

黄杰, 田作林, 张聪, 等. 拉萨地块松多榴辉岩的变质演化过程: NCKMnFMASHTO 体系中的相平衡关系[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1559–1571.
Huang Jie, Tian Zuolin, Zhang Cong, et al. Metamorphic evolution of Sumdo eclogite in Lhasa Block of the Tibetan Plateau: Phase equilibrium in NCKMnFMASHTO System[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1559–1571(in Chinese with English abstract).

拉萨地块松多榴辉岩的变质演化过程： NCKMnFMASHTO 体系中的相平衡关系

黄 杰^{1,2} 田作林¹ 张 聪¹ 杨经绥¹ 陈 梅^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质研究所, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037;

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 拉萨地块松多榴辉岩主要矿物组合为石榴子石、绿辉石、角闪石、多硅白云母、绿帘石、金红石。石榴子石环带不明显, 核部成分均一, 从核部到边部, 镁铝榴石和钙铝榴石含量降低, 可能分别记录了榴辉岩峰期及退变质过程信息。绿辉石显示微弱的成分环带, 硬玉含量从核部到边部略有升高, 部分绿辉石边部发育韭闪石退变质边, 反映了在减压过程中外来流体进入体系的过程。多硅白云母具有高的 Si 含量(3.5~3.6), 其中石榴石包体中的多硅白云母相对基质中的白云母有更高的 Si 值。本文利用 Thermocalc 变质相平衡模拟软件, 结合详细岩相学观察, 在 NCKMnFMASHTO 体系下, 模拟松多含多硅白云母榴辉岩的变质演化过程。其中, 榴辉岩峰期矿物组合为 $g+o+law+phn+ru$, 石榴石核部最大镁铝榴石值和石榴子石包体中多硅白云母最大 Si 值确定的榴辉岩峰期温压条件约为 620°C , $32\times 10^8\text{ Pa}$, 榴辉岩经历了近等温降压的退变质过程。相平衡模拟结果表明拉萨地块松多榴辉岩经历了超高压变质作用过程, 并经历了相对快速的折返过程到中部地壳层次。

关键字: 拉萨地块; 松多榴辉岩; 相平衡; $P-T$ 轨迹; 变质作用

中图分类号: P588.34 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1559-13

Metamorphic evolution of Sumdo eclogite in Lhasa Block of the Tibetan Plateau: Phase equilibrium in NCKMnFMASHTO System

HUANG Jie^{1,2}, TIAN Zuo-lin¹, ZHANG Cong¹, YANG Jing-sui¹, CHEN Mei^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The eclogite in the Lhasa block mainly consists of garnet, omphacite, phengite, epidote and rutile. The garnet in the eclogite has no visible zonation and a homogeneous core. The Xpy and Xgr decrease from core to rim. Most of the omphacites show

收稿日期: 2015-06-11; 改回日期: 2015-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202034), 中国地质调查局面上项目(12120115026801, 12120114061501)及中国地质科学院地质研究所基本科研业务费(J1518)资助。

作者简介: 黄杰, 男, 1990年生, 硕士生, 从事变质岩岩石学研究工作; E-mail: 2001130126@cugb.edu.cn。

通讯作者: 张聪, 男, 1983年生, 副研究员, 从事变质地质学及超高压岩石学研究工作; E-mail: congzhang@pku.edu.cn。

weak zonation. The Jd value increases from core to rim. The growth of some narrow barroisite rods along omphacite cleavage may reflect retrograde processes. The phengite included in garnet has higher Si value than that in the matrix. The authors applied for the first time the phase equilibrium simulation method to the study of this common eclogite in the Lhasa block. *P-T* pseudosection of sample 13SD43 was employed in the NCKMnFMASHTO system. The maximum Xpy in the core of garnet and the maximum Si value in phengite were used to determine the peak metamorphic condition of 610°C, 32Kbar, with a peak mineral assemblage of g+o+law+phn+ru. With the help of phase equilibrium and petrography research, several metamorphic evolution processes of the eclogite could be recognized. Studies show that the eclogites in the Lhasa block probably experienced UHP metamorphism and rapid exhumation to the middle crust, which might have provided new evidence for the existence of the suture zone in the Lhasa block.

Key words: Lhasa block; Sumdo eclogite; phase equilibrium; *P-T* path; metamorphism

About the First author: Huang Jie, male, born in 1990, master candidate, mainly engages in the study of petrology; E-mail: 2001130126@cugb.edu.cn.

About the corresponding author: ZHANG Cong, male, born in 1983, associate professor, major in metamorphic geology; E-mail: congzhang@pku.edu.cn.

1 前 言

高压—超高压变质岩石作为俯冲到下部地壳甚至地幔深度又折返到地表的岩石,是汇聚板块边界大洋俯冲和大陆碰撞的重要标志,经历了由洋壳俯冲到陆陆碰撞及折返的整个地质过程^[1-7]。洋壳俯冲高压—超高压榴辉岩记录了大洋板块俯冲及造山带形成和演化过程中的大量重要信息,是了解板块俯冲和造山过程的重要窗口。通过对其形成的温压条件以及变质 *P-T* 轨迹的研究,可以推测其俯冲及折返过程中经历的地球动力学过程,对理解造山带形成与演化有着十分重要的意义。

自从榴辉岩在拉萨地块东部松多地区被发现以来^[8-9],拉萨地块内部是否存在缝合带的问题就一直被地质学家重视并存在较大争议。不少学者对区内榴辉岩进行了岩石学及地球化学研究^[10-13],地球化学研究表明松多榴辉岩的原岩具有典型的 MORB 特征^[13-15]。已开展的岩石学研究及温压条件计算表明榴辉岩的峰期温压条件约为 730°C, 25.8×10⁵ Pa~26.7×10⁵ Pa^[8,10-11,16]; 760~800°C, 33×10⁵ Pa~39×10⁵ Pa^[17]; 753~790°C, 34×10⁵ Pa~38×10⁵ Pa^[13] 及 610°C, 30×10⁵ Pa^[18]。从温压计算方法来看,早期学者多使用石榴石—单斜辉石矿物对温度计^[19]和石榴石—单斜辉石—多硅白云母地质压力计^[20-21]进行估算,对于此类温压计来说,其最大的缺陷就在于 Fe³⁺ 的不确定性,采用电价平衡方法 Fe³⁺=Na-(Al+Cr) 计算得来的 Fe³⁺ 误差较大,会引起 Fe²⁺/Mg 比例的显著变化^[22-23]。应用此类方法,不同学者计算得到榴辉

岩形成的温压条件差别也相对较大。这种差别以及相对薄弱的岩相学研究,导致对松多地区榴辉岩变质过程的认识至今仍不明确。

本文以新鲜榴辉岩样品(13SD43)为例,采用详细的岩相学观察和变质相平衡模拟方法,利用 Thermocalc 相图计算软件在 NCKMnFMASHTO 体系下模拟榴辉岩的视剖面图。在此基础上计算榴辉岩的峰期温压条件并划分出榴辉岩变质过程中经历的不同演化阶段,进而推演其 *P-T* 轨迹。文中所使用的矿物代号为: Act—阳起石, Coe—柯石英, Cpx—单斜辉石, Ep—绿帘石, Grt—石榴石, Gl—蓝闪石, Hb—钠钙质—钙质角闪石, Jd—硬玉, Law—硬柱石, Phn—多硅白云母, o—绿辉石, q—石英, Py—镁铝榴石, Gr—钙铝榴石, Ta—滑石, Amph—普通角闪石。

2 区域地质概况

西藏拉萨地块位于班公—怒江缝合带和雅鲁藏布江缝合带之间,地理位置上西起狮泉河、冈仁波齐,向东经念青唐古拉山与伯舒拉岭相连,南北宽约 300 km,东西向延伸约 2000 km,面积达 45 万 km²,其内部发育冈底斯中、新生代岛弧及活动陆缘火山带。拉萨地块中变质岩比较发育,呈零星分布的念青唐古拉群为古老的变质基底,其岩石组合类型主要有含石榴黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、斜长角闪片岩、大理岩、石英岩及花岗片麻岩等。锆石 U—Pb 同位素年龄约为 1250 Ma^[24],而在那木错西缘和那曲以北地区念青唐古拉群表壳岩石和变质深成岩锆石 SHRIMP SHRIMP 锆石 U—Pb 定

