

# 西藏米林县片麻状黑云花岗闪长岩地球化学特征、 锆石 U-Pb 定年及 Pb-Sr-Nd 同位素组成

时超, 李荣社, 何世平, 王超, 辜平阳, 计文化, 查显锋, 张海迪

(西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

**摘要:**喜马拉雅是印度与欧亚板块俯冲碰撞作用形成的全球最年轻、规模最大和正在活跃的造山带。利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年技术对位于东喜马拉雅构造结侵入南迦巴瓦岩群的片麻状黑云花岗闪长岩进行了测年, 获得岩浆结晶年龄为  $515.5 \pm 2.3$  Ma (早寒武世), 提供了泛非构造-岩浆事件在东喜马拉雅构造结的记录。岩石地球化学分析表明,  $\text{SiO}_2$  含量为 66.47%~72.42%, A/CNK 指数为 0.98~1.08, 平均 1.03, 在 A/NK-A/CNK 指数图解中样品大部分落入过铝质区, 里特曼指数  $\sigma$  为 1.53~3.08, 为钙碱性系列, 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解上大部分样品投入高钾钙碱性系列区, 在 Harker 图解中所有样品中的  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{FeO}^T$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  随着  $\text{SiO}_2$  含量的变化增加而减少,  $\text{Na}_2\text{O}$  随着  $\text{SiO}_2$  含量的增加而增加, 均呈较好的线性关系。稀土元素配分模式为轻稀土元素富集的右倾曲线 ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 为 19.1~63.8, 出现弱 Eu 负异常 ( $\delta\text{Eu} = 0.24 \sim 0.88$ ), 微量元素表现出 Ba、Nb、Ta、Sr、Zr 亏损, 而大离子亲石元素 Rb、Th 和 U 相对富集的特征。Sr、Nd 同位素组成表明, 丹娘乡片麻状黑云花岗闪长岩具有负  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 ( $-8.67 \sim -10.57$ ) 和较老的 Nd 模式年龄 ( $t_{\text{DM}} = 1.84 \sim 3.42$ ), 说明其来源可能是上地壳物质, 结合  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值特征, 推断丹娘乡片麻状黑云花岗闪长岩是在高温环境下经部分熔融形成的。通过构造环境判别图及岩石地球化学研究认为丹娘乡准铝质-弱过铝质片麻状黑云花岗闪长岩形成于后碰撞造山环境, 结合新得到的 513 Ma 同位素年龄, 认为泛非碰撞造山事件早寒武世在东喜马拉雅构造结一带可能结束, 进入后碰撞造山的构造演化阶段。

**关键词:** 泛非运动; 片麻状黑云花岗闪长岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 东喜马拉雅构造结

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>2; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)06-0818-13

## Geochemistry, zircon U-Pb dating and Pb-Sr-Nd isotopic composition of the gneissic biotite granodiorite in Mainling County, Tibet

SHI Chao, LI Rong-she, HE Shi-ping, WANG Chao, GU Ping-yang, JI Wen-hua, ZHA Xian-feng and ZHANG Hai-di

(Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The Himalayan orogenic belt, caused by the subduction and collision between Indian plate and Eurasian plate, is the youngest and largest currently active orogenic belt in the world. The LA-ICP-MS U-Pb zircon age of  $515.5 \pm 2.3$  Ma from the gneissic biotite granodiorite that intruded into the Namche Barwa complex in eastern syntaxis of the Himalayan orogenic belt provides a geological record of Pan-African tectonic-magmatic event in this area. The  $\text{SiO}_2$  content is 66.47%~72.42%, the average of the A/CNK indexes is 1.03 (0.98~1.03), and all samples fall into the peraluminous region in the A/NK-A/CNK index diagram. The Rittmann index  $\sigma$  is between 1.53 and 3.08, belonging to the calc-alkaline series. Most of the samples fall into

收稿日期: 2012-03-05; 修订日期: 2012-08-15

基金项目: 国土资源大调查项目(1212011121258); 国家青年基金资助项目(41002063)

作者简介: 时超(1986-), 男, 硕士, 研究实习员, 构造地质学专业, E-mail: fancyboy88@163.com; 通讯作者: 何世平(1963-), 男, 研究员, 主要从事大地构造、地球化学研究, E-mail: xakeyi@163.com.

a high-K calc-alkaline series area in the  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  diagram. The values of  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}^{\text{T}}$ ,  $\text{MnO}$  and  $\text{K}_2\text{O}$  show a good linear relationship with  $\text{SiO}_2$  content in the Harker diagrams. The chondrite-normalized REE patterns indicate that the samples are enriched in LREE,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  values are 19.1~63.8, with slightly negative Eu anomalies ( $\delta\text{Eu} = 0.62 \sim 0.79$ ). Trace elements show the depletion of Ba, Nb, Ta, Sr and Z as well as the relative enrichment of Rb, Th and U. The negative  $\epsilon \text{Nd}(t)$  values ( $-8.67 \sim -10.57$ ) and Nd model ages ( $t_{\text{DM}} = 1.84 \sim 3.42$ ) of the gneissic biotite granodiorite of Tanya Township indicate that this rock had an old upper crust material source. Combined with the initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio features, the authors hold that the source rock of the gneissic biotite granodiorite of Tanya Township was granitic magma that partially melted in a high temperature environment. From the tectonic environment discrimination diagrams, it is inferred that metaluminous-weakly peraluminous gneissic biotite granodiorite of Tanya Township was formed in the post-collisional stage characterized by the conversion from a compressional environment to an extensional. Combined with the isotope age 513 Ma, the authors consider that the Pan-African collisional orogenic movement in the eastern Himalayan syntaxis ended and started the post-collisional tectonic evolution in Early Cambrian period.

**Key words:** Pan-African movement; gneissic biotite granodiorite; LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope age; Eastern Himalayan syntaxis

位于西藏南部的高喜马拉雅地区具地球上最高的海拔,大面积出露着具有丰富地质信息的中下地壳岩石,是探讨西藏地区早期构造演化的有利窗口,历来为地质工作者所关注(张旗,1981;卫管一等,1989;潘桂棠等,2004;许志琴等,2005;李才等,2010)。近年来,青藏高原南部发现大量泛非运动年龄记录:滇西北怒江一带获得片麻状花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $487 \pm 11$  Ma(宋述光等,2007);西藏亚东、聂拉木、吉隆及康玛等地区获得大量 529~457 Ma 的泛非期变质年龄数据(许志琴等,2005);1:25 万安多县幅<sup>①</sup>在聂荣地块获得侵入聂荣岩群片麻状二长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $515 \pm 14$  Ma;八宿县同卡地区卡穷岩群中获得细粒黑云母碱长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $507 \pm 10$  Ma(李才等,2008);亚东县附近获得片麻状含石榴石黑云花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $499.2 \pm 3.9$  Ma(时超等,2010)。在北喜马拉雅康马-隆子微地块的康马县康马岩体西南侧奥陶系底部发现一套底砾岩,不整合于中-新元古代拉钦岗日岩群之上(周志广等,2004);在冈底斯-念青唐古拉地块的申扎县塔尔玛乡木纠错地区确立了下奥陶统他多组与前震旦系念青唐古拉岩群的不整合关系(程立人等,2005);在冈底斯-念青唐古拉地块申扎地区发现了寒武系与奥陶系之间的角度不整合(李才等,2010)等均为泛非期造山事件的证据。

显而易见,青藏高原泛非事件的波及范围、作用时间及其性质已成为众多研究者关注的焦点。笔者对西藏米林县侵入南迦巴瓦岩群的片麻状黑云花岗闪长岩进行了年代学、岩石地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素研究,为探讨高喜马拉雅地区泛非运动增添了新的基础资料。

## 1 区域地质背景

喜马拉雅是印度与欧亚板块俯冲碰撞作用形成的全球最年轻、规模最大和正在活跃的造山带,东、西两端分别有一个构造急剧转向的构造结,这里是整个喜马拉雅造山带中构造应力作用最强、隆升和剥蚀速率最快的地区(张泽明等,2008a,2008b;沈昆等,2008;臧学祥等,2010)。喜马拉雅东构造结主要由高喜马拉雅结晶岩系组成,又称南迦巴瓦岩群,缺失特提斯喜马拉雅沉积岩系(郑来林等,2004a,2004b)。

根据岩性、变形样式的差异,南迦巴瓦岩群自下而上划分为直白岩组( $\text{Pt}_{2,3z}$ )、多雄拉岩组( $\text{Pt}_{2,3d}$ )和派乡岩组( $\text{Pt}_{2,3p}$ ),三者之间均为构造界面分割。直白岩组( $\text{Pt}_{2,3z}$ )主要为一套富铝片麻岩、混合片麻岩、片麻状闪长岩及大理岩,夹石榴单斜辉石岩、石榴角闪岩、蓝晶二长片麻岩等高压麻粒岩夹层或扁豆体,岩石具高温型性流变特征。多雄拉岩组( $\text{Pt}_{2,3d}$ )

