

江南造山带的形成与演化

王孝磊, 周金城, 陈昕, 张凤凤, 孙梓铭

内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210046

摘要: 处于扬子地块和华夏地块之间的江南造山带是理解华南地壳演化、岩浆过程和成矿效应的关键。近年来, 围绕江南造山带的构造-岩浆演化产生了较大争论, 因而影响到对华南显生宙岩浆-成矿事件内在联系及动力学机制的认识。本文总结了近年来对江南造山带研究大量资料, 对有关江南造山带形成和演化的几个方面进行了剖析和讨论, 明确了江南造山带是一个稍晚于世界典型 Grenville 期造山事件的新元古代的造山带, 具有完整的蛇绿岩、岛弧火山岩、高压变质岩、同碰撞岩浆岩、造山磨拉石、碰撞后岩浆岩和造山后岩浆岩等与造山过程相吻合的岩石组合, 经历了从洋洋俯冲、弧-陆碰撞到洋-陆俯冲、弧后盆地打开再到造山后伸展的构造过程, 在华南中部形成了大量中元古代末到新元古代早期的新生地壳, 很可能是显生宙成岩-成矿作用的重要物源。

关键词: 江南造山带; 新元古代; Rodinia 超大陆; 扬子地块; 华夏地块

中图分类号: P542.2 文章编号: 1007-2802(2017)05-0714-22 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2017.05.003

Formation and Evolution of the Jiangnan Orogen

WANG Xiao-lei, ZHOU Jin-cheng, CHEN Xin, ZHANG Feng-feng, SUN Zi-ming

State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences
and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China

Abstract: The Jiangnan Orogen, which lies between the Yangtze and Cathaysia blocks, is the key to understand the crustal evolution, magmatic process and ore-forming effect of the South China. In recent years, big arguments on the tectono-magmatic evolution of the Jiangnan Orogen have strongly influenced the understanding on internal relationship between the Phanerozoic magmatism and mineralization events in South China and their dynamic mechanisms. Based on the synthetic evaluation of a huge amount of geochronological and geochemical data of rocks in the Jiangnan Orogen, several important issues regarding the formation and evolution of the Jiangnan Orogen have been analyzed and discussed in this paper. It is confirmed that the Jiangnan Orogen is a Neoproterozoic orogenic belt, which was formed slightly later than the typical Grenvillian orogenic event, with complete orogeny-related rock associations, including ophiolites, arc volcanic rocks, high-pressure metamorphic rocks, syn-collisional magmatic rocks, orogenic molasses, post-collisional and post-orogenic magmatic rocks. The Jiangnan Orogen subsequently experienced various tectonic processes including the ocean-ocean subduction, arc-continent collision, ocean-continent subduction, opening of back-arc basins, and post-orogenic extension. The orogeny led to the formation of extensive late Mesoproterozoic and early Neoproterozoic juvenile crust that might have contributed greatly to the Phanerozoic diagenesis and metallogenesis in South China.

Key words: Jiangnan orogen; Neoproterozoic; Rodinia supercontinent; Yangtze block; Cathaysia

华南是东亚的重要地质块体, 北与华北板块以秦岭-大别造山带相隔, 西以龙门山断裂和红河断裂为界限。华南以大面积、多期次岩浆作用和巨量 W-Sn、稀土等多金属矿床为特色, 长久以来一直广受

关注。理解华南在不同地质时期的构造-岩浆-成矿过程, 其关键在于追根溯源, 弄清构建华南基底和基础地质框架的前寒武纪地质演化史。正因为如此, 华南前寒武纪的地质-地壳演化始终保持了较高

收稿日期: 2017-02-10 收到, 2017-03-27 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41330208, 41222016)

第一作者简介: 王孝磊 (1979-), 男, 博士, 教授, 获第 16 届侯德封奖, 研究方向: 岩石学、前寒武纪地质学. E-mail: wxl@nju.edu.cn.

的吸引力,一直是海内外地质学界研究和探讨的热点之一。20世纪90年代中期以前,前辈学者已对此开展了大量开拓性和奠基性的工作(Grabau, 1924; 郭令智等, 1977, 1980; 王德滋等, 1984; 白文吉等, 1986; 水涛等, 1986; 水涛, 1987; Hsü *et al.*, 1988; 徐克勤等, 1989; Chen *et al.*, 1991; 刘鸿允, 1991; 李继亮, 1992; 许志琴等, 1992; 周新民和朱云鹤, 1992; Charvet *et al.*, 1996; Shu and Charvet, 1996; Chen and Jahn, 1998)。理解华南前寒武纪的地壳演化,关键是梳理构成华南的两大块体——扬子地块(板块)和华夏地块(板块)的拼接过程,处于扬子和华夏地块之间的“江南造山带”便成为关键之关键。

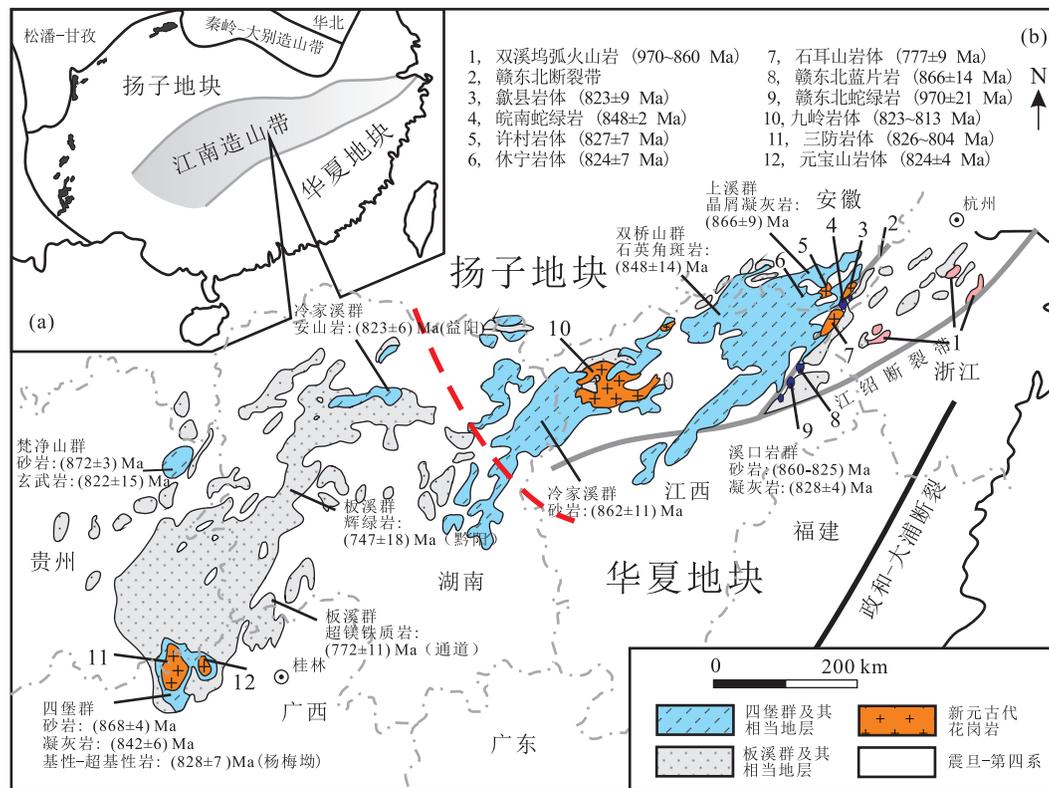
20世纪八九十年代,对江南造山带的研究多集中于其东段(赣东北、皖南、浙西、浙北等),在中-新元古代蛇绿岩套、岛弧火山-沉积岩系、高压变质作用、碰撞型花岗岩及扬子-华夏板块的拼合等方面取得了一系列成果(王德滋等, 1984; 白文吉等, 1986; 水涛等, 1986; 王自强和索书田, 1986; 徐步台, 1987; 周新民和王德滋, 1988; 周新民等, 1989; 周国庆和赵建新, 1991; Chen *et al.*, 1991; 程海, 1991; 马长信, 1991; 沈渭洲和杨杰东, 1991; 徐备等, 1992; 凌洪飞等, 1992; 徐夕生和周新民, 1992; 周新民和朱云鹤, 1992, 1993; Li *et al.*, 1992, 1994, 1997; 沈渭洲等, 1993; 舒良树等, 1993, 1995; Li, 1999),达成了较为一致的认识:江南造山带是华夏和扬子地块间的元古代碰撞拼贴带(郭令智等, 1980; Chen *et al.*, 1991; 周新民和朱云鹤, 1993)。而自20世纪90年代中后期以来,随着国际上有关中元古代末至新元古代初形成的Rodinia超大陆的聚合-裂解讨论的深入,围绕江南造山带乃至华南的前寒武纪构造演化研究又掀起了一场新的学术大讨论(Zhao and Cawood, 1999; Li *et al.*, 1999, 2003a, 2003b, 2004, 2006, 2008b, 2008c, 2009a; Ling *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2002a, 2002b, 2004, 2006a, 2006b, 2009; 周金城等, 2003a, 2003b; 王孝磊等, 2003; Wang *et al.*, 2004a, 2004b, 2006, 2007, 2008a, 2008b, 2012a, 2012b, 2013b, 2014; Zheng, 2004; Zheng *et al.*, 2004, 2007, 2008; Wu *et al.*, 2006; Ye *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2011; Yao *et al.*, 2013, 2014a, 2014b, 2014c)。尽管目前对于江南造山带的形成和演化模式仍有不同认识,但近年来积累的大量数据使其演化过程日渐清晰。

对江南造山带形成和演化的深入研究有助于

加深对华南前寒武纪重大地质问题的认识,揭示华南显生宙不同阶段岩浆-成矿过程之间的内在联系,凝练华南地壳演化模式,加强全球对比研究。正是基于以上认识,笔者在总结大量文献和数据资料的基础上,对江南造山带形成和演化这一命题密切相关的8个方面进行了系统总结,对相关的科学问题进行了梳理和剖析,以期研究华南前寒武纪构造演化的学者提供参考,抛砖引玉。

1 江南造山带的定义和范围

在华南中部,有一近北东东走向的前寒武纪地质单元(图1),西起桂北,经黔西南、黔东北、湘西、赣西北、赣东北、皖南、浙西至浙北,约1500 km长、200 km宽,将华南一分为二,其北西侧为扬子地块,南东侧为华夏地块。该前寒武纪地质单元由中新元古代浅变质岩系及新元古代花岗岩岩和少量镁铁质岩组成。黄汲清(1945)将其命名为“江南古陆”后,认为江南古陆在前震旦纪褶皱的基础上叠加了加里东的褶皱造山,又将其易名为“江南地背斜”(黄汲清, 1959);因该地质介于扬子和华夏地块之间并呈线状隆起而得名“江南地轴”(黄汲清, 1960)。该地质单元还有“江南地块”(黄汲清, 1954)、“湘赣浙缝合带”(许靖华等, 1987)等名称。板块构造理论引入国内后,郭令智等(1977, 1984)认为该区域为一套元古代“沟-弧-盆”体系,并称之为“江南古岛弧”,从而引发了对华南大地构造性质和演化历史认识的根本性变化。此后的研究在蛇绿岩套、岛弧火山岩、高压变质岩、造山带岩浆岩等方面取得了不少新的认识,扬子地块东南缘存在一个中-新元古代的造山带这一认识也为广泛接受(周新民和王德滋, 1988; 周国庆等, 1989; 周新民等, 1989; 周国庆和赵建新, 1991; 程海, 1991; 马长信等, 1991; 徐备等, 1992; 徐夕生和周新民, 1992; 周新民和朱云鹤, 1992, 1993; 舒良树等, 1995; 杨明桂等, 2002; Zhou *et al.*, 2002b, 2006a; 邓国辉等, 2003; 周新民, 2003; 楼法生等, 2003; Zhou *et al.*, 2009)。这即是“江南造山带”(舒良树等, 1993, 1995)一名的由来。近年来,国内外一些文献又将其称为“四堡造山带”(Sibao Orogen),对应的造山作用称为“四堡造山作用”(Sibao Orogeny)(Li *et al.*, 2006, 2008, 2009; Greentree *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009)。笔者认为,“江南造山带”一词由“江南古陆”演变而来,在定义上具有继承性,且在地域上有广泛的代表性,用它来指示扬子地块和华夏地块之间的这一前寒武纪地质单



图件据 Wang 等(2014)

图 1 江南造山带地质简图

Fig.1 Geological sketch map of the Jiangnan Orogen

元及所代表的“晋宁期”造山事件更为合适。而“四堡”一词仅是桂北地区的局部地名,且该区元古代造山过程的地质记录远不如江南造山带东段典型和具有代表性,如用“四堡造山带”一词可能不太充分,且易造成混淆。值得注意的是,“江南造山带”一词本身仅是一个客观的表述,指的是分布于扬子和华夏地块之间的一条中-新元古代的造山带。该名称只对应本期造山作用,但对该造山作用的性质、效应、构造极性并无明确限定。有些学者不认为扬子和华夏地块之间在新元古代拼接,这一问题可再研究,但这并不能否认新元古代的造山作用和对应的“江南造山带”的存在。

尽管对于“江南造山带”中-新元古代的造山事件有较多的认同,但对于其形成时间仍存一定的争议,其本质在于扬子-华夏地块拼合时间的认识上。华南晋宁期、加里东期和印支期 3 个时代的构造-岩浆事件非常显著,扬子和华夏地块的拼合究竟与这三期事件如何关联是这一问题的关键。许靖华等(1987)将华南同北美阿巴拉契亚地区进行对比,提出江南造山带是扬子和华夏地块在印支期发生碰撞作用形成的造山带(Hsü *et al.*, 1988; 1990)。这

一观点曾得到一些学者的支持,并有一些中生代古生物化石资料发表(赵崇贺等, 1995; 薛重生等, 1996; 周正国, 1999)。但后来的研究表明,在这些前寒武纪岩石中发现的所谓中生代古生物证据是存在疑问的(杨群等, 2005)。扬子地块与华夏地块的最初拼合究竟是发生于早古生代还是新元古代?这一问题似乎更受关注。华南加里东期的变质变形较为强烈(Wan *et al.*, 2007; Yu *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2011b),麻粒岩、斜长角闪岩、片麻岩以及混合岩化现象在华南加里东褶皱带多处出现。然而,此类中-高级变质岩在江南造山带却极少出露。徐备等(1992)也认为扬子地块和华夏地块在加里东时期曾有过一次碰撞事件。Wong 等(2011)通过对江山-绍兴断裂带两侧中生代酸性岩的研究认为,这两个块体在新元古代时期可能并未完全拼合。然而,早古生代的拼合缺乏足够的地质依据,最关键的是缺乏该时期的洋壳残留(Shu *et al.*, 2006, 2011)。另外,假如早古生代发生的是类似三叠纪华南-华北之间的陆-陆碰撞,则缺乏高压-超高压变质岩;如果发生的是与俯冲相关的弧-陆碰撞或洋-陆俯冲的话,又缺乏大量弧岩浆岩来证明。此外,

大量的沉积地层工作表明,早古生代扬子地块和华夏地块之间为陆缘海或边缘海环境(王博和舒良树, 2001; 吴新华等, 2004; 杨群等, 2005; 舒良树等, 2007; Shu *et al.*, 2014), 而不是开放的大洋盆地。倘若如此, 扬子地块和华夏地块在古生代之前早已相连。Wang 等(2010)对横穿江南造山带中西段的大量寒武-志留系砂岩进行的碎屑锆石年龄谱研究表明, 扬子地块、江南造山带和华夏地块 3 个地质单元内的砂岩具有类似的碎屑锆石年龄谱。说明这 2 个块体在古生代之前就已相连, 并具有相似的源区。Li 等(2010)对武夷-云开造山带东段进行了详细的年代学、地球化学和变质温压条件的研究, 认为加里东时期的武夷-云开造山带是发育在陆壳基底之上的陆内造山带。国内不少学者也持类似观点(如 Wang *et al.*, 2011b; Shu *et al.*, 2014)。

