

吕畅,王浩,周国晋等. 2026. 华北克拉通新太古代-古元古代陆壳演化:来自冀东卢龙地区大红峪组碎屑矿物 U-Pb 年代学和 Hf-O 同位素的制约. 岩石学报,42(07) : 2415-2430, doi: 10.18654/1000-0569/2026.07.08; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.07.08

华北克拉通新太古代-古元古代陆壳演化:来自冀东卢龙地区大红峪组碎屑矿物 U-Pb 年代学和 Hf-O 同位素的制约^{*}

吕畅^{1,2} 王浩^{1,2**} 周国晋^{1,2} 杨进辉^{1,2} 冉静^{1,2} 闫垚琪^{1,2} 许蕾^{1,2} 周宝全^{1,2} 梅清风^{1,2}
LÜ Chang^{1,2}, WANG Hao^{1,2**}, ZHOU GuoJin^{1,2}, YANG JinHui^{1,2}, RAN Jing^{1,2}, YAN YaoQi^{1,2}, XU Lei^{1,2}, ZHOU BaoQuan^{1,2} and MEI QingFeng^{1,2}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所,岩石圈演化与环境演变全国重点实验室,北京 100029
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049
1. *State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
2. *College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
- 2026-01-20 收稿, 2026-03-12 改回 .

Lü C, Wang H, Zhou GJ, Yang JH, Ran J, Yan YQ, Xu L, Zhou BQ and Mei QF. 2026. Continental evolution of the North China Craton during the Neoarchean to Paleoproterozoic: Constraints from detrital mineral U-Pb ages and Hf-O isotopes of the Dahongyu Formation in the Lulong area, eastern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 42(7) : 2415-2430, doi: 10.18654/1000-0569/2026.07.08; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.07.08

Abstract The North China Craton (NCC), as an ancient continental block in China, records crucial information about early continental evolution. In the Lulong area of eastern Hebei Province, the quartz sandstones of the Mesoproterozoic Dahongyu Formation unconformably overlie the Archean basement, serving as an ideal archive for deciphering early crustal history. This study presents integrated analyses of U-Pb geochronology, trace elements, and Hf-O isotopes of detrital zircons and monazites from these sandstones, aiming to clarify the relationship between the sedimentary cover and basement, trace sediment provenance, and constrain continental crustal evolution. Results show that detrital zircons yield three major age peaks at ~2.5Ga, ~2.2Ga and 2.1 ~ 1.9Ga, with the oldest and youngest concordant ages at 3300Ma and 1917Ma, respectively. Monazites give a main U-Pb age cluster of ~2.49Ga. Hf-O isotopic compositions of zircons reveal that the Neoarchean (~2.5Ga) grains are characterized predominantly by positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and a wide range of $\delta^{18}\text{O}$ values, whereas the Paleoproterozoic (2.2 ~ 1.9Ga) zircons show slightly positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and extremely high $\delta^{18}\text{O}$ values. These data indicate that the detritus of the Dahongyu Formation was mainly derived from the Eastern Block of the NCC. The detrital record was suggested to register multiple stages of continental evolution, including significant juvenile crustal growth in the Neoarchean, crustal reworking during the cratonization at the end of the Archean, and intense collisional orogeny and intracrustal recycling in the Paleoproterozoic. This study provides new sedimentary constraints on the growth, maturation, and stabilization of the NCC during the early Precambrian.

Key words North China Craton; Continental crustal evolution; Neoarchean; Paleoproterozoic; Eastern Hebei Province; U-Pb geochronology; Zircon Hf-O isotopes

摘 要 华北克拉通作为我国古老的陆块,其早前寒武纪陆壳演化是理解全球早期大陆形成的关键。冀东卢龙地区长城系大红峪组石英砂岩直接不整合覆盖于太古宙基底之上,是揭示早期地壳信息的理想载体。本文通过对该组砂岩中碎屑锆石与独居石进行系统的 U-Pb 年代学、微量元素及 Hf-O 同位素分析,旨在厘清沉积盖层与基底关系、示踪物源并探讨陆壳演

^{*} 本文受国家自然科学基金项目(42322203、42288201)、地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2025ZD1005300、2024ZD1001306)和中国科学院先导项目(XDB0710000)联合资助。

第一作者简介:吕畅,男,2000年生,硕士生,岩石学专业,E-mail: lvchang@mail.iggcas.ac.cn

^{**} 通讯作者:王浩,男,1986年生,博士,研究员,主要从事前寒武纪地质学研究,E-mail: wanghao@mail.iggcas.ac.cn

化。结果表明:碎屑锆石 U-Pb 年龄呈现 ~2.5Ga、~2.2Ga 和 2.1~1.9Ga 三个主要峰值,最古老和最年轻谐和年龄分别为 3300Ma 和 1917Ma;独居石 U-Pb 年龄则集中分布于 ~2.49Ga。锆石的 Hf-O 同位素组成显示,新太古代(~2.5Ga)锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以正值为主, $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较宽;古元古代锆石(2.2~1.9Ga)则出现弱正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及异常高 $\delta^{18}\text{O}$ 值。综合分析表明,大红峪组碎屑物质主要来源于华北克拉通东部陆块,是华北克拉通新太古代新生地壳增生、末期克拉通化过程中地壳再造、以及古元古代强烈碰撞造山与壳内再循环等多阶段陆壳演化过程的直接记录。本研究为深入认识华北克拉通早前寒武纪地壳生长、成熟与稳定化提供了新的沉积记录约束。

关键词 华北克拉通; 陆壳演化; 新太古代; 古元古代; 冀东; U-Pb 年代学; 锆石 Hf-O 同位素

中图法分类号 P588.21; P597.3

华北克拉通作为我国规模最大、演化历史最为复杂的古老陆块,完整记录了克拉通从形成、生长、成熟直至破坏的全过程,是研究早期大陆形成与演化的天然实验室。20 世纪 90 年代以来,鞍山白家坟地区 38 亿年花岗质糜棱岩与冀东曹庄地区富含始太古代碎屑锆石的铬云母石英岩的发现,揭示了华北存在始太古代早期地壳物质,引起了国际前寒武纪地质学界的广泛关注(Liu *et al.*, 1992)。随后,信阳地区 >3.6Ga 下地壳麻粒岩包体的识别(Zheng *et al.*, 2004),进一步证实华北克拉通存在耦合的始太古代上、下地壳,为揭示其早期陆核形成及壳-幔相互作用提供了关键依据。近年来,冀东卢龙喇叭山地区又陆续报道了一系列含古老碎屑锆石的表壳岩和始太古代具奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩(TTG)特征的片麻岩(初航等,2016;万渝生等,2021a,b),为探索地球早期陆壳演化提供了新的窗口,迅速成为研究热点(Dong *et al.*, 2024, 2025; 吕畅等,2024; Zhao *et al.*, 2025)。尽管如此,华北克拉通内始太古代岩石的出露范围仍十分有限(图 1),仅依靠现有露头难以系统揭示其早前寒武纪的完整演化历史。

自中元古代起,华北克拉通进入伸展裂解阶段,形成了一系列裂陷盆地,其中燕辽裂陷槽保存了沉积连续、层序完整的中-新元古代地层,以天津蓟县剖面为标志,由下而上包括长城系、蓟县系、待建系和青白口系(陆松年等,2010)。在冀东卢龙喇叭山地区,长城系大红峪组石英砂岩直接不整合覆盖于始太古代-新太古代结晶基底之上,是太古宙基底风化、剥蚀与再沉积的直接产物,其碎屑物质记录了早期地壳的关键信息。

碎屑锆石因其良好的物理化学稳定性、富含 U-Th-Hf 元素以及良好的 O 同位素保存能力,被广泛应用于沉积物源分析及地壳演化研究(Hawkesworth and Kemp, 2006; Dhuime *et al.*, 2012; Grimes *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2022)。通过原位微区 U-Pb 定年、微量元素及 Hf-O 同位素分析,可有效揭示其形成时代、源区属性及壳幔相互作用过程。然而,锆石产出于多种岩石类型(从基性岩到酸性岩,甚至部分超基性岩),仅依靠锆石同位素示踪有时难以准确区分再循环表壳物质的贡献。相比之下,独居石主要产出于过铝质中酸性岩浆岩及泥质变质岩中,是表壳物质再循环的直接物质记录(Hietpas *et al.*, 2010; Itano *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2020a)。因此,同时开展碎屑锆石与独居石的综合研究,能

够更全面地约束物源性质,并更可靠地识别古老地壳再循环信号(Chew *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2020)。

本文以冀东卢龙喇叭山地区大红峪组石英砂岩为研究对象,通过对其中碎屑锆石与独居石进行系统的 U-Pb 年代学、微量元素及 Hf-O 同位素(锆石)联合分析,旨在:(1)厘清该地区沉积盖层与基底之间的关系;(2)解释碎屑物质来源及其时空分布特征;(3)进一步制约华北克拉通新太古代-古元古代期间的地壳生长、再造与演化过程。

1 地质背景与岩相学

1.1 区域地质背景

华北克拉通是中国主要的前寒武纪克拉通之一,其北界为中亚造山带,南接秦岭-大别造山带,西邻祁连造山带与塔里木板块,东侧以郯庐断裂带为界(翟明国,2019)。克拉通基底主要由新太古代-古元古代岩石构成,而中太古代及更老的岩石仅在鞍山、信阳、冀东等少数地区零星出露(图 1)。根据 Zhao and Cawood (2012) 的构造划分方案,研究区所在的冀东地区位于华北克拉通东部陆块。

冀东地区保存了华北克拉通乃至全球罕见的古老陆壳记录。研究表明,该区存在约 38 亿年的始太古代物质(万渝生等,2021b; Dong *et al.*, 2024; 吕畅等,2024),并在古-中太古代期间(~35 亿年、34~31 亿年及 29 亿年)经历了多期陆壳生长与再造(Nutman *et al.*, 2011; 孙会一等,2016; Liou *et al.*, 2019; Dong *et al.*, 2025; Zhao *et al.*, 2025)。尽管缺乏新太古代早中期巨量地壳生长的直接记录,但新太古代晚期(2.55~2.50Ga)该区经历了强烈的构造-岩浆活动:西部广泛分布 2.55~2.53Ga 的英云闪长岩和石英闪长岩,东部以 2.53~2.51Ga 的花岗岩为主,中部则出露小规模 2.50~2.49Ga 迁安片麻岩(Nutman *et al.*, 2011; Zhai, 2015)。同时,新太古代表壳岩系及基性-超基性岩组合主要分布在中部和西部(图 2a)。古元古代晚期(~1.8Ga)华北克拉通进入裂解阶段,冀东作为燕辽盆地的一部分,沉积了中元古代长城系等稳定的沉积盖层。中生代以来,受华北克拉通破坏影响,区内发育了多期中生代花岗岩和镁铁-超镁铁质侵入体。

1.2 研究区地质与地层特征

本研究聚焦于冀东卢龙地区。该区基底主要由新太古

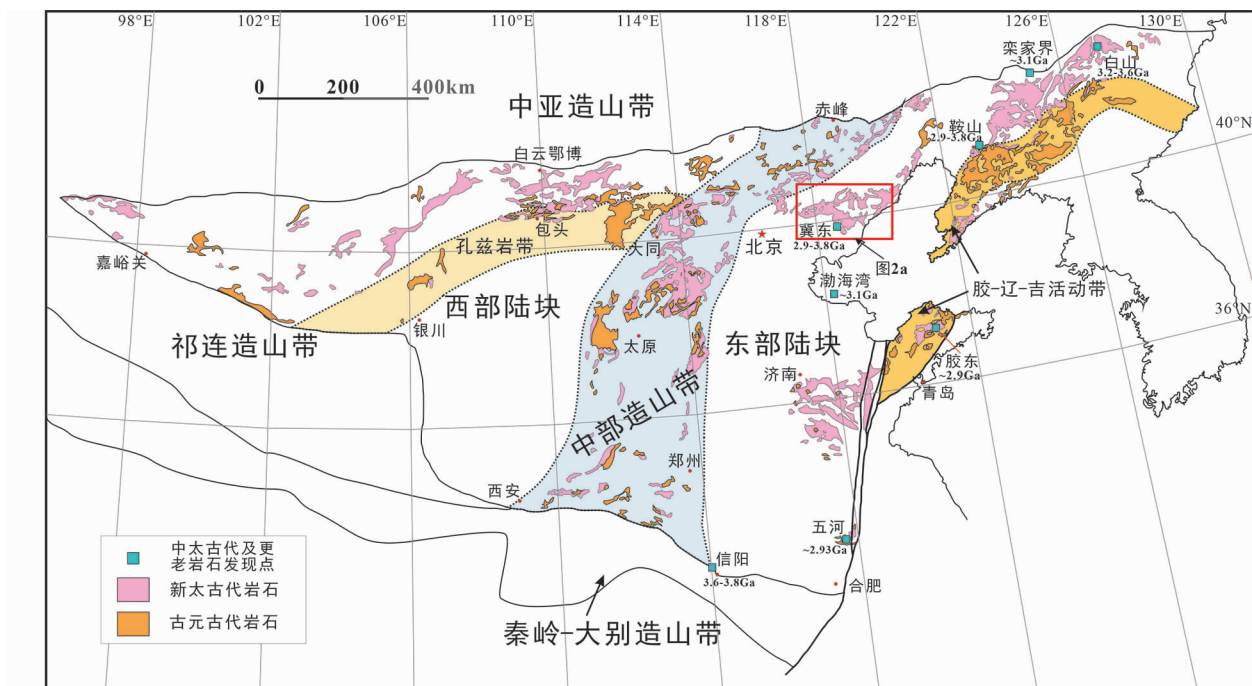


图1 华北克拉通构造划分简图(据 Zhao *et al.*, 2012; Kang *et al.*, 2024 修改)

