

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.040>



北大别构造带始太古代片麻岩的发现

邱啸飞¹, 彭练红¹, 孔令耀², 邓新¹, 王达^{3,4}, 陈伟雄^{1,5}, 吴年文¹,
童喜润¹, 田洋¹, 牛志军¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205
2. 湖北省地质调查研究院, 湖北武汉 430074
3. 美国卡内基科学研究所, 华盛顿 20015
4. 成都理工大学, 四川成都 610059
5. 中国地质大学, 湖北武汉 430074

摘要: 始太古代岩石因其稀缺性, 对于理解最早期陆壳形成和演化具有重要意义. 报道了大别造山带北大别构造带内新识别出的一套英云闪长片麻岩和斜长角闪片麻岩组合的锆石年龄, 并将其命名为“木子店片麻杂岩”. 定年结果显示, 斜长角闪片麻岩和英云闪长片麻岩的锆石年龄分别为 $(3\ 653 \pm 43)$ Ma 和 $(3\ 701 \pm 29)$ Ma, 为目前扬子克拉通已发现的最古老岩石, 说明扬子克拉通之下可能存在极为古老的基底岩石. 与崆岭杂岩基底岩石的对比研究显示, 木子店片麻杂岩在岩石类型以及时代上与崆岭杂岩均存在明显差异, 说明崆岭杂岩和木子店片麻杂岩可能代表了扬子克拉通内相互独立的微陆块古陆核.

关键词: 始太古代; 木子店片麻杂岩; 扬子克拉通; 北大别构造带; 英云闪长片麻岩; 构造地质学; 岩石学.

中图分类号: P58

文章编号: 1000-2383(2024)11-3960-11

收稿日期: 2023-02-07

Discovery of Eoarchean Gneisses in Northern Dabie Belt

Qiu Xiaofei¹, Peng Lianhong¹, Kong Lingyao², Deng Xin¹, Wang Da^{3,4}, Chen Weixiong^{1,5}, Wu Nianwen¹,
Tong Xirun¹, Tian Yang¹, Niu Zhijun¹

1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China
2. Hubei Geological Survey, Wuhan 430074, China
3. Carnegie Institution for Science, Washington D.C. 20015, USA
4. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
5. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Eoarchean rocks are of great significance for understanding the formation and evolution of the earliest continental crust due to their scarcity. In this study, it reports zircon U-Pb ages of a newly recognized tonalitic gneiss and plagioclase-amphibolitic gneiss assemblage in the northern Dabie belt, which is named as the “Muzidian gneiss complex”. The zircon dating results show that the ages of the plagioclase-amphibolitic schist and tonalitic gneiss in the Muzidian gneiss complex are $(3\ 653 \pm 43)$ Ma and $(3\ 701 \pm 29)$ Ma, respectively, which are the oldest rocks known in the Yangtze craton, indicating ancient

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 42272229, U2344210); 武汉地质调查中心“潜龙计划”青年拔尖人才项目 (No. QL2022-02).

作者简介: 邱啸飞 (1985-), 男, 研究员, 博士, 主要从事华南陆块前寒武纪地质学研究. ORCID: 0000-0001-8770-813X. E-mail: qiu Xiaofei@mail.cgs.gov.cn

引用格式: 邱啸飞, 彭练红, 孔令耀, 邓新, 王达, 陈伟雄, 吴年文, 童喜润, 田洋, 牛志军, 2024. 北大别构造带始太古代片麻岩的发现. 地球科学, 49(11): 3960-3970.

Citation: Qiu Xiaofei, Peng Lianhong, Kong Lingyao, Deng Xin, Wang Da, Chen Weixiong, Wu Nianwen, Tong Xirun, Tian Yang, Niu Zhijun, 2024. Discovery of Eoarchean Gneisses in Northern Dabie Belt. *Earth Science*, 49(11): 3960-3970.

basement rocks may exist beneath the craton. A comparative study with the basement rocks of the Kongling complex reveals that both the lithology and age of the Muzidian gneiss complex are distinct from those of the Kongling complex, indicating that they may represent independent microcontinental nucleus of the Yangtze craton.

Key words: Eoarchean; Muzidian gneiss complex; Yangtze craton; northern Dabie belt; tonalitic gneiss; tectonics; petrology.

克拉通地体早前寒武纪陆核的形成与演化是认识各克拉通形成、生长及其陆壳成熟化的关键。作为目前已知最古老大陆地壳的主要组成,冥古宙到始太古代岩石可为最早期大陆地壳的组成特征和形成条件提供最直接信息,因而对于了解早期地球的物理化学性质具有重要意义(Harrison *et al.*, 2017; Boehnke *et al.*, 2018; Wan *et al.*, 2019)。然而,绝大多数早期地壳物质都被后期地质过程所破坏或强烈改造,使得目前这类岩石在地球上数量极少。目前仅在全球范围内十余个地质体中有所发现,包括加拿大的Acasta片麻杂岩(4.03~3.60 Ga)(Bowring and Williams, 1999; Bauer *et al.*, 2017)、Nuvvuagittuq绿岩带(3.82~3.75 Ga)(David *et al.*, 2009)、格陵兰的Itsaq片麻杂岩(3.85~3.65 Ga)(Nutman *et al.*, 2009),以及位于我国华北克拉通的鞍山片麻岩(3.8~3.3 Ga)(Liu *et al.*, 1992; Wan *et al.*, 2019)、冀东片麻岩(~3.8 Ga)(万渝生等, 2021)和塔里木陆块的阿克塔什塔格片麻杂岩(~3.7 Ga)(Ge *et al.*, 2018)等,总出露面积占比不到现在地壳的百万分之一。受限于这些早期地质体的出露规模,使得现阶段对地球最早期地质历史的构造演化过程等仍存在很大争议(Hawkesworth *et al.*, 2019; Zheng and Zhao, 2020; 万渝生, 2022)。此外,由于早期地壳岩石的出露规模和范围极为有限,也难以界定它们是否具有足够的全球代表性,使得地球的原始地壳组成成为一个关键未知项,制约了对其早期地壳生长方式、生命起源及板块构造启动过程等诸多科学问题的探讨。因此,尽可能多地在不同克拉通古陆核中寻找和识别太古宙早期乃至冥古宙地壳岩石,将是认识和探索地球早期陆壳形成、演化及其地球动力学背景的关键。

本文在大别造山带北大别构造带木子店地区新识别出一套始太古代(~3.7~3.6 Ga)英云闪长片麻岩和斜长角闪片麻岩岩石组合,并对其开展了锆石U-Pb定年分析,发现该套岩石组合可能代表了目前我国最古老岩石之一,且区域上可能存在更为古老的地壳物质。

