

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.013



西藏定结高压基性麻粒岩(退变榴辉岩)的 变质 $P-T$ 轨迹及构造意义

丁自耕^{1,2}, 仝来喜^{1*}, 刘小汉³, 刘兆^{1,2}, 周学君³

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广东广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085

摘要: 定结(Dinggye)位于藏南高喜马拉雅结晶岩系的中部, 研究该区域麻粒岩的变质 $P-T$ 轨迹对于理解青藏高原的碰撞和抬升过程至关重要. 通过对该地区的高压基性麻粒岩(退变榴辉岩)的岩相学观察, 确定了 4 期矿物组合: (1) 峰期榴辉岩相矿物组合(M_1)由石榴子石(核部)+绿辉石(假象)+石英+金红石组成; (2) 高压麻粒岩相矿物组合(M_2)主要由石榴子石(幔部)+单斜辉石+斜长石+钛铁矿+角闪石+黑云母组成; (3) 中压麻粒岩相矿物组合(M_3)由石榴子石(边缘)+斜方辉石+斜长石+钛铁矿+黑云母组成; (4) 角闪岩相矿物组合(M_4)主要由角闪石+斜长石组成. 在 NCFMASH_TO 体系下, 用 THERMOCALC 软件对该高压基性麻粒岩进行了热力学模拟. 结合传统温压计和平均温压计计算结果, 求得 M_2 、 M_3 、 M_4 阶段的温压条件分别为 786~826 °C、0.78~0.96 GPa; 798~850 °C、0.71~0.75 GPa; 610~666 °C、0.51~0.60 GPa, 这指示了一条以峰期后近等温降压(ITD)为特征的顺时针 $P-T$ 轨迹. 结合已有地质资料, 表明定结高压基性麻粒岩(退变榴辉岩)是喜马拉雅碰撞造山的产物, 峰期后经历了近等温降压的构造抬升过程.

关键词: 高压基性麻粒岩; $P-T$ 轨迹; 碰撞造山; 高喜马拉雅; 定结; 岩石学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2018)01-0220-16

收稿日期: 2017-08-01

Metamorphic $P-T$ Path of High-Pressure Mafic Granulite (Retrograded Eclogite) from Dinggye of Tibet and Its Tectonic Implication

Ding Zigeng^{1,2}, Tong Laixi^{1*}, Liu Xiaohan³, Liu Zhao^{1,2}, Zhou Xuejun³

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Dinggye is located in the central part of the Greater Himalayan crystalline complex (GHC) in southern Tibet. It is essential to investigate the metamorphic $P-T$ path of granulite in this area to better understand the collision and uplifting process of the Tibetan plateau. The petrological study of the high-pressure mafic granulite (retrograded eclogite) from the region indicates four stages: (1) peak eclogite facies mineral assemblage (M_1) consists of garnet (core)+omphacite (psedomorph)+quartz+rutile; (2) high-pressure granulite facies mineral assemblage (M_2) comprises garnet (mantle)+clinopyroxene+plagioclase+ilmenite+amphibole+biotite; (3) medium-pressure granulite facies assemblage (M_3) is composed of garnet (rim)+orthopyroxene+plagioclase+biotite; (4) amphibolite facies mineral assemblage (M_4) consists of

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41272261).

作者简介: 丁自耕(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究. ORCID: 0000-0002-6643-3090.

E-mail: dingzigeng15@mails.ucas.ac.cn

* **通讯作者:** 仝来喜. E-mail: lxtong@gig.ac.cn

引用格式: 丁自耕, 仝来喜, 刘小汉, 等. 2018. 西藏定结高压基性麻粒岩(退变榴辉岩)的变质 $P-T$ 轨迹及构造意义. 地球科学, 43(1): 220-235.

amphibole+plagioclase. Using the THERMOCALC program, the thermodynamic modeling in the NCFMASHTO system has been undertaken for the high-pressure mafic granulite. Combined with the conventional thermobarometers and the average P - T estimates, the P - T conditions of the different metamorphic stages are estimated to be 786–826 °C, 0.78–0.96 GPa (M_2); 798–850 °C, 0.71–0.75 GPa (M_3); and 610–666 °C, 0.51–0.60 GPa (M_4), respectively, indicating a post-peak clockwise P - T path characterized by nearly isothermal decompression. Combined with geological data available, we propose that the high-pressure mafic granulite (retrograded eclogite) of the Dinggye formed during the Himalayan collisional orogeny, and underwent a post-peak tectonic uplift process of nearly isothermal decompression.

Key words: high-pressure mafic granulite; P - T path; collisional orogenesis; Greater Himalaya; Dinggye; petrology.

喜马拉雅造山带是全球最年轻、规模最大和正在活跃的大陆造山带,是研究板块构造和造山作用的天然实验室(张泽明等,2007).高喜马拉雅结晶岩系以发育典型的中压变质岩为特征(Le Fort, 1975; Hodges, 2000),而近年来,榴辉岩和高压麻粒岩等高级变质岩石在喜马拉雅造山带陆续被发现(Lombardo and Rolfo, 2000; Groppo *et al.*, 2007; Chakungal *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2017),这些高级变质岩石既是喜马拉雅造山带下部地壳的探针,也是喜马拉雅造山带碰撞—隆升的直接证据(刘树文等,2005).目前,喜马拉雅造山带已经有两种榴辉岩被发现,分别是西构造结的超高压榴辉岩和中段定结等地的榴辉岩,前人对西构造结印度境内 Tso Morari 地块的超高压榴辉岩估算的峰期温压条件是 ~ 750 °C、 > 3.5 GPa(O'Brien *et al.*, 2001; Mukherjee *et al.*, 2005).Wang *et al.*(2017)计算的定结地区的榴辉岩峰期温压条件是 $720 \sim 760$ °C、 $2.0 \sim 2.1$ GPa,低于西构造结的峰期压力,研究人员在东构造结南迦巴瓦峰附近发现的高压麻粒岩峰期的温压条件是 $750 \sim 850$ °C、 $1.40 \sim 1.80$ GPa(丁林和钟大赉,1999; Guilmette *et al.*, 2011),这表明整个高喜马拉雅结晶岩系,从西构造结到东构造结,都经历了高压或超高压变质作用(张泽明等,2013; Kohn, 2014),而在雅鲁藏布江缝合带西段,发现的是片麻岩(刘强等,2017)等变质压力较低的岩石.

Lombardo and Rolfo(2000)根据高喜马拉雅中段马卡鲁峰附近的镁铁质变质岩中石榴石和绿辉石(已消失)典型的降压反应现象,推测高喜马拉雅中段可能存在过榴辉岩,但并未找到真正的榴辉岩矿物组合.廖群安等(2003)在高喜马拉雅中段定结县境内发现了镁铁质麻粒岩及其退变产物,通过样品快速降压和先增温后降温的温压估算认为其在快速隆升的早期有地幔热源作用的存在.刘树文等(2005)通过对产于申扎一定结伸展构造系南段构造带下盘糜棱岩化片麻岩内镁铁质高压麻粒岩的矿物化学和 P - T 研究,认为其经历了早期低地热梯度下

的快速构造折返、中期构造剥蚀升温快速隆升和晚期伸展缓慢抬升的构造热演化过程.Groppo *et al.*(2007)对 Phung Chu 山谷的麻粒岩化榴辉岩划分了 4 期变质矿物组合,峰期榴辉岩相矿物组合是石榴子石+绿辉石(已被单斜辉石和斜长石的合晶取代)+白云母(已被黑云母和斜长石合晶取代),经历了一个以近等温降压为特征的抬升过程.Wang *et al.*(2017)在定结县的镁铁质麻粒岩中发现了残余的绿辉石包裹体,证实了高喜马拉雅中段榴辉岩的存在.前人确定的定结峰期榴辉岩相温压条件主要有: $845 \sim 896$ °C、 > 1.2 GPa(廖群安等,2003); $625 \sim 675$ °C、 $1.35 \sim 1.48$ GPa(刘树文等,2005); > 580 °C、 > 1.5 GPa(Groppo *et al.*, 2007); $720 \sim 760$ °C、 $2.0 \sim 2.1$ GPa(Wang *et al.*, 2017).这些温压条件变化范围比较大,可能是由于用于计算温压的矿物组合不同.此外,前人对该地区峰期榴辉岩相的形成时代有着不同的观点,刘树文等(2005)利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年获得的代表榴辉岩相变质作用时代的年龄是 29.5 ± 0.4 Ma;Wang *et al.*(2017)对定结榴辉岩进行的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年获得的两个峰期榴辉岩相年龄为 13.9 ± 1.2 Ma 和 14.9 ± 0.7 Ma,这意味着定结榴辉岩可能是迄今为止喜马拉雅造山带最年轻的榴辉岩.前人对该地区所恢复的变质 P - T 轨迹也有所不同(廖群安等,2003;刘树文等, 2005; Groppo *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2017).这些差异的产生是因为该地区基性麻粒岩记录着多期次的变质过程,岩石矿物组合和变质演化历史复杂,因此重新恢复该地区的变质 P - T 轨迹十分有必要,这可以丰富该地区的 P - T 轨迹,对更好地理解认识和认识喜马拉雅造山带的早期碰撞和后期隆升过程具有重要意义.

本研究对定结的高压基性麻粒岩(退变榴辉岩)进行详细的岩相学观察,使用传统温压计、平均温压法和变质相图模拟的方法,对变质 P - T 轨迹进行了重建,并结合已有的年代学证据,探讨了其形成的大地构造背景.

