

藏南拉轨岗日变质核杂岩核部花岗质片麻岩的地球化学特征及构造意义^{*}

辜平阳¹ 何世平¹ 李荣社¹ 时超¹ 董增产¹ 查显锋¹ 吴继莲² 王轶¹

GU PingYang¹, HE ShiPing¹, LI RongShe¹, SHI Chao¹, DONG ZengChan¹, ZHA XianFeng¹, WU JiLian² and WANG Yi¹

1. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安地质调查中心, 西安 710054

2. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an Geological Survey Center, Xi'an 710054, China

2. Earth Science & Resources College of Chang'an University, Xi'an 710054, China

2011-12-21 收稿, 2012-12-29 改回.

GU PY, HE SP, LI RS, WANG C, SHI C, DONG ZC, WU JL and WANG Y. 2013. Geochemical features and tectonic significance of granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes in southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 756–768

Abstract The granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes in southern Tibet is characterized by high SiO₂ and K₂O, low Fe₂O₃, MgO and MnO, with alumina saturation index (A/CNK) of 1.07 ~ 1.19 and peraluminous minerals (such as muscovite and garnet). These features suggest that the granitic gneiss belongs to the high-K calci-alkaline peraluminous rocks. It is obvious that the chondrite-normalized REE shows right inclined patterns with obvious negative Eu abnormality, simultaneously, the primitive mantle normalized trace element spidergrams are characterized by enriched LILE (such as Rb, Th and U) and depleted HFSE (such as Sr and Nb), as well as evidently low contents of Ba and Hf, which are compatible with the characteristics of crustal derived S-type granites. The initial values of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(*I*_{Sr}) are in a range of 0.709 ~ 0.7306, the $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ in a range of 80.65 ~ 379 and $\varepsilon_{\text{Nd}}(t=514\text{Ma})$ values of -7.13 ~ -8.97, without significant correlation between $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ and *I*_{Sr}. The ratios of (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_i (= 18.1062 ~ 18.8085), (²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_i (= 15.7 ~ 15.8) and (²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb)_i (= 37.5 ~ 38.2) also reveal crustal Pb isotopic features. Therefore, the granitic magma is originated from partially melting of clay and sandstone sedimentary rocks. With the U-Pb isotopic age of 514Ma, we believe that these rocks in Laguigangri formed during the transition period from syncollision (compressional) to post collision (extensional environment) in Pan African orogenic events in the north Himalayan. This magmatic activity may play an important role in formation of the Laguigangri metamorphic core complex.

Key words Laguigangri metamorphic core complexes; Granitic gneiss; Geochemistry; Ziron U-Pb dating; Pan African orogenic events

摘 要 拉轨岗日变质核杂岩花岗质片麻岩高 SiO₂、K₂O, 低 Fe₂O₃、MgO、MnO, 铝饱和指数 A/CNK 为 1.07 ~ 1.19, 含白云母、石榴子石等过铝质矿物, 属高钾钙碱性过铝质岩石。稀土总量较高, 轻稀土富集, 轻、重稀土分馏明显, Eu 负异常; 富集大离子亲石元素 Rb、Th、U, 贫高场强元素 Sr、Nb、Hf 和 Ba 亏损, 具有壳源 S 型花岗岩的特征。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比值 *I*_{Sr} 变化于 0.709 ~ 0.7306, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低, 为 -7.13 ~ -8.97, 且 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 *I*_{Sr} 无明显相关关系, $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值较高, 为 80.65 ~ 379。(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_i = 18.1062 ~ 18.8085, (²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_i = 15.6713 ~ 15.7901, (²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb)_i = 37.529 ~ 38.1815, 表现出地壳特征的 Sr、Nd、Pb 同位素特征。岩浆源区可能是以粘土岩主, 砂质岩占次要地位的沉积岩, 经部分熔融形成的花岗质岩浆上升侵位形成。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 514Ma, 是泛非造山事件在北喜马拉雅拉轨岗日一带的地质记录。岩石形成于由碰撞造山的挤压环境向后碰撞造山的伸展环境转化阶段, 说明泛非碰撞造山事件在拉雅拉轨岗日一带可能结束, 进入后碰撞造山的构造演化阶段。岩浆底侵可能使拉轨岗日变质核杂岩在该阶段已经初步隆起, 对变质核杂岩的形成起了重要作用。

^{*} 本文受国家青年基金项目(41002063)和中国地质大调查项目(1212010610102)联合资助。

第一作者简介: 辜平阳, 男, 1982 年生, 助理研究员, 主要从事构造地质学、地球化学研究, E-mail: pingyang-322@163.com

关键词 拉轨岗日变质核杂岩;花岗片麻岩;地球化学;锆石 U-Pb 定年;泛非造山事件
中图法分类号 P588.121; P597.3

变质核杂岩(MCC)是20世纪美国学者在研究北美西部科迪勒拉造山带中一套独特的伸展构造和岩石组合的基础上提出来的,由变质核和侵入岩组成的穹形或拱形孤立隆起,其上为构造滑脱和扩张的不变质盖层组成,是地壳较深层次地质信息的载体,研究地球深部信息的“窗口”(Davis and Coney, 1979; Coney, 1980)。随着研究的深入,中外地质学家先后报道了一系列不同时代、不同构造特色的变质核杂岩(郑亚东和张青, 1993; 宋鸿林, 1995; Faure *et al.*, 1996; 孙岩等, 1997; Wang *et al.*, 2001; Darby *et al.*, 2001; Yan *et al.*, 2003; 李德威等, 2003; 赵海滨等, 2007; 关会梅等, 2008)。在变质核杂岩的形成时代、成因、伸展构造与岩浆活动及地壳减薄机制等方面取得重要进展(Davis 和郑亚东, 2002; 宋鸿

林, 2002; 刘德民, 2003a; 楼法生等, 2005; 沈晓明等, 2008; 苏春乾等, 2008)。变质核杂岩往往是多期岩浆活动的中心,且空间结构及拆离滑脱构造系的发育型式等为成矿元素的活化、迁移、富集提供了良好的条件,对于指导核杂岩区的找矿具有重要意义(马寅生等, 2002; 付伟等, 2005; 尹维青和李建旭, 2007)。

前人对拉轨岗日变质核杂岩的精细结构、变形变质、形成机制、遥感影像特征及同构造侵入体与变质核杂岩的形成关系进行了详细研究(隋志龙等, 2003, 2006; 李德威等, 2003, 2004; 刘德民, 2003b; 袁晏明等, 2003; 张金阳等, 2003; 李建忠等, 2005),但对该杂岩的地球化学特征、成因及构造属性等探讨较少,其形成时代仍有争议。拉轨岗日变质核杂

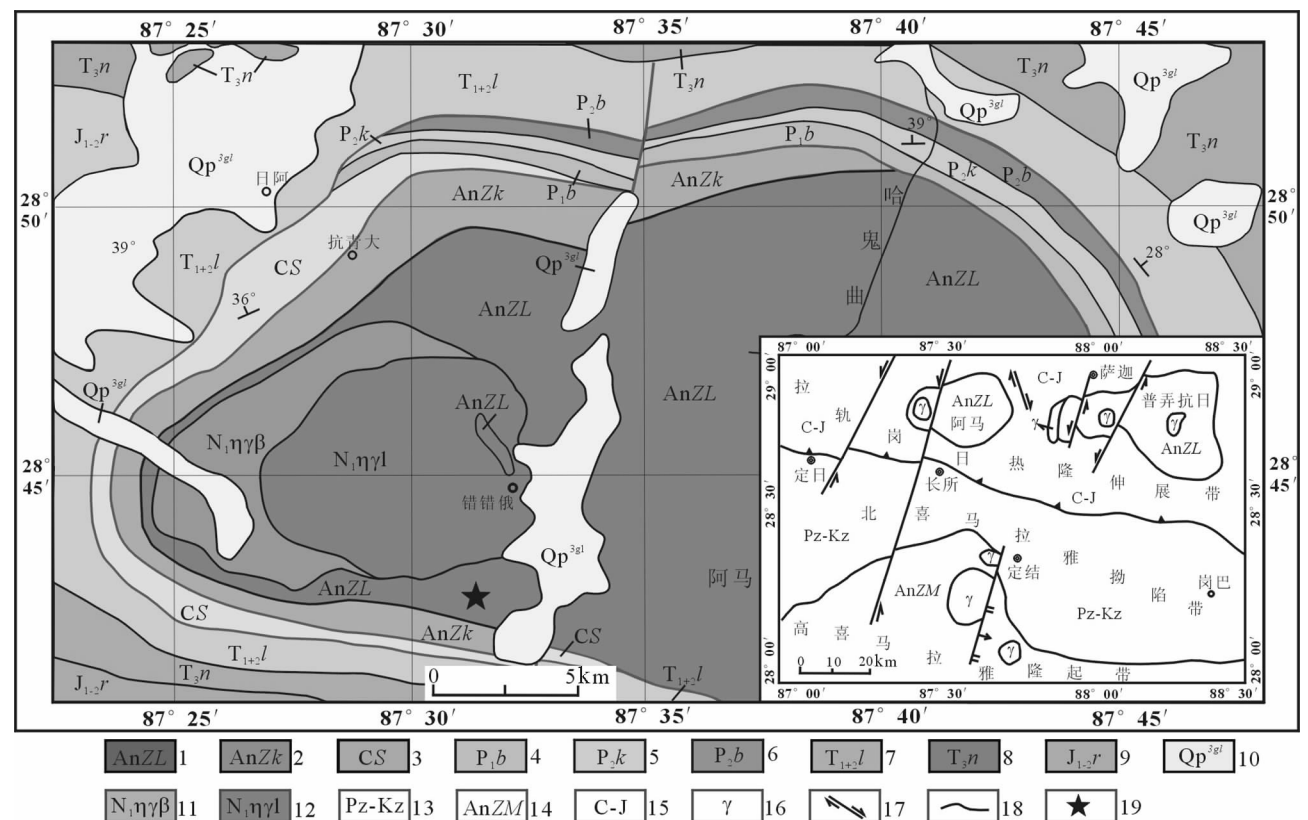


图1 藏南定日县长所乡北拉轨岗日一带地质图(据李德威等, 2003)
1-震旦纪拉轨岗日变质杂岩;2-震旦纪抗青大岩组;3-石炭纪少岗群;4-早二叠世比郎组;5-中二叠世康马组;6-中二叠世白定浦组;7-早-中三叠世吕村组;8-晚三叠世涅如组;9-早-中侏罗世日当组;10-第四系上更新统;11-片麻状黑云二长花岗岩;12-白云母二长花岗岩;13-古生界-新生界;14-震旦纪马卡鲁变质杂岩;15-石炭系-侏罗系;16-花岗岩体;17-平移断层;18 地质界线;19-采样位置

