

扬子西缘瓦斯沟花岗岩的元素-Nd 同位素地球化学 ——岩石成因与构造意义

林广春

(长安大学 地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要:对扬子地块西缘康滇裂谷北段的瓦斯沟花岗质杂岩进行了系统的岩石学、元素-Nd 同位素地球化学研究, 结果表明该岩体为 I 型花岗岩, 是由前存年轻(中元古代末—新元古代初)岛弧地壳物质部分熔融形成的。早期的花岗岩形成于扬子地块西缘由会聚挤压向陆内伸展的转折环境, 晚期的花岗闪长岩形成于板内环境, 很可能与新元古代地幔柱事件有关。它们显示的“岛弧地球化学特征”是继承了源岩地球化学特征的结果, 不代表其形成时的构造环境。

关键词:新元古代, 康滇裂谷, 瓦斯沟, 花岗岩, 地幔柱

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)05-0398-07

Petrochemical characteristics of Wasigou complex in western Yangtze block: petrogenetic and tectonic significance

LIN Guang-chun

(College of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Petrological, geochemical and Nd isotopic data are reported for the Neoproterozoic Wasigou complex in the Kangdian rift on the western margin of the Yangtze block. This complex is an I-type granite, and its geochemical and Nd isotopic characteristics suggest that it was generated by partial melting of the pre-existing Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic island arc crust. The early granite was produced by the tectonic transition from compression to intraplate extension on the western margin of the Yangtze block, whereas the late granodiorite was formed in an intraplate setting and might be related to the Neoproterozoic plume event. Their arc-like geochemical features such as Nb-Ta depletion must have been inherited from the protoliths rather than from their tectonic setting during the formation of the complex.

Key words: Neoproterozoic; Kangdian rift; Wasigou; granite; plume

扬子地块西缘新元古代岩浆活动非常强烈, 广泛分布新元古代岩浆岩, 基本上沿康滇裂谷连续分布, 包括花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩、基性-超基性小侵入体和基性岩墙、岩脉等。对这些新元古代岩浆岩的成因和构造背景, 目前存在板内裂谷(Li Zhengxiang *et al.*, 1999, 2003; Li Xianhua *et al.*, 2002, 2003a, 2003b; 李献华等, 2002a, 2002b; 朱维光等, 2004; 林广春等, 2006)和活动大陆边缘(沈渭洲等, 2000, 2002; Zhou *et al.*, 2002a, 2002b, 2006; 颜丹平等, 2002; 陈岳龙等, 2004)两种相对立的观点, 并进一步引起了

对华南板块在 Rodinia 超级大陆再造中位置的争论(Zhou *et al.*, 2002b, 2006; 李献华等, 2002a, 2002b; 颜丹平等, 2002; 郑永飞, 2004; 林广春等, 2006)。显然, 扬子地块西缘新元古代岩浆岩的成因和构造背景研究, 对认识华南地区新元古代时期构造演化及 Rodinia 超级大陆重建研究都将产生重要的影响。

本文选取川西康滇裂谷北段的瓦斯沟花岗质杂岩, 报道该岩体的元素-Nd 同位素地球化学组成, 并探讨其岩石成因与构造意义。

收稿日期: 2008-01-28; 修订日期: 2008-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40273012, 40421303); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-141, GIGCX-04-06)

作者简介: 林广春(1974-), 男, 讲师, 主要从事岩浆岩石学和岩石地球化学研究, E-mail: lgchunxa@126.com

1 地质背景

瓦斯沟花岗岩杂岩位于康滇裂谷北段(图 1), 普遍发育叶理, 岩性主要为花岗岩和花岗闪长岩, 以往被认为是康定花岗岩杂岩的一部分, 是新太古代-古元古代变质基底(四川省地质矿产局, 1991), 但最近的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定表明瓦斯沟叶理状花岗岩形成于 ~ 795 Ma (Zhou *et al.*, 2002a), 花岗闪长岩形成于 $770\sim 755$ Ma (Li Zhengxiang *et al.*, 2003)。其中花岗岩为中-细粒半自形粒状结构, 弱片麻状构造, 矿物组成以钾长石、石英、斜长石为主, 含少量角闪石、黑云母。钾长石主要为条纹长石, 含量 50% 左右, 宽板状或他形粒状, 石英含量 25%~30%, 呈他形粒状, 具波状消光, 斜长石含量 10% 左右, 自形-半自形板状, 主要为奥长石, 可见聚片双晶, 已发生绢云母化, 角闪石含量 5% 左右, 他形粒状, 多已发生绿泥石化和绿帘石化, 黑云母含量小于 5%, 呈细小片状定向分布。根据

