



引文格式: 苏文字, 刘帅奇, 张贵宾. 柴北缘绿梁山蛇纹石化橄榄岩成因: 来自蛇纹石 B 同位素的证据[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 328–341. DOI: 10.12401/j.nwg.2025046

Citation: SU Wenyu, LIU Shuaiqi, ZHANG Guibin. Genesis of Serpentinized Peridotite in Lüliangshan, North Qaidam: Evidence from Boron Isotopes of Serpentine[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 328–341. DOI: 10.12401/j.nwg.2025046

柴北缘绿梁山蛇纹石化橄榄岩成因: 来自蛇纹石 B 同位素的证据

苏文字, 刘帅奇, 张贵宾*

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 柴北缘绿梁山地区出露的蛇纹石化橄榄岩的成因机制存在争议——源自俯冲板片, 再活化的岩石圈地幔或地幔楔。笔者在绿梁山地区采集了两种类型橄榄岩(石榴子石二辉橄榄岩和纯橄岩), 并对其中的蛇纹石进行了主微量元素和原位 B 同位素分析。绿梁山两种类型橄榄岩分别经历了不同类型的蛇纹石化作用, 纯橄岩以橄榄石的蛇纹石化作用为主, 而石榴子石二辉橄榄岩则是以辉石蛇纹石化占主导。橄榄石蛇纹石化产生的蛇纹石具有高的 MgO、As 和低的 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、FeO、Li、Yb、Y、Ti、Sc、Zn, 而辉石蛇纹石化作用则相反。两种类型橄榄岩中的蛇纹石的其 B 同位素存在显著差异, 纯橄岩中蛇纹石的 B 含量为 $13.3 \times 10^{-6} \sim 38.5 \times 10^{-6}$, 其 $\delta^{11}B$ 值为 $-9.5\% \sim +5.0\%$, 与地幔值接近或偏高; 而石榴子石二辉橄榄岩蛇纹石的 B 含量为 $10.5 \times 10^{-6} \sim 49.9 \times 10^{-6}$, 其 $\delta^{11}B$ 值为 $6.3\% \sim 23.0\%$, 显著富集重 B 同位素。蛇纹石 B 同位素组成的差异指示了绿梁山橄榄岩形成于两种不同的构造背景, 石榴子石二辉橄榄岩为岩石圈地幔成因, 后经海水蚀变, 富集重 B 同位素; 而纯橄岩为地幔楔成因, 经历俯冲板片流体的蛇纹石化作用之后, 富集轻 B 同位素。

关键词: 橄榄岩; 蛇纹石化; 原位 B 同位素; 板片蛇纹岩; 地幔楔蛇纹岩; 柴北缘超高压变质带

中图分类号: P59

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0328-14

Genesis of Serpentinized Peridotite in Lüliangshan, North Qaidam: Evidence from Boron Isotopes of Serpentine

SU Wenyu, LIU Shuaiqi, ZHANG Guibin*

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The genetic mechanism of serpentinized peridotite in Lüliangshan area of the North Qaidam UHPM belt is controversial. It was proposed as product of subducted slabs, refertilised lithospheric mantle or mantle

收稿日期: 2023-05-30; 修回日期: 2025-02-04; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972056、416622202), 国家重大研究计划项目(91755206)联合资助。

作者简介: 苏文字(1998–), 女, 硕士研究生, 主要从事地球化学研究。E-mail: wysu1998@163.com。

* 通讯作者: 张贵宾(1979–), 男, 教授, 博士生导师, 从事变质岩和同位素地球化学研究。E-mail: gbzhang@pku.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

wedge. In this paper, two types of peridotite (garnet lherzolite and dunite) were collected from Lüliangshan area, and the major and trace elements, and in-situ boron isotope of serpentine were analyzed. The two types of peridotite have experienced different types of serpentinization respectively. The dunite is dominated by the serpentinization of olivine, while the garnet lherzolite is dominated by the serpentinization of pyroxene. The serpentine produced by the serpentinization of olivine has higher content of MgO and As but lower content of Al_2O_3 , Cr_2O_3 , FeO, Li, Yb, Y, Ti, Sc and Zn; while the serpentine produced by the serpentinization of pyroxene is opposite. Serpentine in two types of peridotite showed significant differences in boron isotope. The boron content of serpentine in dunite is from 13.3×10^{-6} to 38.5×10^{-6} , and its $\delta^{11}\text{B}$ value is from -9.5% to $+5.0\%$, which is close to or slight higher than the $\delta^{11}\text{B}$ value of the mantle. The boron content of serpentine in garnet lherzolite is from 10.5×10^{-6} to 49.9×10^{-6} , and its $\delta^{11}\text{B}$ value is from 6.3% to 23.0% , indicating that they are significantly enriched in heavy boron isotope. The difference of boron isotope composition of serpentines indicates that the Lüliangshan peridotite was formed in two different tectonic settings. The garnet lherzolite is formed in lithospheric mantle and has been altered by seawater, thus with enrichment of heavy boron isotope. While the dunite is of mantle-wedge origin and had undergone serpentinization interacted with subduction fluids, thus with enrichment of light boron isotope.

Keywords: peridotite; serpentinization; in-situ boron isotopes; slab serpentine; mantle-wedge serpentine; North Qaidam UHP metamorphic belt

B是中等程度挥发性的亲石、不相容元素,其在熔/流体活动中容易发生迁移,并主要赋存于电气石、白云母和蛇纹石等矿物中。B元素有两个同位素 ^{10}B 与 ^{11}B ,其中 ^{11}B (相对丰度 80.1%)优先在3次配位的流体中富集;而 ^{10}B (相对丰度 19.9%)优先在具有四面体配位的晶体中富集。因此,硼同位素伴随流体活动会产生显著分馏,进而可以有效地定量反演地幔楔与俯冲板片之间的流体运移过程(Peacock et al., 1999; Konrad-Schmolke et al., 2014; Albers et al., 2020)。硼同位素计算公式为: $\delta^{11}\text{B} = [(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{sample}} / (^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{standard}} - 1] \times 1000$, 在自然界中 $\delta^{11}\text{B}$ 的范围为 -37% ~ $+58\%$,由于现代海水的 $\delta^{11}\text{B}$ 高达 $+39.6\%$,所以海底沉积物、蚀变大洋玄武岩(AOB)和蛇纹岩等的 $\delta^{11}\text{B}$ 值为正值,而大陆地壳的 $\delta^{11}\text{B}$ 值通常 $<5\%$ (Marschall et al., 2011, 2018; De Hoog et al., 2018)。

蛇纹石化是地球上最重要的水岩作用之一,它的发生对于岛弧的形成、地震的产生、海底流体活动乃至生命起源、演化等具有重要意义。蛇纹石类矿物的平均含水量为13%,可以稳定存在于从海沟到弧下深度所对应的宽泛温压条件下;叶蛇纹石在约600~700℃、120~170 km的弧下深度才会发生完全分解并释放大流量流体(Wunder et al., 2001)。因此,蛇纹石类矿物是大洋岩石圈和俯冲带内水和流体活动性元素迁移的最重要载体。蛇纹石化过程中流体活动性元素

(B、Li、As、Sb、Pb、Cs、U、Sr和Ba等)会显著富集,而主量元素几乎不发生迁移(除Ca之外)(Tenthorey et al., 2004; 吴凯等, 2020)。由于原岩性质、流体成分和氧逸度等条件的不同,大洋岩石圈蛇纹岩和弧前蛇纹岩的特征也略有不同。因此,可以用蛇纹岩的地球化学特征来反演蛇纹石化过程及其中的元素迁移,以及可能经历的流体/熔体交代过程(Deschamps et al., 2013)。此外,蛇纹石作为含水层状硅酸盐矿物,硅氧层会被硼元素以类质同象替代。最近, Martin et al. (2020)有关研究表明蛇纹石的B同位素可以有效示踪和区分俯冲板片和地幔不同来源的流体。

柴北缘超高压变质带西端的绿梁山地区所出露的造山带橄榄岩,其金刚石包体及一些特殊矿物出溶结构表明其经历过深俯冲超高压变质作用(Song et al., 2005a)。但这些橄榄岩的成因仍有争议,如幔源岩浆堆晶成因(Song et al., 2007, 2009),再活化的岩石圈地幔(Shi et al., 2010)和蚀变的洋底橄榄岩(Yang et al., 2008)。据此,笔者对蛇纹石化纯橄岩与蛇纹石化石榴子石二辉橄榄岩中的蛇纹石进行了原位硼同位素分析,以探讨B同位素对绿梁山造山带橄榄岩的成因和流体活动的限定。

1 区域地质概况

柴北缘超高压变质带位于中国西部的青海省境

内, 青藏高原东北缘, 沿柴达木盆地北缘呈 NWW-SEE 向展布, 其北侧是祁连山地体, 南侧为柴达木地体, 东接秦岭造山带, 西端被阿尔金断裂所切(图 1a; 林成