Fig. 1 Geological sketch map of Laguigangri in northern Changsuo village, Dingri County, southern Tibet (after Li *et al.*, 2003)
1-Sinian Laguigangri metamorphic complexes; 2-Sinian Kangqingda Rock Formation; 3-Carboniferous Shaogang Group; 4-Lower Permian Bilong Formation; 5-Middle Permian Kangma Formation; 6-Middle Permian Kangma Baidingpu Formation; 7-Early-Middle Triassic Lucun Formation; 8-Late Triassic Nieru Formation; 9-Early-Middle Jurassic Ridang Formation; 10-the Upper Pleistocene of Quaternary; 11-gneissic biotite monzogranite; 12-muscovite monzogranite; 13-Paleozoic-Cenozoic; 14-Sinian Makalu metamorphic complexes; 15- Paleozoic-Cenozoic; 16-granite; 17-strike-slip fault; 18-geological boundary; 19-sample location

岩带东部的康马岩体已获得 485Ma 的 Rb-Sr 等时线年龄(王俊文等,1981),锆石 U-Pb 年龄集中于 485 ~ 558Ma(许荣华和金成伟,1986;Lee *et al.*,2000;刘文灿等,2004b;夏斌等,2008),拉轨岗日变质核杂岩阿马花岗质片麻岩曾有 1.8 ~ 1.9Ga(中国地质大学,2003^①)和 1811.7 ± 7.2 Ma 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(廖群安等,2007)报道。鉴于此,在对阿马一带拉轨岗日变质核杂岩核部花岗质片麻岩有必要进行详细的地球化学和高精度同位素定年研究,进而探讨花岗质片麻岩形成时代及大地构造意义。

1 区域地质背景

拉轨岗日变质核杂岩带位于藏南低分水岭一带,与高喜马拉雅隆起带之间以定日-岗巴拗陷带分隔,表现为由一系列核部发育花岗岩体的具有伸展构造性质的热穹窿组成的隆起带,是青藏高原南部典型的变质核杂岩之一。区内出露前震旦纪拉轨岗日杂岩(AnZL)和抗青大岩组(AnZk)、石炭纪少岗群(CS)、早二叠世比崆组(P_1b)、中二叠世康马组(P_2k)、中二叠世白定浦组(P_2b)、早-中三叠世吕村组($T_{1-2}l$)、晚三叠世涅如组(T_3n)、早中侏罗世日当组($J_{1-2}r$)及第四系,白云母二长花岗岩及片麻状黑云二长花岗岩后期侵入(图1)。本文以阿马一带拉轨岗日变质核杂岩为研究对象,该核杂岩不同程度地被后期 NNE 向左行平移断层切割,但仍显示典型的三层结构型式。

变质核分布在拉轨岗日隆起带的主脊部位,主体由拉轨岗日群变质杂岩组成,该群可分解为两个部分,彼此之间以正断式韧性剪切带接触。上部抗青大岩组,主要岩石类型包括云母石英片岩、十字石蓝晶石片岩、石榴云母片岩、石英岩和大理岩;下部拉轨岗日杂岩,以片麻岩为主,主要岩石类型为眼球状片麻岩、条痕状片麻岩、条带状片麻岩、花岗质片麻岩和混合花岗岩,局部夹有透镜状斜长角闪岩、榴闪岩。变质核近中心部位出现近等轴状分布的花岗岩体,变质核中的花岗岩体边缘片麻理发育,片麻理与接触带平行,内部含有片麻岩的捕掳体。强烈变质变形的变质核基底岩系与盖层之间为大型滑脱断层,由基底拆离断层及其相关的正断式韧性剪切带组成。拉轨岗日变质核杂岩的盖层系统由石炭系、二叠系、三叠系和侏罗系浅变质或未变质的岩石组成,围绕变质核由老到新呈环形分布。受基底拆离断层伸展拆离的影响,在局部地段盖层下部地层出现尖灭和缺失现象。盖层明显地受变质核内岩浆侵入及其相关的热活动的影响,发育次级拆离断层和脆性正断层,拆离断层沿着能干性不同的岩性界面顺层发育,主要是沿着大套碳酸盐岩与碎屑岩的界面,以中等到低角度产出,断层面在地表的倾角一般为 $30^\circ \sim 45^\circ$,带动核部变质杂岩上升,导致其揭顶和剥露,引起基底与盖层之间滑脱拆离。

2 花岗片麻岩年代学特征

2.1 样品及其岩相学特征

用于同位素测年的样品 07NR-2 采自西藏南定日县长所乡北阿马一带,拉轨岗日变质核杂岩核部(地理坐标: $N = 32^\circ 01' 30.5''$; $E = 91^\circ 41' 28.5''$; $H = 2519$ m),岩性为眼球状黑云母花岗片麻岩。样品重量约 25kg,岩石为浅灰色,粗粒鳞片花岗变晶结构,片麻状构造、眼球状-条带状构造,矿物组成为:石英(20% ~ 25%)、斜长石(30% ~ 35%)、钾长石(10% ~ 15%)、黑云母(15% ~ 20%),石榴子石(1% ~ 3%),白云母(1% ~ 2%),副矿物有锆石和磷灰石。

2.2 分析方法

锆石的阴极发光(CL)图像在西北大学扫描电镜实验室完成,采用 FEI 公司 XL30 型 SFEG 电子束进行锆石内部结构显微照相分析。测试点的选取首先根据锆石反射光和透射光照片进行初选,再与 CL 图像反复对比,力求避开内部裂隙和包裹体,以获得较准确的年龄信息。

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 ICPMS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波长 193nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas200M 光学系统的联机上进行。激光束斑直径为 $30\mu\text{m}$,激光剥蚀深度为 $20 \sim 40\mu\text{m}$ 。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_2 在锆石中的含量较恒定,选择 ^{29}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 *et al.*,2002;袁洪林等,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)对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 Isoplot(ver3.0)完成(Ludwig,2003)。

2.3 分析结果

对拉轨岗日变质核杂岩核部花岗片麻岩进行了 LA-

① 中国地质大学. 2003. 1:25 万定日县幅区域地质调查报告

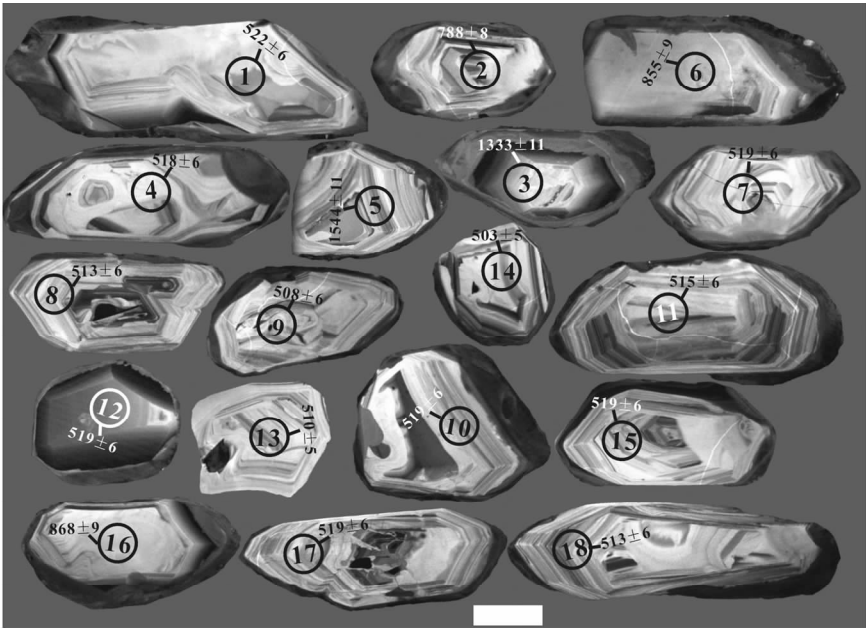


图2 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩典型锆石阴极发光图像
Fig.2 Representative zircon CL images of granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes

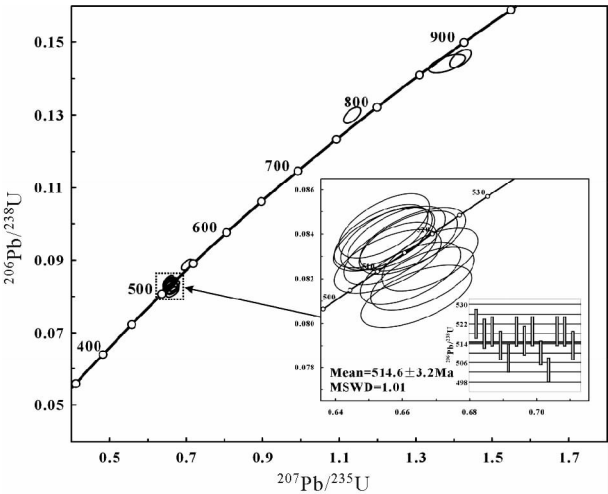


图3 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes

ICPMS 锆石 U-Pb 定年和锆石内部结构阴极发光 (CL) 观察 (图2)。双目镜下显示,所测锆石均大部分为无色透明,少数为浅米黄色,自形程度相对较好,长柱状锆石长宽比多在 3 : 1 ~ 2 : 1。依据锆石阴极发光内部结构的差异,可将锆石大体可以分为两类:第一类锆石从中部至边部发育相对较好的韵律环带(1、4、7、9 ~ 11、13 ~ 18 号锆石),或者锆石中心为 CL 强度均一,不显环带结构,如 12 号锆石。第二类锆石数量较少,发育宽缓或窄的振荡环带结构,外围均发育明显的暗色生长加大边,如 2、3、5、6、16 号锆石。

