

# 扬子克拉通西缘康定杂岩中花岗质岩石的成因及其构造意义\*

刘树文<sup>1</sup> 闫全人<sup>2</sup> 李秋根<sup>1</sup> 王宗起<sup>2</sup>

LIU ShuWen<sup>1</sup>, YAN QuanRen<sup>2</sup>, LI QiuGen<sup>1</sup> and WANG ZongQi<sup>2</sup>

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

1. Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2008-12-13 收稿, 2009-02-13 改回.

**Liu SW, Yan QR, Li QG and Wang ZQ. 2009. Petrogenesis of granitoid rocks in the Kangding Complex, western margin of the Yangtze Craton and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8):1883–1896**

**Abstract** Gneissic granitoid rock suite in the Kangding Complex, located in western margin of the Yangtze Craton, comprises mainly tonalite, granodiorite, hoar fine-grained monzogranite with a little of pink coarse-grained monzogranite. SHRIMP zircon U-Pb isotopic dating revealed that the tonalite and granodiorite emplaced at 797 ~ 795Ma, and a new SHRIMP zircon U-Pb chronological data yield a weighted average age of <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U age of 767 ± 24Ma for a hoar fine-grained monzogranite (sample Kd-18), interpreted as emplacement age of the hoar fine-grained monzogranite. Tonalites, granodiorites, hoar fine-grained monzogranites, comprising dioritic enclaves in the gneissic granitoids, are characterized by right-inclined chondrite-normalized REE patterns with high (La/Yb)<sub>N</sub> values and without Eu anomalies, and significantly negative Nb, Ta, P and Ti in primitive mantle normalized multi-element spider diagrams. Whereas, pink coarse-grained monzogranites show flat chondrite-normalized REE patterns, strongly negative Eu and Nb, Ta, Sr, P and Ti anomalies but LILEs enrichment. Sm-Nd isotopes analyses reveal that the granitoids have  $\varepsilon_{Nd}(t) = -0.57 \sim +5.67$ , and most of the samples  $\varepsilon_{Nd}(t) > 0$ . Integrated features of geology, petrology to petrochemistry and Sm-Nd isotopes, the magma of the tonalite, granodiorite and hoar fine-grained monzogranite may be derived from partial melting of juvenile basaltic rocks and greywacks with depleted mantle affinity under high pressure condition, and the magma of the pink coarse-grained monzogranite could come from supracrust materials at the relative lower pressure condition. Petrogenesis of these granitoids, combining with tectonic discrimination, suggests that the Neoproterozoic Kangding Complex in the western margin of the Yangtze Craton could be produced in a tectonic setting of the subduction-related active continental margin.

**Key words** Gneissic granitoids; SHRIMP zircon dating; Geochemistry and Sm-Nd isotopes; Petrogenesis and tectonic setting; Kangding Complex; Western margin of the Yangtze Craton

**摘要** 扬子克拉通西缘康定杂岩中的片麻状花岗岩主要由英云闪长岩、花岗闪长岩、灰白色细粒二长花岗岩和少量的粉红色粗粒二长花岗岩组成。其中英云闪长岩和花岗闪长岩形成于 797 ~ 795Ma, 灰白色细粒二长花岗岩 SHRIMP 锆石定年产生一个 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 权重平均 767 ± 24Ma, 被解释为该期花岗质岩浆的结晶年龄。英云闪长岩、花岗闪长岩和灰白色细粒二长花岗岩和其中的闪长岩包体表现为右斜式稀土配分模式, 具有很高的 (La/Yb)<sub>N</sub> 比值, 无 Eu 异常, 在原始地幔标准化的多元素蜘蛛网状图上表现了明显的 Nb、Ta、P 和 Ti 负异常。而粉红色粗粒二长花岗岩却表现了平坦的稀土配分模式, 具有强烈的负 Eu 异常和强烈的 Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 负异常, 但是富集大离子亲石元素。所有这些片麻状花岗岩具有  $\varepsilon_{Nd}(t) = -0.57 \sim +5.67$ , 绝大部分样品  $\varepsilon_{Nd}(t) > 0$ 。结合地质学、岩石学、地球化学和 Sm-Nd 同位素特征, 康定杂岩中英云闪长岩、花岗闪长岩和灰白色细粒二长花岗岩形成于来自亏损地幔的初生地壳玄武质岩石和相关的杂砂岩在高压条件下的部分熔融, 而粉红色粗粒二

\* 本文为国家自然科学基金面上项目(40872120)和国家重大基础研究项目(2002CB412608)资助成果。

第一作者简介: 刘树文, 男, 1958 年生, 博士, 教授, 长期从事前寒武纪地质学、岩石学、地质年代学和地球化学研究工作, E-mail: swliu@pku.edu.cn

长花岗岩的岩浆导源于表壳岩低压条件下的部分熔融。结合这些片麻状花岗岩的岩石成因和构造鉴别,表明扬子克拉通西缘康定杂岩中新元古代片麻状花岗岩形成于安第斯型活动大陆边缘。

**关键词** 片麻状花岗岩; SHRIMP 锆石定年; 地球化学和 Sm-Nd 同位素; 岩石成因和构造背景; 康定杂岩; 扬子克拉通西缘  
**中图分类号** P588.121; P597.3

先前的地质调查将扬子克拉通西部的变质结晶基底,称为康滇地轴,认为结晶基底具有双层结构,下部为结晶基底,即陆核,将其形成时代定义为新太古代-古元古代,主体构成类似于花岗岩-绿岩带(如原康定群)。上部为褶皱基底,即在结晶基底之上发育起来的层状岩系,经过褶皱变形-变质形成的变质基底,形成于中新元古代,包括部分变质火山岩、变质火山碎屑岩(如盐边群)和典型的变质沉积岩(如会理群)等(四川省地矿局,1991)。然而近年来年代学研究表明,扬子克拉通西缘的主体变质结晶基底并非形成于太古宙-古元古代,而是形成于新元古代,尤其是近年来大量的锆石 U-Pb 同位素年代学的研究揭示扬子克拉通西缘的变质结晶基底主要形成于 830 ~ 750Ma (Zhou *et al.*, 2002; 牟传龙等, 2003; 陈岳龙等, 2004; 刘文中等, 2005; 杜利林等, 2005, 2007; 赵俊香等, 2006; Xiao *et al.*, 2007; 耿元生等, 2007a, b, 2008; Wang *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2008)。

扬子克拉通西缘前寒武纪变质基底的研究倍受国内外学者的关注,不仅仅是因为大量的地质年代学研究揭示这些变质基底岩石形成于新元古代,更重要的是这些新元古代地质记录可能与 Rodinia 超大陆的聚合与裂解作用有关,是 Rodinia 超大陆全球性地盾事件的响应(Li *et al.*, 2003a, b, c)。它们的成因和构造背景是 Rodinia 超大陆的形成与裂解的直接记录,直接涉及到扬子克拉通在 Rodinia 超大陆中的位置及超大陆形成演化的动力学过程,具有极其重要的科学意义。关于扬子克拉通西缘 830 ~ 750Ma 的火成岩形成的动力学过程存在两种不同的模式,一种模式认为它们是 Rodinia 超大陆裂解的直接记录,形成于地幔柱活动导致的陆内裂谷构造背景(Li *et al.*, 2003a, b, c; Wang *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2008),另一模式认为这些火成岩形成于活动大陆边缘,即形成于洋壳残片俯冲作用相关的岛弧或者弧后构造背景,而不是陆内裂谷背景(Zhou *et al.*, 2002, 2006; 牟传龙等, 2003; 陈岳龙等, 2004; 杜利林等, 2005, 2007; Wang *et al.*, 2006; 赵俊香等, 2006; Xiao *et al.*, 2007; 耿元生等, 2007a, b; Zhao *et al.*, 2008a, b)。

分布于康定-泸定地区的康定杂岩形成于 800 ~ 750Ma 之间,是扬子克拉通西缘新元古代最重要的岩浆记录之一(Zhou *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003a, b, c; 杜利林等, 2005, 2007; Xiao *et al.*, 2007; 耿元生等, 2008),其中广泛发育花岗质岩石,既有强烈变质变形的花岗质混合岩、片麻状花岗岩,又有块状的花岗闪长岩和二长花岗岩等,它们的成因可能直接记录了扬子克拉通西缘新元古代形成演化的动力学过程。

本文报导康定杂岩中花岗质岩石的地质学、岩相学、地球化学和 Sm-Nd 同位素的特征,探讨其岩石成因和构造意义,为扬子克拉通西缘新元古代的构造背景研究提供一些新的证据。

## 1 地质学特征

康定杂岩位于扬子克拉通西缘的康定-泸定地区,被多组断裂所围限(图 1)。西部为 NNW 向鲜水河断裂,该断裂以西主要分布三叠系地层,沿着鲜水河断裂发育大量中生代花岗岩。其中折多山花岗岩,具有埃达克质岩石的地球化学特征,形成于 18Ma 增厚地壳底部的部分熔融(刘文中等, 2006)。康定杂岩东侧,被 NNE 向断裂所限制,该断裂以东广泛发育上古生界盖层,大量出露中-新元古代的花岗质岩石、不连续出露的苏雄组的火山岩和沉积层序,局部被中生代沉积物覆盖。北部被弧形断裂所包围,使松潘-甘孜构造带的上古生界地块逆冲到康定杂岩之上,沿着一些断裂带保存有新元古代-下古生界的片岩(图 1)。