贵等, 2017; 王佳兴等, 2020)。柴北缘超高压变质带北部相距 300 km 处即为北祁连加里东期缝合带, 发育典型的蛇绿岩和低温高压变质岩组合。

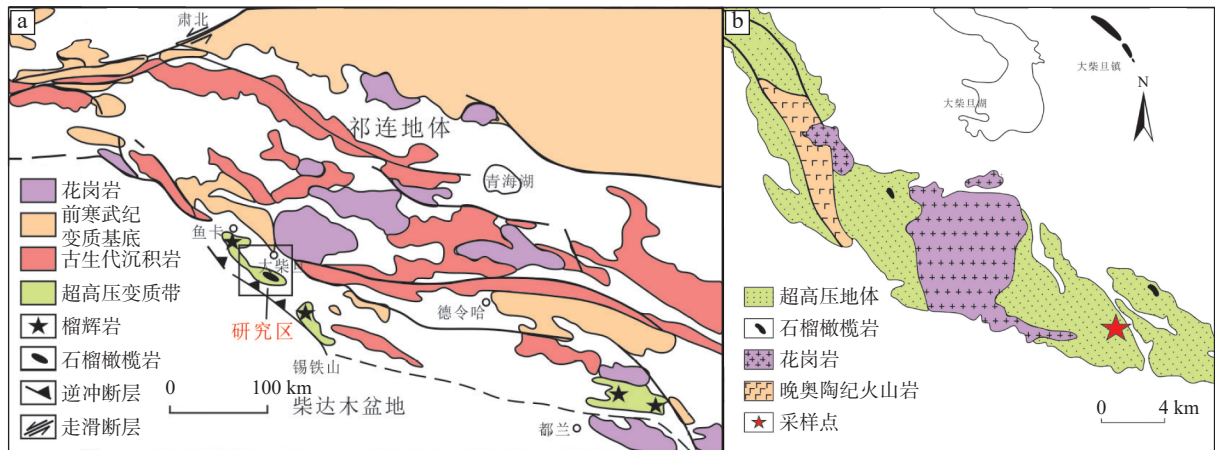


图1 青藏高原东北部柴北缘超高压变质带的主要构造单元(a; 据 Zhang et al., 2009a 修改)、绿梁山地体地质简图(b; 据 Song et al., 2004 修改)

Fig. 1 (a) Major tectonic units of the North Qaidam UHP metamorphic belt, northeastern Tibetan Plateau, (b) geological map of Luliangshan area

柴北缘超高压变质带自西向东主要出露于鱼卡、绿梁山、锡铁山和都兰 4 个区域(图 1a)。在泥质片麻岩和榴辉岩中均有柯石英报道(杨经绥等, 2001; Yang et al., 2001; Song et al., 2003; Zhang et al., 2009a, 2009b, 2010, 2023; Liu et al., 2012), 而在石榴橄榄岩的锆石中发现有金刚石包裹体(Song et al., 2005a)。此外, 在都兰北带野马滩榴辉岩中还保存有 K-cymrite(Zhang et al., 2009), 以及辉石中出溶白云母的现象(Han et al., 2015)表明柴北缘曾作为一个整体发生了深俯冲而经历过超高压变质作用。

柴北缘超高压变质带中发育两种类型橄榄岩: ①绿梁山造山带橄榄岩, 岩石类型包括石榴子石二辉橄榄岩、石榴方辉橄榄岩、纯橄岩和石榴辉石岩。锆石中包裹的金刚石包体及石榴子石和橄榄岩中的出溶结构表明, 其经历过大于 200 km 的深俯冲过程(Song et al., 2014)。②都兰区域的沙柳河和野马滩大洋蛇绿岩型地幔橄榄岩, 代表大洋岩石圈残片(Zhang et al., 2016, 2023)。

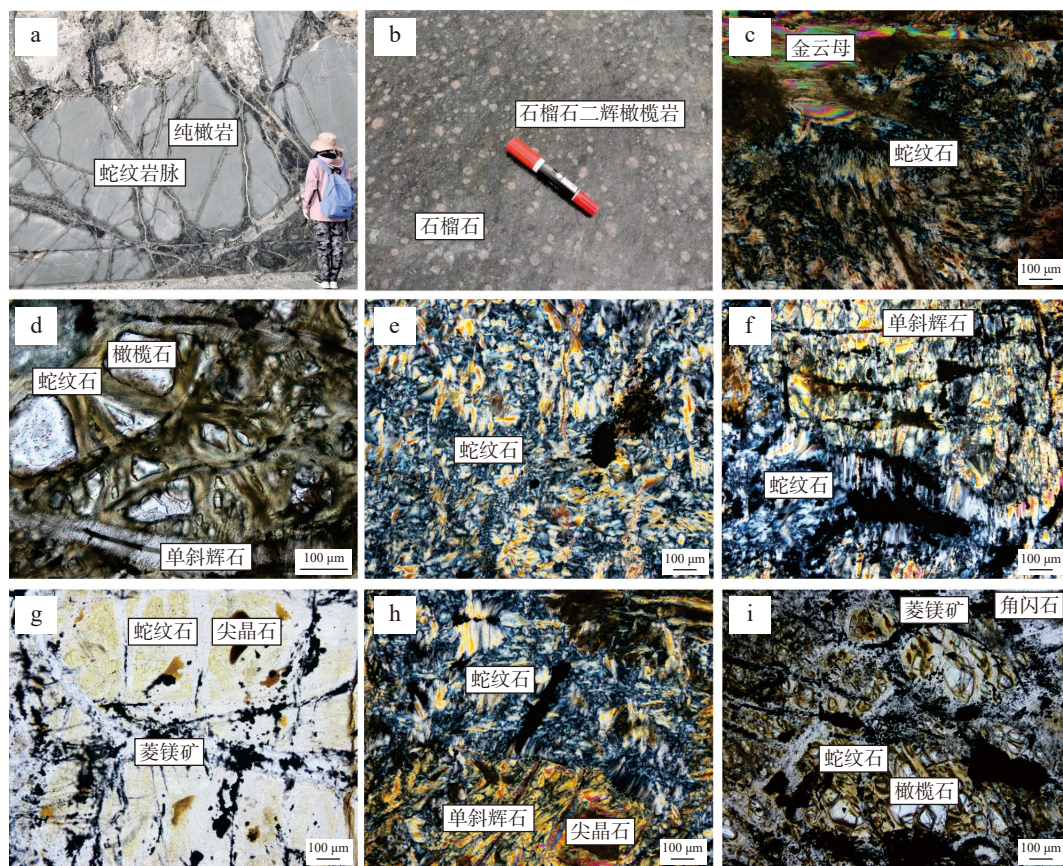
绿梁山位于大柴旦镇以南约 20 km 处, 该区大部分被第四系覆盖, 且其西侧侵入有早侏罗纪花岗岩(图 1b; Song et al., 2004)。岩石类型主要以花岗质片麻岩和含夕线石(蓝晶石)的副片麻岩为主, 橄榄岩作为一个大块体(500~800 m)出露于其中(杨建军等, 1994; Song et al., 2004, 2005b, 2007)。橄榄岩呈层状, 可以识

别出①纯橄岩($Ol+Spl\pm Opx$)、②含石榴子石纯橄岩和方辉橄榄岩($Grt+Ol+Opx\pm Cpx$)、③石榴子石二辉橄榄岩($Ol+Grt+Opx+Cpx\pm Cmt\pm Phl$)、④石榴辉石岩($Grt+Opx+Cpx+Phl$)4 种岩石类型(Song et al., 2005b, 2007, 2009; Yang et al., 2008)。笔者选取 3 块典型岩石样品进行分析测试, 包括 2 块纯橄岩(21LL03 和 21LL12)和 1 块石榴子石二辉橄榄岩(21LL08)(E 95°20'38.91", N 37°39'8.6") (图 2a、图 2b)。

2 分析方法

2.1 蛇纹石主量元素分析

蛇纹石的主量元素分析在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成, 实验仪器为配备有 4 道波谱仪的日本 JEOL 公司生产的 JEOL JXA-8 230 型电子探针, 样品在上机测试之前先镀上尽量均匀, 厚度约为 20 nm 的碳膜, 详细的电子探针分析流程见 Yang et al. (2022)。测试工作条件为: 加速电压为 15 kV, 加速电流为 20 nA, 束斑直径为 2 μ m, 使用天然矿物或合成氧化物作为标样, 所有测试数据均进行了 ZAF 校正处理, 分析精度在 5% 以内(表 1)。蛇纹石的背散射图像在实验过程中一并获取(图 2i)。



a、b. 样品的野外特征照片; c. 石榴子石二辉橄榄岩中的金云母; d. 石榴子石二辉橄榄岩中橄榄石呈筛网状残留, 单斜辉石呈纤维状次生边; e、f. 竹叶状相互贯穿的叶蛇纹石; g、h. 尖晶石以包裹体的形式存在于橄榄石和辉石晶体中; i. 蛇纹石碳酸盐化析出颗粒状菱镁矿

图2 纯橄岩与石榴子石二辉橄榄岩的野外特征与镜下显微照片

Fig. 2 Field occurrence and microscopic characteristics of dunite and garnet lherzolite

2.2 蛇纹石微量元素分析

蛇纹石的微量元素在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室测定, 采用 193 nm 准分子激光器 (GeoLas HD) 与四极杆等离子质谱仪 (Thermo Q-ICP-MS) 联用, 分析束斑为 44 μm , 激光频率为 5 Hz, 能量密度为 8 J/cm²。每次分析包括了 20 s 背景采集和 50 s 数据采集, 数据采用 NIST610 合成玻璃的 Si 元素为内标, NIST612 作为次级标样。用数据分析软件 Iolite v.3.71 对数据进行分析 (Paton et al., 2010, 2011; 表 2)。

