第47卷 第4期	华北地质
2024年12月	NORTH CHINA GEOLOGY

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2024.04.03

陈康,景永康,王元伟,张龙,邓楠,吴珺玮,张毅,李发旺,刘佩文.2024.富硅熔体与地幔橄榄石反应的高温高压实验研究及其对华北克拉通陆 下岩石圈地幔性质转变的启示[J].华北地质,47(4):25-36.

CHEN Kang, JING Yongkang, WANG Yuanwei, ZHANG Long, DENG Nan, WU Junwei, ZHANG Yi, LI Fawang, LIU Peiwen. 2024. High Temperature and high pressure experimental study on the reaction of silicon-rich melt with mantle olivine and its implications for the property transformation of the subcontinental lithosphere mantle in the North China Craton[J]. North China Geology, 47(4):.25-36.

富硅熔体与地幔橄榄石反应的高温高压实验研究及 其对华北克拉通陆下岩石圈地幔性质转变的启示

陈康1.2.3, 景永康1.2, 王元伟1.2, 张龙1.2, 邓楠1.2,

吴珺玮^{1,2},张毅^{1,2},李发旺^{1,2},刘佩文^{1,2}

(1.中国地质调查局金矿勘查技术创新中心,西安710100; 2.中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 西安710100; 3.西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室,西安710069)

摘 要:【研究目的】大陆岩石圈地幔内部广泛发育熔体与橄榄岩的反应,以华北克拉通岩石圈较为典型。根据地 幔捕虏体的矿物交代特征和相关元素地球化学指标判别,硅酸盐熔体与橄榄岩的反应是华北克拉通岩石圈地幔内 熔体一岩石反应的主要类型。然而华北克拉通陆下岩石圈地幔性质转变的实验岩石学证据尚不充足。【研究方法】为 了探讨这一反应机制及相关动力学过程,以河南鹤壁方辉橄榄岩中的橄榄石和湖北黄陵三斗坪的英云闪长岩为初始 物,在中国科学院地球内部物质高温高压重点实验室的LC250—300/50活塞圆筒压机上开展了高温(1200~1400°C) 高压(1.0和1.5 GPa)条件下的富硅熔体与地幔橄榄石的反应实验。【研究结果】结果表明,代表古老难熔岩石圈地幔 的橄榄石与富硅熔体反应,生成斜方辉石。斜方辉石的En组分73~93,属于顽火辉石。在1.0 GPa压力下,温度从 1250°C升高至1350°C,有更多的镁橄榄石分子溶解到熔体中,随着斜方辉石的结晶,残余熔体SiO₂、Al₂O₃和K₂O分 别从 66.20%、17.24%、1.40% 下降至 61.91%、16.02%、1.28%,而 MgO 由 3.93% 升高至 8.26%。在 1.5 GPa压力下,温 度从 1 250°C升高至 1 400°C,残余熔体SiO₂、Al₂O₃、K₂O分别从 65.79%、17.64%、1.36% 下降至 61.74%、15.78%、 1.23%;而 MgO 从 3.11% 升高至 7.07%。【结论】温度变化对反应后熔体化学组成的影响显著超过压力变化。富硅熔 体与橄榄石反应生成斜方辉石,能够解释华北克拉通地幔橄榄岩包体的交代现象,斜方辉石脉体是富硅熔体与橄榄 石反应的产物,该反应同时导致岩石圈地幔由难熔型向饱满型转变。

关键 词:实验岩石学;富硅熔体;地幔橄榄石;熔体一矿物反应;溶解一结晶作用;华北克拉通

创新点:基于富硅熔体与地幔橄榄石的高温高压实验,证实了橄榄岩中的斜方辉石脉体是富硅熔体与橄榄石反应形成的,为岩石圈地幔由难熔型向饱满型的演化提供实验岩石学依据。

中图分类号: P542 **文献标志码:**A **文章编号:** 2097-0188(2024)04-0025-12

收稿日期:2024-10-17

- 基金项目:中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金项目"阿尔金卡尔恰尔地区超大型萤石成矿带成矿流体性质研究" (KC20230011);中国地质调查局项目"新疆若羌县帕夏拉依档一带萤石、锂矿产调查评价"(DD20243309);陕西省自然科学 基础研究计划项目"柴北缘西段NYF型富铌钽重稀土伟晶岩成因"(2023-JC-QN-0342)
- 作者简介:陈康(1991一),男,工程师,2017年毕业于中国科学院大学矿物学、岩石学、矿床学专业,现在主要从事战略性矿产调查与评价工作,E-mail:kangchen320@163.com。

High temperature and high pressure experimental study on the reaction of silicon-rich melt with mantle olivine and its implications for the property transformation of the subcontinental lithosphere mantle in the North China Craton

CHEN Kang^{1,2,3}, JING Yongkang^{1,2}, WANG Yuanwei^{1,2}, ZHANG Long^{1,2}, DENG Nan^{1,2}, WU Junwei^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, LI Fawang^{1,2}, LIU Peiwen^{1,2}

(1. Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, China Geological Survey, Xi'an 710100, China;

2. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, China; 3. State Key

Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: This paper is the result of research on the lithospheric mantle.

