

西藏定结高喜马拉雅石榴辉石岩—镁铁质麻粒岩的岩石特征及其地质意义

廖群安, 李德威, 易顺华, 卢 练

(中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 在高喜马拉雅带的定日县曲当—扎乡一带出露的高喜马拉雅结晶岩系中, 发现了高压变质的石榴辉石岩及其降压变质的镁铁质麻粒岩组合, 早期高压条件下形成的石榴辉石岩矿物组合为 Grt+Cpx(富铝)+Ru+Q, 斜长石已完全消失, 形成温度为 845~896 °C, 压力大于 1.2 GPa, 已达到榴辉岩相的压力条件. 中期的麻粒岩相组合为 Opx+Pl±Cpx±Ga, 其中 Opx、Cpx 和 Pl 为石榴石的后成合晶, 形成温度为 993~776 °C, 压力为 0.90~1.21 GPa, 为中压麻粒岩相产物, 晚期矿物仅见普通角闪石、斜长石和石英, 是角闪岩相退变质的产物, 表明 HHC 经历了降压升温—降压降温的快速抬升过程, 证明其抬升作用与地幔热源的参与有关.

关键词: 高喜马拉雅; 聂拉木群; 石榴辉石岩.

中图分类号: P58 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)06-0627-07

作者简介: 廖群安(1959—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石学及岩石地球化学研究.

E-mail: qanlian@cug.edu.cn

1 概述

近年来对喜马拉雅造山带的研究已取得一些重要的进展, Pognante 等^[1]在高喜马拉雅构造带西构造结巴基斯坦北部的 Babusar Pass 地区和 Kaghan 山谷发现了始新世的榴辉岩和麻粒岩, 继后 Guillot 等^[2]又在西构造结印度西北部的 Tso Moriri 地区发现了榴辉岩, Zhong 等^[3,4]和刘焰等^[5,6]在东喜马拉雅构造结的大拐弯一带发现了高压麻粒岩. 这些发现引起了国内外的广泛关注, 对研究喜马拉雅造山带早期的碰撞和后期的隆升均具有十分重大的意义. 在喜马拉雅带中段, Lombardo 和 Rolfo^[7]曾根据马卡鲁附近的镁铁质变质岩中石榴石和辉石(已消失)典型的降压反应现象, 推测该区可能存在过榴辉岩, 但并未找到真正榴辉岩的矿物组合. 本文工作地区位于西藏定结县境内, 构造位置位于喜马拉雅造山带的高喜马拉雅带中段, 与 Lombardo 报道的退变质榴辉岩的位置相近(图1), 镁铁质麻粒

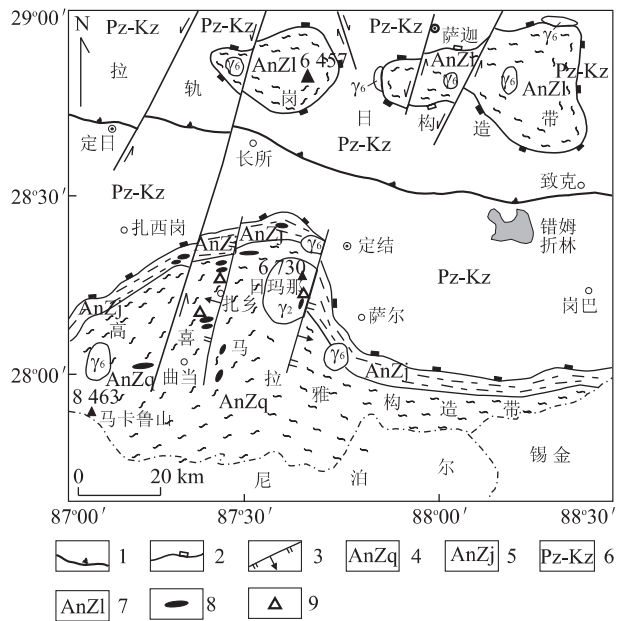


图 1 工作区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of study area

- 1. 构造分区断层; 2. 基底与盖层间的折离断层; 3. 正断层; 4. 聂拉木群曲乡岩组; 5. 聂拉木群江东岩组; 6. 古生代—新生代盖层; 7. 拉轨岗日群; 8. 基性变质岩透镜体; 9. 样品位置

收稿日期: 2003-05-15

基金项目: 中国地质调查局“1:25 万定结幅、陈塘区幅(国内部分)区域地质调查”项目(No. 20001300009231).