2.3 蛇纹石 B 同位素分析

蛇纹石原位硼同位素测试是在北京大学造山带与地壳演化重点实验室完成。采用 193 nm 准分子激光器 (GeoLas HD) 与多接收等离子体质谱仪 (MC-ICPMS) 联用。分析束斑为 90 μm , 激光频率为 5 Hz, 能量密度为 8 J/cm², 载气为氦气。多接收等离子体质

谱仪 (MC-ICPMS) 为英国 Nu Instrument 公司的 Nu Plasma II, 配备 16 个法拉第杯和 6 个离子计数器, 冷却气、辅助气、样品气均为氦气。使用 Nu Plasma II 自带的软件进行背景扣除, 随后使用标样-样品-标样 (SSB) 交叉法对未知样品测试值进行质量歧视校正 (徐洁等, 2020; 表 3)。

2.4 蛇纹石拉曼光谱分析

蛇纹石的拉曼光谱实验在中国地质科学院地质研究所的激光拉曼实验室完成, 实验仪器为 HORIBA-JY 公司生产的 LabRAMHR HR Evolution 型激光拉曼光谱仪, 搭载 Olympus BX41 显微镜 (Zhang et al., 2022)。工作光源为 Nd: YAG 固体激光器, 激光波长 532 nm, 输出功率 100 mW, 通过摄谱仪上 100 μm 的共聚焦孔后由 1800 g 光栅接收, 使用 -60 $^{\circ}\text{C}$ 的深热电冷却 CCD 探测器 (Syncerity) 对散射光进行检测。实验使用单晶硅片的 520.7 cm^{-1} 谱峰做标定, 拉曼信号采

表 1 柴北缘绿梁山蛇纹石矿物的主量元素(%)测试结果

Tab. 1 Major elements (%) of serpentine from Lüliangshan peridotite, North Qaidam

编号	21LL03-3	21LL03-4	21LL08-2	21LL08-3	21LL12-1	21LL12-2	21LL2-3
SiO ₂	44.7	44.6	38.9	44.9	44.9	45.1	44.9
TiO ₂	0.09	0.09	0.08	0.04	0.07	0.05	0.07
Al ₂ O ₃	0.33	0.45	5.39	0.47	0.19	0.17	0.19
Cr ₂ O ₃	0.05	0.02	0.6	0.07	0.02	0.05	0.06
MgO	39.2	39.4	36.9	38.9	39.5	39.7	39.5
FeO	3.11	3.09	4.21	3.27	2.87	2.77	2.93
MnO	0.04	0.04	0.11	0.08	0.03	0.02	0.03
NiO	0.10	0.10	0.14	0.11	0.19	0.18	0.19
CaO	0.04	0.03	0.07	0.12	0.02	0.03	0.02
Na ₂ O	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
K ₂ O	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00	0.00	0.01
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
F	0.02	0.02	0.00	0.03	0.09	0.09	0.05
Cl	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
合计	87.72	87.85	86.51	88.03	87.86	88.15	87.96
Oxygens	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
Si	4.10	4.08	3.49	4.10	4.12	4.12	4.12
Ti	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Al	0.04	0.05	0.53	0.05	0.02	0.02	0.02
Cr	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00
Mg	5.41	5.41	4.96	5.33	5.44	5.45	5.43
Fe ²⁺	0.24	0.24	0.31	0.25	0.22	0.21	0.22
Mn	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Ni	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	9.81	9.81	9.37	9.78	9.83	9.83	9.83
X _{Mg}	0.96	0.96	0.94	0.96	0.96	0.96	0.96

注：表格结果为测试所取平均值。

集在 $100\sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$ 的光谱区间内。100 倍物镜照射在样品表面的功率为 $1\sim 5\text{ mW}$, 光谱分辨率为 $\pm 0.59\text{ cm}^{-1}$, 激光束斑为 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$, 采集时间为 $10\sim 20\text{ s}$ 。数据采用 LabSpec 6 软件处理。

3 分析结果

3.1 岩相学

石榴子石二辉橄榄岩(21LL08)主要由石榴子石、

单斜辉石、斜方辉石、橄榄石、金云母(图 2c)和蛇纹石组成, 橄榄石作为残留呈孤岛状(图 2d), 蛇纹石充填在网脉之中(图 2e)。蛇纹石化纯橄岩(21LL03 与 21LL12)主要以橄榄石为主, 含少量斜方辉石与单斜辉石, 橄榄石发生强烈蛇纹石化作用, 蛇纹石呈竹叶状相互穿插(图 2e、图 2f)。薄片下单斜辉石可以见到两种形态, 一种是分布在基质中的假象结构(图 2h), 另一种是在蛇纹石化的橄榄石边部出现单斜辉石纤维状次生边(图 2d), 可见少量尖晶石矿物, 以包裹

表 2 柴北缘绿梁山蛇纹石矿物微量元素 (10^{-6}) 测试结果Tab. 2 Trace elements (10^{-6}) of serpentine from Lüliangshan peridotite, North Qaidam

编号	21LL03-3	21LL03-4	21LL08-2	21LL08-3	21LL12-1	21LL12-2	21LL2-3
Li	0.46	0.72	2.16	8.08	0.40	0.41	0.29
B	33.3	34.1	21.0	26.0	21.1	24.7	22.0
Ca	162 100	3 500	4 927	20 850	—	—	—
Sc	3.92	4.39	33.33	3.72	5.16	4.89	5.19
Ti	53.4	49.1	89.3	35.6	6.79	5.94	7.03
V	8.60	11.43	68.19	12.33	5.89	4.96	5.26
Cr	175	126	4 716	1 183	24.1	109	330
Co	74.0	40.1	60.7	40.9	47.7	49.5	53.0
Ni	1 192	743	1 523	890	1 452	1 404	1 390
Cu	1.24	1.77	1.95	0.48	—	—	0.16
Zn	17.4	14.4	31.6	20.0	10.3	11.0	15.4
As	1.14	1.14	0.71	0.56	1.60	2.35	1.03
Rb	0.53	0.00	4.68	2.92	—	0.49	0.41
Sr	18.85	6.10	4.05	6.50	0.31	0.38	0.36
Y	2.48	2.24	2.44	0.17	0.04	0.04	0.05
Zr	0.39	0.40	1.49	0.15	0.03	0.05	0.07
Nb	0.10	0.10	0.13	0.03	0.01	0.01	0.02
Sb	0.14	0.22	—	0.17	0.17	0.20	0.11
Cs	0.33	0.32	0.98	0.54	0.17	0.16	0.12
Ba	0.94	1.12	5.87	5.19	0.11	0.14	0.27
La	0.19	0.21	0.52	0.07	0.02	0.05	0.06
Ce	0.72	0.77	1.18	0.14	0.09	0.15	0.19
Pr	0.11	0.11	0.13	0.01	0.01	0.02	0.03
Nd	0.63	0.61	0.54	0.06	0.05	0.10	0.14
Sm	0.21	0.17	0.09	0.01	0.02	0.03	0.04
Eu	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01
Gd	0.29	0.27	0.13	—	—	—	0.02
Tb	0.06	0.05	0.03	0.00	—	0.01	0.00
Dy	0.39	0.34	0.24	0.02	0.01	0.01	0.01
Ho	0.08	0.07	0.09	0.00	—	—	—
Er	0.25	0.20	0.35	0.03	—	—	0.01
Tm	0.03	0.03	0.06	0.00	—	—	0.00
Yb	0.24	0.21	0.52	0.05	—	—	—
Lu	0.03	0.03	0.09	0.01	—	—	—
Hf	0.01	0.01	0.04	—	—	—	—
Ta	0.00	0.01	0.01	—	0.00	0.00	0.00
Pb	0.36	0.23	0.75	0.41	0.18	0.15	0.19
Th	0.01	0.01	0.24	0.02	0.01	0.01	0.02
U	0.01	0.01	0.06	0.02	0.19	0.10	0.42
La/Yb	0.79	1.09	1.29	2.85	0.00	—	—
ΣREE	3.25	3.04	3.93	0.30	0.18	0.32	0.44
Eu/Eu*	0.13	0.11	0.71	—	—	—	1.59
(Dy/Yb) _N	1.11	1.20	0.34	0.34	—	—	—

注: 表格结果为测试所取平均值。

表 3 柴北缘绿梁山蛇纹石 B 同位素(‰)测试结果

Tab. 3 Boron isotopes (‰) of serpentine from Lüliangshan peridotite, North Qaidam

测点号	δ值	SE	测点号	δ值	SE	测点号	δ值	SE	测点号	δ值	SE
21LL03-3			21LL08-2			21LL12-1			21LL12-3		
1	2.0	0.7	1	17.4	1.5	1	-2.3	0.9	1	0.9	0.9
2	5.0	0.7	2	23.0	0.9	2	3.3	1.1	2	2.3	0.9
3	3.6	0.7	3	22.6	0.8	3	0.9	1.2	3	0.6	0.9
4	1.3	0.7	4	6.3	1.6	4	-2.0	1.1	4	0.9	0.9
5	-0.5	0.8	5	11.8	1.6	5	-3.1	1.2	5	2.4	0.8
6	-0.8	0.7	6	16.6	1.1	6	-2.2	1.3	6	-0.3	0.8
7	-0.1	0.8	7	18.1	1.4	7	0.8	1.2	7	-3.8	0.9
8	-1.7	0.7	8	17.4	1.1	8	0.2	1.4	8	1.8	0.9
9	-4.5	0.7	9	14.7	1.1	9	1.9	1.0	9	-1.2	0.9
10	-3.6	0.8	10	16.0	1.0	10	-3.8	1.2	10	-1.0	0.9
21LL03-4			21LL08-3			21LL12-2					
1	3.3	0.6	1	11.9	0.7	1	-1.7	1.1			
2	4.4	0.7	2	17.2	0.9	2	-4.4	1.2			
3	2.6	0.6	3	11.7	0.9	3	-1.8	1.0			
4	1.1	0.6	4	21.6	0.6	4	1.0	1.0			
5	-0.7	0.6	5	13.44	0.7	5	-4.4	1.2			
6	0	0.6	6	9.6	0.7	6	-3.1	1.3			
7	0.6	0.6	7	11.4	0.7	7	-9.5	1.2			
8	1.3	0.6	8	12.5	0.7	8	-4.0	1.2			
9	0.3	0.6	9	11.2	0.7	9	0.8	1.1			
10	-0.1	0.6				10	-5.5	1.3			