① 中国地质大学(北京)地质调查院,2010. 1:25 万安多县幅区调报告。

由条带状混合片麻岩和眼球状混合岩、肠状混合岩等组成,岩石发育塑性流动褶皱及鞘褶皱。派乡岩组( $Pt_{2-3}p$ )主要由黑云变粒岩、片麻岩及多层大理岩组成,发育一系列尖棱状的相似褶皱,劈理化较普遍。本文的研究对象片麻状花岗闪长岩共有两处,

东边的为椭圆状南北向分布,以侵入体形式侵入南迦巴瓦岩群,西边的为扁豆状东西向分布,以侵入体形式侵入南迦巴瓦岩群,与该岩体北部的花岗岩呈渐变过渡的接触关系,本文采样地点位于该花岗闪长岩体内,距离西藏米林县丹娘乡约 7 km (图 1)。

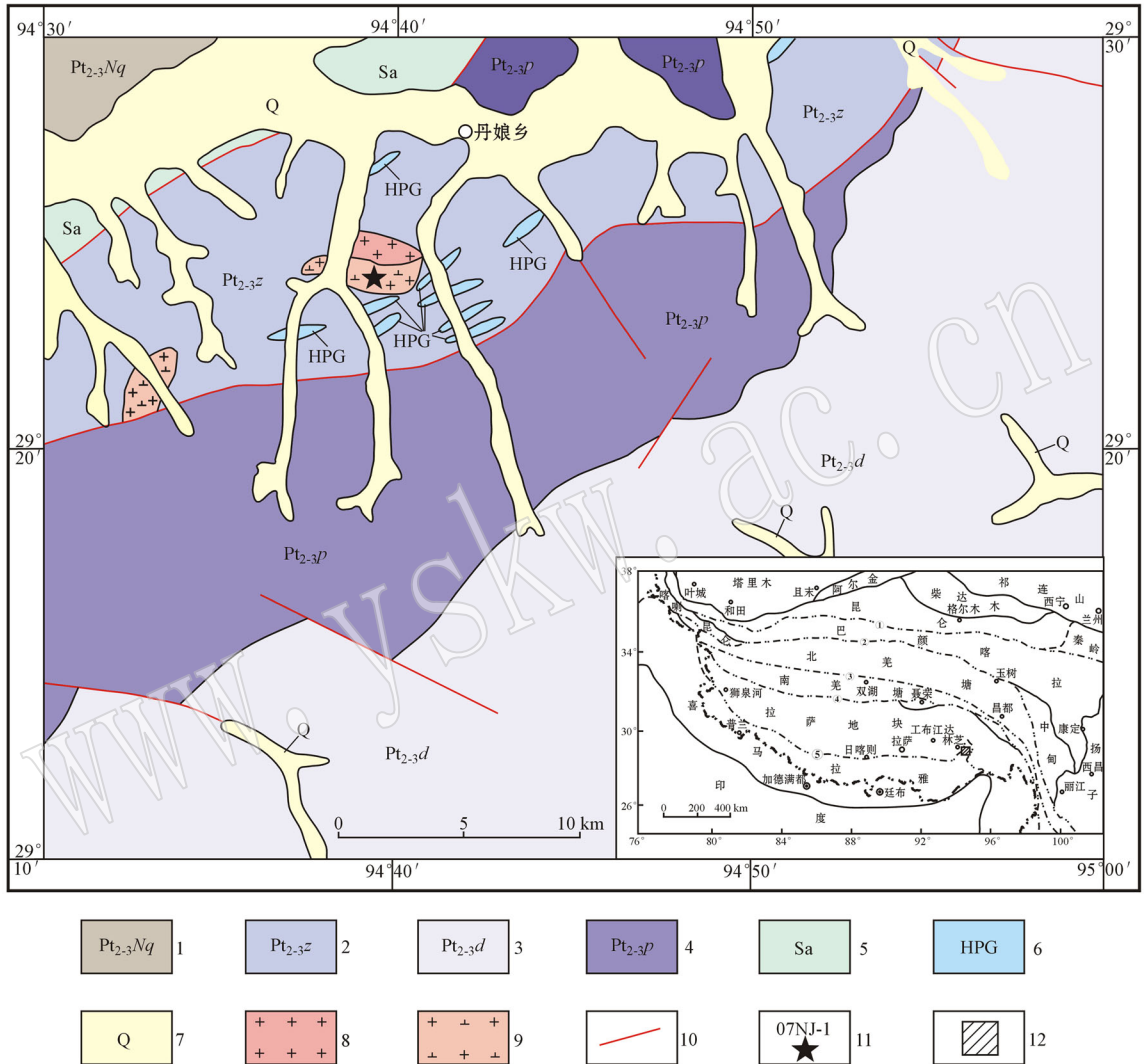


图 1 西藏米林丹娘乡南部地质简图[据成都地质矿产研究所(2003)<sup>①</sup> 修编]

Fig. 1 Geological sketch map of south Tanya Township in Mainling County, Tibet(modified after Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, 2003<sup>①</sup>)

1—中新元古代念青唐古拉岩群; 2—中新元古代南迦巴瓦岩群直白岩组; 3—中新元古代南迦巴瓦岩群多雄拉岩组; 4—中新元古代南迦巴瓦岩群派乡岩组; 5—老虎嘴石英片岩; 6—高压麻粒岩残留体; 7—第四系; 8—片麻状花岗岩; 9—片麻状花岗闪长岩; 10—断层; 11—采样位置; 12—研究区位置; ①—康西瓦-木孜塔格-玛沁-勉县-略阳缝合带; ②—西金乌兰-金沙江缝合带; ③—龙木错-双湖缝合带; ④—班公湖-怒江缝合带; ⑤—雅鲁藏布江缝合带

1—Nyainqentanglha Rock Group ( $Pt_{2-3}Nq$ ); 2—Zhibai Formation of Barwa Rock Group ( $Pt_{2-3}z$ ); 3—Duoxiongla Formation of Barwa Rock Group ( $Pt_{2-3}d$ ); 4—Paixiang Formation of Barwa Rock Group ( $Pt_{2-3}p$ ); 5—Tiger Mouth quartz schist; 6—high-pressure granulite relicts; 7—Quaternary; 8—gneissic granite; 9—gneissic granodiorite; 10—fault; 11—sampling location; 12—study area; ①—suture of Kangxiwa-Muzitage-Maqin-Mianxian-Lueyang; ②—suture of Xijinwulan-Jinshajiang; ③—suture of Lungmu Co-Shuanghu; ④—suture of Bangonghu-Nujiang; ⑤—suture of Yarlung Zangbo Jiang

① 成都地质矿产研究所. 2003. 1:25 万墨脱县幅区调报告.

## 2 岩体岩相学特征

丹娘乡片麻状花岗闪长岩呈灰色, 半自形-他形粒状结构、蠕虫结构, 片麻状构造, 局部发育眼球状构造, 岩石发生轻微蚀变。在正交偏光下, 可以见到该岩体主要矿物有斜长石(40%~45%)、石英(25%~30%)、钾长石(10%~15%), 次要矿物为黑云母

(6%~8%)、角闪石(5%~6%), 副矿物有磷灰石(2%)、榍石(1%)、锆石(1%)。其中部分石英发生碎裂, 可见波状消光, 少数小颗粒石英(0.1 mm)被包裹在斜长石内部(图 2a)。黑云母总体沿片麻理方向定向排列(图 2b)。在侵入岩的 QAP 三角图解中落入花岗闪长岩区域, 结合镜下矿物成分和含量的鉴定, 将西藏丹娘乡侵入南迦巴瓦岩群的岩体定名为片麻状黑云花岗闪长岩。

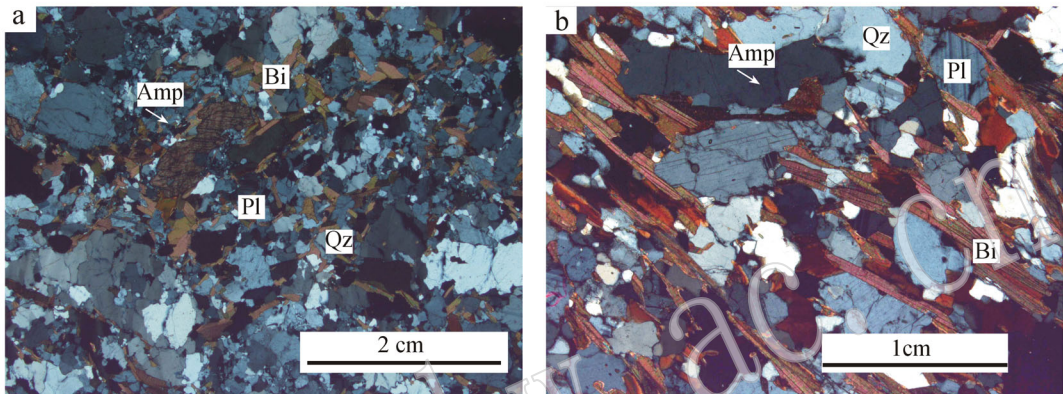


图 2 片麻状花岗闪长岩(NJ-1)中的石英具碎裂重结晶现象(a)和黑云母呈定向排列(b)(正交偏光)

