

华北克拉通东南部太古宙英云闪长岩— 奥长花岗岩—花岗闪长岩形成及演化

刘磊^{1,2)}, 康诗胜^{1,2)}, 刘恒^{1,2)}, 胡天杨^{1,2)}, 周炜鉴³⁾, 张云飞^{1,2)}

1) 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙, 410083;

2) 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙, 410083

3) 湖南工程职业技术学院自然资源学院, 长沙, 410083



内容提要: 华北克拉通是世界范围内少数保存有大量太古宙英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩 (TTG) 及多期次岩浆事件记录的克拉通之一, 相关研究对揭示全球太古宙时期壳—幔动力学演化过程具有重要的指示意义。本文在华北克拉通东南部归纳总结了 52 个太古宙时期 TTG 岩石样品的有效地球化学资料。根据地区与岩石成因差异, 将样品主要分为三类: 霍邱、五河地区低铝、低压型 TTG 岩石, 鲁西 (C 带)、丰县张河地区中铝、中低压型 TTG 岩石以及登封地区高铝、高压型 TTG 岩石。华北克拉通东南部的 TTG 片麻岩经历了两期明显的地壳生长事件: 2.95~2.70 Ga, 2.58~2.48 Ga (峰值为约 2.52 Ga)。主、微量数据表明, 华北克拉通东南部的 TTG 片麻岩主体源于低钾镁铁质岩石的部分熔融, 并且源区可能受到来自于壳—幔相互作用的影响。其中, 霍邱、登封地区的 TTG 分别受到流体、熔体交代作用; 鲁西和张河地区则同时受到熔体和流体交代作用。霍邱地区 TTG 片麻岩形成于约 2.70 Ga, 成因可能受鲁西地区地幔柱垂向构造的影响; 太古宙末期, 鲁西及张河地区与登封地区 TTG 片麻岩的形成具有一定联系, 主要表现为受洋内岛弧地体侧向的洋内俯冲与弧陆碰撞增生控制, 并经历了区域麻粒岩相变质作用。

关键词: TTG 片麻岩; 壳—幔相互作用; 华北克拉通; 弧陆增生

组成陆壳的岩浆岩中, 英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩 (Tonalite—Trondhjemite—Granodiorite, TTG) 是最主要的深成侵入岩 (赵国春和张国伟, 2021; Condie et al., 2009)。因此, TTG 岩石在理解太古宙陆壳的形成和演化方面起着至关重要的作用 (吴鸣谦等, 2014; 姜杨等, 2014; 葛宁洁等, 2001; 王金芳等, 2021)。目前, 有关太古宙 TTG 岩石成因机制的争议主要集中在三方面: (1) 源岩性质; (2) 动力学体制; (3) 残留相矿物本身的地球化学性质。前人早期统计了全球太古宙 TTG 岩石 (约 4.0~2.50 Ga) 的地球化学资料, 发现随着 TTG 岩石中 $Mg^\#$ 及 Cr 和 Ni 等元素含量逐渐增加, $CaO+Na_2O$ 和 Sr 元素含量亦同步增加 (Martin et al., 2005)。据此, 他们提出随着地球的不断冷却, 俯冲板片进行部分熔融的深度也在逐渐增加, 进而熔体与地幔楔相互作用程度不断增强。在动力学体制方面, 部分学者认为太古宙 TTG 片麻岩可能形成

于俯冲构造体制, 并与俯冲板片或者岛弧根部物质的部分熔融有关 (Martin et al., 2005; Wang Wei et al., 2013)。相比而言, 依据太古宙 TTG 片麻岩的面状分布、缺少与地幔物质的相互作用以及与科马提岩的紧密共生等特征, 其他学者提出垂向构造成因体制 (如: 地幔柱模式或者拆沉模式等) (Smithies et al., 2009; Wu Meiling et al., 2016; Nebel et al., 2018)。与 TTG 熔体平衡的残留相除了石榴子石之外, 常见的还有斜长石, 含 Ti 矿物 (如金红石、钛铁矿、榍石), 角闪石和辉石。在镁铁质岩石熔融时, Al_2O_3 、 Na_2O 和 Sr 优先进入斜长石, 其稳定域小于 1.5 GPa (Moyen and Steven, 2006), 因此, 斜长石出现在残留相中时, 会导致 TTG 熔体成分中 Al_2O_3 、 Na_2O 和 Sr 含量的降低。实验研究表明, TTG 熔体中 Nb 和 Ta 的含量主要受残留相中金红石的控制, 当金红石出现时, TTG 熔体中的 Nb 和 Ta 往往出现大幅度降低, 其稳定域一般认为在 1.5 GPa 之上, 除

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号: 41972198)、湖南省科技创新团队项目 (编号: 2021RC4055) 和湖南省自然科学基金资助项目 (编号: 2022JJ30702) 的成果。

收稿日期: 2022-03-20; 改回日期: 2022-08-15; 网络首发: 2022-08-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.08.055

作者简介: 刘磊, 男, 1984 年生, 教授, 博士生导师; 主要从事前寒武纪地质与矿床地球化学研究; Email: liu01@ustc.edu.cn。

了含 Ti 矿物,另一个控制熔体 Ti—Nb—Ta 含量的矿物是角闪石,也是高压角闪岩相的主要矿物 (Xiong Xiaolin et al., 2005)。

Moyen 等 (2011) 根据岩石地球化学关键指标 (即 Sr 含量、Sr/Y 和 La/Yb 值),将太古宙 (约 3.50 ~ 2.50 Ga) TTG 划分为高压 (HP)、中压 (MP) 和低压 (LP) 型,并将其成因分别归类于俯冲、后碰撞伸展以及地幔柱等不同构造体制。大多数 TTG (约 80%) 属于源自加厚下地壳部分熔融 (深度约 30 ~ 45 km) 的 LP 和 MP 型,而剩余 20% 的 HP 型 TTG,被解释为源自俯冲板块 (> 60 km)。Wang Wei 等 (2017) 通过对辽北地区新太古代晚期 TTG 片麻岩的深入研究,提出不同压力类型 TTG 片麻岩可能形成于后撤型增生造山体系的不同构造位置,其中高压型 TTG 片麻岩与短暂的构造挤压有关,而中、低压类型形成于后撤伸展阶段。

值得注意的是,TTG 通常被认为是由成分类似于现今溢流玄武岩的富水的镁铁质源岩 (Martin et al., 2014),通过部分熔融或分离结晶过程形成的 (Bédard, 2006; Smithies, 2000; Laurent et al., 2020)。部分学者提出太古宙高压型 TTG 片麻岩的“高压”属性可能与角闪石的分离结晶或者斜长石堆晶有关 (Bai Xiang et al., 2014; Laurent et al., 2020)。尽管如此,绝大部分太古宙早期 (> 3.0 Ga) TTG 片麻岩属于中、低压类型,而高压型 TTG 片麻岩直到太古宙晚期 (约 3.0 ~ 2.50 Ga) 才大量产出 (Wang Wei et al., 2017; Liu Heng et al., 2020; Ge Rongfeng et al., 2018)。近年来,TTG 的地球化学差异性主要被解释为与不同深度的部分熔融有关 (Moyen, 2011; Moyen and Martin, 2012)。最近的研究表明,太古宙 TTG 片麻岩可能来自:(1)富集岩石圈地幔中镁铁质熔体的分离结晶;(2)加厚下地壳含水镁铁质岩石的部分熔融;(3)俯冲大洋板块的熔融 (包括浅俯冲和深俯冲),浅俯冲大洋板块沿着壳—幔边界底侵,最终并入大陆地壳 (Sun Guozheng et al., 2021)。此外,在深俯冲期间,H₂O 作为熔剂在不同 TTG 熔体的形成中起着至关重要的作用,这有助于产生成分多样性的 TTG (Moyen, 2011; Pourteau et al., 2020)。

另一方面,虽然关于陆壳如何形成和演化一直存在较多的争议,但是,许多大陆生长模型表明,70%以上的现代大陆地壳形成于太古宙末期之前 (Armstrong, 1981; Mc Lennan and Taylor, 1982);作为太古宙克拉通的主要成分,TTG 片麻岩占太古宙

大陆出露面积的 60% ~ 70%,被认为是研究前寒武纪地壳岩浆作用和变质演化的重要样本 (Zhao Guochun et al., 2008; 周艳艳等, 2009; Moyen and Martin, 2012)。换言之,太古宙陆壳 TTG 片麻岩是现今陆壳的最重要组成部分 (Armstrong, 1981; Dhuime et al., 2012; Hawkesworth et al., 2013)。因此,开展太古宙 TTG 片麻岩的成因机制研究是探讨早期大陆地壳起源和形成演化过程的关键 (万渝生等, 2021)。

克拉通内部的古老地体为了解太古宙大陆生长和总体构造演化机制提供了一个良好窗口 (Deng Hao et al., 2019)。华北克拉通在太古宙晚期逐渐稳定成为克拉通,是中国最古老的克拉通之一,经历了多阶段复杂的构造演化,是研究陆壳生长演化的天然实验室 (Condie, 2000; Cawood et al., 2013; Zhou Yanyan et al., 2014; Li Lei and Zhai Weijian, 2019)。众所周知,包括东南缘在内的华北克拉通经历了两期地壳生长事件,分别为新太古代早期 (2.85 ~ 2.70 Ga) 和新太古代晚期 (2.58 ~ 2.48 Ga)。经过这两次长时间的陆壳生长事件,华北克拉通拥有了初始的克拉通属性 (肖玲玲等, 2019; 黄道袁等, 2020; 第五春荣, 2021)。然而,与世界上大多数地区的克拉通不同,2.60 ~ 2.50 Ga 是华北克拉通构造热事件发育的最主要时期 (Condie et al., 2009)。实际上,对于华北克拉通太古宙基底出露较好的地区,前人已经开展了多方面的探索,但在太古宙基底未出露或极少出露的地区,尤其是东南缘的霍邱、五河、登封、鲁西 (C 带)、张河等地区,这一方面的研究较薄弱。因此,我们以华北克拉通太古宙 TTG 为研究对象,通过收集前人在该区的地层学、岩石学、地球化学、年代学和同位素数据,结合已发表的研究成果,对上述地区早前寒武纪地质演化开展系统的对比研究。本文重点讨论以下问题:通过分析不同区域之间 TTG 片麻岩的差异以及规律,对其进行分类汇总,并研究其岩石构造成因、源区性质以及动力学体制,进而揭露太古宙地壳生长过程和模式,为整个华北克拉通的基底和构造属性提供研究思路。

1 华北克拉通东南缘太古宙地壳物质的分布

华北克拉通作为中国最古老的克拉通地块之一 (图 1a),虽然经历地壳多期生长,但是主要形成于新太古代时期,在过去的几十年里引起了世界范围

内地球科学家的广泛关注和研究。华北克拉通陆壳生长在新太古代早期表现为地幔岩浆作用,并且作用范围非常广泛。新太古代晚期虽然地幔物质有所加入,但是壳内再循环作用起着主导作用(万渝生等,2015; Wan Yusheng et al. , 2015)。

普遍认为,华北克拉通是多个微块体拼合的结果,然而,对于其具体划分方法一直存在不同的观点(图 1b, 图 2)。产生不同观点的原因是由于对于太古宙陆壳基底岩石性质的认知不够准确清晰。以往观点有:1)华北克拉通通常被认为由横贯华北造山

带的东、西两个地块在约 1.85 Ga 时合并而成(Zhao Guochun et al. ,2005),皖北五河地区的五河杂岩和霍邱地区的霍邱杂岩归属为胶—辽—吉带穿过郯庐断裂带的延伸。因此,五河和霍邱地区的陆壳形成及演化应该类似于胶—辽—吉带(刘超辉和蔡佳,2017; Wang Wei et al. , 2017; Lu Junsheng et al. , 2021);2)Zhai Mingguo and Santosh(2011)认为华北克拉通大致由胶辽、许昌、济宁和阿拉善等七个微陆块组成,它们于 2.60~2.53 Ga 拼合完成克拉通化。在该体系中,徐淮地区的早前寒武纪单元属于徐淮

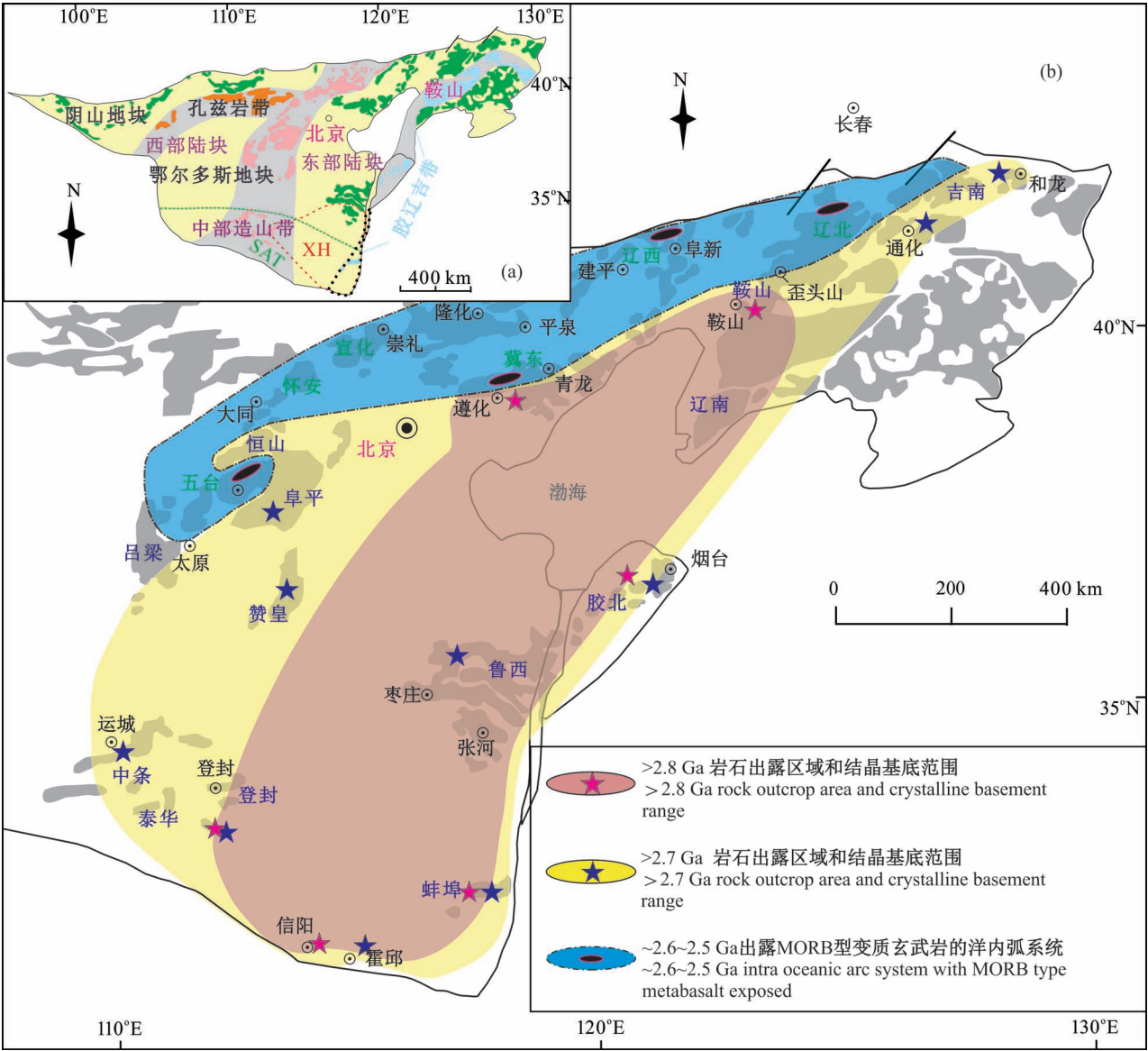


图 1 华北克拉通基底构造单元划分图(a)(据 Zhao Guochun et al. , 2005)、华北克拉通东部陆块新太古代地质简图(b)(据 Zhao Guochun et al. , 2005, Wang Wei et al. , 2015)

Fig. 1 Tectonic subdivision of the China (a) (after Zhao Guochun et al. , 2005) and Neoproterozoic geological map of the eastern continental block of the North China Craton (c, after Zhao Guochun et al. , 2005, Wang Wei et al. , 2015)

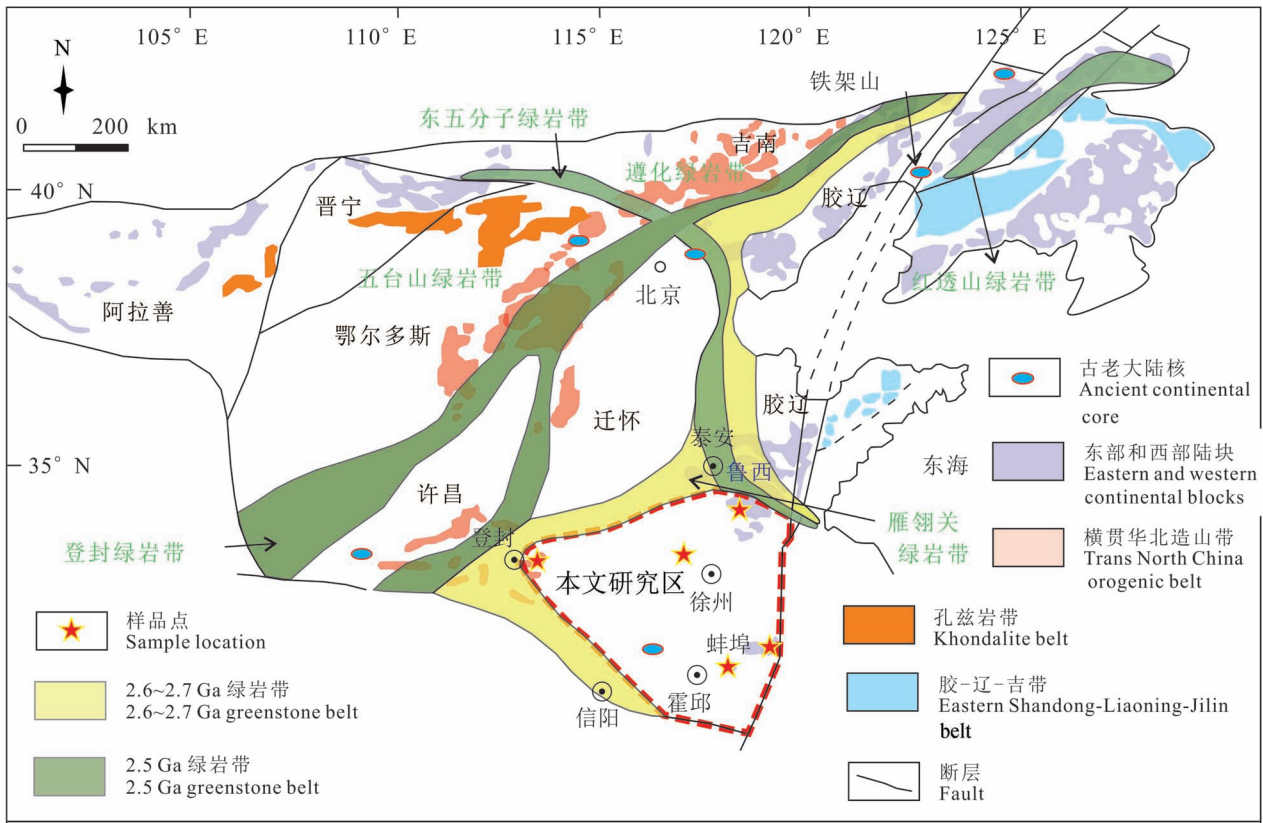


图 2 华北克拉通基底构造单元划分图
(据 Zhai Mingguo et al. , 2011)

Fig. 2 Tectonic subdivision of the North China Craton
(after Zhai Mingguo et al. , 2011)

微陆块 (赵宗溥, 1993; 翟明国, 2012); 3) Wan Yusheng et al. (2015) 以 ≥ 2.60 Ga 的岩石的地理位置为依据, 通过对早期构造—热事件的分析, 将华北克拉通划分为 3 个古陆块, 其中霍邱、五河、登封形成时间为约 2.50 Ga, 华北克拉通东南部大部分基底隶属于南部古陆块, 它们于古元古代末期 (1.97 ~ 1.80 Ga) 完成克拉通化 (Wan Yusheng et al. , 2015; Diwu Chunrong et al. , 2016; 第五春荣等, 2018)。

华北克拉通东南部的太古宙变质陆壳基底包括但不限于霍邱群、五河群、泰山群、济宁群以及登封群。通过前人文章对钻孔岩芯的描述, 发现上述地区太古宙陆壳存在一些共性岩石, 如大规模的 TTG 片麻岩和以发育条带状铁建造 (Banded iron formation, BIF) 为特征的表壳岩系列, 同时在地层序列上也存在对比性 (图 3)。霍邱杂岩和五河杂岩主要包括 TTG 片麻岩、石英岩、云母片岩、变粒岩、大理岩、条带状铁建造和斜长角闪岩等岩石组合, 并报道有 2.9 Ga 的 TTG 片麻岩。而徐州张河和鲁西 C

带济宁岩群的岩芯主要以变质火山岩和 BIF 铁矿为主, 同时发育有约 2.5 Ga 的 TTG 片麻岩。登封地区岩性则以斜长角闪岩、BIF 铁矿以及约 2.5 Ga 的 TTG 片麻岩为主 (杨恩秀等, 2008; Yang et al. , 2014; 王伟等, 2015)。本文对华北克拉通东南部地区出露太古宙岩石较少地区的 TTG 数据进行归纳整理, 通过对比分析不同区域之间 TTG 片麻岩的差异以及规律, 我们对以下科学问题进行了初步探讨: 该地区不同区域间 TTG 片麻岩的构造成因, 源区性质是否一致, 地壳生长模式是否相关, 这对理解全球太古宙时期壳—幔动力学演化过程具有一定的指示意义。

1.1 五河和霍邱变质基底

五河杂岩被称为五河群 (也称为蚌埠群), 是经历中高级变质作用的一套地层, 主要出露于蚌埠隆起带, 形成年龄跨度很大, 并且岩性复杂。构造格局总体是近东西向的蚌埠隆起与北北东向的断裂系统相叠加的构造格局 (图 4a、b)。区域内花岗质岩石

广泛出露,前人的研究成果包含大量的岩石学和地球化学资料(Kang and Schmidt, 2017; Liu Lei et al., 2017; Wang Wei et al., 2017)。

五河杂岩于皖北五河及蚌埠、凤阳一带出露,西边距离郯庐断裂大约 100 km。主要包括深部的变质基性岩和浅部的表壳岩以及变质的花岗岩侵入体。此外,以花岗岩和花岗闪长片麻岩为代表的花岗岩类也广泛发育。五河地区太古宙时期 TTG 岩石多为钻孔资料(图 3),野外露头极少。锆石年代学数据表明,五河群经历了新太古代晚期岩浆事件以及古元古代中期多期次变质和深熔作用。

靠近华北克拉通东南缘的霍邱地区的表壳岩被认为代表太古宙基底岩石,并以产出条带状铁建造

(BIF)而闻名(邢凤鸣和任思明,1984; Wan Yusheng et al., 2010a; 杨晓勇等,2012; Liu Lei et al., 2016)。华北克拉通东南缘的霍邱杂岩以新太古代灰色片麻岩、角闪岩和大量变质沉积岩为主,上面覆盖着新元古代—古元古代地层和第四纪沉积物。霍邱和五河变质基底南北长 60 多千米,总面积 1500 多平方千米。由于出露在地表的岩石样品较少,该地区的地质格架是通过岩性组合和钻孔相关数据推断出来的。根据钻探数据,霍邱群自下而上可以分为花园组、吴集组和周集组(图 3, 图 4c)。其中,花园组以经历混合岩化的斜长角闪岩和角闪黑云混合岩类为主。吴集组可分为上、下两部分,下部以黑云斜长片麻岩和角闪黑云斜长变粒岩等变质岩为主,

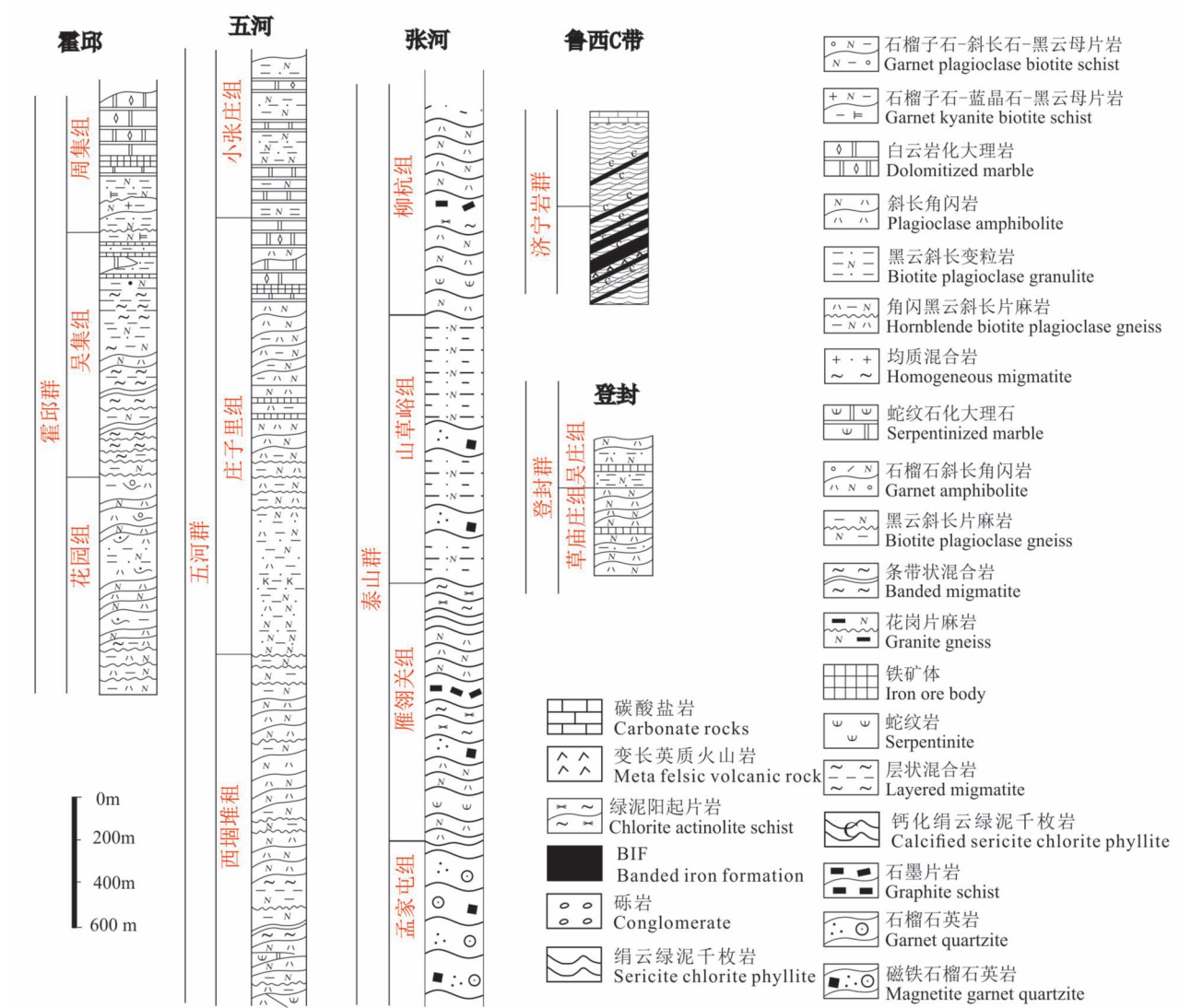


图 3 华北克拉通东南部地层岩性对比柱状图(据杨恩秀等, 2008; Yang Xiaoyong et al., 2014; 王伟等,2015)
Fig. 3 Stratigraphic lithology correlation histogram of Southeast of North China Craton(after Yang Enxiu et al., 2008&; Yang Xiaoyong et al., 2014; Wang Wei et al., 2015&)

