

华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解

——观察、解释与检验

李献华¹, 李武显², 何 斌²

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640

摘 要: 本文重点回顾了近十年来华南前寒武纪地质演化的主要研究进展, 特别是新元古代早期扬子-华夏块体拼合形成华南陆块、新元古代中期华南的陆内裂谷岩浆作用和盆地演化及其与 Rodinia 超大陆的聚合-裂解的关系, 并对一些重要区域地质演化和深部动力学机制的学术争议进行评述, 为进一步的研究提出建议。

关 键 词: 华夏; 扬子; 华南; 前寒武纪地质; Rodinia 超大陆

中图分类号: P542 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)06-0543-17

Building of the South China Block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: Observations, interpretations and tests

LI Xian-hua¹, LI Wu-xian², HE Bin²

1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

2. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China*

Abstract: We present in this paper a comprehensive review of the major advancements of the Precambrian geological evolution of South China. Emphases are placed on the formation of the South China Block by amalgamation between the Yangtze and the Cathaysia blocks in early Neoproterozoic, rifting-related intracontinental magmatism and basin evolution in the South China in middle Neoproterozoic and their relevance to the assemblage and break-up of Rodinia supercontinent. We also revisit some major issues and controversies on geological evolution and geodynamics in Neoproterozoic South China, and suggest further investigations for improving Precambrian research of South China.

Key words: Cathaysia; Yangtze; South China; Precambrian geology; Rodinia supercontinent

华南陆块由华夏和扬子块体拼合形成, 国内外学者对华夏和扬子块体拼合的时代和演化进行了长期的研究。早期一些研究提出华南是早古生代或早中生代通过碰撞造山作用形成的^[1~3], 但由于华南内部缺乏古生代或中生代蛇绿岩和活动大陆边缘岩浆弧的记录, 而且扬子-华夏两个块体早古生代具有连续的沉积岩相和生物相, 上述模式受到许多后续研究的质疑^[4~7]。近十年来, 随着分析技术的进步和观察研究的深入, 特别是注意到华南陆块的形成演化与 Rodinia 超大陆聚合-裂解有密切的关系, 华南新元古代地质研究有了长足的进步, 这不仅是国际地学研究的热点之一, 而且成为 Rodinia 超大陆

研究中一个不可或缺的“参照点”。

本文将重点回顾近十年来华南前寒武纪地质演化的主要研究进展, 特别是新元古代早期扬子-华夏块体拼合形成华南陆块、新元古代中期华南的陆内裂谷岩浆作用和盆地演化及其与 Rodinia 超大陆聚合-裂解的关系, 并对一些重要区域地质演化和深部动力学机制的学术争议进行评述, 旨在“温故知新”, 为进一步的研究提出建议。

1 扬子与华夏陆块的前新元古代基底

1.1 扬子基底

扬子块体的基底岩石主要为峡东地区的崆岭杂

岩、扬子西北缘的后河杂岩和云南的大红山群(图1)。位于扬子块体的西北部的崆岭群高级变质杂岩是目前已知的最古老基底,主要由 TTG 片麻岩、变沉积岩和斜长角闪岩(局部有基性麻粒岩)组成。Qiu 等^[8]最早用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法确定了崆岭群最老的 TTG 片麻岩的结晶年龄为 2.90~2.95 Ga;焦文放等^[9]用 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年方法测得崆岭杂岩的一个黑云母斜长片麻岩的结晶年龄为 3218±13 Ma (2σ,下同);而 Gao 等^[10]最近则报道了一个奥长花岗质片麻岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 3302±14 Ma,这是迄今为止报道的扬子

块体最老的岩石。总体上看,崆岭杂岩的 TTG 片麻岩主体形成于中太古代大约 2.9 Ga,存在少数大约 3.2~3.3 Ga 的古太古代老花岗质岩石。崆岭杂岩的变质锆石年龄集中在 1.9~2.0 Ga^[8],与大别山黄土岭麻粒岩相变质作用时代一致^[11,12],表明区域在古元古代经历了高级变质作用,可能与 Columbia 超大陆聚合有关的古元古代造山运动有关^[12]。在大约 1.85 Ga,扬子块体北缘发育了华山观环斑花岗岩^[13]和侵入崆岭杂岩的圈椅墙 A 型花岗岩^[14],标志着扬子块体古元古代造山运动的结束。

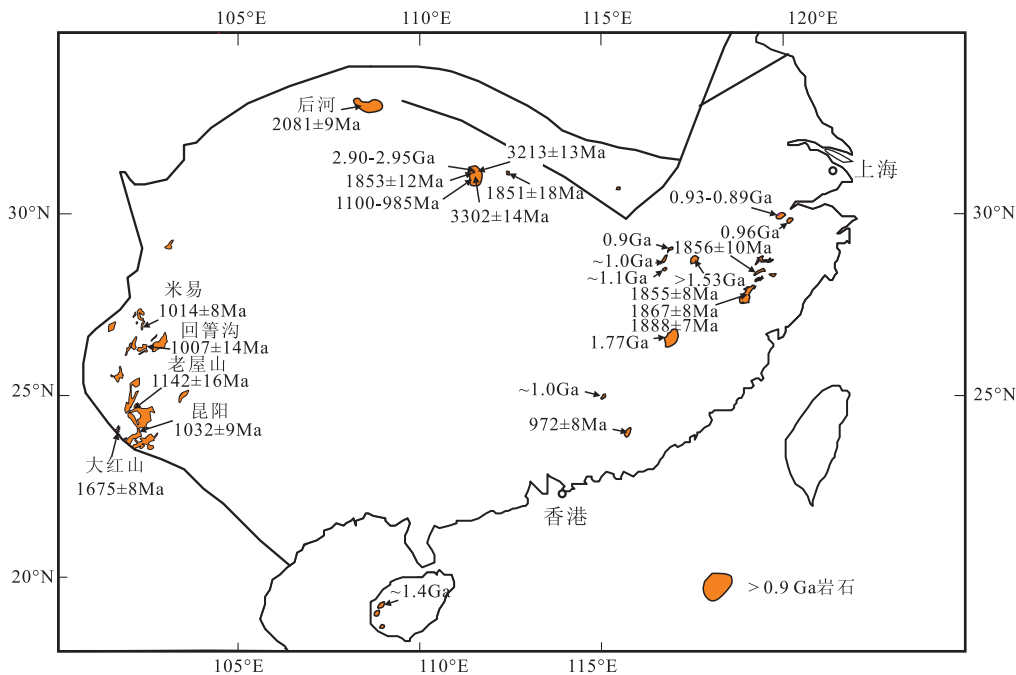


图1 华南前寒武纪(>0.9 Ga)基底岩石分布图(数据来自文献[5,8~10,13~16,18~20,26~40])

Fig.1 The distribution of Precambrian rocks (>0.9 Ga) in the South China(date from ref. [5,8~10,13~16,18~20,26~40])

南秦岭的后河杂岩由英云闪长质片麻岩和少量斜长角闪岩及大理岩组成,经历了高角闪岩相变质和混合岩化作用。锆石定年结果表明英云闪长质片麻岩形成于 2.08 Ga^[15],代表后河杂岩的形成时代,是目前扬子块体西北缘出露的最老基底岩石。

云南大红山群经历了高绿片岩-低角闪岩相变质和构造变形,其中的火山岩形成时代为 1.68 Ga^[16]。因此,古元古代大红山群变质火山-沉积岩是目前扬子西南缘已知的最古老基底岩石。

1.2 华夏基底

华夏块体的基底岩石主要为浙西南的八都杂岩、浙北诸暨陈蔡杂岩和闽西北天井坪斜长角闪岩以及海南西北部的抱板杂岩(图1)。

八都杂岩主要由变质沉积岩、斜长角闪岩、混合岩和片麻状花岗岩组成,其中片麻状花岗岩侵入变

质沉积岩。变质沉积岩中岩浆碎屑锆石年龄主要集中在 2.5 Ga,并经历了 1.88 Ga 的麻粒岩相变质作用^[17]。锆石 U-Pb 定年结果显示,八都杂岩中的花岗岩形成于 1.89~1.83 Ga^[18,19],是目前华夏块体出露的最古老结晶岩石,其结晶年龄也限定了八都变质沉积岩的最小沉积时代。因此八都变质沉积岩的沉积时代应为 2.5~1.9 Ga。

八都杂岩中的斜长角闪岩与闽西北天井坪斜长角闪岩有相似的元素和 Nd 同位素地球化学特征,后者的结晶时代为 1.77 Ga^[20],与陈蔡杂岩中的斜长角闪岩的结晶年龄(1.78 Ga)在误差范围内完全一致^[19]。根据花岗岩和斜长角闪岩的成因研究^[18,21],华夏块体可能经历了古元古代晚期的造山运动和陆内裂谷作用,形成了 1.89~1.88 Ga 的同造山 S 型花岗岩、1.87~1.83 Ga 的晚造山 A 型花

岗岩和 1.78~1.77 Ga 的板内裂谷基性岩浆作用,与华北及其他大陆记录的 Columbia 超大陆的最终聚合-初始裂解同期。八都杂岩和天井坪的 1.78~1.77 Ga 斜长角闪岩的初始 ϵ_{Nd} 值高达 +8.5, 远高于同时期全球亏损地幔值(+5), 表明古元古代存在极度亏损地幔源区, 这为全球亏损地幔的非线性增长演化模式提供了重要地质记录^[21]。

值得指出的是, 近年来一些高精度年代学研究修正了以往认为闽西北麻源群和诸暨陈蔡群主体为古元古代和闽西北马面山群为中元古代的认识。SHRIMP 和 LA-ICPMS 锆石定年结果显示, 麻源群、陈蔡群和马面山群的变质火山-沉积岩源岩的形成时代均为新元古代中期(0.8~0.7 Ga), 并在早古生代武夷-云开造山期发生了强烈的变质变形^[19, 22~25]。

海南岛西北部出露的抱板杂岩是华夏块体西南部已知的最老基底。抱板杂岩由角闪岩相变质的片麻状花岗岩、沉积岩和火山岩组成。Li 等^[26, 27]的研究表明, 抱板片麻状花岗岩和变质火山岩的形成年

龄集中在 1.43 Ga; 而相邻的“石碌群”中也形成于大约 1.43 Ga, 与抱板杂岩的火山-沉积岩同时代, 而不是以往认为的形成于新元古代。抱板杂岩经历了格林威尔期的变质作用^[26], 碎屑锆石 U-Pb 年龄分析结果表明, 不整合覆盖在“石碌群”之上的“石灰顶组”石英岩和石英片岩的沉积时代大致为 1.2~1.0 Ga, 很可能形成于格林威尔期造山带的前陆盆地^[27]。

1.3 碎屑锆石的意义

近年来, 随着 LA-ICPMS 和离子探针技术的广泛应用, 扬子和华夏块体积累了大量的沉积岩(包括河沙)碎屑锆石和幔源岩石的捕获锆石 U-Pb 年龄数据, 部分锆石还进行了原位的 Hf 同位素分析。我们综合了近年来发表的扬子和华夏块体沉积岩的 6800 余个碎屑锆石 U-Pb 年龄和 1580 余个锆石 Hf 同位素数据, 以对扬子和华夏块体前寒武纪陆壳增生演化提供进一步的约束。

