

牛晓露, 杨经绥, 刘飞, 等. 新疆中天山南缘乌瓦门地区蛇绿岩中超镁铁岩的成因: 来自岩石矿物学和地球化学的证据[J]. 中国地质, 2015, 42(5):1404-1420.

Niu Xiaolu, Yang Jingsui, Liu Fei, et al. Mineralogical and geochemical constraints on the origin of the ultramafic rocks from Wuwamen ophiolite on the southern margin of Middle Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2015, 42(5): 1404-1420(in Chinese with English abstract).

新疆中天山南缘乌瓦门地区蛇绿岩中超镁铁岩的成因: 来自岩石矿物学和地球化学的证据

牛晓露¹ 杨经绥¹ 刘 飞¹ 冯光英¹ 田亚洲¹ 张 岚^{1,2} 高 健^{1,2} 赵一珏^{1,2}

(1. 大陆构造与动力学国家重点实验室地幔研究中心, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 本文对新疆中天山南缘乌瓦门蛇绿混杂岩中的超镁铁岩进行了岩石矿物学和地球化学研究, 对其成因和形成环境进行限定。乌瓦门蛇绿混杂岩中的超镁铁岩为蛇纹石化二辉橄榄岩, 由橄榄石($Fo=89.1\sim 90.6$)、斜方辉石($Wo_{0.4-2.4}En_{87.2-90.7}Fs_{8.9-10.9}$; $Mg^{\#}=89.0\sim 91.0$)、单斜辉石($Wo_{49.1-51.3}En_{16.0-48.4}Fs_{0.9-4.3}$; $Mg^{\#}=90.2\sim 92.1$)和尖晶石($Mg^{\#}=71.8\sim 77.5$; $Cr^{\#}=9.3\sim 13.4$)组成。主量元素组成上, 以低 $MgO(37.74\%\sim 41.34\%)$ 、高 $Al_2O_3(2.58\%\sim 3.39\%)$ 、高 $CaO(2.23\%\sim 3.68\%)$ 和高 $TiO_2(0.05\%\sim 0.11\%)$ 为特征。微量元素上, 亏损稀土元素(REE 总量为 $1.73\times 10^{-6}\sim 4.63\times 10^{-6}$), 亏损不相容元素(如, $Rb=0.4\times 10^{-6}\sim 1.39\times 10^{-6}$, $Zr=0.73\times 10^{-6}\sim 3.28\times 10^{-6}$, $Hf=0.04\times 10^{-6}\sim 0.11\times 10^{-6}$), 富集相容元素(如, $Cr=2516\times 10^{-6}\sim 2793\times 10^{-6}$, $Co=84.6\times 10^{-6}\sim 119\times 10^{-6}$, $Ni=1641\times 10^{-6}\sim 2261\times 10^{-6}$)。矿物学和地球化学特征一致指示, 乌瓦门蛇绿混杂岩中的超镁铁岩为经历过低程度(5%~10%)部分熔融作用的残余地幔橄榄岩, 形成于洋中脊环境, 是 MOR 型蛇绿岩中的地幔橄榄岩。

关键词: 残余地幔橄榄岩; 超镁铁岩; 蛇绿岩; 乌瓦门; 天山; 新疆

中图分类号: P588.12⁵ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1404-17

Mineralogical and geochemical constraints on the origin of the ultramafic rocks from Wuwamen ophiolite on the southern margin of Middle Tianshan Mountains, Xinjiang

NIU Xiao-lu¹, YANG Jing-sui¹, LIU Fei¹, FENG Guang-ying¹,
TIAN Ya-zhou¹, ZHANG Lan^{1,2}, GAO Jian^{1,2}, Zhao Yi-jue^{1,2}

(1. *CARMA, State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

收稿日期: 2015-06-24; 改回日期: 2015-08-04

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201011034)、国家自然科学基金重点项目 NSFC(40930313)、国家自然科学基金创新群体项目 NSFC(40921001)、国家自然科学基金青年基金项目 NSFC(41302038)、国家行业专项(SinoProbe-05-02)和中国地质调查局工作项目(12120115027201)联合资助。

作者简介: 牛晓露, 女, 1983 年生, 助理研究员, 岩浆岩岩石学和岩石地球化学研究方向; E-mail: niuxiaoludx@126.com。

Abstract: The Wuwamen ophiolite is located on the southern margin of Middle Tianshan Mountains, Xinjiang. In this paper, petrology, mineralogy and geochemistry of the ultramafic rocks from Wuwamen ophiolite were studied to constrain their origin and tectonic setting. The ultramafic rocks from Wuwamen ophiolite are serpentinized lherzolites composed of olivine ($Fo=89.1-90.6$), orthopyroxene ($Wo_{0.4-2.4}En_{87.2-90.7}Fs_{8.9-10.9}$; $Mg^{\#}=89.0-91.0$), clinopyroxene ($Wo_{49.1-51.3}En_{16.0-48.4}Fs_{0.9-4.3}$; $Mg^{\#}=90.2-92.1$) and spinel ($Mg^{\#}=71.8-77.5$; $Cr^{\#}=9.3-13.4$). They are characterized by relatively lower content of MgO (37.74%–41.34%), and higher content of Al_2O_3 (2.58%–3.39%), CaO (2.23%–3.68%) and TiO_2 (0.05%–0.11%). The ultramafic rocks are also depleted in rare earth elements (REE; total REE = $1.73 \times 10^{-6}-4.63 \times 10^{-6}$) and incompatible elements (e.g., $Rb=0.4 \times 10^{-6}-1.39 \times 10^{-6}$, $Zr=0.73 \times 10^{-6}-3.28 \times 10^{-6}$, $Hf=0.04 \times 10^{-6}-0.11 \times 10^{-6}$), and enriched in compatible elements (e.g., $Cr=2516 \times 10^{-6}-2793 \times 10^{-6}$, $Co=84.6 \times 10^{-6}-119 \times 10^{-6}$, $Ni=1641 \times 10^{-6}-2261 \times 10^{-6}$). These data indicate that the ultramafic rocks from Wuwamen ophiolite are residues of mantle rocks after low degrees (ca. 5%–10%) of partial melting in a Mid-Ocean-Ridge (MOR) environment.

Key words: residual mantle rocks; ultramafic rocks; ophiolite; Wuwamen; Tianshan Mountains; Xinjiang

About the first author: NIU Xiao-lu, female, born in 1983, associate researcher, major in igneous petrology and geochemistry. E-mail: niuxiaoludx@126.com.

1 引言

中国西部的天山造山带为一条东西长 1500 km 的巨大山链,由准噶尔地块、塔里木地块和其间的伊犁—中天山地块长期相互作用形成的复合型造山带^[1]。以中天山北缘边界断裂和中天山南缘边界断裂为界,天山造山带又分为北天山、中天山和南天山。沿中天山南缘断裂带从西至东在长阿吾子、古洛沟、乌瓦门及库米什一带多处出露蛇绿岩,这些蛇绿岩代表伊犁—中天山板块与塔里木地块之间的缝合线,对认识南天山洋的演化历史具有重要意义^[2-8]。

年代学及区域地质、古生物等资料表明,中天山南缘蛇绿岩形成时代主体为奥陶—志留纪,洋壳俯冲消减及其导致的蓝片岩带、榆树沟麻粒岩地体以及大量碰撞型花岗岩、高压变质岩等研究成果限定中天山南缘的板块俯冲事件应发生于早—中志留世—早泥盆世,碰撞作用发生于晚石炭世,碰撞造山事件可能结束于晚石炭世末期,并于二叠纪进入碰撞后演化阶段^[2-3,5-7,9-16]。

超镁铁岩是蛇绿岩的重要组成部分,也是区别蛇绿岩构造成因类型的主要鉴别标志。超镁铁岩代表地幔物质,对超镁铁岩的研究,尤其是细致的矿物学工作,可以获得超镁铁岩(及蛇绿岩)在成因、类型、产出环境及洋盆演化等方面的重要信息。

中天山南缘的乌瓦门蛇绿混杂岩由构造岩块和混杂基质两部分组成,其中,超镁铁岩是构造岩块的重要组成部分之一。目前,仍缺乏对该超镁铁岩块

的系统研究,尤其缺乏细致的矿物学工作。因此,本文拟对中天山南缘乌瓦门蛇绿混杂岩中的超镁铁岩块开展矿物学和岩石地球化学方面的相关工作,获得其矿物成分及地球化学组成特征,进而对其成因和形成环境进行探讨。该研究将完善对南天山洋构造演化过程的认识。

2 乌瓦门蛇绿岩的产出特征及样品描述

乌瓦门蛇绿混杂岩出露于新疆库尔勒市和静县巴仑台镇南侧乌瓦门地区,呈构造岩片侵入位于中天山南缘断裂带中(图 1),出露宽度约为 2 km。混杂岩带南侧,以宽约 100 m 的韧性剪切带和南天山上古生界中泥盆统萨阿尔明组大理岩、结晶灰岩夹绿泥石英片岩、黑云绿泥石英片岩相分隔;根据剪切带内不对称褶皱等运动标志判断,该剪切带形成于由南向北的逆冲作用。混杂岩带北侧,以宽约 50 m 的韧性剪切带与中天山基底中新元古界巴仑台群斜长角闪岩和片麻岩相分隔,剪切带内的褶皱产状、S-C 组构等指示由南向北的逆冲运动^[17]。

乌瓦门蛇绿混杂岩由构造岩块和混杂基质两部分组成,构造岩块包括:由变质橄榄岩、辉长岩、玄武岩组成的蛇绿岩残块、中天山基底变质岩系的斜长角闪岩和片麻岩构造块体、来源于南天山泥盆系的大理岩残块;混杂基质主要为强烈剪切变形的绿泥石英片岩、绢云石英片岩、千枚岩和变砂岩^[6,17]。

乌瓦门超镁铁岩露头坐标为 $42^{\circ}37'47.94''$, $86^{\circ}15'48.92''$,整体呈灰黑色(图 2-a),宽 250~300 m。