更多的地质事实表明, 江南造山带是一个中-新元古代的造山带, 其发育最早可能始于中元古代末而终于新元古代早期(860~800 Ma), 其形成导致了扬子和华夏地块的拼合。相关的地质证据主要包括元古代的蛇绿岩-弧火山岩-高压变质岩-同碰撞和碰撞后的岩浆岩, 区域性地层角度不整合、前陆盆地和弧后盆地沉积等(周新民和王德滋, 1988; 周国庆等, 1989; 周新民等, 1989; 程海, 1991; 马长信, 1991; 徐备等, 1992; 徐夕生和周新民等, 1992; 周新民和朱云鹤, 1992, 1993; Shu *et al.*, 1994; 舒良树等, 1995; 杨明桂等, 2002; Zhou *et al.*, 2002b, 2006a; 邓国辉等, 2003; 周新民, 2003; 楼法生等, 2003; Wang *et al.*, 2006, 2007, 2012b, 2014; Zhou *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2013b)。在江南元古代造山作用结束后, 沿江南造山带产生了造山后的伸展(Wang *et al.*, 2008b, 2012b), 发育成了一个夭折的裂谷(Li *et al.*, 1999), 在其后形成了边缘海相沉积, 并于早古生代时期再次褶皱造山。

明确了“江南造山带”是扬子地块和华夏地块之间的中-新元古代造山带, 那么研究该造山带就需要剔除寒武纪以来的构造事件的影响, 而江南造山带的范围也很可能不完全是通常从地质图上所看到的带状区域。目前, 对于江南造山带的范围仍有不同认识。其北西侧与扬子地块的接触边界基本无异议, 沿着前寒武纪地层出露的柳州-凯里-张家界-九江-祁门-黄山一线。其南东侧往华夏地块方向, 东段边界清晰, 江绍断裂带作为扬子-华夏地块的边界已广为接受(如, 周新民, 2003)。然而, 江绍断裂带能否再往西延及如何延伸, 仍无定论。在江西

境内, 浙赣铁路以东的元古代地层(主要为周潭群)出现角闪岩相变质, 被认为是华夏地块的一部分(薛振华, 1997; 章邦桐等, 1997; 余达淦等, 1999)。然而, 最近的工作表明, 赣中周潭群至少有一部分变沉积岩具有与双桥山群一致的源区和构造环境, 推断其很可能属扬子地块(Li *et al.*, 2011a; 王孝磊等, 2013), 而其分布区的南部(相山地区)可能更多地属于华夏地块(Zhang *et al.*, 2016)。再往西南, 在江南造山带西段的湖西、黔东北和桂北地区, 缺乏与造山带东段皖南、赣东北、浙西北地区相对应的蛇绿岩、(双溪坞群)弧火山岩及蛇绿岩中的高压变质岩。不过, 最近也有研究表明, 在桂北地区存在与俯冲有关的高镁闪长岩(Chen *et al.*, 2014)、高镁的玄武岩(Zhao and Zhou, 2013), 可能与造山有关的白云母花岗岩(Yao *et al.*, 2014c), 甚至桂北蛇绿岩的存在也再被提起(Yao *et al.*, 2016)。有可能本区的新元古代弧有关的岩浆作用发生得较迟(周金城等, 2003a)。另外, 江南造山带西段的桂北四堡群和黔东北梵净山群具有与造山带东段和中段的双桥山群、溪口(岩)群、上溪群、冷家溪群等类似的源区和碎屑锆石年龄谱(Wang *et al.*, 2013b; Yao *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014)和褶皱样式(见本区各省区域地质志), 与上覆地层有类似的接触关系(角度不整合), 这说明这些地层产生于类似的构造环境, 反映了类似的早期大陆拼合过程, 只不过紧接其后的裂解过程可能稍有差异。

对于江南造山带东、西段岩浆岩的差异可以引发诸多设想。如果将西段岩浆岩的空间分布与东段对比, 就可发现, 如果西段确实存在与双溪坞弧同时代的岩浆活动, 那么这些岩浆岩应分布于目前元古代地层出露的桂北-湘西以东的位置。桂北龙胜-湘西黔阳一线往东约 300 km, 有一条近北东东向的著名的“低 Nd 模式年龄花岗岩带”(Chen and Jahn, 1998), 带内燕山期岩浆活动与 W-Sn 多金属成矿作用有关, 这期花岗岩浆的成因存在较大争论。一些学者认为这些花岗岩中明显有新生地壳物质的参与(朱金初等, 2006; Li *et al.*, 2009a)。然而, 这些花岗岩具高硅、缺基性岩伴生的特点, 且带内的印支期花岗岩中含有大量的新元古代岩浆核(舒徐洁, 北京 SHRIMP 会议摘要), 表明这些中生代的岩浆岩很可能是新元古代地壳物质部分熔融而成。此外, 低 Nd 模式年龄带上的这些中生代花岗岩总体上模式年龄的分布型式与江南造山带东段新元古代岩浆岩的完全一致(Shu *et al.*, 2011)。这表明, “低 Nd 带”中生代花岗岩的源区具

有与江南造山带东段新元古代花岗岩的源区完全一致的平均地壳存留年龄,暗示其地壳源区性质非常相似。也即,江南造山带西段新元古代的岛弧物质很可能就处于目前的低 Nd 模式年龄带区域,为显生宙地层和岩浆岩所覆盖,并作为中生代花岗岩的源区。也正因为此源区的特殊性质以及构造上作为扬子-华夏地块边界这一特殊位置,使得其熔融出来的花岗质岩浆在经历一定的结晶演化过程而富含 W-Sn 并矿化。洪大卫等(2002)曾对这一观点提出大量地质证据。当然,这一设想还需要更多的证据来支持。

2 造山带的蛇绿岩

蛇绿岩是板块缝合线的重要标志,识别蛇绿岩是研究块体拼合的重要内容。20 世纪 80 年代,在江南造山带有 3 处蛇绿岩曾被提出:皖南蛇绿岩(白文吉等, 1986; 周新民和王德滋, 1988)、赣东北蛇绿岩(白文吉等, 1986; 周国庆等, 1989; 周国庆和赵建新, 1991; Chen *et al.*, 1991; Li *et al.*, 1997)和桂北龙胜蛇绿岩(郭令智等, 1980, 1986)。

20 世纪 90 年代,较多学者认为桂北龙胜“蛇绿岩”的证据并不充分(张桂林等, 1997; 葛文春等, 2000)。桂北“蛇绿岩套”的岩石组合包括辉橄岩、橄辉岩、辉石岩、辉长岩、辉绿岩、细碧-角斑岩和硅质岩等,并赋存于新元古代丹洲群地层中(郭令智等, 1980, 1986; 钟白云等, 1981; 夏斌, 1984)。由于强烈的次生蚀变,原生矿物发生蛇纹石化、透闪石-阳起石化、绿泥石化、斜黝帘石化、钠长石化、滑石化和碳酸盐化等。野外可见明显的结晶分异现象,在较大的露头上(如瓢里和塘头)可以见到镁铁-超镁铁质岩从辉橄岩变化到辉石岩和辉绿岩,反映了岩浆的堆晶过程。这些基性-超基性岩与围岩并非呈“冷侵入”的构造接触关系,而是在有些地方见到围岩的角岩化等热接触变质现象(钟白云等, 1983; 夏斌, 1984; 张桂林和梁金城, 1993; 张桂林等, 1997; 葛文春等, 2000)。一些地方见到的接触部位明显的变形和片理化也非“冷侵位”的结果,而是顺层贯入的基性-超基性岩席在原地经历变形分解而形成的透镜体(张桂林等, 1997)。此外,龙胜地区的基性-超基性岩的轻稀土高度富集(葛文春等, 2000; 周金城等, 2003b; Zhou *et al.*, 2004),与蛇绿岩套玄武岩轻稀土亏损的地球化学特征并不吻合。以上证据倾向于表明,龙胜丹洲群地层中的基性-超基性岩并不能代表洋壳残留,而可能是基性岩浆顺层侵入于形成于海相环境的丹洲群,并经历

了后期的构造分解的结果。在桂北宝坛地区最初也有人认为四堡群中发育蛇绿岩(郭令智等, 1980, 1986)。但该区的基性-超基性岩石具有类似龙胜地区的岩性和“弧”的地球化学特征(葛文春等, 2000; 周金城等, 2003a; Zhou *et al.*, 2004; Zhao and Zhou, 2013),且其并未经过分解变形,可能也是侵入的基性岩浆结晶分异的结果。近年来, Yao 等(2016)又提出桂北龙胜地区可能存在蛇绿岩套,这还需更多的工作来证实,其年龄与龙胜丹洲群的沉积时代的差异可能可以约束其“构造成位”的时代。

皖南蛇绿岩和赣东北蛇绿岩带首次由白文吉等(1986)报道,其后引起更多关注。

赣东北蛇绿岩套南起江西弋阳樟树墩,经德兴西湾,北至德兴茅桥,沿赣东北断裂带分布约 30 km,有约 200 个基性-超基性岩块。据有关资料,相关岩石类型有二辉橄榄岩、堆晶辉长岩、闪长岩、细碧玢岩、辉绿岩、玄武岩、斜长花岗岩、安山岩、硅质岩等(邢凤鸣等, 1992),蛇绿岩套中又见热接触变质现象(周国庆等, 1989; 李献华等, 1994; 舒良树等, 1993),相应的岩石包括石榴子石角岩、透闪石角岩、透辉石角岩、红柱石电气黑云母角岩、堇青石镁铁尖晶石角岩、黄长石大理岩等。不过,野外看到的赣东北蛇绿岩普遍都是蛇纹岩,在樟树墩有蛇纹石矿开采。笔者获取的全岩地球化学资料显示,赣东北蛇绿岩的原岩恢复主要为方辉橄岩。这套岩石不含豆荚状铁矿(邹海波和周新民, 1992),橄辉岩蛇纹石化较强,笔者通过大量的工作,在少量的薄片找到了原生的橄辉石和斜方辉石矿物,其 $Mg^{\#}$ 在 90 左右。

皖南蛇绿岩套呈北东向沿伏川-歙县分布,延长 40 余千米,因在伏川一带出露较好而常被称为“伏川蛇绿岩”(周新民等, 1989)。其组成岩石包括纯橄岩、方辉橄岩、堆晶辉石岩、伟晶辉长岩、辉长岩、富钠闪长岩和石英闪长岩、枕状细碧岩、熔结凝灰岩、岩屑晶屑凝灰岩及少量安山岩、角斑岩以及凝灰质千枚岩等(周新民等, 1989; 杨建明等, 1993)。这些岩石组合构造推覆于新元古代歙县花岗闪长岩体之上,在构造位置上处于赣东北断裂带的北东端。另外,在伏川村附近有一个铬铁矿矿部。相对于赣东北蛇绿岩,皖南蛇绿岩保存较为完整,在伏川村和伏塘坑村都具有较好的剖面,豆荚状铬铁矿产出,有枕状玄武岩和较为明显的堆晶辉石岩出露,发育辉长岩的岩墙,但未见类似赣东北的斜长花岗岩。在伏塘坑村旁的采坑中可以见到明显的橄辉石和辉石的残留,电子探

针分析其 $Mg^{\#}$ 值比赣东北的略高,显示一个更为亏损的地幔。

早期的 Sm-Nd 等时线定年结果显示皖南和赣东北蛇绿岩的年代基本一致。比如,周新民等(1989)报道的伏川蛇绿岩中辉石岩全岩-矿物(包括普通辉石、斜长石和磷灰石)等时线年龄为(1024±30)Ma;徐备和乔广生(1989)报道的赣东北蛇绿岩年龄为(930±33)Ma;周国庆和赵建新(1991)报道的赣东北蛇绿岩年龄为(1160±28)Ma;Chen等(1991)报道的赣东北蛇绿岩辉长岩全岩-矿物(包括辉石和斜长石)等时线年龄为(1034±24)Ma,伏川蛇绿岩套粗粒辉长岩全岩-矿物(辉石和斜长石)等时线年龄为(935±10)Ma;邢凤鸣等(1992)报道的赣东北樟树墩蛇绿岩套辉长岩全岩-矿物(包括斜长石和辉石)等时线年龄为(1034±16)Ma。Li等(1997)汇总了赣东北蛇绿岩的 Sm-Nd 同位素数据,重新计算得到一个等时线年龄为(956±44)Ma。

赣东北蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄与出露在西湾村西蛇绿岩露头中的斜长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(968±23)Ma(李献华等,1994),在误差范围内一致。后来对该斜长花岗岩开展的工作也得到了类似的年龄,如 Gao 等(2009)获得了(970±21)Ma 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄结果;笔者等也得到了(987±11)Ma、(971±21)Ma、(1001±8)Ma、(1025±50)Ma 的 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄结果(Sun *et al.*, 2017)。最近,又有学者对赣东北蛇绿岩中的辉长岩开展了 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年工作,得到了(1009±5)Ma 左右的年龄(李源等,2017),与之前获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果(王存智等,2015)在误差范围内一致,进一步验证了赣东北蛇绿岩的年代。Li 等(2008a)也在此蛇绿岩中对花岗岩获得了(880±19)Ma 的上交点年龄,不过其研究的样品并非斜长花岗岩,且具有富集的 Nd 同位素特征,另外该样品的锆石年龄较为复杂,分布范围大,该花岗岩可能是构造就位时围岩发生部分熔融所产生,不能用来代表蛇绿岩的年龄,且年龄也有待进一步验证。另外,赣东北蛇绿岩构造就位位于张村岩群中,与张村岩群相当的双桥山群形成于 860~825Ma(Yin *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014),张村岩群中凝灰岩的年龄为(833±10)Ma(李源等,2017)。因此,赣东北蛇绿岩的构造就位时间应不早于 830 Ma。

对于皖南蛇绿岩,吴荣新等(2005)较早发现其中的辉长岩时代为新元古代(826±4 Ma),其中还发现有新元古代早期(891±13 Ma)的锆石,后来被

解释为从地幔源区中所继承(Zhang *et al.*, 2012)。丁炳华等(2008)报道了堆晶异剥橄榄岩和辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为(827±9)Ma 和(848±12)Ma。这些新的年龄资料也得到后来不同学者工作的证实(Zhang *et al.*, 2013; Yin *et al.*, 2013)。

显然,最新的资料说明皖南蛇绿岩与赣东北蛇绿岩的形成年龄并不一致,这也许从另一方面反映出二者产生的构造背景有差异。前人的研究表明,皖南蛇绿岩套中火山岩的 Nd 同位素并不太亏损(周新民等,1989),暗示其形成于大陆边缘。与皖南蛇绿岩年龄相当的基性岩断续出现于双桥山群、冷家溪群等地层之中,包括赣北庐山地区的基性岩(Li *et al.*, 2013)、皖南-赣北障源基性岩(张彦杰等,2011;周效华等,2014)、皖南鹤城科马提质玄武岩(汪龙等,2016)、赣中周潭群中的基性岩(Zhang *et al.*, 2017)、湘东北浏阳玄武岩(Wang *et al.*, 2004b; Yao *et al.*, 2014a)、湘北益阳科马提质玄武岩(Wang *et al.*, 2004b)等等,这些岩石具有 N-MORB 或者岛弧玄武岩的地球化学特征,所赋存的围岩也产生于弧后的环境。因此,皖南蛇绿岩应形成于弧后伸展的环境,其对应的橄榄岩经历了更高层次的熔体抽取,因而更加亏损微量元素(Sun *et al.*, 2017)。相对而言,形成于中元古代末期到新元古代早期的赣东北蛇绿岩则可能形成于弧前环境(Li *et al.*, 1997; Sun *et al.*, 2017),与其中出现高压的蓝片岩相符。

