

中喜马拉雅日玛那地区退变榴辉岩岩石 地球化学及年代学研究

刘学, 张贵宾, 张立飞, 刘帅奇

(北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 喜马拉雅造山带是目前最年轻的仍处于碰撞阶段的陆陆碰撞造山带。高喜马拉雅结晶岩系内产出的(退变)榴辉岩记录了印度板块俯冲和折返的重要信息。本文对中喜马拉雅日玛那地区的(退变)榴辉岩进行了岩石学、全岩地球化学及锆石年代学研究, 确定了其变质演化、原岩性质及构造背景。日玛那榴辉岩呈透镜状或岩墙状与花岗片麻岩接触, 基于矿物组合识别出3个变质阶段: ① 峰期榴辉岩相: 石榴子石+绿辉石+多硅白云母+金红石+石英; ② 高压麻粒岩相: 以单斜辉石+斜长石后成合晶、黑云母+斜长石的后成合晶为代表; ③ 角闪岩相: 以基质中角闪石的大量出现为特征。锆石 U-Pb 定年给出两期年龄, 峰期榴辉岩相锆石年龄为约 15.5~14 Ma, 具平坦的 HREE 分配模式, 缺失 Eu 负异常, 麻粒岩相的年龄约为 12 Ma, 锆石显著富集 HREE, 并呈现出 Eu 负异常的特征, 指示石榴子石分解和斜长石生长。矿物温压计限定日玛那榴辉岩峰期变质条件为约 730°C、1.9~2.1 GPa。榴辉岩记录了顺时针的变质 p - T 轨迹, 从峰期榴辉岩相经近等温快速降压至麻粒岩相, 最后降温降压至角闪岩相。另外, 日玛那榴辉岩的原岩为亚碱性玄武岩并沿着拉斑玄武岩趋势演化, 地球化学特征与洋中脊玄武岩类似, 对榴辉岩残留的岩浆锆石核定年给出了 890~850 Ma 的原岩年龄。综上, 我们认为日玛那榴辉岩起源于新元古代大洋中脊玄武岩, 在中新世(约 15.5 Ma)随印度板块俯冲至欧亚大陆下面, 发生榴辉岩相变质, 而后开始折返。

关键词: 中喜马拉雅; 日玛那榴辉岩; 锆石 U-Pb 定年; 变质演化; 原岩

中图分类号: P588.3; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)02-0360-33

Petrology, geochemistry and geochronology of granulitized eclogites from the Nyönno Ri region, central Himalaya

LIU Xue, ZHANG Gui-bin, ZHANG Li-fei and LIU Shuai-qi

(The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Himalayan orogenic belt represents one of the youngest continent-continent collisional orogenic belts and the collision is still an ongoing process. Eclogites in the Greater Himalayan Crystalline complex contain important information about subduction and exhumation processes of the Indian plate. In this paper, we investigate the petrology, whole-rock geochemistry and zircon chronology of retrograde eclogites in the Nyönno Ri region, Central Himalaya. The objective of our study is elucidate the metamorphic evolution, nature of protolith and tectonic setting of these rocks. The eclogites are enclosed within granitic gneisses and occur as lens or bands. Three metamorphic stages are identified with different mineral assemblages: ① peak eclogite-facies: garnet, omphacite, polysilicate

收稿日期: 2023-09-24; 接受日期: 2023-11-28; 编辑: 郝艳丽; 英文审校: 周美夫

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372061, 41972056, 91755206, 41622202)

作者简介: 刘学 (1996-), 男, 满族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 1801214955@pku.edu.cn; 通讯作者:

张贵宾 (1979-), 男, 副教授, 变质岩和同位素地球化学方向, E-mail: gbzhang@pku.edu.cn。

网络首发时间: 2024-01-29; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.p.20240128.2233.002.html>

muscovite, rutile, and quartz; ② high-pressure granulite-facies: symplectite of clinopyroxene and plagioclase, and symplectite of biotite and plagioclase; and ③ amphibolite-facies: amphibole in the matrix. Zircon grains of the peak eclogite-facies stage has an age of $\sim 15.5 \sim 14$ Ma and have chondrite-normalized REE patterns with flat HREE and without negative Eu anomalies, whereas zircon grains of the granulite-facies stage have an age of ~ 12 Ma and show significantly enriched HREE and negative Eu anomalies, indicative of garnet breakdown and plagioclase growth. From the mineral thermobarometry, the peak metamorphic conditions are estimated to be $\sim 730^\circ\text{C}$ and $1.9 \sim 2.1$ GPa. The eclogites have a clockwise metamorphic p - T path with the peak eclogite facies metamorphism followed by the near-isothermal rapid decompression, then the granulite-facies metamorphism. The final metamorphism was cooling and decompressing under the amphibolite-facies conditions. The eclogites in the Nyönno Ri region were formed from protoliths of alkaline basalts geochemically similar to mid-ocean ridge basalts (MORBs). Relict magmatic core of zircon grains has a protolith age of $890 \sim 850$ Ma. In summary, we suggest that the eclogites in the Nyönno Ri region formed from Neoproterozoic MORBs that were subsequently subducted and metamorphosed under the eclogite-facies condition beneath the Eurasian continent at ~ 15.5 Ma, followed by exhumation.

Key words: Central Himalaya; the Nyönno Ri eclogites; zircon U-Pb dating; metamorphic evolution; protolith

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42372061, 41972056, 91755206, 41622202)

榴辉岩记录了造山带构造演化的重要信息,其在制约印度和欧亚大陆俯冲碰撞过程中提供了关键证据。位于西构造结的巴基斯坦西北部的 Kaghan 地区 (Pognante and Spencer, 1991; Tonarini *et al.*, 1993; O'Brien, 2001; Kaneko *et al.*, 2003; Parrish *et al.*, 2006) 和印度的 Tso Moriri 穹隆 (de Sigoyer *et al.*, 1997, 2000; Mukherjee and Sachan, 2001) 最早发现了含柯石英超高压榴辉岩。但对于中喜马拉雅, Lombardo 和 Rolfo (1998) 最先报道了 Kharta 地区花岗片麻岩中的退变榴辉岩, 之后在通门-Kharta 一线 (Li *et al.*, 2003, 2018; Cottle *et al.*, 2019b; Wang *et al.*, 2021), 中国西藏定结县、定日县 (Ama Drime 地区) 和亚东地区 (刘树文等, 2005; Groppo *et al.*, 2007; Cottle *et al.*, 2009a; Kali *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2017b; Wu *et al.*, 2022) 以及尼泊尔的 Arun Valley (Parkinson and Kohn, 2002; Corrie *et al.*, 2010)、印度锡金地区 (Rolfo *et al.*, 2005) 和不丹西北部 (Chakungal *et al.*, 2010; Grujic *et al.*, 2011; Warren *et al.*, 2011) 陆续有退变榴辉岩被发现, 东西跨越超过 450 km。与西构造结超高压岩石的出露地紧邻缝合带相比, 中喜马拉雅榴辉岩远离缝合带约数百公里, 但大都靠近藏南拆离系, 且与南北向伸展断裂有关。另外, 中喜马拉雅榴辉岩普遍叠加了强烈的麻粒岩相变质作用, 前人研究大多依赖于辉石和斜长石的后成合晶推测其曾经历了榴辉岩

相变质作用 (Groppo *et al.*, 2007)。近年来, 绿辉石的发现为中喜马拉雅榴辉岩相变质作用提供了确凿证据 (Wang *et al.*, 2017b; Li *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2022)。

相比于西构造结始新世 (50~45 Ma) 的峰期变质年龄, 目前所报道的中喜马拉雅 (退变) 榴辉岩的峰期变质年龄普遍年轻, 主要包含如下 4 种观点: 始新世 (39~33 Ma; Liu *et al.*, 2007; Cottle *et al.*, 2009a; Kellett *et al.*, 2014)、早渐新世 (30~29 Ma; Wang *et al.*, 2017a, 2021)、晚渐新世 (26~23 Ma; Corrie *et al.*, 2010) 和中中新世 (17~14 Ma; Grujic *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017b; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2022)。而有关中喜马拉雅 (退变) 榴辉岩的原岩时代也存在不同认识, 主要分为以下几种观点: 白垩纪晚期 (100~80 Ma) (Rolfo *et al.*, 2005; Lombardo *et al.*, 2016)、古生代 (约 450 Ma) (Dong *et al.*, 2022)、新元古代 (约 980 Ma) (Liu *et al.*, 2007; Cottle *et al.*, 2009a; Wang *et al.*, 2017b)、古元古代 (约 1 800 Ma) (Chakungal *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2022)。

为了理清中喜马拉雅 (退变) 榴辉岩的峰期变质时代和原岩年龄, 本文对中喜马拉雅日玛那地区的 (退变) 榴辉岩进行详细的岩石学、全岩地球化学和锆石年代学研究, 以探讨日玛那地区 (退变) 榴辉岩的峰期变质时代、原岩属性及其构造意义。

1 地质背景

1.1 喜马拉雅造山带

喜马拉雅造山带是在新特提斯洋闭合之后,由印度大陆与欧亚大陆碰撞形成的(Yin, 2006)。在东西方向上,喜马拉雅造山带以西端的 Chaman 断裂和东端的 Sagaing 断裂为界,从西构造结 Nanga Parbat 到东构造结 Namche Barwa 延伸达 2 500 km,横贯印度、巴基斯坦、尼泊尔、不丹和中国藏南地区;在南北方向上,则以北部的雅鲁藏布江缝合带(IYS)和南部的主前缘逆冲断裂(MFT)为界。另外,喜马拉雅造山带从北到南由 4 个岩性单元组成(Yin, 2006):特提斯喜马拉雅(THS)、高喜马拉雅(GHC)、低喜马拉雅(LHS)和次喜马拉雅(SH)结晶岩系。这 4 个岩性单元依次被藏南拆离系(STD)、主中央逆冲断层(MCT)和主边界逆冲断层(MBT)分隔(图 1a)(Gansser, 1964; Webb *et al.*, 2011)。

特提斯喜马拉雅结晶岩系位于造山带前缘,主要由古元古代至始新世的硅质碎屑岩、碳酸盐岩及古生代和中生代的火山岩组成(Yin, 2006)。在特提斯喜马拉雅中部至东部分布着一系列穹隆构造,统称为北喜马拉雅片麻岩穹隆,包括淡色花岗岩、云母片岩、花岗片麻岩和一些基性岩脉(Zhang *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2021);穹隆核部由麻粒岩相-角闪岩相高级变质岩和淡色花岗岩体组成。高喜马拉雅结晶岩系是造山带的高级变质岩核,位于特提斯喜马拉雅和低喜马拉雅之间,主要由古元古代-奥陶纪沉积岩系和花岗岩片麻岩组成,普遍经历了高角闪岩相至麻粒岩相变质作用(Wang *et al.*, 2022),部分熔融程度高,GHC 上部部分熔融程度为 15%~25%(体积分数,下同),下部为 5%~10%(Wang *et al.*, 2015)。低喜马拉雅由古元古代绿片岩到低角闪岩相硅质碎屑岩和碳酸盐沉积岩组成(DeCelles *et al.*, 2001)。次喜马拉雅为前陆盆地沉积物(Yin, 2006; Webb *et al.*, 2011)。

1.2 日玛那地区地质概况

日玛那地区主要位于中国西藏定日县一定结县境内,出露于高喜马拉雅结晶杂岩系内的 Ama Drime 地块(图 1b)。中喜马拉雅的 Ama Drime 地块是目前(退变)榴辉岩报道最多的区域。Ama Drime 地块是一个长轴近南北向且具有多次伸展构造的穹隆(Kali *et al.*, 2010),两侧以倾向相反的两个正断层

为边界,西侧为 Ama Drime Detachment (ADD, 定结正断层),东侧为 Nyönno Ri Detachment (NRD, 日玛那正断层)。定结正断层为 100~300 m 厚的脆性拆离断层系,主要由淡色花岗岩、石英岩、大理岩和钙质硅酸盐组成(Jessup *et al.*, 2008)。日玛那正断层右旋分离错断了藏南拆离系(STDs)(Zhang and Guo, 2007)(图 1b)。Ama Drime 地块主要由两部分组成:南部的正片麻岩单元和北部的副片麻岩单元(Jessup *et al.*, 2008; Jessup and Cottle, 2010; Langille *et al.*, 2010)。正片麻岩单元主要由花岗片麻岩、混合岩和少量的泥质片麻岩组成,副片麻岩单元岩性主要为泥质片麻岩和云母片岩。(退变)榴辉岩主要呈透镜状或岩墙状产出正片麻岩和混合岩中,并且其长轴方向与片麻岩的片理方向基本一致。

日玛那(退变)榴辉岩野外以透镜体和层状产出,围岩为花岗片麻岩(图 2a、2b、3a、3b)。它们的出露位置多位于 GHC 靠近 STDs 的上部,甚至接近于雪线以上的峰顶,海拔基本在 6 000 m 以上(图 2b)。在卫星遥感图像中可以识别出多条被围岩片麻理强烈揉皱的长度达数百米的暗色夹层(图 2c),与野外实拍图片类似(图 2b、2c)。榴辉岩透镜体的大小不均,呈几厘米到数十米长。较大透镜体核部退变程度低,边部退变程度高,整体外观呈黑色;石榴子石变斑晶存在明显的白眼圈结构。本文研究的样品采自于日玛那地区附近相对新鲜的、退变质程度较弱的退变榴辉岩露头(图 2a、3a、3b)。

2 分析方法

2.1 全岩主、微量元素分析

全岩主、微量成分测试在中国地质大学(北京)科学研究院元素地球化学实验室的等离子体光谱仪检测室进行。全岩主量元素测定使用仪器为美国利曼公司(LEEMAN LABS. INC)Prodigy 型等离子发射光谱仪(ICP-OES)。称取 50 mg 样品,采样碱溶法将样品进行全部溶解,并将碱溶溶液用纯净硝酸稀释液提取定容后待测;岩石标样为 AGV-2、GSR-1、GSR-5;称取 100 mg 样品,在马弗炉内 980°C 条件下恒温 60 min 后,干燥皿保存降温之室温后称量计算获得烧失量(LOI)。全岩微量元素分析仪器为美国安捷伦公司生产 Agilent 7500 a 型等离子质谱仪,分析过程中美国标准局美国 Equipment 实验室制备的标准溶液 Std-1、Std-2、Std-4 为检测外部标样,定值加

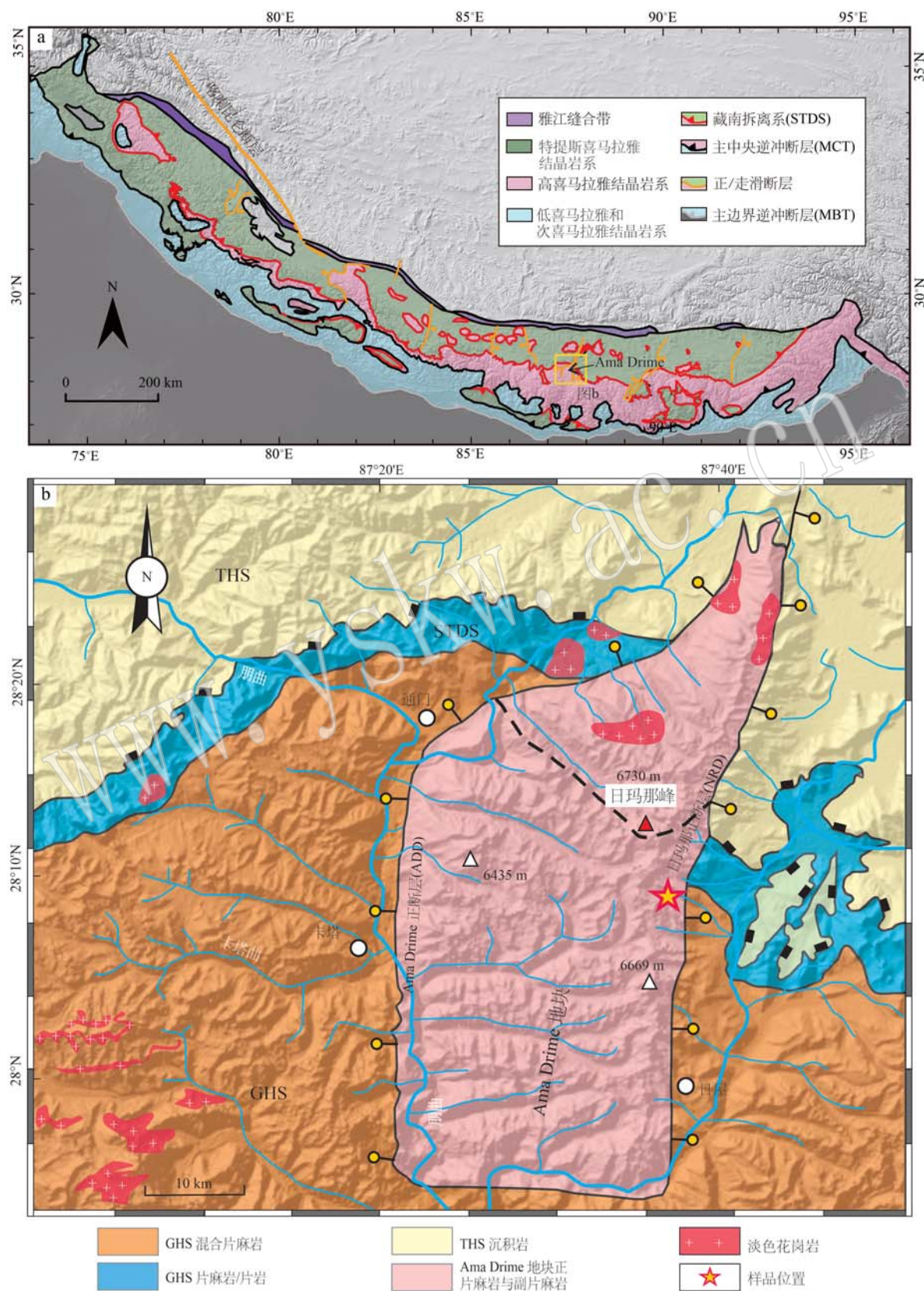


图1 喜马拉雅造山带地质简图 (a, 改自 Webb *et al.*, 2017) 和 Ama Drime 地块地质简图 (b, 改自 Wang *et al.*, 2017a)

Fig.1 Geological sketch map of the Himalayan orogen (a, modified from Webb *et al.*, 2017) and geological sketch map of Ama Drime massif (b, modified from Wang *et al.*, 2017a)

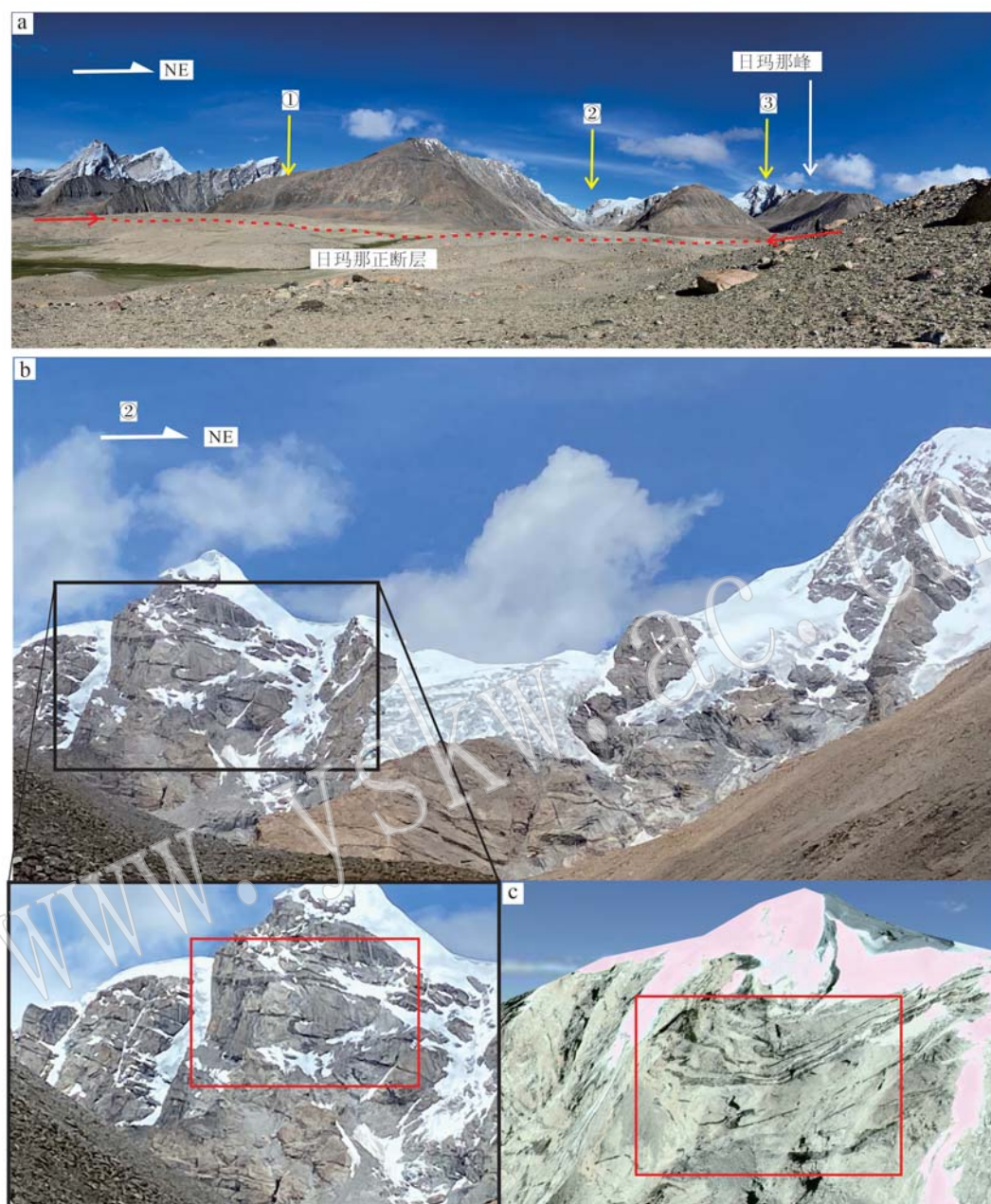


图 2 采样位置(a)、原位露头的基性岩岩墙(b)和 Google Earth 卫星遥感图像(c)

Fig. 2 Sample position(a), In-situ outcropped basic rock intrusions (b) and remote sensing image of Google Earth satellite (c)

