

# 西准噶尔达拉布特地幔橄榄岩弧前成因的矿物地球化学和氧同位素证据

钱丰<sup>1)</sup>, 田亚洲<sup>1)</sup>, 武勇<sup>2)</sup>, 杨经绥<sup>3,4)</sup>Pre-pub. on line: www.  
geojournals.cn/georev

- 1) 贵州大学资源与环境工程学院, 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳, 550025;
- 2) 中核集团核工业北京地质研究院, 铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京, 100029;
- 3) 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210023;
- 4) 中国地质科学院地质研究所, 自然资源部深地动力学重点实验室地幔研究中心, 北京, 100037

**内容提要:** 达拉布特蛇绿岩位于中亚造山带西南缘, 是古亚洲洋的扩张、俯冲、消减和闭合过程的产物, 保留了洋盆形成及构造演化信息。前人对达拉布特蛇绿岩的形成大地构造背景始终未取得统一的认识。为探讨蛇绿岩所代表的构造演化过程, 笔者以达拉布特蛇绿岩中的地幔橄榄岩为研究对象, 通过详细的矿物地球化学及其氧同位素研究, 对达拉布特地幔橄榄岩成因及构造背景提出新的制约。达拉布特方辉橄榄岩中橄榄石 Ni/Co 值为 21~22, Ni/Mn 值为 3.0~7.8 具有部分熔融残余的特征, 此外, 橄榄石中不相容元素相对于正常地幔橄榄石亏损, 表明方辉橄榄岩为部分熔融的残余组分。方辉橄榄岩中尖晶石 Cr<sup>#</sup> 为 47~52, TiO<sub>2</sub> 含量 0.01%~0.04%, 橄榄石 Fo 为 90.34%~90.98% 指示方辉橄榄岩经历>20% 的部分熔融。方辉橄榄岩中橄榄石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{olivine}}$  值 +5.1~+6.2‰, 单斜辉石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{epx}}$  值 +5.6~+6.9‰, 其变化范围较大且整体高于正常地幔中橄榄石和单斜辉石的  $\delta^{18}\text{O}$  值, 矿物间氧同位素分馏系数  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{olivine}}$  平均 -0.3‰,  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{epx}}$  平均 -0.7‰, 显著区别于正常地幔中平衡的氧同位素分馏系数, 具有明显的交代作用特征。结合方辉橄榄岩橄榄石中亏损的微量元素特征, 认为方辉橄榄岩可能受到流体交代作用的影响, 俯冲壳源物质脱水形成的高  $\delta^{18}\text{O}$  流体交代地幔橄榄岩导致了矿物与矿物间不平衡的氧同位素特征。通过尖晶石与单斜辉石成分判别, 尖晶石与单斜辉石的主量元素具有介于弧前与深海地幔之间的过渡型特征, 与俯冲初始阶段形成的地幔橄榄岩相似。综合矿物地球化学与氧同位素特征, 笔者认为达拉布特地幔橄榄岩为形成于弧前初始俯冲环境。板块俯冲导致弧前扩张形成新洋壳, 上涌的软流圈 MORB-like 熔体与俯冲壳源物质熔融形成熔/流体与地幔橄榄岩相互作用, 形成达拉布特地幔橄榄岩。

**关键词:** 地幔橄榄岩; 矿物地球化学; 氧同位素; 俯冲带; 西准噶尔

蛇绿岩形成及就位过程记录了大洋扩张、俯冲、消亡等造山过程, 并伴生地幔岩浆活动的改造 (Coleman, 2014)。通过对蛇绿岩的研究可以为恢复古洋盆形成、闭合及大地构造演化提供重要依据 (Woelki et al., 2018; Yang Yaqi et al., 2019a, b; 刘飞等, 2021)。地幔橄榄岩作为蛇绿岩重要组成部分下伏于堆晶单元底部, 被认为是原始地幔部分熔融分离出洋壳岩浆后的残余组分 (王浩等, 2020)。由于残余组分不相容元素显著地亏损, 其地球化学特征能够有效识别渗透熔体或流体的性质和来源, 对于探讨地幔演化及构造环境具有巨大的

潜力 (Robinson et al., 2015; Jean and Shervais, 2017)。

西准噶尔达拉布特蛇绿岩是新疆境内出露的规模最大也最为典型的蛇绿岩带 (图 1), 被认为是中亚造山带古亚洲洋盆的扩张、俯冲、闭合和消减过程的产物 (Chen Shi et al., 2013; 刘金霖, 2014; 李海等, 2021; Zhu Qingmin et al., 2021)。长期以来, 达拉布特蛇绿岩被国内外学者作为重建古亚洲洋形成及构造演化的研究对象 (Chen Shi et al., 2013; 刘金霖, 2014; Yang Gaoxue et al., 2015, 2019; Qiu Tian, 2017; 田亚洲等, 2019; 杨华燊, 2020; 李海等,



注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41703036, 41720104009, 91955203)的成果。

收稿日期:2022-01-08; 改回日期:2022-02-25; 网络首发:2022-03-20; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.03.031

作者简介:钱丰,男,1996年生,硕士研究生,构造地质学专业;Email: 1740551838@qq.com。通讯作者:田亚洲,男,1987年生,副教授,从事基性、超基性岩岩石学研究;Email: tianyazhou87@163.com。

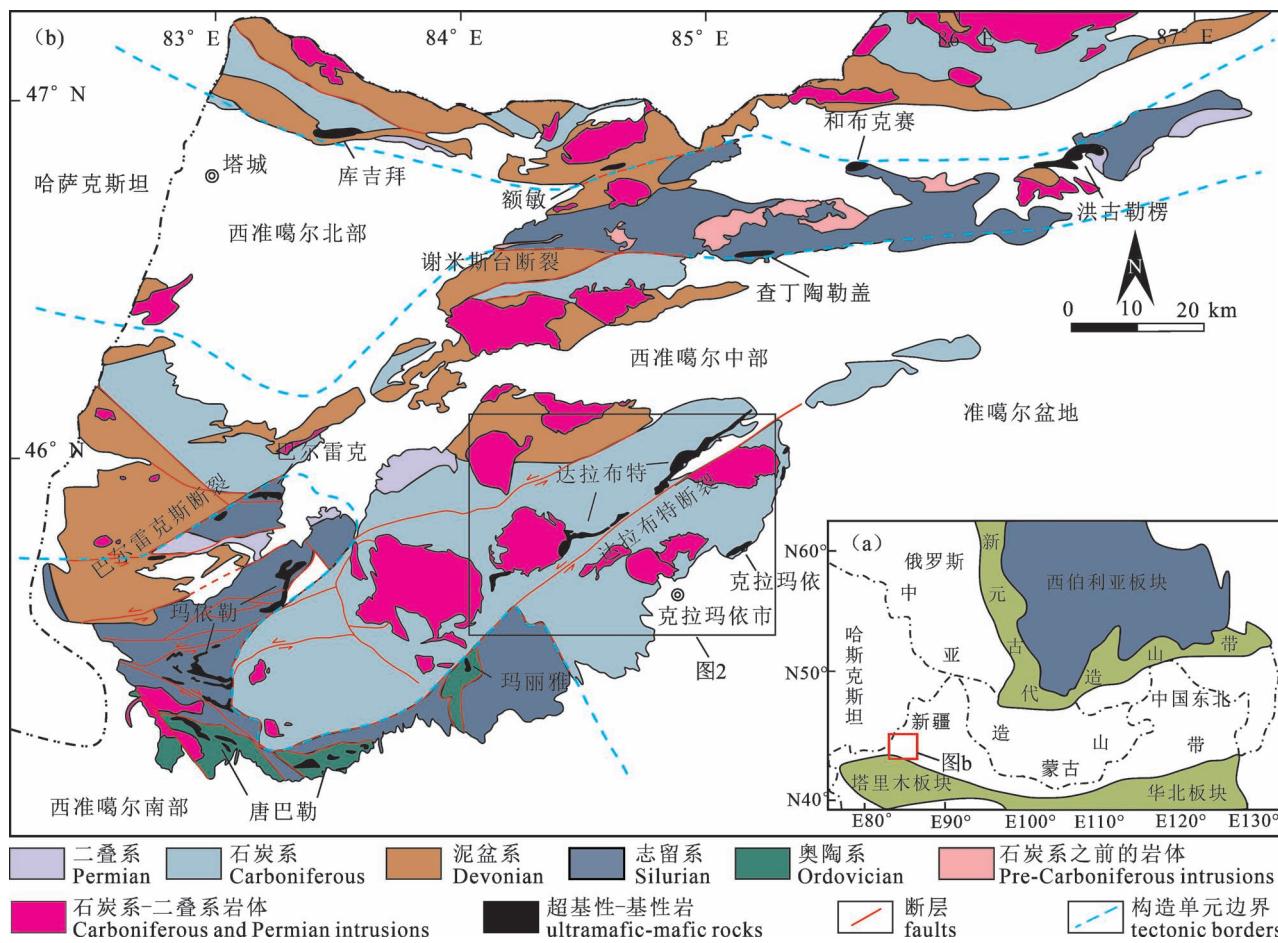


图 1 中亚造山带构造简图(a, 据 Jahn et al. , 2004;)与西准噶尔地质简图(b, 据 Liu Bo et al. , 2017 修改)

Fig. 1 Simplified map of the Central Asian Orogenic Belt (a, after Jahn et al. , 2004) and Simplified Geological Map of the West Junggar Region (b, modified after Liu Bo et al. , 2017)

2021), 对蛇绿岩形成的构造背景取得了一些进展和不同认识。例如, ①通过对全岩及矿物地球化学研究认为蛇绿岩形成于弧前盆地(杨华燊, 2020; Zhu Qingmin et al. , 2021); ②认为达拉布特 MORE型岩石形成于洋中脊环境(雷敏等, 2008); ③根据铬铁矿中含水矿物包裹体以及铬铁矿与拉斑玄武岩的相关性认为形成于受俯冲作用影响的弧后盆地(田亚洲, 2015a); ④根据蛇绿岩两侧地层岩性(陈石和郭召杰, 2010)和地球物理探测(李海等, 2021)认为是残余洋盆的闭合导致蛇绿岩构造侵入等, 现阶段研究表明对达拉布特蛇绿岩形成的大地构造背景和俯冲模式的认识依旧分歧很大。近年来, 随着蛇绿岩铬铁矿中金刚石等超高压、强还原性和壳源矿物的发现(Yang Jingsui et al. , 2007, 2021; Robinson et al. , 2015), 又增加了深部地幔以及俯冲再循环物质参与了蛇绿岩的形成及演化的新问

题。作为古洋壳的残留, 蛇绿岩无论在其早期的形成和后期的侵位过程中, 都可能受到海底热液或俯冲流熔体的参与, 并可能导致其地幔源区的物质组成发生改变。如何识别地幔中存在的不同物源及产生的影响, 成为判别蛇绿岩形成构造环境的一个值得重视的问题。

基于地幔中亏损或再富集事件对地幔橄榄岩的改造, 其矿物的主微量及同位素特征保留了地幔演化、岩浆分异、部分熔融或是和流体/熔体之间相互作用的重要记录, 可以为探究蛇绿岩形成的大地构造背景提供有力的依据(Birner et al. , 2017; Rogkala et al. , 2019)。随着近年来矿物原位测试技术的提高, 使得矿物氧同位素(王静等, 2020)变化可以被准确识别。鉴于氧同位素在地幔与地壳中存在显著的差异, 以及受俯冲地壳影响的地幔岩石会产生明显的氧同位素改变, 地幔岩石的氧同位素

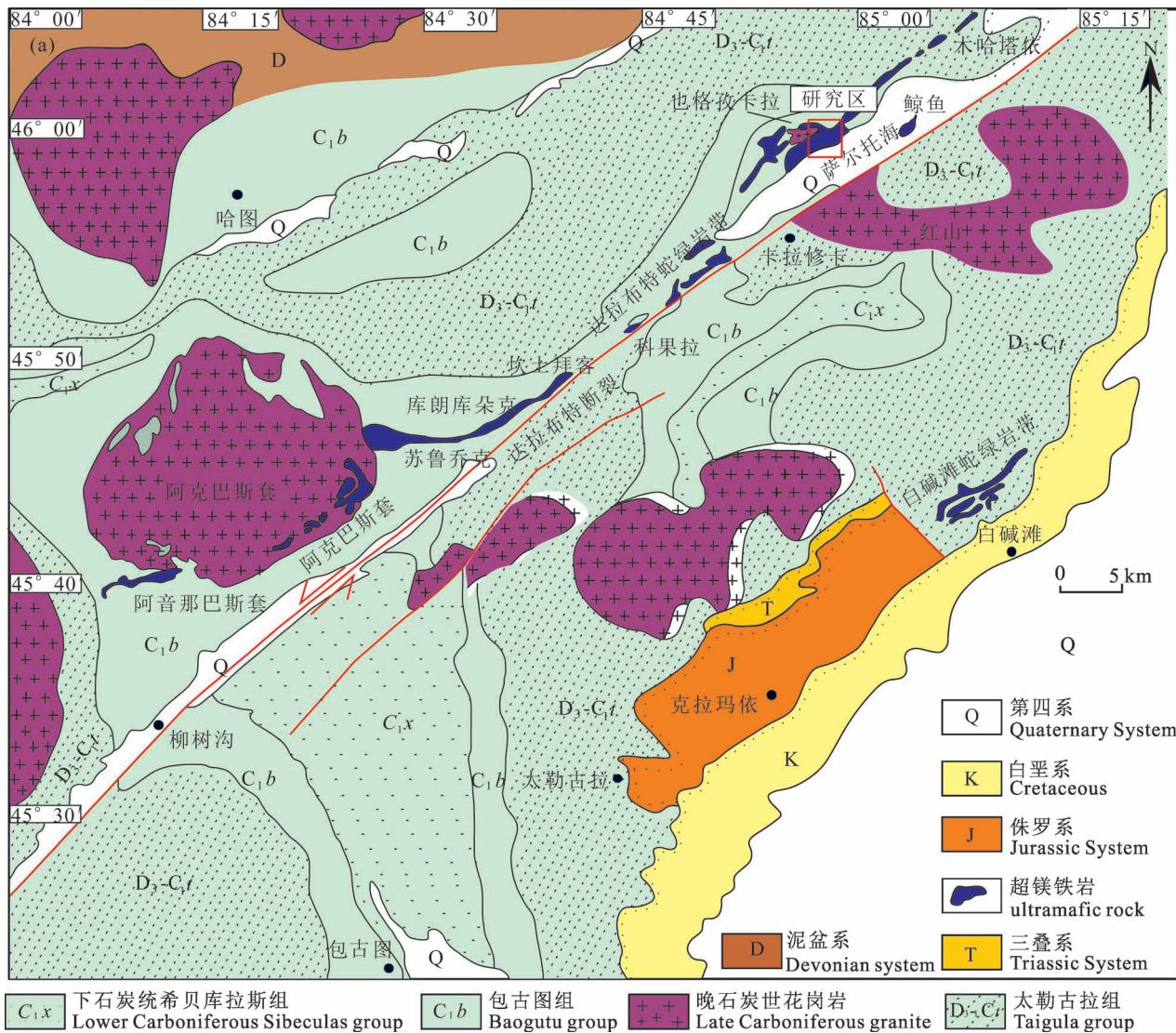


图 2 西准噶尔中部地质简图(据新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the central West Junggar (modified after Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang, 1993#)

