

引用格式: 万渝生, 董春艳, 颜颇强, 等, 2022. 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期 (2.6~3.0 Ga) 巨量陆壳增生: 综述 [J]. 地质力学学报, 28 (5): 866–906. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222817](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222817)

Citation: WAN Y S, DONG C Y, XIE H Q, et al., 2022. Huge growth of the late Mesoarchean–early Neoproterozoic (2.6~3.0 Ga) continental crust in the North China Craton: A review [J]. Journal of Geomechanics, 28 (5): 866–906. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222817](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222817)

华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期 (2.6~3.0 Ga) 巨量陆壳增生: 综述

万渝生, 董春艳, 颜颇强, 李 源, 王宇晴, 王堃力

WAN Yusheng, DONG Chunyan, XIE Hangqiang, LI Yuan, WANG Yuqing, WANG Kunli

中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037

Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Huge growth of the late Mesoarchean–early Neoproterozoic (2.6~3.0 Ga) continental crust in the North China Craton: A review

Abstract: Based on a brief introduction of the spatial distribution, rock types and formation ages of the late Mesoarchean–early Neoproterozoic (2.6~3.0 Ga) rocks in some key areas of the North China Craton, this paper summarizes the ages and geochemical and Nd–Hf–O isotopic compositions of the granitoids all over the craton. The late Mesoarchean–early Neoproterozoic basement shows the following features: (1) The late Mesoarchean–early Neoproterozoic magmatism is almost continuous, with a peak period of 2.70~2.75 Ga; (2) The late Mesoarchean–early Neoproterozoic rocks widely occur in the North China Craton, mainly in the Eastern Ancient Terrane, the Central Ancient Terrane and the Southern Ancient Terrane; (3) The intrusive rocks are mainly tonalite in composition, with trondhjemite, granodiorite, K-rich granite and gabbro-diorite; (4) The supracrustal rocks are commonly small in scale and scatter in granitoids. The rock types are mainly meta-basaltic rocks. In some areas, there are meta-komatiites, meta-andesitic-dacitic rocks and meta-clastic sedimentary rocks; (5) 2.6 Ga can be regarded as the boundary between the early and late Neoproterozoic in the North China Craton; (6) TTG rocks show large Sr/Y and La/Yb variations, plotting in the high-, medium- and low-pressure TTG areas in the Sr/Y–Y and La/Yb–Yb diagrams. Except for a few K-rich granites, the late Mesoarchean–early Neoproterozoic rocks are commonly depleted in Nd–Hf isotope compositions, with the magmatic zircon being similar in O isotope composition to that of the Archean magmatic zircon worldwide; (7) Many regions have similar geological characteristics, but some regions show great uniqueness. The research further supports the understanding that, similar to many other typical cratons worldwide, the late Mesoarchean–early Neoproterozoic is the most important period of continental accretion in the North China Craton, and the main difference is that the North China Craton underwent a strong and widespread magmatotectonothermal event at the end of the Neoproterozoic.

Keywords: late Mesoarchean–early Neoproterozoic; North China Craton; Nd–Hf–O isotopes; TTG; huge continental growth

摘 要: 在对一些重点地区新太古代早期—中太古代晚期 (2.6~3.0 Ga) 岩石的空间分布、岩石类型和形

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (41890834); 国家自然科学基金重点项目 (42130311); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221645, DD20190358, DD22021649)

This research is financially supported by the Major Project of the National Natural Science Foundation of China (Grant No.41890834), the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (Grant No.42130311) and Key Programs of the Ministry of Land and Resources of China (Grants DD20221645, DD20190358, DD22021649)

第一作者简介: 万渝生 (1958—), 男, 博士, 研究员, 主要从事早前寒武纪地质和锆石年代学研究。E-mail: wanyusheng@bjshrmp.cn

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-09-01; 责任编辑: 范二平

成时代作简要介绍基础上,文章总结了华北克拉通这一时代花岗质岩石的年龄分布模式、地球化学和 Nd-Hf-O 同位素组成特征。新太古代早期—中太古代晚期变质基底具有如下特征:①新太古代早期—中太古代晚期岩浆作用在华北克拉通几乎连续分布,峰期为 2.70~2.75 Ga;②新太古代早期—中太古代晚期岩石在华北克拉通广泛存在,主要分布在东部古陆块、中部古陆块和南部古陆块中;③新太古代早期—中太古代晚期侵入岩以英云闪长岩为主,存在奥长花岗岩和花岗闪长岩及其他类型岩石;④新太古代早期—中太古代晚期表壳岩规模很小,零星分布于花岗质岩石中,岩石类型主要为变玄武质岩石,一些地区存在变质科马提岩、变质安山质—英安质火山岩和变质碎屑沉积岩;⑤2.6 Ga 可作为华北克拉通新太古代早期和晚期的界线;⑥TTG 岩石的 Sr/Y 和 La/Yb 比值存在很大变化,在 Sr/Y-Y 和 La/Yb-Yb 图中位于高压、中压和低压 TTG 分布区;除少量富钾花岗岩外,华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期岩石大都具有亏损 Nd-Hf 同位素组成特征;岩浆锆石 O 同位素组成与全球太古宙岩浆锆石类似;⑦许多地区都具有类似地质特征,但一些地区显示出较大的独特性。新的研究进一步支持了这样的认识:与全球其他许多典型克拉通类似,新太古代早期—中太古代晚期是华北克拉通最重要的陆壳增生时期,主要区别是华北克拉通叠加了强烈的新太古代晚期岩浆构造热事件。

关键词: 新太古代早期—中太古代晚期;华北克拉通;Nd-Hf-O 同位素;TTG;陆壳巨量增生

中图分类号: P588.122;P597.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6616 (2022) 05-0866-41

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222817

0 引言

全球范围内,新太古代是陆壳形成的最重要时期。与新太古代晚期相比,新太古代早期构造岩浆热事件更为发育(Condie, 2000; Condie et al., 2009)。但是,华北克拉通、印度等地区存在十分强烈的新太古代晚期构造岩浆热事件(Jayananda et al., 2000; Condie et al., 2005; 沈其韩等, 2005; Clark et al., 2009; Drüppel et al., 2009; Veevers and Saeed, 2009; Wan et al., 2011a)。华北克拉通具有很长的地壳形成演化历史(Zhai and Santosh, 2011; Wan et al., 2015; 郑建平, 2020)。对于华北克拉通,陆壳增生最重要时期是新太古代早期—中太古代晚期或是新太古代晚期还存在不同认识。由锆石定年所确定的新太古代晚期强烈岩浆构造热事件年龄峰值与陆壳巨量增生时代并不能完全等同,因为其中包括了大量壳内再循环作用年龄记录。另一问题是如何理解 Nd-Hf 同位素组成的地质意义。Wan et al. (2014a) 对华北克拉通新太古代早期(主要为~2.7 Ga) TTG 岩石进行了综述,地区包括西乌兰不浪、恒山、阜平、胶东、鲁西、赞皇、中条和霍邱(Guan et al., 2002; Kröner et al., 2005a, 2005b; Jahn et al., 2008; Jiang et al., 2010; Wan et al., 2010a, 2011b; 董晓杰等, 2012; Han et al., 2012; Zhang et al., 2012; 马铭株等, 2013; Yang et al., 2013; Zhu et al., 2013), 指出华北克拉通与其他许

多克拉通的差异不是新太古代早期构造热事件不发育,而是存在新太古代晚期构造热事件的强烈叠加改造(Zhai et al., 2005; Wan et al., 2010b, 2011b; Zhai and Santosh, 2011)。

近十年来,华北克拉通太古宙地质研究取得重要进展。~2.7 Ga 岩石在和龙、吉南、辽北、密云、固阳、辉县、鲁山等地相继被发现(Zhou et al., 2014; Guo et al., 2015; Shi and Zhao, 2017; Wang et al., 2017a, 2017b; Diwu et al., 2020; Wu et al., 2021; Bao et al., 2022), ~2.7 Ga 岩石分布地区几乎增加了一倍;同时,~2.6 Ga 和 2.8~3.0 Ga 岩石在许多地区被发现(Jia et al., 2016, 2020; 杜传业等, 2017; Liu et al., 2017, 2019; Wang et al., 2017c; Liou et al., 2019; Li et al., 2020; Sun et al., 2021)。在原发现~2.7 Ga 岩石的地区,也取得了不少重要进展(Bai et al., 2019; Dong et al., 2021; Wan et al., 2021a)。在阜平地区,~2.7 Ga TTG 岩石原只零星发现(Guan et al., 2002; Han et al., 2012),而新确定的 TTG 岩石分布范围大于 100 km²(路增龙等, 2014)。

文中首先对华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期(2.6~3.0 Ga)岩石分布重点地区作了介绍,包括典型样品的锆石定年,然后总结了华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期锆石年龄分布模式、地球化学和 Nd-Hf-O 同位素组成特征,最后对一些重要问题进行了讨论(文中数据未标明为引用者的,为作者未发表资料)。研究支持了新太古代早期—

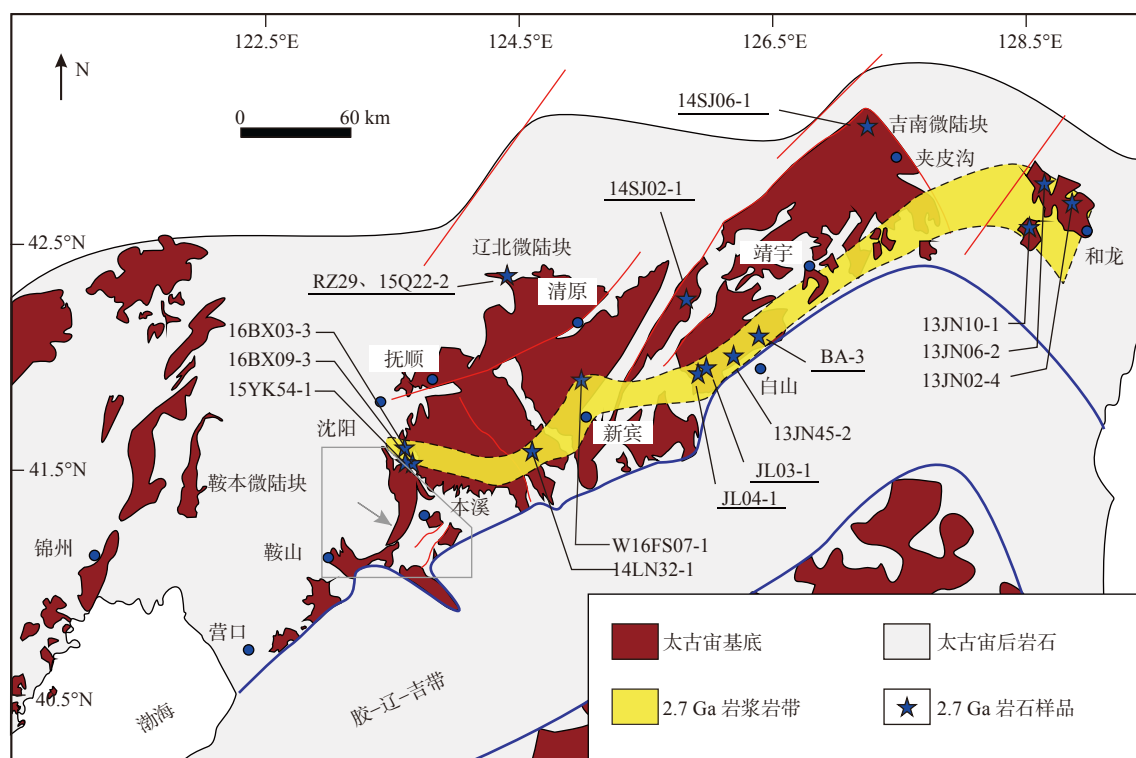


图2 吉南–辽北地区地质图 (图中给出了2.6~3.0 Ga岩石定年样品分布, 据 Bao et al., 2022 修改)

Fig. 2 Geological map of the southern Jilin–northern Liaoning area, showing the spatial distribution of 2.6 ~ 3.0 Ga dated rock samples (modified from Bao et al., 2022)

~2.6 Ga TTG 岩石 (BA-3)。此外, 该岩带的北部也有新太古代早期 TTG 岩石存在 (图2; 14SJ02-1、14SJ06-1), 它们零星分布于新太古代晚期 TTG 岩石中 (Wu et al., 2021), 表明新太古代早期 TTG 存在于更大的空间范围。此外, 在清原西北还发现~3.0 Ga TTG 岩石 (图2; RZ29、15Q22-2), 它们的规模也很小, 仅零星分布 (Liu et al., 2017; Li et al., 2020)。

(1) 2.73 Ga 英云闪长质片麻岩 (16BX03-3; Bao et al., 2022)

样品取自歪头山地区 (图2)。锆石呈棱柱状, 具核–边结构 (图3a), 核部岩浆锆石普遍遭受不同程度重结晶改造。26个有效数据的 Th/U 比值为 0.12~1.06, 数据点几乎沿谐和线连续分布, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化为 2532~2733 Ma (图3b)。这种分布形式在高级变质地体常见 (Vavra et al., 1999)。最大年龄 (2712 Ma) 和最小年龄 (2532 Ma) 分别解释为岩石形成和高级变质作用年龄。数据点 30 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2733 Ma, Hf 同位素组成不同于其他锆石, 解释为外来锆石。

(2) 2.68 Ga TTG (13JN45-2; Bao et al., 2022)

样品取自白山西部 (图2)。锆石呈短粗或不规

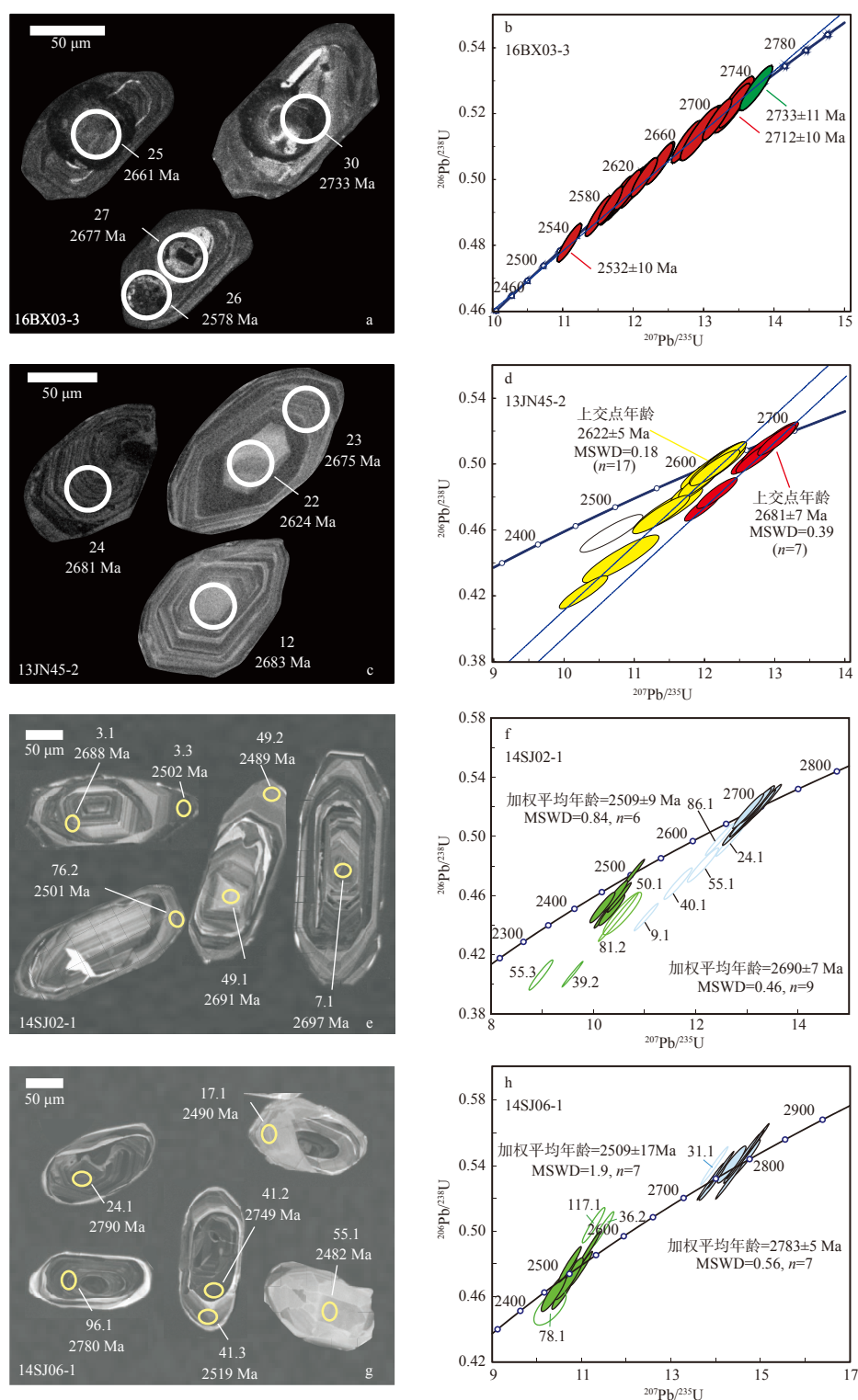
则形状, 具振荡环带 (图3c)。24个有效数据点的 Th/U 比值为 0.45~0.88。可分为两个年龄组 (图3d), 但锆石的 Hf 同位素类似。把较老的一组年龄 2681 ± 7 Ma 解释为岩石形成时代。

(3) 2.69 Ga 英云闪长质片麻岩 (14SJ02-1; Wu et al., 2021)

样品取自清原东部 (图2)。岩石具片麻理, 粗粒粒状变晶结构, 存在小的镁铁质微粒包体。英云闪长质片麻岩的锆石呈棱柱状, 部分锆石两端圆滑, 发育核–边结构 (图3e)。核部锆石具振荡环带。共对核部和边部锆石进行了24个数据点分析, 一些锆石存在不同程度铅丢失 (图3f)。15个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 0.17~0.84, 其中9个位于谐和线集中分布数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2690 ± 7 Ma (MSWD=0.46), 解释为英云闪长岩结晶年龄。9个变质锆石数据点的 Th/U 比值为 0.07~1.04, 6个集中分布数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2509 ± 9 Ma (MSWD=0.84), 代表了新太古代晚期变质作用的年代。

(4) 2.78 Ga 奥长花岗质片麻岩 (14SJ06-1; Wu et al., 2021)

样品取自夹皮沟西北部 (图2)。岩石显示微弱



a, b—2.73 Ga 英云闪长质片麻岩, 歪头山 (16BX03-3; Bao et al., 2022); c, d—2.68 Ga TTG, 白山西北 (13JN45-2; Bao et al., 2022); e, f—2.69 Ga 英云闪长质片麻岩, 清原东 (14SJ02-1; Wu et al., 2021); g, h—2.78 Ga 奥长花岗质片麻岩, 夹皮沟西北 (14SJ06-1; Wu et al., 2021)

图3 吉南-辽北地区新太古代早期岩石的锆石 CL 图像和 U-Pb 谐和图

Fig. 3 CL images and SHRIMP U-Pb concordia diagrams for zircons from the early Neoproterozoic rocks in the southern Jilin-northern Liaoning area

(a) and (b) 2.73 Ga tonalitic gneiss, Waitoushan, (16BX03-3; Bao et al., 2022); (c) and (d) 2.68 Ga TTG, northwest of Baishan (13JN45-2; Bao et al., 2022); (e) and (f) 2.69 Ga tonalitic gneiss, east of Qingyuan (14SJ02-1; Wu et al., 2021); (g) and (h) 2.78 Ga trondhjemitic gneiss (14SJ06-1; Wu et al., 2021)

的混合岩特征。锆石呈半自形短粗或棱柱状, 两端圆滑, 大多具有核-边结构, 核部具振荡环带, 但普遍遭受重结晶改造 (图 3g)。11 个岩浆锆石数据点分析, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2722~2790 Ma, 较老的 7 个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2783 ± 5 Ma (MSWD=0.56; 图 3h), 解释为岩石形成年龄。10 个变质锆石数据点分析, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2480~2530 Ma, 与英云闪长质片麻岩样品 14SJ02-1 的变质年龄误差范围内一致。

1.2 铁架山-弓长岭地区

鞍山-本溪地区是华北克拉通一个重要的早前寒武纪基底组成部分, 在该区首次发现了中国最古老的~3.8 Ga 岩石 (Liu et al., 1992)。其重要性不仅是不同类型 3.8 Ga 岩石被发现, 还在于发育了 2.5~3.8 Ga 太古宙不同时代的岩石, 为探讨太古宙大陆地壳形成演化提供了机会 (Wan et al., 2015)。在早期研究中, 中太古代 (2.9~3.0 Ga) 铁架山花岗岩主要发现于鞍山铁架山地区 (钟富道, 1984; 万渝生等, 1998; 伍家善等, 1998), 在弓长岭地区仅零星发现 (万渝生和刘敦一, 1993)。在金家岭-弓长岭一带以往被认为的新太古代晚期齐大山花岗岩中, Dong et al. (2017a) 识别出了大量中太古代富钾花岗岩, 使中太古代富钾花岗岩分布面积扩大了数倍 (图 4), 成为全球规模最大的中太古代壳源花岗岩之一, 称之为铁架山-弓长岭花岗岩。这也得到最新研究的进一步支持 (王伟等, 2022)。铁架山花岗岩和齐大山花岗岩都是富钾花岗岩 (正长花岗岩,

二长花岗岩), 外貌相似。虽然铁架山花岗岩通常表现出比齐大山花岗岩更强变形, 但齐大山花岗岩局部也可遭受强烈变形, 变形强度不能用作区分它们的标志。二者地球化学组成也相似, 高 K_2O 低 Na_2O , 具有明显负 Eu 异常。所以, 很多情况下只有开展锆石年代学工作才可能分辨它们。在铁架山-弓长岭花岗岩中, 存在少量表壳岩, 包括 BIF 和石英岩, 称之为铁架山表壳岩, 形成时代可能为~3.0 Ga (Dong et al., 2017a)。除铁架山-弓长岭花岗岩外, 鞍山地区还存在中太古代 (3.0 Ga) 东鞍山花岗岩 (图 4; 万渝生等, 1998; 伍家善等, 1998), 它们在岩石类型、分布规模和地球化学组成特征等方面与铁架山-弓长岭花岗岩都存在较大区别。

(1) 2.95 Ga 正长花岗质片麻岩 (A0502, 铁架山-弓长岭花岗岩; Dong et al., 2017a)

样品取自铁架山北 (图 4)。风化岩石微呈红色, 具片麻理 (图 5a)。锆石呈柱状, 具振荡环带, 但许多锆石显示强烈重结晶 (图 6a)。12 个数据点分析, 锆石普遍存在放射成因铅丢失 (图 6b)。11 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 0.72~1.45。最靠近谐和线的 5 个数据点确定了一条不一致线, 上交点年龄为 2948 ± 14 Ma (MSWD=0.26), 解释为岩石形成时代。

(2) 2.92 Ga 糜棱岩化细粒正长花岗岩 (A1211, 铁架山-弓长岭花岗岩; Dong et al., 2017a)

样品取自小岭子西 (图 4) 一个采石场, 可识别出细粒正长花岗岩和斑状正长花岗岩两种类型岩

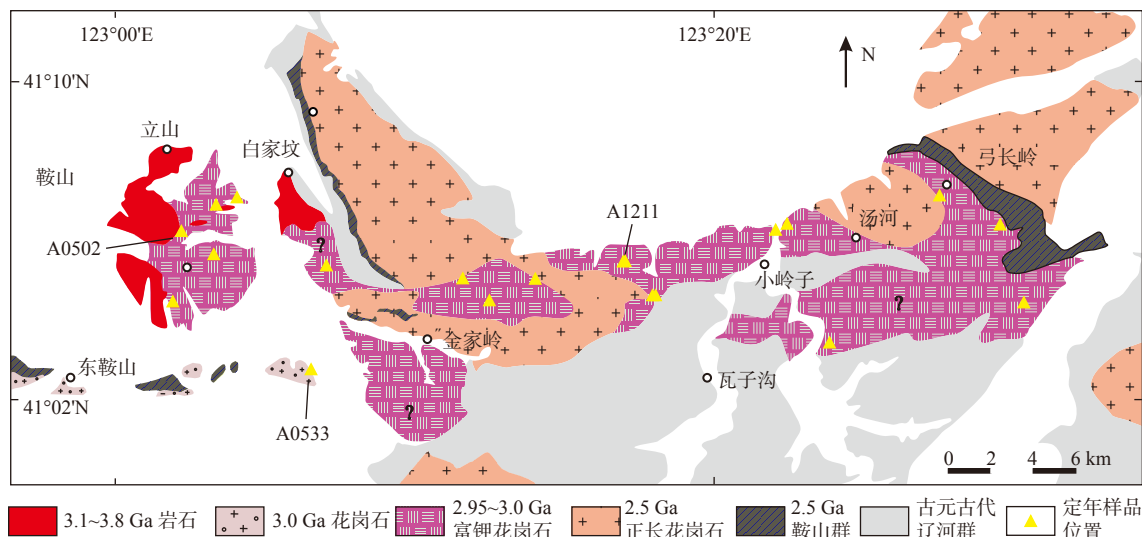


图 4 铁架山-弓长岭地区地质图 (底图据 Dong et al., 2017a; 图中给出了 2.9~3.0 Ga 富钾花岗岩定年样品位置, 数据来源 Dong et al., 2017a; 王伟等, 2022)

Fig. 4 Geological map of the Tiejiashan-Gongchangling area (Dong et al., 2017a), showing the locations of dated 2.9~3.0 Ga K-rich granite samples (Dong et al., 2017a; Wang et al., 2022)

石,两者都遭受糜棱岩化,可见相互接触关系(图5b)。糜棱岩化细粒正长花岗岩(A1211)广泛分布。锆石形状短粗,呈振荡环带,但大多数表现出不同程度的重结晶(图6c)。对8颗锆石进行了10个数据点分析, Th/U 比值为 0.07~1.28。大多数锆石显示强烈放射成因铅丢失,5个数据点确定的一条不一致线的上交点年龄为 2924 ± 12 Ma (MSWD=0.26; 图6d)。位于谐和线上的数据点 1.1RC 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2952 Ma。这可能代表了正长花岗岩的形成年龄,或者为外来锆石年龄。糜棱岩化斑状正长花岗岩(A1212)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2913 ± 29 Ma。

(3) 2.99 Ga 二长花岗质片麻岩(A0533, 东鞍山花岗岩)

