

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.01.004

## 扬子陆核崆岭杂岩太古宙地壳演化

邱啸飞<sup>1,2,3</sup>, 陈伟雄<sup>2,3</sup>, 徐大良<sup>1,2</sup>, 赵小明<sup>4</sup>, 童喜润<sup>1,2</sup>

QIU Xiao-Fei<sup>1,2,3</sup>, CHEN Wei-Xiong<sup>2,3</sup>, XU Da-Liang<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiao-Ming<sup>4</sup>, TONG Xi-Run<sup>1,2</sup>

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 武汉 430205; 2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 武汉 430205; 3. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 武汉 430074; 4. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004

1. Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;

3. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

4. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, Guangxi, China

**摘要:** 扬子陆核黄陵穹隆出露了目前扬子克拉通已知的最古老结晶基底——崆岭杂岩, 是了解扬子克拉通太古宙地壳形成与演化的理想窗口。本文将近年来崆岭杂岩太古宙岩石的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素以及地球化学研究成果进行了总结, 揭示了扬子陆核太古宙岩石时空分布规律及地壳演化的动力学过程进行了约束。结果表明, 扬子陆核地壳演化过程可分为始太古代原始地壳形成与演化、中太古代早期地壳生长、中太古代晚期加厚地壳熔融、新太古代地壳生长与再造以及新太古代末地壳岩石变质改造等五个阶段, 对应了太古宙地质演化的五个阶段。

**关键词:** 崆岭杂岩; 太古宙; 地壳演化; 地球动力学过程; 扬子克拉通

中图分类号: P534.2

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2022)01-0056-11

**Qiu X F, Chen W X, Xu D L, Zhao X M and Tong X R. 2022. Crustal Evolution in Archean for the Kongling Complex in the Yangtze Craton Nucleus. *South China Geology*, 38(1): 56-66.**

**Abstract:** The Kongling Complex exposed in the Huangling Dome is the known oldest crystalline basement in the Yangtze Craton nucleus, thus being an ideal window for understanding the formation and evolution of Yangtze Craton Archean continental crust. This paper summarized the research achievement on Archean Kongling Complex through zircon U-Pb chronology, Hf isotope and geochemistry methods in recent years, and revealed the temporal and spatial distribution rules of Archean Yangtze nucleus rocks and constrained the geodynamic processes of crustal evolution. It is concluded that the formation and evolution has been divided into five periods, namely the formation and evolution of the primitive crust in the Eoarchean, the crustal growth in the early Mesoarchean, the melting of thickened crust during the late Mesoarchean, the growth and reformation of crust in the Neoarchean, and the metamorphism of crustal rocks at the late Neoarchean, corresponding to the five stages of the geological evolution of the Archean.

**Key words:** Kongling Complex; Archean; crustal evolution; geodynamic processes; Yangtze Craton

收稿日期: 2021-11-8; 修回日期: 2021-12-7

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41303026) 和中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心开放基金项目(编号: PMGR202003)

第一作者: 邱啸飞(1985—), 男, 博士, 研究员, 主要从事前寒武纪地质学 and 同位素地球化学研究, E-mail: qiuxiaofei@mail.cgs.gov.cn

地球早期大陆演化及其地球动力学过程是当前固体地球科学领域最为前沿和重要的研究方向之一 (Turner S et al., 2020; 翟明国等, 2020; 赵国春等, 2021; Windley B F et al., 2021; 孙卫东等, 2021)。了解各古老克拉通早前寒武纪陆核的形成与构造演化是理解早前寒武纪大陆动力学并在此基础上发展板块构造理论的关键。太古宙岩石代表了地球早期的主要地壳组成, 成为了解大陆地壳成因的理想对象 (Nutman A P et al., 1996; Qiu X F et al., 2018a; Wan Y S et al., 2019; 邱啸飞等, 2019, 2020; Zhong Y T et al., 2021)。

扬子克拉通作为我国最重要的前寒武纪块体之一, 其早期形成与构造演化对认识中国大陆地壳组成和构造格局演变具有重要意义。然而, 由于后太古宙地层以及茂密植被的覆盖, 太古宙地质体在扬子克拉通的出露范围非常有限, 使得一些关键地质问题, 如其基底规模组成以及大陆地壳演化和增生规律等还未研究透彻。

黄陵穹隆地处湖北省宜昌市兴山县、秭归县和夷陵区一带, 是目前扬子克拉通内唯一有确切古太古代地质体报道的地区, 出露了扬子克拉通最古老结晶基底——崆岭杂岩 (亦称“崆岭岩群”或“崆岭高级变质地体”)。作为扬子克拉通已知面积最广、时代最老的基底岩系 (Jiao W F et al., 2009; Gao S et al., 2011; Guo J L et al., 2014; Qiu X F et al., 2018a; 邱啸飞等, 2019), 崆岭杂岩具有自古太古代以来相对完整的岩石记录, 因而成为不可多得的了解扬子克拉通早期形成与构造演化的窗口。

近年来, 随着高精度同位素年代学、地球化学研究以及地质调查工作成果的不断积累, 对黄陵穹隆内古老岩石的研究取得了诸多新的发现和认识, 为系统总结扬子克拉通早期地壳演化提供了基础资料。基于此, 本文通过对黄陵穹隆近年来早前寒武纪岩石的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素以及地球化学研究认识进行归纳总结, 探讨了这些岩石的性质、成因及其构造背景, 以此对崆岭杂岩太古宙岩石时空分布规律及地壳演化的动力学过程进行约束。

