

文章编号: 1004—5589 (2023) 04—0621—15

地幔柱活动对克拉通岩石圈地幔的影响: 西伯利亚克拉通地幔橄榄岩包体 Sr-Nd-Hf 同位素制约

程哲, 孙晶

中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249

摘要: 利用单矿物溶液法分析了 Obnazhennaya 金伯利岩中橄榄岩包体单矿物的 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 并且与 Udachnaya 金伯利岩中橄榄岩包体单矿物的 Sr-Nd-Hf 同位素组成进行了对比。结果显示, Obnazhennaya 金伯利岩中橄榄岩包体单斜辉石具有亏损的 Sr 同位素组成和富集的 Nd、Hf 同位素组成。Obnazhennaya 金伯利岩中橄榄岩包体石榴子石的 Sr-Nd-Hf 同位素组成表现出原始的特征, 没有受到交代作用的影响。通过对比 Udachnaya 和 Obnazhennaya 金伯利岩中地幔包体的特征和单斜辉石的二元混合模拟发现, Udachnaya 金伯利岩中的地幔包体的 Sr-Nd-Hf 同位素组成更偏向于金伯利岩的特征, 而与之相反, Obnazhennaya 金伯利岩中的地幔包体的 Sr-Nd-Hf 同位素组成则位于金伯利岩和地幔柱溢流玄武岩之间, 且更加偏向于溢流玄武岩的同位素特征。因此, 地幔柱活动对西伯利亚克拉通岩石圈产生了影响, 改变了其岩石圈地幔的同位素组成。

关键词: Sr-Nd-Hf 同位素; 地幔柱; 橄榄岩包体; 西伯利亚岩克拉通

中图分类号: P597 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2023.04.003

Effect of mantle plume activity on craton lithospheric mantle: Sr-Nd-Hf isotopic constraints of mantle peridotite xenoliths of Siberian Craton

CHENG Zhe, SUN Jing

College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: The Sr-Nd-Hf isotopic compositions of minerals in peridotite xenoliths from the Obnazhennaya kimberlite are analyzed using solution method, and compared with those from Udachnaya kimberlite. The results show that the clinopyroxenes within peridotite xenolith in the Obnazhennaya kimberlite are depleted in Sr and enriched in Nd, Hf isotopic compositions. The Sr-Nd-Hf isotopic compositions of garnets from peridotite xenoliths in the Obnazhennaya kimberlite show primitive characteristics and are not affected by metasomatism. By comparing the characteristics of mantle xenoliths in Udachnaya and Obnazhennaya kimberlites and simulating binary mixing of clinopyroxenes, it is found that the Sr-Nd-Hf isotopic composition of mantle xenoliths in Udachnaya kimberlite is quite similar to the characteristics of the hosting kimberlite, while, the Sr-Nd-Hf isotopic composition of mantle xenoliths in Obnazhennaya kimberlite is of the character between kimberlite and basalt related to mantle plume, and it is more close to the isotopic characteristics of basalt lava flow. Therefore, the study suggests that the mantle

收稿日期: 2023-07-01; 修订日期: 2023-09-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (41602045)

第一作者: 程哲 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石地球化学研究。E-mail: 13163537588@163.com

通信作者: 孙晶 (1987—), 女, 博士, 副教授, 主要从事岩石学与地球化学研究。E-mail: sunjingv@163.com

plume activity has an impact on the Siberian Craton lithosphere, changing the isotopic composition of its lithospheric mantle.

Keywords: Sr-Nd-Hf isotopes; mantle plume; peridotite xenoliths; Siberian Craton

0 引言

由于难熔地幔根的存在,克拉通能够保持长期的稳定。但是来自克拉通岩石圈地幔下部的地幔柱在上涌时会穿透岩石圈地幔,在此过程中地幔柱是否改造克拉通岩石圈地幔一直是国内外研究的热点问题。要了解地幔柱活动对克拉通岩石圈地幔的影响,就需要研究地幔柱活动前后克拉通岩石圈地幔的变化。金伯利岩岩浆喷发为研究岩石圈地幔提供了有效的途径,它们将地幔橄榄岩包体从位于克拉通下部的岩石圈地幔带到地球表面。由于这些地幔橄榄岩包体是岩石圈地幔(主要是尖晶石和石榴子石橄榄岩)的直接样本,可以提供有关岩石圈地幔的组成、结构、热状态和地幔过程的直接信息^[1]。特别是地幔柱活动后喷发的金伯利岩,其携带的橄榄岩包体的主微量元素和同位素地球化学组成能够反映地幔柱活动后克拉通岩石圈地幔的地球化学特征。

西伯利亚克拉通在 251 Ma 发生了一次超级地幔柱活动,形成了著名的西伯利亚大火成岩省^[2]。目前利用二次离子质谱法(SIMS)研究金伯利岩中钙钛矿 U-Pb 地质年龄,确定了西伯利亚克拉通两个著名的 Udachnaya 和 Obnazhennaya 金伯利岩筒的喷发时间。两个金伯利岩筒分别喷发于 357 Ma^[3]和 152 Ma^[4],即在时间上处于超级地幔柱活动发生之前和结束之后,是研究地幔柱活动对克拉通影响的理想地点。前人对地幔柱活动前后两个金伯利岩筒中地幔橄榄岩包体的主微量元素进行了研究,认为 Udachnaya 地幔包体中石榴子石被金伯利岩熔体所交代而 Obnazhennaya 地幔包体中石榴子石被玄武岩质熔体交代,并且认为由于地幔柱引起的热扰动造成了西伯利亚克拉通岩石圈地幔产生了近 50 km 的厚度差异,即 Udachnaya 下方的岩石圈地幔(~200 km)比 Obnazhennaya 下方的岩石圈地幔(~150 km)厚^[5-11]。西伯利亚克拉通岩石圈地幔厚度变化的原因至今仍有争议,有研究认为西伯利亚岩石圈地幔是在碰撞拼合之前或碰撞拼合时导致克拉通不同地区厚度的不同^[12],因此厚度

的变化并不能证明地幔柱活动对岩石圈地幔产生了影响。前人对西伯利亚地幔橄榄岩包体的研究表明,在地幔柱活动之前的 Udachnaya 地幔包体具有非放射成因(相对于 CI-球粒陨石)的 Os 同位素组成和较低的 $[Pd/Ir]_N$,这些都是经历过熔体抽提的古代亏损克拉通地幔的特征。而在地幔柱活动后的 Obnazhennaya 地幔包体存在被硅酸盐熔体渗透过的 Os 同位素特征,同时也存在“原始”残留的证据($Fo > 92$ 和较低的 $[Pd/Ir]_N$)^[13]。

现有的研究没有系统统计和对比过地幔柱活动前后 Udachnaya 和 Obnazhennaya 地幔橄榄岩的地球化学特征,缺少对地幔柱活动前后岩石圈地幔性质的对比。前人对 Udachnaya 地幔橄榄岩包体的单斜辉石和石榴子石的 Sr、Nd 和 Hf 同位素进行了研究,但是缺乏地幔柱活动后 Obnazhennaya 地幔橄榄岩包体的矿物 Sr、Nd 和 Hf 同位素的研究。研究地幔包体中石榴子石和单斜辉石的 Sr、Nd 和 Hf 同位素组成,能够更有效地约束岩石圈地幔的特征。笔者对 Obnazhennaya 地区收集的二辉橄榄岩和纯橄岩包体中分离出来的单斜辉石和石榴子石进行了 Sr、Nd、Hf 同位素研究。进一步了解西伯利亚地幔柱活动中西伯利亚克拉通岩石圈地幔的演化过程,约束地幔柱活动对克拉通岩石圈地幔的影响。

1 地质背景及样品描述

1.1 地质背景

西伯利亚克拉通位于亚洲北部,是地球上最大的太古代至古元古代大陆区域之一,总面积约 $4 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[14]。西伯利亚克拉通主要被古生代沉积物和二叠纪溢流玄武岩所覆盖。地壳基底岩石主要暴露在 Anabar 和 Aldan 地盾上^[15]。西伯利亚克拉通在大约 1.8 Ga 时期克拉通化并且稳定。有超过 1 000 个金伯利岩筒分布在西伯利亚克拉通上,研究发现该克拉通至少经历了 4 期金伯利岩浆喷发: 436 ~ 408 Ma、357 ~ 345 Ma、245 ~ 221 Ma 和 160 ~ 149 Ma^[9,15-16]。在 251 Ma,西伯利亚克拉通发生大规模玄武岩溢流,形成了目前地球上最大的显生宙大陆溢流玄武岩省,即所谓的西伯利亚暗色

岩系。其岩浆喷发面积约 $2 \times 10^6 \text{ km}^2$, 这一时期的地幔柱事件也称为超级地幔柱^[17]。

Udachnaya 金伯利岩岩筒位于西伯利亚克拉通中部 ($112^{\circ}19' \text{ E}$, $66^{\circ}26' \text{ N}$) (图 1), 是 Daldyn-Alakit 金伯利岩矿区的一部分。它切穿新元古代至古生代沉积岩, 由东、西两个筒组成^[18]。金伯利岩中钙钛矿的 U-Pb 测年得出 Udachnaya 东筒的喷发时间为 $(367 \pm 5) \text{ Ma}$, Udachnaya 西筒喷发时间为 $(358.1 \pm 3.7) \text{ Ma}$ ^[3]。位于西伯利亚克拉通的东北部的 Obnazhennaya 金伯利岩岩筒 ($121^{\circ}35' \text{ E}$, $70^{\circ}15' \text{ N}$) (图 1) 侵入震旦系的白云岩, 并且在 Olenek 河与 Kuoika 河汇合处附近的岸边存在露头, 其喷发时间为 152 Ma ^[4, 18-19]。

