

# 川西丹巴地区新元古代变质玄武岩成因及构造意义

林广春<sup>1,2</sup>

(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:**对扬子地块西缘康滇裂谷北段的丹巴变质玄武岩进行了系统的岩石学、元素-Nd 同位素地球化学研究,结果表明该岩石为碱性玄武岩,样品相对富 MgO、富 TiO<sub>2</sub>, Mg<sup>#</sup> 值介于 0.51~0.59 之间。稀土总量较高,轻重稀土分馏较明显, Th、Nb、Ta、Zr、Hf 和 LREE 等不相容元素富集, Y 和 HREE 明显亏损,地球化学特征与洋岛玄武岩(OIB)类似。岩浆形成于板内裂谷环境,起源于类似 OIB 的地幔源区,并在上升过程中受到了大陆岩石圈地幔(SCLM)物质不同程度的混染,同时还可能有少量下地壳物质的混染。样品在岩石化学上表现出地幔柱岩浆作用的痕迹,很可能与导致 Rodinia 超级大陆裂解的新元古代地幔柱事件有关。

**关键词:**变质玄武岩;康滇裂谷;新元古代;Rodinia 超级大陆

中图分类号:P588.14<sup>+</sup>5;P595

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2013)04-0485-11

## Petrogenesis and tectonic significance of the Neoproterozoic Danba metabasalt in western Yangtze block

LIN Guang-chun<sup>1,2</sup>

(1. College of Earth Science 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:** Petrology, geochemical and Nd isotopic data are reported for the Neoproterozoic Danba metabasalt in the Kangdian Rift on the western margin of the Yangtze block. Samples were collected from alkaline basalts, which are enriched in MgO, TiO<sub>2</sub>, with Mg<sup>#</sup> being 0.51~0.59. They have high total rare earth elements and show high fractionation between LREE and HREE. The trace elements are characterized obviously by enrichment of Th, Nb, Ta, Zr, Hf and LREE but depletion of Y and HREE. Their geochemical and Nd isotopic characteristics suggest that they are similar to OIB. The basaltic magma was generated in an intraplate setting, and was generated by partial melting of OIB mantle source region, with variable degrees of contamination of SCLM during magma ascending; in addition, some samples might have experienced contamination of the lower crust. These samples reveal some plume magmatism characteristics in petrochemistry, and imply that magmatism was probably related to the Neoproterozoic plume event, which resulted in the breakup of Rodinia supercontinent.

**Key words:** metabasalt; Kangdian Rift; Neoproterozoic; Rodinia supercontinent

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,以酸性岩为主,包括花岗岩、花岗闪长岩、英云闪

长岩等,基性岩相对较少,主要为小侵入体、少量层状火山岩和基性岩墙、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3种相对立的观

收稿日期:2013-01-12;修订日期:2013-05-28

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金(CHD2010JC038)

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

点: ① 地幔柱模式, 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(860~740 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-超级地幔柱活动有关(Li Zhengxiang *et al.*, 1999, 2003; 李献华等, 2002, 2008; Li Xianhua *et al.*, 2002, 2003a, 2003b, 2006, 2010; Zhu *et al.*, 2006, 2008; 林广春等, 2006; 郭春丽等, 2007; Lin *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2008; 林广春, 2008, 2010)。② 岛弧模式, 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(沈渭洲等, 2000, 2002; 颜丹平等, 2002; Zhou *et al.*, 2002a, 2002b, 2006a, 2006b; Chen *et al.*, 2005; 杜利林等, 2006, 2007; Zhao and Zhou *et al.*, 2007a, 2007b; Sun *et al.*, 2007, 2008; Zhao *et al.*, 2008; 李志红等, 2008); ③ 板块-裂谷模式(Zheng *et al.*, 2007, 2008), 认为扬子和华夏陆块的造山运动持续到约 820 Ma, 大规模的 820~830 Ma 花岗岩形成于造山带垮塌阶段, 而随后的岩浆活动形成于岩石圈伸展-裂谷阶段。并由此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(颜丹平等, 2002; 李献华等, 2002, 2008; Li Xianhua *et al.*, 2002, 2003b; Zhou *et al.*, 2002a, 2002b, 2006a, 2006b; Zheng, 2004; Lin *et al.*, 2007; Li Zhengxiang *et al.*, 2008)。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。

值得指出的是, 以上 3 种对扬子西缘新元古代构造属性相对立的观点在很大程度上是由于对岩浆岩成因解释的不同, 特别是对其中的花岗质岩石的成因有很大的分歧。在川西丹巴地区的康滇裂谷考察过程中, 观察到有层状变质玄武岩出露, 与同期的新元古代基性岩墙、岩脉在时-空上密切共生。通常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), 而玄武质岩石有比较明确的岩石构造组合关系, 能够对火成岩构造组合提供比较明确的制约。本文将报道川西康滇裂谷北段的丹巴变质玄武岩的元素-Nd 同位素地球化学组成, 并探讨其岩石成因与构造意义, 为扬子块体西缘新元古代构造属性提供有效的岩石地球化学制

约。

## 1 地质背景

四川丹巴地区位于扬子地块西缘康滇裂谷最北端(图 1), 该区出露少量层状火山岩, 属康定群下部的咱里组, 侵入前震旦系, 并被上震旦统及显生宇地层沉积覆盖。康定群以往被认为是新太古代-古元古代变质基底, 但最近的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定表明其中的康定杂岩形成于 800~750 Ma(Li Xianhua *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2002a; Li Zhengxiang *et al.*, 2003; etc)。岩石野外定名为变质玄武岩(局部可定名为斜长角闪岩), 岩石经历了较强变质作用, 绿泥石化明显, 发育片理。在丹巴县城南约 30 km 处的汉牛大桥附近, 原始层序保持较完整, 可见变质玄武岩、绢云千枚岩、大理岩呈层状

