西准噶尔蛇绿混杂岩中的白云石大理岩和石榴角闪岩:早古生代残余洋壳深俯冲的证据*

朱永峰[1] 徐新[2] 陈博[1] 薛云兴[1]

ZHU YongFeng[1], XU Xin[2], Chen Bo[1] and XUE YunXing[1]

1. 北京大学地球与空间科学学院,造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871
2. 新疆资源环境中心,乌鲁木齐 830000
1. *The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China*
2. *Xinjiang Resources and Environment Center, Urumq 830000, China*

2008-07-20 收稿, 2008-09-20 改回.

Zhu YF, Xu X, Chen B and Xue YX. 2008. Dolomite marble and garnet amphibolite in the ophiolitic mélange in western Junggar: Relics of the Early Paleozoic oceanic crust and its deep subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12):2767 – 2777

Abstract This paper systematically described four outcrops (Darbut, Saertuohai, Baijiantan, and Baikouquan) of two ophiolitic belts (Darbut and Keramay) in western Junggar (Xinjiang, NW China), and especially made detailed studies on petrology of the spinel-bearing dolomite marble and meta-gabbro in these mélanges. The results showed that the dolomite marble was formed by prograde metamorphism of spinel peridotite in subduction zone, during which clinopyroxene was transformed to dolomite + quartz + magnetite assemblage, orthopyroxene and olivine were transformed to serpentine first, and serpentine was replaced by dolomite + quartz + magnetite assemblage finally. Three reactions: 1) diopside + CO_2 = dolomite + quartz, 2) serpentine + $CaCO_3$ = dolomite + quartz + magnetite + H_2O, and 3) the coesite/quartz transformation reaction constrain the *P-T* values of the metamorphism for the Bajiantan marble to be 660 ~ 670℃ and 26.5 ~ 27.5 kbar. These *P-T* values suggested that the Early Paleozoic ophiolitic mélange was subducted (to depth of ~ 70km) and exhumated to surface finally. Therefore, the Keramay ophiolite mélange represents the subduction zone formed at Late Paleozoic. Clinopyroxene in both meta-gabbro and spinel peridotites display exsolution lamellaes of spinel and orthopyroxene formed pre-subduction, and thus record the emplacement process of the ophiolitic mélanges. The studied ophiolitic mélanges in western Junggar not only represent the *P-T* conditions for the formation of the ophiolitic mélanges, but also record the *P-T* conditions for the subduction process of at least some rock units from these ophiolitic mélanges as well as their exhumation process. The ophiolitic mélanges in western Junggar really are a complex combination of very different rock units including primary ophiolitic units as well as the exhumated units from the subduction zone.

Key words Ophiolite; Marble; Subduction zone; Darbut; Keramay; Junggar; Xinjiang

摘 要 本文在描述达拉布特和克拉玛依蛇绿岩中四个典型剖面(达拉布特、萨尔托海、白碱滩和百口泉)的基础上,通过研究变白云石大理岩和石榴角闪岩的形成和演化过程,展示西准噶尔蛇绿混杂岩的复杂性。白碱滩白云石大理岩是尖晶石二辉橄榄岩变质反应的产物。变质反应导致单斜辉石转变为白云石 + 石英 + 磁铁矿,橄榄石和斜方辉石先转变为蛇纹石 + 磁铁矿,蛇纹石再转变为白云石 + 石英 + 磁铁矿。透辉石 + CO_2 = 白云石 + 石英 + 磁铁矿以及蛇纹石 + $CaCO_3$ = 白云石 + 石英 + 磁铁矿 + H_2O 这两个变质反应基本同时发生,他们以及石英—柯石英相变关系所限定的 *P-T* 空间(660 ~ 670℃,26.5 ~ 27.5 kbar)代表白云石大理岩的形成温度和压力。白云石大理岩与尖晶石二辉橄榄岩在一个不大的区域共存,说明循环到地球深部的尖晶石二辉橄榄岩(即:白云石大理岩的原岩)折返到地壳浅部后又与蛇绿岩中未俯冲的尖晶石二辉橄榄岩混杂在一起。因此,克拉玛依蛇绿混杂岩代表古俯冲带的位置。变辉长岩和尖晶石二辉橄榄岩中的单斜辉石均发育出溶结构(出溶尖晶石和斜方辉石)。这些出溶结构是蛇绿岩快速上升就位时由于温度和压力突然降低辉石发生分解反应的产物。因此,西

* 本文得到国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B08)资助.

第一作者简介:朱永峰,男,1965 年生,教授,博士生导师,岩石学、矿床学、地球化学专业, E-mail: yfzhu@pku.edu.cn

准噶尔蛇绿混杂岩中的岩石组合记录着蛇绿岩形成时期、以及之后部分岩块通过俯冲带循环到地慢深处(最大深度~70km)并折返到地壳浅部的全过程。西准噶尔蛇绿混杂岩带是一个多时期、多阶段和多成因岩石的混杂体。

关键词 蛇绿岩;大理岩;俯冲带;达拉布特;克拉玛依;准噶尔;新疆

中图法分类号 P588.313; P588.125

1 引言

新疆西准噶尔及其以北的塔尔巴哈台山南缘广泛出露蛇绿混杂岩(图1,冯益民,1986;师占义等,1986;朱宝清等,1987;郝梓国等,1989;张弛和翟明国,1993;Kwon *et al.*, 1989; Zhang *et al.*, 2001;Zhu *et al.*, 2008)。克拉玛依蛇绿岩(徐新等,2006;何国琦等,2007)和塔城北山早奥陶世蛇绿岩(朱永峰和徐新,2006)的发现促进了对该地区地质演化认识的深入。这些蛇绿混杂岩发生了程度不等的变质,局部强烈的动力变质很大程度上改变了蛇绿混杂岩的组成特征,在一些地区已经难以识别蛇绿混杂岩的层序。在另外一些地区或露头,蛇绿岩的各个单元保存完整。西准噶尔的奥陶—志留系海相沉积变质岩主要出露在唐巴勒地区(其中含志留纪蓝片岩,郭义华,1993;张立飞,1997)。在克拉玛依地区,古老的地质体最近才被识别出来(何国琦等,2007;朱永峰等,2007)。这些零星出露的早古生代地层被大面积下石炭统火山—沉积地层覆盖。下石炭统太勒古拉组为蛇绿混杂岩的主要围岩地层,其凝灰岩中锆石SHRIMP年龄为~328Ma(王瑞和朱永峰,2007)。达拉布特和克拉玛依蛇绿混杂岩的岩块呈带状出露,与太勒古拉组火山—沉积地层之间以断层形式接触。本文描述达拉布特和克拉玛依蛇绿岩带四个典型露头的剖面结构,在此基础上重点论述变质作用对这些蛇绿混杂岩的改造及其所记录的*P-T*条件。