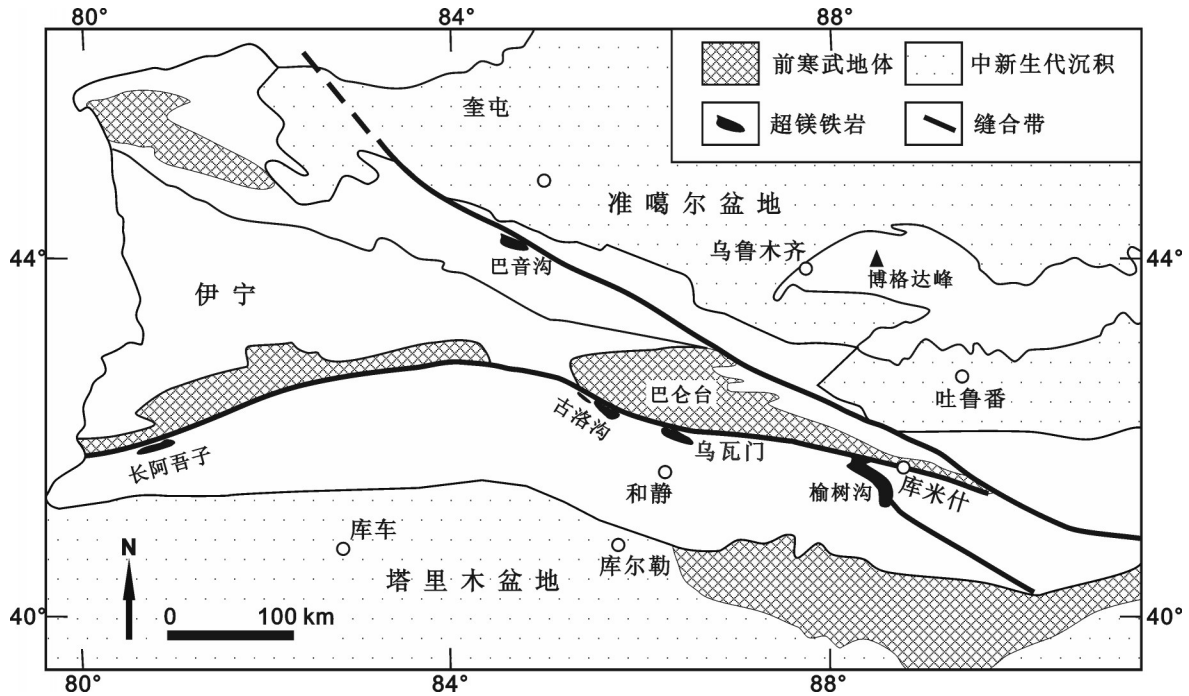


图1 天山造山带地质简图及乌瓦门超镁铁岩的分布
 Fig.1 Sketch map of the Tianshan orogenic belt and the location of the Wuwamen ultramafic massif



图2 乌瓦门超镁铁岩野外照片
 a—乌瓦门超镁铁岩野外露头;b—乌瓦门超镁铁岩与大理岩接触
 Fig.2 Outcrops of the Wuwamen ultramafic massif

其与北侧的玄武岩之间为冲沟,未见两者直接的接触关系。地幔橄榄岩南侧与风化大理岩直接接触(图2-b)。乌瓦门超镁铁岩为蛇纹石化二辉橄榄岩,有橄榄石、斜方辉石和单斜辉石残留(图3);据残留晶推测,橄榄石、斜方辉石和单斜辉石的含量为60%~80%、8%~20%和10%~20%,尖晶石以副矿物形式存在(小于5%)。可能由于构造改造作用,

个别样品糜棱岩化基质和残留斑晶呈现一定的方向性(图3-f)。

3 分析方法

本文对乌瓦门超镁铁岩进行了全岩主量和微量元素组成分析,并对主要组成矿物(橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石)进行了电子探针主量元

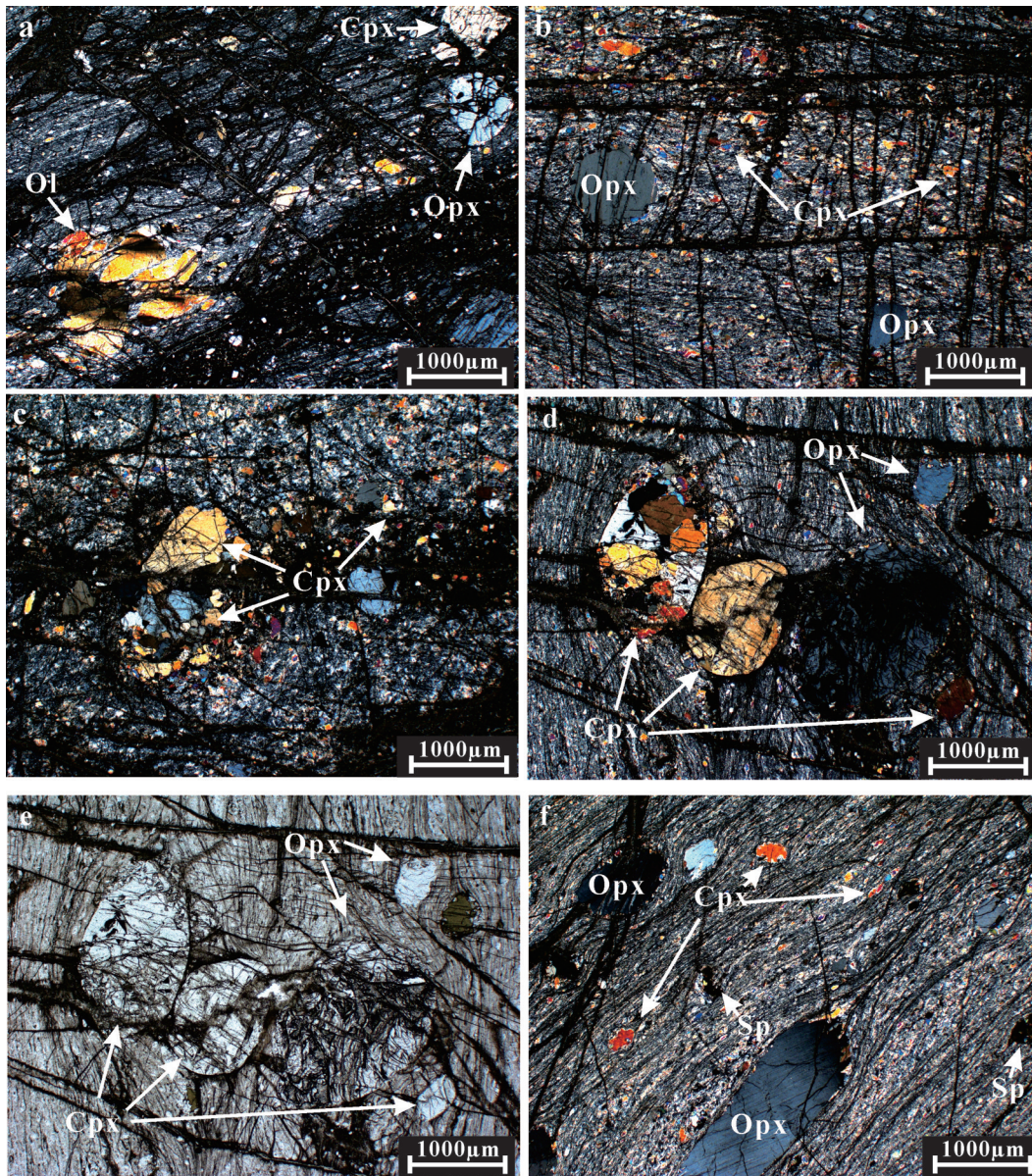


图3 乌瓦门超镁铁岩的显微照片

a—橄榄石、斜方辉石和单斜辉石残留(正交偏光);b—单斜辉石和斜方辉石残留,单斜辉石呈细碎状分布(正交偏光);
c—单斜辉石残留(正交偏光);d,e—单斜辉石和斜方辉石残留,分别为正交和单偏光下;f—大颗粒斜方辉石和细碎单斜辉石残留,尖晶石呈港湾状;Ol—橄榄石;Opx—斜方辉石;Cpx—单斜辉石;Sp—尖晶石

Fig.3 Photomicrographs of Wuwamen ultramafic rocks

a—Relics of olivine, orthopyroxene and clinopyroxene (crossed nicols); b— Relics of orthopyroxene and fine-grained clinopyroxene (crossed nicols);
c—Relics of clinopyroxene (crossed nicols); d, e—Relics of olivine, and clinopyroxene, under crossed nicols and plainlight respectively;
f— Relics of course-grained orthopyroxene, fine-grained clinopyroxene (crossed nicols) and spinel;
Ol—Olivine; Opx—Orthopyroxene; Cpx— Clinopyroxene; Sp—Spinel

素组成分析。全岩主量和微量元素分析在国家地质实验测试中心完成。样品粉末熔成玻璃饼后,应用X射线荧光光谱仪(PW4400)测定主量元素组成,测试精度优于1%。采用两酸(HNO₃+HF)高压反应釜溶样方法对样品粉末进行溶解,采用等离子

质谱仪(ICPMS;PE300D)来测定微量元素含量。含量高于10×10⁻⁶的元素误差小于5%,小于10×10⁻⁶元素的误差小于10%。矿物电子探针主量元素分析测试在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室完成。仪器型号为JXA-

8100, 加速电压 15 kV, 束流 1×10^{-8} A, 束斑 $1 \mu\text{m}$ 。采用 PRZ 方法校正, 分析标样为美国 SPI 公司的 53 种矿物, 测试精度优于 1%。

4 分析结果

4.1 矿物学特征

乌瓦门超镁铁岩中残留橄榄石、尖晶石、斜方辉石和单斜辉石的主量元素组成分析结果见表 1~表 4。

乌瓦门蛇纹石化橄榄岩中残留橄榄石成分比较均一, $Fo=89.1\sim 90.6$, 平均为 90.1, 与库米什榆树沟蛇绿岩超镁铁岩中橄榄石 Fo 值一致 (89.3~91.5)^[8]。 SiO_2 含量为 40.86%~44.68%, FeO 含量为 8.47%~9.56%, MgO 含量为 41.72%~49.31%, NiO 含量为 0.19%~0.42%。

尖晶石的成分比较均一, $\text{Mg}^\# = 71.8\sim 77.5$, $\text{Cr}^\# = 9.3\sim 13.4$, 表现为高 $\text{Mg}^\#$ 、低 $\text{Cr}^\#$ 的特点, 这是熔融程度较低的地幔橄榄岩中尖晶石的特征^[16-19]。如图 4 所示, 乌瓦门超镁铁岩中橄榄石和尖晶石成分均落入深海地幔橄榄岩的橄榄石和尖晶石成分范围内。

乌瓦门超镁铁岩中斜方辉石的成分范围为 $\text{Wo}_{0.4-2.4}\text{En}_{87.2-90.7}\text{Fs}_{8.9-10.9}$, 属顽火辉石。其 $\text{Mg}^\# = 89.0\sim 91.0$, 与橄榄石的 $\text{Mg}^\#$ 范围 (89.1~90.6) 一致。斜方辉石中 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 的含量分别为 2.86%~4.44% 和 0.14%~0.42%。在斜方辉石的 $\text{Mg}^\# - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解中 (图 5-a), 样品大部分落入深海橄榄岩的斜方辉石成分范围内; 在斜方辉石的 $\text{Mg}^\# - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 图解中 (图 5-b), 样品落入深海橄榄岩的斜方辉石成分范围的下方, 这可

能反映了乌瓦门超镁铁岩具有较低的 Cr_2O_3 含量。

乌瓦门超镁铁岩中的单斜辉石均为透辉石, 成分为 $\text{Wo}_{49.1-51.3}\text{En}_{16.0-48.4}\text{Fs}_{0.9-4.3}$ 。其 $\text{Mg}^\#$ 相对较低, 为 90.2~92.1, $\text{MgO} = 14.21\%\sim 15.35\%$, $\text{FeO} = 2.34\%\sim 2.85\%$; 而 Al_2O_3 、 Na_2O 和 TiO_2 的含量则相对较高, 分别为 4.90%~6.69%、1.27%~1.76% 和 0.17%~0.63%。在单斜辉石的 $\text{Mg}^\# - \text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Mg}^\# - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 图解中, 样品均落入深海橄榄岩的单斜辉石成分范围内 (图 6)。

