古亚洲洋碳酸盐俯冲再循环及其对华北克拉通岩石圈组成的影响

刘勇胜^{1*}, 陈春飞², 何德涛¹, 张拉¹, 虞凯章¹

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

2. Department of Earth and Environmental Sciences, Macquarie University, North Ryde 2109, Australia

* 通讯作者, E-mail: yshliu@cug.edu.cn

收稿日期: 2020-10-03; 收修改稿日期: 2021-03-26; 接受日期: 2021-03-31; 网络版发表日期: 2021-06-23

国家重点研发计划项目(编号: 2019YFA0708400)、国家自然科学基金项目(批准号: 41530211)和地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费(编号: MSFGPMR01)资助

摘要 在洋盆闭合的长期演化历史中, 沉积碳酸盐在板块俯冲作用中会被不同程度地带入地球内部, 从而显著影响岩石圈地幔性质和大尺度气候变化. 那些经历了俯冲带深部循环作用的碳酸盐(岩)是记录已消失洋盆的重要载体. 华北克拉通北缘汉诺坝玄武岩中的碳酸岩侵入体记录了灰岩再循环进入地幔后熔融形成碳酸岩过程的岩石学和地球化学特征, 并且携带了大量碎屑锆石. 这些碎屑锆石具有从前寒武纪到显生宙的年龄谱, 但前寒武纪年龄峰(包括~2.5Ga、2.1~2.3Ga、1.8~2.0Ga、~1.65Ga、1.3~1.4Ga、~1.1Ga、0.91~0.94Ga、0.74~0.81Ga和0.62~0.63Ga)完全不同于华北克拉通北缘地质体中的锆石年龄谱, 而与兴蒙造山带沉积物中碎屑锆石的年龄谱相似. 尤其是300~373Ma锆石显著偏正的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值(7.7~13.5)明显区别于同时期华北克拉通北部的锆石, 而与兴蒙造山带中锆石的正 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值一致. 上述特征表明, 汉诺坝碳酸岩侵入体的灰岩源岩来自古亚洲洋, 而且灰岩沉积时间不早于300Ma, 也就是说古亚洲洋在晚石炭世-早二叠世还未完全闭合. 中亚造山带中广泛分布的变质碳酸盐和华北克拉通北缘普遍出现的岩石圈地幔碳酸盐交代作用表明古亚洲洋曾发育了广泛的沉积碳酸盐岩, 而且很大一部分可能在俯冲过程中返回了地球内部, 并显著影响了华北克拉通北缘岩石圈的组成和物理化学性质(如氧逸度).

关键词 华北克拉通, 岩石圈, 古亚洲洋, 俯冲作用, 深部碳循环, 锆石年代学

1 引言

在地质历史时期曾存在着大量的大洋碳酸盐岩(Mackenzie和Morse, 1992). 大洋中的碳酸盐是地球表层的重要碳汇, 以蚀变洋壳中的碳酸盐脉或快速埋藏的大洋沉积物和在海山和大陆边缘沉积的厚层状碳酸

盐岩(达数公里)的形式存在. 海洋沉积碳酸盐通过俯冲作用进入地球内部是地表碳返回地球内部的一种重要方式(Clift, 2017), 不仅可能是形成一些地幔端元组分的机制(Castillo, 2015), 更是对维持地球环境宜居性具有关键作用(Lee和Lackey, 2015; McKenzie等, 2016). 在洋盆闭合的长期地质演化历史中, 这些大洋沉积碳

中文引用格式: 刘勇胜, 陈春飞, 何德涛, 张拉, 虞凯章. 2021. 古亚洲洋碳酸盐俯冲再循环及其对华北克拉通岩石圈组成的影响. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1753~1772, doi: 10.1360/SSTe-2020-0261

英文引用格式: Liu Y, Chen C, He D, Zhang L, Yu K. 2021. Recycling of Paleo-Asian Ocean carbonates and its influence on the lithospheric composition of the North China Craton. Science China Earth Sciences, 64(8): 1346~1362, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9764-1>

酸盐最终要么滞留在了造山带中, 要么通过板块俯冲作用被携带到了不同深度的地幔(甚至可能到达对流上地幔及过渡带(Li S G等, 2017)或者下地幔深度(Bulanova等, 2010; Walter等, 2011), 或者俯冲进入深部地幔后由于俯冲板块折返而再次暴露于地表(如造山带中的超高压大理岩; Becker和Altherr, 1992; Schertl和Okay, 1994; Ogasawara等, 2000; Lü等, 2013). 因此, 被俯冲的大洋碳酸盐是记录已消失洋盆的重要载体。

在西伯利亚克拉通、塔里木克拉通及华北克拉通之间曾长期存在的古亚洲洋是新元古代开始的罗迪尼亚超大陆裂解的产物(Dobretsov等, 2003). 随后, 从晚前寒武纪开始, 古亚洲洋俯冲-增生作用形成了中亚造山带, 该造山带以各种岛弧拼合作用而导致的显生宙大陆地壳快速增生而闻名(Jahn等, 2000). 古亚洲洋的消解和闭合是向北部的西伯利亚克拉通和南部的华北克拉通双向俯冲的结果(Şengör等, 1993; Xiao等, 2003; Windley等, 2007). 由于对一些关键岩石的形成时间和地质背景的认识不同, 对于古亚洲洋最终闭合的时间存在两种主要观点, 包括晚泥盆世之前闭合(Xu等, 2013)或者二叠纪末(~250Ma)完成闭合(Xiao等, 2003; Windley等, 2007). 古亚洲洋曾发育了大量碳酸盐岩(Volkova和Budanov, 1999; Lü等, 2013; Schertl和Sobolev, 2013; Zhao等, 2013), 其中很大一部分可能在古亚洲洋闭合过程中通过俯冲作用被带回到地球内部(Liu等, 2015; Chen等, 2016), 导致华北克拉通(Liu等, 2010b; Wang等, 2016; Chen等, 2017; Xu R等, 2017; Chen等, 2018; 刘勇胜等, 2019; He等, 2020b)、南蒙微陆块(Wiechert等, 1997; Kononova等, 2002)以及塔里木克拉通(Cheng等, 2018)岩石圈地幔发生物理和化学性质改变. 因此, 识别和研究碳酸盐岩俯冲对重建古亚洲洋活动历史和准确认识碳酸盐岩再循环对克拉通岩石圈地幔的改造作用有重要意义。

近年来, 除了在兴蒙造山带(中亚造山带东段)南缘的达里湖地区发现再循环沉积碳酸盐岩来源的碳酸岩(Liu等, 2015; He等, 2017), 在华北克拉通北部也陆续发现了一系列具有再循环壳源岩石地球化学信息(如富集放射成因Sr同位素)的碳酸岩(脉), 包括怀仁和涿鹿(阎国翰等, 2007)、大同塔山(Liu等, 2014)、汉诺坝(Chen等, 2016)、桃花山(Xue等, 2018)、四子王旗(Zhang等, 2017)以及阳原和天镇(Wang等, 2020). 本文在Chen等(2016)对汉诺坝碳酸岩侵入体进行了详细的

岩石学和地球化学研究工作的基础上, 提供了汉诺坝碳酸岩源岩应为来自古亚洲洋沉积碳酸盐岩的系统锆石年代学证据. 同时, 结合中亚造山带中碳酸盐岩的广泛分布等, 总结探讨了古亚洲洋碳酸盐大规模俯冲再循环及其对华北克拉通北缘壳幔物质组成与分异的影响。

2 地质背景和样品

华北克拉通由东部和西部两个太古宙大陆块体在古元古代(约1.8Ga)拼合并最终稳定下来而形成(Zhao等, 2001). 自早古生代以后, 华北克拉通先后经历了多个方向的俯冲改造作用, 包括北边古亚洲洋板块的俯冲作用、南边古特提斯洋板块和扬子板块的俯冲作用以及东边太平洋板块的俯冲作用(Windley等, 2010). 华北克拉通自晚中生代以来发生了强烈的构造和热活化事件, 出现了广泛的岩浆和火山作用(徐义刚等, 2009). 根据对第三纪玄武岩和奥陶纪含金刚石金伯利岩中捕虏体的岩石学、地球化学和同位素研究, 揭示出华北克拉通岩石圈地幔经历了大规模的岩石圈减薄(Menzies等, 1993; Griffin等, 1998). 华北克拉通北缘志留系到下石炭统沉积地层的缺失表明古亚洲洋板块俯冲导致了华北克拉通北缘的岩石圈加厚隆升作用(Meng和Ge, 2002; 刘勇胜等, 2003). 在华北克拉通北缘发育的大量晚古生代和早中生代花岗岩类侵入体反映了古亚洲洋俯冲对华北克拉通岩石圈的强烈影响(Zhang等, 2009a, 2009b). 因此, 尽管太平洋板块俯冲作用被认为是导致华北克拉通破坏和岩石圈减薄的主要机制(朱日祥等, 2011), 古亚洲洋板块俯冲作用将大量大洋和大陆沉积物携带到华北克拉通北缘的岩石圈地幔, 毫无疑问也对华北克拉通岩石圈地幔的改造具有重要贡献(Xu, 2002; Liu等, 2010b; Chen等, 2016, 2017; Wu等, 2017; Wang等, 2019).

汉诺坝地区的碳酸岩侵入体位于华北克拉通北缘的新近纪碱性玄武岩中(图1). Chen等(2016)的研究表明这些碳酸岩含有幔源单斜辉石、斜方辉石和橄榄石. 同时, 它们的大离子亲石元素、高场强元素和稀土元素含量以及高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.70522~0.70796)和氧同位素比值($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=22\sim23\%$)特征与沉积碳酸盐岩相似, 指示其源岩为俯冲再循环的沉积碳酸盐岩. 但是, 其中还出现了高度无序石墨、碳硅石等还原矿物,

图1 (网络版彩图)兴蒙造山带和华北克拉通北缘构造简图

修改自Zhang等(2014). 汉诺坝位于华北克拉通北缘距离兴蒙造山带约200km处

且碳酸岩的C同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -14.4 \sim -11.2\text{‰}$)也明显比沉积碳酸盐岩更偏轻,并具有显著增高的Ni含量($1 \sim 133 \text{ ppm}$)和Nd同位素比值($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.51282 \sim 0.51298$)($1 \text{ ppm} = 1 \mu\text{g g}^{-1}$). 这些特征综合指示汉诺坝碳酸岩形成于再循环沉积碳酸盐岩高程度熔融作用,随后经历了与地幔橄榄岩反应和脱 CO_2 作用引起的局部还原作用(Chen等, 2016; 刘勇胜等, 2019).

本次工作从约8kg碳酸岩样品中共分离出101粒锆石. 对所有锆石都采用阴极发光(CL)进行了图像分析以揭示其内部结构(图2), 保证年龄和Hf同位素分析点可靠有效.

3 锆石U-Pb年龄、Hf同位素和微量元素分析方法

为了能够使U-Pb年龄和Hf同位素分析处于相同位置,我们采用二次离子质谱(SIMS)和激光剥蚀多接收器等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS, 低频剥蚀条件)对锆石进行了U-Pb定年.

SIMS分析(中国科学院地质与地球物理研究所, Cameca IMS-1280)的具体仪器参数和数据处理方法见Li等(2009), 采用的离子束尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, U-Th-

Pb同位素比值校正采用锆石标准91500做外标(Wiedenbeck等, 1995). 对锆石标准Qinghu分析获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄($(160.2 \pm 2.0) \text{ Ma}$, 2SD , $n=6$)和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄($(161.4 \pm 4.6) \text{ Ma}$, 2SD , $n=6$)在不确定度范围内与ID-TIMS年龄一致($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄= $(159.38 \pm 0.12) \text{ Ma}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄= $(159.68 \pm 0.22) \text{ Ma}$)(Li等, 2009).