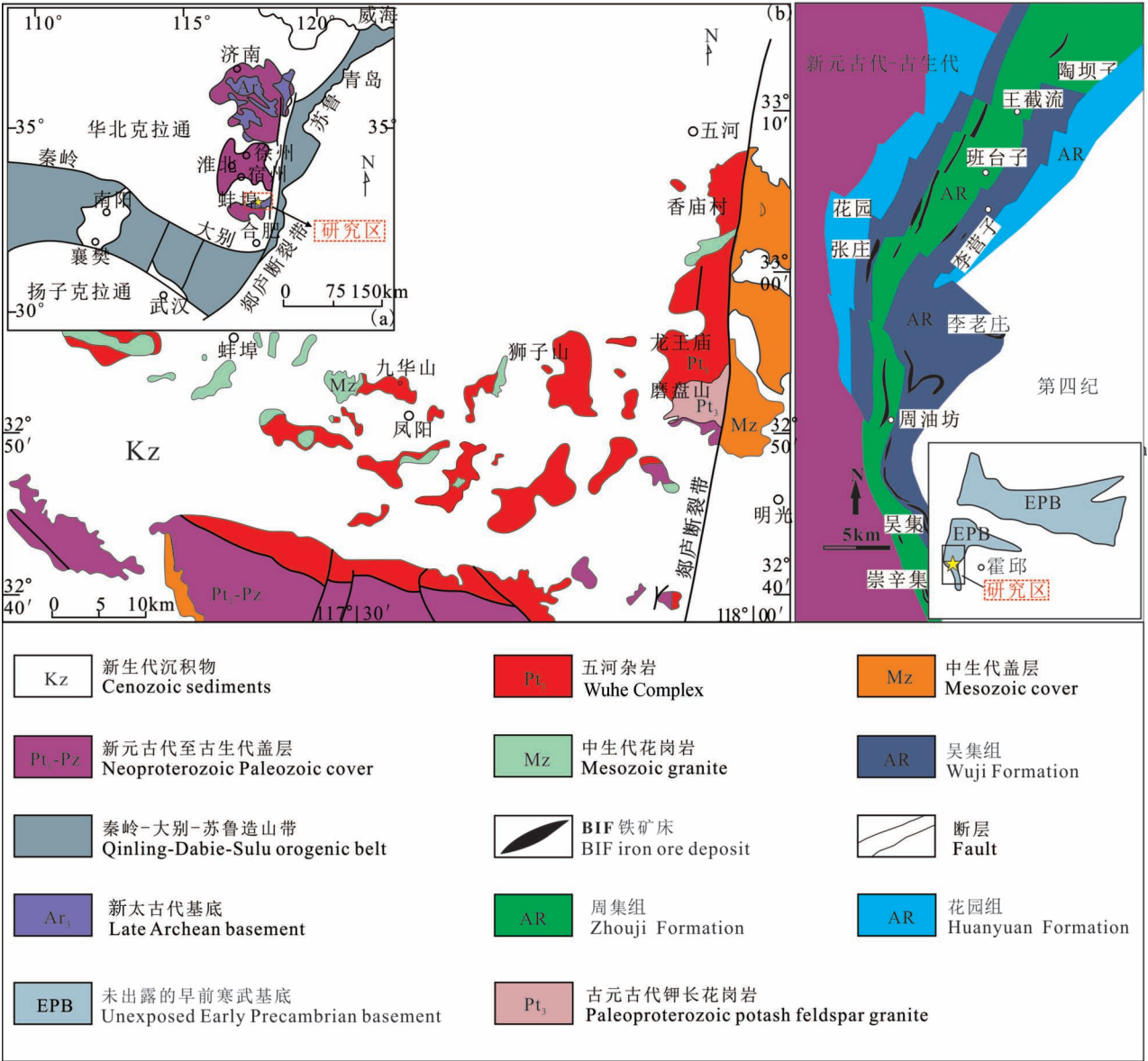


图 4 五河(a)、(b) (据刘贻灿等,2015)和霍邱(c) (据 Liu Lei et al. , 2016)地质简图
Fig. 4 Geological map of Wuhe (a), (b), (after Liu Yican et al. , 2015&) and Huoqiu (c) (after Liu lei et al. , 2016)

上部少量的岩性与下部相同,但是以磁铁石英岩、伴生的白云石大理岩和斜长角闪岩为代表。周集组总体为白云大理岩组合,下部由混合岩、伴生的斜长石角闪岩和磁铁矿等组成,上部以白云石化大理岩为主(Wan Yusheng et al. , 2010b; Yang Xiaoyong et al. , 2014)。霍邱杂岩识别出了年龄为 2.75 Ga 的英云闪长岩和 2.9 Ga 的 TTG 岩石(Wan Yusheng et al. , 2010b; Liu Lei et al. , 2016)。

1.2 登封杂岩

位于华北克拉通登封地区的太古宙岩石称为登封杂岩(Zhang et al. , 1985)。基底年龄广泛分布,

从较老的新太古代登封群到较年轻的古元古代嵩山群都有分布,花岗质岩石呈近南北向分布(图 4)。构成陆壳主要成分的 TTG 质片麻岩和表壳岩在空间上密切相关,并从西边侵入到登封群中,嵩山群不整合在太古宙基底之上。

登封地区的片麻岩主要由大塔寺区域的英云闪长质片麻岩、会善寺区域的奥长花岗质片麻岩以及牛屋栏区域的奥长花岗片麻岩组成。登封杂岩主要由斜长角闪岩、角闪变粒岩、BIF 铁矿等组成,表现出角闪岩相变质作用(图 3)。花岗质岩石主要以新太古代晚期 TTG 片麻岩和正长花岗岩为代表(Zhou

Yanyan et al. , 2011; Wang Wei et al. , 2017)。登封杂岩的围岩可分为早期的 TTG 深成岩体和晚期钾质花岗岩 (Zhang Guowei et al. , 1985; Guo Anlin, 1988; Kusky and Zhai Mingguo, 2012)。它们具有片麻状组构,表现为斜长石与角闪石和/或黑云母呈层状排列 (Diwu Chunrong et al. , 2011; Deng Hao et al. , 2016)。

1.3 鲁西地区 C 带和徐州张河地区

前人对于鲁西地区研究较为深入,并取得了很多重要成果,因为它在太古宙时期构造岩浆热事件稳定,直到古元古代才遭受变质活动,保存早期地壳记录完好 (Wang Wei et al. , 2013; 任鹏等, 2015; Ren Peng et al. , 2016; Dong Chunyan et al. , 2017; Gao Lei et al. , 2020)。鲁西地区发育了 2.75~2.60 Ga 和 2.60~2.50 Ga 两期构造岩浆事件 (Wan Yusheng et al. , 2011, 2014)。Wan 等 (2010a) 根据年代学以及空间位置差异,将鲁西地区的太古宙陆壳基底分为三个带: A 带,位于鲁西地区东北部,形成时代为新太古代晚期,主要由混合岩和壳源花岗岩组成; B 带,位于中部 (A 带的西南方向), 含有新太古代早期 (2.70 Ga) 的 TTG 岩石,并以发育来自于地幔作用的科马提岩为主要特征; C 带,位于西南部,为本次统计数据的主要区域,改区域露头明显可见不同类型岩石之间的岩浆混合作用。该地区发育有条带状 TTG 岩石,其岩石的结晶年龄峰值为

2.53~2.52 Ga, 岩浆作用十分强烈,主要产于泰山岩群、孟家屯岩组以及济宁岩群中 (图 3)。

鲁西 C 带平邑—费县地区出露的新太古代 TTG 片麻岩侵入早期表壳岩石中。这些 TTG 片麻岩经历了角闪岩相变质和强烈变形作用。新太古代晚期 (2.56~2.52 Ga) 的表壳岩由黑云母片麻岩、角闪片岩、变质砾岩、条带状铁建造 (BIF) 和绢云浅粒岩组成 (Wang Wei et al. , 2011)。新太古代晚期的侵入岩主要由 TTG 富钠型花岗片麻岩、辉长岩、石英闪长岩和富钾花岗岩组成。这些岩石大多数遭受深熔作用,与新太古代表壳岩具有相同的 NW—SE 向构造面理 (片麻理),表明区域变形可能发生在新太古代晚期花岗岩侵位之后 (Sun Di et al. , 2019)。

枣庄、济宁地区新太古代晚期 (约 2.56~2.52 Ga) 岩石组合,主要由砾岩、条状铁层、黑云母片麻岩、角闪片岩和绢云母千枚岩组成。同时带上发育有肥城—枣庄古岩浆弧 (图 6) 位于鲁西 C 带西南侧,其中形成的 TTG 组合分为两组,分别是山草峪组和驿山组。

徐州张河地区 TTG 片麻岩位于华北克拉通东南缘,该地区太古宙陆壳基底岩石出露很少,变质基底主要包括泰山岩群和徐宿地区班井和夹沟出露的捕虏体。江苏省地矿局第五地质大队对徐州西北方向 100 km 处的丰县张河地区开展了一系列勘探工作,发现了 BIF 型铁矿。通过钻孔岩芯资料看,基底

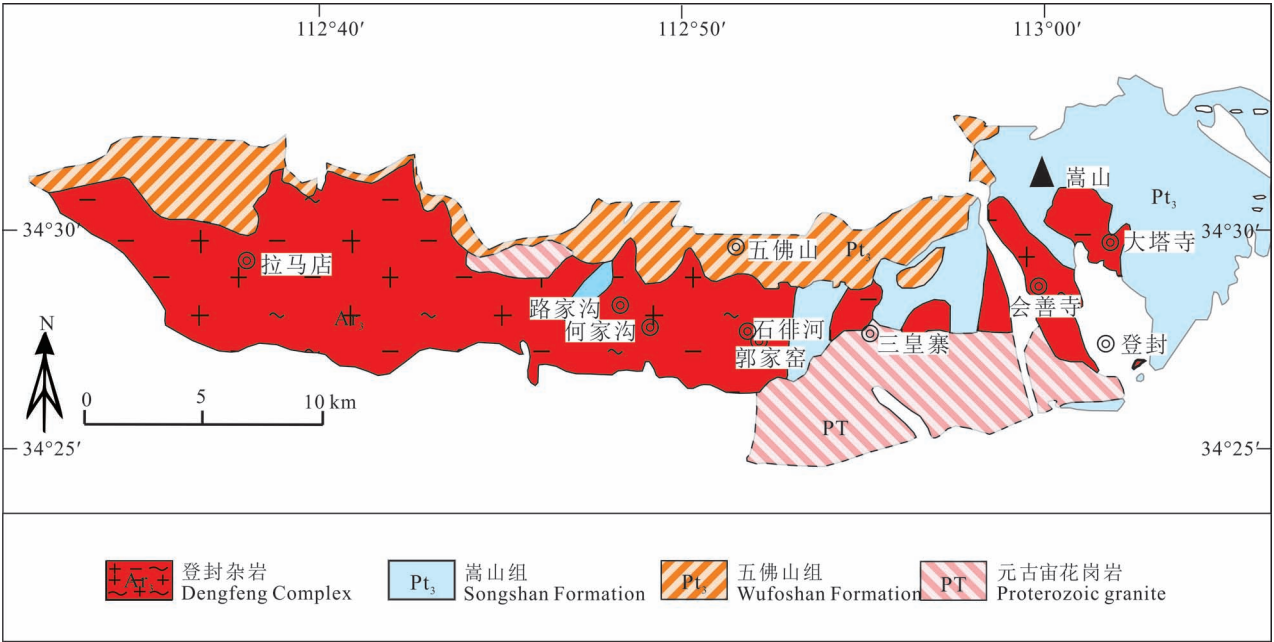


图 5 登封地区地质简图 (据 Diwu Chunrong et al. , 2011)

Fig. 5 Geological map of Dengfeng area (after Diwu Chunrong et al. , 2011)

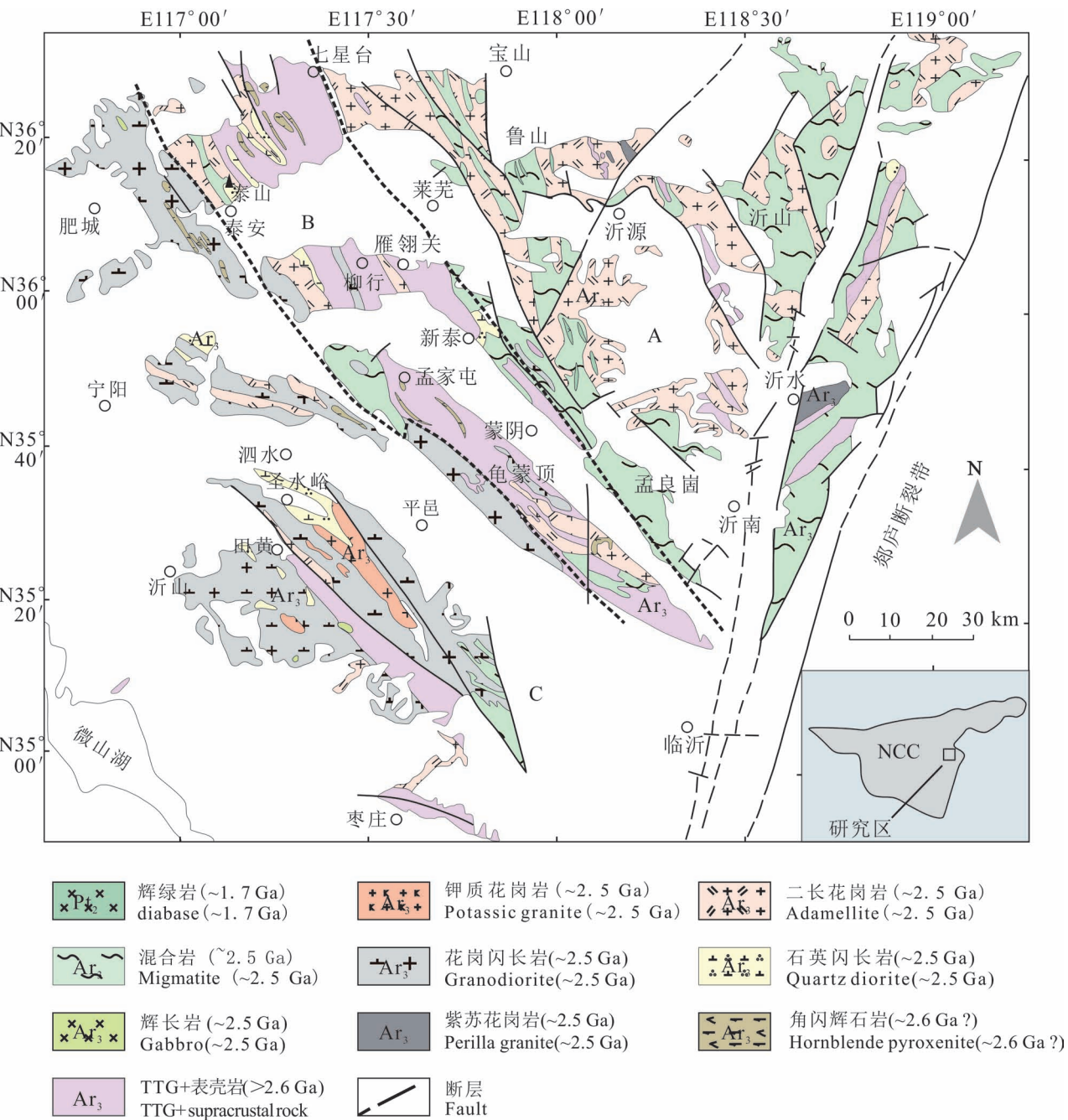


图 6 鲁西地质简图(据 Wan Yusheng et al. , 2010a)

Fig. 6 Geological map of western Shandong(after Wan Yusheng et al. , 2010a)

下部的岩性以长英质角闪黑云斜长片麻状混合岩、混合花岗片麻岩为主,夹少量斜长角闪岩、混合岩化黑云斜长片麻岩(图 3)。特征矿物石榴子石较少出现,石英含量较高,属中压型低角闪岩相。中部的岩性以混合花岗片麻岩、黑云斜长变粒岩等为主,夹少量斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩。特征矿物石榴子石经常出现,十字石零星出现,属中压型低角闪岩相。上部的岩性以二长混合片麻岩、黑云斜长混合

片麻岩为主,夹少量斜长角闪岩。特征矿物绿帘石、角闪石较常出现,属绿帘—角闪岩相。综合该地区的成岩年龄数据(待发表资料),基底存在太古宙 TTG 岩石。

2 地球化学特征和岩石成因

在前人根据太古宙绿岩带的划分中,华北克拉通东南部具有统一的陆壳基底,是组成华北克拉通

的七个微陆块之一的重要组成部分(翟明国,2012; Zhai Mingguo and Santosh, 2011)。本文对该地区太古宙基底岩石及相关钻孔数据进行了统计分析,尤其是对华北克拉通东南缘 TTG 片麻岩数据进行详

细分析,具体表现为通过对该地区的东南部(霍邱、五河)、西部(登封)地区以及中北部(鲁西 C 带、张河),TTG 岩石的年代学、岩石学、地球化学对比分析,探讨其新太古代动力学体制,进而对徐淮地区在

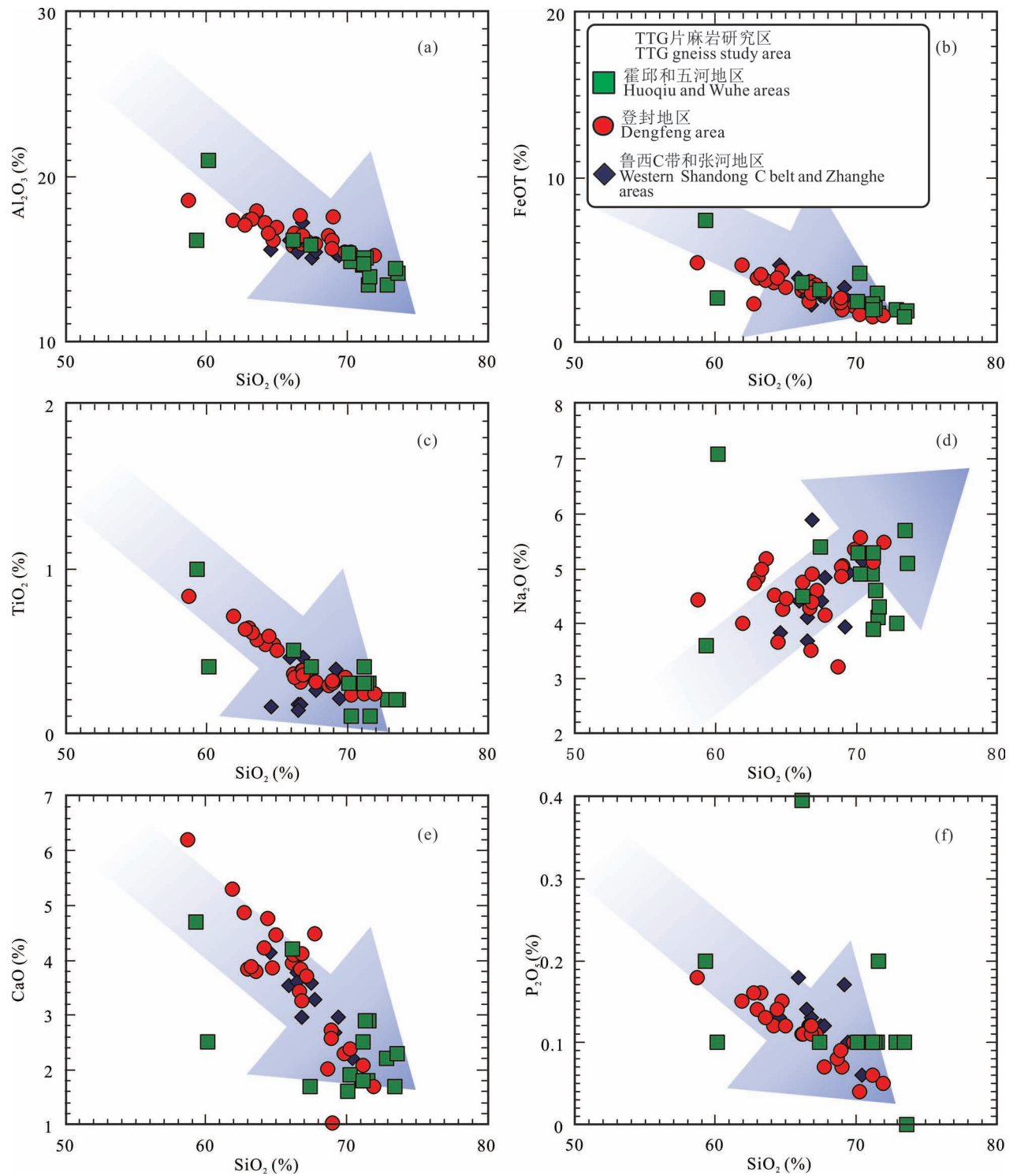


图7 华北克拉通东南部新太古代时期 TTG 岩石的 SiO₂ 与主量元素相关哈克图解
Fig. 7 Harker diagram of relationship between SiO₂ and major elements of Neoproterozoic TTG rocks in Southeast of North China Craton

新太古代时期如何演化展开讨论。

本研究收集 TTG 片麻岩样品的选取原则是：(1) 样品需具有相应的主量元素、微量元素数据且分析数据符合精度要求；(2) 不同地区的同一批次样品应当有可靠的定年数据；(3) 同一地区样品的锆石 Lu—Hf 同位素数据能够反映配套的结晶年龄

并进行源区限定。本次收集的数据来自霍邱和五河 (15 个)、登封 (26 个)、鲁西 C 带 (4 个)、张河 (7 个, 待发表数据)、五个地区共 52 个 TTG 样品 (数据和索引参考文献见附表 1, 见 [www, geojournals. cn/georev](http://www.geojournals.cn/georev) 的网上文件; 印刷版略)。主微量数据根据地区主要分为三类: 东南部 (霍邱、五河), 中北部

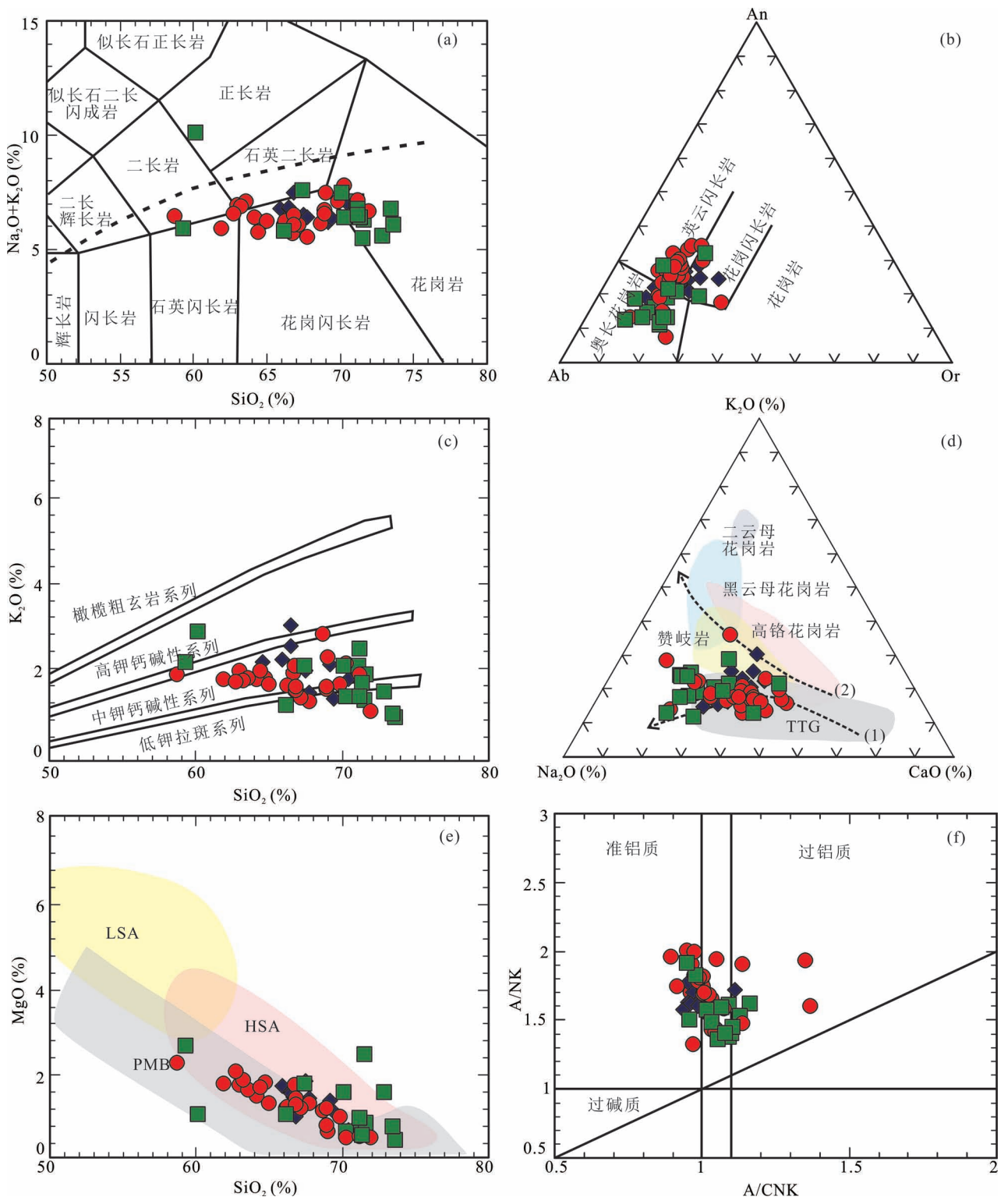


图8 华北克拉通东南部 TTG 岩石性质判别图,图例同图6

Fig. 8 TTG rock property discrimination diagram in Southeast of North China Craton, the legends are the same to figure 6
 (a) $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O+Na}_2\text{O}$ (底图据 Middlemost, 1994); (b) An—Ab—Or 三角图(底图据 Barker and Arth, 1976); (c) $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}$ (底图据 Rickwood, 1989); (d) $\text{K}_2\text{O—Na}_2\text{O—CaO}$ 三角图; (e) $\text{SiO}_2\text{—MgO}$ (PMB: 实验条件下变质玄武岩的部分熔融; LSA—低硅 adakite; HSA—高硅 adakite (底图据 Martin et al., 2005)); (f) A/CNK—A/NK (底图据 Maniar and Piccoli, 1989)
 (a) $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O+Na}_2\text{O}$ diagram (after Middlemost, 1994); (b) An—Ab—Or diagram (after Barker and Arth, 1976); (c) $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}$ diagram (after Rickwood 1989); (d) $\text{K}_2\text{O—Na}_2\text{O—CaO}$ diagram; (e) $\text{SiO}_2\text{—MgO}$ diagram; PMB—partial melting of metamorphic basalt under experimental conditions, LSA—low SiO_2 adakite, HAS—high SiO_2 adakite (after Martin et al., 2005); (f) A/CNK—A/NK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989)

(鲁西 C 带、张河)以及西部(登封)地区。

为方便了解新太古代 TTG 岩石代表的地球动力学意义,必须熟悉不同岩石组合的岩石成因和构造环境。这些 TTG 片麻岩的 SiO_2 含量为 58.71%~72.9%,仅东南部和西部各有一个样品的 SiO_2 含量小于 60%; MgO 的含量较低,主要的范围分布在 3%以下(0.5%~2.7%); Al_2O_3 、 K_2O 、 CaO 、 Na_2O 、 TiO_2 含量的变化范围分别为 10.35%~21%、1.00%~3.16%、1.02%~6.20%、2.29%~7.10%、0.1%~1.0%(图 7)。从图 8a 中可以发现,样品主要落在花岗闪长岩和花岗岩区域,但各个地区都存在极少的样品散落在石英二长岩和正长岩等钾钠含量较高的区域(图 8a)。在 An—Ab—Or 图中,样品在奥长花岗岩、英云闪长岩到花岗闪长岩都有分布,整体来讲有将近一半的样品属于英云闪长岩,霍邱地区更多样品落在奥长花岗岩区域(图 8b)。在 $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}$ 图中(图 8c),TTG 大部分位于中钾钙碱性岩石区域,少量样品落在低钾拉斑玄武岩系列,只有一个霍邱的样品落在高钾钙碱性系列。在 $\text{K}_2\text{O—Na}_2\text{O—CaO}$ 三角图中,大部分样品落在 TTG 区域,只有少数落在与 TTG 成分相似的 Sanukite 区域(图 8d)。其主量元素完全符合 TTG 岩石高 SiO_2 、 Na_2O 低 MgO 、 K_2O 的特征,并且在哈克图解当中 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 TiO_2 与 SiO_2 的呈明显的反比关系,而 Na_2O 与 SiO_2 呈较显著的正相关(图 7, 8e)。值得注意的是,反映岩石形成压力的 Al_2O_3 含量不仅与 SiO_2 呈显著的反相关,且西部、中北部以及东南部的 TTG 片麻岩的 Al_2O_3 含量还呈现出规律的变化,相关分布对应不同的压力属性。在 A/CNK—A/NK 图中,两种指数的变化范围分别是 0.79~1.37、1.33~2.09,表现出准铝质至过铝质特征(图 8f)。