康定杂岩由大量的变质变形片麻状花岗岩深成侵入体和中级变质的表壳岩组成。其中主要的片麻状花岗岩的岩石组合为英云闪长岩(奥长花岗岩)、花岗闪长岩和灰白色二长花岗岩,其中有少量的石英闪长岩,以英云闪长岩分离结晶的早期包体形式出现,局部发育少量的粉红色似斑状二长花岗岩。这些片麻状花岗岩中发育长英质混合岩、细粒斜长角闪岩和细粒角闪岩捕掳体(图 1 和图 2)。康定杂岩中表壳岩岩石组合包括长英质混合岩、斜长角闪岩和夕线石榴石二长片麻岩等。其中的斜长角闪岩通常由基质和残斑两部分组成,基质主要为斜长石、绿泥石和云母,基质中的斜长石绿帘石化强烈,残斑主要为角闪石、长石,形态不规则,有时可见斜长石残斑具较密集的双晶,其原岩应为基性火山岩(杜利林等, 2007)。英云闪长岩(奥长花岗岩)和花岗闪长岩与石英闪长质片麻岩之间表现了明显的侵入接触关系,表现为英云闪长岩和花岗闪长岩中有石英闪长岩捕掳体,并有英云闪长岩和花岗闪长岩岩脉、岩枝侵入于石英闪长质片麻岩和细粒闪长岩包体(图 2A 和 B)。康定杂岩中的英云闪长岩和花岗闪长岩形成于 ~ 795Ma (Zhou *et al.*, 2002)。

## 2 岩石学特征

康定杂岩中片麻状花岗岩的主要岩石组合包括石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、灰白色细粒二长花岗岩和少量粗粒粉红色二长花岗岩,其中有斜长角闪岩、长英质片麻

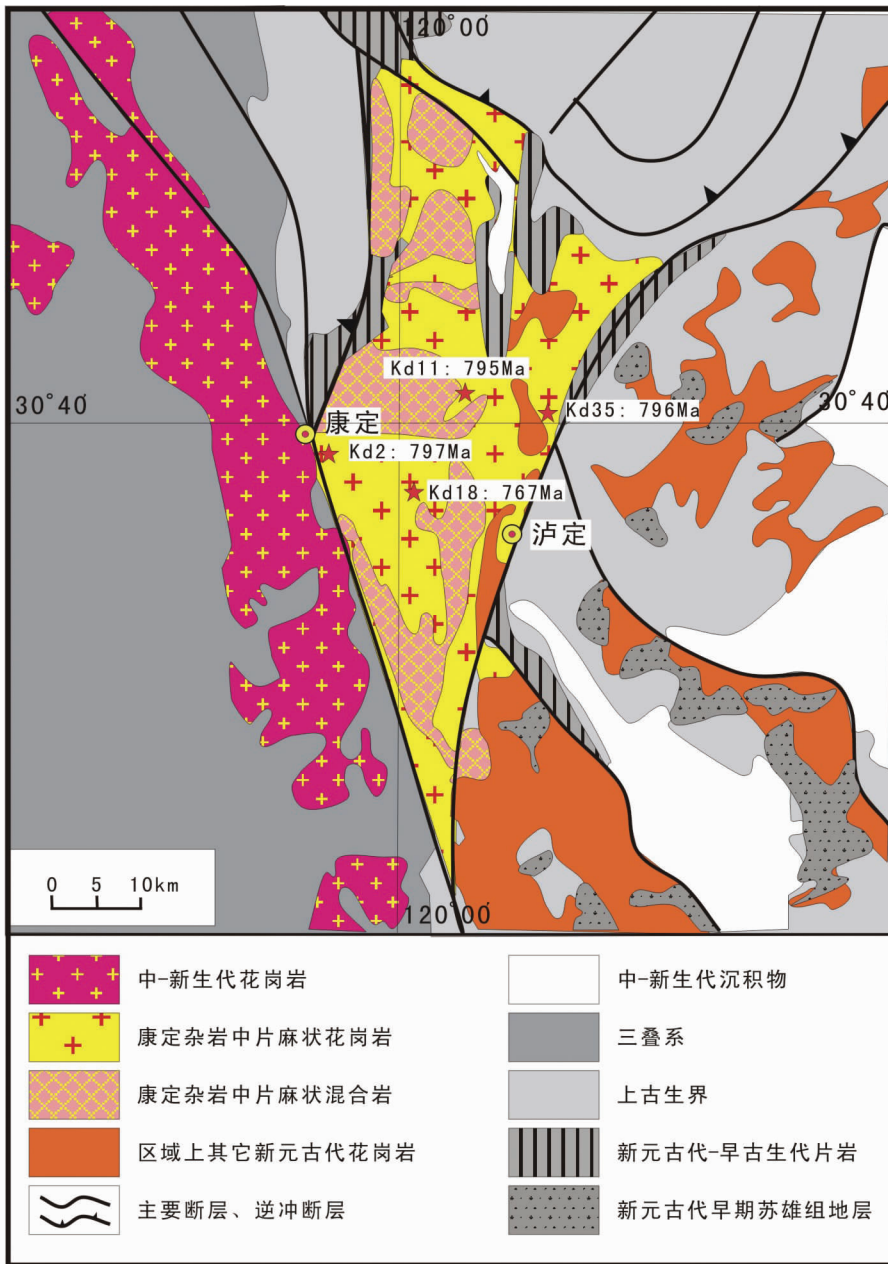


图1 康定杂岩地质简图(据 Zhou *et al.*, 2002 修改)

图中样品 Kd2、Kd11 和 Kd35 引自 Zhou *et al.* (2002), Kd18 为本文测定

Fig.1 Geological sketch map of the Kangding Complex (modified after Zhou *et al.*, 2002)

岩、富铝片岩等表壳岩包体。

其中英云闪长岩,灰色,中细粒粒状变晶结构,片麻状构造,主要矿物组合为斜长石、石英、黑云母和少量的角闪石、钾长石等。其中斜长石自形板状晶形,具有明显结晶环带,代表了岩浆结晶成因。主要的副矿物组合包括榍石、锆石等。当石英含量少于20%时过渡为石英闪长岩,当暗色矿物含量较少时过渡为奥长花岗岩。英云闪长岩和奥长花岗岩之间没有截然的分界线,为渐变过渡关系。在英云闪长岩中含有较多的细粒闪长岩包体,从包体与主岩之间的关系来

看,可将细粒闪长岩包体分为两类,一类是包体与主岩之间为渐变过渡,缺少截然分界,另一类则表现出包体和围岩之间存在截然界面。显微镜下细粒角闪岩包体主要由角闪石、黑云母、斜长石、少量石英和副矿物组成,表现了与英云闪长岩相同的造岩矿物组合和富矿物组合,表明它们可能是早期岩浆分离结晶的产物。

花岗闪长岩,灰白色,与表壳岩之间表现了明显的侵入接触关系,内接触带含有大量的围岩捕虏体。细粒粒状变晶结构,片麻状构造。主要矿物组合为斜长石、石英、钾长石和



图2 康定杂岩的野外地质特征

A-石英闪长岩及其铁镁质岩石包体;B-奥长花岗岩及其包体

Fig.2 Geological features of the gneissic granitoids in the Kangding Complex

少量的黑云母等。外表上看,该类花岗闪长岩酷似奥长花岗岩,因此大部分花岗闪长岩类岩石样品野外被定为奥长花岗岩,镜下观察,比奥长花岗岩含有相对较多的钾长石,定名为花岗闪长岩更合适。

根据康定杂岩中的二长花岗岩的结构特征,可以将其分为两类。其中细粒二长花岗岩占主导地位,灰白色,风化面表现为粉白色。细粒粒状变晶结构,片麻状构造。显微镜下可见其主要矿物组合为斜长石、微斜长石、石英,含有少量的黑云母,可见蚀变的白云母。另一类二长花岗岩表现了截然不同的岩石学特征,表现为粉红色,中粗粒似斑状结构,块状构造。主要的矿物组合为条纹长石、斜长石、石英和黑云母,石英表现了填充空隙的特征,斑晶主要为钾长石。完全没有受到变形作用的改造,表现了碰撞后花岗岩的特征。

### 3 地质年代学

康定杂岩片麻状花岗岩中的英云闪长岩和花岗闪长岩已经被很好的定年,Zhou *et al.* (2002)给出 SHRIMP 锆石 U-

Pb 同位素年龄为 797 ~ 795Ma (图 1)。为了精确确定该杂岩中与英云闪长岩和花岗闪长岩密切组合到一起的灰白色细粒二长花岗岩的年龄,我们对样品 Kd-18(灰白色细粒二长花岗岩)进行了锆石分离。样品中的锆石均表现了柱状自形形态,长宽比为 3:1 到 2:1 无色透明到淡黄色,内部结构简单,表现为清楚的振荡环带,说明这些锆石为岩浆成因。实验分析在中国地质科学院离子探针中心 SHRIMP II 实验室完成,样品制备、分析过程和工作条件见参考文献(宋彪等, 2002)。对灰白色细粒二长花岗岩样品(Kd-18)共进行了 18 个颗粒的 18 个点的分析,结果列于表 1,分析结果已经进行了普通铅校正。SHRIMP 分析数据的处理和成图均使用 Isoplot/EX 软件 2003 版本完成。

分析结果表明,所有分析锆石 U、Th 浓度分别在  $27 \times 10^{-6} \sim 145 \times 10^{-6}$  和  $8 \times 10^{-6} \sim 234 \times 10^{-6}$  的较宽范围变化, Th/U 值变化在 0.20 ~ 1.64 之间(表 1),结合所有锆石颗粒具有明显的震荡环带,进一步证明这些锆石均为岩浆成因。所有 18 个分析结果都落在谐和线上或者谐和线附近(图 3),得到  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  权重平均年龄为  $791 \pm 10\text{Ma}$ 。然而从表 1 中不难看出,18 个分析数据的表现年龄中有 7 个分析数据在 802Ma 之上,11 个分析数据在 785Ma 之下,明显地可分为两群,两群之间存在 17Ma 年龄缺口,如果以此缺口为界分别统计两群分析数据,分别得到  $826 \pm 29\text{Ma}$  (MSWD = 0.14) 和  $767 \pm 24\text{Ma}$  (MSWD = 0.21)。我们认为前 7 个分析得到的  $826 \pm 29\text{Ma}$  (MSWD = 0.14) 可能记录了康定杂岩中早期侵入结晶相的形成年龄,即捕获岩浆锆石年龄,也就是康定杂岩中可能存在 ~826Ma 的岩浆侵入事件,与扬子克拉通西缘新元古代早期侵入相的事件一致(Zhou *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003a)。而另 11 颗锆石分析得到的  $767 \pm 24\text{Ma}$  可能代表了该灰白色细粒二长花岗岩的形成时代。而  $791 \pm 19\text{Ma}$  的年龄值可能只有统计学意义,不具有真实的地质意义。因此该期二长花岗质岩浆作用发生在  $767 \pm 24\text{Ma}$ 。