入的 Rh 为检测内部标准进行含量标定,使用美国地质调查局(USGS)标准样品 AGV2、BHVO-2、W-2 以及中国地质测试中心岩石标样 GSR-1 和 GSR-3 的全流程溶解样品进行分析质量监控,分析精确度优于 $\pm 5\%$ 。

2.2 矿物主量元素分析

矿物主量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室利用 JXA-8230 型电子探针

(EPMA)对抛光薄片上的矿物进行测定,加速电压 15 kV,电子束流 10 nA,电子光束直径 $1\sim 2\ \mu\text{m}$,分析扫描时间 10~15 s,分析标样为透长石(K)、透辉石(Ca, Mg)、金红石(Ti)、硬玉(Na, Al, Si)、铬氧化物(Cr)、蔷薇辉石(Mn)、赤铁矿(Fe)和硅化镍(Ni)、数据以 Phi-Rho-Z 方法矫正(Li *et al.*, 2018)。所有矿物均使用 AX 程序计算(www.esc.cam.ac.uk/astaff/holland/)。

2.3 锆石 U-Pb 定年和微量元素分析

锆石 U-Pb 定年和微量元素是在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室由四极电感耦合等离子质谱仪(Q-ICP-MS)和193nm GeoLas HD 激光剥蚀系统(LA)搭配完成,阴极发光图像(CL)在北京大学电子显微镜实验室完成,使用FEI Quanta 200F场发射扫描电子显微镜拍摄,加速电压为15 kV,射束电流为120 nA。锆石 U-Pb 定年激光束斑直径32 μm ,能量8 J/cm²,频率5 Hz。对3种锆石标样(91500、GJ-1 和 Plešovice)和两个微量元素校准标样(NIST SRM 610 和 612)测定之后继续测定8~10个未知样品。锆石 91500 和 NIST SRM 610 作为 U-Pb 定年和微量元素的外标。多次重复测量 91500、GJ-1、Plešovice 得出谐和年龄分别为 1 062.7 $\pm$ 5.5、605.5 $\pm$ 2.5 和 341.8 $\pm$ 1.6 Ma (2 σ),符合推荐值(Wiedenbeck *et al.*, 1995; Jackson *et al.*, 2004; Slama *et al.*, 2008)。锆石微量元素分析的准确度和精确度优于 $\pm$ 5%。

3 结果

3.1 岩相学

日玛那(退变)榴辉岩具变斑晶结构,保存有单斜辉石+斜长石后成合晶(图3e、3f)。麻粒岩化榴辉岩的矿物组合为石榴子石(25%~30%)、单斜辉石(20%~25%)、斜长石(20%~25%)、角闪石(15%~20%)、黑云母(5%~8%)、石英(5%)以及少量副矿物包括金红石、钛铁矿、磷灰石和铁氧化物。石榴子石变斑晶可分为两种:石榴子石 I 以石榴子石核部-幔部含有非常丰富的包裹体为代表,如角闪石、石英、金红石、钛铁矿等(图3c);石榴子石 II 只含有少量的包裹体,包括角闪石、石英等(图3d)。二者周围均有一圈斜长石或斜长石+角闪石组合形成的白眼圈结构。单斜辉石+斜长石后成合晶在基质中普遍存在,部分退变成棕色的角闪石+斜长石组合(图3e、3f)。角闪石以独立矿物或与斜长石共生的后成合晶的形式存在于基质当中,也存在于石榴子石周围的冠状体中(图3c、3d、3e、3g)。黑云母+斜长石后成合晶广泛存在于基质中(图3h),为多硅白云母分解的产物(Lombardo and Rolfo, 2000; Groppo *et al.*, 2007)。金红石则以包裹体的形式存在,基质中很少发现,钛铁矿则是以与斜长石共生的后成合晶形式存在于基质和石榴子石中。

石榴子石:石榴子石粒径大小为0.3~3 mm,自形,矿物成分较均一,以铁铝榴石($X_{\text{Alm}}=0.49\sim0.59$)、镁铝榴石($X_{\text{Prp}}=0.10\sim0.18$)、钙铝榴石($X_{\text{Grs}}=0.24\sim0.37$)为主,含有少量的锰铝榴石($X_{\text{Sps}}<0.03$,表1)。石榴子石 I 核部具有较高的铁铝榴石,较低钙铝榴石和镁铝榴石;幔部较均一,由核到边铁铝榴石含量增加,镁铝榴石下降,钙铝榴石、锰铝榴石无明显变化;边部可能受后期改造作用严重,成分不均一(图4a)。石榴子石 II 核部具有较低的铁铝榴石和镁铝榴石,较高的钙铝榴石;幔部较均一,几乎无变化;边部钙铝榴石呈明显下降趋势,而铁铝榴石、镁铝榴石可能受后期改造严重,变化不一(图4b)。这种石榴子石边部最外层钙铝榴石最低、锰铝榴石最高的特点,可能是由于高温下的扩散再平衡或元素迁移反应所造成的(Zhao *et al.*, 2001; Groppo *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2018)。

单斜辉石:根据产状可将其分为两种类型,一种是以矿物包裹体的形式存在于石榴子石中,另一种是与斜长石构成后成合晶的形式存在于基质当中。这两类单斜辉石在成分上无明显差异,Wo[Ca/(Ca+Mg+Fe²⁺)]成分为0.47~0.49,En[Mg/(Ca+Mg+Fe²⁺)]成分为0.34~0.40,Fs[Fe²⁺/(Ca+Mg+Fe²⁺)]成分为0.10~0.16(表2),都是属于透辉石(图4c)。基质中的单斜辉石的Jd含量很低,在2%~3%之间,在退变过程中由绿辉石分解形成。单斜辉石+斜长石的后成合晶在日玛那地区退变榴辉岩广泛发育,基质中的绿辉石已全部分解,这种现象在Ama Drime 地区甚至在整个中喜马拉雅退变榴辉岩中广泛存在(Lombardo and Rolfo, 2000; Groppo *et al.*, 2007; Cottle *et al.*, 2009a, 2009b; Corrie *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2017b; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2022)。

角闪石:根据其镜下矿物结构特征可细分为4种类型:石榴子石包体中的角闪石(Amp I),通常与石榴子石边部发育的冠状体、斜长石共生的角闪石(Amp II),基质中大片绿色、棕色的角闪石(Amp III),与黑云母+斜长石后成合晶共生的棕色角闪石(Amp IV)。在成分上4种类型的角闪石并无明显差异,都属于镁角闪石(Leake *et al.*, 1997; 图4d),其中K₂O为0.2%~0.63%, $(\text{Na}+\text{K})_{\text{A}}$ 为0.06~0.48(<0.5),Si为6.74~7.41, X_{Mg} [Mg/(Mg+Fe²⁺)]集中在0.60~0.65之间(表3)。

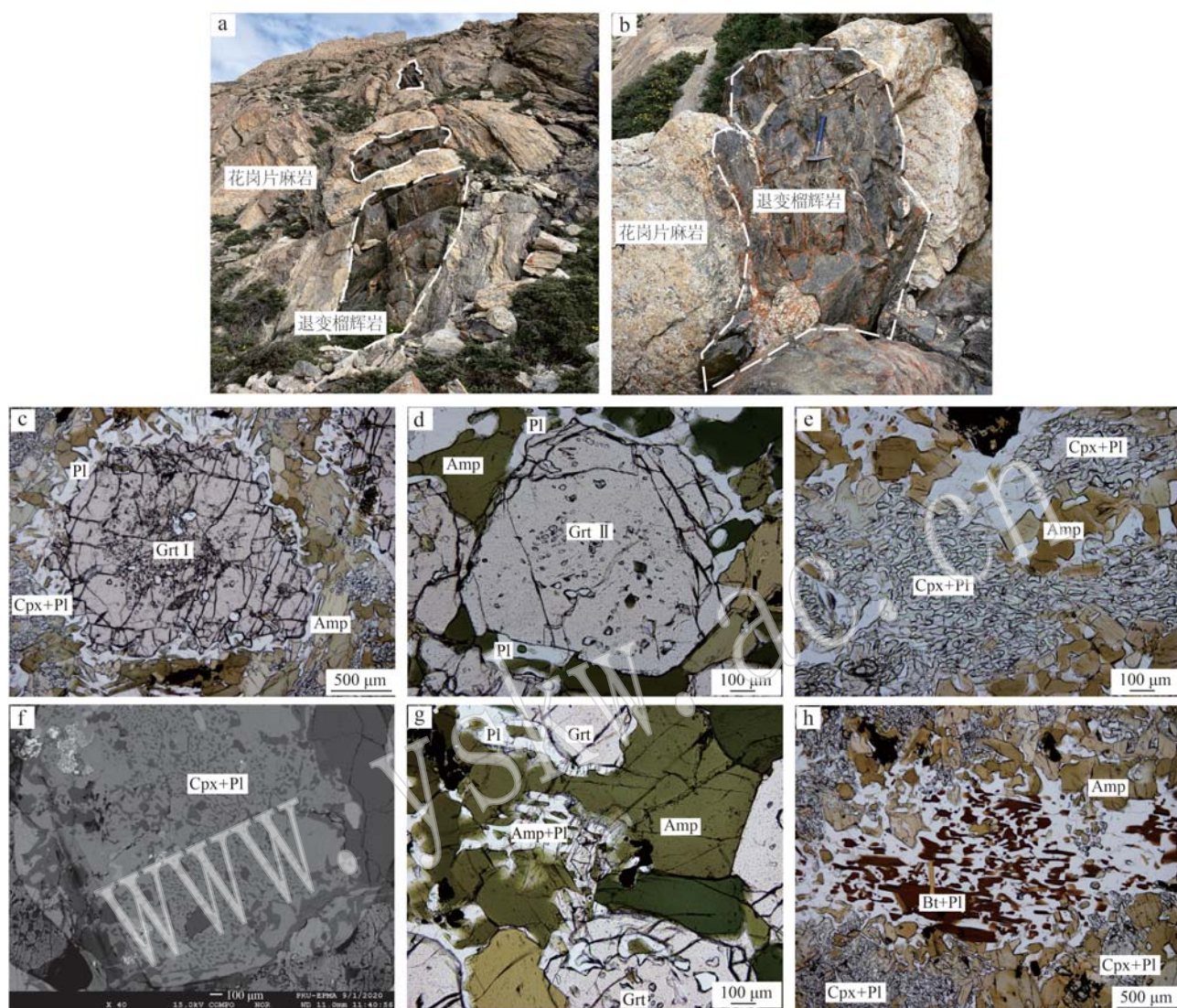


图3 日玛那退变榴辉岩野外露头(a,b)、两类石榴子石(c,d)、单斜辉石与斜长石后成合晶(e,f)、石榴子石+角闪石+斜长石矿物组合(g)和黑云母+斜长石后成合晶(h)照片(c~h均为单偏光照片)

Fig. 3 Outcrops of granulitized eclogites from the Nyönno Ri region (a, b), microphotos of both types of garnet (c, d), Cpx+Pl symplectite (e, f), Grt+Amp+Pl (g) and Bt+Pl symplectite (h) (c~h are single polarized)

Grt—石榴子石; Cpx—单斜辉石; Amp—角闪石; Pl—斜长石; Bt—黑云母

Grt—garnet; Cpx—clinopyroxene; Amp—amphibole; Pl—plagioclase; Bt—biotite

斜长石: 产状较为多样, 可细分为与单斜辉石共生的斜长石、存在于石榴子石周围冠状体中的斜长石、与基质中大片绿色角闪石共生的斜长石及与黑云母共生的斜长石等。不同产状下斜长石成分无明显差别(表4), 斜长石的 An 值为 23~39。

早期的副矿物金红石大部分被钛铁矿和石英取代, 在石榴子石中还存在金红石包体。

综上, 中喜马拉雅日玛那地区退变榴辉岩可以划分3个变质期次: ① 峰期榴辉岩相: 石榴子石+绿

辉石(已转变成单斜辉石+斜长石后成合晶)+多硅白云母(已转变成黑云母+斜长石后成合晶)+金红石+石英; ② 高压麻粒岩相: 主要特征是以基质中普遍存在的单斜辉石+斜长石后成合晶、黑云母+斜长石的后成合晶为代表; ③ 角闪岩相: 以基质中角闪石出现为特征。本文对于变质期次的划分与前人的研究结果基本是一致的(李德威等, 2003; 刘树文等, 2005; Wang *et al.*, 2017b; Li *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2022)。

表 1 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩石榴子石成分环带分析结果

Table 1 Composition of garnet for granulitized eclogites from the Nyönno Ri region in central Himalaya

样品点	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	g10	g11	g12	g13	g14	g15	g16	g17	g18	g19	g20	g21	g22	g23	g24	g25	g26	$w_v/\%$
SiO ₂	38.90	39.00	38.50	39.30	38.80	38.70	38.90	38.80	38.90	38.90	39.10	38.40	38.70	38.90	38.80	38.90	38.40	38.70	38.80	38.90	38.90	38.90	38.40	37.10	39.20	38.60	
TiO ₂	0.15	0.09	0.06	0.00	0.11	0.13	0.06	0.13	0.04	0.08	0.05	0.10	0.07	0.14	0.13	0.12	0.11	0.11	0.04	0.18	0.03	0.05	0.07	0.04	0.13	0.07	
Al ₂ O ₃	21.20	20.90	21.10	20.70	21.10	21.10	20.70	21.00	20.80	21.00	21.10	21.20	20.80	20.20	20.80	21.10	21.00	20.90	21.10	21.00	20.90	21.20	20.80	20.10	20.90	20.80	
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.10	0.06	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.02	0.08	0.02	0.02	0.02	0.00	
Fe ₂ O ₃	0.52	0.84	1.21	0.03	0.80	1.20	0.60	1.16	0.71	1.12	0.03	1.36	1.17	0.31	0.00	0.37	1.44	0.99	0.49	0.00	0.35	0.00	1.40	1.86	0.00	0.16	
FeO	23.70	23.90	23.30	24.60	23.80	23.30	23.80	23.80	23.80	23.60	24.50	23.20	23.50	24.70	24.40	23.60	23.70	23.40	23.50	23.70	24.40	24.60	22.90	22.50	23.90	25.40	
MnO	0.33	0.17	0.26	0.33	0.31	0.35	0.27	0.28	0.29	0.28	0.29	0.35	0.21	0.25	0.27	0.47	0.24	0.41	0.31	0.29	0.23	0.28	0.32	0.41	0.48	0.71	
MgO	4.00	3.42	3.13	2.83	2.70	2.91	2.67	2.70	2.76	2.96	2.82	2.76	2.79	2.68	2.65	2.93	2.89	3.07	3.03	2.81	2.75	2.92	3.07	2.85	2.89	2.52	
CaO	12.00	12.80	13.00	13.10	13.60	13.50	13.60	13.70	13.50	13.60	13.20	13.60	13.60	13.10	13.00	13.50	13.30	13.30	13.40	13.10	13.30	12.50	13.40	12.80	13.20	12.10	
Na ₂ O	0.01	0.06	0.06	0.03	0.03	0.07	0.03	0.00	0.07	0.01	0.00	0.03	0.06	0.03	0.06	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.03	0.01	
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	
Total	100.8	101.0	100.5	100.9	101.1	101.1	100.6	101.4	100.8	101.4	101.3	100.9	100.8	100.3	100.1	101.0	100.9	100.8	100.5	99.9	100.9	100.5	100.3	97.6	100.7	100.5	
氧原子数	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
Si	3.01	3.02	3.00	3.06	3.01	3.00	3.03	3.00	3.03	3.01	3.03	2.99	3.01	3.05	3.04	3.02	2.99	3.01	3.02	3.04	3.03	3.03	3.00	2.99	3.04	3.03	
Ti	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	
Al	1.93	1.90	1.94	1.89	1.93	1.93	1.90	1.92	1.91	1.91	1.93	1.94	1.91	1.87	1.92	1.93	1.93	1.92	1.93	1.93	1.92	1.95	1.92	1.91	1.91	1.93	
Cr	0.00	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	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fe ³⁺	0.03	0.05	0.07	0.00	0.05	0.07	0.04	0.07	0.04	0.07	0.00	0.08	0.07	0.02	0.00	0.02	0.08	0.06	0.03	0.00	0.02	0.00	0.08	0.11	0.00	0.01	
Fe ²⁺	1.54	1.55	1.52	1.60	1.55	1.51	1.55	1.54	1.55	1.52	1.59	1.51	1.53	1.62	1.60	1.53	1.54	1.52	1.53	1.55	1.59	1.61	1.50	1.51	1.56	1.67	
Mn	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	
Mg	0.46	0.40	0.36	0.33	0.31	0.34	0.31	0.31	0.32	0.34	0.33	0.32	0.32	0.31	0.31	0.34	0.34	0.36	0.35	0.33	0.32	0.34	0.36	0.34	0.34	0.30	
Ca	1.00	1.06	1.08	1.09	1.13	1.12	1.14	1.14	1.12	1.12	1.10	1.13	1.13	1.10	1.09	1.12	1.11	1.10	1.11	1.09	1.11	1.05	1.12	1.11	1.10	1.02	
Na	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Sum	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.98	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	
Alm	0.51	0.51	0.51	0.53	0.51	0.50	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52	0.51	0.51	0.53	0.53	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52	0.52	0.53	0.50	0.51	0.51	0.55	
Sps	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	
Prp	0.15	0.13	0.12	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	
Grs	0.33	0.35	0.36	0.36	0.38	0.38	0.38	0.38	0.37	0.37	0.36	0.38	0.38	0.36	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.35	0.37	0.37	0.36	0.34	

续表 1
Continued Table 1

样品点	g51	g52	g53	g54	g55	g56	g57	g58	g59	g60	g61	g62	g63	g64	g65	g66	g67	g68	g69	g70
SiO ₂	38.60	38.10	38.10	38.50	38.20	38.50	38.30	38.70	37.60	38.00	38.40	36.90	38.50	38.40	38.20	38.40	38.40	37.90	38.10	38.30
TiO ₂	0.03	0.13	0.21	0.26	0.11	0.19	0.09	0.08	0.37	0.38	0.37	0.43	0.16	0.18	0.02	0.20	0.05	0.12	0.25	0.12
Al ₂ O ₃	20.80	20.70	20.60	20.80	21.00	20.60	20.90	20.70	20.90	19.90	20.40	21.50	20.60	20.60	20.60	20.80	20.90	21.20	20.80	20.70
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.00	0.05	0.02	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.04	0.07	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.09	0.00	0.01
Fe ₂ O ₃	0.68	0.48	1.31	0.87	1.56	0.86	1.60	0.08	2.47	0.59	1.18	4.06	0.40	1.46	1.20	0.95	0.23	1.06	0.83	0.00
FeO	24.60	25.00	24.00	24.00	23.10	23.90	23.30	27.50	22.70	25.00	24.80	21.80	24.60	24.10	24.00	25.20	25.20	24.50	24.70	26.00
MnO	0.59	1.15	0.83	0.60	0.69	0.61	0.80	1.46	0.76	1.07	0.89	0.65	0.64	0.60	0.57	0.73	0.70	0.79	1.05	1.21
MgO	3.79	3.18	3.94	4.28	4.32	4.41	4.10	3.44	4.19	3.43	3.77	4.58	4.26	4.34	4.41	4.30	3.84	3.67	3.33	3.31
CaO	11.20	10.80	10.80	10.90	11.00	10.80	11.30	8.72	11.20	10.50	10.70	10.70	10.40	10.60	10.30	9.74	10.30	10.60	10.90	9.73
Na ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.04
K ₂ O	0.01	0.00	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Total	100.2	99.5	99.7	100.2	100.0	99.9	100.1	100.8	99.9	98.8	100.4	100.4	99.5	100.1	99.3	100.3	99.6	99.8	99.8	99.4
氧原子数	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Si	3.02	3.01	3.00	3.00	2.98	3.01	2.99	3.04	2.94	3.02	3.00	2.87	3.03	3.00	3.01	3.00	3.02	2.98	3.00	3.03
Ti	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
Al	1.91	1.93	1.91	1.91	1.93	1.90	1.92	1.92	1.93	1.87	1.89	1.97	1.91	1.90	1.92	1.91	1.94	1.96	1.93	1.94
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.04	0.03	0.08	0.05	0.09	0.05	0.09	0.01	0.15	0.04	0.07	0.24	0.02	0.09	0.07	0.06	0.01	0.06	0.05	0.00
Fe ²⁺	1.61	1.65	1.57	1.57	1.51	1.56	1.52	1.80	1.48	1.66	1.62	1.42	1.62	1.57	1.58	1.65	1.66	1.61	1.63	1.72
Mn	0.04	0.08	0.06	0.04	0.05	0.04	0.05	0.10	0.05	0.07	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.07	0.08
Mg	0.44	0.38	0.46	0.50	0.50	0.51	0.48	0.40	0.49	0.41	0.44	0.53	0.50	0.51	0.52	0.50	0.45	0.43	0.39	0.39
Ca	0.93	0.92	0.91	0.91	0.92	0.91	0.94	0.73	0.94	0.90	0.90	0.89	0.87	0.89	0.87	0.82	0.87	0.89	0.92	0.83
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Alm	0.53	0.55	0.52	0.52	0.51	0.52	0.51	0.59	0.50	0.55	0.54	0.49	0.53	0.52	0.53	0.55	0.55	0.54	0.54	0.57
Sps	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
Prp	0.15	0.12	0.15	0.17	0.17	0.17	0.16	0.13	0.16	0.13	0.15	0.18	0.16	0.17	0.17	0.17	0.15	0.14	0.13	0.13
Grs	0.31	0.30	0.30	0.30	0.31	0.30	0.32	0.24	0.32	0.30	0.30	0.31	0.29	0.30	0.29	0.27	0.29	0.30	0.30	0.27