1 区域地质概况

大别造山带位于秦岭-桐柏-大别-苏鲁造山带的中部,依据矿物组合、地球化学组成及变质级别,其从北向南可分为5个构造单元,即北淮阳低级变质带、北大别高温超高压麻粒岩相带、中大别中温超高压榴辉岩相带、南大别低温超高压榴辉岩相带以及宿松低温高压蓝片岩相带。构造单元之间以韧性剪切带或断层相隔,并被中生代大规模的花岗岩类侵入。

北大别构造带长期以来被认为是扬子克拉通北缘卷入造山带的部分,可能代表了扬子克拉通下地壳岩石及其部分熔融产物(Hacker *et al.*, 1998; Sun *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2008)。其主体由一套混合岩化片麻岩所构成,夹少量镁铁质-超镁铁质岩、榴辉岩、麻粒岩、磁铁石英岩以及大理岩透镜体。北大别存在东、西两个穹隆,东边为岳西穹隆,西边为罗田穹隆。它们具有相似的岩性构造特点,即整体均由片麻岩组成,且核部存在较强的混合岩化。近年来,在该构造带内不同区域,尤其是罗田穹隆区内陆续发现了一批太古宙岩石,包括黄土岭麻粒岩、团风混合岩、贾庙花岗片麻岩以及木子店花岗片麻岩等(Wu *et al.*, 2008; 邱啸飞等, 2020; Qiu *et al.*, 2021b; Tian *et al.*, 2022),定年结果显示,这些岩石的原岩形成时间主要集中在~2.7~2.5 Ga的新太古代。另外,在大别-苏鲁造山带元古宙花岗片麻岩中也发现了一些冥古宙到始太古代的古老捕获/继承锆石。例如,Zhou *et al.*(2020)在苏鲁造山带新元古代仰口花岗片麻岩中找到了始太古代(~3.7 Ga)岩浆锆石;Qiu *et al.*(2021a)更是在北大别木子店地区古元古代片麻状花岗闪长岩中首次发现了冥古宙(~4.03 Ga)岩浆锆石,并采用SIMS U-Pb定年方法对其进行了验证(数据未发表)。

在北大别构造带木子店地区,一系列太古宙-古元古代花岗片麻岩、磁铁石英岩以及变超基性-基性岩零星出露,并被白垩纪黑云二长花岗岩所侵入(图1)。Qiu *et al.*(2021b)对木子店镇邱家坞村一带TTG片麻岩进行了锆石定年和Hf同位素研究,结果显示,这些花岗片麻岩主要形成于~2.5~2.4 Ga,

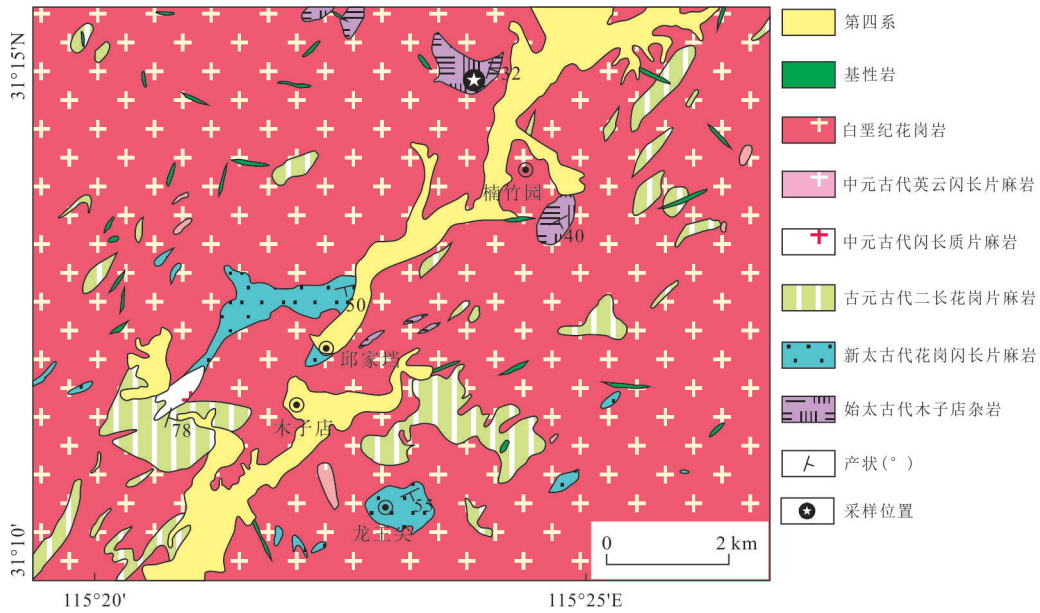


图 1 木子店地区区域地质简图(据 Qiu *et al.*, 2021b 修改)

Fig.1 Schematic geological map for the Muzidian area and sampling location (modified after Qiu *et al.*, 2021b)

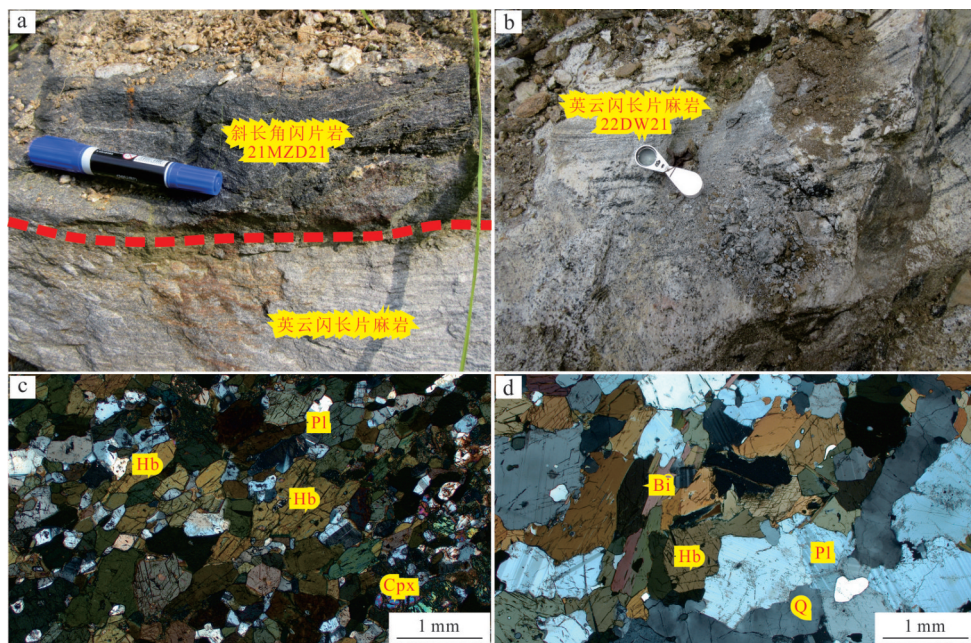


图 2 木子店片麻杂岩斜长角闪片麻岩(a, c)和英云闪长片麻岩(b, d)野外和镜下照片

Fig.2 Field outcrop and photomicrograph for the plagioclase-amphibolitic schist (a, c) and tonalitic gneiss (b, d) from the Muzidian gneiss complex

