

# 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦群高压麻粒岩中含石榴石花岗岩脉锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其与折返作用\*

戚学祥<sup>1</sup> 李化启<sup>1</sup> 李天福<sup>1</sup> 蔡志慧<sup>1</sup> 于春林<sup>2</sup>

QI XueXiang<sup>1</sup>, LI HuaQi<sup>1</sup>, LI TianFu<sup>1</sup>, CAI ZhiHui<sup>1</sup> and YU ChunLin<sup>2</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037

2. 北京市地质矿产勘查局, 北京 100050

1. Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources; Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Beijing Bureau of Geological and Mineral Survey Exploration and Development, Beijing 100050, China

2009-08-08 收稿, 2010-01-11 改回.

Qi XX, Li HQ, Li TF, Cai ZH and Yu CL. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating for garnet-rich granite veins in high-pressure granulites from the Namche Barwa complex, eastern syntaxis of the Himalayas, and the relationship with exhumation. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3):975–984

**Abstract** The Namche Barwa complex, located at the core of the eastern syntaxis of the Himalayan orogenic belt, has been subjected to the high-pressure granulite-grade metamorphism, amphibolite-grade retrogressive metamorphism and migmatization, and is the metamorphic rocks with high-pressure granulite lens or interlens. The major and trace element data of the garnet-rich granite in the retrogressive granulite show that (1) they are high potassium, aluminum-rich; (2) they are strongly enriched in LREE with high fractional degree, depleted in HREE, and enriched in LILE and RHE relative to primordial mantle; (3) they have substantial negative Eu anomalies, and Rb/Sr > 1.4. The magmatic initial temperature are ranging from 792°C to 801°C estimated by the major data and Zr contents for garnet-rich granite, which is lower than the peak metamorphic temperature (850°C). The zircon SHRIMP U-Pb dating show that (1) the ages for the inherited cores are ranging from 519Ma to 525Ma, exhibit the Namche Barwa complex rocks had been influenced in the pan-African movement; (2) the latest growth rim of zircon grains have three stage ages of 39~44Ma, 24~25Ma and 7.3Ma, the first is the forming time of garnet-rich granite veins, the second shows the following MCT and STDS tectonic event in later Oligocene, and the last indicates the tectonic-surficial feedback information in later Miocene. To sum up, the garnet-rich granite veins in the retrogressive granulite are high-K, peraluminous calc-alkaline granite, formed by fluid-absent partial melting of the lower crust under the condition of isothermally decompression during rapid exhumation of the Namche Barwa complex, and the exhumation of Namche Barwa complex followed on the heel of the peak metamorphism. The garnet-rich granite had been changed during the movement of STDS and MCT, and tectonic-surficial feedback.

**Key words** Garnet-rich granite; Zircon SHRIMP U-Pb dating; Namche Barwa complex; Eastern syntaxis

**摘要** 东喜马拉雅构造结核部的南迦巴瓦群是经历了高压麻粒岩相峰期变质、角闪岩相退变质和强烈混合岩化作用形成的以含有高压麻粒岩透镜体或夹层为特色的变质岩组合。地质地球化学研究表明产于退变质高压麻粒岩中的含石榴石花岗岩脉具有高钾、富铝、轻稀土强烈富集、分馏程度很高、重稀土相对亏损、Eu 强烈亏损、大离子亲石元素及放射性元素相对原始地幔值强烈富集、Rb/Sr > 1.4 的特征。利用花岗岩的主要成分及锆的含量估算的岩浆初始温度为 792~801°C, 略低于南迦巴瓦群的峰期变质温度 850°C。锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果显示锆石核部年龄集中在 519~525Ma 之间, 揭示出印度地块经历泛非期构造运动改造的痕迹。锆石边部主要存在 39~44Ma, 24~25Ma 和 7.3Ma 三个年龄段, 前者代表了花岗岩浆的侵位时代, 第二个年龄段是对 MCT 和 STDS 构造热事件改造的反映, 后者揭示出构造-浅表反馈作用的信息。说明含石榴石花岗岩

\* 本文受中国地质调查局项目(1212010918009)、科技部深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-05-03)和中国地质科学院实验室基金联合资助。

第一作者简介: 戚学祥, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 主要从事构造与成矿方面的研究, E-mail: qxue2005@163.com

脉是在南迦巴瓦群折返过程中近等温降压条件下地壳岩石发生“干”深熔作用形成的高钾过铝质钙碱性花岗岩,以及南迦巴瓦群在经历峰期变质作用后很快就开始折返,并在后碰撞过程中经历了藏南拆离系(STDS)和主中央冲断带(MCT)构造事件及后期构造-浅表反馈作用的影响。

**Key words** 含石榴石花岗岩;锆石 SHRIMP U-Pb 定年;南迦巴瓦群;东构造结

**中图法分类号** P588.121;P597.3

喜马拉雅造山带是新生代以来印度板块与欧亚大陆发生碰撞形成的绵延2000km、平均海拔在4000~5000m、走向近东西、中部向南弯曲、两端分别向北凸出的弧形构造带,北以雅鲁藏布缝合带与拉萨地块相邻,南以前锋冲断带与印度克拉通为界(Burchfiel *et al.*, 1992; Yin and Harrison, 2000)。造山带两端向北凸出、构造线由近东西向突然转向近南北的倒“U”形区分别构成东构造结和西构造结,它们不仅和整个喜马拉雅造山带一样经历了新特提斯洋俯冲、印度板块与欧亚大陆的俯冲碰撞、隆升、拆离等一系列大规模构造运动,而

且是整个造山带中构造变形最强烈、隆升和剥蚀速率最快、新生代深熔作用和岩浆活动最活跃的地区(Ding *et al.*, 2001; Booth *et al.*, 2004; 郑来林等, 2004; 孙志明等, 2004; 戚学祥等, 2008; Seward and Burg, 2008)。

喜马拉雅东构造结和西构造结一样由印度板块构成构造结的核部、向外依次为雅鲁藏布缝合带和拉萨地块三个构造单元组成,不同构造单元之间以规模不等的韧性剪切带为界(许志琴等, 2008),并围绕印度板块向北突出的楔形体作马蹄形弯曲(图1)。1/25万的地质填图

