

文章编号: 1009-3850(2004)03-0022-08

# 东喜马拉雅构造结高压麻粒岩特征、 形成机制及折返过程

孙志明<sup>1</sup>, 郑来林<sup>1</sup>, 耿全如<sup>1</sup>, 李生<sup>1</sup>,  
廖光宇<sup>1</sup>, 石文礼<sup>2</sup>, 张东<sup>2</sup>

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082; 2. 甘肃地调院 第三地质矿产调查院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 东喜马拉雅构造结一带断续分布的直白高压麻粒岩, 是一套相当于下地壳根带深度形成的高压麻粒岩相岩石。该麻粒岩相地体归属印度大陆东北端, 是世界上最年轻的麻粒岩相岩石之一, 其变质作用与印度大陆与欧亚大陆之间碰撞过程中发生的陆内俯冲作用有关。对于高压麻粒岩的形成机制及折返过程一直是人们研究和关注的焦点。本文在 1:25 万墨脱幅区域地质调查项目的研究结果的基础上, 依据高压麻粒岩相岩石出露的大地构造背景, 讨论了与之有关的若干问题, 并提出适合该区的高压麻粒岩的形成机制和折返过程的新认识。

**关键词:** 东喜马拉雅构造结; 高压麻粒岩; 形成机制; 折返过程; 西藏

中图分类号: P588.3

文献标识码: A

## 1 概述

从西藏米林县鲁霞经派乡到西兴拉, 在雅鲁藏布江的东侧或东南侧出露有高压麻粒岩相岩石, 其主要分布在直白岩组中。除直白岩组外, 还有多雄拉混合岩和派乡岩组, 三者以韧性剪切带的形式呈构造接触, 这套高压麻粒岩相岩石的组合出露的面积约为 379.1 km<sup>2</sup>, 其总体走向与区域片麻岩的产状一致, 总体走向为北东-南西向<sup>[1]</sup> (图 1)。

高压麻粒岩作为退变质作用的残留体呈构造透镜体状产于直白岩组中, 规模从数厘米到数十米不等。高压麻粒岩的岩石类型有石榴单斜辉石岩、石榴蓝晶高压麻粒岩, 与围岩以糜棱岩带相接触; 围岩有角闪黑云二长片麻岩、夕线黑云二长片麻岩、二

长浅粒岩、含石榴黑云母变粒岩、花岗片麻岩、黑云母片麻岩等。岩石中混合岩化现象比较发育, 且有韧性剪切现象。在透镜体的中心, 变形很弱, 片理不发育, 向透镜体的外围, 片理化明显加强, 矿物定向排列, 并且在边部出现混合岩化的细条带。

## 2 高压麻粒岩特征

### 2.1 岩石学、矿物学特征

该区的高压麻粒岩岩石类型主要有石榴蓝晶高压麻粒岩和石榴单斜辉石岩两种。

#### 1. 石榴蓝晶高压麻粒岩

石榴蓝晶高压麻粒岩为斑状变晶结构, 片麻状构造。变斑晶主要为石榴子石、蓝晶石, 其中石榴子石变斑晶最大直径大于 6cm, 一般为 1~10mm。石

收稿日期: 2004-07-15

第一作者简介: 孙志明, 1968年生, 男, 副研究员, 从事岩石学、构造学及区域地质调查工作。  
资助项目: 中国地质调查局“1:25万《墨脱县幅》区域地质调查”。

