

doi:10.3799/dqkx.2010.076

川西石棉花岗岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学特征:岩石成因与构造意义

林广春^{1,2}

1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054

2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西西安 710054

摘要: 扬子西缘新元古代岩浆岩分布广泛, 目前对其成因和构造背景还存在很大争议。对扬子西缘康滇裂谷北段石棉花岗岩体进行了系统的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、岩石学和元素-Nd 同位素地球化学研究, 结果表明该岩体是弱铝质的高钾钙碱性 I 型花岗岩, 形成于 818 ± 7 Ma, 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, 并混染了少量古老地壳物质。石棉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时期, 其“岛弧地球化学特征”是继承了源岩的地球化学特征的结果, 不代表其形成时的构造环境。

关键词: 花岗岩; 康滇裂谷; 新元古代; 构造环境; 地球化学; 地质年代。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2010)04-0611-10

收稿日期: 2009-10-26

Zircon U-Pb Age and Petrochemical Characteristics of Shimian Granite in Western Sichuan: Petrogenesis and Tectonic Significance

LIN Guang-chun^{1,2}

1. College of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

Abstract: Neoproterozoic magmatic rocks are widespread in western margin of the Yangtze block, and their genesis and tectonic setting have been an issue in hot debate at the present time. SHRIMP U-Pb zircon age, petrology, geochemical and Nd isotopic data are reported for the Neoproterozoic Shimian granite in the Kangdian rift of western Sichuan. This pluton is of metaluminous high-K calc-alkalic I-type granite and emplaced at 818 ± 7 Ma. Petrology, geochemical and Nd isotopic characters suggest that the pluton was generated by partial melting of pre-existing, young (Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic) island arc crust, with contamination of old crust materials during magma ascending and emplacement. The Shimian granite is the product of the tectonic transition from compression to introplate extension in western margin of the Yangtze block. Their arc-like geochemical features (such as Nb-Ta depletion) should have been inherited from the protoliths, rather than reflection of their tectonic setting when the pluton formed.

Key words: granite; Kangdian rift; Neoproterozoic; tectonic setting; geochemistry; geochronology.

0 引言

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。目前对这些岩浆

岩的成因和构造背景存在两种截然不同的观点: 一种观点认为扬子地块西缘新元古代早期 (>900 Ma) 岩浆岩形成于和 Rodinia 超级大陆聚合有关的岛弧造山运动, 而新元古代中期 ($860 \sim 740$ Ma) 的岩浆岩为板内非造山成因, 并与导致 Rodinia 超级大陆裂解的地幔柱—超级地幔柱活动有

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40273012, 40421303); 长安大学科技发展基金 (No. 0305-1001)。

作者简介: 林广春 (1974—), 男, 博士, 地球化学专业。E-mail: lgchunxa@126.com

关(Li *et al.*, 2002, 2003a, 2003b, 2003c, 2006; Zhu *et al.*, 2004, 2008; Lin *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2008; 林广春, 2008); 持这种观点的研究人员支持华南大陆是连接北美和澳大利亚—南极大陆之间的桥梁和 Rodinia 超级大陆的“核心”(Li *et al.*, 1995, 2008). 另一种观点则认为扬子地块西缘新元古代岩浆岩是与造山运动有关的大陆边缘岩浆弧, 俯冲造山运动可能持续到 0.74 Ga 或更晚(Zhou *et al.*, 2002a, 2002b, 2006a, 2006b, 2007; Zheng, 2004; 杜利林等, 2005, 2006, 2007; Zhao and Zhou, 2007a, 2007b; Zhao *et al.*, 2008). 一些研究人员认为华南大陆很可能位于 Rodinia 超级大陆的边缘(Zhou *et al.*, 2006a, 2006b) 或根本不属于 Rodinia 超级大陆的一部分(Zhou *et al.*, 2002b). 显然, 扬子西缘新元古代岩浆岩的成因和构造背景研究, 对认识华南板块在新元古代时期的构造演化及 Rodinia 超级大陆重建研究都将产生重要的影响.

本文选取扬子西缘康滇裂谷北段的石棉花岗岩体, 报道其 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和元素-Nd 同位素地球化学组成, 并探讨其岩石成因与构造意义.

1 地质背景

石棉花岗岩体又称大相岭或黄草山岩体, 为较大的花岗质岩基(约 794 km²), 岩性主要为中粗粒斑状钾长—二长花岗岩, 矿物组成以钾长石、石英、斜长石为主, 含少量角闪石、黑云母, 副矿物有磁铁矿、磷灰石等. 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. 岩体普遍含自形的钾长石巨晶, 最大直径约 1~2 cm, 呈斑状结构, 岩石具弱片麻状构造. 石棉花岗岩体侵入东侧的新元古代苏雄组火山岩, 并进一步被东西两侧的古生代—中生代地层所覆盖(图 1). 岩体内常见同时代的后期侵入的基性岩墙、岩脉(Li *et al.*, 2003c; Lin *et al.*, 2007), 尤其是在岩体边缘部分.

本文对采自岩体的 10 个样品进行元素地球化学和同位素分析, SHRIMP 年龄样品 04KD23-1 采自石棉县城南约 10 km 的公路旁.

