

# 喜马拉雅东构造结高压麻粒岩 $P-T$ 轨迹、锆石 U-Pb 定年及其地质意义<sup>\*</sup>

刘凤麟 张立飞<sup>\*\*</sup>

LIU FengLin and ZHANG LiFei<sup>\*\*</sup>

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

Key Laboratory of Crustal and Orogenic Evolution, Ministry of Education, China; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

2014-05-10 收稿, 2014-07-25 改回.

**Liu FL and Zhang LF. 2014. High-pressure granulites from Eastern Himalayan Syntaxis:  $P-T$  path, zircon U-Pb dating and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (10):2808–2820**

**Abstract** Along Yalu-Tsangpo River, Eastern Himalayan Syntaxis, expose high-pressure mafic granulites. Peak stage assemblage of high-pressure mafic granulite is garnet + clinopyroxene + quartz + rutile. The reaction plagioclase + orthopyroxene  $\rightarrow$  clinopyroxene + garnet + quartz indicates peak pressure exceeded the orthopyroxene-out pressure. The peak conditions of high-pressure mafic granulite are 904°C and 1.37GPa. Zircon U-Pb dating shows that the age of high pressure granulite facies metamorphism is  $20.7 \pm 2.3$ Ma. Amphibole-orthopyroxene granulite is the product of the first stage retrograde metamorphism, and the assemblage is orthopyroxene + amphibole + plagioclase + quartz + ilmenite + magnetite, and the  $P-T$  conditions are  $< 0.6$ GPa and  $720 \sim 760^\circ\text{C}$ . The overprinted amphibolite facies assemblage is amphibole + plagioclase + quartz + ilmenite + magnetite and the  $P-T$  conditions are  $< 0.6$ GPa and  $< 745^\circ\text{C}$ . The age of metamorphic zircon in amphibole-orthopyroxene granulite is  $9.38 \pm 0.22$ Ma. According to the inclusions amp + pl + qz in such zircon, this age represents the age of amphibolite facies metamorphism. Therefore, the  $P-T-t$  path of the high-pressure granulites from Eastern Himalayan Syntaxis is clockwise and it represents a two-stage exhumation process, i. e. the first stage of exhumation; from the depth of high-pressure granulite facies to the depth of amphibolite facies beginning at about 20Ma; the second stage of exhumation; from the depth of amphibolite facies to the earth surface beginning at about 9Ma. According the  $P-T$  conditions and the results of U-Pb zircon dating, the average exhumation rates for these two stages are 2.4mm/y and 2.3mm/y, respectively. Our study is consistent with the opinion of two-stage uplifts of Tibetan Plateau and further proves that the uplift of Tibetan Plateau connects tightly with the exhumation of subduction zone.

**Key words** High-pressure granulites;  $P-T$  path; Zircon U-Pb dating; Eastern Himalayan Syntaxis; Tibetan Plateau

**摘要** 喜马拉雅东构造结出露了一套基性高压麻粒岩,其峰期矿物组合为石榴石 + 单斜辉石 + 石英 + 金红石 + 斜长石,利用相平衡计算其峰期温压条件为 904°C、1.37GPa,利用锆石 U-Pb 定年方法确定其变质年龄为  $20.7 \pm 2.3$ Ma。角闪斜方辉石麻粒岩为其第一阶段退变产物,其变质矿物组合为斜方辉石 + 角闪石 + 斜长石 + 石英 + 钛铁矿 + 磁铁矿,温压条件为压力小于 0.6GPa,温度为 720~760°C。角闪岩相退变矿物组合为角闪石 + 斜长石 + 石英 + 钛铁矿 + 磁铁矿,温度小于 745°C,压力小于 0.6GPa。在角闪斜方辉石麻粒岩中变质锆石获得的定年结果为  $9.38 \pm 0.22$ Ma,根据锆石中角闪石 + 斜长石 + 石英的矿物包体特征,确定该年龄代表角闪岩相退变质年龄。据此,确定了喜马拉雅东构造结基性高压麻粒岩的  $P-T-t$  轨迹为顺时针 2 阶段折返过程,即第一阶段发生在 20Ma 左右的由高压麻粒岩相到角闪岩相退变阶段,第二阶段发生在 9Ma 左右的从角闪岩相深度折返到地表的阶段,计算得到其折返速率分别为 2.4mm/y 和 2.3mm/y,这 2 个阶段的折返与目前通常认为的青藏高原 2 个主要抬升阶段是基本一致的。

**关键词** 高压麻粒岩;  $P-T$  轨迹; 锆石 U-Pb 定年; 喜马拉雅东构造结; 青藏高原隆升

**中图法分类号** P588.347; P597.3

<sup>\*</sup> 本文受国家自然科学基金创新群体项目资助(41121062)。

**第一作者简介:** 刘凤麟,男,1991年生,博士生,变质地质学专业

**\*\* 通讯作者:** 张立飞,男,教授,变质地质学专业, E-mail: lfzhang@pku.edu.cn

## 1 引言

喜马拉雅山脉被认为是印度板块与亚洲板块碰撞的结果,目前是大陆动力学研究的重点地区。在喜马拉雅东构造结出露了典型的高压麻粒岩相变质岩石,自报道以来曾引起人们的广泛关注,但有关高压麻粒岩的变质演化、形成的温压条件以及时代,一直存有大的争议(Liu and Zhong, 1997; Ding *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2010; Zeng *et al.*, 2012; Booth *et al.*, 2004, 2009)。前人根据矿物温压计确定的峰期温压条件主要有:1.7~1.8GPa 和 890°C (Liu and Zhong, 1997),1.4~1.8GPa 和 750~850°C (Ding and Zhong, 1999),2.6~2.8GPa 和 800~900°C (Zhang *et al.*, 2010; 张泽明等, 2007)。这些峰期温压条件变化范围比较大,可能是因为在多组分、不同世代的矿物组合中,利用矿物对方法测定温压条件,会产生很大的不确定性。另外,有关东构造结高压麻粒岩形成时代也存在着不同的观点,早期 Ding and Zhong (1999) 提出其峰期的变质时代为 45~69Ma, 退变质年龄为 18~23Ma; Ding *et al.* (2001) 根据离子探针锆石定年确定高压麻粒岩峰期的变质时代为 40Ma; 近来 Zhang *et al.* (2010) 利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得高喜马拉雅东构造结高压麻粒岩峰期变质时代为 37~32Ma。

本文对于喜马拉雅东构造结出露的高压麻粒岩进行了深入的变质岩石学研究。利用相平衡方法计算了其形成的温压条件和 *P-T* 轨迹,并利用锆石的离子探针(SIMS)分析,确定了高压麻粒岩峰期和退变时代,结合 *P-T* 轨迹特征,探讨了喜马拉雅东构造结高压麻粒岩的变质演化及其大地构造意义。

## 2 区域地质背景

在喜马拉雅东构造结,喜马拉雅单元作为印度板块的一个部分,包括特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅结晶岩系、拉萨地体(冈底斯地体)三个部分(Yin and Harrison, 2000)(图1)。特提斯喜马拉雅序列由浅变质沉积岩和未变质的沉积岩组成;高喜马拉雅结晶岩系由高级变质沉积岩以及角闪岩、麻粒岩、大理岩和混合岩组成;缝合带北侧的拉萨地体或冈底斯地体由高级变质岩、未变质的古生代到中生代的沉积地层以及南部花岗岩基组成(Liu and Zhong, 1997)。印度河-雅江缝合带在印度和亚洲板块之间,由低级的变质岩(如:绿片岩、低角闪岩相变质岩)和超镁铁质残片组成(Liu and Zhong, 1997)。

在研究区域中,样品采自高喜马拉雅岩系的南迦巴瓦岩群。基性麻粒岩主要呈透镜状、布丁状为片麻岩所包裹(如图2野外照片所示),包括基性高压麻粒岩和角闪斜方辉石麻粒岩两类,采集地点为 29°36.960'N, 94°56.461'E (图1)。

## 3 岩相学和矿物学

电子探针分析在北京大学中国教育部造山带和地壳演化重点实验室进行,所用仪器是 JELL JXA-8100 型电子探针,分析的条件是:加速电压 15kV;束流  $1 \times 10^{-8}$  A;束斑 1 $\mu$ m;修正方法 PRZ;标准样品美国 SPI 公司 53 种矿物。分析结果见表 1。

### 3.1 基性高压麻粒岩(样品 ML56)

基性高压麻粒岩矿物组合为斜长石(20%, 体积分数,下

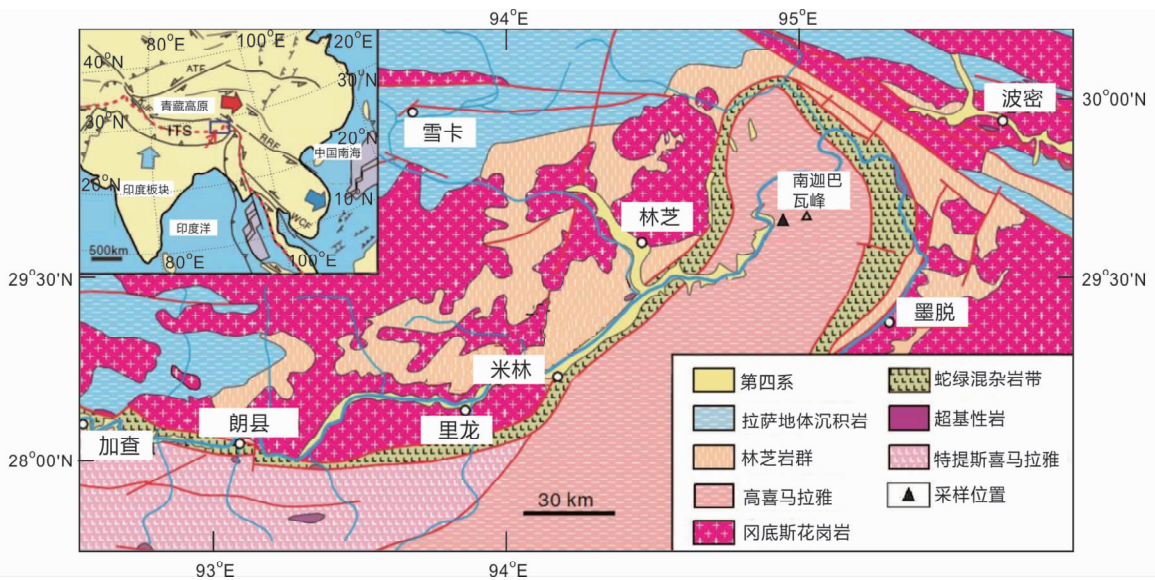


图1 研究区域地质简图(据 Zhang *et al.*, 2010 修改)

Fig. 1 A geological sketch map of the study area (modified after Zhang *et al.*, 2010)



