰值为+10~+6和-0.8, 如图4c所示), 表明怀玉弧和双溪坞弧的碎屑主要源自新生地壳或长英质岩石(如 Yang et al., 2022)。

**沥口群及其相当岩石(~820~750 Ma):** 沥口群(皖南)与河上镇群(浙西北)和登山群(赣东北)相当, 直接上覆于许村岩体之上或不整合下伏于溪口群及其同期地层之下(~820 Ma), 并为震旦系休宁组所上覆。沥口群和河上镇群碎屑锆石的主要年龄变化于989~748 Ma, 峰值817和749 Ma, 其  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值主要集中于+11和-8两个峰值(图3d和4e)。登山群发育~820~776 Ma的陆相双峰式火山岩及凝灰岩夹层(Wang and Li, 2003; Li et al., 2003)。伴生的石罨山和莲花山侵入体形成于~800~780 Ma, 具A型花岗岩的地球化学亲缘性, 与江南造山带裂谷型板溪群及其相当岩系类似(如 Zheng et al., 2008)。Tian et al. (2020)也报道了鹰阳关群上亚群发育有  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.9 \sim -6.9$  的~765 Ma流纹岩, 其捕虏锆石年龄主要峰值为~829 Ma, 次峰为~2.5, ~0.97和~0.76 Ga(图6k)。同时神山群上亚群沉积岩碎屑锆石以~844~734 Ma(峰值为~768 Ma)为主要区间(图3d), 其相关变辉长岩形成年龄为~791 Ma(如 Wang et al., 2018b; Yang et al., 2022)。

结合其他资料, 可得出怀玉及其南延的周潭杂岩和神山群下亚群等均形成于~850~830 Ma(图8), 与溪口群及相当岩系同期, 其碎屑锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值主要集中在~+11和-5~-8(图4g)。神山群上亚群和鹰阳关群上亚群可能与沥口群相对应, 形成于~810~750 Ma, 其中发育具裂谷背景的双峰式火山岩组合, 以玄武岩、辉长-辉绿岩、流纹岩、英安岩和花岗岩为特征, 其基性火成岩具OIB型( $\text{Nb}/\text{La}=1.3\sim 2.5$ )和弧型( $\text{Nb}/\text{La}=0.11\sim 0.75$ )微量元素配分模式,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.8 \sim +8.5$ , 而长英质火成岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于-10.9与+4.8之间(图7c)。

## 2.5 新元古代江南造山带

江南造山带新元古代岩石以变火山-沉积岩和相关侵入岩为特征, 主要有冷家溪群、板溪群及其相当岩石单元(图1)。其中冷家溪群及其同期地层形成于~860~830 Ma(图8), 是弧后盆地背景产物, 后碰撞背景成因的沧水铺群形成于~820 Ma, 板溪群及其相当岩系形成于~810~750 Ma, 属非造山裂谷伸展背景产物。

冷家溪群及其相当岩系以变火山岩、变质砂岩、粉砂岩和板岩为特征, 被认为是江南造山带

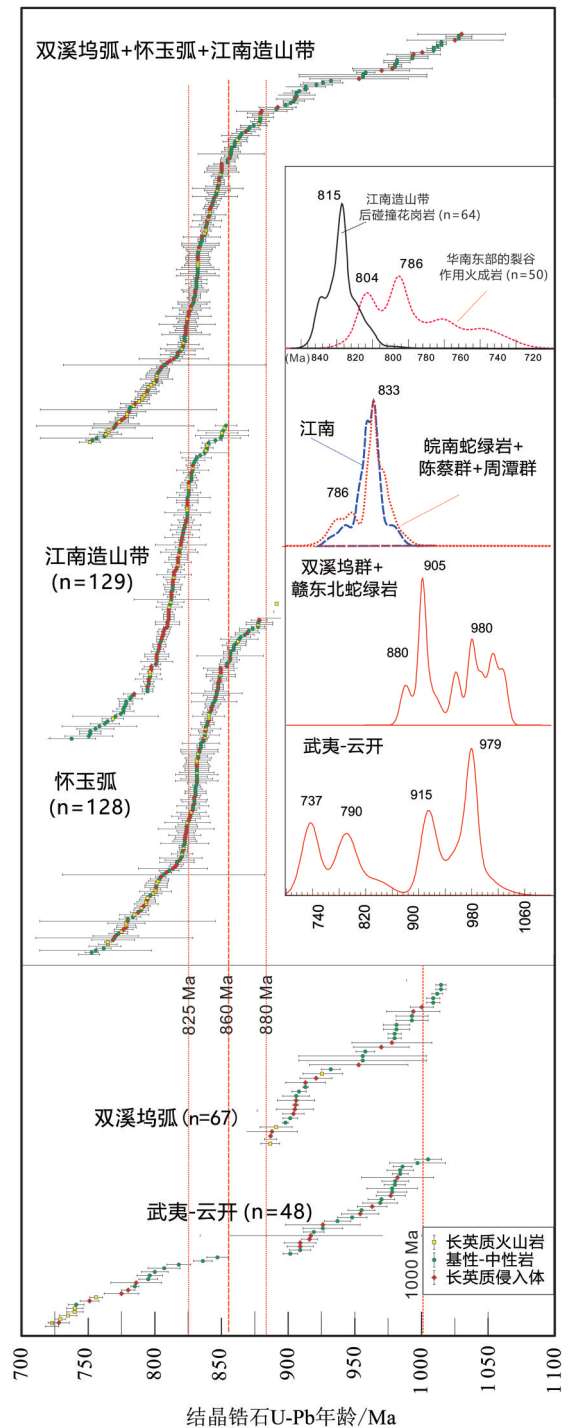


图8 华南陆块东部不同区块和构造单元新元古代火成岩的形成年龄统计(据 Wang et al., 2024 及其参考文献)

Fig. 8 Summary of the reported formation ages for the Neoproterozoic igneous rocks from different tectonic units in the eastern South China(after Wang et al., 2024 and references therein)

的基底岩石(如 Shu et al., 2021)。现有资料显示冷家溪群及其相当岩系内的斑脱岩年龄变化于865~822 Ma, 侵入该群的花岗质岩石年龄变化于~823~794 Ma(如九岭和西园坑; Li et al., 2003; Wang et al., 2008; Zhao et al., 2013a, 2013b; 高林志等, 2011)。

冷家溪群及其相当岩系的碎屑锆石 U-Pb 年龄峰值多集中于~865 和~837 Ma, 对应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值形成了 2 个主要峰值(+10.4 和-1.4)和 1 个次要峰值(-11.4; 图 3c 和 4i; Zhang et al., 2015b; Wang et al., 2007b, 2008a, 2010a, 2013a, 2014a, 2017, 2018b, 2019; Zhao et al., 2013a, 2013b; Yan et al., 2015; Zhang et al., 2015b)。冷家溪群及其相当岩系的火成岩主要为蛇纹石化橄榄岩、辉石岩、二辉橄榄岩、枕状玄武岩、玄武岩、粗粒玄武岩、玄武安山岩、安山岩、辉长岩和辉绿岩和少量安山岩、英安岩, 与冷家溪群变沉积岩互层产出或千枚岩呈构造冷侵位关系。其结晶锆石 U-Pb 年龄变化范围为 860~826 Ma, 集中在 845~830 Ma, 地球化学上可划分出 MORB 型和弧型基性-中性岩、弧型高镁玄武岩和安山岩-英安岩(图 7b; 如 Zhang and Wang, 2016, 2020)。相应的 MORB 型镁铁质岩石的  $\text{SiO}_2=49.4\%\sim 52.1\%$ ,  $\text{MgO}=7.4\%\sim 9.0\%$ , 具左倾或相对平坦的微量元素配分模式,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于+1.3 与+9.4 之间。弧型拉斑质基性岩的  $\text{SiO}_2=48.78\%\sim 53.7\%$ ,  $\text{MgO}=7.71\%\sim 12.74\%$ , 具明显 Nb-Ta 负异常,  $(\text{Nb}/\text{La})_n=0.35\sim 0.53$ ,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-1.6\sim -0.4$  和锆石  $\delta^{18}\text{O}=6.5\%\sim 7.7\%$ 。

以益阳和浏溪冲枕状玄武岩为代表的岛弧型高镁玄武岩, 以前被命名为具鬃刺结构的科马提岩或科马提质岩石(如 Wang et al., 2007a), 但这些岩石  $\text{TiO}_2$  和 Nb/La 较低,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-4.0\sim -1.0$ ; 其“鬃刺”不明显, 主要由单斜辉石构成(如 Wang et al., 2018b; Zhang and Wang, 2016), 不符合科马提岩的岩石学特征。在益阳和浏阳地区见高镁安山岩, 其 Nb/La=0.27~0.67,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-7.4$  与 -5.4, 系受沉积物改造而成的地幔楔源区部分熔融产物(如 Zhang et al., 2015b; Zhang and Wang, 2016, 2020)。益阳和浏阳地区 MORB 型、“高镁”型与弧型基性岩及高镁安山岩等同期共存, 反映其为活动大陆边缘产物(图 7b)。结合上述岩石中丰富的“古老”捕获锆石, 表明江南造山带冷家溪群及其相当岩系形成于~860~825 Ma 的大陆弧后盆地环境(如 Zhang and Wang, 2016; Zhang et al., 2015b)。2015b), 而桂北龙胜和元宝山冷家溪期蛇绿岩也被认为形成于弧前背景(Yao et al., 2014, 2016)。