野外和岩相学观察, 岩石应定名为黑云母角闪石花岗岩。花岗闪长岩为细-中粒半自形粒状结构, 矿物组成以斜长石、石英、角闪石为主, 含少量钾长石、黑云母。斜长石含量 60% 左右, 自形-半自形板状, 主要为中长石, 环带结构发育, 核部绢云母化, 石英含量 20%~25%, 呈他形粒状, 具波状消光, 角闪石含量 10% 左右, 他形粒状, 黑云母含量 5%, 呈细小片状, 钾长石主要为微斜长石, 含量小于 5%。岩石具体定名应为黑云母角闪石花岗闪长岩。瓦斯沟岩体内常见同时代的后期侵入的基性岩墙、岩脉, 在早期的花岗岩中, 基性侵入岩的岩性主要是辉绿岩 (779 ± 6 Ma, 林广春等, 2006), 晚期的花岗闪长岩中, 基性侵入岩的岩性主要是辉长岩 (758 ± 37 Ma, 林广春等, 2006), 并且与花岗闪长岩岩体发生明显岩浆混合, 表明两者是近于同时形成的(林广春等, 2006)。对采自瓦斯沟花岗岩杂岩的 5 个样品进行元素-Nd 同位素分析, 其中样品 04KD1-10、04KD4-11 采自早期的花岗岩, 04KD2-02、04KD4-12、04KD7-01 采自晚期的花岗闪长岩。

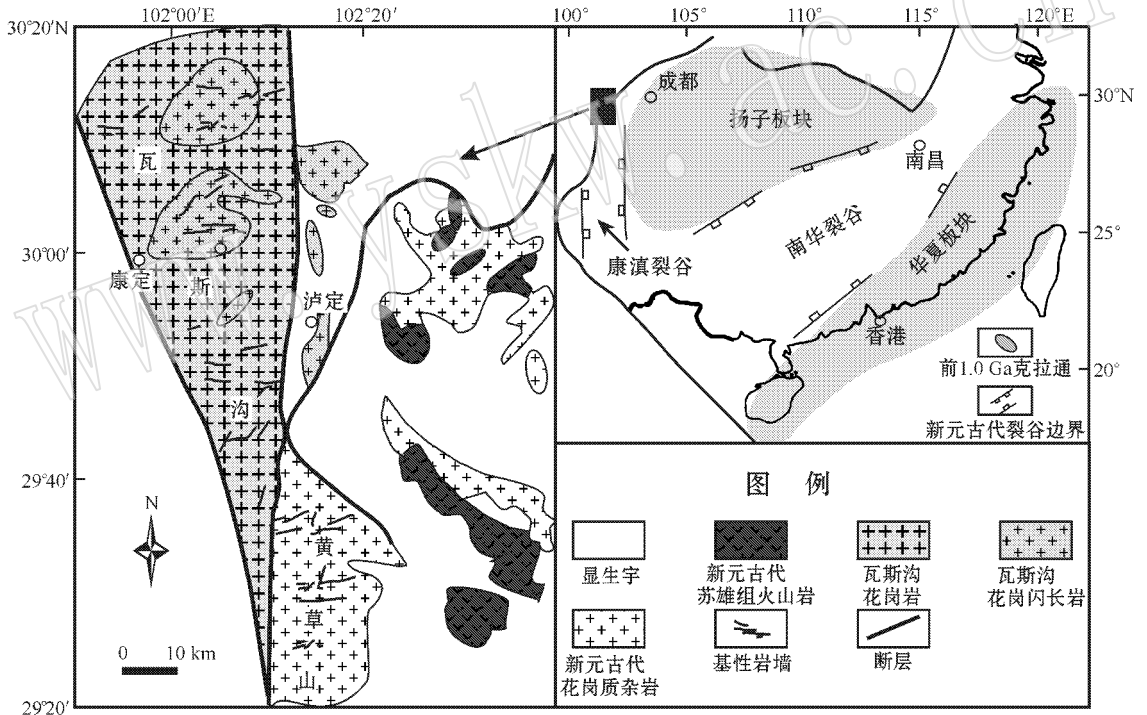


图 1 川西康定-泸定地区前寒武纪地质简图

Fig. 1 Simplified Precambrian geological map of the Kangding-Luding region, western Sichuan
 右上角插图为华南新元古代裂谷系构造简图, 引自 Li Zhengxiang 等 (1999)