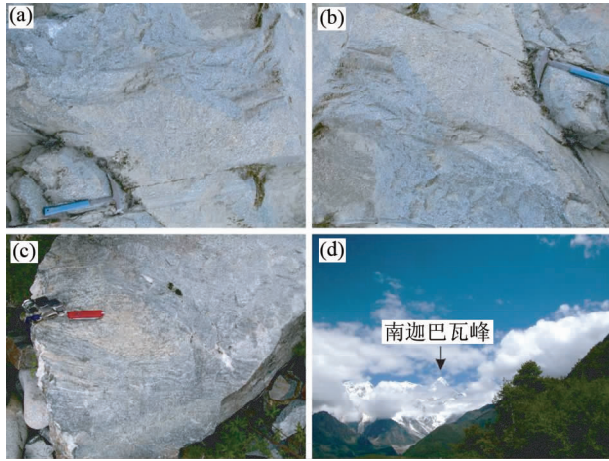


图2 喜马拉雅东构造结高压麻粒岩野外产状照片  
(a-c)-野外露头照片;(d)-从采样位置眺望南迦巴瓦峰,指示采样点位置  
Fig. 2 Field photographs illustrating the outcrops and location of high-pressure granulites from Eastern Himalayan Syntaxis  
(a-c)-field photographs; (d)-viewing the Namcha Barwa from the sampling location

同),角闪石(13%),单斜辉石(6%),斜方辉石(6%),石榴石(40%)和石英(5%)以及少量的金红石,钛铁矿,磷灰石和锆石等副矿物。

石榴石主要成分为铁铝榴石(Alm)43~54、镁铝榴石(Prp)18~38、钙铝榴石(Grs)17~28和少量的锰铝榴石(Sps)1~3。石榴石为巨晶,半径为2~3cm(图3a),其中的包体有石英,单斜辉石,金红石(图3b),磷灰石,石榴石也包裹有少量斜长石和角闪石,可能与退变质有关。石榴石有明显的成分环带:核部成分环带较为平坦,Gr<sub>s</sub>:21~28,Prp:18~23,Alm:51~54,Sps:2~3;边部成分变化较大,Gr<sub>s</sub>从28下降到19,Alm从48下降到43,Prp从22上升到38,Sps从2下降到1,表现为进变质环带特征(图4c、图5)。

单斜辉石成分为透辉石(图4b、表1),可分为三种:1)石榴石中的包体(图3b),镁值( $X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe)$ ,下同)为0.81~0.85,多与石榴石中的石英包体共生;2)基质中的单斜辉石(图3c),镁值为0.76~0.86,没有明显环带;3)形成斜方辉石的冠状体,镁值为0.80左右。石榴石中没有斜方辉石包体,石榴石域中斜方辉石不稳定(图3a,b),这暗示了形成基性高压麻粒岩的反应:

斜方辉石+斜长石→石榴石+单斜辉石+石英

斜方辉石为紫苏辉石(图4b、表1),有三种:1)保留岩浆结构的斜方辉石巨晶,粒度为1~4mm,其镁值远高于基质中的斜方辉石,从核部到边部,镁值从0.77下降到0.74,并有单斜辉石形成的冠状体;2)基质中的碎斑,镁值为0.67左右,可能是岩浆成因的斜方辉石碎裂形成,粒度为0.2mm左右,多有单斜辉石的冠状体;3)基质中的紫苏辉石,减压过程

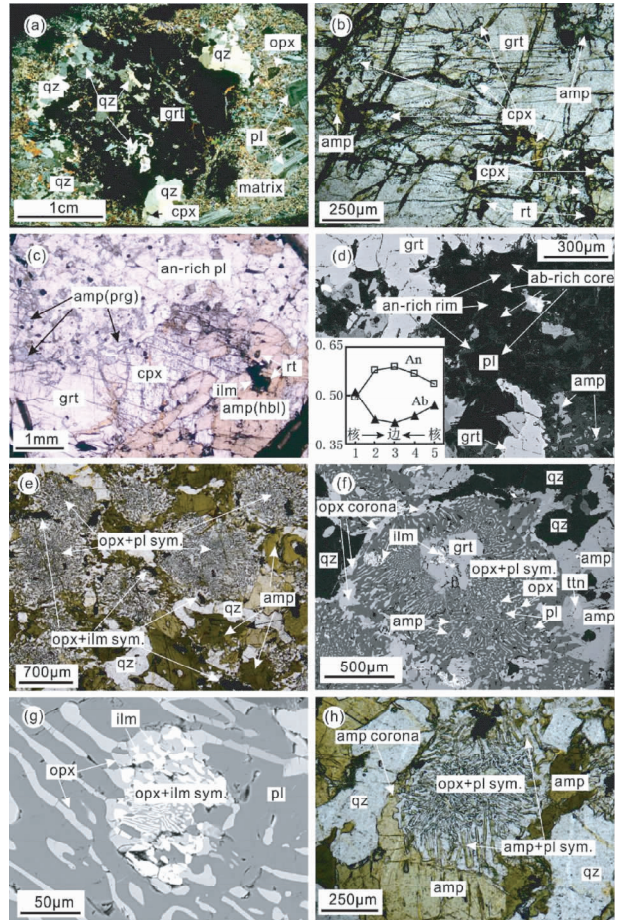


图3 喜马拉雅东构造结基性高压麻粒岩和角闪斜方辉石麻粒岩的显微照片和背散射照片

(a-d)-基性高压麻粒岩(样品ML56):(a)-石榴石域正交光下显微照片,表示反应:斜方辉石+斜长石→单斜辉石+石榴石+石英;(b)-石榴石中包体单偏光下显微照片;(c)-石榴石、单斜辉石以及退变质非闪石单偏光下显微照片;(d)-石榴石退变质形成的角闪石和斜长石的背散射照片,钙长石升高的环带表明了压力降低的条件;(e-h)-角闪斜方辉石麻粒岩(样品ML46):(e)-角闪斜方辉石麻粒岩总体特征单偏光显微照片,可见斜方辉石+斜长石、钛铁矿+斜长石的后合成晶结构,sym.表示后合成晶,下同;(f)-残余石榴石和斜方辉石+斜长石的背散射照片;(g)-钛铁矿+斜方辉石后合成晶的背散射照片;(h)-角闪石叠加斜方辉石形成角闪石+斜长石后合成晶的单偏光显微照片

Fig. 3 Optical and electron microphotographs of textures in high-pressure mafic granulite and amphibole-orthopyroxene granulite from Eastern Himalayan Syntaxis

(a-d)-high-pressure mafic granulite (Sample ML56): (a)-optical micrograph (cross polarized) of the garnet domain, indicating the reaction  $opx + pl \rightarrow cpx + grt + qz$ ; (b)-optical micrograph (plane polarized) of inclusions in grt; (c)-optical micrograph (plane polarized) of grt, cpx, hbl and retrograde pargasite; (d)-BSE image showing retrograde amp and zoning pl after garnet, and the An-increasing zoning indicates decompression; (e-h)-amphibole-orthopyroxene granulite (Sample ML46): (e)-optical micrograph (plane polarized) of amphibole-orthopyroxene granulite, showing  $opx + pl$  and ilm + pl symplectite after garnet (sym. abbreviation for symplectite, the same below); (f)-BSE image showing that garnet is replaced by vermicular  $opx + pl$ ; (g)-BSE image of ilm + pl symplectite; (h)-optical micrograph (plane polarized) of amp + pl symplectite, illustrating amphibolite facies overprint

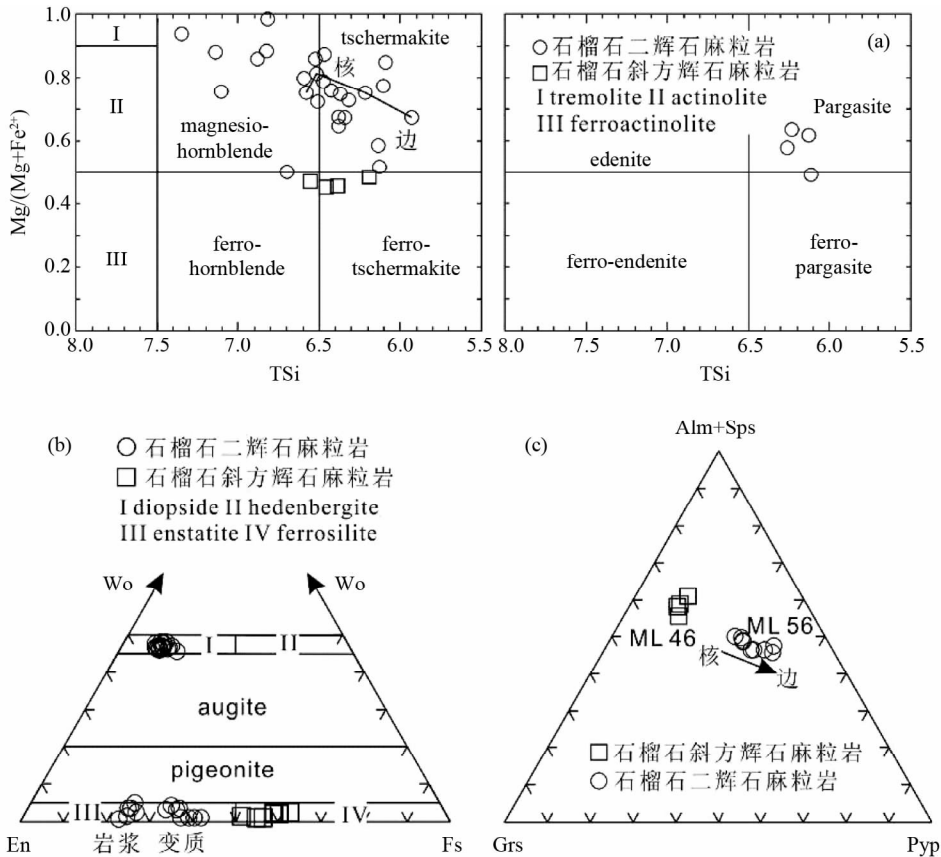


图 4 喜马拉雅东构造结基性高压麻粒岩和角闪斜方辉石麻粒岩代表性矿物成分图解

(a)-角闪石(具有镁值降低的成分环带);(b)-辉石;(c)-石榴石

Fig. 4 Representative EMP mineral analyses of high-pressure mafic granulite and amphibole-orthopyroxene granulite plotted in standard end-member diagram

(a)-amphibole (with  $X_{Mg}$  decreasing compositional zoning); (b)-pyroxene; (c)-garnet

中形成, 镁值为 0.58 ~ 0.65。前两种斜方辉石可能是原岩斜方辉石残余, 是变质作用不平衡的结果, 第三种斜方辉石可能为退变质形成的。

斜长石成分为拉长石和 中长石, 可分为四种: 1) 原岩残留的岩浆成因拉长石, 粒度为 1 ~ 6mm, 保留巨晶的岩浆结构, 可见钙长石 (An) 含量升高 (51 上升到 63, 表 1) 的反环带; 2) 为第一种斜长石巨晶边部增生的反应净边 (中长石), An = 37 ~ 47, 与基质中斜长石 An 含量一致; 3) 基质中的斜长石, 为中长石, 粒度为 0.2 ~ 1mm, An = 38 ~ 47 (表 1); 4) 在石榴石域, 与绿色韭闪石共生形成的斜长石, 形成石榴石的退变质产物 (图 3d), 从核部到边部有 An 含量增加的成分环带, An 从 49 增加到 58 (表 1、图 3d)。

