

doi:10.3799/dqkx.2013.000

东昆仑中灶火地区超镁铁质辉石岩的成因

罗文行^{1,2}, 钱莉莉^{1,2}, 李德威^{2,4*}, 朱云海^{2,3}, 刘德民², 高成²

1. 长江三峡勘测研究院有限公司, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074

4. 中国地质大学青藏高原研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 最近在青海东昆仑中灶火地区发现超镁铁质岩的岩石学、地球化学以及成因矿物学等方面的研究成果。岩石主要由单斜辉石、斜方辉石和角闪石组成, 另有少量斜长石、石英、黑云母和铁质不透明矿物。角闪石和黑云母为后期退变质矿物。斜方辉石成因判别分析结果为岩浆成因, 故该超镁铁质岩为辉石岩而非麻粒岩。该辉石岩化学成分上表现为异常的高 MgO、高 CaO、低 Al₂O₃ 特征, 微量元素表现为 Rb、Th 富集而 Nb、Ti 的亏损, 表明其来源于富集地幔。通过岩相学、稀土元素等特征与前人研究结果对比认为该辉石岩是俯冲洋壳部分熔融产生的富 Si 熔体与地幔橄辉岩发生交代反应产生辉石岩岩浆, 然后底侵到地壳中部冷却结晶形成的。野外地质特征显示辉石岩的侵位晚于发生糜棱岩化的围岩, 即晚于围岩的形成时代, 即早二叠世, 说明该辉石岩是在中二叠世古特提斯洋向北大规模俯冲及其所导致的弧后伸展的构造背景下形成的。

关键词: 辉石岩; 地球化学; 矿物学; 交代成因; 东昆仑。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2013)06-1214-15

收稿日期: 2012-12-11

Petrogenesis of the Zhongzaohuo Ultramafic Pyroxenite Pluton, East Kunlun: Constraints from Petrology, Geochemistry and Genetic Mineralogy

LUO Wen-xing^{1,2}, QIAN Li-li^{1,2}, LI De-wei^{2,4*}, ZHU Yun-hai^{2,3}, LIU De-min², GAO Cheng²

1. Three Gorges Geotechnical Consultants Co., Ltd, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Research Center of Tibetan Plateau, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: An ultramafic pyroxenite pluton has been discovered in Zhongzaohuo area in the East Kunlun orogen Recently. This paper reports the results of petrological, geochemical and genetic mineralogy research on the pyroxenite pluton. The rock is mainly composed of clinopyroxene, orthopyroxene and amphibole, and minor plagioclase, quartz, biotite and iron opaque minerals. Amphibole and biotite were formed during retrograde metamorphism. The discriminant analysis results suggest that the Opx are magmatogenic, thus the rock should be named pyroxenite rather than granulite. The rock has high MgO, CaO and low Al₂O₃ and enriched in Rb and Th and depleted in Nb and Ti, showing clear evidence for an enriched mantle source. Field occurrence of the pyroxenite pluton suggests that the pyroxenite pluton was formed after the mylonization of the surrounding rocks. Combined with the tectonic evolution of East Kunlun, we come to the conclusion that the subduction of an Paleo-Tethys (A'nyemaqen) oceanic slab at the Middle Permian led to fluid and Si-rich? melt metasomatism, inducing partial melting of an enriched lithospheric mantle (peridotites) to form the ultramafic pyroxenite magma. The pyroxenite magma underplated the overlying lower crust, captured the metamorphic zircons of the granulite and exchanged some trace elements, but didn't result in the lower crust partial melting to form any felsic magma. The pyroxenite magma emplaced alone eventually.

Key words: pyroxenite; geochemistry; mineralogy; metasomatic; the East Kunlun.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40572113, 40974040, 41172188); 国家深部专项 (No. SinoProbe-01-03-02); 中国地质调查局区调项目 (No. 1212010914036)。

作者简介: 罗文行 (1983-), 博士, 主要从事大陆构造地质勘查与研究。E-mail: lwx1983@gmail.com

* **通讯作者:** 李德威, E-mail: dewei89@sina.com

辉石岩在岩石学分类上是一种比较特殊的岩石,它化学成分上属于基性岩,但在矿物组成上因暗色矿物含量很高而被归于超镁铁质岩.辉石岩是上地幔的重要组成物质,其重要性仅次于橄榄岩,尤其在壳幔结合带,辉石岩可能扮演着非常重要角色(Frey,1980;Hirschmann and Stolper,1996).近年来,人们认识到辉石岩对于理解地幔不均一性非常关键,其成因的研究越来越受到学术界的关注(Liu *et al.*,2005;Downes,2007).目前多数学者认为辉石岩的成因具有多样性(陈斌等,2008;张亚玲和徐义刚,2012),最近,张亚玲等(2012)总结出主要的3种类型:(1)堆晶成因;(2)再循环洋壳变质成因;(3)交代成因,并总结了3种不同成因辉石岩在源区组分、结构构造、主要元素、稀土、Sr-Nd同位素及O同位素方面的鉴别特征,为以后的研究者提供了参考.

前人在东昆仑地区已经发现有许多辉石岩,常呈透镜状、椭圆团块状产出,与橄榄岩、辉长岩等伴生构成镁铁-超镁铁质杂岩(李荣社等,2008).而华北汉诺坝等地发现的辉石岩多呈厘米级的包体或者捕虏体形式产出(张国辉等,1998a;Zhang *et al.*,1999;刘勇胜等,2004;宗克清等,2005).本文研究的辉石岩样品来自最近地质调查新发现的辉石岩露头,与以往发现的规模很小的包体或捕虏体不同,本次发现的辉石岩呈几十个团块状露头密集分布在长约200 m,宽约50 m的椭圆形区域范围内,推测为一小型岩体.该辉石岩周围也没有伴生的橄榄岩、辉长岩等其他镁铁质-超镁铁质岩石,岩性较为单一,矿物组成简单.这种孤立产出以及不同于以往的较大的规模特征,可能暗示该辉石岩具有特殊的成因意义.本文在野外观察、室内岩相学研究的基础上,通过岩石主要元素、微量元素化学分析和矿物成分定量测定,试图解释该辉石岩的成因,并探讨其可能经历的地球动力学过程.

1 区域地质背景及岩体野外特征

研究区位于青藏高原东北缘的东昆仑造山带,该造山带北邻柴达木盆地,南接高原腹地(图1a),是在原特提斯和古特提斯洋盆俯冲、碰撞的基础上发展起来的复杂造山带,是中国中央造山带的组成部分(许志琴等,2006).东昆仑地区构造以近东西向展布为主,自北向南有3条重要的断裂带——东昆北、东昆中和东昆南断裂带,将东昆仑造山带划分

为不同的构造单元(莫宣学等,2007),研究区属于东昆北地块.青藏高原原特提斯和古特提斯的演化在东昆仑地区留下了丰富的记录.原特提斯洋在奥陶纪-志留纪关闭消亡过程中形成了东昆中构造混杂岩带,并使东昆北地块发生低压角闪岩相-麻粒岩相区域变质作用(张建新等,2003),昆中带发生中压区域变质作用(Chen *et al.*,2007)和岩浆活动(Chen *et al.*,2001a).东昆北地块分布有大量的深变质岩和花岗岩,前人称之为花岗岩-变质杂岩带(刘成东,2008).东昆北地块在显生宙经历了3个构造-岩浆旋回,其中以晚海西-印支旋回最为重要,该旋回花岗岩构成了东昆仑造山带火成岩的主体(莫宣学等,2007;刘成东,2008).该区发育的深变质岩主要有古元古代白沙河岩群(Pt_1B)和中元古代小庙岩群(Pt_2X)(王国灿等,2007),变质程度达高角闪岩相,局部为麻粒岩相.白沙河岩群为一套以片麻岩为主夹片岩和大理岩的变质岩组合,局部见基性岩变质形成的斜长角闪岩.在辉石岩出露点附近,白沙河岩群以片麻岩、片岩夹少量变砂岩为岩性特征.研究区白沙河岩群普遍发生深熔作用形成混合岩,并且发生强烈变形.

本文所讨论的辉石岩露头呈团块状、透镜状散布在东昆仑北坡中灶火地区白沙河岩群与花岗闪长岩侵入体接触部位(图1b),辉石岩团块镶嵌于花岗闪长岩中(图2),但距离白沙河岩群的变质岩仅有几十米距离.辉石岩的直接围岩花岗闪长岩为中细粒半自形粒状结构,块状构造,主要矿物有斜长石、石英、黑云母、角闪石和少量绢云母、绿泥石,岩石局部发生绢云母化.在辉石岩露头附近岩体为糜棱岩化花岗闪长岩、变晶糜棱岩及变晶初糜棱岩,变形较为强烈.经锆石U-Pb定年,该岩体的年龄为432.3 Ma(朱云海未发表数据),属早志留世(S_1).辉石岩露头北侧几十米即可见白沙河岩群变质岩系,以黑云斜长片麻岩、黑云斜长角闪片麻岩、黑云母石英片岩为主,局部有大理岩夹层.大理岩层显示的同斜褶皱及多处糜棱岩化带表明白沙河岩群发生了强烈的构造变形.在辉石岩体周边进行实测剖面时发现,白沙河岩群变质岩、辉石岩的直接围岩早志留世花岗闪长岩以及附近一条早二叠世的二长花岗岩脉均有不同程度的糜棱岩化.室内镜下观察发现这些糜棱岩化岩石已经不同程度的发生重结晶,但是无论在露头尺度、手标本尺度还是显微镜下,在辉石岩中都没有发现类似的强烈塑性变形特征,矿物也没有定向排列的现象.