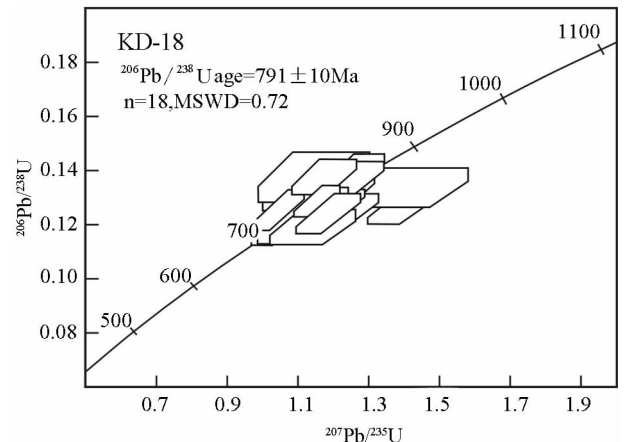


图3 灰白色细粒二长花岗岩锆石 U-Pb 同位素谐和线图  
Fig.3 The zircon U-Pb isotopic concordia diagram of a hoar fine-grained monzogranite



表 1 样品 Kd-18 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素测年结果表  
Table 1 SHRIMP zircon U-Pb isotopic dating results for sample Kd-18

Labels /Spots	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	Th/U	Pb* ( $\times 10^{-6}$ )	Ph <sub>c</sub>	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	Ages (Ma) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
KD-18-1	78.27	92.56	1.1826	12	0.0086	0.12787	0.00686	1.4007	0.1027	0.07945	0.00347	776	39
KD-18-2	114.52	234.16	2.0447	20	0.00196	0.12168	0.00746	1.0895	0.07779	0.06494	0.00193	740	43
KD-18-3	105.42	173.55	1.6464	19	0.00017	0.13644	0.00593	1.2612	0.06912	0.06704	0.0019	825	34
KD-18-4	28.15	26.36	0.9364	4	0.00549	0.13482	0.00735	1.3923	0.18636	0.0749	0.00866	815	42
KD-18-5	46.32	48.26	1.042	7	0.00095	0.12517	0.00711	1.2388	0.08891	0.07178	0.00268	760	41
KD-18-6	65.95	44.83	0.6798	9	0.00969	0.13257	0.00644	1.0996	0.10093	0.06016	0.00433	802	37
KD-18-7	46.13	49.51	1.0733	7	0.01271	0.13874	0.00934	1.1438	0.15605	0.05979	0.00661	838	53
KD-18-8	27.98	22.87	0.8173	4	0.00725	0.12816	0.01487	1.1417	0.1734	0.06461	0.00547	777	86
KD-18-9	59.59	11.82	0.1984	7	0.00718	0.12639	0.00758	1.0835	0.10497	0.06217	0.00429	767	44
KD-18-10	63.67	41.54	0.6524	9	0.00014	0.12771	0.00613	1.2149	0.07441	0.069	0.00224	775	35
KD-18-11	63.81	71.38	1.1186	11	0.00405	0.13995	0.00707	1.2528	0.09103	0.06492	0.00301	844	40
KD-18-12	46.6	26.19	0.5619	7	0.00017	0.13852	0.00651	1.1724	0.09127	0.06139	0.00347	836	37
KD-18-13	29.6	27.73	0.9366	4	0.00375	0.12524	0.01154	1.1096	0.12314	0.06426	0.0033	761	66
KD-18-14	25.26	8.59	0.34	3	0.00389	0.11986	0.0067	1.141	0.11973	0.06904	0.00567	730	39
KD-18-15	76.49	28.25	0.3693	11	0.00435	0.13719	0.00712	1.2508	0.09123	0.06613	0.00299	829	41
KD-18-16	125.49	24.15	0.1924	16	0.00066	0.12928	0.00545	1.1777	0.06285	0.06607	0.00184	784	31
KD-18-17	144.86	143.3	0.9892	23	0.00076	0.12958	0.00576	1.1527	0.06588	0.06451	0.00199	785	33
KD-18-18	65.47	76.21	1.1642	10	0.00134	0.12495	0.00749	1.1852	0.09235	0.06879	0.00295	759	43

## 4 地球化学特征

对康定杂岩中的花岗质岩石共进行了 20 个代表性岩石的岩石化学分析,其中 19 个样品进行了微量元素和稀土元素分析,包括了 2 个细粒闪长岩包体,4 个英云闪长岩(奥长花岗岩)、3 个花岗闪长岩、8 个灰白色细粒二长花岗岩和 3 个粗粒粉红色二长花岗岩,所有的分析结果列入表 2。

### 4.1 岩石化学

在 Barker(1979)分类图上,与英云闪长岩和奥长花岗岩落在英云闪长岩区(图 4A),在 ANK( $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  分子比)对 ACNK( $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  分子比)分类图上英云闪长岩和奥长花岗岩落在了亚铝岩石系列(图 4B),随着  $\text{SiO}_2$  的升高,  $\text{MgO}$ 、 $\text{FeOt}$  和  $\text{CaO}$  明显降低(图 4C-E)。在  $\text{K}_2\text{O}$  对  $\text{SiO}_2$  分类图上,英云闪长岩均落在了低钾拉斑玄武岩系列(图 4F)。细粒闪长岩包体表现了低的  $\text{SiO}_2$  (49.31% ~ 51.35%),较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (17.78% ~ 18.82%)、 $\text{CaO}$  (8.14% ~ 8.96%)、 $\text{MgO}$  (4.08% ~ 5.67%) 和  $\text{FeOt}$  (9.70% ~ 10.09%),  $\text{TiO}_2$  含量较低(1.06% ~ 1.14%)。在  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  分类图上,两个细粒闪长岩包体样品落在了低钾拉斑玄武岩系列和中钾钙碱性系列。在  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{FeOt}$  与  $\text{SiO}_2$  协变图上,表现了最低的  $\text{SiO}_2$  和最高的  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{FeOt}$  含量,并且细粒闪长岩包体与英云闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩同落在一条演变线上,进一步证明它们可能是同源岩浆分离结晶的产物(图 4C、D、E 和 F)。

花岗闪长岩的  $\text{SiO}_2$  变化在 62.78% ~ 69.7% 之间,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  分布在 15.36% ~ 16.12%。与英云闪长岩相比,花岗闪长岩的  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  明显偏高,  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{FeOt}$  等组分明显偏低(表 2)。在 An-Ab-Or 分类图上,花岗闪长岩落在了花岗闪长岩区(图 4A),并表现了亚铝中钾钙碱性特征(图 4B、F)。

灰白色细粒二长花岗岩表现了高的  $\text{SiO}_2$  (71.85% ~ 74.28%)、 $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$ ,表现了很低的  $\text{FeOt}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{TiO}_2$ (表 2、图 4C-F)。在花岗岩分类图上,灰白色细粒二长花岗岩被投到了二长花岗岩与花岗闪长岩分界线附近(图 4A),表现了从亚铝到过铝质的地球化学属性,绝大部分样品表现了高钾钙碱性花岗岩的特征(图 4F)。而粉红色粗粒花岗岩具有最高的  $\text{SiO}_2$  (~ 75.25%),较低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,最低的  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{FeOt}$  和  $\text{TiO}_2$ ,最高的  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$ ,表现了高钾钙碱性到 Shoshonite 系列(表 2、图 4C-F)。

### 4.2 稀土元素地球化学的特征

在球粒陨石标准化的稀土配分图(图 5),除粉红色粗粒二长花岗岩以外的所有其它样品都表现了右斜式稀土配分模式。英云闪长岩表现了从无 Eu 异常到弱的正 Eu 异常(图