2 分析方法

主量元素和微量元素分别在中国科学院广州地球化学研究所的 Rigaku RIX 2000 型荧光光谱仪(XRF)和 Perkin-Elmer Sciex ELAN 6000 型电感耦合等离子体-质谱仪(ICP-MS)上分析, XRF 主量元素分析方法与 Goto 和 Tatsumi (1994) 报道的相似, 分析精度优于 5%, ICP-MS 微量元素分

析流程见刘颖等(1996), 分析精度优于 3%。Sm-Nd 的化学分离采用常规的阳离子树脂(REE 和其他元素分离)和 HDEHR (Sm, Nd 分离)方法, Nd 同位素组成测试在广州地球化学研究所的 Micromass Isoprobe 型 MC-ICP-MS 上进行, 详细的分析程序参见梁细荣等(2003)。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正, 测得的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值校正到 Shin Etsu JNd-1 标准的 0.512115 (Tanaka *et al.*, 2000)。Nd 同位素分析的全流程本底 < 100 pg。

3 结果

3.1 元素地球化学

瓦斯沟花岗质杂岩 5 个样品的元素分析结果列于表 1。样品 04KDI-10、04KD4-11 的 SiO_2 含量较高,分别为 74.08%、73.38%,具有较高的全碱含量, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 分别为 8.69% 和 8.79%,岩石相对富 K_2O , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值分别为 1.67、1.86,同时具有较低的 Al_2O_3 、 CaO 含量,在 TAS 分类图解(Middlemost, 1994)上,样品落入花岗岩范围(图 2a),属于高钾钙碱性-钾玄岩系列(图 2b),样品 04KD2-02、04KD4-12、04KD7-01 的 SiO_2 含量相对较低,为 66.43%~68.68%,岩石相对富 Na_2O , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.35~0.55,具有较高的 Al_2O_3 、 CaO 含量,在 TAS 分类图解上样品落入花岗岩闪长岩范围(图 2a),属于钙碱性系列(图 2b)。所有样品的 $A/\text{CNK} = 0.95 \sim 1.03$,为准铝-弱过铝质花岗岩,类似于 I 型花岗岩(Chappell & White, 1992)。

在球粒陨石标准化图解(图 3a)上,除样品 04KD7-01 外,均表现出轻稀土元素富集、重稀土元素基本水平的右倾模式,2 个花岗岩样品 04KDI-10、04KD4-11 具有明显的 Eu 负异常,3 个花岗闪长岩样品则没有或仅有微弱的 Eu 负异常,其中样品 04KD7-01 的轻重稀土元素分馏明显,并且 HREE 的含量相对较低。在 MORB 标准化蛛网图(图 3b)上,样品表现出明显的 Sr、Ti 和 Nb、Ta 负异常(2 个花岗岩样品 04KDI-10、04KD4-11 的 Sr、Ti 负异常尤为强烈)以及 Rb、Th 正异常。Sr、Eu 强烈负异常表明岩浆发生了明显的长石分离结晶,Ti 的负异常可能是钛铁氧化物分离结晶的结果,Nb、Ta 的亏损类似形成于岛弧环境岩石的特征。

3.2 Nd 同位素

瓦斯沟花岗质杂岩体 4 个样品的 Nd 同位素分析结果列于表 2。样品的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.0782 \sim 0.1166$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512157 \sim 0.512386$, $\epsilon\text{Nd}(t) = +1.68 \sim +3.03$ (花岗岩 $t = 795 \text{ Ma}$, Zhou *et al.*, 2002; 花岗闪长岩 $t = 755 \text{ Ma}$, Li Zhengxiang *et al.*, 2003),两阶段的 Nd 模式年龄 $t_{2\text{DM}} = 1.2 \sim 1.3 \text{ Ga}$,表明其物质来源为年轻的初生地壳或亏损地幔源基性岩浆分异产物。

4 讨论

4.1 岩石成因

本文研究的瓦斯沟花岗质杂岩虽然与同时代的基性辉长-辉绿岩墙、岩脉密切共生,但基性岩墙、岩脉的比例很小,因此不可能是幔源玄武质岩浆分异的产物。瓦斯沟杂岩的矿物学特征(含角闪石)及其准铝-弱过铝质的岩石化学特征表明它是 I 型花岗岩,其源岩应为中基性火成岩。我们注意到样品普遍具有较高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(+1.68~+3.03),暗示了瓦

表 1 瓦斯沟花岗质杂岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) data of Wasigou complex

