

西藏松多榴辉岩的矿物原位微量元素地球化学研究

李天福^{1,2} 杨经绥^{1,2} 李兆丽^{1,2} 徐向珍^{1,2} 任玉峰² 陈松永^{1,2}

(1. 大陆动力学与构造国家重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要:对松多榴辉岩中单矿物进行的 LA-ICP-MS 原位微区微量元素分析研究结果表明,石榴石主要富集中、重稀土元素和 Y,同时具有高丰度的 Sc、V、Cr 和 Co 等元素。绿辉石中的微量元素以中稀土元素、Sr、Sc、V、Cr、Co、Ni 和 Ti 为主,含有一定量的 Zr、Hf 等。石榴石、绿辉石、角闪石和绿帘石中均显示轻稀土元素亏损的特点,表明在退变质过程中没有发生明显的富轻稀土元素的外来流体交代作用,因而其微量元素矿物地球化学的某些特点不同于苏鲁地区的榴辉岩。石榴石变斑晶中某些元素(如 Ti、Zr)的分带性暗示了榴辉岩在紧随峰期变质之后的折返过程中发生了降压增温过程。榴辉岩主要变质矿物中微量元素的分配显然受到矿物主量元素的分配所控制,如 MgO 在石榴石和绿辉石之间的分配对 Ni、Co、Ti 分配的控制以及 CaO 的分配对 Sr、Y、REE 分配的控制等。退变质过程中矿物的形成或分解以及物理化学条件的改变都可以引起矿物间微量元素的重新分配。由绿辉石退变质而形成的角闪石,较之原先的绿辉石,其微量元素配分曲线总体特征会发生变化,但元素总体丰度相近,某些元素特点相似,又反映了绿辉石和角闪石之间的成生联系。金红石是 Ti、Nb、Ta、Zr、Hf 的主要赋存矿物,而与之共生的绿帘石所表现出来的高场强元素的亏损特征表明了金红石的存在所带来的影响。

关键词:榴辉岩;原位;微量元素;松多;西藏

中图分类号: P575; P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)06-0858-17

In situ trace element geochemistry of minerals in eclogite from Somdo, Tibet

LI Tian-fu^{1,2}, YANG Jing-sui^{1,2}, LI Zhao-li^{1,2}, XU Xiang-zhen^{1,2}, REN Yu-feng²
and CHEN Song-yong^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Continental Dynamics and Tectonics, Beijing 100037, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: LA-ICP-MS in situ trace element analysis was performed for minerals in eclogite from Somdo. According to the results, garnet mainly contains MREE, HREE and Y, with high concentrations of Sc, V, Cr and Co; omphacite contains high concentrations of MREE, Sr, Sc, V, Cr, Co, Ni and Ti, with certain amounts of Zr and Hf; garnet, omphacite, amphibole and epidote all exhibit LREE depletion, indicating the nonexistence of metasomatism by exotic LREE-rich fluid during the retrogressive metamorphism of the eclogite, and this accounts for somewhat different trace element characteristics between eclogite here and Su-Lu UHP eclogites that are characterized by LREE enrichment. Zoning of some trace elements(e.g., Ti and Zr) demonstrates the pressure decreasing and temperature increasing closely after peak metamorphism during the turning back to the shallow position. Trace element partitioning between rock-forming minerals is controlled by the partitioning of major elements between minerals, e.g., MgO partitioning between garnet and omphacite controls the partitioning of Ni, Co, Ti, whereas CaO partitioning controls the partitioning of Sr, Y and REE. The

收稿日期: 2012-05-24; 修订日期: 2012-09-27

基金项目: 地质调查项目(1212010610107)

作者简介: 李天福(1962-),男,研究员,火成岩岩石学专业, E-mail: litianfu@sina.com.

formation and decomposition of minerals and the change of physical-chemical conditions might result in new partitioning of trace elements between minerals during retrogressive metamorphism. Amphibole formed by omphacite retrogression would not wholly inherit the trace element distribution pattern of omphacite without any diversification, as indicated by differences in their trace element distribution patterns; nevertheless, the somewhat similar specific characteristics of trace element distribution patterns between omphacite and amphibole demonstrate their certain genetic linkage. Rutile is the main bearer of HFS elements such as Ti, Nb, Ta, Zr and Hf, which strongly effects the depletion of HFS elements in coexisting epidote.

Key words: eclogite; in situ; trace elements; Somdo; Tibet

大陆板块深俯冲过程中的微量元素化学行为的研究具有非常重要的意义,因为这些元素的变化特征是俯冲带物质转换的指示和标志,据此可以示踪岛弧岩浆作用、岩石圈物质分异和壳幔相互作用。因此,对天然和实验条件下形成的高压变质岩已经进行了大量的矿物微量元素研究(Green, 2000; Herman and Green, 2001; Tsujimori, 2006; 宗克清等, 2006; 石超等, 2007; Fulmer *et al.*, 2010)。原岩为经历过地壳浅部地质作用的岩石的榴辉岩,是大陆地壳俯冲到地球深部发生变质作用的产物,它记录了深部条件下元素的地球化学行为和物质交换过程。有关天然榴辉岩矿物的微量元素地球化学研究,对超高压变质作用过程中的元素地球化学行为和分布特征以及其所指示的动力学过程的认识,具有重要的意义。

激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)为岩石圈地球化学中的微量元素研究提供了一种原位、微区、快速、准确的分析技术。它不仅可以对矿物进行原位微区微量元素准确分析,而且可以避免流体包裹体以及次生矿物的影响,揭示单个矿物微量元素空间变化细节,因此,LA-ICP-MS是对固体地质样品进行原位微区微量元素研究、深入揭示地球动力学过程的有效手段之一。前人对超高压榴辉岩(Sassi *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2003, 2005; Luo *et al.*, 2004)以及地幔榴辉岩(O'Reilly and Griffin, 1995; Harte and Kirkley, 1997; Barth *et al.*, 2000)中不同矿物进行过微区微量元素研究,探讨了矿物相之间的平衡问题(Jahn *et al.*, 2003, 2005)陆壳物质的深俯冲对地幔的改造和再循环过程(Luo *et al.*, 2004)以及榴辉岩中主、微量元素在矿物相之间的分布和分配(O'Reilly and Griffin, 1995; Harte and Kirkley, 1997; Barth *et al.*, 2000; Sassi *et al.*, 2000)。

青藏高原是世界上快速隆起的年轻高原,研究

其正在发生的地质过程,对于认识地球上古老的地质作用具有重要意义。20世纪80~90年代以来,在青藏高原周边陆续发现了一些榴辉岩产出,如北侧的北阿尔金(Zhang *et al.*, 2005)、南阿尔金(刘良等, 1996)、北祁连(Wu *et al.*, 1993)和柴北缘(杨经绥等, 1998),与之有关的早古生代超高压变质作用分布于柴北缘地区(杨经绥等, 2001)和南阿尔金(张建新等, 2002; 刘良等, 2002);在南侧的喜马拉雅地区, Ghazafar and Chaudhry(1986)首次确认了榴辉岩的存在,随后发现了其他榴辉岩产出地点,如巴基斯坦北部的Kaghan Valley始新世榴辉岩(Pognante *et al.*, 1991; Lombardo *et al.*, 2000; Kaneko *et al.*, 2003)、印度西北部的Ladakh东部Tso Morari始新世早期榴辉岩(Tonarini *et al.*, 1993; Guillot *et al.*, 1995, 1997; de Sigoyer *et al.*, 1997, 2000; Leech *et al.*, 2005)以及位于这两地之间的Stak榴辉岩(Le Fort *et al.*, 1997),并且在Kaghan Valley(O'Brein *et al.*, 2001)和Tso Morari(Mukherjee and Sachan, 2003)榴辉岩中发现了超高压变质作用的标志矿物柯石英。但是在青藏高原内部鲜有榴辉岩的发现,仅见的报道是羌塘中部戈木地区的榴辉岩,其时代可能为三叠纪(李才等, 2006; Zhang *et al.*, 2006)。

杨经绥等(2006)发现了产于拉萨地块内的榴辉岩露头,并提出它可能是一条新的高压/超高压变质带,并对其所代表的古特提斯洋盆等大地构造背景进行了讨论(杨经绥等, 2007; Yang *et al.*, 2008);课题组其他成员也从变质岩石学(李天福等, 2007)、元素地球化学(陈松永等, 2007)、同位素年代学(徐向珍等, 2007; 陈松永等, 2008; Li *et al.*, 2009)等方面做了进一步研究。已有的讨论主要从宏观、综合的角度对榴辉岩的形成背景和过程及其地质意义进行了论述,有必要从更微观和精细的角度对于榴辉岩的形成过程及其过程中有无流体的参

与进行进一步讨论。本文拟通过对榴辉岩单矿物的 LA-ICP-MS 原位微区微量元素分析,对变质演化过程中发生的元素迁移及元素分配所反映出的榴辉岩在形成过程中的某些细节(温度压力变化和有无流体参与)进行讨论。

1 区域地质背景与榴辉岩的野外产出

松多榴辉岩所在的拉萨地块位于印度河-雅鲁藏布缝合带之北(王希斌等,1984),之南为喜马拉雅地体。印度河-雅鲁藏布缝合带大体沿雅鲁藏布江谷地延展,西端与克什米尔-印度缝合带相连,东段延伸并向南转入缅甸境内,与那加山缝合带连接。一般认为该缝合带代表了印度板块与欧亚大陆之间新特提斯洋的最后闭合位置(Allegre *et al.*, 1984)。拉萨地块内发育冈底斯中、新生代岛弧及活动陆缘火山带。在岛弧火山及活动陆缘火山带的北部地区出露中元古代变质基底念唐古拉群。拉萨地块北部拉萨河以东一带有低绿片岩-低角闪岩相变质岩系的分布,被认为是前奥陶纪地层(西藏自治区地质矿产局,1994)。松多榴辉岩出露在拉萨以东 100 多 km 的松多-工布江达一带,位于冈底斯岩浆岛弧带的北缘,被称为北冈底斯榴辉岩带。榴辉岩的围岩为一套白云母石英片岩等变质碎屑岩,为一套低绿片岩相-低角闪岩相的变质岩,地层的时代有人认为属前奥陶纪(陈松永等,2007)。

