中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 10 期: 3180 ~ 3194
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

利用富集玄武岩揭示克拉通边部岩石圈地幔的性质与过程

戴宏坤*, 郑建平*, 熊庆, 胡琳琳, 周翔

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074
* 通讯作者, E-mail: hkdai@cug.edu.cn(戴宏坤), jpzheng@cug.edu.cn(郑建平)

收稿日期: 2024-03-11; 收修改稿日期: 2024-06-04; 接受日期: 2024-06-26; 网络版发表日期: 2024-09-04
国家自然科学基金项目(42272053、41930215)和地质过程与矿产资源国家重点实验室自主课题项目(MSFGPMR2022-6)资助

摘要 难熔的岩石圈地幔深根是克拉通长期稳定的基础, 地幔捕虏体是研究克拉通下方岩石圈地幔演化的关键对象. 富集放射性同位素的玄武岩通常含有明显的岩石圈地幔贡献, 在缺乏地幔捕虏体的情况下, 如何利用富集玄武岩的岩石学、地球化学、热力学模拟等手段约束克拉通边部岩石圈地幔的性质和过程, 是非常值得深入研究的问题. 本文以缺乏地幔捕虏体的华北西北部的早白垩世富集玄武质岩石为例, 进行了这方面的有益尝试. 这些玄武质岩石具有高SiO_2和碱金属元素含量(SiO_2=45.8~59.8wt.%, K_2O+Na_2O=4.81~9.88wt.%)、岛弧型微量元素配分曲线和富集的放射性同位素(ε_{Nd}=−2.64~−12.88, $^{87}Sr/^{86}Sr$=0.7063~0.7093)组成特征. 它们的TiO_2和FeO_t含量显著高于难熔地幔来源的天然/实验熔体, 与饱满地幔的派生熔体组成相似; 同时, 它们又富集亲流体元素(Rb、Ba), 暗示其地幔源区受到了流体交代作用. 结合地幔熔融热力学模拟和区域构造历史, 这些富集玄武质岩石的形成可能同时受控于软流圈的减压熔融以及受古亚洲洋俯冲板片流体交代的饱满岩石圈地幔的低程度熔融. 综合研究表明, 华北西北部在早白垩世具有薄的、饱满的岩石圈地幔, 而同期华北东部依旧保留有难熔岩石圈深根, 暗示克拉通岩石圈去根作用及伴随的饱满地幔增生是穿时发生的, 并与环克拉通构造域活动紧密相关. 因此, 富集玄武岩在揭示克拉通边部岩石圈地幔的性质及古构造活动印记方面具有重要的应用前景.

关键词 富集玄武岩, 岩石圈地幔, 华北西北部, 古俯冲印记, 早白垩世

1 引言

克拉通多位于大陆的核部, 具有低温、刚性、高强度的特征, 能够长期稳定漂浮在对流地幔之上, 且缺乏构造岩浆活动. 这种长寿、稳定的特性通常归因于克拉通具有巨厚(>200km)、低密度的岩石圈地幔根(O'Reilly等, 2001). 火山岩携带的深部岩石碎解物质(捕虏体、捕虏晶)是大陆深根的直接样品, 对其开展系统的定深(捕获和熔融深度)、定年(形成和改造年龄)和定性(物理和化学性质)研究显示, 大陆深根地幔主要由难熔的方辉橄榄岩和少量二辉橄榄岩组成, 易熔组分(FeO_t、Al_2O_3、Na_2O、K_2O)含量低、固相线温

中文引用格式: 戴宏坤, 郑建平, 熊庆, 胡琳琳, 周翔. 2024. 利用富集玄武岩揭示克拉通边部岩石圈地幔的性质与过程. 中国科学: 地球科学, 54(10): 3180–3194, doi: 10.1360/SSTe-2024-0074
英文引用格式: Dai H K, Zheng J, Xiong Q, Hu L, Zhou X. 2024. Insight of enriched basalts into the nature and evolution of mantle lithosphere beneath craton margins. Science China Earth Sciences, 67(10): 3128–3142, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1371-x

© 2024 《中国科学》杂志社

度高, 难以发生部分熔融作用(Griffin等, 2009), 而且较大的岩石圈厚度亦能抑制下伏的软流圈发生部分熔融(Davies等, 2015). 此外, 难熔克拉通地幔可能发生去根作用, 并伴随饱满地幔增生和显著岩石圈减薄(Wu等, 2019), 例如华北克拉通东部地区(North China Craton)和怀俄明克拉通(Wyoming Craton), 去根后的克拉通地区一般容易受到构造、岩浆活动的影响, 类似于造山带地区(Lee等, 2011). 然而, 含深部岩石捕获物质的火山岩显示高度不均匀的时空分布特征, 通常只在克拉通边部地区零星出现一些不含捕虏体的地幔岩浆作用, 如何充分利用这些幔源岩浆反演深部岩石圈的属性和过程, 是非常值得探索的问题.

被显生宙造山带环绕(图1a)的华北克拉通即是这样的代表性大陆地区之一, 克拉通东部发育有古生代, 特别是晚中生代至新生代的火山岩, 这些火山岩大多携带了来自岩石圈深部的捕获物质(图1b), 因而华北东部岩石圈地幔的演化过程已有充分的研究和认识. 对捕获物的研究显示, 华北东部地区在早白垩世发生了去根作用和饱满地幔增生(Wu等, 2019). 具体来讲, 古生代金伯利岩中的捕获物多为石榴石方辉橄榄岩, 它们具有富集的不相容微量元素和放射性同位素组成, 显示古生代的岩石圈地幔具有巨厚、难熔属性并受到了强烈的交代作用(郑建平, 1999; Griffin等, 2009). 相比之下, 晚中生代至新生代火山岩中的捕获物多为尖晶石二辉橄榄岩, 它们具有亏损的不相容微量元素和放射性同位素, 表明此时岩石圈地幔已转变为薄的、饱满属性(吴福元等, 2008; Liu等, 2019). 与捕获物所揭示的信息类似, 区域上玄武质岩石的组成特征在晚中生代也发生了显著转变(Liu等, 2008): ≥110Ma的玄武质岩石一般具有岛弧型的微量元素组成特征和富集的同位素组成(图1c和1d), 暗示存在古老、强交代的岩石圈地幔(Zhang等, 2002; 郑永飞等, 2018); 而<110Ma的玄武质岩石则显示洋岛型的微量元素特征和亏损的微量元素组成(Xu等, 2005), 表明

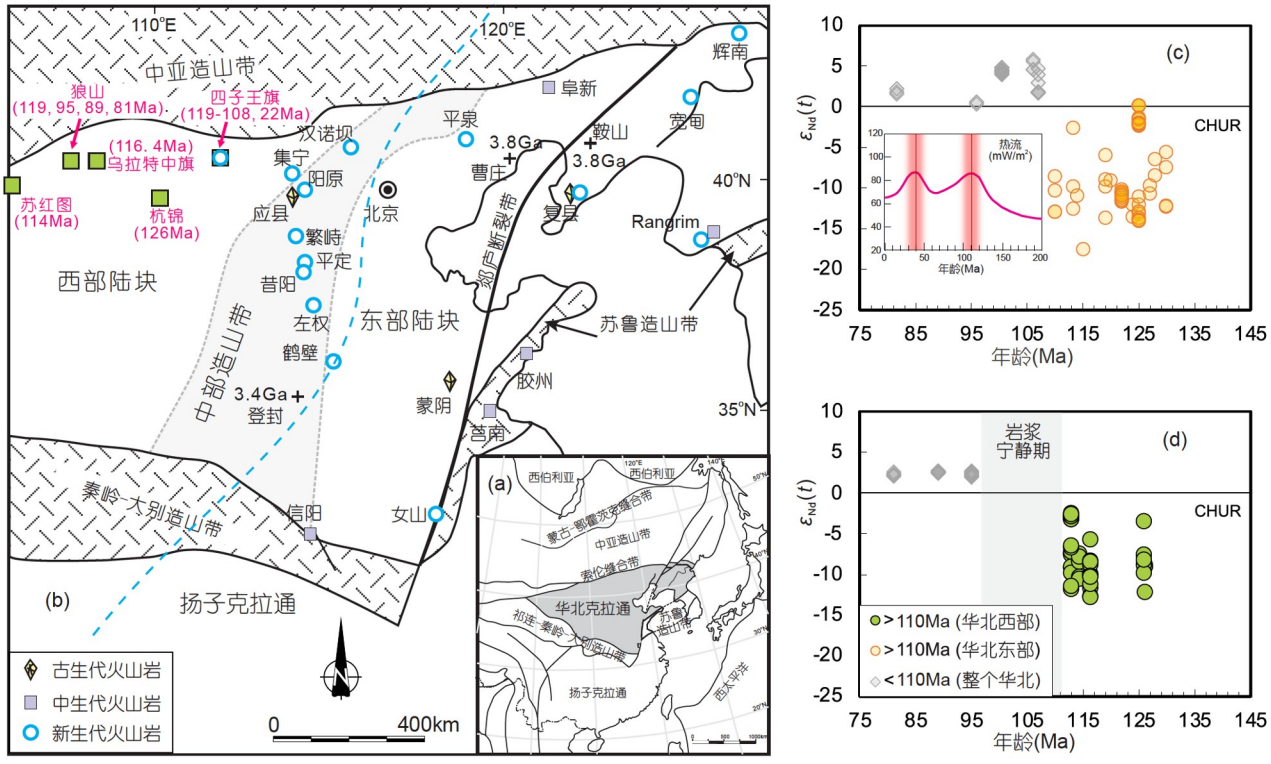

图 1　华北克拉通和周边显生宙造山带的空间关系(a)、华北西北部白垩纪-新生代玄武质岩石的年龄和空间分布简图(b)以及华北西部和东部白垩纪玄武质岩石的Nd同位素组成演变((c)、(d))

(b)中也展示了华北中部造山带和华北东部地区的代表性含深部岩石捕虏体的显生宙火山岩分布(Zheng等, 2012), 蓝色虚线表示地幔过渡带中滞留的(古)太平洋俯冲板片最西部在地表的投影位置(Huang和Zhao, 2006). (c)和(d)参考Dai等(2023)

古老、强交代的岩石圈地幔深根已显著减薄并被置换为饱满地幔, 玄武岩的源区已主体从岩石圈地幔转变为软流圈(Xu等, 2004; 徐义刚等, 2018).

