

柴北缘超高压变质带沙柳河蛇绿岩型地幔橄榄岩及其意义*

张贵宾¹ 宋述光^{1**} 张立飞¹ 牛耀龄² 舒桂明¹

ZHANG GuiBin¹, SONG ShuGuang¹, ZHANG LiFei¹, NIU YaoLing² and SHU GuiMing¹

1. 教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. Department of Earth Sciences, University of Durham, Durham DH1 3LE, UK

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

2. Department of Earth Sciences, University of Durham, Durham DH1 3LE, UK

2005-05-12 收稿, 2005-06-18 改回.

Zhang GB, Song SG, Zhang LF, Niu YL and Shu GM. 2005. Ophiolite-type mantle peridotite from Shaliuhe, North Qaidam UHPM belt, NW China and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4):1049–1058

Abstract An ophiolite-type mantle peridotite from Shaliuhe section in Dulan UHP terrane, North Qaidam, a continent-type UHP metamorphic belt has been reported. The primary mineral assemblage is olivine + orthopyroxene + chromite. Two generations of olivines were identified from the harzburgites: the first generation (Ol^1) has the same compositions as modern abyssal peridotites and kink bands are well developed. The second generation (Ol^2) has Fo-content as high as 94 ~ 97 mol% and contains large quantity of small fluid inclusions, which is believed to be metamorphosed from the serpentinized Ol^1 . The relict orthopyroxenes are characterized by high-content of Al and Ca and compositionally consistent with abyssal peridotites. P-T estimates suggest that this peridotite body is a typical spinel-phase harzburgite. The country rock is banded kyanite-eclogite and its protolith is believed to be cumulate gabbro. These two rock types, together with co-existing eclogites resembling N-MORB and OIB geochemical characteristics, are composed of an oceanic ophiolite suite. All these features indicate that these harzburgites may represent the uppermost mantle peridotites of the basal part of the oceanic crust. The presence of the oceanic harzburgite in continental-type UHP belt reveals an integrated process of continental orogenic belt from oceanic lithospheric subduction to subsequent continental subduction and collision.

Key words Mantle harzburgite, Ophiolite, Continent-type UHPM belt, North Qaidam

摘 要 本文报道了柴北缘大陆型超高压变质带沙柳河地区发现的蛇绿岩型地幔橄榄岩,其原始矿物组合为橄榄石 + 斜方辉石 + 铬铁矿。方辉橄榄岩中识别出两个世代的橄榄石,第一世代橄榄石(Ol^1)残晶发育扭折带,化学成分与现代大洋地幔橄榄岩的橄榄石一致,第二世代橄榄石(Ol^2)Fo值高达94~97,其内部含有细小的流体包裹体,是第一世代橄榄石蛇纹石化后再次变质的产物。斜方辉石残晶的成分具有高Al和Ca的特征,与大洋地幔橄榄岩中斜方辉石的成分一致。温压条件的估算反映该橄榄岩体属于典型的尖晶石相方辉橄榄岩。其围岩是由堆晶辉长岩变质的条带状蓝晶石榴辉岩,二者构成了大洋蛇绿岩套的下部层位,并且与区内具有N-MORB和OIB性质的榴辉岩共生。这些特征表明该方辉橄榄岩应代表洋壳下伏地幔橄榄岩,从而揭示大陆造山带从早期的大洋俯冲消亡到大陆俯冲碰撞的完整过程。

关键词 地幔橄榄岩; 蛇绿岩; 大陆型超高压变质带; 柴北缘

中图法分类号 P588.348

* 国家基础科学发展规划项目(G1999075508)、国家自然科学基金项目(40372031, 40272031, 40228003, 40325005)资助。

第一作者简介: 张贵宾, 男, 1979年生, 在读博士研究生

** 通讯作者: 宋述光, E-mail:sgsong@pku.edu.cn

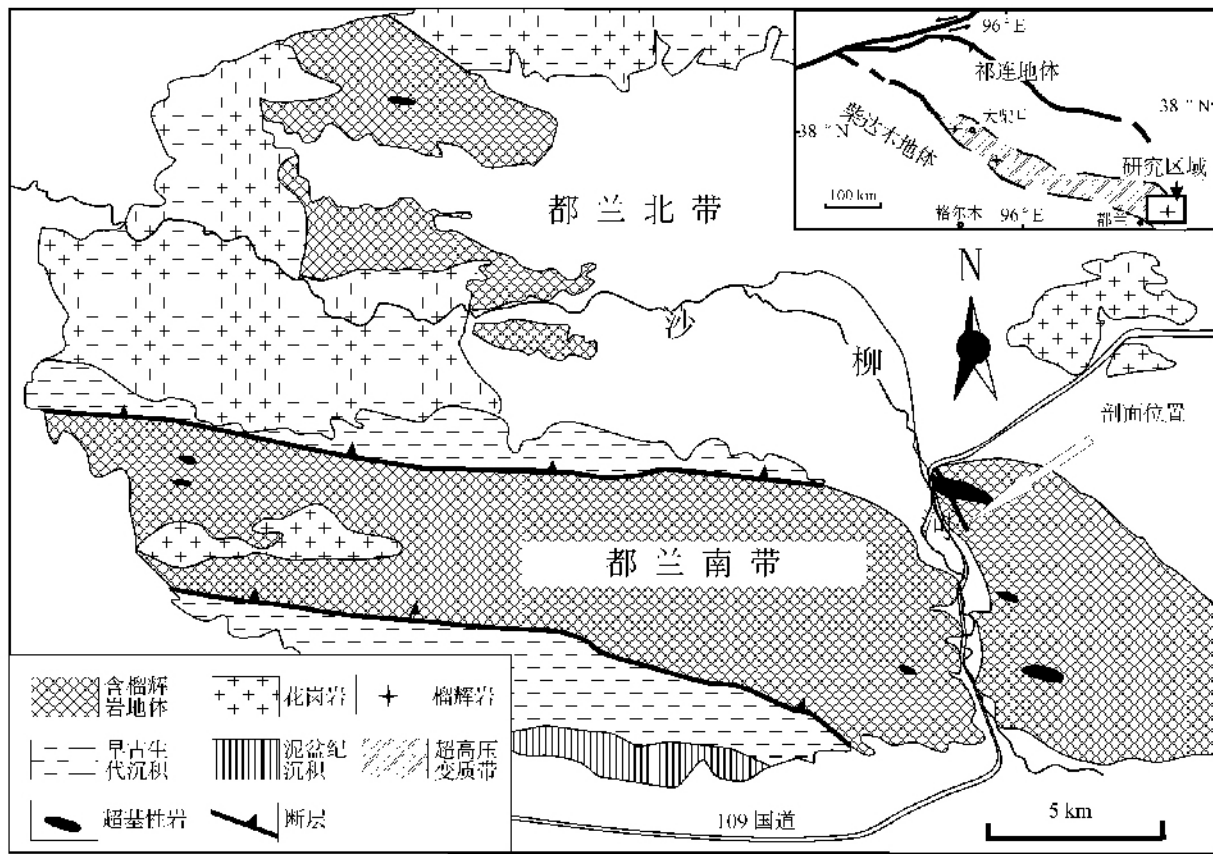


图1 柴北缘都兰地区区域地质略图(改自 Song *et al.*, 2003b)