收集到的样品显示相容元素 Cr、Ni,大离子亲石元素 Sr,高场强元素 Zr 均与 SiO_2 呈负相关关系,

SiO_2 含量低的部分样品中四种元素的含量明显增高,最高分别可达 70×10^{-6} 、 28×10^{-6} 、 771×10^{-6} 、 234×10^{-6} 。La 的变化范围为 7.2×10^{-6} ~ 59×10^{-6} ,稀土元素配分模式图显示整体为右倾的趋势,富集轻稀土,重稀土亏损,其中霍邱地区倾斜程度略大。霍邱及五河地区 TTG 片麻岩具有较高的轻稀土含量,表现出中等分馏的轻稀土配分模式;登封地区 TTG 片麻岩显示强烈分馏的轻稀土配分模式,表现出正的 Eu 异常;鲁西 C 带及张河地区 TTG 片麻岩显示中等分馏的轻稀土配分模式。在原始地幔标准化蛛网图中,整体上都存在 Nb、Ta、Ti 的负异常,此外,登封地区表现出 Sr 的正异常,而另外两个地区则存在轻微的负异常。年龄较老的霍邱地区有明显的区别于较年轻的样品的 Th 正异常以及明显的重稀土元素亏损(图 9)。

样品 La/Yb (5~227)、 Sr/Y (17~291)、 Ce/Sr (0.02~0.43) 值的变化范围较大,在 La/Yb—Sr/Y 和 Y—Ce/Sr 图中可以分辨出登封地区、霍邱和五河地区、鲁西 C 带—张河地区分别对应高压、中压和中低压型 TTG 片麻岩(图 10a、b)。Y 的数据虽然变化范围较大为 1.7×10^{-6} ~ 27×10^{-6} ,但是只有两个样品的数据较大达到 22×10^{-6} 和 27×10^{-6} ,其余皆小于 15×10^{-6} ,故在 Y—Sr/Y 图中能够观察到 TTG 岩石的数据落在 adakite 区域,只有极少数据落在岛弧岩浆区域(图 10c)。在 Yb_N (1~15) 与 $(\text{La/Yb})_N$ (3.6~163) 相关图解中可以明显分辨出三个地区样品的区别,霍邱和五河地区的 TTG 岩石具有较大的 $(\text{La/Yb})_N$ 和较小的 Yb_N 值,而鲁西和张河地区却恰恰相反,两者的不同也在 TTG 岩石的源岩成分中反映出来,即霍邱和五河区域 TTG 的源岩存在含 25%石榴子石的角闪岩,而鲁西和张河地区源岩角闪岩中石榴子石的含量只有 10%,登封地区 TTG 岩石的源岩可能以上两种皆存在(图 10d)。

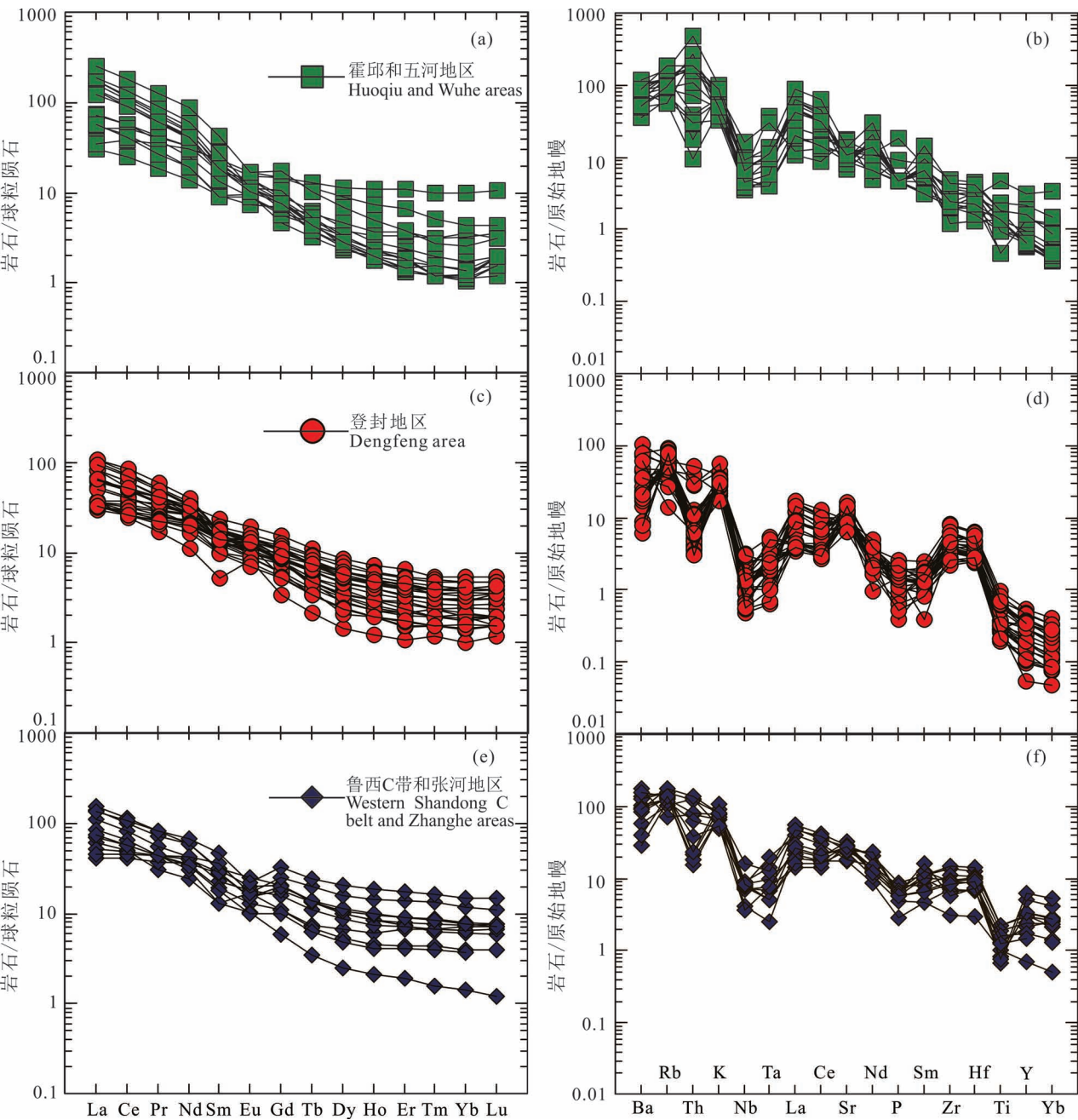


图 9 华北克拉通东南部 TTG 岩石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a、c、e)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b、d、f)
(球粒陨石和原始地幔标准化来自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns and Primitive mantle-normalized trace elements diagrams for TTG rocks
of the Southeast of North China Craton (Chondrite and primitive mantle normalization factors are from Sun and McDonough, 1989)

根据 TTG 岩石样品的 $\text{SiO}_2\text{—Mg}^\#$ 特征以及 Rb 和 Rb/Sr 的变化范围 ($21\times10^{-6}\sim115\times10^{-6}$ 、 $0.03\sim0.56$), 在构成的判别图中可以看出三个地区 TTG 岩石与 adakite 类似, 皆是通过部分熔融形成 (图 11a、b)。在 $3\text{ CaO—Al}_2\text{O}_3/(\text{FeOT}+\text{MgO})\text{—}5\text{ K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 源岩判别图中可以看到东南部和西部地区的

TTG 基本属于低钾镁铁质岩石, 而中北部地区 TTG 还存在高钾镁铁质岩石 (图 11c)。与该规律相似, 根据 Zr/Sm ($5.62\sim117.86$) 和 Nb/Ta ($3.1\sim29$) 值的变化, 在 $\text{Zr}/\text{Sm}\text{—Nb}/\text{Ta}$ 一图中可以进一步判别出西部和东南部的源岩主要是含角闪石的榴辉岩, 而中北部还存在含金石榴辉岩 (图 11d)。此外,

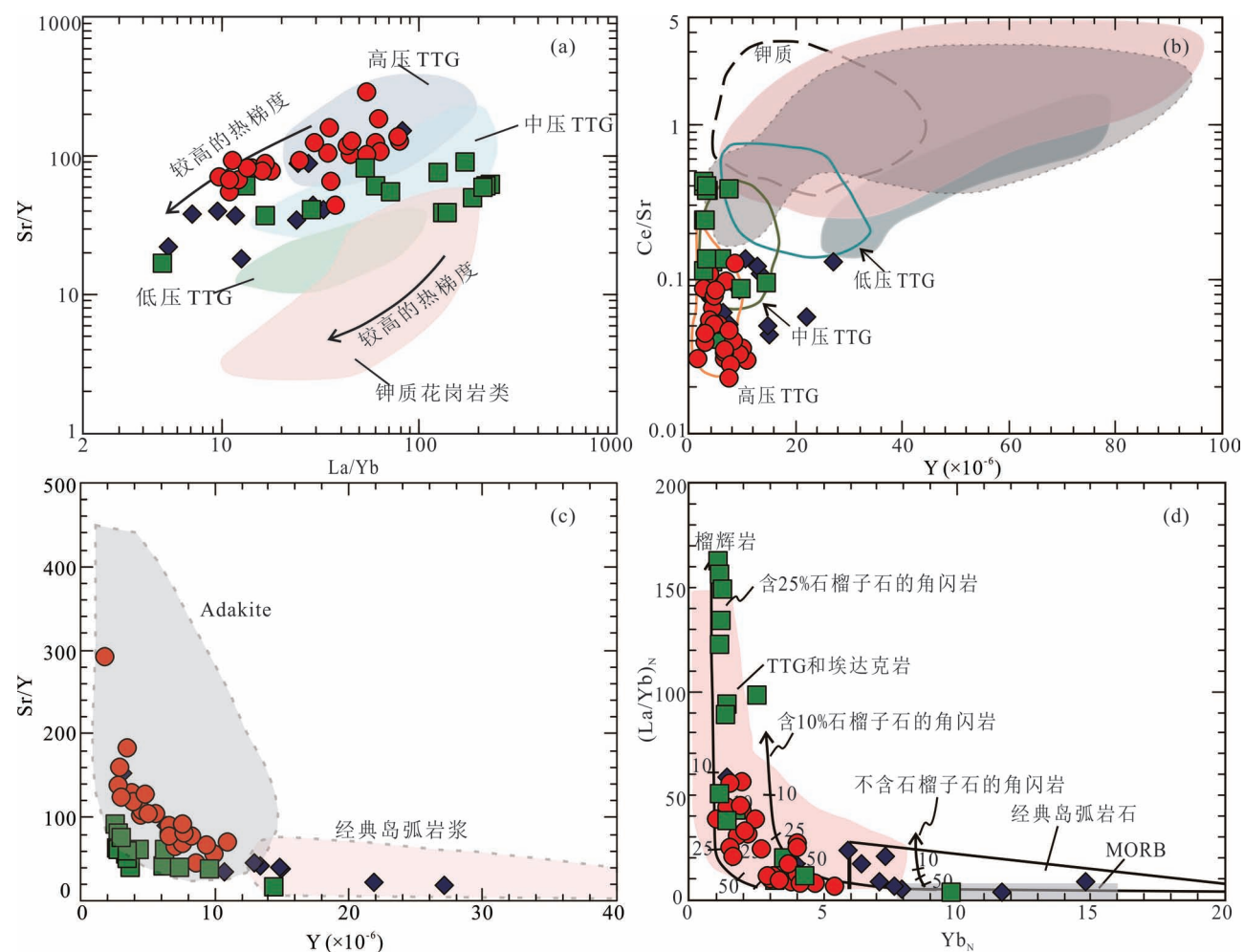


图 10 华北克拉通东南部 TTG 岩石 $\text{La/Yb}-\text{Sr/Y}$ (a) (底图据 Moyen et al., 2011)、 $\text{Y}-\text{Ce/Sr}$ (b) (底图据 Moyen et al., 2011)、 $\text{Y}-\text{Sr/Y}$ (c) (底图据 Moyen and Martin, 2012)、 $\text{Yb}_N-(\text{La/Yb})_N$ (d) (底图据 Martin, 2005) 图解, 图例同图 6

Fig. 10 diagram of TTG rocks $\text{La/Yb}-\text{Sr/Y}$ (a, after Moyen et al., 2011) and $\text{Y}-\text{Ce/Sr}$ (b, after Moyen et al., 2011) and $\text{Y}-\text{Sr/Y}$ (c, after Moyen and Martin, 2012) and $\text{Yb}_N-(\text{La/Yb})_N$ (d, after Martin, 1986) in Southeast of North China Craton, the legends are the same to figure 6

TTG 岩石的 Zr/Hf 、 Lu/Hf 、 $(\text{Nb/La})_N$ 、 $(\text{Hf/Sm})_N$ 值的变化分别为 25~48、0.01~0.17、0.17~5.3、0.04~0.72, 在相关的投图中可以判断出, 三个地区的 TTG 岩石都显示不存在碳酸盐岩的交代作用, 没有锆石的分离结晶, 总体保留了原始岩浆成分; 在 $(\text{Nb/La})_N-(\text{Hf/Sm})_N$ 图中可以区分出, 西部的 TTG 岩石受熔体相关俯冲交代作用, 东南部的 TTG 岩石主要受流体相关俯冲交代作用, 而中北部地区既受到熔体相关俯冲交代作用, 又受流体相关俯冲交代作用的影响 (图 11e, f)。在本研究中, 未发现 Nb/Ta 值与其他指标存在联系 (图 11); Nb/Ta 似乎与熔融深度无关 (另一方面, Nb 和 Ta 的绝对浓度见图 11)。这一结果显然与 Foley 等 (2002) 关于金红

石中 HFSE 分配的结论不一致。然而, 鲁西 C 带及张河地区 TTG 岩石显示太古宙高钾镁铁质岩石的成分, 是 TTG 熔体的潜在来源, 并且它们的 Nb/Ta 值变化范围较大 (图 11c, d)。尽管鲁西 C 带及张河地区的片麻岩显示出较高的 Nb/Ta 值, 但由于 TTG 片麻岩的源岩同样具有高的 Nb/Ta 值, 因此, 金红石的分离结晶不是该地区 Nb/Ta 值升高的唯一途径。

对收集到的 TTG 岩石年龄进行统计 (杨淳等, 1997; 劳子强和王世炎, 1999; 王世进等, 2008; 万渝生等, 2009; 王世进等, 2010), 可以清楚地看到登封和鲁西—张河的 TTG 岩石主要形成于新太古代晚期 (2600~2400 Ma), 东南部霍邱地区除此之外还存

在新太古代早期甚至中太古代(2950~2700 Ma)的TTG 岩石(图 12, 数据见附表 2; 见 [www. geojournals. cn/georev](http://www.geojournals.cn/georev) 的网上文件; 印刷版略)。图 13 为 TTG 的锆石年龄— $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图。为了减少由于铅丢失使锆石年龄变年轻的影响, 使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的锆石结晶年龄进行计算, 图解显示锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围为-3.0~8.9, 大多数都是正值。霍邱和五河地区的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大, 且随着中太古代—新

太古代表现出显著的壳幔相互作用的影响, 而本文收集的主微量数据主要来自于霍邱地区的中太古代岩石。登封地区 TTG 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值接近亏损地幔线, 表明该地区受到地壳物质的混染较少(图 13, 数据见附表 3; 见 www. geojournals. cn/georev 的网上文件; 印刷版略), 岩浆来源于新生地壳物质。鲁西 C 带和张河地区的 TTG 片麻岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值界于亏损地幔和球粒陨石演化线之间, 表明岩浆最有可能来自

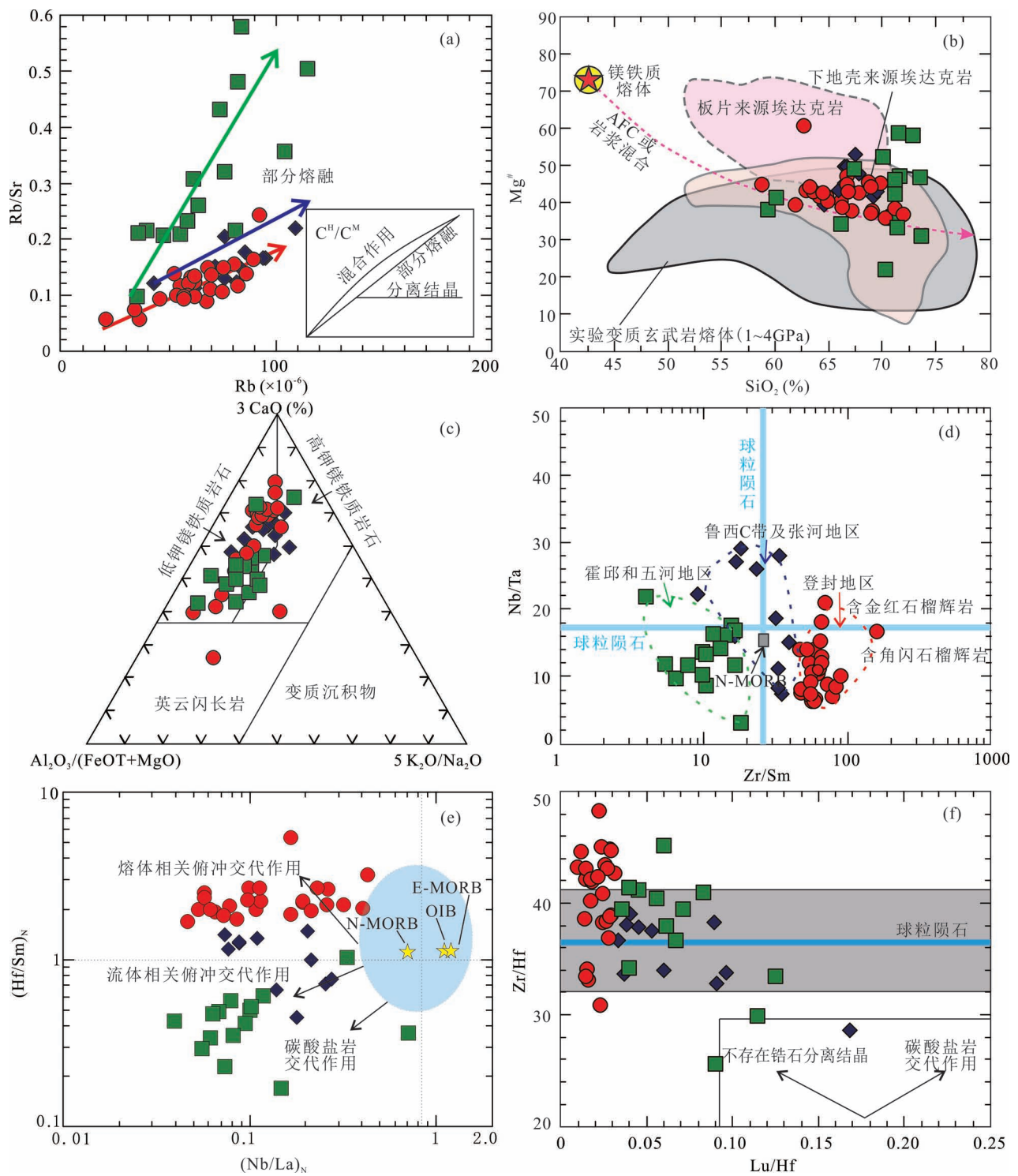
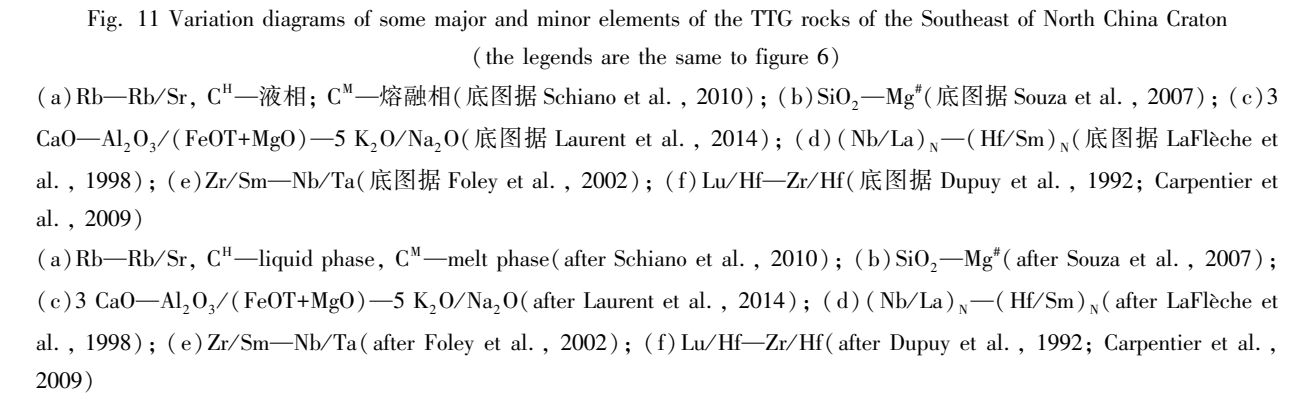


图 11 华北克拉通东南部 TTG 岩石主量和微量元素变化图(图例同图 6 一致)



地壳。

2.1 东南部(霍邱、五河)地区

华北克拉通东南部的霍邱杂岩发生了三次主要的岩浆活动,其中 2.80~2.70 Ga 和 2.50 Ga 时期经历了主要的地壳生长事件,下地壳可能经历了幕式生长过程,与早前寒武纪时期处于克拉通的边缘位置有关。蚌埠及五河一带零星出露有不同类型的 TTG 片麻岩,而霍邱地区获取的 TTG 岩石数据主要来自钻孔。该区域 TTG 样品显示存在 3 期明确的年龄(图 12、13,约 2.90 Ga、2.70 Ga 和 2.50 Ga),揭示了它们的源岩可能是在中太古代至古元古代三次不同的构造热事件中产生的。较古老的年龄证实了霍邱—五河地区存在中太古代地壳,这与华北克拉通沂水地区的报道相似(Wu et al., 2013)。基于全岩 Rb-Sr 和锆石 U-Pb 定年数据,前人认为“霍邱群”约形成于 2.70 Ga,分别在 2.30~2.20 Ga 和 1.80~1.40 Ga 期间经历了两期变质作用,霍邱群 2.70 Ga 岩石具有较低的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值,指示其来自古老陆壳物质的壳内再造过程(Liu Lei et al., 2016)。

该结果不同于早期一些认为花岗片麻岩是在 2.75 Ga 和 2.56 Ga 的两个构造热事件阶段(Wan Yusheng et al., 2010b),或者是在约 2.75 Ga 的单个阶段形成的观点(杨晓勇等,2012)。较年轻的年龄(2444±29 Ma)接近于侵入华北克拉通相邻地块的大量花岗岩的年龄(约 2.50 Ga)(Geng Yuansheng et al., 2012; Zhang Lianchang et al., 2012; Zhai Mingguo and Santosh, 2013)。岩石中 2711~2765 Ma 的年龄表明,地壳生长的峰值可能出现在 2.80~2.70 Ga。根据前人的研究,尽管 2.60~2.50 Ga 的岩石占华北克拉通前寒武纪基底的 80%左右,但 2.80~2.70 Ga 仍然是华北克拉通一个主要新生地

壳增长长期。

霍邱地区 TTG 岩石的 MgO 含量变化范围较

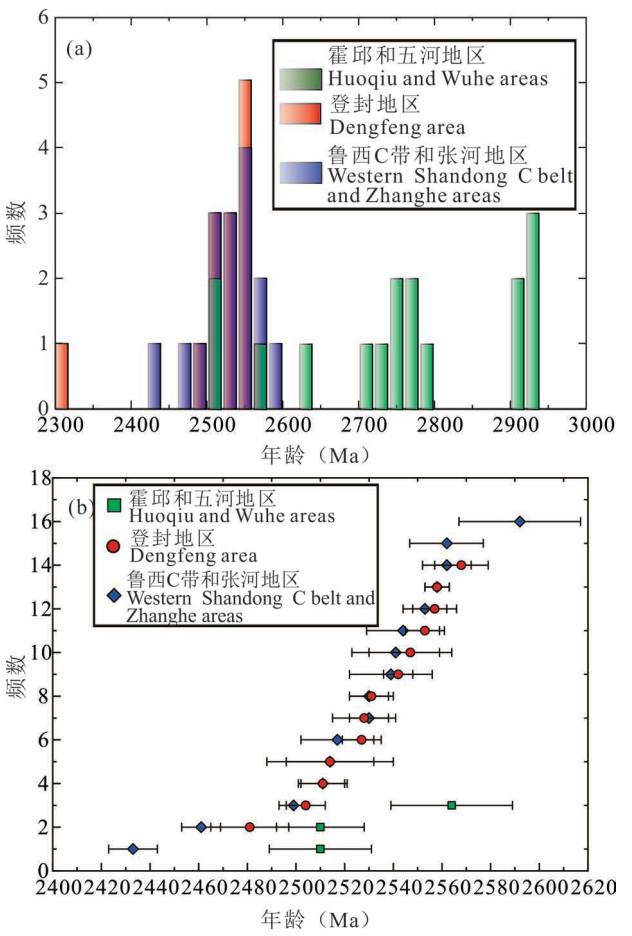


图 12 华北克拉通东南部新太古代 TTG 岩石的锆石年龄变化

Fig. 12 zircon age variation of Neoproterozoic TTG rocks in Southeast of North China Craton
图例之外的颜色为两种地区 TTG 的重叠
The colors but the legend are the overlap of two regions TTG

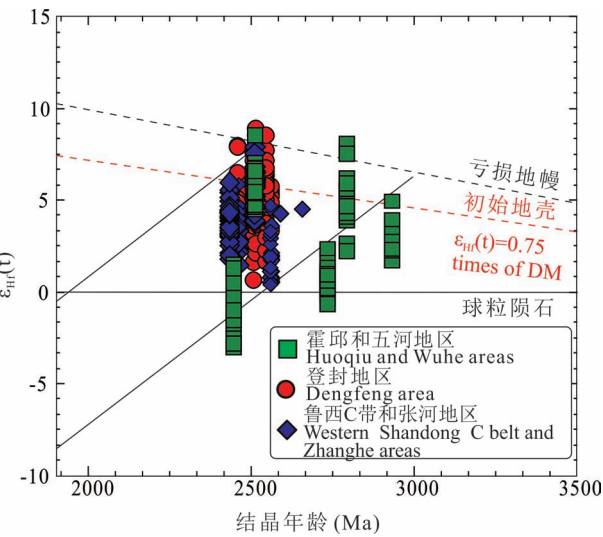


图 13 华北克拉通东南部新太古代 TTG 岩石的
锆石年龄— $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解

Fig. 13 zircon age of Neoproterozoic TTG rocks in Southeast
of North China Craton— $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram

