

# 松潘-甘孜造山带南段晚三叠世兰尼巴和羊房沟花岗岩岩石学、地球化学特征及成因

万传辉<sup>1,2</sup>, 袁静<sup>1</sup>, 李芬香<sup>1</sup>, 鄢圣武<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中南冶金地质研究所, 湖北 宜昌 443003)

**摘要:** 对位于松潘-甘孜地体南部的兰尼巴岩体和羊房沟岩体进行了详细的岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年代学研究, 重点讨论了岩体的成因。U-Pb 激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICPMS) 年龄集中在 211 Ma 附近, 属晚三叠世, 代表了岩体的形成年龄。两岩体具有中等至较高的 SiO<sub>2</sub> 含量(58.31%~68.02%) 和较高的全碱含量(6.70%~8.80%), 具有准铝质(A/CNK=0.68~0.99) 的特征, 属于高钾钙碱性到橄榄玄粗岩系列。其中, 兰尼巴岩体南段富 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(15.85%~16.27%), K<sub>2</sub>O(3.29%~3.40%), 中等 MgO(1.16%~1.47%), 并具有高 Sr(869×10<sup>-6</sup>~1 032×10<sup>-6</sup>) 低 Y(9.53×10<sup>-6</sup>~9.85×10<sup>-6</sup>) 特征以及中等至较高的稀土元素分馏(La/Yb)<sub>N</sub>>3], 并且见有暗色包体, 非常类似于下地壳熔融形成的钾质埃达克岩。兰尼巴岩体的北段及羊房沟岩体的主量元素、微量元素特征都很相似, 相对兰尼巴岩体南段具有更高的 K<sub>2</sub>O 含量(4.08%~5.96%) 相对低的 Sr(664×10<sup>-6</sup>~868×10<sup>-6</sup>) 稍高的 Y(19.71×10<sup>-6</sup>~27.76×10<sup>-6</sup>) 和明显较低的 Sr/Y 比值(29.39~42.05), 显示出高钾钙碱性 I 型花岗岩的特征, 可能来自于增厚下地壳的部分熔融。野外地质特征和地球化学特征均显示岩体的形成有幔源物质或新生地壳物质的参与, 其中幔源岩浆的加入为松潘-甘孜造山带大量中生代花岗岩的形成提供了热源和部分物源。地幔岩浆的上侵和高钾钙碱性花岗岩体的形成标志着松潘-甘孜造山带至少在晚三叠世就已处于伸展构造环境。

**关键词:** 松潘-甘孜造山带; 川西; 晚三叠世; 高钾钙碱性 I 型花岗岩; 钾质埃达克岩

中图分类号: P619.22<sup>+</sup>2; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)02-0185-14

## Late Triassic granitoids in the southern part of the Songpan-Garze fold belt: Petrology, geochemical composition and petrogenesis

WAN Chuan-hui<sup>1,2</sup>, YUAN Jing<sup>1</sup>, LI Fen-xiang<sup>1</sup> and YAN Sheng-wu<sup>1</sup>

(1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Central-South Research Institute of Metallurgical Geology, Yichang 443003, China)

**Abstract:** The Songpan-Garze fold belt (SGFB) on the eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau covers a huge triangular area bounded by Yangtze (South China), North China and Qinghai-Tibetan Plateau blocks. It has gone through two orogenic phases, i. e., Paleotethys and Neotethys, with the major deformation stages occurring in Late Triassic. Mesozoic intermediate-acid intrusives, composed of both normal calc-alkaline and high Sr low Y granitoids, are widely distributed in the Songpan-Garze fold belt. The investigation of their petrogenesis, characteristics of the sources and geodynamic significances is very important in understanding the evolution of SGFB characterized by poorly-exposed basement. The authors studied petrology, geochemical composition and zircon U-Pb chronological characteristics of Lanniba and Yangfanggou granitoids in the southern part of the Songpan-Garze fold belt as well as their petrogenesis and geological significance. The study of Lanniba and Yangfanggou granitoids formed during the post-collision period can shed light on such problems as regional

收稿日期: 2010-06-30; 修订日期: 2011-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772043)

作者简介: 万传辉(1985-), 男, 汉族, 硕士研究生, 岩石矿物及矿床学专业, E-mail: chuanhuiwan@163.com.

tectono-magmatic events, basement nature and tectonic evolution. Cathodoluminescence (CL) images show that the zircons are big and idiomorphic and have clear magmatic oscillatory zoning, suggesting magmatic origin. U-Pb zircon LA-ICPMS dating shows that the Lanniba and Yangfanggou granitoids have magmatic crystallization ages of around 211 Ma. These granitoids are high-K calc-alkaline (even shoshonite), with intermediate to high  $\text{SiO}_2$  (58.31% ~ 68.02%) and metaluminous characteristics ( $A/CNK = 0.68 \sim 0.99$ ). Rocks in the southern part of the Lanniba granitoids contain high  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.85% ~ 16.27%) and  $\text{K}_2\text{O}$  (3.29% ~ 3.40%), intermediate  $\text{MgO}$  (1.16% ~ 1.47%), high Sr ( $869 \times 10^{-6} \sim 1\,032 \times 10^{-6}$ ), low Y ( $9.53 \times 10^{-6} \sim 9.85 \times 10^{-6}$ ) with fractionated REE [ $(\text{La}/\text{Yb})_N > 31$ ] and also have some dark inclusions. These rocks are very similar to the K-adakite derived from partial melting of thickened lower crust. Yangfanggou and the northern part of the Lanniba granitoids are very similar to each other in major and trace elements. In contrast with the southern part of Lanniba granitoids, they have higher  $\text{K}_2\text{O}$  (4.08% ~ 5.96%) and Y ( $19.71 \times 10^{-6} \sim 27.76 \times 10^{-6}$ ), lower Sr ( $664 \times 10^{-6} \sim 868 \times 10^{-6}$ ), and obviously lower Sr/Y ratio (29.39 ~ 42.05), showing characteristics of high-K calc-alkaline I-type granitoids; thus they might have been derived from partial melting of thickened lower crust. Field geological and geochemical characteristics indicate that the granitoids contained mantle components, thus providing heat and part of source materials for the Mesozoic granites in Songpan-Garze fold belt. The involvement of mantle-derived magma and the existence of ultrahigh-K calc-alkaline I-type granitoids ( $211 \pm 2$  Ma) indicate that the Songpan-Garze orogen was under an extensional scheme at least in Late Triassic period.

**Key words:** Songpan-Garze fold belt; Sichuan; Late Triassic; high-K calc-alkaline I type granitoids; K-adakite

松潘-甘孜造山带位于青藏高原的东部,为一夹持于扬子、华北和青藏高原三大岩石圈板块之间巨大的三角状褶皱区域(图1)经历了古特提斯和新特提斯两次造山事件,记录了印支期以来扬子、华北和羌塘3个块体之间的收敛等构造活动。但是,除了在其东部及南部边缘出露有三叠纪以前的地层和前震旦系结晶基底外,全区基本被巨厚的三叠系沉积岩所覆盖(邹定邦等,1984; Sengör, 1987; 张云湘等, 1988; Nie *et al.*, 1994),掩盖了其基底属性、构造演化样式和序列、岩浆活动与成矿作用潜力等重要的地质信息,导致了前人对该区的基底性质和大地构造属性存在多种认识,因此被称为“中国地质的‘百慕大’(许志琴等,1991)”,又被称为“亚洲之谜”(Enkin *et al.*, 1992),受到地质界的广泛关注(任纪舜等,1980; Sengör, 1987; Enkin *et al.*, 1992; 潘桂棠等, 1997; 任纪舜等, 2004; Roger *et al.*, 2004; Harrowfield and Wilson, 2005; 胡健民等, 2005; Reid *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2006, 2007; 赵永久等, 2007a; Xiao *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2008; Yuan *et al.*, 2010)。

花岗岩是大陆地壳主要成分和构造运动的直接产物,其地球化学特征既能反映源区性质,又是构造事件重要的岩浆记录。显然,对于缺乏基底出露的松潘-甘孜造山带,这些花岗岩的存在为研究其基底

属性提供了不可替代的探针作用。

前人对该地区花岗岩的专题研究成果较少,其年代学资料主要来源于一些全岩的 Rb-Sr 和 K-Ar 同位素方法,据其认为花岗岩的形成主要与印支运动导致的褶皱造山过程有关(四川地质矿产局, 1991),但由于局限于当时的测试手段和精度,并且 Rb-Sr 和 K-Ar 体系易受热干扰事件影响而导致年龄误差较大,虽有一些单颗粒锆石的 U-Pb 年龄数据(袁海华等,1991; Roger *et al.*, 2004),但它们可能是锆石增生边与核部的混合年龄,测年数据准确性并不高。近年来由于测试手段不断进步,高精度的单颗粒锆石微区原位测试已得到了较好的年龄数据(胡健民等,2005; Zhang *et al.*, 2006; Xiao *et al.*, 2007),显示松潘-甘孜地区的花岗岩主要形成于晚三叠世,岩浆活动可以延续到早侏罗世的晚期。但是对于花岗岩的成因问题仍存在较大争议,许志琴等(1992)认为这些花岗岩是松潘-甘孜碰撞型滑脱-逆冲型山链中由于滑脱剪切热导致的熔融所形成;胡健民等(2005)也获得了相似的认识,并认为幔源岩浆成分的加入是花岗岩形成的热源之一;游振东等(2006)认为这些花岗岩浆起源于华北与扬子大陆板块的汇聚构造环境,受控于大陆地壳碰撞、陆壳增厚导致的重熔;Xiao 和 Clemens(2007)、Zhang 等(2007)和袁静等(2011)通过对松潘-甘孜地体内三