Fig.1 Geological map of the Dulan UHP metamorphic terrane showing distribution of the north belt and the south belt

1 引言

高压超高压变质带是古板块汇聚边界及大陆碰撞造山的重要标志,它记录了地壳物质从俯冲到构造折返的一个完整的动力学路径。根据 Maruyama *et al.* (1996) 和 Ernst (2001) 的分类,大陆上的古俯冲带可以划分为环太平洋型 (Pacific-type 或 B-type) 和阿尔卑斯型 (Alpine-type 或 A-type)。Song *et al.* (2004) 将二者简单地称之为大洋型和大陆型两种类型。其中大洋型古俯冲带主要由代表大洋岩石圈残片的蛇绿混杂岩、低温高压变质岩和岛弧杂岩带组成,如我国的北祁连山 (Wu *et al.*, 1993; 宋述光, 1997)、西天山 (如, Gao *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2002); 而大陆型古俯冲带主要由大陆地壳成分占主导并经历超高压变质作用的花岗质片麻岩、变沉积岩以及少量榴辉岩、超基性岩等组成,是大洋岩石圈俯冲消亡之后两个大陆岩石圈发生俯冲碰撞,其中一个大陆岩石圈在俯冲的大洋岩石圈的拖曳力的作用下俯冲到另一大陆岩石圈之下而发生超高压变质作用。

在大陆型超高压变质带中,石榴橄榄岩是一种非常独特的岩石类型,主要来源于俯冲带之上的地幔楔或俯冲的大陆地壳中的超基性杂岩,其成因与大陆深俯冲有密切的关系

(如 Zhang *et al.*, 2000; Song *et al.*, 2004, 2005a, b)。但是,在柴北缘超高压变质带中,除石榴橄榄岩之外,还发育有一些不含石榴石、强烈蛇纹石化的超基性岩块体与榴辉岩共生。

根据岩石组合特征,我们能够确定柴北缘超高压变质带是一典型的大陆型古俯冲带,可以与中国东部大别-苏鲁超高压变质带相对比。片麻岩锆石中柯石英及石榴橄榄岩锆石中金刚石包裹体的发现 (杨经绥等, 2001; Song *et al.*, 2003a, 2005b) 提供了柴北缘大陆地壳深俯冲的证据。然而,地球化学研究表明柴北缘超高压带大部分榴辉岩的原岩具洋壳性质 (Song *et al.*, 2003b; 杨经绥等, 2003; 孟繁聪等, 2003), 但在岩石学上并未有加里东期的大洋蛇绿岩组合的确凿证据。本文报道在柴北缘超高压变质带沙柳河剖面中发现的方辉橄榄岩,该橄榄岩体与堆晶辉长岩变质的条带状蓝晶石榴辉岩构成典型的蛇绿岩组合,这一发现对于揭示柴北缘大陆型超高压变质带的性质和原岩组合有重要意义。

2 地质背景

柴北缘超高压变质带位于青藏高原北部,走向 NW-SEE, 夹于柴达木与祁连两个前寒武纪结晶基底所组成的地块之间,其西端被阿尔金左行走滑断裂所切。由西至东为大

柴旦的鱼卡河含榴辉岩地体、绿梁山含石榴橄榄岩地体、锡铁山榴辉岩地体和都兰含榴辉岩地体,沿 WNW-ESE 方向延伸达 400 km。石榴白云母片麻岩锆石中柯石英包裹体(杨经绥等,2001; Song *et al.*, 2003a)及石榴橄榄岩中的一些特殊出溶结构(Song *et al.*, 2004; 2005a)和金刚石包裹体的发现(Song *et al.*, 2005b),确定其为可与世界其它经典地区对比的与大陆碰撞有关的超高压变质带。

本文所研究的沙柳河剖面位于此超高压变质带的最东端都兰地区,根据榴辉岩的岩石学、矿物学和地球化学差异,都兰地体通常被划分为南北两带(Song *et al.*, 2003a)。两带被花岗岩体及早古生代沉积隔开(图 1)。北带榴辉岩出露于约 40 km² 的较小区域内,其西端被 400 Ma 的花岗岩体(Wu *et al.*, 2004)侵入,东端被第四纪沉积物所覆盖,榴辉岩的主要矿物组合为:石榴石 + 绿辉石 + 金红石 + 多硅白云母;南带榴辉岩沿南北两个断层所限定的 5 km 宽的区域东

西展布,主要矿物组合为:石榴石 + 绿辉石 + 金红石 + 多硅白云母 + 蓝晶石(Song *et al.*, 2003 a, b)。榴辉岩的变质温压条件为: $P = 2.8 - 3.3 \text{ GPa}$, $T = 620 - 740 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Song *et al.*, 2003b)。本区详细的岩石学、矿物学和变质温压条件及 $P - T$ 轨迹等方面的资料可参照 Song *et al.* (2003 a, b)

3 野外产状及岩相学

沙柳河剖面位于都兰南带东端,都兰北东 40 km 左右,沿 109 国道近南北向展布(图 1)。如图 2 和图 3A 所示,剖面的北部由条带状粗粒蓝晶石榴辉岩、辉石岩和超基性岩组成, Yang *et al.* (1994) 最先报道了该剖面蓝晶石榴辉岩的产出。剖面南部主要为花岗质片麻岩和碎屑岩变质片麻岩并夹有透镜状细粒榴辉岩、超基性岩和大理岩等岩石。