大, $\text{Mg}^\#$ 数值含量较高, 且变化范围很大, 这些特征反映了 TTG 岩浆与地幔楔中橄榄岩之间存在相互作用, 即俯冲板片熔融过程中可能存在地幔楔橄榄岩的混染 (图 8e, 11b)。与其他地区的 TTG 岩石类似, 存在 REE 模式强烈分馏, HFSE 亏损, LREE 和 LILE 富集等特征。结合 La/Yb — Sr/Y 和 Y — Ce/Sr 高一中—低压型 TTG 区分图 (图 10a、b), 可以判断出该地区的 TTG 岩石属于中压 TTG。此外, 由于该地区 TTG 岩石的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 变化范围很大, 并且具有明显高于其他地区的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 含量。通过源区判别图可以发现比值较大的样品对应含 25% 石榴子石的角闪岩作为源岩 (图 10d), 而比值较小的样品对应含 10% 石榴子石的角闪岩作为源岩, 结合锆石的年代学分析, 年龄较老的 TTG 岩石具有较大的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值, 较年轻的 TTG 岩石 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值反而较小。在 $3 \text{ CaO}—\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}+\text{MgO})—5 \text{ K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 一图中可以看到这些地区的 TTG 属于低钾镁铁质岩石 (图 11c), 除不同比例的石榴子石之外, $\text{Zr}/\text{Sm}—\text{Nb}/\text{Ta}$ 一图反映其源岩成分还存在含角闪石榴辉岩作为源岩, 表明形成时温压条件较高。综合 $\text{Lu}/\text{Hf}—\text{Zr}/\text{Hf}$ 及 $(\text{Nb}/\text{La})_{\text{N}}—(\text{Hf}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 元素特征 (图 11e、f), 指示霍邱—五河地区的 TTG 岩石形成过程中不存在碳酸盐岩的交代作用, 与沉积物质的加入无关, 另外, 与登封等地区也存在明显的差别, 仅受到流体相关俯冲交代作用。霍邱地区因为

较低的 Sr/Y 值, 较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 含量表示其受到深俯冲岩浆作用, 且形成于压力较高的环境, 从而达到榴辉岩相变质作用。结合其较高的稀土元素值, 变化范围较大的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值表现出的壳幔相互作用, 以及鲁西 C 带 2.7 Ga 时期出露的科马提岩, 认为该地区 TTG 岩石的形成可能受约 2.70 Ga 地幔柱构造体制下形成的高温高压作用的影响, 可能与地幔柱和岛弧的联系作用体制有关。五河地区新太古代时期的岩石因为没有搜集到相关 TTG 的主微量, 故无法判断其与登封和鲁西 C 带地区具有一致的地质属性, 但富集的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值表明, 中太古代的 TTG 岩石可能为新太古代岩浆事件提供了地壳物质来源。

2.2 西部(登封)地区

华北造山带南段嵩山地区出露的登封杂岩主要由新太古代 TTG 片麻岩、变闪长岩和角闪岩组成 (郭安林, 1988)。登封杂岩是华北造山带南段的一套早前寒武纪变质岩, 传统上被认为是典型的花岗岩—绿岩带。自 20 世纪 50 年代以来, 对登封杂岩进行了大量的年代学和地球化学研究, 表明该杂岩主要形成于新太古代晚期 (约 2.6~2.5 Ga)。前人在登封杂岩中识别出一套新太古代构造混杂岩, 它们由 TTG 片麻岩、类似于 Sanukite 的变闪长岩和具有 N-MORB 地球化学特征的变基性火山岩构成, 形成于俯冲汇聚构造环境 (第五春荣, 2021)。

登封地区的部分花岗质岩石属于 TTG 片麻岩系列, 三种岩石的数量以英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩顺序递减 (Barker and Arth, 1976, 图 8b), 显示准铝质—过铝质的 TTG 片麻岩特征 (Martin, 1994, 图 8f)。TTG 片麻岩呈现 Na_2O 演化趋势, 钾含量较低属于低钾拉斑—中钾钙碱性系列 (图 8c、d), 并表现出与高硅 adakite (HSA) 相似的低镁高硅的特征 (图 8e), 暗示其成因可能与之相似, 与俯冲板片部分熔融相关。本区 TTG 片麻岩的 $\text{Mg}^\#$ 值变化范围较小 (36~47, 只有一个数值为 61), 在相关图解中基本投入下地壳来源 adakite 中 (图 11b), 表明不可能源自地幔源区物质的部分熔融 (Rapp, 1999; Smithies, 2000; Martin et al., 2005)。在稀土元素图解当中, 与鲁西—张河地区的 TTG 岩石相似, 显示 HREE 强烈分馏的特征, REE 总量偏低、存在轻微的 Eu 正异常 (图 9c), 可能累积了较多长石组分 (Shang et al., 2004); 而在原始地幔标准化的蛛网图中, 登封和鲁西—张河地区都表现出 Nb、Ta、Ti 的负异常 (图 9d), 说明 TTG 源区亏损 HFSE 元素, 同时在其形成过程中应该有角闪石、石

榴子石等对 HREE 分配系数大于 1 并具有 Eu 负异常的矿物的分离或残留 (Hanson, 1978)。

该地区 TTG 岩石的 Y 含量低, Sr/Y 和 Ce/Sr 值较高, 属于高压型 TTG (图 10a、b), 表示其形成的源区深度大于东南部和中北部 TTG 岩石。无论是根据地球化学投图 (图 11a、c), 还是前人已进行的较多高温高压实验, 都表明 TTG 岩石是由含水玄武质岩石 (榴辉岩相或含石榴子石的角闪岩相) 的部分熔融产生的 (Barker and Arth, 1976; Rapp et al., 1991; Rapp, 1995)。根据 Foley 等 (2002) 的描述, 登封地区的 TTG 岩石通常是由变质玄武岩在榴辉岩相条件下部分熔融形成的, Nb/Ta 值反映了源岩镁铁质成分的多少。然而, 在全球太古代记录中, 具有“高压型”地球化学特征的 TTG 的 Nb/Ta 值低于其镁铁质来源, 表明残余角闪石在 TTG 岩浆演化中发挥了重要作用, 这一特征可能反映了含水的可能性增加, 而不是在无流体熔融期间, 通过压力控制条件使斜长石残留量减少 (Moyen, 2011)。

岩相学观察发现登封地区 TTG 片麻岩变质体中缺少中性火成岩石, 也未发现基性堆晶岩 (Huang Bo et al.; 2021), Y—Sr/Y、Yb—(La/Yb)_N 和 Zr/Sm—Nb/Ta 相关图解 (图 10c、d, 图 11d) 显示大多数 TTG 在形成过程可能存在一定比例榴辉岩的部分熔融。石榴子石稳定域说明压力不低于 0.8 GPa, 大约在 700~1000℃ 时, 仅在高压条件下 (>1.5 GPa), 镁铁质岩石通过脱水熔融作用产生奥长花岗岩熔体, 含有富 Al 组分表明, 残余熔体相中富含角闪石和石榴子石, 不含斜长石 (如; Rapp et al., 1991)。地球化学成因表明登封杂岩中的 TTG 质片麻岩具有较低的 Mg[#]、MgO、Cr、Ni 含量以及较低的 Nb/Ta 值, 指示其与典型太古宙 TTG 岩石和显生宙典型的高硅 adakite 具有类似的地球化学特征, 其源岩可能是由低角度俯冲的新生玄武质洋壳部分熔融而成 (Diwu Chunrong et al., 2011)。残留物中金红石的存在表明压力大于 1.5 GPa, 意味着 12~15℃/km 的低地热梯度, Zr/Hf 和 Lu/Hf 之间缺乏相关性, 表明不存在锆石的分离结晶作用, 总体保留了原始岩浆的成分, 登封地区 TTG 岩石没有古老地壳物质的加入。由此看来, 登封地区的 TTG 片麻岩与张河和鲁西 C 带地区相似, 目前仅报道了约 2.5 Ga 的 TTG 片麻岩 (图 12)。如图 13 所示, 登封杂岩中大多数 2.50 Ga 锆石的高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值接近于同时代亏损地幔的初始 Hf 同位素比值, 对应于最年轻的 T_{DM} 年龄, 接近岩浆中锆石生长的时间, 这些可以解

释为登封地区的岩石代表新生地壳。此外, 所有约 2.50 Ga 的锆石都具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 其中一些非常接近同时代亏损地幔的初始 Hf 同位素比值。因此, 登封的年代学资料也为“2.50 Ga 是华北地区地壳生长的主要时期”这一观点提供有力的支持。登封地区石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较大, 可能反映了熔融过程中不充分或不均匀的混合, 并且表现出亏损地幔的 Hf 同位素特征。综上所述, 登封地区的 TTG 岩石通过岛弧环境下低角度俯冲, 导致加厚地壳的含水玄武质洋壳部分熔融形成, 石榴子石和角闪石作为残留相 (Gutscher et al., 2000)。这也可以解释 TTG 片麻岩在登封地区大面积出露的原因。

2.3 中北部(鲁西 C 带、张河)地区

研究表明, 约 2.70 Ga 科马提岩—拉斑玄武岩以及约 2.60 Ga 构造热事件是地幔柱/地幔翻转等垂向构造过程的产物, 而新太古代晚期动力学机制则以岛弧岩浆作用过程为主 (Wan Yusheng et al., 2014; Ren Peng et al., 2016)。鲁西 A 和 C 带中的 2.53~2.48 Ga 未变形和弱变形岩浆岩, 包括高 Ba—Sr 花岗岩、硅质高镁玄武岩以及壳源二长花岗岩和正长花岗岩, 它们具有板片回撤和地壳稳定演化后期阶段的特征 (Wan Yusheng et al., 2010a; Peng Toupeng et al., 2013; Gao Lei et al., 2018)。鲁西 C 带主要以 TTG 岩石为主, 形成时代为 2560~2530 Ma, 反映了俯冲过程从近洋到近陆的侵入岩构造岩石组合特征 (图 6)。鲁西—张河地区新太古代晚期 (2563~2500 Ma) TTG 岩石, 既具有贫 K₂O 的奥长花岗岩演化趋势, 又具有富 K₂O 的钙碱性演化趋势, 处于过渡状态, 形成于大陆边缘弧环境。弧演化的第一阶段可能形成了以 C 带为代表的 2.56~2.52 Ga 变形的年轻岩石, 包括辉长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、英云闪长岩和高 SiO₂ adakite, 与交代的幔源花岗闪长岩、壳源二长花岗岩和正长花岗岩有关 (Wang Yuejun et al., 2009; Peng Toupeng et al., 2012; Sun Guozheng et al., 2019)。

在 Rb—Rb/Sr 图中 (图 11a), TTG 片麻岩以部分熔融趋势为主, 在 SiO₂—MgO、Y—Sr/Y 和 SiO₂—Mg[#] 岩石成因判别图中 (图 8e, 10c, 11b), 这些样品分布在高硅 adakite、经典岛弧岩浆以及板片来源 adakite 区域。这些特征表明, 鲁西及张河地区的 TTG 熔体不是来自下地壳变质镁铁质岩石, 而是来自俯冲板片物质的部分熔融。在 Al₂O₃/(FeO+MgO)—3 CaO—5 K₂O/Na₂O 三角图中, 样品在低钾镁铁质岩石和高钾镁铁质岩石的熔体范围皆有分布

(图 11c, Laurent et al., 2014), 因此俯冲板片熔体可能与高硅 adakite 类似也受到地幔楔橄榄岩的混染。与其他地区相比, 该地区 TTG 片麻岩除了富集轻稀土亏损重稀土, 存在 Nb、Ta、Ti 的负异常等共同点之外, 还存在比较明显的 Eu 的负异常(图 9e、f), 再结合 La/Yb—Sr/Y 和 Y—Ce/Sr 高中低压型 TTG 区分图(图 10a、b), 这些样品基本属于中低压 TTG 类型。Eu 负异常的产生反映原始岩浆的性质, 所以, TTG 片麻岩可能是由俯冲程度相对较浅的镁铁质玄武岩部分熔融形成的。Yb_N—(La/Yb)_N 图解(图 10d)进一步揭示 TTG 片麻岩的源岩成分, 这些样品的源岩主要产生于经典岛弧区域, 且受到不含石榴子石角闪岩流体的交代, 处于球粒陨石和亏损地幔演化线之间的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和中低压的属性进一步证实了该地区 TTG 岩石的形成深度较浅, 明显区别于霍邱、五河和登封地区。此外, 通过 Zr/Sm—Nb/Ta 图解可以发现局部地区的 TTG 岩石在形成过程中可能存在含金红石的榴辉岩作为源岩(图 11d)。最后, 利用 Lu/Hf—Zr/Hf 和 (Nb/La)_N—(Hf/Sm)_N 交代作用判别图(图 11e、f), 发现这些样品皆不存在锆石残留体, 基本保留了原始岩浆成分, 没有经历碳酸盐岩交代作用, 但是既经历了熔体和流体相关俯冲交代作用。综上所述, 鲁西—张河地区约 2.50 Ga TTG 片麻岩是由不含石榴子石的玄武岩源区, 在浅层的经典岛弧背景下, 俯冲板片通过流体和熔体的交代作用, 由镁铁质岩石部分熔融形成。随后, 结合先亏损后富集 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值特征和登封地区的岩石成因, 表明在不断地俯冲过程中, 鲁西 C 带和张河等地的洋内岛弧地体与登封地体的弧陆碰撞增生, 受侧向的洋内俯冲以及弧陆增生作用, 可能形成了太古宙末期 TTG 片麻岩和区域麻粒岩相变质作用。

3 华北克拉通东南部太古宙地质事件序列和壳—幔动力学机制

太古宙 TTG 通常分为低铝型和高铝型, 前者一般形成于相对低压条件下, 也称为低压型 TTG, 本文中霍邱和五河地区 TTG 片麻岩主要为该类型, 其代表源岩在部分熔融形成 TTG 的过程中存在斜长石和辉石的分离结晶; 而后者一般形成于压力较高的环境, 称为高压型 TTG, 登封地区的 TTG 片麻岩具有类似特征, 表示其部分熔融形成 TTG 的过程中, 可能存在石榴子石和金红石的残余相。而鲁西 C 带及张河地区的 TTG 片麻岩属于过渡类型, 即中压型 TTG, 该类型产生的残余相以角闪石和石榴子石

为主, 可能伴有少量的金红石 (Moyen, 2011)。在华北克拉通东南部, 太古宙 TTG 片麻岩的 Al₂O₃ 含量的高低与轻重稀土的分异程度之间存在显著的相关性。高压和中压类型 TTG 岩石与高铝类型 TTG 岩石相当, 而低压类型 TTG 岩石与低铝类型 TTG 岩石相当。因此, 岛弧相关模式可以合理地解释太古宙不同压力类型 TTG 的成因。太古代时期, 尤其是新太古代早期, 是陆壳基底发育速度最快的时期 (Zhai Mingguo and Santosh, 2011; Geng Yuansheng et al., 2012; Condie and Kröner, 2013; Wan Yusheng et al., 2014)。Condrie (1975) 的观点是新太古代中期之前, 以地幔柱为主的垂向构造模式是生成 TTG 的主要方式。通过太古宙早期独特的岩石组合可以推断约 2.5 Ga 之前的地热梯度大约为现在的 3 倍。此外, 霍邱地区在 2.70 Ga 时期, 出露有大量海相沉积的条带状硅铁建造 (BIF) 型铁矿, 表示部分陆壳碎屑物质已进行深海沉积, 因此, 极有可能形成于温度较高, 但压力较小的洋弧俯冲构造环境。Brown 等 (2020) 认为, 板块构造的启动使双变质带开始产生, 从而导致了大洋扩张和板块俯冲的大规模迁移。在登封地区, 第五春荣 (2021) 识别出俯冲汇聚环境的 TTG 片麻岩, 并提出其构成“新太古代构造混杂岩”的观点。Huang Bo 等 (2020) 将华北克拉通南部的登封杂岩进行了空间上的区分, 划分为东、西两部分, 并根据它们相似的变质年龄 (2.54~2.50 Ga), 和低温低压, 高温高压的变质温压梯度, 提出登封杂岩的双变质带代表了新太古代晚期的碰撞造山作用。因此, 登封地区极有可能是俯冲碰撞汇聚带。而在鲁西地区, 出露有 2.50 Ga 的花岗岩绿岩带, 绿岩带通常指示弧后盆地的岛弧连续增生构造模式 (翟明国, 2012), 但是根据鲁西地区时代上先富集后亏损再富集的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 以及中低压的形成环境, 结合其形成时代 2.59~2.56 Ga 期间为构造岩浆作用“静寂期”, 和 2.55~2.49 Ga 的岩浆事件, 认为其可能先形成于洋弧俯冲构造环境, 随后与华北克拉通东南部连续的岩浆作用相对应, 可能演变为俯冲汇聚构造背景。最近, 有学者重新确定和划分了 TTG 岩石形成时代及岩石组合, 认为 C 带可能与华北克拉通东南部有关, 并且可能与登封东部地区具有一定的成因联系 (Liu Chaohui et al., 2019)。在鲁西 C 带的枣庄地区, 还识别出 BIF 型铁矿, 含 BIF 的绿岩带的拖拽是洋壳俯冲的动力。同时, 登封地区也发现了 BIF 型矿体, 因此, TTG 在后续的俯冲汇聚过程中, 极有可能受到地幔物质的

加热。伴有 BIF 铁矿层的岩石由于密度较大,而后与登封地区的 TTG 汇聚,达到了下地壳深度,从而使登封地区的 TTG 片麻岩形成的压力条件较高。一方面鲁西 C 带地区的 TTG 片麻岩普遍受到的深熔作用,也支持该地区的岩石受到后续俯冲高温岩浆加热的影响(翟明国等,2020)。因此,构建华北克拉通东南部的中北部通过向中部地区俯冲,而后形成统一基底的模式是可行的。

近些年来,国内外的研究学者对华北克拉通的陆壳基底进行了大量的研究。各自提出了不同的认识与见解,既有认为陆壳呈现幕式生长的以地幔柱构造为代表的垂向模式(Smithies et al., 2009; Wu Meiling et al., 2016; Nebel et al., 2018),也有提出陆壳是连续生长的以俯冲—汇聚模式为代表的水平构造模式(Martin et al., 2005; Wang Wei et al., 2013)。Sun Guozheng 等(2021)通过统计华北克拉通东部陆块的 TTG 岩石,认为大陆地壳的厚度和地热梯度与地球动力学机制变化有关,从中太古代晚期(约 2.90 Ga)的垂直构造类型转化为新太古代早期到晚期(约 2.70~2.50 Ga)的热俯冲板块构造类型。Cui Zexian 等(2022)通过统计华北克拉通南缘 TTG 岩石的锆石数据,认为大多数太古宙锆石样品仍保留其原始含水量,可进一步用于揭示岩石成因和构造背景,推测华北克拉通可能发生了从中太古代晚期(约 2.80 Ga)的垂直构造到新太古代晚期(约 2.50 Ga)的板块构造(带俯冲)的地球动力学机制变化。在归纳整理前人最新研究成果的同时,我们构建了关于华北克拉通东南缘太古代陆壳基底岩构造格架和时空分布规律:

(1)中太古代晚期(2.9~2.8 Ga)是陆壳生长的初始时期,此时大陆地壳较薄,厚度大约为 27~39km,该时期的 TTG 片麻岩仅在霍邱、五河等少数地区零星出露。热力学和微量元素的模拟结果显示该时期具有较高的地温梯度(21~31 °C/km)和基底热流值(46~80 mW/m²)(图 14a、b)。该结果通常是地幔柱构造活动在地表的直接反映(Wilson, 1963),也表明以地幔柱模式为代表的垂直构造体系在中太古代晚期的陆壳生长事件中发挥主导作用(孙国正,2021)。

(2)新太古代早期(2.80~2.70 Ga)是陆壳生长的关键时期,在该时期,奥长花岗岩和英云闪长岩大量发育,形成 TTG 片麻岩的主体(Zhai Mingguo, 2011; Zhai Mingguo and Santosh, 2013)。该时期地壳的增长速度加快,在约 2.7 Ga 时达到最大厚度

(约 62 km),同时,基底热流值以及莫霍面的地温梯度在不断下降(21~31 °C/km 下降到 7~24 °C/km)(图 14a、c)。造成该现象的原因可能是地幔的快速冷却,以及岩石圈的不断增厚(孙国正,2021)。在火山岩的组成上也表现为早期的科马提岩转化为钙碱性岩浆岩,构造体制也由伸展向挤压转变。所以,无论是从岩相学、热力学还是构造学角度分析,新太古代早期都是地球动力学体制由以垂直为主的地幔柱模式向板块构造模式转变的关键时期(Gao et al., 2019)。本文搜集的华北克拉通东南部太古宙早期(>2.80 Ga)地质记录主要保留在霍邱及五河等地区(图 1b)。新太古代之前的岩体共同组成了华北克拉通陆核中年龄最老的部分,霍邱地区搜集的 TTG 岩石支持了上述观点(图 1b)。新太古代早期(约 2.70 Ga)的岩浆事件记录在鲁西和胶东等地出露较多,其中鲁西地区科马提岩石的发现被认为是地幔柱构造的重要证据,并指示了陆壳生长的垂向特征(Wan Yusheng et al., 2011; 万渝生, 2017)。随着研究的不断深入,在霍邱等地发现了以花岗质片麻岩为代表的约 2.70 Ga 的岩石,越来越多的年代学证据表明华北克拉通和世界上其他古老克拉通一样,均经历了 2.70 Ga 地壳生长事件。另外,壳—幔作用研究反映新太古代中期的科马提岩、钙碱性火山岩、TTG 片麻岩的组合类型可能与地幔柱和岛弧的作用相关(图 14b)。

(3)华北克拉通新太古代晚期(约 2.60~2.50 Ga)属于地壳生长的稳定期,这一时期的热力学模拟显示地壳厚度(33~59km)、莫霍面地温梯度(8~22°C/km)和基底热流值(20~50mW/m²)与前一阶段相比略有下降,这可能是密度较高的镁铁质下地壳拆沉的结果(图 14a、d)(Hu et al., 2019)。同时,该时期内花岗闪长岩大规模出现,代表地壳成熟度也在不断地提高。在地球早期的板块热力学模拟中表明地幔的潜能温度在不断下降,岩石圈和俯冲带也在不断增厚和发育成熟,逐渐形成与现在板块构造体系一致的大型构造带(孙国正,2021)。而华北克拉通的特点在于在该时期发育世界其他地区克拉通并不发育的构造岩浆活动(图 1)。通过收集到的锆石年代学和 Lu—Hf 同位素的统计结果表明,华北克拉通东南缘的登封地区、鲁西 C 带地区、丰县张河、霍邱及五河等地含有约 2.50~2.60 Ga TTG 片麻岩组合,并且登封地区没有更古老的地质印记。

结合新太古代 TTG 的岩石成因和壳—幔动力学研究,我们构建了华北克拉通东南部霍邱—五

河—登封—鲁西—张河地区太古宙末期的地球动力学变化模型(图 15b、d): (I) 初始俯冲阶段, 鲁西及张河地区的洋弧在俯冲条件下发生岩石圈地幔的部分熔融, 形成亏损的大洋岩石圈地幔, 登封地区的洋陆俯冲带来的流体交代地幔楔, 然后部分熔融形成 TTG 岩石, 板片的持续俯冲脱水, 地幔楔中大离子亲石元素和轻稀土元素含量不断提高并发生部分熔融, 形成低镁的 TTG 岩石类型; (II) 岛弧体系进一步演变, 约 2.5 Ga 时期发生了华北克拉通东南部岛弧和弧陆碰撞过程中的幔源岩浆底侵相关的麻粒岩

相的变质作用, 由此跟登封地区形成的双变质带联系紧密。因此无论是年代学的分析, 还是壳—幔作用研究, 都表明华北克拉通东南部约 2.5 Ga 的陆壳形成的构造环境主要受到侧向的洋内俯冲以及弧陆增生作用过程控制。

4 华北克拉通东南部太古宙地壳生长方式探讨及其意义

关于陆壳的生长方式前人已进行了较多的研究, 从最开始的以地幔柱模式为主的幕式生长, 到近

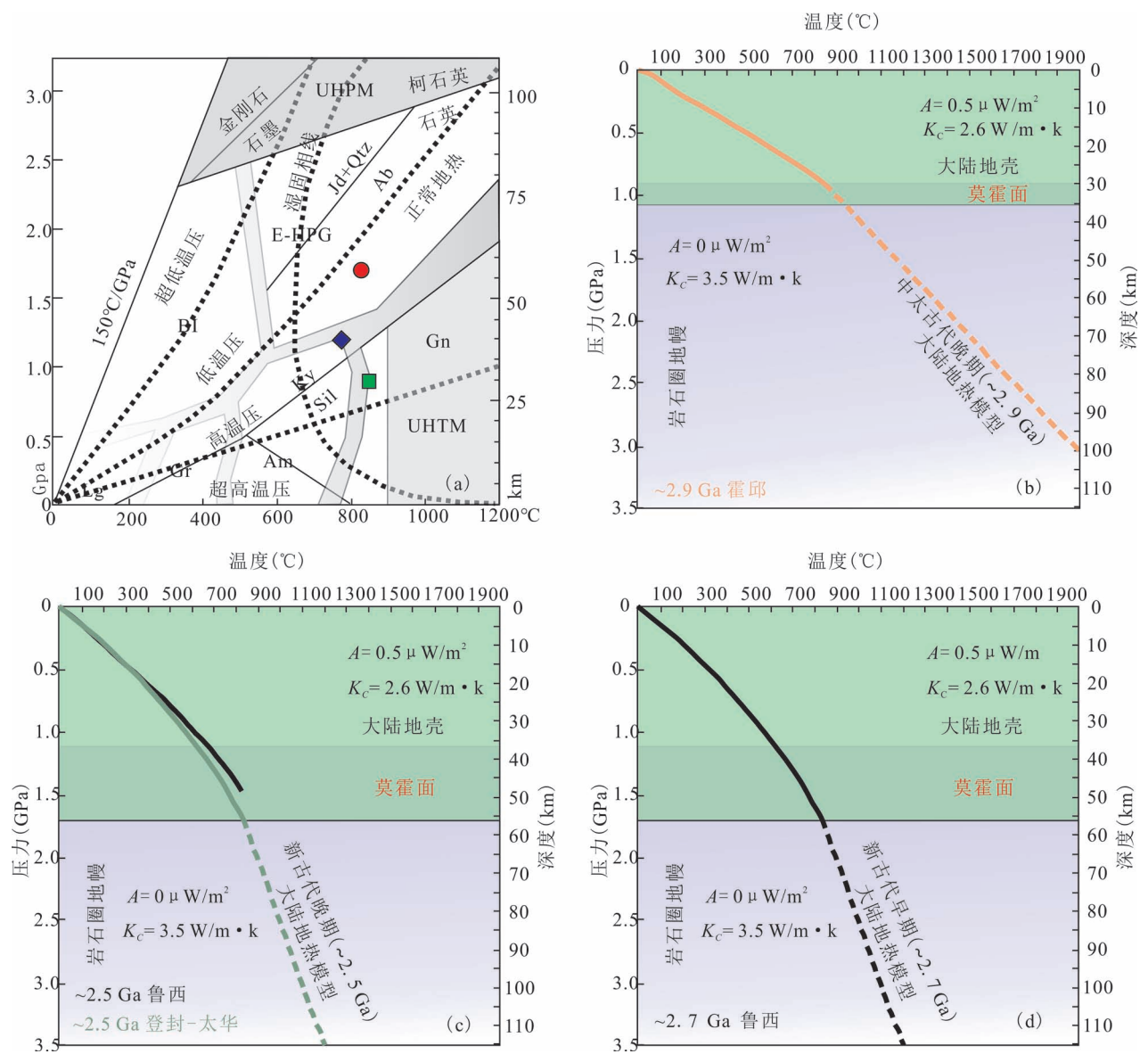


图 14 华北克拉通东部中—新太古代大陆岩石圈的热演化模型(据孙国正, 2021)

Fig. 14 Generic model for the Meso- to Neoproterozoic thermal evolution of the Eastern North China Craton (after Sun Guozheng, 2021&)

K_c —大陆地壳的热导率; 图例同图 6

K_c — Thermal conductivity of continental crust; the legends are the same to figure 6

年来地球化学、实验岩石学等手段发现单一构造模式的局限性,人们逐渐认识到板块构造体制也是早期地球动力学的重要机制之一。约 2.5 Ga 出露的高铝 TTG 片麻岩可能代表其通过低角度俯冲的部分熔融产生 (Huang Xiaolong et al. , 2010; Zhou Yanyan et al. , 2014)。我们本次对报道的华北克拉通东南部的新太古代 TTG 片麻岩进行分析,也认为它的源岩是通过加厚洋壳部分熔融形成 (Diwu et al. , 2020)。近期岩石成因研究发现,大多数高压型 TTG 片麻岩的源区都来自岩石圈地幔玄武岩,是 2.5 Ga 地壳生长的载体。此外,前文的讨论也表明存在高镁 TTG 片麻岩类型,代表地幔通过壳—幔相互作用对地壳生长的影响。需要注意的是,在新太古代早期到 (约 2.70 Ga) 新太古代末期 (约 2.50~2.60 Ga) 之间地壳生长方式可能存在构造体制的转