年为748~787 Ma,并认为念青唐古拉山和高喜马拉雅形成时代相当^[25]。

松多榴辉岩带位于拉萨市北东方向约200 km的松多乡一带,产在拉萨地块的中东部,呈近东西向延伸,已知规模100 km以上。主要发育于下奥陶统的松多岩群,可分为盆萨冈、马布库和雷龙库三个组,松多群岩性主要为片岩、大理岩和石英岩,时代为前奥陶纪地层^[24];《西藏自治区区域地质志》将该套地层厘定为石炭系^[26];2004年新版的《青藏高原地质图》将其归为石炭—二叠系地层^[27]。而新发现的榴辉岩就在该岩群中,其形成时代为260 Ma左右,变质时代为二叠纪^[28]。榴辉岩镜状产出,榴辉岩的围岩为一套含石榴子石的片岩和绿帘角闪岩。采样点位置如图1-b所示。榴辉岩出露规模,沿东

西向展布2 km左右,南北向展布1 km左右。其围岩为一套石英岩、超基性岩、蛇纹岩、绿片岩以及云母片岩的岩石组合,空间上榴辉岩与白云母片岩关系密切(图2-a)。

3 岩相学特征

松多榴辉岩为粒状变晶结构,块状构造。主要矿物组成为石榴子石(30%~35%),绿辉石(25%~30%),角闪石(10%~15%),绿帘石(10%~15%),次要矿物为金红石(5%),多硅白云母(3%)和少量的石英(1%),并含有少量的锆石和磷灰石等副矿物。石榴子石呈粉红色,半自形,显微镜下观察无明显的核边结构。按照颗粒粒度可以将石榴石分为两类,粗粒石榴石粒径在2~4 mm,细粒的在0.5~1.2

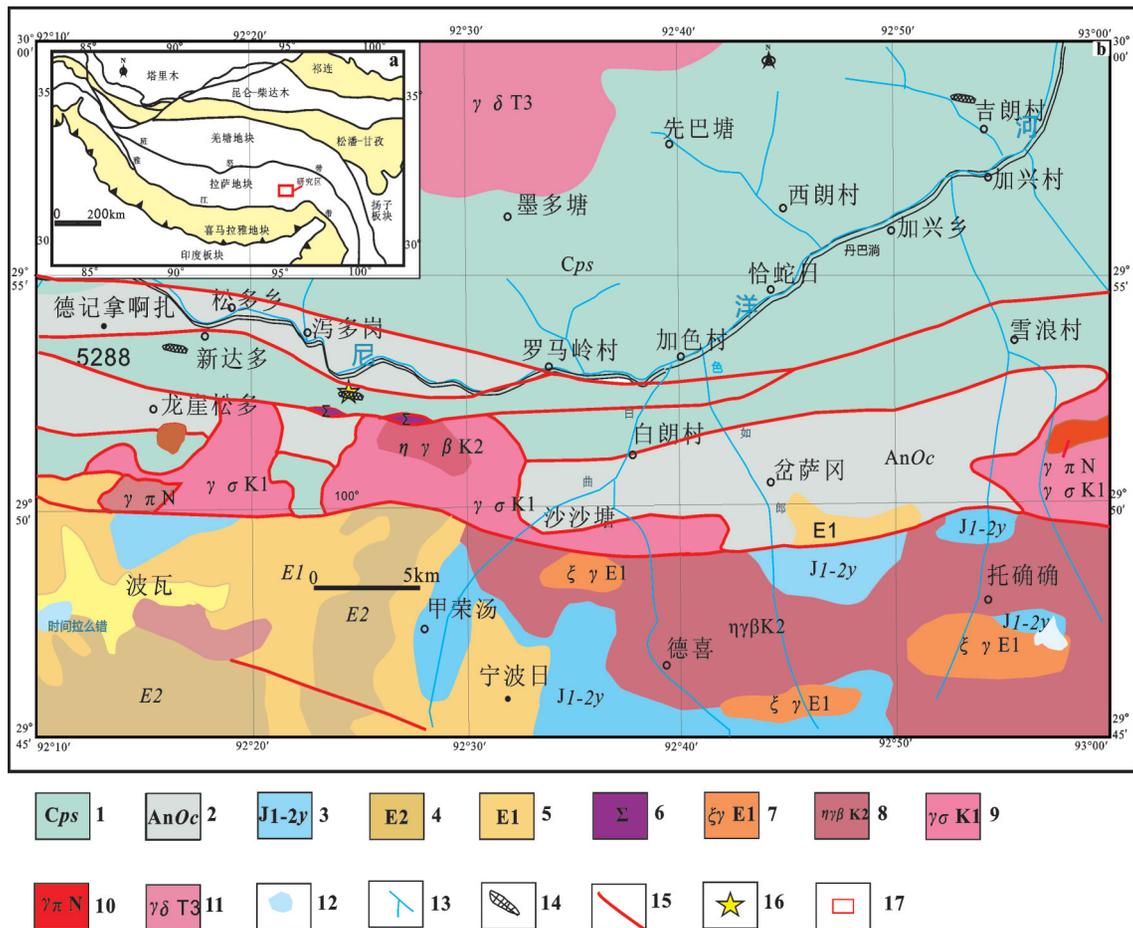


图1 研究区地质图

a—青藏高原构造单元划分简图和本文研究区位置;b—研究区地质图和本文采样位置
Fig.1 Geological map of the study area and the field occurrence of the eclogite

a—Simplified map of tectonic subdivision of the Tibetan Plateau and the study area;b—Geological map of the study area and the sample locations

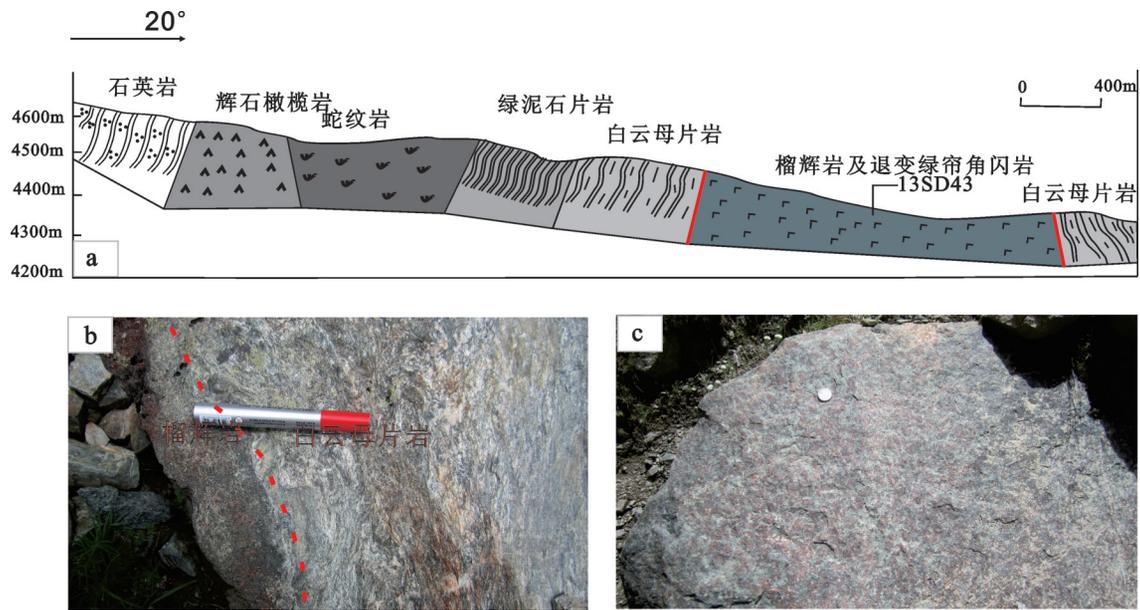


图2 拉萨地块松多榴辉岩产出剖面(a 13SD43代表采样点位置)榴辉岩与围岩的野外接触关系(b)及新鲜榴辉岩的野外照片(c)
Fig.2 (a) Geological section of Sumdo eclogite from the Lhasa Block (13SD43 represents sampling location). (b) Field photograph showing the relationship between eclogite and its country rocks. (c) Field photograph of fresh eclogite in the Sumdo area

mm左右,且粗粒石榴石表面裂理发育,在空间上与辉石密切共生,具有较为平直的联系边界。少数石榴子具有净边结构(图3-a),核幔部有金红石、白云母、辉石及角闪石等多种矿物包体。包体周围裂理发育与基质相通,说明包体可能经历了退变质改造过程,这给限定石榴子石生长阶段的变质条件带来了很大的不确定性。细粒石榴石保存相对完好,表面基本无裂隙,内部鲜有矿物包体。绿辉石单偏光下呈草绿色到无色,短柱状和粒状。基质中的绿辉石粒径在2~4 mm,有微弱的片理化现象,含有角闪石、金红石及石榴子石包体。在绿辉石的边部有角闪石反应边(图3-b)。角闪石呈绿色-淡褐色,多色性明显,呈基质、包体和后成合晶三种产出状态。部分角闪石还和白云母共生分布在石榴石裂隙之间(图3-c),为退变质过程中形成的角闪石。白云母主要为多硅白云母,呈片状存在于基质及石榴石包体中。帘石在基质中较为常见,颗粒粒度大小不一(图3-d),以黝帘石及部分绿帘石为主。