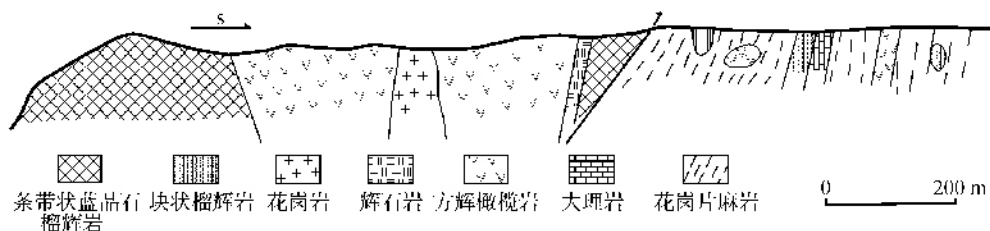


图 2 沙柳河剖面简图(位置如图 1 中所示)

Fig. 2 Shaliuhe cross section in the Dulan UHP terrane (see its locality in Fig. 1)

3.1 条带状蓝晶石榴辉岩

条带状蓝晶石榴辉岩主要分布于剖面的北端,出露宽度约 30 m,在超基性岩体的南侧也有出露(图 2,图 3A)。岩石具有典型的条带状构造(图 3B),但矿物的变形不明显,反映是岩石原生的堆晶条带。蓝晶石榴辉岩呈粗粒斑状斑晶结构,主要由石榴石、绿辉石、蓝晶石、金红石等矿物组成;部分样品由于后期的退化变质作用改造发育有大量角闪石和斜长石组成的后成合晶。地球化学分析显示这些条带状蓝晶石榴辉岩具有高 Al, Ca 和 Sr 的特征,并具有明显的 Eu 正异常,反映其原岩是岩浆房堆晶的辉长岩。

3.2 蛇纹石化地幔橄榄岩

如图 1 所示,橄榄岩在都兰地区多处出露,通常以大小不等的构造块体的形式与榴辉岩伴生,或呈透镜体产于片麻岩中。大部分岩块都遭受强烈蛇纹石化的改造,其原始矿物和结构难以辨认。最大的橄榄岩体位于沙柳河剖面北侧(图 2,图 3A),宽约 500 m,与条带状蓝晶石榴辉岩伴生,二者之间并没有大的断层,而是协调的接触关系,构成蛇绿岩套下部层位地幔橄榄岩 - 变质堆晶辉长岩较完整的剖面。该橄榄岩体有少量辉石岩呈脉状穿切,并且被晚期小花岗岩株侵

入。岩体大部分已经发生强烈蛇纹石化,这种蛇纹石化橄榄岩呈灰黑色 - 暗绿色(图 3C),局部可见蛇纹岩特有的绿色蛇皮状纹理。我们在其中发现了保存有残留橄榄石和辉石的变质方辉橄榄岩。主要由蛇纹石和其中残留的橄榄石和斜方辉石组成。

4 地幔橄榄岩的结构和矿物学特征

尽管经历过强烈的蛇纹石化作用,但岩石中变形作用较弱,所以变质橄榄岩的原始结构和矿物组合得以部分保存下来。其原始矿物组合应为橄榄石 + 斜方辉石 + 铬铁矿,基质中未见单斜辉石,反应此橄榄岩是地幔高程度熔融萃取后的残留体,为典型的尖晶石相地幔橄榄岩。由于后期水的参与,橄榄岩在发生蛇纹石化后,主要矿物被交代产生蛇纹石,同时有滑石、磁铁矿、透闪石的出现。矿物电子探针测试工作在北京大学地球与空间科学学院教育部造山带与地壳演化重点实验室进行,电子探针型号为 JEO JXA - 8100,加速电压 15 kV,电子束 20 nA。每个元素背底扫描时间为 5 秒,分析扫描时间为 20 秒。自然和人工样品的重复分析对于大部分元素的精度好于 $\pm 2\%$ 。

