

川西康定—丹巴地区新元古代基性岩墙成因及源区性质

林广春^{1,2} 董俊超³

(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; 3. 陕西中核资源有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 扬子地块西缘新元古代岩浆岩分布广泛, 目前对其成因和构造背景的认识还存在很大争议。本文报道了川西康滇裂谷北段康定—丹巴地区新元古代基性岩墙的岩石学、元素地球化学和 Sm-Nd 同位素特征, 探讨其岩石成因、岩浆源区性质和岩浆熔融深度。结果表明岩石样品属拉斑系列, 形成于板内裂谷环境, 岩浆在上升侵位过程中受到了初生岛弧地壳物质不同程度的混染。岩浆起源于亏损地幔源区, 是尖晶石地幔橄榄岩部分熔融的产物, 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: 基性岩墙; 康滇裂谷; 新元古代; Rodinia 超级大陆

中图分类号: P581; P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)06-1793-13

扬子地块西缘新元古代岩浆活动强烈, 沿康滇裂谷基本连续分布, 以花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩等酸性岩为主, 基性岩相对较少, 包括小侵入体、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, 目前存在三种不同的认识: 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^[1-17]。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”^[18-19]; ②岛弧模式, 认为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^[20-35], 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^[22-23]或根本不属于 Rodinia 超级大陆的一部分^[21]; ③板块—裂谷模式^[36-38], 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。

由此可见, 尽管对扬子地块西缘新元古代岩浆岩的研究已经取得了诸多成绩, 但对一些关键科学问题的认识还存在分歧, 或有待进一步探讨。例如, 这些岩浆岩成因和构造背景是“板内裂谷”还是“岩浆弧”? 是否与导致 Rodinia 超级大陆裂解的新元古代地幔柱事件有关? 岩浆形成于何种地幔源区? 熔融深度如何? 等等。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。笔者在川西康定—丹巴地区考察时, 观察到大量的基性岩墙侵入花岗质围岩中。基性岩墙通常被作为伸展构造的标志, 由源自地幔的玄武质岩浆充填张性裂隙形成, 具有重要的构造演化意义^[39-40], 并能为上地幔的物质组成提供制约^[41]。相对于酸性岩, 基性岩有比较明确的岩石构造组合关

收稿日期: 2013-01-25; 改回日期: 2013-10-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(CHD2010JC038)资助。

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

系, 基性岩的成因研究将更有助于检验扬子块体西缘新元古代时期的构造环境。本文以扬子西缘康滇裂谷北段康定—丹巴地区的基性岩墙为研究对象, 详细分析其岩石学、元素地球化学和 Sm-Nd 同位素特征, 探讨其岩石成因、源区性质及构造意义。

1 地质背景

四川康定—丹巴地区位于扬子地块西缘康滇裂谷北段(图 1), 区内前寒武纪岩石主要为康定群或称康定杂岩, 岩性为一些花岗岩及少量闪长岩和辉长岩, 普遍具有叶理而通常被称之为片麻岩。康定杂岩以往被认为是新太古代—古元古代变质基底, 但最近获得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄表明其形成于

800~750 Ma^[2,20], 并经历明显的中生代构造—热事件影响^[8]。本文研究的基性岩墙属康定杂岩的一部分, 主要分布在康定县姑咱镇北到丹巴县城的大渡河两岸, 南北延长约 300 km。

样品 GZ11-04、GZ11-05、GZ11-06、GZ11-07 采自康定县姑咱镇北, 黄金坪至羊厂村的公路上及附近大渡河两岸, 岩性为灰绿色细粒辉绿岩, 呈小规模岩墙、岩脉侵入于 755~795 Ma 的瓦斯沟花岗质杂岩^[15,20]中(图 2-a)。主要矿物为斜长石(45%~55%)、辉石(35%~45%)、角闪石(约 5%)和少量黑云母、石英及铁钛氧化物(约 5%)等。样品有一定程度的蚀变, 片理化明显, 常发育后期 X 型剪节理。大多数岩墙表现出侵位略晚于花岗质岩石并与花岗质岩浆发生不

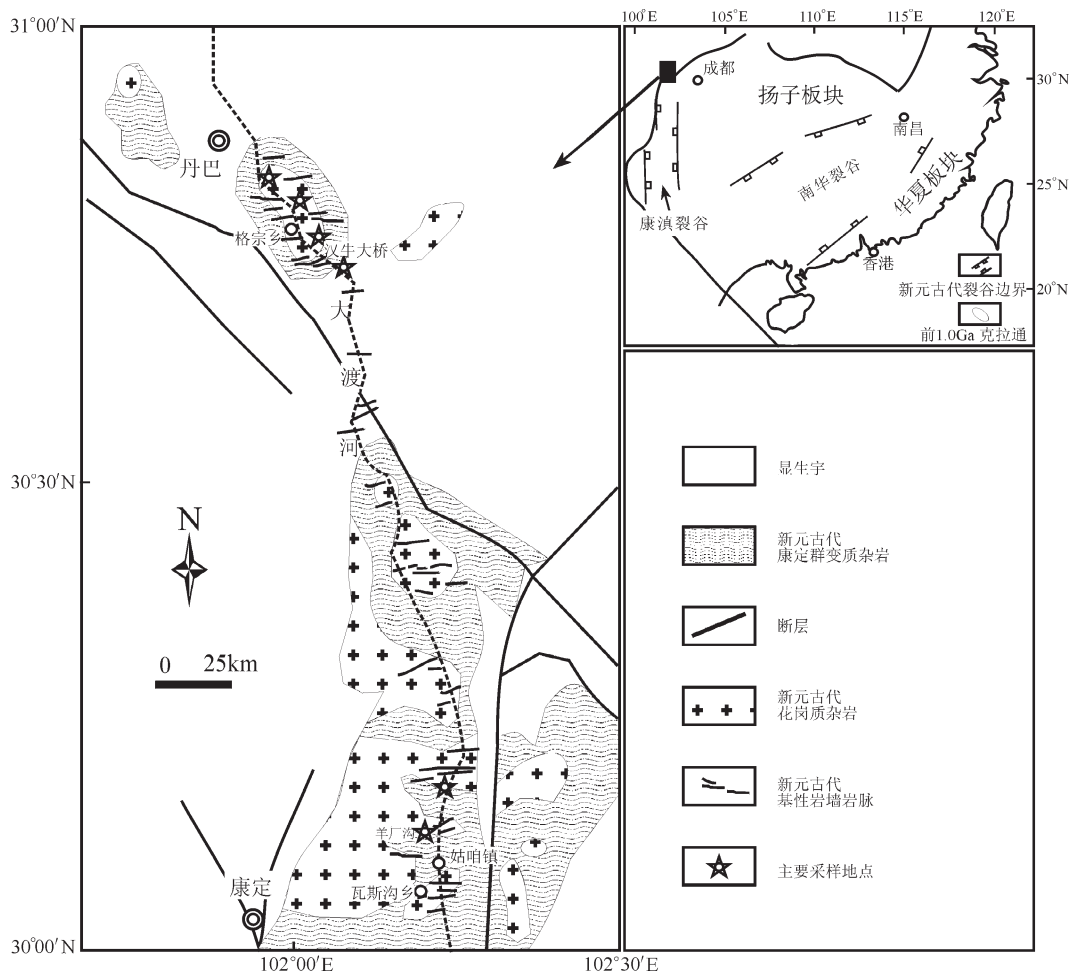


图 1 华南新元古代裂谷系构造简图(a)(引自文献[1])和川西康定—丹巴地区前寒武纪地质简图(b)
(底图据 1:500000 四川省区域地质志)