换,主要体现在由太古宙早期地幔柱和岛弧联合作用体制控制,末期转变为受洋内俯冲和弧—陆增生作用控制,表明俯冲相关的侧向构造体制在太古宙末期逐渐取代了垂向的地幔柱构造体制 (Liu Heng et al. , 2020; Wang Wei et al. , 2015)。其中,与新太古代末期相似的构造岩浆活动以及地壳生长事件在国内外克拉通 (塔里木克拉通、Gawler 克拉通、Dharwar 克拉通南部等地) 也广泛发育。

华北克拉通东南部的鲁西 C 带地区太古宙末期绿岩带的情况不是单一的,印度南部地区的太古宙结晶基底中也保留有一系列 2.50 Ga 的岛弧岩浆作用产物以及 BIF 矿床等微陆块俯冲增生的记录,表明全球克拉通在太古宙末期的地壳生长方式也有可能为弧—陆碰撞,微陆块增生等构造过程。霍邱地区的 TTG 岩石地质记录时代为中太古代—新太

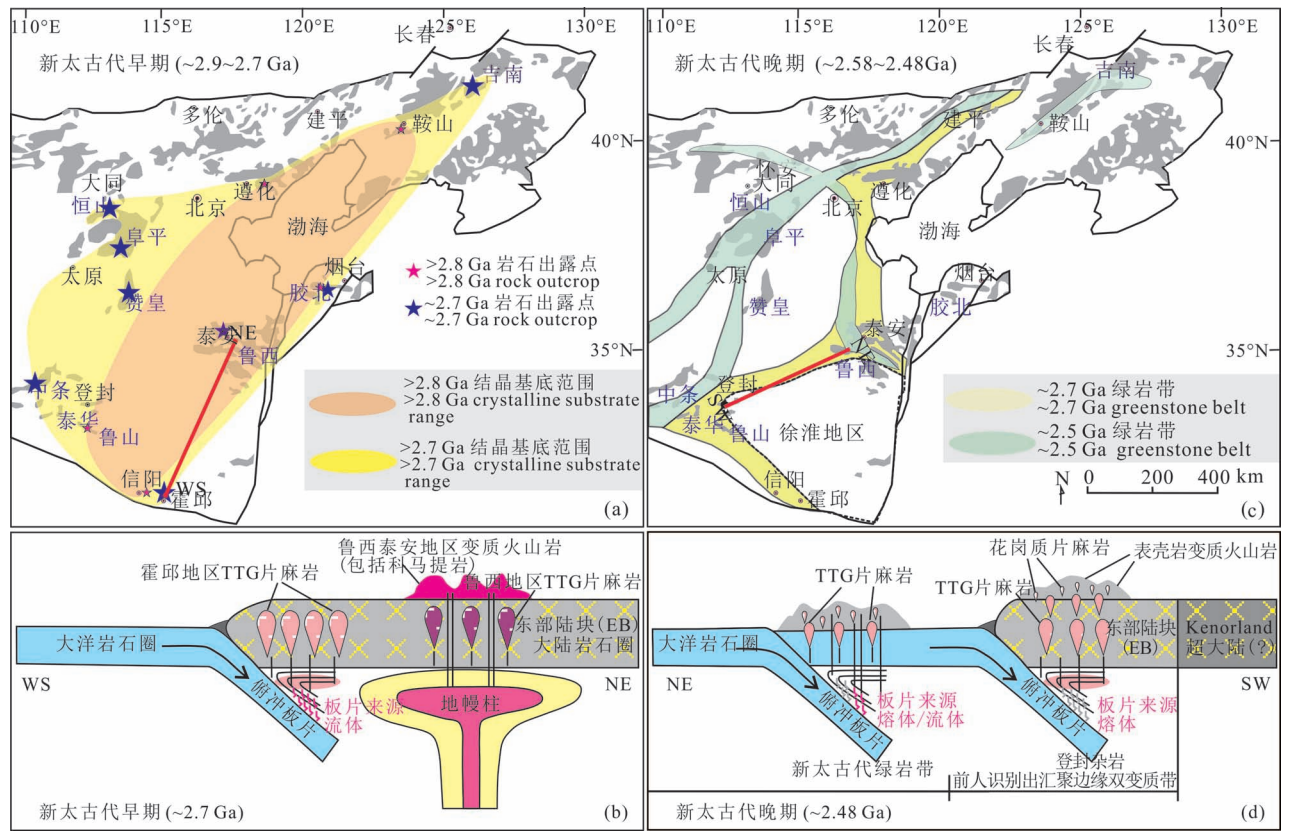


图 15 华北克拉通东部陆块新太古代早期区域地质图(a) (据 Wang Wei et al. , 2015); 华北克拉通东南部新太古代早期地壳生长方式模型(b) (据王伟等,2015); 华北克拉通东部陆块新太古代晚期区域地质图(c) (据 Wang Wei et al. , 2015); 华北克拉通新太古代晚期地壳生长方式模型(d) (据王伟等,2015)

Fig. 15 Early Neoproterozoic regional geological map of the eastern continental block of the North China Craton (a) (after Wang Wei et al. , 2015) and Model of late Neoproterozoic crustal growth pattern in the Southeast of North China Craton (b) (after Wang Wei et al. , 2015&) and Late Neoproterozoic regional geological map of the eastern continental block of the North China Craton (c) (after Wang Wei et al. , 2015) and Model of early Neoproterozoic crustal growth pattern in the Southeast of North China Craton (d) (after Wang Wei et al. , 2015&)

古代时期,表明地壳生长虽然是地球早期壳—幔动力学演化的重要形式,但是也可能发生了地壳物质的循环,虽然这些地区 TTG 岩石数据出露相对较少,但是它们可能从热俯冲向地球上类似显生宙的冷俯冲模式发生了转变,因此,可能以及最早的超大陆汇聚过程(如 Kenorland 超大陆)和板块构造的启动密切相关(王伟等,2015)。

综上所述,虽然以上地区太古宙陆壳岩石存在一些对应属性,但同时期不同地域的 TTG 片麻岩在地层上具有差异性,表现在成矿环境、成矿物质来源、地球化学特征和成矿时代等众多方面(Liu Lei and Yang Xiaoyong, 2015,; Liu Lei et al., 2016; Liu Lei and Yang Xiaoyong, 2017; Liu Lei et al., 2018)。因此,需要对占陆壳多数的太古宙 TTG 岩石开展系统全面的岩石学、地球化学和地质年代学方面的研究,结合前人在区域内相关地壳捕虏体岩石和富钾花岗岩类岩石研究成果,精细刻画出华北克拉通东南部太古宙陆壳形成和演化史,进而限定它们的构造属性。特别是,通过时空上的对比研究,判别它们之间是否存在内在成因联系,为华北克拉通东南缘早前寒武纪基底的构造属性提供坚实的理论制约。霍邱—五河—登封—鲁西—张河地区太古宙基底岩石的构造属性及地壳演化历程的确定,将丰富华北克拉通东南缘这一太古宙露头极少出露地区的早前寒武纪研究。目前,除了这些地质观测和壳—幔相互作用研究,还需要进一步的工作来确认其区域上的地热梯度和地壳厚度,将单个微陆块的构造事件拓展至整个克拉通基底,类比同一时期的其他克拉通中是否具有相似特征,为解析全球由地幔柱构造向板块构造体制过渡的研究提供思路。

5 结论

(1)以华北克拉通东南部的霍邱、五河、鲁西 C 带、丰县张河以及登封地区为整体研究对象,TTG 片麻岩的主要岩浆期次可划分为两期:中太古代时期至新太古代早期 2.95~2.70 Ga,新太古代晚期 2.58~2.48 Ga(峰值约为 2.52 Ga),在该时期经历了明显的地壳生长。

(2)研究表明这些地区的 TTG 片麻岩整体源于低钾镁铁质岩石的部分熔融,并根据地区主要分为三类:霍邱、五河为低铝低压型 TTG;鲁西 C 带—丰县张河为中铝中低压型 TTG;登封地区高铝高压型 TTG。

(3)霍邱地区 TTG 片麻岩的形成可能受鲁西地

区约 2.70 Ga 科马提岩和一系列钙碱性火山岩浆的影响,部分熔融过程中受到流体交代作用,TTG 片麻岩的共生组合可能与地幔柱和岛弧的共同作用体制有关。

(4)华北克拉通东南部的 TTG 岩石的陆壳增生事件在新太古代晚期达到高潮。鲁西及张河地区的洋内岛弧地体同时受到熔体和流体交代作用,与登封地区受到熔体交代作用的弧陆碰撞增生,可能形成了太古宙末期 TTG 片麻岩,经历区域麻粒岩相变质作用,并且主要受侧向的洋内俯冲以及弧陆增生作用过程控制。

致谢: 本文所用大量的全岩主微量数据、锆石年龄和 Hf 同位素数据大部分来自文献资料,非常感谢前辈们对于地质行业的付出,在表示感谢。同时感谢审稿专家和章雨旭研究员为本文改进提出了良好的意见。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 第五春荣,刘祥,孙勇. 2018. 华北克拉通南缘太华杂岩组成及演化. 岩石学报,34: 999~1018.
- 第五春荣. 2021. 华北克拉通南部太古宙大陆地壳的生长和演化. 岩石学报,37(02): 317~340.
- 葛宁洁,李惠玉,秦礼萍,侯振辉,柏林. 2001. 大别山麻粒岩和 TTG 片麻岩的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学. 地质学报, (03): 379~384.
- 郭安林. 1988. 河南中部太古代登封花岗—绿岩地体中 TTG 质片麻岩与绿岩带关系及其地壳演化意义. 地质论评, (02): 123~131.
- 黄道袁,董春艳,万渝生. 2020. 华北克拉通南缘小秦岭地区新太古代晚期—古元古代晚期岩浆构造热事件: 锆石 U—Pb—Hf 同位素和地球化学证据. 地球科学,45(09): 3330~3340.
- 姜杨,赵希林,林寿发, Davis D W,邢光福,李龙明,段政. 2014. 扬子克拉通东南缘新元古代陆缘弧型 TTG 的厘定及其构造意义. 地质学报,88(08): 1461~1474.
- 劳子强,王世炎. 1999. 河南省嵩山地区登封群研究的新进展. 中国区域地质, (01): 10~17.
- 刘超辉,蔡佳. 2017. 五河杂岩风阳群白云山组的源区特征及沉积时代: 来自锆石 U—Pb 年龄和 Lu—Hf 同位素的证据. 岩石学报, 33: 2867~2880.
- 刘贻灿,王程程,张品刚,聂佳珍. 2015. 华北东南缘前寒武纪下地壳的生长和变质演化. 岩石学报, (10): 2847~2862.
- 任鹏,颜炳强,王世进,董春艳,马铭株,刘敦一,万渝生. 2015. 鲁西 2.5~2.7Ga 构造岩浆热事件: 泰山黄前水库 TTG 侵入岩的野外地质和锆石 SHRIMP 定年. 地质论评,61(05): 1068~1078.
- 孙国正. 2021. 华北克拉通东部中—新太古代花岗岩与岩石圈热状态研究. 导师:刘树文. 北京大学博士学位论文.
- 万渝生,刘敦一,王世炎,赵逊,董春艳,周红英,殷小艳,杨长秀,高林志. 2009. 登封地区早前寒武纪地壳演化—地球化学和锆石 SHRIMP U—Pb 年代学制约. 地质学报,83(07): 982~999.

万渝生,董春艳,任鹏,白文倩,颀顽强,谢世稳,刘守偈,马铭株,刘敦一. 2015. 华北克拉通太古宙 TTG 岩石的形成和演化. 地质学报,89(S1):304.

万渝生,董春艳,任鹏,白文倩,颀顽强,刘守偈,谢士稳,刘敦一. 2017. 华北克拉通太古宙 TTG 岩石的时空分布、组成特征及形成演化:综述. 岩石学报,33(05):1405~1419.

万渝生,颀顽强,王惠初,李鹏川,初航,肖志斌,董春艳,刘守偈,李源,郝光明,刘敦一. 2021. 冀东地区~3.8 Ga TTG 岩石发现. 地质学报,95(05):1321~1333

王金芳,李英杰,李红阳,董培培. 2021. 贺根山缝合带晚石炭世 TTG 岩浆事件:奥长花岗岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学制约. 地质学报,95(02):396~412.

王世进,万渝生,张成基,杨恩秀,宋志勇,王立法,张富中. 2008. 鲁西地区早前寒武纪地质研究新进展. 山东国土资源,(01):10~20.

王世进,万渝生,王伟,宋志勇,董春艳,王立法,杨恩秀. 2010. 鲁西蒙山龟蒙顶、云蒙峰岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 测年及形成时代. 山东国土资源,26(05):1~6.

王伟,刘树文,白翔,郭荣荣. 2015. 前寒武纪地球动力学(VIII):华北克拉通太古宙末期地壳生长方式. 地学前缘,22(06):109~124.

吴鸣谦,左梦璐,张德会,赵国春. 2014. TTG 岩套的成因及其形成环境. 地质论评,60(03):503~514.

邢凤鸣,任思明. 1984. 皖西霍邱群条带状硅铁建造成因议. 地质学报,(01):35~48.

杨淳,宋彪,潘森,张胜祥,陈华国,高爱萍. 1997. 鲁西蒙山山脉中段早前寒武纪花岗岩质岩石岩石学和单锆石年龄. 地球学报,(03):101~106.

杨恩秀,陶有兵,张新平,朱继托,万渝生,王世进. 2008. 鲁西地区新太古界雁翎关组中花岗岩质“砾石”SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及地质意义. 地球化学,37,481~487.

杨晓勇,王波华,杜贞保,王启才,王玉贤,涂政标,张文利,孙卫东. 2012. 论华北克拉通南缘霍邱群变质作用、形成时代及霍邱 BIF 铁矿成矿机制. 岩石学报,28(11):3476~3496.

翟明国. 2012. 华北克拉通的形成以及早期板块构造. 地质学报,86:1335~1349.

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. 岩石学报,36(08):2249~2275.

赵国春,张国伟. 2021. 大陆的起源. 地质学报,95:1~19.

赵宗溥. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京:科学出版社:389~390.

周艳艳,赵太平,薛良伟,王世炎,高剑峰. 2009. 河南嵩山地区新太古代 TTG 质片麻岩的成因及其地质意义:来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约. 岩石学报,25(2):331~347.

Armstrong R L, Harmon R S. 1981. Radiogenic isotopes: the case for crustal recycling on a steady-state no-continental-growth Earth. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, A301, 443~472.

Bai Xiang, Liu Shuwen, Guo Rongrong, Zhang Lifei, Wang Wei. 2014. Zircon U—Pb—Hf isotopes and geochemistry of Neoproterozoic dioritic—trondhjemitic gneisses, Eastern Hebei, North China Craton: Constraints on petrogenesis and tectonic implications. Precambrian Research, 251:1~20.

Barker F, Arth J G. 1976. Generation of trondhjemitic—tonalitic liquids and Archean bimodal trondhjemitic—basalt suites. Geology, 4(10):371~374.

Brown M, Johnson T, Gardiner N. 2020. Plate Tectonics and the Archean Earth. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 48:291~320.

Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. 2013. The continental record and the generation of continental crust. Geological Society of America Bulletin, 125(1~2):14~32.

Condie K C. 1975. Mantle-plume model for the origin of Archean greenstone belts based on trace element distributions. Nature, 258:413~414.

Condie K C. 2000. Episodic continental growth models: afterthoughts and extensions. Tectonophysics, 322:153~162.

Condie K C, O'Neill C, Aster R C. 2009. Evidence and implications for a widespread magmatic shutdown for 250 My on Earth. Earth and Planetary Science Letters, 282(1~4):294~298.

Condie K C, Kröner A. 2013. The building blocks of continental crust: Evidence for a major change in the tectonic setting of continental growth at the end of the Archean. Gondwana Research, 23(2):394~402.

Cui Zexian, Xia Xiaoping, Huang Xiaolong, Xu Jian, Yang Qing, Zhang Wanfeng, Zhang Le, Lai Chunkit, Wang Xue. 2022. Meso- to Neoproterozoic geodynamic transition of the North China Craton indicated by H₂O-in-zircon for TTG suite. Precambrian Research, 371:106574.

Deng Hao, Kusky T, Polat A, Wang Chen, Wang Lu, Li Yunxiu, Wang Junpeng. 2016. A 2.5 Ga fore-arc subduction—accretion complex in the Dengfeng Granite—Greenstone Belt, Southern North China Craton. Precambrian Research, 275:241~264.

Deng Hao, Kusky T, Polat A, Huang Bo, Peng Hongtao, Wang Junpeng, Wang Songjie. 2019. Magmatic Record of Neoproterozoic Arc—Polarity Reversal from the Dengfeng Segment of the Central Orogenic Belt, North China Craton. Precambrian Research, 326:105~123.

Dhuime B, Hawkesworth C J, Cawood P A, Storey C D. 2012. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago. Science, 335:1334~1336.

Diwu Chunrong, Sun Yong, Guo Anlin, Wang Hongliang, Liu Xiaoming. 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, 20:149~170.

Diwu Chunrong, Zhang Chengli, Sun Yong. 2016. Archean continental crust in the Southern North China craton. Springer Geology, 29~44.

Diwu Chunrong, Liu Xiang, Sun Yong. 2018 &. The composition and evolution of the Taihua Complex in the southern North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 34:999~1018.

Diwu Chunrong, Wang Tingyi, Yan Jianhao. 2020. New evidence for Neoproterozoic (ca. 2.7 Ga) crustal growth in the North China Craton. Precambrian Research, 350:105921.

Diwu Chunrong. 2021 &. Crustal growth and evolution of Archean continental crust in the southern North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 37(02):317~340.

Dong Chunyan, Xie Hangqiang, Kröner A, Wang Shijin, Liu Shoujie, Xie Shiwen, Song Zhiyong, Ma Mingzhu, Liu Dunyi, Wan Yusheng. 2017. The Complexities of Zircon Crystallization and Overprinting during Metamorphism and Anatexis: an Example from the Late Archean TTG Terrane of Western Shandong Province, China. Precambrian Research, 300:181~200.

Foley S, Tiepolo M, Vannucci R. 2002. Growth of early continental

- crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 417(6891) : 837~840.
- Gao Lei, Liu Shuwen, Sun Guozheng, Guo Rongrong, Hu Yalu, Fu Jinghao, Wang Maojiang, Ma Chenchen, Hu Fangyang. 2018. Petrogenesis of late Neoproterozoic high-K granitoids in the Western Shandong terrane, North China Craton, and their implications for crust—mantle interactions. *Precambrian Research*, 315: 138~161.
- Gao Lei, Liu Shuwen, Zhang Bo, Sun Guozheng, Hu Yalu, Guo Rongrong. 2019. A ca. 2.8 Ga plume-induced intraoceanic arc system in the eastern North China Craton. *Tectonics*, 38, 1694~1717.
- Gao Lei, Liu Shuwen, Hu Yalu, Sun Guozheng, Guo Rongrong, Bao Han. 2020. Late Neoproterozoic Geodynamic Evolution: Evidence from the Metavolcanic Rocks of the Western Shandong Terrane, North China Craton. *Gondwana Research*, 80: 303~320.
- Ge Ningjie, Li Huiyu, Qin Liping, Hou Zhenhui, Bo Lin. 2001. Sr, Nd and Pb Isotope Geochemistry of Granulites and TTG Gneisses from the North Dabie Mountains. *Acta Geologica Sinica*, (03): 379~384.
- Ge, Rongfeng, Zhu, Wenbin, Wilde S A, Wu H. 2018. Remnants of Eoarchean continental crust derived from a subducted proto-arc. *Science Advances*, 4(2): 3159.
- Geng Yuansheng, Du Lilin, Ren Liudong. 2012. Growth and reworking of the early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes. *Gondwana Research*, 21 (2~3): 517~529.
- Guo Anlin. 1988. Relationships between the TTG gneisses and the greenstone belt in the Archean Dengfeng granite—greenstone terrane, central Henan and their implications for crustal evolution. *Geological Review*, 34: 123~131.
- Gutscher M A, Maury R, Eissen J P, Bourdon E. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28: 535~538.
- Hanson G N. 1978. The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. *Earth Planetary Science Letters*, 38(1): 26~43.
- Hawkesworth C, Cawood P, Dhuime B. 2013. Continental growth and the crustal record. *Tectonophysics*, 609: 651~660.
- Hu Yalu, Liu Shuwen, Gao Lei, Sun Guozheng, Guo Rongrong, Fu Jinghao, Wang Maojiang, Hu Fangyang. 2019. Diverse middle Neoproterozoic granitoids and the delamination of thickened crust in the Western Shandong Terrane, North China Craton. *Lithos*, 348~349, 105178.
- Huang Bo, Kusky T M, Johnson T E, Wilde S A, Wang Lu, Polat A, Fu Dong. 2020. Paired metamorphism in the Neoproterozoic: A record of accretionary-to-collisional orogenesis in the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 543.
- Huang Daomao, Dong Chunyan, Wan Yusheng. 2020. Late Neoproterozoic—Late Paleoproterozoic Magmato—Tectonothermal Events in the Xiaoqinling Area, Southern Margin of the North China Craton, as Documented by Zircon U—Pb—Hf Isotope Analyses and Whole-Rock Geochemistry. *Earth Science Earth Sci*, 45(09): 3330~3340.
- Huang Xiaolong, Niu Yaoling, Xu Yigang, Yang Qijun, Zhong Junwei. 2010. Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan—Taihua complex in the southern North China Craton: Implications for late Archean crustal accretion. *Precambrian Research*, 182(1~2): 43~56.
- Huang Xiaolong, Wilde S A, Zhong Junwei. 2013. Episodic crustal growth in the southern segment of the Trans-North China Orogen across the Archean—Proterozoic boundary. *Precambrian Research*, 233(3): 337~357.
- Jiang Yang, Zhao Xilin, Lin Shoufa, Donald W. DAVIS, Xing Guangfu, Li Longming, Duan Zheng. 2014. Identification and Tectonic Implication of Neoproterozoic Continental Margin—Arc TTG Assemblage in Southeastern Margin of the Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica*, 88(08): 1461~1474.
- Jiang Neng, Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Zhang Shuangquan. 2010. 2.7Ga crust growth in the North China craton. *Precambrian Research*, 179(1~4): 37~49.
- Kang N, Schmidt M W. 2017. The melting of subducted banded iron formations. *Earth and Planetary Science Letters*, 476: 165~178.
- Lao Ziqing, Wang Shijin. 1999. New advances in the study of the Dengfeng complex in the Songshan region, Henan Province. *Regional Geology of China*, (01): 10~17.
- Laurent O, Martin H, Moyen J F, Doucelance R. 2014. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of “modern-style” plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, 205: 208~235.
- Laurent O, Björnsen J, Wotzlaw J F, Bretscher S, Pimenta S M, Moyen J F, Ulmer P, Bachmann O. 2020. Earth’s earliest granitoids are crystal-rich magma reservoirs tapped by silicic eruptions. *Nature Geoscience*, 13(2): 163~169.
- Li Lei, Zhai Wenjian. 2019. Geochemistry and petrogenesis of the ca. 2.5 Ga high-K granitoids in the southern north china craton. *Journal of Earth Science*, 30(03): 647~665.
- Liu Chaohui, Can Jia. 2017. Provenance and depositional age of the Baiyunshan Formation of the Fengyang Group in the Wuhe Complex: Constraints from zircon U-Pb age and Lu—Hf isotopic studies. *Acta Petrologica Sinica*, 33: 2867~2880.
- Liu Chaohui, Zhao Guochun, Liu Fulai, Cai Jia. 2019. A Palaeoproterozoic—Mesoproterozoic micro-continent entrained in the Jiao—Liao—Ji Belt at the southeastern North China Craton: evidence from the zircon record in the Bengbu area. *Geological Magazine*, 156(9): 1565~1586.
- Liu Fulai, Zhang Jian, Liu Chaohui. 2017. Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Preface. *Precambrian Research*, 303: 1~9.
- Liu Heng, Wang Wei, Cawood P A, Mu Yali, Yao Jiachen, Li Jiawen, Guo Lishuang. 2020. Synchronous late Neoproterozoic Na- and K-rich granitoid magmatism at an active continental margin in the Eastern Liaoning Province of North China Craton. *Lithos*, 105770: 376~377.
- Liu Lei, Yang Xiaoyong. 2015. Temporal, environmental and tectonic significance of the Huoqiu BIF, southeastern North China Craton: Geochemical and geochronological constraints. *Precambrian Research*, 261: 217~233.
- Liu Lei, Yang Xiaoyong, Santosh M, Zhao Guochun, Aulbach S. 2016. U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from the Southeastern North China Craton: Meso- to Neoproterozoic episodic crustal growth in a shifting tectonic regime. *Gondwana Research*, 35: 1~14.
- Liu Lei, Yang Xiaoyong. 2017. Crust periodic evolution: evidence from the Taihua complex, southern North China Craton. *Precambrian Research*, 326: 24~34.
- Liu Lei, Zhang Huishan, Yang Xiaoyong, Li Yanguang. 2018. Age, origin and significance of the Wugang BIF in the Taihua complex, Southern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 95: 880~898.