相比之下, 华北西部的捕获物只发现于少许晚白垩世至新生代火山岩中, 包括狼山、四子王旗、汉诺坝等地(图1b), 其岩石圈地幔在早白垩世(克拉通破坏的关键期)演化过程尚不清楚. 具体而言, 这些捕虏体主体为尖晶石二辉橄榄岩, 显示饱满的组成和较弱的交代作用(陈燕等, 2004; Dai等, 2021a), 类似于华北东部新生地幔(Zheng等, 2007); Pb同位素生长模拟显示这些捕虏体所代表的饱满岩石圈地幔可能形成于中元古代(~1.4Ga), 即华北西北部的难熔地幔的去根作用和饱满地幔增生应该发生在中元古代, 与古亚洲洋打开有关(Dai等, 2021a). 然而, 区域零星分布的玄武质岩石在110Ma依旧存在从同位素富集型向亏损型转变的特征(图1d), 与东部的火山岩组成演变情况类似(图1c). 这种转变曾被解释为古老、交代地幔深根被新生饱满地幔置换的结果, 即华北东部和西部(甚至整个中-东亚地区)的岩石圈去根作用是在早白垩世同步发生的(Sheldrick等, 2020). 由此可见, 华北西北部的岩石圈去根作用在什么时代、什么背景下发生? 去根后岩石圈地幔的性质和演化过程如何? 这些都还不清楚.

本文收集了有关华北西北部早白垩世富集型玄武质岩石(图1b)的文献数据(网络版附表S1, http://earthcn.scichina.com), 并利用地球化学和热力学模拟手段对数据进行了重新的分析和评估. 结果显示: 这些早白垩世地幔岩浆岩记录了软流圈减压熔融和受流体交代的减薄岩石圈部分熔融的共同过程. 结合区域构造演化历史, 有理由相信华北西北部的去根作用及其后的饱满地幔增生和交代过程分别与古亚洲洋打开和俯冲历史有关, 克拉通地幔改造过程是周缘板块活动的累积效应. 因此, 本研究认为板内富集玄武质岩石可以有效解读岩石圈根部地幔属性和与周边板块的协同演化过程.

2 地质背景

华北克拉通是典型的古老陆块, 在地壳浅部(Wan等, 2011)和深部(Zheng等, 2012)都有>3.8Ga的岩石记录. 根据多学科方法的综合研究, 该克拉通一般认为是由数个太古代陆核在太古代沿绿岩带拼合形成(伍家善等, 1998; Zhai和Santosh, 2011), 亦或是由东、西两个陆块在古元古代(~1.85Ga)沿中部造山带拼合形成(图1b; Zhao等, 2001). 无论何种方式, 拼合之后的华北是一个完整的陆块, 发育有巨厚、未变形的沉积盖层, 零星发育金伯利岩活动(张宏福和杨岳衡, 2007), 显示长期稳定特征. 直至中生代, 华北东、西部分出现差异演化(郑建平和戴宏坤, 2018): 华北东部经历强烈的岩浆作用(Zhang等, 2014)、广泛地壳变形(Wang等, 2011)和岩石圈减薄和置换(Wu等, 2019); 华北西部主体由于具有岩石圈深根支撑而显示相对稳定(Chen等, 2009), 岩浆作用、地壳变形、岩石圈减薄和地幔改造只在边部出现(贺元凯等, 2009; Dai等, 2021a).

华北西北部岩石圈强烈改造作用一般认为是周边构造域活动的结果(图1a), 包括古亚洲洋板块自古生代至早中生代的向南俯冲、古特提斯洋板块在古生代的北向俯冲及三叠纪扬子陆块深俯冲、(古)太平洋自170Ma的主体向西俯冲(Sun等, 2007; Dai等, 2021a)和55Ma以来青藏高原隆升伴生的印度大陆北东向汇聚(Ding等, 2017). 具体而言, 古亚洲洋板块的向南俯冲引起了华北北部强烈的古生代岩浆作用, 这些岩浆作用显示区域岩石地幔受到了俯冲物质的交代作用(Zhang等, 2014), 区域上晚白垩世至新生代的玄武质岩浆作用(图1b)显示再循环的俯冲板片物质依旧还在软流圈中(Dai等, 2019); 古特提斯洋板块及随后的扬子板块俯冲可能远程驱赶了华北北部之下的软流圈上涌并导致区域三叠纪的抬升作用(Meng等, 2019); 古太平洋自170Ma以来的主体向西俯冲及俯冲带后撤引起了东亚大陆的广泛伸展作用(Niu, 2014); 印度大陆北东向飘移, 伴随的软流圈对流绕过华北西部的岩石圈深根、控制了中部造山带北端的新生代岩浆作用(Li等, 2018). 在现今, 地球物理观测显示, 华北西北部的岩石圈厚度约为80km, 显著薄于克拉通内部(Chen等, 2009).

3 数据总结

图1b中用红色字体强调展示了本研究收集和重点讨论的华北西北部≥110Ma玄武岩的分布地点和年龄. 这些玄武岩以及东部早白垩世(≥110Ma)玄武岩和整个华北的晚白垩世-新生代玄武岩的年龄、化学组成数据和数据来源都整理在附表S1中. 绝大多数样品的烧

失量低于4wt.%(图2), 且这些样品的主量元素总量均接近100wt.%(附表S1), 表明这些玄武岩风化蚀变作用微弱, 可以用于探讨岩石成因过程.

(1) 主量元素. 华北西北部≥110Ma的玄武质岩石总体含有较高的SiO_2和碱含量(SiO_2>45wt.%; K_2O+Na_2O>5wt.%), 属于粗面玄武岩和玄武粗安岩范畴, 少数样品属于粗安岩(图3a). 这些玄武质岩石的主量元素组成整体上与以<110Ma玄武岩为代表的饱满地幔熔体的分异演化趋势一致(图3b~3f); 相比而言, 华北东部同时代的玄武质岩石, 在给定MgO含量时具有更高的SiO_2、更低的TiO_2和FeO_t含量, 它们通常被认为来源于古老、强交代的难熔岩石圈地幔(Zhang等, 2002, 2003).

(2) 微量元素. 华北西北部≥110Ma的玄武质岩石具有明显富集不相容元素的特征, 特别是轻稀土元素和大离子亲石元素(如Rb、Ba), 球粒陨石标准化后表现出右倾的稀土配分曲线, 中-重稀土分异较弱, 无显著Eu异常(图4a). 在原始地幔标准化蛛网图上, 这些玄武质岩石显示一致的Ti负异常, 但不具有其他高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf)异常(图4b). 这些特征明显区别于华北东部同时代玄武质岩石的组成特征, 后者一般具有更低的重稀土元素含量(图4c)和明显的高场强元素负异常(图4d). 相对而言, <110Ma的玄武质岩石在组成上并未呈现出上述空间变化, 它们总体表现出强烈的中-重稀土分异(图4e)和显著的Nb和Ta正异常(图4f).

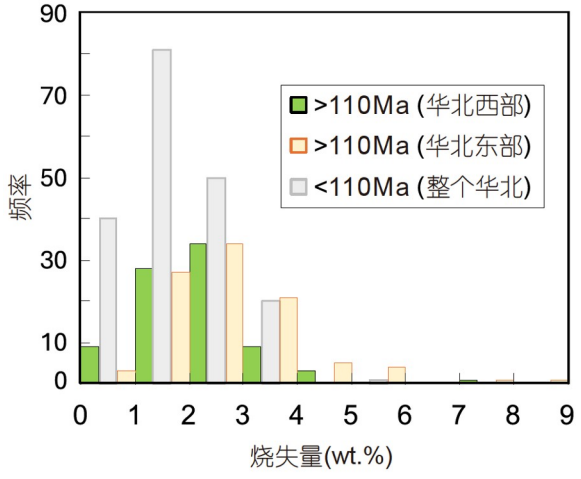

图 2　华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的烧失量频数分布
图中也展示了华北东部同时代的玄武质岩石以及整个华北<110Ma的玄武质岩石的组成特征(Dai等, 2023)

(3) Sr-Nd同位素. 华北西北部≥110Ma的玄武质岩石区别于区域上已知岩石圈地幔捕虏体的组成和整个克拉通<110Ma玄武质岩石的组成, 但与华北东部同时代玄武质岩石和古老难熔地幔捕虏体一致(图5a). 这些≥110Ma的玄武质岩石表现出相对均一的Nd同位素组成和变化的Sr同位素组成, 从而偏离典型的地幔趋势(DePaolo和Wasserburg, 1979).

(4) Pb同位素. 华北西北部≥110Ma的玄武质岩石与区域上的岩石圈地幔捕虏体以及华北东部同时代的玄武质岩石相似(图5b和5c). 事实上, 整个华北克拉通≥110Ma和<110Ma的玄武质岩石具有相似的Pb同位素组成, 它们总体上比典型的地球化学储库(EMI、EMII、MORB、HIMU)更亏损.