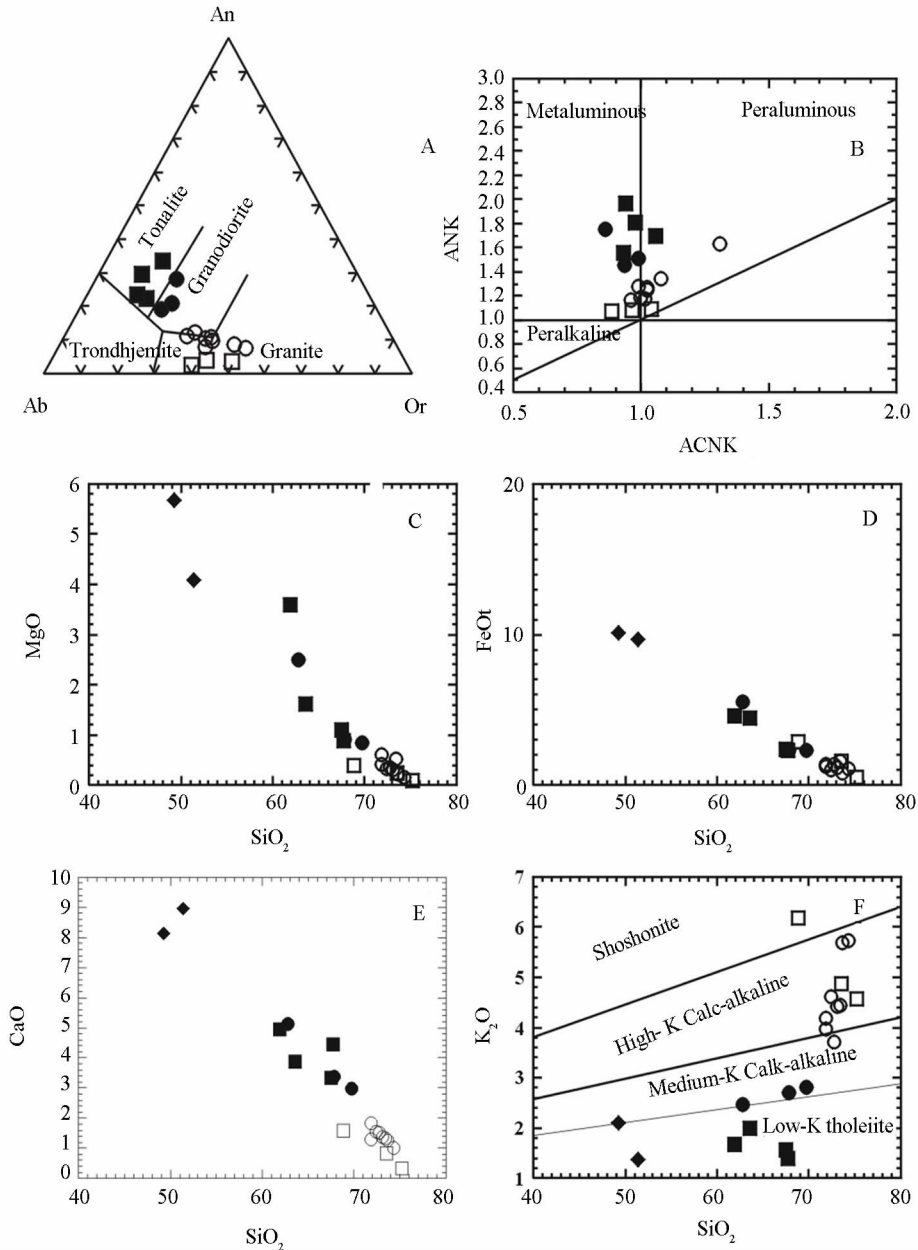


图4 康定杂岩片麻状花岗岩的岩石化学特征

实的菱形-细粒闪长岩包体;实的方块-英云闪长岩;实的圆-花岗岩;空心圆-灰白色细粒二长花岗岩;空的方块-粉红色粗粒二长花岗岩。

图A据Barker(1979),图B据Maniar and Piccoli(1989),图F据Le Maitre *et al.*(1989)

Fig.4 Petrochemical features of the gneissic granitoids in the Kangding Complex

5A, B, D)。细粒闪长岩包体的稀土配分特征与英云闪长岩基本一致(图5B)。花岗岩基本没有Eu异常(图5C)。灰白色细粒二长花岗岩为正Eu异常到无异常。粉红色粗粒二长花岗岩表现了与英云闪长岩、花岗岩、灰白色细粒二长花岗岩完全不同的稀土元素特征,主要表现在(1)该类岩石表现了平坦式稀土配分模式、强烈的负Eu异常(图5E)。灰白色细粒二长花岗岩表现了最高的 $(La/Yb)_N$ 比值,粉红色粗粒二长花岗岩表现了最高的稀土总量(图5F)。随着稀土总量的增加,负Eu异常加剧(表2)。从稀土元素地

球化学特征来看,从细粒闪长岩包体,通过英云闪长岩、花岗岩到灰白色细粒二长花岗岩的大部分样品表现了相同或者相近的稀土元素地球化学特征,可能具有亲缘关系。而粉红色粗粒二长花岗岩表现了与上述岩石系列明显的非亲缘关系。

#### 4.3 其它微量元素地球化学特征

在原始地幔标准化的蜘蛛网状图上,英云闪长岩表现为高场强元素Nb、Ta、P和Ti明显亏损,大离子亲石元素无明显

表2 康定杂岩的地球化学特征表(主量元素: wt%; 稀土、微量元素:  $\times 10^{-6}$ )Table 2 Geochemical features of the Kangding Complex (Major element: wt%; Trace element:  $\times 10^{-6}$ )

岩石类型 样品号	细粒闪长岩包体		英云闪长岩				花岗闪长岩	
	CX3046-3	CX3047-3	CX3044-1	CX3047-2	CX3047-4	CX3048-2	CX3044-2	CX3046-4
SiO <sub>2</sub>	51.35	49.31	63.53	61.93	67.51	67.67	67.8	62.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.82	17.78	16.45	16.25	16.95	17.22	16.12	15.86
CaO	8.96	8.14	3.88	4.96	3.32	4.45	3.36	5.14
K <sub>2</sub> O	1.37	2.09	1.99	1.68	1.56	1.4	2.71	2.47
TiO <sub>2</sub>	1.06	1.14	0.84	0.42	0.24	0.25	0.26	0.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.78	11.21	4.92	5.14	2.65	2.57	2.59	6.13
MgO	4.08	5.67	1.61	3.6	1.11	0.89	0.9	2.49
Na <sub>2</sub> O	3.42	3.84	5.13	3.91	5.05	4.88	4.96	3.89
MnO	0.15	0.22	0.27	0.12	0.06	0.05	0.09	0.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.32	0.24	0.32	0.16	0.1	0.1	0.11	0.15
LOI	0.87	0.65	1.27	2	1.63	0.69	1.23	0.56
FeOt	9.7	10.09	4.43	4.62	2.38	2.31	2.33	5.52
Total	99.1	99.17	99.72	99.65	99.91	99.91	99.87	99.62
La	13.38	22.288	26.71	15.916	30.037	7.91	15.57	32.499
Ce	24.22	45.006	54.87	35.264	54.971	13.76	27.62	60.758
Pr	2.49	5.236	6.76	4.869	6.784	1.56	3.69	6.987
Nd	9.35	21.568	27.56	24.133	24.361	5.25	14.24	25.364
Sm	2.19	5.318	7.35	5.555	3.721	1.44	3.45	4.637
Eu	0.79	1.643	2.15	1.464	1.077	0.78	1.39	0.995
Gd	1.53	4.998	6.39	5.158	3.227	1.16	2.76	4.184
Tb	0.22	0.843	1.01	0.868	0.417	0.2	0.49	0.63
Dy	1.15	4.859	5.56	5.118	1.921	1.1	2.73	3.263
Ho	0.22	0.945	1.05	0.978	0.37	0.22	0.52	0.607
Er	0.65	2.813	2.94	2.861	1.158	0.68	1.66	1.824
Tm	0.11	0.409	0.41	0.422	0.168	0.1	0.25	0.293
Yb	0.64	2.707	2.71	2.712	1.142	0.62	1.64	2.08
Lu	0.1	0.454	0.43	0.452	0.183	0.1	0.26	0.335
TREE	57.04	119.09	145.9	105.77	129.54	34.88	76.27	144.46
Eu/Eu*	1.25	0.96	0.94	0.82	0.93	1.79	1.33	0.68
(La/Yb) <sub>N</sub>	14.13	5.56	6.66	3.97	17.77	8.62	6.42	10.56
(Yb) <sub>N</sub>	2.58	10.92	10.93	10.94	4.6	2.5	6.61	8.39
Co	0.54	9.435	2.31	33.749	4.974	4.95	4.98	1.632
Cu	1.87	4.879	2.96	11.891	2.831	3.05	3.72	2.626
Pb	39.36	12.839	17.52	5.013	17.438	11.01	21.39	15.539
Sc	1.29	13.022	14.77	26.596	6.082	3.55	4.39	7.39
Ga	24.3	22.591	24.52	16.702	22.372	22.73	33.5	25.079
Li	16.12	21.814	42	6.793	22.569	25.53	33.15	4.799
Rb	142	33.3	42.1	48.4	35.9	30.5	58.2	92.1
Sr	317	650	513	312	403	335	391	143
Y	10.39	25.35	29.2	26.28	13.68	9.94	16.64	18.64
Zr	46.74	224.0	123.18	43.33	142.78	53.52	80.25	96.78
Nb	5.99	8.876	9.15	7.876	6.929	4.84	13.03	9.437
Ba	726	544	664	317	505	409	1037	876
Hf	1.77	6.069	3.62	1.757	3.905	1.42	2.72	3.205
Ta	0.36	0.506	0.41	0.176	0.339	0.2	0.56	0.229
Th	12.5	6.25	4.47	1.261	9.486	1.85	6.53	16.553
U	6.95	1.261	1.77	0.161	2.939	1.93	4.76	3.069
Rb/Sr	0.45	0.05	0.08	0.16	0.09	0.09	0.15	0.64
Ba/Sr	2.29	0.84	1.29	1.02	1.25	1.22	2.65	6.12
Nb/Ta	16.64	17.54	22.32	44.75	20.44	24.2	23.27	41.21
Zr/Hf	26.41	36.9	34.03	24.66	36.56	37.69	29.5	30.2
Th/U	1.8	4.96	2.53	7.83	3.23	0.96	1.37	5.39
Sr/Y	30.48	25.64	17.57	11.85	29.49	33.72	23.52	7.68