2 样品与分析方法

榴辉岩主要有两大类型,即金红石榴辉岩和石英榴辉岩,反映榴辉岩结构和矿物组合的部分显微照片参见图 1 及其注释。

金红石榴辉岩岩石呈灰绿色,中细粒变晶结构,矿物粒度最大为 1.5 mm,排列无定向性,因此岩石主要呈块状构造。矿物组成有石榴石、绿辉石、多硅白云母、金红石、绿帘石、角闪石、磷灰石、斜长石、钛铁矿、锆石、石英和绿泥石等。石榴石呈等轴状晶体,普遍未发生明显的次生变化,晶体中心部位往往有大量的细小矿物包裹体,这些矿物是角闪石、多硅白云母、绿辉石、绿帘石、石英和偶见的锆石等。石榴石边部往往比较洁净,少见矿物包裹体,电子探针分析显示成分环带。绿辉石晶形为短柱状,大多数

均发生退变质成为角闪石。金红石含量一般低于 1%,分散分布。有的金红石全部或者边部部分退变为榍石。样品中的多硅白云母含量少,呈细长片状产出出于粒间或呈石榴石中的包裹体。

石英榴辉岩因石榴石的含量高于 50% 而使得岩石的颜色偏弱红色,岩石为中粗粒变晶结构,矿物组成主要特点是石英含量较高(可达 20%),不定向均匀分布,岩石呈块状构造。石榴石均匀分布,呈等轴粒状,以含有大量的细小矿物包裹体为特征,特别是含有较多的石英包裹体,其中一些类似于柯石英退变质后的石英多晶体(杨经绥等,2006)。绿辉石为粗粒短柱状晶体,多数已经被角闪石替代,只有部分残留的绿辉石。石英为中细粒晶体,充填于其他矿物之间,反映其形成较晚。虽然石英与石榴石、绿辉石等榴辉岩相矿物组合不属于同一世代,但因其其在岩石中含量较高,为与石英含量较少的榴辉岩相区别,故定名为石英榴辉岩。

本文选用了样品号为 06y-551(金红石榴辉岩)和 06y-301(石英榴辉岩)的 2 个样品进行了主要造岩矿物的原位微区微量元素分析。测试分析是在国家地质实验测试中心的 New Wave-UV-213 激光熔蚀系统和与之相结合的高分辨 ICP-MS(Finnigan Mat Element 2)质谱仪上进行的。在原位微区分析中,对数据应用基体归一校准法处理(胡明月等,2008),其最大优点是可以预先用其它微区分析技术对未知样品中的内标元素进行定量,适用于具有环带结构、难以找到均匀分布的内标元素的地质样品进行元素空间分布测定。标样为 NIST 612 和 MPI-DING Glass KL2-G。激光束斑直径为 40 μm ,频率 10 Hz,输出能量 2 mJ,烧蚀深度 20 μm 。激光采样过程中,首先遮挡激光束进行空白计数 12 s,接着对样品上的 1 个点位进行连续剥蚀 40 s,最后停止剥蚀,用氦气吹扫清洗进样系统时继续计数 15 s,1 个样品点总分析时间约 70 s。

3 分析结果

3.1 石榴石

原位微区分析结果(表 1)表明,石榴石富集中、重稀土元素和 Y(图 2a、2b,图 3a、3b),同时富集 Sc、V、Cr 和 Co 等过渡元素,未见有正弦曲线型稀土元素配分曲线。

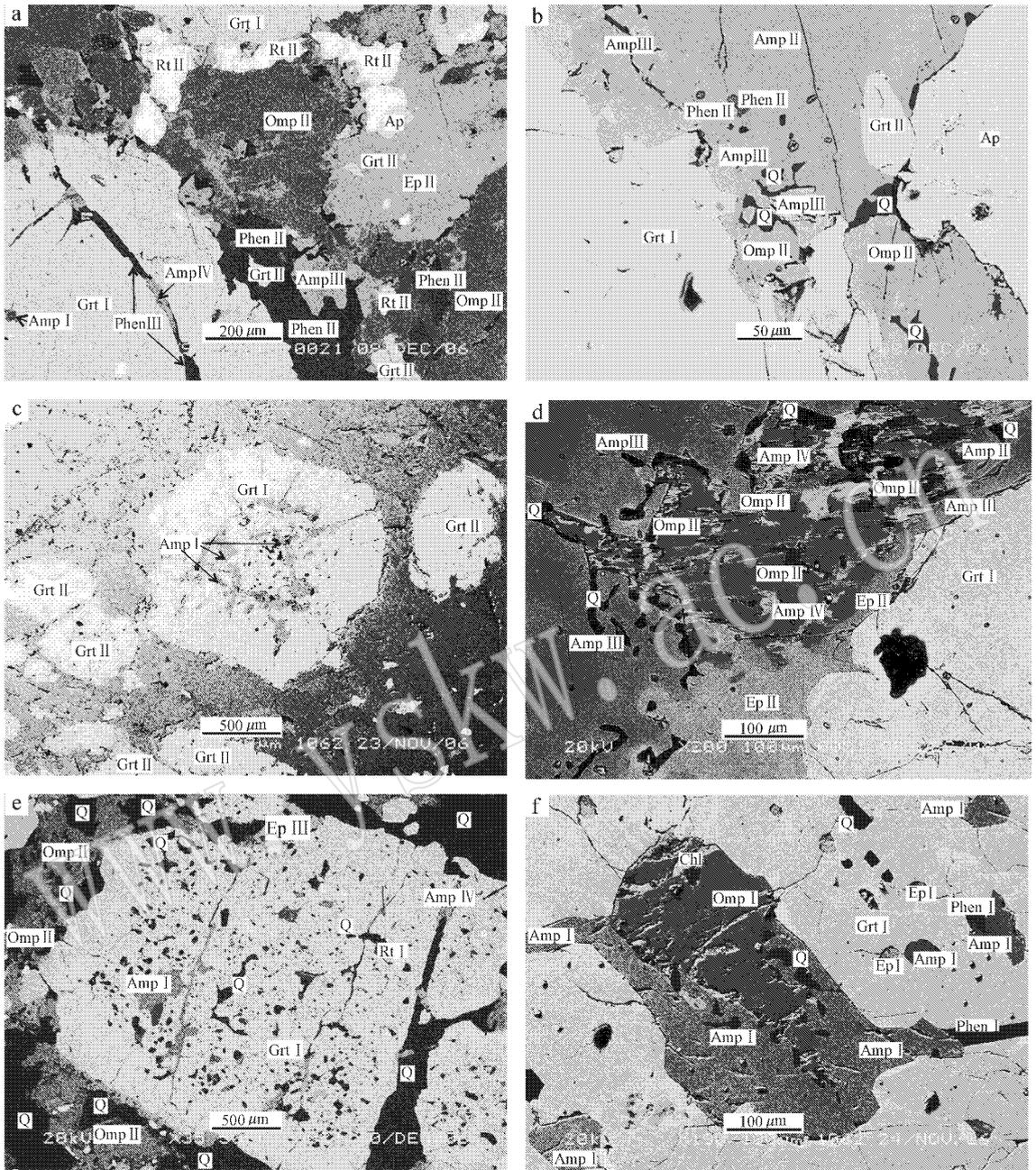


图 1 松多榴辉岩 SEM 图像

Fig. 1 SEM images of eclogite from Somdo

a—共生产出的石榴石变斑晶、基质绿辉石、多硅白云母及金红石，角闪石替代绿辉石，石榴石变斑晶的裂隙中生长有角闪石和多硅白云母；
 b—角闪石变嵌晶和角闪石变晶替代绿辉石，鸡骨状石英交生其间；c—石榴石变斑晶中有角闪石和多硅白云母包裹体和两者的复合包裹体，基质中多硅白云母、绿帘石、石榴子石和角闪石平衡共生；d—角闪石从边部替代绿辉石，另一世代的骸晶状角闪石从内部替代绿辉石，具补片状变晶结构；e—石英榴辉岩中的石榴石变斑晶和其内部的石英、角闪石包裹体，周围基质中为绿辉石和石英；f—石榴石变斑晶中的绿辉石、多硅白云母和角闪石复合包裹体以及交生的石英，显然角闪石是替代绿辉石而形成的；Grt—石榴石；Omp—绿辉石；Phen—多硅白云母；Ep—绿帘石；Amp—角闪石；Rt—金红石；Q—石英；Ap—磷灰石；Ab—钠长石

a—coexisting garnet porphyroblast, omphacite, phengite and rutile, where omphacite was replaced by amphibole, there are amphibole and phengite in cracks of garnet; b—amphibole poikiloblast and porphyroblast replace omphacite, with intergrowth of quartz; c—inclusions of amphibole and phengite or their composite inclusions in garnet porphyroblast, equilibrium coexisting phengite, epidote, garnet and amphibole in matrix; d—amphibole replaces omphacite on the margin, and another generation of amphibole skeleton crystal replaces omphacite on the inner side, showing patch texture; e—garnet porphyroblast and inclusions of quartz and amphibole in it, with omphacite and quartz in matrix around quartz eclogite; f—composite inclusions of omphacite, phengite and amphibole with quartz intergrowth in garnet porphyroblast; Grt—garnet; Omp—omphacite; Phen—phengite; Ep—epidote; Amp—amphibole; Rt—rutile; Q—quartz; Ap—apatite; Ab—albite

表 1 松多榴辉岩矿物的部分主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)的 LA-ICP-MS 分析结果
 Table 1 LA-ICP-MS analyses of some major elements($w_B/\%$) and trace elements($w_B/10^{-6}$) in minerals from Somdo eclogite