样号	04KDI-10	04KD4-11	04KD2-02	04KD4-12	04KD7-01
SiO_2	74.08	73.38	68.24	68.68	66.43
TiO_2	0.15	0.19	0.45	0.35	0.36
Al_2O_3	12.51	12.91	14.76	15.39	16.03
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$	2.23	2.50	4.47	3.71	4.35
MnO	0.03	0.05	0.09	0.09	0.09
MgO	0.25	0.23	1.23	0.70	1.23
CaO	0.60	0.71	3.62	2.76	3.77
Na_2O	3.26	3.07	4.40	4.49	4.04
K_2O	5.43	5.72	1.52	2.48	1.88
P_2O_5	0.02	0.02	0.10	0.10	0.14
LOI	0.79	0.58	0.54	0.66	1.10
Total	99.35	99.36	99.42	99.41	99.42
A/CNK	1.02	1.03	0.95	1.02	1.03
V	10.2	13.6	71.4	29.9	52.7
Cr	8.10	5.99	14.6	11.8	17.7
Co	1.58	1.94	8.17	4.06	9.10
Ni	2.16	2.35	6.61	3.51	8.23
Ga	18.0	18.7	16.8	16.2	22.0
Ge	1.48	1.61	1.55	1.86	1.94
Rb	159.0	183.0	50.8	59.4	63.6
Sr	51.6	42.1	234.0	276.0	523.0
Y	31.4	51.8	24.8	22.8	13.8
Zr	142.0	182.0	181.0	137.0	82.6
Nb	13.20	13.60	7.19	7.50	5.81
Ba	529	546	316	722	817
La	39.7	49.9	20.5	22.0	91.2
Ce	76.7	99.1	48.8	43.9	170.0
Pr	9.04	11.90	6.37	5.54	20.20
Nd	32.1	41.9	24.1	20.0	66.6
Sm	6.19	8.11	4.55	3.84	8.61
Eu	0.57	0.68	0.99	1.10	1.59
Gd	5.53	7.53	4.04	3.60	5.28
Tb	0.98	1.38	0.69	0.58	0.60
Dy	5.74	8.08	4.12	3.67	2.88
Ho	1.19	1.78	0.89	0.82	0.51
Er	3.38	5.20	2.60	2.41	1.45
Tm	0.51	0.81	0.40	0.41	0.19
Yb	3.54	5.87	2.78	2.83	1.25
Lu	0.58	0.93	0.45	0.47	0.21
Hf	4.65	6.10	4.65	3.36	1.91
Ta	0.80	0.97	0.53	0.49	0.32
Th	14.30	21.50	4.39	5.43	12.90
U	1.49	2.38	0.92	0.99	0.72

注: A/CNK = $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (摩尔比); $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ 为全铁。

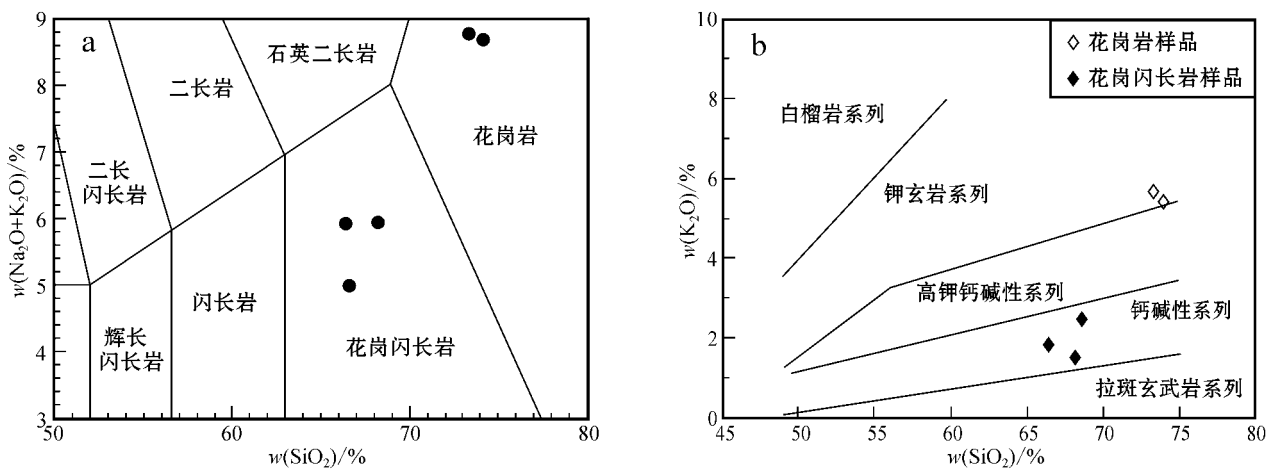


图 2 瓦斯沟花岗质杂岩的 $(Na_2O + K_2O) - SiO_2$ 图解 (a) (Middlemost, 1994) 和 $K_2O - SiO_2$ 图解 (b) (Peccerillo & Taylor, 1976)