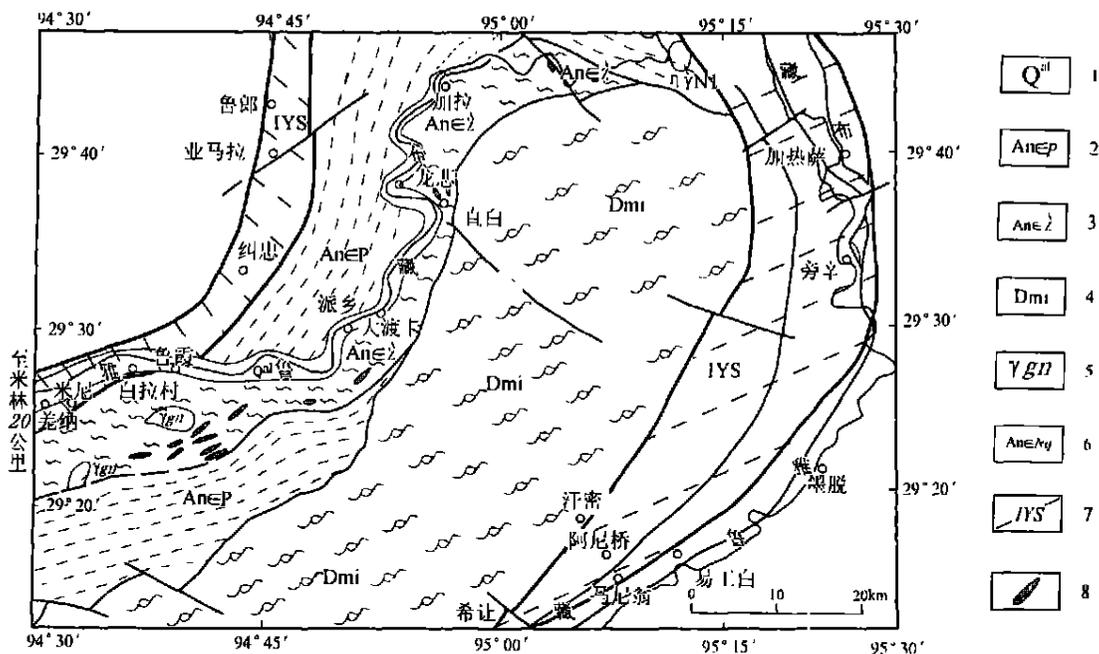


图1 南迦巴瓦岩群及高压麻粒岩分布图

1. 第四系; 2. 派乡岩组; 3. 直白岩组; 4. 多雄拉岩组; 5. 花岗质片麻岩体; 6. 念青唐古拉岩群; 7. 雅鲁藏布江蛇绿岩带; 8. 高压麻粒岩透镜体

Fig. 1 Distribution of the high-pressure granulite and Namjagbarwa Group Complex

1= Quaternary; 2= Paixiang Formation Complex; 3= Zhibai Formation Complex; 4= Duoxiongla Formation Complex; 5= granitic gneiss mass; 6= Nyainqentanglha Group Complex; 7= Yarlung Zangbo ophiolite zone; 8= high-pressure granulite lense

榴子石变斑晶内有大量包裹物, 如黑云母、金红石、钛铁矿、长石、蓝晶石、石英等, 构成筛状变晶结构, 有较干净的环边。

根据显微镜下石榴蓝晶石高压麻粒岩的矿物反应关系及岩相学特点, 主要可识别出早、中、晚3期变质矿物组合。第1期变质矿物组合(M1)为白云母、黑云母、长石、石英等, 呈包裹体残留在蓝晶石、石榴子石变斑晶矿物中; 第2期变质矿物组合(M2)为石榴子石、蓝晶石、微晶碱性条纹长石及反条纹长石、金红石及石英等变斑晶矿物, 它们代表峰期阶段的变质矿物组合; 第3期变质矿物组合(M3)为夕线石、黑云母、斜方辉石、尖晶石、钛铁矿、斜长石等, 呈后成合晶矿物出现在峰期矿物的周围。板状蓝晶石部分或完全被毛发状夕线石取代, 但仍保存有蓝晶石的板状晶形。

2. 石榴单斜辉石岩

石榴单斜辉石岩常呈红褐色、灰黑色, 呈透镜体或团块状产出于石榴黑云斜长片麻岩中。透镜体及岩片的展布方向与区域片麻理一致。透镜体多为椭

球状, 长宽比大于2, 长度为50cm到数米不等, 透镜体的核部变形较弱, 向边部增强, 矿物定向显示片理。同时角闪岩化退变质也向边部增强。另外由于混合岩化作用的影响, 石榴单斜辉石岩透镜体中也可见有混合岩化的长英质条带, 条带的定向与透镜体的排列方向一致。

岩石矿物晶体较粗大, 为中粗粒粒状变晶结构, 多为1~2mm不等。石榴子石可达3~8mm, 块状-微定向构造。主要矿物成分为角闪石及石榴子石, 有的含有透辉石, 含量70%~90%以上。次要矿物为黑云母、石英、斜长石等。角闪石为柱状, 具浅棕色-棕色的多色性, 斜消光,  $C \wedge Ng = 15^\circ \sim 25^\circ$ 。石榴子石多为圆粒状, 裂理比较发育, 内部常有较多的石英小圆粒的包体, 形成筛状变晶结构, 在石榴子石外围有一圈由斜长石、角闪石组成的次生边或冠状边(白眼圈)结晶细小, 呈蠕虫状, 放射状, 与石榴石接触也相垂直分布, 再向外是由角闪石、黑云母环绕, 包围形成眼球状构造。斜长石多与角闪石连生, 出现于石榴子石外围, 可见钠式双晶, 但不完整。当

退变质作用加强时,白眼圈增宽,核部石榴子石变小,以至全部为钙长石和角闪石取代而形成圆形的白斑。退变质作用强烈时,角闪石可完全取代辉石。这样,石榴单斜辉石岩经退变质作用以后形成石榴斜长角闪岩甚至形成斜长角闪岩。