样品号 矿物	1a-2					1a-3					1a-4					1a-5					1a-6					1a-7					2a-1					2a-2					2a-3					2a-4					2a-5					2a-6					2a-7					2a-8					2a-9					2a-10					2a-11					2a-12					2a-13					3a-1					3a-2					3a-3					3a-4					3a-5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	Grt	Amp	Grt	Amp	Omp	Grt	Amp	Omp	Grt	Amp	Omp	Grt	Amp	Omp	Grt	Amp	Omp	Rt	Grt	Amp	Omp	Grt	Amp	Omp	Rt	Grt	Amp	Omp	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Grt	Amp	Grt	Amp	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp	Rt	Grt	Amp																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
SiO ₂	35.50	42.61	45.83	35.18	0.09	35.53	35.16	50.06	49.74	50.20	50.13	35.68	35.12	35.52	0.12	35.59	35.46	35.71	36.63	35.87	34.68	34.91	34.83	34.78	50.78	0.06	0.26	0.23	0.10	99.08	0.09	0.12	0.19	0.17	0.21	0.20	0.06	0.31	0.14	99.15	0.07	0.04	0.06	0.23	0.11	1.05	0.10	0.11	0.08	0.05	23.15	15.65	12.18	22.91	0.02	22.83	22.62	6.43	6.41	6.82	6.47	22.81	22.50	22.49	0.04	22.69	22.94	22.87	21.94	22.76	22.72	23.26	23.04	23.33	4.55	21.55	16.21	14.06	23.12	0.52	21.60	24.17	5.89	6.72	5.63	5.59	22.39	22.98	23.46	0.42	23.05	22.49	22.06	21.09	21.17	21.38	21.24	22.00	20.57	10.54	0.38	0.17	0.09	0.63	0.00	0.45	1.56	0.03	0.04	0.02	0.03	0.37	1.25	1.35	0.39	0.39	0.36	0.58	0.82	0.48	0.48	0.49	0.49	0.08	MnO	8.79	13.88	16.81	6.74	0.02	8.64	4.68	15.53	15.29	15.25	15.43	9.72	6.32	5.98	0.02	9.11	9.00	9.43	8.66	8.28	7.77	8.42	8.01	8.34	21.93	MgO	10.49	11.05	10.38	11.20	0.00	10.76	11.59	21.73	21.46	21.71	21.98	8.85	11.39	10.99	0.00	8.98	9.60	9.40	10.74	10.90	11.88	11.49	11.47	12.30	11.80	CaO	10.49	11.05	10.38	11.20	0.00	10.76	11.59	21.73	21.46	21.71	21.98	8.85	11.39	10.99	0.00	8.98	9.60	9.40	10.74	10.90	11.88	11.49	11.47	12.30	11.80	总和	99.91	99.84	99.58	99.89	99.74	99.88	99.90	99.85	99.83	99.84	99.83	99.88	99.87	99.94	99.88	99.91	99.89	99.87	99.91	99.96	99.91	99.95	99.90	99.90	99.75	Rb	0.04	1.90	17.54	0.25	0.05	0.83	0.04	0.01	0.05	0.26	0.01	0.00	0.00	0.04	0.02	0.07	0.19	0.59	0.09	0.05	0.14	0.08	0.08	Ba	0.05	6.08	10.06	0.54	0.28	1.60	0.25	0.29	0.06	0.07	0.08	0.91	0.07	0.04	0.03	1.83	3.28	0.29	0.01	0.05	0.04	0.89	0.00	Th	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	U	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Nb	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00	66.9	0.01	0.16	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Ta	0.00	0.00	0.00	0.00	5.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	4.95	0.00	0.01	0.11	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	La	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Ce	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.10	0.06	0.09	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Pr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Sr	0.09	1.28	1.24	0.18	0.29	0.12	0.13	27.52	21.78	27.43	28.26	0.25	0.35	0.16	0.35	0.06	0.02	0.09	0.96	0.24	0.34	0.11	0.14	1.46	Nd	0.11	0.03	0.01	0.04	0.10	0.02	0.02	0.58	0.50	0.38	0.49	0.11	0.04	0.03	0.06	0.13	0.10	0.05	0.02	0.02	0.02	0.08	0.05	Sm	0.59	0.13	0.03	0.16	0.47	0.06	0.64	0.61	0.51	0.70	1.05	0.30	0.15	0.00	0.14	0.74	0.88	0.16	0.11	0.15	0.44	0.03	0.17	0.02	Zr	4.09	4.21	4.06	4.59	70.28	11.78	4.13	12.43	10.79	13.47	12.29	10.55	6.92	4.81	186	8.91	6.64	11.40	3.22	3.54	12.92	6.45	9.37	5.33	0.62	Hf	0.05	0.18	0.31	14.99	8.15	0.23	0.07	0.88	0.72	0.96	0.82	0.15	0.26	0.07	10.5	0.13	0.11	0.17	0.05	0.04	0.27	0.06	0.11	0.05	0.14	Eu	0.44	0.11	0.01	0.12	2.93	0.78	1.36	1.14	0.96	1.21	7.56	2.05	1.05	0.01	1.12	0.79	0.88	0.20	0.07	0.12	0.46	0.03	0.16	0.01	Gd	3.27	1.29	0.21	1.18	0.42	0.05	0.37	0.27	0.29	0.37	1.05	0.21	0.07	0.01	9.48	6.25	7.27	1.34	0.70	1.03	2.74	0.34	1.30	0.03	Tb	1.03	0.52	0.07	0.55	0.00	1.10	0.51	0.19	0.14	0.16	0.18	2.26	0.86	0.60	0.00	2.84	1.86	2.19	0.52	0.35	0.45	0.76	0.23	0.59	0.01	Dy	9.44	5.05	0.60	8.49	0.00	12.35	8.64	0.68	0.60	0.62	0.70	16.15	12.22	8.75	18.98	13.46	16.36	6.60	5.54	6.72	7.01	4.60	8.52	0.09	Y	70.59	27.96	3.36	87.53	0.02	93.06	81.25	1.48	1.53	1.29	1.51	64.84	115.52	85.17	0.02	69.84	62.02	74.27	60.89	58.05	81.93	74.25	56.96	93.75	0.51	Ho	2.51	1.15	0.13	3.23	3.77	3.05	0.05	0.06	0.06	0.05	2.53	4.29	2.97	0.00	2.68	2.43	2.97	2.11	2.03	2.91	2.52	1.92	3.45	0.02	Er	9.35	3.01	0.39	12.98	0.00	13.37	11.02	0.08	0.12	0.08	5.38	17.95	12.05	0.00	4.56	5.81	7.04	7.93	8.31	14.38	14.76	9.27	15.76	0.08	Tm	1.49	0.41	0.06	2.13	2.05	1.67	0.01	0.01	0.01	0.01	0.55	3.45	2.14	0.00	0.40	0.71	0.89	1.33	1.40	2.83	3.75	1.69	2.76	0.01	Yb	10.76	2.45	0.36	15.12	0.00	13.52	10.77	0.04	0.06	0.03	0.05	2.93	27.27	16.34	2.04	4.44	5.32	9.42	10.92	21.85	36.12	12.35	20.55	0.09	Lu	1.58	0.37	0.05	2.22	1.87	1.45	0.00	0.01	0.01	0.01	0.34	4.41	2.57	0.00	0.17	0.52	0.67	1.31	1.67	3.62	7.10	1.86	3.18	0.01	Sc	66.54	76.60	85.57	56.76	3.15	65.30	50.33	57.45	60.29	56.59	56.21	68.99	64.85	54.94	1.91	55.05	63.99	61.12	64.66	59.40	68.62	65.71	73.43	77.21	34.85	V	141	328	531	143	1362	163	149	711	710	700	699	132	178	127	1327	156	133	114	131	117	157	150	116	150	333	Cr	181	223	205	240	787	198	274	274	334	419	394	454	193	77	823	514	336	405	59	61	107	101	21	245	233	Co	70	89	90	55	0	69	28	46	46	45	44	71	42	43	0	71	68	69	63	58	50	61	47	57	101	Ni	4	223	153	3	1	2	127	144	130	115	8	5	4	5	0	0	4	5	44	17	3	1	3	1	3	1306