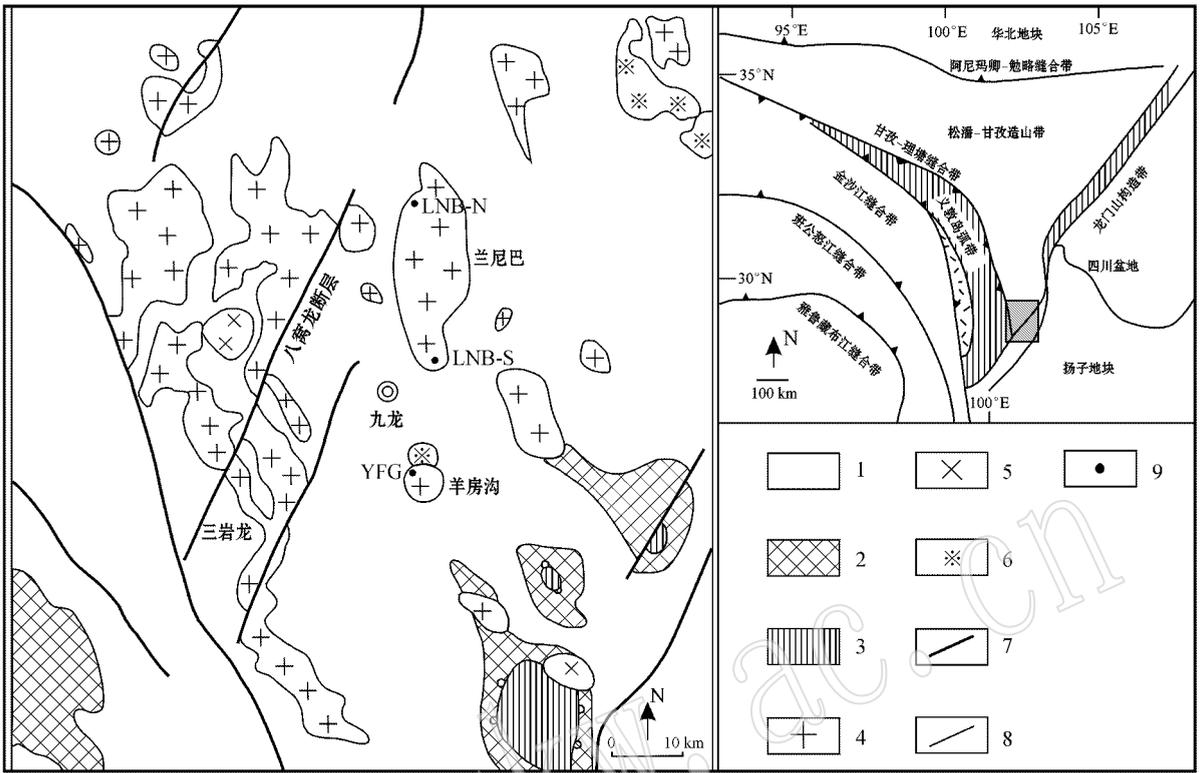


图 1 研究区区域地质简图 [据袁静等(2011)修改]

Fig. 1 Simplified geological map of the study area in Songpan fold belt (after Yuan Jing *et al.*, 2011)

1—中生代(三叠纪)沉积岩和火山沉积岩; 2—古生代片岩、大理岩和角闪岩; 3—元古宙结晶基底; 4—印支期花岗岩; 5—喜山期花岗岩; 6—燕山期花岗岩; 7—断层; 8—地质界线; 9—采样位置

1—Mesozoic (Triassic) sedimentary rocks and volcanic rocks; 2—Palaeozoic schist, marble and amphibolite; 3—Proterozoic basement; 4—Indosinian granitoids; 5—Himalayan granitoids; 6—Yanshanian granitoids; 7—fault; 8—geological boundary; 9—sampling location

叠纪埃达克岩和 A 型花岗岩等的研究,认为花岗岩的形成可能来源于松潘-甘孜三叠纪地壳增厚之后三叠纪岩石圈的拆沉,但系统年代学和地球化学数据的缺乏,极大地限制了对该区花岗岩成因模式的研究。此外,由于该区地处高原,野外工作条件差(平均海拔 4 000 m 以上,研究区北部贡嘎山高达海拔 7 556 m),迄今为止针对这些花岗岩野外地质特征、岩石类型、单元和组合、系统的年代学和地球化学研究仍很薄弱,其更深层次的地球动力学意义还有待进一步揭示。本文选择松潘-甘孜造山带南部的川西九龙地区兰尼巴岩体(LNB)和羊房沟岩体(YFG),开展详细的岩石学和地球化学分析,试图了解花岗岩的成因机制,并对前人构造演化的模式做一检验。

## 1 地质背景

松潘-甘孜造山带位于青藏高原东部,以川西高

原及巴颜喀拉山为主体,总体为一个覆盖了  $2 \times 10^5 \text{ km}^2$  的倒三角形的褶皱带。其北侧以阿尼玛卿缝合带与东昆仑-西秦岭造山带相隔,西侧以金沙江缝合带与冈瓦纳大陆外缘的羌塘-昌都拼贴地块毗邻,东南缘以龙门山-锦屏山为界与扬子克拉通相连(图 1)(Zhang *et al.*, 1984; Chen *et al.*, 1995; Chen and Wilson, 1996)。虽然该地体是一个中生代以来长期演化的造山带,在新生代时受到强烈的改造(Dewey *et al.*, 1988),但是变形过程主要发生在印支期(晚三叠世)(许志琴等, 1992; Hsü *et al.*, 1995; Burchfiel *et al.*, 1995; Yin and Harrison, 2002)。印支期的造山运动造成区内震旦系-古生界强烈变形,三叠纪沉积盖层向南推覆于扬子板块之上从而使地壳明显增厚。

在褶皱带内,沉积物几乎全是厚达 5~15 km 的三叠纪海相复理石沉积(许志琴等, 1992)。前三叠纪的地层分布在带内的丹巴地区,形成以新元古代沉积物为核部的背斜。这些前三叠的地层都经历过

绿片岩相到角闪岩相的变质作用(Huang *et al.*, 2003)。相反,三叠纪的复理石沉积只遭受了绿片岩相变质作用,但是它们在印支期(晚三叠世)由于华北、扬子和西藏板块的汇聚挤压,发生了强烈的褶皱变形(许志琴等,1992;Brugier *et al.*, 1997;Reid *et al.*, 2005)。三叠纪海相复理石沉积在松潘-甘孜盆地的东缘和东南缘被大尺度剥离,从而与扬子地体的结晶基底及古生代的盖层分开(许志琴等,1992)。根据最近的三叠纪沉积物碎屑锆石(870 个锆石单颗粒)U-Pb 年代学研究(Weislogel *et al.*, 2006),发现该带内三叠纪沉积物的源区包括秦岭-大别造山带、华北板块和扬子板块。

松潘-甘孜造山带内广泛出露印支期的中酸性花岗岩类侵入体(图 1)。这些岩体侵位于三叠纪西康群中,暗示它们是后造山或后碰撞的花岗岩。岩体呈面状散布于造山带内,多以小岩体和小岩株的形式产出,在东缘和南部出露更广,大部分属于钙碱性花岗岩。它们总体上没有方向性,也没有显示出与周围构造带有明显的空间关系。显然,岩浆活动是松潘-甘孜造山带构造发展过程中的一个重要组成部分。澄清它们的侵位时代、相互接触关系、地球化学特征、岩浆源区和形成机制等问题对揭示松潘-甘孜褶皱带复杂的构造演化历史至关重要。

## 2 岩石学及岩相学特征

兰尼巴岩体(LNB)位于合德至色库沟之间,近南北展布,面积约 230 km<sup>2</sup>,呈岩基产出(图 1)。主体部分为黑云母花岗岩,也有花岗闪长岩、石英二长岩及二长岩等。羊房沟岩体(YFG)位于九龙南东,呈北西—南东方向展布,面积约 50 km<sup>2</sup>(图 1)。主体部分为正长岩,边缘为二长岩,南端见有石英二长岩、石英闪长岩,它们之间呈渐变过渡关系。由于山体陡峭,加上植被茂密,两个岩体都未采到中心相的样品。

野外观察显示,部分岩体明显侵入到褶皱的三叠系内,指示这些花岗岩体的侵位是在三叠纪褶皱形成以后发生的。另外值得注意的是这些岩石并未发生构造变形或变质,说明在岩体形成后没有受到区域内大规模构造作用事件的影响。

两个岩体的岩石均呈浅灰色、灰色,块状构造,具中细粒花岗岩结构,根据矿物组成的不同划分为 3

种岩性:①黑云母花岗岩,主要矿物组成为石英(20%~30%)钾长石(35%~40%)斜长石(15%~20%, $An \approx 30$ )黑云母(5%~10%)角闪石(5%~8%);②黑云母二长花岗岩,主要矿物组成为石英(20%~30%)钾长石(30%~40%)斜长石(25%~30%, $An \approx 30$ )黑云母(10%~20%)角闪石(5%~10%);③花岗闪长岩,主要矿物组成为石英(25%~30%)斜长石(35%~40%, $An \approx 40$ )钾长石(10%~15%)黑云母(5%~10%)角闪石(5%~10%)。它们的副矿物组成几乎相同,包括榍石、磷灰石、锆石、Fe-Ti 氧化物等。

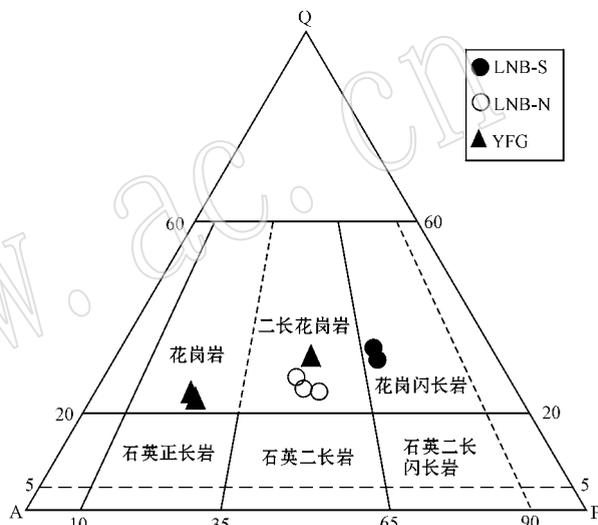


图 2 兰尼巴、羊房沟花岗岩 QAP 分类命名图

Fig. 2 QAP nomenclature diagram of LNB and YFG granitoids

Q—石英;P—斜长石;A—钾长石+钠长石

Q—quartz;P—plagioclase;A—potassium feldspar+albite

## 3 锆石 U-Pb 年代学

用于锆石 U-Pb 年代学测定的锆石样品,由廊坊地质服务有限公司利用标准技术进行分选,制靶后进行阴极发光(CL)照相,以观察锆石的内部结构。U-Pb 年龄在中国地质大学 GPMR 实验室利用 LA-ICP-MS 方法测定,分析方法及仪器参数见 Yuan 等(2004)。采用 Andersen(2002)的方法对普通 Pb 进行校正,采用 Ludwig 的 Isoplot 2.49-EX 程序进行锆石加权平均年龄计算及谐和图的绘制。兰尼巴、羊房沟岩体所挑选的锆石在镜下观察呈金黄色,金属光泽。阴极发光电子(CL)图像中,多数锆石较自形,锆石晶形较好,颗粒较大,少数颗粒已破碎,粒径介