Fig. 2 Recrystallization of quartz fragmentation (a) and alignment of biotite (b) in gneissic granodiorite (crossed nicols)

Q—石英; Bi—黑云母; Pl—斜长石; Amp—角闪石  
Q—quartz; Bi—biotite; Pl—plagioclase; Amp—amphibole

## 3 岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

### 3.1 采样

测年样品(NJ-1)采自西藏米林县丹娘乡兰嘎村片麻状花岗闪长岩, 地理坐标为 N: 29°26'14.2", E: 94°41'1.6", H: 3 150 m, 样品重量大约 10 kg。将岩石破碎至 20~30 目, 用通常方法分选后得到约 1 000 粒锆石。在双目镜下挑选出形态较为完整、无裂痕、无包裹体的锆石约 120 粒作为测定对象。

### 3.2 测试方法

将分选出的锆石晶体制成样品靶, 打磨时使得锆石中心暴露出来, 然后进行锆石可见光显微照相、阴极发光(CL)显微图像及 LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 同位素组成测定。

锆石的阴极发光(CL)图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。采用美国 Gatan 公司生产的阴极荧光光谱仪(型号 Mono CL3+)进行锆石内部结构显微照相分析。LA-ICP-MS 法锆石微区 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 Agilent7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司

的 ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas200M 光学系统的联机上进行。激光束斑直径为 30 μm, 激光剥蚀深度为 20~40 μm。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化, 采样方式为单点剥蚀, 数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式, 每完成 4~5 个待测样品测定, 插入测标样一次。在所测锆石样品 15~20 个点前后各测 2 次 NIST SRM610。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外部标准物质, 元素含量采用 NIST SRM610 作为外标。由于 SiO<sub>2</sub> 在锆石中的含量较恒定, 选择<sup>29</sup>Si 作为内标来消除激光能量在点分析过程中以及分析点之间的漂移, 对于大多数元素单点分析的相对标准偏差为 5%~15%。详细分析步骤和数据处理方法参见相关文献(Gao Shan *et al.*, 2002; 袁鸿林等, 2003)。采用 Glitter (ver4.0, Macquarie University)程序对锆石的同位素比值及元素含量进行计算, 并按照 Andersen Tom 的方法(Andersen, 2002), 用 LAMICPMS Common Lead Correction(ver3.15)进行了普通铅校正, 年龄计算及谐

和图采用 Isoplot(ver3.0)完成(Ludwig, 2003)。

### 3.3 锆石特征

丹娘乡片麻状花岗闪长岩中获得的锆石呈浅黄色-无色透明柱状或粒状, 自形程度较高(部分残缺锆石属于碎样时机械破损), 粒径多在  $80 \mu\text{m} \times 120$

$\mu\text{m} \sim 180 \mu\text{m} \times 260 \mu\text{m}$ , 多数锆石较大。锆石的阴极发光(CL)图像如图3所示, 多数发育宽缓的环带结构(1、4、5、8、10、11、14、17、24、25、28、31 测点); Th/U 比值一般在  $0.06 \sim 1.60$  之间(表1), 多数大于  $0.21$ , 平均值为  $0.31$ , 具岩浆结晶锆石特征。



图3 片麻状花岗闪长岩(NJ-1)锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of zircon from gneissic granodiorite

丹娘乡片麻状花岗闪长岩的锆石经普通铅校正后, U-Pb 测试结果列于表1, 锆石有效测试点共32个。21号测点可能由于测试误差导致谐和度太差, 不参与计算; 19、32号测点分别得到  $471 \text{ Ma}$ 、 $496 \text{ Ma}$  年龄数据, 可能代表两期变质年龄; 其余锆石测点(1~18、20、22~31号, 一共29个测点)有一个集中区,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄介于  $510 \sim 525 \text{ Ma}$  之间, 在 U-Pb 谐和图上成群集中分布(图4), 谐和年龄为  $513.7$

$\pm 2.8 \text{ Ma}$  (MSWD = 0.12),  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $515.5 \pm 2.3 \text{ Ma}$  (MSWD = 0.38), 谐和年龄和加权平均年龄在误差范围内基本一致, 这些测点所对应的锆石具有环带结构, Th/U 比值多数大于  $0.21$ , 表明这些锆石应为同期岩浆结晶成因。因此,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄  $515.5 \pm 2.3 \text{ Ma}$  代表片麻状花岗闪长岩的岩浆作用期间原岩形成年龄。

表 1 侵入南迦巴瓦岩群片麻状黑云花岗闪长岩(NJ-1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of gneissic biotite granodiorite that intruded into Namche Barwa complex

样品 编号	同位素比值										同位素表面年龄/Myr										谐和度		谐和年龄/Myr	
	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		Th/U		年龄	年龄
	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$		
07NJ-1-01	0.055 1	0.000 8	0.637 0	0.010 0	0.083 7	0.001 1	0.025 1	0.000 4	416	17	500	6	518	6	501	8	141	2 446	209	0.06	96.53	518	6	
07NJ-1-02	0.055 6	0.000 9	0.652 0	0.011 0	0.084 9	0.001 1	0.026 2	0.000 4	438	18	510	7	525	6	522	8	402	2 532	228	0.16	97.14	525	6	
07NJ-1-03	0.055 6	0.000 8	0.647 0	0.011 0	0.084 3	0.001 1	0.025 8	0.000 4	436	17	506	7	522	6	514	7	625	2 784	259	0.22	96.93	522	6	
07NJ-1-04	0.055 8	0.000 8	0.644 0	0.011 0	0.083 6	0.001 1	0.024 8	0.000 4	444	17	505	7	518	6	496	7	525	2 705	241	0.19	97.49	518	6	
07NJ-1-05	0.056 1	0.000 9	0.650 0	0.011 0	0.084 1	0.001 1	0.024 7	0.000 4	455	18	509	7	520	6	493	7	763	1 276	127	0.60	97.88	520	6	
07NJ-1-06	0.055 3	0.000 9	0.639 0	0.011 0	0.083 8	0.001 1	0.025 1	0.000 4	424	18	502	7	519	6	501	8	502	3 022	269	0.17	96.72	519	6	
07NJ-1-07	0.056 4	0.001 0	0.646 0	0.012 0	0.083 0	0.001 1	0.026 8	0.000 4	468	19	506	7	514	6	535	8	239	1 831	127	0.13	98.44	514	6	
07NJ-1-08	0.056 9	0.001 0	0.655 0	0.012 0	0.083 3	0.001 1	0.022 9	0.000 4	489	19	511	7	516	6	458	8	195	2 447	222	0.08	99.03	516	6	
07NJ-1-09	0.056 3	0.001 1	0.656 0	0.013 0	0.084 4	0.001 1	0.024 3	0.000 4	464	23	512	8	523	7	485	8	656	1 780	185	0.37	97.90	523	7	
07NJ-1-10	0.056 3	0.000 9	0.648 0	0.011 0	0.083 3	0.001 1	0.024 3	0.000 4	465	19	507	7	516	6	484	7	541	1 469	138	0.37	98.26	516	6	
07NJ-1-11	0.056 2	0.001 0	0.647 0	0.012 0	0.083 4	0.001 1	0.024 2	0.000 4	460	20	506	7	516	6	483	7	516	1 221	117	0.42	98.06	516	6	
07NJ-1-12	0.057 7	0.001 1	0.658 0	0.013 0	0.082 7	0.001 1	0.023 6	0.000 4	519	23	514	8	512	6	472	8	374	809	77	0.46	100.39	512	6	
07NJ-1-13	0.055 3	0.001 0	0.638 0	0.012 0	0.083 7	0.001 1	0.025 0	0.000 5	425	22	501	8	518	6	500	10	159	1 592	140	0.10	96.72	518	6	
07NJ-1-14	0.057 0	0.001 1	0.654 0	0.013 0	0.083 2	0.001 1	0.024 1	0.000 4	490	22	511	8	515	6	481	8	474	2 118	192	0.22	99.22	515	6	
07NJ-1-15	0.058 1	0.001 3	0.665 0	0.015 0	0.083 0	0.001 1	0.024 9	0.000 5	532	27	518	9	514	7	498	10	119	1 168	54	0.10	100.78	514	7	
07NJ-1-16	0.056 9	0.001 0	0.653 0	0.012 0	0.083 2	0.001 1	0.024 7	0.000 4	487	20	510	7	515	6	492	8	643	2 720	249	0.24	99.03	515	6	
07NJ-1-17	0.056 5	0.001 0	0.649 0	0.012 0	0.083 3	0.001 1	0.023 8	0.000 4	471	21	508	8	516	6	475	8	556	2 547	229	0.22	98.45	516	6	
07NJ-1-18	0.055 9	0.001 1	0.642 0	0.013 0	0.083 3	0.001 1	0.024 7	0.000 4	450	24	504	8	516	6	494	8	311	1 673	121	0.19	97.67	516	6	
07NJ-1-19	0.056 7	0.001 2	0.592 0	0.013 0	0.075 7	0.001 0	0.020 6	0.000 3	480	26	472	8	471	6	412	6	4 101	2 560	272	1.60	100.21	471	6	
07NJ-1-20	0.057 0	0.001 1	0.656 0	0.013 0	0.083 5	0.001 1	0.023 8	0.000 4	492	21	512	8	517	6	475	8	646	2 801	201	0.23	99.03	517	6	
07NJ-1-21	0.061 1	0.001 2	0.668 0	0.014 0	0.079 4	0.001 0	0.023 4	0.000 4	641	23	520	8	492	6	468	8	709	1 587	144	0.45	105.69	492	6	
07NJ-1-22	0.057 4	0.001 2	0.656 0	0.014 0	0.082 9	0.001 1	0.024 6	0.000 4	506	26	512	9	513	6	491	8	652	1 965	180	0.33	99.81	513	6	
07NJ-1-23	0.058 6	0.001 3	0.668 0	0.015 0	0.082 7	0.001 1	0.024 5	0.000 5	553	27	520	9	512	7	489	9	307	1 967	130	0.16	101.56	512	7	
07NJ-1-24	0.058 9	0.001 3	0.669 0	0.015 0	0.082 3	0.001 1	0.024 2	0.000 5	563	26	520	9	510	6	484	9	432	1 928	176	0.22	101.96	510	6	
07NJ-1-25	0.057 9	0.001 2	0.658 0	0.013 0	0.082 4	0.001 1	0.023 1	0.000 4	527	23	514	8	511	6	462	8	861	2 324	220	0.37	100.59	511	6	
07NJ-1-26	0.057 8	0.001 2	0.657 0	0.014 0	0.082 4	0.001 1	0.022 8	0.000 4	524	25	513	9	510	6	456	8	353	2 330	158	0.15	100.59	510	6	
07NJ-1-27	0.056 8	0.001 7	0.649 0	0.020 0	0.082 9	0.001 2	0.022 8	0.000 5	484	42	508	12	514	7	456	9	326	563	56	0.58	98.83	514	7	
07NJ-1-28	0.058 5	0.001 3	0.667 0	0.015 0	0.082 7	0.001 1	0.024 1	0.000 4	550	27	519	9	512	6	481	9	486	1 645	152	0.30	101.37	512	6	
07NJ-1-29	0.057 9	0.001 3	0.660 0	0.015 0	0.082 7	0.001 1	0.023 2	0.000 4	526	28	514	9	512	7	464	8	993	2 684	258	0.37	100.39	512	7	
07NJ-1-30	0.058 9	0.001 5	0.669 0	0.017 0	0.082 5	0.001 1	0.021 7	0.000 4	562	31	520	10	511	7	434	9	352	1 916	165	0.18	101.76	511	7	
07NJ-1-31	0.058 6	0.001 4	0.669 0	0.016 0	0.082 9	0.001 1	0.023 5	0.000 4	553	29	520	10	513	7	469	9	776	2 694	261	0.29	101.36	513	7	
07NJ-1-32	0.058 3	0.001 6	0.643 0	0.017 0	0.080 0	0.001 1	0.022 9	0.000 4	541	35	504	11	496	7	457	9	1 244	1 614	163	0.77	101.61	496	7	