续表 2

Continued Table 2

岩石类型		灰白色细粒二长花岗岩						
样品号	CX3049-1	CX30421-3	CX3045-1	CX3045-2	CX3045-3	CX3046-1	CX3046-2	CX3047-1
SiO <sub>2</sub>	69.7	74.28	71.85	73.63	71.88	72.75	73.44	73.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.56	13.63	15.03	14.51	16.01	14.93	13.71	13.33
CaO	2.97	1.02	1.84	1.27	1.31	1.52	1.33	1.36
K <sub>2</sub> O	2.8	5.74	4.18	5.68	3.96	3.72	4.45	4.41
TiO <sub>2</sub>	0.3	0.18	0.22	0.14	0.2	0.23	0.19	0.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.56	1.19	1.54	0.87	1.33	1.51	1.78	1.3
MgO	0.85	0.16	0.41	0.21	0.6	0.35	0.51	0.3
Na <sub>2</sub> O	4.44	3.27	4.43	3.69	3.38	4.31	3.74	4.03
MnO	0.06	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.06	0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.03	0.09	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04
LOI	0.88	0.43	0.57	0.5	0.58	0.59	0.83	2.02
FeOt	2.3	1.07	1.39	0.78	1.2	1.36	1.6	1.17
Total	99.95	99.82	100.03	100.47	99.2	99.84	99.91	100.02
La	22.91	—	41.277	30.77	20.036	19.53	20.28	26.59
Ce	41.24	—	67.022	50.25	33.522	39.57	43.69	49.14
Pr	4.87	—	7.867	5.66	3.45	4.87	5.78	5.49
Nd	18.26	—	25.148	19.56	12.456	17.97	21.24	19.56
Sm	4.26	—	4.867	4.04	2.85	3.63	4.84	4.3
Eu	1.24	—	4.169	1.23	1.029	1.01	1.23	1
Gd	4.14	—	3.451	3.03	1.867	3.05	4.82	2.51
Tb	0.67	—	0.432	0.4	0.246	0.44	0.77	0.27
Dy	3.93	—	1.665	1.65	1.198	2.33	4.21	0.85
Ho	0.78	—	0.252	0.27	0.205	0.43	0.84	0.15
Er	2.28	—	0.654	0.7	0.561	1.19	2.43	0.42
Tm	0.35	—	0.09	0.09	0.084	0.18	0.35	0.06
Yb	2.21	—	0.524	0.54	0.533	1.23	2.39	0.38
Lu	0.33	—	0.079	0.09	0.074	0.19	0.35	0.06
TREE	107.47	—	157.5	118.28	78.11	95.62	113.22	110.78
Eu/Eu*	0.89	—	2.96	1.03	1.28	0.9	0.77	0.86
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.01	—	53.23	38.51	25.4	10.73	5.73	47.28
(Yb) <sub>N</sub>	8.91	—	2.11	2.18	2.15	4.96	9.64	1.53
Co	15.63	—	2.553	1.1	1.499	2.67	29.63	4.744
Cu	4.46	—	3.608	2.46	2.595	2.25	20.37	5.592
Pb	15.22	—	29.773	43.69	21.849	28.19	6.27	13.052
Sc	10.64	—	7.176	2.3	7.236	3.59	20.09	6.536
Ga	26.8	—	41.884	38.78	33.943	26.19	19.39	23.538
Li	35.33	—	17.231	19.18	92.936	17.32	7.07	12.691
Rb	41.81	—	113	120	106	94.5	31.0	47.0
Sr	424	—	4886	393	589	137	426	286
Y	24.63	—	9.905	13.01	9.14	15.01	24.07	6.318
Zr	126	—	57.6	65.8	72.8	80.0	69.45	64.9
Nb	3.13	—	12.731	13	8.664	11.2	7.11	3.209
Ba	572	—	1686	1340	1356	830	323	742
Hf	3.98	—	1.559	2.26	2.304	2.87	2.36	1.886
Ta	0.38	—	0.58	0.51	0.361	0.47	0.41	0.178
Th	10.61	—	25.767	22.32	7.886	7.8	5.05	9.738
U	5.02	—	5.51	5.96	2.496	1.67	2.37	0.883
Rb/Sr	0.1	—	0.23	0.31	0.18	0.69	0.07	0.16
Ba/Sr	1.35	—	3.46	3.41	2.3	6.07	0.76	2.59
Nb/Ta	8.24	—	21.95	25.49	24	23.83	17.34	18.03
Zr/Hf	31.72	—	36.97	29.12	31.6	27.89	29.43	34.38
Th/U	2.11	—	4.68	3.74	3.16	4.67	2.13	11.03
Sr/Y	17.23	—	49.23	30.18	64.41	9.11	17.68	45.3



续表 2

Continued Table 2

岩石类型		粉红色粗粒二长花岗岩				岩石类型		粉红色粗粒二长花岗岩			
样品号	CX3048-1	CX3051-1	CX3052-1	CX3053-1	样品号	CX3048-1	CX3051-1	CX3052-1	CX3053-1		
SiO <sub>2</sub>	72.41	75.25	73.58	68.85	TREE	119.56	136.82	206.12	295		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.07	14.04	13.44	14.48	Eu/Eu*	0.84	0	0.42	0.42		
CaO	1.55	0.33	0.82	1.57	(La/Yb) <sub>N</sub>	47.15	0.99	5.94	5.98		
K <sub>2</sub> O	4.61	4.57	4.87	6.18	(Yb) <sub>N</sub>	1.73	44.7	19.15	26.33		
TiO <sub>2</sub>	0.19	0.02	0.17	0.33	Co	1.836	0.241	1.45	2.56		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.11	0.53	1.78	3.2	Cu	4.507	4.083	3.23	2.46		
MgO	0.32	0.08	0.24	0.39	Pb	31.164	22.065	23.35	25.77		
Na <sub>2</sub> O	4.22	4.82	4.36	4.14	Sc	6.154	5.068	3.79	5.09		
MnO	0.03	0	0.06	0.05	Ga	33.977	20.017	25.93	27.1		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.01	0.03	0.08	Li	67.813	22.345	31.93	11.93		
LOI	0.35	0.44	0.88	0.81	Rb	175	334	128	180		
FeOt	1.00	0.48	1.6	2.88	Sr	333	6.51	68.0	67.0		
Total	99.8	100.04	100.05	99.76	Y	9.072	87.529	37.74	54.15		
La	29.933	16.254	41.78	57.82	Zr	57.5	161	142	195		
Ce	52.926	36.316	81.35	112.01	Nb	12.108	25.718	17.13	15.42		
Pr	5.946	4.869	9.26	15.27	Ba	1005	1.026	646	704		
Nd	20.156	21.123	36.49	54.61	Hf	1.854	12.619	5.53	7.73		
Sm	3.742	6.722	8.1	10.84	Ta	1.147	0.287	1.31	1.03		
Eu	0.93	0.009	1.08	1.52	Th	19.837	40.043	23.93	31.6		
Gd	2.838	7.686	7.51	11.32	U	5.337	11.694	7.01	5.95		
Tb	0.331	1.911	1.16	2.02	Rb/Sr	0.53	51.32	1.88	2.68		
Dy	1.405	14.54	7.24	11.81	Ba/Sr	3.02	0.16	9.5	10.51		
Ho	0.219	3.151	1.39	2.4	Nb/Ta	10.56	89.61	13.08	14.97		
Er	0.564	9.762	4.54	6.87	Zr/Hf	31.03	12.76	25.65	25.23		
Tm	0.073	1.718	0.71	0.99	Th/U	3.72	3.42	3.41	5.31		
Yb	0.429	11.086	4.75	6.53	Sr/Y	36.7	0.07	1.8	1.24		
Lu	0.065	1.676	0.76	0.99							

注: Total 为岩石化学总量; LOI-烧失量; FeOt-将岩石中所有的铁换算为 FeO, TREE-稀土元素总量; Eu/Eu\* -球粒陨石标准化后 Eu/(Sm × Gd)<sup>1/2</sup> 值; (La/Yb)<sub>N</sub>-球粒陨石标准化后两元素比值。

显异常,两个细粒闪长岩包体中的一个(CX3047-3)表现了与英云闪长岩相同的图谱特征,而样品 CX3046-3 表现为富集大离子亲石元素和 Nb、Ta 和 P 的负异常(图 6A, B)。花岗闪长岩和灰白色细粒二长花岗岩的微量元素图谱与英云闪长岩完全一致(图 6C, D)。然而,粉红色粗粒二长花岗岩表现了大离子亲石元素强烈富集和 Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 强烈亏损的地球化学特征(图 6E)。从(La/Yb)<sub>N</sub>对(Yb)<sub>N</sub>相关图上,粉红色粗粒二长花岗岩表现了明显高的(Yb)<sub>N</sub>值,而灰白色细粒二长花岗岩表现了最低的(Yb)<sub>N</sub>和 Y 值,并表现了最高的(La/Yb)<sub>N</sub>值和 Sr/Y 比值,分布在 Adakite 区,英云闪

长岩、花岗闪长岩落在了经典岛弧到 Adakite 的过渡区(图 7A 和 B)。

## 5 Sm-Nd 同位素特征

共分析了康定杂岩 13 个代表性样品的 Sm-Nd 同位素特征,所有分析结果列于表 3。样品的<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd 分布范围为 0.0883 ~ 0.1518, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 在 0.512121 ~ 0.512465 之间变化,最年轻的地幔模式年龄 0.95Ga,与其成岩年龄 0.795Ga 较为接近。而最老的模式年龄为 1.61Ga。样品的  $f_{Sm/Nd}$  值在