激光剥蚀U-Pb定年、Hf同位素和微量元素分析全部在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成. Hf同位素分析点与U-Pb定年中使用的点重叠. 为了在低剥蚀频率条件下获得高精度U-Pb年龄, U-Pb定年和Hf同位素分析均采用Neptune Plus MC-ICP-MS(Thermo Fisher Scientific, 德国)和GeoLas Pro激光剥蚀系统(Lambda Physik, 德国)完成. U-Pb定年用2个法拉第杯和5个离子计数器(H2、H4、IC1、IC2、IC3、IC4和IC5)在低质量分辨率模式下同时测量了 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{208}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{206}Pb 、 $^{204}(\text{Pb}+\text{Hg})$ 和 ^{202}Hg 同位素. 激光剥蚀采用 $16 \mu\text{m}$ 光斑, 剥蚀频率为2Hz, 采用锆石标准GJ-1作为U-Pb定年的校正外标. Hf同位素分析采用锆石标准91500、GJ-1和TEM作为监控标准, 用于锆石Hf同位素分析的详细仪器参数见Hu等(2012). 单颗粒锆石微量元素分析采用的光斑直径为 $24 \mu\text{m}$, 剥蚀频率为6Hz, 具体的分析仪器(GeoLas

图 2 锆石CL图像及年龄
圆圈为分析点, 数据为年龄值(单位: Ma)

Pro激光剥蚀系统和Agilent 7500a ICP-MS)参数和校正策略见Liu等(2010c)。U-Pb定年、Hf同位素和微量元素分析的背景和分析物信号的离线选择和计算以及干扰校正和外部校正采用ICPMSDataCal(Liu等, 2010b, 2010c; Lin等, 2016)完成。

利用LA-MC-ICP-MS对Plešovice锆石分析的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄((338.7 $\pm$ 6.12)Ma, 2SD, $n=12$)和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄

((337.7 $\pm$ 8.0)Ma, 2SD, $n=12$)在不确定度范围内与ID-TIMS年龄一致((337.1 $\pm$ 0.4)Ma, 2 σ ; Sláma等, 2008)。对锆石标准91500、GJ-1和TEM分析的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值(91500: 0.282308 $\pm$ 0.000036, 2SD, $n=28$; GJ-1: 0.282022 $\pm$ 0.000024, 2SD, $n=6$; TEM: 0.282668 $\pm$ 0.000047, 2SD, $n=6$)也与推荐值在不确定度范围内一致(Yuan等, 2008; Hu等, 2012)。

4 结果

共对101粒锆石上104个点进行了U-Pb年龄分析, 选择51粒锆石进行了Hf同位素组成分析. 其中, 69个分析点记录了前寒武纪到显生宙的一致年龄. 所有U-Pb年龄、Hf同位素和微量元素组成分析结果分别见表1~表3.

前寒武纪锆石晶型不完整, 大多数无规则形状(图2). 前寒武纪锆石在~2.5Ga、2.1~2.3Ga、1.8~2.0Ga、~1.65Ga、1.3~1.4Ga、~1.1Ga、0.91~0.94Ga、0.74~0.81Ga和0.62~0.63Ga处显示出多个年龄峰(图3). 2.5Ga锆石具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值(0.12~3.01), 1.8~2.0Ga锆石整体具有偏低的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值(变化较大, 从-8.79到0.35), 其他前寒武纪锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值在-14.5~7.3之间有较大变化(图4a).

显生宙锆石的年龄主要集中在300~452Ma、205~298Ma、101~180Ma(三粒锆石)及58Ma(一粒锆石)(图3; 表1). 300~452Ma锆石大多没有内部环带, 205~298Ma锆石无环带或为平面分带锆石, 101~180Ma锆石和58Ma锆石显示出典型的振荡环带和完整晶型(图2). 显生宙锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值整体变化范围大(从-28到13.5), 其中300~373Ma锆石具有显著偏正的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值(7.7~13.5)(图4b).

在微量元素组成上, 所有锆石均富集重稀土元素(图5). 绝大多数锆石具有负Eu异常, Th/U比值低于1.3.

5 讨论

5.1 汉诺坝碳酸岩中锆石的成因

火成碳酸岩中的锆石副矿物既有从碳酸岩熔体结晶而形成的原生锆石(Rodionov等, 2012; Montero等, 2016), 也有岩浆迁移过程中捕获的继承锆石(Barker, 2001; Gervasoni等, 2017). 典型的从碳酸岩熔体结晶形成的锆石以高Th/U比值($\gg 10$)和轻微或者无负Eu异常为特征(Belousova等, 2002; Hoskin和Schaltegger, 2003; Rodionov等, 2012; Montero等, 2016). 汉诺坝碳酸岩中的锆石Th/U比值非常低(0.05~1.56), 绝大部分具有显著的负Eu异常(图5), 完全不同于典型碳酸岩中的原生岩浆锆石. 另外, 典型碳酸岩中的锆石以低 $\sum \text{REE}$ (<300ppm)为特征(Hoskin和Schaltegger, 2003), 但汉诺坝碳酸岩中的锆石整体具有较高

图3 锆石年龄分布

(a) 汉诺坝碳酸岩中锆石U-Pb年龄分布; (b) 兴蒙造山带沉积物中碎屑锆石年龄(Rojas-Agramonte等, 2011; Han等, 2012a, 2012b; Xu等, 2013)与火成岩中岩浆锆石年龄分布(陈斌等, 2001; 王涛等, 2001; 石玉若等, 2004; 葛文春等, 2005; Chen等, 2009; Demoux等, 2009; Liu等, 2012); (c) 华北克拉通北部晚古生代-中生代沉积物(Cope等, 2005; Zhou等, 2019)、现代河流沉积物(Yang等, 2009)、火成岩(郭敬辉等, 1999; Miao等, 2002; Wu等, 2005; Zhang等, 2007a, 2007b; Zhao等, 2008; Grant等, 2009; Zhang等, 2009a, 2009b)以及汉诺坝地区下地壳麻粒岩包体中的锆石年龄分布(Wilde等, 2003; Liu等, 2004a; Liu等, 2009; Zheng等, 2009; Liu等, 2010a; Jiang等, 2011; Wei等, 2015). 文献数据仅选择谱和度大于90%的数据. 概率密度计算方法据Vermeesch(2012)

的 $\sum \text{REE}$ (绝大部分锆石大于500ppm, 最高达2486ppm)(表3). 另一方面, 汉诺坝碳酸岩侵位于新生代玄武岩中, 其中的锆石年龄分布范围广且都远大于围岩年龄(14~27Ma; Zhu, 1998). 而且, Gervasoni等(2017)的实验研究表明要从碳酸岩熔体中结晶出锆石, 碳酸岩熔体的 SiO_2 含量需要高于20wt.%, 而汉诺坝碳酸岩以低 SiO_2 含量为特征(0.3~7.6wt.%). 所有这些特征都表明汉诺坝碳酸岩中的锆石不是从碳酸岩熔体结

表 1 汉诺坝碳酸岩中锆石U-Pb年龄及Th、U含量

分析点号	分析方法	含量(ppm)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
		Th	U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ
JSB1502-01	LA-MC-ICP-MS	21	27	0.78	0.0563	0.0015	0.3508	0.0094	0.0452	0.0003	465	57	305	7	285	2
JSB1502-02	LA-MC-ICP-MS	1969	6858	0.29	0.0603	0.0010	0.0755	0.0012	0.0091	0.00002	613	35	74	1	58	0
JSB1502-03	LA-MC-ICP-MS	988	6122	0.16	0.0527	0.0001	0.3327	0.0016	0.0458	0.0002	322	6	292	1	289	1
JSB1502-07	LA-MC-ICP-MS	76	201	0.38	0.1146	0.0006	5.5045	0.0421	0.3482	0.0019	1873	11	1901	7	1926	9
JSB1502-08	LA-MC-ICP-MS	139	366	0.38	0.0558	0.0015	0.3013	0.0105	0.0387	0.0002	456	1148	267	8	245	1
JSB1502-10	LA-MC-ICP-MS	87	225	0.38	0.1263	0.0018	6.8418	0.1479	0.3897	0.0040	2048	24	2091	19	2121	19
JSB1502-11	LA-MC-ICP-MS	94	85	1.10	0.1210	0.0004	5.9595	0.0447	0.3569	0.0019	1972	6	1970	7	1968	9
JSB1502-21	LA-MC-ICP-MS	176	398	0.44	0.0520	0.0004	0.2489	0.0021	0.0349	0.0002	283	10	226	2	221	1
JSB1502-22	LA-MC-ICP-MS	43	72	0.59	0.1025	0.0006	4.3405	0.0551	0.3088	0.0035	1669	9	1701	11	1735	17
JSB1502-23	LA-MC-ICP-MS	73	78	0.94	0.0554	0.0007	0.4541	0.0069	0.0596	0.0005	432	39	380	5	373	3
JSB1502-24	LA-MC-ICP-MS	37	120	0.31	0.0885	0.0006	2.8911	0.0249	0.2382	0.0016	1392	23	1380	7	1377	8
JSB1502-29	LA-MC-ICP-MS	288	3097	0.09	0.0554	0.0008	0.2892	0.0065	0.0379	0.0008	428	29	258	5	240	5
JSB1502-30	LA-MC-ICP-MS	355	465	0.77	0.0525	0.0003	0.3052	0.0017	0.0421	0.0001	309	12	270	1	266	1
JSB1502-31	LA-MC-ICP-MS	279	500	0.56	0.0564	0.0003	0.4889	0.0037	0.0628	0.0003	478	11	404	3	393	2
JSB1502-32	LA-MC-ICP-MS	20	57	0.36	0.0723	0.0005	1.5058	0.0121	0.1512	0.0006	994	14	933	5	908	4
JSB1502-33	LA-MC-ICP-MS	223	169	1.32	0.1319	0.0004	6.3766	0.0252	0.3507	0.0010	2124	6	2029	4	1938	5
JSB1502-34	LA-MC-ICP-MS	53	74	0.72	0.1312	0.0005	6.7017	0.0449	0.3704	0.0021	2115	8	2073	6	2031	10
JSB1502-36	LA-MC-ICP-MS	173	670	0.26	0.0767	0.0008	1.9274	0.0185	0.1805	0.0014	1122	8	1091	6	1070	8
JSB1502-37	LA-MC-ICP-MS	160	378	0.42	0.1340	0.0005	6.9076	0.0444	0.3740	0.0022	2151	6	2100	6	2048	10
JSB1502-38	LA-MC-ICP-MS	40	582	0.07	0.1528	0.0003	10.2255	0.0612	0.4855	0.0029	2377	8	2455	6	2551	13
JSB1502-39	LA-MC-ICP-MS	447	584	0.76	0.0526	0.0004	0.3019	0.0027	0.0416	0.0002	309	12	268	2	263	2
JSB1502-40	LA-MC-ICP-MS	172	502	0.34	0.0535	0.0003	0.2947	0.0026	0.0399	0.0002	350	11	262	2	252	1
JSB1502-42	LA-MC-ICP-MS	15	265	0.06	0.1163	0.0003	5.3025	0.0273	0.3307	0.0013	1900	5	1869	5	1842	6
JSB1502-44	LA-MC-ICP-MS	129	267	0.48	0.1452	0.0003	8.1868	0.0427	0.4091	0.0021	2300	3	2252	5	2211	10
JSB1502-49	LA-MC-ICP-MS	74	105	0.70	0.0537	0.0006	0.3696	0.0047	0.0499	0.0002	367	21	319	3	314	1
JSB1502-51	LA-MC-ICP-MS	268	579	0.46	0.1649	0.0004	10.2201	0.0505	0.4494	0.0019	2507	5	2455	5	2393	8
JSB1502-52	LA-MC-ICP-MS	71	76	0.93	0.1142	0.0005	4.9568	0.0277	0.3147	0.0012	1933	8	1812	5	1764	6
JSB1502-54	LA-MC-ICP-MS	359	354	1.01	0.0622	0.0002	0.9554	0.0048	0.1114	0.0004	680	9	681	3	681	2
JSB1502-55	LA-MC-ICP-MS	456	742	0.62	0.0529	0.0003	0.2768	0.0016	0.0379	0.0001	324	11	248	1	240	1
JSB1502-56	LA-MC-ICP-MS	325	479	0.68	0.0523	0.0003	0.2331	0.0023	0.0323	0.0002	298	8	213	2	205	2
JSB1502-57	LA-MC-ICP-MS	200	430	0.46	0.0749	0.0004	1.5767	0.0108	0.1526	0.0006	1066	14	961	4	916	3
JSB1502-59	LA-MC-ICP-MS	37	582	0.06	0.1211	0.0003	5.8595	0.0380	0.3507	0.0018	1973	6	1955	6	1938	9
JSB1502-60	LA-MC-ICP-MS	274	2454	0.11	0.0545	0.0002	0.3208	0.0014	0.0427	0.0001	391	40	282	1	269	1
JSB1502-64	LA-MC-ICP-MS	176	384	0.46	0.0561	0.0002	0.5614	0.0038	0.0726	0.0004	457	9	452	3	452	2
JSB1502-65	LA-MC-ICP-MS	314	483	0.65	0.1658	0.0004	11.4429	0.2557	0.5002	0.0110	2517	4	2560	21	2615	47
JSB1502-66	LA-MC-ICP-MS	229	309	0.74	0.0521	0.0003	0.3425	0.0023	0.0477	0.0001	300	15	299	2	300	1
JSB1502-67	LA-MC-ICP-MS	127	390	0.32	0.1670	0.0004	10.8498	0.0625	0.4712	0.0023	2527	4	2510	6	2489	10
JSB1502-70	LA-MC-ICP-MS	44	117	0.37	0.1702	0.0005	13.3976	0.1349	0.5712	0.0056	2561	5	2708	10	2913	23
JSB1502@0	SIMS	484	948	0.51	0.0608	0.0003	0.8594	0.0139	0.1026	0.0016	630	11	630	8	630	9

