地学前缘
EARTH SCIENCE FRONTIERS

新疆达拉布特超镁铁岩成因——来自铬尖晶石的证据

陈　博，　朱永峰*

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

Chen Bo，　Zhu Yongfeng*

The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, China; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, *China*

Chen Bo, Zhu Yongfeng. Petrology of ultramafic rock in Darbut ophiolite (Xinjiang), evidence from Cr-spinel. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 312-322

Abstract: This paper reports the investigation on the petrology of spinel harzburgite and olivine pyroxenite in the Darbut ophiolitic mélange, as well as the worm-like intergrowth texture composed of Cr-spinel and orthopyroxene wide-spreading in harzburgite (Western Junggar, Xinjiang). Our study shows that the observed intergrowth texture is not a graphic texture or a symplectite as assumed by previous research, instead, it is a product of the evolution of the Cr-rich magma formed after the melting of the primitive mantle. After highly fractionating, this Cr-rich magma formed massive chromite (i. e., Sa'ertuohai chromite deposit), and the melt moved into the mantle rock, and formed the worm-like intergrowth texture consisting of Cr-spinel and orthopyroxene. Therefore, the intergrowth texture of Cr-spinel and pyroxene can be an important indicator for podiform chromite exploration. We also report the exsolution texture of Cr-spinel in orthopyroxene in the studied harzburgite, and suggest that it is the result of a metamorphic reaction induced by the drastic increase of oxygen fugacity during the rapid emplacement of Darbut ophiolite.

Key words: Darbut; ophiolite; Cr-spinel; intergrowth texture; exsolution texture; Xinjiang

摘　要：通过研究西准噶尔达拉布特蛇绿混杂岩中方辉橄榄岩和橄榄辉石岩的岩石学特征，分析方辉橄榄岩广泛发育的铬尖晶石和斜方辉石构成的蠕虫状共生连晶结构的成因，得出结论认为：这种共生连晶结构不是前人所认为的文象结构或者石榴石的后成合晶，而是原始地幔岩熔融形成富铬岩浆的演化产物。这种富铬岩浆高度分异形成铬铁矿块体(即萨尔托海铬铁矿矿床)后，熔体进入地幔岩中结晶形成铬尖晶石和斜方辉石的蠕虫状共生连晶结构。因此，铬尖晶石与辉石的共生连晶结构可以作为豆荚状铬铁矿的重要找矿标志。方辉橄榄岩中的斜方辉石发育铬尖晶石出溶结构，出溶棒的成分特点表明，该结构是达拉布特蛇绿岩在快速就位过程中环境氧逸度突然升高诱发变质反应的结果。

关键词：达拉布特；蛇绿岩；铬尖晶石；共生连晶结构；出溶结构；新疆

中图分类号：P588.12　**文献标志码**：A　**文章编号**：1005-2321(2008)06-0312-11

收稿日期：2008-03-10；**修回日期**：2008-05-26

基金项目：国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B08)；国家自然科学基金项目(40572033)

作者简介：陈　博(1985—)，男，硕士研究生，地球化学专业，从事岩石学与地球化学研究。

* **通讯作者简介**：朱永峰，男，教授，博士生导师。E-mail: yfzhu@pku.edu.cn

0 前言

新疆西准噶尔地区是我国重要的蛇绿岩分布区之一,上世纪 80 年代,以寻找铬铁矿为主要目标,我国地质工作者对达拉布特蛇绿岩带开展了一些研究[1-10],对蛇绿岩的形成环境提出了以下几种不一致的看法:(1)洋脊环境[5-7];(2)初始岛弧的弧前盆地[8];(3)大洋盆地和海沟环境[9];(4)弧后盆地[10]。存在这些争议的主要原因除了该蛇绿岩组成单元出露不全且遭到后期强烈破坏这些因素外,还可能因为对该蛇绿混杂岩中的地幔岩需要进一步的深入工作。本文在前人工作基础上,通过系统研究达拉布特蛇绿岩带中超镁铁岩的岩石学特征,探讨其地质和成矿意义。

1 区域地质概况

西准噶尔古生代造山带是西伯利亚板块和塔里木—华北板块之间中亚古生代造山带的一部分,区内发育多条蛇绿岩带(图 1),从老到新依次为:唐巴勒—克拉玛依早古生代蛇绿岩带、洪古勒楞中奥陶

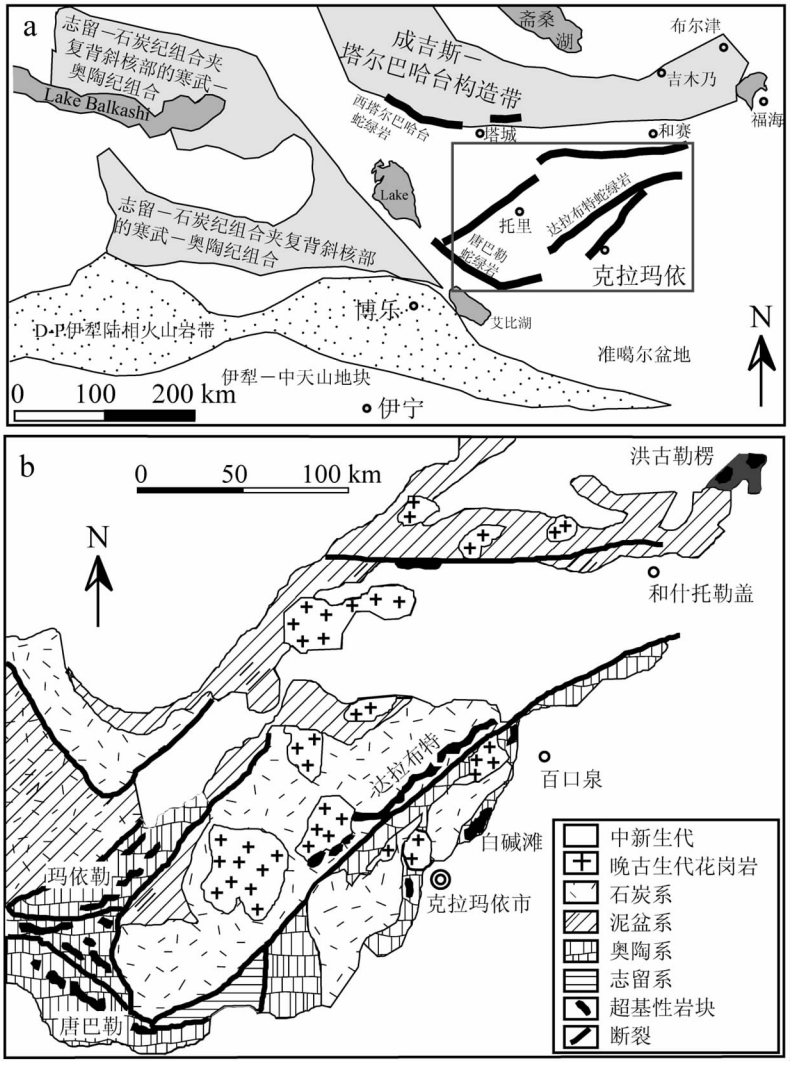

图 1 西准噶尔及其邻区大地构造简图(a)(据文献[14]修改)及显示多条蛇绿岩带分布的西准噶尔地区地质简图(b)(据文献[11]修改)