Fig. 1 Structural division of the North China Craton (modified after Zhao *et al.*, 2012; Kang *et al.*, 2024)

代钾长花岗岩及更古老的始太古代片麻岩组成,上覆中元古代长城系、蓟县系、青白口系及古生代寒武系(图 2b)。值得注意的是,卢龙地区缺失长城系底部的常州沟组、串岭沟组 and 团山子组。沉积盖层直接以大红峪组砂岩不整合覆盖在太古宙基底之上(图 2c)(Dong *et al.*, 2024)。

大红峪组在区域上厚度相对较薄(约 480m),标准剖面位于天津蓟县,为一套碎屑岩-火山岩-碳酸盐岩组合,自下而上可分为 3 段:下段以碎屑岩为主,发育厚层乳白色石英砂岩、紫红色粉砂岩、含砂白云岩或白云质石英砂岩以及翠绿色富钾页岩,具典型韵律层理;中段以出现大量富钾基性火山熔岩、火山角砾岩为标志,夹少量石英砂岩和凝灰岩;上段主要为含叠层石交替的碳酸盐岩。对大红峪组中段富钾火山岩的锆石 U-Pb 定年结果集中在 $\sim 1625\text{Ma}$ (如 $1625.3 \pm 6.2\text{Ma}$, 陆松年和李惠民(1991); $1625.9 \pm 8.9\text{Ma}$, 高林志等(2008); $1622 \pm 32\text{Ma}$, Lu *et al.* (2008); $1624 \pm 9\text{Ma}$, 张健等(2015)),该年龄被广泛接受为该组的沉积时代。

1.3 样品描述与岩相学

本文研究的砂岩样品(21JH223)采自河北卢龙石门镇喇叭山地区($118^{\circ}51'48.82''\text{E}$, $39^{\circ}46'32.31''\text{N}$),层位上对应于大红峪组下段。岩性为乳白色中细粒长石石英砂岩,具有清晰的韵律层理(图 3a)。显微镜下观察显示,岩石具有中细粒砂状结构。碎屑颗粒粒度介于 $50 \sim 250\mu\text{m}$ 之间,分选中等,磨圆度以次棱角状和次圆状为主(图 3b-e),指示了相对有限的搬运距离。碎屑组分以石英(单晶为主,个别多晶)为

主,含少量钾长石、斜长石和云母。岩屑类型包括硅质岩和粉砂岩等。上述矿物学和结构特征为后续探讨物源性性质奠定了重要的岩相学基础。

2 分析方法

本次研究综合运用了多种原位微区分析技术,对碎屑独居石和锆石进行 U-Pb 定年、微量元素及同位素(Hf-O)分析。所有单矿物分选和薄片制作在廊坊市峰泽岩矿检测技术有限公司完成,其余所有分析均在中国科学院地质与地球物理研究所完成。详细的仪器工作条件、标样信息及数据处理流程如下。

阴极发光(CL)和背散射(BSE)图像拍摄使用的仪器是 Nova Nano SEM 450 型扫描电镜,配备有 Gatan Mono CL4 型阴极发光光谱仪。独居石的原位微区 U-Pb 定年和微量元素同时分析在激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)上完成,使用的仪器为配备 Geolas 193nm ArF 激光剥蚀系统的 Agilent 7500a 型 ICP-MS。分析采用束斑直径为 $24\mu\text{m}$,激光频率为 3Hz。以标准玻璃 NIST 610 作为微量元素外标,独居石 44069 (Aleinikoff *et al.*, 2006) 作为 U-Pb 定年校正标样,独居石 117531 (Tomascak *et al.*, 1996) 作为监控标样。数据处理采用 Iolite 4.0 软件(Paton *et al.*, 2011),微量元素含量以 $\text{Ce}(230526 \times 10^{-6})$ 为内标进行校正,详细流程见 Liu *et al.* (2012)。

锆石氧同位素分析在 CAMECA IMS-1280 型二次离子质

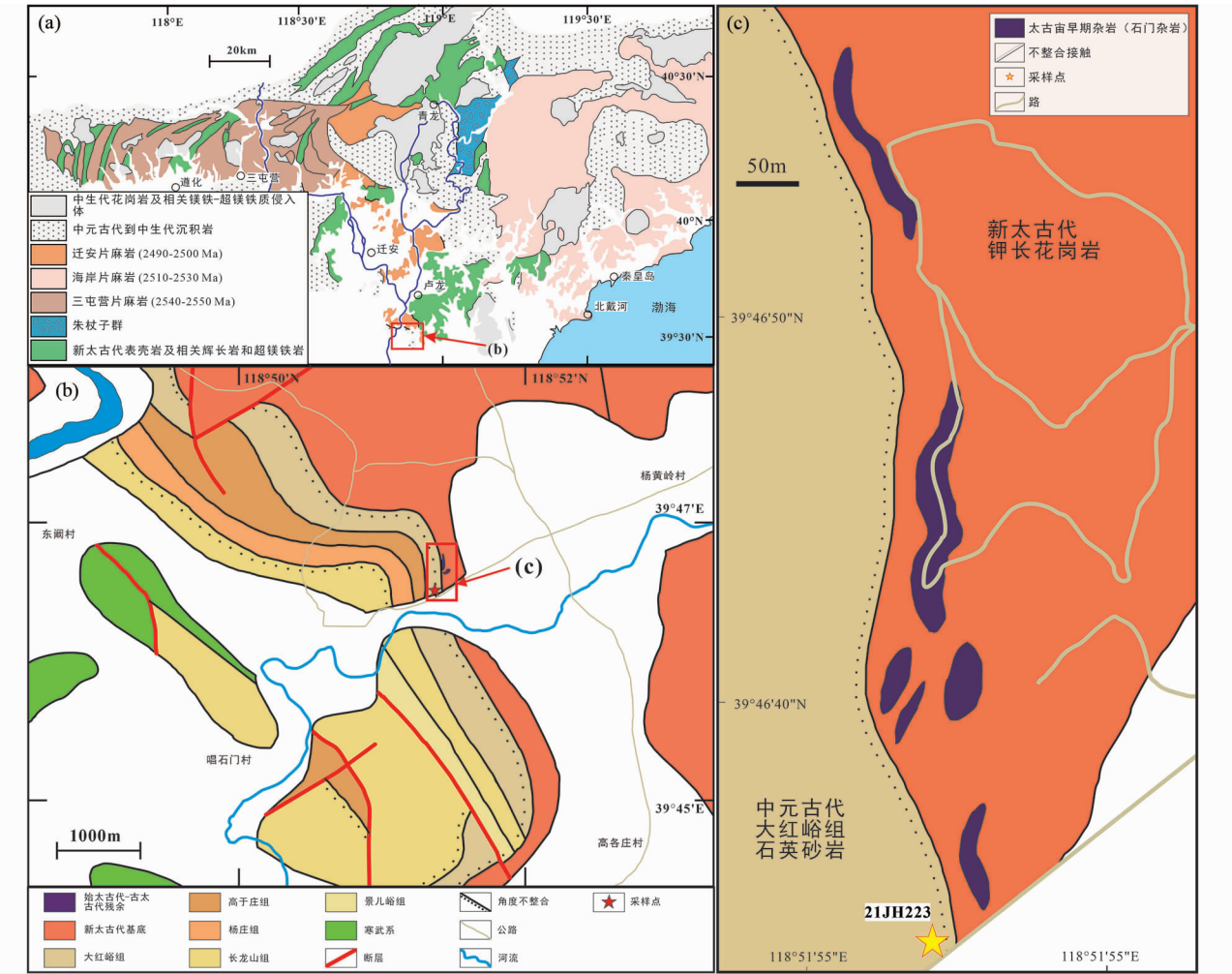


图 2 研究区地质图

(a)冀东地区地质图(据 Nutman *et al.* , 2011 修改); (b)喇叭山地区地质图; (c)采样点周边地质简图(据 Dong *et al.* , 2024 修改)

Fig. 2 Geological maps of studied areas

(a) Geological map of eastern Hebei region (modified after Nutman *et al.* , 2011); (b) Geological map of Labashan area; (c) Geological map of the sampling location (modified after Dong *et al.* , 2024)

谱仪(SIMS)上进行。使用 Cs⁺ 一次离子源,束斑大小约为 20 × 20 μm,分析前对样品表面进行镀金处理。氧同位素比值以维也纳标准平均海水(V-SMOW)O 同位素值进行标准化(¹⁸O/¹⁶O = 0.0020052),并采用标准锆石 Penglai(^{δ¹⁸O} = 5.31 ± 0.10‰; Li *et al.* , 2010)进行仪器分馏校正。为监控分析质量,将标准锆石 Qinghu(推荐 ^{δ¹⁸O} = 5.4 ± 0.2‰; Li *et al.* , 2013)作为未知样进行穿插分析,获得的平均 ^{δ¹⁸O} 值为 5.47 ± 0.31‰(n = 34)。这与推荐值在误差范围内一致。单点分析的不确定度按 2SE 表示。详细分析流程参见 Tang *et al.* (2015)。

锆石 U-Pb 定年在 CAMECA IMS-1280HR 型 SIMS 上完成。分析前对完成氧同位素测试的靶位进行重新剖光以除去前序分析坑。使用一次氧离子束轰击样品表面,束斑大小为 20 × 30 μm。以标准锆石 Plešovice (²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄 =

337.13 ± 0.37 Ma, Sláma *et al.* , 2008)进行 U/Pb 分馏校正。采用实测的²⁰⁴Pb 信号并结合现代地壳平均 Pb 同位素组成对普通铅进行校正,详细分析流程可参考 Li *et al.* (2009)。监控标样 Qinghu 锆石的分析结果(²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄 = 159.6 ± 2.0 Ma, n = 15)与其推荐值(159.45 ± 0.16 Ma; Li *et al.* , 2009)在误差范围内一致。年龄不确定度以 1SE(单点)和 2SE(加权平均)表示。

锆石微量元素分析利用 Geolas 193nm ArF 激光剥蚀系统联用 Element XR 型高分辨率 ICP-MS 进行。分析条件为:束斑直径 32 μm,频率 5 Hz,能量密度 5 J/cm²。以 NIST 610 玻璃为外标,²⁹Si 为内标利用 Iolite 4.0 软件进行定量计算(Paton *et al.* , 2011)。采用人工玻璃 ARM-1(Wu *et al.* , 2019b)以及锆石 91500(Wiedenbeck *et al.* , 2004)和 GJ-1(Piazolo *et al.* , 2017)监控数据质量,绝大多数微量元素的分