4 全岩成分和矿物化学特征

新鲜榴辉岩(13SD43)的全岩成分是在国家地质实验测试中心利用XRF方法和化学测试法分析

获得的,全岩具有硅不饱,富钙、贫钠等特点(表1)。该全岩成分为变质相平衡模拟的初始成分。电子探针矿物成分分析在北京大学造山带与大陆构造教育部重点实验室利用JEOL JXA-8110电子探针完成,分析条件为:加速电压15 kV,电流10 nA,束斑直径1 μm (多硅白云母为5 μm)。

4.1 石榴子石

松多榴辉岩的石榴子石成分如表2、图4所示,由钙铝榴石(Gr23~29)、镁铝榴石(Py17~30)、铁铝榴石(Alm45~49)和锰铝榴石(Sps1~2)四个端元组成。石榴子石成分环带不明显,核部成分较为均匀,其边部Py含量降低而Alm和Grs的含量升高,表现出扩散环带的特点^[29-30],表明石榴石在较高温度条件下环带可能被均一化改造,而后期退变过程中又经历了Fe-Mg再平衡的过程。与角闪石和部分绿辉石接触的石榴石边缘形状不规则,显示有退变质改造的特点,表现为退变石榴子石的特征。

4.2 单斜辉石

单斜辉石以绿辉石为主,部分绿辉石边部退变生成角闪石和斜长石的后成合晶。绿辉石中硬玉Jd的含量(0.27~0.31),部分显示微弱的成分环带特征,从绿辉石的核部到边部,硬玉的含量Jd的含量

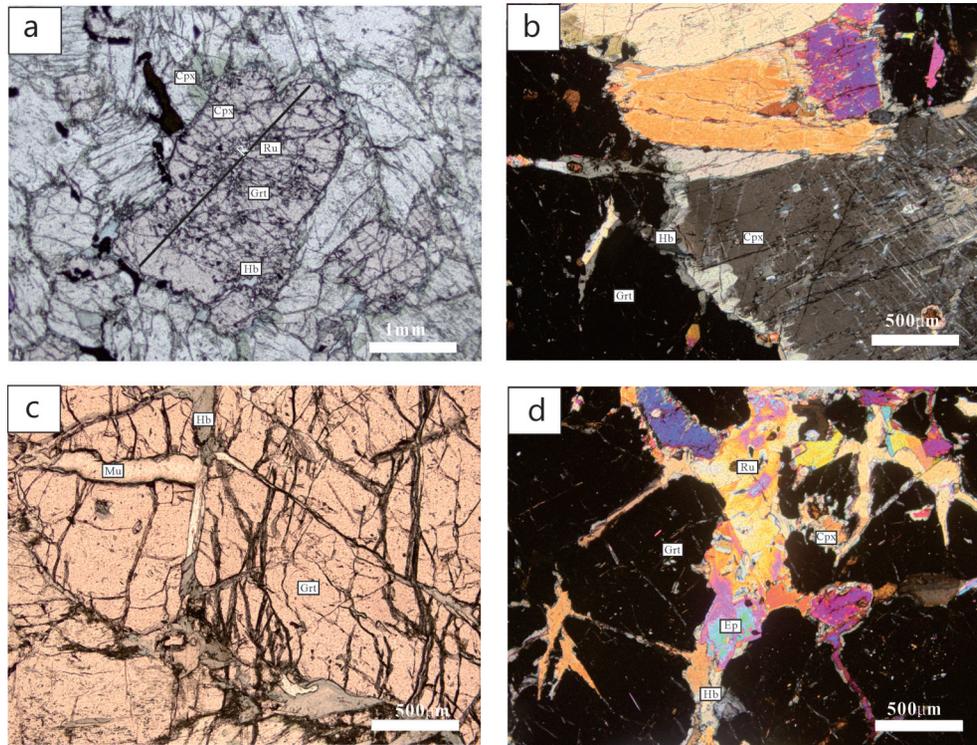


图3 拉萨地块松多榴辉岩的显微结构

a—具有净边结构的石榴子石(单偏光);b—绿辉石边部的角闪石反应边(正交偏光);c—石榴子石裂隙中的后期角闪石(单偏光);d—石榴子石和绿辉石颗粒之间的绿帘石和角闪石(正交偏光):Grt—石榴子石;Cpx—单斜辉石;Hb—普通角闪石; Mu—白云母;Ep—绿帘石;Ru—金红石

Fig. 3 Microstructure of Sumdo eclogite from the Lhasa block

a—Garnet with clear rim (plainlight); b— The amphibole reaction rim of omphacite (crossed nicols); c —Later amphibole in the garnet crack (plainlight); d—Epidote and amphibole between the garnet and omphacite (crossed nicols); Grt—Garnet; Cpx—Clinopyroxene; Hb—Hornblende; Mu—Muscovite; Ep—Epidote; Ru—Rutile

表1 松多榴辉岩(13SD43)的全岩成分(%)
Table 1 Bulk rock composition of eclogite (sample 13SD43) from the Sumdo area(%)

样品号	13SD43
SiO ₂	43.99
TiO ₂	1.86
Al ₂ O ₃	14.47
Fe ₂ O ₃	3.11
FeO	11.21
MnO	0.24
MgO	7.86
CaO	12.97
Na ₂ O	1.87
K ₂ O	0.18
P ₂ O ₅	0.13
LOI	0.28
H ₂ O ⁺	0.99
Total	99.16

(0.29~0.31)和j(o)的含量(0.29~0.30)。探针数据显示,大多数绿辉石从核部到边部X_{Fe}[Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg)]值降低(图5-b)。

4.3 角闪石

松多榴辉岩中的角闪石主要为钠-钙质闪石, Si 值为 6.3~7.3(a.f.u.), Na 值为 0.5~0.7(a.f.u.)。角闪石呈基质、包体以及后成合晶三种形式存在于榴辉岩中,不同产状的角闪石表现出不同的矿物化学特征。基质中的角闪石主要为 Na-Ca 质闪石中的冻蓝闪石;石榴石及绿辉石包体中的角闪石为冻蓝闪石, Si 含量变化较大在 6~7.5(a.f.u.), Na 在 0.5~1(a.f.u.), 可能为原有蓝闪石退变而来;辉石边部的角闪石主要为韭闪石和绿铁闪石, 靠近辉石的角闪石具有较低的 Si 和较高的 Na 含量。

4.4 多硅白云母

榴辉岩中白云母 Si 值范围是 3.50~3.62(a.f.u.),

表2 松多榴辉岩(13SD43)的代表性矿物电子探针成分(%)
Table 2 Representative electron microscope composition of the Sumdo eclogite (sample 13SD43) (%)

