

# 藏北羌塘中部戈木日榴辉岩的岩石学、矿物学及变质作用 $pTt$ 轨迹

翟庆国<sup>1</sup>, 李 才<sup>2</sup>, 王 军<sup>1</sup>

ZHAI Qing-guo<sup>1</sup>, LI Cai<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061

1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China*

**摘要:**羌塘中部榴辉岩位于龙木错-双湖缝合带中段, 改则县古姆乡片石山地区。榴辉岩的主要矿物成分为石榴子石、绿辉石、多硅白云母、金红石、角闪石等, 围岩为石榴白云母片岩和蓝片岩, 石榴白云母片岩主要由石榴子石、多硅白云母和石英构成, 蓝片岩由石榴子石、角闪石(含蓝闪石)、多硅白云母等构成。岩石学和矿物学研究显示, 榴辉岩主要经历了3期变质作用: ①峰期榴辉岩相变质作用阶段, 以石榴子石、绿辉石和多硅白云母为特征, 变质温度和压力分别为500°C和2.3GPa; ②绿帘角闪岩相变质作用阶段, 以后期形成的冻蓝闪石、镁红闪石、绿帘石、钠长石等交代早期矿物为特征; ③绿片岩相变质作用阶段, 以毛发状阳起石等为特征。榴辉岩的变质演化过程代表了青藏高原北部古特提斯洋俯冲消减和冈瓦纳与劳亚大陆碰撞造山的过程。

**关键词:**藏北; 羌塘地区; 榴辉岩;  $pTt$  轨迹

**中图分类号:** P588.12<sup>75</sup>      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-2552(2009)09-1207-14

**Zhai Q G, Li C, Wang J. Petrology, mineralogy and  $pTt$  path for the eclogite from central Qiangtang, northern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(9):1207-1220**

**Abstract:** The eclogite from central Qiangtang is located in the central part of Longmucuo - Shuanghu suture zone in Pianshishan area of Gumu Town, Gerze County. Major minerals of eclogite include garnet, omphacite, phengite, rutile and amphibole, and their surrounding rocks are garnet phengite schist and blueschist. Garnet phengite schist is mainly composed by garnet, phengite and quartz, and blueschist is mainly composed by garnet, amphibolite and phengite. Petrology and mineralogy data suggest that the eclogite has experienced three stages of metamorphism. Stage I: Peak eclogite metamorphism featured by Grt + Omp + Phen + Rt, the  $p-T$  conditions of the eclogite are 500 °C and ~ 2.3 GPa. Stage II: Epidote-amphibolite facies metamorphism is characterized by assemblages of Bar + Ab + Ep of later stage alteration on the early eclogite minerals. Stage III: Green schist facies metamorphism is featured by fibrous actinolites. The evolution of eclogite is an evidence of the subduction of Paleo-Tethys and collision between Gondwana and Laurasia in the Northern Tibetan plateau.

**Key words:** northern Tibet; Qiangtang area; eclogite;  $pTt$  path

羌塘位于青藏高原北部, 地处冈瓦纳大陆与欧亚大陆的交汇部位, 是研究古特提斯洋俯冲消减和两大陆碰撞造山过程的关键地区。近年来的区域地

质调查和研究工作表明, 羌塘中部存在一条低温高压变质带, 蓝片岩、榴辉岩均已有报道<sup>[1-8]</sup>。羌塘中部发现榴辉岩是近几年青藏高原基础地质研究的重要

收稿日期: 2009-06-17; 修订日期: 2009-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 40872146、40672147)、中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(编号: J0910)、中国地质调查局项目《1:25万玛依岗日幅区域地质调查》(编号: 1212010818015、1212010561605)和中国石化项目(编号: PH08005)资助

作者简介: 翟庆国(1980-), 男, 博士, 助理研究员, 从事青藏高原区域构造与大地构造研究。E-mail: zhaiqingguo@126.com

进展,自报道以来引起了国内外的广泛关注<sup>[7-10]</sup>。尽管目前国内外学者已对该榴辉岩的岩石学、矿物学、年代学等方面做了部分研究工作,但研究工作不够深入,尤其是岩石学和矿物学研究不够,进而导致对其形成时的构造环境、成因等认识的分歧<sup>[7-10]</sup>。本文对羌塘中部戈木日东边的榴辉岩进行了详细的岩石学和矿物学研究,在此基础上结合年代学资料建立了榴辉岩变质作用  $pTt$  轨迹,为青藏高原北部地区高压变质带的研究提供了新资料。

## 1 榴辉岩的产出状态和岩石学特征

羌塘中部戈木日东边的榴辉岩位于龙木错-双湖缝合带中段(图 1-a),地处藏北高原无人区,距离本区最近的乡——改则县古姆乡东北约 100 km 的片石山。榴辉岩产在由蓝闪石片岩和石榴白云母片岩构成的高压变质带中。如图 1 所示,片石山地区榴辉岩呈东西向展布,长约 40 km,平均宽度在 15 km 左右,出露面积大于 600 km<sup>2</sup>。榴辉岩以片石山为中心,向东延伸到二连湖,向西到谢马日东坡。高压变质带南北两侧以逆断层与石炭系浅变质的板岩、石英片岩、石英岩等相接触。榴辉岩主要呈透镜状、块状产在蓝片岩和石榴白云母片岩组成的高压变质带中(图版 I-a-d),直接围岩为石榴白云母片岩,除局部被一些风化破碎的砂砾覆盖外,岩石之间的关系比较清楚。榴辉岩块体大小不一,大者可达数百米,小者仅几个厘米(图版 I-a-d),长轴方向与围岩片理走向一致(图版 I-c),可见榴辉岩沿石榴白云母片岩走向断续分布。多数榴辉岩岩石较致密,石榴子石、绿辉石、白云母等矿物均匀分布,但也有少量榴辉岩石榴子石、绿辉石等矿物发生明显的分异,呈条带状构造(图版 I-d)。榴辉岩中石榴子石呈粉红色,粒度多小于 1 mm,局部可见粒度较大者达 2 mm。对榴辉岩进行镜下观察发现,榴辉岩中石榴子石、绿辉石等典型榴辉岩相变质矿物保存完好(图版 II-a,b)。

## 2 榴辉岩的矿物学特征

榴辉岩矿物成分电子探针测试在中国地质科学院矿产资源研究所和北京大学地球与空间科学学院完成,仪器型号分别为:JXA8800 和 JXA8100,测试条件为:加速电压 20 kV,电流  $2 \times 10^{-8}$  A,电子束斑 5  $\mu\text{m}$ ,部分小的包裹体矿物用 2  $\mu\text{m}$  的束斑测定。

根据野外和室内岩石薄片观测,榴辉岩中主要矿物成分为石榴子石、绿辉石、多硅白云母、角闪石、金红石、榍石、绿帘石、磷灰石、斜长石、石英等,榴辉岩及其围岩主要岩石类型和矿物组合见表 1,采样位置见图 1-b。本文将重点讨论榴辉岩及其围岩中的石榴子石、绿辉石、多硅白云母、角闪石等的矿物学和矿物化学特征。

### 2.1 石榴子石

羌塘中部榴辉岩中石榴子石多呈粉红色,中—细粒自形—半自形粒状。粒度和含量在不同榴辉岩岩块中不尽相同,多数榴辉岩中石榴子石粒度在 0.1~0.3 mm 之间,大者可达 2 mm,小者多小于 0.1 mm。绿辉石分布于石榴子石的粒间,局部地方三连点平衡结构保存完好(图版 II-a,b)。石榴子石在榴辉岩中含量多在 30%~50%之间,不同岩块及块体的不同部位含量有所变化。多数石榴子石保存较完好,没有发生变形、变质,并且颗粒相对较干净,除少量石榴子石中矿物包裹体较多外,多数颗粒包裹体不多。

羌塘中部榴辉岩石榴子石电子探针分析结果见表 2。石榴子石化学成分以铁铝榴石分子和钙铝榴石分子为主,镁铝榴石和锰铝榴石含量较少,所有榴辉岩块体中石榴子石成分相对较稳定。总体来说,石榴子石中铁铝榴石(Alm)含量在(61~68)mol %之间,钙铝榴石(Gr<sub>s</sub>)在(23~30)mol %之间,镁铝榴石(Prp)在(6~11)mol %之间,锰铝榴石(Sps)含量多大于 2mol %。在 Coleman<sup>[11]</sup>石榴子石分类图解中,榴辉岩均分布在 C 型榴辉岩的区域内(图 2)。

对矿物包裹体相对较少且呈六边形的石榴子石颗粒(石榴子石纵切面)进行 X-Ray 成分图和矿物化学成分剖面电子分析(图 3、图 4),结果显示,石榴子石具有明显的成分环带,具有造山带中低温高压变质岩石中石榴子石的普遍特征<sup>[12]</sup>。石榴子石由核部到边部铁铝榴石和镁铝榴石含量逐渐增加,钙铝榴石和锰铝榴石逐渐减少,说明石榴子石为榴辉岩进变质作用过程中形成的。如图 3 所示,石榴子石  $X_{\text{grs}} [= \text{Ca}/(\text{Mg} + \text{Fe} + \text{Ca} + \text{Mn})]$  由核部约 0.31 降低至边部约 0.25,  $X_{\text{sps}} [= \text{Mn}/(\text{Mg} + \text{Fe} + \text{Ca} + \text{Mn})]$  由约 0.04 降低至大约 0.01,  $X_{\text{alm}} [= \text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe} + \text{Ca} + \text{Mn})]$  由约 0.57 升高到约 0.63,  $X_{\text{prp}} [= \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe} + \text{Ca} + \text{Mn})]$  由 0.05 升高到约 0.11。