注: MC-LA-ICP-MS U-Pb 同位素含量和年龄测试在西北大学大陆力学国家重点实验室完成,使用 Andersen 等的软件进行了普通铅校正。 $\text{Pb}^* = 0.241 \times {}^{206}\text{Pb} + 0.221 \times {}^{207}\text{Pb} + 0.524 \times {}^{208}\text{Pb}_0$ 。

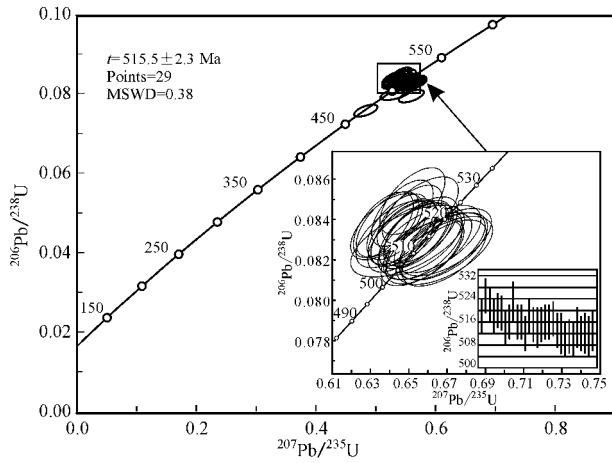


图 4 丹娘乡花岗质片麻岩 (NJ-1) 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram for gneissic granodiorite in Tanya Township

## 4 岩石地球化学特征

### 4.1 常量元素特征

丹娘乡片麻状花岗闪长岩岩石化学分析数据经过去除烧失量及数据均一化处理后列于表 2。高  $\text{SiO}_2$  含量为 66.47% ~ 72.42% ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 15.07% ~ 15.75% ,  $\text{Na}_2\text{O}$  为 3.21% ~ 4.33% ,  $\text{K}_2\text{O}$  为 2.68% ~ 5.21% , 属于钾质岩石, 低  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.03% ~ 1.01%) ,  $\text{MgO}$  (0.48% ~ 1.73%) ,  $\text{MnO}$  (0.01% ~ 0.05%) ;  $\text{FeO}^T/\text{MgO}$  为 2.80 ~ 3.65, 平均 3.16, 比值稍高于一般 I 型、M 型花岗岩 (Whalen *et al.* , 1987), 低于 A 型花岗岩 (Turner *et al.* , 1992) 。铝饱和指数  $A/\text{CNK}$  为 0.98 ~ 1.08, 平均 1.03, 在  $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$  指数图解中样品大部分落入过铝质区 (图 5a) 显示准铝质-弱过铝质岩石的特征。里特曼指数  $\sigma$  为 1.53 ~ 3.08, 为钙碱性系列, 在  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  图解上大部分样品投入高钾钙碱性系列区 (图 5b) 。在 Harker 图解中所有样品中的  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{FeO}^T$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  随着  $\text{SiO}_2$  含量的变化增加而减少,  $\text{Na}_2\text{O}$  随着  $\text{SiO}_2$  的含量增加而增加, 均呈较好的线性关系 (图 6) , 反映其原始岩浆具有同源或同时代的特征。综上所述, 该岩体为准铝质-弱过铝质高钾钙碱性系列花岗岩, 具有 S 型花岗岩的特征。

### 4.2 稀土及微量元素特征地球化学特征

丹娘乡片麻状花岗闪长岩稀土及微量元素分析数据如表 2 所示。该岩体稀土总量较高 ( $50.2 \times 10^{-6}$

表 2 丹娘乡片麻状黑云花岗闪长岩主要元素 ( $w_B/\%$ ) 稀土及微量元素 ( $w_B/10^{-6}$ ) 分析结果

Table 2 Major element compositions ( $w_B/\%$ ), REE element compositions and trace element compositions ( $w_B/10^{-6}$ ) of gneissic biotite granodiorite in Tanya Township