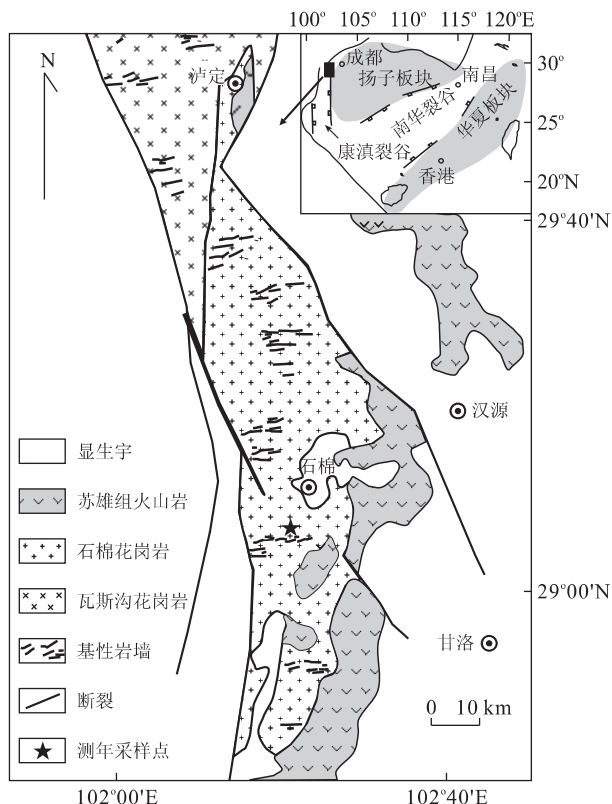


图 1 川西泸定—石棉地区前寒武纪地质略图

Fig. 1 Simplified Precambrian geological map of the Luding-Shimian region, western Sichuan

右上角插图为华南新元古代裂谷系构造简图(Li *et al.*, 1999)

2 分析方法

在双目镜下挑选晶型完好、具有代表性的锆石颗粒和标准锆石 TEM (TEM 的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U = 0.066 8, 相应的年龄为 417 Ma, Black *et al.*, 2003) 粘贴在环氧树脂表面, 然后抛光并镀金. 在 SHRIMP 同位素分析前, 对待测锆石进行了透射光和反射光显微照相以及阴极发光图像分析, 以检查锆石的内部结构, 从而帮助选定最佳的待测锆石部位和数据解释. 锆石的 U-Th-Pb 同位素分析在地质科学院离子探针中心的 SHRIMP-II 离子探针上进行.

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 and 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 HDEHP (Sm、Nd 分离) 方法, Nd 同位素组成

表 1 川西石棉花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素分析结果

点号	Th (μg/g)	U (μg/g)	Th/ U	²⁰⁶ Pb* (%)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±1σ(Ma)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±1σ(Ma)
1	173	219	0.81	0.17	0.069 49±0.000 67	0.124 7±0.000 7	1.172±0.014	757±4	872±22
2	69	99	0.72	0.63	0.071 08±0.000 93	0.139 0±0.001 1	1.261±0.036	838±6	801±57
3	57	113	0.52	0.99	0.071 76±0.000 85	0.135 3±0.001 0	1.186±0.037	817±6	727±64
4	211	203	1.07	0.76	0.072 86±0.000 76	0.142 5±0.000 9	1.308±0.027	858±5	824±41
5	160	264	0.63	0.52	0.067 65±0.000 55	0.136 8±0.000 8	1.194±0.019	826±4	719±32
6	92	161	0.59	0.80	0.070 25±0.000 72	0.136 6±0.000 9	1.197±0.029	825±5	727±50
7	92	143	0.67	0.91	0.070 10±0.000 76	0.138 7±0.000 9	1.196±0.034	836±5	693±58
8	147	317	0.48	0.35	0.067 79±0.000 49	0.136 9±0.000 7	1.226±0.017	827±4	772±28
9	69	119	0.60	1.15	0.071 60±0.001 40	0.134 6±0.001 0	1.150±0.042	813±5	673±77
10	77	126	0.63	0.73	0.070 48±0.000 81	0.135 2±0.000 9	1.202±0.029	817±5	756±50
11	174	210	0.85	0.51	0.070 54±0.000 78	0.137 6±0.000 8	1.259±0.023	831±5	817±37
12	58	119	0.50	0.40	0.070 00±0.001 20	0.134 1±0.001 0	1.234±0.034	811±6	829±56
13	51	96	0.55	0.46	0.073 00±0.001 50	0.132 8±0.001 0	1.266±0.037	803±6	904±59
14	143	198	0.75	0.12	0.068 81±0.000 64	0.133 8±0.000 8	1.250±0.017	809±4	863±35
15	54	92	0.60	0.76	0.074 40±0.001 50	0.136 1±0.001 0	1.279±0.041	822±6	873±64
16	115	182	0.66	0.39	0.071 10±0.001 20	0.131 1±0.000 8	1.227±0.028	794±5	865±45
17	148	162	0.94	0.48	0.071 49±0.000 69	0.132 5±0.000 8	1.233±0.021	801±5	854±34

注：²⁰⁶Pb* 表示普通²⁰⁶Pb 占总²⁰⁶Pb 的百分比；采用²⁰⁴Pb 校正方法计算年龄。

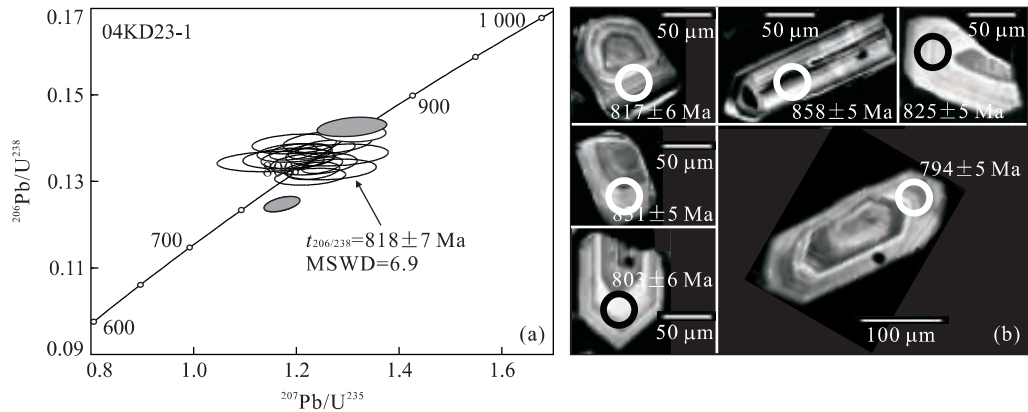


图 2 石棉花岗岩的锆石 U-Pb 谐和图解(a)和代表性锆石阴极发光图像(b)