于 100~200  $\mu\text{m}$ ，具明显的岩浆锆石振荡环带(图 3)。采用 32  $\mu\text{m}$  的激光剥蚀斑径分别对样品的锆石进行了 LA-ICPMS 定年分析，共完成 60 多颗锆石 30 个点的测试。少量数据由于激光击穿锆石而不可用，各挑选了其中 10 个左右信号较好的数据(表 1)。

兰尼巴锆石(测样 LNB3)与羊房沟锆石(测样 YFG1)的 Th/U 比值为 0.29~0.78，基本都大于 0.40，应属于岩浆锆石(Hoskin and Black, 2000)。LNB3 样品 10 个分析点都集中在一致线附近的很小区域内， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $211.4 \pm 1.5 \text{ Ma}$

(MSWD=0.082,  $1\sigma$ ) (图 4a)。YFG1 样品 11 个分析点都集中在一致线附近的很小区域内， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $210.4 \pm 2.1 \text{ Ma}$  (MSWD=0.117,  $1\sigma$ ) (图 4b)。

## 4 地球化学特征

### 4.1 分析方法

用于测试主量元素和微量元素的样品在无污染的情况下碎至 200 目以下。主量元素测试在中国科

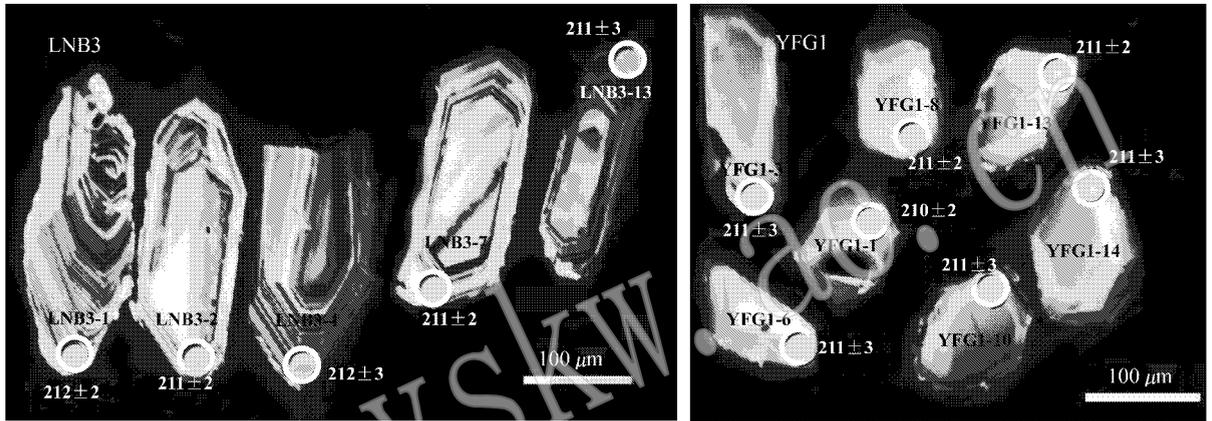


图 3 样品代表性锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircon samples

表 1 锆石 LA-ICPMS U-Pb 数据

Table 1 U-Pb zircon LA-ICPMS chronological data of samples

样号	$\omega_{\text{Pb}}/10^{-6}$			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}, 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}, 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}, 1\sigma$	年龄/Ma	
	Pb	Th	U					$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}, 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}, 1\sigma$
LNB3-1	4	171	581	0.29	$0.053 \pm 2$	$0.033 \pm 4$	$0.246 \pm 10$	$212 \pm 2$	$223 \pm 8$
LNB3-2	8	375	885	0.42	$0.051 \pm 1$	$0.033 \pm 4$	$0.235 \pm 9$	$211 \pm 2$	$214 \pm 7$
LNB3-4	5	262	650	0.40	$0.049 \pm 2$	$0.034 \pm 4$	$0.228 \pm 10$	$212 \pm 3$	$209 \pm 8$
LNB3-5	9	418	809	0.52	$0.052 \pm 2$	$0.033 \pm 4$	$0.244 \pm 11$	$212 \pm 2$	$221 \pm 9$
LNB3-7	10	518	914	0.57	$0.048 \pm 1$	$0.033 \pm 4$	$0.225 \pm 9$	$211 \pm 2$	$206 \pm 8$
LNB3-8	9	447	841	0.53	$0.047 \pm 2$	$0.033 \pm 4$	$0.217 \pm 9$	$212 \pm 2$	$200 \pm 7$
LNB3-9	6	319	716	0.45	$0.049 \pm 2$	$0.033 \pm 3$	$0.225 \pm 9$	$211 \pm 2$	$206 \pm 8$
LNB3-10	6	276	682	0.41	$0.052 \pm 2$	$0.034 \pm 4$	$0.243 \pm 11$	$212 \pm 2$	$221 \pm 9$
LNB3-13	9	423	891	0.47	$0.051 \pm 1$	$0.033 \pm 4$	$0.238 \pm 8$	$211 \pm 3$	$217 \pm 7$
LNB3-14	9	407	954	0.43	$0.052 \pm 1$	$0.033 \pm 4$	$0.250 \pm 9$	$211 \pm 2$	$226 \pm 7$
YFG1-1	5	255	393	0.65	$0.054 \pm 2$	$0.033 \pm 4$	$0.248 \pm 11$	$210 \pm 2$	$225 \pm 9$
YFG1-3	4	209	305	0.69	$0.053 \pm 3$	$0.033 \pm 4$	$0.244 \pm 14$	$211 \pm 3$	$222 \pm 12$
YFG1-5	5	225	328	0.68	$0.050 \pm 2$	$0.033 \pm 4$	$0.224 \pm 12$	$208 \pm 3$	$205 \pm 10$
YFG1-6	4	203	257	0.79	$0.051 \pm 3$	$0.033 \pm 4$	$0.234 \pm 16$	$211 \pm 3$	$213 \pm 13$
YFG1-7	6	309	484	0.64	$0.050 \pm 2$	$0.033 \pm 4$	$0.228 \pm 10$	$211 \pm 2$	$209 \pm 9$
YFG1-8	5	257	412	0.62	$0.048 \pm 2$	$0.033 \pm 4$	$0.227 \pm 11$	$211 \pm 2$	$208 \pm 9$
YFG1-10	4	196	287	0.68	$0.054 \pm 3$	$0.033 \pm 4$	$0.243 \pm 13$	$211 \pm 3$	$221 \pm 10$
YFG1-11	5	219	315	0.70	$0.054 \pm 3$	$0.033 \pm 4$	$0.253 \pm 14$	$211 \pm 2$	$229 \pm 11$
YFG1-12	4	205	279	0.73	$0.054 \pm 3$	$0.033 \pm 4$	$0.246 \pm 15$	$211 \pm 3$	$223 \pm 12$
YFG1-13	5	217	318	0.68	$0.056 \pm 3$	$0.033 \pm 4$	$0.256 \pm 13$	$211 \pm 2$	$232 \pm 11$
YFG1-14	3	152	233	0.65	$0.055 \pm 3$	$0.033 \pm 4$	$0.247 \pm 14$	$211 \pm 3$	$224 \pm 11$

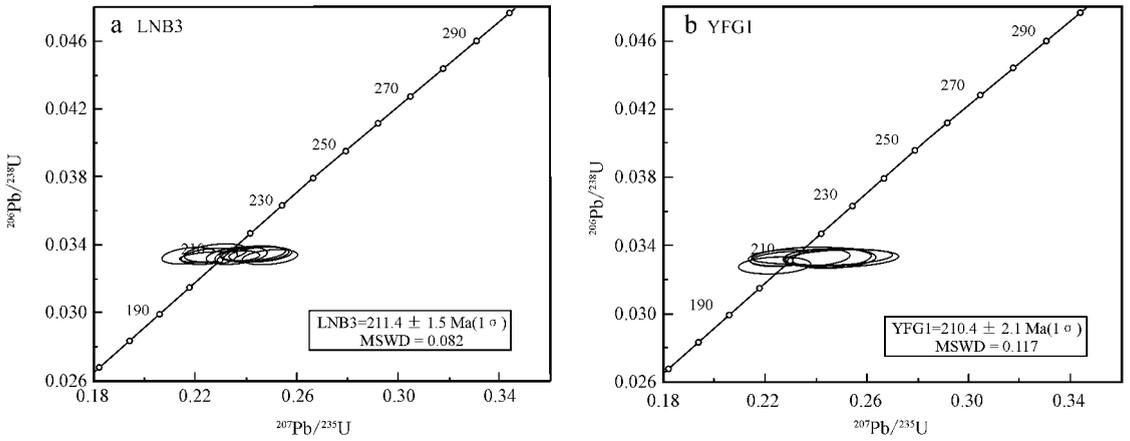


图 4 锆石 U-Pb 谐和年龄图

Fig. 4 U-Pb zircon concordia diagram of samples

学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室采用 XRF 测定,分析精度优于 5%,分析方法与 Goto 和 Tatsumi(1994)的报道方法相似。微量元素数据在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)测得,采用 ICP-MS 测定,分析精度优于 5%~10%,分析方法见刘勇胜等(2003)。

4.2 主量元素

兰尼巴岩体具有中等到高的 SiO<sub>2</sub> 含量(60.18%~68.02%),为中酸性岩;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(15.47%~16.27%)中等的 MgO 含量(1.16%~3.08%)低到中等, Mg<sup>#</sup> 值为 45~51; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 2.83%~5.71%, CaO 含量为 2.81%~5.14%, Na<sub>2</sub>O 含量(3.05%~4.00%)和 K<sub>2</sub>O 含量(3.29%~5.09%)较高(表 2)。在火成岩 TAS 图解(图 5)中,兰尼巴岩体的 5 个样品分别落入了二长岩、石英二长岩和花岗闪长岩的区域, K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 关系图(图 6)显示出高钾钙碱性到橄榄玄粗岩系列的特征。里特曼组合指数(δ)有小于 3.3(钙碱性)和处于 3.3~9 间(碱性)两组。兰尼巴岩体南段(LNB-S)的两个样品为酸性岩,相对于北段(LNB-N)中性岩体其 K<sub>2</sub>O 及 Ti、Fe、Mn、Mg、P 的氧化物含量更低一些(表 2)。

