



扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定及其意义

杜利林^{1,2} 耿元生¹ 杨崇辉¹ 王新社¹ 任留东¹ 周喜文¹ 王彦斌^{1,3} 杨铸生⁴

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 北京离子探针中心, 北京 100037; 4. 四川省地质矿产厅攀西地质大队, 四川 西昌 615000)

摘要: 对原划为新太古代-古元古代康定杂岩的雅江桥片麻状奥长花岗岩、花滩奥长花岗岩和磨盘山花岗岩的地球化学分析表明, 其具有低 $Mg^\#$ 、 $Na_2O > K_2O$ 轻重稀土元素强烈分异, 无或略具微弱的负 Eu 异常, 低 Yb_N 、Cr、Ni、V、Nb、Ta、Ti, 高 Ba、Sr 变化较大, 与 TTG 类似。雅江桥奥长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定结果为 778 ± 11 Ma。初步认为本次工作所选的康定杂岩为形成于新元古代的 TTG 花岗岩。结合 TTG 的形成环境和前人研究成果, 认为扬子地台西缘新元古代花岗岩是板块俯冲环境体制下玄武质洋壳部分熔融的产物。

关键词: 扬子西缘, 康定杂岩, TTG, 新元古代, 板块俯冲环境

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)04-0273-09

The stipulation of Neoproterozoic TTG in western Yangtze block and its significance

DU Li-lin^{1,2}, GENG Yuan-sheng¹, YANG Chong-hui¹, WANG Xin-she¹, REN Liu-dong¹,
ZHOU Xi-wen¹, WANG Yan-bin^{1,3} and YANG Zhu-sheng⁴

(1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China;
3. Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China; 4. Panxi Geological Party, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Xichang 615000, China)

Abstract: Geochemical data indicate that Yajiangqiao trondhjemite, Huatan trondhjemite and Mopanshan granite, considered as component parts of Kangding complex formed in Late Archean or Palaeoproterozoic, are similar to TTG in such aspects as low $Mg^\#$, $Na_2O > K_2O$, strong fractionated REE, no or slightly negative Eu anomaly, low Yb_N , Cr, Ni, V, Nb, Ta, Ti, high Ba, and changeable Sr. SHRIMP zircon dating suggests that Yajiangqiao trondhjemite was emplaced in 778 ± 11 Ma. The results of the study show that Kangding complex is composed of Neoproterozoic granites bearing characteristics of TTG. The formation environments of TTG together with the results of previous studies imply that Neoproterozoic granites were formed by melted basaltic ocean crust under the condition of plate subduction along the western margin of Yangtze block.

Key words: western margin of Yangtze block; Kangding complex; TTG; Neoproterozoic; plate subduction

近年来, 新元古代 Rodinia 超级大陆研究成为热点, 扬子地台周围该时期岩浆活动引起了国内地质界的关注, 并获得了许多新的同位素和地球化学资料(李献华, 1998, 1999; 李献华等, 2001a; 凌文黎等,

2000; 葛文春等, 2001a, 2001b; 邱检生等, 2002; 周金城等, 2003; 李武显等, 2004; 薛怀民等, 2004; Li, 1999; Li *et al.*, 2003b; Li W X and Li X H, 2003; Ling *et al.*, 2003) 沿扬子地台西缘自北向南约 600 km

范围内,新的同位素年代学和地球化学资料证实存在有大量新元古代中酸性岩浆(徐士进等,1996;郭建强等,1998;喻安光等,1999;沈渭洲等,2000;李献华等,2001b,2002a,2002b;陈岳龙等,2004;Zhou *et al.*,2002;Li X H *et al.*,2003a;Li Z X *et al.*,2003)和一些基性岩浆活动(徐士进等,1998;沈渭洲等,2002a,2002b;2003a,2003b;朱维光等,2004)。对于该时期岩浆活动形成的构造环境存在地幔柱(李献华等,2001b,2002a,2002b;Li X H *et al.*,2002,2003a,2003b;Li Z X *et al.*,2003;朱维光等,2004)和岛弧环境(颜丹平等,2002;Zhou *et al.*,2002;沈渭洲等,2003b)两种明显不同的成因观点。

本次工作选取原康定杂岩中雅江桥片麻状奥长花岗岩(1:50 000 金江幅划为混合岩)、花滩奥长花岗岩和磨盘山花岗岩,通过岩相学观察、岩石地球化学分析,并选取了雅江桥奥长花岗岩样品进行锆石离子探针年龄测试。

1 样品地质背景

雅江桥片麻状奥长花岗岩和花滩奥长花岗岩野外呈浅灰色,弱片麻状构造,细-中粒结构,主要组成矿物分别为长石、石英、黑云母和角闪石,其东部为呈不整合覆盖的三叠纪石英砂岩、泥质岩和第三纪泥质岩、钙质粉砂岩,西部与三叠纪石英砂岩、泥质岩呈断层接触,两者之间也呈断层接触(图1a)。具体采样位置:雅江桥奥长花岗岩(CX123-1:26°

36.672'N,101°47.911'E),花滩奥长花岗岩(CX124-1:26°38.650'N,101°49.281'E)。磨盘山花岗岩野外呈浅灰色,弱片麻状构造,中粒结构,露头上可见近于同期的英云闪长岩侵入花岗岩中,主要的组成矿物为长石、石英、少量角闪石和黑云母,其东部为第四系覆盖,西部与侏罗纪地层呈断层接触(图1b),具体采样位置: CX49-2(27°42.015'N,102°05.005'E), CX50-1(27°41.838'N,102°05.163'E), CX51-1、CX51-2(27°41.907'N,102°05.377'E), CX52-1(27°42.311'N,102°05.797'E)。

2 岩相学特征

镜下雅江桥奥长花岗岩具碎裂结构,弱片麻状构造,主要组成矿物为斜长石、钾长石、石英、黑云母和少量的角闪石。斜长石主要为奥长石,含量50%左右,呈半自形板状-他形粒状,粒度多为1~3 mm,具细密平直的聚片双晶,但可能由于构造应力双晶纹略显弯曲,绢云母化和高岭土化较强烈,钾长石主要为条纹长石,含量10%左右,他形粒状,粒度1~2 mm;石英含量20%~25%,呈他形粒状,粒度大小不等,具波状消光;黑云母含量10%,呈片状定向分布,单偏光下多色性明显,部分可能由角闪石退变而来。通过对其野外和岩相学观察认为不具有混合岩特征,名称应为黑云母奥长花岗岩。