[Objective] In terms of petrological and geochemical studies on a large number of mantle xenoliths, melt-peridotite reactions always occur in subcontinental lithospheric mantles, especially in the North China Craton (NCC). Based on the mineral metasomatic characteristics of mantle xenoliths and the related element geochemical signatures, the reaction between silicate melt and peridotite is the main type of melt-rock reaction within the NCC lithosphere mantle. However, the direct evidence of experimental petrography about the mechanism is insufficient. [Methods] In this contribution, natural olivine of harzburgite from Hebi, Henan province, and tonalite from Sandouping, Huangling, Hubei province were collected as starting material. The Si-rich melt-olivine reaction experiments were performed at conditions of 1 200 ~ 1 400 °C, 1.0 ~ 1.5 GPa, on LC25-0300/50 piston-cylinder apparatus equipped at Key Laboratory of High-temperature and High-pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, which explored the reaction mechanism and kinetics of the melt-peridotite reaction. [Results] The main crystallized phase under experimental conditions is orthopyroxene, its En content ranges from 73 to 100 discriminated into enstatite. After reactions, the MgO content of reacted melts increased and linearly correlated with the temperature, while the contents of SiO₂, Al₂O₃ and K₂O decreased linearly with the increase in temperature. As the temperature increased, more forsterite was dissolved in the melts, and with more orthopyroxene generated, the SiO₂, Al₂O₃ and K₂O of melts decreased which changed the composition of the melts. Under the pressure of 1.0GPa, the temperature rises from 1 250°C to 1 350°C, the SiO₂, Al₂O₃, and K₂O in the residual melt decrease from 66.20%, 17.24% and 1.40% to 61.91%, 16.02%, and 1.28% respectively, however MgO in the residual melt increases from 3.93% to 8.26%. Under the pressure of 1.5 GPa, the temperature rises from 1 250°C to 1 400°C, the SiO₂, Al₂O₃ and K₂O in the residual melt decrease from 65.79%, 17.64% and 1.36% to 61.74%, 15.78%, and 1.23% respectively, however MgO in the residual melt increases from 3.11% to 7.07%. [Conclusions] The pressure has a much less influence on the chemical composition change or residual melts than the temperature. In all reactions between Si-rich melt and olivine, orthopyroxene was newly formed the experimental results also explain the composition of the peridotite in NCC and the phenomenon of the orthopyroxene veins in the peridotite, which can transform the lithosphere mantle from refractory into fertile.

Key words: experimental petrology, Si-rich melt, mantle olivine, melt-mineral reaction, dissolution-crystallization, North China Craton

Highlights: Based on High-pressure and temperature experiments, it confirmed that the orthopyroxene veins in the peridotite are the reaction results of the Si-rich melt and olivine reaction, and provided experimental petrological evidence for the lithospheric mantle transforming from "refractory" into "fertile".

About the first author: Chen Kang, born in 1991, male, Master, engineer, specializes in mineralogy, petrology, mineral deposit, currently engaged in geological mineral exploration, E-mail: kangchen320@163.com.

Fund support: Funded by Science and Technology Innovation Foundation of Comprehensive Survey&Command Center for Natural Resources (No. 20230011); Geological Survey Project of China Geological Survey (No. DD20243309); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (No. 2023-JC-QN-0342)

岩石圈地幔是地球内部连接地壳和软流圈的 重要圈层,是岩石圈的主体。根据Byod(1989)的划 分方案,岩石圈地幔可以分为大陆型岩石圈地幔和 大洋型岩石圈地幔。大陆岩石圈地幔以莫霍面为 界,下伏于大陆地壳,上覆于软流圈。特殊的位置 决定了大陆岩石圈地幔对大陆地壳和整个大陆岩 石圈的性质和组成有重要影响。由于大陆岩石圈 强度大、浮力大,所以克拉通在地质历史时期内能 够长期保持稳定(Carlson et al., 2005; 吴福元等, 2008),然而,部分克拉通因后期地质作用遭受破 坏,失去了原有的稳定性。大陆型岩石圈地幔的演 化是克拉通破坏的主要原因,因此对大陆岩石圈地 幔演化机制的研究具有重要的意义。

实验岩石学可以通过高温高压实验模拟,正演 研究矿物、岩石及其组分的物理化学行为,与天然 矿物和岩石样品反演研究相互补充,从而确定地球 深部物质的物理化学性质,破解矿物和岩石成因, 揭示地球内部状态和过程。从20世纪初美国卡内 基研究所建立地球物理实验室,实验岩石学已经历 了100多年的发展,在认识地球内部状态和过程以 及矿物和岩石成因方面发挥了重要作用,实验岩石 学有望破解地球内部流体的性质和作用、地幔演化 和岩浆分异等重要科学问题。

我国华北地区已经成为当今研究克拉通破坏的 典型地区(郑建平等,2007;许文良等,2013:郑永飞 等,2018;王惠初等,2022;常青松等,2022;郭硕等, 2023)。通过对我国华北克拉通陆下岩石圈地幔包 体系统的岩石学、矿物学和地球化学研究,推断在华 北克拉通发育熔体与橄榄岩反应导致地幔由难熔型 向饱满型转化。如在辉南、女山、山旺、汉诺坝、三义 堂、符山等地,地幔橄榄岩包体发育交代成因硅酸盐 矿物(辉石、角闪石、金云母、斜长石等)和/或次生重 结晶结构、交代脉体等显性交代特征,以及包体全岩 富集大离子亲石元素(LILE)、轻稀土元素(LREE)和 包体中单斜辉石具低(La/Yb)_N、高Ti/Eu比值等隐性 交代特征,由此推断上述地方的岩石圈地幔发生了 硅酸盐熔体与橄榄岩的反应(郑建平等,2007;许文 良等,2013;郑永飞等,2018; Dai et al., 2019; Zou et al., 2020; Zhao et al., 2020, 2021; Zhang et al., 2021)_o 前人通过大量研究认为在华北克拉通岩石圈地幔演

化过程中较为广泛地存在着不同性质熔体与地幔橄 榄岩的反应,曾经厚度200 km、冷的、难熔的大陆型 地幔已被替换为现今厚度60~120km、热的、饱满的 大洋型地幔(Griffin et al., 1998; Fan et al., 2000; Zheng et al., 2007)。华北克拉通岩石圈地幔在中生 代改造,极有可能受到了来自软流圈地幔的熔体和 来自地壳的熔体的交代,这种交代作用被认为是岩 石圈地幔改造的重要原因(徐义刚,2006;张宏福, 2009;Lin et al., 2019; Hu et al., 2019), 熔体与岩石的 反应成为大陆动力学的重要研究课题。大多数学者 (Kelemen et al., 1998; Liu et al., 2005; 高山等, 2009) 认为富硅熔体与岩石圈地幔岩石(矿物)反应的产物 主要是斜方辉石,但有实验表明在低压下(2.0 GPa) 交代反应可以形成单斜辉石和斜方辉石(王超等, 2010),野外观察和实验模拟的认识存在明显的分 歧,并且缺少详实的实验岩石学制约,其反应机制及 动力学含义处于探索阶段。为此,本文开展高温高 压条件下富硅熔体与橄榄石反应的模拟实验,为阐 明华北克拉通岩石圈地幔由难熔型向饱满型演化提 供实验岩石学方面的证据。