## 1 崆岭杂岩太古宙岩石时空分布特点

崆岭杂岩总出露面积约 360 km<sup>2</sup>, 其被新元古代黄陵花岗岩基侵入分隔为南、北两部分, 主体为北部崆岭杂岩, 由太古宙结晶基底和古元古代表壳岩构成。北部崆岭杂岩又进一步被古元古代近南北向水月寺蛇绿岩 (Han Q S et al., 2017; 韩庆森等, 2020) 分割为东、西两个次一级块体, 而南部崆岭杂岩则被新元古代近东西向庙湾蛇绿岩 (邱啸飞等, 2015) 分为南、北两部分 (图 1)。高角闪岩相到麻粒岩相变质的 TTG 片麻岩和混合岩为崆岭杂岩结晶基底的最主要岩石类型, 并夹少量基性 - 超基性变质岩, 岩石整体变形强烈, 主要形成于太古宙 (3.4-2.5 Ga); 表壳岩则主要为覆盖于基底岩石之上的以含富铝矿物和石墨为特征的变泥质岩, 变质相可达高麻粒岩相, 有的研究者将其定义为孔兹岩系 (严溶等, 2006; 邱啸飞等, 2016, 2017; Qiu X F et al., 2018b)。尽管无法排除孔兹岩系中混有太古宙表壳岩的可能性, 但通过对其开展变质锆石 U-Pb、变质矿物 (石榴石) - 全岩 Sm-Nd 等时线等定年方法, 部分研究者认为该套孔兹岩系主体的形成时代为古元古代 (2.20-1.95 Ga), 并提出这些表壳岩与区域上古元古代蛇绿岩 (水月寺蛇绿岩) 等一起为扬子克拉通存在多陆块于古元古代的碰撞拼合过程提供了佐证 (Yin C Q et al., 2013; 邱啸飞等, 2016, 2017; Qiu X F et al., 2018b; 韩庆森等, 2020)。崆岭杂岩被多期不同时代辉长辉绿岩 (部分变质成为斜长角闪岩) 以及花岗岩在不同部位沿断层或不整合面侵入, 并被无变质变形的后震旦纪沉积岩覆盖。

崆岭杂岩中片麻岩和混合岩的原岩主要为古太古代 - 新太古代花岗岩, 且普遍经历了 ~2.0-1.9 Ga 的古元古代高压变质作用 (Zhang S B et al., 2006a; 魏君奇等, 2013; Qiu X F et al., 2018b; 邱啸飞等, 2019; Liu B et al., 2019)。最近的研究显示, 北部崆岭杂岩太古宙岩浆岩时代从 ~3.4 Ga~2.5 Ga 不等, 而南部崆岭杂岩受限于太古宙岩石出露面积, 研究程度明显偏低, 对南部崆岭杂岩基底岩石开展的年代学研究表明该区岩浆作用主要发生在 ~3.0 Ga (Wan Y S et al., 2019; Gao S et al., 2011)。尽管崆岭杂岩太古宙岩石由于强烈深熔作用改造, 呈

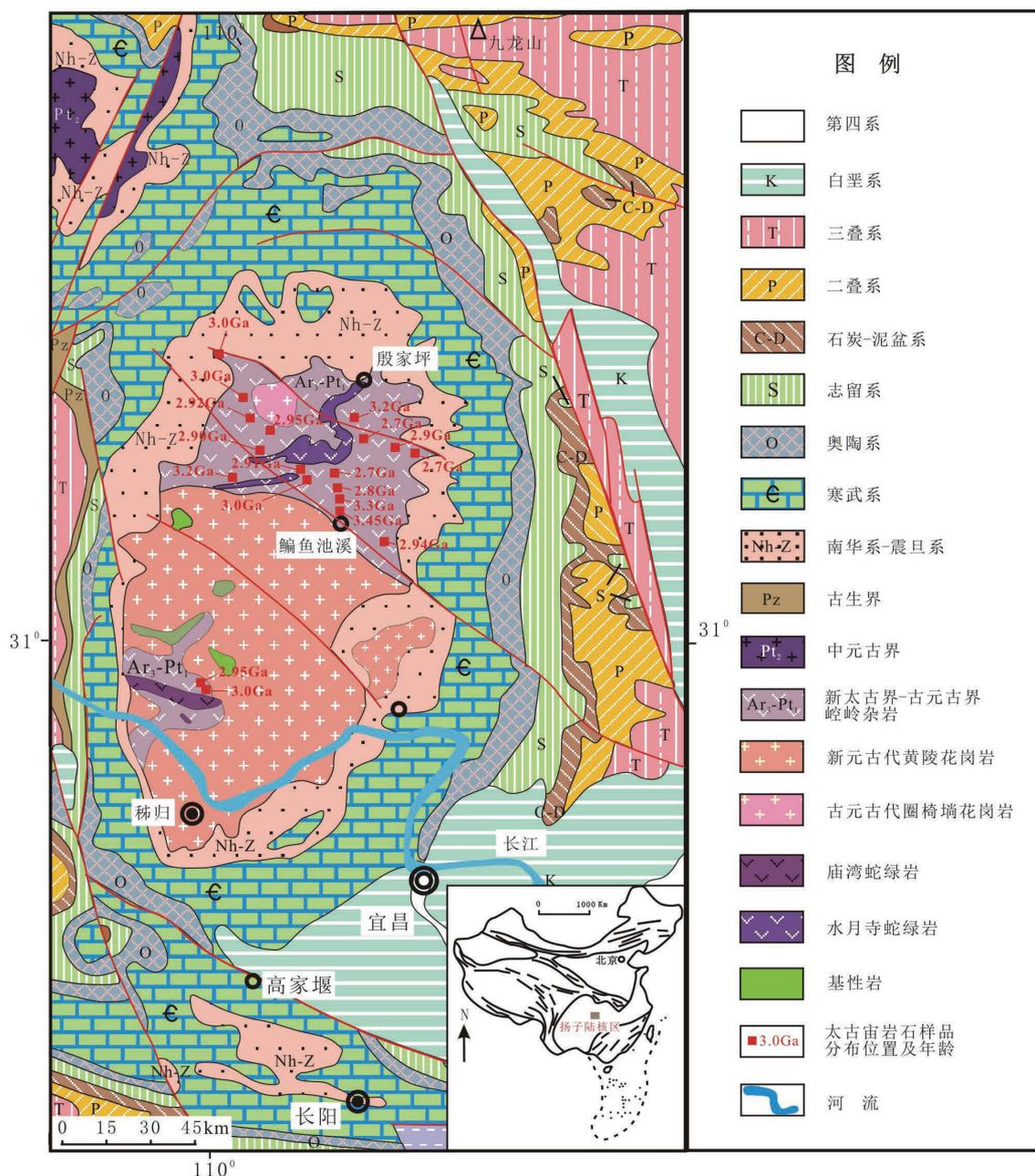


图1 扬子陆核地质简图(据 Liu X M et al., 2008; Guo J L et al., 2015; Wei Y X et al., 2019 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the nucleus of the Yangtze craton showing the distribution locations of Archean rocks (Modified after Liu X M et al., 2008; Guo J L et al., 2015; Wei Y X et al., 2019)

条带状构造,其全岩地球化学组成可能不均一,但总体来看仍可识别出至少两期不同地球化学特点的 TTG 片麻岩类,其中早期 TTG 片麻岩分布在北部崆岭杂岩水月寺蛇绿岩以西地区,总体表现出富 Na 特点,从 ~3.4 Ga 开始一直持续到 ~3.0 Ga,而晚期 TTG 片麻岩则不同程度地表现出富 K 特点(Qiu X F et al., 2018a)。