花滩奥长花岗岩镜下具半自形粒状结构,主要组成矿物为奥长石、石英和少量角闪石。奥长石含

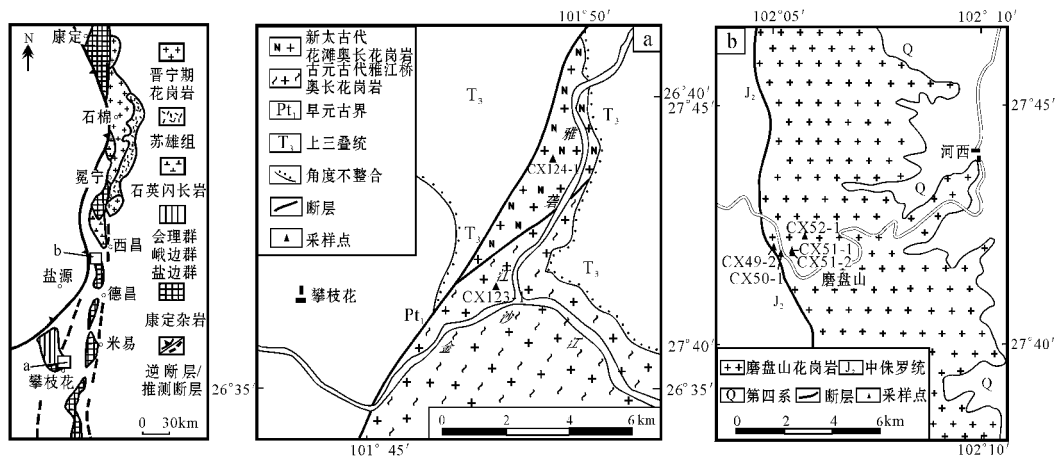


图1 扬子西缘部分康定杂岩地质略图①②

Fig. 1 Geological map of part of Kangding complex in Western Yangtze craton

① 成都理工学院, 1998. 中华人民共和国 1:5 万地质图金江幅.

② 四川省地质局第一区测队, 1965. 中华人民共和国 1:20 万地质图西昌幅.

量 70%~75% ,呈自形-半自形板状 粒度 2~4 mm ,强烈绢云母化 ;石英含量 20% ,他形粒状 ;角闪石含量小于 5% ,他形粒状 ,粒度小于 1 mm ,多已发生绿泥石化和绿帘石化。

磨盘山花岗岩为细-中粒半自形粒状结构 ,主要组成矿物为斜长石、石英和少量黑云母。斜长石含量 60%~65% ,自形-半自形板状 粒度 1~2 mm ,斜长石为中长石和奥长石 ,其中含中长石稍多。中长石环带异常发育 ,核部绢云母化 ,而奥长石发育密集的聚片双晶 ;石英含量 20%~25% ,他形粒状 ,粒度 2~3 mm ;黑云母含量小于 10% ,呈细小片状分布。CX51-1 样品与其他不同 ,镜下为似斑状结构 ,斑晶为中长石 ,含量 10% 左右 ,基质粒度小于 0.5mm ,主要为奥长石、石英和黑云母 ,其中黑云母含量 10% 左右 ,呈片状杂乱分布。

3 地球化学特征

在康定杂岩样品岩石化学分析表(表 1)中 SiO_2 含量为 69.09%~74.19% , Al_2O_3 为 13.15%~16.09% , $Na_2O > K_2O$, $Al_2O_3 / (K_2O + Na_2O + CaO)$ (摩尔数)值多在 1.01~1.08 之间(只有 1 个样品为 1.16) ,多小于 1.1 ,具 I 型花岗岩特征。 $Mg^\#$ 值在

0.37~0.44 之间(典型的 TTG 小于 0.45) 。在 AFM 分类图上位于钙碱性岩区 ,并靠近 A 端员 ,和平均 Adakite 成分(Condie , 2005)具有一定的差别 ,且 MgO 含量普遍较 Adakite 岩低(图 2a) ;在 K - Na - Ca 图解中 ,样品点大多与太古宙 TTG 不同 ,而与元古宙和古生代 TTG 类似(Condie , 2005) ,具钙碱性的演化趋势(图 2b) ;在 Q - Ab - Or 标准矿物图解(图 2c)中 ,与典型的钙碱性岩不同 ,样品点具有沿奥长花岗岩趋势线分布的特征 ;在 An - Ab - Or 标准矿物图解中(图 2d) ,多落入花岗闪长岩、英云闪长岩和奥长花岗岩区域(只有 1 个样品点落在花岗岩区域) 。稀土元素总量在 $87.61 \times 10^{-6} \sim 132.77 \times 10^{-6}$ 之间 , Yb_N 为 2.93~4.90 之间(TTG 中 , Yb_N 为 0.3~8.5) ,与太古宙后的花岗质岩石明显不同 ; $(La/Yb)_N$ 在 13.6~24.3 之间 [TTG 中 $(La/Yb)_N$ 为 5~150 之间] (Martin , 1993 , 1994) (表 1) 。在球粒陨石标准化的稀土元素配分图解中(图 3) 轻重稀土元素显示强烈分异的特点 ,无或略具微弱的负铈异常 ,而与一般有明显负铈异常的壳源成因花岗岩区别明显。微量元素分析表中(表 1) 相容性元素 V、Cr、Co、Ni 和高场强元素 Nb、Ta 低 ,高 Ba ,而 Sr 含量变化范围较大(可能与源区中无斜长石残留有关 ,其中低 Sr 样品皆表现为微弱负 Eu 异常) ,与