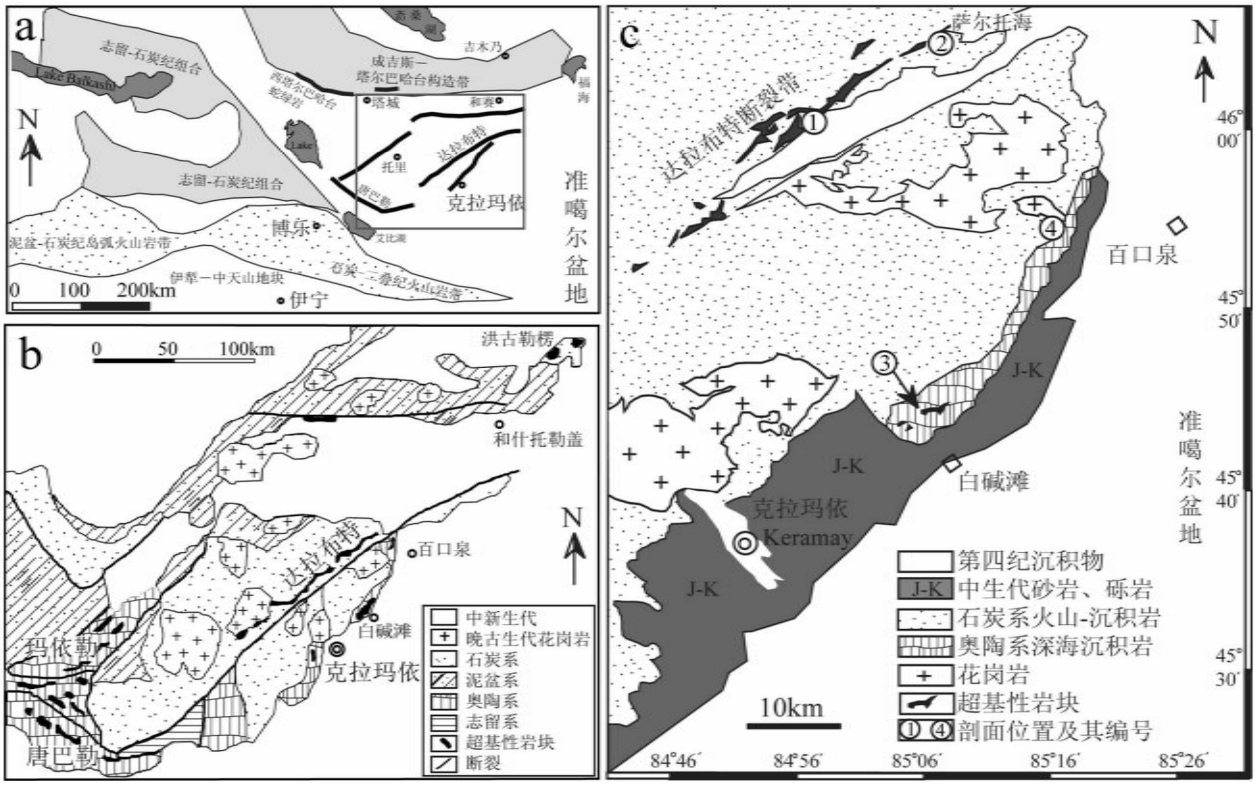


图1 研究区地质构造简图

a-西准噶尔及其邻区大地构造简图,显示多条蛇绿岩带的分布(据朱永峰和徐新,2006);b-西准噶尔地区地质简图(据徐新等,2006;何国琦等,2007;朱永峰等,2007);c-达拉布特和克拉玛依蛇绿混杂岩带的地质图,显示达拉布特①、萨尔托海②、白碱滩③和百口泉④四个露头的位置

Fig. 1 Simplified geological map for the studied region

a-Simplified tectonic map showing the tectonic structure of western Junggar and its adjacent region (modified after Zhu and Xu, 2006); b-The distribution of ophiolite belts in Western Junggar (based on Xu *et al.*, 2006; He *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2007); c-The geological map shows the outcrop locations of Darbut①, Saertuihai②, Baijiangtan③, and Baikouquan④ in the Darbut and Karamay ophiolitic belts

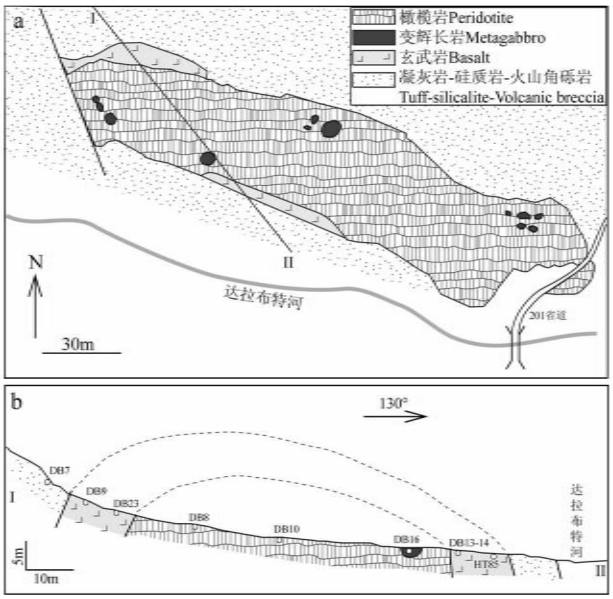


图 2 达拉布特蛇绿岩地质图以及实测剖面

a-达拉布特蛇绿岩露头的大比例尺地质图;b-蛇绿岩剖面图. 虚线代表被剥蚀的玄武岩层

Fig. 2 The geological and section map for the Darbut ophiolitic mélange

a-Geological map for the Darbut ophiolitic mélange; b-Section showing the relations of the rock units in the Darbut ophiolitic mélange

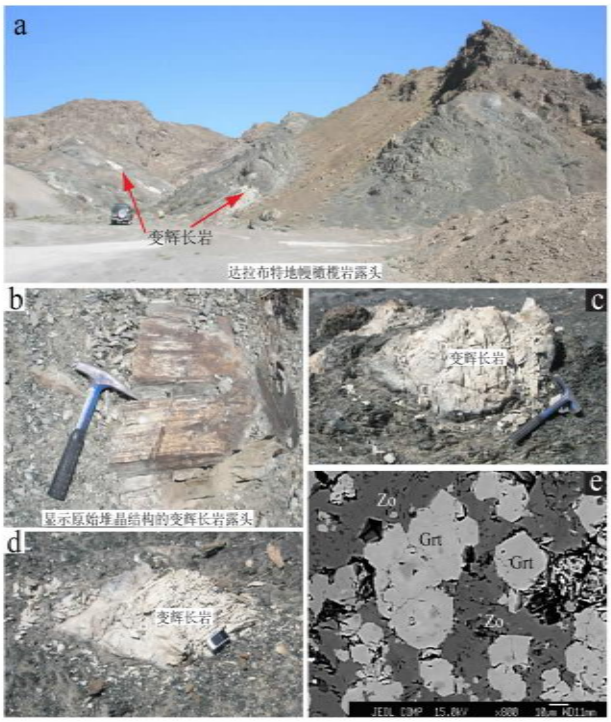


图 3 达拉布特蛇绿混杂岩的露头以及其中变辉长岩的岩相学特征

a-达拉布特蛇绿混杂岩露头的照片;b-变辉长岩露头显示出堆晶结构,野外照片;c-d-透镜状变辉长岩位于地幔橄榄岩中,野外照片;e-变辉长岩的电子显微镜背散射(BSE)图像,显示该岩石中的斜长石转变为石榴石+黝帘石

Fig. 3 The outcrop of the Darabute ophiolitic mélange and the petrographic characteristics of the metagabbro

a-Photo showing the outcrop of the Darbut ophiolitic mélange; b-Cumulate texture for the metagabbro; c-d-Metagabbro outcrop with different shapes in the serpentinized peridotite; e-BSE image showing the garnet + zoisite after plagioclase in metagabbro

2 达拉布特蛇绿混杂岩

达拉布特蛇绿岩带近 NE 向延伸超过 50km,大部分地段与达拉布特河谷(断裂带)平行。该蛇绿岩带中各岩石单元出露齐全,层序清楚,超镁铁岩分布广泛,且在其东北段发育豆荚状铬铁矿矿床(萨尔托海铬铁矿矿床目前在大规模开采)。达拉布特蛇绿岩带曾是我国重要的铬铁矿找矿靶区,该蛇绿岩带的两个出露完好的地区为达拉布特河桥(简称达拉布特)和萨尔托海。

2.1 达拉布特露头(位置见图 1c 中的①)

克拉玛依至铁厂沟的公路穿越达拉布特河桥的北岸是达拉布特蛇绿混杂岩出露最好的地区之一。我们通过最近 2 年的野外地质和实验室研究工作,完成了该露头的大比例尺地质图(图 2a)。该地区超镁铁岩露头呈带状近 EW 向展布,主体为尖晶石橄榄辉石岩和方辉橄榄岩,出露面积约 200m×45m,多数情况下与围岩呈断层接触。超镁铁岩块周围出露下石炭统凝灰岩夹硅质岩、粉砂岩、火山角砾岩和砂岩。局部见到该沉积地层与超镁铁岩之间的不整合接触关系(多数情况下为断层接触)。超镁铁岩主要由橄榄辉石岩和方辉橄榄岩组成,橄榄石基本被蛇纹石、滑石和磁铁矿交代。橄榄辉石岩的主要矿物组成为斜方辉石、橄榄石和铬尖晶石,蛇纹石化强烈。常见斜方辉石假象和橄榄石孤岛状假象。铬尖晶石为褐红色,多与斜方辉石构成共生连晶结构。橄榄辉石岩中的橄榄石主要呈孤岛状假象,橄榄石假象中保留着塑性变形的痕迹。在蛇纹石化较弱的样品中,斜方辉石的光性特点保存完好。在电子显微镜下观察到斜方辉石的交代残余结构,矿物局部转变为蛇纹石。斜方辉石出溶铬尖晶石的现象普遍发育(陈博和朱永峰,2008)。