4　地壳混染和结晶分异评估

4.1　地壳混染

华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的组成特征包括高SiO_2和Al_2O_3含量(图3a和3d)、富集大离子亲石元素(图4b)和放射性同位素(图5), 这些可能是地壳混染的结果, 也可能继承自地幔源区. 下列证据显示地壳混染微弱:

(1) 玄武质岩石中的大离子亲石元素含量显著高于大陆地壳中的含量(图4a和4b), 表明它们对地壳混染不敏感, 难以用大量地壳混染来解释. 在原始地幔标准化蛛网图上, 这些玄武质岩石缺乏地壳特征的Nb和Ta负异常, 亦不支持存在显著地壳混染(图4);

(2) 模拟计算显示, 如果华北西北部≥110Ma的玄武质岩石是由软流圈来源的熔体混染大陆地壳而形成, 这些玄武质岩石的Sr-Nd同位素组成需要在高程度地壳混染(40%~80%)或高混染/结晶比(r≥0.7)的情况下才能产生(图5a). 能量控制的同步混合和结晶(Bohrson等, 2014)模拟显示, 如此高程度的地壳混染显然是不现实的(Dai等, 2021b; Heinonen等, 2022);

(3) 华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的Pb同位素组成与区域上新生代玄武岩中的麻粒岩捕虏体的Pb同位素组成相似(图5b和5c), 明显区别于以麻粒岩地体为代表的古老陆壳Pb同位素组成(Liu等, 2022). 麻粒岩捕虏体一般代表了熔融残余的深部地壳, 具有较高固相线温度(与侵入的镁铁质地幔熔体温度类似)和

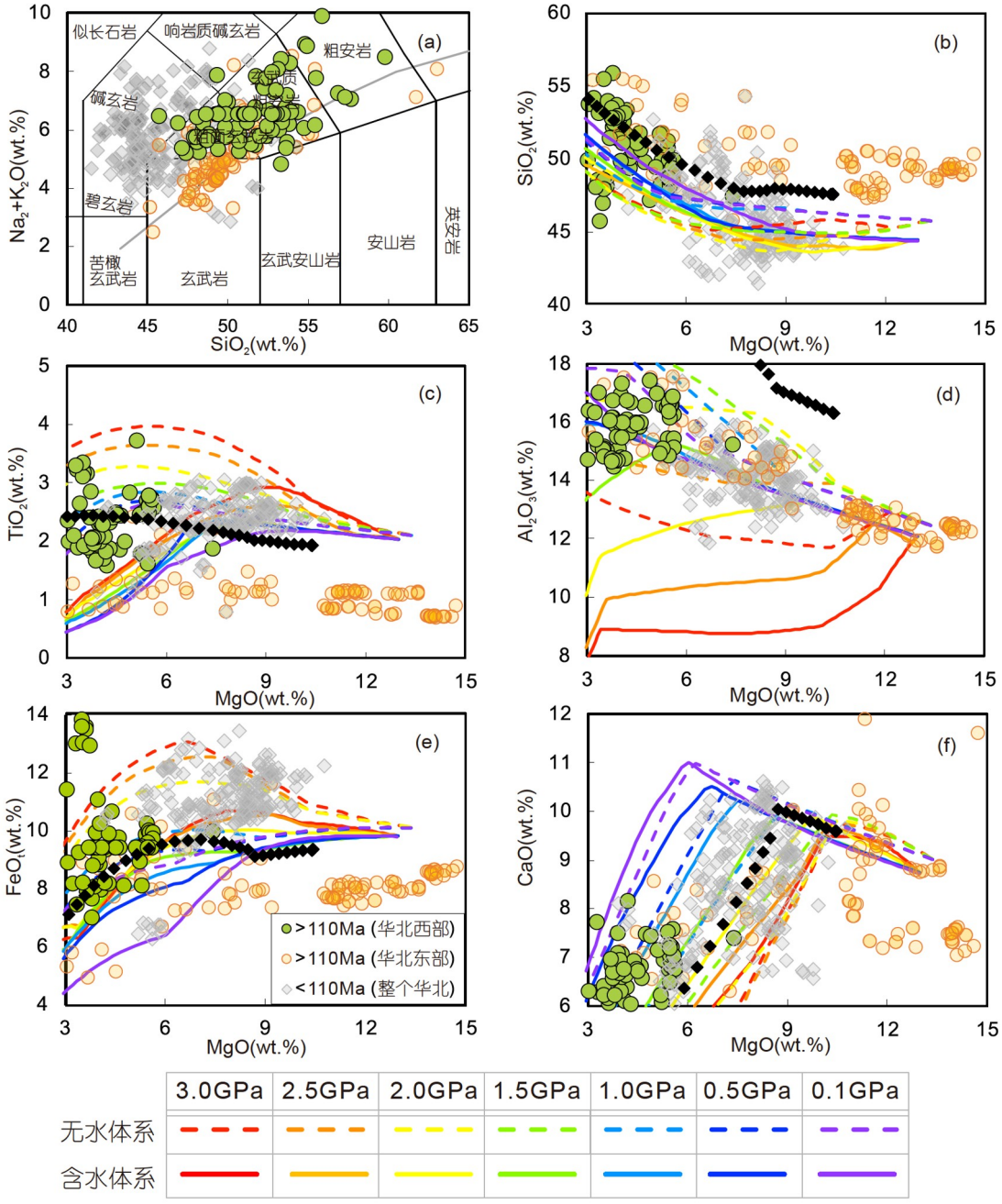

图 3　华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的主量元素特征

绝大多数样品的烧失量低(图2)且总量接近100wt.%(附表S1), 作图时未进行归一化. 图中也展示了华北东部同时代的玄武质岩石以及整个华北<110Ma的玄武质岩石的组成特征(Dai等, 2023). 在(a)中, 岩浆岩的SiO_2和总碱含量分类图引自Le Bas和Streckeisen(1991). 在(b)~(f)中, 彩色曲线代表了以89Ma狼山玄武岩的原始岩浆为代表的饱满地幔熔体分离结晶组成演化趋势(Dai等, 2021c), 黑色点表示饱满橄榄岩(PHN1611)在2GPa和1350℃产生的实验熔体(实验编号465; Kushiro, 1996)在低压(1GPa)条件下无水分离结晶趋势. 在Dai等(2021c)和本研究中, 模拟的初始氧逸度均为FMQ-1, 降温步长均为5℃

较低的Pb含量(Gao等, 1998), 难以混染改变岩浆组成(Dai等, 2021b); 麻粒岩地体通常具有较低的放射性Pb同位素组成和较高的Pb含量, 有较强的能力混染岩浆的Pb同位素组成(Liu等, 2022), 但所研究的玄武质岩

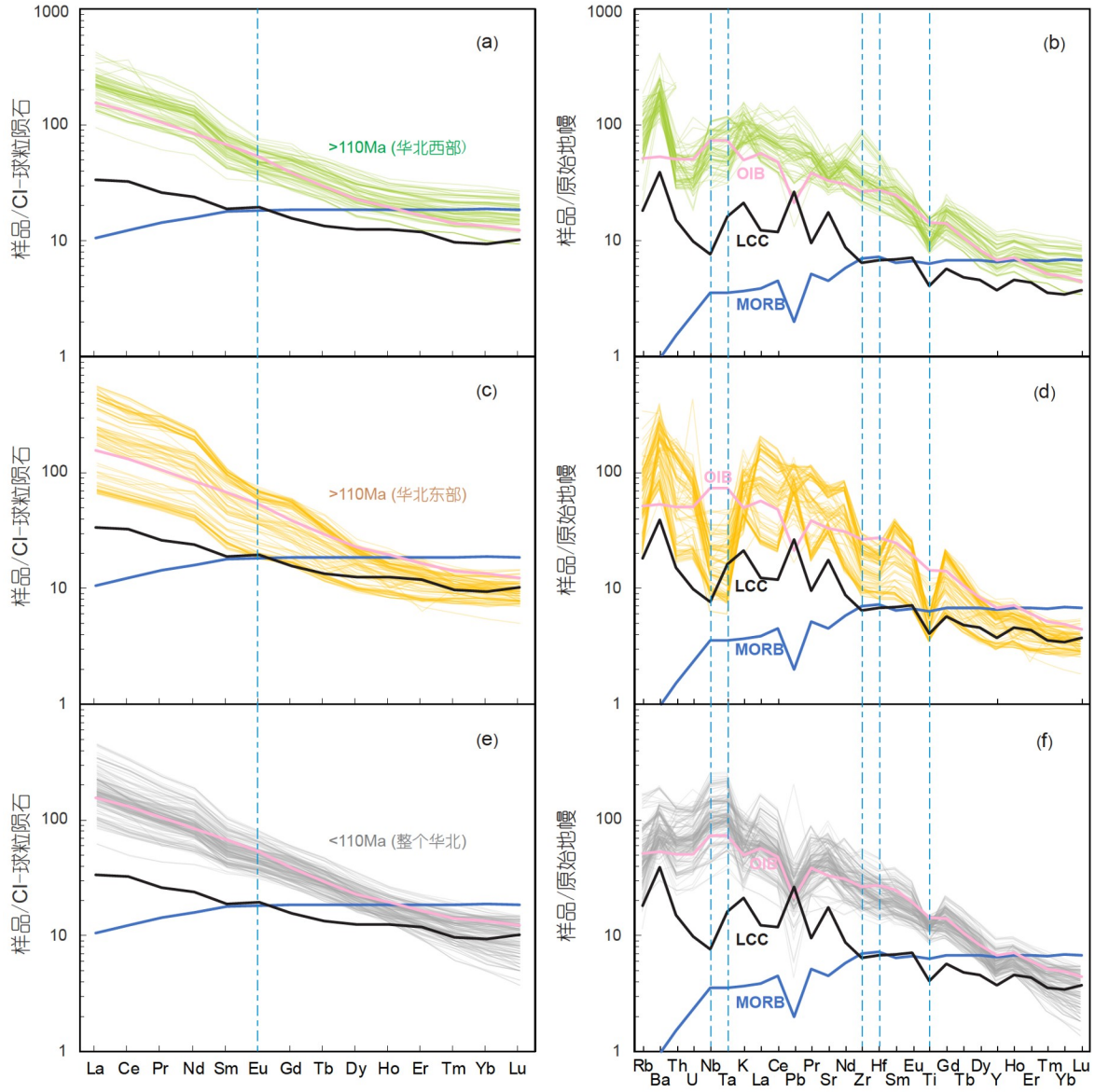

图 4　华北克拉通白垩纪至新生代玄武质岩石的球粒陨石标准化稀土配分曲线和原始地幔标准化蛛网图

图中的粗线分别代表洋岛玄武岩(OIB)、大陆下地壳(LCC)和洋中脊玄武岩的推荐组成. 球粒陨石和原始地幔的组成引自McDonough和Sun (1995), OIB和MORB的组成引自Sun和McDonough(1989), 大陆下地壳的组成引自Rudnick和Gao(2003). 垂直虚线是用于帮助定位不同图版中的相同元素

石与麻粒岩地体的Pb同位素组成的显著差异(图5b和5c), 表明地壳混染较弱.