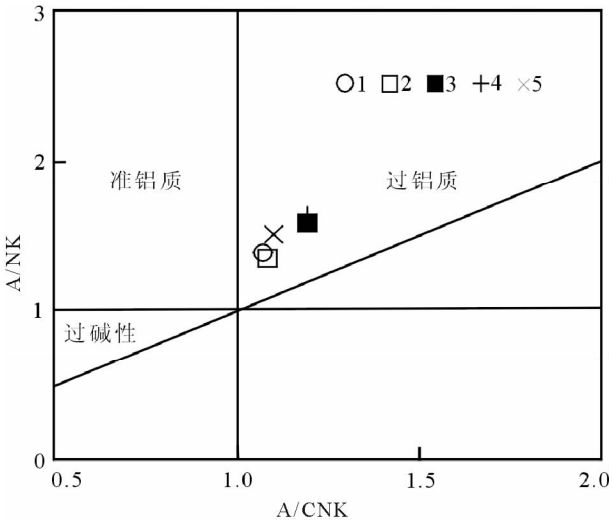


图4 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩 A/NK-A/CNK 图解 (据 Maniar and Piccoli, 1989)
Fig. 4 A/NK-A/CNK diagram of granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes (after Maniar and Piccoli, 1989)

轨岗日变质核杂岩核部花岗片麻岩(07LG-1)的锆石 U-Pb 分析结果经校正后的有效数据点共 18 个,从表 1 可知,第一类锆石 13 个测点数据在谐和图中围绕谐和线成群集中分布(图3),锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $522 \pm 6\text{Ma} \sim 503 \pm 5\text{Ma}$,加权平均年龄为 $514 \pm 3\text{Ma}$,二者在误差范围内基本一致, Th/U 比值一般为 0.25 ~ 1.29,结合阴极发光图像特征,属于岩浆结晶锆石。第二类锆石在谐和图中发散分布,3 号和 5

表 1 定日县长所乡北拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩 MC-LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果

测点号	同位素比值						同位素表面年龄(Ma)						同位素值($\times 10^{-6}$)						Th/U				
	207Pb/235U		206Pb/238U		误差	比值	208Pb/232Th		207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U		208Pb/232Th		误差						
	比值	误差	比值	误差			年龄	误差	年龄	误差	年龄	误差	年龄	误差	年龄	误差							
071LG-1-1	0.05625	0.0007	0.65452	0.0089	0.08437	0.00095	0.02264	0.00028	462	14	511	5	522	6	453	6	<0.69	281.66	17.55	14.75	366.17	882.4	0.4150
071LG-1-2	0.06327	0.0008	1.13387	0.0148	0.12995	0.00145	0.03869	0.00044	717	12	770	7	788	8	767	9	1.27	578.59	40.98	35.5	463.93	1123.4	0.4130
071LG-1-3	0.08575	0.0011	2.59692	0.0336	0.2196	0.00246	0.06585	0.00079	1333	11	1300	9	1280	13	1289	15	0.74	750.7	72.05	17.39	133.29	860.14	0.1550
071LG-1-4	0.05738	0.0008	0.66174	0.0097	0.08362	0.00094	0.02468	0.00034	506	15	516	6	518	6	493	7	0.78	396.69	25.06	18.51	383.2	1117.09	0.3430
071LG-1-5	0.09579	0.0012	3.57003	0.0481	0.27025	0.00304	0.08383	0.00098	1544	11	1543	11	1542	15	1627	18	0.94	306.78	32.86	25.53	152.59	282.49	0.5402
071LG-1-6	0.07063	0.0009	1.41664	0.0186	0.14544	0.00162	0.04765	0.00054	947	12	896	8	875	9	941	10	<0.62	664.76	52.5	59.11	620.51	1134.31	0.5470
071LG-1-7	0.05669	0.0008	0.65518	0.009	0.08381	0.00094	0.0232	0.00027	479	14	512	6	519	6	464	5	1.02	420.64	26.66	46.44	999.33	1242.22	0.8045
071LG-1-8	0.05847	0.0008	0.66815	0.0095	0.08286	0.00093	0.02457	0.00029	547	14	520	6	513	6	491	6	<0.61	595.89	38.73	85.06	1724.52	1672.72	1.0310
071LG-1-9	0.05888	0.0009	0.66598	0.0102	0.08201	0.00093	0.02614	0.00035	563	16	518	6	508	6	522	7	0.72	300.76	19.64	11.99	234.77	932.2	0.2518
071LG-1-10	0.05693	0.0008	0.6582	0.0096	0.08383	0.00094	0.02634	0.00031	489	15	514	6	519	6	525	6	<0.46	443.23	28.17	88.91	1668.35	1287.51	1.2958
071LG-1-11	0.05724	0.0008	0.65624	0.0091	0.08313	0.00093	0.01993	0.00024	501	14	512	6	515	6	399	5	<0.74	568.58	36.33	35.24	872.22	1661.17	0.5251
071LG-1-12	0.05648	0.0008	0.65362	0.0092	0.08391	0.00094	0.02493	0.00035	471	14	511	6	519	6	498	7	<0.62	508.25	32.03	5.46	1040	1523.54	0.683
071LG-1-13	0.05839	0.0009	0.66239	0.0099	0.08225	0.00092	0.02383	0.00031	544	15	516	6	510	5	476	6	1	263.91	17.22	11.96	251.25	782.75	0.3210
071LG-1-14	0.05929	0.001	0.66406	0.0109	0.08122	0.00092	0.02286	0.00031	578	18	517	7	503	5	457	6	2.14	249.41	16.48	20.56	438.87	732.2	0.5994
071LG-1-15	0.05665	0.0009	0.65448	0.0099	0.08377	0.00094	0.02281	0.00031	478	16	511	6	519	6	456	6	<0.55	361.58	22.83	14.05	299.92	1026.57	0.2922
071LG-1-16	0.07153	0.0011	1.42467	0.022	0.14443	0.00163	0.04565	0.00062	915	54	881	14	868	9	865	9	1.51	557.23	43.63	32.85	391.89	968.01	0.4048
071LG-1-17	0.05739	0.0009	0.66304	0.0104	0.08377	0.00094	0.02189	0.00032	507	17	516	6	519	6	438	6	0.67	844.6	53.81	14.99	327.83	2316.46	0.1415
071LG-1-18	0.05743	0.0009	0.65563	0.0106	0.08278	0.00094	0.02434	0.00034	508	17	512	6	513	6	486	7	0.61	346.21	22.4	30.59	576.85	980.21	0.5885

号²⁰⁷Pb/²⁰⁶U 表面年龄分别为 1333 ± 11Ma 和 1544 ± 11Ma, 其中 3 号锆石 Th/U 比值较低,可能受到构造事件、变质或蚀变等因素影响。2、6、16 号锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄为 770 ~ 896Ma,Th/U 比值一般为 0.40 ~ 0.55,可能属于捕获的早期岩浆成因锆石。

锆石内部结构差异较大,可能影响因素很多,如岩浆结晶过程中岩浆动力学变化、晶体-岩浆界面特征的差异、熔体中元素的饱和度和元素扩散等 (Corfu *et al.*, 2003; Black *et al.*, 2003)。本次所测锆石内部结构不均一,具有明显深熔成因锆石的特征,可能是锆石结晶过程中深熔流体作用的结果 (Song *et al.*, 2010)。

综上所述,1544 ± 11Ma ~ 788 ± 8Ma 的锆石表面年龄可以解释为岩浆部分熔融、运移及结晶作用过程中捕获的围岩年龄信息。514 ± 3Ma 应该为轨岗日变质核杂岩核部花岗片麻岩的形成年龄。

3 花岗片麻岩岩石地球化学特征

3.1 主量元素地球化学特征

拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩主量元素分析见表 2。高 SiO₂ (71.57% ~ 74.20%)、K₂O (3.02% ~ 5.90%); Al₂O₃ 为 11.11% ~ 12.64%; Na₂O 为 2.09% ~ 2.54%, K₂O/Na₂O 为 1.27 ~ 2.32,属于钾质岩石;低 Fe₂O₃ (0.32% ~ 0.50%)、MgO (0.78% ~ 1.27%)、MnO (0.04% ~ 0.10%); FeO^T/MgO 为 2.20 ~ 3.89,平均 3.13,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)。P₂O₅ 变化于 0.11 ~ 0.14,与高分异 S 型花岗岩接近 (P₂O₅ = 0.14),明显不同于 A 型花岗岩 (King *et al.*,

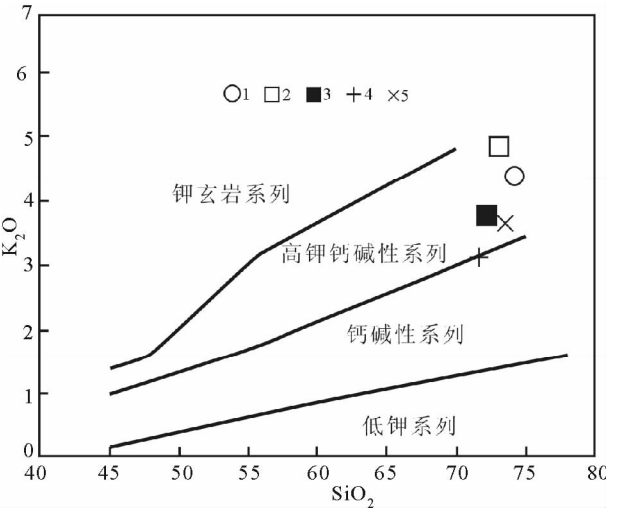


图 5 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩 SiO₂-K₂O 图解 (据 Rickwood, 1989)

Fig.5 SiO₂-K₂O diagram of granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes(after Rickwood, 1989)