体的形态分布在橄榄石颗粒中间(图 2g)与辉石颗粒中间(图 2h)。在单偏光镜下可见到橄榄石周边有菱镁矿出现(图 2i)。对石榴子石二辉橄榄岩和蛇纹石化纯橄岩中的蛇纹石矿物进行拉曼光谱分析,实验结果显示本次研究分析的所有蛇纹石样品均为叶蛇纹石(图 3)。

3.2 蛇纹石主微量元素

石榴子石二辉橄榄岩(21LL08)中的蛇纹石 SiO₂ 含量为 33.3%~47.5%, MgO 为 33.9%~40.7%, FeO 为 2.57%~7.54%, Al₂O₃ 为 0.13%~13.9%, CaO 为 0.02%~0.49%, Na₂O+K₂O 为 0~0.2%, Mg[#]为 0.89~0.97。纯橄岩(21LL03 和 21LL12)中蛇纹石主量元素含量变化范围小, SiO₂ 为 43.7%~45.7%, MgO 为 38.2%~40.4%, FeO 为 2.54%~3.48%, Al₂O₃ 为 0~0.99%, CaO 为 0~0.08%, Na₂O+K₂O 为 0~0.06%, Mg[#]为 0.95~0.97。将

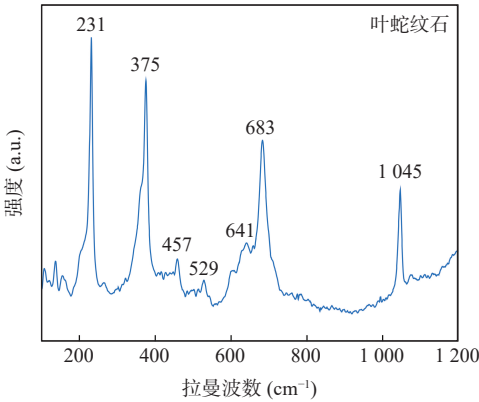


图3 蛇纹石矿物拉光谱分析图
Fig. 3 Raman spectrogram of serpentine

蛇纹石主量元素按照 14 个氧原子进行计算,绘制 Al 与 X_{Mg}[Mg/(Mg+Fe)原子比] 的图像(图 4a),可以发现

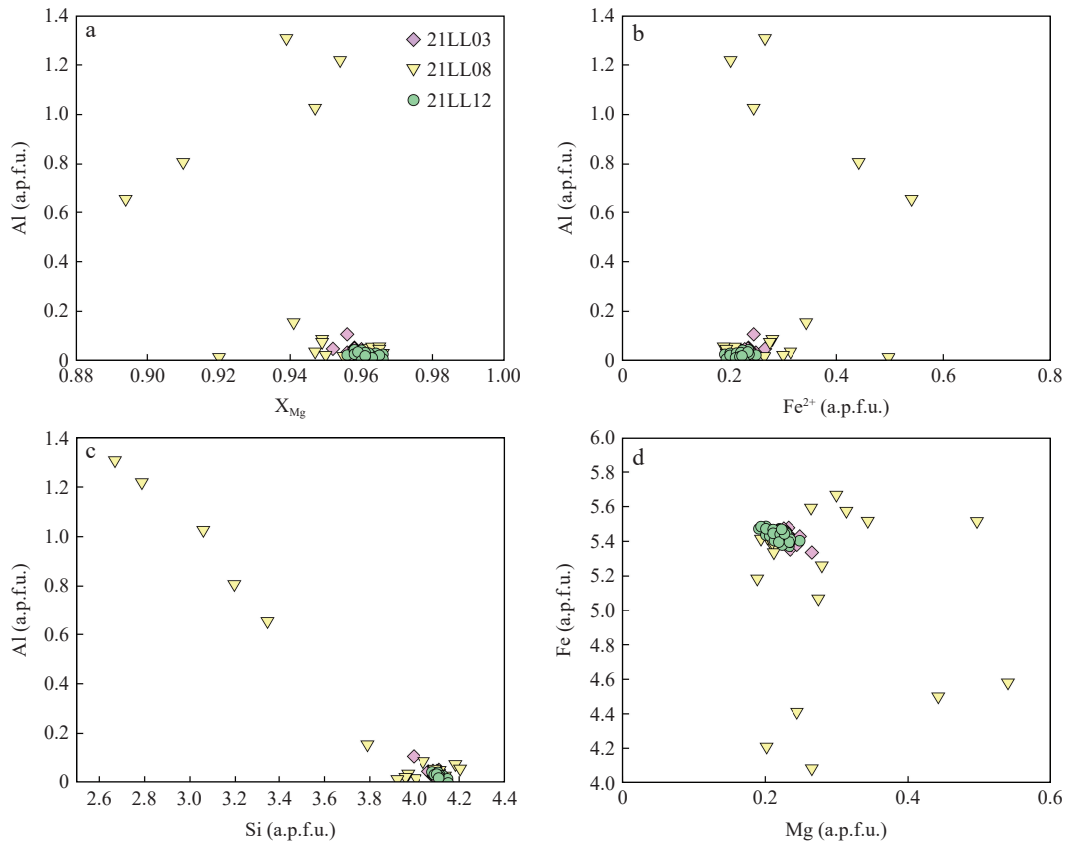


图4 绿梁山地区蛇纹石的成分变化

Fig. 4 Composition changes of serpentine in Lüliangshan area

大多数蛇纹石低 Al (< 0.2 a.p.f.u.), 且 X_{Mg} 大多数为 $0.94 \sim 0.97$, 少数蛇纹石富 Al。

石榴子石二辉橄榄岩(21LL08)中, 蛇纹石的 B 含量为 $10.5 \times 10^{-6} \sim 49.9 \times 10^{-6}$, 蛇纹石的 Ti ($6.85 \times 10^{-6} \sim 220 \times 10^{-6}$)、Sc ($1.49 \times 10^{-6} \sim 97.9 \times 10^{-6}$)、V ($0.6 \times 10^{-6} \sim 165 \times 10^{-6}$)、Cr ($0 \sim 12490 \times 10^{-6}$)、Mn ($358 \times 10^{-6} \sim 1606 \times 10^{-6}$)、Co ($22.0 \times 10^{-6} \sim 122 \times 10^{-6}$)、Ni ($644 \times 10^{-6} \sim 2699 \times 10^{-6}$)、Sr ($0.43 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6}$)、Li ($0.2 \times 10^{-6} \sim 31 \times 10^{-6}$)、Y ($0.02 \times 10^{-6} \sim 4.95 \times 10^{-6}$) 及 REE ($0.03 \times 10^{-6} \sim 8.14 \times 10^{-6}$) 等变化范围比较大。在球粒陨石标准化稀土图谱中, 蛇纹石具有较高的 REE 含量, 呈现“V”字型稀土分配样式, 具显著的 Eu 负异常至轻微 Eu 负异常的特征 (图 5a)。在蛛网图中, 石榴子石二辉橄榄岩的蛇纹石富集 Rb、Ba、Th、U 并具有显著的 Pb 异常 (图 5d)。纯橄岩样品 21LL03 蛇纹石的 B 含量为 $28.6 \times 10^{-6} \sim 38.5 \times 10^{-6}$, 具有低的 Ti ($44.2 \times 10^{-6} \sim 58.8 \times 10^{-6}$)、Sc ($3.41 \times 10^{-6} \sim 5.24 \times 10^{-6}$)、V ($7.55 \times 10^{-6} \sim 15.7 \times 10^{-6}$)、Cr ($12.8 \times 10^{-6} \sim 467 \times 10^{-6}$)、Mn ($295 \times 10^{-6} \sim 725 \times 10^{-6}$)、Li ($0 \sim 1.28 \times 10^{-6}$)、Y ($1.22 \times 10^{-6} \sim 3.3 \times 10^{-6}$)、REE ($1.63 \times 10^{-6} \sim 4.32 \times 10^{-6}$) 和高的 Co ($31.0 \times 10^{-6} \sim 429 \times 10^{-6}$)、Ni ($669 \times 10^{-6} \sim$