Fig. 2 U-Pb zircon concordia diagram (a) and representative zircons CL images (b) for Shimian granite, western Sichuan

测试在广州地球化学研究所的 Micromass Isoprobe 型 MC-ICPMS 上进行,详细的分析程序参见梁细荣等(2003). ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 9 校正,测得的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值校正到 Shin Etsu JNdi-1 标准的 0.512 115(Tanaka *et al.*, 2000). Nd 同位素分析的全流程本底<100 pg.

3 结果

3.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

对样品 04KD23-1(29°06′41″N,102°20′29″E)的 17 个锆石颗粒进行了 17 个分析点的 U-Pb 同位素年龄分析,分析结果列于表 1,锆石 U-Pb 谐和图解见图 2a. 所分析的锆石颗粒大多数是破碎晶,少数

为透明的自形晶体,锆石颗粒大小差异明显(图 2b). 阴极发光图像显示大多数锆石具有继承核,边部发育完好的环带结构. 1 号分析点的 U-Pb 年龄稍微偏年轻,可能有 Pb 的丢失;4 号分析点的 U-Pb 年龄稍微偏老,可能是因为继承锆石的影响. 其余 15 个分析点在误差范围内有一致的 U-Pb 同位素组成,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄的加权平均值为 818±7 Ma (2σ),代表了石棉花岗岩体的结晶年龄. 与石棉岩体已有的年龄结果在误差范围内一致(~800 Ma, Zhao *et al.*, 2008;786±36 Ma,沈渭洲等,2000).

3.2 主量和微量元素地球化学

石棉花岗岩体 10 个样品主量和微量元素分析结果见表 2. 岩体 SiO₂ 含量较高(71.02%~77.83%), 富 K₂O, K₂O/Na₂O 为 1.10~2.35, A/CNK=

表 2 川西石棉花岗岩主量元素(%)和微量元素(μg/g)分析结果

Table 2 Major (%) and trace element (μg/g) analyses of Shimian granite in western Sichuan

样号	04KD 20—6	04KD 20—10	04KD 21—4	04KD 23—1	04KD 23—4	04KD 24—2	98KD 71	98KD 72	98KD 74	98KD 86
主量元素(%)										
SiO ₂	77.83	77.23	71.19	71.02	71.98	76.28	74.57	76.26	74.69	77.19
TiO ₂	0.08	0.08	0.35	0.32	0.35	0.11	0.19	0.09	0.11	0.13
Al ₂ O ₃	11.87	12.26	14.16	13.44	14.18	12.37	13.38	12.47	12.18	11.52
TF _{e2} O ₃	1.65	1.68	3.58	3.91	3.39	1.62	1.91	1.47	1.59	1.63
MnO	0.03	0.03	0.06	0.06	0.06	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02
MgO	0.16	0.16	0.38	0.36	0.36	0.09	0.36	0.01	0.19	0.16
CaO	0.20	0.14	2.00	1.92	2.07	0.60	0.47	0.41	0.82	0.33
K ₂ O	5.03	5.27	4.11	4.50	3.75	5.16	4.20	4.70	6.01	5.52
Na ₂ O	3.00	3.06	3.37	3.22	3.33	2.74	3.83	3.53	2.56	2.52
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.07	0.07	0.07	0.01	0.05	0.03	0.03	0.04
烧失	0.51	0.41	0.85	0.58	0.75	0.47	0.22	0.46	0.79	0.47
总量	100.36	100.31	100.10	99.40	100.27	99.46	99.22	99.46	99.00	99.52
A/CNK	1.11	1.12	1.04	0.98	1.07	1.11	1.14	1.07	1.00	1.08
(Ga/Al)×10 ⁴	2.66	2.53	2.64	2.54	2.53	2.45	2.55	2.85	2.19	3.53
微量元素(μg/g)										
Ga	16.70	16.40	19.90	18.30	19.10	16.20	18.20	19.00	14.30	21.70
Rb	261.00	244.00	170.00	189.00	165.00	229.00	142.00	206.00	204.00	368.00
Sr	15.30	15.20	178.00	117.00	179.00	81.00	64.70	18.20	64.30	7.21
Y	41.20	56.30	49.00	44.80	41.90	29.10	28.30	39.50	33.30	72.20
Zr	85.20	109.00	195.00	240.00	185.00	113.00	179.00	84.80	143.00	177.00
Nb	18.00	14.30	15.90	13.90	15.20	8.61	12.50	13.00	11.70	18.00
Ba	93.60	96.20	608.00	827.00	469.00	274.00	739.00	175.00	976.00	65.70
La	16.70	22.50	54.30	63.60	63.10	36.20	35.10	38.20	35.60	66.10
Ce	36.10	47.10	109.00	128.00	127.00	75.30	72.70	79.60	71.30	131.00
Pr	4.70	6.13	13.70	15.40	15.70	9.01	8.79	9.92	8.80	16.60
Nd	18.00	23.00	48.10	54.90	53.70	30.60	32.30	35.30	31.10	55.80
Sm	4.56	5.81	9.73	9.64	9.77	5.64	5.98	7.18	6.03	11.90
Eu	0.14	0.16	1.23	1.22	1.19	0.63	0.94	0.41	0.56	0.33
Gd	4.96	6.09	8.52	8.11	7.87	4.54	5.33	6.25	5.31	11.50
Tb	1.00	1.23	1.41	1.36	1.25	0.73	0.87	1.05	0.89	2.04
Dy	6.59	8.52	8.72	7.88	7.57	4.55	5.19	6.47	5.88	12.80
Ho	1.50	1.94	1.79	1.58	1.56	1.00	1.03	1.35	1.22	2.63
Er	4.40	5.84	5.25	4.56	4.46	3.15	2.85	4.12	3.69	7.65
Tm	0.76	0.99	0.83	0.68	0.72	0.55	0.47	0.70	0.61	1.24
Yb	5.06	6.51	5.47	4.53	4.59	3.80	3.30	5.15	4.16	7.90
Lu	0.79	1.07	0.84	0.70	0.72	0.62	0.48	0.81	0.64	1.15
Hf	3.89	4.18	6.09	6.68	5.46	4.03	5.55	3.51	4.81	7.07
Ta	2.22	1.58	1.39	1.17	1.28	1.06	1.19	1.80	1.29	2.02
Th	23.20	30.10	22.90	21.50	23.00	27.10	19.30	23.60	22.00	57.80
U	4.72	6.21	4.74	3.56	6.08	5.38	3.94	4.41	4.33	8.04