Fig. 1 Simplified geologogical map showing the tectonic structure of Western Junggar and its adjacent region ((a), modified after Reference [14]) and the distribution of ophiolitebelts in Western Junggar ((b), modified after Reference [11])

世蛇绿岩带、玛依勒山中晚志留世蛇绿岩带和达拉布特中泥盆世蛇绿岩带。这些蛇绿岩带出露规模不等(长 30～100 km)。本文所研究的达拉布特蛇绿岩带位于克拉玛依市以北的扎依尔山区,呈 NE 向沿达拉布特断裂带及其北侧次级断裂产出,十个较大超镁铁质岩体的出露面积总计约 50 km^2[11]。本区出露一套早古生代的深海浊积岩-硅质岩-枕状玄武岩,玄武岩的锆石 SHRIMP 年龄约为 517 Ma[12],这套地层单元分布局限,仅在克拉玛依西部山区零星出露。在西准噶尔地区还出露一套志留—奥陶系的海相沉积变质岩,并且在唐巴勒地区还发现了志留纪的蓝片岩。这些零星出露的早古生代地层被大面积发育的石炭纪火山-沉积地层覆盖,石炭纪地层自下而上为:下石炭统太勒古拉组、包古图组和希贝库拉斯组火山碎屑沉积建造。太勒古拉组为蛇绿岩的主要围岩地层,其下部为一套细碧岩、玄武岩、辉绿岩、硅质岩和含铁碧玉岩与超镁铁岩伴生,上部为凝灰质砂岩、粉砂岩、泥质硅质岩的互层,凝灰岩中锆石 SHRIMP 测定结果约为 328 Ma[13]。达拉布特蛇绿混杂岩的岩块呈带状出露,与太勒古拉组火山-沉积岩地层之间以断裂形式接触[3-8, 12]。

2 超镁铁岩岩石学

依据共生矿物种类以及主要矿物的相对含量,达拉布特超镁铁岩主要由橄榄辉石岩和方辉橄榄岩组成。这两类岩石呈构造岩块产出,均发生了强烈蚀变,蚀变矿物主要为蛇纹石、滑石和磁铁矿。

2.1 橄榄辉石岩

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,但保留了斜方辉石柱状假象和橄榄石孤岛状假象。铬尖晶石与斜方辉石共生,或填隙在辉石之间或辉石与橄榄石之间。根据矿物假象估算原岩中斜方辉石占 75%～85%,橄榄石占 10%～15%,铬尖晶石占 3%～5%。

橄榄辉石岩中的橄榄石主要呈孤岛状假象存在,孤岛分内外两层,内部为棕红色矿物,保留着橄榄石高突起的特点,电子探针分析表明其为蛇纹石和水镁石的混合物。外层的蛇纹石比较纯净,孤岛边缘环绕着纤维状蛇纹石(图 2a)。橄榄石孤岛状假象中保留着塑性变形的痕迹,表现为波状消光。除了孤岛状假象外,部分橄榄石呈浑圆状假象(<1 mm,已经蚀变为蛇纹石和水镁石的混合物),不规则裂理发育,并在边界处零星散布着磁铁矿颗粒。橄榄石还以包体形式存在于斜方辉石内部,构成包橄结构(图 2b)。

橄榄辉石岩中保存了斜方辉石假象,在蛇纹石化较弱的颗粒中,斜方辉石的光性特点依然可见。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,多数情况下,斜方辉石晶体的整体架构仍然保存(图 3),因此,可以观察到辉石的主要光性特征(如二级蓝干涉色等,图 2c, h)。蛇纹石一般沿斜方辉石的解理方向蚕食并交代斜方辉石,导致斜方辉石呈现出格架状或者条带状(图 3b—d)。橄榄辉石岩中斜方辉石的假象表现出以下特点:(a)熔融残余结构:斜方辉石(3～6 mm)之间常呈紧密嵌合状,由于部分熔融,矿物均已浑圆化,"三连点"处呈现弧形;(b) 塑性变形:斜方辉石假象保留了受构造应力作用的痕迹(图 2c),表现为晶体弯曲成弧状,具明显波状消光;(c) 出溶结构:部分斜方辉石中存在平行分布的铬尖晶石出溶棒(图 2d),这些出溶棒呈棕褐色。斜方辉石出溶铬尖晶石的现象在橄榄辉石岩中零星分布,而在方辉橄榄岩中普遍发育。

橄榄辉石岩铬尖晶石为褐红色—黑色(半透明—不透明),多数与斜方辉石共结连生,呈蠕虫状,两者相互分割成孤立的、不规则的条状或粒状,构成共生连晶结构。这种结构中,铬尖晶石与斜方辉石的含量大致相同,局部包裹粒状斜方辉石(图 2e)。铬尖晶石也常包裹或半包裹橄榄石,但不与橄榄石共结连生。部分铬尖晶石呈极不规则条状分布在斜方辉石间隙或斜方辉石与橄榄石之间(图 2f)。电子显微镜下的观察表明,铬尖晶石发育不规则显微裂隙,其中充填蛇纹石。

2.2 方辉橄榄岩

方辉橄榄岩的矿物组成与橄榄辉石岩的相同,其中斜方辉石假象完好保留,呈残斑状,基质为细粒、鳞片状的蛇纹石,孤岛状橄榄石假象常见。铬尖晶石与斜方辉石紧密共生。依据橄榄石和斜方辉石假象估算,方辉橄榄岩中橄榄石含量 65%～75%,斜方辉石 15%～25%,铬尖晶石 3%～7%。橄榄石主要以孤岛状假象出现,在斜方辉石中观察到橄榄石包体。橄榄石孤岛内部已蛇纹石化。与基质中破碎、鳞片状的蛇纹石不同,孤岛状橄榄石假象干净并呈现波状消光,部分孤岛状橄榄石假象中散布着细小的磁铁矿晶体。方辉橄榄岩中普遍存在斜方辉石