1.3.1 扬子块体 图 2(A 和 B) 是扬子东部和西部沉积岩中 3892 个前寒武纪碎屑锆石年龄谱图, 从中可以看出扬子东部沉积岩中碎屑锆石年龄有两个

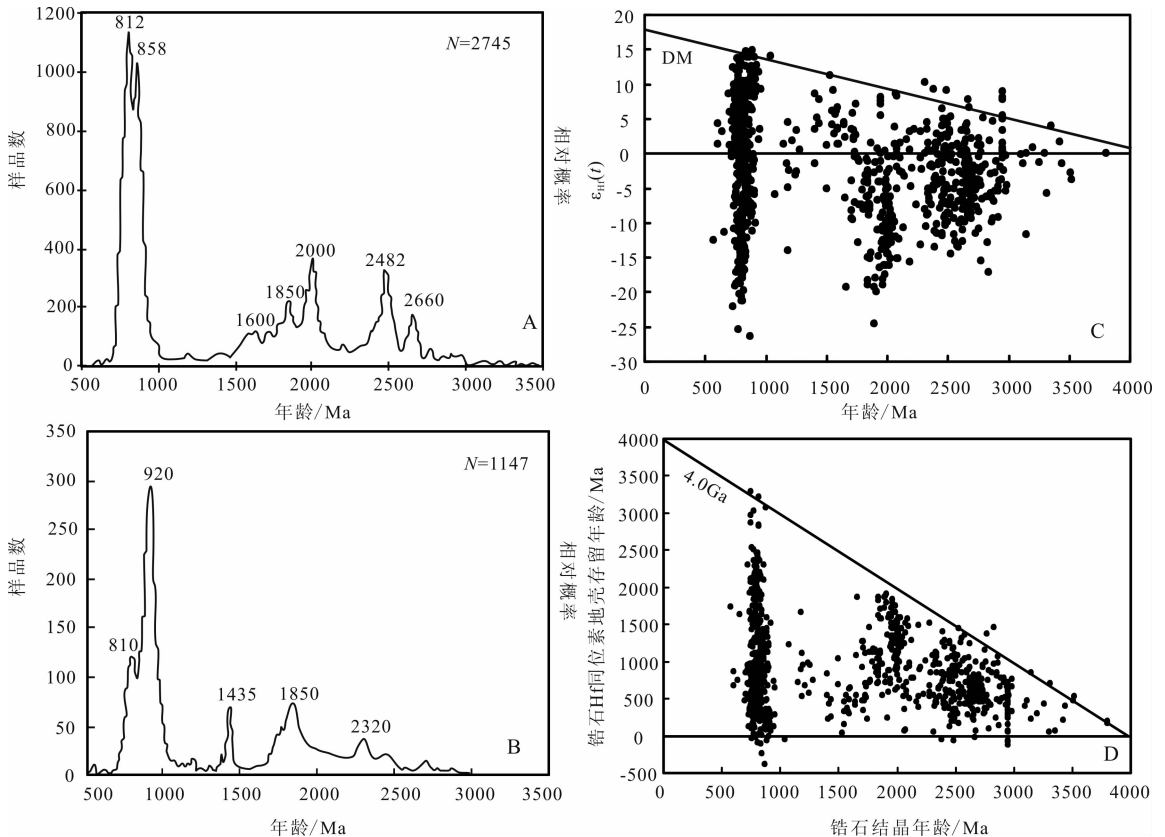


图 2 扬子块体东部(A)和西部(B)沉积岩中前寒武纪碎屑锆石年龄谱; 扬子块体前寒武纪沉积岩中碎屑锆石年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 相关图 (C) 以及锆石年龄和 Hf 同位素地壳存留年龄相关图 (D) (数据来自文献^[16, 26, 45~55])

Fig. 2 The detrital zircon age histograms for Precambrian sedimentary rocks from eastern (A) and western (B) Yangtze Block, and (C) the detrital zircon age vs. Hf and (D) zircon age vs. Hf modal age diagrams of the detrital zircon from the Precambrian sedimentary rocks in the South China Block (date from ref. ^[16, 26, 45~55])

显著的年龄峰:812 Ma 和 858 Ma,另有几个相对小的峰:1600 Ma、1850 Ma、2000 Ma、2482 Ma 和 2660 Ma;扬子西部沉积岩中碎屑锆石年龄有一个显著的年龄峰值 920 Ma 和一个次峰 810 Ma,另有几个相对小的年龄峰:1435 Ma、1850 Ma 和 2320 Ma。总体上,扬子块体沉积岩中新元古代锆石的比例占绝对多数,这和整个扬子块体上大规模的新元古代花岗质岩浆活动密切相关,其中 810 Ma 锆石在东部的比例远高于西部。东部另有一个与 810 Ma 相当比例的锆石年龄峰是 858 Ma。虽然在扬子东南缘有少量 850 Ma 的岩浆岩报道^[41~43],但远没有 800~820 Ma 的岩浆岩出露面积大。扬子西部沉积岩没有 858 Ma 年龄峰,但出现了一个很大的年龄峰 920 Ma,很可能来源于四堡期岩浆弧^[44]。我们注意到太古代碎屑锆石比例很低(西部基本缺失),特别是大于 2700 Ma 的碎屑锆石年龄非常少,表明这些前寒武纪沉积岩剥蚀源区太古代结晶岩石出露的比例很小。

扬子块体沉积岩前寒武纪的 982 个碎屑锆石的 Hf 同位素分析结果(图 2C、D)表明,绝大多数锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$ ($t =$ 锆石结晶年龄),岩浆作用以古老地壳再造为主,但 2.9~2.5 Ga 和 0.92~0.80 Ma 两个时期部分锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$ (部分接近亏损地幔值),其 Hf 同位素的地壳存留年龄($t_{\text{DM}}^{\text{C}} - t$) $\leq \pm 300$ Ma,表明这两个时期扬子块体有明显的新生地壳增长,岩浆作用包括新生地幔物质加入和古老地壳物质再造。锆石的 Hf 同位素模式年龄(t_{DM}^{C})介于 4.0~0.83 Ga,各个时代的最大锆石 Hf 同位素地壳存留年龄一致指示了有 4.0 Ga 的古老地壳物质的再造。结合扬子块体出露的最老的 3.3 Ga 结晶岩石,扬子块体陆核的形成应在 3.3 Ga 以前。大约 4.0 Ga 古老地壳物质有可能来源于扬子块体本身(即扬子块体可能存在更老的结晶基底岩石),或来源于其它未知的古陆块(即扬子块体没有更老的结晶基底岩石)。在未确定更老的结晶岩石之前,深入的锆石形态和微区原位 Hf-O 同位素分析可以对这两种可能性提供约束。

1.3.2 华夏块体 图 3A 是华夏块体各个时代沉积岩的(包括现代河沙)2910 个前寒武纪碎屑锆石年龄谱图,可以看出这些沉积岩中碎屑锆石年龄有三个显著的年龄峰:960 Ma、1850 Ma 和 2485 Ma,四个相对小的年龄峰:588 Ma、765 Ma、1080 Ma 和 1430 Ma,其中四个年龄峰与华夏已知的前寒武纪岩浆岩年龄:1.8~1.9 Ga、1.4 Ga、0.97 Ga 和 0.8

~0.7 Ga 一致。虽然很多研究都发现华夏块体存在太古代碎屑锆石(图 3A 显示的 2.5 Ga 的年龄峰),使得一些研究人员推断华夏块体存在太古代基底,但迄今为止尚未在其中发现太古代岩石。值得注意的是,绝大多数报道的太古代碎屑锆石都是浑

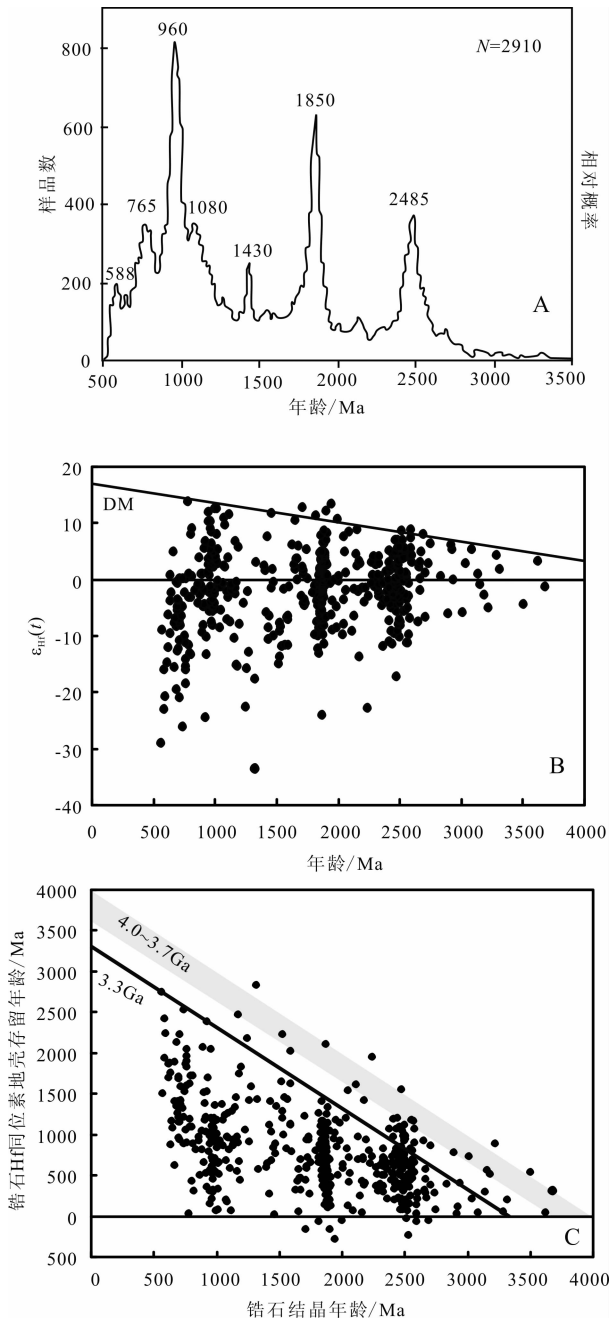


图 3 华夏块体前寒武纪沉积岩中碎屑锆石年龄谱(A);碎屑锆石年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 相关图(B)、年龄和 Hf 同位素地壳存留年龄相关图(C)(数据来自文献[17,18,23,26,57~63])

Fig. 3 The age histogram (A), ages vs. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram (B) and ages vs. Hf modal age diagram (C) for detrital zircon from Precambrian sedimentary rocks in Cathaysia Block (date from ref. [17,18,23,26,57~63])

圆状的他型晶并有复杂的内部结构,表明这些锆石成因复杂而且经历了长距离搬运^[56],而不同于其他来自华夏元古代基底的近源锆石。因此,目前尚无确凿证据表明华夏块体存在太古代基底岩石。

华夏块体 500 个碎屑锆石的 Hf 同位素分析结果(图 3B、C)显示,大多数锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$,表明岩浆作用以古老地壳再造为主,但 2.5 Ga、1.8~1.9 Ga 和 0.96~1.1 Ga 三个时代的许多锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$ (部分接近亏损地幔值),其 Hf 同位素地壳存留年龄 $\leq \pm 300$ Ma。考虑到 2.5 Ga 锆石的剥蚀源区不明,尚不能确定晚太古代是否是华夏块体的主要地壳增长时期,目前比较明确的是 1.8~1.9 Ga 和 0.96~1.1 Ga 是华夏块体两个明显的新生地壳增长时期。所有锆石的 Hf 同位素模式年龄(t_{DM})为 4.2~0.81 Ga,各个时代的最大锆石 Hf 同位素地壳存留年龄指示有 4.0~3.7 Ga 古老地壳物质。如果不考虑太古代碎屑锆石,元古代锆石的最大锆石 Hf 同位素地壳存留年龄主要指示了大约 3.3 Ga 的古老地壳物质。

华夏块体目前已知最老的八都变质沉积岩的沉积时代为 2.5~1.9 Ga,最老的岩浆岩为侵入八都变质沉积岩的 1.9~1.8 Ga 的花岗岩。因此,华夏块体的高级变质-结晶基底是在 1.9~1.8 Ga 期间通过新生地壳物质增生和 3.3~2.5 Ga 太古代地壳物质再造形成的。华夏块体是否存在太古代结晶基底以及太古代古老地壳物质的来源仍需进一步的研究。