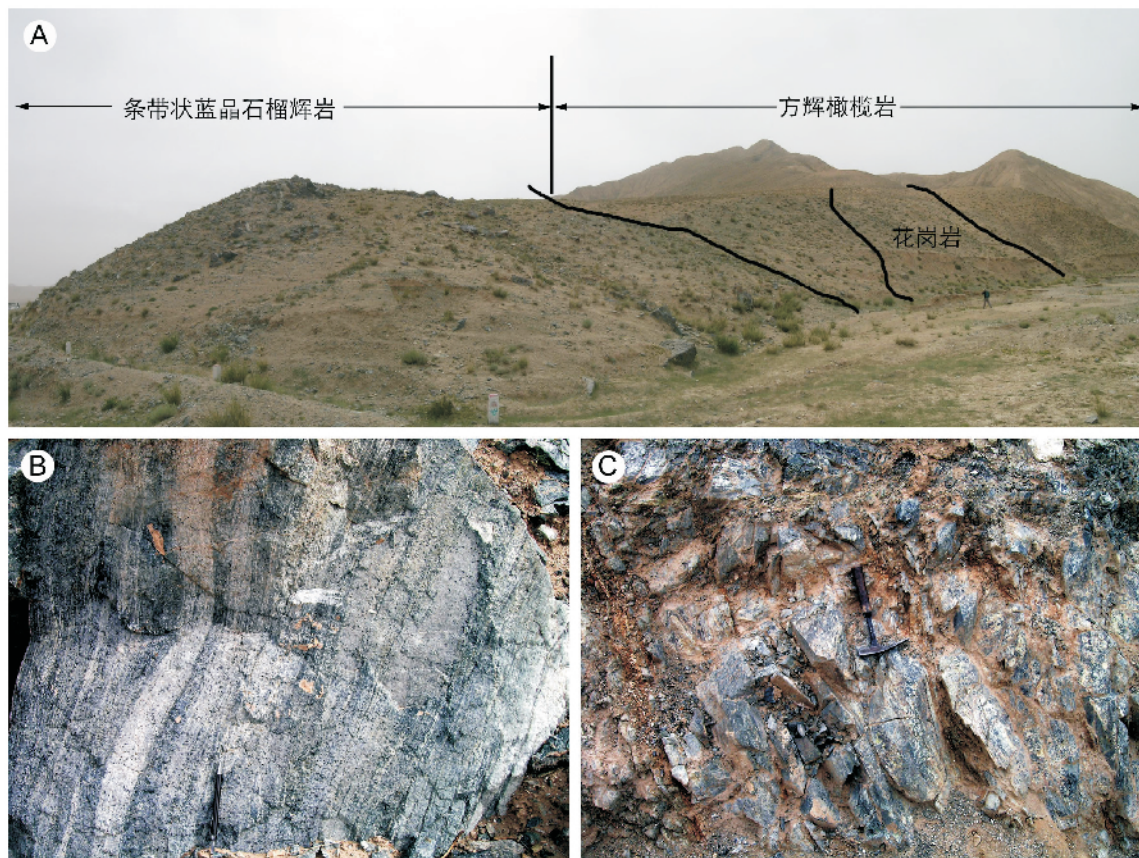


图3 沙柳河方辉橄榄岩及相关岩石的野外照片

A. 方辉橄榄岩与条带状蓝晶石榴辉岩的空间关系; B. 条带状蓝晶石榴辉岩; C. 蛇纹石化方辉橄榄岩

Fig.3 Photographs of harzburgite and associated rocks in the field section

4.1 橄榄石

岩石中橄榄石的含量约 85 ~ 90%, 但大部分(90 % 以上)橄榄石已发生蛇纹石化。矿物内部结构特征及电子探针矿物成分分析(表1)表明橄榄石可以划分为两个世代。第一世代橄榄石(Ol^1)在岩石中呈孤岛状残晶分布于蛇纹石中, 残晶的大小不等, 大部分粒度在 0.1 ~ 0.5 mm 之间, 最大可达 1 mm, 是原始粗粒橄榄石在蛇纹石化过程中被蚀变的残留(图4 A, B)。在一些较大的残晶中发育典型的扭折带(kink bands)(图4B), 这种扭折带在蛇绿岩底部地幔橄榄岩(如北祁连山玉石沟蛇绿岩, Song and Su 1998)和碱性火山岩中地幔橄榄岩包体(如中国东部, Jin *et al.*, 1989)的橄榄石中是非常常见的, 是地幔塑性流变过程中橄榄石位错攀移形成的位错壁(Nicolas, 1973)。然而, 这种扭折带在超高压变质的石榴橄榄岩的橄榄石中鲜有报道。如图5所示, 第一世代橄榄石的 MgO 含量为 49.1 ~ 50.7 wt%, NiO 的含量为 0.28 ~ 0.44 wt%, CaO 含量通常低于 0.02%。Fo 值的范围为 88.3 ~ 91.6 mol%, 平均值为 90.5, 在图5中与柴北缘石榴橄榄岩橄榄石的成分有明显不同, 但与现代大洋深海橄榄岩(Dick *et al.*, 1989)和蛇绿岩底部地幔橄榄岩中橄

石的成分一致, 反映了此方辉橄榄岩是地幔岩石高程度熔融后的残留物。

在样品 4C12 和 4C14 中, 除第一世代正常的橄榄石之外, 我们还发现结晶粒度较大, 但比较破碎的第二世代高镁橄榄石(Ol^2)。由于后期蛇纹石化改造, 这两个世代的橄榄石在空间结构关系上并不清楚, 但第二世代橄榄石内部较脏, 有大量细小的流体和固体包裹体(图4C)。第二世代橄榄石矿物成分见表1所示, 其 FeO 含量 3.43 ~ 5.64 wt%, 远低于第一世代的橄榄石, MgO 含量为 52.5 ~ 53.5 wt%, 相应的 Fo 值高达 94.3 ~ 96.5, NiO 的含量略低, 为 0.14 ~ 0.35 wt%, 显示出与第一世代橄榄石有明显的差别。Fo 值如此高的橄榄石在各种地幔环境的橄榄岩中, 如大陆地盾区地幔橄榄岩、现代大洋深海地幔橄榄岩、以及古缝合带中蛇绿岩底部地幔橄榄岩等都是十分罕见的。这种高镁橄榄石不可能是地幔部分熔融后的残余, 因为形成如此高 Fo 的橄榄石所需要的温度 > 1700 °C (Thompson and Gibson, 2000)。合理的解释是, 该地幔橄榄岩体在超高压变质之前经历了地壳浅部过程并在一定程度上遭受蛇纹石化, 在形成蛇纹石的过程中有磁铁矿的析出, 然后被卷入到大陆俯冲带中发生高压超高压变质作用而使蛇纹石变质成为第二世代

表1 橄榄石矿物化学成分
Table 1 Representative analyses of olivine in harzburgite

样品	4C20-1	4C20-2	4C20-3	4C20-4	4C20-5	4C20-6	4C20-7	4C20-8	4C30-1	4C30-2	4C30-3	4C30-4	4C30-5	4C30-6	4C30-7	4C30-8	4C30-9	4C14-1	4C14-2	4C12-1	4C12-2	4C12-3	4C12-4
	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ¹	Ol ²	Ol ²	Ol ²	Ol ²	Ol ¹
SiO2	41.53	40.96	40.85	41.17	41.17	41.67	41.23	41.40	41.16	41.03	41.17	41.09	40.85	41.20	41.09	40.94	40.79	41.14	41.54	42.02	41.84	41.25	40.45
TiO2	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.04	0.09	0.03	0.04	0.00
Al2O3	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01
Cr2O3	0.03	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.08	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.05	0.02	0.07	0.01	0.00	0.01	0.03	0.04	0.00	0.08	0.01
FeO	9.06	9.49	9.44	9.28	9.42	9.46	9.43	9.33	8.68	9.10	8.48	9.01	8.67	8.28	8.25	8.62	9.26	11.47	5.64	5.42	3.43	4.48	10.75
MnO	0.19	0.14	0.12	0.17	0.18	0.14	0.11	0.23	0.24	0.12	0.12	0.07	0.23	0.14	0.12	0.10	0.18	0.19	0.14	0.14	1.43	0.69	0.15
NiO	0.33	0.44	0.31	0.38	0.30	0.46	0.39	0.44	0.38	0.33	0.32	0.33	0.40	0.28	0.34	0.36	0.38	0.28	0.35	0.32	0.14	0.21	0.33
MgO	49.53	50.31	49.23	49.63	49.86	50.87	50.15	50.17	49.93	50.60	49.65	50.41	50.34	50.73	50.44	49.97	50.33	48.49	52.49	52.56	53.53	53.18	49.04
CaO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00
Na2O	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02
K2O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.71	101.38	100.00	100.72	100.94	102.68	101.40	101.58	100.47	101.24	99.77	100.94	100.58	100.67	100.32	100.07	100.99	101.62	100.24	100.60	100.44	100.01	100.75
Si	1.01	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	1.01	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.17	0.18	0.18	0.17	0.17	0.18	0.19	0.23	0.11	0.11	0.07	0.09	0.22
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00
Ni	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Mg	1.79	1.81	1.80	1.80	1.80	1.81	1.81	1.80	1.81	1.82	1.81	1.82	1.82	1.83	1.83	1.82	1.82	1.76	1.88	1.87	1.90	1.90	1.79
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.99	3.01	3.00	3.00	3.00	3.01	3.00	3.00	3.00	3.01	2.99	3.00	3.01	3.00	3.00	3.00	3.01	3.00	3.00	2.99	3.00	3.01	3.01
Fo	90.7	90.4	90.3	90.5	90.4	90.6	90.5	90.6	91.1	90.8	91.3	90.9	91.2	91.6	91.6	91.2	90.6	88.3	94.3	94.5	96.5	95.5	89.1