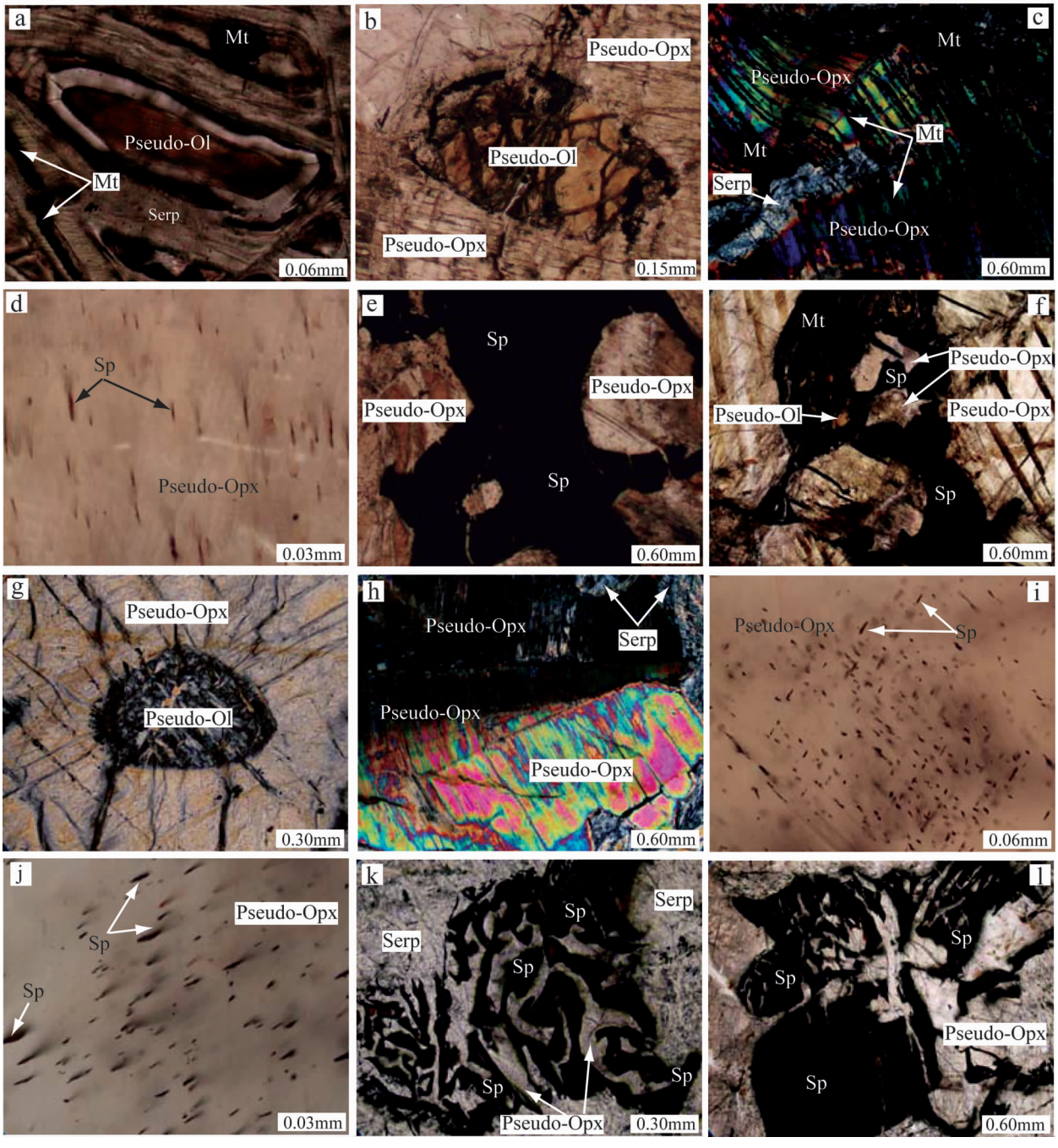

图 2　橄榄辉石岩及方辉橄榄岩显微照片

Fig. 2　The microphotographs of olivine-pyroxenite and harzburgite

a—橄榄石孤岛状假象,内部为蛇纹石与水镁石的混合物,单偏光;b—斜方辉石包裹橄榄石,单偏光;c—斜方辉石发生塑性变形,沿解理分布着磁铁矿颗粒,正交偏光;d—斜方辉石的铬尖晶石出溶棒,单偏光;e—铬尖晶石与斜方辉石共生(共生连晶结构),其中包裹斜方辉石,单偏光;f—铬尖晶石分布于斜方辉石与橄榄石间隙中,单偏光;g—包裹橄榄石的斜方辉石出现不对称的放射状裂纹,单偏光;h—斜方辉石发育多级扭折带,正交偏光;i,j—斜方辉石中的铬尖晶石出溶棒,单偏光;k,l—铬尖晶石与斜方辉石共生形成共生连晶结构,单偏光。Pseudo-Opx—斜方辉石假象,Serp—蛇纹石,Mt—磁铁矿,Pseudo-Ol—橄榄石假象,Sp—铬尖晶石

包裹橄榄石的现象(包橄结构),橄榄石包体的粒度较大(已经蛇纹石化,0.2～1.0 mm),一般呈椭球状,它与辉石的边界常常充填着磁铁矿。部分包裹橄榄石的斜方辉石出现不对称的放射状裂纹,这是橄榄石蚀变为蛇纹石后体积增大的结果(图 2g)。