4.2 全岩主微量元素组成

乌瓦门地区超镁铁岩的主量和微量元素组成见表 5。

在主量元素组成上, 乌瓦门地区超镁铁岩的烧失量为 0.42%~5.44%, 反映岩石遭受了不同程度的蛇纹石化作用。对主量元素分析结果扣除烧失量之后进行归一化计算。计算后样品的 SiO_2 含量为 43.69%~46.14%, 平均为 44.76%; TiO_2 含量为 0.05%~0.11%, 平均为 0.07%; Al_2O_3 含量为 2.58%~3.39%, 平均为 2.93%; CaO 含量为 2.23%~3.68%, 平均为 2.81%, MgO 的含量为 37.74%~41.34%, 平均为 39.98%, $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{Total}}$ 含量为 8.51%~9.39%, 平均为 9.09%; $\text{Mg}^\#$ 为 89.5~90.0。乌瓦门超镁铁岩的主量元素组成较雅鲁藏布江蛇绿岩带中的超镁铁岩相对富集 (以东波超镁铁岩为例, 其主量元素组成平均值为: $\text{SiO}_2 = 42.29\%$ 、 $\text{TiO}_2 = 0.02\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.82\%$ 、 $\text{CaO} = 0.95\%$ 、 $\text{MgO} = 40.76\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{Total}} = 8.3\%$ 、 $\text{Mg}^\# = 89.7\sim 91.7$)^[26]。在超镁铁岩的 $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO} - \text{CaO}$ 和 $\text{MgO} - \text{TiO}_2$ 协变图解中, 乌瓦门

表 1 乌瓦门超镁铁岩橄榄石电子探针分析结果 (%)

Table 1 Electron microprobe analyses of olivines from the Wuwamen ultramafic rocks (%)

点号	12YX7-1.1	12YX7-1.2	12YX7-1.3	12YX7-1.4	12YX7-1.5	12YX7-1.6	12YX7-1.7	12YX7-1.8	12YX7-1.9
SiO_2	40.86	41.04	42.29	40.88	43.40	44.68	42.77	40.94	43.83
TiO_2	0	0	0.02	0.01	0.08	0.01	0	0.01	0
Al_2O_3	0	0	0.11	0	3.27	0.28	1.15	1.29	0.37
Cr_2O_3	0	0	0.02	0	0.49	0.08	0.15	0.22	0.04
FeO	9.56	9.30	8.91	9.27	9.09	9.06	9.41	9.12	8.47
MnO	0.14	0.11	0.12	0.11	0.15	0.15	0.11	0.13	0.13
MgO	49.31	48.84	47.66	49.13	41.72	45.58	46.08	47.85	45.79
CaO	0.03	0	0.03	0	1.47	0.05	0.14	0.02	0.07
Na_2O	0	0.02	0	0.01	0.02	0	0	0	0
K_2O	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0
NiO	0.37	0.42	0.35	0.36	0.19	0.22	0.32	0.32	0.35
Total	100.27	99.73	99.51	99.77	99.88	100.11	100.14	99.91	99.05
Fo	90.2	90.4	90.5	90.4	89.1	90.0	89.7	90.3	90.6

注: $Fo = 100 \times \text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 。

表2 乌瓦门超镁铁岩尖晶石电子探针分析结果(%)
Table 2 Electron microprobe analyses of spinels from the Wuwamen ultramafic rocks (%)

点号	12YX7-4.1	12YX7-1.1	12YX7-1.2	12YX7-1.3	12YX7-14.1	12YX7-14.2	12YX7-14.3	12YX7-14.4	12YX7-14.5	12YX7-2.1	12YX7-2.2
SiO ₂	0.04	0.03	0.05	0.01	0.03	0.06	0.06	0.08	0.06	0.02	0.01
TiO ₂	0.05	0	0	0.06	0	0	0.06	0	0.04	0.01	0
Al ₂ O ₃	54.91	56.21	55.51	55.41	53.93	53.12	52.11	52.74	53.85	54.85	55.21
Cr ₂ O ₃	10.55	8.60	9.40	9.34	11.10	11.42	12.08	11.52	10.53	10.66	10.44
FeO	15.20	14.67	14.58	14.56	15.54	15.65	16.98	15.76	17.16	14.65	14.49
MnO	0.13	0.07	0.11	0.11	0.14	0.11	0.16	0.14	0.10	0.10	0.11
MgO	19.16	19.57	19.42	19.36	19.17	18.46	18.26	18.50	18.21	19.82	19.81
Na ₂ O	0.02	0	0	0	0.03	0.02	0.01	0	0	0.03	0.02
K ₂ O	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0
NiO	0.26	0.29	0.35	0.36	0.27	0.25	0.27	0.36	0.27	0.20	0.28
Total	100.32	99.44	99.42	99.21	100.22	99.10	100.00	99.10	100.22	100.34	100.37
Mg [#]	75.0	76.4	76.2	76.1	75.6	73.7	72.6	73.8	71.8	77.4	77.3
Cr [#]	11.4	9.3	10.2	10.1	12.1	12.6	13.4	12.8	11.6	11.5	11.3
点号	12YX7-2.3	12YX7-2.4	12YX7-2.5	12YX7-2.6	12YX7-2.7	12YX7-2.8	12YX7-2.9	12YX7-2.10	12YX7-2.11	12YX7-2.12	12YX7-2.13
SiO ₂	0.06	0.04	0.05	0.03	0.06	0.03	0	0.04	0.08	0	0.02
TiO ₂	0.04	0.01	0.04	0	0	0	0.02	0.01	0.02	0.02	0
Al ₂ O ₃	54.80	55.59	54.84	53.60	53.81	53.92	53.77	53.91	54.01	53.86	53.39
Cr ₂ O ₃	10.44	10.37	10.51	11.34	11.06	11.24	11.51	11.30	10.71	11.20	10.89
FeO	14.48	14.16	14.79	14.86	14.95	14.04	15.44	15.11	15.56	14.59	15.68
MnO	0.11	0.07	0.11	0.16	0.17	0.14	0.10	0.12	0.16	0.16	0.12
MgO	19.82	19.52	19.14	18.60	19.51	19.50	19.30	18.84	18.52	19.03	18.63
CaO	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0
Na ₂ O	0.02	0	0.02	0.10	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.05	0.06
K ₂ O	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0	0.02	0.03	0.03
NiO	0.27	0.26	0.22	0.28	0.25	0.33	0.27	0.29	0.21	0.26	0.25
Total	100.05	100.02	99.72	98.98	99.82	99.20	100.44	99.65	99.34	99.20	99.07
Mg [#]	77.5	76.1	75.2	74.8	76.8	77.1	75.8	74.7	73.8	76.0	74.6
Cr [#]	11.3	11.1	11.4	12.4	12.1	12.3	12.6	12.3	11.7	12.3	12.0

注: Mg[#] = 100 × Mg/(Mg + Fe); Cr[#] = 100 × Cr/(Cr + Al)。

超镁铁岩具有相对较高的Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO和TiO₂含量,因此,样品均落入深海橄榄岩成分范围内(图7)。

球粒陨石标准化稀土元素(REE)配分模式见图8-a。为对比研究,图8还给出了Izu-Bonin弧前盆地橄榄岩^[28]、洋中脊玄武岩地幔源区^[29-30]、洋岛玄武岩(OIB)、富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)和亏损型洋中脊玄武岩(N-MORB)^[31]的REE配分模式。乌瓦门超镁铁岩的REE总量较低,为 1.73×10^{-6} ~ 4.63×10^{-6} ;REE配分模式总体上表现为LREE弱亏损, $(La/Yb)_{CN} = 0.50 \sim 1.71$, $(La/Sm)_{CN} = 0.66 \sim 2.48$, $(Gd/Yb)_{CN} = 0.62 \sim 0.97$;乌瓦门超镁铁岩的HREE(从Sm到Lu)配分模式平行于N-MORB源区地幔的HREE配分模式^[29-30],但含量略低(图8-a)。

乌瓦门超镁铁岩相容元素含量较高,Cr=2516×

$10^{-6} \sim 2793 \times 10^{-6}$, Co= $84.6 \times 10^{-6} \sim 119 \times 10^{-6}$, Ni= $1641 \times 10^{-6} \sim 2261 \times 10^{-6}$;不相容元素含量低,Rb= $0.4 \times 10^{-6} \sim 1.39 \times 10^{-6}$, Pb= $0.33 \times 10^{-6} \sim 20.51 \times 10^{-6}$, Zr= $0.73 \times 10^{-6} \sim 3.28 \times 10^{-6}$, Hf= $0.04 \times 10^{-6} \sim 0.11 \times 10^{-6}$;这是蛇绿岩中地幔橄榄岩的典型特征。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上,与大洋中脊玄武岩源区地幔的配分模式相比,明显富集Rb、Ba、Th、U、Sr和Pb等活性元素;呈现U、Sr、Pb正异常(图8-b)。

5 讨论

5.1 乌瓦门超镁铁岩为残余地幔岩石

乌瓦门超镁铁岩的全岩主微量元素地球化学组成和矿物成分均指示乌瓦门超镁铁岩为经历过部分熔融作用之后的残余地幔岩石。

表3 乌瓦门超镁铁岩斜方辉石电子探针分析结果(%)

Table 3 Electron microprobe analyses of orthopyroxenes from the Wuwamen ultramafic rocks (%)							
点号	12YX7-4.1	12YX7-4.2	12YX7-4.3	12YX7-4.4	12YX7-4.5	12YX7-1.1	12YX7-1.2
SiO ₂	55.59	54.73	55.50	55.68	55.39	55.64	55.17
TiO ₂	0.05	0.05	0.00	0.08	0.09	0.10	0.08
Al ₂ O ₃	3.38	4.10	3.52	3.38	3.93	2.86	3.37
Cr ₂ O ₃	0.33	0.33	0.28	0.21	0.30	0.14	0.30
FeO	6.39	6.35	6.44	6.51	6.47	6.90	7.24
MnO	0.12	0.17	0.11	0.15	0.16	0.14	0.17
MgO	33.24	32.73	33.19	32.95	32.52	33.10	32.56
CaO	0.36	0.44	0.48	0.36	0.61	0.33	0.39
Na ₂ O	0	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03
K ₂ O	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0
NiO	0.09	0.12	0.11	0.10	0.09	0.04	0.08
Total	99.55	99.05	99.67	99.45	99.60	99.26	99.39
Mg [#]	90.3	90.2	90.3	90.0	89.9	89.5	89.0
Wo	0.7	0.8	0.9	0.7	1.2	0.6	0.8
En	89.6	89.5	89.5	89.4	88.9	89.0	88.3
Fs	9.7	9.7	9.6	9.9	9.9	10.4	10.9