1 区域地质背景

喜马拉雅造山带自北向南可分为4个构造单元(图 1a),分别是北喜马拉雅(THS)、高喜马拉雅(GHC)、低喜马拉雅(LHS)和次喜马拉雅(SH)(Yin,2006).藏南拆离断层系(STDS)、主中央逆冲断层(MCT)、主边界逆冲断层(MBT)依次将4者隔开.在珠穆朗玛峰东部的 Ama Drime 地块,榴辉岩

分布在高喜马拉雅结晶岩系的下层构造层位,其围岩主要是花岗质片麻岩和变质沉积岩(Lombardo and Rolfo,2000).锆石定年显示,退变榴辉岩的原岩是形成于 110~88 Ma 的基性岩墙(Lombardo *et al.*, 2000),Ama Drime 地块退变榴辉岩主要由单斜辉石、斜长石、石榴子石和角闪石组成,含有少量斜方辉石、黑云母、钛铁矿和石英等矿物(Groppo *et al.*, 2007).本文研究区位于 Ama Drime 地块的东侧定结县境内,以藏南拆离断层系东西走向的汇聚

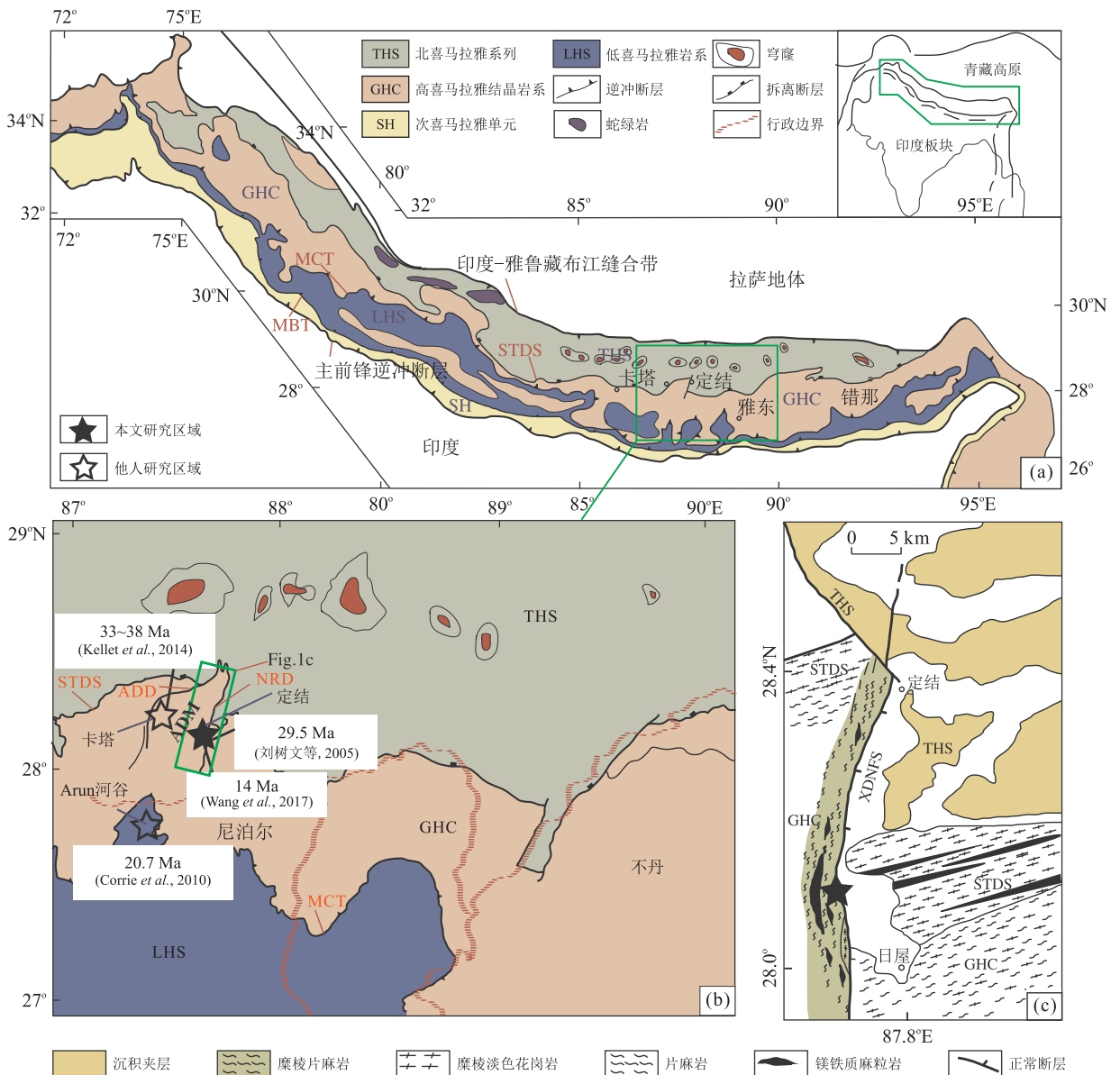


图 1 喜马拉雅造山带(a)、喜马拉雅中部(b)以及定结区域(c)地质简图

Fig.1 Geological sketch of the Himalayan orogen (a), central Himalaya (b) and Dinggye area (c)

图 a 据 Xu *et al.* (2013) 修改; 图 b 据 Grujic *et al.* (2011) 修改, 并标示出了前人发现的麻粒岩化榴辉岩的位置和变质年龄(Kellet *et al.*, 2014; 刘树文等, 2005; Corrie *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2017); 图 c 据刘树文等(2005)修改. STDS. 藏南拆离断层系; MCT. 主中央逆冲断层; MBT. 主边界逆冲断层; ADM. Ama Drime 地块; XDNFS. 申扎一定结正断层体系; ADD. Ama Drime 拆离断层; NRD. Nyönno Ri 拆离断层

和南北走向的张裂为特征。藏南拆离断层系(STDS)在 13~11 Ma 左右停止活动,同时代该断层系由南北向伸展转变成东西向伸展,指示着在抬升过程中岩层最南段的镁铁质麻粒岩与藏南拆离断层系和南北向伸展的韧性剪切带有关(张进江等,2002; Jessup *et al.*, 2008; Jessup and Cottle, 2010; Leloup *et al.*, 2010; 于俊杰等, 2011)。研究区基底结晶岩系中韧性剪切带十分发育。韧性剪切带主要有 4 种走向分布型式:北喜马拉雅 NNE-SSW 向韧性剪切带、NNW-SSE 向韧性剪切带、拉轨岗日变质核杂岩与抗青大岩组之间近环形分布的韧性剪切带以及高喜马拉雅近 EW 向韧性剪切带(刘德民等, 2003)。研究区韧性剪切带常常平行于区内拆离断层发育,倾角较小(Pan and Kidd, 1992),应变强度从韧性剪切带中心向两侧逐渐减弱(刘德民等, 2003)。

先前的研究显示,定结岩层可以进一步划分成两个部分:北面的 Ama Drime 副片麻岩单元,南面的 Ama Drime 正片麻岩单元(Jessup *et al.*, 2008; Jessup and Cottle, 2010; Kali *et al.*, 2010; Langille *et al.*, 2010)。Ama Drime 副片麻岩单元由副片麻岩和被淡色花岗岩侵入的云母片岩组成。Ama Drime 正片麻岩单元是由花岗片麻岩,以及含有少量副片麻岩的混合岩组成。片麻岩内部发育韧性剪切带,麻粒岩明显受韧性剪切带控制,显示成带分布、分段集中的特点,与围岩组成透镜网格系统(李德威等, 2003)。基性麻粒岩(退变榴辉岩)主要以包裹体或者透镜体的形式在正片麻岩中出现,与围岩糜棱片麻岩及相关的变形岩石的构造面理表现为协调一致的接触关系(刘树文等, 2005)。

2 岩相学特征及变质期次划分

本文中的高压基性麻粒岩样品采自西藏定结地区的正片麻岩单元,包括 L-13-60, L-13-61, L-13-64, 均为角闪石榴二辉麻粒岩,斑状变晶结构,块状构造。岩石主要由石榴子石(20%~25%)、斜方辉石(20%~25%)、斜长石(15%~25%)、单斜辉石(15%~20%)、黑云母(5%)、角闪石(5%)、石英(5%)和钛铁矿(5%)组成。副矿物包括金红石、磷灰石和榍石,含量低于 5%,是典型的基性麻粒岩(周信等, 2014)(图 2a)。

石榴子石变斑晶粒径在 0.2~1.2 mm,少量变斑晶呈筛状结构,含有丰富的包裹体,如石英、金红石、磷灰石等(图 2b, 2f),主要以大的变斑晶形式出

现在基质中,边部一般具有斜方辉石+斜长石的蠕虫状后成合晶。单斜辉石与斜长石的交生合晶分布广泛(图 2c, 2e),是由绿辉石分解形成的,其周围有少量榍石分布。大的较自形角闪石形成变斑晶,与黑云母共生,代表峰期变质矿物组合(图 2d)。斜方辉石主要出现在基质中,在石榴子石变斑晶边部与斜长石组成蠕虫状后成合晶(图 2f, 2h),合晶中含有黑云母(图 2h),形成了白眼圈结构;小的他形角闪石与斜长石组成后成合晶(图 2h),分布在斜方辉石与斜长石的蠕虫状合晶周围,属于角闪岩相矿物。钛铁矿在各个变质阶段普遍存在,早期被石榴子石变斑晶所包裹,退变质阶段与斜方辉石和斜长石形成后成合晶(图 2g),出现在石榴子石边部的斜方辉石和斜长石的后成合晶中(图 2d, 2h),其周围有少量的磷灰石分布。

根据对岩石薄片的矿物组合和反应结构的分析,可将该麻粒岩分成 4 期,具体如下:

(1)峰期榴辉岩相阶段(M_1):矿物组合是石榴子石(核部)+绿辉石(假象)+石英+金红石。石英、金红石等早期矿物在石榴子石变斑晶中以包裹体的形式存在。

(2)高压麻粒岩相阶段(M_2):矿物组合是石榴子石(幔部)+单斜辉石+斜长石+钛铁矿+角闪石+黑云母。角闪石和黑云母以变斑晶的形式在峰期稳定存在。由于退变质强烈,早期的绿辉石没有保存下来。但该岩石具有绿辉石典型的降压分解结构,这种结构被认为是榴辉岩经历完全的高压麻粒岩相退变质的典型结构,是绿辉石在榴辉岩相退变至高压麻粒岩相过程中形成的(Möller, 1998; Zhao *et al.*, 2001),变质反应是绿辉石+石英=单斜辉石+钠质斜长石。

(3)中压麻粒岩相阶段(M_3):矿物组合是石榴子石(边部)+斜方辉石+斜长石+钛铁矿+黑云母。石榴子石变斑晶边部多具有斜方辉石+斜长石+钛铁矿的蠕虫状后成合晶。这种蠕虫状后成合晶结构是一种近等温降压反应结构,变质反应是石榴子石+单斜辉石+石英=斜方辉石+斜长石。这个变质反应是高压麻粒岩中常见的指示近等温减压 $P-T$ 轨迹的变质反应(Harley, 1989)。

(4)角闪岩相阶段(M_4):矿物组合是角闪石+斜长石。在麻粒岩持续退变过程中,有流体开始加入退变反应。单斜辉石与斜长石反应生成角闪石,变质反应是单斜辉石+斜长石+水=角闪石(陈相艳等, 2015),反应退变至角闪岩相阶段。

