

关于造山带深熔型花岗质岩石的初步思考

——以东喜马拉雅构造结为例

郭小飞^{1,2}, 周云³

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要:造山带演化中高级变质岩石发生深熔作用形成的花岗质岩石在东喜马拉雅构造结尤为常见。野外地质调查发现,在大型韧性剪切带和脆性断层中多分布着与区域构造线及围岩片麻理方向一致的混合岩和花岗岩类的小脉体和透镜体。综合分析可知,深熔型花岗质岩石能量主要来自强烈褶皱、推覆、剪切、断裂等驱动力所产生的热压能量,主要是泥质岩、杂砂岩等沉积源岩在不同物化条件下部分熔融的结果。花岗质岩石处于喜马拉雅碰撞造山带构造转换阶段,变沉积岩在深部的部分熔融并折返,是对印欧碰撞造山作用的响应,它们跟构造-岩浆-变质-成矿作用相辅相成。

关键词:深熔作用;东喜马拉雅构造结;沉积源岩;花岗质岩石

中图分类号: P588.12^{*1}

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2016)04-0249-05

地壳熔融在造山带演化中是一个重要的地质过程,它强烈影响着造山带地壳的热稳定性和流变性^[1]。流体参与与否、是否存在地幔玄武质岩浆底侵作用以及地壳物质成分差异对于大陆地壳的部分熔融具有重要的影响^[2-5]。地质历史时期,造山带及其周缘地区常发育大型韧性剪切带和脆性断层,通常被认为是块体碰撞或造山后的调整响应^[6,7],这种调整响应可以使得高级变质岩石发生部分熔融形成深熔型花岗质岩石。青藏高原及其周边山脉大多被认为是印度和欧亚板块新生代碰撞的结果,是研究碰撞造山作用的典型地区^[8-10]。在喜马拉雅碰撞造山带的高级变质岩系中广泛发育各种类型的变质岩石和侵入体,多期次的高级变质作用和部分熔融事件使得原岩遭受强烈变质作用形成花岗片麻岩并伴生混合岩和岩体侵入。近年来,大规模的韧性剪切带和脆性断层与地壳物质发生深熔作用及花岗质岩浆侵位关系已经引起普遍的关注,然而剪切作用与地壳物质变质-变形作用、部分熔融以及岩体侵位之间的诱发关系仍存有争议^[11]。本文试图以东喜马拉雅构造结的深熔型花岗质岩石为研究对象,总结前人研究成果并介绍其岩相学、地球化学特征,进一步探究深

熔型花岗质岩石的形成机制及动力学制约,为研究深熔作用提供一些素材。

1 深熔型花岗质岩石的特征

印度河-雅鲁藏布江缝合线以南,自北而南依次划分为特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅和低喜马拉雅。低喜马拉雅以主中央逆冲断层与北侧高喜马拉雅相邻,高喜马拉雅北以藏南拆离系与特提斯喜马拉雅相邻^[13](图1)。变质深熔成因的花岗质岩石分布较广,年龄涵盖各个地质历史时期,在高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅岩系中尤为发育。野外地质考察可以发现,区内多分布片麻状花岗岩,大部分片麻岩经历了深熔作用的改造,呈岩基、岩株、岩枝状产出,形成各类混合岩、混合片麻岩、混合花岗岩,是岩系变质岩层就地部分熔融并就地成岩的产物。受区域变质作用控制,岩体延伸方向与区域构造线及围岩片麻理方向一致。青藏高原东南缘剪切带内岩石均遭受不同程度的变质变形作用,各个前寒武纪基底岩群的大部分岩石都经历了深熔作用的改造形成各类混合岩、花岗岩。

笔者收集了高喜马拉雅地区混合岩和花岗岩的

收稿日期:2016-07-11

资助项目:广西自然科学基金“广西钦防海槽沉积岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究(2015GXNSFBA139204)”

作者简介:郭小飞(1990-),男,江西吉安人,博士研究生在读,中国科学院广州地球化学研究所,构造地质学专业,E-mail: ni-ubidrbbsr@126.com。