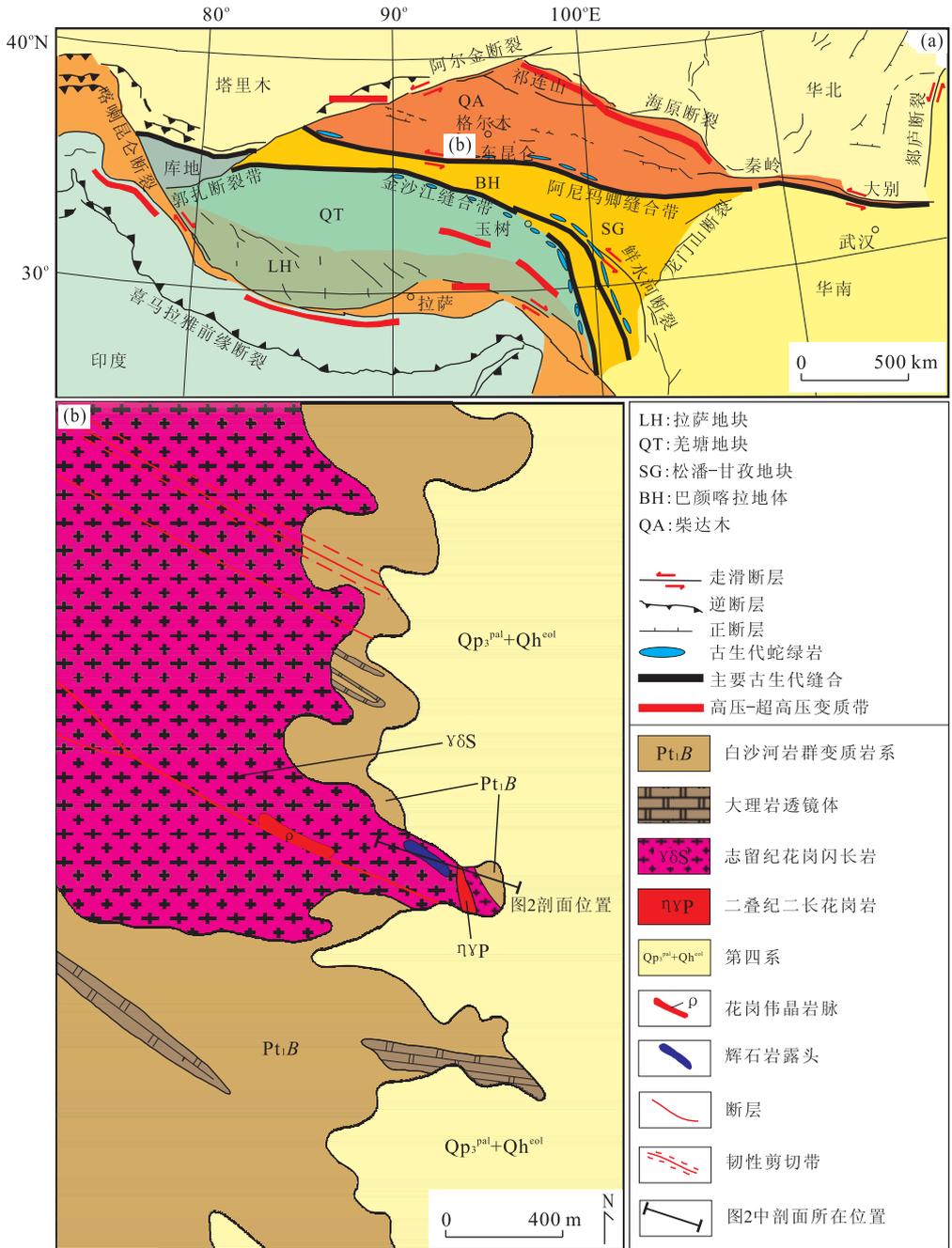


图 1 研究区构造位置(a. 据 Roger *et al.*, 2008 修改)及辉石岩体周围地质图(b)

Fig. 1 Tectonic outline of the Tibetan Plateau showing the study area (a. after Roger *et al.*, 2008) and simplified geological map of Zhongzaohuo area (b) in the North Block of the East Kunlun orogen, western China

2 采样与分析方法

前后 3 次共采集辉石岩约 100 kg 用于各种观察和测试分析样品的制备,样品主要来自其中 3 个看起来较为新鲜的露头,分别为 Bgnl-1、Bgnl-2 和 B3604. 回到室内后首先将 30~50 cm 见方的 2 个岩块按照不同方向切割,从中取出几个呈立方体的非常新鲜的样品,然后从这些立方体上再切割下

3~5 cm 的板状岩石片,进行薄片、探针片的磨制以及岩石化学分析.

全岩主、微量分析在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成. 将野外采集的样品用切割机切出中间最为新鲜的部分,粉碎至 200 目以下的粉末送测. 全岩主量元素的分析采用国标 GB/T 14506. 28-2010 的方法. 全岩微量元素含量利用 Agilent 7500a ICP-MS 分析完成. 用于

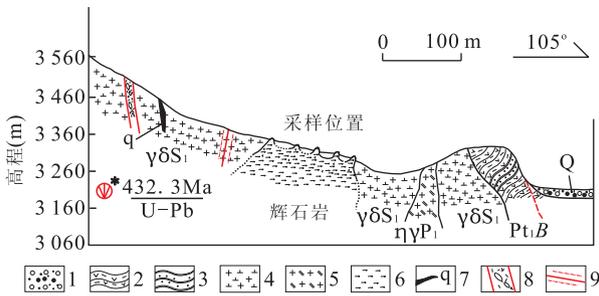


图2 东昆仑中早火地区辉石岩体及其围岩实测剖面(剖面位置见图1)

Fig. 2 Geological section showing the field occurrence of pyroxenite pluton and its contact relationships with adjacent geological bodies in the East Kunlun orogen, western China

1. 第四系砂砾岩层; 2. 片麻岩; 3. 变砂岩; 4. 花岗闪长岩; 5. 二长花岗岩; 6. 辉石岩; 7. 石英岩; 8. 断层破碎带; 9. 糜棱岩化带

ICP-MS 分析的样品处理过程如下: (1) 称取粉碎至 200 目以下的岩石粉末 50 mg 于 Teflon 溶样器中; (2) 采用 Teflon 溶样弹将样品用 HF + HNO₃ 在 195 °C 条件下溶解 48 h; (3) 将在 120 °C 条件下蒸干除 Si 后的样品用 2% HNO₃ 稀释 2 000 倍, 定容于干净的聚酯瓶. 详细的样品消解处理过程、分析精密度和准确度同文献(Liu *et al.*, 2008). 矿物化学成分分析在中科院广州地球化学研究所电子探针实验室的 JEOL JXA-8100 型电子探针分析仪上完成, 电子加速电压为 15 kV, 电流为 20 nA, 作用时间 30 s, 电子束斑直径为 2 μm.

3 结果

3.1 岩石学特征

野外辉石岩露头呈团块状突出于地表, 几十个这样的露头散布在短轴长约 50 m、长轴长约 200 m 的椭圆形区域, 推测其与地下相连, 为一小型岩体(图 2). 手标本上为深灰黑色柱粒状粗粒结构, 致密块状构造, 岩石比重很大.

矿物组成上各个露头不是很均一, 同一个露头不同部位采样也有所不同. 主要为二辉辉石岩和单斜辉石岩, 以前者为主. 显微镜下为自形一半自形柱状、粒状结构, 有的薄片下呈交代残余结构, 主要矿物有单斜辉石、斜方辉石、角闪石以及少量磁铁矿等不透明铁质矿物, 局部有石英及很少的斜长石(图 3a~3f). 两种辉石均发生退变质, 浅黄褐色角闪石即由辉石变化而来, 部分斜方辉石边部有滑石后成

合晶, 铁质不透明矿物为不规则粒状, 小的仅有 0.02 mm 大小, 大的达 0.1 mm, 包裹在辉石中构成席勒构造或者分布于辉石矿物之间, 石英颗粒呈他形充填在大颗粒的辉石矿物之间的空隙中(图 3a~3f).

单斜辉石: 半自形柱状, 一般柱长约 1.05 mm, 宽约 0.48 mm, 正中一正交突起, 有的呈浅褐黄色. 多色性不明显. 有二组不十分好的粗解理, 经常有一组平行于 C 轴解理, 斜消光. 最高干涉色二级蓝, 在最高干涉色切面上测得 $Ng' \wedge C = 53^\circ$, 应为普通辉石. 可见简单双晶, 有麻点状不透明矿物镶嵌于单斜辉石颗粒中构成“席勒构造”.

斜方辉石: 柱状, 无色, 一组解理十分发育, 往往有一组垂直解理的稀疏裂理, 平行消光, 最高干涉色一级黄白, 大多数为一级灰, 普遍有断断续续单斜辉石的连晶, 其延长方向平行解理. 有的柱体边缘有一圈次生的滑石和铁质不透明物. 正中一正高突起, 但比普通辉石低一点. 一般柱长约 2.4 mm, 宽约 1 mm. 沿解理方向包裹有长条或短条状铁质不透明矿物, 较多时构成不典型的“席勒构造”. 斜方辉石多色性不明显, 应为顽火辉石或者古铜辉石.

角闪石: 他形为主, 浅褐黄(Ng')到无色(Np'), 少数为半自形, 正低到正中突起, 最高干涉色一级橙黄, 斜消光, $Ng' \wedge C = 15 \sim 20^\circ$, 呈不规则状交代单斜辉石, 极少交代斜方辉石. 其柱长约 1.8 mm, 宽约 0.8 mm, 应为退变质过程形成的.

其他矿物还有石英、黑云母、斜长石等, 简单描述如下. 石英: 无色透明, 干净, 表面如玻璃, 他形呈填隙状、不规则状充填在辉石等大颗粒之间, 最高干涉色一级白, 一个薄片中有 5~6 个颗粒, 一般粒径宽在 0.1 mm 左右. 黑云母: 半自形—他形, 棕红色(Ng')到浅黄色(Np'), 平行消光, 正中突起, 干涉色三级蓝. 斜长石: 干净, 无色, 最高干涉色一级灰白, 具有聚片双晶, 半自形板状, 有的薄片下有 2 个, 有的仅见 1 个颗粒, 长 0.24 mm 左右, 宽约 0.07 mm.