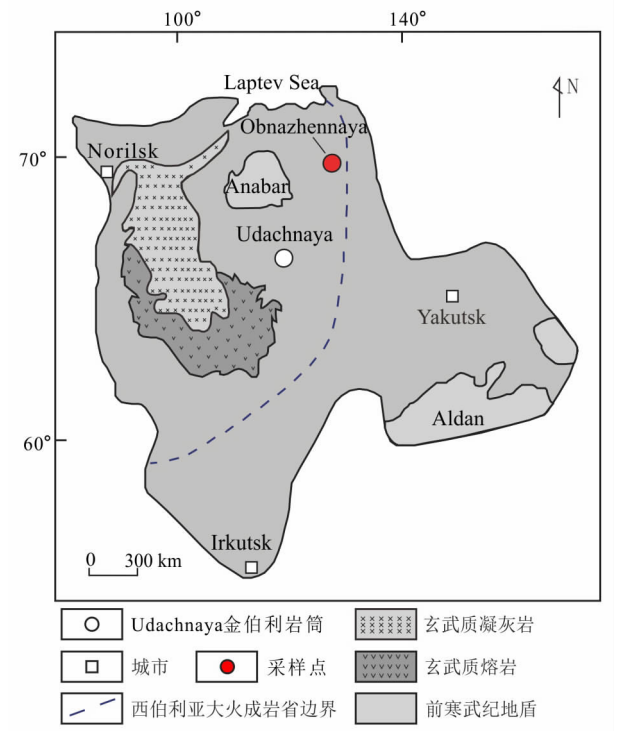


图 1 西伯利亚克拉通地质简图^[16]

Fig. 1 Simplified geological map of Siberian Craton^[16]

1.2 样品描述

本次研究主要分析了 3 个 Obnazhennaya 金伯利岩筒中收集的橄榄岩包体样品, 包括 1 个尖晶石二辉橄榄岩、1 个尖晶石石榴子石二辉橄榄岩和 1 个尖晶石纯橄岩。直径为 5 ~ 10 cm。所有样品均是尖晶石相橄榄岩, 显示出粒状结构, 主要含有橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和尖晶石等矿物, 部分样品中含有石榴子石、金云母和角闪石。从这些岩

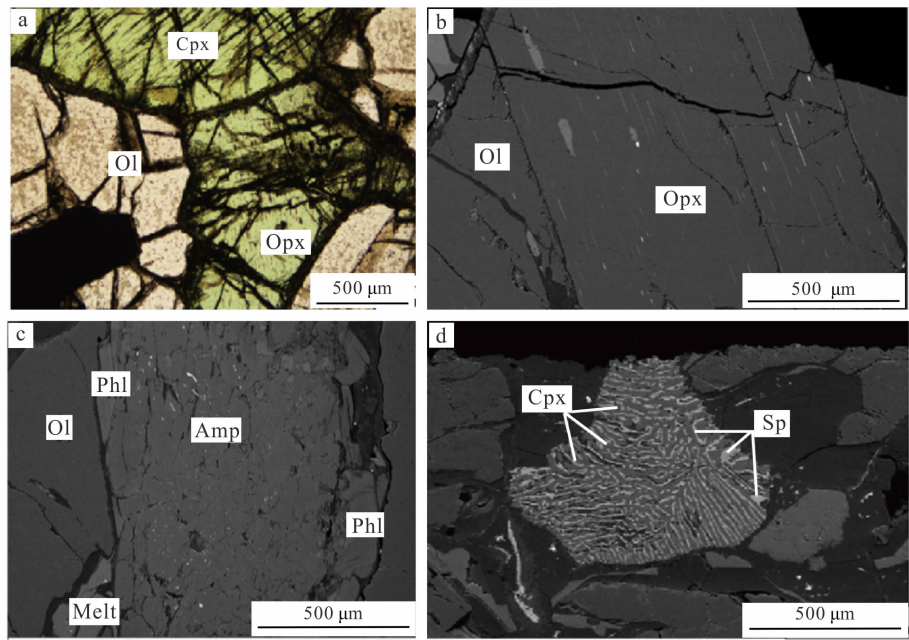
石样品中分离出纯净的单斜辉石和石榴子石进行矿物分析。样品 Obn7-341 中发现橄榄石、单斜辉石和斜方辉石矿物之间存在三边平衡结构, 这意味着 3 个矿物之间的元素达到平衡 (图 2a), 这些矿物经历过高温固态流动而发生塑性变形。样品 Obn7-343 的斜方辉石表面可见细小的单斜辉石出溶体 (图 2b), 出溶现象表明包体在上升过程中, 由于温压条件的变化而产生固溶体的分离。在样品 Obn7-341 和样品 Obn7-343 的矿晶体 (橄榄石、斜方辉石和单斜辉石) 边缘发现了随机分布的 Ca 质熔体, 同时发现金云母和角闪石出现在含有 Ca 质熔体的样品 Obn7-343 中 (图 2c)。尖晶石在 Obnazhennaya 橄榄岩包体中普遍存在, 通常与单斜辉石共生, 并且以他形晶、蠕虫状 (图 2d)、自形晶出现。不同结构的尖晶石可能代表着它们形成于不同的环境和温压条件。石榴子石少量存在于方辉橄榄岩和二辉橄榄岩中, 主要为圆形或者椭圆形颗粒状。

2 分析方法

单斜辉石和石榴子石的 Sr-Nd-Hf 同位素的测定是使用中国地质大学 (北京) 同位素地球化学实验室的多接收电感耦合质谱仪 (MC-ICP-MS) 完成。实验方法是在前人研究的基础上由中国地质大学 (北京) 同位素地球化学实验室改进而来^[20-25]。

从橄榄岩包体中分离出来的单斜辉石和石榴子石颗粒用超纯水清洗, 之后使用玛瑙研钵将淋洗干净的样品研磨至 $< 100 \mu\text{m}$ 的粉末状。将称好的样品放入 Teflon 杯中, 加入混合酸 (3 mL HF 酸和 1 mL 浓硝酸) 在 140°C 电热板上加热反复消解至样品完全溶解。之后利用 0.2 mL 的 3.5 mol/L 硝酸和 0.45 mol/L 硼酸混合物, 在 120°C 电热板上加热用于去除样品中的氟化物。

用 Ln-Spec 树脂离子交换柱进行 Hf、Nd、Sr 的纯化和分离。使用 3 mol/L HCl 分离得到 Rb、Sr 和 LREE 的混合溶液, 基体元素 Ti 利用 0.3 mol/L HNO_3 、0.09 mol/L 维生素 C 和 1% H_2O_2 的混合溶液分离, 用 6 mol/L HCl 分离 Zr 元素, 最后使用 2 mol/L HF 淋洗 Hf。对回收的 Rb, Sr 和 LREE 混合溶液使用 Sr 特效树脂分离 Sr 元素, 用 2.5 N



OL. 橄榄石; Opx. 斜方辉石; Cpx. 单斜辉石; Gar. 石榴子石; Sp. 尖晶石; Amp. 角闪石; Phl. 金云母。
a. 二辉橄榄岩 (Obn7-341) 正交偏光照片, 具三边平衡结构; b. 纯橄岩 (Obn7-343) 背散射图像, 细小单斜辉石出溶; c. 纯橄岩 (Obn7-343) 背散射图像, 存在角闪石、金云母和 Ca 质熔体; d. 二辉橄榄岩 (Obn7-341) 背散射图像, 尖晶石具蠕虫状结构。图 a、b、c 引自文献 [16]。

图 2 Obnazhennaya 地幔橄榄岩包体的镜下特征
Fig. 2 Microscopic features of Obnazhennaya mantle peridotite xenoliths

HNO₃ 分离 Rb, 后用超纯水回收 Sr。在 Ln-Spec 树脂上使用 0.3 N HCl 分离回收 Nd 元素。

由于样品较为稀少并且在单斜辉石和石榴子石中 Lu、Hf、Sm 和 Nd 的浓度较低, 同位素比值分析较为困难。这些样品在 MC-ICPMS 的静态模式下测量, 大部分样品采用雾化器, 以氩氮混合气为载气, 将样品引入质谱分析。而部分含量极低的样品采用膜去溶的方法引入质谱, 以加大信号。使用杯状结构、质量偏差和干涉修正来测量 Hf 同位素^[26]。重复测量 BHVO-2 标样, 得到的 Hf 的标准值¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.283 105 ± 0.000 003, ⁸⁶Sr/⁸⁷Sr = 0.703 488 ± 0.000 008, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.513 055 ± 0.000 007, 与 GeoReM 推荐值基本吻合。利用 La Jolla 国际标样和标样 SRM987 的检测结果保证仪器的准确度。国际标样 La Jolla 的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 在中国地质大学 (北京) 实验室检测的参考值为分别为 0.511 837 ± 15 (2σ), 国际标样 SRM-987 的⁸⁸Sr/⁸⁶Sr 在中国地质大学 (北京) 实验室的参考值为 0.710 250 ± 27 (2σ)。

3 测试结果

单斜辉石和石榴子石的 Sr、Nd、Hf 同位素比值以及 Lu、Hf、Sm、Nd、Rb 和 Sr 的丰度见表 1。同时也计算出了 Nd、Hf 和 Sr 同位素比值的初始值和 Nd、Hf 亏损地幔模式年龄。图 3 显示了西伯利亚克拉克通 Udachnaya、Obnazhennaya 的地幔橄榄岩包体中单斜辉石和石榴子石的 Sr、Nd、Hf 的数据。