组成的变化可以有效地用来识别地幔中俯冲壳源物质再循环记录(Liu Chuanzhou et al., 2014)。据此,笔者以达拉布特地幔橄榄岩为研究对象,在岩石学、矿物学及地球化学研究的基础上结合矿物氧同位素特征,拟对达拉布特蛇绿岩形成的大地构造背景给出新的制约。

## 1 达拉布特蛇绿岩地质特征

西准噶尔地区位于中亚造山带的西南缘(图1a),区内广泛出露早古生代以来的沉积地层,其中以石炭系半深海一大陆破相火山—碎屑沉积建造为主。区内地层普遍受到晚石炭系花岗岩熔体的侵入

(龚一鸣和纵瑞文,2015)(图2)。通过锆石U-Pb定年确定花岗岩体的侵入时限在310~295 Ma(韩宝福等,2006; Geng Hongyan et al., 2009)。区内从北到南发育了巴尔雷克、玛依勒、达拉布特等左行走滑断裂,断裂以NE—SW走向平行分布,对区内蛇绿岩的分布产生了影响(Choulet et al., 2012; 陈宣华等,2014)。沿断裂走向出露巴尔雷克521 Ma(温志刚等,2016)、玛依勒572 Ma(Yang Gaoxue et al., 2012)、克拉玛依414 Ma(徐新等,2006)、达拉布特392 Ma(辜平阳等,2009)等多条古生代蛇绿混杂岩带,其年龄范围从寒武纪至早泥盆世。这些蛇绿岩被认为产在西伯利亚板块和哈萨克斯坦—准噶

尔板块汇聚而成的古生代造山带,是研究古亚洲洋演化的天然实验室。

西准噶尔中部地区位于西准噶尔北部的谢米斯台断裂与南部的巴尔雷克断裂、玛依勒断裂和达尔布特断裂之间(图 2)。该地区出露泥盆纪至早石炭世海相地层以及达拉布特与白碱滩两条蛇绿混杂岩带,且广泛发育晚石炭世至早二叠世花岗岩侵入体(Zhu Qingmin et al., 2021)。被认为是泥盆纪至早二叠世洋陆转换的产物。其中,达拉布特蛇绿岩带以 NE—SW 走向展布于达拉布特断裂带北侧,大致平行于达拉布特断裂带层(图 2)。蛇绿岩呈北东走向延至白杨沟,而南西方向因庙儿沟花岗岩体的侵位所截,全长近 100 km,宽约 5 km,最宽处可达 8 km,总出露面积约 50 km<sup>2</sup>,是新疆境内目前为止所发现面积最大的蛇绿岩带(Choulet et al., 2012; 陈石等, 2016; 林伟等, 2017; 王国灿和张攀, 2019)。带中包括了 10 个不同规模的超镁铁岩体,从北东到南西向依次为:木哈塔依、鲸鱼、萨尔托海、达拉布特、科果拉、坎土拜拉、苏鲁乔克、阿克巴斯套和阿音巴斯套等(图 3)。达拉布特蛇绿岩受后期强烈的构造运动影响,蛇绿岩原有层序被破坏,其内部组构复杂。原来下部层序的铁镁质或超铁镁质岩石逆冲至复理石沉积地层之上,或者蛇绿岩顶部的深海沉积物和枕状玄武岩被洋壳底部或地幔橄榄岩覆盖(陈石和郭召杰,2010)。蛇绿岩带内原有层序被破坏,不同类型的岩性混杂在一起呈蛇绿混杂岩带(李行等,1987)。前人通过对不同基性岩的年代学研究分别获得获得 391±6 Ma(辜平阳等, 2009)、391±6 Ma, 368±11 Ma 和 375±2 Ma(杨高学, 2012)、392.5

±2.9 Ma(田亚洲等,2015b)的达拉布特蛇绿岩的年龄,其年龄在西准噶尔地区众多蛇绿岩中最年轻,被认为是板块碰撞最终结合部位(朱宝清等,1994)。达拉布特蛇绿岩分别与下石炭统太勒古拉组、上石炭统包古图组以及希贝库拉斯组的沉积地层相邻,它们分别位于蛇绿岩的南北两侧,岩性为凝灰岩、凝灰质粉砂岩夹紫红色玄武岩、安山岩、火山角砾岩和硅质岩(李海等,2021)。通过化石、沉积学研究认为两侧地层呈滨海相。两侧地层年代学时代为上石炭世(宋春晖等,1996)。根据对侵入花岗岩体的研究发现达拉布特蛇绿岩内部及两侧的花岗岩侵入年龄在 310 Ma 左右,达拉布特蛇绿岩中阿克巴斯套岩体被阿克巴斯套花岗岩体所截,两者为侵入接触(苏玉平等,2006)。阿克巴斯套花岗岩体锆石 U-Pb 定年结果为 303 ± 3 Ma(苏玉平等,2006; 韩宝福等, 2006),萨尔托海蛇绿岩受到也格孜卡拉花岗岩的侵入,也格孜卡拉花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定确定的侵入时限为 308 ± 3 Ma(陈石等, 2010)。并在其中发现埃达克岩、高镁闪长岩等组合,据此有学者提出这一期 A 型花岗岩侵入形成于洋脊俯冲,认为俯冲阶段的板片窗效应作用导致软流圈物质上涌形成拉斑质和碱性岩浆(Geng Hongyan et al., 2009; 刘希军等, 2009)。然而,洋脊俯冲意味着下插洋脊受新生洋壳的推动,达拉布特蛇绿岩在年龄上是西准噶尔地区最年轻的蛇绿岩,区域构造地质上未发现较新洋壳(陈石等, 2010)。也有学者认为侵入的花岗岩质岩浆形成于后碰撞阶段的造山后伸展背景下(韩宝福等, 2006; Geng Hongyan et al., 2009)。在萨尔托海蛇绿岩侵

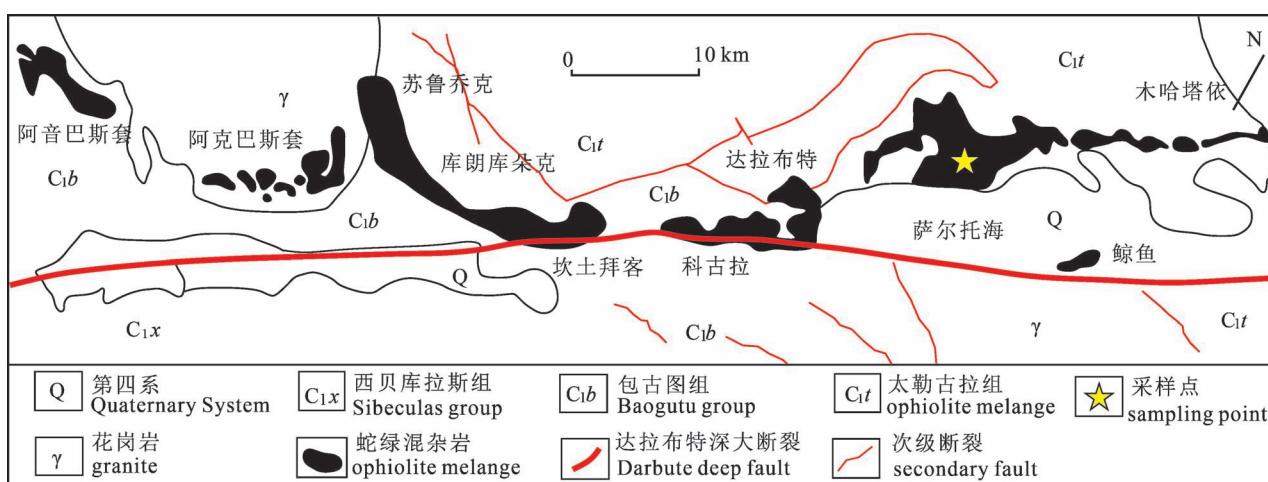


图 3 西准噶尔达拉布特蛇绿岩分布简图(据李行等, 1987)

Fig. 3 Spatial distribution map for the Darbute ophiolite from West Junggar (after Li Hang et al., 1987&)

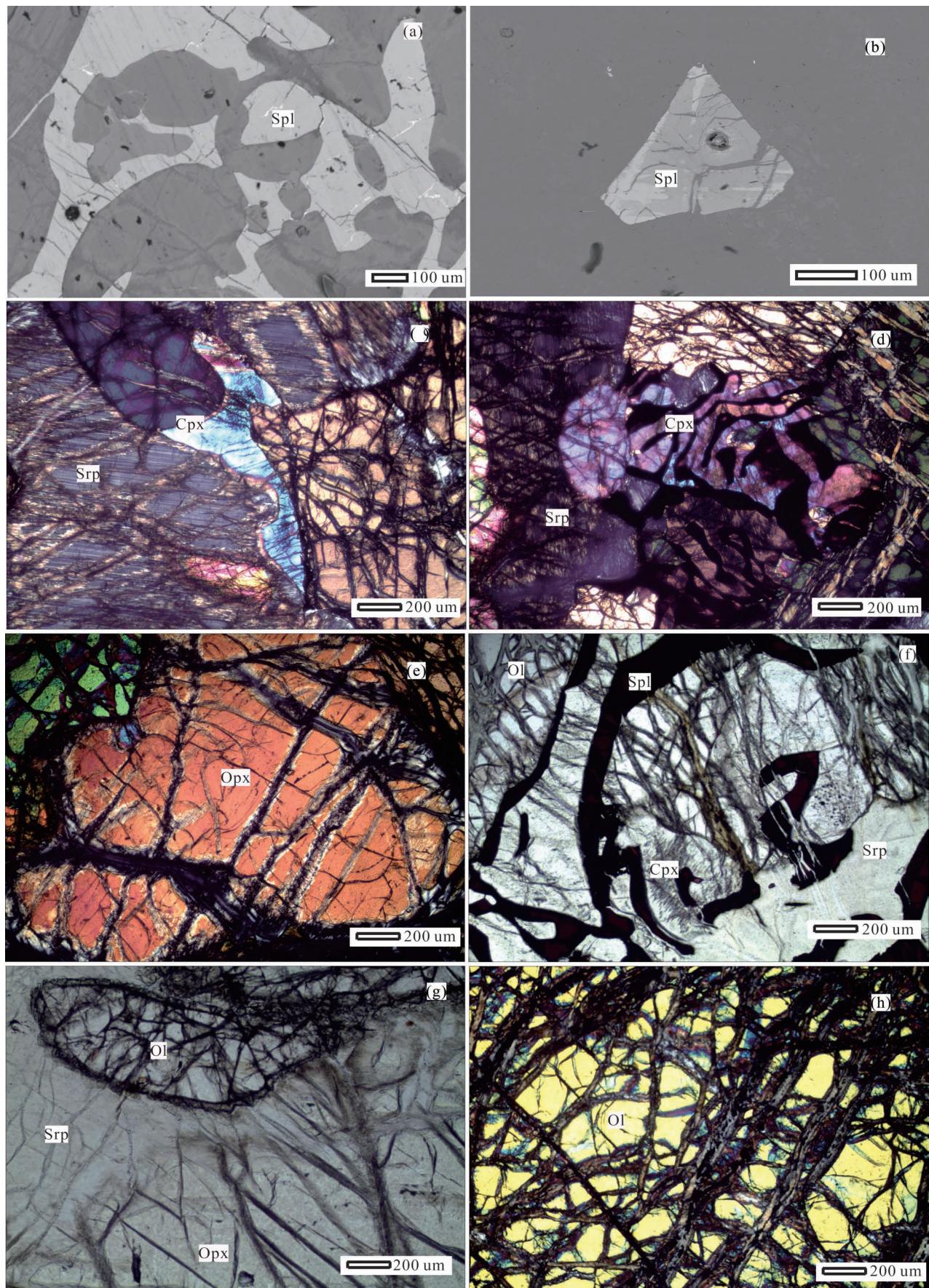


图 4 西准噶尔达拉布特地幔橄榄岩矿物背反射图像(a,b)和显微照片(c,d,e,f,g,h)

Fig. 4 Back-scattered electron image (a, b) and photomicrographs (c, d, e, f, g, h) of mineral for mantle peridotite from Darbute, West Junggar

图(b)来自纯橄岩;图(a,c,d,e,f,g,h)来自方辉橄榄岩。SrP—蛇纹石;Spl—尖晶石;Opx—斜方辉石;Cpx—单斜辉石;Ol—橄榄石

Fig. (b) is from dunites; Fig (a, c, d, e, f, g, h) are from the harzburgites. SrP—serpentinite; Spl—spinel; Opx—orthopyroxene; Cpx—clinopyroxene; Ol—olivine

入的也格孜卡拉花岗岩被认为是典型的“钉合岩体”,它的侵入年代可以约束达拉布特蛇绿岩侵位年代在  $308 \pm 3$  Ma 之前(陈石等,2010)。

## 2 蛇绿岩地幔橄榄岩的特征

达拉布特蛇绿岩所出露的各岩石单元较全,但受后期构造作用的改造呈混杂堆积。岩石普遍蛇纹石化。超镁铁质岩石类型有方辉橄榄岩、纯橄榄岩、二辉橄榄岩,其中以方辉橄榄岩为主,纯橄榄岩与二辉橄榄岩较少,常常以透镜状产于方辉橄榄岩中。而在铁镁质岩方面分别为橄长岩、辉长岩、辉绿岩、枕状熔岩和块状玄武岩。其中橄长岩、辉长岩、辉绿岩以岩脉形式侵入地幔岩中。笔者测试样品来自达拉布特蛇绿岩带中部的萨尔托海方辉橄榄岩。

达拉布特超镁铁质岩类以方辉橄榄岩为主,且普遍发育强烈的蛇纹石化,蛇纹石通常发育于岩石表面或沿破裂面分布,仅保留少量较新鲜方辉橄榄岩。所采样品方辉橄榄岩表面呈黑绿色、灰绿色或土黄色。由于矿物间的差异风化,岩石表面斜方辉石颗粒相对凸起。岩石为块状构造,细—中粒结构。其中尖晶石含量<3%,常与单斜辉石以蠕虫状交互伴生(图 4a,d,f);单斜辉石含量<3%,与尖晶石紧密伴生,呈他形,粒径 50~200 μm(图 4c,d);斜方辉石含量 15%~20%,粒径 1~4 mm,呈浑圆状或以港湾状与橄榄石或单斜辉石伴生。沿边缘及解理缝发育蛇纹石化(图 4g),部分斜方辉石完全蛇纹石化,多呈假象;橄榄石含量 75%~80%,多为半自形,粒径 1~3 mm,普遍发育碎裂结构,部分波状消光,通常沿裂隙发育蛇纹石化(图 4h),受强烈蛇纹石化影响的橄榄石呈岛状。橄榄石蚀变形成的纤维状蛇纹石集合体呈网状、环状分布。部分橄榄石呈浑圆状包裹在斜方辉石中(图 4g)。

## 3 测试方法

尖晶石、橄榄石、单斜辉石单矿物的电子探针分析在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成,测试分析仪器型号为 JXA-8100,工作时加速电

