



www.
geojournals.cn/georev

燕辽裂陷槽基底陆壳生长事件

——来自长城系碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素的启示

李文奇^{1, 2)}, 刘汇川^{1, 2)}, 刘小平^{1, 2)}, 于志琪^{1, 2)}, 王艺壬^{1, 2)}, 王莹莹^{1, 2)}

1) 油气资源与探测国家重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京, 102249;

2) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249

内容提要: 华北克拉通大陆地壳生长已有大量研究, 但对于被巨厚沉积盖层覆盖的燕辽裂陷槽基底地壳生长的问题前人讨论较少。笔者等以燕辽裂陷槽基底之上的长城系沉积岩为研究对象, 统计了燕辽裂陷槽内长城系地层中碎屑锆石年龄频谱和 Lu-Hf 同位素数据, 探讨长城系地层沉积年龄、碎屑锆石沉积源区和地壳生长事件等科学问题。同位素年龄将燕辽裂陷槽长城系沉积年龄约束为 1680 Ma, 代表着燕辽裂陷槽的开启时间。燕辽裂陷槽长城系碎屑锆石年龄频谱主要显示为 2.7~2.5 Ga 和 2.2~1.9 Ga 两个阶段, Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 表现为高的正值区间 0.1~34.6。通过对比长城系碎屑锆石与华北克拉通结晶基底的 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM2} 模式年龄数据, 推测燕辽裂陷槽长城系沉积物源为燕辽裂陷槽下伏基底。结合碎屑锆石 U-Pb 定年、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 T_{DM2} 模式年龄数据, 我们认为燕辽裂陷槽下伏基底中元古代前地壳生长有 3 个峰值, 分别为 2.7~2.5 Ga, 2.2~1.9 Ga 和 1.7~1.6 Ga。

关键词: 燕辽裂陷槽; 长城系; 长城群; 碎屑锆石; U-Pb 年龄; Lu-Hf 同位素; 陆壳生长

陆壳生长(也叫陆壳增生)是指幔源岩浆及其产物从地幔中分异出来加入到地壳中成为新生地壳的过程(Santosh and Hofmann, 1994; Alborede, 1998), 主要有水平生长和垂向生长两种方式。水平生长以俯冲作用产生的新生岛弧岩浆为主, 主要发生在增生型大陆碰撞造山带, 岩浆活动强烈; 垂向生长主要以地幔柱形式发生, 主要是地幔柱驱动幔源物质对原有地壳的底垫作用(洪大卫等, 2000)。

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一, 其陆壳经历了多期的地壳增生事件。前人研究发现华北克拉通陆壳可能最早于 4.0~3.8 Ga 形成(Zhai Mingguo et al., 2010), 尤其在华北克拉通中部、南部和东北部区域采集到的元古代和古生代沉积岩中均发现有 3.8~3.7 Ga 的碎屑锆石存在(Li Tang and Santosh, 2018; Zhai Mingguo and Santosh, 2011), 指示了始太古代的地壳生长事件。另外, 目前学者们一致认为全球陆壳的主体形成于 2.8~2.7 Ga, 以大量 TTG 岩系(英云闪长岩—奥长花岗岩—

花岗闪长岩)和火山岩为标志(Zhao Zongbo et al., 1993; Windley, 1995; Goodwin, 1996; Santosh et al., 2010a, 2010b, 2010c, 2010d)。与地球上其他区域一致, 华北克拉通也存在显著的 2.9~2.7 Ga 地壳生长事件(Zhai Mingguo and Santosh, 2011)。例如, Zhai Mingguo 和 Santosh (2011) 总结发现华北克拉通地壳 3.0 Ga 之前的变质镁铁质岩石和火成片麻岩占总体的 15%, 2.5 Ga 后的岩浆岩占 7%, 而在 3.0~2.5 Ga 期间生成的岩浆岩占比 78%, 其中 3.0~2.5 Ga 的岩浆岩又可以分为 2.9~2.7 Ga 和 2.6~2.5 Ga 两个阶段(Zhai Mingguo, 2004; Zhai Mingguo and Santosh, 2011)。现代同位素年代学以及锆石 Hf 同位素数据也证实陆壳生长模式为幕式生长(Santosh and Hofmann, 1994; Condie, 2000)。作为大陆地壳主要成分的花岗质岩石通常富集 Sm-Nd 和 Lu-Hf 同位素, 被认为是古老地壳循环的结果(Allegre and Othman, 1980; Darbyshire and Shepherd, 1994; Liew and Hofmann, 1988)。此

注: 本文为中石油科技创新基金“磷酸盐矿物原位 U-Pb 测定含油气盆地油气成藏期次”项目(编号: 2021DQ02-0103)、国家重点研发计划项目“富氢天然气成藏机制及氢资源分布预测技术”(编号: 2021YFA0719000)和中国石油勘探开发研究院开放基金课题(编号: 2022-KFKT-07)的成果。

收稿日期: 2023-07-19; 改回日期: 2023-11-14; 网络首发: 2024-05-20; 责任编辑: 李明, 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.05.022

作者简介: 李文奇, 男, 1994 年生, 博士研究生, 主要从事岩石地球化学等研究; Email: lwqcup@163.com。通讯作者: 刘汇川, 男, 1986 年生, 副教授, 主要从事构造地质学和岩石地球化学研究; Email: lhc@cup.edu.cn。

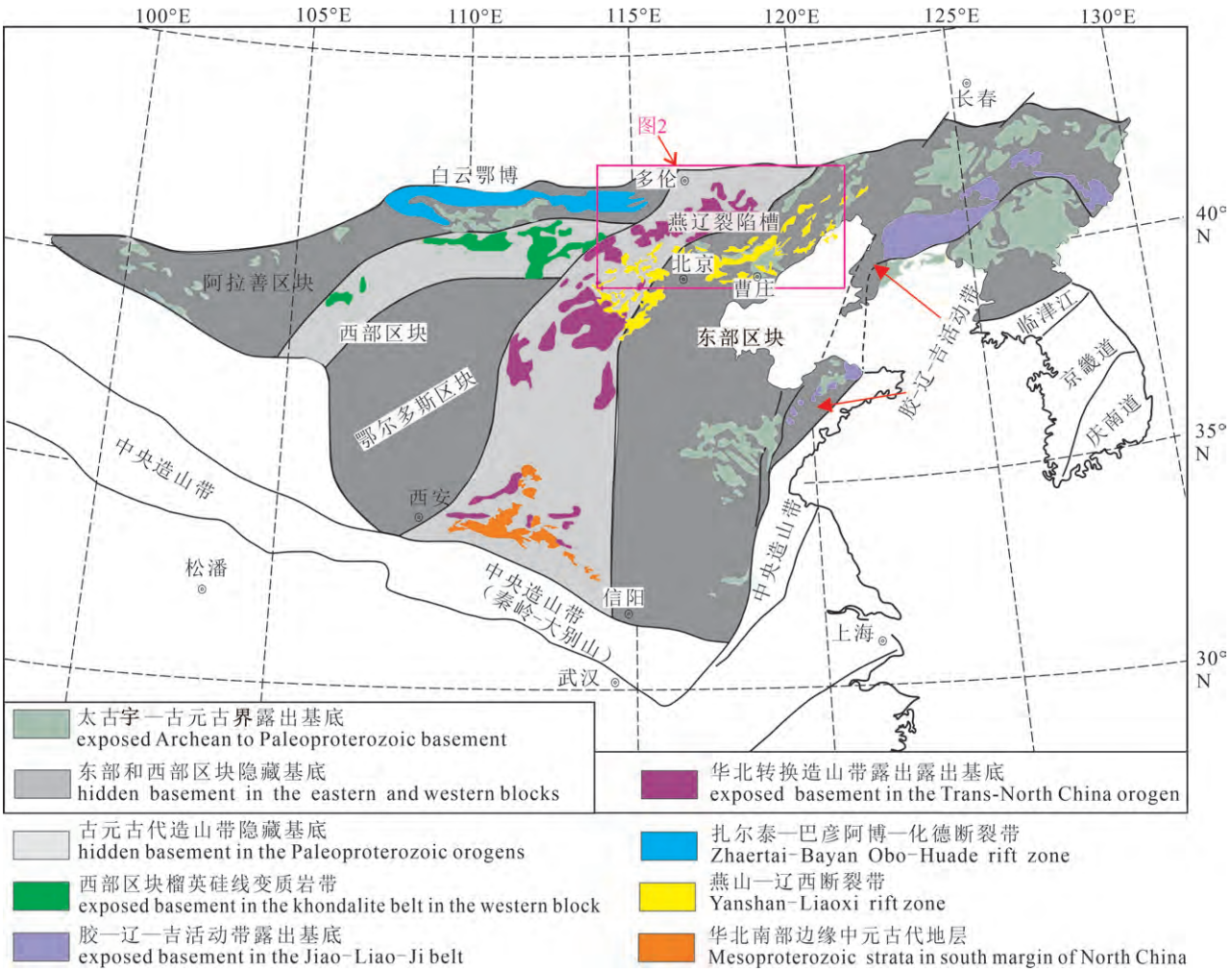


图 1 华北克拉通构造单元划分 (据 Liu Xiaoguang et al., 2019 修改)

Fig. 1 Tectonic framework of the North China Craton (modified from Liu Xiaoguang et al., 2019)

外,前人在对显生宙地壳增生最显著的中央造山带的研究发现大范围分布的新生地壳中的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$ (Geng Yuansheng et al., 2009; Tang Gongjian et al., 2012a, 2012b, 2012c),所以,花岗质岩石较高的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值代表了新生地壳。

碎屑锆石是风化壳和碎屑岩中比较常见的矿物,其物理化学性质稳定,不易被破碎,U-Pb 同位素体系封闭温度高,在低级变质作用和风化作用中能够保持稳定,受后期热事件活动影响小 (Cherniak et al., 1997; Lee et al., 1997; Cherniak and Watson, 2001; Corfu et al., 2003; Ding Jing et al., 2018),并且锆石 U-Pb 定年和 Lu—Hf 同位素示踪实验手段目前成熟可靠 (吴福元等,2007)。锆石 Lu—Hf 同位素组成可以反映初始岩浆的重要信息 (Hawkesworth and Kemp, 2006; Kemp et al.,

2009)。因此,锆石 U-Pb 年龄和 Lu—Hf 同位素结合可以作为地壳生长和循环的关键示踪方法 (Cherniak et al., 2004; Hawkesworth and Kemp, 2006; Santosh et al., 2020)。

华北克拉通出露基底沿华北的南、北缘以及中部即豫晋蒙的中条山、吕梁山、太行山一带分布,在东部即鲁西、胶北至辽东、辽北 (吉南) 也成带分布 (翟明国,2021)。然而,而燕辽裂陷槽基底被上覆巨厚的沉积盖层覆盖,难以通过对基底岩石直接分析来研究华北克拉通陆壳生长长期次问题。所以笔者等围绕燕辽裂陷槽基底地壳生长的期次和形式等问题,以燕辽裂陷槽内分布比较广泛的长城系沉积地层为研究对象,综述长城系沉积岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Lu—Hf 同位素数据特征,来探讨燕辽裂陷槽基底地壳增生事件。

1 地质背景

1.1 华北克拉通构造单元划分

华北克拉通位于欧亚大陆东部,面积约 $1.3 \times 10^6 \text{ km}^2$,经历了复杂的多阶段构造演化,约在 2.5 Ga 完成克拉通化形成稳定的古陆 (Zhai Mingguo et al., 2014)。华北克拉通主要由东部块体、西部块体和中部造山带 (TNCO) 组成 (图 1)。东部块体由太古宙基底和古元古代胶—辽—吉活动带构成,西部块体被古元古代孔兹岩带分割,可细分为阴山区块和鄂尔多斯区块 (Lu Songnian et al., 2008)。东部块体和西部块体在 1.85 Ga 沿近南北向展布的中部造山带 (TNCO) 拼合 (图 1)。此后华北克拉通进入多期次裂谷发育演化阶段,主要发育燕辽裂谷、熊耳裂谷、北缘裂谷和东缘裂谷 (Zhai Mingguo and Peng Peng, 2007)。从古生代起,华北的南、北缘都经历了现代板块构造意义的造山事件,显示了华北克拉通古陆通过古亚洲洋和古秦岭洋与相邻陆块之间的闭合俯冲过程,分别形成了兴蒙造山带和秦岭—大别造山带。北界为中亚 (兴蒙) 造山带,南界为秦岭—大别造山带,西部被祁连造山带切割,东部可达朝鲜半岛,并以苏鲁造山带为边界 (Zhai Mingguo et al., 2014)。

