矿物岩石地球化学通报
Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry
Vol.44 No.1, Jan., 2025

含CO_2硅酸盐熔体-橄榄岩反应的实验研究：对中国东北异剥橄榄岩和单斜辉石岩捕虏体成因的制约

张薇[1],王春光[1,2*],许文良[1,2],杨德彬[1,2],李本仙[1]

1. 吉林大学 地球科学学院,长春 130061; 2. 吉林大学 自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室,长春 130061

摘　要：东北地区新生代碱性玄武岩中辉石岩和异剥橄榄岩捕虏体的岩石学和矿物化学特征暗示其形成于含CO_2熔体-橄榄岩反应,为进一步限定熔体-橄榄岩反应的类型及其经历的深部过程,本文使用反应偶的方法进行了含CO_2熔体和橄榄岩相互作用的系列实验。结果显示,在1.5 GPa、1275 °C条件下,CO_2从硅酸盐熔体中分离,熔体对橄榄岩的改造作用较弱;在2~3 GPa、1325~1375 °C条件下,CO_2存在于硅酸盐熔体中,反应造成橄榄岩中单斜辉石的显著富集,尤其在3 GPa、1375 °C条件下,在熔体-橄榄岩界面形成单斜辉石岩反应带。含CO_2硅酸盐熔体-橄榄岩反应形成的单斜辉石具有较低的Mg/(Mg+Fe)值,矿物成分变异趋势与前人碳酸盐熔体-橄榄岩反应的实验结果相反。通过实验结果与东北地区地幔捕虏体的对比研究,认为汪清单斜辉石岩和异剥橄榄岩捕虏体是含CO_2硅酸盐熔体-橄榄岩反应的结果,而双辽、蛟河辉石岩和异剥橄榄岩捕虏体是碳酸盐熔体-橄榄岩反应的结果。

关　键　词：熔体-橄榄岩反应实验;单斜辉石岩;异剥橄榄岩;地幔捕虏体;中国东北地区

中图分类号：P589.1,P581　　**文章编号：**1007-2802(2025)01-0072-12　　**doi:** 10.3724/j.issn.1007-2802.20240102

An experimental study of CO_2-bearing silicate melt-peridotite reactions: constraints on the genesis of wehrlite and clinopyroxenite xenoliths from the northeastern China

ZHANG Wei[1], WANG Chun-guang[1,2*], XU Wen-liang[1,2], YANG De-bin[1,2], LI Ben-xian[1]

1. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun* 130061*, China;*

2. *Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Natural Re-sources, Changchun* 130061*, China*

Abstract: Characteristics of petrology and mineral chemistry of mantle xenoliths of wehrlite and clinopyroxenite entrained by Cenozoic alkali basalts in the northeastern China imply that they were formed by reactions of CO_2-bearing melt and peridotite. In order to further determine the styles and their experienced deep processes of melt-peridotite reactions, in this work, we have carried out a series experiments of CO_2-bearing silicate melt and peridotite reactions using the reaction couple method. At 1.5 GPa and 1275 °C, CO_2 was exsolved from the silicate melt, and the peridotite was relative weakly modified by the melt. At 2~3 GPa and 1325–1375 °C, CO_2 was dissolved in the silicate melt, and reactions of melt-peridotite lead to the obvious enrichment of clinopyroxene in the peridotite, especially a clinopyroxenite zone was formed in the melt-peridotite interface at 3 GPa and 1375 °C. Clinopyroxenes formed by reactions of the CO_2-bearing melt and peridotite are characterized with relatively low Mg/(Mg+Fe) values, which are contrary to the results of carbonate melt-peridotite reactions by previous researchers. Via the comparison between the experimental results and data of mantle xenoliths from the northeastern China, we concluded that the clinopyroxenite and

收稿编号:2024-0100,2024-05-31 收到,2024-07-19 改回

基金项目:科技部国家重点研发计划项目(2023YFF0804102);国家自然科学基金资助项目(42072072)

第一作者简介:张薇(1999—),女,硕士研究生,研究方向:实验岩石学. email:zw22@mails.jlu.edu.cn

*通信作者简介:王春光(1986—),男,副教授,研究方向:实验岩石学. email:c_wang@jlu.edu.cn

引用此文:

张薇,王春光,许文良,杨德彬,李本仙. 2025. 含CO_2硅酸盐熔体-橄榄岩反应的实验研究:对中国东北异剥橄榄岩和单斜辉石岩捕虏体成因的制约. 矿物岩石地球化学通报,44(1):72–83

Zhang W, Wang C G, Xu W L, Yang D B, Li B X. 2025. An experimental study of CO_2-bearing silicate melt-peridotite reactions: constraints on the genesis of wehrlite and clinopyroxenite xenoliths from the northeastern China. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 44(1):72–83

wehrlite xenoliths in the Wangqing area were formed by reactions of the CO_2-bearing melt and peridotite, whereas the pyroxenite and wehrlite xenoliths in the Shuangliao and Jiaohe areas were formed by the carbonate melt-peridotite reactions.

Key words: melt-peridotite reaction experiment; clinopyroxenite; wehrlite; mantle xenolith; northeastern China

0 引言

地表和地球深部的碳循环是地球演化的重要过程。地球深部碳循环作用及其地球动力学过程一直是地球科学的热点问题。俯冲带是实现地球深部碳循环的关键场所。俯冲作用将富含碳酸盐的壳源物质比如沉积物、蚀变洋壳再循环到深部地幔,形成碳酸盐化榴辉岩(Dasgupta and Hirschmann,2010)。在地幔流的作用下,榴辉岩上涌达到固相线以上发生部分熔融并与周围橄榄岩发生反应(Mallik and Dasgupta,2012)。高温高压实验证明在同等压力下碳的加入会大幅度降低橄榄岩的固相线并提高其部分熔融程度(Dasgupta and Hirschmann,2006;Foley,2011)。含CO_2熔体-橄榄岩反应消耗斜方辉石和橄榄石生成单斜辉石(Brey et al.,1983;Wyllie et al.,1983;Dalton and Wood,1993)并将方辉橄榄岩转化为异剥橄榄岩(Green and Wallance,1988;Yaxley et al.,1998;Coltorti et al.,1999)或者辉石岩(Liu et al.,2015)。地幔捕虏体和造山带地幔橄榄岩中的单斜辉石岩、异剥橄榄岩和单斜辉石的局部富集现象以及相关的矿物学地球化学证据表明可能存在碳酸盐熔体(或含CO_2熔体)交代作用(Yaxley et al.,1991;Rudnick et al.,1993,2004;Xu et al.,1998;Zheng et al.,2006;Xu et al.,2013;Wang et al.,2013;高天山等,2015;赵起超等,2015;Su et al.,2016;Wang C Y et al.,2016;Deng et al.,2017;Wu et al.,2017;Shen et al.,2018;Guo et al.,2020;Wang et al.,2024)。这些类型的地幔岩石广泛出现在中国东北新生代碱性玄武岩携带的捕虏体中。如松辽盆地以东的汪清、伊通、双辽、蛟河、舒兰等地产出的单斜辉石岩、二辉石岩、异剥橄榄岩捕虏体具有单斜辉石取代橄榄石或者斜方辉石的结构,并且单斜辉石稀土元素含量、$(La/Yb)_N$和$^{87}Sr/^{86}Sr$值较高,Ti/Eu值较低(Xu et al.,1996;Guo et al.,2020;Wang et al.,2024)。这些特征暗示捕虏体中单斜辉石的富集与碳酸盐相关熔体对地幔的改造作用有关(Yaxley et al.,1998;Coltorti et al.,1999)。然而,这些捕虏体在矿物主量元素成分上表现出不同的变化趋势。例如,双辽、蛟河、舒兰大部分辉石岩和异剥橄榄岩中矿物的$Mg^{\#}$较高,与相伴产出的方辉、二辉橄榄岩相近(周琴等,2007;Yu et al.,2009,2010;Guo et al.,2020;Wang et al.,2024;Zhu et al.,2024);而汪清、伊通的异剥橄榄岩、辉石岩和部分蛟河辉石岩矿物$Mg^{\#}$较低,明显低于相伴产出的方辉、二辉橄榄岩(Xu et al.,1996,1998;赵起超等,2015;Wang et al.,2024)。