辉石岩的围岩花岗闪长岩在野外即可看出有发生糜棱岩化, 室内薄片鉴定发现不同地段的样品变形程度不同, 主要有黑云母花岗质变晶初糜棱岩、黑云母花岗质糜棱岩, 糜棱岩化黑云母花岗闪长岩. 岩石中碎斑和碎基相对含量不等, 有的碎斑较多, 有的碎基较多, 碎斑大小也不等. 碎斑主要有单矿物的斜长石、少量钾长石以及石英. 有的斜长石碎斑旋转现象明显, 斜长石具有环带, 其内部发生绢云母化(图 3h). 大部分碎基发生动态重结晶作用, 磨碎的细小

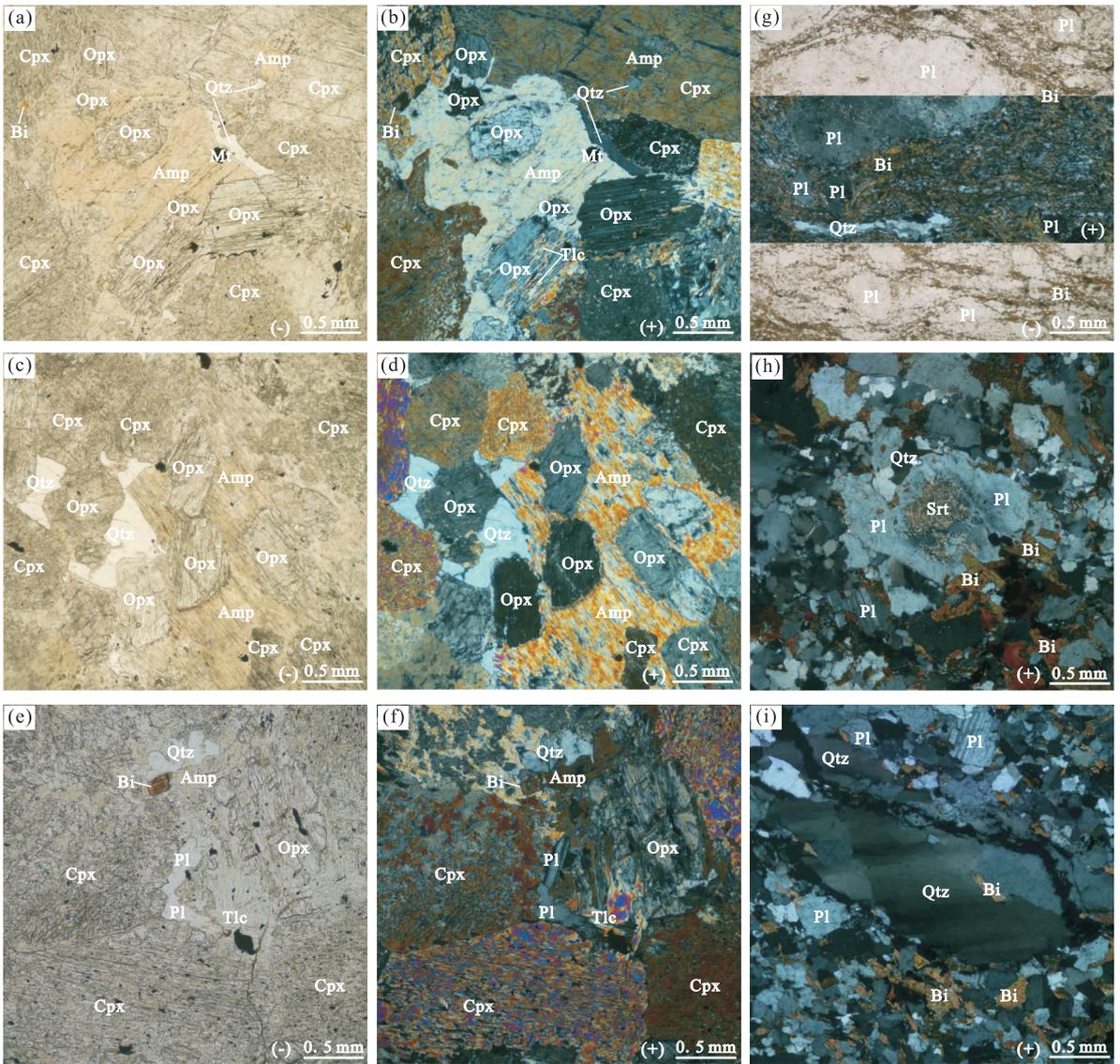


图 3 辉石岩及其围岩典型显微照片

Fig. 3 Typical microphotographs of pyroxenite and its surrounding rocks

a, b. B3604-3; c, d. Bgnl-1; e, f. Bgnl-2; g~i. 围岩花岗岩长岩体中的糜棱岩。Amp. 角闪石; Bi. 黑云母; Cpx. 单斜辉石; Opx. 斜方辉石; Pl. 斜长石; Qtz. 石英; Srt. 绢云母; Tlc. 滑石

黑云母又重新连接变大, 石英颗粒逐渐变大, 有的在应变带中连接成为条带状(图 3g)。大颗粒石英碎斑波状消光现象非常普遍(图 3i), 表明其受力作用较强。

3.2 主量和微量元素

全岩主量元素分析结果列于表 1。数据显示, 岩石为基性岩, MgO、CaO 含量高, 分别达到将近 20% 和 15%, Mg[#] 高达 82.4~84.6, 其次是 FeO^T, Al₂O₃、TiO₂ 含量较低。经计算里特曼指数 δ 仅有 0.02~0.03, 为钙碱性系列。由图 4 可见, 本文辉石岩的化学成分变化不大, 其中 2 个样品的成分基本重合。与冀北小张家口超基性杂岩中的辉石岩成分

(陈安国等, 1996; 陈斌等, 2008)对比可见, 本文辉石岩的成分与冀北小张家口辉石岩基本一起落在同一个演化线上, 说明东昆仑中段中灶火地区的辉石岩与冀北小张家口基性-超基性杂岩中辉石岩有相似性。本文数据与小张家口辉石岩的数据一起综合来看, Al₂O₃、CaO、TiO₂ 含量呈有规律变化, 与 MgO 呈负相关(图 4a, 4b, 4c)。强相容元素 Ni 与 MgO 呈正相关(图 4d), 显示辉石的分离结晶作用。不相容元素 Sc 和 V 与 MgO 呈良好的负相关关系(图 4e, 4f), 是富单斜辉石辉石岩的显著特征(陈斌等, 2008)。

岩石微量元素分析结果列于表 2。稀土元素配

表 1 东昆仑中灶火地区辉石岩主量元素与 CIPW 标准矿物含量(%)

Table 1 Major elements composition and CIPW normative mineral content of the Zhongzaohuo pyroxenite

样品号	Bgnl-1	Bgnl-2	B3604
SiO ₂	51.91	51.97	51.67
TiO ₂	0.32	0.32	0.40
Al ₂ O ₃	3.72	3.66	3.58
FeO ^T	7.63	7.40	8.47
MnO	0.13	0.12	0.17
MgO	19.19	19.45	18.90
CaO	14.78	14.52	14.90
Na ₂ O	0.42	0.41	0.37
K ₂ O	0.13	0.12	0.08
P ₂ O ₅	0.011	0.009	0.010
H ₂ O	0.08	0.02	
LOI	1.92	2.06	1.25
Total	100.241	100.059	99.800
Pl	11.67	11.52	11.18
Or	0.77	0.71	0.47
Di	52.98	52.08	53.43
Hy	26.67	28.42	26.65
Ol	6.05	5.44	6.10
Ilm	0.63	0.63	0.78
Mt	1.23	1.20	1.35
Ap	0.02	0.02	0.02
Mg [#]	84.1	84.6	82.4

注:FeO^T, 全铁; Mg[#] = 100 × molar MgO / (MgO + FeO^T).

分曲线图(图 5)上表现为轻稀土和重稀土元素相对亏损,中稀土元素相对富集,具有轻微的 Eu 负异常,δEu 值小于 0.7(表 2),稀土元素含量略大于 10 倍球粒陨石水平.轻重稀土略有分异,总体上稀土配分曲线呈略向上凸的钟形,在 Nd 或 Sm 形成顶点,与陈斌等报道的冀北小张家口辉石岩稀土型式(陈斌等, 2008)相似,与前人报道的交代成因的辉石岩 REE 配分型式(Garrido and Bodinier, 1999; Liu, *et al.*, 2005)也很类似(图 5).虽然 3 个样品的稀土配分型式相似,但 B3604 比另外 2 个样品的稀土含量整体要高.

以 MORB 的成分作为原始地幔岩浆的代表的话,从微富量元素蛛网图(图 6)上可以看出,本文辉石岩具有明显的强不相容元素 Rb、Ba、Th 富集特征,同时可见高场强元素 Nb、Ti 相对轻稀土和大离子亲石元素不同程度的亏损.表明岩石可能起源于富集地幔.

3.3 矿物化学

本文辉石岩样品中主要矿物是单斜辉石和斜方辉石,镜下鉴定单斜辉石主要以普通辉石为主,斜方辉石以顽火辉石为主,而激光拉曼光谱分析(罗文行

未发表数据)单斜辉石的谱峰与透辉石相似,斜方辉石的谱峰显示与镜下鉴定相同,为顽火辉石.辉石的分类命名主要根据其化学成分,因此精确确定辉石的种属需要做矿物成分的定量分析.2 种辉石的电子探针分析结果列于表 3(这里仅列出用于计算温度的二辉石矿物对的分析结果,感兴趣的读者可以向作者询问索取详细结果,本文所提到的数据不限于表 3 所列),其中 Fe³⁺ 含量由电价平衡法计算.

