

西南天山东德沟镁铁-超镁铁岩中尖晶石的 矿物学特征及其地质意义

孔凡梅 李旭平 李守军 吴 苏

(山东科技大学 地质科学与工程学院, 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘要: 中国西南天山东德沟镁铁-超镁铁岩出露于天山伊犁-中天山板块和塔里木板块之间的碰撞造山带中, 岩石类型主要为(方辉)橄辉岩, 且普遍经历了含水流体(熔体)的渗透交代作用, 含有形态和成分变化复杂的尖晶石, 表现为从红褐色到黄褐色、再到深绿色和浅绿色, 尖晶石的 Cr_2O_3 和 FeO 的含量依次降低, Al_2O_3 和 MgO 的含量逐渐增高。研究认为红褐色和黄褐色的铬尖晶是原生矿物, 而绿色的镁铝尖晶石为次生矿物。原生铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 为 $0.41\sim 0.87$, $\text{Mg}^\#$ 为 $0.21\sim 0.61$, 且成分变化大, 显示其可能具多期熔融的复杂成因; 次生绿色的尖晶石形态不一、成分相对有较大变化, 表明其至少形成于两个期次的变质作用或流体交代过程。原生铬尖晶石具有 SSZ 环境橄辉岩的特征, 指示其寄主岩石可能是俯冲上板片地幔楔岛弧环境的橄辉岩残片。

关键词: 西南天山 橄辉岩 铬尖晶石 镁铝尖晶石

中图分类号: P578.4⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)05-0951-10

Mineralogy of spinel from mafic-ultramafic rocks in Dongdougou, southwestern Tianshan and its geological significance

KONG Fan-mei, LI Xu-ping, LI Shou-jun and WU Su

(Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals,

Institute of Geological Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: The mafic-ultramafic rocks of Dongdougou are located in the orogenic belt between the Tarim plate and the Yili-central Tianshan plate, southwestern Tianshan. Harzburgite is the main type of peridotite, generally metasomatized by hydrous melt or fluid. It includes different types of spinels, being red-brown, brown, dark green, and light green in color. Cr_2O_3 and FeO decrease gradually whereas Al_2O_3 and MgO increase with the metasomatism. Studies indicate that red-brown and brown picotiles constitute the primary type, while green magnesium spinels possess the second place. The compositions of the primary picotiles are variable with $\text{Cr}^\#$ and $\text{Mg}^\#$ in the range of $0.41\sim 0.87$ and $0.21\sim 0.61$ respectively, which may indicate polyphase origin of melting. Secondary spinels have different shapes, and their compositions vary tremendously, exhibiting two stages of metasomatism or metamorphism. The primary picotiles have characteristics of peridotite in a subducting upper plate mantle wedge zone, which implies the host rocks might have been the fragments of peridotite from a SSZ volcanic arc environment.

Key words: southwestern Tianshan; peridotite; picotile; magnesium spinel

收稿日期: 2011-03-20; 修订日期: 2011-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40973022), 国家 973 项目(2009CB825007)

作者简介: 孔凡梅(1974-), 女, 博士研究生, 岩石学专业, E-mail: kongfanmei666@sina.com。

中国新疆西南天山为西起中亚乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦诸国的南天山在中国境内的东延部分,该造山带位于伊犁-中天山板块和塔里木板块之间,东西延长超过 200 km,向西延入吉尔吉斯斯坦,出露一套与 Makbal 的榴辉岩-蓝片岩带相接的榴辉岩、蓝片岩为代表的 HP-UHP 变质岩系 (Tagiri *et al.*, 1995; Zhang *et al.*, 2007; 李旭平等 2008)。新疆西南天山高压-超高压变质带通常被认为是南天山古洋盆在古生代闭合过程中由塔里木板块向伊犁-中天山板块俯冲发生高压变质作用形成的 (Gao *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2007), 被认为是 NEE-SSW 向延伸的古俯冲增生杂岩体 (艾永亮等 2005), 而天山蛇绿岩大体沿南天山主脊断裂延伸, 蛇绿混杂岩与蓝片岩共同构成了伊犁中天山板块南缘的增生楔 (张旗等 2001)。

研究区 (图 1a) 位于伊犁-中天山板块和塔里木板块之间的造山带中 (李旭平等 2008), 镁铁-超镁铁岩出露在昭苏县夏塔乡东德沟, 位于高俊等 (2009) 所称的西天山高压增生楔区域内, 该增生楔构成了中天山复合弧地体南侧古生代增生楔的主体, 夹持于南北两条大型韧性剪切带之间 (Gao *et al.*, 1999)。

前人在该区发现的超基性岩已经历了完全的蛇纹岩化作用, 其原岩为方辉橄榄岩 (李旭平等,

2008)。本文首次在昭苏县以南的西南天山一带发现较新鲜的镁铁-超镁铁岩 (图 1), 岩石中主要矿物为橄榄石、斜方辉石, 不同程度的发生蛇纹石化、绿泥石化和碳酸盐化, 普遍含有数量不等的尖晶石, 矿物组合显示岩石类型主要为 (方辉) 橄辉岩。橄辉岩中普遍可见角闪石、金云母等含水矿物, 每件样品中都可观察到数量不等的角闪石, 部分样品中含量可达 15%~20%, 含水矿物的出现喻示橄辉岩普遍经历了含水流体 (熔体) 的渗透交代作用, 这些情况与前人发现的西南天山俯冲变质带发育有广泛的流体作用 (Li *et al.*, 2007) 是一致的。因该区橄辉岩中尖晶石的形态、颜色、种类表现尤其复杂, 本文首先对尖晶石做了研究。希望借助于对尖晶石的矿物学研究, 了解其部分熔融和后期交代的复杂经历, 以揭示其寄主岩石——方辉橄辉岩在 SSZ 环境中的演化特征, 从而为俯冲上板片在碰撞造山带演化过程的动力学机制提供依据。

1 研究方法

岩石学、结构构造和矿物组合的研究结合野外露头、手标本和偏光显微镜的综合观察。尖晶石矿物化学成分列在表 1 和表 2 中。电子探针分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室进行。