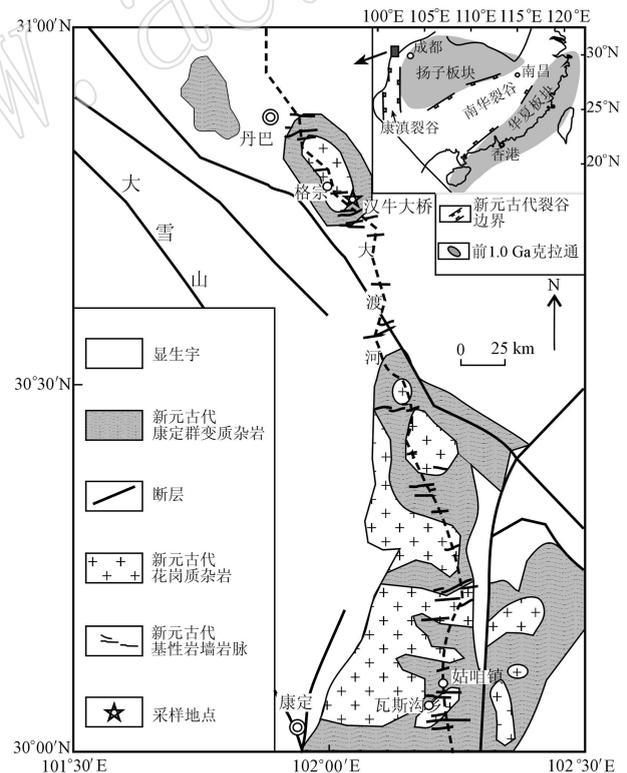


图 1 川西康定-丹巴地区前寒武纪地质简图(底图据四川省地质矿产局, 1991)

Fig. 1 Simplified Precambrian geological map of Kangding-Damba area, western Sichuan (modified after Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991)

右 上 角 插 图 为 华 南 新 元 古 代 裂 谷 系 构 造 简 图 (引 自 Li Zhengxiang *et al.*, 1999)

the inset shows the Neoproterozoic rift basins (after Li Zhengxiang *et al.*, 1999)

分布,其中变质玄武岩相对较少,以条带状、透镜状、不规则团块状分布于绢云千枚岩、大理岩中,还发育少量硅质岩、凝灰岩。层状玄武岩中有较多的同期基性岩墙、岩脉侵入,局部地段也可见到基性岩墙、岩脉被层状玄武岩覆盖(图 2a、2b、2c),表明两者应为同时期岩浆作用产物。

变质玄武岩(斜长角闪岩)的矿物组成较为简单,以斜长石和普通角闪石为主,其中斜长石绢云母化明显,含少量黑云母。副矿物锆石主要为无色-黄色透明自形晶,晶形主要为柱面较发育的四方双锥,显示原始岩浆成因的特征。结构主要为鳞片状变晶结构、变余斑状结构,暗色矿物排列略具定向性,可见弱片麻状构造、气孔构造等(图 2d)。

沈渭洲等(1997)通过单颗粒锆石 U-Pb 年龄测得这些变质玄武岩的喷发时代为 736~800 Ma,结

合与其同期的基性岩墙、岩脉的年龄(780~760 Ma, Lin *et al.*, 2007)以及区域新元古代岩浆岩的年代学数据(Li Xianhua *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2002a; etc),都表明这类岩石为新元古代中期火山作用产物。本文对采自金牛大桥附近变质层状玄武岩的 9 个样品进行元素-Nd 同位素分析。

## 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 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

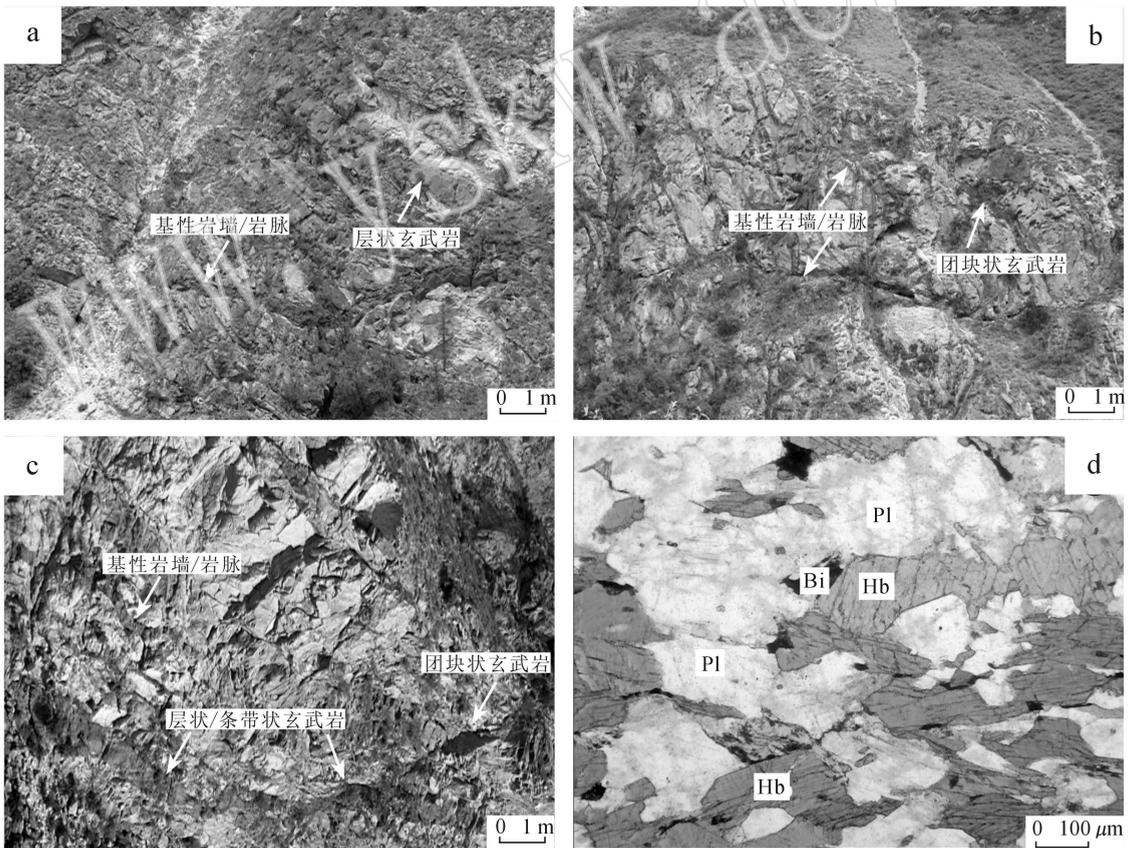


图 2 川西丹巴变质玄武岩野外照片及显微结构特征

Fig. 2 Field photographs and photomicrograph of metabasalt from Danba area, western Sichuan

a, b 和 c 为野外照片,可见变质玄武岩呈层状、条带状、团块状,与同期基性岩墙密切共生;d 为显微照片,单偏光,主要矿物斜长石(Pl)、普通角闪石(Hb)和少量黑云母(Bi),暗色矿物弱定向排列

a, b and c are field photographs, metabasalt are layered, banded or conglomerate, which were spatially and temporally coeval with the mafic dykes; d is photomicrograph, the major minerals include plagioclase(Pl), hornblende(Hb) and a little biotite(Bi), which show indistinct directional array