3.1 单斜辉石

Obnazhennaya 地幔橄榄岩包体中单斜辉石 Rb 质量分数为 0.10 × 10⁻⁶ ~ 0.29 × 10⁻⁶, Sr 的质量分数为 120 × 10⁻⁶ ~ 149 × 10⁻⁶。其中 Obn7-341 和 Obn7-343 样品 Rb 的质量分数要比 Obn7-297 的高。二辉橄榄岩中单斜辉石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_(i) 范围在 0.703 481 ~ 0.704 108 (图 3a)。而纯橄岩样品的 Sr 同位素比值相较于二辉橄榄岩样品更加亏损,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_(i) 的范围为 0.702 801 ~ 0.702 842。单斜辉石样品 Lu 的质量分数为 0.06 × 10⁻⁶ ~ 0.15 × 10⁻⁶, Hf 的质量分数为 0.73 × 10⁻⁶ ~ 1.12 × 10⁻⁶。其中二辉橄榄岩中单斜辉石的 ε_{Hf} (t) 值为 -2.6 ~ 3.1, 而

表 1 西伯利亚克拉通 Obnazhennaya 金伯利岩筒地幔橄榄岩包体单斜辉石和石榴子石 Sr-Nd-Hf 同位素数据
Table 1 Sr-Nd-Hf isotopic data of clinopyroxene and garnet mantle peridotite xenoliths in Obnazhennaya kimberlite pipe of Siberian Craton

样品号	Obn7-297	Obn7-341	Obn7-343	Obn7-343R	Obn7-341	Obn7-343	Obn7-343R
岩石类型	Spl-Lh	Spl-Gar-Lh	Spl-Dun	Spl-Dun	Spl-Gar-Lh	Spl-Dun	Spl-Dun
矿物	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Gar	Gar	Gar
年龄/Ma	152	152	152	152	152	152	152
Lu	0.15	0.08	0.06	0.06	2.76	2.76	2.76
Hf	1.05	0.73	1.12	1.12	3.63	3.63	3.63
¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	0.020 297	0.015 570	0.007 611	0.007 611	0.108 093	0.108 069	0.108 067
¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _(m)	0.282 834	0.282 657	0.282 465	0.282 455	0.286 173	0.284 972	0.284 886
1σ	3	3	3	3	7	5	7
¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _(t)	0.282 774	0.282 611	0.282 443	0.282 433	0.285 854	0.284 653	0.284 567
ε _{Hf} (<i>t</i>)	3.1	-2.6	-8.6	-9.0	112.1	69.6	66.5
<i>T</i> _{DM} /Ga	1.8	1.3	1.3	1.3	2.1	1.3	1.2
Rb	0.1	0.29	0.24	0.24	0.87		
Sr	146.00	120.00	149.00	149.00	5.52		
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.001 981	0.006 989	0.004 658	0.004 658	0.455 819		
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _(m)	0.704 108	0.703 496	0.702 811	0.702 852	0.703 606		
1σ	3	3	3	4	3		
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _(i)	0.704 087	0.703 481	0.702 801	0.702 842	0.702 621		
Sm	2.34	2.52		2.12		7.27	7.27
Nd	8.54	9.70		9.86		5.12	5.12
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.165 632	0.157 058		0.129 987		0.859 347	0.859 002
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd _(m)	0.512 035	0.512 470		0.512 568		0.517 092	0.515 390
1σ	2	2		5		13	63
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd _(t)	0.511 870	0.512 314		0.512 439		0.516 237	0.514 536
ε _{Nd} (<i>t</i>)	-11.2	-2.5		-0.1		74.1	40.8
<i>T</i> _{DM} /Ga	3.5	1.8		1.1		0.9	0.5

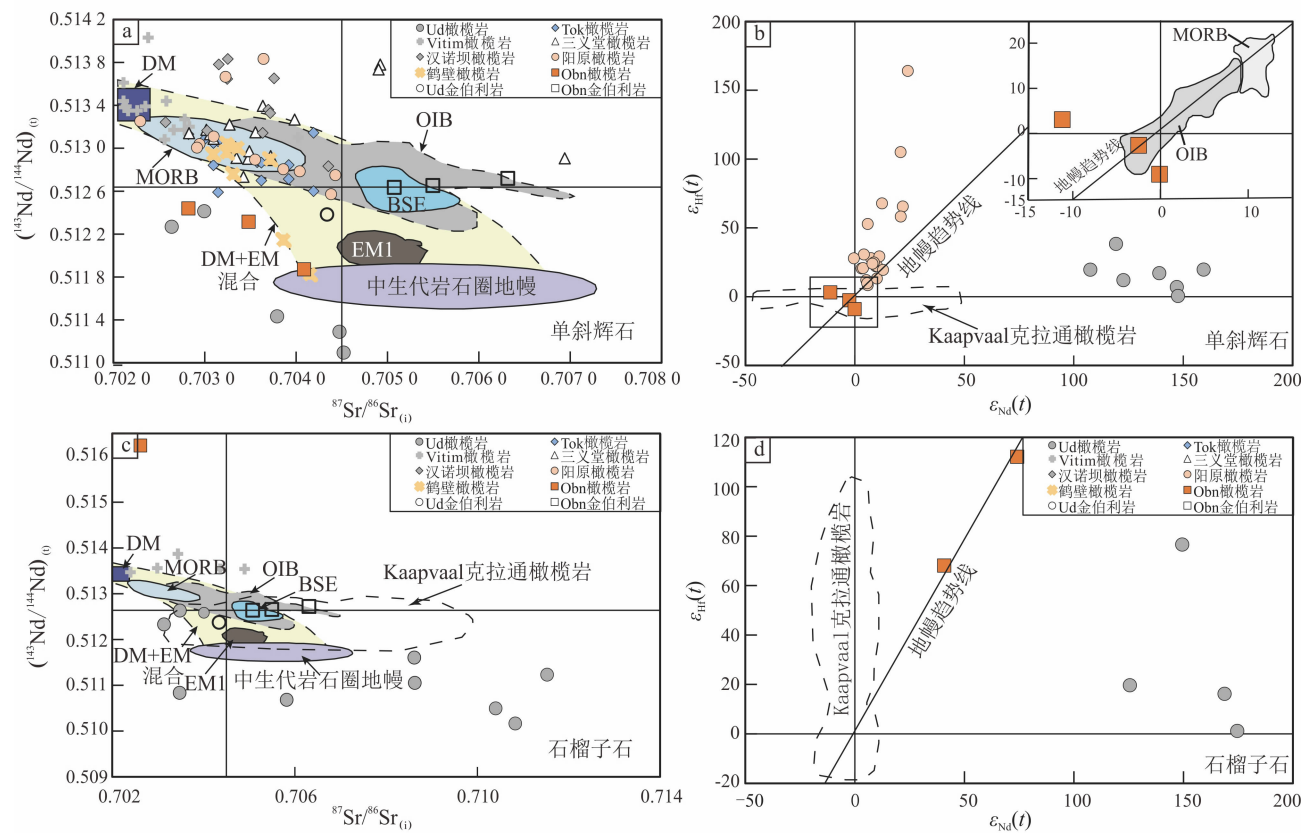
注: R: 重复样; Spl: 尖晶石; Gar: 石榴子石; Dun: 纯橄岩; Lh: 二辉橄榄岩; m: 测量值; t=152 Ma; 元素浓度单位: 10⁻⁶; 元素浓度数据来源于文献 [27]。同位素比值以相对于球粒陨石均一储库 (CHUR) 的 ε 符号表示。其中¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282 785; ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512 638; ⁸⁶Sr/⁸⁷Sr = 0.704 500。Hf 模式年龄使用 λ¹⁷⁶Lu = 1.94 × 10⁻¹¹ s⁻¹, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf (DM) = 0.038 4, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf (DM) = 0.283 250; Nd 的模式年龄使用 λ¹⁴⁷Sm = 6.55 × 10⁻¹² s⁻¹, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd (DM) = 0.213 7, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd (DM) = 0.513 150; λ⁸⁷Rb = 1.42 × 10⁻¹¹ s⁻¹。

纯橄岩的单斜辉石具有非放射性的同位素特征的 ε_{Hf}(*t*) 值, 其范围为 -8.6 ~ -9.0 (图 3b)。单斜辉石的 Hf 亏损地幔模式年龄为 1.8 ~ 1.3 Ga。单斜辉石样品 Sm、Nd 的质量分数分别为 2.12 × 10⁻⁶ ~ 2.52 × 10⁻⁶ 和 8.54 × 10⁻⁶ ~ 9.86 × 10⁻⁶。ε_{Nd}(*t*) 值的范围为 -11.2 ~ -2.5, Nd 亏损地幔模式年龄为 3.5 ~ 1.8 Ga。

3.2 石榴子石

Obnazhennaya 地幔橄榄岩包体中分离出的石榴

子石显示出和单斜辉石不一样的 Sr - Nd - Hf 同位素特征。石榴子石的 Rb、Sr、Sm、Lu 和 Hf 的含量相较于单斜辉石的含量更高。其中尖晶石二辉橄榄岩中石榴子石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_(i) 的值为 0.702 600, ε_{Hf}(*t*) 值为 112.1, Hf 亏损地幔模式年龄为 2.1 Ga。ε_{Nd}(*t*) 值为 74.1, Nd 亏损地幔模式年龄为 0.9 Ga。而纯橄岩的石榴子石 ε_{Hf}(*t*) 的平均值为 68.1, Hf 亏损地幔模式年龄为 1.3 Ga, ε_{Nd}(*t*) 值为 40.8, Nd 亏损地幔模式年龄为 0.5 Ga。