在东鞍山东(图4),沿一公路边上岩石露头新鲜,为片麻状二长花岗岩(图5d)。锆石呈柱状或椭圆状,具振荡环带,但部分遭受重结晶改造(图6e)。9个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 0.26~0.95。锆石普遍存在放射性成因铅丢失。3个靠近谐和线的数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均年龄为 2989 ± 7 Ma (MSWD=0.59; 图6f),解释为岩石形成时代。岩石中存在~3.1 Ga 外来锆石。

1.3 冀东地区

冀东早前寒武纪基底主要由新太古代晚期花岗质岩石(>80%)和表壳岩组成(图7)。表壳岩多以不同形态残余体分布于花岗质岩石中,在青龙、卢龙一带呈较大规模出露。根据空间分布、岩石类型



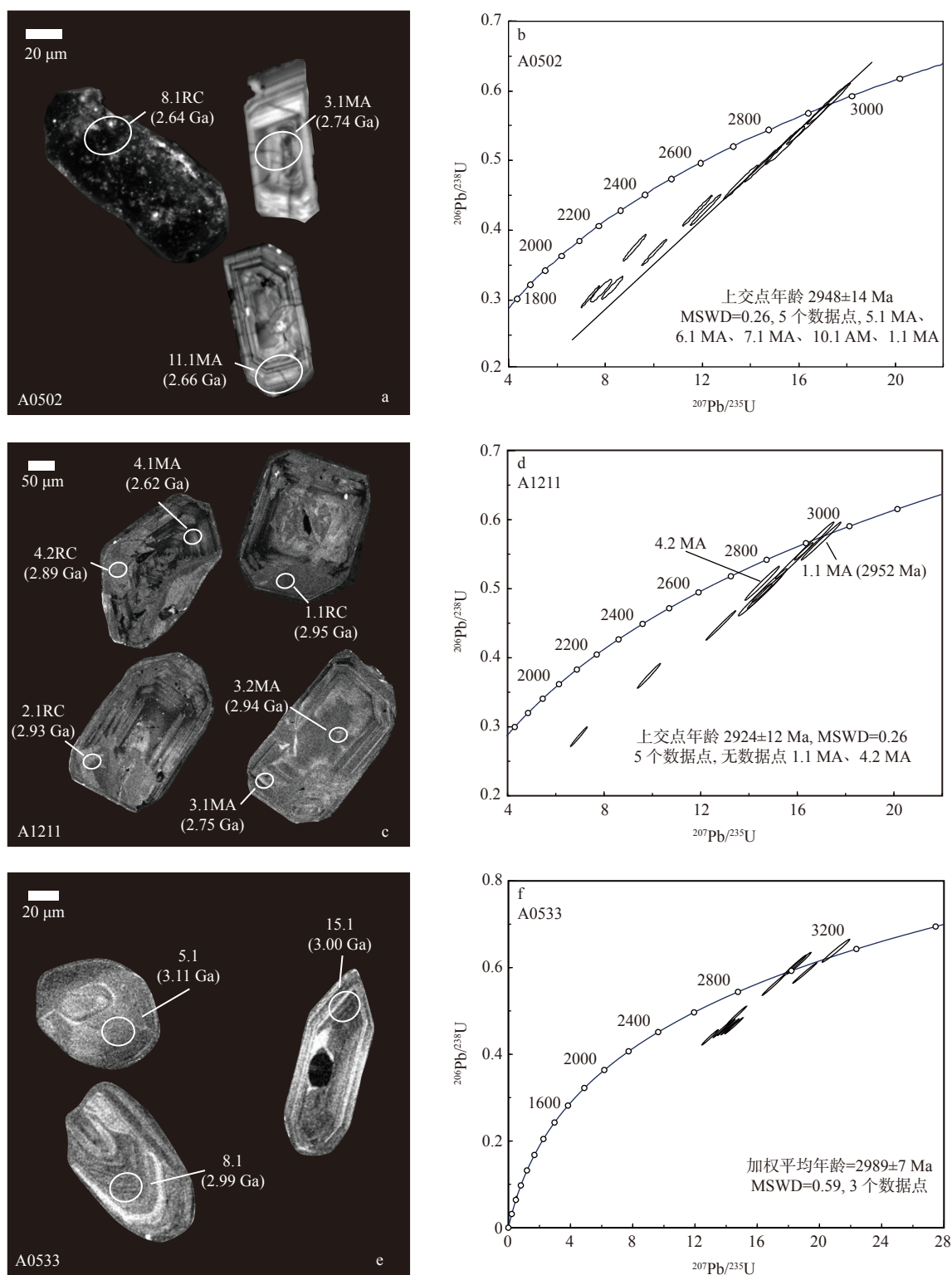
a—2.95 Ga 正长花岗质片麻岩(A0502, 铁架山—弓长岭富钾花岗岩), 铁架山北(Dong et al., 2017a); b—2.92 Ga 糜棱岩化细粒正长花岗岩(A1211, 铁架山—弓长岭富钾花岗岩), 小岭子西(Dong et al., 2017a); c—2.92 Ga 糜棱岩化细粒正长花岗岩(A1211)与 2.91 Ga 糜棱岩化细粒正长花岗岩(A1212)界线, 与图5b位置相同(Dong et al., 2017a); d—2.99 Ga 二长花岗质片麻岩(A0533, 东鞍山花岗岩), 东鞍山东
野外照片中, 笔的长度为 14 cm, 硬币的直径为 2 cm; 下同

图5 铁架山—弓长岭地区中太古代花岗质岩石的野外照片

Fig. 5 Field photographs of the Mesoproterozoic granitoids in the Tiejiaoshan-Gongchangling area

(a) 2.95 Ga syenogranitic gneiss (A0502, Tiejiaoshan-Gongchangling K-riched granite), north of Tiejiaoshan (Dong et al., 2017a); (b) 2.92 Ga mylonitized fine-grained syenogranite (A1211, Tiejiaoshan-Gongchangling K-riched granite), west of Xiaolingzi (Dong et al., 2017a); (c) Boundary between the 2.92 Ga mylonitized fine-grained syenogranite (A1211) and the 2.91 Ga mylonitized fine-grained syenogranite (A1212), same location as Fig.5b (Dong et al., 2017a); (d) 2.99 Ga monzogranitic gneiss (A0533), east of Donganshan

Samples A0502 and A1211 are from the Tiejiaoshan-Gongchangling K-rich granite, and sample A0533 is from the Donganshan granite. The pen is 14 cm in length, whereas the coin is 2 cm in diameter, the same below.



a、b—2.95 Ga 正长花岗质片麻岩, 铁架山北 (A0502; Dong et al., 2017a); c、d—2.92 Ga 糜棱岩化细粒正长花岗岩, 小岭子西 (A1211; Dong et al., 2017a); e、f—2.99 Ga 二长花岗质片麻岩, 东鞍山东 (A0533)

图 6 铁架山—弓长岭地区中太古代花岗质岩石的锆石阴极发光图像和 U-Pb 谐和图

Fig. 6 CL images and SHRIMP U-Pb concordia diagrams for zircons from the Mesoarchean granitoids in the Tiejiaoshan-Gongchangling area (a) and (b) 2.95 Ga syenogranitic gneiss, north of Tiejiaoshan (A0502; Dong et al., 2017a); (c) and (d) 2.92 Ga mylonitized fine-grained syenogranite, west of Xiaolingzi (A1211; Dong et al., 2017a); (e) and (f) 2.99 Ga monzogranitic gneiss, east of Donganshan (A0533)

和变质程度,它们被命名为遵化岩群、迁西岩群、滦县岩群、双山子岩群、单塔子岩群等不同岩群,但近年来的研究表明它们的形成时代都为新太古代晚期(Wan et al., 2015)。花岗质岩石包括 TTG 和壳源花岗岩,新太古代晚期岩石显示空间上的变化(Nutman et al., 2011)。TTG 主要分布在西部遵化-迁安-安子岭一带,以英云闪长质片麻岩为主,形成时代为 2.52~2.55 Ga。它们普遍遭受强烈变质变形,局部发生深熔作用改造。壳源花岗岩大都为~2.5 Ga 二长花岗岩-正长花岗岩,主要分布于东部沿海地区,它们变质变形通常较弱,统称为秦皇岛花岗岩。除花岗质岩石外,规模较大的新太古代晚期侵入岩还有闪长质岩石,以界岭口闪长岩为代表。西部表壳岩以变质玄武质岩石为主,东部表壳岩以火山(碎屑)沉积岩和碎屑沉积岩为主。太古宙基底变质程度也显示出空间变化,通常从西部的高角闪岩相-麻粒岩相到东部的绿片岩相-角闪岩相。但是,青龙东部双山子岩群东侧的安子岭杂岩遭受了强烈变质变形和局部深熔作用改造。

除广泛分布的新太古代晚期岩石外,冀东地区还存在>3.1 Ga 岩石和锆石(Liu et al., 1992, 2013; 伍家善等, 1998; Nutman et al., 2011; Wan et al., 2015; 孙会一等, 2016; Bai et al., 2019)。最为有名的是黄柏峪-卢龙地区铬云母石英岩等变质碎屑沉积岩,其中存在大量 3.4~3.8 Ga 碎屑锆石(Wu et al., 2005a; Wilde et al., 2008; Nutman et al., 2011),最近又发现大

量 3.9~4.0 Ga 碎屑锆石和 3.8 Ga 花岗闪长质片麻岩(Wan et al., 2021; 万渝生等, 2021b)。2.6~3.0 Ga 碎屑锆石和外来锆石在该区也有大量发现(Fu et al., 2016; Yang and Wei, 2017; Bai et al., 2019),但这一时代的岩石却十分稀少,仅在 3 个地区零星发现。

(1) 2.9 Ga 草场表壳岩(LP100、LP103; Liou et al., 2019)

表壳岩位于冀东西部草场地区(图 7)。表壳岩出露长~800 m,宽 6 m,呈南北走向,向西倾斜。表壳岩主要由长英质片麻岩和斜长角闪岩组成(图 8),长英质片麻岩包括斜长片麻岩和黑云斜长片麻岩,存在长英质浅色体(图 8b)。部分斜长角闪岩含有石榴石。斜长角闪岩厚度从 10 cm 到 40 cm 不等,局部与长英质片麻岩互层(图 8c)。一些斜长角闪岩中也有长英质浅色体存在(图 8c)。可见两条宽度为 1~3 m 变质基性岩脉切割表壳岩。LP100 和 LP103 为中细粒斜长片麻岩(图 9a—9d)。2 个样品的锆石形态和结构类似,呈棱柱状或卵形,具核-边结构(图 9a、9c)。核部锆石具振荡环带,在核部岩浆锆石和边部变质锆石之间,通常存在白色成分域环带,可能与流体作用有关。样品 LP103 的核部锆石 Th/U 比值大都为 0.5~0.8,一些锆石存在不同程度铅丢失;沿谐和线分布的数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄存在一定变化(2793~2911 Ma),7 个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2907±3 Ma(MSWD=1.01;图 9b),解释为岩石形成时代;变质锆石的 Th/U 为 0.03~0.32,6 个最

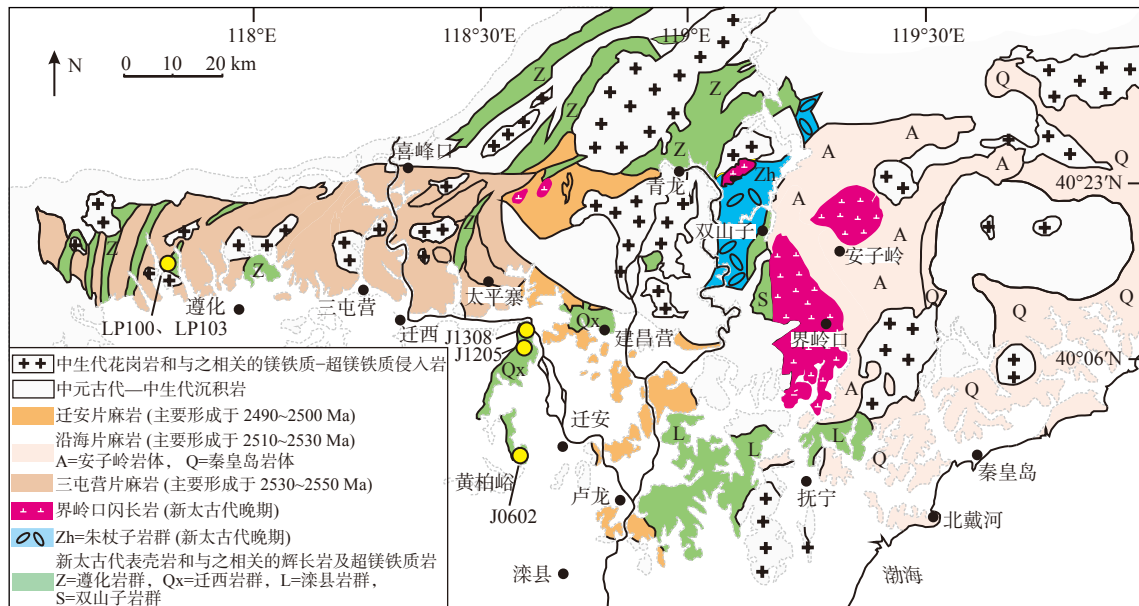


图 7 冀东地区地质图(底图据 Nutman et al., 2011; 图中给出了 2.6~3.0 Ga 定年岩石样品的位置,数据来源于 Nutman et al., 2011; Liou et al., 2019)

Fig. 7 Geological map of eastern Hebei (Nutman et al., 2011), showing the locations of dated 2.6~3.0 Ga rock samples (Nutman et al., 2011; Liou et al., 2019)



a—表壳岩剖面; b、c—铁镁质片麻岩与长英质片麻岩互层, 图 8b 中粗粒浅色体岩脉与铁镁质片麻岩平行化; d、e—浅色长英质片麻岩

图 8 冀东草场地区中太古代表壳岩的野外照片 (Liou et al., 2019)

Fig. 8 Field photographs of the Mesoarchean supracrustal rocks in the Caochang region, eastern Hebei (Liou et al., 2019)

(a) Supracrustal rock section; (b) and (c) Mafic gneisses interbedded with felsic gneisses; a coarse-grained leucosome dyke parallels to the mafic gneisses in Fig. 8b; (d) and (e) Leucocratic felsic gneisses

靠近谐和线的数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2498\pm 5\text{ Ma}$ (MSWD=0.5), 解释为新太古代晚期变质作用年龄记录。样品 LP100 的岩浆锆石和变质锆石的 U、Th 组成和年龄与样品 LP103 类似, Th/U 比值分别为 0.39~1.32 和 0.03~0.22, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄分别为 $2915\pm 4\text{ Ma}$ (MSWD=3.7) 和 $2497\pm 11\text{ Ma}$ (MSWD=1.6; 图 9d)。

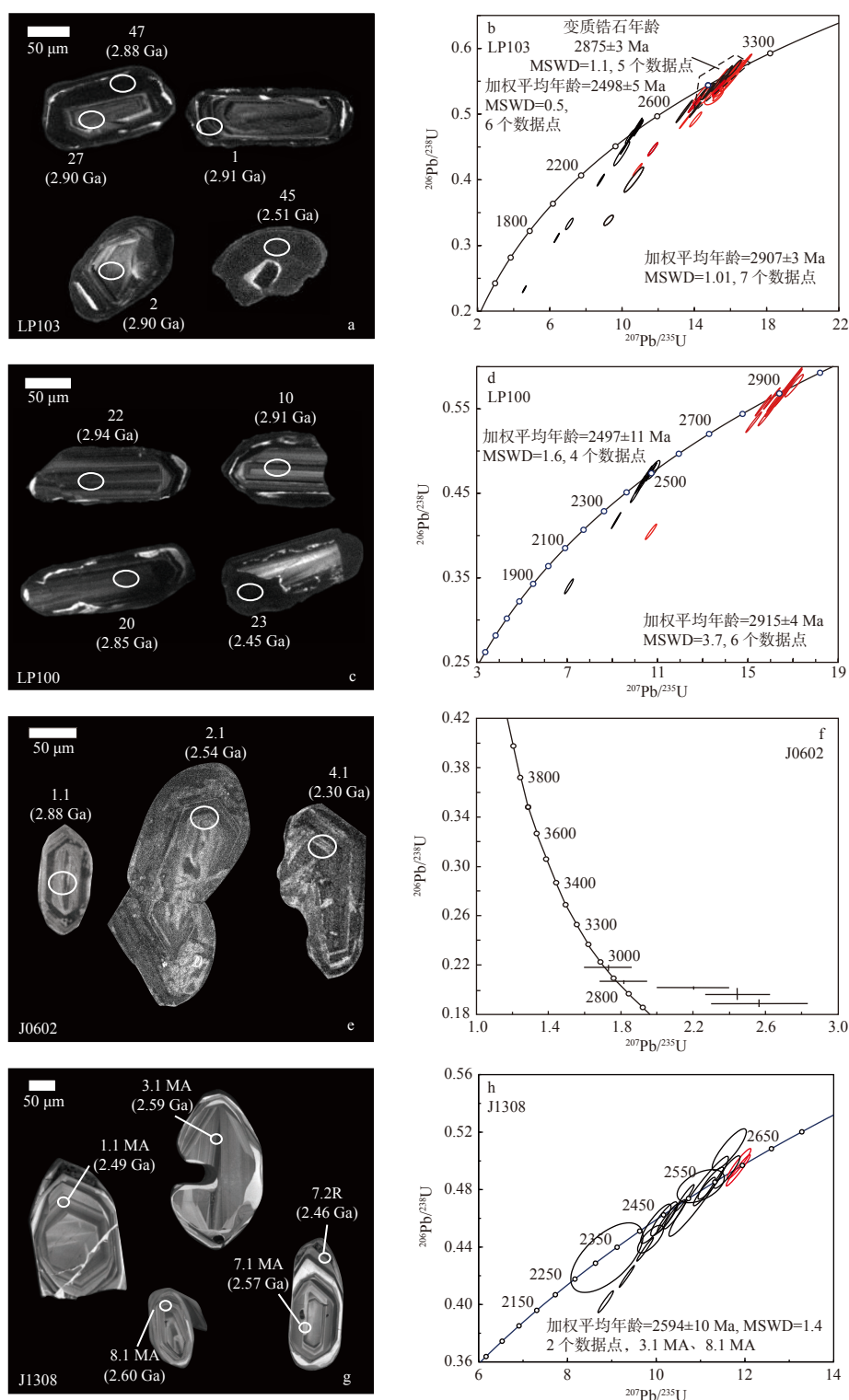
(2) 2.94 Ga 英云闪长质片麻岩 (J0602, Nutman et al., 2011)

样品取自黄柏峪南。Nutman et al. (2011) 在这里识别出多期中太古代—古太古代 TTG 岩石, 它们零星存在于新太古代晚期富钾花岗岩中, 而本身包裹斜长角闪岩透镜体。样品 J0602 取自混合岩中的粒度更细、黑云母含量更高的部分 (图 10a)。锆石呈棱柱状, 大部分锆石遭受变质, 振荡环带被破坏 (图 9e)。10 个数据点分析位于振荡环带残存的区域。普遍显示强烈铅丢失, 只有 2 个数据点靠近谐和线, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $2968\pm 12\text{ Ma}$ 和 $2879\pm 9\text{ Ma}$; 图 9f)。所有数据构成的不一致线上交点年龄为 $2936\pm 34\text{ Ma}$ (MSWD=1.7), 推测英云闪长岩的形成年龄为

~2940 Ma。

(3) 2.59 Ga 奥长花岗质片麻岩 (J1308)

样品取自黄柏峪北刘皮庄附近 (图 7)。岩石出露规模很小, 仅见十余米宽。岩石呈灰白色, 组成均匀 (图 10b)。附近见基性麻粒岩, 但两者关系不清楚。片麻状奥长花岗岩 (J1308) 的锆石呈柱状, 两端圆滑, 存在核-边结构 (图 9g)。核部锆石具封闭振荡环带, 多遭受不同程度重结晶改造, 边部的重结晶程度更强。变质增生边普遍很窄。对 14 颗锆石进行了 18 个数据点分析。8 个岩浆锆石 (大都显示一定程度重结晶) 数据点分析, Th/U 比值为 0.10~1.23。数据点沿谐和线分布, 但 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄存在很大变化 (2474~2598 Ma; 图 9h)。2 个年龄最大数据点 (3.1MA、8.1MA) 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2594\pm 10\text{ Ma}$ (MSWD=1.4), 大致代表了奥长花岗岩的形成时代。9 个重结晶锆石成分域的 T/U 比值为 0.01~0.57。大多数数据点沿谐和线分布, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄也存在很大变化, 这种分布形式很可能表明岩石遭受了后期高级变质作用改造。1 个变质增生边 (7.2R) 的 Th/U 为 0.01, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2455\pm 6\text{ Ma}$



a、b—2.91 Ga 长英质片麻岩, 草场 (LP103; Liou et al., 2019); c、d—2.92 Ga 长英质片麻岩, 与样品 LP103 同一位置 (LP100; Liou et al., 2019); e、f—2.94 Ga 英云闪长质片麻岩, 曹庄 (J0602; Nutman et al., 2011); g、h—2.59 Ga 奥长花岗质片麻岩, 刘皮庄 (J1308)

图 9 冀东地区新太古代早期—中太古代晚期岩石的锆石阴极发光图像和 U-Pb 谐和图

Fig. 9 CL images and SHRIMP U-Pb concordia diagrams for the zircons from the late Mesoarchean–early Neoproterozoic rocks in eastern Hebei (a) and (b) 2.91 Ga felsic gneiss, Caochang (LP103; Liou et al., 2019); (c) and (d) 2.92 Ga felsic gneiss (LP100; Liou et al., 2019), same location as the sample LP103; (e) and (f) 2.94 Ga tonalitic gneiss, Caozhuang (J0602; Nutman et al., 2011); (g) and (h) 2.59 Ga trondhjemitic gneiss, Liupizhuang (J1308)



a—2.94 Ga 英云闪长质片麻岩, 曹庄 (J0602; Nutman et al., 2011); b—2.59 Ga 奥长花岗质片麻岩, 刘皮庄 (J1308)

图 10 冀东地区新太古代早期—中太古代晚期岩石的野外照片

Fig. 10 Field photographs of the late Mesoarchean–early Neoproterozoic granitoids in eastern Hebei

(a) 2.94 Ga tonalitic gneiss, Caozhuang (J0602; Nutman et al., 2011); (b) 2.59 Ga trondhjemitic gneiss, Liupizhuang (J1308)

(不谐和度=11%)。

1.4 白云鄂博—固阳地区

阴山地块早前寒武纪基底研究程度相对较低, 但十余年来仍取得了许多重要成果(图 11; 简平等, 2005; 范宏瑞等, 2010; Dong et al., 2012; 董晓杰等, 2012; Jian et al., 2012; Ma et al., 2013a, 2013b, 2014a, 2014b; 马铭株等, 2013; 马旭东等, 2013; 董春艳等, 2021; 段瑞涵等, 2021), 基本特征可概括如下: ①~2.5 Ga 岩浆作用十分强烈, 也有 2.6~2.7 Ga TTG

岩石存在, 并有更古老锆石存在; ②~2.5 Ga 表壳岩包括不同类型变质火山岩和火山沉积岩, 并有 BIF 存在, ~2.5 Ga 深成侵入岩包括辉长岩、闪长岩、TTG 和正长花岗岩等; ③2.7~2.8 Ga 存在强烈的地幔添加作用, 白云鄂博群和腮林忽洞群碎屑锆石的 Hf 同位素组成也显示类似特征(马铭株等, 2014); ④~2.5 Ga 岩石主要为~2.7 Ga 古老陆壳物质壳内再循环作用产物, 地幔添加也起了重要作用; ⑤存在古元古代中晚期(1.9~2.2 Ga)岩浆作用; ⑥发育

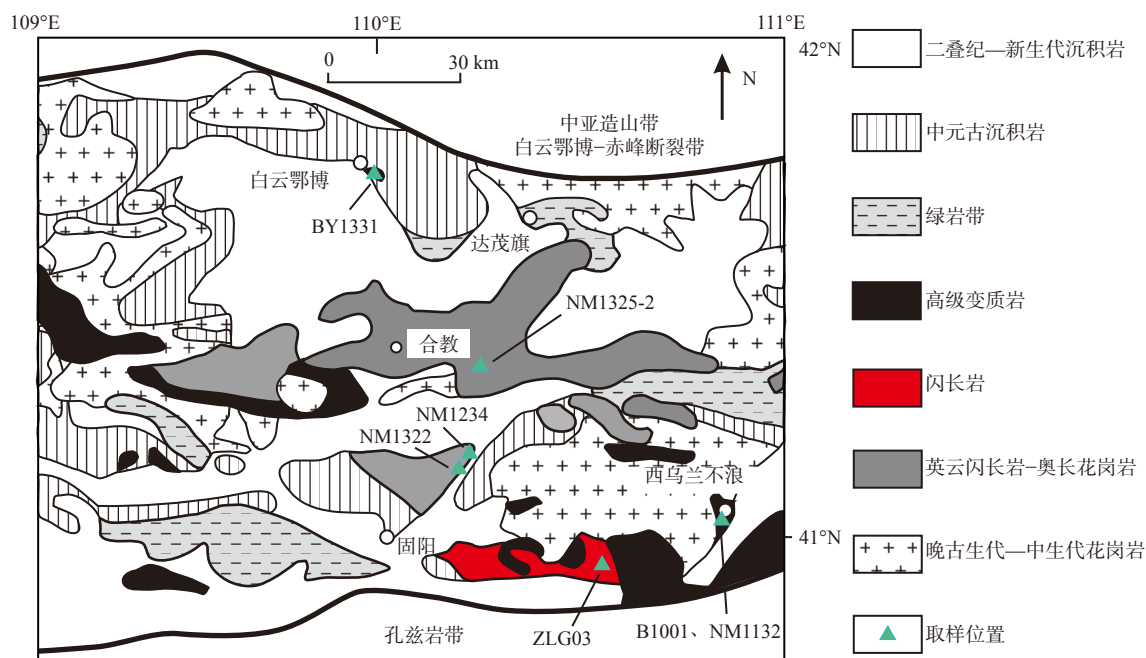


图 11 白云鄂博—固阳地区地质图 (底图据 Jian et al., 2012 修改; 图中给出了新太古代早期定年岩石样品的位置, 数据来源董晓杰等, 2012; 马铭株等, 2013; 董春艳等, 2021)

Fig. 11 Geological map of the Bayan Obo–Guyang area (modified after Jian et al., 2012), showing the locations of the dated early Neoproterozoic rock samples (Dong et al., 2012; Ma et al., 2013; Dong et al., 2021)