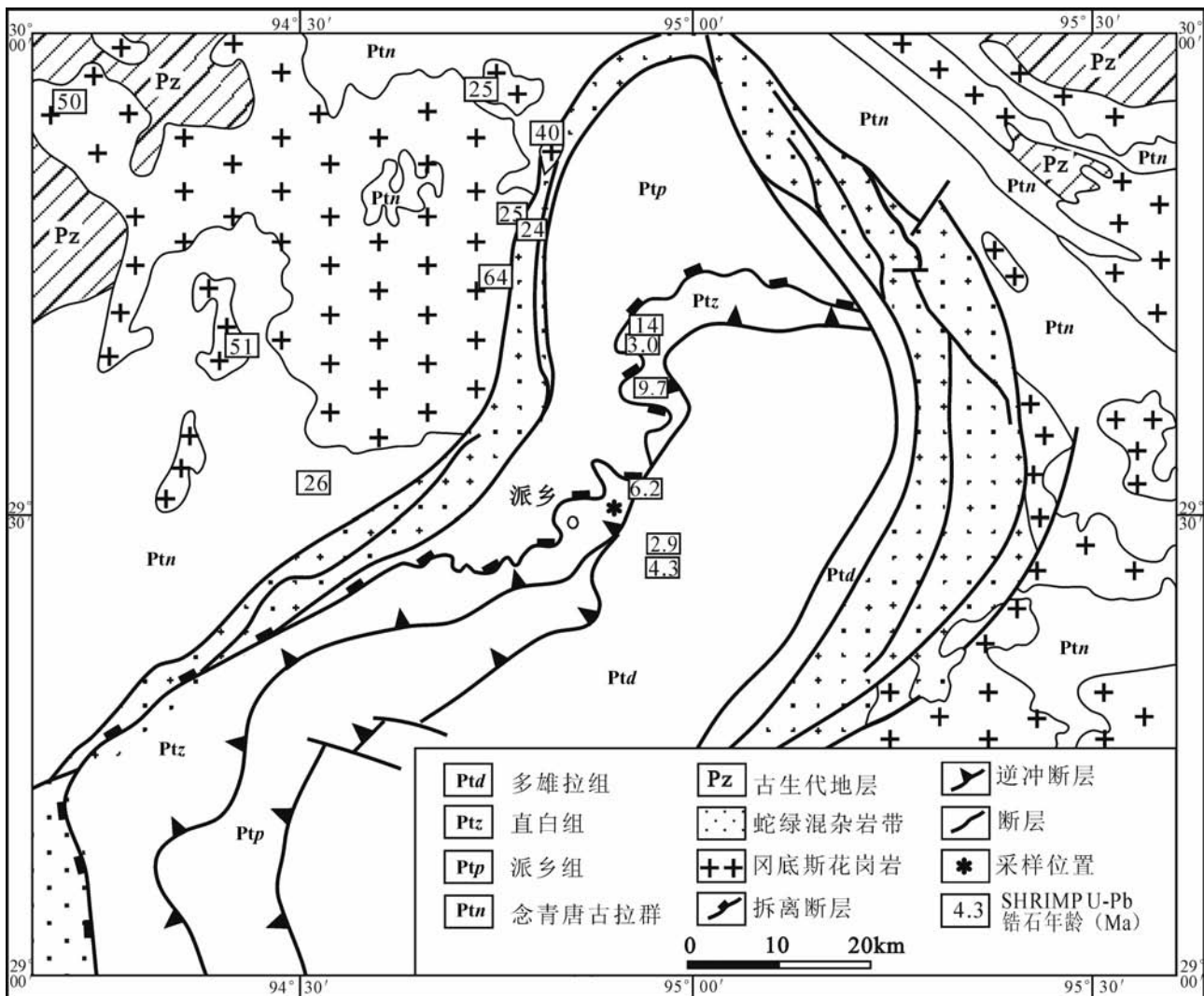


图1 喜马拉雅东构造结地质构造略图(据孙志明等, 2004; Booth *et al.*, 2004; 许志琴等, 2008 修编)

Fig. 1 Tectonic sketch map of the eastern syntaxis of the Himalayas (Recompiled after Sun *et al.*, 2004; Booth *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2008)

(郑来林等,2003<sup>①</sup>)及前期研究从宏观上勾勒出该区的构造轮廓,初步查明了在构成东喜马拉雅构造结三个构造单元中都广泛发育不同时代和规模的花岗岩体(脉)及印度地块内南迦巴瓦群变质岩中高压麻粒岩的时、空分布。其中,东构造结边部的拉萨地块南缘经历了~120Ma、40~70Ma两次大规模岩浆活动,构成冈底斯花岗岩带的一部分,在雅鲁藏布缝合带中的花岗岩以小规模的岩床(墙)为主,形成时代集中于18~25Ma,而在印度地块中则以发育于片麻岩中宽几厘米~几米的花岗岩脉为主,形成时代多小于14Ma(Ding *et al.*, 2001; Booth *et al.*, 2004; Seward and Burg, 2008)。高压麻粒岩的峰期变质年龄在45~69Ma之间,退变质年龄18~23Ma(丁林和钟大赉,1999;孙志明等,2004)。总体来看,前人已从构造运动、岩浆活动和变质作用等方面对东喜马拉雅构造结进行了初步研究,但对含高压麻粒岩南迦巴瓦群的起始折返时限未给予应有的关注。为此,本文将在前人研究的基础上对产于高压麻粒岩中含石榴石花岗岩脉的形成时代和构造环境进行研究,探讨其形成与高压麻粒岩折返的关系。

## 1 地质概况

东喜马拉雅构造结的主要构造单元-印度地块仅有高喜马拉雅结晶岩系组成,在1/25万地质图中称为南迦巴瓦群,缺失特提斯喜马拉雅沉积岩系。根据原岩建造、变质程度和变质样式的不同将南迦巴瓦群分为多雄拉组、直白组和派乡组(郑来林等,2004),其间以韧性剪切带为界(图1)。

多雄拉组分布于印度地块中部,主要由条带状、眼球状混合岩和混合片麻岩组成。其中,混合岩岩性较均一,由基体和新生的长英质脉体两部分组成,基体通常为暗色条带或团块,其岩石类型为由长石、角闪石、黑云母、石英、石榴石组成的黑云斜长角闪岩和由夕线石、钾长石、石英、石榴石和斜长石组成的富铝质片麻岩条带;长英质条带呈脉状沿片麻理分布,一般宽度在0.5~5.0cm之间,个别可达50cm,延伸达5m,由钾长石、斜长石、石英、黑云母、夕线石和石榴石组成,形成时代为1.7~4.3Ma(Booth *et al.*, 2004; Seward and Burg, 2008)。

直白组分布于东构造结西部和北部雅鲁藏布江以东的派乡-直白-加拉一带,由富铝质片麻岩、花岗片麻岩和高压麻粒岩透镜体或夹层组成,经历了麻粒岩相变质和角闪岩相退变质作用,混合岩化明显。高压麻粒岩透镜体或夹层是直白组变质岩的特征性标志,规模从几厘米到几十米不等。由于退变质作用,麻粒岩透镜体多存在明显的分带现象,即在透镜体或夹层中心部位仍保留高压麻粒岩矿物组合,向外依次转变为中压麻粒岩相和角闪岩相矿物组合(钟大赉和丁林等,1995;孙志明等,2004;张泽明等,2007),高压麻粒岩峰期变质作用形成于890℃,1.8GPa(Liu and Zhong, 1997)或750~850℃,1.4~1.8GPa(Ding *et al.*, 2001;郑来林等,2004;孙

志明等,2004),形成时代为69~45Ma(丁林和钟大赉,1999;孙志明等,2004),退变质作用形成于621~726℃,0.6~0.7GPa(Ding *et al.*, 2001;郑来林等,2004;孙志明等,2004),形成时代为23~11Ma(Ding *et al.*, 2001,孙志明等,2004)。直白组混合岩化作用普遍存在,不论是在富铝质片麻岩和花岗质片麻岩中还是在高压麻粒岩中都发育宽0.5~80cm,长达几米或十几米的长英质脉。前人研究表明片麻岩中长英质脉体的形成时代为1.5~14Ma(Burg *et al.*, 1997; Booth *et al.*, 2004; Seward and Burg, 2008)。