1.2 前寒武主要地层单元介绍

华北克拉通前寒武系地层主要由太古宙—古元古代变质岩基底和上覆的中—新元古代沉积岩层组成 (Lu Songnian et al., 2008)。其基底主要以新元古代 TTG 片麻岩和盖层变质岩为主,古—中太古代基底主要保存在华北克拉通东部,比如河北省东部和辽宁省鞍山市 (Lu Songnian et al., 2008)。发现的古太古代岩群出露范围有限,主要包括冀东曹庄岩组和鞍山白家坟表壳岩系的斜长角闪岩。中太古代岩群多沿华北克拉通北缘的麻粒岩相带分布,包括龙岗岩群、迁西岩群、沂水岩群和桑干杂岩中的基性火山岩等 (耿元生等, 2002)。新太古代岩石作为华北克拉通基底的主体,分布范围广泛,包括登封岩群、太华群、绛县和宋家山岩群、色尔腾山群、五台群、阜平群、恒山杂岩、泰山岩群、双山子及青龙河群、遵化岩群、鞍山岩群以及青原岩群等 (耿元生等, 2002)。古元古代岩层分布则比较局限,主要存在于裂陷槽或坳拉谷中,比如,南北向的熊耳裂陷槽内的中条山和吕梁山地区的中条群、吕梁群、野鸡山群,而近东西向燕辽裂陷槽内的辽河群 (耿元生等, 2002)。中—新元古代沉积岩地层厚度巨大,出露

广泛,层序特征完整。比如,北部燕辽裂陷槽发育连续中元古代地层,自下而上划分为长城系、蓟县系和青白口系;南缘熊耳裂陷槽发育熊耳群、汝阳群、洛峪口群、官道口群和栾川群;北缘裂谷盆地发育狼山群、渣尔泰群、白云鄂博群和化德群等;东缘 Pyongnam 裂谷盆地也发育相当地层 (Zhai Mingguo et al., 2014)。

1.3 前寒武主要岩浆岩和变质岩分布特征

太古代及之前的广泛发育的岩浆事件在引言中我们已有陈述。此外,华北克拉通还发育有 4 期中—新元古代岩浆事件:1.78 Ga 的大火成岩省事件、1.72~1.62 Ga 的非造山岩浆活动、1.37~1.32 Ga 的岩浆活动以及约 900 Ma 的岩浆活动 (Zhai Mingguo et al., 2014)。1.78 Ga 的大火成岩省事件的具体表现主要包括华北克拉通中部的太行—吕梁基性岩墙群、熊耳裂谷火山岩系、1.76~1.73 Ga 的密云—北台基性岩墙群。1.72~1.62 Ga 的非造山岩浆活动的岩浆岩,主要包括发育在华北北部的大庙岩体型斜长岩杂岩体、密云环斑花岗岩、长城系大红峪组火山岩,发育在华北南部的龙王幢 A 型花岗岩以及一些基性岩墙群和碱性岩类等,这些岩石共同构成典型的非造山岩浆岩组合 (Zhai Mingguo et al., 2014)。在河北平泉、兴隆、宽城、下板城、怀来、辽宁的凌源、朝阳以及京西等地区出露出一组辉绿岩席,主要侵入到下马岭组和雾迷山组 (Li Huaikun et al., 2009; Zhang Shuanhong et al., 2012; Zhai Mingguo et al., 2014)。925~890 Ma 岩浆活动主要包括晋冀蒙地区的大石沟大型基性岩墙群和华北东南缘的栾川、储兰、大连以及朝鲜沙里院基性岩床群 (Liu Yongqing et al., 2005; Peng Peng et al., 2011; Wang Xiaolei et al., 2011)。

1.4 燕辽裂陷槽及长城系

1.8 Ga 后华北克拉通由碰撞挤压转变为拉张伸展背景,在此基础上燕山—辽西地区逐渐形成燕辽裂谷 (张健等, 2015),并发育了由长城系、蓟县系和青白口系组成的稳定沉积盖层 (图 2a)。其中的长城系是燕辽裂陷槽中元古代最早的地层,在燕辽裂陷槽地层出露最为完整,地层厚度约为 3000 m。蓟县剖面为其标准剖面,从下到上可划分为常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪组 (图 2b)。

常州沟组岩性以砂岩和砾岩为主,下部为河流相砾岩,中上部为长石石英砂岩、石英砂岩、岩屑石英砂岩以及少量薄层粉砂岩 (陈贤等, 2014);串岭沟组岩性以页岩、粉砂质页岩和白云质细砂岩为主,

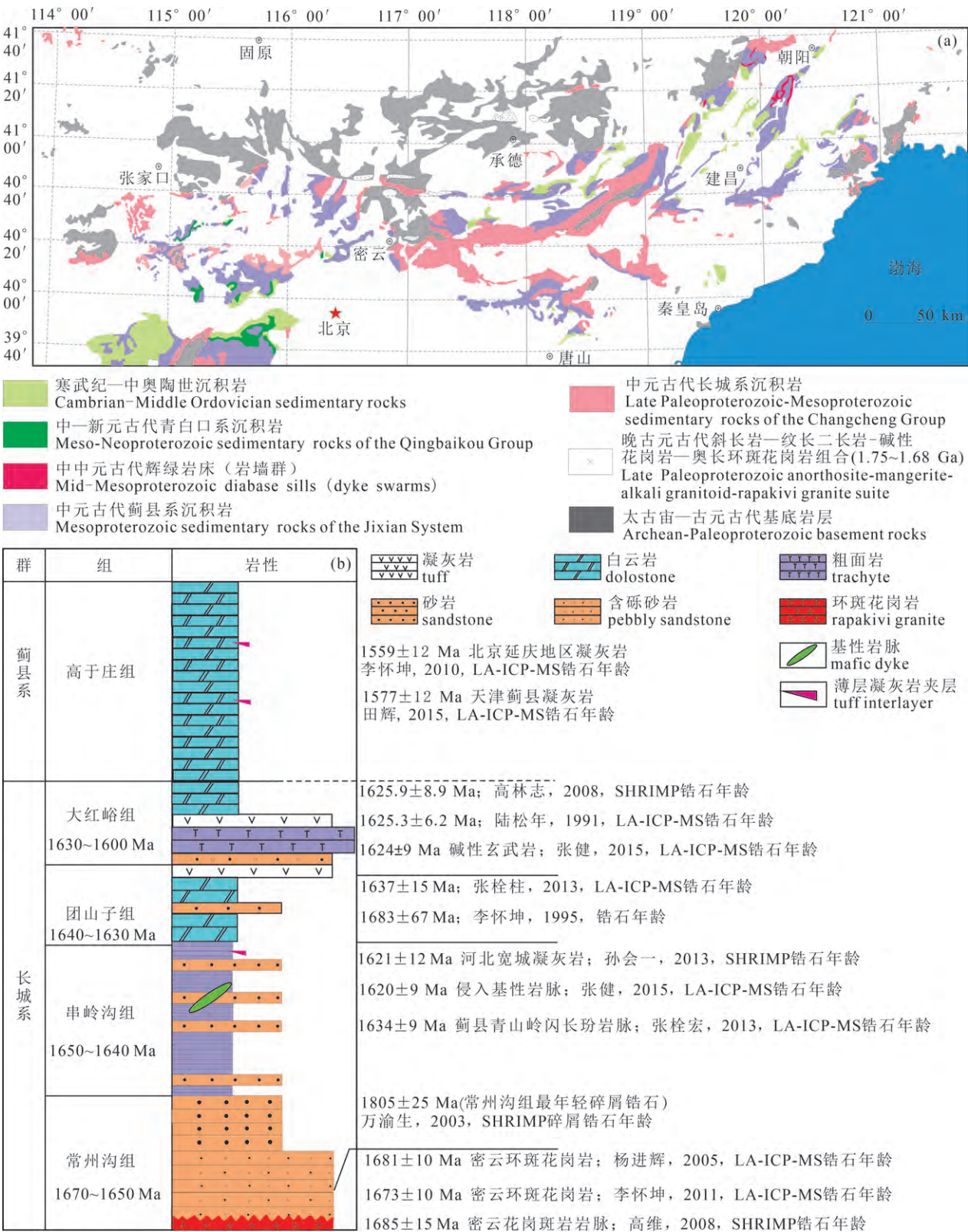


图 2 华北克拉通北缘地质简图(a) (据 Zhang Shuanhong et al. , 2012; Wang Wei et al. , 2013 修改) 以及长城系地层剖面 and 锆石 U-Pb 年龄格架 (b)

Fig. 2 Simplified geological map of the northern margin of the North China Craton (a, modified from Zhang Shuanhong et al. , 2012; Wang Wei et al. , 2013) and stratigraphic column and geochronological framework of the Changcheng Group (Changcheng System) (b)

表 1 兴城地区长城系样品
Table1 The samples of Changcheng System collected
from Xingcheng region

样品 编号	剖面	层位(代号)	岩性	备注
SS-1	首山	大红峪组 (Chd)	石英砂岩	Ch ₁ 上部 Ch ₁ 下部,双重逆冲 推覆构造发育处
SS-2	首山	大红峪组 (Chd)	石英砂岩	
SS-3	首山	团山子组 (Cht)	石英砂岩	
SS-4	首山	团山子组 (Cht)	杂砂岩	
SS-5	首山	串岭沟组 (Chch)	粉砂岩	Chc 上部 Chc 中部
SS-6	首山	串岭沟组 (Chch)	泥质粉砂岩	
SS-7	首山	常州沟组 (Chc)	石英砂岩	
SS-8	首山	常州沟组 (Chc)	砂质泥岩	
SS-9	首山	常州沟组 (Chc)	中砂岩	Ch ₁ 中部 Ch ₁ 中部 Ch ₁ 下部或 Chch 上部? Chch 中上部 Chc 上部 Chc 中部
JSX-1	夹山西	大红峪组 (Chd)	石英砂岩	
JSX-2	夹山西	大红峪组 (Chd)	石英砂岩	
JSX-3	夹山西	大红峪组 (Chd)	石英砂岩	
JSX-4	夹山西	团山子组 (Cht)	石英砂岩	Chc 上部 Chc 中部
JSX-5	夹山西	团山子组 (Cht)	粉砂岩	
JSX-6	夹山西	团山子组 (Cht)	泥质 粉砂岩	
JSX-7	夹山西	串岭沟组 (Chch)	泥岩	
JSX-8	夹山西	串岭沟组 (Chch)	泥质粉砂岩	Chc 上部 Chc 中部
JSX-9	夹山西	常州沟组 (Chc)	中砂岩	
JSX-10	夹山西	常州沟组 (Chc)	粉砂岩	

下部为滨海潮间带灰色粉砂岩和粉砂质页岩,含砂岩透镜体和条带。中部为潮下低能带灰绿色页岩,常含有碳质碎片和星散状黄铁矿;上部以潮间带黑色粉砂质页岩和粉砂岩为主,并夹杂砂岩凸镜体和条带(张健等,2015)。上下两部分受砂岩夹层影响,层理多呈波状起伏。与下伏常州沟组为整合接触(孙会一等,2013;张栓宏等,2013),;团山子组岩性主要是铁质白云岩、泥晶白云岩以及少量粉砂岩,上部地层局部夹火山岩夹层;下部以泻湖相灰黑色含铁白云岩为主,夹板状泥岩和泥质白云岩,白云岩中常见星散状或结核状黄铁矿,风化面呈褐红色,上部以含硅质层黑色含铁白云岩为主,并夹薄厚不等的白云质砂岩,常见岩盐假晶、干裂和浅水波痕,为盐度较高的潮间—潮上带沉积。团山子组与上下地层均为整合接触(张栓宏等,2013);大红峪组岩性为角砾白云岩、长石砂岩和石英砂岩,夹富钾粗面岩和富钾玄武岩等(陆松年和李惠民,1991)。下部以碎屑岩为主,厚层乳白色石英岩状砂岩夹紫红色粉砂岩、含浅绿色硅质条带的含砂白云岩或白云质石英砂岩以及翠绿色富钾页岩,具有韵律式沉积特征;中部以大量富钾基性火山岩熔岩、火山角砾岩和火山集块岩,夹少量石英砂岩和凝灰岩为标志;上部主

要为富黑色、白色燧石的叠层石白云岩,厚层至巨厚层状(张健等,2015)。

2 燕辽裂陷槽长城系样品岩石类型

本文的燕辽裂陷槽长城系沉积岩样品在辽宁兴城夹西山和首山两个剖面采集(图3)。夹西山剖面共采集10个样品,首山剖面采集9个样品,包括(从下到上)常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪组(表1)。

JSX-1、JSX-2 和 JSX-3 为大红峪组石英砂岩,JSX-1 石英 90%,颗粒呈线接触,分选性较差,磨圆度较差,存在石英次生加大边(见照片 JSX-1, 10×5.25, 正交),存在隐晶质燧石,存在气液包裹体。JSX-2 石英 90%,颗粒呈线接触,压实作用较强,分选性差,磨圆度差,存在石英次生加大边,有来自变质岩母岩的石英,具有碎裂结构。JSX-3 石英 95%,接触较差,压实作用较弱,分选、磨圆差,有来自变质岩母岩的石英,具有碎裂结构,存在隐晶质燧石。