1 实验及分析方法

为了模拟研究克拉通岩石圈地幔受到来自地 壳的富硅熔体的交代作用,利用中国科学院地球化 学研究所地球内部物质高温高压重点实验室的 LPC250-300/50活塞圆筒压机,在1200~1400°C 的高温和1.0 GPa和1.5 GPa的高压条件下开展了 克拉通岩石圈地幔主要矿物橄榄石与英云闪长质 富硅熔体发生反应的实验研究。

1.1 实验初始物

本文实验所用初始物包括:1)作为熔体的英云 闪长岩(模拟地壳来源的富硅熔体);2)方辉橄榄岩 中的橄榄石(模拟地幔矿物)。

初始物英云闪长岩 99SC81 采自湖北黄陵三斗 坪,前人研究显示该岩石的原岩是大陆基性火成 岩,因此可以代表俯冲或拆沉陆壳基性岩的部分熔 融产物。制作实验玻璃的步骤包括:先将英云闪长 岩手工敲打成小块,然后在玛瑙研钵中研磨至粒度 接近 200 目。之后,将这些粉末放入铁饱和的铂金 坩埚中,在无氧且常压的环境下加热至1 500°C,并

保持1小时。接着,将得到的玻璃重复进行破碎、研磨和在1500°C常压高温下的熔融,共三次,以确保 其成分的一致性。最后,将玻璃破碎并研磨成细粉 末,放入烘箱中在110°C下烘干至少12小时,以去 除其中的吸附水分。其化学组成见表1,用来代表 实验反应前的富硅熔体。

模拟地幔矿物的橄榄石从河南鹤壁新生代玄 武岩中的方辉橄榄岩捕虏体中分选的。实验初始 物选择从方辉橄榄岩挑选出橄榄石,而不是岩石整 体,主要是为了避免方辉橄榄石中的其他矿物干扰 实验反应过程以及反应结果。方辉橄榄岩新鲜,是 华北克拉通太古代古老难熔型岩石圈地幔的残留 (Zheng et al., 2001; Sun et al., 2012)。将方辉橄榄 岩样品进行手工破碎,然后通过筛分、淘洗,烘干后 用电磁仪将橄榄石和辉石进行初步分离,最后在双 目镜下挑选出纯净的橄榄石并用超声波清洗干净 作为初始物。橄榄石的主量元素成分列于表1。

表1 初始物的化学组成 (wt%) Table 1 Chemical compositions of the starting material (wt%)

	SiO_2	${\rm TiO}_2$	Al_2O_3	${\rm FeO^b}$	MnO	MgO	CaO
英云闪长质玻璃*	63.30	0.45	16.90	5.10	0.12	2.73	4.29
橄榄石	41.29	-	-	7.58	0.11	48.72	0.08
	NiO	Na ₂ O	K_2O	P_2O_5	总量	Mg#°	
英云闪长质玻璃	-	3.79	1.41	0.17	98.26	0.49	
橄榄石	0.33	-	-	-	98.11	0.92	

注:a—英云闪长岩玻璃烧失量1.75wt%;b—英云闪长岩玻璃的FeO 是换算后以二价铁表示的全铁;c—Mg#=molar (MgO/(MgO+ Σ FeO)),下同。

1.2 实验条件和装置

本次实验采用的橄榄石是采自鹤壁的镁橄榄石,其化学组成成分列于表1,在常压下有非常高的熔点,接近1900°C(王勤,2016)。英云闪长质富硅熔体的化学组成见表1。前人实验研究表明,熔体在常压下1200~1400°C基本全部熔融,因此本次实验的温度范围设定为1200~1400°C(Wang et al., 2013)。本次实验的铂金样品管中内衬了石墨坩埚,因此实验样品的氧逸度由C-CO-CO₂(CCO)缓冲剂控制,属于一个轻度的还原环境。实验的详细条件见表2。

表2 实验条件及实验产物的相组合 Table 2 Experimental conditions and phase assemblages of the run products

编号	温度 / °C	熔矿比a	压力/GPa	时间/h	物相组合b
YG13	1 200	1:1	1.0	42	Ol+Gl+Opx
YG03	1 250	1:1	1.0	72	Ol+Gl+Opx
YG10	1 300	1:1	1.0	11	Ol+Gl+Opx
YG14	1 300	1:1	1.0	28	Ol+Gl+Opx
YG16	1 300	1:1	1.0	34	Ol+Gl+Opx
YG15	1 350	1:1	1.0	72	Ol+Gl+Opx
YG04	1 250	1:1	1.5	72	Ol+Gl+Opx
YG02	1 300	1:1	1.5	52	Ol+Gl+Opx
YG11	1 300	1:1	1.5	72	Ol+Gl+Opx
YG08	1 350	1:1	1.5	72	Ol+Gl+Opx
YG12	1 400	1:1	1.5	34	Ol+Gl+Opx

注:a一估算的熔体/矿物质量比,取整数;b一正体字表示反应后的 残余物相,加粗斜体字表示新生成的矿物相,Gl一熔体,Ol一橄榄 石,Opx一斜方辉石

本次高温高压实验采用的装置为中国科学院 地球化学研究所地球内部物质高温高压院重点实 验室的 Mavo LC250-300/50 活塞圆筒压力机。实验 样品组装如图1。实验初始物放置在铂金管(内径 6.8 mm、高 6.4 mm)内衬1 mm厚的石墨坩埚中。首 先称取一定质量的初始物玻璃粉末,加入少量无水 乙醇,用模具压制成圆柱状,然后在石墨坩埚内按 照"三明治"夹心结构(玻璃粉末三层,橄榄石两层) 的方式装入圆柱状样品。铂金样品管外是壁厚 1mm的薄 Al₂O₃套管,然后将样品管及 Al₂O₃套管放





人石墨加热器中,并在上下用氧化铝堵头充填。根 据每次实验需要在样品管内装入所需的玻璃粉末 和橄榄石,通过控制玻璃粉末和橄榄石的装入质量 控制熔体与橄榄石的比例。实验的温度采用钨铼 热电偶测定和监控,温度误差±1℃。