派乡组展布于雅鲁藏布缝合带南东,直白组北西地带,位于直白组之上,其间以向北西倾斜的韧性剪切带为界。主要岩石类型为黑云片岩、黑云斜长片麻岩、大理岩和石英岩等,未见高压麻粒岩出露,变质程度在高角闪岩相和低角闪岩相之间,具有从下往上逐渐降低的趋势。岩石中可见石榴石、蓝晶石、夕线石等富铝矿物,展示其原岩可能属泥质岩类。

雅鲁藏布缝合带为一条蛇绿混杂岩带,呈连续的弧形冠状展布于南迦巴瓦群与拉萨地块之间,其两侧边界都为向印度地块外侧倾斜的韧性剪切带(图1)。主要由低角闪岩相的超基性岩、基性岩和石英岩、白云母石英片岩组成,夹有少量印度地块(南迦巴瓦群)或拉萨地块(念青唐古拉群)的外来岩块。

拉萨地块位于东构造结外围,主要由冈底斯岩浆岩带的东延部分和念青唐古拉群角闪岩相变质岩组成。冈底斯岩浆岩带中的花岗岩主要形成于燕山期和喜山期,前者包括花岗闪长岩、英云闪长岩和少量的花岗岩;喜山期岩浆岩主要是微斜长石花岗岩、白云母花岗岩或二云母花岗岩、石榴石花岗岩,是印度板块与欧亚板块碰撞造山的产物(Booth *et al.*, 2004;张泽明等,2007)。

## 2 样品测试方法

锆石分选在河北省地质调查研究院完成。样品经常规的粉碎和重选,分选出纯度较高的锆石,然后在双目镜下经人工挑选出纯度在99%以上的锆石样品。用环氧树脂将锆石样品和标样固定成圆饼状,用不同型号砂纸和磨料将锆石磨去一半并抛光。然后在北京离子探针中心对抛光好的锆石进行阴极发光成像观察,查明锆石内部生长层的分布和结构。在此基础上,在北京离子探针中心网络虚拟实验室,通过SROS远程工作站,对澳大利亚Curtin科技大学离子探针开放实验室的高分辨率高灵敏度离子探针SHRIMP II仪器上的样品进行锆石U-Pb同位素定年测试。样品的Pb/U值是根据测量时标样的UO/U-Pb/U关系和样品的UO/U来标定的,样品中的U、Th和Pb含量是根据标样的Zr、U、Th含量

① 郑来林等. 2003. 1/25万墨脱县幅区域地质调查报告和地质图. 成都地质矿产研究所: 11-235

和测定的 Zr、U 和 Pb 值来校正的。测定的标样为 TEMORA 锆石,每测定 3 个点后插入一次标样测定,以便及时校正。岩石的常量元素、微量元素和稀土元素分析在国家地质实验测试中心完成。其中,常量元素是用 X-射线荧光光谱仪测定 (XRF),并用等离子光谱法进行验证;微量元素和稀土元素采用等离子质谱仪测定 (ICP-MS)。

### 3 岩石地球化学特征

直白组高压麻粒岩透镜体边部常发育不同规模的含石榴石花岗岩脉,它们呈脉状或层状产出,宽度一般在 5 ~ 20cm,长达几米~十几米,部分随麻粒岩一起变形形成规模不等的褶皱。本文研究的含石榴石花岗岩采自似层状高压麻粒岩边部,呈脉状产出,与退变高压麻粒岩互层,并发生弯曲,形成微型褶皱(图 2a)。脉体宽 10 ~ 25cm,具有明显的似斑状结构。斑晶由石榴石组成,基质有斜长石、钾长石、石英、黑云母,副矿物有榍石、磁铁矿、磷灰石和锆石等。石榴石斑晶呈他形-半自形粒状,粒度 1.2 ~ 2mm,含量约 15%,在石榴石内部有石英、锆石、方解石、磷灰石、石墨、黑云母和长石等矿物包裹体。此外,石榴石内还发育一组平行排列的裂隙(图 2b);石英呈他形粒状分布于石榴石颗粒间,在石英内部发育定向排列的裂纹(图 2c),波状消光,粒度 0.05 ~ 0.5mm,含量约 47%;钾长石与石英一起构成浅色似斑状花岗岩的基质,多数双晶不明显,少量出现格子双晶,在晶体表面发育近于平行排列的出溶条带(图 2d),粒度在 0.1 × 0.2 ~ 0.5 × 0.8mm 之间,含量约 15%;斜长石呈它形柱粒状,卡氏双晶发育,波状消光,粒度为 0.1 × 0.5 ~ 0.3 × 0.8mm,含量约 8%;岩石中存在两种黑云母:一种为解理清晰的半自形-它形片状体,个别存在膝褶现象(图 2e),粒度 0.05 × 0.25 ~ 0.1 × 0.5mm,含量约 8%,零星分布于基质中,部分相对集中定向分布于石榴石斑晶边部;另一种为解理不清晰、呈褐红色它形片状,粒度 0.05 × 0.1 ~ 0.5 × 0.3mm,主要呈零星状分布,少量呈团块状分布于石榴石斑晶边部、内部或裂隙中(图 2f),其形成时代晚于解理发育的黑云母,含量约 5%;副矿物呈星点状分布,含量约 2%。

化学分析结果(表 1)表明,高压麻粒岩中含石榴石花岗岩脉具有高硅(SiO<sub>2</sub> 为 71.8% ~ 73.7%)、低钠(Na<sub>2</sub>O : 1.3% ~ 1.8%)、高钾(K<sub>2</sub>O : 3.9% ~ 5.9%)的地球化学特征。在 AR-SiO<sub>2</sub> 图解上(图略)位于钙碱性岩区及里特曼指数小于 3.3,说明其属于钙碱性岩类;在 A/CNK-A/NK 图解上(图略)位于过铝质花岗岩区(表 1),展示出该岩脉为过铝质高钾钙碱性花岗岩。

花岗岩的 ΣREE 变化于 228.3 × 10<sup>-6</sup> ~ 248.3 × 10<sup>-6</sup>, LREE/HREE 在 4.7 ~ 7.8 之间,(La/Yb)<sub>N</sub> 在 4.01 ~ 9.72 之间,(Gd/Yb)<sub>N</sub> 为 0.95 ~ 2.01,δEu 为 0.30 ~ 0.34,δCe 为 0.98,展示出轻稀土强烈富集、分馏程度很高、重稀土相对亏损、分馏程度低、Eu 强烈亏损、Ce 无异常的特点。稀土元素

表 1 南迦巴瓦高压麻粒岩中含石榴石花岗岩脉和退变高压麻粒岩的常量元素(wt%)、稀土元素和微量元素(× 10<sup>-6</sup>)含量

Table 1 Chemical compositions of major (wt%) and trace elements(× 10<sup>-6</sup>) for garnet-rich granite and retrogressive high-pressure granulite in Namche Barwa complex