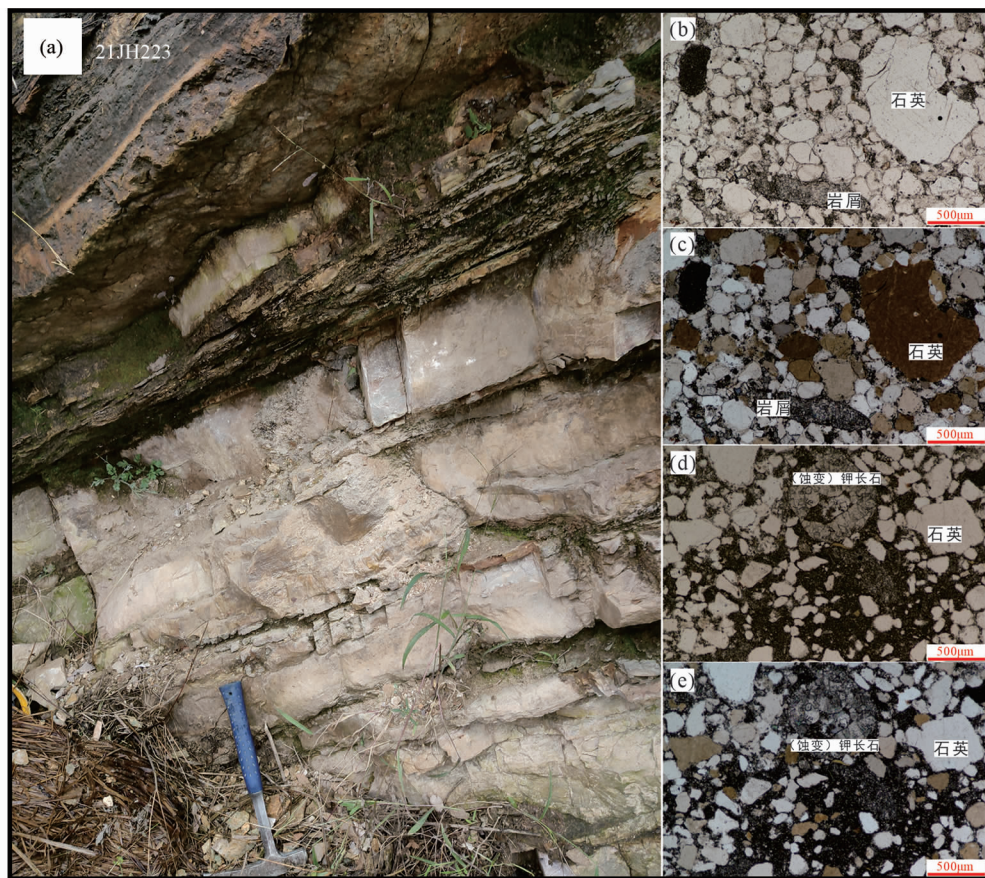


图3 冀东卢龙地区大红峪组石英砂岩(样品 21JH223)采集处野外照片(a)及其单偏光(b,d)和正交偏光(c,e)显微镜下照片

Fig. 3 Photograph of quartz sandstone (Sample 21JH223) (a), and its microphotographs under plane polarized light (b, d) and cross-polarized light (c, e) from the Dahongyu Formation in Labashan area, eastern Hebei Province

析精度优于10%。稀土元素含量采用球粒陨石值进行标准化(Sun and McDonough, 1989)。

从 U-Pb 定年结果中,筛选出 115 颗谐和度 >90% 的锆石进行原位 Lu-Hf 同位素分析。分析在 Neptune Plus 型多接收器 (MC-) ICP-MS 上完成。激光系统为 Geolas Pro (193nm),束斑直径 32 μm ,频率 6Hz,能量密度 5J/cm²。分析过程中,以标准锆石 91500、SA01 和 MUNZirc 作为质量监控标样,其测得的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 加权平均值分别为 0.282308 ± 0.000024 (n = 15), 0.282293 ± 0.000019 (n = 42), 0.282117 ± 0.000023 (n = 48),与文献推荐值一致(王浩等,2022)。通过分析标准锆石 91500 和 NIST610 玻璃监控¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值测量的准确性,其¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 平均值分别为 0.000315 ± 0.000013 (n = 15) 和 0.1474 ± 0.0014 (n = 10),也与前人数据吻合(0.000314 ± 0.000026, Fisher *et al.*, 2014; 0.1433 ± 0.0047, Jochum *et al.*, 2011)。ε_{Hf}(t)值和两阶段 Hf 模式年龄计算以²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为基础采用以下参数:¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf_{CHUR} = 0.0336 (Bouvier *et al.*, 2008),¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf_{CHUR} = 0.282785 (Bouvier *et al.*, 2008),¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf_{DM} = 0.03933

(Blichert-Toft and Puchtel, 2010),¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf_{DM} = 0.283294 (Blichert-Toft and Puchtel, 2010),¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf_{CC} = 0.015 (Griffin *et al.*, 2002),λ¹⁷⁶Lu = 1.867 × 10⁻¹¹/yr (Söderlund *et al.*, 2004)。下标 CHUR、DM、CC 分别指球粒陨石均一岩浆储库、亏损地幔和大陆地壳。

3 分析结果

从约 5kg 石英砂岩(样品 21JH223)中分选出约 1000 颗锆石和 30 颗独居石。锆石颗粒多呈无色透明,形态以半自形棱柱状为主,粒度集中于 50 ~ 100 μm ,少数颗粒可达 150 μm ,长宽比为 1 : 1 至 3 : 1。CL 图像显示,绝大多数锆石发育典型的岩浆振荡环带,仅极少数颗粒可见狭窄的暗色变质边(图4)。独居石大多无色透明,可分为两类(图4):一类为磨圆较好的细小碎片(20 ~ 50 μm),呈浑圆状,长宽比大约为 1 : 1;另一类为较大颗粒(100 ~ 200 μm),保留一定的棱柱状晶形,长宽比大约是 1 : 1 ~ 4 : 1。BSE 图像显示,除个别颗粒具有微弱环带外,多数独居石内部成分均一(图4)。

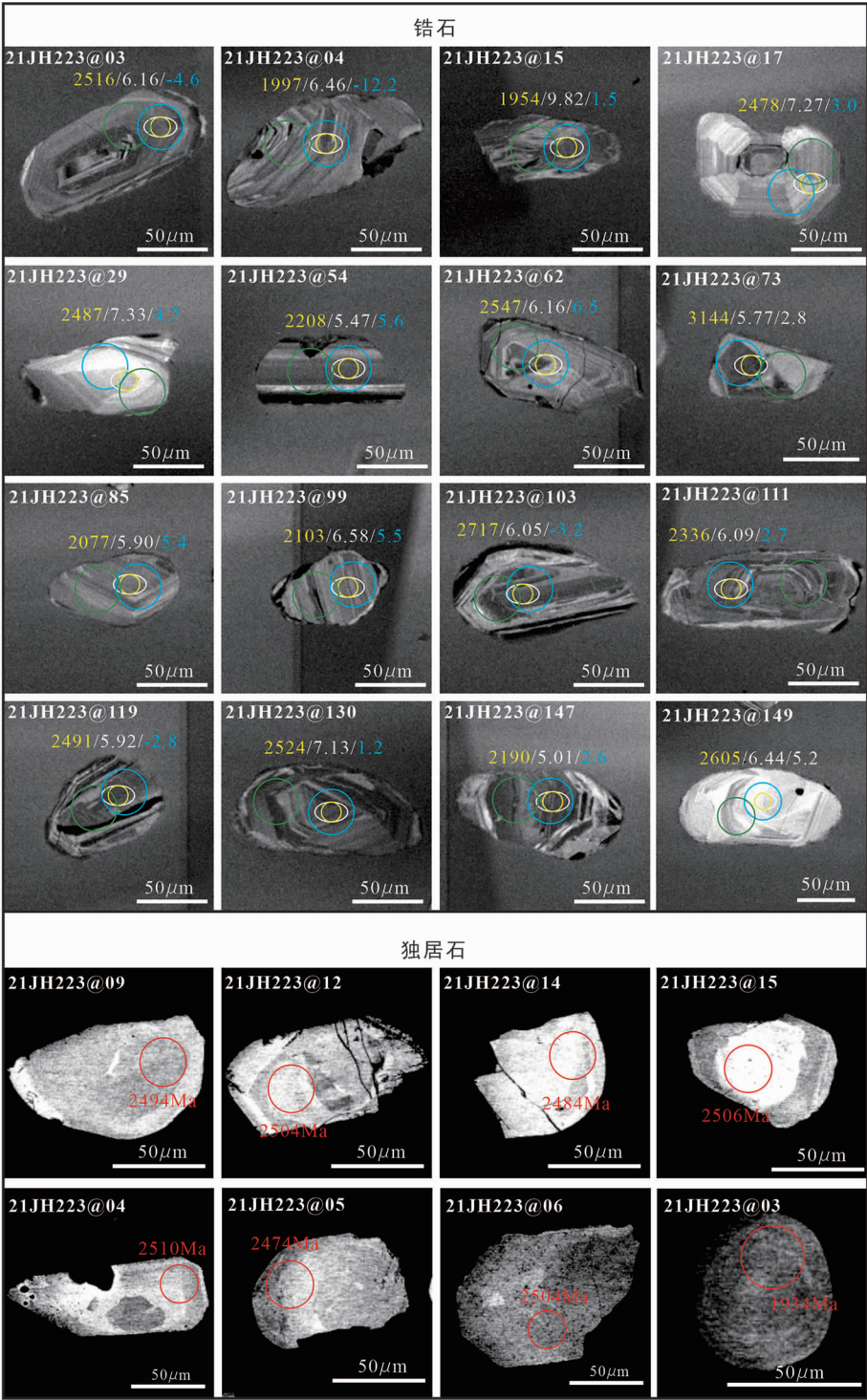


图 4 石英砂岩(样品 21JH223)中锆石阴极发光图像及独居石背散射图像

黄色小圈、白色椭圆、蓝色大圈和绿色大圈分别代表锆石颗粒的 SIMS O 同位素、SIMS U-Pb 定年、LA-MC-ICP-MS Hf 同位素和 LA-ICP-MS 微量元素分析点; 红圈代表独居石背散射图像的 LA-ICP-MS 测年和微量元素分析点

Fig. 4 CL images of zircons and BSE images of monazites from quartz sandstone (Sample 21JH223)

Yellow circles, white ellipses, blue circles and green circles represent zircon analytical spots for SIMS oxygen isotopic analysis, SIMS U-Pb dating, LA-MC-ICP-MS Hf isotopic analysis, and LA-ICP-MS trace element analysis, respectively; Red circles represent analytical spots of monazite BSE images for LA-ICP-MS U-Pb dating and trace element analysis

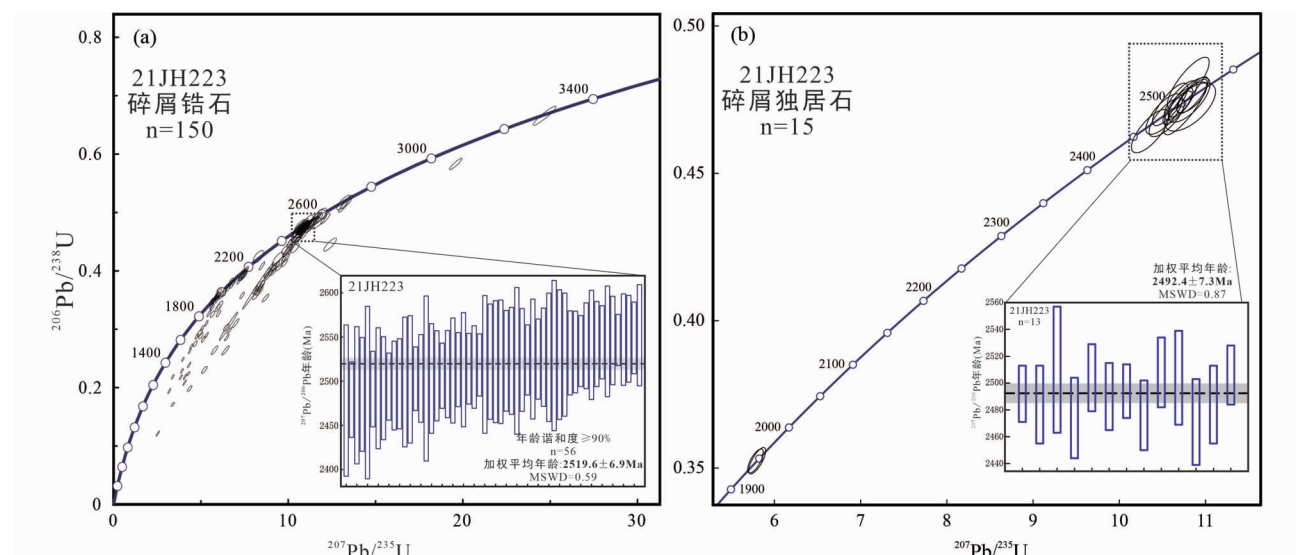


图5 石英砂岩(样品 21JH223)中锆石(a)和独居石(b) U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Concordia diagrams of zircon (a) and monazite (b) U-Pb ages for quartz sandstone (Sample 21JH223)

对 150 颗锆石和 15 颗独居石进行了原位 U-Pb 定年(数据见附表 1 和附表 2)。锆石的 Th/U 比值介于 0.12 ~ 2.80 之间。U-Pb 谐和图(图 5a)显示数据点主要沿两条不一致线分布,上交点年龄分别约为 2.5Ga 和 2.0Ga,指示锆石经历了不同程度的 Pb 丢失。在谐和度 $\geq 90\%$ 的颗粒中,可识别出 3 个主要的年龄峰值:(1)主峰位于 $\sim 2.5\text{Ga}$ (2.45 ~ 2.6Ga),此年龄段的锆石颗粒数量最多;(2)次要峰位于 2.1 ~ 1.9Ga;(3)弱峰位于 $\sim 2.2\text{Ga}$ (图 6)。最年轻颗粒的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1.92Ga,最老年龄可达 $\sim 3.3\text{Ga}$ 。15 颗独居石的 Th 含量变化较大 ($17140 \times 10^{-6} \sim 104433 \times 10^{-6}$), Th/U 比值普遍大于 10。其中 13 颗颗粒的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄误差范围内一致,加权平均值为 $2492.4 \pm 7.3 \text{ Ma}$,另两颗颗粒的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄约为 1.94Ga (图 5b)。