针对异剥橄榄岩和单斜辉石岩的成因及其与熔体-橄榄岩反应的关系,前人进行了含CO_2体系(Gervasoni et al.,2017;Wang et al.,2022)和无CO_2体系(Tursack and Liang,2012;Saper and Liang,2014)的高温高压实验研究。由于CO_2在硅酸盐熔体中的溶解度随着压力降低而降低(Brooker et al.,2011),含CO_2熔体与地幔橄榄岩反应的实验或相平衡实验均在较高压力条件下进行(一般≥3 GPa;Dasgupta et al.,2013;Mallik and Dasgupta,2013;Sokol et al.,2016;Sun and Dasgupta,2019;Wang et al.,2022)。近期,Wang等(2022)进行了以方解石组分为主的远洋沉积物熔体(SiO_2 < 1%)与方辉橄榄岩反应的实验,实验条件为3 GPa和1100~1300 ℃。反应形成了单斜辉石岩-二辉橄榄岩-方辉橄榄岩的岩性序列。从橄榄岩到辉石岩,单斜辉石的$Mg^{\#}$升高,TiO_2、Cr_2O_3、Al_2O_3、Na_2O含量的降低。然而,中国东北富含单斜辉石的地幔捕虏体大多属于尖晶石相地幔岩石,其形成或稳定存在的压力不超过2.5 GPa。一些硅酸盐熔体-橄榄岩反应实验,对探讨地幔岩石中单斜辉石的富集提供新的思路(Lambart et al.,2012;Tursack and Liang,2012;Saper and Liang,2014)。Tursack和Liang(2012)进行了玄武质熔体与尖晶石二辉橄榄岩反应-结晶实验。首先在1 GPa,1300~1320 ℃的条件下使二者发生反应,在反应进行8~24 h之后,将温度缓慢降至1200 ℃,最终保持温度和压力约8~30 h, 以促使矿物发生原位结晶。反应-结晶实验形成了异剥橄榄岩-二辉橄榄岩序列。在此基础上,Saper和Liang(2014)在初始橄榄岩中加入12%的玄武岩粉末,以增加反应熔体/橄榄岩比例,并且将最终温度降至1050 ℃。实验形成辉长岩-异剥橄榄岩-二辉橄榄岩序列。反应-结晶形成的岩性序列中,从二辉橄榄岩至异剥橄榄岩,橄榄石和辉石的$Mg^{\#}$和NiO含量降低,TiO_2和MnO含量升高。实验结果在岩性序列和矿物成分变异方面,与蛇绿岩地幔序列(如阿曼蛇绿岩、加拿大Bay of Island蛇绿岩、美国Josephine蛇绿岩等)以及地幔捕虏体(如夏威夷Hualalai、西班牙Cabo Ortegal等)相似。

综上所述，硅酸盐熔体或者碳酸盐熔体与橄榄岩反应均可导致单斜辉石的富集——形成异剥橄榄岩或单斜辉石岩。两种类型的熔体-橄榄岩反应的反应熔体和压力条件不同，形成的矿物成分变异趋势也存在显著差异。那么，中国东北玄武岩中的辉石岩和异剥橄榄岩捕虏体形成于何种熔体-橄榄岩反应，其形成代表何种深部过程？为解决这一问题，在前人实验研究的基础上，本文进行了1.5~3 GPa条件下含CO_2硅酸盐熔体-橄榄岩反应实验，综合前人的熔体-橄榄岩反应实验结果，以查明反应熔体类型和压力对含CO_2熔体-橄榄岩反应的影响。将实验的结果与中国东北产出的异剥橄榄岩、单斜辉石岩及其相伴产出的橄榄岩和辉石岩进行对比，进而解释天然样品的成因及其经历的深部过程。

1 实验方法

熔体-橄榄岩反应实验在中国科学技术大学壳幔物质与环境重点实验室活塞圆筒式高温高压装置中进行。1.5 GPa和2 GPa条件下的实验使用19.1 mm直径的圆筒压腔，3 GPa条件下的实验使用12.7 mm直径的圆筒压腔。初始熔体成分和橄榄岩中矿物成分列于表1。实验条件见表2。

1.1 初始物质的选择和制备

本文用于制备熔体初始物质的原料为产出于Montserrat现代活动火山的玄武安山岩Mont147，在Mont147中加入方解石，制成含有5%(质量百分比，下同)CO_2的玄武质初始成分(CB，表1)。用于制备初始橄榄岩原料为产出于吉林辉南的尖晶石二辉橄榄岩捕虏体(WFY-1)，将其粉碎至35目后进行矿物分选，按照60% 橄榄石、23% 斜方辉石、12% 单斜辉石和5% 尖晶石的比例重新混合，制成初始橄榄岩(WFY-2，表1，Wang et al.，2020)。

1.2 实验的运行

实验分别在1.5 GPa和1275 ℃、2 GPa和1325 ℃以及3 GPa和1375 ℃条件下进行，运行时间均为3 h。实验编号代表实验运行的温度、压力条件。例如，“CBR1.5-1275”表示在1.5 GPa和1275 ℃下进行的反应实验。反应实验使用石墨(内)-铂(外)样品舱。样品舱外依次为石墨管，Pyrex玻璃和NaCl。铂管的外径为2.8 mm，内径为2.6 mm，长度为6 mm。石墨管的外径为2.5 mm，内径为1.1 mm。实验组装采用反应偶的方法，将二辉橄榄岩粉末置于石墨样品舱底部，将含CO_2玄武质粉末置于石墨舱顶部(图1)。粉末压实后，加盖石墨置入铂舱，并使用氩弧焊将铂舱和铂片舱盖焊接密封。实验在未加热之前，将装置加压至目标压力；以75 °C/min或30 °C/min的速度加热至目标温度；实验结束时通过切断电源使样品淬火。反应结束

表 1 初始物质成分

Table 1 Compositions of initial materials

氧化物/%	含CO_2玄武质熔体	尖晶石二辉橄榄岩			
	CB/%	WFY-2			
		橄榄石/%	斜方辉石/%	单斜辉石/%	尖晶石/%
SiO_2	48.61	40.25	54.39	51.45	0.08
TiO_2	0.68	0.01	0.09	0.39	0.15
Al_2O_3	16.64	0.04	4.44	5.49	54.26
Cr_2O_3	—	0.03	0.39	0.81	12.83
FeOt	7.94	9.82	6.25	2.93	10.87
MnO	0.19	0.12	0.12	0.11	0.15
MgO	3.24	48.41	32.46	16.27	20.50
CaO	14.16	0.09	0.88	20.55	0.01
Na_2O	2.73	0.00	0.12	0.98	0.02
K_2O	0.69	0.00	0.01	0.00	0.01
NiO	—	0.38	0.11	0.04	0.35
P_2O_5	0.12	—	—	—	—
CO_2	5.00	—	—	—	—
合计	100.00	99.15	99.26	99.02	99.23
$Mg^{\#}$	42.13	89.78	90.25	90.82	77.07
$Cr^{\#}$	—	—	—	—	13.69

注：$Mg^{\#}$ = 100×Mg/(Mg+Fe)，原子数比；$Cr^{\#}$ = 100×Cr/(Cr+Al)，原子数比；CB为初始熔体成分；WFY-2是由60%橄榄石，23%斜方辉石，12 %单斜辉石和5%尖晶石组成。

表 2　实验条件的总结

Table 2　Summary of experimental conditions

样品编号	t/℃	p/GPa	升温速率/(°C/min)
CBR 1.5-1275	1275	1.5	75
CBR 2-1325	1325	2	30
CBR 3-1375	1375	3	75

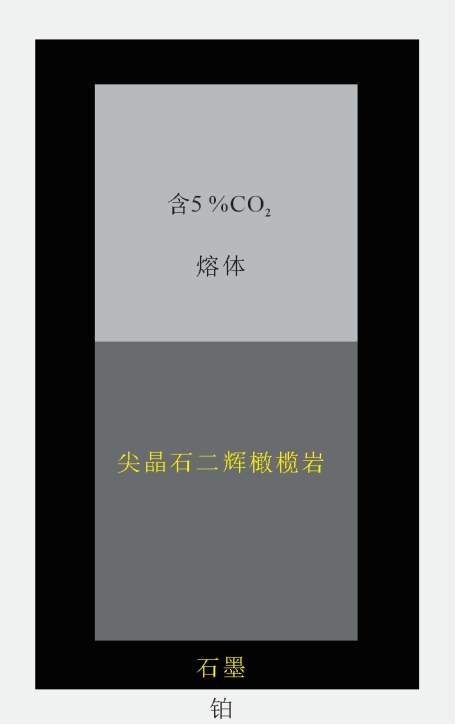


图1 含CO_2熔体-橄榄岩反应实验的样品组装示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sample assembly used in the CO_2-bearing melt and peridotite reaction experiments