Min	g-c	g-r1	g-r2	g-r3	ol-c	ol-r	o2-c	o2-r	phn	phn-in	plm-in	ep	amph-in	amph-in	amph	amph-sym	amph-sym	
SiO ₂	38.41	39.18	39.40	38.90	54.60	54.42	54.33	54.93	54.65	51.85	53.75	38.89	50.94	51.23	42.31	40.28	41.40	51.25
TiO ₂	0.10	0.00	0.10	0.10	0.24	0.26	0.25	0.26	0.13	0.21	0.19	0.18	0.12	0.20	0.45	0.32	0.52	0.09
Al ₂ O ₃	21.43	22.06	21.60	21.75	7.97	7.88	8.04	7.99	23.20	24.81	23.78	26.12	6.35	7.11	15.23	17.82	15.88	6.89
Cr ₂ O ₃	0.04	0.18	0.07	0.01	0.01	0.06	0.01	0.05	0.08	0.11	0.07	0.05	0.00	0.03	0.00	0.02	0.11	0.00
Fe ₂ O ₃	0.11	0.18	1.06	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.13	1.16	1.79	1.20	1.78	1.43	2.09
FeO	24.65	21.01	20.36	22.16	5.42	5.18	5.45	5.33	2.28	2.52	2.66	0.08	11.95	10.94	13.82	14.41	14.75	11.11
MnO	0.64	0.34	0.46	0.92	0.07	0.04	0.07	0.02	0.06	0.02	0.00	0.00	0.05	0.01	0.11	0.09	0.02	0.02
MgO	4.45	7.56	6.80	5.41	10.55	10.29	10.20	10.48	4.43	3.62	4.35	0.05	13.65	13.86	9.28	8.15	8.71	13.75
CaO	9.81	9.31	10.91	10.77	17.01	17.51	17.09	17.18	0.00	0.00	0.03	22.71	10.29	9.62	9.81	9.98	10.12	9.60
Na ₂ O	0.04	0.00	0.04	0.01	3.80	3.93	4.10	4.22	0.54	0.70	0.61	0.01	2.28	2.56	3.48	3.40	3.28	2.55
K ₂ O	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	10.27	10.34	10.42	0.02	0.26	0.35	0.78	1.05	0.99	0.22
Totals	99.69	99.85	100.84	100.50	99.69	99.57	99.56	100.47	95.64	94.18	95.86	97.24	97.04	97.70	96.49	97.30	97.23	97.55
Si	3.01	3.00	3.00	3.00	1.98	1.97	1.97	1.97	3.62	3.50	3.56	3.06	7.40	7.36	6.34	6.04	6.21	7.37
Ti	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.04	0.06	0.01
Al	1.98	1.99	1.94	1.97	0.34	0.34	0.34	0.34	1.81	1.98	1.86	2.42	1.09	1.20	2.69	3.15	2.81	1.17
Cr	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Fe ³⁺	0.01	0.01	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.13	0.19	0.14	0.20	0.16	0.23
Fe ²⁺	1.61	1.34	1.30	1.43	0.16	0.16	0.17	0.16	0.13	0.14	0.15	0.01	1.45	1.31	1.73	1.81	1.85	1.34
Mn	0.04	0.02	0.03	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Mg	0.52	0.86	0.77	0.62	0.57	0.56	0.55	0.56	0.44	0.36	0.43	0.01	2.95	2.97	2.07	1.82	1.95	2.95
Ca	0.82	0.76	0.89	0.89	0.66	0.68	0.66	0.66	0.00	0.00	0.00	1.91	1.60	1.48	1.58	1.60	1.63	1.48
Na	0.01	0.00	0.01	0.00	0.27	0.28	0.29	0.29	0.07	0.09	0.08	0.00	0.64	0.71	1.01	0.99	0.95	0.71
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	0.89	0.88	0.00	0.05	0.06	0.15	0.20	0.19	0.04

注:g-c石榴子石核部,g-r石榴子石边部,o-c绿辉石核部,o-r绿辉石边部,phn-in包体中多硅白云母,amph-in角闪石包体,amph-sym角闪石后合成晶。

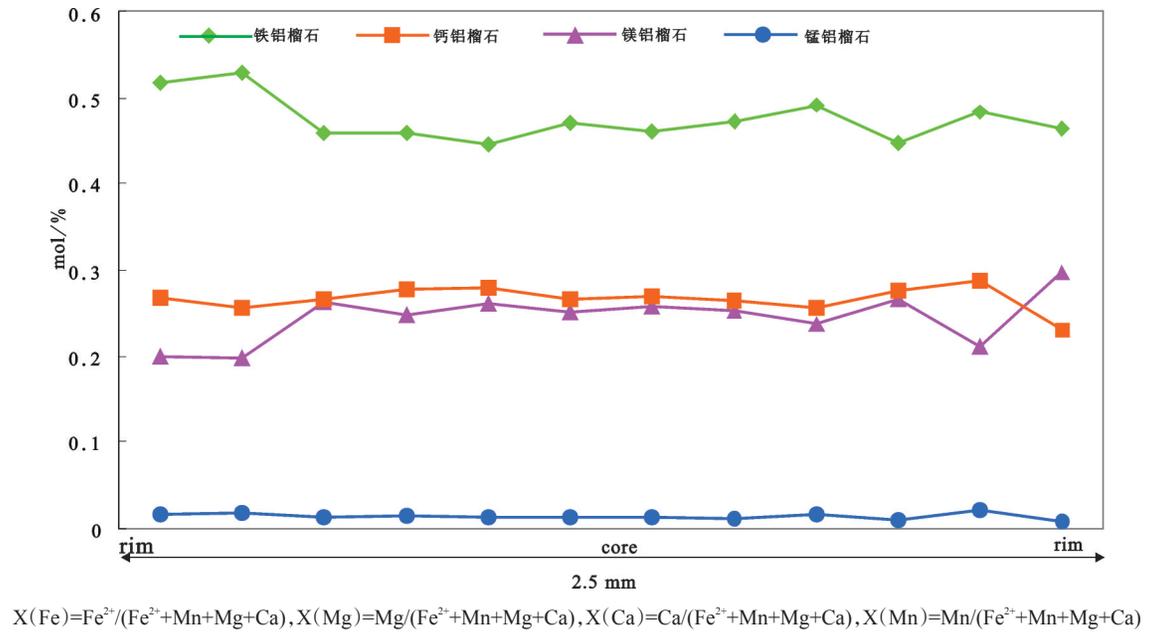


图4 拉萨地块松多榴辉岩石榴石环带的成分剖面
Fig. 4 The composition profile of garnet from Sumdo eclogite, Lhasa Block

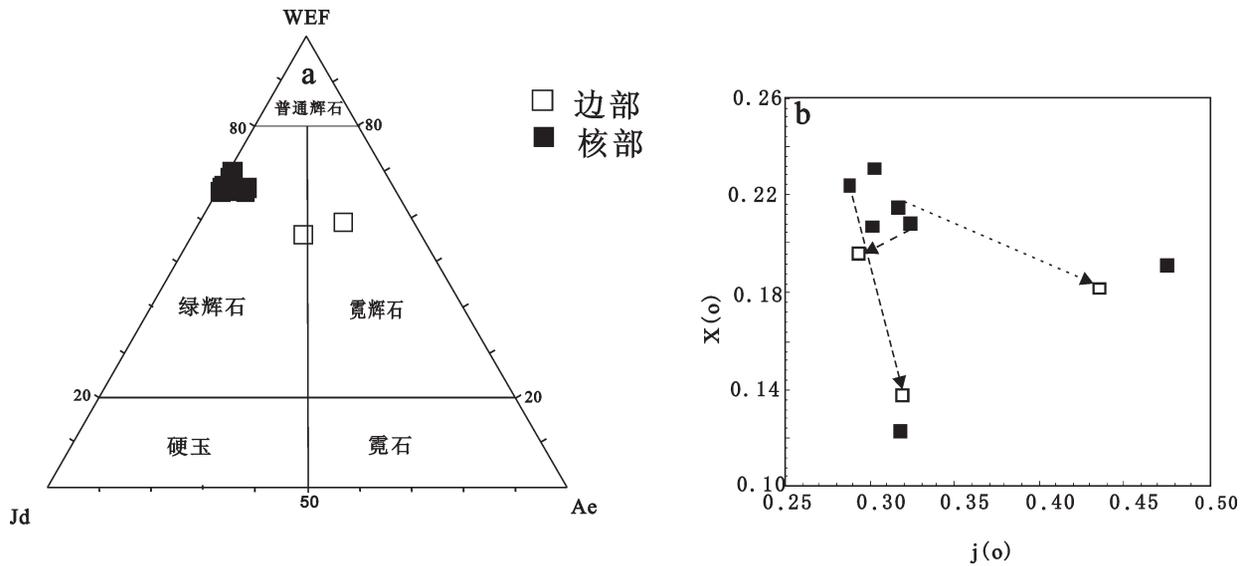


图5 拉萨地块松多榴辉岩单斜辉石的普通辉石-霓石-硬玉三成分图解(a); 绿辉石的j(o)-X(o)图(b)显示了从核到边的成分变化, $X(o) = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$, $j(o) = \text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$
Fig. 5 (a) Ternary plot of diopside-jadite-aegirine showing composition of omphacite in Sumdo eclogite Lhasa Block; (b) j(o) versus X_{Fe} diagram for omphacite, showing the composition variation from the core to the rim, $X(o) = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$, $j(o) = \text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$