1.3 实验步骤

实验初期,在LPC250-300/50活塞圆筒压机中 将所需尺寸活塞放入底座中心孔内,将压盘中心孔 对准底座模具的活塞后轻轻扣在上面;选取合适尺 寸的不锈钢片(或石墨片)放入腔体底部,依次放入 样品组装,上面放不锈钢堵头,将云母片(涂硅胶) 准确放在压盘装样腔上方;装上托板;装支撑隔板, 组装完成后将装配好的活塞圆筒压力盘组合推入 工作舱并确认就位;在支撑隔板上部放上绝缘板。 拧紧手泵,手动使上部油缸加压到约300 bar;接热 电偶丝,接电缆,接水管;然后在控制柜上开机,根 据实验要求进行程序操作。

实验中,先缓慢升压至目标压力,然后再分2个阶段(600°C、目标温度)加热到目标温度,升温速率50°C/min,在600°C保持3min,以使升温过程保持稳定,然后继续加热到目标温度,最后保压恒温。

实验后,按照预设时间完成后断电淬火,将活 塞圆筒压力盘组合拉出,尽快依次卸下单个部件并 擦拭干净后放于合适位置,用液压机小心地压出活 塞、实验产物,然后将实验产物小心取出,移入环氧 树脂中制成样品靶,打磨抛光,用于后期的观察和 电子探针分析。

1.4 分析方法

初始物英云闪长岩及其玻璃的化学组成在中 国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点 实验室的Axios(PW4400)X射线荧光光谱仪(XRF) 上分析。实验产物的背散射电子照片在中国科学 院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室 的JEOL JSM-6460LV型扫描电镜上拍摄,加速电压 为15 kV或25 kV。实验产物的主量元素分析在长 安大学成矿作用及其动力学实验室的JEOL JXA-8100型电子探针上完成。对于矿物,分析条件为加 速电压15 kV,束电流2 nA,束斑直径0.5~2 μm;对 于熔体,为防止元素 Na、K的丢失,尽量使用大束斑 (5~10 μm)进行分析。

2 实验结果

本次实验产物的物相组成见表2,代表性背散 射电子照片见图2。显微观察和电子探针分析表 明,实验反应生成斜方辉石,残余橄榄石与熔体。

富硅熔体与橄榄石反应后生成斜方辉石带,初 始熔体 Melt 1+Oll→熔体 Melt 2,当 Melt 2中斜方 辉石组分达到饱和后,斜方辉石会在橄榄石周围晶 出,包围橄榄石,熔体对橄榄石的溶蚀过程结束。 熔体因结晶出斜方辉石又发生改变,当斜方辉石全 部析出后,熔体变为 Melt 3。Melt 3中没有其他矿 物达到饱和,反应就此结束,形成 Opx 型反应边和 残留熔体 Melt 3。其反应过程为:初始熔体→少量 橄榄石溶解→过渡熔体→斜方辉石结晶→残余熔 体,总的反应式可表示为:

 $Melt 1+Ol 1 \rightarrow Opx+Melt 3 \qquad (3.1)$

其中 Melt 1 为初始熔体, Melt 2 为过渡熔体, Melt 3 为最终熔体, Ol 1 为初始橄榄石, Ol 2 为反应 后橄榄石, Opx 为反应生成的斜方辉石。富硅熔体 与橄榄石在1.0和1.5 GPa下反应,形成斜方辉石带。

2.1 反应生成矿物斜方辉石

本次实验在1200~1400°C的温度范围内均有 斜方辉石生成。生成的斜方辉石环绕于橄榄石分 布,斜方辉石的形态为半自形至自形,大多呈现短柱 状,随着反应时间和温度的增加,自形程度增加。

初始物和实验生成斜方辉石的电子探针数据见 表3。矿物成分显示它们属于富Mg的顽火辉石(表 3,图3)。利用背散射电子照片测量反应带的平均宽 度,在一定的范围内,随着反应时间的增加,反应带 变宽,生成的斜方辉石晶体多,自形程度较高(表4, 图2,4a,4b),这些特征与反应动力学有关。反应时 间越长,熔体结晶的斜方辉石增多,当熔体组分中所 有饱和的斜方辉石都结晶后,最终到达平衡。因此, 实验过程中要想长出较大的晶体,在一定的范围内, 可以增加实验反应时间,升高实验温度。本次实验 研究表明温度因素对斜方辉石的En含量以及斜方 辉石的Mg#有重要影响。随着温度的升高,橄榄石 中镁橄榄石分子更易溶解于熔体,从而增加了反应 熔体中的Mg含量,因此反应熔体结晶出具有更高 En含量和Mg#的斜方辉石(图4c,4d)。



图2 富硅熔体与橄榄石反应实验产物的代表性背散射电子照片

Fig.2 Representative BSE images of run products after reaction between Si-rich melt and olivine 注:在1.0 GPa和1.5 GPa条件下,英云闪长质富硅熔体和橄榄石反应产生的反应边类型为Opx型;GI一熔体,OI一橄榄石,Opx一斜方辉石; 图(a)至图(h)展示了不同温度与压力实验条件下的代表性背散射电子照片,图(i)、(j)、(k)、(l)中用黑色虚线标记了反应带

2.2 反应后橄榄石

在本文实验中,反应后橄榄石颗粒基本保持完 好,橄榄石外围明显生成新矿物斜方辉石,根据电 子探针数据分析,反应后橄榄石的成分在垂直反应 界面方向上发生明显变化,所以说明橄榄石发生部 分熔融,实验结果的岩相学特征在图2中展示,橄榄 石的电子探针数据列于表5中。表5分析结果表 明,反应后橄榄石的Fo(镁橄榄石)含量随着温度的 升高与初始值相同,未发生明显变化(图5),反应后 橄榄石与初始物橄榄石的Fo值一致。因此,随着温 度的增加,虽然初始物橄榄石有一定的熔融,但是 并未影响到整体橄榄石的主量元素变化,这也从侧 面说明了古老岩石圈地幔更难熔的特点,因此反应 生成的斜方辉石主要由反应前的熔体成分控制,只 是在一定程度上受到了初始橄榄石的影响。压力对 Fo值似乎影响较小,本次实验在1.0 GPa和1.5 GPa 的条件下,反应后橄榄石的Fo与反应前保持不变。