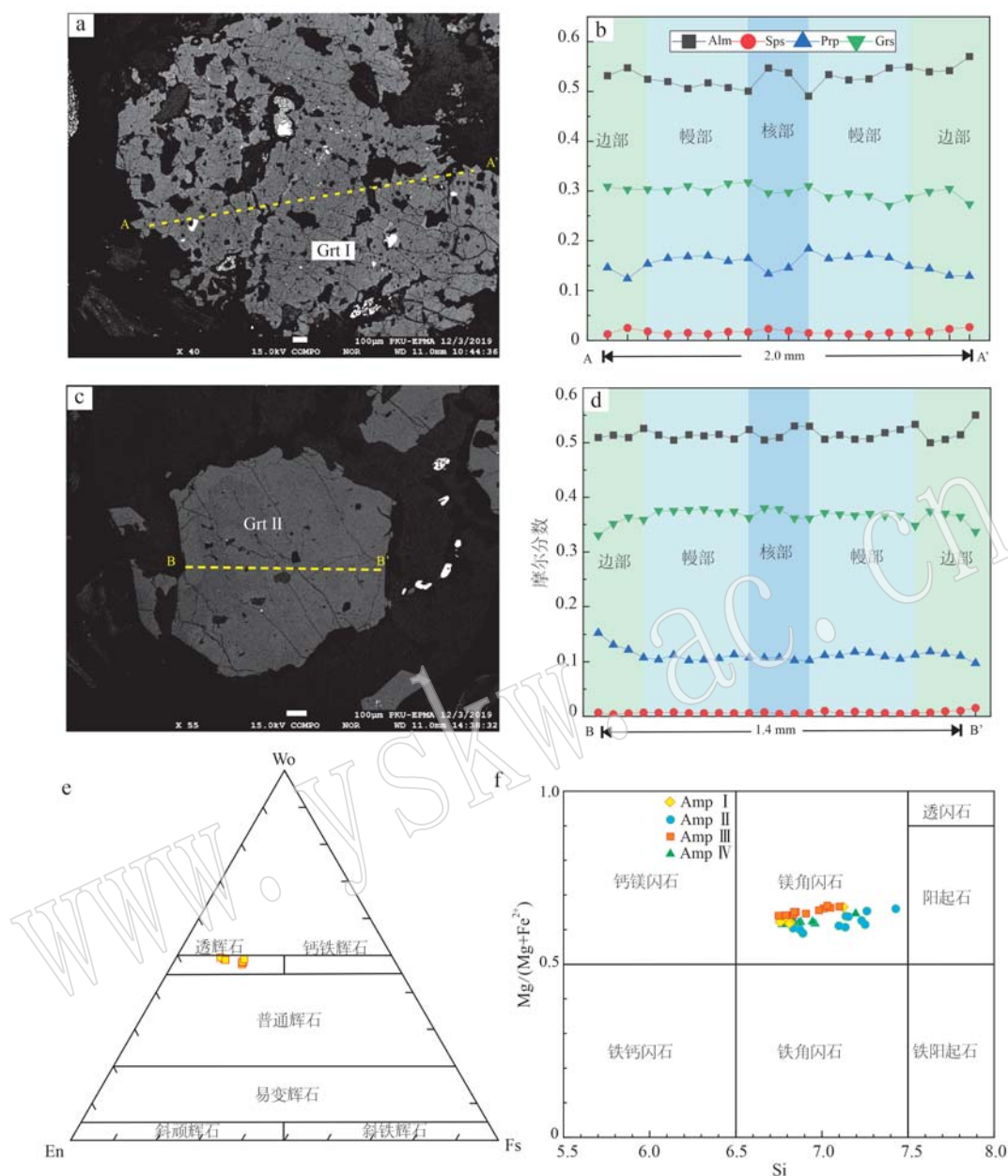


图4 石榴子石环带(a~d)、辉石分类图解(e)和角闪石分类图解(f)

Fig. 4 Representative garnets (left, BSE image) and their profiles (right) (a~d); Diagram of pyroxene classification(e); Diagram of amphibole classification(f)

3.2 全岩主、微量元素特征

我们选取了22件退变榴辉岩样品进行了主、微量元素测试。在主量元素上,退变榴辉岩 SiO_2 含量为45.32%~58.53%, MgO 含量为3.90%~8.27%, CaO 含量为5.30%~11.37%, Al_2O_3 为11.23%~18.95%, TiO_2 为1.26%~3.87%, TFe_2O_3 为11.73%~18.31%, K_2O 为0.30%~3.56%, $\text{Mg}^\#$ 为0.31~0.54(表5)。在微量元素上,日玛那榴辉岩轻度富集 LREE, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.74 \sim 9.63$, 具有 Eu 负异常

($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.18 \sim 0.31$)。在蛛网图中, Rb、U、Ta、Pb 中表现出类似的正异常,但在 Nb、Zr、Hf 中表现出轻微的负异常, Sr、Ba 表现为明显的负异常(图5a、5b)。

另外,变质和蚀变作用会使某些元素发生迁移,从而限制了它们在岩石成因研究中的应用。板片在俯冲和折返过程中,大离子亲石元素(如 K、Rb、Sr、Ba)通常会有比较强的活动性而发生迁移,而稀土和高场强元素依旧能较大幅度地保持稳定而不发生迁

表 2 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩单斜辉石成分分析结果

$w_B/\%$

Table 2 Composition of clinopyroxenes for granulitized eclogites from the Nyönno Ri region in central Himalaya

样品点	cpx 1	cpx 2	cpx 3	cpx 4	cpx 5	cpx 6	cpx 7	cpx 8	cpx 9	cpx 10
SiO ₂	54.18	54.57	55.34	54.30	53.72	53.63	52.92	53.83	53.90	53.61
TiO ₂	0.11	0.07	0.08	0.13	0.09	0.12	0.02	0.06	0.08	0.06
Al ₂ O ₃	1.28	1.40	1.69	1.35	0.65	1.14	0.60	0.65	0.66	0.82
Cr ₂ O ₃	0.00	0.04	0.03	0.04	0.03	0.00	0.06	0.08	0.04	0.00
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00
FeO	7.04	7.27	6.23	7.31	10.01	9.90	9.63	10.13	9.93	9.82
MnO	0.09	0.08	0.08	0.09	0.13	0.13	0.18	0.14	0.12	0.23
MgO	14.01	13.81	13.78	13.87	12.58	12.55	12.60	12.54	12.59	12.27
CaO	24.09	23.90	23.54	23.89	23.71	22.95	23.57	23.51	23.67	23.92
Na ₂ O	0.36	0.41	0.72	0.35	0.17	0.25	0.18	0.20	0.17	0.14
K ₂ O	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	101.19	101.55	101.49	101.33	101.10	100.67	100.02	101.14	101.16	100.87
氧原子数	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
Si	1.98	1.99	2.01	1.99	2.00	1.99	1.99	2.00	2.00	2.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.06	0.06	0.07	0.06	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.22	0.22	0.19	0.22	0.31	0.31	0.30	0.31	0.31	0.31
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Mg	0.77	0.75	0.74	0.76	0.70	0.70	0.71	0.69	0.70	0.68
Ca	0.95	0.93	0.91	0.94	0.94	0.91	0.95	0.94	0.94	0.95
Na	0.03	0.03	0.05	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	4.00	3.99	3.98	3.99	3.99	3.99	4.00	3.99	3.99	3.99
Wo	48.99	48.93	49.43	48.78	48.26	47.58	48.17	48.02	48.25	48.97
En	39.66	39.34	40.24	39.40	35.62	36.18	35.79	35.64	35.73	34.96
Fs	11.35	11.73	10.33	11.83	16.12	16.24	16.04	16.33	16.02	16.07

移 (Sigoyer *et al.*, 1997; Slagstad *et al.*, 2004)。本文所研究的榴辉岩样品烧蚀量较低 (0.12% ~ 1.37%), 且未见明显的 Ce 异常, 表明大部分样品受后期蚀变影响较小 (图 5a) (Polat and Hofmann, 2003)。另外, Zr 作为典型的高场强元素, 其在变质和后期蚀变过程中不易迁移, 因此可作为元素活动性的指标 (Zhang *et al.*, 2022)。在绘制 Zr 与部分元素的相关图解中, 我们发现 Zr 与主量元素 Al₂O₃、TiO₂、TFe₂O₃ 呈正相关关系, 而与 SiO₂、CaO 与 MgO 呈负相关关系 (图 6a~6e)。另外, 稀土元素 Nd、Y, 高场强元素 (Nb), 过渡族金属元素 (Ni) 与 Zr 均呈线性关系, 表明这些元素在变质过程中未发生明显迁移 (图 6g~6j)。

在 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解中, 榴辉岩样品主要集中在亚碱性玄武岩区域 (图 7a)。在 TiO₂-FeO/MgO 图解中, 榴辉岩样品沿着拉斑趋势演化 (图 7b)。在 V-Ti 图解中, 样品落入的区域较分散, 但主要集中在

洋脊玄武岩 (MORB) 和大陆溢流玄武岩 (CFB) 重合区域和大陆溢流玄武岩区域, 与洋岛玄武岩 (OIB) 或碱性玄武岩 (AB) 区域 (图 7c)。在 Zr/Y-Zr 图解上, 绝大部分样品均落在了洋脊玄武岩区域 (图 7d)。

3.3 锆石 U-Pb 年代学

我们选择了 5 件样品榴辉岩样品 (ZC2008、TZ14、TZ800、ZC2009、ZC2016) 进行锆石 U-Pb 年代学及微量元素研究。本研究中使用谐和度 >90% 的年龄, 年龄小于 1.0 Ga 的锆石采用 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄, 反之则采用 ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 年龄。

样品 ZC2008 的锆石呈自形-半自形棱柱状, 长为 80~120 μm, 长宽比为 1:1~2:1 (图 8a)。阴极荧光图像 (CL) 显示锆石主要分两类: 第 1 类锆石 (ZC2008) 呈均一化的灰色或微弱的扇形环带, 含有较多的包裹体; 另一类锆石具明显的核边结构, 核部锆石 (核部 ZC2008C) 呈亮灰色, 边部锆石 (边部

表 3 中喜馬拉雅日瑪那(退變)榴輝岩角閃石成分分析結果

Table 3 Composition of amphiboles for granulitized eclogites from the Nyönno Ri region in central Himalaya

类型	基质角闪石												后成晶角闪石											
	amp20	amp21	amp22	amp23	amp25	amp26	amp27	amp28	amp29	amp30	amp31	amp41	amp45	amp46	amp47	amp48	amp49	amp50	amp51	amp52	amp53	amp57		
样品点																								
SiO ₂	49.05	46.52	48.66	47.93	48.55	47.70	46.50	46.07	46.81	47.33	46.41	49.25	49.34	50.64	45.78	48.16	48.74	48.41	48.46	46.66	46.44	48.55		
TiO ₂	1.34	1.67	1.38	1.55	1.42	1.37	1.85	2.00	1.82	1.59	1.56	0.55	0.59	0.60	1.19	0.81	0.75	0.88	1.29	1.50	1.58	1.14		
Al ₂ O ₃	8.07	9.47	8.39	8.41	8.27	9.19	9.93	10.10	9.73	9.30	9.79	7.97	7.14	5.86	9.97	7.94	7.56	7.58	7.85	9.27	9.17	7.25		
Cr ₂ O ₃	0.07	0.03	0.03	0.09	0.05	0.01	0.05	0.05	0.06	0.00	0.04	0.04	0.02	0.02	0.08	0.00	0.08	0.02	0.02	0.03	0.04	0.12		
FeO	11.53	11.92	11.84	11.45	11.68	11.61	12.14	12.20	12.02	11.76	12.03	13.26	13.74	12.52	13.61	12.86	12.15	14.17	13.94	14.26	14.04	12.99		
MnO	0.06	0.06	0.06	0.02	0.04	0.05	0.04	0.07	0.06	0.07	0.09	0.09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.08	0.11	0.11	0.08	0.15		
MgO	13.49	12.81	13.40	13.23	13.63	12.86	12.65	12.55	12.67	12.83	12.71	12.35	12.45	13.53	11.58	12.65	12.68	12.26	12.29	11.56	11.79	12.88		
CaO	12.62	12.44	12.40	12.63	12.72	12.43	12.56	12.59	12.53	12.67	12.31	11.72	12.33	11.92	11.87	11.96	11.36	12.29	12.07	12.06	12.18	12.07		
Na ₂ O	0.84	1.17	1.05	0.99	0.92	0.87	1.23	1.22	1.19	1.20	1.01	0.86	0.78	0.63	1.32	0.89	0.87	0.90	1.03	1.31	1.16	0.98		
K ₂ O	0.39	0.51	0.41	0.43	0.38	0.49	0.63	0.50	0.51	0.53	0.52	0.34	0.33	0.19	0.49	0.34	0.28	0.34	0.37	0.45	0.48	0.36		
Total	97.46	96.60	97.62	96.73	97.66	96.58	97.58	97.35	97.40	97.28	96.49	97.55	96.79	96.89	96.88	96.64	95.70	97.20	97.67	97.21	97.21	96.67		
氧原子数	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23		
Si	7.10	6.85	7.05	7.01	7.03	6.98	6.79	6.75	6.84	6.91	6.84	7.17	7.25	7.38	6.78	7.09	7.19	7.12	7.09	6.89	6.86	7.14		
Ti	0.15	0.19	0.15	0.17	0.16	0.15	0.20	0.22	0.20	0.18	0.17	0.06	0.07	0.07	0.13	0.09	0.08	0.10	0.14	0.17	0.18	0.13		
Al	1.38	1.64	1.43	1.45	1.41	1.59	1.71	1.74	1.68	1.60	1.70	1.37	1.24	1.01	1.74	1.38	1.32	1.32	1.35	1.61	1.60	1.26		
Cr	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01		
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.11	0.11	0.12	0.15	0.03	0.03	0.00	0.03	0.02		
Fe ²⁺	1.40	1.47	1.44	1.40	1.42	1.42	1.48	1.49	1.47	1.44	1.48	1.61	1.69	1.53	1.69	1.58	1.50	1.74	1.70	1.76	1.74	1.60		
Mn	0.01	0.01	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	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02		
Mg	2.91	2.81	2.89	2.88	2.94	2.81	2.75	2.74	2.76	2.79	2.79	2.68	2.73	2.94	2.56	2.77	2.79	2.69	2.68	2.54	2.60	2.83		
Ca	1.96	1.96	1.93	1.98	1.97	1.95	1.97	1.98	1.96	1.98	1.94	1.83	1.94	1.86	1.88	1.89	1.80	1.94	1.89	1.91	1.93	1.90		
Na	0.24	0.33	0.30	0.28	0.26	0.25	0.35	0.35	0.34	0.34	0.29	0.24	0.22	0.18	0.38	0.25	0.25	0.26	0.29	0.38	0.33	0.28		
K	0.07	0.10	0.08	0.08	0.07	0.09	0.12	0.09	0.10	0.10	0.10	0.06	0.06	0.04	0.09	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09	0.09	0.07		
Sum	15.21	15.36	15.27	15.27	15.27	15.24	15.38	15.38	15.34	15.34	15.33	15.22	15.21	15.14	15.43	15.28	15.19	15.28	15.27	15.36	15.37	15.26		
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.67	0.65	0.66	0.66	0.67	0.66	0.64	0.64	0.64	0.65	0.65	0.63	0.61	0.66	0.60	0.64	0.65	0.61	0.61	0.59	0.60	0.64		

续表 3
Continued Table 3

类型 样品点	与黑云母共生角闪石										角闪石包裹体						
	amp60	amp61	amp62	amp63	amp64	amp65	amp66	amp68	amp70	amp71	amp72	amp73	amp74				
SiO ₂	49.52	47.19	47.31	46.41	46.90	46.22	45.98	45.85	46.23	46.05	45.92	46.12	48.49				
TiO ₂	1.10	1.54	1.39	1.42	1.43	1.58	1.39	1.38	1.50	1.38	1.56	1.62	1.40				
Al ₂ O ₃	6.95	8.46	8.93	9.74	9.78	9.96	10.18	10.07	9.95	10.40	10.46	9.80	7.46				
Cr ₂ O ₃	0.07	0.07	0.04	0.03	0.05	0.14	0.03	0.11	0.04	0.09	0.05	0.08	0.00				
FeO	12.90	13.52	13.30	13.02	12.91	12.85	13.28	13.05	13.16	12.80	13.08	13.29	12.06				
MnO	0.08	0.07	0.08	0.06	0.11	0.05	0.10	0.10	0.06	0.09	0.06	0.05	0.10				
MgO	13.39	12.33	12.39	12.00	12.16	12.00	12.06	12.12	12.09	11.98	12.02	12.02	13.43				
CaO	12.46	12.22	12.18	11.89	12.30	11.80	12.38	12.25	12.02	11.87	12.15	12.02	12.09				
Na ₂ O	0.86	1.12	1.15	1.24	1.35	1.31	1.37	1.27	1.36	1.36	1.33	1.37	1.03				
K ₂ O	0.35	0.43	0.46	0.43	0.48	0.47	0.54	0.49	0.51	0.48	0.49	0.54	0.20				
Total	97.68	96.95	97.43	96.73	97.47	96.88	97.31	97.14	97.31	97.20	97.51	96.98	96.63				
氧原子数	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23				
Si	7.20	6.96	6.94	6.85	6.87	6.81	6.77	6.76	6.80	6.77	6.74	6.81	7.10				
Ti	0.12	0.17	0.15	0.16	0.16	0.18	0.15	0.15	0.17	0.15	0.17	0.18	0.15				
Al	1.19	1.47	1.54	1.69	1.69	1.73	1.77	1.75	1.73	1.80	1.81	1.71	1.29				
Cr	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00				
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.02	0.06	0.00	0.06	0.00	0.06	0.05	0.09	0.05	0.01	0.05				
Fe ²⁺	1.57	1.67	1.63	1.61	1.58	1.58	1.64	1.61	1.62	1.57	1.61	1.64	1.48				
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01				
Mg	2.90	2.71	2.71	2.64	2.65	2.64	2.65	2.66	2.65	2.62	2.63	2.64	2.93				
Ca	1.94	1.93	1.91	1.88	1.93	1.86	1.95	1.94	1.89	1.87	1.91	1.90	1.90				
Na	0.24	0.32	0.33	0.36	0.38	0.37	0.39	0.36	0.39	0.39	0.38	0.39	0.29				
K	0.07	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.10	0.04				
Sum	15.24	15.33	15.34	15.35	15.37	15.36	15.44	15.42	15.41	15.40	15.41	15.40	15.26				
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.65	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.61	0.62	0.62	0.63	0.62	0.62	0.66				

表 4 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩斜长石成分分析结果

Table 4 Composition of plagioclases granulitized eclogites from the Nyönno Ri region in central Himalaya

 $w_i/\%$

样品点	Pl-1	Pl-2	Pl-3	Pl-4	Pl-5	Pl-6	Pl-7	Pl-8	Pl-9	Pl-10	Pl-11	Pl-12	Pl-13
SiO ₂	60.75	61.83	60.41	60.79	62.89	63.63	61.47	64.36	64.02	62.43	61.83	63.16	64.58
TiO ₂	0.01	0.05	0.00	0.05	0.00	0.03	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Al ₂ O ₃	24.68	24.40	25.13	25.08	23.84	23.22	24.33	22.97	23.43	24.50	24.43	23.84	23.03
Cr ₂ O ₃	0.02	0.03	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.02	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	0.24	0.20	0.23	0.29	0.14	0.24	0.24	0.21	0.20	0.19	0.19	0.17	0.19
FeO	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
MnO	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02
CaO	7.32	6.96	8.16	7.73	5.98	5.57	7.09	5.11	5.34	6.66	6.63	5.96	4.94
Na ₂ O	7.11	7.20	6.95	6.96	7.64	7.96	7.36	8.13	8.17	7.37	7.59	7.74	7.99
K ₂ O	0.17	0.19	0.16	0.16	0.27	0.28	0.19	0.28	0.23	0.18	0.20	0.28	0.34
Total	100.31	100.86	101.08	101.09	100.79	100.98	100.70	101.11	101.41	101.37	100.90	101.15	101.12
氧原子数	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Si	2.70	2.72	2.67	2.68	2.76	2.79	2.72	2.81	2.79	2.73	2.72	2.77	2.82
Ti	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
Al	1.29	1.27	1.31	1.30	1.24	1.20	1.27	1.18	1.20	1.26	1.27	1.23	1.18
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe ²⁺	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
Mn	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
Mg	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
Ca	0.35	0.33	0.39	0.37	0.28	0.26	0.34	0.24	0.25	0.31	0.31	0.28	0.23
Na	0.61	0.62	0.60	0.60	0.65	0.68	0.63	0.69	0.69	0.63	0.65	0.66	0.68
K	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Sum	4.97	4.95	4.98	4.96	4.95	4.95	4.97	4.95	4.96	4.95	4.97	4.95	4.94

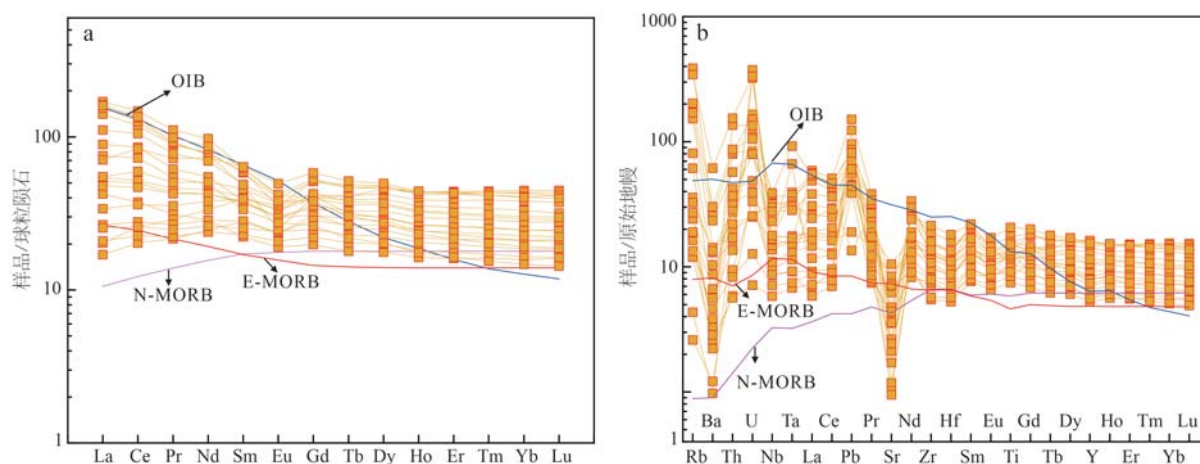


图5 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩的球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989 和 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns and primitive mantle-normalized spider diagram for granulitized eclogites from the Nyönno Ri region in central Himalaya (primitive mantle and chondrite normalized values are from Sun and McDonough, 1989; McDonough and Sun, 1995)