5440×10^{-6})、Sr ($0.9 \times 10^{-6} \sim 173 \times 10^{-6}$) 含量。在稀土图谱中, 蛇纹石具平坦的稀土分配样式和显著的 Eu 负异常 ($Eu/Eu^* = 0.02 \sim 0.31$) (图 5b)。在微量元素蛛网图中, 样品 21LL03 中蛇纹石 Rb、Ba、Sr 含量较低, 但富集 Nb、Ta、Pb (图 5e)。此外, 纯橄岩样品 21LL12 中蛇纹石的 B 含量为 $13.3 \times 10^{-6} \sim 37.3 \times 10^{-6}$, 相比于样品 21LL03, 蛇纹石具有低的 Li ($0 \sim 0.79 \times 10^{-6}$)、Ti ($4.02 \times 10^{-6} \sim 10.0 \times 10^{-6}$)、V ($1.81 \times 10^{-6} \sim 12.8 \times 10^{-6}$)、Mn ($145 \times 10^{-6} \sim 341 \times 10^{-6}$)、Y ($0.01 \times 10^{-6} \sim 0.1 \times 10^{-6}$)、Sr ($0.14 \times 10^{-6} \sim 0.6 \times 10^{-6}$)、Ti ($4.02 \times 10^{-6} \sim 10.0 \times 10^{-6}$) 和 REE ($0.02 \times 10^{-6} \sim 1.01 \times 10^{-6}$) 含量; 但具有类似的 Co ($38.1 \times 10^{-6} \sim 95.5 \times 10^{-6}$)、Ni ($1097 \times 10^{-6} \sim 1588 \times 10^{-6}$) 和 Sc ($3.87 \times 10^{-6} \sim 6.8 \times 10^{-6}$) 含量。在稀土图谱中, 该样品中的蛇纹石具有显著低的 REE 含量, HREE 含量低于检出限, LREE 含量为 $0.02 \times 10^{-6} \sim 0.94 \times 10^{-6}$ (图 5c)。在蛛网图中, 样品 21LL12 中蛇纹石具有显著的 U 和 Pb 的正异常 (图 5f)。

3.3 蛇纹石硼同位素

石榴子石二辉橄榄岩(21LL08)和纯橄岩(21LL03 和 21LL12)中的蛇纹石具有差异显著的 B 同位素组成。

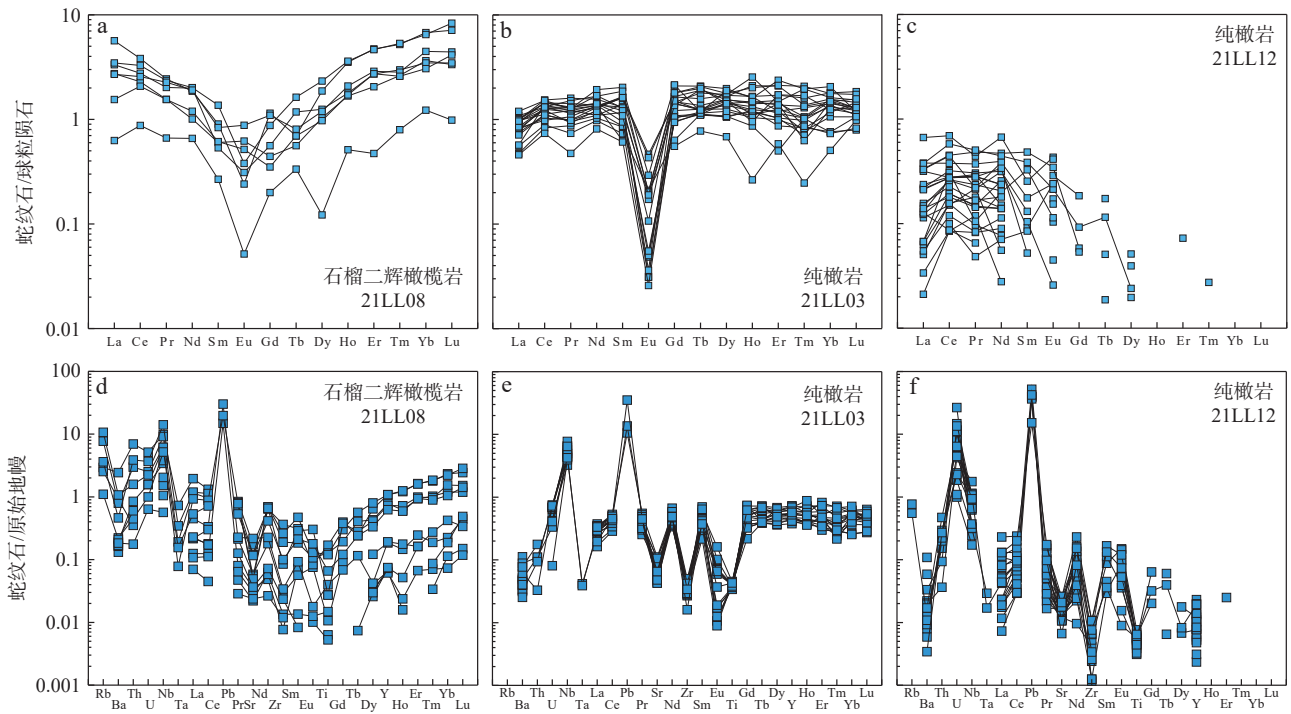


图5 绿梁山地区蛇纹石化橄榄岩中蛇纹石的稀土元素球粒陨石标准化配分图(a、b、c)、微量元素原始地幔标准化蛛网图(d、e、f; 标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 (a, b, c) Chondrite-normalized rare-earth element patterns and (d, e, f) primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of serpentized peridotite in the Luliangshan area

石榴子石二辉橄榄岩蛇纹石 B 同位素 $\delta^{11}\text{B}$ 为 6.3‰~23.0‰, 富集重 B 同位素 (图 6a)。而纯橄岩样品 (21LL03 和 21LL12) 蛇纹石 B 同位素分别为 -4.5‰~5.0‰ 和 -9.5‰~3.3‰, 与地幔的 B 同位素值接近或偏高 (图 6a)。此外, 石榴子石二辉橄榄岩和纯橄

岩中蛇纹石的 B 同位素与微量元素 Li、U、Sr、Ba、Cr、Cs 和 Th 也呈现不同的趋势 (图 6)。石榴子石二辉橄榄岩蛇纹石 B 同位素与 Li、U、Sr、Ba、Cr、Cs、Th 含量呈负相关关系, 而纯橄岩中蛇纹石的 B 同位素则呈现出相反的趋势。

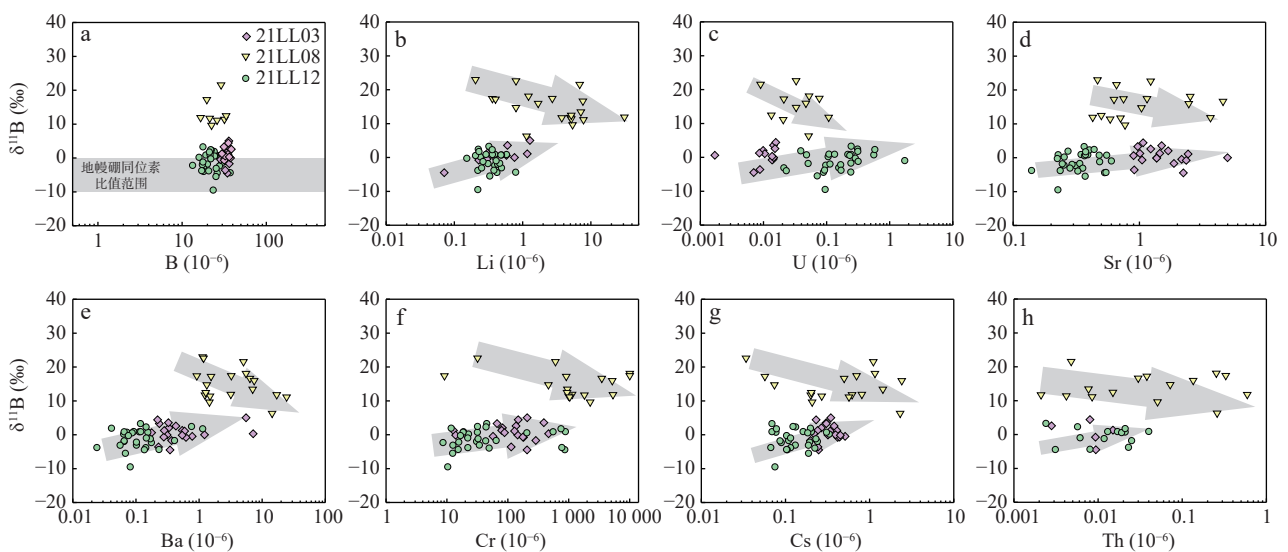


图6 硼同位素比值与流体活动性元素(FMEs)的关系图

Fig. 6 Correlations between boron isotope ratios and fluid mobile elements (FMEs)

4 讨论

4.1 蛇纹石化过程中的元素行为

蛇纹石化过程中伴随着显著的化学元素迁移, 特别是对于流体活动性元素而言 (B、Li、As、Sb、Rb、而言, Ba、Cs、Sr、U、Pb)。一般而言, 蛇纹石化过程中主量元素 (SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 、 FeO) 的迁移量很小 (Mevel, 2003), 但由利蛇纹石向叶蛇纹石转变过程中会导致蛇纹石的 SiO_2 升高, MgO 和 H_2O 含量降低。此外, 高压相的叶蛇纹石一般较低压相的利蛇纹石更富 Al (Deschamps et al., 2013)。不同类型的 Fe-Mg 矿物 (橄榄石、单斜辉石、斜方辉石) 发生蛇纹石化也会造成蛇纹石成分上的差异。橄榄石蛇纹石化产生的蛇纹石具有高的 MgO (35%~45%; 图 4d) 和 NiO (~0.5%), 而辉石发生蛇纹石化产生的蛇纹石则具有低的