3 造山带的岛弧火山岩

江南造山带岛弧火山岩的识别也是理解江南造山带构造演化的重要一环。岛弧的范围和性质的确定有助于恢复扬子地块和华夏地块元古代拼合的型式与历史。双溪坞地区岛弧火山岩得到了广泛的认同(郭令智等,1980;王自强和索书田,1986;水涛等,1988;浙江省地质矿产局,1989;兰玉琦和叶瑛,1991;兰玉琦等,1992;程海,1993),被划于“双溪坞群”中,出露于浙西北,夹持于赣东北断裂带和江绍断裂带之间。双溪坞群火山岩的主要岩性有英安质熔结凝灰岩、凝灰岩、玄武岩、安山岩、细碧岩、英安岩、流纹岩等(程海,1993;杨树锋等,2009),自下而上分成 4 个组:平水组、北坞组、岩山组和章村组(浙江省地质矿产局,1989),又有晚期的闪长岩侵入。

沈渭洲和杨杰东(1991)依据 Nd-Sr-O 同位素数据,认为双溪坞群弧火山岩中的细碧-角斑岩混入了

少量(<10%)的地壳组分。Li 等(2009a)依据其对双溪坞火山岩系统的地球化学对比研究,认为其来自亏损俯冲交代的岩石圈地幔。徐备和乔广生(1989)将赣东北登山-浙西北开化地区的登山群(又称上墅群、井潭组)火山岩也作为岛弧火山岩。兰玉琦和叶瑛(1991)、陈冠宝等(1998)也持此种看法。然而,该套火山岩具有高 K_2O 的特点,部分样品具有 OIB 的微量元素分配型式,与伸展作用有关(赵风清等, 1997; 吴根耀等, 1998; 廖群安等, 1999; 曾勇等, 2002),并不能作为典型的弧火山岩。前文提到类似双溪坞的弧火山岩在江南造山带西段却未发现,有可能埋藏于目前江南造山带西部范围的东侧,并作为后期中生代岩浆岩的源区(Shu *et al.*, 2011)。

双溪坞火山岩已积累了大量的年龄数据。章邦桐等(1992)获得了双溪坞群一个全岩-矿物 Sm-Nd 等时线年龄(1 个角斑岩、2 个石英角斑岩、1 个细碧岩及从中分离的磷灰石和绿帘石)为 (928 ± 44) Ma。程海(1993)报道的章村组 2 个英安岩样品单颗粒锆石 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 蒸发法年龄分别为 (904 ± 3.9) Ma 和 (875 ± 4.3) Ma。陈志洪等(2009a)报道的平水地区高镁闪长岩、富 Nb 玄武玢岩和斜长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 (932 ± 7) Ma、 (916 ± 6) Ma 和 (902 ± 5) Ma; 2 件角斑岩样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 (904 ± 8) Ma 和 (906 ± 10) Ma(陈志洪等, 2009b)。侵入于平水玄武岩中的桃红闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (913 ± 15) Ma(Ye *et al.*, 2007)。这些新的锆石定年数据都有较好的精度且 U-Pb 同位素比值谐和度较好,结果与早期数据基本一致。Li 等(2009a)报道的北坞组和章村组流纹岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 (926 ± 15) Ma 和 (891 ± 12) Ma。依据这些年龄数据,可知江南造山带东段双溪坞地区的弧岩浆活动主要发生于 930~880 Ma 间,稍晚于伏川和赣东北蛇绿岩的年代,这与地质事实相符。直接覆盖在双溪坞群火山岩上的骆家门组砾岩中的碎屑锆石年龄进一步约束了双溪坞群火山岩的活动时间(970~860 Ma)(Wang *et al.*, 2013a)。

Zheng 等(2008)根据江南造山带东段新元古代花岗质岩石的模式年龄主要分布在中元古代末期的现象,认为扬子地块东南缘的洋壳俯冲和相关的岛弧岩浆作用最早发生于中元古代末期,且该阶段产生的新生地壳在后期的弧-陆碰撞过程中又经历再造。然而,陈志洪等(2009a, 2009b)发现双溪坞

火山岩中的锆石具有极度亏损的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值,表明其源区应是新元古代早期经俯冲洋壳脱水交代亏损的地幔,代表了与岛弧岩浆作用有关的新生地壳的生长。Li 等(2009a)提供的全岩 Nd-Hf 同位素资料也支持这种说法。不过,Zheng 等(2008)仍然为深入研究扬子地块东南缘(扬子-华夏地块之间)的洋壳俯冲-地壳演化过程及是否存在 Grenville 期岩浆作用提供了新的思考。尽管扬子-华夏地块之间尚未发现中元古代末期的岩浆岩,但田里片岩所代表的变质事件(Li *et al.*, 2007)以及新元古代地层中所获取的虽不多但也有一定数量的格林威尔期碎屑锆石(Wang *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2009)也说明了这方面的研究仍需进一步的工作。尽管如此,扬子-华夏地块之间的晋宁期造山运动发生在新元古代早中期,似乎已无较大问题。沿江绍断裂分布有一系列元古代的闪长岩,被认为是新元古代块体拼接时的“焊接剂”(周新民和朱云鹤, 1993)。进一步的工作可围绕这些新元古代闪长岩及同期的岩浆作用来展开。

4 造山带的基底

江南造山带出露在扬子地块东南缘,对其基底的研究首先需要分析江南造山带内所出露的地层。江南造山带内分布的元古代地层大体可以分为上下两部分:下部地层以冷家溪群(湖南)、双桥山群(赣北-皖南)、上溪群(皖南)、溪口岩群(皖南-赣东北)、梵净山群(黔东北)和四堡群(桂北)等为代表,具线性紧闭褶皱;上部地层包括从板溪群、丹洲群等以来的地层,为连续沉积,具开阔的宽缓褶皱(见安徽、江西、湖南、广西、贵州等各省/区区域地质志)。两套地层的构造差异在野外多处均可看到。相对来说,下部那套地层被认为是江南造山带的基底,上覆地层为盖层(花友仁, 1995; 马文运, 1997)。然而,正如下文所述,由于下部的这些地层变质级别低,并不能称之为结晶基底,故而称为褶皱基底。

这套褶皱基底的年代,早期主要根据侵入于该地层中的花岗岩年龄来制约。桂北本洞花岗岩侵入于四堡群地层中,其早期的 Rb-Sr 岩石-矿物等时线年龄为 ~1000 Ma(伍实, 1979; 孙幼祥, 1982),因而限定该套褶皱基底也形成于中元古代。然而,后来的元古代花岗岩定年资料表明,沿江南造山带分布的很多花岗岩/花岗闪长岩都是形成于 ca. 835~795 Ma(Li *et al.*, 2003a; 钟玉芳等, 2005; Wang *et al.*, 2006; 张芳荣和黄新曙, 2008; 薛怀民等,

2010; 王敏等, 2011; 张菲菲等, 2011)。因此, 这些褶皱基底地层的年龄理论上完全有可能“跨入”新元古代, 有必要做进一步的年代学工作。

对前寒武纪浅变质沉积地层的定年工作, 主要有两种方式: 一是尽量寻找地层中的夹层火山岩, 直接测定年龄; 二是通过地层中砂质或凝灰质碎屑岩中的碎屑锆石年龄来获取其最大沉积年龄, 再结合侵入于其中的岩浆岩的年龄, 来分别限定地层年代的下限和上限。Wang 等(2007)较早对江南造山带西段四堡群、冷家溪群这些原先认为是“中元古代”的地层进行了碎屑锆石的年代学研究, 认为这套地层的形成不早于 ca. 860 Ma。接着, 又在赣东北双桥山群地层中发现了夹层的角斑岩和凝灰岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果分别为 (878 ± 4) Ma 和 (879 ± 5) Ma, 侵入于这套地层的辉长岩侵入体中分选出的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年结果为 (801 ± 4) Ma (Wang *et al.*, 2008a); 再结合皖南和九岭地区侵入于双桥山群中的元古代花岗岩的年龄 (820~830 Ma), 限定江西双桥山群地层可能形成于 ca. 880~820 Ma。高林志等(2008)对这套地层中横涌组 and 安乐林组的凝灰岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年工作, 分别得到 (831 ± 5) Ma 和 (829 ± 5) Ma 的年龄。湘西地区基本没有这套褶皱地层分布, 但在湘西以西的黔东北梵净山地区有所出露, 称为梵净山群。Zhou 等(2009)对梵净山群砂岩和夹层火山岩中的锆石进行了 U-Pb 定年, 得到这地层也应形成于 ca. 860~820 Ma 的结果。此外, 在武夷山以西, 赣中鹅湖-弋阳周潭-慈竹-余江马荃一带, 沿北东方向也出露一套宽 1.5~2 km、长约 100 km 变质岩系, 在江西称为周潭群。该岩系为高绿片岩相-低角闪岩相变质, 主要由片麻岩、斜长黑云母片岩、石榴子石片岩、砂线石片岩、石英片岩、变粒岩和斜长角闪岩组成, 在地理位置上处于扬子-华夏板块的接触部位, 早期对其归属于华夏还是扬子板块有不同认识。该岩系虽变质程度与江南造山带内的其他“褶皱基底”地层稍有不同, 但由于该区可能受到加里东、印支-燕山期构造运动的影响, 因而须认真甄别其构造属性。对赣中周潭群这些初步的锆石 U-Pb 年代学工作 (Li *et al.*, 2011a; 王孝磊等, 2013) 表明, 周潭群很可能形成于新元古代中期, 与江南造山带内的褶皱基底有类似的源区, 并在加里东期 (± 450 Ma) 经历了明显的变质作用 (Zhang *et al.*, 2017)。

近年来, 笔者又对江西双桥山群、湖南冷家溪群、庐山星子群以及皖南溪口岩群中砂岩的碎屑锆

石开展了更为详细的定年工作 (Wang *et al.*, 2014)。系统的年代学工作表明, 江南造山带这些“褶皱基底”的浅变质沉积岩具有相似的碎屑锆石年龄谱和最大沉积年龄 (ca. 860~820 Ma), 有较多新元古代早期地壳物质提供物源, 其源区既有江南造山带东侧的新生岛弧物质, 也有造山带西侧的扬子地体的古老地壳物质, 表明这样一套地层应形成于弧后盆地的沉积背景 (Li *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017)。结合这套地层详细的构造分析, 可以对江南造山带的构造演化提供重要制约。根据区调资料, 这些褶皱基底地层的褶皱样式和上覆新元古代盖层的完全不同, 呈线性紧闭褶皱, 且与上覆地层之间有一个明显的角度不整合。这表明, 这套褶皱基底地层应该形成于造山引起的褶皱之前, 因而地层的最大沉积年龄可以限定江南造山带造山过程中弧后盆地关闭的时间下限。

然而, 江南造山带的结晶基底在哪里? 具有何种性质? 这些问题仍未能得到较好解答。周新民和王德滋 (1988)、徐夕生和周新民 (1992) 在皖南-赣北新元古代花岗岩中发现了一些可能来源于残留源区的包体, 对这些包体的深入研究可能将为结晶基底的研究提供有益信息。

5 造山带的变质作用

在造山作用过程中, 由于俯冲作用、地壳加厚和构造推覆, 伴随着造山过程的不同阶段, 在不同部位都有相应的变质作用发生 (Miyashiro, 1972; Vanderhaeghe and Teyssier, 2001)。在一些著名的造山带都可以见到典型的造山带变质作用, 如巴罗造山带 (Burg and Gerya, 2005)、秦岭-大别古生代和中生代超高压变质作用 (Zhai *et al.*, 1998; Hacker *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 2009)、日本三波川变质带 (Kurata and Banno, 1974)、北美的格林威尔造山带 (Roback, 1996) 等。在华南地区, 加里东期的区域变质作用较为显著, 主要的变质岩岩石类型包括中高级区域变质产生的麻粒岩、片麻岩、角闪岩和混合岩化。然而, 江南造山带元古代的区域变质作用的性质和范围却是一个难解的谜。

沿皖南、赣东北、湖南、黔东北和桂北所分布的元古代地层仅发育了低绿片岩相的变质作用; 在湖南长沙-澧陵-浏阳一带甚至为甚低级变质作用 (朱明新和王河锦, 2001)。相关的变质岩石大多为板岩、千枚岩和透闪石化的岩石, 尚无确切的片麻岩和麻粒岩报道, 即便是片岩也出露极少, 仅在赣东北九岭岩体、桂北三防岩体外围的基底地层中见到

有含石榴子石的从千枚岩向片岩的过渡相。赣北庐山星子群中部分岩石可达角闪岩相变质, 曾被认为是江南造山带的基底(项新葵和许建华, 1993; 谢国刚等, 1996; 吴根耀等, 1998)。然而, 该期变质作用的时代缺乏有效制约, 从最近获得的基底地层年代学资料(Zhang *et al.*, 2017)来看, 其铅丢失所对应的变质作用应该发生于 ca.820 Ma 之后。Li 等(2007)报道了赣东北田里片岩的云母激光 Ar-Ar 定年的结果, 认为变质和变形年龄分别为 (1042 ± 7) Ma 和 (1015 ± 4) Ma。该结果与之前所报道的白云母 Ar-Ar 年代结果 (1029 ± 0.9) Ma(樊光明等, 1997)一致。除了这些极少出露的中元古代末期的片岩之外, 江南造山带内的局部地区还有少量高压变质岩石报道。这些岩石出露于赣东北蛇绿岩中, 相关的岩石类型包括蓝闪石片岩、硬玉钠长片岩等(舒良树等, 1993)。舒良树等(1993)对高压的蓝闪石片岩中的蓝闪石进行了 K-Ar 法年龄测定, 得到 (866 ± 14) Ma 的年龄, 代表了与俯冲有关的低温高压变质作用。该年龄一方面需要有新的年龄资料来验证, 另外一方面其地质意义需结合江南造山带东段的构造演化过程来分析。

总体来看, “江南造山带”内大量出露的沉积岩以低级变质作用的板岩、千枚岩为主, 在其碎屑锆石中也没有发现该时期的变质锆石, 似乎表明这套岩石距离碰撞带较远, 这也与这些地层弧后盆地的环境相一致。另外一种解释是, 新元古代的时候扬子和华夏地块之间发生的是双向俯冲, 没有显著的应力作用而导致强烈的区域变质作用(Zhao, 2015)。

6 造山带的新元古代花岗岩

江南造山带内的前寒武纪岩浆岩形成时代跨度 ca.1200~750 Ma。目前报道的最老的岩浆岩可能是铁砂街火山岩(主要为流纹岩、细碧岩、凝灰岩等), 年代为 $1172 \pm 10 \sim 1132 \pm 8$ Ma(高林志等, 2013)、 (1159 ± 8) Ma(Li *et al.*, 2013)。然而, 该套火山岩具双峰式特征, 基性岩具板内特征, 可能产生于早期的裂谷环境下(Li *et al.*, 2013), 彼时晋宁期造山作用还未启动, 因此不属于“江南造山带”的形成过程。接下来, 除具有洋壳属性的蛇绿岩套岩石外, 江南造山带内与造山有关的早期岩浆岩主要形成于 ca.950~880 Ma, 且多分布在双溪坞弧地体内。从已有的露头资料来看, 紧随其后产生的岩浆活动大约始于 860 Ma(Li *et al.*, 2008b; 姜杨等, 2014; 以及作者未发表数据); 并在约 820 Ma 形成

一个非常明显的峰值(Li *et al.*, 2003b), 以沿江南造山带分布的花岗闪长岩及伴生的少量基性岩为主。之后大约从 815 Ma 开始, 岩浆活动表现为不整合在褶皱基底地层之上的火山岩, 如湖南益阳的安山质和英安质集块岩(王剑等, 2003; Wang *et al.*, 2014)。然后在 ca.805~795 Ma 形成了上墅组及其相当的火山岩, ca.780 Ma 之后的岩浆活动以石耳山花岗岩(唐红峰等, 1997; Zheng *et al.*, 2008)、道林山花岗岩(周宇章等, 2006; Li *et al.*, 2008b; Wang *et al.*, 2011a)及湘西-桂北的镁铁质-超镁铁质岩(王孝磊等, 2003; Wang *et al.*, 2008b)为代表。