总之, 地壳物质混染对华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的组成影响较弱. 事实上, 前人对华北东部同时代的玄武质岩石以及整个克拉通的<110Ma玄武质岩石的研究, 均显示地壳物质混染对玄武岩组成的影响微弱.

4.2　结晶分异

华北西北部≥110Ma的玄武质岩石具有高SiO_2含量和较低的MgO、Cr、Ni含量, 表明可能经历了橄榄石和单斜辉石的分异作用. 这些玄武质岩石的主量元素组成整体上与饱满地幔熔体的分异趋势一致(图3), 特别是与无水、低压条件下的分异趋势类似. 在华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的MgO含量变化区间内,

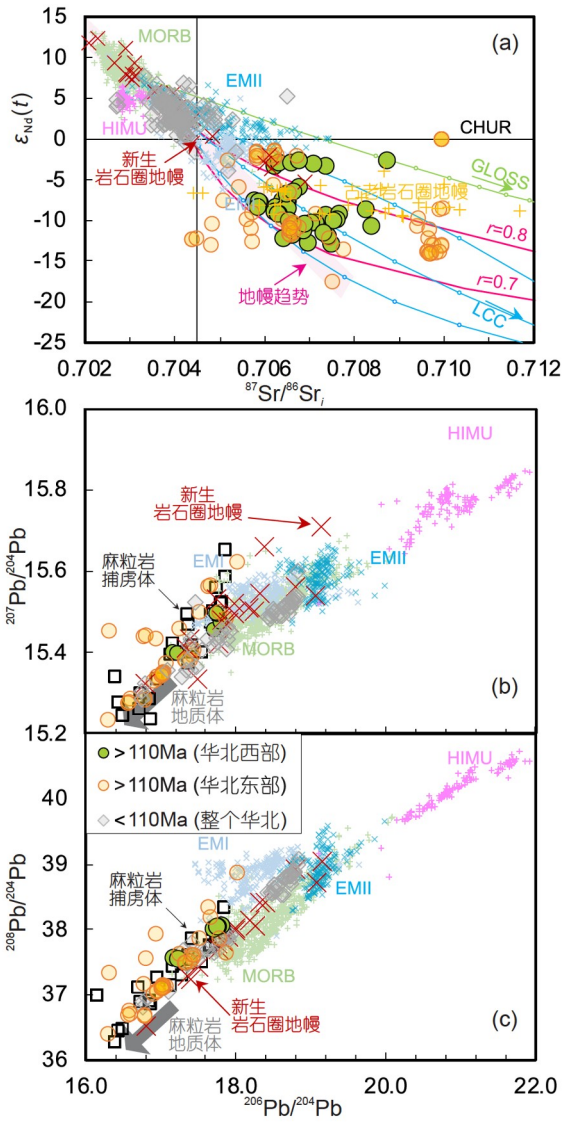

图 5　华北克拉通白垩纪至新生代玄武质岩石的Sr-Nd-Pb同位素组成

作为对比，图中也展示了由大洋玄武岩代表的典型地球化学储库(MORB, Gale等(2013); HIMU、EMI、EMII, Stracke等(2003))和由华北西北部地幔捕虏体所代表的新生岩石圈地幔(Choi等, 2008; Liu等, 2012; Chen等, 2017); (a)中的地幔Sr-Nd同位素趋势引自DePaolo和Wasserburg(1979)，蓝色和绿色曲线分别代表了华北西北部<110Ma玄武岩平均组成与GLOSS II沉积物(Plank, 2014)和不同Nd含量的大陆下地壳发生简单混合的组成变化轨迹，粉色曲线代表了该玄武岩平均组成与大陆地壳发生同化混染和结晶分异同步过程(*r*代表不同混染/结晶比)的组成演化轨迹，其中同化混染和结晶分异同步过程的计算公式引自DePaolo(1981)，计算过程需要用的大陆地壳的元素和同位素组成、全岩分配系数都与Gao等(2004)相同. 在(b)、(c)中，华北西北部<110Ma玄武岩携带的麻粒岩捕虏体组成引自张国辉等(1998)和Liu等(2001)，灰色的粗箭头指向区域麻粒岩地质体的组成(Liu等, 2022)

模拟的分异趋势一般由橄榄石、单斜辉石和尖晶石分异作用控制，斜长石没有分异(Dai等, 2021c). 此外，华北西北部≥110Ma的玄武质岩石和以整个华北晚白垩世-新生代玄武岩为代表的软流圈熔体具有相似的Ti/V(图6a)，暗示玄武质岩石的氧逸度较低(Reagan等, 2010)，在此条件下它们缺乏Eu负异常的特征(图4a)也指示斜长石分异作用十分有限. 在更高的MgO含量区间，如华北东部≥110Ma的玄武质岩石的MgO含量变化范围内，岩浆一般只经历了橄榄石分异作用(Asimow和Langmuir, 2003; Herzberg, 2006).

5　源区组成特征

5.1　主量元素约束

当玄武质岩石所经历的结晶分异影响能有效扣除时，约束玄武质岩石地幔源区特征的有效方式之一是直接对比玄武质岩石组成和不同条件下的实验熔体组成(Shorttle和Maclennan, 2011). 本研究通过对比模拟的结晶分异趋势(图3)和华北西北部≥110Ma的玄武质岩石全岩组成来评估结晶分异的影响. 结果显示，在这些玄武质岩石的MgO含量变化范围内，模拟的演化熔体的FeO_t和TiO_2含量与初始熔体组成一致(图3)，表明华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的FeO_t和TiO_2含量受结晶分异影响较弱，能够用于与不同实验条件下的原始熔体(Kushiro, 1996; Falloon和Danyushevsky, 2000)对比示踪地幔源区特征. 这一方法已被用于揭示华北东部≥110Ma玄武质岩石的源区特征(Yang等, 2004)和整个华北<110Ma玄武质岩石的源区特征(Dai等, 2023).

如图6b所示，实验初始物质组成愈加饱满，产生熔体的TiO_2含量愈高. 具体而言，方辉橄榄岩熔体的TiO_2含量通常<1wt.% (Falloon和Danyushevsky, 2000)，而非橄榄岩类的镁铁质/超镁铁质岩石，如不同类型的辉石岩、角闪石岩和金云母岩，所产生的熔体一般具有>2wt.%的TiO_2含量(Kushiro, 1996). 华北克拉通<110Ma的玄武质岩石通常具有较高的TiO_2含量，认为是含辉石岩脉的饱满二辉橄榄岩地幔熔融产生(Dai等, 2023)；华北东部≥110Ma的玄武质岩石通常含有<2wt.%的TiO_2，被解释为难熔克拉通岩石圈地幔的熔体(Zhang等, 2002). 华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的TiO_2含量显著高于方辉橄榄岩熔体，但类似于非橄榄

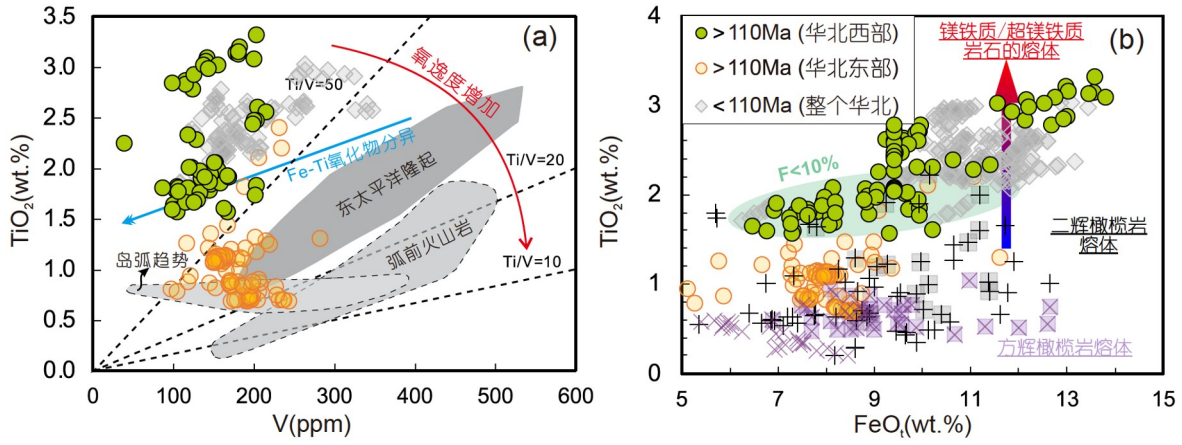

图 6　**华北克拉通白垩纪至新生代玄武质岩石的TiO_2 vs V组成特征(a)及与代表性地幔岩石的实验熔体组成对比(b)**

(a)中火山岩区域和Fe-Ti氧化物分异趋势引自Reagan等(2010). (b)中黑色+代表饱满二辉橄榄岩实验熔体, 其中带灰色阴影的数据点表示实验压力在1.5~2.5GPa的熔体组成, 绿色椭圆阴影区域表示低程度(<10%)熔体组成范围; 紫色×代表难熔方辉橄榄岩实验熔体, 其中带浅紫色阴影的数据点表示实验压力在1.5~2.5GPa的熔体组成. 粗的彩色箭头指向非橄榄岩类地幔岩石(如角闪石岩、硅不饱和/过饱和辉石岩)的熔体组成, 这类岩石的实验熔体一般具有较高的TiO_2含量(≥2wt.%; Kushiro, 1996). 二辉橄榄岩和方辉橄榄岩的实验熔体组成见Dai等(2023).

岩类的镁铁质/超镁铁质岩石所产生的熔体以及饱满二辉橄榄岩的低程度熔体(图6b). 此外, 华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的TiO_2和V的组成特征总体上与整个克拉通的<110Ma玄武质岩石所代表的饱满熔体类似, 都显示较高的Ti/V, 暗示低氧逸度源区; 相反, 华北东部≥110Ma的玄武质岩石所代表的难熔岩石圈地幔熔体总体具有较低的Ti/V, 与高氧逸度的岛弧地幔类似(图6a). 因此, 华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的地幔源区具有饱满地幔的特征.