高压基性麻粒岩保留了多期的变质矿物的组合,这些组合表明它们经历了复杂的变质动力学过程。

早期的高压麻粒岩相变质阶段是由石榴子石变斑晶及其中的包裹体矿物代表的,其共生矿物组合是单斜辉石+石榴子石+石英;在石榴子石的变斑晶中可见到有浑圆状的石英的细小包裹体,且可见有放射状的裂隙,表明经历了一个压力快速释放的过程。怀疑有柯石英存在的可能。

第二期中压的麻粒岩相变质是由石榴子石变斑晶周围的白色冠状的后生合晶为代表,矿物组合是细粒的单斜辉石+紫苏辉石+斜长石±角闪石(褐色)。

第三期矿物组合是角闪石(褐色)+斜长石,它们交代或全部交代第二期矿物组合,当交代强烈时,麻粒岩矿物组合可完全转变成斜长角闪岩。

3个变质作用的阶段显示了由高压麻粒岩相首先经过了一个降压(近等温)的过程,然后变为降温降压的地质过程。表明高压麻粒岩演化的一个历程。

## 2.2 岩石地球化学特征

对于高压麻粒岩的岩石地球化学特征有另文详述,这里需指出的是,这套高压麻粒岩应该隶属于印度板块的一部分,在印度板块和欧亚板块的碰撞过程中,俯冲到地下约50km。根据原岩性质、岩石组合特征,并结合岩石化学、地球化学特征研究表明,直白含高压麻粒岩片麻岩这套岩石组合的有原岩可以划分出以下的几套沉积建造:

(1)以夕线石榴蓝晶黑云片麻岩为主的岩石组合,其原岩代表一套成熟度较高的细砂岩—泥质岩组合,夹有少量的火山岩及碳酸岩,其原岩为陆源的细碎屑岩—泥质岩建造,形成于较稳定的沉积环境。

(2)以石榴单斜辉石岩、石榴角闪岩等为代表的岩石组合,其原岩代表了一种泥质灰岩或不纯的灰岩的一种沉积建造。

(3)以厚层大理岩、含石墨大理岩、透闪透辉岩、黑云变粒岩、透辉方柱岩等钙硅酸盐岩等的组合,代

表了一种半稳定的广海浅海的沉积环境。

(4)部分斜长角闪岩、透辉岩的原岩表明它们的原岩代表了一种大陆拉斑玄武岩,为火山成因。

因此,推测当时的环境为一种相对较稳定的沉积环境之下的一种复理石或类复理石的沉积建造,并由于构造作用,在地壳的深部发育了大陆拉斑玄武岩(可能是相当于裂谷环境)。

## 2.3 高压麻粒岩形成的温压条件

根据蓝晶石高压麻粒岩和石榴单斜辉石岩中的常见的共生矿物组合的特点,笔者采用Gt-Bi、Gt-Opx、Gt-Cpx、Gt-Pl-Sill(Ky)-Qz等地质温压计来估算各阶段变质作用的温度和压力条件。该区早期(M1)变质作用阶段的温度为614~800℃之间,压力为0.48~0.93GPa;区内高压麻粒岩相岩石的峰期矿物组合(M2)形成时,温度为850℃,压力为1.65~1.8GPa;退变质矿物组合(M3)反映出温度为621~726℃,压力为0.6~0.7GPa;变质作用后期的温度为660~792℃,而压力小于0.5GPa。

## 2.4 同位素年代学研究

年代学问题是探讨地质构造演化的关键性问题之一,对于深变质岩而言同位素年代学是唯一确定年代的方法,同位素年代学方法研究高压麻粒岩带的变质作用过程及时代,为研究印度板块的基底和印度板块与欧亚板块大陆碰撞模式的建立提供了确切的证据。

国内外的一些地质学家对南迦巴瓦岩群的年代学进行过一些研究<sup>[2~5]</sup>。这些研究大多侧重于高压麻粒岩<sup>[6~10]</sup>和新生代以来的隆升<sup>[11,12]</sup>等方面的有关问题,已开展的有关同位素年代学方面的研究也同样侧重于新生代。本次调查研究主要针对变质岩的原岩年龄及变质作用的年代进行了研究。

### 1. 原岩时代及前寒武纪变质事件

本次研究在南迦巴瓦岩群直白岩组中与高压麻粒岩相伴生的角闪岩透镜体中获得了角闪石的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar坪年龄(表1,图2)为575.20±5.24Ma,等时线年龄为582±11.24Ma。该年龄为角闪石的冷却变质年龄。样品Mv(01)T-56采集于派乡转运站,岩性为斜长角闪岩。岩石呈透镜状产于黑云斜长片麻岩中,规模大约15cm×35cm,长轴走向与围岩中的片麻理平行,片麻理倾向305°—310°、倾角30°—40°。所采样品位于透镜体的核部,角闪石含量高达65%~70%。