以 ca.820 Ma 为峰值的这期岩浆岩的成因是探讨扬子-华夏地块拼接的关键。该期岩浆岩以花岗岩类岩石为主体, 据江南造山带涉及的湖南、广西、贵州、江西、浙江、安徽等省区域地质志及相关区调资料, 在江南造山带西段, 前寒武纪火成岩总出露面积约 2100 km², 其中花岗岩类约占 87%; 在江南造山带东段, 总出露面积约 6100 km², 其中花岗岩类占约 5000 km²。而且, 该造山带是华南前寒武纪花岗岩的主要分布区, 因此研究这些新元古代(ca.835~800 Ma)花岗岩的成因对于江南造山带的形成以及华南前寒武纪地壳演化都有重要科学意义。

这些花岗岩主要分布在皖南(包括休宁、许村和歙县岩体)(Li *et al.*, 2003a; Wu *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2013c, 2014)、赣西北和湘东北(九岭岩体及其西延)(Li *et al.*, 2003a; 钟玉芳等, 2005; 张芳荣和黄新曙, 2008; 张菲菲等, 2011; Wang *et al.*, 2014), 以及桂北(三防、元宝山、本洞、龙有、寨滚、田朋等岩体)(Li, 1999; Wang *et al.*, 2006, 2014), 在黔东南梵净山(薛怀民等, 2010; 王敏等, 2011)和湘南部城步地区(柏道远等, 2010)也有少量出露, 在赣北庐山地区的花岗质“混合岩”(Wang *et al.*, 2014)可能也属此期。这些花岗岩的共同特征是强过铝, 在皖南和赣西北的岩体中有石榴子石和堇青石, 在桂北的岩体中有石榴子石, 少见白云母。总体上岩性以花岗闪长岩类为主(包括花岗闪长岩、英云闪长岩、石英闪长岩等), 在桂北出露有较多的黑云母花岗岩, 野外可见到侵入于花岗闪长岩中, 说明形成年代稍晚。江南造山带内的这些新元古代花岗岩总体上无变形变质, 呈块状构造, 仅在个别岩体(如歙县岩体)边部由于受到后期的构造应力而呈片麻状。

解释这些花岗岩的成因, 首先要弄清其源区的性质。江南造山带东段的皖南和江西境内的该期花岗岩以含堇青石为特征, 与一般的 S 型花岗岩相

比,具有相对较高(接近0)的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(Li *et al.*, 2003a)及较正的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(Zheng *et al.*, 2007),说明其源区有较多新生地壳物质的参与。周新民和王德滋(1988)提出皖南歙县花岗岩来自蛇绿岩和上覆沉积岩的部分熔融。锆石的Hf模式年龄指示,这些花岗岩的平均地壳存留年龄接近东侧双溪坞弧岩体的模式年龄,说明岛弧岩石的风化产物较多地参与了这些花岗岩的源区(Wu *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2007; 张菲菲等, 2011; Wang *et al.*, 2014)。而江南造山带西段的桂北地区,花岗岩的全岩Nd同位素相对东段偏低,锆石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值也较为一致(王孝磊等, 2006; Zheng *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2014),表明造山带西段可能更多古老地壳物质参与了这些花岗岩的形成,而新生岛弧物质提供得相对较少。锆石的Hf-O同位素也说明了这一点(Wang *et al.*, 2013c; Zhao *et al.*, 2013)。

对于江南造山带内这些新元古代花岗岩,其源区还缺乏具体的制约,因为在该带内也并未发现可适合作为花岗岩源区的中高级变质岩,尽管花岗岩的全岩Nd同位素与围岩“褶皱基底”地层的Nd同位素一致,但变质程度低,似乎并不能作为其源区。徐夕生和周新民(1991, 1992)在皖南花岗岩和九岭花岗岩中发现了多种类型的包体,对其中的深源中高级变质岩包体进行深入的研究工作可以为探讨花岗岩源区以及江南造山带的基底提供重要的信息。此外,与这些花岗岩相伴生的基性-超基性岩很少,仅在桂北四堡地区有可观数量出露,对该区基性岩浆岩的成因和构造背景的深入探讨也是解决花岗岩构造背景的重要途径。

分析了花岗岩的物源,热源和构造动力学机制也是争论的焦点问题。徐夕生和周新民(1992)指出江南造山带桂北三防(又称摩天岭)岩体和江西九岭岩体是同碰撞造山作用的产物,而皖南的新元古代强过铝花岗岩形成于晚碰撞阶段。然而,近年来所获取的锆石高精度定年数据表明这些花岗岩形成时代一致,且围岩地层褶皱型式和变质情况也完全类似,说明它们应该都形成于地层褶皱之后,具有类似的构造背景。Li等(2003a)将这些花岗岩的形成与导致Rodinia超大陆裂解的可能的地幔柱事件联系起来,但是地幔柱作用的证据似乎显得缺乏。Wang等(2004b, 2006)基于这些花岗岩的块状构造、S型的地球化学和矿物学特征、形成时代晚于赣东北高压蓝闪石片岩的变质年龄、且其形成需要造山带的伸展以利于花岗岩的形成等考虑,提出这些花岗岩应形成于造山晚期的碰撞后(post-collisional)阶段,在弧后盆地关闭和沉积地层褶皱之后,

造山晚期的造山带坍塌和岩石圈拆沉所伴随的深部岩浆的上涌,为地壳层位岩石的熔融提供了热源,使得花岗岩侵位于褶皱的基底地层中,并在之后的抬升剥蚀中为震旦系或更新的地层所不整合覆盖。沿造山带不同地区地壳性质的差异导致了东西两段所形成的该期花岗岩地球化学性质的差异。事实上,大量的造山带岩浆作用都是发生在碰撞后阶段,此时构造减压以及可能的拆沉和地幔上涌都会有利于花岗质岩浆的形成,而在同碰撞阶段,强烈的挤压作用,反而不利于大量岩浆岩的形成,在剪切带会有少量花岗岩浆出现(Sylvester, 1998; Bonin, 2004)。

7 造山后岩浆作用的过程

以板溪群、丹洲群等为代表的这套地层与“褶皱基底”构造型式不同,呈宽缓褶皱,因此,这个不整合的形成更可能代表了造山活动趋于结束。沉积地层学的工作也表明,这套地层形成于类似于裂谷的阶段(王剑,2000; Wang and Li, 2003)。鉴于此,丹洲群和板溪群这套地层也可从“江南造山带”中划分出来。不过,考虑到这套地层无论是在源区还是在构造背景上都与之前的造山过程存在密切联系,因此,还将其放入“江南造山带”内的地层中。Bonin等(1998)将造山过程进行了细分,认为造山后(post-orogenic)阶段紧随造山过程,此时造山过程已经结束,为完全的板内阶段。造山后的岩浆活动即代表了江南造山带新元古代岩浆活动的晚期,其时代为ca. 800~750 Ma。该期岩浆活动在江南造山带东段表现为上墅组火山岩、许村复合岩墙及铺岭组火山岩(Wang *et al.*, 2012b)、皖南-浙北的石耳山花岗岩(唐红峰等,1997; Zheng *et al.*, 2008);在江南造山带西段表现为湘西古丈-黔阳-通道镁铁-超镁铁质岩、桂北龙胜镁铁-超镁铁质岩(Wang *et al.*, 2008b)。总体而言,江南造山带造山后的岩浆活动具有以下特征:①多呈双峰式,在江南造山带东段,该时期的火山岩呈玄武岩-流纹岩或辉绿岩-花岗斑岩组合(Wang *et al.*, 2012b),在造山带西段的桂北龙胜地区,葛文春等(2000)报道基性岩中伴生有少量流纹岩;②出现碱性玄武岩,如湘西的该期基性岩地球化学为碱性,高全碱含量,高 TiO_2 ;③高 TiO_2 碱性玄武岩和低 TiO_2 拉斑玄武岩共存,前者具OIB类似的地球化学特征,后者具类似岛弧的地球化学特征;④开始大量出现酸性岩火山岩,基性岩既有喷出岩,也有侵入岩,且岩墙较多;⑤基性

岩的岩浆源区多样化,既有早期俯冲导致的熔体和流体交代的岩石圈地幔,也有软流圈地幔,且以交代的岩石圈地幔为主;⑥缺乏强碱性火山岩和高 MgO 玄武岩。

对于该期造山后岩浆作用的成因和构造背景,也存在一定争论。有学者认为与地幔柱活动有关(Li *et al.*, 2003a, 2003b, 2008b)。然而,该期的岩浆活动在华南表现并不显著,岩浆岩的量也并不多,尤其是在江南造山带西段出露的面积仅有 100 余平方千米,在东段也没有 ca. 820 Ma 的岩浆作用更为强烈。另外,其分布与造山带的分布型式完全一致,这说明,该期岩浆活动未必需要地幔柱来解释(周金城等, 2005, 2008),而很可能就是造山之后的由于造山带坍塌和岩石圈拆沉所引起伸展、裂谷作用的结果(Wang *et al.*, 2008b)。正因为如此,在源区上,既有较多造山过程中交代的岩石圈地幔的熔融,又有少量上涌的亏损软流圈地幔物质的参与,并可能经历了二者间的相互作用。说明这些岩浆岩的形成可能蕴含了圈层演化的重要信息。

这些与造山带坍塌、岩石圈拆沉有关的造山后岩浆过程可能具有一定的穿时性。从年代上来看,江南造山带东段的造山后岩浆作用发生较早,以 ca. 800~790 Ma 的上墅组火山岩和许村复合岩墙为代表(Wang *et al.*, 2012b),之后发展为 ca. 780 Ma 的石耳山花岗岩和道林山花岗岩(Zheng *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2011a),最后到 ca. 760 Ma 减弱,并以铺岭组火山岩为代表(Wang *et al.*, 2012b)。而江南造山带西段的造山后岩浆作用却发生较晚,始于 ca. 770 Ma,可能持续到 ca. 750 Ma,岩浆分布呈线性,且后期出现具 OIB 地球化学特征的碱性玄武岩(Wang *et al.*, 2008b)。同时,造山带西段裂谷沉积的板溪群和丹洲群都具有较大的沉积厚度(顾雪祥等, 2003),这与造山带东段的陆相火山岩不同,说明西段虽造山后岩浆作用发生较晚,但却经历了更加强烈的拉张。

8 与新元古代超大陆演化的关系

在江南造山带形成的过程中,有一个全球性的超级大陆(即 Rodinia)正在发育之中。Rodinia 超大陆的拼合-裂解是 20 世纪 90 年代以来国际前寒武纪研究的一个焦点问题。McMenamin 和 McMenamin(1990)认为 Rodinia 超大陆的边缘(大陆架)是早期动物形成的“摇篮”。之后,有关 Rodinia 超大陆的古地理再造, Hoffman(1991)提出劳伦古陆位于 Rodinia 超大陆的中心,东冈瓦纳(澳

大利亚、印度和南极)与其相邻,西伯利亚位于劳伦古陆的一侧,而另一侧是波罗的、非洲和南美地块群,该模式为 Rodinia 重建的经典方案。尽管存在一些争论(Piper, 2000),但大量的研究支持该模式,并且对其进行了深化和细节加工(Li *et al.*, 1995, 2008c; Dalziel, 1997; D'Agrella-Filho *et al.*, 1998; Weil *et al.*, 1998)。

Rodinia 超大陆拼合的重要标志是格林威尔期造山作用及同期造山带的全球分布。格林威尔期造山作用命名于北美东部加拿大的格林威尔省,指发生在中元古代晚期的一次影响广泛的造山作用。该造山作用导致格林威尔造山带的形成并可能表明美国西南与东南极在该时期的连接(南西 EAT 假说)(Moore, 1991)。格林威尔造山带的研究以劳伦古陆南缘的美国 Texas 最为系统(徐备, 2001)。Mosher(1998)建立了一条从 Texas 中部到西部、能代表格林威尔造山带核部到边缘的完整剖面,并描述了 1326~1275 Ma 的弧-陆碰撞、1150~1120 Ma 的陆-陆碰撞和 A 型俯冲过程,认为该区与 Rodinia 超大陆聚合有关的造山运动持续了约 300 Ma。Grimes 和 Copeland(1998)的研究表明,格林威尔造山带内逆冲作用的年代为 996~978 Ma,与加拿大格林威尔造山带内 996~977 Ma 的年龄一致,表明 Rodinia 超大陆的最后聚合时间。由于格林威尔期造山作用与 Rodinia 超大陆的拼合密切相关,格林威尔期造山作用后来常被用来泛指发生在中元古代晚期(距今约 1.3~1.0 Ga)的所有造山运动(e.g. McLelland *et al.*, 1996; Keppie *et al.*, 2001; Tohver *et al.*, 2002; Solari *et al.*, 2003; Ratschbacher *et al.*, 2003)。尽管格林威尔造山作用最初命名的北美地区造山作用主要发生于 1.3~1.0 Ga,且未见报道有晚于 980 Ma 的与造山有关的成岩年龄,但近几年的研究表明,其他陆块可能跟 Rodinia 超大陆拼合有关的造山作用的发生时间并不完全相同。例如, Mezger 和 Michael(1999)对印度东部 Eastern Ghats 带的热历史研究表明,连接印度和南极古陆的 Grenvillian 造山事件的年龄为 960 Ma。Watt 和 Thrane(2001)指出东格陵兰与造山有关的变质作用和花岗岩侵位发生于 950~915 Ma 期间,与斯堪的纳维亚(Sveconorwegian)造山带的岩浆活动在时间上更相近,而与劳伦古陆南缘的格林威尔期造山事件不太一致。斯里兰卡中元古代末到新元古代初在活动边缘环境下产出的钙碱性花岗岩类的年龄则从 1100 Ma 延续至约 880 Ma(Kröner *et al.*, 2003)。而沿江南造山带分布的大量前寒武纪花岗岩的结晶

年龄则如前所述更为“年轻”,比典型的格林威尔期造山作用的时间晚了约 200 Ma。对这些相对“年轻”的年龄资料的出现,其解释有两种:一是 Rodinia 超大陆拼合的时间在各大陆块不尽相同,有早有晚;二是某些陆块可能并不为 Rodinia 的一部分。

相对 Rodinia 的形成,对其裂解的研究受到了更多的关注。由格林威尔期造山作用形成的新元古代 Rodinia 超大陆,在新元古代中晚期由于裂谷作用而转化成几个次一级的大陆地块(Hoffman, 1991)。主要表现为劳伦、Baltica 和 Siberia 古陆从 Rodinia 超大陆中分离出来,以及东、西冈瓦纳陆块群的分离(徐备, 2001)。其结果正如 Hoffman (1991)所述,原来作为新元古代超大陆内部的裂谷演变为古生代冈瓦纳大陆的外部边缘,而新元古代超大陆的外部边缘则成为冈瓦纳大陆的内部。有趣的是, Rodinia 的裂解大都沿着格林威尔期造山带发生,并形成一些呈全球性分布的大陆裂谷带和区域性的裂谷盆地。其中,大多数裂谷很快就夭折了,如澳大利亚的中部和西部的的新元古代盆地(如 Officer, Ngalia, Amadeus 盆地)(Eyles and Januszczak, 2004)、华南的震旦系裂谷盆地(Li *et al.*, 2003b)等。目前的研究认为, Rodinia 裂解发生的时间可能是穿时的(Eyles and Januszczak, 2004),例如劳伦西部的裂谷作用发生在 780 Ma 左右(Park *et al.*, 1995),而其东部延至 600 Ma 才出现裂谷化(Lieberman, 1997)。但通常认为 Rodinia 裂解主要始于 750 Ma 左右(如 Evans *et al.*, 2000; Wingate and Giddings, 2000; Jenkins *et al.*, 2004)。世界上不少地区已发现该时期与裂谷作用有关的岩浆事件,如澳大利亚西部和北部广泛出露的 Mundine Well 岩墙群(Wingate and Giddings, 2000),刚果克拉通南缘(756 ± 2) Ma 和(746 ± 2) Ma 的火成岩(Hoffman *et al.*, 1996)、北美西部 ca. 780 Ma 的 Franklin 岩墙群(Park *et al.*, 1995)等。另外, Rodinia 超大陆的裂解还可能和新元古代的“雪球地球”事件联系起来(Hoffman *et al.*, 1998; Godd ris *et al.*, 2003; Donnadieu, 2004)。