点号	12YX7-14.1	12YX7-14.2	12YX7-14.3	12YX7-14.4	12YX7-14.5	12YX7-2.1	12YX7-2.2
SiO ₂	54.73	54.57	54.71	54.43	54.74	55.19	55.30
TiO ₂	0.10	0.09	0.06	0.02	0.08	0.08	0.05
Al ₂ O ₃	4.38	4.38	4.44	4.07	4.08	4.21	3.34
Cr ₂ O ₃	0.40	0.30	0.40	0.42	0.36	0.42	0.33
FeO	6.56	6.87	6.72	6.54	6.75	6.30	6.35
MnO	0.14	0.15	0.15	0.15	0.11	0.16	0.14
MgO	32.53	33.12	32.49	32.22	31.44	32.52	32.54
CaO	0.63	0.20	0.53	0.99	1.20	0.73	0.95
Na ₂ O	0.04	0.01	0.06	0.11	0.18	0.06	0.04
K ₂ O	0.02	0	0	0.01	0.10	0.01	0.01
NiO	0.06	0.02	0.10	0.07	0.06	0.09	0.06
Total	99.59	99.71	99.66	99.03	99.10	99.77	99.11
Mg [#]	90.1	91.0	89.9	90.9	89.3	90.2	90.1
Wo	1.2	0.4	1.1	2.0	2.4	1.4	1.9
En	89.0	90.7	89.0	89.1	87.2	88.9	88.4
Fs	9.8	9.0	9.9	8.9	10.4	9.7	9.7

首先,乌瓦门超镁铁岩具有亏损的主量元素组成。地幔橄榄岩发生部分熔融时, CaO、Al₂O₃、SiO₂等组分相对易熔而倾向于进入熔体, MgO则相对难熔而倾向于留在残余地幔岩中。乌瓦门超镁铁岩的CaO平均含量为2.81%, 低于原始地幔CaO含量(3.23%); Al₂O₃平均含量为2.93%, 低于原始地幔Al₂O₃含量(4.09%); SiO₂平均含量为44.76%, 低于原始地幔SiO₂含量(46.12%); MgO的平均含量为39.98%, 高于原始地幔MgO含量(37.77%)^[33]; Mg[#]为89.5~90.0, 略高于原始地幔的Mg[#](89.0)。

此外,在微量元素组成上,乌瓦门超镁铁岩富集相容元素,亏损不相容元素。相容元素Cr、Co和Ni的含量较高,分别为 2516×10^{-6} ~ 2793×10^{-6} 、 84.6×10^{-6} ~ 119×10^{-6} 和 1641×10^{-6} ~ 2261×10^{-6} ;不相容元素含量较低(Rb= 0.4×10^{-6} ~ 1.39×10^{-6} 、Pb= 0.33×10^{-6} ~ 20.51×10^{-6} 、Zr= 0.73×10^{-6} ~ 3.28×10^{-6} 、Hf= 0.04×10^{-6} ~ 0.11×10^{-6});这是亏损地幔岩的典型特征。

乌瓦门超镁铁岩具有亏损的矿物组成。其橄榄石和斜方辉石的Mg[#]分别为89.1~90.6和89.0~91.0, 均表现为较窄的变化范围,且两个值较为接近,这是

表4 乌瓦门超镁铁岩单斜辉石电子探针分析结果(%)
Table 4 Electron microprobe analyses of clinopyroxenes from the Wuwamen ultramafic rocks (%)

点号	12YX7-4.1	12YX7-4.2	12YX7-4.3	12YX7-4.4	12YX7-4.5	12YX7-4.6	12YX7-4.7	12YX7-4.8	12YX7-4.9	12YX7-1.1	12YX7-1.2	12YX7-1.3	12YX7-14.1
SiO ₂	52.19	52.56	51.78	51.76	52.02	52.90	52.13	52.09	52.93	51.21	51.87	51.70	52.03
TiO ₂	0.22	0.20	0.20	0.24	0.23	0.17	0.25	0.27	0.27	0.63	0.58	0.33	0.39
Al ₂ O ₃	5.65	5.62	5.66	5.68	5.78	5.59	5.64	5.31	5.24	6.69	6.61	6.39	6.54
Cr ₂ O ₃	0.82	0.69	0.67	0.75	0.80	0.72	0.74	0.67	0.74	0.90	0.82	0.85	0.89
FeO	2.62	2.49	2.58	2.53	2.66	2.85	2.64	2.61	2.85	2.64	2.42	2.78	2.40
MnO	0.10	0.07	0.11	0.06	0.08	0.05	0.12	0.06	0.09	0.13	0.09	0.07	0.10
MgO	14.68	14.85	14.69	14.63	14.84	14.69	14.88	15.10	14.98	14.29	14.24	14.47	14.21
CaO	21.81	21.58	21.78	21.99	21.55	21.96	21.57	21.32	21.99	21.48	21.09	21.19	20.86
Na ₂ O	1.60	1.60	1.51	1.56	1.55	1.50	1.54	1.49	1.45	1.56	1.66	1.72	1.76
K ₂ O	0	0.01	0.01	0	0.01	0	0	0	0.03	0	0	0.02	0
NiO	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.05	0	0.06	0	0.01	0.13	0.06	0.07
Total	99.71	99.69	99.02	99.22	99.53	100.48	99.51	98.98	100.57	99.54	99.51	99.58	99.25
Mg [#]	91.0	91.4	91.0	91.2	90.9	90.2	91.0	91.2	90.3	90.6	91.4	90.3	91.4
Wo	50.6	49.7	50.7	51.3	50.0	49.9	49.9	49.1	49.6	50.4	49.3	50.2	49.1
En	47.5	47.6	47.6	47.5	47.9	46.4	47.9	48.4	47.1	46.7	46.3	47.7	46.5
Fs	1.7	2.6	1.5	1.0	1.9	3.7	2.0	2.4	3.1	2.7	4.3	2.0	4.2

点号	12YX7-14.2	12YX7-14.3	12YX7-14.4	12YX7-14.5	12YX7-14.6	12YX7-14.7	12YX7-14.8	12YX7-14.9	12YX7-14.10	12YX7-2.1	12YX7-2.2	12YX7-2.3
SiO ₂	51.80	51.69	51.66	51.43	52.58	52.47	51.45	52.76	52.40	51.58	52.60	51.73
TiO ₂	0.28	0.30	0.37	0.29	0.34	0.32	0.36	0.24	0.31	0.26	0.28	0.25
Al ₂ O ₃	6.37	6.07	6.27	6.29	5.37	5.96	6.00	5.57	5.43	6.18	4.90	5.70
Cr ₂ O ₃	0.64	0.66	0.59	0.59	0.48	0.55	0.63	0.95	0.74	0.73	0.61	0.84
FeO	2.81	2.64	2.60	2.74	2.76	2.73	2.71	2.79	2.81	2.54	2.34	2.48
MnO	0.07	0.09	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.02	0.11	0.10	0.10	0.06
MgO	14.68	14.78	14.55	14.67	14.81	14.51	14.61	14.49	15.03	14.65	15.35	14.80
CaO	21.44	21.65	21.80	21.82	22.52	22.15	21.54	22.09	21.59	21.80	22.27	21.50
Na ₂ O	1.43	1.47	1.44	1.51	1.27	1.52	1.49	1.55	1.47	1.51	1.43	1.57
K ₂ O	0	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0	0.02	0.02
NiO	0.04	0.03	0.07	0.02	0.01	0.02	0.05	0.02	0.02	0.05	0	0.06
Total	99.56	99.39	99.48	99.47	100.24	100.34	98.93	100.50	99.92	99.40	99.90	99.01
Mg [#]	90.2	90.9	90.8	90.5	90.6	90.4	90.7	90.2	90.5	91.2	92.1	91.4
Wo	49.5	50.3	50.4	51.1	50.4	50.8	50.3	50.5	49.4	50.9	50.5	50.3
En	47.1	47.7	46.8	47.7	46.1	46.2	47.4	46.0	47.8	47.5	48.4	48.1
Fs	3.3	1.8	2.6	1.0	3.3	2.8	2.1	3.5	2.7	1.4	0.9	1.4

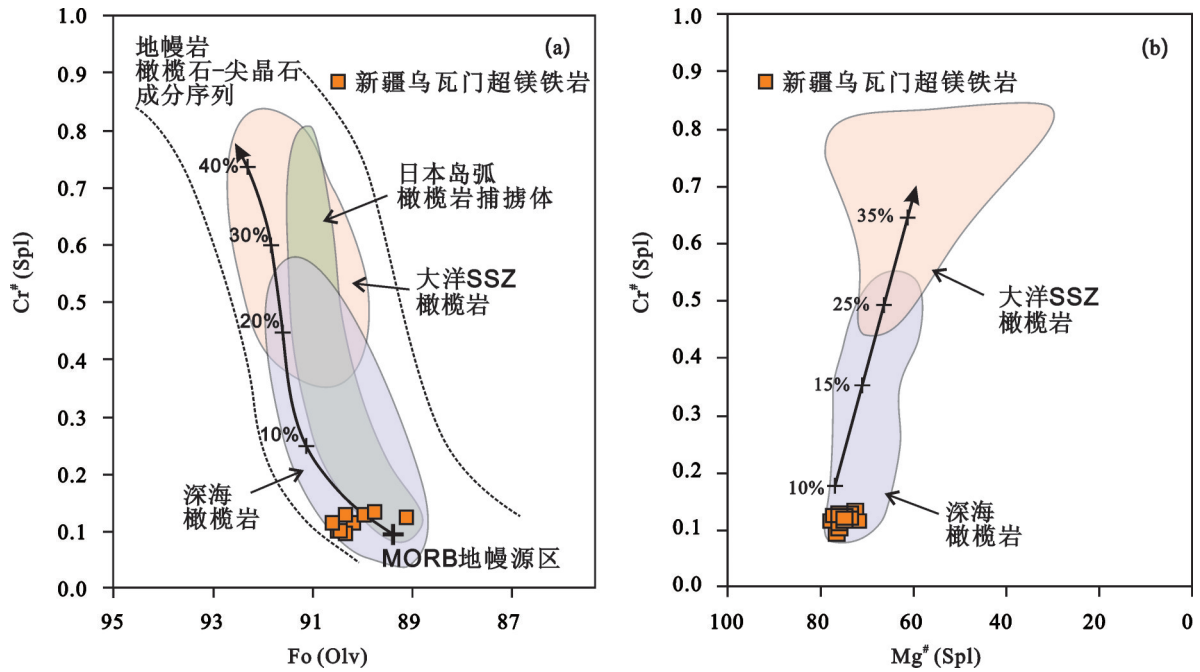


图4 乌瓦门超镁铁岩的橄榄石 Fo-尖晶石 Cr[#]判别图解(a)和尖晶石的 Mg[#]-Cr[#]判别图解(b)

(a) 深海橄榄岩矿物成分据文献[18], 大洋SSZ橄榄岩成分据文献[20], 日本岛弧橄榄岩捕掳体成分据文献[21], 地幔岩橄榄石-尖晶石成分序列及熔融程度和趋势据文献[21]; (b) 深海橄榄岩矿物成分据文献[18], 大洋SSZ橄榄岩成分据文献[22], 橄榄岩熔融趋势及程度据文献[23]

Fig. 4 Plot of olivine Fo versus spinel Cr[#] (a) and spinel Mg[#] versus spinel Cr[#] (b) of the Wuwamen peridotites.