表 1 直白岩组中角闪石<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 阶段性升温测年数据Table 1 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age determinations with the increase of temperatures during different phases for the hornblende from the Zhibai Formation Complex

温度/°C	<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	<sup>39</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	<sup>37</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	( <sup>40</sup> Ar <sub>放</sub> / <sup>39</sup> Ar <sub>K</sub> )校	<sup>39</sup> Ar/ 10 <sup>-12</sup> mol	<sup>39</sup> Ar/ %	( <sup>40</sup> Ar <sub>放</sub> / <sup>39</sup> Ar <sub>总</sub> )/ %	年龄/ Ma	误差/ Ma
500	622.2889	11.832354	20.10860	30.7081	0.024	0.98	55.86	524.88	40.36
700	736.1244	15.200756	3.66918	29.5840	0.183	7.56	60.52	508.13	8.10
850	798.5716	15.131555	1.48104	33.5022	0.266	11.13	63.24	565.85	6.79
950	763.2741	13.433349	1.76293	35.1235	0.379	15.70	61.55	589.20	6.16
1050	769.3061	13.877757	1.67385	34.4275	0.465	19.24	61.85	579.21	5.38
1100	739.1083	12.686304	1.12930	35.1582	0.666	27.56	60.18	589.70	5.45
1150	769.1324	14.141423	2.34145	33.8914	0.335	13.88	61.96	571.48	7.65
1250	775.9868	14.324590	5.34297	34.4604	0.073	3.02	62.79	579.68	25.54
1350	757.2136	13.700247	7.97973	35.0634	0.025	1.04	62.25	588.34	82.56

测试单位: 桂林地质矿产研究所; 样品号: Mv(01) T-56

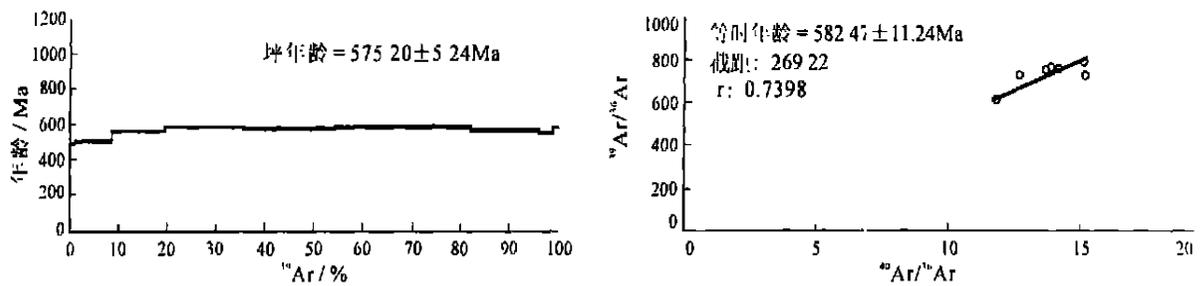


图 2 角闪石的坪年龄谱图和等时线图

Fig. 2 Plateau age spectrum and isochron diagram for the hornblende from the Zhibai Formation Complex

章振根等(1992)用 Rb-Sr 全岩等时线法测得的年龄值为  $749.38 \pm 37.22$  Ma, 另两组全岩 Rb-Sr 法等时线年龄为  $961 \pm 157$  Ma、 $1064 \pm 82$  Ma (表 2)。样品 98N40 所代表的片麻状花岗岩的侵位年代为  $553 \sim 522$  Ma; 样品 98N10 中的锆石碎屑锆石, 年龄为  $1312 \pm 6$  Ma (表 2), 代表了所以南迦巴瓦岩群的原岩年龄。

在丹娘花岗质片麻岩中获得的锆石 U-Pb 年龄为  $552 \sim 525$  Ma (潘桂棠等, 2004), 进一步证实了在高喜马拉雅结晶岩系中  $600 \sim 500$  Ma 的侵入岩的普遍存在, 但在高喜马拉雅结晶岩系中还未获得过老于喜马拉雅期的变质年龄。因此, 高喜马拉雅结晶岩系是否经历过早于喜马拉雅期的变质作用仍是一个谜。本次研究获得的角闪石冷却变质年龄表明, 南迦巴瓦岩群经历过泛非运动并发生了变质程度达角闪岩相的变质作用。

## 2. 喜马拉雅期变质事件

目前, 大多研究者认为高压麻粒岩是印度板块和欧亚板块的碰撞产物, 其形成时代晚于碰撞时代,

对其变质作用过程的研究可以反映喜马拉雅运动的特征。从一些同位素年龄的结果(表 3) 可以看出, 该区的高压麻粒岩的年龄主要集中于  $69 \sim 45$  Ma, 表明其为变质高峰期的年龄。而  $23 \sim 18$  Ma 是后期退变质组合产生的年龄。