锆石和独居石的微量元素组成见附表 3 和附表 4。在球粒陨石标准化稀土元素配分图上,锆石普遍表现出强烈的重稀土元素富集、显著的正 Ce 异常和明显的负 Eu 异常 (Eu/Eu^* 在 0.06 ~ 0.82) (图 7a),部分锆石颗粒同时具有较高的轻稀土元素含量以及 P 或 Fe 含量,指示其含有磷酸盐或铁氧化物包裹体。独居石则呈现完全不同的模式,以轻稀土元素富集、重稀土元素亏损和极强的负 Eu 异常 (Eu/Eu^* 在 0.01 ~ 0.25) 为特征 (图 7b)。

对 150 颗锆石进行了 O 同位素分析(附表 5)。所有分析点的 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 4.27‰ ~ 10.52‰。为可靠解释物源信息,后续讨论仅基于谐和度 $> 90\%$ 的锆石数据 ($n = 115$)。一颗古太古代和一颗中太古代锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $6.82 \pm 0.34\text{‰}$ 和 $5.77 \pm 0.31\text{‰}$;主峰新太古代组 (2.72 ~ 2.46Ga, $n = 75$) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 4.27‰ ~ 8.48‰;古元古代 $\sim 2.2\text{Ga}$ 组 (2.36 ~ 2.14Ga, $n = 12$) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 5.01‰ ~ 6.20‰;古元古代 2.12 ~ 1.92Ga 组 ($n = 26$) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围最大,为

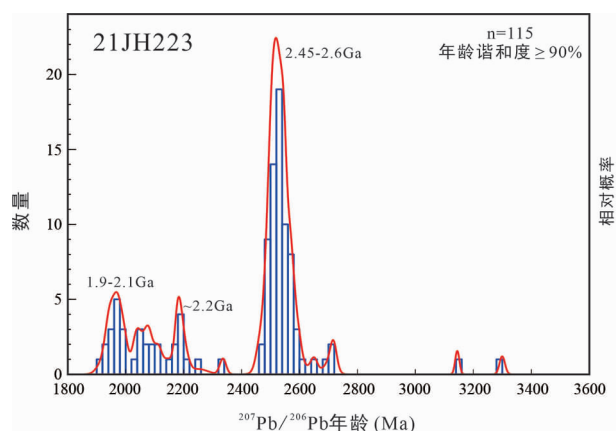


图6 石英砂岩(样品 21JH223)中锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分布直方图及相对概率图

Fig. 6 Relative probability plot and histogram of zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages for quartz sandstone (Sample 21JH223)

4.78‰ ~ 10.52‰ (图 8a)。

锆石 Lu-Hf 同位素分析结果见附表 5。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 $-12.2 \sim +7.9$ 之间 (图 8b),其中正值占主导 (98 颗)。对应的两阶段 Hf 模式年龄介于 3.86 ~ 2.26Ga,主要集中在 3.0 ~ 2.6Ga 之间。其中古太古代和中太古代锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -4.4 和 2.8 。主峰新太古代组 (2.72 ~ 2.46Ga, $n = 75$) 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-7.5 \sim +7.9$; $\sim 2.2\text{Ga}$ 组锆石 (2.36 ~ 2.14Ga, $n = 12$) 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值皆为正值 ($+0.3 \sim +5.6$); 2.12 ~ 1.92Ga 组锆石 ($n = 26$) 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围最宽,为 $-12.2 \sim +6.2$ 。

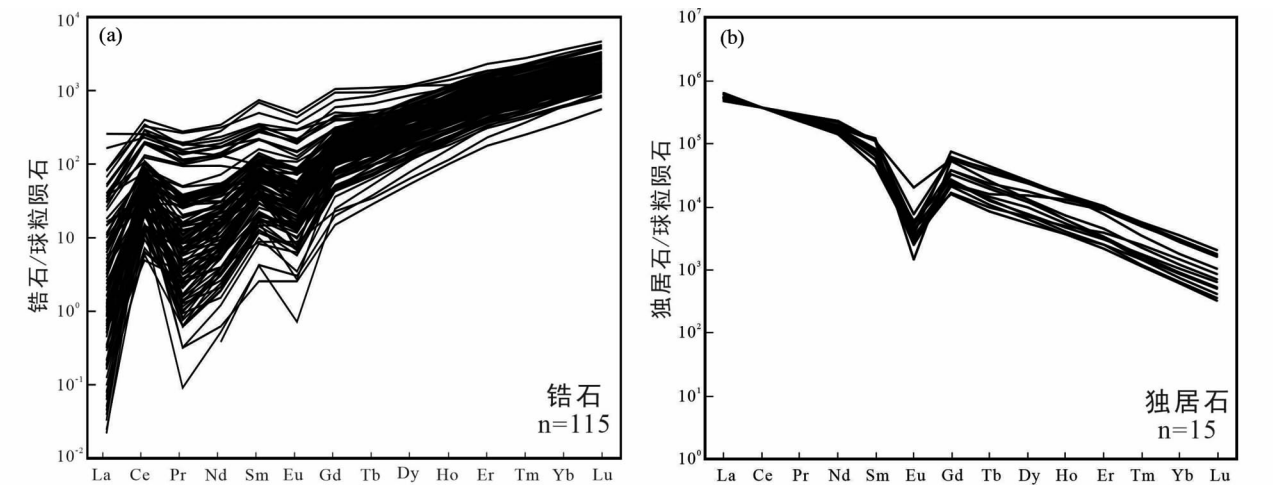


图 7 石英砂岩(样品 21JH223)中锆石(a)和独居石(b)球粒陨石标准化稀土元素配分图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of zircons (a) and monazites (b) from quartz sandstone (Sample 21JH223) (chondrite-normalization values from Sun and McDonough, 1989)

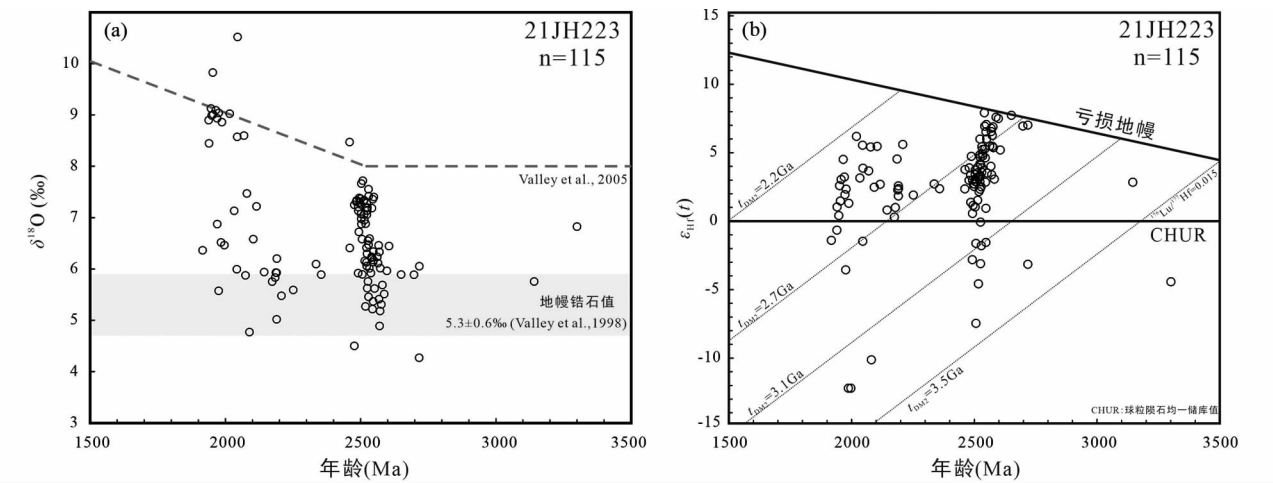


图 8 石英砂岩(样品 21JH223)锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与年龄关系图(a)及 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与年龄关系图(b)

(a)地幔锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值 = $5.3 \pm 0.6\text{‰}$, 引自 Valley *et al.*, 1998; 虚线表示全球锆石 O 同位素演化趋势, 引自 Valley *et al.*, 2005; (b) CHUR 表示球粒陨石均一储库, t_{DM2} 表示二阶段 Hf 模式年龄; 大陆地壳平均 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用 0.015, 引自 Griffin *et al.*, 2002

Fig. 8 Plots of zircon $\delta^{18}\text{O}$ value vs. U-Pb age (a) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value vs. U-Pb age (b) for quartz sandstone (Sample 21JH223)

(a) The $\delta^{18}\text{O}$ value of $5.3 \pm 0.6\text{‰}$ for mantle zircon is from Valley *et al.*, 1998; The dashed line represents the evolutionary line of global zircon O isotopes from Valley *et al.*, 2005; (b) CHUR means chondritic uniform reservoir; t_{DM2} means two-stage Hf model age; The average $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ratio of continental crust is assumed as 0.015 after Griffin *et al.*, 2002

4 讨论

4.1 碎屑矿物成因

研究样品中多数锆石具有清晰的岩浆振荡环带、较高的 Th/U 比值(多数 >0.4)、高的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值($0.000203 \sim 0.003065$)以及典型的岩浆型稀土配分模式(重稀土元素富

集、正 Ce 异常和负 Eu 异常)(图 4、图 7a),均指示其岩浆成因(Wu and Zheng, 2004)。部分锆石显示出较高的轻稀土元素含量以及 P 或 Fe 含量,这些锆石颗粒同时具有较低的 U-Pb 年龄谐和度(附表 3),指示其受到放射性损伤影响内部含有较多包裹体,其微量元素组成不能代表原始锆石特征。因此在后续的讨论中,本文仅利用在年龄谐和度 $>90\%$ 的锆石颗粒上获得的微量元素数据探讨锆石成因。尽管多数锆石

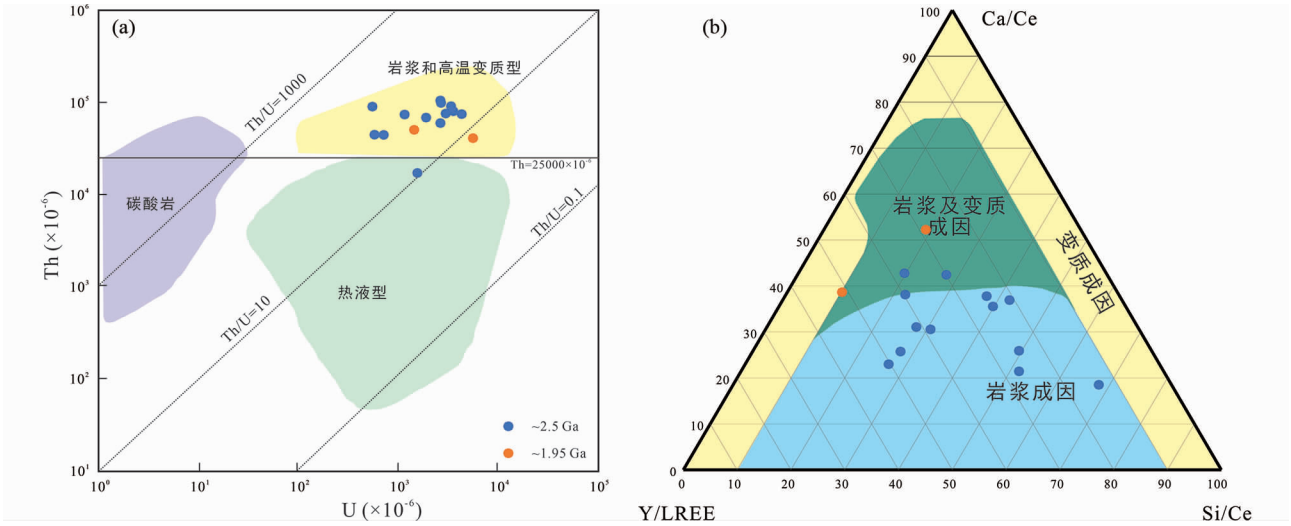


图9 独居石 Th-U 图(a, 据 Zi *et al.* , 2024 修改)及成因判别图 (b, 据 Wu *et al.* , 2019a 修改)