后取出样品舱,使用金刚石低速锯沿圆柱的轴线切开,并镶嵌于环氧树脂中,先后使用砂纸和沾有Al_2O_3抛光液的绒布抛光至1 μm, 清洗后喷碳以备电子探针分析。

1.3　电子探针分析

反应结果的背散射图像和熔体、矿物成分分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室JXA-8230电子探针X射线显微分析仪上进行。背散射图像和矿物成分分析使用20 kV的加速电压和25 nA的电子束,熔体成分分析使用15 kV的加速电压和10 nA的电子束。熔体成分分析使用10 μm直径的电子束,矿物成分分析使用聚焦电子束。为避免K、Na的高温挥发,优先分析K、Na含量。峰值的采集时间为20~30 s,峰值两侧背景值的采集时间为10~15 s。仪器参数设置与作者前期实验研究(Wang C G et al.,2016)一致。探针分析使用的标样包括SPI公司提供的透辉石(Si、Ca),金红石(Ti),铁铝榴石(Al、Fe),蔷薇辉石(Mn),橄榄石(Mg),硬玉(Na),透长石(K),以及氧化铬(Cr)和金属镍(Ni)。

2　结果

2.1　岩性序列和结构

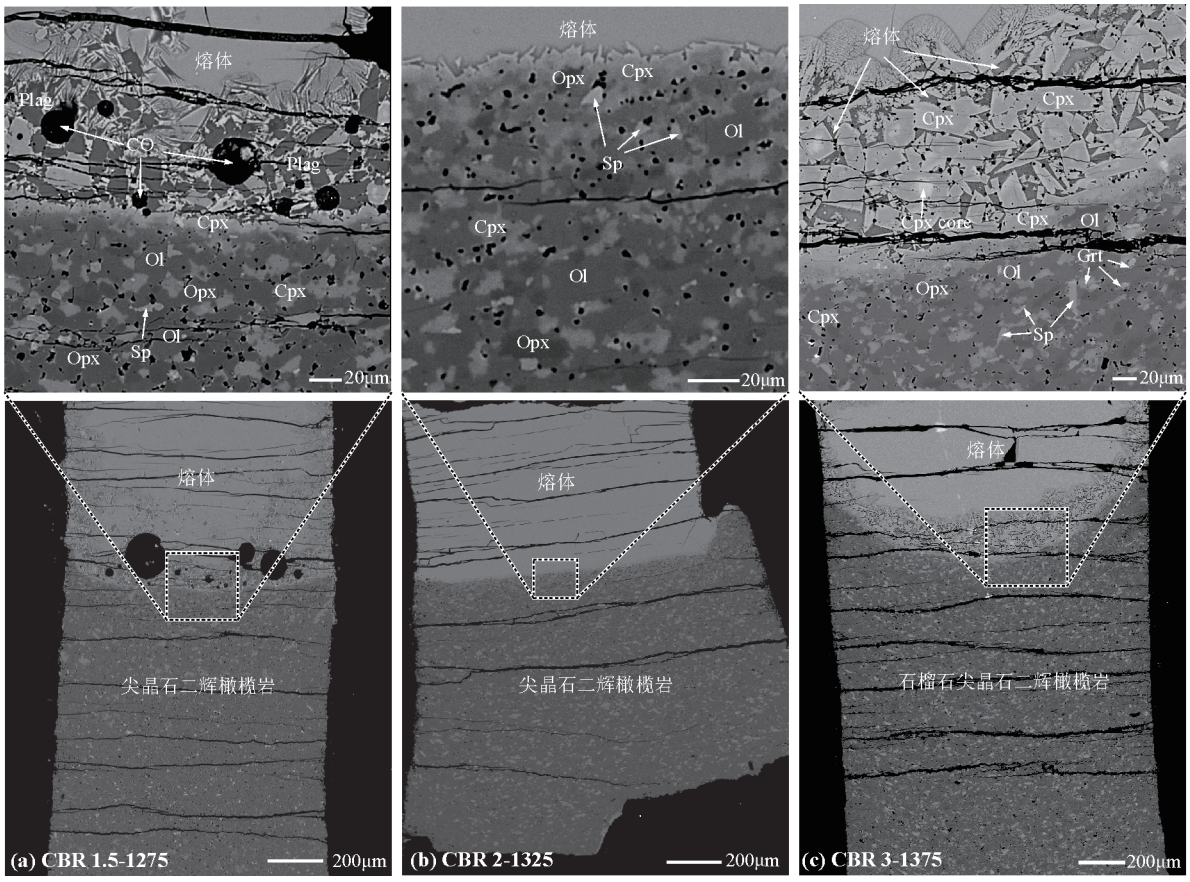
实验结果的岩性组合和结构随实验的温度、压力条件变化。在1.5 GPa、1275 °C条件下(实验CBR1.5-1275),CO_2以气相的形式从硅酸盐熔体中分离,表现为熔体中出现大小不等的囊泡状空腔。熔体中结晶出斜长石。橄榄岩结构基本未发生改变。靠近熔体-橄榄岩界面,橄榄岩中单斜辉石的丰度升高。在界面处形成一层单斜辉石薄层(图2a)。

在2 GPa和3 GPa的实验中,CO_2溶解于玄武质熔体中(图2b、2c)。2 GPa、1325 °C条件下(实验CBR2-1325),在熔体-橄榄岩界面处形成单斜辉石薄层(10~20 μm)。靠近界面,橄榄岩的单斜辉石/斜方辉石的比例显著升高。其中单斜辉石或者包裹斜方辉石、橄榄石和尖晶石,或者出现在这些矿物颗粒之间。远离界面处的橄榄岩也发生单斜辉石的富集(图2b)。3 GPa、1375 °C条件下(实验CBR3-1375),大量橄榄岩溶解于熔体之中,导致熔体-橄榄岩界面向橄榄岩方向发生凹陷。橄榄岩中出现港湾状石榴石并围绕尖晶石生长。与2 GPa条件下的实验结果相似,橄榄岩中也发生单斜辉石富集。更为明显的特征是,界面处形成了单斜辉石岩反应带。该反应带宽度明显高于1~2 GPa实验形成的单斜辉石层(150~220 μm)。单斜辉石岩反应带富含粒间熔体,其中的单斜辉石颗粒明显大于橄榄岩中的颗粒,并且在背散射图像中表现出明显的核边分异(图2c)。

2.2　熔体和矿物成分变异

图3~5展示熔体-橄榄岩反应实验结果中熔体和矿物成分在垂直熔体-橄榄岩界面方向上的空间变异。各实验中未出现矿物结晶区域的熔体成分较为均一;与初始熔体成分相比,无矿物结晶区域的熔体具有较高的$Mg^{\#}$和SiO_2含量以及较低的Na_2O和CaO含量(图3)。在实验CBR1.5-1275中,靠近界面处斜长石粒间熔体的$Mg^{\#}$和CaO含量升高,SiO_2和Na_2O含量降低。在实验CBR3-1375中,靠近界面处单斜辉石岩粒间熔体的SiO_2含量升高,$Mg^{\#}$、Na_2O和CaO含量降低。粒间熔体成分的变异趋势与矿物分离结晶趋势相符。

CBR2-1325和CBR3-1375实验橄榄岩中的单斜辉石成分较为均一,并且与初始成分相近(图4a~4e)。在实验CBR2-1325中靠近熔岩反应界面的单斜辉石成分发生轻微的变异。靠近界面的部分单斜辉石为淬火晶



矿物符号：Ol—橄榄石；Opx—斜方辉石；Cpx—单斜辉石；Sp—尖晶石；Grt—石榴石；Plag—斜长石

图2 含CO_2熔体橄榄岩反应实验结果的背散射图像

Fig.2 Back-scattered electron images for products of the CO_2-bearing melt and peridotite reaction experiments

体。与橄榄岩中的单斜辉石相比反应界面的单斜辉石具有较低的$Mg^{\#}$、Cr_2O_3含量和较高的Al_2O_3、MnO含量。单斜辉石岩和橄榄岩中的单斜辉石均为普通辉石(图4f)。在实验CBR3-1375中，单斜辉石岩中的单斜辉石成分出现明显的变异。这些单斜辉石的边部和部分单斜辉石的核部为淬火晶体。反应后的单斜辉石范围从透辉石到普通辉石(图4f)。与橄榄岩相比反应带内的单斜辉石表现出$Mg^{\#}$、Cr_2O_3含量的降低和MnO含量的升高。而淬火的单斜辉石与其他的单斜辉石成分表现出不同的变化趋势。淬火的单斜辉石具有较高的Al_2O_3、Na_2O含量和较低的CaO、MnO含量。