06y-301

续表 1-2
Continued Table 1-2

		06y-551																						
样号		3a-7	3a-8	3a-9	3a-10	3a-11	3a-12	3a-15	3a-16	4a-1	4a-2	4a-3	4a-4	4a-5	4a-6	4a-7	4a-8	4a-9	4a-11	4a-12	4a-13	4a-14	4a-15	4a-18
矿物		Omp	Omp	Omp	Grt	Grt	Grt	Amp	Grt	Rt	Omp	Omp	Omp	Grt	Grt	Grt	Amp	Ep	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Amp
SiO ₂		50.17	51.60	49.90	35.54	35.60	35.61	45.34	35.40	0.11	50.29	49.72	50.47	35.71	35.54	34.29	50.22	36.34	36.81	35.95	35.76	35.61	36.17	47.10
TiO ₂		0.22	0.22	0.22	0.13	0.11	0.12	0.26	0.05	99.29	0.22	0.23	0.23	0.07	0.15	0.10	0.19	0.40	0.12	0.12	0.10	0.11	0.15	0.20
Al ₂ O ₃		7.16	6.98	7.17	23.02	22.81	22.83	11.24	22.73	0.04	7.15	7.08	7.29	22.71	22.94	22.04	6.98	31.59	22.48	22.54	22.49	22.82	22.72	9.19
Fe ₂ O ₃		4.82	4.93	4.91	21.36	21.96	21.94	12.46	25.88	0.22	5.08	4.92	4.55	21.99	20.88	21.02	5.11	5.30	21.73	21.39	21.10	21.30	20.15	11.42
MnO		0.03	0.03	0.03	0.26	0.21	0.24	0.07	0.96	0.00	0.03	0.03	0.02	0.51	0.43	0.54	0.03	0.03	0.53	0.52	0.51	0.43	0.43	0.08
MgO		15.62	15.13	15.76	8.98	8.68	8.86	18.00	5.85	0.02	16.20	15.91	15.53	8.87	8.64	8.05	15.76	0.12	7.91	8.52	8.43	9.11	8.93	19.53
CaO		21.88	20.96	21.88	10.64	10.56	10.31	12.42	9.05	0.01	20.94	22.01	21.74	10.06	11.33	13.71	21.53	26.01	10.32	10.88	11.47	10.51	11.33	12.38
总称		99.89	99.84	99.86	99.93	99.93	99.92	99.79	99.92	99.68	99.90	99.90	99.84	99.93	99.91	99.75	99.83	99.79	99.91	99.92	99.86	99.88	99.89	99.90
Rb		0.02	0.05	0.01	0.12	0.02	0.04	0.07	0.01				0.23	0.08	0.06	0.06	0.01	0.01	0.11	0.12	0.08	0.06	0.05	0.05
Ba		0.14	0.18	0.09	3.83	0.04	0.01	0.82		0.06			0.85	0.07	0.43	0.36	3.32	3.98	2.37	0.22	0.22	0.22	0.03	1.45
Th			0.00		0.00			0.00		0.00		0.00	0.00				0.01							0.01
U		0.00		0.00		0.00						0.01	0.00	0.00	0.24	0.11	0.02		0.00	0.00	0.00	0.00		0.00
Nb								0.04	0.00	85.36	0.01	0.01	0.00				0.20		0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02
Ta		0.00	0.00	0.00				0.00		6.11	0.00			0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.01
La		0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.06	0.00	0.07	0.02	0.39	0.00	0.27	0.01	0.01	0.00	0.07
Ce		0.10	0.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.08	0.07	0.08	0.00	0.00	0.10	0.09	1.39	0.00	0.13	0.00	0.01	0.00	0.04
Pr		0.04	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00		0.03	0.04	0.03	0.00	0.00	0.04	0.04	0.27	0.00	0.05	0.00	0.01	0.01	0.01
Sr		26.51	25.70	25.53	0.38	0.06	0.10	1.37	0.07	0.29	20.67	24.89	21.73	0.19	0.18	6.25	25.65	596.8	1.30	1.86	0.44	0.20	0.15	1.44
Nd		0.54	0.39	0.40	0.01	0.00	0.01	0.04	0.04	0.42	0.51	0.51	0.02	0.01	0.42	0.25	1.99	0.03	0.30	0.01	0.04	0.02	0.11	
Sm		0.62	0.58	0.54	0.07	0.10	0.07	0.10	0.51	0.49	0.56	0.63	0.20	0.13	0.58	0.40	1.35	0.27	0.39	0.17	0.20	0.10	0.02	
Zr		15.28	15.89	14.26	8.73	8.83	9.37	9.15	7.12	406.3	15.17	16.26	15.58	9.80	14.25	1492.0	5.66.2	3.76	5.15	5.69	5.21	10.09	8.40	4.19
Hf		0.97	0.87	0.96	0.15	0.14	0.14	0.68	0.10	16.97	0.83	0.90	1.03	0.15	0.17	37.26	17.58	0.12	0.07	0.09	0.07	0.23	0.09	0.30
Eu		0.25	0.23	0.24	0.06	0.09	0.10	0.02	0.43	0.00	0.21	0.25	0.24	0.20	0.08	0.35	0.16	0.76	0.24	0.25	0.11	0.15	0.12	0.01
Gd		1.21	1.08	1.16	1.10	1.14	1.12	0.33	5.80	0.00	1.03	1.11	1.31	1.97	1.44	3.58	1.02	3.91	2.60	3.10	1.59	2.66	1.16	0.01
Tb		0.16	0.16	0.17	0.62	0.65	0.71	0.05	1.72		0.15	0.17	0.18	1.06	0.97	1.35	0.17	1.02	1.04	1.25	0.74	1.25	0.61	0.02
Dy		0.60	0.57	0.60	9.01	9.68	10.44	0.41	12.01	0.64	0.68	0.70	12.04	16.27	15.86	1.13	8.74	12.25	15.53	9.79	14.79	8.74	0.16	
Y		1.57	1.67	1.67	70.42	70.82	77.18	1.91	40.76	0.02	1.52	1.47	1.56	68.88	150.35	125.30	5.62	40.35	98.59	125.51	84.16	86.04	80.32	0.81
Ho		0.06	0.06	0.05	2.72	2.73	2.98	0.08	1.63		0.05	0.06	0.06	0.78	6.04	4.80	0.22	1.55	3.65	5.02	3.20	3.43	2.88	0.03
Er		0.10	0.09	0.10	9.03	8.17	9.37	0.25	2.85	0.00	0.08	0.12	0.07	7.34	22.74	17.53	0.80	3.27	13.18	19.25	12.09	8.71	11.42	0.13
Tm		0.01	0.01	0.01	1.26	1.08	1.22	0.04	0.26		0.00	0.01	0.01	0.94	3.70	2.91	0.13	0.28	2.19	3.19	2.06	1.00	1.88	0.02
Yb		0.04	0.04	0.04	8.24	6.25	7.24	0.27	1.28		0.04	0.04	0.02	5.63	24.09	21.30	1.11	1.13	16.27	24.42	15.44	5.38	12.53	0.12
Lu		0.00	0.01	0.01	1.20	0.83	0.96	0.05	0.13	0.00	0.01	0.00	0.00	0.67	3.09	3.29	0.21	0.10	2.50	3.95	2.34	0.62	1.70	0.02
Sc		60.98	60.24	60.25	62.04	61.58	61.24	50.96	54.46	3.14	58.16	59.02	58.92	71.67	50.07	57.75	57.81	12.13	54.50	58.21	66.13	75.03	61.88	54.55
V		588	589	598	116	102	101	529	136	2026	601	619	617	149	150	184	587	866	242	258	173	198	237	426
Cr		237	240	236	168	141	194	1204	347	443	200	220	188	252	127	20	17	282	14	27	585	452	411	238
Co		36	37	37	53	52	54	71	43		40	37	36	58	54	53	36	1	55	57	54	55	55	73
Ni		126	134	131				215		0	148	136	140	2	2	4	122		2	3	3	4	4	365

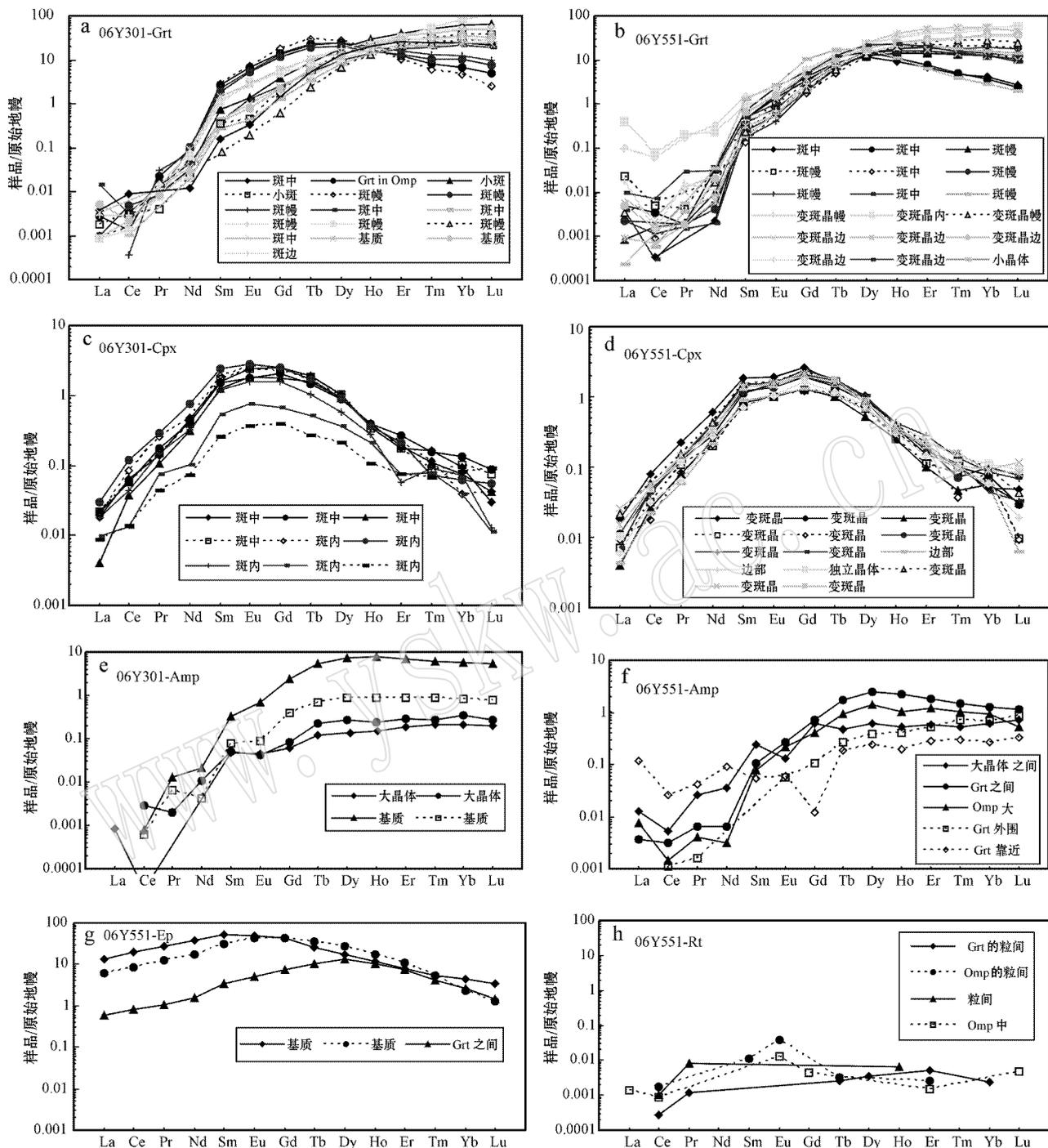


图 2 松多榴辉岩矿物稀土元素原始地幔 (McDonough 和 Sun, 1995) 标准化曲线

Fig. 2 Primitive-mantle normalized REE partition curves of minerals from Somdo eclogite (primitive mantle values after McDonough and Sun, 1995)

石榴榴辉岩中部分石榴石的稀土元素配分曲线显示了幔部比核部重稀土元素相对亏损、中稀土元素相对富集的特点。金红石榴辉岩中的个别石榴石的稀土元素配分曲线显示了幔部比核部重稀土元素