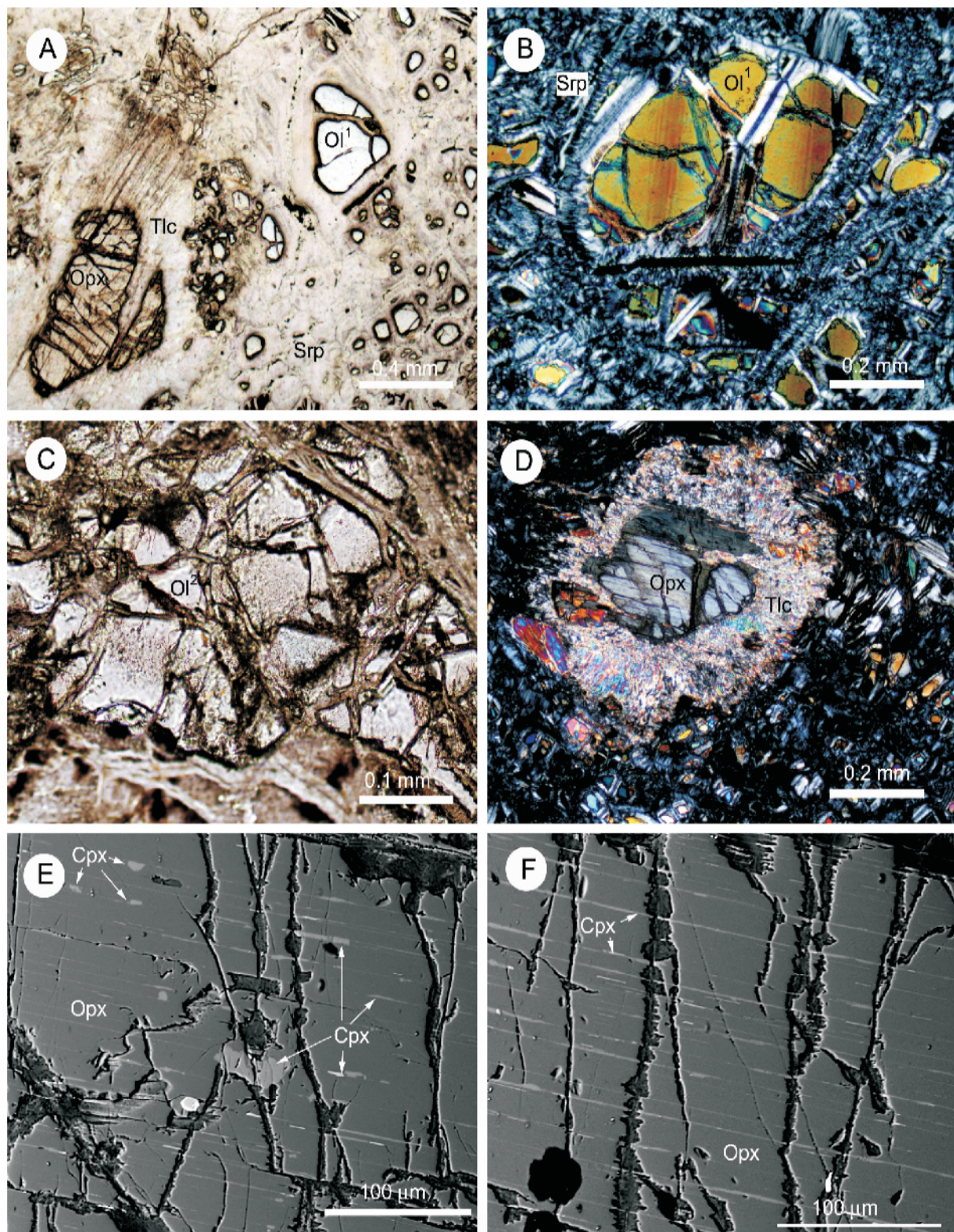


图4 方辉橄榄岩的镜下结构和背散射照片

A. 单偏光下第一世代蛇纹石化橄榄石 (Ol^1) 残晶和滑石化斜方辉石 (Opx) 残晶; B. 第一世代橄榄石的扭折带 (正交偏光); C. 第二世代橄榄石 (Ol^2) 内可见大量细小流体包裹体; 正交偏光下斜方辉石的残晶, 滑石呈冠状体分布其周围; E、F. 斜方辉石的背散射图像, 发育密集的单斜辉石出溶片晶

Fig. 4 Photomicrographs of harzburgite and BSE images of orthopyroxene (Opx)

表 2 斜方辉石矿物化学成分

Table 2 Representative analyses of orthopyroxene in harzburgite

Anlalysis	4C30 - 1	4C30 - 2	4C30 - 3	4C30 - 4	4C30 - 5	4C30 - 6	4C30 - 7	4C30 - 8	4C30 - 9	4C30 - 11	4C30 - 12
Mineral	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Cpx - L	Cpx-L
SiO2	56.53	54.96	56.24	56.08	55.77	55.62	56.22	56.34	56.19	53.54	54.46
TiO2	0.03	0.38	0.00	0.00	0.05	0.06	0.00	0.00	0.03	0.06	0.02
Al2O3	3.05	4.63	3.30	3.19	2.69	3.30	3.36	3.25	3.34	2.43	1.27
Cr2O3	0.49	1.05	0.65	0.64	0.53	0.55	0.65	0.50	0.61	0.74	0.16
FeO	5.84	6.11	5.55	5.86	5.57	6.49	5.81	5.83	6.11	1.45	1.43
MnO	0.18	0.15	0.08	0.14	0.22	0.19	0.20	0.18	0.18	0.14	0.20
NiO	0.08	0.19	0.14	0.05	0.05	0.01	0.19	0.10	0.08	0.21	0.06
MgO	34.39	33.94	34.30	34.14	33.29	34.33	34.37	34.71	34.22	17.09	17.26
CaO	0.38	0.15	0.26	0.23	1.62	0.19	0.24	0.18	0.25	24.07	23.67
Na2O	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.00	0.00	0.03	0.42	0.26
K2O	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Total	100.99	101.58	100.54	100.36	99.83	100.77	101.04	101.09	101.05	100.15	98.8
Si	1.93	1.87	1.92	1.92	1.93	1.90	1.92	1.92	1.92	1.94	2.00
Ti	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.12	0.19	0.13	0.13	0.11	0.13	0.13	0.13	0.13	0.10	0.05
Cr	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00
Fe3	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Fe	0.16	0.16	0.16	0.17	0.15	0.17	0.16	0.16	0.17	0.03	0.04
Mn	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Ni	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Mg	1.75	1.72	1.75	1.75	1.72	1.75	1.75	1.76	1.74	0.92	0.94
Ca	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.93	0.93
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Mg#	91.5	91.4	91.7	91.3	91.8	91.2	91.6	91.8	91.2	96.5	95.6
T _{Al-Cr} (℃)	962	1219	1051	1052	993	1012	1026	959	1039		
T _{Ca} (℃)	841	694	777	758	1192	728	764	720	770		
P (GPa)	1.7	0.6	1.3	1.2	1.1	4.0	1.3	1.2	1.2		