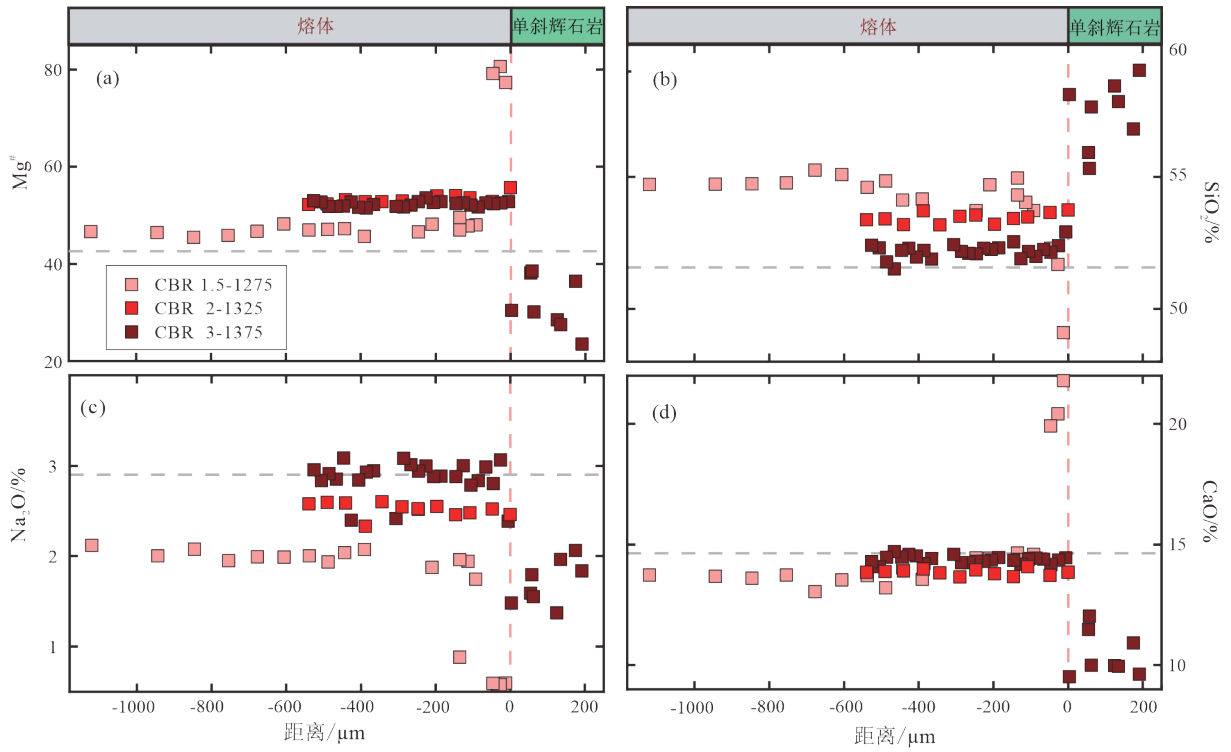
在各熔体-橄榄岩反应实验中，远离界面处橄榄石的$Mg^{\#}$和CaO含量高于初始值(图5a、5b)；尖晶石的$Mg^{\#}$高于初始值，$Cr^{\#}$低于初始值(图5c、5d)。随着位置靠近熔体-橄榄岩界面，橄榄石和尖晶石的$Mg^{\#}$逐渐降低。与CBR1.5-1275相比，CBR2-1325和CBR3-1375中橄榄石$Mg^{\#}$的降低更为显著。反应实验结果中斜方辉石的成分较为分散，但其成分围绕着初始值上下波动。

3 讨论

3.1 熔体-橄榄岩反应导致单斜辉石的富集过程

橄榄岩在碳酸盐熔体中溶解的实验研究表明，富钙碳酸盐熔体-橄榄岩反应可导致橄榄岩中单斜辉石的富集以及单斜辉石岩的形成。橄榄岩的溶解速度和富含单斜辉石反应带的生成速度与温度相关(Wang et al.，2022)。无CO_2条件下玄武质熔体-橄榄岩反应结晶过程亦可导致单斜辉石的富集，辉石组分的溶解以及冷却过程中液相线矿物——单斜辉石的结晶形成异剥橄榄岩(Tursack and Liang，2012；Saper and Liang，2014)。橄榄岩与硅酸盐熔体之间的反应速度受控于橄榄岩的物理状态。部分熔融橄榄岩的溶解速度明显高于亚固相橄榄岩的溶解速度，橄榄岩的部分熔融和粒间熔体的存在加快了熔体-橄榄岩之间的物质交换速度，溶解、结晶、重结晶过程加速橄榄岩的溶解与反应带的生成(Wang et al.，2020)。

本文实验结果表明，富钙含CO_2硅酸盐熔体-橄榄岩反应导致橄榄岩中单斜辉石的富集，并在熔体-橄榄岩界面形成单斜辉石岩反应带，单斜辉石的富集程度



竖直虚线表示熔体-单斜辉石岩界面位置;水平灰色虚线为初始熔体成分(去除CO_2)

图3 反应熔体$Mg^{\#}$值(a)和氧化物含量(b~d)在垂直于反应界面方向上的变异

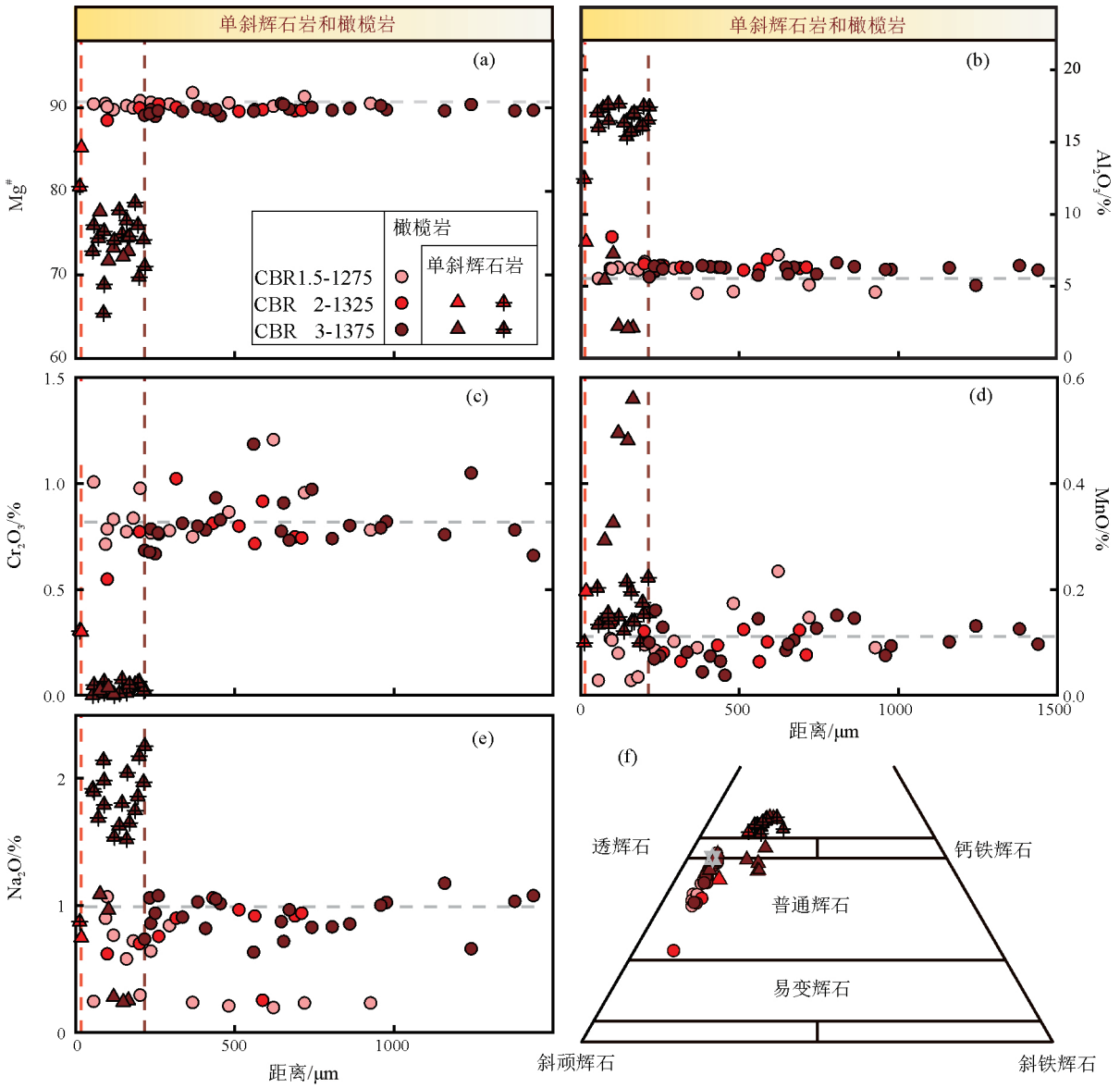
Fig.3 Variations of $Mg^{\#}$ values (a) and oxide abundances (b–d) in the reacted melt along the direction perpendicular to the reaction interface