Fig.1 Simplified geological map of Neoproterozoic rift basin in South China (a) (after reference [1]) and simplified Precambrian geological map of Kangding—Danba area, western Sichuan (b) (modified after 1:500000 Regional Geology of Sichuan Province)

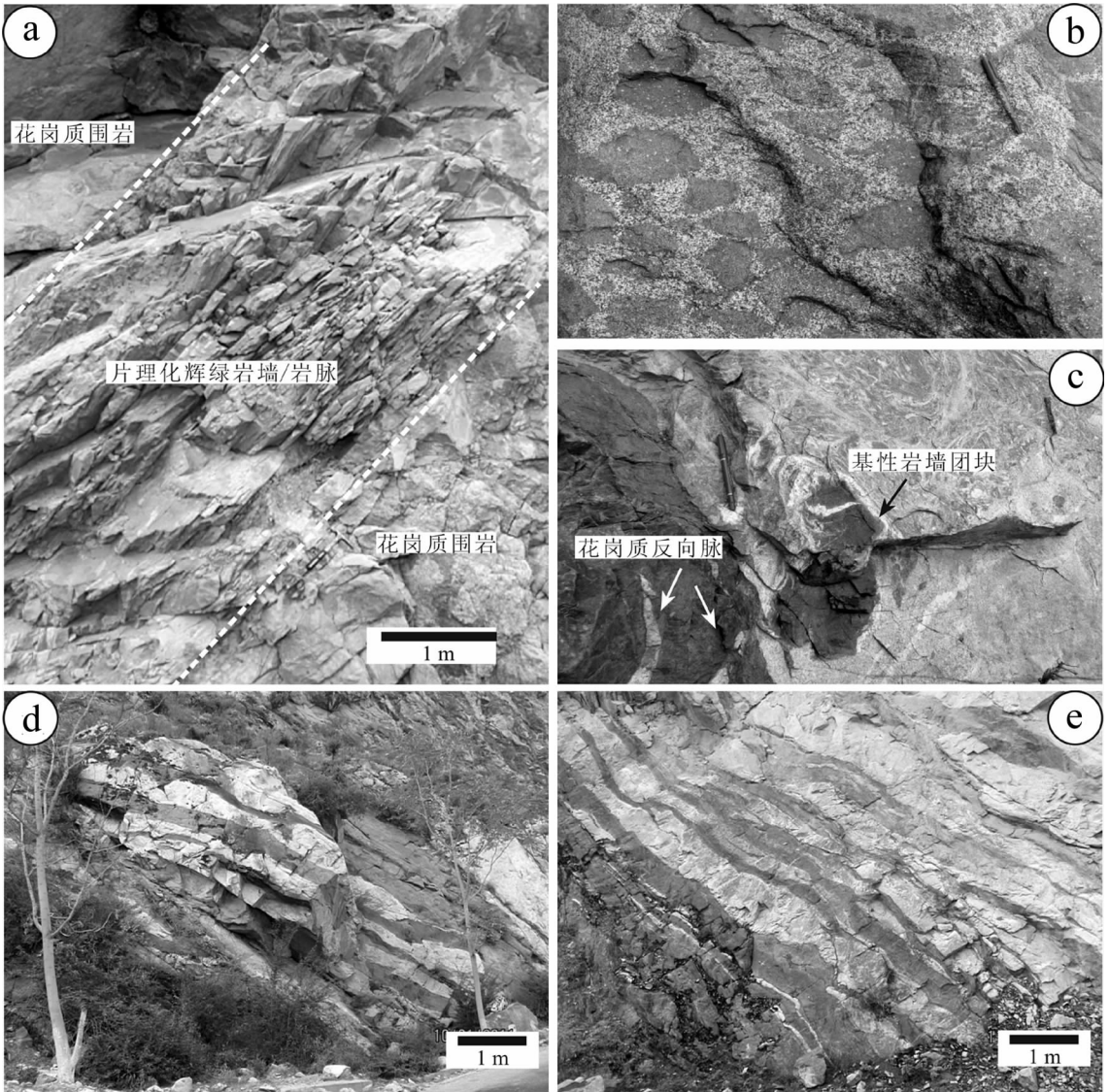


图 2 川西康定—丹巴地区基性岩墙野外产状

Fig.2 Field photos of mafic dykes from Kangding-Danba area, western Sichuan

同程度的岩浆混合,如:(1)花岗质岩石中出现大量拉长的、定向排列的基性岩包体(图 2-b),称为“鱼群状包体”,是基性岩浆侵入没有完全固结的花岗质岩石中,由于花岗质岩浆流动而被破碎、拉长形成的^[43],野外常见基性岩墙/小岩体的边部出现宽达数米至数十米的定向包体带;(2)在基性岩墙边部,可见花岗质岩石呈不规则脉状侵入岩墙中(图 2-c),靠近基性岩墙的花岗质岩石还可见从岩墙边部破碎分离出的碎块(图 2-c),这种基性岩墙被称为同深成岩墙(synplutonic dyke),侵入基性岩墙中的花岗质岩脉称为反向脉(back-vein),是基性岩墙在未固结的花岗

质岩浆流动过程中被破裂,并被花岗质岩浆侵入的结果^[43]。这些现象表明基性岩墙侵位时花岗质岩尚未完全固结,基性岩墙和花岗质岩石是近于同时形成的。

样品 DB11-02、DB11-04、DB11-07~DB11-15 采自丹巴县格宗乡汗牛大桥至丹巴县城的公路边。岩性为灰黑色中细粒辉长岩,侵位于约 823 Ma 格宗花岗岩^[12,20]中,并被显生宙地层覆盖。这些岩墙大致为东西向展布、近于直立,宽度 1~3 m(图 2-d,e),岩石主要矿物成分为斜长石(45%~55%)、辉石(25%~35%)、角闪石(约 15%)和少量黑云母及铁钛氧化物