Fig. 2 Plots of $(Na_2O + K_2O) - SiO_2$ (a) (Middlemost, 1994) and $K_2O - SiO_2$ (b) (Peccerillo & Taylor, 1976) for classification of Wasigou complex, western Sichuan

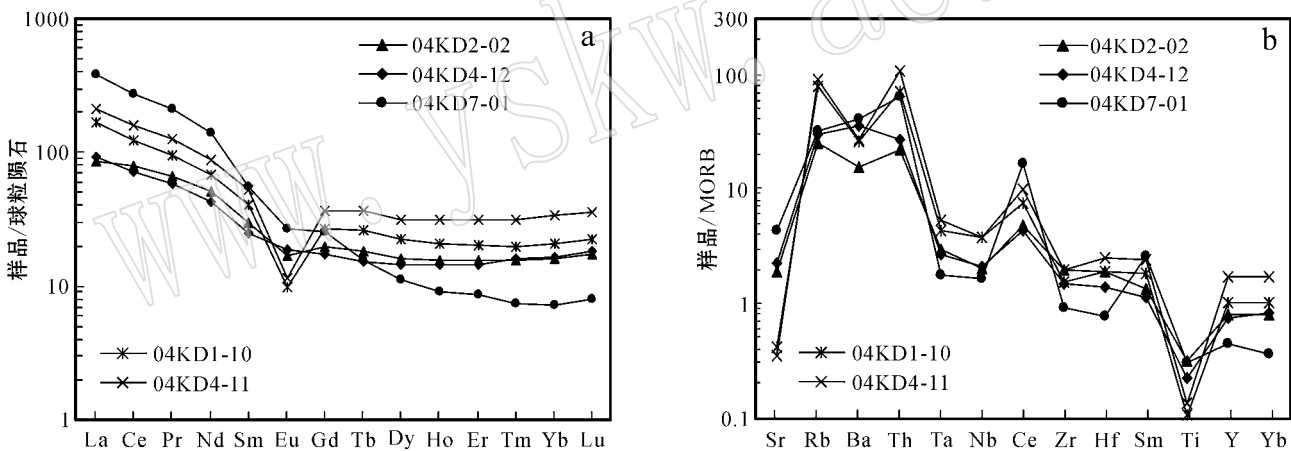


图 3 瓦斯沟花岗质杂岩样品的稀土元素分布形式图 (a) 和微量元素蛛网图 (b)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergram (b) for Wasigou complex
球粒陨石和 MORB 微量元素数据引自 Sun & McDonough (1989)

表 2 瓦斯沟花岗质杂岩 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 2 Sm-Nd isotopic data of Wasigou complex

样品号	$\epsilon(\text{Sm}) \times 10^{-6}$	$\epsilon(\text{Nd}) \times 10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	t_{DM}/Ga	$t_{2\text{DM}}/\text{Ga}$
04KD1-10	6.19	32.1	0.116 6	$0.512\ 306 \pm 0.000\ 009$	+1.68	-0.41	1.32	1.33
04KD2-02	4.55	24.1	0.114 4	$0.512\ 386 \pm 0.000\ 008$	+3.03	-0.42	1.17	1.19
04KD4-12	3.84	20.0	0.116 3	$0.512\ 380 \pm 0.000\ 010$	+2.74	-0.41	1.20	1.21
04KD7-01	8.61	66.6	0.078 2	$0.512\ 157 \pm 0.000\ 010$	+2.06	-0.60	1.12	1.27

注：花岗岩 $t = 0.795\ \text{Ga}$ ，引自 Zhou 等 (2002)；花岗闪长岩 $t = 0.755\ \text{Ga}$ ，引自 Li Zhengxiang 等 (2003)；Sm、Nd 含量采用 ICP-MS 测试结果； $t_{\text{DM}} = 1/\lambda_{\text{Sm}} \times \ln \{ [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - 0.513\ 15] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - 0.213\ 7] + 1 \}$ ； $t_{2\text{DM}} = t_{\text{DM}} - (t_{\text{DM}} - t) \times (f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}) / (f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}})$ ，其中 f_{S} 、 f_{CC} 和 f_{DM} 分别为样品、平均大陆地壳和亏损地幔的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值； $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1] \times (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.196\ 7$ ； $f_{\text{CC}} = -0.4$ ； $f_{\text{DM}} = 0.085\ 92$ 。