在 Hoffman(1991)建立的新元古代 Rodinia 超大陆复原图中,由于缺乏相关资料,没有给出中国的几个前寒武纪陆块的确切位置。此后几年,国外学者所提出的 Rodinia 重建模式(Dalziel, 1991, 1992; Moores, 1991)中也未标明中国几个主要陆块的位置。为此,不少学者通过细致的古地磁和年代学研究,对 Rodinia 复原图进行了修订和补充。其

中,以澳大利亚华人学者李正祥博士及其研究团体的研究较为系统和深入。Li 等(1995)在 Hoffman 等的基础上,首先提出在 Rodinia 的东冈瓦纳和西伯利亚之间可能缺失了一个地质体,该地质体即为扬子和华夏碰撞形成的华南地块。进而, Li 等(1999)通过桂北宝坛地区镁铁质岩与澳大利亚东南 Gairdner 岩墙群(GDS)的年龄对比,提出在 820 Ma 左右华南存在一个地幔柱,该地幔柱的作用导致了 Rodinia 的裂解及华南新元古代基性-酸性岩浆岩的形成。Li 等(2003b)又将前面的模式进一步发展为超级地幔柱(super-plume)模型。他们认为,华南新元古代中期与地幔柱活动有关的非造山岩浆活动呈双峰式,且主要有 2 个活动峰期,一个在 830~795 Ma,发生于裂谷作用之前,峰期与裂谷作用开始时间一致;另一个是 780~745 Ma,处于裂解时期。(超级)地幔柱模式的提出引起了广大学者对华南前寒武纪构造-岩浆演化的研究的注意,也有一些学者对该模式提出了质疑(颜丹平等, 2002; Zhou *et al.*, 2002b; Jiang *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2004)。对于华南在 Rodinia 中的位置,究竟位于其内部(澳大利亚和劳伦古陆之间; Li *et al.*, 1995, 2003)还是边缘(澳大利亚的西北等; Zhou *et al.*, 2002b; Jiang *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2007, 2014; Yu *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2011; Cawood *et al.*, 2013),也存在较大争论。例如, Kirschvink(1992)、Zhang 和 Piper(1997)通过古地磁研究,提出华南可能位于澳大利亚的西部; Zhao 和 Cawood(1999)通过麻源群变质岩的温压研究,证实了华南新元古代造山运动的存在,并指出华南 870~820 Ma 的造山活动在澳大利亚东部和北美并不存在,因此,认为华南可能靠近澳大利亚的北部,位于 Rodinia 超大陆的边缘; Zhou 等(2002b)通过对扬子西缘花岗质岩浆岩的年代学研究,发现本区的俯冲作用至少持续了 100 Ma,因而在扬子地块西部在新元古代存在一个大洋,这也不支持华南处于澳大利亚和劳伦古陆之间的 Rodinia 重建模式; Jiang 等(2003)认为华南与印度西北的新元古代地层具有非常大的相似性,认为在新元古代时期华南可能靠近印度西北。Li 和 Evans(2011)根据古地磁资料提出了华南在澳大利亚西侧和澳大利亚与劳伦古陆之间两种位置方案, Wen 等(2017)提出塔里木地块可能与华南地块一起作为澳大利亚和劳伦古陆之间的“missing link”。Yang 等(2004)在古地磁研究的基础上提出,华南和澳大利亚在 750~380 Ma 期间一直相连,在 Rodinia 超大陆中可能位

于澳大利亚西北;他们通过对宜昌莲沱组的古地磁研究进一步的修正了自己模式,细化了这一连接的变化过程(Jiang *et al.*, 2015)。Zhang 等(2015)对宜昌陡山沱组的古地磁数据也与这一连接相一致。

从江南造山带的形成和演化过程来看,江南造山带的主造山过程发生在 920~820 Ma,明显晚于典型的格林威尔期岩浆作用的时间。另外,值得注意的是,扬子地块的西缘、西北缘和北缘也存在同期的洋壳俯冲有关的造山过程(Zhou *et al.*, 2002b; Ling *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2002; Shi *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2007)。因此,扬子地块在中元古代末到新元古代早期应该周缘均为大洋所包围。

扬子地块西缘和西北缘的俯冲有可能会持续到 ca. 750 Ma(Zhou *et al.*, 2006b),而东南缘的洋洋俯冲则可能在 ca.880 Ma 才趋于结束,弧-陆碰撞发生在 880~860 Ma,而洋陆俯冲及与弧后盆地相关的造山过程可能发生在 860~820 Ma。因此,华南在 Rodinia 超大陆中可能并不处于其内部,而很可能在其边缘。如果考虑华南和华北可能的连接关系,推断华南可能置于澳大利亚的东北侧,与华北具有较近的距离,与印度和斯里兰卡具有类似的位置,均处于 Rodinia 的边部。另外,对于新元古代冰期来看,由于被长安冰期覆盖的湘西的造山后岩浆作用发生在 ca.750 Ma 左右,因此华南新元古代的第一

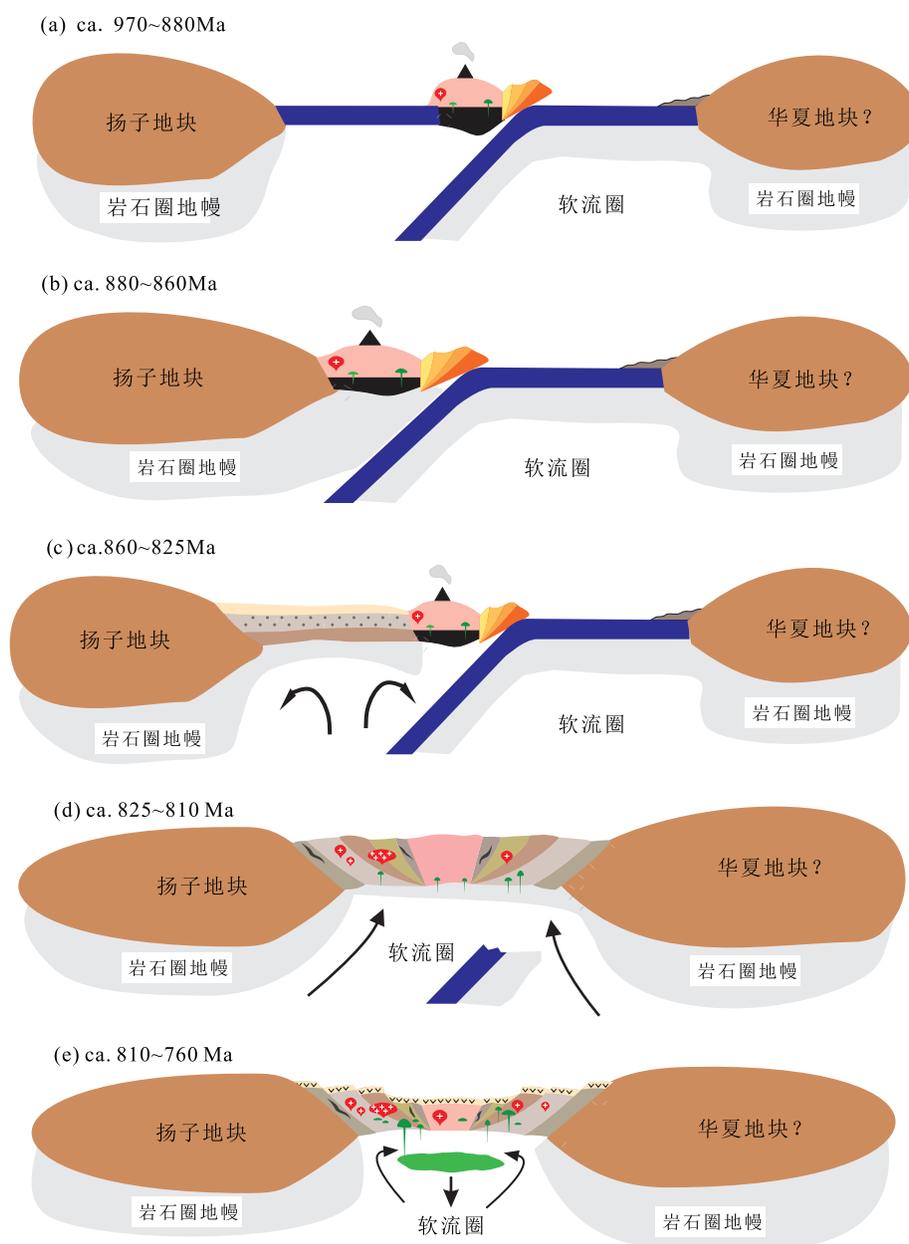


图 2 江南造山带新元古代构造-岩浆演化卡通图

Fig.2 Cartoons showing the tectono-magmatic evolution of the Jiangnan Orogen during the Neoproterozoic era

次明显的冰期应该形成于750 Ma 之后。而对于 Rodinia 超大陆的裂解来说,在华南这里找不到较为明显的地幔柱的证据(周金城等,2005; Wang *et al.*, 2004a; Zheng *et al.*, 2008)。

对于发生于新元古代早期的造山活动,江南造山带并不是唯一的例子,除了塔里木地块以外(Tang *et al.*, 2016; Zong *et al.*, 2017),世界范围内该时期的造山带也存在于其他地区。如,在西伯利亚克拉通边部的 Tuva-Mongolia 地块记录有 ca. 800 Ma 的造山作用(Kuzmichev *et al.*, 2001),很可能与华南一样处于 Rodinia 的边部,代表了 Rodinia 超大陆聚合晚期局部的拼合过程。新元古代(ca. 809~750 Ma)的造山过程在塞舌尔群岛、马达加斯加和印度北部也有研究,被认为代表了 Rodinia 超大陆西缘大陆弧的岩浆作用(Tucker *et al.*, 2001; Torsvik *et al.*, 2001)。斯里兰卡可能与 Rodinia 超大陆聚合有关的元古代造山过程为 ca. 1100 ~ 880 Ma(Kröner *et al.*, 2003)。挪威的新元古代造山作用发生于 ca. 980 ~ 970 Ma,并至少延续到 ca. 830 Ma(Kirkland *et al.*, 2006)。印度中部 Sausar 造山作用有关的角闪岩相变质作用主要发生在 900 ~ 800 Ma(Roy *et al.*, 2006)。

9 结语

江南造山带是理解华南前寒武纪构造演化和后期地壳再造的关键。基于大量的地质事实和新的年代学和地球化学资料,笔者对江南造山带的形成和演化可以作如下归纳:江南造山带是新元古代时期发生在扬子地块东南缘的以岛弧地体拼接为主的增生型造山带,经历了早期的洋洋俯冲(ca. 970~880 Ma)、弧-陆碰撞(ca. 880~860 Ma)、洋陆俯冲和弧后盆地沉积(ca. 860~825 Ma)的过程,最终导致弧后盆地的关闭,使得冷家溪群、四堡群、双桥山群和梵净山群等地层发生紧闭褶皱。在约 825 ~ 810 Ma 造山作用结束,之后,造山带进入板内伸展(裂谷)阶段,产生了以双峰式火山岩为主的板内岩浆活动(图2)。江南造山带的形成较典型的 Grenville 期造山作用晚近 200 Ma,在 Rodinia 超大陆中扬子地块应处于其西北边缘。

参考文献 (References):

Bonin B, Azzouni-Sekkal A, Bussy F, Ferrag S. 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: Petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 45(1-4): 45-70
Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to

within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review. *Lithos*, 78(1-2): 1-24
Burg J P, Gerya T V. 2005. The role of viscous heating in Barrovian metamorphism of collisional orogens: Thermomechanical models and application to the Lepontine dome in the central alps. *Journal of Metamorphic Geology*, 23(2): 75-95
Cawood P A, Wang Y J, Xu Y J, Zhao G C. 2013. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A fragment of greater India lithosphere?. *Geology*, 41(8): 903-906
Charvet J, Shu L S, Shi Y S, Guo L Z, Faure M. 1996. The building of South China: Collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13(3-5): 223-235
Chen J F, Foland K A, Xing F M, Xu X, Zhou T X. 1991. Magmatism along the southeast margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China. *Geology*, 19(8): 815-818
Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284(1-2): 101-133
Chen X, Wang D, Wang X L, Gao J F, Shu X J, Zhou J C, Qi L. 2014. Neoproterozoic chromite-bearing high-Mg diorites in the western part of the Jiangnan orogen, southern China: Geochemistry, petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 200-201: 35-48
D'Agrella-Filho M S, Trindade R I F, Siqueira R, Ponte-Neto C F, Pacca I I G. 1998. Paleomagnetic constraints on the Rodinia supercontinent: Implications for its Neoproterozoic break-up and the formation of Gondwana. *International Geology Review*, 40(2): 171-188
Dalziel I W D. 1991. Pacific margins of Laurentia and East Antarctica-Australia as a conjugate rift pair: Evidence and implications for an Eocambrian supercontinent. *Geology*, 19(6): 598-601
Dalziel I W D. 1992. On the organization of American plates in the Neoproterozoic and the breakout of Laurentia. *GSA Today*, 2(11): 237-241
Dalziel I W D. 1997. Neoproterozoic-Paleozoic geography and tectonics: Review, hypothesis, environmental speculation. *Geological Society of America Bulletin*, 109(1): 16-42
Donnadieu Y, Godd ris Y, Ramstein G, N d lec A, Meert J. 2004. A 'snowball Earth' climate triggered by continental break-up through changes in runoff. *Nature*, 428(6980): 303-306
Evans D A D, Li Z X, Kirschvink J L, Wingate M T D. 2000. A high-quality mid-Neoproterozoic paleomagnetic pole from South China, with implications for ice ages and the breakup configuration of Rodinia. *Precambrian Research*, 100(1-3): 313-334
Eyles N, Januszczak N. 2004. 'Zipper-rift': A tectonic model for Neoproterozoic glaciations during the breakup of Rodinia after 750 Ma. *Earth-Science Reviews*, 65(1-2): 1-73
Gao J, Klemd R, Long L G, Xiong X M, Qian Q. 2009. Adakitic signature formed by fractional crystallization: An interpretation for the Neo-Proterozoic meta-plagiogranites of the NE Jiangxi ophiolitic m lange belt, South China. *Lithos*, 110(1-4): 277-293
Godd ris Y, Donnadieu Y, N d lec A, Dupr  B, Dessert C, Grard A, Ramstein G, Fran ois L M. 2003. The Sturtian 'snowball' glaciation: Fire and ice. *Earth and Planetary Science Letters*, 211