Mv(01) T-109 为鲁霞米尼村含方柱石斜长角闪岩, 角闪石 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 为  $42.67 \pm 2.54$  Ma (表 3、表 4, 图 3), 表明其为碰撞后与高压麻粒同期的产物。

## 3. 隆升年龄

丁林等(1999)在该区的大量麻粒岩及花岗岩中磷灰石、锆石及榍石中所得的裂变径迹年龄分布在  $3 \sim 0.16$  Ma (表 5), 它们指示了退变质高压麻粒岩最后冷却抬出地表的年代。

## 3 变质作用期次及演化

根据变质岩石的变质作用的类型、变质相、变质相系及地层古生物资料, 以及同位素年龄资料并结合前人资料认为本区变质作用的时期总体上为喜马

表 2 南迦巴瓦地区前寒武纪变质岩同位素数据

Table 2 Isotope ages of the Precambrian metamorphic rocks in the Namjagbarwa area

序号	样品号	采样地点	岩石名称	采用的方法	年龄	数据来源
1		南迦巴瓦	片麻岩	全岩 Rb-Sr 法	749.38±37.22Ma	文献 <sup>[4]</sup>
1		大岩洞	斜长角闪岩	全岩 Rb-Sr 法	961±157Ma	1:20 万波密幅-通麦幅
2		西兴拉	斜长角闪岩	全岩 Rb-Sr 法	1064±82Ma	1:20 万波密幅-通麦幅
3	Mv(01)T-56	派乡	角闪岩透镜体	角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	575.20±5.24Ma	本次区调项目
4	98N40	丹娘	丹娘花岗质片麻岩	锆石 U-Pb	525-552Ma	潘桂棠等, 2004
5	98N	直白布弄隆	石榴蓝晶麻粒岩	锆石 U-Pb	1312±16Ma	潘桂棠等, 2004

表 3 南迦巴瓦地区喜马拉雅期变质岩同位素数据

Table 3 Isotope ages of the Himalayan metamorphic rocks in the Namjagbarwa area

序号	样品号	采样地点	岩石名称	方法	年龄/Ma	数据来源
1	94T69	多雄拉山口	角闪黑云花岗岩	角闪石 K-Ar 法	21.08±0.52 20.82±0.05	文献 <sup>[8]</sup>
2	Mv(01)T-109	鲁霞米尼村	含方柱石斜长角闪岩	角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	42.67±2.54	本次区调
3	MIII(00)I-5	派乡	石榴单斜辉石岩	辉石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	82.89~35.73	本次区调
4	95T146	直白	石榴蓝晶高压麻粒岩	锆石 U-Pb 法	44.5±4.93 60.9±1.95 65.69±1.53 68.57±1.7	文献 <sup>[8]</sup>
5	94T26	直白	石榴蓝晶高压麻粒岩	锆石 U-Pb 法	22.6±5.7	文献 <sup>[8]</sup>
6		直白	石榴单斜辉石高压麻粒岩	单斜辉石 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	64.56±1.29	文献 <sup>[8]</sup>
7		派乡一直白	石榴角闪花岗岩中	角闪石的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	坪年龄 17.5±0.3	文献 <sup>[8]</sup>

表 4 Mv(01)T-109 角闪石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  测试结果Table 4  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age determinations for the hornblende from the rock sample Mv(01)T-109

T/°C	$^{39}\text{Ar}/\%$	$^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	年龄/Ma	误差/Ma
500	0.84	80.40	472.52	1.87	47.05	4.24
700	2.12	92.75	484.92	1.92	44.12	1.75
850	7.24	143.56	588.23	0.66	41.49	0.55
950	13.92	177.04	668.39	0.38	42.18	0.34
1050	26.02	135.22	605.84	0.21	45.40	0.17
1100	29.31	157.85	618.93	0.19	40.59	0.19
1150	14.33	156.51	631.84	0.34	42.88	0.43
1250	5.27	150.99	604.58	0.72	41.80	1.21
1350	1.01	142.03	597.78	3.10	48.97	8.52