件:加速电压为 15 kV,电流为 20 nA,束斑直径为

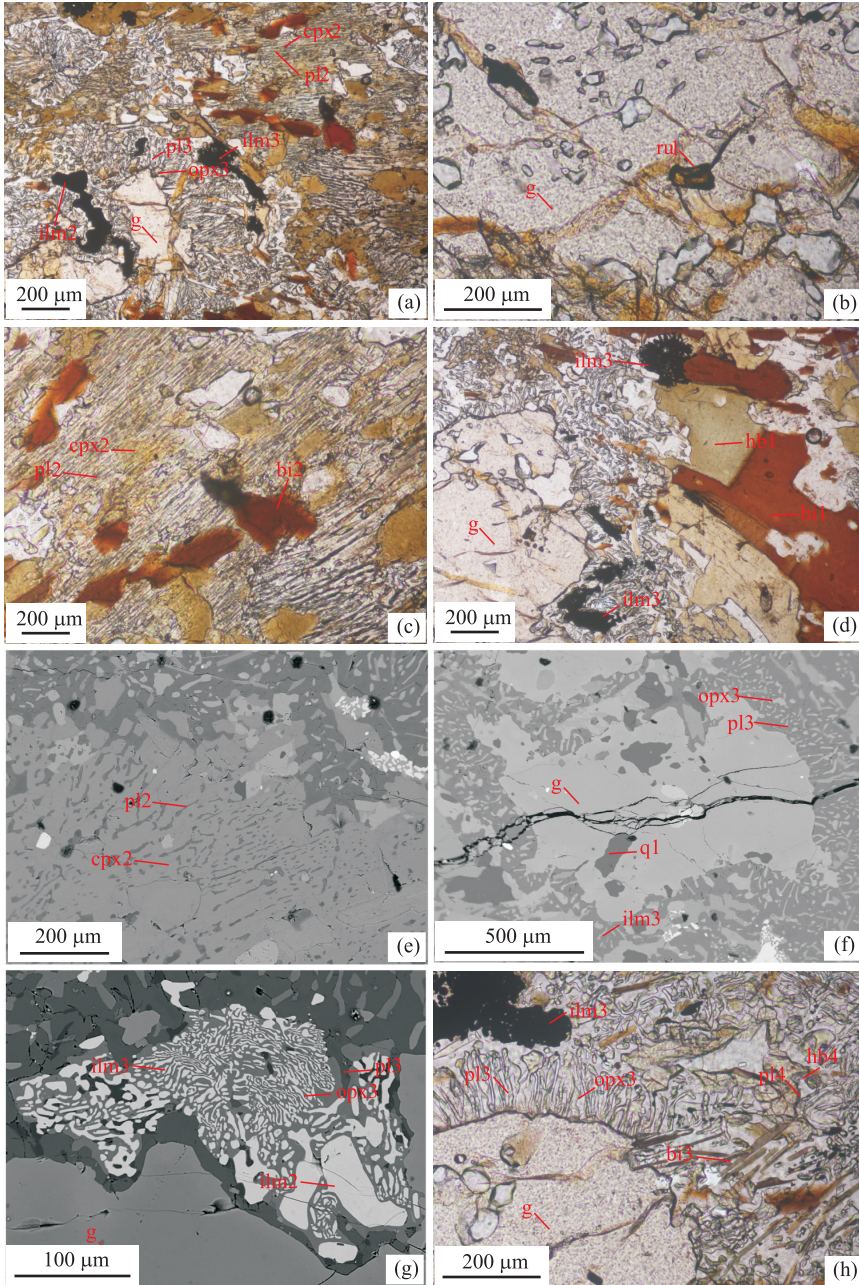


图 2 定结高压基性麻粒岩的显微照片(a~d,单偏光)以及背散射照片(e~h)

Fig. 2 Photomicrographs and back scattered images (BSI) of high-pressure mafic granulites in Dinggye

a. 基性麻粒岩中的石榴子石变斑晶、单斜辉石、斜长石、斜方辉石和钛铁矿等, L-13-64; b. 石榴子石变斑晶中的金红石包裹体, L-13-60; c. 绿辉石分解后形成的单斜辉石与斜长石的共生结构, L-13-60; d. 峰期黑云母与角闪石共生, L-13-60; e. 单斜辉石与斜长石的共生结构, L-13-60; f. 石榴子石变斑晶边部的斜方辉石与斜长石的蠕虫状后合成晶, L-13-60; g. 钛铁矿与斜方辉石和斜长石组成的后合成晶, L-13-60; h. 斜方辉石与斜长石的蠕虫状后合成晶以及角闪石和斜长石的后合成晶, L-13-60. 矿物缩写: g. 石榴子石; opx. 斜方辉石; cpx. 单斜辉石; pl. 斜长石; hb. 角闪石; bi. 黑云母; ilm. 钛铁矿; ru. 金红石; q. 石英

3 矿物化学

样品的矿物化学成分分析是在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的 CAMECASX-FiveFE 场发射电子探针完成. 分析条

2 μm , 采用 X-PI 修正法进行数据校正. 电子探针分析结果见表 1. 其主要矿物成分特征如图 3 ~ 图 5 所示:

石榴子石: 主要是铁铝榴石、钙铝榴石和镁铝榴石. 石榴子石的成分主要从 $\text{Alm}_{49-53}\text{Pyr}_{20-16}\text{Grs}_{30-29}$

Sps₁₋₂ 到 Alm₅₃₋₅₇ Pyr₁₆₋₁₇ Grs₃₀₋₂₃ Sps₂₋₄ 变化(图 3).

表 1 定结高压基性麻粒岩中代表性矿物电子探针数据 (%)

Table 1 The representative mineral microprobe data (%) of the high-pressure mafic granulite in Dinggye

矿物	榴辉岩相矿物组合(M ₁)												
	g(c)	g(c)	g(c)	bi1	bi1	bi1	bi1	bi1	bi1	hb1	hb1		
SiO ₂	39.13	38.80	38.24	37.65	38.07	37.25	37.76	37.84	42.03	42.85	43.87	44.56	42.10
TiO ₂	0.05	0.06	0.02	4.79	4.81	4.70	4.86	4.07	0.69	1.61	1.13	0.68	0.72
Al ₂ O ₃	21.97	21.88	21.89	14.68	14.47	14.51	14.78	14.64	13.07	12.65	12.23	11.51	13.67
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.04	0.05	0.10	0.08	0.04	0.04	0.00	0.02	0.03	0.01	0.03
Fe ₂ O ₃	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
FeO	23.04	24.40	24.18	18.82	18.62	18.14	20.61	19.23	16.44	17.56	17.59	16.56	17.89
MnO	0.57	1.03	0.61	0.04	0.05	0.05	0.08	0.02	0.06	0.14	0.12	0.08	0.09
MgO	4.83	3.81	3.87	11.24	11.44	11.00	10.41	12.29	10.97	9.17	9.96	10.87	9.78
CaO	10.75	10.44	11.38	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	11.33	11.16	11.17	11.89	11.69
Na ₂ O	0.02	0.04	0.03	0.12	0.15	0.24	0.20	0.18	1.13	1.35	1.26	1.02	1.44
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	9.29	9.14	8.78	8.85	9.50	0.92	1.33	1.17	0.75	1.20
Cl	0.01	0.00	0.01	0.15	0.16	0.16	0.16	0.10	0.12	0.16	0.14	0.08	0.20
F	0.00	0.00	0.00	0.19	0.21	0.23	0.10	0.00	0.05	0.07	0.09	0.10	0.10
Total	100.38	100.47	100.27	97.02	97.22	95.14	97.87	97.91	96.81	98.07	98.76	98.11	98.92
Si	3.020	3.012	2.974	2.815	2.835	2.830	2.813	2.805	6.245	6.412	6.487	6.575	6.247
Ti	0.000	0.004	0.001	0.269	0.269	0.269	0.272	0.227	0.078	0.181	0.125	0.076	0.081
Al	1.997	2.002	2.007	1.294	1.270	1.300	1.298	1.280	2.289	2.232	2.132	2.287	2.392
Cr	0.001	0.001	0.002	0.003	0.006	0.005	0.002	0.002	0.000	0.003	0.003	0.001	0.004
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.043	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.773	0.224	0.332	0.389	0.458
Fe ²⁺	1.485	1.584	1.530	1.177	1.160	1.153	1.284	1.192	1.270	1.949	1.807	1.611	1.711
Mn	0.037	0.068	0.041	0.003	0.003	0.003	0.005	0.001	0.007	0.018	0.015	0.010	0.011
Mg	0.555	0.440	0.449	1.253	1.270	1.246	1.155	1.358	2.429	2.045	2.194	2.146	2.162
Ca	0.888	0.868	0.948	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	1.804	1.790	1.769	1.880	1.859
Na	0.003	0.007	0.004	0.018	0.021	0.035	0.029	0.026	0.327	0.392	0.360	0.293	0.415
K	0.003	0.000	0.000	0.886	0.868	0.851	0.841	0.898	0.174	0.255	0.220	0.141	0.227
Total	7.989	7.986	7.999	7.718	7.702	7.692	7.700	7.789	15.396	15.501	15.444	15.432	15.567