ZC2008R)呈深灰色,具有振荡环带,几乎不含包裹体(图8a)。在谐和图中,第1类锆石(ZC2008)的29个分析点得出加权平均年龄为 13.84 ± 0.18 Ma (MSWD=1.07, $n=29$) (图9a)。第2类具有两期变质的锆石核部(ZC2008C)的18个分析点得出加权平均年龄为 13.83 ± 0.32 Ma (MSWD=1.3, $n=18$) (图9c),与第1类锆石的年龄基本一致;锆石边部(ZC2008R)的22个分析点得出加权平均年龄为 11.98 ± 0.22 Ma (MSWD=5.7, $n=22$) (图9e),相较核部年龄要年轻1~2 Ma。所有的锆石都具有极低的Th以及Th/U值(<0.01 , 图12),符合变质锆石的化学特征(Rubatto, 2002)。对于稀土元素特征而言,第1类锆石(ZC2008, 图9b)和第2类两期变质锆石(ZC2008C, 图9d)的核部特征一致,具平坦的HREE分布特征并且不具备Eu异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.70 \sim 1.28$),指示其与石榴子石同期生长,并且与斜长石不共生(Rubatto, 2002)。第2类两期变质锆石的边部(ZC2008R, 图9f)则显著富集HREE,显示出明显的左倾特征,同时具有轻微Eu负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.34 \sim 1.97$),指示斜长石的生长,可能代表了高压麻粒岩相。

样品TZ14的锆石主要呈他形,长为50~150 μm ,长宽比为1:1~3:1(图8b)。少数保留继承锆石核,部分锆石具有较薄的浅灰色变质边(图8b)。年龄可分为两组,16个分析点得出的加权平均年龄为 14.17 ± 0.36 Ma (MSWD=1.4, $n=16$) (图10a),其Th/U值为0.007~0.02(图12);在稀土元素特征

上,这些锆石呈现平坦至轻微富集的HREE特征,无Eu异常或轻微的Eu正异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.97 \sim 1.38$)。样品TZ800锆石呈长柱状,部分保留有岩浆振荡环带,4个样品分析点给出年龄范围为876~749 Ma, Th/U值为0.1~1(图11a、图12)。TZ800样品的岩石锆石核显著富集HREE并具有显著的Eu负异常的特征(图11b)。

样品ZC2009的锆石呈他形,近圆状,长约50 μm ,具扇形环带(图9c)。7个分析点给出的加权平均年龄为 15.51 ± 0.87 Ma (MSWD=1.03, $n=7$), Th/U值为0.007~0.019(图10c、图12),具有平坦的HREE分布特征,无Eu异常或轻微的Eu正异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.10 \sim 1.34$) (图10d)。

样品ZC2016的锆石呈半自形-他形棱柱状,长约100 μm ,长宽比约为1.5:1~3:1(图9d)。CL图像上保留残余继承锆石核。对锆石核进行U-Pb定年,年龄范围为896~752 Ma, Th/U值为0.1~1(图11c、图12)。这些锆石核显著富集HREE并具有显著的Eu负异常特征,为典型的岩浆锆石($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.21 \sim 0.44$) (图11d)。

4 讨论

4.1 榴辉岩的变质演化

目前在中喜马拉雅的定结-定日(Ama Drime)地区、通门地区、亚东地区、尼泊尔的Arun Valley地区、

表 5 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩主($w_B/\%$)、微量($w_B/10^{-6}$)元素分析结果
Table 5 Whole-rock major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements for granulitized eclogites from the Nyömo Ri region in central Himalaya

样品号	ZC20-01	ZC20-02	ZC20-03	ZC20-04	ZC20-05	ZC20-06	ZC20-07	ZC20-08	ZC20-09	ZC20-10	ZC20-11	ZC20-12	ZC20-16	ZC20-18	ZC20-20	ZC20-22	ZC20-24	ZC20-26	ZC20-30	TZ14
SiO ₂	46.10	45.32	51.69	50.40	48.30	52.62	47.37	54.80	48.87	52.92	58.53	51.82	46.14	47.06	48.21	47.74	51.32	50.63	48.59	47.40
TiO ₂	2.78	1.61	1.26	1.30	2.27	2.29	2.15	1.93	1.53	2.42	1.74	1.80	1.56	2.73	1.72	2.66	2.23	2.65	3.87	2.45
Al ₂ O ₃	14.99	16.89	14.34	14.13	14.27	11.23	13.55	12.23	14.00	11.87	13.10	13.33	15.28	15.76	18.95	14.01	13.01	12.38	12.33	13.84
TFe ₂ O ₃	16.84	16.36	13.11	13.58	15.57	14.04	15.41	13.31	12.84	15.63	11.73	15.18	13.61	15.90	14.17	17.34	13.84	16.74	18.31	16.46
MnO	0.27	0.17	0.18	0.23	0.30	0.68	0.26	0.22	0.22	0.26	0.23	0.24	0.23	0.25	0.37	0.23	0.30	0.29	0.32	0.21
MgO	6.11	8.27	7.16	6.59	5.47	4.56	6.26	5.08	7.56	5.21	4.25	5.85	7.41	6.42	3.90	4.81	5.98	4.68	4.04	5.69
CaO	6.81	7.11	8.10	9.36	8.95	11.07	10.09	8.53	10.90	8.90	5.97	8.81	11.37	6.80	5.30	7.87	8.69	8.61	8.46	7.86
Na ₂ O	0.58	1.84	1.99	1.58	2.55	0.84	2.36	0.70	2.06	0.68	1.24	1.06	2.38	2.87	2.38	0.76	1.97	1.50	1.45	2.13
K ₂ O	2.96	0.63	0.46	0.94	0.61	0.53	0.60	0.99	0.42	0.33	1.54	0.30	0.52	0.46	3.56	2.01	0.67	0.52	0.47	1.89
P ₂ O ₅	0.39	0.11	0.15	0.11	0.23	0.14	0.18	0.14	0.12	0.22	0.17	0.13	0.12	0.39	0.12	0.35	0.25	0.23	0.42	0.37
LOI	1.37	0.92	0.56	0.78	0.29	0.64	0.40	1.04	0.31	0.27	0.77	0.39	0.34	0.36	0.81	1.25	0.53	0.39	0.29	0.44
Total	99.20	99.23	99.01	99.01	98.81	98.64	98.63	98.96	98.83	98.70	99.29	98.90	98.94	99.01	99.49	99.02	98.78	98.63	98.55	98.76
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.42	0.50	0.52	0.49	0.41	0.39	0.45	0.43	0.54	0.40	0.42	0.44	0.52	0.45	0.36	0.36	0.46	0.36	0.31	0.41
Li	23.00	14.61	15.31	19.92	6.14	2.74	13.17	12.42	4.50	1.41	14.63	2.99	3.55	5.84	37.06	15.91	7.83	5.67	9.02	19.14
P	1 409.4	548.8	664.4	467.6	805.8	603.6	907.2	590.4	474.8	924.0	829.2	521.5	517.0	1 311.8	469.2	1 509.6	1 014.4	944.8	1 459.4	1 521.6
K	26 760	6 866	4 926	9 018	5 032	5 432	6 942	10 156	3 778	3 260	18 924	2 710	5 334	3 600	32 580	22 400	6 896	5 252	4 118	19 408
Sc	43.36	54.16	45.76	41.18	38.82	47.68	60.02	43.42	45.18	44.82	44.68	49.82	53.72	40.76	31.52	47.50	33.76	45.18	45.08	35.60
Ti	20 260	13 792	10 848	9 710	15 432	18 244	20 000	15 568	10 918	18 700	16 482	13 481	12 848	17 586	11 842	22 780	17 404	20 620	26 880	19 692
V	262.60	403.40	354.80	244.20	313.40	448.80	477.40	354.40	326.20	447.40	400.20	387.12	378.80	241.20	196.86	311.20	272.20	370.20	297.60	332.80
Cr	138.80	104.66	74.24	117.50	61.70	3.45	103.52	95.20	128.42	72.24	46.44	49.30	130.20	117.18	58.40	84.10	95.02	36.44	9.34	100.76
Mn	1 832.2	1 355.8	1 431.6	1 599.8	1 895.2	4 930.0	2 270.0	1 611.2	1 449.6	1 841.2	2 016.0	1 649.9	1 775.4	1 475.8	2 378.0	1 729.0	2 142.0	2 038.0	2 040.0	1 439.6
Co	38.46	60.08	55.36	49.12	35.62	37.08	56.62	36.22	46.62	43.20	40.06	51.79	53.18	36.20	22.70	44.90	45.48	44.16	33.04	43.48
Ni	66.76	85.30	65.62	65.00	33.14	36.64	64.12	43.98	69.60	46.26	42.18	48.37	71.48	50.18	23.06	40.66	78.58	29.16	10.99	48.62
Cu	98.48	45.04	12.03	57.46	79.72	273.60	129.68	59.42	124.94	129.66	41.76	210.26	244.40	3.60	6.16	64.80	163.46	173.42	114.92	24.50
Zn	109.06	219.20	101.48	92.82	98.14	59.12	140.72	119.02	97.78	118.90	98.08	176.94	112.82	69.14	106.92	127.30	108.94	103.72	105.34	100.02
Ga	19.17	26.08	24.10	17.69	17.46	12.33	23.44	20.16	16.56	18.70	26.72	19.41	20.72	21.84	22.26	25.24	16.06	17.88	20.14	21.36
Rb	246.20	11.74	11.40	51.24	15.31	10.36	22.84	38.98	7.57	2.76	97.16	1.65	8.46	11.89	218.00	128.98	20.76	17.21	12.05	108.34
Sr	25.00	51.76	80.44	131.62	177.28	55.94	155.82	21.62	91.02	20.02	44.52	74.59	148.62	36.18	75.90	51.42	221.40	100.08	93.20	149.32
Y	70.42	37.62	32.52	23.94	42.86	36.26	47.56	64.76	26.50	48.10	60.54	36.00	29.80	73.80	73.66	67.72	25.34	52.12	70.20	33.58
Zr	139.36	168.84	111.24	61.22	108.11	78.52	141.39	91.33	84.36	143.47	128.18	88.52	63.99	175.54	211.68	178.14	120.41	150.13	239.82	151.79
Nb	26.20	9.77	6.96	7.82	10.59	6.12	12.17	11.89	4.15	11.75	11.94	6.15	5.08	27.82	16.44	23.00	22.72	12.65	21.40	19.75
Cs	26.72	2.44	2.55	15.32	1.50	0.37	0.98	2.70	0.62	0.60	8.65	0.05	0.59	1.32	11.89	10.99	1.31	1.96	0.72	5.95

续表 5
Continued Table 5

样品号	ZC20-01	ZC20-02	ZC20-03	ZC20-04	ZC20-05	ZC20-06	ZC20-07	ZC20-08	ZC20-09	ZC20-10	ZC20-11	ZC20-12	ZC20-16	ZC20-18	ZC20-20	ZC20-22	ZC20-24	ZC20-26	ZC20-30	TZ14
Ba	178.90	22.46	27.00	72.58	60.60	15.50	90.70	39.36	18.27	6.79	99.48	8.51	32.54	22.76	429.60	211.80	93.58	19.93	46.58	163.22
La	33.46	40.38	21.16	10.05	12.17	4.03	12.92	4.80	4.97	11.37	8.06	6.32	6.04	36.58	38.40	38.04	17.84	13.06	16.77	26.34
Ce	72.44	90.42	52.52	22.94	30.54	12.40	31.74	15.73	13.84	28.74	22.14	17.05	15.88	77.20	81.34	83.04	44.44	36.50	51.32	64.30
Pr	8.42	10.56	5.88	2.97	4.11	2.05	4.38	2.75	2.13	4.04	3.37	2.55	2.36	8.65	8.82	9.39	5.17	4.80	6.88	7.40
Nd	36.86	45.48	25.60	13.36	19.82	11.52	21.26	15.63	11.17	19.77	17.76	13.30	12.23	36.18	35.68	40.50	22.94	23.70	34.02	32.46
Sm	8.91	9.63	5.90	3.40	5.67	4.29	6.23	6.03	3.53	5.76	6.03	4.33	3.88	9.09	7.40	9.52	5.15	6.99	9.75	7.46
Eu	2.32	2.38	1.72	1.11	1.72	1.36	1.93	1.94	1.21	1.73	2.07	1.38	1.40	2.05	1.44	2.44	1.60	2.13	2.87	2.21
Gd	10.51	8.42	6.36	4.08	7.08	6.28	8.11	8.58	4.55	7.34	8.21	5.84	5.12	10.55	8.34	10.91	5.38	8.74	11.97	7.82
Tb	1.74	1.19	0.97	0.67	1.15	1.09	1.35	1.55	0.76	1.23	1.45	0.99	0.86	1.82	1.53	1.75	0.81	1.42	1.93	1.14
Dy	12.03	7.51	6.23	4.48	7.61	7.19	9.13	10.79	5.08	8.32	9.99	6.78	5.71	12.23	11.64	11.76	5.14	9.37	12.61	6.97
Ho	2.48	1.50	1.24	0.92	1.51	1.39	1.83	2.18	1.02	1.68	2.00	1.38	1.16	2.41	2.47	2.41	0.99	1.86	2.50	1.31
Er	7.27	4.30	3.54	2.66	4.31	3.84	5.17	6.36	2.92	4.83	5.75	3.95	3.28	7.05	7.22	7.00	2.72	5.30	7.11	3.57
Tm	1.13	0.65	0.54	0.41	0.65	0.56	0.77	0.98	0.44	0.73	0.87	0.59	0.49	1.10	1.10	1.06	0.39	0.79	1.06	0.51
Yb	7.61	4.19	3.58	2.69	4.19	3.58	4.96	6.49	2.81	4.74	5.63	3.85	3.16	7.29	7.39	6.95	2.50	5.14	6.85	3.27
Lu	1.14	0.63	0.54	0.41	0.62	0.52	0.73	0.95	0.41	0.71	0.81	0.57	0.47	1.05	1.10	1.05	0.36	0.76	1.01	0.48
Hf	3.29	4.00	2.67	1.63	2.62	1.96	3.34	2.47	1.97	3.29	3.15	2.17	1.76	4.05	4.94	4.14	2.69	3.51	5.58	3.42
Ta	1.51	0.66	0.47	0.54	0.67	0.37	0.72	2.73	0.28	0.62	1.61	0.38	0.31	3.78	1.54	1.36	1.29	0.70	1.24	1.16
Pb	3.28	10.74	5.69	3.96	5.89	2.77	4.48	6.81	5.38	1.35	3.20	4.73	8.79	5.05	6.13	5.82	5.78	4.28	3.14	0.96
Th	6.78	6.98	3.59	1.39	2.30	0.50	2.43	1.16	0.48	1.67	1.45	0.80	0.71	11.52	13.15	7.39	1.87	2.78	3.14	4.86
U	3.47	1.76	1.02	3.19	2.42	0.85	2.30	7.88	0.15	0.53	6.79	0.70	0.27	2.82	7.00	2.21	0.53	0.82	1.66	1.68
Eu*	9.71	9.03	6.13	3.74	6.38	5.29	7.17	7.31	4.04	6.55	7.12	5.09	4.50	9.82	7.87	10.21	5.27	7.86	10.86	7.64
Eu/Eu*	0.24	0.26	0.28	0.30	0.27	0.26	0.27	0.27	0.30	0.26	0.29	0.27	0.31	0.21	0.18	0.24	0.30	0.27	0.26	0.29
(La/Yb) _N	4.40	9.63	5.91	3.74	2.90	1.12	2.60	0.74	1.77	2.40	1.43	1.64	1.91	5.02	5.20	5.47	7.13	2.54	2.45	8.05

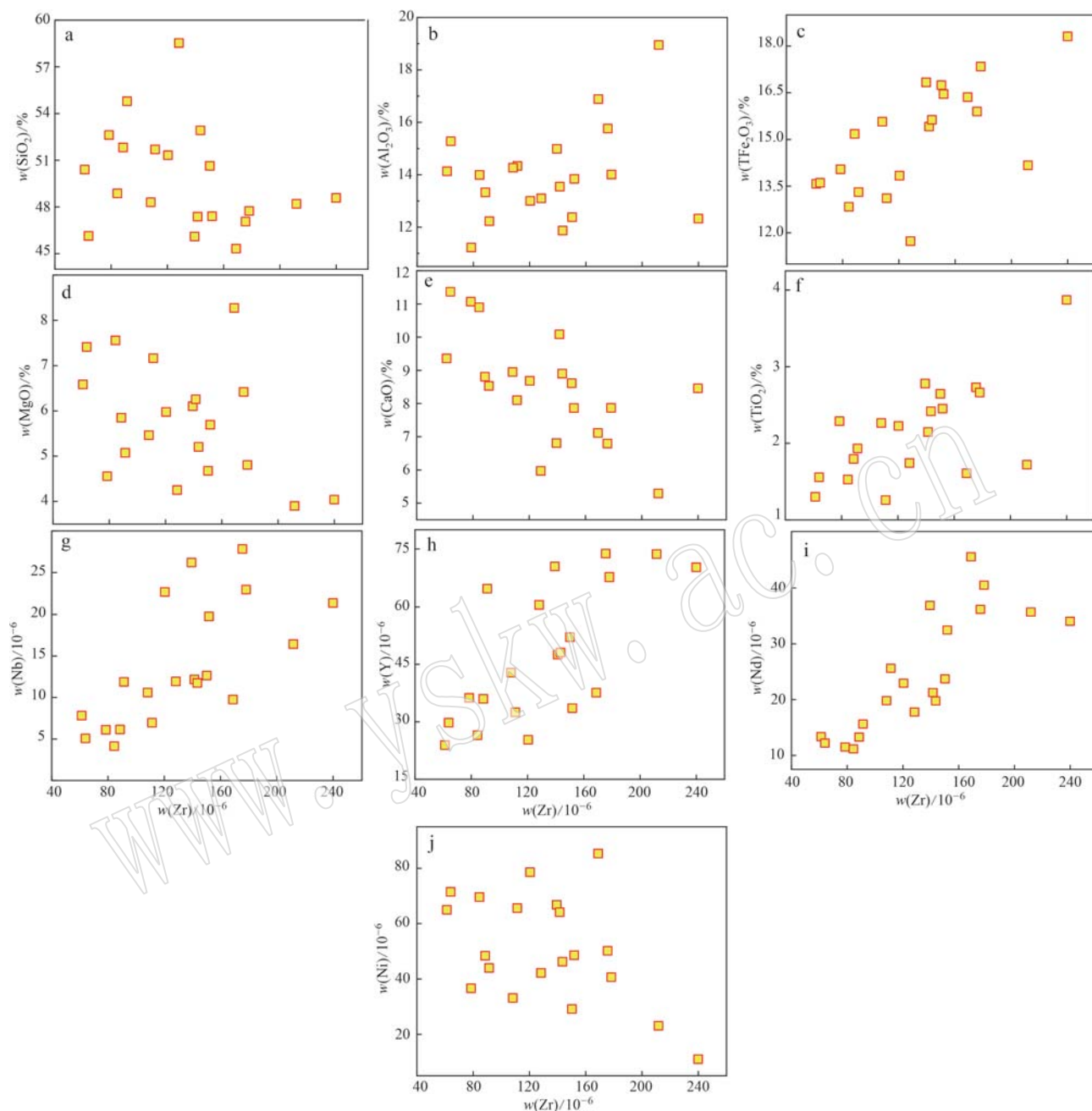


图6 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩全岩主、微量元素对Zr含量图解

Fig. 6 Zirconium versus major and trace elements of retrogressed eclogites from the Nyönno Ri region in central Himalaya

印度的锡金地区以及不丹西北部均发现有榴辉岩 (Lombardo *et al.*, 1998; Lombardo and Rolfo, 2000; Groppo *et al.*, 2007; Rolfo *et al.*, 2008; Corrie *et al.*, 2010; Warren *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017b; Li *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2022)。这些榴辉岩主要呈透镜体或经揉皱变形的夹层状分布在片麻岩当中,但都发生了强烈的退变质 (Wang *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019; Wu

et al., 2022)。Lombardo 和 Rolfo (2000) 基于单斜辉石和斜长石的后成合晶估算原来绿辉石的硬玉分子为 35%~45% (摩尔分数, 下同)。Li 等 (2018) 分别在通门地区榴辉岩基质中和石榴子石包体中发现了绿辉石,绿辉石的硬玉分子最高可达 35%,并限定峰期榴辉岩相的温压条件为 >2.1 GPa 和 >750℃。中喜马拉雅(退变)榴辉岩的基质中存在大量后成合晶和冠状体等不平衡结构,这导致对于其峰期温压

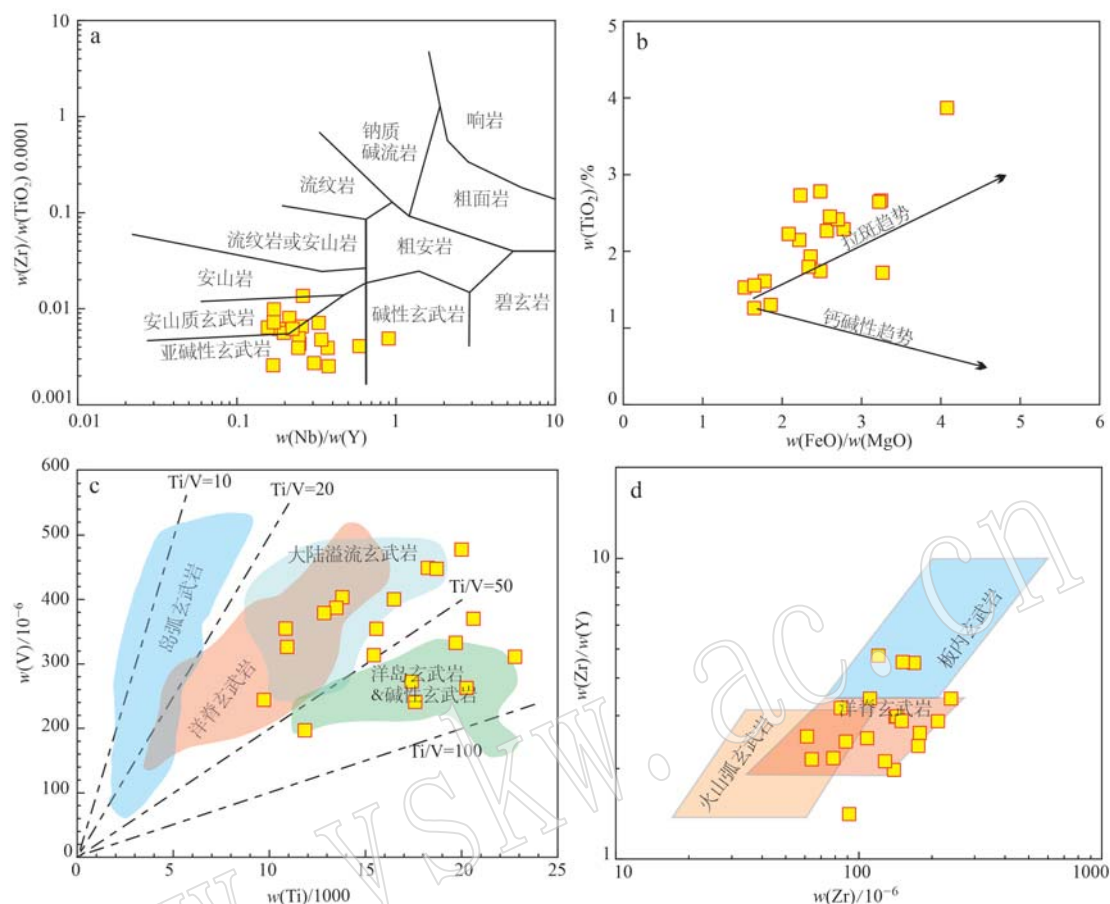


图7 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩 $Zr/TiO_2-Nb/Y$ (a)、 TiO_2-FeO^*/MgO (b)、 $V-Ti$ (c) 和 $Zr/Y-Zr$ (d) 图解