压为 15.0 kV,探针束流为 20 nA,电子束斑直径为 5 μm。

橄榄石微量元素含量在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成。基于 ReSolution 193 nm 激光剥蚀系统与 Agilent 7700x 电感耦合等离子质谱完成测试。氦气作载气,每个采集周期包括 30 s 的空白信号和 60 s 的样品信号。分析方法:①外标样选择:橄榄石以 NIST 610-T1-G, StHs6/8, GOR128-G 为标准物质。标样的元素含量依据 GeoReM 数据库 (<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。②都采用多外标、无内标法(Liu Yongsheng et al., 2008)对元素含量进行定量计算。样品的数据均采用多外标、无内标法校正,选用<sup>29</sup>Si 作为归一化元素。③对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu Yongsheng et al., 2008, 2010) 完成。

橄榄石、单斜辉石、斜方辉石的原位氧同位素分析是在北京核工业地质研究所用 Cameca IMS-1280 SIMS 获得。氧同位素分析时 Cs<sup>+</sup>离子被用作一次离子轰击样品颗粒,轰击能量为 20 kV,离子束的强度为 13~46 nA,束斑大小为 10~15 μm,视场光阑宽度设置为 6×6 mm,入口狭缝宽约 120 μm,能量狭缝宽度为 40 eV,质量分辨率为 2400 (50% 峰宽)。利用两个法拉第杯同时采集<sup>16</sup>O 和<sup>18</sup>O 的信号,放大电路的高阻分别为  $10^{10}\Omega$  和  $10^{11}\Omega$ ,<sup>16</sup>O 信号的强度范围为  $16 \times 10^9 \sim 35 \times 10^9$  cps(每秒计数),方法详细描述可参考(Li Xianhua et al., 2010; Tang Guoqiang et al., 2019)。针对不同矿物分别采用 06JY31CPX、06JY31OPX、06JY34OL 标样校正仪器。橄榄石标样 06JY34OL 的  $\delta^{18}\text{O}$  值 +5.25‰;单斜辉石标样 06JY31CPX 的  $\delta^{18}\text{O}$  值 +5.19‰;斜方辉石标样  $\delta^{18}\text{O}$  值 +5.54‰(Tang Guoqiang et al., 2019)。

## 4 矿物主、微量元素特征

笔者选取达拉布特方辉橄榄岩 11 件样品进行

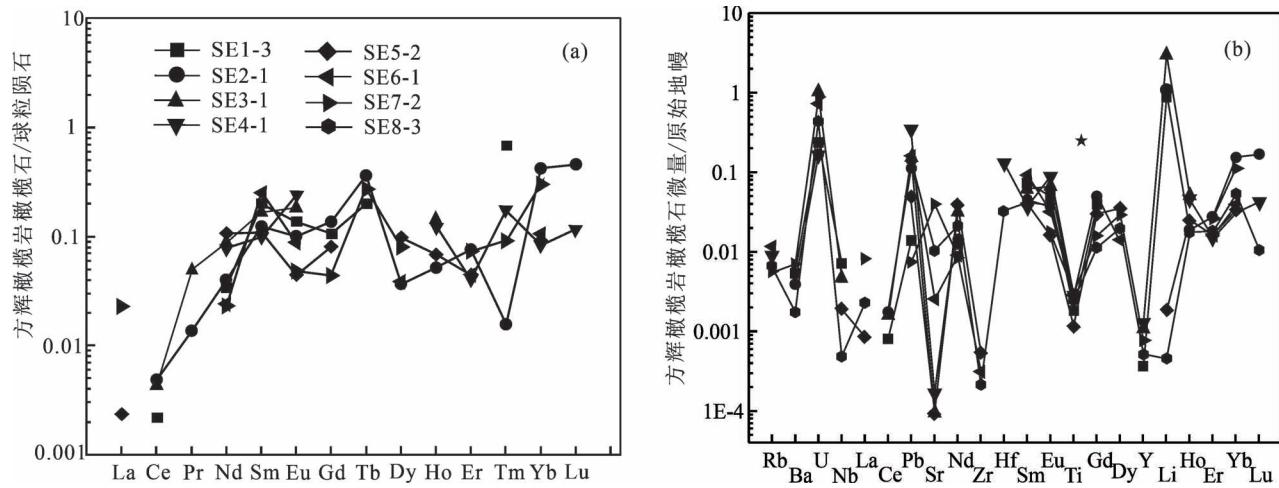


图 5 西准噶尔达拉布特方辉橄榄岩橄榄石球粒陨石标准化稀土元素配分图与原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE pattern and primitive mantle-normalized trace element diagrams for olivine in harzburgite from Darbute, West Junggar

原始地幔数据与球粒陨石值来自 (McDonough et al., 1995)

Chondrite normalization values and primitive mantle-normalization values are from (McDonough et al., 1995)

表 1 西准噶尔达拉布特方辉橄榄岩中橄榄石主要元素特征(%)

Table 1 The characteristics of major elements of olivine in harzburgite from Darbute of West Junggar(%)

样品号	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Na <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	Total	Fo
SE18-1	48.98	0.01	40.73	0.01	0.01	0.00	9.24	0.12	0.00	0.04	0.47	99.60	90.51
SE18-2	49.06	0.03	40.97	0.00	0.01	0.00	8.99	0.13	0.00	0.03	0.50	99.70	90.76
SE1-3	49.02	0.00	40.90	0.00	0.02	0.00	9.30	0.11	0.00	0.00	0.53	99.88	90.46
SE2-1	49.51	0.00	41.32	0.00	0.01	0.01	9.22	0.10	0.00	0.01	0.52	100.69	90.63
SE2-2	49.23	0.00	40.57	0.00	0.01	0.01	9.16	0.09	0.00	0.00	0.42	99.49	90.63
SE3-1	48.92	0.02	40.51	0.00	0.00	0.00	8.65	0.12	0.00	0.00	0.44	98.66	91.06
SE4-1	48.51	0.01	39.99	0.01	0.03	0.00	9.16	0.11	0.00	0.00	0.45	98.26	90.51
SE5-2	48.44	0.00	39.98	0.00	0.02	0.00	9.10	0.11	0.01	0.02	0.47	98.15	90.54
SE6-1	48.12	0.00	43.57	0.00	0.02	0.01	9.17	0.12	0.00	0.00	0.37	101.38	90.42
SE7-2	47.45	0.05	43.02	0.00	0.00	0.00	8.89	0.12	0.00	0.17	0.46	100.14	90.57
SE8-2	47.11	0.00	43.22	0.01	0.04	0.01	8.92	0.12	0.02	0.00	0.49	99.94	90.48
SE8-3	48.22	0.00	43.34	0.00	0.02	0.00	9.13	0.10	0.02	0.00	0.39	101.21	90.48
SE9-1	48.30	0.01	43.46	0.01	0.03	0.00	8.96	0.13	0.01	0.00	0.43	101.33	90.66
SE10-1	47.81	0.00	43.26	0.00	0.02	0.00	8.82	0.12	0.01	0.02	0.40	100.47	90.70

注: Fo = 100Mg/(Mg+Fe)

测试, 测试结果结果如下。

#### 4.1 橄榄石

橄榄石电子探针测试共 14 个点, 测试结果见表 1。方辉橄榄岩中橄榄石 Fo 值位于 90.34% ~ 90.98%, 为典型的镁橄榄石。方辉橄榄岩的 NiO 含量为 0.367% ~ 0.531%, 橄榄石 MnO 含量在 0.09% ~ 0.14%。

方辉橄榄岩橄榄石 LA-ICP-MS 测试共 8 个点, 稀土及微量元素测试结果见表 2。方辉橄榄岩橄榄石稀士与微量元素总体含量较低, 呈轻稀土亏损配

分模式。微量元素中流体活动性元素 U、Pb、Li 元素相对富集。而 Nb、La、Sr、Zr、Y 元素相对亏损。不相容元素 V 含量  $0.55 \times 10^{-6}$  ~  $3.26 \times 10^{-6}$ 、Ca 含量  $< 264 \times 10^{-6}$  低于正常地幔橄榄石 V 含量  $12 \times 10^{-6}$  ~  $76 \times 10^{-6}$ 、Ca 含量  $785 \times 10^{-6}$  ~  $1284 \times 10^{-6}$  (Witt-Eickschen and O' Neill, 2005)。而 Li 含量  $< 1.72 \times 10^{-6}$ 、Sc 含量  $2.71 \times 10^{-6}$  ~  $4.81 \times 10^{-6}$ , 与普兰亏损的地幔橄榄岩相当 Li 含量  $0.52 \times 10^{-6}$  ~  $2.95 \times 10^{-6}$ 、V 含量  $0.36 \times 10^{-6}$  ~  $4.25 \times 10^{-6}$ 、Sc 含量  $2.20 \times 10^{-6}$  ~  $7.50 \times 10^{-6}$  (Su Benxun et al., 2019)。可能为部分

熔融后的残余组分。

## 4.2 尖晶石

尖晶石电子探针测试共 13 个点, 测试结果见表 3。高 Cr 尖晶石  $\text{Cr}^{\#}>0.6$ , 而高 Al 尖晶石  $\text{Cr}^{\#}<0.6$  (Zhou Meifu et al., 2014)。方辉橄榄岩尖晶石  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量在 24.24%~29.99% 之间,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的含量

表 2 西准噶尔达拉布特方辉橄榄岩中橄榄石  
微量稀土元素含量 ( $\times 10^{-6}$ )

Table 2 The characteristics of trace elements and REE content  
for olivine in harzburgite from Darbute of West Junggar ( $\times 10^{-6}$ )

样品	SE1-3	SE2-1	SE3-1	SE4-1	SE5-2	SE6-1	SE7-2	SE8-3
Sc	4.15	4.81	4.15	3.21	2.44	2.71	3.72	3.63
Li	1.39	1.72	1.77	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39
Be	0.00	0.07	0.07	0.00	0.00	0.38	0.22	0.11
B	26.40	15.90	16.30	12.70	18.00	19.20	16.50	14.60
V	3.26	2.98	3.78	2.10	0.82	0.55	2.29	2.20
Cr	125.00	56.10	87.80	72.20	20.30	4.49	34.80	53.50
Co	147.00	147.00	145.00	143.00	147.00	144.00	143.00	143.00
Ni	3243.00	3216.00	3155.00	3110.00	3199.00	3182.00	3129.00	3119.50
Cu	0.00	0.10	0.13	0.00	0.28	0.00	1.19	0.60
Zn	49.40	51.10	56.60	47.50	41.30	36.60	44.90	46.60
Ga	0.06	0.00	0.04	0.01	0.05	0.03	0.04	0.04
Ge	0.31	1.12	1.48	1.39	1.28	0.37	0.85	0.93
As	0.81	0.32	0.40	0.23	0.61	0.44	0.29	0.42
Rb	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.77	0.03
Y	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Zr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Nb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sn	0.21	0.10	0.06	0.09	0.00	0.03	0.07	0.08
Sb	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01
Cs	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
Ba	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02
La	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Ce	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nd	0.02	0.02	0.04	0.04	0.05	0.01	0.01	0.02
Sm	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.00	0.02
Eu	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
Gd	0.02	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01
Tb	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Dy	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01
Ho	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Er	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Tm	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Yb	0.00	0.07	0.02	0.01	0.02	0.02	0.05	0.03
Lu	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hf	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02
Ta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.05	0.02	0.02	0.00	0.04	0.03
Pb	0.00	0.02	0.02	0.05	0.01	0.02	0.00	0.03
Th	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
U	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01

40.55%~43.85%, 其  $\text{Cr}^{\#}$  值在 0.47~0.51, 为高 Al 尖晶石, 与 Kizildag 方辉橄榄岩中尖晶石  $\text{Cr}^{\#}$  值 0.45~0.51 相似 (Chen Chen et al., 2018)。 $\text{MgO}$  含量 12.16%~13.14%,  $\text{FeO}$  含量 15.82%~21.52%,  $\text{Mg}^{\#}$  值 55%~58%。方辉橄榄岩尖晶石  $\text{Fe}^{3+ \#}$  较低 < 2.43, 可能代表部分熔融导致的  $\text{Fe}^{3+}$  的流失 (Canil et al., 1994),  $\text{TiO}_2$  含量 0.01~0.04%, 在地幔橄榄岩范围内  $\text{TiO}_2<0.72\%$ ,  $\text{Fe}^{3+ \#}<10$  (Ghosh et al., 2012)。

## 4.3 单斜辉石

单斜辉石电子探针测试共 16 个点, 测试结果见表 4。 $\text{MgO}$  含量 16.05%~20.12%, 平均 16.97%,  $\text{FeO}$  在 1.69%~3.43%,  $\text{Mg}^{\#}$  值为 90.74~94.27 与 Kizildag 初始俯冲地幔橄榄岩单斜辉石  $\text{Mg}^{\#}$  值 92~94 相似 (Su Benxun et al., 2020)。 $\text{CaO}$  含量 17.21%~23.89%, 平均 22.62%;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  在 1.05%~1.24% 之间;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在 2.51%~3.92% 之间, 低于深海地幔橄榄岩,  $\text{TiO}_2$  含量 <0.03%, 与弧前地幔橄榄岩相似 (Pagé et al., 2008)。

## 5 矿物原位氧同位素特征

达拉布特方辉橄榄岩中矿物氧同位素 SIMS 测试共 38 个点, 其中橄榄石 16 个点, 单斜辉石 14 个点, 斜方辉石 8 个点, 氧同位素测试结果见表 5, 分别为: 橄榄石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{olivine}}$  值为 +5.1‰~+6.2‰, 平均值 +5.8‰; 单斜辉石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{cpx}}$  值为 +5.6‰~+6.9‰, 平均值 +6.2‰; 斜方辉石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{opx}}$  值为 +5.3‰~+5.7‰, 平均值 +5.5‰; 橄榄石和单斜辉石都整体高于正常地幔橄榄石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{O}_1}$  值  $5.18 \pm 0.28\text{‰}$  和单斜辉石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{cpx}}$  平均值 +5.69‰ (Mattey et al., 1994), 且具有较大的变化范围。而斜方辉石的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{opx}}$  值位于正常地幔范围内且相对均一。矿物间氧同位素分馏系数  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{cpx}-\text{olivine}}$  平均 +0.4‰、 $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{olivine}}$  平均 -0.3‰、 $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{cpx}}$  平均 -0.7‰, 显著区别于正常地幔  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{cpx}-\text{olivine}}$ 、 $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{olivine}}$  和  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{cpx}}$  分别平均为 0.4‰、0.5‰ 和 0.1‰ (Xu Yigang et al., 1996; Chazot et al., 1997)。

表3 西准噶尔达拉布特方辉橄榄岩中尖晶石主要元素特征(%)

Table 3 The characteristics of major elements of splines in harzburgite from Darbute of West Junggar(%)