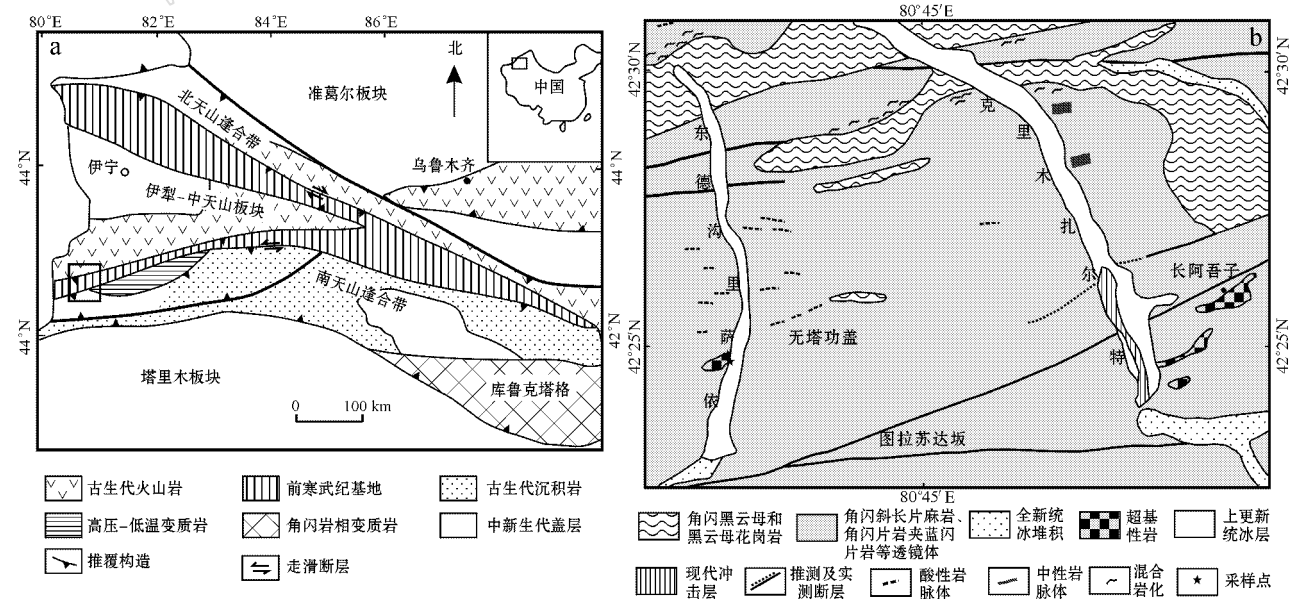


图 1 研究区地质简图 (a, 据 Gao *et al.*, 1999) 及采样点图 (b)

Fig. 1 Simplified geological map (a, after Gao *et al.*, 1999) and sampling localities (b) of the study area

仪器型号 JXA-8100 ;分析条件 :加速电压 15 kV ;束流 1×10^{-8} A ;束斑 $1 \mu\text{m}$;标准样品用美国 SPI 公司的天然矿物 ,数据通过 PHRZ 程序校正。

2 尖晶石形态、种类及特征

铬尖晶石是超镁铁岩中常见的副矿物,因其矿物成分对形成条件的敏感性和多变性,常被用来指示超镁铁岩的岩石成因(Dick and Bullen, 1984; Barnes and Roeder, 2001)。超镁铁岩在变质作用和重结晶过程中(Roeder and Campbell, 1985)都可能生成不同的铬尖晶石。所以,研究铬尖晶石的矿物学与研究岩石变质作用相对照,对了解经历各种变质作用的超镁铁岩的成因具有重要意义。样品中尖晶石主要表现为两类形态:一类为红色-黄褐色尖晶石,自形-半自形方形、粒状或粒状集合体为主,少数颗粒为他形,粒度大小不一,以细粒为主,含量约为1%~2%,产于蛇纹石化、绿泥石化的方辉橄榄岩中。另一类为绿色尖晶石,半自形棱角状或形态不规则的他形粒状,颗粒边界弯曲,粒度大小不一,含量约为5%~10%,具体表现为两种形态,一类粒度较粗,深绿色;另一类粒度较小,浅绿色;二者产于角闪石含量较多的橄榄岩、辉石岩或绿泥石片岩中。

岩石矿物学特征显示尖晶石寄存的岩石主要为次生变化程度不一的橄榄岩(方辉橄榄岩),其次是橄榄辉石岩、绿泥石片岩等。

尖晶石的颜色一般受其化学成分的制约,尤其与 Cr、Al、Fe 和 Mg 有关,含 Cr、Fe 高者颜色深;含 Al、Mg 高者颜色浅(贾大成等, 2006)。东德沟橄榄岩中尖晶石颜色变化较大,表现为黑色的铬铁矿、红褐色和黄褐色尖晶石、深绿色和浅绿色尖晶石。电子探针分析表明,其化学成分与其镜下颜色密切相关。依据其镜下光学特征和化学成分,基本可分为5个亚类(图2):①铬尖晶石,分子式为 $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}) (\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$, 半自形-自形粒状,红褐色,包裹在绿泥石或蛇纹石中,与橄榄石、斜方辉石共生,其成分主要为铬和铁, Cr_2O_3 和 FeO 含量分别为 31.52%~50.5% 和 22.69%~55.65%, Al_2O_3 的含量为 3.38%~24.63%, MgO 的含量为 3.93%~13.53%。颗粒较大者中心和边缘成分有所变化(图2b),从核部向边部 Cr_2O_3 和 FeO 含量减少, Al_2O_3 和 MgO 含量增高(表1和表2);②(富铝)铬尖晶石,分子式仍可写为 $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}) (\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$, 但