近 SN 向的断裂控制着达拉布特超镁铁岩块的西部边界,岩块向东延伸到达拉布特河床之下,被完全覆盖,公路穿越超镁铁岩块的东部(图 2a)。在西北角见到被断裂带破碎的玄武岩覆盖在超镁铁岩之上,且在玄武岩层之上覆盖着薄层硅质岩。在该露头南侧出露玄武岩,并显示出不十分典型的岩枕构造。在超镁铁岩中多处见到变辉长岩团块(图 3a),这种变辉长岩团块形状各异,大小差别巨大(图 3a-d)。

一个近似矩形变辉长岩露头的出露面积约 3m×2m,一个长条状变辉长岩团块的出露面积约 1m×5m。大部分变辉长岩团块较小(0.05m×0.1m~0.3m×0.5m)。个别变辉长岩团块显示出明显的堆晶结构(图 3b)。变辉长岩主要由单斜辉石和具斜长石假象的钙铝榴石+黝帘石±钠长石组成(图 3e),其岩石学以及相关矿物的化学成分在另文(陈博和朱永峰,2008)中详细报道。单斜辉石普遍出溶棕褐色尖晶石。

分析该露头的剖面(图 2b)可以看出,超镁铁岩两侧出露玄武岩,变辉长岩仅呈团块分布在超镁铁岩之中。我们认为,变辉长岩是堆晶辉长岩变质的产物,在蛇绿岩剖面中应该位于超镁铁岩之上和玄武岩层之下。因此,该剖面图显示一个穹隆构造(图 2b):中心部位隆起超镁铁岩,其上部变辉长岩的大部分被剥蚀掉了,目前观察到的一些小团块是变辉长岩的残余。位于变辉长岩之上的玄武岩则大部分被剥蚀,仅在穹隆边部保留。

2.2 萨尔托海露头(位置见图 1c 中的②)

萨尔托海是我国著名的铬铁矿开采地区,豆荚状铬铁矿赋存在蛇绿岩剖面最下部的纯橄岩和橄榄岩中,目前从地下 300m~500m 深度开采着铬铁矿。图 4 显示该地区蛇绿混杂岩露头的野外照片(图 4a-c),出露岩块的示意性层序剖面(图 4d)及其我们 2008 年 5 月新测绘的剖面图(图 4e)。萨尔托海矿区北部山区主要由硅质岩和火山—沉积岩构成(位于剖面顶部),其下覆岩石为玄武岩。玄武岩和硅质岩均经历了强烈脆性变形,硅质岩发育 X 节理(图 4b),硅质岩与其下覆玄武岩之间整合沉积接触。剖面中部主要为破碎的玄武岩层,视厚度超过 270m。在玄武岩之下出露变辉长岩,该变辉长岩与下覆含豆荚状铬铁矿纯橄岩之间的接触关系被砂砾覆盖。该露头的变辉长岩与达拉布特露头上的变辉长岩没有区别,斜长石已经完全被石榴石和黝帘石±钠长石取代,单斜辉石则保持新鲜。

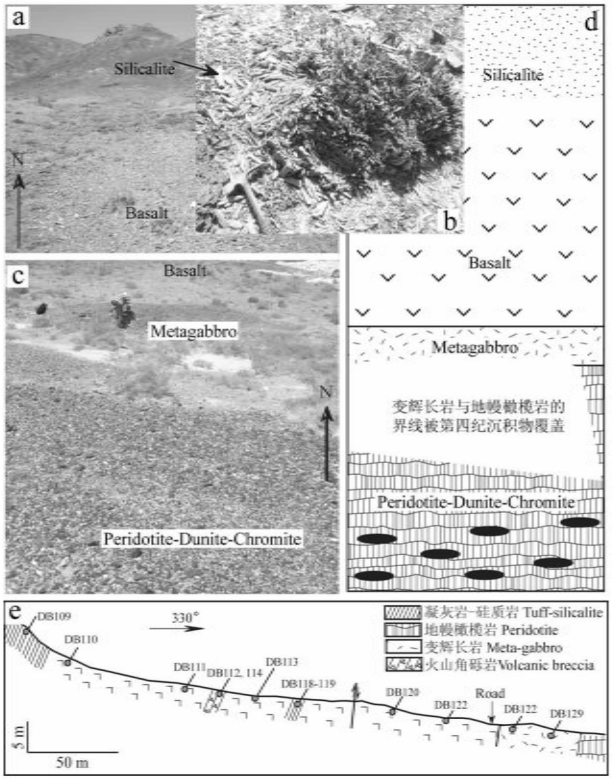


图 4 萨尔托海蛇绿混杂岩露头和组成特征

a-e-萨尔托海蛇绿混杂岩露头的野外照片以及强烈破碎的硅质岩;d-萨尔托海蛇绿岩的垂向剖面,岩层厚度没有按照比例尺;e-萨尔托海蛇绿岩的实测剖面

Fig. 4 The Saertuihai ophiolitic mélange

a-c-Photos showing field relations for the outcrop of the Saertuihai ophiolitic mélange and the destructive silicalite; d-Section showing relations among the different rock units, no scaled; e- Measured section showing the relations of the rock units in the Saertuohai ophiolitic mélange

3 克拉玛依蛇绿混杂岩

克拉玛依蛇绿岩带位于克拉玛依市扎依尔山与准噶尔盆地的边界上,呈 NE 向产出多个与硅质岩共生的超镁铁质岩体(徐新等,2006)。硅质岩中微体古生物化石研究表明,该蛇绿岩带的形成时代早于奥陶纪晚期(何国琦等,2007)。克拉玛依西南山区边缘零星出露一套深海浊积岩—硅质岩—枕状玄武岩,枕状玄武岩中锆石的最年轻 SHRIMP 年龄为~517Ma(朱永峰等,2007)。克拉玛依蛇绿混杂岩的两个著名露头(白碱滩和百口泉)之间有简易公路连接(与引水渠平行),且沿公路可以观察到断续出露的超镁铁岩块。向克拉玛依市区方向,超镁铁岩块逐渐被白垩纪砂砾岩地层覆盖。

3.1 白碱滩露头(位置见图 1c 中的③)

白碱滩露头位于克拉玛依市区 NE 约 30km 处。蛇绿混杂岩带呈 NE 向延伸,我们实测的剖面(图 5a)显示:地幔岩岩块(包括蛇纹石片岩、尖晶石二辉橄榄岩和辉石岩透镜体)之间夹有厚层硅质岩和凝灰岩。剖面顶部为玄武岩和凝灰岩—砂岩,火山—沉积岩之下出露辉长岩(局部已经转变为闪长岩,即辉石被蚀变为角闪石),在辉长岩与地幔岩之间存在一层硅质岩—凝灰岩。剖面下部出露大理岩,图 5c 显示一个夹在地幔岩中的大理岩透镜体。最大的大理岩块体出露在剖面最南端(出露面积约 130m×50m,图 5d),在大理岩存在蛇纹石化尖晶石二辉橄榄岩的透镜体(图 5d-e)。

该地区出露的地幔岩主要由新鲜辉石、橄榄石和边部磁铁矿化的铬尖晶石组成(图 6a-b)。显微结构研究表明,辉石发育出溶结构(斜方辉石出溶单斜辉石,单斜辉石出溶斜方辉石)。这种出溶结构表明,岩石经历了压力变化所诱发的变质作用(朱永峰和徐新,2007)。与这些超镁铁岩共同产出的白云石大理岩实质上是超镁铁岩变质反应的产物(见 4.2 节),大理岩中保留着蛇纹岩残留体以及铬尖晶石(图 6c)。