Fig. 7 Plots of Zr/TiO_2^* vs. Nb/Y (a), FeO^*/MgO vs. SiO_2 (b), $Ti/1000$ vs. V (c) and Zr/Y vs. Zr (d) for granulitized eclogites from the Nyönno Ri region in central Himalaya

条件的限定还存在较多争议。峰期压力的限定主要以绿辉石的硬玉含量为主要限定标准,观点较为一致 (Wang *et al.*, 2017b; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2022),但是关于温度则有学者认为中喜马拉雅(退变)榴辉岩经历了超高温变质作用 (Wang *et al.*, 2021; Dong *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022)。不过总体来说,中喜马拉雅(退变)榴辉岩记录了顺时针的变质 $p-T$ 轨迹,从绿帘角闪岩相到峰期榴辉岩相以近等温升压为主,随后快速降压,受到高压麻粒岩相和二辉麻粒岩的叠加,最后降温降压至角闪岩相,逐渐被抬升到地表 (Wang *et al.*, 2017b; Li *et al.*, 2018)。

年代学的工作目前主要集中在锆石、独居石和石榴子石等不同定年方法,限定出中喜马拉雅(退变)榴辉岩记录的多期变质年龄。锆石 U-Pb 定年限定出的年龄为 15~14 Ma (Kharta, Kellett *et al.*,

2014; Lombardo *et al.*, 2016; 日屋, Wang *et al.*, 2017; 不丹, Grujic *et al.*, 2011) 或者 17~16 Ma (通门, Li *et al.*, 2003; Cottle *et al.*, 2009a; Li *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021; 亚东, Wu *et al.*, 2022)。对于这些锆石年龄的解释,存在以下两种观点:一种是依据锆石中绿辉石包体、锆石平坦的 HREE 配分模式和 Eu 负异常的缺失以及锆石与石榴子石边部(代表峰期榴辉岩相)具有榴辉岩相稀土元素配分系数,认为锆石年龄就是榴辉岩峰期年龄 (Wang *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2022);另一种则认为这代表后期麻粒岩相叠加的年龄 (Lombardo *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2021),而真正发生榴辉岩化的时间则要早于榴辉岩中锆石记录的年龄 (Wang *et al.*, 2021; Dong *et al.*, 2022)。围岩片麻岩中的变质锆石比榴辉岩中的更加复杂,从 37 Ma 到

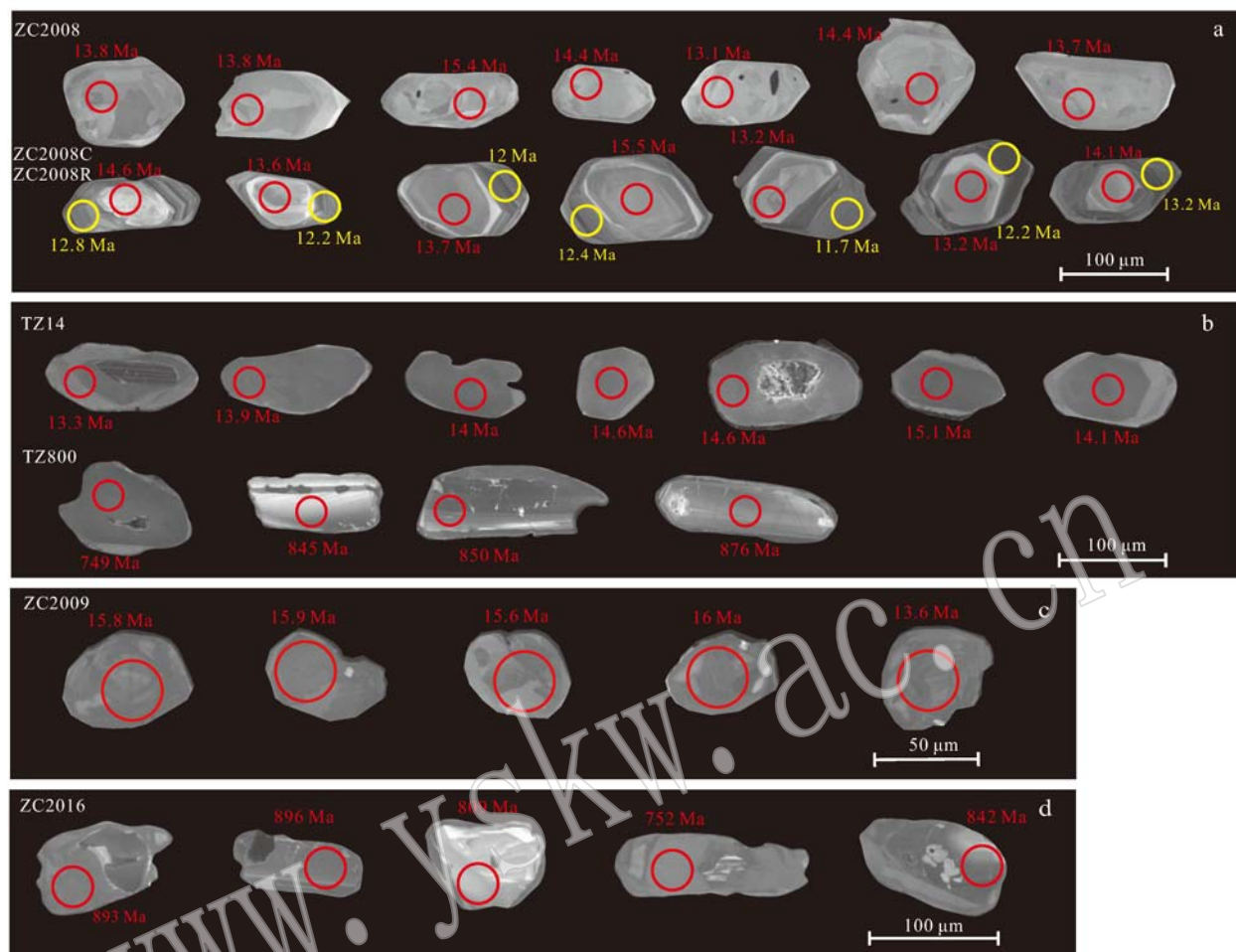


图8 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩典型锆石 CL 图像

Fig. 8 Representative cathodoluminescence images of zircons for retrogressed eclogites from the Nyönno Ri region in central Himalaya

15 Ma 都有连续的记录 (Wang *et al.*, 2017a, 2021)。李德威等(2003)对日玛那地区的基性麻粒岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,得到了 29.5 ~ 16 Ma 的年龄,并且将最老的 29.5 Ma 解释成麻粒岩相变质的时代,而刘树文等(2005)则将 29.5 Ma 解释成榴辉岩相变质的时代。此外,对于 Lu-Hf 等时线方法,Corrie 等(2010)对 Arun Valley 榴辉岩的定年结果给出石榴子石-全岩等时线年龄 20.7 ± 0.4 Ma,认为代表石榴子石早期生长的时间。Kellett 等(2014)得到的 Ama Drime 内部的退变榴辉岩的石榴子石 Lu-Hf 定年结果却为 38~33 Ma。这两者的差异很可能是由于石榴子石核部往往含有许多包裹体,例如锆石和磷灰石,这些难以完全排除的副矿物将影响 Lu-Hf 定年的准确性。中喜马拉雅的 Arun Valley 地区、不丹西北部、Ama Drime 地区以及 Ama Drime 地区内部的定结、卡塔、通门地区、亚东地区的

榴辉岩相变质作用时代的差异一方面可能是由于不同测试方法之间的误差所致,另一方面可能是因为如 Kellett 等(2014)提出的可能在该地区的深部地壳存在一个连续的持续约 20 Ma 的高压变质作用所致。

虽然目前还存在较多争议,但中喜马拉雅高级变质岩与西喜马拉雅构造结的变质时代明显不同。年龄上中喜马拉雅的榴辉岩可能更加年轻(锆石年龄 < 20 Ma),温压限定上峰期压力更低(约 2.0 GPa)但对应的温度更高(约 750℃),甚至在后期存在进一步的升温,并达到超高温变质条件。经过数十百万年的持续造山,可能由于俯冲角度、速度和介质的差异,中喜马拉雅在中新世时已经与以西喜马拉雅为代表的早期造山样式不同,此时中喜马拉雅的地壳厚度已经超过 60 km,并开始大规模快速隆升 (Wu *et al.*, 2022)。

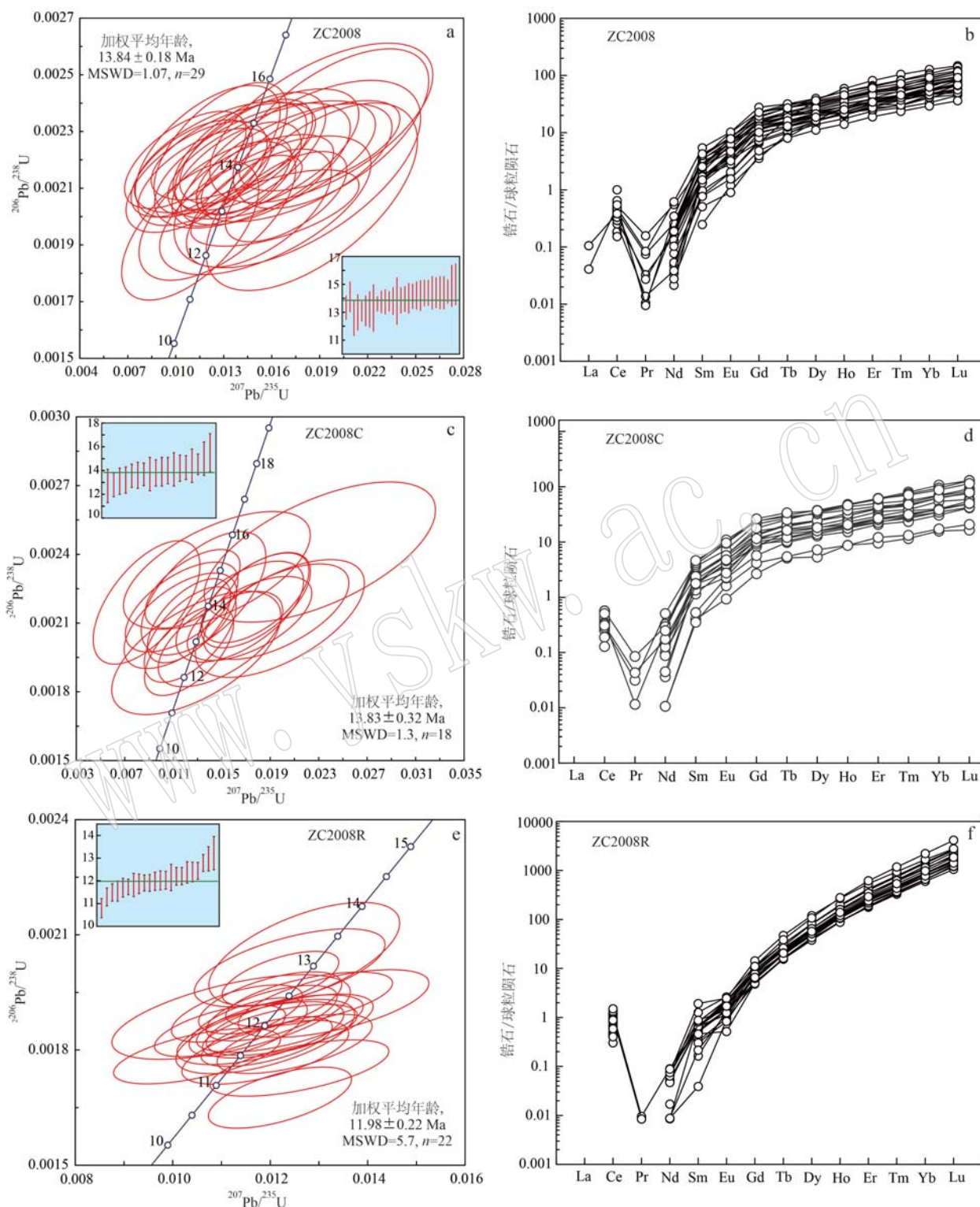


图9 退变榴辉岩样品 ZC2008 的锆石 U-Pb 年龄(a、c、e)和稀土元素配分图(b、d、f)

Fig. 9 Zircon U-Pb concordia diagrams (a, c, e) and chondrite-normalized REE patterns (b, d, f) of sample ZC2008 for retrogressed eclogites

日玛那退变榴辉岩呈透镜体或岩墙状与围岩花岗片麻岩直接接触,其变质演化可划分为3个期次:

峰期榴辉岩相、高压麻粒岩相和晚期角闪岩相。我们在日玛那榴辉岩识别出3类型锆石年龄,分别为

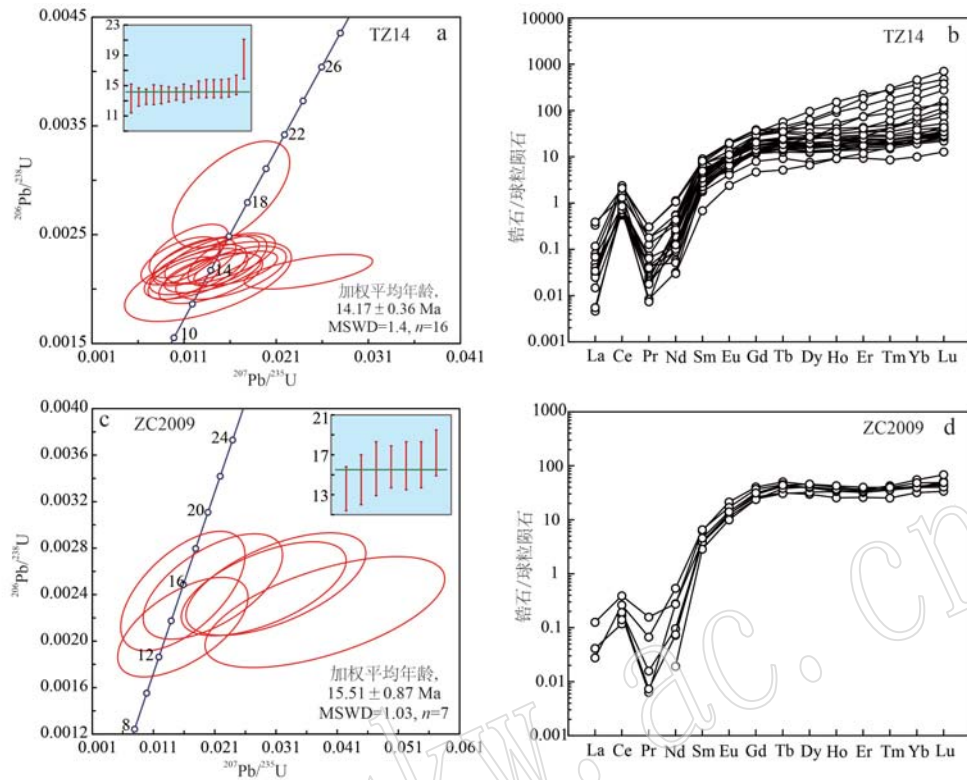


图 10 退变榴辉岩样品 TZ14 和 ZC2009 的锆石 U-Pb 年龄(a,c)和稀土元素配分图(b,d)

Fig. 10 Zircon U-Pb concordia diagrams (a, c) and chondrite-normalized REE patterns (b, d) of sample TZ14 and ZC2009 for retrogressed eclogites

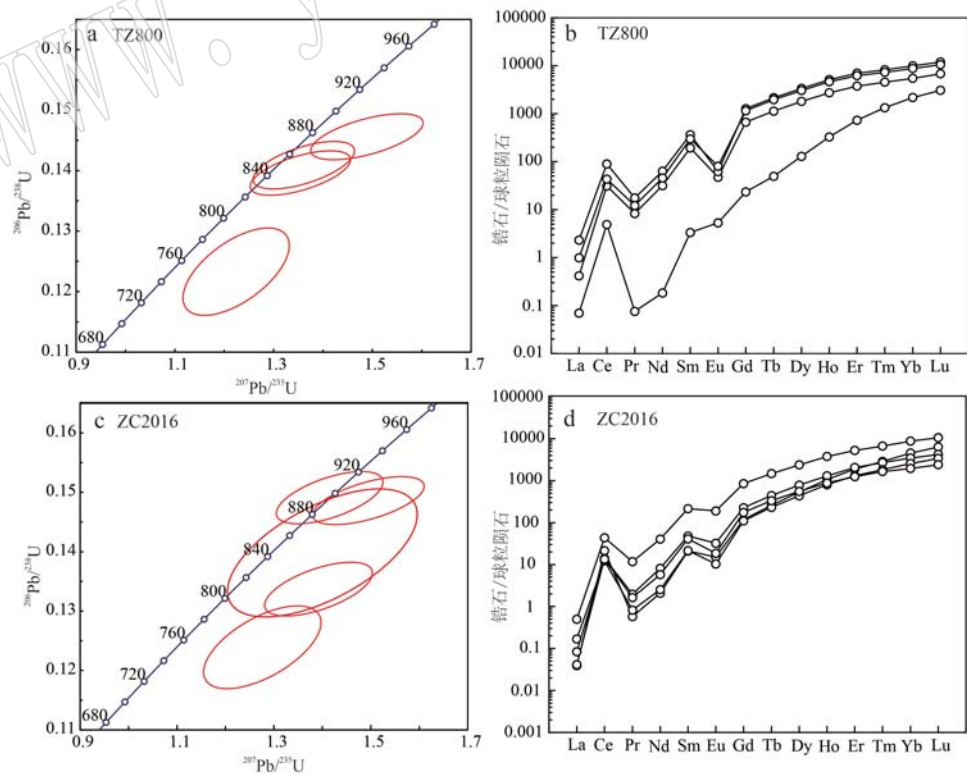


图 11 退变榴辉岩样品 TZ800 和 ZC2016 的锆石 U-Pb 年龄(a,c)和稀土元素配分图(b,d)

Fig. 11 Zircon U-Pb concordia diagrams (a, c) and chondrite-normalized REE patterns (b, d) of sample TZ800 and ZC2016 for retrogressed eclogites

表 6 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩锆石 U-Pb 定年数据结果

Table 6 Results of zircon U-Pb ages for granulitized eclogites from the Nyönno Ri region in central Himalaya