JSX-4、JSX-5 和 JSX-6 为团山子组样品。JSX-4 为石英砂岩,石英 80%,接触呈线接触,压实作用较弱,分选性差,磨圆度差,存在石英次生加大边,外形不规则无解理,无双晶,存在长石,有解理。JSX-5 为粉砂岩,石英 90%,颗粒接触较差,分选性较差,磨圆度较差,外形不规则无解理,无双晶。JSX-5 为泥质粉砂岩,石英 80%,颗粒接触较差,压实作用较弱,分选性差,磨圆度差。

JSX-7 和 JSX-8 为串岭沟组样品。JSX-7 为泥岩,黏土矿物 89%,成层性较差,存在部分颗粒,分选性较差,磨圆度较差。JSX-8 为泥质粉砂岩,石英 70%,分选性较差,磨圆度较差,外形不规则无解理,无双晶。

JSX-9 和 JSX-10 为常州沟组样品。JSX-9 为中砂岩,石英 85%,颗粒接触较差,压实作用较弱,分选性差,磨圆度差。JSX-10 为粉砂岩,石英 85%,颗粒接触较差,压实作用较弱,分选性差,磨圆度差。

SS-1 和 SS-2 为大红峪组石英砂岩。SS-1 石英 89%,颗粒呈线接触,压实作用较强,分选性差,磨圆度差,存在石英次生加大边。SS-2 石英 90%,颗粒呈线接触,压实作用较强,分选性差,磨圆度差,存在石英次生加大边。

SS-3 和 SS-4 为团山子组样品。SS-3 为石英砂岩,石英 90%,接触较差,压实作用较弱,分选性差,磨圆度差。SS-4 为杂砂岩,石英 85%,接触呈线接触,压实作用较弱,分选性差,磨圆度差,存在石英次生加大

边,外形不规则无解理,无双晶,存在长石,具有解理。且存在泥质粉砂岩,同时存在细砂岩,为杂砂岩。

SS-5 和 SS-6 为串岭沟组样品。石英 90%,颗粒接触较差,分选性较差,磨圆度较差,外形不规则无解理,无双晶,存在裂缝,且后期充填。SS-5 为粉砂岩,石英 90%,颗粒接触较差,分选性较差,磨圆度

较差,外形不规则无解理,无双晶,存在裂缝,且后期充填。SS-6 为泥质粉砂岩,石英 80%,颗粒接触较差,压实作用较弱,分选性差,磨圆度差。

SS-7,SS-8 和 SS-9 为常州沟组样品。SS-7 为石英砂岩,石英 89%,颗粒呈线接触,压实作用较强,分选性差,磨圆度差,存在石英次生加大边。SS-8



图 3 辽宁兴城夹西山和首山剖面长城系露头

Fig. 3 Photographs of field crops of Changcheng System in Jiaksi Mountain and Shoushan Mountain in Xingcheng region
(a) 常州沟组与太古宙花岗岩角度不整合; (b) 常州沟组底部砾岩; (c) 常州沟组石英砂岩; (d) 串岭沟组底部页岩; (e) 串岭沟组泥页岩和粉砂岩; (f) 团山子组下段钙质砂岩; (g) 团山子组上段白云岩—叠层石; (h) 大红峪组二段含砾石英砂岩; (i) 大红峪组内石英砾岩
(a) The Changzhougou Formation exhibits angular unconformity over the Archean granites; (b) conglomerates at the bottom of the Changzhougou Formation; (c) quartz sandstones of the Changzhougou Formation; (d) shale at the bottom of the Chuanlinggou Formation; (e) mudstones and siltstones of the Chuanlinggou Formation; (f) calcareous sandstone at the lower section of the Tuanshanzi Formation; (g) dolostone and stromatolite at the upper section of the Tuanshanzi Formation; (h) conglomeratic quartz sandstone at the Second Member of the Dahongyu Formation; (i) quartz sandstones of the Dahongyu Formation

为砂质泥岩,黏土含量 75%,石英 21%,分选性较差,磨圆度较差,外形不规则无解理,无双晶。SS-9 为中砂岩,石英 70%,分选性较差,磨圆度较差,外形不规则无解理,无双晶。

3 碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Lu—Hf 同位素

3.1 碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱

笔者等统计了前人文献中的长城系碎屑锆石

U-Pb 同位素年龄数据 (高林志等, 2008; Lu Songnian et al. , 2008; 李怀坤等, 2011; 任荣等, 2011; Gao Linzhi et al. , 2011; Wan Yusheng et al. , 2011; 孙会一, 2013; 张栓宏等, 2013; 张健等, 2015; Wang Wei et al. , 2015; Zhang Yanbin et al. , 2015; Ding Jing et al. , 2018; Liu Xiaoping et al. , 2021) (如图 6 所示)。常州沟组样品岩性主要为石英砂岩,共统计 453 个数据点,Th/U 比值均>0.1,其年龄峰值为 2.7~2.5 Ga,最年轻的碎屑锆石年龄为

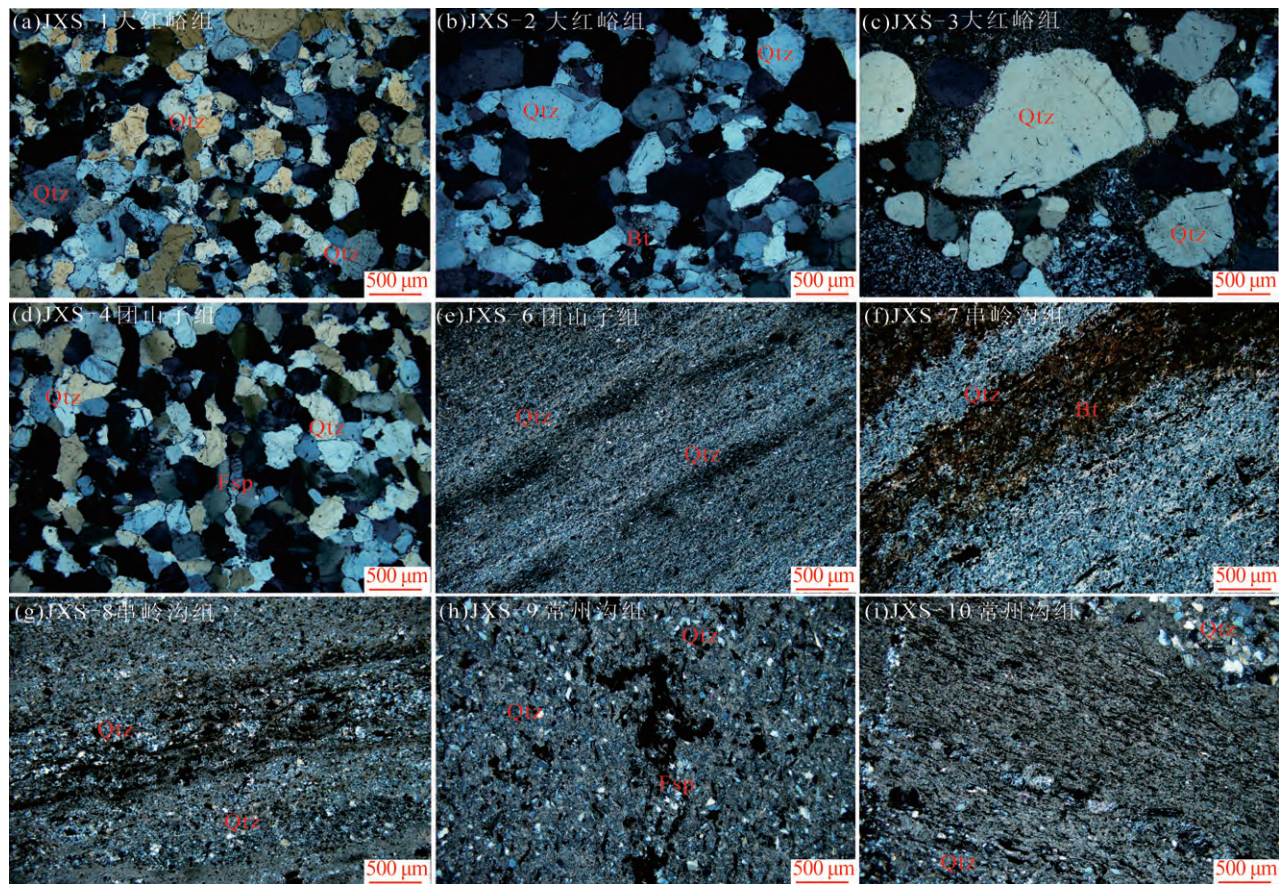


图 4 辽宁省兴城地区夹西山剖面长城系沉积岩显微照片

Fig. 4 Micrographs of sedimentary rocks from Changcheng System on the Jiaksi Mountain profile in Xingcheng region, Liaoning
Qtz—石英; Bt—黑云母; Fsp—长石
Qtz—quartz; Bt—biotite; Fsp—feldspar

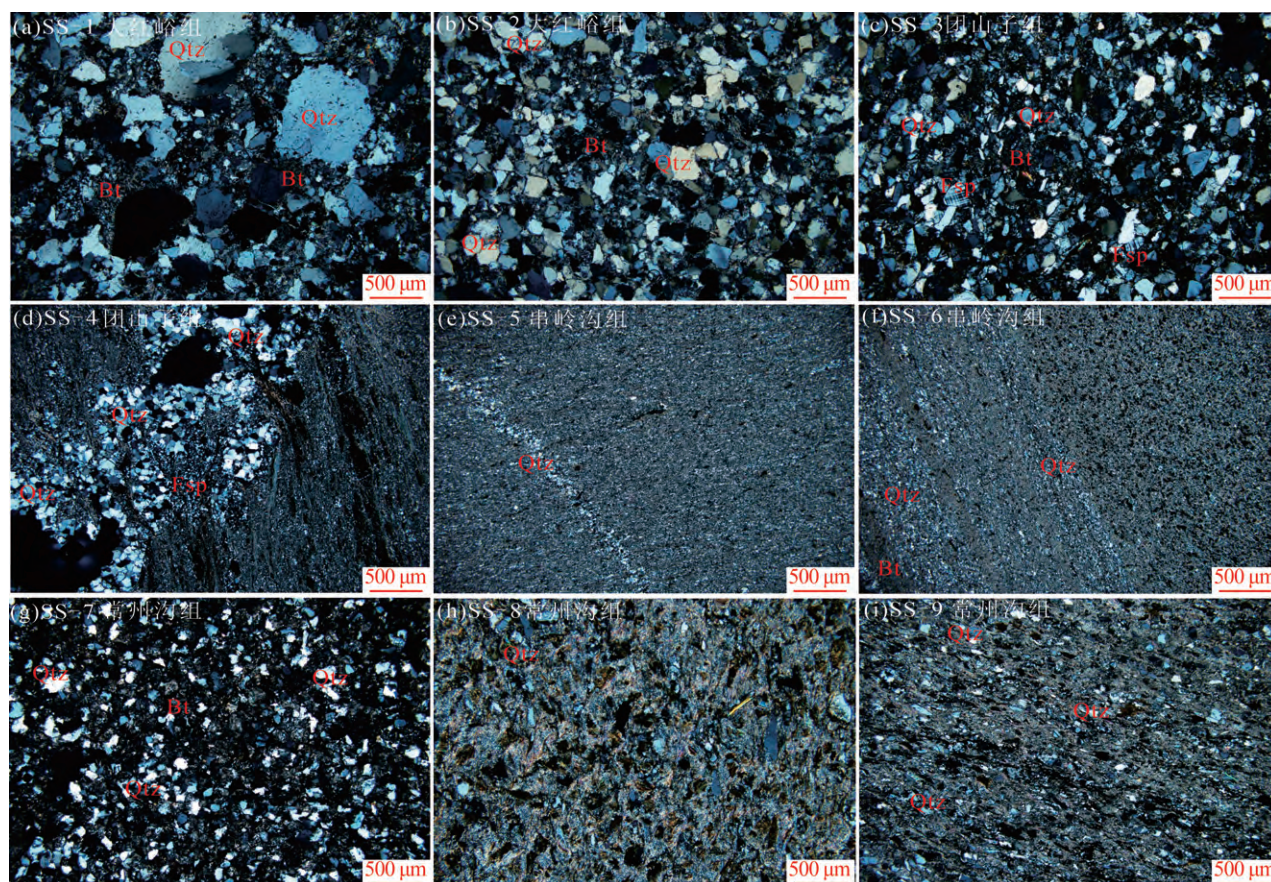


图 5 辽宁省兴城地区首山剖面长城系样品薄片照片

Fig. 5 Micrographs of sedimentary rocks from Changcheng System on the Shoushan Mountain profile in Xingcheng region, Liaoning Province