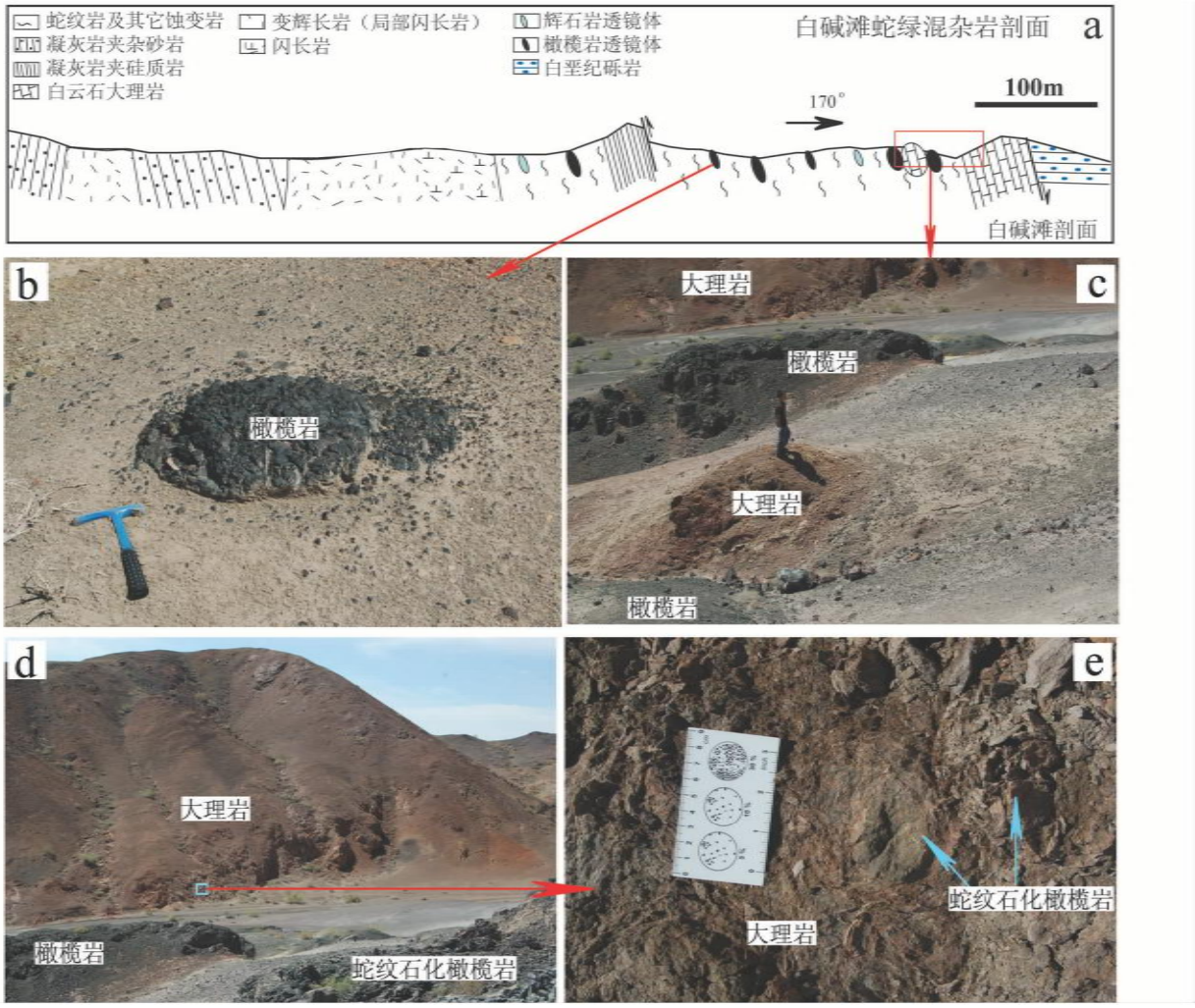


图5 白碱滩蛇绿岩的实测剖面以及尖晶石二辉橄榄岩和大理岩的关系

a-白碱滩蛇绿岩露头的实测剖面;b-强烈风化蛇纹石片岩中的尖晶石二辉橄榄岩透镜体;c-大理岩透镜体位于地幔岩之中;d-e-大理岩中保留的蛇纹石化橄榄岩

Fig. 5 Geological section of the Baijiangtan ophiolitic mélange and the relations between peridotite and marble

a-Geological section showing the Baijiangtan ophiolitic mélange; b-A peridotite lense in the strongly weathered serpentinite schist; c-Marble lenses coexist with peridotite; d-e-Serpentinized peridotite lense in the marble

在变质过程中,单斜辉石直接转变为白云石+石英+磁铁矿,橄榄石和斜方辉石先转变为蛇纹石+磁铁矿,蛇纹石再转变为白云石+石英+磁铁矿(图6c-e)。

尖晶石是白云石大理岩中唯一保留的地幔矿物,呈褐红色,边部被磁铁矿交代,具环带结构。尖晶石核部的端员组分变化巨大($Sp_{0.13\sim0.28}Chr_{0.84\sim0.61}Mt_{0\sim0.12}$),尖晶石边部相对贫Cr富Fe($Sp_{0\sim0.07}Chr_{0.57\sim0.43}Mt_{0.48\sim0.57}$)。在Sp-Mt-Chr三角图解上,尖晶石核部与边部完全分离(图7a)。在$Cr^{\#}$-$Mg^{\#}$上图解中(图7b),尖晶石核部$Cr^{\#}$和$Mg^{\#}$值均显示出比较大的变化范围,二者之间没有相关性。

3.2 百口泉露头(位置见图1c中的④)

百口泉露头位于克拉玛依市区东北约50km处。蛇绿混杂岩带呈NE向延伸,向SW方向与白碱滩露头连接为一个统一的蛇绿岩带。百口泉剖面如图8a所示,蛇绿混杂岩被下石炭统火山角砾岩覆盖,下石炭统火山角砾岩与蛇绿混杂岩中的玄武岩之间呈断层接触关系。该蛇绿岩剖面的主体是玄武岩,在玄武岩中零星分布着一些变辉长岩透镜体(最大的变辉长岩透镜体:110m×3m)和蛇纹石化橄榄岩透镜体(一般0.2m×0.7m~1m×2m),在一个蛇纹石化橄榄岩透镜体中见到大理岩(图8b)。剖面最南端由一个明显的断裂带限定,断裂以北的硅质岩夹凝灰岩强烈破碎,而以南的相同岩石保存完好。

百口泉蛇纹石化橄榄岩的原岩主要为辉石橄榄岩,较新鲜样品中保留的原生矿物包括单斜辉石和少量斜方辉石。单斜辉石显示明显的核幔结构:单斜辉石边部被角闪石交

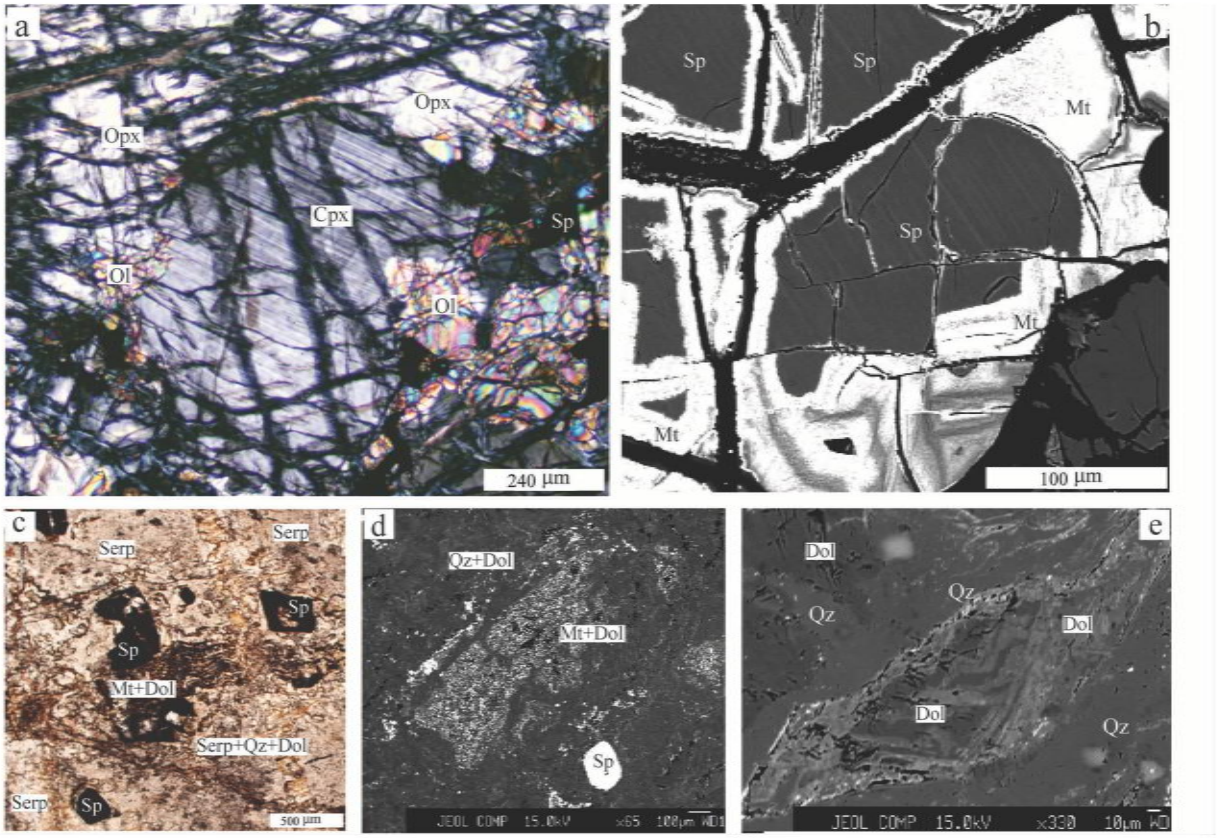


图 6 尖晶石二辉橄榄岩和白云石大理岩的岩相学特征

a-尖晶石二辉橄榄岩中的单斜辉石、斜方辉石、橄榄石和尖晶石,显示单斜辉石的出溶结构,正交偏光;b-二辉橄榄岩中尖晶石的环带结构,BSE 图像;c-e-白云石大理岩的显微照片,具环带结构的尖晶石分布在大理岩中(c,单偏光),斜方辉石被白云石 + 磁铁矿交代的假相与尖晶石共生(d,BSE),以及白云石与石英共生(e)。Cpx-单斜辉石,Dol-白云石,Mt-磁铁矿,Ol-橄榄石,Opx-斜方辉石,Qz-石英,Sp-尖晶石