岩及其降压退变质产物发现于高喜马拉雅结晶岩系



图 2 片麻岩中的镁铁质麻粒岩透镜体
Fig. 2 Lens of mafic granulite in gneiss

中,岩相学及矿物化学研究发现,其早期的高压矿物组合为 $\text{Grt}(\text{Alm}_{51.56-56.19}\text{Gro}_{19.06} - 28.30\text{Py}_{14.57-19.57}) + \text{Cpx}(\text{富铝}) + \text{Ru} + \text{Q}$, 尽管已达到了由麻粒岩相向榴辉岩相转变的压力条件(斜长石已完全消失),但由于温度和原岩组成(极低 Na_2O)的制约,并未形成榴辉岩的标志矿物绿辉石,只能定名为石榴辉石岩,排除了 Lombardo 和 Rolfo^[7]推测的榴辉岩存在的可能。此外,本次研究亦发现石榴辉石岩降压退变质形成的麻粒岩

相矿物组合 $\text{Opx} + \text{Pl} + \text{Cpx} + \text{Sp}$ 和角闪岩相矿物组合 $\text{Am} + \text{Pl} + \text{Q}$ 记录,对研究喜马拉雅造山带的造山和隆升过程具有重要的意义。

2 样品描述

石榴辉石岩和镁铁质麻粒岩分布十分局限,主要呈透镜体形态产于高喜马拉雅结晶岩系中,围岩为聂拉木群的花岗质片麻岩(图 2)和石英岩及石英片岩。透镜体一般长 80 cm 至 300 cm,厚 30~100 cm。石榴辉石岩仅保存在规模较大的透镜体核部,向边缘逐渐退变质为二辉麻粒岩、榴闪岩和斜长角闪岩。

石榴辉石岩:原始矿物组合为石榴石(15%~25%)、富铝单斜辉石(40%~50%)和石英及少量的金红石,但岩石中降压退变质强烈,石榴石与富铝单斜辉石粒间普遍发育由斜方辉石(10%~20%) + 斜长石(15%~25%)组成的后成合晶,呈放射状、蠕虫状集合体环绕石榴石残晶分布(图 3a, 3b),有时在后成合晶中还可可见蠕虫状的低铝透辉石。富铝单斜辉石内部则被角闪石和斜长石交代穿孔,边缘常具角闪石反应边。金红石在石榴石中呈包裹体产出,多