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,详细的分析流程参见梁细荣等(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 JNdi-1 标准的 0.512115 (Tanaka *et al.*, 2000)。Nd 同位素分析的全流程本底  $< 100 \text{ pg}$ 。

### 3 结果

丹巴变质玄武岩样品的主量和微量元素分析结果列于表 1,Nd 同位素分析结果列于表 2。样品普遍具有不同程度蚀变(烧失量  $\text{LOI} > 1.5\%$ ),由于 K、Na 和低场强元素(LFSE: Cs、Rb、Sr、Ba)在蚀变过程中可能发生了迁移,因此本文将主要依据高场强元素(HFSE: Ti、Zr、Y、Nb、Ta、Hf)、Th 和稀土元素(REE)等不活泼元素对样品进行岩石学分类、成因和构造背景讨论。

#### 3.1 主量元素

玄武岩样品的  $\text{SiO}_2$  含量在 45.44% ~ 48.05% 之间变化,样品属碱性火山熔岩。岩石相对富 MgO ( $\text{MgO} = 6.25\% \sim 8.34\%$ )、富  $\text{TiO}_2$  ( $\text{TiO}_2 = 2.19\% \sim 3.15\%$ ),  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} = 13.74\% \sim 14.96\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.62\% \sim 15.05\%$ 。Mg<sup>#</sup> 值介于 0.51 ~ 0.59 之间,表明岩浆经历了较弱的分异演化。岩石的  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  含量变化较大,分布在 1.40% ~ 7.67% 之间。样品的部分碳酸盐化造成 CaO 含量有所升高。部分样品的 LOI 较高,显示后期蚀变的影响。在 Nb/Y - Zr/TiO<sub>2</sub> 岩石分类图(Winchester and Floyd, 1976)上,所有样品 Nb/Y 比值  $> 0.5$ ,落入碱性岩石范围(图 3),岩石类型为碱性玄武岩。

#### 3.2 微量元素

在球粒陨石标准化图解(图 4a)上,玄武岩样品均表现出轻稀土元素富集的右倾模式,玄武岩的稀土总量较高,  $\sum \text{REE} = 113 \times 10^{-6} \sim 180 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5.71 \sim 10.6$ ,轻重稀土分馏较明显,其中  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.11 \sim 3.10$ ,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.63 \sim 2.71$ 。部分样品显示 Eu 异常( $\delta \text{Eu} = 0.82 \sim 1.29$ )。可能与晚期斜长石的分离结晶/堆晶作用有关。

在原始地幔标准化蛛网图上(图 4b),样品均具有稍微右倾的分布形式,微量元素表现为 Th、Nb、

Ta、Zr、Hf 和 LREE 等不相容元素富集,以及 Y 和 HREE 明显亏损,总体上呈现“隆起”模式,其曲线形态与 OIB 非常相似。部分样品的 Sr 异常可能与岩浆中斜长石的分离结晶/堆晶作用有关,也可能是后期蚀变的结果。

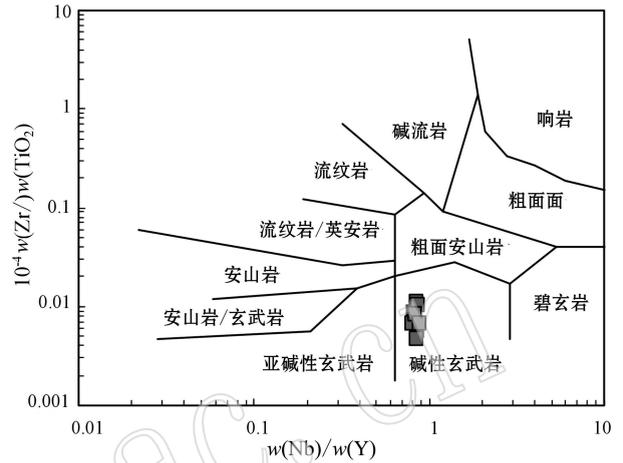


图 3 川西丹巴地区变质玄武岩  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$  岩石分类图解(Winchester and Floyd, 1976)

Fig. 3  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$  diagram of metabasalt from Danba area, western Sichuan (after Winchester and Floyd, 1976)

#### 3.3 Nd 同位素

丹巴变质玄武岩 6 个样品的 Nd 同位素分析结果列于表 2。样品的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.133208 \sim 0.149602$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512411 \sim 0.512671$ ,  $\epsilon \text{Nd}(t) = +1.45 \sim +6.37$ , 其中样品 DB11-05、DB11-06 的  $\epsilon \text{Nd}(t)$  相对较高(+6.08、+6.37)。

### 4 讨论

#### 4.1 岩石成因

在微量元素蛛网图上(图 4b),所有样品曲线形态与 OIB 类似,不相容元素的丰度虽然略低于 OIB,但明显高于岛弧玄武岩,表现出板内裂谷环境的地球化学特征。在 Ti - Sm - V 构造判别图(Vermes, 2006)上,丹巴玄武岩样品投影于 OIB 和 MORB 范围(图 5a);在 Ti - V 相关图(Shervais, 1982)上,典型的岛弧玄武岩的 Ti/V 比值为 10 ~ 20 附近,而样品的 Ti/V 比值都在 35.8 ~ 81.2 之间,明显高于岛弧玄武岩,与 OIB 和 MORB 相当(图 5b);在 Zr - Ti 相关图(Pearce, 1982)上,样品具有较高的 Zr、Ti 含量,投影于 WPB 和 MORB 区(图 5c);在 Zr - Y