(续表1)

分析点号	分析方法	含量(ppm)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
		Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
JSB1502@01	SIMS	59	284	0.21	0.0609	0.0006	0.8520	0.0153	0.1015	0.0016	635	20	626	8	623	9
JSB1502@02	SIMS	1291	2186	0.59	0.0555	0.0003	0.4974	0.0081	0.0650	0.0010	432	14	410	6	406	6
JSB1502@03	SIMS	105	2134	0.05	0.0775	0.0002	2.1443	0.0342	0.2006	0.0032	1135	5	1163	11	1178	17
JSB1502@04	SIMS	239	1172	0.20	0.0704	0.5300	1.1721	1.6140	0.1207	1.5246	941	11	788	9	735	11
JSB1502@05	SIMS	406	2273	0.18	0.0849	0.0003	2.5554	0.0415	0.2183	0.0034	1313	7	1288	12	1273	18
JSB1502@06	SIMS	469	897	0.52	0.0559	0.0004	0.5480	0.0096	0.0711	0.0011	450	16	444	6	442	7
JSB1502@07	SIMS	263	587	0.45	0.0704	0.0006	1.5197	0.0264	0.1565	0.0023	941	18	938	11	937	13
JSB1502@08	SIMS	267	477	0.56	0.0559	0.0006	0.5420	0.0106	0.0704	0.0012	446	23	440	7	439	7
JSB1502@09	SIMS	423	567	0.75	0.0484	0.0011	0.1054	0.0029	0.0158	0.0002	118	52	102	3	101	2
JSB1502@10	SIMS	1077	1257	0.86	0.0478	0.0006	0.1111	0.0022	0.0168	0.0003	91	28	107	2	108	2
JSB1502@11	SIMS	205	444	0.46	0.0549	0.0008	0.4109	0.0088	0.0543	0.0008	406	34	349	6	341	5
JSB1502@12	SIMS	522	335	1.56	0.1196	0.0004	5.9310	0.0980	0.3596	0.0058	1951	6	1966	14	1980	28
JSB1502@13	SIMS	487	886	0.55	0.0507	0.0007	0.2354	0.0047	0.0337	0.0005	227	30	215	4	213	3
JSB1502@14	SIMS	99	90	1.10	0.0662	0.0011	1.2034	0.0287	0.1318	0.0022	813	36	802	13	798	12
JSB1502@17	SIMS	45	111	0.41	0.0653	0.0009	1.1280	0.0243	0.1253	0.0020	784	30	767	12	761	11
JSB1502@18	SIMS	64	96	0.67	0.1109	0.0010	4.8631	0.0858	0.3180	0.0049	1814	16	1796	15	1780	24
JSB1502@19	SIMS	28	384	0.07	0.0570	0.0010	0.5661	0.0152	0.0720	0.0014	492	39	455	10	448	9
JSB1502@20	SIMS	205	207	0.99	0.0657	0.0007	1.1462	0.0209	0.1265	0.0019	798	22	775	10	768	11
JSB1502@21	SIMS	194	178	1.09	0.0674	0.0010	1.2405	0.0265	0.1335	0.0020	851	31	819	12	808	12
JSB1502@24	SIMS	403	1182	0.34	0.0525	0.0014	0.2597	0.0082	0.0358	0.0006	309	60	234	7	227	4
JSB1502@25	SIMS	883	2060	0.43	0.0494	0.0004	0.1735	0.0030	0.0255	0.0004	167	18	162	3	162	3
JSB1502@26	SIMS	1197	1974	0.61	0.0497	0.0005	0.1742	0.0034	0.0254	0.0004	181	25	163	3	162	3
JSB1502@27	SIMS	614	1147	0.54	0.0497	0.0009	0.1977	0.0048	0.0289	0.0005	181	42	183	4	183	3
JSB1502@29	SIMS	2492	1711	1.46	0.0524	0.0003	0.3371	0.0055	0.0467	0.0007	303	14	295	4	294	4
JSB1502@32	SIMS	228	328	0.69	0.1000	0.0008	3.7988	0.0641	0.2754	0.0042	1625	14	1592	14	1568	21
JSB1502@33	SIMS	522	335	1.56	0.1197	0.0004	5.9371	0.0980	0.3596	0.0058	1952	6	1967	14	1980	28

晶而来, 而应该是岩浆上升过程中来自围岩的捕虏晶, 或者是继承自其源岩的碎屑锆石。

利用汉诺坝玄武岩捕获的麻粒岩包体可以推测该地区下地壳在新生代时期存在太古代($\sim 2.5\text{Ga}$)、早元古代($\sim 1.8\text{Ga}$)、中生代($66\sim 200\text{Ma}$)和新生代($45\sim 60\text{Ma}$)的麻粒岩(Wilde等, 2003; Liu等, 2004b; Zheng等, 2009; Liu等, 2010a)和辉石岩(Liu等, 2004b)(图3c)。汉诺坝地区下地壳自中生代中期以来($<200\text{Ma}$)发生了多次岩浆底侵事件, 下地壳麻粒岩和辉石岩的主要年龄峰揭示了这一现象。在汉诺坝碳酸岩中的锆石年龄数据中, 只有四个年龄小于 200Ma (分别是 180Ma 、 160Ma 、 101Ma 和 58Ma)。这四粒年轻锆

石的形态与其他 $>200\text{Ma}$ 的较老锆石不同, 这些年轻锆石发育良好的岩浆振荡分带(图2), 暗示它们可能与中生代和新生代的岩浆底侵事件有关。因此, 这些小于 200Ma 的锆石很可能来自于碳酸岩岩浆上升过程中混染的下地壳麻粒岩或者辉石岩。

汉诺坝碳酸岩中的前寒武纪锆石在 $\sim 2.5\text{Ga}$ 、 $2.1\sim 2.3\text{Ga}$ 、 $1.8\sim 2.0\text{Ga}$ 、 $\sim 1.65\text{Ga}$ 、 $1.3\sim 1.4\text{Ga}$ 、 $\sim 1.1\text{Ga}$ 、 $0.91\sim 0.94\text{Ga}$ 、 $0.74\sim 0.81\text{Ga}$ 和 $0.62\sim 0.63\text{Ga}$ 出现年龄峰, 而该地区新生代下地壳、二叠纪沉积岩及现代河流碎屑锆石记录的地壳岩石年龄均缺少 $0.6\sim 1.4\text{Ga}$ 年龄(图3c)。因此, 汉诺坝碳酸岩中的锆石年龄谱峰既不同于汉诺坝下地壳麻粒岩和辉石岩包体所

表 2 汉诺坝碳酸岩中锆石 Hf 同位素组成

分析点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$	$\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$
JSB1502-01	0.282152	0.000017	0.000774	0.000078	0.02682	0.00277	0.28215	-15.8
JSB1502-02	0.282683	0.000019	0.001735	0.000069	0.04881	0.00147	0.28268	-1.92
JSB1502-03	0.282567	0.000017	0.001702	0.000038	0.05930	0.00109	0.28256	-1.23
JSB1502-07	0.281637	0.000023	0.001075	0.000033	0.03582	0.00107	0.28160	0.31
JSB1502-08	0.282482	0.000017	0.001142	0.000019	0.04104	0.00059	0.28248	-5.07
JSB1502-10	0.281534	0.000020	0.001421	0.000088	0.05036	0.00251	0.28148	0.03
JSB1502-11	0.281565	0.000019	0.000767	0.000021	0.02863	0.00073	0.28154	0.35
JSB1502-21	0.282552	0.000027	0.001443	0.000029	0.04463	0.00085	0.28255	-3.13
JSB1502-22	0.281943	0.000013	0.000785	0.000007	0.02760	0.00038	0.28192	6.99
JSB1502-23	0.282930	0.000014	0.001340	0.000017	0.04336	0.00078	0.28292	13.5
JSB1502-24	0.282134	0.000021	0.001166	0.000020	0.03854	0.00092	0.28210	7.30
JSB1502-29	0.282573	0.000017	0.001003	0.000032	0.03589	0.00102	0.28257	-1.94
JSB1502-30	0.282655	0.000020	0.001453	0.000026	0.04300	0.00107	0.28265	1.47
JSB1502-31	0.282292	0.000020	0.001131	0.000023	0.03686	0.00054	0.28228	-8.62
JSB1502-32	0.282304	0.000018	0.000377	0.000006	0.01184	0.00014	0.28230	3.28
JSB1502-44	0.281391	0.000030	0.001443	0.000025	0.04587	0.00058	0.28133	0.44
JSB1502-49	0.282870	0.000022	0.001376	0.000037	0.04746	0.00141	0.28286	11.2
JSB1502-51	0.281296	0.000017	0.000642	0.000009	0.01942	0.00035	0.28127	3.01
JSB1502-54	0.282509	0.000017	0.001076	0.000023	0.02933	0.00050	0.28250	5.26
JSB1502-56	0.282464	0.000023	0.000987	0.000017	0.02830	0.00055	0.28246	-6.52
JSB1502-59	0.281296	0.000019	0.000440	0.000014	0.01332	0.00050	0.28128	-8.79
JSB1502-64	0.282232	0.000024	0.002272	0.000188	0.06775	0.00517	0.28221	-9.85
JSB1502-65	0.281238	0.000022	0.001249	0.000018	0.04305	0.00082	0.28118	0.12
JSB1502-66	0.282810	0.000016	0.001479	0.000012	0.04757	0.00037	0.28280	7.66
JSB1502-67	0.281267	0.000015	0.000941	0.000006	0.03080	0.00030	0.28122	1.92
JSB1502-70	0.281276	0.000022	0.001058	0.000023	0.03298	0.00065	0.28122	2.79
JSB1502@0	0.282509	0.000014	0.001004	0.000019	0.04082	0.00055	0.28250	4.16
JSB1502@02	0.282774	0.000021	0.001738	0.000032	0.06249	0.00156	0.28276	8.55
JSB1502@05	0.281723	0.000014	0.001237	0.000036	0.04464	0.00100	0.28169	-9.07
JSB1502@06	0.282473	0.000018	0.001024	0.000017	0.03635	0.00079	0.28246	-1.14
JSB1502@07	0.282109	0.000017	0.001835	0.000065	0.05687	0.00283	0.28208	-3.86
JSB1502@08	0.282280	0.000019	0.000723	0.000017	0.02653	0.00088	0.28227	-7.96
JSB1502@09	0.282504	0.000019	0.000991	0.000013	0.03419	0.00066	0.28250	-7.32
JSB1502@11	0.282797	0.000024	0.002906	0.000043	0.10717	0.00301	0.28278	7.75
JSB1502@12	0.281495	0.000018	0.001399	0.000030	0.05288	0.00099	0.28144	-3.46
JSB1502@13	0.282633	0.000016	0.001249	0.000018	0.04131	0.00081	0.28263	-0.42
JSB1502@14	0.281907	0.000034	0.002962	0.000149	0.08443	0.00400	0.28186	-14.6
JSB1502@17	0.282472	0.000020	0.000807	0.000005	0.02912	0.00037	0.28246	5.77
JSB1502@18	0.281502	0.000020	0.001135	0.000033	0.03192	0.00064	0.28146	-5.87
JSB1502@19	0.282117	0.000023	0.001652	0.000183	0.04642	0.00597	0.28210	-13.8
JSB1502@20	0.282072	0.000023	0.002695	0.000026	0.09609	0.00205	0.28203	-9.20
JSB1502@21	0.281966	0.000020	0.002103	0.000129	0.06847	0.00278	0.28193	-11.8
JSB1502@24	0.282532	0.000018	0.002106	0.000090	0.06289	0.00177	0.28252	-3.83
JSB1502@25	0.282970	0.000018	0.000796	0.000006	0.02905	0.00046	0.28297	10.5
JSB1502@27	0.281868	0.000059	0.003483	0.000033	0.09148	0.00101	0.28186	-28.4
JSB1502@29	0.282545	0.000018	0.002291	0.000056	0.06663	0.00149	0.28253	-2.00
JSB1502@32	0.281899	0.000046	0.002681	0.000114	0.11839	0.00623	0.28182	2.36