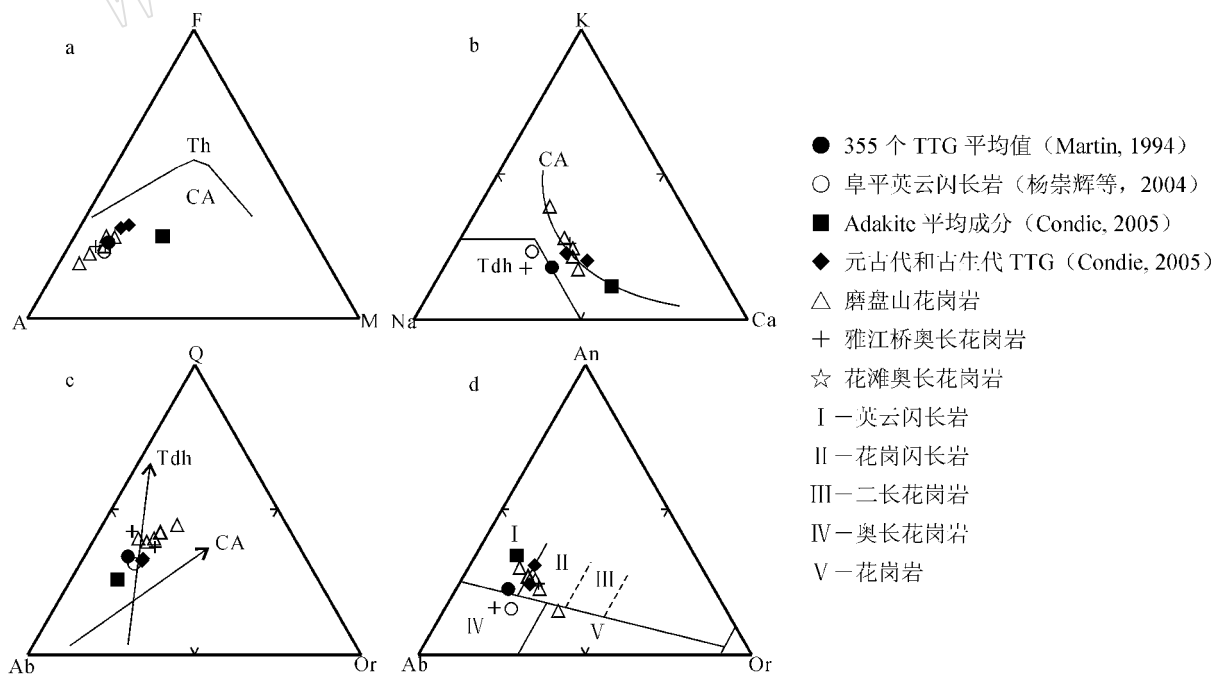


图 2 康定杂岩地球化学分类判别图解

Fig. 2 Geochemical classification of Kangding complex

表1 花岗岩主量元素($w_B/\%$)、稀土元素和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析表Table 1 Major element ($w_B/\%$), REE and trace element ($w_B/10^{-6}$) data of granites

样品号	CX49-2	CX50-1	CX51-1	CX51-2	CX52-1	CX123-1	CX124-1	TTG1	TTG2	TTG3	Adakite	FP
SiO ₂	72.14	70.17	69.09	69.98	74.19	69.93	72.66	69.79	67.3	65.9	62.34	70.05
TiO ₂	0.25	0.31	0.33	0.33	0.21	0.30	0.24	0.34	0.47	0.47	0.67	0.31
Al ₂ O ₃	14.12	15.08	16.09	15.51	13.15	15.30	14.68	15.56	15.8	16.5	17.05	14.97
Fe ₂ O ₃	0.72	0.94	1.42	1.42	0.76	1.47	1.22	3.12	4.04	4.11	3.99	0.51
FeO	1.35	1.51	1.38	1.52	0.97	1.26	1.13	—	—	—	—	2.06
MnO	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.08	0.07	0.05	0.08	0.09	0.08	0.07
MgO	0.68	1.02	1.16	0.95	0.54	1.11	0.75	1.18	1.48	1.67	3.31	1.3
CaO	2.80	3.32	3.88	3.55	1.77	3.26	1.98	3.19	3.42	4.36	6.53	2.24
Na ₂ O	3.69	3.79	4.02	4.00	3.30	3.93	4.61	4.88	4.33	4.00	4.25	4.97
K ₂ O	2.52	2.29	1.64	2.07	3.23	2.57	1.41	1.76	2.30	2.14	1.42	2.2
P ₂ O ₅	0.08	0.10	0.12	0.12	0.07	0.09	0.10	0.13	0.14	0.12	0.26	0.13
CO ₂	0.12	0.39	0.12	0.21	0.30	0.39	0.21	—	—	—	—	0.36
Al/(K+Na+Ca)	1.02	1.02	1.04	1.02	1.08	1.01	1.16	0.99	1.00	0.98	0.84	1.02
Mg [#]	0.38	0.44	0.44	0.38	0.37	0.43	0.38	0.43	0.43	0.45	0.62	0.48
La	24.0	23.5	19.8	28.4	20.0	32.5	28.1	32	26	17	24	34.82
Ce	46.5	45.3	38.0	53.4	37.5	62.2	49.4	56	45	34	65	65.44
Pr	5.11	4.94	4.34	5.66	4.21	5.85	5.29	—	—	—	—	6.26
Nd	18.5	17.4	15.6	19.4	15.2	20.1	18.2	21.4	18	16	26	25.71
Sm	3.26	2.70	2.70	3.13	2.91	3.01	2.61	3.3	3.5	3.1	4.7	3.67
Eu	0.75	0.76	0.83	0.86	0.63	0.95	0.88	0.92	0.95	0.84	1.37	0.89
Gd	2.58	2.03	2.09	2.18	2.04	2.50	1.77	2.2	3	2.8	2.30	3.89
Tb	0.37	0.30	0.31	0.31	0.34	0.38	0.22	0.31	0.49	0.40	0.40	0.39
Dy	2.12	1.63	1.71	1.76	1.87	1.97	1.16	1.16	—	—	—	1.98
Ho	0.42	0.29	0.31	0.32	0.34	0.42	0.23	—	—	—	—	0.44
Er	1.25	0.89	0.91	0.93	0.93	1.25	0.70	0.59	—	—	—	1.19
Tm	0.16	0.12	0.12	0.12	0.13	0.20	0.12	—	—	—	—	0.15
Yb	1.16	0.73	0.78	0.77	0.84	1.22	0.90	0.55	1.33	1.16	0.81	0.68
Lu	0.18	0.12	0.11	0.10	0.12	0.22	0.17	0.12	0.23	0.18	0.09	0.10
Y	12.0	8.59	8.74	9.43	9.91	12.1	7.42	7.5	17.3	14.5	9.7	9.02
V	27.7	30.0	29.0	29.3	18.1	41.6	19.9	35	—	—	—	—
Cr	6.9	12.3	12.1	6.23	3.91	11.3	6.04	29	55	32	82	7.5
Co	5.10	7.56	7.51	6.82	3.67	6.53	3.57	—	—	—	—	4.2
Ni	2.50	5.77	3.87	2.87	<2.00	2.79	<2.00	14	23	12	64	4
Ga	17.2	16.7	18.0	17.6	14.8	16.3	14.2	—	—	—	—	19
Rb	66.6	56.9	50.5	59.5	85.3	51.7	29.1	55	63	63	15	83
Sr	266	294	311	308	186	477	592	454	473	493	1550	387
Ba	739	630	532	644	459	1028	793	690	717	716	309	795
Th	3.84	2.66	2.53	4.09	6.31	6.59	3.14	6.9	6.1	7.6	3.9	6.4
Sc	4.72	6.07	6.33	5.68	3.79	6.13	3.14	4.7	—	—	—	4.1
Pb	16.1	13.8	8.22	13.6	18.4	14.5	12.3	—	—	—	—	—
U	0.68	0.46	0.20	0.59	0.62	0.41	0.23	1.6	2.1	1.9	1.2	0.2
Zr	131	132	130	185	120	129	168	152	152	122	117	104
Nb	7.8	7.4	6.1	6.8	7.7	7.4	5.7	6.4	7.1	6.7	9.7	5.3
Hf	3.81	3.36	3.30	4.91	4.83	3.85	4.49	4.5	4.3	3.4	3.3	2.8
Ta	0.49	0.33	0.25	0.38	0.38	0.42	0.28	0.71	0.72	0.75	0.60	0.5