Fe^{2+} 、Cr、 Fe^{3+} 的含量要比第一种类型的尖晶石少得多。半自形粒状,黄褐色,包裹在蛇纹石、碳酸盐矿物中,常与孤岛状橄榄石、斜方辉石共生,产于蚀变较弱的橄榄岩中,其成分主要为铬和铁, Cr_2O_3 和 FeO 的含量分别为 31.53%~32.35% 和 25.09%~28.75%, 比红褐色尖晶石中含量明显下降。 MgO 为 10.03%~11.16%, 与红褐色尖晶石相差不大, Al_2O_3 的含量为 27.58%~30.8%, 明显比红褐色尖晶石增多;③铬铁矿,为 FeCr_2O_4 端员组分,他形粒状,包裹于绿泥石或金云母之中,铁黑色(图2d),产于蚀变较弱的橄榄岩中,其成分主要为铁和铬, FeO 含量高达 70.1%, 而 Al_2O_3 含量极少,仅为 0.25%, 可能是后期铬铁矿化的产物;④镁铝尖晶石,半自形他形粒状,深绿色,晶粒较粗,最大者可达 6 mm,可见裂理,产于辉石岩、绿泥石片岩或角闪石含量较多的橄榄岩中,部分颗粒沿与蛇纹石化条带方向一致的长轴方向半定向排列。 Al_2O_3 的含量为 47.68%~60.67%, MgO 为 15.99%~20.49%, 这两种组分含量比铬尖晶石增加许多,但 FeO 、 Cr_2O_3 含量比铬尖晶石明显降低,分别为 13.6%~20.63% 和 8%~14.42%。部分颗粒具明显的成分环带,中心颜色深而边部颜色稍浅(图2f),电子探针分析显示中心 FeO 和 Cr_2O_3 的含量稍高些而 Al_2O_3 和 MgO 含量低,边缘反之。产于辉石岩的部分尖晶石颗粒具辉石式解理,可能由辉石分解形成,而保留辉石解理的假像(图2e);⑤镁铝尖晶石,基本为 MgAl_2O_4 端员组分,他形细粒状,粒度平均为 0.13 mm,浅绿色,常沿其长轴方向半定向排列,晶体长轴方向与蛇纹石化的网状脉体方向一致。产于交代强烈的橄榄岩中,该类尖晶在5种类型中 Al_2O_3 和 MgO 含量最高,但 Cr_2O_3 和 FeO 含量最低,平均仅为 0.97% 和 10.91%。显然,红褐色→黄褐色→深绿色→浅绿色尖晶石, Cr_2O_3 和 FeO 含量依次降低,而 Al_2O_3 和 MgO 含量逐渐增高。

东德沟橄榄岩中尖晶石形态复杂,成分变化极大,喻示其可能经历了极为复杂的形成与变化过程。绿泥石或蛇纹石紧贴铬尖晶石的外缘分布,或交代铬尖晶石,铬尖晶石外缘多呈锯齿状(图2b、d、h),这些现象提供了尖晶石被交代的证据。Ender等(2010)观察到 İzmir-Ankara-Erzincan 缝合带中的绿色尖晶石,认为其为次生矿物。东德沟橄榄岩中橄榄石(F_0 均值 91.2)和斜方辉石(E_n 均值 91.53)与 $\text{Cr}^\#$ 极低(均值 0.067)的绿色尖晶石共生,此种情况

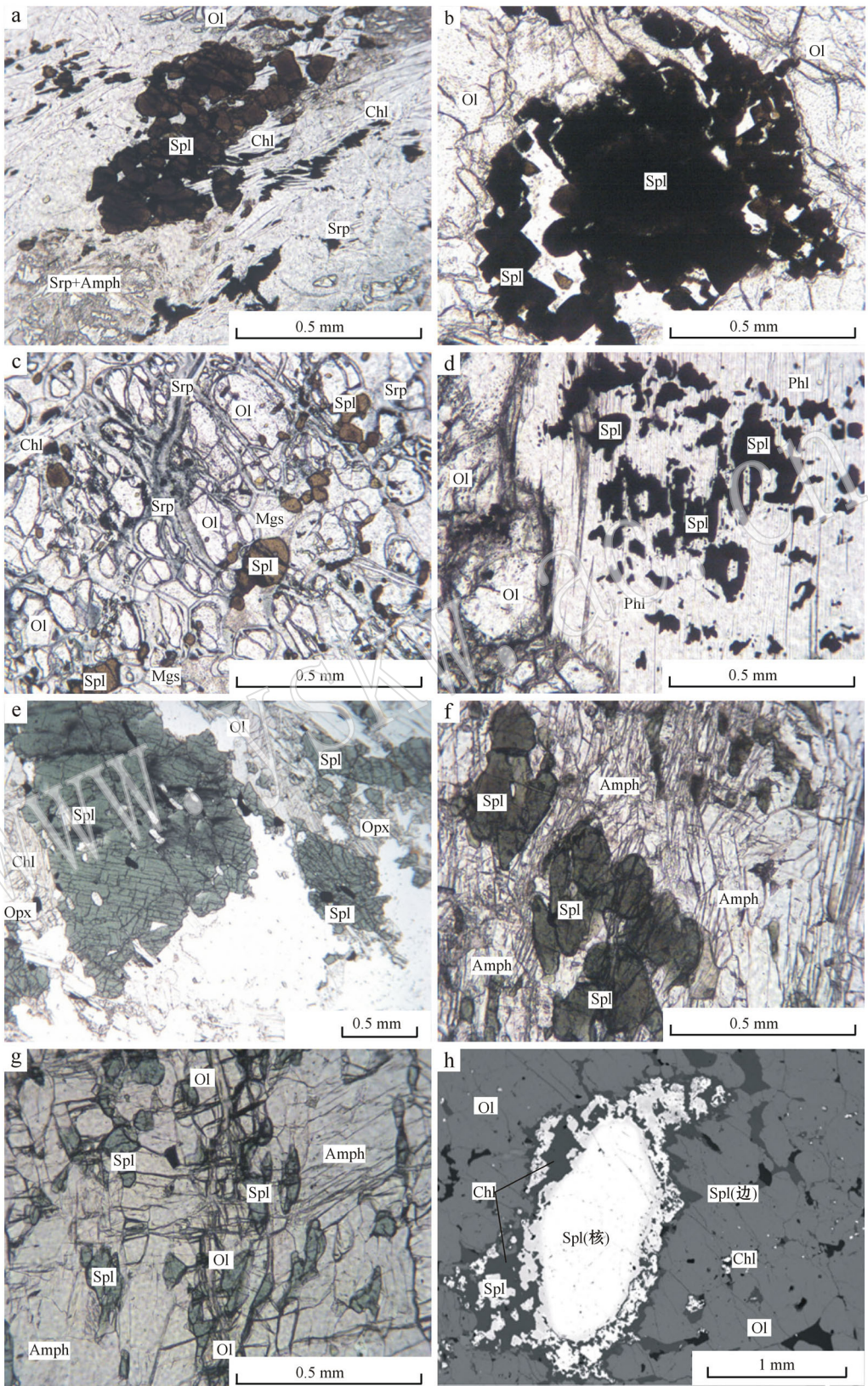


图 2 东都沟橄榄岩中尖晶石形态[a~g为单偏光照片,h为 BES图,矿物代号根据沈其韩(2009)]

Fig. 2 Spinel shape of peridotite in Dongdougou (a~g are plainlight images; h is BES image; mineral abbreviations after Shen Qihan, 2009)