斯沟花岗质岩很可能是前存的初生地壳物质部分熔融形成的,其Nd模式年龄 $t_{2DM} = 1.2 \sim 1.3$ Ga 制约了这些地壳物质的上限年龄,这与在扬子西缘新元古代初生岛弧地壳普遍存在是相一致的(李献华等, 2002a, 2003b)。李献华等(2002a, 2002b, 2003b)进一步推测扬子块体西-西北缘很可能在中元古代晚期—新元古代早期存在一个俯冲带,正是这个俯冲的洋壳导致了扬子块体西缘初生岛弧地壳物质的增生。

在Nb-Y和Rb-(Y+Nb)构造判别图(图4a, 4b)(Pearce *et al.*, 1984)上, 2个花岗岩样品04KD1-10、04KD4-11投影于火山弧和板内环境的交界处,而花岗闪长岩样品落入火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩范围。矿物学和岩石化学特征表明,花岗岩样品为准铝-弱过铝质的高钾钙碱性-钾玄岩系列I型花岗岩,与Barbarin(1999)花岗岩分类中的富钾钙碱性花岗岩类(KCG)相似。富钾钙碱性花岗岩类(KCG)可以出现在不同的构造环境中,实际上指示的是一种构造体制的变化而不是一个特定的构造环境,它的出现可能指示了大陆会聚向离散的转折(Roberts & Clements, 1993; Barbarin, 1999)。瓦斯沟杂岩中的花岗岩很可能是新元古代时期扬子地块西缘构造环境由会聚向伸展转换过程的产物,其源岩为中元古代晚期—新元古代早期的岛弧初生玄武质地壳。花岗闪长岩样品的岩石化学特征类似于太古宙TTG(样品04KD2-02、04KD4-12, Martin, 1994)和现代埃达克岩(样品04KD7-01, Condie, 2005),显示出明显类似于岛弧环境的地球

球化学特征,但需要注意的是,瓦斯沟花岗闪长岩年龄(770~755 Ma, Li Zhengxiang *et al.*, 2003)与岩体内广泛分布的基性岩墙、岩脉年龄(758 ± 37 Ma, 林广春等, 2006)在误差范围内是一致的,同时在花岗闪长质围岩中大量出现鱼群状基性包体、基性岩墙中出现花岗闪长质围岩的反向脉等岩浆混合现象,也表明花岗闪长质围岩和基性岩墙是近于同时形成的。通常玄武质岩石有比较明确的岩石构造组合关系,而花岗质岩石的地球化学特征主要受源区组成和岩浆结晶演化过程等因素的制约,构造环境往往是第二位的控制因素(Frost *et al.*, 2001),在许多情况下,花岗岩的地球化学判别往往给出的是其源岩的构造环境而不是花岗岩本身的形成环境。这些花岗闪长岩样品显示出的类似于岛弧环境的地球化学特征,应该是继承了源岩(中元古代晚期—新元古代早期底侵于地壳底部初生岛弧地壳,而这些初生岛弧地壳物质很可能来自同期或稍早的洋壳俯冲)的地球化学特征,并不代表其形成时的构造环境。瓦斯沟杂岩中的花岗闪长岩与同期的基性岩墙、岩脉在时间-空间上密切相关,在成因上应该是一致的,应是板内岩浆活动的产物。类似这种带有明显弧火成岩特点但形成于碰撞作用之后(板内)的例子,国内外有很多报道,如莫宣学在研究三江造山带火成岩构造组合时提出的“滞后型”弧火山岩(Mo Xuanxue *et al.*, 1991),以及在Rio Grande裂谷,许多裂谷早期形成的岩石也清晰地显示出与俯冲带相关的火山岩特征(Aldrich *et al.*, 1986)等。