样品号	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Na <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NiO	Total	Fe <sup>3+/#</sup>	Cr <sup>#</sup>	Mg <sup>#</sup>
SE18-2	13.05	27.90	0.00	0.00	0.01	0.02	16.33	0.21	0.01	42.62	0.01	0.08	100.25	0.10	0.51	58.77
SE1-3	12.97	26.59	0.00	0.00	0.00	0.01	16.86	0.26	0.00	41.43	0.00	0.12	98.24	2.43	0.51	57.82
SE2-1	12.70	28.33	0.01	0.00	0.00	0.01	16.94	0.25	0.00	42.43	0.00	0.11	100.78	0.00	0.50	57.20
SE2-2	12.96	28.98	0.00	0.00	0.00	0.01	16.13	0.20	0.02	41.00	0.00	0.13	99.43	0.00	0.49	58.87
SE3-1	13.01	29.04	0.02	0.00	0.00	0.03	16.23	0.26	0.00	42.12	0.00	0.11	100.80	0.00	0.49	58.84
SE4-1	13.09	28.35	0.02	0.00	0.00	0.03	16.63	0.24	0.00	42.85	0.00	0.15	101.35	0.01	0.51	58.38
SE5-2	13.05	29.19	0.00	0.00	0.00	0.03	15.83	0.22	0.02	41.11	0.03	0.09	99.58	0.00	0.49	59.51
SE6-1	13.12	29.99	0.00	0.00	0.00	0.04	16.42	0.26	0.00	40.73	0.00	0.15	100.71	0.00	0.48	58.76
SE7-2	12.33	26.62	0.02	0.01	0.00	0.03	16.06	0.28	0.04	43.75	0.01	0.09	99.22	0.00	0.53	57.78
SE8-2	12.52	27.26	0.01	0.01	0.00	0.01	16.94	0.20	0.01	43.59	0.00	0.10	100.66	0.00	0.52	56.85
SE8-3	12.64	27.70	0.01	0.00	0.00	0.01	16.69	0.25	0.03	42.41	0.00	0.06	99.81	0.09	0.51	57.45
SE9-1	12.26	26.82	0.02	0.00	0.01	0.02	17.48	0.27	0.03	43.85	0.02	0.10	100.88	0.10	0.52	55.56
SE10-1	12.21	27.37	0.02	0.00	0.00	0.01	17.44	0.30	0.00	42.94	0.00	0.08	100.37	0.00	0.51	55.53

注:Mg<sup>#</sup>=Mg/(Mg+Fe), Cr<sup>#</sup>=Cr/(Cr+Al), Fe<sup>3+/#</sup>=Fe<sup>3+</sup>/(Al+Cr+Fe<sup>3+</sup>)×100

表4 西准噶尔达拉布特方辉橄榄岩单斜辉石电子探针分析结果(%)

Table 4 The characteristics of major elements of clinopyroxenes in harzburgite from Darbute of West Junggar(%)

样品号	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Na <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	Total	Mg <sup>#</sup>
SE18-1	16.53	3.03	52.06	0.01	23.89	0	1.99	0.08	0.05	1.1	0.07	98.81	93.68
SE18-2	16.55	3.1	51.86	0.01	23.74	0.01	1.79	0.05	0.08	1.11	0.05	98.35	94.27
SE18-3	16.88	3.04	52.32	0	23.55	0.02	1.99	0.11	0.04	1.16	0	99.1	93.79
SE5-1	16.64	3.01	52.96	0.01	23.16	0.02	1.97	0.08	0.05	1.09	0.03	99.01	93.78
SE5-2	16.46	3.03	52.71	0	23.8	0.01	1.89	0.05	0.02	1.05	0.08	99.1	93.95
SE5-3	16.63	2.85	52.3	0	23.66	0.03	1.69	0.07	0.03	1.11	0.02	98.39	94.61
SE1-1	16.05	3.25	53.89	0	23.49	0.02	2.05	0.08	0.09	1.2	0.05	100.17	93.31
SE2-2	16.39	2.99	55.91	0.02	23.1	0.02	2.2	0.06	0.14	1.11	0	101.94	93
SE3-1	20.12	2.86	53.07	0.01	18.43	0.03	3.18	0.11	0.04	1.09	0.1	99.03	91.85
SE4-1	16.62	3.27	53.36	0.01	22.79	0.02	2.48	0.14	0.08	1.24	0.05	100.05	92.27
SE5-2	17.9	2.56	52.34	0.01	21.83	0	2.39	0.09	0.02	1.1	0.08	98.31	93.04
SE6-3	18.82	2.51	45.14	0.08	17.21	0.01	3.43	0.15	0.09	1.13	0.1	88.67	90.74
SE7-1	16.63	2.75	55.58	0	23.18	0.01	2.17	0.09	0.04	1.09	0.09	101.62	93.18
SE8-1	16.7	2.97	53.97	0	22.89	0.01	2.19	0.07	0.02	1.15	0.01	100	93.14
SE9-1	16.46	2.72	53.79	0.02	23.53	0.02	2.03	0.07	0.07	1.11	0.03	99.86	93.52
SE10-2	16.11	2.74	54.12	0	23.61	0	2.05	0.09	0.05	1.06	0.03	99.86	93.34

## 6 地幔橄榄岩成因特征

### 6.1 部分熔融过程及特征

橄榄石中Ni、Co和Mn不受变质作用的影响,因此,Ni/Co和Ni/Mn值可用于区分地幔部分熔融和岩浆结晶分异(Wang Jing et al., 2021)。熔融残留的橄榄石中Ni/Co与Ni/Mn值,大于硅酸盐地球(BSE)Ni/Co值20,Ni/Mn值2(McDonough et al., 1995),并与早期亏损地幔的研究报告的数值一致(Sobolev et al., 2007),而岩浆分离结晶的橄榄石显示较低的Ni/Co和Ni/Mn值(分别<20和<2)。达拉布特地幔橄榄岩中橄榄石Ni/Co值为21~22,Ni/Mn值为3.0~7.8,大于硅酸盐地球Ni/Co与Ni/Mn

值,呈熔融残余特征。此外,样品中不相容元素V含量 $0.55\times10^{-6}\sim3.26\times10^{-6}$ 、Ca含量 $<264\times10^{-6}$ 相对正常地幔橄榄石V含量 $12\times10^{-6}\sim76\times10^{-6}$ 、Ca含量 $785\times10^{-6}\sim1284\times10^{-6}$ 更低(Witt-Eickschen and O'Neill, 2005),代表部分熔融后亏损的残余组分。

随熔融程度逐步提高,单斜辉石率先熔融消耗,因此地幔橄榄岩中单斜辉石的含量可作为部分熔融程度的指标(Dick et al., 1984a)。岩石中单斜辉石含量与尖晶石的形态变化随岩石部分熔融程度变化而改变,部分熔融程度由低到高的过程中尖晶石由半自形、细粒(二辉橄榄岩体)→他形、粗粒(含单斜辉石方辉橄榄岩)→他形、蠕虫状(方辉橄榄岩),而单斜辉石含量逐渐减少(Leblanc, 1980;赵斌等,

表 5 西准噶尔达拉布特方辉橄榄岩单斜辉石、橄榄石、斜方辉石氧同位素

Table 5 Oxygen isotope composition of clinopyroxenes, olivine, orthopyroxenes in harzburgites from Darbute of West Junggar

样品	点号	$\delta^{18}\text{O}$ (Cpx)	点号	$\delta^{18}\text{O}$ (Ol)	点号	$\delta^{18}\text{O}$ (Opx)
SE1-3	1	6.321277	1	5.494458	1	5.440359
SE1-3	2	6.983556	2	5.118935	2	5.608921
SE1-3	3	5.873941	3	5.860506		
SE2-1	4	6.555169	4	6.242513	3	5.675747
SE2-1	5	6.612021	5	5.886938	4	5.580993
SE2-1	6	4.171866	6	6.160726		
SE2-1			7	6.284903		
SE3-1	7	6.307812	8	5.779218	5	5.679238
SE3-1	8	6.346213	9	5.531861	6	5.591965
SE3-1	9	6.608531	10-1	5.757275		
SE3-1	10	5.920819	10-2	5.693940		
SE3-1			11	6.127313		
SE4-1	11	5.929297	12-1	5.732340	7	5.795436
SE4-1	12	6.271656	12-2	5.598188	8	5.344608
SE4-1	13	5.941723	13	5.811135		
SE4-1	14	5.662989	14	5.781213		

2020)。本文方辉橄榄岩中尖晶石以蠕虫状和他形

的单斜辉石共生(图 4a,d,f), 单斜辉石含量<3%以副矿物产出。指示了方辉橄榄岩和纯橄岩都经历过较高程度的部分熔融作用。

由于 Cr 和 Al 在部分熔融过程具有不同的相容性, Cr 是相容元素, 而 Al 不相容(Dick et al., 1984b)。本文方辉橄榄岩尖晶石的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量随部分熔融程度升高的趋势而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量下降, 呈负相关关系如(图 8c), 代表方辉橄榄岩受部分熔融的影响。尖晶石中 Cr、Al 较大的变化反应用  $\text{Cr}^\#$  值 100  $\text{Cr}^\# / (\text{Cr} + \text{Al})$  表现。随着寄主岩石部分熔融程度的增加,  $\text{Cr}^\#$  值也随之增加, 因此  $\text{Cr}^\#$  值被用来指示地幔亏损程度(鲍佩声等, 1999)。根据 Hellebrand 等(2001)提出  $\text{Cr}^\# < 0.6$  尖晶石部分熔融程度计算公式:  $F = 10 \times \ln(\text{Cr}^\#) + 24$ , F 代表部分熔融程度,  $\text{Cr}^\#$  值为铬尖晶石中  $\text{Cr} / (\text{Cr} + \text{Al})$ 。带入达拉布特方辉橄榄岩尖晶石的  $\text{Cr}^\#$  值可得到方辉橄榄岩部分熔融程度 16%~17%。在尖晶石  $\text{Mg}^\# - \text{Cr}^\#$  图解与  $\text{Cr}^\# - \text{TiO}_2$  图解中方辉橄榄岩的部分熔融程度大致

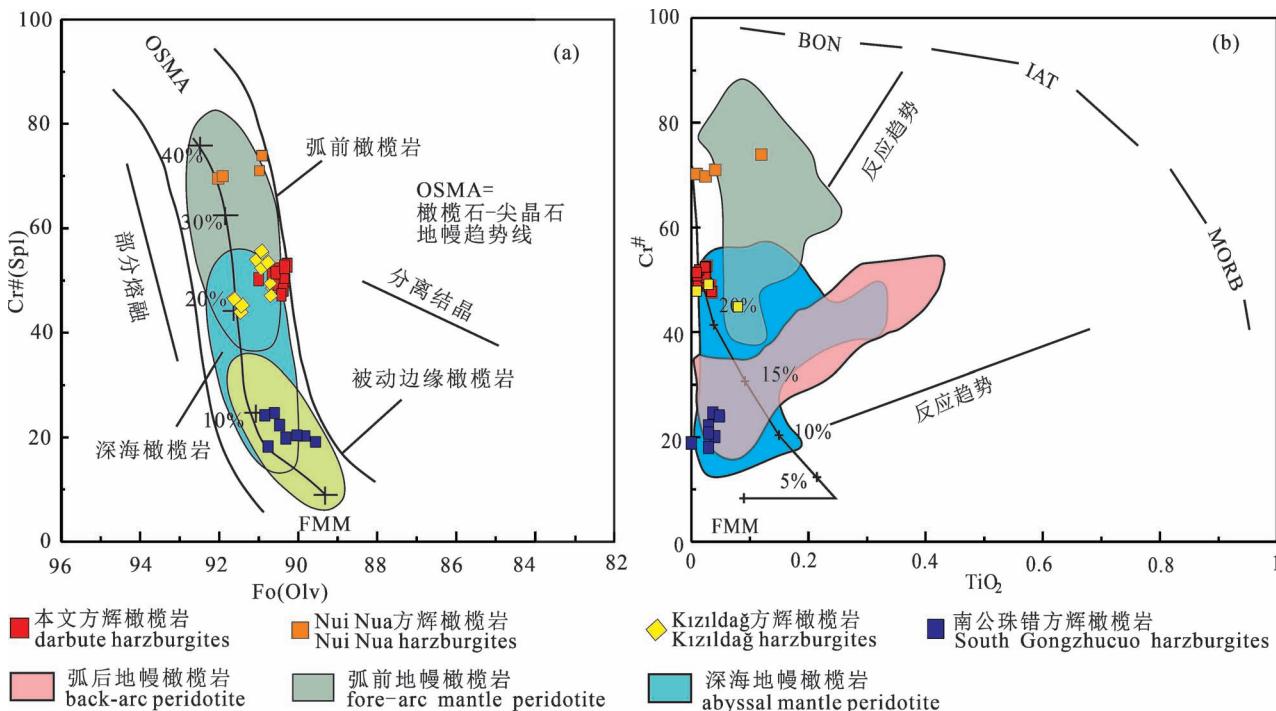


图 6 西准噶尔达拉布特方辉橄榄岩(a)尖晶石  $\text{Cr}^\# - \text{Olivine}$  Fo 图解与(b)尖晶石  $\text{Cr}^\# - \text{TiO}_2$  图解

Fig. 6 Illustration of (a) spinel  $\text{Cr}^\# - \text{olivine}$  Fo and (b) spinel  $\text{Cr}^\# - \text{TiO}_2$  in harzburgites from Darbute of West Junggar

深海地幔橄榄岩(ABP)区域据文献(Dick et al., 1984a);弧前地幔橄榄岩(FAP)及被动大陆边缘区域来自(Pearce et al., 2000);橄榄石—尖晶石地幔序列(OSMA)区域来自(Arai, 1994);弧后地幔橄榄岩区域来自(Lian Dongyang et al., 2016);Kizildag 方辉橄榄岩数据来自(Chen Chen et al., 2018);南公珠错方辉橄榄岩来自(张利等,2016);Nui Nua 方辉橄榄岩来自(Ngo et al., 2016)abyssal mantle peridotite region according to (Dick et al., 1984a); fore-arc mantle peridotites and the passive continental margin from (Pearce et al., 2000); The mantle olivine array (OSMA) is from (Arai, 1994); Back-arc mantle peridotite region according to (Lian Dongyang et al., 2016); Kizildag harzburgites data from (Chen Chen et al., 2018); South Gongzhucuo harzburgites from (Zhag Li et al., 2016&); Nui Nua harzburgites from (Ngo et al., 2016)

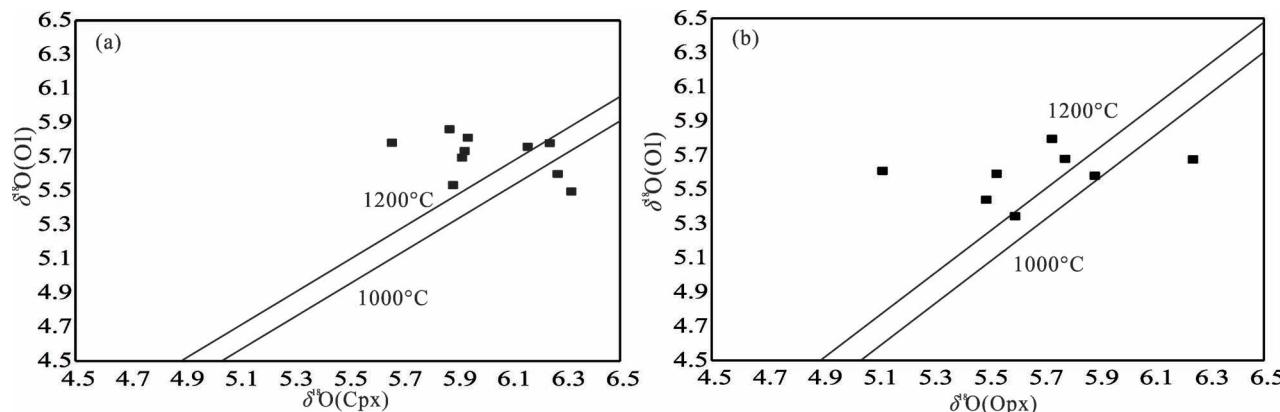


图 7 西准噶尔达拉布特方辉橄榄岩中橄榄石和辉石氧同位素组成(1000℃与1200℃的平衡分馏线来自 Chiba et al., 1989)