5.2　微量元素和同位素约束

如前所述, 华北西北部≥110Ma的玄武质岩石可能经历了橄榄石、单斜辉石和尖晶石的分异作用. 这些矿物对应蛛网图中的微量元素(图4)一般具有较低的分配系数(Adam和Green, 2006), 这些元素的含量和比值因此能够透视早期的结晶分异过程、示踪地幔源区特征. 例如, 中-重稀土元素通常是熔融压力和熔融程度的敏感指标(McKenzie和O'Nions, 1991), 大离子亲石元素和高场强元素则能记录源区交代过程(Vernières等, 1997). 因此, 这两类元素常常用于揭示玄武质岩石的源区熔融条件(Hole等, 2023)和交代特征(Xu等, 2022).

(1) 熔融条件. 根据上述原理, Sm、Tb和Yb可以用于揭示华北西北部≥110Ma的玄武质岩石的熔融条件. 部分熔融模拟显示, 石榴石相橄榄岩的熔体具有较高的Tb/Yb, 尖晶石橄榄岩的熔体具有较低的Tb/Yb; 无论对于尖晶石相和石榴石相橄榄岩, 熔体的Yb/Sm均随着熔融程度的增加而降低, 单斜辉石的分离结晶对熔体微量元素组成的影响较弱. 如图7显示, 华北所有白垩纪至今的玄武质岩石的Tb/Yb和Yb/Sm都落入尖晶石相和石榴石相橄榄岩低程度熔体(<10%)的混合区域. 其中, 华北西北部≥110Ma玄武质岩石总体具有较低的Tb/Yb, 而同时代东部玄武质岩石则显示较大的Tb/Yb变化. 这可能表明, 相对于华北东部, 华北西北部≥110Ma玄武质岩石含有更少的来自石榴石相橄榄岩熔体的贡献.

(2) 交代作用. 华北西北部≥110Ma玄武质岩石具有显著富集亲流体元素(如Rb和Ba)的特征, 而亲熔体元素(如Th和U)含量较低(图4). 这表明这些玄武岩源区可能受到了富水流体的交代作用. 这一推测可以进一步用Nb/Yb vs Th/Yb图解证实(图8a; Pearce, 2008), 因为这些元素分异通常与熔体活动有关, 难以受流体迁移的影响(Johnson和Plank, 1999). 华北西北部≥110Ma玄武质岩石只有少数样品在给定Nb/Yb时显示更高的Th/Yb, 总体与由大洋玄武岩为代表的地幔趋势一致(图8a). 值得注意的是, 华北西北部≥110Ma玄武质岩石与整个克拉通<110Ma玄武质岩石具有相似的Nb/Yb vs Th/Yb, 而区别于华北东

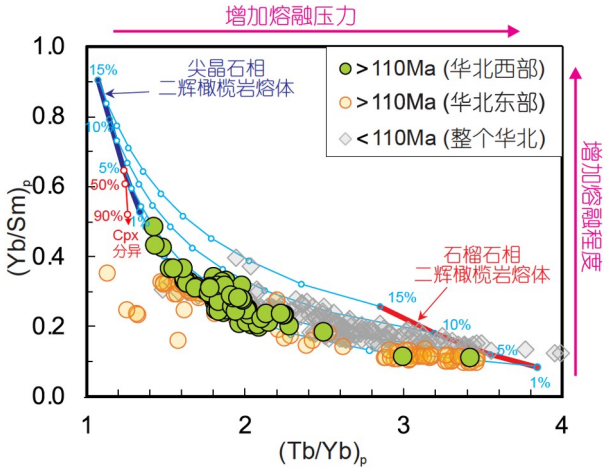

图 7　华北克拉通白垩纪至新生代玄武质岩石的熔融条件估算

假定熔融前的地幔源区为二辉橄榄岩且具有原始地幔的微量元素组成(McDonough和Sun, 1995), 浅蓝色曲线代表在石榴石相熔体和尖晶石相条件下发生不同程度(1%、5%、10%、15%)累积分离熔融产生的熔体发生混合的组成变化轨迹, 带箭头的红色曲线代表尖晶石相条件下产生的低程度(5%)熔体经历不同程度(50%、90%)单斜辉石分离结晶的组成变化趋势. 累积分离熔融和单斜辉石分离结晶的熔体微量元素组成可根据Shaw(1970)的公式计算, 微量元素在橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石的分配系数引自Bédard (2006), 在石榴石中的分配系数引自Adam和Green(2006). 尖晶石相条件下源区二辉橄榄岩的初始矿物组合为: 橄榄石体积占比53%, 斜方辉石体积占比27%, 单斜辉石体积占比17%, 尖晶石体积占比3%; 石榴石相条件下源区二辉橄榄岩的初始矿物组合为: 橄榄石体积占比57%, 斜方辉石体积占比21%, 单斜辉石体积占比13%, 石榴石体积占比9%. 尖晶石相条件下源区二辉橄榄岩的熔融矿物组合为: 橄榄石体积占比−6%, 斜方辉石体积占比28%, 单斜辉石体积占比67%, 尖晶石体积占比11%; 石榴石相条件下源区二辉橄榄岩的熔融矿物组合为: 橄榄石体积占比4%, 斜方辉石体积占比−19%, 单斜辉石体积占比104%, 尖晶石体积占比11%. 源区二辉橄榄岩的初始矿物组合和熔融矿物组合数据引自Hellebrand等(2002)

部≥110Ma的玄武质岩石. 后者具有显著高的Th和U含量以及比地幔趋势更高的Th/Yb, 一般认为其源区受到了俯冲大陆地壳来源的熔体交代作用(Zhang等, 2002).

此外, Rb/Sr vs Ba/Rb可以进一步用于区分流体交代作用所引起的源区矿物学变化: 即角闪石结晶或金云母结晶. 这是因为这两种矿物是岩石圈地幔中最常见的富水矿物(Green等, 2011), 但是它们对亲流体元素具有不同的分配系数(Gao等, 2023), 含角闪石的地幔岩石熔融产生具有低Rb/Sr和高Ba/Rb的熔体, 含金云母的地幔岩石熔融则产生高Rb/Sr和低Ba/Rb的熔体(图8b). 由此, 华北西北部≥110Ma玄武质岩石一般显示低Rb/Sr和高Ba/Rb特征(图8b), 暗示富水流体交代作用在地幔源区中引起了角闪石结晶. 需要指出的是, 整个华北克拉通的<110Ma玄武质岩石也有高Rb/Sr和低Ba/Rb特征, 但它们不富集流体活动性元素(图4), 因此它们的高Rb/Sr和低Ba/Rb特征被认为继承于俯冲的大洋地壳(Dai等, 2019).

另外, 华北西北部≥110Ma玄武质岩石的Sr-Nd同位素组成偏离典型的“地幔趋势”(图5a), 可能暗示源区的富水流体交代作用与俯冲板片有关. 具体来讲, “地幔趋势”是由具有不同Rb/Sr和Sm/Nd的地幔长期放射性积累产生(DePaolo和Wasserburg, 1979); 对于向右偏离“地幔趋势”的玄武岩, 其源区可能需要加入高Sr/Nd和$^{87}Sr/^{86}Sr$的俯冲远洋沉积物或板片流体(Conceição等, 2005), 这些再循环组分的加入可以有效提高源区的$^{87}Sr/^{86}Sr$但对Nd同位素影响较弱. 值得注意的是, 加入富含不相容元素的远洋沉积物会显著影响源区的微量元素组成, 进而影响玄武岩的微量元素组成, 例如所产生的玄武岩会具有较高的Th/Ce和Th/Nb(Xu等, 2022). 华北西北部≥110Ma玄武质岩石大多不具有此类地球化学信号(图8a), 因此这些玄武质岩石解耦的Sr-Nd同位素组成可能显示地幔源区受到了俯冲板片流体的交代作用.

6　熔融动力学过程

板内玄武质岩石通常记录了: (1) 减薄岩石圈之下的软流圈上涌、减压熔融(Davies等, 2015), (2) 长期受熔/流体交代的岩石圈固相线降低导致熔融(Pilet等, 2008), (3) 上述两种情形同时作用(Xu等, 2005; Tang等, 2006). 情形(1)所产生的玄武质岩石一般富集碱金属元素并显示类似洋岛玄武岩的微量元素特征和亏损的放射性同位素组成(Ball等, 2019); 情形(2)产生的玄武岩一般会继承交代岩石圈的印记, 表现为富集不相容元素和放射性同位素组成(Lustrino等, 2007); 情形(3)产生的玄武质岩石是软流圈减压熔融和交代岩石圈地幔低程度熔融的产物, 一般具有前两种情形下产生的玄武岩混合的特征(O’Reilly等, 2009). 下面将通过地球化学和热力学模拟手段, 以华北西北部≥110Ma玄武质岩石为例, 详细探讨源区和熔融过程.

这些玄武质岩石具有富集不相容元素和放射性同

位素的组成特征(图4和5), 指示显著的交代岩石圈地幔物质贡献, 因而可能由情形(2)或(3)产生. 对软流圈绝热减压熔融模拟显示(图9a), 软流圈的潜热温度(T_p)越高、熔融起始深度越大, 产生的熔体具有越高的Tb/Yb, 特别是当岩石圈厚度较大时(图9b). 如果华北西北部≥110Ma玄武质岩石是由交代岩石圈地幔熔融产生(情形(2)), 岩石圈厚度需要足够大(底界面压力大于2GPa)从而阻碍正常热状态(T_p=1350℃)的软流圈发生熔融. 此时岩石圈地幔熔融区跨越了尖晶石相和石榴石相的转变条件, 产生的熔体可以覆盖这些玄武岩的Tb/Yb变化范围(图7); 如果这些玄武质岩石是由交代岩石圈地幔熔融和软流圈减压熔融共同控制(情形(3)), 交代岩石圈应该较薄(底界面压力约为2GPa)、软流圈需要轻微过热(T_p=1400~1450℃), 此时岩石圈和软流圈分别在尖晶石相和石榴石相中发生熔融, 分别产生具有低Tb/Yb和高Tb/Yb的熔体, 混合熔体能够较