注: A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)(摩尔比); TF_{e2}O₃ 为全铁.

0.98~1.14,为弱过铝质.岩石样品属于高钾钙碱性系列(图 3a),在 TAS 分类图解上(Middlemost, 1994),样品落入花岗岩范围(图 3b).在以 SiO₂ 含量为横坐标的 Harker 图解上(图 4),样品的 Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、TiO₂、CaO、P₂O₅ 和 Sr、Eu、Zr、V 均与 SiO₂ 呈良好的负相关关系,表明随岩浆演化,可能存在斜长石、角闪石、Fe-Ti 氧化物和磷灰石等的分离结晶.

在球粒陨石标准化图解(图 5a)上,样品表现出轻稀土元素略微富集、重稀土元素基本水平的形态,

具有明显的 Eu 负异常.在 MORB 标准化蛛网图(图 5b)上,样品表现出强烈的 Sr、Ba、P、Ti 负异常和明显的 Nb、Ta 负异常,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,P、Ti 负异常可能是磷灰石、钛—铁氧化物分离结晶的结果,Nb、Ta 的亏损类似于形成岛弧环境岩石的特征.

3.3 Nd 同位素

石棉花岗岩体 6 个样品的 Nd 同位素分析结果列于表 3. 样品的¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.106 1~0.153 0,

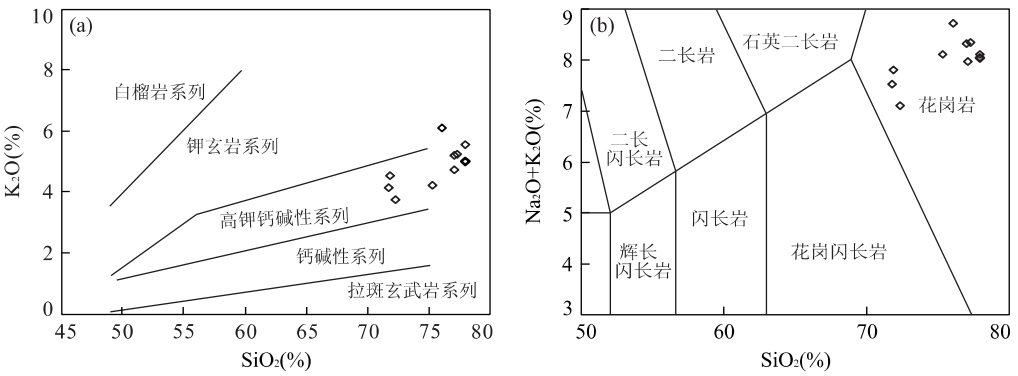


图 3 石棉花岗岩的(a)K₂O—SiO₂ 图解(Peccerillo and Taylor, 1976)和(b)(K₂O+Na₂O)—SiO₂ 岩石分类图解(Middlemost, 1994)

Fig. 3 Plots of (a) K₂O-SiO₂ and (b) (K₂O+Na₂O)-SiO₂ for classification of Shimian granite, western Sichuan