岩性	含石榴石花岗岩				退变高压麻粒岩	
样品号	06Q6-1	06Q6-2	06Q6-4	06Q6-5	06Q6-3.1	06Q6-3.2
SiO <sub>2</sub>	72.04	71.79	73.47	73.72	55.23	56.36
TiO <sub>2</sub>	0.42	0.46	0.42	0.42	1.35	1.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.76	12.92	12.55	12.28	14.38	14.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.47	0.55	0.33	0.38	1.64	1.70
FeO	3.36	3.54	2.94	2.78	8.93	8.51
MnO	0.10	0.10	0.07	0.07	0.18	0.17
MgO	0.78	1.09	0.93	0.95	5.40	4.94
CaO	2.08	2.32	2.56	2.46	7.80	6.94
Na <sub>2</sub> O	1.48	1.29	1.73	1.80	1.67	1.61
K <sub>2</sub> O	5.90	5.57	4.39	3.92	1.89	2.24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.12	0.08	0.08	0.19	0.24
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.34	0.10	0.44	0.38	1.08	1.10
CO <sub>2</sub>	0.21	0.21	0.21	0.21	0.12	0.21
LOI	0.09	0.05	0.12	0.19	0.25	0.26
Total	100.13	100.11	100.24	99.64	100.11	100.14
A/NK	1.45	1.58	1.65	1.70	3.00	2.81
A/CNK	1.01	1.04	1.02	1.05	0.76	0.80
AR	2.98	2.64	2.36	2.27	1.38	1.44
La	43.7	45.6	51.1	48.0	18.7	22.4
Ce	88.7	92.7	103.0	97.1	40.4	48.8
Pr	10.0	10.6	11.6	10.9	5.3	6.4
Nd	36.5	38.5	42.4	39.3	22.6	26.8
Sm	8.11	8.51	9.13	8.47	5.81	6.78
Eu	0.89	0.91	0.91	0.93	1.28	1.45
Gd	8.60	9.13	9.11	8.31	6.50	7.21
Tb	1.55	1.49	1.42	1.27	1.11	1.20
Dy	10.80	9.64	8.26	7.28	7.19	7.37
Ho	2.38	2.04	1.63	1.37	1.46	1.42
Er	7.48	6.10	4.61	3.85	4.27	4.08
Tm	1.13	0.88	0.62	0.51	0.61	0.57
Yb	7.34	5.52	3.98	3.33	4.04	3.67
Lu	1.09	0.80	0.57	0.48	0.60	0.55
ΣREE	228.3	232.4	248.3	231.1	119.9	138.7
LREE						
HREE	4.65	5.53	7.22	7.75	3.65	4.32
δEu	0.32	0.31	0.30	0.34	0.63	0.63
δCe	0.98	0.98	0.98	0.98	0.96	0.97
( $\frac{La}{Yb}$ ) <sub>N</sub>	4.01	5.57	8.66	9.72	3.12	4.11
( $\frac{Gd}{Yb}$ ) <sub>N</sub>	0.95	1.33	1.85	2.01	1.30	1.59
Sr	95.2	90.3	103	107	46.6	46.3
Rb	235	244	189	164	115	161
Ba	679	613	718	914	101	122
Th	32.6	35.7	39.5	42.5	6.4	8.6
Nb	12.1	10.8	9.0	9.0	15.0	19.1
Zr	198	179	167	166	142	187
Y	69.9	57.7	45.6	38.9	40.6	40.2
Yb	7.34	5.52	3.98	3.33	4.04	3.67
Hf	5.81	5.34	4.79	4.99	3.88	4.83
Ta	1.28	1.20	1.06	1.06	1.39	1.87
U	3.84	3.85	4.06	4.23	3.55	4.92
Rb/Sr	2.47	2.70	1.83	1.53	2.47	3.48

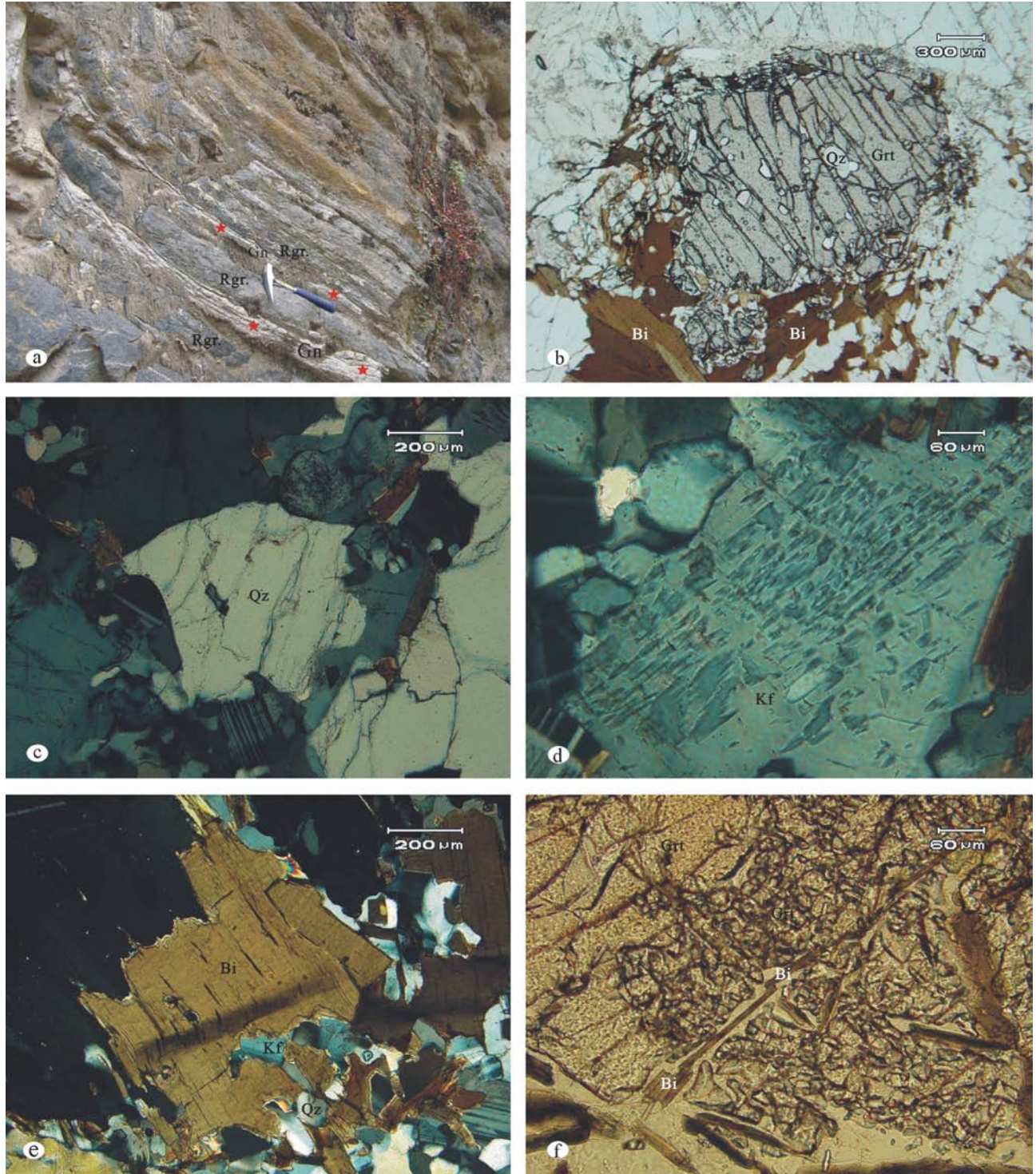


图2 高压麻粒岩中含石榴石花岗岩脉的岩石学特征

Gn-含石榴石花岗岩;Rgr-退变麻粒岩;Grt-石榴石;Kf-钾长石;Qz-石英;Bi-黑云母.五角星为采样位置.a-退变麻粒岩中褶皱的含石榴石花岗岩脉;b-石榴石中定向排列的裂纹;c-石英中定向排列的裂纹;d-钾长石中的出溶现象;e-黑云母发生膝褶变形;f-石榴石边部裂隙中的黑云母