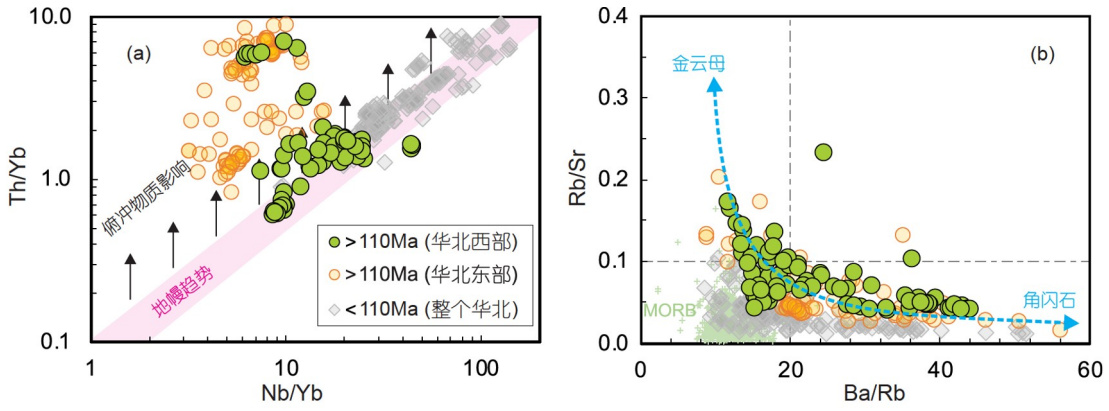

图 8　华北克拉通白垩纪至新生代玄武质岩石的源区交代特征

(a)中地幔趋势由大洋玄武质岩石的组成限定, 黑色箭头指向源区被俯冲地壳熔体交代后产生的熔体组成(Pearce, 2008). (b)中含金云母或角闪石的地幔源区产生的熔体组成范围引自Furman和Graham(1999). 洋中脊玄武岩的数据引自Gale等(2013)

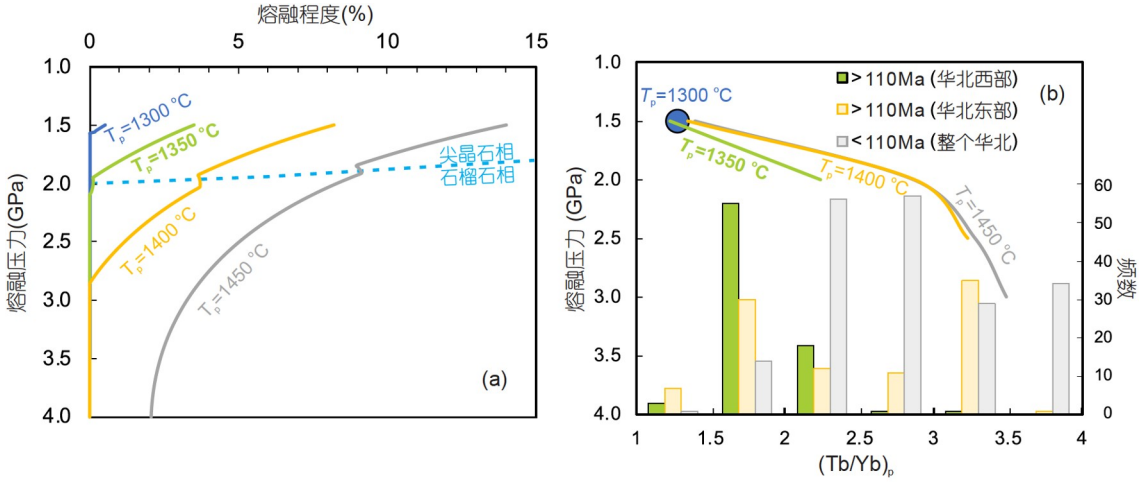

图 9　不同潜热温度(1300~1450℃)的软流圈绝热减压过程中熔融程度随深度的变化

(a) 熔融程度随深度变化的拐点由尖晶石-石榴石相变引起; (b) 一维累积绝热熔体的组成随深度的变化. 柱状图代表华北克拉通白垩纪至新生代玄武质岩石的(Tb/Yb)$_p$变化, 下标p代表原始地幔标准化. 绝热熔融模拟用alphaMELTS程序(Smith和Asimow, 2005)进行, 减压步长为100bar (1bar=10^5Pa), 每一步熔体分数超过0.0005的部分会被抽取形成累积熔体, 地幔源区的初始组成设定为原始地幔(McDonough和Sun, 1995), 计算过程中微量元素分配系数引自Bédard(2006). (a)中熔融曲线的拐点由石榴石-尖晶石相变导致. (b)中也展示了华北白垩纪至新生代玄武岩的(Tb/Yb)$_p$组成频数分布

好重现华北西北部≥110Ma玄武质岩石的组成变化. 当岩石圈厚度过薄时(底界面压力小于2GPa), 岩石圈和不同热状态的软流圈产生的熔体都具有较低的Tb/Yb, 不能重现华北西北部≥110Ma玄武质岩石的化学组成(图9b). 不难看出, 还需要独立的地质约束才能区分华北西北部≥110Ma玄武质岩石的源区熔融过程.

区域上的古地表热流可以提供相关线索(图10a): 古地表热流演化曲线在110Ma显示一个峰值(80mW/m^2). 这可能记录了岩石圈减薄和再增厚的过程, 亦或是软流圈热波动的结果(Artemieva和Mooney, 2001). 可注意到: (1) 区域上89Ma玄武岩只携带丰富的尖晶石相橄榄岩捕虏体、未见石榴石相捕虏体(Dai等, 2021a); (2) 区域上95~81Ma玄武质岩石记录了软流圈逐渐冷却的趋势(Dai等, 2019, 2023). 这说明地表热流的变化主要受控于软流圈温度波动, 岩石圈厚度变化的影响较小. 此外, 由于华北西北部≥110Ma玄武质岩石源区受到富水流体交代作用(图4、5和8), 交代地幔的固相线(Katz等, 2003)可与地表热流限定的传导地温梯度在浅部相交, 从而产生低程度岩石圈地幔熔体(图10b). 事实上, 以饱满地幔在2GPa条件下的实验熔体为初始物质开展低压(1GPa)分离结晶模拟, 演化熔体组成能较好拟合华北西北部≥110Ma玄武质岩主量元素组成范围(图3). 经综合考虑, 本研究认为华北西北部≥110Ma玄武质岩石可能受岩石圈熔融和软流圈熔融共同控制(情形(3)), 即记录了薄的交代岩石圈和软流圈分别在尖晶石相和石榴石相发生熔融的地幔过程.

7 华北西北部岩石圈地幔属性与演化过程

假定华北西北部在白垩纪具有厚度稳定的薄的岩石圈(见上文, 底界面压力约为2GPa), 区域上≥110Ma玄武质岩石中的软流圈熔体组分类似于区域上<110Ma的玄武质岩石(图4). 如果交代岩石圈地幔为含有角闪石的方辉橄榄岩, 岩石圈地幔熔融主要由角闪石分解贡献, 产生的熔体在组成上应该类似于华北东部≥110Ma玄武质岩石(Zhang等, 2002; Yang等, 2004), 表现为低的FeO_t和TiO_2含量. 此时, 岩石圈地幔熔体与软流圈熔体混合难以重现华北西北部≥110Ma玄武质岩石的组成, 特别是在FeO_t和TiO_2含量方面(图6b). 相比之下, 含角闪石的饱满橄榄岩产生的熔体一般具有较高的FeO_t和TiO_2含量, 能够较好重现碱性玄武岩组

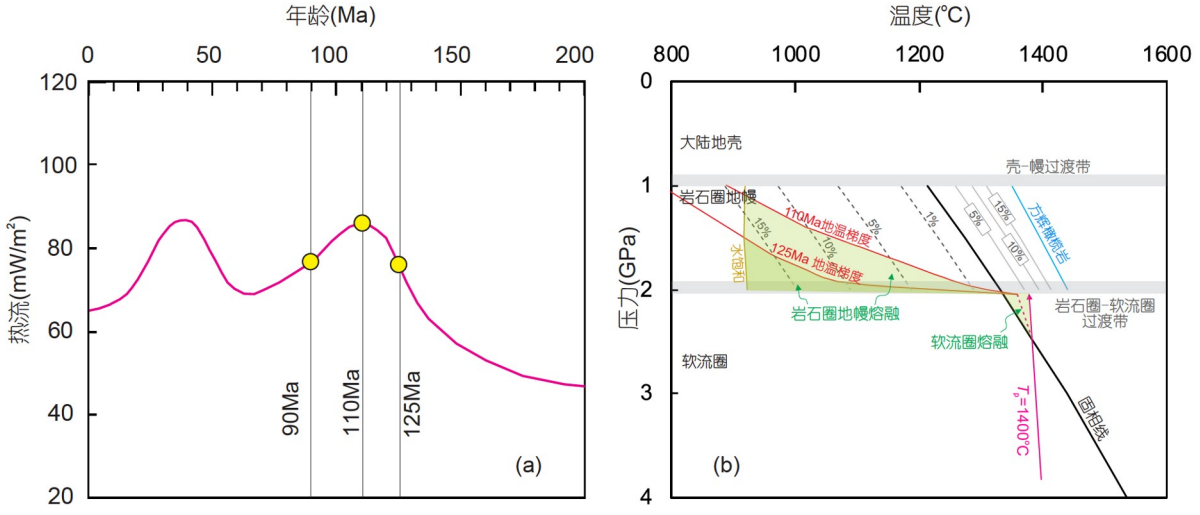

图 10 华北克拉通侏罗纪至今地表热流波动情况(Xu和Qiu, 2016)(a)、华北西北部≥110Ma玄武质岩石的熔融区域(绿色阴影区域)(b)

不同程度水化或抽取后的岩石圈地幔固相线根据Katz等(2003)计算; 设定岩石圈底界面压力为2.0GPa(见正文), 125Ma和110Ma的传导地温梯度(红色曲线所示)可以根据当时的地表热流(分别约为70和80mW/m^2, 图10a)用Artemieva和Mooney(2001)方法计算; 因华北西北部在90和125Ma具有相似的地表热流(图10a)和岩石圈厚度(见正文), 早白垩世软流圈的潜热温度(T_p=1400℃)设定为区域上90~81Ma玄武质岩石的源区温度(Dai等, 2023). 因经历频繁的熔体侵入, 岩石圈-软流圈过渡区的地温梯度一般偏离岩石圈内部典型的传导地温梯度(O'Reilly和Griffin, 2010), 与软流圈熔融绝热轨迹(红色虚线)相连接

成(Pilet等, 2008). 由此推测, 华北西北部在早白垩世(特别是≥110Ma)之前已经发生了去根作用, 岩石圈地幔已经具有饱满的组成. 考虑到: (1) 89Ma的狼山玄武岩中的辉石岩捕虏体的Pb同位素生长模拟显示, 饱满岩石圈地幔的增生时间可能在1.4Ga; (2) 华北西北部晚白垩世-新生代玄武岩中(图1b)的地壳捕虏体及锆石捕虏晶均记录了1.4Ga的结晶年龄或模式年龄峰值, 表明这一期热事件对岩石圈的改造已达地壳层位. Dai等(2021a)认为华北北缘的饱满地幔增生可能是Rodina超大陆裂解背景下古亚洲洋打开、古老大陆岩石圈伸展张裂及软流圈上涌和冷却的结果. 因此, 本研究用富集玄武岩所揭示的岩石圈地幔属性与区域上捕获物质限定的深部岩石圈演化过程是吻合的, 尽管饱满地幔增生时代可能还需要对区域上橄榄岩捕虏体开展更深入细致的年代学工作.