2 华南晚中元古-早新元古代造山运动与 Rodinia 超大陆聚合

2.1 区域变质作用

2.1.1 华夏块体 1.3~1.0 Ga (格林威尔期)变质作用 Li 等^[26,27]的研究表明,海南抱板杂岩中 1.43 Ga 花岗岩为典型的非造山型花岗岩,其元素和同位素地球化学组成特征与 Laurentia 大陆南部“中元古代非造山岩浆岩带”中的 1.43 Ga Sherman 花岗岩基^[64]非常相似。抱板杂岩经历了 1.3~1.0 Ga 变质作用^[26],与 Laurentia 大陆的格林威尔期变质作用时代一致。碎屑锆石 U-Pb 年龄分析结果表明,不整合覆盖在石碌群之上的“石灰顶组”石英岩和石英片岩的沉积时代大致为 1.2~1.0 Ga。很可能形成于区域格林威尔期造山带前陆盆地。“石灰顶组”沉积岩含有大量 1.6~1.5 Ga 的碎屑锆石,与 Laurentia 大陆西南部 Belt 盆地的沉积岩碎屑锆石年龄一致,而 Belt 盆地的砂岩来源于一“非 Laurentia”的西部物源^[65]。Li 等^[27]推测华夏陆块在中元

古代很可能是 Laurentia 大陆的一部分,其中抱板杂岩(包括石碌群)可能是 Laurentia 大陆南部“中元古代非造山岩浆岩带”的西延,华夏块体在格林威尔造山期为 Laurentia 大陆西南部 Belt 盆地提供沉积物源。

2.1.2 扬子块体南缘 1.1~0.9 Ga (四堡期)变质变形作用 田里片岩位于扬子块体东南缘,经历了高绿片岩相变质和两期变形作用^[28],最年轻的碎屑锆石 U-Pb 年龄约为 1.53 Ga,白云母激光原位 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果显示,田里片岩的变质年龄为 1042~1015 Ma,并经历了 968~942 Ma 的构造活化事件。因此田里片岩母岩的沉积时代应为 1.53~1.04 Ga。田里片岩是目前扬子块体南缘唯一出露的四堡期变质岩,与上覆的 825 Ma 未变质变形的裂谷盆地火山-沉积岩^[66]呈角度不整合,不整合面之上是裂谷盆地底部的翁家岭组底砾岩。该不整合面不仅显示出上、下岩石在变质变形作用方面的巨大差异,而且还指示了该地区超过约 200 Ma 的沉积缺失,记录了 >0.9 Ga 以前的造山运动和以后 0.83 Ga 的裂谷盆地演化。

2.2 岩浆作用

2.2.1 华夏块体 舒良树等^[31]在粤东兴宁县径南(华夏块体东部)厘定出格林威尔期变流纹岩。这些流纹岩与变杂砂岩呈互层,两者同褶皱、同变质,以高钾钙碱性为特征,类似于形成于活动大陆边缘的酸性火山岩,变流纹岩的结晶年龄约为 0.98 Ga,并含有大量的 1.10 Ga 的捕获锆石。赣南鹤仔片麻状花岗岩体的锆石 Pb/Pb 年龄约为 1.0 Ga^[30]。虽然华夏块体上出露的格林威尔期岩浆岩很少,但华夏块体各个时代的沉积岩中含有大量的格林威尔期(1.2~0.96 Ga)岩浆成因的碎屑锆石(图 1),表明华夏块体曾经有大量的格林威尔期岩浆岩出露,这是区域沉积岩的剥蚀源区。

2.2.2 扬子块体 扬子块体周边零星出露 1.0~0.9 Ga 的四堡期同造山岩浆岩(图 1)。在扬子块体东南缘沿江绍断裂带北侧(浙江绍兴平水-富阳双溪坞)出露四堡期钙碱性基性-酸性火山岩和花岗质侵入岩,其中“平水组”火山岩以玄武质安山岩-安山岩为主,其形成时代为 0.96 Ga^[29,32],被 0.92~0.91 Ga 的英云闪长岩-花岗闪长岩侵入^[33];富阳双溪坞火山-沉积岩自下而上由北坞组安山岩-英安岩、岩山组碎屑岩和章村组流纹岩组成,其中北坞组和章村组火山的形成时代分别为 0.93 Ga 和 0.89 Ga^[29]。这些四堡期火山岩经历了绿片岩相变质和强烈的变形,章村组火山岩被新元古代中期未变质

变形的裂谷盆地火山-沉积岩^[67]角度不整合覆盖,不整合面之上是裂谷盆地底部的“骆家门底砾岩”。元素和同位素地球化学研究表明,平水和双溪坞火山-侵入岩为一套典型的钙碱系列岩石,是新元古代早期洋壳向北俯冲于扬子块体之下形成的岩浆弧^[29]。

在扬子块体西南缘厘定出两个格林威尔期同构造花岗岩:攀枝花北东回笱沟的片麻状花岗岩^[26]和米易垭口的变质变形二长花岗岩^[34],两个花岗岩的形成年龄均为 1.0 Ga,被解释为扬子与华夏块体在西南缘碰撞拼贴时形成的同构造花岗岩。

另外,江西弋阳铁砂街群出露了一套变质中酸性火山岩,形成年龄约为 1.1 Ga^[35]。由于铁砂街群出露于扬子和华夏块体边界,对这套岩石属于扬子南缘还是华夏北缘尚有不同的认识。扬子块体西南缘的云南昆阳群中(老屋山组和黑山头组)也有约 1.1 Ga 的中酸性火山岩报道^[36,37],我们倾向于将昆阳群和铁砂街群火山岩一起作为扬子块体南缘的同期岩浆岩,可能是区域四堡期(或格林威尔期)最早的岩浆活动。

2.3 蛇绿岩

蛇绿岩的厘定对了解板块聚合和造山带演化具有重要的意义。不同的研究人员认为在扬子块体周边存在许多蛇绿岩(残片),如扬子西部的“盐边蛇绿岩”^[68]、南缘的“龙胜蛇绿岩”^[69]、东南缘的“赣东北蛇绿岩”和“皖南伏川蛇绿岩”^[5, 70~72],以及最近在黄陵地区的“庙湾蛇绿岩”^[38]。

近十年的研究表明,原先认为的一些“蛇绿岩”并非蛇绿岩。如桂北“龙胜蛇绿岩”中的细碧岩具有板内和岛弧火山岩的双重地球化学属性,其中的流纹岩夹层年龄约为 765 Ma^[73],基性岩石是侵入丹洲群 760 Ma 的辉长岩^[74],是新元古代裂谷作用的产物。川西“盐边蛇绿岩”中玄武岩的地球化学特征有两种,一种类似于“岛弧钙碱性玄武岩”,另一种类似于 MORB,但两类玄武岩都不同程度地受到地壳物质的混染,因此,不是形成于大洋环境而是形成于陆壳基底上的弧后盆地玄武岩^[44]。

“赣东北蛇绿岩”是迄今为止比较确认的蛇绿岩,其中玄武岩具有一致的亏损 Nd 同位素组成(初始 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) \approx +5$),REE 和微量元素组成既有 MORB 型,也有岛弧玄武岩型,类似于“SSZ”型蛇绿岩,可能形成于弧后扩张形成的小洋盆^[75]。樟树墩基性-超基性岩的全岩-矿物 Sm-Nd 内部等时线年龄(1.0 Ga^[5])和西湾埃达克质花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(0.97 Ga^[39, 40])限定了赣东北弧后盆地洋

壳的形成年龄和俯冲年龄,而西湾 0.88 Ga“仰冲型”花岗岩则给出了赣东北蛇绿岩的构造侵位时代^[76]。总体上,赣东北蛇绿岩的形成和演化与“双溪坞岩浆弧”的形成以及“田里片岩”的变质时代基本一致,因此它很可能代表了扬子块体东南缘新元古代早期岩浆弧的弧后扩张盆地。

早期的定年结果显示“皖南伏川蛇绿岩”形成于 0.93~1.0 Ga^[70, 5],与赣东北蛇绿岩的形成时代基本一致,因此二者通常被认为是同属一个蛇绿混杂岩体。最近丁炳华等^[77]报道了“皖南伏川蛇绿岩”中的堆晶岩异剥橄榄岩和侵入到方辉橄榄岩中的辉长岩岩脉的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 827 ± 9 Ma 和 848 ± 12 Ma,笔者认为“皖南伏川蛇绿岩”属于“SSZ 型蛇绿岩”,形成时代为 827~848 Ma,指示存在于华夏和扬子板块之间的古洋盆在新元古代(约 850 Ma)之前由扩张开始转化为俯冲消减。然而,岩石地球化学研究表明,“皖南伏川蛇绿岩”中的玄武质岩具有富集的 Nd 同位素组成特征,特别是部分样品的 $\text{SiO}_2 > 60\%$,地壳混染作用明显^[75]。张旗和周国庆^[78]曾质疑“皖南伏川蛇绿岩”是否属于蛇绿岩。我们认为有必要对其深入研究。

最近 Peng 等^[38]对黄陵背斜南部崆岭岩群中的元古宙庙湾岩组变形变质超镁铁-镁铁质岩进行了系统研究,得到的锆石 U-Pb 定年结果为 1100~985 Ma,基性岩具有平坦至亏损的 LREE 特征,笔者认为这套岩石是中元古代末-新元古代初的蛇绿混杂岩,称之为“庙湾蛇绿岩”,形成于扬子块体与“神农架岩浆弧”的弧前环境,扬子块体与“神农架岩浆弧”在 870~850 Ma 碰撞,使“庙湾蛇绿岩”仰冲到扬子块体上,并在碰撞晚期形成黄陵花岗岩。按照 Peng 等^[38]的解释,太古代崆岭杂岩不属于扬子块体的基底,而可能是澳大利亚大陆边缘(“神农架岩浆弧”)的基底。值得注意的是“庙湾蛇绿岩”的 Nb/Th 值为 2.9~10.2^[38],远低于 E-MORB 和 N-MORB 的 Nb/Th 值(14~19),表明“庙湾蛇绿岩”在形成过程中有富集 Th 的陆壳物质加入。另外,“庙湾蛇绿岩”的形成时间跨度大于 100 Ma。因此,需要对“庙湾蛇绿岩”做进一步的研究。“庙湾蛇绿岩”对扬子块体早前寒武纪大陆演化的认识提出了许多问题,特别是崆岭杂岩是否能代表扬子块体的基底。

2.4 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆的聚合

目前学术界的基本共识是华南陆块在新元古代通过四堡造山运动由华夏和扬子两个块体拼合形成,但不同的研究人员对最终的拼合时间有不同的认识。综合四堡造山带构造-岩浆-变质作用和蛇绿

岩的研究成果,我们认为华南四堡造山运动的时限大致为 1.1~0.9 Ga。华夏与扬子块体最初(1.1~1.0 Ga?)在扬子西南缘发生拼贴,其前陆盆地(昆阳群及相当地层)沉积了来自华夏块体碎屑沉积物(以 1.43 Ga 抱板花岗岩的锆石为特征);洋壳向扬子块

体俯冲在扬子东南缘形成了高绿片岩相变质(田里片岩)、双溪坞岩浆弧以及赣东北弧后盆地(赣东北蛇绿岩);弧后盆地的俯冲形成西湾埃达克质花岗岩、最终闭合导致蛇绿岩仰冲、形成西湾“仰冲型”花岗岩,并在 0.88 Ga 前形成统一的华南陆块(图 4)。