DM. 亏损地幔; MORB. 洋中脊玄武岩; OIB. 洋岛玄武岩; EM1. 富集地幔 I 型; BSE. 硅酸盐地球; 黑色斜线表示地幔趋势, 来自文献 [28]。数据来源: Udachnaya 的地幔包体来自文献 [6, 27], Vitim 的地幔包体来自文献 [29], Tok 的地幔包体来自文献 [30], Kaapvaal 克拉通的地幔包体来自文献 [31-35], Udachnaya 金伯利岩和 Obnashennaya 金伯利岩来自文献 [36], 三义堂、汉诺坝、阳原、鹤壁的橄辉岩地幔包体来自文献 [37-40]。

图 3 单斜辉石 (a、b) 和石榴子石 (c、d) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t)}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(t)}$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}-\epsilon_{\text{Hf}}$ 图解
Fig. 3 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t)}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(t)}$ and $\epsilon_{\text{Nd}}-\epsilon_{\text{Hf}}$ diagrams of clinopyroxene (a, b) and garnet (c, d)

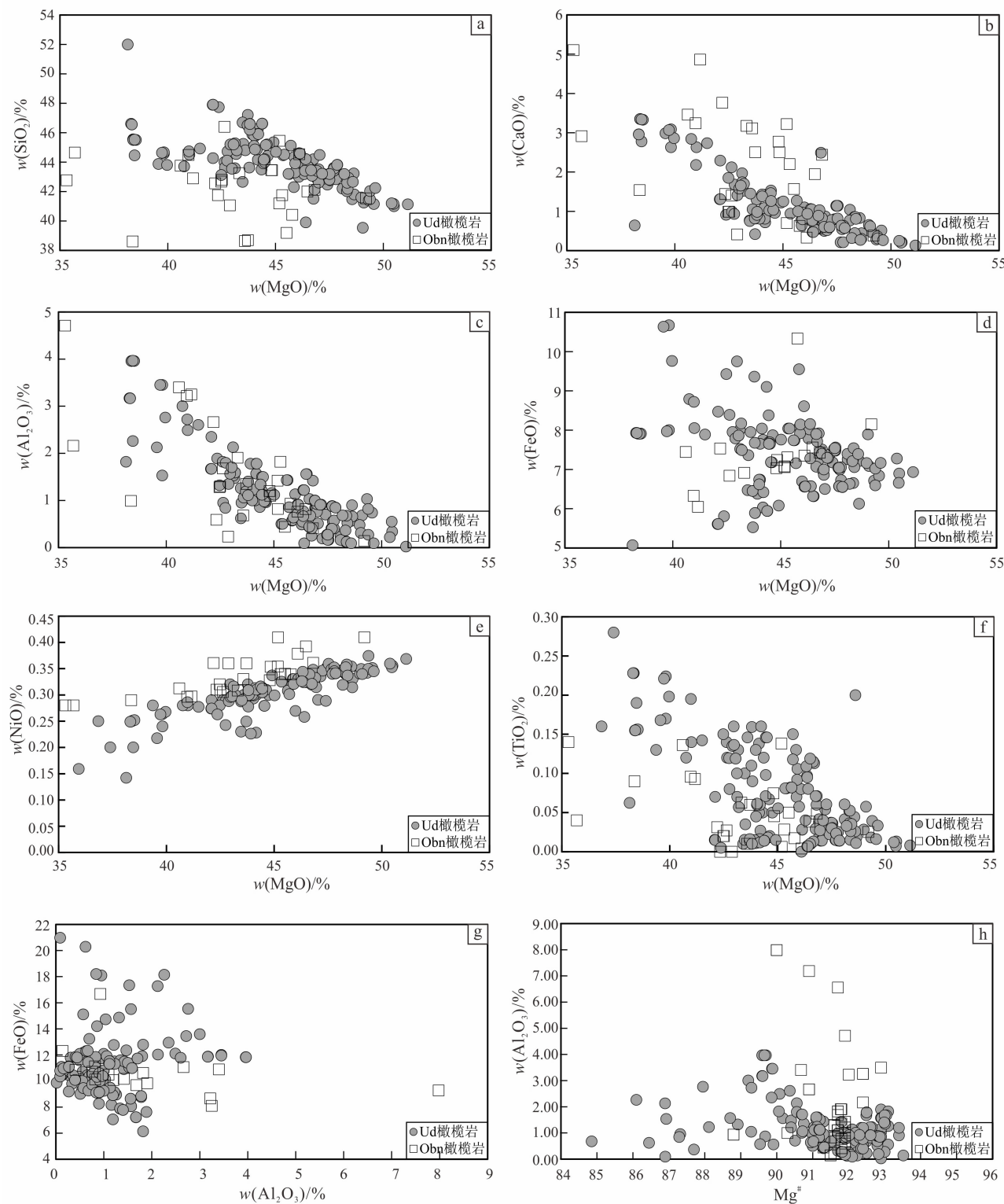
不同于 Udachnaya 地幔橄辉岩包体的石榴子石较富集的 Nd 同位素比值和较宽的 Sr 同位素比值范围, 本次研究中 Obnashennaya 地幔橄辉岩包体的石榴子石表现出比亏损地幔更加亏损的特征, 即较高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的比值, 这是 Obnashennaya 地幔橄辉岩中石榴子石独有的特点 (图 3c)。Nd - Hf 同位素图 (图 3d) 显示 Obnashennaya 橄辉岩包体的石榴子石的 Nd 同位素比值和 Hf 同位素比值均落在“地幔趋势”线上, 且其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值远高于 OIB 和 MORB 的范围。

4 讨论

4.1 Udachnaya 和 Obnashennaya 地幔包体的部分熔融

克拉通岩石圈地幔是部分熔融和交代作用共同

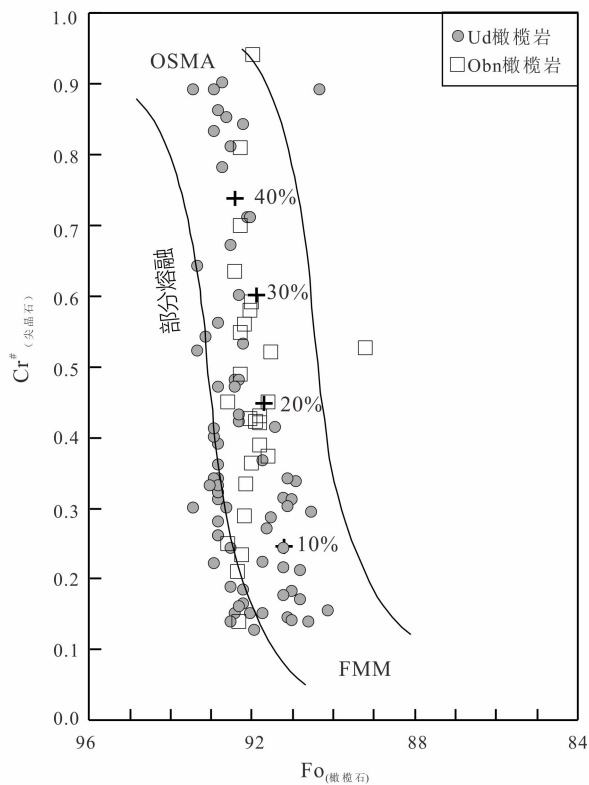
改造的结果, 其中部分熔融过程使岩石圈地幔的成分从饱满变难熔^[41-42]。橄辉岩包体的全岩和矿物的地球化学特征能较好地反映岩石圈地幔受到部分熔融作用的程度。部分熔融会使残余物中的单斜辉石、尖晶石以及玄武质组分 (SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 TiO_2 和 Na_2O) 亏损^[43], 使地幔包体的矿物组成发生变化, 即从二辉橄辉岩转变为方辉橄辉岩, 最后到纯橄岩。由图 4 可见, Udachnaya 和 Obnashennaya 橄辉岩包体全岩的 MgO 和 Al_2O_3 、 CaO 、 TiO_2 呈现出明显的负相关趋势, 与 NiO 呈正相关, 这些特征与世界范围内残留橄辉岩的特征相似。这种近似直线的趋势是不同程度部分熔融与不同程度的交代改造共同作用形成的^[48]。橄辉岩中橄辉石的 Fo 值和尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 值是指示地幔岩石熔体抽提程



Udachnaya 的数据来自文献 [18, 27, 44-47]; Obnazhennaya 的数据来自文献 [16, 19]。

图 4 Udachnaya 和 Obnazhennaya 地幔橄榄岩包体全岩主量元素协变图

Fig. 4 Co-variation plots of major elements in whole rock of Udachnaya and Obnazhennaya mantle peridotite enclaves



部分熔融趋势引自文献 [49]。

图 5 Fo 值和尖晶石 Cr[#] 共变图
Fig. 5 Spinel Cr[#] vs. olivine Fo

度的敏感指标。图 5 进一步证明了 Udachnaya 橄榄岩包体和 Obnazhennaya 橄榄岩包体经历了较高级度的部分熔融和熔体抽提，并可以看出两个地区的尖晶石二辉橄榄岩包体均经历了不同程度的部分熔融（最大熔融程度 >40%）。其中，部分熔融程度低的 Udachnaya 橄榄岩包体和 Obnazhennaya 橄榄岩包体具有较低的橄榄石 Mg[#]（<90）和较高含量的 Al₂O₃，表明其不是年轻的地幔，而是再富集的古老地幔^[17]；而部分熔融程度较高的橄榄岩包体具有较高的橄榄石 Mg[#] 值（>0.9）和较低含量的 Al₂O₃，说明 Udachnaya 和 Obnazhennaya 地区的高橄榄石 Mg[#] 橄榄岩包体是古老难熔岩石圈地幔的残余物。