表1 扬子西缘丹巴变质玄武岩主量元素( $w_B/\%$ )和微量元素( $w_B/10^{-6}$ )分析结果Table 1 Major( $w_B/\%$ ) and trace element( $w_B/10^{-6}$ ) analyses of Danba metabasalt in western Sichuan

样号	DB10-01	DB10-02	DB10-06	DB10-07	DB10-08	DB11-01	DB11-03	DB11-05	DB11-06
SiO <sub>2</sub>	45.44	48.05	46.21	47.80	47.06	46.24	46.70	47.23	46.34
TiO <sub>2</sub>	3.08	3.11	2.80	2.62	2.81	3.15	2.96	2.20	2.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.68	13.46	12.75	14.11	14.71	14.98	15.05	12.62	13.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	13.88	14.82	14.33	13.82	14.07	14.96	13.74	14.33	13.82
MnO	0.32	0.21	0.36	0.13	0.17	0.16	0.16	0.19	0.21
MgO	7.46	6.25	8.34	7.57	6.58	6.61	7.82	6.32	7.58
CaO	9.12	3.69	11.16	5.08	9.29	6.19	5.55	10.88	12.35
Na <sub>2</sub> O	2.86	3.78	1.41	2.89	2.11	3.62	4.54	0.81	1.20
K <sub>2</sub> O	1.26	3.89	0.34	3.58	0.28	1.42	0.38	1.93	0.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.46	0.34	0.28	0.49	0.41	0.52	0.40	0.25	0.25
LOI	1.89	1.82	1.66	1.56	1.88	1.63	2.30	3.04	2.03
总量	99.45	99.42	99.64	99.65	99.37	99.49	99.62	99.77	99.65
Mg <sup>#</sup>	0.57	0.51	0.59	0.58	0.54	0.52	0.59	0.52	0.58
Ti	18 459	18 639	16 781	15 703	16 841	18 864	17 766	13 211	13 154
P	2 007	1 484	1 222	2 138	1 789	2 271	1 748	913	1 101
V	243	232	256	259	252	232	249	369	359
Rb	46.0	33.9	4.78	43.7	52.2	23.9	16.0	38.7	2.30
Sr	428	227	288	280	467	409	219	707	916
Y	28.7	27.5	24.7	31.2	32.4	32.3	32.6	26.0	25.7
Zr	219	236	188	286	284	261	249	145	142
Nb	24.6	22.3	19.8	26.6	28.1	27.0	27.1	22.9	21.7
Cs	1.24	1.23	0.93	2.32	0.68	1.40	0.33	2.84	0.18
Ba	474	318	288	447	251	444	185	314	195
La	25.1	26.8	37.7	33.5	29.7	29.8	27.7	19.1	18.0
Ce	53.1	46.4	70.6	70.1	65.7	64.0	63.1	42.4	41.1
Pr	8.91	6.27	9.91	7.69	7.98	8.58	8.36	5.67	5.44
Nd	36.9	22.3	34.4	30.6	33.5	37.0	35.3	24.8	23.6
Sm	7.14	6.43	.84	8.26	8.29	8.42	7.86	5.84	5.20
Eu	2.31	2.42	1.94	2.17	2.44	2.69	2.50	1.89	1.92
Gd	7.32	5.06	5.04	7.78	7.77	8.31	7.66	6.15	5.36
Tb	1.12	0.88	1.07	1.24	1.25	1.24	1.15	0.94	0.89
Dy	5.69	3.74	4.65	6.12	6.10	6.88	6.44	5.35	5.04
Ho	1.10	0.76	0.96	1.31	1.37	1.33	1.21	1.07	0.92
Er	2.72	1.97	2.72	3.31	3.44	3.30	3.00	2.75	2.68
Tm	0.38	0.28	0.44	0.52	0.53	0.44	0.40	0.37	0.29
Yb	2.29	1.99	2.56	3.06	2.77	2.71	2.33	2.40	1.98
Lu	0.29	0.29	0.37	0.44	0.41	0.40	0.32	0.35	0.30
Hf	6.11	6.44	6.81	5.01	4.99	5.87	5.73	3.52	3.67
Ta	1.77	1.66	1.82	1.86	1.63	1.72	1.73	1.20	1.19
Th	2.78	3.10	2.50	2.13	1.88	3.25	3.35	2.39	1.39
U	0.77	0.82	0.63	0.84	0.75	0.80	0.75	0.49	0.46
∑REE	154	126	180	176	171	175	167	119	113
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.89	9.68	10.6	7.88	7.71	7.90	8.54	5.71	6.55
(La/Sm) <sub>N</sub>	2.27	2.69	3.10	2.62	2.31	2.28	2.27	2.11	2.23
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	2.64	2.10	1.63	2.10	2.32	2.53	2.71	2.12	2.24
Nb/Y	0.86	0.81	0.80	0.85	0.87	0.84	0.83	0.88	0.84
Nb/U	31.9	27.2	31.4	31.7	37.5	33.6	35.9	46.7	47.1
△Nb	-0.02	-0.14	-0.05	-0.18	-0.13	-0.08	-0.04	+0.25	+0.24

注: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>为全铁, Mg<sup>#</sup> = Mg<sup>2+</sup> / (Mg<sup>2+</sup> + Fe<sup>2+</sup>)。假设 Fe<sup>2+</sup> / (Fe<sup>2+</sup> + Fe<sup>3+</sup>) = 0.80。

表 2 扬子西缘丹巴变质玄武岩 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 2 Sm-Nd isotopic data of Danba metabasalt in western Sichuan