相对亏损、中稀土元素稍微富集的特点,与石榴石核部和其它分析点位的稀土元素曲线在 Dy 处相交。

不相容元素分布图上(图 3a、3b),Ti 均显示具有不同程度的负异常,并且具有 Zr 正异常而 Hf 弱负异

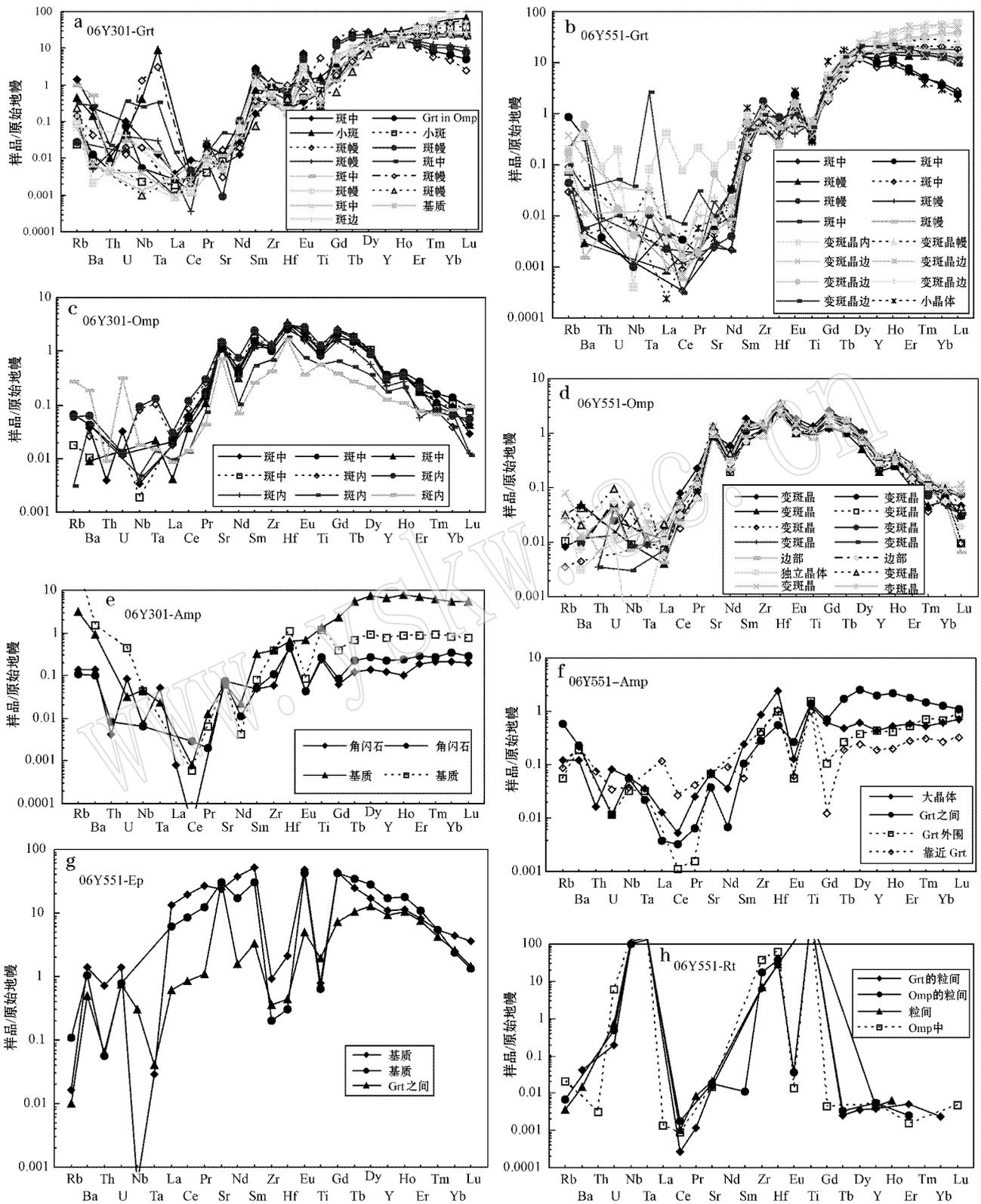


图 3 松多榴辉岩矿物不相容元素原始地幔 (McDonough 和 Sun, 1995) 标准化曲线

Fig. 3 Primitive-mantle normalized incompatible trace element partition curves of minerals from Somdo eclogite (primitive mantle values after McDonough and Sun, 1995)

常。Eu 显示明显的正异常。除个别分析点外,大离子亲石元素 Sr 在石英榴辉岩的石榴石中显示弱负异常,而在金红石榴辉岩的石榴石中显示弱正异常。高场强元素 Nb、Ta 显示散乱,但是部分分析点的 Ta 显示强烈的正异常。

3.2 绿辉石

绿辉石中的微量元素主要为 Sr、Sc、V、Cr、Co、Ni 和 Ti,含有一定的 Zr、Hf 等。在稀土元素配分型式曲线上(图 2c、2d),Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy 比两端的轻稀土元素和重稀土元素相对富集,其中 Eu 显示最高峰,呈中间上凸的曲线,尤其是轻稀土元素亏损,不同于苏鲁地区榴辉岩中的绿辉石(宗克清等, 2006)。在不相容元素分布图(图 3c、3d)上,整体上,元素丰度比石榴石低 2 个数量级,Nd、Zr、La 显示为负异常,而 Ti 呈弱负异常,Hf 显示正异常,Eu 位于 Hf 和 Ti 的内插连线位置上,大离子亲石元素 Sr 显示高正异常,高场强元素 Nb、Ta 显示散乱(Kosler 2001)。

3.3 角闪石

在角闪石的稀土元素配分型式图(图 2e、2f)上,配分曲线呈左倾形,即轻稀土元素相对亏损,中、重稀土元素相对富集,与石榴石的配分型式相似,这也不同于苏鲁超高压带中国大陆科学钻探主孔中榴辉岩角闪石的轻稀土较富集的配分型式(宗克清等, 2006)。当然,角闪石与石榴石的这种相似,是角闪石的形成环境和其内在的晶格特点共同决定的,不一定意味着角闪石的形成与石榴石有关,因为镜下观察结果表明角闪石形成于绿辉石的退变质作用。在不相容元素分布图中(图 3e、3f),角闪石的配分曲线也低 1 个数量级,均具有明显的 Ti、Hf 的正异常和 Ce、Nd、Eu 的负异常,Zr 处于 Sm 和 Hf 之间的内插连线位置,富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr 等。金红石榴辉岩中的角闪石 Ti 正异常更强烈,Nb、Ta 较散乱。

3.4 金红石和绿帘石

在不相容元素分布图上,金红石显示高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 强正异常(图 3h),因此金红石是这些元素的主要赋存相;亏损大离子亲石元素 Rb、Ba、Th 等和轻稀土元素 La、Ce 以及重稀土元素。绿帘石则相反,显示高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 的负异常,相对富集稀土元素(图 3g)。在稀土元素配分型式图上,金红石呈平坦的分布曲线(图 2h),绿帘石呈中稀土略微富集的近平坦曲线(图 2g),后者不同于苏鲁超高压带中国大陆科学钻探主孔中榴辉

岩绿帘石的轻稀土元素强烈富集的配分型式(宗克清等, 2006)。

4 讨论

4.1 变质作用中矿物之间的微量元素分配

从图 4 中可以看出,松多榴辉岩石榴石中 Ni 的含量与 MgO 含量呈正相关关系(图 4a),而绿辉石中 Ni 的含量与 MgO 的含量无相关关系(图 4b)。由于 Mg 和 Ni 离子半径相似,所以 Ni 在石榴石和绿辉石等矿物相中的含量受到 MgO 含量的控制,也与温度呈正相关关系(O'Reilly and Griffin, 1995)。但是松多榴辉岩中石榴石相中 Ni 的含量受到 MgO 含量的明显制约,而绿辉石中则没有表现出 MgO 含量对 Ni 含量的制约,说明可能还有其它因素对其产生影响(如温度)。已有的研究表明,石榴石和绿辉石中的 CaO 含量对 Ti 含量的制约很微弱(O'Reilly and Griffin, 1995),但是松多榴辉岩中石榴石的 CaO 含量对于 Ti 含量的制约很明显,呈正相关关系(图 4c),而绿辉石中 Ti 的含量的确不受 CaO 含量的制约(图 4d)。石榴石中 Y 的含量主要受 CaO 含量的控制,不受温度和压力的影响,因此 Y 与 CaO 呈正相关关系(图 4e),而 Sr 在晶格中的占位更是受到与之离子半径相似的 Ca 的制约,Sr 在石榴石中的含量强烈地受到 CaO 含量的控制(O'Reilly and Griffin, 1995; Harte and Kirkley, 1997),松多榴辉岩石榴石的 CaO-Sr 相关投点图中两者之间呈正相关关系(图 4f)。所以,Y 和 Sr 在石榴石中的含量主要受 CaO 含量的控制。

O'Reilly 和 Griffin(1995)、Harte 和 Kirkley(1997)对于榴辉岩中石榴石和绿辉石之间微量元素的分配已经做过研究,认为石榴石和绿辉石之间微量元素的分配受矿物成分、形成温度和压力的控制,如 REE、Sr 和 Y 等在石榴石和绿辉石之间的分配明显受 Ca 分配的控制。松多榴辉岩中 REE、Sr 和 Y 在石榴石和绿辉石之间的分配系数(D)也受到了 Ca 分配系数的控制(图 5a、5b、5c),均显示程度不同的正相关关系,并且其相关关系与苏鲁地区榴辉岩的特点一致(宗克清等, 2006)。高场强元素 Ti 在石榴石和绿辉石之间的分配系数和 Ca 的分配系数也存在明显的正相关性(图 5d);而过渡族 Co 的分配与 Ca 的分配之间没有相关关系(图 5e)。从已有的资料看,榴辉岩中有无金红石,对于石榴石和绿辉石之间

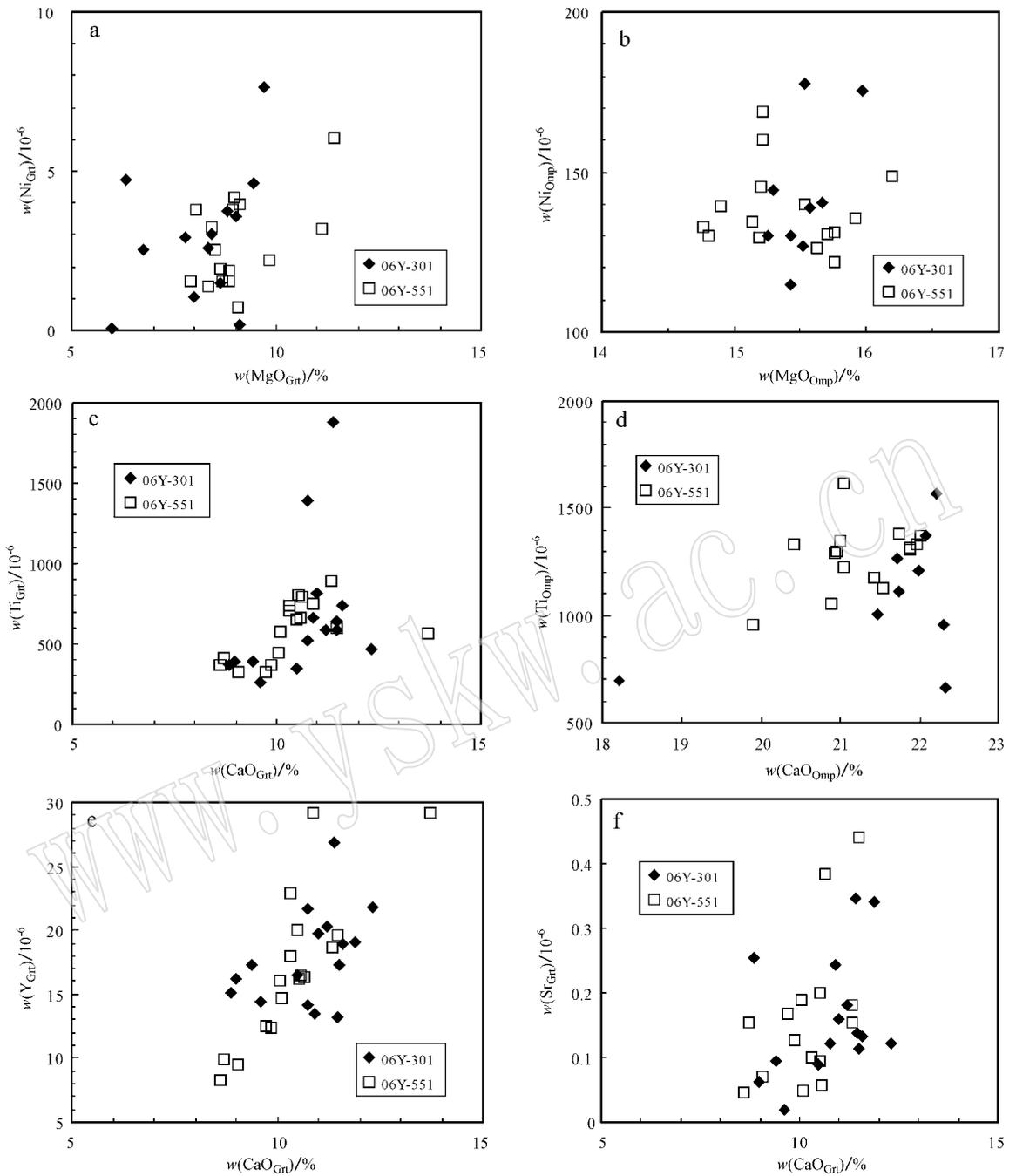


图 4 松多榴辉岩石榴石和绿辉石中主要元素 MgO 和 CaO 对微量元素的制约

Fig. 4 Variations between major compositions MgO and CaO and some trace elements of garnet and omphacite from Somdo eclogite