Fig. 2 Petrological features of garnet-rich granite veins in high-pressure granulite

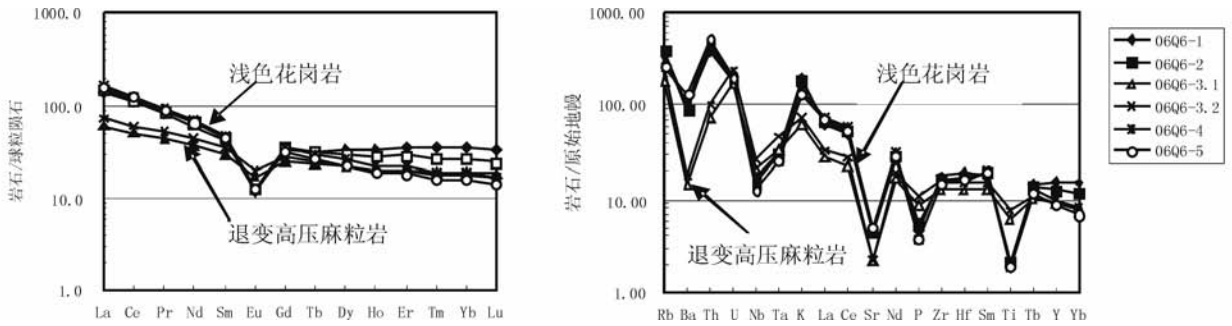


图3 南迦巴瓦群高压麻粒岩中花岗岩脉和退变高压麻粒岩球粒陨石标准化稀土配分模式(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(球粒陨石标准化值据 Pearce *et al.*, 1984;原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primordial mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for granite and granulite in the Namche Barwa complex (Chondrite from Pearce *et al.*, 1984; primordial mantle from Sun and McDonough, 1989)

球粒陨石标准化配分曲线展示所有样品呈基本一致的向右倾斜、中间呈“V”字型凹进的稀土配分模式,与退变高压麻粒岩的区别在于稀土总量几乎是高压麻粒岩的2倍、轻稀土的分馏程度和Eu亏损程度相对较高(图3a)。花岗岩的微量元素原始地幔标准化蛛网图(图3b)呈现出向右倾斜的“M”型多峰谷模式与退变高压麻粒岩相似,大离子亲石元素(LILE)K、Rb、Ba及放射性元素Th、U和部分稀土元素Nb、La和Ce相对原始地幔强烈富集,其他元素相对原始地幔轻度富集,Rb、Th、K和Nd为正异常,Ba、Nb、Sr、P和Ti为明显的负异常,其变化特征与退变高压麻粒岩基本相似,区别在于退变高压麻粒岩微量元素总量相对较小,展示出花岗岩与退变高压麻粒岩之间存在一定的亲缘性。

#### 4 锆石特征及 SHRIMP U-Pb 定年

锆石大部分呈半自形-它形的短柱状,晶面整洁光滑,粒度在 $80 \times 300 \sim 100 \times 120 \mu\text{m}$ 之间,长宽比一般为1.5:1,个别可达3.5:1。锆石阴极发光图像显示锆石由继承性锆石构成的内核和后期生长的边组成(图4),内核阴极发光图像呈灰白色、次圆状、形态不规则、内部具有港湾状溶蚀现象(图4d,f),部分有清晰的韵律环带(图4d,e,f),U、Th含量分别变化于 $249 \times 10^{-6} \sim 2395 \times 10^{-6}$ 和 $124 \times 10^{-6} \sim 1535 \times 10^{-6}$ ,Th/U值在0.07~0.69之间,说明它们可能为碎屑锆石。锆石边都围绕内核呈环带状生长,结晶边完整,韵律环带清晰,锆石U、Th含量分别变化于 $695 \times 10^{-6} \sim 2092 \times 10^{-6}$ 和 $9 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$ ,Th/U值在0.01~0.03之间(表2),它们的Th/U比值虽然较小,但其清晰的韵律环带仍展示出岩浆成因性质。

锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测试结果表明,继承性锆石(内核)的年龄主要分布于519~525Ma,平均年龄值为 $523.6 \pm 5.6\text{Ma}$ ,MSWD为0.63(表1,图5)。锆石边的 SHRIMP U-Pb 年龄则集中分布于39~44Ma、24~25Ma和 $7.3 \pm 0.2\text{Ma}$ (由于该年龄段仅有一个样品,没有代表性,在此仅供参考)三个

年龄段(表2,图5)。在谐和图上,39~44Ma区间的所有样品点相对集中分布在协和线上,但由于每个年龄值的 $1\sigma$ 值很小(0.4~0.8),平均值的MSWD很大,因此将其相对集中的点分别进行平均值计算(图5a),其中40Ma附近样品的平均年龄值为 $40.0 \pm 0.6\text{Ma}$ ( $n=3$ ),置信度为95%,MSWD为1.2;44Ma附近样品的平均年龄值为 $43.7 \pm 0.6\text{Ma}$ ( $n=5$ ),置信度为95%,MSWD为0.15;24~25Ma区间的样品平均年龄值为 $24.9 \pm 0.5\text{Ma}$ ,置信度为95%,MSWD为0.8(图5b)。核部的年龄值反映原岩的形成时代,锆石边部年龄中的39~44Ma代表了含石榴石花岗岩结晶年龄,24~25Ma和7.3Ma与后期构造活动的叠加改造有关。

## 5 讨论

### 5.1 高压麻粒岩中含石榴石花岗岩脉形成的构造背景

高压麻粒岩中含石榴石花岗岩脉的岩石学以富铝矿物——石榴石的含量高达15%和不含白云母矿物为特点,地球化学以 $\text{SiO}_2$ (71.8%~73.7%)和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (12.3%~12.9%)的含量较高, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 2$ , $\text{A}/\text{CNK} > 1$ 为特点。在Pearce *et al.* (1984)和Pearce(1996)判别图解上样品分布于后碰撞板内花岗岩区(图6),结合该岩脉产于退变麻粒岩中,接触界限清晰及其形成时代与退变麻粒岩( $42.7 \pm 2.5\text{Ma}$ ,孙志明等,2004)相近判断该岩脉形成于后碰撞阶段。此外,含石榴石花岗岩脉的Rb/Sr比值在1.5~2.7之间(表1),具有高Rb/Sr( $> 1.4$ )比值和Ba远高于背景值(图3b)的特点,揭示其岩浆在缺乏流体环境下发生深熔作用形成的产物(Harris and Inger, 1992; Harris and Massey, 1994; Booth *et al.*, 2004),即在地壳减薄、南迦巴瓦群折返过程中因压力的降低而诱发地壳岩石发生“干”深熔作用,形成富黑云母和石榴石的花岗岩浆,顺高压麻粒岩面理灌入,形成富黑云母和石榴石的过铝质高钾钙碱性花岗岩脉。