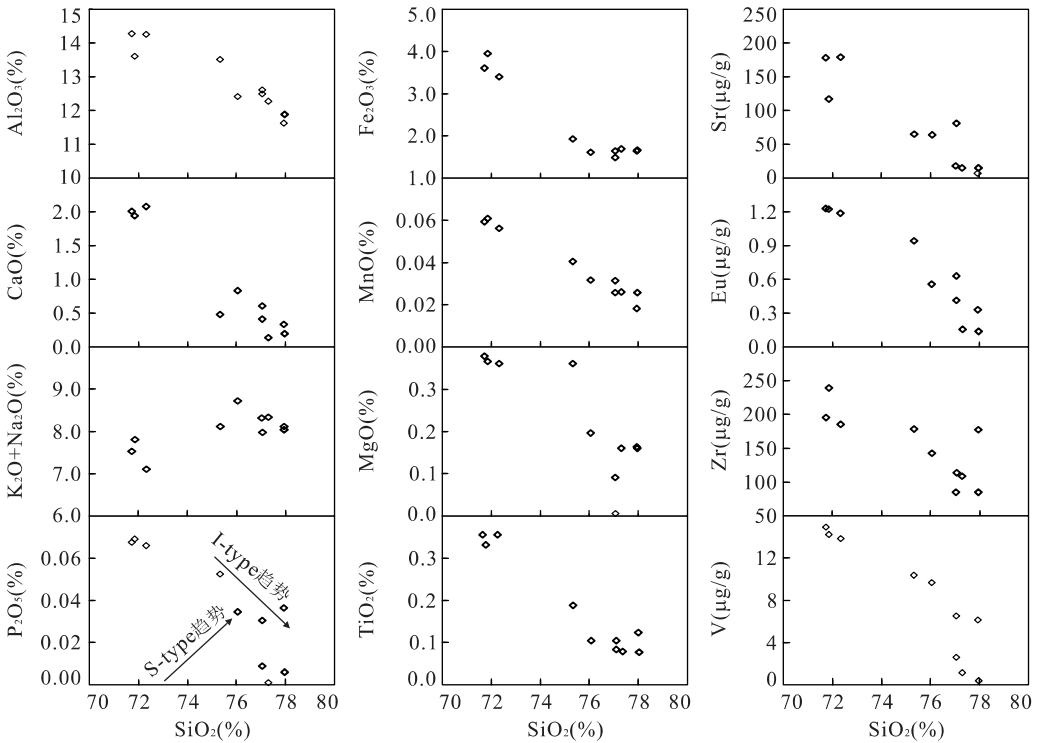


图 4 石棉花岗岩的 Harker 图解

Fig. 4 Chemical variation diagrams for Shimian granite, western Sichuan

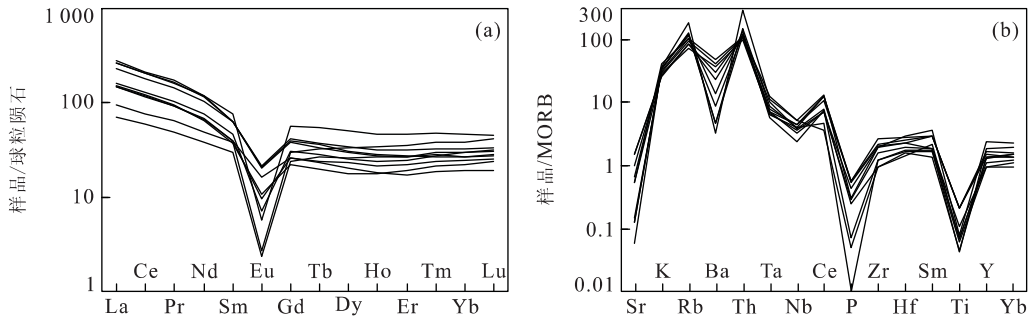


图 5 石棉花岗岩样品的稀土元素分布形式(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE diagram (a) and MORB-normalized spidergram (b) for Shimian granite

球粒陨石和 MORB 数据引自 Sun and McDonough, 1989

表 3 川西石棉花岗岩 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 3 Sm-Nd isotopic data for Shimian granite in western Sichuan

样品号	Sm($\mu\text{g/g}$)	Nd($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$	$T_{2\text{DM}}(\text{Ga})$
04KD20—6	5.81	23.0	0.153 0	0.512 371 $\pm$ 0.000 008	−0.63	−0.222	1.955	1.642
04KD21—4	9.73	48.1	0.122 3	0.512 108 $\pm$ 0.000 009	−2.55	−0.378	1.736	1.792
04KD23—1	9.64	54.9	0.106 1	0.512 076 $\pm$ 0.000 011	−1.48	−0.460	1.521	1.708
04KD24—2	5.64	30.6	0.111 4	0.512 086 $\pm$ 0.000 011	−1.84	−0.434	1.585	1.736
98KD71	5.98	32.3	0.111 9	0.512 306 $\pm$ 0.000 009	+2.38	−0.431	1.268	1.406
98KD86	11.9	55.8	0.128 9	0.512 254 $\pm$ 0.000 010	−0.38	−0.346	1.606	1.621

注： $t=0.818\text{ Ga}$ ；Sm、Nd 含量采用 ICP-MS 测试结果； $T_{\text{DM}}=1/\lambda_{\text{Sm}}\times\ln\{[(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}}-0.513\,15]/[(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}}-0.213\,7]+1\}$ ； $T_{2\text{DM}}=T_{\text{DM}}-(T_{\text{DM}}-T)\times(f_{\text{CC}}-f_{\text{S}})/(f_{\text{CC}}-f_{\text{DM}})$ ；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， $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}=(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}}/(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}-1$ ， $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.196\,7$ ； $f_{\text{CC}}=-0.4$ ； $f_{\text{DM}}=0.085\,92$ 。

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.5120\,76\sim0.512\,371$ ，具有较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(−2.55~+2.38)。两阶段的 Nd 模式年龄 $T_{2\text{DM}}=1.406\sim1.792\text{ Ga}$ 。

4 讨论

4.1 岩石成因

本文研究的石棉花岗岩缺乏同时期共生的辉长岩，因此不可能是幔源玄武质岩浆分异的产物(M 型)；大多数样品的 A/CNK 不超过 1.1，为弱过铝质成分，而高 SiO₂ 的 S 型花岗岩通常 A/CNK 超过 1.1，是强过铝质成分；样品具相对低的 Zr、Nb、Y、Ga 和低的 10 000×Ga/Al 比值，也排除了 A 型花岗岩的可能(Whalen *et al.*，1987)。笔者注意到岩石含有少量角闪石，这是 I 型花岗岩的特征矿物。同时样品的 P₂O₅ 含量很低(0.01%~0.07%)，在 Harker 图解上(图 4)P₂O₅ 与 SiO₂ 呈负相关关系，这是高分异 I 型花岗岩的特征(Chappell，1999；Broska *et al.*，2004)，部分高 SiO₂ 样品为过铝质，具有高的全碱含量，表明岩浆经历了较强的斜长石、角闪石和黑云母的分离结晶。综上所述，石棉花岗岩应为弱铝质的高分异 I 型花岗岩，其源岩应为中—基性火成岩。