不服从橄榄岩熔体贫化的一般趋势(McDonough and Rudnik, 1998) 结合镜下观察到的岩相学特征和前述尖晶石形态、化学成分的特点, 笔者认为该区绿色的尖晶石为后期变质或交代的产物, 而红褐色和黄褐色的铬尖晶石才是与橄榄石和斜方辉石平衡共生的原生矿物, 才能对其所寄存的岩石成因有指示。可见, 本区铬尖晶石至少可以区分出两个形成阶段, 即地幔中或岩浆中矿物原生成因阶段和后期交代改造阶段。

3 尖晶石的矿物化学特征

东德沟橄榄岩中他形-半自形原生红褐色-黄褐色铬尖晶石的 $Cr^{\#}$ 为 0.41~0.87, 平均为 0.576; $Mg^{\#}$ 为 0.21~0.61, 平均为 0.437(表 1), 具富铬富

铝双成分系列的特点, 部分颗粒显示出熔融程度较高的高 $Cr^{\#}$ 低 $Mg^{\#}$ 的特点(Dick and Bullen, 1984)。尖晶石的 $Cr^{\#}$ 与 $Mg^{\#}$ 基本呈负相关关系(图 3a)。Ohara & Ishii(1998) 将俯冲上板片 Mariana 弧前橄榄岩划分为无水的 A-型(anhydrous A-type) 含水的 H-型(hydrous H-type) 和过渡的 I-型(intermediate I-type) 三类橄榄岩。东德沟橄榄岩的尖晶石的化学成分变化相对较大(表 1), 部分晶体颗粒成分环带发育, 颗粒核心比边缘高 Cr (表 1, 图 2h) 而低 Al , 这种成分环带与 Ohara & Ishii(1998) 描述的 I-型方辉橄榄岩具有类似特征。

Cr 和 Mg 在尖晶石与硅酸盐的分异中, Cr 富集于固相, Al 在熔体中富集, 岩浆中结晶的尖晶石反映了岩浆的温度、压力和熔体成分, 它对构造环境和形成环境的解释, 尤其对造山带的解释(Cookenboo *et al.* ,

表 1 东德沟橄榄岩中原生铬尖晶石矿物的化学成分

Table 1 Electron microprobe analyses of primary Cr-spinels of peridotite in Dongdeguo

矿物 颜色	铬尖晶石						富铝铬尖晶石			
	红褐色	红褐色	红褐色	红褐色	红褐色	红褐色	黄褐色	黄褐色	黄褐色	黄褐色
样品号	DU-17-1.1	DU-17-1.2	DU-17(核)	DU-01-1.7	D-02-1.1	D-02-1.2	D-01-1.1	D-01-4.7	D-01-4.8	D-01-4.10
SiO ₂	0.10	0.09	0.01	0.09	0.00	0.38	0.10	0.11	0.13	0.28
TiO ₂	0.10	0.11	0.01	0.05	0.03	0.01	0.06	0.10	0.06	0.02
Al ₂ O ₃	3.38	5.05	12.93	20.54	16.88	24.63	28.47	27.58	28.45	30.08
Cr ₂ O ₃	35.13	33.51	50.50	31.52	40.82	38.16	32.32	32.35	31.90	31.53
FeO	55.65	55.83	26.96	35.79	29.24	22.69	26.67	28.75	26.58	25.09
MnO	0.34	0.25	0.40	0.32	0.41	0.30	0.38	0.32	0.34	0.27
MgO	3.97	3.93	8.50	9.14	10.34	13.53	10.92	10.03	10.81	11.16
CaO	0.03	0.00	0.00	0.01	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17
Na ₂ O	0.01	0.01	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.09
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00
NiO	0.42	0.37	0.09	0.32	0.09	0.04	0.05	0.11	0.09	0.12
Total	99.13	99.16	99.43	98.30	98.08	99.73	99.00	99.37	98.39	98.82
氧原子数	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Si	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Ti	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.14	0.21	0.50	0.78	0.64	0.88	1.03	1.00	1.03	1.08
Cr	0.98	0.93	1.32	0.80	1.04	0.91	0.78	0.79	0.78	0.76
Fe ³⁺	0.86	0.85	0.18	0.40	0.31	0.18	0.19	0.20	0.19	0.16
Fe ²⁺	0.78	0.79	0.57	0.56	0.48	0.39	0.49	0.54	0.50	0.48
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.21	0.21	0.42	0.44	0.50	0.61	0.50	0.46	0.50	0.51
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
$Cr^{\#}$	0.87	0.82	0.72	0.51	0.62	0.51	0.43	0.44	0.43	0.41
$Mg^{\#}$	0.21	0.21	0.42	0.44	0.51	0.61	0.50	0.46	0.50	0.51
Y_{Fe}	0.43	0.43	0.09	0.2	0.15	0.09	0.09	0.1	0.09	0.08

注: 表中化学成分的单位为 $w\%$, $Cr^{\#} = Cr / (Cr + Al)$, $Mg^{\#} = Mg / (Mg + Fe^{2+})$, $Y_{Fe} = Fe^{3+} / (Fe^{3+} + Cr + Al)$