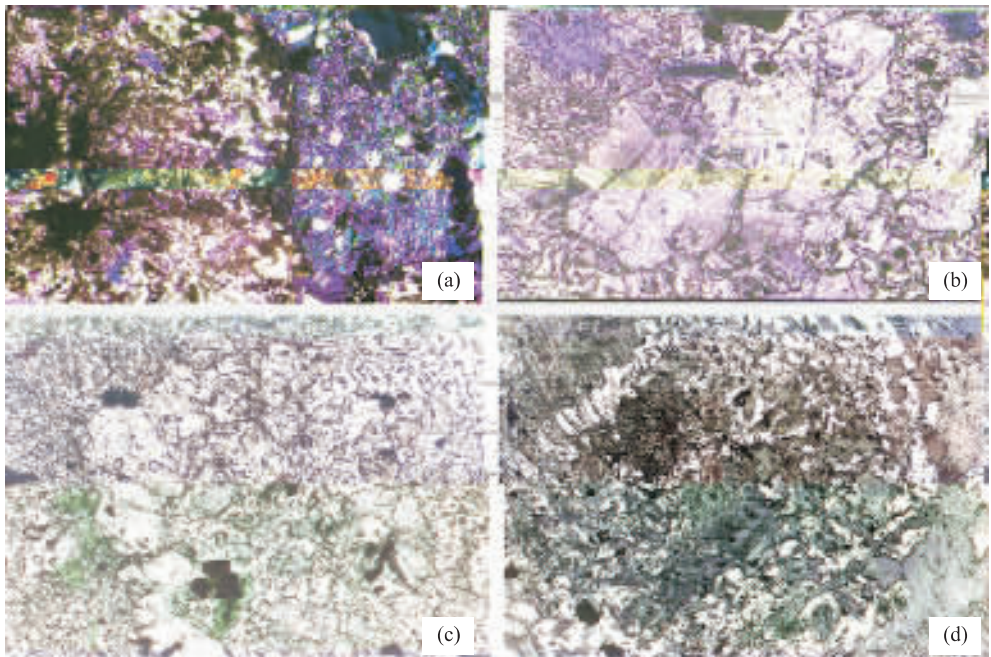


图 3 石榴辉石岩及其降压退变质岩石的岩相学特征

Fig. 3 Petrograph of the garnet-pyroxenite and retrograde rocks by decompression

a. 石榴辉石岩、石榴石和单斜辉石之间发育有 $\text{Opx} + \text{Pl} + \text{Cpx}$ 后成合晶(正交, $50\times$); b. 石榴辉石岩中石榴石周围的蠕虫状后成合晶(单偏光, $100\times$); c. 石榴辉石岩在麻粒岩相退变质,形成以蠕虫状后成合晶($\text{Opx} + \text{Pl} + \text{Cpx}$)为主的麻粒岩相组合(单偏光, $50\times$); d. 由麻粒岩相组合进一步退变质,形成具石榴石假象的斜长角闪岩(单偏光, $50\times$)

被钛铁矿交代。

石榴二辉麻粒岩:石榴辉石岩麻粒岩相退变质的产物,矿物组成为蠕状斜方辉石(20%~25%)、蠕状单斜辉石(5%~10%)、蠕状斜长石(25%~35%)、角闪石(10%~15%)、石英(5%~8%)、黑云母(2%~5%)。其中斜方辉石和斜长石、单斜辉石一起构成蠕状的后成合晶,保留有石榴石的假象,斜方辉石为紫苏辉石,单斜辉石为低铝的透辉石,斜长石成分变化较大,交代石榴石者为原钙长石($w(\text{An}) > 90\%$),与角闪石共生者为拉长石。石榴石和早期的单斜辉石完全消失,或仅存少量的残晶(图3c)。

斜长角闪岩:由石榴二辉麻粒岩进一步退变质形成,其中的辉石+钙长石合晶进一步被角闪石和较酸性的斜长石取代,但仍保留石榴石的晶形假象(图3d),石榴石完全消失。矿物组成为角闪石(45%~50%)、斜长石(35%~40%)、石英(5%~10%)、黑云母(5%~10%)。

3 矿物学特征

本文主要对石榴辉石岩中的原生矿物和其中的麻粒岩相后成合晶及角闪岩相退变质的造岩矿物进行了电子探针分析。测试仪器名称及型号为:电子探针仪 JCSA-733EP120089384;测试环境为温度 20℃,湿度 50%;测试依据:GB/T1570-94。所有数据均在中国地质大学(武汉)测试中心电子探针室完成。

3.1 辉石

电子探针分析结果显示,工作区基性变质岩中的单辉石均为透辉石,但不同变质条件下形成的单斜辉石的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 变化较大:石榴辉石岩中的原生单斜辉, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 高(6.50%~6.89%),并含有较高的 $w(\text{Na}_2\text{O})$ (0.47%~0.67%),含 Jd(2.87%~5.44%) 分子和较高的 CaTs(5.06%) 分子。后成合晶中的单斜辉石 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (4.38%~0.79%) 明显要低,且具有连续降低的特点, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 亦明显降低(0.30%~0.03%),具连续降低的特点, Jd 分子含量由 2.01% 渐降至 0。这种成分变化显然与降压反应有关,表明其形成于一种连续降压的滑变反应过程。斜方辉石只见于后成合晶中,属斜紫苏辉,富 Fs 分子,对早期石榴石的成分具明显的继承性,与单斜辉石一样, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (0.52%~2.67%) 变化范围大,表明是在