(约 5%), 绢云母化明显。

野外地质产状以及区域新元古代岩浆岩的年代学研究成果^[8,12,20], 都表明这些基性岩墙的侵位时代为新元古代中期(800~760 Ma)。本文对上述 15 个样品进行主量和微量元素地球化学分析, 并对其中 8 个样品(2 个辉绿岩、6 个辉长岩)进行了 Sm-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 报道的相似^[43], 分析精度优于 5%。ICP-MS 微量元素分析流程见刘颖等^[44], 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, Sm-Nd 同位素组成测试在广州地球化学研究所的 Micromass Isoprobe 型多接受器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)上进行, 详细的分析程序参见梁细荣等^[45]。¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219 校正, 测得的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值校正到 Shin Etsu JNdi-1 标准的 0.512115^[46]。Nd 同位素分析的全流程本底<100 pg。

3 测试结果

基性岩墙样品的主量和微量元素分析结果列于表 1, Sm-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 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、成因和源区性质讨论。

3.1 主量元素地球化学

与丹巴地区辉长岩相比, 采自康定县姑咱镇的辉绿岩相对高 SiO₂ (54.51%~56.57%, 丹巴辉长岩为 47.12%~52.95%)、低 TiO₂ (0.60%~0.74%, 丹巴辉长岩为 0.90%~1.33%)、低 Fe₂O₃^T (6.60%~7.74%, 丹巴辉长岩为 9.34%~13.04%)、低 MgO (2.78%~3.29%, 丹巴辉长岩为 3.20%~8.23%)。所有样品的 Al₂O₃=15.60%~19.04%, Mg[#] 值介于 0.46~0.66, 包括了从接近原始

岩浆到分异演化岩浆的组分。岩石的(Na₂O+K₂O) 含量变化较大, 为 3.12%~5.07%。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/TiO₂ 岩石分类图^[47]上, 样品投影于玄武岩(采自丹巴辉长岩)-玄武安山岩区域(采自康定县姑咱镇辉绿岩)(图 3-a)。所有样品 Nb/Y 比值<0.5, 落入亚碱性岩石范围(图 3-a), 在 FeOt/MgO-TiO₂ 图解^[48]上, 除采自康定县姑咱镇的 4 个辉绿岩样品外, 其他样品均显示拉斑系列趋势(图 3-b)。

3.2 微量元素地球化学

在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 4-a)上, 所有样品均表现出轻稀土元素富集的右倾模式。其中采自南部姑咱镇的辉绿岩稀土总量相对较高, $\sum \text{REE}=92.3 \times 10^{-6} \sim 105 \times 10^{-6}$, 轻重稀土分馏较明显, (La/Yb)_N=9.87~10.6, 其中 (La/Sm)_N=3.22~3.31, (Gd/Yb)_N=1.95~2.15; 而采自北部丹巴地区的辉长岩稀土总量较低, $\sum \text{REE}=55.8 \times 10^{-6} \sim 94.5 \times 10^{-6}$, 轻重稀土分馏相对不明显, (La/Yb)_N=3.32~5.52, 其中 (La/Sm)_N=1.55~2.15, (Gd/Yb)_N=1.55~2.13。部分样品显示较弱的 Eu 异常($\delta \text{Eu}=0.93 \sim 1.13$)。可能与晚期斜长石的分离结晶/堆晶作用有关。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4-b)上, 所有样品均具有稍微右倾的分布形式, 地球化学特征表现为 Th、LREE 等不相容元素相对富集, 高场强元素 Ta、Nb 等明显亏损, Ti 呈现负异常, 表现出类似于岛弧环境的地球化学特征, 也可能是陆壳物质加入混染的结果。部分样品的 Sr、P 异常可能与岩浆中斜长石和或磷灰石的分离结晶/堆晶作用有关, 也可能是后期蚀变的结果。

3.3 Sm-Nd 同位素

川西康定—丹巴地区基性岩墙 8 个样品的 Sm-Nd 同位素分析结果(表 2)显示:¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.1131~0.1547, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512476~0.512607, 并具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+2.85~+6.33)。

4 讨论

4.1 岩石成因

在微量元素蛛网图(图 4-b)上, 所有样品均显示出与岛弧玄武岩相似的 Nb、Ta、Ti 负异常, 但不相容元素的丰度总体上高于岛弧玄武岩, 介于洋岛玄武岩和岛弧玄武岩之间, 表现出板内和岛弧玄武

表 1 扬子西缘康定—丹巴地区基性岩墙主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果

Table 1 Major (%) and trace element (10^{-6}) analyses of mafic dykes in Kangding-Danba area, western Sichuan