### 5.2 含石榴石花岗岩脉形成的初始温度

锆元素在不同成分岩石部分熔融体中的溶解度实验表

表 2 锆石 SHRIMP U-Pb 定年数据

Table 2 SHRIMP U-Pb data for zircons

样品号	含量 ( $\times 10^{-6}$ )			Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$			$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$			$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$			年龄 (Ma)	
	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$\pm \%$	$\pm \%$	$\pm \%$	$\pm \%$	$\pm \%$	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm \%$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1s		
06q6-2-2.2	810	8.9	2.62	0.01	0.0712	13	0.003830	1.7	0.0376	13	261.10	1.7	24.65	0.41	
06q6-2-3.1	1418	14.8	7.83	0.01	0.0535	4.5	0.006456	1.0	0.0476	4.6	154.90	1.0	41.48	0.42	
06q6-2-3.2	249	166.6	18.0	0.69	0.05909	1.4	0.08384	0.99	0.683	1.8	11.93	0.99	519.0	5.0	
06q6-2-4.1	917	13.3	4.80	0.01	0.0496	4.7	0.00609	1.9	0.0416	5.1	164.20	1.9	39.15	0.75	
06q6-2-5.1	1352	12.2	4.58	0.01	0.0410	13	0.003904	1.4	0.0221	13	256.10	1.4	25.12	0.36	
06q6-2-7.1	926	11.1	4.99	0.01	0.0509	3.0	0.006279	1.1	0.0441	3.2	159.30	1.1	40.35	0.44	
06q6-2-9.1	2092	10.4	12.2	0.01	0.0488	2.8	0.006821	0.94	0.0459	3.0	146.60	0.94	43.82	0.41	
06q6-2-10.1	1492	16.9	8.70	0.01	0.0471	2.9	0.006783	0.99	0.0441	3.1	147.40	0.99	43.58	0.43	
06q6-2-11.1	759	8.2	4.12	0.01	0.0470	4.5	0.006299	1.4	0.0408	4.7	158.70	1.4	40.48	0.56	
06q6-2-13.1	878	18.4	4.65	0.02	0.0444	7.1	0.00612	1.7	0.0374	7.3	163.40	1.7	39.32	0.66	
06q6-2-13.2	2395	1534.9	175	0.66	0.05741	0.48	0.08496	0.82	0.6725	0.95	11.77	0.82	525.7	4.1	
06q6-2-14.1	642	18.8	0.634	0.03	0.049	23	0.001135	2.4	0.0076	23	881.00	2.4	7.31	0.17	
06q6-2-15.1	878	20.4	5.17	0.02	0.0461	4.6	0.00686	2.4	0.0436	5.2	145.70	2.4	44.1	1.1	
06q6-2-15.2	408	124.1	29.8	0.31	0.05773	1.2	0.08499	1.1	0.676	1.6	11.77	1.1	525.8	5.7	