角闪石成分为镁闪石、钙-镁闪石和韭闪石 (图 4a), 可分为四种角闪石: 1) 基质中的角闪石, 棕黄色 (图 3c),  $TiO_2$  含量为 0.4% ~ 1.8% (表 1); 2) Cpx 的冠状体, 成分与第一种角闪石类似; 3) 包裹在石榴石中, 多与斜长石共生, 可能为石榴石的退变质产物 (图 3b); 4) 绿色韭闪石,  $TiO_2$  含量为 0.08% ~ 0.72%, 与第四种斜长石共生 (图 3c), 形成石榴石

的退变质产物。

有两种石英: 1) 基质中的石英; 2) 石榴石域中的粗粒石英或石榴石中的石英包体 (图 3a), 通过  $opx + pl$  生成  $cpx + grt + qz$  的变质反应形成。金红石有两种, 一种为石榴石中的包体 (图 3b), 另一种在基质中 (图 3c)。金红石中的 Zr 含量为  $136 \times 10^{-6} \sim 4118 \times 10^{-6}$ , 平均  $879 \times 10^{-6}$  ( $n = 34$ )。钛铁矿形成金红石的退变质边, 或者存在于基质中 (图 3c)。其他副矿物还有磷灰石, 锆石, 电气石。

根据矿物组合和结构, 可以识别出三期矿物组合: 峰期高压麻粒岩相:  $grt + cpx + qz + rt \pm amp$ ; 退变质角闪二辉石麻粒岩阶段:  $cpx + amp + pl + opx + ilm + qz$ ; 退变质角闪岩相阶段:  $pl$  (富钙) +  $parg$  (韭闪石) +  $ilm + qz$ 。

### 3.2 角闪斜方辉石麻粒岩 (样品 ML46)

角闪斜方辉石麻粒岩中的矿物组合为斜长石 (30%), 斜方辉石 (35%), 角闪石 (25%), 石英 (10%), 黑云母 (5%) 和石榴石 (小于 1%, 图 3f) 以及少量的钛铁矿, 锆石, 榍石和磷灰石。

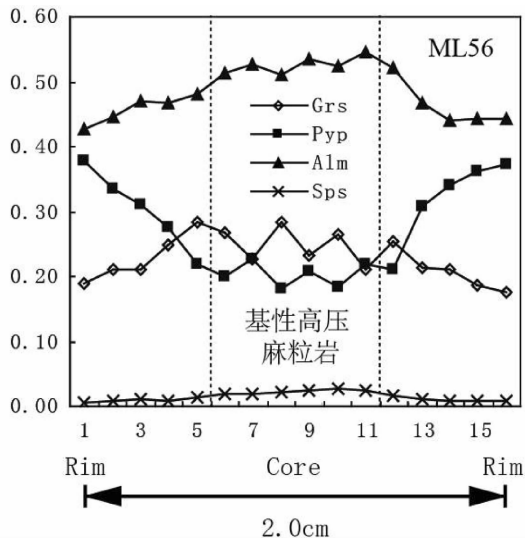


图5 喜马拉雅东构造结高压麻粒岩石榴石电子探针分析的成分环带

Fig. 5 Compositional EMP profiles across garnet grains in high-pressure mafic granulite from Eastern Himalayan Syntaxis

石榴石为残余状(图3f),成分为  $Alm = 52 \sim 54$ ,  $Grs = 29 \sim 32$ ,  $Prp = 11 \sim 13$ ,  $Sps = 4 \sim 5$ (表1、图5)。

斜方辉石为紫苏辉石(图4b),有三种类型:1)与富钙斜长石共生,呈蠕虫状形成石榴石假象,形成石榴石退变质的后成合晶( $X_{Mg} \approx 0.40$ ,图3f,h,表1);2)与钛铁矿共生,蠕虫状(图3g), $X_{Mg} \approx 0.44$ (表1);3)形成退变质石榴石的冠状体(图3f),成分与第一种斜方辉石一致。

斜长石为培长石( $An = 85 \sim 93$ ,表1),与蠕虫状斜方辉石共生(图3f,h)。

角闪石为铁-镁闪石、铁-钙镁闪石(图4a),有三种:1)在基质中,粒度大,为1mm左右(图3h);2)为蠕虫状,叠加在蠕虫状斜方辉石之上,形成角闪石+富钙斜长石的后成合晶,表示角闪岩相叠加(图3f,h);3)形成斜方辉石+斜长石后成合晶的冠状体(图3h),同样表示角闪岩相叠加。钛铁矿为蠕虫状,与斜方辉石交生(图3g),可能发生的反应是:石榴石+单斜辉石+金红石 $\rightarrow$ 斜方辉石+钛铁矿+斜长石。

石英在基质中,粒度较大,为1mm左右(图3f,h)。

其他副矿物还有榴石(图3f),磁铁矿,锆石。

根据矿物组合和结构,可以识别出三期变质矿物组合:峰期高压麻粒岩相矿物组合为残余石榴石和以斜方辉石+富钙斜长石的后成合晶推测的单斜辉石;退变质角闪斜方辉石麻粒岩相矿物组合为  $opx + pl$ (富钙)+  $ilm + qz + amp + mag \pm grt$ ;退变质角闪岩相矿物组合为  $amp + pl + ilm + mag + qz$ 。

## 4 P-T 视剖面计算

基性高压麻粒岩(样品 ML56)和角闪斜方辉石麻粒岩

(样品 ML46)的全岩成分均根据 XRF 分析得出,其中全岩的三价铁含量是根据所有主要矿物中的三价铁的含量和各自在全岩中的比例计算得出, $H_2O$  设为过量。计算使用 ThermoCalc ver. 3.33。本文使用的矿物活度模型是角闪石,Diener *et al.* (2007);单斜辉石,Green *et al.* (2007);石榴石,White *et al.* (2007);绿帘石,Holland and Powell, (1998);斜长石,Holland and Powell, (2003);磁铁矿和钛铁矿,White *et al.* (2000);斜方辉石,Powell and Holland, (1999)。

### 4.1 基性高压麻粒岩相的视剖面图

根据样品 ML56 的全岩成分  $SiO_2 : Al_2O_3 : CaO : MgO : FeO : Na_2O : TiO_2 : O = 55.835 : 10.520 : 10.869 : 9.821 : 8.590 : 2.832 : 1.024 : 0.510$ ,水设为过量,可以作出视剖面图(图6)。斜方辉石+斜长石 $\rightarrow$ 单斜辉石+石榴石+石英的反应,说明峰期压力在斜方辉石消失线之上。薄片观察的高压麻粒岩相峰期矿物组合  $grt + cpx + qz + rt$  在图6a中反映的温压条件为  $>810^\circ C$ ,  $>1.23 GPa$ (图6a)。石榴石的成分环带  $z(g) = Ca / (Ca + Mg + Fe^{2+})$  和  $x(g) = Fe^{2+} / (Mg + Fe^{2+})$  限定了一条从  $794^\circ C$ 、 $1.06 GPa$  到  $904^\circ C$ 、 $1.37 GPa$  的进变质  $P-T$  轨迹(图6b)。根据金红石中的 Zr 的含量,运用 Watson *et al.* (2006) 的金红石中的 Zr 温度计计算,形成金红石的平均温度为  $722 \pm 58.8^\circ C$  ( $1\sigma$  误差),而石榴石等值线确定的生长出金红石的温度是  $785 \sim 795^\circ C$ (图6b),与金红石中锆含量温度计确定的温度较为一致。沿着  $PT$  轨迹,石榴石在全岩中含量也逐渐增大(图6c),这与观察到的事实是一致的。石榴石边部成分确定了高压麻粒岩的峰期温压条件为  $904^\circ C$ 、 $1.37 GPa$ 。基性高压麻粒岩中退变质斜长石钙含量从核部到边部升高的环带( $An = 49 \sim 58$ )反映峰期之后的降压过程(图6d)。基质中的矿物组合是  $opx + di + pl + qz + ilm + amp$ ,温压条件为  $745 \sim 890^\circ C$ ,压力小于  $0.98 GPa$ (图6d)。

### 4.2 角闪斜方辉石麻粒岩的视剖面图

根据角闪斜方辉石麻粒岩的全岩成分  $SiO_2 : Al_2O_3 : CaO : MgO : FeO : Na_2O : TiO_2 : O = 54.702 : 8.315 : 10.875 : 8.666 : 14.092 : 0.365 : 1.775 : 1.211$ ,水设为过量,做出视剖面图(图7)。退变质角闪斜方辉石麻粒岩阶段矿物组合  $opx + di + pl + qz + ilm + amp$  在图7中反映的温压条件为  $720 \sim 760^\circ C$ ,  $<0.6 GPa$ (图7)。角闪岩相矿物组合  $amp + pl + qz + ilm + mag$  反映的温压条件是  $<745^\circ C$ ,  $<0.6 GPa$ (图6d中区域2,图7)。

## 5 锆石 U-Pb 定年

锆石的分选由廊坊市诚信地质服务有限公司完成,锆石制靶工作在中国科学院地质与地球物理研究所二次离子探

表 1 基性高压麻粒岩 (ML56) 和角闪斜辉石麻粒岩 (ML46) 代表性矿物电子探针分析 (wt%)

Table 1 EPMA analyses (wt%) of representative minerals of high-pressure mafic granulite (Sample ML56) and amphibole-orthopyroxene granulite (Sample ML46)