对含有矿物包裹体的石榴子石的分析表明,包裹体矿物主要有石英、绿帘石、金红石、榍石、绿辉

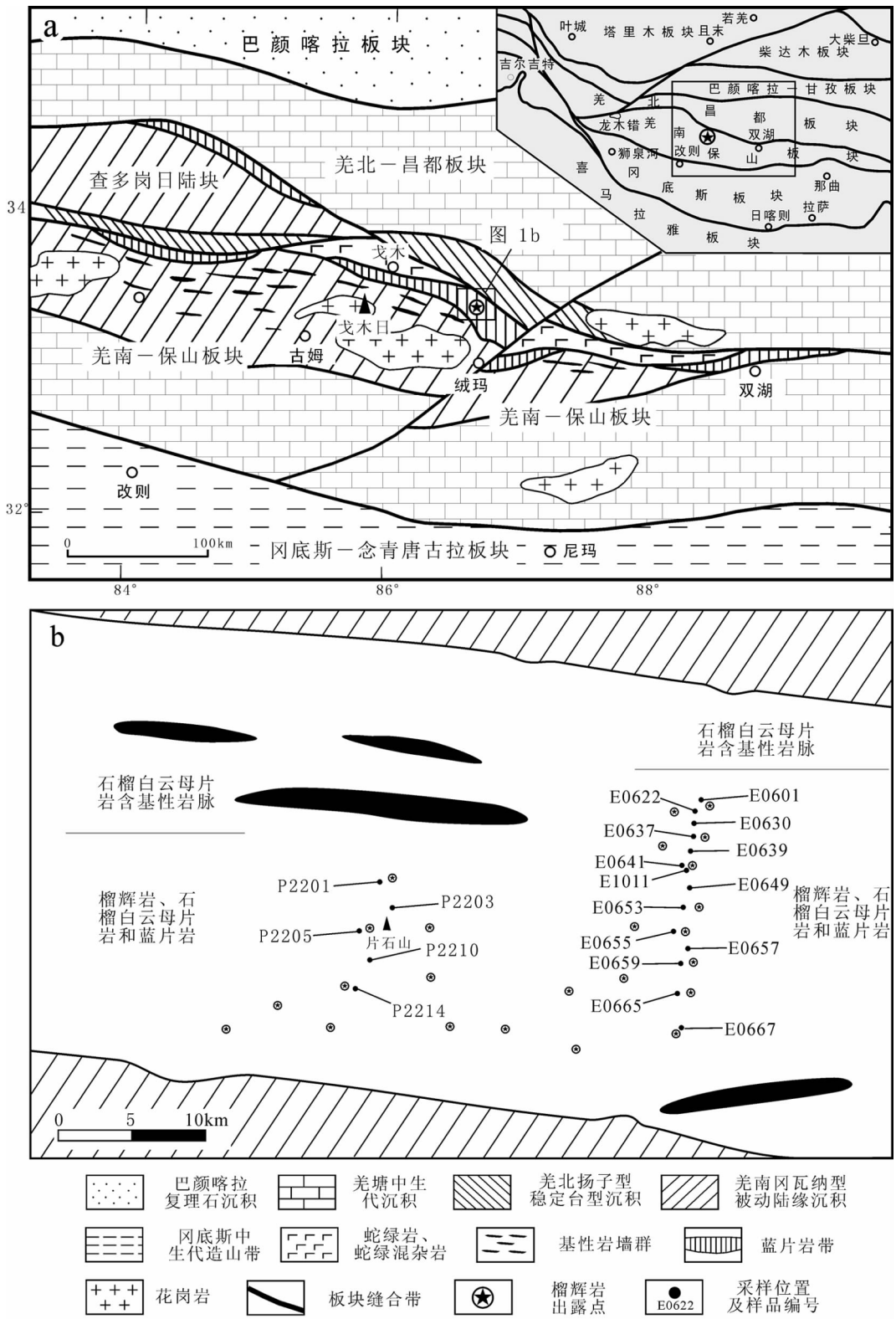


图 1 藏北羌塘中部地区地质简图(a)和榴辉岩的采样位置(b)

Fig. 1 Geological map of the central Qiangtang area, northern Tibet (a) and sampling location of eclogite (b)

石、斜长石、钠云母等,其中绿辉石主要分布在石榴子石的边部,其他矿物分布没有明显的规律性,在石榴子石核部和边部均有产出。钠云母与绿帘石呈盒子状、柱状共生合晶产出,它们很可能是早期硬柱石退变的产物。

蓝片岩中石榴子石的产状与榴辉岩中的类似,这也反映了它们的原岩及形成过程类似,只是变质程度不一样。石榴子石多呈粉红色,半自形—自形粒状,粒度多在0.2 mm左右。蓝片岩中石榴子石的成分见表3,石榴子石 Alm 含量(mol%)在61~66之间,Gr<sub>s</sub>在27~29之间,Pr<sub>p</sub>在6~8之间,Sps在1~4之间,各端元组分含量和榴辉岩中的石榴子石类似,在Coleman<sup>[11]</sup>石榴子石分类图解中均分布在C型榴辉岩的区域内(图2)。

作为榴辉岩的直接围岩,石榴白云母片岩中石榴子石的含量也较多,占35%左右。石榴子石多呈暗粉红色,他形—半自形粒状,粒度分2种类型,一种粒度较小的多在1 mm左右,另一种较大的多在2~3 mm之间。石榴子石变形较强,可见旋转、拖拽结构,反映岩石经历了较强的变形变质作用。石榴白云母片岩中的石榴子石成分见表3,白云母片岩中的石榴子石与榴辉岩中的相比,具有更高的铁铝榴石(70~80 mol%)和镁铝榴石(4~14 mol%)含量,而钙铝

表1 西藏羌塘中部榴辉岩及其围岩的岩石类型和矿物组合

Table 1 Representative rock types and their mineral assemblages of eclogite and their surrounding rocks in central Qiangtang area, northern Tibet

样品号	岩石类型	矿物组合
E0601	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep/Cz, Qtz, Pl, Ap
E0622	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep, Qtz, Pl, Ap, Ttn
E0630	石榴白云母片岩	Grt, Phen, Qtz
E0637	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep, Qtz, Pl, Ap, Ttn
E0639	石榴白云母片岩	Grt, Phen, Qtz
E0641	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep, Qtz, Pl, Ap, Ttn
E0649	石榴白云母片岩	Grt, Phen, Qtz
E0653	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep, Ttn
E0655	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep, Ttn
E0657	石榴白云母片岩	Grt, Phen, Qtz
E0659	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep, Qtz, Pl, Ttn
E0665	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep/Cz, Pl, Ap, Ttn
E0667	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep, Ttn
E1011	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep/Cz, Pl, Ap, Ttn
P2201	蓝片岩	Grt, Phen, Glau, Ep/Cz, Pl
P2203	石榴白云母片岩	Grt, Phen, Qtz
P2205	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep/Cz, Ttn
P2210	石榴白云母片岩	Grt, Phen, Qtz
P2214	榴辉岩	Grt, Omp, Phen, Amp, Rt, Ep/Cz

注: Amp—角闪石; Ap—磷灰石; Cz—斜黧帘石; Ep—绿帘石; Glau—蓝闪石; Grt—石榴子石; Omp—绿辉石; Phen—多硅白云母; Pl—斜长石; Qtz—石英; Rt—金红石; Ttn—榍石

榴石(3~22 mol%)含量较低,锰铝榴石(1~4 mol%)大体相当,在Coleman<sup>[11]</sup>石榴子石分类图解中也均分布在C型榴辉岩的区域内(图2)。

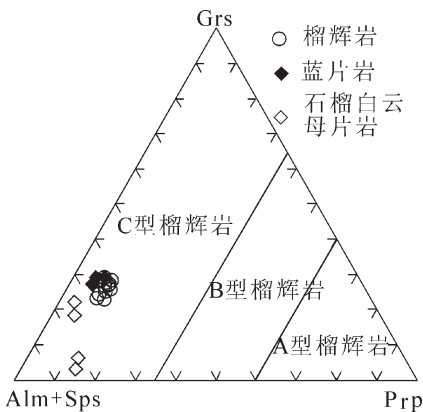


图2 榴辉岩分类图解<sup>[11]</sup>

Fig. 2 Diagram showing different categories of eclogite

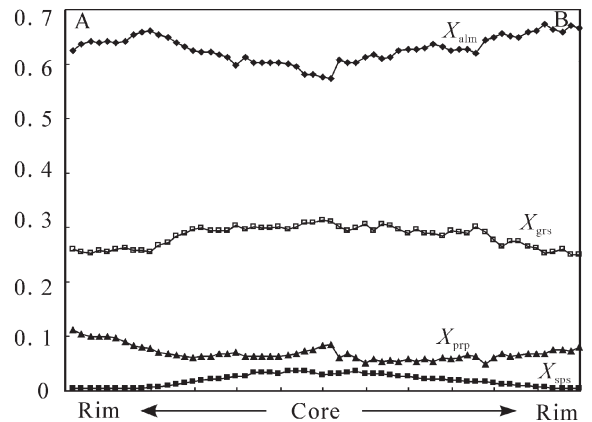


图3 榴辉岩石榴子石矿物成分剖面

(剖面位置为图4右下图中的A-B)