- Liu Yican, Wang Chengcheng, Zhang Pingang, Nie Jiezheng. 2015. Growth and metamorphic evolution of the Precambrian lower crust at the southeastern margin of the North China Block. *Acta Petrologica Sinica*, (10): 2847~2862.
- Lu Junsheng, Zhai Mingguo, Kong Xu, Long Xiaoping, Feng Qiang. 2021. Clockwise P — T — t path for Paleoproterozoic metamorphism in the Huoqiu Metamorphic Complex of the southeastern North China Craton. *Lithos*, 106014: 386~387.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101:635~643.
- Martin H. 1994. The Archean grey gneisses and the genesis of the continental crust. In *Archean Crustal Evolution* (ed. K. C. Condie). Elsevier, Amsterdam, 205~259.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite—trondhjemite—granodiorite (TTG), and sanukitoid; relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1~24.
- Martin H, Moyen J F, Guitreau M, BlichertTof J, Pennec J L L. 2014. Why Archean TTG cannot be generated by MORB melting in subduction zones. *Lithos*, 198~199: 1~13
- McLennan S M, Taylor S R. 1982. Geochemical constraints on the growth of the continental crust. *The Journal of Geology*, 90(4):347~361.
- Middlemost E A K. , 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37: 215~224.
- Moyen J F. 2011. The composite Archean grey gneisses; Petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archean crustal growth. *Lithos*, 123:21~36.
- Moyen J F, Martin H. 2012. Forty years of TTG research. *Lithos*, 148: 312~336
- Nebel O, Capitanio F A, Moyen J F, Weinberg R F, Clos F, Nebel-Jacobsen Y J, Cawood P A. 2018. When crust comes of age; on the chemical evolution of Archean, felsic continental crust by crustal drip tectonics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 376: 20180103.
- Peng Touping, Fan Weiming, Peng Bingxia. 2012. Geochronology and geochemistry of late Archean adakitic plutons from the Taishan granite—greenstone Terrain; implications for tectonic evolution of the eastern North China Craton. *Precambrian Research*, 208~211: 53~71.
- Peng Touping, Wilde S A, Fan Weiming, Peng Bingxia. 2013. Late Archean siliceous high magnesian basalt (SHMB) from the Taishan Greenstone Terrane, Eastern North China Craton; petrogenesis and tectonic implications. *Precambrian Research*, 228: 233~249.
- Pourteau A, Doucet L S, Blereau E R, Volante S, Johnson T E, Collins W J, Li Zhengxiang. Champion D C. 2020. TTG generation by fluid-fluxed crustal melting; Direct evidence from the Proterozoic Georgetown Inlier, NE Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 550.
- Rapp R P, Watson E B, Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Research*, 51(1~4): 1~25.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar implications for continental growth and crust—mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4):891~931.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge; experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335~356.
- Ren Peng, Xie Hangqiang, Wang Shijin, Dong Chunyan, Ma Mingzhu, Liu Dunyi, Wan Yuseheng. 2015. 2.5~2.7 Ga Tectono-thermal Events in Western Shandong: Geology and Zircon SHRIMP Dating of TTG Rocks in Huangqian Reservoir, Taishan Mountain. *Geological Review*, 61(05):1068~1078.
- Ren Peng, Xie Hangqiang, Wang Shijin, Nutman Allen, Dong Chunyan, Liu Shoujie, Xie Shiwen, Che Xiaochao, Song Zhiyong, Ma Mingzhu, Liu Dunyi, Wan Yusheng. 2016. A Ca. 2.60 Ga Tectono—Thermal Event in Western Shandong Province, North China Craton from Zircon U—Pb—O Isotopic Evidence: Plume or Convergent Plate Boundary Process. *Precambrian Research*, 281: 236~252.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams, which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22:247~263.
- Shang C K, Satir M, Siebel W, Nsifa E N, Taubald H, Liegeois J P, Tchoua F M. 2004. TTG magmatism in the Congo craton; a view from major and trace element geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematics; Case of the sangmelima region, ntem complex, southern Cameroon—sciencedirect. *Journal of African Earth Sciences*, 40(1~2): 61~79.
- Shi Kangxing, Wang Changming, Santosh M, Yao Enya, Du Bin, Chen Qi, Zhu Jiaxuan. 2020. Neoproterozoic crustal growth and tectonic evolution of the TransNorth China Orogen, North China Craton; evidence from granite—greenstone successions in the Dengfeng Complex. *International Journal of Earth Sciences*, 2020, 109(8):2801~2823.
- Smithies R H. 2000. The Archean tonalite—trondhjemite—granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth And Planetary Science Letters*, 182: 115~125.
- Smithies R H, Champion D C, Kranendonk M J V. 2009. Formation of Paleoproterozoic continental crust through infracrustal melting of enriched basalt. *Earth and Planetary Science Letters*, 281:298~306.
- Sun Di, Li Qiugen, Liu Shuwen, Chen Xu, Wang Zongqi, Chen Yanjing, Cao Shutai, Wang Xiaoyu. 2019. Neoproterozoic magmatic arc evolution in the Wutai—Hengshan—Fuping area, North China Craton; New perspectives from zircon U-Pb ages and Hf isotopic data. *Precambrian Research*, 331.
- Sun Guozheng, Liu Shuwen, Santosh M. , Gao Lei, Hu Yalu, Guo Rongrong. 2019. Thickness and geothermal gradient of neoproterozoic continental crust; inference from the southeastern north China craton. *Gondwana Research*, 73: 16~31.
- Sun Guozheng, Liu Shuwen, Cawood P A, Tang Ming, Hunen J C, Gao Lei, Hu Yalu, Hu Fangyang. 2021. Thermal state and evolving geodynamic regimes of the Meso- to Neoproterozoic North China Craton. *Nature communication*, 12(1): 3888.
- Sun Guozheng. 2021. Meso- to Neoproterozoic granitoids and lithospheric thermal state in the Eastern North China Craton. Supervisor; Liu Shuwen. Doctoral Dissertation of Beijing University.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts; Implication and Processes. *Magmatism in the Ocean Basins*, 42:313~345.
- Kusky T M, Zhai Mingguo. 2012. The Neoproterozoic ophiolite in the north China craton; early Precambrian plate tectonics and scientific debate. *Journal of Earth Science*, 23(3):8.
- Wan Jianjun, Wang Andong, Pan Jiayong, Liu Chengdong, Zhao Yan, Zhou Zhengbing, Luo Xiandong. 2021. Episodic crustal growth and reworking at the southeastern margin of the North China Craton;

- evidence from zircon U-Pb and Lu—Hf isotopes of Archean tonalite—trondhjemite—granodiorite gneisses in the Bengbu—Wuhe area. *Acta Geochimica*, 40(3): 366~89.
- Wan Yusheng, Wang Shiyun, Zhao Xun, Zhou Hongying, Yin Xiaoyan, Yang Changxiu, Gao Zhilin, 2009&. Early Precambrian Crustal Evolution in the Dengfeng Area, Henan Province (eastern China): Constraints from Geochemistry and SHRIMP U-Pb Zircon Dating. *Acta Geologica Sinica*, 83(07): 982~999.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Wang Shijin, Dong Chunyan, Yang Enxiu, Wang Wei, Zhou Hongying, Du Lilin, Yin Xiaoyan, Xie Hangqiang, Ma Mingzhu. 2010a. Juvenile Magmatism and Crustal Recycling at the End of the Neoproterozoic in Western Shandong Province, North China Craton: Evidence from SHRIMP Zircon Dating. *American Journal of Science*, 310(10): 1503~1552.
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Wang Wei, Xie Hangqiang, Liu Dunyi. 2010b. Archean basement and a Paleoproterozoic collision Orogen in the Huoqiu area at the southeastern margin of North China Craton: evidence from sensitive high resolution ion micro-probe U-Pb zircon geochronology. *Acta Geological Sinica*, 84(1): 91~104.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Wang Wei, Song T, Kröner A, Dong Chunyan, Zhou Hongying, Yin Xiaoyan. 2011. Provenance of Mesoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: an integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry. *Gondwana Research*. 20: 219~242.
- Wan Yusheng, Xie Shiwen, Yang Chonghui, Kröner A, Ma Mingzhu, Dong Chunyan, Du Linli, Xie Hangqiang, Liu Dunyi. 2014. Early Neoproterozoic (~2.7 Ga) Tectono—Thermal Events in the North China Craton: A Synthesis. *Precambrian Research*, 247: 45~63.
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Ren Peng, Bai Wenqian, Xie Hangqiang, Xie Shiwen, Liu Shouji, Ma Mingzhu, Liu Dunyi. 2015&. The formation and evolution of Archean TTG rocks in the North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 89(S1): 304.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Dong Chunyan, Xie Hangqian, Kröner A, Ma Mingzhu, Liu Shoujie, Xie Shiwen, Ren Peng. 2015. Formation and evolution of Archean continental crust of the North China Craton. *Springer Geology*, 2: 59~136.
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Ren Peng, Bai Wenqian, Jie Wanqiang, Liu Shoujie, Xie Shiwen, Liu Dunyi. 2017 &. Spatial and temporal distribution, compositional characteristics and formation and evolution of Archean TTG rocks in the North China Craton: A synthesis. *Acta Petrologica Sinica*, 33(05): 1405~1419.
- Wan Yusheng, Xie Hangqiang, Wang Huichu, Li Pengchuan, Chu Hang, Xiao Zhibin, Dong Chunyan, Liu Shouji, Li Yuan, Hao Guangming, Liu Dunyi. 2021&. Discovery of ~3.8 Ga TTG rocks in eastern Hebei, North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 95(05): 1321~1333.
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2021&. Late Carboniferous TTG magmatic event in the Hegenshan suture zone: zircon U-Pb geochronology and geochemical constraints from the Huduge trondhjemite. *Acta Geologica Sinica*, 95(02): 396~412.
- Wang Shijin, Wan Yusheng, Zhang Chengji, Yang Enxiu, Song Zhiyong, Wang Lifa, Zhang Fuzhong. 2008&. Major Advanced Development Gained in Studying Early Cambrian Geology in Luxi Area. *Shandong land and resources*, (01): 10~20.
- Wang Shijin, Wan Yusheng, Wang Wei, Song Zhiyong, Dong Chunyan, Wang Lifa, Yang Enxiu. 2010&. SHRIMP U-Pb Age Dating and the Formation Age of Zircon in Guimengding Rock and Yunmengshan Rock in Mengshan Area of Luxi. *Shandong land and resources*, 26(05): 1~6.
- Wang Wei, Liu Shuwen, Bai Xiang, Yang Pengtao, Li Qiugen, Zhang Lifei. 2011. Geochemistry and zircon U—Pb—Hf isotopic systematics of the Neoproterozoic Yixian—Fuxin greenstone belt, northern margin of the North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Gondwana Research*, 20(1): 64~81.
- Wang Wei, Zhai Mingguo, Wang Shijin, Santosh M., Du Lilin, Xie Hangqiang, Lv Bin, Wan Yusheng. 2013. Crustal reworking in the North China Craton at ~2.5 Ga: evidence from zircon U-Pb age, Hf isotope and whole rock geochemistry of the felsic volcano-sedimentary rocks from the western Shandong Province. *Geological Journal*, 48(5): 406~28.
- Wang Wei, Liu Shuwen, Santos M, Wang Genhou, Bai Xiang, Guo Rongrong. 2015. Neoproterozoic intra-oceanic arc system in the Western Liaoning Province: Implications for Early Precambrian crustal evolution in the Eastern Block of the North China Craton. *Earth-Science Reviews*, 150: 329~364.
- Wang Wei, Liu Shuwen, Bai Xiang, Guo Rongrong. 2015 &. Precambrian geodynamics (m); Late Archean crustal growth models recorded in the North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 22(06): 109~124.
- Wang Wei, Cawood P A, Liu Shuwen, Guo Rongrong, Bai Xiang, Wang Kang. 2017. Cyclic formation and stabilization of Archean lithosphere by accretionary orogenesis: Constraints from TTG and potassic granitoids, North China Craton. *Tectonics*, 36: 1724~1742.
- Wang Xue, Huang Longxiao, Yang Fan, Luo Zhengxian. 2017. Late Neoproterozoic magmatism and tectonic evolution recorded in the Dengfeng Complex in the southern segment of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 302: 180~197.
- Wang Yuejun, Zhang Yuzhi, Zhao Guochun, Fan Weiming, Xia Xiaoping, Zhang Feifei, Zhang Aimei. 2009. Zircon U-Pb Geochronological and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of the Taishan Sanukitoids (Shandong): Implications for Neoproterozoic Subduction in the Eastern Block, North China Craton. *Precambrian Research*, 174(3~4): 273~286.
- Wilson J T. 1963. Evidence from islands on the spreading of the ocean floor. *Nature*, 197, 536~538.
- Wu K K, Zhao Guochun, Sun Min, Yin Changqing, He Yanhong, Tam P Y. 2013. Metamorphism of the Northern Liaoning Complex: implications for the tectonic evolution of the Late Archean basement of the Eastern Block, North China Craton. *Geoscience Frontiers*, 4: 305~320.
- Wu Meiling, Lin Shoufa, Wan Yusheng, Gao Jianfeng. 2016. Crustal evolution of the Eastern Block in the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Lu—Hf isotopes of the Northern Liaoning Complex. *Precambrian Research*, 275: 35~47.
- Wu Mengqian, Zuo Menglu, Zhang Dehui, Zhao Guochun. 2014&. Genesis and Diagenetic Environment of TTG Suite. *Geological Review*, 60(03): 503~514.
- Xing Fengming, Ren Siming. 1984 &. The preliminary study on origin of the banded and striped silico—iron formation of Huoqiu Group in western Anhui. *Acta Geological Sinica*, 1: 35~48.
- Xiong Xiaolin, Adam J Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt;

- Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218: 339~359.
- Yang Chun, Song Biao, Pan Miao, Zhang Shengxiang, Chen Huaguo, Gao Aiping. 1997. The Petrologic Characteristics and Single-Zircon Dating of the Early -Precambrian TTG in the Middle of Mengshan Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, (03): 101~106.
- Yang Enxiu, Tao Youbing, Zhang Xinping, Zhu Jituo, Wan Yusheng, Wang Shijin. 2008. SHRIMP zircon dating of granitic gravel from Neoproterozoic Yanlinguan Formation in western Shandong and its geological significance. *Geochemica*, 37, 481~487.
- Yang Xiaoyong, Wang Huabo, Du Zhenbao, Wang Qicai, Wang Yuxian, Zhang Wenli, Sun Weidong. 2012. On the metamorphism of the Huoqiu Group, forming ages and mechanism of BIF and iron deposit in the Huoqiu region, southern margin of North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (11): 3476~3496.
- Yang Xiaoyong, Liu Lei, Lee I, Wang Bohua, Du Zhenbao, Wang Qicai, Wang Yuxian, Sun Weidong. 2014. A review on the Huoqiu banded iron formation (BIF), southeast margin of the North China Craton: genesis of iron deposits and implications for exploration. *Ore Geology Reviews*, 63:418~443.
- Zhai Mingguo, Bian Aiguo, Zhao Taiping. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of the Neoproterozoic, and its break-up during the Late Palaeoproterozoic and Meso-proterozoic. *Science China Earth Sciences*, 43:219~232.
- Zhai Mingguo. 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review. *Science China Earth Sciences*, 54: 1110~1120.
- Zhai Mingguo. 2012. Evolution of the North China Craton and Early Plate Tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 86: 1335~1349.
- Zhai Mingguo, Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth. *Gondwana Research*, 24(1): 275~297.
- Zhai Mingguo, Zhao Lei, Zhu Xiyan, Jiao Shujuan, Zhou Yanyan, Zhou, Ligang. 2020. Review and overview for the frontier hotspot: Early continents and start of plate tectonics. *Acta Petrologica Sinica*, 36(08): 2249~2275.
- Zhang Lianchang, Zhai Mingguo, Zhang Xiaojing, Xiang Peng, Dai Yanpei, Wang Changle, Pirajno F. 2012. Formation age and tectonic setting of the Shirengou Neoproterozoic banded iron deposit in eastern Hebei Province: Constraints from geochemistry and SIMS zircon U-Pb dating. *Precambrian Research*, 222~223: 325~338.
- Zhang Guowei, Bai Yubao, Song Yong, Guo Anlin, Zhou Dingwu, Li Taohong. 1985. Composition and evolution of the Archean crust in central Henan, China. *Precambrian Research*, 27: 7~35.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, Li Sanzhong. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 136: 177~202.
- Zhao Guochun, Wilde S A, Sun Min, Guo Jinghui, Kröner A, Li Sanzhong, Li Xuping, Zhang Jian. 2008. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Huai'an complex: constraints on Late Archean to Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Trans-North China Orogen. *American Journal of Science*, 308(3): 270~303.
- Zhao Guochun, Zhang Guowei. 2021. Origin of continents. *Acta Geologica Sinica*, 95: 1~19.
- Zhao Zongbo. 1993. Precambrian crustal evolution of Sino Korean paraplatform. Beijing: Science Press, 389~390.
- Zhou, Yanyan, Zhao, Taiping, Xue, Liangwei, Wang Shiyuan, Gao Jianfeng. 2009. Petrological, geochemical and chronological constraints for the origin and geological significance of Neoproterozoic TTG gneiss in the Songshan area, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 331~347.
- Zhou Yanyan, Zhao Taiping, Wang Y C, Hu Guohui. 2011. Geochronology and Geochemistry of 2.5 to 2.4 Ga Granitic Plutons from the Southern Margin of the North China Craton: Implications for a Tectonic Transition from Arc to Post-Collisional Setting. *Gondwana Research*, 20(1): 171~183.
- Zhou Yanyan, Zhao Taiping, Zhai Mingguo, Gao Jianfeng, Sun Qianying. 2014. Petrogenesis of the Archean tonalite—trondhjemite—granodiorite (TTG) and granites in the Lushan area, southern margin of the North China Craton: Implications for crustal accretion and transformation. *Precambrian Research*, 255: 514~537.

Formation and evolution of Archean TTG in southeastern North China Craton

LIU Lei^{1,2}, KANG Shisheng^{1,2}, LIU Heng^{1,2}, HU Tianyang^{1,2}, ZHOU Weijian³, ZHANG Yunfei^{1,2},

1) Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring,

Ministry of Education in Central South University, Changsha, 410083;

2) School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, 410083;

3) Natural Resources department, Hunan College of Engineering Vocational Technology, Changsha, 410083

Abstract: The North China Craton (NCC) is one of the cratons that preserve a large number of Archean Tonalite—Trondhjemite—Granodiorite (TTG) rocks and multi-stage magmatic events. The related studies of NCC have important implications for revealing the late Archean crust—mantle dynamic evolution. This paper collects and arranges the valid geochemical data of 52 Archean TTG gneiss samples in the Xuhuai area, which is located in the southeastern of NCC. According to the distribution of region and petrogenesis, it can be divided into three parts: the low-aluminum and low-pressure TTG rocks in the southeast (Huoqiu and Wuhe) of the Xuhuai area, the medium-aluminum and medium—low-pressure TTG rocks in the north—central (Western Shandong C belt and Zhanghe), and the high-aluminum and high-pressure TTG rocks in the western area (Dengfeng). The TTG gneiss in the Xuhuai area

has significantly two stages crustal growth: 2.95 ~ 2.70 Ga, 2.58 ~ 2.48 Ga (peak value ~ 2.52 Ga). Based on analysis of major and trace elemental data, it is proposed that they are properly sourced from the partial melting of low-K mafic rocks and the magma source area of TTG gneiss may be affected by the mixture of crust—mantle interaction. The source region of Huoqiu TTG had subjected to fluid metasomatism, whereas the the source region of Dengfeng magma had suffered melt metasomatism. The magma source regions of Western Shandong and Zhanghe had experienced both melt and fluid metasomatism. Tectonic systems show that mantle plume vertical structure may impact the generation of TTG gneiss in the Huoqiu area. In the late Archean, western Shandong and Zhanghe areas may have a relationship of TTG gneiss forming especially lateral intra-oceanic subduction and arc—continent collision accretion control of intra-oceanic island arc terrane, and experienced regional granulite facies metamorphism.

Acknowledgements: This study was financially supported by the National Natural Science Foundation of China and the scientific and technological innovation team of Hunan Province (grants Nos. 41972198 and 2021RC4055)

Keywords: TTG gneiss; Crust—mantle interaction; North China Craton; Arc—continental accretion

First Author: LIU Lei, male, born in 1984. professor, doctoral supervisor, mainly engaged in Precambrian Geology and deposit geochemistry. E-mail: liu01@ustc.edu.cn

Manuscript received on: 2022-03-20; Accepted on: 2022-08-15; Network published on: 2022-08-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.08.055 **Edited by:** ZHANG Yuxu

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total	Mg [#]	K ₂ O/Na ₂ O	A/CNK	Ba	Rb
鲁西C带																		
16SD98-1	69.21	15.29	3.52	3.92	2.68	1.42	2.23	3.94	0.06	0.39	0.17	0.6	99.85	41.78	0.57	1.11	691	76
16SD103-1	66.83	17.18	2.37	2.64	2.95	1.05	1.55	5.9	0.03	0.46	0.13	1.23	99.94	44.07	0.26	1.03	384	62
16SD109-2	70.41	15.27	2.31	2.57	2.21	0.73	1.9	5.15	0.03	0.27	0.06	1.22	99.82	36.01	0.37	1.05	1168	43
16SD123-1	65.96	16.1	4.14	4.6	3.54	1.76	2.36	4.42	0.08	0.46	0.18	0.35	99.81	43.11	0.53	0.99	919	95
霍邱地区																		
ZK242-45-2	66.2	16.1	3.78	4.2	4.2	1.1	1.3	4.5	0.1	0.5	0.4	0.5	99.2	34.16	0.29	0.98	560	35
ZK242-47	71.4	15	2.16	2.4	2.9	0.6	1.8	4.6	0	0.3	0.1	0.3	99.5	33.12	0.39	1.01	430	47.3
ZK242-55	73.6	14.1	1.98	2.2	2.3	0.5	1	5.1	0	0.2	0	0.4	99.4	31.04	0.20	1.03	250	39.5
ZZZK62-2-1	70.1	15.3	2.61	2.9	1.6	1.6	2.2	5.3	0	0.3	0.1	0.6	100.2	52.22	0.42	1.09	700	73.6
ZZZK62-2-2	67.4	15.8	3.33	3.7	1.7	1.8	2.2	5.4	0	0.4	0.1	0.6	99.4	49.08	0.41	1.10	590	82.2
ZZZK62-2-3	73.5	14.4	1.62	1.8	1.7	0.8	1.1	5.7	0	0.2	0.1	0.7	99.9	46.82	0.19	1.05	350	35.5
ZZZK62-3-1	71.2	15	2.43	2.7	1.8	1	1.5	5.3	0	0.4	0.1	1.2	100.3	42.32	0.28	1.10	360	61.4
ZZZK62-3-2	60.1	21	2.79	3.1	2.5	1.1	3	7.1	0	0.4	0.1	1.1	99.4	41.28	0.42	1.08	800	104
BTZK509-4-1	71.6	13.9	1.80	2	2.9	0.9	2	4.3	0	0.1	0.2	0.6	98.5	47.13	0.47	0.96	430	80.9
BT209-5	71.1	14.6	2.25	2.5	1.8	0.7	2.2	4.9	0	0.3	0.1	0.8	99.3	35.68	0.45	1.06	720	76.1
BT209-8	72.9	13.4	2.07	2.3	2.2	1.6	1.6	4	0.1	0.2	0.1	0.8	99.1	57.95	0.40	1.09	510	83.8
BT209-9	71.5	13.4	3.15	3.5	1.8	2.5	1.4	4.1	0	0.3	0.1	0.9	99.6	58.59	0.34	1.16	350	55.1
BT816-3	70.3	14.8	4.41	4.9	1.9	0.7	1.5	4.9	0.1	0.1	0.1	0.6	99.9	22.06	0.31	1.13	510	58.6
ZK242-46-1	59.3	16.1	7.83	8.7	4.7	2.7	2.3	3.6	0.2	1	0.2	0.7	99.5	38.07	0.64	0.95	590	63.7
ZZZK62-3-3	71.2	14.7	2.07	2.3	2.5	1	2.6	3.9	0	0.3	0.1	1.1	99.8	46.27	0.67	1.07	610	114.5
登封地区																		
DF07-08	68.92	16.1	2.52	2.8	2.72	0.84	1.67	5.03	0.03	0.3	0.09	1.1	99.6	37.28	0.33	1.07	488	46
DF07-13	68.95	15.6	2.79	3.1	2.57	1.24	1.71	4.86	0.05	0.32	0.09	1.4	99.9	44.21	0.35	1.07	445	61.9
DF07-15	62.95	17.3	4.14	4.6	3.85	1.78	2.1	4.84	0.06	0.64	0.14	1.6	99.8	43.39	0.43	1.00	345	89.6

DF07-16	64.78	16.1	4.59	5.1	3.86	1.83	1.92	4.27	0.06	0.54	0.15	1.1	99.7	41.55	0.45	1.00	235	80.2
DF07-17	67.14	16	3.69	4.1	3.71	1.25	1.48	4.61	0.05	0.38	0.11	0.9	99.6	37.65	0.32	1.00	336	53.3
DF07-18	61.89	17.3	4.95	5.5	5.3	1.81	1.9	4	0.07	0.71	0.15	1.1	99.7	39.46	0.48	0.95	266	69.4
DF07-19	66.29	16.5	3.60	4	4.1	1.28	1.75	4.49	0.05	0.34	0.11	0.9	99.8	38.80	0.39	0.99	378	58.7
DF07-20	66.85	16.3	3.51	3.9	3.27	1.48	1.63	4.9	0.04	0.38	0.11	1	99.9	42.91	0.33	1.03	155	70
DF07-21	64.18	17.2	3.78	4.2	4.22	1.52	1.89	4.51	0.05	0.54	0.12	1.1	99.6	41.76	0.42	1.00	315	62.1
DF07-24	64.97	16.9	3.51	3.9	4.46	1.34	1.78	4.46	0.05	0.5	0.12	1.1	99.6	40.50	0.40	0.97	332	57.1
DF07-25	66.82	16.4	3.15	3.5	4.12	1.33	1.72	4.38	0.04	0.35	0.12	0.8	99.6	42.95	0.39	0.99	293	56.9
DF07-26	63.56	17.9	3.96	4.4	3.79	1.68	1.93	5.18	0.06	0.57	0.13	0.8	100.1	43.06	0.37	1.02	288	75.4
DF07-27	63.26	17.4	4.32	4.8	3.88	1.91	1.88	4.98	0.05	0.61	0.16	1	99.9	44.08	0.38	1.01	115	86
DF07-28	64.42	16.5	4.14	4.6	4.77	1.72	2.1	3.65	0.05	0.59	0.14	1	99.5	42.55	0.58	0.97	314	74.6
DF05-8	69.03	17.5	2.06	2.29	1.02	0.7	2.41	5.06	0.03	0.31	0.07	1.41	99.84	37.71	0.48	1.37	906	59
DF05-9	68.7	16.38	2.55	2.83	2.01	1.19	2.96	3.2	0.03	0.29	0.08	1.56	99.21	45.44	0.93	1.35	890	92
DF05-1	66.67	17.61	2.59	2.88	3.43	1.3	2.04	4.28	0.03	0.31	0.12	0.7	99.36	47.21	0.48	1.14	846	62.1
DF05-4B	66.74	15.89	3.88	4.31	3.83	1.78	2.22	3.51	0.05	0.38	0.12	1.04	99.86	45.00	0.63	1.05	1130	68
DF13075	71.23	14.99	1.62	1.8	2.07	0.57	2.02	5.12	0.03	0.24	0.06	1.64	99.77	38.55	0.39	1.04	480	34.2
DF13078	71.99	15.2	1.72	1.91	1.69	0.56	1.16	5.49	0.02	0.24	0.05	1.77	100.09	36.74	0.21	1.14	749	20.5
14DF24-01	66.2	15.74	3.27	3.63	3.94	1.24	1.3	4.76	0.05	0.36	0.11	0.96	98.29	40.36	0.27	0.96	476	55.4
BG16D1B1	69.89	15.36	2.28	2.53	2.3	1.05	1.77	5.35	0.04	0.34	0.1	0.85	99.78	45.12	0.33	1.03	473	60.2
BG16D4B1	58.71	18.57	5.08	5.65	6.2	2.31	2.02	4.44	0.08	0.83	0.18	0.87	99.74	44.75	0.45	0.89	310	67.7
XS0416-10	62.7	17.03	2.44	2.71	4.87	2.11	1.83	4.74	0.06	0.63	0.16	0.91	100.14	60.67	0.39	0.91	143	81.9
DF-24	70.31	15.41	1.76	1.96	2.37	0.55	2.26	5.56	0.02	0.23	0.04	1.08	99.8	35.73	0.41	0.97	571	36.2
DF-48	67.79	15.9	3.22	3.58	4.48	1.34	1.38	4.16	0.04	0.31	0.07	0.89	99.94	42.58	0.33	0.96	602	52.7

Sample	Sr	Cr	Co	Ni	Cs	V	Ta	Nb	Hf	Zr	Y	Th	U	La	Ce	Pr		
鲁西C带																		
16SD98-1	371	40	10.8	21	3.51	63	0.77	5.62	3.2	120	10.7	6.46	1.51	26	50	5.24		
16SD103-1	556	16.2	1.46	5.58	2.49	61	0.27	5.04	3.74	146	13.4	10.2	1.3	33	61	6.81		
16SD109-2	355	37	5.73	8.96	0.5	45	0.38	5.76	2.01	77	9.43	6.33	0.72	14.3	30	2.83		
16SD123-1	575	65	11.4	21	4.26	72	0.56	6.27	4.17	158	12.9	9.74	2.12	36	70	7.7		