2.3 残余熔体

在本文实验中,英云闪长质富硅熔体全部熔融,实验结果的岩相学特征在图2中展示,残余熔体成分的电子探针数据列于表6中。结果表明,在1.0和1.5 GPa条件下,反应后熔体的Mg#与MgO含量升高并且与温度呈线性关系,而SiO₂、Al₂O₃和K₂O的含量则随着温度的升高,呈线性下降(图6,7)。

编号	YG13	YG03	YG10	YG14	YG16	YG15	YG04	YG02	YG11	YG08	YG12
P(GPa)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
T(°C)	1200	1250	1300	1300	1300	1350	1250	1300	1300	1350	1400
t(h)	42	72	11	28	34	72	72	52	72	72	34
Ν	5	4	5	4	5	5	7	10	5	6	6
SiO_2	53.93	54.99	56.18	55.22	54.71	57.26	52.98	57.58	54.91	54.50	56.43
TiO_2	0.28	0.11	0.10	0.11	0.10	0.09	0.15	0.08	0.11	0.10	0.10
Al_2O_3	4.02	4.89	4.36	5.13	4.09	3.82	7.47	4.26	6.66	5.27	4.77
Cr_2O_3	0.37	0.49	0.78	0.34	0.54	0.24	0.42	0.24	0.58	0.52	0.38
FeO	15.50	8.42	7.78	6.06	8.02	5.90	10.63	4.15	8.74	7.82	6.40
MnO	0.43	0.17	0.20	0.10	0.23	0.17	0.26	0.09	0.17	0.18	0.15
MgO	24.96	29.17	30.27	31.55	30.48	32.36	25.71	33.29	28.08	29.25	31.08
CaO	0.74	0.82	0.75	0.63	0.13	0.61	1.30	0.48	0.99	0.84	0.71
NiO	0.11	0.21	0.20	0.05	0.96	0.06	0.18	0.23	0.09	0.13	0.14
Na ₂ O	0.04	0.07	0.08	0.06	0.10	0.07	0.21	0.09	0.22	0.09	0.09
总量	100.37	99.34	100.68	99.24	99.36	100.57	99.31	100.49	100.55	98.70	100.23
Mg#	0.74	0.86	0.88	0.90	0.87	0.91	0.81	0.93	0.85	0.87	0.90
Wo	2	2	2	1	2	1	3	1	2	2	2
En	73	84	86	89	85	90	79	93	83	85	88
Fs	25	14	12	10	13	9	18	6	15	13	10

表3 反应生成的斜方辉石主量元素组成 (wt%) Table 3 Major element compositions of orthopyroxene formed in reactions

注:表中所列氧化物成分数据为电子探针分析结果的平均值;T一温度、P一压力、N一有效的电子探针分析点个数;下同。





En一顽火辉石;Wo一硅灰石;Fs一铁辉石 注:底图据 Morimoto (1988)。从图中可以看出,英云闪长质富硅熔 体与橄榄石反应生成的斜方辉石都是顽火辉石

说明随着温度的升高,有更多的镁橄榄石分子熔蚀 到反应的熔体中,而随着反应熔体中结晶出更多的 斜方辉石,使得 SiO₂等含量下降,改变了熔体的组 成。实验数据表明,压力对反应后熔体化学组成的 影响不明显,总体上压力变化导致熔体成分改变的 程度远不及温度变化。

表4 富硅熔体与橄榄石反应形成的反应带宽度 Table 4 Reaction zone width formed in reaction between Si-rich melt and olivin

编号	温度 / °C	压力 / GPa	反应时间/h	反应带宽度 / µm
YG13	1 200	1.0	42	7
YG03	1 250	1.0	72	11
YG10	1 300	1.0	11	13
YG14	1 300	1.0	28	16
YG16	1 300	1.0	34	18
YG15	1 350	1.0	72	23
YG04	1 250	1.5	72	14
YG11	1 300	1.5	72	23
YG08	1 350	1.5	72	37
YG12	1 400	1.5	34	45

注:反应带宽度是根据背散射电子照片(图2)测量的反应带界面的 垂直距离平均值

3 讨论

3.1 熔体与橄榄石反应的动力学过程

富硅熔体与橄榄石发生反应的结果使得整个 反应体系产生岩相学和某些物相化学组成上的系 统性变化。造成这些变化的动力学过程包括矿物 颗粒尺度上的溶解和结晶作用(Morgan et al., 2005; Wang et al., 2013)。

对于本文的实验反应机制,起主导作用的是溶 解以及结晶作用。在实验过程中,溶解和结晶这两 个相反的过程始终处于动态平衡。在熔体的作用



图4 反应带宽度、组分与时间、温度关系组图

 Fig.4 Reaction band width, composition, versus time, temperature relationship group diagram

 a-反应带宽度与反应时间的关系;b-反应生成的斜方辉石宽度与反应温度的关系;

c一反应生成的斜方辉石En组分与温度的关系;d一斜方辉石Mg#与温度的关系

表5 反应后橄榄石的主量元素组成(wt%) Table 5 Major element compositions of olivine after reactions

编号	YG13	YG03	YG10	YG14	YG16	YG15	YG02	YG11	YG12
P(GPa)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5
$T(^{\circ}C)$	1200	1250	1300	1300	1300	1350	1300	1300	1400
t(h)	42	72	11	28	34	72	52	72	34
Ν	5	5	5	5	5	5	4	5	4
SiO_2	42.53	41.40	42.74	42.70	41.36	42.37	42.03	41.94	42.26
FeO	7.88	7.88	7.52	7.62	7.66	7.54	8.02	7.88	7.54
MnO	0.13	0.13	0.11	0.12	0.10	0.11	0.13	0.15	0.10
MgO	49.94	49.42	50.16	49.67	50.65	49.16	49.35	49.75	49.36
CaO	0.04	0.07	0.09	0.13	0.07	0.07	0.11	0.07	0.07
NiO	0.39	0.35	0.31	0.36	0.35	0.34	0.34	0.37	0.36
总量	100.92	99.25	100.93	100.60	100.19	99.59	99.97	100.15	99.69
Mg#	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92