续表 1

高压麻粒岩相矿物组合(M ₂)																	
矿物	g(m)	g(m)	g(m)	cpx2	cpx2	cpx2	cpx2	cpx2	cpx2	pl2	pl2	pl2	pl2	pl2	bi2	bi2	bi2
SiO ₂	38.69	38.61	38.41	51.44	51.79	51.45	52.01	51.53	51.96	52.37	50.11	52.38	50.43	36.19	37.53	37.92	
TiO ₂	0.10	0.07	0.15	0.06	0.01	0.05	0.08	0.02	0.01	0.02	0.02	0.07	0.06	4.75	5.07	4.88	
Al ₂ O ₃	21.80	21.73	21.61	0.81	0.39	0.90	1.34	1.60	29.23	29.75	23.94	31.60	31.94	14.86	14.18	14.25	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.05	0.00	0.04	0.04	0.02	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03	0.09	
Fe ₂ O ₃	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	
FeO	24.05	24.12	23.28	11.83	11.60	11.06	8.61	10.68	0.53	0.29	2.44	0.29	0.27	19.93	18.80	19.29	
MnO	0.86	0.98	0.64	0.27	0.18	0.16	0.11	0.23	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.05	0.09	0.09	
MgO	3.78	3.77	4.04	12.28	12.21	12.74	13.67	12.39	0.42	0.00	2.81	0.00	0.00	11.26	11.01	11.08	
CaO	10.52	10.35	11.76	22.77	22.92	22.88	23.32	23.30	13.38	12.89	17.24	12.88	13.67	0.23	0.02	0.04	
Na ₂ O	0.01	0.11	0.03	0.14	0.19	0.17	0.38	0.14	4.36	4.50	2.55	4.36	3.54	0.10	0.10	0.13	
K ₂ O	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06	0.10	0.03	0.04	0.02	9.52	9.22	9.34	
Cl	0.01	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.13	0.15	0.15	
F	0.03	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.09	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.15	0.19	
Total	99.87	99.90	99.98	99.64	99.35	99.43	99.56	99.93	100.05	99.99	99.21	101.63	99.93	97.13	96.35	97.45	
Si	3.018	3.016	2.993	1.949	1.968	1.945	1.944	1.939	2.369	2.380	2.346	2.339	2.294	2.731	2.827	2.831	
Ti	0.006	0.004	0.009	0.002	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.270	0.287	0.274	
Al	2.005	2.001	1.985	0.036	0.017	0.040	0.059	0.071	1.571	1.594	1.322	1.664	1.713	1.322	1.260	1.255	
Cr	0.000	0.003	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.004	0.002	0.006	
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.016	0.071	0.060	0.079	0.077	0.058	0.020	0.011	0.096	0.011	0.010	0.000	0.000	0.000	
Fe ²⁺	1.569	1.575	1.500	0.304	0.308	0.271	0.192	0.278	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.258	1.185	1.204	
Mn	0.057	0.065	0.042	0.009	0.006	0.005	0.004	0.007	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.003	0.006	0.006	
Mg	0.439	0.439	0.470	0.694	0.691	0.718	0.761	0.695	0.029	0.000	0.196	0.000	0.000	1.266	1.236	1.233	
Ca	0.879	0.866	0.982	0.925	0.933	0.927	0.934	0.940	0.653	0.628	0.865	0.616	0.666	0.019	0.002	0.003	
Na	0.002	0.016	0.004	0.010	0.014	0.013	0.028	0.010	0.385	0.396	0.232	0.378	0.312	0.015	0.015	0.019	
K	0.002	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.004	0.006	0.002	0.002	0.001	0.917	0.886	0.890	
Total	7.977	7.986	8.001	4.001	3.999	4.000	4.001	3.999	5.031	5.017	5.062	5.012	4.998	7.805	7.706	7.721	

续表 1

矿物	麻粒岩相矿物组合(M ₃)										角闪岩相矿物组合(M ₄)									
	g(r)	g(r)	g(r)	bi3	opx3	opx3	opx3	opx3	pl3	pl3	pl3	pl3	pl3	hb4	hb4	pl4	pl4	pl4	pl4	
SiO ₂	37.88	39.06	38.45	34.81	36.32	50.54	50.75	49.97	49.88	45.08	45.24	45.65	45.29	45.64	45.61	50.43	50.43	56.39	56.39	
TiO ₂	0.07	0.08	0.01	3.75	5.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	1.11	1.16	0.06	0.06	0.00	0.00	
Al ₂ O ₃	21.69	22.07	21.83	14.97	15.11	0.30	0.36	2.84	3.07	34.35	34.80	33.50	34.64	8.26	9.22	31.94	31.94	26.87	26.87	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.03	0.09	0.14	0.00	0.04	0.03	0.05	0.03	0.01	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fe ₂ O ₃	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	
FeO	25.95	24.30	24.56	22.67	20.69	31.46	31.25	29.51	29.46	0.38	0.43	0.79	0.37	17.27	17.63	0.33	0.33	0.37	0.37	
MnO	0.94	0.74	0.49	0.04	0.03	0.39	0.37	0.32	0.48	0.00	0.06	0.04	0.02	0.06	0.07	0.00	0.00	0.03	0.03	
MgO	4.08	3.96	3.89	11.20	10.22	16.11	16.54	15.11	14.73	0.01	0.01	0.43	0.01	11.22	10.70	0.00	0.00	0.04	0.04	
CaO	8.96	10.41	11.07	0.10	0.09	0.45	0.49	1.43	1.36	18.00	18.67	17.88	18.07	11.78	12.20	13.67	13.67	9.33	9.33	
Na ₂ O	0.02	0.01	0.05	0.23	0.29	0.16	0.00	0.07	0.14	1.18	0.91	1.05	1.06	0.73	0.91	3.54	3.54	6.32	6.32	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	8.26	9.01	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.58	0.58	0.02	0.02	0.06	0.06	
Cl	0.00	0.00	0.00	0.11	0.12	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.07	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	
F	0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.21	0.07	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total	99.59	100.63	100.38	96.29	97.11	99.48	99.82	99.31	99.22	99.04	100.38	99.42	99.49	96.78	98.19	99.99	99.99	99.41	99.41	
Si	2.979	3.018	2.989	2.649	2.739	1.975	1.974	1.946	1.945	2.098	2.086	2.118	2.097	6.812	6.744	2.294	2.294	2.548	2.548	
Ti	0.004	0.005	0.001	0.215	0.288	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.124	0.129	0.002	0.002	0.000	0.000	
Al	2.011	2.010	2.000	1.343	1.344	0.014	0.017	0.130	0.141	1.885	1.891	1.833	1.891	1.453	1.607	1.713	1.713	1.432	1.432	
Cr	0.000	0.000	0.002	0.006	0.008	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.006	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	
Fe ³⁺	0.027	0.000	0.026	0.216	0.000	0.047	0.035	0.000	0.000	0.015	0.017	0.030	0.014	0.470	0.345	0.011	0.011	0.014	0.014	
Fe ²⁺	1.681	1.570	1.571	1.226	1.305	0.981	0.981	0.961	0.961	0.000	0.000	0.000	0.000	1.685	1.836	0.000	0.000	0.000	0.000	
Mn	0.063	0.048	0.032	0.003	0.002	0.013	0.012	0.011	0.016	0.000	0.002	0.002	0.001	0.008	0.009	0.000	0.000	0.001	0.001	
Mg	0.478	0.456	0.450	1.271	1.149	0.938	0.959	0.877	0.856	0.001	0.001	0.030	0.001	2.496	2.359	0.000	0.000	0.003	0.003	
Ca	0.755	0.862	0.922	0.009	0.007	0.019	0.020	0.060	0.057	0.898	0.922	0.889	0.897	1.884	1.933	0.666	0.666	0.452	0.452	
Na	0.003	0.002	0.007	0.034	0.043	0.012	0.000	0.005	0.011	0.106	0.081	0.095	0.095	0.212	0.261	0.312	0.312	0.554	0.554	
K	0.003	0.003	0.000	0.801	0.867	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.110	0.110	0.001	0.001	0.004	0.004	
Total	8.004	7.974	8.000	7.773	7.752	4.000	4.000	3.992	3.990	5.004	5.000	4.998	4.998	15.280	15.336	4.999	4.999	5.008	5.008	

注:矿物的离子数是利用 AX 程序计算的(Holland and Powell, 1998; 2003 年升级).g(c).石榴子石核部;g(m).石榴子石幔部;g(r).石榴子石边部.

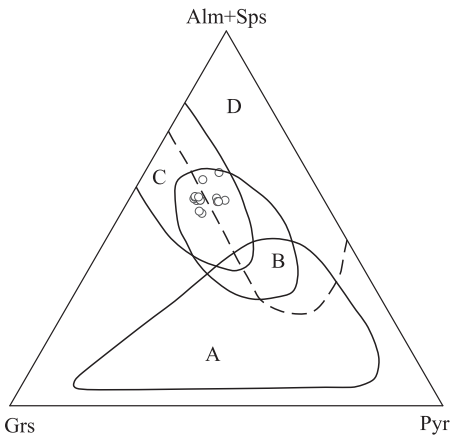


图 3 石榴子石变斑晶 Grs-Alm+Sps-Pyr 图解

Fig.3 Grs-Alm+Sps-Pyr diagram for garnet porphyroblast
A、B、C 分别为科尔曼 3 类榴辉岩中石榴子石成分区;D 为麻粒岩相石榴子石分布区,据 Coleman *et al.*(1965)

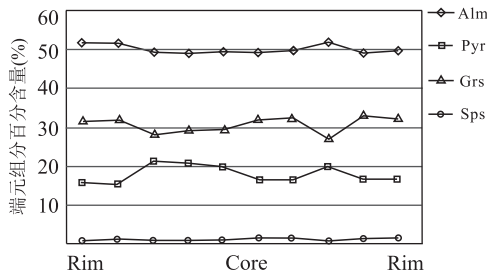


图 4 石榴子石变斑晶成分剖面

Fig.4 Core-rim compositional profile for the garnet porphyroblast

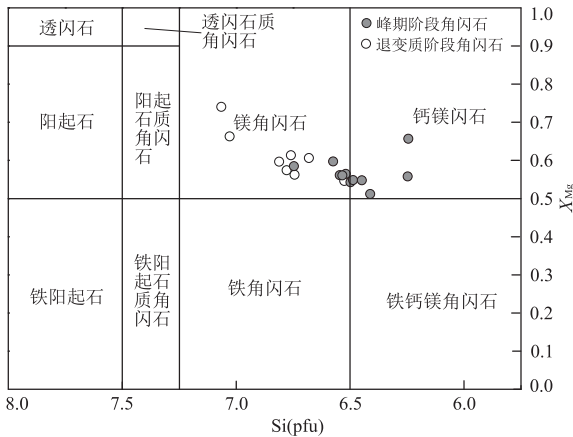


图 5 基性麻粒岩中角闪石分类图解

Fig.5 Classification diagram of amphiboles in the mafic granulite
据 Leake *et al.*(2004)

研究选取了一颗较完整的石榴子石变斑晶做了成分剖面(图 4),其铁铝榴石含量在 49.0%~51.9%之间,钙铝榴石含量在 28.2%~32.3%之间,镁铝榴石含量在 15.7%~21.3%之间,另外还有少量的锰铝榴石(0.7%~1.4%)。通过图 4 可以看出,铁铝榴石

从核部到边部含量略有升高;镁铝榴石和钙铝榴石含量从核部到幔部略有升高,从幔部到边部降低。

斜方辉石: Al_2O_3 含量集中在 0.4%~0.6%之间, CaO 含量在 0.4%~0.6%之间变化,其 X_{Mg} ($\text{Mg}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$) 值在 0.2~0.3 之间。