Mineral	基性高压麻粒岩 (ML56)											角闪斜辉石麻粒岩 (ML46)										
	Grt-c	Grt-r	Amp-m	Amp-p	Pl-i,c	Pl-i,r	Pl-m	Pl-gr,c	Pl-gr,r	Opx-i,c	Opx-i,r	Opx-m	Cpx-g	Cpx-m	Amp	Grt-c	Grt-r	Bt	Opx-s	Opx-i	Pl	
SiO <sub>2</sub>	38.58	39.59	44.68	40.49	54.43	51.71	57.81	53.90	52.25	53.94	53.61	52.75	52.81	52.78	42.15	38.01	38.34	36.02	49.53	49.97	44.40	
TiO <sub>2</sub>	0.23	0.05	1.61	0.22	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.13	0.08	0.10	0.25	0.13	1.79	0.14	0.10	3.71	0.08	0.05	0.00	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.97	21.73	12.65	15.34	28.05	30.68	25.69	29.13	30.70	1.37	1.53	1.30	2.35	2.28	11.40	21.77	21.67	15.12	0.58	0.84	35.55	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.05	0.07	0.00	0.00	0.04	0.00	0.22	0.00	0.20	0.20	0.00	0.11	0.08	0.01	0.02	0.03	0.04	0.02	0.00	0.00	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.48	1.87	2.29	2.37	0.26	0.03	0.96	0.00	0.00	0.87	1.25	1.45	0.00	0.84	1.83	0.00	0.00	0.00	0.85	0.00	0.48	
FeO	24.28	20.10	8.63	15.92	0.00	0.00	0.00	0.00	15.49	16.29	21.77	5.66	7.40	17.61	24.26	23.50	19.45	33.34	32.74	0.00	0.00	
MnO	0.87	0.32	0.06	0.11	0.05	0.01	0.01	0.04	0.00	0.21	0.21	0.30	0.02	0.13	0.19	1.89	1.64	0.13	1.00	1.04	0.00	
MgO	5.89	10.03	13.36	8.19	0.10	0.01	0.04	0.04	0.01	26.92	25.65	21.83	14.81	13.58	8.11	2.88	3.32	10.77	12.89	14.21	0.05	
CaO	8.14	6.95	10.99	12.01	10.58	13.01	7.76	10.09	11.76	0.66	1.22	1.56	22.34	22.18	11.20	10.69	11.16	0.00	0.95	0.44	18.45	
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.04	1.75	1.84	5.53	4.13	7.15	5.81	4.61	0.02	0.08	0.04	0.61	0.65	1.19	0.00	0.03	0.15	0.11	0.00	0.81	
K <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.73	1.13	0.18	0.11	0.29	0.18	0.11	0.00	0.01	0.00	0.04	0.02	1.34	0.01	0.02	9.34	0.08	0.03	0.07	
Total	100.36	100.54	96.59	97.38	99.20	99.73	99.71	99.41	99.46	99.81	100.00	101.11	99.00	100.07	96.82	99.67	99.81	94.73	99.44	99.32	99.81	
Oxygen	12	12	23	23	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	23	12	12	11	6	6	8	
Si	2.99	2.98	6.51	6.12	2.48	2.35	2.60	2.41	2.38	1.95	1.95	1.95	1.96	1.96	6.45	2.99	3.00	2.77	1.98	1.98	2.06	
Ti	0.01	0.00	0.18	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.21	0.01	0.01	0.22	0.00	0.00	0.00	
Al	1.92	1.93	2.17	2.74	1.51	1.65	1.36	1.54	1.65	0.06	0.07	0.06	0.10	0.10	2.06	2.02	2.00	1.37	0.03	0.04	1.94	
Cr	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fe <sup>3+</sup>	0.09	0.11	0.25	0.27	0.01	0.00	0.03	0.07	0.00	0.02	0.03	0.04	0.00	0.02	0.21	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	
Fe <sup>2+</sup>	1.57	1.27	1.05	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.50	0.67	0.18	0.18	0.23	2.26	1.60	1.54	1.25	1.11	1.09	0.00	
Mn	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.13	0.11	0.01	0.03	0.04	0.00	
Mg	0.68	1.13	2.90	1.85	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45	1.39	1.20	0.82	0.75	1.85	0.34	0.39	1.24	0.77	0.84	0.00	
Ca	0.68	0.56	1.72	1.95	0.52	0.63	0.37	0.48	0.57	0.03	0.05	0.06	0.89	0.88	1.84	0.90	0.94	0.00	0.04	0.02	0.92	
Na	0.01	0.01	0.49	0.54	0.49	0.36	0.62	0.51	0.41	0.00	0.01	0.00	0.04	0.05	0.35	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.07	
K	0.00	0.00	0.14	0.22	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	
Sum	8.00	8.00	15.50	15.82	5.02	5.01	5.02	5.03	5.01	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	15.58	7.99	7.99	7.80	4.00	4.00	5.01	
X <sub>grs</sub>	0.23	0.19	X <sub>an</sub>	X <sub>an</sub>	0.51	0.63	0.37	0.49	0.58						X <sub>grs</sub>	0.30	0.32	X <sub>an</sub>			0.93	
X <sub>prp</sub>	0.23	0.38	X <sub>Mg</sub>	X <sub>Mg</sub>						0.76	0.74	0.64	0.82	0.77	X <sub>prp</sub>	0.11	0.13	X <sub>Mg</sub>	0.41	0.44		
X <sub>alm</sub>	0.53	0.43													X <sub>alm</sub>	0.54	0.52					
X <sub>sp</sub>	0.02	0.01													X <sub>sp</sub>	0.04	0.04					

注: X<sub>grs</sub> = Ca/(Ca + Mg + Fe<sup>2+</sup> + Mn); X<sub>prp</sub> = Mg/(Ca + Mg + Fe<sup>2+</sup> + Mn); X<sub>alm</sub> = Fe<sup>2+</sup>/(Ca + Mg + Fe<sup>2+</sup> + Mn); X<sub>sp</sub> = Mn/(Ca + Mg + Fe<sup>2+</sup> + Mn); X<sub>an</sub> = Ca/(Ca + Na); X<sub>Mg</sub> = Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>); c-核; r-边; m-在基质中; i-岩浆残余; g-在石榴石域中; gr-石榴石退变质形成; p-退变质绿色非闪石; s-后成合晶; t-与钛铁矿共生

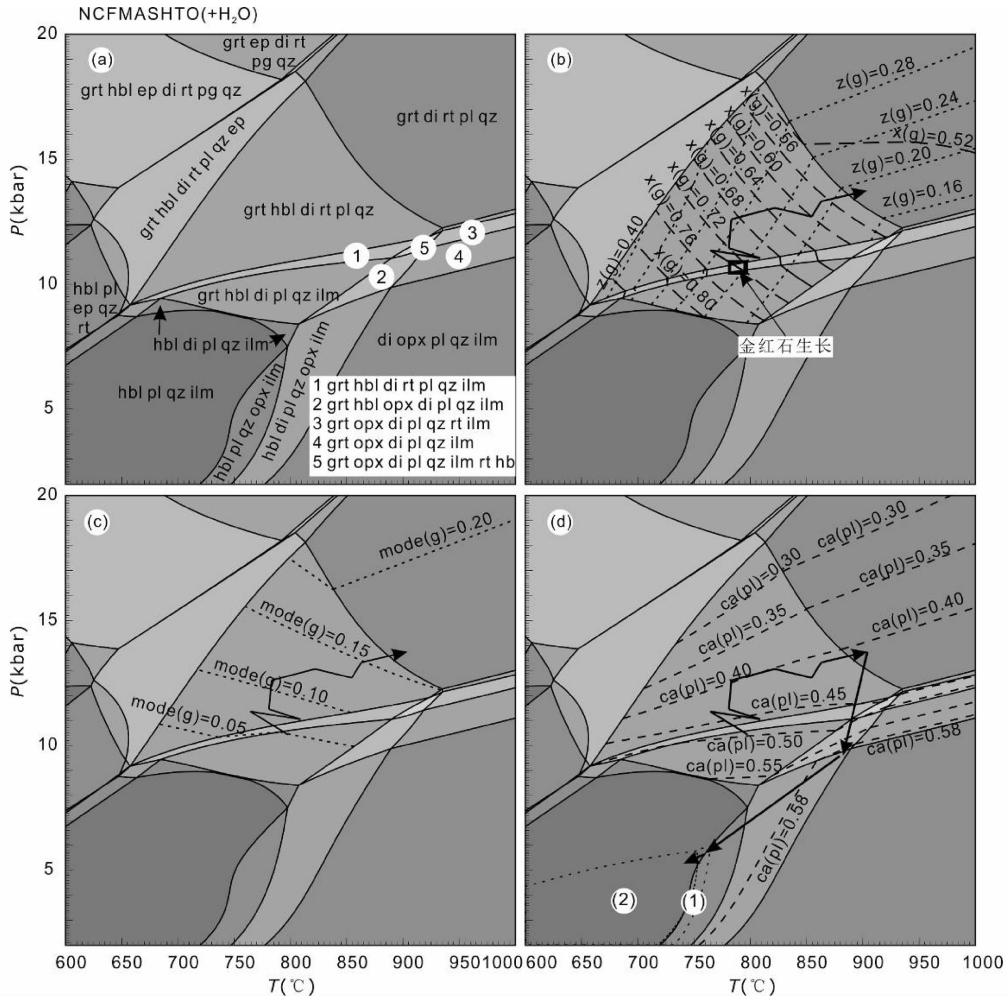


图6 基性高压麻粒岩(样品 ML56)的视剖面图(a)、石榴石成分  $x(g)$  和  $z(g)$  等值线图 and  $P$ - $T$  轨迹(b)、石榴石的含量等值线  $mode(g)$  和  $P$ - $T$  轨迹(c) 和斜长石的  $An$  等值线和基性高压麻粒岩退变质轨迹(d)

图6d中(1)、(2)所示的区域所示的区域是角闪斜方辉石麻粒岩的视剖面中角闪石+斜方辉石+斜长石+钛铁矿+石英+磁铁矿和角闪石+斜长石+石英+钛铁矿+磁铁矿的矿物组合的温压条件(图7)

Fig. 6  $PT$  pseudosection (a), isopleths of  $x(g)$  and  $z(g)$  of garnet and  $P$ - $T$  path (b), isopleth of  $mode(g)$  (c) and isopleth of  $An$  in plagioclase (d) for high-pressure mafic granulite (Sample ML56) from the Eastern Himalayan Syntaxis

(1) and (2) in Fig. 6d are the  $P$ - $T$  ranges for retrograde assemblages in amphibole-orthopyroxene granulite (Sample ML46): (1)  $opx + pl + ilm + amp + qz + mag$ , (2)  $amp + pl + qz + ilm + mag$  (Fig. 7)

针实验室完成。锆石的 CL 图像在北京大学物理学院 SEM 实验室完成。锆石中包体的鉴别运用能谱分析和拉曼光谱分析,分别在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室电子显微镜实验室和物相分析室完成。

锆石 U-Pb 定年分别在中国科学院地质与地球物理研究所二次离子探针实验室以及北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,锆石微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完成。

中国科学院地质与地球物理研究所二次离子探针实验室锆石 U-Th-Pb 定年实验所用仪器为 Cameca IMS-1280, 实验条件为一次  $O_2$  束加速到 13kV, 电流为 1.2 ~ 1.8nA, 束斑为  $15 \times 10 \mu m$  的椭圆。北京大学造山带与地壳演化教育部

重点实验室锆石 U-Th-Pb 定年和微量元素元素分析,剥蚀载气是 He 气,采用的激光束斑直径是  $32 \mu m$ , 使用  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄作为变质锆石的年龄。同位素比例计算、投图和年龄计算使用的是 Isoplot (ver3.0) 程序(Ludwig, 2003)。

### 5.1 基性高压麻粒岩(样品 ML56) 锆石

基性高压麻粒岩的锆石主要是岩浆锆石,变质锆石和具有核边结构的锆石较少。岩浆锆石(50 ~ 150  $\mu m$ )为自形楔状,有振荡环带。岩浆锆石中的矿物包体有磷灰石和石英。变质锆石在阴极发光照片下较暗,没有环带或者有补丁状环带。岩浆锆石具有 Eu 的负异常和 Ce 的正异常,相对变质锆石,稀土总量较高(大于  $240 \times 10^{-6}$ , 见电子版附表 1、图 10),具



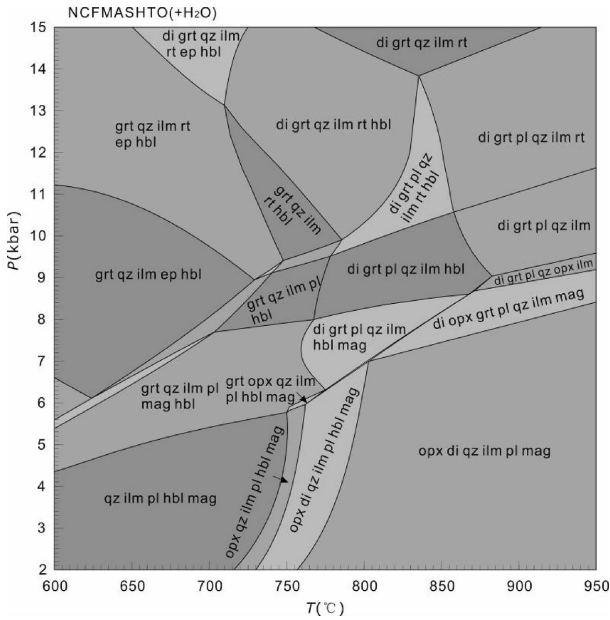


图7 角闪斜方辉石麻粒岩(样品 ML46)的视剖面图(详细说明参考文字部分)