- (1-2): 1-12
- Grabau A W. 1924. *Stratigraphy of China, Part I: Paleozoic and older*. Peking: Geological Survey and Ministry of Agriculture and Commerce of China, 1-534
- Greentree M R, Li Z X, Li X H, Wu H C. 2006. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia. *Precambrian Research*, 151(1-2): 79-100
- Grimes S W, Copeland P. 1998. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of thrusting the Grenville belt of West Texas: Beginning of the final assembly of Rodinia at 996 ~ 997 Ma. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 30(7): 160
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D, Shuwen D. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1-4): 215-230
- Hoffman P F, Hawkins D P, Isachsen C E, Bowring S A. 1996. Precise U-Pb zircon ages for early Damara magmatism in the Summas Mountains and Welwitschia Inlier, northern Damara belt, Namibia. *Communications of the Geological Survey of Namibia*, 11: 49-53
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, Schrag D P. 1998. A Neoproterozoic snowball Earth. *Science*, 281(5381): 1342-1346
- Hoffman P F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? *Science*, 252(5011): 1409-1412
- Hsü K J, Li J L, Chen H H, Wang Q C, Sun S, Şengör A M C. 1990. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology. *Tectonophysics*, 183(1-4): 9-39
- Hsü K J, Sun S, Li J L, Chen H H, Pen H B, Sengor A M C. 1988. Mesozoic overthrust tectonics in South China. *Geology*, 16(5): 418-421
- Jenkins G S, McKay C P, McMenamin M A S. 2004. Introduction: The proterozoic. In: Jenkins G S, McMenamin M A S, McKay C P, Sohl L (eds). *The extreme proterozoic geology: Geochemistry, and climate*. Washington, DC: The American Geophysical Union, 1-4
- Jiang G Q, Sohl L E, Christie-Blick N. 2003. Neoproterozoic stratigraphic comparison of the Lesser Himalaya (India) and Yangtze block (South China): Paleogeographic implications. *Geology*, 31(10): 917-920
- Jing X Q, Yang Z Y, Tong Y B, Han Z R. 2015. A revised paleomagnetic pole from the mid-Neoproterozoic Liantuo Formation in the Yangtze block and its paleogeographic implications. *Precambrian Research*, 268: 194-211
- Keppie J D, Dostal J, Ortega-Gutiérrez F, Lopez R. 2001. A Grenvillian arc on the margin of Amazonia: Evidence from the southern Oaxacan Complex, southern Mexico. *Precambrian Research*, 112(3-4): 165-181
- Kirkland C L, Daly J S, Whitehouse M J. 2006. Granitic magmatism of Grenvillian and late Neoproterozoic age in Finnmark, Arctic Norway-constraining pre-Scandian deformation in the Kalak Nappe Complex. *Precambrian Research*, 145(1-2): 24-52
- Kirschvink J K. 1992. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: The snowball Earth. In: Schopf J W, Klein C eds. *The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study*. Cambridge: Cambridge University Press, 51-52
- Kröner A, Kehelpannala K V W, Hegner E. 2003. Ca. 750 ~ 1100 Ma magmatic events and Grenville-age deformation in Sri Lanka: Relevance for Rodinia supercontinent formation and dispersal, and Gondwana amalgamation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(3): 279-300
- Kurata H, Banno S. 1974. Low-grade progressive metamorphism of pelitic schists of the sazare area, sanbagawa metamorphic terrain in central Sikoku, Japan. *Journal of Petrology*, 15(2): 361-382
- Kuzmichev A B, Bibikova E V, Zhuravlev D Z. 2001. Neoproterozoic (~ 800 Ma) orogeny in the Tuva-Mongolia massif (Siberia): Island-continent collision at the northeast Rodinia margin. *Precambrian Research*, 110(1-4): 109-126
- Li J Y, Wang X L, Zhang F F, Zhou X H, Shu X J. 2016. A rhythmic source change of the Neoproterozoic basement meta-sedimentary sequences in the Jiangnan Orogen: Implications for tectonic evolution on the southeastern margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 280: 46-60
- Li L M, Lin S F, Xing G F, Davis D W, Davis W J, Xiao W J, Yin C Q. 2013. 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. *Precambrian Research*, 238: 1-17
- Li L M, Sun M, Wang Y J, Xing G F, Zhao G C, He Y S, He K D, Zhang A M. 2011a. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the meta-sedimentary rocks in central Jiangxi Province, South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of South China Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 44-55
- Li L M, Sun M, Wang Y J, Xing G F, Zhao G C, Lin S F, Xia X P, Chan L, Zhang F F, Wong J. 2011b. U-Pb and Hf isotopic study of zircons from migmatized amphibolites in the Cathaysia Block: Implications for the early Paleozoic peak tectonothermal event in South-eastern China. *Gondwana Research*, 19(1): 191-201
- Li W X, Li X H, Li Z X, Lou F S. 2008a. Obduction-type granites within the NE Jiangxi Ophiolite: Implications for the final amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Gondwana Research*, 13(3): 288-301
- Li X H, Li W X, Li Z X, Liu Y. 2008b. 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
- Li X H, Li W X, Li Z X, Lo C H, Wang J, Ye M F, Yang Y H. 2009a. 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
- Li X H, Li Z X, Ge W C, Zhou H W, Li W X, Liu Y, Wingate M T D. 2003a. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Research*, 122(1-4): 45-83
- Li X H, Li Z X, Sinclair J A, Li W X, Carter G. 2006. Revisiting the "Yanbian Terrane": Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China. *Precambrian*

- Research, 151(1-2): 14-30
- Li X H, Zhao J X, McCulloch M T, Zhou G Q, Xing F M. 1997. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of Neoproterozoic ophiolites from southeastern China: Petrogenesis and tectonic implications. *Precambrian Research*, 81(1-2): 129-144
- Li X H, Zhao Z H, Gui X T, Yu J S. 1992. Sm-Nd and zircon U-Pb isotopic constraints on the age of formation of the Precambrian crust in southeast China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 11(2): 111-120
- Li X H, Zhou G Q, Zhao J X, Fanning C M, Compston W. 1994. SHRIMP ion microprobe zircon U-Pb Age and Sm-Nd isotopic characteristics of the NE Jiangxi ophiolite and its tectonic implications. *Chinese Journal of Geochemistry*, 13(4): 317-325
- 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
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, De Waele B, Ernst R E, Fitzsimons I C W, Fuck R A, Gladkochub D P, Jacobs J, Karlstrom K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevsky S A, Thrane K, Vernikovsky V. 2008c. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Research*, 160(1-2): 179-210
- Li Z X, Evans D A D, Zhang S. 2004. A 90° spin on Rodinia: Possible causal links between the Neoproterozoic supercontinent, superplume, true polar wander and low-latitude glaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(3-4): 409-421
- Li Z X, Evans D. 2011. Late Neoproterozoic 40° intraplate rotation within Australia allows for a tighter-fitting and longer-lasting Rodinia. *Geology*, 39(1): 39-42
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J, Zhang S, Zhou H. 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(1-4): 85-109
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth and Planetary Science Letters*, 173(3): 171-181
- Li Z X, Li X H, Wang X C. 2009b. The South China piece in the Rodinian puzzle: A reply to the comment by Munteanu and Wilson. *Precambrian Research*, 171(1-4): 77-79
- Li Z X, Li X H, Wartho J A, Clark C, Li W X, Zhang C L, Bao C M. 2010. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions. *Geological Society of America Bulletin*, 122(5-6): 772-793
- Li Z X, Wartho J A, Oechipinti S, Zhang C L, Li X H, Wang J, Bao C M. 2007. Early history of the eastern Sibao Orogen (South China) during the assembly of Rodinia: New mica ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating and SHRIMP U-Pb detrital zircon provenance constraints. *Precambrian Research*, 159(1-2): 79-94
- Li Z X, Zhang L H, Powell C M. 1995. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? *Geology*, 23(5): 407-410
- Lieberman B S. 1997. Early Cambrian paleogeography and tectonic history: A biogeographic approach. *Geology*, 25(11): 1039-1042
- Ling H F, Shen W Z, Wang R C, Xu S J. 2001. Geochemical characteristics and genesis of Neoproterozoic granitoids in the northwestern margin of the Yangtze block. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9-10): 805-819
- Ling W L, Gao S, Zhang B R, Li H M, Liu Y, Cheng J P. 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent. *Precambrian Research*, 122(1-4): 111-140
- McLelland J, Daly J S, McLelland J M. 1996. The Grenville orogenic cycle (ca. 1350 ~ 1000 Ma): An Adirondack perspective. *Tectonophysics*, 265(1-2): 1-28
- McMenamin M A S, McMenamin D L S. 1990. The emergence of animals: The Cambrian breakthrough. New York: Columbia University Press, 1-207
- Mezger K, Michael A C. 1999. The thermal history of the Eastern Ghats belt (India) as revealed by U-Pb and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of metamorphic and magmatic minerals: Implications for the SWEAT correlation. *Precambrian Research*, 94(3-4): 251-271
- Miyashiro A. 1972. Metamorphism and related magmatism in plate tectonics. *American Journal of Sciences*, 272(7): 629-656
- Moores E M. 1991. Southwest U.S.-East Antarctic (SWEAT) connection: A hypothesis. *Geology*, 19(5): 425-428
- Mosher S. 1998. Tectonic evolution of the southern Laurentian Grenville orogenic belt. *Geological Society of America Bulletin*, 110(11): 1357-1375
- Park J K, Buchan K L, Harlan S S. 1995. A proposed giant radiating dyke swarm fragmented by the separation of Laurentia and Australia based on paleomagnetism of ca. 780 Ma mafic intrusions in western North America. *Earth and Planetary Science Letters*, 132(1-4): 129-139
- Piper J D A. 2000. The neoproterozoic supercontinent: Rodinia or palaeopangaea? *Earth and Planetary Science Letters*, 176(1): 131-146
- Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, Webb L E, Grimmer J C, McWilliams M O, Ireland T, Dong S W, Hu J M. 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. *Tectonophysics*, 366(1-2): 1-53
- Roback R C. 1996. Characterization and tectonic evolution of a mesoproterozoic island arc in the southern Grenville orogen, Llano uplift, central Texas. *Tectonophysics*, 265(1-2): 29-52
- Roy A, Kagami H, Yoshida M, Roy A, Bandyopadhyay B K, Chattopadhyay A, Khan A S, Huin A K, Pal T. 2006. Rb-Sr and Sm-Nd dating of different metamorphic events from the Sausar Mobile Belt, central India: Implications for Proterozoic crustal evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(1): 61-76
- Shi Y R, Liu D Y, Zhang Z Q, Miao L C, Zhang F Q, Xue H M. 2007. SHRIMP Zircon U-Pb dating of gabbro and granite from the Huashan ophiolite, Qinling orogenic belt, China: Neoproterozoic suture on the northern margin of the Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 239-243
- Shu L S, Charvet J. 1996. Kinematics and geochronology of the Proterozo-

- ic Dongxiang-Shexian ductile shear zone: With HP metamorphism and ophiolitic melange (Jiangnan region, South China). *Tectonophysics*, 267(1-4): 291-302
- Shu L S, Faure M, Jiang S Y, Yang Q, Wang Y J. 2006. SHRIMP zircon U-Pb age, litho-and biostratigraphic analyses of the Huaiyu domain in South China-evidence for a neoproterozoic orogen, not Late Paleozoic-early mesozoic collision. *Episodes*, 29(4): 244-252
- Shu L S, Faure M, Yu J H, Jahn B M. 2011. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia. *Precambrian Research*, 187(3-4): 263-276
- Shu L S, Jahn B M, Charvet J, Santosh M, Wang B, Xu X S, Jiang S Y. 2014. Early Paleozoic depositional environment and intraplate tectono-magmatism in the Cathaysia Block (South China): Evidence from stratigraphic, structural, geochemical and geochronological investigations. *American Journal of Science*, 314(1): 154-186
- Shu L S, Zhou G Q, Shi Y S, Yin J. 1994. Study of the high pressure metamorphic blueschist and its Late Proterozoic age in the Eastern Jiangnan belt. *Chinese Science Bulletin*, 39(14): 1200-1204
- Shu X J, Wang X L, Sun T, Xu X S, Dai M N. 2011. Trace elements, U-Pb ages and Hf isotopes of zircons from Mesozoic granites in the western Nanling Range, South China: Implications for petrogenesis and W-Sn mineralization. *Lithos*, 127(3-4): 468-482
- Solari L A, Keppie J D, Ortega-Gutiérrez F, Cameron K L, Lopez R, Hames W E. 2003. 990 and 1100 Ma Grenvillian tectonothermal events in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: Roots of an orogen. *Tectonophysics*, 365(1-4): 257-282
- Sun Z M, Wang X L, Qi L, Zhang F F, Wang D, Li J Y, Yu M G, Shu X J. 2017. Neoproterozoic ophiolites in southern China revisited: Mineral and whole-rock geochemistry. *Precambrian Research*, under review
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1-4): 29-44
- Tang Q Y, Zhang Z W, Li C S, Wang Y L, Ripley E M. 2016. Neoproterozoic subduction-related basaltic magmatism in the northern margin of the Tarim Craton: Implications for Rodinia reconstruction. *Precambrian Research*, 286: 370-378
- Tohver E, van der Pluijm B A, Van der Voo R, Rizzotto G, Scandolaria J E. 2002. Paleogeography of the Amazon craton at 1.2 Ga: Early Grenvillian collision with the Llano segment of Laurentia. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(1-2): 185-200
- Torsvik T H, Ashwal L D, Tucker R D, Eide E A. 2001. Neoproterozoic geochronology and palaeogeography of the Seychelles microcontinent: The India link. *Precambrian Research*, 100(1-4): 47-59
- Tucker R D, Ashwal L D, Torsvik T H. 2001. U-Pb geochronology of Seychelles granitoids: A Neoproterozoic continental arc fragment. *Earth and Planetary Science Letters*, 187(1-2): 27-38
- Vanderhaeghe O, Teyssier C. 2001. Crustal-scale rheological transitions during late-orogenic collapse. *Tectonophysics*, 335(1-2): 211-228
- Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, Zhuang J, Song B, Shi Y, Du L. 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. *Gondwana Research*, 12: 166-183
- Wang D, Wang X L, Zhou J C, Shu X J. 2013a. Unraveling the Precambrian crustal evolution by Neoproterozoic conglomerates, Jiangnan orogen: U-Pb and Hf isotopes of detrital zircons. *Precambrian Research*, 233: 223-236
- Wang J, Li Z X. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up. *Precambrian Research*, 122(1-4): 141-158
- Wang Q, Wyman D A, Li Z X, Bao Z W, Zhao Z H, Wang Y X, Jian P, Yang Y H, Chen L L. 2011a. Petrology, geochronology and geochemistry of ca. 780 Ma A-type granites in South China: Petrogenesis and implications for crustal growth during the breakup of the supercontinent Rodinia. *Precambrian Research*, 178(1-4): 185-208
- Wang T, Wang X X, Zhang G W, Pei X Z, Zhang C L. 2002. Remnants of a neoproterozoic collisional orogenic belt in the core of the Phanerozoic Qinling orogenic belt (China). *Gondwana Research*, 6(4): 699-710
- Wang W, Zhou M F, Yan D P, Li J W. 2012a. Depositional age, provenance, and tectonic setting of the Neoproterozoic Sibao Group, southeastern Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 192-195: 107-124
- Wang W, Zhou M F, Yan D P, Li L, Malpas J. 2013b. Detrital zircon record of Neoproterozoic active-margin sedimentation in the eastern Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Research*, 235: 1-19
- Wang X L, Shu L S, Xing G F, Zhou J C, Tang M, Shu X J, Qi L, Hu Y H. 2012b. 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
- Wang X L, Zhao G C, Zhou J C, Liu Y S, Hu J. 2008a. 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. *Gondwana Research*, 14(3): 355-367
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Wang R C, Qiu J S, O'Reilly S Y, Xu X S, Liu X M, Zhang G L. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks. *Precambrian Research*, 159(1-2): 117-131
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Zhao G C, Yu J H, Qiu J S, Zhang Y J, Xing G F. 2014. Geochemical zonation across a Neoproterozoic orogenic belt: Isotopic evidence from granitoids and metasedimentary rocks of the Jiangnan orogen, China. *Precambrian Research*, 242: 154-171
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Gao J F. 2004a. Comment on "Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma?" by Xian-Hua Li *et al.* [*Precambrian Res.* 122(2003)45-83]. *Precambrian Research*, 132(4): 401-403
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Gao J F. 2004b. Geochemistry of the Mesozoic to Neoproterozoic basic-acid rocks from Hunan Province, South China: Implications for the evolution of the western Jiangnan orogen. *Precambrian Research*, 135(1-2): 79-103

- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Jiang S Y, Shi Y R. 2008b. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic mafic rocks from western Hunan, South China: Implications for petrogenesis and post-orogenic extension. *Geological Magazine*, 145(2): 215-233
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Zhang W L, Liu X M, Zhang G L. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution. *Precambrian Research*, 145(1-2): 111-130
- Wang X L, Zhou J C, Wan Y S, Kitajima K, Wang D, Bonamici C, Qiu J S, Sun T. 2013c. Magmatic evolution and crustal recycling for Neoproterozoic strongly peraluminous granitoids from southern China: Hf and O isotopes in zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 366: 71-82
- Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, Zhao G C, Zhang G W, Zhang Y Z, Zhang F F, Li S Z. 2011b. Kwanghsian crustal anatexis within the eastern South China Block: Geochemical, zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic fingerprints from the gneissoid granites of Wugong and Wuyi-Yunkai domains. *Lithos*, 127(1-2): 239-260
- Wang Y J, Zhang F F, Fan W M, Zhang G W, Chen S Y, Cawood P A, Zhang A M. 2010. Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology. *Tectonics*, 29(6): TC6020
- Watt G R, Thrane K. 2001. Early neoproterozoic events in East Greenland. *Precambrian Research*, 110(1-4): 165-184
- Weil A B, Van der Voo R, Niocail C M, Meert J G. 1998. The Proterozoic supercontinent Rodinia: Paleomagnetically derived reconstructions for 1100 to 800 Ma. *Earth and Planetary Science Letters*, 154(1-4): 13-24
- Wen B, Evans D A D, Li Y X. 2017. Neoproterozoic paleogeography of the Tarim Block: An extended or alternative "missing-link" model for Rodinia?. *Earth and Planetary Science Letters*, 458: 92-106.
- Wingate M T D, Giddings J W. 2000. Age and palaeomagnetism of the Mundine Well dyke swarm, Western Australia: Implications for an Australia-Laurentia connection at 755 Ma. *Precambrian Research*, 100(1-3): 335-357
- Wong J, Sun M, Xing G F, Li X H, Zhao G C, Wong K, Wu F Y. 2011. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of Mesozoic felsic rocks from eastern Zhejiang, South China: Geochemical contrast between the Yangtze and Cathaysia blocks. *Gondwana Research*, 19(1): 244-259
- Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Zhang S B, Liu X M, Wu F Y. 2006. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Research*, 146(3-4): 179-212
- Xiao L, Zhang H F, Ni P Z, Xiang H, Liu X M. 2007. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of early Neoproterozoic mafic-intermediate intrusions from NW margin of the Yangtze Block, South China: Implication for tectonic evolution. *Precambrian Research*, 154(3-4): 221-235
- Yang Z Y, Sun Z M, Yang T S, Pei J L. 2004. A long connection (750~380 Ma) between South China and Australia: Paleomagnetic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(3-4): 423-434
- Yao J L, Cawood P A, Shu L S, Santosh M, Li J Y. 2016. An early Neoproterozoic accretionary prism ophiolitic mélange from the Western Jiangnan orogenic belt, South China. *The Journal of Geology*, 124(5): 587-601
- Yao J L, Shu L S, Santosh M, Li J Y. 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
- Yao J L, Shu L S, Santosh M, Xu Z Q. 2014b. Palaeozoic metamorphism of the Neoproterozoic basement in NE Cathaysia: Zircon U-Pb ages, Hf isotope and whole-rock geochemistry from the Chencai Group. *Journal of the Geological Society*, 171(2): 281-297
- Yao J L, Shu L S, Santosh M, Zhao G C. 2014c. 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. 2014a. 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. *Precambrian Research*, 247: 187-207
- Ye M F, Li X H, Li W X, Liu Y, Li Z X. 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. *Gondwana Research*, 12(1-2): 144-156
- Yin C Q, Lin S F, Davis D W, Xing G F, Davis W J, Cheng G H, Xiao W J, Li L M. 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. *Precambrian Research*, 236: 145-156
- Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L J, Griffin W L, Jiang S Y, Wang R C, Xu X S. 2007. Finding of ancient materials in Cathaysia and implication for the formation of Precambrian crust. *Science Bulletin*, 52(1): 13-22
- Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L J, Griffin W L, Zhang M, Wang R C, Jiang S Y, Shu L S. 2008. Where was South China in the Rodinia supercontinent?: Evidence from U-Pb geochronology and Hf isotopes of detrital zircons. *Precambrian Research*, 164(1-2): 1-15
- Zhai X M, Day H W, Hacker B R, You Z D. 1998. Paleozoic metamorphism in the Qinling orogen, Tongbai Mountains, central China. *Geology*, 26(4): 371-374
- Zhang C H, Yu J H, O'Reilly S Y, Griffin W L, Qian J, Liu Q, Lou F, Zhou X Y, Shen L W. 2016. Granulite facies xenoliths from the Yuhushan complex, central Jiangxi, South China: Constraints on Late Palaeozoic orogeny and middle-lower crust components. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(1): 45-61
- Zhang C L, Santosh M, Zou H B, Li H K, Huang W C. 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
- Zhang F F, Wang X L, Wang D, Yu J H, Zhou X H, Sun Z M. 2017. Neoproterozoic backarc basin on the southeastern margin of the Yan-

- gtze Block during Rodinia assembly: New evidence from provenance of detrital zircons and geochemistry of mafic rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 129, doi: 10.1130/B31528.1
- Zhang Q R, Piper J D A. 1997. Palaeomagnetic study of Neoproterozoic glacial rocks of the Yangzi Block: Palaeolatitude and configuration of South China in the late Proterozoic supercontinent. *Precambrian Research*, 85(3-4): 173-199
- Zhang S B, Wu R X, Zheng Y F. 2012. Neoproterozoic continental accretion in South China: Geochemical evidence from the Fuchuan ophiolite in the Jiangnan orogen. *Precambrian Research*, 220-221: 45-64
- Zhang S H, Li H Y, Jiang G Q, Evans D A D, Dong J, Wu H C, Yang T S, Liu P J, Xiao Q S. 2015. New paleomagnetic results from the Ediacaran Doushantuo formation in South China and their paleogeographic implications. *Precambrian Research*, 259: 130-142.
- Zhao G C, Cawood P A. 1999. Tectonothermal evolution of the Mayuan assemblage in the Cathaysia Block: Implications for Neoproterozoic collision-related assembly of the South China craton. *American Journal of Science*, 299(4): 309-339
- Zhao G C. 2015. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction. *Gondwana Research*, 27(3): 1173-1180
- Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, Zheng J P, Li J W. 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny. *Geology*, 39(4): 299-302
- Zhao J H, Zhou M F, Zheng J P. 2013. 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(5): 1505-1519
- Zhao J H, Zhou M F. 2013. Neoproterozoic high-Mg basalts formed by melting of ambient mantle in South China. *Precambrian Research*, 233: 193-205
- Zheng Y F, Chen R X, Zhao Z F. 2009. Chemical geodynamics of continental subduction-zone metamorphism: Insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples. *Tectonophysics*, 475(2): 327-358
- Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, Zhang S B, Yuan H L, Wu F Y. 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
- Zheng Y F, Wu Y B, Chen F K, Gong B, Li L, Zhao Z F. 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4145-4165
- Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, Wu Y B, Li X H, Li Z X, Wu F Y. 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust. *Lithos*, 96(1-2): 127-150
- Zheng Y F. 2004. Position of South China in configuration of Neoproterozoic supercontinent. *Chinese Science Bulletin*, 49(8): 751-753
- Zhou J C, Wang X L, Qiu J S, Gao J F. 2004. Geochemistry of Meso- and Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks from northern Guangxi, China: Arc or plume magmatism? *Geochemical Journal*, 38: 139-152
- Zhou J C, Wang X L, Qiu J S. 2009. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: Coeval arc magmatism and sedimentation. *Precambrian Research*, 170(1-2): 27-42
- Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, Malpas J, Leshner C M. 2002a. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the Northern Margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia. *The Journal of Geology*, 110(5): 611-618
- Zhou M F, Ma Y X, Yan D P, Xia X P, Zhao J H, Sun M. 2006a. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 144(1-2): 19-38
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, Li Y Q, Ding J. 2002b. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1-2): 51-67
- Zhou M F, Yan D P, Wang C L, Qi L, Kennedy A. 2006b. Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1-2): 286-300
- Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, He Z Y, Guo J J, Shi X L, Liu Y S, Hu Z C, Zhang Z M. 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32-48
- 白文吉, 甘启高, 杨经绥, 邢凤鸣, 徐祥. 1986. 江南古陆东南缘蛇绿岩完整层序剖面的发现和基本特征. *岩石矿物学杂志*, 5(4): 289-299, 384
- 柏道远, 贾宝华, 刘伟, 陈必河, 刘耀荣, 张晓阳. 2010. 湖南城步火成岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其对江南造山带新元古代构造演化的约束. *地质学报*, 84(12): 1715-1726
- 曾勇, 杨明桂, 赖新平, 王发宁. 2002. 赣东北地区中晚元古代的岩浆作用与构造环境. *华南地质与矿产*, (3): 37-43
- 陈冠宝, 徐树桐, 陶正, 石永红. 1998. 皖南井潭组变质火山岩 Sm-Nd 同位素年龄及其大地构造意义. *现代地质*, 12(4): 548-554
- 陈志洪, 郭坤一, 董永观, 陈荣, 李龙明, 梁一鸿, 李春海, 俞锡明, 赵玲, 邢光福. 2009b. 江山-绍兴拼合带平水段可能存在新元古代早期板片窗岩浆活动: 来自锆石 LA-ICP-MS 年代学和地球化学的证据. *中国科学(D 辑)*, 39(7): 994-1008
- 陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 董永观, 陈荣, 曾勇, 李龙明, 贺振宇, 赵玲. 2009a. 浙江平水群角斑岩的成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. *科学通报*, 54(5): 610-617
- 程海. 1991. 浙西北晚元古代早期碰撞造山带的初步研究. *地质论评*, 37(3): 203-213
- 程海. 1993. 浙西北晚元古代岛弧火山岩的地球化学研究. *地球化学*, (1): 18-27
- 邓国辉, 楼法生, 黄传冠. 2003. 赣东北珍珠山群的建立及意义. *地质通报*, 22(1): 32-42
- 丁炳华, 史仁灯, 支霞臣, 郑磊, 陈雷. 2008. 江南造山带存在新元

- 古代 (~850 Ma) 俯冲作用-来自皖南 SSZ 型蛇绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄证据. 岩石矿物学杂志, 27(5): 375-388
- 樊光明, 薛重生, 杨晓松. 1997. 江西田里和浙江游溪韧性剪切带特征及其意义. 华东地质学院学报, 20(4): 301-308
- 高林志, 刘燕学, 丁孝忠, 宋志瑞, 黄志忠, 张传恒, 张恒, 史志刚. 2013. 江山-绍兴断裂带铁沙街组变流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其意义. 地质通报, 32(7): 996-1005
- 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 刘燕学, 刘训, 凌联海, 张传恒. 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): 1744-1751
- 葛文春, 李献华, 李正祥, 周汉文, 王剑, 李奇岬. 2000. 桂北“龙胜蛇绿岩”质疑. 岩石学报, 16(1): 111-118
- 顾雪祥, 刘建明, Schulz O, Vavtar F, 郑明华. 2003. 江南造山带雪峰隆起区元古宙浊积岩沉积构造背景的地球化学制约. 地球化学, 32(5): 406-426
- 郭令智, 施央申, 马瑞士, 卢华复. 1986. 江南元古代板块运动和岛弧构造的形成和演化. 见: 国际前寒武纪地壳演化讨论会论文集. 北京: 地质出版社, 30-37
- 郭令智, 施央申, 马瑞士, 叶尚夫, 卢华复. 1984. 中国东南部地体构造的研究. 南京大学学报, 20(4): 732-739
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1977. 论古海沟岛弧系的研究方法及其意义. 福建地质, 4: 1-24
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1980. 华南大地构造格架和地壳演化. 见: 第 26 届国际地质大会国际交流学术论文集(构造地质、地质力学). 北京: 地质出版社, 109-116
- 洪大卫, 谢锡林, 张季生. 2002. 试析杭州-诸广山-花山高 ϵ_{Nd} 值花岗岩带的地质意义. 地质通报, 21(6): 348-354
- 花友仁. 1995. 扬子板块的地壳演化与地层对比. 地质与勘探, 51(2): 15-22
- 黄汲清. 1945. 中国主要地质构造单位. 中央地质调查所地质专报(甲种第 20 号), 1-165
- 黄汲清. 1954. 中国主要地质构造单元. 北京: 地质出版社, 1-162
- 黄汲清. 1959. 编制中国大地构造图的若干意见(节要). 地质科学通讯, 2: 3-8
- 黄汲清. 1960. 中国地质构造基本特征的初步总结. 地质学报, 40(1): 1-31
- 姜杨, 赵希林, 林寿发, Davis D W, 邢光福, 李龙明, 段政. 2014. 扬子克拉通东南缘新元古代陆缘弧型 TTG 的厘定及其构造意义. 地质学报, 88(8): 1461-1474
- 兰玉琦, 叶瑛, 沈忠悦. 1992. 论浙北双溪坞群火山岩系的年代及其形成环境. 浙江国土资源, (1): 8-15
- 兰玉琦, 叶瑛. 1991. 江南地背斜东南缘晚元古宙岛弧型火山岩及其成矿远景. 地质找矿论丛, 6(2): 1-10
- 李继亮. 1992. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1-315
- 李献华, 周国庆, 赵建新. 1994. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 地球化学, 23(2): 125-131
- 李源, 顾强, 宋志瑞. 2017. 赣东北蛇绿岩和张村岩群的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. 地质评论, 63(4): 855-868
- 廖群安, 薛重生, 李昌年, 王京名. 1999. 赣东北地区早古生代登山岩群弧后盆地火山岩的成因与洋壳演化. 岩石矿物学杂志, 18(1): 1-7
- 凌洪飞, 沈渭洲, 章邦桐, 刘继顺, 杨杰东, 陶仙聪. 1992. 江西修水地区震旦纪前后沉积岩的 Nd 同位素组成和物质来源. 岩石学报, 8(2): 190-194
- 刘鸿允. 1991. 中国震旦系. 北京: 科学出版社, 1-388
- 楼法生, 黄志忠, 宋志瑞, 吴新华. 2003. 华南中部中新元古代造山带构造演化探讨. 地质调查与研究, 26(4): 200-206
- 马文运. 1997. 湘鄂黔桂毗邻区扬子地台基底与第一盖层之探讨. 湖南地质, 16(4): 213-218
- 马长信. 1991. 赣东北元古宙宙障公山群的钆钕同位素年龄新成果及其地质意义. 科学通报, 36(19): 1518-1519
- 沈渭洲, 杨杰东. 1991. 浙江西裘细碧-角斑岩的 Nd, Sr, O 同位素地质研究. 地质学报, 65(4): 337-346
- 沈渭洲, 朱金初, 刘昌实, 徐士进, 凌洪飞. 1993. 华南基底变质岩的 Sm-Nd 同位素及其对花岗岩类物质来源的制约. 岩石学报, 9(2): 115-124
- 舒良树, 施央申, 郭令智, Charvet J, 孙岩. 1995. 江南中段板块-地体构造与碰撞造山运动学. 南京: 南京大学出版社, 1-174
- 舒良树, 王博, 朱文斌. 2007. 南天山蛇绿混杂岩中放射虫化石的时代及其构造意义. 地质学报, 81(6): 1161-1168
- 舒良树, 周国庆, 施央申, 殷俊. 1993. 江南造山带东段高压变质蓝片岩及其地质时代研究. 科学通报, 38(20): 1879-1882
- 水涛, 徐步台, 梁如华, 邱郁双. 1986. 绍兴-江山古陆对接带. 科学通报, 31(6): 444-448
- 水涛, 徐步台, 梁如华, 邱郁双. 1988. 中国浙闽变质基底地质. 北京: 科学出版社, 1-93
- 水涛. 1987. 中国东南大陆基底构造格局. 中国科学(B 辑), 17(4): 414-422
- 孙幼祥. 1982. 广西前寒武纪东安期本洞岩体岩石学特征与成因研究. 硕士学位论文. 南京: 南京大学, 1-115
- 唐红峰, 张光辉, 周新民, 刘伯根. 1997. 一个造山后花岗岩基: 石耳山花岗岩的形成时代和成因. 南京大学学报(自然科学), 33(4): 587-595
- 汪龙, 刘春明, 胡召齐, 江来利, 黄德志. 2016. 皖南鹤城科马提质变玄武岩地球化学特征及大地构造意义. 中国有色金属学报, 26(4): 863-877
- 王博, 舒良树. 2001. 对赣东北晚古生代放射虫的初步认识. 地质论评, 47(4): 337-344
- 王存智, 邢光福, 余明刚, 黄志忠, 洪文涛, 赵希林, 周效华, 段政, 鞠冬梅. 2015. 赣东北蛇绿岩形成时代及构造环境-樟树墩辉长岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学约束. 岩石矿物学杂志, 34(3): 309-321
- 王德滋, 周新民, 孙幼祥. 1984. 华南前寒武纪花岗岩类的基本特征. 见: 花岗岩地质和成矿关系(国际花岗岩学术讨论会论文集). 南京: 江苏科学技术出版社, 82-90
- 王剑, 李献华, Duan T Z, 刘敦一, 宋彪, 李忠雄, 高永华. 2003. 沧水铺火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及“南华系”底界新证据. 科学通报, 48(16): 1726-1731
- 王剑. 2000. 华南新元古代裂谷盆地演化-兼论与 Rodinia 解体的关系. 北京: 地质出版社
- 王敏, 戴传固, 王雪华, 陈建书, 马会珍. 2011. 贵州梵净山白云母花岗岩锆石年代、钆同位素及对华南地壳生长的制约. 地学前缘, 18(5): 213-223
- 王孝磊, 于津海, 舒徐洁, 唐成虎, 邢光福. 2013. 赣中周潭群副变