Fig. 7 Oxygen isotopic composition in olivine and pyroxenes in harzburgites for Darbute from West Junggar (the equilibrium fractionation lines at 1000°C and 1200°C are from Chiba et al., 1989)

20% (图 8a)。此外,橄榄石的 Fo 值和尖晶石中 Cr<sup>#</sup> 值 (Cr/(Cr+Al)) 的组成关系可以被用于表征岩浆源区的亏损程度及不同构造背景下部分熔融的差异 (Arai et al., 1998)。本文中方辉橄榄岩尖晶石 Cr<sup>#</sup>— 橄榄石 Fo 图解与 Cr<sup>#</sup>— TiO<sub>2</sub> 图解中显示具有较高的部分熔融程度>20%, 代表了部分熔融后亏损的残余组分 (图 6a、b)。

## 6.2 矿物氧同位素特征对交代熔流体的约束

岩石和矿物的氧同位素组成可有效限制岩石成因条件、机制、岩浆源和任何可能的流体—围岩相互作用 (Liu Chuanzhou et al., 2014)。地壳中不同组分的氧同位素具有较大差异, 蚀变洋壳  $\delta^{18}\text{O}$  值为 0 ~ +12‰、碎屑沉积物  $\delta^{18}\text{O}$  值为 +12‰ ~ +20‰、碳酸盐和硅酸盐中远洋沉积物  $\delta^{18}\text{O}$  值为 +20‰ ~ 25‰ (Eiler et al., 1998)。相对于近地表低温环境下水—岩反应所造成的岩石大范围  $\delta^{18}\text{O}$  变化, 上地幔岩石的  $\delta^{18}\text{O}$  具有相对均一的值, 正常地幔的总体  $\delta^{18}\text{O}$  为  $+5.5 \pm 0.4\text{\textperthousand}$  (Mattey et al., 1994)。正常地幔中不同矿物的氧同位素被很好的限制在特定范围内, 其中橄榄石  $5.18 \pm 0.28\text{\textperthousand}$ , 在 +4.8‰ ~ +5.5‰ 之间; 单斜辉石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{cpx}}$  值 +5.4‰ ~ +6.1‰, 平均 +5.69‰; 斜方辉石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{cpx}}$  范围内 +5.25‰ ~ +5.9‰, 平均 +5.57‰ (Mattey et al., 1994; Chazot et al., 1997)。辉石与橄榄石相比具有较高  $\delta^{18}\text{O}$  值, 矿物之间的氧同位素分馏也十分有限:  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{cpx}-\text{olivine}}$ 、 $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{olivine}}$  和  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{cpx}}$  分别平均为 0.4‰、0.5‰ 和 0.1‰ (Xu Yigang et al., 1996; Chazot et al., 1997)。地幔岩石或原始幔源岩浆中  $\delta^{18}\text{O}$  偏离

正常地幔  $\delta^{18}\text{O}$  值  $5.5 \pm 0.4\text{\textperthousand}$  范围或是矿物之间氧同位素的不平衡的现象都被认为是受到流体、熔体交代作用的影响, 其形成或演化过程受到外来组分的参与或改造。因此, 地幔橄榄岩的氧同位素组成可以很好地示踪上地幔发生的许多地质过程, 是指示其原岩或来源的敏感指标 (张宏福等, 2008)。达拉布特方辉橄榄岩中各矿物的氧同位素值分别为: 橄榄石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{olivine}}$  值 +5.1‰ ~ +6.2‰, 平均 +5.8‰; 单斜辉石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{cpx}}$  值 +5.6‰ ~ +6.9‰, 平均 +6.2‰; 而斜方辉石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}}$  值 +5.3‰ ~ +5.7‰, 平均 +5.5‰, 在正常地幔的斜方辉石  $\delta^{18}\text{O}_{\text{cpx}}$  范围内 +5.25‰ ~ +5.9‰, 平均 +5.57‰ (Mattey et al., 1994)。橄榄石与单斜辉石整体高于正常地幔值且具有较大的变化范围, 而斜方辉石的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}}$  值位于正常地幔范围内且相对均一。 $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{olivine}}$  平均 -0.3‰,  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{cpx}}$  平均 -0.7‰, 显著区别于正常地幔  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{olivine}}$  和  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{cpx}}$  的平均值分别为 0.5‰ 和 0.1‰ (Xu Yigang et al., 1996; Chazot et al., 1997), 表现出矿物之间氧同位素不平衡 (图 7a、b)。

鉴于达拉布特地幔橄榄岩普遍蛇纹石化, 在讨论橄榄石微量元素特征以及矿物氧同位素特征所代表的地质背景时需要甄别矿物中元素与同位素变化是地幔内熔流体作用还是近地表低温热液蚀变导致。橄榄石在水溶液中比辉石具有更高的溶解度, 其反应速率比辉石更快 (李静超等, 2019)。我们通过橄榄石的主微量元素特征探讨蛇纹石化对样品中矿物的

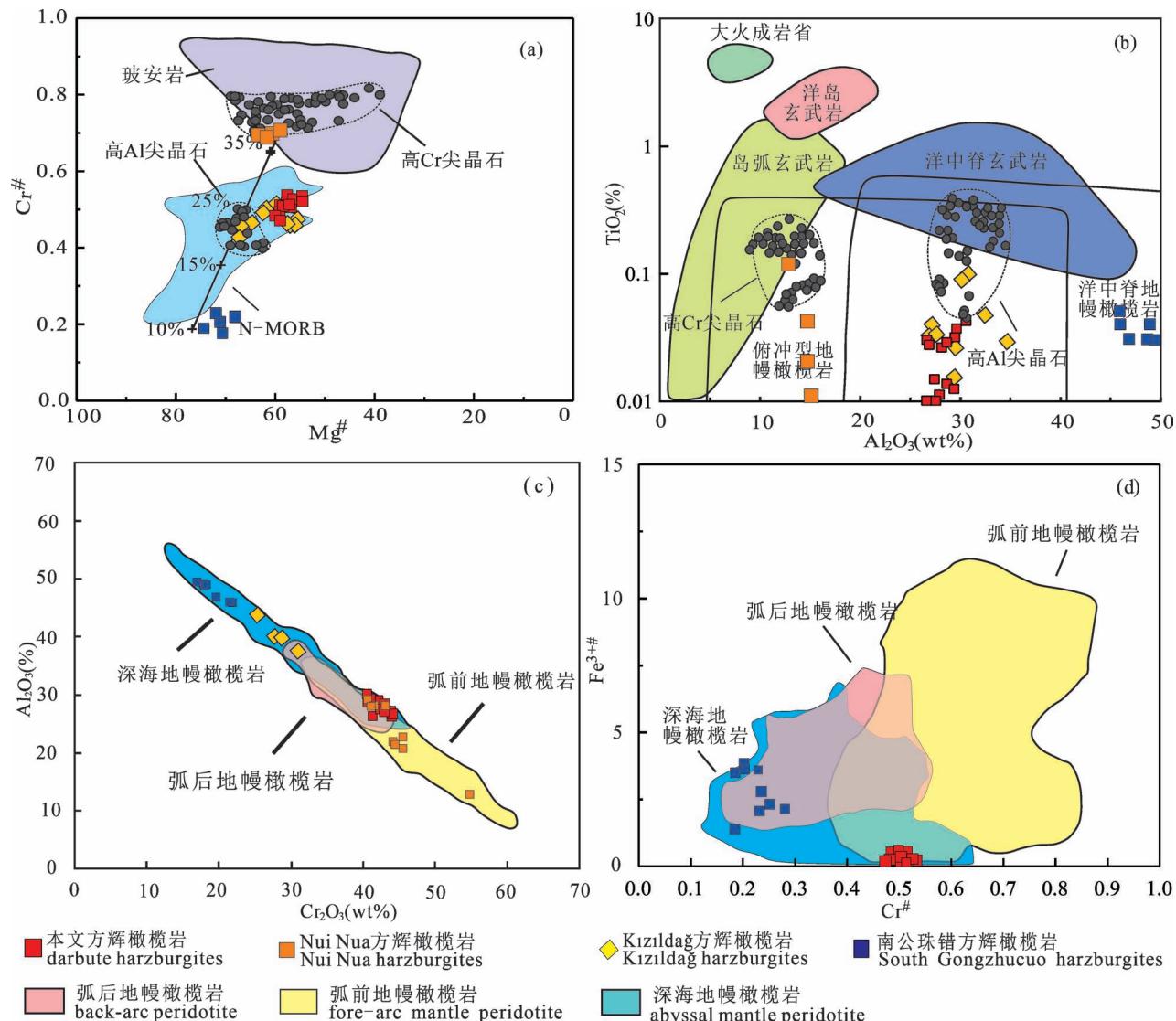


图 8 西准噶尔达拉布特方辉橄榄岩中尖晶石图解(图 a 据 Chen Chen et al. , 2018; 图 b 据 Kamenetsky et al. , 2001; 图 c,d 据 Lian Dongyang et al. , 2016)

Fig. 8 Illustration of spinel in harzburgites from Darbute of West Junggar (Fig. a according to Chen Chen et al. , 2018;

Fig. b according to Kamenetsky et al. , 2001; Fig. c, d according to Lian Dongyang et al. , 2016)

高 Cr 与高 Al 尖晶石数据来自(Zhou Meifu et al. , 2014); Kızıldağ 方辉橄榄岩数据来自(Chen Chen et al. , 2018); 南公珠错方辉橄榄岩来自(张利等,2016); Nui Nua 方辉橄榄岩来自(Ngo et al. , 2016)

High Cr and high Al spinel data from (Zhou Meifu et al. , 2014); Kızıldağ harzburgites data from (Chen Chen et al. , 2018); Nan Gongzhucuo harzburgites from (Zhang Li et al. , 2016&); Nui Nua harzburgites from (Ngo et al. , 2016)

影响。橄榄石的蛇纹石化会导致主量成分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  上升而  $\text{NiO}$  下降,微量元素中  $\text{Sr}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Sb}$  上升而  $\text{Li}$ 、 $\text{Cs}$  下降(黄瑞芳等,2013),蚀变的橄榄石中  $\text{Li}$  含量  $0.24 \times 10^{-6} \sim 0.36 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Cr}$  含量  $184 \times 10^{-6} \sim 388 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Ti}$  含量  $10.1 \times 10^{-6} \sim 46.0 \times 10^{-6}$ (Su Benxun et al. , 2019)。本文方辉橄榄岩样品中并未观察到相似变化。橄榄石微量元素以及矿物中的氧同位素特征代表地幔中熔流体作用的影响。

斜方辉石中的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Op}}$  位于正常地幔范围且相对均一,同位素组成没有明显的后期改造特征,这可能是方辉橄榄岩中分析测试的斜方辉石颗粒较大的  $>1 \text{ mm}$  粒径的原因,使得它在熔流体作用下具有更强的抗改造能力。因此斜方辉石的氧同位素组成代表方辉橄榄岩初始  $\delta^{18}\text{O}$  在正常地幔范围内。而橄榄石与单斜辉石中  $\delta^{18}\text{O}$  值显著地高于正常地幔范围,说明作为部分熔融残余的地幔橄榄岩在形成后

又受到高 $\delta^{18}\text{O}$ 熔流体的交代作用影响。与橄榄石相比,单斜辉石 $\delta^{18}\text{O}$ 具有变化范围更大且更高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。这与交代作用中橄榄石相对稳定,不易受后期熔/流体作用影响的特征相符(李佩等,2012; Tang Yanjie et al., 2014)。地幔中的氧同位素在高温条件下趋于均一化(Liu Chuanzhou et al., 2014)。由于橄榄石是受亚固相元素扩散作用最小的矿物,因此最有可能在交代后元素热扩散过程中保留前期熔/流体特征的影响(苏本勋等,2021)。橄榄石较单斜辉石具更低且稳定的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 说明在受高 $\delta^{18}\text{O}$ 熔流体交代后迅速冷却,缺乏在持续高温下扩散至均一的过程,这也解释了矿物以及矿物之间 $\delta^{18}\text{O}$ 的不平衡,暗示交代介质可能富水导致熔体迅速冷却。在橄榄石和辉石氧同位素组成图解中不同样品的橄榄石与辉石之间 $\delta^{18}\text{O}$ 投图相对离散,与1000°C与1200°C的平衡分馏线相偏离(Chiba et al., 1989)(图7a、b)。然而,方辉橄榄岩中橄榄石的球粒陨石标准化图解以及微量元素蛛网图解中都显示橄榄石强烈的亏损,没有表现出交代导致的LREE富集(图5)。这与橄榄石中高 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征不符。由于俯冲板块脱水形成的流体中微量元素含量比板块熔融形成的熔体小3个数量级(Liu Chuanzhou et al., 2014)。橄榄石中两种相互矛盾的特征可以被俯冲板块脱水形成的流体交代解释。

由俯冲带进入地幔中的俯冲板片是地幔中最显著的壳源物质来源,强烈地影响着地幔源区的物质组成。与俯冲相关的流体及脱水后熔融的熔体在地幔中发生的岩浆作用成为制约幔源岩石地化特征的重要原因。鉴于上地壳普遍较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,方辉橄榄岩矿物及矿物间的 $\delta^{18}\text{O}$ 异常,可能是俯冲地壳脱水形成的高 $\delta^{18}\text{O}$ 流体与亏损地幔橄榄岩交代形成。

## 7 达拉布特地幔橄榄岩构造背景

由于 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ti}^{4+}$ 在尖晶石中的扩散速率低而较少受后期冷却的亚固态再平衡作用影响,更多的保留形成初始时期的特征。因此,常被用来探究尖晶石形成的原生环境(Arai et al., 1998; 赵慧等,2019)。尖晶石 $\text{Cr}^{\#}$ 值变化不仅能代表岩石部分熔融程度还可以反映岩石形成环境(Dick et al., 1984b)。高Cr尖晶石与高Al尖晶石通常以 $\text{Cr}^{\#}=0.6$ 为界,而铬铁岩中尖晶石 $\text{Cr}^{\#}$ 值范围较窄,高Cr尖晶石 $\text{Cr}^{\#}$ 范围0.70~0.81;高Al尖晶石 $\text{Cr}^{\#}$ 范围39~50(Zhou Meifu et al., 2014)。高Cr尖晶石与岛弧环境下玻安质熔体具有亲缘性,而高Al尖晶石