连续降压条件下的滑变反应的产物(表1)。

3.2 石榴石

石榴石主要为早期的交代残晶,不同样品中者和由核部到边缘成分有一定的变化,前者反应了原岩组成对石榴石成分的影响,后者则与麻粒岩相的退变质有关。在 0312 样品中,成分环带不明显,石榴石较富 $w(\text{CaO})$ (11.64%~11.73%),但相对低 $w(\text{MgO})$ (3.77%~4.11%)。在 278-4 样中,石榴石显示出较明显的环带构造,核部成分均一,相对于 0312 中者较富 $w(\text{MgO})$ (5.53%~4.94%),低 $w(\text{CaO})$ (8.14%~9.63%),边缘有一宽约 100 m 的反应环带, $w(\text{MgO})$ (2.99%)、 $w(\text{CaO})$ (7.41%) 均有明显的降低,应该与后成合晶中的辉石和斜长石达到了平衡。石榴石核部的主要端元组分变化范围为 $x(\text{Alm}) = 50.97\% \sim 56.19\%$ 、 $x(\text{Gro}) = 19.06\% \sim 28.30\%$ 、 $x(\text{Pyr}) = 14.57\% \sim 20.50\%$,与巴基斯坦境内发现的榴辉岩^[1]中的石榴石的成分十分一致,在 Winkler 的 $\text{Alm} + \text{Sps} - \text{Cro} + \text{And} + \text{Ua} - \text{Pyr}$ 图中,落在 B 型和 C 型榴辉岩的重叠区内。石榴石边缘的反应环带为 $x(\text{Alm}) = 63.73\%$ 、 $x(\text{Gro}) = 16.70\%$ 、 $x(\text{Pyr}) = 12.07\%$,成分投点落在榴辉岩与麻粒岩的重叠区。

3.3 斜长石

斜长石是麻粒岩相退变质阶段的产物,均为基性斜长石,但成分变化较大,不仅与样品有关,在同一样品中的不同产出部位也有明显的变化。在 0312 样品中,斜长石仅在 $\text{Opx} + \text{Cpx} + \text{Pl}$ 后成合晶中出现,为 $x(\text{An}) = 54.70\%$ 的拉长石。在 278-4 样品中,斜长石既存在于石榴石周围的 $\text{Opx} + \text{Pl}$ 后成合晶中,也出现在被交代的单斜辉石内部。前者随与石榴石距离的增加 An 分子降低,在靠近石榴石的放射状后成合晶中, $x(\text{An}) > 90\%$,为罕见的原钙长石。在距离石榴石较远的蠕状后成合晶中为培长石 ($x(\text{An}) = 73.70\%$),而在单斜辉内部由单斜辉石分解出来的斜长石为拉长石 ($x(\text{An}) = 69.2\%$)。可见,斜长石的成分对所交代的矿物也有一定的继承性,其组成的较大变化也表明在降压抬升期间的反应尚未达到平衡,是连续降压过程中滑变反应的结果(表2)。