此外, 基于以下考虑, 华北西北部去根后的岩石圈地幔交代作用(见5.2节)可能与古亚洲洋板片俯冲有关. 首先, 华北西北部在空间上远离(古)太平洋的影响范围, 该俯冲板片在地幔过渡带中的最西部目前位于中部造山带之下(图1a和1b); 其次, 发育于中部造山带的新生代玄武岩向北逐渐更为富集再循环组分, 暗示来自北侧的俯冲物质影响(Xu等, 2017); 另外, 华北西北部岩石圈捕获物质记录了强烈的古生代热扰动, 与古亚洲洋板片向南俯冲的时限一致(Dai等, 2021a). 热扰动导致的熔融作用能优先榨取岩石圈中的交代富集组分, 残余的岩石圈地幔则具有亏损不相容微量元素和放射性同位素组成(Foley和Ezad, 2024). 这种残余岩石圈地幔特征与区域上晚白垩世至新生代玄武岩中携带的橄榄岩捕虏体高度一致(Dai等, 2021a).

目前普遍认为华北东部岩石圈去根作用的一级控制因素是(古)太平洋板片俯冲(Wu等, 2019), 华北南侧的地幔置换作用通常解释为与古特提斯洋板片和扬子板块的俯冲有关(Zheng等, 2014). 类似的, 本研究用富集玄武岩所揭示的华北西北部饱满岩石圈地幔增生和交代过程可能主控于古亚洲洋的演化过程, 即在中元古代, 古亚洲洋打开导致了华北北缘的先存难熔克拉通岩石圈发生伸展和张裂并引起地幔饱满增生; 在古生代, 古亚洲洋板块南向俯冲引起了饱满地幔的进一步交代作用. 因此, 本研究显示富集玄武岩是揭示大陆岩石圈中的古俯冲印记的有力对象, 强调克拉通地幔与周边构造域的协同演化过程.

8 结论

华北西北部≥110Ma玄武质岩石较高FeO_t和TiO_2含量, 揭示其来自饱满地幔的部分熔融; 而富集亲流体元素、轻稀土元素和放射性同位素组成的特征, 则表明源区同时存在俯冲印记. 地幔熔融的热力学模拟证据显示, 这些富集玄武岩记录了软流圈减压熔融并叠加薄的受俯冲板片流体交代的岩石圈地幔的部分熔融过程. 综合考虑地幔捕获物质的信息和区域构造历史, 华北西北部难熔岩石圈地幔去根作用及去根后饱满地幔的改造过程分别与古亚洲洋板块的打开和俯冲历史有关, 强调克拉通岩石圈幔与环克拉通构造域的协同演化过程; 同时, 研究显示克拉通边部富集玄武岩是揭示岩石圈地幔性质和古俯冲印记的有力对象.

致谢 感谢主编和两位评审人给予本文的时间付出和指导意见.

参考文献

陈燕, 吴泰然, 许绚, 张双涛. 2004. 内蒙古四子王旗东八号中新世含深源捕虏体富钾橄榄玄武岩的发现及其意义. 高校地质学报, 10: 586–593

贺元凯, 吴泰然, 荆旭, 罗红玲, 赵磊. 2009. 华北板块北缘早白垩世的底侵作用: 来自麻粒岩包体的证据. 岩石学报, 25: 1201–1215

吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄雨克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24: 1145–1174

伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社

徐义刚, 李洪颜, 洪路兵, 马亮, 马强, 孙明道. 2018. 东亚大地幔楔与中国东部新生代板内玄武岩成因. 中国科学: 地球科学, 48: 825–843

张国辉, 周新华, 陈绍海, 孙敏. 1998. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩和辉石岩捕虏体Sr-Nd-Pb同位素五维空间特征及其地质意义. 科学通报, 43: 2218–2222

张宏福, 杨岳衡. 2007. 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和Sr-Nd-Hf同位素地球化学特征. 岩石学报, 23: 663–672

郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中新生代岩石圈减薄. 北京: 中国地质大学出版社

郑建平, 戴宏坤. 2018. 西太平洋板片俯冲与后撤引起华北东部地幔置换并导致陆内盆山耦合. 中国科学: 地球科学, 48: 436–456

郑永飞, 徐峥, 赵子福, 戴立群. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 379–414

Adam J, Green T. 2006. Trace element partitioning between mica- and amphibole-bearing garnet lherzolite and hydrous basanitic melt: 1.

Experimental results and the investigation of controls on partitioning behaviour. Contrib Mineral Petrol, 152: 1–17

Artemieva I M, Mooney W D. 2001. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study. J Geophys Res, 106: 16387–16414

Asimow P D, Langmuir C H. 2003. The importance of water to oceanic mantle melting regimes. Nature, 421: 815–820

Ball P W, White N J, Masoud A, Nixon S, Hoggard M J, Maclennan J, Stuart F M, Oppenheimer C, Kröpelin S. 2019. Quantifying asthenospheric and lithospheric controls on mafic magmatism across North Africa. Geochem Geophys Geosyst, 20: 3520–3555

Bédard J H. 2006. A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle. Geochim Cosmochim Acta, 70: 1188–1214

Bohrson W A, Spera F J, Ghiorso M S, Brown G A, Creamer J B, Mayfield A. 2014. Thermodynamic model for energy-constrained opensystem evolution of crust magma bodies undergoing simultaneous recharge, assimilation and crystallization: The magma chamber simulator. J Petrol, 55: 1685–1717

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 L, Cheng C, Wei Z G. 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton. Earth Planet Sci Lett, 286: 171–183

Choi S H, Mukasa S B, Zhou X H, Xian X Y 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

Conceição R V, Mallmann G, Koester E, Schilling M, Bertotto G W, Rodriguez-Vargas A. 2005. Andean subduction-related mantle xenoliths: Isotopic evidence of Sr-Nd decoupling during metasomatism. Lithos, 82: 273–287

Dai H K, Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Xiong Q, Xu R, Su Y P, Ping X Q, Chen F K. 2019. Langshan basalts record recycled Paleo-Asian oceanic materials beneath the northwest North China Craton. Chem Geol, 524: 88–103

Dai H K, Zheng J P, Xiong Q, O'Reilly S Y, Griffin W L. 2021a. Deep lithosphere of the North China Craton archives the fate of the Paleo-Asian Ocean. Earth-Sci Rev, 215: 103554

Dai H K, Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Xiong Q, Ping X Q, Chen F K, Lu J G. 2021b. Pyroxenite xenoliths reflect complex modification of the deep lithosphere from repeated subduction beneath the northwestern North China Craton. J Petrol, 62: egaa079

Dai H K, Oliveira B, Zheng J P, Griffin W L, Afonso J C, Xiong Q, O'Reilly S Y. 2021c. Melting dynamics of Late Cretaceous lamprophyres in central Asia suggest a mechanism to explain many continental intraplate basaltic suite magmatic provinces. J Geophys Res-Solid Earth, 126: e2021JB021663

Dai H K, Zheng J P, Xiong Q, Griffin W L, O'Reilly S Y. 2023. Continental thermal blanketing explains the compositional dichotomy of the diffuse basaltic province across central-eastern Asia. Geophys Res Lett, 50: e2023GL104951

Davies D R, Rawlinson N, Iaffaldano G, Campbell I H. 2015. Lithospheric controls on magma composition along Earth's longest continental hotspot track. Nature, 525: 511–514

DePaolo D J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. Earth Planet Sci Lett, 53: 189–202

DePaolo D J, Wasserburg G J. 1979. Petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns. Geochim Cosmochim Acta, 43: 615–627

Ding L, Spicer R A, Yang J, Xu Q, Cai F L, Li S, Lai Q Z, Wang H Q, Spicer T E V, Yue Y H, Shukla A, Srivastava G, Ali K M, Bera A, Mehrotra R. 2017. Quantifying the rise of the Himalaya orogen and implications for the South Asian monsoon. Geology, 45: 215–218

Falloon T J, Danyushevsky L V. 2000. Melting of refractory mantle at 1.5, 2, and 2.5 GPa under anhydrous and H_2O-undersaturated conditions: Implications for the petrogenesis of high-Ca boninites and the influence of subduction components on mantle melting. J Petrol, 41: 257–283

Foley S F, Ezad I S. 2024. Melting of hydrous pyroxenites with alkali amphiboles in the continental mantle: 2. Trace element compositions of melts and minerals. Geosci Front, 15: 101692

Furman T, Graham D. 1999. Erosion of lithospheric mantle beneath the East African Rift system: Geochemical evidence from the Kivu volcanic province. Lithos, 48: 237–262

Gale A, Dalton C A, Langmuir C H, Su Y J, Schilling J G. 2013. The mean composition of ocean ridge basalts. Geochem Geophys Geosyst, 14: 489–518

Gao M D, Xu H J, Foley S F, Zhang J F, Wang Y. 2023. Ultrahigh-pressure mantle metasomatism in continental collision zones recorded by post-collisional mafic rocks. GSA Bull, 135: 3066–3082