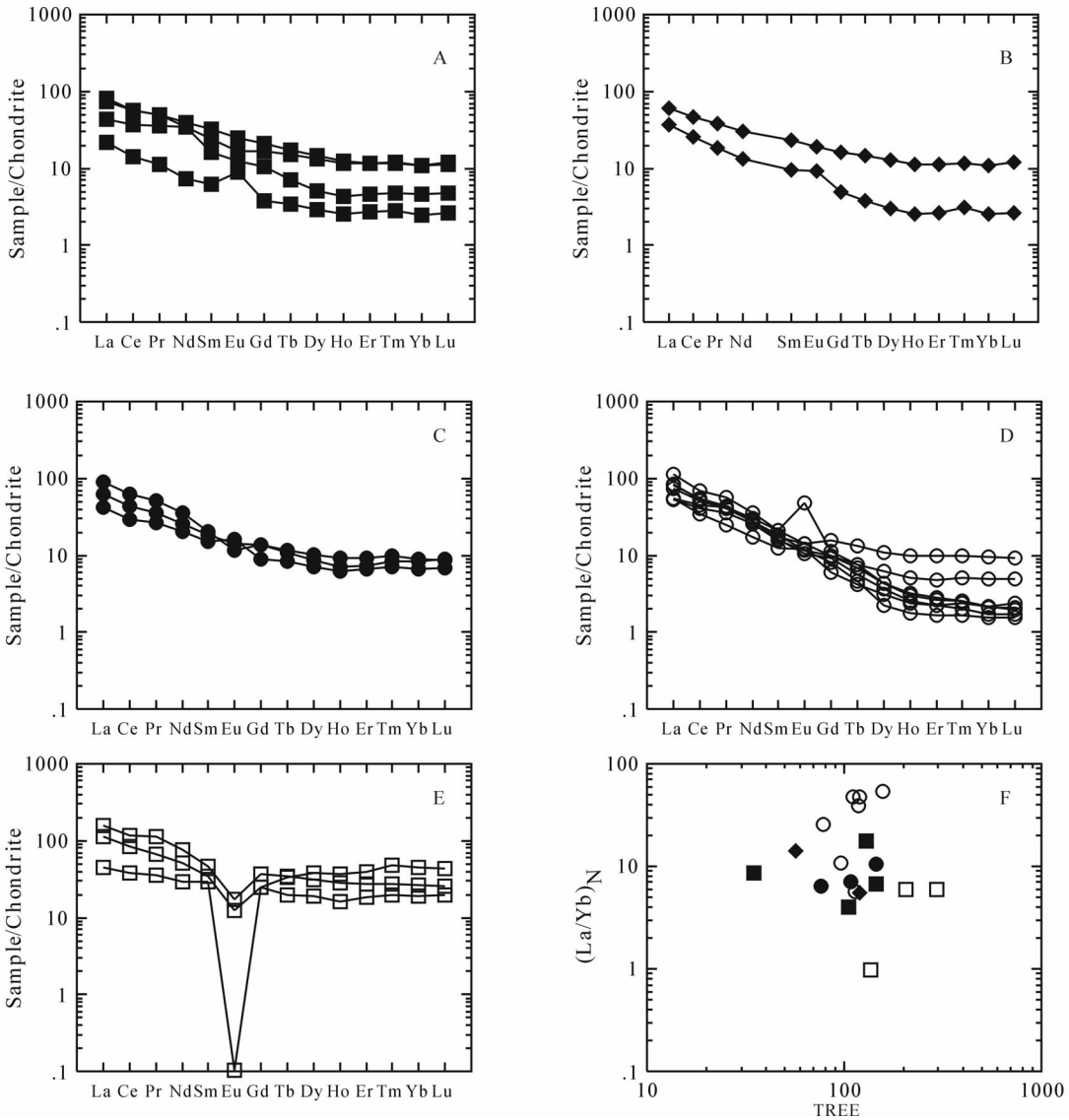


图5 康定杂岩的稀土元素特征

A-英云闪长岩; B-英云闪长岩中的细粒闪长岩包体; C-花岗闪长岩; D-灰白色细粒二长花岗岩; E-粉红色粗粒二长花岗岩; F-TREE 对  $(La/Yb)_N$  相关图, 岩性符号同图4

Fig.5 REE features of the granitoids in the Kangding Complex

-0.228 ~ -0.551, 767Ma 的  $\epsilon_{Nd}(t) = -0.57 \sim +5.67$ , 绝大部分样品具有正的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值, 最高的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值接近亏损地幔演化线, 三个负的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值也落在 CHUR 线附近(表3)。这些同位素特征说明康定杂岩中的花岗质岩石形成于亏损地幔相关的初生地壳的部分熔融, 受到了老地壳成分的低度混染。

## 6 岩石成因和构造背景讨论

上述 Sm-Nd 同位素特征, 说明形成这些花岗质岩石的岩浆来自于初生地壳的部分熔融, 细粒闪长岩包体、英云闪长

岩和花岗闪长岩都表现了相对较高的  $Mg^{\#}$  值, 有的样品  $Mg^{\#}$  值 > 50(表2)。总体上,  $Mg^{\#}$  值随着  $SiO_2$  的升高而降低, 粉红色粗粒二长花岗岩具有最低的  $Mg^{\#}$  值(图8A)。在 AFM ( $Al_2O_3/FeOt + MgO$  分子比) 对 CFM ( $CaO/FeOt + MgO$  分子比) 相关图上(图8B), 英云闪长岩、花岗闪长岩和其中的细粒闪长岩包体都落到了变质玄武岩部分熔融区表明其源区岩石以铁镁质岩石为主, 而  $\epsilon_{Nd}(t)$  多数为正值, 最小者 -0.57 表明其源区物质具有亏损地幔的亲缘性, 0.95Ga 到 1.68Ga 的亏损地幔 Nd 模式年龄, 说明其源区物质不老于 0.95Ga, 具有初生地壳性质。而灰白色细粒二长花岗岩和粉红色粗粒二长花岗岩都分布在杂砂岩部分熔融区。粉红色

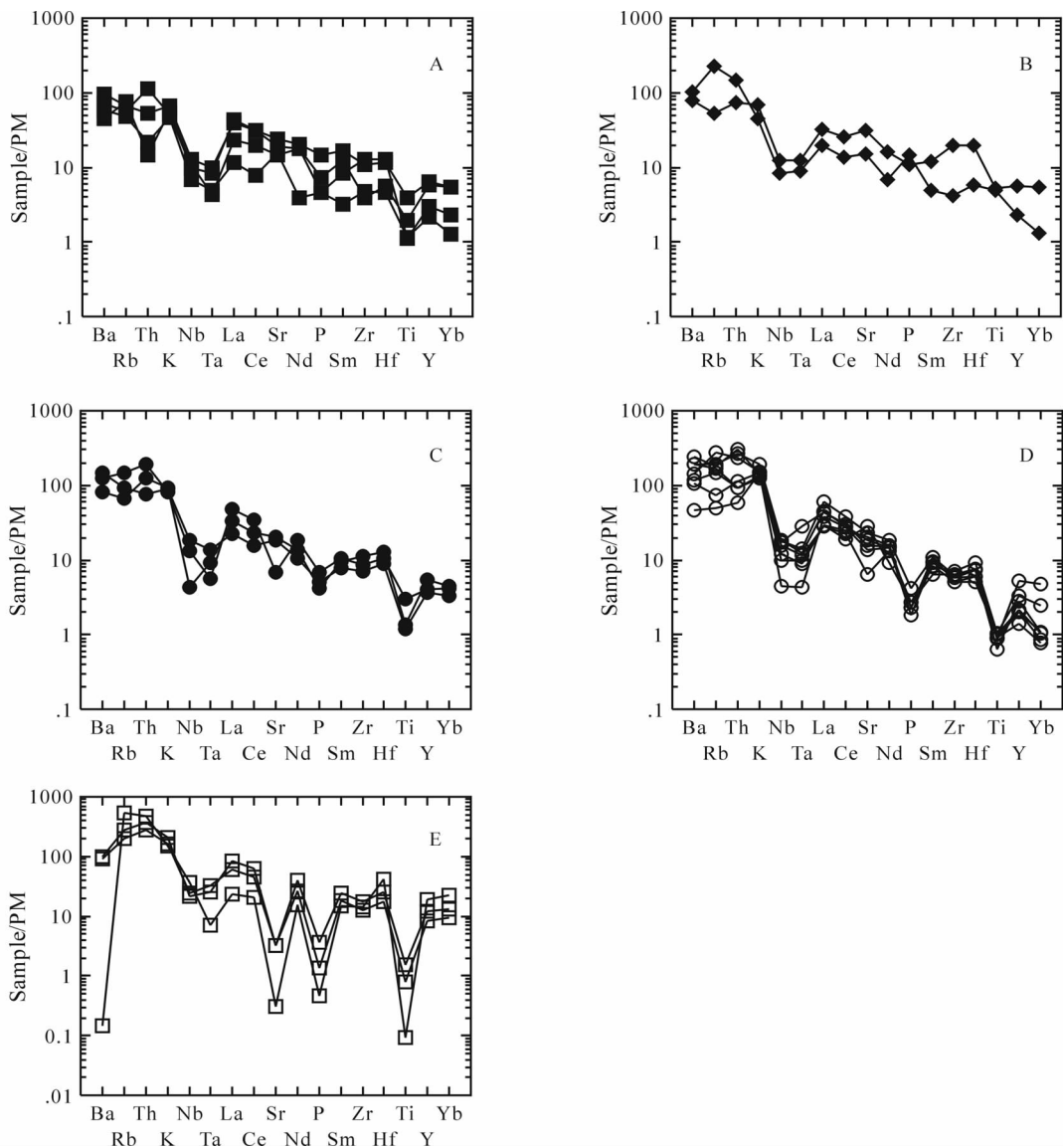


图6 原始地幔标准化的蜘蛛网状图(原始地幔值引自 Sun and McDonough,1989)  
 A-英云闪长岩;B-英云闪长岩中的细粒闪长岩包体;C-花岗闪长岩;D-灰白色细粒二长花岗岩;E-粉红色粗粒二长花岗岩

Fig.6 Primitive normalized spider diagrams (the values of primitive mantle after Sun and McDonough,1989)