羊房沟岩体(YFG)具有中等的 SiO<sub>2</sub> 含量(58.31%~61.46%),为中性岩; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量(13.73%~15.08%)和 MgO(2.64%~3.97%)含量中等, Mg<sup>#</sup> 值为 45~53; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 6.53%~7.50%, CaO 含量为 4.89%~5.67%, Na<sub>2</sub>O 含量(2.20%~2.62%)相对较低, K<sub>2</sub>O 含量(4.08%~5.85%)较高(表 1)。在火成岩 TAS 图解中可以看

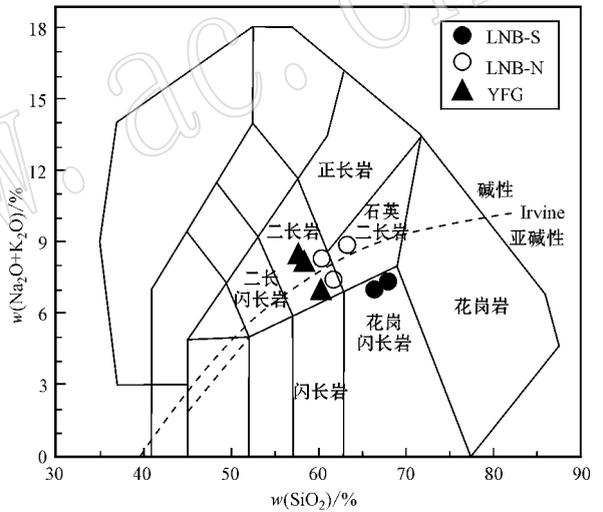


图 5 花岗岩 TAS 分类命名图(据 Middlemost, 1994)

Fig. 5 TAS nomenclature diagram of granitic pluton (after Middlemost, 1994)

到,羊房沟岩体的 3 个样品在火成岩落入了二长岩的区域(图 5)。K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 关系图(图 6)中显示出橄榄玄粗岩系列的特征。同样根据里特曼组合指数(δ)也可将 YFG 分为小于 3.3(钙碱性)和 3.3~9(碱性)的两组岩石。

两个岩体均含有较高的 K<sub>2</sub>O 和全碱含量。由于全碱含量较高,兰尼巴岩体和羊房沟岩体都有具有较低的铝饱和指数(A/CNK 都小于 1),在 A/NK-A/CNK 图解(图 7)中上样品全部落入准铝质范围内。除了 LNB-S 的两个样品 K<sub>2</sub>O < Na<sub>2</sub>O 外,其余的样品都是 K<sub>2</sub>O > Na<sub>2</sub>O。在 AFM 图解(图 8)中所有样品具有钙碱性(CA)的演化趋势。通常 I 型花岗

表 2 样品主量元素数据  
Table 2 Major elements data

$w_B/\%$

岩体 样号	LNB-S		LNB-N			YFG		
	LNB1	LNB2	LNB3	LNB4	LNB5	YFG1	YFG2	YFG3
SiO <sub>2</sub>	68.02	66.63	1.61	63.12	60.18	58.52	58.31	61.46
TiO <sub>2</sub>	0.43	0.49	0.75	0.71	0.82	0.94	0.90	0.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.85	16.27	15.59	15.63	15.47	13.73	14.13	15.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.83	3.20	5.58	4.65	5.71	7.50	6.97	6.53
MnO	0.06	0.06	0.11	0.09	0.10	0.13	0.12	0.13
MgO	1.16	1.47	2.72	2.43	3.08	3.97	3.95	2.64
CaO	3.19	3.53	5.14	2.81	2.88	5.67	5.63	4.89
Na <sub>2</sub> O	3.99	4.00	3.05	3.71	3.18	2.20	2.35	2.62
K <sub>2</sub> O	3.40	3.29	4.35	5.09	4.79	5.85	5.96	4.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.15	0.37	0.34	0.40	0.61	0.58	0.42
LOI	0.63	0.59	0.43	1.10	3.02	0.58	0.79	0.94
Total	99.69	99.69	99.69	99.69	99.64	99.69	99.68	99.69
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	7.39	7.29	7.40	8.80	7.97	8.05	8.31	6.70
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.85	0.82	1.43	1.37	1.51	2.66	2.54	1.56
CaO/Na <sub>2</sub> O	0.80	0.88	1.69	0.76	0.91	2.58	2.40	1.87
A/CNK	0.99	0.98	0.82	0.93	0.99	0.68	0.69	0.86
A/NK	1.55	1.60	1.60	1.35	1.49	1.38	1.37	1.73
FeO <sup>T</sup>	2.55	2.88	5.02	4.18	5.14	6.74	6.27	5.87
Mg <sup>#</sup>	45	48	49	51	52	51	53	45
组合指数(δ)	2.17	2.23	2.91	3.79	3.52	4.09	4.40	2.38
CIPW 计算部分结果								
石英(Q)	23.47	21.25	14.08	13.2	13.3	8.85	7.42	17.69
钙长石(An)	15.08	16.56	16.22	11	12.75	10.67	10.74	17.81
钠长石(Ab)	35.11	35.33	27.58	33.22	29.43	20.33	21.66	23.92
正长石(Or)	21.37	20.78	28.14	32.61	31.75	38.6	39.29	26.67
刚玉(C)	0	0	0	0	0.4	0	0	0
透辉石(Di)	0.06	0.25	5.25	0.87	0	10.08	9.98	3.32
紫苏辉石(Hy)	3.29	4	5.4	6.02	8.7	6.67	6.35	6.73
磷灰石(An)	0.27	0.3	0.75	0.69	0.84	1.27	1.19	0.85

注：A/CNK =  $n(\text{Al}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ , A/NK =  $n(\text{Al}_2\text{O}_3)/n(\text{Alk})$ , 均为分子数比； $\text{FeO}^T = \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \times 0.8998$ ； $\text{Mg}^\# = \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}) \times 100$ , 其中  $\text{Fe}^{2+} = \text{FeO}^T/80$ 。

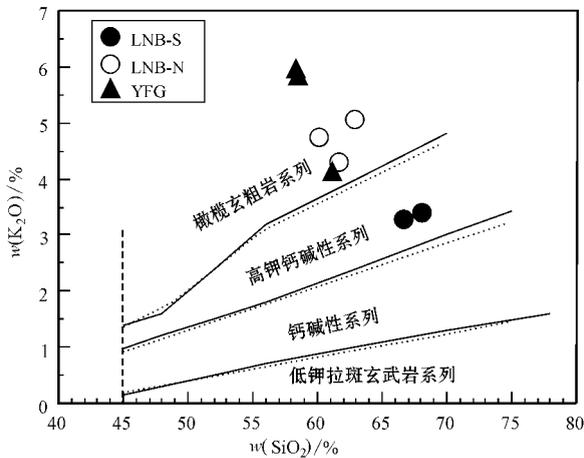


图 6 K<sub>2</sub>O - SiO<sub>2</sub> 关系图(划分线据 Peccerillo 和 Taylor, 1976; Rickwood, 1989)

Fig. 6 K<sub>2</sub>O versus SiO<sub>2</sub> classification diagram of LNB and YFG pluton (division lines after Peccerillo and Taylor, 1976; Rickwood, 1989)

岩的一般区别于 S 型花岗岩的特征为 A/CNK < 1.1, 有标准矿物透辉石或少量的标准矿物刚玉, 而 S 型花岗岩 A/CNK > 1.1, 并有大量的标准矿物刚玉。根据表 1 中主量元素及标准矿物计算(CIPW)的结果, 并且加上样品中均含有角闪石, 证明本文所研究的两个岩体应均属于 I 型花岗岩的范畴。主量元素的地球化学特征(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O 和 FeO<sup>T</sup>、MgO 含量中等, 高 K<sub>2</sub>O 等)与 Barbarin(1999)总结的产于从挤压转变至拉张过程的富钾钙碱性花岗岩(KCG)相似。以上特征显示本文岩体为 I 型花岗岩。

4.3 稀土元素和微量元素

根据主量元素和微量元素的特征, 可以将这两个岩体的样品划分为不同的两类。在岩性上, 第 1 类为兰尼巴南段岩体(包括 LNB1、LNB2)的花岗闪长岩, 第 2 类包括黑云母花岗岩(YFG1、YFG2)和黑云母二长花岗岩(LNB3、LNB4、LNB5、YFG3)。