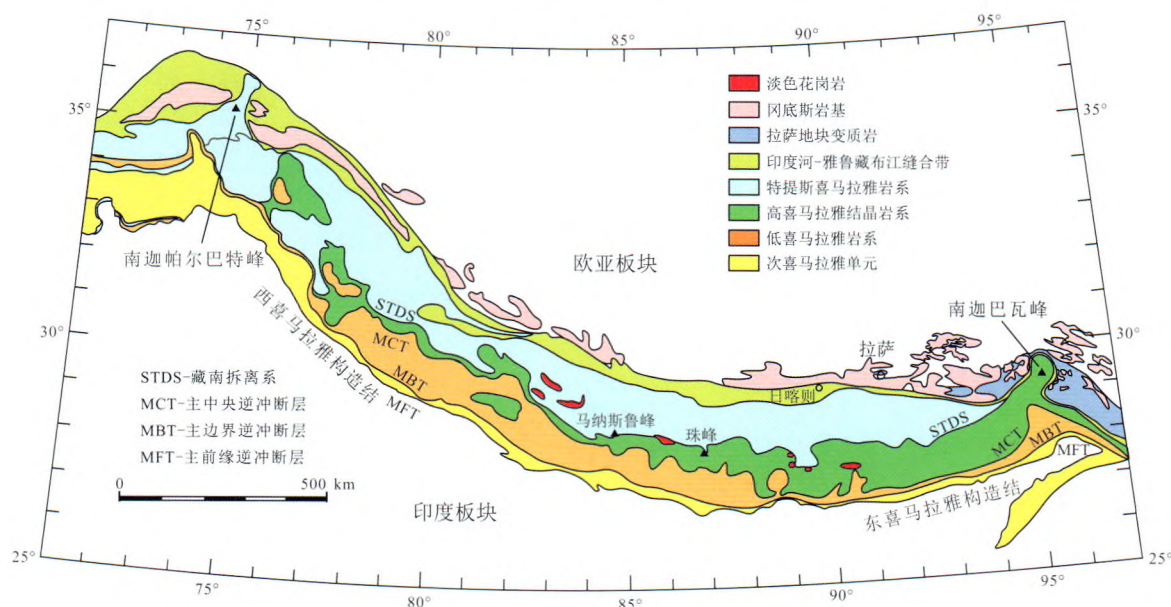
图1 喜马拉雅造山带地质简图(据参考文献^[12])

Fig.1 Geological sketch map of Himalaya orogenic belt (after reference [12])

地球化学数据,其中花岗质岩石在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上为LREE略富集的右倾型,轻重稀土分馏明显,具有弱的Eu负异常,显示地壳熔融花岗岩的特征(图2)。同时还可以看出,浅色体稀土元素含量要低于暗色体,这是因为深熔作用过程中副矿物由于难熔而残余。研究^[14]认为深熔程度不同,副矿物进入熔体的比例不同。深熔程度很低时,副矿物很少进入熔体,主要受副矿物控制的稀土元素及微量元素在熔体中的含量就低;随着深熔程度增高,副矿物逐渐进入熔体中,稀土元素及微量元素在浅色体中的含量随之增大,其稀土元素配分模式与熔融母岩就较为相似。

2 形成机制

高级变质岩通过前进变质(深熔)反应形成熔体相,熔体的行为既不像水那样总是从体系中分离出去,也不像固态矿物相那样保留在体系中^[17]。所形成的部分熔体不断在岩石体系中局部集中,发生分凝作用,或从岩石体系中分离出去,形成各种侵入体,留在体系内的熔体在降温过程中发生结晶作用,释放出水流体,引起峰期矿物组合不同程度地经历逆反应和退变质反应^[18]。这种理论可以在青藏高原东南缘哀牢山红河剪切带得到验证,它就经历了早期升温升压(进变质)、峰期和晚期(降温降压)等不同阶段^[19]。

深熔型花岗质岩石的能量来源主要来自强烈褶皱、推覆、剪切、断裂等驱动力所产生的热压能量,此外,

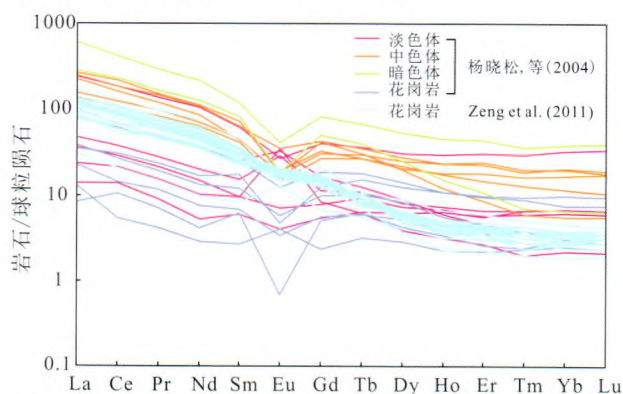


图2 青藏高原南部混合岩和花岗岩稀土元素配分模式图(数据来源参考文献[15, 16])

Fig.2 REE pattern of migmatites and granites from Southern Tibet (data from references [15, 16])