在方辉橄榄岩中,斜方辉石作为残余斑晶粒径变化大(0.5～10 mm),矿物边界参差不齐,外凸或形成港湾状。相邻的矿物颗粒常有相互楔入或半包

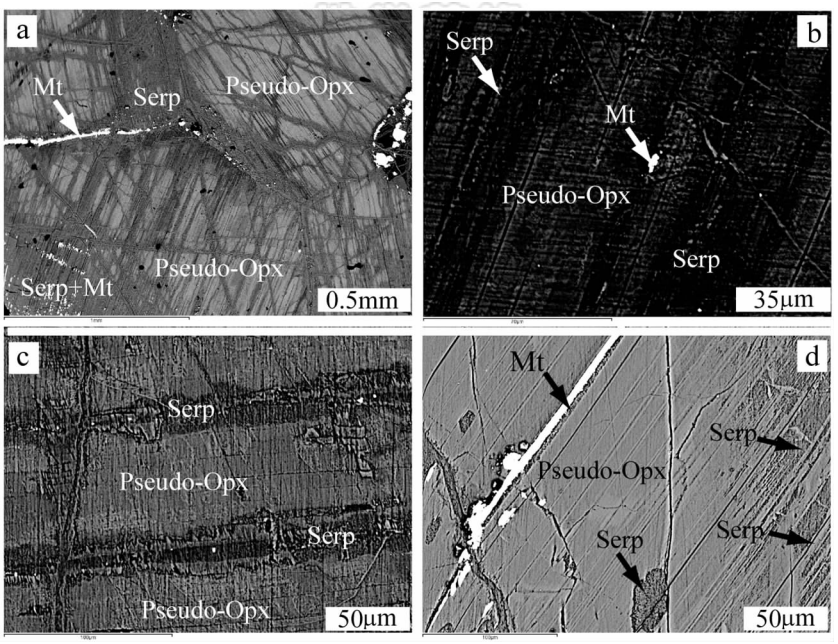

图 3 背散射电子图像(BSE)

Fig. 3 BSE images showing the characteristics of orthopyroxene pseudomorphs and the replacement of serpentine after orthopyroxene in olivine pyroxenite

显示橄榄辉石岩中斜方辉石晶体假象及其被蛇纹石交代的特征,其局部被蛇纹石取代,但主体保留了辉石的晶体格架。Pseudo-Opx—斜方辉石假象(依然保留斜方辉石晶体结构的性质),Serp—蛇纹石,Mt—磁铁矿

裹的现象。斜方辉石多出现塑性扭折,具体表现为斜方辉石被分割为几个区域,不同的区域表现出突变的阶梯状消光,这与渐变的波状消光虽然有区别,但实质上都是由应力作用导致晶格错动而产生的光性差异。斜方辉石表面常发育相互平行的多级扭折带(图 2h)。斜方辉石中有两组尖晶石出溶棒(夹角约 90°),出溶棒密集分布,每组出溶棒严格平行排列(图 2i, j)。铬尖晶石出溶棒宽度<1 μm,长 10~15 μm。出溶尖晶石的斜方辉石发生了蛇纹石化,但多数情况下保留着辉石的假象。与斜方辉石形成共生连晶的铬尖晶石在形态上的分化明显,多数情况下铬尖晶石与斜方辉石交互共生(图 2k),部分铬尖晶石呈不规则粒状(约 2 mm)或浑圆状,在颗粒边缘与辉石交互共生(图 2l)。

3 矿物化学成分

橄榄辉石岩和方辉橄榄岩中铬尖晶石的成分列于表 1。橄榄辉石岩中铬尖晶石的端员组分及其比例为 $Mg(Al,Cr)_2O_4$: $Fe(Al,Cr)_2O_4$: Fe_3O_4 = 61 : 36 : 3;方辉橄榄岩中铬尖晶石端员组分的比例为 63 : 34 : 3。在尖晶石的 $Cr^{\#}$-$Mg^{\#}$ 和 $Cr^{\#}$-Fe^{2+}/Fe^{3+} 图解上(图 4a, b),这两种岩石中的尖晶石表现出明显的区别,主要体现在 $Cr^{\#}$ 值的差异方面,其 $Mg^{\#}$ 值和 Fe^{2+}/Fe^{3+} 比值基本在相同的范围内变化。方辉橄榄岩中尖晶石的 Fe^{2+}/Fe^{3+} 比值变化范围比较大一些,$Mg^{\#}$ 值相对较高。橄榄辉石岩中铬尖晶石的 $Cr^{\#}$ 在 0.47~0.53,$Mg^{\#}$ 在 0.57~0.63,Fe^{2+}/Fe^{3+} 的变化范围为 6.2~10.7(1 个例外:14.5)。方辉橄榄岩中铬尖晶石的 $Cr^{\#}$ 为 0.47~0.49,比橄榄辉石岩中铬尖晶石的略低,$Mg^{\#}$ 的变化范围相对较窄(0.61~0.64),Fe^{2+}/Fe^{3+} 在 6.4~17.9(1 个例外:25.3)。这种差异可能意味着这两种岩石发生部分熔融的程度有差异,因为与高程度部分熔融对应的尖晶石一般具有相对较高的 $Cr^{\#}$ 值[15]。EDS 测定表明,斜方辉石中铬尖晶石出溶棒的 Fe 含量较高,但由于出溶棒细小(宽度<1 μm),电子探针分析仅仅得到出溶棒与主晶的混合成分($w(SiO_2)$ = 6.28%; $w(Cr_2O_3)$ = 22.01%; $w(FeO)$ = 37.7%),与蠕虫状共生连晶中的铬尖晶石相比,铬尖晶石出溶棒的 Cr 含量相对较低,Fe 含量较高。

蛇纹石的电子探针分析结果列于表 2。从 Cr_2O_3-Al_2O_3 关系图上可以看出:蛇纹石分布在两个区域(图5):区域I中蛇纹石的 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 相

表 1 达拉布特橄榄辉石岩及方辉橄榄岩中铬尖晶石的电子探针分析结果

Table 1 Representative results of EMPA of chromian spinel in Darbut olive-pyroxenite and harzburgite