单斜辉石: CaO 含量在 22%~24%之间变化, Al_2O_3 含量的变化范围在 0.8%~1.6%之间,少数颗粒低至 0.4%。 Na_2O 含量在 1.4%~4.0%之间变化。

角闪石: 主要分为两种类型,分别以变斑晶和后成合晶的形式存在。第一种大的变斑晶是原岩变质留下的,在峰期也稳定存在,属于镁角闪石和钙镁闪石,其矿物化学成分特点是 X_{Mg} 值和 Ti 含量较低。 X_{Mg} 值在 0.54~0.58 之间变化, TiO_2 含量在 0.7%~1.6%之间变化, Na_2O 含量分布在 0.8%~1.4%之间,而 K_2O 含量在 0.6%~1.2%之间。第二种合晶是单斜辉石,斜长石和流体反应生成的,属于镁角闪石, X_{Mg} 值比第一种角闪石高,分布在 0.53~0.66 之间; TiO_2 含量主要在 0.6%~1.1%之间变化, Na_2O 和 K_2O 含量较低,分别在 0.6%~0.9%之间和 0.4%~0.7%之间变化。

斜长石: 在基质中广泛存在,主要以合晶的形式出现。在高压麻粒岩相阶段,其成分变化约为 $\text{An}_{44-78} \text{Ab}_{56-21} \text{Or}_{0-1}$, 主要是拉长石和培长石;在中压麻粒岩相阶段,其成分变化约为 $\text{An}_{84-91} \text{Ab}_{15-8} \text{Or}_{0-1}$, 主要是培长石和钙长石。在角闪岩相阶段,其成分变化约为 $\text{An}_{45-68} \text{Ab}_{55-32} \text{Or}_{0-1}$, 主要是中长石和拉长石。

黑云母: 各期次黑云母成分变化不大,具有富 Ti 和富 Fe 的特点。 TiO_2 含量分布在 4%~5%之间,其 X_{Fe} ($\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$) 值在 0.50 左右, F 含量较低($<0.20\%$)。

4 温压计算及相平衡模拟

4.1 温压计算

根据上述的岩相学特征和变质阶段划分,结合矿物化学数据,笔者划分出来了 4 个不同的变质阶段,峰期榴辉岩相矿物组合(M_1),高压麻粒岩相阶段(M_2),中压麻粒岩相阶段(M_3),角闪岩相阶段(M_4)。笔者使用传统的矿物温压计对不同变质阶段的变质作用 P - T 条件进行计算,结果见表 2。除此之外,再基于热力学数据库,采用 THERMOCALC 平均温压方法作为补充。

表2 利用传统矿物温压计计算的各阶段变质 P - T 条件Table 2 The calculated P - T results of different metamorphic stages by conventional mineral thermobarometry

变质阶段	温度计	T ($^{\circ}\text{C}$)	压力计	P (GPa)
M_2	T(00R)	650~730	P(91E)	0.78~0.96
M_3	T(93L)	798~850	P(93L)	0.71~0.75
M_4	T(94H)	610~666	P(07B) P(95A)	0.51~0.60

注: T(00R).g-cpx 温度计, Ravna(2000); T(93L).g-opx 温度计, Lal(1993); T(94H).hb-pl 温度计, Holland and Blundy(1994); P(91E).g-cpx-pl-q 压力计, Eckert *et al.*(1991); P(93L).g-opx-pl-q 压力计, Lal(1993); P(07B).hb-pl-q 压力计, Bhadra and Bhattachary(2007); P(95A).Al-in hb 压力计, Anderson and Smith(1995).

(1) 峰期榴辉岩相阶段(M_1): 由于样品峰期的绿辉石已经降压分解, 退变成单斜辉石与斜长石的交生合晶, 所以无法通过峰期矿物组合的化学成分来定量计算峰期的温压条件. 但 Wang *et al.*(2017) 在其样品中发现了残余的绿辉石包裹体, 其建立的 P - T 视剖面图显示, 绿辉石在一个较为宽泛的温度范围(650~900 $^{\circ}\text{C}$)内稳定, 根据 M_2 阶段的温压条件, 当温度限定在 800 $^{\circ}\text{C}$ 时, 绿辉石是稳定的, 压力 > 1.5 GPa. 因此笔者可以推算出 M_1 阶段的大致温压范围为 650~800 $^{\circ}\text{C}$ 、>1.5 GPa.

(2) 高压麻粒岩相阶段(M_2): 根据石榴子石变斑晶幔部成分结合其他高压麻粒岩相矿物组合, 利用 g-cpx-pl-q 温压计(Ravna, 2000; Eckert *et al.*, 1991)来计算该阶段的温压条件. 通过计算得到的温度在 650~730 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 压力在 0.78~0.96 GPa 范围内. 利用平均温压法分别计算了平均温度和压力, 当压力设定在 0.8~0.9 GPa 时, 对应的温度是 786~826 $^{\circ}\text{C}$ (P 、 T 计算 fit 值为 1.00, 落入 95% 置信度内 (fit 值 < 1.73)). 结合相图模拟结果综合考虑, 笔者决定使用平均温压法所求得的结果. 最终确定 M_2 阶段的温压条件为 786~826 $^{\circ}\text{C}$ 、0.78~0.96 GPa.

(3) 中压麻粒岩相阶段(M_3): 根据石榴子石变斑晶边部成分结合退变的矿物组合, 可利用 g-opx-pl-q 温压计(Lal, 1993)来计算该阶段的温压条件. 通过计算得到的温度在 798~850 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 压力在 0.71~0.75 GPa 范围内.

(4) 角闪岩相阶段(M_4): 根据角闪岩相的角闪石与斜长石的后成合晶成分, 可用 hb-pl-q 温压计(Holland and Blundy, 1994; Bhadra and Bhattachary, 2007)和 Al-in hb 压力计(Anderson and Smith, 1995)来计算该阶段的温压. 通过计算得到温度在 610~666 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 压力在 0.51~0.60 GPa

范围内.

4.2 变质相平衡模拟

变质相图通常由一系列视剖面图构成, 并指示具有特定全岩成分的相平衡关系. 在 P - T 视剖面图上, 可以定量计算每个矿物摩尔含量等值线, 矿物成分等值线, 从而可以通过矿物电子探针成分很好地限定变质岩石的 P - T 演化, 从定量的角度来理解变质作用的过程. 因此, 变质相图被认为是研究变质作用非常有效的方法(魏春景, 2011).

本文利用 THERMOCALC 3.33 程序(Powell *et al.*, 1998)及 ds55s 数据库(Powell *et al.*, 1998; 2003 年升级), 在 Na_2O - CaO - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - TiO_2 - Fe_2O_3 (NCKFMASHTO) 体系下对本区基性麻粒岩做了相平衡模拟. 在计算过程中不考虑熔体, 假设变质过程中流体为纯水. 实验和野外的研究表明不考虑熔体对于相图的拓扑结构和相边界没有大的影响, 而高温部分由于不考虑熔体, 可能是亚稳定的(Daczko and Halpin, 2009; Pitra *et al.*, 2010), 样品中出现大量的角闪石和黑云母, 暗示变质过程中存在一定量的 H_2O , 因此在本模拟中 H_2O 设置为过量. 少量的 K_2O , MnO 和 P_2O_5 在计算过程中不考虑. 对于典型的大洋中脊玄武岩而言, Fe^{3+} 含量约为全铁含量的 12%~16% (Bézos and Humler, 2005; Cottrell and Kelley, 2011), 由于在本样品中未观察到磁铁矿, 说明氧逸度较低, 故本文采用 12% 这一数值. 本文视剖面图计算采用的矿物活度模型分别为石榴石(g; White *et al.*, 2007), 斜方辉石(opx; White *et al.*, 2002), 单斜辉石(cpx; Green *et al.*, 2007), 普通角闪石(hb; Diener *et al.*, 2007), 绿帘石(ep; Holland and Powell, 1998), 斜长石(pl; Holland and Powell, 2003), 钛铁矿(ilm; White *et al.*, 2000), 流体相为纯水(H_2O), 金红石(ru)、石英(q)为纯相矿物. 笔者将全岩 XRF 主量数据(表 3)转化为氧化物的摩尔含量, 结合主要矿物电子探针数据和矿物含量, 得出用于模拟计算的有效全岩成分为: $\text{SiO}_2 = 51.43\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 9.38\%$ 、 $\text{CaO} = 12.03\%$ 、 $\text{MgO} = 11.91\%$ 、 $\text{FeO} = 12.07\%$ 、 $\text{Na}_2\text{O} = 0.76\%$ 、 $\text{TiO}_2 = 1.61\%$ 、 $\text{O} = 0.83\%$ (摩尔百分含量).

图 6 显示的是样品 L-13-60 在 NCFMASHTO 体系下计算的 P - T 视剖面图. 在该视剖面图中, 以四变域和五变域为主, 石英和流体(纯水)过量. 通过石榴子石变斑晶核部到边部的成分变化结合各阶段矿物组合稳定域及前述传统温压计计算的结果, 可

表 3 全岩地球化学数据

Table 3 Whole-rock compositions (%) of the mafic granulite

	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	TFe ₂ O ₃	Total
L-13-60	0.71	7.21	0.22	14.48	46.73	1.36	10.20	1.95	0.25	16.61	99.54
L-13-61	0.78	7.04	0.24	14.33	46.70	1.31	10.13	2.02	0.25	16.68	99.35
L-13-64	0.70	7.13	0.22	14.07	46.64	1.38	10.53	1.96	0.28	17.35	99.99

注:数据为摩尔百分含量。

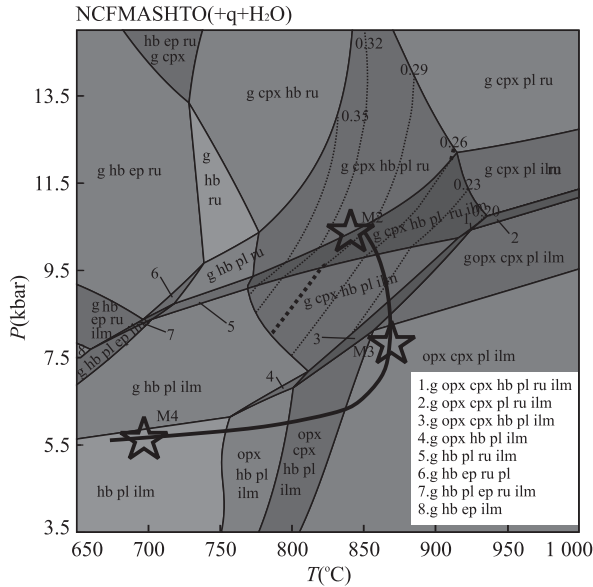


图 6 在 NCFMASHTO(+q+H₂O)体系下模拟的定结高压基性麻粒岩的视剖面图及石榴子石钙含量等值线($X_{Ca} = Ca/(Fe+Mg+Ca)$)