Qtz—石英; Bt—黑云母; Fsp—长石

Qtz—quartz; Bt—biotite; Fsp—feldspar

1805±25 Ma。串岭沟组样品岩性主要为石英砂岩,共统计数据 655 个,Th/U 比值均>0.1,锆石年龄频谱有 2.7~2.5 Ga 和 2.2~1.9 Ga 两个峰值,最年轻的碎屑锆石年龄为 1673±44 Ma。团山子组样品岩性主要为石英砂岩,共统计数据 296 个,Th/U 比值均>0.1,锆石年龄频谱峰值为 2.7~2.5 Ga。大红峪组样品岩性主要为石英砂岩,碎屑锆石 U-Pb 同位素数据点 147 个,Th/U 比值均>0.1,锆石年龄频谱有 2.7~2.5 Ga 和 2.2~1.9 Ga 两个峰值,最年轻的碎屑锆石年龄为 1829±33 Ma。

3.2 Lu—Hf 同位素

根据长城系沉积岩碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄数据(图 6),长城系沉积岩碎屑锆石年龄主要分为有 3 个期次:2.7~2.5 Ga、2.2~1.8 Ga 和 1.7~1.6 Ga。

2.7~2.5 Ga 时期,碎屑锆石有常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪组 4 个组完整的 Lu—Hf 同

位素数据(图 7)。常州沟锆石有 230 组 Lu—Hf 同位素数据样品点,锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布为 -12.0~17.4,其中 70%样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值>0,主要集中在 0~10 区间,其二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 分布范围为 3.4~2.3 Ga,峰值主要集中在 2.9~2.7 Ga(图 8)。串岭沟组锆石有 15 个 Lu—Hf 同位素数据样品点, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布范围 6.8~22.9,表现为高的正值特征,其二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 分布范围为 2.7~1.7 Ga(图 8)。团山子组 2.7~2.5 Ga 锆石有 55 个 Lu—Hf 同位素数据样品点,锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布为 -3.8~8.0,仅有两个样品点为负值,主要集中在 0~15.0 区间,其二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 分布范围为 2.9~2.1 Ga,峰值主要集中在 2.8~2.6 Ga(图 8)。大红峪组锆石有 59 个 Lu—Hf 同位素数据样品点, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布范围在 -6.7~34.6,其中 85%样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值>0,主要集中在 5.0~15.0 区间,其二阶

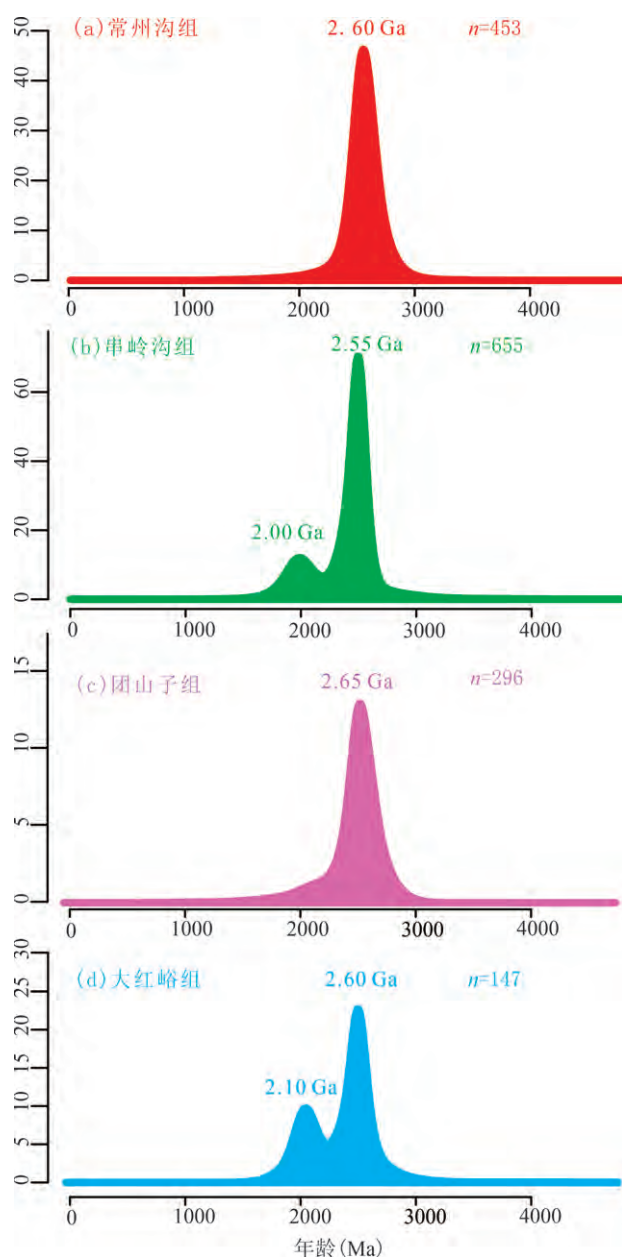


图6 燕辽裂陷槽长城系碎屑锆石 U-Pb 年龄统计分布频谱图 (数据据高林志等, 2008; Lu Songnian et al., 2008; 李怀坤等, 2011; 任荣等, 2011; Gao Linzhi et al., 2011; Wan Yusheng et al., 2011; 孙会一等, 2013; 张栓宏等, 2013; 张健等, 2015; Wang Wei et al., 2015; Zhang Yanbin et al., 2015; Ding Jing et al., 2018; Liu Xiaoping et al., 2021)

Fig. 6 U-Pb age distribution column of the detrital zircons of the Changcheng System in the Yanliao intracontinental rift (data from Gao Linzhi et al., 2008&, 2011; Lu Songnian et al., 2008; Li Huaikun et al., 2011&; Ren Rong et al., 2011&; Sun Huiyi et al., 2013&; Zhang Shuanhong et al., 2013&; Zhang Jian et al., 2015&; Wan Yusheng et al., 2011; Wang Wei et al., 2015; Zhang Yanbin et al., 2015; Ding Jing et al., 2018; Liu Xiaoping et al., 2021)

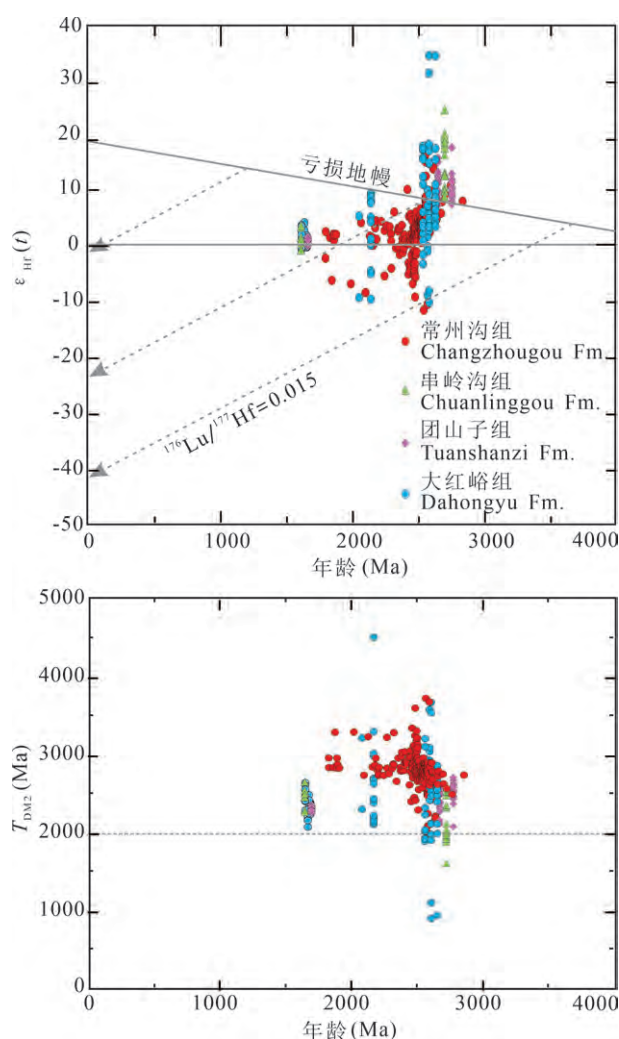


图7 燕辽裂陷槽长城系锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ —年龄和 T_{DM2} —年龄关系图解 (数据据任荣等, 2011; 张健等, 2015; Wan Yusheng et al., 2011; Wang Wei et al., 2015; Liu Xiaoping et al., 2021)

Fig. 7 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ —age and T_{DM2} —age diagrams of the zircons from the Changcheng System in the Yanliao intracontinental rift (data from Ren Rong et al., 2011&; Zhang Jian et al., 2015&; Wan Yusheng et al., 2011; Wang Wei et al., 2015; Liu Xiaoping et al., 2021)

段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 分布范围为 3.6~1.9 Ga, 主体集中在 2.9~2.6 Ga。

2.2~1.8 Ga 碎屑锆石有常州沟组和大红峪组 Lu—Hf 同位素数据 (图 9)。常州沟组锆石有 21 个 Lu—Hf 同位素数据样品点, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布为 -8.3~4.7, 主要集中在 0~5.0 区间, 其两阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 分布范围为 3.3~2.7 Ga。大红峪组锆石有 21 个组 Lu—Hf 同位素数据样品点, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布为 -8.3~4.7, 主要集中在 -10.0~10.0 区间, 其

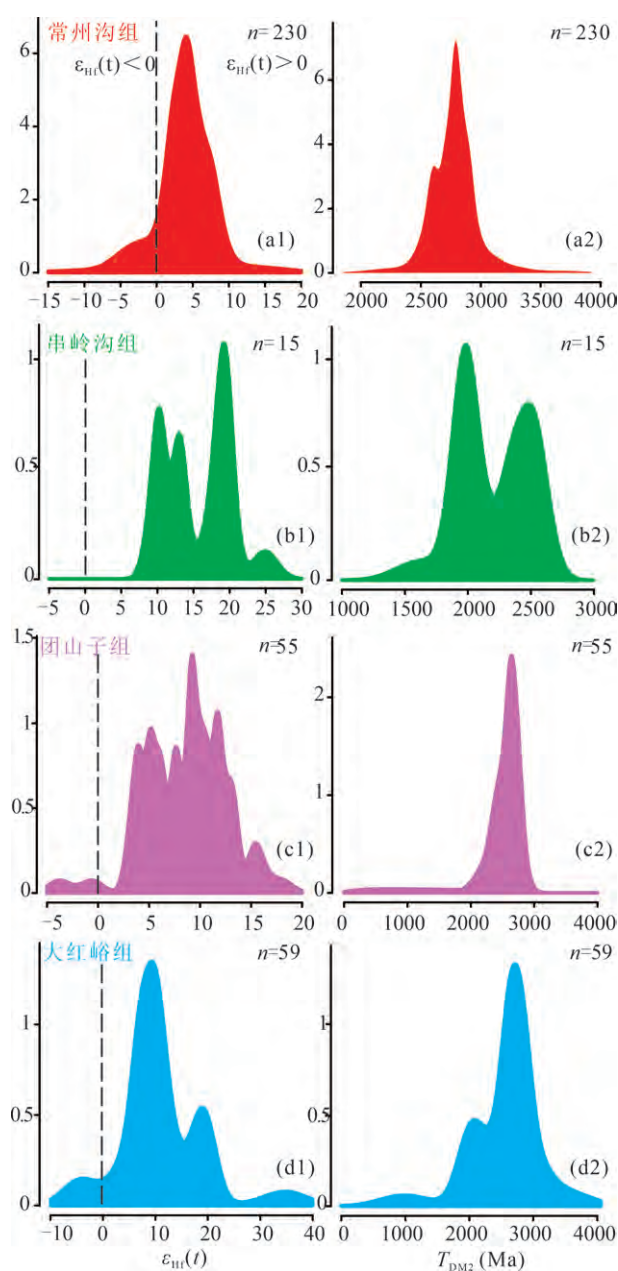


图8 燕辽裂陷槽长城系 2.7~2.5 Ga 碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM2} 频谱图 (数据据任荣等, 2011; 张健等, 2015;

Wan Yusheng et al., 2011; Wang Wei et al., 2015; Liu Xiaoping et al., 2021)

Fig. 8 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and T_{DM2} spectrums of the detrital zircon at 2.7~2.5 Ga of the Changcheng System in the Yanliao intracontinental rift (data from Ren Rong et al., 2011&; Zhang Jian et al., 2015&; Wan Yusheng et al., 2011; Wang Wei et al., 2015; Liu Xiaoping et al., 2021)

两阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 分布范围为 3.3~2.1 Ga。

1.7~1.6 Ga 碎屑锆石有串岭沟组、团山子组和大红峪组 Lu—Hf 同位素数据(图 10)。串岭沟组锆

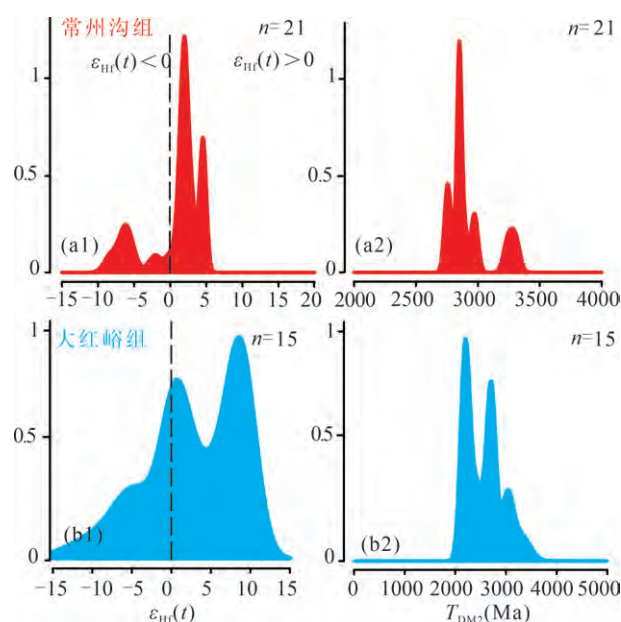


图9 燕辽裂陷槽长城系 2.2~1.8 Ga 碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM2} 频谱图 (数据据任荣等, 2011;

Wan Yusheng et al., 2011; Wang Wei et al., 2015; Liu Xiaoping et al., 2021)

Fig. 9 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and T_{DM2} spectrums of the detrital zircon at 2.2~1.8 Ga of the Changcheng System in the Yanliao intracontinental rift (data from Ren Rong et al., 2011&; Wan Yusheng et al., 2011; Wang Wei et al., 2015; Liu Xiaoping et al., 2021)

石有 16 个 Lu—Hf 同位素数据样品点, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布为 -0.6~3.8, 其二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 分布范围为 2.7~2.3 Ga。团山子组锆石有 25 个 Lu—Hf 同位素数据样品点, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布为 0.2~1.8, 其两阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 分布范围为 2.4~2.2 Ga。大红峪组锆石有 62 个 Lu—Hf 同位素数据样品点, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布为 -2.1~4.3, 其两阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 分布范围为 2.6~2.2 Ga。

4 讨论

4.1 长城系地层沉积年龄限定

长城系是燕辽拗陷槽最早的沉积记录, 对夹于地层中的火山岩开展锆石 U—Pb 年龄测定可以直接限定沉积地层的沉积年龄。依据火山岩夹层的锆石 U—Pb 年龄数据, 我们可以对华北克拉通中元古代燕辽裂陷槽中元古界标准剖面地层年代格架底部进行精确的划分。李怀坤等(1995)和张栓宏等(2013)通过对团山子组上部的钾质火山岩夹层锆石 U—Pb 年龄测定, 分别得到了 1683 ± 67 Ma 和 1637 ± 15 Ma

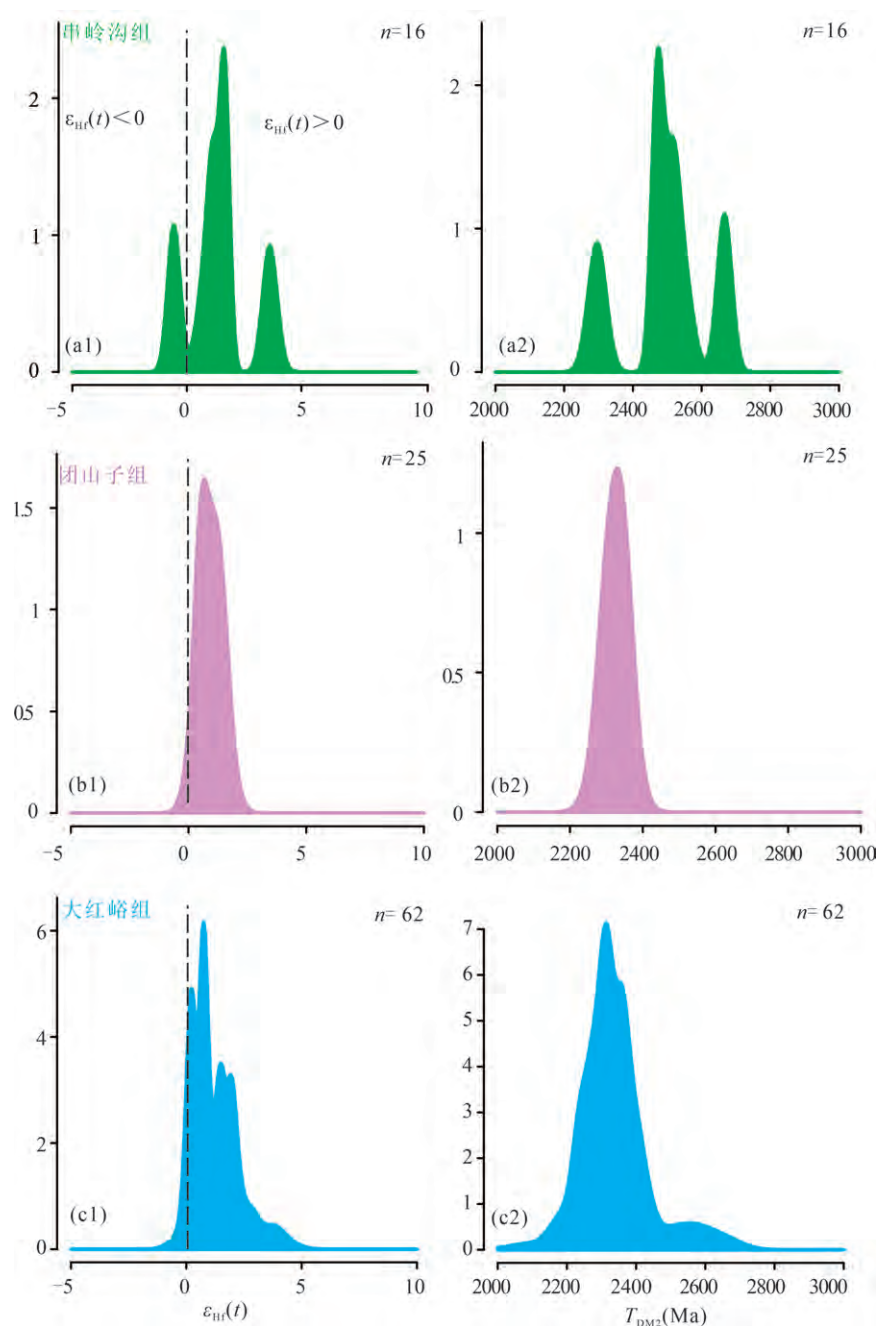


图10 燕辽裂陷槽长城系 1.7~1.6 Ga 碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM2} 频谱图 (数据据张健等, 2015; Wan Yusheng et al., 2011; Wang Wei et al., 2015; Liu Xiaoping et al., 2021)

Fig. 10 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and T_{DM2} spectrums of the detrital zircon at 1.7~1.6 Ga of the Changcheng System in the Yanliao intracontinental rift (data from Zhang Jian et al., 2015& Wan Yusheng et al., 2011; Wang Wei et al., 2015; Liu Xiaoping et al., 2021)

两组结果,以此限定了团山子组上部的沉积年龄,并指示团山子组顶界年龄小于 1637 Ma。团山子组上部大红峪组火山岩锆石年龄则多集中在 1625 Ma (陆松年和李惠民, 1991; 高林志等, 2008; 张健等, 2015), 这指示团山子组沉积年龄早于 1625 Ma。此

外,李怀坤等(2010)在北京延庆地区高于庄组三段上部凝灰岩中获得的 1559 ± 12 Ma (SHRIMP) 的锆石 U-Pb 年龄和 1560 ± 5 Ma (LA-MC-ICP-MS) 的 U-Pb 年龄,田辉等(2015)在天津蓟县东水厂村附近中元古代高于庄组三段(即张家峪亚组)下部发现凝灰岩夹层,其锆石 U-Pb 年龄为 1577 ± 12 Ma,结合北京延庆高于庄组顶部凝灰岩锆石 U-Pb 年龄(1560 ± 5 Ma)推断整个燕山地区高于庄组三段主体的沉积时限在 1560~1580 Ma,将高于庄组与大红峪组的界线年龄限定为 1600 Ma 左右。

Ding Jing 等(2018)对串岭沟组底部碎屑锆石 LA-ICP-MS 年龄测定为 1673 ± 44 Ma,说明串岭沟组沉积年龄应在 1673 Ma 之后。孙会一等(2013)获得河北宽城串岭沟组凝灰岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 1621 ± 12 Ma。张健等(2015)获得侵入串岭沟组基性岩脉的 SHRIMP 年龄 1620 ± 9 Ma; 张栓宏等(2013)对蓟县青山岭侵入位于串岭沟组地层内闪长玢岩脉锆石年龄 LA-ICP-MS 测定为 1634 ± 9 Ma; 高林志等(2009)获得串岭沟组基性侵入体辉绿岩床 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 1638 ± 14 Ma,因此串岭沟组地层沉积应发生在 1638 Ma 之前。

长城系底界(同样也是常州沟组底界)年龄的确定对于研究华北克拉通中元古代构造演化以及全球古—中元古代地层对比均具有重要意义。目前常州沟组和串岭沟组没有发现火山岩夹层,

其沉积年龄无法直接确定。已有研究表明常州沟组最年轻的碎屑锆石年龄为 1805 ± 25 Ma (Wan Yusheng et al., 2003, 2011),说明长城系常州沟组底界年龄小于 1.8 Ga,对之前长城系地层底界年龄在 1.8 Ga 左右或更早的认识有了更进一步的限定

(Lu Songnian et al., 2008)。另外,长城系下伏的环斑花岗岩与常州沟组呈不整合接触关系,学者们对环斑花岗岩的锆石年龄进行了研究。李怀坤等(2011)在北京市密云大龙门村发现的花岗斑岩岩脉与其围岩被常州沟组沉积覆盖。杨进辉等(2005)、高维等(2008)和李怀坤等(2011)分别对北京密云环斑花岗岩锆石研究获得了 1681 ± 10 Ma (LA-ICP-MS)、 1685 ± 15 Ma (SHRIMP) 和 1673 ± 10 Ma (LA-ICP-MS) 等三组年龄数据,并认为密云环斑花岗岩形成于非造山伸展环境,可能代表了燕辽裂谷的启动和华北中元古代沉积的起点。和政军等(2011)在北京密云地区发现环斑花岗岩(脉)上发育有古风化壳,并被长城系常州沟组砂岩覆盖,其碎屑锆石 U-Pb 年龄值为 1682 ± 20 Ma 和 1703 ± 20 Ma, 这套古风化壳的存在和测年结果将常州沟组底界沉积年龄限定在 1682 Ma 以后。此外,学者们在华北克拉通东北缘密云—承德—建平识别出一条规模巨大的岩浆岩带(长达 500 km),其形成年龄范围在 1680~1750 Ma 之间,并且所有的岩浆岩体都没有侵入到长城系的沉积盖层中(Liu Xiaoping et al., 2021)。上述的证据表明长城系底界的沉积年龄应该晚于 1680~1750 Ma 的岩浆岩体,即晚于 1680 Ma。

4.2 源区示踪

沉积岩中的碎屑组分是物源区岩石风化、剥蚀、搬运和沉积一系列过程的产物。碎屑锆石抗风化、磨损能力强,很好地保存了源区母岩的年龄记录,所以碎屑锆石年代学可以很好地约束沉积物源区分布范围,有助于更好地理解物源区、区域古地理、沉积年龄以及不同碎屑所属地层之间的构造关系(Hu Bo et al., 2009; Wan Yusheng et al., 2011; Ding Jing et al., 2018)。

根据长城系地层碎屑锆石年龄频谱统计结果(图 6),长城系碎屑锆石的年龄主要为新太古代晚期和古元古代晚期,有 2.7~2.5 Ga 和 2.1~1.9 Ga 两个年龄峰值。华北克拉通 2.7 Ga 年龄数据主要分布在山东东部和西部,部分分布在张家口、固阳县和阜平县等地区。新太古代晚期岩浆岩广泛分布于东部块体、西部块体和中部造山带(TNCO),其年龄范围在 2.55~2.48 Ga (Guo Rongrong et al., 2013; Li Shanshan et al., 2016; Santosh et al., 2016, 2020; Shi Yurong et al., 2012; Li Tang and Santosh, 2018),与在 2.52~2.50 Ga 期间经历过变质的 TTG 岩石表现出相似的年代相关性。类似的 2.5 Ga 构造—岩浆事件也广泛发生在印度南部和南极洲克拉