在湖南益阳的沧水铺保留一套火山碎屑单元, 发育于冷家溪群和板溪群之间, 称为沧水铺群, 代表了板溪群和冷家溪群之间的角度不整合。该

群下段为林家湾组砾岩, 砾岩中火山岩砾石的年龄变化于 867~832 Ma(如 Zhang et al., 2015b), 砾岩中碎屑锆石年龄峰为~2.5、~1.85 和~0.85 Ga。上段为银珠坝火山集块岩和火山碎屑岩, 形成于~825~814 Ma,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-4.7\sim -1.7$ , 具高镁安山岩-英安岩特征。Zhang et al.(2015b)认为其代表了扬子与华夏陆块拼贴的后碰撞背景产物, 即沧水铺群(~820 Ma)为后碰撞环境产物。

板溪群及其相当岩系主要由砾岩、灰岩、砂岩、粉砂岩、板岩、片岩、页岩、灰岩和凝灰岩等组成, 是一套连续沉积的序列(Wang and Li, 2003)。在其底部(如横路冲组)保存有分选差、厚约 20 m 的复成分砾岩。板溪群及其相当岩系角度不整合于冷家溪群或沧水铺群之上, 覆盖于~820 Ma 本洞和三防花岗岩, 也被~806~760 Ma 的基性岩所侵入。板溪群内斑脱岩获得的锆石 U-Pb 平均年龄为~814~765 Ma, 碎屑岩中碎屑锆石年龄集中在 862~783 Ma, 相应  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为-15.2~+12.7(峰值分别为+10.2、+3.8、-3.5 和-11.2)(图 3d 和 4k, 如 Zhao et al., 2013a, 2013b; Wang and Li, 2003; Wang et al., 2008, 2010a, 2013a, 2017)。而赋存于板溪群内的镁铁质岩石(如隘口-黔阳、安江-沅陵、铜岛-龙城)形成年龄为~814~760 Ma, 大部分介于 790~760 Ma 之间。上述板溪群内基性岩在地球化学性质上可分为两类(图 7c, 如 Wang et al., 2019), 一类以隘口-黔阳基性-超基性岩为代表的板内 OIB 型碱性玄武岩, 其基性岩  $\text{SiO}_2$  变化于 47.4%~54.4%,  $\text{MgO}=2.51\%\sim 11.72\%$ ,  $\text{TiO}_2=1.36\%\sim 3.50\%$ ,  $\text{Nb}=16.1\sim 69.9 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $\text{Nb}/\text{U}=22\sim 47$ ,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于+1.1 与+5.4 之间, 具幔源锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-\delta^{18}\text{O}$  值(如 Wang et al., 2019)。另一组以沅陵-安江辉长岩-辉绿岩为代表的岛弧型基性岩, 其  $\text{TiO}_2=1.42\%\sim 3.17\%$ ,  $\text{Nb}=20.4\sim 37.4 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $\text{Nb}/\text{La}=0.24\sim 0.64$ ,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-2.5\sim -0.3$ , 锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为-6.6~-1.0、 $\delta^{18}\text{O}=6.1\%\sim 6.7\%$ , 推测其是受俯冲改造的地幔楔源区部分熔融或岩石圈-软流圈相互作用产物(图 7c)。此外, 板溪群内发育~824~794 Ma 的 I 型和 S 型花岗岩, 其  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值介于-9.8 与+4.5 之间、锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  峰值为+2.8 和-2.7(图 4l)。因此板溪群及其相当岩系形成于~810~750 Ma, 以夭折裂谷沉积和岩浆作用为主要特征, 代表了华夏与扬子陆块造山后裂解阶段产物。

### 3 琼西南和扬子西南古位置: 从哥伦比亚内部到罗迪尼亚超大陆外缘

现有的古地磁和地质资料表明, 哥伦比亚超大陆已经在~1.6 Ga完成汇聚拼合, 其在~1.6~1.3 Ga期间的古地理中心接近赤道(如Li et al., 2023), 然后于早中元古代发生大规模裂解(如1.4~1.3 Ga)直至~1.3 Ga裂解完成。在该超大陆内部的裂解作用以发育MORB型或OIB型碱性基性岩和非造山A型花岗岩为标志, 而在其外缘(如东南极)~1.43 Ga火成岩则多以弧型拉斑质基性岩和S型花岗岩为特征(如Xu et al., 2022; Li et al., 2023; Zhao and Cawood, 2012; Wang et al., 2017; Zhang et al., 2018, 2019)。如前所述, 抱板群变火成岩以~1.43 Ga碱性OIB型和MORB型基性岩为特征, 暗示其为非造山裂解环境。抱板变沉积岩碎屑锆石年龄峰值为~1.78、~1.60和~1.45 Ga(图2a; 如Li et al., 2008), 与东南极Gawler、西劳伦珀塞尔超群下带(lower belt-purcell supergroup)和塔斯马尼亚中下洛矶海角群(lower-middle Rocky Cape group)等~1.45~1.33 Ga岩系的年龄频谱相似, 但不同于珀塞尔超群上带(upper belt-purcell supergroup; 图9a-c; 如Goodge et al., 2006, 2017; Li et al., 2008; Zhang et al., 2018, 2019; Xu et al., 2020)。~1.80和~1.45 Ga的这些碎屑锆石具与西劳伦同期花岗岩相似的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 同位素组成, 且~1.60 Ga锆石颗粒可能主要来源于广泛发育1.65~1.55 Ga岩浆岩和变质岩的东南极高勒(Gawler)克拉通(Mawson大陆)和东印度巴斯塔(Bastar)克拉通(如Yu et al., 2012, 2018)。因此, 琼西南在~1.45 Ga更可能处于哥伦比亚超大陆内部的非造山裂谷环境, 而不是外缘俯冲背景(图10a)。

已有资料表明, 在扬子西南缘, ~1.8~1.5 Ga的大红山群和东川群等主要由砂岩、粉砂岩、板岩、千枚岩、大理岩、火山岩和同期基性侵入岩等构成, 形成于与哥伦比亚裂解有关的裂谷环境(如Wang and Zhou, 2014a)。与此同时, 在扬子西南缘还发育~1.50~1.38 Ga和~1.10~1.00 Ga的基性岩和花岗岩(图1), 其中~1.45 Ga基性岩和花岗岩在地球化学特征上分别与抱板群变基性和长英质火成岩相似, 可解释为哥伦比亚期超大陆裂解作用产物。

扬子西南缘的昆阳群和会理群以硅质岩、大理岩及火山岩为特征, 形成时代为~1.20~1.05 Ga, 其碎屑锆石年龄峰值为~2.5、~1.75、~1.60、~1.45

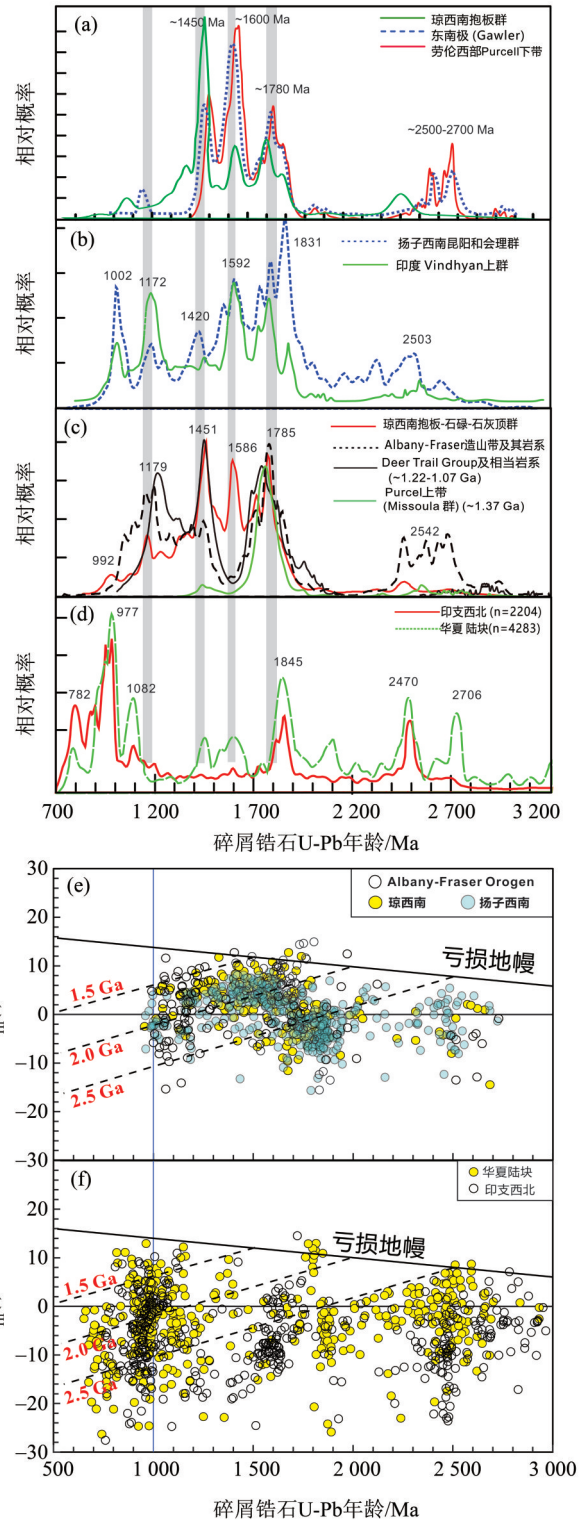


图9 劳伦、东南极及印度陆块主要构造单元及与华南东部新元古代沉积岩碎屑锆石年龄谱系(a-d)和表观年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (e-f)对比图(据Wang et al., 2024及其参考文献)