微量元素的分配没有明显的影响。REE 和 Sr 在石榴石与绿辉石之间的分配系数不受 Mg 分配的控制(图 5f、5g),而 Y 在石榴石和绿辉石之间的分配受 Mg 分配的控制,呈弱负相关关系(图 5h)。高场强元素 Ti 在石榴石和绿辉石之间的分配受到了 Mg 分配的控制,但是呈负相关(图 5i),这点不同于苏鲁地

区榴辉岩的特征(宗克清等, 2006)。过渡族元素 Co 在石榴石和绿辉石之间的分配受到了 Mg 分配的控制,呈正相关关系(图 5j),与苏鲁榴辉岩的特点(宗克清等, 2006)相同。可见,虽然 Mg^{2+} 、 Ti^{4+} 、 Co^{3+} 的离子半径非常接近,其在石榴石和绿辉石之间的分配系数本来应该表现出某种控制作用,但是除了晶

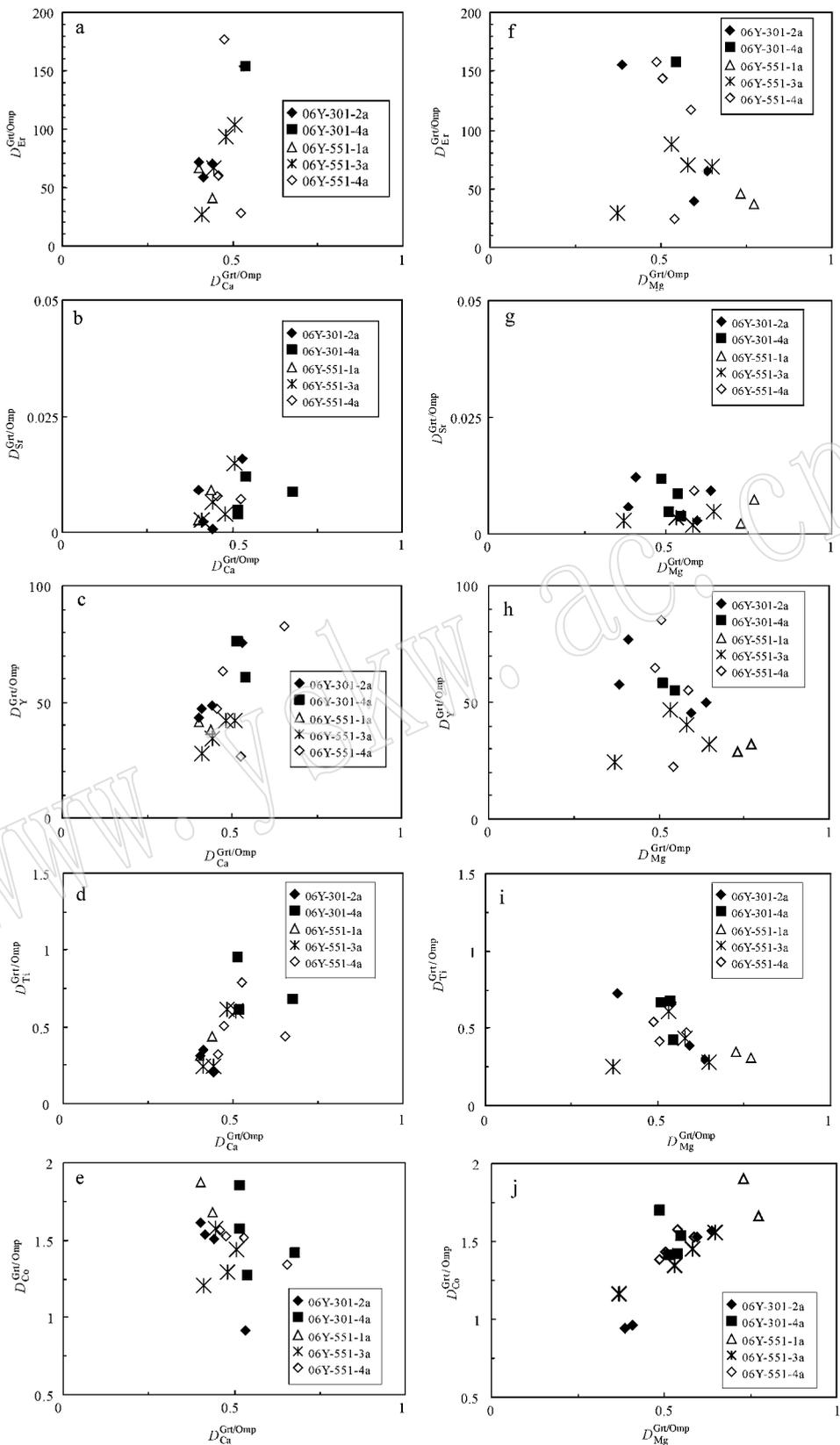


图 5 松多榴辉岩石榴石和绿辉石之间主元素 MgO 和 CaO 的分配与微量元素分配的变化

Fig. 5 Variations of major compositions MgO and CaO and trace element partitioning between garnet and omphacite from Somdo eclogite

体化学因素之外,还可能有复杂的其它因素的控制作用,因此导致了不同地区榴辉岩在这一特点上的差异。

微量元素对于岩石形成时的温度、压力的变化比主量元素更敏感,但是目前利用微量元素来计算温度和压力的温压计却很少(Kosler, 2001),因此石榴石和绿辉石之间微量元素(如 Ti、Co)的分配与温

度或压力的控制关系还暂时不能进行讨论。

4.2 石榴石中微量元素的分带

在石英榴辉岩和金红石榴辉岩的石榴石大变斑晶中,从核部到边部,高场强元素 Ti 都具有含量降低的特点(图 6),而过渡族元素 V 和性质近似于重稀土元素的 Y 则均无变化。在石英榴辉岩中的石榴石中,高场强元素 Zr 和重稀土元素 Dy 的含量从核

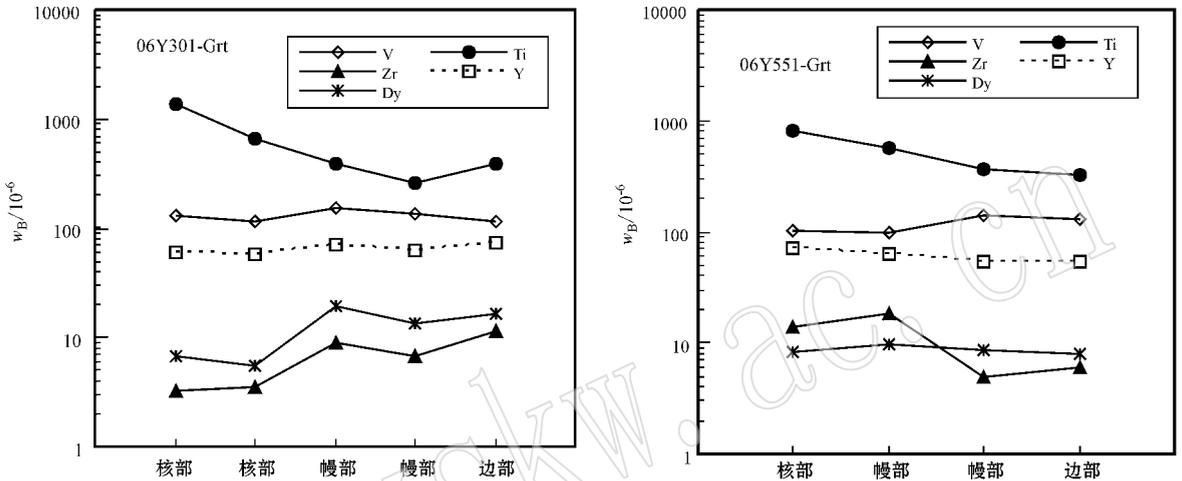


图 6 松多榴辉岩石榴石中从核部到边部微量元素丰度的变化

Fig. 6 Trace element variations in garnet from Somdo eclogite

部到边部则表现为有较明显的增高;与之相反,Zr 和 Dy 元素的含量在金红石榴辉岩中的石榴石中从核部到边部则表现为微弱的降低。

由上和图 6 中可见,同样是高场强元素,在同一个石榴石晶体中的表现截然不同:在石英榴辉岩中,Ti 表现为从核部到边部的降低,Zr 表现为增高;而在金红石榴辉岩中,Ti 同样表现为从核部到边部的降低,Zr 也表现为略有降低。这说明了在不同的全岩成分条件下,高场强元素 Zr 表现出了相反的变化特点。重稀土元素 Dy 也在不同的全岩成分条件下有略微不同的含量变化特点。Ti 在石榴石中的含量变化主要受压力的控制,与压力的变化呈正相关关系(O'Reilly and Griffin, 1995),因此榴辉岩中石榴石 Ti 含量从核部到边部减低的特点,说明松多石榴石变斑晶的幔部到边部是变质峰期之后降压过程形成的。Zr 在石榴石中的含量主要受温度的控制,与温度的变化呈正相关关系(O'Reilly and Griffin, 1995)。因此,从石英榴辉岩中石榴石从核部到边部 Zr 含量的变化大概说明了温度增高的过程,而金红石榴辉岩中石榴石中 Zr 含量从核部到边部变化初