Fig. 3 Compositional profile of garnet from eclogite

### 2.2 绿辉石

榴辉岩中绿辉石含量不均匀,一般在 20%~40%之间,多呈浅绿色,具轻微的多色性,半自形—自形板柱状结构,粒度也不均匀,一般在 0.3~0.8 mm 之间,大者可达 1 mm。绿辉石主要以 3 种状态产出,一种为保存较好的矿物晶体,晶体较干净,受后期变质作用的影响较小,这种绿辉石和石榴子石共生,并可见三连点平衡结构,局部地方绿辉石具有一定的定向性;另一种绿辉石多受晚期变质作用的影响,局部或大部分被角闪石交代或呈包裹体产在角闪石中(图版 II -a,d),这种绿辉石晶体表面不太干净,受后期影响较大;此外还有少量绿辉石呈细小的包裹体产在石榴子石中。榴辉岩中的绿辉石的成分见表 2,绿辉石硬玉分子(Jd)的含量在 29~47 mol%之间,霓石分子的含量在 9~17 mol%之间,在辉石分类图解(WEE-Jd-Ae 图解)(图 5)中,所有样品的点均位于绿辉石的区域内。

### 2.3 多硅白云母

多硅白云母也是典型的高压变质矿物,广泛产于世界各地的高压变质带中。羌塘中部榴辉岩中多硅白云母含量较少,一般不超过 5%,多呈自形、小板状或鳞片状产出,个别大者与绿辉石大小相当。多硅白云母多与绿辉石和石榴子石平衡共生。榴辉岩中多硅白云母电子探针分析数据见表 2,多

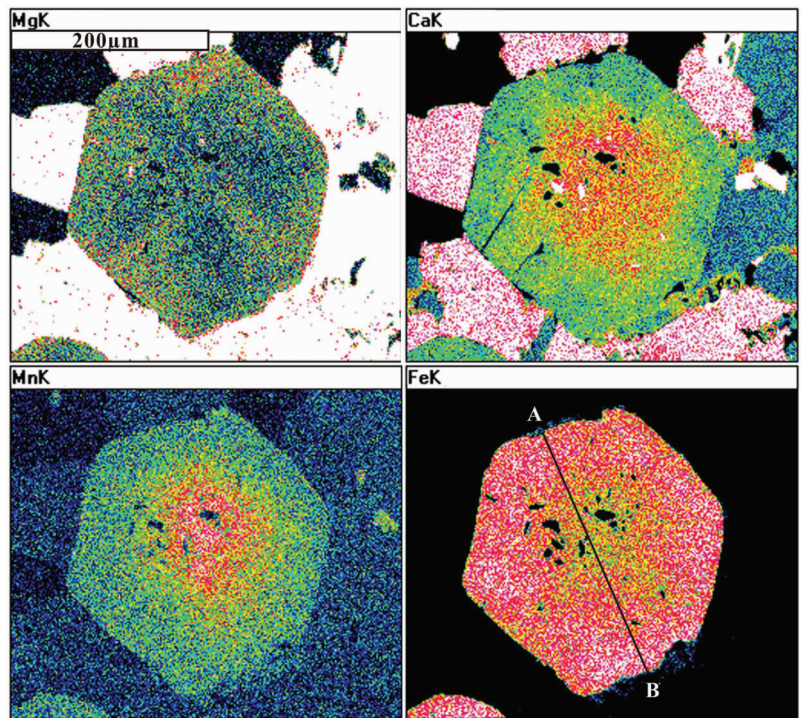


图 4 榴辉岩中石榴子石 X-Ray 成分图

Fig. 4 X-Ray compositional diagram of garnet from eclogite

硅白云母  $SiO_2$  含量多在 50~52wt%之间,每单位晶胞(p. f. u.)Si 原子数多在 3.35~3.45 之间(以 11 个 O 原子计算),在 Al-Si 图解(图 6)中,Al 原子数与 Si 原子数呈负相关,所有分析点均位于多硅白云母的区域。蓝片岩中多硅白云母和榴辉岩中的产出和特征基本一致(图 6)。

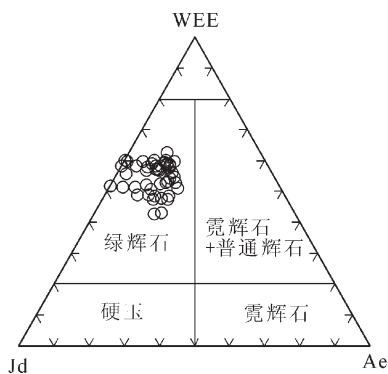


图 5 榴辉岩中辉石成分图解

Fig. 5 Compositional diagram of pyroxene from eclogite

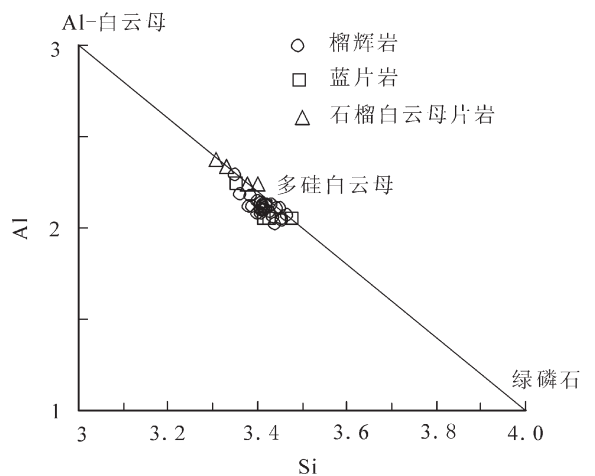
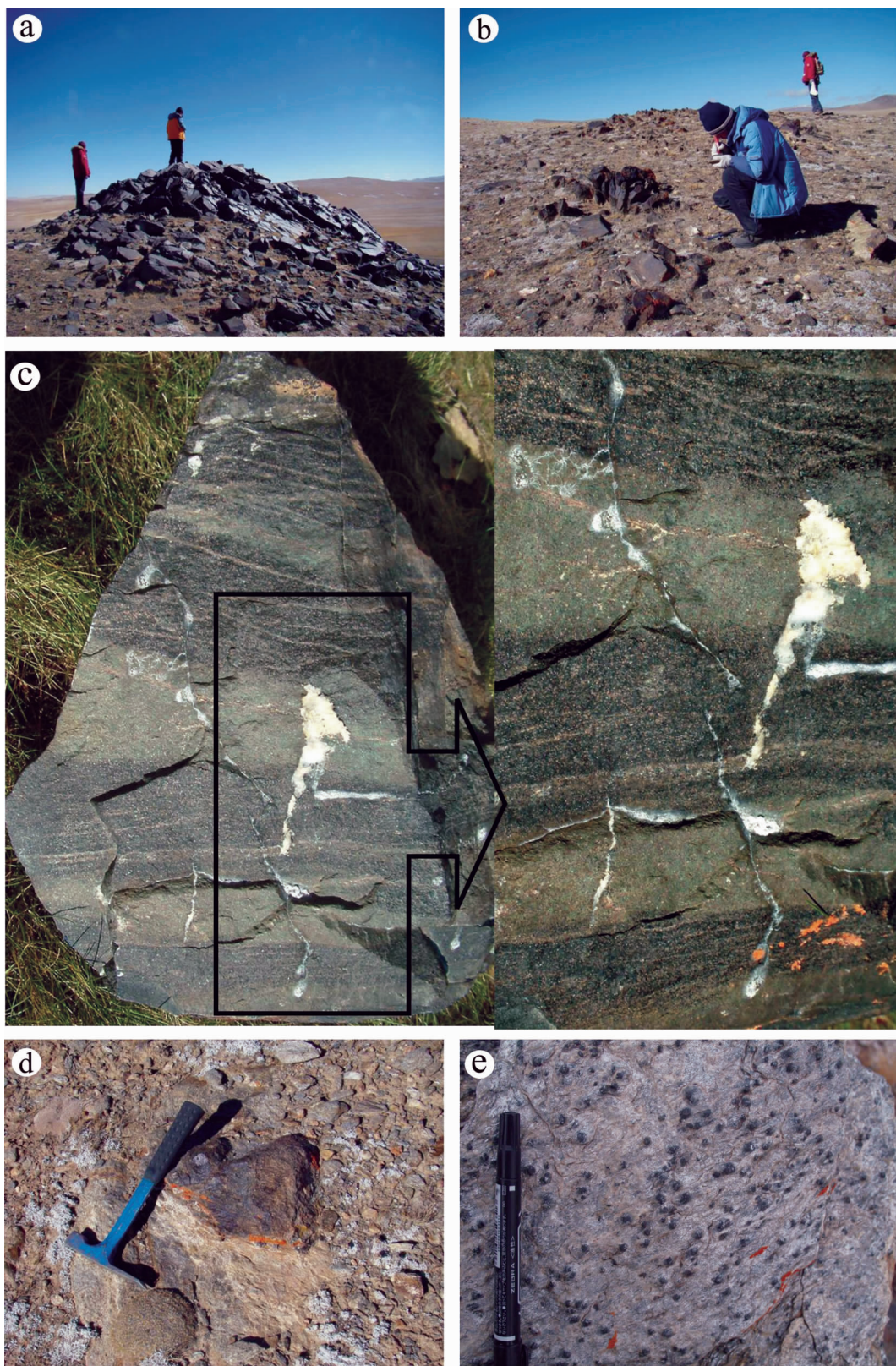