盖层地温增加、深大断裂引发深部地壳热流值增加的综合因素也可使基体岩石产生局部熔融或熔融^[20]。例如,在连续活跃的逆冲推覆切穿以往经历过低度部分熔融的印度表壳岩过程中,剪切热跟淡色花岗岩的产生密切相关^[21]。

杨晓松等^[22]对高喜马拉雅黑云斜长片麻岩进行脱水熔融实验证实,黑云斜长片麻岩是喜马拉雅淡色花岗岩的源岩之一,二者的Sr-Nd同位素组成和稀土配分模式非常相似,显示出它们之间可能存在血缘关系,脱水熔融是形成高喜马拉雅淡色花岗岩和下地壳麻粒岩的重要方式。虽然最近吴福元等^[13]在对喜马拉雅淡色花岗岩的综述中提出高分异型花岗岩的观点,但目前大多认为其源岩主要是高喜马拉雅

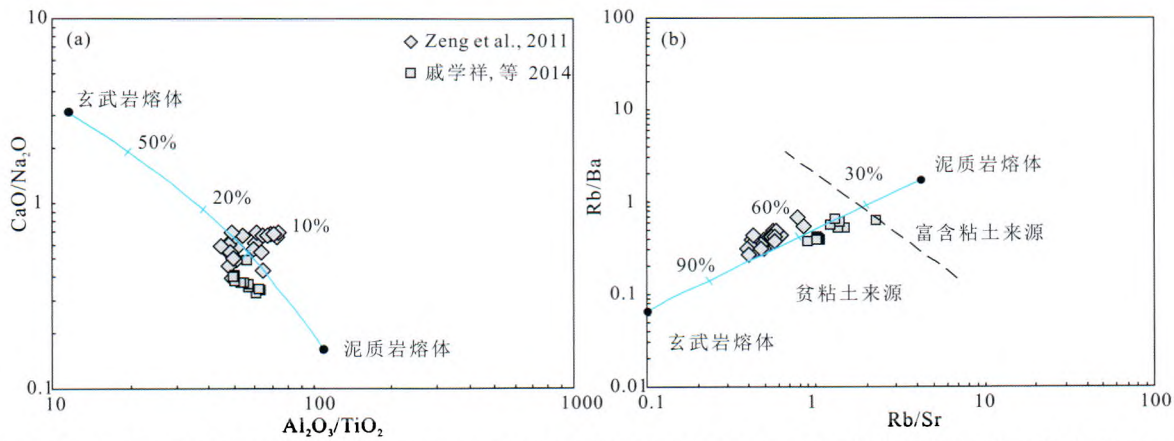


图3 藏南和三江地区花岗质岩石(a) $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解^[24], (b) $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解^[24] (数据源自参考文献[16, 25])

Fig.3 (a) the $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ vs. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ diagram^[24], (b) the Rb/Sr vs. Rb/Ba diagram^[24] for granitic rocks from Southern Tibet and Sanjiang area (data from references [16, 25])

雅变泥质岩。如笔者对藏南和三江地区的淡色花岗岩和混合岩长英质脉体的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 和 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解(图3)中,可以看出它们均跟壳源物质的部分熔融有关。总之,在研究深熔型花岗质岩石的形成机制时,泥质岩、杂砂岩等沉积源岩在不同物化条件下部分熔融是学术主流。变质沉积岩的熔融作用主要有三种机制:饱和水固相线上的熔融、白云母脱水熔融和黑云母脱水熔融^[23]。

3 动力学制约

华南的大部分研究地区普遍受陆内深断裂的控制,许多深断裂继承了古俯冲带、古拼接带等板块边界构造(如喜马拉雅造山带;图4),在后来发生的部分熔融事件中,新生岩浆继承了早先形成的与俯冲和碰撞有关的含有较多幔源物质的特征,在地球化学方面显示幔源组分参与特征^[26]。除了深熔型花岗质岩石,分布于青藏高原断裂带内部及两侧的钾质、超钾质岩石被认为是由挤压向伸展转换的大地构造环境中,上地幔熔融产生的玄武质岩浆底侵到下地壳,诱发下地壳岩石重熔,并伴有部分地幔物质参与形成深部岩浆房,在深部压力作用下,原始岩浆沿深

断裂上升所致^[27]。在构造转换阶段,应力松弛导致的流体活动性、玄武质岩浆底侵以及走滑、伸展、剪切、断裂等构造产生的温压条件有利于深熔作用的发生。例如,胡荣国^[28]在研究柴北缘造山带中段锡铁山地体花岗质片麻岩中浅色体形成机制时认为,在构造转换阶段的高压麻粒岩相减压(升温)阶段诱发的深熔作用(部分熔融)是浅色体形成的主要机制。