表现为洋中脊似MORB型熔体的影响(Kamenetsky et al., 2001; Zhou Meifu et al., 2014)。本文中方辉橄榄岩尖晶石 $\text{Cr}^{\#}$ 值在0.47~0.51高于南公珠错洋中脊方辉橄榄岩 $\text{Cr}^{\#}$ 值0.18%~0.24%,低于Nui Nua弧前方辉橄榄岩 $\text{Cr}^{\#}$ 值0.70%~0.74%,位于高Cr与高Al尖晶石之间(图8a),与Kizildag方辉橄榄岩中尖晶石 $\text{Cr}^{\#}$ 值0.45~0.51相似,后者被认为形成于初始俯冲阶段(Chen Chen et al., 2018)。在 $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解中方辉橄榄岩尖晶石的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量26.62%~29.99%位于洋中脊地幔橄榄岩与俯冲型地幔橄榄岩之间,与代表俯冲初始阶段的Kizildag方辉橄榄岩相似(图8b)。在 $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解中,方辉橄榄岩全部落于深海橄榄岩与弧前橄榄岩的重合区域,靠近弧后地幔橄榄岩范围(图8c)。受俯冲物质源区影响的地幔橄榄岩由于 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等含量的加入往往具有较高的 $\text{Fe}^{3+}$ 含量与氧逸度。部分熔融过程中 $\text{Fe}^{3+}$ 优先进入熔体中,使残余地幔橄榄岩中 $\text{Fe}^{3+}$ 含量减少氧逸度下降(Canil et al., 1994)。尖晶石中 $\text{Fe}^{3+\#}$ 、 $\text{Cr}^{\#}$ 值能约束形成的大地构造背景(Lian Dongyang et al., 2016)。在 $\text{Fe}^{3+\#}-\text{Cr}^{\#}$ 图解中方辉橄榄岩尖晶石的 $\text{Fe}^{3+\#}$ 较低,大多落于深海地幔橄榄岩与弧前地幔橄榄岩重合区域(图8d)。

在橄榄石Fo—尖晶石 $\text{Cr}^{\#}$ 图解中,通过橄榄石Fo与尖晶石 $\text{Cr}^{\#}$ 判别方辉橄榄岩的形成背景,本文中方辉橄榄岩样品尖晶石 $\text{Cr}^{\#}$ 高于南公珠错深海地幔橄榄岩,与Kizildag地幔橄榄岩相似都落于弧前与深海地幔橄榄岩的交汇处(图6、8a)。尖晶石中 $\text{TiO}_2$ 的含量能反映熔体—岩石作用影响(Xiong Qing et al., 2017)。地幔橄榄岩与MORE熔体的交代作用能显著地提高尖晶石中 $\text{TiO}_2$ 的含量,而 $\text{Cr}^{\#}$ 值变化不大,而与玻安质熔体相互作用过程会导致 $\text{TiO}_2$ 与 $\text{Cr}^{\#}$ 值提高,因此 $\text{Cr}^{\#}$ 与 $\text{TiO}_2$ 的组合被用来指示岩石形成及演化的构造背景。在尖晶石 $\text{Cr}^{\#}-\text{TiO}_2$ 图解中,方辉橄榄岩尖晶石样品位于深海地幔橄榄岩、弧前地幔橄榄岩交汇范围(图6b)。

在单斜辉石 $\text{Mg}^{\#}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 图解中本文方辉橄榄岩中单斜辉石位于南公珠错深海地幔橄榄岩与Song Ma弧前地幔橄榄岩之间,与Kizildag初始俯冲阶段形成的地幔橄榄岩相似。

方辉橄榄岩中橄榄石与单斜辉石的高 $\delta^{18}\text{O}$ 特征指示了俯冲带环境的流体交代作用。代表了达拉布特地幔橄榄岩具有俯冲壳源物质参与。方辉橄榄岩中尖晶石和单斜辉石的判别图解都落于深海地幔

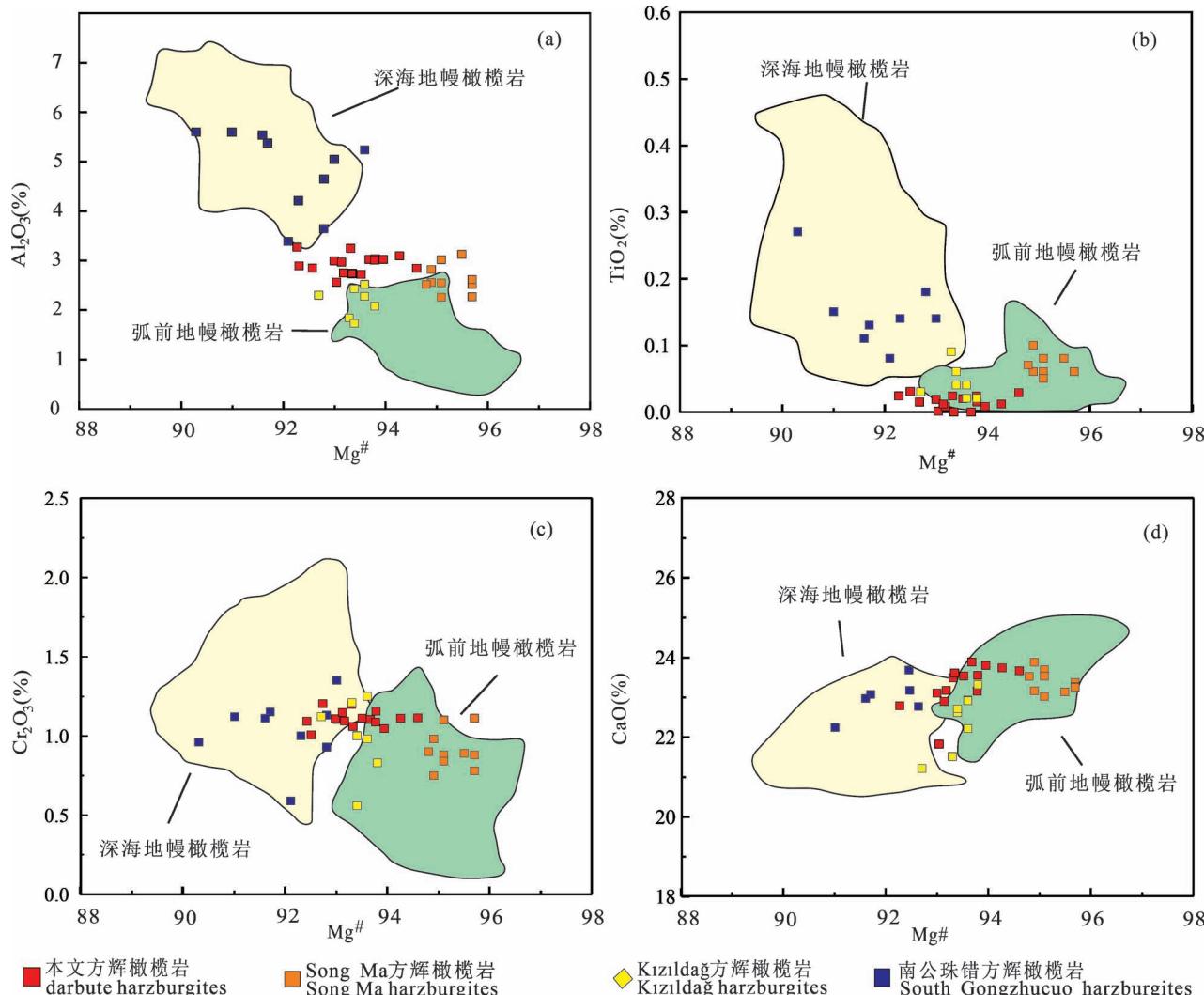


图 9 西准噶尔达拉布特方辉橄榄岩中单斜辉石图解(图据 Lian Dongyang et al. , 2016)

Fig. 9 Illustration of clinopyroxenes in harzburgites from Darbute (figure according to Lian Dongyang et al. , 2016)

深海地幔橄榄岩及弧前地幔橄榄岩据 ( Pagé et al. , 2008) ; 南公珠错方辉橄榄岩来自 ( 张利等, 2016) ; Song Ma 方辉橄榄岩 ( Ngo et al. , 2016) ; Kızıldağ 方辉橄榄岩数据来自 ( Su Benxun et al. , 2020)

abyssal mantle peridotite and pre-arc mantle peridotite according to ( Pagé et al. , 2008) ; Nan Gongzhucuo harzburgites from ( Zhang Li et al. , 2016&) ; Song Ma harzburgites ( Ngo et al. , 2016) ; Kızıldağ harzburgites data from ( Su Benxun et al. , 2020)

橄榄岩与弧前地幔橄榄岩之间 ( 图 6、图 8、图 9)。达拉布特地幔橄榄岩中方辉橄榄岩表现出由深海地幔橄榄岩向弧前地幔橄榄岩过度的趋势。这种过渡特征代表了 MORB 型岩浆作用以及聚敛型板块俯冲作用的共同影响。地幔橄榄岩中由深海至弧前特征的演化可以被俯冲初始阶段的板块活动所解释 ( Marchesi et al. , 2016; 杨华燊, 2020)。

结合达拉布特地幔橄榄岩矿物地球化学及其氧同位素特征,笔者认为达拉布特蛇绿岩形成于弧前初始俯冲环境。在板块俯冲初始阶段,由于板块断裂导致的压力释放导致软流圈物质减压熔融形成类

似 MORB 型岩浆。随着板块俯冲下沉,板块脱水熔融形成的熔流体与上涌的软流圈岩浆相互作用强烈地影响着上部地幔岩石的地化特征 ( Arculus et al. , 2015; Stern and Gerya, 2018)。俯冲板块流体交代使得地幔橄榄岩经历更高程度的部分熔融,并导致橄榄石与单斜辉石的高  $\delta^{18}\text{O}$  特征,形成兼具深海与弧前地幔橄榄岩特征的方辉橄榄岩。

## 8 结论

笔者结合矿物主微量及氧同位素测试分析对达拉布特地幔橄榄岩进行研究。主要结论如下:

(1) 达拉布特方辉橄榄岩中橄榄石 Ni/Co 值为 21~22, Ni/Mn 值为 3.0~7.8 具有部分熔融残余的特征, 此外, 橄榄石中不相容元素相对于正常地幔橄榄石亏损, 表明方辉橄榄岩为部分熔融的残余组分。方辉橄榄岩中尖晶石 Cr<sup>#</sup> 为 47~52、TiO<sub>2</sub> 含量 0.01%~0.04%, 橄榄石 Fo 为 90.34%~90.98% 在部分熔融图解中指示方辉橄榄岩经历>20% 的部分熔融。

(2) 方辉橄榄岩中橄榄石与单斜辉石中  $\delta^{18}\text{O}$  值整体高于正常地幔橄榄石和单斜辉石的  $\delta^{18}\text{O}$  范围, 矿物间氧同位素分馏系数  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{olivine}}$  平均 -0.3‰,  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx}-\text{cpx}}$  平均 -0.7‰ 显著区别于正常地幔表现为氧同位素不平衡, 结合橄榄石中 LREE 亏损特征, 认为方辉橄榄岩可能经历了俯冲壳源物质脱水形成的高  $\delta^{18}\text{O}$  流体的交代作用。

(3) 尖晶石与单斜辉石的主量元素具有介于弧前与深海地幔之间的过渡型特征, 与俯冲初始阶段形成的地幔橄榄岩相似。结合矿物地球化学及其氧同位素特征, 笔者认为达拉布特地幔橄榄岩为形成于弧前初始俯冲环境。板块俯冲导致弧前扩张形成新洋壳, 上涌的软流圈 MORB-like 熔体与俯冲壳源物质熔融形成的溶/流体与地幔橄榄岩相互作用, 形成达拉布特地幔岩橄榄岩。

**致谢:**本论文的研究得到东华理工大学杨东光老师对电子探针实验给予的帮助, 中国科学院地球化学研究所戴智慧老师对 LA-ICP-MS 实验给予的帮助, 杨亚琦老师与芮会超博士对本文进行了认真审阅, 并提出了许多宝贵的意见, 在此表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 鲍佩声, 肖序常, 王军, 李才, 胡克. 1999. 西藏中北部双湖地区蓝片岩带及其构造涵义. 地质学报, 73(4): 302~314.
- 陈石, 郭召杰, 漆家福, 邢向荣. 2016. 准噶尔盆地西北缘三期走滑构造及其油气意义. 石油与天然气地质, 37(3): 322~331.
- 陈石, 郭召杰. 2010. 达拉布特蛇绿岩带的时限和属性以及对西准噶尔晚古生代构造演化的讨论. 岩石学报, 26(8): 2336~2344.
- 陈宣华, 聂兰仕, 丁伟翠, 王学求, 王志宏, 叶宝莹. 2014. 西准噶尔走滑断裂系元素分布特征及其成矿意义. 岩石学报, 31(2): 71~87.
- 龚一鸣, 纵瑞文. 2015. 西准噶尔古生代地层区划及古地理演化. 地球科学, 40(3): 461~484.
- 辜平阳, 李永军, 张兵, 佟丽莉, 王军年. 2009. 西准噶尔达拉布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年. 岩石学报, 25(6):

1364~1372.

- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限. 岩石学报, 22(5): 1077~1086.
- 黄瑞芳, 孙卫东, 丁兴, 王玉荣. 2013. 基性和超基性岩蛇纹石化的机理及成矿潜力. 岩石学报, 29(12): 4336~434.
- 雷敏, 赵志丹, 侯青叶, 张宏飞, 许继峰, 陈岳龙, 张本仁, 刘希军. 2008. 新疆达拉布特蛇绿混杂岩带玄武岩地球化学特征: 古亚洲洋与特提斯洋的对比. 岩石学报, 24(4): 661~672.
- 李海, 李永军, 徐学义, 万阔, 赵强, 杨高学, 王祚鹏. 2021. 西准噶尔达拉布特蛇绿岩带萨尔托海岩体深部结构、构造特征: 地质与地球物理证据. 大地构造与成矿学, 45(4): 634~650.
- 李行, 巩志超, 董显扬, 郑金田. 1987. 新疆西准噶尔地区基性超基性岩生成地质背景及区域成矿特征. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 18(4): 3~140.
- 李静超, 赵涛, 刘治博, 林赟, 邵华胜, 袁国礼, 宋扬. 2019. 藏北昂吾地区超基性岩的蛇纹石化和磁铁矿化过程及影响因素. 岩石学报, 35(07): 2158~2172.
- 李佩, 夏群科, Deloule E. 2012. 山东蓬莱新生代岩石圈地幔的异常锂同位素组成: 橄榄岩包体的离子探针分析. 高校地质学报, 18(1): 62~73.
- 林伟, 孙萍, 薛振华, 张仲培. 2017. 西准噶尔达拉布特断裂带中段晚古生代构造分析. 岩石学报, 33(10): 2987~3001.
- 刘飞, 杨经绥, 牛晓露, 李观龙, 冯光英. 2021. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩: 记录了地幔柱影响的超慢速伸展和洋内俯冲过程. 岩石学报, 37(10): 2971~2994.
- 刘金霖. 2014. 华北克拉通东北缘与东北造山带陆下岩石圈地幔性质对比研究. 导师: 王建. 长春: 吉林大学博士学位论文: 1~144.
- 刘希军, 许继峰, 王树庆, 侯青叶, 白正华, 雷敏. 2009. 新疆西准噶尔达拉布特蛇绿岩 E-MORB 型镁铁质岩的地球化学、年代学及其地质意义. 岩石学报, 25(6): 1373~1389.
- 宋春晖, 王金荣, 黄华芳. 1996. 西准噶尔白碱滩北部太勒古拉组深水沉积研究. 兰州大学学报(自然科学版), 32(3): 132~137.
- 苏本勋, 刘霞, 陈晨, Robinson P T, 肖燕, 周美夫, 白洋, Uysal I, 张鹏飞. 2021. 蛇绿岩铬铁矿成矿新模型: 流体不混溶作用. 中国科学: 地球科学, 51(2): 250~260.
- 苏玉平, 唐红峰, 侯广顺, 刘从强. 2006. 新疆西准噶尔达拉布特构造带铝质 A 型花岗岩的地球化学研究. 地球化学, 35(1): 55~67.
- 田亚洲, 杨经绥, 杨华燊, 田云雷. 2019. 新疆萨尔托海铬铁矿中铂族矿物及硫化物特征. 地质学报, 93(10): 2639~2655.
- 田亚洲, 杨经绥. 2015a. 新疆西准噶尔达拉布特蛇绿岩地幔橄榄岩成因. 中国地质, 370(5): 205~229.
- 田亚洲. 2015b. 萨尔托海蛇绿岩中高铝型铬铁矿成因. 导师: 杨经绥. 北京: 中国地质科学院博士学位论文: 1~246.
- 王国灿, 张攀. 2019. 蛇绿混杂岩就位机制及其大地构造意义新解: 基于残余洋盆型蛇绿混杂岩构造解析的启示. 地球科学, 44(5): 1688~1704.
- 王浩, 李建峰, 宋茂双, 邵同宾, 王晓宁, 王思猛. 2020. 金鲁地幔橄榄岩地球化学特征及其对泽当蛇绿岩构造演化的指示. 大地构造与成矿学, 44(6): 1226~1238.
- 王静, 苏本勋, 唐国强, 高炳宇, 吴石头, 李娇. 2020. 橄榄石、单斜辉石和斜方辉石锂-氧同位素原位微区分析标准物质及其微量元素特征. 岩石学报, 36(4): 1274~1284.
- 温志刚, 赵文平, 刘团锋, 刘松柏. 2016. 新疆西准噶尔巴尔鲁克蛇绿岩形成时代及大地构造意义. 地质通报, 35(9): 1401~