成分及参数	*1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SiO_2	0.03	0.05	0.06	0.04	0.02	0.06	0.06	0	0.04	0.04	0.03	0.01	0.02	0	0.15	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.024	0.025	0.026	0.01
TiO_2	0.03	0.09	0.09	0.05	0.02	0	0	0.04	0.03	0.03	0.03	0	0	0	0	0.04	0	0.03	0	0.04	0	0.022	0	0.03	0
Al_2O_3	29.31	28.84	29.28	28.87	29.00	29.19	29.39	29.31	29.30	29.18	29.10	29.32	29.09	22.82	27.58	27.73	27.31	27.84	27.69	28.05	28.87	25.88	24.97	26.67	26.63
Cr_2O_3	40.40	40.55	39.17	39.84	39.92	39.32	39.33	39.27	39.68	40.57	39.39	39.43	39.71	29.70	40.86	41.62	42.60	40.29	40.93	39.70	39.32	42.43	42.69	42.11	41.54
FeO	16.22	16.11	16.99	16.57	16.40	16.64	16.66	16.72	16.18	15.44	16.31	16.54	16.61	35.55	17.17	17.08	15.82	17.48	18.74	17.75	18.81	17.43	18.19	16.41	17.94
MgO	13.84	14.00	13.5	13.92	14.06	14.31	13.85	13.81	14.24	14.22	14.07	13.97	14.06	9.79	14.07	13.35	13.85	13.22	12.74	13.39	13.05	13.07	12.39	13.85	12.97
MnO	0.36	0.31	0.44	0.38	0.35	0.45	0.43	0.37	0.35	0.40	0.43	0.41	0.39	0.96	0.36	0.44	0.38	0.42	0.34	0.42	0.31	0.29	0.319	0.30	0.25
NiO	0.04	0.06	0.10	0.10	0.11	0.07	0.10	0.07	0.08	0.13	0.17	0.10	0.17	0.18	0.14	0.17	0.12	0.15	0.01	0.17	0.03	0	0	0	0
Total	100.23	100.01	99.63	99.77	99.88	100.04	99.82	99.59	99.90	100.01	99.53	99.78	100.05	99.00	100.33	100.44	100.11	99.46	100.48	99.54	100.42	99.15	98.59	99.40	99.33
O=4																									
Si	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.005	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
Ti	0.001	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
Al	1.025	1.012	1.032	1.015	1.017	1.019	1.031	1.031	1.025	1.021	1.023	1.029	1.018	0.843	0.968	0.978	0.964	0.989	0.979	0.993	1.015	0.930	0.909	0.949	0.954
Cr	0.948	0.954	0.926	0.939	0.939	0.921	0.925	0.926	0.931	0.952	0.928	0.928	0.932	0.736	0.962	0.984	1.009	0.960	0.971	0.943	0.927	1.022	1.042	1.004	0.997
Fe^{3+}	0.023	0.028	0.035	0.042	0.042	0.056	0.040	0.041	0.040	0.024	0.045	0.043	0.048	0.420	0.060	0.037	0.026	0.047	0.048	0.060	0.057	0.044	0.047	0.043	0.049
Mg	0.612	0.621	0.601	0.619	0.624	0.633	0.615	0.614	0.630	0.630	0.625	0.620	0.622	0.458	0.625	0.595	0.618	0.594	0.570	0.600	0.580	0.594	0.571	0.622	0.588
Fe^{2+}	0.380	0.373	0.390	0.371	0.365	0.356	0.374	0.376	0.361	0.359	0.362	0.368	0.365	0.512	0.368	0.391	0.370	0.393	0.422	0.387	0.412	0.400	0.422	0.372	0.406
Mn	0.009	0.008	0.011	0.010	0.009	0.011	0.011	0.009	0.009	0.010	0.011	0.010	0.010	0.026	0.009	0.011	0.010	0.011	0.009	0.011	0.008	0.008	0.008	0.008	0.006
Ni	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.002	0.004	0.005	0.003	0.004	0.003	0.004	0.000	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
$Mg^{\#}$	0.617	0.625	0.607	0.625	0.631	0.640	0.622	0.620	0.636	0.637	0.633	0.627	0.630	0.472	0.629	0.604	0.625	0.602	0.574	0.608	0.585	0.597	0.575	0.626	0.591
$Cr^{\#}$	0.481	0.485	0.473	0.481	0.480	0.475	0.473	0.473	0.476	0.483	0.476	0.474	0.478	0.466	0.498	0.502	0.511	0.493	0.498	0.487	0.477	0.524	0.534	0.514	0.511

*1～13:方辉橄榄岩中的尖晶石;14:尖晶石出溶棒(由于很细小,分析误差较大);15～25:橄榄辉石岩中的尖晶石;Fe^{3+} 依据电价平衡计算。

表 2 达拉布特橄榄辉石岩及方辉橄榄岩中蛇纹石的电子探针分析结果

Table 2 Representative results of EMPA of serpentine in Darbut olive-pyroxenite and harzburgite

成分	*1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
SiO_2	42.37	41.95	42.79	42.38	40.44	41.44	42.14	42.93	42.11	44.27	42.34	41.20	41.36	42.39	43.50	43.58	44.21	43.77	43.60	39.41	39.57	39.00
TiO_2	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01
Al_2O_3	1.32	1.43	0.50	1.12	1.66	1.90	1.58	0.99	1.64	0.33	1.44	1.08	1.84	1.02	0.59	0.68	0.59	0.60	0.60	1.54	1.52	1.61
Cr_2O_3	0.80	0.91	0.16	0.82	1.32	1.05	1.00	0.77	0.91	0.02	0.93	1.28	0.80	0.88	0.04	0.02	0.02	0.03	0.00	1.12	1.07	1.18
MgO	38.34	38.42	39.42	38.22	39.33	38.61	38.13	37.61	38.42	37.66	38.55	39.00	37.53	37.19	37.56	37.93	38.00	37.90	38.35	34.70	36.27	35.54
MnO	0.08	0.15	0.07	0.14	0.05	0.09	0.11	0.17	0.10	0.12	0.21	0.07	0.24	0.23	0.11	0.11	0.08	0.09	0.12	0.18	0.27	0.29
FeO	3.00	3.37	2.00	3.38	3.48	3.37	3.26	3.21	3.28	3.15	3.46	3.33	4.01	3.53	1.48	1.42	1.45	1.55	1.55	4.64	5.02	5.20
NiO	0.13	0.05	0.16	0.13	0.07	0.14	0.09	0.16	0.15	n.a.	0.11	0.19	0.03	0.32	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
CaO	0.04	0.03	0.04	0.04	0.00	0.05	0.04	0.06	0.07	0.03	0.07	0.01	0.05	0.07	0.00	0.06	0.04	0.04	0.04	0.07	0.02	0.06
Na_2O	0.00	0.01	0.03	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	86.08	86.32	85.18	86.25	86.39	86.69	86.37	85.90	86.69	85.61	87.14	86.16	85.88	85.68	83.30	83.80	84.38	83.98	84.28	81.68	83.74	82.87
O=9																						
Si	2.578	2.554	2.613	2.581	2.475	2.517	2.562	2.617	2.552	2.690	2.556	2.523	2.540	2.602	2.692	2.681	2.699	2.688	2.671	2.556	2.515	2.509
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Al	0.095	0.103	0.036	0.080	0.120	0.136	0.113	0.071	0.117	0.023	0.102	0.078	0.133	0.074	0.043	0.049	0.042	0.043	0.043	0.118	0.113	0.122
Cr	0.038	0.044	0.008	0.039	0.064	0.050	0.048	0.037	0.044	0.001	0.044	0.062	0.039	0.043	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.057	0.054	0.060
Mg	3.478	3.488	3.589	3.470	3.588	3.497	3.456	3.419	3.471	3.412	3.470	3.560	3.437	3.403	3.465	3.479	3.458	3.469	3.503	3.356	3.437	3.408
Mn	0.004	0.008	0.004	0.007	0.003	0.005	0.006	0.009	0.005	0.006	0.011	0.004	0.012	0.012	0.006	0.006	0.004	0.004	0.006	0.010	0.015	0.016
Fe	0.153	0.172	0.102	0.172	0.178	0.171	0.166	0.164	0.166	0.160	0.175	0.171	0.206	0.181	0.077	0.073	0.074	0.079	0.079	0.252	0.267	0.280
Ni	0.006	0.002	0.008	0.006	0.003	0.007	0.004	0.008	0.007	0.000	0.005	0.009	0.001	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.003	0.002	0.003	0.003	0.000	0.003	0.003	0.004	0.005	0.002	0.005	0.001	0.003	0.005	0.000	0.004	0.002	0.003	0.002	0.005	0.001	0.004
Na	0.000	0.001	0.004	0.002	0.004	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	6.355	6.374	6.367	6.360	6.435	6.388	6.360	6.329	6.368	6.296	6.369	6.408	6.372	6.339	6.286	6.294	6.281	6.289	6.305	6.356	6.402	6.399