Fig. 7 *P-T* pseudosection for amphibole-orthopyroxene granulite (Sample ML46) from the Eastern Himalayan Syntaxis (see text for details)

有核边结构的锆石有明亮的具有振荡环带的岩浆核,和暗色变质边(图8a)。变质锆石具有平坦的稀土分配模式和较低的稀土含量(小于 $41 \times 10^{-6}$ ,图10),没有Eu的负异常。变质锆石或者锆石的变质边中鉴别出的矿物包体有磷灰石和石英。

变质边锆石和变质锆石的加权平均年龄为 $20.7 \pm 2.3$  Ma, MSWD = 17,  $n = 6$  (表2、图9)。岩浆年龄从大约100 Ma 到大约1500 Ma (表2、图9)。这些核的年龄支持了南迦巴瓦群受到了超大陆构造演化的观点,大约1000 Ma 的峰值年龄(加权平均年龄 $1019 \pm 38$  Ma, MSWD = 9.8,  $n = 8$ ,图9)可能是Rodinia超大陆形成的影响(Zhao *et al.*, 2002, 2004; Santosh *et al.*, 2004, 2006; 张泽明等, 2008)。

## 5.2 退变质角闪斜方辉石麻粒岩(样品 ML46) 锆石

角闪斜方辉石麻粒岩的锆石多为他形-半自形,为短楔形或椭圆状,半径为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 。在CL图片中可以识别出明显的核边结构(图8d),锆石核部有高的Th/U比(平均0.33),核的大小不一,但是都是楔形,有明显的震荡环带。岩浆锆石或者岩浆核锆石具有较高的稀土含量(大于 $300 \times 10^{-6}$ ,图10),Eu负异常和Ce正异常明显。变质边宽度不一,CL照片下较暗,有弱的补丁状环带或者无环带(图8d)。这些边的Th/U比都非常低,均小于0.03,有较低的稀土含量(小于 $100 \times 10^{-6}$ ),稀土模式较平坦(图10),有较弱的Eu的负异常(图10)。这些特征都说明核部锆石是继承的岩浆来源的,而边部是变质成因的。无核边结构的变质锆石特征

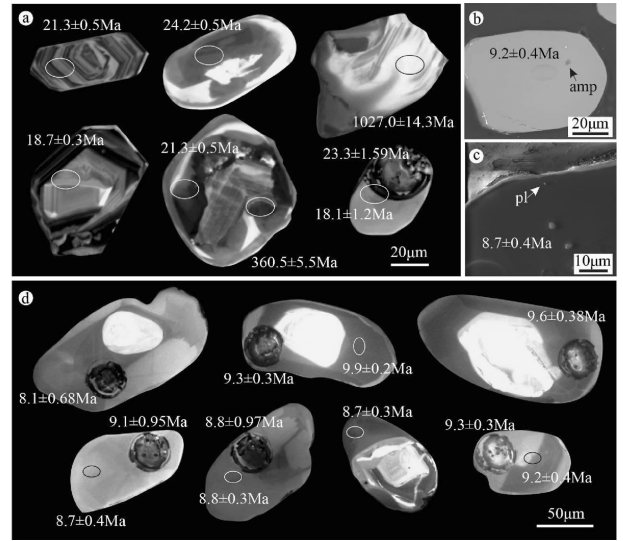


图8 喜马拉雅东构造结基性高压麻粒岩和角闪斜方辉石麻粒岩锆石阴极发光照片和锆石包体(运用能谱EDS识别)照片

椭圆形束斑为SIMS束斑;圆形束斑为LA-ICP-MS束斑。(a)-基性高压麻粒岩ML56中锆石的阴极发光照片;(b-d)-角闪斜方辉石麻粒岩ML46锆石中包体的BSE照片(b,其中包体可见角闪石)、锆石中包体的SEM照片(c,其中的包体为斜长石)和锆石阴极发光照片(d)

Fig. 8 Cathodoluminescence image of zircon and microphotographs of inclusions in zircon (determined by EDS analyses) in high-pressure mafic granulite and amphibole-orthopyroxene granulite from Eastern Himalayan Syntaxis

elliptical SIMS pits and circular LA-ICP-MS pits are marked with ages. (a)-CL image of zircon in high-pressure mafic granulite (Sample ML56); (b-d)-BSE image of inclusion in zircon (b amphibole), SEM image of inclusion in zircon (c plagioclase) and CL image of zircon (d) in amphibole-orthopyroxene granulite (Sample 46)

与变质边锆石特征一致,CL照片下较暗,有弱的补丁状环带或者无环带,Th/U < 0.03。变质锆石中的矿物包体有石英、角闪石和斜长石(图8b,c)

计算变质锆石的“207-corrected age”,20个数据得到了 $9.38 \pm 0.22$  Ma 加权平均年龄,其MSWD为2.8(表2、图9),从锆石包裹体特征推测这一年龄代表角闪岩相退变质作用时间。

## 6 成因探讨

### 6.1 高压麻粒岩 *PT* 轨迹

基性高压麻粒岩经历了三期主要变质演化阶段,峰期高压麻粒岩相变质阶段,退变质角闪斜方辉石麻粒岩相变质阶



表2 部分基性高压麻粒岩和角闪斜方辉石麻粒岩 SIMS 二次离子探针 U-Pb 定年结果

Table 2 A part of SIMS zircon U-Pb data for high-pressure mafic granulite and amphibole-orthopyroxene granulite from Eastern Himalayan Syntaxis

Spot No.	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm\sigma$ (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm\sigma$ (%)	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm\sigma$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm\sigma$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm\sigma$ (Ma)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm\sigma$ (Ma)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm\sigma$ (Ma)	$\frac{^{207}\text{Pb-corr}}{\text{Age (Ma)}}$	$\pm\sigma$ (Ma)	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th U	$f_{206}$ (%)	
角闪斜方辉石麻粒岩(样品 ML46)																				
ML-46@25	868.339	6.04	0.06713	23.28													133	4	0.028	13.78
ML-46@38	696.796	4.42	0.2066	9.18													304	6	0.019	35.7
ML-46@23	740.216	3.95	0.06017	10.22													676	5	0.008	3.62
ML-46@36	710.06	2.83	0.08115	9.32													625	4	0.007	15.05
ML-46@21	720.683	3.85	0.06751	14.07													292	5	0.018	13.9
ML-46@28	727.146	3.68	0.0528	16.51													276	6	0.02	11.84
ML-46@34	657.254	4.09	0.09745	16.91													180	4	0.023	17.18
ML-46@10	684.724	3.24	0.06563	11.76													384	3	0.007	0
ML-46@32	675.875	4.66	0.07523	8.13													733	4	0.006	5.89
ML-46@37	682.129	2.32	0.05104	8.02													1118	3	0.003	2.25
ML-46@30	668.82	1.96	0.05631	5.53													2105	6	0.003	2.11
ML-46@26	672.976	2.48	0.04617	6.34													1789	6	0.003	1.03
ML-46@33	662.995	2.61	0.05403	9.54													736	5	0.007	
ML-46@17	634.704	2.3	0.06694	7.12													1035	6	0.004	5.79
ML-46@16	647.668	1.99	0.04725	6.26													1847	7	0.004	0.94
ML-46@35	645.779	2.2	0.04743	8.83													1135	3	0.003	
ML-46@2	0.84302	1.99	0.0939	1.56													624	3	0.005	0.02
ML-46@13	0.85764	1.8	0.1008	1.51													2148	26	0.012	0.02
ML-46@1	1.20185	1.68	0.1248	1.51													1200	82	0.068	0.01
ML-46@15	1.3753	1.97	0.1346	1.59													823	198	0.24	0.04
ML-46@29	1.38925	1.78	0.1426	1.69													2001	28	0.014	0.01
ML-46@19	2.32312	2.41	0.1985	1.5													342	250	0.73	0
ML-46@14	2.33276	1.81	0.2024	1.5													692	355	0.513	0.03
ML-46@8	2.21871	3.48	0.2037	3.26													217	93	0.427	
ML-46@11	2.78512	1.67	0.2275	1.5													576	195	0.339	0.08
ML-46@5	3.57994	1.6	0.2719	1.5													690	622	0.901	0.02
ML-46@9	8.76959	1.68	0.4024	1.56													506	154	0.304	0.03
基性高压麻粒岩(样品 ML56)																				
ML-56@16	423.617	2.1	0.05328	7.14													836	376	0.449	0.98
ML-56@10	244.158	2.49	0.29076	5.07													230	79	0.345	45.77
ML-56@26	342.054	1.83	0.05127	3.92													2089	1099	0.526	1.11
ML-56@2	261.987	1.61	0.15061	1.62													4475	2640	0.59	12.43
ML-56@25	295.948	2.04	0.06237	9.6													739	10	0.014	7.81
ML-56@1	253.727	1.98	0.08256	4.76													1888	10	0.005	3.91
ML-56@14	205.051	13.4	0.07406	8.51													216	109	0.503	8.48
ML-56@11	139.185	2.76	0.04824	3.4													1340	50	0.037	0.7
ML-56@8	68.157	4.77	0.13398	4.86													874	84	0.096	10.78
ML-56@34	49.225	1.51	0.13152	1.02													2135	1257	0.588	9.48
ML-56@29	0.21536	3.72	0.0326	1.5													1485	666	0.448	0.82
ML-56@22	0.63176	2.65	0.0779	1.52													653	31	0.047	0.28
ML-56@3	0.99351	3.93	0.1326	1.52													298	165	0.555	1.65
ML-56@12	1.41528	3.91	0.156	1.51													449	69	0.154	1.84
ML-56@4	1.77127	2.03	0.1717	1.5													242	35	0.145	0.06
ML-56@17	1.63948	4.16	0.171	1.51													92	56	0.611	0.64
ML-56@32	1.72579	2.02	0.1727	1.51													265	37	0.139	0.08
ML-56@5	3.22552	1.78	0.2475	1.59													386	199	0.516	0.04