3.4 角闪石

角闪石多为交代单斜辉石成因,探针分析结果显示主要为镁普通角闪石,个别为镁钙闪石,成分投点均投在角闪岩相区。同样,在同一样品中,角闪石

表 1 辉石的电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe data of pyroxenes

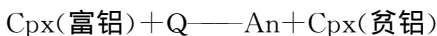
成分	0312								278-4					
	Cpx				Opx				Cpx			Opx		
	残晶		后成合晶		筛状残晶		后成合晶							
SiO ₂	49.87	49.56	49.07	48.06	49.36	49.17	49.85	49.95	50.05	51.31	51.23	50.24	49.33	48.91
TiO ₂	0.32	0.15	0.05	0.21	0.20	0.30	0.14	0.09	0.04	0.01	0.06	0.03	0.01	0.00
Al ₂ O ₃	6.89	6.64	6.50	4.38	3.73	3.53	1.74	0.97	1.02	0.52	0.88	1.12	0.91	0.97
C ₂ O ₃	0.21	0.20	0.12	0.00	0.08	0.06	0.04	0.09	0.10	0.04	0.00	0.00	0.00	0.26
FeO	10.70	10.05	10.57	10.81	8.96	12.00	11.63	12.77	29.39	28.86	14.52	13.74	34.83	36.00
MnO	0.24	0.28	0.38	0.36	0.25	0.33	0.50	0.30	1.17	1.22	0.18	0.34	0.72	0.68
MgO	10.03	10.56	10.35	12.03	13.53	12.50	12.49	12.68	17.25	17.51	10.70	10.54	13.09	11.91
CaO	19.64	20.53	21.83	23.51	23.30	21.38	22.14	22.43	0.54	0.47	20.33	21.82	0.69	0.68
Na ₂ O	0.67	0.55	0.47	0.23	0.03	0.25	0.30	0.20	0.09	0.00	0.16	0.21	0.00	0.00
K ₂ O	0.14	0.10	0.18	0.02	0.08	0.02	0.02	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总量	98.71	98.62	99.52	99.61	99.49	99.54	98.83	99.56	99.64	99.93	98.06	98.04	99.58	99.41
Si	1.90	1.88	1.85	1.808	1.846	1.856	1.897	1.894	1.943	1.979	1.99	1.95	1.97	1.97
Ti	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ^{IV}	0.10	0.12	0.15	0.19	0.15	0.14	0.08	0.04	0.05	0.02	0.01	0.05	0.04	0.03
Al ^{VI}	0.21	0.18	0.14	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01
Fe ⁺³	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.14	0.18	0.07	0.00	0.00	0.07	0.03	0.01
Fe ⁺²	0.34	0.32	0.29	0.34	0.28	0.31	0.23	0.23	0.88	0.93	0.47	0.37	1.13	1.20
Cr	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Mg	0.57	0.60	0.58	0.66	0.75	0.70	0.71	0.72	0.99	1.00	0.62	0.61	0.78	0.71
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02
Ca	0.80	0.84	0.88	0.95	0.93	0.87	0.90	0.91	0.022	0.019	0.85	0.91	0.03	0.03
Na	0.05	0.04	0.03	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
K	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wo	46.61	47.43	48.75	48.47	47.21	46.03	48.39	48.66	1.14	0.95	43.54	45.96	1.48	1.48
En	33.12	33.94	32.16	33.67	38.07	37.04	38.17	38.50	51.24	50.25	31.88	30.89	39.04	36.11
Fs	20.27	18.63	19.09	17.86	14.72	17.99	13.44	12.83	47.62	48.74	24.58	23.16	59.49	62.41
CaTs	5.16	6.21	5.44	3.56	3.43	2.70	0.98	1.42			0.59	3.51		
Jd	5.44	4.40	2.87	2.01	0.00	2.10	0.02	0.02			1.23	0.04		

表中氧化物为质量分数,%;Si,Ti,⋯,Na,K等为原子数;Wo,En,Fs,CaTs,Jd为摩尔分数,%。

的成分也显示出较大的变化范围,以 0312 样品为例,其 $w(\text{SiO}_2)$ 为 40.66%~45.20%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 14.92%~9.27%, $w(\text{MgO})$ 为 6.87%~11.56%。由于角闪石中的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 对压力的反应较灵敏,其较大的变化范围亦反映了不平衡条件的存在,指示本区高压变质岩快速抬升的过程。

4 变质温压条件的估算

综合上述资料可以看出,代表本区峰期变质事件的石榴辉石岩的矿物组合为富铝 $\text{Cpx} + \text{Grt} + \text{Q} + \text{Ru}$,原生矿物中未发现斜长石,而存在于富铝 Cpx 与 Grt 间的降压后成合晶组合为 $\text{Opx} + \text{An} \pm$ 贫铝 Cpx ,表明由石榴辉石岩向二辉石麻粒岩的转变存在着以下变质反应:



Grt+Q——An+Opx

这 2 个反应是高压麻粒岩向中压麻粒岩降压退变质的典型反应,其反应过程则是由麻粒岩向高压麻粒岩、榴辉岩转变的过程,并以斜长石的消失和绿辉石的出现作为榴辉岩相的临界标志^[8],其反应压力在麻粒岩相温度范围(1 000 ℃)附近,视原岩成分的差别变化在 1.2~1.7 GPa 的范围内^[9],由此可见,本区发现的石榴辉石岩至少应是高压麻粒岩相的产物,是喜马拉雅造山带中段高压变质的记录。石榴辉石岩的峰期变质条件实际上已经达到了斜长石完全消失的榴辉岩相的压力条件,其压力条件至少在 1.2 GPa 以上。在斜长石完全消失且岩石中并无其他富钠矿物相的情况下,本区石榴辉石岩中未出现绿辉石的原因应与其原岩的组成有关,对 0312 和 278-4 两个样品的全岩湿化学分析结果表明,2 个样品均具有很低的 $w(\text{Na}_2\text{O})(0.57\% \sim 0.72\%)$,