~2.5 Ga 变质作用; ⑦发育古元古代晚期(1.86~1.94 Ga)变质作用。其中, 西乌兰不浪地区发现~2.7 Ga TTG 岩石具有重要意义(董晓杰等, 2012; 马铭株等, 2013); 在白云鄂博地区发现~2.6 Ga TTG 岩石(范宏瑞等, 2010; 董春艳等, 2021)。除此之外, 在固阳地区也发现了新太古代早期 TTG 岩石, 它们零星分布于新太古代晚期岩浆岩中。

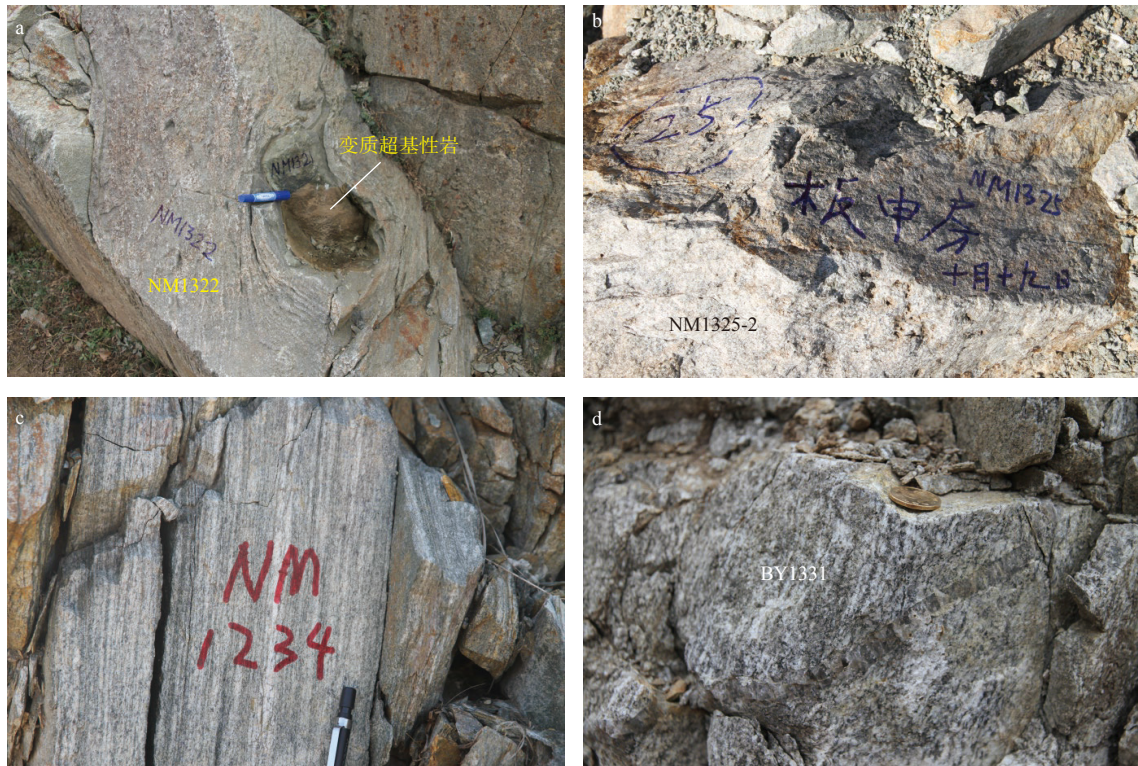
(1) 2.7 Ga 片麻状英云闪长岩(NM1322)

样品取自固阳东北(图 11)。该处出露较大规模英云闪长质岩石, 可见宽度约 100 m。它们被闪长质岩石切割。岩石普遍具条带状构造, 遭受强烈变形。取样处, 岩石的条带状构造相对较弱, 包裹变质超基性岩(图 12a)。片麻状英云闪长岩(NM1322)的锆石呈柱状, 显示不同程度重结晶, 存在窄的变质增生边(图 13a)。4 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 0.51~0.83, 2 个岩浆锆石数据点和 1 个重结晶锆石数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为

2696±10 Ma(MSWD=1.93), 解释为岩石形成时代。21 个变质锆石数据点的 Th/U 比值和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 0.04~1.13 和 2300~2587 Ma, 其中 9 个集中在谐和线上的数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2513±9 Ma(MSWD=4.2; 图 13b), 解释为新太古代晚期构造热事件年龄记录。3 个集中在谐和线上的最年轻变质锆石数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2455±10 Ma(MSWD=0.55)。

(2) 2.7 Ga 片麻状二长花岗岩(NM1325-2)

在合教东(图 11), 山边存在一些采石场, 新鲜岩石以奥长花岗质岩石为主, 还有变质闪长岩和片麻状二长花岗岩。可见~20 m 宽的斜长角闪岩包在奥长花岗岩中。样品 NM1325-2 采自二长花岗质岩石露头(图 12b)。锆石呈柱状, 具有核-边结构(图 13c)。核部锆石具封闭振荡环带, 也普遍遭受重结晶改造。7 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 0.26~0.75, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2543~2682 Ma, 数据点

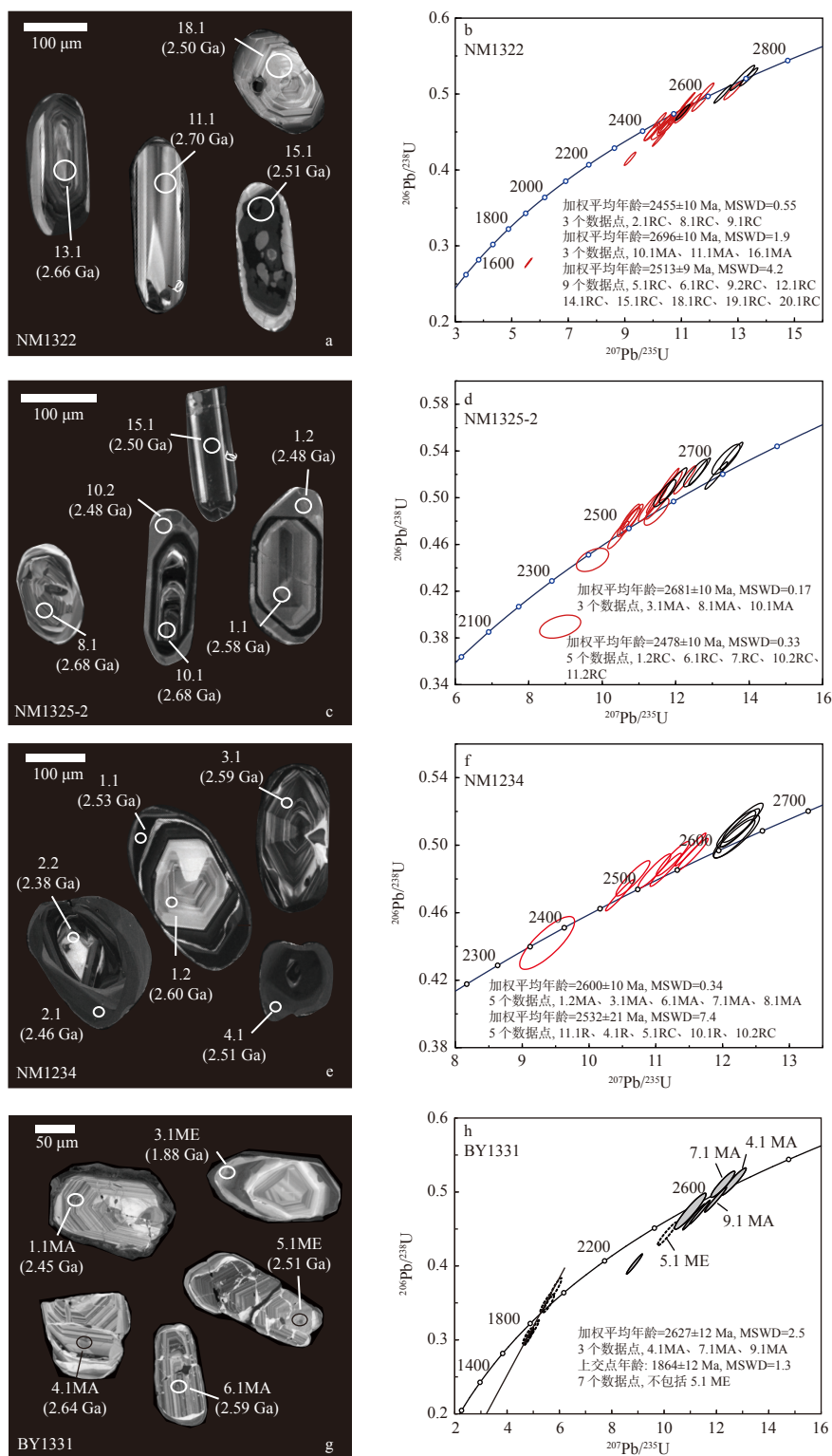


a—2.70 Ga 英云闪长质片麻岩(NM1322), 包裹变质超基性岩, 固阳东北; b—2.68 Ga 二长花岗质片麻岩(NM1325-2), 合教东; c—2.60 Ga 奥长花岗质片麻岩(NM1234), 固阳东北; d—2.63 Ga 英云闪长质片麻岩(BY1331), 白云鄂博东南(董春艳等, 2021)

图 12 白云鄂博—固阳地区新太古代早期岩石的野外照片

Fig. 12 Field photographs of the early Neoproterozoic rocks in the Bayan Obo-Guyang area

(a) 2.70 Ga tonalitic gneiss (NM1322), containing a meta-ultra-mafic rock enclave, northeast of Guyang; (b) 2.68 Ga monzogranitic gneiss (NM1325-2), east of Hejiao; (c) 2.60 Ga trondhjemitic gneiss (NM1234), northeast of Guyang; (d) 2.63 Ga tonalitic gneiss (BY1331), southeast of the Bayan-Obo area (Dong et al., 2021)



a、b—2.70 Ga 英云闪长质片麻岩 (NM1322), 固阳东北; c、d—2.68 Ga 二长花岗质片麻岩 (NM1325-2), 合教东; e、f—2.60 Ga 奥长花岗质片麻岩 (NM1234), 固阳东北; g、h—2.63 Ga 英云闪长质片麻岩 (BY1331), 白云鄂博东南 (董春艳等, 2021)

图 13 白云鄂博—固阳地区新太古代早期岩石的锆石阴极发光图像和 U-Pb 谐和图

Fig. 13 CL images and SHRIMP U-Pb concordia diagrams for the zircons from the early Neoproterozoic rocks in the Bayan Obo-Guyang area (a) and (b) 2.70 Ga tonalitic gneiss (NM1322), containing a meta-ultra-mafic rock enclave, northeast of Guyang; (c) and (d) 2.68 Ga monzogranitic gneiss (NM1325-2), east of Hejiao; (e) and (f) 2.60 Ga trondhjemitic gneiss (NM1234), northeast of Guyang; (g) and (h) 2.63 Ga tonalitic gneiss (BY1331), southeast of the Bayan-Obo area (Dong et al., 2021)

略反向分布(图 13d), 原因还不清楚。其中 3 个年龄最大数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2681\pm 10\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.17$), 解释为岩石形成时代。13 个变质锆石数据点的 Th/U 比值和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $0.17\sim 0.97$ 和 $2435\sim 2582\text{ Ma}$, 其中 5 个年龄最小集中在谐和线上的数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2478\pm 10\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.33$), 大致代表了新太古代晚期—古元古代早期变质作用时代。

(3) 2.6 Ga 片麻状奥长花岗岩(NM1234)

在固阳东北(图 11), 沿公路存在一很好的剖面, 主要由奥长花岗质岩石组成。岩石普遍遭受深熔作用改造和强烈变形(图 12c)。奥长花岗质岩石中局部存在暗色成分层, 解释为平行化了的角闪质岩石包体。锆石呈椭圆状, 具核—边结构(图 13e)。核部岩浆锆石具封闭振荡环带。边部锆石组成均匀, 颜色更暗。5 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 $0.31\sim 0.70$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2600\pm 10\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.34$; 图 13f), 解释为奥长花岗岩形成时代。8 个变质重结晶锆石数据点的 Th/U 比值和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $0.06\sim 0.75$ 和 $2388\sim 2552\text{ Ma}$, 其中 5 个集中在谐和线上的数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2532\pm 21\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=7.4$), 解释为新太古代晚期告知热事件年龄记录。

(4) 新太古代早期片麻状英云闪长岩(BY1331; 董春艳等, 2021)

样品采自白云鄂博东南(图 11)。岩石遭受强烈变形, 局部发育深熔成因的浅色条带(图 12d)。锆石呈柱状或近等轴状, 具核—边结构(图 13g)。核部岩浆锆石具密集振荡环带或板状环带, 但遭受不同程度重结晶改造。7 个核部岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 $0.23\sim 1.00$, 其中 3 个位于或接近谐和线的年龄最大数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2627\pm 12\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=2.5$; 图 13h)。数据点 5.1ME 的成分域显示重结晶特征, 其 Th/U 比值为 0.14 , $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2514 Ma 。其他 7 个变质锆石数据点的 Th/U 比值为 $0\sim 0.06$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值范围为 $1843\sim 1884\text{ Ma}$, 它们构成不一致线的上交点年龄为 $1864\pm 12\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.3$)。

1.5 胶东地区

胶东是华北克拉通早前寒武纪变质基底重要分布区之一(图 14)。由于普遍遭受强烈风化和覆盖,

胶东地区太古宙岩石露头出露通常很差, 但在中部栖霞地区岩石露头很好, 有关胶东地区太古宙变质基底的认识大都来自栖霞地区的研究(王来明, 1989; Tang et al., 2007; Jahn et al., 2008; 刘建辉等, 2011; 单厚香等, 2013; Wu et al., 2014; Xie et al., 2014; 谢士稳等, 2015; 万渝生等, 2017; Wan et al., 2021)。王来明(1989)对栖霞地区开展 1:5 万地质填图, 从变质地层中划分出不少 TTG 岩石, 但仍保留了大量新太古代壳岩, 称之为胶东岩群。根据新的认识, 这些胶东岩群表壳岩也大都为 TTG 岩石, 主体为英云闪长岩。它们遭受强烈变质变形, 部分遭受不同程度深熔作用改造, 形成条纹构造和条带构造, 但宏观上均匀, 仍显示出岩浆岩的岩石外貌特征。太古宙表壳岩包括中太古代黄崖底表壳岩和新太古代晚期胶东岩群, 但出露规模都很小, 以包体形式零星分布于太古宙花岗质岩石中。由于遭受强烈改造, 加之岩石类型和地球化学组成特征类似, 不同时代英云闪长质片麻岩在野外难以相互区别, 不同时代奥长花岗质片麻岩在野外也难以相互区别。为了确定不同时代 TTG 岩石的空间分布, 在地质填图基础上, 研究团队进行了大量 TTG 岩石 SHRIMP U-Pb 锆石定年, 大致确定了不同时代 TTG 的空间分布(图 15; 万渝生等, 2017; Wan et al., 2021)。不同时代英云闪长质片麻岩大体呈北西—南东向分布, 与栖霞地区变质基底构造线走向一致, 这很可能是新太古代晚期和古元古代晚期构造热事件共同作用的结果。不同时代 TTG 岩石的全岩 Nd 同位素组成类似(图 16a), 表明 2.9 Ga 玄武质岩石在太古宙不同时代发生熔融形成 TTG 岩石。但是, 一些新太古代晚期岩石具有高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 表明那时地幔添加作用的存在。锆石 Hf 同位素组成也显示了类似特征(图 16b)。

与栖霞相比, 胶东其他地区太古宙变质基底研究程度不高, 但仍获得不少研究成果(图 14)。可以肯定, 整个胶东地区太古宙基底都以 2.9 Ga、2.7 Ga 和 2.5 Ga 英云闪长岩为主, 在新太古代早期为统一的基底。

(1) 2.9 Ga 条带状英云闪长岩(JD1423; 万渝生等, 2019a)

样品取自莱州南(图 14)。变质基底岩石沿一条小路零星出露。英云闪长质岩石条带状构造明显, 由灰色和浅色条带组成, 显示强烈深熔和变形

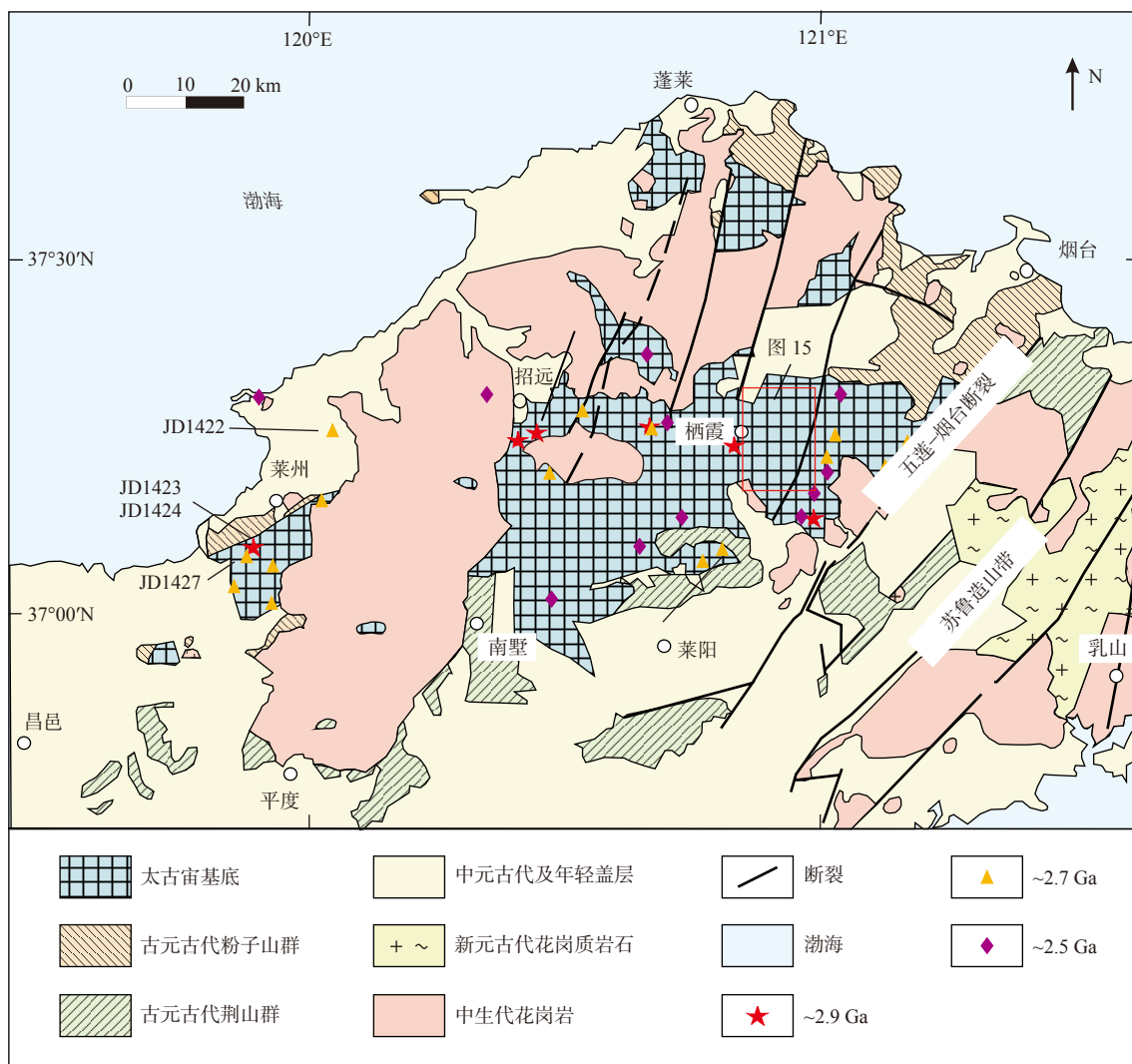


图 14 胶东地区地质图 (Wan et al., 2015; 图中给出了太古宙岩石定年样品空间分布 (栖霞地区除外) 和图 15 的位置)

Fig. 14 Geological map of eastern Shandong Province, North China Craton (Wan et al., 2015), showing the spatial distribution of the dated Archean rock samples (except the Qixia area) and the location of Fig. 15

(图 17a)。锆石呈柱状或近等轴状, 具核-边结构 (图 18a)。7 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 0.25~0.94, 其中 6 个 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄最大数据点的加权平均年龄为 2875 ± 5 Ma (MSWD=0.41, 图 18b), 代表了岩石形成时代或略小于岩石形成年龄。7 个变质增生边数据点的 Th/U 比值为 0~0.11, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化很大 (2662~2831 Ma), 3 个最年轻并相对集中分布的数据点的加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2664 ± 5 Ma (MSWD=0.39), 其余 4 个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2717~2831 Ma。

(2) 片麻状闪长质岩石 (JD1424; 万渝生等, 2019a)

片麻状闪长质岩石与 2.9 Ga 条带状英云闪长岩

(JD1423) 互层。岩石具片麻理 (图 17b)。锆石呈等轴状或椭圆状, 具复杂内部结构 (图 18c)。岩浆锆石普遍遭受重结晶改造, 但变质增生边不发育。大多数锆石无明显铅丢失 (图 18d)。8 个岩浆锆石数据点分析, Th/U 比值为 0.32~0.61, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2752~2925 Ma。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄最大的 2 个数据点的加权平均年龄为 2921 ± 13 Ma (MSWD=0.12), 代表了岩石形成时代。12 个重结晶锆石分析, Th/U 比值为 0.12~1.91, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2612~2922 Ma。6 个变质增生边数据点的 Th/U 比值为 0.02~0.53。数据点 4.1R 的结构特征与变质增生边类似, Th/U 比值为 0.16, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2498 ± 9 Ma。数据点 12.1R 结构上显示变质成因, Th/U 比值为 0.02, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$

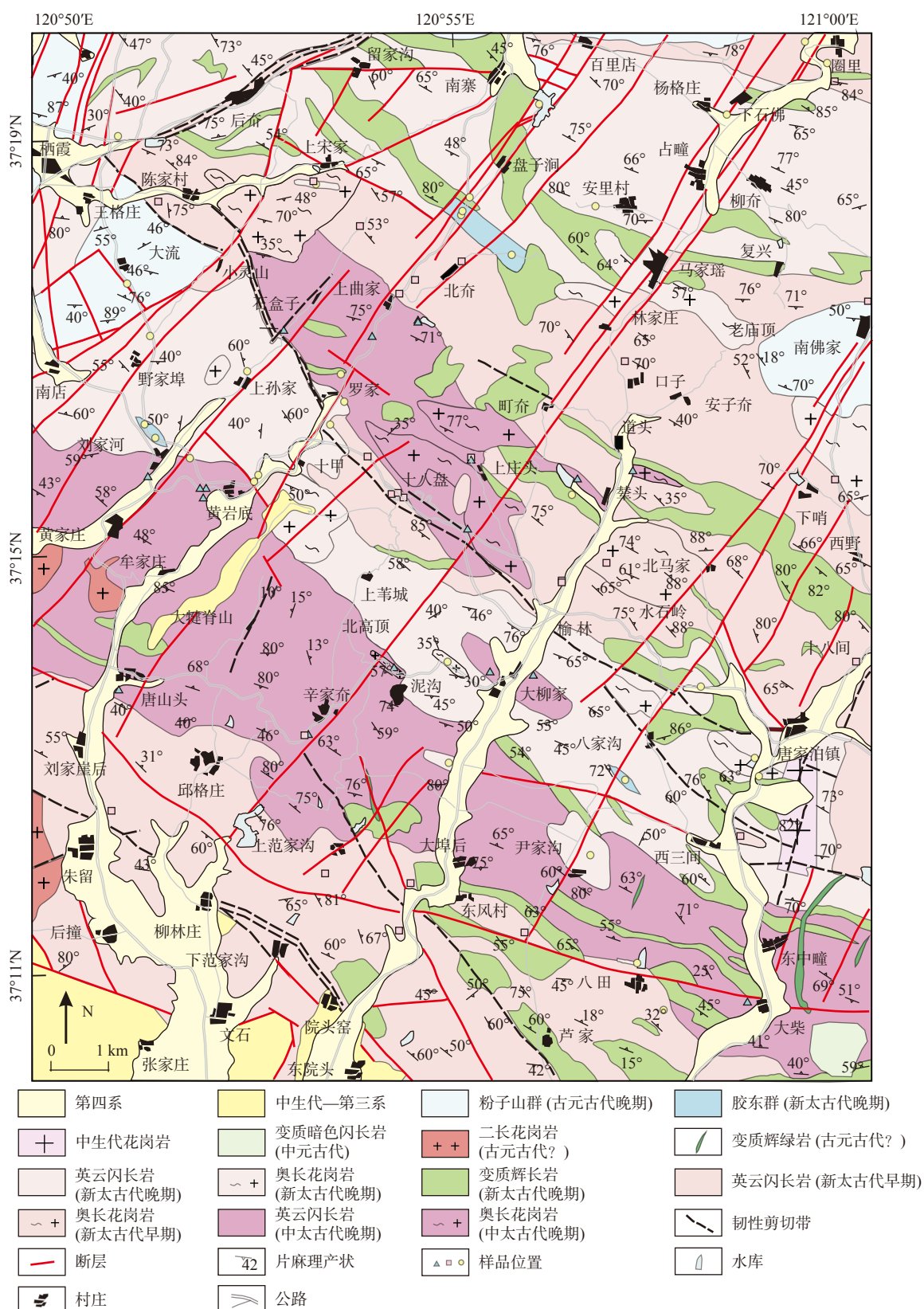
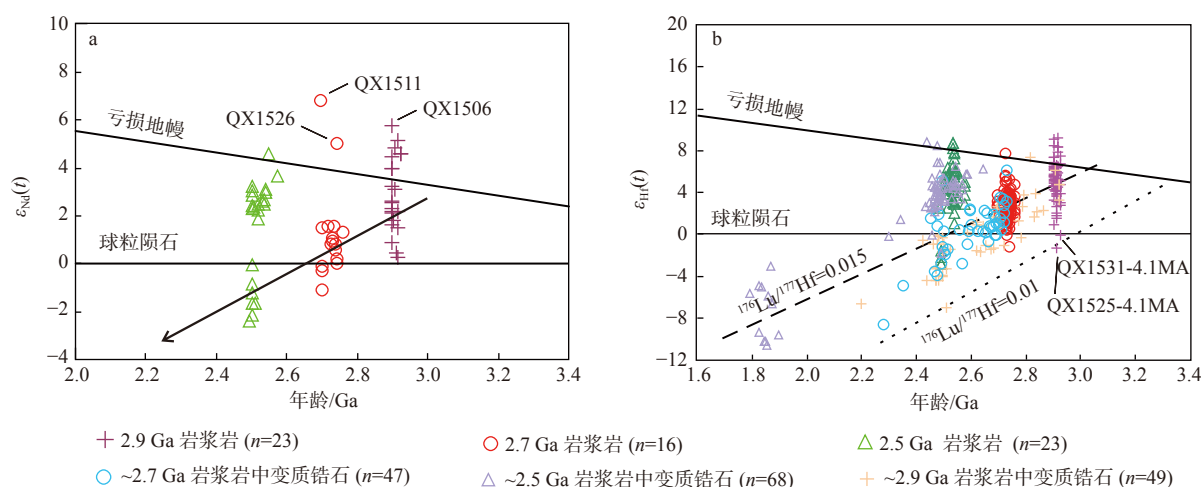