霍邱地区

ZK242-45-2	357	20	8.5	10.1	2.24	48	0.16	3.5	0.4	13.2	9.6	0.8	0.5	12.1	31.1	3.9
ZK242-47	229	14	4.2	4.3	0.8	21	0.17	3	0.6	22	2.8	2.8	0.5	12.8	26.2	2.78
ZK242-55	183.5	11	2.9	1.9	0.77	12	0.16	2.7	0.5	22.6	3.3	2.5	0.3	13.5	24.9	2.54
ZZZK62-2-1	170.5	5	4.7	1.9	5.66	25	0.34	5.5	1	41.4	2.7	15	1.2	40.9	69.3	6.96
ZZZK62-2-2	170.5	8	6.1	2.8	6.97	33	0.43	7	0.9	36.4	3.4	13.1	1.4	37.3	64.7	6.63
ZZZK62-2-3	169	3	3.4	1.4	2.31	13	0.24	3.2	1	34.2	2.8	19.4	1.9	41.3	72.6	7.54
ZZZK62-3-1	200	3	3.8	1.5	1.44	25	0.39	5.5	1.4	55.3	3.4	22.4	1.7	43.7	81.5	8.57
ZZZK62-3-2	291	3	5	1.8	3.31	25	0.56	6.5	1.3	49.3	7.4	40.5	3.6	59.1	111.5	12.05
BTZK509-4-1	375	31	4.9	16.3	2.78	25	1.51	4.7	1	25.6	6.2	3.3	7.3	7.2	15.25	1.73
BT209-5	238	10	3.9	2.7	1.41	23	0.44	5.1	1.1	45.3	2.6	18.7	2.4	32.4	57.8	5.85
BT209-8	144.5	14	3.4	2.3	5.32	17	0.28	3.8	0.6	24.6	3.7	15.2	2	31.4	55.1	5.51
BT209-9	265	29	9.8	15.8	4.79	49	0.21	2.5	0.4	13.4	4.3	6	2.5	17.3	34.6	4.02
BT816-3	253	15	3.8	4.9	1.45	18	0.39	3.4	0.7	20.9	6.1	9.3	7.1	17.1	34.5	3.57
ZK242-46-1	245	32	20.9	20.7	3.45	146	1.21	11.7	0.9	22.6	14.4	1.5	0.8	8.3	23.3	3.32
ZZZK62-3-3	227	5	3.3	1.3	4.34	23	0.45	4.6	0.7	27.6	3	15.6	1.4	28.6	54.9	5.69
登封地区																
DF07-08	493	9	127.7	6.1	1.26	30	0.4	2.88	2.74	115	4.6	2.58	0.43	20.2	38.5	4.13
DF07-13	462	14	127.9	10	1.54	41	0.36	2.52	2.92	123	3.9	1.69	0.29	12.9	25.4	2.76
DF07-15	550	18	80.5	12.5	3.44	76	0.63	6.99	4.26	191	9.9	1.18	1.33	8.8	19.7	2.77
DF07-16	517	19	97.8	12.6	3.42	90	0.28	2.96	3.58	132	7.6	1.06	0.37	7.8	18.1	2.45
DF07-17	536	13	136.6	9.5	2.84	59	0.41	2.74	3.05	117	6.6	0.91	0.6	7.2	16.3	2.18
DF07-18	634	21	108	14.5	3.72	91	0.53	4.5	5.13	231	9.4	1.17	0.6	8.7	20.8	2.84
DF07-19	586	14	123.2	10.2	2.56	51	0.34	2.59	2.47	96	5.6	1.9	0.41	15.4	30.2	3.39
DF07-20	517	14	121.8	9.8	2.76	50	0.26	2.09	2.44	99.6	5	2.35	0.25	22.9	43.6	4.66
DF07-21	635	20	109	12.3	2.36	76	0.43	3.93	3.49	149	8.2	2.04	0.64	12	25.1	3.13
DF07-24	590	13	94.4	8.7	2.38	59	0.59	3.7	2.92	126	6.6	0.97	0.38	8.8	19.6	2.55
DF07-25	613	11	107.6	7.5	1.95	48	0.26	1.94	2.86	115	4.8	1.73	0.17	16	31	3.46
DF07-26	510	18	83.4	11.3	3.12	67	0.31	3.99	3.11	139	6.6	1.39	0.44	7.8	18	2.41
DF07-27	627	21	78.7	13.3	3.31	87	0.35	3.5	4	193	7.7	0.84	0.44	7.7	17.4	2.31
DF07-28	700	22	95.5	14.2	2.59	83	0.29	3.49	4.18	177	7.6	2.26	0.51	15.5	32.7	3.95

DF05-8	489	0.66	2.89	1.35	---	21.1	0.34	2.97	4.28	191	3.78	4.76	0.63	26.2	53.1	5.74
DF05-9	379	7.59	4.54	4.45	---	28	0.29	3.04	2.76	119	2.76	4.89	0.81	19.6	32.8	3.83
DF05-1	504	5.8	6.53	8.96	---	27.9	0.18	3	3.01	130	1.73	1.02	0.51	9.13	15.4	1.62
DF05-4B	460	31.7	11.2	17	---	43.3	0.43	5.15	3.75	146	7.07	7.88	1.43	24.2	44.9	5.01
DF13075	466	11.6	480	7	---	24.8	0.12	1.68	2.49	82.4	2.91	1.51	0.53	8.79	18	2.2
DF13078	369	10	749	4.59	---	23.1	0.16	1.75	2.79	93.3	2.97	1.4	0.52	7.89	16.4	2.01
14DF24-01	472	8	126.8	8	1.48	42	0.41	2.56	2.81	118.5	3.8	2.52	0.41	19.8	37.8	3.96
BG16D1B1	457	1.05	5.86	7.29	1.74	37.8	0.25	3.49	3.68	142	4.49	2.41	0.53	16.4	30	3.93
BG16D4B1	771	3.53	20.5	11.4	2.51	120	0.37	5.63	5.39	234	10.9	1.24	1.14	8.9	23.1	3.36
XS0416-10	701	36	---	---	---	---	0.32	6.71	4.79	148	7.6	0.81	0.56	7.97	16.2	2.14
DF-24	642	5.59	3.58	4.15	0.84	22.1	0.11	1.54	2.57	87.7	3.5	1.88	0.55	14.8	30.7	3.54
DF-48	380	14.9	9.02	18.12	1.7	44.1	0.16	2.89	4.07	156	8.57	6.33	0.47	25.7	47.8	4.89

Sample	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	TREE	Or	Ab	An
鲁西C带															
16SD98-1	19.4	3.46	1.04	3.17	0.41	2.16	0.42	1.17	0.17	1.09	0.17	113	13.817	34.947	12.778
16SD103-1	27	4.65	1.16	4.2	0.5	2.51	0.47	1.21	0.16	1.01	0.15	144	9.532	51.963	14.349
16SD109-2	11.1	1.96	0.98	2.2	0.27	1.67	0.34	1.11	0.17	1.21	0.18	68	11.695	45.38	11.011
16SD123-1	27	4.77	1.46	4.13	0.51	2.48	0.47	1.3	0.19	1.24	0.19	157	14.703	39.423	17.274
霍邱地区															
ZK242-45-2	15.1	3.38	0.88	2.99	0.42	2.23	0.42	1.08	0.13	0.73	0.11	75	8.138	40.337	19.302
ZK242-47	9	1.42	0.56	0.95	0.12	0.58	0.11	0.28	0.04	0.24	0.04	55	10.998	40.252	14.206
ZK242-55	8.9	1.38	0.51	1.16	0.16	0.75	0.12	0.31	0.03	0.19	0.03	54	6.105	44.585	11.788
ZZZK62-2-1	22.3	2.96	0.68	1.36	0.14	0.62	0.1	0.22	0.03	0.18	0.04	146	13.474	46.472	7.546
ZZZK62-2-2	21.9	3.13	0.72	1.65	0.16	0.83	0.13	0.29	0.03	0.2	0.05	138	13.716	48.198	8.209
ZZZK62-2-3	24.6	3.33	0.68	1.52	0.14	0.67	0.11	0.23	0.03	0.19	0.04	153	6.666	49.467	7.979
ZZZK62-3-1	28.2	4.25	0.65	2.16	0.2	0.85	0.13	0.3	0.03	0.21	0.05	171	9.207	46.573	8.593

ZZZK62-3-2	40.1	6.42	0.97	3.59	0.38	1.74	0.28	0.63	0.07	0.43	0.08	237	18.604	63.039	12.327
BTZK509-4-1	6.5	1.41	0.42	1.43	0.22	1.16	0.21	0.61	0.08	0.54	0.09	37	12.327	37.942	13.259
BT209-5	19.6	2.77	0.65	1.67	0.17	0.64	0.1	0.23	0.03	0.19	0.05	122	13.586	43.324	8.652
BT209-8	18.4	2.53	0.82	1.69	0.19	0.79	0.13	0.33	0.04	0.24	0.05	117	9.84	35.217	10.677
BT209-9	15.2	2.52	0.82	1.91	0.23	1.02	0.16	0.4	0.05	0.29	0.05	79	8.699	36.478	8.705
BT816-3	11.5	2.01	0.51	1.23	0.17	0.96	0.19	0.55	0.08	0.6	0.08	73	9.39	43.925	9.294
ZK242-46-1	14.3	3.53	0.97	2.97	0.48	2.86	0.61	1.79	0.25	1.66	0.27	65	15.087	33.813	23.279
ZZZK62-3-3	18.7	2.84	0.59	1.58	0.16	0.72	0.11	0.24	0.04	0.23	0.05	114	15.956	34.27	12.2
登封地区															
DF07-08	14.22	2.14	0.6	1.64	0.18	0.85	0.15	0.37	0.05	0.32	0.05	83	10.312	44.475	13.485
DF07-13	9.72	1.56	0.51	1.29	0.15	0.74	0.13	0.33	0.05	0.3	0.05	56	10.596	43.112	12.751
DF07-15	12.57	3.01	0.94	2.62	0.36	1.98	0.35	0.9	0.13	0.8	0.12	55	13.249	43.73	19.422
DF07-16	10.75	2.33	0.79	2.17	0.29	1.61	0.29	0.73	0.1	0.64	0.1	48	12.132	38.636	19.434
DF07-17	9.29	1.97	0.7	1.71	0.23	1.2	0.23	0.57	0.08	0.51	0.08	42	9.231	41.174	18.67
DF07-18	12.79	2.8	0.85	2.5	0.35	1.82	0.34	0.86	0.12	0.8	0.12	56	12.056	36.343	25.381
DF07-19	12.47	2.03	0.64	1.65	0.2	1.1	0.2	0.51	0.07	0.45	0.07	68	10.897	40.032	20.674
DF07-20	15.71	2.09	0.61	1.57	0.18	0.91	0.17	0.45	0.06	0.42	0.06	93	10.147	43.662	16.328
DF07-21	12.98	2.68	0.83	2.32	0.31	1.57	0.29	0.72	0.1	0.68	0.11	63	11.855	40.498	21.386
DF07-24	10.5	2.14	0.69	1.77	0.23	1.18	0.23	0.57	0.08	0.53	0.08	49	11.122	39.905	22.027
DF07-25	12.63	2.06	0.54	1.54	0.18	0.88	0.17	0.4	0.05	0.35	0.05	69	10.667	38.898	20.629
DF07-26	10	2.1	0.75	1.75	0.24	1.17	0.23	0.55	0.08	0.49	0.09	46	12.032	46.235	18.94
DF07-27	9.85	2.15	0.81	1.85	0.25	1.33	0.25	0.65	0.09	0.57	0.09	45	11.802	44.771	19.339
DF07-28	15.48	2.69	0.85	2.28	0.28	1.38	0.27	0.7	0.09	0.63	0.09	77	13.208	32.874	23.885
DF05-8	19.2	2.62	0.74	1.62	0.17	0.72	0.13	0.36	0.06	0.33	0.05	111	14.815	44.542	4.787
DF05-9	12.6	1.9	0.67	1.14	0.14	0.54	0.11	0.26	0.04	0.25	0.04	74	18.444	28.55	9.964
DF05-1	5.19	0.81	0.49	0.71	0.08	0.37	0.07	0.18	0.03	0.17	0.03	34	12.588	37.807	16.949
DF05-4B	17	2.71	0.76	2.33	0.27	1.35	0.26	0.66	0.1	0.68	0.11	100	13.882	31.418	19.273
DF13075	8.51	1.57	0.45	1.13	0.13	0.62	0.11	0.28	0.04	0.25	0.04	42	12.392	44.974	10.256
DF13078	7.86	1.49	0.41	1.08	0.13	0.61	0.11	0.29	0.04	0.27	0.04	39	7.109	48.189	8.357
14DF24-01	13.82	2.09	0.58	1.68	0.16	0.81	0.14	0.36	0.06	0.33	0.04	82	8.197	42.985	18.935
BG16D1B1	14.4	2.44	0.7	1.67	0.2	0.99	0.17	0.48	0.06	0.37	0.05	72	10.874	47.055	11.183
BG16D4B1	15.4	3.63	1.14	3.17	0.42	2.2	0.41	1.09	0.14	0.92	0.14	64	12.788	40.252	26.54

XS0416-10	9.37	2.14	0.76	1.91	0.28	1.48	0.27	0.76	0.1	0.7	0.11	44	11.488	42.613	21.018
DF-24	12.6	1.87	0.51	1.24	0.13	0.61	0.11	0.25	0.04	0.24	0.04	67	13.805	48.629	10.764
DF-48	16.2	2.35	0.63	2.06	0.28	1.57	0.31	0.78	0.11	0.68	0.1	103	8.539	36.868	21.616

Reference:

- Deng Hao, Kusky T, Polat Al, Wang Chen, Wang Lu, Li Yunxiu, Wang Junpeng. 2016. A 2.5Ga fore-arc subduction-accretion complex in the Dengfeng Granite-Greenstone Belt, Southern North China Craton. *Precambrian Research*, 275: 241-264.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Guo Anlin, Wang Hongliang, Liu Xiaoming. 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: 149-170.
- Huang Xiaolong, Wilde S A, Zhong Junwei. 2013. Episodic crustal growth in the southern segment of the Trans-North China Orogen across the Archean-Proterozoic boundary. *Precambrian Research*, 233(3):337-357.
- Liu Lei, Yang Xiaoyong, Santosh M, Aulbach S. 2015. Neoarchean to Paleoproterozoic continental growth in the southeastern margin of the North China Craton: Geochemical, zircon U–Pb and Hf isotope evidence from the Huoqiu complex. *Gondwana Research*, 28: 1002-1018.
- Shi Kangxing, Wang Changming, Santosh M, Yao Enya, Du Bin, Chen Qi, Zhu Jiaxuan. 2020. Neoarchean–Paleoproterozoic crustal growth and tectonic evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton: evidence from granite–greenstone successions in the Dengfeng Complex. *International Journal of Earth Sciences*, 2020, 109(8):2801-2823.
- Sun Guozheng, Liu Shuwen, Santosh M., Gao Lei, Hu Yalu, Guo Rongrong. 2019. Thickness and geothermal gradient of neoarchean continental crust: inference from the southeastern north china craton. *Gondwana Research*, 73: 16-31.
- Wang Xue, Huang Longxiao, Yang Fan, Luo Zhengxian. 2017. Late Neoarchean magmatism and tectonic evolution recorded in the Dengfeng Complex in the southern segment of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 302: 180-197.
- 万渝生, 刘敦一, 王世炎, 赵逊, 董春艳, 周红英, 殷小艳, 杨长秀, 高林志. 2009. 登封地区早前寒武纪地壳演化—地球化学和锆石 SHRIMP U–Pb 年代学制约. *地质学报*, 83(7): 982–999.
- 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎, 高剑峰. 2009. 河南嵩山地区新太古代TTG质片麻岩的成因及其地质意义: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约. *岩石学报*, 25(2): 331–347.

样品号	岩性	采样地点	测试方法	形成年龄 (Ma)	数据来源
霍邱地区					
HQ0708	片麻状英云闪长岩	吴集村	SHRIMP 锆石 U-Pb	2754±13	Wan et al., 2010
HQ0704	条带状英云闪长岩	吴集村	SHRIMP 锆石 U-Pb	2564±25	Wan et al., 2010
ZK122-2	正片麻岩	张庄	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	2711±25	Liu et al., 2015
ZK122-3	TTG片麻岩	张庄		2914±14	Liu et al., 2015
ZK3-511	正片麻岩	班台子	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	2765±11	Liu et al., 2015
ZX34-40	正片麻岩	崇辛集	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	2752±24	Liu et al., 2015
18AHB01-1	花岗闪长岩			2911±7	Sun et al., 2021
18AHB02-1	花岗闪长岩			2929±6	Sun et al., 2021
18AHB02-3	奥长花岗岩			2931±5	Sun et al., 2021
五河地区					
14SZS01	花岗闪长质片麻岩	狮子山		2510±21	Wan et al., 2021
14XMC01	花岗闪长质片麻岩	香庙村		2777±41	Wan et al., 2021
14XMC02	花岗闪长质片麻岩	香庙村		2790±17	Wan et al., 2021
14BB07	花岗闪长质片麻岩	狮子山		2510±18	万建军, 2016
14BB09	花岗闪长质片麻岩	香庙村		2625±12	万建军, 2016
14BB44-1	花岗闪长质片麻岩	蚌埠东南		2929±7	Liu, 2019
14BB35-1	花岗闪长质片麻岩	五河	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	2731±9	Liu, 2019
登封地区					
XS0416-10	英云闪长质片麻岩	嵩山（路家沟）	SHRIMP 锆石 U-Pb	2531±9	万渝生等, 2009
XS0416-12	奥长花岗质片麻岩	嵩山（会善寺）	SHRIMP 锆石 U-Pb	2553±8	万渝生等, 2009
DF07-08	奥长花岗质片麻岩	何家沟	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	2511±10	Diwu et al., 2011
DF07-10	奥长花岗质片麻岩	何家沟	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	2504±8	Diwu et al., 2011
DF07-15	英云闪长质片麻岩	刘家沟	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	2547±17	Diwu et al., 2011
DF07-24	英云闪长质片麻岩	刘家沟	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	2542±6	Diwu et al., 2011

14DF03-01	TTG 片麻岩	嵩山（路家沟）	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	2514±26	Deng et al., 2016
JLG0201	TTG 片麻岩	嵩山	SHRIMP 锆石 U-Pb	2528±13	Huang et al., 2020
BG16D1B1	花岗闪长岩	北沟村	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	2481±16	Shi et al., 2020
DF05-9	花岗闪长质片麻岩	会善寺	SHRIMP 锆石 U-Pb	2568±11	Huang et al., 2013
DF-6	英云闪长质片麻岩	大塔寺	蒸发 Pb-Pb age	2557±9	劳于强和土世炎, 1999
DF08-7	英云闪长质片麻岩	三皇寨	CAMECA, mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age	2306±6	Huang et al., 2013
DF13078	TTG 片麻岩奥长花岗岩 片麻岩	晋窑村	CAMECA, mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age	2527±8	Wang et al., 2017
DF13087	TTG 片麻岩	会善寺	CAMECA, mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age	2558±5	Wang et al., 2017
鲁西C带地区					
	条带状英云闪长岩	邹城市田黄北		2530±8	王世进等, 2008
	片麻状花岗闪长岩	邹城市匡庄镇钓鱼台村南		2514±18	王世进等, 2008
	花岗闪长岩	蒙山地区龟蒙顶北周公地		2499±6	杨淳等, 1997
S0760	花岗闪长质片麻岩条带	平邑北部		2562 ± 10	Dong et al., 2017
S0714	奥长花岗质片麻岩	平邑东部		2592 ± 25	Dong et al., 2017
S0770	花岗闪长质片麻岩条带	泗水南部		2553 ± 9	Dong et al., 2017
S0762	糜棱岩化花岗闪长岩	平邑南部		2541±18	Wan et al., 2010
S0774	花岗闪长质片麻岩	泗水西北		2530±8	Wan et al., 2010
S0704	斑状花岗闪长岩	田黄南部		2517±15	Wan et al., 2010
S0709	花岗闪长质片麻岩	龟蒙顶		2539±17	王世进等, 2010
S0711	花岗闪长质片麻岩	龟蒙顶		2544±15	王世进等, 2010
16SD98-1	花岗闪长质片麻岩	枣庄		2562±15	Sun et al., 2019
16SD123-1	英云闪长质片麻岩	黄草坡村		2558±5	Sun et al., 2019

References:

- Diwu Chunrong, Sun Yong, Guo Anlin, Wang Hongliang, Liu Xiaoming. 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: 149-170.
- Dong Chunyan, Xie Hangqiang, Kröner A, Wang Shijin, Liu Shoujie, Xie Shiwen, Song Zhiyong, Ma Mingzhu, Liu Dunyi, Wan Yusheng. 2017. The Complexities of Zircon Crystallization and Overprinting during Metamorphism and Anatexis: an Example from the Late Archean TTG Terrane of Western Shandong Province, China. *Precambrian Research*, 300: 181- 200.

- Deng Hao, Kusky T, Polat Al, Wang Chen, Wang Lu, Li Yunxiu, Wang Junpeng.2016.A 2.5Ga fore-arc subduction-accretion complex in the Dengfeng Granite-Greenstone Belt, Southern North China Craton.Precambrian Research, 275: 241-264.
- Huang Bo, Kusky T M, Johnson T E, Wilde S A, Wang Lu, Polat A, Fu Dong.2020.Paired metamorphism in the Neoproterozoic: A record of accretionary-to-collisional orogenesis in the North China Craton.Earth and Planetary Science Letters, 543.
- Huang Xiaolong, Niu Yaoling, Xu Yigang, Yang Qijun, Zhong Junwei.2010.Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan-Taihua complex in the southern North China Craton: Implications for late Archean crustal accretion.Precambrian Research, 182(1-2): 43-56.
- Jiang Neng, Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Zhang Shuangquan.2010.~2.7Ga crust growth in the North China craton.Precambrian Research, 179(1-4): 37-49.
- Liu Lei, Yang Xiaoyong.2015.Temporal, environmental and tectonic significance of the Huoqiu BIF, southeastern North China Craton: Geochemical and geochronological constraints.Precambrian Research, 261: 217-233.
- Shi Kangxing, Wang Changming, Santosh M., Yao Enya, Du Bin, Chen Qi, Zhu Jiaxuan.2020.Neoproterozoic–Paleoproterozoic crustal growth and tectonic evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton: evidence from granite–greenstone successions in the Dengfeng Complex.International Journal of Earth Sciences, 109(8): 2801-23.
- Sun Guozheng, Liu Shuwen, Santosh M., Gao Lei, Hu Yalu, Guo Rongrong.2019.Thickness and geothermal gradient of neoproterozoic continental crust: inference from the southeastern north china craton.Gondwana Research, 73: 16-31.
- Sun Guozheng, Liu Shuwen, Cawood P A, Tang Ming, Hunen J C, Gao Lei, Hu Yalu, Hu Fangyang.2021.Thermal state and evolving geodynamic regimes of the Meso- to Neoproterozoic North China Craton.Nature communication, 12(1): 3888.
- Wan Jianjun, Wang Andong, Pan Jiayong, Liu Chengdong, Zhao Yan, Zhou Zhengbing, Luo Xiandong.2021.Episodic crustal growth and reworking at the southeastern margin of the North China Craton: evidence from zircon U–Pb and Lu–Hf isotopes of Archean tonalite–trondhjemite–granodiorite gneisses in the Bengbu-Wuhe area.Acta Geochimica, 2021, 40(1): 1-12.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Wang Shijin, Dong Chunyan, Yang Enxiu, Wang Wei, Zhou Hongying, Du Lilin, Yin Xiaoyan, Xie Hangqiang, Ma Mingzhu.2011.Juvenile Magmatism and Crustal Recycling at the End of the Neoproterozoic in Western Shandong Province, North China Craton: Evidence from SHRIMP Zircon U–Pb Dating and Hf Isotope Measurement of Detrital Zircons from the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: an integrated study of U–Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons from the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: an integrated study of U–Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Wang Wei, Song T, Kröner A, Dong Chunyan, Zhou Hongyin, Yin Xiaoyan.2011.Provenance of Meso- to Neoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: an integrated study of U–Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons from the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: an integrated study of U–Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons
- Wan Yusheng, Wang Shijin, Liu Dunyi, Wang Wei.2012.Redefinition of Depositional Ages of Neoproterozoic Supracrustal Rocks in Western Shandong Province, China: SHRIMP U–Pb Zircon Dating.Gondwana Research, 21(4): 768- 784.
- Wang Wei, Zhai Mingguo, Wang Shijin, Santosh M., Du Lilin, Xie Hangqiang, Lv Bin, Wan Yusheng.2013.Crustal reworking in the North China Craton at ~2.5 Ga: evidence from zircon U–Pb age, Hf isotope and whole rock geochemistry of the felsic volcano-sedimentary rocks from the western Shandong Province.Geological Journal, 48(5): 406-28.
- Wang Xue, Huang Xiao-Long, Yang Fan, Luo Zheng-Xian.2017.Late Neoproterozoic magmatism and tectonic evolution recorded in the Dengfeng Complex in the southern segment of the Trans-North China Orogen.Precambrian Research, 302: 180-97.
- 第五春荣. 2021. 华北克拉通南部太古宙大陆地壳的生长和演化. 岩石学报, 2021, 37(2): 24.
- 劳子强, 王世炎. 1999. 河南省嵩山地区登封群研究的新进展. 地质通报, 1999(1): 9–16.
- 万渝生, 刘敦一, 王世炎, 董春艳, 周红英, 殷小艳, 杨长秀, 高林志. 2009. 登封地区早前寒武纪地壳演化—地球化学和锆石SHRIMP U–Pb年代学制约. 地质学报, 2009(07): 90–107.
- 王世进, 万渝生, 张成基, 杨恩秀, 宋志勇, 王立法, 张富中. 2008. 鲁西地区早前寒武纪地质研究新进展. 山东国土资源, 24(1): 11.

王世进, 万渝生, 王伟, 宋志勇, 董春艳, 王立法, 杨恩秀. 2010. 鲁西蒙山龟蒙顶、云蒙峰岩体的锆石SHRIMP U-Pb测年及形成时代. 山东国土资源. 26(5):6.

杨淳, 张胜祥. 1997. 鲁西蒙山山脉中段早前寒武纪花岗质岩石岩石学和单锆石年龄. 地球学报: 中国地质科学院院报, 18(3): 324-329.