Fig. 6 The petrographic characteristics of the spinel peridotite and dolomite marble

a-Microphotographs showing the mineral assemblage of the spinel peridotite, crossed polar; b-BSE image showing the zonation of Cr-spinel in peridotite, the light rim is magnetite; c-Microphotograph showing the mineral assemblage of the dolomite marble, plane polarized light; d-BSE image showing a pyroxene pseudomorph consisting of magnetite + dolomite coexisting with spinel; e-BSE image showing the coexistence of dolomite and quartz in marble. Cpx-clinopyroxene, Dol-dolomite, Mt- magnetite, Opx-orthopyroxene, Ol-olivine, Qz -quartz, Serp-serpentine, Sp-spinel

代,核部的单斜辉石发育出溶结构(图 8c)。变辉长岩中的斜长石均已经转变为黝帘石 + 石榴石 ± 钠长石,单斜辉石稳定存在,并发育出溶结构(图 8d)。

在距离百口泉剖面约 3km 的西南侧相应位置,见到石榴角闪岩透镜体沿断裂带分布。石榴角闪岩主要由角闪石和石榴石 + 黝帘石集合体组成(图 8e),其中含少量绿帘石、绿泥石、钠长石、钛铁矿、金红石、榍石、普通辉石、磷灰石、石英和锆石。石榴石中包裹着锆石、磷灰石、石英和金红石等矿物包体。初步研究表明(陈博等,2008),该石榴角闪岩至少记录了四个变质阶段:石榴石—单斜辉石—金红石—石英—磷灰石—锆石组成的阶段Ⅰ(可能为榴辉岩相),钙铝榴石—普通辉石—钛铁矿—磷灰石 ± 角闪石组成的退变阶段Ⅱ,角闪石—斜长石—榍石构成的阶段Ⅲ(角闪岩相),以及绿帘石—石英—绿泥石构成的绿片岩相变质阶段(Ⅳ)。

4 讨论

4.1 单斜辉石的出溶结构

变辉长岩中的单斜辉石均显示出溶结构:在一些样品中,单斜辉石出溶尖晶石叶片或者出溶棒,尖晶石出溶叶片一般呈棕褐色,相互平行并规则地沿一个方向排列,少数情况下观察到两组相互直交的出溶叶片(类似在塔城北山早奥陶世蛇绿岩中观察到的出溶结构,朱永峰和徐新,2006)。在另外一些样品中,单斜辉石出溶斜方辉石片晶(例如在百口泉变辉长岩中,图 8d),出溶叶片完全沿着单斜辉石的结晶方向分布。与中亚地区(例如哈萨克斯坦 Kokchetav 和中国西南天山)蛇绿混杂岩中辉石出溶结构(出溶石英、金云母和钾长石,Zhu and Ogasawara, 2002; Zhu, 2003; Zhang *et al.*,

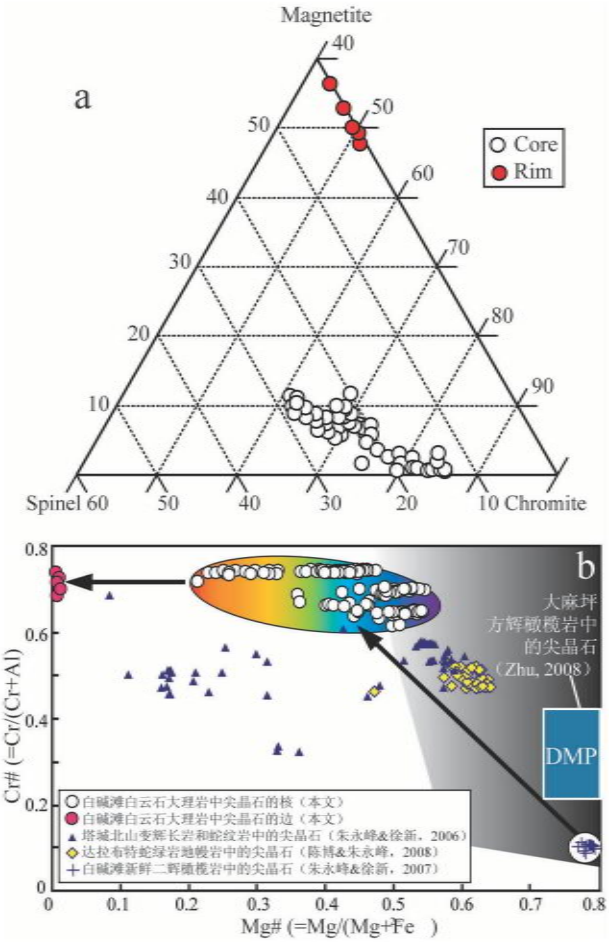


图 7 白云石大理岩中尖晶石的成分变异特征

a-白云石大理岩中尖晶石的 Spine-Mt-Chromite 三角图解;b-$Cr^{\#}$-$Mg^{\#}$变异图显示不同成因尖晶石的成分特点。塔城北山蛇绿岩中变质尖晶石引自朱永峰和徐新(2006)。大麻坪方辉橄榄岩中的尖晶石成分范围(Zhu, 2008)作为参照对比,带虚线的阴影区域代表蛇绿混杂岩中未变质尖晶石的成分空间(依据 Haggerty, 1991)

Fig. 7 Chemical compositions of the spinel in dolomite marble

a-Compositional plots for Cr-spinel in marble; b-Plot of $Cr^{\#}$-$Mg^{\#}$ shows the variations of spinel compositions in different rocks. Spinel from Damaping harzburgite (DMP, based on Zhu, 2008) is shown for comparison

2005)不同,西准噶尔的辉石出溶尖晶石,表明该岩石在较高温度条件下经历了快速抬升。尖晶石的形成温度相对比较高,西准噶尔蛇绿岩中尖晶石出溶结构主要是氧逸度变化和压力迅速降低诱发变质反应的结果。这种出溶结构记录了蛇绿岩的侵位事件。

尖晶石二辉橄榄岩中的单斜辉石也显示出溶结构,单斜辉石出溶斜方辉石(见图 6a,8c)。白碱滩尖晶石二辉橄榄岩中辉石出溶结构是相对高温条件下压力快速降低所诱发变质反应的产物(朱永峰和徐新,2007)。在百口泉蛇纹石化橄榄岩中观察到的单斜辉石出溶结构(图 8c)与在白碱滩见到的现象类似,说明克拉玛依地幔岩中发育的辉石出溶结构是地幔岩侵位过程的响应。

总之,西准噶尔变辉长岩和尖晶石二辉橄榄岩中观察到的辉石出溶结构代表着蛇绿岩的侵位事件,之后的俯冲和折返过程至少没有改变部分样品中的出溶结构(尽管在这些样品中,斜长石分解形成黝帘石 + 石榴石 ± 钠长石,部分单斜辉石被角闪石交代)。在变质作用发育强烈的地段,出溶结构完全消失,单斜辉石完全被角闪石取代(形成石榴角闪岩)或者转变为白云石 + 石英 + 磁铁矿(白云石大理岩)。