Fig.6 The P - T pseudosection and X_{Ca} ($= Ca/(Fe+Mg+Ca)$) composition isopleth in the NCFMASHTO (+q+H₂O) system for the high-pressure mafic granulite from the Dinggye

以对 P - T 条件作出有效限定.高压麻粒岩相阶段的矿物组合可能处于图中 $g+cpx+hb+pl+ru+ilm$ 区域内,通过石榴子石的钙等值线($X_{Ca} = Ca/(Fe+Mg+Ca)$)可以限定该阶段的温度和压力范围.该阶段温度限定在 $800 \sim 820$ °C 范围内,压力变化在 $9.5 \sim 10.0$ kbar 范围内.峰期后退变质阶段发生降压反应,石榴子石变斑晶边部形成 $opx+pl$ 的蠕虫状后成合晶,矿物组合位于 $opx+cpx+pl+ilm$ 区域,压力范围明显小于高压麻粒岩(M_2)阶段.随着麻粒岩的持续退变,有流体开始加入退变反应,生成角闪石和黑云母等含水矿物,矿物组合位于 $hb+pl+ilm$ 区域内.该阶段温度降低,压力较麻粒岩相阶段略有降低,可看作一个近等压降温过程.结合传统矿物温压计算结果和平均温压计算结果,得到了如图 6 所示的 P - T 轨迹.从 M_2 到 M_3 阶段是一个近等温降压的阶段, M_3 到 M_4 阶段是一个近等压降温的阶段.

5 变质作用的 P - T 轨迹及其构造意义

本文通过对西藏定结地区的高压基性麻粒岩(退变榴辉岩)进行岩相学观察、矿物温压计算和视剖面图模拟,确定了该岩石变质作用的 P - T 轨迹.如图 7 所示,该高压基性麻粒岩样品的退变质 P - T 轨迹是一条顺时针曲线.从高压麻粒岩阶段(M_2)到麻粒岩相阶段(M_3)是一个近等温降压(ITD)过程,从麻粒岩相(M_3)阶段到角闪岩相阶段(M_4)是一个近等压降温(IBC)过程.这一曲线与 Groppo *et al.* (2007) 所恢复的 P - T 轨迹走向大致相同,但在角闪岩相阶段(M_4)的压力略高于后者. Wang *et al.* (2017) 所恢复的 P - T 轨迹在 750 °C 左右发生了近等温降压,这一温度低于本文所恢复的近等温降压的温度.刘树文等(2005)所恢复的 P - T

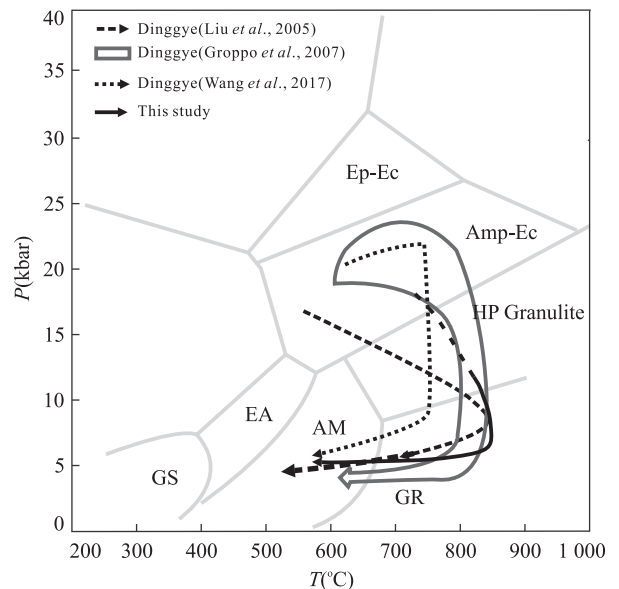


图 7 西藏定结高压基性麻粒岩(退变榴辉岩)的 P - T 轨迹
Fig.7 P - T paths of the Dinggye high-pressure mafic granulites (retrograded eclogite)

AM.角闪岩相; Amp-Ec.角闪-榴辉岩相; EA.绿帘角闪岩相; EC.榴辉岩相; Ep-Ec.绿帘-榴辉岩相; GR.麻粒岩相; GS.绿片岩相.相边界据 Zhang *et al.* (2010) 修改

轨迹在榴辉岩相向高压麻粒岩转变时经历了一个升温的过程,这与前面提到的二者和本文所恢复的 P - T 轨迹都是不一样的,其主要特征是快速升温的热松弛效应,表现了造山带构造剥蚀和均衡隆升过程.从矿物变质反应结构和后期变质矿物组合没达到平衡的情况来看,峰期后的变质作用是一个非常快速的地质事件,可能与中地壳的熔融事件有关,也与喜马拉雅中央山脊的快速隆起和剥蚀事件相一致(季建清等,2004).在本文的研究中,深部的榴辉岩在早期往地表折返的过程中快速抬升,使得绿辉石发生了降压分解生成单斜辉石与钠质斜长石的交生合晶.随着进一步的抬升,石榴子石分解生成了斜方辉石与斜长石的蠕虫状后成合晶,后期抬升到地表被剥蚀,流体加入退变质过程中,生成了角闪石等含水矿物.这些出露在地表的退变榴辉岩可能标定高喜马拉雅杂岩应处于俯冲带的上盘,甚至是弧前增生杂岩或者增生地体中,退变榴辉岩的出露点限定了弧前增生楔底界即地表缝合带出露的最南最底界(肖文交等,2017).

该地区榴辉岩相变质年龄为 14 Ma 左右(Wang *et al.*, 2017),这与 Rolfo *et al.* (2005) 从榴辉岩锆石的变质边中获得的 U-Pb SHRIMP 年龄 13~14 Ma 大致相同,笔者认为这可以代表峰期榴辉岩相变质时间,而不是 29.5 ± 0.4 Ma (刘树文等, 2005).这可能说明最终的印度大陆碰撞拼贴发生于 14 Ma 之后,主中央逆冲断层(MCT)最年轻的变质变形活动时限是 14~12 Ma (Mottram *et al.*, 2015),这也是该碰撞时限的一个重要约束条件(肖文交等,2017).Kali *et al.* (2010) 在 Ama Drime 地块副片麻岩中识别出了 4 期矿物组合,通过矿物成分分析和相平衡模拟,该副片麻岩也具有一个顺时针的 P - T 轨迹. Corrie *et al.* (2010) 对 Ama Drime 地块南部的 Arun 河谷的榴辉岩进行了定年和岩石学研究,认为 Arun 的榴辉岩经历了 3 个变质阶段,第 1 阶段是榴辉岩相阶段(~ 670 °C、 ≥ 1.5 GPa),形成时间为 23~16 Ma;第 2 阶段是麻粒岩相退变质阶段(~ 780 °C、1.2 GPa),第 3 阶段是角闪岩相退变质阶段(~ 675 °C、0.6 GPa),时代为 ~ 14 Ma.这种多期的退变质现象表明曾位于喜马拉雅造山带根部的下地壳变质杂岩经历了由高压到低压的绝热快速抬升过程,与 17 Ma 以来喜马拉雅的隆升作用密切相关(李德威等,2002).上述的研究结果可能表明,在喜马拉雅造山带中段,高喜马拉雅结晶岩系在新生代经历了多期构造-热事件(张泽明等,2013).一般

认为,具有 ITD 过程的顺时针 P - T 轨迹所对应的一次构造事件通常与大陆俯冲增厚的构造过程有关,如板片俯冲或陆陆碰撞(England and Thompson, 1984; Bohlen, 1987).结合本文的地质背景和对样品的分析结果,笔者认为其对应的构造事件应该是在 14 Ma 左右印度次大陆板块与欧亚大陆板块的碰撞挤压,随后高喜马拉雅发生了快速的构造隆升以及近等温降压(IBC)的动力学过程(刘焰和钟大赉,1998;廖群安等,2003;刘树文等,2005),随着快速隆升而来的地表剥蚀,使深部的高级变质岩得以出露于地表.这个阶段的快速隆升伴随着高喜马拉雅大规模中-酸性岩浆活动,以及广泛发育的南北向裂谷构造系(刘小汉等,2009).

6 结论

本文通过对定结高压基性麻粒岩(退变榴辉岩)详细的岩相学观察,采用传统温压计和平均温压计计算方法,结合变质相平衡模拟,确定了各变质阶段的温压条件,并建立了相应的 P - T 演化轨迹.结合已有的变质年代学资料和该地区前人的研究成果,笔者得到了以下两点认识:

(1) 定结高压基性麻粒岩(退变榴辉岩)存在着 4 个变质阶段的矿物组合,峰期榴辉岩相阶段矿物组合是石榴子石(核部)+绿辉石(假象)+角闪石+黑云母+石英+金红石;高压麻粒岩相阶段矿物组合是石榴子石(幔部)+单斜辉石+斜长石+钛铁矿+黑云母,温压条件是 $786 \sim 826$ °C、 $0.78 \sim 0.96$ GPa;中压麻粒岩相阶段矿物组合是石榴子石(边部)+斜方辉石+斜长石+钛铁矿+黑云母,温压条件是 $798 \sim 850$ °C、 $0.71 \sim 0.75$ GPa;角闪岩相阶段矿物组合是角闪石+斜长石,温压条件是 $610 \sim 666$ °C、 $0.51 \sim 0.60$ GPa.整个 P - T 轨迹是一条具有峰期后近等温降压(ITD)顺时针曲线,与造山带碰撞的构造背景相对应.

(2) 定结高压麻粒岩(退变榴辉岩)是喜马拉雅碰撞造山的产物,经历了近等温降压(ITD)的构造抬升过程.

致谢:电子探针分析得到广州地化所同位素地球化学国家重点实验室电子探针实验室贺鹏丽博士和陈林丽工程师的帮助;全岩地球化学分析得到了邵珠琳同学的帮助;特邀主编魏春景教授和两位评审专家给出了非常有益的建设性修改意见,作者在此表示诚挚的感谢!