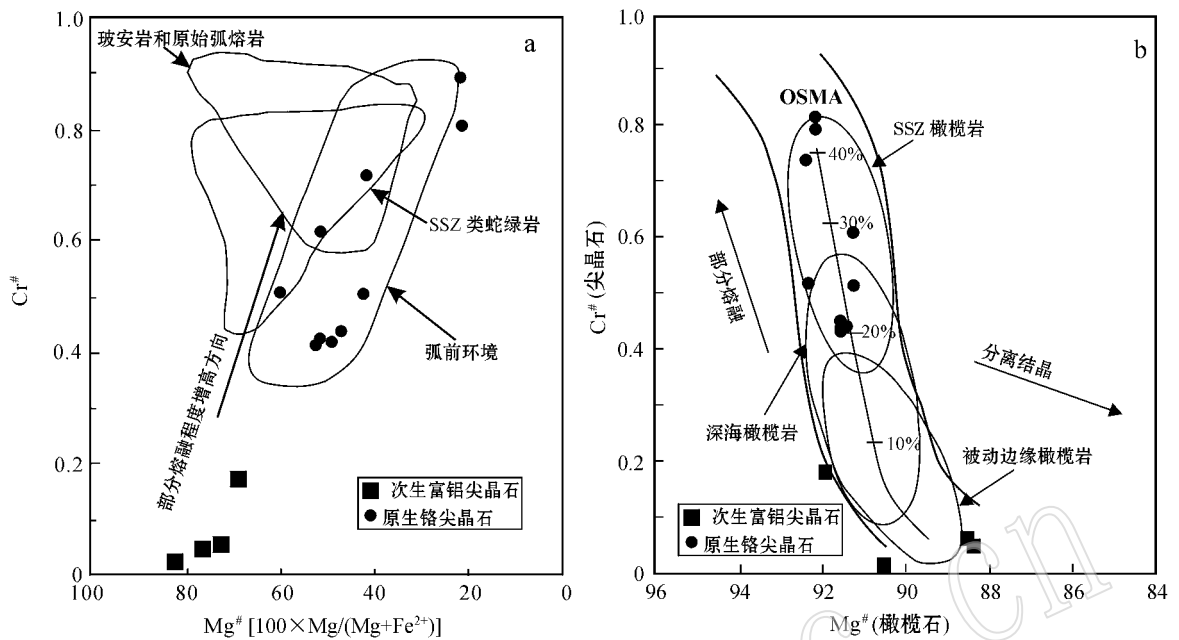


图 3 东德沟橄榄岩尖晶石 $Cr^{\#} - Mg^{\#}$ (a) 和铬尖晶石 $Cr^{\#}$ -橄榄石 $Mg^{\#}$ (b) 判别图解

Fig. 3 Discriminant diagram for $Cr^{\#} - Mg^{\#}$ (a) of peridotite spinels and picotite $Cr^{\#}$ versus olivine $Mg^{\#}$ (b) in Dongdeguo 弧前环境区间据 Guillot 等 (2001); SSZ 类蛇绿岩、玻安岩和原始弧熔浆区间据 Bridge 等 (1995); 橄榄石/尖晶石地幔排列 (OSMA) 据 Arai (1994); 深海橄榄岩域据 Dick and Bullen (1984); SSZ 橄榄岩和被动边缘橄榄岩域据 Pearce 等 (2000)

Field for fore-arc-environment after Guillot *et al.*, 2001; for SSZ ophiolite boninite and primitive arc lava after Bridge *et al.*, 1995; for olivine-spinel mantle array after Arai, 1994; for abyssal peridotites after Dick and Bullen, 1984; SSZ and passive margin peridotites after Pearce *et al.*, 2000

1997) 具有确定性 (Arai and Okada, 1991; Lee, 1999), 常把它看作岩石物理化学条件的指示计 (Dick and Bullen, 1984; Arai, 1992, 1994)。Arai (1994)、Barnes 和 Roeder (2001) 等都对尖晶石化学成分及其意义作了深入的研究, 通常运用尖晶石的 $Cr^{\#}$ [$Cr / (Cr + Al)$]、 $Mg^{\#}$ 、 Fe^{3+} 和 TiO_2 含量来表达分析。

实验证明, 尖晶石的 $Cr^{\#}$ 越大, 所在岩体经历的熔融程度越大 (Mysen and Kushiro, 1977; 李建平, 1996)。橄榄岩中铬尖晶石的 $Cr^{\#}$ 基本上由部分熔融程度来控制 (Dick and Bullen, 1984; Arai, 1994) 部分熔融可能包含残余橄榄岩的第二次熔融 (Dick and Bullen, 1984; Arai, 1994; Ahmed *et al.*, 2005)。东德沟方辉橄榄岩中自形-半自形细粒的红褐色或黄褐色原生铬尖晶石富 Cr 和 Fe, 多数细粒晶体沿长轴方向呈长条状或串珠状分布, 边缘较平直, 表明细粒红褐色或黄褐色尖晶石是从部分熔融的熔体中再结晶形成的; 而被绿泥石包裹的大颗粒或自形-半自形粒状集合体的红褐色尖晶石外缘多呈锯齿状 (图 2a、b、h), 核部和边部成分变化较大; 并且这两类尖晶石成

分变化广泛, 这些情况说明东德沟岩体可能经历了不止一次的部分熔融事件, 也就是说东德沟橄榄岩可能经历了多次熔融事件, 并导致了地幔成分的明显不均一性 (鲍佩声等, 1999)。

在铬尖晶石成分 $Cr^{\#} - Mg^{\#}$ 图解 (图 3a) 上, 东德沟橄榄岩中原生铬尖晶石样品成分区较集中, 全部落入弧前橄榄岩尖晶石中 (Guillot *et al.*, 2001), 部分落入 SSZ 环境蛇绿岩中 (Bridge *et al.*, 1995), 但次生富铝尖晶石在橄榄石成分区分散, 不落入任何区域内或其边缘, 表明次生富铝尖晶石具有与原生铬尖晶石不同的成因特性 (图 3a); 在尖晶石 $Cr^{\#}$ 和橄榄石 $Mg^{\#}$ 图解 (图 3b) 上, 原生铬尖晶石样品全部落入橄榄石-尖晶石地幔阵列 (OSMA) 中, 反映了橄榄石与该类铬尖晶石在地幔中达到平衡, 相当于 MORB 地幔经 20%~45% 部分熔融而成, 次生富铝尖晶石不落入橄榄石-尖晶石地幔阵列, 显然次生尖晶石没有与橄榄石在地幔中达到平衡。俯冲带岛弧幔残余的 $Cr^{\#}$ (0.2~0.9) 范围相对宽泛, 其尖晶石 Y_{Fe} 比值一般 < 0.3 (Arai *et al.*, 2011), 东德沟橄榄岩中原生尖晶石有与其类似的特征, 但有 2 个样品

的 Y_{Fe} 比值稍高(表 1), Abe 等(1992)指出高 $Fe^{3+}/(Cr + Al + Fe^{3+})$ 尖晶石明显在富角闪石的橄榄岩中富集,高氧逸度有利于尖晶石富集 Fe^{3+} (Roeder, 1974)这可能是其 Y_{Fe} 比值高的重要原因。

东德沟次生绿色尖晶石的 Al_2O_3 含量为 47.68% ~ 66.85%(表 2),比 Izmir-Ankara-Erzincan 缝合带中异剥橄榄岩、辉石岩中次生绿色尖晶石(Al_2O_3 为 59.05% ~ 63.39% X Ender *et al.*, 2010)范围宽泛, FeO 的含量比其略低,而 MgO 的含量比其略高些,可能是由于原岩成分或变质条件有所差别。绿色尖晶石成分变化较大,晶粒粗大者自形程度较高,颜色深, Cr_2O_3 和 FeO 含量(表 2)比色浅者高,但 Al_2O_3 和 MgO 含量(表 2)比色浅者要低,细粒者自形程度低,颜色浅,沿与蛇纹石化的网状脉体方向一致的晶体长轴方向半定向排列, Cr_2O_3 和 FeO 比色深者低, Al_2O_3 和