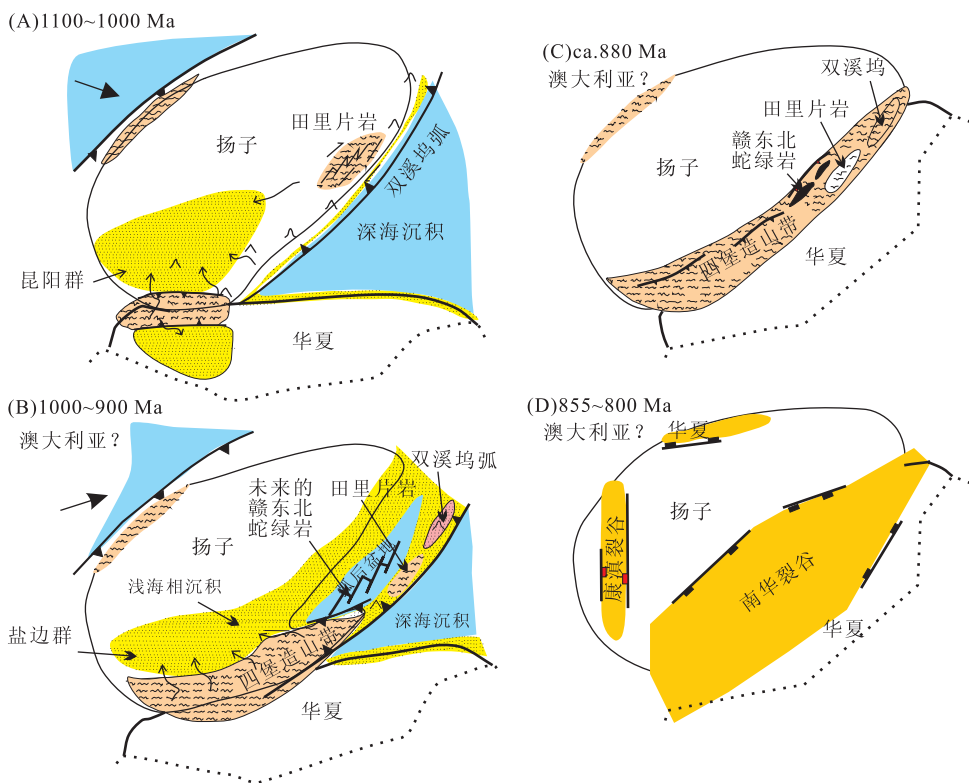


图 4 扬子-华夏块体拼合形成华南陆块到造山后伸展示意图(据文献[28,29]修改)

Fig. 4 A cartoon shows assembly of Yangtze and Cathaysia blocks to form the South China and post-orogenic extension(modified from ref. [28,29])

3 华南新元古代中期岩浆作用和盆地演化与 Rodinia 超大陆裂解

3.1 860~840 Ma 造山后岩浆作用

3.1.1 华夏地块 860~840 Ma 的岩浆岩在华夏地块出露非常零星。据 Shu 等^[79]报道,华夏地块最北端浙江绍兴地区的 Huaquan 辉长岩形成年龄为 858 ± 11 Ma,并认为该年龄代表了怀玉地体/扬子地块与华夏地块之间蛇绿混杂岩的形成年龄。随后,Shu 等^[80]在邻近地区又报道了 857 ± 7 Ma 的玄武岩和 841 ± 12 Ma 的辉长岩年龄,并在闽西北的政和地区厘定出两个块状和片麻状辉长岩的年龄(分别为 836 ± 7 Ma 和 847 ± 8 Ma)。最近,Li 等^[19]报道了绍兴地区漓浦辉长闪长岩及其共生的陈蔡双峰式火山岩年龄分别为 838 ± 5 Ma 和 841 ± 6 Ma。地球化学研究显示,这些早期认为可能是蛇绿岩的岩石均为与大陆裂谷有关的岩浆活动产物,代表了

华夏地块上四堡造山运动后最早的新元古代伸展背景下的岩浆活动,它们与扬子地块上同时期的岩浆活动有很好的对应,表明华南地块在四堡运动之后已经结合成统一的华南地块^[80]。值得注意的是,尽管 860~840 Ma 的岩浆岩在华夏地块有所出露,但同时代的碎屑锆石在华夏地块新元古代及之后的地层中(包括古生代和中生代地层)却非常少,很可能是因为华夏块体 860~840 Ma 的岩浆岩以基性岩为主。

3.1.2 扬子地块 扬子地块 860~840 Ma 的岩浆岩主要零星分布在其周边(图 5),以东南缘发育最为完整,岩石类型最为丰富,主要包括浙东南双溪坞地区侵入双溪坞群的神坞辉绿岩墙(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 849 ± 7 Ma),赣东北地区港边正长岩(SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 848 ± 4 Ma^[42])以及德兴地区珍珠山双峰式火山岩(SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 849 ± 6 Ma^[43])。它们代表了扬子地块东南缘四堡

运动后岩浆作用或者是最初的 Rodinia 超大陆的裂谷岩浆活动^[42,43]。扬子地块南缘的湘西-桂北地区,由于新元古代裂谷沉积的覆盖,目前报道的 850~860 Ma 的岩浆岩非常少,仅在桂北地区有 836±3 Ma 的寨滚花岗闪长岩^[81]。但是,湘西北的冷家溪群、桂北的四堡群、黔东北的梵境山群和赣北的双桥山群火山-碎屑沉积岩中,有大量的 860 Ma 左右的碎屑锆石年龄的报道^[52,82,83],它们可能代表了约 860 Ma 开始的四堡造山后的最初拉张裂谷中的火山-沉积充填物。扬子地块西缘的康滇地区,860~840 Ma 的岩浆活动包括 857±13 Ma 的关刀山石英闪长岩^[84,85]、864±8 Ma 的格宗花岗岩^[86]、853±42 Ma 泸定桥头辉长岩^[87]。但是,对于它们形成的构造环境存在争论。一种观点认为,早新元古代时期扬子地块西缘的康滇地区是洋壳向东俯冲形成的岛弧/活动大陆边缘,形成了该地区 860~840 Ma 的岩浆弧^[85~87]。Li 等^[84]则认为关刀山闪长岩是板内非造山背景下低钾拉斑质岩石部分熔融形成的。我们认为新元古代早期盐边群及相当地层的穿透性近东西走向的褶皱构造线与扬子地块西缘近南北向的活动大陆边缘明显直交,不支持康滇地区新元古代早期存在向东的洋壳俯冲和活动大陆边缘^[44]。扬

子地块北缘目前报道的 860~840 Ma 的岩浆岩非常少,仅有东秦岭造山带的 844±2 Ma 方城碱性正长岩,暗示扬子地块北缘从造山到板内伸展的构造转换时间不晚于约 844 Ma^[88]。

3.2 830~750 Ma 岩浆作用——Rodinia 超级地幔柱与超大陆裂解

华南广泛发育了新元古代中期(830~750 Ma)的岩浆岩和火山-沉积盆地,岩浆岩以大规模的花岗岩和酸性火山岩为主,其次为玄武岩和基性侵入体,主要出露在现今扬子块体的周缘和华夏块体的东部(图 5)。花岗岩与酸性火山岩包括过铝质 S 型、准铝质高钾钙碱性 I 型、铝质 A 型和埃达克质岩石,不同研究人员对这些酸性岩浆岩的成因和形成的构造背景有很大争议,包括岩浆弧、造山带垮塌以及(与地幔柱活动有关的)板内裂谷环境等。需要指出的是,花岗质岩石的地球化学特征通常受到源岩性质、岩浆的形成和演化等多种因素的影响,因此花岗质岩石的地球化学特征通常没有明确的构造环境指示意义。相对而言,幔源基性岩浆,特别是能够代表岩浆成分的玄武岩和一些快速冷却的基性岩脉/岩席的地球化学组成则能够较好地反映其地幔组成、热结构及其构造背景^[89]。

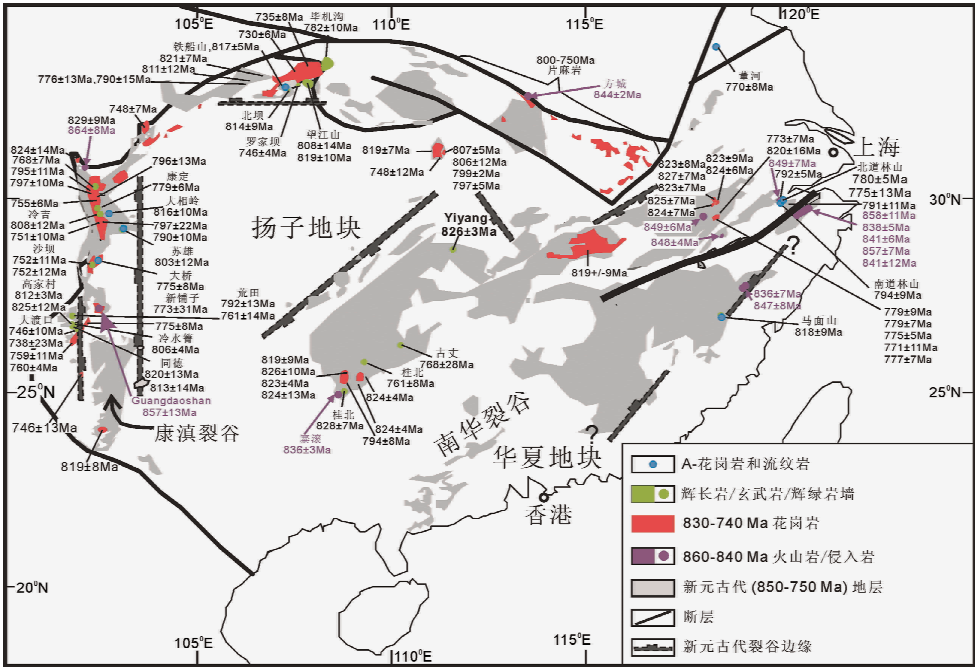


图 5 华南新元古代中期侵入岩和火山-沉积岩系分布图(据文献^[43,66,90]修改)

Fig. 5 The distribution of middle Neoproterozoic intrusive rocks and volcanic-sedimentary rocks in the South China(modified from ref. ^[43,66,90])

李献华等^[89]和 Wang 等^[91]对近年来文献报道的华南 830~750 Ma 玄武质岩石的地球化学和同位素数据的综合分析,除少数高 MgO 的玄武质岩

石样品具有接近原始玄武岩浆成分($Mg^\# \geq 65$ 和/或 $MgO > 9\%$),如桂北科马提质玄武岩^[92]、益阳科马提质玄武岩^[93]、碧口玄武岩^[94]、同德苦橄岩^[95]

和苏雄玄武岩^[96]等,大多数玄武质岩石的 $Mg^\#$ 或 MgO 含量明显低于原始玄武岩浆成分,表明经历了不同程度的结晶分异演化,总体上以拉斑系列和碱性系列玄武岩组合为特征(图 6),很少有钙碱性系列岩石。在 $Ti-Sm-V$ 判别图上^[97],绝大多数样品都投入到 OIB 和 MORB 范围,其 $Ti/V > 20$,形成于板内环境。

通过对玄武质岩浆岩原始岩浆组成可以计算出其地幔潜能温度(t_p)。绝大多数玄武岩具有明显高于同时代 MORB 源区的 t_p (1350~1450℃),如益阳科马提质玄武岩和同德苦橄岩的 t_p 最高为 1600~1620℃、苏雄玄武岩和碧口群高 Ti 玄武岩的 t_p 约为 1505~1535℃、康滇辉绿岩脉的 t_p 约为 1485~1565℃、湘西辉绿岩和桂北细碧岩 t_p 约为 1573~1588℃^[91,93~95]。如此高的地幔潜能温度,表明华南新元古代中期玄武质岩浆与异常高温的地幔柱活动有关,而益阳科马提质玄武岩和同德苦橄岩则为华南新元古代地幔柱活动提供了直接的高温岩石记录。图 7 是根据新元古代早-中期玄武质岩石的成因研究,结合区域地质构造与盆地演化,提出的华南新元古代早-中期地球动力学演化模型。

从岩石地球化学特征看,华南新元古代中期玄武质岩石形成于与地幔柱活动有关的板内裂谷环境,与玄武质岩浆岩共生的花岗质岩石也应形成于板内非造山环境。一些玄武质岩石具显示出 Nb-Ta 亏损的“岛弧玄武岩”特征,很可能与受大洋俯冲板片熔体/流体交代的岩石圈地幔和/或地壳物质的加入有关。需要指出的是辉长岩等基性侵入岩通常是堆晶成因的,其全岩地球化学组成一般不能代表岩浆的成分(与玄武岩和快速冷却的基性岩脉不同),因此对基性侵入岩地球化学的解释需谨慎。