下,橄榄石的晶格遭受破坏而发生局部的熔化,被 熔化的橄榄石成分与富硅熔体混合,某些组分在熔 体中达到饱和以后,又以新矿物相的形式结晶析 出。在整个过程中,熔体的温度、压力、浓度等在一 定的条件下,存在着一定的平衡,当温度、压力、浓





度等条件发生改变时,原来的平衡被破坏,会生成 新的矿物,同时熔体的成分也会发生变化。在熔体 一橄榄石反应的过程中,溶解与结晶过程不断地随 着温度等条件的变化而不断地发生变化。

溶解—结晶作用能够很好地解释反应后熔体和

衣b 残东烙忰的土重兀紊组风(WI%)											
Table 6 Major element compositions of the residue melts											
编号	YG03	YG10	YG14	YG15	YG04	YG11	YG08	YG12			
P (GPa)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5			
T (°C)	1250	1300	1300	1350	1250	1300	1350	1400			
t(h)	72	11	28	72	72	72	72	34			
Ν	4	3	5	5	2	6	4	4			
SiO_2	66.20	64.96	62.91	61.91	65.79	65.60	65.13	61.74			
TiO_2	0.47	0.42	0.42	0.41	0.47	0.43	0.47	0.45			
Al_2O_3	17.24	16.39	16.51	16.02	17.64	16.89	16.82	15.78			
FeO	4.42	4.83	4.84	4.74	4.68	4.14	4.41	4.94			
MnO	0.16	0.12	0.13	0.10	0.16	0.10	0.11	0.18			
MgO	3.93	5.55	7.55	8.26	3.11	4.10	4.77	7.07			
CaO	4.71	4.30	4.60	4.32	4.85	4.43	4.39	4.74			
Na ₂ O	2.95	2.44	3.08	3.06	2.73	2.91	2.64	2.76			
K_2O	1.40	1.15	1.25	1.28	1.36	1.34	1.30	1.23			
P_2O_5	0.17	0.16	0.18	0.13	0.22	0.16	0.19	0.19			
总量	101.65	100.33	101.47	100.22	100.99	100.10	100.22	99.07			
Mg#	0.61	0.67	0.74	0.76	0.54	0.64	0.66	0.72			

惊头 4 ~ 月 - 主体 子(10)

残留矿物的化学成分变化。在本文实验反应过程中, 在1.0 GPa压力下,从1 250°C升高至1 350°C,残余熔 体中的 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、CaO、K₂O、P₂O₅分别从 66.20%、0.47%、17.24%、4.71%、1.40%、0.17%下降 至 61.91%、0.41%、16.02%、4.32%、1.28%、0.13%; FeO、MgO、Na₂O分别从4.42%、3.93%、2.95%升高至 4.74%、8.26%、3.06%。在1.5 GPa压力下,从1 250°C 升高至1400°C,残余熔体中的SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、CaO、 K₂O、P₂O₅分别从65.79%、0.47%、17.64%、4.85%、 1.36%、0.22%下降至61.74%、0.45%、15.78%、4.74%、 1.23%、0.19%; FeO、MgO、Na₂O分别从4.68%、 3.11%、2.73%升高至4.94%、7.07%、2.76%。而残留 橄榄石的化学成分只有微小甚至几乎不变。在英 云闪长质熔体与橄榄石的反应中,1.0 GPa下随着温





度从1250°C升高到1350°C,反应后熔体的MgO 含量从3.93%增加到8.26%,而橄榄石的MgO却几 乎没有变化,Fo含量并没有降低,而是随着温度升 高保持不变。

溶解—结晶作用能够很好地解释残留熔体与 反应带矿物化学成分的一致性。残留熔体成分与 反应带矿物的化学成分具有较好的正相关关系。 如图 8 所示,反应产物斜方辉石的 Mg#与熔体的 Mg#有很好的正相关关系,这暗示熔体的成分对反 应带矿物的成分有控制作用。换句话说,反应带矿 物的成分与熔体的成分有直接关系。如果反应带矿 物是通过扩散形成的,反应带矿物的化学成分应该 受到矿物和熔体共同控制;如果反应带矿物是通过 溶解—结晶形成的,矿物从熔体中直接结晶出来,成 华



图8 残余熔体与生成的斜方辉石 Mg#的关系 Fig.8 Plot of Mg# in the residue melt versus that in the newly formed orthopyroxene 注:从图中可以看出,反应后残留熔体的Mg#与反应生成的 斜方辉石 Mg#有着良好的正相关性,表明反应生成的斜方 辉石的成分受到熔体成分的控制

分受到熔体的控制。本文的实验结果与后者一致。

从富硅熔体与橄榄石反应形成的反应边物相 组成看,富硅熔体与橄榄石的反应边矿物是Opx,属 于一个简单反应体系。在1.0和1.5 GPa的实验条 件下,反应边中的矿物是一致的,都是斜方辉石。 说明在富硅熔体与橄榄石的反应中,压力并没有导 致反应体系中反应产物出现的矿物相明显不同。 由于在高压下,顽火辉石为一致熔融化合物,反应 生成的顽火辉石主要是由体系中熔体的顽火辉石 的固相线决定,在富硅熔体与橄榄石组成的简单体 系中顽火辉石的液相线低于1200°C,因此有斜方 辉石在反应边中结晶。

从反应产物的化学组成看,残留熔体和生成的 矿物相都不同程度地受到了体系的影响。由于反 应边矿物的成分受熔体成分控制,体系中CaO含量 不满足于生成单斜辉石的CaO含量,所以反应带中 并没有生成单斜辉石。由于反应体系在属于较低压 条件下进行,所以反应带中也没有出现石榴子石。

3.2 熔体一橄榄石反应对华北克拉通岩石圈地幔 演化的意义

大陆岩石圈地幔在空间上介于陆壳与软流圈 之间,其演化自然与后两个层圈有密切联系。大陆 岩石圈地幔具有富 Mg贫 Fe、Al、Ca,具有强度大、 密度低的特点,所以克拉通能够在地质历史时期内 长时间保持稳定,是地球上稳定的块体(Griffin et al., 2009; Xu et al., 2008; Kelemen et al., 1998).