样品号	Sm( $w_B/10^{-6}$ )	Nd( $w_B/10^{-6}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
DB10-06	7.84	34.4	0.137 776	0.511 706	$0.512 411 \pm 0.000 008$	+ 1.45
DB10-08	8.29	33.5	0.149 602	0.511 758	$0.512 523 \pm 0.000 009$	+ 2.46
DB11-01	8.42	37.0	0.137 546	0.511 729	$0.512 432 \pm 0.000 008$	+ 1.89
DB11-03	7.86	35.3	0.134 526	0.511 725	$0.512 413 \pm 0.000 009$	+ 1.82
DB11-05	5.84	24.8	0.142 291	0.511 943	$0.512 671 \pm 0.000 009$	+ 6.08
DB11-06	5.20	23.6	0.133 208	0.511 958	$0.512 639 \pm 0.000 008$	+ 6.37

注:  $t = 0.780 \text{ Ga}$ , 引自 Lin *et al.* (2007); Sm、Nd 含量采用 ICP-MS 测试结果。

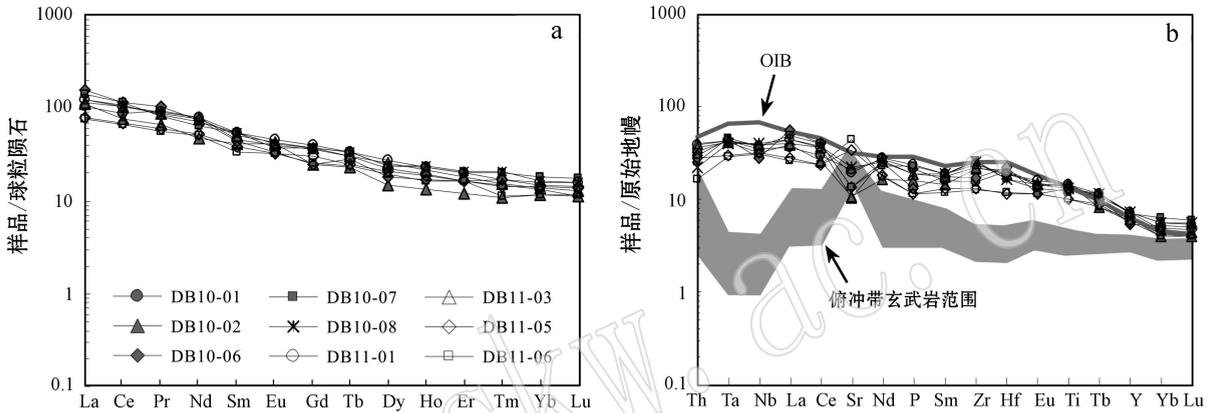


图 4 川西丹巴地区变质玄武岩的稀土元素分布型式(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE diagram (a) and primitive mantle-normalized spidergram (b) of Danba metabasalt, western Sichuan

球粒陨石 REE 数据、原始地幔数据引自 Sun and McDonough, 1989, 俯冲带玄武岩数据引自 Tatsumi and Eggins, 1995  
the normalization REE and primitive mantle values are from Sun and McDonough, 1989; ranges of the island arc basalts are from Tatsumi and Eggins, 1995

- Nb 判别图(Pearce & Norry, 1979)上,所有样品的 Zr/Y 比值和 Zr 含量高而落入板内玄武岩范围(图 5d)。

样品不相容元素的丰度普遍略低于 OIB,可能是受到低不相容元素丰度的物质的混染。由于不同元素在不同矿物中具有不同的相容性,随结晶作用的进行,残余岩浆逐渐亏损早期结晶相中的相容元素,并逐渐富集早期结晶相中的不相容元素,但总分配系数相同或相近的元素比值不会因岩浆的结晶作用而明显改变。因此,选取总分配系数相同或很相近、对不同源区存在显著差别的元素比值(如 Th/Nb、La/Sm、Ce/Yb、Zr/Nb 等),可以检验是否存在同化混染作用,并可大致判别混染程度。在 La/Sm - Th/Nb 相关图(图 6a)上,样品分布于 OIB 和大陆岩石圈地幔(SCLM)之间,表现出由 OIB 向大陆岩石圈地幔(SCLM)延伸的趋势;在 Zr/Nb - Ce/Yb 相

关图(图 6b)上,样品分布于大陆岩石圈地幔(SCLM)附近,并有向下地壳延伸的趋势。上述特征显示丹巴玄武岩岩浆的形成应有大陆岩石圈地幔物质的参与。还注意到,样品的 Th 含量变化大(1.39 ~ 3.35), Nb/U 比值为 27.2 ~ 47.1 [在 OIB 和 MORB 中 Nb/U 比值为 47,球粒陨石和原始地幔为 34, Sun & McDonough, 1989; 岩石圈地幔 SCLM 为 40(McDonough, 1990); 大陆地壳为 9.7 (Rudnick & Gao, 2003)],显示这些玄武岩样品可能还受到地壳物质不同程度的混染。样品具正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(+ 1.45 ~ + 6.37),暗示混染的地壳物质主要为亏损下地壳,在 Nb/U - Nb 图解(图 6c)上也表明有下地壳物质的加入。样品 DB11-05、DB11-06 的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  相对较高(+ 6.08、+ 6.37), Nb/U 分别为 46.7、47.1,都暗示受地壳物质混染最少。