*1～14:橄榄辉石岩中的蛇纹石;15～22:方辉橄榄岩中的蛇纹石; n.a.=未测试。

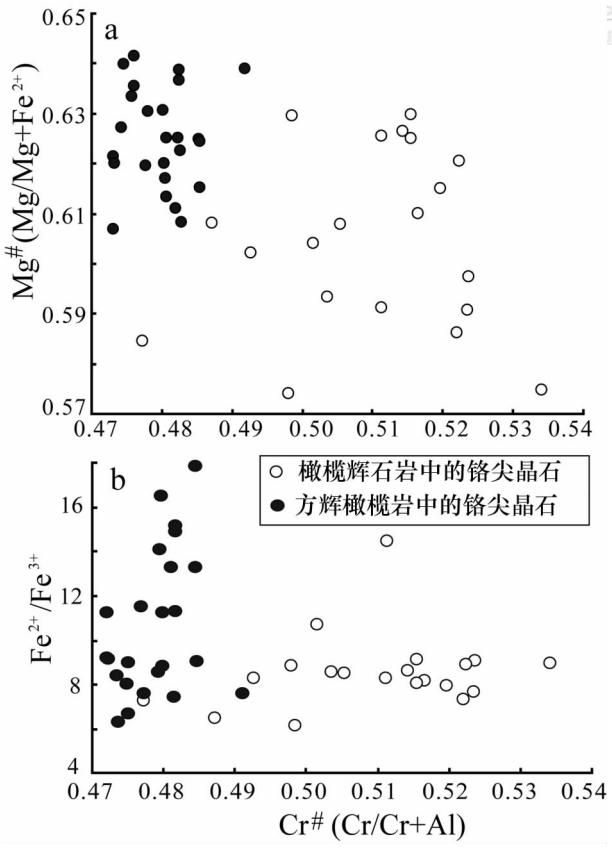

图 4 橄榄辉石岩和方辉橄榄岩中铬尖晶石的 $Cr^{\#}$-$Mg^{\#}$ 和 $Cr^{\#}$-Fe^{2+}/Fe^{3+} 图解

($Cr^{\#}=Cr/Cr+Al$; $Mg^{\#}=Mg/Mg+Fe^{2+}$)

Fig. 4 $Cr^{\#}$-$Mg^{\#}$ and $Cr^{\#}$-Fe^{2+}/Fe^{3+} plots for Cr-spinel in olivine-pyroxenite and harzburgite

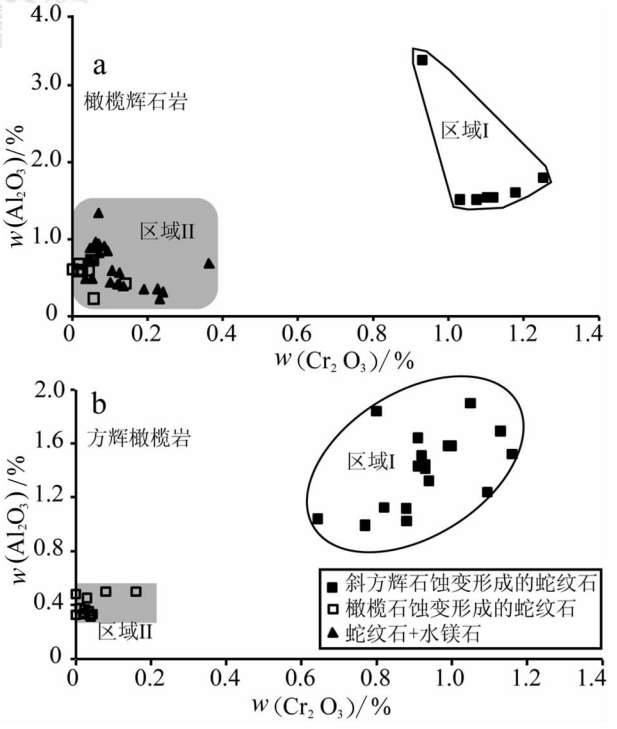

图 5 橄榄辉石岩和方辉橄榄岩中蛇纹石 Cr_2O_3-Al_2O_3 图解

Fig. 5 Cr_2O_3-Al_2O_3 plots for serpentinite in olivine-pyroxenite and harzburgite

对较高,它们由斜方辉石蚀变而成;区域 II 的 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 值都很低,它们可能是蛇纹石或蛇纹石+水镁石的混合物(橄榄石的蚀变产物)。这些成分特点帮助我们正确估算原岩中斜方辉石与橄榄石的相对含量。