与实验压力、温度条件有关(图2)。在低于2 GPa的压力条件下,CO_2从熔体中分离,导致单斜辉石的富集程度较低。相比之下,当压力高于2 GPa, CO_2存在于硅酸盐熔体中,单斜辉石的富集程度显著升高。本实验的三个温-压条件下,橄榄岩生成物中熔体含量均较低(图2)。但与初始成分相比,反应熔体以及橄榄岩中橄榄石和尖晶石成分均发生不同程度改变(图5),表明橄榄岩发生了部分熔融,且与反应熔体发生物质交换。因此,我们认为熔体中CO_2含量的增加有助于其CaO组分向橄榄岩中迁移,导致后者单斜辉石的富集,而较高压力是硅酸盐熔体"携带"CO_2的必要条件(Brooker et al.,2011)。

3.2 不同类型熔体-橄榄岩反应中单斜辉石的成分变异

如前文所述,硅酸盐熔体、碳酸盐熔体和含CO_2硅酸盐熔体与橄榄岩反应,均可生成单斜辉石,但生成的单斜辉石成分存在差异。图6将本文实验获得的不同岩性分带内单斜辉石成分与碳酸盐熔体-橄榄岩反应实验(Wang et al.,2022)和硅酸盐熔体-橄榄岩反应实验(Saper and Liang,2014)生成的单斜辉石成分进行了比较。碳酸盐熔体-橄榄岩反应实验中,从橄榄岩到单斜辉石岩,单斜辉石的$Mg^{\#}$升高(90~99),并且伴随着Al_2O_3、Cr_2O_3、Na_2O、TiO_2含量的下降(Wang et al.,2022)。硅酸盐熔体-橄榄岩反应实验中,从橄榄岩到单斜辉石岩,单斜辉石的$Mg^{\#}$(70~89)和Cr_2O_3含量降低,同时伴随着Al_2O_3、Na_2O、TiO_2含量的升高(Saper and Liang,2014)。本文含CO_2熔体-橄榄岩反应实验中单斜辉石成分变化趋势与硅酸盐熔体-橄榄岩反应趋势相似,但是变化范围较大。从橄榄岩到单斜辉石岩,单斜辉石的$Mg^{\#}$(65~91)和Cr_2O_3、NiO含量降低,Al_2O_3、MnO含量升高。而Na_2O、TiO_2的含量范围变化较大。同时单斜辉石岩中淬火的单斜辉石表现出较高的Al_2O_3、Na_2O含量。

综上所述,不同类型熔体-橄榄岩反应的生成物中单斜辉石的成分与反应熔体成分相关。最明显的差别在于单斜辉石的$Mg^{\#}$。在地幔运移的碳酸盐熔体,其成分以钙镁质为主(Li et al.,2017;李曙光和汪洋,2018;Wei et al.,2024)。因此,导致单斜辉石$Mg^{\#}$升高,伴随不相容元素含量降低。相比之下,再循环硅酸盐熔体富含FeO和不相容组分。因此反应形成的单斜辉石$Mg^{\#}$降低,伴随不相容元素含量升高。以上单斜辉石成分变异趋势得到Gervasoni等(2017)实验结果的印证。在2.2~2.5 GPa、1050~1100 °C条件下,富CO_2贫SiO_2熔体(CO_2=37.0%,SiO_2=10.0%)与橄榄岩反应



竖直红色虚线代表单斜辉石岩-橄榄岩界面位置；灰色水平虚线和星形代表初始单斜辉石成分

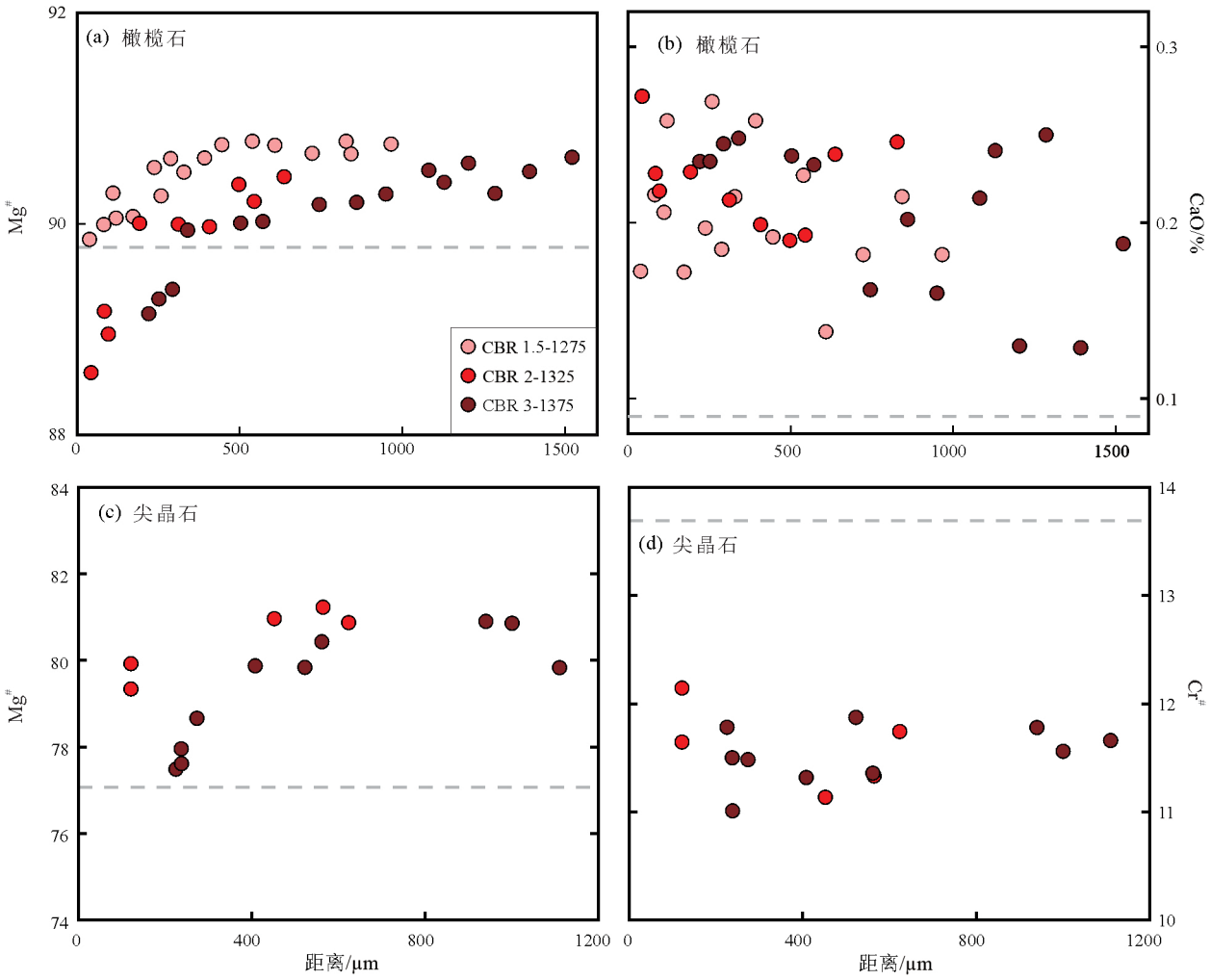
图4 单斜辉石$Mg^{\#}$值(a)和氧化物含量(b~e)在垂直于反应界面方向上的变异及辉石的分类图解(f)(据Morimoto et al.,1988)

Fig.4 Variations of $Mg^{\#}$ values (a) and oxide abundances (b–e) in the clinopyroxene along the direction perpendicular to the reaction interface; clinopyroxene classification diagram (f) (after Morimoto et al.,1988)