3.3 盆地演化

华南新元古代沉积盆地主要分为南华裂谷系、康滇裂谷和扬子北缘火山-沉积盆地^[67],其中对南华裂谷的研究最为详细。南华裂谷系的沉积学研究表明其具典型裂谷盆地沉积演化特征^[67,98]。代表裂谷盆地早期形成阶段的成因相组合有冲洪积相组合、陆相(或海相)火山岩及火山碎屑岩相组合、滨浅海沉积相组合、淹没碳酸盐台地及欠补偿盆地黑色页岩相组合;而代表中、后期形成阶段的成因相组合有滨岸边缘相至深海相组合,冰期冰积岩相组合、碳酸盐岩及碳硅质细碎屑岩相组合。裂谷盆地的岩相古地理演化经历了五个重要时期,反映了由陆变海、由地堑-地垒相间盆地变广海盆地、由浅海

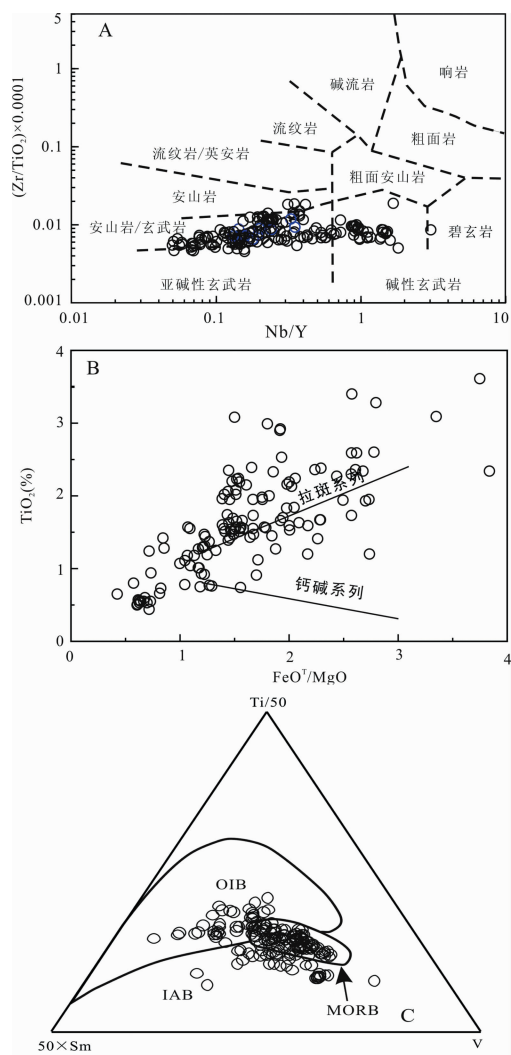


图 6 华南新元古代中期玄武质岩石的分类(A)、系列(B)和形成环境的 $Ti-Sm-V$ 判别图(C)

Fig. 6 (A) Nb/Y vs. $Zr/TiO_2 \times 0.0001$, (B) FeO^T/MgO vs. TiO_2 and (C) $Ti-Sm-V$ diagrams

变深海、盆地由小变大的演化过程。裂谷盆地的形成经历了裂谷基的形成、地幔柱作用下裂谷体的形成、被动沉降与裂谷盖的形成三个阶段^[67,98]。新元古代中期(850~700 Ma)发生了全球性裂谷作用,对比南澳阿德莱德裂谷系地层层序、火山活动及 Marinoan 之前的冰川事件与华南裂谷演化史有相似之处,反映了二者在新元古代裂谷盆地演化早-中期具有十分密切的联系^[99],也表明华南裂谷盆地是 Rodinia 超大陆在新元古代时期解体过程的一个重要组成部分。

近年来一些学者先后对华南地区四堡群和板溪群(及相应地层)的沉积岩开展了主微量和同位素分析,碎屑锆石年龄谱及 Hf 和 O 同位素示踪,取得了一些进展,但仍有不同认识:一是认为沉积物源与岩

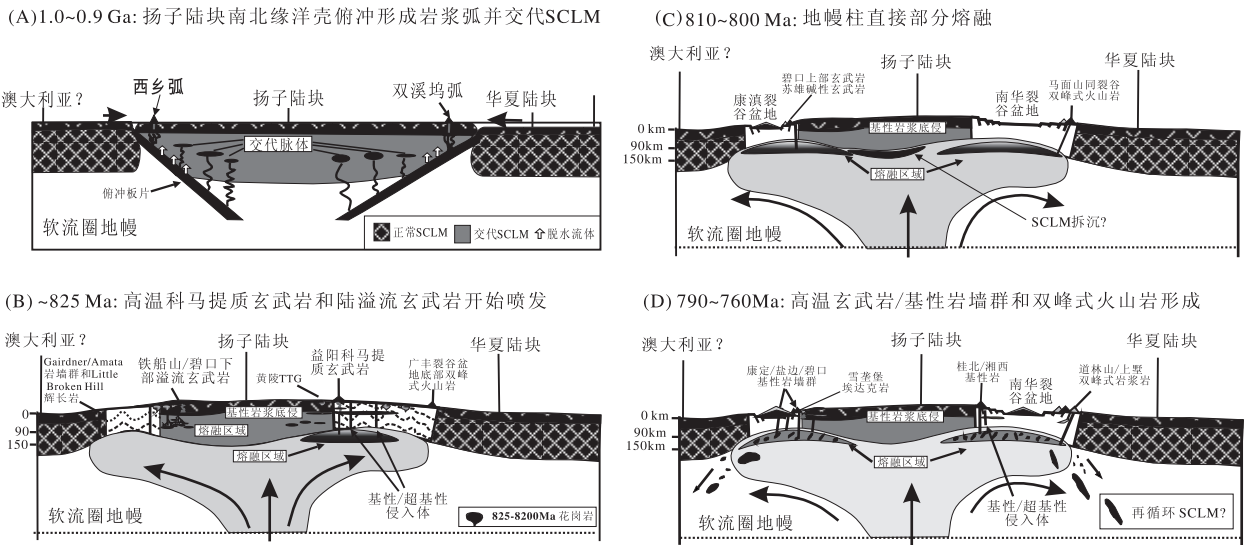


图 7 华南新元古代早-中期地球动力学演化模型(据文献[89,91])

Fig. 7 A geodynamic model for the South China during early-middle Neoproterozoic(modified from ref. [89,91]修改)

浆弧有关^[47,52,100,101],另一则认为与跟地幔柱有关的大规模岩浆岩的剥蚀有关^[51,102]。需指出的是,沉积岩地球化学示踪具有很大的不确定性,上述两种模型都需要更多的证据。然而,不同研究者均发现华南地区新元古代沉积岩碎屑锆石年龄谱主要峰值均为 850~720 Ma^[52,48,51,102]。新元古代地层中含有大量同时代碎屑锆石可能暗示这一地区在新元古代长期处于一个热异常(或地幔柱)中心,许多碎屑锆石 Hf 同位素组成也在新生地壳和亏损地幔生长曲线之间(图 2),暗示新元古代是华南地区一个重要地壳生长阶段,且在 860~870 Ma 以后出现低¹⁸O 岩浆岩,指示这些岩浆岩的源区经历了与裂谷有关的高温热液蚀变^[51]。综合这些观察,我们认为用地幔柱导致的裂谷模型解释更为合理。

4 地球动力学演化:模式与检验

4.1 华南新元古代地球动力学演化模型

目前的主流观点是,新元古代早期华南陆块的形成和随后的大规模板内裂谷岩浆作用与 Rodinia 超大陆的聚合和裂解密切相关,虽然对华南陆块在 Rodinia 超大陆重建中的位置仍有不同的意见。根据 IGCP440 项目“Rodinia 超大陆聚合与裂解”的总结^[103],华南位于冈瓦纳和劳伦两大古陆之间,四堡运动导致华夏-扬子块体最终在 0.9 Ga 拼合形成华南陆块,完成了冈瓦纳和劳伦两大古陆的最终聚合。华南四堡运动与印度东部的 Eastern Ghats Belt 以及相应的东南极 Rayner Province 造山运动的时限(0.99~0.90 Ga)一致,标志着 Rodinia 超大陆的最终聚合。

与上述模型不同的是,一些研究人员针对酸性和基性侵入岩普遍存在 Nb-Ta 亏损的“岛弧”,特别是在扬子西-西北缘还厘定出一些埃达克质岩石,认为新元古代中期扬子块体在东南缘和西-西北缘存在两个岩浆弧。东南缘的岩浆弧及造山作用可能持续到 0.8 Ga 或更晚^[81,83,104,105],大规模的 0.82 Ga 花岗岩可能和造山带伸展-垮塌有关^[104,106~108];西-西北缘的岩浆弧及造山作用则持续到 0.74 Ga 或更晚^[55,86,109~116],据此,一些学者认为华南陆块可能位于 Rodinia 超大陆的边缘或者不是超大陆的一部分^[86,111]。

4.2 关键地质问题及检验

4.2.1 新元古代四堡(江南)造山作用结束的时代

新元古代四堡(江南)造山作用的结束代表了华南陆块的最终聚合,因此造山带结束的时代对认识华南陆块形成与演化至关重要。目前对四堡造山作用的结束时代主要有两种不同的认识:①认为结束时间在 0.9~0.88 Ga,主要证据有区域田里片岩记录的最后一期变质变形作用 0.94 Ga、双溪坞岩浆弧最晚的岩浆作用时代 0.89 Ga 和西湾蛇绿混杂岩中的“仰冲型”花岗岩的年龄 0.88 Ga,而 0.85 Ga 的双峰式火山岩、板内型辉绿岩脉和碱性杂岩代表了造山后或非造山岩浆作用;②认为造山作用的结束时间大致在 0.82~0.80 Ga,主要依据是区域 0.86~0.83 Ga 四堡群(或冷家溪群及相应地层)与 0.82 Ga 丹洲群(或板溪群及相应地层)呈角度不整合。另外一些学者认为扬子南缘大约 0.82 Ga 大规模 S 型花岗岩应属于“造山”型花岗岩。我们认为以下几个问题在今后四堡造山带研究中需要关注:

①扬子与华夏块体的边界。目前比较一致的意见是浙北的江山—绍兴断裂带是扬子与华夏块体的东部边界,但由于新元古代及以后的沉积覆盖,两个块体的边界在江山—绍兴带以西并不清楚,直接影响对四堡造山带演化以及造山后岩浆-盆地属性的认识;②四堡群(及相当地层)是造山带的变质变形基底吗?如果是,为什么四堡群(及相当地层)基本未变质?四堡群(及相当地层)的沉积环境与盆地属性?③四堡群(或冷家溪群及相应地层)与丹洲群(或板溪群及相应地层)之间的不整合面的构造意义是什么?目前的年代学资料表明,这个不整合面发生的时代应该在 830~820 Ma,上、下地层的沉积缺失时间很短,表明在 825 Ma 左右很短的时间内发生了区域性的地壳隆升、去顶、沉降和大面积的岩浆作用。目前有地幔柱和造山带垮塌不同的动力学机制解释,但仍需进行更加深入的构造地质和沉积盆地分析研究;④赣东北蓝片岩问题。除了“田里片岩”的研究外,与四堡造山带有关的变质作用研究一直相对薄弱,主要是由于中-高级变质岩出露非常少。舒良树等^[117]曾经在赣东北西湾报道发现蓝片岩,早期的 K-Ar 和 Ar-Ar 定年结果分布在 790~900 Ma 之间,平均 866 Ma^[6]。“西湾蓝片岩”不仅是四堡造山带唯一报道的高压变质岩,也是全球范围内少有的前寒武纪蓝片岩,遗憾的是近十几年来一直没有新的研究工作报道。