MgO 的含量(表 2)比色深者高,此现象显示东德沟次生绿色尖晶石可能不是同一期变质作用的产物。前人研究发现富铝尖晶石在高氧逸度中富集,高氧逸度(f_{O_2})有利于尖晶石的结晶,使与角闪石共生的尖晶石越来越多(陈世忠等 2006)陈俊兵等(2007)发现马里亚纳南部前弧橄榄岩中,尖晶石发生富 Al 贫 Cr 的演化过程是含水流体(熔体)的交代作用的结果,这表明东德沟次生绿色尖晶石至少形成于两个期次的变质作用或流体交代过程。

4 讨论与结论

前面研究表明,东德沟橄榄岩中原生绿尖晶石可能是多次熔融事件的产物,次生绿色尖晶石则至少形成于两个期次的变质或流体作用过程。

表 2 东德沟橄榄岩中蚀变和次生尖晶石矿物化学成分

Table 2 Electron microprobe analyses of altered and secondary spinels of peridotites in Dongdeqou

矿物	蚀变尖晶石			次生铝尖晶石		
	红褐色	黑色铬铁矿	黑绿色	深绿色	深绿色	浅绿色
颜色						
样品号	DU-17(边部)	DU-16	Du-04(核部)	DU-04(边部)	D-05/06	D-29
数据个数	2	2	2	2	6	5
SiO ₂	0.07	0.19	0.08	0.04	0.05	0.10
TiO ₂	0.00	0.33	0.03	0.00	0.08	0.00
Al ₂ O ₃	40.41	0.25	47.68	60.67	55.43	66.85
Cr ₂ O ₃	24.97	19.96	14.42	4.63	8	0.37
FeO	19.18	70.10	20.53	13.71	17.66	10.81
MnO	0.15	0.58	0.12	0.17	0.18	0.14
MgO	15.88	1.80	15.99	20.49	17.91	22.22
CaO	0.00	0.06	0.04	0.00	0.01	0.04
Na ₂ O	0.03	0.00	0.01	0.00	0.04	0.03
K ₂ O	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01
NiO	0.14	0.51	0.25	0.32	0.38	0.24
Total	100.82	93.79	99.17	100.04	99.74	100.81
氧原子数	4	4	4	4	4	4
Si	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.33	0.01	1.55	1.83	1.73	1.94
Cr	0.55	0.60	0.31	0.09	0.17	0.01
Fe ³⁺	0.12	1.35	0.13	0.08	0.10	0.05
Fe ²⁺	0.33	0.89	0.34	0.22	0.29	0.18
Mn	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.66	0.10	0.66	0.78	0.71	0.82
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ka	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Cr [#]	0.29	0.98	0.17	0.05	0.08	0.00
Mg [#]	0.66	0.10	0.66	0.78	0.71	0.82

注 表中化学成分的单位为 $w_B/\%$ 。

SSZ 带为在洋中脊处发生部分熔融形成的地幔橄榄岩再度熔融的最佳构造环境(史仁灯等, 2005), 这与 SSZ 带构造环境中复杂的源区(包括不同部分熔融程度的地幔橄榄岩)部分熔融的熔体与残留地幔橄榄岩的再反应(Kelemen *et al.*, 1995)以及丰富的流体活动(Melcher *et al.*, 2002)均有关系。Ahmed 等(2005)认为, 尖晶石中 TiO_2 的含量与其产生的构造环境密切相关, 岛弧环境最低, MORB 环境中等而板内环境最高(Arai, 1992)。从表 1 可以看出, 东德沟橄榄岩中原生铬尖晶石中 TiO_2 平均为 0.07%, $< 0.1\%$, 含量很低。在尖晶石的 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 关系图中(图 4), 原生尖晶石样品几乎全部落入 SSZ 橄榄岩区(Kamenetsky *et al.*, 2001), 在橄榄石 $\text{Mg}^\#$ 和铬尖晶石 $\text{Cr}^\#$ 关系图(图 3b)中, 全部落入 SSZ 橄榄岩区(Pearce *et al.*, 2000), 证明东德沟橄榄岩中原生铬尖晶石具有 SSZ 环境橄榄岩的特征。

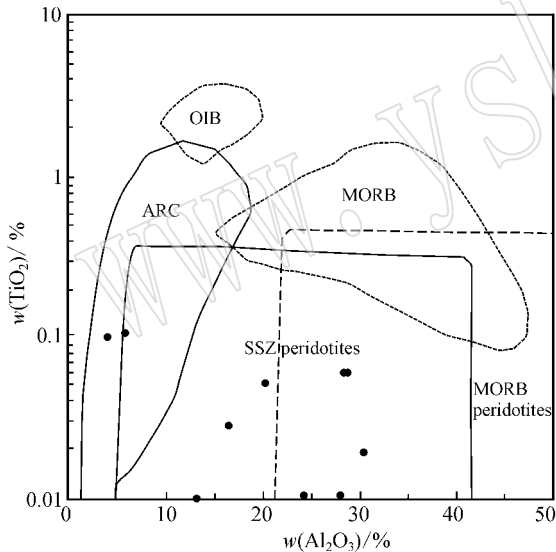


图 4 东德沟橄榄岩铬尖晶石 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解
(据 Kamenetsky *et al.*, 2001)

Fig. 4 Diagram of $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ Cr-spinels in Dongdegou peridotites (after Kamenetsky *et al.*, 2001)

OIB—洋岛玄武岩; ARC—岛弧岩浆岩; MORB—洋中脊玄武岩; SSZ—上部俯冲带; SSZ peridotites—SSZ 型橄榄岩; MORB peridotites—洋中脊型橄榄岩

OIB—ocean island basalt; ARC— island-arc magmas; MORB—mid-ocean ridge basalt; SSZ—supra-subduction zone; SSZ peridotites—SSZ type peridotites; MORB peridotites—MORB type peridotites

Dick 和 Bullen(1984)利用尖晶石的 $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$ 把超镁铁质构造岩分为 3 类: $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al}) < 0.6$ 的为 I 型; $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al}) > 0.6$ 的为 III 型; II 型为过渡

类型, 包括 I 型至 III 型尖晶石的变化范围。深海橄榄岩属于 I 型, 代表真正的大洋岩石圈; III 型为与岛弧有关的火山岩和侵入岩、大陆侵入岩组合以及大洋高原玄武岩; II 型则具复合成因, 其成分区跨度大, 该类尖晶石具复杂、多期熔融的历史(王希斌等, 2005)。洋内岛弧系统属于这一类型。研究发现东德沟橄榄岩中原生铬尖晶石形态、成分变化较大, 成因复杂, 属于具复合成因的 II 型特征。