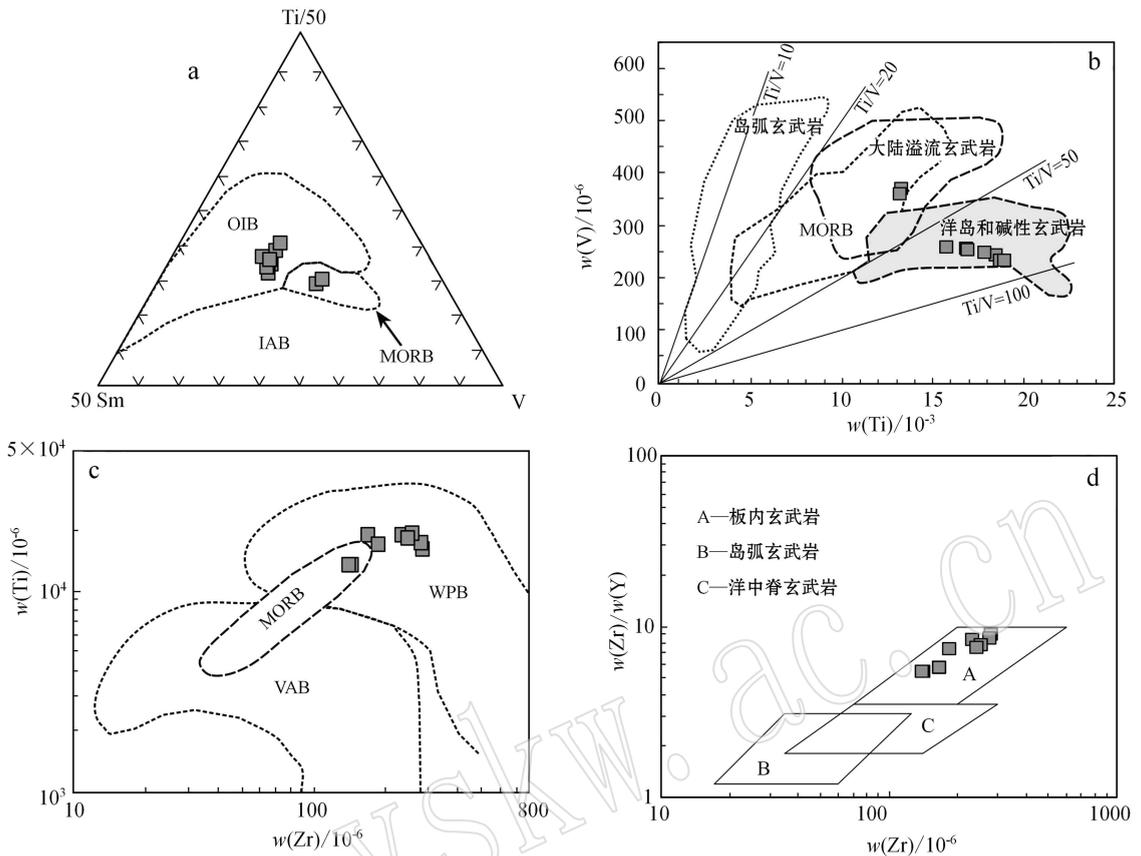


图 5 川西丹巴地区变质玄武岩样品的构造判别图

Fig. 5 Tectonic discrimination diagrams of Danba metabasalt, western Sichuan

a: Ti - Sm - V 判别图 (Vermeesch, 2006), OIB=洋岛玄武岩, IAB=岛弧玄武岩, MORB=洋中脊玄武岩; b: V - Ti 判别图 (Shervais, 1982); c: Ti - Zr 判别图 (Pearce, 1982), VAB=火山弧玄武岩, WPB=板内玄武岩; d: Zr/Y - Zr 判别图 (Pearce and Norry, 1979)

a: Ti - Sm - V diagram (after Vermeesch, 2006), OIB=ocean-island basalts, IAB=island arc basalt, MORB=mid-ocean ridge basalt;  
 b: V - Ti diagram (after Shervais, 1982); c: Ti - Zr diagram (after Pearce, 1982), VAB=volcanic arc basalt, WPB=intraplate basalt;  
 d: Zr/Y - Zr diagram (after Pearce and Norry, 1979)

综上所述,本文认为丹巴新元古代变质玄武岩应形成于板内裂谷环境,与扬子西缘同时代的基性岩成因类似(如 803 ± 12 Ma 苏雄玄武岩, Li Xianhua *et al.*, 2002; 808 ± 12 Ma 的冷碛辉长岩,李献华等, 2002; 780~760 Ma 基性岩墙群, Lin *et al.*, 2007 等),岩浆起源于类似 OIB 型地幔源区,在上升过程中受到了大陆岩石圈地幔(SCLM)物质不同程度的混染,同时还可能有少量地壳物质的混染。

### 4.2 构造意义

扬子地块西缘康滇裂谷中出露有同时代的富 MgO 高温岩浆,如石棉北 780~760 Ma 基性岩墙 (Lin *et al.*, 2007)、796 ± 5 Ma 的同德苦橄岩脉(Li Xianhua *et al.*, 2010)等,这些岩浆的熔融温度(地幔潜能温度分别为 1 450~1 470℃、1 600~1 620℃)

都明显高于正常的 MORB-地幔源区(1 280℃ ~ 1 350℃, McKenzie & Bickle, 1988),很可能与导致 Rodinia 超级大陆裂解的新元古代地幔柱事件有关。这些研究成果为扬子地块西缘新元古代地幔柱模式提供了直接的高温岩石记录。通常一个理想的地幔柱省包括高温和高压的岩浆,前者如苦橄岩或科马提岩,后者如金伯利岩和碱性玄武岩。在扬子地块西缘的新元古代岩浆岩中,高温的岩浆(石棉北 780~760 Ma 基性岩墙, Lin *et al.*, 2007; 796 ± 5 Ma 的同德苦橄岩脉, Li Xianhua *et al.*, 2010)和高压岩浆(803 ± 12 Ma 的苏雄碱性玄武岩, Li Xianhua *et al.*, 2002; 本文研究的 ~780 Ma 丹巴变质玄武岩等)都有出露,这些都支持扬子地块西缘新元古代岩浆活动的地幔柱成因。