表 3 样品微量元素数据

 $w_B/\%$ 

Table 3 Trace elements data

岩体 样号	LNB-S		LNB-N			YFG		
	LNB1	LNB2	LNB3	LNB4	LNB5	YFG1	YFG2	YFG3
Rb	130	134	153	173	175	190	254	127
Sr	869	1 032	851	664	824	816	849	868
Ba	951	1 180	1 467	1 489	1 701	1 835	1 626	1 636
Zr	171	178	217	238	221	229	252	282
Hf	4.55	4.60	5.52	6.10	5.76	6.59	7.11	7.35
Nb	21.28	21.54	21.50	47.56	38.56	29.84	30.44	26.44
Ta	1.46	1.30	1.31	2.98	2.38	1.77	1.94	1.56
U	4.53	4.35	4.24	4.62	4.87	5.04	8.74	4.55
Th	15.00	16.60	20.35	24.43	20.96	39.66	38.87	22.14
Y	9.85	9.53	20.25	20.38	19.71	27.76	25.03	26.82
Co	5.00	6.38	11.94	10.77	14.12	19.22	16.01	10.49
La	37.31	42.57	44.78	54.05	49.6	56.74	56.32	55.16
Ce	64	73.2	87.2	91.1	85.6	110.1	106.7	103.2
Pr	7.11	8.16	9.98	10.47	9.76	13.68	12.84	12.31
Nd	24.4	27.71	36.8	37.33	35.15	51.85	47.89	45.87
Sm	4.18	4.64	6.81	6.54	6.38	9.81	9.03	8.55
Eu	1.22	1.39	1.81	1.75	1.74	2.25	2.03	2.12
Gd	3.21	3.39	5.37	5.26	5.05	7.48	6.86	6.68
Tb	0.4	0.42	0.73	0.72	0.7	1.01	0.92	0.94
Dy	2.01	2.03	3.83	3.7	3.67	5.35	4.8	4.97
Ho	0.36	0.37	0.72	0.7	0.71	0.99	0.9	0.93
Er	0.9	0.9	1.89	1.88	1.82	2.55	2.32	2.45
Tm	0.12	0.12	0.28	0.27	0.27	0.37	0.35	0.37
Yb	0.85	0.78	1.81	1.78	1.79	2.37	2.19	2.36
Lu	0.12	0.11	0.26	0.25	0.26	0.35	0.32	0.35
∑REE	146.25	165.81	202.29	215.75	202.46	264.93	253.42	246.26
LREE/HREE	17.31	19.42	12.58	13.82	13.19	11.93	12.58	11.93
(La/Yb) <sub>N</sub>	31.32	39.3	17.74	21.84	19.88	17.14	18.44	16.76
δEu	0.98	1.02	0.88	0.88	0.9	0.77	0.76	0.83
δCe	0.9	0.9	0.97	0.88	0.9	0.94	0.93	0.93
Gd/Yb	3.75	4.37	2.97	2.97	2.82	3.15	3.13	2.83
Y/Yb	11.52	12.27	11.18	11.48	11.01	11.69	11.42	11.36
Ho/Yb	0.42	0.47	0.4	0.39	0.4	0.42	0.41	0.39
Rb/Sr	0.15	0.13	0.18	0.26	0.21	0.23	0.30	0.15
Rb/Ba	0.14	0.11	0.10	0.12	0.10	0.10	0.16	0.08
Nb/Ta	14.55	16.61	16.39	15.98	16.22	16.87	15.67	16.95
K/Rb	217.79	203.84	236.91	245.25	228.05	256.78	195.22	267.99
Sr/Y	88.20	108.24	42.05	32.57	41.80	29.39	33.93	32.36

注  $\delta Eu = 2 Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$ ,  $\delta Ce = 3 Ce_N / (2La_N + Nd_N)$ ; 下标 N 表示球粒陨石标准化, 标准化数据据 Sun 和 McDonough, 1989。

第 1 类花岗闪长岩的  $SiO_2 = 66.63\% \sim 68.02\%$  ( $> 56\%$ ),  $Al_2O_3 = 15.85\% \sim 16.27\%$  ( $> 15\%$ ),  $MgO = 1.16\% \sim 1.47\%$  ( $< 3\%$ ),  $Y = 9.53 \times 10^{-6} \sim 9.85 \times 10^{-6}$  ( $< 18 \times 10^{-6}$ ),  $Yb = 0.78 \times 10^{-6} \sim 0.85 \times 10^{-6}$  ( $< 1.9 \times 10^{-6}$ ),  $Sr = 869 \times 10^{-6} \sim 1 032 \times 10^{-6}$  ( $> 400 \times 10^{-6}$ ),  $Sr/Y = 88 \sim 108$  ( $> 40$ )。以上地球化学特征具有埃达克岩的特征(表 2、表 3)。用  $Sr/Y - Y$  关系图解可以清楚地将所有样品分为埃达克岩和正常的安山岩-英安岩-流纹岩(图 9)两类,但本文的埃达克岩也有一些特征与典型的埃达克岩不同(如  $SiO_2$  含量中等、富 K 以及具有钙碱性演化趋

势等)却与钾质埃达克岩(K-adakite)  $K_2O/Na_2O \approx 1$  或  $> 1$  ( $Mg^\# < 50$ )一致(张旗等 2004),因此将第 1 类花岗闪长岩称为钾质埃达克岩(或 C 型埃达克岩)。

第 2 类黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩的化学特征类似于高钾钙碱性 I 型花岗岩。相对于第 1 类来说,其  $Sr$  ( $< 450 \times 10^{-6}$ )含量相对低,  $Y$  ( $> 17.4 \times 10^{-6}$ )含量相对偏高,  $Sr/Y$  比值低 ( $< 24$ ), 富  $MgO$ 、 $Y$ 、 $Yb$ 、 $Co$  等, 贫  $Al_2O_3$  ( $> 15.13\%$ )  $\wedge Na_2O$  ( $> 2.94\%$ )  $\wedge Ba$ 、 $Sr$ 、 $Nb$ 。

从表 2 和花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分图解(图 10), 花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网

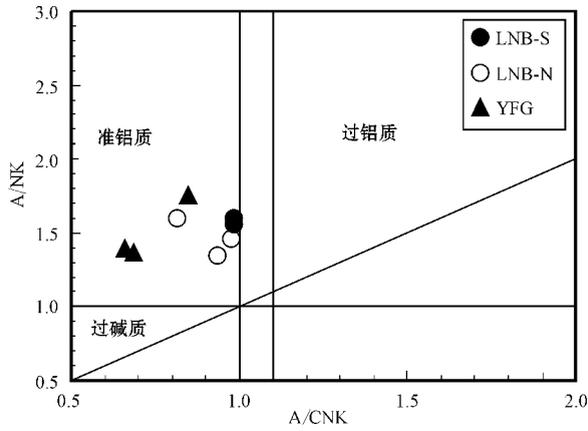


图 7 花岗岩 A/NK - A/CNK 图解

Fig. 7 A/NK - A/CNK diagram of granitic plutons

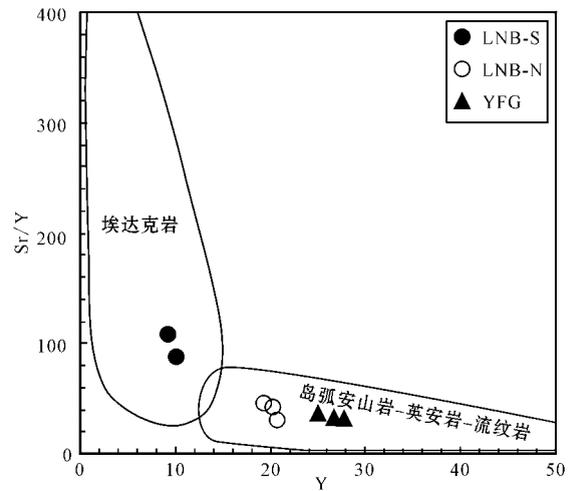


图 9 Sr/Y - Y 判别图(据 Defant 和 Drummond, 1990)  
Fig. 9 Sr/Y versus Y diagram of LNB and YFG granitic bodies( after Defant and Drummond, 1990 )

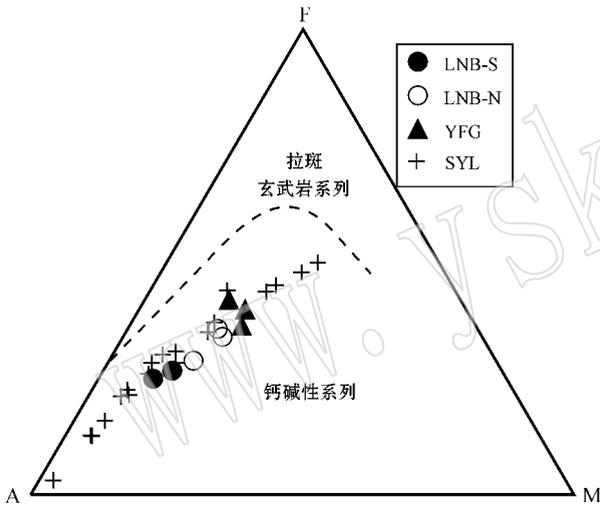


图 8 花岗岩 AFM 图解

Fig. 8 AFM diagram of granitoids

SYL—晚三叠世三岩龙岩体(袁静等 2011)

SYL—Late Triassic Sanyanlong granitoid( after Yuan Jing et al. , 2011 )

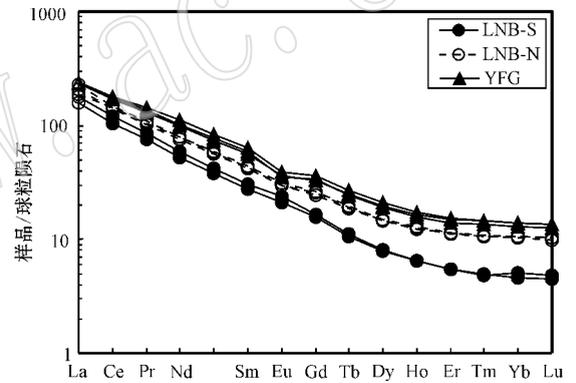


图 10 花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分图解  
(标准化数据据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns of granitoids  
( chondrite data after Sun and McDonough, 1989 )

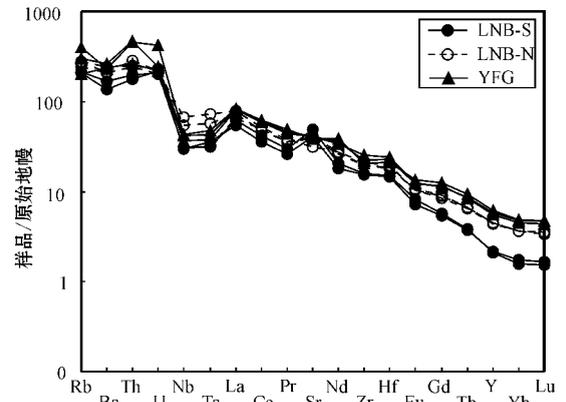


图 11 花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图  
(标准化数据据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 11 Primitive mantle normalized trace elements patterns of granitoids( PM data after Sun and McDonough, 1989 )