MgO (25%~40%; 图 4d) 和高的 Al_2O_3 (25%~40%; 图 4a) 和 Cr_2O_3 (~1%; Deschamps et al., 2010)。绿梁山石榴子石二辉橄榄岩 (21LL08) 相比于纯橄岩 (21LL03 和 21LL12) 具有低的 MgO 并且显著富集 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 以及 FeO (图 4b)。因此, 绿梁山不同橄榄岩间蛇纹石主量元素的差异可能是由于发生蛇纹石化的铁镁矿物不同所导致。石榴子石二辉橄榄岩主要以辉石的蛇纹石化占主导, 而纯橄岩则以橄榄石的蛇纹石化为主。此外, 橄榄石蛇纹石化和辉石蛇纹石化在蛇纹石的微量元素上也有所区别。辉石蛇纹石化相比于橄榄石蛇纹石化产生蛇纹石具有高的 Yb、Y、Ti、Sc、Zn 和低的 La/Yb 值 (Deschamps et al., 2012; 图 7)。绿梁山石榴子石二辉橄榄岩相比于纯橄岩蛇纹石显著富集 LREE、Y、Zn, 且具有高的 Ti、Sc 和低的 La/Yb, 这一特征也证实不同类型 (橄榄石和辉石) 的蛇纹石化过程。

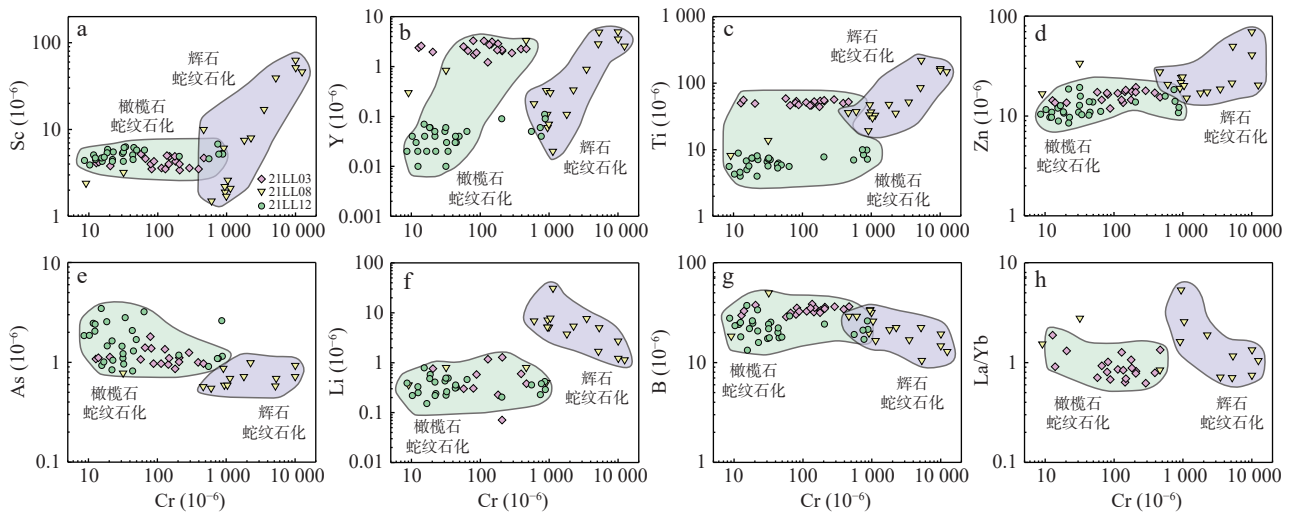


图7 Cr元素与流体活动性元素(FMEs)的关系图

Fig. 7 Correlations between Cr elements and fluid mobile elements (FMEs)

绿梁山石榴子石二辉橄榄岩和纯橄岩蛇纹石的稀土样式也明显不同。纯橄岩 21LL03 呈现平坦的稀土分配样式, 并具有显著的 Eu 负异常 (图 5b)。而纯橄岩 21LL12 中蛇纹石富集轻稀土, 而重稀土未检出 (图 5c), 表明两种类型的蛇纹石化纯橄岩的原岩成分不同, 导致变质后的蛇纹石化橄榄岩继承原岩特征, 具有不同含量的微量元素特征。石榴子石二辉橄榄岩中蛇纹石富集轻和重稀土, 而贫中稀土 (图 5a)。一般情况下, 蛇纹石的稀土样式会继承其宿主矿物 (橄榄石和辉石) 的特征, 通常辉石蛇纹石化产生的蛇纹石一般富集重稀土而亏损轻稀土, 而橄榄石蛇纹石过

程一般呈现平坦的稀土样式 (Deschamps et al., 2012, 2013)。但蛇纹石化过程会再富集轻稀土元素, 从而改造蛇纹石的稀土样式。纯橄岩 21LL03 中的蛇纹石继承了橄榄石的特征, 呈现出平坦的轻重稀土样式, 而明显的 Eu 负异常指示其原岩形成过程中源区存在大量长石。石榴子石二辉橄榄岩中蛇纹石重稀土富集的特征则是继承了辉石的稀土样式, 而该样品蛇纹石轻稀土富集的特征可能与蛇纹石化过程中被俯冲流体交代或轻稀土再富集有关。

除此以外, 蛇纹石作为俯冲带流体活动性元素的一个重要载体, 可以携带流体活动性元素到俯冲带深

部 (Evans et al., 2013)。作为俯冲带典型的富 B 矿物, 笔者在绿梁山橄榄岩中分析得到蛇纹石的 B 含量为 $10.5 \times 10^{-6} \sim 49.9 \times 10^{-6}$, 明显高于地幔的 B 含量 (亏损地幔: 0.06×10^{-6} ; 原始地幔: 0.3×10^{-6}) (Deschamps et al., 2013; 图 6a)。与 B 类似, 蛇纹石化橄榄岩也具有较高的 Li 含量, 并且辉石蛇纹石化相比于橄榄石蛇纹石化产生蛇纹石的 Li 含量更高 (图 6b), 但不同类型蛇纹石化产生蛇纹石的 B 含量并无明显差别 (Deschamps et al., 2010)。对于绿梁山橄榄岩而言, 石榴子石二辉橄榄岩中的蛇纹石的 Li 和 Zn 含量分别为 $0.20 \times 10^{-6} \sim 31 \times 10^{-6}$ 和 $15.1 \times 10^{-6} \sim 69.6 \times 10^{-6}$, 明显高于纯橄岩中蛇纹石的 Li ($0 \sim 1.28 \times 10^{-6}$) 和 Zn ($8.5 \times 10^{-6} \sim 19.4 \times 10^{-6}$) 含量 (图 7d)。亲硫元素 As 也可进入到蛇纹石中, 但与 Li 相反, 橄榄石蛇纹石化过程相比于辉石蛇纹石化会优先富集 As。绿梁山纯橄岩中蛇纹石的 As 含量为 $0 \sim 3.46 \times 10^{-6}$, 要高于石榴子石二辉橄榄岩 (As: $0 \sim 0.99 \times 10^{-6}$) (图 7e)。总而言之, 笔者在柴北缘绿梁山地区识别出两个类型的蛇纹石化作用, 分别对应于橄榄石蛇纹石化和辉石蛇纹石化, 不同类型的蛇纹石化过程导致了蛇纹石成分上的差异。

4.2 B 同位素指示造山带橄榄岩成因

Song et al. (2004, 2005a) 在绿梁山石榴橄榄岩的锆石中报道了金刚石的包裹体, 并在石榴子石和橄榄石中发现了金红石、斜方辉石、单斜辉石、钛铁矿以及钠质闪石、Al-铬铁矿的出溶结构。上述现象表明绿梁山石榴橄榄岩曾经经历超深俯冲, 变质的峰期温压条件可达 $960 \sim 1040\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5.0 \sim 6.5\text{ GPa}$ 。然而, 关于绿梁山造山带橄榄岩的成因机制一直存在争议, 存在以下①幔源岩浆堆晶成因、②再活化的岩石圈地幔、③蚀变的洋底橄榄岩 3 种观点 (Guo et al., 2023)。Song et al. (2007, 2009) 根据绿梁山石榴橄榄岩的条带状构造, 以及强烈富集大离子亲石元素 (Rb、Cs、Ba、Sr、U、Pb) 和亏损高场强元素 (Nb、Ta、Zr、Hf、Ti) 的出岛弧岩浆地球化学特征, 提出岛弧环境下地幔楔部分熔融产生熔体堆晶的成因模型。Yang et al. (2008) 认为该地区出露的石榴橄榄岩起源于岩石圈地幔, 后侵位到洋壳当中, 并经历洋底蚀变, 发生强烈蛇纹石化。而 Shi et al. (2010) 发现绿梁山石榴橄榄岩具有低的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 同位素组成, 与幔源岩浆堆晶的特征不符, 而更可能来源于再活化的岩石圈地幔。Chen et al. (2017) 在石榴橄榄岩的锆石包体中发现了多相固体包裹体并且识别出高 $\delta^{18}\text{O}$ ($5.6\% \sim 7.8\%$) 和低 $\delta^{18}\text{O}$