以 6 个氧计算,Fe³⁺ 以电价平衡的方法 (Droop, 1987); Opx: 斜方辉石; Cpx-L: 单斜辉石出溶片晶; Mg# = 100Mg/(Mg + Fe)

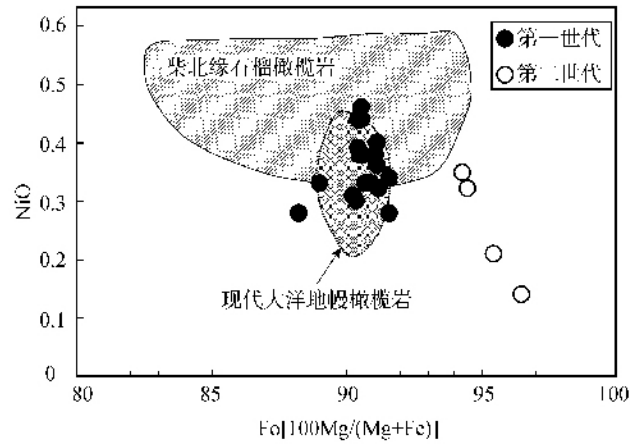


图5 方辉橄榄岩中橄榄石成分的 $Mg^\#$ 与 NiO 含量间的关系图解

现代大洋地幔橄榄岩数据引自 Dick (1989), 柴北缘石榴橄榄岩数据引自宋述光(待刊)

Fig.5 $Mg^\#$ vs. wt% NiO in olivine in harzburgite. Data of oceanic abyssal peridotite are from Dick (1989), data of garnet peridotite are from Song *et al.* (unpublished)

的高 Fo 橄榄石。矿物中流体和固体包裹体则是蛇纹石在发生脱水而变质成为橄榄石的重结晶过程中捕获的,有力地证明了第二世代橄榄石是变质成因的,可能与榴辉岩相高压超高压变质有关。

4.2 斜方辉石

岩石中斜方辉石也是呈大小不等的残晶,含量约 10 ~ 15%,粒度 0.5 ~ 5 mm。所有辉石颗粒边部发育由滑石组成的冠状体,是斜方辉石在水的作用下发生退化变质的产物,原始的矿物晶体仅在核部保存有 30 ~ 50% 的残留部分(图 4A, D),而一部分蚀变严重,只保存了斜方辉石的假象。矿物的电子探针成分见表 2,在 Wo - En - Fs 图解(图 6)中主要分布于斜顽辉石区。其顽火辉石分子 En 为 88.3 ~ 91.1; Al_2O_3 的含量较高为 2.69 ~ 4.63%, CaO 含量变化范围为 0.15 ~ 1.62 wt%, TiO_2 的含量低于 0.6%,有的甚至低于检测限(0.02 wt%)。

大部分斜方辉石残晶中发育有密集的、平行于(100)分布的出溶片晶,在背散射图像(图 4E, F)中呈亮的平行条纹,其含量最高可达 3 ~ 5 vol%。电子探针成分分析显示这些出溶体是典型的透辉石(表 3,图 6)。由于单斜辉石一般较其它矿物受蚀变的影响要小(Mével, 2003),所以在斜方辉石残留甚至在滑石组成的假象中还保存了完好的出溶结构。这种出溶结构是深海橄榄岩(如: Dick & Natland, 1996; Niu & Heinan, 1997a)和蛇绿岩底部地幔橄榄岩(如玉石沟蛇绿岩, Song & Su, 1998)的斜方辉石广泛发育的现象。辉石作为复杂的固溶体,单斜辉石中的 En 和斜方辉石中的 Di 组含量会随温度的升高而增加(Lindsley, 1983)。当高温形成

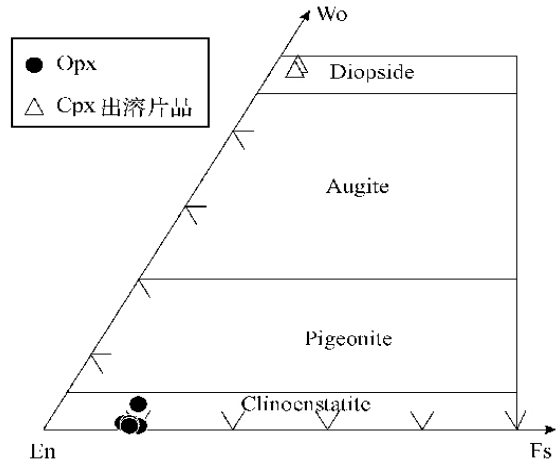


图6 辉石分类图解

Fig.6 Classification diagram for pyroxene

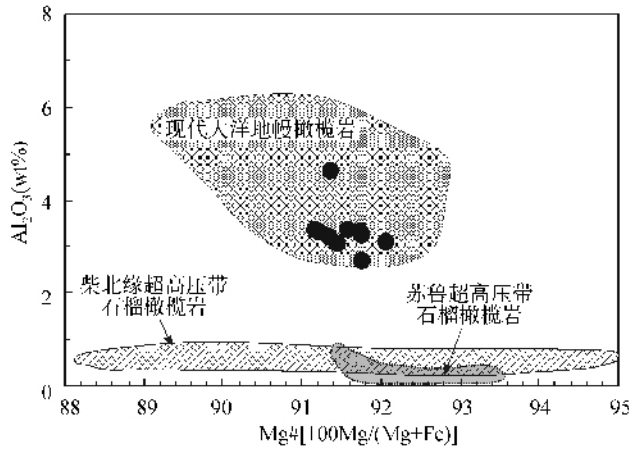


图7 方辉橄榄岩中斜方辉石的 $Mg^\# [100Mg/(Mg + Fe_{total})] - Al_2O_3$ 图解

现代大洋地幔橄榄岩的数据取自 Dick (1989), 柴北缘石榴橄榄岩数据引自宋述光等(待发表)资料, 苏鲁超高压带石榴橄榄岩数据引自 Yang and Jahn (2000) 和 Zhang *et al.* (2000)