## 2 崆岭杂岩太古宙构造 - 岩浆事件

对扬子陆核崆岭杂岩太古宙岩石的同位素年代学、地球化学组成以及新元古代沉积岩中的太古宙碎屑锆石年龄和 Hf 同位素组成进行归纳总结,可大致将扬子陆核太古宙构造过程和地壳演化划分为五个阶段:

## 2.1 原始地壳形成与演化阶段(4.0-3.2 Ga)

扬子克拉通目前已识别出的最古老岩石时代为古太古代(~3.45-3.2 Ga) (Jiao W F et al., 2009; Gao S et al., 2011; Guo J L et al., 2014), 这些岩石样品全部采自北部崆岭杂岩, 且岩性均为奥长花岗片麻岩, 与华北克拉通鞍山地区古太古代以前的 TTG 片麻岩在岩石类型上类似(Wan Y S et al., 2019; 万渝生等, 2020)。尽管年龄超过 3.5 Ga 的岩石在扬子克拉通内目前还未发现, 但 3.8-3.5 Ga 大陆地壳的存在已经被黄陵穹隆新元古代沉积岩中碎屑锆石年龄所证实(Zhang S B et al., 2006b; Liu X M et al., 2008; 徐琼等, 2021)。最近, 魏运许等(私人交流)在崆岭杂岩 ~3.0 Ga 的斜长角闪岩中发现了一粒 3.91 Ga 具基性岩浆成因结构特征的始太古代继承锆石, 暗示扬子克拉通的原始地壳可能在始太古代早期就已经开始形成。另外, Qiu X F et al. (2021) 最近在北大别木子店地区发现了三粒冥古宙锆石, 是迄今扬子克拉通已知最古老的锆石年龄记录, 同样支持扬子克拉通应存在早前寒武纪原始地壳。

崆岭杂岩太古宙岩石的全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素组成也间接证实了原始地壳岩石的存在(Gao S et al., 2011; Chen K et al., 2013; Guo J L et al., 2014, 2015)。崆岭杂岩大多数 TTG 岩石都具有负的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值, 对应同位素模式年龄为 4.1-3.5 Ga, 表明它们来自于始太古代甚至冥古宙原始地壳的再循环; 少量 TTG 岩石也显示出了与球粒陨石类似的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(Gao S et al., 2011), 暗示在之前存在的古老大陆地壳再造过程中可能也有初生地壳物质的加入。值得注意的是, Wan Y S et al. (2019) 对南部崆岭杂岩中 TTG 片麻岩开展了锆石 SHRIMP 定年工作, 在其中也发现了 3.45-3.23 Ga 的继承锆石年龄, 表明古太古代大陆地壳可能广泛存在于整个黄陵穹隆地区。

尽管近年来对这些中太古代以前的地壳演化历史取得了一定的认识, 但由于这些岩石分布较为有限, 有关扬子克拉通原始地壳形成演化的研究还存在一些疑问。例如, 扬子克拉通古太古代以前的岩石目前尚未发现, 不清楚这些原始地壳岩石究竟是仍存在于现有基底岩石之下? 还是已经在后续

地质过程中被全部再循环了? 此外, 有关这些原始地壳的生长方式也并不清楚。由于缺乏俯冲作用直接相关的地质记录, 一些研究者主张该时期地壳生长过程以垂向作用为主。值得注意的是, 扬子陆核是否真的出露 >3.2 Ga 的岩石也存有疑问。Wei J Q et al. (2020) 通过岩相学和地球化学分析, 结合野外地质情况, 认为崆岭杂岩内 TTG 片麻岩中年龄介于 3.45-3.22 Ga 之间的锆石均为捕获锆石或碎屑锆石。但无论如何, 3.2 Ga 和下一阶段地壳演化之间也存在着近 200 Ma 的岩浆作用间隔。

## 2.2 中太古代早期(3.2-3.0 Ga)地壳生长

与崆岭杂岩古太古代岩石相比, 扬子克拉通的中太古代岩石出露较少, 近年来陆续开展了一些初步的年代学和地球化学研究, 使得对其岩石成因、构造背景等方面的认识还存在着一些争议。随着近年来在扬子陆核和扬子克拉通西南缘取得的一些新发现和认识, 有关扬子克拉通中太古代岩石成因和地壳演化过程也越来越受到重视(Qiu X F et al., 2018; Cui X Z et al., 2021)。Qiu X F et al. (2018) 对崆岭杂岩西北部桃园 TTG 片麻岩进行了研究: (1) 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 将该岩体形成时间限定在 ~3.0 Ga, 明显不同于早期利用全岩 Rb-Sr 同位素等时线法在该岩体中获得的古元古代年龄(湖北省地质局, 1990); (2) 该岩体 Nd 同位素特征显示出类似当时亏损地幔的 Nd 同位素组成, 暗示中太古代可能是扬子克拉通的另一重要地壳生长期。此外, Wei Y X et al. (2019) 在北部崆岭杂岩野马洞岩组中识别出一套透闪石片岩、斜长角闪片岩、黑云斜长片麻岩、磁铁石英岩及变粒岩、浅粒岩组合, 将其原岩归为基性(超基性)火山岩—英安质火山岩建造或火山碎屑岩; 并在变科马提质岩(超基性火山岩)和变基性火山岩中分别获得了 ~3.0 Ga 和 ~2.94 Ga 的锆石年龄, 在条带状磁铁石英岩和大理岩中获得了 ~2.9 Ga 的变质年龄, 认为其属于扬子陆核中太古代花岗-绿岩带, 也为了解扬子陆核中太古代构造演化提供了重要素材。

扬子陆核的中太古代地壳生长过程也被区域上新元古代沉积岩中碎屑锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成所记录(Zhang S B et al., 2006b; Liu X M et al., 2008; 徐琼等, 2021), 例如, Zhang S B et al.