分析项目	辉绿岩														
	GZ11-04	GZ11-05	GZ11-06	GZ11-07	DB11-02	DB11-04	DB11-07	DB11-08	DB11-09	DB11-10	DB11-11	DB11-12	DB11-13	DB11-14	DB11-15
SiO ₂	54.41	55.59	56.57	56.27	50.47	47.91	52.03	47.12	49.10	51.23	51.50	52.95	52.85	51.65	52.58
TiO ₂	0.68	0.69	0.74	0.60	1.16	1.07	1.33	0.99	1.01	0.96	1.24	1.22	1.23	0.90	1.16
Al ₂ O ₃	17.61	17.79	17.03	17.17	15.93	19.04	15.80	18.26	15.79	16.60	15.65	15.60	16.70	16.80	16.82
Fe ₂ O ₃ ^T	7.74	7.64	7.45	6.60	13.04	10.74	12.45	11.09	10.43	9.69	12.78	12.01	10.72	9.34	11.58
MnO	0.15	0.15	0.15	0.12	0.23	0.14	0.21	0.18	0.20	0.22	0.26	0.25	0.22	0.14	0.19
MgO	3.29	3.16	3.07	2.78	4.57	6.28	5.08	5.35	8.23	5.30	4.40	4.20	4.40	3.20	4.39
CaO	8.23	7.16	6.82	7.73	5.58	6.35	6.66	10.90	8.92	9.54	8.67	8.16	6.50	6.96	6.14
Na ₂ O	2.80	3.98	2.53	3.03	4.75	3.82	2.91	1.02	3.78	4.08	2.38	2.07	3.55	4.56	3.52
K ₂ O	1.37	1.09	0.96	1.28	0.24	0.94	0.21	2.30	0.27	0.35	0.97	1.42	0.66	2.47	0.86
P ₂ O ₅	0.22	0.23	0.52	0.20	0.28	0.24	0.30	0.26	0.25	0.25	0.21	0.22	0.33	0.41	0.33
LOI	3.40	1.89	3.62	3.65	3.33	3.23	2.68	2.43	1.52	1.43	1.42	1.44	2.78	3.21	2.38
总量	99.90	99.36	99.45	99.43	99.58	99.75	99.65	99.90	99.50	99.64	99.48	99.54	99.53	99.64	99.94
Mg [#]	0.51	0.51	0.50	0.51	0.46	0.59	0.50	0.54	0.66	0.58	0.46	0.46	0.48	0.46	0.48
Ti [#]	4455	4180	4145	3681	7800	6479	7556	6091	5716	5638	7095	7187	7374	5360	6595
V	177	156	162	128	147	274	187	303	301	311	314	302	190	63.3	201
Cr	33.5	10.1	11.6	5.86	111	65.8	6.63	28.9	128	51.4	5.63	5.47	4.87	5.17	6.62
Rb	44.5	34.6	39.5	34.2	7.69	33.6	4.75	55.4	3.02	6.36	21.5	32.9	15.3	59.1	22.7
Sr	779	671	726	703	818	642	964	1116	647	1172	1125	1212	790	765	704
Y	26.4	24.3	14.9	23.9	18.4	35.4	20.4	20.7	18.9	23.5	16.7	17.7	24.1	21.8	25.2
Zr	108	86.0	63.0	106	62.1	102	61.0	85.8	75.2	86.5	54.1	56.3	86.5	91.9	82.2
Nb	5.58	5.69	2.58	5.61	1.72	4.27	1.63	3.03	3.13	3.17	1.93	1.74	2.99	3.34	2.57
Ba	710	465	593	597	129	292	43.1	561	58.6	95.0	231	351	236	1182	312
La	20.0	19.5	20.4	18.1	8.26	14.0	8.98	12.7	13.0	14.7	7.59	7.90	14.4	13.0	13.6
Ce	41.8	40.6	42.0	36.6	18.8	33.4	20.9	30.9	30.5	34.1	18.2	18.6	30.8	31.5	30.1
Pr	5.29	5.18	5.31	4.60	2.82	4.51	2.95	4.31	4.19	4.77	2.55	2.64	4.07	4.39	3.87
Nd	21.3	20.6	21.2	18.5	13.4	19.7	14.3	18.4	18.6	20.4	12.2	12.7	19.1	20.5	18.2
Sm	4.00	3.83	3.97	3.56	3.43	4.43	3.63	4.12	3.99	4.42	3.00	3.09	4.40	4.67	4.28
Eu	1.19	1.15	1.14	1.04	1.29	1.06	1.29	1.27	1.18	1.49	1.11	1.10	1.51	1.46	1.48
Gd	3.37	3.45	3.46	3.21	3.48	4.55	3.75	4.04	3.84	4.17	3.13	3.20	4.60	4.60	4.42
Tb	0.53	0.49	0.49	0.46	0.58	0.70	0.60	0.63	0.57	0.67	0.52	0.51	0.70	0.69	0.67
Dy	2.94	2.73	2.74	2.59	3.45	4.35	3.56	3.75	3.35	3.87	3.23	3.23	4.18	4.14	4.00
Ho	0.59	0.57	0.58	0.53	0.70	0.93	0.75	0.78	0.71	0.82	0.66	0.67	0.89	0.82	0.89
Er	1.62	1.50	1.51	1.40	1.91	2.51	2.10	2.13	1.89	2.28	1.79	1.85	2.45	2.18	2.44
Tm	0.23	0.21	0.22	0.21	0.27	0.35	0.30	0.31	0.27	0.34	0.27	0.27	0.35	0.30	0.34
Yb	1.42	1.33	1.41	1.32	1.76	2.17	1.82	1.95	1.70	2.19	1.63	1.71	2.16	1.78	2.17
Lu	0.22	0.21	0.22	0.21	0.25	0.31	0.27	0.30	0.24	0.34	0.25	0.26	0.34	0.27	0.32
Hf	2.81	2.24	2.60	2.65	1.68	2.90	1.65	2.16	2.01	2.19	1.52	1.56	2.30	2.38	2.18
Ta	0.18	0.16	0.17	0.17	0.10	0.29	0.10	0.21	0.18	0.19	0.13	0.11	0.20	0.19	0.18
Th	4.77	3.97	2.43	4.41	1.00	3.81	1.01	1.17	1.31	1.69	1.07	1.09	2.21	1.41	2.03
U	1.35	1.02	1.32	1.02	0.31	1.38	0.34	0.32	0.34	0.56	0.39	0.39	0.83	0.55	1.13
Nb/U	4.13	5.55	1.95	5.50	5.57	3.09	4.80	9.60	9.29	5.66	4.93	4.51	3.59	6.10	2.28

注: Fe₂O₃^T为全铁; Mg[#]= Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe³⁺), 假设 Fe³⁺/(Fe²⁺+Fe³⁺) = 0.80。

表 2 扬子西缘康定—丹巴地区基性岩墙 Sm-Nd 同位素分析结果
Table 2 Sm-Nd isotopic data for mafic dykes in Kangding-Danba area, western Sichuan

样号	岩性	Sm/10 ⁻⁶	Nd/10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd ± 2σ	ε _{Nd(t)}
GZ11-04	辉绿岩	4.00	21.3	0.113471	0.511896	0.512476 ± 0.000008	5.15
GZ11-06	辉绿岩	3.97	21.2	0.113067	0.511956	0.512534 ± 0.000007	2.56
DB11-02	辉长岩	3.43	13.4	0.154747	0.511796	0.512586 ± 0.000008	3.20
DB11-07	辉长岩	3.63	14.3	0.153333	0.511803	0.512587 ± 0.000007	3.34
DB11-09	辉长岩	3.99	18.6	0.129803	0.511943	0.512607 ± 0.000009	6.08
DB11-11	辉长岩	3.00	12.2	0.148928	0.511830	0.512592 ± 0.000008	3.88
DB11-13	辉长岩	4.40	19.1	0.139088	0.511785	0.512496 ± 0.000009	2.98
DB11-15	辉长岩	4.28	18.2	0.141767	0.511788	0.512503 ± 0.000008	2.85