石棉花岗岩样品普遍具有较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(−2.55~+2.38)，但与在时间—空间上密切共生的玄武质岩(苏雄玄武岩，Li *et al.*，2002a；冷碛辉长岩，李献华等，2002b；康定基性岩墙、岩脉，Lin *et al.*，2007)相比明显偏低，这排除了新底侵玄武质岩石部分熔融的可能。石棉花岗岩很可能是由前存的初生地壳物质部分熔融形成的，这与在扬子西缘，新元古代初生岛弧地壳的普遍存在相一致(李献华等，2002b；Li *et al.*，2003b)。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(李献华等，2002b；Li *et al.*，2003b)。岩石相平衡熔融实验研究也表明，对于偏铝的高钾钙碱性 I 型花岗岩，最适合的产生机制是钙碱性—高钾钙碱性的安山质源岩局部熔融(Roberts and Clements，1993)。我们还注意到样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化范围较大(−2.55~+2.38)，以及较老的 Nd 模式年龄(1.4~1.8 Ga)，这可能是岩浆混染了古老地壳物质的结果(薛怀民等，2006)。通过以上研究，笔者认为石棉花岗岩应是中元古代晚期—新元古代早期扬子块体西缘的俯冲洋壳产生的初生岛弧地壳物质部分熔融形成的，岩浆上升侵位过程中混染了部分古老地壳物质。

在 Nb—Y 和 Rb—Y+Nb 构造判别图上(图 6，Pearce *et al.*，1984)，石棉花岗岩样品投影于火山弧、同碰撞和板内环境的交界处，没有明确的指示意义。虽然石棉花岗岩具有明显的 Nb-Ta 亏损等类似于岛弧环境的地球化学特征，但这些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)。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(吴福元等，2007；张旗等，2007)。这些花岗质岩具有诸如 Nb-Ta 亏损等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—新元古代早期的初生岛弧地壳)的地球化学特征，并不代表其形成时的构造环境。值得注意的是，石棉花岗岩富 K₂O(3.75%~6.01%)，贫 CaO(0.14%~2.07%)，并含有钾长石斑晶，与 Barbarin 花岗岩分类中 KCG 相似(Barbarin，1999)。高钾和含钾长石斑晶钙碱性花岗岩(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，KCG 的出现可能指示了大陆会聚向离散的转折

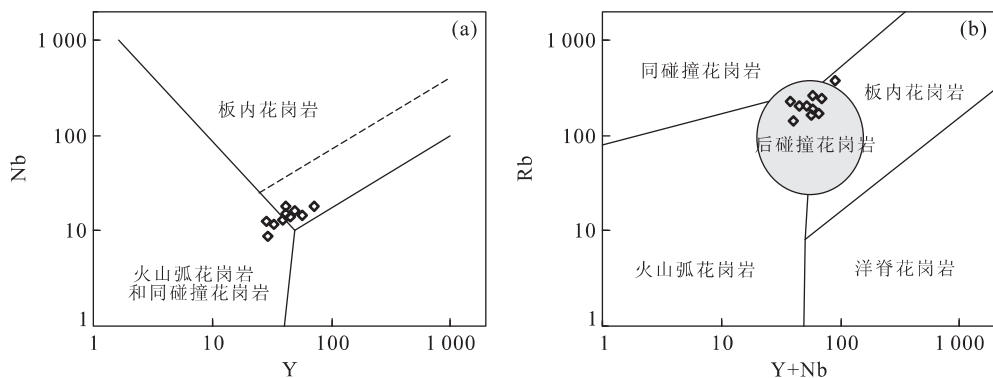


图 6 川西石棉花岗岩构造判别图(Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 6 Tectonic discrimination diagrams for Shimian granite, western Sichuan

(a)Nb-Y 判别图; (b)Rb-(Y+Nb)判别图

(Barbarin, 1999). 本文研究的石棉花岗岩体应是扬子地块西缘由会聚向离散的转折时期形成的.

4.2 构造意义

我们对近年来获得的扬子地块西缘新元古代其他相关岩浆岩的研究结果进行简要的回顾和综述, 总结扬子地块西缘新元古代岩浆活动的演化序列如下: (1) 1.0 ~ 0.9 Ga 的造山岩浆活动, 如 1028 ± 9 Ma 天宝山组酸性火山岩 (耿元生等, 2007)、 938 ± 30 Ma 石棉镁铁—超镁铁质岩 (Shen *et al.*, 2002; 朱维光等, 2004)、 937 ± 106 Ma 石棉大水沟斜长角闪岩 (Xu *et al.*, 1998) 等; (2) 0.86 ~ 0.85 Ga 小规模板内岩浆活动, 如 857 ± 13 Ma 盐边关刀山岩体 (Li *et al.*, 2003b)、 864 ± 26 Ma 丹巴格宗岩体 (Zhou *et al.*, 2002a; Li *et al.*, 2003b) 等; (3) 构造环境由会聚造山向大规模陆内伸展转变, 如本文研究的 818 ± 7 Ma 石棉花岗岩及 ~ 795 Ma 瓦斯沟花岗岩 (Zhou *et al.*, 2002b; 林广春, 2008) 等; (4) 与大规模非造山裂谷作用有关的 790 ~ 760 Ma 基性岩墙群 (Zhu *et al.*, 2008)、780 ~ 760 Ma 基性岩墙群 (Lin *et al.*, 2007)、780 Ma 的 A 型花岗岩 (Huang *et al.*, 2008) 及 770 ~ 755 Ma 瓦斯沟花岗闪长岩 (Li *et al.*, 2003c; 林广春, 2008) 等. 可见, 扬子地块西缘新元古代岩浆活动是由约 1.0 ~ 0.9 Ga 造山带的岩浆活动和 0.86 ~ 0.74 Ga 非造山的岩浆活动组成. 造山运动的结束代表华南 Rodinia 超大陆最终形成, 非造山运动的开始代表华南 Rodinia 超大陆裂解的最初时间, 这两种不同的岩浆活动代表华南新元古代的重要构造事件的转折. 而 818 ± 7 Ma 的高钾和含钾长石斑晶钙碱性的石棉花岗岩体侵位, 标志着扬子地块西缘构造环境由会聚挤压向大规模的陆内伸展转变.