4.2 白云石大理岩的成因

白碱滩出露的白云石大理岩含大量铬尖晶石,其中绝大多数尖晶石保留着自形晶体(图 6c-d),说明该岩石经历的部分熔融程度不高(因为在地幔岩部分熔融过程中,尖晶石和单斜辉石首先熔融,Zhu, 2008)。因此,白碱滩大理岩的原岩最可能为尖晶石二辉橄榄岩。这与白碱滩出露大量新鲜尖晶石二辉橄榄岩岩块(图 5b-c,朱永峰和徐新,2007)的事实相吻合。白碱滩大理岩中铬尖晶石的成分很独特,以其相对较低的 $Mg^{\#}$和较高的 $Cr^{\#}$区别于正常地幔岩中的尖晶石。与同处一地的白碱滩二辉橄榄岩中的尖晶石相比,这种差异巨大(图 7b)。在图 7b 中还展示出西准噶尔其它蛇绿岩中尖晶石的成分特点。显然,经受变质改造的尖晶石(如塔城北山蛇绿岩中的尖晶石和白碱滩大理岩中的尖晶石)具有很大的 $Mg^{\#}$值变化空间,而未经过变质改造蛇绿岩中尖晶石的成分(如达拉布特蛇绿岩中的尖晶石和白碱滩二辉橄榄岩中的尖晶石)很均匀。这种成分上的巨大差异主要表现在变质岩中的尖晶石富 Fe、Al 而贫 Mg、Cr。这是一种从地幔岩特征向地壳岩石转变的趋势,说明地壳物质参与了变质反应(即:幔源尖晶石 + 地壳物质 = 白碱滩大理岩中的尖晶石)。如图 7b 所示,从二辉橄榄岩中的尖晶石转变到白云石大理岩中的尖晶石核需要增加大量 Fe 和 Al,这种成分上截然变化,表明他们各自平衡的物理化学条件完全不同。铬尖晶石成分的这种变化特征也说明,尖晶石二辉橄榄岩变质反应发生在非等化学的开放体系中,地壳物质参与了变质反应。

白碱滩大理岩是蛇纹石化尖晶石二辉橄榄岩发生变质反应的产物。在变质过程中,单斜辉石直接转变为白云石 + 石英 + 磁铁矿(图 6d),橄榄石和斜方辉石先转变为蛇纹石 + 磁铁矿,蛇纹石转变为白云石 + 石英 + 磁铁矿,反应关系表示如下:

$$(Ca, Mg, Fe)Si_2O_6 + CO_2 = (Mg, Ca)CO_3 + Fe_3O_4 + SiO_2 \quad (1)$$

蛇纹石仅在白云石大理岩的局部残存(图 6c),说明蛇纹石在变质过程中被分解。蛇纹石的分解产物是白云石 + 石英 + 磁铁矿。蛇纹石分解形成白云石需要消耗 $CaCO_3$,而富 $CaCO_3$ 流体在俯冲带环境中一般处于饱和状态(Kerrick

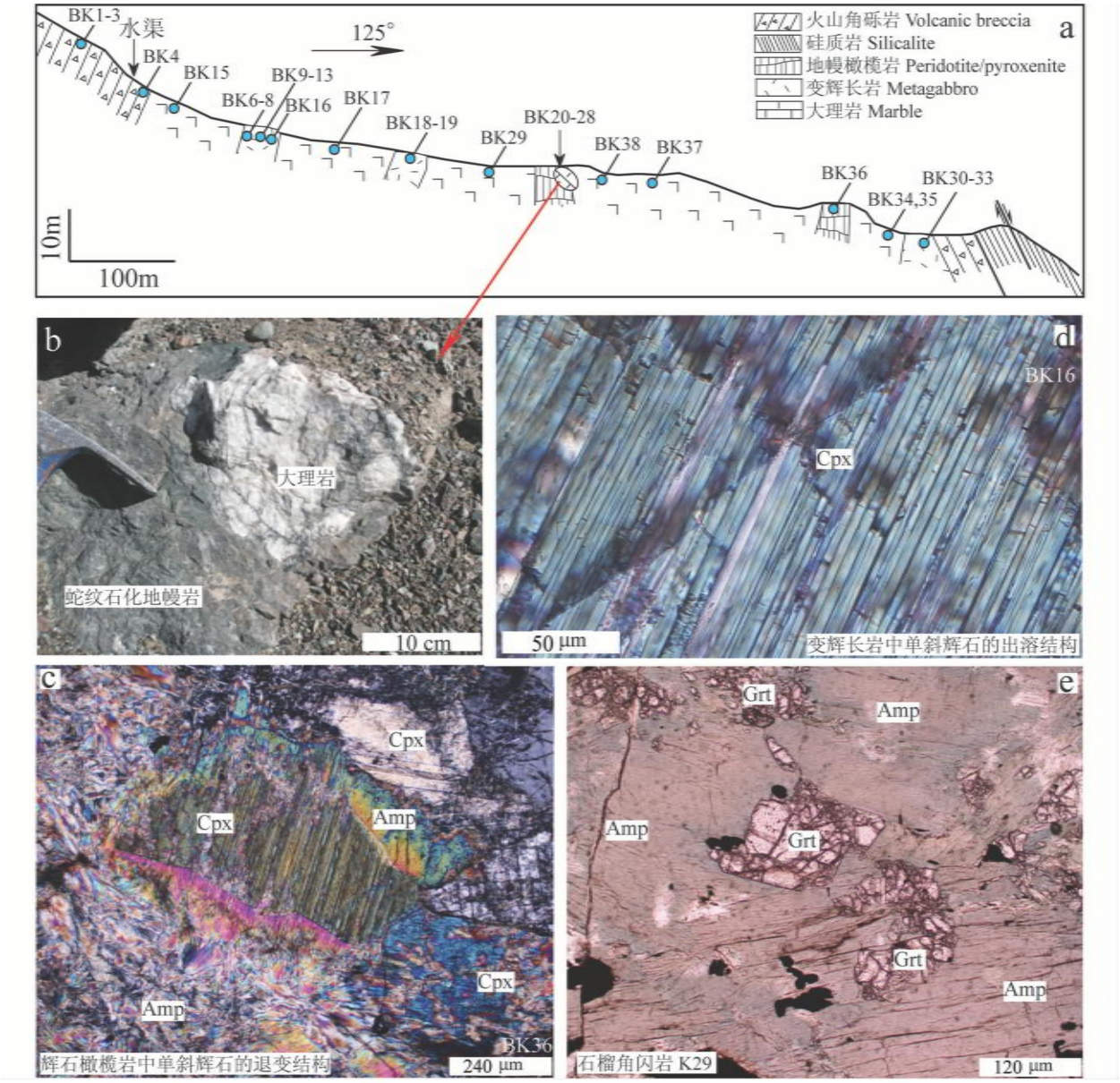


图 8 百口泉蛇绿岩剖面以及主要组成单元的岩相学特征

a-百口泉蛇绿岩露头的实测剖面图;b-与蛇纹石化橄榄岩共生的大理岩;c-辉石橄榄岩中单斜辉石的核幔结构,核部显示出溶结构,正交偏光;d-变辉长岩中单斜辉石的出溶结构,正交偏光;e-石榴角闪岩,单偏光。Amp-角闪石, Cpx-单斜辉石, Grt-石榴石

Fig. 8 The geological section of the Baikouquan ophiolitic mélange and its major rock units

a-Geological section showing the Baikouquan ophiolitic mélange; b-Photo shows the coexistence of peridotite and marble; c-Clinopyroxene with exsolution texture was replaced by amphibole along rim and formed core-rim texture in peridotite, crossed polars; d-Clinopyroxene with exsolution texture in metagabbro, crossed polars; e-Microphotographs showing the mineral compositions of the garnet amphibolite, plane polarized light. Amp-amphibole, Cpx-clinopyroxene, Grt-garnet

and Connolly, 2001),因此:

$$(Fe, Mg)_3[Si_2O_5](OH)_4 + CaCO_3 = (Mg, Ca)CO_3 + SiO_2 + Fe_3O_4 + H_2O \quad (2)$$

蛇绿混杂岩中常常出现各种成分的大理岩,其成因复杂多样(Jamieson, 1981; Searle and Cox, 2002; Banno, 2004)。本文所描述的白云石大理岩是尖晶石二辉橄榄岩发生变质反应的产物。这个过程代表蛇绿岩中的地幔岩岩块进入俯冲带所经历变质反应的物理化学条件。