图(图 11)中可以看出,两类岩石的微量元素和稀土(REE)元素组成在总的趋势上大体一致。具有较高的 Rb( $127 \times 10^{-6} \sim 254 \times 10^{-6}$ ), Sr( $664 \times 10^{-6} \sim 1032 \times 10^{-6}$ )和 Ba( $951 \times 10^{-6} \sim 1835 \times 10^{-6}$ ),较低的 K/Rb(195.22~267.99), Rb/Sr(0.13~0.30)和 Rb/Ba(0.08~0.14)比值。两类岩石的稀土元素总量  $\Sigma \text{REE} = 146.25 \times 10^{-6} \sim 264.93 \times 10^{-6}$ , 球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(图 10)为右倾型式,轻稀土元素富集,其 LREE/HREE = 11.93~19.42, ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> = 16.76~39.30, 属中等程度的轻重稀土元素分馏。具有弱的 Eu、Ce 负异常( $\delta \text{Eu} = 0.76 \sim$

1.02,  $\delta\text{Ce} = 0.88 \sim 0.97$ )。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上,随元素不相容程度的降低,配分曲线呈现向右倾斜的特征,样品出现明显的 Ba、Nb 负异常(图 11)。不同的是,第 1 类钾质埃达克岩稀土元素总量稍微低于第 2 类高钾钙碱性花岗岩,重稀土亏损更明显,配分曲线更陡峭一些( $\text{La}/\text{Yb}_N > 31$ ),几乎没有负 Eu 异常( $\delta\text{Eu} = 0.98 \sim 1.02$ ),在原始地幔标准化微量元素蛛网图上也可以看出其高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Zr、Hf、Y 等更加亏损一些,相反 Sr 含量更高,达  $869 \times 10^{-6} \sim 1\,032 \times 10^{-6}$ 。同典型的钙碱性 I 型花岗岩一样(Chappell and White, 1974, 2001),第 2 类花岗岩具有较平坦的稀土元素配分型式( $\text{La}/\text{Yb}_N = 17.14 \sim 22.80$ ),负 Eu 异常明显一些, $\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 0.90$ 。

## 5 讨论

### 5.1 岩浆的成因和物质来源

松潘-甘孜地体内的三叠纪复理石发生了很强烈的两期变形:D1 期,与地体内前三叠纪沉积物的普遍增厚相联系,此为印支期造山的结果;D2 期,小范围的变形与褶皱带东南边缘的转换挤压消减有关(Harrowfield and Wilson, 2005; Reid *et al.*, 2005)。本文研究的印支期(晚三叠世)花岗岩(208~212 Ma)并没有发生变形且与 D1 期没有相交的年龄区间,因此岩浆的侵位应晚于 D1 期,属于后碰撞花岗岩。

#### 5.1.1 第 1 类钾质埃达克岩的成因

到目前为止,对大陆环境的埃达克岩来说,可能由以下几种物质部分熔融形成:增厚的下地壳(Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005)底侵的玄武质源岩(Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1996)拆沉的下地壳(王强等, 2001; Xu *et al.*, 2002; Gao, 2004)。新的实验岩石学研究表明,基性岩发生部分熔融的产物通常是富 Na 的( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 0.5$ ),玄武岩部分熔融产生的熔体的  $\text{Mg}^\#$  值小于 45(Rapp, 1997)。这些都与本文研究的钾质埃达克岩富钾特征相悖,因此本区埃达克岩的形成应与底侵的玄武质源岩的部分熔融无关。另据前人对于该区的研究(袁海华等, 1991; 赵永久等, 2007b; Zhang *et al.*, 2007),松潘-甘孜褶皱带内三叠纪的花岗岩同位素特征均显示为地壳特征, $\epsilon\text{Nd}(t) = -1.2 \sim -7.4$ ,  $I_{\text{Sr}} =$

0.705 3~0.707 8,尤其是 Xiao 等(2007)、袁静等(2011)所研究的花岗岩与本文花岗岩岩体相距不远,年龄稍早或同时(锆石 U-Pb LA-ICPMS 年龄为 213~230 Ma)。对于具有地壳同位素特征的埃达克岩来说,地壳增厚或部分熔融都是十分必要的。最新的实验结果(Xiao and Clemens, 2007)表明,钾质埃达克岩(微弱的 Eu 负异常)的形成需要非常高的压力( $> 2.0$  GPa, 等同于地壳厚度  $> 66$  km)和高温( $> 1\,075^\circ\text{C}$ ),并且源岩比普通埃达克质岩浆的玄武质源岩要更富钾和长英质矿物。

岩体中含有较多的暗色闪长质包体,成分上比寄主岩石更偏基性,形状和大小不一,从形态及与寄主岩石的关系看有岩浆混合过程的迹象,不可能是源区残留体和不混熔产物。这可能表明幔源基性岩浆与壳源岩浆的混合在岩体的形成中起了重要作用。此外,较高的 Sr、Ba 含量,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量稳定并与  $\text{SiO}_2$  含量没有明显的相关关系,元明显 Eu 负异常(或呈正异常),低的 Rb/Sr、中等的 K/Rb 比值均指示岩浆形成后并没有大量的斜长石和云母等矿物分离结晶,而 La/Yb、Sr/Y 比值高, Gd/Yb 比值较低且与  $\text{SiO}_2$  含量没有明显的相关关系,明显低的 Y 和重稀土元素含量,相对高的轻重稀土元素,分异表明其可能来自石榴石稳定区增厚的深部地壳的部分熔融。结合以上资料,本文认为第 1 类钾质埃达克岩形成于地壳增厚、软流圈上涌的高温( $> 1\,075^\circ\text{C}$ )、高压( $> 2.0$  GPa, 等同于地壳厚度  $> 66$  km)且石榴石稳定残留、没有或仅有少量的斜长石分离结晶的基性下地壳部分熔融。

#### 5.1.2 第 2 类高钾钙碱性 I 型花岗岩的成因

重稀土元素中 Yb 和 Lu 在石榴石中的分配系数最大,而 Gd、Dy、Ho(地球化学特征和 Y 相似)在角闪石中的分配系数较大。当石榴石为源区主要残留相时,形成的熔体具有倾斜的 HREE 分配模式,其  $\text{Y}/\text{Yb} > 10$ (有时接近 20),  $\text{Ho}/\text{Yb} > 1.2$ (谢才富等, 2006),  $\text{Y}/\text{Yb}$  比值分别为 11.01~11.48,  $\text{Ho}/\text{Yb}$  比值分别为 0.39~0.42( $< 1.2$ ),并且在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 11)中具有接近水平的 HREE 分配模式,由此可以推断其源区可能主要以角闪石为主要残留相,有少量的斜长石残留(弱的 Eu 负异常),应该没有石榴石的残留,可能在低一些的压力( $< 1.7$  GPa(大多情况为  $\leq 1.5$  GPa))和深度  $< 50$  km 的环境下(Xiao and Clemens, 2007)由下地壳部分熔融形成。

## 5.2 地球动力学意义

在松潘-甘孜地体周边存在着标志古特提斯洋闭合的两条缝合带:北侧的阿尼玛卿-冕略(秦岭-昆仑)缝合带和西南边的金沙江缝合带。最近通过阿尼玛卿-冕略缝合带的同位素年龄、指示化石的识别及构造变形的研究,发现阿尼玛卿-冕略洋的闭合不会晚于早三叠世,因此一个被普遍接受的事实是华北和华南板块的碰撞过程是发生在三叠纪的(Li *et al.*, 1996; Xu *et al.*, 2002; Elena *et al.*, 2003; Bian *et al.*, 2004; 张国伟等, 2004a, 2004b)。研究发现金沙江缝合带中的花岗岩两组锆石 U-Pb 年龄为 245~227 Ma (Wang *et al.*, 2000; Reid *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2007) 和 219~208 Ma。结合区域地质背景,笔者认为 245~227 Ma 的花岗岩为同碰撞花岗岩, 219~210 Ma 的花岗岩为后碰撞花岗岩。

关于松潘-甘孜褶皱带中三叠纪至早侏罗世花岗岩的研究,最近发表的文章中主要提及有毛尔盖(211±1 Ma)、羊拱(216±6 Ma)、嘎伍岭(199±3 Ma)、松林(238±8 Ma)、雅江(197±3 Ma)、顶天柱(197±4~242±4 Ma)、塔贡(210±2~227±4 Ma)、日鲁库(213±6~228±5 Ma)、年保也车(211±1 Ma)、老君沟(196 Ma)、孟通沟(164 Ma)、羊拱海(158.7±1.4 Ma)、达盖寨(185.2±1.4 Ma)、可尔因(157.6±1.2 Ma)、扎多(219±2 Ma)、巴彦喀拉(216±5 Ma)、南一里(223.1±2.6 Ma)、三岩龙(208±2~212±2 Ma)及本文的兰尼巴(211.4±1.5 Ma)和羊房沟(210.4±2.1 Ma)等岩体(张旗等, 2001; Rapp *et al.*, 2002; Roger *et al.*, 2003; 胡健民等, 2005; 秦江锋等, 2005; Zhang *et al.*, 2006, 2007; Xiao *et al.*, 2007; 李建康等, 2009; Cai *et al.*, 2009; Pei *et al.*, 2009; 袁静等, 2011)。具有精确年代学和地球化学资料的岩体大致分为 3 类:①高钾钙碱性的 I 型花岗岩,年龄为 211~228 Ma;②钾质埃达克岩,年龄集中在 208~221 Ma 间;③ A 型花岗岩,年龄≤211 Ma。从年龄方面看可分为两组:高钾钙碱性的 I 型花岗岩与钾质的埃达克岩大致形成于同一时代或稍早, A 型花岗岩稍晚。它们大都形成于后碰撞的环境中,因此这些花岗岩的形成可能有着共同的地球动力学背景。在岩石圈伸展的体制下形成后碰撞的 A 型花岗岩要归因于软流圈的上涌,而这可能又要归结于岩石圈的拆沉(Jung *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 2002; Ilbeyli *et al.*, 2004; Zhang

*et al.*, 2007)。

虽然高钾钙碱性的 I 型花岗岩与埃达克岩缺少表明拆沉的下地壳与对流地幔相互作用的地球化学特征,且与岩石圈的拆沉有没有关系现在并不清楚,但是高钾钙碱性 I 型花岗岩和埃达克岩浆形成后的含石榴石、角闪石的残余固相物质,将更加可能导致岩石圈拆沉、去根作用发生,造成岩石圈的减薄和大陆伸展作用。特别是年保也车及四姑娘山 A 型花岗岩的发现(Zhang *et al.*, 2007; 赵永久等, 2007b),提供了在松潘-甘孜褶皱带内可能有岩石圈拆沉的一个证据。因此,兰尼巴、羊房沟岩体的成因研究,不仅可以示踪中生代松潘-甘孜地区的下地壳物质组成,而且对解释华北、扬子和西藏板块碰撞后的岩石圈减薄、构造体制的转换,探索松潘-甘孜造山带的构造格局和形成演化具有重要意义。