注: Sm、Nd 含量采用 ICP-MS 测试结果; 取 t = 0.780 Ga。

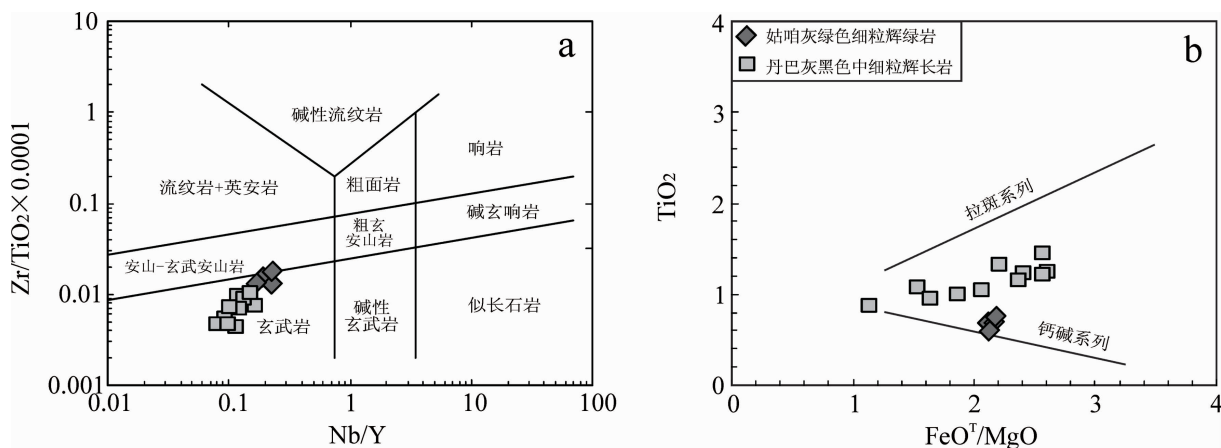


图 3 川西康定—丹巴地区基性岩墙(a)Zr/TiO₂-Nb/Y 岩石分类图解^[47]和(b)TiO₂-FeOT/MgO 图解^[48]
Fig.3 Zr/TiO₂-Nb/Y diagram^[47] (a) and TiO₂-FeOT/MgO diagram^[48] (b) of mafic dykes from the study area

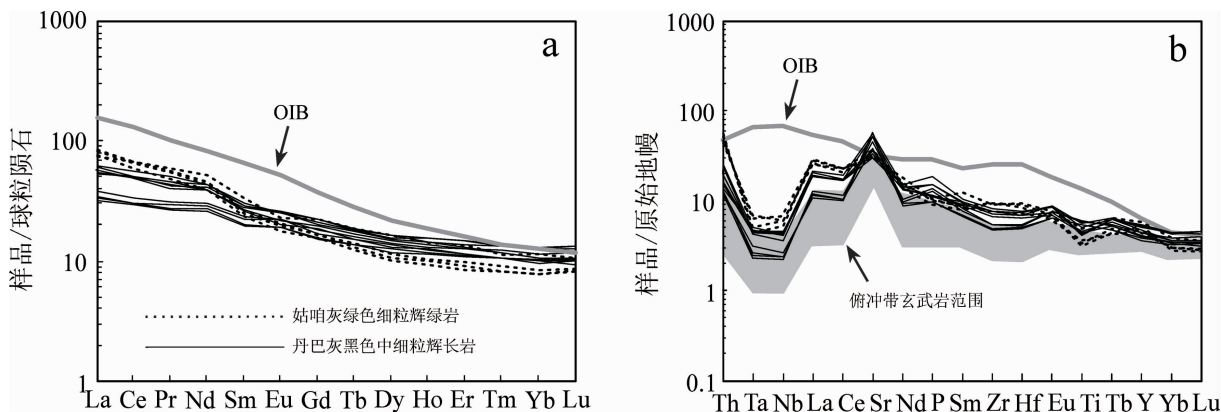


图 4 川西康定—丹巴地区基性岩墙的稀土元素分布形式(a)和微量元素蛛网图(b)

(球粒陨石 REE 数据、原始地幔数据引自文献[49], 俯冲带玄武岩数据引自文献[50])

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergram (b) for mafic dykes from Kangding-Danba area, western Sichuan

(chondrite and primitive mantle values after reference [49], data of island arc basalts after reference [50])

岩双重性质的地球化学特征。

虽然大多数样品具有 Nb、Ta、Ti 亏损等弧/碰撞环境地球化学特征，但 Nb、Ta、Ti 亏损不一定和岛弧/碰撞相联系，这很可能是受到大陆地壳物质混染的结果^[51-52]。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 Ce/Yb-Zr/Nb 相关图(图 5-a)和 Th/Nb-La/Sm 相关图(图 5-b)上，采自丹巴的辉长岩分布在亏损地幔(N-MORB)和大陆地壳(Buck Crust)组分之间，而采自康定县姑咱镇的辉绿岩则分布在上地壳附近；在(Th/Yb)_N-(Ta/Th)_N 相关图解(图 5-c)上，所有样品分布在亏损地幔(N-MORB)与地壳混染趋势线上，姑咱辉绿岩显示混染程度更大，这与野外观察到的姑咱辉绿岩与花岗质围岩呈现明显的岩浆混合现象以及主量元素特征(相对高 SiO₂、低 TiO₂、Fe₂O₃^T、MgO)、微量元素特征(轻重稀土分馏更明显)相一致。此外，本文研究的基性岩墙样品 Th 含量变化大(1.00~4.77)，Nb/U 比值普遍很低(1.95~9.60)，在 OIB 和 MORB 中 Nb/U 比值为 47^[49]，球粒陨石和原始地幔为 34^[49]；大陆地壳为 9.7^[53]，都暗示这些样品普遍受到地壳物质不同程度的混染。考虑到样品普遍具正的 ε_{Nd}(t)值(+2.85~+6.33)，推断混染的地壳物质很可能是初生地壳，这与在扬子地块西缘，新元古代初生岛弧地壳普遍存在^[51,12]是相吻合的。

前人研究表明，大陆地壳物质的混染作用能够产生类似岛弧环境地球化学特征的印记(例如：Nb、Ta、Ti 的负异常)，从而常会导致将受到混染的大陆(板内)玄武岩误判为岛弧玄武岩^[52,54]。在不用 Nb、Ta 或 Ti 作为判别因子的地球化学图解上，如 Zr/Y-Zr 相关图^[55]上，样品均落入板内玄武岩和洋中脊玄武岩范围(图 6-a)；在 Ti-V 相关图^[56]上，样品的 Ti/V 比值都在 18.1~84.7，主要集中在 20~50，明显高于岛弧玄武岩，与 MORB 相当(图 6-b)。在 Zr-Y-Nb 判别图^[57]上，样品由于受地壳物质混染导致 Nb、Ta 亏损的影响，落入板内拉斑玄武岩、火山弧玄武岩和 N 型 MORB 过渡区(图 6-c)；在 Th-Hf-Ta 判别图^[58]上也有类似