样品编号	07NJ-1- (1)	07NJ-1- (2)	07NJ-1- (3)	07NJ-1- (4)	07NJ-1- (5)
$\text{SiO}_2$	72.42	66.47	67.56	70.58	69.75
$\text{TiO}_2$	0.21	0.87	0.59	0.42	0.64
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15.75	15.42	15.14	15.24	15.07
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.06	1.01	0.21	0.03	0.50
$\text{FeO}$	1.35	3.93	4.05	2.90	3.10
$\text{MnO}$	0.01	0.05	0.04	0.03	0.03
$\text{MgO}$	0.48	1.73	1.28	0.94	0.97
$\text{CaO}$	2.96	2.71	2.25	2.77	2.61
$\text{Na}_2\text{O}$	3.42	3.21	3.48	4.33	3.42
$\text{K}_2\text{O}$	3.28	4.41	5.21	2.68	3.74
$\text{P}_2\text{O}_5$	1.28	4.41	5.21	2.68	3.74
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	6.71	7.62	8.69	7.00	7.15
$\sigma$	1.53	2.48	3.08	1.78	1.91
$\text{FeO}^T/\text{MgO}$	2.94	2.80	3.32	3.10	3.65
AR	2.12	2.45	3.00	2.27	2.36
$A/\text{CNK}$	1.08	1.03	0.98	1.01	1.04
La	11.34	185.40	40.96	42.51	81.57
Ce	19.97	310.40	78.54	76.47	149.60
Pr	2.37	35.63	9.57	8.97	17.63
Nd	8.98	122.00	37.54	32.68	65.85
Sm	1.96	22.39	10.06	6.07	13.95
Eu	0.55	2.02	0.78	1.09	1.61
Gd	1.78	17.69	9.92	4.43	10.31
Tb	0.26	2.57	1.44	0.61	1.25
Dy	1.44	13.53	7.31	2.86	5.18
Ho	0.24	2.48	1.26	0.52	0.77
Er	0.63	7.13	3.20	1.47	1.95
Tm	0.08	0.94	0.37	0.18	0.21
Yb	0.50	6.08	2.15	1.21	1.28
Lu	0.07	0.87	0.31	0.17	0.17
$\Sigma\text{REE}$	50.17	729.13	203.40	179.24	351.32
LREE	45.17	677.84	177.44	167.79	330.21
HREE	5.00	51.29	25.96	11.45	21.11
LREE/HREE	9.03	13.22	6.84	14.66	15.65
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	22.68	30.49	19.05	35.19	63.83
$\delta\text{Eu}$	0.88	0.30	0.24	0.62	0.39
Ba	334.50	698.70	506.40	431.70	565.70
Rb	55.33	245.40	392.70	187.90	201.50
Sr	498.30	153.20	98.06	229.30	94.24
Co	127.50	118.40	82.19	123.40	103.20
V	6.73	81.88	49.08	40.82	48.40
Cr	4.98	35.50	22.59	34.24	22.48
Ni	2.39	8.53	4.73	8.25	11.07
Nb	2.93	26.17	23.73	23.37	8.06
Ta	0.28	3.47	1.12	1.50	0.79
Zr	104.10	17.18	177.30	4.95	187.70
Hf	2.94	1.07	5.03	0.28	5.49
Y	6.92	68.87	33.48	14.71	20.31
Cs	1.57	2.13	4.26	3.76	5.05
Th	4.84	75.03	27.14	44.28	50.31
U	0.58	6.54	2.91	4.69	2.87
Pb	15.53	13.42	13.86	11.50	37.48
Li	11.09	17.09	33.38	27.70	70.90
Be	1.33	3.93	4.24	2.87	3.83
Sc	2.36	13.30	9.62	10.68	5.99
Rb/Sr	0.11	1.60	4.00	0.82	2.14
Rb/Ba	0.17	0.35	0.78	0.44	0.36
Nb/Ta	10.41	7.54	21.24	15.58	10.21

注: 主要元素、微量元素及稀土元素由中国地质调查局西安地质矿产研究所采用 XRF 分析。

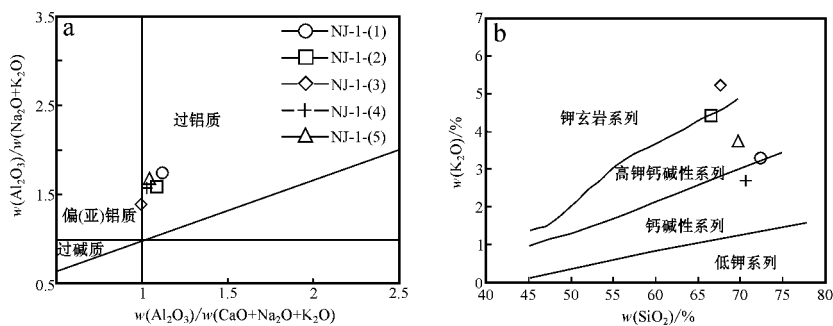


图 5 丹娘乡片麻状花岗闪长岩的 Shand 指数图 (a, 据 Maniar and Piccoli, 1989) 和  $K_2O-SiO_2$  图 (b, 据 Rickwood, 1989)  
 Fig. 5 Shand index (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and  $K_2O-SiO_2$  diagram (b, after Rickwood, 1989) of gneissic granodiorite in Tanya Township

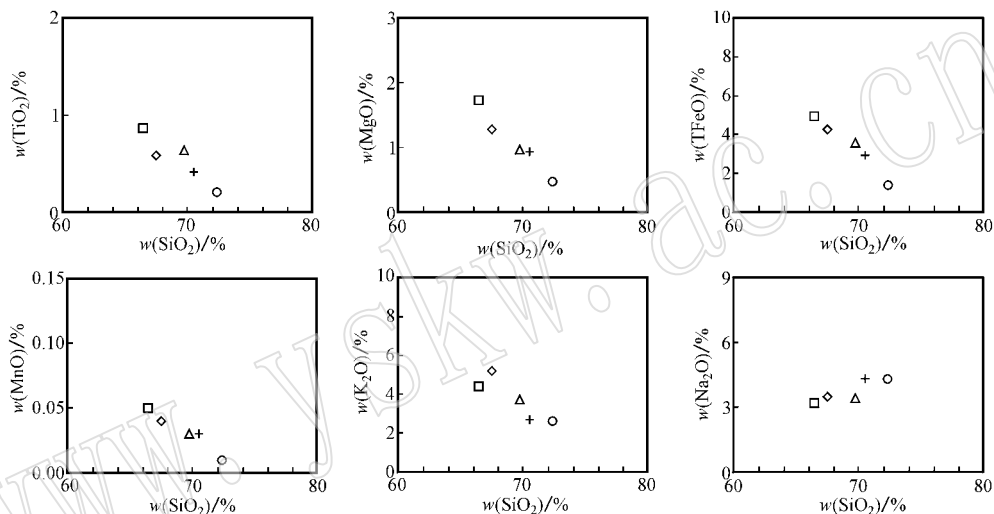


图 6 丹娘乡片麻状花岗闪长岩的 Harker 图解  
 Fig. 6 Harker diagram of gneissic granodiorite in Tanya Township

$\sim 729.1 \times 10^{-6}$ ) 稀土元素配分模式为轻稀土元素富集的右倾曲线 (图 7a) ( $La/Yb$ )<sub>N</sub> 为 19.1~63.8, 出现弱 Eu 负异常 ( $\delta Eu = 0.24 \sim 0.88$ )。Eu 的负异常可能是斜长石、钾长石的分离引起的 (王中刚等, 1989)。由表 2 和微量元素蛛网图 (图 7b) 可知, 该岩体的强不相容大离子亲石元素 Rb、Ba、Th 和 U 相对富集, 尤其出现 Rb、Th 高峰, 而 Nb、Ta、Sr、Zr 等元素出现显著负异常, 表明该岩体可能属于陆壳重熔的产物, 总体表现为 S 型花岗岩类的特征。 (Pearce *et al.*, 1984; 肖庆辉等, 2002; 林慈奎等, 2006; 雍拥等, 2008)。该岩体还显示出 Ba 弱负异常, 可能与后期的蚀变作用有关。

#### 4.3 同位素地球化学特征

丹娘乡片麻状花岗闪长岩的 Sr、Nd、Pb 同位素组成见表 3, 根据岩浆结晶年龄  $t = 515$  Ma 对岩石  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值  $I_{Sr}$ 、 $\epsilon Nd(t)$ 、Pb 同位素等比值进

行统一计算。丹娘乡片麻状花岗岩  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值  $I_{Sr}$  为 0.706 6~0.751 4, 其中样品 07NG-1(1)~07NG-1(4) 为 0.706 6~0.716 0, 与现代大陆硅铝质岩石的  $I_{Sr}$  平均值为 0.719 接近, 明显高于未遭受地壳硅铝物质混染的大洋玄武岩  $I_{Sr}$  值 (0.702~0.707),  $I_{Sr}$  指示成岩物质源于地壳 (肖庆辉等, 2002)。样品 07NG-1(5) 的值为 0.751 4, 可能是岩浆活动中  $^{87}Sr$  流失速度比  $^{86}Sr$  的流失速度慢或是实验样品被污染导致的, 本次不参与讨论。较低的  $\epsilon Nd(t) = -8.81 \sim -10.57$ , 与后碰撞准铝质-弱过铝质花岗岩  $\epsilon Nd(t)$  值相似 (White and Chappell, 1988), 且  $\epsilon Nd(t)$  和  $I_{Sr}$  无明显相关关系 (图 8a) 表明基本无地幔物质的加入 (朱炳泉, 1998)。具有高  $\epsilon Sr(t)$  值 (平均值 239.18) 周泰禧等 (1996) 和 Chen 等 (2000) 研究认为, 高  $\epsilon Nd(t)$  值反映了地幔的贡献, 而高  $\epsilon Sr(t)$  值反映了地壳物质的贡献。 ( $^{207}Pb/^{204}Pb$ ) = 15.738 6~15.840 3,



表 3 丹娘乡片麻状黑云花岗闪长岩 Sr、Nb、Pb 同位素组成  
Table 3 Sr, Nd, Pb isotope data for gneissic biotite granodiorite in Tanya Township