(系列实验CAME02/03/05)形成异剥橄榄岩。在运行时间较长的实验中(CAME05,48 h)，反应将熔体中的SiO_2消耗殆尽(SiO_2=0.2%)，形成的单斜辉石具有最高的$Mg^{\#}$(95)，与碳酸盐熔体-橄榄岩反应实验的结果相似。高$Mg^{\#}$单斜辉石的形成与碳酸盐组分与橄榄岩反应有关。相反，运行时间较短的实验中(CAME02/03，5~24 h)形成的单斜辉石具有较低的$Mg^{\#}$(77~84)，与(含CO_2)硅酸盐熔体-橄榄岩反应实验的结果相似。低$Mg^{\#}$单斜辉石可能形成于硅酸盐组分与橄榄岩反应。

3.3 对中国东北富单斜辉石地幔捕虏体成因的制约

东北地区新生代玄武岩中包含多种类型的捕虏体，包括橄榄岩和辉石岩。其中，松辽盆地以东汪清、蛟河、双辽地区的辉石岩、异剥橄榄岩具有碳酸盐相关熔体-橄榄岩反应的岩石学和矿物化学特征(Guo et al.,2020；Wang et al.,2024)。如图6所示，这些捕虏体与相伴产出的橄榄岩构成两种不同的矿物成分变异趋势：①汪清地区单斜辉石岩和异剥橄榄岩中的单斜辉石具有较低的$Mg^{\#}$(81~87)，低于相伴产出的橄榄岩中单斜辉石$Mg^{\#}$；②双辽和蛟河地区辉石岩中的单斜辉石具有较高的$Mg^{\#}$(88~93)，与相伴产出橄榄岩中单斜辉石的$Mg^{\#}$相近，其中蛟河异剥橄榄岩中单斜辉石的$Mg^{\#}$(94)高于方辉橄榄岩和二辉橄榄岩中单斜辉石的$Mg^{\#}$。单斜辉石成分变异趋势①与硅酸盐或含CO_2硅



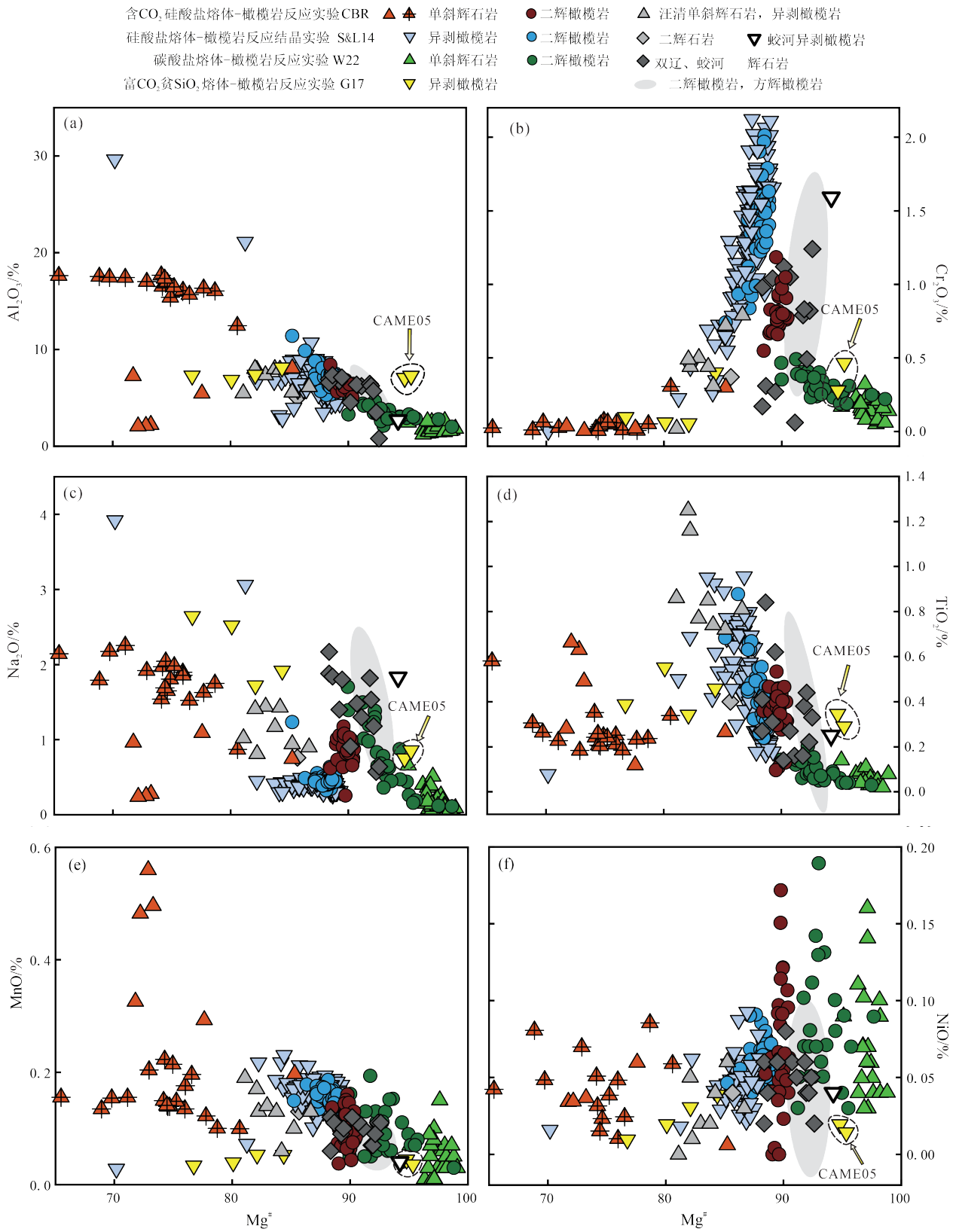
水平灰色虚线为初始橄榄石和尖晶石成分

图5 橄榄石(a、b)中Mg#值和CaO含量及尖晶石(c、d)中Mg#和Cr#值在垂直于反应界面方向上的变异

Fig.5 Variations of Mg# values and CaO abundances in the olivine (a,b) and Mg# with Cr# values in spinel (c,d) along the direction perpendicular to the reaction interface

酸盐熔体-橄榄岩反应的特征一致,变异趋势②与碳酸盐熔体-橄榄岩反应实验结果的趋势相似(图6)。结合前人对双辽、蛟河、汪清地区捕虏体的岩石学和地球化学的研究(Guo et al.,2020;Wang et al.,2024),我们认为汪清地区的单斜辉石岩和异剥橄榄岩形成于含CO_2硅酸盐熔体-橄榄岩反应,而蛟河、双辽地区的辉石岩和异剥橄榄岩形成于碳酸盐熔体-橄榄岩反应。

那么,形成东北地区辉石岩和异剥橄榄岩的物理条件如何? 以上与高温高压实验结果的对比研究结合温度计研究可以给出答案。表3中总结了这些地区富含单斜辉石的岩性比如单斜辉石岩、异剥橄榄岩、二辉石岩的温度,其中包括通过主量元素计算的温度(t_{BKN})和通过微量元素计算的温度(t_{REE})。汪清单斜辉石岩和异剥橄榄岩t_{REE}(1024~1253 ℃)高于t_{BKN}(885~1099 ℃),这种温度特征是快速冷却所导致的(Dygert and Liang,2015;Wang et al.,2015;Yao and Liang,2015)。而双辽、蛟河的辉石岩和异剥橄榄岩t_{REE}(889~1115 ℃)与t_{BKN}(807~1062 ℃)相近,表明它们来源于平衡良好的地幔环境(Liang et al.,2013)。新生代早期,太平洋板块开始向欧亚大陆俯冲,俯冲携带变质沉积物进入地幔深部。沉积物熔融形成的碳酸盐熔体与周围的橄榄岩反应,形成富含辉石岩和异剥橄榄岩地幔区域。其反应过程与碳酸盐熔体-橄榄岩反应实验的过程相似(Wang et al.,2022)。在地幔对流的作用下,这些区域上涌并逐渐增生到岩石圈地幔底部,缓慢的固化增生过程使矿物主量元素和微量元素达到良好的平衡。在中新世早期,日本海的打开标志着东北亚大地幔楔的形成(Dong et al.,2023;Tang et al.,2023)。贮存于软流圈的碳酸盐化榴辉岩通过减压熔融,形成含CO_2硅酸盐熔体。具有较高温度的含CO_2硅酸盐熔体向上迁移直至岩石圈地幔。这些熔体与岩石圈地幔橄榄岩反应,形成汪清地区的辉石岩