Fig.9 Th-U plot of monazite (a, modified after Zi *et al.* , 2024) and discrimination of monazite with different origins (b, modified after Wu *et al.* , 2019a)

颗粒显示磨蚀痕迹,但仍保留较好的柱状晶形,表明其经历搬运距离较短。综上,这些锆石应属碎屑岩锆石。

独居石的成因较为复杂,可形成于从沉积岩成岩、热液活动到高级变质及岩浆结晶等多种地质环境 (Engi, 2017; Lan, 2022; Zi *et al.* , 2024)。本次获得的独居石颗粒虽少,但较大颗粒仍保留弱环带及棱柱状外形,暗示其可能为岩浆成因。以下地球化学特征进一步支持这一判断:(1)较高 Th 含量(多数大于 40000×10^{-6})和 Th/U 比值(普遍 > 10),与高温岩浆或高级变质独居石特征相符,显著区别于低温热液或成岩成因独居石(图 9a);(2)较低的 Ca/Ce 比值(图 9b),亦指示岩浆来源;(3)显著的 Eu 负异常及较低的 $(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}}$ 比值(< 300),反映独居石结晶时与斜长石共存,而未与石榴子石达到平衡,这与中酸性岩浆体系的结晶行为一致。尽管有研究提出,以 $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.1$ 作为区分不含石榴子石变质岩中独居石与花岗质岩石中独居石的稀土元素指标 (Itano *et al.* , 2020),但是独居石 Eu 异常的大小取决于其与斜长石结晶的时序以及斜长石的含量,因此花岗岩中独居石的 Eu/Eu^* 常显示极大的变化范围致使 $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.1$ 作为区分花岗岩中独居石与不含石榴子石变质岩中独居石的指标并不准确。结合上述形貌与地球化学证据,以及下文将论述的 $\sim 2.5\text{Ga}$ 集中年龄,本文认为这些独居石均属碎屑岩岩浆独居石,其物源主要来自新太古代晚期花岗质岩石。

4.2 冀东卢龙地区大红峪组碎屑沉积物来源

已有的研究表明,锆石微量元素可以作为区分母岩浆类型的有效指标 (Belousova *et al.* , 2002)。本次研究的碎屑锆石(谐和度 $> 90\%$)微量元素组成,在 Y-Nb/Ta 和 Y-Yb/Sm 等判别图中多落入花岗岩类区域(图 10),结合其年龄谱特

征,表明物源来自基底的中酸性岩浆岩,尤其是新太古代 TTG 岩套。碎屑矿物年龄谱清晰地揭示了 $\sim 2.5\text{Ga}$ 、 $\sim 2.2\text{Ga}$ 和 $2.1 \sim 1.9\text{Ga}$ 三个主要峰值,与华北克拉通东部陆块已知的主要构造-热事件期次高度吻合。特别值得注意的是,碎屑独居石给出了非常集中的 2.49Ga 加权平均年龄,这与碎屑锆石的主年龄峰($2.60 \sim 2.45\text{Ga}$)基本对应,但独居石的年龄分布更为单一。独居石主要产出于过铝质中酸性岩浆岩及高级变质岩中,其 2.49Ga 的峰值强烈暗示,在新太古代末期,研究区物源范围内曾发生一次广泛的、与深熔作用或高级变质作用相关的热事件,形成了大量富含独居石的岩石。相比之下,锆石作为更普遍的副矿物,其年龄谱则更完整地记录了多期次的岩浆活动。岩相学观察显示,碎屑颗粒磨圆度中等偏差,分选一般,且含有长石等不稳定矿物(图 3),共同指示了近源沉积的特点,即碎屑物质经历了有限的搬运,物源应主要为盆地周缘已出露的古老结晶基底。在恢复古地理时需注意,华北克拉通东部陆块在中生代以来经历了强烈的构造破坏与郯庐断裂带的大规模走滑,现今的岩石分布格局已发生显著改变。有研究指出,若对郯庐断裂位移进行校正,鞍山与冀东的古老杂岩在中元古代时期可能同属一个连续的陆块,这为理解远距离物源提供了新的视角 (Tian and Nutman, 2022)。

研究样品中发现两颗年龄为 3.14Ga 和 3.3Ga 的碎屑锆石。这两颗古老的锆石都具有略高于地幔值的 $\delta^{18}\text{O}$ 值($5.77\text{‰} \sim 6.82\text{‰}$)。 3.3Ga 锆石具负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-4.4),而 3.14Ga 锆石具有微正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($+2.8$),这些特征表明其母岩浆已有古老地壳物质的参与。这一发现与东部陆块日益增多的古老岩石记录相呼应。近年来,不仅在冀东曹庄和喇叭山等地发现了大量 $> 3.4\text{Ga}$ 的碎屑锆石和奥长花岗岩,在鞍山地区、渤海盆地钻孔及辽北和栾家界地区也相继识别

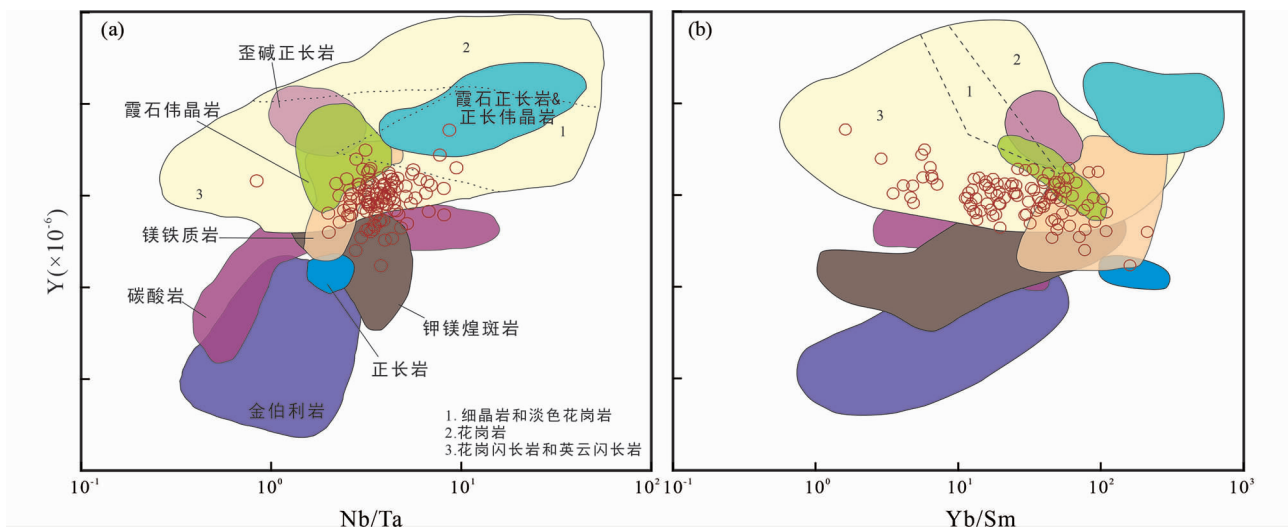


图 10 石英砂岩(样品 21JH223)锆石微量元素含量及比值二元地球化学判别图(据 Belousova *et al.*, 2002 修改)

Fig. 10 Binary geochemical discrimination diagrams of trace element concentrations and ratios for zircons from quartz sandstone (Sample 21JH223) (modified after Belousova *et al.*, 2002)

出 33~31 亿年的表壳岩、TTG 及花岗质片麻岩(Wu *et al.*, 2008; Nutman *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2015, 2020b; Li *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2022; 孙会一等, 2016)。这些证据共同表明,华北克拉通东部存在一个古老的始-中太古代陆核,它为后续地质时期的沉积盆地提供了珍贵的古老碎屑物质。

~2.5 Ga 的年龄峰是本研究最显著的物源信号,该组碎屑锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围较宽(-7.5 ~ +7.9),但以正值为主,对应的两阶段 Hf 模式年龄主体集中于约 27 亿年,同时其 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化于 4.27‰ ~ 8.48‰ 之间,多数高于典型地幔值。这一特征与华北克拉通东部广泛出露的 ~2.5 Ga TTG 片麻岩、花岗岩及绿岩带的地球化学特征高度一致。华北克拉通东部陆块新太古代末期基底岩石主要出露于鲁西、冀东和辽北三地,其次在辽南、胶东等地也有少量发现(图 1),大部分新太古代 TTG 及花岗岩岩浆锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 0~7 之间,与本文碎屑锆石在数值上具有一致性(Liu *et al.*, 2013; Bai *et al.*, 2015, 2019, 2020; 耿元生等, 2018; 郝乐燃等, 2020; 袁玲玲等, 2020; 王跃等, 2022)。少部分锆石较富集的 Hf 同位素特征与鞍山地区的 2.52~2.50 Ga 花岗质岩石富集的锆石 Hf 同位素特征具有较高匹配度(Wan *et al.*, 2015)。目前对华北克拉通东部陆块新太古代末岩体做过锆石原位 O 同位素分析的研究较少。冀东地区新太古代晚期花岗质岩石(如 ~2.53 Ga 的界岭口闪长岩)的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值(2.76‰ ~ 6.83‰)(董春艳等, 2018)与鞍山地区同期花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(3.35‰ ~ 10.9‰, 主体 4.8‰ ~ 7.0‰)(Wan *et al.*, 2013, 2015)共同涵盖了本研究碎屑锆石的范围。

古元古代的碎屑锆石构成了另外两个重要的年龄组: ~2.2 Ga 和 2.1~1.9 Ga。~2.2 Ga 组锆石具有正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+0.3 ~ +4.5)和近地幔的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,这与胶-辽-吉活动带内

广泛发育的 2.2~2.1 Ga 花岗岩的特征相符(Li *et al.*, 2011; Zhao and Zhai, 2013; 刘福来等, 2015; 宋运红等, 2016; Wang *et al.*, 2017)。2.1~1.9 Ga 组碎屑锆石的同位素特征最为复杂, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围极宽(-12.2 ~ +6.2), $\delta^{18}\text{O}$ 值也普遍较高(可达 10.52‰)。尽管目前研究区所在的东部陆块地表缺乏该时代的大规模岩浆岩露头,但在华北克拉通西部的孔兹岩带及中部的恒山、吕梁等杂岩中,广泛发育 2.05~1.95 Ga 的壳源花岗质岩石,其锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(多在 -2 ~ +7)和较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征与本组碎屑锆石有可比之处(耿元生等, 2009; 赵瑞幅等, 2011; Du *et al.*, 2013; 李正辉等, 2013; Santosh *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2017; 甘保平等, 2019; 庞岚尹等, 2019)。因此,西部的孔兹岩带及中部的恒山、吕梁等杂岩可能是本区大红峪组石英砂岩的物源。然而,考虑到大红峪组砂岩具有近源沉积的特点,另一个可能的解释是:中元古代沉积时期,研究区所在的东部陆块之下或邻近区域,可能存在目前尚未出露或已被完全剥蚀的、同期(2.1~1.9 Ga)的岩浆岩体,这为冀东大红峪组提供了近源碎屑物质。这一推测暗示,东部陆块在古元古代晚期的岩浆-构造活动可能比现今地表地质记录所揭示的更为活跃和复杂。

4.3 喇叭山地区盖层与基底关系

华北克拉通中元古界长城系作为其第一套稳定沉积盖层,标志着该克拉通由基底形成阶段转入稳定的盖层发育阶段。在冀东卢龙喇叭山地区,长城系顶部的大红峪组石英砂岩以明显的角度不整合直接覆盖于太古宙基底杂岩(包括新太古代钾长花岗岩及更古老的始太古代 TTG 片麻岩捕虏体)之上(图 2c)。对这一关键接触界面上下岩石单元的研究,特别是对盖层中碎屑矿物的精细剖析,是厘清基底隆升-

剥蚀历史和盖层沉积前古地理格局的有效途径。本研究中获得最年轻的碎屑锆石谱和年龄为 1917Ma, 最年轻独居石年龄为约 1934Ma, 这两个年龄共同将大红峪组的沉积时代限定在不早于约 1.9Ga, 这与人通过大红峪组中部火山岩夹层直接测年获得的 ~1625Ma 沉积时代上限吻合 (Lu *et al.*, 2008; 陆松年和李惠民, 1991; 张健等, 2015)。

一个值得深入探讨的现象是, 尽管喇叭山地区下伏基底中已被证实存在始太古代 (如 ~3.8Ga) 的 TTG 片麻岩捕虏体, 本次研究的大红峪组砂岩中却未发现同期 (>3.4Ga) 的碎屑锆石。这种“基底有而盖层无”的差异, 其成因可能涉及以下多方面因素:

(1) 喇叭山地区已发现的始太古代岩石主要以规模极小的捕虏体形式“包裹”在新太古代花岗岩中, 露头面积占比极低 (图 2b, c)。这表明, 在中元古代大红峪组沉积时期, 该地区遭受剥蚀的主要是大量出露的新太古代花岗岩体, 而其内部包裹的古老捕虏体因未达地表或暴露面积过小, 提供的碎屑物质有限而未能被碎屑锆石记录下来。

(2) 前人对冀东曹庄地区铭云母石英岩 (年龄更老) 的研究表明, 大量冥古宙-始太古代碎屑锆石可能来自一个当时已存在、但后来被改造或深埋的古老陆块 (Wang *et al.*, 2026)。大红峪组沉积时, 主要的物源区与沉积盆地格局可能已发生改变。即使有古老物质从更远的源区被剥离, 其在长距离搬运和沉积过程中的水动力分选 (古老锆石可能因辐射损伤而物理稳定性降低), 以及与其他丰富的新太古代物质混合稀释, 也可能导致其在最终沉积物中比例极低甚至难以探测。

(3) 研究区毗邻邻庐断裂带, 中生代以来强烈的构造活动 (包括断裂走滑、可能的构造推覆) 可能使得现今观察到的大红峪组与下伏基底的接触关系并非完全原始的沉积接触。虽然无直接证据支持大规模的异地推覆, 但后期的构造扰动可能对地层原始厚度、沉积序列的连续性造成影响, 从而增加了解读的复杂性。

4.4 华北克拉通新太古代-古元古代陆壳演化

沉积地层中的碎屑锆石与独居石, 如同从古老源区剥离的“时间胶囊”, 其 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素组成是反演深部陆壳生长、再造与成熟过程的理想档案。上文已详细论证, 冀东卢龙地区大红峪组的碎屑物质主要源自华北克拉通东部陆块。因此基于这些碎屑矿物的年代学和 Hf-O 同位素信息可以探讨华北克拉通新太古代-古元古代陆壳演化过程。以往基于区域上出露的基底岩石记录的研究将华北克拉通东部陆块新太古代-古元古代的陆壳演化梳理为以下四个主要阶段 (Diwu *et al.*, 2024):

(1) 新太古代早期 (2.85 ~ 2.70Ga): 新生陆壳的主体增生期

基于基底岩石的统计分析提出, 华北克拉通在约 2.92 ~ 2.50Ga 期间经历了极高的大陆生长速率, 现有地壳体积的

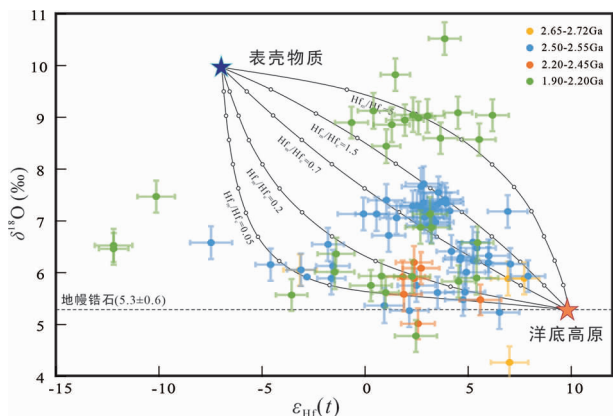


图 11 石英砂岩 (样品 21JH223) 碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $\delta^{18}\text{O}$ 图。曲线表示地幔源区成分与表壳源区成分之间的混合趋势, 曲线上的空心圆圈表示 10% 混合增量; 假设地幔岩浆的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 17$, $\delta^{18}\text{O} = 5.3\text{‰}$, 而表壳性质锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -7$, $\delta^{18}\text{O} = 10\text{‰}$ 。

Fig. 11 Plot of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ value of the detrital zircons from quartz sandstone (Sample 21JH223)

The curve represents the mixing trend between the mantle- and supracrustal-derived components and the small open circle on the curve represents 10% mixing increment by assuming that the mantle magma has $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 17$ and $\delta^{18}\text{O} = 5.3\text{‰}$ and the supracrustal zircon has $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -7$ and $\delta^{18}\text{O} = 10\text{‰}$.

50% ~ 60% 于此阶段奠定 (Diwu *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2025)。其中, 2.85 ~ 2.70Ga 尽管不是最突出年龄峰, 但该时期的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值极高, 几乎接近同期亏损地幔。全球尺度的统计分析揭示 2.8 ~ 2.7Ga 期间陆壳经历了巨量增生。部分学者将此阶段的地壳生长与超级地幔柱活动相联系, 认为地幔柱诱发的广泛玄武质岩浆活动, 形成了巨厚的镁铁质下地壳, 为后续的 TTG 生成提供了源区 (Condie *et al.*, 2001; 翟明国, 2019)。本次研究中的少量 2.72 ~ 2.65Ga 碎屑锆石, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以较高正值 (最高达 +7.7) 为主, $\delta^{18}\text{O}$ 值 (4.27‰ ~ 6.44‰) 接近或略高于地幔值 (图 11)。这一特征与华北克拉通多个地区 (如鞍山、鲁西) 同期基底的记录完全一致, 应是这期陆壳增生作用的体现。

(2) 新太古代晚期 (2.55 ~ 2.50Ga): 克拉通化完成与混合源区改造

2.55 ~ 2.50Ga 岩石组合在整个华北克拉通广泛分布, 占基底岩石规模 80% ~ 90% 以上的 TTG 及后碰撞富钾花岗岩形成于此时期。这一时期不仅发育强烈的岩浆活动, 还有诸多高温-超高温变质作用记录, 是华北克拉通地质记录中最主要的年龄峰值, 也是华北克拉通区别于其他克拉通 (如 Kaapvaal 克拉通, Pilbara 克拉通) 的典型标志 (Diwu *et al.*, 2024)。在此期间, 华北克拉通完成了初步克拉通化, 并经历了强烈的陆壳增生与再造 (Zhai, 2015; Kang *et al.*, 2024; 耿元生等, 2018)。本次研究的碎屑矿物年龄谱以 ~2.5Ga 为主峰, 其锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值呈现显著的两极分化 (-7.5 ~

+7.9),但以正值为主; $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围宽(4.51‰~8.48‰),整体高于地幔值。一方面,部分锆石具有正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及与正常地幔一致的 $\delta^{18}\text{O}$ 值表明,仍有相当规模的新生幔源物质在此阶段加入。另一方面,显著升高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值则指示尽管一些锆石具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,其仍是表壳物质快速再循环的结果,并非指示了亏损地幔的直接加入。特别是一些锆石具有负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及古老的Hf模式年龄,指示了古老表壳物质的广泛再造。因此,2.55~2.50Ga的岩浆事件是地壳增生与再造并存的复合事件。本研究中碎屑独居石提供了精确~2.49Ga年龄峰值,其物源很可能是陆壳再造过程中深熔阶段或者过铝质岩浆阶段的产物。

(3) 古元古代早期(2.45~2.20Ga):“构造静寂期”的局部活化

传统观点将2.45~2.20Ga视为全球构造岩浆活动的“静寂期”(Spencer *et al.*, 2018; Condie *et al.*, 2022)。本次研究中此年龄段的碎屑锆石数量也相对较少。近年来,在华北克拉通北缘大青山等地陆续识别出2.46~2.38Ga的表壳岩及相关侵入体(Dong *et al.*, 2022)。这些岩石形成于大陆环境,其地球化学特征暗示可能处于伸展背景。本次研究中~2.2Ga的碎屑锆石具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(0.3~4.5)和近地幔的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(5.01‰~6.20‰),指示表壳物质参与较少。这很可能对应哥伦比亚超大陆聚合早期,在统一的克拉通基底上发生的陆内伸展或裂谷事件。

(4) 古元古代晚期(2.2~1.9Ga):强烈的陆壳再造与碰撞造山

古元古代晚期(2.2~1.9Ga),全球范围内发育了广泛的碰撞造山作用形成了哥伦比亚超大陆。这一时期华北克拉通内部也产出多条造山带或活动带(孔兹岩带、胶-辽-吉活动带以及中部造山带等),代表了华北克拉通内部或其他陆块之间发生的碰撞造山事件(Zhao *et al.*, 2012)。板块汇聚的俯冲及碰撞过程中,陆壳会经历快速的增生与再造。本研究揭示在2.1~1.9Ga期间,碎屑锆石数量显著增加,其同位素特征发生剧变: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围极宽(-12.2~+6.2),且出现明显的负值; $\delta^{18}\text{O}$ 值急剧升高,最高超过10‰。这种极大的Hf-O同位素变化范围可能与碎屑锆石具有多种混合来源有关。特别值得注意的是,部分碎屑锆石具有极高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的同时还兼具正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的现象(图11),它表明有很多新生的表壳物质在经历低温水岩相互作用后快速进入地壳深部发生部分熔融(Valley *et al.*, 1998),这是汇聚板块边缘岩浆活动的典型特征。

5 结论

(1) 冀东卢龙地区大红峪组石英砂岩的碎屑锆石U-Pb年龄谱主要显示~2.5Ga、~2.2Ga和2.1~1.9Ga三个峰值,独居石年龄集中分布于~2.49Ga。最年轻碎屑锆石(1917Ma)与独居石(~1934Ma)年龄限定了大红峪组的沉积

时代不早于~1.9Ga,与区域火山岩夹层年龄(~1625Ma)界定的沉积时限吻合。

(2) 碎屑矿物形态、组合及地球化学特征指示大红峪组石英砂岩为近源沉积,物源主要来自华北克拉通东部陆块。~2.5Ga的碎屑锆石与独居石记录了新太古代晚期广泛的岩浆-变质事件;古元古代碎屑锆石则可能源自东部陆块下尚未出露或已被剥蚀的同时代岩体,以及胶-辽-吉活动带等相关构造单元的贡献。

(3) 碎屑锆石Hf-O同位素记录与华北克拉通东部陆块新太古代-古元古代多阶段的陆壳演化过程相一致:新太古代早期(2.85~2.70Ga)以新生地壳增生为主;新太古代晚期(2.55~2.50Ga)为克拉通化完成的关键时期,期间增生与再造并存;古元古代早期(2.45~2.20Ga)可能存在局部构造-岩浆活化;古元古代晚期(2.20~1.90Ga)则发生了强烈的碰撞造山作用,大量新生表壳物质快速再造,体现为碎屑岩岩浆锆石兼具高 $\delta^{18}\text{O}$ 值和正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值特征。

References

- Aleinikoff JN, Schenck WS, Plank MO, Srogi L, Fanning CM, Kamo SL and Bosbyshell H. 2006. Deciphering igneous and metamorphic events in high-grade rocks of the Wilmington Complex, Delaware: Morphology, cathodoluminescence and backscattered electron zoning, and SHRIMP U-Pb geochronology of zircon and monazite. *Geological Society of America Bulletin*, 118(1-2): 39-64
- Bai WQ, Dong CY, Nutman AP, Xie HQ, Liu DY and Wan YS. 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 Santunying area, eastern Hebei. *Gondwana Research*, 76: 348-372
- Bai WQ, Dong CY, Song ZY, Nutman AP, Xie HQ, Wang SJ, Liu SJ, Xie SW, Li Y, Liu DY and Wan YS. 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. *Geological Journal*, 55(9): 6462-6486
- Bai X, Liu SW, Guo RR and Wang W. 2015. Zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry of two contrasting Neoproterozoic charnockitic rock series in Eastern Hebei, North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Precambrian Research*, 267: 72-93
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly SY and Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622
- Blichert-Toft J and Puchtel IS. 2010. Depleted mantle sources through time: Evidence from Lu-Hf and Sm-Nd isotope systematics of Archean komatiites. *Earth and Planetary Science Letters*, 297(3-4): 598-606
- Bouvier A, Vervoort JD and Patchett PJ. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1-2): 48-57
- Chew D, O'Sullivan G, Caracciolo L, Mark C and Tyrrell S. 2020. Sourcing the sand: Accessory mineral fertility, analytical and other biases in detrital U-Pb provenance analysis. *Earth-Science Reviews*, 202: 103093
- Chu H, Wang HC, Rong GL, Chang QS, Kang JL, Jin S and Xiao ZB. 2016. The geological significance of the rediscovered fuchsite quartzite with abundant Eoarchean detrital zircons in eastern Hebei