为多硅白云母。这与前人在该地区榴辉岩中得到的白云母的Si值3.4~3.6(a.f.u.)基本一致^[17,18]。(Mg+Fe)值范围为0.50~0.64(a.f.u.), Mg/(Mg+Fe)在0.75

左右,说明在多硅白云母中主要发生了镁绿磷石替代。由于在退变过程中,多硅白云母可能会发生不同程度的成分重置和退变质反应的改造,所以用石

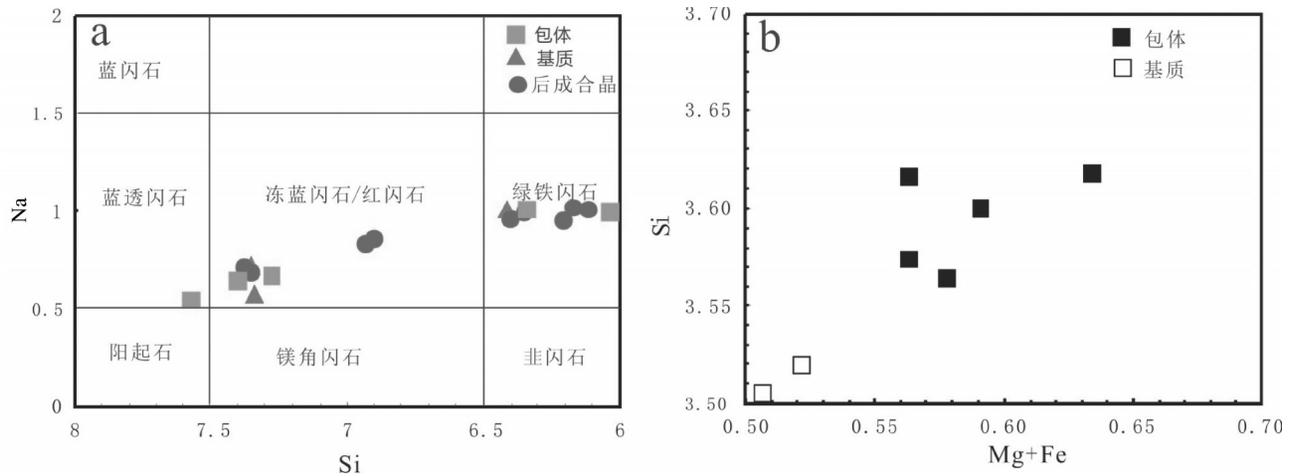


图6 松多榴辉岩中角闪石的成分和分类图^[31] (a)及多硅白云母的(Mg+Fe)-Si的成分图(b)

Fig. 6 The composition and classification diagram for amphibole^[31] (a) and (Mg+Fe) - Si diagram for phengite in Sumdo eclogite (b)

榴石包裹体中具有最高硅含量的多硅白云母估算峰期压力较为合适。

5 相平衡模拟

在模拟松多榴辉岩的矿物组合、矿物成分变化及其变质演化过程中,笔者采用 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{MnO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ (NCKMnFMASHTO)体系模拟变质作用过程。流体相设为纯水,并假设水、金红石和多硅白云母过饱和,考虑到 P_2O_5 主要形成磷灰石,且在主要硅酸盐矿物中含量均很少,因此不考虑 P_2O_5 组分, P_2O_5 按照磷灰石 $(\text{CaO})_5 \cdot (\text{P}_2\text{O}_5)_{1.5} \cdot (\text{H}_2\text{O})_{0.5}$ 分子式扣除相应的Ca组分。

相平衡模拟使用的初始全岩成分取自XRF分析得到的全岩主量元素质量百分数数据,换算为模式体系中的mole百分比进行计算。视剖面图的计算使用程序THERMOCALC3.33^[32](2009年7月更新),及配套的内部一致性数据库^[32]。所涉及的固溶体活度模型为石榴石^[33-34]、单斜辉石^[35]、角闪石^[36]、帘石^[37]、绿泥石^[38]、斜长石^[39]、滑石^[37]、多硅白云母^[40]、硬柱石、金红石、石英和水设为纯端元相。

样品13SD43在NCKMnFMASHTO体系下的 $P-T$ 视剖面图以四变域和五变域为主,三变域次之,双变域极少。在视剖面图(图7)中计算并标示出了石榴石的镁铝榴石等值线(Py)、钙铝榴石等值线(Gr)和多硅白云母硅等值线(Si)。图中显示在含蓝闪石榴辉岩矿物组合(gI+g+o+law)中,多硅白云

母具有中等的正斜率,镁铝榴石斜率较陡,钙铝榴石具有较陡的负斜率,随温度升高而增加。在含硬柱石的榴辉岩组合(g+o+law)中,多硅白云母具有中等-平缓的正斜率,随压力的增加而增加。石榴石中钙铝榴石基本不随温度和压力变化而变化,而镁铝榴石具有中等的正斜率,随温度的升高而升高。在含绿帘石、硬柱石的榴辉岩组合(g+o+law+ep)中石榴石的钙铝榴石和镁铝榴石都具有较陡的正斜率,随压力增加而迅速升高?但是也同时受到温度的影响。镁铝榴石的含量随温度升高而升高。在硬柱石消失的含滑石、绿帘石榴辉岩组合(g+o+ep+ta),石榴石中的镁铝榴石和钙铝榴石都有近垂直的正斜率,前者随压力增加而增加,后者随温度增加而升高。

样品13SD43中现有的矿物组合g-o-ep/czo-phn-ru-q在图中稳定的温压范围为 $15 \times 10^5 \sim 25 \times 10^5$ kPa, $550 \sim 650^\circ\text{C}$,但是实际矿物组合中各矿物的成分(如石榴石中镁铝榴石和钙铝榴石的含量、多硅白云母中的Si含量)与此温压范围内计算得到的矿物成分差别很大,并指示了更高的压力条件和温度条件。

用实测的的石榴石环带的镁铝榴石和钙铝榴石含量值投在 $P-T$ 视剖面图上,石榴石成分点主要落在含绿帘石、硬柱石榴辉岩矿物组合g+o+ep+law区域,稳定的温压范围为: $550 \sim 650^\circ\text{C}$, $20 \times 10^5 \sim 25 \times 10^5$ kPa。从石榴子石成分环带来看,石榴石可能记录了榴辉岩峰期及退变质过程信息。利用石榴石核部镁铝榴石的含量和多硅白云母最大Si值在 $P-$

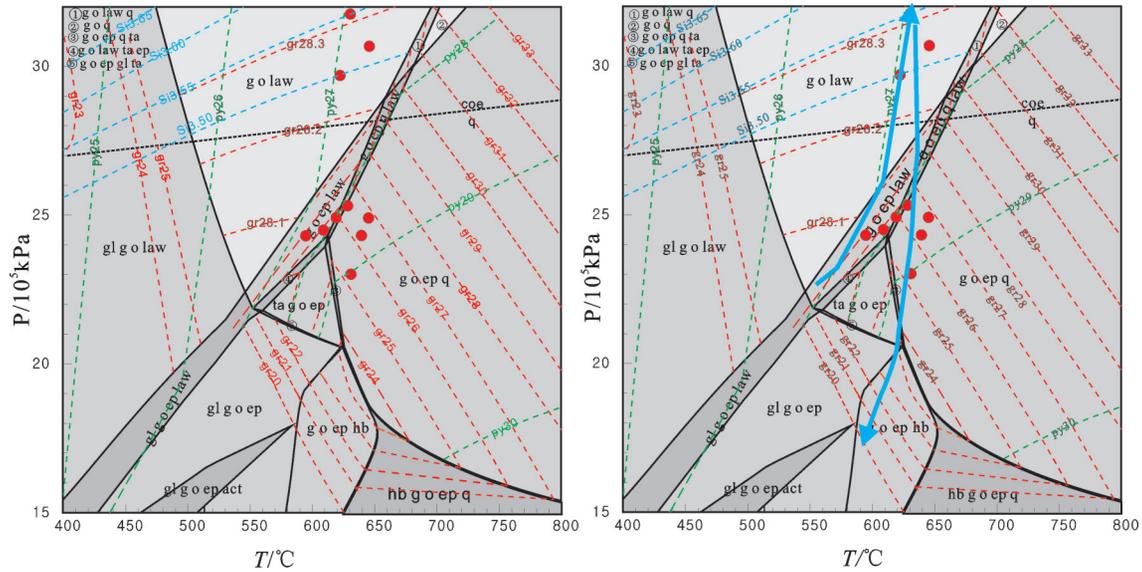


图7样品13SD43在NCKMnFMASHTO(+phn+ru+H₂O)体系下的P-T视剖面图

全岩成分见表1,换算成模式体系中的mole百分含量为:SiO₂=48.28, Al₂O₃=9.48, CaO=15.35, MgO=10.35, FeO=12.94, K₂O=0.12, Na₂O=2, TiO₂=1.29, MnO=0.06, O=1.54。g-石榴子石, o-绿辉石, Hb-普通角闪石, gl-蓝闪石, Ep-绿帘石, Ru-金红石, law-硬柱石, ta-滑石, coe-柯石英, q-石英