Pl. 斜长石; Hb. 角闪石; Cpx. 单斜辉石; Bi. 黑云母; Q. 石英

并遭受了古元古代~2.1~2.0 Ga 的变质作用. 然而在该地区, 除这些新太古代 TTG 片麻岩外, 还存在一套时代更老、变质程度更高的麻粒岩相变质的基性-超基性岩、中酸性岩以及含铁石英岩 (BIF) 组合, 总出露面积约为 5 km². 岩性主要包括黑云角闪斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩及少量含榴斜长角闪

岩和麻粒岩 (变橄辉石岩) 等, 并可见一些基性-超基性岩透镜体, 为区别于区域上新太古代 TTG 片麻岩, 将该套岩石组合命名为“木子店片麻杂岩”.

样品 21MZD21 采自木子店片麻杂岩中的斜长角闪片麻岩 (图 2a). 岩石呈灰黑色, 具有粒状柱状变晶结构, 片状构造. 岩石主要由角闪石、斜长石以及

少量单斜辉石构成(图 2b).角闪石为半自形柱状,无色-浅褐色,主要粒径约为 0.3~1 mm,含量约为 60%~65%;斜长石为它形柱状,充填于单斜辉石和角闪石颗粒之间,粒径约为 0.1~0.2 mm,含量约为 30%~35%;单斜辉石为半自形,主要粒径为 0.1~0.3 mm,含量为 3%~5%.副矿物包括磁铁矿、黄铁矿、少量榍石以及锆石等.

样品 22DW21 采自木子店片麻杂岩中的英云闪长质片麻岩(图 2c).岩石呈灰白色,具有鳞片粒状变晶结构,片麻状构造.岩石主要由斜长石(约 45%~50%)、角闪石(约 12%~15%)、黑云母(约 8%~10%)以及石英(约 25%~30%)组成,镜下未见钾长石(图 2d).石英和斜长石颗粒均具长轴定向特点,粒径约为 0.2~2 mm,与黑云母、角闪石等暗色矿物一起构成片麻理.部分斜长石具有轻微的绢云母化.角闪石为半自形柱状,粒径约为 0.2~1 mm,黑云母为自形片状,片径约为 0.1~0.5 mm.副矿物包括黄铁矿、锆石、磷灰石.

2 分析方法

野外样品采集后直接送往河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司进行锆石分选工作.样品破碎后通过传统重磁方法分离出锆石,随后将其粘在环氧树脂上进行制靶,经抛光、喷碳等步骤处理后用于阴极发光(CL)照相以确定锆石颗粒内部结构,并在此基础上选择合适的区域开展锆石 U-Pb 定年分析.锆石 CL 以及透、反射光照相均在北京锆年领航科技有限公司采用配备英国 Gatan 公司生产的阴极荧光探头装置系统的 JSM6510 扫描电镜上完成.

锆石的 U-Pb 年龄测定在中国地质调查局武汉地质调查中心同位素地球化学研究室完成.测试仪器为装配 RESolution 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统与 icapQ 型 ICP-MS 联机.斜长角闪片岩和英云闪长片麻岩的测试激光束斑直径分别为 19 mm 和 29 mm,激光剥蚀时间为 45 s,激光频率为 3 Hz,能量密度为 4 J/cm².测定时采用国际锆石标准 91500 来对年龄校正,采用 NIST SRM610 来校准元素含量.单个数据点误差为 1s.采用锆石标准物质 Plésovice 和 TANZ 作为未知样品对数据结果进行监控.锆石 U-Pb 同位素组成原始数据采用 ICPMSDataCal 软件(ver. 10.9)进行处理(Liu *et al.*, 2008).年龄计算以及谐和图的绘制

均采用 ISOPLOT 软件完成(Ludwig, 2003).

3 锆石特征与 U-Pb 定年分析结果

样品斜长角闪片岩(21MZD21)中的锆石多为破碎状或板柱状,无色透明至半透明,长度范围为 80~200 μm.锆石 CL 照片显示(图 3),多数锆石具有复杂的核边结构,其中核部多显示出稀疏或较弱的震荡环带,与基性岩浆结晶锆石特点类似;锆石边部与核部直接界线清晰,且多具有明显偏强的 CL 发光而无震荡环带,对该样品中 25 个锆石颗粒进行了 30 个点的 U-Pb 年龄测定,多数锆石为不谐和锆石(图 4).位于核部的 15 个分析点具有相对较高的 Th($89.6 \times 10^{-6} \sim 656 \times 10^{-6}$)和 U($280 \times 10^{-6} \sim 988 \times 10^{-6}$)含量,其构成不一致线上交点年龄为($3\ 653 \pm 43$) Ma (MSWD=4.3),近似谐和(谐和度 >90%)的 6 个数据点的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为($3\ 589 \pm 44$) Ma (MSWD=1.3),与不一致线上交点年龄在误差范围内一致,解释为斜长角闪片岩的原岩形成时间.位于边部重结晶区域和无明显震荡环带锆石的 8 个分析点具有明显较低的 Th($59.3 \times 10^{-6} \sim 233 \times 10^{-6}$)和 U($72.4 \times 10^{-6} \sim 149 \times 10^{-6}$)含量,构成的不一致线上交点年龄为($2\ 529 \pm 48$) Ma (MSWD=2.0),可能代表了锆石变质重结晶的时间.此外,7 个分析点具有 ~124~114 Ma 的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,与区域上大面积出露的白垩纪二长花岗岩及混合岩时代接近.