## 6 结论

(1) 研究区内的花岗岩属晚三叠世的花岗岩,锆石 U-Pb LA-ICPMS 年龄为 208±3~212±3 Ma,集中于 211±2 Ma。

(2) 兰尼巴岩体南段花岗岩为酸性的钾质埃达克岩( $K_2O/Na_2O \approx 1$ ,  $Mg^\# < 50$ ),形成于地壳增厚、软流圈上涌的高温(>1075°C)、高压(>2.0 GPa,等同於地壳厚度>66 km)且石榴石稳定、没有或少量斜长石分离结晶的基性下地壳部分熔融;兰尼巴岩体北段和羊房沟岩体应属于高钾(高达钾玄岩系列)钙碱性 I 型花岗岩(高 K, A/CNK<1.1),形成于相对较低的压力(<1.7 GPa,大多情况为≤1.5 GPa)和深度<50 km 的环境,由下地壳部分熔融形成。二者的下地壳源岩可能为元古宙的康定杂岩(扬子板块的结晶基底,796~797 Ma),待同位素数据得出后将做进一步讨论。

(3) 钾质埃达克岩和高钾钙碱性 I 型花岗岩以及 A 型花岗岩在三叠纪末前后的产出指示了松潘-甘孜造山带碰撞后由挤压增厚到伸展减薄的动力学过程,加之地幔物质的上涌,暗示着地体内可能存在着下地壳榴辉岩相的拆沉。

## References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}Pb$  [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.

- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [ J ]. *Nature*, 362 : 144~146.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types , their origins and their geodynamic environments [ J ]. *Lithos*, 46 : 605~626.
- Bian Qiantao , Li Dihui and Pospelov I. 2004. Age , geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolites , North Qinghai-Tibet Plateau , China [ J ]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23 : 577~596.
- Brugier O , Lancelot J R and Malavieille J. 1997. U-Pb dating on single zircon grains from the Triassic Songpan-Garze flysch ( Central China ) : provenance and tectonic correlations [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 152 : 217~231.
- Burchfiel B C , Chen Zhiliang , Liu Yuping , et al. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions , central China [ J ]. *International Geology Review*, 663~735.
- Cai Hongming , Zhang Hongfei , Xu Wangchun , et al. 2009. U-Pb zircon ages , geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of granitoids in Western Songpan-Garze Fold Belt : petrogenesis and implication for tectonic evolution [ J ]. *Journal of Earth Science*, 20( 4 ) : 681~698.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types [ J ]. *Pacific Geology*, 8 : 173~174.
- Chappell B W and White A J R. 2001. Two contrasting granite types : 25 years later [ J ]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48 : 489~499.
- Chen Shefa , Wilson C J L and Worley B A. 1995. Tectonic transition from the Songpan-Garze Fold Belt to the Sichuan Basin , southwestern China [ J ]. *Basin Research*, 7( 3 ) : 235~253.
- Chen Shefa and Wilson C J L. 1996. Emplacement of the Longmen Shan Thrust-Nappe Belt along the eastern margin of the Tibetan Plateau [ J ]. *Journal of Structural Geology*, 18 : 413~440.
- Chung Sunlin , Liu Dunyi , Ji Jianqing , et al. 2003. Adakites from continental collision zones : melting of thickened lower crust beneath southern Tibet [ J ]. *Geology*, 31 : 1 021~1 024.
- Dewey J F , Shackleton R M , Chang Chengfa , et al. 1988. The tectonics evolution of the Tibetan plateau [ J ]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A327 : 379~413.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [ J ]. *Nature*, 347 : 662~665.
- Elena A K , Maurice B and Jacques M. 2003. Discovery of the Paleo-Tethys Residual Peridotites along the Anyemaqen-Kunlun Suture Zone ( North Tibet ) [ J ]. *Comptes Rendus. Géoscience*, 335 : 709~719.
- Enkin R J , Yang Zhenyu , Chen Yan , et al. 1992. Paleomagnetic constraints on the geodynamic history of the major blocks of China from the Permian to the present [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 97 ( B10 ) : 13 953~13 989.
- Gao Shan , Rudnick R L , Yuan Honglin , et al. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton [ J ]. *Nature*, 432 : 892~897.
- Goto A and Tatsumi Y. 1994. Quantitative analysis of rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer [ J ]. *The Rigaku Journal*, 11 : 40~59.
- Harrowfield M J and Wilson C J L. 2005. Indosinian deformation of the Songpan-Garze Fold Belt , northeast Tibetan Plateau [ J ]. *Journal of Structural Geology*, 27( 1 ) : 101~117.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [ J ]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18 : 423~439.
- Hou Z Q , Gao Y F , Qu X M , et al. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220 : 139~155.
- Hsü K , Pan G T , Sengör A , et al. 1995. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau : a working hypothesis based on the archipelago model of orogenesis [ J ]. *International Geology Review*, 37 : 473~508.
- Hu Jianmin , Meng Qingruo , Shi Yuruo , et al. 2005. SHRIMP U-Pb dating of zircons from granitoid bodies in the Songpan-Ganzi terrane and its implication [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 21( 3 ) : 867~880 ( in Chinese with English abstract ).
- Huang M H , Buick I S and Hou L W. 2003. Tectonometamorphic evolution of the Eastern Tibet Plateau : evidence from the Central Songpan-Ganzi orogenic belt , Western China [ J ]. *Journal of Petrology*, 44( 2 ) : 255~278.
- Ilbeyli N , Pearce J A , Thirlwall M F , et al. 2004. Petrogenesis of collision-related plutonics in Central Anatolia , Turkey [ J ]. *Lithos*, 72 : 163~182.
- Jung S , Mezger K and Hoernes S. 1998. Petrology and geochemistry of syn- to post-collisional metaluminous A-type granites : a major and trace element and Nd-Sr-Pb-O-isotope study from the Proterozoic Damara Belt , Namibia [ J ]. *Lithos*, 45 : 147~175.
- Li Jiankang , Yang Xuejun , Wang Denghong , et al. 2009. Cooling Process of Granite in Northwestern Sichuan Province and Its Constraint to Regional Mineralization [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 83( 8 ) : 1 141~1 149 ( in Chinese ).
- Li Shuguang , Sun Weidong , Zhang Guowei , et al. 1996. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia Valley in Mianlue tectonic arc , South Qinling : observation for a Paleozoic oceanic basin and its close time [ J ]. *Science in China ( Series D )*, 39 : 300~310.
- Liu Yongsheng , Hu Shenghong , Liu Xiaoming , et al. 2003. Accurate analysis of Zr , Hf , Nb and Ta in high-grade metamorphic rocks with ICP-MS [ J ]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 28( 2 ) : 151~156 ( in Chinese with English abstract ).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [ J ]. *Earth-Science Reviews*, 37 : 215~224.
- Nie Shangyou , Yin An , Rowley D B , et al. 1994. Exhumation of the Dabie Shan ultra-high-pressure rocks and accumulation of the Songpan-Ganzi flysch sequence , Central China [ J ]. *Geology*, 22 : 999~1 002.
- Pan Guitang , Chen Zhiliang , Li Xingzhen , et al. 1997. Geological and Tectonic Evolution of Eastern Tethys [ M ]. Beijing : Geological Publishing House , 104~114 ( in Chinese ).
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area , northern Turkey [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58 : 63~81.
- Pei Xianzhi , Li Zuochen , Ding Sanping , et al. 2009. Post-Orogenic granites in Pingwu Region , Northwest Sichuan : evidence for North China Block and Yangtze Block collision during Triassic [ J ]. *Journal*

- of Earth Science, 20(2): 250~273.
- Petford N and Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca batholith Peru [J]. *Journal of Petrology*, 37: 1491~1521.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong and Li Yongfei. 2005. Petrogenesis and geological significance of Yangba granodiorites from Bikou area, Northern margin of Yangtze Plate [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 697~706 (in Chinese with English abstract).
- Rapp P R. 1997. Heterogeneous Source Regions for Archean Granitoids [M]. Oxford: Oxford University Press, 35~37.
- Rapp P R, Xiao L and Shimizu N. 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 293~302.
- Reid A J, Wilson C J L, Liu Shun, et al. 2007. Mesozoic plutons of the Yidun Arc, SW China: U/Pb geochronology and Hf isotopic signature [J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1~4): 88~106.
- Reid A J, Wilson C J L and Liu Shun. 2005. Structural evidence for the Permo-Triassic tectonic evolution of the Yidun arc, eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Structural Geology*, 27(1): 119~137.
- Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun, et al. 1980. Geotectonics of China and Its Evolution [M]. Beijing: Science Press, 107~109 (in Chinese).
- Ren Jishun and Xiao Liwei. 2004. Lifting the mysterious veil of the tectonics of the Qinghai-Tibet Plateau by 1:250 000 geological mapping [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 22: 247~263.
- Roger F, Arnaud N, Gilder S, et al. 2003. Geochronological and geochemical constraints on Mesozoic suturing in East Central Tibet [J]. *Tectonics*, 22: 111~119.
- Roger F, Malavieille J, Leloup P H, et al. 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan-Garze Fold Belt (Eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth*, 22(5): 465~481.
- Sengör A M C. 1987. Tectonic subdivision and evolution of Asia [J]. *Bulletin Technology University Istanbul, Tectonics*, 40: 355~435.
- Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. Regional Geology of Sichuan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~223 (in Chinese).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin* [C]. Geological Society Special Publications, Blackwell Scientific Publications, 42: 313~345.
- Wang Qiang, McDermott F, Xu Jifeng, et al. 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: lower crustal melting in an intracontinental setting [J]. *Geology*, 33(6): 464~468.
- Wang Qiang, Xu Jifeng and Zhao Zhenhua. 2001. The summary and comment on research on a new kind of igneous rock-Adakite [J]. *Advance in Earth Science*, 16: 201~208 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaofeng, Metcalfe I and Jian Ping. 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan suture zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 675~690.
- Weislogel A L, Graham S A, Chang E Z, et al. 2006. Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi complex: sedimentary record of collision of the North and South China blocks [J]. *Geology*, 34(2): 97~100.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huimin, et al. 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 187(1~2): 143~173.
- Xiao L and Clemens J D. 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: experimental and field constraints [J]. *Lithos*, 95(3~4): 399~414.
- Xiao L, Zhang H F, Clemens J D, et al. 2007. Late Triassic granitoids of the Eastern margin of the Tibetan Plateau: Geochronology, petrogenesis and implications for tectonic evolution [J]. *Lithos*, 96(3~4): 436~452.
- Xie Caifu, Zhu Jinchu, Ding Shijiang, et al. 2006. Stipulation and tectonic significance of Hercynian shoshonitic intrusive rocks in central Hainan, Southern China [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 51(16): 1944~1954 (in Chinese).
- Xu Jifeng, Shinjo R, Defant M J, et al. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. *Geology*, 30(12): 1111~1114.
- Xu Zhiqin, Hou Liwei and Wang Zongxiu. 1991. New progress on researches of tectonics of Songpan-Garze belt [J]. *Chinese Geology*, 12: 14~16 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Hou Liwei and Wang Zongxiu. 1992. Orogenic Processes of the Songpan-Ganze Orogenic Belt of China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Yin An and Harrison T M. 2002. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annual Review of Earth Planet of Sciences*, 28: 211~280.
- You Zhendong, Chen Suhua and Lai Xingyun. 2006. The Danba domal metamorphic terrane, Western Sichuan, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 148~159 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Chao, Zhou Meifu, Sun Min, et al. 2010. Triassic granitoids in the eastern Songpan-Ganzi Fold Belt, SW China: Magmatic response to geodynamics of the deep lithosphere [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 29(3~4): 481~492.
- Yuan Haihua, Zhang Zhilan and Zhangping. 1991. The uplift and cooling history of Longmen Laojougou granites [J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 18(1): 17~22 (in Chinese).
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, et al. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353~370.
- Yuan Jing, Xiao Long, Wan Chuanhui, et al. 2011. Petrogenesis of Fangmaying-Sanyanlong granitic complex body in Southern Songpan-Garze Fold Belt and its tectonic implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 195~206 (in Chinese).
- Zhang Guowei, Cheng Shunyou and Guo Anlin. 2004a. Mianlue paleosuture on the southern margin of central orogenic system in Qinling-