在一个地幔岩体中同时出现高 Al ($\text{Cr}^\# < 0.6$) 和高 Cr ($\text{Cr}^\# > 0.6$) 的尖晶石, 可有多种解释, 也许与地幔橄榄岩的部分熔融程度、主岩(地幔橄榄岩)亏损程度及岩浆的性质有关(Zhou *et al.*, 2001), 有些学者认为一个岩体中同时具有 $\text{Cr}^\# < 0.6$ 和 $\text{Cr}^\# > 0.6$ 的铬尖晶石, 其形成环境经历了从洋中脊到岛弧环境的变化(Arai and Matsukage, 1998; Proenza *et al.*, 1999)。前人研究指出弧前橄榄岩主要是上地幔浅部俯冲带(SSZ)的方辉橄榄岩和壳幔过渡带的纯橄榄岩(Arai, 1994), 其尖晶石 $\text{Cr}^\#$ 变化于 40~90, 以 70 为主(Bloomer and Fisher, 1987), 且 $\text{Mg}^\#$ 与 $\text{Cr}^\#$ 负相关, 东德沟铬尖晶石表现出与之一致的特点, 且东德沟铬尖晶石($\text{Cr}^\#$ 为 0.41~0.87, $\text{TiO}_2 < 0.3\%$)与阿曼北部 Wadi Rajmi 和 Wadi Fizh 地区岛弧环境中(Arai *et al.*, 2006)尖晶石($\text{Cr}^\#$ 为 0.4~0.8, $\text{TiO}_2 < 0.3\%$)(Arai *et al.*, 2011)有相似的特征。这些都喻示了该区原生铬尖晶石寄存的方辉橄榄岩极有可能是俯冲上板片地幔楔岛弧环境橄榄岩残片。

References

- Abe N, Arai S and Saeki Y. 1992. Hydration processes in the arc mantle: Petrology of the Megata peridotite xenoliths, the northeast Japan arc[J]. *Jour. Min. Petr. Econ. Geol.*, 87: 305~317.
- Ahmed H A, Arai S, Yaser M, *et al.* 2005. Spinel composition as a petrogenetic indicator of the mantle section in the Neoproterozoic Bou Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco[J]. *Precambrian Research*, 138: 225~234.
- Ai Yongliang, Zhang Lifei, Li Xuping, *et al.* 2005. Geochemical characteristics of HP-UHP eclogites and blueschists, and tectonic implications in southwestern Tianshan[J]. *China. Progress of Nature Scienc*, 11: 1346~1356 (in Chinese with English abstract).
- Arai S and Matsukage K. 1998. Petrology of a charomite micropodiform Hess Deep, equatorial Pacific: a comparison between abyssal and alpine-type podiform chromitites[J]. *Lithos*, 43: 1~14.
- Arai S and Okada H. 1991. Petrology of serpentine sandstone as a key to

- tectonic development of serpentine belts[J]. *Tectonophysics* , 195 : 65 ~ 81.
- Arai S , Kadoshima K and Morishita T. 2006. Wide-spread arc-related melting in the mantle section of the northern Oman ophiolite as inferred from detrital chromian spinels[J]. *Journal of the Geological Society* , London , 163 : 869 ~ 879.
- Arai S , Okamura H , Kadoshima K , *et al.* 2011. Chemical characteristics of chromian spinel in plutonic rocks : Implications for deep magma processes and discrimination of tectonic setting[J]. *Island Arc* , 20 : 125 ~ 137.
- Arai S. 1992. Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry[J]. *Mineral. Mag.* , 56 : 173 ~ 184.
- Arai S. 1994. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships : Review and interpretation[J]. *Chemical Geology* , 113 : 191 ~ 204.
- Bao Peisheng , Wang Xibin , Peng Genyong , *et al.* 1999. Chromite Deposits in China[M]. Beijing : Science Press , 55 ~ 96(in Chinese with English abstract).
- Barnes S J and Roeder P L. 2001. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks[J]. *J. Petrol.* , 42 : 2 279 ~ 2 302.
- Bloomer S H and Fisher R L. 1987. Petrology and geochemistry of igneous rocks from the Tonga Trench-A nonaccreting late boundary [J]. *Journal of Geology* , 95 : 469 ~ 495.
- Bridges J C , Prichard H M and Meireles C A. 1995. Podiform chromite-bearing ultrabasic rocks from the Braganca massif , northern Portugal : fragments of island arc mantle[J]. *Geology Magazine* , 132 : 39 ~ 49.
- Chen Junbing and Zeng Zhigang. 2007. Petrology and mineralogy of peridotites from the southern Mariana forearc : Implication for the metasomatism of the mantle wedge under Mariana arc[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology* , 27(1) : 53 ~ 59(in Chinese with English abstract).
- Chen Shizhong , Yang Jingsui , Xu Zhiqin , *et al.* 2006. Transformation of chromium spinel and garnet : Evidence of CCSD-PP3 Ultramafic rocks processed UHP metamorphism[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* , 31(4) : 475 ~ 487(in Chinese with English abstract).
- Cookenboo H O , Bustin R M and Wilks K R. 1997. Detrital chromium spinel compositions used to reconstruct the tectonic setting of provenance : Implications for orogeny in the Canadian Cordiller[J]. *Journal of Sedimentary Research* , 67 : 116 ~ 123.
- Dick H J B and Bullen T. 1984. Chromium spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and Alpine-type peridotites and spatially associated lavas[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology* , 86 : 54 ~ 76.
- Ender Sarlfaklog-lua , Hayrettin Özen , Aydin Çolakog-lub , *et al.* 2010. Petrology , mineral chemistry , and tectonomagmatic evolution of Late Cretaceous suprasubduction-zone ophiolites in the izmir-Ankara-Erzincan suture zone[J]. *Turkey : International Geology Review* , 52(2 ~ 3) : 187 ~ 222.
- Gao J , Klemm R , Zhang L , *et al.* 1999. P-T path of high pressure low temperature rocks and tectonic implications in the western Tianshan Mountains(NW China) [J]. *Journal of Metamorphic Geology* , 17 : 621 ~ 636.
- Gao Jun , Qian Qing , Long Lingli , *et al.* 2009. Accretionary orogenic process of Western Tianshan , China [J]. *Geological Bulletin of China* , 28(12) : 1 804 ~ 1 816(in Chinese with English abstract).
- Guillot S , Hattori K H , Sigoyer J D , *et al.* 2001. Evidence of hydration of the mantle wedge and its role in the exhumation of eclogites[J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 193 : 115 ~ 127.
- Jia Dacheng , Xing Lixin , Pan Jun , *et al.* 2006. Geochemical Characteristics of the Aluminum-Enriched Spinels in Xenoliths from the Upper Mantle Shear Belt in Yitong , Northeastern China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)* , 36(4) : 497 ~ 502 (in Chinese with English abstract).
- Kamenetsky V S , Crawford A J and Meffre S. 2001. Factors controlling chemistry of magmatic spinel : An empirical study of associated olivine , Cr-spinel and melt inclusion from primitive rocks[J]. *Journal of Petrology* , 42(4) : 655 ~ 671.
- Kelemen P B , Shimizu N and Salters V J M. 1995. Extraction of mid-ocean ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channel[J]. *Nature* , 375 : 747 ~ 753.
- Lee Y I. 1999. Geotectonic significance of detrital chromian spinel : A review[J]. *Geosciences Journal* , 3(1) : 23 ~ 29.
- Li Jianping , Jacques K and Daniel V. 1996. Chemical behaviour of solid phases during partial melting and facies transition(spinel → plagioclase) of mantle peridotite II . application natural rocks[J]. *Geochimica* , 25(4) : 353 ~ 364(in Chinese with English abstract).
- Li X P , Zhang L F , Wei C J , *et al.* 2007. Petrology of rodingites derived from eclogites in the western Tianshan , China[J]. *J. Met. Geol.* , 25 : 363 ~ 382.
- Li Xuping , Zhang Lifei and Wang Zeli. 2008. Geochemistry of rodingite derived from eclogite in western Tianshan , China[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 24(4) : 711 ~ 717(in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Rudnik R L. 1998. Mineralogy and composition of the upper mantle[A]. *Russell J Hemley. Ultrahigh-Pressure Mineralogy : Physics and Chemistry of the Earth's Deep Interior[C]*. Reviews in Mineralogy , 37 : 139 ~ 164.
- Melcher F , Meisel T , Puhl J , *et al.* 2002. Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps : constraints from geochemistry[J]. *Lithos* , 65 : 69 ~ 112.
- Mysen B D and Kushiro I. 1977. Compositional variations of coexisting phases with degree of melting of peridotites in the upper mantle[J]. *Am. Mineral* , 62 : 843 ~ 865.
- Ohara Y and Ishii T. 1998. Peridotites from the southern Mariana forearc : heterogeneous fluid supply in mantle wedge[J]. *Isl Arc* , 7(3) : 541 ~ 558.
- Pearce J A , Barker P F , Edwards S J , *et al.* 2000. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system , South Atlantic[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* , 139 : 36 ~ 53.
- Proenza J , Gervilla F , Melgarejo J C , *et al.* 1999. Al- and Cr-rich