- 1410.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社: 1~782.
- 徐新, 何国琦, 李华芹, 丁天府, 刘兴义, 梅绍武. 2006. 克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息. 中国地质, 33(3): 470~476.
- 杨高学. 2012. 西准噶尔古生代蛇绿混杂岩地质特征及其构造演化. 导师: 李永军. 西安: 长安大学博士学位论文: 1~152.
- 杨华燊. 2020. 新疆西准噶尔达拉布特地幔橄榄岩的岩石学特征及其构造意义. 导师: 田亚洲. 贵阳: 贵州大学硕士学位论文: 1~85.
- 张宏福, 汤艳杰, 赵新苗, 杨岳衡. 2008. 非传统同位素体系在地幔地球化学研究中的重要性及其前景. 地质前缘, 14(2): 37~57.
- 张利, 杨经绥, 刘飞, 连东洋, 黄健, 赵慧, 杨艳. 2016. 南公珠错地幔橄榄岩: 雅鲁藏布江缝合带西段一个典型的大洋地幔橄榄岩. 岩石学报, 32(12): 95~118.
- 赵斌, 龚小晗, 黄启帆, 史仁灯. 2020. 西藏雅鲁藏布江缝合带普兰地幔橄榄岩铬尖晶石成因研究. 岩石学报, 36(2): 455~468.
- 赵慧, 杨经绥, 刘飞, 熊发挥, 连东洋, 姚虎, 董玉飞. 2019. 雅鲁藏布江缝合带西段错不扎铬铁矿特征及形成环境. 中国地质, 46(1): 121~131.
- 朱宝清, 冯益民. 1994. 新疆西准噶尔板块构造及演化. 新疆地质, 12(02): 91~105.
- Arai S, Matsukage K. 1998. Petrology of a chromitite micropod from Hess Deep, equatorial Pacific: A comparison between abyssal and alpine-type podiform chromitites. *Lithos*, 43: 1~14.
- Arai S. 1994. Characterization of spinel peridotites by olivine—spinel compositional relationship: review and interpretation. *Chemical Geology*, 113(3~4): 191~204.
- Arculus R J, Ishizuka O, Bogus K A, Gurnis M, Hickey-Vargas R, Aljaldali M H, Bandini-Maeder A N, Barth A P, Brandl P A, Drab L, Guerra R M, Hamada M, Jiang Fuqing, Kanayama K, Kender S, Kusano Y, Li He, Loudin L C, Maffione M, Marsaglia K M, McCarthy A, Meffre S, Morris Antony, Neuhaus M, Savov I P, Sena C, Tepley F J, Land C, Yogodzinski G M, Zhang Zhaohui. 2015. A record of spontaneous subduction initiation in the Izu—Bonin—Mariana arc. *Nature Geoscience*, 8: 728~733.
- Bao Peisheng, Xiao Xuchang, Wang Jun, Li CAI, Hu Ke. 1999&. The Bluswist Belt in the Shuanghu Region, Central—Northern Tibet and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 73(4): 302~314.
- Birner S K, Warren J M, Cottrell E, Davis F A, Kelley K A, Falloon T J. 2017. Forearc peridotites from Tonga record heterogeneous oxidation of the mantle following subduction initiation. *Journal of Petrology*, 58(9): 1755~1780.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993#. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House: 1~782.
- Canil D, O'Neill H S C, Pearson D G, Rudnick R L, McDonough W F, Carswell D A. 1994. Ferric iron in peridotites and mantle oxidation states. *Earth and Planetary Science Letters*, 123(1~3): 205~220.
- Chazot G, Lowry D, Matthey D, Menzies D. 1997. Oxygen isotopic composition of hydrous and anhydrous mantle peridotites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(1): 161~169.
- Chen Chen, Su Benxun, Xiao Yan, Pang K N, Robinson P T, Uysal I, Lin Wei, Qin K Z, Avcı E, Kapsiotis A. 2018. Intermediate chromitite in Kizildag ophiolite (SE Turkey) formed during subduction initiation in Neo-Tethys. *Ore Geology Reviews*, 104: 88~100.
- Chen Shi, Guo Zhaojie, Georgia P P, Zhu Beibei. 2013. Late Paleozoic peperites in West Junggar, China, and how they constrain regional tectonic and palaeoenvironmental setting. *Gondwana Research*, 23(2): 666~681.
- Chen Shi, Guo Zhaojie, Qi Jiafu, Xing Xiongrong. 2016&. Three-stage strike-slip fault systems at northwestern margin of Junggar Basin and their implications for hydrocarbon exploration. *Oil & Gas Geology*, 37(3): 322~331.
- Chen Shi, Guo Zhaojie. 2010&. Time constraints, tectonic setting of Dalabute ophiolitic complex and its significance for Late Paleozoic tectonic evolution in West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2336~2344.
- Chen Xuanhua, Mie Lanshi, Ding Weichui, Wang Zhihong, Ye Yingying. 2015&. The relationship between strike-slip tectonic system and geochemical anomalies in the West Junggar, northwestern China and its implication for mineral exploration. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 371~387.
- Chiba H, Chacko T, Clayton R N, Goldsmith J R. 1989. Oxygen isotope fractionations involving diopside, forsterite, magnetite, and calcite: Application to geothermometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(11): 2985~2995.
- Choulet F, Faure M, Cluzel D, Chen Yan, Lin Wei, Wang Bo. 2012. From oblique accretion to transpression in the evolution of the Altai collage: new insights from West, Junggar, northwestern China. *Gondwana Research*, 21(2~3): 530~547.
- Coleman R G. 2014. The ophiolite concept evolves. *Elements*, 10(2): 82~84.
- Dick H J B, Bullen T. 1984b. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86: 54~76.
- Dick H J B, Fisher R L. 1984a. Mineralogic studies of the residues of mantle melting: abyssal and alpine-type peridotites. *Developments in Petrology*, 11(2): 295~308.
- Eiler J M, McInnes B, Valley J W, Graham C M, Stolper E M. 1998. Oxygen isotope evidence for slab-derived fluids in the sub-arc mantle. *Nature*, 393(6687): 777~781.
- Geng Hongyan, Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wenjiao, Xian Weisheng, Zhao Guochun, Zhang Lifei, Wong Kenny, Wu Fuyuan. 2009. Geochemical, Sr—Nd and zircon U—Pb—Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? *Chemical Geology*, 266(3~4): 364~389.
- Ghosh B, Morishita T, Bhatta K. 2012. Detrital chromian spinels from beach placers of Andaman Islands, India: A perspective view of petrological characteristics and variations of the Andaman ophiolite. *Island Arc*, 21(3): 188~201.
- Gu Pingyang, Li Yongjun, Zhang Bing, Dong Lili, Wang Junnian. 2009&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Darbut ophiolite, western Junggar, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1364~1372.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Chen Lihui, Zhang Lei. 2006&. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 107~1086.
- Hellebrand E, Snow J E, Dick H J B, Hofmann A W. 2001. Coupled

- major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites. *Nature*, 410(8629) : 677~681.
- Huang Ruifang, Sun Weidong, Ding Xing, Wang Yurong. 2013&. Mechanism for serpentinization of mafic and ultramafic rocks and the potential of mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12) : 4336~4348.
- Jean M M, Shervais J W. 2017. The distribution of fluid mobile and other incompatible trace elements in orthopyroxene from mantle wedge peridotites. *Chemical Geology*, 457: 118~130.
- Jahn B, Capdevila R, Liu Dunyi, Vernon A and Badarch G. 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor - UlaanBaatar, Mongolia: geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5) : 629~653.
- Kamenetsky V S, Crawford A J, Meffre S. 2001. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: An empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *Journal of Petrology*, 42(4) : 655~671.
- Leblanc M. 1980. Chromite growth, dissolution and deformation from a morphological view point: SEM investigations. *Mineralium Deposita*, 15(2) : 201~210.
- Lei Min, Zhao Zhidan, Hou Qingye, Zhang Hongfei, Xu Jifeng, Chen Yuelong, Zhang Benren, Liu Xijun. 2008&. Geochemical and Sr—Nd—Pb isotopic characteristics of the Dulabute ophiolite, Xinjiang: comparison between the Paleo Asian ocean and the Tethyan mantle domains. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4) : 661~672.
- Li Hai, Li Yongjun, Xu Xueyi, Wan Fen, Zhao Qiang, Yang Gaoxue, Wang Zuopeng. 2021&. Deep structure and tectonic of Sartohay ophiolite in West Junggar, Xinjiang: New geological and geophysical evidence. *Geotectonica et Metallogenesis*, 45(4) : 634~650.
- Li Hang, Gong Zhichao, Dong Xianyang, Zheng Jintian. 1987&. On the geological setting of basic and ultrabasic rocks and the characteristics of regional metallization (Mainly chromite) in the west Junggar of Xinjiang, China. *Bulletin of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources the Chinese academy of geological sciences*, 18 (4) : 3~140.
- Li Jingchao, Zhao Tao, Liu Zhibo, Lin Yun, Shao Huasheng, Yuan Guoli, Song Yang. 2019&. The processes and influencing factors of serpentinization and associated magnetite mineralization of ultramafic rocks from Angwu area, North Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 35 (7) : 2158~2172.
- Li Pei, Xia Qunke, Deloule E. 2012&. Abnormal Lithium isotope composition of Cenozoic Lithospheric Mantle Beneath Bengtai, Shandong Province: The ion Probe Analysis of Peridotite Xenoliths. *Geological Journal of China Universities*, 18(1) : 62~73.
- Li Xianhua, Long Wengguo, Li Qiuli, Liu Yu, Zheng Yongfei, Yang Yuecheng, Chamberlain K R, Wan Defang, Guo Cunhua, Wang Xuance, Tao Hua. 2010. Penglai zircon megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf—O isotopes and U-Pb age. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(2) : 117~134.
- Lian Dongyang, Yang Jingsui, Robinson P T, Liu Fei, Xiong Fahui, Zhang Lan, Gao Jian, Wu Weiwei. 2016. Tectonic evolution of the Western Yarlung Zangbo ophiolitic belt, Tibet: implications from the petrology, mineralogy, and geochemistry of the peridotites. *The Journal of Geology*, 124(3) : 353~376.
- Lin Wei, Sun Ping, Xue Zhenhua, Zhang Zhongpei. 2017&. Structural analysis of Late Paleozoic deformation of central Darbute fault zone, West Junggar, China. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (10) : 2987 ~3001.
- Liu Bo, Han Baofu, Chen Jiafu, Ren Rong, Zheng Bo, Wang Zengzhen, Feng Lixia. 2017. Closure time of the Junggar—Balkhash ocean: constraints from late Paleozoic volcanosedimentary sequences in the Barleik mountains, West Junggar, NW China. *Tectonics*, 36: 2823 ~2845.
- Liu Chuanzhou, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, Li Qiuli, Sun Weidong, Ji Weiqiang. 2014. A ‘hidden’  $^{18}\text{O}$ -enriched reservoir in the sub-arc mantle. *Scientific Reports*, 4(1) : 4232.
- Liu Fei, Yang Jingsui, Niu Xiaolu, Li Guanlong, Feng Guangying. 2021&. Early Cretaceous Dongbo ophiolite in the western part of the Yarlung Zangbo Suture Zone, Tibet: Constraints on multi-stages from ultra-slow spreading influenced by a mantle plume to intra-oceanic subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 37 (10) : 2971 ~2994.
- Liu Jinlin. 2014&. Comparative Study on Nature of Subcontinental Lithosphere Mantle in Northeastern Margin of the North China Craton and Northeast Orogenic Belt. Instructor: Wang Jian. Changchun: Jilin University Doctoral Dissertation: 1~144.
- Liu Xijun, Xu Jifeng, Wang Shuqing, Hou Qingye, Bai Zhenghua, Lei Min. 2009&. Geochemistry and dating of E-MORB type rocks from Darbute ophiolite in West Junggar, Xinjiang and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6) : 1373~1389.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Günther D, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1) : 34~43.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, Gao Changgui, Gao Shan, Xu Juan, Chen Haihong. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15) : 1535~1546.
- Marchesi C, Garrido C J, Proenza J A, Hidas K, Varas-Reus M I, Butjosa L, and Lewis J F. 2016. Geochemical record of subduction initiation in the sub-arc mantle. insights from the loma caribe peridotite (Dominican Republic). *Lithos*, 252~253: 1~15.
- Mattey D, Lowry D, Macpherson C. 1994. Oxygen isotope composition of mantle peridotite. *Earth and Planetary Science Letters*, 128(3~4) : 231~241.
- McDonough W F, Sun S S. 1995. "The composition of the Earth". *Chemical Geology*, 120(3~4) : 223~253.
- Ngo T X, Santosh M, Tran H T, Pham H T. 2016. Subduction initiation of Indochina and South China blocks: insight from the forearc ophiolitic peridotites of the Song Ma Suture Zone in Vietnam. *Geological Journal*, 51(3) : 421~442.
- Pagé P, Bédard J H, Schroetter J M, Tremblay A. 2008. Mantle petrology and mineralogy of the Thetford Mines Ophiolite Complex. *Lithos*, 100(1~4) : 255~292.
- Pearce J A, Barker P F, Edwards S J, Parkinson I J, Leat P T. 2000. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc—basin system, South Atlantic. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(1) : 36~53.
- Qiu Tian, ZhuYongfeng. 2017. The petrology and geochemistry of listwaenite in the Sartohay ophiolitic melange of West Junggar, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 91(1) : 30.
- Robinson P T, Trumbull R B, Schmitt A, Yang Jingsui, Li Jianwei,