4.2 地幔柱活动对西伯利亚克拉通岩石圈地幔的影响

通过对比发现，大多数 Obnazhennaya 地区地幔橄榄岩包体样品的 Fo > 92，这是广泛熔体抽提后的结果，但是 Obnazhennaya 橄榄岩包体中矿物

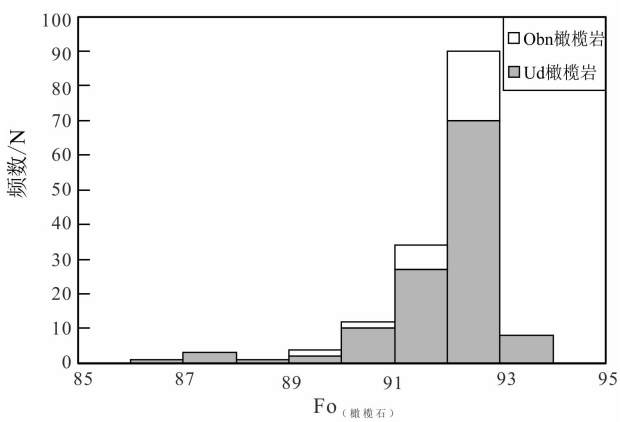
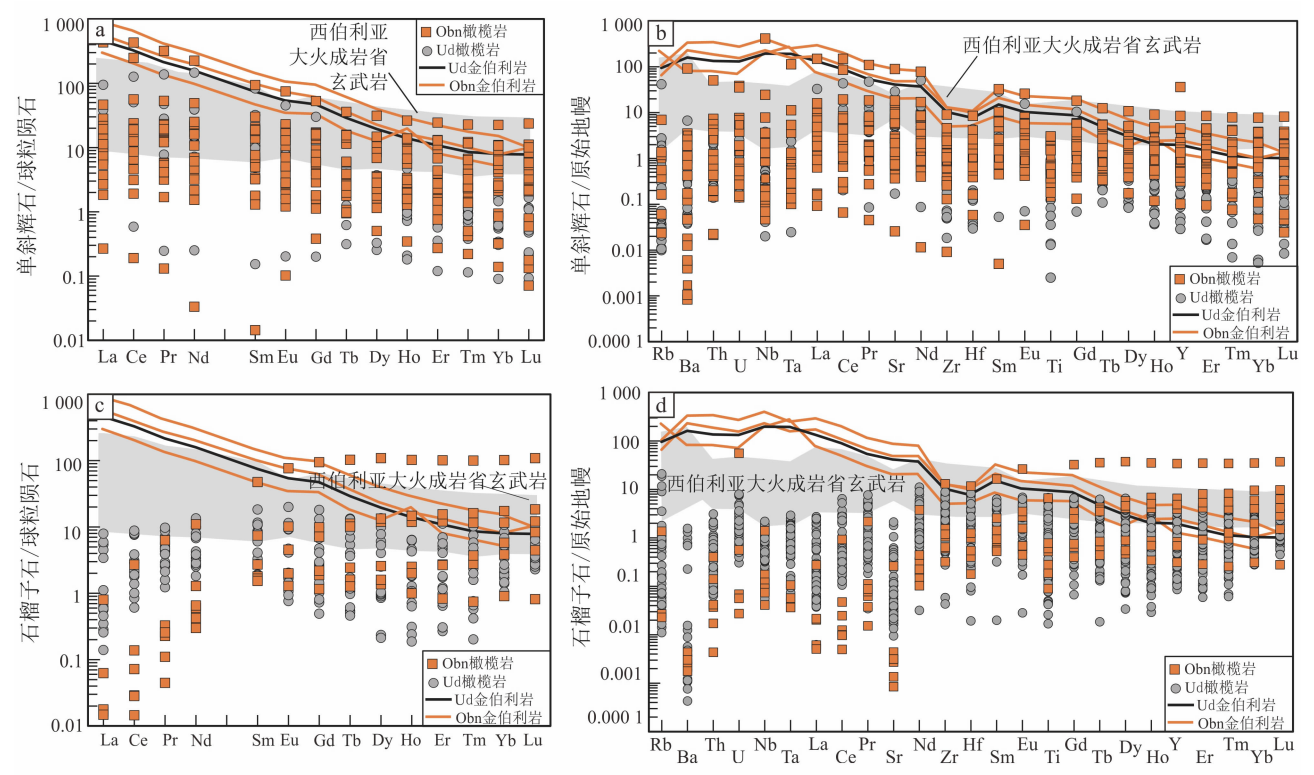


图 6 Udachnaya 和 Obnazhennaya 橄榄岩包体的橄榄石 Fo 值频率分布图
Fig. 6 Frequency distribution plot of olivine forsterite contents of Udachnaya and Obnazhennaya peridotite xenoliths

的微量元素表明地幔包体在形成过程中存在一定程度的交代作用。由图 5 和图 6 可见，Udachnaya 地区的地幔橄榄岩包体的橄榄石 Fo 值相较于 Obnazhennaya 具有更加广泛的分布范围。研究认为在溢流玄武岩喷发期间高温流体广泛的交代作用发生在低 Fo 含量的橄榄岩，使得 Obnazhennaya 橄榄岩包体的 Fo 值提升^[5]。研究发现，Obnazhennaya 地区下部的大陆岩石圈地幔受到了多种交代熔体的影响，包括碳酸盐熔体、玄武岩熔体和金伯利岩熔体^[16]。微量元素的变化特征反映了不同类型的交代熔体与地幔橄榄岩的相互作用。地幔柱活动前后西伯利亚克拉通岩石圈地幔的微量元素特征发生了改变，Obnazhennaya 与 Udachnaya 橄榄岩包体中单斜辉石的微量元素的特征相似，并且与西伯利亚大火成岩省玄武岩、Udachnaya 和 Obnazhennaya 金伯利岩的稀土配分模式相似（图 7a、b）。Udachnaya 和 Obnazhennaya 橄榄岩包体的单斜辉石显示出较为单一的稀土元素组成模式，即从重稀土元素到中稀土元素到轻稀土元素的逐渐富集（图 7a）。大多数 Obnazhennaya 橄榄岩包体中的单斜辉石显示出大离子亲石元素富集（如 Rb、Th、U 等），高场强元素亏损的特征（如 Ti、Zr 和 Hf 等）（图 7b），这在交代地幔橄榄岩中十分常见，是属于熔体耗尽后熔体交代的结果^[37]。除了样品 Obn7-362 的单斜辉石的稀土配分模式与 Obnazhennaya 寄主金伯利岩相似外（图 7a），大部分样品的单斜辉石稀土配

分模式与西伯利亚大火成岩省玄武岩相似。另外, 样品 Obn22-13 表现出独特的稀土元素配分模式, 即轻稀土元素亏损, 重稀土元素富集 (图 7a)。除了少数样品具有较高的 $(La/Yb)_N$ 值外,

Udachnaya 和 Obnazhennaya 地幔包体中大部分单斜辉石的 Ti/Eu 值较高, 与碳酸盐交代作用不吻合。这种特征表明单斜辉石的轻稀土元素富集可能是晚期金伯利岩交代作用形成的。



Udachnaya 橄榄岩和 Obnazhennaya 橄榄岩的数据来源同图 4; 西伯利亚大火成岩省数据来自文献 [50]; Ud 和 Obn 金伯利岩数据来自文献 [51]; 原始地幔和球粒陨石标准值来自文献 [52]。

图 7 Udachnaya 和 Obnazhennaya 地幔橄榄岩包体单斜辉石 (a、b) 和石榴子石 (c、d) 稀土元素球粒陨石标准化配分模式和微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns and primitive manalized trace element spider diagrams of clinopyroxene (a, b) and garnet (c, d) in Udachnaya and Obnazhennaya mantle peridotite xenoliths

在克拉通环境下, 熔体抽提后的橄榄岩通常显示出重稀土平坦型和正弦型的石榴子石稀土元素配分模式 (图 7c)。正弦型表现为轻稀土元素相对亏损, 中稀土元素逐渐富集, 到重稀土元素又相对亏损。重稀土富集型主要为轻稀土元素亏损向中稀土元素逐渐变富集, 重稀土元素相对原始地幔富集。这两种模式在 Udachnaya 地幔橄榄岩包体中十分常见, 大部分 Udachnaya 粗粒橄榄岩包体和方辉橄榄岩包体中, 石榴子石稀土元素呈正弦型, 中稀土元素和重稀土元素亏损几乎与轻稀土元素持平。而 Udachnaya 过渡型和剪切变形橄榄岩包体的石榴子石具有较高的中稀土元素, 呈现轻微的正弦型到重

稀土富集型^[18,44-45,53-54]。但是在 Obnazhennaya 地幔橄榄岩包体的石榴子石中仅发现了重稀土平坦型的稀土元素配分模式, 且相较于 Udachnaya 地区橄榄岩包体的石榴子石, 轻稀土元素含量更低。研究认为石榴子石的正弦型稀土配分模式是部分熔融过程中中稀土元素优先进入熔体, 重稀土元素被保留在残留物中而形成的, 或者是于碳酸盐熔体的隐性交代作用形成的^[44-55]。由于受到交代作用的影响, 原本的正弦型模式会变为重稀土平坦型的石榴子石稀土元素配分模式, 因此 Obnazhennaya 橄榄岩包体石榴子石的稀土配分模式可能是受到交代作用的影响。相较于金伯利岩交代作用造成的轻稀土元素