4.2.2 扬子西缘新元古代构造-岩浆属性 扬子西缘出露了大量的 850~740 Ma 基性和酸性岩浆岩,但目前对这些岩浆岩形成的构造背景有两种不同的认识:一是认为这些岩浆岩与新元古代地幔柱引起的裂谷有关,如苏雄双峰式火山岩及伴随的侵入岩和基性岩脉(特别是同德苦橄质岩脉^[84,95,96,118~122]);二是认为这些岩浆岩是洋壳向东俯冲形成的岛弧岩岩浆^[109~113]。扬子西缘中-新生代受到明显的构造叠加改造,如龙门山推覆体直接推覆在新元古代彭灌杂岩之上,因此,松潘-甘孜复理石之下是否存在扬子块体的基底仍需要做深入的研究,以进一步确定扬子块体的西部边界。另外,需要加强区域新元古代的构造和盆地演化研究,特别是新元古代裂谷盆地及其基底的研究。目前的研究显示,区域新元古代盆地的基底(包括盐边群、会理群及相当地层)发育了穿透性的近东西向构造,而康滇裂谷盆地的火山-沉积岩均未变质变形,表明大约在 0.82 Ga 之前发生了南北向的挤压构造。

4.2.3 扬子西北缘新元古代构造-岩浆属性 扬子西北缘新元古代出露了大量的新元古代火山-侵入

岩,但不同研究人员对这些岩浆岩的成因及形成的构造环境有不同的认识。一种观点认为,西乡群下部(0.95 Ga)的高 Mg 安山岩-低 Ti 拉班玄武岩为一套弧前玻安岩组合,西乡群上部(0.90 Ga)的钙碱性玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩为典型的岩浆弧组合,而上覆的大约 0.82 Ga 铁船山组玄武岩-英安/流纹岩双峰式火山岩为一套与地幔柱活动有关的大陆裂谷火山岩^[123]。扬子西北缘出露了大面积的碧口群玄武岩及少量酸性火山岩夹层,根据 Wang 等^[94]的研究,碧口群可分为上下两部分,形成年龄分别为 821 ± 7 Ma 和 811 ± 12 Ma;元素和同位素地球化学特征表明,下部玄武岩来源于受到俯冲交代的岩石圈地幔,地幔潜能温度为大约 1400~1488 °C(与这个时期的 MORB 地幔源相当)、熔融的压力为 1.4~2.2 GPa;下部玄武岩来源于软流圈地幔,地幔潜能温度为 1550 ± 30 °C(比 MORB 地幔源约高 160 °C)、熔融的压力约为 2.6 GPa,与地幔柱有关。因此,碧口群玄武岩很可能是华南 825 Ma 地幔柱成因的大陆溢流玄武岩省的残余。

另一些研究人员对扬子西北缘大约 870~700 Ma 的基性和酸性侵入岩的详细的地球化学研究^[109,114~116]发现,这些侵入岩普遍具有高场强元素亏损“岛弧”岩石的地球化学特征,并厘定出埃达克岩^[111],提出这些新元古代中期的侵入岩形成于和洋壳俯冲有关的大陆边缘岩浆弧环境。

4.2.4 关于岩浆岩形成构造环境研究的方法学 在华南新元古代岩浆岩的形成构造环境研究中,不同研究人员对火山岩和侵入岩的地球化学研究给出的结论大相径庭,除需要做进一步的研究外,岩浆岩形成构造环境研究的方法学和多解性值得关注。在岩浆岩形成的构造环境研究中,应注重岩石组合和区域构造、沉积、变质、盆地演化等资料的综合研究。如前所述,花岗质岩石的地球化学特征通常受到源岩性质、岩浆形成和演化等多种因素的影响,因此大多数花岗质岩石的地球化学特征通常没有明确的构造环境指示意义或存在多解性,如埃达克质岩石至少有 5 种以上的成因,可以形成于从俯冲、碰撞后到板内等多种构造环境。相对于花岗质岩石来说,玄武岩和快速冷却的基性岩脉的地球化学组成可以代表岩浆的组成,对示踪地幔源区的性质及形成的构造环境比较明确,但辉长岩等基性侵入岩由于矿物的结晶分异或堆晶作用,其全岩地球化学特征往往不能代表岩浆的组成,因此用基性侵入岩的全岩地球化学进行构造环境判别可能会造成“误判”,需要对这些侵入岩的矿物结晶顺序和岩浆成分进行研

究。在富水的岛弧基性岩浆体系中的矿物结晶顺序则是橄榄石/尖晶石→辉石→斜长石,而贫水的裂谷基性岩浆体系中的矿物结晶顺序是橄榄石/尖晶石→斜长石→辉石,因此,贫水和富水体系形成的基性岩石组合不同。此外,单斜辉石的 Al/Ti 值也可以有效地区分岛弧和非造山裂谷基性侵入岩^[124];与基性侵入岩有关的金属矿床的成矿专属性也可能提供有益的信息,如扬子北缘望江山基性-超基性杂岩中,毕机沟大型 V-Ti 磁铁矿床就形成于橄榄岩-橄长岩(浅色)辉长岩-细粒辉长岩一套完整的堆晶岩序列的最晚期。

参考文献 (References):

- [1] Haynes S J. Structural reconnaissance of the Jiangnan geanticline: A suspected terrane of compressional tectonic character [A]. Howell D G, Wiley T J. Proc. 4th Int. Tectonostratigraphic Terrane Conf. U. S. G. S[C]. Menlo Park, 1988: 31—33.
- [2] Hsü K J, Sun S, Li J L, Chen H H, Peng H P, Şengör A M C. Mesozoic overthrust tectonics in South China[J]. *Geology*, 1988, 16: 418—421.
- [3] Hsü K J, Li J L, Chen H H, Wang Q C, Sun S, Şengör A M C. Tectonics of South China: Key to understanding West-Pacific geology[J]. *Tectonophysics*, 1990, 183: 9—39.
- [4] 陈旭, 戎嘉余. 对华南早古生代板溪洋的质疑[J]. *地质论评*, 1995, 4: 389—400.
Chen Xu, Rong Jiayu. Is the early Paleozoic Banxi Ocean in South China necessary[J]. *Geological Review*, 1995, 4: 389—400. (in Chinese with English abstract)
- [5] Chen J, Foland K A, Xing F, Xu X, Zhou T. Magmatism along the southeastern margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China[J]. *Geology*, 1991, 19: 815—818.
- [6] Charvet J, Shu L, Shi Y, Guo L, Faure M. The building of south China: Collision of Yangtze and Cathaysia Blocks, problems and tentative answers[J]. *J. SE Asian Earth Sci.*, 1996, 13: 223—235.
- [7] Li X H, McCulloch M T. Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze Block: Evidence for a Proterozoic continental collision in southeast China[J]. *Precam. Res.*, 1996, 76: 67—76.
- [8] Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, Groves D I, Ling W L. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 2000, 28: 11—14.
- [9] 焦文放, 吴元保, 彭敏, 汪晶, 杨赛红. 扬子板块最古老岩石的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *中国科学(D)*, 2009, 39: 972—978.
Jiao WenFang, Wu Yuanbao, Peng Min, Wang Jing, Yang Saihong. The oldest basement rock in the Yangtze Craton revealed by zircon U-Pb age and Hf isotope composition[J]. *Science in China (D)*, 2009, 52(9): 1393—1399. (in Chinese)
- [10] Gao S, Yang J, Zhou L, Li M, Hu Z, Guo J, Yuan H, Gong H, Xiao G, Wei J. Age and growth of the Archean Kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga granitoid gneisses[J]. *Am. J. Sci.*, 2011, 311: 153—182.
- [11] Sun M, Chen N, Zhao G, Wilde S A, Ye K, Guo J H, Chen Y, Yuan C. U-Pb zircon and Sm-Nd isotopic study of the Huangtuling granulite, Dabie-Sulu belt, China: Implication for the Paleoproterozoic tectonic history of the Yangtze craton [J]. *Am. J. Sci.*, 2008, 308: 469—483.
- [12] Wu Y B, Zheng Y F, Gao S, Jiao W F, Liu Y S. Zircon U-Pb age and trace element evidence for Paleoproterozoic granulite facies metamorphism and Archean crustal rocks in the Dabie Orogen[J]. *Lithos*, 2008, 101: 308—322.
- [13] 张丽娟, 马昌前, 王连训, 余振兵, 王世明. 扬子地块北缘古元古代斑斑花岗岩的发现及其意义[J]. *科学通报*, 2011, 56: 44—57.
Zhang Lijuan, Ma Changqian, Wang Lianxun, She Zhenbing, Wang Shiming. Discovery of Paleoproterozoic rapakivi granite on the northern margin of the Yangtze block and its geological significance[J]. *Chi. Sci. Bull.*, 2011, 56: 306—318. (in Chinese with English abstract)
- [14] 熊庆, 郑建平, 余淳梅, 苏玉平, 汤华云, 张志海. 宜昌圈椅墙 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素与扬子大陆古元古代克拉通化作用[J]. *科学通报*, 2008, 53: 2782—2792.
Xiong Qing, Zheng Jianping, Yu Chunmei, Su Yuping, Tang Huayun, Zhang Zhihai. Zircon U-Pb age and Hf isotope of Quanyishang A-type granite in Yichang: Signification for the Yangtze continental cratonization in Paleoproterozoic [J]. *Chi. Sci. Bull.*, 2009, 54(3): 436—446. (in Chinese)
- [15] Wu Y B, Gao S, Zhang H F, Zheng J P, Liu X C, Wang H, Gong H J, Zhou L, Yuan H L. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Paleoproterozoic arc related granitoid in the Northwestern Yangtze Block and its geological implications[J]. *Precam. Res.*, 2012, 200-203: 26—37.
- [16] Greentree M R, Li Z X. The oldest known rocks in southwestern China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2008, 33: 289—302.
- [17] Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L, Zhou M F, Griffin W L, Wang L. 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]. *Precam. Res.*, 2012, doi:10.1016/j.precamres.2011.07.014.
- [18] Yu J H, Wang L J, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhang M, Li C, Shu L. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China[J]. *Precam. Res.*, 2009, 174: 347—363.
- [19] Li Z X, Li X H, Wartho J A, Clark C, Li W X, Zhang C L,