样号	07NG-1(1)	07NG-1(2)	07NG-1(3)	07NG-1(4)	07NG-1(5)
Sm/ $10^{-6}$	1.96	22.39	10.06	6.07	13.95
Nd/ $10^{-6}$	8.98	122.00	37.54	32.68	65.85
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.71	0.75	0.80	0.73	0.80
$I_{\text{Sr}}$	0.71	0.72	0.71	0.72	0.75
$\epsilon \text{Sr}(t)$	39.01	167.88	142.26	172.50	674.26
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
$\epsilon \text{Nd}(t)$	-9.50	-8.68	-10.57	-10.03	-8.81
$t_{\text{DM}}/\text{Ga}$	2.26	1.84	3.42	1.96	2.12
$t_{2\text{DM}}/\text{Ga}$	1.64	1.68	1.58	1.77	1.61
Pb/ $10^{-6}$	15.53	13.42	13.86	11.50	37.48
Th/ $10^{-6}$	4.84	75.03	27.14	44.28	50.31
U/ $10^{-6}$	0.58	6.54	2.91	4.69	2.87
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$19.5638 \pm 27$	$21.5105 \pm 24$	$21.2072 \pm 22$	$21.4336 \pm 11$	$19.0108 \pm 29$
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$15.7927 \pm 21$	$15.9026 \pm 18$	$15.8318 \pm 17$	$15.9540 \pm 8$	$15.7599 \pm 23$
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$40.7303 \pm 57$	$48.9621 \pm 55$	$44.6936 \pm 49$	$44.5587 \pm 24$	$39.7740 \pm 59$
$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$	19.38	19.18	20.20	19.49	18.65
$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$	15.78	15.77	15.77	15.84	15.74
$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$	40.25	40.41	41.70	38.67	37.72

注: Sr、Nb、Pb 同位素组成由西北大学大陆动力学国家重点实验室完成测试分析,  $t = 515 \text{ Ma}$ 。

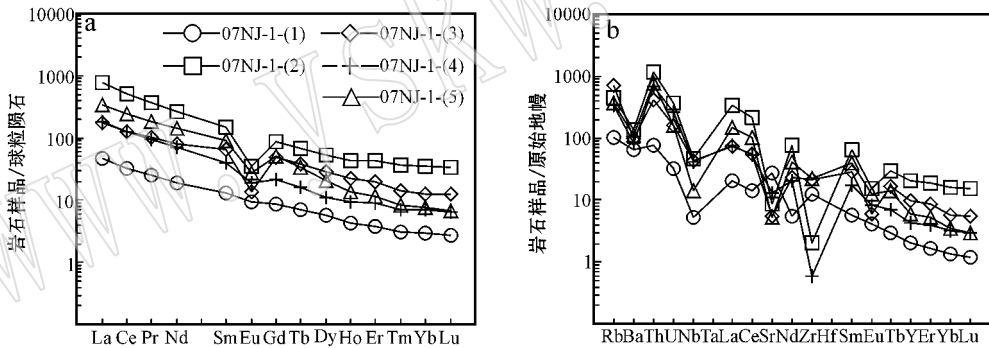


图 7 丹娘乡片麻状花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b)  
(标准化值据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle normalized spidergram (b) for gneissic granodiorite in Tanya Township (normalized data after Sun and McDonough, 1989)

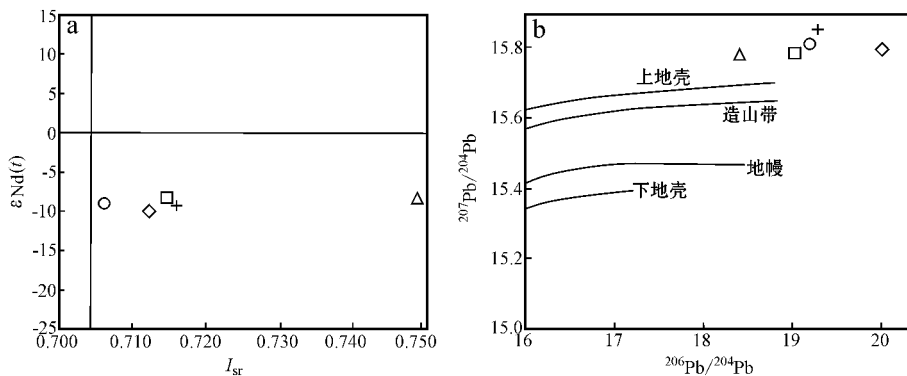


图 8 丹娘乡片麻状花岗闪长岩  $\epsilon \text{Nd}(t) - I_{\text{Sr}}$  图解 (a) 和  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解 (b)

Fig. 8  $\epsilon \text{Nd}(t) - I_{\text{Sr}}$  diagram (a) and  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagram (b) for gneissic granodiorite in Tanya Township

比值较高,与大陆平均值( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.76 \pm 0.09$ , Asmerom *et al.*, 1991)基本吻合。( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ) = 18.6453~20.2046。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上(图 8b)样品位于上地壳演化线附近,属于上地壳特征的 Pb 同位素组成。

## 5 讨论与结论

### 5.1 源区和构造环境分析

丹娘乡花岗片麻岩具有过铝质特征( $A/\text{CNK} > 1.03$ ),与后碰撞准铝质-弱过铝花岗岩学及地球化学特征相似,相对高的  $\text{SiO}_2$  含量,地壳特征的 Sr、Nd、Pb 同位素组成及本区缺少同源的中基性岩浆活动等特征,就排除了其直接来自地幔源区的可能性。地球演化过程中, K、Rb 不断向上迁移进入硅铝层,上地幔越来越亏损 K、Rb, Sr 主要富集在斜长石中代替 Ca 的位置。因此, Rb/Sr 比值越高,说明源岩主要来自上部陆壳,且上部陆壳的 Rb/Sr 值大约为 0.32,大陆壳平均 Rb/Sr 值大约为 0.24(Taylor and Mcleannan, 1985)。研究区丹娘乡准铝质-弱过铝质片麻状花岗岩的 Rb/Sr 值远大于 0.32,据此可以判断丹娘乡准铝质-弱过铝质片麻状花岗岩源岩为上部陆壳,与同位素地球化学特征一致。Sr、Nd 同位素组成表明,丹娘乡片麻状花岗闪长岩具有负  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和 Nd 模式年龄( $t_{\text{DM}} = 1.84 \sim 3.42$ , 表 3)表明其来源可能是古老的上地壳物质,可能与古元古代古老地壳物质的再循环有关。结合 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值特征,综合推断丹娘乡片麻状花岗闪长岩源岩形成于上地壳,在高温环境下部分熔融的花岗闪长质岩浆,进一步认为该岩体可能是南迦巴瓦岩群在高温

环境下部分熔融的产物。

花岗岩类是组成大陆地壳的主要岩石,在造山演化的各个阶段都可以产生。一些学者曾认为过铝质花岗岩是陆-陆碰撞过程中早期挤压环境下地壳加厚而发生部分熔融的产物(Harris *et al.*, 1986; Pearce, 1996; Williamson *et al.*, 1996)。研究发现,大量原来认为是同碰撞的过铝质花岗岩是后碰撞期的产物(Pitcher *et al.*, 1983),形成于碰撞高峰期后的岩石圈伸展背景(Forster *et al.*, 1999; Kalsbeek *et al.*, 2001; 肖庆辉等, 2002)。西藏丹娘乡准铝质-弱过铝质片麻状花岗闪长岩属高钾钙碱性系列,而高钾钙碱性系列岩浆岩是后碰撞岩浆活动的重要特征之一(Zhao *et al.*, 1996; Liegeois *et al.*, 1998)。西藏丹娘乡准铝质-弱过铝质片麻状花岗闪长岩在 Rb-(Y+Nb)图解(图 9a)上投点分别落入火山弧花岗岩(VAG)、后碰撞花岗岩(Post-COLG)重叠区域内及板内花岗岩(WPG)、后碰撞花岗岩(Post-COLG)的重叠区内,在  $R_1 - R_2$  因子判别图(图 9b)上,投点落入同碰撞花岗岩区,少数落在碰撞后造山区,由此显示西藏丹娘乡准铝质-弱过铝质片麻状花岗闪长岩可能形成于后碰撞构造阶段;在  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} - \delta\text{Eu}$ 图解(图 9c)中样点主要落入壳源区。从多元素多方法图解中可以看出西藏丹娘乡准铝质-弱过铝质片麻状花岗闪长岩可能是后造山阶段形成的。根据本文所获得的常量元素、稀土和微量元素、同位素地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果认为西藏丹娘乡准铝质-弱过铝质片麻状花岗岩属于准铝质-弱过铝质钙碱性系列 S 型花岗岩,可能是在  $513.7 \pm 2.8 \text{ Ma}$ (即早寒武世)后碰撞阶段形成的。