3.3.1 单斜辉石 本文辉石岩中单斜辉石以高 CaO、高 MgO、低 Al₂O₃ 为特征, Mg[#] 值为 86~90. 其 100 × MgO / (MgO + FeO^T) 比值为 74.5~81.9, Al₂O₃、FeO^T、MgO 和 CaO 含量分别为 0.02%~0.35%、3.7%~6.3%、15.6%~21.5% 和 13.0%~25.1%. 单斜辉石成分计算结果投到成分图解(图 7)上显示,本文辉石岩中单斜辉石为普通辉石系列 (Wo = 28.1 × 10⁻⁶ ~ 49.6 × 10⁻⁶; En = 42.9 × 10⁻⁶ ~ 63.0 × 10⁻⁶; Fs = 5.9 × 10⁻⁶ ~ 9.9 × 10⁻⁶) (Morimoto, 1988), 矿物种属主要是透辉石和普通辉石.与吴才来等(2001)报道的可可西里辉石岩包体及吴文总结的其他各地相关岩石中不同成因类型的单斜辉石成分对比(图 8)发现,本文辉石岩中的单斜辉石 Al₂O₃ 含量低于其他所有的岩石的单斜辉石.本文单斜辉石的 100 × MgO / (MgO + FeO^T) 对 FeO^T、MgO 和 CaO 的变异图中数据点落在中国东部二辉橄榄岩包体和澳大利亚、法国、美国加利福尼亚和夏威夷以及蒙古的橄榄岩包体中的单斜辉石区域(图 8f, 8g, 8h),说明本文辉石岩与地幔橄榄岩有密切联系.

3.3.2 斜方辉石 本文辉石岩中斜方辉石以富 Mg、低 Al₂O₃ 为特征, Mg[#] 值为 80~89, Al₂O₃ 含量介于 0.03%~0.16%. 斜方辉石 100 × MgO / (MgO + FeO^T) 比值为 65.5~80.0, 比单斜辉石略低. FeO^T、MgO 和 CaO 含量分别为 6.6%~15.0%、26.5%~31.8% 和 0.24%~0.97%. 经计算斜方辉石成分 En = 76.5 × 10⁻⁶ ~ 85.5 × 10⁻⁶, Fs = 12.4 × 10⁻⁶ ~ 22.8 × 10⁻⁶, 为顽火辉石系列, 古铜辉石种属(Morimoto, 1988). 有部分含 CaO 较高的,成分上疑似斜方辉石的实际上是斜顽辉石或者易变辉石,属于单斜辉石亚族(如图 7 中向上偏移者).与吴才来等(2001)总结的各地相关岩石中不同成因类型的斜方辉石成分对比(图 8a~8d)可见,本文辉石岩中的斜方辉石同样具有极低的 Al₂O₃ 含量,不同于图中其他所有的岩石.本文斜方辉石的 100 × MgO / (MgO + FeO^T) 分别对 FeO^T、MgO 和

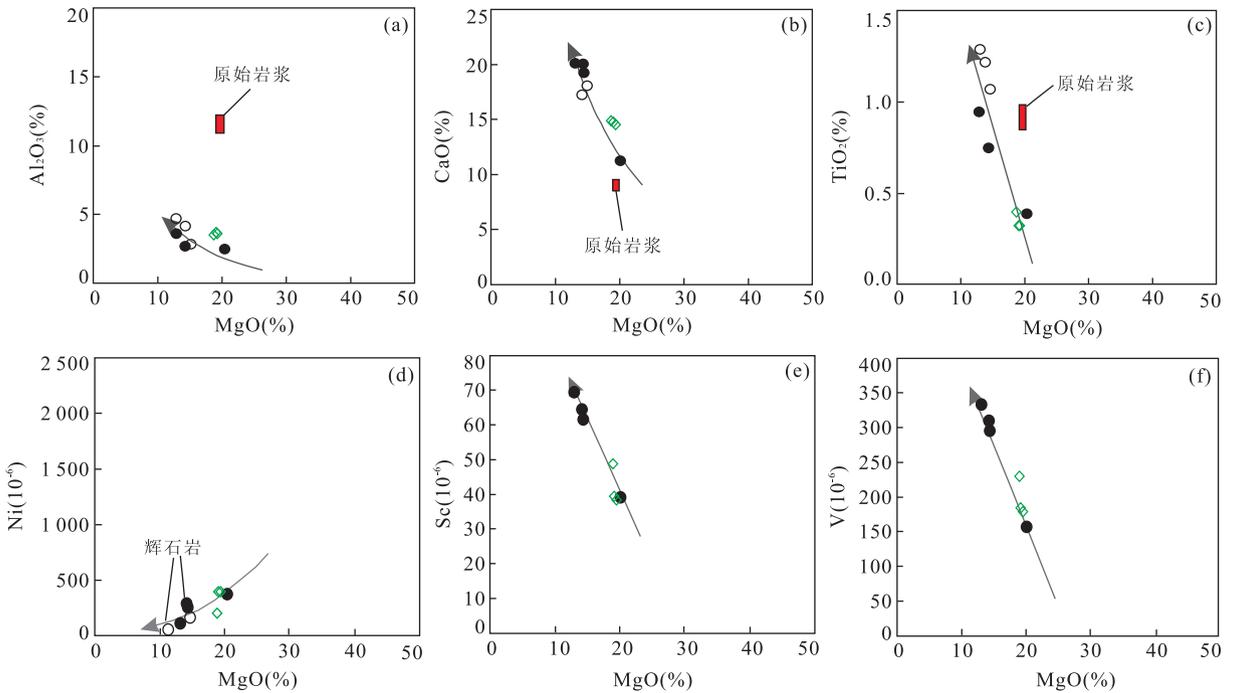


图 4 MgO 对 Al_2O_3 、CaO、 TiO_2 、Ni、Sc、V 变化图

Fig. 4 Variation of MgO vs. Al_2O_3 、CaO、 TiO_2 、Ni、Sc and V

空心圈引自(陈安国等, 1996)的数据, 实心圈引自(陈斌等, 2008)的数据, 绿色空心菱形框为本文数据

表 2 东昆仑中灶火地区辉石岩微量元素及稀土元素分析结果 (10^{-6})

Table 2 Trace elements and REE compositions of the Zhongzaohuo pyroxenite

样品号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
Bgnl-1	18.0	0.29	39.4	184	1769	81.1	400	93.1	49.3	6.26	5.61	53.2	12.8	19.2	0.56
Bgnl-2	10.8	0.29	38.3	180	1712	78.9	395	103	50.1	6.13	5.42	46.3	12.5	18.1	0.50
B3604	20.4	0.38	48.8	230	608	64.0	207	62.5	75.7	9.00	1.79	55.2	18.9	22.4	0.30
样品号	Mo	Sn	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
Bgnl-1	0.21	0.65	0.80	27.2	2.78	8.09	1.37	6.95	2.08	0.50	2.37	0.39	2.54	0.49	1.41
Bgnl-2	0.14	0.66	0.84	27.0	2.65	7.96	1.30	6.72	2.05	0.47	2.20	0.39	2.45	0.47	1.33
B3604			0.40	13.9	3.72	9.04	1.67	8.94	2.89	0.65	3.02	0.55	3.51	0.69	1.91
样品号	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	Σ LREE	Σ HREE	$\frac{\Sigma$ LREE}{\SigmaHREE}	Σ REE	$(La/Lu)_N$	La/Yb	δ Eu
Bgnl-1	0.20	1.20	0.17	0.79	0.15	3.39	0.64	0.35	21.8	8.78	2.48	31	1.73	2.32	0.68
Bgnl-2	0.19	1.24	0.18	0.76	0.15	5.66	0.70	0.33	21.2	8.45	2.51	30	1.60	2.14	0.68
B3604	0.28	1.78	0.26	0.96	0.039	6.54	0.25	0.21	26.91	12.00	2.24	38.9	1.51	2.08	0.67

注: Σ REE、 Σ HREE 不含 Y; δ Eu = $w(Eu)_N / [0.5 \times (w(Sm)_N + w(Gd)_N)]$, 下标 N 代表球粒陨石标准化.

CaO 变异图中, FeO^T 和 MgO 的数据点落在可可西里辉石岩包体、中国东部辉石包体及二辉橄榄岩包体的交叉区域, 而 CaO 的数据点落在在中国东部辉石岩包体及二辉橄榄岩包体和澳大利亚、法国、美国加利福尼亚和夏威夷以及蒙古的橄榄岩包体中的交叉区域, 也暗示本文辉石岩与地幔橄榄岩有密切联系.

由图 8 可见, 不管是单斜辉石还是斜方辉石都与麻粒岩中的辉石成分有明显区别, 而与橄榄岩包体有相似之处.

4 讨论

4.1 是辉石岩还是基性麻粒岩?