4 讨论与结论

达拉布特方辉橄榄岩中广泛发育斜方辉石出溶铬尖晶石的现象,出溶铬尖晶石棒的端员组分为 $Mg(Al,Cr)_2O_4$: $Fe(Al,Cr)_2O_4$: Fe_3O_4 = 42 : 27 : 31。出溶结构的形成需要一个突变的环境,包括压力骤降、温度快速降低或者氧逸度巨变[14-17]。根据铬尖晶石出溶棒的成分特点,本文认为达拉布特斜方辉石出溶铬尖晶石是由氧逸度突然升高造成的。斜方辉石一般不含 Fe^{3+},氧逸度升高使 Fe^{2+} 转化为 Fe^{3+},造成矿物晶体结构不稳定,Al 和 Cr 同时迁移,形成铬尖晶石出溶结构。蛇绿岩快速上升就位必然导致环境氧逸度升高。根据这种逻辑关系,本文认为出溶结构的形成过程对应着蛇绿岩的就位事件。

铬尖晶石在达拉布特方辉橄榄岩中广泛分布,且主要与斜方辉石构成蠕虫状共生连晶结构。达拉布特地幔岩中的这种结构曾经被描述为文象状结构[18-19],或者后成合晶结构[20-21]。地幔岩中的这种尖晶石与辉石共生的结构,存在两种成因观点:一种观点认为它形成于橄榄石内部的出溶结构[22-23]。在高温条件下,Cr^{3+} 和 Fe^{3+} 可以稳定的存在于橄榄石晶格内,在迅速抬升的过程中,温度下降导致三价离子不稳定,形成以辉石和尖晶石族矿物共结连生为特点的出溶结构[22];另一种观点认为这是由石榴石分解形成的后成合晶结构。早期存在于地幔岩中的石榴石由于压力的突然降低,分解形成辉石和尖晶石,由以下反应式表示:石榴石+橄榄石=斜方辉石+单斜辉石+尖晶石[24]。

然而,以上两种机制都不能解释达拉布特地幔岩中斜方辉石与铬尖晶石形成的共生连晶结构。如果出溶结构的机制成立,橄榄石出溶形成的矿物相

应该严格按照橄榄石的晶格优选方位定向排列,但在达拉布特方辉橄榄岩中斜云辉石与铬尖晶石粗大,形态极不规则(图 2)。因此,尖晶石与辉石的共生连晶结构不是出溶过程的产物。达拉布特方辉橄榄岩中没有石榴石残余,难以说明原岩经历了由石榴石相向尖晶石相的转换。石榴石分解形成后成合晶的矿物相之间有一定比例(opx∶cpx∶sp=2∶1∶1),而达拉布特方辉橄榄岩中缺少单斜辉石。另外,石榴石分解形成的后成合晶应该保留石榴石的矿物形态(或者石榴石假象),而达拉布特方辉橄榄岩中尖晶石与辉石共生连晶结构的形态异常复杂(图 2)。因此,出溶结构机制和后成合晶机制均不能解释本文在达拉布特超基性岩块中观察到的尖晶石与辉石的共生连晶结构。

本文展示的岩相学证据表明,达拉布特超镁铁岩中的铬尖晶石为岩浆结晶形成而非变质成因(也非地幔矿物残余)。斜方辉石和铬尖晶石构成的蠕虫状共生连晶结构常在发育豆荚状铬铁矿的蛇绿岩带中出现[25-28]。萨尔托海铬铁矿矿床位于达拉布特蛇绿岩带内[21]。同属达拉布特蛇绿岩带的二辉橄榄岩团块[2-3]和萨尔托海铬铁矿矿床[18]都具有铬尖晶石与辉石共生连晶结构,这类铬尖晶石的形成应该与铬铁矿矿床的形成属于同期地质事件。形成铬铁矿的富铬矿浆来源于原始地幔岩的高度熔融,熔体高度分异导致铬铁矿富集,部分熔体渗入地幔岩中,结晶形成铬尖晶石和斜方辉石的蠕虫状共生连晶结构。因此,达拉布特蛇绿岩中发育的铬尖晶石与辉石的共生连晶结构是形成铬铁矿矿床(萨尔托海铬铁矿矿床)岩浆演化的产物。对这种现象的正确认识具有重要的找矿勘探意义,因此这种铬尖晶石和辉石的蠕虫状共生连晶结构可以作为豆荚状铬铁矿的重要找矿标志。另外,由于蛇绿岩带中的铬铁矿中可能含一些地幔深部的矿物如金刚石、自然 Ta 和各种合金矿物[29-30],对达拉布特蛇绿岩带中的地幔岩岩块和铬铁矿开展深入研究也具有重要的地球动力学意义。

本文是国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B08)和国家自然科学基金项目(40572033)资助成果。实验室工作得到舒桂民老师的协助,薛云兴和谭娟娟提供了诸多帮助,《地学前缘》的匿名审稿专家提出的具体修改意见对我们修改本文有很大帮助,特此一并致谢。

References:

[1] Wang Y S, Zhang J S. Discussion of the basic geological features and genetic model of Darbut ophiolite zone, Xinjiang [J]. Bull Xi'an Inst Geol Min Res, Chinese Acad Geol Sci, 1982, 4: 40-54(in Chinese).

[2] Shi Z Y, Li J M, Li Z X. Genetic types and geological features of lherzolite nodules in Darbut ultrabasic rock zone, Xinjiang[J]. Bull Xi'an Inst Geol Min Res, Chinese Acad Geol Sci, 1982, 4: 22-35(in Chinese).

[3] Shi Z Y, Li J M, Li Z X. The discovery and study of the mantle-derived spinellherzolite in the Darbut ultrabasic rock belt Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 1986, 4: 339-350(in Chinese).

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

[5] Zhu B Q, Wang L S, Wang L X. Paleozoic Era ophiolite of southwest part in Western Junggar, Xinjiang, China[J]. Bull Xi'an Inst Geol Min Res, Chinese Acad Geol Sci, 1987, 17: 3-64(in Chinese).

[6] Zhang C, Huang X. The ages and tectonic settings of ophiolites in West Junggar, Xinjiang [J]. Geological Review, 1992, 38: 509-524(in Chinese).

[7] Zhang C, Zhai M G. Ophiolitic belts and their genetic environment in Western Junggar[M]// Tu G Z. New improvement of solid geosciences in northern Xinjiang. Beijing: Science Press, 1993: 53-78(in Chinese).

[8] Fen Y M. Genetic environments and original types of ophiolites in West Junggar[J]. Bull Xi'an Inst Geol Min Res, Chinese Acad Geol Sci, 1986, 13: 37-45(in Chinese).

[9] Bai W J, Robinson P, Yang J S, et al. Tectonic evolution of different dating ophiolites in the Western Junggar, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(Suppl): 62-72(in Chinese).