熔体与橄榄岩之间的反应在多种地质环境中 广泛存在,包括造山带橄榄岩(Bodinier et al., 1990)、超镁铁质侵入杂岩体(Kelemen et al., 1992)、 金伯利岩中的地幔橄榄岩捕虏体(Liu et al., 2005) 以及深海橄榄岩,这些反应已被广泛研究和报道。 这类反应主要展现出两种模式:一种是斜方辉石的 消耗伴随着橄榄岩的生成,导致原有的二辉橄榄岩 或方辉橄榄岩转变为纯橄岩,这种转变在蛇绿岩套 和造山带橄榄岩中尤为常见(Bodinier et al., 1990), 且主要发生在浅部岩石圈地幔(Kelemen et al., 1998):另一种模式则是橄榄石的消耗与斜方辉石 的生成,使二辉橄榄岩或方辉橄榄岩转变为方辉橄 榄岩或富含斜方辉石的方辉橄榄岩,这种转变在超 镁铁质侵入杂岩体和地幔橄榄岩捕虏体中更为普 遍(Kelemen et al., 1992),且主要发生在深部岩石圈 地幔,甚至可能在古老的岩石圈地幔中广泛存在 (Kelemen et al., 1998)。华北克拉通的地幔橄榄岩 捕虏体岩相学研究表明,新太古代或古元古代岩石 圈地幔,以方辉橄榄岩和高Mg#(0.92~0.94)橄榄 石捕虏晶为代表,在晚侏罗世至早白垩世早期期间 经历了富硅质熔体和碳酸盐质熔体的双重改造 (Gao et al., 2008; Xu et al., 2010)。这种熔体与橄榄 岩的相互作用是华北克拉通岩石圈地幔性质发生 变化的主要驱动力。

富硅熔体与橄榄石(岩)之间反应的实验研究 为探讨克拉通演化提供了直接的实验岩石学证据。

2024年 陈康等:富硅熔体与地幔橄榄石反应的高温高压实验研究及其对华北克拉通陆下岩石圈地幔性质转变的启示 35

这些研究主要集中在反应过程对熔体成分的影响以 及反应所产生的岩石类型与序列,如Morgan et al. (2005)在1.0 GPa下所进行的橄榄岩—玄武安山质 熔体反应实验,产生了含熔体的方辉橄榄岩; Yaxley et al.(1998)在高压下所进行的橄榄岩一榴 辉岩部分熔融的熔体反应实验,产生了富含斜方辉 石的方辉橄榄岩和斜方辉石岩。上述反应消耗了 橄榄岩中的橄榄石和单斜辉石,产生了斜方辉石。 本文的英云闪长质富硅熔体与橄榄石反应,得到的产 物也是斜方辉石。实验产物与地幔包体(Liu et al., 2005)的高度吻合印证了克拉通岩石圈地幔环境 下,存在富硅熔体与地幔橄榄岩的反应。如果这个 反应达到一定的规模,就可以在岩石圈地幔内形成 辉石岩,从而导致岩石圈地幔向饱满型的转变。从 华北克拉通岩石圈地幔捕虏体观察到的岩相学现 象以及特定的岩石(矿物)组合显示,在岩石圈地幔 中可能普遍存在熔体一橄榄石(岩)反应,而熔体一 橄榄石反应的高温高压实验研究为确认该推论提 供了直接证据。因此,熔体一橄榄石(岩)反应是华 北克拉通岩石圈地幔发生由难熔型向饱满型转变 的重要机制。

4 结论

(1)富硅熔体与代表古老难熔岩石圈地幔的橄 榄石反应,生成斜方辉石。斜方辉石的En组分在 73~93之间,属于顽火辉石。反应生成的斜方辉石 的形态及成分随着实验条件呈有规律的变化。在 相同的温度和压力条件下,在一定范围内,随着反 应时间的增加,反应带加宽,生成的斜方辉石增多, 自形程度升高;在相同的压力和反应时间下,在一 定范围内,随着实验温度的升高,反应带变宽,生成 的斜方辉石增多,自形程度升高。

(2)富硅熔体一橄榄石的反应过程为矿物的溶 解、结晶作用,其中主要为熔体的结晶作用,反应后 橄榄石的化学组成基本保持不变,而富硅熔体的成 分发生明显变化。

(3)残余熔体的MgO含量升高并且与温度呈线 性关系,而SiO₂、Al₂O₃和K₂O的含量则随着温度的 升高,呈线性下降。随着温度的升高,有更多的镁 橄榄石分子溶解到反应中的熔体中,而随着反应熔 体中结晶出更多的斜方辉石,使得SiO₂等含量下降,改变了熔体的组成。