虽然石棉花岗岩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, 它应该是扬子地块西缘由会聚向离散的构造环境下形成的, 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. 笔者认为地幔柱模式/超级地幔柱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. 本文的研究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 *et al.*, 1995, 2008).

5 结论

最新的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄表明, 川西石棉花岗岩体侵位结晶发生在 818 ± 7 Ma. 石棉花岗岩是弱铝质高钾钙碱性的高分异 I 型花岗岩, 是中元古代末—新元古代初扬子地块西缘的俯冲洋壳产生的初生岛弧地壳部分熔融形成的, 岩浆上升侵位过程中混染了部分古老地壳物质. 石棉花岗岩形成于扬子地块西缘由会聚向离散的转折时期, 其“岛弧地球化学特征”是继承了源岩 (初生岛弧地壳) 的地球化学特征的结果, 不代表其形成时的构造环境.

致谢: SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学测试得到中国地质科学院北京离子探针中心宋彪研究员、陶华工程师的指导和帮助; 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; 野外考察得到了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的作用, 在此表示衷心感谢.

References

- Barbarin, B., 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46 (3): 605 — 626. doi: 10. 1016/S0024-4937(98)00085-1
- Black, L. P., Kamo, S. L., Allen, C. M., et al., 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200 (1-2): 155 — 170. doi: 10. 1016/S0009-2541(03)00165-7
- Broska, I., Williams, C. T., Uher, P., et al., 2004. The geochemistry of phosphorus in different granite suites of the western Carpathians, Slovakia: the role of apatite and P-bearing feldspar. *Chemical Geology*, 205 (1-2): 1 — 15. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2003. 09. 004
- Chappell, B. W., 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46 (3): 535 — 551. doi: 10. 1016/S0024-4937(98)00086-3
- Du, L. L., Geng, Y. S., Yang, C. H., et al., 2005. Geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon chronology of basalts from the Yanbian Group in the western Yangtze block. *Acta Geologica Sinica*, 79 (6): 805 — 813 (in Chinese with English abstract).
- Du, L. L., Geng, Y. S., Yang, C. H., et al., 2006. The stipulation of Neoproterozoic TTG in western Yangtze block and its significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25 (4): 273 — 281 (in Chinese with English abstract).
- Du, L. L., Geng, Y. S., Yang, C. H., et al., 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).
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., et al., 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42 (11): 2033 — 2048. doi: 10. 1093/petrology/42. 11. 2033
- Geng, Y. S., Yang, C. H., Du, L. L., et al., 2007. 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).
- Goto, A., Tatsumi, Y., 1994. Quantitative analysis of rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer (I). *The Rigaku Journal*, 11 (1): 40 — 59.
- Huang, X. L., Xu, Y. G., Li, X. H., et al., 2008. Petrogenesis and tectonic implications of Neoproterozoic, highly fractionated A-type granites from Mianning, South China. *Precambrian Research*, 165 (3-4): 190 — 204. doi: 10. 1016/j. precamres. 2008. 06. 010
- Li, X. H., Li, Z. X., Ge, W., et al., 2003a. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Research*, 122 (1): 45 — 83. doi: 10. 1016/S0301-9268(02)00207-3
- Li, X. H., Li, Z. X., Zhou, H. W., et al., 2003b. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan pluton in SW Sichuan: petrogenesis and tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 46 (Suppl.): 73 — 83. doi: 10. 1360/03dz9029
- Li, Z. X., Li, X. H., Kinny, P. D., et al., 2003c. 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. *Precambrian Research*, 122 (1): 85 — 109. doi: 10. 1016/S0301-9268(02)00208-5
- Li, X. H., Li, Z. X., Sinclair, J. A., et al., 2006. Revisiting the “Yanbian terrane”: implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze block, South China. *Precambrian Research*, 151 (1-2): 14 — 30. doi: 10. 1016/j. precamres. 2006. 07. 009
- Li, X. H., Li, Z. X., Zhou, H. W., et al., 2002a. 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. *Precambrian Research*, 113 (1): 135 — 154. doi: 10. 1016/S0301-9268(01)00207-8
- Li, X. H., Li, Z. X., Zhou, H. W., et al., 2002b. U-Pb Zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of Neoproterozoic basaltic magmatism in western Sichuan: petrogenesis and geodynamic implications. *Earth Science Frontiers*, 9 (4): 329 — 338 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., et al., 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, 160 (1-2): 179 — 210. doi: 10. 1016/j. precamres. 2007. 04. 021
- Li, Z. X., Li, X. H., Kinny, P. D., et al., 1999. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 173 (3): 171 — 181. doi: 10. 1016/S0012-821X(99)00240-X
- Li, Z. X., Zhang, L. H., Powell, C. McA., et al., 1995. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? *Geology*, 23: 407 — 410. doi: 10. 1130/0091-7613(1995)023<0407: SCIRPO>2. 3. CO
- Liang, X. R., Wei, G. J., Li, X. H., 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). *Geochimica*, 32(1): 91—96 (in Chinese with English abstract).
- Lin, G. C., 2008. Petrochemical characteristic of Wasigou complex in western Yangtze block; petrogenetic and tectonic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(5): 398—404 (in Chinese with English abstract).
- Lin, G. C., Li, X. H., Li, W. X., 2007. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd-Hf isotope of Neoproterozoic mafic dyke swarms in western Sichuan: petrogenesis and tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 50(1): 1—16. doi:10.1007/s11430-007-2018-0
- Liu, Y., Liu, H. C., Li, X. H., 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552—558 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Sci. Rev.*, 37(3—4): 215—224. doi:10.1016/0012-8252(94)90029-9
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Geology*, 25(4): 956—983.
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58(1): 63—81.
- Roberts, M. P., Clements, J. D., 1993. Origin of high-potassium, talc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21(9): 825—828. doi:10.1130/0091-7613(1993)021<0825:OOHPTA>2.3.CO
- Shen, W. Z., Li, H. M., Xu, S. J., et al., 2000. U-Pb chronological study of zircons from the Huangcaoshan and Xiasuozi granite in the western margin of Yangtze plate. *Geological Journal of China Universities*, 6(3): 412—416 (in Chinese with English abstract).
- Shen, W. Z., Xu, S. J., Gao, J. F., et al., 2002. Sm-Nd dating and Nd-Sr isotopic characteristics of the Shimian ophiolitesuite, Sichuan Province. *Chinese Science Bulletin*, 47(22): 1897—1901. doi:10.1360/02tb9415
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 42: 313—345.
- Tanaka, T., Togashi, S., Kamioka, H., et al., 2000. JNdi-1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chemical Geology*, 168(3—4): 279—281. doi:10.1016/S0009-2541(00)00198-4
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95(4): 407—419. doi:10.1007/BF00402202
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217—1238 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S. J., Shen, W. Z., Wang, R. C., et al., 1998. U-Pb dating of zircon grains from the ore-bearing plagioclase amphibolite in the Dashuigou Te deposit. *Chinese Science Bulletin*, 43(17): 1486—1489. doi:10.1007/BF02884130
- Xue, H. M., Liu, F. L., Meng, F. C., 2006. Petrogenesis of Neoproterozoic granitoids from the Wulian region in the Sulu orogen: Sr-Nd isotopic constraints. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4): 497—504 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Pan, G. Q., Li, C. D., et al., 2007. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study (3). *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2683—2698 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. H., Zhou, M. F., 2007a. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle. *Precambrian Research*, 152(1—2): 27—47. doi:10.1016/j.precamres.2006.09.002
- Zhao, J. H., Zhou, M. F., 2007b. Neoproterozoic adakitic plutons and arc magmatism along the western margin of the Yangtze block, South China. *The Journal of Geology*, 115(6): 675—689. doi:10.1086/52161
- Zhao, X. F., Zhou, M. F., Li, J. W., et al., 2008. 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. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.07.018
- Zheng, Y. F., 2004. Position of South China in configuration of Neoproterozoic supercontinent. *Chinese Science Bulletin*, 49(8): 751—753. doi:10.1007/BF02889741
- Zhou, M. F., Kennedy, A. K., Sun, M., et al., 2002a. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China: implications for the accretion of Rodinia. *The Journal of Geology*, 110(5): 611—618. doi:10.1086/341762
- Zhou, M. F., Yan, D. P., Kennedy, A. K., et al., 2002b.