样品点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ
ZC2008											
801	3.39	684	0.005	0.016 9	0.003 1	0.002 1	0.000 1	13.3	0.9	17.0	3.1
802	1.74	432	0.004	0.017 4	0.005 0	0.002 2	0.000 2	14.1	1.1	17.4	5.0
808	1.22	263	0.005	0.010 9	0.003 5	0.002 0	0.000 2	12.6	1.3	11.0	3.5
829	1.52	310	0.005	0.012 6	0.004 0	0.002 0	0.000 2	13.0	1.3	12.7	4.0
828	3.05	467	0.007	0.016 2	0.004 3	0.002 0	0.000 1	13.1	0.7	16.3	4.2
811	2.85	531	0.005	0.015 2	0.003 7	0.002 0	0.000 2	13.1	1.1	15.2	3.7
815	2.68	300	0.009	0.015 6	0.005 4	0.002 0	0.000 2	13.2	1.3	15.6	5.4
812	0.50	166	0.003	0.018 5	0.005 4	0.002 1	0.000 3	13.3	1.7	18.5	5.4
825	9.29	1173	0.008	0.014 6	0.002 7	0.002 1	0.000 1	13.6	0.5	14.7	2.7
813	2.92	583	0.005	0.015 1	0.003 9	0.002 1	0.000 1	13.7	0.8	15.2	3.9
816	2.61	614	0.004	0.011 8	0.003 4	0.002 1	0.000 1	13.8	0.9	11.8	3.4
805	1.99	864	0.002	0.014 4	0.002 3	0.002 1	0.000 1	13.8	0.7	14.5	2.3
822	1.96	380	0.005	0.011 3	0.003 6	0.002 1	0.000 2	13.8	1.0	11.4	3.6
824	0.77	171	0.005	0.017 6	0.006 3	0.002 2	0.000 3	13.8	1.7	17.5	6.3
809	2.02	517	0.004	0.013 8	0.003 3	0.002 2	0.000 2	13.9	0.9	13.9	3.3
818	0.97	442	0.002	0.011 0	0.003 1	0.002 2	0.000 1	14.0	0.9	11.0	3.1
832	1.56	403	0.004	0.014 8	0.005 0	0.002 2	0.000 2	14.0	1.1	14.8	5.0
831	1.77	573	0.003	0.010 6	0.003 1	0.002 2	0.000 1	14.2	0.9	10.7	3.1
810	1.55	325	0.005	0.012 8	0.004 4	0.002 2	0.000 2	14.2	1.0	12.8	4.4
819	2.18	396	0.006	0.016 0	0.005 3	0.002 2	0.000 2	14.2	1.1	16.0	5.3
830	1.88	543	0.004	0.014 4	0.003 4	0.002 2	0.000 2	14.4	1.0	14.5	3.4
821	1.96	416	0.005	0.013 6	0.004 2	0.002 2	0.000 1	14.4	0.9	13.6	4.2
807	2.13	323	0.007	0.012 0	0.003 7	0.002 2	0.000 2	14.4	1.2	12.1	3.7
817	0.97	451	0.002	0.014 6	0.003 9	0.002 2	0.000 2	14.4	1.1	14.7	3.9
820	2.24	456	0.005	0.012 8	0.003 4	0.002 2	0.000 2	14.4	1.2	12.9	3.4
826	1.00	297	0.003	0.015 7	0.004 7	0.002 2	0.000 2	14.4	1.2	16.7	5.0
806	0.96	498	0.002	0.019 0	0.004 1	0.002 3	0.000 1	14.5	0.9	19.0	4.1
827	1.68	289	0.006	0.019 7	0.005 0	0.002 3	0.000 2	14.9	1.5	19.7	5.0
823	1.08	224	0.005	0.019 1	0.005 7	0.002 3	0.000 2	15.0	1.5	19.1	5.6
ZC2008C											
08C10	0.72	187	0.004	0.012 9	0.005 7	0.002 0	0.000 2	12.7	1.4	12.8	5.7
08C5	3.24	628	0.005	0.012 3	0.003 0	0.002 0	0.000 2	12.8	1.0	12.4	3.0
08C25	1.87	346	0.005	0.014 9	0.004 2	0.002 0	0.000 2	13.1	1.1	15.0	4.2
08C16	1.85	464	0.004	0.012 4	0.003 1	0.002 1	0.000 2	13.2	1.1	12.5	3.1
08C6	3.45	656	0.005	0.012 3	0.002 8	0.002 1	0.000 2	13.6	1.0	12.4	2.8
08C3	1.35	292	0.005	0.011 6	0.003 8	0.002 1	0.000 2	13.6	1.1	11.7	3.8
08C11	1.70	500	0.003	0.017 3	0.004 2	0.002 1	0.000 2	13.7	1.0	17.3	4.2
08C9	1.51	287	0.005	0.019 8	0.005 7	0.002 1	0.000 2	13.7	1.4	19.8	5.6
08C20	0.96	395	0.002	0.019 5	0.004 9	0.002 2	0.000 2	13.8	1.1	19.5	4.9
08C16	1.88	448	0.004	0.016 5	0.004 3	0.002 2	0.000 2	13.9	1.2	16.6	4.3
08C19	1.63	342	0.005	0.011 7	0.003 8	0.002 2	0.000 2	14.0	1.1	11.8	3.8
08C23	1.22	279	0.004	0.008 8	0.003 6	0.002 2	0.000 2	14.1	1.4	10.6	4.2
08C13	1.86	376	0.005	0.017 8	0.003 7	0.002 2	0.000 2	14.2	1.1	17.9	3.7
08C12	2.06	434	0.005	0.017 8	0.003 6	0.002 2	0.000 2	14.3	1.0	17.8	3.6
08C17	2.33	323	0.007	0.013 5	0.004 2	0.002 2	0.000 2	14.4	1.4	13.5	4.2
08C26	1.75	572	0.003	0.012 6	0.003 2	0.002 3	0.000 1	14.5	0.9	12.7	3.2
08C7	1.15	298	0.004	0.014 6	0.006 3	0.002 3	0.000 2	15.0	1.4	14.6	6.2
08C14	0.88	159	0.006	0.023 1	0.007 8	0.002 4	0.000 3	15.5	1.6	23.0	7.7
ZC2008R											
08R24	30.2	3640	0.008	0.012 2	0.001 2	0.001 7	0.000 1	10.8	0.4	12.3	1.0
08R8	38.9	4420	0.009	0.012 6	0.001 5	0.001 8	0.000 1	11.3	0.4	12.7	1.3
08R10	33.0	3800	0.009	0.010 5	0.001 4	0.001 8	0.000 1	11.5	0.4	10.6	1.2
08R17	33.7	3690	0.009	0.011 9	0.001 4	0.001 8	0.000 1	11.6	0.4	12.0	1.3
08R15	25.8	4250	0.006	0.012 5	0.001 3	0.001 8	0.000 1	11.7	0.4	12.6	1.0

续表 6
Continued Table 6

样品点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ
08R22	35.7	5 240	0.007	0.011 9	0.001 1	0.001 8	0.000 1	11.7	0.3	12.0	0.9
08R14	6.11	2 500	0.002	0.011 9	0.001 5	0.001 8	0.000 1	11.8	0.5	12.0	1.3
08R7	13.2	2 830	0.005	0.011 8	0.001 4	0.001 8	0.000 1	11.9	0.4	11.9	1.2
08R9	6.90	5 160	0.001	0.011 0	0.001 1	0.001 9	0.000 1	11.9	0.4	11.1	0.9
08R19	38.8	5 500	0.007	0.012 2	0.001 3	0.001 8	0.000 1	11.9	0.4	12.3	1.1
08R21	16.2	5 030	0.003	0.011 6	0.001 0	0.001 9	0.000 1	12.0	0.4	11.7	0.7
08R1	23.6	3 470	0.007	0.012 4	0.001 4	0.001 9	0.000 1	12.0	0.4	12.5	1.2
08R27	5.55	3 830	0.001	0.012 2	0.001 4	0.001 9	0.000 1	12.0	0.4	12.3	1.2
08R5	10.9	2 290	0.005	0.011 2	0.002 0	0.001 9	0.000 1	12.2	0.6	11.3	1.9
08R16	17.2	5 060	0.003	0.011 3	0.001 1	0.001 9	0.000 1	12.2	0.4	11.4	0.9
08R2	31.0	4 820	0.006	0.012 0	0.001 1	0.001 9	0.000 1	12.2	0.4	12.1	0.9
08R23(2)	4.74	2 620	0.002	0.013 3	0.001 6	0.001 9	0.000 1	12.4	0.5	13.4	1.5
08R11	28.1	3 770	0.008	0.012 0	0.001 2	0.001 9	0.000 1	12.4	0.4	12.1	1.0
08R3	18.4	3 800	0.005	0.012 8	0.001 4	0.001 9	0.000 1	12.4	0.4	12.9	1.2
08R4	13.2	4 210	0.003	0.012 2	0.001 0	0.002 0	0.000 1	12.8	0.4	12.3	0.7
08R25	9.60	2 790	0.003	0.012 4	0.001 6	0.002 0	0.000 1	13.0	0.5	12.5	1.4
08R23	4.90	3 370	0.002	0.012 7	0.001 6	0.002 1	0.000 1	13.2	0.7	12.8	1.5
TZ											
ZC24	2.01	90.0	0.022	0.013 6	0.007 4	0.002 1	0.000 3	13.3	1.9	13.5	7.3
ZC18	2.76	305	0.009	0.013 9	0.004 6	0.002 1	0.000 2	13.5	1.2	14.7	4.7
ZC06	2.49	326	0.008	0.017 9	0.003 8	0.002 1	0.000 1	13.5	0.9	17.9	3.8
ZC11	2.82	407	0.007	0.011 0	0.003 2	0.002 1	0.000 2	13.5	1.0	11.1	3.2
ZC09	1.93	236	0.008	0.016 1	0.004 9	0.002 2	0.000 2	13.8	1.3	16.1	4.9
ZC21	3.31	209	0.016	0.012 3	0.004 6	0.002 1	0.000 2	13.8	1.2	12.3	4.5
ZC22	2.39	258	0.009	0.014 1	0.004 3	0.002 2	0.000 2	13.9	1.0	14.2	4.3
ZC19	7.94	395	0.020	0.024 5	0.005 7	0.002 2	0.000 1	13.9	0.8	24.4	5.7
ZC15	4.37	202	0.022	0.012 5	0.004 3	0.002 2	0.000 2	14.0	1.2	12.6	4.3
ZC31	2.52	357	0.007	0.016 6	0.003 7	0.002 2	0.000 1	14.1	0.9	16.6	3.7
ZC01	2.08	298	0.007	0.012 1	0.003 7	0.002 3	0.000 2	14.5	1.1	12.2	3.7
ZC03	2.78	354	0.008	0.015 7	0.003 5	0.002 3	0.000 2	14.6	1.2	15.7	3.5
ZC07	3.07	288	0.011	0.010 6	0.003 5	0.002 3	0.000 2	14.6	1.2	10.6	3.5
ZC16	3.01	242	0.012	0.013 4	0.004 7	0.002 3	0.000 2	14.6	1.2	13.4	4.7
ZC30	2.73	231	0.012	0.014 9	0.004 9	0.002 3	0.000 2	14.7	1.2	15.0	4.8
ZC23	2.56	211	0.012	0.011 5	0.003 5	0.002 4	0.000 2	15.1	1.3	11.6	3.5
ZC12	2.28	244	0.009	0.016 1	0.005 2	0.002 9	0.000 4	18.5	2.6	16.1	5.1
TZ800											
ZC26	158	1 490	0.11	1.224 0	0.088 0	0.123 3	0.005 9	749	34	809	41
ZC27	484	481	1.01	1.354 0	0.083 0	0.139 6	0.003 0	845	18	869	36
ZC28	1 410	1 225	1.15	1.361 0	0.084 0	0.140 9	0.003 2	850	18	871	36
ZC13	899	767	1.17	1.489 0	0.093 0	0.145 6	0.003 1	876	18	929	35
ZC2009											
1789-06	0.52	50.6	0.010	0.015 8	0.008 7	0.002 1	0.000 4	13.6	2.2	15.6	8.6
1789-03	0.37	52.2	0.007	0.039 0	0.016 0	0.002 3	0.000 4	14.5	2.5	38.0	15.0
1789-04	0.46	54.9	0.008	0.015 8	0.008 3	0.002 4	0.000 4	15.6	2.7	15.6	8.2
1789-02	1.04	55.5	0.019	0.029 0	0.011 0	0.002 5	0.000 3	15.8	2.1	28.0	11.0
1789-07	0.68	62.5	0.011	0.020 7	0.009 3	0.002 5	0.000 4	15.9	2.4	20.5	9.1
1789-09	0.68	51.9	0.013	0.031 0	0.012 0	0.002 5	0.000 4	16.0	2.3	30.0	12.0
1789-01	0.59	65.7	0.009	0.055 0	0.017 0	0.002 7	0.000 4	17.2	2.3	54.0	17.0
ZC2016											
1615	122	183	0.67	1.276 0	0.099 0	0.123 9	0.005 7	752	33	831	44
1613	90.9	158	0.58	1.392 0	0.091 0	0.133 7	0.003 7	809	21	884	38
1621	209	203	1.03	1.400 0	0.160 0	0.139 8	0.008 8	842	51	873	73
1604	352	589	0.60	1.495 0	0.094 0	0.148 6	0.003 3	893	19	930	40
1611	825	637	1.30	1.415 0	0.090 0	0.149 1	0.003 6	896	20	894	38

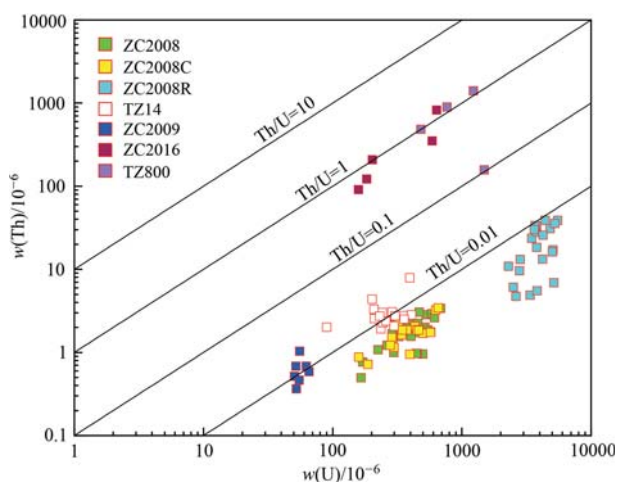


图 12 退变榴辉岩锆石 Th-U 图解

Fig. 12 Th-U diagram for zircons of retrogressed eclogites

15.5、14 以及 12 Ma。年龄为 15.5~14 Ma 的锆石具有平坦的 HREE 特征并且缺失 Eu 负异常,表明锆石与石榴子石伴生并且没有斜长石,这些特点均表明锆石是在榴辉岩相的条件下形成的,因此我们认为日玛那地区(退变)榴辉岩的榴辉岩相变质年龄为 15.5~14 Ma。这与前人对中国定结地区与不丹西北部退变榴辉岩的锆石定年结果(15~14 Ma)一致(Grujic *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017b)。而约 12 Ma 的锆石几乎不含包裹体,稀土元素特征明显更富集 HREE,显示出明显的左倾特征,同时具有 Eu 负异常,这些特点可能指示石榴子石的分解,并伴随斜长石的生长,因此我们认为约 12 Ma 年龄为麻粒岩相的退变年龄。另外,我们绘制了锆石微量元素含量或比值与年龄的关系图(图13),发现 $(Dy/Yb)_N$

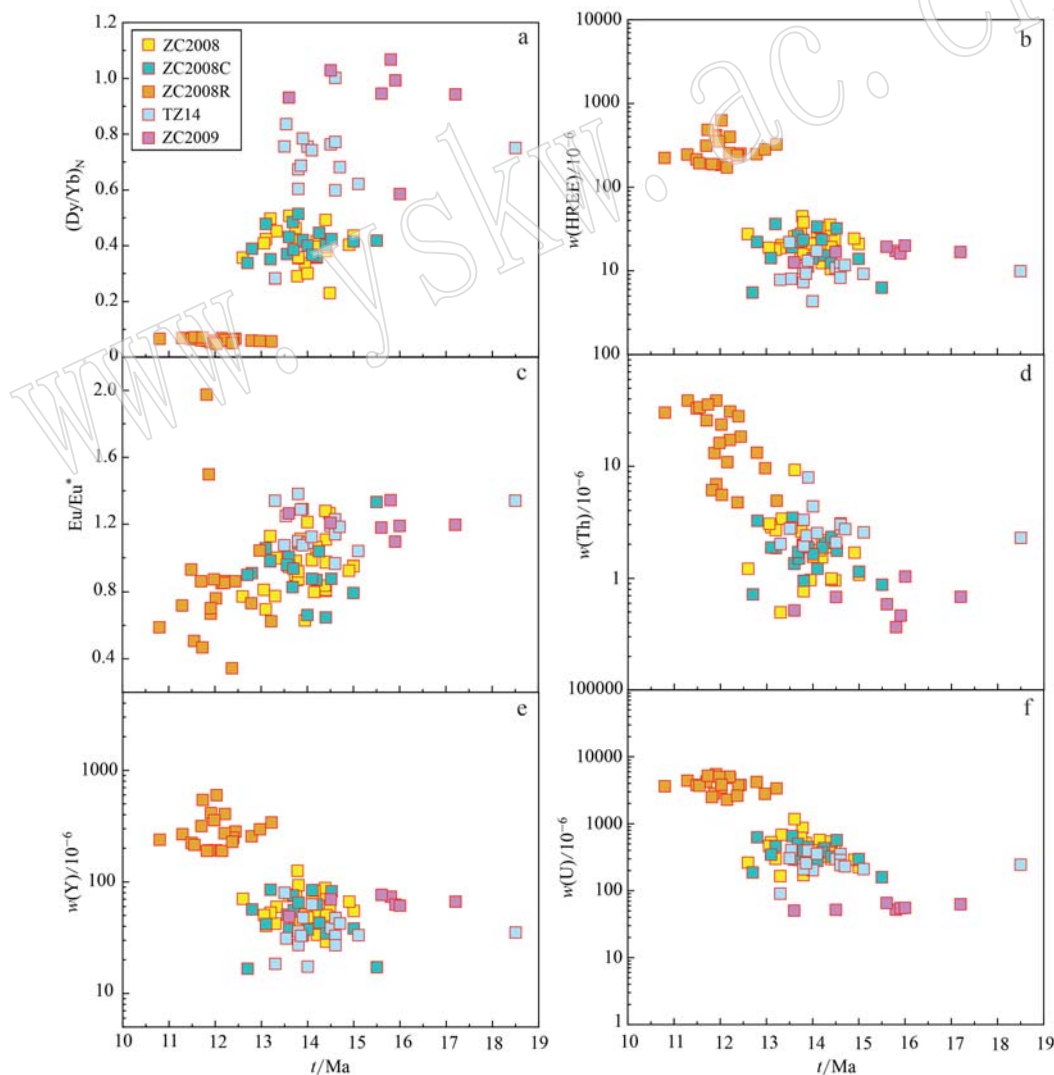


图 13 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩锆石典型微量元素含量或比值对年龄图

Fig. 13 Diagrams of composition versus age for key trace element values and ratios for zircon of retrogressed eclogites from the Nyönno Ri region in central Himalaya

值、Y 含量、HREE 总量均随年龄的减小而增加,反映了退变质过程中石榴子石的分解(图 13a、13b、13e);而 Eu/Eu^* 值随着年龄的减少而增加,反映了退变质过程中斜长石的生长(图 13c);Th、U 含量随着年龄的减小而不断增加(图 13d、13f),可能与一些副矿物如褐帘石、金红石分解有关。

在温压条件上,锆石 Ti 含量温度计计算得到温度为 550~650℃ (Ferry and Watson, 2007, 表 7)。部分样品计算得到的温度为 730℃ 以上。另外,石榴子石-单斜辉石-斜长石-石英的压力计估算得到峰期榴辉岩相的压力为 1.9~2.1 GPa (Newton and Perkins, 1982)。Wu 等 (2022) 利用金红石的 Zr 温度计 (Zack *et al.*, 2004; Watson *et al.*, 2006; Tomkins *et al.*, 2007; 张丽娟等, 2016) 计算中喜马拉雅亚东麻粒岩化(退变)榴辉岩当压力为 2.1 GPa 时,得到 750~770℃ 的峰期温度,与本研究的部分计算结果比较一致,因此我们将中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩的峰期温压限定为约 730℃、1.9~2.1 GPa。中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩同样记录了顺时针的变质 p - T 轨迹(图 14),从峰期榴辉岩相经历近等温快速降压,受到高压麻粒岩相的叠加,最后降温降压至角闪岩相,逐渐被抬升到地表。

4.2 榴辉岩的原岩属性

中喜马拉雅(退变)榴辉岩的原岩年龄仍存在较大争议,主要分为以下几种观点:白垩纪晚期(100~80 Ma) (Rolfo *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2009; Lombardo *et al.*, 2016), 新元古代(约 980 Ma) (Liu *et al.*, 2007; Cottle *et al.*, 2009a; Wang *et al.*, 2017), 古元古代(约 1 800 Ma) (Chakungal *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2022), 以及古生代(约 450 Ma) (Dong *et al.*, 2022)。Li 等 (2009) 认为 110~80 Ma 为中喜马拉雅榴辉岩的原岩年龄,而约 980 Ma 和约 1 800 Ma 为捕获的碎屑锆石年龄。Rolfo 等 (2005) 得出卡塔地区麻粒岩化榴辉岩原岩年龄为 110~80 Ma, Lombardo 等 (2016) 同样获得约 90 Ma 的白垩纪晚期原岩年龄。Liu 等 (2007) 采用 SIMS 锆石 U-Pb 方法得到 Ama Drime 地块内(退变)榴辉岩的上交点年龄为 971 ± 8 Ma, Cottle 等 (2009a) 和 Kellett 等 (2014) 在该地区也得到了约 980 Ma 的原岩年龄。Wang 等 (2017) 得到日屋地区的麻粒岩化榴辉岩样品中的锆石核部年龄为 $1\,017.6 \pm 9.6$ Ma, 认为其可能代表榴辉岩的年龄。Chakungal 等 (2010) 利用 SIMS 锆石 U-Pb 定年得到不丹西北部退变榴辉岩 1 750 Ma 的

原岩年龄,推断该类型岩浆作用与伸展构造体制下岩石圈地幔部分熔融有关。Zhang 等 (2022) 通门和日屋地区(退变)榴辉岩锆石获得了约 1 850 Ma 的原岩年龄,认为中喜马拉雅榴辉岩为古元古代的大陆溢流玄武岩。

在前人的研究中,有些工作是从单颗粒锆石核部得到的原岩年龄,并没有足够的锆石年龄数据 (Lombardo *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017), 对于原岩年龄的限定十分局限。而我们两组榴辉岩锆石样品 TZ 和 ZC2016 分别给出了 876~749 Ma 和 896~752 Ma 的新元古代年龄,年龄主要集中在 890~850 Ma, 并且这些锆石核保存有明显的岩浆振荡环带,具有高的 Th/U 值(0.1~1.5), 为典型的岩浆成因锆石 (Hoskin and Schaltegger, 2003), 因此日玛那地区(退变)榴辉岩的原岩年龄为新元古代(890~850 Ma)。

日玛那榴辉岩具平坦型或 LREE 轻微富集型的稀土元素特征,与 OIB 或 E-MORB 特征类似(图 5a)。 Ti/V 值可作为构造环境判别的指标,Ti 是一种不相容元素,V 则相反。一般情况下,OIB 具有较高的 Ti/V 值,而岛弧玄武岩则具有较低的 Ti/V 值,而洋中脊玄武岩的 Ti/V 值则介于二者之间。日玛那榴辉岩具有较高的 Ti/V 值,与洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩类似(图 7c)。在 Zr/Y-Zr 图中,绝大多数榴辉岩样品均落在洋中脊玄武岩区域(图 7d)。综上,日玛那榴辉岩可能来源于大洋中脊玄武岩,形成于洋盆打开阶段。

4.3 构造启示

喜马拉雅造山带榴辉岩分为两种类型:一是西构造结的超高压榴辉岩;另一种是中喜马拉雅高压麻粒岩化榴辉岩。另外在东构造结出露有高压麻粒岩,但并未达到榴辉岩相变质 (Liu and Zhong, 1997; Ding *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2010; 刘凤麟等, 2014)。从西到东,变基性岩的变质峰期压力逐渐降低,从超高压榴辉岩相到榴辉岩相,至麻粒岩相。变质峰期压力的降低可能与印度板块自西向东俯冲角度变缓有关 (de Sigoyer *et al.*, 2000; Kaneko *et al.*, 2003; Parrish *et al.*, 2006; Guillot *et al.*, 2007, 2008)。目前关于中喜马拉雅麻粒岩化榴辉岩的成因机制分为两种观点:① 印度大陆俯冲到欧亚大陆发生榴辉岩化 (Guillot *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2022); ② 加厚基性下地壳 (Grujic *et al.*, 2011)。加厚基性下地壳模型认为中喜

表 7 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩锆石微量元素成分分析结果
Table 7 Zircon trace element contents for granulitized eclogites from the Njónno Ri region in central Himalaya