图 15 栖霞地区地质图 (万渝生等, 2017; Wan et al., 2021; 图中给出了太古宙定年样品位置, 三角、方框和圆圈分别代表 2.9 Ga、2.7 Ga 和 2.5 Ga 岩石样品)

Fig. 15 Geological map of the Qixia area (Wan et al., 2017; Wan et al., 2021), showing the spatial distribution of the dated Archean rocks, with triangle, square and circle represent 2.9 Ga, 2.7 Ga and 2.5 Ga rock samples, respectively



a—全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -年龄图; b—锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图

图 16 栖霞地区太古宙岩浆岩的 Nd-Hf 同位素组成 (Wan et al., 2021)

Fig. 16 Nd-Hf isotopic composition of the Archean magmatic rocks in the Qixia area (Wan et al., 2021)

(a) Whole-rock $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. age diagram; (b) zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. age diagram

年龄为 2648 ± 4 Ma。

(3) 2.7 Ga 条带状英云闪长岩 (JD1422; 万渝生等, 2019a)

样品取自莱州东北 (图 14) 一废弃金矿采坑。坑内主体岩石为条带状英云闪长岩 (图 17c)。拉伸线理发育。岩石具片麻状—条带状构造。锆石呈柱状或近等轴状。岩浆锆石具密集封闭环带, 部分遭受重结晶 (图 18e)。10 个岩浆锆石的 Th/U 比值为 $0.31 \sim 0.65$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2726 ± 5 Ma (MSWD=1.4, 图 18f), 代表了岩石形成时代。重结晶锆石 (10.1RC) 的 Th/U 比值为 0.25, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2526 Ma, 表明新太古代晚期构造热事件影响存在。

(4) 2.7 Ga 片麻状英云闪长岩 (JD1427; 万渝生等, 2019a)

样品取自莱州南 (图 14)。一长约 300 m 的大沟出露主体岩石为片麻状英云闪长岩, 局部显示深熔特征, 呈条带状构造, 存在可能为拉断的变质辉长岩 (图 17d)。锆石呈柱状或等轴状, 具核—边结构, 但变质增生边通常较窄, 核部岩浆锆石组成均匀, 普遍遭受重结晶 (图 18g)。6 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 $0.51 \sim 0.84$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2700 ± 6 Ma (MSWD=0.38; 图 18h), 代表了岩石形成时代。3 个 Th/U 比值为 $0.02 \sim 0.07$ 的重结晶锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2602~2661 Ma, 1 个 Th/U 比值小于 0.01 的变质增生边 (6.1R) 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2690 Ma, 表明新太古代早期变质作用存在。3 个变质增生边的 Th/U 比值都小于 0.30。2 个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加

权平均年龄为 2492 ± 12 Ma (MSWD=0.77), 表明新太古代晚期构造热事件影响存在。

1.6 鲁西地区

鲁西是华北克拉通开展早寒武纪研究最早地区之一。鲁西花岗绿岩带出露良好, 总面积约 40000 km², 大体沿北西—南东向展布, 在东部被郯庐断裂截切。在已有工作基础上 (曹国权, 1996), 十余年来, 鲁西地区前寒武纪研究取得了大量新的进展 (杜利林等, 2003, 2005, 2010; 陆松年等, 2008; Jiang et al., 2010; Wan et al., 2010b, 2011b, 2012, 2014b; Ren et al., 2016; Dong et al., 2017b; Sun et al., 2020; Zuo et al., 2021)。

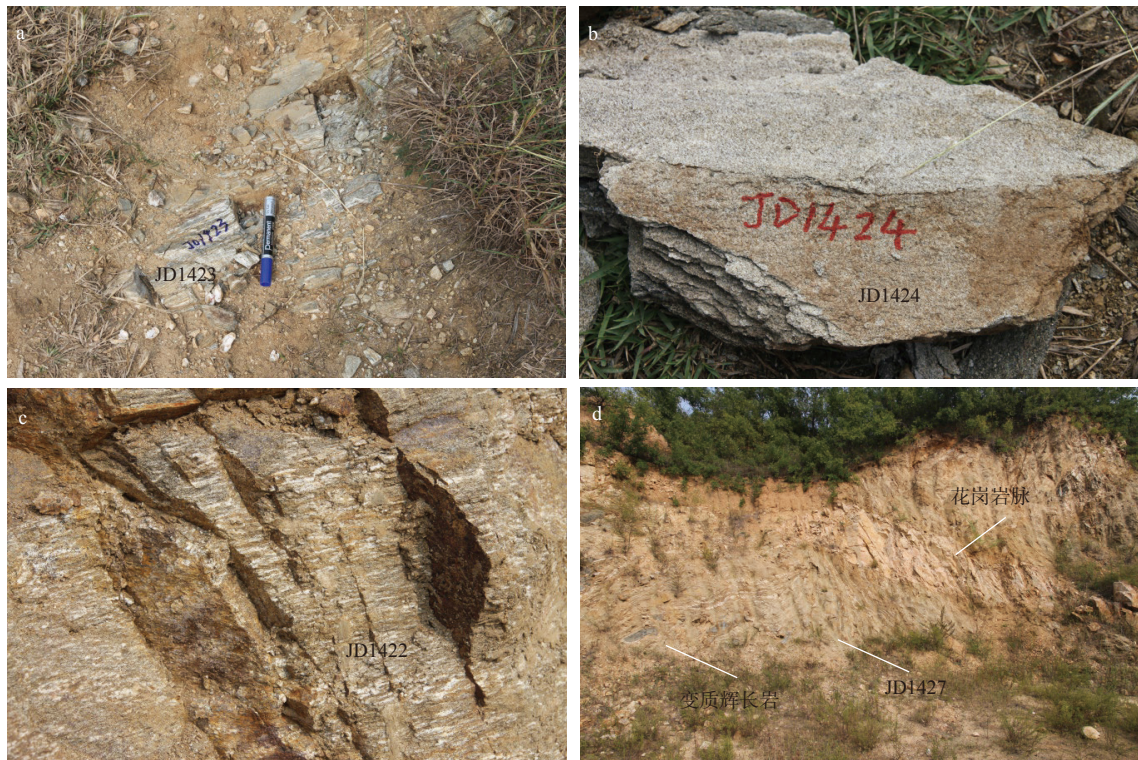
① 鲁西花岗绿岩带形成于 2.50~2.75 Ga, 缺乏中太古代以前和古元古代晚期构造岩浆热事件, 是研究新太古代地壳形成演化的理想地区。

② 鲁西地区太古宙基底存在明显的分带性, 根据岩石类型和形成时代, 从东北到西南可依次划分为三个岩带: A 带为新太古代晚期的壳源花岗岩, B 带为新太古代早期的岩石, C 带为新太古代晚期的新生岩浆岩。

③ 根据鲁西地区 B 带广泛发育的 ~2.6 Ga 构造热事件, 把鲁西花岗绿岩带形成演化划分为新太古代早期 (2.60~2.75 Ga) 和新太古代晚期 (2.50~2.60 Ga) 两个阶段。

④ 新太古代早期侵入岩以 TTG 为主, 存在变质辉长岩—闪长岩; 新太古代晚期侵入岩更为多样复杂, 包括 TTG、壳源花岗岩、辉长岩—闪长岩。

⑤ 该地区存在新太古代早期和晚期两个不同时代的表壳岩系。新太古代早期表壳岩系 (雁翎关—柳杭岩系) 包括雁翎关岩组、孟



a—2.88 Ga 带状英云闪长岩 (JD1423), 下埠东; b—2.92 Ga 闪长质片麻岩 (JD1424), 与样品 JD1423 位置相同; c—2.73 Ga 条带状英云闪长岩 (JD1422), 张家埠; d—2.70 Ga 英云闪长质片麻岩 (JD1427), 包裹变质辉长岩包体, 下埠南

图 17 胶东莱州地区太古宙岩石的野外照片 (万渝生等, 2019a)

Fig. 17 Field photographs of the Archean rocks in the Laizhou area, eastern Shandong (Wan et al., 2019a)

(a) 2.88 Ga banded tonalite (JD1423), east of Xiafu; (b) 2.92 Ga dioritic gneiss (JD1424), same location as the sample JD1423; (c) 2.73 Ga banded tonalite (JD1422), Zhangjiafu; (d) 2.70 Ga tonalitic gneiss (JD1427), containing meta-gabbro enclaves, south of Xiafu

家屯岩组和柳杭岩组下段, 主要由斜长角闪岩和变质超基性岩组成, 也有少量变质碎屑沉积岩。新太古代晚期 (2.53~2.55 Ga) 表壳岩系 (山草峪-济宁岩系) 包括山草峪岩组、柳杭岩组上段和济宁岩群, 主要为变质碎屑沉积岩, 也有少量 BIF 和变质长英质火山岩。⑥鲁西地区新太古代早期和晚期分别为地幔柱和岛弧的构造环境。

万渝生等 (2019b) 对鲁西太古宙典型的七星台地区进行了地质填图 (图 19), 取得重要进展: ①确定该区的 A 带和 B 带之间为构造接触; ②靠近接触带大范围分布的 TTG 岩石不是原认为的 2.6 Ga 奥长花岗质岩石, 而是 2.7 Ga 英云闪长质岩石, 前者只有零星分布; ③A 带中, 新太古代早期岩石呈大小不等的包体在新太古代晚期富钾花岗岩中存在; ④在新太古代早期表壳岩中发现华北克拉通规模最大的太古宙变质枕状玄武岩, 在新太古代晚期表壳岩中发现大量酸性火山岩和火山碎屑沉积岩; ⑤识别出新太古代早期 (2.6 Ga) 和晚期 (2.5 Ga) 两期构造热事件; ⑥识别出多期太古宙变质辉长-闪

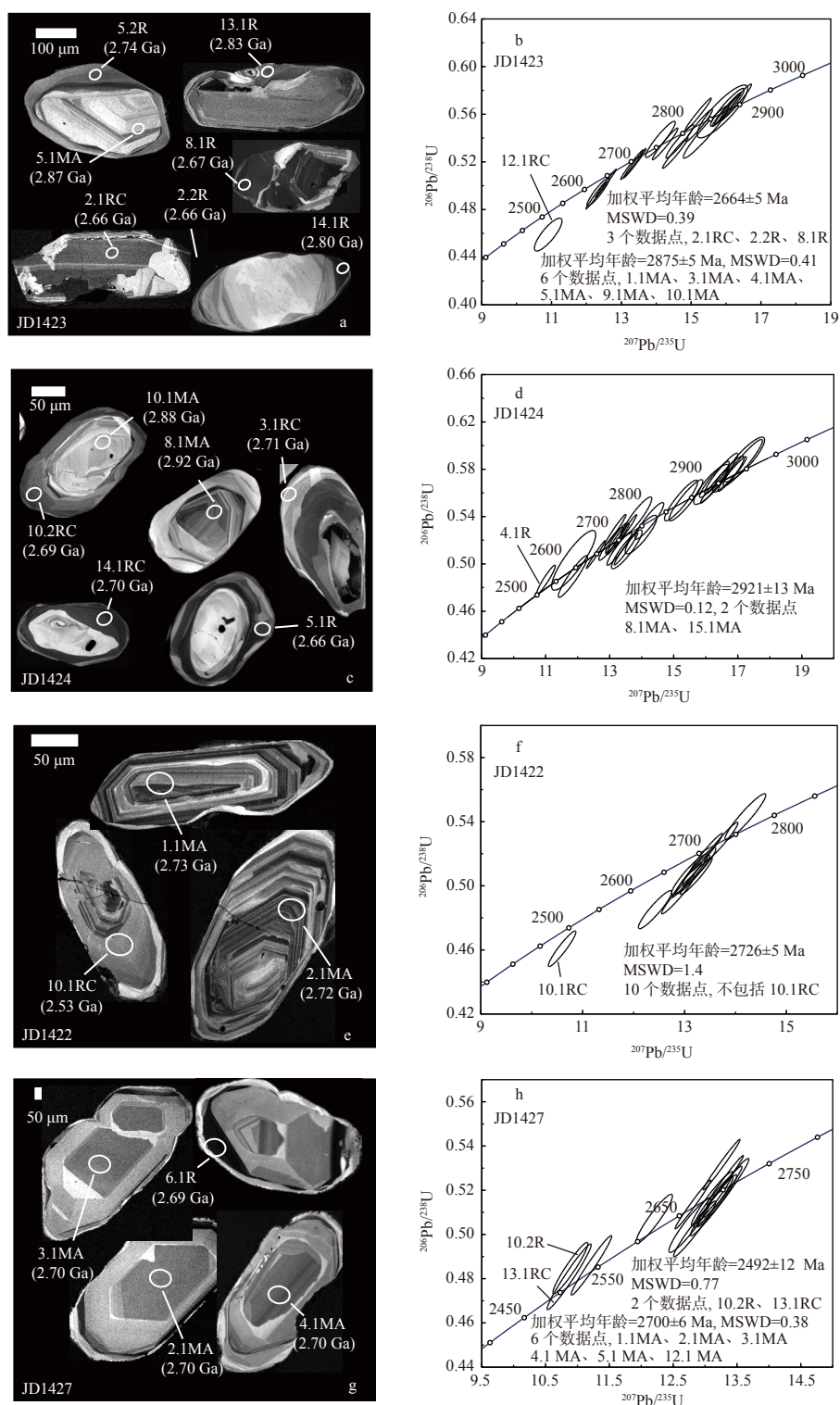
长岩; ⑦进一步确定鲁西地区新太古代早期存在几乎连续分布的岩浆作用 (图 20)。该区新太古代早期变质辉长-闪长岩典型岩石样品定年结果如下。

(1) 2.66 Ga 变质二长闪长岩 (16L4D2-2; 马铭株等, 2020)

样品取自官营西南 (图 19b)。该处可见 2.6 Ga 片麻状奥长花岗岩包裹变质二长闪长岩, 两者界线清楚 (图 21a)。岩浆锆石呈柱状, 具板状环带, 个别具振荡环带 (图 22a)。Th/U 比值为 0.35~0.66, 9 个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2662 \pm 8 \text{ Ma}$ (MSWD=0.67; 图 22b), 解释为二长闪长岩的形成时代。

(2) 2.68 Ga 变质辉长岩 (16L9D3-2; 马铭株等, 2020)

样品取自官营东 500 m (图 19b)。变质辉长岩-辉石岩出露宽度约 20 m, 与新太古代早期柳杭岩组斜长角闪岩呈侵入接触, 在附近见一宽约 5 m 的伟晶岩脉 (图 21b)。变质辉长岩与变质辉石岩共生 (图 21c), 为同时代产物。变质辉长岩呈中粗粒, 具片麻理构造。岩浆锆石多呈柱状, 部分呈等轴状,



a、b—2.88 Ga 带状英云闪长岩 (JD1423), 下埠东; c、d—2.92 Ga 闪长质片麻岩 (JD1424), 与样品 JD1423 位置相同; e、f—2.73 Ga 条带状英云闪长岩 (JD1422), 张家埠; g、h—2.70 Ga 英云闪长质片麻岩 (JD1427), 下埠南

图 18 胶东莱州地区太古宙岩石的锆石阴极发光图像和 U-Pb 谐和图 (万渝生等, 2019a)

Fig. 18 CL images and SHRIMP U-Pb concordia diagrams for zircons from the Archean rocks in the Laizhou area, eastern Shandong (Wan et al., 2019a)

(a) and (b) 2.88 Ga banded tonalite (JD1423), east of Xiaifu; (c) and (d) 2.92 Ga dioritic gneiss (JD1424), same location as the sample JD1423; (e) and (f) 2.73 Ga banded tonalite (JD1422), Zhangjiafu; (g) and (h) 2.70 Ga tonalitic gneiss (JD1427), south of Xiaifu

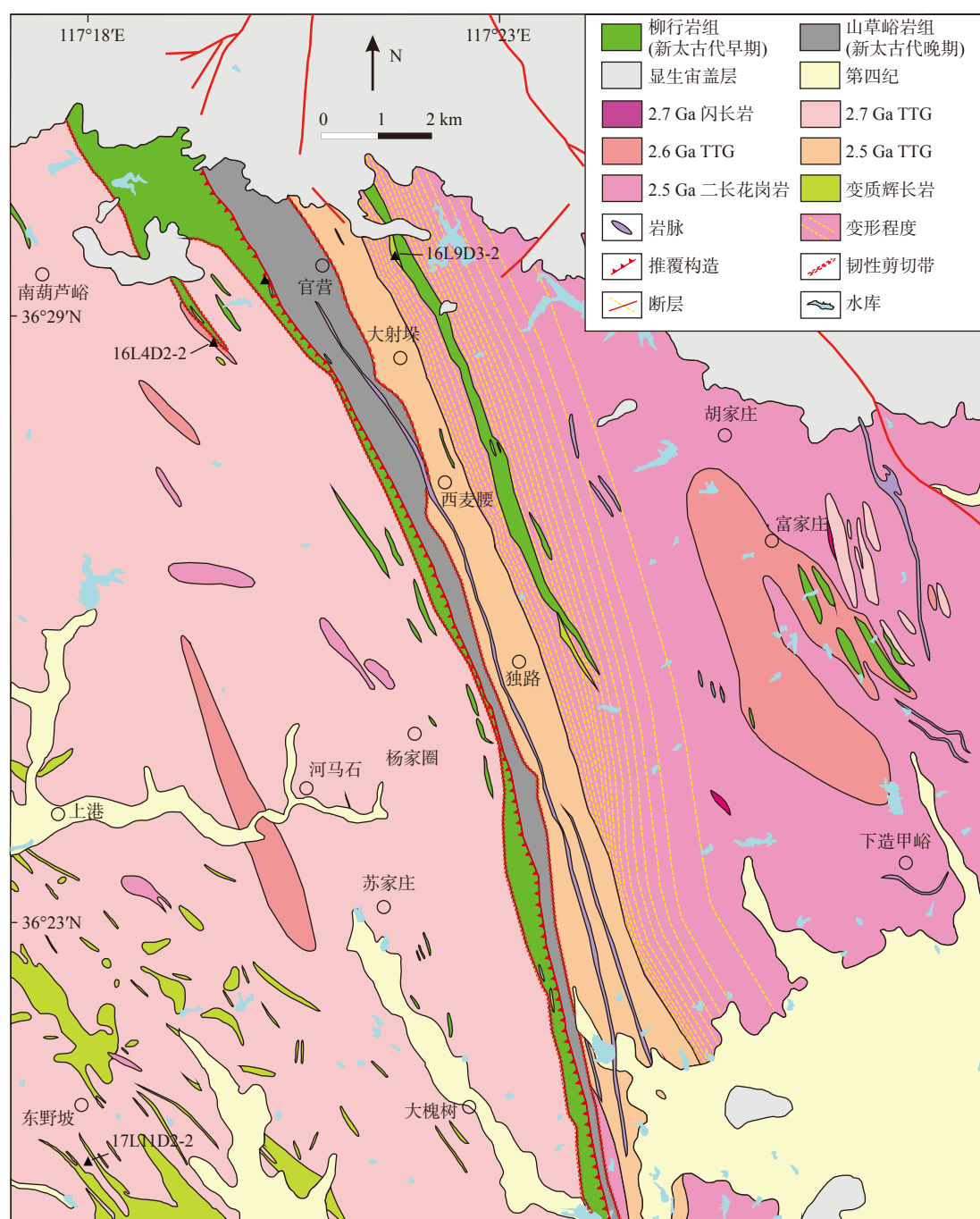


图 19 鲁西七星台地区地质图 (底图据 Bai et al., 2020; 图中给出了新太古代早期定年样品位置, 数据来源马铭株等, 2020)

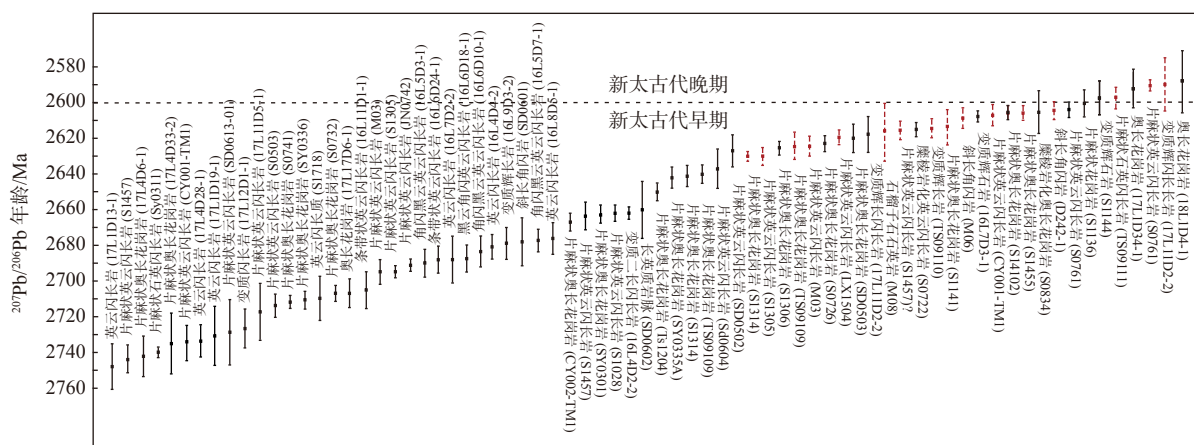
Fig. 19 Geological map of the Qixingtai area, western Shandong (Bai et al., 2020), showing the locations of the dated early Neoproterozoic rock samples (Ma et al., 2020)

组成均一或具板状环带 (图 22c)。17 个数据点的 Th/U 比值为 1.72~10.40。10 个在谐和线上集中分布数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2679 ± 9 Ma (MSWD=0.49; 图 22d), 代表了辉长岩的侵入年龄。

(3) 2.62 Ga 变质辉长闪长岩 (17L11D2-2; 马铭株等, 2020)

样品取自东野坡南 (图 19b)。变质辉长闪长

岩、变质辉长岩和变质辉石岩共生 (图 21d), 出露宽度约 20 m。斑状辉长岩构成辉长岩和辉石岩之间的过渡产物。变质辉长闪长岩 (17L11D2-2) 的锆石呈柱状, 具有板状环带, 部分遭受变质重结晶改造 (图 22e)。5 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比值为 0.12~0.41, 普遍显示不同程度铅丢失, 1 个位于谐和线上数据点 (3.1MA) 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2618 ± 10 Ma



黑线和红色虚线分别代表岩浆年龄和变质年龄

图 20 鲁西地区新太古代早期侵入岩的锆石年龄变化 (马铭株等, 2020)

Fig. 20 Zircon age variation for the early Neoproterozoic magmatic rocks in west Shandong (Ma et al., 2020)

Black line and red dotted line represent magmatic and metamorphic ages, respectively

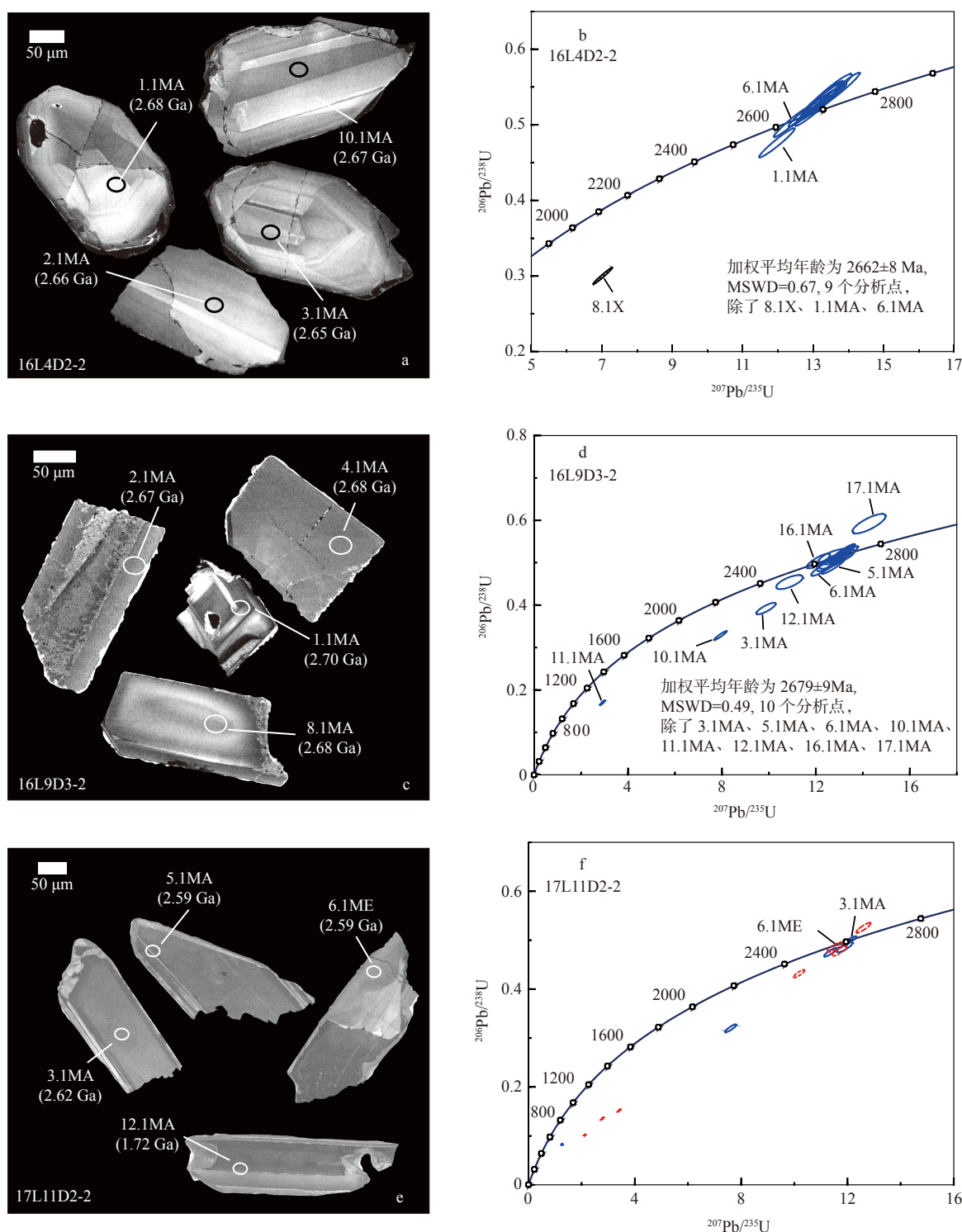


a—2.66 Ga 变质闪长岩 (16L4D2-2), 被包裹在 ~2.6 Ga 奥长花岗质片麻岩中, 官营西南; b—变质辉长岩—辉石岩侵入新太古代早期柳杭岩组斜长角闪岩, 界线附近又有伟晶岩脉侵入, 官营东; c—2.68 Ga 变质辉长岩 (16L9D3-2), 与变质辉石岩空间上共生, 位置同图 21b; d—变质辉长岩和变质辉石岩空间上共生, ~2.6 Ga 变质辉长闪长岩 (17L11D2-2) 取自该露头附近, 东野坡南