分析单位: 国家地质实验测试中心, 主量元素利用 X 荧光光谱仪(3080E)测定, 分析的相对标准偏差小于 2%~8%; 微量元素 Nb、Zr、Rb、Sr、Ba、Ga、Pb、V 利用 X 荧光光谱仪(RIX2100)测定, 分析的相对标准偏差小于 5%; 稀土元素和其他微量元素利用 ICP-MS(Excell)测定, 分析的相对标准偏差小于 10%; TTG¹ 为 355 个 TTG 平均值(Martin, 1994); TTG²、TTG³ 和 Adakite 为元古宙、古生代 TTG 和埃达克岩(Condie, 2005); FP 为英云闪长岩(杨崇辉等, 2004)。

典型的 Adakite 岩有一些差别。在大洋中脊玄武岩标准化的微量元素配分图解中,整体配分曲线呈明显的右倾模式,Nb、Ta、P 和 Ti 有明显的亏损,与 TTG 类似(图 4)。在花岗岩的 Nb-Y 构造环境判别图解中,康定杂岩样品点皆落在火山弧与同碰撞花岗岩区内,在 Rb-Y+Nb 判别图解中,所选样品皆落入火山弧花岗岩区内(Pearce *et al.*, 1984)(图 5)。

4 锆石特征及 U-Pb 年龄

本次工作选择了雅江桥奥长花岗岩样品(CX123-1)进行锆石内部结构研究和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测试。测试在北京离子探针中心完成,具体分析见 Williams(1998)。锆石样品多为短柱状至长柱状,长宽比多为 1.2~1.3 左右。在阴极发光(CL)图像(图 6)中,所有的锆石都具有密集规则的环带,并且 Th/U 比值皆大于 0.2(表 2),岩浆特

征明显(Rowley *et al.*, 1997; Keay *et al.*, 1999; Hoskin & Black, 2000)。由于部分锆石测点普通铅含量稍高,测试数据结果采用²⁰⁴Pb校正偏离谐和线较大,所以采用²⁰⁸Pb进行校正。对所测定的 18 个点做加权平均,获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 778±11 Ma(图 7)。

5 初步结论及意义

Zhou 等(2002)对扬子西缘的原康定群中康定杂岩、贡才杂岩、格宗杂岩和米易杂岩进行了地球化学研究,认为扬子西缘的康定杂岩具有 TTG 或 Adakite 的特征。笔者分析 Zhou 等(2002)数据发现,其中的花岗岩 Mg[#] 值小于 45,而 Adakite 中 Mg[#] 值为~51(Martin *et al.*, 2005);同时 Na₂O>K₂O 不同于 Adakite。本次工作中康定杂岩与典型 TTG(Martin, 1993, 1994)和阜平地区 TTG 中英云闪长岩特征相似(杨崇辉等, 2004),而 Mg[#]、Cr、Ni、