(a) Compositional fields for abyssal peridotites after reference [18], for oceanic SSZ peridotites after reference [20], for peridotite xenolith suites of Japan after reference [21], olivine-spinel mantle array and partial melting trend after reference [21]. (b) Compositional fields for abyssal peridotites after reference [18], for oceanic SSZ peridotites after reference [22]. The arrow with ticks represents the percentage of melting of the host peridotite after reference [23]

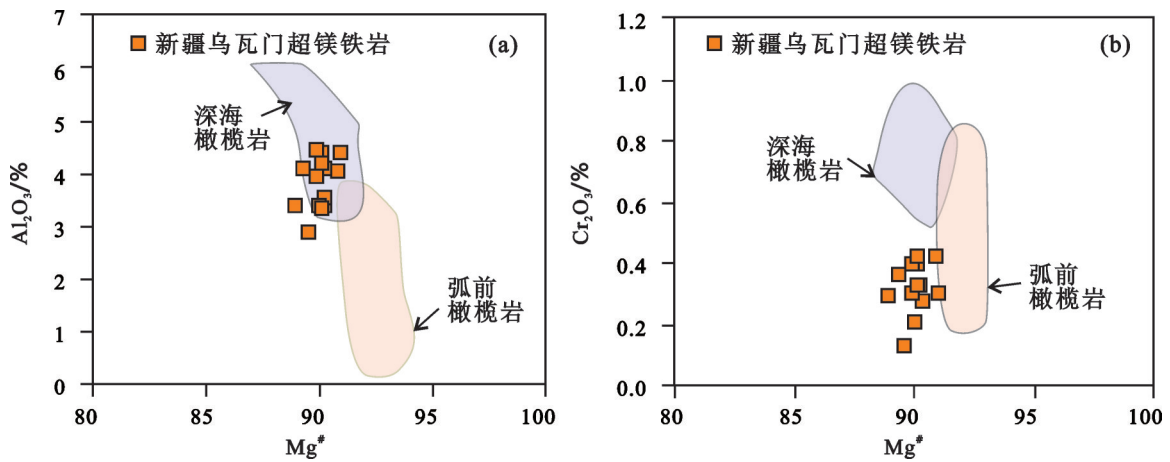


图5 乌瓦门超镁铁岩中斜方辉石的 Mg[#]-Al₂O₃图解(a)和 Mg[#]-Cr₂O₃图解(b)

深海橄榄岩和弧前橄榄岩的成分据文献[24]

Fig. 5 Compositional variations of orthopyroxenes from the Wuwamen peridotites. (a) Mg[#] versus Al₂O₃; (b) Mg[#] versus Cr₂O₃. Fields outlining Opx compositions in abyssal peridotites, forearc peridotites after reference [24]

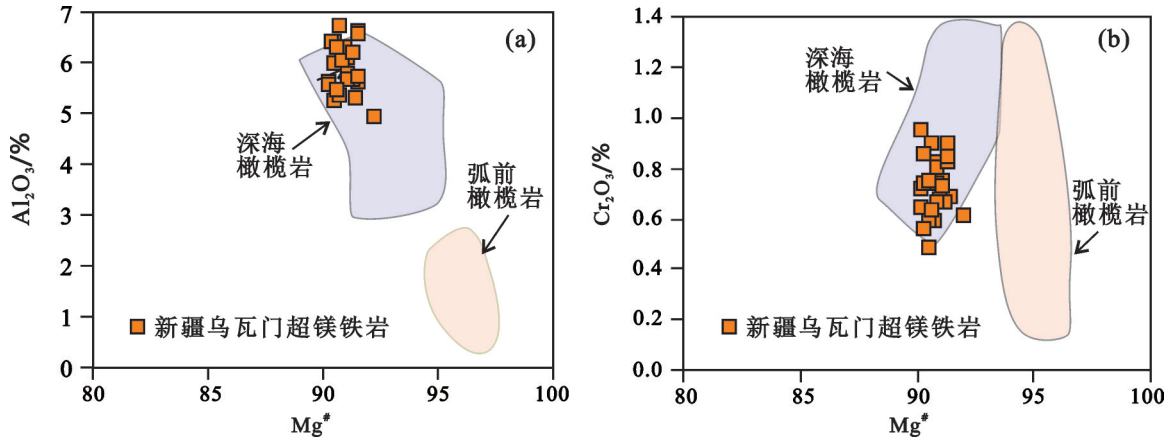


图6 乌瓦门超镁铁岩中单斜辉石的 $Mg^{\#}$ - Al_2O_3 图解(a)和 $Mg^{\#}$ - Cr_2O_3 图解(b)
深海橄榄岩和弧前橄榄岩的成分据文献[24]

Fig. 6 Compositional variations of clinopyroxenes from the Wuwamen peridotites. (a) $Mg^{\#}$ versus Al_2O_3 ; (b) $Mg^{\#}$ versus Cr_2O_3 . Fields outlining Opx compositions in abyssal peridotites, forearc peridotites after reference [24]

熔融残余地幔橄榄岩中矿物的典型特征^[19,34],不同于具有较宽成分变化范围的堆晶橄榄岩中的橄榄石和斜方辉石。图9为乌瓦门超镁铁岩中单斜辉石的成分与岩浆成因单斜辉石的成分对比图解。如图所示,与岩浆成因单斜辉石成分相比,乌瓦门超镁铁岩的单斜辉石成分较为集中,且以富 Mg 、 Cr ,贫 Ti 、 Fe 、 Ca 为特征,是熔融残余地幔岩中矿物的组成特征。元素 Na 表现特殊,乌瓦门超镁铁岩单斜辉石的 Na 含量明显高于岩浆成因单斜辉石的 Na 含量;这可能反映了乌瓦门超镁铁岩曾经历了富 Na 流体的改造作用。

5.2 部分熔融程度

首先,地幔橄榄岩中的矿物组成和矿物成分可以反映其部分熔融程度。乌瓦门超镁铁岩中的斜方辉石和单斜辉石,均具有相对较高的 Al_2O_3 含量(分别为2.86%~4.44%和4.90%~6.69%)和较低的 $Mg^{\#}$ (分别为89.0~91.0和90.2~92.1),与熔融程度较高的雅江缝合带西段东波超镁铁岩的斜方辉石和单斜辉石成分形成明显对比(其 Al_2O_3 含量分别为0.38%~3.67%和0.29%~4.71%, $Mg^{\#}$ 分别为90.3~92.8和92.7~99.4)^[26],指示乌瓦门超镁铁岩经历的部分熔融程度相对较低。乌瓦门超镁铁岩的尖晶石表现为高 $Mg^{\#}$ 、低 $Cr^{\#}$ 的特点, $Mg^{\#}=71.8\sim 77.5$, $Cr^{\#}=9.3\sim 13.4$,与印度Manipur蛇绿岩二辉橄榄岩尖晶石的成分一致(其 $Mg^{\#}$ 和 $Cr^{\#}$ 分别为72.6~74.4和10.8~23.3)^[36],这是熔融程度较低的地幔橄榄岩中尖晶石

的特征^[18-19]。在橄榄石 Fo -尖晶石 $Cr^{\#}$ 图解上(图4-a),乌瓦门超镁铁岩落于部分熔融程度较低的下方,为原始地幔橄榄岩经过较低部分熔融程度(小于10%)的残留物^[21];在尖晶石的 $Mg^{\#}$ - $Cr^{\#}$ 图解上(图4-b),乌瓦门超镁铁岩的尖晶石也集中于部分熔融程度较低的左下角,指示熔融程度小于10%^[23]。

此外,由于重稀土元素(HREE)在俯冲过程中不受影响,所以可以较好地反映地幔橄榄岩的部分熔融程度^[37-39]。根据计算的N-MORB地幔源区的分离熔融模式估算^[24,32](图8-a),乌瓦门超镁铁岩的熔融程度为5%~10%。Pearce等利用元素 Ti 、 V 和 Yb 计算模拟了不同氧逸度下MORB地幔源区经历不同程度部分熔融后的成分变化^[20],如图10所示,乌瓦门超镁铁岩也均落在熔融程度为5%~10%的残留地幔岩成分区间内。

综上所述,矿物成分、稀土元素和微量元素分布特征一致指示乌瓦门超镁铁岩可能经历了5%~10%的部分熔融作用,是熔融程度相对较低的残余地幔岩石。

5.3 形成环境及构造意义

Pearce等依据蛇绿岩形成的构造环境将其划分为形成于洋中脊的MOR型(Mid-Ocean-Ridge)蛇绿岩和形成于俯冲带之上的SSZ型(Supra-Subduction Zone)蛇绿岩^[40]。Robertson总结了MOR和SSZ型蛇绿岩在岩石学、矿物学和地球化学方面的区别^[41]:MOR型蛇绿岩中的地幔橄榄岩一般为二

表5 乌瓦门超镁铁岩的主量(%)和微量元素(10^{-6})地球化学分析数据
 Table 5 Major (%) and trace element (10^{-6}) compositions of the Wuwamen ultramafic rocks

岩石类型	二辉橄橄岩	二辉橄橄岩	二辉橄橄岩	二辉橄橄岩	二辉橄橄岩	二辉橄橄岩	二辉橄橄岩	二辉橄橄岩	二辉橄橄岩
样品号	12YX7-1	12YX7-2	12YX7-3	12YX7-4	12YX7-5	12YX7-8	12YX7-14	12YX7-18	12YX7-19
SiO ₂	44.86	43.24	44.4	44.82	42.68	43.58	45.05	42.48	44.36
TiO ₂	0.09	0.06	0.11	0.06	0.05	0.07	0.05	0.06	0.07
Al ₂ O ₃	3.3	2.81	2.67	2.92	2.62	2.89	2.98	2.45	3.27
Fe ₂ O ₃ Total	8.93	9.29	9.08	8.89	8.98	9.07	9.21	8.6	8.9
MnO	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12	0.13
MgO	36.69	40.61	40.35	39.12	40.31	38.58	40.05	38.9	38.68
CaO	3.58	2.62	2.4	2.9	2.52	2.58	2.7	2.12	3.42
Na ₂ O	0.26	0.18	0.22	0.18	0.18	0.16	0.21	0.14	0.23
K ₂ O	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0	0.01	0.01
LOI	3.38	1.54	0.69	1.6	3.07	3.46	0.42	5.44	1.66
Total	101.27	100.51	100.08	100.66	100.57	100.56	100.82	100.35	100.75
Mg [#]	89.2	89.7	89.9	89.8	90.0	89.5	89.7	90.0	89.7
Cr	2516	2793	2651	2717	2725	2620	2706	2592	2716
Mn	969	1038	1009	1023	1041	987	1007	957	963
Co	84.6	103	105	98.6	107	101	101	100	98.9
Ni	1641	1899	2039	1782	2069	1864	1904	1983	1858
Cu	31.2	15.3	22.4	10.5	8.87	8.79	14.1	29.2	12.8
Zn	55.8	58.7	51.3	54.3	61.2	50.0	54.4	50.4	54.5
Ga	2.69	2.39	2.28	2.5	2.22	2.55	2.47	2.03	2.72
Rb	1.39	0.64	0.4	1.07	0.84	1.09	0.6	0.83	0.54
Sr	74.5	26.7	13.8	34.5	26.4	49.8	19	23.8	49.5
Ba	7.56	6.21	3.84	11.7	8.82	7.38	4.46	3.83	4.96
Pb	0.64	1.32	0.33	1.23	2.51	1.16	0.45	0.48	0.35
Th	0.06	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.09	0.04	0.05
U	0.18	0.03	0.18	0.03	0.01	0.02	0.03	0.03	0.10
Nb	0.12	0.1	0.11	0.06	0.08	0.08	0.1	0.07	0.12
Ta	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07
Zr	3.28	1.03	2.9	0.73	0.81	1.79	1.45	1.66	1.41
Hf	0.10	0.04	0.11	0.04	0.04	0.08	0.06	0.07	0.07
Ti	519	295	615	315	272	418	300	368	382
V	77.8	68.2	63.4	71.4	66.7	68.2	71.7	57.8	74.2
Y	2.51	1.84	2.14	1.89	1.77	1.96	1.92	1.69	2.39
La	0.71	0.25	0.19	0.18	0.18	0.31	0.37	0.14	0.34
Ce	1.28	0.47	0.54	0.28	0.33	0.57	0.69	0.3	0.63
Pr	0.15	0.06	0.09	0.03	0.04	0.08	0.07	0.05	0.08
Nd	0.71	0.31	0.55	0.2	0.2	0.42	0.33	0.28	0.4
Sm	0.18	0.11	0.18	0.08	0.09	0.13	0.1	0.1	0.14
Eu	0.08	0.04	0.07	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.06
Gd	0.3	0.19	0.26	0.19	0.17	0.22	0.2	0.18	0.23
Tb	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05
Dy	0.42	0.30	0.36	0.28	0.27	0.33	0.27	0.27	0.35
Ho	0.09	0.06	0.08	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.08
Er	0.29	0.21	0.26	0.21	0.21	0.23	0.21	0.2	0.26
Tm	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
Yb	0.28	0.22	0.24	0.24	0.22	0.23	0.25	0.19	0.28
Lu	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
ΣREE	4.63	2.33	2.96	1.91	1.92	2.76	2.70	1.91	2.99
(La/Yb) _N	1.71	0.77	0.53	0.51	0.55	0.91	1.00	0.50	0.82
(La/Sm) _N	2.48	1.43	0.66	1.42	1.26	1.50	2.33	0.88	1.53
(Gd/Yb) _N	0.86	0.70	0.87	0.64	0.62	0.77	0.65	0.76	0.66
(La/Nd) _N	1.94	1.56	0.67	1.74	1.74	1.43	2.17	0.97	1.65