数据来源：Saper 和Liang(2014)；Wang等(2022)；Xu等(1998)；Gervasoni等(2017)；赵起超等(2015)；Guo等(2020)；Wang等(2024)；Zhu等(2024)；方辉、二辉橄榄岩单斜辉石数据范围是由origin软件绘制的95%置信区间面积的置信椭圆

图6 中国东北地幔捕虏体中单斜辉石成分与本文以及其他熔-岩反应实验结果中单斜辉石成分的对比

Fig.6 Comparison of clinopyroxene compositions in the mantle xenoliths from the northeastern China with those clinopyroxenes from melt-rock reaction experiments in this study and previous studies

表 3　东北地区辉石岩和异剥橄榄岩捕虏体的岩石学、地球化学特征和温度的总结

Table 3　Summary of petrological and geochemical characteristics and temperatures of pyroxenite and wehrlite xenoliths from the NE China

序号	样品号	岩性	单斜辉石	温度			参考文献
			$Mg^{\#}$	t_{BKN}/℃	t_{REE} /℃	±1 σ	
汪清							
1	W19-2	橄榄石-单斜辉石岩	85.24	—	1060	29	
2	W19-4	橄榄石-单斜辉石岩	82.24	—	1196	23	
3	W19-6	橄榄石-单斜辉石岩	82.97	—	1161	29	
4	W19-8	橄榄石-单斜辉石岩	83.76	—	1166	19	
5	W19-12	橄榄石-单斜辉石岩	84.20	—	1253	26	Wang et al.,2024
6	W19-7	二辉石岩	85.67	885	1024	17	
7	W19-1	异剥橄榄岩	81.08	1094	1232	21	
8	W19-5	异剥橄榄岩	82.08	—	1195	26	
9	W19-19	异剥橄榄岩	86.67	1099	1158	19	
双辽							
10	17SL1-21	二辉石岩	92.37	958	1041	28	
11	17SL3-7	二辉石岩	91.93	807	889	152	Guo et al.,2020
12	17SL1-22	二辉石岩	92.14	948	949	25	
蛟河							
13	17JH11	石榴子石-单斜辉石岩	88.36	1048	1073	37	
14	17JH12	石榴子石-单斜辉石岩	91.12	951	1063	87	
15	17JH1	二辉石岩	89.23	1018	1115	83	
16	17JH2	二辉石岩	90.71	898	994	43	
17	17JH3	二辉石岩	91.82	1035	951	39	Guo et al.,2020
18	17JH6	石榴子石-二辉石岩	88.66	1062	1068	38	
19	17JH7	二辉石岩	89.46	1020	1010	14	
20	17JH8	二辉石岩	90.18	1041	1101	62	
21	17JH14	异剥橄榄岩	94.23	—	1076	8	

和异剥橄榄岩。反应过程与本文进行的实验以及前人进行的反应-结晶实验(Tursack and Liang,2012;Saper and Liang,2014)相似。

4　结论

(1)含CO_2硅酸盐熔体与橄榄岩反应形成单斜辉石岩反应带,并使橄榄岩发生单斜辉石富集。

(2)含CO_2硅酸盐熔体-橄榄岩反应形成的单斜辉石具有较低的$Mg^{\#}$。与之相反,碳酸盐熔体-橄榄岩反应提高单斜辉石的$Mg^{\#}$。

(3)东北地区汪清的辉石岩和异剥橄榄岩捕虏体是含CO_2硅酸盐熔体与岩石圈地幔橄榄岩反应的结果。双辽、蛟河的辉石岩和异剥橄榄岩捕虏体是碳酸盐熔体与软流圈地幔橄榄岩反应的结果。

作者贡献声明：张薇,数据收集和整理、制图、撰写稿件;王春光,实验设计和运行、电子探针分析、图像采集和文章修订;徐文良和杨德彬,文章修订;李本仙,初始样品的制备。

利益冲突声明：作者保证本文无利益冲突。

致谢：感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见,使本文质量得到较大提升。感谢中国科学技术大学倪怀玮教授对我们开放活塞-圆筒实验室及相关实验资源,同时感谢张力老师和郭璇老师在实验运行过程中的协助和指导。感谢杨文强老师在电子探针分析过程中的协助和指导。

参考文献 (References):

Brey G, Brice W R, Ellis D J, Green D H, Harris K L, Ryabchikov I D. 1983. Pyroxene-carbonate reactions in the upper mantle. Earth and Planetary Science Letters, 62(1): 63–74

Brooker R A, Sparks R S J, Kavanagh J L, Field M. 2011. The volatile content of hypabyssal kimberlite magmas: Some constraints from experiments on natural rock compositions. Bulletin of Volcanology, 73(8): 959–981

Coltorti M, Bonadiman C, Hinton R W, Siena F, Upton B G J. 1999. Carbonatite metasomatism of the oceanic upper mantle: Evidence from clinopyroxenes and glasses in ultramafic xenoliths of grande comore, Indian Ocean. Journal of Petrology, 40(1): 133–165

Dalton J A, Wood B J. 1993. The compositions of primary carbonate melts and their evolution through wallrock reaction in the mantle. Earth and Planetary Science Letters, 119(4): 511–525

Dasgupta R, Hirschmann M M. 2006. Melting in the Earth's deep upper mantle caused by carbon dioxide. Nature, 440: 659–662

Dasgupta R, Hirschmann M M. 2010. The deep carbon cycle and melting in Earth's interior. Earth and Planetary Science Letters, 298(1–2): 1–13

Dasgupta R, Mallik A, Tsuno K, Withers A C, Hirth G, Hirschmann M M. 2013. Carbon-dioxide-rich silicate melt in the Earth's upper mantle. Nature, 493(7431): 211–215

Deng L X, Liu Y S, Zong K Q, Zhu L Y, Xu R, Hu Z C, Gao S. 2017. Trace element and Sr isotope records of multi-episode carbonatite metasomatism on the eastern margin of the North China Craton. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 18(1): 220–237

Dong Y, Xu W L, Zhang J R, Li Y B, Niida K, Yamamoto S, Wang Y N, Ji Z. 2023. Timing of Izanagi-Pacific ridge subduction beneath Eurasia: Constraints from metamorphic soles in Hokkaido, Japan. Geological Society of America Bulletin, 136(7–8): 2723–2734

Dygert N, Liang Y. 2015. Temperatures and cooling rates recorded in REE in coexisting pyroxenes in ophiolitic and abyssal peridotites. Earth and Planetary Science Letters, 420: 151–161

Foley S F. 2011. A reappraisal of redox melting in the earth's mantle as a function of tectonic setting and time. Journal of Petrology, 52(7–8): 1363–1391

高天山, 陈江峰, 谢智. 2015. 苏鲁造山带中胡家林超镁铁质岩岩石地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报, 34(3): 601–618［Gao T S, Chen J F, Xie Z. Petrology and Geochemistry of Ultramafic Rocks at Hujialin, Sulu Orogen. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 34(3): 601–618 (in Chinese with English abstract)］

Gervasoni F, Klemme S, Rohrbach A, Grützner T, Berndt J. 2017. Experimental constraints on mantle metasomatism caused by silicate and carbonate melts. Lithos, 282–283: 173–186

Green D H, Wallace M E. 1988. Mantle metasomatism by ephemeral carbonatite melts. Nature, 336: 459–462

Guo P, Ionov D A, Xu W L, Wang C G, Luan J P. 2020. Mantle and recycled oceanic crustal components in mantle xenoliths from northeastern China and their mantle sources. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(4): e2019JB018232

Lambart S, Laporte D, Provost A, Schiano P. 2012. Fate of pyroxenite-derived melts in the peridotitic mantle: Thermodynamic and experimental constraints. Journal of Petrology, 53(3): 451–476

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. National Science Review, 4(1): 111–120

李曙光, 汪洋. 2018. 中国东部大地幔楔形成时代和华北克拉通岩石圈减薄新机制: 深部再循环碳的地球动力学效应. 中国科学: 地球科学, 48(7): 809–824［Li S G, Wang Y. 2018. Formation time of the big mantle wedge beneath Eastern China and a new lithospheric thinning mechanism of the North China Craton—Geodynamic effects of deep recycled carbon. Scientia Sinica (Terrae), 48(7): 809–824 (in Chinese with English abstract)］