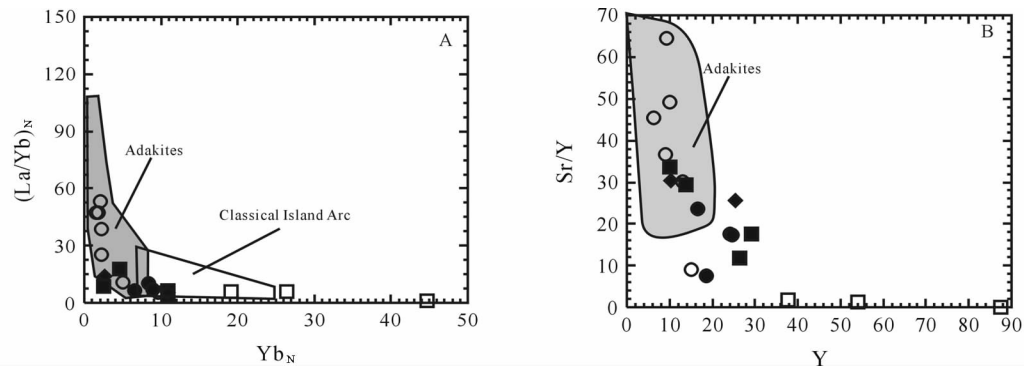


图7 (La/Yb)<sub>N</sub>与Yb<sub>N</sub>相关图(A)和Sr/Y与Y相关图(B)

图中 Adakite 的区域引自 Martin(1999),岩性符号同图4

Fig.7 (La/Yb)<sub>N</sub> versus Yb<sub>N</sub> (A) and Sr/Y versus Y (B) plots

表3 Sm-Nd 同位素特征

Table 3 Sm-Nd isotopic features of the granitoids in the Kangding Complex

样品号	岩石名称	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ( $2\sigma$ )	$t_{\text{DM}}$ (Ga)	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
CX3044-1	英云闪长岩	7.22	33.24	0.1315	$0.512281 \pm 11$	1.61	-0.331	-6.96	-0.57
CX3044-2	花岗闪长岩	2.58	11.7	0.1336	$0.512345 \pm 12$	1.53	-0.321	-5.72	0.48
CX3045-1	灰白色二长花岗岩	3.51	21.38	0.0993	$0.512437 \pm 10$	0.95	-0.495	-3.92	5.64
CX3046-1	灰白色二长花岗岩	3.28	16.44	0.1209	$0.512265 \pm 17$	1.45	-0.385	-7.28	0.16
CX3046-2	细粒闪长岩包体	5.37	24.95	0.1304	$0.512387 \pm 21$	1.39	-0.337	-4.90	1.61
CX3046-3	细粒闪长岩包体	4.92	22.26	0.1337	$0.512389 \pm 12$	1.45	-0.320	-4.86	1.33
CX3047-2	英云闪长岩	6.36	27.25	0.1413	$0.512441 \pm 08$	1.49	-0.282	-3.84	1.59
CX3047-3	花岗闪长岩	5.38	24.49	0.133	$0.512364 \pm 11$	1.48	-0.324	-5.34	0.91
CX3047-4	英云闪长岩	3.16	19.96	0.0958	$0.512121 \pm 9$	1.33	-0.513	-10.09	-0.19
CX3048-1	灰白色二长花岗岩	3.05	18.39	0.1004	$0.512258 \pm 12$	1.20	-0.490	-7.41	2.04
CX3048-2	花岗闪长岩	1.06	4.206	0.1518	$0.512465 \pm 15$	1.68	-0.228	-3.37	1.03
CX3049-1	花岗闪长岩	2.87	19.69	0.0883	$0.512148 \pm 12$	1.22	-0.551	-9.56	1.08
CX3052-1	粉红色二长花岗岩	7.87	37.23	0.128	$0.512273 \pm 11$	1.56	-0.349	-7.12	-0.38

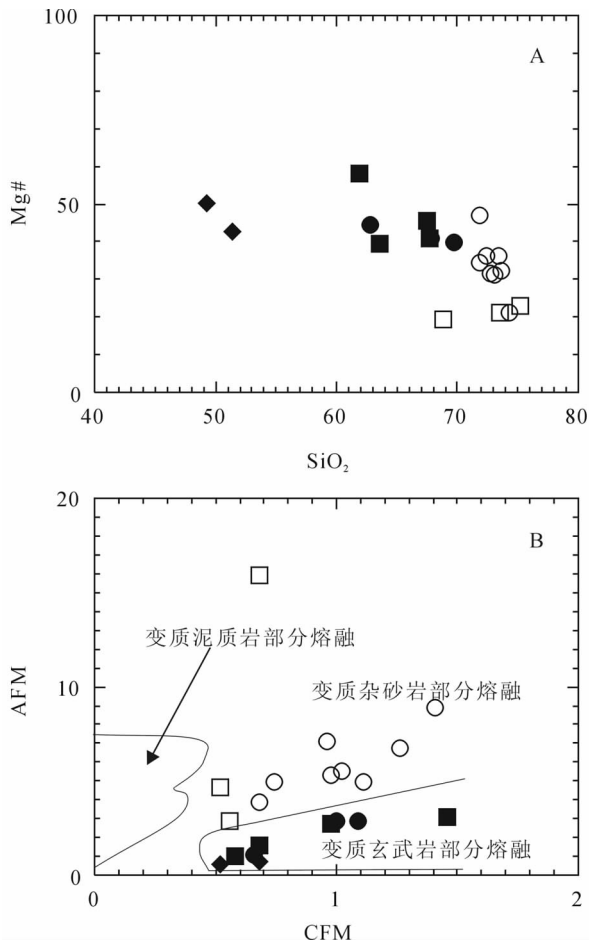
注:  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  以时间 767Ma 计算

图8 岩石成因图解

A-Mg#与SiO<sub>2</sub>协变图; B-AFM与CFM岩石成因鉴别图(底图据 Altherr *et al.*, 2000, 有修改). 图中岩性符号说明同图4

Fig. 8 Petrogenesis diagrams

粗粒二长花岗岩分布于更靠近泥质岩区(图8B),说明源区含有较多的变质杂砂岩和少量的变质泥质岩。结合稀土元素和微量元素地球化学特征,灰白色二长花岗岩表现了右斜式稀土图谱(图5D)和正的Eu异常到无Eu异常,表明源区存在较多的石榴石,并且在斜长石稳定范围之下,即形成于高温高压条件下的部分熔融,因此,表现了Adackite的地球化学特征。而粉红色二长花岗岩表现了平坦式稀土图谱,不仅具有高的大离子亲石元素的丰度和明显的Nb、Ta、P和Ti的负异常,而且具有明显的Sr负异常和最低的Sr/Y比值(图6E,图7B),岩石具有明显低的CaO含量(图4E),表明源区可能具有较少的斜长石,并且部分熔融可能发生在斜长石稳定范围之上,即斜长石在部分熔融过程中作为残留相,部分熔融深度相对较浅。然而,粉红色二长花岗岩的-0.38的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,表明其源区物质中仍然含有较多的来源于初生地壳的物质。综上所述,早期花岗岩岩浆最有可能形成于来自于亏损地幔的变质火山岩、杂砂岩的部分熔融,经历了角闪石、黑云母和斜长石的结晶分异作用。晚期粉红色的二长花岗岩岩浆形成于相对较低压力下的部分熔融。

在R1-R2构造判别图上,英云闪长岩、花岗闪长岩落入了前板块碰撞和碰撞后隆升区(图9A),灰白色细粒二长花岗岩落入了同碰撞花岗岩区,而粉红色二长花岗岩落入了晚造山到非造山过渡区(图9A)。在Rb-Y+Nb构造判别图上(图9B),粉红色粗粒二长花岗岩落入了碰撞后和版内构造环境,其余样品均落入了岛弧构造区。

上述岩石成因和构造判别分析表明,英云闪长岩、花岗闪长岩和灰白色细粒二长花岗岩形成于高温高压条件下来源于亏损地幔源的初生地壳岩石(包括相关的杂砂岩)的部分熔融,粉红色粗粒二长花岗岩,具有 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.38$ ,形成于低压下来源于上部地壳岩石的部分熔融,最有可能表壳沉积岩序列部分熔融的产物,但是也含有较多的导源幔源物质

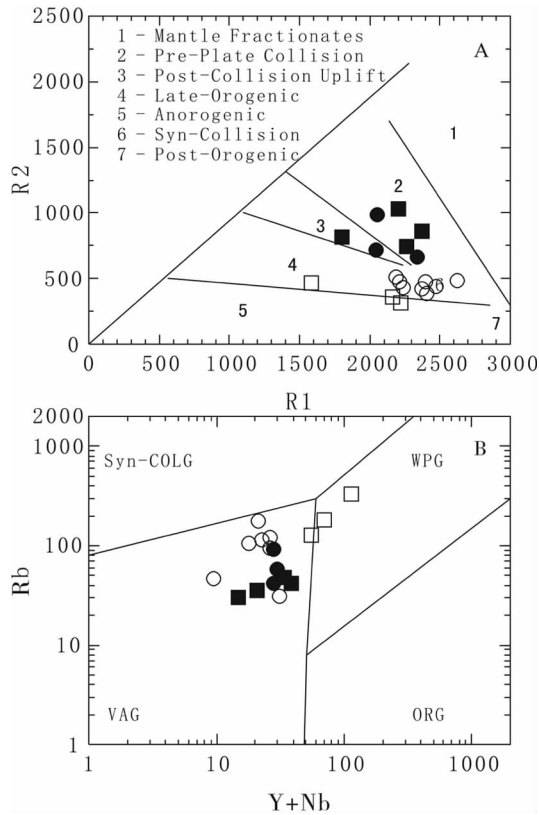


图9 R1-R2图解(A, 据 Batchelor and Bowden, 1985)和Rb-Y+Nb构造判别图(B, 据 Pearce *et al.*, 1984)

图中岩性符号同图4

Fig. 9 Tectonic discrimination diagrams of R1-R2 (A, after Batchelor and Bowden, 1985) and the Rb-Y+Nb plots (B, after Pearce *et al.*, 1984)