Fig.7 Cation ratio $100Mg/(Mg + Fe_{total})$ vs. wt. % Al_2O_3 in orthopyroxene in harzburgite. The field of abyssal peridotites is taken from Dick (1989), field of garnet peridotites in the North Qaidam is from Song *et al.* (unpublished) and in the Sulu UHP terane is from Zhang *et al.* (2000) and Yang (2000)

的这种辉石在降温时组分发生改变就会产生出溶。
在斜方辉石的矿物成分上,高含量 Al_2O_3 和 CaO 是该方辉橄榄岩与超高压变质带中石榴橄榄岩的最大区别。在 $Mg^\# [100Mg/(Mg + Fe)] - Al_2O_3$ 图解(图 7)中,所有分析数据均落入现代深海地幔橄榄岩的范围内,远离苏鲁和柴北缘超高压变质带石榴橄榄岩斜方辉石成分区。
我们利用斜方辉石的两个温度计,即: Brey and Kohler (1990) 的 Ca-in-Opx 温度计 ($T_{Ca-in-Opx}$) 和 Witt-Eickschen and

Seck (1991) 的斜方辉石 M1 位 Al-Cr 温度计 ($T_{\text{Al-Cr}}$), 并根据表 2 给出的矿物成分进行了平衡温度计算。计算的结果见表 2。其中 Ca-in-Opx 温度计 ($T_{\text{Ca-in-Opx}}$) 是基于岩石中斜方辉石和单斜辉石的平衡共生, 在我们所研究的样品中, 两个方面的问题严重地影响了计算结果: (1) 所有样品都是方辉橄辉岩而没有单斜辉石, (2) 大部分斜方辉石都发育单斜辉石 (即 Ca 成分) 的出溶, 因此所获得的温度相差很大, 发生出溶的辉石给出了较低的温度范围 $694 \sim 841$ °C, 平均值为 757 ± 44 °C。该温度并不是地幔状态下斜方辉石的平衡温度, 而可能代表发生出溶时的温度。利用斜方辉石 M1 位 Al-Cr 温度计 ($T_{\text{Al-Cr}}$) 则可以避免单斜辉石出溶的影响, 因为斜方辉石 Al 在出溶过程中变化不大。该温度计给出的温度除一个数据较高 ($T_{\text{Al-Cr}} = 1219$ °C) 之外, 其它数据局限于较小的范围 $959 \sim 1052$ °C 之内, 平均 1012 ± 37 °C, 该温度比较合理的代表了地幔状态下的平衡温度。

由于岩石中原始的矿物相比较简单, 精确计算岩石的平衡应力是比较困难的。实验证明, 斜方辉石中 Al 的含量随着应力的增大而降低 (如 Brey and Kohler, 1990)。沙柳河方辉橄辉岩斜方辉石中 Al_2O_3 含量很高 ($2.69 \sim 4.63$ wt%), 远远高于石榴橄辉岩中的 Al_2O_3 含量 (见图 7)。利用 Mecier (1980) 单辉石压力计, 获得的压力除一个数据较高之外, 主要为 $1.1 \sim 1.7$ GPa, 平均 1.3 ± 0.2 GPa。虽然这些数据只是作为参考, 但与大洋岩石圈地幔尖晶石相橄辉岩的平衡压力基本一致, 而远低于柴北缘石榴橄辉岩的形成压力 ($5 \sim 7$ GPa, Song *et al.*, 2004, 2005a)。

4.3 铬铁矿

铬铁矿在本区方辉橄辉岩中含量很低 ($< 1\%$), 且粒度 < 0.05 mm。电子探针分析显示其 Cr_2O_3 含量为 $29.4 \sim 33.4$ wt%, $< \text{FeO} > 48.7 \sim 54.5$ wt%, 而 Al_2O_3 含量低, 只有 $1.1 \sim 1.6$ wt%, 反映是高度部分熔融后的残留。

5 构造意义

由大陆俯冲碰撞形成的大陆型超高压变质带在岩石组合、变质温压条件等方面与大洋型低温高压变质带有很大的差别。根据世界其它典型大陆型超高压变质带, 如中国东部大别-苏鲁, 挪威 Western Gneiss Region, 阿尔卑斯的华力西带等地榴辉岩和超基性岩的岩石学和地球化学研究, 其原岩大部分具有典型的大陆地壳的性质 (如 Jahn, 1999), 因此, 许多学者提出了大陆地壳整体俯冲和折返的模式 (如: Zhang *et al.*, 2000; Liou and Zhang 2002; Zheng *et al.*, 2003), 认为榴辉岩和超基性岩都是原位的 (in situ), 即是俯冲的大陆地壳所固有的基性超基性岩超高压变质的产物, 而与大洋岩石圈无关。柴北缘超高压带主要由正片麻岩、副片麻岩及其少量榴辉岩和石榴橄辉岩透镜体组成, 该岩石组合代表典型的大陆型俯冲碰撞带。

然而, 本文所研究的橄辉岩的岩石学和矿物学特征表明它不是石榴橄辉岩, 而是经过高度部分熔融的方辉橄辉岩。橄辉石残晶中扭折带的发育反映岩石经历了上地幔环境下高温塑性流变, 斜方辉石残晶的高 Al_2O_3 和高 CaO (透辉石出溶) 等特征证明是低压 (< 2.0 GPa) 高温 (≥ 1000 °C) 条件下形成的辉石, 属于尖晶石相方辉橄辉岩, 与石榴橄辉岩超高压变质的斜方辉石在成分和结构上明显不同, 但能够与现代大洋和蛇绿岩底部地幔橄辉岩中的斜方辉石对比。因此我们可以断定该橄辉岩体是经过高度部分熔融、形成深度较浅的地幔方辉橄辉岩。

在野外的空间展布上, 该方辉橄辉岩体与堆晶辉长岩变质的条带状蓝晶石榴辉岩紧密共生, 而其它块状榴辉岩的地球化学特征与现代正常大洋玄武岩 (N-MORB) 和洋岛玄武岩 (OIB) 十分相似 (Song *et al.*, 2003b), 因此, 本区中地幔橄辉岩-堆晶辉长岩-大洋玄武岩构成了较完整的大洋蛇绿岩剖面。这些岩石并不是大陆地壳的原有组分, 而是代表大陆地壳俯冲之前的大洋岩石圈的残片。这一岩石组合的发现证明了大陆造山带从早期的大洋俯冲消亡到大陆俯冲碰撞的完整过程。