图 6 榴辉岩及其围岩多硅白云母成分图解

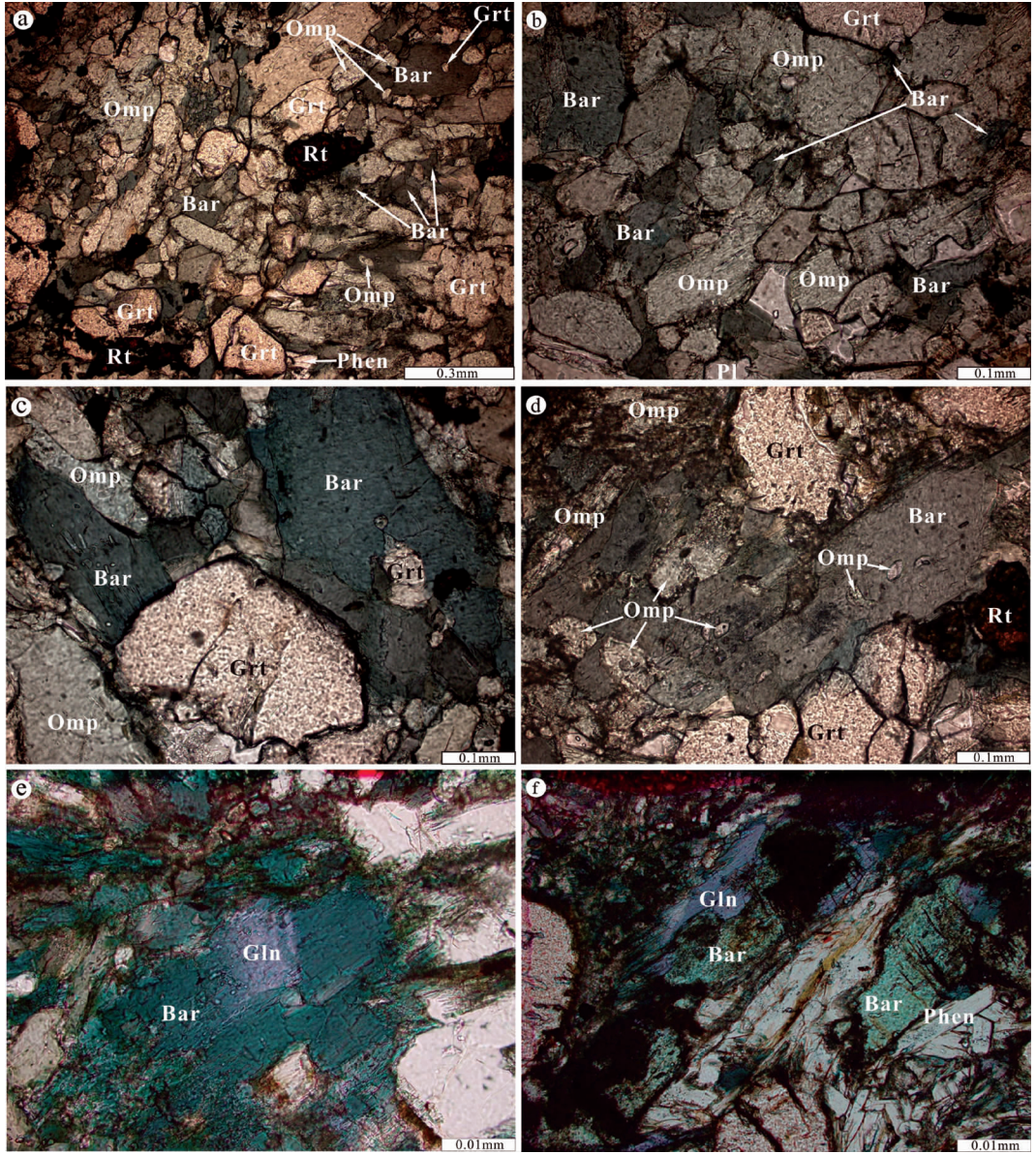
Fig. 6 Phengite compositional diagram of eclogites and their surrounding rocks

图版 I Plate I



a—榴辉岩野外露头(大);b—榴辉岩野外露头(小);c—一条带状榴辉岩;  
d—石榴白云母片岩中的榴辉岩透镜体;e—石榴白云母片岩

图版 II Plate II



a—角闪石部分交代绿辉石和石榴子石,且其中有小的绿辉石和石榴子石包裹体;b—保存较好的、自形一半自形的绿辉石;c—角闪石中的石榴子石包裹体;d—角闪石中的绿辉石包裹体;e—蓝片岩中的蓝闪石被冻蓝闪石包裹;f—蓝片岩中的蓝闪石退变为冻蓝闪石

### 2.4 角闪石

角闪石是高级变质岩石中的常见矿物,榴辉岩中也有产出(角闪榴辉岩),但多数是榴辉岩折返过程中后期变质作用的产物。羌塘中部榴辉岩中的角闪石的含量较多,且不同部位含量也不一致,一般在 20%~40%之间。角闪石呈半自形—自形板柱状、粒状,粒度多在 0.5~1 mm 之间,大者可达 3 mm 左右。角闪石多呈蓝绿色,多色性明显,镜下可见角闪石交

代石榴子石和绿辉石的现象,并且在角闪石中还有小的石榴子石和绿辉石包裹体(图版 II -c,d),反映了角闪石应该形成于它们之后。电子探针分析表明,榴辉岩中的角闪石类主要有钠钙角闪石和钙角闪石类,如冻蓝闪石、镁红闪石、镁角闪石、阳起石、浅闪石和含铁韭闪石(表 2,图 7),其中阳起石多呈细脉状、毛发状。钠钙角闪石类  $\text{Na}_2\text{O}$  含量多在 3.15%~5.27%之间,钙角闪石类  $\text{Na}_2\text{O}$  含量在 2.25%~3.89%

表2 羌塘中部高压变质带中榴辉岩部分矿物的成分分析结果  
 Table 2 Representative mineral analysis in eclogites from high pressure metamorphic belt, central Qiangtang

样品 矿物	E0601						E0622						E0637										
	Grt	Omp	Phen	Bar	Bar	Grt	Omp	Phen	Grt	Omp	Phen	Grt	Omp	Phen	Grt	Omp	Phen						
SiO <sub>2</sub>	37.84	54.36	50.28	47.71	47.12	38.88	56.16	51.84	38.44	50.58	38.44	56.05	51.27	39.5	57.24	51.82	39.42	56.91	52.37	38.51	54.92	50.9	
TiO <sub>2</sub>	0.12	0.10	0.74	0.31	0.45	0.08	0.05	0.42	0.10	0.00	0.28	0.03	0.49	0.06	0.04	0.33	0.05	0.03	0.22	0.11	0.08	0.50	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.11	7.33	26.07	9.56	10.83	21.56	8.46	27.39	21.63	9.20	29.27	21.75	8.96	26.79	21.91	7.28	27.19	21.84	7.46	26.47	21.31	7.27	26.46
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.04	0.00	0.06	0.03	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.04	0.03	0.01	0.00	
FeO	28.44	8.22	3.73	13.6	13.84	28.40	8.19	3.53	27.01	7.64	3.98	26.75	8.40	3.48	27.28	8.15	3.83	29.05	7.88	3.43	27.59	7.93	3.56
MnO	0.39	0.01	0.02	0.05	0.02	0.49	0.01	0.00	0.66	0.00	0.03	1.73	0.01	0.03	0.75	0.04	0.00	0.25	0.01	0.02	0.35	0.01	0.02
MgO	2.49	8.55	3.08	11.8	11.98	2.60	7.84	3.28	2.48	8.05	2.74	1.71	7.34	3.33	2.39	8.99	3.17	2.15	9.33	3.52	2.55	9.07	3.24
CaO	9.58	14.14	0.01	7.79	8.50	7.66	11.43	0.03	9.19	9.27	0.01	9.65	11.05	0.06	8.38	11.75	0.01	7.81	12.09	0.00	9.88	14.21	0.03
Na <sub>2</sub> O	0.08	5.83	0.54	3.81	3.59	0.08	6.99	0.66	0.00	6.70	0.70	0.08	7.34	0.65	0.00	5.98	0.59	0.09	5.70	0.57	0.08	5.60	0.54
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	9.93	0.55	0.67	0.00	0.01	8.69	0.00	0.00	7.11	0.00	0.03	9.11	0.00	0.01	8.34	0.00	0.01	8.59	0.00	0.02	9.62
合计	100.05	98.59	94.4	95.24	97.03	99.79	99.16	95.84	100.29	99.33	94.74	100.21	99.23	95.21	100.28	99.48	95.28	100.67	99.42	95.23	100.41	99.12	94.87
O	12	6	11	23	23	12	6	11	12	6	11	12	6	11	12	6	11	12	6	11	12	6	11
Si	3.00	1.99	3.41	7.03	6.83	3.06	2.03	3.42	3.07	2.11	3.35	3.03	2.03	3.42	3.08	2.08	3.43	3.08	2.07	3.47	3.03	2.00	3.42
Al <sup>IV</sup>	0.00	0.01	0.59	0.97	1.17	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.53	0.00	0.00	0.58
Al <sup>VI</sup>	1.97	0.31	1.49	0.69	0.68	2.00	0.36	1.55	1.99	0.39	1.64	2.02	0.38	1.52	2.01	0.31	1.56	2.01	0.32	1.53	1.97	0.31	1.51
Ti	0.01	0.00	0.04	0.03	0.05	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03
Cr	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	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.11	0.10	0.56	0.62	0.00	0.06	0.12	0.00	0.00	0.20	0.00	0.08	0.12	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.10	0.00	0.08	0.11
Fe <sup>2+</sup>	1.89	0.14	0.11	1.12	1.06	1.87	0.19	0.07	1.77	0.23	0.02	1.76	0.17	0.07	1.78	0.25	0.09	1.90	0.24	0.09	1.81	0.16	0.08
Mn	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Mg	0.29	0.47	0.31	2.59	2.59	0.31	0.42	0.32	0.29	0.43	0.27	0.20	0.40	0.33	0.28	0.49	0.31	0.25	0.50	0.35	0.30	0.49	0.32
Ca	0.81	0.55	0.00	1.23	1.32	0.65	0.44	0.00	0.77	0.36	0.00	0.81	0.43	0.00	0.70	0.46	0.00	0.65	0.47	0.00	0.83	0.55	0.00
Na	0.01	0.41	0.07	1.09	1.01	0.01	0.49	0.08	0.00	0.47	0.09	0.01	0.51	0.08	0.00	0.42	0.08	0.01	0.40	0.07	0.01	0.40	0.07
K	0.00	0.00	0.86	0.10	0.12	0.00	0.00	0.73	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00	0.73	0.00	0.00	0.82
Cations	8.01	3.99	6.98	15.43	15.45	7.94	3.99	6.89	7.93	3.99	6.83	7.96	4.00	6.91	7.91	4.01	6.88	7.92	4.00	6.88	7.99	3.99	6.94