通以及其他同时代的克拉通(Jayananda et al., 2020)。根据长城系碎屑锆石与结晶基底年龄相似性与一致性可以推测燕辽坳拉槽中—新元古代沉积物源为华北克拉通内部的岩体(Wan Yusheng et al., 2011)。此外,笔者等采集的长城系沉积岩样品磨圆度很差,且斜长石含量很低,说明 2.7~2.5 Ga 碎屑锆石更有可能是直接来源于燕辽裂陷槽基底本身。锆石 Lu—Hf 同位素特征也可以很好地验证这一点。大部分长城系 2.7~2.5 Ga 碎屑锆石 Hf 同位素表现为高的正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,与广泛分布的 2.7~2.5 Ga 岩浆岩 Hf 同位素特征相似。例如,登封群长英质岩石年龄为 2.75~2.48 Ga,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 5.0~9.7 之间(Shi Kangxing et al., 2019)。沂水杂岩中的花岗岩(2.54~2.49 Ga) $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 -2.5~5.0 之间,其新太古代模式年龄为 2.92~2.70 Ga (Li Shanshan et al., 2016; Santosh et al., 2017)。辽宁省北部的新太古代花岗岩组合包括 TTG 岩和钾质花岗岩年龄范围在 2.59~2.50 Ga 之间,显示出较高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值 0.5~8.7,其模式年龄在 2.84~2.54 Ga 之间(Wang Wei et al., 2017)。

华北克拉通部分 2.2~1.9 Ga 长英质火山岩广泛出露在大青山、河北西北部、五台、吕梁、中条山和大石桥等地。2.0~1.8 Ga 岩石则广泛分布在内蒙古缝合带中的孔兹岩带(Santosh, 2010)、中部造山带(TNCO)杂岩以及辽宁省古元古代变质—火山—沉积建造中(Li Wei et al., 2018; Li Tang and Santosh, 2018; Zhao Guochun et al., 2005)。在内蒙古—河北北部造山带发现有大量 2.2~1.90 Ga 花岗岩存在,在山西天镇和吕梁山识别出 2.0 Ga 花岗岩侵入(Kusky and Li Jianghai, 2003)。在华北克拉通西部孔兹岩的深部重熔和变质形成了大量 S 型花岗岩。Liu Chaohui 等(2014)在吕梁杂岩中识别出了 2.2 Ga 的高镁安山岩、富铌玄武—安山岩和埃达克岩,其代表着古元古代的俯冲。上述古元古代岩浆岩大多数锆石表现出正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,均与长城组 2.2~1.9 Ga 碎屑锆石特征相同(Li Shanshan et al., 2018; Liu Chaohui et al., 2014; Li Tang and Santosh, 2018)。通过对比燕辽裂陷槽长城系碎屑锆石与华北克拉通岩浆岩中锆石年龄频谱和 Lu—Hf 同位素特征,我们推测长城系 2.2~1.9 Ga 锆石同样来源于燕辽裂陷槽基底本身。

4.3 地壳生长与构造演化

锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值被认为是年轻地壳增生的标志(Jahn, 2004; Kemp et al., 2007; Kemp et al.,

2005)。综合燕辽裂陷槽长城系地层的锆石 U-Pb 定年和 Lu—Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM2} 模式年龄数据分析,长城系统统计的碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 >0 , $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主要分布范围在 $0.1 \sim 34.6$ 之间。同时碎屑锆石 T_{DM2} 模式年龄与其结晶年龄范围 $2.7 \sim 1.6$ Ga 比较接近, T_{DM2} 范围在 $2.9 \sim 2.0$ Ga 之间。因此,我们推测在新太古代—古元古代时期燕辽裂陷槽基底主要经历了 $2.7 \sim 2.5$ Ga 和 $2.2 \sim 1.9$ Ga 两期地壳生长事件。 $2.7 \sim 2.5$ Ga 期次可以进一步细分为 $2.75 \sim 2.60$ Ga 和 2.5 Ga 两期。其中 $2.75 \sim 2.60$ Ga 期次地壳增生主要受到岛弧—地幔柱交互作用的控制 (Guo Xiaofei et al., 2016; Li Shanshan et al., 2016; Santosh et al., 2017; Li Tang and Santosh, 2018), 同时包含水平生长和垂向生长 (地幔柱) 两种方式。而 2.5 Ga 期次地壳增生主要表现为洋壳俯冲形式 (Li Shanshan et al., 2016; Santosh et al., 2016, 2017), 主要由水平生长控制。 $2.2 \sim 1.9$ Ga 地壳生长可以进一步划分为 $2.2 \sim 2.0$ Ga 和 $2.0 \sim 1.9$ Ga 两个期次。 $2.2 \sim 2.0$ Ga 期次地壳增生主要与洋壳俯冲和东西部地块的拼合过程有关 (Liu Chaohui et al., 2014; Li Tang and Santosh, 2018; Zhou Ligang et al., 2017), 主要表现为水平生长形式。 $2.00 \sim 1.90$ Ga 期次地壳生长事件形成于碰撞后伸展环境, 可以归于水平生长形式。

古元古代 ($1.71 \sim 1.62$ Ga) 期间火山岩侵入岩体在华北克拉通广泛存在 (Liu Jianfeng et al., 2016; Lu Songnian et al., 2002; Sun Zhenjun et al., 2017; Wang Wei et al., 2013; Wang Wei et al., 2015; Xia Linqi et al., 2013), 在长城系前人也有发现。从图 7、图 8、图 9 中我们可以发现, $1.71 \sim 1.62$ Ga 火山岩和侵入岩体锆石同样具有 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 正值。据此我们推测在晚古元古代时期 ($1.71 \sim 1.62$ Ga) 华北克拉通有可能也经历了一次地壳生长事件。Wang Wei 等 (2015) 认为哥伦比亚超大陆最终聚合后的造山后环境中岩石圈的分层引发了 $1.71 \sim 1.62$ Ga 岩浆岩的形成 (Wang Wei et al., 2015)。因此, $1.71 \sim 1.62$ Ga 期次地壳生长可以归因于板内背景下的垂直增生。

结合锆石 U-Pb 定年和锆石 Lu—Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM2} 模式年龄数据认为华北克拉通燕辽裂陷槽新元古代—古元古代地壳生长与演化主要经历了 3 个主要阶段, 分别为 $2.7 \sim 2.5$ Ga, $2.2 \sim 1.9$ Ga 和 $1.7 \sim 1.6$ Ga。Zhai Mingguo 和 Santosh (2011) 提出华北克拉通前寒武时期的地壳增生与稳定主要与

3 期关键地质事件相关, 包括 2.7 Ga 地壳生长的主要阶段; 2.5 Ga 微板块的聚合与克拉通化; 以及 $2.0 \sim 1.82$ Ga 古元古代裂谷—俯冲—聚合—碰撞构造事件及随后的麻粒岩相高级变质—花岗岩变质。华北克拉通北部地壳生长与演化见于 4.2 部分, 结果显示燕辽裂陷槽与华北克拉通北部地壳生长事件与演化基本保持一致。第五春荣 (2021) 对华北克拉通南部太古宙大陆地壳研究发现, 华北克拉通南部太古代地壳生长主要包括 2.76 Ga 和 2.52 Ga 两个主要阶段, 包括一期发生在 $2.85 \sim 2.70$ Ga 左右, 以形成于此时期的涑水杂岩中花岗质岩石和鲁山太华片麻岩系中深成侵入岩和斜长角闪岩为代表; 另一期发生在 $2.58 \sim 2.48$ Ga, 以登封杂岩、涑水杂岩以及小秦岭地区太华杂岩中 2.52 Ga 各类花岗质岩石和变基性岩为代表。结合锆石年龄, 华北克拉通南部和北部基底总体上显示出类似的地壳生长阶段。同样在华北克拉通西部的基底地壳生长研究中, 张成立等 (2018) 综合华北克拉通西部陆块阴山地块、孔兹岩带和鄂尔多斯地块基底正、副片麻岩以及鄂尔多斯地块现代河流沙锆石, 鄂尔多斯基底及盖层继承碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素统计研究发现, 该陆块存在古、中太古代陆壳物质, 自新太古代以来先后发生了新太古代 2.7 Ga、 $2.55 \sim 2.45$ Ga 以及古元古代 $2.2 \sim 2.0$ Ga 和 $1.95 \sim 1.85$ Ga 等多期构造热事件。通过对比华北克拉通北部、南部和西部陆块的基底地壳生长与演化进程发现, 华北克拉通总体体现出类似的地壳演化过程, 但在具体的地壳生长事件的时间稍有差异。

5 结论

笔者等统计了前人文献中的燕辽裂陷槽长城系碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Lu—Hf 同位素数据, 得出以下认识:

(1) 燕辽裂陷槽长城系碎屑锆石年龄频谱指示 $2.7 \sim 2.5$ Ga 和 $2.2 \sim 1.9$ Ga 两个主要阶段, Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 表现为高的正值区间 $0.1 \sim 34.6$ 之间。

(2) 结合锆石 U-Pb 定年和锆石 Lu—Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM2} 模式年龄数据认为华北克拉通燕辽裂陷槽新太古代—古元古代地壳生长有 3 个期次, 分别为 $2.7 \sim 2.5$ Ga, $2.2 \sim 1.9$ Ga 和 $1.7 \sim 1.6$ Ga。

致谢: 感谢前人对燕辽裂陷槽长城系碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Lu—Hf 同位素等的大量研究; 感谢审稿专家提出的宝贵意见, 诸多建设性意见使本文质量得以提高。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈贤, 张传恒, 刘家军, 特古斯. 2014. 蓟县常州沟组沉积特征及其地质意义. 地层学杂志, 38(2): 236~244.
- 第五春荣. 2021. 华北克拉通南部太古宙大陆地壳的生长和演化. 岩石学报, 37: 317~340.
- 杜利林, 杨崇辉, 任留东, 宋会侠, 耿元生, 万渝生. 2012. 吕梁地区 2.2~2.1 Ga 岩浆事件及其构造意义. 岩石学报, 28(9): 2751~2769.
- 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.
- 高林志, 张传恒, 刘鹏举, 丁孝忠, 王自强, 张彦杰. 2009. 华北~江南地区中、新元古代地层格架的再认识. 地球学报, 30(4): 433~446.
- 高维, 张传恒, 高林志, 史晓颖, 刘耀明, 宋彪. 2008. 北京密云环斑花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义. 地质通报, 27(6): 793~798.
- 耿元生, 万渝生, 沈其韩. 2002. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生. 地质学报, 76(2): 199~208.
- 和政军, 牛宝贵, 张新元, 赵磊, 刘仁燕. 2011. 北京密云元古宙常州沟组之下环斑花岗岩古风化壳岩石的发现及其碎屑锆石年龄. 地质通报, 30(05): 798~802.
- 洪大卫, 王式, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\varepsilon(\text{Nd}, t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地学前缘, 7(2): 441~456.
- 胡波, 翟明国, 郭敬辉, 彭澎, 刘富, 刘爽. 2009. 华北克拉通北缘化德群中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其构造意义. 岩石学报, 25(1): 193~211.
- 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 1995. 长城系团山子组火山岩颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地球化学, 24(1): 43~48+101.
- 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 孙立新, 相振群, 耿建珍, 周红英. 2009. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约. 地质通报, 28(10): 1396~1404.
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨锋杰. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束. 岩石学报, 26(7): 2131~2140.
- 李怀坤, 苏文博, 周红英, 耿建珍, 相振群, 崔玉荣, 刘文灿, 陆松年. 2011. 华北克拉通北部长城系底界年龄小于 1670 Ma: 来自北京密云花岗岩斑岩岩脉锆石 LA~MC~ICPMS U-Pb 年龄的约束. 地学前缘, 18(3): 108~120.
- 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: 138~146.
- 孙会一, 高林志, 包创, 陈岳龙, 刘敦一. 2013. 河北宽城中元古代串岭沟组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质学报, 87(4): 591~596.
- 田辉, 张健, 李怀坤, 苏文博, 周红英, 杨立公, 相振群, 耿建珍, 刘欢, 朱士兴. 2015. 蓟县中元古代高于庄组凝灰岩锆石 LA~MC~ICPMS U-Pb 定年及其地质意义. 地球学报, 36(5): 647~658.
- 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 2003. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限制. 科学通报, 48(18): 1970~1975.
- 王凯怡, Wilde S A. 2002. 山西五台地区大洼梁花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 精确年龄. 岩石矿物学杂志, 21(4): 407~411.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu—Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 186~220.
- 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 谢烈文. 2005. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义. 岩石学报, 21(6): 1633~1644.
- 翟明国. 2021. 鄂尔多斯地块是破解华北早期大陆形成演化和构造体制谜团的钥匙. 科学通报, 66: 3441~3461.
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通元古代构造事件. 岩石学报, 23(11): 2665~2682.
- 翟明国, 胡波, 彭澎, 赵太平. 2014. 华北中—新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件. 地学前缘, 21(1): 100~119.
- 张成立, 苟龙龙, 第五春荣, 刘欣雨, 赵觉, 胡育华. 2018. 华北克拉通西部基底早前寒武纪地质事件、性质及其地质意义. 岩石学报, 4: 981~998.
- 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.
- 张拴宏, 赵越, 叶浩, 胡健民, 吴飞. 2013. 燕辽地区长城系串岭沟组及团山子组沉积时代的新制约. 岩石学报, 29(7): 2481~2490.
- 赵宗溥, 翟明国, 王凯怡. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京: 科学出版社: 389~390.
- Alborede. 1998. The growth of continental crust. Tectonophysics, 296: 1~14.
- Allegre C J, Othman D B. 1980. Nd—Sr isotopic relationship in granitoid rocks and continental crust development——A chemical approach to orogenesis. Nature, 286(5771): 335~342.
- Chen Xian, Zhang Chuanheng, Liu Jiajun, Te Gusi. 2014&. Fluvial Facies in the Changzhou Formation in the Jixian Area of China and Geological Significance. Journal of stratigraphy, 38(2): 236~244.
- Cherniak D J, Hanchar J M, Watson E B. 1997. Diffusion of tetravalent cations in zircon. Contributions to Mineralogy & Petrology, 127(4): 383~390.
- Cherniak D J, Watson E B. 2001. Pb diffusion in zircon. Chemical Geology, 172: 5~24.
- Condie K C. 2000. Episodic continental growth models: afterthoughts and extensions. Tectonophysics, 322(1): 153~162.
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 53: 469~500.
- Darbyshire D P F., Shepherd T J. 1994. Nd and Sr Isotope Constraints on the Origin of the Cornubian Batholith, Sw England. Journal of the Geological Society, 151(5): 795~802.
- Ding Jing, Shi Yurao, Kroner A, Anderson J L. 2018. Constraints on sedimentary ages of the Chuanlinggou Formation in the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: LA-ICP-MS and SHRIMP U - Pb dating of detrital zircons. Acta Geochimica, 37(2): 257~280.
- Du Lilin, Yang Chonghui, Guo Jinghui, Wang Huicu, Wang Wei, Ren Liudong, Wan Yusheng and Geng Yuansheng. 2010. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite. Chinese Science Bulletin, 55(17): 1782~1789.
- Du Lilin, Yang Chonghui, Ren Liudong, Song Huixia, Geng Yuansheng, Wan Yusheng. 2012&. The 2.2~2.1 Ga magmatic event and its tectonic implication in the Lüliang Mountains, North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 28(9): 2751~2769.