(2006b)发现新元古代莲沱组砂岩中的碎屑锆石两阶段 Hf 模式年龄为  $\sim 4.0\text{-}3.1$  Ga, 且两个峰值年龄为 3.6 Ga 和 3.2 Ga, 表明在这些时期存在广泛的地壳生长过程, 并据此进一步提出一个  $\sim 3.2$  Ga 的亏损地幔储库, 暗示扬子克拉通存在该时期的壳幔分异过程。在分析了扬子陆核新元古代碎屑岩数千粒锆石年龄及 Hf 同位素之后, Liu X M et al. (2008) 认为其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值尽管在一定范围内变化, 但中太古代年龄的碎屑锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值的上限靠近当时亏损地幔, 同样支持扬子克拉通可能存在中太古代初生地壳生长过程。最近, 徐琼等(2021)对扬子陆核多个剖面的莲沱组碎屑锆石进行了 U-Pb 年龄和 Hf 同位素数据的收集和统计, 发现每个剖面莲沱组的碎屑锆石都存在着明显的  $\sim 3.2$  Ga 的 Hf 同位素模式年龄峰值, 也同样显示中太古代的初生地壳生长在扬子克拉通可能普遍存在。

关于扬子陆核中元古代的构造背景也存在着争议。例如, Qiu X F et al. (2018) 认为桃园奥长花岗岩片麻岩属于低 Sr 类型的 TTG 岩石, 结合其高 Na、Mg、Cr、Ni, 以及亏损的 Nd 同位素特点, 认为其可能为板块俯冲过程中俯冲洋壳在角闪岩相变质条件下发生部分熔融形成, 且发生了与地幔楔之间的相互作用, 暗示扬子陆核的板块构造在  $\sim 3.0$  Ga 时即已出现, 且中太古代地壳生长以侧向增生为主。此外, Guo J L et al. (2015) 指出崆岭杂岩中  $\sim 3.0\text{-}2.9$  Ga 的 TTG 片麻岩显示出地幔 - 熔体相互作用的特征, 也认为其可能形成于与俯冲作用有关的大陆弧构造背景。然而与上述观点相反, Wei J Q(2021) 通过对崆岭杂岩中太古代绿岩带的基性 - 超基性岩进行岩石学和地球化学研究, 认为这些高镁熔岩可能喷发自地幔柱冲击大陆岩石圈地幔时产生的大陆裂谷环境, 因而主张扬子陆核中太古代的地壳生长过程应以垂向增生为主。

显然, 扬子陆核中太古代地质过程和构造背景研究是将来需重点关注的课题之一。尽管存在着一些争议, 目前几乎所有研究者都将扬子陆核中太古代 (3.2-3.0 Ga) 地质事件与随后的 2.9-2.8 Ga TTG 岩浆作用区分开来, 认为两者属于不同构造环境的产物。

### 2.3 中太古代晚期 (2.9-2.8 Ga) 加厚地壳熔融

已有的研究显示, 崆岭杂岩主体形成于  $\sim 2.9\text{-}$

2.8 Ga (Qiu Y M et al., 2000; Li L M et al., 2014; Li Y H et al., 2018; Qiu X F et al., 2021), 广泛分布于崆岭杂岩北部的水月寺—坦荡河、交战垭—雾渡河一带, 以 TTG 片麻岩为主, 野外可见其侵入到中太古代早期野马洞组花岗 - 绿岩带中 (Wei J Q, 2021)。Zhang S B et al. (2006a) 报道了采自崆岭杂岩的三个闪长质片麻岩和混合岩的锆石 U-Pb 年龄主要为 2.9 Ga 左右, 将其解释为正变质岩原岩的侵入年龄。Liu X M et al. (2008) 和 Gao S et al. (2011) 通过对扬子陆核锆石 Hf 同位素进行分析, 认为  $\sim 3.0\text{-}2.9$  Ga 是扬子克拉通太古宙地壳增长的重要期次。Qiu X F et al. (2018) 通过对崆岭杂岩中太古代早期和晚期 TTG 岩石进行细致的年代学和地球化学对比, 认为扬子陆核  $\sim 3.2\text{-}3.0$  Ga 和  $\sim 2.9\text{-}2.8$  Ga 的 TTG 岩浆作用受控于两个不同的地质事件; 与前者相比, 后者的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、CaO 和 Sr 含量均更高, 而重稀土元素的含量则相对较低; 两者在元素含量上的差异, 加之后者相对较高的 Nb/Ta、Sr/Y 和 La/Yb 比值, 解释为两者在不同压力条件下形成, 即后者可能来自更高压力条件 (可能达到榴辉岩相) 下的部分熔融; 另一不同之处在于后者较前者通常具有更低的 MgO 以及更高的  $\text{K}_2\text{O}$  含量, 这表明后者可能是加厚下地壳部分熔融的结果, 没有与地幔之间发生相互作用, 而前者形成过程中有地幔物质的参与。扬子陆核 3.0 Ga 时地壳生长使得区域地壳发生增厚, 在 2.9-2.8 Ga 时这些加厚的下地壳发生部分熔融, 导致了中太古代晚期 TTG 岩浆岩的形成。与之相类似情况在华北克拉通中也有所报道, 研究表明华北克拉通南部 2.77 Ga 开始的板块俯冲导致地壳增厚, 随后加厚下地壳部分熔融形成了区域上  $\sim 2.72$  Ga 的 TTG 岩石 (Huang X L et al., 2010)。

总体来说, 崆岭杂岩中  $\sim 2.9\text{-}2.8$  Ga TTG 岩石作为目前整个扬子克拉通研究历史最久、程度最高的前寒武纪地质单元, 在过去数十年间得到了国内外学者的大量研究, 因而有关其岩石时代、成因等问题的解答已相对明确, 存在的争议也较小。然而, 这些 TTG 岩石后续的演化和再造过程等仍需关注。例如, 在对侵入到崆岭杂岩的古元古代圈椅墙 A 型花岗岩岩浆源区进行探讨时, Peng M et al. (2012) 基于英云闪长岩熔融实验数据和扬子陆核

古老基底的同位素演化趋势, 认为圈椅墙花岗岩的源区为区域上  $\sim 2.9\text{-}2.8$  Ga 的 TTG 岩石。然而, Xiong Q et al. (2009) 和 邱啸飞等 (2014) 通过对比圈椅墙花岗岩和中太古代 TTG 岩石的锆石 Hf 同位素以及全岩 Nd 同位素, 均倾向于将其源区解释为更深部的长英质地壳, 而非  $\sim 2.9\text{-}2.8$  Ga 英云闪长片麻岩。