样品英云闪长片麻岩(22DW21)中锆石主要呈长柱状-椭圆状,多数锆石颗粒为自形到半自形.CL 图像显示多数锆石具有封闭且清晰的震荡环带,部分锆石由于遭受不同程度的重结晶作用而存在变质增生边.对该样品中 24 颗锆石共进行了 24 个数据点分析,大部分锆石均存在不同程度的 Pb 丢失现象,所有分析点大致构成一条不一致线,不一致线上交点年龄为($3\ 701 \pm 29$) Ma (MSWD=3.1),与 3 个靠近谐和线锆石的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄($3\ 679 \pm 11$) Ma (MSWD=0.20)相接近(图 4),认为其代表了英云闪长片麻岩的形成年龄.

4 讨论

4.1 始太古代木子店片麻杂岩发现的意义

作为我国最重要的前寒武纪块体之一,扬子克

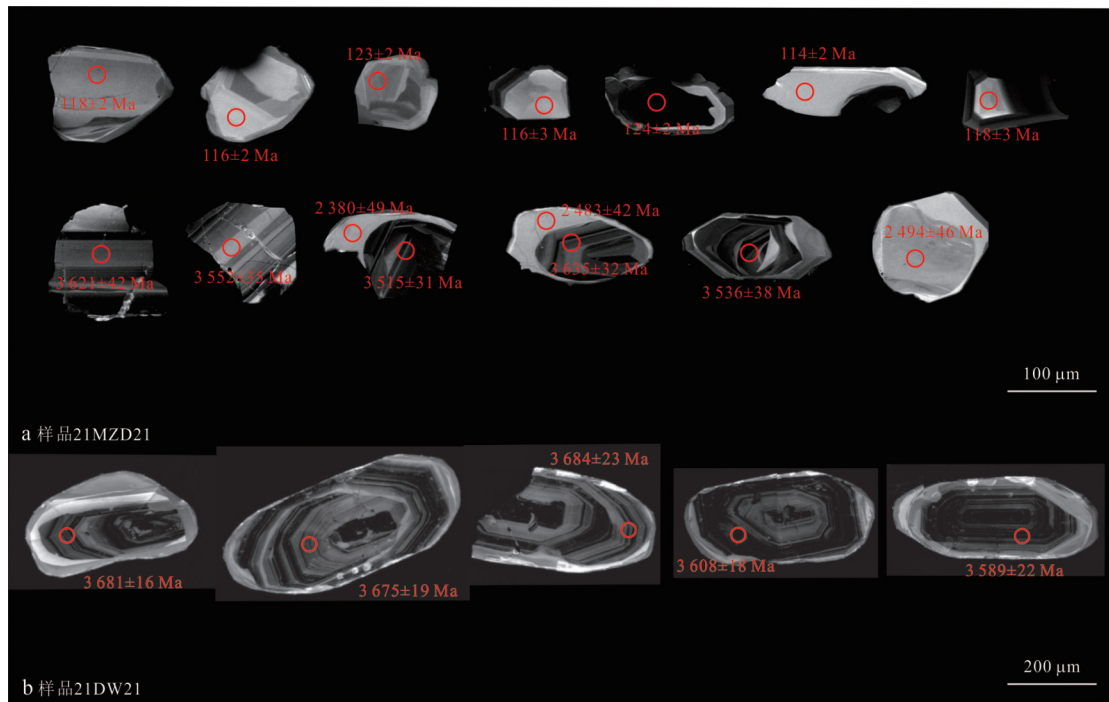


图 3 北大别木子店片麻杂岩代表性锆石阴极发光图

Fig.3 CL images of representative zircons for the Muzidian gneiss complex in the northern Dabie belt

a. 斜长角闪片麻岩(21MZD21); b. 英云闪长片麻岩(22DW21)

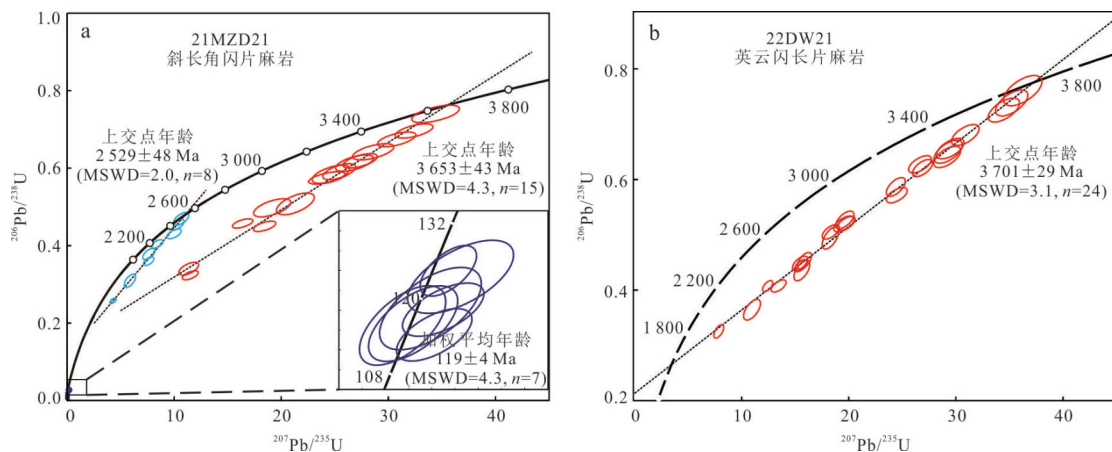


图 4 北大别木子店片麻杂岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 U-Pb concordia diagrams of zircons from the Muzidian gneiss complex in the northern Dabie belt

a. 斜长角闪片麻岩(21MZD21); b. 英云闪长片麻岩(22DW21)

拉通的早期形成与构造演化对充分认识中国大陆地壳组成、构造格局演变乃至全球早前寒武纪地壳形成和演化均具有重要意义。然而,相比于邻近的华北克拉通和塔里木陆块均有确切始太古代岩石的报道(Liu *et al.*, 1992; Zheng *et al.*, 2004; 万渝生等, 2009, 2021; Ge *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2020), 尽管少量冥古宙-始太古代锆石记录在扬子克拉通偶有报道(Zhang *et al.*, 2006; 任光明等,

2020; Zhou *et al.*, 2020; Qiu *et al.*, 2021a), 其早前寒武纪变质基底的研究程度目前仍显得相对薄弱。

目前, 扬子克拉通有确切太古宙早期(>3.2 Ga) 基底岩石报道的地区仅限于其核部的崆岭高级变质岩区(Jiao *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2014), 出露有迄今已报道的华南陆块最古老基底——崆岭杂岩。该地区也成为目前扬子克拉通乃至整个华南陆块研究程度最高的早前寒武纪地