References

- Anderson, J. L., Smith, D. R., 1995. The Effects of Temperature and $F(O_2)$ on the Al-in-Hornblende Barometer. *American Mineralogist*, 80(5-6): 549-559. <https://doi.org/10.2138/am-1995-5-615>
- Bézos, A., Humler, E., 2005. The $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ Ratios of MORB Glasses and Their Implications for Mantle Melting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 711-725. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.026>
- Bhadra, S., Bhattacharya, A., 2007. The Barometer Tremolite+Tschermakite+2 Albite=2 Pargasite+8 Quartz: Constraints from Experimental Data at Unit Silica Activity, with Application to Garnet-Free Natural Assemblages. *American Mineralogist*, 92(4): 491-502. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2067>
- Bohlen, S. R., 1987. Pressure-Temperature-Time Paths and a Tectonic Model for the Evolution of Granulites. *The Journal of Geology*, 95(5): 617-632.
- Chakungal, J., Dostal, J., Grujic, D., et al., 2010. Provenance of the Greater Himalayan Sequence: Evidence from Mafic Granulites and Amphibolites in NW Bhutan. *Tectonophysics*, 480(1-4): 198-212. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.10.014>
- Chen, X. Y., Tong, L. X., Zhang, C. L., et al., 2015. Retrograde Garnet Amphibolite from Eclogite of the Zhejiang Longyou Area: New Evidence of the Caledonian Orogenic Event in the Cathaysia Block. *Chinese Science Bulletin*, 60(13): 1207-1217 (in Chinese with English abstract).
- Coleman, R. G., Lee, D. E., Beatty, L. B., et al., 1965. Eclogites and Eclogites: Their Differences and Similarities. *Geological Society of America Bulletin*, 76(5): 483-508. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1965\)76\[483:EAETDA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1965)76[483:EAETDA]2.0.CO;2)
- Corrie, S. L., Kohn, M. J., Vervoort, J. D., 2010. Young Eclogite from the Greater Himalayan Sequence, Arun Valley, Eastern Nepal: P - T - t Path and Tectonic Implications. *Earth & Planetary Science Letters*, 289(3-4): 406-416. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.11.029>
- Cottrell, E., Kelley, K. A., 2011. The Oxidation State of Fe in MORB Glasses and the Oxygen Fugacity of the Upper Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 305(3-4): 270-282. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.03.014>
- Daczko, N. R., Halpin, J. A., 2009. Evidence for Melt Migration Enhancing Recrystallization of Metastable Assemblages in Mafic Lower Crust, Fiordland, New Zealand. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(2): 167-185. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00811.x>
- Diener, J. F. A., Powell, R., White, R. W., et al., 2007. A New Thermodynamic Model for Clino- and Orthoamphiboles in the System Na_2O - CaO - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - O . *Journal of Metamorphic Geology*, 25(6): 631-656. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00720.x>
- Ding, L., Zhong, D. L., 1999. Metamorphic Characteristic and Geotectonic Implication of the High-Pressure Granulites from Namjagbarwa, Eastern Tibet. *Science in China (Series D)*, 29(5): 385-397 (in Chinese).
- Eckert, J. O., Newton, R., Kleppa, O., 1991. The H of Reaction and Recalibration of Garnet-Pyroxene-Plagioclase-Quartz Geobarometers in the CMAS System by Solution Calorimetry. *American Mineralogist*, 76(1-2): 148-160.
- England, P. C., Thompson, A. B., 1984. Pressure-Temperature-Time Paths of Regional Metamorphism I. Heat Transfer during the Evolution of Regions of Thickened Continental Crust. *Journal of Petrology*, 25(4): 894-928. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.894>
- Green, E., Holland, T., Powell, R., 2007. An Order-Disorder Model for Omphacitic Pyroxenes in the System Jadeite-Diopside-Hedenbergite-Acmite, with Applications to Eclogitic Rocks. *American Mineralogist*, 92(7): 1181-1189. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2401>
- Groppo, C., Lombardo, B., Rolfo, F., et al., 2007. Clockwise Exhumation Path of Granulitized Eclogites from the Ama Drime Range (Eastern Himalayas). *Journal of Metamorphic Geology*, 25(1): 51-75. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2006.00678.x>
- Grujic, D., Warren, C. J., Wooden, J. L., 2011. Rapid Synconvergent Exhumation of Miocene-Aged Lower Orogenic Crust in the Eastern Himalaya. *Lithosphere*, 3(5): 346-366. <https://doi.org/10.1130/L154.1>
- Guilmette, C., Indares, A., Hébert, R., 2011. High-Pressure Anatectic Paragneisses from the Namche Barwa, Eastern Himalayan Syntaxis: Textural Evidence for Partial Melting, Phase Equilibria Modeling and Tectonic Implications. *Lithos*, 124(1-2): 66-81. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.09.003>
- Harley, S. L., 1989. The Origins of Granulites: A Metamorphic Perspective. *Geological Magazine*, 126(3): 215-247. <https://doi.org/10.1017/s0016756800022330>
- Hodges, K. V., 2000. Tectonics of the Himalaya and Southern Tibet from Two Perspectives. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3): 324-350. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<0324:TOTHAS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<0324:TOTHAS>2.3.CO;2)
- Holland, T., Blundy, J., 1994. Non-Ideal Interactions in Calcic Amphiboles and Their Bearing on Amphibole-Plagioclase Thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(4): 433-447. <https://doi.org/10.1007/bf01170811>

1007/BF00310910

- Holland, T., Powell, R., 2003. Activity-Composition Relations for Phases in Petrological Calculations; An Asymmetric Multicomponent Formulation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145(4): 492–501. <https://doi.org/10.1007/s00410-003-0464-z>
- Holland, T. J. B., Powell, R., 1998. An Internally Consistent Thermodynamic Data Set for Phases of Petrological Interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 309–343. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x>
- Jessup, M. J., Cottle, J. M., 2010. Progression from South-Directed Extrusion to Orogen-Parallel Extension in the Southern Margin of the Tibetan Plateau, Mount Everest Region, Tibet. *The Journal of Geology*, 118(5): 467–486. <https://doi.org/10.1086/655011>
- Jessup, M. J., Newell, D. L., Cottle, J. M., et al., 2008. Orogen-Parallel Extension and Exhumation Enhanced by Denudation in the Trans-Himalayan Arun River Gorge, Ama Drime Massif, Tibet-Nepal. *Geology*, 36(7): 587–590. <https://doi.org/10.1130/G24722A.1>
- Ji, J. Q., Zhong, D. L., Song, B., et al., 2004. Metamorphism, Geochemistry and U-Pb Zircon SHRIMP Geochronology of the High-Pressure Granulites in the Central Greater Himalayas. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1283–1300 (in Chinese with English abstract).
- Kali, E., Leloup, P. H., Arnaud, N., et al., 2010. Exhumation History of the Deepest Central Himalayan Rocks, Ama Drime Range: Key Pressure-Temperature-Deformation-Time Constraints on Orogenic Models. *Tectonics*, 29(2): TC2014. <https://doi.org/10.1029/2009TC002551>
- Kellett, D. A., Cottle, J. M., Smit, M., 2014. Eocene Deep Crust at Ama Drime, Tibet: Early Evolution of the Himalayan Orogen. *Lithosphere*, 6(4): 220–229. <https://doi.org/10.1130/L350.1>
- Kohn, M. J., 2014. Himalayan Metamorphism and Its Tectonic Implications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42(1): 381–419. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-055005>
- Lal, R. K., 1993. Internally Consistent Recalibrations of Mineral Equilibria for Geothermobarometry Involving Garnet-Orthopyroxene-Plagioclase-Quartz Assemblages and Their Application to the South Indian Granulites. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(6): 855–866. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1993.tb00195.x>
- Langille, J. M., Jessup, M. J., Cottle, J. M., et al., 2010. Kinematic Evolution of the Ama Drime Detachment: Insights into Orogen-Parallel Extension and Exhumation of the Ama Drime Massif, Tibet-Nepal. *Journal of Structural Geology*, 32(7): 900–919. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.04.005>
- Le Fort, P., 1975. Himalayas: The Collided Range. Present Knowledge of the Continental Arc. *American Journal of Science*, 275: 1–44.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Brich, W. D., et al., 2004. Nomenclature of Amphiboles: Additions and Revisions to the International Mineralogical Association's Amphibole Nomenclature. *Mineralogical Magazine*, 68(1): 209–215. <https://doi.org/10.1180/0026461046810182>
- Leloup, P. H., Mahéo, G., Arnaud, N., et al., 2010. The South Tibet Detachment Shear Zone in the Dinggye Area: Time Constraints on Extrusion Models of the Himalayas. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(1–2): 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.12.035>
- Li, D. W., Liao, Q. A., Yuan, Y. M., et al., 2002. Discovery and Significance of Basic Granulites in the Complexes in the Middle Himalaya. *Earth Science*, 27(1): 80, 96 (in Chinese).
- Li, D. W., Liao, Q. A., Yuan, Y. M., et al., 2003. U-Pb Zircon Ages of Rimana Granulites in the Middle Himalaya. *Chinese Science Bulletin*, 48(20): 2176–2179 (in Chinese).
- Liao, Q. A., Li, D. W., Yi, S. H., et al., 2003. Petrologic and Geologic Significance of Garnet Pyroxenite and Mafic Granulites from High Himalayan Region, Tibet. *Earth Science*, 28(6): 627–633 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. M., Li, D. W., Yang, W. R., 2003. Study of Mylonite and Deformation of Ductile Shear Zone, Dingjie Area. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 479–486 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q., Deng, Y. B., Xiang, S. Y., et al., 2017. Early Ordovician Tectono-Thermal Event in Zhongba Terrane and Its Geological Significance. *Earth Science*, 42(6): 881–890 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.076>
- Liu, S. W., Zhang, J. J., Shu, G. M., et al., 2005. Mineral Chemistry, P - T - t Paths and Exhumation Processes of Mafic Granulites in Dinggye, Southern Tibet. *Science in China (Series D)*, 35(9): 810–820 (in Chinese).
- Liu, X. H., Ju, Y. T., Wei, L. J., et al., 2009. An Alternative Tectonic Model for the Yarlung Zangbo Suture Zone. *Science in China (Series D)*, 39(4): 448–463 (in Chinese).
- Liu, Y., Zhong, D. L., 1998. Petrology of High-Pressure Granulites from Eastern Himalaya: Implications to Tectonic Significance. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3): 267–281 (in Chinese with English abstract).
- Lombardo, B., Rolfo, F., 2000. Two Contrasting Eclogite Types in the Himalayas: Implications for the Himalayan Orogeny. *Journal of Geodynamics*, 30(1–2): 37–60. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.04.005>