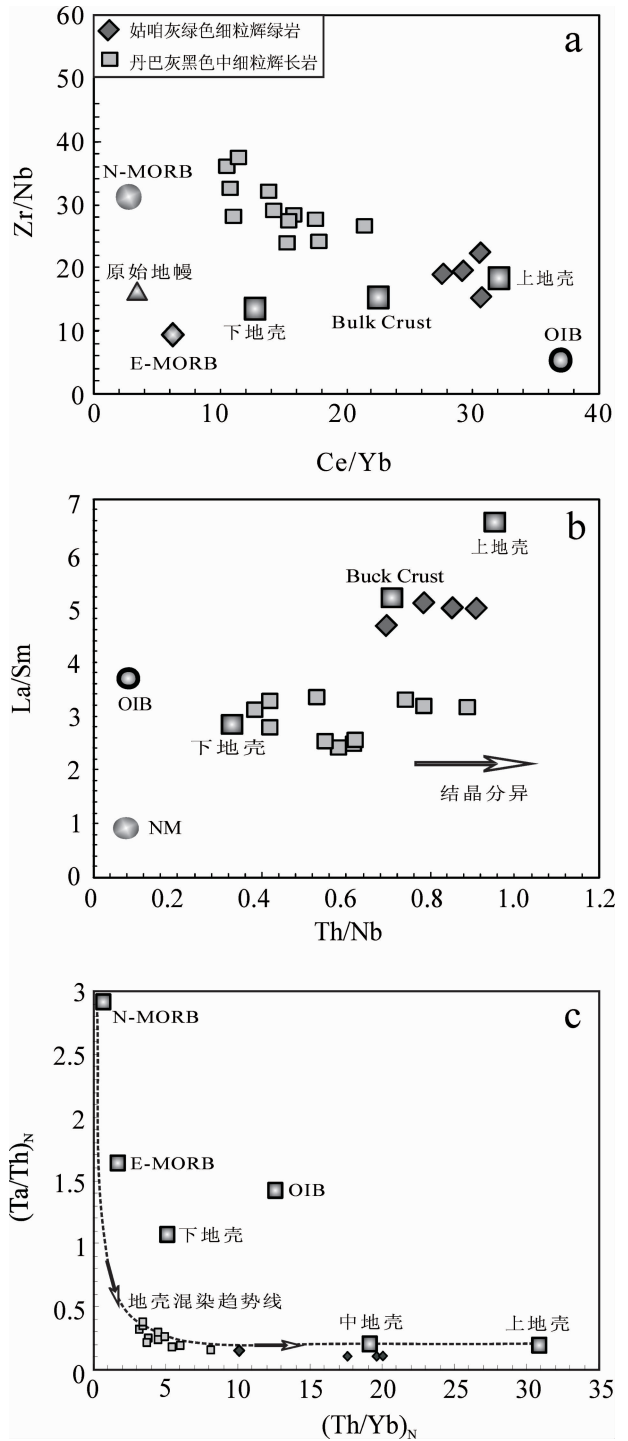


图 5 川西康定—丹巴基性岩墙 Zr/Nb-Ce/Yb 图解(a)、La/Sm-Th/Nb 图解(b)和(Th/Yb)_N-(Ta/Th)_N 图解(c) (NM, PM, EM, OIB 数据引自文献[49]; BC 数据引自文献[53])
Fig.5 Zr/Nb-Ce/Yb diagram (a), La/Sm-Th/Nb diagram (b) and (Th/Yb)_N-(Ta/Th)_N diagram (c) for mafic dykes from the study area (data of NM, PM, EM, OIB after reference [49]; data of BC after reference [53])