注: $Mg^{\#} = 100 \times Mg / (Mg + \Sigma Fe)$; $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 、 $(Gd/Yb)_N$ 和 $(La/Nd)_N$ 为球粒陨石标准化后的元素比值,球粒陨石数据来自文献[25]。

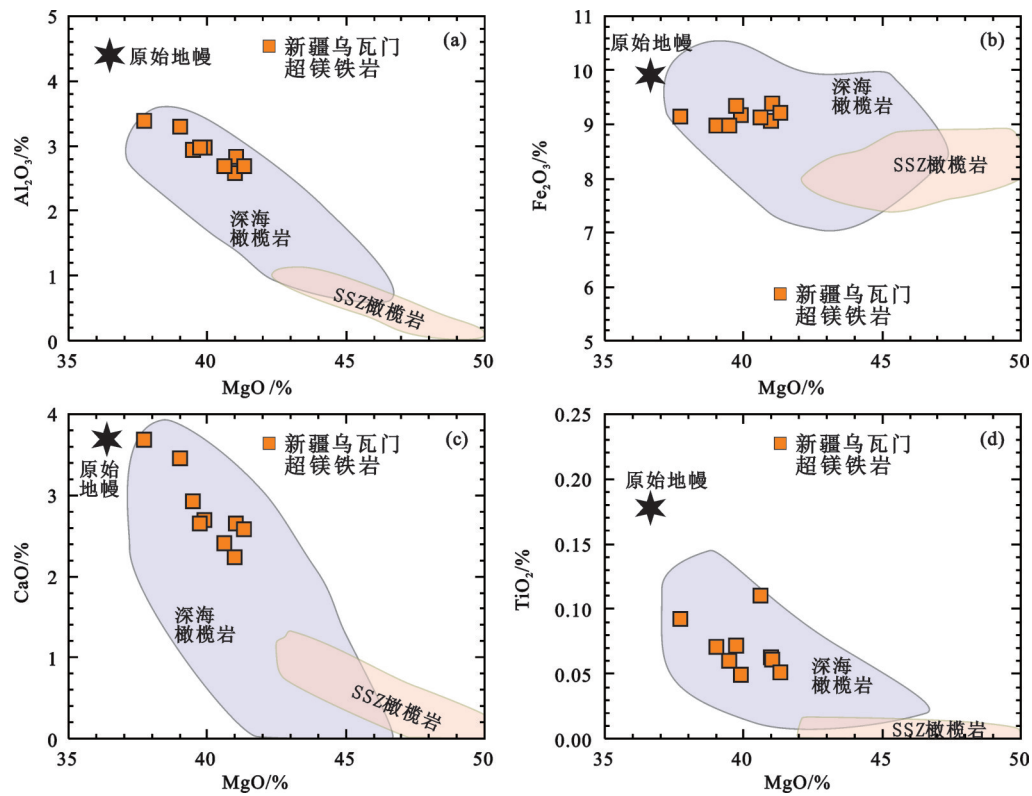


图7 乌瓦门超镁铁岩的MgO-Al₂O₃(a)、MgO-Fe₂O₃(b)、MgO-CaO(c)和MgO-TiO₂(d)协变图解
元素含量均为去除挥发分归一化之后的含量,深海橄榄岩和SSZ橄榄岩成分引自文献[27-28].
Fig. 7 MgO-Al₂O₃ (a), MgO-Fe₂O₃ (b), MgO-CaO (c) and MgO-TiO₂ (d) diagrams for the Wuwamen peridotites
The whole-rock major elements are volatile-free. Abyssal and SSZ peridotites fields after references [27-28]

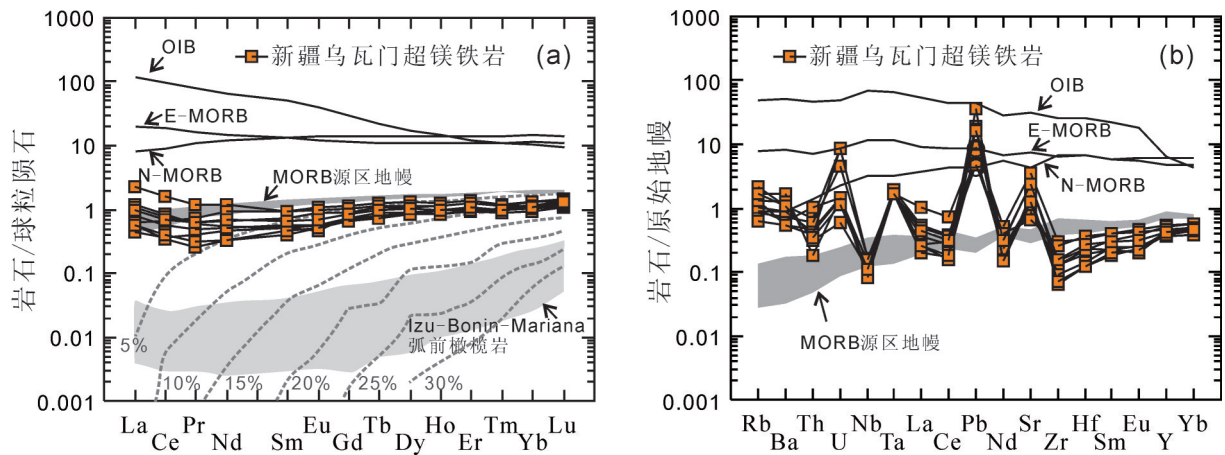


图8 乌瓦门超镁铁岩的球粒陨石标准化REE配分模式(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
球粒陨石数据文献[25],原始地幔微量元素数据文献[31];为对比研究,图中还给出了Izu-Bonin弧前盆地橄榄岩^[28]、MORB源区地幔^[29-30]、洋岛玄武岩(OIB)、E-MORB和N-MORB^[31]的稀土及微量元素配分模式;虚线为模拟的地幔橄榄岩部分经5%、10%、15%、20%、25%和30%部分熔融后的REE配分模式^[24,32]

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams for the Wuwamen peridotites
Chondrite values after reference [25], and the primitive mantle values after reference [31]. For comparison, REE patterns of Izu-Bonin forearc basin peridotites^[28], depleted-MORB-mantle source^[29-30], and ocean-island basalt (OIB), enriched-MORB and normal-MORB^[31] are also shown. Dashed lines represent the modeled spectrum of the peridotite compositions at 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% partial melting^[24,32]

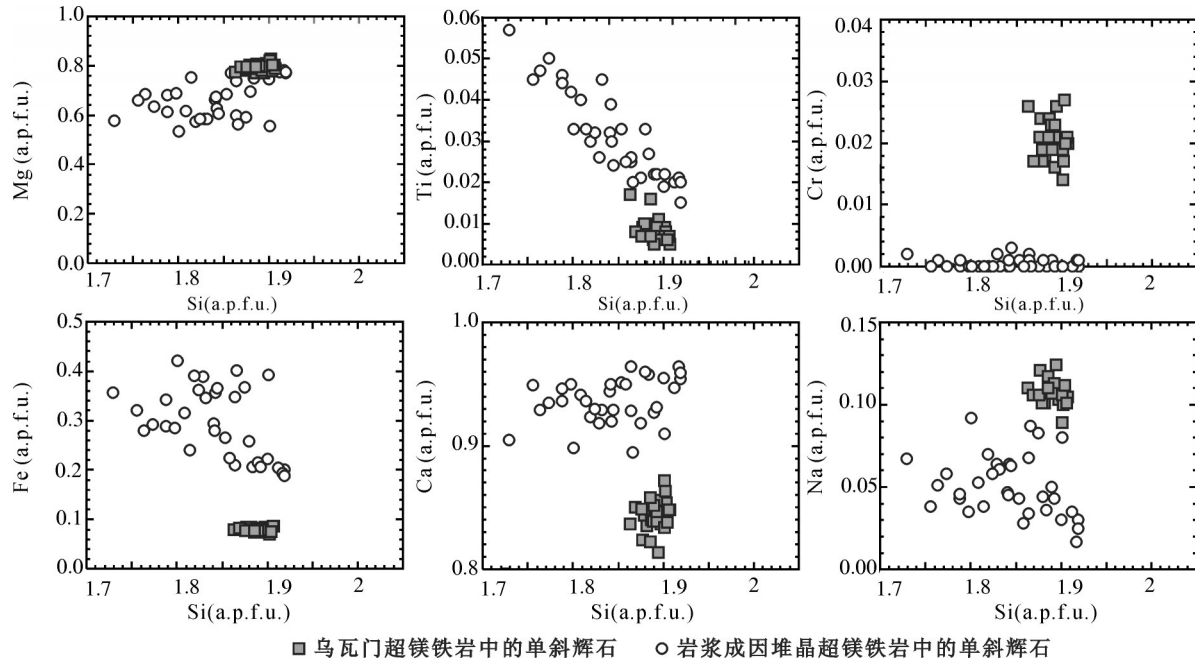


图9 乌瓦门超镁铁岩单斜辉石与岩浆成因堆晶超镁铁岩单斜辉石成分对比图解
a.p.f.u., 每个分子单元中元素的个数; 堆晶超镁铁岩单斜辉石数据来源于文献[35]