质体出露区,并发现了目前华南陆块最古老的岩石——~3.45 Ga 的奥长花岗片麻岩(Guo *et al.*, 2014).然而,随着对扬子克拉通早前寒武纪地质体年代学工作的不断开展,一些新的研究表明崆岭地区并非扬子克拉通唯一的太古宙基底出露区,在诸如扬子克拉通西南缘的撮科(崔晓庄等, 2020; Zhao *et al.*, 2020)、北缘的钟祥(Wang *et al.*, 2013, 2018; Zhou *et al.*, 2015)、南秦岭的鱼洞子(Hui *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020)、陡岭(Wu *et al.*, 2014; Nie *et al.*, 2016)以及北大别构造带的黄土岭(Sun *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2008)、团风(邱啸飞等, 2020)、木子店(Qiu *et al.*, 2021b)等地区也陆续有太古宙岩石的报道,但这些岩石的年龄全部集中在中-新太古代.扬子克拉通是否和华北克拉通和塔里木陆块一样,存在古太古代以前(>3.6 Ga)的岩石记录,对于综合理解我国乃至全球早前寒武纪地质演化,不同克拉通间基底对比工作起着重要作用.

大别造山带北大别构造带内的木子店高级变质岩区内新识别出的木子店片麻杂岩原属“大别群”(也称“大别山杂岩”)的组成部分,构造单元上属于北大别构造带西段,总体变质级达麻粒岩相,高于区域上新太古代 TTG 片麻岩类,且长期以来被认为是扬子克拉通北缘陆壳基底的一部分(江来利等, 2000).本文对该套基底岩石开展了锆石 U-Pb 定年研究结果显示,木子店片麻杂岩中英云闪长片麻岩和斜长角闪片岩分别获得了不一致线上交点年龄为(3 701±29) Ma 和(3 653±43) Ma,说明木子店片麻杂岩的原岩形成时代主要为始太古代,这是扬子克拉通乃至整个华南目前已发现的最古老岩石,为了解华南陆块早期地壳形成和演化过程提供了理想素材.

此外,在木子店片麻杂岩的斜长角闪片岩中还发现了一定数量的新太古代(~2.5 Ga)和早白垩世(~120 Ma)锆石,前者 CL 图像显示它们主要为重结晶锆石,且年龄与区域上新太古代 TTG 片麻岩基本相同(Qiu *et al.*, 2021b),该时期的岩浆岩尽管在扬子克拉通范围内目前虽仍未被发现,但在秦岭-大别造山带中却屡有报道,被认为可能代表了扬子克拉通北缘的早前寒武纪基底最终形成的重要时期.例如, Hu *et al.* (2013) 在南秦岭陆块中获得了 2 509~2 469 Ma 的花岗片麻岩锆石年龄; Nie *et al.* (2016) 在南秦岭陡岭杂岩中也获得了~2.5~2.4 Ga

的年龄; Qiu *et al.* (2021b) 最近在北大别木子店地区英云闪长片麻岩样品中获得的~2.5 Ga 的锆石 U-Pb 年龄等.与之相比,华北克拉通则存在普遍而显著的新太古代末期的岩浆-变质事件,并被认为可能标志了该克拉通最终克拉通化的时间(Yang and Wei, 2017; 翟明国等, 2020).例如, Diwu *et al.* (2011) 在华北克拉通南缘的登封杂岩中获得了 2 547~2 504 Ma 的锆石年龄; Li *et al.* (2023) 最近在华北克拉通东北部也报道了 2.55~2.52 Ga 以及 2.53~2.51 Ga 的 TTG 和二长花岗岩.然而秦岭-大别造山带内~2.5 Ga 岩石中锆石与华北克拉通同时代锆石在 Hf 同位素组成上存在着显著差异(Nie *et al.*, 2016).与此同时,早白垩世锆石在 CL 图中并未显示出明显震荡环带,与核部存在震荡环带的岩浆成因锆石相区别,加之该期锆石年龄与大别造山带内大面积出露的早白垩世花岗岩类及混合岩时代也相近(Wu *et al.*, 2007; 胡俊良等, 2018),暗示北大别始太古代木子店片麻杂岩原岩形成后可能至少受到了新太古代和早白垩世两次构造-热事件的影响.

4.2 扬子克拉通木子店和崆岭地区基底岩石组成对比

木子店地区是目前扬子克拉通除崆岭地区以外仅有的另一处存在 3.2 Ga 以前陆壳物质的地区.两者是相互独立具有不同地壳演化历史的微陆块早期陆核,还是具有统一演化序列的同一古老陆核在扬子克拉通不同地区的出露,涉及到扬子克拉通是否由多微陆块逐渐拼合形成这一重要科学问题(Qiu *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2017; 涂城等, 2021; 邱啸飞, 2022).

崆岭杂岩是目前扬子克拉通乃至整个华南陆块研究程度最高、出露面积最大的早前寒武纪地质体,保留了自古太古代以来相对完整的岩石记录和地壳演化历史,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.数十年来,国内外研究者对该地体开展了大量同位素年代学和地球化学研究工作.邱啸飞等(2022)依据近年来崆岭杂岩太古宙岩石已发表的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素以及地球化学组成等,将崆岭地区地壳演化过程分为始太古代(~4.0~3.2 Ga)原始地壳形成与演化、中太古代(~3.2~3.0 Ga)早期地壳生长、中太古代晚期(~2.9~2.8 Ga)加厚地壳熔融、新太古代(~2.7~2.6 Ga)地壳生长与再造,以及新太古代末