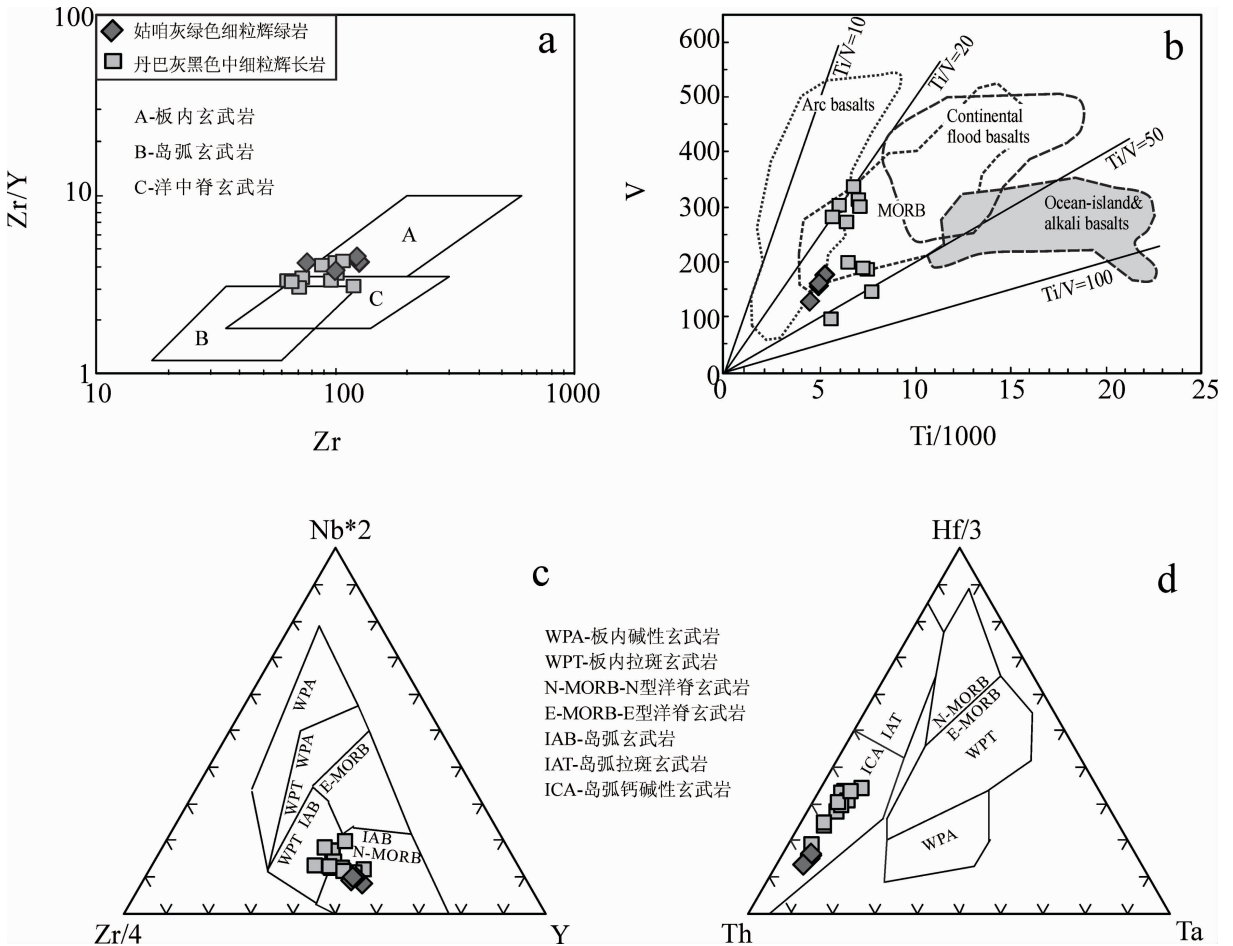


图6 川西康定—丹巴地区基性岩墙构造判别图
 a—Zr/Y—Zr 判别图^[55]; b—V—Ti 判别图^[56]; c—Zr—Nb—Y 判别图^[57]; d—Th—Hf—Ta 判别图^[58]
 Fig.6 Tectonic discrimination diagrams of mafic dykes from Kangding—Danba area, western Sichuan
 a—Zr/Y—Zr diagram^[55]; b—V—Ti diagram^[56]; c—Zr—Nb—Y diagram^[57]; d—Th—Hf—Ta diagram^[58]

的情况,样品落入火山弧玄武岩范围(图 6-d)。样品很可能是受地壳物质混染,在部分构造判别图(图 6-c, 6-d)上的投影向“弧”区偏移。

综上所述,本文认为川西康定—丹巴地区新元古代基性岩墙应形成于板内裂谷环境,与扬子地块西缘同时代的基性岩(如 780~760 Ma 基性岩墙^[9]、790~760 Ma 基性岩墙^[10]、(808±12) Ma 的冷碛辉长岩^[12]等)成因类似,岩浆在上升过程中受到了初生岛弧地壳物质不同程度的混染。

4.2 地幔源区性质及岩浆熔融深度

对于康定—丹巴地区新元古代基性岩墙的源区性质、组成和岩浆熔融深度等问题的认识,往往与岩浆源区、地幔动力学机制等问题密切相关。本文根据样品的元素地球化学特征,并结合前人的研究成

果,就相关问题作进一步的探讨。

前面已经讨论过,在 Ce/Yb—Zr/Nb 相关图(图 5-a)和 Th/Nb—La/Sm 相关图(图 5-b)上,样品大致分布在亏损地幔(N-MORB)与(上)地壳成分连线上,以及在(Th/Yb)_N—(Ta/Th)_N 相关图解(图 5-c)上,样品显示起源于亏损地幔(N-MORB)并受地壳物质混染趋势,同时 Nd 同位素数据显示样品普遍具正的 ε_{Nd}(t)值(+2.85~+6.33),考虑到地壳物质的混染导致 ε_{Nd}(t)值可能已经偏低,因此笔者推断岩浆应起源于亏损地幔源区。

在(La/Sm)_N—(Tb/Yb)_N 相关图上(图 7-a),基性岩墙样品主要分布于尖晶石稳定域。在 Sm/Yb—La/Sm 相关图(图 7-b)上,考虑到地壳混染、结晶分异的影响,样品同样表现出尖晶石地幔橄榄岩部分熔融

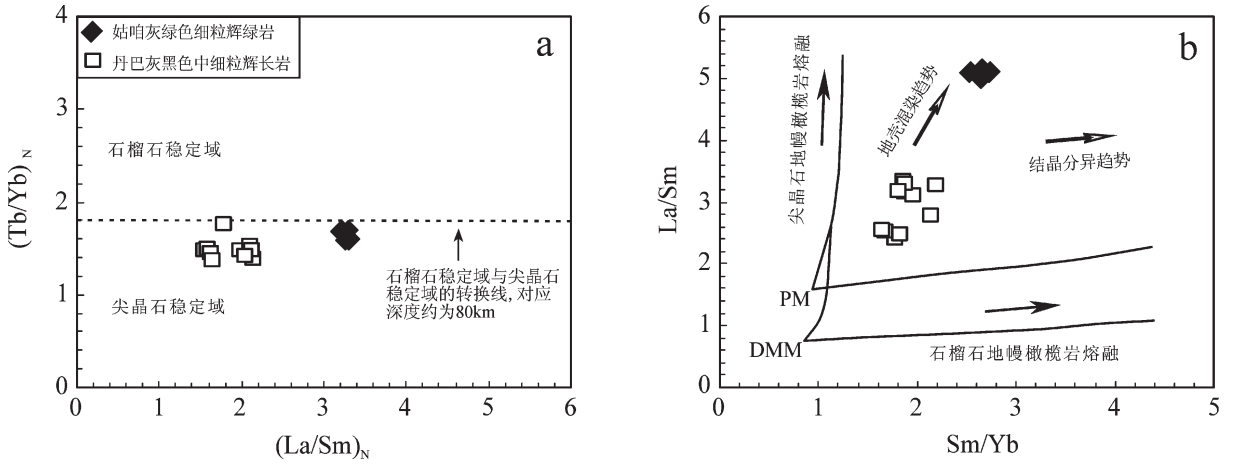


图 7 川西康定—丹巴地区基性岩墙的(a) $(Tb/Yb)_N-(La/Sm)_N$ 图解^[59]和(b) $La/Sm-Sm/Yb$ 图解^[60]
 Fig.7 $(Tb/Yb)_N-(La/Sm)_N$ diagram^[59] (a) and $La/Sm-Sm/Yb$ diagram^[60] (b) for mafic dykes from the study area

趋势。岩浆应来源于尖晶石稳定域地幔,是尖晶石地幔橄榄岩部分熔融的产物。

4.3 对 Rodinia 超级大陆重建的启示

笔者注意到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(796±5) Ma 的同德苦橄岩脉^[7]、石棉北 780~760 Ma 基性岩墙^[8]等,这些岩浆的熔融温度(地幔潜能温度,分别为 1600~1620 °C、1450~1470 °C)都明显高于正常的 MORB-地幔源区(1280~1350 °C^[61]),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

成果都为扬子地块西缘新元古代岩浆岩成因的地幔柱模式提供了直接的高温岩石记录。

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,形成于板内的张性环境,如峨眉山玄武岩^[62]等。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。在 $Zr/Nb-Nb/Th$ 相关图(图 8-a)上,样品 Zr/Nb 比值高、 Nb/Th 比值低,投