表 3 汉诺坝碳酸岩中锆石微量元素含量^{a)}

分析点号	年龄 (Ma)	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U
JSB1502-02	58	9.17	2488	44.0	0.098	123	0.17	1.21	2.73	0.21	19.1	9.55	130	56.3	349	84.2	958	196	14446	14.2	6.24	1969	6858
JSB1502-03	289	1.49	2984	18.2	0.73	12.6	0.23	2.12	5.22	0.67	67.0	26.3	288	88.7	397	71.8	669	128	11439	9.37	20.0	988	6122
JSB1502-07	1873	14.2	1711	3.56	0.12	38.6	0.00	0.99	4.51	0.74	34.8	10.6	139	51.6	267	53.5	542	106	10431	1.40	11.7	76.4	201
JSB1502-10	2048	13.3	1582	0.91	0.052	2.64	0.18	2.63	3.84	0.092	36.9	13.2	148	46.0	220	38.1	349	61.2	12236	0.52	12.7	86.6	225
JSB1502-11	1972	58.6	969	1.75	0.17	7.27	0.47	6.14	7.00	0.81	37.1	9.24	102	30.6	139	24.0	222	38.6	9874	0.51	13.2	93.6	85.1
JSB1502-21	221	/	1120	2.15	2.69	14.9	1.51	5.27	3.64	0.17	18.4	6.34	84.7	32.6	175	34.8	347	67.9	12256	2.49	2.94	176	398
JSB1502-23	373	7.65	854	1.28	0.26	10.3	0.00	0.11	2.42	0.43	12.6	5.12	65.0	24.3	131	26.6	282	55.9	9561	0.75	1.58	73.4	78.2
JSB1502-24	1392	19.1	966	2.79	0.86	14.9	0.81	4.99	4.65	1.31	19.3	6.87	80.9	29.8	158	32.4	320	62.9	9787	0.70	5.70	37.5	120
JSB1502-26	162	13.5	1174	7.67	0.09	20.0	0.30	2.82	5.42	0.91	29.7	8.37	98.7	39.9	152	45.4	357	68.7	10766	8.52	62	1197	1974
JSB1502-29	240	/	2434	8.37	0.0	4.47	0.13	1.12	3.89	0.41	46.9	18.7	225	70.1	312	55.6	527	97.1	11759	4.85	5.71	288	3097
JSB1502-30	266	3.76	1162	1.80	0.0	17.1	0.023	1.19	3.25	1.51	17.8	6.50	84.0	32.0	176	38.6	436	98.6	9273	0.91	7.98	355	465
JSB1502-31	393	3.27	1362	2.24	3.01	16.8	1.89	14.3	8.52	2.33	41.4	12.2	134	41.4	199	37.0	359	64.9	10094	1.10	9.55	279	500
JSB1502-32	908	13.8	325	0.36	0.04	2.01	0.012	0.89	0.96	0.15	8.95	2.38	27.8	9.85	50.8	9.97	102	19.8	8267	0.21	1.56	20.4	56.7
JSB1502-33	2124	17.1	2049	5.81	8.59	59.8	4.00	20.3	11.8	2.05	54.2	16.8	197	61.6	303	55.4	538	96.7	9472	2.37	42.8	223	169
JSB1502-34	2115	26.4	794	3.05	6.93	38.6	2.42	11.0	4.18	1.00	19.3	5.60	70.7	24.1	122	24.4	240	47.9	9970	1.38	9.63	53.1	73.6
JSB1502-36	1122	45.8	4242	2.30	6.99	16.2	2.27	15.8	12.9	2.59	90.5	34.0	381	120	561	105	976	163	10388	0.89	16.8	173	670
JSB1502-40	252	13.8	1364	1.32	0.40	4.90	0.28	2.97	4.77	0.69	31.1	10.3	120	39.2	195	39.0	378	69.6	8960	0.74	7.48	172	502
JSB1502-42	1900	87.7	566	1.28	0.23	2.98	0.34	2.08	0.68	0.59	8.54	2.58	40.3	19.5	140	43.0	628	149	12038	1.15	23.5	15.0	265
JSB1502-44	2300	45.7	1045	5.67	0.25	13.0	0.25	2.28	2.07	0.24	19.3	6.90	89.0	31.4	161	30.4	301	54.4	10604	2.33	29.3	129	267
JSB1502-54	681	4.93	814	4.85	0.51	59.1	0.18	2.09	3.87	1.09	17.9	5.64	66.9	20.7	119	25.4	266	54.2	10262	1.27	20.1	359	354
JSB1502-55	240	6.31	1598	4.86	30.2	93.7	10.6	42.1	11.9	0.51	32.8	10.7	126	45.4	240	48.0	481	94.6	8796	2.22	9.89	456	742
JSB1502-56	205	13.7	897	2.76	0.26	34.2	0.42	2.88	4.69	1.01	22.2	6.76	78.0	25.7	129	25.8	262	50.7	10932	1.37	6.11	325	479
JSB1502-57	1066	89.0	2255	2.99	3.82	26.4	3.11	17.7	17.5	10.4	86.2	28.6	270	72.2	299	50.9	464	73.0	12237	0.96	11.2	200	430
JSB1502-59	1973	17.3	461	1.15	0.24	3.62	0.41	0.33	2.93	3.22	19.1	6.02	50.9	12.1	48.3	10.3	98.2	16.8	12588	0.50	6.71	37.0	582
JSB1502-60	269	8.58	2311	4.26	0.56	7.32	0.57	3.33	6.20	1.88	44.8	18.1	204	65.7	318	59.8	580	110	10763	2.33	13.0	274	2454
JSB1502@02	406	3.29	1717	6.48	0.28	34.1	0.22	3.16	5.68	0.96	33.0	12.3	149	59.4	281	63.0	622	115	9024	2.87	73.3	538	1020
JSB1502@06	442	17.7	966	2.46	11.7	198	7.73	51.6	33.5	7.44	59.6	11.3	95.7	31.9	139	30.2	303	60.6	10705	1.49	61.1	350	660
JSB1502@08	439	159	585	2.17	0.67	12.0	0.20	1.83	2.82	0.24	13.6	4.42	50.6	19.2	89.9	20.1	205	41.7	9657	2.22	24.7	160	292
JSB1502@11	341	50.0	2823	8.11	9.10	77.2	11.9	81.1	54.1	15.6	110	32.3	332	104.0	422	88.7	807	143	8740	3.94	54.7	585	1190
JSB1502@29	294	59.7	1611	4.11	0.58	22.8	0.65	5.53	6.28	2.34	28.2	10.60	123.0	53.2	261	58.2	598	129	10196	1.06	27.1	282	428

a) 微量元素含量单位为ppm

揭示的该地区下地壳特征,也完全不同于华北克拉通北部晚古生代-中生代沉积物(Cope等, 2005; Zhou等, 2019)以及流经该地区的现代河流(永定河和滦河)沉积物中碎屑锆石的年龄峰(Yang等, 2009)。汉诺坝碳酸岩的低SiO₂含量(<7.6wt.%; Chen等, 2016)表明即使有硅酸盐地壳物质混染,华北大陆地壳硅酸盐岩石的混染作用也非常有限。Chen等(2016)的研究表明汉诺坝碳酸岩形成于再循环沉积碳酸盐岩高程度熔融作用。因此,上述现象表明汉诺坝碳酸岩中的前寒武纪锆石主要应继承其源岩(即再循环的沉积碳酸盐岩),而非

来自于华北克拉通下地壳物质的混染。此外,华北克拉通北缘现代河流(永定河和滦河)沉积物中的碎屑锆石没有显示0.6~1.4Ga的年龄峰(Yang等, 2009),指示汉诺坝碳酸岩中的锆石也不可能是风成沉积物混染造成。

泥质灰岩中通常由于含有不同比例的硅质沉积物而往往包含大量锆石。因此,携带泥质灰岩的板片在俯冲过程中会将锆石带入俯冲带。泥质灰岩通常具有低的密度和黏度,易于以底辟方式从俯冲带进入地幔楔,继而在地幔楔中发生熔融作用(Behn等, 2011; Kelemen

图4 (网络版彩图) 汉诺坝碳酸岩中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值与U-Pb年龄的变化关系

球粒陨石储库(CHUR)数据来自Blichert-Toft和Albarède(1997), 亏损地幔和大陆地壳Hf同位素组成来自Griffin等(2000). 兴蒙造山带(XMOB)火成岩和沉积物中锆石(周长勇等, 2005; Chen等, 2009; Liu等, 2012; Li Y等, 2017)以及华北克拉通北部(NCC)火成岩(Zheng等, 2004; Yang等, 2007; Zhang等, 2009b)和古生代-中生代地层中的锆石(Yang等, 2006)放在图(b)中作对比

图5 汉诺坝碳酸岩中锆石的球粒陨石标准化稀土元素模式图

年龄后面括号中数值为Th/U比值. 球粒陨石值(C1)来自McDonough和Sun(1995)

和Manning, 2015; Chen等, 2016). 高温高压实验研究表明在含少量水的条件下灰岩的熔融温度可以低至870~900℃(Poli, 2015), 而且碳酸盐沉积物和泥质灰岩熔融形成的碳酸岩熔体是硅饱和的(与石英/柯石英共存)(Grassi和Schmidt, 2011; Tsuno和Dasgupta, 2012;

Schettino和Poli, 2020). 锆石的U-Pb体系封闭温度高, 可达900℃以上(Cherniak和Watson, 2001). 因此, 大陆边缘沉积碳酸盐岩在俯冲进入地幔或者下地壳并发生熔融作用时, 其中的锆石完全可能幸存下来, 并被快速喷发的碳酸岩熔体携带至地表.