辉石岩的矿物组成以单斜辉石、斜方辉石为主, 与某些基性麻粒岩很难区分. 例如 Wilde *et al.* (2003) 对河北汉诺坝 4 个不含橄榄石 (Cpx+Opx+Pl) 的辉石岩包体进行了研究, 但是同样的包体张国辉等 (1998a, 1998b) 和 Chen *et al.* (2001b) 定名为麻粒岩. 樊祺诚等 (2005) 认为汉诺坝捕掳体麻粒岩

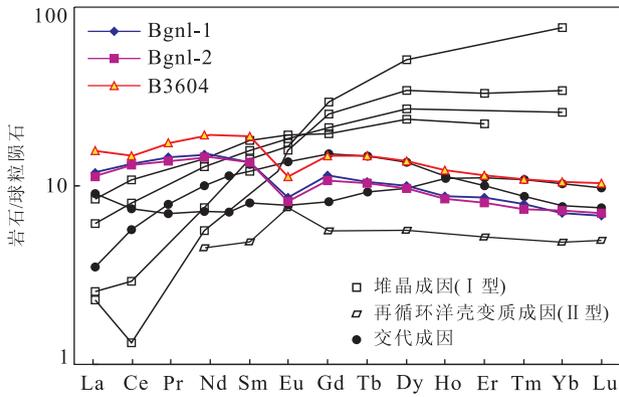


图 5 辉石岩稀土元素配分曲线图与不同成因辉石岩的典型 REE 配分形式. 数据来源: I 和 II 型辉石岩(Kornprobst, *et al.*, 1990); 交代成因辉石岩(Garrido and Bodinier, 1999; Liu *et al.*, 2005); 球粒陨石标准化值来源于 Sun and McDonough (1989)

Fig. 5 REE patterns of pyroxenite samples (Bgnl-1, Bgnl-2, B3604) in the East Kunlun orogen, western China and Type I and II pyroxenites and metasomatic pyroxenites. Sources: the Type I and II pyroxenites (Kornprobst *et al.*, 1990); Metasomatic pyroxenites (Garrido and Bodinier, 1999; Liu *et al.*, 2005); Chondrite-normalized values are from Sun and McDonough (1989)

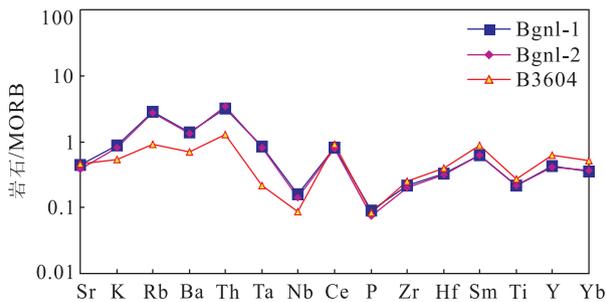


图 6 东昆仑中灶火辉石岩微量元素蛛网图(MORB 标准化值来源于(Pearce and Cann, 1973))

Fig. 6 MORB-normalized trace elements spidergrams of pyroxenite in the East Kunlun orogen, western China

主要是斜长二辉岩,组成矿物除 2 种辉石外,斜长石的含量可以从多到少甚至到无,以致于无法与黑色的辉石岩相区别. 本次调查发现的辉石岩矿物组成与上述樊祺诚等(2005)描述的麻粒岩相斜长二辉岩非常相似,因此有必要从成因矿物学角度确定该样品是辉石岩还是麻粒岩.

首先,从 $100 \times \text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}})$ 分别对 Al_2O_3 、 FeO^{T} 、 MgO 和 CaO 的变异图(图 8)上可以看出,本文辉石岩中的 2 种辉石所落入的区域与华

北麻粒岩中的辉石所在区域离得很远,可见本文辉石岩与华北麻粒岩有很大区别.

从麻粒岩的定义上麻粒岩是一种变质岩,以出现变质成因的斜方辉石为标志. 笔者从成因矿物学的角度,对本文样品中的斜方辉石进行判别. 多勃列佐夫(1971)曾提出一系列用于区分辉石成因的判别式(靳是琴和李鸿超, 1985),根据本文辉石岩的矿物组成特征,选用如下用于区分斜方辉石成因的判别式:

$$D(x)_{\text{Opx}} = 1\ 000 \times (0.059\ 6\text{Al}^{\text{IV}} + 0.016\ 6\text{Fe}^{3+} + 0.021\ 2\text{Fe}^{2+} + 0.016\ \text{Mn} - 0.005\ 1\text{Mg} + 0.000\ 9\text{Na}) - 13.5$$

其中, Si、 Al^{IV} 等是对于氧为 6 时阳离子数. 若 $D(x)_{\text{Opx}} > 0$, 为麻粒岩相(无石榴子石岩石)的斜方辉石; $D(x)_{\text{Opx}} < 0$, 为岩浆成因的斜方辉石. 将本文 20 个分析点的斜方辉石成分数据代入上式计算, 所得 $D(x)_{\text{Opx}}$ 全部为负值, 说明本文辉石岩中斜方辉石为岩浆成因.

Bhattacharyya(1971) 提出一个斜方辉石成因的判别图解, Rietmeijer 在 1983 年对该图解进行了改进(Rietmeijer, 1983). 将本文 20 个分析点的斜方辉石成分数据投到该图解(图 9)上可以看出, 大部分数据点都落在岩浆成因的区域, 只有少数几个点落在岩浆成因与变质成因区域边界附近的变质成因区一侧.

从上述几种判别方法的结果, 可以确定本文样品中的斜方辉石为岩浆成因的, 也就是说该岩石是辉石岩而不是麻粒岩.

4.2 辉石岩的成因

辉石岩可能的成因模式主要有以下 3 种(张亚玲和徐义刚, 2012):

(1) 高压堆晶成因(I 类辉石岩)辉石岩, 是由橄榄岩部分熔融产生的熔体在岩浆通道内上升过程中, 在 1.5~2.5 Gpa 压力范围内结晶而成(Irving, 1974; Best, 1975; Frey and Prinz, 1978), 具有类似上地幔的化学特征. 这种辉石岩一般具有堆晶结构或火成结构, 矿物自形程度好, 具有高 Mg、Ni、Cr, 低 K_2O 特征, REE 表现为强烈亏损 LREE, 富集 HREE, 呈左倾型, 无 Eu 异常. 本文辉石岩无论在露头上还是手标本上, 都不存在分层的堆晶结构, 化学成分上较低的 Al_2O_3 和 TiO_2 , 较高的 CaO, 与原始地幔岩浆不符, 因此排除了堆晶成因.

(2) 再循环洋壳变质成因(II 类辉石岩)辉石岩, 一般会保存有褶皱、香肠构造强烈的变形构造, 粒状

表 3 单斜辉石和斜方辉石矿物对电子探针分析数据结果(%)

Table 3 Composition of Opx and Cpx in the Zhongzaohuo pyroxenite

分析点	1. 2. 1	1. 2. 2	3. 3. 1	3. 3. 2	5. 6. 1	5. 6. 2	5. 10. 1	5. 10. 2
矿物	Cpx	Opx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Cpx	Opx
SiO ₂	52.792	55.310	55.063	52.482	55.610	53.661	54.323	55.495
TiO ₂	0.329	0.093	0.115	0.466	0.040	0.305	0.128	0.115
Al ₂ O ₃	0.170	0.138	0.107	0.169	0.101	0.137	0.084	0.087
Cr ₂ O ₃	0.205	0.163	0.143	0.225	0.060	0.158	0.300	0.133
FeO	4.771	11.257	14.103	4.874	15.008	4.372	6.337	13.996
MnO	0.117	0.160	0.193	0.075	0.159	0.046	0.095	0.150
MgO	16.113	28.283	29.115	16.487	28.549	16.175	18.528	29.437
CaO	23.123	3.956	0.700	21.271	0.389	23.878	19.176	0.345
Na ₂ O	0.506	0.035	0.015	0.639	0.000	0.432	0.358	0.040
K ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.048	0.024	0.018	0.154	0.006
Total	98.126	99.395	99.554	96.736	99.940	99.182	99.483	99.804
Si	1.979 7	1.985 0	1.980 9	1.988 1	1.995 5	1.987 0	1.995 5	1.986 7
Al ^{IV}	0.009 3	0.002 5	0.003 1	0.013 3	0.001 1	0.008 5	0.003 5	0.003 1
Al ^{VI}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
Ti	0.009 3	0.002 5	0.003 1	0.013 3	0.001 1	0.008 5	0.003 5	0.003 1
Cr	0.006 1	0.004 6	0.004 1	0.006 7	0.001 7	0.004 6	0.008 7	0.003 8
Fe ³⁺	0.067 4	0.025 3	0.036 6	0.048 2	0.003 0	0.045 1	0.033 3	0.024 1
Fe ²⁺	0.081 4	0.311 8	0.386 4	0.105 6	0.447 3	0.089 8	0.160 8	0.394 1
Mn	0.003 7	0.004 9	0.005 9	0.002 4	0.004 8	0.001 4	0.003 0	0.004 6
Mg	0.900 8	1.513 2	1.561 4	0.931 1	1.527 2	0.892 9	1.014 6	1.571 0
Ca	0.929 1	0.152 1	0.027 0	0.863 4	0.015 0	0.947 4	0.754 8	0.013 2
Na	0.036 8	0.002 4	0.001 1	0.046 9	0.000 0	0.031 0	0.025 5	0.002 8
K	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.002 3	0.001 1	0.000 9	0.007 2	0.000 3
Wo	46.010 0	7.570 0	1.340 0	43.220 0	0.750 0	47.190 0	37.890 0	0.660 0
En	44.610 0	75.290 0	77.360 0	46.610 0	76.460 0	44.480 0	50.940 0	78.170 0
Fs	7.550 0	17.020 0	21.250 0	7.820 0	22.790 0	6.790 0	9.890 0	21.030 0

注:以 6 个 O 原子和 4 个阳离子为基准计算;此表仅列出用于计算温度的辉石矿物对的数据。

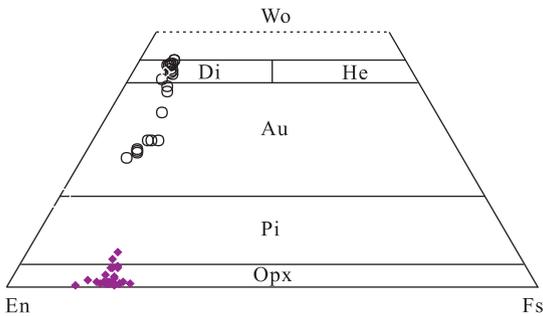


图 7 东昆仑中灶火辉石岩体中辉石矿物成分分类三角图 (据 Morimoto, 1988 修改)

Fig. 7 Wo-En-Fs diagram showing the classification of pyroxene in the pyroxenite pluton in the East Kunlun orogen, western China

Di. 透辉石; He. 钙铁辉石; Au. 普通辉石; Pi. 易变辉石; Opx. 斜方辉石

或花岗变晶结构,以及低 Mg[#] 高 Al₂O₃,明显的 Eu 正异常等特征. 本文辉石岩看不到变形迹象,高 Mg[#] 而低 Al₂O₃,具有轻微的 Eu 负异常,与 II 类辉石岩的特征均不符合,因此该成因模式也排除了.