图 21 鲁西七星台地区新太古代早期变质超基性岩—中性岩的野外照片 (马铭株等, 2020)

Fig. 21 Field photographs of the early Neoproterozoic meta-ultramafic to intermediate rocks in the Qixingtai area, western Shandong (Ma et al., 2020)

(a) 2.66 Ga meta-diorite (16L4D2-2), occurring as enclaves in ~2.6 Ga trondhjemitic gneiss, southwest of Guanying; (b) Meta-gabbro—pyroxenite, intruding the amphibolite of the early Neoproterozoic Liuhang Group, and cut by pegmatite dyke near the boundary, east of Guanying; (c) 2.68 Ga meta-gabbro (16L9D3-2), contacting with meta-pyroxenite, same location as Fig 21b; (d) Meta-gabbro, contacting with meta-pyroxenite, ~2.6 Ga meta-gabbro sample 17L11D2-2 is taken near the outcrop, south of Dongyepo



a、b—2.66 Ga 变质闪长岩 (16L4D2-2), 官营西南; c、d—2.68 Ga 变质辉长岩 (16L9D3-2), 官营东; e、f— ~ 2.6 Ga 变质辉长闪长岩 (17L11D2-2), 东野坡南

图 22 鲁西七星台地区新太古代早期变质超基性岩—中性岩的锆石阴极发光图像和 U-Pb 谐和图 (马铭株等, 2020)

Fig. 22 CL images and SHRIMP U-Pb concordia diagrams for the zircons from the early Neoproterozoic meta-ultramafic to intermediate rocks in the Qixingtai area, western Shandong (Ma et al., 2020)

(a) and (b) 2.66 Ga meta-diorite (16L4D2-2), southwest of Guanying; (c) and (d) 2.68 Ga meta-gabbro (16L9D3-2), east of Guanying; (e) and (f) ~ 2.6 Ga meta-gabbro (17L11D2-2), south of Dongyepo

(图 22f), 大致代表了变质辉长闪长岩的形成时代。7 个变质重结晶锆石数据点的 Th/U 比值为 0.001~0.06 (1 个为 0.24), 也显示不同程度铅丢失, 1 个位于谐和线上数据点 (6.1ME) 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2590 ± 15 Ma, 大致代表了岩石遭受变质作用的时代。

1.7 蚌埠地区

蚌埠位于华北克拉通东南缘。早前寒武纪基底岩石在该区零星分布, 称为五河杂岩 (图 23)。五河杂岩主要由变铁镁质岩石、变长英质岩石、斜长角闪岩、大理岩和花岗质岩石等组成, 主体可能形成于古元古代 (刘贻灿等, 2015)。最近, Liu et al. (2019) 在蚌埠地区分辨出多期太古宙花岗质岩石, 最为重要的是中太古代 TTG 岩石的发现, 确定了 2.49~2.52 Ga 和 1.84 Ga 变质作用存在。Sun et al. (2021) 进一步确定该区存在 2.6 Ga 壳源富钾花岗岩, 同样识别出 ~2.5 Ga 构造热事件存在。太古宙岩石的分布规模都很小, 值得进一步开展研究, 以确定不同时代太古宙岩石的空间分布和规模。

(1) 2.93 Ga 花岗闪长质片麻岩 (14BB44-1; Liu et

al., 2019)

样品取自凤阳东南 (图 23)。锆石呈棱柱状, 具核-边结构, 核部锆石具振荡环带 (图 24a)。30 个岩浆锆石数据点的 Th/U 比为 0.50~1.74, 部分数据点显示铅丢失, 不一致线上交点年龄为 2934 ± 6 Ma (MSWD=0.53; 图 24b), 解释为岩石形成年龄。

(2) 2.83 Ga 花岗闪长质片麻岩 (14BB35-1; Liu et al., 2019)

样品取自五河东南 (图 23), 被中生代角闪花岗岩侵入。花岗闪长质片麻岩 (14BB35-1) 的锆石呈柱状, 或不规则状, 具核-边结构, 核部锆石具振荡环带, 普遍遭受重结晶改造 (图 24c)。数据点大都沿谐和线分布 (图 24d)。大多数数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 2694~2860 Ma, 可进一步划分为 2802~2860 Ma (32 个数据点) 和 2694~2759 Ma (21 个数据点) 两组, 它们的 Th/U 比值分别为 0.14~0.98 和 0.17~0.63, 不一致上交点年龄分别为 2831 ± 10 Ma 和 2729 ± 14 Ma。Liu et al. (2019) 把 2729 ± 14 Ma 解释为岩石形成时代, 把 2831 ± 10 Ma 解释为外来锆石年龄。不过, 从锆石特征和数据点分布形式看, 2694~

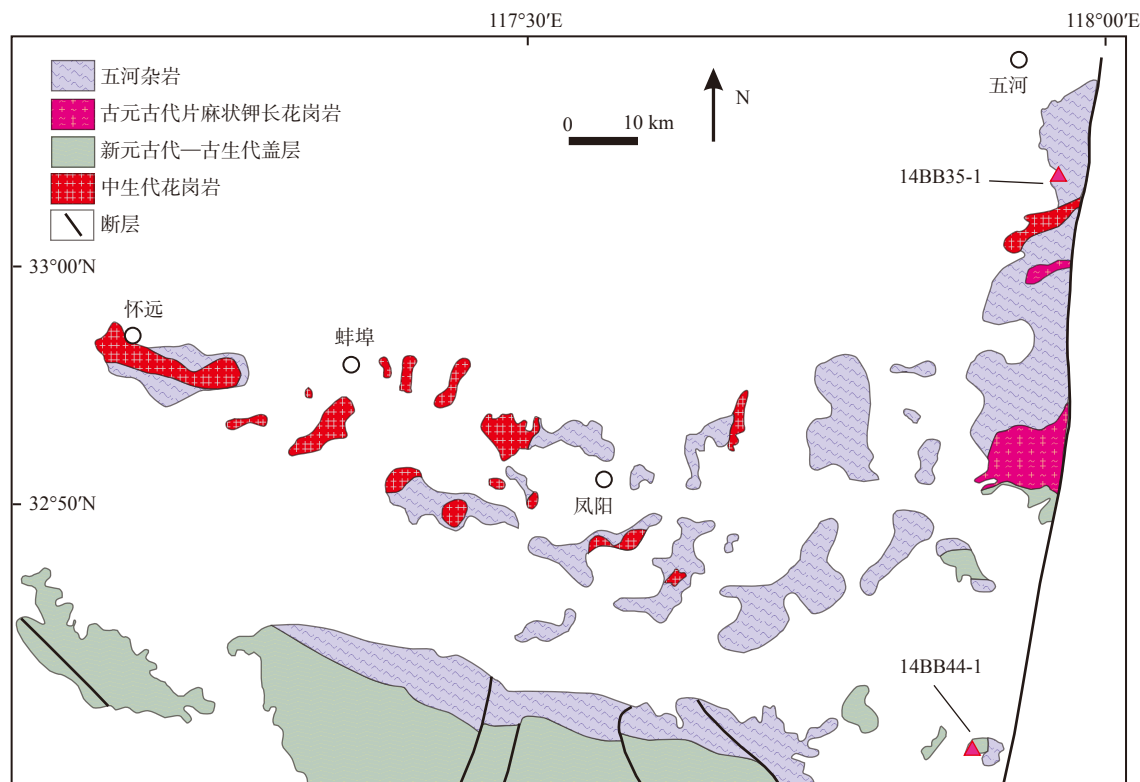
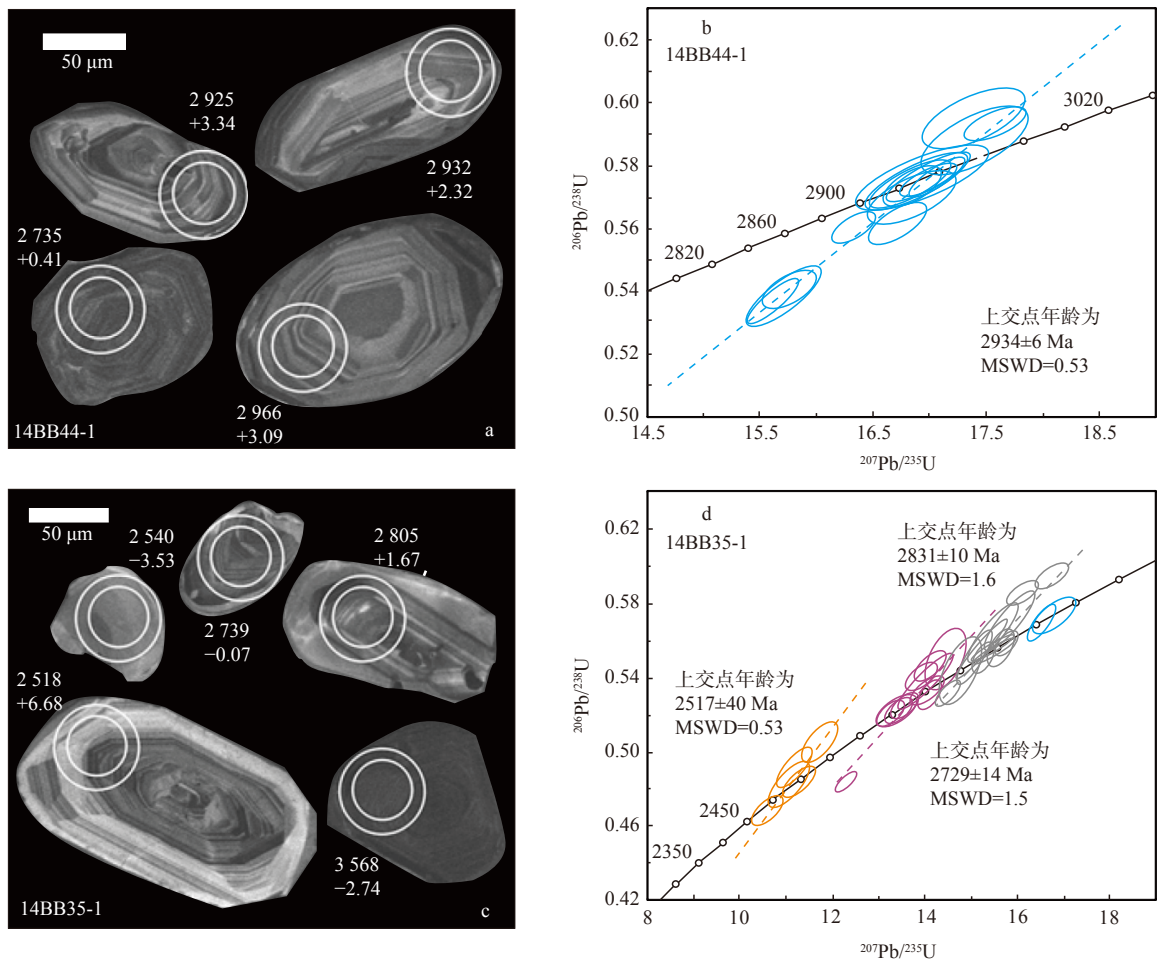


图 23 蚌埠地区地质图 (底图据刘贻灿等, 2015; 图中给出了中太古代晚期定年样品位置, 数据来源 Liu et al., 2019)

Fig. 23 Geological map of the Bengbu area (Liu et al., 2015), showing the locations of the dated late Mesoarchean rock samples (Liu et al., 2019)



a、b—2.93 Ga 花岗闪长质片麻岩 (14BB44-1), 凤阳东南; c、d—2.83 Ga 花岗闪长质片麻岩 (14BB35-1), 五河南

a、c 中白色圆圈 (50 μm 和 35 μm) 分别为 Lu-Hf 和 U-Pb 分析位置; 数字为 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

图 24 蚌埠地区中太古代晚期花岗质岩石的锆石阴极发光图像和 U-Pb 谐和图 (Liu et al., 2019)

Fig. 24 CL images and SHRIMP U-Pb concordia diagrams for the zircons from the late Mesoproterozoic granitoids in the Bengbu area (Liu et al., 2019)

(a) and (b) 2.93 Ga granodioritic gneiss (14BB44-1), southeast of Fengyang; (c) and (d) 2.83 Ga granodioritic gneiss (14BB35-1), south of Wuhe. Circles (50 μm and 35 μm) show the positions of Lu-Hf and U-Pb analytical sites, respectively, with $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values shown

2759 Ma 锆石更可能为变质重结晶改造使岩浆锆石发生古铅丢失的结果, 2829 $\pm$ 7 Ma 为岩石形成时代。5 个变质边数据点构成的不一致线上交点年龄为 2517 $\pm$ 40 Ma, 为新太古代晚期构造热事件年龄记录。同时存在 2905~2918 Ma 外来锆石。

1.8 鲁山地区

鲁山位于华北克拉通南缘。基底岩石原称之为太华岩群, 进一步划分为下太华亚岩群和上太华亚岩群。上太华亚岩群岩石组合具孔兹岩系性质, 形成于古元古代 (Wan et al., 2006)。下太华亚岩群的主体为英云闪长质片麻岩组成 (图 25)。根据 ~2.8 Ga 锆石蒸发法年龄, Kröner et al. (1988) 认为英

云闪长质片麻岩形成于中太古代。之后的研究进一步支持了这一认识 (Liu et al., 2009a; Diwu et al., 2010; Huang et al., 2010; Zhou et al., 2014; Jia et al., 2020)。Diwu et al. (2010) 和 Huang et al. (2010) 提出鲁山地区存在 2.7~2.75 Ga TTG 岩石, 但这些年龄的锆石通常显示变质结构特征, 难以确定是否能够代表岩石的形成时代。Wan et al. (2014a) 在总结华北克拉通新太古代早期 TTG 岩石时未包括鲁山地区。但是, Zhou et al. (2014) 的研究表明, 鲁山地区确实存在新太古代早期 (2.65~2.75 Ga) 花岗质岩石 (二长花岗岩)。尽管如此, 鲁山地区太古宙基底仍以中太古代 (2.80~2.85 Ga) TTG 岩石为主。在中太

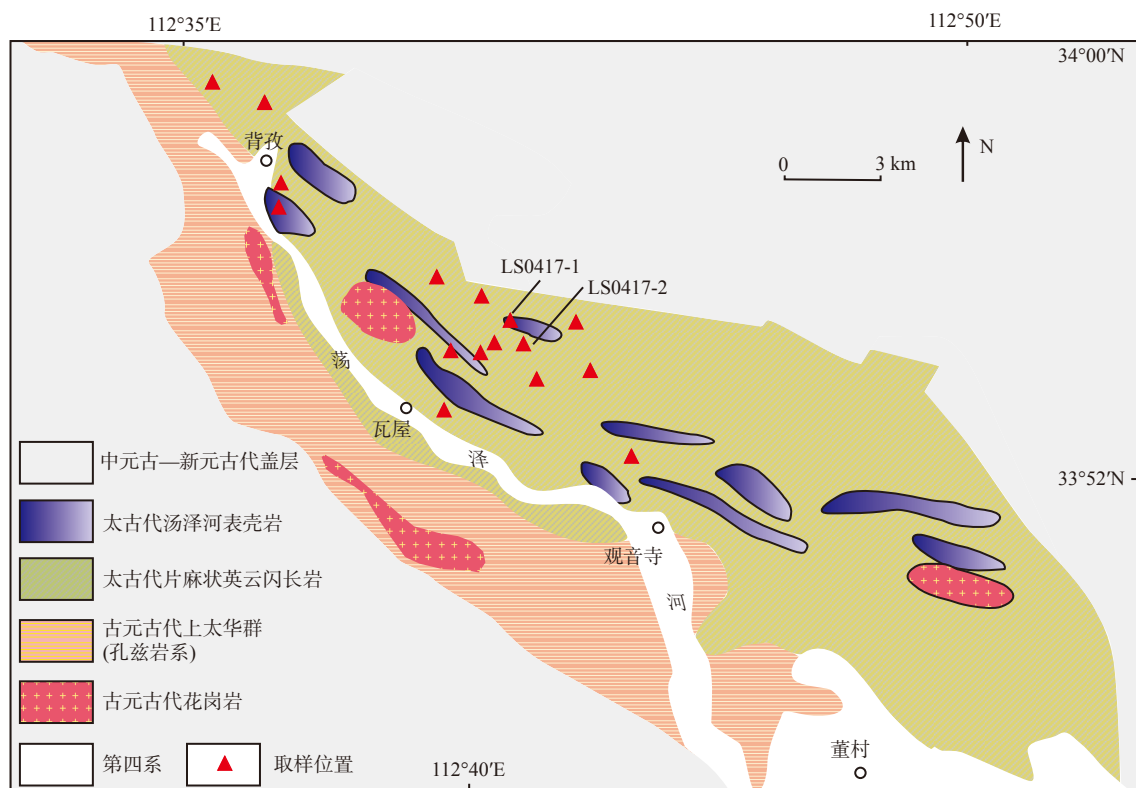


图 25 鲁山地区地质图 (底图据 Liu et al., 2009a; 图中给出了新太古代早期—中太古代晚期定年样品位置, 数据来源 Liu et al., 2009a; Diwu et al., 2010; Zhou et al., 2014; Jia et al., 2020)

Fig. 25 Geological map of the Lushan area (Liu et al., 2009a), showing the locations of the dated late Mesoarchean–early Neoproterozoic rock samples (Liu et al., 2009a; Diwu et al., 2010; Zhou et al., 2014; Jia et al., 2020)

古代 TTG 岩石中存在少量以斜长角闪岩为主的中太古代表壳岩 (图 25)。斜长角闪岩中存在 2.90~3.10 Ga 外来锆石 (Diwu et al., 2010), 还存在 2.64~2.67 Ga 和 2.77~2.79 Ga 两组变质锆石年龄记录。

(1) 2.84 Ga 斜长角闪岩 (LS0417-1; Liu et al., 2009a)

样品取自瓦屋东北 (图 25)。斜长角闪岩以包体形式存在于 TTG 岩石中, 具层状构造 (图 26a), 变质原岩可能为基性凝灰岩。锆石粒度很大, 一些还残余了震荡环带 (图 27a), 是否为岩浆成因值得进一步研究, 但并不影响表壳岩形成于中太古代晚期的原有认识。2 个具岩浆结构成分域的数据点的 Th/U 比值为 0.21~0.39, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2838 ± 35 Ma (MSWD=0.01; 图 27b)。根据结构和组成, 可把变质锆石划分为两种类型。类型 I (Me-I) 多为重结晶成因, 13 个数据点的 Th/U 比值为 0.19~0.68, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2792 ± 11 Ma (MSWD=0.21)。类型 II (Me-II) 多为宽度不大的变质增生边, 7 个数据点的 Th/U 比值为 0.02~0.08, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2651 ± 13 Ma (MSWD=0.87)。

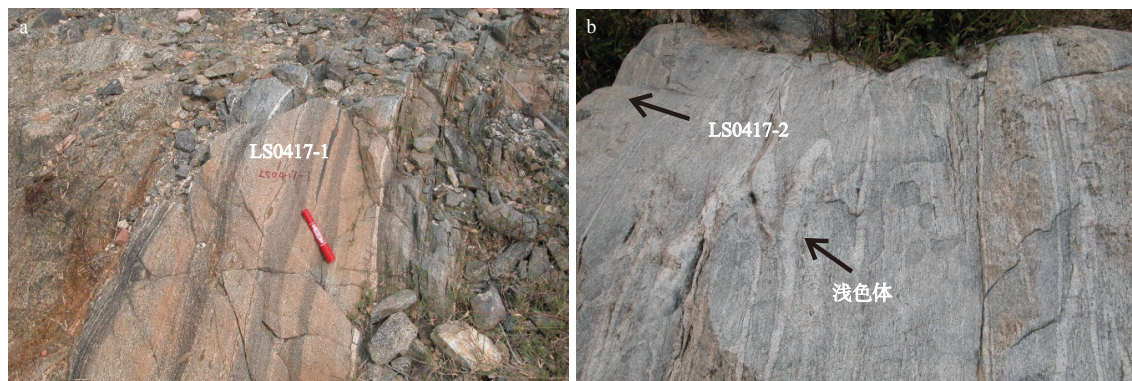
(2) 2.83 Ga 片麻状英云闪长岩 (LS0417-2; Liu et

al., 2009a)

样品取自上一样品的附近 (图 25)。岩石遭受强烈变形, 有浅色体存在 (图 26b)。锆石具核-边结构, 核部岩浆锆石具震荡环带 (图 27c), 14 个数据点的 Th/U 比值为 0.18~0.97, 其中 9 个年龄最大数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2829 ± 18 Ma (MSWD=1.5; 图 27d)。11 个变质锆石数据点的 Th/U 比值为 0.61~7.07, 其中 9 个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2772 ± 22 Ma (MSWD=0.53)。

2 锆石年龄统计和地球化学特征

统计锆石年龄时, 使用数据满足条件为: 年龄误差小于 15 Ma, 不谐和度小于 10%, 在这一限制下, 大多数 LA-ICP-MS 年龄数据都被排除掉了。由于壳源花岗岩数据不多, 把限制条件作了适当放宽 (年龄误差小于 25 Ma, 不谐和度小于 20%)。岩浆作用从 3.0 Ga 到 2.6 Ga 几乎连续分布, 但在 2.7 Ga 存在一个大的峰值, 在 2.92 Ga 存在小的峰值 (图 28)。岩石类型主要为 TTG, 不同时代都有壳源花岗岩和辉长-闪长岩存在。

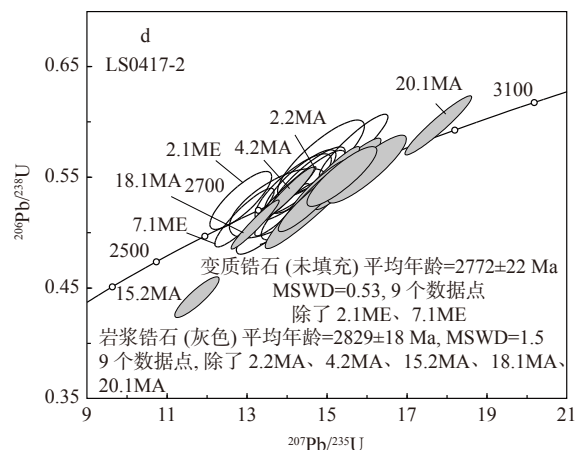
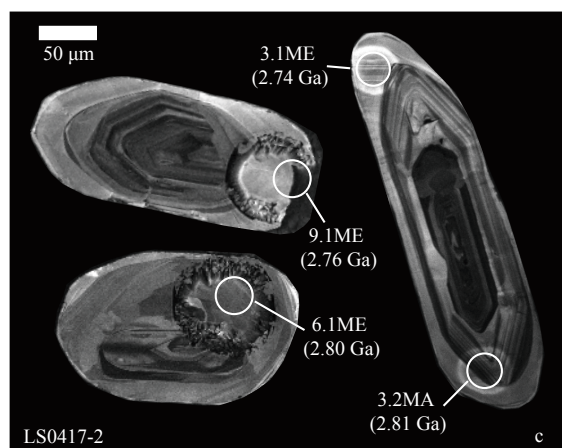
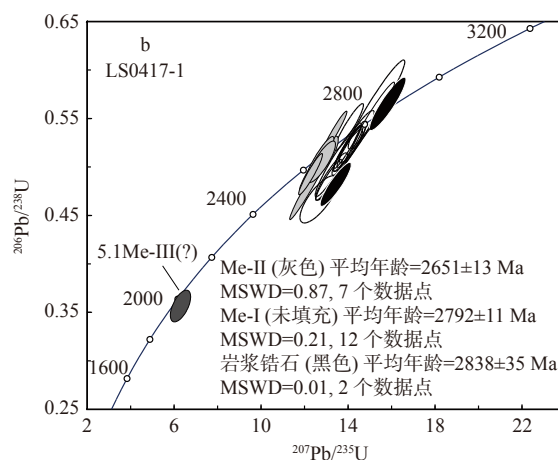
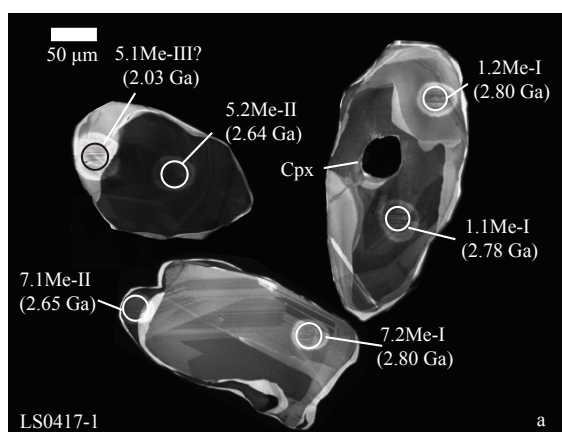


a—2.84 Ga 层状斜长角闪岩 (LS0417-1), 瓦屋东北; b—2.83 Ga 片麻状英云闪长岩 (LS0417-2), 背深熔浅色体细脉切割, 瓦屋东北

图 26 鲁山地区中太古代岩石的野外照片 (Liu et al., 2009a)

Fig. 26 Field photographs of the Mesoarchean rocks in the Lushan area (Liu et al., 2009a)

(a) 2.84 Ga interlayered amphibolite (LS0417-1), northeast of Wawu; (b) 2.83 Ga gneissic tonalite (LS0417-2) cut by thin anatectic dykes, field of view is 1.3 m wide, northeast of Wawu



a、b—2.84 Ga 层状斜长角闪岩 (LS0417-1), 瓦屋东北; c、d—2.83 Ga 片麻状英云闪长岩 (LS0417-2), 瓦屋东北

图 27 鲁山地区中太古代岩石的锆石阴极发光图像和 U-Pb 谐和图 (Liu et al., 2009a)

Fig. 27 CL images and SHRIMP U-Pb concordia diagrams for the zircons from the Mesoarchean rocks in the Lushan area (Liu et al., 2009a)