Gao S, Luo T C, Zhang B R, Zhang H F, Han Y W, Zhao Z D, Hu Y K. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. Geochim Cosmochim Acta, 62: 1959–1975

Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 432: 892–897

Green D H, Hibberson W O, Kovács I, Rosenthal A. 2011. Water and its influence on the lithosphere-asthenosphere boundary. Nature, 467: 448–451

Griffin W L, O'Reilly S Y, Afonso J C, Begg G C. 2009. The

composition and evolution of lithospheric mantle: A re-evaluation and its tectonic implications. J Petrol, 50: 1185–1204

Heinonen J S, Spera F J, Bohrson W A. 2022. Thermodynamic limits for assimilation of silicate crust in primitive magmas. Geology, 50: 81–85

Hellebrand E, Snow J E, Hoppe P, Hofmann A W. 2002. Garnet-field melting and late-stage refertilization in 'residual' abyssal peridotites from the Central Indian Ridge. J Petrol, 43: 2305–2338

Herzberg C T. 2006. Petrology and thermal structure of the Hawaiian plume from Mauna Kea volcano. Nature, 444: 605–609

Hole M J, Gibson S A, Morris M C. 2023. Slab window-related magmatism as a probe for pyroxenite heterogeneities in the upper mantle. Geology, 51: 268–272

Huang J L, Zhao D P. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. J Geophys Res, 111: B09305

Johnson M C, Plank T. 1999. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments. Geochem Geophys Geosyst, 1: 1007

Katz R F, Spiegelman M, Langmuir C H. 2003. A new parameterization of hydrous mantle melting. Geochem Geophys Geosyst, 4: 1073

Kushiro I. 1996. Partial melting of a fertile peridotite at high pressures: An experimental study using aggregates of diamond. Geophys Monogr, 95: 109–122

Le Bas M J, Streckeisen A L. 1991. The IUGS systematics of igneous rocks. J Geol Soc, 148: 825–833

Lee C T A, Luffi P, Chin E J. 2011. Building and destroying continental mantle. Annu Rev Earth Planet Sci, 39: 59–90

Li S L, Guo Z, Chen Y J, Yang Y J, Huang Q H. 2018. Lithospheric structure of the northern Ordos from ambient noise and teleseismic surface wave tomography. J Geophys Res-Solid Earth, 123: 6940–6957

Liu D Q, Guo J H, Jiang N, Hu J, Mitchell R N, Fan W B, Mao Q, Zhao L. 2022. Lead isotopic compositions of late Archean lower continental crust. Geochim Cosmochim Acta, 337: 95–105

Liu J G, Carlson R W, Rudnick R L, Walker R L, Gao S, Wu F Y. 2012. Comparative Sr-Nd-Hf-Os-Pb isotope systematics of xenolithic peridotites from Yangyuan, North China Craton: Additional evidence for a Paleoproterozoic age. Chem Geol, 332-333: 1–14

Liu J G, Cai R H, Pearson D G, Scott J M. 2019. Thinning and destruction of the lithospheric mantle root beneath the North China Craton: A review. Earth-Sci Rev, 196: 102873

Liu Y S, Gao S, Jin S Y, Hu S H, Sun M, Zhao Z B, Feng J L. 2001. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba basalt, North China Craton: Implications for petrogenesis and lower crustal composition. Geochim Cosmochim Acta, 65: 2589–2604

Liu Y S, Gao S, Kelemen P B, Xu W L. 2008. Recycled crust controls contrasting source compositions of Mesozoic and Cenozoic basalts in the North China Craton. Geochim Cosmochim Acta, 72: 2349–2376

Lustrino M, Melluso L, Morra V. 2007. The geochemical peculiarity of "Plio-Quaternary" volcanic rocks of Sardinia in the circum-Mediterranean area. In: Beccaluva L, Bianchini G, Wilson M, eds. Cenozoic Volcanism in the Mediterranean Area. Geol Soc Am Spec Paper, 418: 277–301

McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. Chem Geol, 120: 223–253

McKenzie D, O'Nions R K. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. J Petrol, 32: 1021–1091

Meng Q R, Wu G L, Fan L G, Wei H H. 2019. Tectonic evolution of early Mesozoic sedimentary basins in the North China block. Earth-Sci Rev, 190: 416–438

Niu Y L. 2014. Geological understanding of plate tectonics: Basic concepts, illustrations, examples and new perspectives. Tectoni Metal, 10: 23–46

O'Reilly S Y, Griffin W L. 2010. The continental lithosphere-asthenosphere boundary: Can we sample it? Lithos, 120: 1–13

O'Reilly S Y, Griffin W L, Poudjom Djomani Y H, Morgan P. 2001. Are lithospheres forever? Tracking changes in subcontinental lithospheric mantle through time. GSA Today, 11: 4

O'Reilly S Y, Zhang M, Griffin W L, Begg G, Hronsky J. 2009. Ultradeep continental roots and their oceanic remnants: A solution to the geochemical "mantle reservoir" problem? Lithos, 112: 1043–1054

Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos, 100: 14–48

Pilet S, Baker M B, Stolper E M. 2008. Metasomatized lithosphere and the origin of alkaline lavas. Science, 320: 916–919

Plank T. 2014. The chemical composition of subducting sediments. In: Holland H, Turekian K K, eds. Treat Geochem, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier. 4: 607–629

Reagan M K, Ishizuka O, Stern R J, Kelley K A, Ohara Y, Blichert-Toft J, Bloomer S H, Cash J, Fryer P, Hanan B B, Hickey-Vargas R, Ishii T, Kimura J I, Peate D W, Rowe M C, Woods M. 2010. Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system. Geochem Geophys Geosyst, 11: Q03X12

Rudnick R L, Gao S. 2003. Compositions of continental crust. In: Holland H, Turekian K K, eds. Treat Geochem. Amsterdam: Elsevier. 3: 1–64

Shaw D M. 1970. Trace element fractionation during anatexis. Geochim Cosmochim Acta, 34: 237–243

Sheldrick T C, Barry T L, Dash B, Gan C SC, Millar I L, Barfod D N, Halton A M. 2020. Simultaneous and extensive removal of the east

Asian lithospheric root. Sci Rep, 10: 4128

Shorttle O, Maclennan J. 2011. Compositional trends of Icelandic basalts: Implications for short-length scale lithological heterogeneity in mantle plumes. Geochem Geophys Geosyst, 12: Q11008

Smith P M, Asimow P D. 2005. Adiabat_1ph: A new public front-end to the MELTS, pMELTS, and pHMELTS models. Geochem Geophys Geosyst, 6: Q02004

Stracke A, Bizimis M, Salters V J M. 2003. Recycling oceanic crust: Quantitative constraints. Geochem Geophys Geosyst, 4: 8003

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geol Soc Lond Spec Publ, 42: 313–345

Sun W D, Ding X, Hu Y H, Li X H. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. Earth Planet Sci Lett, 262: 533–542

Tang Y J, Zhang H F, Ying J F. 2006. Asthenosphere-lithospheric mantle interaction in an extensional regime: Implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton. Chem Geol, 233: 309–327

Vernières J, Godard M, Bodinier J. 1997. A plate model for the simulation of trace element fractionation during partial melting and magma transport in the Earth's upper mantle. J Geophys Res, 102: 24771–24784

Wan Y S, Liu D Y, Wang W, Song T R, Köhler A, Dong C Y, Zhou H Y, Yin X Y. 2011. Provenance of Meso- to Neoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: An integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry. Gondwana Res, 20: 219–242

Wang T, Zheng Y D, Zhang J G, Zeng L S, Donskaya T, Guo L, Li J B. 2011. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. Tectonics, 30: TC6007

Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, Wilde S A, Walker R J. 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. Annu Rev Earth Planet Sci, 47: 173–195

Xu R, Liu Y S, Wang X H, Zong K Q, Hu Z C, Chen H 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 R, Liu Y S, Lambart S, Hoernle K, Zhu Y T, Zou Z Q, Zhang J B, Wang Z C, Li M, Moynier F, Zong K Q, Chen H H, Hu Z C. 2022. Decoupled Zn-Sr-Nd isotopic composition of continental intraplate basalts caused by two-stage melting process. Geochim Cosmochim Acta, 326: 234–252

Xu W, Qiu N S. 2016. Heat flow and destabilized cratons: A comparative study of the North China, Siberian, and Wyoming cratons. Int Geol Rev, 59: 898–918

Xu Y G, Huang X L, Ma J L, Wang Y B, Iizuka Y, Xu J F, Wang Q, Wu X Y. 2004. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. Contrib Mineral Petrol, 147: 750–767

Xu Y G, Ma J L, Frey F A, Feigenson M D, Liu J F. 2005. Role of lithosphere-asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton. Chem Geol, 224: 247–271

Yang J H, Chung S L, Zhai M G, Zhou X H. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. Lithos, 73: 145–160

Zhai M G, Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. Gondwana Res, 20: 6–25

Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M, Zhai M G, Yin J F. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. Contrib Mineral Petrol, 144: 241–254

Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Zhou M F, Fan W M, Zheng J P. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. Geochim Cosmochim Acta, 67: 4373–4387

Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, Ye H, Wu F. 2014. Temporal and spatial variations of mesozoic magmatism and deformation in the north china craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization. Earth-Sci Rev, 131: 49–87

Zhao G C, 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

Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Yu C M, Zhang H F, Pearson N, Zhang M. 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. Geochim Cosmochim Acta, 71: 5203–5225

Zheng J P, Griffin W L, Ma Q, O'Reilly S Y, Xiong Q, Tang H Y, Zhao J H, Yu C M, Su Y P. 2012. Accretion and reworking beneath the North China Craton. Lithos, 149: 61–78

Zheng J P, Tang H Y, Xiong Q, Griffin W L, O'Reilly S Y, Pearson N, Zhao J H, Wu Y B, Zhang J F, Liu Y S. 2014. Linking continental deep subduction with destruction of a cratonic margin: Strongly reworked North China SCLM intruded in the Triassic Sulu UHP belt. Contrib Mineral Petrol, 168: 1028

(责任编委: 陈意)