(3)交代成因辉石岩是富 Si 熔体交代橄榄岩形成 (Kelemen 1995; Kelemen *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 2005),具有以下特征:没有明显的变形,团块或透镜状构造,矿物种类简单,高 Mg 和 Ni,富强不相容元素(Rb、Th 等),稀土配分形式呈上凸的钟形或轻稀土富集的下凹形. 这些特征与本文辉石岩的特征比较符合,说明该辉石岩很可能是交代成因.

单斜辉石和斜方辉石矿物化学成分变异图解 (图 8)也显示,本文 2 种辉石的成分落入二辉橄榄岩与橄榄岩包体的区域,也说明辉石岩的形成与地幔橄榄岩有密切联系. Rb、Ba、Th 等强不相容元素的富集特征以及 ε_{Hf}(t)全为负值((-4.9~ -9.8) ±,另文发表)表明参与反应的橄榄岩来自富集地幔,而岩石较高的 SiO₂(51.67%~51.97%)含量说明一定有富 Si 的物质参与. 这些特征表明,该辉石岩很可能是由俯冲板块释放的富 Si 熔体与富集地幔橄榄岩交代反应形成的. 那么,这种交代反应是形成辉石岩岩浆,还是直接形成固态的辉石岩呢? 对于这个问题,本文通过计算辉石岩的形成温度试图

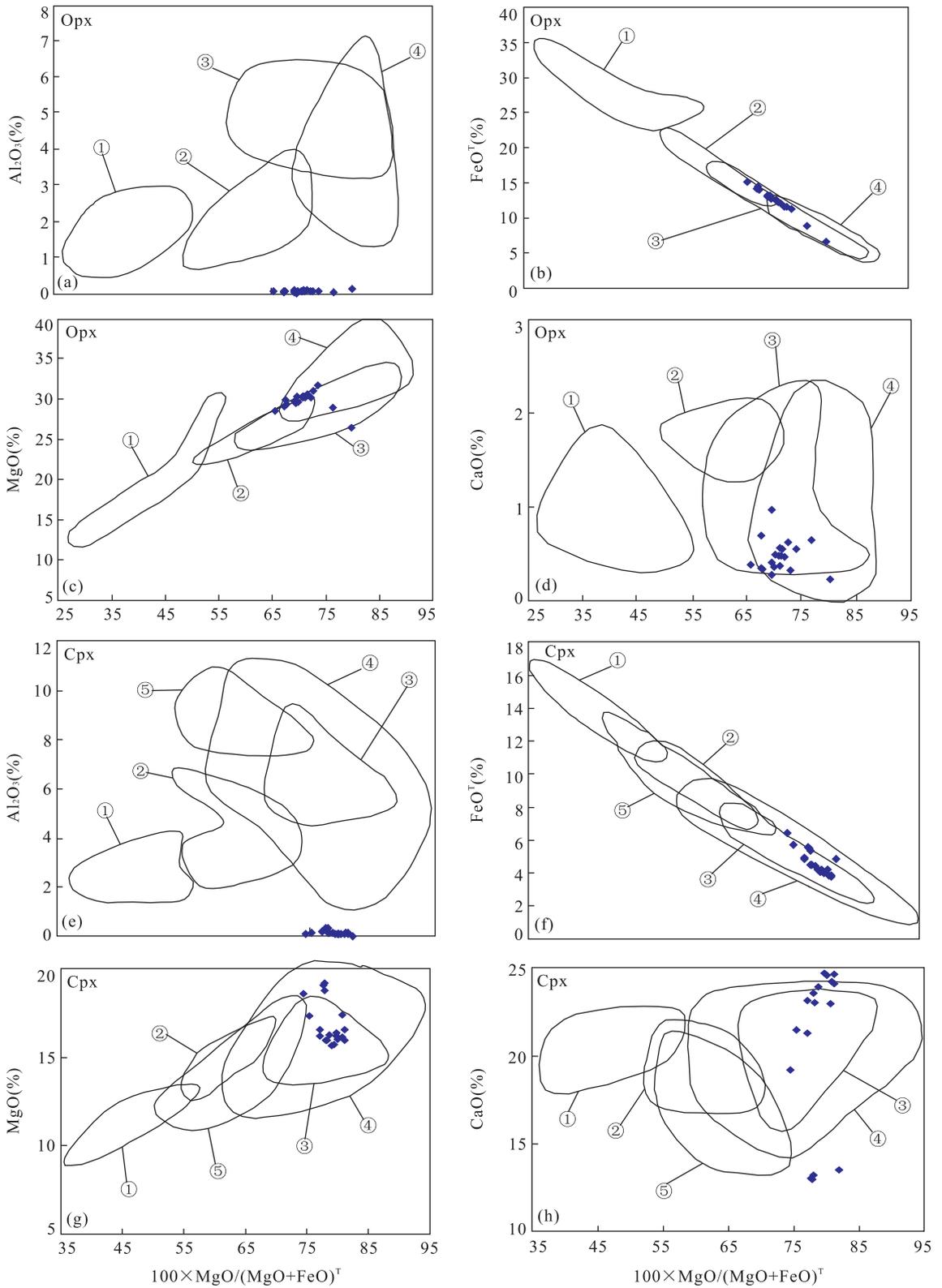


图 8 2 种辉石 $100 \times \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO})^T$ 分别对 Al_2O_3 、 FeO^T 、 MgO 和 CaO 的变异图解(底图据(吴才来等, 2001)修改, 略去了对比数据点)

Fig. 8 Variation of $100 \times \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO})^T$ vs. Al_2O_3 , FeO^T , MgO and CaO of Cpx and Opx in the pyroxenite pluton
 ①华北麻粒岩; ②可可西里辉石岩包体; ③中国东部和蒙古辉石岩包体; ④中国东部二辉橄榄岩包体和澳大利亚、法国、美国加利福尼亚和夏威夷、蒙古的橄榄岩包体; ⑤中国东部新生代玄武岩中辉石巨晶

表 4 采用不同二辉石温度计的计算结果

Table 4 Temperature results calculated with the two-pyroxene thermometers

矿物对	1. 2	3. 3	5. 6	5. 10	Max	Min	Mean	计算方法参考文献
温度 计算 结果 T ($^{\circ}\text{C}$)	908	983	827	1 103	1 103	827	955	Wood and Banno, 1973
	707	839	619	1 044	1 044	619	802	Nehru and Wyllie, 1974
	776	996	617	1 399	1 399	617	947	Lindsley and Dixon, 1976
	844	962	769	1 127	1 127	769	926	Wells, 1977
	898	1 059	766	1 253	1 253	766	994	Bertrand and Mercier, 1985
	797	962	668	1 132	1 132	668	890	Brey and Köhler, 1990
		Opx- T_{Ca} , $n=20$			1 055. 7	785. 6	891. 2	Brey and Köhler, 1990

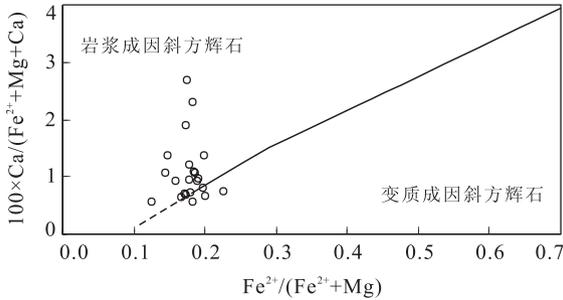


图 9 东昆仑中灶火辉石岩体中斜方辉石成因判别图解 (Rietmeijer, 1983)

Fig. 9 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ and $100 \times \text{Ca}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Ca})$ relation showing the compositions and origins of orthopyroxene in the pyroxenite pluton

得到些许启示。

由于角闪石大部分是后期退变质的产物, 只能利用两种辉石来计算辉石岩的形成温度. 笔者选用 6 种常用的二辉石温度计对表 3 所列的 4 个矿物对进行温度计算, 结果列于表 4. 可以看出, 各种温度计计算结果的变化范围都很大, 跨度达 300°C 以上, 但对于同一个矿物对, 各个温度计的结果差别不是很大. 这一结果是否可信呢? 为了检验, 笔者采用 Brey and Köhler(1990)提出的斜方辉石 Ca 含量温度计对 20 个斜方辉石成分进行了计算(数据未列出, 感兴趣的读者可以向作者索取), 结果显示温度在 $785.6 \sim 1\,055.7^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均值为 891.2°C (表 4), 该温度相对于幔源辉石岩包体(吴才来等, 2001)的形成温度偏低. 相比于平均值, 笔者更倾向于认为 $785.6 \sim 1\,055.7^{\circ}\text{C}$ 温度跨度有 280°C 的这一区间可能更具有地质含义.

由于本文辉石中 Al_2O_3 含量非常低, 采用 Mercier(1980)提出的与 Al 含量相关的单斜辉石压力计对 20 个单斜辉石成分数据进行计算, 未能获得任何压力值. 笔者知道, Al 只有在高压的条件下才进入辉石的晶格, 本文辉石中如此低的 Al_2O_3 含量(Cpx 中 $0.02\% \sim 0.35\%$; Opx 中 $0.03\% \sim$

0.16%), 说明其形成压力非常低, 但具体压力值范围难以确定.

以上计算的 $785.6 \sim 1\,055.7^{\circ}\text{C}$, 跨度达 280°C 的温度范围以及非常低的压力条件, 说明富 Si 熔体与富集地幔橄榄岩交代反应形成的是辉石岩岩浆而不是固态的辉石岩. 该辉石岩岩浆可能一直上升侵位到地壳中部才最终全部冷却结晶, 在上升侵位的过程中, 处于较深部位结晶的矿物其温度和压力较高, 而较浅部位结晶的矿物其温度和压力较低, 其形成的温压条件处于一个较宽的区间.