续表 2

样品	E0637						E0653						E0665						E1011						P2205										
	Grt	Omp	Phen	Grt	Omp	Phen	Grt	Omp	Phen	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	Bar	Grt	Omp	Phen	Grt	Omp	Phen	Grt	Omp	Phen	Bar	Bar	Bar	Grt	Omp	Phen	Grt	Omp
SiO <sub>2</sub>	38.52	55.97	51.16	38.41	56.07	51.45	37.95	54.75	54.47	49.96	49.41	51.96	49.49	51.77	51.86				37.7	54.33	51.11	38.29	55.39	52.54	37.49	55.13	53.24	47.17	47.95	46.32	37.49	55.13	53.24		
TiO <sub>2</sub>	0.10	0.03	0.48	0.04	0.08	0.47	0.10	0.06	0.28	0.23	0.23	0.23	0.26	0.15	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.59	0.15	0.06	0.65	0.13	0.08	0.17	0.45	0.42	0.32	0.13	0.08	0.17		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.53	7.66	27.05	21.54	7.51	26.53	20.87	8.93	26.66	10.48	10.34	6.58	10.54	6.61	6.53		21.04	7.99	21.04	7.99	26.66	21.05	9.44	28.11	21.11	8.94	24.84	11.59	10.44	10.05	21.11	8.94	24.84		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.18	0.00	0.03	0.00		0.01	0.05	0.01	0.05	0.04	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00		
FeO	29.52	8.18	3.59	27.93	7.86	3.49	28.04	7.42	3.34	13.10	13.75	11.89	13.33	11.31	11.71		28.76	7.72	28.76	7.72	3.17	29.24	8.13	3.34	29.97	7.54	2.94	13.91	13.87	18.35	29.97	7.54	2.94		
MnO	0.20	0.03	0.02	0.27	0.00	0.00	0.23	0.03	0.03	0.08	0.04	0.07	0.07	0.06	0.03		0.22	0.04	0.22	0.04	0.00	0.29	0.04	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00	0.07	0.05	0.23	0.00	0.00		
MgO	2.18	8.88	3.21	2.69	8.77	3.42	1.90	7.36	3.69	11.04	11.31	13.88	10.96	14.42	13.68		2.34	8.29	2.34	8.29	3.23	1.87	6.70	3.08	1.99	7.99	4.12	11.26	11.41	8.81	1.99	7.99	4.12		
CaO	8.31	12.65	0.01	9.08	13.26	0.00	10.30	13.03	0.05	6.60	6.94	8.42	6.71	8.48	8.63		9.73	14.39	9.73	14.39	0.00	9.84	11.88	0.00	9.60	13.06	0.00	8.50	8.35	8.36	9.60	13.06	0.00		
Na <sub>2</sub> O	0.00	6.00	0.63	0.00	5.79	0.55	0.03	6.95	0.55	4.71	4.59	3.27	4.63	3.15	3.23		0.02	5.97	0.02	5.97	0.51	0.04	6.92	0.53	0.00	6.84	0.25	3.74	3.71	3.56	0.00	6.84	0.25		
K <sub>2</sub> O	0.00	0.02	8.85	0.00	0.01	9.31	0.00	0.01	9.99	0.27	0.28	0.20	0.34	0.23	0.22		0.00	0.02	0.00	0.02	10.21	0.00	0.01	9.76	0.00	0.00	10.12	0.64	0.41	0.24	0.00	0.00	10.12		
合计	100.37	99.42	95.01	99.96	99.37	95.23	99.42	98.54	99.06	96.47	96.91	96.68	96.33	96.21	96.01		99.93	98.92	99.93	98.92	95.52	100.77	98.61	98.04	100.52	99.58	95.68	97.29	96.66	96.09	100.52	99.58	95.68		
O	12	6	11	12	6	11	12	6	11	23	23	23	23	23	23		12	6	12	6	11	12	6	11	12	6	11	23	23	23	12	6	11		
Si	3.04	2.03	3.41	3.03	2.04	3.43	3.03	1.99	3.49	7.22	7.12	7.45	7.18	7.42	7.50		3.00	1.98	3.00	1.98	3.41	3.02	2.02	3.40	2.98	1.98	3.53	6.84	6.98	6.93	2.98	1.98	3.53		
Al <sup>IV</sup>	0.00	0.00	0.59	0.00	0.00	0.57	0.00	0.01	0.51	0.78	0.88	0.55	0.82	0.58	0.50		0.00	0.02	0.00	0.02	0.59	0.00	0.00	0.60	0.02	0.02	0.47	1.16	1.02	1.07	0.02	0.02	0.47		
Al <sup>VI</sup>	2.00	0.33	1.54	2.00	0.32	1.51	1.96	0.37	1.50	1.00	0.88	0.56	0.98	0.54	0.62		1.97	0.32	1.97	0.32	1.51	1.96	0.41	1.55	1.96	0.36	1.47	0.82	0.78	0.70	1.96	0.36	1.47		
Ti	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01		0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.05	0.05	0.04	0.01	0.00	0.01		
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	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		
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.03	0.12	0.00	0.01	0.12	0.00	0.12	0.05	0.31	0.47	0.40	0.34	0.49	0.23		0.00	0.11	0.00	0.11	0.08	0.00	0.03	0.07	0.00	0.13	0.06	0.42	0.42	0.55	0.00	0.13	0.06		
Fe <sup>2+</sup>	1.95	0.21	0.07	1.84	0.23	0.08	1.87	0.10	0.12	1.27	1.19	1.03	1.28	0.87	1.18		1.91	0.13	1.91	0.13	0.10	1.93	0.21	0.11	1.99	0.10	0.11	1.27	1.27	1.75	1.99	0.10	0.11		
Mn	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00		0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00		
Mg	0.26	0.48	0.32	0.32	0.48	0.34	0.23	0.40	0.35	2.38	2.43	2.97	2.37	3.08	2.95		0.28	0.45	0.28	0.45	0.32	0.22	0.36	0.30	0.24	0.43	0.41	2.44	2.48	1.96	0.24	0.43	0.41		
Ca	0.70	0.49	0.00	0.77	0.52	0.00	0.88	0.51	0.00	1.02	1.07	1.29	1.04	1.30	1.34		0.83	0.56	0.83	0.56	0.00	0.83	0.46	0.00	0.82	0.50	0.00	1.32	1.30	1.34	0.82	0.50	0.00		
Na	0.00	0.42	0.08	0.00	0.41	0.07	0.00	0.49	0.07	1.32	1.28	0.91	1.30	0.88	0.91		0.00	0.42	0.00	0.42	0.07	0.01	0.49	0.07	0.00	0.48	0.03	1.05	1.05	1.03	0.00	0.48	0.03		
K	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.79	0.00	0.00	0.82	0.05	0.05	0.04	0.06	0.04	0.04		0.00	0.00	0.00	0.87	0.00	0.00	0.00	0.81	0.00	0.00	0.86	0.12	0.08	0.05	0.00	0.00	0.86		
Cations	7.96	3.99	6.90	7.97	4.01	6.93	7.99	3.99	6.92	15.39	15.41	15.26	15.41	15.23	15.28		8.01	3.99	8.01	3.99	6.98	7.99	3.98	6.94	8.02	4.00	6.94	15.49	15.44	15.43	8.02	4.00	6.94		

注: 氧化物含量为%

表3 羌塘中部高压变质带中蓝片岩和石榴白云母片岩中部分矿物的成分分析结果  
**Table 3 Representative mineral analysis in blueschists and garnet phengite schists from the HP metamorphic belt, central Qiangtang**