样品点	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	Th/U	Eu/Eu*	(Dy/Yb) _N	HREE	$u_B/10^{-6}$
ZC2008																											
801	1.13	59.9	0.71	0.00	0.37	-	0.08	0.36	0.36	3.31	0.78	6.41	1.83	6.21	1.13	9.49	1.71	13.200	0.07	1.53	3.39	684	0.005	1.00	0.45	20.4	575
802	2.70	75.4	0.65	0.00	0.29	-	0.09	0.52	0.43	3.43	0.86	7.69	2.23	8.45	1.72	14.2	2.73	12.890	0.08	0.97	1.74	432	0.004	0.99	0.36	29.3	636
805	0.39	125.9	0.82	0.00	0.30	-	0.04	0.12	0.12	1.36	0.66	9.39	3.33	13.5	2.67	21.6	3.74	11.000	0.14	1.94	1.99	864	0.002	0.87	0.29	44.8	511
806	-	60.9	0.72	0.00	0.11	-	0.00	0.04	0.07	0.73	0.35	4.13	1.58	6.56	1.37	12.0	2.21	11.530	0.19	1.18	0.96	498	0.002	1.27	0.23	23.7	
807	0.93	50.0	0.58	0.00	0.25	-	0.10	0.26	0.24	2.25	0.60	5.10	1.49	5.51	0.95	8.34	1.45	13.350	0.07	0.76	2.13	323	0.007	0.98	0.41	17.7	563
808	1.15	70.4	0.57	0.00	0.26	-	0.11	0.48	0.31	3.09	0.83	7.18	2.13	8.07	1.48	13.4	2.44	12.930	0.07	0.56	1.22	263	0.005	0.77	0.36	27.6	576
809	0.90	51.3	0.68	0.00	0.26	0.01	0.12	0.31	0.36	3.07	0.71	5.78	1.60	5.89	1.09	9.34	1.66	11.790	0.08	1.22	2.02	517	0.004	1.11	0.41	19.6	561
810	-	33.6	0.62	0.00	0.19	-	0.02	0.23	0.20	1.40	0.37	3.52	0.99	3.93	0.70	5.65	1.14	13.010	0.08	0.77	1.55	325	0.005	1.05	0.42	12.4	
811	-	40.4	0.63	0.00	0.28	-	0.01	0.26	0.16	2.02	0.49	4.36	1.15	4.50	0.76	6.89	1.41	13.010	0.09	1.11	2.85	531	0.005	0.70	0.42	14.7	
812	-	42.2	0.44	0.00	0.11	-	0.02	0.15	0.12	1.48	0.40	4.04	1.20	4.87	0.99	9.58	2.06	12.890	0.06	0.36	0.50	166	0.003	0.78	0.28	18.7	
813	-	47.3	0.68	0.00	0.28	-	0.06	0.24	0.22	2.43	0.53	4.89	1.30	5.14	0.79	7.07	1.17	13.130	0.08	1.30	2.92	583	0.005	0.90	0.46	15.5	
815	0.80	53.1	0.61	0.01	0.32	0.02	0.26	0.42	0.40	2.85	0.72	6.07	1.61	5.56	1.06	8.17	1.47	12.890	0.06	0.69	2.68	300	0.009	1.13	0.50	17.9	553
816	-	77.0	0.69	0.00	0.40	-	0.09	0.39	0.39	3.79	1.03	8.10	2.34	8.60	1.54	12.9	2.37	13.510	0.11	1.34	2.61	614	0.004	0.98	0.42	27.8	
817	0.21	77.2	0.64	0.00	0.23	-	0.12	0.56	0.59	4.66	1.18	8.74	2.35	9.05	1.63	15.1	2.97	12.350	0.09	1.08	0.97	451	0.002	1.11	0.39	31.1	478
818	0.15	51.0	0.53	0.00	0.09	-	0.01	0.08	0.05	0.82	0.31	3.96	1.31	5.39	0.99	7.87	1.27	12.410	0.20	1.02	0.97	442	0.002	0.63	0.34	16.8	461
819	-	51.2	0.70	0.00	0.29	-	0.10	0.21	0.25	2.36	0.56	5.07	1.50	5.55	1.07	9.50	1.84	13.290	0.09	0.93	2.18	396	0.006	1.06	0.36	19.5	
820	0.62	29.2	0.56	0.00	0.19	-	0.03	0.12	0.09	0.99	0.30	2.84	0.80	3.15	0.60	5.00	0.91	12.710	0.09	1.04	2.24	456	0.005	0.81	0.38	10.5	538
821	0.92	44.3	0.56	0.00	0.18	-	0.08	0.38	0.49	3.55	0.79	5.67	1.26	4.19	0.77	7.71	1.72	11.200	0.06	0.96	1.96	416	0.005	1.28	0.49	15.7	562
822	2.50	93.6	0.69	0.00	0.30	0.00	0.11	0.59	0.47	4.50	1.10	9.72	2.98	11.0	2.12	18.3	3.55	12.690	0.07	0.87	1.96	380	0.005	0.87	0.36	38.0	630
823	1.20	55.0	0.53	0.00	0.19	-	0.12	0.54	0.37	2.54	0.77	6.38	1.78	6.44	1.16	9.80	1.78	12.020	0.07	0.58	1.08	224	0.005	0.95	0.44	21.0	579
824	1.01	43.0	0.56	0.00	0.16	0.00	0.02	0.27	0.21	1.69	0.47	4.17	1.25	4.53	0.94	7.80	1.42	13.170	0.07	0.42	0.77	171	0.005	0.92	0.36	15.9	568
825	1.50	74.7	0.74	0.00	0.61	-	0.09	0.61	0.49	4.03	1.00	8.79	2.36	8.25	1.44	11.6	2.16	12.950	0.13	2.66	9.29	1173	0.008	0.95	0.51	25.8	594
826	-	50.3	0.49	0.00	0.18	0.00	0.07	0.39	0.27	2.69	0.60	5.59	1.43	5.70	1.13	9.26	1.68	12.290	0.06	0.75	1.00	297	0.003	0.81	0.40	19.2	
827	-	66.5	0.57	0.00	0.20	-	0.06	0.26	0.25	2.65	0.69	6.84	2.00	7.53	1.33	11.4	2.09	13.290	0.05	0.71	1.68	289	0.006	0.93	0.40	24.3	
828	1.60	50.4	0.58	0.00	0.33	-	0.05	0.20	0.19	2.44	0.61	5.42	1.64	5.67	1.04	8.88	1.72	12.850	0.07	1.05	3.05	467	0.007	0.81	0.41	19.0	598
830	1.80	88.2	0.66	0.00	0.29	0.01	0.29	0.83	0.60	5.71	1.19	10.1	2.95	10.5	2.08	17.0	3.08	12.050	0.08	1.33	1.88	543	0.003	0.84	0.40	35.6	607
831	1.80	83.6	0.68	0.00	0.33	0.00	0.16	0.65	0.46	4.68	1.02	9.26	2.56	9.89	1.83	15.6	2.94	12.510	0.09	1.34	1.77	573	0.003	0.80	0.40	32.8	607
832	8.40	48.0	0.60	0.03	0.23	0.00	0.09	0.23	0.27	2.09	0.49	4.76	1.43	5.63	1.15	10.6	2.33	12.950	0.09	1.04	1.56	403	0.004	1.21	0.30	21.1	730
ZC2008C																											
08C3	-	37.6	0.60	0.00	0.19	-	0.05	0.18	0.19	1.79	0.44	3.81	1.06	3.82	0.68	5.91	1.08	13.180	0.08	0.66	1.35	292	0.005	1.01	0.43	12.6	
08C5	1.14	56.6	0.64	0.00	0.35	-	-	0.40	0.34	3.23	0.71	6.12	1.70	6.69	1.19	10.5	2.00	12.590	0.07	1.32	3.24	628	0.005	0.91	0.39	22.1	576
08C6	2.00	50.7	0.71	0.00	0.32	-	0.07	0.26	0.24	2.23	0.64	5.10	1.46	5.83	0.98	9.22	1.50	13.030	0.08	1.43	3.45	656	0.005	0.96	0.37	19.0	614
08C7	0.73	38.2	0.56	0.00	0.16	-	0.08	0.29	0.21	2.24	0.52	4.08	1.09	4.15	0.84	6.57	1.24	13.910	0.07	0.75	1.15	298	0.004	0.79	0.42	13.9	548
08C9	0.41	55.9	0.53	0.00	0.25	-	0.15	0.37	0.32	2.81	0.78	6.24	1.68	6.63	1.14	10.8	1.91	12.360	0.09	0.66	1.51	287	0.005	0.94	0.39	22.2	514
08C10	-	16.7	0.49	0.00	0.12	-	0.01	0.06	0.05	0.55	0.19	1.36	0.50	1.59	0.29	2.69	0.42	12.650	0.04	0.38	0.72	187	0.004	0.90	0.34	5.49	
08C11	-	75.7	0.69	0.00	0.23	0.00	0.12	0.55	0.42	4.35	1.00	8.61	2.45	8.33	1.42	11.9	2.34	11.920	0.08	1.22	1.70	500	0.003	0.83	0.49	26.4	
08C12	-	43.1	0.66	0.00	0.25	-	0.02	0.27	0.23	1.71	0.56	4.52	1.30	4.86	0.93	6.78	1.40	12.470	0.09	1.05	2.06	434	0.005	1.04	0.45	15.3	
08C13	0.44	62.7	0.52	0.00	0.22	-	0.04	0.32	0.27	2.72	0.75	6.25	1.85	6.83	1.30	11.6	2.12	12.620	0.05	0.95	1.86	376	0.005	0.87	0.36	23.7	518

续表 7-1
Continued Table 7-1

样品点	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	Th/U	Eu/Eu*	(Dy/Yb) _N	HREE	t/°C
08C14	0.45	17.2	0.45	0.00	0.08	-	0.01	0.05	0.09	0.86	0.20	1.83	0.49	2.01	0.34	2.93	0.53	13 630	0.05	0.49	0.88	159	0.006	1.33	0.42	6.3	519
08C16	-	33.0	0.60	0.00	0.26	-	0.00	0.08	0.13	1.17	0.37	3.29	0.87	3.46	0.60	5.24	1.05	12 660	0.09	1.07	1.88	448	0.004	1.29	0.42	11.2	
08C17	0.78	34.5	0.59	0.00	0.21	-	0.06	0.21	0.13	1.91	0.39	3.54	1.00	3.74	0.73	5.88	1.08	13 160	0.08	0.75	2.33	323	0.007	0.65	0.40	12.4	552
08C16	1.29	85.2	0.65	0.00	0.35	0.01	0.14	0.60	0.55	4.89	1.14	9.52	2.70	10.20	2.04	18.1	3.30	12 570	0.08	0.98	1.85	464	0.004	0.98	0.35	36.3	584
08C19	-	37.4	0.55	0.00	0.19	-	0.02	0.26	0.16	2.07	0.45	4.04	1.15	4.19	0.76	6.75	1.26	12 100	0.07	0.79	1.63	342	0.005	0.66	0.40	14.1	
08C20	0.82	65.1	0.68	0.00	0.18	0.00	0.24	0.65	0.64	4.94	1.07	8.25	2.14	7.39	1.21	10.7	1.99	11 960	0.07	0.95	0.96	395	0.002	1.08	0.51	23.5	555
08C23	0.32	84.4	0.54	0.00	0.20	-	0.06	0.36	0.33	3.67	0.95	8.82	2.62	9.76	1.91	16.1	3.27	12 360	0.06	0.67	1.22	279	0.004	0.88	0.37	33.7	500
08C25	0.74	42.0	0.62	0.00	0.19	0.00	0.08	0.27	0.28	2.38	0.61	4.63	1.17	4.47	0.81	6.48	1.27	12 380	0.07	0.80	1.87	346	0.005	1.06	0.48	14.2	549
08C26	1.11	82.4	0.61	0.00	0.31	-	0.12	0.71	0.56	5.39	1.27	9.42	2.61	9.99	1.80	14.9	2.90	12 420	0.07	1.45	1.75	572	0.003	0.88	0.42	32.2	574
ZC2008R																											
08R1	0.77	192	0.64	0.00	0.59	-	0.00	0.05	0.06	0.99	0.58	9.69	5.22	30.3	8.77	109	31.2	11 620	0.52	6.74	23.6	3 470	0.007	0.76	0.06	185	551
08R2	1.70	407	0.92	0.00	0.74	0.00	0.04	0.10	0.13	2.07	1.20	20.4	10.7	65.0	18.9	236	67.5	12 370	1.50	9.61	31.0	4 820	0.006	0.86	0.06	398	603
08R3	-	283	1.11	0.00	0.53	-	0.03	0.10	0.12	1.86	0.97	14.7	7.33	44.6	12.4	149	38.3	12 530	2.18	7.61	18.4	3 800	0.005	0.86	0.07	252	
08R4	0.14	256	0.79	0.00	0.44	-	0.00	0.09	0.08	1.35	0.73	13.2	7.03	42.4	11.7	147	40.7	11 840	1.43	8.63	13.2	4 210	0.003	0.73	0.06	249	458
08R5	1.50	190	0.85	0.00	0.30	-	0.00	0.08	0.08	1.07	0.59	10.4	5.10	29.4	8.31	102	26.6	11 700	1.38	4.34	10.9	2 290	0.005	0.85	0.07	171	594
08R7	0.78	192	0.78	0.00	0.40	-	0.00	0.03	0.08	1.04	0.59	10.1	5.08	30.4	8.93	112	30.3	12 710	1.37	5.44	13.2	2 830	0.005	1.50	0.06	187	552
08R8	-	267	0.94	0.00	0.71	-	0.00	0.08	0.09	1.68	0.89	15.1	7.51	42.7	11.5	146	37.6	13 030	1.85	8.05	38.9	4 420	0.009	0.72	0.07	245	
08R9	-	413	1.39	0.00	0.26	-	0.00	0.10	0.10	1.88	1.06	20.3	11.0	69.8	19.8	252	66.8	12 640	3.91	10.1	6.90	5 160	0.001	0.67	0.05	419	
08R11	-	249	0.87	0.00	0.61	0.00	0.00	-	0.06	1.42	0.69	13.2	6.56	40.0	11.3	142	40.1	12 000	1.05	7.54	28.1	3 770	0.008	-	0.06	240	
08R10	0.17	223	0.74	0.00	0.69	-	0.04	0.10	0.10	1.21	0.72	12.5	6.19	36.2	10.2	128	33.9	11 730	1.47	7.05	33.0	3 800	0.009	0.93	0.07	215	468
08R14	-	190	0.75	0.00	0.31	-	0.00	0.01	0.05	1.08	0.58	9.64	4.96	31.5	8.93	111	32.0	11 390	0.77	4.88	6.11	2 500	0.002	1.98	0.06	188	
08R15	0.98	317	0.77	0.00	0.66	-	0.03	0.13	0.13	1.72	0.92	16.6	8.70	51.8	15.2	184	52.5	11 330	1.34	8.08	25.8	4 250	0.006	0.86	0.06	312	566
08R16	0.54	273	0.74	0.00	0.50	-	0.02	0.10	0.11	1.63	0.86	13.9	7.23	45.0	12.6	150	41.7	10 330	0.93	10.1	17.2	5 060	0.003	0.85	0.06	257	530
08R17	-	215	0.77	0.00	0.58	-	0.02	0.10	0.07	1.57	0.72	12.0	5.96	35.7	9.38	112	30.9	11 650	0.91	6.99	33.7	3 690	0.009	0.51	0.07	194	
08R19	0.15	414	1.06	0.00	0.81	-	0.03	0.19	0.15	2.27	1.18	20.8	11.2	68.6	18.7	239	64.4	11 800	2.37	10.9	38.8	5 500	0.007	0.70	0.06	402	461
08R21	0.78	357	0.98	0.00	0.57	-	0.00	0.13	0.13	1.60	0.98	16.5	8.76	57.1	16.2	210	59.6	12 470	2.62	9.77	16.2	5 030	0.003	0.88	0.05	352	552
08R22	0.22	543	1.92	0.00	0.92	-	0.04	0.30	0.14	2.95	1.77	30.4	15.2	88.7	24.1	285	70.0	11 270	3.77	10.4	35.7	5 240	0.007	0.47	0.07	483	481
08R23	-	341	1.50	0.00	0.19	-	0.00	0.05	0.05	1.20	0.77	16.5	9.10	56.7	15.8	193	48.8	10 660	3.32	7.03	4.90	3 370	0.002	0.63	0.06	323	
08R23(2)	-	229	0.74	0.00	0.27	-	0.00	0.07	0.03	1.02	0.61	10.9	6.13	38.9	11.4	144	41.0	11 130	1.06	5.56	4.74	2 620	0.002	0.34	0.05	241	
08R24	0.83	239	0.77	0.00	0.54	-	0.04	0.13	0.08	1.29	0.78	13.0	6.82	39.5	11.0	131	35.8	13 160	1.18	6.68	30.2	3 640	0.008	0.59	0.07	224	556
08R25	-	296	0.89	0.00	0.36	-	0.00	0.03	0.07	1.35	0.77	14.5	7.90	48.2	13.6	166	47.1	11 430	1.20	5.86	9.60	2 790	0.003	1.04	0.06	283	
08R27	1.37	599	1.55	0.00	0.25	-	0.01	-	0.10	2.27	1.45	27.2	15.7	102	30.0	375	105	11 170	4.54	7.66	5.55	3 830	0.001	-	0.05	627	588
TZ																											
ZC01	1.23	38.7	0.45	0.00	0.42	-	0.10	0.61	0.65	4.50	0.80	5.11	1.22	3.71	0.59	4.48	0.81	11 740	0.06	0.75	2.08	298	0.007	1.19	0.76	10.8	581
ZC03	0.78	47.6	0.59	0.00	0.50	-	0.09	1.10	1.09	6.67	1.24	7.11	1.34	4.08	0.59	4.75	0.90	11 960	0.06	0.88	2.78	354	0.008	1.23	1.00	11.7	552
ZC07	-	32.9	0.50	0.00	0.48	-	0.09	0.68	0.50	3.68	0.67	4.59	1.02	2.93	0.54	3.98	0.76	11 480	0.06	0.68	3.07	288	0.011	0.97	0.77	9.23	
ZC09	0.94	36.0	0.54	0.00	0.47	-	0.06	0.41	0.40	2.94	0.63	4.04	1.08	3.65	0.61	4.48	0.85	11 510	0.06	0.59	1.93	236	0.008	1.10	0.60	10.7	563
ZC11	-	31.2	0.49	0.00	0.57	-	0.03	0.48	0.52	3.32	0.65	4.37	0.91	2.62	0.43	3.5	0.60	11 970	0.05	0.94	2.82	407	0.007	1.25	0.84	8.06	
ZC12	0.73	35.2	0.54	0.00	0.40	-	0.11	0.55	0.63	3.69	0.74	4.63	1.05	3.41	0.52	4.13	0.81	11 630	0.08	0.78	2.28	244	0.009	1.34	0.75	9.92	548

续表 7-2
Continued Table 7-2

样品点	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	Th/U	Eu/Eu*	(Dy/Yb) _N	HREE	t/°C
ZC15	-	17.4	0.56	0.01	0.34	0.00	0.02	0.27	0.24	1.64	0.35	1.93	0.52	1.54	0.22	1.71	0.33	11 980	0.06	0.49	4.37	202	0.022	1.09	0.76	4.32	
ZC16	-	27.1	0.55	0.00	0.43	0.00	0.02	0.34	0.34	2.42	0.48	3.15	0.74	2.86	0.48	3.52	0.68	12 010	0.04	0.59	3.01	242	0.012	1.14	0.60	8.28	
ZC18	-	79.9	0.46	0.00	0.51	0.01	0.25	1.39	1.17	7.96	1.53	10.7	2.31	7.18	1.23	9.45	1.88	11 490	0.05	0.73	2.76	305	0.009	1.08	0.76	22.1	
ZC19	7.70	47.7	0.60	0.08	1.29	0.03	0.50	1.06	0.77	4.52	0.84	6.48	1.42	4.54	0.69	5.53	1.00	12 090	0.10	1.02	7.94	395	0.020	1.08	0.78	13.2	722
ZC21	2.10	27.2	0.58	0.01	0.39	-	0.05	0.35	0.42	2.43	0.55	3.27	0.77	2.35	0.38	3.25	0.55	12 130	0.05	0.53	3.31	209	0.016	1.38	0.67	7.31	618
ZC22	1.50	32.9	0.57	0.01	0.42	0.00	0.04	0.44	0.46	2.64	0.57	4.25	0.95	3.00	0.48	4.14	0.68	12 210	0.05	0.64	2.39	258	0.009	1.29	0.69	9.25	594
ZC23	1.10	33.3	0.56	0.00	0.37	-	0.06	0.42	0.38	2.94	0.56	3.79	0.98	2.90	0.52	4.08	0.73	12 090	0.04	0.56	2.56	211	0.012	1.04	0.62	9.21	573
ZC24	0.12	18.4	0.55	0.00	0.38	-	0.01	0.11	0.14	0.97	0.20	1.69	0.52	1.95	0.41	3.99	0.98	11 710	0.08	0.21	2.01	90	0.022	1.34	0.28	7.84	451
ZC30	-	42.5	0.52	0.01	0.54	0.00	0.05	0.53	0.54	3.62	0.69	5.01	1.17	4.11	0.61	4.92	0.88	11 310	0.04	0.63	2.73	231	0.012	1.19	0.68	11.7	
ZC31	2.80	63.0	0.52	0.00	0.55	-	0.20	1.26	1.14	7.62	1.31	8.31	1.79	5.76	0.90	7.49	1.34	11 400	0.05	0.86	2.52	357	0.007	1.13	0.74	17.3	639
TZ800																											
ZC13	24.10	7 210	14.2	0.24	26.4	1.16	21.3	46.0	4.66	238	73.1	772	262	1 025	186	1 495	267	9 930	4.80	166	899	767	1.172	0.14	0.35	3 235	
ZC26	1.51	690	14.7	0.02	2.99	0.01	0.09	0.51	0.31	4.82	1.85	32.9	18.5	121	34.10	367	78.0	14 060	172	217	158	1 490	0.106	0.60	0.06	619	
ZC27	17.60	4 220	7.56	0.10	19.1	0.79	14.9	29.6	2.74	137	42.6	458	154	618	115	929	172	9 550	3.03	96.0	484	481	1.006	0.13	0.33	1 988	
ZC28	27.80	8 200	19.5	0.55	55.2	1.67	29.8	56.1	3.61	263	80.2	857	289	1 152	210	1 690	304	9 430	6.23	248	1 410	1 225	1.151	0.09	0.34	3 645	
ZC2009																											
1789-06	37.00	48.9	0.51	0.03	0.24	0.02	0.13	0.61	0.75	5.41	1.18	7.54	1.45	4.31	0.65	5.42	0.85	11 040	0.05	0.17	0.52	51	0.010	1.27	0.93	12.7	885
1789-10	1.27	73.5	0.51	0.00	0.10	0.00	0.13	0.96	1.24	8.28	1.87	11.3	2.27	5.93	0.94	7.11	1.10	10 550	0.04	0.14	0.37	52	0.007	1.34	1.07	17.4	583
1789-05	-	62.5	0.44	0.01	0.16	0.01	0.25	1.00	0.99	7.55	1.68	9.88	1.91	5.32	0.91	6.66	1.30	10 710	0.04	0.16	0.46	55	0.008	1.10	0.99	16.1	
1789-03	-	61.3	0.45	0.00	0.12	0.00	0.03	0.58	0.66	4.97	1.14	8.19	1.89	5.97	1.08	9.36	1.73	10 640	0.05	0.17	1.04	56	0.019	1.19	0.59	20.0	
1789-04	1.90	66.5	0.46	0.00	0.12	0.00	0.05	0.58	0.73	6.06	1.55	9.94	1.94	5.61	0.99	7.06	1.19	10 650	0.05	0.19	0.68	63	0.011	1.20	0.94	16.8	610
1789-02	0.71	69.7	0.51	0.01	0.07	0.00	0.01	0.44	0.58	4.91	1.41	10.4	2.09	6.14	0.92	6.74	1.02	11 270	0.04	0.26	0.68	52	0.013	1.21	1.03	16.9	546
1789-07	1.42	76.5	0.50	0.00	0.09	0.00	0.04	0.70	0.82	6.44	1.63	11.6	2.40	6.61	1.01	8.18	1.24	11 020	0.06	0.22	0.59	66	0.009	1.18	0.95	19.4	590
ZC2016																											
1 604	1.90	2 000	4.26	0.01	13.2	0.06	0.97	3.23	0.88	24.3	9.70	136	60.1	312	72.6	770	160	10 150	3.08	111	352	589	0.598	0.30	0.12	1 375	
1 611	6.20	6 490	6.30	0.12	26.8	1.12	19.0	33.0	10.98	175	54.8	599	212	865	169	1 482	267	8 220	2.06	141	825	637	1.295	0.44	0.27	2 995	
1 613	6.40	2 300	2.74	0.01	8.55	0.19	3.81	7.37	1.87	46.6	16.5	199	73.5	339	68.2	585	107	9 190	1.45	26.9	90.9	158	0.575	0.31	0.23	1 173	
1 615	3.10	1 390	4.50	0.04	7.60	0.08	1.18	3.28	0.60	22.7	8.70	111	45.4	216	46.7	435	86.0	10 180	2.10	31.2	122	183	0.667	0.21	0.17	829	
1 621	1.90	1 650	4.10	0.02	8.20	0.16	2.70	6.30	1.08	36.0	12.5	141	50.0	206	42.0	330	61.0	11 270	1.42	40.4	209	203	1.030	0.22	0.29	689	