- Du Lilin, Yang Chonghui, Wang Wei, Ren Liudong, Wan Yusheng, Wu Jiashan, Zhao Lei, Song Huixia, Geng Yuansheng, Hou Kejun. 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.
- Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Yin Chongyu, Shi Xiaoying, Wang Ziqiang, Liu Pengju, Tang Feng, Song Biao. 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): 336~376.
- Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Liu Pengju, Ding Xiaozhong, Wang Ziqiang, Zhang Yanjie. 2009&. Recognition of Meso- and Neoproterozoic Stratigraphic Framework in North and South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(4): 433~446.
- Gao Wei, Zhang Chuanheng, Gao Linzhi, Shi Xiaoying, Liu Yaoming, Song Biao. 2008&. Zircon SHRIMP U-Pb age of rapakivi granite in Miyun, Beijing, China, and its tectono-stratigraphic implications. *Geological Bulletin of China*, 27(6): 793~798.
- Geng Yuansheng, Wan Yusheng, Shen Qihan. 2002&. Early Precambrian Basic Volcanism and Crustal Growth in the North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 192~208.
- GengYuansheng., Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wenjiao, Xian Weisheng, Zhao Guochun, Zhang Lifei, Wong Kenny, Wu Fuyuan. 2009. Geochemical, Sr—Nd and zircon U—Pb—Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? *Chemistry Geology*, 266(3~4): 364~389.
- Goodwin A M. 1996. Principles of precambrian geology. London: Academic Press; 1~327.
- Guo Rongrong, Liu Shuwen, Santosh M., Li Qiugen, Bai Xiang, Wang Wei. 2013. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Lu—Hf isotopes of metavolcanics from eastern Hebei reveal Neoproterozoic subduction tectonics in the North China Craton. *Gondwana Research*, 24(2): 664~686.
- Guo Xiaofei, Wang Yuejun, Liu Huichuan, Zi Jianwei. 2016. Zircon U-Pb Geochronology of the Cenozoic Granitic Mylonite along the Ailaoshan—Red River Shear Zone: New Constraints on the Timing of the Sinistral Shearing. *Journal of Earth Science*, 27(3): 435~443.
- Hawkesworth C J, Kemp A I S. 2006. Using hafnium and oxygen isotopes in zircon to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 226(3~4): 144~162.
- He Zhengjun, Niu Baogui, Zhang Xinyuan, Zhao Lei, Liu Renyan. 2011&. Discovery of the paleo-weathered mantle of the rapakivi granite covered by the Proterozoic Changzhou Formation in the Miyun area, Beijing and their detrital zircon dating. *Geological Bulletin of China*, 30(5): 798~802.
- Hong Dawei, Wang Shi, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 2000&. Genesis of Positive $\varepsilon(\text{Nd}, t)$ Granitoids in the Da Hinggan Mts. —Mongolia Orogenic Belt and Growth Continental Crust. *Geoscience Frontiers*. 7(2): 441~456.
- Hu Bo, Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Peng Peng, Liu Fu, Liu Shuang. 2009&. LA-ICP-MS U-Pb Geochronology of Detrital Zircons from the Huade Group in the Northern Margin of the North China Craton and its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 193~211.
- Jahn B M. 2004. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. Geological Society, London, Special Publications, 226: 73~100.
- Jayananda M, Aadhiseshan K R, Kusiak M A, Wilde S A, Sekhama K U, Guitreau M, Santosh M, Gireesh R V. 2020. Multi-stage crustal growth and Neoproterozoic geodynamics in the Eastern Dharwar Craton, southern India. *Gondwana Research*, 78: 228~260.
- Kemp A I S, Foster G L, Schersten A, Whitehouse M J, Darling J, Storey C. 2009. Concurrent Pb—Hf isotope analysis of zircon by laser ablation multi-collector ICP-MS, with implications for the crustal evolution of Greenland and the Himalayas. *Chemical Geology*, 261(3~4): 244~260.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, Paterson BA, Woodhead J D, Hergt J M, Gray C M, Whitehouse M J. 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf—O isotopes in zircon. *Science*, 315(5814): 980~983.
- Kemp A I S, Wormald R J, Whitehouse M J, Price R C. 2005. Hf isotopes in zircon reveal contrasting sources and crystallization histories for alkaline to peralkaline granites of Temora, southeastern Australia. *Geology*, 33(10): 797~800.
- Kusky T M, Li Jianghai. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383~397.
- Kroener A, Wilde S A, Li Jianghai, Wang Kaiyi. 2005. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 577~595.
- Lee J K, Williams I S, Ellis D J. 1997. Pb, U and Th diffusion in natural zircon. *Nature*, 390: 159~162.
- Li Huaikun, Li Huimin, Lu Songnian. 1995&. Crain Zircon U-Pb Ages for Volcanic Rocks from Tuanshanzi Formation of Changcheng System and Their Geological Implications. *Geochimica*, 24(1): 43~48.
- Li Huaikun, Su Wenbo, Zhou Hongying, Geng Jianzhen, Xiang Zhenqun, Cui Yurong, Lu Songnian. 2011&. The base age of the Changchengian System at the northern North China Craton should be younger than 1670 Ma: Constraints from zircon U-Pb LA-MC-ICPMS dating of a granite-porphyry dike in Miyun County, Beijing. *Geoscience Frontiers*, 18(3): 108~120.
- Li Huaikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, Su Wenbo, Lu Songnian, Zhou Hongying, Geng Jianzhen, Li Sheng, Yang Fengjie. 2010&. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131~2140.
- Li Tang, Santosh M. 2018. Neoproterozoic—Paleoproterozoic terrane assembly and Wilson cycle in the North China Craton: An overview from the central segment of the Trans North China Orogen. *Earth Science Review*, 182: 1~27.
- Liew T C, Hofmann A W, 1988. Precambrian crustal components, plutonic associations, plate environment of the Hercynian fold belt of central-Europ——Indications from a Nd and Sr isotopic study. *Contrib. Mineral. Petrology*, 98(2): 129~138.
- Li Shanshan, Santosh M, Cen Kuang, Teng Xueming, He Xiaofang. 2016. Neoproterozoic convergent margin tectonics associated with microblock amalgamation in the North China Craton: Evidence from the Yishui Complex. *Gondwana Research*, 38: 113~131.
- Li Wei, Dong Yunpeng, Liu Xiaoming. 2018. Geochronology, geochemistry and Nd—Hf isotopes of the Xiaokouzi granite from the

- Helanshan complex: Constraints on the Paleoproterozoic evolution of the Khondalite Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 317: 57~76.
- Liu Chaohui, Zhao Gongchun, Liu Fulai, Shi Jianrong. 2014. 2.2 Ga magnesian andesites, Nb-enriched basalt—andesites, and adakitic rocks in the Luliang Complex: Evidence for Early Paleoproterozoic subduction in the North China Craton. *Lithos*, 208: 104~117.
- Liu Jianfeng, Li Jinyi, Qu Junfeng, Hu Zhaochu, Feng Qianwen, Guo Chunli. 2016. Late Paleoproterozoic tectonic setting of the northern margin of the North China Craton: Constraints from the geochronology and geochemistry of the mangerites in the Longhua and Jianping areas. *Precambrian Research*, 272: 57~77.
- Liu Xiaoguang, Li Sanzhong, Zhang Jian, Li Xiyao, Zhao Shujuan, Dai Liming, Wang Guangzeng. 2019. Meso—Neoproterozoic strata and target source rocks in the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, 334: 105~458.
- Liu Xiaoping, Liu Huichuan, Gao Pin, Li Wenqi, Liu Huan, Hou Jiakai. 2021. Detrital zircon U—Pb—Hf isotopes from the Yanliao intracontinental rift sediments: Implications for multiple phases of Neoproterozoic—Paleoproterozoic juvenile crustal growth in the North China Craton. *Gondwana Research*, 96: 76~88.
- Liu Yongqing, Gao Linzhi, Liu Yanxue, Song Biao, Wang Zongxiu. 2005. Zircon U—Pb dating from the Early Neoproterozoic mafic magmatic event in Xuhuai area. *Chinese Science Bulletin*, 50(22): 2514~2521.
- Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huaikun, Li Humin. 2002. A group of rifting events in the terminal paleoproterozoic in the North China craton. *Gondwana Research*, 5(1): 123~131.
- Lu Songnian, Zhao Guochun, Wang Huicu, Guo Jiehao. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, 160: 77~93.
- Peng Peng, Zhai Mingguo, Li Qiuli, Wu Fuyuan, Hou Quanlin, Li Zhong, Li Tiesheng, Zhang Yanbin. 2011. Neoproterozoic (~900 Ma) Sariwon sills in North Korea: Geochronology, geochemistry and implications for the evolution of the south-eastern margin of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 243~254.
- Santosh M, Hofmann A W. 1994. Mantle plumes and episodic crustal growth. *Nature*, 372: 63~68.
- Santosh M, Maruyama S, Komiya T, Yamamoto S. 2010a. Orogens in the evolving Earth: from surface continents to 'lost continents' at the core mantle boundary. *Geological Society of London Special Publications*, 338: 77~116.
- Santosh M, Rajesh V J, Tsunogae T, Arai S. 2010b. Diopsidites from a Neoproterozoic—Cambrian suture in southern India. *Geological Magazine*, 147: 777~788.
- Santosh M, Zhao Dapeng, Kusky T. 2010c. Mantle dynamics of the Paleoproterozoic North China Craton: A perspective based on tomography. *Journal of Geodynamics*, 49: 39~53.
- Santosh M, Tsunogae T, Shimizu H, Dubessy J. 2010d. Fluid characteristics of retrogressed eclogites and mafic granulites from the Cambrian Gondwana suture zone in southern India. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159: 349~369.
- Santosh M, Teng Xueming, He Xiaofang, Li Tang, Yang Qiongyan. 2016. Discovery of Neoproterozoic suprasubduction zone ophiolite suite from Yishui Complex in the North China Craton. *Gondwana Research*, 38: 1~27.
- Santosh M, Teng Xueming, He Xiangfang, Tang Li, Yang Qiongyan. 2017. Discovery of Neoproterozoic suprasubduction zone ophiolite suite from Yishui Complex in the North China Craton. *Gondwana Research*, 48: 311.
- Santosh M, Gao Pin, Yu Bing, Yang Chengxue, Kwon Sanghoon. 2020. Neoproterozoic suprasubduction zone ophiolite discovered from the Miyun Complex: Implications for Archean—Paleoproterozoic Wilson cycle in the North China Craton. *Precambrian Research*, 342: 105710.
- Shi Kangxin, Wang Changming, Santosh M, Du Bin, Yang Lifei, Chen Qi. 2019. New insights into Neoproterozoic—Paleoproterozoic crustal evolution in the North China Craton: Evidence from zircon U—Pb geochronology, Lu—Hf isotopes and geochemistry of TTGs and greenstones from the Luxi Terrane. *Precambrian Research*, 327: 232~254.
- Shi Yurong, Wilde S, Zhao Xitao, Ma Yinsheng, Du Lilin, Liu Dunyi. 2012. Late Neoproterozoic magmatic and subsequent metamorphic events in the northern North China Craton: SHRIMP zircon dating and Hf isotopes of Archean rocks from Yunmengshan Geopark, Miyun, Beijing. *Gondwana Research*, 21(4): 785~800.
- Sun Dazhong, Li Huimin, Lin Yunxian, Zhou Huifang, Zhao Fengqing, Tang Min. 1991. Precambrian geochronology, chronotectonic framework and model of chronocrustal structure of the Zhongtiao Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 3: 216~231.
- Sun Huiyi, Gao Linzhi, Bao Chuang, Chen Yuelong, Liu Dunyi. 2013. Zircon LA-MC-ICPMS U—Pb dating of tuff from Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in Jixian County of North China and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(4): 591~596.
- Sun Zhenjun, Yu Henan, Li Chao, Xue Huaiyu, Zhang Huifeng. 2017. Paleoproterozoic (ca. 1.7 Ga) magmatism in Chifeng, Inner Mongolia: Implications for the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen. *Arabian Journal of Geoscience*, 10(20): 453~467.
- Tang Gongjian, Wang Qiang, Wyman D A, Li Zhengxiang, Xu Yigang, Zhao Zhenhua. 2012a. Recycling oceanic crust for continental crustal growth: Sr—Nd—Hf isotope evidence from granitoids in the western Junggar region, NW China. *Lithos*, 128: 73~83.
- Tang Gongjian, Wang Qiang, Wyman D A, Li Zhengxiang, Zhao Zhenhua, Yang Yueheng. 2012b. Late Carboniferous high epsilon (Nd) (t)—epsilon (Hf) (t) granitoids, enclaves and dikes in western Junggar, NW China: Ridge-subduction-related magmatism and crustal growth. *Lithos*, 140: 86~102.
- Tang Gongjian, Wyman D A, Wang Qiang, Li Jie, Li Zhengxiang, Zhao Zhenhua, Sun Weidong. 2012c. Asthenosphere—lithosphere interaction triggered by a slab window during ridge subduction: Trace element and Sr—Nd—Hf—Os isotopic evidence from Late Carboniferous tholeiites in the western Junggar area (NW China). *Earth and Planetary Science Letters*, 329: 84~96.
- Tian Hui, Zhang Jian, Li Huaikun, Su Wenbo, Zhou Hongying, Yang Ligong, Xiang Zhenqun, Geng Jianzhen, Liu Huan, Zhu Shixing. 2015. Zircon LA-MC-ICPMS U—Pb dating of tuff from Mesoproterozoic Gaoyuzhuang formation in Jixian County of North China and its geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(5): 647~658.
- Wan Yusheng, Zhang Qiaoda, Song Tianrui. 2003. The age of the detrital zircon SHRIMP from the Changzhougou formation of the Ming Tombs system in Beijing is defined as the source area and maximum sedimentary age of the Cratonic cap rocks in North China. *Chinese Science Bulletin*, 48(18): 1970~1975.