样品名称 矿物	P22b50 石榴白云母片岩						P22b51 蓝片岩						P22b53 蓝片岩																
	Grt	Phen	Phen	Grt	Phen	Phen	Grt	Phen	Bar(R)	Glau(C)	Glau(C)	Glau	Grt	Phen	Phen	Grt	Phen	Phen	Grt	Phen	Phen	Grt	Phen	Phen					
SiO <sub>2</sub>	36.99	50.70	50.56	37.11	37.30	51.22	52.28	37.34	37.35	51.72	50.14	51.83	57.23	56.93	52.36	55.40	55.87	55.84	37.71	37.61	51.57	50.42	53.30	56.38	54.75	56.42	55.62	56.39	
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.05	0.43	0.53	0.10	0.12	0.26	0.33	0.22	0.11	0.30	0.59	0.16	0.02	0.04	0.18	0.08	0.06	0.13	0.15	0.16	0.30	0.43	0.23	0.07	0.15	0.06	0.05	0.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.10	21.83	30.11	30.76	21.13	21.32	28.86	29.24	20.56	21.11	26.18	25.47	7.53	9.80	10.07	7.55	11.79	11.42	9.89	21.12	21.46	27.02	28.57	26.64	10.34	11.15	10.06	10.97	9.95
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.02	0.05	0.02	0.08	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.02	0.32	0.00	0.40	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
FeO	36.51	35.18	2.10	2.14	31.96	34.23	2.76	2.58	29.78	30.09	4.59	4.65	15.49	13.75	13.59	15.28	13.12	13.23	13.45	28.03	27.85	3.14	2.83	3.14	11.57	12.80	11.56	12.13	12.13
MnO	1.58	1.54	0.07	0.03	1.90	0.47	0.00	0.00	0.73	0.63	0.00	0.01	0.06	0.00	0.07	0.01	0.00	0.03	0.03	0.62	1.66	0.02	0.04	0.05	0.11	0.09	0.08	0.07	0.07
MgO	3.61	3.40	2.51	2.35	1.05	1.54	2.76	2.84	1.41	1.48	3.35	3.28	11.66	9.00	9.13	11.31	8.74	8.64	8.85	1.96	1.60	3.30	2.88	3.47	10.43	10.06	10.70	9.77	10.55
CaO	0.91	2.03	0.00	0.00	7.84	6.51	0.02	0.00	9.76	9.47	0.00	0.01	6.42	0.90	0.95	6.01	1.03	1.30	0.89	10.13	10.50	0.00	0.11	0.00	1.82	3.07	1.52	1.75	1.75
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.08	0.92	0.91	0.06	0.03	0.52	0.30	0.04	0.02	0.36	0.34	4.72	7.72	7.40	4.80	7.42	7.75	7.46	0.00	0.04	0.43	0.87	0.32	7.12	6.61	6.93	7.05	6.33
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	8.91	8.84	0.02	0.00	9.48	8.75	0.00	0.00	10.13	9.64	0.34	0.01	0.02	0.30	0.04	0.07	0.04	0.01	0.00	9.60	8.82	9.99	0.04	0.11	0.03	0.05	0.03
合计	100.9	101.4	95.8	96.1	101.5	95.9	96.3	99.9	100.3	96.7	94.2	98.2	98.4	98.2	97.8	97.7	98.4	96.6	100.1	100.9	95.8	95.0	97.1	97.9	98.8	97.4	97.5	97.3	97.3
O	12	12	11	11	12	11	11	12	12	11	11	11	23	23	23	23	23	23	23	12	12	11	11	11	23	23	23	23	23
Si	2.97	2.96	3.33	3.31	2.97	2.97	3.38	3.40	3.00	2.98	3.43	3.42	7.39	7.94	7.89	7.48	7.78	7.89	2.99	2.97	3.42	3.35	3.48	7.80	7.59	7.80	7.75	7.79	
Al <sup>IV</sup>	0.03	0.04	0.67	0.69	0.03	0.03	0.62	0.60	0.00	0.02	0.57	0.58	0.61	0.06	0.12	0.52	0.29	0.22	0.12	0.01	0.03	0.58	0.65	0.52	0.20	0.41	0.20	0.25	0.21
Al <sup>VI</sup>	1.96	2.00	1.66	1.68	1.96	1.97	1.62	1.64	1.94	1.97	1.47	1.46	6.65	1.54	1.53	0.75	1.65	1.66	1.53	1.97	1.97	1.53	1.59	1.53	1.49	1.41	1.44	1.55	1.41
Ti	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
Cr	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	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.09	0.05	0.04	0.04	0.09	0.07	0.06	0.04	0.05	0.05	0.18	0.19	0.60	0.17	0.31	0.51	0.30	0.06	0.24	0.00	0.05	0.10	0.10	0.05	0.24	0.26	0.43	0.26	0.56
Fe <sup>2+</sup>	2.34	2.28	0.08	0.08	2.04	2.20	0.09	0.10	1.95	1.96	0.07	0.07	1.25	1.43	1.27	1.31	1.23	1.48	1.35	1.87	1.79	0.07	0.06	0.12	1.10	1.23	0.91	1.15	0.84
Mn	0.11	0.10	0.00	0.00	0.13	0.03	0.00	0.00	0.05	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.11	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.43	0.40	0.25	0.23	0.13	0.18	0.27	0.28	0.17	0.18	0.33	0.33	2.48	1.86	1.89	2.41	1.81	1.79	1.86	0.23	0.19	0.33	0.29	0.34	2.15	2.08	2.21	2.03	2.17
Ca	0.08	0.17	0.00	0.00	0.67	0.56	0.00	0.00	0.84	0.81	0.00	0.00	0.98	0.13	0.14	0.92	0.15	0.19	0.14	0.86	0.89	0.00	0.01	0.00	0.27	0.46	0.23	0.26	0.26
Na	0.01	0.01	0.12	0.12	0.01	0.01	0.07	0.04	0.01	0.00	0.05	0.04	1.31	2.08	1.99	1.33	2.00	2.09	2.04	0.00	0.01	0.06	0.11	0.04	1.91	1.78	1.86	1.90	1.70
K	0.00	0.00	0.75	0.74	0.00	0.00	0.80	0.73	0.00	0.00	0.86	0.84	0.06	0.00	0.00	0.06	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.81	0.75	0.83	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
Cations	8.03	8.02	6.91	6.91	8.03	8.03	6.92	6.84	8.02	8.01	6.98	6.97	15.35	15.21	15.13	15.30	15.16	15.30	15.18	8.00	8.02	6.93	6.93	6.92	15.19	15.25	15.09	15.17	14.96

注: C=核部, R=边部

之间。

蓝片岩中的角闪石的含量较多, 约占岩石组分的 50%, 角闪石多呈半自形—自形板柱状, 粒度在 0.3~0.8 mm 之间。多数角闪石呈蓝绿色, 多色性明显, 个别呈蓝紫色(蓝闪石)。电子探针分析显示, 角闪石主要为蓝闪石和冻蓝闪石, 其中冻蓝闪石一般构成蓝闪石退变反应边(图 7, 图版 II -e, f, 表 3), 而多数蓝闪石表现为退变残余结构, 蓝闪石边部退变为冻蓝闪石。

### 2.5 其他变质矿物

除上述矿物外, 榴辉岩中还含有少量的绿帘石、金红石、榍石、磷灰石、斜长石、石英等矿物, 它们总含量不超过 5%, 其中绿帘石和金红石含量相对较多。绿帘石可以稳定在很宽的温度和压力范围之内, 是高压变质作用中极为普通的矿物。羌塘榴辉岩中的绿帘石多呈细粒状产在基质中, 局部可见绿帘石脉体, 大多为后期退化变质作用形成的。金红石呈不规则粒状、柱状产出, 且多发生了退变质, 形成榍石环绕在金红石颗粒周围。

## 3 榴辉岩变质作用 $pTt$ 轨迹

### 3.1 榴辉岩形成时的温度和压力估算

羌塘中部榴辉岩的主要矿物组合为 Grt+Omp+Phen+Rut。本文榴辉岩变质温压的计算主要根据 Ravn<sup>[14]</sup> 的  $Fe^{2+}$ -Mg 交换温度计和来自以下反应式的内部一致温压方程式:



榴辉岩相变质温度计算是通过共生的绿辉石和成分环带不明显的细粒石榴子石或石榴子石边缘成分的  $Fe^{2+}$ -Mg 分配系数( $K_D$ )进行的。设定它们在榴辉岩相变质过程中达到了平衡。绿辉石的  $Fe^{3+} = Na - (Al^VI + Cr)$ , 石榴子石的 TFe 作为  $Fe^{2+}$  考虑。所选择的分析位置主要在石榴子石的边部, 尤其是和绿辉石接触的具有平衡边结构的部位。根据石榴子石-单斜辉石地质温度计估算榴辉岩平衡温度为 416~537°C, 平均为 475°C, 据石榴子石-单斜辉石-多硅白云母组合地质压力计<sup>[15]</sup>, 估计其压力为 1.99~2.62 GPa, 平均为 2.3 GPa。然后再设定压力为 2.3 GPa