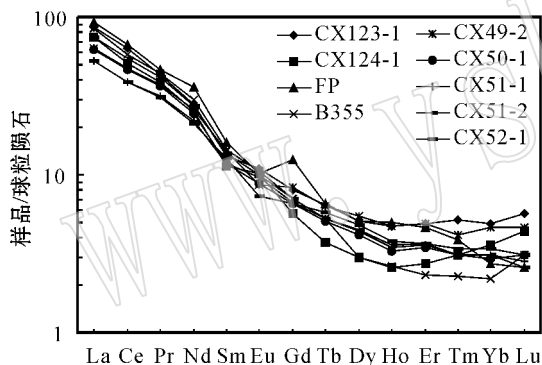


图 3 康定杂岩稀土元素配分图解

Fig. 3 Chondrite-normalized REE pattern of Kangding complex

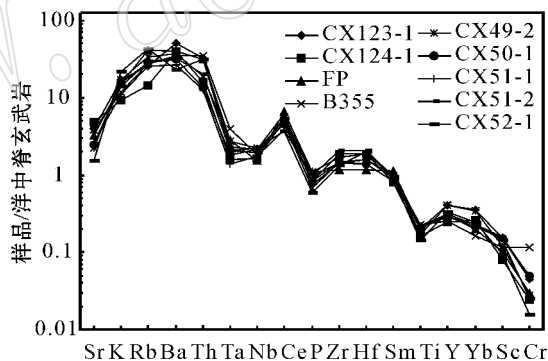


图 4 康定杂岩微量元素配分图解

Fig. 4 Trace element pattern of Kangding complex

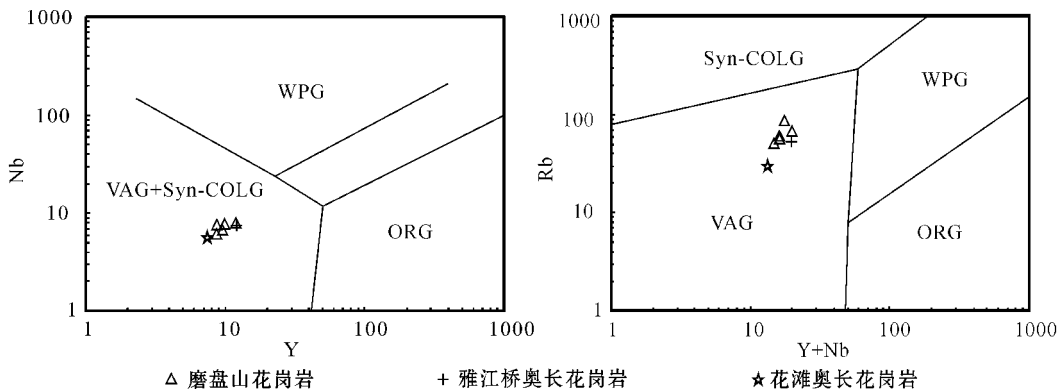


图 5 康定杂岩 Nb-Y, Rb-Y+Nb 构造环境判别图解

Fig. 5 Tectonic discrimination of Nb-Y and Rb-Y+Nb for Kangding complex

表 2 雅江桥奥长花岗岩(CX123-1)锆石 SHRIMP 分析数据

Table 2 Zircon SHRIMP data of Yajiangqiao trondhjemite(CX123-1)

点号	²⁰⁶ Pb _c /%	U	Th	²⁰⁶ Pb* /ε ₂₃₈ U	²³² Th /ε ₂₃₈ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 年龄/Ma	不谐和 性/%	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb* ± %	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U ± %	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U ± %	误差 相关性			
1.1	0.21	147	134	16.5	0.94	778 ± 15	1 101 ± 41	28	0.065 0	2.4	1.150	2.9	0.128 3	1.7	0.612
1.2	0.06	712	563	75.4	0.82	747 ± 12	846 ± 21	12	0.064 41	0.99	1.090	1.8	0.122 8	1.5	0.822
2.1	0.05	1 196	1 270	138	1.10	812 ± 14	840 ± 12	4	0.068 68	0.56	1.270	1.7	0.134 2	1.6	0.926
3.1	0.19	491	427	53.1	0.90	763 ± 20	854 ± 21	11	0.068 18	0.95	1.182	2.6	0.125 7	2.4	0.921
4.1	0.33	242	220	27.8	0.94	806 ± 14	1 009 ± 46	20	0.070 9	2.0	1.301	2.6	0.133 1	1.6	0.549
5.1	1.64	391	391	45.4	1.03	746 ± 17	2 059 ± 48	61	0.065 7	3.9	1.110	4.2	0.122 6	1.6	0.479
6.1	0.11	499	425	54.6	0.88	772 ± 13	825 ± 23	7	0.066 49	0.95	1.166	1.8	0.127 2	1.5	0.794
7.1	0.44	402	330	44.5	0.85	779 ± 13	792 ± 40	2	0.065 97	1.5	1.168	2.2	0.128 4	1.6	0.602
8.1	0.46	174	207	20.1	1.23	801 ± 16	921 ± 48	12	0.060 0	1.8	1.095	2.5	0.132 3	1.7	0.558
9.1	0.25	523	372	57.9	0.74	780 ± 13	826 ± 26	6	0.067 21	0.99	1.191	1.8	0.128 6	1.5	0.755
10.1	0.43	455	307	52.5	0.70	808 ± 13	802 ± 37	-1	0.066 08	1.0	1.217	1.9	0.133 5	1.6	0.632
11.1	1.83	29	23	3.40	0.82	773 ± 24	1 634 ± 120	51	0.0613	5.5	1.076	6.0	0.127 2	2.3	0.347
12.1	0.21	628	327	67.6	0.54	759 ± 12	812 ± 24	7	0.065 66	0.87	1.131	1.8	0.124 9	1.6	0.784
12.2	0.53	149	64	18.0	0.45	827 ± 19	1 183 ± 57	29	0.066 2	3.4	1.248	4.1	0.136 8	2.2	0.591
13.1	0.44	213	193	23.1	0.94	760 ± 14	1 067 ± 120	29	0.070 5	6.0	1.215	6.2	0.125 1	1.6	0.255
14.1	0.13	295	207	32.7	0.73	775 ± 14	1 008 ± 40	23	0.066 5	2.1	1.171	2.6	0.127 8	1.6	0.611
15.1	0.18	535	481	59.7	0.93	786 ± 13	793 ± 26	1	0.065 54	1.0	1.172	1.9	0.129 7	1.5	0.761
15.2	1.62	58	58	6.34	1.03	748 ± 18	1 179 ± 180	36	0.069 7	9.0	1.18	9.2	0.122 9	2.0	0.209