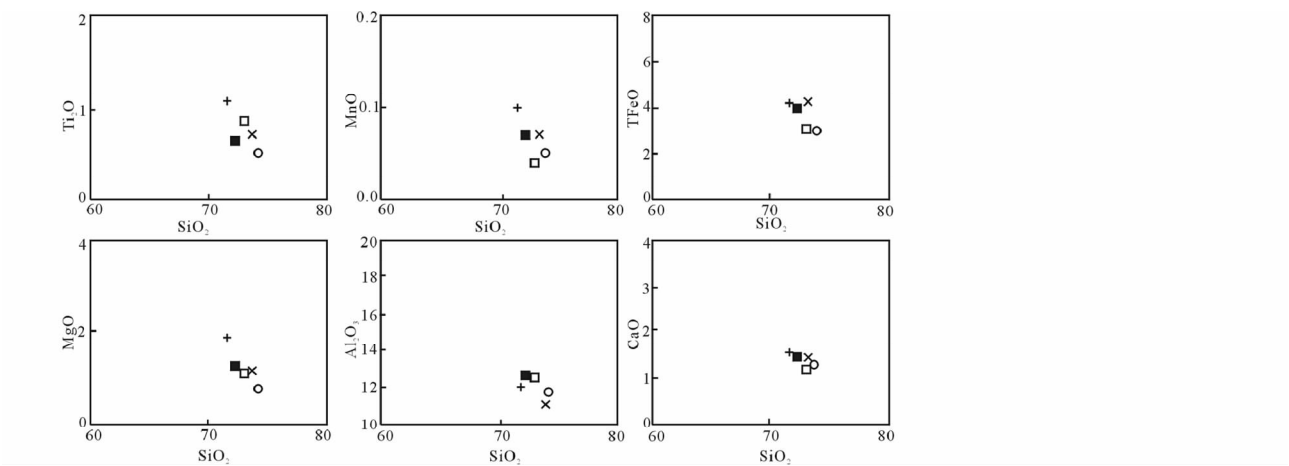


图 6 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩的 Harker 图解
Fig. 6 Harker diagram of granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes

表 2 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩主量元素含量分析结果 (wt%)

Table 2 Major element compositions of granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes (wt%)											
样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
LG-1	74.2	0.51	11.76	0.32	2.75	0.05	0.78	1.33	2.33	4.41	0.13
LG-2	73.04	0.85	11.54	0.39	2.73	0.04	1.1	1.19	2.54	5.9	0.11
LG-3	72.23	0.64	12.64	0.42	3.59	0.07	1.27	1.46	2.33	3.79	0.14
LG-4	71.57	1.07	11.94	0.5	3.73	0.1	1.9	1.56	2.38	3.02	0.13
LG-5	73.66	0.71	11.11	0.41	3.9	0.07	1.17	1.49	2.09	3.63	0.14
样品号	LOI	TOTAL	A/NKC	ANK	CMF	AMF	R1	R2	AR	里特曼指数	FeO ^T /MgO
LG-1	0.94	99.50	1.07	1.37	0.38	1.87	2984.34	411.54	3.12	1.46	3.89
LG-2	0.58	100.01	1.08	1.32	0.30	1.75	2708.47	427.75	3.37	1.84	2.80
LG-3	1.48	100.06	1.19	1.59	0.30	1.43	2968.86	467.02	2.53	1.28	3.12
LG-4	1.66	99.55	1.19	1.66	0.26	1.11	3070.36	495.26	2.33	1.02	2.20
LG-5	1.11	99.50	1.10	1.51	0.30	1.23	3176.43	435.27	2.66	1.07	3.65

注:主量元素由中国地质调查局西安地质矿产研究所采用 XRF 分析

表 3 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩稀土元素含量 (×10⁻⁶) 分析结果

Table 3 REE element compositions (×10 ⁻⁶) of granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes											
样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
LG-1	47.26	89.75	10.52	39.27	9.019	1.007	8.516	1.392	8.434	1.695	4.873
LG-2	64.73	83.83	14.93	54.8	13.03	1.289	10.95	1.73	10.47	2.115	6.23
LG-3	48.31	89.16	10.72	40.39	9.363	1.207	8.865	1.437	9.247	1.907	5.866
LG-4	98.35	183.9	21.36	79.32	16.03	1.534	13.01	1.81	9.405	1.702	4.676
LG-5	56.75	105.1	12.71	47.81	10.89	1.098	10.11	1.641	9.858	1.951	5.791
样品号	Tm	Yb	Lu	LREE	HREE	ΣREE	LREE/HREE	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N
LG-1	0.661	4.113	0.552	196.8	76.90	273.7	2.56	0.35	7.75	3.30	1.67
LG-2	0.856	5.435	0.735	232.6	92.99	325.6	2.50	0.32	8.03	3.12	1.63
LG-3	0.852	5.523	0.792	199.2	89.66	288.8	2.22	0.40	5.90	3.25	1.30
LG-4	0.599	3.979	0.557	400.5	80.83	481.3	4.95	0.32	16.7	3.86	2.64
LG-5	0.782	5.176	0.727	234.4	91.49	325.8	2.56	0.31	7.39	3.28	1.58

注:稀土元素和微量元素由中国地质调查局西安地质矿产研究所采用 ICP-MS 分析

1997)。铝饱和指数 A/CNK 为 1.07~1.19,平均 1.12,在 A/NK-A/CNK 图解中样品均落入过铝质区(图 4),且 CIPW 标准矿物计算所有样品均含有刚玉(C),含量为 1.01%~2.37%,显示强过铝质岩石的特征。里特曼指数 (K₂O +

Na₂O)²/(SiO₂-43) 为 1.02~1.84,为钙碱性系列,在 SiO₂-K₂O 图解上样品投入高钾钙碱性系列区(图 5)。在 Harker 图解中所有样品中的 Al₂O₃、CaO、MgO、FeO^T、TiO₂ 随着 SiO₂ 含量的增加而减少,K₂O 随着 SiO₂ 的含量增加而增加,均呈

表4 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩微量元素含量(×10⁻⁶)分析结果
Table 4 Trace element compositions (×10⁻⁶) of granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes

样品号	Ba	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	Ga	Ni	Cr
LG-1	409	255	44.7	46.66	176	7.36	34.64	2.83	5.5	15.47
LG-2	401	306	29.8	54.47	122	9.25	42.46	5.56	0.04	2.21
LG-3	436	256	62.6	55.17	144	9.5	29.75	3.61	12.4	33.17
LG-4	603	218	68.5	45.09	164	14.17	55.63	3.44	17.24	48.24
LG-5	330	258	46.1	55.45	194	10.71	35.19	3.81	9.08	31.77
样品号	Hf	Sc	Ta	Co	Li	Be	B	W	Sn	Rb/Sr
LG-1	5.59	7.01	0.84	134	82.2	2.01	33.2	13.87	25.83	5.69
LG-2	1.81	0.99	1.17	180	27.5	2.23	4.23	4.1	43.2	10.3
LG-3	4.43	9.78	1.06	153	117.5	3.29	56.2	17.1	25.81	4.10
LG-4	2.34	16.26	1.31	176	110.0	2.25	101	24.15	18.6	3.18
LG-5	6.02	10.25	1.13	158	106.6	2.63	55.0	17.06	19.97	5.61

表5 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩 Sr、Nd、Pb 同位素组成
Table 5 Sr-Nd-Pb isotope data for granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes

样品号	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	<i>I</i> _{Sr}	<i>ε</i> _{Sr} (<i>t</i>)	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	<i>ε</i> _{Nd} (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM} (Ga)	<i>t</i> _{2DM} (Ga)	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _{<i>t</i>}	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _{<i>t</i>}	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _{<i>t</i>}
LG-1	0.8332	0.7110	101.2	0.5121	-7.13	2.17	1.62	18.8085	15.7901	38.1820
LG-2	0.8246	0.7306	379.5	0.5121	-7.26	2.30	1.63	18.6720	15.6713	37.870
LG-3	0.8037	0.7161	173.0	0.5120	-8.40	2.34	1.71	18.7099	15.7969	38.285
LG-4	0.7882	0.7143	147.3	0.5119	-8.97	2.03	1.75	18.1062	15.7163	37.827
LG-5	0.8298	0.7096	80.65	0.5121	-7.15	2.15	1.46	18.3989	15.7655	37.529

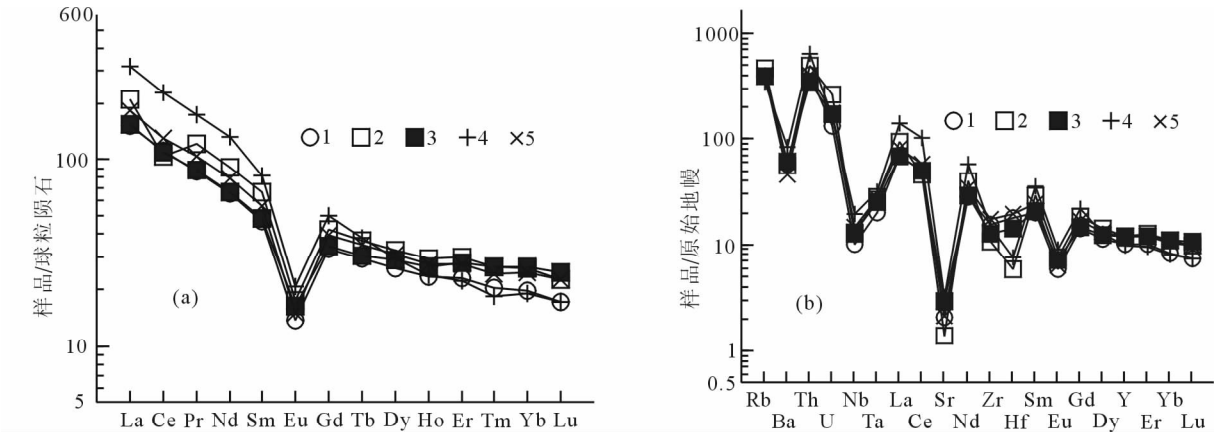


图7 稀土元素球粒陨标准化配分图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle normalised spidergram (b) for the granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes (normalized data from Sun and McDonough, 1989)