4.3 对蛇绿岩俯冲深度的限定

反应(1)的发生具有重要科学意义,因为透辉石 + CO_2 = 白云石 + 石英(Berman, 1988)代表一个进变质过程,温度

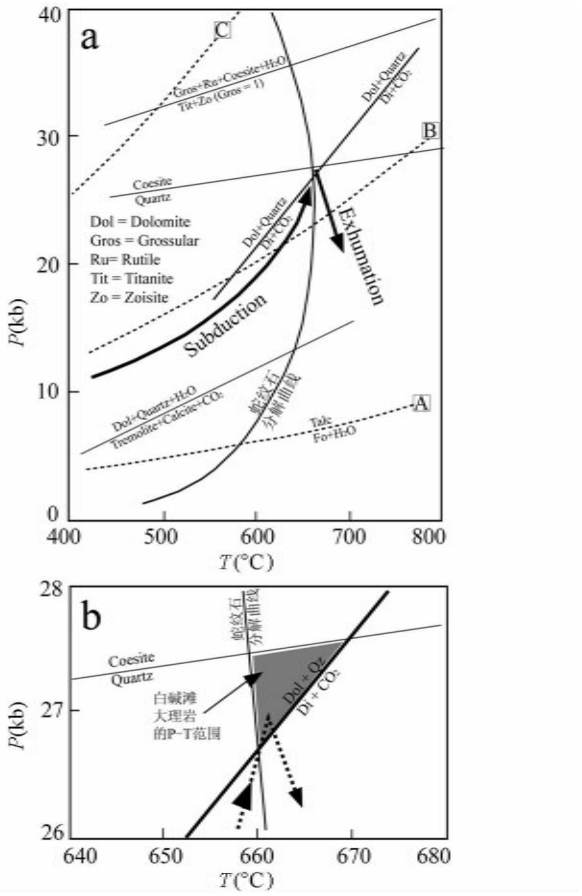


图 9 白碱滩大理岩的 *P-T* 空间图

a-白碱滩大理岩的 *P-T* 空间图(Di + CO_2 = Dol + Qz 依据 Berman, 1988;蛇纹石的分解边界依据 Wunder and Schreyer, 1997)。A、B、C 三条虚线分别代表三种不同年龄俯冲洋壳的 *PT* 轨迹(A-年轻洋壳,C-古老洋壳,依据 Peacock, 1990);b-a 的局部放大,显示俯冲的尖晶石二辉橄榄岩穿越 Di + CO_2 = Dol + Qz 反应线后,没有穿越石英-柯石英相变线而折返的 *P-T* 路径。Di-透辉石,Dol-白云石,Qz-石英

Fig. 9 Metamorphic *P-T* conditions for the Baijiangtan dolomite marble

The dashed lines A, B and C represents the *P-T* paths of subducted oceanic crust at different ages (based on Peacock, 1990); b-The enlarged *PT* space showing the subduction and exhumation *P-T* path for the Baijiangtan spinel peridotite and dolomite marble. Di-diopside, Dol-dolomite, Qz-quartz

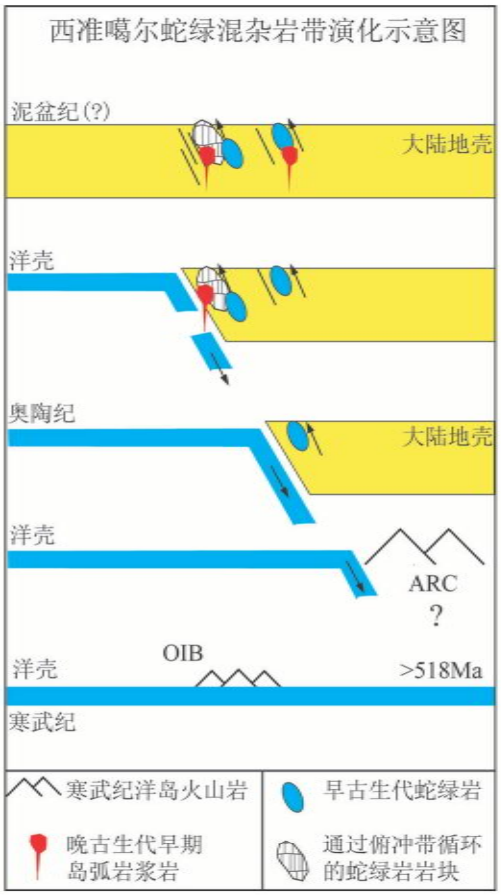


图 10 寒武—泥盆纪期间西准噶尔地壳演化模式图

Fig. 10 Sketch map showing the tectonic evolution of the western Junggar during Cambrian to Devonian

和压力升高导致这个变质反应发生。该反应的逆过程被认为是与柯石英榴辉岩伴生的高压—超高压大理岩退变质反应之一(Wang and Liou, 1993)。在白碱滩白云石大理岩中观察到的反应(1)发生在俯冲阶段(即:发生进变质反应)。反应(1)的 *P-T* 线与石英/柯石英转变的 *P-T* 线在大约 670℃ 和 27.5 kbar 的位置相交。石英与白云石共生说明形成白云石大理岩变质反应的最大压力没有到达柯石英稳定域,即大理岩的形成压力低于 27.5kbar(温度低于 670℃)。蛇纹石分解表明,温度达到或者超过 600℃ (P = 10 ~ 35 kbar)。蛇纹石分解反应提供了大量流体,加速了上述两个变质反应的进行。大理岩中的白云石与石英共生(图 6d, e)。这些事实支持上述结论:蛇纹石化二辉橄榄岩通过变质反应形成了白云石大理岩,在此过程中,尖晶石的成分也发生了变化(图 7b)。反应(1)和(2)可以限定形成白碱滩白云石大理岩的 *P-T* 范围(660 ~ 670℃,26.5 ~ 27.5 kbar,图 9)。白碱滩白云石大理岩是蛇绿岩中蛇纹石化尖晶石二辉橄榄岩通过俯冲带循环到地球深部 ~ 70km 时发生变质反应的产物。

5 结论

西准噶尔在早古生代蛇绿岩混杂岩就位后,至少其中的部分岩块(片)通过俯冲带循环到地幔深部。变辉长岩、石榴角闪岩、白云石大理岩与尖晶石二辉橄榄岩在一个不大的区域共存,说明循环到地球深部的蛇绿岩岩块(现在为白云石大理岩、石榴角闪岩和变辉长岩)折返到地壳浅部后又与蛇绿岩中的尖晶石二辉橄榄岩(即:白云石大理岩的原岩)混杂在一起。因此,克拉玛依蛇绿岩带标志着古俯冲带的位置。

蛇绿岩的就位时间应该早于形成白云石大理岩和石榴角闪岩的变质事件。也就是说,蛇绿混杂岩形成后,其中的部分岩块进入俯冲带,被拖曳到~70km的深度,通过变质反应(1)和(2),形成了白云石大理岩。这个过程很好地解释了该蛇绿混杂岩中锆石SHRIMP年龄(~414Ma和~332Ma,徐新等,2006)与微体古生物化石所确定时代(>444Ma,何国琦等,2007)之间的矛盾。

图10示意性地展示西准噶尔在古生代早期的地质演化格局。西准噶尔在寒武纪呈多岛洋状态,形成一些洋岛玄武岩(朱永峰等,2007)。从寒武纪晚期—奥陶纪早期开始,形成了俯冲带并导致洋壳消减。在早奥陶世出现洋壳残余(蛇绿岩),这种过程持续时间可能较长。奥陶纪蛇绿岩中的一些岩块进入俯冲带并被拖曳到比较深的地方,发生变质改造。随着俯冲作用的结束,一些经历了高压变质的地幔岩和变辉长岩折返到地壳浅部(可能发生在泥盆纪)。因此,目前西准噶尔蛇绿混杂岩带是一个多时期、多阶段和多成因岩石的混杂体。

致谢 国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B08)资助成果。实验室工作得毛骞(中国科学院地质与地球物理研究所)和Massonne HJ(德国Stuttgart大学)的大力协助。李锦轶研究员阅读了初稿并提出了修改意见,许继峰研究员对文章提出诸多建设性的修改意见,作者一并致谢。

References

Banno S. 2004. Ultramafic rocks and associated eclogites of the Sanbagawa schists, Japan: A review. International Geology Review, 46: 693 – 704

Berman RG. 1988. Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-CO_2. Journal of Petrology, 29: 445 – 522

Chen B, Zhu YF. 2008. Petrology of ultramafic rock in Darbut ophiolite (Xinjiang), evidence from Cr-spinel. Earth Science Frontier, 15(5): in press (in Chinese with English abstract)