分析单位: 中国地质科学院地质研究所 北京离子探针中心, 误差为 1σ, Pb_c 和 Pb* 分别代表普通铅和放射成因铅, 标准校正误差为 0.36%。

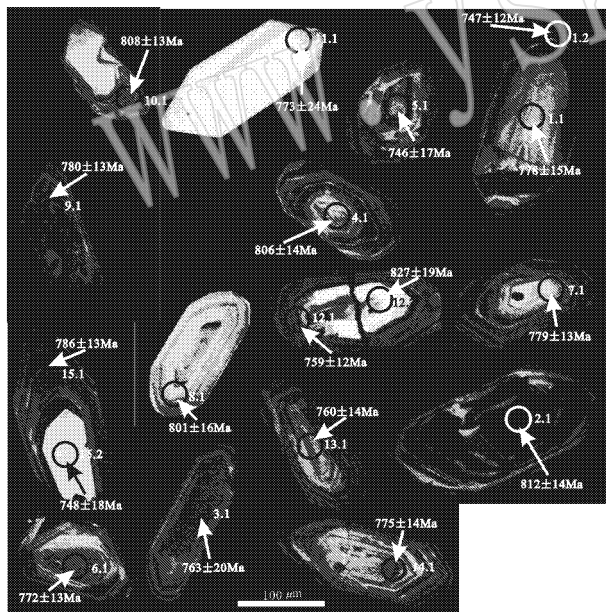


图 6 雅江桥奥长花岗岩锆石 CL 图像

Fig. 6 CL images of zircon from Yajiangqiao granodiorite

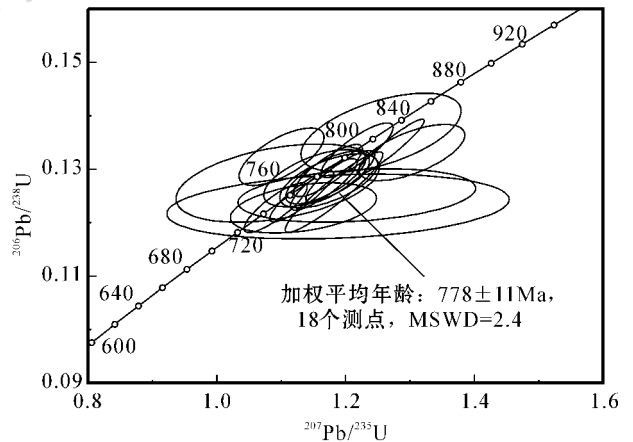


图 7 雅江桥奥长花岗岩锆石 U-Pb 年龄

Fig. 7 U-Pb concordia diagram of zircons from Yajiangqiao granodiorite

V 和 Sr 与 Adakite 具有很大的差别 (Condie, 2005; Martin *et al.*, 2005)。雅江桥奥长花岗岩与花滩奥长花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t = 0.8 \text{ Ga})$ 为 0.66 和 1.31, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t = 0.8 \text{ Ga})$ 为 0.705 275 和 0.704 761 (详细资料将另文发表), 表明其岩浆源于玄武岩或壳幔

混合岩源区。但是, 所有花岗岩样品中具低的 $\text{Mg}^\#, \text{Cr}, \text{Ni}, \text{V}$ 值, 同时花岗岩中无基性幔源包体发现, 证明其物源不是来自壳幔混合源区。花岗岩的形成是玄武岩在较高压力环境下部分熔融的产物。

雅江桥奥长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $778 \pm 11 \text{ Ma}$, 表明其形成时代为新元古代。磨盘山杂岩的锆石 U-Pb 年龄为 $776 \pm 2 \text{ Ma}$ (胥德恩等, 1995), 与近年来新的年代学资料是一致的 (Zhou

et al., 2002; Li Z X *et al.*, 2003; 陈岳龙等, 2004)。

目前, 据 TTG 特殊的地球化学特征, 就其成因形成了较为一致的观点: TTG 为石榴石角闪岩或角闪榴辉岩的部分熔融, 在熔融过程中石榴石和角闪石作为残留相存在 (Rapp *et al.*, 1991; Martin, 1993, 1994, 1999; 程裕淇等, 2004)。虽然, TTG 的具体形成环境近年来出现了加厚地壳底部含水玄武质岩石熔融 (Smithies *et al.*, 2000) 下地壳底侵玄武岩的部分熔融 (肖龙等, 2004) 弧体系或太古宙大洋高原根部含水镁铁质岩部分熔融 (Condie, 2005) 观点, 但多数学者认为 TTG 形成于板块俯冲环境, 与俯冲大洋板片的熔融有关 (Defant *et al.*, 1990, 2004; Drummond *et al.*, 1990; Martin, 1993, 1994, 1999; Martin *et al.*, 2002, 2005; Foley *et al.*, 2002, 2003; Smithies *et al.*, 2003)。如前所述, 扬子西缘新元古代岩浆活动形成的构造环境存在地幔柱和岛弧环境两种明显不同观点, 结合前人的研究和本次工作, 笔者认为沿扬子地台西缘从南至北呈狭长带状出现的许多新元古代花岗岩具有 TTG 的特征, 同时在花岗岩中也缺少由于地幔柱底侵形成的基性幔源岩浆包体, 因此认为扬子地台西缘新元古代可能为典型的板块俯冲环境, 大量的岩浆活动与板块俯冲有关, 而不是地幔柱活动的产物。

致谢: 伍家善研究员在岩相学观察方面进行指导, 离子探针中心工作人员在锆石年代学测试中给予支持, 审稿专家和编辑部对本文提出宝贵的修改建议。在此, 衷心地表示感谢!

References

- Chen Yuelong, Luo Zhaohua, Zhao Junxiang, *et al.*, 2005. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province [J]. *Science in China (Series D)*, 48(5): 622~634.
- Cheng Yuqi, Yang Chonghui, Wan Yusheng, *et al.*, 2004. Early Precambrian Geology and Anatexis Reconstruction to Crust in Mid-north Part of Taihang Mountain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 41~67 (in Chinese).
- Condie K C. 2005. TTG and adakites: are they both slab melts? [J]. *Lithos*, 80: 33~44.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 347(18): 662~665.
- Defant M J, Xu Jifeng, Kepezzhinskas P, *et al.*, 2002. Adakites: some variations on a theme [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129~142 (in English with Chinese abstract).
- Drummond M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemitic-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: archean to modern comparisons [J]. *Journal of Geophysical Research*, 95 (B13): 21 503~21 521.
- Foley S F, Tiepolo M and Vannucci R. 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones [J]. *Nature*, 417(20): 837~840.
- Foley S F, Buhre S and Jacob Dorrit E. 2003. Evolution of the Archaean crust by delamination and shallow subduction [J]. *Nature*, 421(16): 249~252.
- Ge Wenchun, Li Xianhua, Li Zhengxiang, *et al.*, 2001a. Mantle source and tectonic settings for the volcanic rocks from Danzhou group in Longsheng area, Northern Guangxi [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*. 31(1): 20~24 (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Li Xianhua, Liang Xirong, *et al.*, 2001b. Geochemistry and geological implications of mafic-ultramafic rocks with the age of ~825 Ma in Yuanbaoshan-Baotan area of northern Guangxi [J]. *Geochimica*, 30(2): 123~130 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jianqiang, You Zaiping, Yang Jun, *et al.*, 1998. Studying on the U-Pb dating of zircon in Tianwan and bianlugang bodies from Shimian area, West Sichuan [J]. *Journal of Mineral and Petrology*, 18(1): 71~74 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Keay S, Steele D and Compston W. 1999. Identifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: an application to the Lachlan foldbelt [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 137: 323~341.
- Li Wu-Xian and Li Xian-hua. 2003. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, Southern China: geochemical and Nd isotopic evidence [J]. *Precambrian Research*, 122: 29~44.
- Li Wuxian and Li Xianhua. 2004. Adakitic granites within the NE Jiangxi Ophiolites, South China—geochemical and Nd isotopic evidence [J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(2): 199~208 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua. 1998. The Jinning orogeny in Southeast China: geochronological and geochemical constraints [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 41 (Supp): 184~194 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua. 1999. U-Pb zircon ages of granites from northern Guangxi and their tectonic significance [J]. *Geochimica*, 28(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Li X H. 1999. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: timing of Neoproterozoic Jinning Orogeny in SE China and implications for Rodinia Assembly [J]. *Precambrian Research*, 97: 43~57.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Ge Wenchun, *et al.*, 2001a. U-Pb zircon ages of the Neo-proterozoic granitoids in southern China and their tectonic implications [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. 20(4): 271~273 (in Chinese with English abstract).
- Li Xian-Hua, Li Zheng-Xiang, Zhou Hanwen, *et al.*, 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: implications for the initial rifting of Rodinia [J]. *Precambrian Research*, 113: 135~154.

- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, *et al.* 2001b. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristics of the Neoproterozoic bimodal volcanics from western Yangtze block [J]. *Geochemica*, 30(4): 315~322 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, *et al.* 2002a. Petrogenesis of Neoproterozoic bimodal volcanics in Western Sichuan and its tectonic implications: geochemical and Sm-Nd isotopic constrain [J]. *Chinese Journal of Geology*, 37(3): 264~276 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, *et al.* 2002b. U-Pb zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of Neoproterozoic basaltic magmatism in Western Sichuan: petrogenesis and geodynamic implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 329~338 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, *et al.* 2003a. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan pluton in SW Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance [J]. *Science in China (Series D)*: 73~83.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Ge Wenchun, *et al.* 2003b. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma [J]. *Precambrian Research*, 122 :45~83.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, *et al.* 2003. 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 [J]. *Precambrian Research*, 122 :85~109.
- Ling Wenli and Cheng Jianping. 2000. Significance and reconstruction of Rodinia Supercontinent and Jinningian tectonics in South China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 19(3):7~11 (in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Gao Shan, Zhang Benren, *et al.* 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northern Yangtze craton, South China: implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent [J]. *Precambrian Research*, 122 :111~140.
- Martin H. 1993. The mechanisms of petrogenesis of the Archean continental crust — Comparison with modern processes [J]. *Lithos*, 30 : 373~388.
- Martin H. 1994. The Archean grey gneisses and the genesis of the continental crust [A]. *Condie K C. The Archean Crustal Evolution [C]*. Elsevier, 205~259.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoid [J]. *Lithos*, 46 :411~429.
- Martin H and Moyen J F. 2002. Secular changes in tonalite-trondhjemite-granodiorite composition as markers of the progressive cooling of Earth [J]. *Geology*, 30(4):319~322.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, *et al.* 2005. An overview of Adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution [J]. *Lithos*, 79 :1~24.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25 :956~983.
- Qiu Jiansheng, Zhou Jincheng, Zhang Guanghui, *et al.* 2002. Geochemistry and petrogenesis of Precambrian granitoid rocks in north Guangxi [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(3):197~208 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Watson E B and Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities [J]. *Precambrian Research*, 51 :1~25.
- Rowley D B, Xue F, Tucker R D, *et al.* 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and prolioth orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 151 :191~203.
- Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, *et al.* 2002a. Sm-Nd dating and Nd-Sr isotopic study of the Shimian ophiolite, Sichuan Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(20):1592~1595.
- Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, *et al.* 2002b. Geochemical characteristics and genesis of the Qiaotou basic complex, Luding county, Western Yangtze block [J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(4):380~389 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, *et al.* 2003a. Geochemical characteristics of the Shimian Ophiolite, Sichuan Province and its tectonic significance [J]. *Geological Review*, 49(1):17~27 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, *et al.* 2003b. Format on age and geochemical characteristics of the Lengshuiqing body, Yanbian, Sichuan province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1):27~37 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Li Huimin, Xu Shijin, *et al.* 2000. U-Pb chronological study of zircons from the Huangcaoshan and Xiasuozhi granite in the western margin of Yangtze plate [J]. *Geological Journal of China Universities*, 6(3):412~416 (in Chinese with English abstract).
- Smithies R H. 2000. The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 182 :115~125.
- Smithies R H and Champion D C. 2000. The Archean high-Mg diorite suite: link to tonalite-trondhjemite-granodiorite magmatism and implications for early Archean crustal growth [J]. *Journal of Petrology*, 41(12):1653~1671.
- Smithies R H, Champion D C and Cassidy K F. 2003. Formation of Earth's early Archean continental crust [J]. *Precambrian Research*, 127 :89~101.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [A]. *Mickibben M A, Shanks III W C and Ridley W I. Applications of Micro Analytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes [C]*. *Reviews Econ. Geol.*, 7 :1~35.
- Xiao Long, Rapp P R and Xu Jifeng. 2004. The role of deep processes controls on variation of compositions of adakitic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2):219~228 (in Chinese with English abstract).
- Xu De'en, Chen Youliang, Zhang Yingquan, *et al.* 1995. The study on the age and origin of the Kangding Complex [J]. *Geological Review*, 41(2):101~111 (in Chinese with English abstract).
- Xu Shijin, Shen Weizhou, Wang Rucheng, *et al.* 1998. U-Pb dating of zircon grains from the ore-bearing palgioclase amphibolite in the Dashuigou Te deposit [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(17):1486~1489.
- Xu Shijin, Wang Rucheng, Shen Weizhou, *et al.* 1996. U-Pb and Rb-Sr isotopic dating of the Jinning granites in the Songpan-Ganzi orogenic belt and their tectonic significance [J]. *Science in China* (Se-