步推测是温度下降的过程。综上所述,松多榴辉岩在紧随峰期变质作用之后是一个降压增温的过程,这与其它方法研究所获得的结果基本一致。

4.3 从退变质矿物角闪石看微量元素在退变质过程中的行为

松多榴辉岩发生了明显的后榴辉岩相退变质作用。榴辉岩退变质过程形成的产物理论上应继承未退变前矿物的微量元素组成特征,因此通过考察角闪石的微量元素分配情况可以推断角闪石是由哪种矿物退变而来(当然也结合镜下观察)以及退变质过程中微量元素的地球化学行为(Jahn *et al.*, 2003)。

从石榴石、绿辉石和退变形成的角闪石的稀土元素配分曲线(图 2a~f)和不相容元素配分曲线(图 3a~f)上看,石榴石与角闪石的配分曲线总体上很相似,而绿辉石与角闪石的配分曲线却不相似,似乎角闪石从石榴石退变质而来。但是镜下的观察表明,角闪石是由绿辉石退变质形成的。仔细观察这些矿物相中不相容元素配分曲线可知,绿辉石和角闪石由很多相似的特点,而角闪石与石榴石没有相同的元素变化特点。例如,角闪石与绿辉石的重稀土元

素含量均比石榴石的低 1 个数量级, 而绿辉石和角闪石之间它们的含量近似。

不相容元素分布图上(图 3c、3d), 绿辉石的 Nd、Zr、La 显示为负异常, 而 Ti 呈弱负异常。Hf 显示正异常, Eu 位于 Hf 和 Ti 的内插连线位置上。大离子亲石元素 Sr 显示高正异常。高场强元素 Nb、Ta 显示散乱。

不相容元素分布图中(图 3e、3f), 角闪石也具有明显的 La、Ce、Nd、Eu 的负异常和 Ti、Hf 的正异常, Zr 处于 Sm 和 Hf 之间的内插连线位置, 富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr 等。金石榴辉岩中的角闪石 Ti 正异常更强烈。高场强元素 Nb、Ta 较散乱。

石榴石在不相容元素配分图(图 3a、3b)中, Ti 均显示为不同程度的负异常, 并且具有 Zr 正异常而 Hf 弱负异常。Eu 显示明显的正异常, 大离子亲石元素 Sr 在石英榴辉岩的石榴石中 Sr 显示弱负异常, 而在金石榴辉岩的石榴石中 Sr 显示弱正异常。高

场强元素 Nb、Ta 分布散乱, 但是部分分析点的 Ta 显示强烈的正异常。

从角闪石/石榴石和角闪石/绿辉石比值曲线图(图 7)上看, 石榴石与角闪石之间的曲线显得散乱, 意味着两者没有成生联系, 而绿辉石与角闪石之间的曲线具有很好的一致性, 显示了成生关系。这说明角闪石是由绿辉石退变形成而非石榴石退变质形成。其实, 退变质过程中矿物的形成或分解以及物理化学条件的改变都可以引起矿物间微量元素的重新分配, 石榴石与角闪石微量元素配分曲线在总体上的相似恰巧不能说明它们之间的成生关系, 因为石榴石与角闪石在晶体化学上的差异没有在微量元素曲线图上反映出来。绿辉石与角闪石的微量元素配分曲线在总体上的差异恰巧反映了两者之间晶体化学的差异, 而其在细节上某些元素(尤其是不活动元素)表现的相似特点正好反映了两者之间的成生联系。

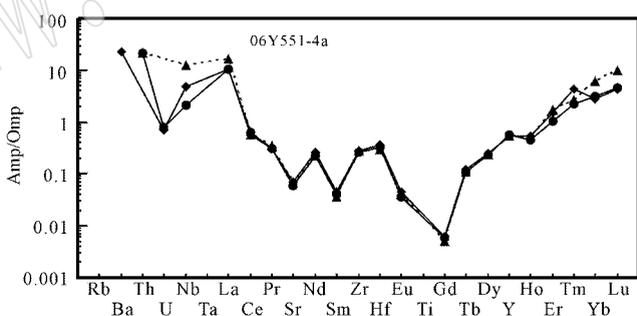
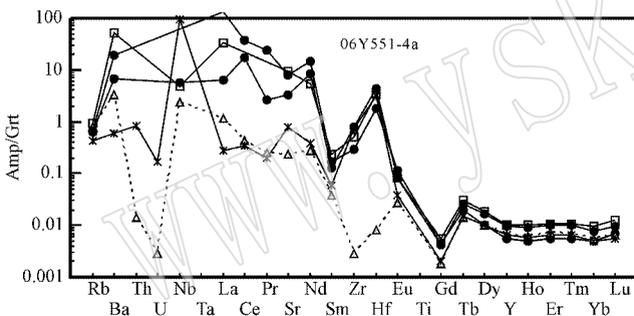


图 7 松多榴辉岩中石角闪石与石榴石和绿辉石之间微量元素的比值曲线

Fig. 7 Trace element ratio curves between amphibole, garnet and omphacite

4.4 金红石和绿帘石中微量元素的地球化学特征

在稀土元素配分型式图上(图 2h), 金红石呈平坦的分布曲线, 绿帘石呈中稀土元素略微富集的近平坦曲线, 后者不同于苏鲁超高压带中国大陆科学钻探主孔中榴辉岩绿帘石的轻稀土元素强烈富集的配分型式(宗克清等, 2006)。

在微量元素分布图(图 3h)上, 金红石显示高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 强正异常, 因此金红石是这些元素的主要赋存相; 同时亏损大离子亲石元素 Rb、Ba、Th 等和轻稀土元素 La、Ce 以及重稀土元素。绿帘石则相反, 显示高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 的负异常, 相对富集稀土元素。显然金红石均富集不活动性高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf, 这与其为 Ti 的

主要载体有关。

本文所分析的绿帘石与金红石样品在同一薄片上。同一样品中绿帘石亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 的原因很可能是这些元素主要都进入了金红石, 而 Ti 则因为相对含量高而未造成绿帘石中 Ti 在配分曲线上显示负异常。至于绿帘石在稀土元素配分曲线上呈平坦的配分型式, 未显示类似苏鲁地区榴辉岩中绿帘石的轻稀土元素富集(宗克清等, 2006)的特点的原因, 可能是没有遭到明显的后期富集稀土元素流体交代的作用; 结合绿辉石和角闪石轻稀土元素亏损的特点, 说明松多榴辉岩在退变质过程中没有明显的富轻稀土元素的外来流体的参与和交代作用。

5 结论

(1) 石榴石主要富集中、重稀土元素和 Y, 同时具有高含量的 Sc、V、Cr 和 Co 等元素。绿辉石中的微量元素以中稀土元素、Sr、Sc、V、Cr、Co、Ni 和 Ti 为主, 含有一定量的 Zr、Hf 等。石榴石、绿辉石、角闪石和绿帘石中均显示轻稀土元素亏损的特点, 表明在退变质过程中没有发生明显的富轻稀土元素的外来流体交代作用, 因而在微量元素矿物地球化学上的某些特点不同于苏鲁地区的榴辉岩。石榴石变斑晶中某些元素的分带性暗示了榴辉岩在紧随峰期变质之后的折返过程中发生了降压增温过程。

(2) 榴辉岩主要变质矿物中微量元素的分配除了肯定受矿物组合(即温压条件)的控制外, 显然还受到矿物主量元素的分配所控制, 如 MgO 在石榴石和绿辉石之间的分配对 Ni、Co、Ti 分配的控制和 CaO 的分配对 Sr、Y、REE 分配的控制等。

(3) 退变质过程中矿物的形成或分解以及物理化学条件的改变都可以引起矿物间微量元素的重新分配, 绿辉石退变质形成的角闪石的微量元素不一定完全继承原先的绿辉石的微量元素特征, 可造成配分曲线总体特征的差异; 而总体元素含量和某些元素在配分曲线细节上的共同点反映了绿辉石和角闪石之间的成生联系。

(4) 金红石是 Ti、Nb、Ta、Zr、Hf 的主要赋存矿物, 与之共生的绿帘石所表现出来的高场强元素的亏损表明了金红石的存在所带来的影响。

References

Allegre C J, Courtillot V and Tapponnier P. 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt [J]. *Nature*, 307 : 17~22.

Barth M G, Rudnick R L, Horn I, *et al.* 2000. Geochemistry of xenolithic eclogites from West Africa, Part I: A link between low MgO eclogites and Archean crust formation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(9) : 1499~1527.

Chen Songyong, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, *et al.* 2008. Study of Lu-Hf geochemical tracing and LA-ICPMS U-Pb isotopic dating of the Sumdo eclogite from the Lhasa Block, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7) : 1528~1538 (in Chinese with English abstract).

Chen Songyong, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, *et al.* 2007. Geochemical characteristics of eclogites in the Lasha terrane, Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 26 : 1327~1339 (in Chinese with English abstract).

de Sigoyer J, Chavagnac V and Blichert-Toft J. 2000. Dating the Indian continental subduction and collisional thickening in the northwest Himalaya: Multichronology of the Tso Moriri eclogites [J]. *Geology*, 28 : 487~490.

de Sigoyer J, Guillot S and Lardeaux J M. 1997. Glaucophane-bearing eclogites in the Tso Moriri dome (eastern Ladakh, NW Himalaya) [J]. *European Journal of Mineralogy*, 9 : 1073~1083.

Fulmer E C, Nebel O and Westrenen W. 2010. High-precision high field strength element partitioning between garnet, amphibole and alkaline melt from Kakanui, New Zealand [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 : 2741~2759.

Ghazanfar M and Chaudhry M N. 1986. Reporting MCT in Northwest Himalaya, Pakistan [J]. *University of Punjab Geological Bulletin*, 21 : 10~18.

Green T H. 2000. The effect of rutile on high-field strength element behavior in the crust-mantle system [J]. *International Conference Abstract*, 5~44.

Guillot S, de Sigoyer J and Lardeaux J M. 1997. Eclogitic metasediments from the Tso Moriri area (Ladakh, Himalaya): Evidence for continental subduction during India-Asia convergence [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128 : 197~212.

Guillot S, Lardeaux J M and Mascle G. 1995. Un nouveau témoin du métamorphisme de haute pression dans la chaîne Himalayenne: les eclogites rétroformées du Dome du Tso Moriri (East Ladakh, Himalaya) [J]. *Paris, Academie Des Sciences Comptes Rendus*, 32 : 931~936.

Harte B and Kirkley M B. 1997. Partitioning of trace elements between clinopyroxene and garnet: data from mantle eclogites [J]. *Chemical Geology*, 136 : 1~24.

Hermann J and Green D H. 2001. Experimental constraints on high pressure melting in subducted crust [J]. *Earth and planetary science letters*, 188 : 149~186.