Fig. 7 P-T pseudosection in the system NCKMnFMASHTO (+phn+ru+H₂O) for sample 13SD43

The bulk composition used in this pseudosection is in Table 1, and it is recalculated on the basis of normalized mol% to SiO₂=48.28, Al₂O₃=9.48, CaO=15.35, MgO=10.35, FeO=12.94, K₂O=0.12, Na₂O=2, TiO₂=1.29, MnO=0.06, O=1.54. g-Garnet, o-Omphacite, Hb-Hornblende, gl-Glaucophane, ep-Epidote, ru-Rutile, law-Lawsonite, ta-Talc, coe-Coesite, q-Quartz

T视剖面图上投图,落在硬柱石榴辉岩矿物组合g+o+law区域,温度在600℃左右,压力可达 32×10^5 kPa,超过了石英和柯石英转变线,属于超高压变质作用温压条件范围。用石榴石边部镁铝榴石和钙铝榴石成分在P-T视剖面图上投图落在绿帘石榴辉岩区域,矿物组合为g+o+ep+law,温压范围为560~630℃, $22 \times 10^5 \sim 25 \times 10^5$ kPa,属于角闪石榴辉岩相变质作用温压范围。

6 讨论

6.1 松多榴辉岩峰期变质P-T条件和矿物组合

根据石榴石核部保存的最大 X_{py} 等值线和多硅白云母中最大Si含量等值线在P-T视剖面图中确定了松多榴辉岩的变质峰期条件约为 32×10^5 kPa和620℃,对应的峰期矿物组合为g-o-law (phn+ru+H₂O),从该地区已有的温压计算结果来看,这个峰期温压和蓝闪石榴辉岩的温压 $(30 \pm 0.6) \times 10^5$ Pa和 $(610 \pm 6)^\circ\text{C}$ ^[18]很接近,所得峰期压力要略高于一些矿物对温压计的估算结果^[11,16],但在 $(30 \sim 40) \times 10^5$ kPa^[17]计算的峰期压力范围内,低于吉郎村榴辉岩压力

$34 \times 10^5 \sim 38 \times 10^5$ kPa^[13],这与该地区绿辉石包体中发现的柯石英假象相吻合^[13],但所得温度要低于石榴石-单斜辉石的温度计算结果^[11,16-17]。从计算的温度范围来看,松多榴辉岩属于中低温榴辉岩。石榴石-单斜辉石温度计中所使用的绿辉石中Fe³⁺成分含量的不确定性对温度结果有较大的影响,此外石榴石边缘成分的变化也会对温度产生相当大的影响,尤其对于本文所讨论的普遍遭受不同程度退变质改造的榴辉岩来说,石榴石的影响不容忽视。如果再考虑绿辉石成分不确定性,以及在榴辉岩退变过程中成分的变化,石榴石-单斜辉石温度计的计算结果就存在很大的不确定性。此外由于高压和超高压榴辉岩一般都经历了复杂的退变质演化历史,多数情况下峰期矿物组合和现在保存的矿物组合和现在保存的并不一致。魏春景等认为在减压折返过程中,减压驱动的脱水作用会像热驱动脱水反应那样使变质矿物组合达到再平衡,结果会使榴辉岩的峰期矿物组合和矿物成分发生变化^[41]。因此,利用石榴石-单斜辉石-多硅白云母地质温压计或者THERMOCALC平均温压方法确定榴辉岩峰

期温压条件以及 $P-T$ 轨迹都有很大不确定性。相对而言,利用以全岩成分为基础的视剖面图模拟结合矿物成分等值线计算,不仅可以计算岩石形成的 $P-T$ 条件及变质轨迹,还可以通过正演模拟方法了解变质作用演化过程中各变质阶段的矿物含量及特征。

相平衡模拟计算表明该区榴辉岩峰期位于硬柱石稳定域,但是在样品中既没有发现典型硬柱石假象,这一点看似很矛盾。实验岩石学和相平衡模拟都显示硬柱石有很宽的稳定域,应该广泛存在于冷俯冲带中,但在世界范围内,出露在地表的含硬柱石岩石尤其是硬柱石榴辉岩仍然较少^[42-43]。相平衡研究表明,含硬柱石的榴辉岩具有富水矿物组合,它的生成过程需要大量的水,并且保存条件非常苛刻,只有沿递进变质 $P-T$ 轨迹返回或足够冷的抬升条件下才可能保存^[42]。Dvais认为含硬柱石榴辉岩的保存主要与快速抬升有关^[42]。Tsuji-mori等(2006)指出受板块俯冲和折返机制的控制,典型的抬升剥露过程不利于含硬柱石榴辉岩在折返过程中保存。以西大别造山带榴辉岩的近等温降压抬升轨迹做类比,其早期阶段硬柱石会通过脱水反应转变为绿帘石,这种抬升过程不可能保存硬柱石,仅可能以假象作为石榴石等矿物的包体存在^[32,44]。由于松多地区榴辉岩中石榴子石裂理发育,遭受了明显的后期改造,所以即使峰期存在硬柱石也不容易保留下来,所以该地区没有含硬柱石或者硬柱石假象的榴辉岩发现和相平衡模拟结果显示的峰期条件在硬柱石稳定域并不矛盾。

在NCKMnFMASHTO模式体系下计算的 $P-T$ 视剖面图模拟出松多榴辉岩的峰期矿物组合落在 $g-o-law(+phn+ru+H_2O)$ 矿物组合域内。相图模拟结果显示:在蓝闪石消失后的 $g-o-law(+phn+ru+H_2O)$ 组合域内,石榴石中镁铝榴石含量主要受温度控制,随温度升高而升高,可以很好地指示温度的变化,利用环带石榴石核部最大 X_{py} 值可以在该组合域内确定岩石形成的峰期温度;而钙铝榴石等值线基本不随温度和压力变化,所以不能在该区域用钙铝榴石来限定压力,多硅白云母的Si含量在大多数矿物组合域中受温度和压力控制,几乎不受全岩成分的影响,并且随着压力升高, Si含量显著变化。因此多硅白云母中的Si含量在给定温度的条件下,

可以很好地限定岩石形成的压力^[41,44]。岩相学和矿物学研究说明岩石中多硅白云母的成分在后期退变质过程中也不同程度的受到了改造,同时石榴子石包体中的多硅白云母的Si高于基质中的多硅白云母。因此多硅白云母的最大Si含量可以更好地指示岩石形成的峰期压力。因此笔者利用 $P-T$ 视剖面图中石榴石核部镁铝榴石的最大含量和多硅白云母中最大的Si含量来限定在矿物组合 $g-o-law(+phn+ru+H_2O)$ 中岩石形成的峰期 $P-T$ 条件,使用石榴石镁铝榴石等值线和多硅白云母Si含量等值线确定温度和压力的系统误差大约是 $6^{\circ}C$ 和 0.6×10^5 kPa(2 δ 的误差),这种误差仅来源于体系中焓的不确定性,没有其他因素影响,因此误差是最小的,而实际误差肯定比这个系统误差要大。利用石榴石的镁铝榴石含量等值线和多硅白云母的Si含量等值线在 $P-T$ 视剖面图上给出了榴辉岩峰期变质温压条件约为 32×10^5 kPa和 $610^{\circ}C$,这个条件与松多榴辉岩中石榴石边部含有的柯石英假象包体相符合,说明松多榴辉岩可能经历了超高压变质作用^[47],而榴辉岩石榴石环带不发育,保留了峰期和退变的变质信息,对应的峰期矿物组合为 $g-o-law(+phn+ru+H_2O)$,属于中低温超高压榴辉岩^[7,41,44]。

6.2 松多榴辉岩变质演化过程

结合松多榴辉岩的野外地质产状,笔者在岩相研究和相平衡模拟的基础上,将松多榴辉岩的变质演化分为三个阶段:(I)递进变质阶段;(II)峰期变质阶段;(III)退变质阶段。