5.2 汉诺坝碳酸岩源岩的构造环境识别

从汉诺坝地区所处的大地构造背景来看, 华北克拉通北部和中亚造山带南部是两个潜在的碳酸岩源岩(沉积灰岩)的源区(图1). 碳酸岩中大量的继承碎屑锆石为揭示其灰岩源岩的构造背景提供了有效手段, 利用沉积物中碎屑锆石年龄和Hf同位素组成特征可以有效地区分华北克拉通北部和中亚造山带南部的沉积物. 华北克拉通北部由太古代至古元古代基底(~2.5Ga和~1.8Ga)(Zhao等, 2001)和晚古生代至中生代花岗质岩石组成(Zhang等, 2009a, 2009b). 华北克拉通北部花岗质岩石中的锆石、晚古生代沉积物以及现代河流沉积物中的碎屑锆石一致地以出现~2.5Ga、~1.8Ga、100~500Ma年龄峰和缺失中元古代和新元古代年龄为特征(图3c), 反映了该地区在寒武纪之前独立稳定的演化历史. 相反, 毗邻华北克拉通北缘的兴蒙造山带则不仅包含年龄主要为600~950Ma和1.1~1.5Ga的中、晚元古代微陆块, 而且还广泛发育从古生代到中生代的火成岩(Wu等, 2000; Demoux等, 2009; Xu等, 2015; Wang等, 2017). 因此, 中亚造山带东南部二叠纪沉积物中的锆石年龄谱图明显区别于华北克拉通, 不仅有中亚造山带的岩浆事件和前寒武纪地壳岩石年龄分布(出现280Ma、480Ma、570Ma、0.9~1.1Ga以及1.3~1.4Ga年龄峰), 而且还有一些~1.9Ga和~2.5Ga的年龄(图3b). 这表明中亚造山带南部二叠纪沉积物除了有中亚造山带地壳物质的贡献, 还可能来自华北克拉通北缘的少量地壳物质贡献(Han等, 2012a, 2012b). 汉诺坝碳酸岩中前寒武纪锆石在0.6~1.4Ga之间的年龄峰明显区别于华北克拉通北部的地质事件和沉积物年龄谱图, 但是与中亚造山带东南部沉积物的年龄谱非常吻合(图3). Yang等(2006)的研究表明兴蒙造山带火成岩中显生宙锆石和华北克拉通北部火成岩中显生宙锆石的Hf同位素组成有显著的差别, 整体上前者的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值(-4~16)明显高于后者. 我们注意到汉诺坝碳酸岩中300~373Ma锆石具有显著偏正的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值(7.7~13.5), 与华北克拉通北部锆石的Hf同位素组成明显不同, 而是落在了兴蒙造山带中锆石的Hf同位素组成范围(图4b). 综上所述, 汉诺坝碳酸岩的源岩应该是来自古亚洲洋壳南缘的大陆边缘沉积碳酸盐岩. 本研究为古亚洲洋的沉积碳酸盐岩被俯冲携带到华北克拉通之下的岩石圈地幔提供了进一步的关键证据.

5.3 对古亚洲洋俯冲闭合时间的约束

由于汉诺坝碳酸岩源岩经历了完整的俯冲再循环作用, 因此其中的碎屑锆石也为制约古亚洲洋消解闭合时间提供了新的手段. 已有研究表明, 沉积岩中碎屑锆石年龄分布可以用来限制沉积作用的最大年龄(Fedo等, 2003; Tang等, 2006; Amato等, 2009). 华北克拉通北部和兴蒙造山带沉积物中锆石的年龄谱都显示了200~400Ma的年龄峰值(图3b、3c). 由于受到寒武纪以来古亚洲洋板块俯冲作用的影响, 在华北克拉通北缘发育了大量晚石炭纪-中二叠纪(324~274Ma)辉长岩-闪长岩-花岗岩侵入体和晚二叠纪-中三叠纪(254~237Ma)花岗岩类侵入体(Zhang等, 2009a, 2009b). 因此, 汉诺坝碳酸岩中的显生宙锆石可能有两个来源: 华北克拉通北缘或古亚洲洋壳. 前人的研究表明, 华北克拉通北缘与兴蒙造山带中显生宙锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 有系统差异(图4b), 华北克拉通北缘火成岩中的锆石整体具有偏负的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ (集中在-38~1.2)(Yang等, 2006; Zhang等, 2009a, 2009b), 但兴蒙造山带显生宙花岗岩和火山岩中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值整体较高(集中在-4~16)(周长勇等, 2005; Chen等, 2009; Li Y等, 2017). 汉诺坝碳酸岩中205~300Ma锆石的Hf同位素组成落在了兴蒙造山带与华北克拉通北部的重叠区, 难以区分其来源; 但300~400Ma锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 特征明显区别于华北克拉通北部火成岩与沉积物中同时期的锆石, 而是落在了兴蒙造山带火成岩与沉积物中锆石的范围. 上述现象表明汉诺坝碳酸岩中300~400Ma锆石应该来自古亚洲洋壳, 也就是说汉诺坝碳酸岩源岩(沉积碳酸盐岩)的形成年龄应不早于300Ma. 由此, 我们推测古亚洲洋在晚石炭世还在发生碳酸盐沉积作用, 这为晚石炭世-早二叠世仍然存在古亚洲洋提供了直接证据, 支持古亚洲洋最终闭合时间应该是二叠纪末的认识(Xiao等, 2003; Windley等, 2007).

5.4 古亚洲洋板块俯冲引起的大规模沉积碳酸盐深部再循环作用

大洋中的碳酸盐沉积作用主要受控于海水温度, 赤道附近高海水温度地区相对容易形成沉积碳酸盐(Dutkiewicz等, 2015). 古亚洲洋分布范围广阔, 演化时间漫长, 但在250~450Ma的大部分时间内其大部分地区都处在南北纬20°范围内(Kirscher, 2014), 非常有利

于碳酸盐沉积,这也与中亚造山带中广泛分布变质碳酸盐的现象一致。中亚造山带从西到东在塔吉克南天山、科克切塔夫地块、中国西南天山、敦煌地块等地区的造山带变质岩中均发现有变质碳酸盐(Volkova和Budanov, 1999; Zong等, 2012; Lü等, 2013; Schertl和Sobolev, 2013; He等, 2014)。塔吉克南天山蓝片岩带中发育层状大理岩,其原岩被认为是发育在大洋洋岛上的沉积碳酸盐盖层(Volkova和Budanov, 1999);在中亚造山带西部的科克切塔夫超高压变质岩则发现了经历过超高压变质作用的不纯大理岩、白云质大理岩、方解石大理岩和辉石-碳酸盐岩等(Schertl和Sobolev, 2013);在西南天山高压变质岩带的变沉积岩中常见大理岩夹层(Lü等, 2013),而且榴辉岩中含有碳酸盐(Li等, 2012);中亚造山带中部敦煌地块同样也观察到大陆边缘沉积碳酸盐发生俯冲的现象,其中的麻粒岩和大理岩伴生(Zong等, 2012; He等, 2014)。尽管中亚造山带东段的兴蒙造山带中未报道经历超高压变质作用的大理岩,但达理湖玄武岩携带的碳酸岩捕虏体记录了沉积碳酸盐岩发生了深部地幔再循环作用(Liu等, 2015)。上述这些现象表明古亚洲洋曾发育了非常广泛的沉积碳酸盐岩,而且其中一部分沉积碳酸盐岩在洋壳俯冲过程中可能返回了地幔。

近年来,在塔里木克拉通和华北克拉通北缘先后发现了一系列具有沉积碳酸盐岩地球化学特征的中、新生代火成碳酸岩(脉),这些碳酸岩应该是沉积碳酸盐岩被古亚洲洋俯冲板块带入地球内部不同深度后熔融形成的。与正常地幔值相比,在塔里木克拉通发现的碳酸岩以低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 、高 $\delta^{13}\text{C}$ 为特征,因此被认为其地幔源区存在古亚洲洋壳俯冲带入的沉积碳酸盐的贡献(Cheng等, 2017)。华北克拉通北缘,在怀仁和涿鹿(阎国翰等, 2007)、汉诺坝(Chen等, 2016)、四子王旗(Zhang等, 2017)等地先后发现了一系列由再循环沉积碳酸盐岩熔融形成的碳酸岩,这些碳酸岩普遍以富集放射成因Sr同位素为特征。由于碳酸盐岩相对较高的固相线温度和较低的力学强度和密度,沉积碳酸盐岩在俯冲板片上难以发生熔融作用,而可能是以固态形式通过塑性底辟作用进入上覆热地幔楔后发生了熔融作用(刘勇胜等, 2019)。华北北部新生代广泛的地幔热事件不仅导致了大规模玄武岩喷发,而且诱发了地幔中这些碳酸盐岩底辟体的高程度熔融和大规模碳释放(Chen等, 2016)。

5.5 沉积碳酸盐再循环对华北克拉通北缘壳幔物质组成的影响

古亚洲洋板块俯冲作用引起的沉积碳酸盐深部再循环作用必然会对华北克拉通北缘壳幔物质组成与分异产生重要影响,并在岩石圈地幔和幔源火成岩的地球化学特征上留下标志性印记(刘勇胜等, 2019)。华北克拉通北缘从西到东一系列新生代玄武岩捕获的地幔包体中单斜辉石表现出由高Ti/Eu、低(La/Yb)_N向低Ti/Eu、高(La/Yb)_N变化的趋势,记录了华北克拉通北缘广泛的岩石圈地幔碳酸盐交代作用的影响(图6a)。那些低Ti/Eu、高(La/Yb)_N单斜辉石的Sr同位素组成变化分为两组(图6b):一组的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值随着Ti/Eu比值降低而升高(最高达到>0.709),落在了沉积碳酸盐和亏损地幔的混合趋势线上,这种变化趋势清晰地反映了亏损地幔受到再循环沉积碳酸盐改造的影响;另一组的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值随着Ti/Eu比值降低变化不大,落在了典型火成碳酸岩和亏损地幔的混合线上,指示引起该类碳酸盐交代作用的熔体可能来自软流圈地幔。

华北克拉通北缘岩石圈地幔很可能经历了古元古代华北克拉通东部带和西部带拼合时的碳酸盐化沉积物俯冲(Xu C等, 2017; Xu等, 2018, 2019)和古生代古亚洲洋壳携带碳酸盐化沉积物俯冲的叠加改造(Wang等, 2016; Chen等, 2017; Wu等, 2017)。上述二者的区别在于两个方面:一是古元古代碳酸盐沉积物以相对较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为特征(Veizer和Mackenzie, 2003; Castillo, 2015);二是古元古代碳酸盐沉积物再循环引起的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 地幔应呈南北向分布,而古亚洲洋板片南向俯冲导致的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 地幔应呈东西向展布。近年来的研究表明碳酸盐交代作用引起的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 地幔在华北克拉通北缘呈东西向展布(Xu等, 2003; Zhang H F等, 2012; Wang等, 2016; Chen等, 2017; Wu等, 2017),而在华北克拉通内部则表现出南北向分带特征(Xu R等, 2017)。因此,结合区域构造环境和再循环碳酸盐交代地幔的空间分布特征,我们推断华北克拉通北缘亏损岩石圈地幔发生碳酸盐交代的熔体很大一部分应来自与古亚洲洋俯冲有关的再循环沉积碳酸盐(Wang等, 2016; Chen等, 2017; Wu等, 2017)。

古亚洲洋俯冲作用带来的碳酸盐沉积物不仅改造了华北克拉通岩石圈地幔物质组成,并可能影响了后期岩浆活动。地幔交代过程中H₂O和CO₂等挥发分加

图 6 华北克拉通北缘新生代玄武岩捕获的地幔橄榄岩包体中单斜辉石 Ti/Eu-(La/Yb)_N和 Ti/Eu-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 变化图

数据来源如下: 四子王旗(Wu等, 2017)、阳原(Yang等, 2018; Wang等, 2019)、繁峙(Tang等, 2008; Chen等, 2017)、大同(Wang等, 2016)、集宁(Zhang H F等, 2012; 王瑞雪等, 2017)、围场(Zou等, 2016)、汉诺坝(Xu等, 1998; Rudnick等, 2004; Choi等, 2008)、辉南(Zhang等, 2020)和我们未发表的伊通橄榄岩包体数据。DLH为达里湖玄武岩中碳酸岩包体平均值(Liu等, 2015)。 (b)中碳酸盐岩为全球四个地区的古生代碳酸盐样品平均值($n=117$, 误差为1SD), 碳酸岩为全球火成碳酸岩样品平均值($n=271$, 误差为1SD)。亏损地幔中单斜辉石(DM Cpx)据Workman和Hart (2005)