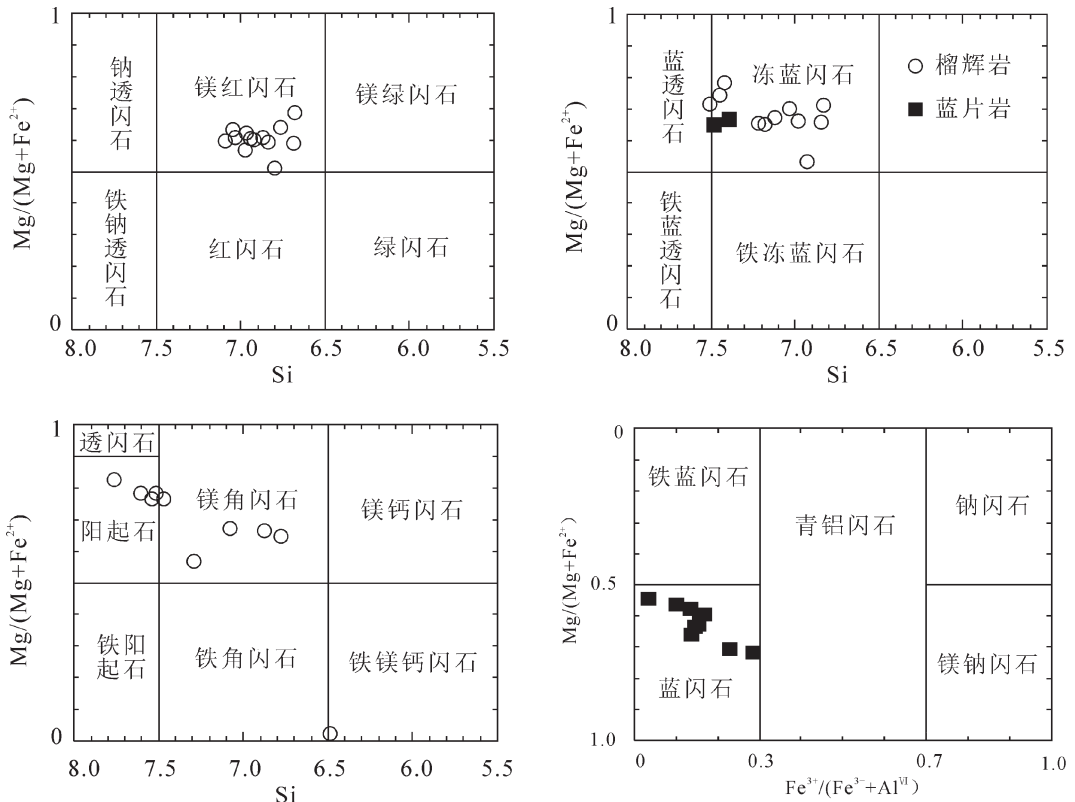


图 7 榴辉岩和蓝片岩中角闪石分类图解<sup>[13]</sup>

Fig. 7 Classification of amphiboles of eclogite and blueschist

时,采用 Erling<sup>[16]</sup>、Powell<sup>[17]</sup>和 Ellis 等<sup>[18]</sup>的温度计公式,对榴辉岩形成的温度进行校正:

$$T(K)=[3104X_{Ca}+3030+10.86p(kb)] / (\ln K_D+1.9034)^{[16]}$$

$$T(K)=(2790+10p+3140X_{Ca})/(1.735+\ln K_D)^{[17]}$$

$$T(K)=[-6173(X_{Ca})^2+6731X_{Ca}+1879+10p(kb)] / (\ln K_D+1.393)^{[18]}$$

式中: $X_{Ca}=Ca/(Ca+Mg+Fe+Mn)$ (石榴子石); $K_D=(X_{Fe^{2+}}/X_{Mg})^{Grt}/(X_{Fe^{2+}}/X_{Mg})^{Cpx}$ 。得到榴辉岩变质作用温度分别为 499~643°C、475~621°C和 447~597°C(表 4)。

### 3.2 榴辉岩变质作用 $p-T$ 轨迹

根据羌塘中部榴辉岩的结构和矿物之间的共生关系,至少可以识别出下述 3 个阶段的变质作用(图 8)。

#### (1) 峰期榴辉岩相变质作用阶段

羌塘中部榴辉岩峰期变质矿物组合为 Grt+Omp+Phen+Rt, 根据石榴子石-单斜辉石-多硅白云母地质温压计,对其温度和压力条件进行估算,获得了约 500°C、2.3GPa 的温度和压力条件。对该榴辉岩峰期变质作用的年代, Pullen 等<sup>[10]</sup> 获得了 237~244 Ma 石榴子石 Lu-Hf 等时线年龄,笔者等对榴辉岩中的锆石进行的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 定年获得了 237Ma±4 Ma 和 230 Ma±3 Ma 的年龄(翟庆国等,未发表资料),认为它代表羌塘中部榴辉岩峰期变质作用的年代。

#### (2) 绿帘角闪岩相变质作用阶段

榴辉岩在折返减压过程中绿辉石发生分解形成角闪石,金红石转变为榍石。冻蓝闪石、镁红闪石、绿帘石、钠长石等的存在,说明榴辉岩退变质作用经历了绿帘角闪岩相变质作用。变质反应在岩石折返过程中是非平衡反应,不能进行温压条件计算,但根据矿物组合推测其温压条件为  $T \approx 450^\circ\text{C}$ ,  $p < 1.0\text{GPa}$ 。

#### (3) 绿片岩相变质作用阶段

榴辉岩最后折返到地表,以形成毛发状阳起石等矿物为特征,主要形成于前期矿物的边缘或裂隙中,变质作用温度小于 400°C,压力小于 0.5GPa。榴辉岩及其围岩的多硅白云母年龄为 214~219Ma 和 217~223Ma<sup>[9]</sup>(翟庆国等,未发表资料),代表榴辉岩折返到地表的年代。

## 4 地质意义

羌塘中部地区低温高压变质带的构造演化过程,目前来说有 4 种观点:①原位的古特提斯洋缝合带,是羌南板块向羌北板块俯冲消减的产物<sup>[1-2,20]</sup>;②早中生代变质核杂岩,是金沙江缝合带向南俯冲消减的再次隆起<sup>[4,21-22]</sup>;③晚古生代裂谷<sup>[23-25]</sup>;④三叠纪羌塘地块与古特提斯岛弧的陆陆碰撞带<sup>[10]</sup>。近年来,羌塘中部蓝片岩、榴辉岩和蛇绿混杂岩的研究表明,羌塘中部存在一条古特提斯板块缝合带<sup>[1-3,7]</sup>,从而否定了裂谷和变质核杂岩的观点。那么羌塘中部榴辉岩的形成是大洋俯冲作用的结果还是大陆碰撞的产物?

大洋俯冲型榴辉岩形成于俯冲带,多呈透镜状产于蓝片岩中,并和蛇绿岩、混杂堆积等相伴生,相当于 Coleman<sup>[11]</sup>分类中的 C 型(低温)榴辉岩,典型地区如环太平洋带 Franciscan 杂岩,日本的三波川变质带<sup>[26-27]</sup>,中国的西南天山榴辉岩<sup>[28-29]</sup>、北祁连榴辉岩<sup>[30-36]</sup>等地。大陆碰撞型榴辉岩主要形成于大陆碰撞结合带,多呈透镜状产在花岗片麻岩、副片麻岩、大理岩、石榴橄榄岩等岩石中。典型地区如中国秦岭-大别-苏鲁碰撞造山带和欧洲的加里东带、海西带、特提斯带。

表 4 榴辉岩温压条件估算结果

Table 4  $p-T$  estimated results of eclogites

样品号	参考文献[15]		参考文献[16]	参考文献[17]	参考文献[18]
	$p/\text{GPa}$	$T/^\circ\text{C}$	$T/^\circ\text{C}$ (2.3GPa)	$T/^\circ\text{C}$ (2.3GPa)	$T/^\circ\text{C}$ (2.3GPa)
0601-5	2.23	499.32	562.39	539.44	513.80
0622-1	2.31	453.36	571.94	547.41	511.41
0622-2	2.62	537.63	635.70	612.93	588.52
0622-3	1.99	453.04	498.73	475.34	446.78
0622-4	2.41	462.21	552.55	529.45	503.12
0622-5	2.50	473.70	593.14	569.23	538.04
0622-6	2.43	437.00	543.24	518.56	481.86
0637-1	2.37	512.11	580.21	557.47	532.87
0637-2	2.20	437.16	558.45	534.40	502.79
0637-5	2.58	514.93	643.35	620.75	597.26
0637-11	2.07	416.08	521.59	497.03	461.52
0641-7	2.16	492.28	539.24	516.28	490.07
0641-10	2.36	504.07	619.88	597.55	575.03
0653-1	2.39	450.57	504.07	481.33	454.47
平均	2.33	474.53	566.04	542.66	514.11

羌塘中部榴辉岩是青藏高原北部地区已报道的唯一一处榴辉岩,它与蓝片岩、蛇绿混杂岩和洋岛型玄武岩共同构成了羌塘中部地区古特提斯板块缝合带<sup>[1-8,37]</sup>。榴辉岩与蓝片岩和石榴白云母片岩共生,并且该地区还出露有蛇绿岩和洋岛型岩石组合<sup>[24,37]</sup>,说明羌塘中部特提斯大洋的存在。此外,已有的研究表明,蓝片岩原岩为洋岛型玄武岩<sup>[38]</sup>,榴辉岩的地球化学特征与蓝片岩一致(翟庆国未发表数据),因此,榴辉岩原岩可能为该地区广泛出露的洋岛型玄武岩。硬柱石榴辉岩是冷洋壳俯冲的结果,但硬柱石很难保存,在榴辉岩折返的过程中很容易分解而转变为绿帘石、钠云母等矿物<sup>[39-41]</sup>,因此,目前世界上硬柱石榴辉岩的报道仅有十几处,并多数位于特提斯构造域内<sup>[39,41-42]</sup>,中国最典型的硬柱石榴辉岩产在祁连山地区<sup>[35-36]</sup>。羌塘中部榴辉岩的温度和压力条件为约 500°C和约 2.3GPa,位于典型硬柱石榴辉岩的稳定区域(图 8)<sup>[19]</sup>。此外,榴辉岩的围岩也未发现花岗片麻岩等典型的陆壳物质,因此笔者认为,羌塘中部的榴辉岩可能是三叠纪古特提斯洋闭合、冷洋壳俯冲消减的产物。