- ries D): 26(1): 52~58.
- Xue Huaimin, Liu Dunyi, Dong Shuwen, *et al.* 2004. U-Pb SHRIMP zircon ages of the Qichun granitoids, Hubei Province: Discovery of Neoproterozoic weakly metamorphosed-unmetamorphosed granitoid in the Dabie Mountain [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 81~88 (in Chinese with English abstract).
- Yan Danping, Zhou Meifu, Song Honglin, *et al.* 2002. Where was South China located in the reconstruction of Rodinia? [J]. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 249~256 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chonghui, Du Lilin, Wan Yusheng, *et al.* 2004. SHRIMP zircon U-Pb chronology of tonalitic gneiss in Banqiaogou area, Pingshan county, Hebei Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(4): 514~522 (in Chinese with English abstract).
- Yu Anguang and Chen Yulu. 1999. Discussion on age of the presinian "Kangding complex" in Shimian, Sichuan [J]. *Geological Journal of Sichuan Province*, 19(3): 200~203 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng, *et al.* 2003. Litho-geochemistry of Meso- and Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks from northern Guangxi [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 9~18 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Mei-Fu, Yan Dan-Ping, Kennedy Allen K, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 51~67.
- Zhu Weiguang, Deng Hailin, Liu Bingguang, *et al.* 2004. The age of the Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex in the Yanbian area, Sichuan Province: Geochronological constraints by U-Pb dating of single zircon grains and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of hornblende [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(10): 1077~1085.
- 附中文参考文献**
- 陈岳龙, 罗照华, 赵俊香, 等. 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 [J]. *中国科学(D辑)*, 34(8): 687~697.
- 程裕淇, 杨崇辉, 万渝生, 等. 2004. 太行山中北段早前寒武纪地质和深熔作用对地壳岩石的改造 [M]. 北京: 地质出版社, 41~67.
- Defant M J, 许继峰, Kepezhinskas P, 等. 2002. 埃达克岩: 关于其成因的一些不同观点 [J]. *岩石学报*, 18(2): 129~142.
- 葛文春, 李献华, 李正祥, 等. 2001a. 桂北龙胜丹洲群火山岩的地幔源区及大地构造环境 [J]. *长春科技大学学报*, 31(1): 20~24.
- 葛文春, 李献华, 梁细荣, 等. 2001b. 桂北元宝山宝坛地区约 825 Ma 镁铁-超镁铁岩的地球化学及其地质意义 [J]. *地球化学*, 30(2): 123~130.
- 郭建强, 游再平, 杨军, 等. 1998. 川西石棉地区田湾与扁路岗岩体的锆石 U-Pb 定年 [J]. *矿物岩石*, 18(1): 71~74.
- 李武显, 李献华. 2004. 赣东北蛇绿岩中的埃达克型花岗岩——地球化学和 Nd 同位素证据 [J]. *高校地质学报*, 10(2): 199~208.
- 李献华. 1998. 华南晋宁期造山运动——地质年代学和地球化学制约 [J]. *地球物理学报*, 41(增刊): 184~194.
- 李献华. 1999. 广西北部新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义 [J]. *地球化学*, 28(1): 1~9.
- 李献华, 李正祥, 葛文春, 等. 2001a. 华南新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 271~273.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 2001b. 扬子地块西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征 [J]. *地球化学*, 30(4): 315~322.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 2002a. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和 Sm-Nd 同位素制约及其大地构造意义 [J]. *地质科学*, 37(3): 264~276.
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 2002b. 川西新元古代玄武质岩浆岩的锆石 U-Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究: 岩石成因与地球动力学意义 [J]. *地学前缘*, 9(4): 329~338.
- 凌文黎, 程建萍. 2000. Rodinia 研究意义、重建方案与华南晋宁期构造运动 [J]. *地质科技情报*, 19(3): 7~11.
- 邱检生, 周金城, 张光辉, 等. 2002. 桂北前寒武纪花岗岩类岩石的地球化学与成因 [J]. *岩石矿物学杂志*, 21(3): 197~208.
- 沈渭洲, 李惠民, 徐士进, 等. 2000. 扬子板块西缘黄草山和下索子花岗岩体锆石 U-Pb 年代学研究 [J]. *高校地质学报*, 6(3): 412~416.
- 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 等. 2002a. 四川石棉蛇绿岩套的 Sm-Nd 及 Nd-Sr 同位素特征 [J]. *科学通报*, 47(20): 1592~1595.
- 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 等. 2002b. 扬子板块西缘泸定桥头基性杂岩体的地球化学特征和成因 [J]. *高校地质学报*, 8(4): 380~389.
- 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 等. 2003a. 四川石棉蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义 [J]. *地质论评*, 49(1): 17~27.
- 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 等. 2003b. 四川盐边冷水箐岩体的形成时代和地球化学特征 [J]. *岩石学报*, 19(1): 27~37.
- 肖龙, Robert P RAPP, 许继峰. 2004. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约 [J]. *岩石学报*, 20(2): 219~228.
- 胥德恩, 陈友良, 张应全, 等. 1995. 康定杂岩的时代及成因探讨 [J]. *地质论评*, 41(2): 101~111.
- 徐士进, 王汝成, 沈渭洲, 等. 1996. 松潘-甘孜造山带中晋宁期花岗岩的 U-Pb 和 Rb-Sr 同位素定年及其大地构造意义 [J]. *中国科学(D辑)*, 26(1): 52~58.
- 徐士进, 沈渭洲, 王汝成, 等. 1998. 大水沟碛矿含矿斜长角闪岩的锆石 U-Pb 定年 [J]. *科学通报*, 43(8): 883~885.
- 薛怀民, 刘敦一, 董树文, 等. 2004. 湖北蕲春花岗岩类锆石 SHRIMP 年龄: 大别山造山带内弱变质-未变质晋宁期花岗岩类的发现 [J]. *地质学报*, 78(1): 81~88.
- 颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, 等. 2002. 华南在 Rodinia 古陆中位置的讨论——扬子地块西缘变质-岩浆杂岩证据及其与 Seychelles 地块的对比 [J]. *地学前缘*, 9(4): 249~256.
- 杨崇辉, 杜利林, 万渝生, 等. 2004. 河北平山英云闪长质片麻岩锆石 SHRIMP 年代学 [J]. *高校地质学报*, 10(4): 514~522.
- 喻安光, 陈玉禄. 1999. 四川石棉地区前震旦纪“康定杂岩”的时代探讨 [J]. *四川地质学报*, 19(3): 200~203.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生, 等. 2003. 桂北中-新元古代镁铁质-超镁铁质岩的岩石地球化学 [J]. *岩石学报*, 19(1): 9~18.
- 朱维光, 邓海林, 刘秉光, 等. 2004. 四川盐边高家村镁铁-超镁铁质杂岩的形成时代: 单颗粒锆石 U-Pb 和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约 [J]. *科学通报*, 49(10): 985~992.