- 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(1-2): 51-67. doi:10.1016/S0012-821X(01)00595-7
- Zhou, M. F., Ma, Y. X., Yan, D. P., et al., 2006a. The Yanbian Terrane (southern Sichuan Province, SW China): a Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze block. *Precambrian Research*, 144(1-2): 19-38. doi:10.1016/j.precamres.2005.11.002
- Zhou, M. F., Yan, D. P., Wang, C. L., et al., 2006b. Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 248(1-2): 286-300. doi:10.1016/j.epsl.2006.05.032
- Zhou, M. F., Zhao, J. H., Xia, X. P., et al., 2007. Comment on "Revisiting the "Yanbian terrane": implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze block, South China" *Precambrian Res.* 151(2006) 14-30. *Precambrian Research*, 155(3-4): 313-317. doi:10.1016/j.precamres.2006.11.013
- Zhu, W. G., Deng, H. L., Liu, B. G., 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 horblende. *Chinese Science Bulletin*, 49(10): 1077-1085. doi:10.1360/03wd0570
- Zhu, W. G., Liu, B. G., Deng, H. L., et al., 2004. Advance in the study of Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks in the western margin of the Yangtze craton. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(3): 255-263 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. G., Zhong, H., Li, X. H., et al., 2008. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China. *Precambrian Research*, 164(1-2): 66-85. doi:10.1016/j.precamres.2008.03.006
- ### 附中文参考文献
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等, 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*, 79(6): 805-813.
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等, 2006. 扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定及其意义. *岩石矿物学杂志*, 25(4): 273-281.
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等, 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, 等, 2007. 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.
- 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. *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. *地球化学*, 32(1): 91-96.
- 林广春, 2008. 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. *岩石矿物学杂志*, 27(5): 398-404.
- 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. *地球化学*, 25(6): 552-558.
- 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. *高校地质学报*, 6(3): 412-416.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217-1238.
- 薛怀民, 刘福来, 孟繁聪, 2006. 苏鲁造山带五莲新元古代花岗岩类成因的 Sr-Nd 同位素证据. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(4): 497-504.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 等, 2007. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三. *岩石学报*, 23(11): 2683-2698.
- 朱维光, 刘秉光, 邓海琳, 等, 2004. 扬子地块西缘新元古代镁铁—超镁铁质岩研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 23(3): 255-263.