(4)富硅熔体一橄榄石反应产物斜方辉石的生成,为解释地幔包体中的辉石岩的成因和华北克拉 通岩石圈地幔由难熔型向饱满型演化的机制提供 了直接的实验岩石学证据。

中文参考文献

- 常青松,施建荣,张家辉,等.2022.集宁地区古元古代基性麻粒岩两 期变质事件的地质意义[J].华北地质,45(02):68-75.
- 高山,章军锋,许文良,等.2009.拆沉作用与华北克拉通破坏[J]. 科 学通报,54:1962-1973.
- 郭硕,刘洋,滕学建,等.2023.华北克拉通西北缘(狼山段)边界特征 及其构造意义[J].华北地质,46(03):28-34.
- 王超,金振民,高山,等.2010.华北克拉通岩石圈破坏的榴辉岩熔体一橄榄岩反应机制:实验约束[J].中国科学:地球科学,40(5):541-555.
- 王春光.2015.不同性质熔体与橄榄岩反应的动力学研究[D].博士 学位论文.长春:吉林大学.
- 王惠初,张家辉,任云伟,等.2022.华北克拉通中北部麻粒岩带基础 地质调查进展及相关问题讨论[J].华北地质,45(01):18-41.
- 王明梁,唐红峰.2014.英云闪长质熔体与地幔橄榄石反应的实验研究——对克拉通内部高镁安山岩成因的约束[J].中国科学:地球科学,44(3):405-413.
- 王勤.2016. 橄榄石的同系温度 T/Tm: 对上地幔蠕变与橄榄石组构 转变的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 46(5):618-638.
- 吴福元,徐义刚,高山,等.2008.华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究 的主要学术争论[J].岩石学报,24(6):1145-1174.
- 徐义刚.2006.用玄武岩组成反演中一新生代华北岩石圈的演化[J]. 地学前缘,13(2):93-104.
- 许文良,周群君,杨德彬,等.2013.大陆深俯冲作用对邻区岩石圈地 幔改造的时间、方式与过程:鲁西橄榄岩类与辉石岩类捕虏体 证据[J].科学通报,58(23):2300-2305.
- 张宏福. 2009.橄榄岩一熔体相互作用:克拉通型岩石圈地幔能够被 破坏之关键[J].科学通报,54(14):2008-2026.
- 郑建平,余淳梅,路凤香,等.2007.华北东部大陆地幔橄榄岩组成、 年龄与岩石圈减薄[J].地学前缘,14(2):87-97.
- 郑永飞,徐峥,赵子福,等.2018.华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉 通减薄和破坏[J].中国科学:地球科学,48(4):379-414.
- 周君群.2014.鲁西早白垩世火成岩中异剥橄榄岩和辉石捕虏体的 成因[D].博士学位论文.长春:吉林大学.

References

Bodinier J L, Vasseur G, Vernieres J, et al. 1990.Mechanisms of mantle metasomatism: geochemical evidence from the Lherz orogenic peridotite[J]. Journal of Petrology, 31(3): 597-628.

Boyd F R. 1989. Compositional distinction between oceanic and cra-

tonic lithosphere[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 96 (1-2): 15-26.

Carlson R W, Pearson D G, James D E, et al. 2005. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle[J]. Reviews of Geophysics, 43(1).

Dai H K, Zheng J P, O'Reilly S Y, et al. 2019.Langshan basalts record recycled Paleo-Asian oceanic materials beneath the Northwest North China Craton[J]. Chemical Geology, 524: 88-103.

- Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. 2000. On and Off the North China Craton: Where is the Archaean Keel?[J]. Journal of Petrology, 41: 933-950.
- Gao S, Rudnick R L, Xu W L, et al. 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 270: 41-53.
- Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower M, Chung S L, Lo C-H, et al (eds). Mantle dynamics and plate interaction in east Asia[J]. American Geophysical Union, Geodynamics Series 27, 27:107-126.
- Griffin W, O'Reilly S Y, Afonso J C, et al. 2009. The composition and evolution of lithospheric mantle: a re-evaluation and its tectonic implications[J]. Journal of Petrology, 50: 1185-1204.
- Hu J, Jiang N, Carlson R W, et al. 2019. Metasomatism of the crustmantle boundary by melts derived from subducted sedimentary carbonates and silicates[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 260: 311-328.
- Kelemen P B, Dick H J B, Quick J E. 1992. Rormation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle[J]. Nature, 358: 635-641.
- Kelemen P B, Hart S R, Bernstein S. 1998. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction[J]. Earth and Planetary Science Letters, 164: 387-406.
- Lin A B, Zheng J P, Xiong Q, et al. 2019. A refined model for lithosphere evolution beneath the decratonized northeastern North China Craton[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 174(2): 15.
- Liu Y S, Gao S, Lee C T, et al. 2005. Melt peridotite interactions: Links between garnet pyroxenite and high-Mg# signature of continental crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 234(1-2): 39-57.
- Morgan Z, Liang Y. 2005. An experimental study of the kinetics of lherzolite reactive dissolution with applications to melt channel formation[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 150: 369-385.

Sun J, Liu C Z, Wu F Y, et al. 2012. Metasomatic origin of clinopyrox-

ene in Archean mantle xenoliths from Hebi, North China Craton: Trace-element and Sr-isotope constraints[J]. Chemical Geology, 328: 123-136.

- Wang M, Tang H. 2013. Reaction experiments between tonalitic melt and mantle olivine and their implications for genesis of high-Mg andesites within cratons[J]. Science China: Earth Sciences, 56 (11): 1918-1925.
- Xu W L, Hergt J M, Gao S, et al. 2008. Interaction of adaktic melt-peridotite: Implications for the high-Mg# signature of Mesozoic adaktic rocks in the eastern North China Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 265: 123-137.
- Xu W L, Yang D B, Gao S, et al. 2010.Geochemistry of peridotite xenoliths in Early Cretaceous high-Mg# diorites from the Central Orogenic Block of the North China Craton: The nature of Mesozoic lithospheric mantle and constraints on lithospheric thinning[J]. Chemical Geology, 270: 257-273.
- Yaxley G M, Green D H. 1998. Reactions between eclogite and peridotite: mantle refertilisation by subduction of oceanic crust[J]. Schweizerische Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen, 78: 243-255.
- Zhang H T, Zhang H F, Zou D Y. 2021. Comprehensive refertilization of the Archean-Paleoproterozoic lithospheric mantle beneath the northwestern North China Craton: Evidence from in situ Sr isotopes of the Siziwangqi peridotites[J]. Lithos, 380-381: 105822.
- Zhao X M, Wang H, Li Z H, et al. 2020.Multi-stage metasomatism of lithospheric mantle by asthenosphere derived melts: Evidence from mantle xenoliths in Daxizhuang at the eastern North China Craton[J]. Mineralogy and Petrology, 114 (2): 141-159.
- Zhao X M, Wang H, Li Z H, et al. 2021. Nature and evolution of lithospheric mantle beneath the western North China Craton: Constraints from peridotite and pyroxenite xenoliths in the Sanyitang basalts[J]. Lithos, 384-385:105987.
- Zheng J P, O' Reilly S Y, Griffin W L, et al. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for lithosphere evolution[J]. Lithos, 57: 43-66.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 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[J]. Geochimica et Cosmoschimica Acta, 71: 5203-5225.
- Zou D Y, Zhang H F, Zhang X Q, et al. 2020. Refertilization of lithospheric mantle beneath the North China Craton in Mesozoic: Evidence from in situ Sr isotopes of Fuxin peridotite[J]. Lithos, 364-365: 105478.