(a) and (b) 2.84 Ga interlayered amphibolite (LS0417-1), northeast of Wawu; (c) and (d) 2.83 Ga gneissic tonalite (LS0417-2), northeast of Wawu

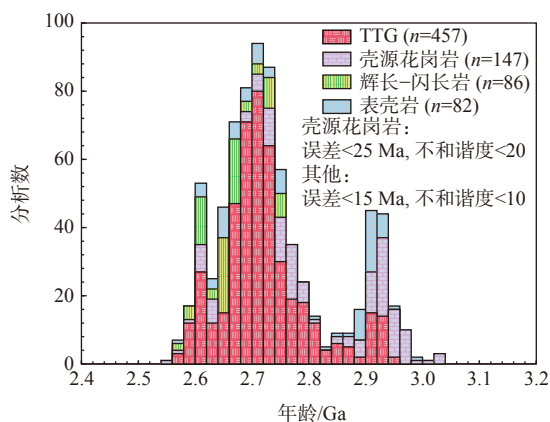


图 28 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期岩石的岩浆锆石年龄直方图

Fig. 28 Age histogram for the magmatic zircons from the late Mesoarchean–early Neoproterozoic rocks in the North China Craton

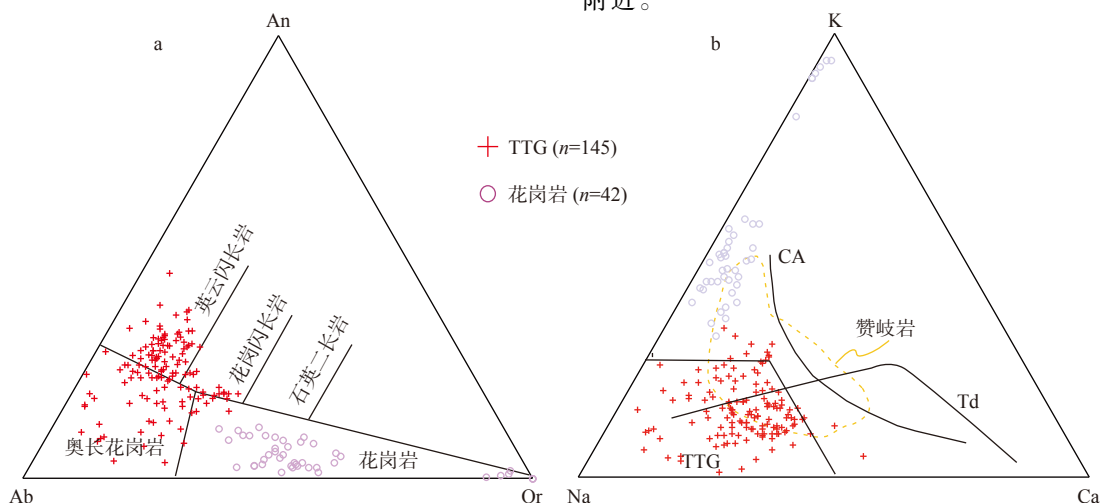


图 29 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期花岗质岩石的 An–Ab–Or 和 K–Na–Ca 图解

Fig. 29 Normative An–Ab–Or diagram and K–Na–Ca diagram of the late Mesoarchean–early Neoproterozoic granitoids in the North China Craton

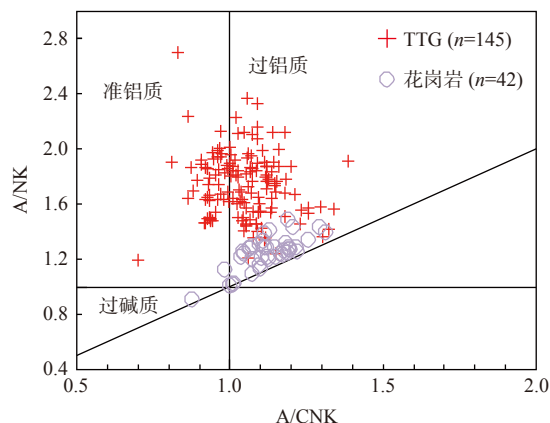


图 30 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期花岗质岩石的 A/CNK–A/NK 图解

Fig. 30 A/CNK–A/NK diagram for the late Mesoarchean–early Neoproterozoic granitoids in the North China Craton

花岗质岩石以 TTG 为主, 并以英云闪长岩占绝对地位(图 29a)。大多数奥长花岗岩数据点分布在靠近英云闪长岩的位置。一些位于花岗岩区的数据点十分靠近 TTG 岩区, 其成因应与 TTG 岩石相同, 也作为 TTG 岩石看待。在 K–Na–Ca 图中, 大多数样品位于 TTG 区(图 29b); 同时存在壳源花岗岩(二长花岗岩、正长花岗岩), K_2O/Na_2O 比值变化较大。靠近钾长石端元的数据点为蚌埠地区 2.6 Ga 超富钾花岗质岩石, 它们仅零星分布(Su et al., 2021)。大多数花岗质岩石为过铝质, 与 TTG 相比, 壳源花岗岩具有更低的 A/NK 值(图 30)。TTG 岩石显示大的 Sr/Y 和 La/Yb 变化, 位于高压、中压和低压 TTG 分布区(图 31)。壳源花岗岩位于钾质花岗岩区或附近。

在全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ –年龄图上, TTG 岩石数据点主要分布于球粒陨石和亏损地幔演化线之间(图 32; 删除了个别 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值异常大的数据点), 部分 2.9 Ga 岩石具有低于球粒陨石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 它们主要为冀东地区的中太古代晚期长英质表壳岩(Liou et al., 2019)。大多数情况下, 壳源花岗岩和辉长–闪长岩与同时代 TTG 岩石具有类似的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 但鞍本地区 2.9~3.0 Ga 铁架山–弓长岭花岗岩具有很低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值。TTG 的全岩 Nd 同位素一阶段模式年龄存在较大变化, 在 2.7 Ga 和 3.0 Ga 存在峰值(图 33a)。铁架山–弓长岭花岗岩具有明显大的 Nd 同位素一阶段模式年龄。全岩 Nd 同位素二阶段模式年龄与一阶段模式年龄无明显区别或稍偏大(图 33b)。

在岩浆锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ –年龄图上, TTG 岩石数据点主要分布于 CHUR 和亏损地幔演化线之间(图 34;

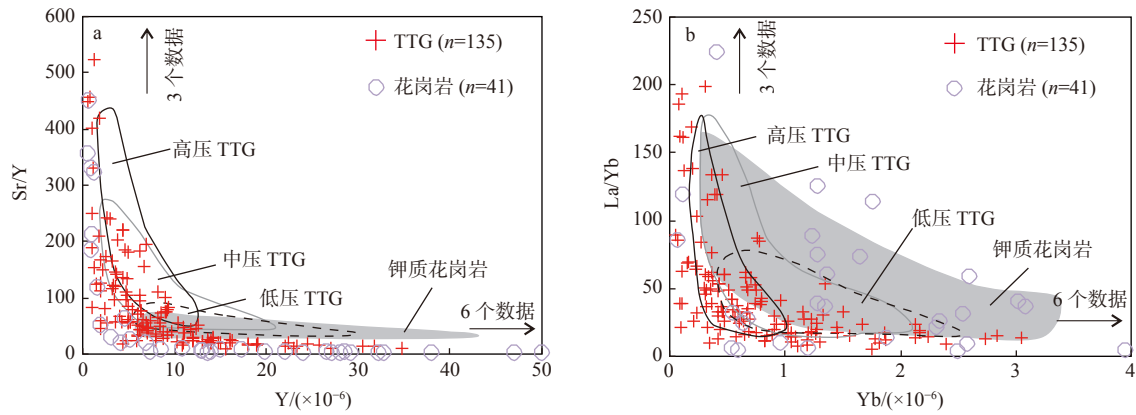


图 31 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期花岗质岩石的 Sr/Y-Y 和 La/Yb-Yb 图解 (Moyen, 2011)

Fig. 31 Sr/Y-Y diagram and La/Yb-Yb diagram (for the late Mesoarchean–early Neoproterozoic granitoids in the North China Craton (Moyen, 2011))

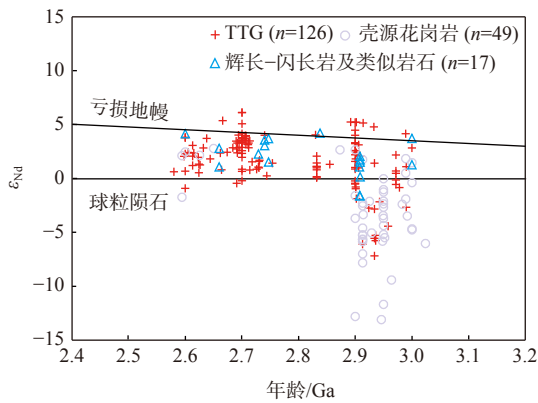


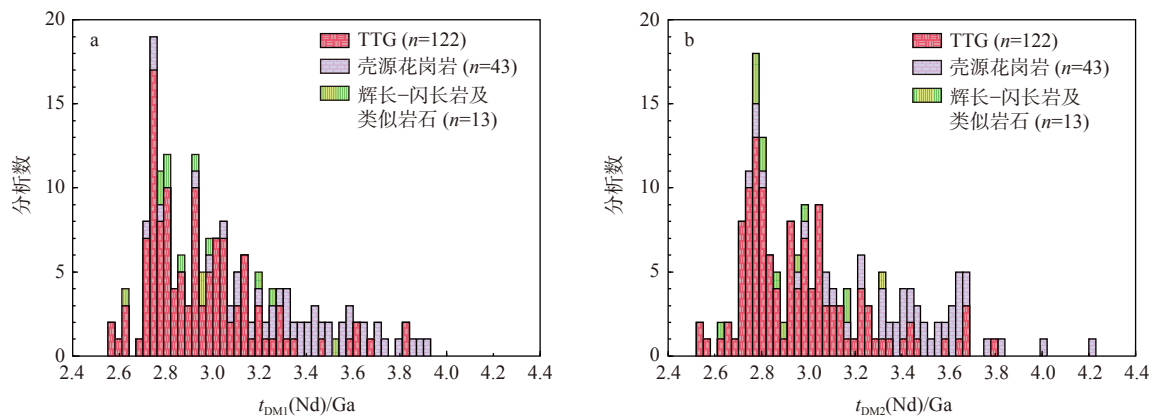
图 32 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期岩石的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - 年龄图

Fig. 32 Whole-rock $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus formation age diagram for the late Mesoarchean–early Neoproterozoic rocks in the North China Craton

删除了个别 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值异常大的数据点)。一些数据点具有低于 CHUR 的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 最为明显的是冀东地区

中太古代晚期长英质表壳岩的岩浆锆石 (Liou et al., 2019) 和鲁西地区 2.7 Ga 英闪长质片麻岩 (样品 S0741; Wan et al., 2011b), 后者的真实性需进一步确定 (Dong et al., 2021)。壳源花岗岩和辉长-闪长岩的岩浆锆石也主要分布于 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 CHUR 和亏损地幔演化线之间, 但鞍本地区 2.9~3.0 Ga 铁架山-弓长岭花岗岩的岩浆锆石具有很低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (图 34)。岩浆锆石 Hf 同位素一阶段模式年龄在 2.7~3.0 Ga 间形成一个高的平台, 在 2.9 Ga 位置略有降低 (图 35a)。峰值年龄为 3.5 Ga 的数据点来自铁架山-弓长岭花岗岩。岩浆锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄与一阶段模式年龄无明显区别, 但铁架山-弓长岭花岗岩岩浆锆石二阶段模式年龄比一阶段模式年龄要大 ~200 Ma (图 35b)。

与岩石形成年龄相比, 全岩 Nd 同位素一阶段模式年龄通常更大, 也有模式年龄与之相近甚至更小



a—一阶段模式年龄; b—二阶段模式年龄

图 33 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期岩石的全岩 Nd 模式年龄直方图

Fig. 33 Whole-rock Nd model age histograms for the late Mesoarchean–early Neoproterozoic rocks in the North China Craton

(a) Single-stage model age (depleted mantle model age); (b) two-stage model age (crustal model age)

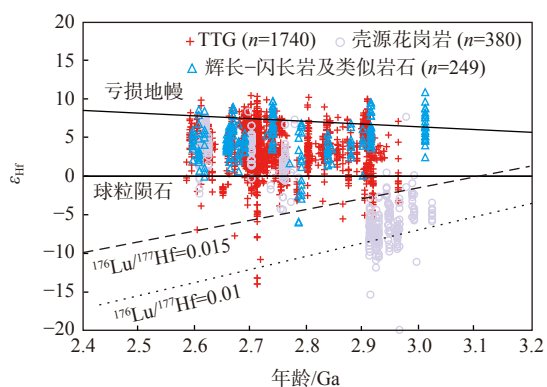
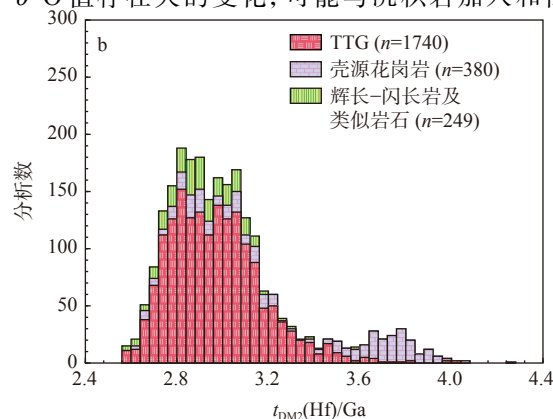
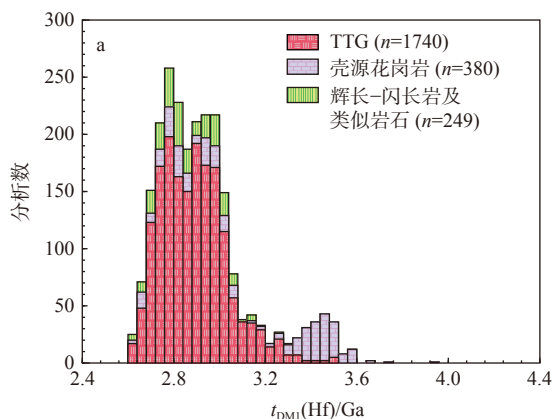


图 34 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期岩石的岩浆锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图

Fig. 34 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ versus formation age diagram for magmatic zircons from the late Mesoarchean-early Neoproterozoic rocks in the North China Craton

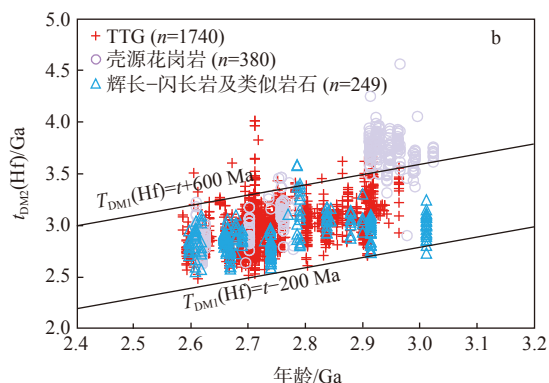
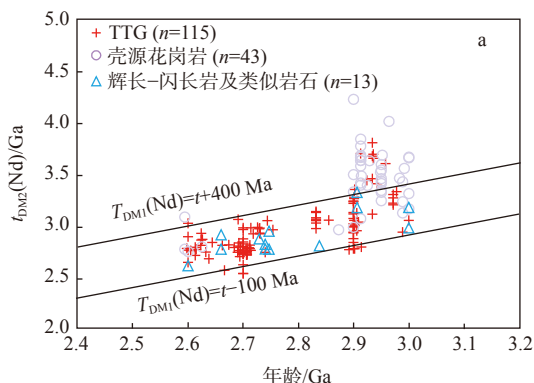


a—一阶段模式年龄; b—二阶段模式年龄

图 35 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期岩石的岩浆锆石 Hf 模式年龄直方图

Fig. 35 Hf model age histograms for the magmatic zircons from the late Mesoarchean-early Neoproterozoic rocks in the North China Craton

(a) Single-stage model age (depleted mantle model age); (b) two-stage model age (crustal model age)



a—全岩 Nd 一阶段模式年龄-年龄图; b—岩浆锆石 Hf 一阶段模式年龄-年龄图

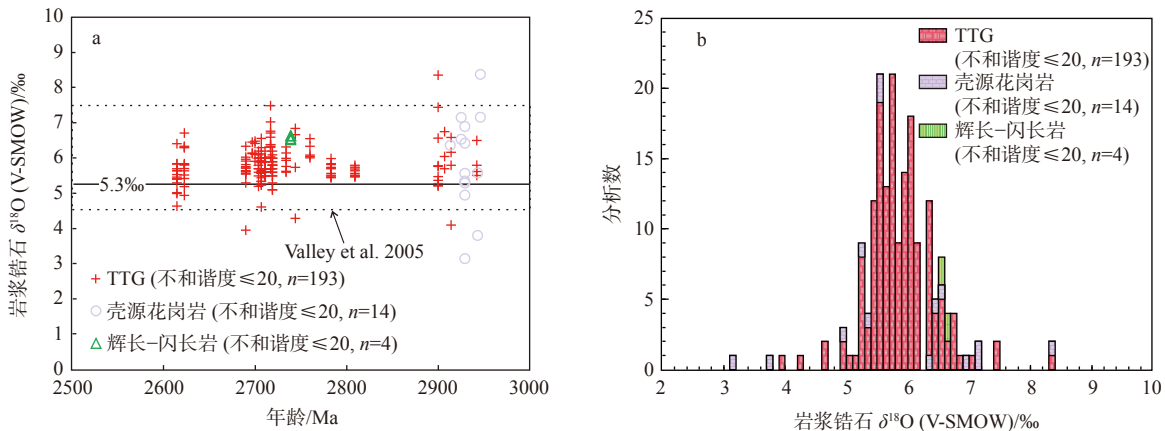
图 36 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期岩石的 Nd-Hf 同位素组成

Fig. 36 Nd-Hf isotopic compositions of the late Mesoarchean-early Neoproterozoic rocks in the North China Craton

(a) Whole-rock two-stage Nd model age versus formation age diagram; (b) Magmatic zircon two-stage Hf model age versus formation age

的 (图 36a), 两者之差一般在 -100 Ma 和 400 Ma 之间。岩浆锆石 Hf 同位素一阶段模式年龄与形成年龄之差一般在 -200 Ma 和 600 Ma 之间 (图 36b)。鞍本地区 2.9~3.0 Ga 铁架山-弓长岭花岗岩具有明显更大的 Nd 和 Hf 同位素模式年龄。总体上, 岩浆锆石 Hf 同位素与全岩 Nd 同位素组成具有类似的变化特征。

锆石 O 同位素数据不多。TTG 岩石岩浆锆石数据点大都位于 Valley et al. (2005) 确定的太古宙岩浆锆石变化范围内 (图 37a), 主要分布在 5.3‰~6.8‰ (图 37b)。个别数据点具有很高和很低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 原因还不清楚。但低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的数据点的锆石年龄不谐和度小于 5%, 看来与铅丢失无关。鞍本地区 2.9~3.0 Ga 铁架山-弓长岭花岗岩岩浆锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在大的变化, 可能与沉积岩加入和低温蚀



a— $\delta^{18}\text{O}$ —年龄图; b— $\delta^{18}\text{O}$ 直方图

图 37 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期岩石的岩浆锆石 O 同位素组成

Fig. 37 O isotopic compositions of the magmatic zircons from the late Mesoarchean—early Neoproterozoic rocks in the North China Craton

(a) $\delta^{18}\text{O}$ versus formation age diagram; (b) $\delta^{18}\text{O}$ histogram

变作用有关 (Dong et al., 2017a)。

3 讨论

3.1 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期变质基底特征

(1) 新太古代早期—中太古代晚期 (2.6~3.0 Ga) 岩浆作用在华北克拉通几乎连续分布, 峰期为 2.70~2.75 Ga (图 28)。2.8~3.0 Ga 侵入岩见于吉南、辽北、鞍山、冀东、胶东、蚌埠、霍邱、鲁山、小秦岭地区。在鲁西地区, 存在 2.6~2.7 Ga 连续岩浆作用 (图 20), 在其他地区, 2.6~2.7 Ga 侵入岩零星分布 (周艳艳等, 2009; 张瑞英等, 2012; Zheng et al., 2012; Zhou et al., 2014; 杜传业等, 2017; Wang et al., 2017b, 2017c; 董春艳等, 2021; Sun et al., 2021; Bao et al., 2022; 此文), 但作为一个整体, 它们的年龄也显示出大致连续的变化 (图 38)。

(2) 新太古代早期—中太古代晚期岩石在华北克拉通广泛存在, 主要分布在 Wan et al. (2015) 所划分的东部古陆块、中部古陆块和南部古陆块中。在西部目前仅见于阴山地块, 但这可能与研究程度较低有关。不过, 研究程度较高的大青山地区, 迄今仍未发现 >2.6 Ga 岩石存在。在许多地区, 新太古代早期—中太古代晚期岩石零星分布, 规模很小, 主要存在于新太古代晚期 TTG 岩石中, 显然遭受到新太古代晚期岩浆构造作用强烈改造。规模较大的新太古代早期—中太古代晚期岩石仅见于胶东和鲁西地区, 在赞皇和西乌兰不浪也有较大规模分

布。但新太古代早期—中太古代晚期碎屑锆石和外来锆石在许多地区被发现 (Wan et al., 2015; Wu et al., 2016; Zhou et al., 2018; Liu et al., 2019; Bao et al., 2022)。在中亚造山带东部额尔古纳微陆块中发现 2.61 Ga 片麻状花岗闪长岩 (Shao et al., 2021) 和 2.61 Ga 片麻状二长花岗岩 (邵军等, 2015); 在松嫩地块中发现 2.7 Ga 片麻状二长花岗岩 (Wu et al., 2018) 和 2.6 Ga 片麻状奥长花岗岩 (钱程等, 2018), 它们是否是从华北克拉通裂解出去的, 需要进一步确定。

(3) 新太古代早期—中太古代晚期侵入岩以英云闪长岩为主, 存在奥长花岗岩和花岗闪长岩 (图 29)。辉长岩—闪长岩零星分布。大规模的壳源花岗岩为鞍山地区 2.9~3.0 Ga 铁架山—弓长岭花岗岩, 而这与鞍山地区存在长期地壳演化历史有关 (Dong et al., 2017a)。其他地区的壳源花岗岩很少, 仅在阴山、蚌埠、鲁山等地零星存在 (Zhou et al., 2014; Sun et al., 2021; 此文)。

(4) 新太古代早期—中太古代晚期表壳岩规模很小, 零星分布, 包括鞍山地区 3.0 Ga 铁架山表壳岩、冀东地区 2.9 Ga 草场表壳岩、胶东地区 2.9 Ga 黄崖底表壳岩、鲁山地区 2.82 Ga 下太华群、鲁西地区 2.72~2.75 Ga 雁翎关—柳杭岩系及和龙地区 2.65~2.68 Ga 和龙群。在山东昌邑地区也可能存在 ~2.7 Ga 表壳岩 (王惠初等, 2015)。规模最大的是鲁西地区雁翎关—柳杭岩系。岩石类型主要为变玄武质岩石, 一些地区存在变质科马提岩、变质安山质—英安质火山岩和变质碎屑沉积岩, 条带状铁建

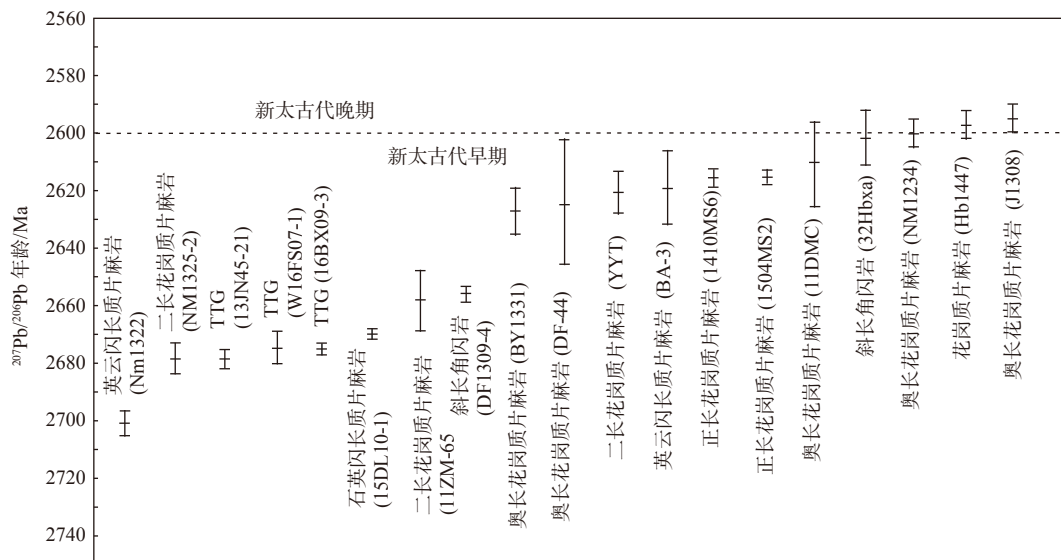


图 38 华北克拉通 2.6~2.7 Ga 侵入岩的锆石年龄变化 (鲁西以外地区)

Fig. 38 Zircon age variation for the 2.6~2.7 Ga intrusive rocks in the North China Craton, except for west Shandong

造(BIF)不发育。全球范围内,在大多数情况下,一个地区如有表壳岩存在,就有大致同时代的TTG岩石存在。但是,华北克拉通许多地区仅有TTG岩石存在,而未发现相应时代的表壳岩。