入会显著降低地幔岩石的固相线温度, 诱发地幔熔融作用, 并且会使熔体更贫硅、富碱(Foley和Pintér, 2018)。因此, 贫硅、富碱熔体的形成很可能与碳酸盐交代地幔有关。华北克拉通北缘燕辽-阴山地区发育一条东西向三叠纪富碱侵入岩带, 其中的碱性岩总体为富碱、硅不饱和的超基性-中性系列岩石, 主要包括正长岩、煌斑岩和碳酸岩等(Niu等, 2012; Yang等, 2012; Zhang S等, 2012; Niu等, 2017)。这些碱性岩富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 具有较演化的Sr-Nd-Hf同位素组成, 被认为来自存在大量再循环壳源物质贡献的交代地幔(Yang等, 2012; Zhang S等, 2012; Hou等, 2015)。而且, 在碱性岩中还发现了大量原生方解石及与之共生的火成碳酸岩, 这些特征表明碱性岩母岩浆富集CO₂, 其地幔源区存在再循环的碳酸盐岩或碳酸盐化沉积物(Niu等, 2012, 2017)。

另外, 俯冲沉积物具有很强的氧化性, 其中的碳酸盐矿物是影响地幔氧逸度的重要贡献物质之一(Brounce等, 2019)。相较于其他氧化性物质, 碳酸盐独有的两个特点让其可以更有效地氧化地幔: 一是在俯冲过程中碳酸盐可局部还原形成石墨、金刚石或者碳

化物(Frezzotti等, 2011; Galvez等, 2013; He等, 2017), 此过程中可能伴随释放高氧逸度组分到上覆地幔; 二是碳酸盐进入地幔后会发生脱碳反应, 由此形成的CO₂会显著提升上覆地幔的氧逸度(Simakin等, 2012)。地幔硫化物对氧逸度非常敏感, 在氧逸度高于QFM+1的环境下就会转化成硫酸盐(Jugo等, 2010)。我们最近对兴安造山带达里湖玄武岩中的碳酸岩与橄榄岩包体的研究表明, 古亚洲洋壳俯冲过程中的沉积碳酸盐再循环作用可以提高岩石圈地幔的局部氧逸度(He等, 2020b), 并显著影响地幔中硫化物的稳定性以及在硫化物中富集元素(如Ni、铂族元素(PGE)等)的活化迁移(He等, 2020a)。华北克拉通北缘是我国重要的Ni-Cu-PGE硫化物矿床成矿带之一(吕林素等, 2007), 与古亚洲洋壳俯冲有关的碳酸盐再循环作用很可能对该地区部分Ni-Cu-PGE硫化物矿床的形成具有重要贡献。

6 结论

汉诺坝碳酸岩侵入体是俯冲灰岩高程度熔融形成的, 其中的锆石U-Pb定年为灰岩起源和古亚洲洋俯冲

时间提供了关键的限制。该碳酸岩中的锆石显示了从前寒武纪到显生宙广泛的年龄范围, 前寒武纪锆石年龄谱与兴蒙造山带碎屑锆石的年龄谱相似, 完全不同于华北克拉通北部沉积物中碎屑锆石年龄谱。而且, 300~373Ma 锆石显著偏正的 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值进一步确证这些显生宙锆石来自兴蒙造山带。汉诺坝碳酸岩中碎屑锆石年龄谱与Hf同位素组成表明其灰岩源岩来自古亚洲洋壳, 而且形成灰岩的沉积作用时间应不早于300Ma。因此, 该研究同时为古亚洲洋在晚石炭世-早二叠世还未完全闭合提供了直接证据。古亚洲洋曾发育了非常广泛的沉积碳酸盐岩, 其中一部分碳酸盐岩在洋壳俯冲过程中返回了地球内部, 并可能通过塑性底辟作用进入上覆地幔楔后发生了高程度熔融作用。古亚洲洋板块俯冲作用引起的沉积碳酸盐深部再循环作用不仅对华北克拉通北缘岩石圈的化学组成和物理性质(如氧逸度)产生了重要影响, 而且可能对该地区的岩浆活动和部分金属硫化物矿床的形成具有重要贡献。

致谢 感谢郭京梁博士在锆石U-Pb定年中的帮助, 感谢三位匿名审稿人提出的修改和完善意见。

参考文献

- 陈斌, 赵国春, Wilde S. 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义. *地质论评*, 47: 361–367
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石U-Pb年龄及地质意义. *岩石学报*, 21: 749–762
- 郭敬辉, 石听, 卞爱国, 许荣华, 翟明国, 李永刚. 1999. 桑干地区早元古代花岗岩长石Pb同位素组成和锆石U-Pb年龄: 变质与地壳熔融作用及构造-热事件演化. *岩石学报*, 15: 199–207
- 刘勇胜, 陈春飞, 何德涛, 陈唯. 2019. 板块俯冲过程中的地球深部碳循环作用. *中国科学: 地球科学*, 49: 1982–2003
- 刘勇胜, 高山, 柳小明, 陈小明, 张文兰, 王选策. 2003. 汉诺坝下地壳-上地幔包体的岩石圈热动力学记录. *科学通报*, 48: 1575–1581
- 吕林素, 毛景文, 刘珺, 张作衡, 谢桂青. 2007. 华北克拉通北缘岩浆Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床地质特征、形成时代及其地球动力学背景. *地球学报*, 28: 148–166
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张福勤, 苗来成, 施光海, 张履桥, 陶华. 2004. 内蒙古苏左旗地区闪长-花岗岩类 SHRIMP年代学. *地质学报*, 78: 789–799
- 王瑞雪, 刘勇胜, 宗克清, 胡兆初. 2017. 内蒙古集宁橄榄岩包体微区微量元素与Sr同位素特征及其岩石圈地幔演化的指示意义. *地球科学*, 42: 511–526
- 王涛, 郑亚东, Gehrels G E, 穆治国. 2001. 南蒙微大陆存在的年代学证据: 亚干-翁奇海杂岩核杂岩花岗岩片麻岩的锆石U-Pb年龄. *科学通报*, 46: 1220–1223
- 徐义刚, 李洪颜, 庞崇进, 何斌. 2009. 论华北克拉通破坏的时限. *科学通报*, 54: 1974–1989
- 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善, 蔡剑辉, 任康绪, 李凤棠. 2007. 华北克拉通火成碳酸岩时空分布和锆钨同位素特征及其地质意义. *高校地质学报*, 13: 463–473
- 周长勇, 吴福元, 葛文春, 孙德有, Abdel Rahman A A, 张吉衡, 程瑞玉. 2005. 大兴安岭北部塔河堆晶辉长岩体的形成时代、地球化学特征及其成因. *岩石学报*, 21: 763–775
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. *中国科学: 地球科学*, 41: 583–592
- Amato J M, Toro J, Miller E L, Gehrels G E, Farmer G L, Gottlieb E S, Till A B. 2009. Late Proterozoic-Paleozoic evolution of the Arctic Alaska-Chukotka terrane based on U-Pb igneous and detrital zircon ages: Implications for Neoproterozoic paleogeographic reconstructions. *Geol Soc Am Bull*, 121: 1219–1235
- Barker D S. 2001. Calculated silica activities in carbonatite liquids. *Contrib Mineral Petrol*, 141: 704–709
- Becker H, Altherr R. 1992. Evidence from ultra-high-pressure marbles for recycling of sediments into the mantle. *Nature*, 358: 745–748
- Behn M D, Kelemen P B, Hirth G, Hacker B R, Massonne H J. 2011. Diapirs as the source of the sediment signature in arc lavas. *Nat Geosci*, 4: 641–646
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib Mineral Petrol*, 143: 602–622
- Blichert-Toft J, Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet Sci Lett*, 148: 243–258
- Brounce M, Cottrell E, Kelley K A. 2019. The redox budget of the Mariana subduction zone. *Earth Planet Sci Lett*, 528: 115859
- Bulanova G, Walter M, Smith C, Kohn S, Armstrong L, Blundy J, Gobbo L. 2010. Mineral inclusions in sublithospheric diamonds from Collier 4 kimberlite pipe, Juina, Brazil: Subducted protoliths, carbonated melts and primary kimberlite magmatism. *Contrib Mineral Petrol*, 160: 489–510
- Castillo P R. 2015. The recycling of marine carbonates and sources of HIMU and FOZO ocean island basalts. *Lithos*, 216–217: 254–263
- Chen B, Jahn B M, Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments. *J Asian Earth Sci*, 34:

- 245–257
- Chen C F, Liu Y S, Feng L, Foley S F, Zhou L, Ducea M N, Hu Z C. 2018. Calcium isotope evidence for subduction-enriched lithospheric mantle under the northern North China Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 238: 55–67
- Chen C F, Liu Y S, Foley S F, Ducea M N, Geng X L, Zhang W, Xu R, Hu Z C, Zhou L, Wang Z C. 2017. Carbonated sediment recycling and its contribution to lithospheric refertilization under the northern North China Craton. *Chem Geol*, 466: 641–653
- Chen C F, Liu Y S, Foley S F, Ducea M N, He D T, Hu Z C, Chen W, Zong K Q. 2016. Paleo-Asian oceanic slab under the North China craton revealed by carbonatites derived from subducted limestones. *Geology*, 44: 1039–1042
- Cheng Z, Zhang Z, Hou T, Santosh M, Chen L, Ke S, Xu L. 2017. Decoupling of Mg-C and Sr-Nd-O isotopes traces the role of recycled carbon in magnesiocarbonatites from the Tarim Large Igneous Province. *Geochim Cosmochim Acta*, 202: 159–178
- Cheng Z, Zhang Z, Xie Q, Hou T, Ke S. 2018. Subducted slab-plume interaction traced by magnesium isotopes in the northern margin of the Tarim Large Igneous Province. *Earth Planet Sci Lett*, 489: 100–110
- Cherniak D J, Watson E B. 2001. Pb diffusion in zircon. *Chem Geol*, 172: 5–24
- Choi S H, Mukasa S B, Zhou X H, Xian X H, Andronikov A V. 2008. Mantle dynamics beneath East Asia constrained by Sr, Nd, Pb and Hf isotopic systematics of ultramafic xenoliths and their host basalts from Hannuoba, North China. *Chem Geol*, 248: 40–61
- Clift P D. 2017. A revised budget for Cenozoic sedimentary carbon subduction. *Rev Geophys*, 55: 97–125
- Cope T, Ritts B D, Darby B J, Fildani A, Graham S A. 2005. Late Paleozoic sedimentation on the northern margin of the North China block: Implications for regional tectonics and climate change. *Int Geol Rev*, 47: 270–296
- Demoux A, Kröner A, Liu D, Badarch G. 2009. Precambrian crystalline basement in southern Mongolia as revealed by SHRIMP zircon dating. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 98: 1365–1380
- Dobretsov N L, Buslov M M, Vernikovskiy V A. 2003. Neoproterozoic to early ordovician evolution of the Paleo-Asian Ocean: Implications to the break-up of Rodinia. *Gondwana Res*, 6: 143–159
- Dutkiewicz A, Müller R D, O’Callaghan S, Jónasson H. 2015. Census of seafloor sediments in the world’s ocean. *Geology*, 43: 795–798
- Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Rev Mineral Geochem*, 53: 277–303
- Foley S F, Pintér Z. 2018. Chapter 1 - Primary Melt Compositions in the Earth’s Mantle. In: Kono Y, Sanloup C, Eds. *Magmas under Pressure*. Amsterdam: Elsevier. 3–42
- Frezzotti M L, Selverstone J, Sharp Z D, Compagnoni R. 2011. Carbonate dissolution during subduction revealed by diamond-bearing rocks from the Alps. *Nat Geosci*, 4: 703–706
- Galvez M E, Beyssac O, Martinez I, Benzerara K, Chaduteau C, Malvoisin B, Malavieille J. 2013. Graphite formation by carbonate reduction during subduction. *Nat Geosci*, 6: 473–477
- Gervasoni F, Klemme S, Rohrbach A, Grützner T, Berndt J. 2017. Experimental constraints on the stability of baddeleyite and zircon in carbonate- and silicate-carbonate melts. *Am Miner*, 102: 860–866
- Grant M L, Wilde S A, Wu F, Yang J. 2009. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th-U-Pb chemistry and U-Pb ages in interpreting discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic boundary. *Chem Geol*, 261: 155–171
- Grassi D, Schmidt M W. 2011. The melting of carbonated pelites from 70 to 700 km depth. *J Petrol*, 52: 765–789
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, van Acherbergh E, O’Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim Cosmochim Acta*, 64: 133–147
- Griffin W L, Zhang A, O’Reilly S Y, Ryan C G. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M, Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Eds. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Geodynamics Series. Washington D C: American Geophysical Union. 107–126
- Han G, Liu Y, Neubauer F, Genser J, Zhao Y, Wen Q, Li W, Wu L, Jiang X, Zhao L. 2012a. Provenance analysis of Permian sandstones in the central and southern Da Xing’an Mountains, China: Constraints on the evolution of the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonophysics*, 580: 100–113
- Han G, Liu Y, Neubauer F, Jin W, Genser J, Ren S, Li W, Wen Q, Zhao Y, Liang C. 2012b. LA-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the Permian sandstones in Da Xing’an Mountains, NE China: New evidence for the eastern extension of the Erenhot-Hegenshan suture zone. *J Asian Earth Sci*, 49: 249–271
- He D T, Liu Y S, Moynier F, Foley S F, Chen C F. 2020a. Platinum group element mobilization in the mantle enhanced by recycled sedimentary carbonate. *Earth Planet Sci Lett*, 541: 116262
- He D T, Liu Y S, Chen C F, Foley S F, Ducea M N. 2020b. Oxidization of the mantle caused by sediment recycling may contribute to the formation of iron-rich mantle melts. *Sci Bull*, 65: 519–521
- He D T, Liu Y S, Gao C G, Chen C F, Hu Z C, Gao S. 2017. SiC-dominated ultra-reduced mineral assemblage in carbonatitic xenoliths from the Dalihu basalt, Inner Mongolia, China. *Am Miner*, 102: 312–320