富集, Obnazhennaya 地区石榴子石的稀土元素组成更倾向于地幔柱活动期间玄武质流体交代的结果^[5]。

地幔包体中 Sr-Nd-Hf 同位素可以直接制约岩石圈地幔的同位素组成, 对判断地幔柱活动是否影响西伯利亚克拉通岩石圈地幔具有重要意义。Obnazhennaya 和 Udachnaya 地区的地幔橄榄岩中单斜辉石表现出较强的非均质性, 这是熔体抽提以及熔/流体交代综合作用的结果。从图 3 中可以发现两个地区地幔橄榄岩包体中单斜辉石和石榴子石的 Sr、Nd 和 Hf 同位素组成具有显著的区别: Udachnaya 地区橄榄岩包体的单斜辉石和石榴子石同位素组成并未显示解耦现象, 而 Obnazhennaya 地区橄榄岩包体的单斜辉石和石榴子石的同位素组成具有明显的解耦现象, 即单斜辉石表现出富集的 Nd 同位素比值特征, 石榴子石则表现出亏损的 Nd 同位素比值特征 (图 3c)。Obnazhennaya 地幔橄榄岩包体单斜辉石表现出来的同位素特征与文献中的 Udachnaya 地幔橄榄岩包体中单斜辉石同位素特征并不完全相同^[7,38]。这种情况说明两个地区的地幔橄榄岩中单斜辉石是由不同的交代作用产生的。

在 Sr-Nd 同位素图 (图 3a) 中, 本次研究的 Obnazhennaya 二辉橄榄岩包体的单斜辉石 Sr 同位素比值和 Nd 同位素比值与西伯利亚克拉通中部 Udachnaya 岩筒中二辉橄榄岩包体和尖晶石相橄榄岩的单斜辉石相似。与其他克拉通地幔橄榄岩中的单斜辉石相比, 这些单斜辉石样品具有更多非放射性成因的 Nd 同位素 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} < 0.512\ 638$), 表明其具有 EM I 型地幔的特征, 而没有单斜辉石的样品具有与 DM、MORB 和 OIB 类似的 Sr 和 Nd 同位素组成。在这方面, 它们不同于西伯利亚南部的 Vitim 地幔橄榄岩包体和西伯利亚东南部的 Tok 地幔橄榄岩包体。在 Nd-Hf 同位素图 (图 3b) 中, Obnazhennaya 的单斜辉石 Nd 和 Hf 同位素比值落在南非 Kaapvaal 克拉通橄榄岩包体的单斜辉石的范围内, 区别于具有放射性 Nd 同位素组成 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) > 100$) 的 Udachnaya 橄榄岩包体单斜辉石。本研究中仅有一个单斜辉石样品落在“地幔趋势”线上 (图 3d), 其他样品高于或低于该趋势线。

Udachnaya 地区的石榴子石的 Sr 同位素比值的分布范围相对较广, 在 Sr-Nd 图 (图 3c) 中表现

出富集的同位素特征, 同时在 Nd-Hf 图 (图 3d) 中, Udachnaya 地区石榴子石的同位素比值与 Udachnaya 地区部分单斜辉石的同位素比值范围相似, 该特征表明在地幔柱活动之前岩石圈地幔经历的各种交代作用同时被单斜辉石和石榴子石很好地保留下来。有石榴子石的存在时, Lu 更容易进入石榴子石中。因此, 在石榴子石稳定的温压区间内, 部分熔融的残留物将具有高 Lu/Hf 比值, 这导致了“地幔趋势”上方较高放射性成因的 Hf 同位素组成。这种特征不仅在 Udachnaya 橄榄岩包体的石榴子石中存在, 并且在西伯利亚克拉通的 Vitim 和 Tok 地幔橄榄岩、南非的 Kaapvaal 地幔橄榄岩和华北克拉通的阳原地幔橄榄岩中均被发现。Nd-Hf 同位素组成的解耦普遍出现在大陆下方岩石圈地幔的橄榄岩中, 这种现象和岩石圈地幔与对流地幔分离后的交代作用有关。但是 Obnazhennaya 地区地幔橄榄岩中石榴子石的 Sr、Nd、Hf 同位素组成完全不同于该地区的单斜辉石, 更不同于 Udachnaya 地区橄榄岩包体的石榴子石。相较于单斜辉石的 Nd、Sr 同位素组成, Obnazhennaya 地区的石榴子石显示出比西伯利亚大火成岩省玄武岩和亏损地幔更加亏损的特征, 且 Nd-Hf 同位素组成很好地落在地幔趋势线上, 说明本次研究中的石榴子石没有受到后期交代熔体的影响。这种极度亏损的同位素特征表明石榴子石是原始的, 石榴子石的重稀土平坦型稀土配分模式并非是玄武质流体交代的结果。

为了研究 Udachnaya 和 Obnazhennaya 地区橄榄岩包体所经历的交代作用, 展示了一个假设的难熔橄榄岩单斜辉石的 Nd、Hf、Sr 丰度和同位素比值 ($\text{Nd} = 1.0 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Hf} = 0.15 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Sr} = 100.0 \times 10^{-6}$; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513\ 900$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.285\ 500$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.702\ 000$) 和 7 种交代熔体的二元混合曲线 (图 8), 其中金伯利岩熔体 $\text{Nd} = 112.7 \times 10^{-6}$, 平均天然碳酸盐熔体 $\text{Nd} = 535.4 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Hf} = 0.61 \times 10^{-6}$, OIB 熔体 $\text{Nd} = 38.5 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Hf} = 7.80 \times 10^{-6}$, 大陆地壳熔体 $\text{Nd} = 20.0 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Sr} = 325.0 \times 10^{-6}$, 西伯利亚大火成岩省玄武岩 $\text{Nd} = 14.0 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Sr} = 281.5 \times 10^{-6}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 385$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.706\ 500$, Udachnaya 金伯利岩 $\text{Nd} = 77.2 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Sr} = 594.8 \times 10^{-6}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 588$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705\ 027$, Obnazhennaya 金伯利岩 $\text{Nd} = 85.1 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Sr} = 1\ 497.3 \times 10^{-6}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} =$

$0.512\ 642 \times 10^{-6}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705\ 630$ ^[27,36,38,51,56-57]。金伯利岩熔体的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 724$, 平均天然碳酸盐熔体和 OIB 熔体的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 800$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\ 900$; 大陆地壳熔体的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511\ 900$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.720\ 000$ ^[50,58]。混合曲线显示 Obn7-341 和 Obn7-343 样品的 Nd 同位素比值介于大陆地壳、西伯利亚玄武岩和 Obnazhennaya 金伯利岩之间 (图 8a), 其中样品 Obn7-297 落在了大陆地壳趋势线上, 指示了 Obnazhennaya 地区地幔包体中单斜辉石的 Nd 同位素比值受到了地壳物质的影响, 而另外两个样品落在西伯利亚大火成岩省玄武岩和 Obnazhennaya 金伯利岩之间, 表明 Nd 同位素组成受到了溢流玄武岩和金伯利岩的影响。由于样品更接近于西伯利亚大火成岩省玄武岩, 说明 Obnazhennaya 橄榄岩包体中单斜辉石受到地幔柱活动期间玄武岩熔体的影响更大, 受到金伯利岩熔体的影响较小。在 Hf 元素丰度和同位素比值相关图中 (图 8b), 碳酸盐熔体 Hf 的丰度较低, 无法有效地反映 Obnazhennaya 橄榄岩包体中单斜辉石的交代熔体。在 Sr 元素丰度和同位素比值的相关图中 (图 8c), Obnazhennaya 橄榄岩包体中单斜辉石样品落在西伯利亚大火成岩省玄武岩上 (分别是 10% 和 25%), 与 Nd 同位素不同。简单的二元混合模型不能很好地再现 Obnazhennaya 地幔包体中单斜辉石的演化过程, 表明 Obnazhennaya 橄榄岩包体中单斜辉石的 Sr、Nd 和 Hf 同位素比值并非单一熔/流体交代叠加形成的, 它们经历了更复杂的演化过程。西伯利亚克拉通岩石圈地幔所经历的交代作用总结为 4 个阶段, 分别是低温交代作用阶段、地幔柱活动前金伯利岩交代作用阶段、地幔柱活动时溢流玄武岩交代作用阶段和地幔柱活动后金伯利岩交代作用阶段^[5]。在 Sr-Nd 同位素图中 (图 3a、c), Obnazhennaya 地区的寄主金伯利岩相较于 Udachnaya 地区的寄主金伯利岩有着更高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(t)}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$ 同位素比值。这个特征也反映在两个地区单斜辉石的样品上, 相较于 Udachnaya 地区的单斜辉石, Obnazhennaya 地区单斜辉石的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(t)}$ 比值略高, 说明西伯利亚岩石圈地幔经历了两期不同的金伯利岩熔体交代, 样品保留了多期熔体交代的证据。