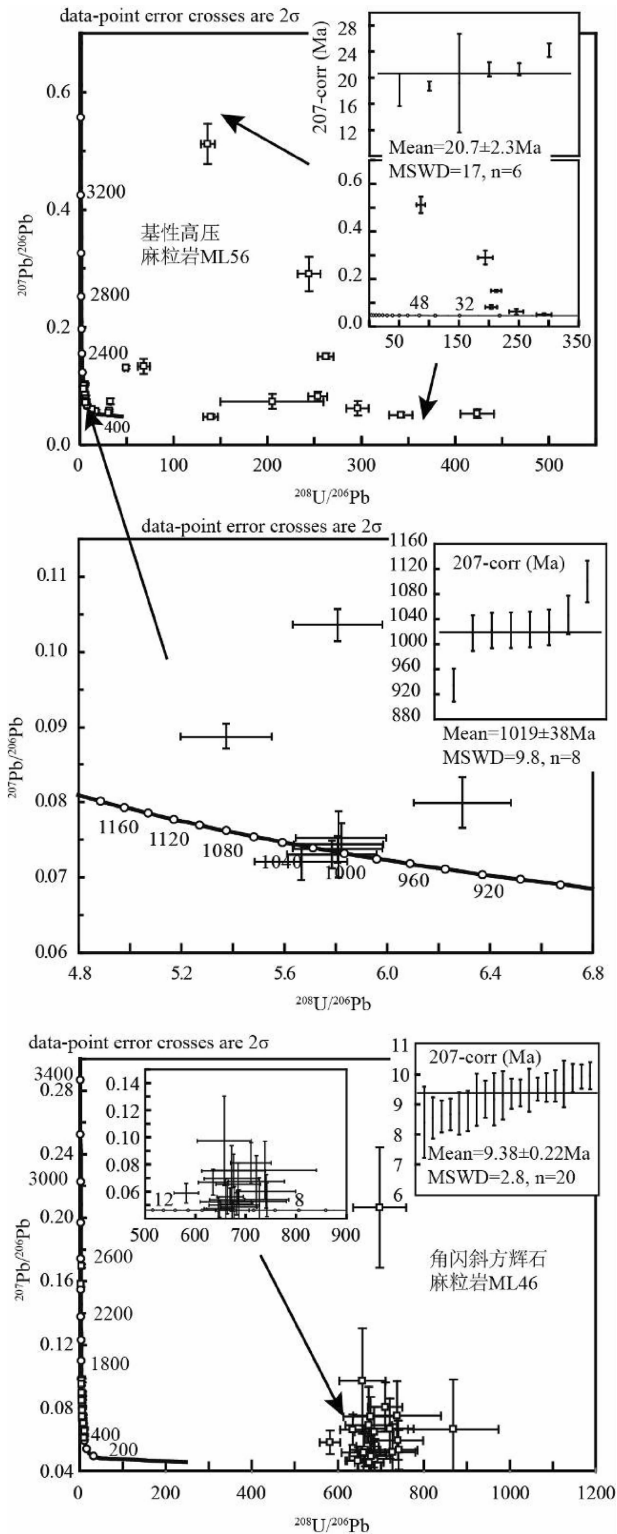


图9 基性高压麻粒岩(样品 ML56)和角闪斜方辉石麻粒岩(样品 ML46)的锆石 Tera-Wasserburg 图解和定年结果(仅使用 SIMS 数据)

Fig. 9 Tera-Wasserburg plot for analyses of zircon in high-pressure mafic granulite (Sample ML56) and amphibole-orthopyroxene granulite (Sample ML46) from Eastern Himalayan Syntaxis (only SIMS data)

段和退变质角闪岩相变质阶段。斜方辉石 + 斜长石  $\rightarrow$  单斜辉石 + 石榴石 + 石英的反应,说明峰期压力在斜方辉石消失线之上,通过石榴石的成分环带限定了一条从  $794^\circ\text{C}$ 、 $1.06\text{GPa}$  增温增压到  $904^\circ\text{C}$ 、 $1.37\text{GPa}$  的进变质  $P-T$  轨迹。石榴石退变质产生的斜长石从核部到边部钙含量逐渐增高 ( $\text{An}:49 \sim 58$ ),限定了降压的轨迹。角闪斜方辉石麻粒岩基质中的矿物组合为  $\text{pl} + \text{amp} + \text{opx} + \text{mag} + \text{ilm} + \text{qz}$ ,相应的温压条件为  $720 \sim 760^\circ\text{C}$ 、 $<0.6\text{GPa}$ 。角闪岩相温压条件是  $<745^\circ\text{C}$ 、 $<0.6\text{GPa}$ 。基性高压麻粒岩在峰期之前经历了增温增压的进变质过程,随后发生降温降压,形成了顺时针的  $P-T$  轨迹,并且具有温度压力最高点都在一点的特征。通常认为俯冲隧道流(Channel flow)具有温度压力最高点都在一点的  $P-T$  轨迹(Cloos, 1982),因此本文有关高压麻粒岩的  $P-T$  轨迹特征进一步支持喜马拉雅东构造结高压麻粒岩可能是俯冲隧道流过程形成的。

本文研究是利用相平衡的方法对该区的高压麻粒岩进行的  $P-T$  视剖面计算的获得的峰期温压条件为: $1.37\text{GPa}$  和  $904^\circ\text{C}$ ,并且结合在角闪斜方辉石麻粒岩中获得的退变质角闪岩相温压条件为  $<745^\circ\text{C}$  和  $<0.6\text{GPa}$ ,较准确地确定出了东构造结高压麻粒岩的退变质  $P-T$  轨迹,表明高喜马拉雅结晶岩系其抬升折返经历了 2 个阶段:即第一阶段从高压麻粒岩相退变到角闪岩相阶段,第二阶段为从角闪岩相直接折返地表过程。这 2 个阶段的退变质过程的确定对于进一步探讨俯冲带折返机制和青藏高原的隆升都具有重要意义(详见后述)。

## 6.2 高压麻粒岩的峰期变质时代

本文研究利用 SIMS 获得高压麻粒岩的峰期变质时代为  $20.7 \pm 2.3\text{Ma}$ ,与该区的泥质高压麻粒岩的峰期  $21.34 \pm 0.56\text{Ma}$  年龄一致(未发表数据),这些  $20\text{Ma}$  左右的年龄数据与东构造结区域上广泛出现的深熔作用年龄  $23 \sim 17\text{Ma}$  基本是一致的(Booth *et al.*, 2004; Zeng *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013a; Searle *et al.*, 2010),因此我们认为本文获得的高压麻粒岩的峰期变质时代  $20.7 \pm 2.3\text{Ma}$ ,应该代表该区地壳加厚出现部分熔融,开始折返阶段。根据喜马拉雅东构造结的地质年代框架,通常认为有四期主要的变质变形阶段(Zhang *et al.*, 2002; 张进江等, 2001, 2003; 钟大赉和丁林, 1996; Wang *et al.*, 2013b):第一期,大约  $60 \sim 45\text{Ma}$ ,代表了印度板块和欧亚板块最初的碰撞的时间;第二期,大约  $23 \sim 17\text{Ma}$ ,是强烈汇聚挤压事件,这期事件造成了主中央断层(MCT)与藏南拆离系(STDS)开始活动和周围构造单元的挤出;第三期,大约  $10\text{Ma}$  ( $13 \sim 7\text{Ma}$ ),造成了周围地块沿喜马拉雅山脉进一步的挤出,第四期,大约在  $7\text{Ma}$ ,造成了青藏高原的快速隆起。高压麻粒岩的峰期  $20.7 \pm 2.3\text{Ma}$  时代应该相当于第二个阶段,增厚的地壳最强烈挤压构造时期,也是藏南拆离系(STDS)开始活动时期,也标志着俯冲的高喜马拉雅岩系折返的开始阶段。

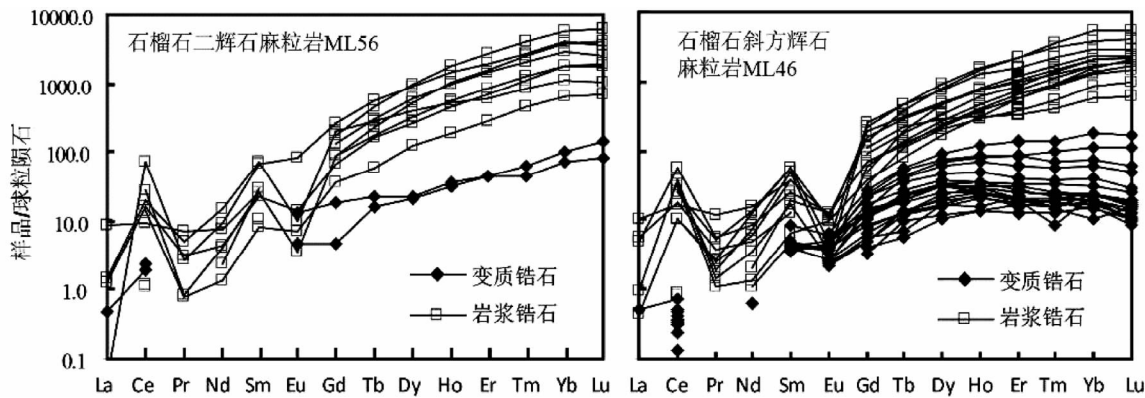


图 10 喜马拉雅东构造结基性高压麻粒岩(样品 ML56)和角闪斜方辉石麻粒岩(样品 ML46)锆石稀土元素模式图  
Fig. 10 REE patterns of zircon in high-pressure mafic granulite (Sample ML56) and amphibole-orthopyroxene granulite (Sample ML46) from Eastern Himalayan Syntaxis

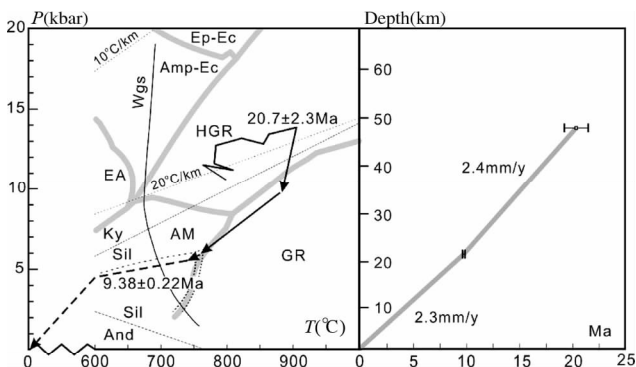


图 11 喜马拉雅东构造结高压麻粒岩演化  $P$ - $T$  轨迹, 深度-时间变化图和两阶段平均折返速率

WGS (wet granite solidus) 根据 Schliestedt and Johannes (1984). 相边界根据基性高压麻粒岩样品 ML56 计算所得. AM-角闪岩; GR-麻粒岩; EA-绿帘角闪岩; HGR-高压麻粒岩; Amp-Ec-角闪-榴辉岩; Ep-Ec-绿帘石榴辉岩. 假设地壳厚度大于 70km, 上地壳厚度 20km, 密度为  $2.7\text{g/cm}^3$ , 下地壳密度为  $3.0\text{g/cm}^3$

Fig. 11  $P$ - $T$  paths of high-pressure granulites from Eastern Himalayan Syntaxis and depth vs. time path from which average exhumation rates are calculated

WGS (wet granite solidus) after Schliestedt and Johannes (1984). Phase boundaries from pseudosection calculation of Sample ML56. AM-amphibole; GR-granulite; EA-epidote amphibolite; HGR-high-pressure granulite; Amp-Ec, amphibolite-eclogite; Ep-Ec, epidote-eclogite. The thickness of the crust is assumed to be  $>70\text{km}$ , and the thickness of the upper crust is assumed to be  $20\text{km}$  with its density  $2.7\text{g/cm}^3$ , and the density of the lower crust is assumed to be  $3.0\text{g/cm}^3$