(~2.5 Ga)地壳岩石变质改造等 5 个阶段。

与之相比,木子店地区早前寒武纪基底岩石在岩性、时代以及锆石 Hf 同位素组成上与崆岭杂岩目前已知的最古老基底之间均存在显著差异。本文研究显示,木子店片麻杂岩以英云闪长质岩石为主,辅以少量花岗闪长质和玄武质岩石,其形成时代约为 3.7~3.6 Ga 的始太古代;然而,崆岭杂岩中目前已报道的最古老岩石仅~3.45 Ga,且古老基底时代上主要位于~3.4~3.0 Ga 的古太古代到中太古代,而岩性上则以奥长花岗质岩石为主,区域上也无较大规模古太古代基性-超基性岩与之伴生。此外,两地区在中-新太古代地质记录也存在明显差异。包括:(1)崆岭杂岩最大规模太古宙 TTG 岩浆作用发生在~3.0~2.8 Ga 的中太古代,但该期构造-热事件目前在木子店地区尚未识别到。与之相比,木子店主要 TTG 片麻岩原岩时代集中在~2.5~2.4 Ga 的新太古代,而该时期碎屑锆石除在崆岭地区新元古代沉积岩中普遍存在以外,也还未在该地区发现这一时期较大规模地质体;(2)研究表明,崆岭地区早前寒武纪基底经历了中太古代(~3.0 Ga)、新太古代早期(~2.7 Ga)和古元古代(~2.0 Ga)三期变质事件叠加,然而本文研究则显示木子店片麻杂岩主要仅记录了~2.5 Ga 的变质重结晶过程,而缺乏~3.0 Ga 和~2.7 Ga 变质作用记录;(3)崆岭杂岩中~2.7~2.6 Ga A 型花岗岩、I 型花岗岩的报道以及该地区沉积岩和现代河流沉积物中大量~2.7~2.6 Ga 碎屑锆石的存在均表明~2.7~2.6 Ga 构造-岩浆事件可能在崆岭地区早前寒武纪陆壳形成过程中扮演了极为重要的角色,但该时间段构造-岩浆记录尽管在北大别构造带内有所记录,但在木子店地区目前仍未有发现。

另外值得注意的是,木子店地区和崆岭地区 TTG 片麻岩的锆石 Hf 同位素也存在显著不同,木子店地区新太古代花岗片麻岩以极富集的锆石 Hf 同位素组成为特点,Hf 同位素模式年龄多集中在~4.2~4.0 Ga,而与之相比,崆岭地区 TTG 片麻岩的锆石 Hf 同位素组成相比则明显亏损,其 Hf 同位素模式年龄主要集中在~3.8~3.7 Ga (Qiu *et al.*, 2021b),这说明在以木子店地区为代表的扬子克拉通北缘之下可能存在更为古老的基底岩石。实际上,近年来越来越多的证据显示,在扬子克拉通北缘可能广泛存在冥古宙-始太古代基底岩石。例如,扬子克拉通北缘鱼洞子、陡岭、胡集、贾庙、木子店

等地陆续报道的新太古代麻粒岩、花岗片麻岩、斜长角闪岩等样品内锆石 Hf 同位素和全岩的 Nd 同位素组成均表明它们可能主要来自始太古代甚至冥古宙地壳物质的再造,暗示在扬子北缘之下可能存在始太古代甚至更古老的地壳残余(邱啸飞等, 2020; Qiu *et al.*, 2021b; Tian *et al.*, 2022)。这一观点也得到扬子北缘岩浆岩中继承锆石年龄的支持。Zhou *et al.* (2020)在苏鲁造山带新元古代仰口花岗片麻岩中找到了始太古代(~3.7 Ga)岩浆锆石;Qiu *et al.* (2021a)则在北大别木子店地区的古元古代二长花岗片麻岩中发现了冥古宙(~4.03 Ga)岩浆锆石等。这些新的证据均指示在扬子克拉通北缘之下可能广泛存在冥古宙到始太古代基底岩石。显然,相对大规模分布的冥古宙-始太古代基底岩石,为后续在扬子北缘及其卷入造山带部分(如南秦岭、北大别、南大别构造带等)寻找和发现古老地壳物质残余提供了基础。

结合作者近年来在木子店和崆岭两个地区所做的工作对比,本文倾向于认为木子店和崆岭地区应具有相互独立的地壳演化历史,木子店片麻杂岩和崆岭杂岩可能代表了扬子克拉通内相互独立的两大微陆块古陆核。

5 结论

(1)对北大别构造带木子店片麻杂岩中斜长角闪片岩和英云闪长片麻岩的锆石 U-Pb 定年结果表明,其形成年龄分别为(3 653±43) Ma 和(3 701±29) Ma,为目前扬子克拉通乃至中国南方已发现的最古老岩石。它们经历了新太古代(~2.5 Ga)和早白垩世(~120 Ma)构造-热事件的影响。

(2)木子店片麻杂岩在岩石类型、时代上与崆岭杂岩均存在明显差异,暗示崆岭杂岩和木子店片麻杂岩可能代表了扬子克拉通内相互独立的微陆块古陆核。

(3)以木子店地区为代表的扬子克拉通北缘之下可能存在更为古老的基底岩石,为后续在该区域及其卷入造山带部分寻找和发现古老地壳物质残余提供了基础。

致谢:野外工作期间得到了中国地质调查局武汉地质调查中心卢山松、江拓高级工程师的大力协助,在此表示感谢!三位匿名审稿专家对本文进行了多次详细审阅并提出了诸多宝贵意见和建议,在此一并表示感谢!