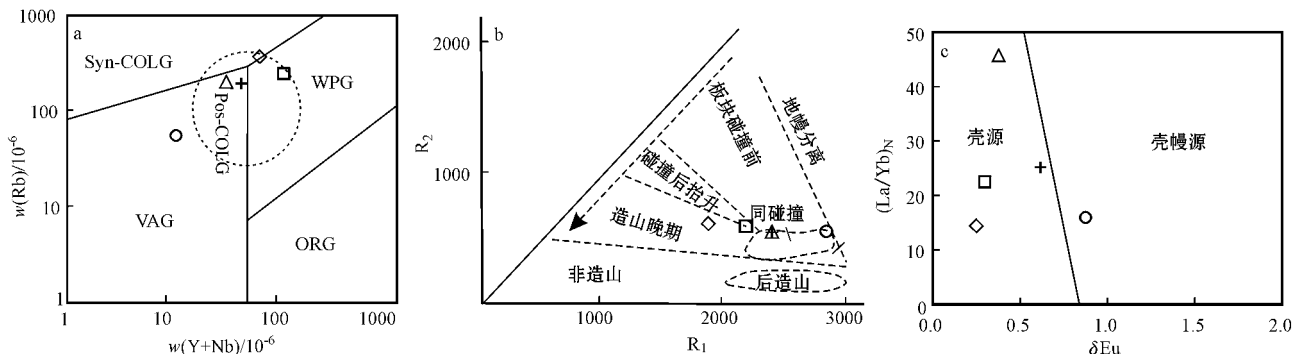


图 9 丹娘乡片麻状花岗闪长岩构造环境图解(a 据 Pearce 等, 1984; b 据 Batchelor 和 Bowden, 1985)

Fig. 9 Diagrams of tectonic environment (a after Pearce *et al.*, 1984; b after Batchelor and Bowden, 1985)

for gneissic granodiorite in Tanya Township

## 5.2 喜马拉雅东构造结造山作用

印度板块与欧亚大陆 65 Ma 以来的碰撞作用是喜马拉雅造山带发生了强烈变质、变形、岩浆、隆升与剥蚀作用( Tapponnier *et al.* , 1982 ; Harrison *et al.* , 1997 ; Hodges , 2000 ; Decelles *et al.* , 2001 )。但是, 研究也表明喜马拉雅造山带是一个长期复合的造山带。自从 Gansser( 1964 )提出喜马拉雅造山带形成于早古生代的观点以来, 很多研究者通过深入的研究给出了更多的证据, 并将其归为泛非造山带的一部分。在北印度、中尼泊尔和中国境内发现的奥陶纪的底砾岩及大量古生代岩浆、变质年龄表明原始喜马拉雅山是泛非-早古生代造山作用的产物, 现在的喜马拉雅造山带是泛非造山基础上再造山的结果( 许志琴等, 2005 )。近年来大量学者对位于喜马拉雅东构造结的南迦巴瓦岩群进行了研究, 获得了 490~553 Ma 的年龄( 潘桂棠等, 2004 ; 张泽明等, 2008a ; 戚学祥等, 2010 )。本文获得侵入南迦巴瓦岩群片麻状花岗闪长岩锆石年龄与其他高喜马拉雅结晶岩区是完全可以对比的, 这进一步支持了南迦巴瓦岩群是高喜马拉雅结晶杂岩的一部分这一传统认识。与此同时, 在亚东地区的高喜马拉雅结晶岩中获得的~500 Ma 的岩浆事件年龄, 也认为亚东和康玛地区同属泛非造山带的延伸部分之一( Liu *et al.* , 2006 ; 时超等, 2010 )。

泛非运动是指主要发生在 600~500 Ma 的一次重要地质事件, 受其影响的非洲大陆及相邻的冈瓦纳大陆的部分地区被称为泛非造山带( Acharyya , 2000 )。本次研究通过高精度的锆石 U-Pb 测年, 获得 513 Ma 的岩浆结晶年龄, 是泛非构造-热事件在东喜马拉雅构造结的地质记录, 说明在古生代早期东喜马拉雅构造结卷入了泛非事件中。通过岩石地球化学研究认为丹娘乡准铝质-弱过铝质片麻状黑云花岗闪长岩成于挤压环境向伸展环境转变的后碰撞造山环境, 结合新得到的 513 Ma 同位素年龄, 说明该时期泛非碰撞造山事件在东喜马拉雅构造结一带可能结束, 进入后碰撞造山的构造演化阶段。

致谢 论文修改过程中, 陈守建教授级高工和潘晓萍副研究员给予指导和鼓励, 镜下鉴定得到李向民研究员的帮助, 在数据测试和处理过程中得到第五春荣、弓化栋、田荣、武鹏的有益帮助, 在此一并表示衷心的感谢。

## References

- Acharyya S K. 2000. Break up of Australia-India-Madagascar Blok , Opening of the India Ocean and Continental Accretion in Southeast Asia with special reference to the characteristics of the Peri-Indian Collision Zones[ J ]. *Gondwana Research* , 4( 4 ): 425~443.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [ J ]. *Chemical Geology* , 192 : 59~79.
- Asmerom Y , Jacobsen S B , Butterfield N J , *et al.* 1991. Sr isotope variations in Late Proterozoic seawater : Implications for crustal evolution[ J ]. *Acta Geochim. Cosmochim.* , 55 : 2 883~2 894.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rocks series using multicationic[ J ]. *Chemical Geology* , 48 : 43~45.
- Chen B , Jahn B M , Wilde S , *et al.* 2000. Two contrasting Palaeozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia , China : Petro-genesis and tectonic implications[ J ]. *Tectonophysics* , 328 : 157~182.
- Cheng Liren , Zhang Yichun and Zhang Yujie. 2005. Discovery of the early Ordovician starta in Xianza County , Tibet and its significance [ J ]. *Journal of Stratigraphy* , 29( 1 ): 38~41( in Chinese with English abstract ).
- Decelles P G , Robison D M , Quade J , *et al.* 2001. Stratigraphy , structure and tectonic evolution of the Himalayan fold-thrust belt in western Nepa[ J ]. *Tectonics* , 20 : 487~509.
- Forster H J , Tischendorf G , Gottesmann B , *et al.* 1999. Late-collisional granites in the Variscan Erzgebirge[ J ]. *Journal of Petrology* , 40 : 1 613~1 645.
- Gansser A. 1964. *Geology of the Himalaya*[ M ]. Interscience Publishers , London.
- Gao Shan , Liu Xiaoming , Yuan Honglin , *et al.* 2002. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICP-MS[ J ]. *Geostand Newsl.* , 22 : 181~195.
- Harris N B W , Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[ J ]. *Geological Society of London , Special Publication* , 19 : 67~81.
- Harrison T M , Ryerson F J , Le F P , *et al.* 1997. A late Miocene-Pliocene orogin for the central Himalayan inverted metamorphism [ J ]. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 146 : 1~7.
- Hodges K V. 2000. Tectonic of the Himalaya and southern Tibet from perspectives[ J ]. *Geol. Soc. Am. Bull.* , 112 : 324~350.
- Kalsbeek F , Jepsen H and Nutman A. 2001. From source migmatite to plutons : tracking the origin of ca. 435 Ma S-type granites in the East Greenland Caledonian orog[ J ]. *Lithos* , 57 : 1~21.
- Li Cai , Wu Yanwang , Wang Ming , *et al.* 2010. Significant progress on Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in Qinghai-Tibet Plateau-discovery of Pan-African orogenic unconformity and Cambrian System in the Gangdise area , Tibet , China[ J ]. *Geological Bulletin of China* , 29( 12 ): 1 733~1 736( in Chinese with English abstract ).