因此, Obnazhennaya 地区橄榄岩包体中单斜辉石的 Sr、Nd、Hf 同位素组成暗示着地幔柱活动后

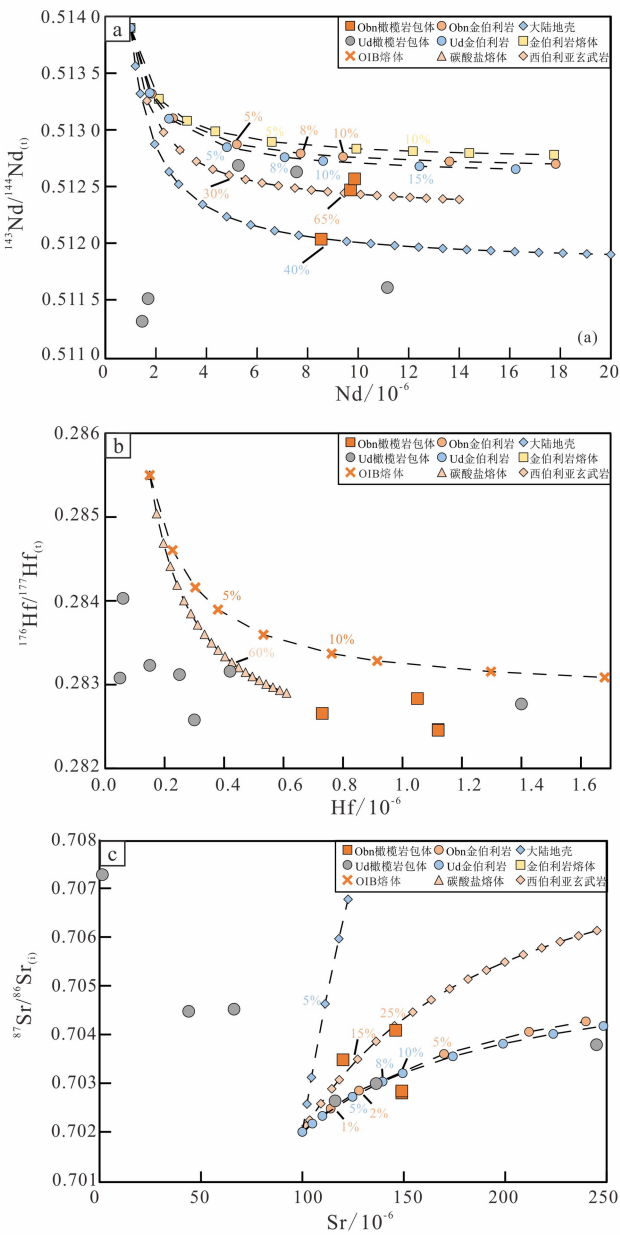


图 8 Udachnaya 和 Obnazhennaya 橄榄岩包体单斜辉石 Nd 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(t)}$ (a)、Hf 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(t)}$ (b)、Sr 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$ (c) 丰度关系图

Fig. 8 Relationship of Nd with $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(t)}$ (a), Hf with $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(t)}$ (b) and Sr with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$ (c) for clinopyroxenes from Udachnaya and Obnazhennaya peridotite xenoliths

岩石圈地幔受到了大陆地壳、地幔柱活动时期玄武岩熔体和金伯利岩熔体共同作用的影响。而研究中的石榴子石并未受到溢流玄武岩和金伯利岩熔体的影响, 保留了原始的特征, 指示了地幔柱活动时溢

流玄武质岩浆确实改造了西伯利亚克拉通岩石圈地幔,使其微量元素和同位素组成发生了不同程度的变化。

4.3 西伯利亚岩石圈地幔地球动力学过程

本次研究对 Obnazhennaya 橄榄岩包体中单斜辉石 Nd-Hf 同位素的模式年龄进行了估计,发现与前人研究的 Obnazhennaya 橄榄岩包体的 Re-Os 模式年龄不同。研究认为样品 Obn7-297、Obn7-341 和 Obn7-343 受到了晚期交代作用的影响,因此其 Re-Os 模式年龄没有地质意义^[16]。由于这些样品受到了交代熔体的影响,估计出的 Obnazhennaya 橄榄岩包体中单斜辉石的 Nd 和 Hf 同位素的模式年龄 (3.5 ~ 1.1 Ga) 同样没有地质意义。如前所述,Obnazhennaya 橄榄岩包体中石榴子石是原始的,没有受到交代作用的影响。其中样品 Obn7-341 的石榴子石的 Hf 同位素模式年龄为 2.1 Ga,与前人研究的西伯利亚克拉通岩石圈地幔的古元古代年龄 (~2.0 Ga) 和西伯利亚克拉通的地壳基底岩的年龄 (~1.9 Ga) 大致相同。因此,在西伯利亚克拉通岩石圈的形成过程中,壳幔的形成存在时间耦合,并且可能存在成因联系。本次研究中没有发现接近西伯利亚地幔柱活动时间的地幔橄榄岩样品,因此无法证明地幔柱活动使 Obnazhennaya 下方岩石圈地幔减薄了 50 km。本次研究中 Obnazhennaya 地幔橄榄岩包体的 Nd-Hf 模式年龄为 Doucet 等^[27]提出的西伯利亚克拉通的地球动力学模型提供了新的证据。在西伯利亚克拉通形成的早期阶段,地幔上升流扰乱了早期的岩石圈,使早期的岩石圈发生拆沉,之后是先前存在的大陆块体相互碰撞最终形成克拉通。而西伯利亚地幔柱活动只对原有的岩石圈地幔进行交代改造,没有形成新的岩石圈地幔。

5 结论

(1) Obnazhennaya 地幔橄榄岩包体中单斜辉石具有亏损的 Sr 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)} = 0.702\,801 \sim 0.704\,087$),富集的 Nd 同位素和 Hf 同位素组成 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)} = 0.512\,035 \sim 0.512\,568$; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(i)} = 0.282\,433 \sim 0.282\,774$);石榴子石具有原始的 Nd-Hf 同位素组成 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +40.8 \sim +74.1$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +66.5 \sim +112.1$) 和亏损的 Sr 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)} = 0.702\,621$)。

(2) 对比两个地区地幔橄榄岩包体的地球化学特征发现,虽然其岩石类型、矿物组成和岩石的主量元素组成相近,但是单斜辉石和石榴子石的微量元素组成存在差异,表明这两个地区下方的岩石圈地幔经历了不同程度的部分熔融和不同的交代改造。

(3) 通过 Sr-Nd-Hf 同位素进行二元混合模拟发现,Obnazhennaya 金伯利岩中地幔包体的 Sr-Nd-Hf 同位素组成更偏向于溢流玄武岩的同位素特征,暗示地幔柱活动对西伯利亚克拉通岩石圈地幔产生了影响,改变了岩石圈地幔的同位素组成。

参考文献:

- [1] GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, AFONSO J C, et al. The composition and evolution of lithospheric mantle: a re-evaluation and its tectonic implications [J]. *Journal of Petrology*, 2009, 50 (7): 1185-1204.
- [2] IVANOV A V, HE H, YAN L, et al. Siberian traps large igneous province: evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 122: 58-76.
- [3] SUN J, LIU C Z, TAPPE S, et al. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: insights from in situ U-Pb and Sr-Nd perovskite isotope analysis [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 404: 283-295.
- [4] SUN J, MITCHELL R N, KOSTROVITSKY S I, et al. Siberia's largest pulse of kimberlites: U-Pb geochronology of perovskite and rutile from the Obnazhennaya kimberlite and its xenoliths, Siberia Craton [J]. *International Geology Review*, 2021, 11/12 (64): 1743-1754.
- [5] HOWARTH G H, BARRY P H, PERNET-FISHER J F, et al. Superplume metasomatism: evidence from Siberian mantle xenoliths [J]. *Lithos*, 2014, 184/187: 209-224.
- [6] PEARSON D G, SHIREY S B, CARLSON R W, et al. Re-Os, Sm-Nd, and Rb-Sr isotope evidence for thick Archaean lithospheric mantle beneath the Siberian Craton modified by multistage metasomatism [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (5): 959-977.
- [7] BOYD F R, POKHILENKO N P, PEARSON D G, et al. Composition of the Siberian Cratonic mantle: evidence from Udachnaya peridotite xenoliths [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1997, 128 (2/

- 3): 228–246.
- [8] GRIFFIN W L, SPETSIUS Z V, PEARSON N J, et al. In situ Re–Os analysis of sulfide inclusions in kimberlitic olivine: new constraints on depletion events in the Siberian lithospheric mantle [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3 (11): 1–25.
- [9] GRIFFIN W L, RYAN C G, KAMINSKY F V, et al. The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton [J]. *Tectonophysics*, 1999, 310 (1/4): 1–35.
- [10] POKHILENKO N P, SOBOLEV N V, KULIGIN S S, et al. Peculiarities of distribution of pyroxenite paragenesis garnets in Yakutian kimberlites and some aspects of the evolution of the Siberian Craton lithospheric mantle [J]. *The Agora Political Science Undergraduate Journal*, 1999, 2 (1): 689–698.
- [11] ASHCHEPKOV I V, VLADYKIN N N, NTAFLS T, et al. Layering of the lithospheric mantle beneath the Siberian Craton: modeling using thermobarometry of mantle xenolith and xenocrysts [J]. *Tectonophysics*, 2014, 634: 55–75.
- [12] 孙晶, 谢庆宾. 西伯利亚雅库特地区岩石圈地幔特征 [J]. *地球科学与环境学报*, 2016, 38 (4): 517–526.
- SUN J, XIE Q B. Characteristics of sub-continental lithospheric mantle underneath Yakutia area of Siberia [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2016, 38 (4): 517–526.
- [13] PERNET-FISHER J F, HOWARTH G H, PEARSON D G, et al. Plume impingement on the Siberian SCLM: evidence from Re–Os isotope systematics [J]. *Lithos*, 2015, 218/219: 141–154.
- [14] DOUCET L S, PESLIER A H, IONOV D A, et al. High water contents in the Siberian cratonic mantle linked to metasomatism: an FTIR study of Udachnaya peridotite xenoliths [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 137: 159–187.
- [15] KINNY P D, GRIFFIN B J, HEAMAN L M, et al. SHRIMP U–Pb ages of perovskite from Yakutian kimberlites [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 1997, 38 (1): 97–105.
- [16] SUN J, LIU C Z, KOSTROVISKY S I, et al. Composition of the lithospheric mantle in the northern part of Siberian Craton: constraints from peridotites in the Obnazhennaya kimberlite [J]. *Lithos*, 2017, 294/295: 383–396.
- [17] FEDORENKO V A, LIGHTFOOT P C, NALDRETT A J, et al. Petrogenesis of the flood-basalt sequence at Noril'sk, north central Siberia [J]. *International Geology Review*, 1996, 38 (2): 99–135.
- [18] IONOV D A, LIU Z, LI J, et al. The age and origin of cratonic lithospheric mantle: Archean dunites vs. Paleoproterozoic harzburgites from the Udachnaya kimberlite, Siberian Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 281: 67–90.
- [19] IONOV D A, DOUCET L S, XU Y, et al. Reworking of Archean mantle in the NE Siberian Craton by carbonate and silicate melt metasomatism: evidence from a carbonate-bearing, dunite-to-websterite xenolith suite from the Obnazhennaya kimberlite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 224: 132–153.
- [20] MÜNKER C, WEYER S, SCHERER E, et al. Separation of high field strength elements (Nb, Ta, Zr, Hf) and Lu from rock samples for MC–ICPMS measurements [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2001, 2 (12): 1–19.
- [21] 李献华, 祁昌实, 刘颖, 等. 扬子地块西缘新元古代双峰式火山岩成因: Hf 同位素和 Fe/Mn 新制约 [J]. *科学通报*, 2005, 50 (19): 109–114.
- LI X H, QI C S, LIU Y, et al. Genesis of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the western margin of the Yangtze Block: Hf isotope and Fe/Mn new constraints [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50 (19): 109–114.
- [22] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu–Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. *岩石学报*, 2007, 23 (2): 185–220.
- WU F Y, LI X H, ZHENG Y F, et al. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (2): 185–220.
- [23] YANG Y H, ZHANG H F, CHU Z Y, et al. Combined chemical separation of Lu, Hf, Rb, Sr, Sm and Nd from a single rock digest and precise and accurate isotope determinations of Lu–Hf, Rb–Sr and Sm–Nd isotope systems using multi-collector ICP–MS and TIMS [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2010, 290 (2): 120–126.
- [24] YANG Y H, CHU Z Y, WU F Y, et al. Precise and accurate determination of Sm, Nd concentrations and Nd isotopic compositions in geological samples by MC–ICP–MS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, 26 (6): 1237–1244.