Fig. 9 Comparisons of clinopyroxenes from the Wuwamen peridotites with those from the ultramafic rocks of igneous, cumulate origin

a.p.f.u., The number of atoms per formula unit. Data of clinopyroxenes from the ultramafic rocks of igneous, cumulate origin after reference [35]

辉橄榄岩, 含有少量纯橄岩和方辉橄榄岩, LREE 亏损, 副矿物尖晶石的 $Cr^{\#}$ 低于 0.60; 上部火山岩为大洋拉斑玄武岩; 堆晶岩组成为纯橄岩、橄长岩和橄辉长岩, 结晶顺序为橄橄榄石—斜长石—单斜辉石; SSZ 型蛇绿岩中的地幔橄橄榄岩主要为方辉橄橄榄岩, 具有 LREE 富集的 V 型稀土配分模式, 尖晶石的 $Cr^{\#}$ 高于 0.60; 上部火山岩为岛弧拉斑玄武岩和玻安岩系火山岩; 堆晶岩为纯橄岩、异剥橄橄榄岩、单斜辉石岩和辉长岩, 结晶顺序为橄橄榄石—单斜辉石—斜方辉石—斜长石。造山带中出露的蛇绿岩并非上述 MOR 和 SSZ 型那么简单, 往往很复杂, 如西藏班公湖—怒江蛇绿岩带, 便同时出露 MOR 型和 SSZ 型蛇绿岩^[42]。

其中, 在判断蛇绿岩类型上, 地幔橄橄榄岩发挥着不可或缺的作用。本文对乌瓦门超镁铁岩的矿物学和岩石地球化学研究结果支持乌瓦门超镁铁岩可能为 MOR 型蛇绿岩中的地幔橄橄榄岩: (1) 乌瓦门超镁铁岩的组成矿物橄橄榄石、尖晶石、斜方辉石和单斜辉石的成分与深海橄橄榄岩矿物成分一致(图 4~6); (2) 其尖晶石的 $Mg^{\#}$ 为 71.8~77.5, $Cr^{\#}$ = 9.3~13.4

(小于 0.60), 与 MOR 型蛇绿岩中地幔橄橄榄岩尖晶石的成分一致(如印度 Manipur MOR 型二辉橄橄榄岩, 其 $Mg^{\#}$ 和 $Cr^{\#}$ 分别为 72.6~74.4 和 10.8~23.3)^[36]; (3) 全岩主要元素组成落于深海橄橄榄岩成分范围内(图 7); (4) 全岩重稀土配分模式与 N-MORB 源区地幔橄橄榄岩一致(图 8)。所以, 乌瓦门超镁铁岩应形成于洋中脊环境。不同的是, 乌瓦门超镁铁岩的 LREE 是富集的, 正常深海橄橄榄岩是亏损的, 这可能与大洋岩石圈在俯冲过程中与俯冲带处形成的熔体反应交代的结果^[43-44]; 已有研究证实亏损的地幔橄橄榄岩只需约 1% 的富集 LREE 等不相容元素的熔体加入, 其 LREE 配分模式即被改变^[28]; 此外, 在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 与大洋中脊玄武岩源区地幔的配分模式相比, 明显富集 Rb、Ba、Th、U、Sr 和 Pb 等活动性元素; 呈现 U、Sr、Pb 正异常(图 8-b), 这可能也是在俯冲带处于熔体反应交代的结果。MOR 型蛇绿岩中地幔橄橄榄岩富集 LREE 是较常见的现象, 如班公湖怒江蛇绿岩带日土角砾状方辉橄橄榄岩^[42]、印度 Manipur 蛇绿岩二辉橄橄榄岩^[36]。董云鹏等对乌瓦门蛇绿岩的玄武岩进行了研究, 揭示

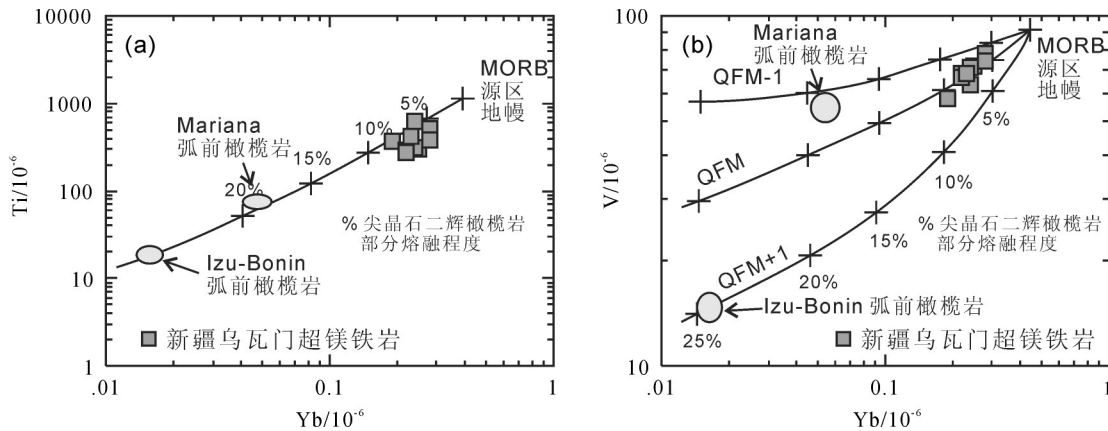


图10 乌瓦门超镁铁岩的Yb-Ti图解(a)和Yb-V图解(b)(据文献[20])

Fig. 10 Yb versus Ti (a) and Yb versus V (b) covariations for the Wuwamen peridotites (after reference [20])

其稀土配分模式为LREE亏损的N-MORB型;并具有与N-MORB一致的微量元素含量及比值;在构造环境判别图解中,也落入N-MORB区域内^[6]。乌瓦门玄武岩的地球化学表现与乌瓦门蛇绿岩可能为MOR型蛇绿岩的认识相一致。

乌瓦门蛇绿混杂岩向西为古洛沟和长阿吾子蛇绿岩,向东为库米什地区榆树沟—铜花山蛇绿岩,这些蛇绿岩代表伊犁中天山板块与塔里木地块之间的缝合线^[2,45-50]。关于南天山蛇绿岩的形成环境,前人提出了不同的认识,汤耀庆等认为古洛沟和长阿吾子蛇绿岩形成于小洋盆或弧后盆地环境^[4];关于榆树沟和铜花山蛇绿岩的形成环境,姜常义和李良辰认为是弧后盆地^[51],吴文奎等认为其形成于弧-盆或活动大陆边缘环境^[52];王润三等认为其形成于具相当规模的洋盆构造环境^[53-54],徐向珍等认为其成分复杂,包括可能来自岛弧和MORB多种构造背景的岩石单元^[8]。关于本文研究的乌瓦门蛇绿岩,董云鹏等认为乌瓦门蛇绿岩形成于弧后盆地环境^[6],主要依据是部分玄武岩样品具有不同程度的LILE、Th富集和Nb、Ta亏损。如上文所述,本文关于乌瓦门蛇绿混杂岩中超镁铁岩的矿物学和岩石地球化学数据支持其形成于洋中脊环境,该结论与董云鹏等^[6]结论有所不同,可能的原因:乌瓦门蛇绿混杂岩由构造岩块和混杂基质组成,本文研究的超镁铁岩和董云鹏等^[6]研究的玄武岩呈残块包裹在混杂基质中,两者可能来自于不同的构造环境,最终被构造运动裹挟到一起。

6 结论

基于对新疆中天山南缘乌瓦门蛇绿混杂岩中超镁铁岩的矿物学和岩石地球化学的研究,可以得出以下认识:

- (1) 乌瓦门蛇绿混杂岩中的超镁铁岩为二辉橄榄岩,具有亏损的矿物和全岩地球化学组成,为残余的地幔橄榄岩;
- (2) 乌瓦门蛇绿混杂岩中的超镁铁岩熔融程度相对较低,仅为5%~10%;
- (3) 乌瓦门蛇绿岩混杂岩中的超镁铁岩形成于洋中脊环境,为洋中脊(MOR)型蛇绿岩中的地幔橄榄岩。

致谢: 本文在矿物电子探针成分分析过程中,得到了中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室戎合的指导与帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Gao J, Li M S, Xiao X C, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan orogen, northwestern China[J]. Tectonophysics, 1998, 287: 213-231.
- [2] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-69.
Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, et al. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-169 (in Chinese).
- [3] 郝杰, 刘小汉. 南天山蛇绿混杂岩形成时代及大地构造意义[J].