- Province. Chinese Science Bulletin, 61 (20): 2299-2308 (in Chinese with English abstract)
- Condie KC, Des Marais DJ and Abbott D. 2001. Precambrian superplumes and supercontinents; A record in black shales, carbon isotopes, and paleoclimates? Precambrian Research, 106 (3-4): 239-260
- Condie KC, Pisarevsky SA, Puetz SJ, Spencer CJ, Teixeira W and Meira Faleiros F. 2022. A reappraisal of the global tectono-magmatic lull at ~2.3Ga. Precambrian Research, 376: 106690
- Dhuime B, Hawkesworth CJ, Cawood PA and Storey CD. 2012. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago. Science, 335 (6074): 1334-1336
- Diwu CR, Sun Y, Si BW and Yan MJ. 2024. Archean continental crustal growth and reworking of the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb age and Hf isotopic composition. Earth-Science Reviews, 248: 104624
- Dong CY, Wang C, Xie HQ, Bai WQ and Wan YS. 2018. Late Neoarchean Jielingkou diorite in eastern Hebei, North China Craton: Origin from U-Pb-Nd-Hf-O isotopic studies. Acta Petrologica Sinica, 34 (9): 2793-2810 (in Chinese with English abstract)
- Dong CY, Ma MZ, Wilde SA, Liu SJ, Li PC, Xu ZY and Wan YS. 2022. The first identification of Early Paleoproterozoic (2.46 ~ 2.38Ga) supracrustal rocks in the Daqingshan area, northwestern North China Craton: Geology, geochemistry and SHRIMP U-Pb dating. Precambrian Research, 377: 106727
- Dong CY, Liu SJ, Nutman AP, Li PC, Xie HQ, Li Y, Liu DY and Wan YS. 2024. New discovery of 3.84 ~ 3.64Ga diverse granitoids in eastern Hebei, North China Craton: Petrogenesis and significance. Geological Society of America Bulletin, 136 (11-12): 5249-5261
- Dong CY, Li PC, Nutman AP, Xie HQ, Liu SJ, Li Y, Liu DY and Wan YS. 2025. New discovery of Paleoproterozoic-Mesoarchean magmatic rocks in eastern Hebei, North China Craton: Petrogenesis and tectonic environment. Precambrian Research, 427: 107870
- Du LL, Yang CH, Wang W, Ren LD, Wan YS, Wu JS, Zhao L, Song HX, Geng YS and Hou KJ. 2013. Paleoproterozoic rifting of the North China Craton: Geochemical and zircon Hf isotopic evidence from the 2137Ma Huangjinshan A-type granite porphyry in the Wutai area. Journal of Asian Earth Sciences, 72: 190-202
- Engi M. 2017. Petrochronology based on REE-Minerals: Monazite, allanite, xenotime, apatite. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 83 (1): 365-418
- Fisher CM, Vervoort JD and DuFrane SA. 2014. Accurate Hf isotope determinations of complex zircons using the “laser ablation split stream” method. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 15 (1): 121-139
- Gan BP, Diwu CR, Wang BL and Wang TY. 2019. Geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic granites from the Helanshan region: Constrains on the formation and evolution of khondalite belt in the western North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 35 (8): 2325-2343 (in Chinese with English abstract)
- Gao LZ, Zhang CH, Yin CY, Shi XY, Wang ZQ, Liu YM, Liu PJ, Tang F and Song B. 2008. SHRIMP zircon ages: Basis for refining the chronostratigraphic classification of the Meso- and Neoproterozoic strata in North China old land. Acta Geoscientica Sinica, 29 (3): 366-376 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Zhou XW, Wang XS and Ren LD. 2009. Late-Paleoproterozoic granite events and their geological significance in Helanshan area, Inner Mongolia: Evidence from geochronology. Acta Petrologica Sinica, 25 (8): 1830-1842 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Yang CH, Du LL, Ren LD and Song HX. 2018. Late Neoarchean magmatism and crustal growth in eastern Hebei: Constraint from geochemistry, zircon U-Pb ages and Hf isotope. Acta Petrologica Sinica, 34 (4): 1058-1082 (in Chinese with English abstract)
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithos, 61 (3-4): 237-269
- Grimes CB, Wooden JL, Cheadle MJ and John BE. 2015. “Fingerprinting” tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon. Contributions to Mineralogy and Petrology, 170 (5-6): 46
- Hao LR, Yang DB, Xu WL, Mu MS, Quan YK, Yang HT and Wang AQ. 2020. Late Neoarchean magmatism and crustal growth in northeastern North China Craton: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotope, trace elements and whole rock geochemistry. Acta Petrologica Sinica, 36 (4): 1076-1090 (in Chinese with English abstract)
- Hawkesworth CJ and Kemp AIS. 2006. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. Chemical Geology, 226 (3-4): 144-162
- Hietpas J, Samson S, Moecher D and Schmitt AK. 2010. Recovering tectonic events from the sedimentary record: Detrital monazite plays in high fidelity. Geology, 38 (2): 167-170
- Itano K, Iizuka T, Chang Q, Kimura JI and Maruyama S. 2016. U-Pb chronology and geochemistry of detrital monazites from major African rivers: Constraints on the timing and nature of the Pan-African Orogeny. Precambrian Research, 282: 139-156
- Itano K, Ueki K, Iizuka T and Kuwatani T. 2020. Geochemical discrimination of monazite source rock based on machine learning techniques and multinomial logistic regression analysis. Geosciences, 10 (2): 63
- Jochum KP, Weis U, Stoll B, Kuzmin D, Yang QC, Raczek I, Jacob DE, Stracke A, Birbaum K, Frick DA, Günther D and Enzweiler J. 2011. Determination of reference values for NIST SRM 610-617 glasses following ISO guidelines. Geostandards and Geoanalytical Research, 35 (4): 397-429
- Kang JL, Zhai MG, Guo JH, Wang HC, Zhou YY, Zhao L, Liou P and Peng P. 2024. Continental crust and general tectonic framework of the North China Craton: A synopsis. In: Zhai MG, Peng P, Zhou YY and Zhao L (eds.). Early Continent Evolution of the North China Craton. Amsterdam: Elsevier, 1-43
- Lan ZW. 2022. Authigenic monazite and xenotime Pb-Pb/U-Pb dating of siliciclastic sedimentary rocks. Earth-Science Reviews, 234: 104217
- Li DP, Chen YL, Xue GL, Kang H, Yu Y, Geng JZ, Zhang YL and Li T. 2020. Initiation of modern-style subduction in the Neoarchean: From plume to subduction with frequent slab break-off. GSA Bulletin, 132 (9-10): 2119-2134
- Li SZ, Zhao GC, Santosh M, Liu X and Dai LM. 2011. Palaeoproterozoic tectonothermal evolution and deep crustal processes in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: A review. Geological Journal, 46 (6): 525-543
- Li WJ, Yin CQ, Long XP, Zhang J, Xia XP and Wang LJ. 2017. Paleoproterozoic S-type granites from the Helanshan Complex in Inner Mongolia: Constraints on the provenance and the Paleoproterozoic evolution of the khondalite belt, North China Craton. Precambrian Research, 299: 195-209
- Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 10 (4): Q04010
- Li XH, Long WG, Li QL, Liu Y, Zheng YF, Yang YH, Chamberlain KR, Wan DF, Guo CH, Wang XC and Tao H. 2010. Penglai zircon megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf-O isotopes and U-Pb age. Geostandards and Geoanalytical Research, 34 (2): 117-134
- Li XH, Tang GQ, Gong B, Yang YH, Hou KJ, Hu ZC, Li QL, Liu Y and Li WX. 2013. Qinghu zircon: A working reference for microbeam analysis of U-Pb age and Hf and O isotopes. Chinese Science Bulletin, 58 (36): 4647-4654
- Li ZH, Liu XM, Dong YP and Xiao ZB. 2013. Geochemistry and zircon U-Pb age of the Paleoproterozoic syn-collisional granites in Helanshan region and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 29 (7): 2405-2415 (in Chinese with English abstract)
- Liou P, Guo JH, Huang GY and Fan WB. 2019. 2.9Ga magmatism in

- Eastern Hebei, North China Craton. *Precambrian Research*, 326: 6-23
- Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4): 339-342
- Liu FL, Liu PH, Wang F, Liu CH and Cai J. 2015. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2816-2846 (in Chinese with English abstract)
- Liu J, Zhang J, Liu ZH, Liu XG, Cheng CQ, Wang ZG, Zhao C and Yu HC. 2022. Origin of the ca. 3.1 Ga Luanjiajie rock assemblage in the northeastern margin of the North China Craton: New constraints on the Mesoproterozoic geodynamic regime. *Precambrian Research*, 376: 106697
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu CH, Yang H, Liu PH, Wang F and Meng E. 2013. The growth, reworking and metamorphism of early Precambrian crust in the Jiaobei terrane, the North China Craton: Constraints from U-Th-Pb and Lu-Hf isotopic systematics, and REE concentrations of zircon from Archean granitoid gneisses. *Precambrian Research*, 224: 287-303
- Liu ZC, Wu FY, Yang YH, Yang JH and Wilde SA. 2012. Neodymium isotopic compositions of the standard monazites used in U-Th-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 334: 221-239
- Lu SN and Li HM. 1991. A precise U-Pb single zircon age determination for the volcanics of Dahongyu Formation, Changcheng System in Jixian. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Science*, 22: 137-146 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Zhao GC, Wang HC and Hao GJ. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, 160(1-2): 77-93
- Lu SN, Li HK and Xiang ZQ. 2010. Advances in the study of Mesoproterozoic geochronology in China: A review. *Geology in China*, 37(4): 1002-1013 (in Chinese with English abstract)
- Lü C, Wang H, Yang JH, Ran J, Zhou BQ and Wu YD. 2024. Eoarchean evolution of the North China Craton: Zircon Hf-O isotopic evidence of the ca. 3.8 Ga gneiss from eastern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 40(3): 689-701 (in Chinese with English abstract)
- Meng FC, Tian YL, Kerr AC, Wang QJ, Chen Y, Zhou YQ and Yang F. 2022. Neoproterozoic reworking of Mesoproterozoic and Paleoproterozoic crust (3.4 ~ 3.0 Ga) within the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes from the basement of the Bohai Bay Basin. *Precambrian Research*, 369: 106497
- Nutman AP, Wan YS, Du LL, Friend CRL, Dong CY, Xie HQ, Wang W, Sun HY and Liu DY. 2011. Multistage Late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei. *Precambrian Research*, 189(1-2): 43-65
- Pang LY, Gao XY, Sun QY, Hu B and Zhao TP. 2019. Petrogenesis of the Paleoproterozoic Huangqikou granitic rocks from the middle part of the Helanshan area and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2344-2362 (in Chinese with English abstract)
- Paton C, Hellstrom J, Paul B, Woodhead J and Hergt J. 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(12): 2508-2518
- Piazolo S, Belousova E, la Fontaine A, Corcoran C and Cairney JM. 2017. Trace element homogeneity from micron- to atomic scale: Implication for the suitability of the zircon GJ-1 as a trace element reference material. *Chemical Geology*, 456: 10-18
- Santosh M, Yang QY, Teng XM and Tang L. 2015. Paleoproterozoic crustal growth in the North China Craton: Evidence from the Lüliang Complex. *Precambrian Research*, 263: 197-231
- Sláma J, Košler J, Condon DJ, Crowley JL, Gerdes A, Hancher JM, Horstwood MSA, Morris GA, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett MN and Whitehouse MJ. 2008. Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1-2): 1-35
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3-4): 311-324
- Song YH, Yang FC, Yan GL, Wei MH and Shi SS. 2016. SHRIMP U-Pb ages and Hf isotopic compositions of Paleoproterozoic granites from the eastern part of Liaoning Province and their tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2620-2636 (in Chinese with English abstract)
- Spencer CJ, Murphy JB, Kirkland CL, Liu YB and Mitchell RN. 2018. A Paleoproterozoic tectono-magmatic lull as a potential trigger for the supercontinent cycle. *Nature Geoscience*, 11(2): 97-101
- Sun HY, Xie HQ, Liu SJ, Dong CY, Liu DY and Wan YS. 2016. Archean magmatism and metamorphism in the Huangbaiyu-Yangyashan area, eastern Hebei Province: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating. *Geological Bulletin of China*, 35(1): 27-42 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345
- Tang GQ, Li XH, Li QL, Liu Y, Ling XX and Yin QZ. 2015. Deciphering the physical mechanism of the topography effect for oxygen isotope measurements using a Cameca IMS-1280 SIMS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 30(4): 950-956
- Tian ZH and Nutman AP. 2022. Structural restoration of an Eo-Mesoproterozoic (3.8 ~ 2.9 Ga) terrane, Eastern China, dissected by the Tanlu fault zone. *Journal of Structural Geology*, 161: 104629
- Tomaschak PB, Krogstad EJ and Walker RJ. 1996. U-Pb monazite geochronology of granitic rocks from Maine: Implications for Late Paleozoic tectonics in the northern Appalachians. *The Journal of Geology*, 104(2): 185-195
- Valley JW, Kinny PD, Schulze DJ and Spicuzza MJ. 1998. Zircon megacrysts from kimberlite: Oxygen isotope variability among mantle melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133(1-2): 1-11
- Valley JW, Lackey JS, Cavosie AJ, Clechenko CC, Spicuzza MJ, Basei MAS, Bindeman IN, Ferreira VP, Sial AN, King EM, Peck WH, Sinha AK and Wei CS. 2005. 4.4 billion years of crustal maturation: Oxygen isotope ratios of magmatic zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150(6): 561-580
- Wan YS, Zhang YH, Williams IS, Liu DY, Dong CY, Fan RL, Shi YR and Ma MZ. 2013. Extreme zircon O isotopic compositions from 3.8 to 2.5 Ga magmatic rocks from the Anshan area, North China Craton. *Chemical Geology*, 352: 108-124
- Wan YS, Ma MZ, Dong CY, Xie HQ, Xie SW, Ren P and Liu DY. 2015. Widespread late Neoproterozoic reworking of Meso- to Paleoproterozoic continental crust in the Anshan-Benxi area, North China Craton, as documented by U-Pb-Nd-Hf-O isotopes. *American Journal of Science*, 315(7): 620-670
- Wan YS, Xie HQ, Wang HC, Liu SJ, Chu H, Xiao ZB, Li Y, Hao GM, Li PC, Dong CY and Liu DY. 2021a. Discovery of Early Eoarchean-Hadean zircons in eastern Hebei, North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 277-291 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Xie HQ, Wang HC, Li PC, Chu H, Xiao ZB, Dong CY, Liu SJ, Li Y, Hao GM and Liu DY. 2021b. Discovery of ~3.8 Ga TTG rocks in eastern Hebei, North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 95: 1321-1333 (in Chinese with English abstract)
- Wang F, Liu FL, Liu PH, Cai J, Schertl HP, Ji L, Liu LS and Tian ZH. 2017. In situ zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of metasedimentary rocks from South Liaohe Group, Jiao-Liao-Ji orogenic belt: Constraints on the depositional and metamorphic ages, and implications for tectonic setting. *Precambrian Research*, 303: 764-780
- Wang H, Yang JH, Kröner A, Zhu YS, Wei QD, Li R and Xu L. 2020a. Extensive magmatism and metamorphism at ca. 3.2 Ga in the