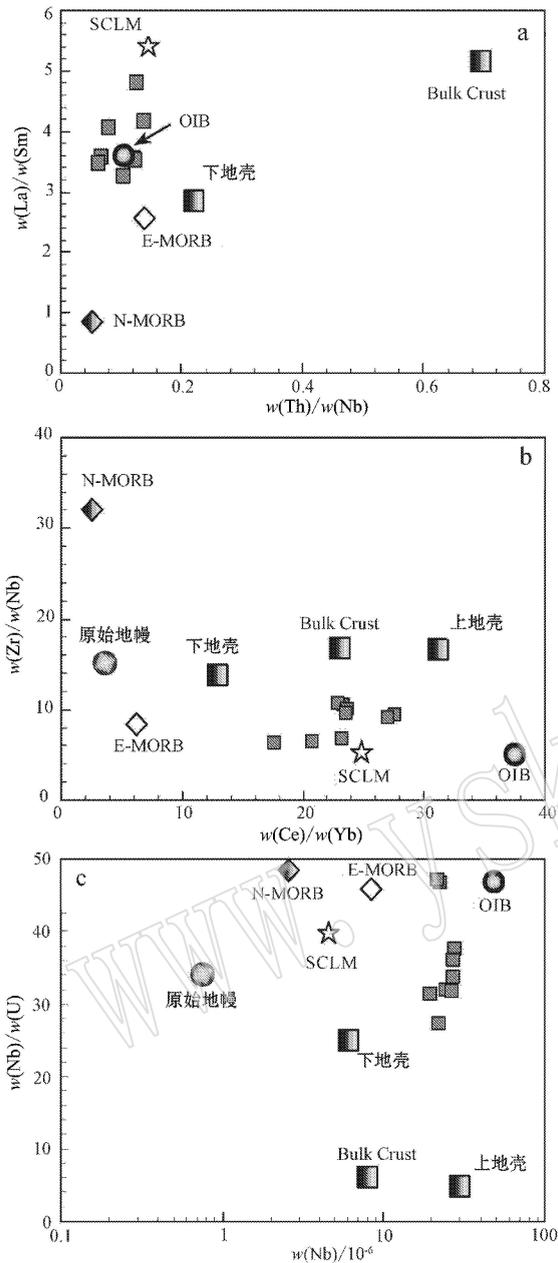


图 6 川西丹巴地区变质玄武岩的 La/Sm - Th/Nb 图解 (a)、Zr/Nb - Ce/Yb 图解 (b) 和 Nb/U - Nb 图解 (c)  
Fig. 6 La/Sm - Th/Nb diagram (a), Zr/Nb - Ce/Yb diagram (b) and Nb/U - Nb diagram (c) of Danba metabasalt, western Sichuan

N-MORB = 正常洋中脊玄武岩, E-MORB = 富集洋中脊玄武岩, OIB = 洋岛玄武岩, SCLM = 大陆岩石圈地幔 (N-MORB, E-MORB, OIB 和原始地幔数据引自 Sun & McDonough, 1989; Bulk Crust 数据引自 Rudnick & Gao, 2003; SCLM 数据引自 McDonough, 1990)

N-MORB = normal mid-ocean ridge basalt, E-MORB = enriched mid-ocean ridge basalt, OIB = ocean-island basalts, SCLM = subcontinental lithospheric mantle (data of N-MORB, E-MORB, OIB and primitive mantle are from Sun & McDonough, 1989; data of Bulk Crust are from Rudnick & Gao, 2003; data of SCLM are from McDonough, 1990)

来自地幔柱的岩浆具有与一般岩浆明显不同的化学特点:地幔柱岩浆来源于地幔的热异常带,属高温、高压和干的岩浆,它们形成于板内的张性环境。当地幔柱岩浆受到次大陆岩石圈和地壳混染时,也可产生与弧岩浆相似的 Nb、Ta、Ti 亏损的微量元素分布型式,使得区分地幔柱岩浆和弧岩浆有时比较困难。Fitton 等(1997)研究冰岛地幔柱时提出  $\Delta Nb$  的概念:  $\Delta Nb = 1.74 + \log(Nb/Y) - 1.92 \times \log(Zr/Y)$ 。

当  $\Delta Nb > 0$  时,岩浆具有类似冰岛地幔柱的地幔源;  $\Delta Nb < 0$  时,具有浅部亏损地幔源 DM, 或受俯冲带、陆壳、大陆岩石圈混染的地幔柱 (Fitton *et al.*, 1997)。 $\Delta Nb$  不受地幔熔融程度、地幔中熔体抽取产生的亏损及地壳混染和蚀变作用影响,比用同位素识别混染和蚀变玄武岩的地幔源更有效 (Fitton *et al.*, 1997)。

计算结果显示,丹巴碱变质玄武岩样品的  $\Delta Nb$  大多为负值(表 1),但受混染最少的 2 个样品 DB11-05、DB11-06 [ $\epsilon Nd(t)$  为 +6.08、+6.37; Nb/U 比值为 46.7、47.1] 的  $\Delta Nb$  分别为 +0.025、+0.024, 仍然表现出地幔柱的特征,应为新元古代地幔柱事件在岩石化学上的反映。

基于以上讨论,本文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。如果这些研究成果是正确的,那么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, 2008)。

## 5 结论

扬子地块西缘丹巴新元古代变质玄武岩为碱性玄武岩,形成于板内裂谷环境,岩浆起源于类似 OIB 的地幔源区,大陆岩石圈地幔 (SCLM) 物质不同程度参与了岩浆的形成,在岩浆上升过程中还可能有少量下地壳物质的混染。岩浆活动很可能与导致 Rodinia 超级大陆裂解的新元古代地幔柱事件有关。

**致谢** 刘颖、李杰、胡光黔、马金龙高级工程师,梁细荣研究员对主量元素、微量元素和 Nd 同位素测试给予了细心的指导,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

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. 1991. Regional Geology of Sichuan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~730 (in Chinese).
- Chen Yuelong, Luo Zhaohua, Zhao Junxiang, *et al.* 2005. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province [J]. Sci. China Ser. D-Earth Sci., 48(5): 622~634.
- Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, *et al.* 2006. The stipulation of Neoproterozoic TTG in western Yangtze block and its significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(4): 273~281 (in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, *et al.* 2007. New understanding on Kangding group on western margin of Yangtze Block: Evidence from geochemistry and chronology [J]. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1562~1577 (in Chinese with English abstract).
- Fitton J G, Saunders A D, Norry M J, *et al.* 1997. Thermal and chemical structure of the Iceland plume [J]. Earth and Planetary Science Letters, 153(3~4): 197~208.
- Frost B R, Barnes C, Collins W J, *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks [J]. J. Petrol., 42: 2033~2048.
- 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.
- Guo Chunli, Wang Denghong, Chen Yuchuan, *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb zircon ages and major element, trace element and Nd-Sr isotope geochemical studies of a Neoproterozoic granitic complex in western Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2457~2470 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaolong, Xu Yigang and Li Xianhua. 2008. Petrogenesis and tectonic implications of Neoproterozoic, highly fractionated A-type granites from Mianning, South China [J]. Precambrian Research, 165: 190~204.
- 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 Research, 122: 45~83.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Sinclair J A, *et al.* 2006. Revisiting the "Yanbian Terrane": Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China [J]. Precambrian Research, 151: 14~30.
- 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.* 2002. 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.* 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(Sup): 73~83.
- Li Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, *et al.* 2008. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting [J]. Geochimica, 37(4): 382~398 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Zhu Weiguang, Zhong Hong, *et al.* 2010. The Tongde Picritic Dikes in the Western Yangtze block: evidence for ca. 800 Ma mantle plume magmatism in South China during the breakup of Rodinia [J]. The Journal of Geology, 118(5): 509~522.
- Li Zhengxiang, Bogdanova S V, Collins A S, *et al.* 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis [J]. Precambrian Research, 160: 67~76.
- 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.
- Li Zhihong, Luo Zhaohua, Chen Yuelong, *et al.* 2008. Geology and geochemistry of the Kangding-Luding metamorphosed intrusions and implication for Tectonic Setting [J]. Geoscience, 22(2): 181~189 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Lin Guangchun. 2008. Petrochemical characteristic of Wasigou complex in western Yangtze block—Petrogenesis and tectonic significance