(I)递进变质阶段:该阶段榴辉岩矿物组合以石榴子石、单斜辉石、绿帘石、黝帘石和角闪石为主,角闪石、绿帘石、黝帘石主要以包体形式存在于石榴子石中。比较包体和基质中角闪石,包体以冻蓝闪石为主,基质中以韭闪石为主。

(II)峰期变质阶段:依据石榴石核部的最大 X_{py} 值等值线和多硅白云母中最大Si含量等值线在 $P-T$ 视剖面图中确定了松多榴辉岩的变质峰期条件为 32×10^5 kPa和 $620^{\circ}C$,对应的峰期矿物组合为 $g-o-law(phn+ru+H_2O)$ 。

(III)退变质阶段:可划分为早期近等温降压阶段和后期后成合晶阶段。

早期近等温降压阶段:松多石榴辉岩在 $P-T$ 视剖面图中模拟出的峰期矿物组合 $g+o+law$ 与岩石中

观察到的现有矿物组合 $g+o+phe$ 并不一致,岩石中绿帘石,角闪石的出现,并结合岩石中绿辉石边部存在的后成合晶现象,笔者推测岩石在峰期变质作用以后,经历了以近等温减压为特征快速抬升过程,早期退变质过程主要发生在硬柱石稳定域内,以硬柱石和少量滑石的脱水反应为主要特征。在早期减压过程中岩石主要经历了以下变质反应:(i) $coe \rightarrow q$; (ii) $law \rightarrow g+H_2O$; 反应(ii)使得石榴石中钙铝榴石含量增加,说明石榴石的钙铝榴石含量不能指示岩石形成的峰期压力条件;进一步减压可能发生 $law \rightarrow ep+\mu$ 的反应,压力达到 $22 \times 10^5 \sim 23 \times 10^5$ kPa 时出现绿帘石/斜黝帘石,这与岩相学观察一致,在 $g-o-ep-law(+phn+q+H_2O)$ 矿物组合域中伴随着硬柱石明显的脱水反应直至消失。在早期的减压退变过程中峰期矿物组合水大量被释放出来,岩石不断发生的脱水作用,使得峰期矿物组合不断演化^[45]。

后期后成合晶阶段:该阶段以石榴石及绿辉石边部出现角闪石+斜长石和单斜辉石+斜长石蠕虫状合晶以及晚期的绿帘角闪岩相矿物组合为特征。岩石在硬柱石消失后继续降压的过程中, $P-T$ 轨迹在含有绿帘石的 $g-o-ep-ru(+phn+q+H_2O)$ 矿物组合域内高角度切割岩石饱和水含量等值线,并沿水含量增加方向演化,岩石将处于流体缺失状态,不利于矿物组合的演化^[46],但早期硬柱石脱水反应释放出的大量水仍可以使岩石在局部富流体区域生成大量的绿帘石,直至出现流体缺失状态。在野外露头榴辉岩局部发现的绿帘石脉体可能是这一阶段形成的。在该阶段角闪石大量形成,分布于各峰期矿物之间。

6.3 地质意义

松多榴辉岩已成为拉萨地体内部一条确定的延伸 100 km 的榴辉岩带,沿着冈底斯岩浆弧北部分布,其变质原岩为 MORB^[14] 或者 OIB^[47]。榴辉岩峰期压力有高压^[8,10-11,16]、超高压^[13,17-18];峰期温度有低温^[18]、中温^[8,10,11,13,16-17]。榴辉岩缺少直接的超高压证据如柯石英等超高压标志矿物,但是榴辉岩中有大量柯石英向石英转变的证据如多晶石英^[10]和放射状裂纹石英^[10,13,18],考虑到柯石英在折返过程中很难保存,且该地区部分榴辉岩具有低硅的特点,这些可能正是到目前没有发现柯石英的原因。鉴于传统温压计和不同的相平衡模拟方法都得到了松多榴

辉岩峰期 $P-T$ 条件位于超高压区域以及多硅白云母较高的 Si 值(3.4~3.6),笔者可以得出松多榴辉岩经历了超高压变质作用的结论。最近,含蓝闪石榴辉岩发现,并得到其 $P-T$ 演化轨迹是榴辉岩。本文的相平衡模拟研究表明松多多硅白云母榴辉岩经历了一个快速俯冲和折返的低温超高压变质演化过程,这与最近发现的蓝闪石榴辉岩类似^[18],结合松多榴辉岩带发现的超镁铁岩石、大洋和洋岛玄武岩等蛇绿岩带的岩石组合^[47],松多榴辉岩带代表了拉萨地块内部一条大洋型高压-超高压变质带。榴辉岩原岩时代为 303 Ma^[11],变质时代为 266 Ma^[28],说明拉萨地块内部存在一个二叠纪的古特提斯洋盆。

7 结论

对松多榴辉岩的详细岩相学和相平衡模拟研究表明,榴辉岩经历了低温超高压变质作用。石榴子石从核部到边部的成分变化记录了顺时针的 $P-T$ 演化轨迹,峰期温压条件为 620°C 、 32×10^5 kPa,退变温压条件为 $560 \sim 630^\circ\text{C}$ 、 $22 \times 10^5 \sim 25 \times 10^5$ kPa。岩石经历了一个快速俯冲和折返的变质演化过程,结合该地区含蓝闪石超高压榴辉岩的发现和变质演化过程的研究^[18],松多榴辉岩带可能代表了拉萨地块内部一条东西向延伸的 100 km 大洋型超高压变质带,这为拉萨地块内部古特提斯缝合带进一步确定提供了新的证据。

致谢:野外工作得到中国地质科学院陈松永副研究员大力帮助,电子探针在北京大学李小平指导下完成,中国地质科学院张颖慧对相图给予了莫大的帮助,匿名审稿人和编辑给本文提出了宝贵的修改意见,在此表示诚挚的谢意。

参考文献(References):

- [1] Smith D C. A review of the peculiar mineralogy of the Norwegian coesite- eclogite province, with crystal- chemical, petrological, geochemical and geodynamical notes and an extensive bibliography[C]//Smith DC(ed.). Eclogites and Eclogite Facies Rocks. Amsterdam: Elsevier, 1988: 1-206.
- [2] Maruyama S, Liou J G, Tarabayashi M. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation [J]. International Geology Review, 1996, 38(6): 485-594.
- [3] Ernst W G. Subduction, ultrahigh- pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices: Implications for arcs and continental growth [J]. Physics of the Earth and Planetary Interior,