表 2 石榴石、斜长石和角闪石的电子探针分析结果
Table 2 Electron microprobe data of Grt, Pl and Am

成分	0312		278-4 m				0312		278-4		0312		
	Grt		Grt				Pl	Pl		Am			
	交代残晶		残晶中心至边缘					后成合晶	Cpx 中	反应边			
SiO ₂	36.74	36.66	37.35	39.25	38.49	37.52	53.76	47.46	49.10	55.29	40.66	45.31	45.29
TiO ₂	0.09	0.10	0.03	0.06	0.01	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.22	1.18	1.38
Al ₂ O ₃	21.99	22.00	21.92	20.08	22.20	21.41	29.72	33.66	32.64	29.21	14.92	9.27	9.86
Cr ₂ O ₃	0.05	0.08	0.00	0.13	0.00	0.00	—	—	—	—	0.21	0.03	0.09
FeO	25.04	24.89	25.90	24.44	25.27	28.20	0.11	0.32	0.21	0.48	20.78	16.07	17.38
MnO	0.59	0.50	0.59	0.51	0.47	1.18	0.01	0.00	0.00	0.02	0.18	0.30	0.31
MgO	3.77	4.11	5.53	5.43	4.94	2.99	0.00	0.00	0.00	0.00	6.87	11.56	11.22
CaO	11.73	11.64	9.02	9.63	8.14	7.41	11.24	18.39	15.49	10.72	11.81	11.71	11.11
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.11	1.10	3.00	4.16	0.98	0.83	0.93
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.08	0.29	0.69	0.85	0.98
总量	100.00	99.98	100.34	99.53	99.52	98.71	100.11	100.94	100.52	100.18	97.31	97.10	98.51
Si	2.87	2.86	2.86	2.96	2.98	2.98	4.85	4.36	4.49	4.93	6.12	6.67	6.58
Ti	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.13	0.15
Al ^{IV}	0.13	0.14	0.14	0.04	0.02	0.03	3.16	3.64	3.51	3.07	1.88	1.33	1.42
Al ^{VI}	1.90	1.88	1.84	1.74	2.00	1.97					0.77	0.29	0.27
Fe ⁺³	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.67	0.94
Fe ⁺²	1.56	1.54	1.66	1.73	1.64	1.87	0.01	0.03	0.02	0.04	1.81	1.32	1.17
Cr	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	—	—	—	—	0.03	0.00	0.01
Mn	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04
Mg	0.44	0.48	0.63	0.61	0.57	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	1.54	2.55	2.43
Ca	0.98	0.97	0.74	0.78	0.68	0.63	1.09	1.81	1.52	1.69	1.91	1.86	1.73
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.20	0.53	0.72	0.28	0.23	0.26
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.006	0.001	0.009	0.03	0.13	0.16	0.18
Alm	51.56	50.97	53.99	54.96	56.19	63.73	45.00	9.80	25.90	29.40	(Ab)		
And	4.12	4.11	4.51	4.94	4.12	4.73	54.70	90.20	73.70	69.20	(An)		
Gro	28.30	27.79	19.65	19.30	19.06	16.76	0.30	0.00	0.40	1.30	(Or)		
Pyr	14.57	15.79	20.60	19.35	19.57	12.07							
Spe	1.30	1.09	1.25	1.03	1.06	2.71							
Uva	0.16	0.25	0.00	0.42	0.00	0.00							

表中氧化物为质量分数,%; Si, Ti, ..., Na, K 等为原子数; Wo, En, Fs, CaTs, Jd 为摩尔分数, %.

即使全部的 Na₂O 都进入单斜辉石,也不可能形成绿辉石. 石榴辉石岩的变质温度采用石榴石单斜辉石温度计^[10~12]进行计算,在压力标定为 0.8~1.4 GPa 的范围内,其温度在 845~896 °C 之间很窄的范围内变化.