注: Pb\* 为放射成因铅, 误差为 1σ

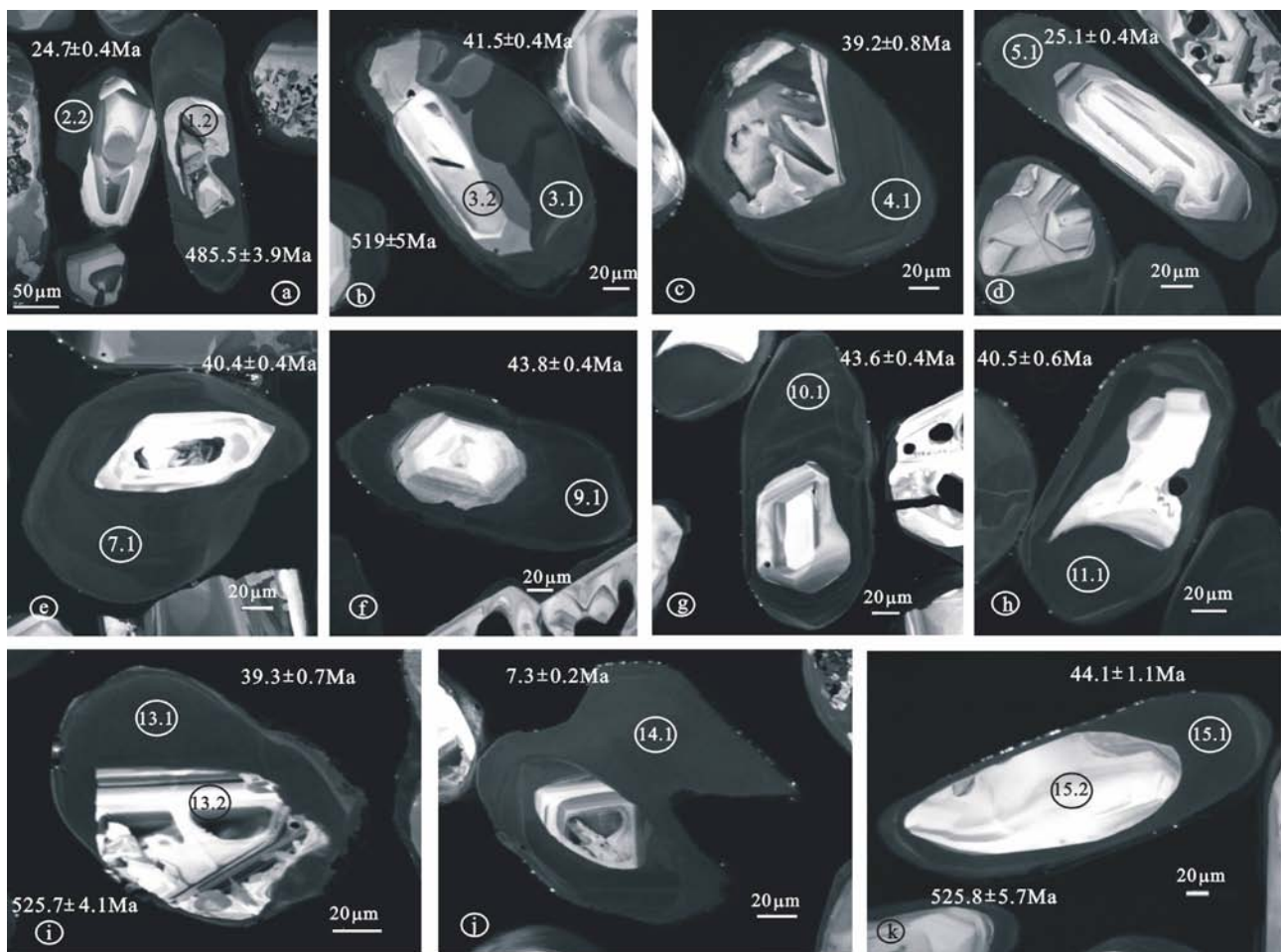


图 4 锆石阴极发光图像

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircons

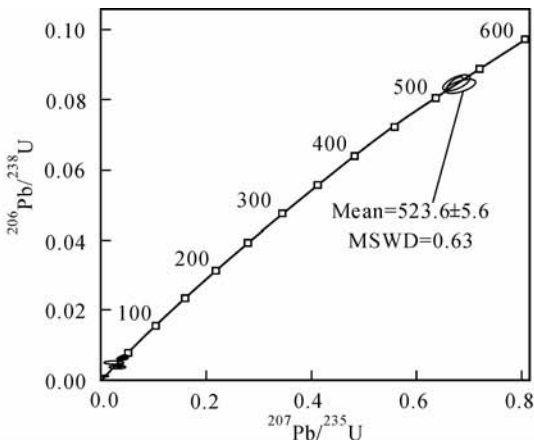


图5 锆石 SHRIMP U-Pb 定年协和图

Fig. 5 SHRIMP U-Pb concordia diagram for zircons

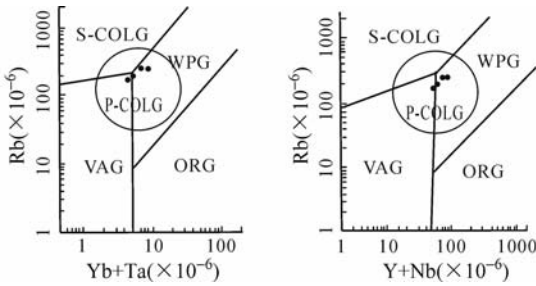
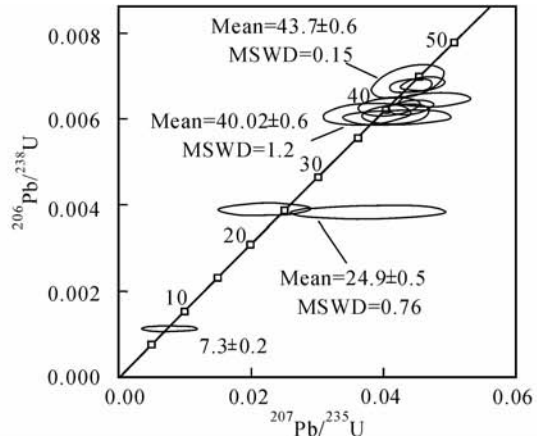


图6 含石榴石花岗岩构造环境判别图解

VAG-火山弧花岗岩; S-COLG-同碰撞花岗岩; WPG-板内花岗岩; ORG-洋中脊花岗岩; P-COLG-后碰撞花岗岩

Fig. 6 Discriminant diagrams of tectonic setting for garnet-rich granite

明在不同成分的岩浆中, 锆的饱和程度取决于岩浆温度和岩浆成分 (Watson, 1979; Watson and Harrison, 1983, 1984), 并满足以下方程:  $\ln D_{Zr}^{Zircon/Melt} = \{-3.8 - [0.85(M-1)]\} + \frac{12900}{T}$ , 其中  $D_{Zr}^{Zircon/Melt}$  是 Zr 在锆石和岩浆中浓度的比值,  $T$  为绝对温度,  $M = (Na^+ + K^+ + 2Ca^{2+}) / (Al^{3+} + Si^{4+})$ 。Miller *et al.* (2003), Zhu *et al.* (2009) 和高丽娥等 (2009) 利用岩浆岩的主要成分及锆的含量 ( $Zr_{melt}$ ), 通过该方程成功的估算出岩浆的初始温度。为此, 依据已有的化学分析数据估算出南迦巴瓦群高压麻粒岩中淡色花岗岩脉的初始岩浆温度为 793 ~ 801 °C, 平均 796 °C (表 1), 介于南迦巴瓦群的峰期变质温度 850 °C 和退变质温度 (角闪岩相) 621 ~ 726 °C (丁林和钟大赉, 1999) 之间, 展示出部分熔融作用发生于南迦巴瓦群退变质过程中的特点。

### 5.3 部分熔融与东喜马拉雅造山带构造结主要构造热事件

含石榴石花岗岩脉锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果显示锆石核部年龄集中在 519 ~ 525 Ma 之间, 揭示出印度地块经历

泛非运动 (~520 Ma) 改造 (Cenki *et al.*, 2004; Collins *et al.*, 2007) 的痕迹。岩石学特征表明含石榴石花岗岩脉形成后虽然和麻粒岩一起发生褶皱变形, 岩石内的矿物, 如石榴石中发育定向排列的裂纹, 石英具有波状消光等变形特征, 但它们都是低温条件下的脆韧性变形, 从阴极发光图像来看, 锆石边部图像均一, 虽未出现明显的新环边, 但  $^{206}Pb/^{238}U$ 、 $^{207}Pb/^{206}Pb$  和  $^{208}Pb/^{232}Th$  三个年龄值的不完全一致, 说明后期脆韧性变形虽然未对锆石的内部结构和组成产生实质性的影响, 但可能引起了一定程度的铅丢失。因此, 锆石边部主体定年值 (39 ~ 44 Ma) 代表了锆石结晶年龄, 体现了花岗岩浆的侵位时代, 而 24 ~ 25 Ma 和 7.3 Ma 则是对后期构造热事件改造的反映。前人研究结果表明东构造结内南迦巴瓦群直白组中标志性的岩石-高压麻粒岩的峰期变质年龄集中于 69 ~ 45 Ma, 退变质年龄集中在 18 ~ 25 Ma (丁林和钟大赉, 1999; 孙志明等, 2004), 南迦巴瓦外围雅鲁藏布缝合带附近拉萨地块内的花岗岩侵位于 24 ~ 26 Ma 之间, 以及南迦巴瓦群直白组变质岩内的花岗岩体 (脉) 形成于 3 ~ 10 Ma (Booth *et al.*, 2004)。前者和印度板块与欧亚大陆主碰撞期相对应, 退变质年龄和拉萨地块内花岗岩侵位时代与藏南拆离系 (STDS) 和主中央冲断带 (MCT) 活动时间相吻合, 直白组变质岩中花岗岩的形成时代是构造-浅表反馈作用的产物 (Booth *et al.*, 2004)。产于退变质麻粒岩中含石榴石花岗岩脉的锆石边部 SHRIMP U-Pb 的三组年龄中的第一个年龄段略小于高压麻粒岩峰期变质下限年龄 (45 Ma), 表明南迦巴瓦群在经历峰期变质作用后很快就开始折返, 后两个年龄段则揭示出南迦巴瓦群在后碰撞过程中经历了藏南拆离系 (STDS) 和主中央逆冲带 (MCT) 构造事件的改造, 及在中新世后期又遭受了构造-浅表反馈作用的影响。