样品 Mv(01)T-109 由桂林地质矿产研究年测试。

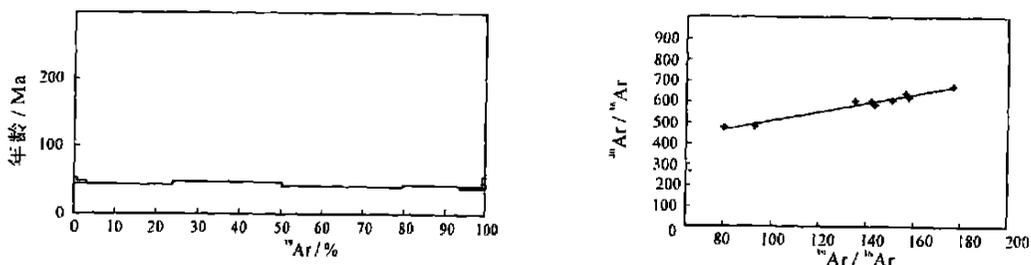
图 3 Mv(01)T-109 角闪石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法坪年龄和等时线年龄图Fig. 3  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Ar plateau age spectrum and isochron diagram for the hornblende from the rock sample Mv(01)T-109

表5 磷灰石、锆石、榍石裂变径迹年龄测定结果<sup>[8]</sup>

Table 5 Fission track ages of apatite, zircon and titanite (after Ding Lin et al., 1999)

采样位置	磷灰石	锆石	榍石
多雄拉山口	1.49±0.19	3.16±0.22	4.89
直白	1.32±0.32	2.94±0.20	
直白	0.16±0.04	1.10±0.09	1.34
直白	0.32±0.09	2.87±0.18	3.02

拉雅期, 结合同位素资料和镜下分析进一步划分为以下几期变质作用。

#### 1. 原岩形成的年龄

同位素年龄中可见有一组数据大致在 1312 ± 16Ma ~ 961 ± 157Ma 之间, 其应该代表该区原岩形成的时期为元古宙。

#### 2. 加里东期变质作用

在丹娘花岗质片麻岩中的锆石 U-Pb 值为 552 ~ 525Ma; 在派乡江对岸的角闪石岩中的角闪石的 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄值为 575.20 ± 5.24Ma, 其可能代表在加里东期有过一次变质作用, 代表了加里东期的造山运动。

#### 3. 喜马拉雅期变质作用

派乡附近的石榴单斜辉石岩的辉石的 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 法坪年龄为 82.89 ~ 35.73Ma, 这种石榴单斜辉石岩在 82.89Ma 附近有一个小的坪, 表明在这个年龄段有一个热扰动, 可能代表喜马拉雅期的造山运动开始的时间。石榴蓝晶高压麻粒岩锆石 U/Pb 年龄为 44.5 ± 4.93Ma、60.9 ± 1.95Ma、65.69 ± 1.53Ma 和 68.57 ± 1.7Ma; 石榴单斜辉石岩中的单斜辉石的 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 坪年龄也给出了其高峰变质组合的年龄为 64.56 ± 1.29Ma, 表明 69 ~ 45Ma 为研究区高峰变质矿物组合产生的年龄<sup>[8]</sup>; 这种年龄值的是在没有后期的退变或原始的的高压麻粒岩的矿物组合保持比较完全的前提下测得的, 因此具有很高的可信度。在本次区调填图中鲁霞附近的斜长角闪岩中角闪石 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 坪及等时线年龄为 42.67 ± 2.54Ma, 派乡附近的石榴单斜辉石岩辉石的 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 法坪年龄 82.89 ~ 35.73Ma, 表明高压麻粒岩形成的年龄。

#### 4. 后期退变的年龄

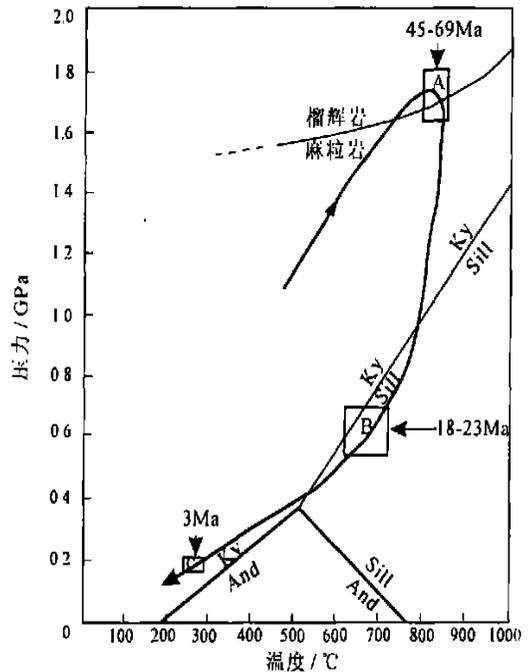
在石榴蓝晶石片麻岩中的退变质组合中得到的年龄为 22.6 ± 5.7Ma, 石榴角闪花岗岩中角闪石的 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 坪年龄为 17.5 ± 0.3Ma<sup>[8]</sup>, 表明 23 ~ 18Ma 这组年龄是后期退变质矿物组合产生的年龄;