References

- Brey GP, Kohler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and the practical assessment of existing thermobarometers. *J. Petrol.* 31(6):1353-1378
- Dick HJB, Fisher RI & Bryan WB. 1984. Mineralogical variability of the uppermost mantle along mid-ocean ridges. *Earth and Planetary Science Letters*, 69: 88-106
- Dick HJB. 1989. byssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism. In: Saunders AD & Norry MJ (eds) *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications 42:71-105
- Droop GRT. 1987. A general equation for estimating Fe³⁺ + microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51: 431-435
- Elthon D. 1989. Pressure of origin of primary mid-ocean ridge basalts. In: A. D. Saunders and M. J. Norry (Editors), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., 42:125-136
- Ernst WG. 2001. Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices - implications for arcs and continental growth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 127: 253-275
- Gao J, Li M, He G, *et al.* 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287: 213-23
- Jin ZM, Green II HW, Ma CL. 1989. Microstructure of olivine and stress in the upper mantle beneath Eastern China. *Tectonophysics*, 169:23-50
- Jahn BM. 1999. Sm-Nd isotope tracer of UHP metamorphic rocks: implications for continental subduction and collisional tectonics. *International Geology Review*, 41: 859-885
- Lindsley DH. 1983. Pyroxene thermometry. *American Mineralogist*, 68: 477-493
- Liou JG, Zhang RY. 2002. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks: *Encyclopedia of Physical sciences and technology*. third ed.,

- Tarzana, CA, Academia Press. 17:227–244
- Maruyama S, Liou JG, Terabayashi M. 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *International Geology Review*, 38: 485–594
- Meng FC, Zhang JX, Yang JS and Xu ZQ. 2003. Geochemical characteristics of eclogites in Xitieshan area, North Qaidam of northwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 435–442
- Mercier J-C C. 1980. Single-pyroxene thermobarometry. *Tectonophysics*, 70: 1–37
- Mevel C. 2003. Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges. *Geoscience*, 335: 825–852
- Nicolas A. 1973. Mechanisms of flow in naturally and experimentally deformed peridotites. *American Journal of Science*, 237: 853–876
- Niu Y, Hekinian R. 1997. Basaltic liquids and harzburgite residues in the Garrett transform: a case study at fast-spreading ridges. *Earth and Planetary Science Letters*, 146: 243–258
- Song SG. 1997. Tectonic evolution of subductive complex belts in the North Qilian mountains. *Advance in Earth Sciences*, 12(4): 351–365 (in Chinese)
- Song SG, Su L. 1998. Rheological properties of mantle peridotites at Yushigou in the North Qilian Mountains and their implications for plate dynamics. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 72(2): 131–141
- Song SG, Yang JS, Xu ZQ, *et al.* 2003a. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, Northern Tibet, NW China. *J. metamorphic Geol.*, 21: 1–14
- Song SG, Yang JS, Liou JG, *et al.* 2003b. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM Terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 70: 195–211
- Song SG, Zhang LF, Niu Y, Song B. *et al.* 2004. Early Paleozoic plate-tectonic evolution and deep continental subduction on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 23: 918–925 (in Chinese)
- Song SG, Zhang LF, Chen J, Liou JG, Niu Y. 2005a. Sodic amphibole exsolutions in garnet from garnet-peridotite, North Qaidam UHPM belt, NW China: implications for ultradeep-origin and hydroxyl defects in mantle garnets. *American Mineralogist*, 90(5): 814–820
- Song SG, Zhang LF, Niu Y, Su L. 2005b. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet-peridotite in the North Qaidam UHPM belt, North Tibetan Plateau: A record of complex histories associated with continental collision. *Earth and Planetary Science Letters*, in press
- Thompson RN, Gibson SA. 2000. Transient high temperature in mantle plume heads inferred from magnesian olivines in Phanerozoic picrites. *Nature*, 407: 502–506
- Witt-Eickchen G, Seck HA. 1991. Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: An improved version of an empirical geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.* 106:431–439
- Wu HQ, Feng YM, Song SG. 1993. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11: 523–536
- Wu CL, Yang JS, Wooden JL. 2004. Chinese Science Bulletin, 49: 1736–1740
- Yang JJ, Deng JF. 1994. Garnet peridotites and eclogites in the northern Qaidam Mountains, Tibetan plateau: a first record. First Workshop on UHP Metamorphism and Tectonics, ILP Task Group III-6, Stanford, A–20
- Yang JJ, Jahn BM. 2000. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP metamorphic terrane in China. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 167–180
- Yang JS, Xu ZQ, Li HB, Wu CL *et al.* 1998. Discovery of eclogite at the northern margin of Qaidam basin, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 43: 1755–1760 (in Chinese)
- Yang JS, Song SG, Xu ZQ, Wu CL, *et al.* 2001. Discovery of Coesite in the North Qaidam early Paleozoic ultrahigh-high pressure (UHP-HP) metamorphic belt, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175–179 (in Chinese)
- Yang JS, Zhang JX, Meng FC, Shi RD, *et al.* 2003. Ultrahigh pressure eclogites of the North Qaidam and Altun mountains, NW China and their protoliths. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 291–314
- Zhang RY, Liou JG, and Yang JS. 2000. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites of the Dabie-Sulu UHP terrane, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 149–166
- Zhang LF, Ellis DJ and Jiang W. 2002. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, part I: evidences from the inclusion of coesite pseudomorphs in garnet and quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites. *American Mineralogist*, 87: 853–860
- Zheng YF, Fu B, Gong B, and Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Science Review*, 62: 105–161

附中文参考文献

- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥, 等. 2003. 柴北缘锡铁山榴辉岩的地球化学特征. *岩石学报*, 19(3): 435–442
- 宋述光. 1997. 北祁连山俯冲杂岩带的构造演化. *地球科学进展*, 12(4): 351–365
- 宋述光, 张立飞, Niu Y, 宋彪, 刘墩一. 2004. 青藏高原北缘早古生代板块构造演化和大陆深俯冲. *地质通报*, 23: 918–925
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 2001. 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. *地质学报*, 75: 175–179
- 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 等. 2003. 中国西部柴北缘—阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨. *地学前缘*, 10(3): 291–314