Chen B, Zhu YF, Wei SN and Xu X. 2008. Garnet amphibolite found in Keramay ophiolitic mélange, western Junggar, NW China. Acta Petrologica Sinica, 24(5): 1034 – 1040 (in Chinese with English Abstract)

Fen YM. 1986. Genetic environments and original types of ophiolites in west Junggar. Bull. Xi'an Inst. Geol. Min. Res., Chinese Acad. Geol. Sci., 13: 37 – 45 (in Chinese with English abstract)

Guo YH. 1983. The blueschist in Tangbale, Xinjiang. In: Plate Tectonic of North of China. Beijing: Geological Publishing House, 89 – 104 (in Chinese)

Haggerty SE. 1991. Oxide mineralogy of the upper mantle. In: Lindsley DH (ed.). Oxide Mminerals: Petrologic and Magnetic Significance. Reviews in Mineralogy, 25: 355 – 416

Hao ZG, Wang XB, Bao PS, Peng GY and Jin YX. 1989. Geological characteristics and genetic study of two types ophiolites in western Junggar, Xinjiang Uygur Autonomous Region. Acta Petrologica et Mineralogica, 8: 299 – 310 (in Chinese with English abstract)

He GQ, Liu JB, Zhang YQ and Xu X. 2007. Keramay Ophiolitic mélange formed during Early Paleozoic in western Junggar basin. Acta Petrologica Sinica, 23(7): 1573 – 1576 (in Chinese with English Abstract)

Jamieson RA. 1981. Metamorphism during ophiolite emplacement the petrology of the St. Anthony Complex. Journal of Petrology, 22: 397 – 449

Kerrick DM and Connolly JAD. 2001. Metamorphic devolatilization of subducted oceanic metabasalts: Implications for seismicity, arc magmatism and volatile recycling. Earth and Planetary Science Letters, 189: 19 – 29

Kwon ST, Tilton CR, Coleman *et al*. 1989. Isotopic investigations on the tectonic of the west Junggar region, Xinjiang, China. Tectonics, 8: 719 – 727

Peacock SM. 1990. Fluid processes in subduction zones. Science, 248: 329 – 337

Searle MP and Cox J. 2002. Subduction zone metamorphism during formation and emplacement of the Semail ophiolite in the Oman Mountains. Geological Magazine, 139: 241 – 255

Shi ZY, Li JM and Li ZX. 1986. The discovery and study of the mantle-derived spinel-lherzolite in the Darbut ultrabasic rock belt Xinjiang. Acta Geologica Sinica, 4: 339 – 350 (in Chinese with English abstract)

Wang R and Zhu YF. 2007. Geology of the Baobei gold deposit in western Juggar and zircon SHRIMP age of its wall-rocks, western Junggar (Xinjiang, NW China). Geological Journal of China Universities, 13: 590 – 602 (in Chinese with English abstract)

Wang XM and Liuo JG. 1993. Ultra-high-pressure metamorphism of carbonate rocks in the Dabie mountains, central China. J. Metamorphic Geol., 11: 575 – 588

Wunder B and Schreyer W. 1997. Antigorite: High-pressure stability in the system MgO-SiO_2-H_2O (MSH). Lithos, 41: 213 – 227

Xu X, He GQ, Li HQ *et al*. 2006. Basic characteristics of the Karamay ophiolitic mélange, Xinjiang, and its zircon SHRIMP dating. Geology in China, 33: 470 – 475 (in Chinese with English Abstract)

Zhang C and Zhai MG. 1993. Ophiolitic belts and their genetic environment in western Junggar. In: Tu GZ (ed.). New Improvement of Solid Geosciences in Northern XinJiang. Beijing: Science Press (in Chinese)

Zhang LF. 1997. $^{40}Ar/^{39}Ar$ age of blueschists in Tangbale, Western Junggar, Xinjiang, and its significance. Chinese Science Bulletin, 42: 2178 – 2181

Zhang LF, Sun M and Xu B. 2001. Phase relations in garnet-bearing metabasites of prehnite-pumpellyite facies from the Darbut-Sartuohai ophiolite, Western Junggar of Xinjiang, China. Mineralogy and Petrology, 71: 67 – 85

Zhang LF, Song SG and Ai YL. 2005. Relict coesite exsolution in omphacite from western Tianshan eclogites, China. Am. Min., 89: 180 – 186

Zhu BQ, Wang LS and Wang LX. 1987. Paleozoic Era ophiolite of southwest part in western Junggar, Xinjiang, China. Bull. Xi'an Inst. Geol. Min. Res., Chinese Acad. Geol. Sci., 17: 3 – 64 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF. 2003. Comments on "Crystal-melt equilibria involving potassium- bearing clinopyroxene as indicator of mantle-derived ultrahigh-potassic liquids: An analytical review" by Perchuk LL, Safonov OG, Yapaskurt VO and Barton Jr. JM [Lithos 60 (2002) 89 – 111]: K-feldspar in metamorphic clinopyroxene, from exsolution to potassium replacement. Lithos, 68: 115 – 119

Zhu YF. 2008. K- and Si-rich glasses in Harzburgite from Damaping, North China. Island Arc, 17: 560 – 576

Zhu YF and Ogasawara Y. 2002. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene. International Geology Review, 44: 831 – 836

Zhu YF and Xu X. 2006. The discovery of early Ordovician ophiolite mélange in Taerbahatai Mts., Xinjiang, NW China. Acta Petrologica Sinica, 22: 2833 – 2842 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF and Xu X. 2007. Exsolution texture of two-pyroxenes in lherzolite from Baijiantan ophiolitic melange, western Junggar, China. Acta Petrologica Sinica, 23: 1075 – 1086 (in Chinese with English

abstract)

Zhu YF, Xu X, Wei SN *et al*. 2007. Geochemistry and tectonic significance of IOB-type pillow basalts in western Mts. of Karamay city (western Junggar), NW China. Acta Petrologica Sinica, 23(7): 1739 – 1748 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF, Chen B, Massonne HJ and Xu X. 2008. An Early Paleozoic high-pressure metamorphic belt established in western Junggar, Xinjiang (central Asia), NW China. Abstract of the IGC 33th, ISA – 05. Oslo 2008 (CD-ROM)

附中文参考文献

陈博,朱永峰. 2008. 达拉布特蛇绿岩中的超镁铁岩岩石学研究. 地学前缘, 待刊

陈博, 朱永峰, 魏少妮, 徐新. 2008. 西准噶尔克拉玛依蛇绿混杂岩中的石榴角闪岩. 岩石学报,24(5):1034 – 1040

冯益民. 1986. 西准噶尔蛇绿岩生成环境及其成因类型. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 13: 37 – 45

郭义华. 1983. 新疆唐巴勒地区的蓝片岩. 见:中国北方板块构造论文集. 北京:地质出版社,89 – 104

郝梓国, 王希斌, 鲍佩声等. 1989. 新疆西准噶尔两类蛇绿岩地质特征及成因研究. 岩石矿物杂志, 8: 299 – 310

何国琦, 刘建波, 张跃迁, 徐新. 2007. 准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂岩带的厘定. 岩石学报, 23(7): 1573 – 1576

师占义, 李金铭, 李振兴. 1986. 新疆达拉布特超基性岩(带)中地幔尖晶石二辉橄榄岩的发现与研究. 地质学报, 4: 339 – 350

王瑞, 朱永峰. 2007. 西准噶尔宝贝金矿地质与容矿火山岩的锆石SHRIMP年龄. 高校地质学报, 13: 590 – 602

徐新, 何国琦, 李华芹等. 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: 470 – 475

张弛, 翟明国. 1993. 西准噶尔蛇绿岩带及其形成环境. 见:涂光炽主编. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 53 – 78

张立飞. 1997. 新疆西准噶尔唐巴勒蓝片岩$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄及其地质意义. 科学通报, 42: 2178 – 2181

朱宝清, 王来生, 王连晓. 1987. 西准噶尔西南地区古生代蛇绿岩. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 17: 3 – 64

朱永峰, 徐新. 2006. 新疆塔尔巴哈台发现早奥陶世蛇绿混杂岩. 岩石学报, 22: 2833 – 2842

朱永峰, 徐新. 2007. 西准噶尔白碱滩二辉橄榄岩中两种辉石的出溶结构及其地质意义. 岩石学报, 23: 1075 – 1086

朱永峰, 徐新,魏少妮等. 2007. 西准噶尔克拉玛依OIB型枕状玄武岩地球化学及其地质意义研究. 岩石学报, 23(7): 1739 – 1748