Fig. 9 Frequency of detrital zircon U-Pb apparent ages (Ma) from the Laurentia, East Antarctica, NW India, and Neoproterozoic sedimentary rocks in the eastern South China (a-d), and detrital zircon U-Pb apparent ages (Ma) vs  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  (e-f) (after Wang et al., 2024 and references therein)

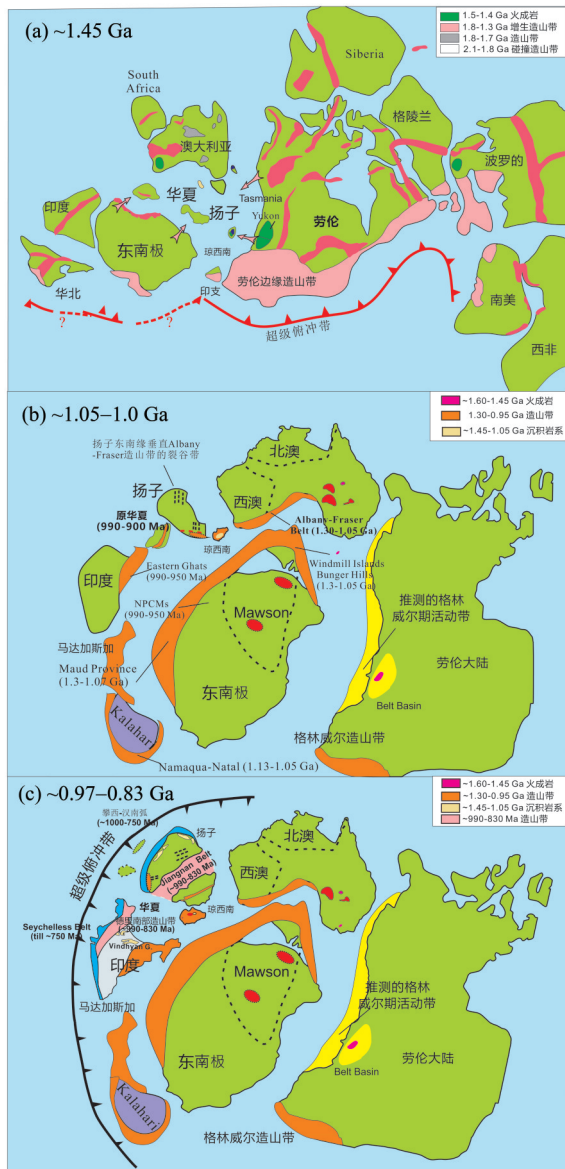


图 10 琼西南、扬子和华夏在哥伦比亚和罗迪尼亚超大陆的古位置重建图(据 Wang et al., 2024 及其参考文献)

Fig. 10 Paleogeographic reconstruction for the SW Hainan, Yangtze and Cathaysia in Columbia and Rodinia (after Wang et al., 2024 and references therein)

和~1.17 Ga, 可对比于琼西南石碌群和石灰顶组(图 9b-c; 如 Li et al., 2013a, 2013b)。另外在扬子陆块东南缘的田里片岩和铁砂街群中也记录了类似碎屑锆石年龄谱系(图 2b)。现有研究表明~1.80 和~1.45 Ga 岩浆事件在东南极和劳伦西部广泛发育, 扬子西南缘 1.80 和~1.45 Ga 碎屑锆石具与西劳伦同期花岗岩相似  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 如图 9e-f 所示, 其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值多为正值(如 Yu et al., 2008, 2012, 2018)。扬子西南缘~1.7~1.1 Ga 的碎屑锆石也类似西劳伦、澳大利亚-南极洲和琼西南、但具有与华夏和印度

西北明显不同的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(图 9e-f; 如 Yu et al., 2008, 2012, 2018; Zhang et al., 2019)。据此, 扬子西南缘与琼西南地区在中元古代联系密切, 在中元古代晚期处于澳大利亚-南极洲和劳伦之间或接近劳伦西北。相反, 华夏陆块基本缺失中元古代变火成岩和沉积岩(图 1; 如 Li et al., 2008), 华夏陆块新元古代早期沉积岩(如云开群)碎屑锆石年龄峰值集中在~2.7、~2.5、~1.85a 和~0.97 Ga, 大多缺乏~1.50 Ga 的碎屑锆石(图 9d)。如此年龄谱系与印度西北部相似, 但与抱板杂岩、石碌群和石灰顶组沉积岩碎屑锆石年龄谱系差别明显(图 9c-d; 如 Yu et al., 2012)。此外, 华夏陆块武夷山地区古元古代岩浆活动在时间和地球化学上均与印度北部相吻合, 其沉积岩年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  模式与可类比于印度北部(图 9f, 如 Cawood et al., 2020; Yu et al., 2008, 2012; Zhang et al., 2020)。~2.7 和~2.0 Ga 的岩浆活动在印度西北和澳大利亚北部较少, 但广泛出露于西劳伦, 且具负-略正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值。因此, 中元古代期间(~1.3 Ga 前), 扬子西南缘可能与琼西南地区紧密相连, 处于哥伦比亚超大陆内部, 而华夏陆块可能远离琼西南, 位于印度、南极洲和澳大利亚附近(图 10a)。

如前所述, 琼西南地区~1.45 Ga 的抱板群斜角闪岩经历了~1.05 Ga 的变质作用(Wang et al., 2024), 该期变质作用时序上与罗迪尼亚聚合时 Albany-Fraser 造山带和巴斯塔克拉通热事件相吻合(如 Morrissey et al., 2017)。琼西南石碌群沉积于大陆弧或活动大陆边缘环境, 其上被~1.05~1.00 Ga 石灰顶组不整合覆盖。同时在扬子西南缘, 昆阳群和会理群及其相当层与琼西南的石碌群在时序上大致同步。琼西南地区和扬子西南缘中元古代晚期地层均富含 1.30~1.05 Ga 碎屑锆石(图 2b 和 9a-d), 这些特征均能对应于 Albany-Fraser 造山带~1.30~1.05 Ga 火成岩及东南极和印度东南相应造山带, 他们均具有相似锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(图 9b; 如 Morrissey et al., 2017)。据此琼西南~1.05 Ga 的造山事件与西澳大利亚-东南极~1.30~1.05 Ga 的 Albany Fraser-Windmill 造山带能很好协调匹配(图 9e)。但扬子西南缘昆阳群和会理群等火山岩的形成时代为 1.14~1.02 Ga, 以双峰火山岩为特征, 其玄武岩为低钛拉斑质、并具正  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(分别为+0.41~+1.6 和+7.0~+10.3)。其中流纹岩则显示出 I 型和 A 型花岗岩地球化学特征, 具负  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-7.1~-5.1)(如 Greentree et al., 2006; Li et al.

2013a, 2013b; Chen et al., 2018; Wang et al., 2019)。此外, 昆阳群和会理群富含未成熟碎屑组分, 且落在主动和被动大陆边缘过渡区域, 其碎屑锆石的年龄谱系和  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值与琼西南同期沉积岩相似(图9), 因而被 Li et al. (2002) 和 Greentree et al. (2006) 等认为形成于受控扬子外缘俯冲作用的前陆盆地。这从侧面反映出扬子西南缘中元古代晚期构造的复杂性或者构造环境的过渡性。

在扬子陆块东南缘, 沿江-绍断裂带发育的田里片岩具有与西南扬子和琼西南同期沉积岩相似, 但不同于华夏变沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系(图2b和3a)。该片岩中的白云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄为 1.11~1.04 Ga (Li et al., 2007), 可能形成于被动大陆边缘或裂谷环境, 物源由扬子内部供给。扬子陆块东南缘~1.05 Ga 的铁砂街群主要由副片麻岩、片岩、千枚岩、板岩和双峰火山岩组成(如 Li et al., 2013a, 2013b; Wang et al., 2018a), 其中玄武岩  $\text{TiO}_2=2.14\%\sim 3.12\%$ 、具 OIB 型微量元素配分模式, 流纹岩富集大离子亲石元素、亏损高产强元素, 具 A 型花岗岩地球化学特征, 多呈现为亏损 Nd-Hf 同位素组成 (Li et al., 2013a, 2013b; Wang et al., 2018a), 应形成于大陆裂谷环境, 但其与扬子西南和琼西南的构造关系尚未可知, 其古位置仍需要更多资料加以确认。在此我们更倾向于认为~1.45 Ga 到~1.05 Ga 是琼西南地区由裂谷背景向汇聚环境的构造转换期。在此期间, 琼西南地区和扬子西南缘向罗迪尼亚外缘的西澳大利亚-东南极北部-印度东南附近漂移(图10a-b; Goodge et al., 2017; Zhang et al., 2018, 2019)。琼西南地区的中元古代造山活动可能是 Albany- Fraser 格林威尔期造山带的响应, 与此同时, 沿扬子边缘形成了一系列与格林威尔造山带呈高角度相交的裂谷盆地, 如同现代 Rhine 地堑所示特征(图10b)。