- [25] YANG Y H, WU F Y, XIE L W, et al. High-precision direct determination of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio of bottled Sr-rich natural mineral drinking water using multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Spectrochimica Acta; Atomic Spectroscopy*, 2011, 66 (8): 656–660.
- [26] BLICHERT T J, CHAUVEL C, ALBARÈDE F. Separation of Hf and Lu for high-precision isotope analysis of rock samples by magnetic sector-multiple collector ICP-MS [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1997, 127: 248–260.
- [27] DOUCET L S, IONOV D A, GOLOVIN A V. Paleoproterozoic formation age for the Siberian Cratonic mantle: Hf and Nd isotope data on refractory peridotite xenoliths from the Udachnaya kimberlite [J]. *Chemical Geology*, 2015, 391: 42–55.
- [28] VERVOORT J D, PLANK T, PRYTULAK J. The Hf–Nd isotopic composition of marine sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75 (20): 5903–5926.
- [29] IONOV D A, ASHCHEPKOV I, JAGOUTZ E. The provenance of fertile off-craton lithospheric mantle: Sr–Nd isotope and chemical composition of garnet and spinel peridotite xenoliths from Vitim, Siberia [J]. *Chemical Geology*, 2005, 217 (1/2): 41–75.
- [30] IONOV D A, SHIREY S B, WEIS D, et al. Os–Hf–Sr–Nd isotope and PGE systematics of spinel peridotite xenoliths from Tok, SE Siberian Craton: effects of pervasive metasomatism in shallow refractory mantle [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2006, 241 (1/2): 47–64.
- [31] LAZAROV M, BREY G P, WEYER S. Evolution of the South African mantle: a case study of garnet peridotites from the Finsch diamond mine (Kapaavaal Craton); part 2: multiple depletion and re-enrichment processes [J]. *Lithos*, 2012, 154: 210–223.
- [32] SIMON N, CARLSON R W, PEARSON D G, et al. The origin and evolution of the Kapaavaal cratonic lithospheric mantle [J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48 (3): 589–625.
- [33] SHU Q, BREY G P, PEARSON G P, et al. The evolution of the Kapaavaal Craton: a multi-isotopic perspective from lithospheric peridotites from Finsch diamond mine [J]. *Precambrian Research*, 2019, 113: 1–20.
- [34] SHU Q, BREY G P, GERDES A, et al. Geochronological and geochemical constraints on the formation and evolution of the mantle underneath the Kapaavaal Craton: Lu–Hf and Sm–Nd systematics of subcalcic garnets from highly depleted peridotites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 113: 1–20.
- [35] BRANCHETTI M, ZEPPEL J, PETERS S, et al. Multi-stage garnet formation and destruction in Kimberley harzburgitic xenoliths, South Africa–Science Direct [J]. *Lithos*, 2021, 390/391: 1–20.
- [36] BIZIMIS M, SALTERS V J M, DAWSON J B. The brevity of carbonatite sources in the mantle: evidence from Hf isotopes [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2003, 145 (3): 281–300.
- [37] LIU J G, CARLSON R W, RUDNICK R L, et al. Comparative Sr–Nd–Hf–Os–Pb isotope systematics of xenolithic peridotites from Yangyuan, North China Craton: additional evidence for a Paleoproterozoic age [J]. *Chemical Geology*, 2012, 332/333 (1): 1–14.
- [38] ZHAO X M, WANG H, LI Z H, et al. Nature and evolution of lithospheric mantle beneath the western North China Craton: constraints from peridotite and pyroxenite xenoliths in the Sanyitang basalts [J]. *Lithos*, 2021, 384/385: 1–15.
- [39] RUDNICK R L, SHAN G, LING W L, et al. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton [J]. *Lithos*, 2004, 77 (1/4): 609–637.
- [40] ZHANG H F, SUN Y L, TANG Y J, et al. Melt-peridotite interaction in the Pre–Cambrian mantle beneath the western North China Craton: petrology, geochemistry and Sr, Nd and Re isotopes [J]. *Lithos*, 2012, 149: 100–114.
- [41] 郑建平. 不同时空背景幔源物质对比与华北深部岩石圈破坏和增生置换过程 [J]. *科学通报*, 2009, 54 (14): 1990–2007.
- ZHENG J P. Comparison of mantle-derived materials from different spatiotemporal settings: implications for destructive and accretional processes of the North China Craton [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54 (14): 1990–2007.
- [42] TANG Y J, ZHANG H F, YING J F, et al. Widespread refertilization of cratonic and circum-cratonic lithospheric mantle [J]. *Earth–Science Reviews*, 2013, 118: 45–68.
- [43] HERZBERG C. Geodynamic information in peridotite petrology [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45 (12): 2507–2530.

- [44] AGASHEV A M, IONOV D A, POKHILENKO N P, et al. Metasomatism in lithospheric mantle roots: constraints from whole-rock and mineral chemical composition of deformed peridotite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya [J]. *Lithos*, 2013, 160/161: 201–215.
- [45] DOUCET L S, IONOV D A, GOLOVIN A V. The origin of coarse garnet peridotites in cratonic lithosphere: new data on xenoliths from the Udachnaya kimberlite, central Siberia [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, 165 (6): 1225–1242.
- [46] DOUCET L S, IONOV D A, GOLOVIN A V, et al. Depth, degrees and tectonic settings of mantle melting during craton formation: inferences from major and trace element compositions of spinel harzburgite xenoliths from the Udachnaya kimberlite, central Siberia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 359/360: 206–218.
- [47] IONOV D A, DOUCET L S, POGGE V, et al. Links between deformation, chemical enrichments and Li-isotope compositions in the lithospheric mantle of the central Siberian Craton [J]. *Chemical Geology*, 2017, 475: 105–121.
- [48] 张宏福. 橄榄岩-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*, 2009, 54 (14): 2008–2026.
ZHANG H F. Peridotite-melt interaction; a key point for the destruction of cratonic lithospheric mantle [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54 (14): 2008–2026.
- [49] ARAI S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: review and interpretation [J]. *Chemical Geology*, 1994, 113: 191–204.
- [50] LIGHTFOOT P C, HAWKESWORTH C J, HERGT J, et al. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr, Nd, and Pb isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1993, 114 (2): 171–188.
- [51] KOSTROVITSKY S I, MORIKIYO T, SEROV I V, et al. Isotope-geochemical systematics of kimberlites and related rocks from the Siberian Platform [J]. *Russian Geology & Geophysics*, 2007, 48 (3): 272–290.
- [52] MCDONOUGH W F, SUN X S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120: 223–253.
- [53] IONOV D A, DOUCET L S, ASHCHEPKOV I V. Composition of the lithospheric mantle in the Siberian Craton: new constraints from fresh peridotites in the Udachnaya–East Kimberlite [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51 (11): 2177–2210.
- [54] SHIMIZU N, SOBOLEV N V, YEFIMAOVA E S. Chemical heterogeneities of inclusion garnets and juvenile character of peridotitic diamonds from Siberia [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 1997, 38 (2): 356–372.
- [55] HOAL K, HOAL B G, ERLANK A J, et al. Metasomatism of the mantle lithosphere recorded by rare earth elements in garnets [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 126 (4): 303–313.
- [56] SUN X S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42 (1): 313–345.
- [57] WOODEN J L, CZAMANSKE G K, FEDORENKO V A, et al. Isotopic and trace-element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57 (15): 3677–3704.
- [58] DEPAOLO D J. Trace element and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1981, 53 (2): 189–202.