-表示未达检测限。

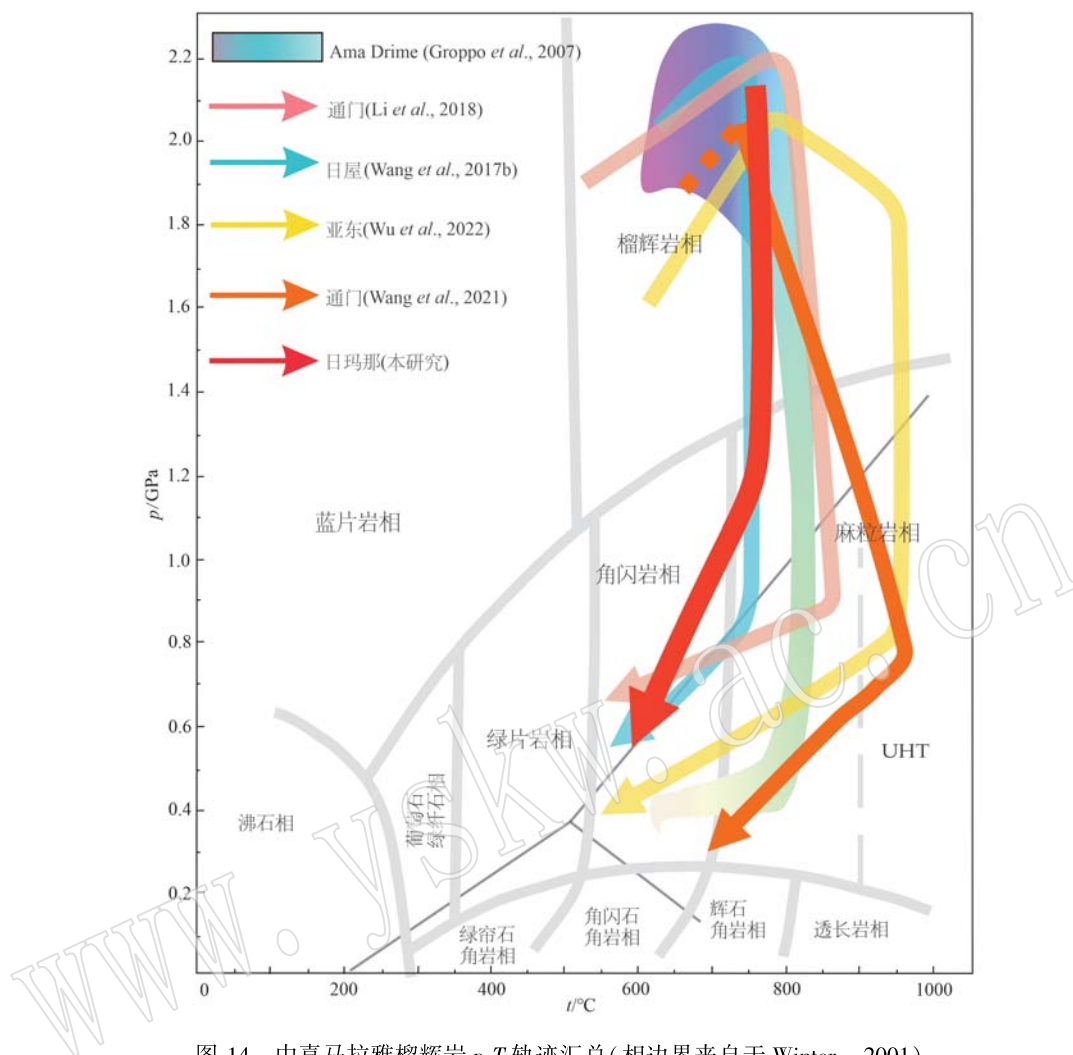


图 14 中喜马拉雅榴辉岩 p - T 轨迹汇总 (相边界来自于 Winter, 2001)

Fig. 14 Integrated p - T paths for eclogites in the central Himalayas (the facies boundaries are modified after Winter, 2001)

马拉雅榴辉岩起源于加厚的印度下地壳,后被中下地壳的隧道流以透镜体形式裹挟折返 (Jamieson *et al.*, 2004)。这意味着榴辉岩与其围岩的源区不同,围岩并没有达到榴辉岩相的压力条件。

综合前人研究,我们认为中喜马拉雅榴辉岩为印度大陆俯冲至欧亚大陆的产物,而非基性下地壳增厚的产物,主要根据如下:① 中喜马拉雅榴辉岩保存了从绿帘角闪榴辉岩相到榴辉岩相的进变质轨迹,表现为增温增压,而非地壳增厚所表现出的以压力增加为主的特征 (Li *et al.*, 2018)。另外,Grucic 等 (2011) 认为中喜马拉雅榴辉岩的原岩为西藏基性下地壳的侵入体,后侵入到围岩当中,按照此观点,中喜马拉雅榴辉岩应该记录了逆时针的变质 p - T 轨迹,而非目前所发现的顺时针轨迹 (Wu *et al.*, 2022)。② 野外露头中,日玛那榴辉岩呈透镜状或夹

层状产于高喜马拉雅结晶岩系的片麻岩中,在 Google Earth 所提供的卫星遥感图像当中,日玛那榴辉岩呈数米长的揉皱状的基性岩层,而非透镜体。这种呈岩层或岩墙形态产出的榴辉岩,必然与其围岩经历了同步的变质演化过程。③ 另外,日玛那地区榴辉岩的原岩为新元古代的洋中脊玄武岩,并且中喜马拉雅榴辉岩表现出多原岩的特征,这与加厚基性下地壳起源的模型不相吻合 (图 2b、2c)。

综上,我们认为中喜马拉雅麻粒岩化榴辉岩为印度大陆俯冲至欧亚大陆的产物。结合锆石年龄,认为在 15.5~14 Ma 日玛那地区榴辉岩发生榴辉岩相变质,此时印度板块已俯冲到欧亚板块最大深度,该过程可能还伴随着榴辉岩的熔融,使得俯冲的印度板块发生了弱化和断离,在约 12 Ma 可能由于板块断离作用,榴辉岩快速折返,经历了强烈的后期

麻粒岩相的叠加。

5 结论

(1) 中喜马拉雅日玛那(退变)榴辉岩呈透镜体或岩墙状与围岩花岗片麻岩直接接触,其矿物组合共保留3个期次:峰期榴辉岩相、高压麻粒岩相、角闪岩相;峰期榴辉岩相变质年龄为15.5~14 Ma,麻粒岩相叠加年龄为约12 Ma;峰期温压限定为约730℃、1.9~2.1 GPa,记录了顺时针的变质 p - T 轨迹。

(2) 日玛那榴辉岩的原岩新元古代(890~850 Ma)的洋中脊玄武岩,形成于洋盆打开阶段。

(3) 中喜马拉雅榴辉岩为印度大陆俯冲至欧亚大陆的产物,而并非起源基性下地壳增厚。

致谢 感谢北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室李小犁、李楠老师的实验帮助。

References

- Chakungal J, Dostal J, Grujic D, *et al.* 2010. Provenance of the Greater Himalayan Sequence: Evidence from mafic eclogite-granulites and amphibolites in NW Bhutan[J]. *Tectonophysics*, 480: 198~212.
- Corrie S L, Kohn M J and Vervoort J D. 2010. Young eclogite from the Greater Himalayan Sequence, Arun Valley, eastern Nepal: p - T - t path and tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 289: 406~416.
- Cottle J M, Jessup M J, Newell D L, *et al.* 2009a. Geochronology of granulitized eclogite from the Ama Drime Massif: Implications for the tectonic evolution of the South Tibetan Himalaya[J]. *Tectonics*, 28(1): TC1002.
- Cottle J M, Searle M P, Horstwood M S A, *et al.* 2009b. Timing of mid-crustal metamorphism, melting, and deformation in the Mount Everest region of Southern Tibet revealed by U-Th-Pb geochronology[J]. *Journal of Geology*, 117: 643~664.
- de Sigoyer J D, Chavagnac V, Blichert-Toft J, *et al.* 2000. Dating the Indian continental subduction and collisional thickening in the north-west Himalaya: Multichronology of the Tso Moriri eclogites[J]. *Geology*, 28: 487~490.
- de Sigoyer J D, Guillot S, Lardeaux J M, *et al.* 1997. Glaucophane-bearing eclogites in the Tso Moriri dome (eastern Ladakh, NW Himalaya) [J]. *European Journal of Mineralogy*, 9: 1 073~1 084.
- DeCelles P G, Robinson D M, Quade J, *et al.* 2001. Stratigraphy, structure, and tectonic evolution of the Himalayan fold-thrust belt in western Nepal[J]. *Tectonics*, 20: 487~509.
- Ding L, Zhong D L, Yin A, *et al.* 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 423~438.
- Dong X Z, Zhang Z, Tian Y, *et al.* 2022. Protoliths and metamorphism of the central Himalayan eclogites: Zircon/titanite U-Pb geochronology, Hf isotope and geochemistry[J]. *Gondwana Res.*, 104: 39~53.
- Ferry J M and Waston E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers [J]. *Mineral Petrol.*, 154: 429~427.
- Gansser A. 1964. *The Geology of the Himalayas*[M]. New York: Wiley Interscience, 289.
- Groppo C, Lombardo B, Rolfo F, *et al.* 2007. Clockwise exhumation path of granulitized eclogites from the Ama Drime range (eastern Himalayas)[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 51~75.
- Grujic D, Warren C J and Woodern J L. 2011. Rapid syn-convergent exhumation of Miocene-aged lower orogenic crust in the eastern Himalaya[J]. *Lithosphere*, 3: 346~366.
- Guillot S, Mahéo G, de Sigoyer J, *et al.* 2008. Tethyan and Indian subduction viewed from the Himalayan high-to ultrahigh-pressure metamorphic rocks[J]. *Tectonophysics*, 451: 225~241.
- Guillot S, Replumaz A, Hattori K H, *et al.* 2007. Initial geometry of western Himalaya and ultrahigh-pressure metamorphic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30: 557~564.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27~62.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, *et al.* 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chem. Geol.*, 211: 47~69.
- Jamieson R A, Beaumont C, Medvedev S, *et al.* 2004. Crustal channel flows; 2. Numerical models with implications for metamorphism in the Himalaya-Tibetan orogen[J]. *Journal of Geophysical Research*, 109: B06407.
- Jessup M J and 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[J]. *The Journal of Geology*, 118: 467~486.
- 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 Dime Massif, Tibet-Nepal[J]. *Geology*, 36: 587~590.
- Kali E, Leloup P, 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[J]. *Tectonics*, 29(2): TC2014.
- Kaneko Y, Katayama I, Yamamoto H, *et al.* 2003. Timing of Himalayan

- ultrahigh-pressure metamorphism: Sinking rate and subduction angle of Indian continental crust beneath Asia[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 589~599.
- Kellett D A, Cottle J M and Smit M. 2014. Eocene deep crust at Ama Drime, Tibet: Early evolution of the Himalaya orogen[J]. *Lithosphere*, 6: 220~229.
- 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 Ama Drime Massif, Tibet-Nepal[J]. *Journal of Structural Geology*, 32: 900~919.
- Leake B E, Krivovichev V G, Linthout K, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- Li D W, Liao Q A, Yuan Y M, *et al.* 2003. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granulites at Rimana (Southern Tibet) in the central segment of Himalayan Orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48: 2 647~2 650.
- Li Dewei, Liao Qunan, Yuan Yanming, *et al.* 2003. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granulites at Rimana in the central segment of Himalayan Orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(20): 2 176~2 179(in Chinese with English abstract).
- Li Q, Zhang L, Fu B, *et al.* 2018. Petrology and zircon U-Pb dating of well-preserved eclogites from the Thongmön area in central Himalaya and their tectonic implications[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 37(2): 203~226.
- Li X L, Zhang L F, Wei C J, *et al.* 2018. Quartz and orthopyroxene exsolution lamellae in clinopyroxene and the metamorphic p - T path of Belomorian eclogites[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 36: 1~22.
- Liu Fenglin and Zhang Lifei. 2014. The p - T Path, zircon U-Pb dating and metamorphic evolution of granulites in the east segment of Himalayan Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30: 2 808~2 820(in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Zhang Jinjiang, Shu Guiming, *et al.* 2005. Petrology, geochemistry, p - T path and exhumation on the granulitized eclogites from Dingjie in the South Tibet region, central Himalaya[J]. *Science China Earth Sciences*, 35: 810~820(in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Siebel W, Massonne H J, *et al.* 2007. Geochronological and petrological constraints for tectonic evolution of the Central Greater Himalayan Sequence in the Kharta Area, Southern Tibet[J]. *The Journal of Geology*, 115: 215~230.
- Liu Y and Zhong D. 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 451~466.
- Lombardo B and Rolfo F. 1998. First report of eclogites from the E Himalaya: Implications for the Himalayan orogeny[J]. *Mem. Sci. Geol.*, 50: 67~68.
- Lombardo B and Rolfo F. 2000. Two contrasting eclogite types in the Himalayas: Implications for the Himalayan orogeny[J]. *Journal of Geodynamics*, 30: 37~60.
- Lombardo B, Rolfo F and McClelland W C. 2016. A review of the first eclogites discovered in the Eastern Himalaya[J]. *European Journal of Mineralogy*, 28(6): 1 099~1 109.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chem. Geol.*, 120: 223~253.
- Mukherjee B K and Sachan H K. 2001. Discovery of coesite from Indian Himalaya: Record of ultra-high pressure metamorphism in Indian continental crust[J]. *Current Science*, 81: 1 358~1 360.
- Newton R C and Perkins D. 1982. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-orthopyroxene (clinopyroxene)-plagioclase-quartz[J]. *American Mineralogist*, 67: 203~222.
- O'Brien P J. 2001. Subduction followed by collision: Alpine and Himalayan examples[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 127: 277~291.
- Parkinson C D and Kohn M J. 2002. A first record of eclogite from Nepal and consequences for the tectonic evolution of the Greater Himalayan Sequence[C]//American Geophysical Union, Spring Meeting abstract id. V42A-11.
- Parrish R R, Gough S J, Searle M P, *et al.* 2006. Plate velocity exhumation of ultrahigh-pressure eclogites in the Pakistan Himalaya[J]. *Geology*, 34: 989~992.
- Pognante U and Spencer D A. 1991. First report of eclogites from the Himalayan belt, Kaghan valley (northern Pakistan)[J]. *European Journal of Mineralogy*, 3(3): 613~648.
- Polat A and Hofmann A W. 2003. Alteration and geochemical patterns in the 3.7~3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland[J]. *Precambrian Research*, 126(3~4): 197~218.
- Rolfo F, Carosi R, Montomoli C, *et al.* 2008. Discovery of granulitized eclogite in North Sikkim expands the Eastern Himalaya High-pressure province[C]//Extended Abstracts: 23rd Himalaya-Karakoram-Tibet Workshop, India.
- Rolfo F, Lombardo B and McClelland W. 2005. Geochemistry and geochronology of E Himalaya Eclogites[J]. *Mitt. Österr. Miner. Ges.*, 150: 134.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 184: 123~138.
- Sigoyer J D, Guillot S, Lardeaux J M, *et al.* 1997. Glaucophane-bearing eclogites in the Tso Moriri dome (eastern Ladakh, NW Himalaya)[J]. *European Journal of Mineralogy*, 9(5): 1 073~1 084.
- Slagstad T, Culshaw N G, Jamieson R A, *et al.* 2004. Early Mesoproterozoic tectonic history of the southwestern Grenville Province, Ontario: Constraints from geochemistry and geochronology of high-grade gneisses[J]. *Memoirs-Geological Society of America*, 197: 209~242.

- Slama J, Kosler J, Condon D J, *et al.* 2008. Plesovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chem. Geol.*, 249: 1~35.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313~345.
- Tomkins H S, Powell R and Ellis D J. 2007. The pressure dependence of the zirconium-rutile thermometer[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 703~713.
- Tonarini S, Villa I M, Oberli F, *et al.* 1993. Eocene age of eclogite metamorphism in Pakistan Himalaya: Implications for Indian-Eurasia collision[J]. *Terra Nova*, 5: 13~20.
- Wang J M, Rubatto D and Zhang J J. 2015. Timing of partial melting and cooling across the Greater Himalayan crystalline complex (Nyalam, Central Himalaya): In-sequence thrusting and its implications[J]. *Journal of Petrology*, 56: 1 677~1 702.
- Wang J M, Wu F Y, Rubatto D, *et al.* 2017a. Monazite behaviour during isothermal decompression in pelitic granulites: A case study from Dinggye, Tibetan Himalaya[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172: 81.
- Wang J M, Lanari P, Wu F Y, *et al.* 2021. First evidence of eclogites overprinted by ultrahigh temperature metamorphism in Everest East, Himalaya: Implications for collisional tectonics on early Earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 558: 116760.
- Wang J, Wu F, Zhang J, *et al.* 2022. The Himalayan collisional orogeny: A metamorphic perspective[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(6): 1 842~1 866.
- Wang Y H, Zhang L F, Zhang J J, *et al.* 2017b. The youngest eclogite in central Himalaya: *p-T* path, U-Pb zircon age and its tectonic implication[J]. *Gondwana Research*, 41: 188~206.
- Warren C J, Grujic D, Kellett D A, *et al.* 2011. Probing the depths of the India-Asia collision: U-Th-Pb monazite chronology of granulites from NW Bhutan[J]. *Tectonics*, 30: TC2004.
- Watson E B, Wark D A & Thomas J B. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413~433.
- Webb A A G, Guo H, Clift P D, *et al.* 2017. The Himalaya in 3D: Slab dynamics controlled mountain building and monsoon intensification[J]. *Lithosphere*, 9(4): 37~65.
- Webb A A G, Yin A, Harrison T M, *et al.* 2011. Cenozoic tectonic history of the Himachal Himalaya (northwestern India) and its constraints on the formation mechanism of the Himalayan orogen[J]. *Geosphere*, 7: 1 013~1 061.
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostand. Newsl.*, 19: 1~23.
- Winter J D. 2001. *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology* [M]. New York: Prentice Hall, 1~697.
- Wu C, Zhang L, Li Q, *et al.* 2022. Tectonothermal transition from continental collision to post-collision: Insights from eclogites overprinted in the ultrahigh-temperature granulite facies (Yadong region, central Himalaya) [J]. *J. Metamorph. Geol.*, 40(5): 955~981.
- Yin A. 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation[J]. *Earth-Sci. Rev.*, 79: 163~164.
- Zack T, Moraes R D & Kronz A. 2004. Temperature dependence of Zr in rutile: Empirical calibration of a rutile thermometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(4): 471~488.
- Zhang G B, Wang J X, Alexander A, *et al.* 2022. The protoliths of central Himalayan eclogites[J]. *GSA Bulletin*, 134 (7~8): 1 949~1 966.
- Zhang J and Guo L. 2007. Structure and geochronology of the southern Xainza-Dinggye rift and its relationship to the south Tibetan detachment system[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 722~736.
- Zhang J, Santosh M, Wang X, *et al.* 2012. Tectonics of the northern Himalaya since the India-Asia collision[J]. *Gondwana Research*, 21: 939~960.
- Zhang Lijuan and Zhang Lifei. 2016. Application of rutile and sphene Zr thermometers in eclogite of Tianshan Mountains in southwest Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(5): 840~857 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Zhao G C, 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 [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28: 719~733.
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, *et al.* 2001. High-pressure granulites (retrogrades eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and tectonic implications[J]. *Journal of Petrology*, 42: 1 141~1 170.

附中文参考文献

- 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[J]. *科学通报*, 48(20): 2 176~2 179.
- 刘凤麟, 张立飞. 2014. 喜马拉雅东构造结高压麻粒岩 PT 轨迹、锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 30: 2 808~2 820.
- 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、PTt 轨迹和折返过程[J]. *中国科学*, 35: 810~820.
- 张丽娟, 张立飞. 2016. 金红石和榍石 Zr 温度计在新疆西南天山榴辉岩中的应用[J]. *岩石矿物学杂志*, 35(5): 840~857.