由石榴辉石岩退变质形成的石榴二辉麻粒岩的代表矿物组合为 Grt(边缘)+Opx+Cpx(低铝)+Pl, 本文用 Powell^[11]的石榴石—单斜辉石温度计和 Nieke^[13]的二辉石温度计进行了温度计算,0312 样品的 Ga—Cpx 温度计算结果为 855~884 °C, 二辉石温度计计算结果为 766~739 °C, 278-4 样品 2 种温度计计算的结果分别为 937~993 °C 和 928~955 °C. 岩相学特征显示,在麻粒岩相阶段存在 Ga+Cpx+Q→Opx+Pl 的反应,其压力可用 Paria 等^[14]的石榴石(边缘)—斜方辉石—单斜辉石(低铝)—斜

长石压力计计算,获得 0312 样品的压力为 0.80~0.96 GPa, 278-4 样品压力为 0.90~1.21 GPa. 由此亦可推断,石榴辉石岩的峰期变质压力应大于 1.21 GPa.

5 讨论

作为地球上最年轻的陆内造山带,在喜马拉雅造山带寻找高压变质岩一直是地质工作者关注的问题,目前在喜马拉雅西构造结的巴基斯坦和印度境内已发现了与麻粒岩共存的榴辉岩^[1,2],在东构造结的大拐弯地区也发现了形成压力达 1.7 GPa 的高压麻粒^[5]. 鉴于这些发现,金振民^[15]指出在东构造结的大拐弯一带发现高压和超高压榴辉岩的可能性. 但是在喜马拉雅造山带中段大范围出露的

HHC 中,除有推测性的榴辉岩报道外, Lombardo 等^[7]尚未找到真正保存下来的高压变质岩. 本文在西藏定结境内 HHC 中发现的高压变质石榴辉石岩中,从其变质矿物组合和温压条件估算表明,其变质温压条件已经达到了榴辉岩相,只是由于原岩极低 Na_2O 才未出现绿辉石,因此在该区寻找真正的榴辉岩是十分可能的. 本区高压变质石榴辉石岩的发现,使喜马拉雅高压变质带在横向上得到了链接,证明其为一个完整的高压变质带.

高喜马拉雅结晶岩系是喜马拉雅造山带抬升幅度最大、剥露最深的地质体,高压镁铁质变质岩的发现,表明其至少是由下地壳底部抬升到地表的,结合本次研究在同一地区超镁铁岩的发现,表明本区很可能存在剥露的下地壳剖面,值得在以后的研究中关注.

从温度、压力的估算结果可看出,由高压石榴辉石岩向中压二辉麻粒岩的转变,其压力值具有由大于 1.2 GPa 到 0.8 GPa 的快速降压的过程,温度则表现为由石榴辉石岩的 845~896 °C 到麻粒岩的 928~993 °C 的增温后渐变为 766~739 °C 的先增温再降温的过程,表明其在快速隆升的早期,有地幔热源作用的存在,这一点已经被本次研究中在该区发现的喜马拉雅期的幔源超镁铁质岩浆活动证实.

参考文献:

[1] Pognante U, Spencer D A. First record of eclogites from the Himalayan belt, Kaghan valley, northern Pakistan [J]. *Eur J Mineral*, 1991, 3: 613—618.

[2] Guillot S, Lardeaux J M, Mascle G. Un nouveau témoin du métamorphisme de haute pression dans la chaîne Himalayenne: Les eclogites rétro-morphosées du dôme du Tso Moriri (East Ladakh, Himalaya) [J]. *C R Acad Sci Paris*, 1995, 32: 931—936.

[3] Zhong D, Ding L. Discovered high-pressure granulite from Namjagabarwa area, Tibet [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 14: 1343—1345.

[4] Zhong D, Ding L. Rising process of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and its mechanism [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 39: 1369—1379.

[5] Liu Y, Zhong D. Petrology of high-pressure granulite from the eastern Himalayan syntaxis [J]. *J Metamorphic Geol*, 1997, 15: 451—466.

[6] 刘焰,钟大赉. 东喜马拉雅高压麻粒岩岩石学研究[J]. *地质科学*, 1998, 33(3): 267—281.

LIU Y, ZHONG D L. Petrology of high-pressure granulite from eastern Himalaya: Implication to tectonic significance [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1998, 33(3): 267—281.

[7] Lombardo B, Rolfo F. Two contrasting eclogite types in the Himalaya: Implications for the Himalayan orogeny [J]. *Journal of Geodynamics*, 2000, 30: 37—60.

[8] 游振东,王方正. 变质岩岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988.

YOU Z D, WANG F Z. *Metamorphic rocks* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988.