6.3 两阶段折返及其对青藏高原隆升的制约

通常认为青藏高原的隆升具有多阶段、非均匀和不等速的特点,地质构造演化经历了 45 ~ 36Ma, 25 ~ 17Ma, 13 ~ 8Ma 和 5Ma 以来的四期构造演化阶段(丁林等, 1995; 钟大赉和丁林, 1996; 潘裕生, 1999; 王国灿等, 2011)。

45 ~ 36Ma 的隆升与印度-欧亚板块的碰撞有关, 构造抬升集中在板块的边缘(丁林等, 1995), 如在印度西北部提斯喜马拉雅山脉的 Tso Moriri 推覆体在 45 ~ 40Ma 的抬升速率为 2 ~ 5mm/y (Schlup *et al.*, 2003)。25 ~ 17Ma 的抬升阶段是由于印度板块持续向欧亚大陆挤压(钟大赉和丁林, 1996), 例如冈底斯地体的曲水岩体在 20 ~ 18Ma 抬升速率为大于 2mm/y (Harrison *et al.*, 1992)。13 ~ 8Ma 隆升阶段, 青藏高原受到印度板块持续挤压, 主边界断层活动强烈(钟大赉和丁林, 1996), 例如碰撞带南侧的 Siwalik 前陆盆地的沉积速率由以前的 0.12mm/y 增大到 0.3mm/y (Johnson *et al.*, 1985), 德母拉岩体这一阶段抬升速率是 0.18mm/y (丁林等, 1995)。5 ~ 3Ma 以来是青藏高原强烈隆升期, 青藏高原现在的面貌是 4 ~ 3Ma 以来快速抬升的结果(钟大赉和丁林, 1996; 潘裕生, 1999; 葛肖虹等, 2006)。

目前有关青藏高原的隆升争议很大, 葛肖虹等(2006)综合中国西部盆地的演化及其环境变迁, 把青藏高原隆升分为 3 个阶段, 而真正对周边气候变化影响和记录的角度来看主要为 2 个阶段: 即中新世早-中期 (23 ~ 11.7Ma) 的初期抬升时期, 出现了中亚季候风, 形成了古黄土; 第二个阶段是形成现今高原地貌的快速抬升期 (0.8 ~ 0.9Ma)。吴福元等(2008)强调造山带的垮塌是导致青藏高原隆升的主要原因, 提出第一阶段 55Ma 俯冲洋壳的断离形成的大面积的冈底斯岩基代表高原的最早的隆升, 第二个阶段的隆升是在 26Ma 左右发生岩石圈的拆沉形成的新生代钾质岩浆岩的侵入导致出现的大规模隆升过程。无论怎样, 20 多万年的隆升在整个高原抬升过程中是最明显的。如前所述本文研究获得的高压麻粒岩峰期变质年龄  $20.7 \pm 2.3\text{Ma}$  可能代表了地壳加厚、开始折返的时代, 和退变角闪岩相的年龄  $9.38 \pm 0.22\text{Ma}$ , 代表了从高压麻粒岩相到角闪岩相退变, 是第一阶段的抬升记录。根据高压麻粒岩和角闪岩相确定的变质  $P$ - $T$  条件, 可以大致估算出东构造结中新世抬升速率大于 2.4mm/y (图 11), 明显高于青藏高原其他地区这一时期的抬

升速率,说明俯冲带的折返抬升可能是导致整个高原隆升的主要原因。第二个阶段应该是从角闪岩相直接折返地表过程,这一过程的平均抬升速率为 2.3mm/y(图 11),应该代表高原最后快速抬升的平均速率。如上所述,通常认为 5~3Ma 以来是青藏高原快速隆升期,那么本文研究的高压麻粒岩纪录的 9Ma 到 5Ma 期间应该是抬升最缓慢时期,这也进一步说明青藏高原的隆升是幕式的,而非均速抬升的。

## 7 结论

(1) 利用相平衡方法确定喜马拉雅东构造结基性高压麻粒岩峰期变质温压条件为 904°C、1.38GPa,代表的地热梯度为 19.0°C/km; 退变质角闪岩相温压条件为温度 < 745°C,压力 < 0.6GPa。获得其 *P-T* 轨迹为顺时针型,具有峰期温度和压力在一点的“发卡状”特征。

(2) 锆石 U-Pb 定年结果表明东构造结高压麻粒岩的峰期变质年龄为  $20.7 \pm 2.3$ Ma,角闪岩相退变时代为  $9.38 \pm 0.22$ Ma。

(3) 东构造结高喜马拉雅岩片抬升折返过程中至少纪录了 2 个阶段,第一阶段由高压麻粒岩相退变到角闪岩相,其抬升速率为大于 2.4mm/y,代表高原主抬升期;第二期阶段是从角闪岩相直接折返到地表,其折返速率为 2.3mm/y,代表了青藏高原最后隆升的平均速率。

**致谢** 野外工作曾得到中国地质大学(北京)朱弟成教授的帮助;舒明贵老师、王长秋老师在电子探针实验中提供了帮助;LA-ICP-MS 实验室马芳老师对微量元素数据采集和处理提供了帮助;与宋述光教授进行了有益的讨论;魏春景教授提出了宝贵的修改意见;在此一并致谢。

## References

Booth AL, Zeitler PK, Kidd WSF, Wooden J, Liu YP, Idleman B, Hren M and Chamberlain CP. 2004. U-Pb zircon constraints on the tectonic evolution of southeastern Tibet, Namche Barwa area. *American Journal of Science*, 304(10): 889–929

Booth AL, Chamberlain CP, Kidd WSF and Zeitler PK. 2009. Constraints on the metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis from geochronologic and petrologic studies of Namche Barwa. *GSA Bulletin*, 121(3–4): 385–407

Cloos M. 1982. Flow melanges: Numerical modeling and geologic constraints on their origin in the Franciscan subduction complex, California. *Geological Society of America Bulletin*, 93(4): 330–345

Diener JFA, Powell R, White RW and Holland TJB. 2007. A new thermodynamic model for clino- and orthoamphiboles in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{O}$ . *Journal of Metamorphic Geology*, 25(6): 631–656

Ding L, Zhong DL, Pan YS, Huang X and Wang QL. 1995. Fission track evidence for the rapid uplift in eastern Himalayan Syntaxis since Pliocene. *Chinese Science Bulletin*, 40(16): 1497–1500 (in Chinese)

Ding L and Zhong DL. 1999. Metamorphic characteristics and geotectonic

implications of the high-pressure granulites from Namjagarwa, eastern Tibet. *Science in China (Series D)*, 42(5): 491–505

Ding L, Zhong DL, Yin A, Kapp P and Harrison TM. 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa). *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 423–438

Ge XH, Ren SM, Ma LX, Wu GD, Liu YJ and Yuan SH. 2006. Multi-stage uplifts of the Qinghai-Tibet Plateau and their environmental effect. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 118–130 (in Chinese with English Abstract)

Green E, Holland T and Powell R. 2007. An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite-diopside-hedenbergite-aegirine, with applications to eclogitic rocks. *American Mineralogist*, 92(7): 1181–1189

Harrison TM, Copeland P, Kidd WSF and Yin A. 1992. Raising Tibet. *Science*, 255(5052): 1663–1670

Holland T and Powell R. 2003. Activity-composition relations for phases in petrological calculations: An asymmetric multi-component formulation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145(4): 492–501

Holland TJB and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 309–343

Johnson NM, Stix J, Tauxe L, Cerveny PF and Tahirkheli RAK. 1985. Paleomagnetic chronology, fluvial processes, and tectonic implications of the Siwalik deposits near Chinji Village, Pakistan. *The Journal of Geology*, 93(1): 27–40

Liu Y and Zhong D. 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis. *Journal of Metamorphic Geology*, 15(4): 451–466

Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex Version 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1–70

Pan YS. 1999. Formation and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 153–163 (in Chinese with English abstract)

Powell R and Holland T. 1999. Relating formulations of the thermodynamics of mineral solid solutions: Activity modeling of pyroxenes, amphiboles, and micas. *American Mineralogist*, 84(1–2): 1–14

Santosh M, Yokoyama K and Acharyya SK. 2004. Geochronology and tectonic evolution of karimnagar and bhopalpatnam granulite belts, Central India. *Gondwana Research*, 7(2): 501–518

Santosh M, Sajeev K and Li JH. 2006. Extreme crustal metamorphism during Columbia supercontinent assembly: Evidence from North China Craton. *Gondwana Research*, 10(3–4): 256–266

Schliestedt M and Johannes W. 1984. Melting and subsolidus reactions in the system  $\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ : Corrections and additional experimental data. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 88(4): 403–405

Schlup M, Carter A, Cosca M and Steck A. 2003. Exhumation history of eastern Ladakh revealed by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and fission-track ages: The Indus River-Tso Morari transect, NW Himalaya. *Journal of the Geological Society*, 160(3): 385–399

Searle MP, Cottle JM, Streule MJ and Waters DJ. 2010. Crustal melt granites and migmatites along the Himalaya: Melt source, segregation, transport and granite emplacement mechanisms. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 100(1–2): 219–233

Wang GC, Cao K, Zhang KX, Wang A, Liu C, Meng YN and Xu YD. 2011. Spatio-temporal framework of tectonic uplift stages of the Tibetan Plateau in Cenozoic. *Scientia Sinica (Terrae)*, 41(3): 332–349 (in Chinese)

Wang JM, Zhang JJ and Wang XX. 2013a. Structural kinematics, metamorphic *P-T* profiles and zircon geochronology across the Greater Himalayan Crystalline Complex in south-central Tibet: Implication for a revised channel flow. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(6): 607–628

- Wang XX, Zhang JJ, Liu J, Yan SY and Wang JM. 2013b. Middle-Miocene transformation of tectonic regime in the Himalayan orogen. *Chinese Science Bulletin*, 58(1): 108–117
- Watson EB, Wark DA and Thomas JB. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413–433
- White RW, Powell R, Holland TJB and Worley BA. 2000. The effect of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  on metapelitic assemblages at greenschist and amphibolite facies conditions: Mineral equilibria calculations in the system  $\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$ . *Journal of Metamorphic Geology*, 18(5): 497–511
- White RW, Powell R and Holland TJB. 2007. Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(5): 511–527
- Wu FY, Huang BC, Ye K and Fang AM. 2008. Collapsed Himalayan-Tibetan orogeny and the rising Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 1–30 (in Chinese with English Abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211–280
- Zeng LS, Gao LE, Dong CY and Tang SH. 2012. High-pressure melting of metapelite and the formation of Ca-rich granitic melts in the Namche Barwa Massif, southern Tibet. *Gondwana Research*, 21(1): 138–151
- Zhang JJ, Zhong DL, Ji JQ, Ding L and Sang HQ. 2001. The structural-chronological frame of the Eastern Himalayan Syntaxis since the India-Asia collision and its correlation with the Ailaoshan-Red River structural belt. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 243–244 (in Chinese with English Abstract)
- Zhang JJ, Ji JQ, Zhong DL, Sang HQ, He SD. 2002. Structural and chronological evidence for the India-Eurasia collision of the Early Paleocene in the Eastern Himalayan Syntaxis, Namjagbarwa. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 446–454
- Zhang JJ, Ji JQ, Zhong DL, Ding L and He SD. 2003. Structural pattern of eastern Himalayan syntaxis in Namjagbarwa and its formation process. *Science in China (Series D)*, 33(4): 373–383 (in Chinese)
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA, and Sun M. 2002. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens; Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews*, 59(1–4): 125–162
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews*, 67(1–2): 91–123
- Zhang ZM, Zheng LL, Wang JL, Zhao XD and Shi C. 2007. Garnet pyroxenite in the Namjagbarwa Group-complex in the eastern Himalayan tectonic syntaxis, Tibet, China: Evidence for subduction of the Indian continent beneath the Eurasian plate at 80–100 km depth. *Geological Bulletin of China*, 26(1): 1–12 (in Chinese with English Abstract)
- Zhang ZM, Wang JL, Zhao GC and Shi C. 2008. Geochronology and Precambrian tectonic evolution of the Namche Barwa complex from the eastern Himalayan syntaxis, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1477–1487 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Zhao GC, Santosh M, Wang JL, Dong X and Liou JG. 2010. Two stages of granulite facies metamorphism in the eastern Himalayan syntaxis, South Tibet: Petrology, zircon geochronology and implications for the subduction of Neo-Tethys and the Indian continent beneath Asia. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(7): 719–733
- Zhong DL and Ding L. 1996. Rising process of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its mechanism. *Science in China (Series D)*, 26(4): 289–295 (in Chinese)