#### 4 早新元古代(~1.0~0.9 Ga)原华夏造山作用: 原高止(Proto-Ghats)大洋俯冲响应

江绍断裂带之南东的华夏地区保存了少量基性-超基性岩, Zhang et al. (2012a) 识别出了一套~1.0~0.90 Ga 的 MORB 型、富铌和弧型基性岩(图7a和8), 表明该时期华夏地幔受到了俯冲组分的交代改造。在构造判别图上, 这些岩石形成于活动大陆边缘环境。其变玄武岩内捕获有大量锆石, 其  $\text{Ba}/\text{La}=1.32\sim 38.9$ ,  $\text{Sm}/\text{Nd}=0.23\sim 0.27$ ,

$\text{Zr}/\text{Y}=2.5\sim 4.7$ , 与陆内弧后盆地玄武岩相似。另外~1.0~0.9 Ga 过铝质 S 型火成岩(如兴宁径南流纹岩)的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为负, 其新元古代沉积岩以复理石浊积岩为特征, 碎屑锆石主要峰值在~0.97 Ga、次要峰值为~2.5 Ga 和~1.85 Ga(图9d; 如 Wan et al., 2007; Yao et al., 2016, 2019, 2021; Li et al., 2014)。在云开南部复理石浊积岩碎屑锆石年龄谱系呈现为~0.97 Ga 的单峰(图3b), 其年龄谱系和相应年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  模式与印度西北相似(图9c-f)。如此特征表明武夷-云开地区可能保存了早新元古代早期(~0.97 Ga)造山作用的相关记录。但该事件的年龄跨度要比劳伦、澳大利亚和东南极的格林威尔造山事件(~1.3~1.0 Ga)年轻, 也略滞后于扬子西南缘和琼西南地区的~1.05~1.00 Ga 造山事件。相反, 其年龄谱系和年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  模式与印度西北相似(图9c-f)。

现有资料显示华南东部~0.97 Ga 变火成岩主要出露于武夷-云开和双溪坞地区, 除武夷-云开地区该时期长英质侵入岩以外, 其锆石  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  均为高的正值(图4和图5, 如 Wang et al., 2013c)。武夷-云开地区新元古代沉积岩中~0.97 Ga 的碎屑锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值多为负值, 明显差异于双溪坞群及赣东北蛇绿混杂岩中火成岩的同期锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(图4)。江南造山带和怀玉弧新元古代地层的碎屑锆石年龄特征峰为 0.86~0.83 Ga, 不同于华夏陆块武夷-云开所呈现的~0.97 Ga 碎屑锆石年龄峰值(如 Wang et al., 2013a; Yang et al., 2022)。结合新元古代早期华夏地区自南东向西北的碎屑搬运和云开-南岭同期 S 型花岗岩, 推测武夷-云开地区~0.97 Ga 的碎屑组分主要源自现今暴露之华夏陆块武夷-云开地区或其东南部, 而非扬子西缘或江南造山带地区(如 Wang et al., 2010a, 2010c; Yu et al., 2008)。

换言之, 华夏陆块~0.97 Ga 碎屑锆石年龄的早新元古代碎屑物源仅有两种可能: 一种是来自与全球格林威尔造山事件有关(~1.2~1.0 Ga)的琼西南, Albany-Fraser 造山带和南极洲威尔克斯(Wilkes)和 Windmill 地区。但这些地区的火成岩年龄普遍比武夷-云开碎屑锆石年龄为老, 其碎屑锆石年龄谱系和  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值也差异于武夷-云开地区(图9)。另一种可能则是华夏陆块 0.97 Ga 的碎屑物质主要源自以~1.0~0.9 Ga 岩浆活动为主的印度-南极洲雷纳(Rayner)-东高止(Eastern Ghats)造山带(岩浆活动主要发生在~1.0~0.9 Ga)。事实上印度东高止地

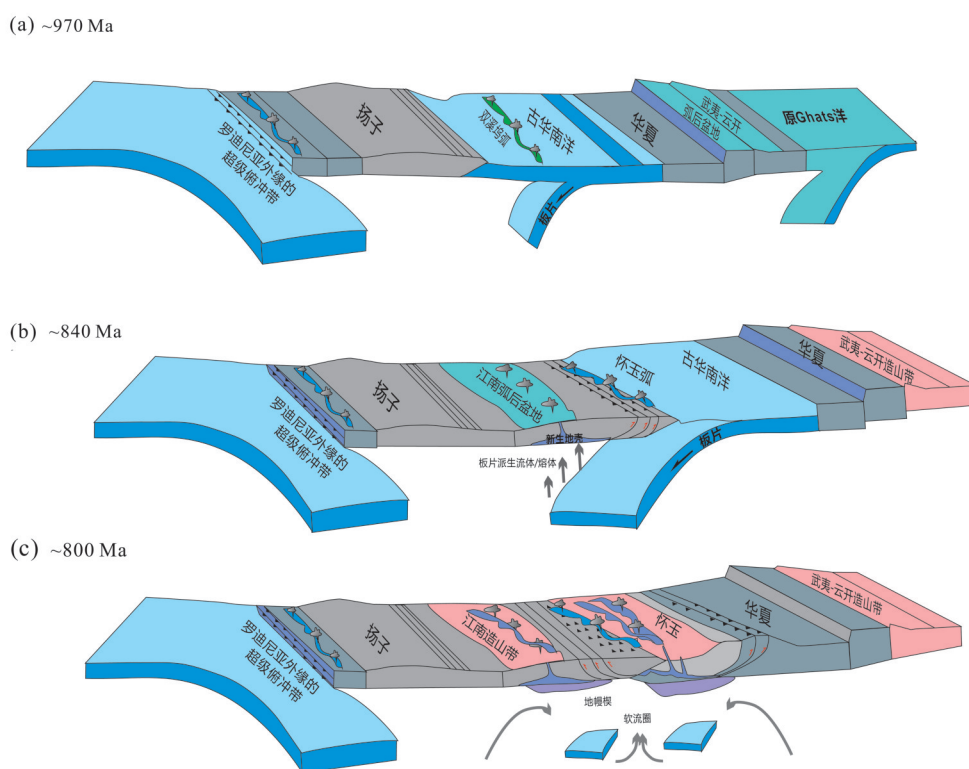
区以发育~1.00~0.93 Ga的蛇绿岩、钙碱性弧型火成岩、花岗岩和火山-沉积层序为特征,支持原高止洋1.00~0.03 Ga的俯冲环境,其闭合造就了印度的东高止和东南极的北查尔斯王子山造山带。华夏武夷-云开地区早新元古代早期火成岩的时空格局与上述造山带具很好的耦合关系。因此武夷-云开弧后盆地可解释为对原高止大洋俯冲的响应,华夏陆块早新元古代造山事件(在此称为原华夏造山带)相当于~1.0~0.9 Ga的印度东高止造山带,其始于~1.00 Ga,终于~0.90 Ga,此时(~0.97 Ga)华夏陆块占据于罗迪尼亚超大陆外缘(图10a-b)。

## 5 新元古代(~970~830 Ma)古华南构造格局:长寿命弧-盆体系

华南新元古代构造格局主要有“地幔柱”和“俯冲碰撞”等观点之争(如Li et al., 2007; 舒良树, 2006, 2012; Zhang and Wang, 2016; Shu et al., 2019),然而,现有数据并不支持华南在新元古代发生过短时期、大范围、超体积的大规模地幔柱

火成事件,而有悖于地幔柱观点。相反,江-绍断裂带以西的双溪坞群火山岩及其侵入岩形成于~1.01~0.88 Ga,峰值年龄为0.98 Ga(图8),其SiO<sub>2</sub>含量变化大、富集大离子亲石元素、亏损高场强元素、高度亏损Nd-Hf同位素组成,其全岩Nd和锆石Hf模式年龄变化范围于~1.10~0.92 Ga(Ye et al., 2007; Chen et al., 2009; Yao et al., 2016)。而且,双溪坞群沉积岩全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为正、古老碎屑锆石少,峰值为+3.9,很少古老地壳物质的添加,以上资料表明~1.01~0.88 Ga时期的双溪坞群处于洋内弧背景。

沿赣东北断裂带分布的早新元古代蛇绿混杂岩,其形成时代大致与双溪坞群近于同期,两者均具高的、正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(图3d和5d)。结合田里片岩、铁砂街群、双溪坞群和赣东北蛇绿混杂岩的空间格局,可认为赣东北蛇绿混杂岩形成于大洋弧后环境,从而构成双溪坞洋-弧体系(图11a)。赣东北蛇绿混杂岩~880 Ma的淡色花岗岩和流纹岩具负的全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(图5c-d),属变沉积岩衍生产物,说明该弧后盆地可能关闭于~880~



(a)示~1.0~0.9 Ga华夏武夷-云开弧后盆地和双溪坞弧与印度东高止和古华南海洋的关联关系;  
(b)示~0.87~0.83 Ga古华南海洋向西俯冲而成怀玉弧和江弧后盆地;  
(c)示~0.8 Ga在罗迪尼亚外缘超级俯冲带背景下扬子与华夏陆块的最终拼贴及随之的陆内裂解。