- He Z, Zhang Z, Zong K, Xiang H, Klemd R. 2014. Metamorphic *P-T-t* evolution of mafic HP granulites in the northeastern segment of the Tarim Craton (Dunhuang block): Evidence for early Paleozoic continental subduction. *Lithos*, 196-197: 1–13
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hancher J M, Hoskin P W O, Eds. *Zircon. Rev Mineral Geochem*. 27–62
- Hou T, Zhang Z, Keiding J K, Veksler I V. 2015. Petrogenesis of the ultrapotassic Fanshan intrusion in the North China Craton: Implications for lithospheric mantle metasomatism and the origin of apatite ores. *J Petrol*, 56: 893–918
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, Liu W G, Zhang W, Tong X R, Lin L, Zong K Q, Li M, Chen H H, Zhou L, Yang L. 2012. Improved *in situ* Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. *J Anal At Spectrom*, 27: 1391–1399
- Jahn B, Wu F, Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Earth Environ Sci Trans R Soc Edinburgh*, 91: 181–193
- Jiang N, Carlson R W, Guo J. 2011. Source of Mesozoic intermediate-felsic igneous rocks in the North China Craton: Granulite xenolith evidence. *Lithos*, 125: 335–346
- Jugo P J, Wilke M, Botcharnikov R E. 2010. Sulfur K-edge XANES analysis of natural and synthetic basaltic glasses: Implications for S speciation and S content as function of oxygen fugacity. *Geochim Cosmochim Acta*, 74: 5926–5938
- Kelemen P B, Manning C E. 2015. Reevaluating carbon fluxes in subduction zones, what goes down, mostly comes up. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: E3997–E4006
- Kirscher U. 2014. Paleozoic Paleogeography of the South Western Part of the Central Asian Orogenic Belt: Paleomagnetic Constraints. Universitätsbibliothek der Ludwig-Maximilians-Universität
- Kononova V A, Kurat G, Embey-Isztin A, Pervov V A, Koeberl C, Brandstätter F. 2002. Geochemistry of metasomatised spinel peridotite xenoliths from the Dariganga Plateau, South-eastern Mongolia. *Mineral Petrol*, 75: 1–21
- Lee C T A, Lackey J S. 2015. Global continental arc flare-ups and their relation to long-term greenhouse conditions. *Elements*, 11: 125–130
- Li J L, Klemd R, Gao J, Meyer M. 2012. Coexisting carbonate-bearing eclogite and blueschist in SW Tianshan, China: Petrology and phase equilibria. *J Asian Earth Sci*, 60: 174–187
- Li S G, Yang W, Ke S, Meng X N, Tian H C, Xu L J, He Y S, Huang J, Wang X C, Xia Q K, Sun W D, Yang X Y, Ren Z Y, Wei H Q, Liu Y S, Meng F C, Yan J. 2017. Deep carbon cycles constrained by a large-scale mantle Mg isotope anomaly in eastern China. *Natl Sci Rev*, 4: 111–120
- Li X H, Liu Y, Li Q L, Guo C H, Chamberlain K R. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochim Geophys Geosyst*, 10: Q04010
- Li Y, Brouwer F M, Xiao W, Zheng J. 2017. Late Devonian to early Carboniferous arc-related magmatism in the Baolidao arc, Inner Mongolia, China: Significance for southward accretion of the eastern Central Asian orogenic belt. *Geol Soc Am Bull*, 129: 677–697
- Lin J, Liu Y, Yang Y, Hu Z. 2016. Calibration and correction of LA-ICP-MS and LA-MC-ICP-MS analyses for element contents and isotopic ratios. *Solid Earth Sci*, 1: 5–27
- Liu S, Feng C, Hu R, Lai S, Coulson I M, Feng G, Yang Y. 2014. Geochemical, Sr-Nd isotope, and zircon U-Pb geochronological constraints on the origin of Early Cretaceous carbonatite dykes, northern Shanxi Province, China. *Acta Petrol Sin*, 30: 350–360
- Liu S, Hu R, Gao S, Feng C, Huang Z, Lai S, Yuan H, Liu X, Coulson I M, Feng G, Wang T, Qi Y. 2009. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong-Baoshan Block, Western Yunnan Province, SW China. *J Asian Earth Sci*, 36: 168–182
- Liu Y S, Gao S, Gao C G, Zong K Q, Hu Z C, Ling W L. 2010a. Garnet-rich granulite xenoliths from the Hannuoba basalts, North China: Petrogenesis and implications for the Mesozoic crust-mantle interaction. *J Earth Sci*, 21: 669–691
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010b. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *J Petrol*, 51: 537–571
- Liu Y S, Gao S, Yuan H L, Zhou L, Liu X M, Wang X C, Hu Z C, Wang L S. 2004a. U-Pb zircon ages and Nd, Sr, and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton: Insights on evolution of lower continental crust. *Chem Geol*, 211: 87–109
- Liu Y S, He D, Gao C G, Foley S, Gao S, Hu Z C, Zong K Q, Chen H H. 2015. First direct evidence of sedimentary carbonate recycling in subduction-related xenoliths. *Sci Rep*, 5: 11547
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. 2010c. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chin Sci Bull*, 55: 1535–1546
- Liu Y S, Wang X H, Wang D B, He D T, Zong K Q, Gao C G, Hu Z C, Gong H J. 2012. Triassic high-Mg adakitic andesites from Linxi, Inner Mongolia: Insights into the fate of the Paleo-Asian ocean crust and fossil slab-derived melt-peridotite interaction. *Chem Geol*, 328: 89–108

- Liu Y S, Yuan H L, Gao S, Hu Z C, Wang X C, Liu X M, Lin W L. 2004b. Zircon U-Pb ages of olivine pyroxenite xenolith from Hannuoba: Links between the 97–158 Ma basaltic underplating and granulite-facies metamorphism. *Chin Sci Bull*, 49: 1055–1062
- Lü Z, Bucher K, Zhang L. 2013. Omphacite-bearing calcite marble and associated coesite-bearing pelitic schist from the meta-ophiolitic belt of Chinese western Tianshan. *J Asian Earth Sci*, 76: 37–47
- Mackenzie F T, Morse J W. 1992. Sedimentary carbonates through Phanerozoic time. *Geochim Cosmochim Acta*, 56: 3281–3295
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the earth. *Chem Geol*, 120: 223–253
- McKenzie N R, Horton B K, Loomis S E, Stockli D F, Planavsky N J, Lee C T A. 2016. Continental arc volcanism as the principal driver of icehouse-greenhouse variability. *Science*, 352: 444–447
- Meng X H, Ge M. 2002. Research on cyclic sequence, events and formational evolution of the Sino-Korea plate. *Earth Sci Front*, 9: 125–140
- Menzies M A, Fan W M, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. *Geol Soc Lond Special Publ*, 76: 71–81
- Miao L, Qiu Y, McNaughton N, Luo Z, Groves D, Zhai Y, Fan W, Zhai M, Guan K. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granitoids from Dongping area, Hebei Province, China: Constraints on tectonic evolution and geodynamic setting for gold metallogeny. *Ore Geol Rev*, 19: 187–204
- Montero P, Haissen F, Mouttaqi A, Molina J F, Errami A, Sadki O, Cambeses A, Bea F. 2016. Contrasting SHRIMP U-Pb zircon ages of two carbonatite complexes from the peri-cratonic terranes of the Reguibat Shield: Implications for the lateral extension of the West African Craton. *Gondwana Res*, 38: 238–250
- Niu X, Chen B, Feng G, Liu F, Yang J. 2017. Origin of lamprophyres from the northern margin of the North China Craton: Implications for mantle metasomatism. *J Geol Soc*, 174: 353–364
- Niu X, Chen B, Liu A, Suzuki K, Ma X. 2012. Petrological and Sr-Nd-Os isotopic constraints on the origin of the Fanshan ultrapotassic complex from the North China Craton. *Lithos*, 149: 146–158
- Ogasawara Y, Ohta M, Fukasawa K, Katayama I, Maruyama S. 2000. Diamond-bearing and diamond-free metacarbonate rocks from Kumdy-Kol in the Kokchetav Massif, northern Kazakhstan. *Isl Arc*, 9: 400–416
- Poli S. 2015. Carbon mobilized at shallow depths in subduction zones by carbonatitic liquids. *Nat Geosci*, 8: 633–636
- Rodionov N V, Belyatsky B V, Antonov A V, Kapitonov I N, Sergeev S A. 2012. Comparative *in-situ* U-Th-Pb geochronology and trace element composition of baddeleyite and low-U zircon from carbonatites of the Palaeozoic Kovdor alkaline-ultramafic complex, Kola Peninsula, Russia. *Gondwana Res*, 21: 728–744
- Rojas-Agramonte Y, Kröner A, Demoux A, Xia X, Wang W, Donskaya T, Liu D, Sun M. 2011. Detrital and xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia: Significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Res*, 19: 751–763
- Rudnick R L, Gao S, Ling W L, Liu Y S, McDonough W F. 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. *Lithos*, 77: 609–637
- Schertl H P, Okay A I. 1994. A coesite inclusion in dolomite in Dabie Shan, China: Petrological and rheological significance. *European J Mineral*, 6: 995–1000
- Schertl H P, Sobolev N V. 2013. The Kokchetav Massif, Kazakhstan: “Type locality” of diamond-bearing UHP metamorphic rocks. *J Asian Earth Sci*, 63: 5–38
- Schettino E, Poli S. 2020. Hydrous carbonatitic liquids drive CO₂ recycling from subducted marls and limestones. In: Manning C E, Lin J F, Mao W L, Eds. *Carbon in Earth's Interior*. 209–221
- Şengör A, Natal'in B, Burtman V. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307
- Simakin A G, Salova T P, Bondarenko G V. 2012. Experimental study of magmatic melt oxidation by CO₂. *Petrology*, 20: 593–606
- Sláma J, Košler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hanchar J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N, Whitehouse M J. 2008. Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem Geol*, 249: 1–35
- Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, Gong B. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating, C and O isotopes for impure marbles from the Jiaobei terrane in the Sulu orogen: Implication for tectonic affinity. *Precambrian Res*, 144: 1–18
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, Zhang J, Liu X M. 2008. Refertilization of ancient lithospheric mantle beneath the central North China Craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. *Lithos*, 101: 435–452
- Tsuno K, Dasgupta R. 2012. The effect of carbonates on near-solidus melting of pelite at 3 GPa: Relative efficiency of H₂O and CO₂ subduction. *Earth Planet Sci Lett*, 319–320: 185–196
- Veizer J, Mackenzie F T. 2003. 7.15 - Evolution of Sedimentary Rocks. In: Holland H D, Turekian K K, Eds. *Treatise on Geochemistry*. Pergamon, Oxford. 369–407
- Vermeech P. 2012. On the visualisation of detrital age distributions. *Chem Geol*, 312–313: 190–194
- Volkova N I, Budanov V I. 1999. Geochemical discrimination of metabasalt rocks of the Fan-Karategin transitional blueschist/