- eastern Kaapvaal Craton. *Precambrian Research*, 351: 105952
- Wang H, Yang JH, Zhu YS, Huang C, Xu L, Wu ST and Liu Y. 2022. Archean crustal growth and reworking revealed by combined U-Pb-Hf-O isotope and trace element data of detrital zircons from ancient and modern river sediments of the eastern Kaapvaal Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 320: 79-104
- Wang H, Yang YH and Yang JH. 2022. A review of progress in Microbeam Lu-Hf isotopic analysis on minerals. *Rock and Mineral Analysis*, 41(6): 881-905 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Yang JH, Zhu YS, Xu L, Huang C, Wu ST, Yang YH and Xie LW. 2026. U-Pb ages, trace elements and Hf-O isotopes of Eoarchean detrital zircons from the Caozhuang quartzite, North China Craton: Implications for crustal evolution of early Earth. *Precambrian Research*, 440: 108113
- Wang Y, Zhou QM, Zhang JL and Zhou GF. 2022. Neoarchean crustal accretion in western Shandong Province: Evidence from granite and monzogranite U-Pb chronology, Hf isotope and rock geochemistry. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52(2): 463-485 (in Chinese with English abstract)
- Wang YF, Li XH, Jin W and Zhang JH. 2015. Eoarchean ultra-depleted mantle domains inferred from ca. 3.81Ga Anshan trondhjemitic gneisses, North China Craton. *Precambrian Research*, 263: 88-107
- Wang YF, Li XH, Jin W, Zeng LS and Zhang JH. 2020b. Generation and maturation of Mesoarchean continental crust in the Anshan Complex, North China Craton. *Precambrian Research*, 341: 105651
- Wiedenbeck M, Hanchar JM, Peck WH, Sylvester P, Valley J, Whitehouse M, Kronz A, Morishita Y, Nasdala L, Fiebig J, Franchi I, Girard JP, Greenwood RC, Hinton R, Kita N, Mason PRD, Norman M, Ogasawara M, Piccoli PM, Rhede D, Satoh H, Schulz-Dobrick B, Skår O, Spicuzza MJ, Terada K, Tindle A, Togashi S, Vennemann T, Xie Q and Zheng YF. 2004. Further characterisation of the 91500 zircon crystal. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 9-39
- Wu FY, Zhang YB, Yang JH, Xie LW and Yang YH. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton. *Precambrian Research*, 167(3-4): 339-362
- Wu LG, Li XH, Ling XX, Yang YH, Li CF, Li YL, Mao Q, Li QL and Putlitz B. 2019a. Further characterization of the RW-1 monazite: A new working reference material for oxygen and neodymium isotopic microanalysis. *Minerals*, 9(10): 583
- Wu ST, Wörner G, Jochum KP, Stoll B, Simon K and Kronz A. 2019b. The preparation and preliminary characterisation of three synthetic andesite reference glass materials (ARM-1, ARM-2, ARM-3) for in situ microanalysis. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 43(4): 567-584
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569
- Yuan LL, Liu J, Zhang XH, Yang ZL, Zhang H and Li HB. 2020. Late Neoarchean magmatism and crustal growth in northern Liaoning: Evidence from zircon U-Pb geochronology and petro-geochemistry of the Qingyuan trondhjemites. *Acta Petrologica Sinica*, 36(2): 333-355 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 2015. *Precambrian Geology of China*. Heidelberg: Springer, 87-90
- Zhai MG. 2019. Tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 722-745 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Tian H, Li HK, Su WB, Zhou HY, Xiang ZQ, Geng JZ and Yang LG. 2015. Age, geochemistry and zircon Hf isotope of the alkaline basaltic rocks in the middle section of the Yan-Liao aulacogen along the northern margin of the North China Craton: New evidence for the breakup of the Columbia Supercontinent. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 3129-3146 (in Chinese with English abstract)
- Zhao C, Liu J, Zhang HX, Zhang C, Chen JS, Cui DD and Zhang JR. 2025. Low-pressure ~3.53Ga trondhjemite in the Eastern Hebei: Implications on the continental nucleus formation of the North China Craton. *Precambrian Research*, 417: 107668
- Zhao GC and Cawood PA. 2012. Precambrian geology of China. *Precambrian Research*, 222-223: 13-54
- Zhao GC, Cawood PA, Li SZ, Wilde SA, Sun M, Zhang J, He YH and Yin CQ. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion. *Precambrian Research*, 222-223: 55-76
- Zhao GC and Zhai MG. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications. *Gondwana Research*, 23(4): 1207-1240
- Zhao RF, Guo JH, Peng P and Liu F. 2011. 2.1Ga crustal remelting event in Hengshan Complex: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf-Nd isotopic study on potassic granites. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1607-1623 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Lu FX, Wang CY, Zhang M, Wang FZ and Li HM. 2004. 3.6Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China Craton. *Geology*, 32(3): 229-232
- Zhou GY, Fisher CM, Luo Y, Pearson DG, Li L, He Y and Wu YB. 2020. A clearer view of crustal evolution: U-Pb, Sm-Nd, and Lu-Hf isotope systematics in five detrital minerals unravel the tectonothermal history of northern China. *GSA Bulletin*, 132(11-12): 2367-2381
- Zhou GY, Pearson DG, Luo Y, Li L, Fisher CM, Li R, Wang W and Wu YB. 2025. Secular evolution of continental crust of the North China Craton constrained by U-Pb and Lu-Hf-O/Sm-Nd isotopic analyses of detrital zircon and monazite in river sediments. *Chemical Geology*, 672: 122515
- Zi JW, Muhling JR and Rasmussen B. 2024. Geochemistry of low-temperature (< 350°C) metamorphic and hydrothermal monazite. *Earth-Science Reviews*, 249: 104668
- ### 附中文参考文献
- 初航, 王惠初, 荣桂林, 常青松, 康健丽, 靳松, 肖志斌. 2016. 冀东地区含大量始太古代碎屑锆石的太古宙锆云母石英岩再次发现及地质意义. *科学通报*, 61(20): 2299-2308
- 董春艳, 王晨, 颜炳强, 白文倩, 万渝生. 2018. 冀东新太古代晚期界岭口闪长岩成因: U-Pb-Nd-Hf-O 同位素研究. *岩石学报*, 34(9): 2793-2810
- 甘保平, 第五春荣, 王伯隆, 王庭怡. 2019. 贺兰山古元古代花岗岩年代学及地球化学特征: 对华北克拉通西部孔兹岩带形成和演化的制约. *岩石学报*, 35(8): 2325-2343
- 高林志, 张传恒, 尹崇玉, 史晓颖, 王自强, 刘耀明, 刘鹏举, 唐烽, 宋彪. 2008. 华北古陆中、新元古代年代地层框架 SHRIMP 锆石年龄新依据. *地球学报*, 29(3): 366-376
- 耿元生, 周喜文, 王新社, 任留东. 2009. 内蒙古贺兰山地区古元古代晚期的花岗岩浆事件及其地质意义: 同位素年代学的证据. *岩石学报*, 25(8): 1830-1842
- 耿元生, 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 宋会侠. 2018. 冀东地区新太古代晚期的岩浆事件与地壳增生: 来自岩石地球化学和锆石年龄及 Hf 同位素的制约. *岩石学报*, 34(4): 1058-1082
- 郝乐燃, 杨德彬, 许文良, 母茂松, 全朕糠, 杨浩田, 王安琪. 2020. 华北克拉通东北部新太古代晚期岩浆作用和地壳增生: 锆石 U-Pb-Hf 同位素、微量元素和地球化学制约. *岩石学报*, 36(4): 1076-1090
- 李正辉, 柳小明, 董云鹏, 肖志斌. 2013. 贺兰山古元古代同碰撞花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代及其地质意义. *岩石学报*, 29(7): 2405-2415
- 刘福来, 刘平华, 王舫, 刘超辉, 蔡佳. 2015. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展. *岩石学报*, 31(10):

2816-2846

- 陆松年, 李惠民. 1991. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年. 中国地质科学院院报, 22: 137-146
- 陆松年, 李怀坤, 相振群. 2010. 中国中元古代同位素地质年代学研究进展述评. 中国地质, 37(4): 1002-1013
- 吕畅, 王浩, 杨进辉, 冉静, 周宝全, 吴亚东. 2024. 华北克拉通始太古代演化——来自冀东 38 亿年片麻岩锆石 Hf-O 同位素的记录. 岩石学报, 40(3): 689-701
- 庞岚尹, 高昕宇, 孙乾迎, 胡波, 赵太平. 2019. 贺兰山中段古元古代黄旗口花岗质岩石的成因及其构造意义. 岩石学报, 35(8): 2344-2362
- 宋运红, 杨凤超, 闫国磊, 魏明辉, 石绍山. 2016. 辽东地区古元古代花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及构造意义. 地质学报, 90(10): 2620-2636
- 孙会一, 颜炳强, 刘守偈, 董春艳, 刘敦一, 万渝生. 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. 地质通报, 35(1): 27-42
- 万渝生, 颜炳强, 王惠初, 刘守偈, 初航, 肖志斌, 李源, 郝光明, 李鹏川, 董春艳, 刘敦一. 2021a. 冀东地区始太古代早期-冥古宙锆石发现. 地质学报, 95(2): 277-291
- 万渝生, 颜炳强, 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. 2021b. 冀东地区 ~3.8 Ga TTG 岩石发现. 地质学报, 95(5): 1321-1333

- 王浩, 杨岳衡, 杨进辉. 2022. 矿物微区 Lu-Hf 同位素分析技术研究进展. 岩矿测试, 41(6): 881-905
- 王跃, 周奇明, 张金龙, 周光峰. 2022. 鲁西地区新太古代地壳增生事件——来自花岗岩和二长花岗岩 U-Pb 年代学、Hf 同位素和岩石地球化学的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 52(2): 463-485
- 袁玲玲, 刘洁, 张晓晖, 杨智荔, 张航, 李宏斌. 2020. 辽北新太古代晚期岩浆热事件与陆壳生长: 来自清原奥长花岗岩的锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据. 岩石学报, 36(2): 333-355
- 翟明国. 2019. 华北克拉通构造演化. 地质力学学报, 25(5): 722-745
- 张健, 田辉, 李怀坤, 苏文博, 周红英, 相振群, 耿建珍, 杨立功. 2015. 华北克拉通北缘 Columbia 超大陆裂解事件: 来自燕辽裂陷槽中部长城系碱性火山岩的地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据. 岩石学报, 31(10): 3129-3146
- 赵瑞幅, 郭敬辉, 彭澎, 刘富. 2011. 恒山地区古元古代 2.1Ga 地壳重熔事件: 钾质花岗岩锆石 U-Pb 定年及 Hf-Nd 同位素研究. 岩石学报, 27(6): 1607-1623