- org/10.1016/S0264-3707(99)00026-5
- Lombardo, B., Rolfo, F., Compagnoni, R., 2000. Glaucophane and Barroisite Eclogites from the Upper Kaghan Nappe: Implications for the Metamorphic History of the NW Himalaya. *Geological Society, London, Special Publications*, 170 (1): 411 – 430. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.170.01.22>
- Mottram, C. M., Parrish, R. R., Regis, D., et al., 2015. Using U-Th-Pb Petrochronology to Determine Rates of Ductile Thrusting: Time Windows into the Main Central Thrust, Sikkim Himalaya. *Tectonics*, 34 (7): 1355 – 1374. <https://doi.org/10.1002/2014TC003743>
- Mukherjee, B., Sachan, H. K., Ahmad, T., 2005. A New Occurrence of Microdiamond from Indus Suture Zone, Himalaya: A Possible Origin. In: Memoire, H.S., ed., Special Extended Abstract Volume. *Géologie Alpine*, 44: 136.
- Möller, C., 1998. Decompressed Eclogites in the Sveconorwegian (Grenvillian) Orogen of SW Sweden: Petrology and Tectonic Implications. *Journal of Metamorphic Geology*, 16 (5): 641 – 656. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00160.x>
- O'Brien, P.J., Zotov, N., Law, R., et al., 2001. Coesite in Himalayan Eclogite and Implications for Models of India-Asia Collision. *Geology*, 29 (5): 435 – 438. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0435:CIHEAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0435:CIHEAI>2.0.CO;2)
- Pan, Y., Kidd, W.S.F., 1992. Nyainqentanglha Shear Zone: A Late Miocene Extensional Detachment in the Southern Tibetan Plateau. *Geology*, 20 (9): 775 – 778. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0775:NSZALM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0775:NSZALM>2.3.CO;2)
- Pitra, P., Ballèvre, M., Ruffet, G., 2010. Inverted Metamorphic Field Gradient towards a Variscan Suture Zone (Champtoceaux Complex, Armorican Massif, France). *Journal of Metamorphic Geology*, 28 (2): 183 – 208. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00862.x>
- Powell, R., Holland, T., Worley, B., 1998. Calculating Phase Diagrams Involving Solid Solutions via Non-Linear Equations, with Examples Using THERMOCALC. *Journal of Metamorphic Geology*, 16 (4): 577 – 588. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00157.x>
- Ravna, K., 2000. The Garnet-Clinopyroxene Fe^{2+} -Mg Geothermometer: An Updated Calibration. *Journal of Metamorphic Geology*, 18 (2): 211 – 219. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00247.x>
- Rolfo, F., McClelland, W., Lombardo, B., 2005. Geochronological Constraints on the Age of the Eclogite-Facies Metamorphism in the Eastern Himalaya. In: Memoire, H.S., ed., Special Extended Abstract Volume. *Géologie Alpine*, 44: 170.
- Wang, Y.H., Zhang, L.F., Zhang, J.J., et al., 2017. The Youngest Eclogite in Central Himalaya: P-T Path, U-Pb Zircon Age and Its Tectonic Implication. *Gondwana Research*, 41: 188 – 206. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.10.013>
- Wei, C.J., 2011. Approaches and Advancement of the Study of Metamorphic P-T-t Paths. *Earth Science Frontiers*, 18 (2): 1 – 16 (in Chinese with English abstract).
- White, R.W., Powell, R., Clarke, G.L., 2002. The Interpretation of Reaction Textures in Fe-Rich Metapelitic Granulites of the Musgrave Block, Central Australia: Constraints from Mineral Equilibria Calculations in the System K_2O -FeO-MgO- Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - TiO_2 - Fe_2O_3 . *Journal of Metamorphic Geology*, 20 (1): 41 – 55. <https://doi.org/10.1046/j.0263-4929.2001.00349.x>
- White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B., 2007. Progress Relating to Calculation of Partial Melting Equilibria for Metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*, 25 (5): 511 – 527. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00711.x>
- White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B., et al., 2000. The Effect of TiO_2 and Fe_2O_3 on Metapelitic Assemblages at Greenschist and Amphibolite Facies Conditions: Mineral Equilibria Calculations in the System K_2O -FeO-MgO- Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - TiO_2 - Fe_2O_3 . *Journal of Metamorphic Geology*, 18 (5): 497 – 511.
- Xiao, W.J., Ao, S.J., Yang, L., et al., 2017. Anatomy of Composition and Nature of Plate Convergence: Insights for Alternative Thoughts for Terminal India-Eurasia Collision. *Science in China (Series D)*, 47 (6): 631 – 656 (in Chinese).
- Xu, Z.Q., Wang, Q., Pécher, A., et al., 2013. Orogen-Parallel Ductile Extension and Extrusion of the Greater Himalaya in the Late Oligocene and Miocene. *Tectonics*, 32 (2): 191 – 215. <https://doi.org/10.1002/tect.20021>
- Yin, A., 2006. Cenozoic Tectonic Evolution of the Himalayan Orogen as Constrained by along-Strike Variation of Structural Geometry, Exhumation History, and Foreland Sedimentation. *Earth-Science Reviews*, 76 (1): 1 – 131. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.08.005>
- Yu, J.J., Zeng, L.S., Liu, J., et al., 2011. Early Miocene Leucogranites in Dinggye Area, Southern Tibet: Formation Mechanism and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (7): 1961 – 1972 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.J., Guo, L., Ding, L., 2002. Structural Characteristics of Middle and Southern Xainza-Dinggye Normal Fault System and Its Relationship to Southern Tibetan Detachment System. *Chinese Science Bulletin*, 47 (10): 738 – 743 (in Chinese).
- Zhang, Z.M., Dong, X., He, Z.Y., et al., 2013. Indian and Asian

- Continental Collision Viewed from HP and UHP Metamorphism of the Himalaya Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1713–1726 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.M., Zhao, G., Santosh, M., et al., 2010. Two Stages of Granulite Facies Metamorphism in the Eastern Himalayan Syntaxis, South Tibet: Petrology, Zircon Geochronology and Implications for the Subduction of Neo-Tethys and the Indian Continent beneath Asia. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(7): 719–733. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00885.x>
- Zhang, Z.M., Zheng, L.L., Wang, J.L., et al., 2007. Garnet Pyroxenite in the Namjagbarwa Group-Complex in the Eastern Himalayan Tectonic Syntaxis, Tibet, China: Evidence for Subduction of the Indian Continent beneath the Eurasian Plate at 80–100 km Depth. *Geological Bulletin of China*, 26(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G., Cawood, P.A., Wilde, S.A., et al., 2001. High-Pressure Granulites (Retrograded Eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and Tectonic Implications. *Journal of Petrology*, 42(6): 1141–1170. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.6.1141>
- Zhou, X., Tong, L.X., Liu, X.H., et al., 2014. Metamorphism Evolution of Mafic Granulite from the Larsemann Hills, East Antarctica. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1731–1747 (in Chinese with English abstract).
- 27(1): 80, 96.
- 李德威, 廖群安, 袁晏明, 等, 2003. 喜马拉雅造山带中段日玛那麻粒岩锆石 U-Pb 年代学. 科学通报, 48(20): 2176–2179.
- 廖群安, 李德威, 易顺华, 等, 2003. 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. 地球科学, 28(6): 627–633.
- 刘德民, 李德威, 杨巍然, 2003. 定结地区韧性剪切带变形特征与糜棱岩研究. 地学前缘, 10(2): 479–486.
- 刘强, 邓玉彪, 向树元, 等, 2017. 藏南仲巴地体早奥陶世构造—热事件及其地质意义. 地球科学, 42(6): 881–890.
- 刘树文, 张进江, 舒桂明, 等, 2005. 藏南定结铁镁质麻粒岩矿物化学、 P - T 轨迹和折返过程. 中国科学(D辑), 35(9): 810–820.
- 刘小汉, 琚宜太, 韦利杰, 等, 2009. 再论雅鲁藏布江缝合带构造模型. 中国科学(D辑), 39(4): 448–463.
- 刘焰, 钟大赉, 1998. 东喜马拉雅地区高压麻粒岩岩石学研究及构造意义. 地质科学, 33(3): 267–281.
- 魏春景, 2011. 变质作用 P - T - t 轨迹的研究方法与进展. 地学前缘, 18(2): 1–16.
- 肖文交, 敖松坚, 杨磊, 等, 2017. 喜马拉雅汇聚带结构—属性解剖及印度—欧亚大陆最终拼贴格局. 中国科学(D辑), 47(6): 631–656.
- 于俊杰, 曾令森, 刘静, 等, 2011. 藏南定结地区早中新世淡色花岗岩的形成机制及其构造动力学意义. 岩石学报, 27(7): 1961–1972.
- 张进江, 郭磊, 丁林, 2002. 申扎—定结正断层体系中, 南段构造特征及其与藏南拆离系的关系. 科学通报, 47(10): 738–743.
- 张泽明, 董昕, 贺振宇, 等, 2013. 喜马拉雅造山带的高压超高压变质作用与印度—亚洲大陆碰撞. 岩石学报, 29(5): 1713–1726.
- 张泽明, 郑来林, 王金丽, 等, 2007. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群中的石榴辉石岩—印度大陆向欧亚板块之下俯冲至 80~100 km 深度的证据. 地质通报, 26(1): 1–12.
- 周信, 全来喜, 刘小汉, 等, 2014. 东南极拉斯曼丘陵镁铁质麻粒岩的变质作用演化. 岩石学报, 30(6): 1731–1747.

附中文参考文献

- 陈相艳, 全来喜, 张传林, 等, 2015. 浙江龙游石榴石角闪岩(退变榴辉岩): 华夏加里东期碰撞造山事件的新证据. 科学通报, 60(13): 1207–1217.
- 丁林, 钟大赉, 1999. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义. 中国科学(D辑), 29(5): 385–397.
- 季建清, 钟大赉, 宋彪, 等, 2004. 喜马拉雅中段高压麻粒岩变质作用、地球化学与年代学. 岩石学报, 20(5): 1283–1300.
- 李德威, 廖群安, 袁晏明, 等, 2002. 喜马拉雅造山带中段核部杂岩中基性麻粒岩的发现及构造意义. 地球科学,