[9] Hyndman D W. Petrology of igneous and metamorphic rocks [M]. [s. l.]: McGraw-Hill Book Company, 1985.

[10] Ellis D J, Green D H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1979, 71(1): 13—22.

[11] Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: The garnet-clinopyroxene geothermometer revisited [J]. *J Metamorphic Geol*, 1985, 3: 231—243.

[12] Sengupta P, Dasgupta S, Bhattacharya P K, et al. Mixing behavior in Quaternary garnet solid solution and an extended Ellis and green garnet-clinopyroxene geothermometer [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1989, 103: 223—227.

[13] Nickel K C. Orthopyroxene-clinopyroxene equilibrium in the system $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS): New experimental results and implications for two-pyroxene thermometer [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1985, 91: 44—53.

[14] Paria P, Bhattacharya A, Sen S K. The reaction garnet + clinopyroxene + quartz = 2orthopyroxene + anorthite: A potential geobarometer for granulites [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1988, 99: 126—133.

[15] 金振民. 喜马拉雅造山带西构造结合柯石英榴辉岩的发现及其启示[J]. *地质科技情报*, 1999, 3: 1—5.

JIN Z M. Discovery of coesite-bearing eclogite from west Himalayan tectonic link and its enlightenment [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1999, 3: 1—5.

Petrologic and Geologic Significance of Garnet Pyroxenite and Mafic Granulites from High Himalayan Region, Tibet

LIAO Qun-an, LI De-wei, YI Shun-hua, LU Lian

(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: HP garnet-pyroxenite and the mafic granulites formed by decompression have been found in the high-Himalaya crystallinities (HHC) from Kada-Zaxang near Dingri County, Tibet. The mineral assemblage of the HP garnet-pyroxenite in early stage, $\text{Grt}+\text{Cpx}(\text{rich in Al}_2\text{O}_3)+\text{Ru}+\text{Q}$, without any plagioclase, was formed in $845-896\text{ }^\circ\text{C}$ and 1.2 GPa , with pressure as high as that in eclogitic phase. While the mineral assemblage of mafic granulite was $\text{Opx}\pm\text{Cpx}(\text{Al-poor})+\text{Pl}(\text{An high up to }90)\pm\text{Grt}(\text{rim})$, of which the Opx, Cpx and Pl are symplectite which replaced the early Grt and Al-rich clinopyroxene in decompression condition; $t=993-776\text{ }^\circ\text{C}$, $p=1.21-0.80\text{ GPa}$. The latest mineral assemblage, $\text{Hb}+\text{Pl}+\text{Q}$, found to have replaced the assemblage of mafic granulite, was formed by retrograde metamorphism in amphibolitic phase. All of this show that the HHC have undergone an HP metamorphism and a stage of decompression retrograde metamorphism and that in early stage the temperature rose with the decompression, but in late stage it dropped with the decompression. Therefore, it can be assumed that the uplifting of the HHC was related to the hot source of the mantle.

Key words: high-Himalaya; garnet-Nielamu; garnet-pyroxenite.

* * * * *

(上接 626 页)

relationship of geomorphology, tectonism, climate and sediments. Meanwhile, the investigation of the representatives, planation surfaces and terrace which indicates the uplifting processes also enables us to analyze the geomorphology evolution and reconstruct its history in a certain region. Given the result of investigation on terrace geomorphology in Yangqu of the upper reaches of the Yellow River, the authors deduce that Nanshan, Guinan has been cut through by the Yellow River before 0.03 Ma . The comparison between different terraces in various places of the Yellow River indicates that its geomorphological evolution is accompanied by episodic uplifting of the Tibet plateau and related episodic toward the source. Four stages can be recognized here. Firstly, in 1.6 Ma , the Yellow River stabilized in Minhe-Lanzhou-Linxia. Secondly, in 1.1 Ma , it cut through Jishi canyon and arrived in Hualong-Guide. Thirdly, in 0.15 Ma , it appeared in the Gonghe basin after splitting Longyan canyon. Fourthly, after the latest uplifting event around, it cut through Nanshan, Guinan and western Qinling, and reached the source of the Yellow River passing Ruergai basin.

Key words: upper Yellow River; Qinghai-Tibet plateau; geological mapping; geomorphology evolution; terrace.