- 地质科学, 1993, 28(1): 93–95.
- Hao Jie, Liu Xiaohan. Ophiolite mélangé time and evolutionary model in south Tianshan area[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1993, 28(1): 93–95 (in Chinese with English abstract).
- [4] 汤耀庆, 高俊, 赵民, 等. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 1–133.
- Tang Yaoqing, Gao Jun, Zhao Min, et al. The Ophiolites and Blueschists in Southwestern Tianshan Orogenic Belt, Xinjiang, Northwestern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 1–133 (in Chinese).
- [5] 李茂松, 何国琦, 高俊, 等. 中国西南天山的蛇绿岩带[C]/张旗主编. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 1996: 112–116.
- Li Maosong, He Guoqi, Gao Jun, et al. Ophiolite belts in Southwest Chinese Tianshan[C]/Zhang Qi (ed.). Study on Ophiolites and Geodynamics. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 112–116 (in Chinese).
- [6] 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 等. 中天山南缘乌瓦门蛇绿岩形成构造环境[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 37–44.
- Dong Yunpeng, Zhou Dingwu, Zhang Guowei, et al. Tectonic setting of the Wuwamen ophiolite at the southern margin of Middle Tianshan Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 37–44 (in Chinese with English abstract).
- [7] 杨经绥, 徐向珍, 李天福, 等. 新疆中天山南缘库米什地区蛇绿岩的锆石 U–Pb 同位素定年: 早古生代洋盆的证据[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 77–95.
- Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Li Tianfu, et al. U–Pb ages of zircons from ophiolite and related rocks in Kumishi region at the southern margin of Middle Tianshan, Xinjiang: Evidence of Early Paleozoic oceanic basic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 77–95 (in Chinese with English abstract).
- [8] 徐向珍, 杨经绥, 郭国林, 等. 新疆天山地区榆树沟—铜花山蛇绿岩特征和构造背景[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 96–120.
- Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Guo Guolin, et al. The Yushugou–Tonghuashan ophiolites in Tianshan, Xinjiang, and their tectonic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 96–120 (in Chinese with English abstract).
- [9] 李玮, 胡建民, 高卫, 等. 新疆南天山库尔干一带泥盆纪—早石炭世放射虫组合的发现[J]. 中国地质, 2007, 34(4): 584–591.
- Li Wei, Hu Jianmin, Gao Wei, et al. Discovery of a Devonian–Lower Carboniferous radiolarian assemblage in the Korgan area, South Tianshan Mountains[J]. *Geology in China*, 2007, 34(4): 584–591 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨天南, 李锦轶, 孙桂华, 等. 中天山早泥盆世陆弧: 来自花岗岩糜棱岩地球化学及 SHRIMP U–Pb 定年的证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 41–48.
- Yang Tiannan, Li Jinyi, Sun Guihua, et al. Earlier Devonian active continental arc in Central Tianshan: Evidence of geochemical analyses and zircon SHRIMP dating on mylonitized granitic rock[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 41–48 (in Chinese with English abstract).
- [11] 黄岗, 张占武, 董志辉, 等. 南天山铜花山蛇绿混杂岩中斜长花岗岩锆石 LA–ICP–MS 微区 U–Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2011, 38(1): 94–102.
- Huang Gang, Zhang Zhanwu, Dong Zhihui, et al. Zircon LA–ICP–MS U–Pb age of plagiogranite from Tonghuashan ophiolite in Southern Tianshan Mountains and its geological implications[J]. *Geology in China*, 2011, 38(1): 94–102 (in Chinese with English abstract).
- [12] 田亚洲, 杨经绥, 刘飞, 等. 新疆布鲁斯台辉长岩岩石学特征及对南天山洋俯冲时限的制约[J]. 岩石学报, 2014, 30(8): 2363–2380.
- Tian Yazhou, Yang Jingsui, Liu Fei, et al. Petrological characteristics of Bulusitai gabbro and its constraints to the time of South Tianshan ocean subduction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2363–2380 (in Chinese with English abstract).
- [13] Klemd R, John T, Scherer E E, et al. Changes in dip of subducted slabs at depth: Petrological and geochronological evidence from HP–UHP rocks (Tianshan, NW–China)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 310: 9–20.
- [14] 蒲晓菲, 宋述光, 张立飞, 等. 西南天山超高压变质带中志留纪岛弧火山岩岩片及其构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1675–1687.
- Pu Xiaofei, Song Shuguang, Zhang Lifei, et al. Silurian arc volcanic slices and their tectonic implications in the southwestern Tianshan UHPM belt, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1675–1687 (in Chinese with English abstract).
- [15] 高俊, 龙灵利, 钱青, 等. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带?[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1049–1061.
- Gao Jun, Long Lingli, Qian Qing, et al. South Tianshan: a Late Paleozoic or a Triassic orogen?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1049–1061 (in Chinese with English abstract).
- [16] 白建科, 李智佩, 徐学义, 等. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组碎屑锆石 U–Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 85–95.
- Bai Jianke, Li Zhipei, Xu Xueyi, et al. Detrital zircon U–Pb dating of Dahalajunshan Formation in Wusun Mountain region, western Tianshan, and its geological implications[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 85–95 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李向民, 董云鹏, 徐学义, 等. 中天山南缘乌瓦门地区发现蛇绿混杂岩[J]. 地质通报, 2002, 21(6): 304–307.
- Li Xiangmin, Dong Yunpeng, Xu Xueyi, et al. Discovery of ophiolitic mélangé in the Wuwamen area on the southern margin of the Central Tianshan Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(6): 304–307 (in Chinese with English abstract).

- [18] Dick H J B, Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, 86: 54–76.
- [19] Komor S C, Grove T L, Hebert R. Abyssal peridotites from ODP Hole 670A (21° 10' N, 45° 02' W): Residues of mantle melting exposed by non-constructive axial divergence[C]//Detrick R, Honnorez J, Bryan W B, et al (eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*. 1990, 106–109: 85–101.
- [20] Pearce J A, Barker P F, Edwards S J, et al. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, 139: 36–53.
- [21] Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation[J]. *Chemical Geology*, 1984, 113: 191–204.
- [22] Bridges J C, Prichard H M, Meireles C A. Podiform chromitite-bearing ultrabasic rocks from the Braganca massif, northern Portugal: fragments of island arc mantle?[J]. *Geology Magazine*, 1995, 132: 39–49.
- [23] Hirose K, Kawamoto T. Hydrous partial melting of lherzolite at 1 GPa: the effect of H₂O on the genesis of basaltic magmas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 133: 463–473.
- [24] Dupuis C, Hébert R, Dubois-Côté V, et al. The Yarlung Zangbo Suture Zone ophiolitic mélange (Southern Tibet): new insights from geochemistry of ultramafic rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25: 937–960.
- [25] Boynton W V. Geochemistry of the earth elements: Meteorite studies[C]//Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 1984: 63–114.
- [26] Niu X L, Yang J S, Xu J F, et al. Petrological and Os isotopic constraints on the origin of the Dongbo peridotite massif, Yarlung Zangbo Suture Zone, Western Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2015, 110: 72–84.
- [27] Niu Y L, Langmuir C H, Kinzler R J. The origin of abyssal peridotites: A new perspective[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 152: 251–265.
- [28] Parkinson I J, Pearce J A. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125), evidence for mantle melting, melt-mantle interaction in a suprasubduction zone setting[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39: 1577–1618.
- [29] Salters V J M, Stracke A. Composition of the depleted mantle[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2004, 5: Q05B07.
- [30] Workman R K, Hart S R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 231: 53–72.
- [31] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313–345.
- [32] Bezard R, Hébert R, Wang C S, et al. Petrology and geochemistry of the Xiugugabu ophiolitic massif, western Yarlung Zangbo suture zone[J]. *Lithos*, 2011, 125: 347–367.
- [33] Allègre C J, Poirier J P, Humler E, et al. The chemical composition of the Earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 134: 515–526.
- [34] Dick H J B. Partial melting in the Josephine peridotite, the effect on mineral composition and its consequence for geobarometry and geothermometry[J]. *American Journal of Science*, 1977, 277: 801–832.
- [35] 牛晓露, 陈斌, 马旭. 河北矾山杂岩体中单斜辉石的研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25: 359–373.
- Niu Xiaolu, Chen Bin, Ma Xu. Clinopyroxenes from the Fanshan pluton, Hebei[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25: 359–373 (in Chinese with English abstract).
- [36] Krishnakanta Singh A. Petrology and geochemistry of Abyssal Peridotites from the Manipur Ophiolite Complex, Indo-Myanmar Orogenic Belt, Northeast India: Implication for melt generation in mid-oceanic ridge environment[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2013, 66: 258–276.
- [37] Melcher F, Meisel T, Puhl J, et al. Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: constraints from geochemistry[J]. *Lithos*, 2002, 65: 69–112.
- [38] Pearce J A, Parkinson I J. Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis[C]//Magmatic Process and Plate Tectonics, Geological Society London, Special Publication, 1993, 76: 373–403.
- [39] Ozawa K, Shimizu N. Open-system melting in the upper mantle: constraints from the Hayachine-Miyamori ophiolite, northeastern Japan[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1995, 100: 22315–22335.
- [40] Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[C]//Kokelaar B P, Howells M F(eds.). *Marginal Basin Geology*. Geological Society of London, Special Publication, London, Blackwell Scientific Publications, 1984, 16:77–94.
- [41] Robertson A H F. Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region[J]. *Lithos*, 2002, 65: 1–67.
- [42] 史仁灯, 杨经绥, 许志琴, 等. 西藏班公湖存在 MOR 型和 SSZ 型蛇绿岩[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(5): 397–408.
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. Recognition of MOR- and SSZ-type ophiolites in the Bangong Lake ophiolite mélange, western Tibet: Evidence from two kinds of mantle

- peridotites[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(5): 397–408 (in Chinese with English abstract).
- [43] Parkinson I J, Pearce J A, Thirlwall M F, et al. Trace element geochemistry from the Izu–Bonin–Mariana forearc, Leg 125[C]// Fryer P, Pearce J A, Stokking L B, et al(eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results. 125*, College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1992: 487–506.
- [44] Pearce J A, van der Laan S R, Arculus R J, et al. Boninite and harzburgite from Leg 125 Bonin–Mariana forearc: a case study of magma genesis during the initial stages of subduction[C]//Fryer P, Pearce J A, Stokking L B, et al(eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results. 125*, College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1992: 623–674.
- [45] 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 香港: 香港文化教育出版社, 1994: 1–430.
- He Guoqi, Li Miaosong, Liu Dequan, et al. *Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China*[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, Hongkong: Education and Cultural Press Ltd., 1994: 1–430 (in Chinese).
- [46] 何国琦, 陆书宁, 李茂松. 大型断裂系统在古板块研究中的意义——以中亚地区为例[J]. *高校地质学报*, 1995, 1(1): 1–11.
- He Guoqi, Lu Shuning, Li Maosong. Tectonic significance of Large fault systems to the study of Paleo–plates[J]. *Geological Journal of Universities*, 1995, 1(1):1–11 (in Chinese with English abstract).
- [47] 何国琦, 成守德, 徐新, 等. 中国新疆及邻区大地构造图(1:2500000)[R]. 北京: 地质出版社, 2005.
- He Guoqi, Cheng Shoude, Xu Xin, et al. *An introduction to the Explanatory Text of the Map of Tectonics of Xinjiang and Its Neighboring area (1:2500000)*[R]. Beijing: Geological Publishing House, 2005 (in Chinese).
- [48] 王宝瑜, 郎智君, 李向东, 等. 中国天山西段地质剖面综合研究[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1–202.
- Wang Baoyu, Lang Zhijun, Li Xiangdong, et al. *Comprehensive Survey of Geological Sections in the West Tianshan of Xinjiang, China*[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1–202 (in Chinese).
- [49] 李锦轶, 肖序常. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述[J]. *地质科学*, 1999, 34(4): 405–419.
- Li Jinyi Xiao Xuchang. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(4): 405–419 (in Chinese with English abstract).
- [50] 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J]. *地质通报*, 2002, 21(2): 55–62.
- Xia Linqi, Zhang Guowei, Xia Zuchun, et al. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: Evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(2): 55–62 (in Chinese with English abstract).
- [51] 姜常义, 李良辰. 榆树沟层状堆积岩的岩石学和地球化学[J]. *矿物岩石*, 1990, 10(2): 31–36.
- Jiang Changyi, Li Liangchen. Petrology and geochemistry of layered cumulation rocks in Yushugou, Xinjiang[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1990, 10(2): 31–36 (in Chinese with English abstract).
- [52] 吴文奎, 姜常义, 杨复, 等. 南天山榆树沟–铜花山构造混杂体综述[J]. *西安地质学院学报*, 1992, 14(1): 8–13.
- Wu Wenkui, Jiang Changyi, Yang Fu, et al. The Yushugou–Tonghuashan structural mixite in Xinjiang[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1992, 14(1): 8–13 (in Chinese with English abstract).
- [53] 王润三, 周鼎武, 王居里, 等. 南天山榆树沟华力西期深地壳麻粒岩地体研究[J]. *中国科学(D辑)*, 1999, 29(4): 306–313.
- Wang Runsan, Zhou Dingwu, Wang Juli, et al. Variscan terrane of deep– crustal granulite facies in Yushugou area, southern Tianshan[J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 42(5): 482–490.
- [54] 王润三, 王居里, 周鼎武, 等. 南天山榆树沟遭受麻粒岩相变质改造的蛇绿岩套研究[J]. *地球科学*, 1999, 34(2): 166–176.
- Wang Runsan, Wang Juli, Zhou Dingwu, et al. Study on Yushugou ophiolite suite modified with the metamorphism of granulite facies in southern Tianshan[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(2): 166–176 (in Chinese with English abstract).