- Li Cai, Xie Yaowu, Sha Shaoli, *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Pan-African granite in Baxoi County, eastern Tibet, China[ J ]. Geological Bulletin of China, 27(1):64~68( in Chinese with English abstract ).
- Liegeois J P, Navez J, Hertogen J, *et al.* 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and per alkaline granitoid[ J ]. Lithos, 45(1):1~28.
- Lin Ciluan, Sun Yong and Chen Danling, *et al.* 2006. Geochemistry and zircon LA-ICP MS dating of Iqe River granitic gneiss northern margin of Qaidam Basin[ J ]. Geochim. , 35(5):498~505( in Chinese with English abstract ).
- Liu W C, Zhou Z H, Zhang X X, *et al.* 2006. SHRIMP zircon geochronological constraints on a Pan-African orogeny in the Yadong Area, Southern Tibet[ J ]. Goldschmidt Conference Abstracts, A365.
- Ludwig K R. 2003. 3.0——A geochronology cal toolkit for Micro-soft Excel[ J ]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, (4):1~70.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [ J ]. GSA Bull. , 10(5):635~643.
- Pan Guitang, Ding Jun, Wang Liquan, *et al.* 2004. 1:150,000 Geological Map of Qinghai-Tibet Plateau and Adjacent Regions (with instructions)[ M ]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House( in Chinese ).
- Pearce J A. 1996. Sources and setting of granitic rocks[ J ]. Episodes, 19(4):120~125.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [ J ]. Petrol. , 25(4):956~983.
- Pitcher W S. 1983. Granite Type and Tectonic Environment[ M ]. Mountain Building Processes, London: Academic Press, 19~40.
- Richwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[ J ]. Lithos, 22(4):247~263.
- Qi Xuexiang, Li Huaqi, Li Tianfu, *et al.* 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[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 26(3):975~984( in Chinese with English abstract ).
- Shen Kun, Zhang Zeming, Yan Ling, *et al.* 2008. Composition and evolution of fluids in the continental orogen: A study of fluid inclusions in high-pressure granulites from the Namche Barwa area, Tibet of southwest China[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 24(7):1488~1500( in Chinese with English abstract ).
- Shi Chao, Li Rongshe, He Shiping, *et al.* 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for gneissic garnet-bearing biotite granodiorite in the Yadong area, southern Tibet, China and its geological significance [ J ]. Geological Bulletin of China, 29(12):1745~1753( in Chinese with English abstract ).
- Song Shuguang, Ji Jianqing, Wei Chunjing, *et al.* 2007. Early Paleozoic granite in Nujiang River of northwest Yunnan in southwestern China and its tectonic implications[ J ]. Chinese Science Bulletin, 52(17):2402~2406( in Chinese with English abstract ).
- Sun S S and Mc Donough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implication for mantle composition and processes[ A ]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basin[ C ]. Geol. Soc. London Spec. Pub, 42:313~345.
- Tapponnier P, Peltzer G and Le Dain A Y. 1982. Propagatin extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticier[ J ]. Geology, 10:611~616.
- Taylor S R and Mcleannan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[ M ]. Oxford: Blackwell.
- Turner S P, Foden J D and Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: an example from the Padthaway Ridge, South Australia[ J ]. Lithos, 28:151~179.
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan and Zhao Zhenhua. 1989. REE Geochemistry[ M ]. Beijing: Science Press( in Chinese ).
- Wei Guanyi, Shi Shaoqing and Mao Yanshi. 1989. Precambrian Geological Structure and Metamorphism of the Himalayan Region[ M ]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1~176( in Chinese ).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[ J ]. Contrib. Mineral. Petrol. , 95:407~419.
- White A J R and Chappell B W. 1988. Some supracrustal S-type granites of the Lachlan Fold Belt[ J ]. Trans. R. Soc. Edin. Earth. Sci. 79:169~181.
- Williamson B J, Shaw A, Downes H, *et al.* 1996. Geochemical constraints on the genesis of Hercynian two-mica leucogranites from the Massive Central[ J ]. Chemical Geology, 127:25~42.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, *et al.* 2002. The Ways of Investigation on Granitoid[ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 1~294( in Chinese ).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Liang Fenghua, *et al.* 2005. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 21(1):1~12( in Chinese with English abstract ).
- Yong Yong, Xiao Wenjiao and Yuan Chao, *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of Paleozoic granitic plutons from the eastern Central Qilian and their tectonic implication[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 24(4):855~866( in Chinese with English abstract ).
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, *et al.* 2003. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and Re of Cenozoic pluton in NE China[ J ]. Chinese Science Bulletin, 48(14):1511~1520( in Chinese ).
- Zhang Qi. 1981. Magmatism and Metamorphism of Tibet[ M ]. Beijing: Science Press, 271~312( in Chinese ).
- Zhang Zeming, Wang Jinli, Shen Kun, *et al.* 2008b. Paleozoic circum-Gondwana orogens: Petrology and geochronology of the Namche Barwa Complex in the eastern Himalayan syntaxis, Tibet[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 24(7):1627~1637( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Zeming, Wang Jinli, Zhao Guochun, *et al.* 2008a. Geochronolo-

- gy and Precambrian tectonic evolution of the Namche Barwa complex from the eastern Himalayan syntaxis, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1477~1486 (in Chinese with English abstract).
- Zhao X X, Coe R S, Gilder S A, *et al.* 1996. Palaeomagnetic constraints on the palaeogeography of China: implications for Gondwanaland [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 643~672.
- Zheng Lailin, Jin Zhenmin, Pan Guitang, *et al.* 2004b. Geological features and tectonic evolution in the Namjagbarwa Area, Eastern Himalaya [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 744~751 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Lailin, Liao Guangyu, Geng Quanru, *et al.* 2004a. New results and major progress in regional geological survey of the Medog County Sheer [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(5~6): 1458~1462 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Taixi, Chen Jiangfeng and Li Xueming. 1996. Origin of high- $\epsilon_{Nd}$  ( $t$ ) granites from Alatao mountain, Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Geology*: 31(1): 71~79 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhiguang, Liu Wencan, Liang Dingyi, *et al.* 2004. Discovery of the Ordovician and its basal conglomerate in the Kangmar area, southern Tibet-with a discussion of the relation of the sedimentary cover and unifying basement in the Himalaya [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(7): 655~663 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingquan. 1998. The Theory and Application of Isotopic System in Earth Sciences [M]. Beijing: Science Press, 1~330 (in Chinese).
- ### 附中中文参考文献
- 程立人, 张以春, 张予杰. 2005. 藏北申扎地区早奥陶世地层的发现及意义 [J]. *地层学杂志*, 29(1): 38~41.
- 李才, 吴彦旺, 王明, 等. 2010. 青藏高原泛非-早古生代造山事件研究重大进展——冈底斯地区寒武系和泛非造山不整合的发现 [J]. *地质通报*, 29(12): 1733~1736.
- 李才, 谢尧武, 沙绍礼, 等. 2008. 藏东八宿地区泛非期花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年 [J]. *地质通报*, 27(1): 64~68.
- 林慈奎, 孙勇, 陈丹玲, 等. 2006. 柴北缘绿卡河花岗岩质片麻岩的地球化学特征和锆石 LA-ICPMS 定年 [J]. *地球化学*, 35(5): 498~505.
- 潘桂棠, 丁俊, 王立全, 等. 2004. 1:150 万青藏高原及邻区地质图 [附说明书] [M]. 成都: 成都地质出版社.
- 戚学祥, 李化启, 李天福, 等. 2010. 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 [J]. *岩石学报*, 26(3): 975~984.
- 沈昆, 张泽明, 闫玲, 等. 2008. 大陆碰撞造山带的流体成分与演化: 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦群高压麻粒岩的流体包裹体研究 [J]. *岩石学报*, 24(7): 1488~1500.
- 时超, 李荣社, 何世平, 等. 2010. 西藏亚东县侵入亚东岩组片麻状含石榴石黑云花岗闪长岩 U-Pb 测年及其地质意义 [J]. *地质通报*, 29(12): 1745~1753.
- 宋述光, 季建清, 魏春景, 等. 2007. 滇西北怒江早古生代片麻状花岗岩的确定及其构造意义 [J]. *科学通报*, 52(8): 927~930.
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社.
- 卫管一, 石绍清, 茅燕石. 1989. 喜马拉雅地区前寒武系地质构造与变质作用 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1~176.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 2002. 花岗岩研究思维与方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1~294.
- 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 等. 2005. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录 [J]. *岩石学报*, 21(1): 1~12.
- 雍拥, 肖文交, 袁超, 等. 2008. 中祁连东段古生代花岗岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义 [J]. *岩石学报*, 24(4): 855~866.
- 袁鸿林, 吴福元, 高山, 等. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析 [J]. *科学通报*, 48(14): 1511~1520.
- 张旗. 1981. 西藏岩浆活动和变质作用 [M]. 北京: 科学出版社, 271~312.
- 张泽明, 王金丽, 赵国春, 等. 2008a. 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 [J]. *岩石学报*, 24(7): 1477~1486.
- 张泽明, 王金丽, 沈昆, 等. 2008b. 环东冈瓦纳大陆边缘的古生代造山作用: 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群的岩石学和年代学证据 [J]. *岩石学报*, 24(7): 1627~1637.
- 郑来林, 金振民, 潘桂棠, 等. 2004b. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化 [J]. *地质学报*, 78(6): 744~751.
- 郑来林, 廖光宇, 耿全如, 等. 2004a. 墨脱县幅地质调查新成果 [J]. *地质通报*, 23(5~6): 1458~1462.
- 周泰禧, 陈江峰, 李学明. 1996. 新疆阿拉套山花岗岩类高  $\epsilon_{Nd}$  值的成因探讨 [J]. *地质科学*, 31(1): 71~79.
- 周志广, 刘文灿, 梁定益, 等. 2004. 藏南康玛奥陶系及其底砾岩的发现并初论喜马拉雅沉积盖层与统一变质基底的关系 [J]. *地质通报*, 23(7): 655~663.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1~330.