- Wan Yusheng, Liu Duni, Wang Wei, Song Tianrui, Kröner A, Dong Chunyan, Zhou Hongyin, Yin Xiaoyan. 2011. Provenance of Mesoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: An integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry. *Gondwana Research*, 20(1): 219~242.
- Wang Kaiyi, Simon Wilde. 2002. Precise SHRIMP U-Pb ages of Dawaliang granite in Wutaishan area, Shanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 407~411.
- Wang Wei, Liu Shuwen, Bai Xiang, Li Qiugen, Yang Pengtao, Zhao Yue, Zhang Shuanhong. 2013. Geochemistry and zircon U - Pb - Hf isotopes of the late Paleoproterozoic Jianping diorite - monzonite - syenite suite of the North China Craton: Implications for petrogenesis and geodynamic setting. *Lithos*, 162: 175~194.
- Wang Wei, Liu Shuwen, Santosh M, Wang Genhou, Bai Xiang, Guo Rongrong. 2015. Neoarchean intra-oceanic arc system in the Western Liaoning Province: Implications for Early Precambrian crustal evolution in the Eastern Block of the North China Craton. *Earth Science Reviews*, 150: 329~364.
- Wang Wei, Cawood P A, Liu Shuwen, Guo Rongrong, Bai Xiang, Wang Kang. 2017. Cyclic formation and stabilization of Archean lithosphere by accretionary orogenesis: Constraints from TTG and potassic granitoids. North China Craton. *Tectonics*, 36(9): 1724~1742.
- Wang Xiaolei, Jiang Shaoyong, Dai Baozhang, Griffin W L, Dai Mengning, Yang Yueheng. 2011. Age, geochemistry and tectonic setting of the Neoproterozoic (ca 830 Ma) gabbros on the southern margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 190(1~4): 35~47.
- Wang Zhihong, Wilde S A, Wan Jialiang. 2010. Tectonic setting and significance of 2.3~2.1 Ga magmatic events in the Trans-North China Orogen: New constraints from the Yanmenguan mafic - ultramafic intrusion in the Hengshan - Wutai - Fuping area. *Precambrian Research*, 178: 27~42.
- Windley B F. 1995. *The Evolving Continents* (3rd edition). Chichester, England: John Wiley & Sons: 377~385+459~462.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007&. Lu-Hf isotopes and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 186~220.
- Xia Linqi, Xia Zuchuan, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2013. Late Paleoproterozoic rift-related magmatic rocks in the North China Craton: Geological records of rifting in the Columbia supercontinent. *Earth Science Review*, 125: 69~86.
- Yang Chonghui, Du Lilin, Ren Liudong, Song Huixia, Wan Yusheng, Ling Hangqiang, Liu Zengxiao. 2011&. The age and petrogenesis of the Xuting granite in the Zhanhuang Complex, Hebei Province: Constraints on the structural evolution of the Trans-North China, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1003~1016.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Liu Xiaoming, Xie Liewen. 2005&. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of the Miyun rapakivi granites from Beijing, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1633~1644.
- Zhai Mingguo. 2004. Precambrian tectonic evolution of the North China Craton. *Geological Society London Special Publications*, 226: 57~72.
- Zhai Mingguo, Peng Peng. 2007&. Paleoproterozoic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665~2682.
- Zhai Mingguo, Li Tiesheng, Peng Peng, Hu Bo, Liu Fu, ZhangYong. 2010. Precambrian key tectonic events and evolution of the North China craton. *Geological Society London Special Publications*, 338(1): 235~262.
- Zhai MingGuo, Santosh M. 2011. TheEarly Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6~25.
- Zhai Mingguo, Hu Bo, Peng Peng, Zhao Taiping. 2014. Meso—Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 100~119.
- Zhang Jian, Tian Hui, Li Huaikun, Su Wenbo, Zhou Hongying, Xiang Zhenqun, Geng Jianzhen, Yang Ligong. 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.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Yang Zhenyu, He Zhefeng, Wu Hai. 2009. The 1.35Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(3~4): 588~600.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Santosh M. 2012. Mid-Mesoproterozoic bimodal magmatic rocks in the northern North China Craton: Implications for magmatism related to breakup of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 222~223: 339~367.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Ye Hao, Hu Jianmin, Wu Fei. 2013&. New constraints on ages of the Chuanlinggou and Tuanshanzi formations of the Changcheng System in the Yan-Liao area in the northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2481~2490.
- Zhang Yanbing, Li Qiuli, Lan Zhongwu, Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zhai Mingguo. 2015. Diagenetic xenotime dating to constrain the initial depositional time of the Yan-Liao Rift. *Precambrian Research*, 271: 20~32.
- Zhao Guochun, Wilde S A, Cawood P A, Sun Min. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302(3): 191~226.
- Zhao Guochun, Sun Ming, Wilde S A, Li Sanzhong. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177~202.
- Zhao Guochun, Wilde S A, Sun Min, Li Sanzhong, Li Xuping, Jian Zhang. 2008. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Luliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 160: 213~226.
- Zhao Zongbo, Zhai Mingguo, Wang Kaiyi. 1993. Precambrian Crustal Evolution of the Sino-Korean Paraplat Form. Beijing: Science Press: 1~390.
- Zheng Jianping, Griffin W L, Reilly S Y O, Lu Fengxiang, Wang Chunyang, Zhang Ming. 2004. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China craton. *Geology*, 32(3): 229~232.
- Zhou Ligang, Zhai Mingguo, Lu Junsheng, Zhao Lei, Wang Haozheng, Wu Jialin, Liu Bo, Zou Yi, Shan Houxiang, Cui Xiahong. 2017. Paleoproterozoic metamorphism of high-grade granulite facies rocks in the North China Craton: Study advances, questions and new issues. *Precambrian Research*, 303: 520~547.

Crustal growth of the Yanliao intracontinental rift basement ——insights from U-Pb ages and Lu—Hf isotopes of the detrital zircon from Mesoproterozoic Changcheng System

LI Wenqi^{1, 2)}, LIU Huichuan^{1, 2)}, LIU Xiaoping^{1, 2)}, YU Zhiqi^{1, 2)}, WANG Yiren^{1, 2)}, WANG Yingying^{1, 2)}

1) State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249;

2) College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249

Objectives: The North China Craton stands as one of the most ancient cratons worldwide, with its continental crust undergoing multiple episodes of crustal growth events. Considerable research has been conducted on the growth of the continental crust in the North China Craton. However, previous discussions on the crustal growth of basement beneath the Yanliao Rift Basin, obscured by extensive deposits of thick sedimentary cover, have been relatively scarce.

Methods: Taking the sedimentary rocks of the Mesoproterozoic Changcheng System above the basement of the Yanliao Rift Basin as example, this study systematically analyzes the detrital zircon age spectra and Lu—Hf isotope data from the Changcheng System strata within the Yanliao Rift Basin. The investigation aims to elucidate scientific inquiries concerning the sedimentary age of the Changcheng Formation, the provenance of detrital zircons and crustal growth events.

Results: The isotopic ages constrain the sedimentary age of the Changcheng System in the Yanliao Rift Basin as ca. 1680 Ma, which represent the timing of initiation of the Yanliao Rift. The detrital zircon age spectrum from the Changcheng System in the Yanliao Rift Basin primarily exhibits two stages: 2.7~2.5 Ga and 2.2~1.9 Ga. The Hf isotope $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values manifest in a high positive range of 0.1 to 34.6. By comparing the detrital zircon U-Pb dating, Lu—Hf isotope $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$, and T_{DM2} model age data of the Changcheng System with the crystalline basement of the North China Craton, it is inferred that the sediment source of the Changcheng System in the Yanliao Rift Basin is the underlying basement of the Yanliao Rift Basin.

Conclusions: ① The detrital zircon age spectrum of the Changcheng System in the Yanliao Rift Basin defines two major age populations two main stages: 2.7~2.5 Ga and 2.2~1.9 Ga. The Hf isotope $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values exhibit a high positive range between 0.1 and 34.6. ② Combining zircon U-Pb dating, zircon Lu—Hf isotope $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and T_{DM2} model age, it is suggested that there are three distinct episodes of crustal growth in the Yanliao Rift Basin of the North China Craton during the Neoarchean to Paleoproterozoic Eras, occurring at 2.7~2.5 Ga, 2.2~1.9 Ga, and 1.7~1.6 Ga.

Keywords: Yanliao Rift; Changcheng System; Changcheng Group; detrital zircon; U-Pb age; Lu—Hf isotope; crustal growth

Acknowledgements: This paper is supported by the PetroChina Science and Technology Innovation Fund for In-situ U-Pb Dating of Phosphate Minerals for the Petroleum Accumulation Periods in Oil and Gas Basins (No. 2021DQ02-0103) and the Open Fund Project of the Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina (No. 2022-KFKT-07)

First author: LI Wenqi, male, born in 1994, Ph. D. candidate, is mainly majored in petrogeochemistry; Email: lwqcup@163.com

Corresponding author: LIU Huichuan, male, born in 1986, professor, is mainly majored in tectonics and petrogeochemistry; Email: lhc@cup.edu.cn

Manuscript received on: 2023-07-19; Accepted on: 2023-11-14; Published online on: 2024-05-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.05.022

Edited by: LI Ming, ZHANG Yuxu