4.3 可能的地球动力学过程

东昆仑地区海西—印支期存在大量壳幔岩浆混合作用的记录(罗照华等, 1999; 莫宣学等, 2007). Liu *et al.* (2004)对约格鲁岩体中相互伴生的花岗岩(寄主岩)、暗色镁铁质微粒包体(MMEs)和辉长岩的锆石进行 SHRIMP 定年, 获得了 242 ± 6 Ma、 241 ± 5 Ma 和 239 ± 6 Ma 的年龄, 三者具有同时性证明 MME 是基性和酸性两种岩浆不完全混合作用形成的基性岩团块. 孙雨等(2009)通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年得到东昆仑东部哈拉尕吐花岗岩闪长岩体寄主岩形成年龄为 255.3 ± 3.6 Ma, 暗色包体形成时代为 252.9 ± 2.5 Ma. 最近, Xiong *et al.* (2012)对诺木洪附近花岗岩闪长岩体及其中暗色镁铁质微粒包体(MMEs)进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分别获得 261 ± 2 Ma 和 263 ± 2 Ma 的年龄. 这些准确的定年结果表明东昆仑地区最晚在中二叠世已开始了壳幔岩浆混合作用, 并至少持续到中三叠世. 野外观察发现该辉石岩未见塑性变形迹象, 而围岩多发生糜棱岩化塑性变形, 说明辉石岩的侵位要晚于这些发生糜棱岩化岩石的时代, 其中最年轻的糜棱岩化岩石是一条早二叠世二长花岗岩脉, 故辉石岩的侵位应在早二叠世之后. 锆石 U-Pb 定年(另文发表)得到两组年龄, 其中一组是 261.2 ± 3.0 Ma, 认为是辉石岩侵位的时代, 这也印证了野

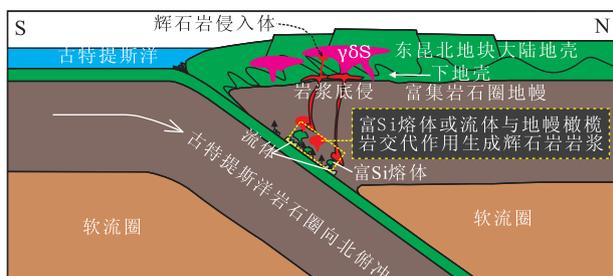


图10 东昆仑中灶火辉石岩形成的地球动力学模型

Fig. 10 Schematic illustration of the formation of Zhongzaohuo pyroxenite pluton in the East Kunlun

外观察所得到的结论。该年龄与东昆仑地区壳幔岩浆混合作用的时代基本一致。该时期正是东昆仑古特提斯洋闭合,大洋岩石圈向北大规模俯冲的时期(莫宣学等,2007)。另一组年龄为 462.6 ± 5.3 Ma,与张建新等(张建新等,2003)测定的白沙河岩群麻粒岩相矽线黑云二长片麻岩的变质年龄(460 ± 8 Ma)在误差允许范围内一致,这一组锆石很可能是辉石岩岩浆底侵过程中捕获的下地壳麻粒岩相的变质锆石。

结合上述地质构造背景,根据上文讨论的辉石岩的成因特征,笔者提出关于辉石岩形成过程的一个初步地球动力学模型(图10):中二叠世时期,古特提斯洋向北大规模俯冲,俯冲的洋壳在流体等作用下发生部分熔融,产生富Si的熔体,这些熔体与东昆仑地块之下的富集岩石圈地幔中的橄榄岩发生交代反应,生成辉石岩岩浆,然后这些岩浆向上底侵到东昆仑下地壳,并接受地壳混染作用。这时由于压力降低,辉石岩岩浆虽然温度降低但仍然处于熔融状态,并很可能处于弧后伸展的构造条件下,于是岩浆继续上升侵位到地壳中部的基底变质岩系与志留纪花岗质岩体接触部位,随后于中二叠世末 261.2 ± 3.0 Ma冷却结晶。在后期基底岩系的抬升剥露过程中,辉石岩与之一起剥露并发生退变质作用和遭受壳源流体交代作用的改造。

5 结论

(1)通过成因矿物学角度的判别分析,本文样品中斜方辉石为岩浆成因,该岩石为辉石岩而非基性麻粒岩。

(2)该辉石岩地球化学特征表明其来源于富集地幔,是俯冲洋壳部分熔融产生的富Si熔体与地幔橄榄岩发生交代反应产生辉石岩岩浆,然后底侵到地壳中部冷却结晶形成的。

(3)该辉石岩的形成与中二叠世古特提斯洋向北大规模俯冲及其所导致的弧后伸展作用有关。

致谢:秦雅东、宋红协助进行了野外采样,在岩石鉴定、数据分析等方面得到廖群安、王人镜、郑暑、马昌前的帮助,文章撰写过程中与王浩、熊富浩、刘彬进行了有益的讨论,在此一并致谢!

References

- Bertrand, P., Mercier, J. C. C., 1985. The Mutual Solubility of Coexisting Ortho- and Clinopyroxene: Toward an Absolute Geothermometer for the Natural System? *Earth and Planetary Science Letters*, 76(1): 109–122. doi: 10.1016/0012-821X(85)90152-9
- Best, M. G., 1975. Amphibole-Bearing Cumulate Inclusions, Grand Canyon, Arizona and Their Bearing on Silica-Undersaturated Hydrous Magmas in the Upper Mantle. *Journal of Petrology*, 16(1): 212–236. doi: 10.1093/petrology/16.1.212
- Bhattacharyya, C., 1971. An Evaluation of the Chemical Distinctions between Igneous and Metamorphic Orthopyroxenes. *American Mineralogist*, 56: 499–506.
- Brey, G. P., Köhler, T., 1990. Geothermobarometry in Four-Phase Lherzolites II. New Thermobarometers, and Practical Assessment of Existing Thermobarometers. *Journal of Petrology*, 31(6): 1353–1378. doi: 10.1093/petrology/31.6.1353
- Chen, A. G., Ma, P. X., Li, H. Y., et al., 1996. The Main Characteristics and Age of Xiaozhangjiakou Ultrabasic Rocks in Chicheng County, Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 12(1): 156–162 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Tian, W., Liu, A. K., 2008. Petrogenesis of the Xiaozhangjiakou Mafic-Ultramafic Complex, North Hebei: Constraints from Petrological, Geochemical and Nd-Sr Isotopic Data. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 295–303 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N. S., Sun, M., Wang, Q. Y., et al., 2007. EMP Chemical Ages of Monazites from Central Zone of the Eastern Kunlun Orogen: Records of Multi-Tectono-Metamorphic Events. *Chinese Science Bulletin*, 52(16): 2252–2263. doi: 10.1007/s11434-007-0299-5
- Chen, N. S., Sun, M., Zhang, K. X., et al., 2001a. ^{40}Ar - ^{39}Ar and U-Pb Ages of Metadiorite from the East Kunlun Orogenic Belt: Evidence for Early-Paleozoic Magmatic Zone and Excess Argon in Amphibole Minerals. *Chinese Science Bulletin*, 46(4): 330–334. doi: 10.1007/BF03187197

- Chen, S., O'Reilly, S. Y., Zhou, X., et al., 2001b. Thermal and Petrological Structure of the Lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China: Evidence from Xenoliths. *Lithos*, 56 (4): 267—301. doi: 10. 1016/S0024-4937(00)00065-7
- Downes, H., 2007. Origin and Significance of Spinel and Garnet Pyroxenites in the Shallow Lithospheric Mantle: Ultramafic Massifs in Orogenic Belts in Western Europe and NW Africa. *Lithos*, 99(1-2): 1-24. doi: 10. 1016/j. lithos. 2007. 05. 006
- Fan, Q. C., Zhang, H. F., Sui, J., et al., 2005. Magma Underplating and Hannuoba Present Crust-mantle Transitional Zone Composition; Xenolith Petrological and Geochemical Evidence. *Science in China (Series D)*, 35(1): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- Frey, F. A., Prinz, M., 1978. Ultramafic Inclusions from San Carlos, Arizona; Petrologic and Geochemical Data Bearing on Their Petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 38 (1): 129—176. doi: 10. 1016/0012—821X (78)90130-9
- Frey, F. A., 1980. The Origin of Pyroxenites and Garnet Pyroxenites from Salt Lake Crater, Oahu, Hawaii: Trace Element Evidence. *American Journal of Science*, 280: 427—449.
- Garrido, C. J., Bodinier, J. L., 1999. Diversity of Mafic Rocks in the Ronda Peridotite: Evidence for Pervasive Melt-Rock Reaction during Heating of Subcontinental Lithosphere by Upwelling Asthenosphere. *Journal of Petrology*, 40(5): 729—754. doi: 10. 1093/ptroj/40. 5. 729
- Hirschmann, M. M., Stolper, E. M., 1996. A Possible Role for Garnet Pyroxenite in the Origin of the “Garnet Signature” in MORB. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 124 (2): 185—208. doi: 10. 1007/s004100050184
- Irving, A. J., 1974. Geochemical and High Pressure Experimental Studies of Garnet Pyroxenite and Pyroxene Granulite Xenoliths from the Delegate Basaltic Pipes, Australia. *Journal of Petrology*, 15(1): 1—40. doi: 10. 1093/ptetrology/15. 1. 1
- Jin, S. Q., Li, H. C., 1985. Introduction of the Genetic Mineralogy (Volume 2). Jilin University Press, Changchun, 203 (in Chinese).
- Kelemen, P. B., 1995. Genesis of High Mg[#] Andesites and the Continental Crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120(1): 1—19. doi: 10. 1007/BF00311004
- Kelemen, P. B., Hart, S. R., Bernstein, S., 1998. Silica Enrichment in the Continental Upper Mantle Via Melt/Rock Reaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 164(1): 387—406. doi: 10. 1016/S0012—821X (98) 00233-7
- Komprobst, J., Piboule, M., Roden, M., et al., 1990. Corundum-Bearing Garnet Clinopyroxenites at Beni Bousera (Morocco): Original Plagioclase-Rich Gabbros Recrystallized at Depth within the Mantle? *Journal of Petrology*, 31(3): 717—745. doi: 10. 1093/ptetrology/31. 3. 717
- Li, R. S., Ji, W. H., Yang, Y. C., et al., 2008. Geology of Kunlun Mountains and Adjacent Areas. Geological Publishing House, Beijing, 1—390 (in Chinese).
- Lindsley, D. H., Dixon, S. A., 1976. Diopside-Enstatite Equilibria at 850 °C to 1 400 °C, 5 to 35 k. B. *American Journal of Science*, 276(10): 1285—1301. doi: 10. 2475/ajs. 276. 10. 1285
- Liu, C. D., 2008. Granitoid Magma Mixing in Eastern Part of the East Kunlun Orogenic Belt. Geological Publishing House, Beijing, 137 (in Chinese).
- Liu, C. D., Mo, X. X., Luo, Z. H., et al., 2004. Mixing Events between the Crust- and Mantle-Derived Magmas in Eastern Kunlun: Evidence from Zircon SHRIMP II Chronology. *Chinese Science Bulletin*, 49 (8): 828—834. doi: 10. 1007/BF02889756
- Liu, Y. S., Gao, S., Lee, C. T. A., et al., 2005. Melt-Peridotite Interactions; Links between Garnet Pyroxenite and High-Mg[#] Signature of Continental Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 234 (1): 39—57. doi: 10. 1016/j. epsl. 2005. 02. 034
- Liu, Y. S., Yuan, H. L., Gao, S., et al., 2004. Zircon U-Pb Ages of Olivine Pyroxenite Xenolith from Hannuoba; Links between the 97—158 Ma Basaltic Underplating and Granulite-Facies Metamorphism. *Chinese Science Bulletin*, 49 (8): 790—797 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1): 133—153. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2007. 10. 016
- Luo, Z. H., Deng, J. F., Cao, Y. Q., et al., 1999. On Late Paleozoic-Early Mesozoic Volcanism and Regional Tectonic Evolution of East Kunlun, Qinghai Province. *Geoscience*, 13(1): 51—56 (in Chinese with English abstract).
- Mercier, J. C. C., 1980. Single-Pyroxene Thermobarometry. *Tectonophysics*, 70(1-2): 1—37. doi: 10. 1016/0040—1951(80)90019-0
- Mo, X. X., Luo, Z. H., Deng, J. F., et al., 2007. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt.

- Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403—414 (in Chinese with English abstract).
- Morimoto, N., 1988. Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39 (1): 55 — 76. doi: 10. 1007/BF01226262
- Nehru, C. E., Wyllie, P. J., 1974. Electron Microprobe Measurement of Pyroxenes Coexisting with H₂O-Undersaturated Liquid in the Join CaMgSi₂O₆-Mg₂Si₂O₆-H₂O at 30 Kilobars, with Applications to Geothermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 48 (3): 221—228. doi:10. 1007/BF00383357
- Pearce, J. A., Cann, J. R., 1973. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19 (2): 290—300. doi:10. 1016/0012—821X(73)90129—5
- Rietmeijer, F. J. M., 1983. Chemical Distinction between Igneous and Metamorphic Orthopyroxenes Especially Those Coexisting with Ca-Rich Clinopyroxenes; A Re-Evaluation. *Mineralogical Magazine*, 47: 143—151.
- Roger, F., Jolivet, M., Malavieille, J., 2008. Tectonic Evolution of the Triassic Fold Belts of Tibet. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2—3): 180—189. doi:10. 1016/j. crte. 2007. 10. 014
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. doi: 10. 1144/GSL. SP. 1989. 042. 01. 19
- Sun, Y., Pei, X., Ding, S., et al., 2009. Halagatu Magma Mixing Granite in the East Kunlun Mountains—Evidence from Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 83 (7): 1000—1010 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Wei, Q. R., Jia, C. X., et al., 2007. Some Ideas of Precambrian Geology in the East Kunlun, China. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 929—937 (in Chinese with English abstract).
- Wells, P. R. A., 1977. Pyroxene Thermometry in Simple and Complex Systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 62(2): 129—139. doi:10. 1007/BF00372872
- Wilde, S. A., Zhou, X., Nemchin, A. A., et al., 2003. Mesozoic Crust-Mantle Interaction beneath the North China Craton; A Consequence of the Dispersal of Gondwanaland and Accretion of Asia. *Geology*, 31(9): 817. doi: 10. 1130/G19489. 1
- Wood, B. J., Banno, S., 1973. Garnet-Orthopyroxene and Orthopyroxene-Clinopyroxene Relationships in Simple and Complex Systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 42(2): 109—124. doi:10. 1007/BF00371501
- Wu, C. L., Yang, J. S., Xu, Z. Q., et al., 2001. The Mineral Chemistry of Pyroxenite Xenoliths in the Volcanic Rocks of Hoh Xil and Their Significance. *Science in China (Series D)*, 31(Supplement): 109—116 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. H., Ma, C. Q., Zhang, J. Y., et al., 2012. The Origin of Mafic Microgranular Enclaves and Their Host Granodiorites from East Kunlun, Northern Qinghai-Tibet Plateau; Implications for Magma Mixing during Subduction of Paleo-Tethyan Lithosphere. *Mineralogy and Petrology*, 104 (3): 211—224. doi: 10. 1007/s00710—011—0187—1
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2006. The Early Palaeozoic Terrene Framework and Formation of the High Pressure (HP) and Ultra-High Pressure (UHP) Metamorphic Belts at the Central Orogenic Belt (COB). *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1793—1806 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. H., Zhou, X. H., Chen, S. H., et al., 1999a. Sr, Nd and Pb Isotopic Characteristics of Granulite and Pyroxenite Xenoliths from Hannuoba Basalts in Five-Dimensional Space and Their Geological Implications. *Chinese Science Bulletin*, 43(20): 2218—2222 (in Chinese).
- Zhang, G. H., Zhou, X. H., Sun, M., et al., 1998b. Heterogeneity of the Lower Crust; Evidence from Geochemistry of the Hannuoba Granulite Xenoliths, Hebei Province. *Geochimica*, 27 (2): 153—169 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Meng, F. C., Wan, Y. S., et al., 2003. Early Palaeozoic Tectono-Thermal Event of the Jinshuikou Group on the Southern Margin of Qaidam; Zircon U-Pb SHRIMP Age Evidence. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 397—404 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. L., Xu, Y. G., 2012. Pyroxentites: High-Pressure Segregates or Recycled Oceanic Crust? *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 74—87 (in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2005. In Situ Trace Elemental Compositions and Geodynamic Significance of Clinopyroxene in Pyroxenite Xenoliths from Hannuoba. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 909—920 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈安国, 马配学, 李洪阳, 等, 1996. 河北省赤城县小张家口超基性岩体主要特征和时代. *岩石学报*, 12(1): 156—162.
- 陈斌, 田伟, 刘安坤, 2008. 冀北小张家口基性—超基性杂

- 岩的成因:岩石学、地球化学和 Nd-Sr 同位素证据. 高校地质学报, 14(3): 295—303.
- 樊祺诚, 张宏福, 隋建立, 等, 2005. 岩浆底侵作用与汉诺坝现今壳—幔边界组成——捕虏体岩石学与地球化学证据. 中国科学(D辑), 35(1): 1—14.
- 靳是琴, 李鸿超, 1985. 成因矿物学概论(下册). 长春: 吉林大学出版社, 203.
- 李荣社, 计文化, 杨永成, 等, 2008. 东昆仑及邻区地质. 北京: 地质出版社, 1—390.
- 刘成东, 2008. 东昆仑造山带东段花岗岩岩浆混合作用. 北京: 地质出版社, 137.
- 刘勇胜, 袁洪林, 高山, 等, 2004. 汉诺坝橄榄辉石岩包体锆石 U-Pb 年龄: 97~158 Ma 岩浆底侵作用和麻粒岩相变质作用之间的成因联系. 科学通报, 49(8): 790—797.
- 罗照华, 邓晋福, 曹永清, 等, 1999. 青海省东昆仑地区晚古生代—早中生代火山活动与区域构造演化. 现代地质, 13(1): 51—56.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等, 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. 高校地质学报, 13(3): 403—414.
- 孙雨, 裴先治, 丁仁平, 等, 2009. 东昆仑哈拉尕吐岩浆混合花岗岩: 来自锆石 U-Pb 年代学的证据. 地质学报, 83(7): 1000—1010.
- 王国灿, 魏启荣, 贾春兴, 等, 2007. 关于东昆仑地区前寒武纪地质的几点认识. 地质通报, 26(8): 929—937.
- 吴才来, 杨经绥, 许志琴, 等, 2001. 可可西里辉石岩包体矿物化学及其地质意义. 中国科学(D辑), 31(增刊): 109—116.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2006. 中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成. 地质学报, 80(12): 1793—1806.
- 张国辉, 周新华, 陈绍海, 等, 1998a. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩和辉石岩捕虏体 Sr-Nd-Pb 同位素五维空间特征及其地质意义. 科学通报, 43(20): 2218—2222.
- 张国辉, 周新华, 孙敏, 等, 1998b. 下地壳及壳幔过渡带化学不均一性——河北汉诺坝地区深源捕虏体元素地球化学证据. 地球化学, 27(2): 153—169.
- 张建新, 孟繁聪, 万渝生, 等, 2003. 柴达木盆地南缘金水口群的早古生代构造热事件: 锆石 U-Pb SHRIMP 年龄证据. 地质通报, 22(6): 397—404.
- 张亚玲, 徐义刚, 2012. 辉石岩: 高压结晶还是再循环洋壳? 高校地质学报, 18(1): 74—87.
- 宗克清, 刘勇胜, 高山, 等, 2005. 汉诺坝辉石岩包体中单斜辉石的微区微量元素组成特征及其地球动力学意义. 岩石学报, 21(3): 909—920.