- Bao C. Magmatic and metamorphic events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, southeastern South China: new age constraints and P-T conditions[J]. GSA Bull., 2010, 122: 772—793.
- [20] Li X H. Timing of the Cathaysia block formation: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon geochronology[J]. Episodes, 1997, 20: 188—192.
- [21] Li X H, Sun M, Wei G J, Liu Y, Lee C Y, Malpas J G. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of amphibolites in the Cathaysia Block, SE China: Evidence for extremely depleted mantle in the Paleoproterozoic[J]. Precam. Res., 2000, 102: 251—262.
- [22] Li W X, Li X H, Li Z X. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance[J]. Precam. Res., 2005, 136: 51—66.
- [23] Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, Zhuang J, Song B, Shi Y, Du L. 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., 2007, 12: 166—183.
- [24] 曾雯, 张利, 周汉文, 钟增球, 向华, 刘锐, 靳松, 吕新前, 李春忠. 华夏地块古元古代基底的加里东期再造: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和微量元素制约[J]. 科学通报, 2008, 53: 335—344.
Zen Wen, Zhang Li, Zhou Hanwen, Zhong Zengqiu, Xiang Hua, Liu Rui, Jin Song, Lv Xingqian, Li Chunzhong. Caledonian reworking of Paleoproterozoic basement in the Cathaysia Block: Constraints from zircon U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements[J]. Chin. Sci. Bull., 2008, 53(6): 895—904. (in Chinese)
- [25] Liu R, Zhou H W, Zhang L, Zhong Z Q, Zeng W, Xiang H, Jin S, Lu X, Li C Z. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of the Mayuan migmatite complex, NW Fujian Province, Southeast China: Constraints on the timing and nature of a regional tectonothermal event associated with the Caledonian orogeny[J]. Lithos, 2010, 119: 163—180.
- [26] Li Z X, Li X H, Zhou H W, Kinny P D. Grenvillian continental collision in south China: new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia[J]. Geology, 2002, 30: 163—166.
- [27] Li Z X, Li X H, Li W X, Ding S J. Was Cathaysia part of Proterozoic Laurentia?—new data from Hainan Island, South China[J]. Terra Nova, 2008, 20: 154—164.
- [28] Li Z X, Wartho J A, Occhipinti S, Zhang C L, Li X H, Wang J, Bao C. 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]. Precam. Res., 2007, 159: 79—94.
- [29] Li X H, Li W X, Li Z X, Lo C H, Wang J, Ye M F, Yang Y H. 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[J]. Precam. Res., 2009, 174: 117—128.
- [30] 刘邦秀, 刘春根, 邱永泉. 江西南部鹤仔片麻状花岗岩类 Pb-Pb 同位素年龄及地质意义[J]. 火山地质与矿产, 2001, 22: 264—268.
Liu Bangxiu, Liu Chungeng, Qiu Yongquan. The Pb-Pb isotopic ages and geologic significance of gneissic granite in Hezi, Jiangxi[J]. Volcanology & Mineral Resources, 2001, 22: 264—268. (in Chinese with English abstract)
- [31] 舒良树, 邓平, 于津海, 王彦斌, 蒋少涌. 武夷山西缘流纹岩的形成时代及其地球化学特征[J]. 中国科学(D), 2008, 38: 950—959.
Shu Liangshu, Deng Ping, Yu Jinhai, Wang Yanbin, Jiang Shaoyong. The age and tectonic environment of the rhyolitic rocks on the western side of Wuyi Mountain, South China[J]. Sci. in China (D), 2008, 51, 1053—1063. (in Chinese)
- [32] 陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 董永观, 陈荣, 曾勇, 李龙明, 贺振宇, 赵玲. 浙江平水群角斑岩的成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 科学通报, 2009, 54: 610—617.
Chen Zhihong, Xing Guangfu, Guo Kunyi, Dong Yongguan, Zeng Yong, Li Longming, He Zhenyu, Zhao Ling. Petrogenesis of keratophyes in the Pingshui Group, Zhejiang: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. Chi. Sci. Bull., 2009, 54: 1570—1578. (in Chinese)
- [33] Ye M F, Li X H, Li W X, Liu Y, Li Z X. 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., 2007, 12: 144—156.
- [34] 杨崇辉, 耿元生, 杜利林, 任留东, 王新社, 周喜文, 杨铸生. 扬子地块西缘 Grenville 期花岗岩的厘定及其地质意义[J]. 中国地质, 2009, 26: 647—657.
Yang Chonghui, Geng Yuansheng, Du Lilin, Ren Liudong, Wang Xinshe, Zhou Xiwen, Yang Zhusheng. The identification of the Grenvillian granite on the western margin of the Yangtze Block and its geological implications[J]. Geology in China, 2009, 26: 647—657. (in Chinese with English abstract)
- [35] 金文山, 孙大中. 华南大陆深部地壳结构及其演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
Jin Wenshan, Sun Dazhong. The deep crust structure and evolution of South China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. (in Chinese)
- [36] Greentree M R, Li Z X, Li X H, Wu H. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia[J]. Precam. Res., 2006, 151: 79—100.
- [37] 张传恒, 高林志, 武振杰, 史晓颖, 阎全人, 李大. 滇中昆阳群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 华南格林威尔期造山的证据[J]. 科学通报, 2007, 52: 818—824.
Zhang Chuanheng, Gao Linzhi, Wu Zhenjie, Shi Xiaoying, Yan Quanren, Li Da. SHRIMP U-Pb zircon age of tuff from the Kunyang Group in central Yunnan: Evidence for Grenvillian orogeny in South China[J]. Chin. Sci. Bull., 2007, 52

- (11): 1517—1525. (in Chinese)
- [38] Peng S, Kusky T M, Jiang X F, Wang L, Wang J P, Deng H. Geology, geochemistry, and geochronology of the Miaowan ophiolite, Yangtze craton: Implications for South China's amalgamation history with the Rodinian supercontinent [J]. *Gondwana Res.*, 2012, 21: 577—594.
- [39] 李献华, 周国庆, 赵建新, Fanning C M, Compston W. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地球化学*, 1994, 23: 125—131.
- Li Xianhua, Zhou Guoqing, Zhao Jianxin, Fanning C M, Compston W. SHRIMP ion microprobe zircon U-Pb age of the NE Jiangxi ophiolite and its tectonic implications [J]. *Geochimica*, 1994, 13(4): 317—325. (in Chinese with English abstract)
- [40] Gao J, Klemd R, Long L L, Xiong X M, Qian Q. Adakitic signature formed by fractional crystallization: An interpretation for the Neo-Proterozoic meta-plagiogranites of the NE Jiangxi ophiolitic melange belt, South China [J]. *Lithos*, 2009, 110: 277—293.
- [41] Li X H, Li W X, Li Z X, Liu Y. 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 [J]. *Lithos*, 2008, 102: 341—357.
- [42] Li X H, Li W X, Li Q L, Wang X C, Liu Y, Yang Y H. Petrogenesis and tectonic significance of the ~850 Ma Gangbian alkaline complex in South China: evidence from in-situ zircon U-Pb and Hf-O isotopes and whole-rock geochemistry [J]. *Lithos*, 2010, 114: 1—15.
- [43] Li W X, Li X H, Li Z X. Ca. 850 Ma bimodal volcanic rocks in northeastern Jiangxi Province, South China: Initial extension during the breakup of Rodinia? [J]. *Am. J. Sci.*, 2010, 310: 951—980.
- [44] Li X H, Li Z X, Sinclair J A, Li W X, Carter G. Revisiting the “Yanbian Terrane”: Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China [J]. *Precam. Res.*, 2006, 151: 14—30.
- [45] Duan L, Meng Q R, Zhang C L, Liu X M. Tracing the position of the South China block in Gondwana: U-Pb ages and Hf isotopes of Devonian detrital zircons [J]. *Gondwana Res.*, 2011, 19: 141—149.
- [46] Liu X, Gao S, Diwu C, Ling W. Precambrian crustal growth of Yangtze Craton as revealed by detrital zircon studies [J]. *Am. J. Sci.*, 2008, 308: 421—468.
- [47] Sun W H, Zhou M F, Gao J F, Yang Y H, Zhao X F, Zhao J H. Detrital zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block, SW China [J]. *Precam. Res.*, 2009, 172: 99—126.
- [48] Sun W H, Zhou M F, Yan D P, Li J W, Ma Y X. Provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic Yanbian Group, western Yangtze Block (SW China) [J]. *Precam. Res.*, 2008, 167: 213—236.
- [49] Wang L J, Griffin W L, Yu J H, O'Reilly S Y. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks [J]. *Precam. Res.*, 2010, 177: 131—144.
- [50] Wang L J, Yu J H, Griffin W L, O'Reilly S Y. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: Evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks [J]. *Precam. Res.*, 2012, doi:10.1016/j.precamres.2011.08.001.
- [51] Wang X C, Li Z X, Li X H, Li Q L, Tang G Q, Zhang Q R, Liu Y. Nonglacial origin for low- $\delta^{18}\text{O}$ Neoproterozoic magmas in the South China Block: Evidence from new in-situ oxygen isotope analyses using SIMS [J]. *Geology*, 2011, 39: 735—738.
- [52] Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Wang R C, Qiu J S, O'Reilly S Y, Xu X, Liu X M, Zhang G L. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. *Precam. Res.*, 2007, 159: 117—131.
- [53] Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Gao S, Wu F Y. Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for 3.8 Ga crustal remnant and episodic reworking of Archean crust in South China [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, 252: 56—71.
- [54] Zhao X F, Zhou M F, Li J W, Sum M, Gao J F, Sun W H, Yang J H. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block [J]. *Precam. Res.*, 2010, 182: 57—69.
- [55] Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, Zheng J P, Li J W. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny [J]. *Geology*, 2011, 39: 299—302.
- [56] Li X H, Li Z X, He B, Li W X, Li Q L, Gao Y Y, Wang X C. The Early Permian active continental margin and crustal growth of the Cathaysia Block: In situ U-Pb, Lu-Hf and O isotope analyses of detrital zircons [J]. *Chem. Geol.*, 2012, doi:10.1016/j.chemgeo.2011.10.027.
- [57] 王果胜, 何付兵, 朱卫平, 马文璞. 闽西南晚三叠世文宾山组碎屑锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. *现代地质*, 2009, 23: 246—255.
- Wang Guosheng, He Fubing, Zhu Weiping, Ma Wenpu. U-Pb Dating of detrital zircons from Late Triassic Wenbinshan Formation in Southwestern Fujian and its geological significance [J]. *Geoscience*, 2009, 23: 246—255. (in Chinese with English abstract)
- [58] Wang Y, Zhang F, Fan W, Zhang G, Chen S, Cawood P A, Zhang A. 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*, 2010, 29: TC6020.
- [59] Wu L, Jia D, Li H, Deng F, Li Y. Provenance of detrital zircons from the late Neoproterozoic to Ordovician sandstones of South China: Implications for its continental affinity [J]. *Geol. Mag.*, 2010, 147, 974—980.

- [60] Xu X, O'Reilly S Y, Griffin W L, Wang X, Pearson N J, He Z. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes[J]. *Precam. Res.*, 2007, 2007, 158: 51—78.
- [61] Yao J, Shu L, Santosh M. Detrital zircon U-Pb geochronology, Hf-isotopes and geochemistry—New clues for the Precambrian crustal evolution of Cathaysia Block, South China [J]. *Gondwana Res.*, 2011, 20: 553—567.
- [62] Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L, Griffin W L, Zhang M, Wang R, Jiang S, Shu L. Where was South China in the Rodinia supercontinent?: Evidence from U-Pb geochronology and Hf isotopes of detrital zircons[J]. *Precam. Res.*, 2008, 164: 1—15.
- [63] Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L, Griffin W L, Zhou M F, Zhang M, Shu L. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments[J]. *Precam. Res.*, 2010, 181: 97—114.
- [64] Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R, Edwards B R. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: A reduced, rapakivi-type anorogenic granite [J]. *J. Petrol.*, 1999, 40: 1771—1802.
- [65] Ross G M, Villeneuve M. Provenance of the Mesoproterozoic (1.45 Ga) Belt basin (western North America): Another piece in the pre-Rodinia paleogeographic puzzle [J]. *GSA Bull.*, 2003, 115: 1191—1217.
- [66] Li W X, Li X H, Li Z X. Middle Neoproterozoic syn-rifting volcanic rocks in Guangfeng, South China: Petrogenesis and tectonic significance[J]. *Geol. Mag.*, 2008, 145: 475—489.
- [67] Wang J, Li Z X. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up[J]. *Precam. Res.*, 2003, 122: 141—158.
- [68] 李继亮, 张凤秋, 王守信. 四川盐边元古代蛇绿岩的稀土元素分配特点[J]. *岩石学研究*, 1983, (3): 37—44.
Li Jiliang, Zhang Fengqiu, Wang Shouxin. The REE distribution feature of Yanbian Proterozoic ophiolite in Sichuan Province[J]. *Study on Petrology*, 1983, (3): 37—44. (in Chinese)
- [69] 夏斌. 广西龙胜元古代二种不同成因蛇绿岩岩石地球化学及侵位方式研究[J]. *南京大学学报*, 1984, (3): 554—566.
Xia Bin. A study on geochemical characteristic and emplaced style of two different ophiolites of later Proterozoic Xuefeng stage in the Longsheng regions, Guangxi southeast China [J]. *Journal of Nanjing University*, 1984, 3: 554—566. (in Chinese with English abstract)
- [70] 周新民, 邹海波, 杨杰东, 王银喜. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. *科学通报*, 1989, 34: 1243—1245.
Zhou Xinmin, Zou Haibo, Yang Jiedong, Wang Yinxi. Sm-Nd isochron age of the Fuchuan Ophiolite Suite in Xixian, Anhui Province and its geological significance[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 1989, 34: 1243—1245. (in Chinese)
- [71] Zhou G. The discovery and significance of the northeastern Jiangxi Province ophiolite (NEJXO), its metamorphic peridotite and associated high temperature-high pressure metamorphic rocks[J]. *J. SE Asian Earth Sci.*, 1989, 3: 237—247.
- [72] 邢凤鸣. 皖南伏川蛇绿岩形成环境的地球化学标志[J]. *岩石矿物学杂志*, 1990, 9: 1—12.
Xing Fengming. Geochemical indication of formation environment of Fuchuan ophiolites in Southern Anhui Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1990, 9: 1—12. (in Chinese with English abstract)
- [73] Zhou J B, Li X H, Ge W C, Li Z X. Age and origin of middle Neoproterozoic mafic magmatism in southern Yangtze Block and relevance to the break-up of Rodinia [J]. *Gondwana Res.*, 2007, 12: 184—197.
- [74] 葛文春, 李献华, 李正祥, 周汉文, 王剑, 李寄岷. 桂北“龙胜蛇绿岩”质疑[J]. *岩石学报*, 2000, 16: 111—118.
Ge Wenchun, Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, Wang Jian, Li Jiyou. Longsheng ophiolite in North Guangxi revisited[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16: 111—118. (in Chinese with English abstract)
- [75] Li X H, Zhao J X, McCulloch M T, Zhou G Q, Xing F M. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of late Proterozoic ophiolites from southeast China: Implication for ophiolite petrogenesis and tectonic evolution[J]. *Precam. Res.*, 1997, 81: 129—144.
- [76] Li W X, Li X H, Li Z X, Lou F S. Obduction-type granites within the NE Jiangxi Ophiolite: Implications for the final amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Gondwana Res.*, 2008, 13: 288—301.
- [77] 丁炳华, 史仁灯, 支霞臣, 郑磊, 陈雷. 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[J]. *矿物岩石学杂志*, 2008, 29: 375—388.
Ding Binghua, Shi Rendeng, Zhi Xiachen, Zheng Lei, Chen Lei. Neoproterozoic (~850 Ma) subduction in the Jiangnan orogen: Evidence from the SHRIMP U-Pb dating of the SSZ-type ophiolite in southern Anhui Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 29: 375—388. (in Chinese with English abstract)
- [78] 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Zhang Qi, Zhou Guoqing. Ophiolites of China[M]. Science Press, 2001. (in Chinese with English abstract)
- [79] Shu L S, Faure M, Jiang S Y, Yang Q, Wang Y J. 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[J]. *Episodes*, 2006, 29: 244—252.
- [80] Shu L S, Faure M, Yu J H, Jahn B M. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia[J]. *Precam. Res.*, 2011, 187: 263—276.
- [81] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Zhang W L, Liu X M, Zhang G L. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for petrogenesis and tectonic evolution[J]. *Pre-*