- 2001, 127(1): 253–275.
- [5] Ernst W G. Preservation/exhumation of ultrahigh– pressure subduction complexes [J]. *Lithos*, 2006, 92(3/4): 321–335.
- [6] Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological date [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(3): 435–455.
- [7] Zhang L F, Lü Z, Zhang G B, et al. The geological characteristics of oceanic– type UHP metamorphic belts and their tectonic implications: Case studies from Southwest Tianshan and North Qaidam in NW China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53 (20) : 3120–3130.
- [8] 杨经绥, 许志琴, 耿全如, 等. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带——青藏高原拉萨地块中发现榴辉岩带[J]. *地质学报*, 2006, 80(12): 1787–1792.
Yang Jingsui, Xu Zhiqing, Geng Quanru, et al. A possible new HP–UHP (?) metamorphic belt in China: discovery of eclogite in the Lhasa terrane, Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(12): 1787–1792 (in Chinese with English abstract).
- [9] 杨经绥, 许志琴, 李天福, 等. 青藏高原拉萨地块中的大洋俯冲型榴辉岩: 古特提斯洋盆的残留?[J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1277–1287.
Yang Jingsui, Xu Zhiqing, Li Tianfu, et al. Oceanic subduction – type eclogite in the Lhasa block, Tibet, China: Remains of the Paleo–Tethys ocean basin?[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(10): 1277–1287.
- [10] Yang J S, Xu Z Q, Li Z L, et al. Discovery of an eclogite belt in the Lhasa Block, Tibet: a new border for Paleo–Tethys? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(1): 76–89.
- [11] 曾令森, 刘静, 高利娥, 等. 青藏高原拉萨地块早古生代高压变质作用及其大地构造意义[J]. *地质前缘*, 2009, 16 (2): 140–151.
Zeng Linseng, Liu Jing, Gao Lie, et al. Early Mesozoic high–pressure metamorphism within the Lhasa Block, Tibet and its implications for regional tectonics [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2): 140–151 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zhang K J and Tang X C. Eclogites in the interior of the Tibetan Plateau and their geodynamic implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(15): 2556–2567.
- [13] Cheng H, Zhang C, Vervoot J D, et al. Zircon U–Pb and garnet Lu–Hf geochronology of eclogites from the Lhasa Block, Tibet [J]. *Lithos*, 2012, 155: 341–359.
- [14] 陈松永, 杨经绥, 罗立强, 等. 西藏拉萨地块 MORB 型榴辉岩的岩石地球化学特征[J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1327–1339.
Chen Songyong, Yang Jingsui, Luo Liqiang, et al. MORB– type eclogites in the Lhasa block, Tibet, China: Petrochemical evidence [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(10): 1327–1339(in Chinese with English abstract).
- [15] Li Z L, Yang J S, Xu Z Q, et al. Geochemistry and Sm–Nd and Rb–Sr isotopic composition of eclogite in the Lhasa terrane, Tibet, and its geological significance[J]. *Lithos*, 2009, 109: 240–247.
- [16] 李天福, 杨经绥, 李兆丽等. 青藏高原拉萨地块松多榴辉岩的岩相学特征和变质演化过程 [J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1310–1326.
Li Tianfu, Yang Jingsui, Li Zhaoli, et al. Petrography and metamorphic evolution of the Sumdo eclogite, Qinghai–Tibetan Plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(10): 1310–1326(in Chinese with English abstract).
- [17] 张丁丁, 张立飞, 赵志丹. 西藏松多榴辉岩变质作用研究[J]. *地质前缘*, 2011, 18(2): 116–126.
Zhang Dingding, Zhang Lifei, Zhao Zhidan. A study of metamorphism of Sumdo eclogite in Tibet, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2): 116–126(in Chinese with English abstract).
- [18] 杨现力, 张立飞, 赵志丹, 等. 青藏高原拉萨地块松多蓝闪石榴辉岩的变质演化: 相平衡及变质作用和 P – T 演化轨迹[J]. *岩石学报*, 2014, 30(5): 1505–1519.
Yang Xianli, Zhang Lifei, Zhao Zhidan, et al. Metamorphic evolution of glaucophane eclogites from Sumdo, Lhasa block of Tibetan Plateau: Phase equilibria and metamorphic P – T path [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(5): 1505–1519.
- [19] Krogh Ravna, E.J. The garnet–clinopyroxene Fe^{2+} –Mg geothermometer: an updated calibration [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18(2): 211–219.
- [20] Krogh Ravna E J, Terry M P. Geothermobarometry of phengite–kyanite–quartz/coesite eclogites [M]//Eleventh Annual V.M. Goldschmidt Conference, Abstract, 2001: 3145.
- [21] Krogh Ravna E J and Paquin J. Thermobarometric methodology applicable to eclogites and garnet ultrabasites [J]. *EMU Notes in Mineralogy*, 2004a, 5(8): 229–259.
- [22] Carswell D A, O’Brien P J, Wilson RN, et al. Thermobarometry of phengite–bearing eclogites in the Dabie Mountains of central China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15(2): 239–252.
- [23] Liu X C, Wei C J, Li S Z, et al. Thermobaric structure of a traverse across western Dabieshan: implications for collision tectonics between the Sino–Korean and Yangtze cratons [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2004, 22(4): 361–379.
- [24] 西藏自治区地质矿产局. 中华人民共和国区域地质调查报告, 1: 200000 下巴滴(沃卡)幅[M]. 北京:地质出版社, 1994.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region. Regional Geological Survey Report of the People's Republic of China, 1:200000 Chin Tang (Voca) Picture[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994 (in Chinese).
- [25] 胡道功, 吴珍汉, 江万, 等. 西藏念青唐古拉岩群 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄和 Nd 同位素研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(1): 29–37.
Hu Daogong, Wu Zhenhan, Jiang Wan, et al. SHRIMP zircon U–Pb age and Nd isotopic study on the Nyainqentanglha Group in Tibet[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(1): 29–37 (in Chinese).

- [26] 西藏自治区地质矿产局.西藏自治区区域地质志[M].北京:地质出版社,1993.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region. Regional Geological Survey Report of the Tibet[M]. Beijing: Geological Publishing House 1993. (in Chinese).
- [27] 中国地质调查局成都地质矿产研究所.青藏高原地质图1:1500000[M].成都:成都测绘出版社,2004.
Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources. China Geological Survey, Geological Map of Tibetan Plateau, 1:1500000[M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 2004 (in Chinese)
- [28] 陈松永,杨经绥,徐向珍,等.西藏拉萨地块松多榴辉岩的锆石Lu/Hf同位素研究及LA-ICPMS U-Pb定年[J].岩石学报,2008,24(7):1528-1538.
Chen Songyong, Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, et al. Study of Lu-Hf geochemical tracing and LA-ICPMS U-Pb isotopic dating of the Sumdo eclogite from the Lhasa block, Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(7): 1528-1538 (in Chinese with English abstract).
- [29] Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, et al. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: petrological and isotopic constraints [J]. Lithos, 2005, 84: 51-76.
- [30] 张建新,孟繁聪,戚学祥,等.柴达木盆地北缘大柴旦和锡铁山榴辉岩中石榴子石环带对比及地质意义[J].地质通报,2002,21(3):123-129.
Zhang JianXin, Meng Fancong, Qi Xxuexiang, et al. Comparison of garnet zoning between eclogite in Da Qaidam and Xitieshan on the north margin of the Qaidam basin[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(3): 123-129 (in Chinese with English abstract).
- [31] Leake B E, Woolley A R, Arpes CES, et al. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names[J]. American Mineralogist, 1997, 82(3): 1019-1037.
- [32] Zhang J X, Meng F C and 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(3): 285-304.
- [33] Wei C J, Powell R, Zhang L F. Eclogites from the south Tianshan, NW China: petrologic characteristic and calculated mineral equilibria in the Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2003, 21(2): 163-179.
- [34] Wei C J, Powell R and Clarke G L. Calculated phase equilibria for low- and medium- pressure metapelites in the KFMASH and KMnFMASH systems[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2004, 22(5): 495-508.
- [35] Green E C R, Holland T J B and Powell R. An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite-diopside-hedenbergite acmite, with applications to eclogitic rocks[J]. American Mineralogist, 2007, 92(7): 1181-1189.
- [36] Diener J F A, Powell R, White R W, et al. A new thermodynamic model for clino- and orthoamphiboles in the system Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-O[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2007, 25(6): 631-656.
- [37] Holland T J B and Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phase of petrological interest[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1998, 16(3): 309-343.
- [38] Holland T J B, Baker J and Powell R. Mixing properties and activity-composition relationships of chlorites in the system MgO-FeO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O[J]. European Journal of Mineralogy, 1998, 10(3): 395-406.
- [39] Holland T J B, Powell R. Activity-composition relations for phases in petrological calculations: An asymmetric multicomponent formulation[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2003, 145(4): 492-501.
- [40] Coggon R, Holland T J B. Mixing properties of phengitic micas and revised garnet phengite thermobarometers[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2002, 20(7): 683-696.
- [41] 魏春景,田作林,张立飞.高压-超高压榴辉岩的峰期矿物组合与P-T条件模拟[J].科学通报,2013,58(22):2159-2164.
Wei Chunjing, Tian Zuolin, Zhang Lifei. Modelling of peak mineral assemblages and P-T conditions for high-pressure and ultrahigh-pressure eclogites[J]. China Science Bull., 2013, 58(22): 2159-2164(in Chinese).
- [42] Clarke G L, Powell R and Fitzherbert J A. The lawsonite paradox: A comparison of field evidence and mineral equilibria modeling [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2006, 24(8): 716-726.
- [43] 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(3): 609-624.
- [44] Song S G, Zhang L F, Niu Y L, 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(5): 547-563.
- [45] Wei C J, Qian J H and Tian Z L. Metamorphic evolution of medium-temperature ultra-high pressure (MT-UHP) eclogites from the South Dabie orogen, Central China: An insight from phase equilibria modeling[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2013b, 31(7): 755-774.
- [46] Guiraud M, Powell R and Rebay G. H₂O in metamorphism and unexpected behaviour in the preservation of metamorphic mineral assemblages[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2001, 19(4): 445-454.
- [47] 陈松永.西藏拉萨地块中古特提斯缝合带的厘定[D].博士学位论文.北京:中国地质科学院,2010:1-199.
Chen Songyong. The development of Sumdo suture in the Lhasa Block, Tibet[D]. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Science, 2010: 1-199 (in Chinese with English summary).