图 11 华南东部中新元古代动力学演化模型

Fig. 11 Schematic cartoons showing the Mesoproterozoic and Neoproterozoic tectonic evolution in the eastern South China Block

870 Ma, 这一认识也为赣东北蛇绿混杂岩~870 Ma 的高压低温蓝片岩所证实(如 Shu et al., 1994, 2019; Yao et al., 2016)。因此, ~1.00~0.88 Ga 至少在赣东北-双溪坞地区发育了“古华南洋”, 该大洋向北西俯冲, 并于~880 Ma 关闭而转化为以怀玉弧、皖南蛇绿混杂岩和江南弧后盆地为标志的江南弧盆格局(~870~830 Ma, 图 11b)。在赣东北-皖南地区及其南延, 发育了龙游庙后杂岩、山后杂岩、诸暨陈蔡杂岩、弋阳周潭杂岩和新余岭上杂岩等新元古代岩石。这些杂岩的变火成岩结晶于~870~825 Ma(图 8), 其岩石组合属于钙碱性基性岩-长英质岩系列(图 7a), 如 MORB 型、弧型和高镁火成岩, 高铌和富铌基性岩以及高硅埃达克岩。其中  $\text{SiO}_2 < 58\%$  的基性-中性火成岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -4.7 \sim +7.54$ ,  $\text{Nb/La} = 0.15 \sim 1.76$ , 长英质火成岩的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.8 \sim +5.3$ ,  $\text{Nb/La} = 0.25 \sim 0.53$ 。Nb/La- $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  图和 Nd/La-Zr/Nb 图上所展示的演化趋势表明, 中基性火成岩源于俯冲板片或再循环沉积物改造的地幔楔(图 8a)。而同期皖南蛇绿混杂岩和相关火成岩具有相似 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 中基性和长英质岩石的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  分别为  $-4.0 \sim +5.7$  和  $-10.7 \sim +0.2$ 。陈蔡群和溪口群沉积岩及其相当岩层的沉积组分成熟度低, 具深海-半深海复理石沉积建造特征, 其全岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值峰值为  $-4.2$  和  $-1.2$ , 较冷家溪群(峰值为  $-6.5$  和  $-4.2$ ) 为高(Wang et al., 2024)。碎屑锆石年龄谱系呈现单峰模式, 峰值为~833 Ma, 且多数具正的锆石原位  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(图 3c 和 4c)。另外骆家门组底砾岩中多见锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为正的~870 Ma 安山质和英安质砾石, 也支持了怀玉地区在~870 Ma 时属于活动大陆边缘的认识(如 Cui et al., 2017; Shu et al., 2019)。因此, 怀玉及其南延诸暨-龙游-弋阳周潭等地在~870~830 Ma 属于古华南洋向西俯冲而成的弧前-岛弧背景。

沿怀玉及其南延至江南造山带一带, 广泛发育具深海-半深海类复理石建造和浊积岩系的冷家溪群及其相当岩系, 其碎屑岩具有与华夏陆块前寒武纪沉积岩系相似的全岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(多小于  $-4.0$ ), 碎屑锆石年龄谱系以~865~837 Ma 为主要峰值,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值多高于  $-1.4$ (图 3c 和 4i)。相反, 溪口群及其相当岩层具有与昆阳群和会理群类似的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(多大于  $-4.0$ ; Wang et al., 2024), 尽管碎屑锆石年龄峰值亦在~865~837 Ma, 但对应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值明显高于冷家溪群及其相当岩系(图 4)。冷家溪群内火山岩或与之相当的火成岩结晶于~870~825 Ma, 主

要集中于~850~830 Ma。其中~870~820 Ma 的结晶锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值峰值为  $+3.5$  和  $-6.2$ , 与怀玉弧火成岩  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(峰值为  $+5.8$ ) 明显不同(图 5f-j), 这表明江南造山带地壳成分相对于怀玉弧而言更为古老。另外, 江南造山带~860~830 Ma 火成岩以钙碱性 N-MORB 型、E-MORB 型、弧型和高镁基性岩、高镁安山岩和正常安山岩为特征, 含少量长英质岩石(图 8c), 其全岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  变化于  $-8.2 \sim +9.0$ 。结合冷家溪群 MORB 型基性岩内丰富的古老捕获锆石, 可确定~860~825 Ma 的冷家溪群及其相当岩系形成于大陆弧后背景, 其位置更靠近扬子腹地(如 Zhang et al., 2013b, 2015b)。此外, 在赣西北庐山地区, 星子群和霄箕洼群变火山岩与冷家溪群变火山岩具同时性、有着相似的岩石类型和一致的地球化学特征, 因此更具亲陆性质的江南造山带向北极可能延伸至赣西北(九岭-庐山), 而不是向东入亲洋壳性质的怀玉弧地区(或以前所称之江南造山带东带)。由此限定~870~830 Ma 自东而西发育了怀玉弧(东)和江南弧后盆地(西)。考虑到如前所述~1.00~0.88 Ga 双溪坞-赣东北洋内弧-盆体系的空间配置及其在 0.88~0.87 Ga 的关闭, 可判断该洋内弧在关闭后转换至~0.87~0.83 Ga 怀玉大陆弧的发展, 从而造就了一个长寿命( $>150$  Ma)的、向西俯冲的新元古代(~980~830 Ma)弧-盆系统, 如图 11b 所示(Cui et al., 2017; Shu et al., 2019; 姜杨等, 2015)。其在 870 Ma 的构造转换也被碎屑锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值的急剧下降, 即自~970~880 Ma 的高度亏损至~860~820 Ma 的显著变化所证实(如 Wang et al., 2013c, 2019; Cui et al., 2017)。在江南造山带, 冷家溪群和板溪群碎屑锆石在~870~860 Ma 还发生了  $\delta^{18}\text{O}$  值的显著突变(如 Yang et al., 2015), ~870 Ma 相对有限的岩浆活动可能与该转换过程中俯冲角度变化或其后撤相关, 也与罗迪尼亚外缘 870 Ma 的构造转换相一致(如 Li et al., 2023), 高级变质作用在该汇聚过程的缺失则可能与其软碰撞有关。

江-绍断裂带普遍被认为是扬子与华夏的缝合带, 但该缝合带过萍乡向南延伸入何处一直存在争议, 不同构造边界被提出, 如图 1 所示(如 Wang et al., 2007b, 2008, 2010a, 2010b, 2013a, 2013b, 2013c, 2014a, 2014b, 2017, 2018b, 2019; 舒良树, 2012; Shu et al., 2019, 2021; Zhu et al., 2019)。舒良树(2012)和 Shu et al.(2019, 2021)等依据萍乡往西在桂北龙胜-元宝山一带出露 860~845 Ma 的蛇绿混杂岩和 835~825 Ma 的元宝山、三防、本洞 S 型花

岗岩(Yao et al., 2014, 2016; Yan et al., 2021), 认为缝合带过萍乡向西可与龙胜-元宝山相连。在此, 综合上述资料和讨论、及陈蔡群、周潭群和神山群下亚群等的空间展布, 更倾向于江-绍断裂带越赣中经郴州-临武断裂延入桂东北而至云开西缘(如 Wang et al., 2008)。该断裂带在空间上叠加于“十-杭高  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 带”、“地震波速突变带”和“地幔过渡带”(如 Gilder et al., 1999; Wang et al., 2008; Zhang et al., 2012b, 2018a; Zhang and Wang, 2016, 2020)。

图 4 表明华夏~1.0~0.9 Ga 长英质火成岩  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为负值, 而双溪坞弧同期火成岩的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为正。此外, 怀玉地区~880~830 Ma 的变火成岩和变沉积岩新元古代碎屑锆石(大多数为正值)比江南造山带具更高的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值。因此怀玉弧~870~830 Ma 的碎屑物供应不太可能来自武夷-云开地区、也不可能源自武夷-云开。另外江南造山带新元古代碎屑组分如果主要来自华夏早元古代长英质火成岩源区, 江南造山带应该保存丰富的早元古代(~1.0~0.90 Ga)碎屑锆石, 但在江南造山带冷家溪群及其相当岩系~1.0~0.9 Ga 的碎屑锆石并不多(图 3-4)。因此怀玉弧及江南造山带新元古代碎屑物更可能来自扬子东南缘(如怀玉、双溪坞弧自身或沿江南造山带东缘近平行方向搬运而来), 这揭示华夏陆块可能在~830 Ma 以前与扬子陆块以古华南洋相隔(图 11a-b; Wang et al., 2010c, 2013a, 2013b, 2013c, 2014a, 2014b, 2017, 2018b, 2019; Yin et al., 2013)。