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。

综上表明,拉轨岗日花岗质片麻岩总体上高SiO₂、K₂O,低Fe₂O₃、MgO、MnO,A/CNK大部分大于1.1,含过铝质矿物白云母、石榴子石及刚玉,为高钾钙碱性过铝质岩石,与典型的S型花岗岩特征相似(邱家骧和林景仟,1991;Chappell and White,2001;李献华等,2007)。

3.2 稀土和微量元素地球化学特征

由表3可知,拉轨岗日花岗片麻岩稀土总量(∑REE = 273.7 × 10⁻⁶ ~ 481.3 × 10⁻⁶)较高,(La/Yb)_N = 5.89 ~ 16.66,在球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线表现为轻稀土富集型(图7a)。(La/Sm)_N = 3.12 ~ 3.85,(Gd/Yb)_N = 1.29 ~ 2.63,表明存在比较明显的轻稀土分馏。Eu负异常(Eu = 0.31 ~ 0.39),表明拉轨岗日花岗片麻岩成岩时熔浆体系中缺少斜长石,也是S型花岗岩的特点之一。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上(表4、图7b),岩石富集大离子亲石元素Rb、Th、U,贫高场强元素Sr、Nb、Hf(两个样品)及Ba等元素为特征,同样具有S型花岗岩的特点(Pearce *et al.*,1984;肖庆辉等,2002;林慈奎等,2006;雍拥等,2008)。

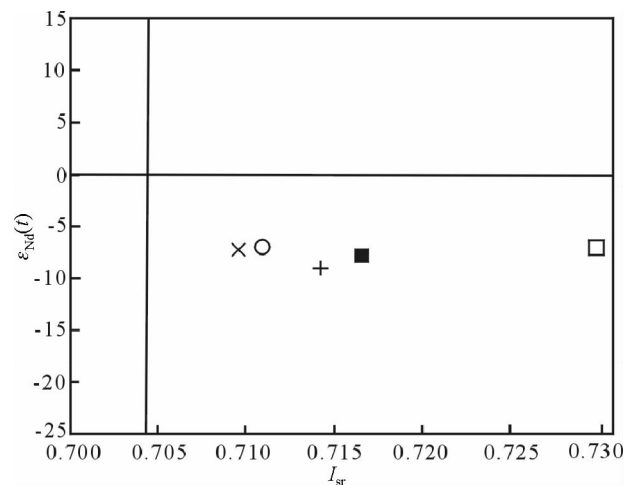


图8 拉轨岗日变质核杂岩花岗质片麻岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - I_{Sr} 图解

Fig. 8 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - I_{Sr} diagram for Laguigangri metamorphic core complexes

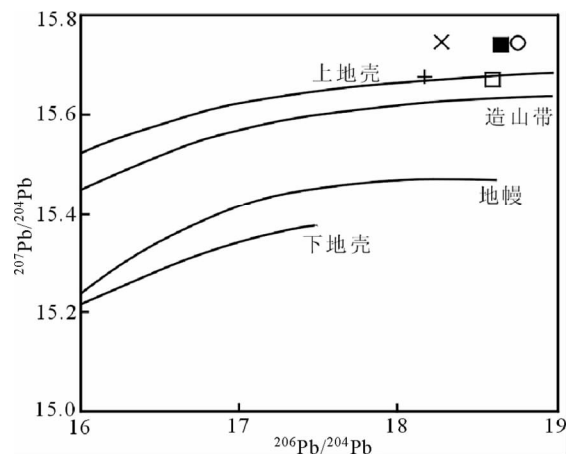


图9 Pb同位素演化图解(底图据 Zartman *et al.*, 1981)

Fig. 9 Diagram of Pb isotope for Laguigangri metamorphic core complexes (after Zartman *et al.*, 1981)

3.3 同位素地球化学特征

拉轨岗日花岗质片麻岩的 Sr、Nd、Pb 同位素组成见表 5, 根据岩浆结晶年龄 $t = 514\text{Ma}$ 对岩石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 I_{Sr} 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、Pb 同位素等比值进行统一计算。拉轨岗日片麻状花岗岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 I_{Sr} 为 $0.709 \sim 0.7306$, 平均值 (0.716) 与现代大陆硅铝质岩的 I_{Sr} 平均值为 0.719 接近, 明显高于未受地壳硅铝物质物质混染的大洋玄武岩 I_{Sr} 值 ($0.702 \sim 0.707$), I_{Sr} 指示成岩物质源于地壳 (肖庆辉等, 2002)。较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.13 \sim -8.97$, 与后碰撞强过铝质花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值相似 (White and Chappell, 1988), 且 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 I_{Sr} 无明显相关关系 (图 8), 表明基本无地幔物质的加入 (朱炳泉,

1998)。高 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值 ($80.65 \sim 379$), 周泰禧等 (1996) 和 Chen *et al.* (2000) 研究认为, 高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值反映了地幔的贡献, 而高 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值反映了地壳物质的贡献。($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_{*t*} = $15.6713 \sim 15.7901$, 比值较高, 接近大陆平均值 ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_{*t*} = 15.76 ± 0.09 , Asmerom *et al.*, 1991)。($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_{*t*} = $18.1062 \sim 18.8085$ 。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上 (图 9), 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。

4 岩浆起源及源区性质探讨

根据 Sylvester (1998) 研究表明, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值能反映 SiO_2 含量介于 $67\% \sim 77\%$ 的过铝质花岗岩源区成分特征, 由砂岩部分熔融形成的花岗质熔体的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值高于由泥岩部分熔融形成的熔体, 泥岩生成的过铝质花岗岩所含的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比一般小于 0.3 , 而砂屑岩生成的过铝质花岗岩所含的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比一般大于 0.3 。拉轨岗日片麻状花岗岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值介于 $0.46 \sim 0.71$, 高于 0.3 , 说明其源岩可能为砂岩, 源区成熟度相对不高。过铝质花岗岩 Rb-Sr-Ba 含量变化与它们源岩中起作用的泥质岩及砂屑岩的源区一致。因此, Rb-Sr-Ba 系统比值的变化可以很好判断源区成分 (Sylvester, 1998)。在 Rb/Sr-Rb/Ba 图解中 (图 10a) 显示 Rb/Sr 随 Rb/Ba 增长而增长的线性关系, 而且大多数分布在富粘土源岩区, 仅一个样品位于贫粘土源岩区; 在 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}}) - \text{CaO}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})$ 图解上 (图 10b) 大部分样品仍投在泥质岩源岩区, 仅一件样品落入杂砂岩区。以上说明拉轨岗日花岗质片麻岩物源具有不均一性, 介于泥岩质和砂岩质之间, 可能以粘土岩主, 砂质岩占次要地位。

拉轨岗日花岗片麻岩具有明显的过铝质特征 ($A/\text{NKC} > 1.07$), 与后碰撞强过铝花岗岩岩石学及地球化学特征相似, 含有高铝矿物及刚玉, 相对高的 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)。研究区片麻状花岗岩的 Rb/Sr 值远大于 0.32 , 据此可以判断拉轨岗日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。

温度升高使含钛矿物 (如黑云母、钛铁矿) 更易分解, 更多的 TiO_2 进入融浆, 因而 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值为源岩形成的温度提供了判别标志, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 > 100$ 为低温 ($< 875^\circ\text{C}$), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 100$ 为高温 ($> 875^\circ\text{C}$) (Sylvester, 1998)。本区花岗质片麻岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值均小于 24 , 反映其部分熔融温度为高温, 与拉轨岗日花岗片麻岩源岩含有杂砂岩熔融所需的高温条件相一致。

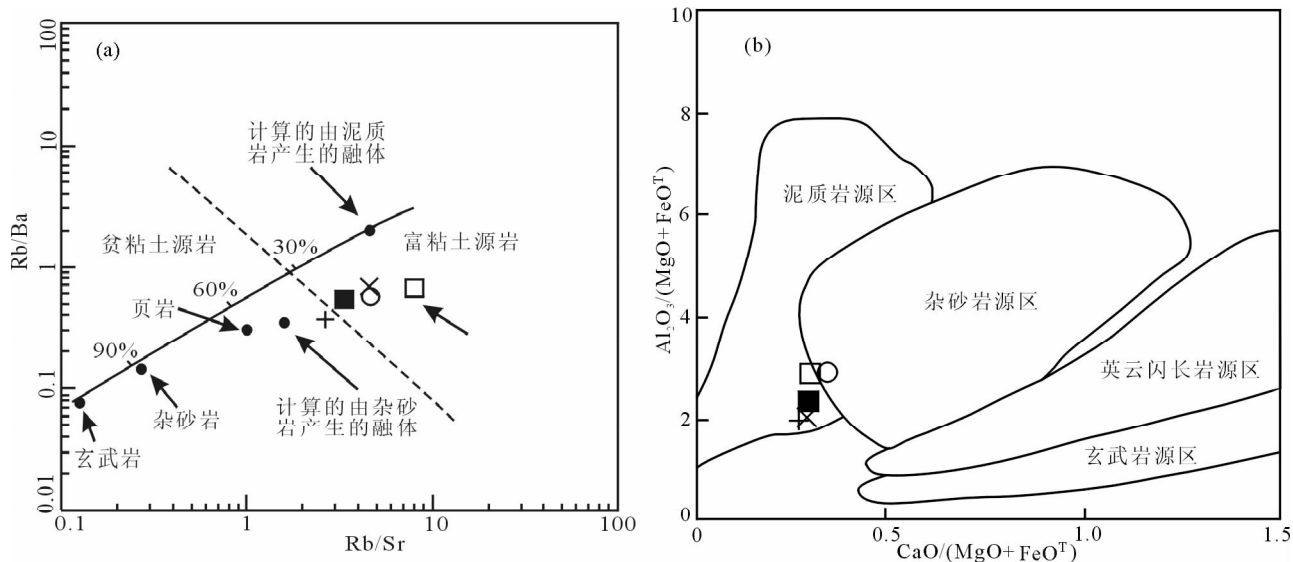


图 10 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩的 Rb/Ba-Rb/Sr 图解 (a, 据 Sylvester, 1998) 和 $Al_2O_3/(FeO^T + MgO)$ - $CaO/(FeO^T + MgO)$ 图解 (b, 据 Alther *et al.*, 2000)