Liang Y, Sun C G, Yao L J. 2013. A REE-in-two-pyroxene thermometer for mafic and ultramafic rocks. Geochimica et Cosmochimica Acta, 102: 246–260

Liu Y S, He D T, 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. Scientific Reports, 5: 11547

Mallik A, Dasgupta R. 2012. Reaction between MORB-eclogite derived melts and fertile peridotite and generation of ocean island basalts. Earth and Planetary Science Letters, 329: 97–108

Mallik A, Dasgupta R. 2013. Reactive infiltration of MORB-eclogite-derived carbonated silicate melt into fertile peridotite at 3 GPa and genesis of alkalic magmas. Journal of Petrology, 54(11): 2267–2300

Morimoto N, Fabries J, Ferguson A K, Ginzburg I V, Ross M, Seifert F A, Zussman J, Aoki K, Gottardi G. 1988. Nomenclature of pyroxenes. American Mineralogist, 73(9–10): 1123–1133

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

Rudnick R L, McDonough W F, Chappell B W. 1993. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: Petrographic and geochemical characteristics. Earth and Planetary Science Letters, 114 (4): 463–475

Saper L, Liang Y. 2014. Formation of plagioclase-bearing peridotite and plagioclase-bearing wehrlite and gabbro suite through reactive crystallization: An experimental study. Contributions to Mineralogy and Petrology, 167(3): 985

Shen J, Li S G, Wang S J, Teng F Z, Li Q L, Liu Y S. 2018. Subducted Mg-rich carbonates into the deep mantle wedge. Earth and Planetary Science Letters, 503: 118–130

Sokol A G, Kruk A N, Chebotarev D A, Palyanov Y N. 2016. Carbonatite melt-peridotite interaction at 5.5–7.0 GPa: Implications for metasomatism in lithospheric mantle. Lithos 248: 66–79

Su B, Chen Y, Guo S, Chu Z Y, Liu J B, Gao Y J. 2016. Carbonatitic metasomatism in orogenic dunites from Lijiatun in the Sulu UHP terrane, Eastern China. Lithos, 262: 266–284

Sun C G, Dasgupta R. 2019. Slab–mantle interaction, carbon transport, and kimberlite generation in the deep upper mantle. Earth and Planetary Science Letters, 506: 38–52

Tang J, Wang F, Wang Y N, Long X Y, Xu W L. 2023. Age, formation mechanisms, spatial extent, and geodynamic effects of the eastern and northeastern Asian big mantle wedges. Earth Science Reviews, 237: 104324

Tursack E, Liang Y. 2012. A comparative study of melt-rock reactions in the mantle: Laboratory dissolution experiments and geological field observations. Contributions to Mineralogy and Petrology, 163(5): 861–876

Wang C G, Guo P, Xiong S, Wang F, Xu W L. 2024. Two styles of melt-peridotite interactions in the upper mantle revealed by mantle xenoliths from northeastern China. Lithos, 468–469: 107485

Wang C G, Liang Y, Dygert N, Xu W L. 2016. Formation of orthopyroxenite

by reaction between peridotite and hydrous basaltic melt: an experimental study. Contributions to Mineralogy and Petrology, 171: 77

Wang C G, Liang Y, Xu W L, Dygert N. 2013. Effect of melt composition on basalt and peridotite interaction: Laboratory dissolution experiments with applications to mineral compositional variations in mantle xenoliths from the North China Craton. Contributions to Mineralogy and Petrology, 166 (5): 1469–1488

Wang C G, Liang Y, Xu W L. 2015. On the significance of temperatures derived from major element and REE based two-pyroxene thermometers for mantle xenoliths from the North China Craton. Lithos, 224: 101–113

Wang C G, Lo Cascio M, Liang Y, Xu W L. 2020. An experimental study of peridotite dissolution in eclogite-derived melts: Implications for styles of melt-rock interaction in lithospheric mantle beneath the North China Craton. Geochimica et Cosmochimica Acta, 278: 157–176

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 X F, Zhang J F, Wang C, Zong K Q, Xu H J. 2022. Experimental constraint on Ca-rich carbonatite melt-peridotite interaction and implications for lithospheric mantle modification beneath the North China Craton. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 127(9): e2022JB024769

Wei B W, Zhang Z C, Cheng Z G, Xie Q H, Santosh M, Kong W L, Liu B X, Reichow M K, Li Y J. 2024. Tracing deep carbon cycling by zinc isotopes in a peralkaline-carbonatite suite. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 25(4): e2023GC011113

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, 288–289: 338–351

Wyllie P J, Huang W L, Otto J, Byrnes A P. 1983. Carbonation of peridotites and decarbonation of siliceous Dolomites represented in the system CaO-MgO-SiO_2-CO_2 to 30 kbar. Tectonophysics, 100(1–3): 359–388

Xu W L, Zhou Q J, Pei F P, Yang D B, Gao S, Li Q L, Yang Y H. 2013. Destruction of the North China Craton: Delamination or thermal/chemical erosion? Mineral chemistry and oxygen isotope insights from websterite xenoliths. Gondwana Research, 23(1): 119–129

Xu Y G, Menzies M A, Vroon P, Mercier J C, Lin C Y. 1998. Texture–temperature–geochemistry relationships in the upper mantle as revealed from spinel peridotite xenoliths from Wangqing, NE China. Journal of Petrology, 39(3): 469–493

Xu Y G, Mercier J C C, Lin C Y, Shi L B, Menzies M A, Ross J V, Harte B. 1996. K-rich glass-bearing wehrlite xenoliths from Yitong, Northeastern China: Petrological and chemical evidence for mantle metasomatism. Contributions to Mineralogy and Petrology, 125(4): 406–420

Yao L J, Liang Y. 2015. Closure temperature in cooling bi-mineralic systems: I. Definition and with application to REE-in-two-pyroxene thermometer. Geochimica et Cosmochimica Acta, 162: 137–150

Yaxley G M, Crawford A J, Green D H. 1991. Evidence for carbonatite metasomatism in spinel peridotite xenoliths from western Victoria, Australia. Earth and Planetary Science Letters, 107(2): 305–317

Yaxley G M, Green D H, Kamenetsky V. 1998. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australian lithosphere. Journal of Petrology, 39(11–12): 1917–1930

Yu S Y, Xu Y G, Huang X L, Ma J L, Ge W C, Zhang H H, Qin X F. 2009. Hf–Nd isotopic decoupling in continental mantle lithosphere beneath Northeast China: Effects of pervasive mantle metasomatism. Journal of Asian Earth Sciences, 35(6): 554–570

Yu S Y, Xu Y G, Ma J L, Zheng Y F, Kuang Y S, Hong L B, Ge W C, Tong L X. 2010. Remnants of oceanic lower crust in the subcontinental lithospheric mantle: Trace element and Sr-Nd-O isotope evidence from aluminous garnet pyroxenite xenoliths from Jiaohe, Northeast China. Earth and Planetary Science Letters, 297(3–4): 413–422

赵起超, 夏群科, 刘少辰, 陈欢, 冯敏. 2015. 吉林汪清和龙岗新生代岩石圈地幔的含水性和元素地球化学特征. 地学前缘, 22(1): 360–373［Zhao Q C, Xia Q K, Liu S C, Chen H, Feng M. 2015. Water content and element geochemistry of peridotite xenoliths hosted by Cenozoic basalt in Longgang and Wangqing, Jilin Province. Earth Science Frontiers, 22(1): 360–373 (in Chinese with English abstract)］

Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Yang J S, Li T F, Zhang M, Zhang R Y, Liou J G. 2006. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: Constraints on mantle evolution beneath eastern China. Journal of Petrology, 47(11): 2233–2256

周琴, 吴福元, 储著银, 杨岳衡, 孙德有, 葛文春. 2007. 吉林蛟河地幔橄榄岩捕虏体的Sr-Nd-Hf-Os同位素特征与岩石圈地幔时代. 岩石学报, 23 (6): 1269–1280［Zhou Q, Wu F Y, Chu Z Y, Yang Y H, Sun D Y, Ge W C. 2007. Sr-Nd-Hf-Os isotopic charaeterizations of the Jiaohe peridotite xenoliths in Jilin Province and constraints on the lithospherie mantle age in northeastern China. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1269–1280 (in Chinese with English abstract)］

Zhu C Y, Chen H, Hao Y T, Xia Q K. 2024. The effects of partial melting and metasomatism on peridotite water contents: Insights from Shuangliao volcano group, Northeast China. Journal of Petrology, 65(2): egae003

（本文责任编辑：龚超颖；英文审校：张兴春）