### 附中文参考文献

- 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 黄萱, 王庆隆. 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据. *科学通报*, 40(16): 1497–1500
- 葛肖虹, 任收麦, 马立祥, 吴光大, 刘永江, 袁四化. 2006. 青藏高原多期次隆升的环境效应. *地学前缘*, 13(6): 118–130
- 潘裕生. 1999. 青藏高原的形成与隆升. *地学前缘*, 6(3): 153–163
- 王国灿, 曹凯, 张克信, 王岸, 刘超, 孟艳宁, 徐亚东. 2011. 青藏高原新生代构造隆升阶段的时空格局. *中国科学(D辑)*, 41(3): 332–349
- 吴福元, 黄宝春, 叶凯, 方爱民. 2008. 青藏高原造山带的垮塌与高原隆升. *岩石学报*, 24(1): 1–30
- 张进江, 钟大赉, 季建清, 丁林, 桑海清. 2001. 东喜马拉雅构造结大陆碰撞以来构造年代学框架及其与哀牢山-红河构造带的对比. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 243–244
- 张进江, 季建清, 钟大赉, 丁林, 何顺东. 2003. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨. *中国科学(D辑)*, 33(4): 373–383
- 张泽明, 郑来林, 王金丽, 赵旭东, 石超. 2007. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群中的石榴辉石岩——印度大陆向欧亚板块之下俯冲至 80–100 km 深度的证据. *地质通报*, 26(1): 1–12
- 张泽明, 王金丽, 赵国春, 石超. 2008. 喜马拉雅造山带东构造结南迦巴瓦岩群地质年代学和前寒武纪构造演化. *岩石学报*, 24(7): 1477–1487
- 钟大赉, 丁林. 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. *中国科学(D辑)*, 26(4): 289–295



附表 1 基性高压麻粒岩和角闪斜方辉石麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS 稀土元素分析 ( $\times 10^{-6}$ )Appendix Table 1 Zircon trace element data ( $\times 10^{-6}$ ) for high-pressure mafic granulite and amphibole-orthopyroxene granulite

样品	成因	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	总量
角闪斜方辉石麻粒岩(样品 ML46)																
ML46-01	岩浆	<0.123	15.45	0.488	6.37	8.56	0.616	38.83	11.64	128.3	43.55	175.46	37.34	347.3	56.8	870.7
ML46-02	岩浆	1.32	10.68	0.356	2.3	1.97	<0.138	19.19	6.91	82.16	33.58	146.3	35.35	348.8	58.56	747.4
ML46-03	岩浆	<0.111	18.34	0.104	0.62	0.99	0.564	7.76	2.9	42.19	17.4	91.59	23.66	261.7	53.09	520.9
ML46-04	岩浆	<0.094	6.17	0.23	2.73	5.55	0.68	32.1	10.77	118.2	43.48	168.2	34.03	296.1	49.55	767.8
ML46-07	变质	<0.074	0.29	<0.056	<0.29	<0.49	<0.120	1.62	0.456	4.24	1.28	3.08	0.438	2.86	0.287	14.55
ML46-08	变质	<0.086	0.23	<0.058	<0.28	<0.43	0.274	2.39	0.881	7.64	1.667	3.28	0.458	2.47	0.26	19.55
ML46-09	岩浆	0.228	23.04	0.137	1.57	2.48	0.151	12.2	5.05	66.51	25.92	121.6	28.83	295.7	50.24	633.6
ML46-10	变质	<0.065	0.201	<0.056	<0.27	<0.44	0.364	5.54	2.07	22.7	6.93	22.28	3.38	30.33	4.25	98.05
ML46-11	岩浆	<0.080	19.96	0.175	3.32	7.42	0.175	44.93	17.6	229.46	88.88	378.9	77.74	670.4	104.4	1643
ML46-12	变质	<0.099	0.082	<0.06	<0.29	<0.40	0.129	1.15	0.255	4.23	0.87	3.54	0.361	1.80	0.403	12.82
ML46-14	变质	<0.126	0.206	<0.060	<0.41	<0.49	0.15	1.33	0.471	5.79	1.63	4.04	0.611	3.69	0.485	18.40
ML46-15	岩浆	<0.101	19.26	<0.084	0.96	2.91	0.755	13.9	4.77	55.72	21.81	95.66	22.04	213.8	38.54	490.1
ML46-16	变质	<0.098	0.208	<0.041	<0.43	0.66	0.273	4.39	1.272	11.69	2.83	6.87	0.978	6.92	0.718	36.81
ML46-17	变质	<0.094	0.15	<0.045	<0.30	0.64	0.224	1.71	0.481	5.01	1.441	3.47	0.504	3.91	0.436	17.98
ML46-18	变质	<0.107	0.223	<0.053	0.29	<0.43	0.255	3.31	1.027	9.72	1.96	4.38	0.569	3.17	0.32	25.22
ML46-19	岩浆	0.105	6.24	0.253	5.97	8.69	0.278	53.4	17.91	189.3	71.06	268.8	55.56	493.4	76.4	1247
ML46-21	变质	<0.100	0.189	<0.086	0.29	<0.40	0.141	0.98	0.454	4.03	1.17	2.94	0.496	3.2	0.363	14.25
ML46-22	变质	<0.095	0.258	<0.075	<0.36	0.53	0.267	4.88	2.03	19.44	4.86	13.88	1.769	12.62	1.532	62.07
ML46-23	变质	0.118	0.449	<0.049	<0.37	<0.52	<0.137	4.43	1.662	17.44	4.64	14.49	2.43	19.01	2.83	67.50
ML46-25	变质	<0.071	0.293	<0.043	<0.32	<0.36	0.128	0.98	0.506	4.93	1.205	2.58	0.481	3.21	0.269	14.58
ML46-26	岩浆	<0.082	0.55	<0.069	<0.73	<0.94	<0.26	6.74	4.08	50.89	16.31	63.1	13.95	142.1	24.58	322.3
ML46-28	岩浆	<0.122	0.223	<0.066	<0.27	0.61	0.152	2.19	0.731	7.63	1.776	5.02	0.629	3.95	0.399	23.31
ML46-29	变质	<0.067	0.264	<0.053	<0.28	<0.31	0.14	3.03	1.52	15.44	3.83	9.99	1.41	10.2	1.29	47.11
ML46-30	岩浆	<0.096	<0.102	<0.051	<0.36	<0.58	<0.140	0.8	0.207	2.64	0.757	2.04	0.332	2.69	0.208	9.674
ML46-31	变质	<0.122	0.322	<0.065	<0.36	0.62	0.214	2.08	0.842	8.41	1.66	4.07	0.585	4.05	0.49	23.34
ML46-32	岩浆	<0.101	0.489	<0.062	<0.57	3.32	<0.181	22.96	8.48	71.26	17.76	53.83	10.61	98.21	15.44	302.4
ML46-33	变质	<0.097	0.499	<0.072	0.49	0.68	<0.183	9.89	7.2	118.1	45.61	196.0	42.32	410.4	60.89	892.0
ML46-34	变质	<0.073	0.224	<0.076	<0.31	<0.37	<0.149	0.65	0.359	2.94	0.774	2.72	0.385	3.84	0.498	12.39
ML46-35	变质	<0.134	0.3	<0.129	<0.97	1.31	0.34	2.79	0.67	6.41	1.38	3.1	0.209	3.98	0.41	20.90
ML46-36	岩浆	2.40	10.01	1.104	7.41	5.74	<0.223	28.24	14.11	207.2	82.1	377.4	90.07	899.4	136.8	1862
ML46-37	变质	<0.084	0.217	<0.094	<0.46	0.73	0.211	2.97	0.71	8.2	1.99	5.44	0.828	5.21	0.647	27.15
ML46-38	岩浆	1.13	35.7	0.526	3.83	3.9	0.75	13.98	4.37	60.98	22.52	107.4	23.39	240.1	42.15	560.7
ML46-39	变质	<0.144	<0.199	<0.109	<0.90	<1.10	0.33	2.42	0.786	7.52	1.43	3.16	0.385	3.22	0.243	19.49
基性高压麻粒岩(样品 ML56)																
ML56-01	岩浆	<0.113	17.35	0.08	1.85	4.02	<0.159	27.65	11.67	153.9	56.85	241.6	51.78	480.6	64.78	1112
ML56-02	岩浆	1.98	5.77	0.648	3.49	3.95	0.198	18.22	6.47	83.56	31.96	140.1	32.58	307.2	49.73	685.9
ML56-03	岩浆	<0.117	0.675	<0.106	<0.62	1.58	<0.196	17.67	8.92	136.0	58.49	263.1	64.48	642.3	104.8	1298
ML56-04	岩浆	0.295	9.9	0.3	2.05	3.48	0.8	14.2	5.92	67.3	25.41	116.4	28.83	306.3	46.25	627.4
ML56-05	岩浆	<0.104	8.38	0.075	0.65	1.23	0.393	7.23	2.14	30.66	10.59	47.29	11.34	111.2	17.26	248.4
ML56-06	岩浆	0.342	11.77	0.459	6.89	10.73	0.574	40.47	10.93	104.3	29.52	102.49	21.1	191.9	26.23	557.7
ML56-07	岩浆	0.0118	43.64	0.263	4.29	10.29	4.95	53.17	20.63	235.4	81.06	327.5	71.14	678.0	88.85	1619
ML56-08	变质	<0.080	1.43	<0.082	<0.64	<0.72	0.275	0.98	0.584	5.42	1.81	7.32	1.56	17.37	3.64	40.39
ML56-09	变质	0.113	1.13	<0.068	<0.49	<0.66	0.73	3.86	0.82	5.73	2.1	7.19	1.17	12.56	2.16	37.56
ML56-10	岩浆	<0.116	0.742	<0.085	1.12	4.58	<0.166	35.89	17.09	254.1	101.5	450.6	104.4	1010	158.1	2138

注:变质-变质锆石;岩浆-岩浆锆石