而在多雄拉的混合岩中存在一组约为 6Ma 的数据, 表明其为该区大规模混合岩化产生的大体时间(潘桂棠, 2004)。

#### 5. 抬出地表的年龄

在大量麻粒岩及花岗岩中的磷灰石、锆石及榍石的裂变径迹年龄分布在 3 ~ 0.16Ma, 指示了退变质高压麻粒岩最后冷却抬出地表的年龄<sup>[8]</sup>。

根据变质作用的温压条件及同位素年龄大致可以将该区的演化的 *p-t-T* 轨迹表示于图 4 中。表明该区经历了一个快速升压后又快速减压的过程。

图4 黑脱幅南迦巴瓦岩群 *p-t-T* 轨迹Fig. 4 *p-t-T* paths for the evolution of the Namjagarwa Group Complex

## 4 高压麻粒岩形成及折返机制

该区高压麻粒岩变质峰期的温度、压力平均为 850 °C 和 1.7GPa, 相当于 60km 左右的深度。高压麻粒岩峰期的温压条件说明该区高压麻粒岩形成于一个构造增厚的环境中, 它的形成与印度板块的俯冲有关。高压麻粒岩形成年龄为 69 ~ 45Ma<sup>[8]</sup>。根据其产出部位、边界条件、峰期变质温压条件以及形成的时代, 推测它们是在陆内俯冲作用的产物。根据该年龄值和目前印度板块向北方向的移动速率 (5cm/y), 假设碰撞后印度板块沿雅鲁藏布江缝合带向冈底斯岩浆弧下的俯冲角度为 10° 左右<sup>[13]</sup>, 20Ma 以来的缩短量主要被 MCT (主中央断裂) 和

MBT(主边界断裂)所吸收以及高压麻粒岩形成深度(60km)进行推算,测区印度板块和欧亚板块的碰撞时代至少应为75Ma。

南迦巴瓦岩群中的混合岩化现象非常普遍,大量发育的淡色岩脉同剥离作用有着密切的联系。它们是原有的变质岩在压力快速降低而温度变化不大的情况下部分熔融的产物。条带状混合岩的主要矿物有:石英+长石+黑云母,常含少量角闪石,白云母少见,偶尔有夕线石、石榴子石产出。这些组合表明它们的结晶条件为:温度大于600℃,压力大于0.8GPa。Burg等(1997)通过对这些混合岩中淡色条带和暗色残留体之间的相互接触关系进行研究后认为,淡色条带形成时的原始产状近于水平<sup>[12]</sup>。淡色条带中磷钇矿的U/Pb年龄为3.9~3.3Ma。尽管磷钇矿的结晶温度变比较大400~700℃(Franz等,1996),笔者仍假定该年龄值代表部分熔融作用所形成的岩浆冷却至700℃时的年龄。结合裂变径迹资料,Burg等(1997)从混合岩中推测其剥露速率:3.5~3.2Ma时为10mm/y,2.2Ma以来为3~5mm/y。在研究区中多次见有后期的岩脉侵入到这套混合片麻岩中,表明在混合岩化作用后还有更晚期的岩浆活动事件。Zeitler(2001)在多雄拉混合岩中测得的锆石年龄为4.1Ma。

本次调查在普遍塑性变形的南迦巴瓦变质岩系中有两种未变形折后期岩浆作用所形成的脉岩,一种是电气石+石英+长石+少量的白云母所组成的淡色的花岗岩,一种是辉石+斜长石所形成的辉映绿岩。淡色花岗岩脉肯定是地壳物质部分熔融的产物而辉映绿岩只能是幔源的。辉映绿岩的出现暗示,大拐弯地区可能存在规模不大的地幔柱的存在,这两种岩脉都未变形,说明其生成于第四纪;因为年龄值为3.5~3.2Ma的混合岩经历了变形且被这两种岩脉所穿插。淡色花岗岩脉中不含石榴子石、角闪石、黑云母,因此形成温度、压力都大大地低于混合岩。综上所述,76Ma时,印度板块和欧亚板块在研究区发生碰撞;印度板块沿雅鲁藏布缝合带往冈底斯岩浆弧下俯冲,69Ma时南迦巴瓦岩群位于60km深处,形成高压麻粒岩。印度板块与欧亚板块碰撞后,随着印度板块前缘特提斯喜马拉雅带的进一步俯冲,越来越大的浮力作用必将阻碍印度板块大陆的进一步下插,同时,由于部分熔融作用和榴辉岩化作用,俯冲到欧亚大陆下冷而重的大洋岩石圈的比重也越来越大,俯冲陆壳板片在越来越强大的上部浮力和下部重力的作用下最终将发生断离(Break-off),较