- 质岩碎屑锆石U-Pb年代学. 岩石学报, 29(3): 801-811
- 王孝磊, 周金城, 邱检生, 高剑锋. 2003. 湖南中-新元古代火山-侵入岩地球化学及成因意义. 岩石学报, 19(1): 49-60
- 王孝磊, 周金城, 邱检生, 张文兰, 柳小明, 张桂林. 2006. 桂北新元古代强过铝花岗岩的成因: 锆石年代学和 Hf 同位素制约. 岩石学报, 22(2): 326-342
- 王自强, 索书田. 1986. 华南地区中、晚元古代阶段古构造及古地理. 见: 华南地区古大陆边缘构造史. 武汉: 武汉地质学院出版社, 16-37
- 吴根耀, 符鹤琴, 汤加富. 1998. 赣东北地区晚元古代登山群火山岩的特点及其形成的大地构造背景. 岩石学报, 14(2): 240-250
- 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 2005. 皖南新元古代花岗岩长岩体锆石U-Pb定年以及元素和氧同位素地球化学研究. 岩石学报, 21(3): 587-606
- 吴新华, 楼法生, 王玉净, 宋志瑞, 杨群, 邓国辉, 黄志忠, 凌联海. 2004. 赣东北地区不同时代硅质岩的地球化学特征及其地质意义. 高校地质学报, 10(2): 588-595
- 伍实. 1979. 广西晚元古代本洞岩体同位素年代学研究. 地球化学, 8(3): 187-194
- 夏斌. 1984. 广西龙胜元古代二种不同成因蛇绿岩岩石地球化学及侵入方式研究. 南京大学学报(自然科学版), 20(3): 554-566
- 项新葵, 许建华. 1993. 星星群变质核杂岩的特征及其地质意义. 矿产与地质, 7(6): 401-407
- 谢国刚, 邓必荣, 罗春林, 黄水清. 1996. 江西庐山地区星星岩群的建立及其地质意义. 江西地质, 10(4): 274-279
- 邢凤鸣, 徐祥, 陈江峰, 周泰禧, Foland K A. 1992. 赣东北元古代蛇绿岩 Sm-Nd 同位素年龄及地质意义. 岩石矿物学杂志, 11(2): 120-124
- 徐备, 郭令智, 施央申. 1992. 皖浙赣地区元古代地体和多期碰撞造山带. 北京: 地质出版社, 1-112
- 徐备, 乔广生. 1989. 赣东北晚元古代蛇绿岩的 Sm-Nd 同位素年龄及原始构造环境. 南京大学学报(地球科学), (3): 108-113
- 徐备. 2001. Rodinia 超大陆构造演化研究的新进展和主要目标. 地质科技情报, 20(1): 15-19
- 徐步台. 1987. 浙东南古基底变质岩的同位素地质年代问题. 地质论评, 33(5): 468-474
- 徐克勤, 朱金初, 刘昌实, 沈渭洲, 徐士进. 1989. 华南花岗岩类的成因系列和物质来源. 南京大学学报(地球科学), (3): 1-18
- 徐夕生, 周新民. 1991. 皖南前寒武纪花岗岩类中的岩石包体. 矿物岩石, 11(1): 24-28
- 徐夕生, 周新民. 1992. 华南前寒武纪 S 型花岗岩类及其地质意义. 南京大学学报, 28(3): 423-430
- 许靖华, 孙枢, 李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学 B 辑, 17(10): 1107-1115
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀等. 1992. 中国松藩-甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社
- 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 谢亚平. 2010. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束. 岩石学报, 26(11): 3215-3244
- 薛振华. 1997. 赣东北周潭群斜角闪岩的成因特征. 华东地质学院学报, 20(3): 211-217
- 薛重生, 张克信, 曾忠平, 王家生, 王霞. 1996. 赣东北蛇绿混杂岩和张村群-登山群变质岩中发现微古化石. 地质科技情报, 15(1): 30
- 颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, Malpas J. 2002. 华南在 Rodinia 古陆中位置的讨论——扬子地块西缘变质-岩浆杂岩证据及其与 Seychelles 地块的对比. 地质前缘, 9(4): 249-256
- 杨建明, 王希斌, 鲍佩声. 1993. 安徽歙县蛇绿岩地球化学特征及形成构造环境. 岩石矿物学杂志, 12(3): 232-242
- 杨明桂, 王发宁, 曾勇. 2002. 赣东北地区的成矿环境与成矿作用. 资源调查与环境, 23(2): 122-129
- 杨群, 王玉净, 尹磊明, 舒良树, 楼法生, 王博. 2005. 论赣东北蛇绿混杂岩的时代-来自微体古生物学的证据. 地质学报, 79(3): 316
- 杨树锋, 顾明光, 卢成忠. 2009. 浙江章村地区中元古代岛弧火山岩的地球化学及构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 39(4): 689-698
- 余达淦, 艾桂根, 黄国夫, 刘平辉. 1999. 江西周潭群同位素年龄特征及其地质意义. 地球学报, 20(2): 195-200
- 张芳荣, 黄新曙. 2008. 江西九岭南缘九仙汤侵入体的锆石U-Pb定年. 资源调查与环境, 29(4): 252-256
- 张菲菲, 王岳军, 范蔚茗, 张爱梅, 张玉芝. 2011. 江南隆起带中段新元古代花岗岩锆石U-Pb年代学和 Hf 同位素组成研究. 大地构造与成矿学, 35(1): 73-84
- 张桂林, 梁金城, 何振培, 廖忠直. 1997. 广西龙胜地区非构造侵位的蛇绿岩. 大地构造与成矿学, 21(2): 137-144
- 张桂林, 梁金城. 1993. 桂北龙胜地区基性超基性岩的变形分解构造及其大地构造意义. 桂林冶金地质学院学报, 13(4): 357-365
- 张彦杰, 周效华, 廖圣兵, 余明刚, 蒋仁, 姜杨. 2011. 江南造山带北缘郭源基性岩地质——地球化学特征及成因机制. 高校地质学报, 17(3): 393-405
- 章邦桐, 胡恭任, 王湘云, 陈培荣, 倪琦生. 1997. 相山地区变质基底新认识及其原岩归属的对比研究. 铀矿地质, 13(1): 1-7
- 章邦桐, 凌洪飞, 沈渭洲, 刘继顺, 杨杰东, 陶仙聪. 1992. 浙江双溪坞群 Sm-Nd 同位素年龄的确定和 Sm-Nd 体系在陈蔡群正斜长角闪岩中重置现象的发现. 地球科学进展, 7(4): 94
- 赵崇贺, 何科昭, 莫宣学, 邵道乾, 林培英, 毕先梅, 郑伯让, 叶德隆, 冯庆来, 叶枏. 1995. 赣东北深断裂带蛇绿混杂岩中含晚古生代放射虫硅质岩的发现及其意义. 科学通报, 40(23): 2161-2163
- 赵风清, 金山山, 甘晓春, 孙大中. 1997. 赣东北-浙西北登山群和松木坞群中火山岩的地球化学. 前寒武纪研究进展, 20(2): 51-57
- 浙江省地质矿产局. 1989. 浙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-89
- 钟玉芳, 马昌前, 余振兵, 林广春, 续海金, 王人镜, 杨坤光, 刘强. 2005. 江西九岭花岗岩类复式岩基锆石 SHRIMP U-Pb年代学. 地球科学——中国地质大学学报, 30(6): 685-691
- 钟自云, 龚安, 方积义. 1981. 龙胜蛇绿岩带的地质特征及构造环境. 桂林冶金地质学院学报, 1(4): 51-61
- 钟自云, 龚安, 方积义. 1983. 广西龙胜蛇绿岩带的地质特征及构造环境. 岩石矿物及测试, 2(1): 1-8
- 周国庆, 舒良树, 吴洪亮. 1989. 与赣东北元古代蛇绿岩有关的高温、高压变质岩和重变质作用机制的讨论. 岩石矿物学杂志, 8(3): 220-231
- 周国庆, 赵建新. 1991. 华南扬子克拉通东南缘赣东北蛇绿岩的 Sm-

- Nd 同位素研究. 科学通报, 36(2): 129-132
- 周金城, 王孝磊, 邱检生, 高剑锋. 2003a. 桂北中-新元古代镁铁质-超镁铁质岩的岩石地球化学. 岩石学报, 19(1): 9-18
- 周金城, 王孝磊, 邱检生, 高剑锋. 2003b. 南桥高度亏损 N-MORB 的发现及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 22(3): 211-216
- 周金城, 王孝磊, 邱检生. 2005. 江南造山带西段岩浆作用特性. 高校地质学报, 11(4): 527-533
- 周金城, 王孝磊, 邱检生. 2008. 江南造山带是否格林威尔期造山带? -关于华南前寒武纪地质的几个问题. 高校地质学报, 14(1): 64-72
- 周效华, 高天山, 马雪, 张彦杰, 廖圣兵, 余明刚, 陈丹丹, 朱延辉. 2014. 江南造山带东段鄂源枕状玄武岩的年代学与构造属性研究. 资源调查与环境, 35(4): 235-244
- 周新民, 王德滋. 1988. 皖南低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比的过铝花岗岩闪长岩及其成因. 岩石学报, 4(3): 37-45
- 周新民, 朱云鹤. 1992. 江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质. 中国科学(B辑), 22(3): 296-303
- 周新民, 朱云鹤. 1993. 华南新元古代碰撞-造山缝合带的岩石学证据. 见: 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社, 3-16
- 周新民, 邹海波, 杨杰东, 王银喜. 1989. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 科学通报, 34(16): 1243-1245
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556-565
- 周宇章, 邢光福, 杨祝良, 沈加林, 陈荣, 包超民, 魏乃颐. 2006. 浙江诸暨新元古代后造山铝质 A 型花岗岩的厘定. 地球学报, 27(2): 107-113
- 周正国, 乐昌硕, 何科昭, 赵崇贺, 聂泽同, 邵道乾, 叶梅. 1999. 赣东北登山群中新发现几丁虫化石及其意义. 科学通报, 44(4): 434-435
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 张辉, 杨策. 2006. 南岭西段花山-姑婆山 A 型花岗质杂岩带: 岩石学、地球化学和岩石成因. 地质学报, 80(4): 529-542
- 朱明新, 王河锦. 2001. 长沙-澧陵-浏阳一带冷家溪群及板溪群的甚低级变质作用. 岩石学报, 17(2): 291-300
- 邹海波, 周新民. 1992. 含豆荚状铬铁矿蛇绿岩与非含矿蛇绿岩. 地质与勘探, 28(4): 30-46

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 张兴春)

·亮点速读·

矿物包裹体中发现早太古代的生命遗迹

西格陵兰 Lsua 地区 37 亿年的表壳岩带中富铁的变质泥岩的弱变形区域保存有较好的原始沉积层理, 以亚毫米级的成分层为特征。其所含的石榴子石-绿帘石-黑云母-白云母-石英-石墨矿物组合反映了角闪岩相的变质作用。在变形较弱的区域, 静态变质作用使得沿沉积层理生长出毫米级的石榴子石晶体, 其中包含有微米级的沉积碎片包体。这些包体同基质中的沉积层一样, 常包含富碳的物质, 而且由于受到寄主矿物石榴子石的保护, 这些含碳物质自变质事件以来几乎没有受到外部环境的影响。最近的研究表明, 这些含碳物质具有 ^{13}C 亏损的碳同位素组成, 被认为是生物成因的特征, 因此这些含碳包体很可能保存有

原始生命活动的重要信息。

最近, 以丹麦哥本哈根大学 Hassenkam T. 为首的研究团队对包裹于石榴子石中的一个大约 10^{-21}m^3 大小的含碳物质展开了系统的研究。他们将红外吸收技术与原子力显微镜结合, 使原子力显微镜的空间分辨率达到 10 nm, 并且可以通过中红外波来研究含碳包体中的有机功能团。他们的研究发现, 包体中的 C 主要与 N、O 及 P 发生键合, 而 C-H 之间以及 H-O 之间的键合程度却很低。早太古代的生命存在形式应该与现代的生物类似, 都是由 H、C、O、N 和 P 为主构成。虽然不同生命的元素比值变化很大, 但元素丰度通常与上述顺序一致, 即 H 是

所有生命中最丰富的元素。他们检测到矿物包体中上述 5 个元素中的 4 个元素, 唯独 H 元素低于检测限。这一现象虽然明显不同于生命中的元素丰度比例, 但却与样品的地质历史相吻合。这是由于有机质在埋藏过程中通常会发生转变, 造成 H 丢失和 C 增加, 最终形成石墨。含碳包体中 C-H 之间以及 H-O 之间极低的键合程度表明, 含碳包体中生物成因的有机质在 500°C 左右经历了热成熟并被较好地保存了数十亿年之久, 同时也排除了外来有机质混染的可能。因此, 这些含碳包体代表了地球历史上最早的生命遗迹, 也支持了早期研究者关于 Lsua 变沉积岩中的 C 为生物成因的认识。

[上述成果来源于: Hassenkam T, Andersson I M P, Dalby I K N, Mackenzie D M A, Rosing M T. 2017. Elements of Eoarchean life trapped in mineral inclusions. Nature 548: 79-81]

(袁超 编译)