- [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27( 5 ): 398 ~ 404( in Chinese with English abstract ).
- Lin Guangchun. 2010. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristic of Shimian granite in western Sichuan—Petrogenesis and tectonic significance[ J ]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35( 4 ): 611 ~ 620( in Chinese with English abstract ).
- 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 ).
- McDonough W F. 1990. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle[ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 101 : 1 ~ 18.
- McKenzie D P and Bickle M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of whole lithosphere[ J ]. *J. Petrol.*, 29 : 625 ~ 679.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks[ J ]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69 : 33 ~ 47.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[ A ]. Thorpe R S. *Andesites*[ M ]. Wiley, New York, 525 ~ 548.
- Rudnick R L and Gao Shan. 2003. Composition of the continental crust [ A ]. Rudnick R L. *The Crust : Vol. 3 C*. Treatise on Geochemistry, Oxford : Elsevier-Pergamon, 1 ~ 64.
- 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 ).
- Shen Weizhou, Xu Shijin, Wang Rucheng, *et al.* 1997. Preliminary chronologic study of Mera-basalt in Danba area and its geological significance[ J ]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18( Supp. ): 62 ~ 64( in Chinese with English abstract ).
- Shervais J W. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 31 : 457 ~ 484.
- 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.
- Sun Weihua, Zhou Meifu, Yan Danping, *et al.* 2008. Provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic Yanbian Group, western Yangtze Block( SW China ) [ J ]. *Precambrian Res.*, 167 : 213 ~ 236.
- Sun Weihua, Zhou Meifu and Zhao Junhong. 2007. Geochemistry and tectonic significance of basaltic lavas in the Neoproterozoic Yanbian Group, southern Sichuan Province, southwest China[ J ]. *Int. Geol. Rev.*, 49 : 554 ~ 571.
- Tanaka T, Togashi S, Kamioka H, *et al.* 2000. JNdi-1 : A neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium[ J ]. *Chem. Geol.*, 168 : 279 ~ 281.
- Tatsumi Y and Eggins S M. 1995. *Subduction Zone Magmatism*[ M ]. Cambridge, Boston : Black Well Science, 1 ~ 211.
- Vermeesch P. 2006. Tectonic discrimination diagrams revisited[ J ]. *Geochem Geophys Geosyst*, 7( 6 ): 1 ~ 55.
- Winchester J A and Floyd P A. 1976. Geochemical magma type discrimination : application to altered and metamorphosed igneous rocks [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 28 : 459 ~ 469.
- 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 ).
- Zhao Junhong and Zhou Meifu. 2007a. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district ( Sichuan Province, SW China ) : implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle[ J ]. *Precambrian Research*, 152 : 27 ~ 47.
- Zhao Junhong and Zhou Meifu. 2007b. Neoproterozoic adakitic plutons and arc magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[ J ]. *Journal of Geology*, 115 : 675 ~ 689.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, *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 [ J ]. *Chemical Geology*, 257( 1 ~ 2 ): 1 ~ 15.
- Zheng Yongfei, Wu Rongxin, Wu Yuanbao, *et al.* 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust : Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and graniticrocks in the Jiangnan orogen, South China[ J ]. *Precambrian Research*, 163( 3 ~ 4 ): 351 ~ 383.
- Zheng Yongfei, Zhang Shaobin, Zhao Zifu, *et al.* 2007. Contrasting zircon Hf and O isotope in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China : Implications for growth and reworking of continental crust [ J ]. *Lithos*, 96 : 127 ~ 150.
- 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.* 2006a. 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.
- Zhou Meifu, Yan Danping, Wang Changliang, *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 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 248: 286~300.
- Zhu Weiguang, Zhong Hong, Deng Hailin, *et al.* 2006. SHRIMP zircon U-Pb age, geochemistry, and Nd-Sr isotopic of Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex, Southwest China [J]. *International Geology Review*, 48: 650~668.
- Zhu Weiguang, Zhong Hong, Deng Hailin, *et al.* 2008. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China [J]. *Precambrian Research*, 164(1~2): 66~85.
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 2002. 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.
- 李献华, 王选策, 李武显, 等. 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷 [J]. *地球化学*, 37(4): 382~399.
- 李志红, 罗照华, 陈岳龙, 等. 2008. 康定-泸定地区变质侵入岩的地质地球化学特征及其构造环境 [J]. *现代地质*, 22(2): 181~189.
- 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. 川西新元古代基性岩墙群的 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.
- 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 [J]. *岩石矿物学杂志*, 27(5): 398~404.
- 林广春. 2010. 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 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(4): 611~620.
- 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.
- 沈渭洲, 徐士进, 王汝成, 等. 1997. 丹巴地区变玄武岩年代学的初步研究及其地质意义 [J]. *地球学报*, 18(增刊): 62~64.
- 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.

## 附中文参考文献

- 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 [J]. *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 [J]. *地质学报*, 81(11): 1562~1577.
- 郭春丽, 王登红, 陈毓川, 等. 2007. 川西新元古代花岗质杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、元素和 Nd-Sr 同位素地球化学研究: 岩石成因与构造意义 [J]. *岩石学报*, 23(10): 2457~2470.