现有资料表明, 位于印度北部和马尔瓦尔间的德里南部造山带, 发育有~0.97~0.83 Ga 的俯冲带(图 10b), 该俯冲带以基性-超基性蛇绿岩套(如 Phulad)、弧火成岩和 Kumbargarh 弧后盆地为标志(Bhowmik et al., 2010)。~0.97 Ga 的变火成岩被~880~810 Ma 德里南部造山事件的变形和变质作用所叠加, 并为~820~750 Ma 的裂谷型沉积建造角度不整合上覆, 在巴基斯坦东南部还报道有新元古代早期埃达克岩和岛弧岩石单元(如 Wang et al., 2017; Khan et al., 2019)。也就是说印度西北不同构造单元的时空格局及其所反映的超级俯冲带与古华南洋~970~830 Ma 的长寿命俯冲作用及随后的扬子-华夏拼贴完美匹配。由此表明, 在罗迪尼亚超大陆外缘发育了如图 10c 和 11a-b 所示的、向北西俯冲汇聚的新元古代(~970~830 Ma)长寿命(>150 Ma)古华南洋-盆体系, 该体系向南可与印度西北构造带相接。

## 6 扬子与华夏陆块于~830~800 Ma 的拼贴及随之的裂解

扬子和华夏陆块的拼合时间长期争论不休, 不同学者提出了~870、~830~815 和~800 Ma 等不同观点(如 Zhou et al., 2002; Shu et al., 2019; Zhang and Wang, 2016, 2020; Yao et al., 2016; Cui et al., 2017; Wang et al., 2019)。在整个江南造山带和怀玉地区, 冷家溪群及其相当岩系几乎同时被板溪群及其相当岩系以角度不整合上覆, 在不整合面上呈现明显不同的变形和变质作用(Shu et al., 2021; Wang et al., 2024 及其参考文献)。板溪群及其相当的沥口群和马面山群等最年轻碎屑锆石峰值集中于~817~740 Ma,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化为+9~+12 和-9~-11(图 6-7; Yao et al., 2019)。位于角度不整合面之上的板溪群粉砂质凝灰岩给出的年龄为~803~791 Ma(峰值为~797 Ma; Yao et al., 2019; 高林志等, 2011)。冷家溪群顶部凝灰质砂岩最年轻碎屑锆石年龄峰值为~825 Ma(高林志等, 2011)。冷家溪群和板溪群内最年轻和最古老的火山岩年龄分别为~825 Ma 和~818 Ma。代表了扬子与华夏拼贴后碰撞产物的沧水铺群银珠坝火山集块岩形成于~825~814 Ma。此外, 板溪群(江南)、沥口群(怀玉)和马面山群(华夏)火成岩形成时间变化于~810~745 Ma, 集中于~804~786 Ma(图 8), 其基性岩(<58%  $\text{SiO}_2$ )以 OIB 型和弧型为特征、长英质火成岩(>65%  $\text{SiO}_2$ )多具 A 型和 S 型花岗岩地球化学属性, 代表了造山后裂谷作用产物(Wang et al., 2019; Shu et al., 2021)。

沿江南造山带出露的过铝质花岗岩多形成于~826~810 Ma, 年龄峰值为~815 Ma(图 8)。这些花岗质岩体侵位于冷家溪群及其相当岩系中, 并为板溪群及其相当岩系所上覆(Shu et al., 2021; Wang et al., 2024 及其参考文献), 在构造判别图中, 花岗岩样品落入后碰撞区域, 可解释为同造山带地壳增厚背景下沉积岩部分熔融产物(如 Zhao and Cawood, 2012 及其相关文献)。而怀玉地区 I 型花岗岩及其相应火山岩年龄普遍大于~820 Ma, 具弧型地球化学特征, 锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为正值,  $\delta^{18}\text{O}$  值较低, 源自~970~830 Ma 的基性地壳(Sun et al., 2017)。由此可以看出~825~810 Ma 扬子、华夏陆块已完成拼合而形成了统一古华南洋陆块, 板溪群之下的区域性角度不整合代表了整个华南东部自碰撞后向陆内裂解的转变(图 11c)。有趣的是, 在印度西北的德里南部造山带, 其碰撞后隆升发生

在~820~800 Ma,以马拉尼A型流纹岩-花岗岩为特征的裂谷岩浆活动发生在~795~753 Ma。如此格局与扬子和华夏陆块的拼合及随之的裂谷作用时序上完美吻合。

综合区内已有新元古代火成岩的年代学数据如图8所示,武夷-云开地区~830~900 Ma的火成岩是相对缺失的,其主要年龄集中在737~790 Ma和915~979 Ma,在双溪坞地区火成岩形成年龄变化于~1 050~730 Ma,其中以双溪坞群和赣东北蛇绿混杂岩带为代表的双溪坞弧火成岩集中在~1 050~880 Ma,峰值980、905和880 Ma。相反,怀玉及其南延地区火成岩形成于~880~750 Ma,以皖南蛇绿岩和周潭-陈蔡群为代表的怀玉弧集中在~870~825 Ma,峰值在~833 Ma。江南

造山带地区新元古代火成岩主要形成于~870~740 Ma,以冷家溪群及其相当岩系为代表的江南弧后盆地火成岩则与怀玉弧形成年龄相似,其峰值在~830 Ma。江南造山带后碰撞火成岩的形成年龄峰值在815 Ma,而华南东部与裂谷作用有关的火成岩则变化在~820~730 Ma,峰值在804 Ma和786 Ma。结合新元古代早期(~1.0~0.75 Ga)攀西-汉南、塞舌尔和马达加斯加的沟-弧体系(图10c),进一步约束我们提出如图10b-c和11b-c的华南东部中-新元古代动力学模型。即,江南造山带与印度西北德里南部造山带在新元古代紧密相关,共同受控于罗迪尼亚超大陆外缘的超级俯冲作用(如Wang et al.,2013c,2014b,2019;Cawood et al.,2018;Shu et al.,2019)。

#### 参考文献:

- 丁炳华,史仁灯,支霞臣,等,2008. 江南造山带存在新元古代(~850Ma)俯冲作用:来自皖南SSZ型蛇绿岩锆石SHRIMP U-Pb年龄证据[J]. 岩石矿物学杂志,27: 375-388.
- 高林志,陈峻,丁孝忠,等,2011. 湘东北岳阳地区冷家溪群和板溪群凝灰岩SHRIMP锆石U-Pb年龄:对武陵运动的制约[J]. 地质通报,30: 1001-1008.
- 姜杨,赵希林,邢光福,等,2015. 扬子陆块东南缘浙江金华地区青白口纪晚期岛弧岩浆活动:来自富铌辉长岩和高镁闪长岩锆石U-Pb年龄和地球化学证据[J]. 地质通报,34(8): 1550-1561.
- 南颐,1994. 粤西云开群的划分及其地质年代[J]. 广东地质,9: 1-11.
- 舒良树,2006. 华南前泥盆纪构造演化:从华夏地块到加里东期造山带[J]. 高校地质学报,12(4): 418-431.
- 舒良树,2012. 华南构造演化基本特征[J]. 地质通报,31(7): 1035-1053.
- 徐亚军,杜远生,黄宏伟,等,2013. 华南发现4.1 Ga的碎屑锆石[J]. 科学通报,58(3): 240-246.
- BHOWMIK S K, BERNHARDT H J, DASGUPTA S, 2010. Grenvillian age high-pressure upper amphibolite-granulite metamorphism in the Aravalli-Delhi Mobile Belt, Northwestern India: New evidence from monazite chemical age and its implication[J]. Precambrian Res, 178: 168-184.
- CAWOOD P A, WANG W, ZHAO T Y, et al, 2020. Deconstructing South China and consequences for reconstructing Nuna and Rodinia[J]. Earth Sci Rev, 204: 103169.
- CAWOOD P A, ZHAO G C, YAO J L, et al, 2018. Reconstructing South China in Phanerozoic and Precambrian supercontinents[J]. Earth Sci Rev, 186: 173-194.
- CHEN X, WANG X L, WANG D, et al, 2018. Contrasting mantle-crust melting processes within orogenic belts: Implications from two episodes of mafic magmatism in the western segment of the Neoproterozoic Jiangnan Orogen in South China[J]. Precambrian Res, 309: 123-137.
- CHEN Z H, GUO K Y, DONG Y G, et al, 2009. Possible Early Neoproterozoic magmatism associated with slab window in the Pingshui segment of the Jiangshan-Shaoxing suture zone: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and geochemistry[J]. Sci China Ser D, 52: 925-939.
- CUI X, ZHU W B, FITZSIMONS I C W, et al, 2017. A possible transition from island arc to continental arc magmatism in the eastern Jiangnan Orogen, South China: Insights from a Neoproterozoic(870-860 Ma)gabbroic-dioritic complex near the Fuchuan ophiolite[J]. Gondwana Res, 46: 1-16.
- GAO J, KLEMD R, LONG L L, et al, 2009. Adakitic signature formed by fractional crystallization: An interpretation for the Neo-Proterozoic meta-plagiogranites of the NE Jiangxi ophiolitic mélange belt, South China[J]. Lithos, 110: 277-293.
- GOODGE J W, FANNING C M, FISHER C M, et al, 2017. Proterozoic crustal evolution of central East Antarctica: Age and isotopic evidence from glacial igneous clasts, and links with Australia and Laurentia[J]. Precambrian Res, 299: 151-176.
- GOODGE J W, VERVOORT J D, 2006. Origin of Mesoproterozoic