成分,说明新元古代时期这一地区的沉积序列中也含有较多的活动陆缘的物质,都表明了康定杂岩形成于活动性大陆边缘。这些特征支持了先前的岛弧模式(Zhou *et al.*, 2002, 2006; 牟传龙等, 2003; 陈岳龙等, 2004; 杜利林等, 2005, 2007; 赵俊香等, 2006; Wang *et al.*, 2006; 耿元生等, 2007a, b; Zhao *et al.*, 2008a, b)。结合区域上一些新元古代苏雄群双峰式火山岩、基性岩墙群、A-型花岗岩的发现,似乎~830Ma和750Ma区域上也确实存在伸展构造背景下的岩浆作用记录(Li *et al.*, 2003a, b, c; Wang *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2008)。因此我们认为,扬子克拉通西缘新元古代可能经历了更复杂的动力学过程,~770Ma之前,可能以安第斯型活动大陆边缘为主体,存在一些与弧后扩张相关的伸张构造背景下的岩浆作用。~750Ma与这一俯冲碰撞相关的动力学背景可能已经结束,转化为造山后或者非造山构造背景下的演化过程。

## 7 结论

地质学和岩石学研究表明,康定杂岩中片麻状花岗岩组

合主要由英云闪长岩、花岗闪长岩、灰白色细粒二长花岗岩和少量粉红色粗粒二长花岗岩组成,SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年揭示灰白色细粒二长花岗岩形成于  $767 \pm 24\text{Ma}$ 。

通过岩石学、岩石化学和 Nd 同位素研究确定英云闪长岩、花岗闪长岩和灰白色二长花岗岩岩浆起源于来自亏损地幔的初生地壳岩石在高温高压条件下的部分熔融,经历了结晶分异和地壳混染作用,而粉红色粗粒二长花岗岩岩浆起源于变质表壳岩在相对较低压力下的部分熔融。这些岩浆活动可能发生在活动大陆边缘构造背景下的不同演化阶段。

**致谢** 耿元生研究员在百忙之中认真地审阅了全文,并提出了宝贵的修改意见,使本文的质量和表达都有明显提高。本文中常量元素、微量元素和稀土元素分析过程中得到了北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室古丽冰、杨斌等的大力协助,在此表示衷心地感谢!

谨以此文献给卢良兆教授八十寿辰,祝愿卢先生健康、长寿!

## References

- Altherr R, Holl A and Hegner E. 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
- Barker F. 1979. Trondhjemite: Definition, environment and hypotheses of origin. In: Barker F (ed.). *Trondhjemites, Dacites, and Related Rocks*. Amsterdam: Elsevier, 1-12
- Batchelor RA and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43-55
- Chen YL, Luo ZH, Zhao JX, Li ZH, Zhang HF and Song B. 2004. Petrogenesis of Kangding Complex: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb age and litho-geochemistry. *Sci. China (Ser. D)*, 34(8): 687-697 (in Chinese)
- Du LL, Geng YS, Yang CH, Wang XS, Zhou XW, Ren LD, Wang YB and Yang ZT. 2005. Geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon chronology of basalts from the Yanbian Group in the western Yangtze Block. *Acta Geologica Sinica*, 76(6): 805-813 (in Chinese with English abstract)
- Du LL, Geng YS, Yang CH, Wang XS, Ren LD, Zhou XW, Shi YR and Yang ZT. 2007. New understanding on Kangding Group on western margin of Yangtze Block: Evidence from geochemistry and chronology. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1562-1577 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Yang CH, Du LL, Wang XS, Ren LD and Zhou XW. 2007a. Chronology and tectonic environment of the Tianbaoshan Formation: New evidence from zircon SHRIMP U-Pb age and geochemistry. *Geological Review*, 53(4): 556-563 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Yang CH, Ren LD, Du LL and Zhou XW. 2007b. Age of crystalline basement in western margin of Yangtze Terrane. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 429-441 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Yang CH, Wang XS, Du LL, Ren LD and Zhou XW. 2008. Metamorphic Basement Evolution in Western Margin of Yangtze Block. Beijing: Geol. Publ. House (in Chinese)
- Huang XL, Xu YG, Li XH, Li WX, Lan JB, Zhang HH, Liu YS, Wang YB, Li HY, Luo ZY and Yang QJ. 2008. Petrogenesis and tectonic implications of Neoproterozoic, highly fractionated A-type granites

- from Mianning, South China. *Precamb. Res.*, 165:190–204
- Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre Le Bas MJ, Sabine PA, Schmid H, Streckeisen A, Woolley AR and Zanettin B. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Oxford: Blackwell
- Li XH, Li ZX, Ge W, Zhou H, Li W, Liu Y and Wingate MTD. 2003a. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at 825Ma? *Precamb. Res.*, 122:45–83
- Li ZX, Li XH, Kinny PD, Wang J, Zhang S and Zhou H. 2003b. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precamb. Res.*, 122:85–109
- Li XH, Li ZX, Zhou H, Liu Y, Liang XY and Li WX. 2003c. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan pluton in SW Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance. *Sci. China (Ser. D)*, 46(Suppl.): 73–83
- Liu SW, Wang ZQ, Yan QR, Li QG, Zhang DH and Wang JG. 2006. Timing, petrogenesis and geodynamic significance of Zheduoshan granitoids. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 343–352 (in Chinese with English abstract)
- Liu WZ, Xu SJ, Wang RC, Zhao LZ, Li HM, Wu JQ and Fang Z. 2005. Zircon U-Pb geochronology of granulites in Panzhihua-Xichang area: New evidence for the Neoproterozoic geological evolution in the western margin of Yangtze Block. *Geological Review*, 51(4):470–476 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101:635–643
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46: 411–429
- Mou CL, Lin SL and Yu Q. 2003. The U-Pb ages of the volcanic rock of the Tianbaoshan Formation, Huili, Sichuan Province. *Journal of Stratigraphy*, 27(3):216–219 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25:956–983
- Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resource (SBGMR). 1991. *Regional Geology of Sichuan Province*. Beijing: Geol. Publ. House (in Chinese)
- Song B, Zhang YH and Liu DY. 2002. Introduction to the naissance of SHRIMP and its contribution to isotope geology. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 23(1):58–61 (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 Special Publication, 42:313–345
- Wang XC, Li XH, Li WX and Li ZX. 2007. Ca. 825Ma komatiitic basalts in South China: First evidence for >1500°C mantle melts by a Rodinian mantle plume. *Geology*, 35: 1103–1106
- Wang Q, Xu JF, Jian P, Bao ZW, Zhao ZH, Li CF, Xiong XL and Ma JL. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47:119–144
- Xiao L, Zhang HF and Ni PZ. 2007. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of Early Neoproterozoic mafic - intermediate intrusions from NW margin of the Yangtze Block, South China: Implication for tectonic evolution. *Precamb. Res.* 154:221–235
- Zhao JH and Zhou MF. 2008a. Neoproterozoic adakitic plutons in the northern margin of the Yangtze Block, China: Partial melting of a thickened lower crust and implications for secular crustal evolution. *Lithos*, 104(1–4): 231–248
- Zhao JX, Chen YL and Li ZH. 2006. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the Kangding Complex and its geological significance. *Geoscience*, 20(3): 378–385 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XF, Zhou MF, Li JW and Wu FY. 2008b. Association of Neoproterozoic A- and I-type granites in South China: Implications for generation of A-type granites in a subduction-related environment. *Chemical Geology*, 257(1–2): 1–15
- Zhou MF, Yan DP, Kennedy AK, Li Y and Ding J. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 196:51–67
- Zhou MF, Ma Y, Yan DP, Xia X, Zhao JH and Sun M. 2006. The Yanbian Terrane (southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block. *Precamb. Res.*, 144:19–38
- Zhu WG, Zhong H, Li XH, Deng HL, He DF, Wu KW and Bai ZJ. 2008. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China. *Precamb. Res.*, 164(1–2):66–85

#### 附中文参考文献

- 陈岳龙, 罗照华, 赵俊香, 李志红, 张宏飞, 宋彪. 2004. 从锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征论四川冕宁康定杂岩的成因. *中国科学(D辑)*, 34(8):687–697
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 任留东, 周喜文, 石玉若, 杨铸生. 2005. 扬子地台西缘盐边群玄武质岩石地球化学特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. *地质学报*, 76(6):805–813
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 周喜文, 任留东, 王彦斌, 杨铸生. 2007. 扬子地台西缘康定群的再认识:来自地球化学和年代学证据. *地质学报*, 81(11):1562–1577
- 耿元生, 杨崇辉, 杜利林, 王新社, 任留东, 周喜文. 2007a. 天宝山组形成时代和形成环境——锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和地球化学证据. *地质论评*, 53(4):556–563
- 耿元生, 杨崇辉, 任留东, 杜利林, 周喜文. 2007b. 扬子地台西缘结晶基底的时代. *高校地质学报*, 13(3):429–441
- 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 杜利林, 任留东, 周喜文. 2008. 扬子地台西缘变质基底演化. 北京:地质出版社
- 刘树文, 王宗起, 闫全人, 李秋根, 张德惠, 王建国. 2006. 折多山花岗岩时代、成因及其动力学意义. *岩石学报*, 22(2):343–352
- 刘文中, 徐士进, 王汝成, 赵连泽, 李惠民, 吴俊奇, 方中. 2005. 攀西麻粒岩锆石 U-Pb 年代学:新元古代扬子古陆块西缘地质演化新证据. *地质论评*, 51(4): 470–476
- 牟传龙, 林仕良, 余谦. 2003. 四川会理天宝山组 U-Pb 年龄. *地层学杂志*, 27(3):216–219
- 四川省地质矿产局. 1991. *四川省区域地质志*. 北京:地质出版社
- 宋彪, 张玉海, 刘敦一. 2002. 微量原位分析仪器 SHRIMP 的产生与锆石同位素地质年代学. *质谱学报*, 23(1):58–61
- 赵俊香, 陈岳龙, 李志红. 2006. 康定杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *现代地质*, 20(3): 378–385