- Dabie : a discussion of the assembly of the main part of the continent [ J ]. Geological Bulletin of China , 23 : 846 ~ 853 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Guowei , Guo Anlin and Yao Anping. 2004b. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China 's continental tectonics [ J ]. Earth Science Frontiers , 11 , 23 ~ 32 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Hongfei , Zhang Li , Harris N , et al . 2006 . U-Pb zircon ages , geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze Fold Belt , Eastern Tibetan Plateau : constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement [ J ]. Contribution Mineral Petrol . , 152 ( 1 ) : 75 ~ 88 .
- Zhang Hongfei , Parrish R and Zhang Li . 2007 . A-type granite and adakitic magmatism association in Songpan-Garze Fold Belt eastern Tibetan Plateau : implication for lithospheric delamination [ J ]. Lithos , 97 ( 3 ~ 4 ) : 323 ~ 335 .
- Zhang Jisheng , Gao Rui , Li Qisheng , et al . 2007 . A study on geophysical characteristic and basement in the Songpan- Garze and Western Qinling Orogenic Belt [ J ]. Geological Review , 53 ( 2 ) : 261 ~ 267 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Qi , Wang Yan and Wang Yuanlong . 2001 . Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshanian period : constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks [ J ]. Acta Petrologica Sinica , 17 : 505 ~ 513 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Qi , Xu Jifeng , Wang Yan , et al . 2004 . Diversity of adakite [ J ]. Geological Bulletin of China , 23 : 959 ~ 963 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Yunxiang , Luo Yaonan and Yang Chongxi . 1988 . Panxi Rift and Its Geodynamics [ M ]. Beijing : Geological Publishing House , 415 ( in Chinese ).
- Zhang Z H , Liu J G and Coleman R G . 1984 . An outline of the plate tectonics of China [ J ]. Geological Society of American Bulletin , 95 ( 3 ) : 295 ~ 312 .
- Zhao Yongjiu , Yuan Chao , Zhou Meifu , et al . 2007a . Geochemistry and petrogenesis of Laojungou and Mengtonggou granites in Western Sichuan , China : constraints on the nature of Songpan-Ganzi basement [ J ]. Acta Petrologica Sinica , 23 ( 5 ) : 995 ~ 1 006 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Yongjiu , Yuan Chao and Zhou Meifu . 2007b . Post-orogenic extension of Songpan-Garze orogen in early Jurassic : Constraints from Niuxingou monzodiorite and Siguniangshan A-type granite of western Sichuan , China [ J ]. Geochemica , 36 ( 2 ) : 139 ~ 152 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhou Meifu , Yan Danping , Vasconcelos P M , et al . 2008 . Structural and geochronological constraints on the tectono-thermal evolution of the Danba domal terrane , eastern margin of the Tibetan plateau [ J ]. Journal of Asian Earth Sciences , 33 ( 6 ) : 414 ~ 427 .
- Zou Dingbang , Rao Rongbiao , Chen Yongming , et al . 1984 . On the Triassic turbidite in the southern Bayanhar Mountain region [ J ]. Contributions to the Geology of the Qinghai-Xizang ( Tibet ) Plateau , 15 : 27 ~ 39 ( in Chinese ).
- ## 附中文参考文献
- 胡健民 , 孟庆任 , 石玉若 , 等 . 2005 . 松潘-甘孜地体内花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义 [ J ]. 岩石学报 , 21 ( 3 ) : 867 ~ 880 .
- 李建康 , 杨学俊 , 王登红 , 等 . 2009 . 川西北花岗岩的冷却过程及其对区域成矿的制约 [ J ]. 地质学报 , 83 ( 8 ) : 1 141 ~ 1 149 .
- 刘勇胜 , 胡圣虹 , 柳小明 , 等 . 2003 . 高级变质岩中 Zr , Hf , Nb , Ta 的 ICP-MS 准确分析 [ J ]. 地球科学 , 28 ( 2 ) : 151 ~ 156 .
- 潘桂棠 , 陈智梁 , 李兴振 , 等 . 1997 . 东特提斯地质构造形成和演化 [ M ]. 北京 : 地质出版社 : 104 ~ 114 .
- 秦江锋 , 赖绍聪 , 李永飞 . 2005 . 扬子板块北缘碧口地区阳坝花岗岩闪长岩体成因研究及其地质意义 [ J ]. 岩石学报 , 21 ( 3 ) : 697 ~ 706 .
- 任纪舜 , 姜春发 , 张正坤 , 等 . 1980 . 中国大地构造及其演化 [ M ]. 北京 : 科学出版社 , 107 ~ 109 .
- 任纪舜 , 肖黎巍 . 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 [ J ]. 地质通报 , 23 ( 1 ) : 1 ~ 11 .
- 四川省地质矿产局 . 1991 . 四川省区域地质志 [ M ]. 北京 : 地质出版社 .
- 王 强 , 许继峰 , 赵振华 . 2001 . 一种新的火成岩 : 埃达克岩的研究综述 [ J ]. 地球科学进展 , 16 : 201 ~ 208 .
- 谢才富 , 朱金初 , 丁式江 , 等 . 2006 . 琼中海西期钾玄质侵入岩的厘定及其构造意义 [ J ]. 科学通报 , 51 ( 16 ) : 1 944 ~ 1 954 .
- 许志琴 , 侯立玮 . 1991 . 松潘-甘孜造山带构造研究新进展 [ J ]. 中国地质 , 12 : 14 ~ 16 .
- 许志琴 , 侯立玮 , 王宗秀 , 等 . 1992 . 中国松潘-甘孜造山带的造山过程 [ M ]. 北京 : 地质出版社 .
- 游振东 , 程素华 , 赖兴运 . 2006 . 四川丹巴穹状变质地体 [ J ]. 地学前缘 , 13 ( 004 ) : 148 ~ 159 .
- 袁海华 , 张志兰 , 张 平 . 1991 . 龙门山老君沟花岗岩的隆升及冷却史 [ J ]. 成都地质学院学报 , 18 ( 1 ) : 17 ~ 22 .
- 袁 静 , 肖 龙 , 万传辉 , 等 . 2011 . 松潘-甘孜南部放马坪-三岩龙花岗岩的成因及其构造意义 [ J ]. 地质学报 , 85 ( 2 ) : 195 ~ 206 .
- 张国伟 , 程顺有 , 郭安林 , 等 . 2004a . 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合 [ J ]. 地质通报 , 23 : 846 ~ 853 .
- 张国伟 , 郭安林 , 姚安平 . 2004b . 中国大陆构造中的西秦岭-松潘大陆构造结 [ J ]. 地学前缘 , 11 : 23 ~ 32 .
- 张 旗 , 王 焰 , 王元龙 , 等 . 2004 . 燕山期中国东部高原下地壳组成初探 : 埃达克岩 Sr , Nd 同位素制约 [ J ]. 岩石学报 , 17 ( 4 ) : 505 ~ 513 .
- 张 旗 , 许继峰 , 王 焰 , 等 . 2001 . 埃达克岩的多样性 [ J ]. 地质通报 , 23 : 959 ~ 965 .
- 张云湘 , 骆耀南 , 杨崇喜 . 1988 . 攀西裂谷 [ M ]. 北京 : 地质出版社 , 415 .
- 赵永久 , 袁 超 , 周美夫 , 等 . 2007a . 川西老君沟和孟通沟花岗岩的地球化学特征、成因机制及对松潘-甘孜地体基底性质的制约 [ J ]. 岩石学报 , 23 ( 5 ) : 995 ~ 1 006 .
- 赵永久 , 袁 超 , 周美夫 , 等 . 2007b . 松潘甘孜造山带早侏罗世的后造山伸展 : 来自川西牛心沟和四姑娘山岩体的地球化学制约 [ J ]. 地球化学 , 36 ( 2 ) : 139 ~ 152 .
- 邹定邦 , 饶荣标 , 陈永明 , 等 . 1984 . 南巴颜喀拉山三叠系浊积岩 [ J ]. 青藏高原地质文集 , 15 : 27 ~ 39 .