- zoic A-type granites in Laurentia: Hf isotope evidence[J]. *Earth Planet Sc Lett*,243: 711–731.
- GREENTREE M R,LI Z X,LI X H,et al,2006. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia[J]. *Precambrian Res*, 151: 79–100.
- ZHANG H C,XU Y J,CAWOOD P A,et al,2023. Linking the Paleozoic evolution of Hainan Island to Indochina and Australia: Implication for the paleogeography of the Eastern Tethys Ocean[J]. *Tectonophysics*,858: 229882.
- KAUR P,ZEH A,CHAUDHRI N,et al,2011. Archaean to Palaeoproterozoic crustal evolution of the Aravalli mountain range,NW India,and its hinterland: The U–Pb and Hf isotope record of detrital zircon [J]. *Precambrian Res*, 187: 155–164.
- KHAN M S,IRSHAD R,KHAN T, 2019. Geochemistry of mafic–felsic rocks of phulad ophiolite,in and around Pindwara–Mount Abu region,South Delhi Fold Belt,NW Indian Shield: Implications for its tectonic evolution[M/OL]// MONDAL M ed.*Geological Evolution of the Precambrian Indian Shield*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89698-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89698-4_17).
- LI L M,LIN S F,XING G F,et al,2013a. Geochemistry and tectonic implications of Late Mesoproterozoic alkaline bimodal volcanic rocks from the Tieshajie Group in the southeastern Yangtze Block,South China[J]. *Precambrian Res*,230: 179–192.
- LI L M,LIN S F,XING G F,et al,2013b. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Shaojiwa Formation and Xingzi Group,Lushan area,SE China: Implications for Neoproterozoic back–arc basin in the Yangtze Block[J]. *Precambrian Res*,238: 1–17.
- LI L M,LIN S F,XING G F,et al,2018. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Jingtang Formation in the eastern Jiangnan orogen,South China: Constraints on petrogenesis and tectonic implications[J]. *Precambrian Res*,209: 166–180.
- LI Q W,ZHAO J H,2020. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks in South China: Evidence from the ophiolite geochemistry[J]. *Precambrian Res*,350: 105893.
- LI W X,LI X H,LI Z X,2005. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance[J]. *Precambrian Res*,136: 51–66.
- LI X H,LI Z X,GE W C,et al,2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma?[J]. *Precambrian Res*,122: 45–83.
- LI X H,LI Z X,LI W X,2014. Detrital zircon U–Pb age and Hf isotope constrains on the generation and reworking of Precambrian continental crust in the Cathaysia Block,South China: A synthesis[J]. *Gondwana Res*, 25: 1202–1215.
- LI X H, 1998. The SHRIMP U–Pb zircon geochronology of Paleoproterozoic plagioclases amphibolite in the Zhejiang–Fujian area[J]. *J Geochem*, 27(4): 327–334.
- LI Y X,YIN C Q,LIN S F,et al,2021. Geochronology and geochemistry of bimodal volcanic rocks from the western Jiangnan Orogenic Belt: Petrogenesis, source nature and tectonic implication[J]. *Precambrian Res*,359: 106218.
- LI Z X,LI X H,LI W X,et al,2008. Was Cathaysia part of Proterozoic Laurentia? New data from Hainan Island,South China[J]. *Terra Nova*,20: 154–164.
- LI Z X,LI X H,ZHOU H W,et al,2002. Grenvillian continental collision in south China: New SHRIMP U–Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia [J]. *Geology*,30: 163–166.
- LI Z X,LIU Y,ERNST R,2023. A dynamic 2000–540 Ma Earth history: From cratonic amalgamation to the age of supercontinent cycle[J]. *Earth Sci Rev*,238: 104336.
- LI Z X,WARTHON 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[J]. *Precambrian Res*,159: 79–94.
- MARTIN E L,SPENCER C J,COLLINS W J,et al,2020. The core of Rodinia formed by the juxtaposition of opposed retreating and advancing accretionary orogens[J]. *Earth Sci Rev*,211: 103413.
- MIKHALSKY E V,HENJES–KUNST F,BELYATSKY B V, et al,2010. New Sm–Nd,Rb–Sr,U–Pb and Hf isotope systematics for the southern Prince Charles Mountains (East Antarctica)and its tectonic implications[J]. *Precambrian Res*,182: 101–123.
- MORRISSEY L J,PAYNE J L,HAND M,et al,2017. Linking the windmill islands,East Antarctica and the Albany–Fraser Orogen: Insights from U–Pb zircon geochronology and Hf isotopes[J]. *Precambrian Res*,293: 131–149.
- SHU L S,CHARVET J,1996. Kinematics and geochronology of the Proterozoic Dongxiang–Shexian ductile shear zone with HP metamorphism and ophiolitic melange(Jiangnan Region,South China)[J]. *Tectonophysics*,267: 291–302.
- SHU L S,DENG P,YU J H,et al,2008. The age and tectonic environment of the rhyolitic rocks on the western side of Wuyi Mountain,South China[J]. *Sci China Ser D*, 51:

- 1053–1063.
- SHU L S, FAURE M, YU J H, et al, 2011. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia[J]. *Precambrian Res*, 187: 263–276.
- SHU L S, WANG J Q, YAO J L, 2019. Tectonic evolution of the eastern Jiangnan region, South China: New findings and implications on the assembly of the Rodinia supercontinent[J]. *Precambrian Res*, 322: 42–65.
- SHU L S, YAO J L, WANG B, et al, 2021. Neoproterozoic plate tectonic process and Phanerozoic geodynamic evolution of the South China Block[J]. *Earth Sci Rev*, 216: 103596.
- SHU L S, ZHOU G Q, SHI Y S, et al, 1994. Study of the high-pressure metamorphic blueschist and its Late Proterozoic age in the Eastern Jiangnan Orogenic Belt[J]. *Chinese Sci Bull*, 39: 1200–1204.
- SUN J J, SHU L S, SANTOSH M, et al, 2017. Neoproterozoic tectonic evolution of the Jiuling terrane in the central Jiangnan orogenic belt (South China): Constraints from magmatic suites[J]. *Precambrian Res*, 302: 279–297.
- SUN J J, SHU L S, SANTOSH M, et al, 2018. Precambrian crustal evolution of the central Jiangnan orogenic belt (South China): Evidence from detrital zircon U–Pb ages and Hf isotopic compositions of Neoproterozoic metasedimentary rocks[J]. *Precambrian Res*, 318: 1–24.
- TIAN Y, WANG W, WANG L Z, et al, 2020. Age and petrogenesis of the Yingyangguan volcanic rocks: Implications on constraining the boundary between Yangtze and Cathaysia blocks, South China [J]. *Lithos*, 376–377: 105755.
- WAN Y S, LIU D Y, XU M H, et al, 2007. SHRIMP U–Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units[J]. *Gondwana Res*, 12: 166–183.
- WANG G G, NI P, ZHU A D, et al, 2018a. 1.01–0.98 Ga mafic intraplate magmatism and related Cu–Au mineralization in the eastern Jiangnan Orogen: Evidence from Liujia and Tieshajie basalts[J]. *Precambrian Res*, 309: 6–21.
- 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[J]. *Precambrian Res*, 294: 175–188.
- WANG J, LI Z X, 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up[J]. *Precambrian Res*, 122(1/2/3/4): 141–158.
- WANG L J, GRIFFIN W L, YU J H, et al, 2010a. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks[J]. *Precambrian Res*, 177: 131–144.
- WANG W, WANG F, CHEN F K, et al, 2010b. Detrital zircon ages and Hf–Nd isotopic composition of Neoproterozoic sedimentary rocks in the Yangtze Block: Constraints on the deposition age and provenance[J]. *J Geol*, 118: 79–94.
- WANG W, ZHOU M F, 2014a. Provenance and tectonic setting of the Paleo- to Mesoproterozoic Dongchuan Group in the southwestern Yangtze Block, South China: Implication for the breakup of the supercontinent Columbia[J]. *Tectonophysics*, 610: 110–127.
- WANG X C, LI X H, LI W X, et al, 2007a. Ca. 825 Ma komatiitic basalts in South China: First evidence for >1500 °C mantle melts by a Rodinian mantle plume[J]. *Geology*, 35: 1103.
- WANG X L, ZHAO G C, ZHOU J C, et al, 2008. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan Orogen[J]. *Gondwana Res*, 14: 355–367.
- WANG X L, ZHOU J C, GRIFFIN W L, et al, 2007b. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan Orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Precambrian Res*, 159: 117–131.
- WANG X L, ZHOU J C, WAN Y S, et al, 2013a. Magmatic evolution and crustal recycling for Neoproterozoic strongly peraluminous granitoids from southern China: Hf and O isotopes in zircon[J]. *Earth Planet Sc Lett*, 366: 71–82.
- WANG X S, GAO J, KLEMD R, et al, 2015. Early Neoproterozoic multiple arc–back–arc system formation during subduction–accretion processes between the Yangtze and Cathaysia blocks: New constraints from the supra–subduction zone NE Jiangxi ophiolite (South China)[J]. *Lithos*, 236–237: 90–105.
- WANG Y J, FAN W M, ZHANG G W, et al, 2013b. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies[J]. *Gondwana Res*, 23: 1273–1305.
- WANG Y J, GAN C S, TAN Q L, et al, 2018b. Early Neoproterozoic (~840 Ma) slab window in South China: Key magmatic records in the Chencai Complex[J]. *Precambrian Res*, 314: 434–451.
- WANG Y J, ZHANG A M, CAWOOD P A, et al, 2013c. Geochronological, geochemical and Nd–Hf–Os isotopic fingerprinting of an Early Neoproterozoic arc–back–arc system