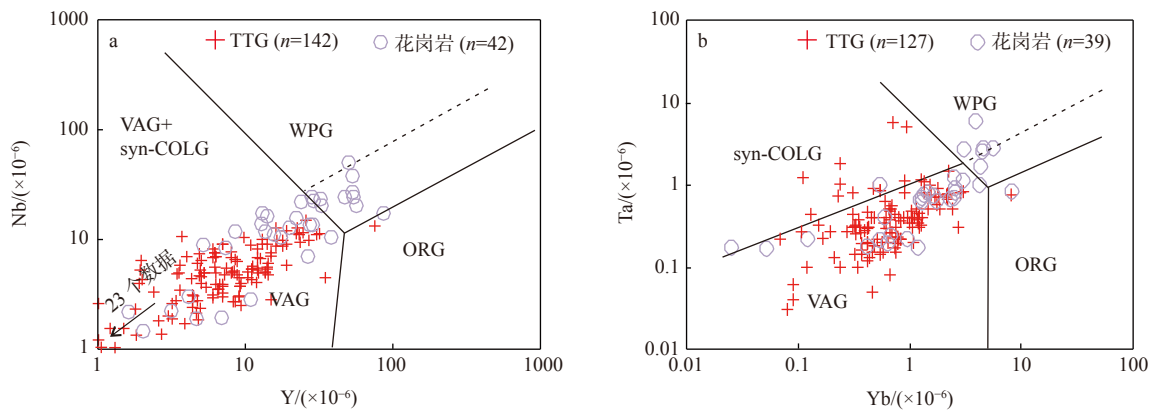
(5)由于新太古代晚期和古元古代晚期构造热事件叠加,新太古代早期—中太古代晚期岩石普遍遭受强烈变质变形和深熔作用改造,使得它们与新太古代晚期岩石难以区别。一些地区存在 2.65~2.85 Ga 变质锆石年龄记录(万渝生等, 2020; Jia et al., 2020; Bao et al., 2022)。2.6 Ga 可作为华北克拉通新太古代早期和晚期的界线,理由如下:①存在~2.6 Ga 变质锆石年龄记录(Liu et al., 2009a; Zheng et al., 2012; Wu et al., 2014; Wan et al., 2015, 2021; Ren et al., 2016; 万渝生等, 2020),这在鲁西地区十分明显;②存在~2.6 Ga 壳源花岗岩(张瑞英等, 2012; Sun et al., 2021),表明物源区存在这一时代的变质和深熔作用;③存在~2.6 Ga 变质辉长岩—闪长岩;④辽南复县古生代金伯利岩中存在具有变质结构特征的~2.6 Ga 外来锆石(Zheng et al., 2009);⑤更年轻碎屑沉积岩中存在~2.6 Ga 变质结构的碎屑锆石;⑥存在 2.60~2.75 Ga 连续岩浆作用年龄记录;⑦在 2.55~2.60 Ga 存在岩浆作用“静默期”。

(6)TTG 岩石的 Sr/Y 和 La/Yb 比值存在非常大的变化,位于高压、中压和低压 TTG 分布区(图 31),表明其形成条件存在很大差异。在一个地区(例如鲁西七星台),2.7 Ga 英云闪长岩的 Sr/Y 和 La/Yb 比值就可存在很大变化,所以,这种变化与构造环境

看来并不存在直接的联系。在 Nb-Y 和 Ta-Yb 图中,TTG 岩石主要位于火山弧花岗岩区(图 39)。在胶东地区,2.7 Ga TTG 为 2.9 Ga 玄武质岩石部分熔融产物,很可能为板底垫托构造环境(Wan et al., 2021)。在鲁西地区,新太古代早期为大洋环境(Dong et al., 2021),如果 TTG 岩石形成于火山弧,也是洋内火山弧环境。大多数壳源花岗岩也位于火山弧花岗岩区,部分壳源花岗岩位于板内花岗岩区。实际上,物源区岩石组成差异也是花岗质岩石 Sr/Y 和 La/Yb 比值变化大的重要原因。

(7)TTG 岩石的全岩 Nd 同位素和岩浆锆石 Hf 同位素数据点大都分布于球粒陨石(或 CHUR)和亏损地幔演化线之间,全岩 Nd 同位素一阶段模式年龄在 2.7 Ga 和 3.0 Ga 存在峰值,而岩浆锆石 Hf 同位素一阶段模式年龄在 2.7~3.0 Ga 形成一个高的平台。Nd 和 Hf 二阶段模式年龄与之类似。全岩 Nd 同位素一阶段模式年龄与形成年龄之差一般在 -100 Ma 和 400 Ma 之间,岩浆锆石 Hf 同位素一阶段模式年龄与形成年龄之差一般在 -200 Ma 和 600 Ma 之间。这些表明,TTG 岩浆大都来自刚从亏损地幔提取出来的玄武质岩石,部分岩石的物源区存在一定的地壳滞留时间或遭受陆壳物质不同程度影响。Nd-Hf 同位素组成表明,鞍本地区中太古代晚期铁架山—弓长岭花岗岩无疑来自十分古老陆壳的再循环。

(8)许多地区都具有类似特征,以 2.70~2.75 Ga 英云闪长质片麻岩为主。但一些地区显示出较大



syn-COLG—碰撞花岗岩；VAG—火山弧花岗岩；WPG—板内花岗岩；ORG—洋脊花岗岩；虚线代表来自异常洋脊的ORG上部边界

图 39 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期花岗质岩石的 Nb-Y 和 Ta-Yb 图解（底图据 Pearce et al., 1984）

Fig. 39 Nb-Y and Ta-Yb diagrams from Pearce et al. (1984) for the late Mesoarchean-early Neoproterozoic granitoids in the North China Craton syn-COLG—Syn-collision granites; VAG—Volcanic arc granites; WPG—Within plate granites; ORG—Ocean ridge granites. The dashed line represents the upper compositional boundary for ORG from anomalous ridge segments

的独特性。例如，只有鞍山地区存在强烈 2.9~3.0 Ga 壳源花岗岩岩浆作用，而该区迄今未发现 2.70~2.75 Ga TTG 岩石，虽然在 2.5 Ga 表壳岩中存在这一年龄的碎屑锆石。2.9~3.0 Ga 大规模壳源花岗岩形成表现出的强烈壳内再循环作用表明那时陆壳规模比现在所看到的要大许多；鲁山地区存在从 2.65 Ga 到 2.85 Ga 的长期岩浆作用，还存在 2.9~3.1 Ga 外来锆石；在 2.72~2.75 Ga，鲁西地区可能为大洋环境 (Dong et al., 2021)，而胶东地区已有较大规模陆壳存在 (Wan et al., 2021)。这些区别表明，华北克拉通直到新太古代早期还未形成统一的整体。

3.2 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期陆壳巨量增生

TTG 岩石完全熔融需要很高的温度，所以，由原有 TTG 发生完全熔融而形成的可能性不大，其主体应来自更深地壳部位玄武质岩石的部分熔融。陆壳规模增大和成熟度增高的主要过程大致为：地幔提取玄武质岩浆，玄武质岩石部分熔融形成 TTG，TTG 岩石通过壳内再循环形成壳源花岗岩 (Moyen, 2011)。壳源花岗岩也可通过表壳岩 (安山质-英安质岩石和碎屑沉积岩) 部分熔融形成。为 TTG 提供玄武质物源区存在多种可能的构造环境：①洋壳俯冲；②地幔大规模熔融引起的板底垫托岩浆作用；③洋底高原的根部；④铁镁质岩石的折沉作用 (Jahn et al., 2008)。对于华北克拉通新太古代早期 TTG 岩石的构造环境，存在板底垫托和岛弧系

统两种主要认识 (Polat et al., 2006; Jahn et al., 2008; Zhai and Santosh, 2011; Yang et al., 2013; Wan et al., 2015)。

十余年的资料积累进一步支持了新太古代早期—中太古代晚期是华北克拉通最重要陆壳增生期的认识。主要证据包括以下两方面。

(1) 新太古代早期—中太古代晚期岩石在华北克拉通广泛分布，迄今已发现的地区在 20 个以上。以 TTG 岩浆活动为主，年龄峰值为 2.7~2.75 Ga。在许多地区，它们以残余体形式零星分布于新太古代晚期花岗质岩石中，但这看来并不是本身形成就少，而是后期遭受强烈破坏的缘故。在太古宙花岗-绿岩带中，同时代表壳岩和 TTG 岩石空间上共存是常见现象，剥蚀越强，表壳岩残余越少；变质越深，表壳岩残余越少。所以，华北克拉通许多地区存在新太古代早期—中太古代晚期 TTG 岩石而缺乏同时代表壳岩，很可能表明包括表壳岩在内的新太古代早期—中太古代晚期变质地体已遭受强烈破坏。中基性岩浆作用为地幔添加提供了直接证据。

(2) 新太古代早期—中太古代晚期 TTG 岩石 Nd-Hf 同位素模式年龄主要集中在 2.7~3.1 Ga (图 33, 图 35)。从 Nd-Hf 同位素组成看，它们可以如下方式形成：①主体来自同时代亏损地幔源区玄武质岩石的部分熔融；②来自同时代亏损地幔，但遭受陆壳物质影响的玄武质岩石的部分熔融，存在多种陆壳物质加入方式；③来自同时代未亏损地幔源区玄

武质岩石的部分熔融; ④中太古代晚期亏损地幔源区玄武质岩石在新太古代早期发生部分熔融。在地质历史早期阶段, 镁铁质地壳在不同时间发生部分熔融是常见的现象, 形成年龄不同而 Nd-Hf 同位素组成类似的 TTG 岩石, 它们在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ -年龄图和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图上分别位于同一演化线上 (Kemp et al., 2010)。在胶东, 2.9 Ga 和 2.7 Ga TTG 岩石具有类似的 Nd-Hf 同位素组成, 一些 2.5 Ga TTG 岩石也具有类似的 Nd-Hf 同位素组成 (图 16), 认为它们都来自相同的 2.9 Ga 镁铁质地壳物源区 (Wan et al., 2021)。岩浆锆石 O 同位素大都具有地幔组成特征, 一些岩浆锆石存在较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 表明变质沉积岩的影响存在。

华北克拉通许多新太古代晚期 TTG 岩石具有 2.6~3.0 Ga 的 Nd-Hf 同位素模式年龄 (Wu et al., 2005b; Geng et al., 2012; Wan et al., 2015), 形成方式也可与新太古代早期—中太古代晚期 TTG 岩石类似。华北克拉通新太古代晚期壳源花岗岩广泛分布。如果古老陆壳物质部分熔融形成壳源花岗岩, Nd-Hf 同位素组成显示长的地壳滞留时间, 易于判别。典型的是鞍本地区 2.5 Ga 齐大山正长花岗岩, 它们的 Nd-Hf 同位素模式年龄明显大于其形成年龄 (Wan et al., 2015)。然而, 华北克拉通新太古代晚期壳源花岗岩的 Nd-Hf 同位素模式年龄多为 2.6~3.0 Ga, 与许多新太古代早期—中太古代晚期 TTG 和表壳岩的 Nd-Hf 同位素组成类似, 表明它们之间可能存在物源上的成因联系 (Wan et al., 2015)。但是, 新太古代晚期壳源花岗岩也与许多同时代 TTG 和表壳岩的 Nd-Hf 同位素组成类似, 仅根据 Nd-Hf 同位素组成特征, 难以判断新太古代晚期壳源花岗岩是来自同时代或新太古代早期—中太古代晚期陆壳物源区。并且, 有地质证据表明, 一些新太古代晚期壳源花岗岩来自同时代 TTG 和表壳岩, 例如, 鲁西七星台地区 2.5 Ga TTG 和冀东卢龙地区 2.5 Ga 滦县群黑云变粒岩遭受大规模深熔作用 (万渝生等, 2019b)。在鲁西新太古代晚期壳源花岗岩带 (A 带), 存在大量 2.5~2.75 Ga TTG 残余体, 显然, 新太古代晚期壳源花岗岩的物源区包括了新太古代早期和晚期 TTG 岩石 (Ren et al., 2016; Bai et al., 2019; Li et al., 2022; 李源等, 2022)。

华北克拉通在新太古代晚期无疑也存在重要的地幔添加 (Liu et al., 2009b; Diwu et al., 2011; Wan et al., 2015)。证据包括: ①2.5 Ga 表壳岩广泛分布, 其

中包括变玄武质岩石, 给出了地幔添加的直接证据; ②2.5 Ga 辉长岩-闪长岩在华北克拉通零星但广泛分布; ③一些 2.5 Ga TTG 岩石具有类似同时代亏损地幔的 Nd-Hf 同位素组成。不过, 镁铁质-中性组合岩石仅构成花岗-绿岩带的很小部分, 具亏损地幔 Nd-Hf 同位素组成特征的 TTG 岩石比例不大。

万渝生 (2018) 给出了华北克拉通陆壳增生曲线 (图 40), 其依据为: ①华北克拉通最早期陆壳至少在 4.1 Ga 以前就存在, 在 3.8 Ga 已有一定规模; ②在 2.5 Ga 左右, 华北克拉通陆壳的 ~80% 已形成; ③新太古代早期—中太古代晚期 (2.7~2.9 Ga) 比新太古代晚期 (2.50~2.55 Ga) 陆壳增生规模更大, 生长速率也许更快; ④与新太古代早期—中太古代晚期相比, 新太古代中期 (2.6~2.7 Ga) 陆壳生长速率相对降低; ⑤在 2.55~2.60 Ga, 存在一个“寂静期”; ⑥古元古代和中生代较太古宙以来的其他时段有更快的陆壳生长速率; ⑦华北克拉通遭受中生代以来的破坏。

新的研究进一步支持了这样的认识: 与全球其他克拉通类似, 华北克拉通地幔添加的最重要时期是新太古代早期—中太古代晚期。这一全球性陆

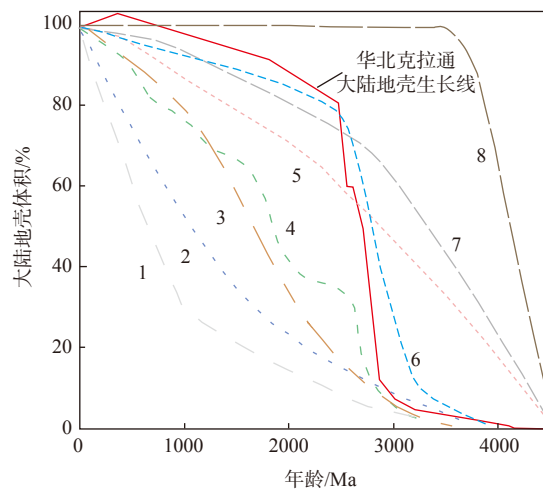


图 40 华北克拉通大陆地壳生长线 (万渝生, 2018; 不同的全球大陆地壳生长线引自 Cawood et al., 2013)

Fig. 40 Crustal growth curve of the North China Craton (Wan, 2018), also showing the global crustal growth curves from different authors (Cawood et al., 2013)

1—Goodwin, 1996; 2—Hurley and Rand, 1969; 3—Allège and Rousseau, 1984; 4—Condie and Aster, 2010; 5—Belousova et al., 2010; 6—Taylor and McLennan, 1985; 7—Dhuime et al., 2012; 8—Armstrong, 1981

壳巨量增生事件对于地球早期不可逆演化具有里程碑意义。带来如下效应：①导致地球热状态快速降低，地球内部和外部环境条件发生剧烈变化或重大转折；②陆壳规模明显增大，岩石圈厚度增大，陆壳刚性增强，更为稳定；③地球内部层圈构造更为清楚，水圈可能也更为发育；④大量陆壳岩石出露于海平面以上，导致风化作用明显增强和大气 CO_2 浓度降低。这些使得类似于现代板块构造体制的启动成为可能，也是BIF大量形成的重要原因(万渝生, 2018)。

4 结论与展望

(1)新太古代早期—中太古代晚期(2.6~3.0 Ga)岩浆作用在华北克拉通广泛发育，岩石类型以2.70~2.75 Ga英云闪长质片麻岩为主。可把2.6 Ga作为华北克拉通新太古代早期和晚期的界线。

(2)除鞍本地区2.9~3.0 Ga富钾花岗岩外，华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期岩石大都具有亏损Hd-Hf同位素组成特征。岩浆锆石O同位素大都具有地幔组成特征。

(3)与全球其他许多典型克拉通类似，华北克拉通最重要陆壳巨量增生时期为新太古代早期—中太古代晚期。主要区别是华北克拉通叠加了强烈的新太古代晚期构造岩浆热事件。

华北克拉通陆壳巨量增生研究取得重要进展，但仍有一些重要问题未能很好地解决。例如，新太古代早期—中太古代晚期的构造环境(板块构造、地幔柱或其他构造体制)，除对华北克拉通开展进一步深入研究外，还需放在全球背景下去考虑。又如，新太古代晚期壳源花岗岩在华北克拉通占有相当的比例，它们是来自新太古代晚期陆壳岩石或是新太古代早期—中太古代晚期陆壳岩石，对于华北克拉通太古宙陆壳巨量增生时代的确定具有重要意义，但仅根据Nd-Hf同位素研究难以达到目的，详细全面的地质研究十分必要。这些深入研究将为全球太古宙地质研究提供新的资料 and 认识。

致谢：谨以此文献给中国地质学创始人之一——李四光先生。感谢《地质力学学报》主编邢树文研究员和特邀主编胡健民研究员的盛情邀请。两位评审人的评审意见对论文质量提高起了重要作用；研究过程中得到许多老师和同行的支持和帮助，刘树文教授、包创博士、吴美玲博士和刘鹏副研究员提供了图件；深表谢意。

References

- BAI W Q, DONG C Y, NUTMAN A P, et al., 2019. Timing of late Neoproterozoic to late Paleoproterozoic events in the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating and LA-ICP-MS Hf isotope analysis of zircons from magmatic and metamorphic rocks in the Santuying area, eastern Hebei[J]. *Gondwana Research*, 76: 348-372.
- BAI W Q, DONG C Y, SONG Z Y, et al., 2020. Late Neoproterozoic granites in the Qixingtai region, western Shandong: further evidence for the recycling of early Neoproterozoic juvenile crust in the North China Craton[J]. *Geological Journal*, 55(9): 6462-6486.
- BAO H, LIU S W, WAN Y S, et al., 2022. Neoproterozoic granitoids and tectonic regime of lateral growth in northeastern North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 107: 176-200.
- CAWOOD P A, HAWKESWORTH C J, DHUIME B, 2013. The continental record and the generation of continental crust[J]. *GSA Bulletin*, 125(1-2): 14-32.
- CAO G Q, 1996. Early Precambrian Geology of western Shandong[M]. Geological Publishing House, Beijing, 1-210 (in Chinese with English abstract).
- CLARK C, COLLINS A S, TIMMS N E, et al., 2009. SHRIMP U-Pb age constraints on magmatism and high-grade metamorphism in the Salem Block, southern India[J]. *Gondwana Research*, 16(1): 27-36.
- CONDIE K C, 2000. Episodic continental growth models: afterthoughts and extensions[J]. *Tectonophysics*, 322(1-2): 153-162.
- CONDIE K C, BEYER E, BELOUSOVA E, et al., 2005. U-Pb isotopic ages and Hf isotopic composition of single zircons: the search for juvenile Precambrian continental crust[J]. *Precambrian Research*, 139(1-2): 42-100.
- CONDIE K C, BELOUSOVA E, GRIFFIN W L, et al., 2009. Granitoid events in space and time: constraints from igneous and detrital zircon age spectra[J]. *Gondwana Research*, 15(3-4): 228-242.
- DIWU C R, SUN Y, LIN C L, et al., 2010. LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua complex on the southern margin of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(23): 2557-2571.
- DIWU C R, SUN Y, GUO A L, et al., 2011. Crustal growth in the North China Craton at ~2.5 Ga: evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex[J]. *Gondwana Research*, 20(1): 149-170.
- DIWU C R, WANG T Y, YAN J H, 2020. New evidence for Neoproterozoic (ca. 2.7 Ga) crustal growth in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 350: 105921.
- DONG C Y, WAN Y S, XIE H Q, et al., 2017a. The Mesoproterozoic Tiejiaoshan-Gongchangling potassic granite in the Anshan-Benxi area, North China Craton: origin by recycling of Paleoproterozoic to Eoproterozoic crust from U-Pb-Nd-Hf-O isotopic studies[J]. *Lithos*, 290-291: 116-135.
- DONG C Y, XIE H Q, KRÖNER A, et al., 2017b. The complexities of zircon crystallization and overprinting during metamorphism and anatexis: an example from the late Archean TTG terrane of western Shandong Province, China[J]. *Precambrian Research*, 300: 181-200.
- DONG C Y, BAI W Q, XIE H Q, et al., 2021. Early Neoproterozoic oceanic crust in the North China Craton: evidence from geology, geochemistry and geo-

- chronology of greenstone belts in western Shandong[J]. *Lithos*, 380-381: 105888.
- DONG C Y, MA M Z, XIE H Q, et al., 2021. Magmatism and metamorphism of the early Precambrian basement in the Bayan Obo area, Inner Mongolia: zircon SHRIMP U-Pb Dating and LA-MC-ICPMS Hf analysis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(2): 417-432. (in Chinese with English abstract)
- DONG X J, XU Z Y, LIU Z H, et al., 2012. 2.7 Ga granitic gneiss in the Northern Foot of Daqingshan Mountain, Central Inner Mongolia, and its geological implications[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(S1): 20-27. (in Chinese with English abstract)
- DONG X J, XU Z Y, LIU Z H, et al., 2012. Zircon U-Pb geochronology of Archean high-grade metamorphic rocks from Xi Ulanbulang area, central Inner Mongolia[J]. *Science China Earth Sciences*, 55(2): 204-212.
- DRÜPPEL K, MCCREADY A J, STUMPFL E F, 2009. High-K granites of the Rum Jungle Complex, N-Australia: insights into the Late Archean crustal evolution of the North Australian Craton[J]. *Lithos*, 111(3-4): 203-219.
- DU C Y, LIU Z H, LI P C, et al., 2017. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical characteristics and geological significance of tonalitic gneisses from Banshigou area of southern Jilin[J]. *Global Geology*, 36(3): 734-750. (in Chinese with English abstract)
- DU L L, ZHUANG Y X, YANG C H, et al., 2003. Characters of zircons in the Mengjiatun formation in Xintai of Shandong and their chronological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 359-366.
- DU L L, ZHUANG Y X, YANG C H, et al., 2005. SHRIMP U-Pb zircon chronology of fine-grained amphibolite in the Mengjiatun area, western Shandong[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(5): 429-434.
- DU L L, YANG C H, ZHUANG Y X, et al., 2010. Hf isotopic compositions of zircons from 2.7 Ga metasedimentary rocks and biotite-plagioclase gneiss in the Mengjiatun Formation Complex, western Shandong Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 991-1001. (in Chinese with English abstract)
- DUAN R H, LIU C H, SHI J R, 2021. Late Neoarchean magmatic arc extends westward in the southern of Yinshan Block: evidence from geochronology and geochemistry of the Wulatezhongqi and Wulatehouqi area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(5): 1372-1404. (in Chinese with English abstract)
- FAN H R, YANG K F, HU F F, et al., 2010. Zircon geochronology of basement rocks from the Bayan Obo area, Inner Mongolia, and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1342-1350. (in Chinese with English abstract)
- FU J H, LIU S W, CHEN X, et al., 2016. Petrogenesis of taxitic dioritic-tonalitic gneisses and Neoarchean crustal growth in Eastern Hebei, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 284: 64-87.
- GENG Y S, DU L L, REN L D, 2012. Growth and reworking of the early Precambrian continental crust in the North China Craton: constraints from zircon Hf isotopes[J]. *Gondwana Research*, 21(2-3): 517-529.
- GUAN H, SUN M, WILDE S A, et al., 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: implications for formation and assembly of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 113(1-2): 1-18.
- GUO B R, LIU S W, ZHANG J, et al., 2015. Zircon U-Pb-Hf isotope systematics and geochemistry of Helong granite-greenstone belt in Southern Jilin Province, China: implications for Neoarchean crustal evolution of the northeastern margin of North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 271: 254-277.
- HAN B F, XU Z, REN R, et al., 2012. Crustal growth and intracrustal recycling in the middle segment of the Trans-North China Orogen, North China Craton: a case study of the Fuping Complex[J]. *Geological Magazine*, 149(4): 729-742.
- HUANG X L, NIU Y L, XU Y G, et al., 2010. Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan-Taihua complex in the southern North China Craton: implications for late Archean crustal accretion[J]. *Precambrian Research*, 182(1-2): 43-56.
- JAHN B M, LIU D Y, WAN Y S, et al., 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry[J]. *American Journal of Science*, 308(3): 232-269.
- JAYANANDA M, MOYEN J F, MARTIN H, et al., 2000. Late Archean (2550-2520 Ma) juvenile magmatism in the Eastern Dharwar craton, southern India: constraints from geochronology, Nd-Sr isotopes and whole rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 99(3-4): 225-254.
- JIA X L, ZHU X Y, ZHAI M G, et al., 2016. Late Mesoarchean crust growth event: evidence from the ca. 2.8 Ga Granodioritic gneisses of the Xiaoqinling area, southern North China Craton[J]. *Science Bulletin*, 61(12): 974-990.
- JIA X L, ZHAI M G, XIAO W J, et al., 2020. Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Taihua Complex in the southern North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 337: 105451.
- JIAN P, ZHANG Q, LIU D Y, et al., 2005. SHRIMP dating and geological significance of Late Archean high-Mg diorite (sanukite) and hornblende-granite at Guyang of Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 151-157. (in Chinese with English abstract)
- JIAN P, KRÖNER A, WINDLEY B F, et al., 2012. Episodic mantle melting-crustal reworking in the late Neoarchean of the northwestern North China Craton: zircon ages of magmatic and metamorphic rocks from the Yinshan Block[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 230-254.
- JIANG N, GUO J H, ZHAI M G, et al., 2010. ~2.7 Ga crust growth in the North China craton[J]. *Precambrian Research*, 179(1-4): 37-49.
- KEMP A I S, WILDE S A, HAWKESWORTH C J, et al., 2010. Hadean crustal evolution revisited: new constraints from Pb-Hf isotope systematics of the Jack Hills zircons[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 296(1-2): 45-56.
- KRÖNER A, COMPSTON W, ZHANG G W, et al., 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating[J]. *Geology*, 16(3): 211-215.
- KRÖNER A, WILDE S A, O'BRIEN P J O, et al., 2005a. Field relationships, geochemistry, zircon ages and evolution of a late Archean to Palaeoproterozoic lower crustal section in the Hengshan terrain of northern China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 79(5): 605-629.
- KRÖNER A, WILDE S A, LI J H, et al., 2005b. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wu-

- taishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 577-595.
- LI Y, XIE H Q, DONG C Y, et al., 2022. Source characteristics of Late Neoproterozoic diatexite in the Yishan area, western Shandong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(3): 598-618. (in Chinese with English abstract)
- LI Y, XIE H Q, DONG C Y, et al., 2022. Zircon evolution from migmatite to crustally-derived granite: a case study of late Neoproterozoic migmatite in the Yishan area, western Shandong, North China Craton[J]. *Gondwana Research* (in press)
- LI Z, WEI C J, CHEN B, et al., 2020. Late Neoproterozoic reworking of the Mesoproterozoic crustal remnant in northern Liaoning, North China Craton: a U-Pb-Hf-O-Nd perspective[J]. *Gondwana Research*, 80: 350-369.
- LIU P, GUO J H, HUANG G Y, et al., 2019. 2.9 Ga magmatism in Eastern Hebei, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 326: 6-23.
- LIU C H, ZHAO G C, LIU F L, et al., 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[J]. *Geological Magazine*, 156(9): 1565-1586.
- LIU D Y, NUTMAN A P, COMPSTON W, et al., 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton[J]. *Geology*, 20(4): 339-342.
- LIU D Y, WILDE S A, WAN Y S, et al., 2009a. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic[J]. *Chemical Geology*, 261(1-2): 140-154.
- LIU F, GUO J H, LU X P, et al., 2009b. Crustal growth at ~ 2.5 Ga in the North China Craton: evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(24): 4704-4713.
- LIU J, LIU Z H, ZHAO C, et al., 2017. Petrogenesis and zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of newly discovered Mesoproterozoic gneisses on the northern margin of the North China Craton[J]. *International Geology Review*, 59(12): 1575-1589.
- LIU J H, LIU F L, LIU P H, et al., 2011. Polyphase magmatic and metamorphic events from Early Precambrian metamorphic basement in Jiaobei area: evidences from the zircon U-Pb dating of TTG and granitic gneisses[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 943-960. (in Chinese with English abstract)
- LIU S J, DONG C Y, XU Z Y, et al., 2013. Palaeoproterozoic episodic magmatism and high-grade metamorphism in the North China Craton: evidence from SHRIMP zircon dating of magmatic suites in the Daqingshan area[J]. *Geological Journal*, 48(5): 429-455.
- LIU Y C, WANG C C, ZHANG P G, et al., 2015. Granulite facies metamorphism, partial melting and metasomatism in the Wuhe complex at the southeastern margin of the North China Block[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 37(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- LIU S N, CHEN Z H, XIANG Z Q, 2008. The world geopark of Taishan: geochronological framework of Ancient Intrusives[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-90. (in Chinese)
- LU X P, WU F Y, LIN J Q, et al., 2004. Geochronological successions of the early Precambrian granitic magmatism in southern Liaodong peninsula and its constraints on tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Chinese Journal of Geology*, 39(1): 123-138. (in Chinese with English abstract)
- LU Z L, SONG H X, DU L L, et al., 2014. Delineation of the ca. 2.7Ga TTG gneisses in the Fuping Complex, North China Craton and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2872-2884. (in Chinese with English abstract)
- MA M Z, XU Z Y, ZHANG L C, et al., 2013. SHRIMP dating and Hf isotope analysis of zircons from the Early Precambrian basement in the Xi Ulanbulang area, Wuchuan, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 501-516. (in Chinese with English abstract)
- MA M Z, ZHANG Y X, XIE H Q, et al., 2014. SHRIMP U-Pb dating and LA-ICP-MS Hf isotope analysis of detrital zircons from medium-to coarse-grained sandstones of the Bayan Obo Group and Sailinhuodong Group and its geological significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2973-2988. (in Chinese with English abstract)
- MA M Z, WAN Y S, XIE H Q, et al., 2020. Neoproterozoic mafic magmatism in Qixingtai area, west Shandong: formation ages and compositions of meta-gabbros[J]. *Earth Science*, 45(7): 2610-2628. (in Chinese with English abstract)
- MA X D, FAN H R, GUO J H, 2013. Neoproterozoic magmatism, metamorphism in the Yinshan Block: implication for the genesis of BIF and crustal evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2329-2339. (in Chinese with English abstract)
- MA X D, FAN H R, SANTOSH M, et al., 2013a. Geochemistry and zircon U-Pb chronology of charnockites in the Yinshan Block, North China Craton: tectonic evolution involving Neoproterozoic ridge subduction[J]. *International Geology Review*, 55(13): 1688-1704.
- MA X D, GUO J H, LIU F, et al., 2013b. Zircon U-Pb ages, trace elements and Nd-Hf isotopic geochemistry of Guyang sanukitoids and related rocks: implications for the Archean crustal evolution of the Yinshan Block, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 230: 61-78.
- MA X D, FAN H R, SANTOSH M, et al., 2014a. Chronology and geochemistry of Neoproterozoic BIF-type iron deposits in the Yinshan Block, North China Craton: implications for oceanic ridge subduction[J]. *Ore Geology Reviews*, 63: 405-417.
- MA X D, FAN H R, SANTOSH M, et al., 2014b. Origin of sanukitoid and hornblende enclaves in the Dajitu pluton from the Yinshan Block, North China Craton: product of Neoproterozoic ridge subduction?[J]. *International Geology Review*, 56(10): 1197-1212.
- MOYEN J F, 2011. The composite Archean grey gneisses: petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archean crustal growth[J]. *Lithos*, 123(1-4): 21-36.
- NUTMAN A P, WAN Y S, DU L L, et al., 2011. Multistage late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei[J]. *Precambrian Research*, 189(1-2): 43-65.
- PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G, 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983.
- POLAT A, LI J, FRYER B, et al., 2006. Geochemical characteristics of the Neoproterozoic (2800-2700 Ma) Taishan greenstone belt, North China

- Craton: evidence for plume-craton interaction[J]. *Chemical Geology*, 230(1-2): 60-87.
- QIAN C, CHEN H J, LU L, et al., 2018. The discovery of Neoproterozoic granite in Longjiang area, Heilongjiang Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(1): 27-36. (in Chinese with English abstract)
- REN P, XIE H Q, WANG S J, et al., 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[J]. *Precambrian Research*, 281: 236-252.
- SHAN H X, ZHAI M G, WANG F, et al., 2013. Geochemical characteristics and petrogenesis of the two types of Neoproterozoic gneisses from the Jiaobei terrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2295-2312. (in Chinese with English abstract)
- SHAO J, LI Y F, ZHOU Y H, et al., 2015. Neo-archaeic magmatic event in Erguna Massif of Northeast China: evidence from the zircon LA-ICP-MS dating of the gneissic monzogranite from the drill[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(2): 364-373. (in Chinese with English abstract)
- SHAO J, LI Y L, WANG D L, et al., 2021. Geochemical and Nd-Hf Isotopic Constraints on the Petrogenesis of an Archean Granitoid in the Erguna Massif, NE China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 95(6): 2033-2044.
- SHEN Q H, GENG Y S, SONG B, et al., 2005. New information from the surface outcrops and deep crust of Archean rocks of the North China and Yangtze Blocks, and Qinling-Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 616-627. (in Chinese with English abstract)
- SHI Y R, ZHAO X T, 2017. Early Neoproterozoic magmatic and Paleoproterozoic metamorphic events in the Northern North China Craton: SHRIMP zircon dating and Hf isotopes of Archean rocks from the Miyun area, Beijing[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(3): 988-1002.
- SUN H Y, YANG Y, WANG C C, et al., 2021. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic (~2.6 Ga) alkaline ultrapotassic granitic gneisses from the southeastern margin of the North China Craton: constraints from U-Pb dating, Hf isotope and petrogeochemistry[J]. *Lithos*, 398-399: 106324.
- SUN G Z, LIU S W, GAO L, et al., 2020. Origin of late Neoproterozoic granitoid diversity in the Western Shandong province, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 339: 105620.
- SUN H Y, XIE H Q, LIU S J, et al., 2016. Archean magmatism and metamorphism in the Huangbaiyu-Yangyashan area, eastern Hebei Province: evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(1): 27-42. (in Chinese with English abstract)
- TANG J, ZHENG Y F, WU Y B, et al., 2007. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen[J]. *Precambrian Research*, 152(1-2): 48-82.
- VALLEY J W, LACKY J S, CAVOSIE A J, et al., 2005. 4.4 billion years of crustal maturation: oxygen isotope ratios of magmatic zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 150, 561-580.
- VAVRA G, SCHMID R, GEBAUER D, 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea zone (southern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 134: 380-404.
- VEEVERS J J, SAEED A, 2009. Permian-Jurassic Mahanadi and Pranhita-Godavari Rifts of Gondwana India: provenance from regional paleoslope and U-Pb/Hf analysis of detrital zircons[J]. *Gondwana Research*, 16(3-4): 633-654.
- WAN Y S, LIU D Y, 1993. Ages of zircons from Mid-Archean gneissic granite and fuchsite quartzite in the Gongchangling area, Liaoning[J]. *Geological Review*, 39(2): 124-129. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y S, LIU D Y, WU J S, et al., 1998. The origin of mesoarchaeic granitic rocks from Anshan Benxi area: constraints of geochemistry and Nd isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 278-288. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y S, WILDE S A, LIU D Y, et al., 2006. Further evidence for ~1.85 Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province[J]. *Gondwana Research*, 9(1-2): 189-197.
- WAN Y S, DONG C Y, WANG W, et al., 2010a. 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[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 84(1): 91-104.
- WAN Y S, LIU D Y, WANG S J, et al., 2010b. Juvenile magmatism and crustal recycling at the end of the Neoproterozoic in Western Shandong Province, North China Craton: evidence from SHRIMP zircon dating[J]. *American Journal of Science*, 310(10): 1503-1552.
- WAN Y S, LIU D Y, WANG W, et al., 2011a. 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 and whole-rock geochemistry[J]. *Gondwana Research*, 20(1): 219-242.
- WAN Y S, LIU D Y, WANG S J, et al., 2011b. ~2.7 Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintai area, western Shandong Province): further evidence of an understated event from U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircon[J]. *Precambrian Research*, 186(1-4): 169-180.
- WAN Y S, WANG S J, LIU D Y, et al., 2012. Redefinition of depositional ages of Neoproterozoic supracrustal rocks in western Shandong Province, China: SHRIMP U-Pb zircon dating[J]. *Gondwana Research*, 21(4): 768-784.
- WAN Y S, XIE S W, YANG C H, et al., 2014a. Early Neoproterozoic (~2.7 Ga) tectono-thermal events in the North China Craton: a synthesis[J]. *Precambrian Research*, 247: 45-63.
- WAN Y S, DONG C Y, WANG S J, et al., 2014b. Middle Neoproterozoic magmatism in western Shandong, North China Craton: SHRIMP zircon dating and LA-ICP-MS Hf isotope analysis[J]. *Precambrian Research*, 255: 865-884.
- WAN Y S, LIU D Y, DONG C Y, et al., 2015. Formation and evolution of Archean continental crust of the North China Craton[M]//ZHAI M G. *Precambrian geology of China*. Berlin: Springer: 59-136.
- WAN Y S, SONG Z Y, WANG L M, et al., 2017. Early Precambrian evolution of the Qixia area, eastern North China Craton: evidence from geological mapping and SHRIMP U-Pb zircon dating[J]. *Geological Bulletin*

- of China, 36(11): 1927-1941. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y S, 2018. Massive growth of early Archean continental core and Neoproterozoic continental crust[M]//ZHAI M G, ZHANG L C, CHEN B. Major precambrian geological events and mineralization in the North China craton. Beijing: Science Press: 39-55. (in Chinese)
- WAN Y S, GUO R P, TIAN J X, et al., 2019a. Discovery of Mesoarchean-early Neoproterozoic TTG rocks in Laizhou area in eastern Shandong of North China Craton: SHRIMP U-Pb zircon dating[J]. *Shandong Land and Resources*, 35(4): 1-16; 37. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y S, XIE H Q, DONG C Y, et al., 2019b. Report of geological map (1: 50000) of the Qixingtai area, Shandong Province[R]. (in Chinese)
- WAN Y S, XIE H Q, DONG C Y, et al., 2020. Timing of tectonothermal events in Archean basement of the North China Craton[J]. *Earth Science*, 45(9): 3119-3160. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y S, LIU S J, SONG Z Y, et al., 2021. The complexities of Mesoarchean to late Paleoproterozoic magmatism and metamorphism in the Qixia area, eastern North China Craton: geology, geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon dating[J]. *American Journal of Science*, 321(1-2): 1-82.
- WAN Y S, XIE H Q, WANG H C, et al., 2021a. Discovery of ~3.8 Ga TTG rocks in eastern Hebei, North China Craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1321-1333. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y S, XIE H Q, WANG H C, et al., 2021b. Discovery of early Eoarchean-Hadean zircons in eastern Hebei, North China Craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 277-291. (in Chinese with English abstract)
- WANG C Y, MENG E, LI Y G, et al., 2017a. A new discovery of ~2.7 Ga granitic magmatism in southeastern Jilin province, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(5): 1919-1923.
- WANG H C, KANG J L, REN Y W, et al., 2015. Identification of ~2.7 Ga BIF in North China Craton: evidence from geochronology of iron-bearing formation in Laizhou-Changyi area, Jiaobei terrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2991-3011. (in Chinese with English abstract)
- WANG L M, 1989. Geological map of Qixia county sheet (1: 50000)[R]. Geological Publishing House. (in Chinese)
- WANG M J, LIU S W, FU J H, et al., 2017b. Neoproterozoic DTTG gneisses in southern Liaoning Province and their constraints on crustal growth and the nature of the Liao-Ji Belt in the Eastern Block[J]. *Precambrian Research*, 303: 183-207.
- WANG W, TIAN Z H, LIU F L, 2022. The research progress of the Paleoproterozoic granite in the Gongchangling area: evidence from geology and zircon U-Th-Pb-Hf isotopic composition[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(2): 359-370. (in Chinese with English abstract)
- WANG X, HUANG X L, YANG F, et al., 2017c. Late Neoproterozoic magmatism and tectonic evolution recorded in the Dengfeng Complex in the southern segment of the Trans-North China Orogen[J]. *Precambrian Research*, 302: 180-197.
- WILDE S A, VALLEY J W, KITA N T, et al., 2008. SHRIMP U-Pb and CAMECA 1280 Oxygen isotope results from ancient detrital zircons in the Caozhuang Quartzite, Eastern Hebei, North China Craton: evidence for crustal reworking 3.8 Ga ago[J]. *American Journal of Science*, 308(3): 185-199.
- WU F Y, YANG J H, LIU X M, et al., 2005a. Hf isotopes of the 3.8 Ga zircons in eastern Hebei Province, China: implications for early crustal evolution of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(21): 2473-2480.
- WU F Y, ZHAO G C, WILDE S A, et al., 2005b. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 523-545.
- WU J S, GENG Y S, SHEN Q H, et al., 1998. Archean geology characteristics and tectonic evolution of China-Korea Paleo-Continent[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-212. (in Chinese)
- WU M L, ZHAO G C, SUN M, et al., 2014. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of major lithologies from the Jiaodong Terrane: implications for the crustal evolution of the Eastern Block of the North China Craton[J]. *Lithos*, 190-191: 71-84.
- WU M L, LIN S F, WAN Y S, et al., 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[J]. *Precambrian Research*, 275: 35-47.
- WU M L, LIN S F, WAN Y S, et al., 2021. Episodic Archean crustal accretion in the North China Craton: insights from integrated zircon U-Pb-Hf-O isotopes of the Southern Jilin Complex, northeast China[J]. *Precambrian Research*, 358: 106150.
- WU X W, ZHANG C, ZHANG Y J, et al., 2018. 2.7 Ga monzogranite on the Songnen Massif and its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(3): 1265-1266.
- XIE S W, XIE H Q, WANG S J, et al., 2014. Ca. 2.9 Ga granitoid magmatism in eastern Shandong, North China Craton: zircon dating, Hf-in-zircon isotopic analysis and whole-rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 255: 538-562.
- XIE S W, WANG S J, XIE H Q, et al., 2015. Petrogenesis of ca. 2.7 Ga TTG rocks in the Jiaodong terrane, North China craton and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2974-2990. (in Chinese with English abstract)
- YANG C, WEI C J, 2017. Two phases of granulite facies metamorphism during the Neoproterozoic and Paleoproterozoic in the East Hebei, North China Craton: records from mafic granulites[J]. *Precambrian Research*, 301: 49-64.
- YANG C H, DU L L, REN L D, et al., 2013. Delineation of the ca. 2.7 Ga TTG gneisses in the Zhanhuang Complex, North China Craton and its geological implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 178-189.
- ZHAI M G, GUO J H, LIU W J, 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: a review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 547-561.
- ZHAI M G, SANTOSH M, 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: a synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 20(1): 6-25.
- ZHANG R Y, ZHANG C L, DIWU C R, et al., 2012. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and its geological implications for the Precambrian granitoids in Zhongtiao Mountain, Shanxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3559-3573. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG J P, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, et al., 2009. Neoproterozoic (2.7-2.8 Ga) accretion beneath the North China Craton: U-Pb age, trace elements and Hf isotopes of zircons in diamondiferous kimberlites[J]. *Lithos*, 112(3-4): 188-202.

- ZHENG J P, GRIFFIN W L, MA Q, et al., 2012. Accretion and reworking beneath the North China Craton[J]. *Lithos*, 149: 61-78.
- ZHENG J P, 2020. Internal and external factors in continental lithosphere mantle replacement in eastern China[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(5): 742-758.
- ZHONG F D, 1984. Geochronological study of Archaean granite-gneisses in Anshan area, northeast China[J]. *Geochimica*(3): 195-205. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Y Y, ZHAO T P, XUE L W, et al., 2009. Petrological, geochemical and chronological constraints for the origin and geological significance of Neoarchean TTG gneiss in the Songshan area, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 331-347. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Y Y, ZHAO T P, ZHAI M G, et al., 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[J]. *Precambrian Research*, 255: 514-537.
- ZHOU Y Y, ZHAO T P, SUN Q Y, et al., 2018. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the 2.6-2.5 Ga amphibolites, low- and high-Al TTGs in the Wangwushan area, southern North China Craton: implications for the Neoarchean crustal evolution[J]. *Precambrian Research*, 307: 93-114.
- ZHU X Y, ZHAI M G, CHEN F K, et al., 2013. ~2.7-Ga crustal growth in the North China Craton: evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the Sushui Complex in the Zhongtiao terrane[J]. *The Journal of Geology*, 121(3): 239-254.
- ZUO R, LONG X P, ZHAI M G, et al., 2021. Geochemical characteristics of the early Neoarchean komatiite from the North China Craton: evidence for plume-craton interaction[J]. *Precambrian Research*, 357: 106143.
- ### 附中文参考文献
- 曹国权, 1996. 鲁西早前寒武纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1-193.
- 董春艳, 马铭株, 颜强强, 等, 2021. 白云鄂博地区早前寒武纪基底岩浆作用和变质作用: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 LA-MC-ICPMS Hf 同位素分析[J]. *岩石学报*, 37(2): 417-432.
- 董晓杰, 徐仲元, 刘正宏, 等, 2012. 内蒙古大青山北麓 2.7 Ga 花岗质片麻岩的发现及其地质意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(S1): 20-27.
- 杜传业, 刘正宏, 李鹏川, 等, 2017. 吉南板石沟地区英云闪长质片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义[J]. *世界地质*, 36(3): 734-750.
- 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 等, 2003. 山东新泰孟家屯岩组锆石特征及其年代学意义[J]. *地质学报*, 77(3): 359-366.
- 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 等, 2005. 鲁西孟家屯一种细粒斜长角闪岩的锆石 SHRIMP 年代学[J]. *地球学报*, 26(5): 429-434.
- 杜利林, 杨崇辉, 庄育勋, 等, 2010. 鲁西新泰孟家屯 2.7Ga 变质沉积岩与黑云斜长片麻岩锆石 Hf 同位素特征[J]. *地质学报*, 84(7): 991-1001.
- 段瑞涵, 刘超辉, 施建荣, 2021. 阴山陆块南缘新太古代末岩浆弧的向西延伸: 来自乌拉特中旗和乌拉特后旗地质年代学和地球化学的证据[J]. *岩石学报*, 37(5): 1372-1404.
- 范宏瑞, 杨奎锋, 胡芳芳, 等, 2010. 内蒙古白云鄂博地区基底岩石锆石年代学及对构造背景的指示[J]. *岩石学报*, 26(5): 1342-1350.
- 简平, 张旗, 刘敦一, 等, 2005. 内蒙古固阳晚太古代赞岐岩 (sanukite): 角闪花岗岩的 SHRIMP 定年及其意义[J]. *岩石学报*, 21(1): 151-157.
- 李源, 颜强强, 董春艳, 等, 2022. 鲁西沂山地区新太古代晚期高级深熔混合岩的源区特征[J]. *岩石学报*, 38(3): 598-618.
- 刘建辉, 刘福来, 刘平华, 等, 2011. 胶北早前寒武纪变质基底多期岩浆-变质热事件: 来自 TTG 片麻岩和花岗质片麻岩中锆石 U-Pb 定年的证据[J]. *岩石学报*, 27(4): 943-960.
- 刘贻灿, 王程程, 张品刚, 等, 2015. 华北板块东南缘五河杂岩的麻粒岩相变质、部分熔融与交代作用[J]. *地球科学与环境学报*, 37(1): 1-11.
- 陆松年, 陈志宏, 相振群, 2008. 泰山世界地质公园古老侵入岩系年代格架[M]. 北京: 地质出版社: 1-90.
- 路增龙, 宋会侠, 杜利林, 等, 2014. 华北克拉通阜平杂岩中 ~2.7Ga TTG 片麻岩的厘定及其地质意义[J]. *岩石学报*, 30(10): 2872-2884.
- 马铭株, 徐仲元, 张连昌, 等, 2013. 内蒙古武川西乌兰不浪地区早前寒武纪变质基底锆石 SHRIMP 定年及 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 29(2): 501-516.
- 马铭株, 章雨旭, 颜强强, 等, 2014. 华北克拉通北缘白云鄂博群和腮林忽洞群底部碎屑锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素分析及其地质意义[J]. *岩石学报*, 30(10): 2973-2988.
- 马铭株, 万渝生, 颜强强, 等, 2020. 鲁西七星台地区新太古代基性岩浆作用: 变质辉长岩的时代和组成[J]. *地球科学*, 45(7): 2610-2628.
- 马旭东, 范宏瑞, 郭敬辉, 2013. 阴山地块晚太古代岩浆作用、变质作用对地壳演化及 BIF 成因的启示[J]. *岩石学报*, 29(7): 2329-2339.
- 钱程, 陈会军, 陆露, 等, 2018. 黑龙江省龙江地区新太古代花岗岩的发现[J]. *地球学报*, 39(1): 27-36.
- 单厚香, 翟明国, 王芳, 等, 2013. 胶北新太古代两类片麻岩的岩石地球化学特征和成因指示[J]. *岩石学报*, 29(7): 2295-2312.
- 邵军, 李永飞, 周永恒, 等, 2015. 中国东北额尔古纳地块新太古代岩浆事件: 钻孔片麻状二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 测年证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 45(2): 364-373.
- 沈其韩, 耿元生, 宋彪, 等, 2005. 华北和扬子陆块及秦岭一大别造山带地表和深部太古宙基底的新信息[J]. *地质学报*, 79(5): 616-627.
- 孙会一, 颜强强, 刘守偈, 等, 2016. 冀东黄柏峪—羊崖山地区太古宙岩浆作用和变质作用: SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. *地质通报*, 35(1): 27-42.
- 万渝生, 刘敦一, 1993. 辽宁弓长岭中太古代片麻状花岗岩和铬云母石英岩的锆石年龄[J]. *地质论评*, 39(2): 124-129.
- 万渝生, 刘敦一, 伍家善, 等, 1998. 辽宁鞍山-本溪地区中太古代花岗岩成因: 地球化学及 Nd 同位素制约[J]. *岩石学报*, 14(3): 278-288.
- 万渝生, 宋志勇, 王来明, 等, 2017. 华北克拉通太古宙典型地区栖霞县幅 1: 5 万地质图修编: 野外地质调查和 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. *地质通报*, 36(11): 1927-1941.
- 万渝生, 2018. 太古宙早期陆核和新太古代陆壳巨量生长[M]//翟明国, 张连昌, 陈斌. 华北克拉通前寒武纪重大地质事件与成矿. 北京: 科学出版社: 39-55.
- 万渝生, 郭瑞朋, 田京祥, 等, 2019a. 华北克拉通胶东莱州地区中太

- 古代-新太古代早期 TTG 岩石的发现: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年 [J]. 山东国土资源, 35(4): 1-16, : 37.
- 万渝生, 颜颇强, 董春艳, 等, 2019b. 鲁西七星台地区地质报告 (1: 50000)[R]. 北京: 中国地质调查局.
- 万渝生, 颜颇强, 董春艳, 等, 2020. 华北克拉通太古宙构造热事件时代及演化 [J]. 地球科学, 45(9): 3119-3160.
- 万渝生, 颜颇强, 王惠初, 等, 2021a. 冀东地区 ~3.8 Ga TTG 岩石发现 [J]. 地质学报, 95(5): 1321-1333.
- 万渝生, 颜颇强, 王惠初, 等, 2021b. 冀东地区始太古代早期-冥古宙锆石发现 [J]. 地质学报, 95(2): 277-291.
- 王惠初, 康健丽, 任云伟, 等, 2015. 华北克拉通 ~2.7Ga 的 BIF: 来自莱州-昌邑地区含铁建造的年代学证据 [J]. 岩石学报, 31(10): 2991-3011.
- 王来明, 1989. 1: 50000 栖霞县幅地质图及说明书 [R]. 济南: 山东省地质矿产局.
- 王伟, 田忠华, 刘福来, 2022. 辽宁鞍山弓长岭地区古太古代花岗岩研究进展: 来自野外地质和锆石 U-Th-Pb-Hf 同位素的证据 [J]. 岩石矿物学杂志, 41(2): 359-370.
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等, 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化 [M]. 北京: 地质出版社: 1-212.
- 谢士稳, 王世进, 颜颇强, 等, 2015. 华北克拉通胶东地区 ~2.7Ga TTG 岩石的成因及地质意义 [J]. 岩石学报, 31(10): 2974-2990.
- 张瑞英, 张成立, 第五春荣, 等, 2012. 中条山前寒武纪花岗岩地球化学、年代学及其地质意义 [J]. 岩石学报, 28(11): 3559-3573.
- 郑建平, 2020. 中国东部大陆岩石圈地幔置换作用的内外原因 [J]. 地质力学学报, 26(5): 742-758.
- 钟富道, 1984. 鞍山铁甲山地区花岗岩片麻岩同位素年代学研究 [J]. 地球化学, (3): 195-205.
- 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 等, 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 [J]. 岩石学报, 25(2): 331-347.

获奖者简历:

万渝生, 男, 1958 年生, 博士, 研究员。在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 长期从事前寒武纪地质和锆石成因及年代学工作。2019 年获得十六次李四光地质科学奖科技奖。以华北克拉通为重点, 针对最古老地体、太古宙大陆形成演化等前沿热点科学问题开展深入系统研究。发表论文 340 余篇和专著 4 部, 第一作者和通讯作者论文 140 余篇。SCI 引用 14879 次, H-index 为 70。连续 8 年进入科睿唯安地学领域全球高被引学者名录 (2014-2021 年)。获得国家自然科学奖二等奖 1 项 (第一名)、国土资源部科学技术奖一等奖 2 项 (第一名, 第二名), 享受国务院政府特殊津贴。