[10] Yang R Y, Tang H F, Liu C Q, et al. Geochemistry of mafic rocks from Dalabute ophiolite in Western Junggar, Xinjiang, NW China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2000, 20: 363-370 (in Chinese).

[11] Beureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Antonomous. Reginal geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993(in Chinese).

[12] Zhu Y F, Xu X, Wei S N, et al. Geochemistry and tectonic significance of IOB-type pillow basalts in western Mts. of

Karamay city (Western Junggar), NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(7): 1739-1748(in Chinese).

[13] Wang R, Zhu Y F. Geology of the Baobei gold deposit in Western Juggar and zircon SHRIMP age of its wall-rocks, Western Junggar (Xinjiang, NW China)[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13: 590-602(in Chinese).

[14] Zhu Y F, Xu X. The discovery of early Ordovician ophiolite melange in Taerbahatai Mts., Xinjiang, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22: 2833-2842(in Chinese).

[15] Zhu Y F. K- and Si-rich glasses in Harzburgite from Damaping, North China[J]. Island Arc, 2008(in press).

[16] Zhu Y F, Ogasawara Y. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene[J]. International Geology Review, 2002, 44: 831-836.

[17] Zhu Y F, Xu X. Exsolution texture of two-pyroxenes in lherzolite from Baijiantan ophiolitic melange, Western Junggar, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23: 1075-1086 (in Chinese).

[18] Peng L G. A discussion on the origin of ultrabasic rock and ophiolitic association in the Western Junggar area of Xinjiang, China[J]. Bull Xi'an Inst Geol Min Res, Chinese Acad Geol Sci, 1987, 16: 147-169(in Chinese).

[19] Gao J P. A first approach to evolution features of magmatic crystallization in some Alpine-type ultrabasic rock bodies northwest, China[J]. Bull Xi'an Inst Geol Min Res, Chinese Acad Geol Sci, 1987, 15: 69-85(in Chinese).

[20] Hao Z G, Wang X B, Bao P S, et al. Geological characteristics and genetic study of two types ophiolites in Western Junggar, Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1989, 8: 299-310(in Chinese).

[21] Bao P S, Wang X B. Metallogenic models of the aluminum-rich podiform chromite deposits[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18: 25-39(in Chinese).

[22] Moseley D. Symplectic exsolution in olivine[J]. American Mineralogist, 1984, 69: 139-153.

[23] Mikouchi T, Yamada I, Miyamoto M. Symplectic exsolution in olivine from the Nakhla martian meteorite[J]. Meteorite. Planet Sci, 2000, 35: 937-942.

[24] Falus G, Szabo C, Kovacs I, et al. Symplectite in spinel lherzolite xenoliths from the Little Hungarian Plain, Western Hungary: a key for understanding the complex history of the upper mantle of the Pannonian Basin[J]. Lithos, 2007, 94: 230-247.

[25] Arai S, Yurimoto H. Podiform chromitites of the Tari-Misaka ultramafic complex, southwestern Japan, as mantle-melt interaction products[J]. Economic Geology, 1994, 89: 1279-1288.

[26] Proenza J, Gervilla F, Melgarejo J C, et al. Al- and Cr-rich chromitites from the Mayari-Baracoa ophiolitic belt (Eastern Cuba): consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotites in suprasubduction mantle[J]. Economic Geology, 1999, 94: 547-566.

[27] Dick H J B. Partial melting in the Josephine peridotite I, the effect on mineral composition and its consequence for geobarometry and geothermometry[J]. Journal of Science, 1977, 277: 801-832.

[28] Morishita T, Maeda J, Miyashita S, et al. Petrology of local concentration of chromian spinel in dunite from the slow-spreading southwest Indian ridge[J]. Eur J Mineral, 2007, 19: 871-882.

[29] Yang J J, Dobrzhinetskaya L, Bai W J, et al. Diamond- and coesite-bearing chromites from the Luobusa, Tibet[J]. Geology, 2007, 35: 875-878.

[30] Yang J J, Bai W J, Fang Q S, et al. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite, Polar Ural[J]. Geology in China, 2007, 34: 950-952(in Chinese).

参考文献:

[1] 王懿圣, 张金声. 达拉布特蛇绿岩带基本地质特征及成因模式讨论[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1982, 4: 40-54.

[2] 师占义, 李金铭, 李振兴. 新疆达拉布特二辉橄榄岩团块的成因类型及其他地质特征[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1982, 4: 22-35.

[3] 师占义, 李金铭, 李振兴. 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[J]. 地质学报, 1986, 4: 339-350.

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

[6] 张弛, 黄萱. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境探讨[J]. 地质论评, 1992, 38: 509-524.

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

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

[9] 白文吉, Robinson P, 杨经绥, 等. 西准噶尔不同时代蛇绿岩及其构造演化[J]. 岩石学报, 1995, 11(增刊): 62-72.

[10] 杨瑞瑛, 唐红峰, 刘丛强, 等. 达拉布特蛇绿岩带镁铁质岩的地球化学[J]. 矿物学报, 2000, 20: 363-370.

[11] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

[12] 朱永峰, 徐新, 魏少妮, 等. 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[J]. 岩石学报,2007, 23 (7): 1739-1748.

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

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

[17] 朱永峰, 徐新. 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[J]. 岩石学报, 2007, 23: 1075-1086.

[18] 彭礼贵. 西准噶尔地区超基性岩成因及蛇绿岩组合成因[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1987, 16: 147-169.

[19] 高纪璞. 我国西北某些阿尔卑斯型超基型岩体的岩浆结晶演化特征初探[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1987, 15: 69-85.

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

[21] 鲍佩声,王希斌. 富铝型豆荚状铬铁矿床的成矿模式[J]. 地球学报, 1997, 18: 25-39.

[30] 杨经绥,白文吉,方青松,等. 极地乌拉尔豆荚状铬铁矿中发现金刚石和一个异常矿物群[J]. 中国地质, 2007, 34: 950-952.

EARTH SCIENCE FRONTIERS

《地学前缘》征订启事

致《地学前缘》订户:

《地学前缘》由天津全国非邮发报刊联合征订服务部负责征订工作(联订代号:5198),需要订购我刊的客户可直接与天津联合征订服务部联系。2009年订价为300元/年(全年6期,50元/期)。

联系地址:天津市大寺泉集北里别墅17号

邮政编码:300385

电　　话:022-23962479,022-23973378

传　　真:022-23973378

网　　址:www.LHZD.com

E-mail:LHZD@public.tpt.tj.cn