## 6 结论

(1) 南迦巴瓦群退变质高压麻粒岩中的含石榴石花岗岩



脉以富黑云母含石榴石、高硅、高钾、富铝、轻稀土强烈富集、分馏程度很高、重稀土相对亏损、分馏程度低、Eu 强烈亏损、大离子亲石元素及放射性元素相对原始地幔强烈富集, Ti 和 Sc 相对原始地幔强烈亏损为特征,是在后碰撞板内环境下、地壳减薄、南迦巴瓦群折返过程中因压力降低而诱发地壳岩石发生“干”深熔作用形成的高钾过铝质钙碱性花岗岩。

(2) 利用岩浆的主要成分及锆的含量 ( $Zr_{melt}$ ), 估算的岩浆初始温度为  $796^{\circ}\text{C}$ , 介于南迦巴瓦群的峰期变质温度  $850^{\circ}\text{C}$  和退变质温度 (角闪岩相)  $621 \sim 726^{\circ}\text{C}$  之间, 以及含石榴石花岗岩脉具有高 Rb/Sr ( $>1.4$ ) 比值和高 Ba 含量的特点, 说明花岗岩浆是在地壳减薄、南迦巴瓦群折返过程中因压力的降低而诱发地壳岩石发生“干”深熔作用形成的。

(3) 锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果显示锆石核部年龄集中在  $519 \sim 525\text{Ma}$  之间, 揭示出印度地块经历泛非期构造运动改造的痕迹。锆石边部存在  $39 \sim 44\text{Ma}$ ,  $24 \sim 25\text{Ma}$  和  $7.3\text{Ma}$  三个年龄段, 前者代表了花岗岩浆的侵位时代, 后者是对后期构造热事件改造的反映, 同时也说明南迦巴瓦群在经历峰期变质作用后很快就开始折返, 并在后碰撞过程中经历了 STDS 和 MCT 构造事件的改造, 及南迦巴瓦地区在中新世后期又遭受了构造-浅表反馈作用影响。

**致谢** 成文过程中与张泽明研究员和曾令森研究员进行了有益的探讨, 在此表示诚挚的感谢!

## References

Booth AL, Zeitler PK, Kidd WF *et al.* 2004. U-Pb zircon constraints on the tectonic evolution of southeastern Tibet, Namche Barwa area. *American Journal of Science*, 304: 889 – 929

Burchfiel BC, Zhiliang C, Hodges KV *et al.* 1992. The South Tibetan detachment system, Himalayan orogen: Extension contemporaneous with and parallel to shorting in a collisional mountain belt. *Geological Society of American Special Paper*, 269: 41

Burg JP, Davy P, Nievergelt P *et al.* 1997. Exhumation during crustal folding in the Namche Barwa syntaxis. *Terra Nova*, 9: 53 – 56

Centi B, Braun I and Brocher M. 2004. Evolution of the continental crust in the Kerala Khondalite belt, southernmost India: Evidence from Nd isotope mapping, U-Pb and Rb-Sr geochronology. *Precamb. Res.*, 134: 275 – 292

Collins AS, Santosh M, Braun I and Clark C. 2007. Age and sedimentary provenance of the Southern granulites, South India: U-Th-Pb SHRIMP secondary ion mass spectrometry. *Precamb. Res.*, 155: 125 – 138

Ding L and Zhong DL. 1999. Metamorphism of high-pressure granulite phase rocks from Najiabawa, eastern Tibet and its tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 29(5): 385 – 397 (in Chinese)

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

Gao LE, Zeng LS, Liu J and Xie KJ. 2009. Early Oligocene Na-rich

peraluminous leucogranites in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet: Formation mechanism and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2289 – 2302 (in Chinese with English abstract)

Harris NBW and Inger S. 1992. Trace element modeling of pelite-derived granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 46 – 56

Harris N and Massey J. 1994. Decompression and anatexis of Himalayan metapelites. *Tectonics*, 13: 1537 – 1546

Miller CF, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31: 529 – 532

Pearce JA, Harris BW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Petrol. J.*, 4: 956 – 983

Pearce JA. 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman DA (ed.). *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12: 79 – 113

Qi XX, Zeng LS, Meng XJ *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating for Dala granite in the Tethyan Himalaya and its geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1501 – 1508 (in Chinese with English abstract)

Seward D and Burg JP. 2008. Growth of the Namche Barwa Syntaxis and associated evolution of the Tsangpo Gorge constraints from structural and thermochronological data. *Tectonophysics*, 451: 282 – 289

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313 – 345

Sun ZM, Zheng LL, Geng QR *et al.* 2004. Genetic mechanisms and exhumation processes of the high-pressure granulites within the eastern Himalayan syntaxis, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(3): 22 – 29 (in Chinese with English abstract)

Watson EB. 1979. Zircon saturation in felsic liquids: Experimental data and applications to trace element geochemistry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 70: 407 – 419

Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 295 – 304

Watson EB and Harrison TM. 1984. Accessory minerals and the geochemical evolution of crustal magmatic system: A summary and prospectus of experimental approaches. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35: 19 – 30

Xu ZQ, Cai ZH, Li HQ *et al.* 2008. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, Eastern Himalayan syntaxis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1463 – 1476 (in Chinese with English abstract)

Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan Tibetan orogen. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211 – 280

Zhang ZM, Zheng LL, Wang JL *et al.* 2007. Garnet pyroxenite in the Namche Barwa Group-complex in the eastern Himalayan syntaxis, Tibet, China: Evidence for subduction of the Indian continent beneath the Eurasian plate at  $80 \sim 100\text{km}$  depth. *Geol. Bull. China*, 26(1): 1 – 12 (in Chinese with English abstract)

Zheng LL, Jin ZM, Pan GT *et al.* 2004. Geological features and tectonic

evolution in the Namche Barwa area, Eastern Himalayas. *Acta Geologica Sinica*, 78 (6): 744 – 751 (in Chinese with English abstract)

Zhu DC, Mo XX, Wang LQ *et al.* 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Zayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. *Science in China (Series D)*, doi: 10.1007/s11430-009-0132-x

#### 附中文参考文献

丁林, 钟大赟. 1999. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造意义. *中国科学(D辑)*, 26(5): 385 – 397

高利娥, 曾令森, 刘静, 谢克家. 2009. 藏南也拉香波早渐新世富钠过铝质淡色花岗岩的成因机制及其构造动力学意义. *岩石学报*,

25(9): 2289 – 2302

戚学祥, 曾令森, 孟祥金等. 2008. 特提斯喜马拉雅打拉花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 24(7): 1501 – 1508

孙志明, 郑来林, 耿全如等. 2004. 东喜马拉雅构造结高压麻粒岩特征、形成机制及折返过程. *沉积与特提斯地质*, 24(3): 22 – 29

许志琴, 蔡志慧, 李化启等. 2008. 喜马拉雅东构造结-南迦巴瓦构造及组构运动学. *岩石学报*, 24(7): 1463 – 1476

张泽明, 郑来林, 王金丽等. 2007. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦群中的石榴辉石岩——印度大陆向欧亚板块之下的俯冲至 80 ~ 100km 深度的证据. *地质通报*, 26(1): 3 – 12

郑来林, 金振民, 潘桂棠等. 2004. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化. *地质学报*, 78(6): 744 – 751