目前,在青藏高原东南缘广泛分布的大型走滑断层在大陆挤压过程中所扮演的角色是争论的焦点。一种观点认为,印度板块是刚性的岩石圈块体,其变形主要集中在板块边缘,走滑断层切割深及岩石圈^[30, 31]。另一种观点认为挤压加厚的陆壳是一种薄的粘性席体,其内部变形是均匀的,主体上是非旋转岩石圈缩短,故而走滑断层纯粹是在地壳尺度^[32, 33]。喜马拉雅造山带演化过程中,深熔作用在青藏高原的应力调整过程中非常普遍。从动力学观点分析,区域变质作用—混合岩化作用—变质深熔作用属于温压递进性变质作用^[20]。笔者认为深熔作用与剪切作用是否切割岩石圈地幔不矛盾。不管是在地壳尺度还是在岩石圈地幔尺度上只要符合深熔作用的物化条件,都可以产生深熔型花岗质岩石。

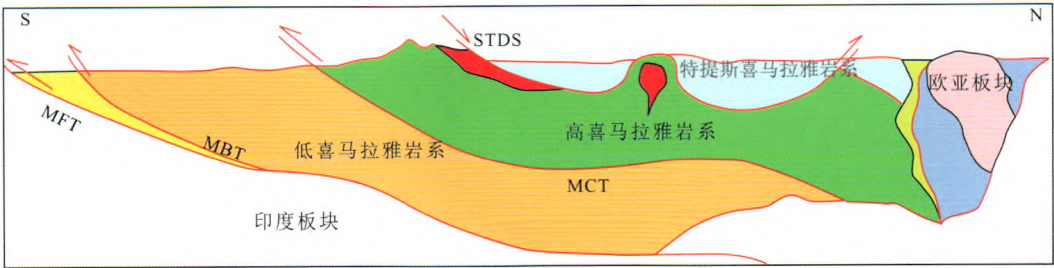


图4 喜马拉雅造山带剖面图(改自参考文献[29])

Fig.4 Geologic section of Himalaya orogenic belt (modified after reference [29])

4 结论

高级变质岩石发生深熔作用形成的花岗质岩石广泛分布于东喜马拉雅构造结,对其进行初步的地球化学研究和动力学分析得到以下结论。

(1)受造山作用影响的深熔型花岗质岩石,球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上为LREE略富集的右倾型,轻重稀土分馏明显,具有弱的Eu负异常,显示地壳熔融花岗岩的特征。

(2)深熔型花岗质岩石能量来源主要来自强烈褶皱、推覆、剪切、断裂等驱动力所产生的热压能量,源岩主要是泥质岩、杂砂岩等沉积源岩在各种物化条件下部分熔融的结果。

(3)这些花岗质岩石处于喜马拉雅碰撞造山带构造转换阶段,伴随着大型韧性剪切带以及脆性断层发育,是对印欧碰撞造山作用的响应,它们与构造-岩浆-变质-成矿作用相辅相成。

参考文献:

- [1] Whitney D L, Teyssier C, Fayon A K, et al. Tectonic controls on metamorphism, partial melting, and intrusion: timing and duration of regional metamorphism and magmatism in the Niğde Massif, Turkey[J]. *Tectonophysics*, 2003, 376(1): 37–60.
- [2] Harris N, Massey J. Decompression and anatexis of Himalayan metapelites[J]. *Tectonics*, 1994, 13(6): 1537–1546.
- [3] Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, et al. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust[J]. *Nature*, 2000, 408(6813): 669–673.
- [4] Kotkov á J, Harley S L. Anatexis during high-pressure crustal metamorphism: evidence from garnet-whole-rock REE relationships and zircon-rutile Ti-Zr thermometry in leucogranulites from the Bohemian Massif[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(10): 1967–2001.
- [5] King J, Harris N, Argles T, et al. Contribution of crustal anatexis to the tectonic evolution of Indian crust beneath southern Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123(1–2): 218–239.
- [6] 张进江, 钟大赉, 桑海清, 等. 哀牢山-红河构造带古新世以来多期活动的构造和年代学证据[J]. *地质科学*, 2006, 41(2): 291–310.
- [7] Zhang B, Zhang J J, Zhong D L. Structure, kinematics and ages of transpression during strain-partitioning in the Chongshan shear zone, western Yunnan, China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(4): 445–463.
- [8] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28(1): 211–280.
- [9] Ding L, Kapp P, Wan X Q. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet[J]. *Tectonics*, 2005, 24(3): 1–18.
- [10] Yao T D, Wu F Y, Ding L, et al. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: a review of the recent researches[J]. *National Science Review*, 2015, 2(4): 468–488.
- [11] 丁式江, 胡健民, 宋彪, 等. 海南岛抱板群内顺层侵位深熔花岗岩锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. *中国科学: D 辑*, 2006, 35(10): 937–948.
- [12] Zhang Z M, Xiang H, Dong X, et al. Oligocene HP metamorphism and anatexis of the Higher Himalayan Crystalline Sequence in Yadong region, east-central Himalaya[J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 173–187.
- [13] 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 1–36.
- [14] 万渝生, 杨崇辉. 河北平山小觉地区阜平岩群浅粒岩深熔作用的地球化学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(4): 421–428.
- [15] 杨晓松, 金振民, 马瑾. 喜马拉雅造山带地壳深熔作用: 来自聂拉木群混合岩的地球化学和年代学证据[J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(10): 926–934.
- [16] Zeng L S, Gao L E, Xie K J, et al. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: melting thickened lower continental crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 303(3): 251–266.
- [17] 魏春景, 王伟. 高级变质岩中深熔作用的相平衡研究[J]. *地质前缘*, 2007, 14(1): 125–134.
- [18] Kriegsman L M. Partial melting, partial melt extraction and partial back reaction in anatectic migmatites[J]. *Lithos*, 2001, 56(1): 75–96.
- [19] Cao S Y, Liu J L, Leiss B, et al. Oligo-Miocene shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: Constraints from structural analysis and zircon U/Pb geochronology of magmatic rocks in the Diancang Shan massif, SE Tibet, China[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(4): 975–993.
- [20] 李兆麟. 关于变质深熔作用与成岩成矿关系的思考[J]. *地质前缘*, 2001, 8(3): 29–38.
- [21] Harrison T M, Grove M, Lovera O M, et al. A model for the origin of Himalayan anatexis and inverted metamorphism[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B11): 27017–27032.
- [22] 杨晓松, 金振民, B. Wunder. 高喜马拉雅黑云斜长片麻岩脱水熔融实验: 对青藏高原地壳深熔的启示[J]. *科学通报*, 2001, 46(3): 246–250.
- [23] Brown M. Retrograde processes in migmatites and granulites revisited[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2002, 20(1): 25–40.
- [24] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granulites[J]. *Lithos*, 1998, 45(1): 29–44.

- [25] 戚学祥,赵宇浩,朱路华,等. 滇西点仓山构造带新生代岩浆活动及其构造意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(8): 2217–2228.
- [26] 华仁民,陈培荣,张文兰,等. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统[J]. 中国科学:D 辑, 2003, 33(4): 335–343.
- [27] Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, et al. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet[J]. *Economic Geology*, 2003, 98(1): 125–145.
- [28] 胡荣国,邱华宁,Jan R. WIJBRANS,等. 柴北缘锡铁山花岗质片麻岩深熔作用年代和冷却历史: 来自浅色体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(1): 125–135.
- [29] Zhang J J, Santosh M, Wang X X, et al. Tectonics of the northern Himalaya since the India–Asia collision[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21(4): 939–960.
- [30] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1986, 19(1): 113–157.
- [31] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan–Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1–4): 3–10.
- [32] England P, Houseman G. Finite strain calculations of continental deformation: 2. Comparison with the India–Asia collision zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B3): 3664–3676.
- [33] Jolivet L, Beyssac O, Goff é B, et al. Oligo–Miocene mid-crustal subhorizontal shear zone in Indochina[J]. *Tectonics*, 2001, 20(1): 46–57.

Preliminary thoughts on the anatectic granitic rocks of orogenic belt: a case study of the Eastern Himalayan Syntaxis

GUO Xiao-fei^{1,2}, ZHOU Yun³

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guilin University of Technology, College of Earth Sciences, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Granitic rocks originated from high-grade metamorphic rocks that occurred anatexis during orogen evolution are particularly common in the eastern Himalayan syntaxis. In large-scale ductile shear zone and brittle fault, there are many small veins and lenticular bodies of migmatites and granites in the same direction as regional tectonic line and surrounding rocks. Comprehensive analysis shows that energy source of anatectic granitic rocks were mainly from strong folding, nappe, shear and fracture driving force generated by hot pressing energy, and the source rocks were derived from sedimentary source rocks such as metapelite, greywacke in the result of partial melting under different physicochemical conditions. These granitic rocks were in the tectonic transformation stage of Himalayan collision orogenic belt in response to the collision orogeny of the Indo-European plate. They were complementary with various sorts of information such as tectonism, magmatism, metamorphism, mineralization in space and time.

Key words: anatexis; eastern Himalayan syntaxis; sedimentary source rock; granitic rocks