Fig. 10 Diagrams of Rb/Ba vs. Rb/Sr (a, after Sylvester, 1998) and $Al_2O_3/(MgO + FeO^T)$ vs. $CaO/(FeO^T + MgO)$ (b, Gerdes *et al.*, 2000) for Laguigangri metamorphic core complexes

Sr、Nd 同位素组成表明,拉轨岗日花岗质片麻岩具有较负 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和很老的 Nd 模式年龄 ($t_{DM} = 2.02 \sim 2.30$ Ga, 表 5), 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 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值特征, 综合推断拉轨岗日花岗质片麻岩源岩形成的深度较浅, 可能以粘土岩为主, 砂质岩占一定比例的沉积岩在高温环境下部分熔融形成的花岗质岩浆。

5 构造环境分析

过铝质花岗岩曾研究认为是陆-陆碰撞过程中同碰撞早期挤压环境下地壳加厚而发生部分熔融的产物 (Pitcher, 1983; Pearce *et al.*, 1984; Harris *et al.*, 1986), 但在碰撞高峰期后的岩石圈伸展背景下仍能产生过铝质花岗岩 (Sylvester, 1998; Williamson *et al.*, 1996; Kalsbeek, 2001)。拉轨岗日花岗质片麻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; Liégeois *et al.*, 1998), 在花岗岩类 R_1 - R_2 因子判别图上 (图 11a), 拉轨岗日花岗质片麻岩样品基本投在了同碰撞花岗岩区。利用 Rb-(Y + Nb) 图解 (图 11b), 花岗片麻岩样品的投点均落在后碰撞花岗岩区, 并由同碰撞花岗岩区向非造山的板内花岗岩区域过渡的趋势, 在 $FeO^T/(FeO^T + MgO)$ - SiO_2 图解上 (图 11c), 除一个样品外, 其它投在后造山花岗岩类区, 说明拉轨岗日花岗质片麻岩形成于构造体制转换的地球动力学背景下, 由主碰撞的挤压环境向后碰撞的伸展环境转化阶段, 在这一过程中降压和升温的环境可能是岩石发生熔融的

主要因素 (吴福元等, 2007)。结合区域资料, 拉轨岗日杂岩及其上部的抗青大岩组原岩为一套石英砂岩、灰岩和富泥细砂-泥质粉砂岩组合, 含玄武岩或玄岩质岩脉, 与喜马拉雅基底变质岩的原岩建造基本上可进行对比 (李德威等, 2003), 均代表了一种稳定伸展环境的产物。刘文灿等 (2002) 研究认为奥陶纪拉轨岗日构造带并不存在明显的挤压造山作用, 而表现为伸展-拉张构造环境。综合说明拉轨岗日花岗质片麻岩形成于后碰撞造山的构造环境, 主碰撞造山阶段结束。该阶段包括了板块之间沿剪切带的大规模运动, 岩石圈拆沉与热软流圈的上涌等, 致使地壳受热诱发部分熔融 (肖庆辉等, 2002), 拉轨岗日花岗质片麻岩源岩可能是在这种条件下形成的。

6 大地构造意义

东冈瓦纳的形成及其与西冈瓦纳大陆的结合是一系列复杂造山事件的结果, 被称为泛非造山作用 (Kenedy, 1964; Kroner, 1984), 时间跨度从 ~ 750 Ma 到 ~ 510 Ma (Meert, 2003; Cawood *et al.*, 2007)。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, 泛非造山作用与喜马拉雅造山带的关系成为研究的焦点。

中外地质学家在喜马拉雅及以北和以东地区相继发现了大量泛非期构造-热事件的地质记录 (Foster, 2000; Gehrels *et al.*, 2003; 刘文灿等, 2004a; Song *et al.*, 2007; 夏斌等, 2008; 李才等, 2008)。许志琴等 (2005) 对喜马拉雅基底变质岩系进行了系统研究, 获得 529 \sim 457 Ma 年代学数据, 认为原

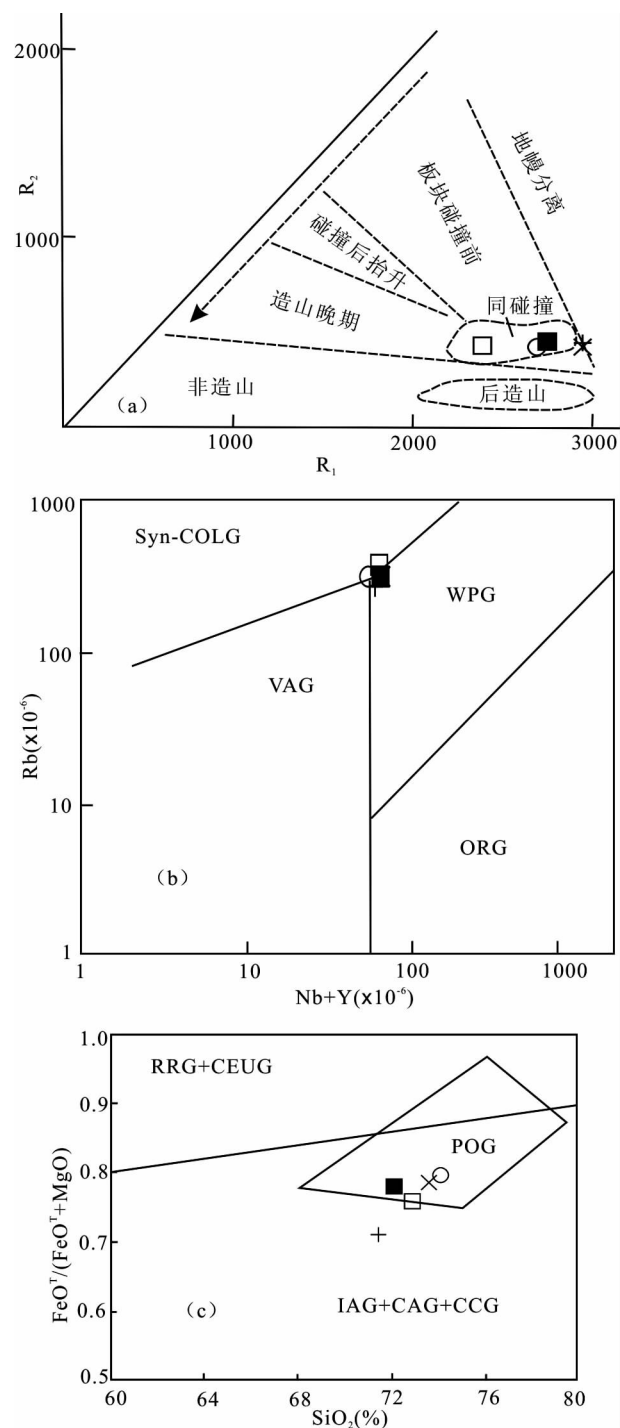


图 11 拉轨岗日变质核杂岩花岗片麻岩构造环境判别图解 (a, 据 Batchelor and Bowden, 1985; b, 据 Pearce *et al.*, 1984; c, 据 Maniar and Piccoli, 1989)
VAG-火山弧花岗岩; Syn-COLG-同碰撞花岗岩; WPG-板内花岗岩; ORG-洋脊花岗岩; Post-COLG-后碰撞花岗岩; RRG-与裂谷有关的花岗岩类; CEUG-与造陆抬升有关的花岗岩类; POG-后造山花岗岩类; IAG-岛弧花岗岩类; CAG-大陆弧花岗岩类; CCG-大陆碰撞花岗岩类

Fig. 11 Diagrams of the tectonic setting for Laguigangri metamorphic core complexes (a, after Batchelor and Bowden, 1985; b, after Pearce *et al.*, 1984; c, after Maniar and Piccoli, 1989)

始的喜马拉雅山是泛非-早古生代造山事件的产物;Liu *et al.* (2006)在高喜马拉雅亚东地区结晶岩中获得 $\sim 500\text{Ma}$ 的岩浆事件年龄,认为亚东地区属泛非造山带的延伸部分之一。此外,朱同兴等(2003)在北喜马拉雅札达-吉隆微地块的定日县南发现了一套盖层底砾岩残留体,早古生代沉积物以超覆接触形式沉积在变质岩基底之上。周志广等(2004)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-新元古代拉轨岗日岩群之上;程立人等(2005)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等均为泛非期造山事件的不整合证据。

以上说明泛非构造-岩浆事件在喜马拉雅一带普遍存在。本次通过高精度的锆石 U-Pb 测年,获得 514Ma 的岩浆结晶年龄,与前人研究成果吻合,是泛非构造-热事件在北喜马拉雅拉轨岗日一带的地质记录,说明在古生代早期北喜马拉雅拉轨岗日一带卷入了泛非事件中。

研究显示冈瓦纳大陆北缘喜马拉雅和冈底斯带是全球泛非运动持续时间最长、结束最晚 ($490 \sim 485\text{Ma}$) 的大陆边缘地区(周志广等,2004; Song *et al.*, 2007),且藏南、藏北具有统一约 500Ma 的泛非基底,该变质基底是全球范围内冈瓦纳大陆统一变质基底形成最晚的区域(任纪舜和肖黎薇,2004)。通过岩石地球化学研究认为拉轨岗日花岗质片麻岩形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 514Ma 同位素年龄,说明该时期泛非碰撞造山事件在拉轨岗日一带可能结束,进入后碰撞造山的构造演化阶段。后碰撞造山阶段岩石圈折沉与软流圈的上涌等热动力作用引起地壳伸展减薄和熔融,岩浆侵入可能使拉轨岗日变质核杂岩核部岩石初步隆起。后期岩浆活动促使内核的再次上隆起,对拉轨岗日变质核杂岩的最终形成起了重要作用。