致谢:成文过程中得到肖序常院士的指导,并与宋述光副教授、张建新研究员进行了深入的讨论,使笔者受益匪浅,电子探针分析得到北京大学舒桂明高级工程师和中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇博士的帮助,在此一并致以衷心的感谢。

## 参考文献

- [1]李才,程立人,胡克,等.西藏龙木错-双湖古特提斯缝合带研究[M].北京:地质出版社,1995.
- [2]鲍佩声,肖序常,王军,等.西藏中北部双湖地区蓝片岩带及其构造涵义[J].地质学报,1999,73(4):302-314.
- [3]邓希光,丁林,刘小汉,等.藏北羌塘中部冈玛日-桃形错蓝片岩的发现[J].地质科学,2000,35(2):227-232.
- [4]Kapp P, An Yin, Manning C E, et al. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. Tectonics, 2003, 22, No. 4, 1043, doi: 1029/2002TC001386.
- [5]陆济璞,张能,黄位鸿,等.藏北羌塘中部红脊山地区蓝闪石+硬柱石变质矿物组合的特征及意义[J].地质通报,2006,25(1/2):70-75.
- [6]朱同兴,张启跃,董瀚,等.藏北双湖地区才多茶卡一带构造混杂岩中发现晚泥盆世和晚二叠世放射虫硅质岩[J].地质通报,2006,25(12):1413-1418.

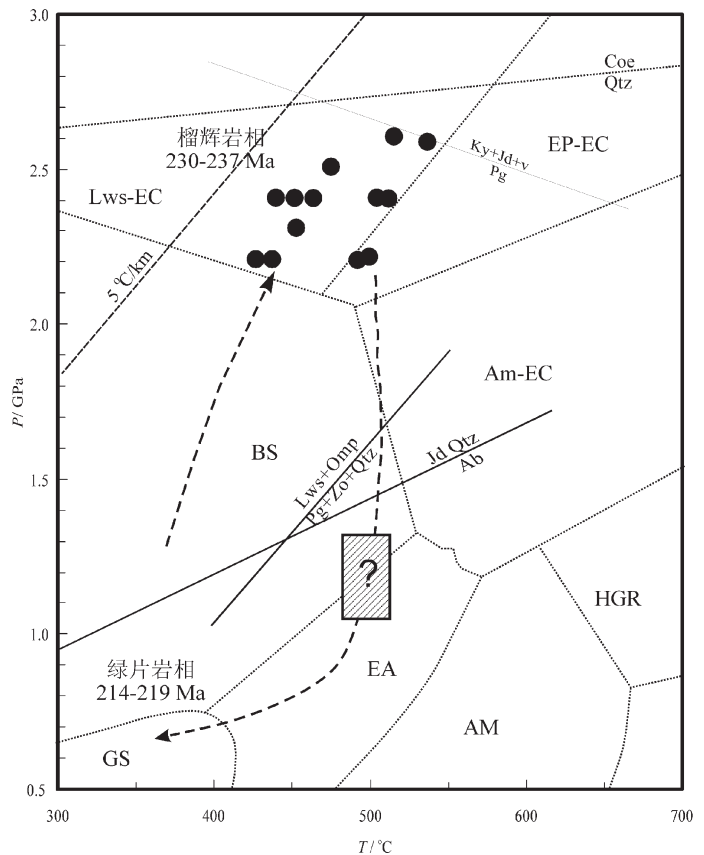


图 8 西藏羌塘中部榴辉岩的  $p-T-t$  轨迹(底图据参考文献[19])

Fig. 8  $p-T-t$  path of eclogite in central Qiangtang area, Tibet  
GS—绿片岩相;BS—蓝片岩相;EA—绿帘角闪岩相;AM—角闪岩相;HGR—高压麻粒岩相;AM-EC—角闪榴辉岩相;EP-EC—绿帘榴辉岩相;Lws-EC—硬柱石榴辉岩相

- [7]李才,翟庆国,董永胜,等.青藏高原羌塘中部发现榴辉岩及其意义[J].科学通报,2006,51(1):70-74.
- [8]Zhang K J, Cai J X, Zhang Y X, et al. Eclogites from central Qiangtang, northern Tibet (China) and tectonic implication[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 245:722-729.
- [9]李才,翟庆国,陈文,等.青藏高原羌塘中部榴辉岩 Ar-Ar 定年[J].岩石学报,2006,22(12):2843-2849.
- [10]Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, et al. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleotethys Ocean[J]. Geology, 2008, 36: 351-354.
- [11]Coleman R G, Lee D E, Beatty L B, et al. Eclogites: their differences and similarities[J]. Geological Society America Bulletin, 1965, 76:483-508.
- [12]Clarke G L, Aitchison J C, Cluzel D. Eclogites and blueschists of Pam Peninsula, NE New Caledonia: a reappraisal[J]. Journal of Petrology, 1997, 38: 843-876.
- [13]Leake B E. Nomenclature of amphiboles[J]. Canadian Mineralogist, 1978, 16: 501-520.

- [14] Ravna E J K. The garnet-clinopyroxene Fe<sup>2+</sup>-Mg geothermometer: an updated calibration [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18:211-220.
- [15] Ravna E J K, Terry M P. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists—an evaluation of equilibria among garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2004, 22: 579-592.
- [16] Erling J Krogh. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer—a reinterpretation of existing experimental data[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 99: 44-48.
- [17] Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1985, 3: 231-243.
- [18] Ellis D J, Green E H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 71:13-22.
- [19] Liou J G, Zhang R Y, Ernst W G. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks[J]. *Review in Mineralogy*, 1998, 37: 33-96.
- [20] Zhang K J, Zhang Y X, Li b. The blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt (northern Tibet, China) as an in situ suture zone: Evidence from geochemical comparison with the Jinsa suture[J]. *Geology*, 2006, 34:493-496.
- [21] Kapp P, Yin A, Manning C E, et al. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet[J]. *Geology*, 2000, 28:19-22.
- [22] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibet orogen[J]. *Annual Review of the Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28:211-280.
- [23] 王成善, 胡承祖, 吴瑞忠, 等. 西藏北部查桑-茶布裂谷的发现及其地质意义[J]. *成都地质学院学报*, 1987, 14(2): 33-46.
- [24] 尹集祥. 青藏高原及邻区冈瓦纳相地层地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-121.
- [25] 邓万明, 尹集祥, 冯中平. 羌塘茶布-双湖地区基性超基性岩、火山岩研究[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(4): 296-301.
- [26] Ernst W G. Mineral parageneses in Franciscan metamorphic rocks, Panoche Pass, California[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76:879-914.
- [27] Ernst W G. Tectonic contact between the Franciscan mélange and the Great Valley Sequence crustal expression of a late Mesozoic Benioff zone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75: 886-901.
- [28] Gao J, Klemd R, Zhang L, et al. PT path of high-pressure metamorphic rocks and its tectonic implication in western Tianshan, northwest China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1999, 17: 621-636.
- [29] 张立飞, 艾永亮, 李强, 等. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化[J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1029-1038.
- [30] Wu H Q, Feng Y M, Song S G. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1993, 11:523-536.
- [31] Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, northern Tibet, NW China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21:631-644.
- [32] Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites in the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China[J]. *Lithos*, 2003, 70:195-211.
- [33] Song S G, Zhang L F, Niu Y L. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China [J]. *American Mineralogist*, 2004, 89: 1330-1336.
- [34] Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet-peridotite in the North Qaidam UHPM belt, North Tibetan Plateau: a record of complex histories associated with continental collision[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2005, 234: 99-118.
- [35] Song S, Zhang L, Niu Y, et al. Eclogite and carpholite-bearing metasedimentary rocks in the North Qilian suture zone, NW China: implications for Early Palaeozoic cold oceanic subduction and water transport into mantle[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25: 547-563.
- [36] Zhang J X, Meng F C, Wan Y S. A cold early Palaeozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: petrological and U-Pb geochronological constraints [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25: 285-304.
- [37] 翟庆国, 李才, 黄小鹏. 西藏羌塘中部古特提斯洋残片——来自果干加年山变质基性岩地球化学证据[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(7): 866-872.
- [38] 邓希光, 丁林, 刘小汉, 等. 青藏高原羌塘中部蓝片岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2002, 18(4): 517-525.
- [39] Zack T, Rivers T, Brumm R, et al. Cold subduction of oceanic crust: implication from a lawsonite eclogite from the Dominican Republic[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2004, 16: 909-916.
- [40] Whitney D L, Davis P B. Why is lawsonite eclogite so rare? Metamorphism and preservation of lawsonite eclogite, Sivrihisar, Turkey [J]. *Geology*, 2006, 34: 473-476.
- [41] Tsujimori T, Sisson V B, Liou J G, et al. Very-low-temperature record of the subduction process: a review of worldwide lawsonite eclogites[J]. *Lithos*, 2006, 92: 609-624.
- [42] Agard P, Labrousse L, Elvevold S, et al. Discovery of Palaeozoic Fe-Mg carpholite in Motalafjella, Svalbard Caledonides: a milestone for subduction-zone gradients[J]. *Geology*, 2005, 33: 761-764.