($-0.7\% \sim 3.0\%$) 两期次流体交代作用, 认为绿梁山造山带橄榄岩为地幔楔橄榄岩, 并被洋壳脱水流体和俯冲大陆地壳脱水流体所交代。

俯冲带蛇纹石化橄榄岩可以是俯冲板片橄榄岩和地幔楔橄榄岩两种类型岩石的蛇纹石化的产物 (Deschamps et al., 2013; Martin et al., 2016)。俯冲板片蛇纹石化被认为是大洋岩石圈地幔橄榄岩与海水反应而发生热液蚀变的过程。一般反应为: 橄榄石+斜方辉石+ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ 蛇纹石+磁铁矿+ H_2 。板片蛇纹岩的全岩 B 同位素组成 $\delta^{11}\text{B}$ 为 $+12\% \sim +30\%$, 这一重 B 同位素信号被认为是继承了海水的特征 ($\delta^{11}\text{B} = +40\%$, Cannaò et al., 2016)。相比之下, 地幔楔橄榄岩的蛇纹石化过程与俯冲板片沉积物和蚀变洋壳玄武岩变质脱水释放流体交代上覆地幔楔有关 (Martin et al., 2016)。地幔楔蛇纹石化过程中 B 同位素变化很大程度上受控于板片脱水流体。但与海水近乎恒定的 B 同位素不同, Martin et al. (2020) 指出板片蛇纹岩的 $\delta^{11}\text{B}$ 可以从 -14% 到 $+24\%$ 之间变化, 俯冲板片在浅部脱出的流体可以将重 B 同位素信号传递给地幔楔橄榄岩, 而随着俯冲板片持续俯冲和伴随的连续脱挥发分, 俯冲板片的脱水流体具有越来越轻的 B 同位素组成。此外, 基于蛇纹石的 B 同位素计算得到俯冲板片脱水流体的 $\delta^{11}\text{B}$ 最低可达 -17% (Martin et al., 2016)。总体而言, 不同构造背景下 (地幔楔 vs. 岩石圈地幔) 发生蛇纹石化所记录的流体信息不同导致其 B 同位素记录存在明显的差异 (Cannaò, 2020; Martin et al., 2020)。总体上, $\delta^{11}\text{B}$ 在 10% 以上的蛇纹石化橄榄岩主要与岩石圈地幔橄榄岩受海水蚀变有关, 而蛇纹石的 $\delta^{11}\text{B}$ 值在 10% 以下则与地幔楔受板片流体交代发生蛇纹石化有关 (图 8)。

笔者在柴北缘绿梁山地体识别出两种类型蛇纹石化橄榄岩 (图 8), 石榴子石二辉橄榄岩中的蛇纹石显著富集 ^{11}B , 其 $\delta^{11}\text{B}$ 为 $6.3\% \sim 23.0\%$, 可能来源于岩石圈地幔橄榄岩, 后期发生蛇纹石化。而纯橄岩样品蛇纹石的 $\delta^{11}\text{B}$ 为 $-9.5\% \sim +5.0\%$, 与地幔楔蛇纹岩的 B 同位素组成接近。此外, 纯橄岩中蛇纹石的 $\delta^{11}\text{B}$ 与流体活动元素 Li 和 Ba 以及难熔元素 Cr 呈正相关关系 (图 6), 指示俯冲过程中板片脱挥发分产生变质流体的 Li、U、Sr、Ba、Cs 和 Th 含量逐渐降低; Cr 的降低则与脱水流体和地幔楔橄榄岩间的相互作用有关, 这一过程同时伴随着 ^{11}B 信号的降低。石榴子石二辉橄榄岩的 $\delta^{11}\text{B}$ 则与 Li、U、Sr、Ba、Cr、Cs、Th 等 7 种元

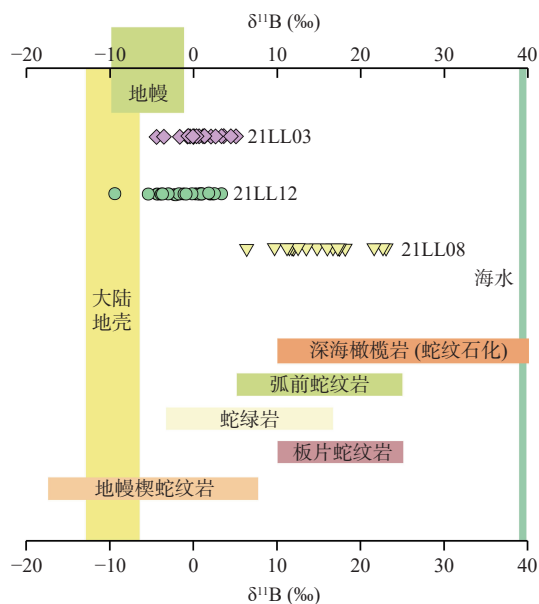


图8 研究区硼同位素比值与他人研究结果对比(数据引自 Marschall et al., 2011; Martin et al., 2016)

Fig. 8 Boron isotope ratios in this study compared with literature data

素呈负相关关系, 推测这与海水具有低的元素本底和高 $\delta^{11}\text{B}$ 有关。

蛇纹石化过程中由纤蛇纹石/利蛇纹石向叶蛇纹石转化过程中, 会脱去大量的 H_2O 和 B, 导致蛇纹石的 B 含量和 $\delta^{11}\text{B}$ 值逐渐降低 (Deschamps et al., 2013)。Cannaò (2020) 指出蛇纹石化相转变过程中的 B 同位素分馏 ($\delta^{11}\text{B}$) 可达 30‰。因此, 蛇纹石相转变过程中的 B 同位素分馏是笔者利用 B 同位素来区分板片蛇纹岩和地幔楔蛇纹岩需考虑的一个重要因素。对于绿梁山橄榄岩而言, 虽然石榴子石二辉橄榄岩和纯橄岩之间存在显著的 B 同位素差异, 但二者的 B 含量基本保持一致。笔者对研究的所有蛇纹石样品均进行了拉曼实验测试 (图 3), 结果显示研究区的蛇纹石样品均为叶蛇纹石样品, 表明在本研究区不存在蛇纹石相转变过程中由低压的利蛇纹石向高压相叶蛇纹石转化过程中的脱 B 效应。此外, 与 Cannaò (2020) 的观点相反, Martin et al. (2020) 测定了同类样品中利蛇纹石和叶蛇纹石的 B 同位素组成, 发现利蛇纹石和叶蛇纹石的 $\delta^{11}\text{B}$ 和 B 含量并没有差别, 即蛇纹石相转变过程中可能并不存在显著的脱硼效应和 B 同位素分馏。综上所述, 基于蛇纹石的 B 同位素组成, 笔者在柴北缘绿梁山地区发现的两类型蛇纹石化橄榄岩, 分别对应于地幔楔和岩石圈地幔两种构造背景 (图 9)。

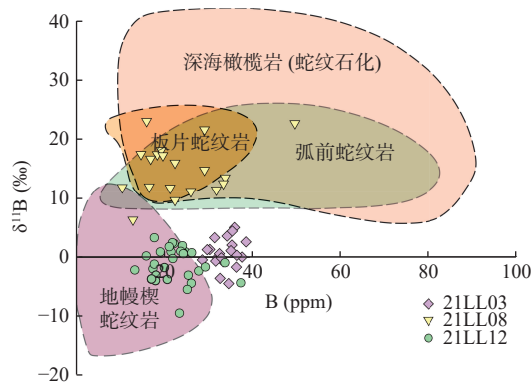


图9 研究区硼含量与硼同位素比值与他人研究结果对比 (数据引自 Martin et al., 2016)

Fig. 9 Boron contents and boron isotope ratios in this study compared with literature data

5 结论

(1) 绿梁山纯橄岩和石榴子石二辉橄榄岩经历了不同类型的蛇纹石化作用, 纯橄岩以橄榄石的蛇纹石化作用为主, 而石榴子石二辉橄榄岩则是以辉石蛇纹石化为主。橄榄石蛇纹石化相比于辉石蛇纹石化所形成的蛇纹石具有高的 MgO 、As 和低的 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、 FeO 、Li、Yb、Y、Ti、Sc、Zn。

(2) 绿梁山纯橄岩和石榴子石二辉橄榄岩中蛇纹石 B 同位素存在显著差异, 石榴子石二辉橄榄岩中蛇纹石明显富集重 B 同位素 ($\delta^{11}\text{B}=6.3\text{‰}-23.0\text{‰}$), 而纯橄岩中蛇纹石则具有低的 $\delta^{11}\text{B}$ 值 ($-9.5\text{‰}\sim+5.0\text{‰}$)。蛇纹石的 B 同位素组成指示了绿梁山橄榄岩形成于两种不同的构造背景, 石榴子石二辉橄榄岩为岩石圈地幔成因, 后经海水蚀变, 形成的蛇纹石富集重 B 同位素; 而纯橄岩为地幔楔成因, 受俯冲板片流体的影响形成的蛇纹石富集轻 B 同位素。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献 (References):