#### 2.4 新太古代 ( $\sim 2.7\text{-}2.6$ Ga) 地壳生长与再造

扬子陆核崆岭杂岩太古宙构造 - 岩浆事件曾长期被认为集中发生于  $\sim 3.4\text{-}2.8$  Ga (Qiu Y M et al., 2000; Gao S et al., 2011; Guo J L et al., 2014; Li L M et al., 2014), 与之相比, 新太古代岩浆岩在崆岭杂岩中并未受到足够重视。然而, 该时期碎屑锆石在扬子陆核沉积地层和河流沉积物中大量出现。Han P Y et al. (2017) 对崆岭地区河流河沙样品中碎屑锆石开展了 U-Pb 年龄和 Hf 同位素分析, 认为  $\sim 2.7\text{-}2.6$  Ga 构造 - 岩浆事件可能在扬子陆核大陆地壳形成过程中扮演了重要角色。此外, 在崆岭地区古元古代和新元古代沉积岩中,  $2.7\text{-}2.6$  Ga 的碎屑锆石也同样占据相当高的比例 (Li Y H et al., 2018; 徐琼等, 2021), 这些锆石具有高度变化的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 说明其源区岩石应包含初生和古老地壳物质, 这与崆岭杂岩新太古代花岗岩类的 Hf 同位素组成特点相一致。崆岭杂岩新太古代花岗岩已有的 Hf 同位素研究显示, A 型花岗岩具有相对亏损的 Hf 同位素组成 (Chen K et al., 2013), 而 I/S 型花岗岩则具有更多非放射成因的古老地壳 Hf 同位素特征 (Chen K et al., 2013; Guo J L et al., 2014)。这些碎屑锆石的 U-Pb 定年和 Hf 同位素结果表明,  $2.7\text{-}2.6$  Ga 的花岗质岩石可能是崆岭杂岩太古宙地壳的重要组成部分, 部分研究者甚至提出该期构造 - 岩浆事件的影响范围可能比区域上  $\sim 3.4\text{-}2.9$  Ga 的岩浆事件更广泛 (Han P Y et al., 2017)。然而事实上, 之前针对扬子陆核新太古代地质体开展的年代学工作并不多, 仅 Ling W L et al. (1998) 在对崆岭杂岩中角闪岩和 TTG 片麻岩进行全岩 Sm-Nd 等时线测年时分别获得了  $2742 \pm 83$  Ma 和  $2728 \pm 118$  Ma 的年龄。

近十年来, 随着锆石 U-Pb 年代学工作的逐步开展, 扬子陆核一些  $\sim 2.7\text{-}2.6$  Ga 的变质 - 岩浆作

用也得以识别, 如崆岭杂岩的正片麻岩、斜长角闪岩以及变沉积岩中普遍记录的  $\sim 2.75\text{-}2.72$  Ga 的高级变质作用可能记录了区域上早期的增生造山过程。Chen K et al. (2013) 报道了崆岭杂岩四个正片麻岩的锆石年龄介于  $\sim 2671\text{-}2622$  Ma 之间, 将其解释为原岩的侵位年龄, 这些正片麻岩具有典型 A 型花岗岩的地球化学特征, 例如较高的 REE、Zr 和 Nb 含量等, 表明其原岩为 A 型花岗岩。这些研究者还注意到, 这些岩石中的一些锆石具有极高的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 (最高可达 7.93), 说明扬子克拉通在新太古代初期大陆地壳出现了显著增长。随后, 邱啸飞等 (2019) 也在崆岭杂岩中识别出一套  $\sim 2.67$  Ga 的花岗片麻岩, 并基于其元素地球化学特点认为该套花岗片麻岩属于 I 型花岗岩; 这些花岗片麻岩具有相对高的锆石饱和温度和相对低的形成压力, 暗示其由伸展背景下构造减压和地幔物质上涌带来的高热量诱发的下地壳黑云母脱水熔融形成。此外, Guo J L et al. (2015) 也报道了  $2.7\text{-}2.6$  Ga 的黑云母花岗片麻岩和二云母花岗片麻岩, 并认为这些花岗岩类属于 S 型花岗岩。与 Chen K et al. (2013) 发现的 A 型花岗片麻岩不同, 这些 I/S 型花岗片麻岩均具有相对富集的 Nd 和 Hf 同位素组成, 表明其来源于中太古代早期初生地壳的再造过程。上述研究表明, 在新太古代初期, 扬子陆核可能同时存在初生地壳的生长和早期地壳的再造。

随着对扬子陆核新太古代构造 - 变质 - 岩浆作用认识的逐渐加深, 研究者多认为该事件可能与扬子陆核的增生造山作用及随后的伸展过程相关, 但也带来了一些新的问题, 包括扬子陆核俯冲 - 增生造山的地质过程和动力学机制。部分研究者认为扬子陆核新太古代的地质记录可能与世界范围内许多古老克拉通内新太古代造山事件相一致, 暗示扬子陆核可能属于新太古代 Kenorland 超大陆的一部分 (Guo J L et al., 2014, 2015; 邱啸飞等, 2019), 但该观点的成立需要更多的地质证据加以支撑, 而其在超大陆中的相应位置也亟待后续工作确定; 另一需要解决的问题则是寻找区域上新太古代造山过程中与地壳演化相关的沉积记录。相对完整的陆块增生拼合过程除孕育俯冲、造山作用诱发的变质、岩浆作用外, 通常还应包括具大陆地壳增生及

随后伸展构造背景下的沉积记录。因此,扬子陆核是否存在新太古代增生造山的沉积记录,对反演扬子陆核新太古代构造演化过程极其关键。

### 2.5 新太古代末 (~2.5 Ga) 构造 - 热事件

尽管新太古代末的碎屑锆石在扬子陆核新元古代沉积岩中普遍存在,但目前除在秦岭—大别造山带中有一些 ~2.5 Ga 的地质体报道外,该年龄地质体在扬子克拉通范围内至今仍未见报道,这导致扬子陆核是否存在新太古代末构造 - 热事件的问题悬而未决。徐琼等(2021)发现扬子陆核南部莲沱组沉积岩中 ~2.5 Ga 的碎屑锆石形态均为自形、棱角状,表明这些锆石并未经历长距离搬运,因此认为扬子陆核南部可能存在 ~2.5 Ga 的尚未出露的地质体。此外,魏君奇和王建雄(2012)在崆岭杂岩斜长角闪岩、TTG 等岩石中发现了 ~2.6-2.5 Ga 的变质锆石,并认定该期变质事件可能对应了引起扬子陆核太古宙花岗片麻岩和元古宙孔兹岩系之间不整合界面的“水月寺运动”,并进一步认为新太古代末的变质作用使得崆岭杂岩内中太古代早期绿岩、中太古代晚期 TTG 岩石和新太古代早期花岗岩类分别变质为角闪岩、TTG 片麻岩以及花岗片麻岩,构成了扬子克拉通太古宙的完整陆核(Wei J Q et al., 2020)。但由于该期地质事件受到的关注度并不高,相关研究成果目前也相对较少,有关扬子陆核新太古代末构造 - 热事件的性质及其地质意义等问题均有待进一步研究。