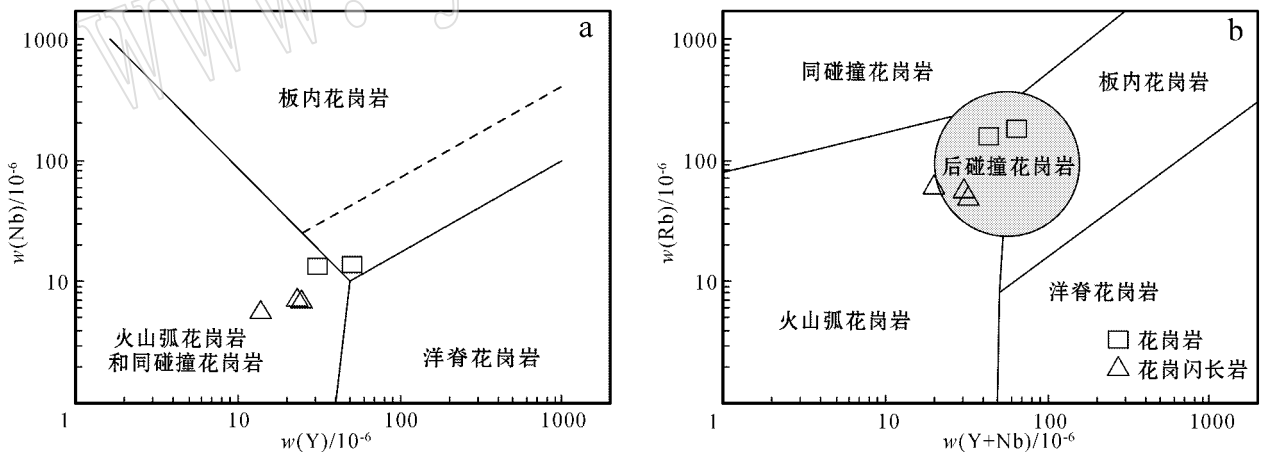


图4 瓦斯沟花岗质杂岩构造判别图(Pearce等, 1984)

Fig. 4 Tectonic discrimination diagrams for Wasigou complex, western Sichuan (Pearce *et al.*, 1984)

4.2 构造意义

虽然瓦斯沟花岗岩体具有岛弧岩浆的一些元素地球化学特征,但区域地质特征和进一步的岩石地球化学分析表明,早期的~795 Ma花岗岩形成于扬子地块西缘由会聚向离散的转折环境,而晚期的770~755 Ma花岗闪长岩形成于板内环境。它们的类似于岛弧环境的地球化学特征应该是继承了源岩——初生岛弧地壳的特征,不代表其形成时的构造环境。结合扬子地块西缘其他新元古代岩浆岩的研究成果,如860

~850 Ma盐边关刀山岩体(李献华等, 2002a) 803 ± 12 Ma的苏雄组双峰式火山岩(Li Xianhua *et al.*, 2002) 808 ± 12 Ma的冷碛辉长岩(李献华等, 2002b) 780~760 Ma基性岩墙群(林广春等, 2006)等,笔者认为地幔柱模式能够更好地解释川西康滇裂谷新元古代岩浆岩的成因,这对于限定扬子西缘在新元古代时期的构造属性以及确定华南板块在Rodinia超级大陆重建中的位置具有重要意义。本文研究结果倾向于支持华南位于澳大利亚和Laurentia大陆之间的Rodinia超级

大陆重建模式(Li Zhengxiang *et al.* , 1995)

5 结论

川西瓦斯沟花岗质杂岩为 I 型花岗岩, 是中元古代晚期—新元古代早期扬子块体西缘俯冲洋壳产生的初生岛弧地壳部分熔融形成。早期的 ~795 Ma 花岗岩形成于扬子地块西缘由会聚到离散的转折环境。晚期的 770~755 Ma 花岗岩闪长岩是板内岩浆活动的产物, 很可能与新元古代地幔柱事件有关。它们的“岛弧地球化学特征”是继承了源岩(初生岛弧地壳)地球化学特征的结果, 不代表其形成时的构造环境。

致谢 刘颖、涂湘林和梁细荣对主量、微量元素和 Nd 同位素测试给予了细心的指导, 野外考察得到李武显的大力支持和帮助, 专家的评审意见对本文的改进起到了很大作用, 在此一并致谢。

References

Aldrich M J, Chapin G E and Laughli A W. 1986. Stress history and tectonic development of the Rio Grande rift, New Mexico [J]. *Jour. Geophys. Res.* , 91 : 6 199~6 211.

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types , their origins and their geodynamic environments [J]. *Lithos* , 40 : 261~293.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. 1991. *Regional Geology of Sichuan Province* [M]. Beijing : Geological Publishing House , 1~730 (in Chinese).

Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt [J]. *Trans R. Soc. Edinburgh Earth Sci.* , 83 : 1~26.

Chen Yuelong , Luo Zhaohua , Zhao Junxian , *et al.* 2005. Petrogenesis and dating of the Kangding complex , Sichuan Province [J]. *Science in China , Series D* , 48 (5) : 622~634.

Condie K C. 2005. TTG and adakites : are they both slab melts ? [J]. *Lithos* , 80 : 33~44.

Frost B R , Barnes C , Collins W J , *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks [J]. *J. Petrol.* , 42 : 2 033~2 048.

Goto A and Tatsumi Y. 1994. Quantitative analysis of rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer (I) [J]. *The Rigaku Journal* , 11 : 40~59.

Li Xianhua , Li Zhengxiang , Ge Wenchun , *et al.* 2003a. Neoproterozoic granitoids in South China : crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma ? [J]. *Precambrian Res.* , 122 : 45~83.