- chromities from the Mayari-Baracoa ophiolitic belt (eastern Cuba): consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotite in suprasubduction mantle [J]. *Economic Geology*, 94 : 547~566.
- Roeder P L and Campbell I H. 1985. The effect of postcumulus reactions on composition of chrome-spinels from the Jimberlana intrusion [J]. *Journal of Petrology*, 26 (3): 763~786.
- Roeder P. 1974. The crystallization of spinel from basaltic liquid as a function of oxygen fugacity [J]. *J. Geol.*, 82 : 709~729.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28 (5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. 2005. 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*, 24 (5): 397~408 (in Chinese with English abstract).
- Tagiri M, Yano T, Bakirov A, et al. 1995. Mineral parageneses and metamorphic P-T paths of ultrahigh-pressure eclogites from Kyrgyzstan Tien-Shar [J]. *The Island Arc*, 4 : 280~292.
- Wang Xibin, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. 2005. Origin and structural nature of Raobozhai ultramafic rock: A discussion [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (6): 1593~1608 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L F, Ai Y, Song S, et al. 2007. Triassic collision of Western Tianshan orogenic belt, China: Evidences from SHRIMP U-Pb dating of zircon from eclogitic rocks [J]. *Lithos*, 96 : 266~280.
- Zhang Qi and Zhou Guoqing. 2001. *Ophiolites of China* [M]. Beijing, Science Press, 1~182 (in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. 2001. Melt-mantle interaction and melt evolution in the Sartoyay high-Al chromite deposits of Dalabute ophiolite (NW China) [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 19 : 517~534.
- ### 附中文参考文献
- 艾永亮, 张立飞, 李旭平等. 2005. 新疆西南天山昭苏一带超高压变质榴辉岩、蓝片岩地球化学特征及其大地构造意义 [J]. *自然科学进展*, 11 : 1346~1356.
- 鲍佩声, 王希斌, 彭根永等. 1999. *中国铬铁矿床* [M]. 北京: 科学出版社, 55~96.
- 陈俊兵, 曾志刚. 2007. 马里亚纳南部前弧橄榄岩的岩石及矿物学: 对弧下地幔楔交代作用的指示 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 27 (1): 53~59.
- 陈世忠, 杨经绥, 许志琴等. 2006. 锐尖晶石和石榴石的相变: 大陆科学钻探 CCSD-PP3 孔超镁铁岩超高压变质作用的证据 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 31 (4): 475~487.
- 高俊, 钱青, 龙灵利等. 2009. 西天山的增生造山过程 [J]. *地质通报*, 28 (12): 1804~1816.
- 贾大成, 邢立新, 潘军等. 2006. 伊通上地幔剪切带捕虏体中富铝尖晶石的地球化学特征 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36 (4): 497~502.
- 李建平, Jacques K, Daniel V. 1996. 地幔橄榄岩部分熔融及相转变 (尖晶石相-斜长石相) 过程中的固相化学成分演化-II 在自然岩石中的应用 [J]. *地球化学*, 25 (4): 353~364.
- 李旭平, 张立飞, 王泽利. 2008. 西天山异剥钙榴岩的地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 24 (4): 711~717.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表 [J]. *岩石矿物学杂志*, 28 (5): 495~500.
- 史仁灯, 杨经绥, 许志琴等. 2005. 西藏班公湖存在 MOR 型和 SSZ 型蛇绿岩——来自两种不同地幔橄榄岩的证据 [J]. *岩石矿物学杂志*, 24 (5): 397~408.
- 王希斌, 杨经绥, 陈松永等. 2005. 也谈饶拔寨超镁铁岩体的成因和构造类型的归属问题 [J]. *岩石学报*, 21 (6): 1593~1608.
- 张旗, 周国庆. 2001. *中国蛇绿岩* [M]. 北京: 科学出版社, 1~182.