References

- Alther R, Holl A, Hegner E, Langer C and Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides; Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1-3): 51-73
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Asmerom Y, Jacobsen SB, Knoll AN, Butterfield NJ and Swett K. 1991. Strontium isotopic variations of Neoproterozoic seawater: Implications for crustal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(10): 2883-2894
- Batchelor RA and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43-55
- Black LP, Kamo SL, Allen CM *et al.* 2003. TEMORA1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1-2): 155-170
- Cawood PA, Johnson MRW and Nemch AA. 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1-2): 70-84
- Chappell BW and White AJR. 2001. Two contrasting granite types: 25

- years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489–499
- Chen B, Jahn BM, Wilde S and Xu B. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328(1–2): 157–182
- Cheng LR, Zhang YC and Zhang YJ. 2005. Discovery of the Early Ordovician strata in Xianza County, Tibet and its significance. *Journal of Stratigraphy*, 29(1): 38–41 (in Chinese with English abstract)
- Coney PJ. 1980. Cordilleran metamorphic core complexes. *Mem. Geol. Soc. Am.*, 153: 7–31
- Corfu F, Hanchar JM, Hoskin POW *et al.* 2003. Atals of zircon textures. In: Hanchar JM and Hoskin POW (eds.). *Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469–500
- Darby BJ, Davis GA and Zheng Y. 2001. Evolving geometry of the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China. *Geol. Soc. America Abstracts with Programs*, 33(3): A–32
- Davis GA and Zheng YD. 2002. Metamorphic core complexes: Definition, types and tectonic setting. *Geological Bulletin of China*, 21(4–5): 185–192 (in Chinese with English abstract)
- Davis GH and Conney PJ. 1979. Geologic development of the Cordilleran metamorphic core complexes. *Geology*, 7(3): 120–124
- Faure M, Shu LS, Zheng YD *et al.* 1996. Extensional tectonics within a subduction-type orogen: The case study of the Wugongshan dome (Jiangxi Province, southeastern China). *Tectonophysics*, 263(1–4): 77–106
- Foster GL. 2000. The Pre-Neogene Thermal History of the Nanga Parbat Haramosh Massif and the NW Himalaya. United Kingdom: Open University, 345–346
- Fu W, Zhou YZ, Yang ZJ *et al.* 2005. Characteristics of multi-horizon ore-bearing formations in southern Tibet AU-Sb metallogenic belt and its controlling factors. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(3): 321–327 (in Chinese with English abstract)
- Gansser A. 1964. *The Geology of the Himalayas*. London: Wiley InterScience, 288–230
- Gao S, Liu XM, Yuan HL *et al.* 2002. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICPMS. *Geostandards Newsletter*, 22: 181–195
- Gehrels GE, DeCelles PG, Martin A *et al.* 2003. Initiation of the Himalayan Orogen as an Early Paleozoic thin-skinned thrust belt. *GAS Today*, 13(9): 4–9
- Guan HM, Liu JL, Ji M *et al.* 2008. Discovery of the Wanfu metamorphic core complex in southern Liaoning and its regional tectonic implication. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 199–208 (in Chinese with English abstract)
- Harris NBW, Pearce JA and Tindle AG. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward MP and Reis AC (eds.). *Collision Tectonics*. Geological Society, London, Special Publication, 19(1): 67–81
- Kalsbeek F, Jepsen HF and Nutman AP. 2001. From source migmatites to plutons: Tracking the origin of ca. 435 Ma S-type granites in the East Greenland Caledonian orogen. *Lithos*, 57(1): 1–21
- King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371–391
- Knenedy WQ. 1964. The structural differentiation of Africa in the Pan-Africa (± 500 m. y.) tectonic episode. *Res. Inst. African Geol. Univ. Leeds 8th Ann. Rep.*, 48
- Kroner A. 1984. Late Precambrian plate tectonics and orogeny: A need to redefine the term Pan-African. In: Klerkx J and Michot J (eds.). *African Geology. Tervuren Musee R. Afrique Centrale, Belgium*, 23–28
- Lee J, Hacker BR, Dinklage WS *et al.* 2000. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: Structural, petrologic, and thermochronologic constraints. *Tectonics*, 19(5): 872–895
- Li C, Xie YW, Sha SL *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Pan-African granite in Baxoi County, eastern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 64–68 (in Chinese with English abstract)
- Li DW, Liu DM, Liao QA *et al.* 2003. Definition and significance of the Lhagoi Kangri metamorphic core complexes in Saga, southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 25(5): 303–307 (in Chinese with English abstract)
- Li DW, Zhang XH, Liao QA *et al.* 2004. New results and main progress in geological survey of the Dinggy (e) County and Chentang district sheets. *Geological Bulletin of China*, 23(5–6): 438–443 (in Chinese with English abstract)
- Li JZ, Wang AH, Feng XT *et al.* 2005. The deformation of the Kungmu ductile shear zone in the Lhagoi Kangri tectonic zone, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25(1–2): 189–193 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li WX and Li ZX. 2007. On the genetic classification and tectonic implication of the Early Yanshan granitoids in the Nanling Rang, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981–991 (in Chinese)
- Liao QA, Li DW, Yuan YM *et al.* 2007. The chronology and significance of Paleoproterozoic granitic gneisses in Dingjie of High Himalayan and Laguigangri of North Himalayan, Tibet. *Sciences in China (Series D)*, 37(12): 1579–1587 (in Chinese)
- Liégeois JP, Navez J, Hertogen J and Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization. *Lithos*, 45(1–4): 1–28
- Lin CJ, Sun Y, Chen DL *et al.* 2006. Geochemistry and zircon LA-ICPMS dating of Iqe River granitic gneiss, northern margin of Qaidam Basin. *Geochimica*, 35(5): 498–505 (in Chinese with English abstract)
- Liu DM. 2003a. Review of the basic characteristics of the metamorphic core complexes in China. *Geoscience*, 17(2): 125–130 (in Chinese with English abstract)
- Liu DM. 2003b. The research about extensional metamorphic core complexes in Dingjie, Xizang. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18(1): 1–5 (in Chinese with English abstract)
- Liu WC, Liang DY, Wang KY *et al.* 2002. Discovery of the Ordovician and its Geological significance in the Kangmar area, southern Tibe. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 247–248 (in Chinese)
- Liu WC, Wan XG, Liang YD *et al.* 2004a. New achievements and main progress in geological survey of the Gyangze and Yadong sheets. *Geological Bulletin of China*, 23(5–6): 444–450 (in Chinese with English abstract)
- Liu WC, Wang Y, Zhang XX *et al.* 2004b. The rock types and isotope dating of the Kangmar gneissic dome in southern Tibet. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 491–501 (in Chinese with English abstract)
- Liu WC, Zhou ZH, Zhang XX and Zhao XG. 2006. SHRIMP zircon geochronological constraints on a Pan-African orogeny in the Yadong Area, southern Tibet. *Goldschmidt Conference Abstracts*, A365
- Lou FS, Shu LS and Wang DZ. 2005. Recent progress in study of metamorphic core complexes. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 67–76 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. 3.0: A geochronological toolkit for Micro-soft Excel. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, (4): 1–70
- Ma YS, Wu ML and Zeng QL. 2002. The Mesozoic-Cenozoic compression and extension transformation process and ore-forming process in Yanshan and adjacent area. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(2): 115–121 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643
- Meert JG. 2003. A synopsis of events related to the assembly of eastern Gondwana. *Tectonophysics*, 362(1–4): 1–40
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983
- Pitcher WS. 1983. Granite type and tectonic environment. In: Hsü K (ed.). *Mountain Building Processes*. London: Academic Press, 19–40
- Qiu JX and Lin JQ. 1991. *Chemical of Petrology*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Ren JS and Xiao LW. 2004. Lifting the mysterious veil of the tectonics of the Qinghai-Tibet plateau by 1: 250000 geological mapping. *Geological Bulletin of China*, 23(1): 1–11 (in Chinese with English abstract)

English abstract)

- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247–263
- Shen XM, Zhang HX, Zhang BY *et al.* 2008. A preliminary study of relationship between, metamorphic core complexes and lithospheric thinning over the Mesozoic in south China. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 11–19 (in Chinese with English abstract)
- Song HL. 1995. An overview of metamorphic core complex-characteristics and origin. *Earth Science Frontiers*, 2(1–2): 103–111 (in Chinese with English abstract)
- Song HL. 2002. Some characteristics of metamorphic core complexes. *Geological Bulletin of China*, 21(4–5): 193–197 (in Chinese with English abstract)
- Song SG, Ji JQ, Wei CJ, Su L, Zheng YD, Song B and Zhang LF. 2007. Early Paleozoic granite in Nujiang River of Northwest Yunnan in southwestern China and its tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 52(17): 2402–2406
- Song SG, Niu YL, Wei CJ, Ji JQ and Su L. 2010. Metamorphism, anatexis, zircon ages and tectonic evolution of the Gongshan block in the northern Indochina continent; An eastern extension of the Lhasa Block. *Lithos*, 120(3–4): 327–346
- Su CQ, Jiang CY, Xia MZ *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating from granite of the metamorphic core complex system in Jueluotage tectonic belt and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2789–2799 (in Chinese with English abstract)
- Sui ZL, Li DW, Yang WR *et al.* 2003. Characteristic from TM image of Laguigangri metamorphic core complex zone in southern Tibet. *Earth Science*, 28(6): 680–684 (in Chinese with English abstract)
- Sui ZL, Li DW, Yang WR *et al.* 2006. Image evidence of the three-layer structure of the Lhagui Kangri metamorphic core complex zone, South Tibet and its significance. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 188–195 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Sun Y, Shu LS, Faure M *et al.* 1997. Tectonic development of the metamorphic core complex of the Wugongshan in the Northern Jiangxi Province. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 33(3): 447–449 (in Chinese with English abstract)
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1–4): 29–44
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell
- Turner SP, Foden JD and Morrison RS. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28(2): 151–179
- Wang DZ, Shu LS, Faure M and Sheng WH. 2001. Mesozoic magmatism and granitic dome in the Wugongshan Massif, Jiangxi Province and their genetical relationship to the tectonic events in southeast China. *Tectonophysics*, 339(3–4): 259–277
- Wang JW, Cheng ZL, Gui ST *et al.* 1981. Rb-Sr isotopic studies of some intermediate-acidic plutons in Southern Xizang. *Geochimica*, (3): 242–246 (in Chinese with English abstract)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- White AJR and Chappell BW. 1988. Some supracrustal (S-type) granites of the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 79(2–3): 169–181
- Williamson BJ, Shaw A, Downes H and Thirlwall MF. 1996. Geochemical constraints on the genesis of Hercynian two-mica leucogranites from the Massif Central, France. *Chemical Geology*, 127(1–3): 25–42
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the Petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract)
- Xia B, Xu LF, Zhang YQ *et al.* 2008. U-Pb SHRIMP zircon ages of the Kangmar granite in the southern Tibet. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(3): 72–76 (in Chinese with English abstract)
- Xiao QH, Deng JF, Ma DQ *et al.* 2002. *The Ways of Investigation on Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 1–294 (in Chinese with English abstract)
- Xu RH and Jin CW. 1986. A geochronological study in the middle of North Himalaya granite belt, Tibet. *Chinese Journal of Geology*, (4): 339–348 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Liang FH *et al.* 2005. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Yan DP, Zhou MF, Song HL and Fu ZR. 2003. Structural style and tectonic significance of the Jianglang dome in the eastern margin of the Tibetan Plateau, China. *Journal of Structural Geology*, 25(5): 765–779
- Yin WQ and Li JX. 2007. Relationship between extension-detachment structure and metallogeny in the district of Xiaoshan, Henan Province. *Mineral Resources and Geology*, 21(2): 136–140 (in Chinese with English abstract)
- Yong Y, Xiao WJ, Yuan C *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of Paleozoic granitic plutons from the eastern Central Qilian and their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 855–866 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Wu FY, Gao S *et al.* 2003. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and Re of Cenozoic pluton in NE China. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511–1520 (in Chinese)
- Yuan YM, Li DW, Zhang XH *et al.* 2003. Characteristics and geological meaning of metamorphic zonation of top Laguigangri metamorphic core complex, Tibet. *Earth Science*, 28(6): 695–700 (in Chinese with English abstract)
- Zartman RE and Doe BR. 1981. Plumbotectonics-the model. *Tectonophysics*, 75(1–2): 135–162
- Zhang JY, Liao QA, Li DW *et al.* 2003. Laguigangri leucogranites and its relation with Laguigangri metamorphic core complex in Sajia, South Tibet. *Earth Science*, 28(6): 695–700 (in Chinese with English abstract)
- Zhao HB, Mo XX, Xu SM *et al.* 2007. Composition and evolution of the Xinkailing metamorphic core complexes in Heilongjiang Province. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 176–188 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XX, Coe RS, Gilder SA and Frost GM. 1996. Palaeomagnetic constraints on the palaeogeography of China: Implications for Gondwanaland. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 643–672
- Zheng YD and Zhang Q. 1993. The Yagan metamorphic core complex and extensional detachment fault in Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 67(4): 301–312 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TX, Chen JF and Li XM. 1996. Origin of high- $\epsilon_{Nd}(t)$ granites from Alatau mountain, Xinjiang. *Chinese Journal of Geology*, 31(1): 71–79 (in Chinese with English abstract)
- Zhou ZG, Liu WC and Liang DY. 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 Himalayas. *Geological Bulletin of China*, 23(7): 654–663 (in Chinese with English abstract)
- Zhu BQ. 1998. *The Theory and Application of Isotopic System in Earth Sciences*. Beijing: Science Press, 1–330 (in Chinese)
- Zhu TX, Wang AH, Zou GF *et al.* 2003. The new discovery of sedimentary cover basal conglomerate in Himalayan. *Geological Bulletin of China*, 22(5): 366–368 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- Davis GA, 郑亚东. 2002. 变质核杂岩的定义、类型及构造背景. *地质通报*, 21(4–5): 185–192
- 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. *地层学杂志*, 29(1): 38–41
- 付伟, 周永章, 杨志军等. 2005. 藏南多层位金锦含矿建造特征及

- 其控矿因素制约. 大地构造与成矿学, 29(3): 321–327
- 关会梅, 刘俊来, 纪沫等. 2008. 辽宁南部万福变质核杂岩的发现及其区域构造意义. 地学前缘, 15(3): 199–208
- 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. 地质通报, 28(1): 64–68
- 李德威, 刘德民, 廖群安等. 2003. 藏南萨迦拉轨岗日变质核杂岩的厘定及其成因. 地质通报, 25(5): 303–307
- 李德威, 张雄华, 廖群安等. 2004. 定结县幅、陈塘区幅地质调查新成果及主要进展. 地质通报, 23(5–6): 438–443
- 李建忠, 王安华, 冯心涛等. 2005. 西藏拉轨岗日构造带孔木韧性剪切带特征. 沉积与特提斯地质, 25(1–2): 189–193
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. 科学通报, 52(9): 981–991
- 廖群安, 李德威, 袁晏明等. 2007. 西藏高喜马拉雅定结和北喜马拉雅拉轨岗日古元古花岗岩质片麻岩的年代学及其意义. 中国科学(D 辑), 37(12): 1579–1587
- 林慈銮, 孙勇, 陈丹玲等. 2006. 柴北缘鱼卡河花岗岩质片麻岩的地球化学特征和锆石 LA-ICPMS 定年. 地球化学, 35(5): 498–505
- 刘德民. 2003a. 中国变质核杂岩的基本特征. 现代地质, 17(2): 125–130
- 刘德民. 2003b. 西藏定结地区变质核杂岩研究. 地质找矿论丛, 18(1): 1–5
- 刘文灿, 梁定益, 王克友等. 2002. 藏南康马地区奥陶系的发现及其地质意义. 地学前缘, 9(4): 247–248
- 刘文灿, 万晓樵, 梁定益等. 2004a. 江孜县幅、亚东县幅地质调查新成果及主要进展. 地质通报, 23(5–6): 444–450
- 刘文灿, 王瑜, 张祥信等. 2004b. 西藏南部康马岩体岩石类型及其同位素测年. 地学前缘, 11(4): 491–501
- 楼法生, 舒良树, 王德滋. 2005. 变质核杂岩研究进展. 高校地质学报, 11(1): 67–76
- 马寅生, 吴满路, 曾庆利. 2002. 燕山及邻区中新世代挤压与伸展的转换和成矿作用. 地球学报, 23(2): 115–121
- 邱家骧, 林景仟. 1991. 岩石化学. 北京: 地质出版社, 203–210
- 任纪舜, 肖黎薇. 2004. 1: 25 万地质填图进一步揭开了青藏高原大地构造的神秘面纱. 地质通报, 23(1): 1–11
- 沈晓明, 张海洋, 张伯友等. 2008. 华南中生代变质核杂岩构造及其与岩石圈减薄机制的关系初探. 大地构造与成矿学, 32(1): 11–19
- 宋鸿林. 1995. 变质核杂岩研究进展、基本特征及成因探讨. 地学前缘, 2(1–2): 103–111
- 宋鸿林. 2002. 关于变质核杂岩构造特征的几个问题. 地质通报, 21(4–5): 193–197
- 苏春乾, 姜常义, 夏明哲等. 2008. 新疆觉罗塔格构造带新元古代变质核杂岩锆石 U-Pb 年龄与地质意义. 岩石学报, 24(12): 2789–2799
- 隋志龙, 李德威, 杨巍然等. 2003. 藏南拉轨岗日变质核杂岩带的 TM 影像特征. 地球科学, 28(6): 680–684
- 隋志龙, 李德威, 杨巍然等. 2006. 藏南拉轨岗日变质核杂岩带三层结构的影像证据及意义. 地学前缘, 13(4): 188–195
- 孙岩, 舒良树, 福赫等. 1997. 赣北地区武功山变质核杂岩的构造发育. 南京大学学报(自然科学), 33(3): 447–449
- 王俊文, 成忠礼, 桂训唐等. 1981. 西藏南部某些中酸性岩体的铷-锶同位素研究. 地球化学, 1981, (3): 242–246
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217–123
- 夏斌, 徐力峰, 张玉泉等. 2008. 西藏南部康马花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 矿物岩石, 28(3): 72–76
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 1–294
- 许荣华, 金成伟. 1986. 西藏北喜马拉雅花岗岩带中段地质年代的研究. 地质科学, (4): 339–348
- 许志琴, 杨经绥, 梁风华等. 2005. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄纪录. 岩石学报, 21(1): 1–12
- 尹维青, 李建旭. 2007. 河南崤山地区伸展滑脱作用及其与金矿的关系. 矿产与地质, 21(2): 136–140
- 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. 岩石学报, 24(4): 855–866
- 袁洪林, 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. 科学通报, 48(14): 1511–1520
- 袁晏明, 李德威, 张雄华等. 2003. 西藏拉轨岗日核杂岩盖层变质分带特征及其地质意义. 地球科学, 28(6): 695–700
- 张金阳, 廖群安, 李德威等. 2003. 藏南萨迦拉轨岗日浅色花岗岩特征及与变质核杂岩的关系. 地球科学, 28(6): 695–700
- 赵海滨, 莫宣学, 徐受民等. 2007. 黑龙江新开岭变质核杂岩的组成及其演化. 地质科学, 42(1): 176–188
- 郑亚东, 张青. 1993. 内蒙古亚干变质核杂岩与伸展拆离断层. 地质学报, 67(4): 301–312
- 周泰禧, 陈江峰, 李学明. 1996. 新疆阿拉套山花岗岩类高 ε_{Nd} 值的成因探讨. 地质科学, 31(1): 71–79
- 周志广, 刘文灿, 梁定益. 2004. 藏南康马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. 地质通报, 23(7): 654–663
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用. 北京: 科学出版社, 1–330
- 朱同兴, 王安华, 邹光富等. 2003. 喜马拉雅地区沉积盖层底砾岩的新发现. 地质通报, 22(5): 366–368