- in South China and its accretionary assembly along the margin of Rodinia[J]. *Precambrian Res*,231: 343–371.
- WANG Y J,ZHANG F F,FAN W M,et al,2010c. Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U–Pb geochronology[J]. *Tectonics*, 29: TC6020.
- WANG Y J,ZHANG Y Z,CAWOOD P A,et al,2024. Proterozoic tectonics of eastern South China: From ca.1.45 Ga rifting in the interior of Columbia to a long-lived convergent orogen at the periphery of Rodinia[J]. *Earth Sci Rev*,249: 104652.
- WANG Y J,ZHANG Y Z,CAWOOD P A,et al,2019. Early Neoproterozoic assembly and subsequent rifting in South China: Revealed from mafic and ultramafic rocks,central Jiangnan Orogen[J]. *Precambrian Res*,331: 105367.
- WANG Y J,ZHANG Y Z,FAN W M,et al,2014b. Early Neoproterozoic accretionary assemblage in the Cathaysia Block: Geochronological, Lu–Hf isotopic and geochemical evidence from granitoid gneisses[J]. *Precambrian Res*, 249: 144–161.
- WANG J Q,SHU L S,YU J H,et al,2017. From the Neoproterozoic mafic rock to the Silurian high-grade metamorphic rock: Evidence from zircon U–Pb geochronological,bulk-rock geochemical and mineral EPMA studies of Longyou garnet amphibolite in SE China[J]. *J Asian Earth Sci*,141: 7–23.
- XU C,GAN C S,HIEU P T,et al,2022. Geochronology and Geochemistry of Mesoproterozoic Mafic Rocks in the Kontum Complex and Its Implication for the Columbia Reconstruction[J]. *Lithosphere*,2022(1): 4967935.
- XU X S,O'REILLY S Y,GRIFFIN W L,et al,2007. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes [J]. *Precambrian Res*,158: 51–78.
- XU Y J,CAWOOD P A,ZHANG H C,et al,2020. The Mesoproterozoic Baoban Complex, South China: A missing fragment of western Laurentian lithosphere[J]. *Geol Soc Am Bull*,132: 1404–1418.
- YAN C L,SHU L S,CHEN Y,et al,2021. The construction mechanism of the Neoproterozoic S-type Sanfang–Yuanbaoshan granitic plutons in the Jiangnan Orogenic Belt, South China: Insights from geological observation, geochronology, AMS and Bouguer gravity modeling[J]. *Precambrian Res*,354: 106054.
- YANG C,LI X H,WANG X C,et al,2015. Mid-Neoproterozoic angular unconformity in the Yangtze Block revisited: Insights from detrital zircon U–Pb age and Hf–O isotopes [J]. *Precambrian Res*,266: 165–178.
- YANG X,WANG Y,ZHANG Y,et al,2022. Early Neoproterozoic (~840 Ma)assemblage in South China and the southern extension of the Jiangshan–Shaoxing zone: Records from the Zhoutan and Shenshan igneous rocks in central Jiangxi [J]. *Precambrian Res*,371: 106573.
- YANG Z Y,JIANG S Y,2019. Detrital zircons in metasedimentary rocks of Mayuan and Mamianshan Group from Cathaysia Block in northwestern Fujian Province, South China: New constraints on their formation ages and paleogeographic implication[J]. *Precambrian Res*,320: 13–30.
- YAO J L,CAWOOD P A,SHU L S,et al,2016. An Early Neoproterozoic accretionary prism ophiolitic mélangé from the western Jiangnan orogenic belt,South China[J]. *J Geol*, 124: 587–601.
- YAO J L,CAWOOD P A,SHU L S,et al,2019. Jiangnan orogen, South China: A ~970–820 Ma Rodinia margin accretionary belt[J]. *Earth Sci Rev*,196: 102872.
- YAO J L,SHU L S,SANTOSH M,2014. Neoproterozoic arc-trench system and breakup of the South China Craton: Constraints from N–MORB type and arc-related mafic rocks,and anorogenic granite in the Jiangnan orogenic belt [J]. *Precambrian Res*,247: 187–207.
- YAO J L,SHU L S,CAWOOD P A,et al,2016. Delineating and characterizing the boundary of the Cathaysia Block and the Jiangnan orogenic belt in South China[J]. *Precambrian Res*,275: 265–277.
- YE M F,LI X H,LI W X,et al,2007. SHRIMP zircon U–Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an Early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block[J]. *Gondwana Res*,12: 144–156.
- YIN C Q,LIN S F,DAVIS D W,et al,2013. Tectonic evolution of the southeastern margin of the Yangtze Block: Constraints from SHRIMP U–Pb and LA–ICP–MS Hf isotopic studies of zircon from the eastern Jiangnan Orogenic Belt and implications for the tectonic interpretation of South China[J]. *Precambrian Res*,236: 145–156.
- YU J H,O'REILLY S Y,WANG L J,et al,2008. Where was South China in the Rodinia supercontinent? Evidence from U–Pb geochronology and Hf isotopes of detrital zircons[J]. *Precambrian Res*,164: 1–15.
- 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[J]. *Precambrian Res*,222–223: 424–449.

- YU J H, ZHANG C H, O'REILLY S Y, et al, 2018. Basement components of the Xiangshan–Yuhuashan area, South China: Defining the boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Precambrian Res*, 309: 102–122.
- ZHANG A M, WANG Y J, FAN W M, et al, 2012a. Earliest Neoproterozoic (ca. 1.0 Ga) arc–back–arc basin nature along the northern Yunkai Domain of the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence from the metabasite[J]. *Precambrian Res*, 220: 217–233.
- ZHANG C L, SANTOSH M, ZOU H B, et al, 2013a. The Fuchuan ophiolite in Jiangnan Orogen: Geochemistry, zircon U–Pb geochronology, Hf isotope and implications for the Neoproterozoic assembly of South China[J]. *Lithos*, 179: 263–274.
- ZHANG C L, ZOU H B, ZHU Q B, et al, 2015a. Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic ridge subduction along southern margin of the Jiangnan Orogen: New evidence from the Northeastern Jiangxi Ophiolite (NJO), South China[J]. *Precambrian Res*, 268: 1–15.
- ZHANG L M, WANG Y Y, QIAN X, et al, 2018. Petrogenesis of Mesoproterozoic mafic rocks in Hainan (South China) and its implication on the southwest Hainan–Laurentia–Australia connection[J]. *Precambrian Res*, 313: 119–133.
- ZHANG L M, ZHANG Y Z, CUI X, et al, 2019. Mesoproterozoic rift setting of SW Hainan: Evidence from the gneissic granites and metasedimentary rocks[J]. *Precambrian Res*, 325: 69–87.
- ZHANG S H, LI Z X, EVANS D A, et al, 2012b. Pre–Rodinia supercontinent Nuna shaping up: A global synthesis with new paleomagnetic results from North China[J]. *Earth Planet Sc Lett*, 353–354: 145–155.
- ZHANG Y Z, WANG Y J, GENG H Y, et al, 2013b. Early Neoproterozoic (~850 Ma) back–arc basin in the Central Jiangnan Orogen (Eastern South China): Geochronological and petrogenetic constraints from meta–basalts[J]. *Precambrian Res*, 231: 325–342.
- ZHANG Y Z, WANG Y J, ZHANG Y H, et al, 2015b. Neoproterozoic assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks: Evidence from the Cangshuipu Group and associated rocks along the Central Jiangnan Orogen, South China[J]. *Precambrian Res*, 269: 18–30.
- ZHANG Y Z, WANG Y J, 2016. Early Neoproterozoic (~840 Ma) arc magmatism: Geochronological and geochemical constraints on the metabasites in the Central Jiangnan Orogen[J]. *Precambrian Res*, 275: 1–17.
- ZHANG Y Z, WANG Y J, 2020. Early Neoproterozoic continental arc system at the Central Jiangnan Orogen, South China: Geochronological and geochemical constraints on the key igneous rock–association[J]. *Geol Soc Am Bull*, 132: 638–654.
- ZHAO G C, CAWOOD P A, 2012. Precambrian geology of China[J]. *Precambrian Res*, 222–223: 13–54.
- ZHAO J H, ZHOU M F, ZHENG J P, 2013b. Constraints from zircon U–Pb ages, O and Hf isotopic compositions on the origin of Neoproterozoic peraluminous granitoids from the Jiangnan Fold Belt, South China[J]. *Contrib Mineral Petr*, 166: 1505–1519.
- ZHAO J H, ZHOU M F, 2013a. Neoproterozoic high–Mg basalts formed by melting of ambient mantle in South China[J]. *Precambrian Res*, 233: 193–205.
- 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[J]. *Precambrian Res*, 163: 351–383.
- ZHOU M F, YAN D P, KENNEDY A K, et al, 2002. SHRIMP U–Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc–magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth Planet Sc Lett*, 196: 51–67.
- ZHU G L, YU J H, ZHOU X Y, et al, 2019. The western boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks, new constraints from the Pingbian Group sediments, southwest South China Block[J]. *Precambrian Res*, 331: 105350.

(责任编辑 秦社彩)