轻的俯冲陆壳部分将迅速回返到中上地壳部位,大洋岩石圈的断离同时也将引起地幔的上隆,并造成幔源岩浆的侵入。同时,这些岩浆的垫板作用将引起地壳的部分熔融。22.6±5.7Ma时,MCD、STD(该断裂在深处同雅鲁藏布江结合带相汇合)开始活动,藏南及喜马拉雅地区在25~22Ma间发生大规模的拆离正断作用,使高喜马拉雅结晶岩系快速抬升。加拉白里-南迦巴瓦变质岩系沿这两个断裂不断地向地表折返。4Ma时伸展活动强烈,南迦巴瓦变质岩系加速向地表折返并发生部分熔融形成混合岩。第四纪以来,大拐弯地区仍有岩浆活动,表明可能有规模不大的地幔热柱存在并形成底劈成因的辉绿岩。

## 5 总结及问题的提出

(1) 该区高压麻粒岩形成于一个构造增厚的环境中,它的形成与印度板块的俯冲有关。82.89Ma可能代表印度板块与欧亚板块开始碰撞的时间。

(2) 该区高压麻粒岩折返的机制主要是由于上部浮力和下部重力的共同作用下发生大规模的拆离正断作用,使高喜马拉雅结晶岩系快速抬升。25~22Ma开始隆升。

(3) 6Ma该区的快速抬升,由于压力骤减,因而大规模的混合岩产生。

(4) 3~0.16Ma指示了退变质高压麻粒岩最后冷却抬出地表的年龄。

在这次地质调查中,由于大量的锆石测年样无法按时完成,因此对研究区的进一步研究受到极大的限制,无法对高压麻粒岩的形成及演化提供更充分的依据,有待进一步工作。

## 参考文献:

- [1] 孙志明,耿全如,楼雄英,等.南迦巴瓦峰地区雅鲁藏布蛇绿混杂岩矿物学特征及时代[J].沉积与特提斯地质,2004,24(2):8-15.
- [2] 王天武,马瑞.西藏东南部南迦巴瓦地区变质作用特征[J].长春地质学院学报,1996,26(2):152-158.
- [3] 章振根.西藏南迦巴瓦峰地区的变质岩年代学研究[J].科学通报,1987,32(2):133-137.
- [4] 章振根,刘玉海,王天武,等.南迦巴瓦峰地区地质[M].北京:科学出版社,1992.
- [5] 郑锡澜,常崇法.雅鲁藏布江下游地区地质构造特征[J].地质科学,1979,(2):116-126.
- [6] 刘焰,钟大贵.东喜马拉雅地区高压麻粒岩岩石学研究及构造意义[J].地质科学,1998,33(3):267-281.

- [7] 钟大赉, 丁林. 西藏南迦巴瓦地区高压麻粒岩[J]. 科学通报, 1995, 40(14): 1343.
- [8] 丁林, 钟大赉. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义[J]. 中国科学(D 辑) 1999, 26(5): 385—397.
- [9] LIU Y, ZHONG D. Petrology of high-pressure granulites from the Eastern Himalayan syntaxis [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1997, 15(4): 451—466.
- [10] DING LIN, DALAI ZHONG, AN YIN et al. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 192: 423—438.
- [11] 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹[J]. 科学通报, 1995, 40(16): 1497. (5): 385—397.
- [12] BURG J-P, PHILIPPE DAVY, PETER et al. Exhumation during crustal folding in the Namche-Barwa syntaxis [J]. Terra Nova, 1997, 9(2): 53—56.
- [13] 赵文津, K. D. 纳尔逊, 车敬凯, 等. 喜马拉雅地区深反射地震——揭示印度大陆北部岩石圈复杂结构[J]. 地球学报, 1996, 17(2): 138—152.

## Genetic mechanisms and exhumation processes of the high-pressure granulites within the Eastern Himalayan syntaxis, Xizang

SUN Zhi-ming<sup>1</sup>, ZHENG Lai-lin<sup>1</sup>, GENG Quan-ru<sup>1</sup>, LI Sheng<sup>1</sup>, LIAO Guang-yu<sup>1</sup>, SHI Wen-li<sup>2</sup>, ZHANG Dong<sup>2</sup>

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China; 2. Gansu Institute of Geological Survey, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** The Zhibai Formation Complex high-pressure granulites within the Eastern Himalayan syntaxis are a succession of high-pressure granulites as the youngest granulites in the world formed at the lower crustal root zones. Tectonically these granulites are assigned to the northeastern part of the Indian continent in a tectonically thickening setting and their metamorphism may be related to the intracontinental subduction during the collision between the Indian and Eurasian continents. The exhumation mechanisms of the granulites may be owed to the rapid uplifting of the Higher Himalayan crystalline rock series caused by large-scale detachment and normal faulting due to the combination of the upper flotation and lower gravitational processes.

**Key words:** Eastern Himalayan syntaxis; high-pressure granulite; genetic mechanism; exhumation process; Xizang