- Zhou Meifu, Erzinger J, Dare S, Xiong Fahui. 2015. The origin and significance of crustal minerals in ophiolitic chromitites and peridotites. *Gondwana Research*, 27(2): 486~506.
- Rogkala A, Petrounias P, Tsikouras B, Giannakopoulou P P, Hatzipanagiotou K. 2019. Mineralogical evidence for partial melting and melt—rock interaction processes in the mantle peridotites of edessa ophiolite (North Greece). *Minerals*, 9(2): 120.
- Sobolev A V, Hofmann A W, Kuzmin D V, Yaxley G M, Arndt N T, Chung S L, Danyushevsky V, Elliot T, Frey F A, Garcia M O, Gurendo A A, Kamenetsky V S, Kerr A C, Krivolutskaya N A, Matvienko V V, Nikogosian I K, Rocholl A, Sigurdsson I A, Sushchanskaya N M, Teklay M. 2007. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. *Science*, 316 (5823): 412~417.
- Song Chunhui, Wang Jinrong, Huang Huafang. 1996&. Study of deep-water sediments of Tailegula Formation on the north of Baijianan, West of Junggar Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 32(3): 132~137.
- Su Benxun, Liu Xia, Chen Chen, Robinson P T, Xiao Yan, Zhou Meifu, Bai Yang, Uysal I, Zhang Pengfei. 2021&. A new model for chromitite formation in ophiolites: Fluid immiscibility. *Science China Earth Sciences*, 64(2): 220~230.
- Su Benxun, Robinson P T, Chen Chen, Xiao Yan, Melcher F, Bai Yang, Gu Xiaoyan, Uysal I, Lenaz D. 2020. The occurrence, origin, and fate of water in chromitites in ophiolites. *American Mineralogist*, 105(6): 894~903.
- Su Benxun, Zhou Meifu, Jing Jiejun, Robinson P T, Chen Chen, Xiao Yan, Liu Xia, Shi Rendeng, Lenaz D, Hu Yan. 2019. Distinctive melt activity and chromite mineralization in Luobusa and Purang ophiolites, southern Tibet: constraints from trace element compositions of chromite and olivine. *Science Bulletin*, 64(02): 108~121.
- Su Yuping, Tang Hongfu, Hou Guangshun, Liu Congqiang. 2006&. Geochemistry of aluminous A-type granites along Darabut tectonic belt in West Junggar, Xinjiang. *Geochimica*, 35(1): 55~67.
- Stern R J, Gerya T. 2018. Subduction initiation in nature and models: A review. *Tectonophysics*, 746: 173~198.
- Tang Guoqiang, Su Benxun, Li Qiuli, Xia Xiaoping, Jing Jiejun, Feng Lianjun, Martin L, Yang Qing, Li Xianhua. 2019. High-Mg<sup>#</sup> olivine, clinopyroxene and orthopyroxene reference materials for in situ oxygen isotope determination. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 43(4): 585~593.
- Tang Yanjie, Zhang Hongfu, Etienne Deloule, Su Benxun, Ying Jifeng, Santosh M, Xiao Yan. 2014. Abnormal lithium isotope composition from the ancient lithospheric mantle beneath the North China Craton. *Scientific Reports*, 4(1): 1~4.
- Tian Yazhou, Yang Jingsui, Yang Huashen, Tian Yunlei. 2019&. The characteristics of PGE and BMS in Sartohay chromitites, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 93(10): 2639~2655.
- Tian Yazhou, Yang Jingsui. 2015a&. The genesis of peridotite in Darbute ophiolite within West Junggar basin, Xinjiang. *Geology in China*, 42(5): 1379~1403.
- Tian Yazhou. 2015b&. Genesis of High-Al Chromitite of the Sartohay ophiolite, Xinjiang. Instructor: Yang Jingsui. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences Doctoral Dissertation; 1~246.
- Wang Guocan, Zhang Pan. 2019&. A new understanding on the emplacement of ophiolitic Mélanges and its tectonic significance: insights from the structural analysis of the remnant oceanic basin-type ophiolitic Mélange. *Earth Science*, 44(5): 1688~1704.
- Wang Hao, Li Jianfeng, Song Maoshuang, Shao Tongbin, Wang Xiaoning, Wang Simeng. 2020&. Geochemical characteristics of jinlu Mantle Peridotite and its Implications for Tectonic Evolution of Zedang Ophiolites. *Geotectonica et Metallogenesis*, 44(6): 1226~1238.
- Wang Jing, Su Benxun, Robinson P T, Xiao Yan, Bai Yang, Liu Xia, Sakai P A, Jing Jiejun, Chen Chen, Liang Zi, Bao Zhian. 2021. Trace elements in olivine: proxies for petrogenesis, mineralization and discrimination of mafic—ultramafic rocks. *Lithos*, 388~389: 106085.
- Wang Jing, Su Benxun, Tang Guoqiang, Gao Binyu, Wu Shitou and Li Jiao. 2020&. Olivine, clinopyroxene and orthopyroxene reference materials for Li and O isotope in-situ microanalyses and their trace element compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 36(4): 1274~1284.
- Wen Zhigang, Zhao Wenping, Liu Tuanfeng, Liu Songbai. 2016&. Formation age and geotectonic significance of Baerluke ophiolite in west Junggar, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 35(9): 1401~1410.
- Witt-Eickschen G, O’Neill H S C. 2005. The effect of temperature on the equilibrium distribution of trace elements between clinopyroxene, orthopyroxene, olivine and spinel in upper mantle peridotite. *Chemical Geology*, 221(1): 65~101.
- Woeilki D, Regelous M, Haase K M, Romer R H W, Beier C. 2018. Petrogenesis of boninitic lavas from the, troodos ophiolite, and comparison with Izu—Bonin—marianna, fore-arc crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 498: 203~214.
- Xiong Qing, Hadrien H, Griffin W L, Zheng Jianping, Satsukawa T, Pearson N J, Reilly Y O. 2017. High- and low-Cr chromitite and dunite in a Tibetan ophiolite: evolution from mature subduction system to incipient forearc in the Neo-Tethyan Ocean. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(6): 1~22.
- Xu Xin, He Guoqi, Li Huqing, Ding Tianfu, Liu Xingyi, Mei Shaowu. 2006&. Basic characteristics of the Karamay ophiolitic mélange, Xinjiang, and its zircon SHRIMP dating. *Geology in China*, 33(3): 470~475.
- Xu Yigang, Menzies M A, Matthey D P, Lowry D, Harte B, Hinton R W. 1996. The nature of the lithospheric mantle near the Tancheng—Lujiang fault, China: an integration of texture, chemistry and O-isotopes. *Chemical Geology*, 134(1~3): 67~81.
- Yang Gaoxue, Li Yongjun, Tong Lili, Wang Zuopeng, Duan Fenghao, Xu Qian, Li Hai. 2019. An overview of oceanic island basalts in accretionary complexes and seamounts accretion in the western Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 179: 385~398.
- Yang Gaoxue, Li Yongjun, Santosh M, Gu Pingyang, Yang Baokai, Zhang Bing, Wang Haibo, Zhong Xing, Tong Lili. 2012. A Neoproterozoic seamount in the Paleo Asian Ocean: evidence from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mayile ophiolitic mélange in West Junggar, NW China. *Lithos*, 140~141: 53~65.
- Yang Gaoxue, Li Yongjun, Xiao Wenjiao, Tong Lili. 2015. OIB-type rocks within West Junggar ophiolitic mélanges: Evidence for the accretion of seamounts. *Earth-Science Reviews*, 150: 477~496.
- Yang Gaoxue. 2012&. Geological characteristics and tectonic evolution of Paleozoic ophiolitic mélange in the West Junggar. Instructor: Li Yongjun. Xi'an: Chang'an University Doctoral Dissertation; 1~152.

- Yang Huashen. 2020&. Petrological Characteristics of the Darbute Peridotite in the Western Junggar, Xingjiang, and its Tectonic, Tian Yazhou, Master dissertation, Guiyang, Guizhou University: 1~85.
- Yang Jingsui, Dobrzhinetskaya L, Bai Wenji, Fang Qingsong, Robinson P T, Zhang Junfeng, Green H W. 2007. Diamond and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. *Geology*, 35 (10) : 875~87.
- Yang Jingsui, Wu Weiwei, Lian Dongyang, Rui Huichao. 2021. Peridotites, chromitites and diamonds in ophiolites. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(3) : 198~212.
- Yang Yaqi, Zhao Lei, Xu Qinjin, Zheng Rongguo, Zhang Jin. 2019b. Early Paleozoic tectonic evolution of the northern West Junggar (NW China): Congustrains from Early Cambrian—Middle Silurian felsic plutons of the Chagantaolegai ophiolitic mélange. *Lithos*, 350~351: 1~17.
- Yang Yaqi, Zhao Lei, Zheng Rongguo, Xu Qinjin. 2019a. Evolution of the early Paleozoic Hongguleleng—Balkybe Ocean: Evidence from the Hebkuesaier ophiolitic mélange in the northern West Junggar, NW China. *Lithos*, 324~325: 519~536.
- Zhang Hongfu, Tang Yanjie, Zhao XinMiao, Yang Yueheng. 2008&. Significance and prospective of non-traditional isotopic systems in mantle geochemistry. *Earth Science Frontier*, 14(2) : 37~57.
- Zhang Li, Yang Jingsui, Liu Fei, Lian Dongyang, Huang Jian, Zhao Hui, Yang Yan. 2016&. The South Gongzhuocuo peridotite massif: A Typical MOR type peridotite in the western Yarlung Zangbo suture zone. *Acta Petrologica Sinica*, 32(12) : 3649~367.
- Zhao Bin, Gong Xiaohan, Huang Qishuai, Shi Rendeng. 2020&. Genesis of chromian spinels in the Purang mantle peridotites of the Yarlung-Zangbo Suture Zone, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (02) : 455~468.
- Zhao Hui, Yang Jingsui, Liu Fei, Xiong Fahui, Lian Dongyang, Yao Hu, Dong Yufei. 2019&. Features of the Cuobuzha podiform chromitite along western Yarlung Zangbo suture zone in Tibet: Implications for its tectonic setting. *Geology in China*, 46(1) : 115 ~125.
- Zhou Meifu, Robinsona P T, Su Benxun, Gao Jianfeng, Li Jianwei, Yang Jingsui, Malpas J. 2014. Compositions of chromite, associated minerals, and parental magmas of podiform chromite deposits: The role of slab contamination of asthenospheric melts in suprasubduction zone environments. *Gondwana Research*, 26 (1) : 262~283.
- Zhu Qingmin, Zhu Yongfeng. 2021. Petrology and geochemistry of ultramafic and mafic rocks in the Late Silurian—Early Devonian darbut ophiolitic mélange of west Junggar (Northwestern China): implications for petrogenesis and tectonic evolution. *International Geology Review*, 1~25.
- Zhu Baoqing and Feng Yimin. 1994&. Plate tectonics and evolution in west Junggar of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 12 (2) : 91~105.

## Mantle peridotite in West Junggar Darbute——Pre-arc genetic evidences from mineral geochemistry and oxygen isotopic geology

QIAN Feng<sup>1)</sup>, TIAN Yazhou<sup>1)</sup>, WU Yong<sup>2)</sup>, YANG Jingsui<sup>3,4)</sup>

1) College of Resources and Environmental Engineering, Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang, 550025;

2) Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029;

3) School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023;

4) Center for Advanced Research on Mantle (CARMA), Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

**Objectives:** The Darbute ophiolites in the southwestern CAOB(Central Asia Orogenic Belt) are the products of the expansion, subduction, and closure of the ancient Asian ocean basin in the CAOB and record the historical formation and the tectonic evolution of the ocean basin. Scholars are yet to reach a consensus on the understanding of the tectonic background resulting in the formation of the Darbute ophiolites. To explore the tectonic evolution process represented by the ophiolite, this paper presents a new constraint on the genesis and tectonic setting of the Darbute mantle peridotite through comprehensive mineral geochemistry and the study of its oxygen isotope using the mantle peridotite in the Darbute ophiolite as the object of study.

**Methods:** The author conducted a comprehensive mineral geochemical and oxygen isotopic study of mantle peridotite in the Darbute ophiolite.

**Results:** The olivine Ni/Co values in the Darbute mantle peridotite are 21~22, with the Ni/Mn ratios being 3.0~7.8, which represent the residual components of partial melting. Furthermore, the incompatible elements in the peridotite are deficient relative to the normal mantle peridotite, which is an indication that the harzburgite is the residual components after partial melting. The spinel Cr<sup>#</sup> of 47~52, TiO<sub>2</sub> content of 0.01%~0.04%, and olivine

Fo of 90.34% ~ 90.98% suggest that the harzburgite experienced >20% partial melting. The olivine values of  $\delta^{18}\text{O}_{\text{olivine}} +5.1\text{\textperthousand} \sim +6.2\text{\textperthousand}$  and clinopyroxene  $\delta^{18}\text{O}_{\text{cpx}} +5.6\text{\textperthousand} \sim +6.9\text{\textperthousand}$  in the harzburgite, which vary extensively and are generally higher than the  $\delta^{18}\text{O}$  values of the olivine and the clinopyroxene in the normal mantle. The oxygen isotope fractionation coefficients between minerals  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx-olivine}}$  average  $-0.3\text{\textperthousand}$  and  $\Delta^{18}\text{O}_{\text{Opx-cpx}}$  average  $-0.7\text{\textperthousand}$ , differ significantly from the oxygen isotope fractionation coefficients in the normal mantle equilibrium and have obvious metasomatism characteristics. When combined with the characteristics of trace elements depleted in peridotite olivine, there is evidence to infer that peridotite may be affected by fluid metasomatism. Comparing the compositions of the spinel and the clinopyroxene in the mantle peridotite produced in different tectonic environments, the major elements in this paper which are the spinel and clinopyroxene have transitional characteristics between the fore-arc and abyssal mantle peridotite, similar to the mantle peridotite formed at the initial subduction stage.

**Conclusions:** Combining the mineral geochemistry and the oxygen isotope characteristics gives evidence to suggest that the Darbute mantle peridotite was formed in the initial subduction environment in the fore-arc region. The initial subduction of the plate leads to the dissemination of the fore-arc region to form a new oceanic crust, and the upwelling of asthenosphere material due to decompression melting to form MORB-like melts. With the subduction of the plate, the melting of the crustal source material results in the intrusion of the melted fluid into the mantle wedge, which enhances the partial melting of the depleted mantle significantly and leads to the formation of the refractory harzburgite. Furthermore, high  $\delta^{18}\text{O}$  fluids formed by the dehydration of the crustal sourced material during the subduction interacted with the mantle peridotites resulting in an unbalanced oxygen isotopic signature between the minerals. The Darbute peridotites were formed through the interaction between the peridotites and the MORB-like melting of the upwelling asthenosphere, the melt/fluid from subducted crustal material.

**Keywords:** peridotite; mineral geochemistry; oxygen isotope; subduction zone; west Junggar

**Acknowledgements:** This study was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41703036, 41720104009, 91955203)

**First author:** QIAN Feng, male, born in 1996, structural geology; Email: 1740551838@ qq. com

**Corresponding author:** TIAN Yazhou, male, born in 1987, Associate Professor, is mainly engaged in the research of mafic and ultramaifc rocks; Email: tianyazhou87@ 163. com

**Manuscript** received on: 2022-01-08; Accepted on: 2022-02-25; Network published on: 2022-03-20

**Doi:** 10. 16509/j. georeview. 2022. 03. 031

**Edited by:** LIU Zhiqiang