References

- Bauer, A. M., Fisher, C. M., Vervoort, J. D., et al., 2017. Coupled Zircon Lu-Hf and U-Pb Isotopic Analyses of the Oldest Terrestrial Crust, the >4.03 Ga Acasta Gneiss Complex. *Earth and Planetary Science Letters*, 458: 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.10.036>
- Boehnke, P., Bell, E. A., Stephan, T., et al., 2018. Potassic, High-Silica Hadean Crust. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(25): 6353–6356. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720880115>
- Bowring, S. A., Williams, I. S., 1999. Priscoan (4.00–4.03 Ga) Orthogneisses from Northwestern Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 3–16. <https://doi.org/10.1007/s004100050465>
- Chen, Q., Sun, M., Zhao, G. C., et al., 2019. Episodic Crustal Growth and Reworking of the Yudongzi Terrane, South China: Constraints from the Archean TTGS and Potassic Granites and Paleoproterozoic Amphibolites. *Lithos*, 326: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.12.005>
- Cui, X.Z., Ren, G.M., Sun, Z.M., et al., 2020. Multiple Tectonothermal Events Recorded in the Early Precambrian Cuoke Complex in the Southwestern Yangtze Block, South China. *Earth Science*, 45(8): 3054–3069 (in Chinese with English abstract).
- David, J., Godin, L., Stevenson, R., et al., 2009. U-Pb Ages (3.8–2.7 Ga) and Nd Isotope Data from the Newly Identified Eoarchean Nuvvuagittuq Supracrustal Belt, Superior Craton, Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 121: 150–163.
- Diwu, C. R., Sun, Y., Guo, A. L., et al., 2011. Crustal Growth in the North China Craton at ~2.5 Ga: Evidence from In Situ Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopes and Whole-Rock Geochemistry of the Dengfeng Complex. *Gondwana Research*, 20(1): 149–170. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.01.011>
- Gao, S., Yang, J., Zhou, L., et al., 2011. Age and Growth of the Archean Kongling Terrain, South China, with Emphasis on 3.3 Ga Granitoid Gneisses. *American Journal of Science*, 311(2): 153–182. <https://doi.org/10.2475/02.2011.03>
- Ge, R. F., Wilde, S. A., Kemp, A. I. S., et al., 2020. Generation of Eoarchean Continental Crust from Altered Mafic Rocks Derived from a Chondritic Mantle: The ~3.72 Ga Aktash Gneisses, Tarim Craton (NW China). *Earth and Planetary Science Letters*, 538: 116225. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116225>
- Ge, R. F., Zhu, W. B., Wilde, S. A., et al., 2018. Remnants of Eoarchean Continental Crust Derived from a Subducted Proto-Arc. *Science Advances*, 4(2): eaao3159. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao3159>
- Guo, J. L., Gao, S., Wu, Y. B., et al., 2014. 3.45 Ga Granitic Gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archean Crustal Growth. *Precambrian Research*, 242: 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.12.018>
- Hacker, B. R., Ratschbacher, L., Webb, L., et al., 1998. U/Pb Zircon Ages Constrain the Architecture of the Ultrahigh-Pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1/2/3/4): 215–230. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00152-6)
- Han, Q. S., Peng, S. B., Kusky, T., et al., 2017. A Paleoproterozoic Ophiolitic Mélange, Yangtze Craton, South China: Evidence for Paleoproterozoic Suturing and Microcontinent Amalgamation. *Precambrian Research*, 293: 13–38. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.004>
- Harrison, T. M., Bell, E. A., Boehnke, P., 2017. Hadean Zircon Petrochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83(1): 329–363. <https://doi.org/10.2138/rmg.2017.83.11>
- Hawkesworth, C., Cawood, P. A., Dhuime, B., 2019. Rates of Generation and Growth of the Continental Crust. *Geoscience Frontiers*, 10(1): 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.02.004>
- Hu, J.L., Liu, J.S., Liu, A.S., et al., 2018. Age and Petrogenesis of the Porphyritic Biotite Monzogranite in the Muzidian Complex in Northern Dabie Mountains: Evidences from Zircon U-Pb Dating, Hf Isotopes and REE Geochemistry. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(4): 750–759 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J., Liu, X. C., Chen, L. Y., et al., 2013. A ~2.5 Ga Magmatic Event at the Northern Margin of the Yangtze Craton: Evidence from U-Pb Dating and Hf Isotope Analysis of Zircons from the Douling Complex in the South Qinling Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 58(28): 3564–3579. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5904-1>
- Hui, B., Dong, Y. P., Cheng, C., et al., 2017. Zircon U-Pb Chronology, Hf Isotope Analysis and Whole-Rock Geochemistry for the Neoproterozoic - Paleoproterozoic Yudongzi Complex, Northwestern Margin of the Yangtze Craton, China. *Precambrian Research*, 301: 65–85.

- <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.09.003>
- Jiang, L.L., Wu, W.P., Hu, L.J., et al., 2000. Tectonic Setting of the North Dabie Complex in the Dabie Mountains. *Geoscience*, 14(1): 29–36 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, W. F., Wu, Y. B., Yang, S. H., et al., 2009. The Oldest Basement Rock in the Yangtze Craton Revealed by Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 52(9): 1393–1399. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0135-7>
- Li, Z. S., Shan, X. L., Liu, J., et al., 2023. Late Neoproterozoic TTG and Monzogranite in the Northeastern North China Craton: Implications for Partial Melting of a Thickened Lower Crust. *Gondwana Research*, 115: 201–223. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.10.008>
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3 800 Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4): 339. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)0200339:romcit>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)0200339:romcit>2.3.co;2)
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1–2): 133–153. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.016>
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. BGC Special Publication 1a, Berkeley, 55.
- Ma, Q., Xu, Y. G., Huang, X. L., et al., 2020. Eoarchean to Paleoproterozoic Crustal Evolution in the North China Craton: Evidence from U-Pb and Hf-O Isotopes of Zircons from Deep-Crustal Xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 278: 94–109. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.09.009>
- Nie, H., Yao, J., Wan, X., et al., 2016. Precambrian Tectonothermal Evolution of South Qinling and Its Affinity to the Yangtze Block: Evidence from Zircon Ages and Hf-Nd Isotopic Compositions of Basement Rocks. *Precambrian Research*, 286: 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.10.005>
- Nutman, A. P., Friend, C. R. L., Paxton, S., 2009. Detrital Zircon Sedimentary Provenance Ages for the Eoarchean Isua Supracrustal Belt Southern West Greenland: Juxtaposition of an Imbricated ca. 3 700 Ma Juvenile Arc against an Older Complex with 3 920–3 760 Ma Components. *Precambrian Research*, 172(3/4): 212–233. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.03.019>
- Qiu, X.F., 2022. Pre-Devonian Crustal Evolution of the Northern Yangtze Craton: Evidence from U-Pb Ages and Hf Isotopes of Detrital Zircons. *Acta Geologica Sinica*, 96(11): 3784–3798 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X.F., Chen, W.X., Xu, D.L., et al., 2022. Crustal Evolution in Archean for the Kongling Complex in the Yangtze Craton Nucleus. *South China Geology*, 38(1): 56–66 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. F., Deng, X., Jiang, T., et al., 2021a. First Discovery of Hadean Xenocrystal Zircons from Granitic Gneisses in the Northern Dabie Orogen. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1775–1776. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14755>
- Qiu, X. F., Tong, X. R., Jiang, T., et al., 2021b. Reworking of Hadean Continental Crust in the Dabie Orogen: Evidence from the Muzidian Granitic Gneisses. *Gondwana Research*, 89: 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.08.014>
- Qiu, X.F., Jiang, T., Wu, N.W., et al., 2020. Neoproterozoic Crustal Rocks and Paleoproterozoic Migmatization in the Dabie Orogen: Evidence from Zircon U-Pb Age and Hf Isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 729–738 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. F., Ling, W. L., Liu, X. M., et al., 2011. Recognition of Grenvillian Volcanic Suite in the Shennongjia Region and Its Tectonic Significance for the South China Craton. *Precambrian Research*, 191(3/4): 101–119. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.011>
- Ren, G.M., Pang, W.H., Wang, L.Q., et al., 2020. Detrital Zircons of 3.8 Ga in Southwestern Yangtze Block and Its Geological Implications. *Earth Science*, 45(8): 3040–3053 (in Chinese with English abstract).
- Sun, M., Chen, N., Zhao, G., et al., 2008. 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. *American Journal of Science*, 308(4): 469–483. <https://doi.org/10.2475/04.2008.03>
- Tian, Y., Wang, W., Jin, W., et al., 2022. Neoproterozoic Granitic Rocks from the Jiamiao Area of the Dabie Orogen: Implications on the Formation and Early Evolution of the Yangtze Craton. *Science China Earth Sciences*, 65(8): 1568–1585. <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9935-5>
- Tu, C., Zhang, S.B., Su, K., et al., 2021. Zircon U-Pb Dating and Lu-Hf Isotope Results for Feidong Complex:

- Implications for Coherent Basement of the Yangtze Craton. *Earth Science*, 46(5): 1630–1643 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., 2022. How to Form the Oldest Continental Crust?. *Earth Science*, 47(10): 3776–3778 (in Chinese).
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Dong, C. Y., et al., 2009. The Oldest Rocks and Zircons in China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1793–1807 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Xie, H. Q., Dong, C. Y., et al., 2019. Hadean to Paleoproterozoic Rocks and Zircons in China. In: Kranendonk, M. J. V., ed., *Earth's Oldest Rocks* (Second Edition). Elsevier, Amsterdam, 293–327.
- Wan, Y. S., Xie, H. Q., Wang, H. C., et al., 2021. Discovery of ~3.8 Ga TTG Rocks in Eastern Hebei, North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1321–1333 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K., Dong, S. W., Li, Z. X., et al., 2018. Age and Chemical Composition of Archean Metapelites in the Zhongxiang Complex and Implications for Early Crustal Evolution of the Yangtze Craton. *Lithos*, 320: 280–301. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.09.027>
- Wang, Z. J., Wang, J., Du, Q. D., et al., 2013. The Evolution of the Central Yangtze Block during Early Neoproterozoic Time: Evidence from Geochronology and Geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 77: 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.08.013>
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., Gao, S., et al., 2008. Zircon U-Pb Age and Trace Element Evidence for Paleoproterozoic Granulite-Facies Metamorphism and Archean Crustal Rocks in the Dabie Orogen. *Lithos*, 101(3/4): 308–322. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.07.008>
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., Zhang, S. B., et al., 2007. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope Compositions of Migmatite from the North Dabie Terrane in China: Constraints on Partial Melting. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(9): 991–1009. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00738.x>
- Wu, Y. B., Zhou, G. Y., Gao, S., et al., 2014. Petrogenesis of Neoproterozoic TTG Rocks in the Yangtze Craton and Its Implication for the Formation of Archean TTGS. *Precambrian Research*, 254: 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.08.004>
- Yang, C., Wei, C. J., 2017. Two Phases of Granulite Facies Metamorphism during the Neoproterozoic and Paleoproterozoic in the East Hebei, North China Craton: Records from Mafic Granulites. *Precambrian Research*, 301: 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.09.005>
- Zhai, M. G., Zhao, L., Zhu, X. Y., et al., 2020. Review and Overview for the Frontier Hotspot: Early Continents and Start of Plate Tectonics. *Acta Petrologica Sinica*, 36(8): 2249–2275 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Wu, P., et al., 2020. The Nature of Subduction System in the Neoproterozoic: Magmatic Records from the Northern Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 347: 105834.
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2006. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Evidence for 3.8 Ga Crustal Remnant and Episodic Reworking of Archean Crust in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1–2): 56–71. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.027>
- Zhao, T. Y., Li, J., Liu, G. C., et al., 2020. Petrogenesis of Archean TTGS and Potassic Granites in the Southern Yangtze Block: Constraints on the Early Formation of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 347: 105848. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105848>
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2004. 3.6 Ga Lower Crust in Central China: New Evidence on the Assembly of the NCC. *Geology*, 32: 229–332.
- Zheng, Y. F., Zhao, G. C., 2020. Two Styles of Plate Tectonics in Earth's History. *Science Bulletin*, 65(4): 329–334. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.12.029>
- Zhou, G. Y., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2015. The 2.65 Ga A-Type Granite in the Northeastern Yangtze Craton: Petrogenesis and Geological Implications. *Precambrian Research*, 258: 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.01.003>
- Zhou, K., Chen, Y. X., Zhang, S. B., et al., 2020. Zircon Evidence for the Eoproterozoic (~3.7 Ga) Crustal Remnant in the Sulu Orogen, Eastern China. *Precambrian Research*, 337: 105529. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105529>

中文参考文献

- 崔晓庄, 任光明, 孙志明, 等, 2020. 扬子陆块西南缘早前寒武纪摄科杂岩记录的多期岩浆-变质事件. *地球科学*, 45(8): 3054–3069.
- 胡俊良, 刘劲松, 刘阿睢, 等, 2018. 北大别木子店岩体斑状黑云二长花岗岩的年龄与成因: 锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素与稀土元素证据. *矿物岩石地球化学通报*, 37(4): 750–759.
- 江来利, 吴维平, 胡礼军, 等, 2000. 大别山北大别杂岩的大地构造属性. *现代地质*, 14(1): 29–36.

- 邱嘯飞, 2022. 扬子克拉通北部前泥盆纪地壳演化: 来自碎屑锆石 U-Pb 和 Hf 同位素证据. 地质学报, 96(11): 3784–3798.
- 邱嘯飞, 陈伟雄, 徐大良, 等, 2022. 扬子陆核崆岭杂岩太古宙地壳演化. 华南地质, 38(1): 56–66.
- 邱嘯飞, 江拓, 吴年文, 等, 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. 地质学报, 94(3): 729–738.
- 任光明, 庞维华, 王立全, 等, 2020. 扬子陆块西南缘 3.8 Ga 碎屑锆石及其地质意义. 地球科学, 45(8): 3040–3053.
- 涂城, 张少兵, 苏克, 等, 2021. 肥东杂岩锆石 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素: 对扬子克拉通统一结晶基底的限制. 地球科学, 46(5): 1630–1643.
- 万渝生, 2022. 最古老陆壳是如何形成的? . 地球科学, 47(10): 3776–3778.
- 万渝生, 刘敦一, 董春艳, 等, 2009. 中国最老岩石和锆石. 岩石学报, 25(8): 1793–1807.
- 万渝生, 颀颀强, 王惠初, 等, 2021. 冀东地区 ~3.8 Ga TTG 岩石发现. 地质学报, 95(5): 1321–1333.
- 翟明国, 赵磊, 祝禧艳, 等, 2020. 早期大陆与板块构造启动: 前沿热点介绍与展望. 岩石学报, 36(8): 2249–2275.