## 3 崆岭杂岩太古宙构造演化模式

根据上述扬子陆核崆岭杂岩太古宙岩石的时空分布以及不同期次地壳演化规律,结合区域构造 - 岩浆 - 变质作用特征,我们可得出扬子陆核太古宙构造演化模式(图 2):

(a) 3.2 Ga 之前,扬子陆核的板块构造尚未启动或仅在局部出现,此时岩浆作用以地幔柱或与之类似的垂向作用为主,扬子陆核出现早期壳幔分异过程,仅极少数古老的继承锆石和 TTG 岩石在扬子陆核得以保留(图 2a)(Zhang S B et al., 2006b; Guo J L et al., 2014)。

(b) 3.2-3.0 Ga 时,随着扬子陆核板块构造的出

现,加之地幔热流值相对较高,此时洋壳的俯冲作用以低角度平俯冲过程为主。考虑到当时的大陆地壳厚度较薄,俯冲洋壳将在相对较浅(压力较低)的位置发生部分熔融,并与地幔楔之间产生相互作用,从而形成以桃园花岗片麻岩为代表的第一期 TTG 岩石,同时伴随明显的初生地壳生长(图 2b)(Qiu X F et al., 2018a)。另外,一些幔源基性岩浆也可能在这一过程中直接喷出地表,形成一些基性 - 超基性火山岩组合(绿岩带的原岩)(Wei J Q et al., 2020)。在俯冲过程中,早期地壳岩石在局部可能会发生变质作用(魏运许等, 2018)。

(c) 2.95-2.85 Ga 时,由于之前洋壳平俯冲导致的地壳生长以及洋 - 陆板块汇聚挤压作用的影响,早期较薄的大陆地壳发生明显增厚,平俯冲洋壳此时在相对较深的位置(即较高压力下)发生部分熔融,而未与地幔楔发生相互作用(图 2c),与此同时,之前相对古老的加厚下地壳在高热流值影响下也可能发生熔融,从而形成崆岭杂岩中第二期的 TTG 岩石(Qiu Y M et al., 2000; Chen K et al., 2013; Li L M et al., 2014; Li Y H et al., 2018)。

(d) 2.75-2.62 Ga 时,扬子陆核发生增生造山作用,这一过程可进一步细分为两个阶段:前一阶段为增生造山阶段,以崆岭杂岩各类古老岩石中普遍记录的 ~2.75-2.72 Ga 高级变质作用为标志(Jiao W F et al., 2009);后一阶段为造山后伸展阶段,随着扬子陆核大陆地壳的不断增厚,造山带最终发生垮塌并伴随大陆岩石圈伸展,该阶段标志着扬子陆核新太古代增生造山过程的结束,此时软流圈地幔上涌提供了大量热量和物质,致使源区不同类型的岩石在不同深度条件下发生高温熔融作用而分别形成辉长辉绿岩(Ling W L et al., 1998)、黑云母花岗岩、二云母花岗岩(Guo J L et al., 2015)、A 型花岗岩(Chen K et al., 2013)以及 I 型花岗岩(邱嘯飞等, 2019)等多种岩浆岩,也使得区域上同时具备初生地壳生长和古老地壳再造的复杂地壳演化特点(图 2d)。

(e) 2.6-2.5 Ga 时,扬子陆核受到了区域上构造 - 热事件的影响,早期形成的绿岩、TTG 岩石以及花岗岩类分别变质为斜长角闪岩、TTG 片麻岩和花岗片麻岩(Wei J Q et al., 2020),最终构成了现今规模的扬子克拉通古老结晶基底(图 2e)。

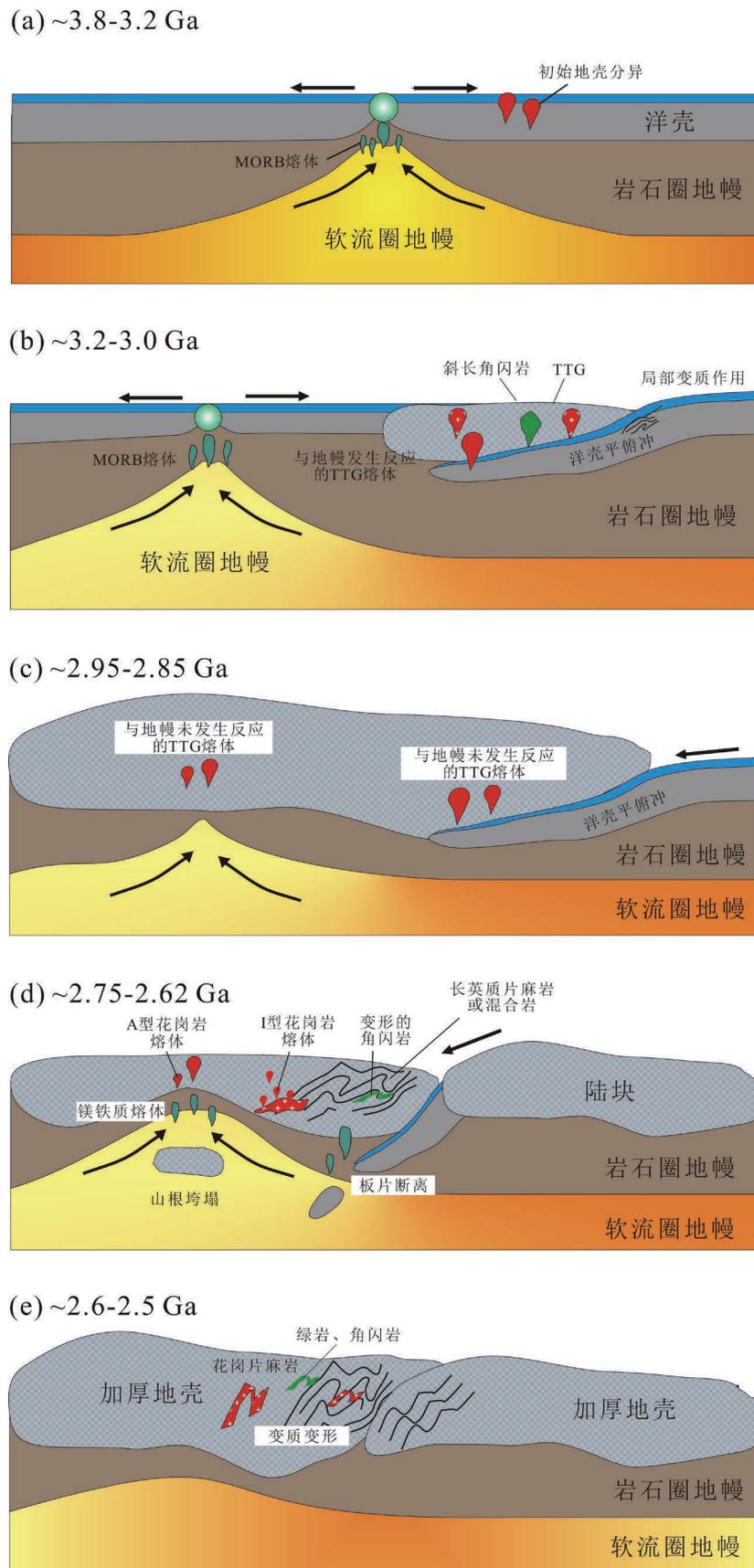


图 2 扬子陆核太古宙构造演化示意图

Fig. 2 Sketch model showing the Archean tectonic evolution of the nucleus of the Yangtze Craton