林成贵, 许荣科, 郑有业, 等. 柴北缘超高压变质带鱼卡榴辉岩型金红石矿地质特征及原岩性质探讨 [J]. 西北地质, 2017,

- 50(2): 142–155.
- LIN Chenggui, XU Rongke, ZHENG Youye, et al. Geological Characteristic and Protolith Nature of Yuqia Eclogite-type Rutile Deposit in Northern Qaidam UHP Metamorphic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(2): 142–155.
- 王佳兴, 蔺梦, 刘泽宇, 等. 柴北缘超高压变质带变质蛇绿岩组合及其地质意义[J]. *西北地质*, 2020, 53(4): 1–10.
- WANG Jiaxing, LIN Meng, LIU Zeyu, et al. Petrological Study of the Meta-ophiolite from the North Qaidam UHP Metamorphic Belt and Its Geological Implications[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 1–10.
- 吴凯, 袁洪林, 吕楠, 等. 蛇纹石化和俯冲带蛇纹岩变质脱水过程中流体活动性元素的行为[J]. *岩石学报*, 2020, 36(1): 141–153.
- WU Kai, YUAN Honglin, LV Nan, et al. The Behavior of Fluid Mobile Elements During Serpentinization and Dehydration of Serpentinites in Subduction Zones[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(1): 141–153.
- 徐洁, 张贵宾, 李楠, 等. LA-MC-ICPMS 电气石及白云母原位硼同位素测试方法及应用[J]. *岩石矿物学杂志*, 2020, 39(3): 323–334.
- XU Jie, ZHANG Guibin, LI Nan, et al. In Situ Isotope Analysis Method for Tourmaline and Muscovite by LA-MC-ICPMS and Its Applications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 2020, 39(3): 323–334.
- 杨建军, 朱红, 邓晋福, 等. 柴达木北缘石榴石橄榄岩的发现及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 1994, 13(2): 97–105.
- YANG Jianjun, ZHU Hong, DENG Jinfu, et al. The Discovery of Garnet Peridotite in Northern Chaidam Mountains and Its Significance[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogical*, 1994, 13(2): 97–105.
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴达木盆地北缘早古生代高压—超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 175–179.
- YANG Jingsui, SONG Shuguang, XU Zhiqin, et al. Discovery of Coesite in the North Qaidam Early Paleozoic Ultra high–high Pressure(UHP–HP)Metamorphic Belt, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 175–179.
- Albers E, Kahl W A, Beyer L, et al. Variant across-forearc compositions of slab-fluids recorded by serpentinites: Implications on the mobilization of FMEs from an active subduction zone (Mariana forearc)[J]. *Lithos*, 2020, 364–365: 105525.
- Cannao E. Boron isotope fractionation in subducted serpentinites: A modelling attempt[J]. *Lithos*, 2020, 376–377: 105768.
- Chen Renxu, Li Haiyong, Zheng Yongfei, et al. Crust–Mantle Interaction in a Continental Subduction Channel: Evidence from Orogenic Peridotites in North Qaidam, Northern Tibet[J]. *Journal of Petrology*, 2017, 58(2): 191–226.
- Deschamps F, Godard M, Guillot S, et al. Behavior of fluid-mobile elements in serpentines from abyssal to subduction environments: Examples from Cuba and Dominican Republic[J]. *Chemical Geology*, 2012, 312–313: 93–117.
- Deschamps F, Godard M, Guillot S, et al. Geochemistry of subduction zone serpentinites: A review[J]. *Lithos*, 2013, 178: 96–127.
- Deschamps F, Guillot S, Godard M, et al. In situ characterization of serpentinites from forearc mantle wedges: Timing of serpentinization and behavior of fluid–mobile elements in subduction zones[J]. *Chemical Geology*, 2010, 269: 262–277.
- De Hoog J C M, Savov I P, ANONYMOUS. Boron Isotopes as a Tracer of Subduction Zone Processes[J]. Springer International Publishing, 2018, 28: 217–247.
- Evans B W, Hattori K, Baronnet A. Serpentine: What, Why, Where?[J] *Elements*, 2013, 9: 99–106.
- Han Lei, Zhang Lifei, Zhang Guibin. Ultra-deep subduction of Yematan eclogite in the North Qaidam UHP belt, NW China: Evidence from phengite exsolution in omphacite[J]. *The American Mineralogist*, 2015, 100(8–9): 1848–1855.
- Guo Jing, Li Yunshuai, Palin R M, et al. Evolution and modification of lithospheric mantle within deeply continental subduction zone: Insights from two contrasting orogenic garnet peridotites in South Altun–North Qaidam belt[J]. *Lithos*, 2023, 450–451: 107185.
- Konrad–Schmolke M, Halama R. Combined thermodynamic–geochemical modeling in metamorphic geology: boron as tracer of fluid–rock interaction[J]. *Lithos*, 2014, 208: 393–414.
- Liu Xiaochi, Wu Yuanbao, Gao Shan, et al. First record and timing of UHP metamorphism from zircon in the Xitieshan terrane: Implications for the evolution of the entire North Qaidam metamorphic belt[J]. *The American Mineralogist*, 2012, 97(7): 1083–1093.
- Marschall H R, Jiang Shaoyong. Tourmaline isotopes: no element left behind[J]. *Elements*, 2011, 7: 313–319.
- Marschall H R. Boron isotopes in the ocean floor realm and the mantle[J]. Springer International Publishing, 2018, 189–215.
- Martin C, Flores K E, Harlow G E. Boron isotopic discrimination for subduction–related serpentinites[J]. *Geology*, 2016, 44(11): 899–902.
- Martin C, Flores K E, Vitale–brovarone A, et al. Deep mantle serpentinization in subduction zones: Insight from in situ B isotopes in slab and mantle wedge serpentinites[J]. *Chemical Geology*, 2020, 545: 119637.
- Mevel C. Serpentinization of abyssal peridotites at mid–ocean ridges[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2003, 335(10–11): 825–852.
- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, et al. Improved laser abla-

- tation U–Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2010, 11(3): 1–36.
- Paton C, Hellstrom J, Paul B, et al. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, 26(12): 2508–2518.
- Peacock S M, Hervig R L. Boron isotopic composition of subduction zone metamorphic rocks[J]. *Chemical Geology*, 1999, 160: 281–290.
- Shi Rendeng, Griffin W L, O'reilly S Y, et al. Evolution of the Luliangshan garnet peridotites in the North Qaidam UHP belt, Northern Tibetan Plateau: Constraints from Re–Os isotopes[J]. *Lithos*, 2010, 117(1–4): 307–321.
- Song Shuguang, Yang Jingsui, Liou J G, et al. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM Terrane, the North Qaidam, NW China[J]. *Lithos*, 2003, 70(3–4): 195–211.
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, northern Tibetan Plateau, NW China[J]. *The American mineralogist*, 2004, 89(8–9): 1330–1336.
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, et al. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, Northern Tibetan Plateau: A record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005a, 234(1–2): 99–118.
- Song Shuguang. Sodic amphibole exsolutions in garnet from garnet-peridotite, North Qaidam UHPM belt, NW China: Implications for ultradeep-origin and hydroxyl defects in mantle garnets[J]. *The American Mineralogist*, 2005b, 90(5–6): 814–820.
- Song Shuguang, Su Li, Niu Yaoling, et al. Petrological and geochemical constraints on the origin of garnet peridotite in the North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt, northwestern China[J]. *Lithos*, 2007, 96(1–2): 243–265.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Zhang Lifei, et al. The Luliangshan garnet peridotite massif of the North Qaidam UHPM belt, NW China: a review of its origin and metamorphic evolution[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2009, 27(9): 621–638.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Su Li, et al. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 129: 59–84.
- Tenthorey E, Hermann J. Composition offluids during serpentinite breakdown in subduction zones: evidence for limited boron mobility[J]. *Geology*, 2004, 32(10): 865–868.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- Wunder B, Wirth R, Gottschalk M. Antigorite: pressure and temperature dependence of polysomatism and water content[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2001, 13: 485–495.
- Yang Jianjun, Powell R. Ultrahigh-pressure garnet peridotites from the devolatilization of sea-floor hydrated ultramafic rocks[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2008, 26(6): 695–716.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Song Shuguang, et al. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Palaeozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, NW China[J]. *Earth and Planetary Science*, 2001, 333(11): 719–724.
- Yang Shuiyuan, Jiang Shaoyong, Mao Qian, et al. Electron probe microanalysis in geosciences: Analytical procedures and recent advances[J]. *Atomic Spectroscopy*, 2022, 43(2): 186–200.
- Zhang Guibin, Ellis D J, Christy A G, et al. UHP metamorphic evolution of coesite-bearing eclogite from the Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *European Journal of Mineralogy (Stuttgart)*, 2009a, 21(6): 1287–1300.
- Zhang Guibin, Zhang Lifei, Song Shuguang, et al. UHP metamorphic evolution and SHRIMP geochronology of a coesite-bearing meta-ophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009b, 35: 310–322.
- Zhang Guibin, Ireland T, Zhang Lifei, et al. Zircon geochemistry of two contrasting types of eclogite: Implications for the tectonic evolution of the North Qaidam UHPM belt, northern Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2016, 35: 27–39.
- Zhang Guibin, Han Lei, Zhang Lifei, et al. The transition from oceanic to continental subduction and collision: A case study of the North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt, northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 242(105488): 1–16.
- Zhang Rongqing, Liou J G, Iizuka Y, et al. First record of K-cymrite in North Qaidam UHP eclogite, western China[J]. *American Mineralogist*, 2009, 94(2–3): 222–228.
- Zhang Jianxin, Mattinson C G, Yu S Y, et al. U–Pb zircon geochronology of coesite-bearing eclogites from the southern Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, northwestern China: spatially and temporally extensive UHP metamorphism during continental subduction[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, 28(9): 955–978.
- Zhang C, Bader T, Liu X Y, et al. Raman geobarometry of quartz inclusions in eclogitic garnet constrains the metamorphic evolution and exhumation of the Sumdo oceanic slab in Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2022, 104: 172–184.