样品号 和点号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2s	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	结晶年龄	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
霍邱地区											
ZX34-40-1		0.02546	0.000594	0.281204	0.000013	0.281204	2444	-55.5	-1.7	2823	-0.98
ZX34-40-2		0.029646	0.000714	0.281227	0.00001	0.281227	2444	-54.6	-1.1	2801	-0.98
ZX34-40-3		0.024748	0.000697	0.281173	0.000007	0.281173	2444	-56.5	-3.0	2872	-0.98
ZX34-40-4		0.02807	0.000668	0.28127	0.00001	0.28127	2444	-53.1	0.5	2739	-0.98
ZX34-40-5		0.033826	0.000772	0.281189	0.00001	0.281189	2444	-56.0	-2.5	2856	-0.98
ZX34-40-6		0.019925	0.000475	0.281204	0.000011	0.281204	2444	-55.5	-1.5	2814	-0.99
ZX34-40-7		0.010334	0.000222	0.281156	0.000013	0.281156	2444	-57.1	-2.8	2860	-0.99
ZX34-40-8		0.035438	0.000805	0.281299	0.000011	0.281299	2444	-52.1	1.3	2710	-0.98
ZX34-40-9		0.018192	0.000449	0.281287	0.000012	0.281287	2444	-52.5	1.5	2701	-0.99
ZX34-40-10		0.02483	0.000589	0.281289	0.000013	0.281289	2444	-52.4	1.3	2708	-0.98
ZX34-40-11		0.031679	0.000792	0.281252	0.000011	0.281252	2444	-53.8	-0.3	2773	-0.98
ZX34-40-12		0.022369	0.000555	0.281222	0.000011	0.281222	2444	-54.8	-1.0	2796	-0.98
五河地区											
14SZS01-1	2528	0.021375	0.000495	0.281379	0.000012	0.2813551	2510	-49.26	6.3	2581	-0.99
14SZS01-2	2548	0.014536	0.00034	0.281361	0.000012	0.2813444	2510	-49.90	5.9	2595	-0.99
14SZS01-3	2554	0.0213	0.000497	0.281331	0.000011	0.2813067	2510	-50.96	4.6	2645	-0.99
14SZS01-4	2535	0.050051	0.001042	0.28147	0.000013	0.2814195	2510	-46.04	8.6	2493	-0.97
14SZS01-5	2555	0.024614	0.000568	0.281378	0.000012	0.2813502	2510	-49.30	6.1	2587	-0.98
14SZS01-6	2526	0.016671	0.00039	0.281329	0.000013	0.2813102	2510	-51.03	4.7	2641	-0.99
14SZS01-7	2548	0.022593	0.000554	0.281377	0.000013	0.28135	2510	-49.33	6.1	2587	-0.98
14SZS01-8	2502	0.015815	0.000348	0.28133	0.000013	0.2813134	2510	-51.00	4.8	2637	-0.99
14SZS01-9	2562	0.01633	0.000378	0.281365	0.000012	0.2813465	2510	-49.76	6.0	2592	-0.99
14SZS01-10	2516	0.04974	0.001132	0.281431	0.000013	0.2813766	2510	-47.42	7.0	2552	-0.97
14SZS01-11	2477	0.038531	0.000913	0.281409	0.000013	0.2813658	2510	-48.20	6.6	2568	-0.97
14SZS01-12	2478	0.019365	0.000448	0.281399	0.000013	0.2813778	2510	-48.56	7.1	2551	-0.99
14SZS01-13	2439	0.021659	0.000507	0.281355	0.000013	0.2813314	2510	-50.11	5.4	2614	-0.98
14SZS01-14	2421	0.025188	0.000576	0.281374	0.000011	0.2813474	2510	-49.44	5.9	2593	-0.98
14SZS01-15	2390	0.016733	0.000392	0.28135	0.000013	0.2813321	2510	-50.29	5.4	2613	-0.99
14SZS01-16	2428	0.021932	0.000549	0.281396	0.000012	0.2813705	2510	-48.66	6.8	2561	-0.98
14SZS01-17	2487	0.025218	0.000597	0.281398	0.000012	0.2813696	2510	-48.59	6.8	2562	-0.98
14SZS01-18	2566	0.025125	0.000589	0.281362	0.000013	0.2813331	2510	-49.86	5.5	2610	-0.98
14SZS01-19	2446	0.022965	0.000531	0.281391	0.000012	0.2813662	2510	-48.84	6.6	2567	-0.98
14XMC02-1	2770	0.054915	0.001166	0.281208	0.000015	0.2811461	2790	-55.31	5.3	2860	-0.96
14XMC02-2	2561	0.046375	0.001038	0.281171	0.00001	0.2811202	2790	-56.62	4.2	2900	-0.97
14XMC02-3	2824	0.063336	0.001339	0.281143	0.000016	0.2810705	2790	-57.61	2.7	2962	-0.96
14XMC02-4	2829	0.056549	0.001334	0.281132	0.000015	0.2810596	2790	-58.00	2.3	2976	-0.96
14XMC02-5	2805	0.032778	0.000737	0.281146	0.000012	0.2811064	2790	-57.50	3.9	2912	-0.98

14XMC02-6	2783	0.062011	0.001341	0.281185	0.000013	0.2811135	2790	-56.12	4.1	2904	-0.96
14XMC02-7	2829	0.041969	0.000927	0.281204	0.000012	0.2811537	2790	-55.45	5.6	2847	-0.97
14XMC02-8	2815	0.075375	0.001641	0.281237	0.000015	0.2811484	2790	-54.28	5.4	2856	-0.95
14XMC02-9	2505	0.055262	0.001257	0.281186	0.000012	0.2811258	2790	-56.09	4.3	2897	-0.96
14XMC02-10	2520	0.059515	0.001308	0.281208	0.000012	0.281145	2790	-55.31	5.0	2870	-0.96
14XMC02-11	2620	0.040559	0.00086	0.281192	0.000012	0.2811489	2790	-55.88	5.3	2859	-0.97
14XMC02-12	2583	0.049708	0.00107	0.281228	0.000011	0.2811751	2790	-54.60	6.2	2825	-0.97
14XMC02-13	2633	0.038287	0.000849	0.281196	0.000012	0.2811532	2790	-55.73	5.5	2852	-0.97
14XMC02-14	2498	0.043361	0.000956	0.281223	0.000013	0.2811774	2790	-54.78	6.2	2824	-0.97
14XMC02-15	2531	0.046933	0.001038	0.28128	0.00001	0.2812298	2790	-52.76	8.1	2752	-0.97
14XMC02-16	2753	0.11665	0.002537	0.281291	0.000016	0.2811572	2790	-52.37	5.6	2849	-0.92
14XMC02-17	2483	0.021052	0.000388	0.281229	0.000012	0.2812106	2790	-54.57	7.5	2775	-0.99
14XMC02-18	2783	0.061553	0.001497	0.281209	0.000015	0.2811292	2790	-55.27	4.7	2883	-0.95
14XMC02-19	2620	0.090974	0.001956	0.281269	0.000012	0.2811709	2790	-53.15	6.0	2835	-0.94
14XMC02-20	2773	0.063474	0.001566	0.281293	0.000014	0.2812098	2790	-52.30	7.6	2773	-0.95
14BB35-1-1	2805	0.0201861	0.0007332	0.2810754	0.00000898	0.281036	2731	-60.00	0.1	3006	-0.98
14BB35-1-2	2843	0.0178268	0.0006704	0.2810822	0.00000909	0.2810457	2731	-59.76	0.4	2992	-0.98
14BB35-1-3	2710	0.0187539	0.0007587	0.2810964	0.00000645	0.281057	2731	-59.26	0.8	2980	-0.98
14BB35-1-4	2702	0.0139186	0.0004994	0.2810916	0.00000795	0.2810658	2731	-59.43	1.1	2967	-0.98
14BB35-1-5	2854	0.0076568	0.000284	0.2810655	0.0000103	0.28105	2731	-60.35	0.5	2985	-0.99
14BB35-1-6	2702	0.0130139	0.0005049	0.2810662	0.0000103	0.2810401	2731	-60.32	0.2	3001	-0.98
14BB35-1-7	2840	0.0284613	0.0009473	0.2810983	0.00000896	0.2810467	2731	-59.19	0.5	2992	-0.97
14BB35-1-8	2702	0.0137529	0.0004833	0.2810674	0.00000916	0.2810424	2731	-60.28	0.2	2998	-0.99
14BB35-1-9	2739	0.0203168	0.0007696	0.2810703	0.0000128	0.2810299	2731	-60.18	-0.2	3016	-0.98
14BB35-1-10	2810	0.0302561	0.0010495	0.2810972	0.0000102	0.2810407	2731	-59.23	0.2	3001	-0.97
14BB35-1-11	2540	0.0147386	0.000571	0.28109	0.00000935	0.2810623	2731	-59.48	0.9	2974	-0.98
14BB35-1-12	2856	0.0148051	0.000575	0.2810837	0.0000105	0.2810522	2731	-59.71	0.7	2983	-0.98
14BB35-1-13	2857	0.0177161	0.0006738	0.2810896	0.000009	0.2810527	2731	-59.50	0.7	2983	-0.98
14BB35-1-14	2858	0.0231001	0.0007987	0.2810687	0.00000902	0.2810249	2731	-60.24	-0.3	3020	-0.98
14BB35-1-15	2809	0.0196994	0.0006872	0.2810859	0.00000704	0.2810489	2731	-59.63	0.5	2989	-0.98
14BB35-1-16	2706	0.0130354	0.0005183	0.2810947	0.00000873	0.2810678	2731	-59.32	1.1	2964	-0.98
14BB35-1-17	2739	0.0272744	0.0010149	0.2811158	0.00000877	0.2810625	2731	-58.57	1.0	2974	-0.97
14BB35-1-18	2759	0.0156488	0.0005992	0.2810902	0.00000787	0.2810585	2731	-59.48	0.8	2976	-0.98
14BB35-1-19	2844	0.0144754	0.0005689	0.2810474	0.00000837	0.2810164	2731	-60.99	-0.6	3031	-0.98
14BB35-1-20	2816	0.0228405	0.0008366	0.281085	0.00000775	0.2810398	2731	-59.66	0.2	3001	-0.97
14BB35-1-21	2810	0.0193858	0.00069	0.2810943	0.00000799	0.2810571	2731	-59.33	0.8	2978	-0.98
14BB35-1-22	2817	0.0152396	0.0006018	0.2811311	0.0000163	0.2810986	2731	-58.03	2.3	2921	-0.98
14BB35-1-23	2822	0.0131543	0.0004897	0.2811109	0.00000933	0.2810844	2731	-58.74	1.8	2940	-0.99
14BB35-1-24	2703	0.0102278	0.0003846	0.28109	0.00000791	0.2810701	2731	-59.48	1.2	2960	-0.99
14BB35-1-25	2713	0.0097551	0.0003739	0.2810932	0.00000788	0.2810738	2731	-59.37	1.4	2955	-0.99

14BB35-1-26	2826	0.0186768	0.0007066	0.2810984	0.00000891	0.2810601	2731	-59.19	0.9	2973	-0.98
14BB35-1-27	2543	0.0130193	0.0005222	0.2810797	0.00000808	0.2810543	2731	-59.85	0.6	2984	-0.98
14BB35-1-28	2502	0.0095798	0.0004056	0.281123	0.00000765	0.2811036	2731	-58.32	2.4	2918	-0.99
14BB35-1-29	2757	0.0102905	0.0003744	0.2810845	0.00000957	0.2810647	2731	-59.68	1.1	2967	-0.99
14BB35-1-30	2702	0.0093104	0.000342	0.2810797	0.0000079	0.281062	2731	-59.85	0.9	2971	-0.99
14BB44-1-1	2926	0.0419732	0.0015979	0.2810578	0.00000955	0.2809681	2929	-60.62	2.2	3099	-0.95
14BB44-1-2	2924	0.0348976	0.0012644	0.2810446	0.00000934	0.2809737	2929	-61.09	2.4	3090	-0.96
14BB44-1-3	2939	0.0359455	0.0012857	0.2810397	0.00000816	0.2809672	2929	-61.26	2.2	3098	-0.96
14BB44-1-4	2921	0.0432529	0.0014651	0.2810601	0.00000869	0.280978	2929	-60.54	2.6	3085	-0.96
14BB44-1-5	2932	0.0419857	0.0015333	0.2810572	0.00000919	0.2809709	2929	-60.64	2.3	3095	-0.95
14BB44-1-6	2931	0.0473931	0.0017679	0.2810884	0.0000117	0.2809889	2929	-59.54	3.0	3071	-0.95
14BB44-1-7	2925	0.0311782	0.0012062	0.2810747	0.00000986	0.281007	2929	-60.02	3.6	3044	-0.96
14BB44-1-8	2935	0.0284068	0.0010331	0.2810233	0.00000891	0.2809651	2929	-61.84	2.1	3100	-0.97
14BB44-1-9	2917	0.032347	0.0011706	0.2810521	0.00000783	0.2809866	2929	-60.82	2.9	3072	-0.96
14BB44-1-10	2938	0.0331317	0.0011763	0.2810581	0.00000956	0.2809918	2929	-60.61	3.1	3065	-0.96
14BB44-1-11	2928	0.0189745	0.0007412	0.2810566	0.00000772	0.281015	2929	-60.66	3.9	3032	-0.98
14BB44-1-12	2946	0.0312118	0.0011575	0.2811107	0.000008	0.2810452	2929	-58.75	5.0	2992	-0.97
14BB44-1-13	2920	0.0305265	0.0011823	0.2810454	0.00000795	0.2809791	2929	-61.06	2.6	3082	-0.96
14BB44-1-14	2924	0.0368389	0.0012844	0.2810684	0.00000792	0.2809963	2929	-60.25	3.2	3059	-0.96
14BB44-1-15	2929	0.0297602	0.0011662	0.2810589	0.00000845	0.2809933	2929	-60.58	3.1	3063	-0.96
14BB44-1-16	2911	0.0426006	0.0015469	0.2810412	0.0000088	0.2809548	2929	-61.21	1.7	3118	-0.95
14BB44-1-17	2920	0.0444671	0.0016716	0.281081	0.00000888	0.2809873	2929	-59.80	2.9	3073	-0.95
14BB44-1-18	2938	0.0325995	0.0012907	0.2810642	0.00000768	0.2809914	2929	-60.39	3.1	3065	-0.96
14BB44-1-19	2943	0.0312487	0.0013301	0.2810805	0.00000914	0.2810054	2929	-59.82	3.6	3046	-0.96
14BB44-1-20	2916	0.0299152	0.0010822	0.2810447	0.00000928	0.2809842	2929	-61.08	2.8	3075	-0.97
14BB44-1-21	2931	0.0359894	0.0012876	0.2810895	0.000011	0.2810171	2929	-59.50	4.0	3031	-0.96
14BB44-1-22	2939	0.0421518	0.0014938	0.2810524	0.00000808	0.2809681	2929	-60.81	2.2	3098	-0.96
14BB44-1-23	2935	0.039699	0.0014094	0.2810511	0.00000797	0.2809717	2929	-60.86	2.3	3093	-0.96

登封地区

DF13078-1	2568	0.021433	0.000706	0.281338	0.000015	0.2813033	2527	-50.71	4.9	2650	-0.98
DF13078-2	2515	0.021175	0.000715	0.281364	0.000018	0.2813296	2527	-49.79	5.8	2616	-0.98
DF13078-3	2513	0.019868	0.000679	0.281374	0.000017	0.2813414	2527	-49.44	6.2	2600	-0.98
DF13078-4	2522	0.027285	0.000906	0.281355	0.000016	0.2813113	2527	-50.11	5.1	2641	-0.97
DF13078-5	2540	0.027189	0.00089	0.281337	0.000014	0.2812938	2527	-50.75	4.5	2664	-0.97
DF13078-6	2532	0.017479	0.000603	0.281361	0.000016	0.2813318	2527	-49.90	5.8	2612	-0.98
DF13078-7	2532	0.02492	0.000821	0.281377	0.000017	0.2813373	2527	-49.33	6.0	2605	-0.98
DF13078-8	2525	0.024546	0.00086	0.281368	0.000017	0.2813265	2527	-49.65	5.6	2620	-0.97
DF13078-9	2515	0.010429	0.000359	0.281357	0.000016	0.2813397	2527	-50.04	6.1	2601	-0.99
DF13078-10	2511	0.020022	0.000685	0.281364	0.000018	0.2813311	2527	-49.79	5.8	2614	-0.98
DF13078-11	2527	0.019688	0.000672	0.281323	0.000018	0.2812905	2527	-51.24	4.4	2668	-0.98

DF13078-12	2533	0.016942	0.00058	0.281369	0.000016	0.2813409	2527	-49.62	6.2	2600	-0.98
DF13078-13	2500	0.019203	0.000648	0.28135	0.000019	0.281319	2527	-50.29	5.4	2630	-0.98
DF13078-14	2541	0.024139	0.000828	0.281378	0.000015	0.2813378	2527	-49.30	6.1	2604	-0.98
DF13078-15	2534	0.016022	0.000549	0.281339	0.000018	0.2813124	2527	-50.68	5.1	2638	-0.98
DF13087-1	2555	0.007794	0.000252	0.281258	0.000019	0.2812457	2558	-53.54	3.5	2726	-0.99
DF13087-2	2563	0.005482	0.000183	0.281313	0.000017	0.281304	2558	-51.60	5.6	2648	-0.99
DF13087-3	2548	0.006652	0.00022	0.281292	0.00002	0.2812813	2558	-52.34	4.8	2679	-0.99
DF13087-4	2564	0.010289	0.000324	0.281315	0.00002	0.2812991	2558	-51.53	5.4	2655	-0.99
DF13087-5	2559	0.007654	0.000261	0.281308	0.000019	0.2812952	2558	-51.77	5.2	2660	-0.99
DF13087-6	2569	0.010544	0.000332	0.281258	0.000016	0.2812417	2558	-53.54	3.4	2732	-0.99
DF13087-7	2532	0.008	0.000252	0.281299	0.000019	0.2812868	2558	-52.09	4.9	2672	-0.99
DF13087-8	2558	0.005882	0.000199	0.28132	0.000017	0.2813103	2558	-51.35	5.8	2640	-0.99
BG16D1B1-1	2411	0.030463	0.000665	0.28138	1.17423E-05	0.2813494	2481	-49.23	5.6	2591	-0.98
BG16D1B1-2	2361	0.03283	0.000721	0.281355	1.17423E-05	0.2813225	2481	-50.11	4.6	2628	-0.98
BG16D1B1-3	2483	0.016456	0.000383	0.281356	1.17423E-05	0.2813378	2481	-50.08	5.2	2604	-0.99
BG16D1B1-4	2461	0.018033	0.000479	0.281354	1.17423E-05	0.2813315	2481	-50.15	4.9	2613	-0.99
BG16D1B1-5	2505	0.029373	0.000676	0.281372	1.17423E-05	0.2813396	2481	-49.51	5.3	2602	-0.98
BG16D1B1-6	2434	0.037879	0.000829	0.281385	1.17423E-05	0.2813465	2481	-49.05	5.5	2595	-0.98
BG16D1B1-7	2487	0.030975	0.000659	0.281375	1.17423E-05	0.2813437	2481	-49.40	5.4	2597	-0.98
BG16D1B1-8	2487	0.028435	0.00063	0.281367	1.17423E-05	0.2813371	2481	-49.69	5.2	2606	-0.98
BG16D1B1-9	2507	0.025358	0.000571	0.281361	1.17423E-05	0.2813336	2481	-49.90	5.0	2610	-0.98
BG16D1B1-10	2378	0.021792	0.000485	0.281338	1.17423E-05	0.281316	2481	-50.71	4.4	2635	-0.99
BG16D1B1-11	2455	0.034493	0.000746	0.281337	1.17423E-05	0.281302	2481	-50.75	3.9	2654	-0.98
BG16D1B1-12	2444	0.025385	0.000553	0.281383	1.17423E-05	0.2813572	2481	-49.12	5.8	2579	-0.98
BG16D1B1-13	2495	0.023672	0.000505	0.281369	1.17423E-05	0.2813449	2481	-49.62	5.4	2595	-0.98
BG16D1B1-14	2294	0.037079	0.000767	0.281381	1.17423E-05	0.2813474	2481	-49.19	5.4	2596	-0.98
BG16D1B1-15	2525	0.024903	0.00056	0.28133	1.17423E-05	0.281303	2481	-51.00	4.0	2651	-0.98
DF07-08-1	2508	0.018228	0.000744	0.281382	0.000011	0.2813463	2511	-49.16	6.0	2593	-0.98
DF07-08-2	2542	0.005803	0.00023	0.28125	0.000011	0.2812388	2511	-53.82	2.2	2735	-0.99
DF07-08-3	2537	0.013007	0.000594	0.281401	0.000015	0.2813722	2511	-48.48	6.9	2558	-0.98
DF07-08-4	2481	0.008551	0.000351	0.281437	0.000011	0.2814204	2511	-47.21	8.6	2493	-0.99
DF07-08-5	2496	0.0132	0.000528	0.281455	0.000015	0.2814298	2511	-46.57	8.9	2480	-0.98
DF07-08-6	2496	0.00708	0.000294	0.281267	0.000013	0.281253	2511	-53.22	2.7	2717	-0.99
DF07-08-7	2503	0.008796	0.000402	0.281397	0.000009	0.2813778	2511	-48.63	7.1	2550	-0.99
DF07-08-8	2528	0.00841	0.000349	0.281418	0.00001	0.2814011	2511	-47.88	7.9	2519	-0.99
DF07-08-9	2510	0.010435	0.000437	0.28134	0.000011	0.281319	2511	-50.64	5.0	2629	-0.99
DF07-08-10	2510	0.008597	0.000372	0.28138	0.000014	0.2813622	2511	-49.23	6.5	2571	-0.99
DF07-08-11	2532	0.007055	0.00029	0.281386	0.000013	0.281372	2511	-49.01	6.9	2558	-0.99
DF07-10-1	2518	0.016737	0.000726	0.281432	0.000015	0.2813971	2504	-47.39	7.6	2524	-0.98
DF07-10-2	2527	0.0174	0.000716	0.281356	0.000016	0.2813214	2504	-50.08	4.9	2627	-0.98

DF07-10-3	2496	0.019438	0.000761	0.281266	0.000015	0.2812297	2504	-53.26	1.7	2751	-0.98
DF07-10-4	2532	0.022893	0.000892	0.281413	0.000017	0.2813698	2504	-48.06	6.7	2561	-0.97
DF07-10-5	2501	0.007599	0.0003	0.281273	0.000013	0.2812587	2504	-53.01	2.7	2710	-0.99
DF07-10-6	2514	0.02135	0.000848	0.281426	0.000016	0.2813852	2504	-47.60	7.2	2540	-0.97
DF07-10-7	2494	0.015222	0.000656	0.281372	0.000017	0.2813407	2504	-49.51	5.6	2601	-0.98
DF07-10-8	2489	0.025685	0.001027	0.281251	0.000015	0.2812021	2504	-53.79	0.7	2791	-0.97
DF07-10-9	2510	0.020553	0.000806	0.281313	0.000015	0.2812743	2504	-51.60	3.3	2691	-0.98
DF07-10-10	2492	0.022645	0.00089	0.281398	0.000016	0.2813556	2504	-48.59	6.1	2581	-0.97
DF07-10-11	2482	0.022894	0.000893	0.281358	0.000012	0.2813156	2504	-50.00	4.7	2636	-0.97
DF07-10-12	2502	0.00731	0.000326	0.2813	0.000015	0.2812844	2504	-52.06	3.6	2675	-0.99
DF07-10-13	2509	0.033966	0.001268	0.281392	0.000019	0.2813312	2504	-48.80	5.3	2615	-0.96
DF07-24-1	2530	0.012682	0.000559	0.281365	0.000018	0.281338	2542	-49.76	6.4	2604	-0.98
DF07-24-2	2541	0.010567	0.000454	0.281292	0.000007	0.2812699	2542	-52.34	4.0	2695	-0.99
DF07-24-3	2534	0.017387	0.000724	0.281363	0.00001	0.2813279	2542	-49.83	6.0	2618	-0.98
DF07-24-4	2558	0.019979	0.00084	0.281417	0.000022	0.2813759	2542	-47.92	7.8	2552	-0.97
DF07-24-5	2538	0.012804	0.000588	0.281366	0.000013	0.2813375	2542	-49.72	6.4	2604	-0.98
DF07-24-6	2535	0.01916	0.000832	0.281369	0.000025	0.2813287	2542	-49.62	6.1	2617	-0.97
DF07-24-7	2547	0.013837	0.000618	0.281236	0.000014	0.2812059	2542	-54.32	1.7	2782	-0.98
DF07-24-8	2559	0.017026	0.000691	0.281327	0.000026	0.2812932	2542	-51.10	4.8	2664	-0.98
DF07-24-9	2549	0.019727	0.000818	0.281439	0.000028	0.2813991	2542	-47.14	8.6	2521	-0.98
DF07-24-10	2540	0.009982	0.000434	0.281347	0.000022	0.2813259	2542	-50.39	6.0	2620	-0.99
DF07-24-11	2533	0.01632	0.000698	0.281335	0.000023	0.2813012	2542	-50.82	5.1	2654	-0.98
DF07-24-12	2546	0.019322	0.000825	0.281401	0.000034	0.2813608	2542	-48.48	7.2	2573	-0.98
DF07-24-13	2558	0.012198	0.000502	0.281369	0.000013	0.2813444	2542	-49.62	6.6	2595	-0.98
DF07-24-14	2549	0.009103	0.000386	0.281242	0.000025	0.2812232	2542	-54.11	2.3	2757	-0.99
DF07-24-15	2533	0.014581	0.000615	0.281379	0.000013	0.2813492	2542	-49.26	6.8	2589	-0.98
DF07-24-16	2545	0.026411	0.001092	0.281317	0.000042	0.2812639	2542	-51.45	3.8	2706	-0.97
DF07-24-17	2546	0.010488	0.00046	0.281341	0.000006	0.2813186	2542	-50.61	5.7	2629	-0.99
DF07-24-18	2542	0.016974	0.000716	0.281345	0.000023	0.2813102	2542	-50.46	5.4	2641	-0.98
DF07-24-19	2562	0.016138	0.000691	0.281355	0.000026	0.2813211	2542	-50.11	5.8	2626	-0.98
DF07-24-20	2549	0.014843	0.000642	0.281295	0.000024	0.2812637	2542	-52.23	3.8	2704	-0.98
DF07-24-21	2535	0.021498	0.000942	0.281288	0.000013	0.2812423	2542	-52.48	3.0	2734	-0.97
鲁西C带地区											
16SD98-1-1	2531	0.021793	0.000933	0.281215	0.000013	0.2811699	2562	-55.06	0.8	2833	-0.97
16SD98-1-2	2530	0.02893	0.001191	0.281218	0.000012	0.2811604	2562	-54.96	0.5	2848	-0.96
16SD98-1-3	2535	0.018158	0.000819	0.281201	0.000015	0.2811613	2562	-55.56	0.6	2843	-0.98
16SD98-1-4	2535	0.019232	0.000848	0.281236	0.000011	0.2811949	2562	-54.32	1.8	2798	-0.97
16SD98-1-5	2561	0.020374	0.000923	0.281222	0.000012	0.2811768	2562	-54.81	1.1	2823	-0.97
16SD98-1-6	2613	0.031435	0.001331	0.281283	0.000011	0.2812165	2613	-52.66	3.7	2769	-0.96
16SD98-1-7	2575	0.020225	0.000877	0.281241	0.000012	0.2811978	2562	-54.14	1.9	2794	-0.97

16SD98-1-8	2540	0.02091	0.000918	0.28121	0.000013	0.2811654	2562	-55.24	0.7	2839	-0.97
16SD98-1-9	2585	0.019332	0.000751	0.28124	0.000011	0.2812029	2562	-54.18	2.0	2786	-0.98
16SD98-1-10	2584	0.023141	0.000996	0.281252	0.000013	0.2812028	2562	-53.75	2.1	2787	-0.97
16SD98-1-11	2540	0.016478	0.000685	0.281281	0.000013	0.2812477	2562	-52.73	3.6	2726	-0.98
16SD98-1-12	2569	0.014668	0.000656	0.281224	0.000011	0.2811918	2562	-54.74	1.7	2801	-0.98
16SD98-1-13	2589	0.014176	0.000588	0.281193	0.000011	0.2811639	2562	-55.84	0.7	2837	-0.98
16SD123-1	2424	0.03295	0.00087	0.281213	0.000048	0.2811727	2558	-55.13	0.8	2831	-0.97
16SD123-2	2405	0.03879	0.001093	0.281282	0.000068	0.2812318	2558	-52.69	2.9	2753	-0.97
16SD123-3	2555	0.02709	0.000688	0.281195	0.000054	0.2811614	2558	-55.77	0.5	2842	-0.98
16SD123-4	2556	0.02529	0.000644	0.28131	0.000041	0.2812785	2558	-51.70	4.6	2684	-0.98
16SD123-5	2561	0.01524	0.000391	0.28122	0.000046	0.2812009	2558	-54.89	1.9	2787	-0.99
16SD123-6	2561	0.0301	0.000751	0.281217	0.000043	0.2811802	2558	-54.99	1.1	2817	-0.98
16SD123-7	2559	0.0247	0.000663	0.281191	0.000042	0.2811586	2558	-55.91	0.4	2845	-0.98
16SD123-8	2660	0.03587	0.000943	0.281263	0.000048	0.281215	2660	-53.36	4.7	2769	-0.97
16SD123-9	2558	0.05373	0.00131	0.281284	0.000049	0.2812199	2558	-52.62	2.6	2766	-0.96
16SD123-10	2699	0.04464	0.001255	0.281255	0.000057	0.2811901	2558	-53.65	1.3	2802	-0.96
16SD123-11	2552	0.03658	0.000957	0.28123	0.000046	0.2811833	2590	-54.53	4.3	2814	-0.97
16SD123-12	2590	0.01596	0.000435	0.281269	0.000044	0.2812474	2558	-53.15	3.1	2724	-0.99
16SD123-13	2559	0.0739	0.001825	0.281324	0.000051	0.2812347	2558	-51.21	4.7	2749	-0.95
16SD123-14	2553	0.05105	0.001219	0.281341	0.000097	0.2812815	2558	-50.61	3.3	2682	-0.96

References:

- Diwu Chunrong, Sun Yong, Guo Anlin, Wang Hongliang, Liu Xiaoming. 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: 149-170.
- Liu Chaohui, Zhao Guochun, Liu Fulai, Cai Jia. 2019. A Palaeoarchean–Mesoarchean micro-continent entrained in the Jiao-Liao-Ji Belt at the southeastern North China Craton: evidence from the zircon record in the Bengbu area. *Geological Magazine*, 156(9): 1565-1586.
- Liu Lei, Yang Xiaoyong, Santosh M, Aulbach S. 2015. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental growth in the southeastern margin of the North China Craton: Geochemical, zircon U–Pb and Hf isotope evidence from the Huoqiu complex. *Gondwana Research*, 28: 1002-1018.
- Shi Kangxing, Wang Changming, Santosh M, Yao Enya, Du Bin, Chen Qi, Zhu Jiaxuan. 2020. Neoproterozoic–Paleoproterozoic crustal growth and tectonic evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton: evidence from granite–greenstone successions in the Dengfeng Complex. *International Journal of Earth Sciences*, 2020, 109(8):2801-2823.
- Sun Guozheng, Liu Shuwen, Santosh M., Gao Lei, Hu Yalu, Guo Rongrong. 2019. Thickness and geothermal gradient of neoproterozoic continental crust: inference from the southeastern north china craton. *Gondwana Research*, 73: 16-31.
- Wang Xue, Huang Longxiao, Yang Fan, Luo Zhengxian. 2017. Late Neoproterozoic magmatism and tectonic evolution recorded in the Dengfeng Complex in the southern segment of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 302: 180-197.