作者衷心感谢中国地质调查局武汉地质调查中心魏运许、彭练红、王建雄教授级高工,中国地质大学(武汉)凌文黎、吴元保、彭松柏教授,在扬子克拉通前寒武纪基底研究中给予的支持和帮助。中国地质科学院地质研究所万渝生研究员和一位匿名审稿专家对本文提出了许多建设性的意见和建议,在此一并表示感谢!谨以此文献礼中国地质调查局武汉地质调查中心60周年华诞!

### 参考文献:

- 韩庆森,彭松柏,焦淑娟. 2020. 扬子克拉通古元古代冷俯冲低温-高压榴辉岩相变泥质岩的发现及其大地构造意义[J]. 地球科学, 45(6): 1986-1998.
- 湖北省地质局. 1990. 湖北省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 邱啸飞,江拓,吴年文,赵小明,徐琼. 2020. 大别造山带新太古代地壳岩石和古元古代混合岩化作用——来自锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. 地质学报, 94(3): 729-738.
- 邱啸飞,杨红梅,卢山松,谭娟娟,蔡应雄. 2015. 扬子陆核古元古代 A 型花岗岩的年代学与地球化学研究及其构造意义[J]. 现代地质, 29(4): 884-895.
- 邱啸飞,杨红梅,卢山松,张利国,段瑞春,杜国民. 2016. 扬子克拉通崆岭杂岩孔兹岩系同位素年代学研究及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 40(3): 549-558.
- 邱啸飞,杨红梅,张利国,赵小明,段桂玲,卢山松,谭娟娟,施念. 2015. 扬子陆块庙湾蛇绿岩中橄榄岩的同位素年代学及其构造意义[J]. 地球科学, 40(7): 1121-1128.
- 邱啸飞,杨红梅,赵小明,卢山松,江拓,段瑞春,刘重芄,彭练红,魏运许. 2019. 扬子克拉通崆岭杂岩新太古代花岗岩片麻岩成因及其构造意义[J]. 地球科学, 44(2): 415-426.
- 邱啸飞,赵小明,杨红梅,魏运许,吴年文,卢山松,江拓,彭练红. 2017. 扬子陆核古元古代变质事件——来自孔兹岩系变质锆石 U-Pb 同位素年龄的证据[J]. 地质通报, 36(5): 706-714.
- 孙卫东,谢国治,张丽鹏,刘鹤,李聪颖,孙赛军. 2021. 板块俯冲起始与大陆地壳演化[J]. 地质学报, 95(1): 32-41.
- 万渝生,颜颜强,董春艳,刘敦一. 2020. 华北克拉通太古宙构造热事件时代及演化[J]. 地球科学, 45(9): 3119-3160.
- 魏君奇,景明明. 2013. 崆岭杂岩中角闪岩类的年代学和地球化学[J]. 地质科学, 48(4): 970-983.
- 魏君奇,王建雄. 2012. 崆岭杂岩中斜长角闪岩包体的锆石年龄和 Hf 同位素组成[J]. 高校地质学报, 18(4): 589-600.
- 魏运许,徐大良,周文孝,万渝生,黄显校,赵小明,段其发,杨世平. 2018. 扬子克拉通核部黄陵地区中太古代花岗杂岩中发现 3.00~2.93Ga 变质事件[J]. 地球科学, 43(7): 2309-2312.
- 徐琼,江拓,侯林春,赵小明,童喜润,散飞雪,邱啸飞. 2021. 扬子陆块三峡地区莲沱组砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 地球科学, 46(4): 1217-1230.
- 严溶,周汉文,曾雯,江麟生,周忠友,陈铁龙. 2006. 湖北宜昌崆岭群孔兹岩系地球化学特征[J]. 地质科技情报, 25(5): 41-46.
- 翟明国,赵磊,祝禧艳,焦淑娟,周艳艳,周李岗. 2020. 早期大陆与板块构造启动—前沿热点介绍与展望[J]. 岩石学报, 36(8): 2249-2275.
- 赵国春,张国伟. 2021. 大陆的起源[J]. 地质学报, 95(1): 1-19.
- Chen K, Gao S, Wu Y B, Guo J L, Hu Z C, Liu Y S, Zong K Q, Liang Z W, Geng X L. 2013. 2.6–2.7 Ga crustal growth in Yangtze craton, South China [J]. Precambrian Research, 224: 472-490.
- Cui X Z, Wang J, Wang X C, Wilde S A, Ren G M, Li S J, Deng Q, Ren F, Liu J P. 2021. Early crustal evolution of the Yangtze Block: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotope systematics of 3.1–1.9 Ga granitoids in the Cuoque Complex, SW China [J]. Precambrian Research, 357: 106155.
- Gao S, Yang J, Zhou L, Li M, Hu Z C, Guo J L, Yuan H L, Gong H J, Xiao G Q, Wei J Q. 2011. Age and growth of the Archean Kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga granitoid gneisses [J]. American Journal of Science, 311: 153-182.
- Guo J L, Gao S, Wu Y B, Li M, Chen K, Hu Z C, Liang Z W, Liu Y S, Zhou L, Zong K Q. 2014. 3.45 Ga granitic

- gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archean crustal growth [J]. *Precambrian Research*, 242: 82-95.
- Guo J L, Wu Y B, Gao S, Jin Z M, Zong K Q, Hu Z C, Chen K, Chen H H, Liu Y S. 2015. Episodic Paleoproterozoic (3.3-2.0Ga) granitoid magmatism in Yangtze craton, South China: Implications for late Archean tectonics[J]. *Precambrian Research*, 270: 246-266.
- Han P Y, Guo J L, Chen K, Huang H, Zong K Q, Liu Y S, Hu Z C, Gao S. 2017. Widespread Neoproterozoic (~2.7-2.6 Ga) magmatism of the Yangtze craton, South China, as revealed by modern river detrital zircons [J]. *Gondwana Research*, 42: 1-12.
- Han Q S, Peng S B, Kusky T, Polat A, Jiang X F, Cen Y, Liu S F, Deng H. 2017. A Paleoproterozoic ophiolitic mélange, Yangtze craton, South China: Evidence for Paleoproterozoic suturing and microcontinent amalgamation[J]. *Precambrian Research*, 293: 13-38.
- Huang X L, Niu Y, Xu Y G, Yang Q J, Zhong J W. 2010. Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan-Taihua complex in the southern North China Craton: Implications for late Archean crustal accretion [J]. *Precambrian Research*, 182: 43-56.
- Jiao W F, Wu Y B, Yang S H, Peng M, Wang J. 2009. The oldest basement rock in the Yangtze Craton revealed by zircon U-Pb age and Hf isotope composition [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1393-1399.
- Li L M, Lin S F, Davis D W, Xiao W J, Xing G F, Yin C Q. 2014. Geochronology and geochemistry of igneous rocks from the Kongling terrane: Implications for Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Yangtze block[J]. *Precambrian Research*, 255: 30-47.
- Li Y H, Zheng J P, Ping X Q, Xiong Q, Xiang L, Zhang H. 2018. Complex growth and reworking processes in the Yangtze cratonic nucleus [J]. *Precambrian Research*, 311: 262-277.
- Ling W L, Gao S, Zheng H F, Zhou L, Zhao Z. 1998. Sm-Nd isotopic dating of Kongling terrain [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43: 86-89.
- Liu B, Zhai M G, Zhao L, Cui X H, Zhou L G. 2019. Zircon U-Pb-Hf isotope studies of the early Precambrian metasedimentary rocks in the Kongling terrane of the Yangtze Block, South China [J]. *Precambrian Research*, 320: 334-349.
- Liu X M, Gao S, Diwu C R, Ling W L. 2008. Precambrian crustal growth of Yangtze Craton as revealed by detrital zircon studies [J]. *American Journal of Sciences*, 308: 421-468.
- Nutman A P, Mcgregor V R, Friend C R L, Bennett V C, Kinny P D. 1996. The Itsaq Gneiss Complex of southern West Greenland: The world's most extensive record of early crustal evolution (3900-3600 Ma) [J]. *Precambrian Research*, 78: 1-39.
- Peng M, Wu Y B, Gao S, Zhang H F, Wang J Q, Liu X M, Gong H J, Zhou L, Hu Z C, Liu Y S. 2012. Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotope compositions of Paleoproterozoic aluminous A-type granites from the Kongling terrain, Yangtze Block: Constraints on petrogenesis and geologic implications [J]. *Gondwana Research*, 22: 140-151.
- Qiu X F, Deng X, Jiang T, Xu Q, Yang W W. 2021. First discovery of Hadean xenocrystal zircons from granitic gneisses in the northern Dabie orogen [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 95(5): 1775-1776.
- Qiu X F, Ling W L, Liu X M, Lu S S, Jiang T, Wei Y X, Peng L H, Tan J J. 2018a. Evolution of the Archean continental crust in the nucleus of the Yangtze block: Evidence from geochemistry of 3.0 Ga TTG gneisses in the Kongling high-grade metamorphic terrane, South China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 149-161.
- Qiu X F, Zhao X M, Yang H M, Lu S S, Wu N W, Jiang T, Gu T, Wang Y F. 2018b. Geochemical and Nd isotopic compositions of the Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the Kongling complex, nucleus of Yangtze craton, South China block: Implications for provenance and tectonic evolution[J]. *Geological Magazine*, 155(6): 1263-1276.
- Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, Groves D I, Ling W L. 2000. 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*, 28: 11-14.
- Turner S, Wilde S, Wörner G, Schaefer B, Lai Y J. 2020. An andesitic source for Jack Hills zircon supports onset of plate tectonics in the Hadean [J]. *Nature Communications*, 11(1): 1241.
- Wan Y S, Xie H Q, Dong C Y, Kröner A, Wilde S A, Bai W Q, Liu S J, Xie S W, Ma M Z, Li Y, Liu D Y. 2019. Hadean to Paleoproterozoic rocks and zircons in China. In: Kranendonk, M.J.V. (Ed.), *Earth's Oldest Rocks (Second Edition)* [M]. Elsevier, Amsterdam.
- Wei J Q, Wei Y X, Wang J X, Wang X D. 2020. Geochronological constraints on the formation and evolution of the Huangling basement in the Yangtze craton, South China [J]. *Precambrian Research*, 342: 105707.
- Wei J Q. 2021. Petrology and geochemistry of the Archean Huangling greenstone belt in the Yangtze Craton, South China [J]. *Precambrian Research*, 364: 106340.
- Wei Y X, Zhou W X, Hu Z X, Li H Q, Huang X X, Zhao X M, Xu D L. 2019. Geochronology and Geochemistry of Archean TTG and Tremolite Schist Xenoliths in Yemadong Complex: Evidence for  $\geq 3.0$  Ga Archean [J]. *Minerals*, 9: 689.
- Windley B, Kusky T M, Polat A. 2021. Onset of plate tectonics by the Eoarchean [J]. *Precambrian Research*, 352(6): 105980.
- Xiong Q, Zheng J P, Yu C M, Su Y P, Tang H Y, Zhang Z H. 2009. Zircon U-Pb age and Hf isotope of Quanyishang A-type granite in Yichang: Signification for the Yangtze continental cratonization in Paleoproterozoic [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 436-446.
- Yin C Q, Lin S F, Davis D W, Zhao G C, Xiao W J, Li L M, He Y H. 2013. 2.1-1.85 Ga tectonic events in the Yangtze Block, South China: Petrological and geochronological evidence from the Kongling Complex and implications for the reconstruction of supercontinent Columbia [J]. *Lithos*, 182: 200-210.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Gao S, Wu F Y. 2006a. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China [J]. *Precambrian Research*, 151(3): 265-288.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Gao S, Wu F Y. 2006b. 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 and Planetary Science Letters*, 252: 56-71.
- Zhong Y T, Kusky T, Wang L, Polat A, Liu X Y, Peng Y Y, Luan Z K, Wang C H, Wang J P, Deng H. 2021. Alpine-style nappes thrust over ancient North China continental margin demonstrate large Archean horizontal plate motions [J]. *Nature Communications*, 12: 6172.