Hu Mingyue, He Hongliao, Zhan Xiuchun, *et al.* 2008. Matrix normalization for In-situ multi-element quantitative analysis of zircon in Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 36 : 947~953 (in Chinese with English abstract).

Jahn B M, Fan Q C, Yang J J, *et al.* 2003. Petrogenesis of the Maowu pyroxenite-eclogite body from the UHP metamorphic terrane of Dabieshan: chemical and isotopic constraints [J]. *Lithos*, 70 : 243~267.

Jahn B M, Liu X C, Yui T F, *et al.* 2005. High-pressure/ultrahigh-pressure eclogites from the Hong'an Block, East-central China: Geochemical characterization, isotope disequilibrium and geochronological controversies [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149 : 499~526.

Kaneko Y, Katayama I and Yamamoto H. 2003. Timing of Himalayan ultrahigh-pressure metamorphism: Sinking rate and subduction angle of the Indian continental crust beneath Asia [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21 : 589~599.

Kosler J. 2001. Laser-ablation ICPMS study of metamorphic minerals

- and processes [A]. Sylvester P. Laser-ablation-ICPMs in the Earth Sciences [C]. Mineralogical Association of Canada, 185~202.
- Le Fort P, Guillot S and Pecher A. 1997. High-pressure metamorphic belt along the Indus suture zone of NW Himalaya: New discoveries and significance [J]. Paris, Academie Des Sciences Comptes Rendus, 325: 773~778.
- Leech M L, Singh S and Jain A K. 2005. The onset of India-Asia continental collision: Early, deep subduction required by the timing of UHP metamorphism in the western Himalaya [J]. Earth and Planetary Science Letters, 234: 83~97.
- Li Cai, Zhai Qingguo and Dong Yongsheng. 2006. Discovery of eclogite and its significance in central Qiangtang, Qinghai-Tibetan plateau [J]. Science Bulletin, 51(1): 70~74 (in Chinese).
- Li Tianfu, Yang Jingsui, Li Zhaoli, et al. 2007. Petrography and metamorphic evolution of the Sumdo eclogite, Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 26: 1310~1326 (in Chinese with English abstract).
- Li Z L, Yang J S, Xu Z Q, et al. 2009. Geochemistry and Sm-Nd and Rb-Sr isotopic composition of eclogite in the Lhasa terrane, Tibet, and its geological significance [J]. Lithos, 109: 240~247.
- Liu Liang, Che Zicheng and Luo Jinhai. 1996. Determination of eclogite in western section of Altun Tagh and the implication [J]. Science Bulletin, 41(16): 1485~1488 (in Chinese).
- Liu Liang, Sun Yong and Xiao Peixi. 2002. UHP (>3.8 GPa) garnet-hercynite is discovered in Altun Tagh [J]. Science Bulletin, 47(9): 657~662 (in Chinese).
- Lombardo B, Rolfo F and Compagnoni R. 2000. Glaucophane and barroisite eclogites from the Upper Kaghan Nappe: Implications for the metamorphic history of the NW Himalaya [A]. Khan M A, et al. Tectonics of the Nanga Parbat Syntaxis and the Western Himalaya [C]. Geological Society (London) Special Publication, 170: 411~430.
- Luo Y, Gao S, Yuan H L, Liu X M, et al. 2004. Ce anomaly in minerals of eclogite and garnet pyroxenite from Dabie-Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt: Tacking subducted sediment formed under oxidizing conditions [J]. Science in China (D), 47(10): 920~930.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth [J]. Chemical Geology, 120: 223~253.
- Mukherjee B K and Sachan H K. 2003. Carbonate-bearing UHPM rocks from the Tso Moriri region, Ladakh, India: Petrological implications [J]. International Geological Review, 45: 49~69.
- O'Brien P J, Zotov N and Law R. 2001. Coesite in Himalayan eclogite and implications for models of India-Asia collision [J]. Geology, 29: 435~438.
- O'Reilly S M and Griffin W L. 1995. Trace-element partitioning between garnet and clinopyroxene in mantle-derived pyroxenites and eclogite: P-T-X control [J]. Chemical Geology, 121: 105~130.
- Pognante U and Spencer D A. 1991. First record of eclogites from the High Himalayan belt, Kaghan Valley (northern Pakistan) [J]. European Journal of Mineralogy, 3: 613~618.
- Sassi R, Harte B, Carswell D A, et al. 2000. Trace element distribution in Central Dabie eclogites [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 139: 298~315.
- Shi Chao and Zhang Zeming. 2007. Element geochemical behavior during the high-pressure metamorphism: Mineral compositional study of eclogites from the CCSD mian drill hole [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(12): 3180~3200 (in Chinese).
- Tibetan Autonomous Region Geology and Mineral Deposit Bureau. 1994. Report for Areal Geological Survey of People's Republic of China, Scale of 1:200 000, Map of Xiabatang (Woka) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Tonarini S, Vila I and Oberli F. 1993. Eocene age of eclogite metamorphism in Pakistan Himalaya: Implications for India-Eurasia collision [J]. Terra Nova, 5: 13~20.
- Tsujimori T, Sisson V B, Liou J G, et al. 2006. Very-low temperature record of the subduction process: A review of worldwide lawsonite eclogites [J]. Lithos, 92: 609~624.
- Wu H Q, Feng Y M, and Song S G. 1993. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China (in Special issue on Chinese metamorphism) [J]. Journal of Metamorphic Geology, 11: 523~536.
- Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Li Tianfu, et al. 2007. SHRIMP U-Pb ages and inclusions of zircons from the Sumdo eclogite in the Lhasa block, Tibet [J]. Geological Bulletin of China, 26: 1340~1355 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Song Shuguang and Xu Zhiqin. 2001. Discovery of UHP index mineral-coesite in Early Palaeozoic HP-UHP metamorphic belt along northern margin of Qaidam basin [J]. Acta Geologica Sinica, 75(2): 175~179 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Geng Quanru, et al. 2006. A possible new HP-UHP (?) metamorphic belt in China: Discovery of eclogite in the Lhasa terrane, Tibet [J]. Acta Geologica Sinica, 80: 1787~1792 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin and Li Haibing. 1998. Discovery of eclogite on northern margin of Qaidam basin, western China [J]. Science Bulletin, 43(14): 1544~1549.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Tianfu, et al. 2007. Oceanic subduction-type eclogite in the Lhasa block, Tibet, China: Remains of the Paleo-Tethys ocean basin? [J]. Geological Bulletin of China, 26: 1277~1287 (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Xu Z Q, Li Z L, et al. 2008. Discovery of an eclogite belt in the Lhasa block, Tibet: A new border for Paleo-Tethys? [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 34: 76~89.
- Zhang J X, Meng F C, Yang J S, et al. 2005. A new HP/UHP metamorphic terrane in the northern Altyn Tagh, western China [J]. International Geology Review, 47: 371~386.
- Zhang Jianxin, Yang Jingsui and Xu Zhiqin. 2002. Evidence of UHP metamorphism in Altun Tagh eclogite [J]. Science Bulletin, 47(3): 231~234.
- Zhang K J, Cai J X, Zhang Y X, et al. 2006. Eclogites from central Qiangtang, northern Tibet (China) and tectonic implications [J].

Earth and Planetary Science Letters, 245:722~729.

Zong Keqing, Liu Yongsheng, Liu Xiaoming, et al. 2006. In situ trace element geochemistry of single minerals in eclogites from the mianhol(100~1 100 m [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(7): 1 891~1 904(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈松永, 杨经绥, 徐向珍, 等. 2008. 西藏拉萨地块松多榴辉岩的锆石 Lu/Hf 同位素研究及 LA-ICPMS U-Pb 定年[J]. 岩石学报, 24(7): 1 528~1 538.

陈松永, 杨经绥, 许志琴, 等. 2007. 西藏拉萨榴辉岩的地球化学特征[J]. 地质通报, 26(10): 1 327~1 339.

胡明月, 何红蓼, 詹秀春, 等. 2008. 基体归一化技术在激光烧蚀-等离子体质谱法锆石原位多元素分析中的应用[J]. 分析化学, 36(7): 947~953.

李才, 翟庆国, 董永胜. 2006. 青藏高原羌塘中部榴辉岩的发现及其意义[J]. 科学通报, 51(1): 70~74.

李天福, 杨经绥, 李兆丽, 等. 2007. 青藏高原拉萨地块松多榴辉岩的岩相学特征和变质演化过程[J]. 地质通报, 26(10): 1 310~1 326.

刘良, 车自成, 罗金海. 1996. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义[J]. 科学通报, 41(16): 1 485~1 488.

刘良, 孙勇, 肖培喜. 2002. 阿尔金发现超高压(>3.8 GPa)石榴二辉橄榄岩[J]. 科学通报, 47(9): 657~662.

石超, 张泽明. 2007. 超高压变质作用过程中的元素地球化学行为

——CCSD 主孔榴辉岩的矿物化学研究[J]. 岩石学报, 23(12): 3 180~3 200.

王希斌, 郑海翔, 曹佑功. 1984. 西藏雅鲁藏布江(中段)蛇绿岩组合层序及特提斯洋壳演化的模式[A]. 李光岑等. 中法喜马拉雅考察成果[C]. 北京:地质出版社, 181~207.

西藏自治区地质矿产局. 1994. 中华人民共和国区域地质调查报告, 1:200 000, 下巴淌(沃卡)矿[M]. 北京:地质出版社.

徐向珍, 杨经绥, 李天福, 等. 2007. 青藏高原拉萨地块榴辉岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及锆石中的包裹体[J]. 地质通报, 26(10): 1 340~1 355.

杨经绥, 宋述光, 许志琴. 2001. 柴达木盆地北缘早古生代高压-超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英[J]. 地质学报, 75(2): 175~179.

杨经绥, 许志琴, 耿全如, 等. 2006. 中国境内可能存在一条新的高压-超高压(?)变质带——青藏高原拉萨地块中发现榴辉岩带[J]. 地质学报, 80(12): 1 787~1 792.

杨经绥, 许志琴, 李海兵. 1998. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩[J]. 科学通报, 43(14): 1 544~1 549.

杨经绥, 许志琴, 李天福, 等. 2007. 青藏高原拉萨地块中的大洋俯冲型榴辉岩:古特提斯洋盆的残留?[J]. 地质通报, 26(10): 1 277~1 287.

张建新, 杨经绥, 许志琴. 2002. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据[J]. 科学通报, 47(3): 231~234.

宗克清, 刘勇胜, 柳小明, 等. 2006. CCSD 主孔 100~1 100 m 榴辉岩中单矿物的原位微区微量元素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(7): 1 891~1 904.