- cam. Res. , 2006, 145: 111—130.
- [82] Wang X L, Zhao G C, Zhou J C, Liu Y S, Hu J. 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.* , 2008, 14: 355—367.
- [83] Zhou J C, Wang X L, Qiu J S. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: Coeval arc magmatism and sedimentation[J]. *Precam. Res.* , 2009, 170: 27—42.
- [84] Li X H, Li Z X, Zhou H W, Liu Y, Liang X R, Li W X. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan pluton in SW Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance[J]. *Sci. in China(D)* , 2003, 46 (suppl.): 73—83.
- [85] Sun W H, Zhou M F. The 860-Ma, Cordilleran-type Guandaoshan Dioritic Pluton in the Yangtze Block, SW China: Implications for the Origin of Neoproterozoic Magmatism[J]. *J. Geol.* , 2008, 116: 238—253.
- [86] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, Li Y, Ding J. 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. Sci. Lett.* , 2002, 196: 51—67.
- [87] 沈渭洲, 高剑峰, 徐士进, 周国庆. 扬子板块西缘泸定桥头基性杂岩体的地球化学特征和成因[J]. *高校地质学报*, 2002, 8: 380—389.
- Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, Zhou Guoqing. Geochemical characteristics and genesis of the Qiaotou Basic complex, Luding County, Western Yangtze Block[J]. *Geol. J. China Universities*, 2002, 8: 380—389. (in Chinese with English abstract)
- [88] 包志伟, 王强, 白国典, 赵振华, 宋要武, 柳小明. 东秦岭方城新元古代碱性正长岩形成时代及其动力学意义[J]. *科学通报*, 2008, 53: 684—694.
- Bao Zhiwei, Wang Qiang, Bai Guodian, Zhao Zhenhua, Song Yaowu, Liu Xiaoming. Geochronology and geochemistry of the Fangcheng Neoproterozoic alkali-syenites in East Qinling orogen and its geodynamic implications[J]. *Chin. Sci. Bull.* , 2008, 53(13): 2050—2061. (in Chinese)
- [89] 李献华, 王选策, 李武显, 李正祥. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷[J]. *地球化学*, 2008, 37: 382—298.
- Li Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, Li Zhengxiang. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting[J]. *Geochimica*, 2008, 37: 382—298. (in Chinese with English abstract)
- [90] 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. 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[J]. *Precam. Res.* , 2010, 178: 185—208.
- [91] Wang X C, Li X H, Li W X, Li Z X. Variable involvements of mantle plumes in the genesis of mid-Neoproterozoic basaltic rocks in South China: A review[J]. *Gondwana Res.* , 2009, 15: 381—395.
- [92] Zhou M F, Zhao T P, Malpas J, Sun M. Crustal-contaminated komatiitic basalts in Southern China: Products of a Proterozoic mantle plume beneath the Yangtze Block[J]. *Precam. Res.* , 2000, 103: 175—189.
- [93] Wang X C, Li X H, Li W X, Li Z X. Ca. 825 Ma komatiitic basalts in South China: First evidence for $>1500^{\circ}\text{C}$ mantle melts by a Rodinian mantle plume[J]. *Geology*, 2007, 35: 1103—1106.
- [94] Wang X C, Li X H, Li W X, Li Z X, Liu Y, Yang Y H, Liang X R, Tu X L. The Bikou basalts in northwestern Yangtze Block, South China: Remnants of 820–810 Ma continental flood basalts? [J]. *GSA Bull.* , 2008, 120: 1478—1492.
- [95] Zhu W G, Li X H, Zhong H, Wang X C, He D F, Bai Z J, Liu F. The Tongde picritic dykes in the Western Yangtze Block: Evidence for ca. 800 Ma mantle plume magmatism in South China during the breakup of Rodinia[J]. *J. Geol.* , 2010, 118: 509—522.
- [96] Li X H, Li Z X, Zhou H, Liu Y, Kinny P D. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia[J]. *Precambrian Res.* , 2002, 113: 135—155.
- [97] Vermeesch P. Tectonic discrimination diagrams revisited[J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.* , 2006, 7: Q06017.
- [98] 王剑. 华南新元古代裂谷盆地演化——兼论与 Rodinia 解体的关系[M]. 北京:地质出版社, 2000.
- Wang Jian. The evolution of Neoproterozoic rift basin of South China relative to break up of Rodinia[M]. Beijing: Geological publishing House, 2000. (in Chinese)
- [99] Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J. The break up of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 1999, 173: 171—181.
- [100] Wang W, Wang F, Chen F, Zhu X, Xiao P, Siebel W. 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.* , 2010, 118: 79—94.
- [101] Wang W, Zhou M F, Yan D P, Li J W. Depositional age, provenance, and tectonic setting of the Neoproterozoic Sibao Group, southeastern Yangtze Block, South China[J]. *Precam. Res.* , 2012, 192–195: 107—124.
- [102] Wang X C, Li X H, Li Z X, Li Q L, Tang G Q, Gao Y Y, Zhang Q R, Liu Y. Episodic Precambrian crust growth: Evidence from U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircon in the Nanhua Basin, central South China [J]. *Precam. Res.* , 2012, doi:10.1016/j.precamres.2011.06.001.
- [103] Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, De Waele B, Ernst R E, Fitzsimons I C W, Fuck R A, Glad-

- kochub D P, Jacobs J, Karlstrom K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevsky S A, Thrane K, Vernikovskiy V. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precam. Res.*, 2008, 160: 179–210.
- [104] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Gao J F. Geochemistry of the Meso-to Neoproterozoic basic-acid rocks from Hunan Province South China: implications for the evolution of the western Jiangnan orogen[J]. *Precam. Res.*, 2004, 135: 79–103.
- [105] Zhou J C, Wang X L, Qiu J S, Gao J F. Geochemistry of Meso-and Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks from northern Guangxi, China: Arc or plume magmatism? [J]. *Geochem. J.*, 2004, 38: 139–152.
- [106] Li X H. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze block; Timing of Neoproterozoic Jin-niing orogeny in SE China and implications for Rodinia assembly[J]. *Precam. Res.*, 1999, 97: 43–57.
- [107] Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Zhang S B, Liu X M, Wu F Y. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China[J]. *Precam. Res.*, 2006, 146: 179–212.
- [108] Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, Zhang S B, Yuan H, Wu F Y. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan orogen, South China[J]. *Precam. Res.*, 2008, 163: 351–383.
- [109] Zhou M F, Kennedy A K, Sun, Malpas J, Leshner C M. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia[J]. *J. Geol.*, 2002, 110: 611–618.
- [110] Zhou M F, Ma Y, Yan D P, Xia X, Zhao J H, Sun M. The Yanbian terrane (Southern Sichuan province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze block[J]. *Precam. Res.*, 2006, 144: 19–38.
- [111] Zhou M F, Yan D P, Wang C L, Qi L, Kennedy A. 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[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, 248: 286–300.
- [112] Zhao J H, Zhou M F. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): implications for subduction related metasomatism in the upper mantle[J]. *Precam. Res.*, 2007, 152: 27–47.
- [113] Zhao J H, Zhou M F. Neoproterozoic adakitic plutons in the northern margin of the Yangtze block, China: Partial melting of a thickened lower crust and implications for secular crustal evolution[J]. *Lithos*, 2008, 104: 231–248.
- [114] Zhao J H, Zhou M F, Zheng J P. Metasomatic mantle source and crustal contamination for the formation of the Neoproterozoic mafic dike swarm in the northern Yangtze Block, South China[J]. *Lithos*, 2010, 115: 177–189.
- [115] Dong Y P, Liu X M, Santosh M, Chen Q, Zhang X, He D, Zhang G W. Neoproterozoic accretionary tectonics along the northwestern margin of the Yangtze Block, China: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry [J]. *Precam. Res.*, 2012: 196–197; 247–274.
- [116] Dong Y P, Liu X M, Santosh M, Zhang X N, Chen Q, Yang C, Yang Z. Neoproterozoic subduction tectonics of the northwestern Yangtze Block in South China: Constrains from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Hannan Massif[J]. *Precam. Res.*, 2011, 189: 66–90.
- [117] 舒良树, 周围庆, 施央申, 殷俊. 江南造山带东段高压变质蓝片岩及其地质时代研究[J]. *科学通报*, 1993, 38: 1879–1882.
- Shu Liangshu, Zhou Guoqing, Shi Yangshen, Yin Jun. Study of the High Pressure Metamorphic Blueschist and Its Late Proterozoic Age in the Eastern Jiangnan Belt[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 1993. 38: 1879–1882. (in Chinese)
- [118] Li X H, Li Z X, Ge W, Zhou H, Li W, Liu Y, Wingate M T D. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma[J]. *Precam. Res.*, 2003, 122: 45–83.
- [119] Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J, Zhang S, Zhou H. 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[J]. *Precam. Res.*, 2003, 122: 85–109.
- [120] Lin G C, Li X H, Li W X. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Neoproterozoic mafic dykes from western Sichuan: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Sci. in China (D)*, 2007, 50: 1–16.
- [121] Zhu W G, Zhong H, Li X H, Deng H L, He D F, Wu K W, Bai Z J. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China[J]. *Precam. Res.*, 2008, 164: 66–85.
- [122] Zhu W G, Zhong H, Li X H, Liu B G, Deng H L, Qin Y. ^{40}Ar - ^{39}Ar age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the Neoproterozoic Lengshuiqing Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complex, SW China[J]. *Precam. Res.*, 2007, 155: 98–124.
- [123] Ling W, Gao S, Zhang B, Li H, Liu Y, Cheng J. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze Craton, South China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent[J]. *Precam. Res.*, 2003, 122: 111–140.
- [124] Loucks R R. Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic-mafic allochthons in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene[J]. *Geology*, 1990, 18: 346–349.