Li Xianhua , Li Zhengxiang , 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 Res.* , 113 : 135~155.

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 implication [J]. *Earth Science Frontiers* , 9 (4) : 329~338 (in Chinese with English abstract).

Li Xianhua , Li Zhengxiang , Zhou Hanwen , *et al.* 2003b. 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* , 46 (Supp.) : 73~83.

Li Zhengxiang , Li Xianhua , Kinny P D , *et al.* 1999. The breakup of Rodinia : did it start with a mantle plume beneath South China ? [J]. *Earth Planet Sci. Lett.* , 173 : 171~181.

Li Zhengxiang , Li Xianhua , 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 Res.* , 122 : 85~109.

Li Zhengxiang , Zhang Linghua and Powell C. 1995. South China in Rodinia : part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia ? [J]. *Geology* , 23 : 407~410.

Liang Xirong , Wei Gangjian , Li Xianhua , *et al.* 2003. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS) [J]. *Geochimica* , 32 (1) : 91~96 (in Chinese with English abstract).

Lin Guangchun , Li Xianhua and Li Wuxian. 2007. SHRIMP U-Pb zircon age , geochemistry and Nd-Hf isotope of Neoproterozoic mafic dyke swarms in Western Sichuan : Petrogenesis and tectonic significance [J]. *Science in China , Series D* , 50 (1) : 1~16.

Liu Ying , Liu Haichen and Li Xianhua. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS [J]. *Geochimica* , 25 (6) : 552~558 (in Chinese with English abstract).

Martin H. 1994. The Archaean grey gneisses and the genesis of the continental crust [A]. *Condie K C. The Archaean Crustal Evolution* [C]. Elsevier , 205~259.

Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Sci. Rev.* , 37 : 215~224.

Mo Xuanxue , Lu Fengxiang and Deng Jinfu. 1991. Volcanism in Sanjiang Tethyan orogenic belt : New facts and concepts [J]. *Jour. of China University of Geosciences* , 2 (1) : 58~74.

Pearce J A , Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *J. Petrol.* , 25 : 956~983.

Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area , Northern Turkey [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* , 58 : 63~81.

Roberts M P and Clements J D. 1993. Origin of high-potassium , Calc-alkaline , I-type granitoid [J]. *Geology* , 21 : 825~828.

Shen Weizhou , Gao Jianfeng , Xu Shijin , *et al.* 2002. 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, Ling Hongfei, Xu Shijin, *et al.* 2000. Geochemical characteristics and genesis of some Neoproterozoic granitoids in the northern part of the western margin of the Yangtze Block [J]. *Geological Review*, 46(5): 512 ~ 519 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 42: 528 ~ 548.
- Tanaka T, Togashi S, Kamioka H, *et al.* 2000. JNd-1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium [J]. *Chem. Geol.*, 168: 279 ~ 281.
- 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).
- Zheng Yongfei. 2004. Position of South China in configuration of Neoproterozoic supercontinent [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(8): 751 ~ 753.
- Zhou Meifu, Kennedy A K, Sun Min, *et al.* 2002b. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China: implications for the accretion of Rodinia [J]. *J. Geol.*, 110: 611 ~ 618.
- Zhou Meifu, Ma Yuxiao, Yan Danping, *et al.* 2006. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block [J]. *Precambrian Res.*, 144: 19 ~ 38.
- Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy A K, *et al.* 2002a. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 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): 1 077 ~ 1 085.

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.
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 2002a. 川西南关刀山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd 同位素地球化学——岩石成因与构造意义 [J]. *中国科学 D 辑*, 32(增刊): 60 ~ 68.
- 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.
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 等. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值 [J]. *地球化学*, 32(1): 91 ~ 96.
- 林广春, 李献华, 李武显. 2006. 川西新元古代岩墙群的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd-Hf 同位素地球化学——岩石成因与构造意义 [J]. *中国科学 D 辑*, 36(7): 630 ~ 645.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素 [J]. *地球化学*, 25(6): 552 ~ 558.
- 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 等. 2002. 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, 凌洪飞, 徐士进, 等. 2000. 扬子板块西缘北段新元古代花岗岩类的地球化学特征和成因 [J]. *地质论评*, 46(5): 512 ~ 519.
- 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, 1 ~ 730.
- 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.
- 郑永飞. 2004. 新元古代超大陆构型中华南的位置 [J]. *科学通报*, 49(8): 715 ~ 717.
- 朱维光, 邓海琳, 刘秉光, 等. 2004. 四川盐边高家村镁铁-超镁铁质杂岩体的形成时代: 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(1) 985 ~ 992.