- greenschist belt, South Tianshan, Tajikistan: Seamount volcanism and accretionary tectonics. *Lithos*, 47: 201–216
- Walter M J, Kohn S C, Araujo D, Bulanova G P, Smith C B, Gaillou E, Wang J, Steele A, Shirey S B. 2011. Deep mantle cycling of oceanic crust: Evidence from diamonds and their mineral inclusions. *Science*, 334: 54–57
- Wang C, Lai Y J, Foley S F, Liu Y, Belousova E, Zong K, Hu Z. 2020. Rutile records for the cooling history of the Trans-North China orogen from assembly to break-up of the Columbia supercontinent. *Precambrian Res*, 346: 105763
- Wang C Y, Liu Y S, Foley S F, Zong K Q, Hu Z C. 2019. Lithospheric transformation of the northern North China Craton by changing subduction style of the Paleo-Asian oceanic plate: Constraints from peridotite and pyroxenite xenoliths in the Yangyuan basalts. *Lithos*, 328–329: 58–68
- Wang C Y, Liu Y S, Min N, Zong K Q, Hu Z C, Gao S. 2016. Paleo-Asian oceanic subduction-related modification of the lithospheric mantle under the North China Craton: Evidence from peridotite xenoliths in the Datong basalts. *Lithos*, 261: 109–127
- Wang T, Tong Y, Zhang L, Li S, Huang H, Zhang J, Guo L, Yang Q, Hong D, Donskaya T, Gladkochub D, Tserendash N. 2017. Phanerozoic granitoids in the central and eastern parts of Central Asia and their tectonic significance. *J Asian Earth Sci*, 145: 368–392
- Wei Y, Zheng J, Su Y, Ma Q, Griffin W L. 2015. Lithological and age structure of the lower crust beneath the northern edge of the North China Craton: Xenolith evidence. *Lithos*, 216–217: 211–223
- Wiechert U, Ionov D A, Wedepohl K H. 1997. Spinel peridotite xenoliths from the Atsagin-Dush volcano, Dariganga lava plateau, Mongolia: A record of partial melting and cryptic metasomatism in the upper mantle. *Contrib Mineral Petrol*, 126: 345–364
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Quadt A V, Roddick J C, Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Geoanal Res*, 19: 1–23
- Wilde S A, Zhou X H, Nemchin A A, Sun M. 2003. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. *Geology*, 31: 817–820
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *J Geol Soc*, 164: 31–47
- Windley B F, Maruyama S, Xiao W J. 2010. Delamination/thinning of sub-continental lithospheric mantle under Eastern China: The role of water and multiple subduction. *Am J Sci*, 310: 1250–1293
- Workman R K, Hart S R. 2005. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth Planet Sci Lett*, 231: 53–72
- Wu D, Liu Y S, Chen C F, Xu R, Ducea M N, Hu Z C, Zong K Q. 2017. *In-situ* trace element and Sr isotopic compositions of mantle xenoliths constrain two-stage metasomatism beneath the northern North China Craton. *Lithos*, 288: 338–351
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, Sun D Y. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89–113
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 103–119
- Xiao W, Windley B F, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069
- Xu B, Charvet J, Chen Y, Zhao P, Shi G. 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Res*, 23: 1342–1364
- Xu B, Zhao P, Wang Y, Liao W, Luo Z, Bao Q, Zhou Y. 2015. The pre-Devonian tectonic framework of Xing'an—Mongolia orogenic belt (XMOB) in north China. *J Asian Earth Sci*, 97: 183–196
- Xu C, Chakhmouradian A R, Kynický J, Li Y, Song W, Chen W. 2019. A Paleoproterozoic mantle source modified by subducted sediments under the North China Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 245: 222–239
- Xu C, Kynický J, Song W, Tao R, Lü Z, Li Y, Yang Y, Pohanka M, Galiova M V, Zhang L, Fei Y. 2018. Cold deep subduction recorded by remnants of a Paleoproterozoic carbonated slab. *Nat Commun*, 9: 2790
- Xu C, Kynický J, Tao R, Liu X, Zhang L, Pohanka M, Song W, Fei Y. 2017. Recovery of an oxidized majorite inclusion from Earth's deep asthenosphere. *Sci Adv*, 3: e1601589
- Xu R, Liu Y, Wang X, Zong K, Hu Z, Chen H, Zhou L. 2017. Crust recycling induced compositional-temporal-spatial variations of Cenozoic basalts in the Trans-North China Orogen. *Lithos*, 274–275: 383–396
- Xu S, Nagao K, Uto K, Wakita H, Nakai S I, Liu C. 1998. He, Sr and Nd isotopes of mantle-derived xenoliths in volcanic rocks of NE China. *J Asian Earth Sci*, 16: 547–556
- Xu Y G, Menzies M A, Thirlwall M F, Huang X L, Liu Y, Chen X M. 2003. “Reactive” harzburgites from Huinan, NE China: Products of the lithosphere-asthenosphere interaction during lithospheric thinning? *Geochim Cosmochim Acta*, 67: 487–505
- Xu Y. 2002. Evidence for crustal components in the mantle and

- constraints on crustal recycling mechanisms: Pyroxenite xenoliths from Hannuoba, North China. *Chem Geol*, 182: 301–322
- Xue S, Ling M X, Liu Y L, Sun W. 2018. Recycling of subducted carbonates: Formation of the Taohuala Mountain carbonatite, North China Craton. *Chem Geol*, 478: 89–101
- Yang J H, Sun J F, Zhang M, Wu F Y, Wilde S A. 2012. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension. *Chem Geol*, 328: 149–167
- Yang J H, Wu F Y, Shao J A, Wilde S A, Xie L W, Liu X M. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth Planet Sci Lett*, 246: 336–352
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Liu X M. 2007. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. *Chem Geol*, 242: 155–175
- Yang J H, Zhang M, Wu F Y. 2018. Mesozoic decratonization of the North China Craton by lithospheric delamination: Evidence from Sr-Nd-Hf-Os isotopes of mantle xenoliths of Cenozoic alkaline basalts in Yangyuan, Hebei Province, China. *J Asian Earth Sci*, 160: 396–407
- Yang J, Gao S, Chen C, Tang Y, Yuan H, Gong H, Xie S, Wang J. 2009. Episodic crustal growth of North China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers. *Geochim Cosmochim Acta*, 73: 2660–2673
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, Zong C L, Günther D, Fontaine G H, Liu X M, Diwu C R. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chem Geol*, 247: 100–118
- Zhang H F, Sun Y L, Tang Y J, Xiao Y, Zhang W H, Zhao X M, Santosh M, Menzies M A. 2012. Melt-peridotite interaction in the Pre-Cambrian mantle beneath the western North China Craton: Petrology, geochemistry and Sr, Nd and Re isotopes. *Lithos*, 149: 100–114
- Zhang H T, Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Chen H H, Chen C F. 2017. Low- $\delta^{13}\text{C}$ carbonates in the Miocene basalt of the northern margin of the North China Craton: Implications for deep carbon recycling. *J Asian Earth Sci*, 144: 110–125
- Zhang L, Liu Y, Wang L, Wang C, Zhang G. 2020. Multiple metasomatism of the lithospheric mantle beneath the northeastern North China Craton. *Lithos*, 374–375: 105719
- Zhang S H, Zhao Y, Kröner A, Liu X M, Xie L W, Chen F K. 2009a. Early Permian plutons from the northern North China Block: Constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 98: 1441–1467
- Zhang S-H, Zhao Y, Song B, Hu J-M, Liu S-W, Yang Y-H, Chen F-K, Liu X-M, Liu J. 2009b. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. *Geol Soc Am Bull*, 121: 181–200
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, Yang Y H. 2007a. Zircon SHRIMP U-Pb and in-situ Lu-Hf isotope analyses of a tuff from western Beijing: Evidence for missing Late Paleozoic arc volcano eruptions at the northern margin of the North China block. *Gondwana Res*, 12: 157–165
- Zhang S H, Zhao Y, Ye H, Liu J M, Hu Z C. 2014. Origin and evolution of the Bainaimiao arc belt: Implications for crustal growth in the southern Central Asian orogenic belt. *Geol Soc Am Bull*, 126: 1275–1300
- Zhang S H, Zhao Y U E, Song B, Yang Z Y, Hu J M, Wu H A I. 2007b. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a late Palaeozoic active continental margin. *J Geol Soc*, 164: 451–463
- Zhang S, Zhao Y, Ye H, Hou K, Li C. 2012. Early Mesozoic alkaline complexes in the northern North China Craton: Implications for cratonic lithospheric destruction. *Lithos*, 155: 1–18
- Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 107: 45–73
- Zhao G, Wilde S A, Sun M, Li S, Li X, Zhang J. 2008. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Lüliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Res*, 160: 213–226
- Zhao P, Chen Y, Xu B, Faure M, Shi G Z, Choulet F. 2013. Did the Paleo-Asian Ocean between North China Block and Mongolia Block exist during the late Paleozoic? First paleomagnetic evidence from central-eastern Inner Mongolia, China. *J Geophys Res Solid Earth*, 118: 1873–1894
- Zheng J, Griffin W L, O'Reilly S Y, Lu F, Yu C, Zhang M, Li H. 2004. U-Pb and Hf-isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: Evolution of the lower crust beneath the North China Craton. *Contrib Mineral Petrol*, 148: 79–103
- Zheng J P, Griffin W L, Qi L, O'Reilly S Y, Sun M, Zheng S, Pearson N, Gao J F, Yu C M, Su Y P, Tang H Y, Liu Q S, Wu X L. 2009. Age and composition of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalts reflect Paleogene underplating beneath the North China Craton. *Chem Geol*, 264: 266–280
- Zhou R, Liu D, Zhou A, Zou Y, Xie J. 2019. A synthesis of late Paleozoic and early Mesozoic sedimentary provenances and

- constraints on the tectonic evolution of the northern North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 185: 104029
- Zhu B Q. 1998. Theory and Applications of Isotope Systematics in Geosciences: Evolution of Continental Crust and Mantle in China (in Chinese). Beijing: Science Press
- Zong K Q, Zhang Z M, He Z Y, Hu Z C, Santosh M, Liu Y S, Wang W. 2012. Early Palaeozoic high-pressure granulites from the Dunhuang block, northeastern Tarim Craton: Constraints on continental collision in the southern Central Asian Orogenic Belt. *J Metamorph Geol*, 30: 753–768
- Zou D, Zhang H, Hu Z, Santosh M. 2016. Complex metasomatism of lithospheric mantle by asthenosphere-derived melts: Evidence from peridotite xenoliths in Weichang at the northern margin of the North China Craton. *Lithos*, 264: 210–223

(责任编辑: 郑永飞)