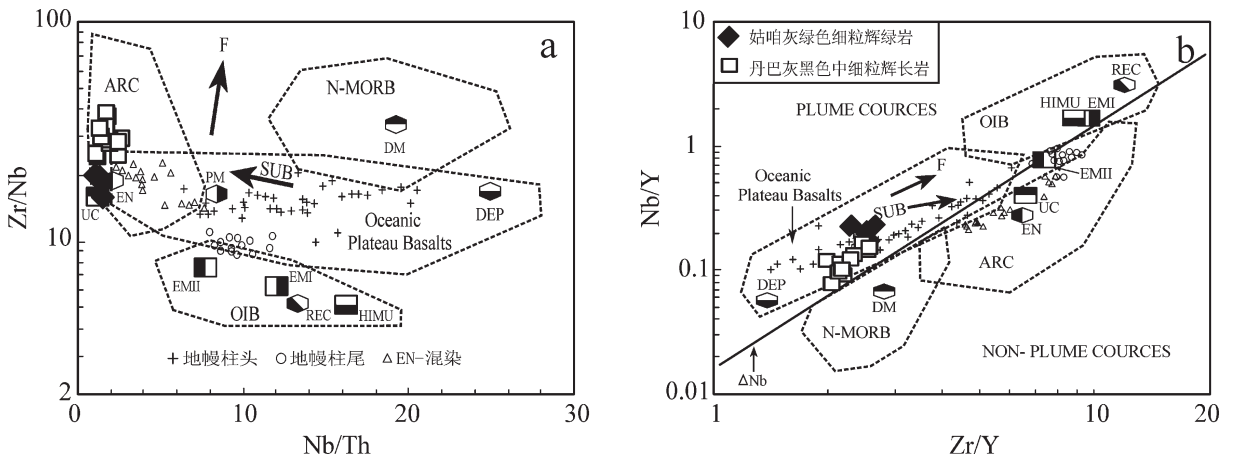


图 8 川西康定—丹巴地区基性岩墙的 $Zr/Nb-Nb/Th$ 图解(a)和 $Nb/Y-Zr/Y$ 图解(b)
 (底图据文献[63]; DEP—亏损组分; EN—富集组分; REC—再循环组分; SUB—消减带; F—批次熔融)
 Fig.8 $Zr/Nb-Nb/Th$ diagram (a) and $Nb/Y-Zr/Y$ diagram (b) for mafic dykes from the study area
 (base map after Reference [63]; arrows indicating effects of batch melting (F) and subduction (SUB); DEP—Deep depleted mantle; EN—Enriched component; REC—Recycled component)

影于上地壳(UC)、富集组分(EN)附近,岩浆明显受到上地壳(UC)、富集组分(EN)的混染,消减组分(SUB)和批次熔融(F)也影响样品的分布趋势。在Nb/Y-Zr/Y相关图(图8-b)上,样品投影于亏损地幔(DM)、亏损组分(DEP)附近(指示岩浆可能起源于亏损地幔),位于大洋高原区域,且分布于 ΔNb 线以上,暗示岩浆很可能与地幔柱事件相关。康定—丹巴地区新元古代基性岩墙样品虽然受到初生岛弧地壳物质的明显混染,显现出Nb、Ta、Ti亏损等弧/碰撞环境地球化学特征,但进一步的研究表明岩浆形成于板内裂谷环境,并且在岩石化学上表现地幔柱的特征,应为新元古代地幔柱事件在岩石化学上的反映。

综合前人研究成果^{[8][12]},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。结合在扬子地块北缘的碧口—汉南裂谷、扬子地块南缘的南华裂谷和南澳大利亚地区所取得的研究成果^[64-66],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^[18-19]。

5 结 论

康定—丹巴地区新元古代基性岩墙岩石类型为辉绿岩、辉长岩。岩浆起源于于亏损地幔源区,是尖晶石地幔橄辉岩部分熔融的产物。岩浆形成于板内裂谷环境,在上升侵位过程中不同程度混染了初生岛弧地壳物质,且很可能与导致Rodinia超级大陆裂解的新元古代地幔柱事件有关。

致谢:感谢审稿专家审阅全文,并提出了宝贵的修改建议,感谢编辑部老师热情的帮助;感谢梁细荣研究员、马金龙高级工程师、李杰高级工程师、刘颖高级工程师、胡光黔高级工程师指导了样品的室内分析和测试。

参考文献(References):

- [1] Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? [J]. Earth Planet Sci. Lett., 1999, 173: 171-181.
- [2] Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, et al. 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, 2003, 122: 85-109.

- [3] Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, et al. 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, 2002, 113: 135-155.
- [4] Li Xianhua, Li Zhengxiang, Ge Wenchun, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? [J]. Precambrian Research, 2003, 122: 45-83.
- [5] Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, et al. 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), 2003, 46(Supp.): 73-83.
- [6] Li Xianhua, Li Zhengxiang, Sinclair J A, et al. Revisiting the "Yanbian Terrane": Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China [J]. Precambrian Research, 2006, 151: 14-30.
- [7] Li Xianhua, Zhu Weiguang, Zhong Hong, et al. 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, 2010, 118(5): 509-522.
- [8] Lin Guangchun, Li Xianhua, Li Wuxian. 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), 2007, 50(1): 1-16.
- [9] Zhu Weiguang, Zhong Hong, Deng Hailin, et al. SHRIMP zircon U-Pb age, geochemistry, and Nd-Sr isotopic of Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex, Southwest China [J]. International Geology Review, 2006, 48: 650-668.
- [10] Zhu Weiguang, Zhong Hong, Deng Hailin, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China [J]. Precambrian Research, 2008, 164(1/2): 66-85.
- [11] Huang Xiaolong, Xu Yigang, Li Xianhua. Petrogenesis and tectonic implications of Neoproterozoic, highly fractionated A-type granites from Mianning, South China [J]. Precambrian Research, 2008, 165: 190-204.
- [12] 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 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, 2002, 9(4): 329-338.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, et al. U-Pb Zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of Neoproterozoic basaltic magmatism in western Sichuan: Petrogenesis and geodynamic implications [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(4): 329-338(in Chinese with English abstract).
- [13] 李献华, 王选策, 李武显, 等. 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, 2008, 37(4): 382-399.
- Li Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, et al. Petrogenesis and

- tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting [J]. *Geochimica*, 2008, 37(4): 382–398(in Chinese with English abstract).
- [14] 郭春丽, 王登红, 陈毓川, 等. 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*, 2007, 23(10): 2457–2470.
Guo Chunli, Wang Denghong, Chen Yuchuan, et al. 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*, 2007, 23 (10): 2457–2470 (in Chinese with English abstract).
- [15] 林广春. 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*, 2008, 27(5): 398–404.
Lin Guangchun. Petrochemical characteristic of Wasigou complex in western Yangtze block——Petrogenesis and tectonic significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 27 (5): 398–404 (in Chinese with English abstract).
- [16] 林广春. 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*, 2010, 35(4): 611–620.
Lin Guangchun. 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*, 2010, 35(4): 611–620(in Chinese with English abstract).
- [17] 汪正江, 王剑, 谢渊, 等. 重庆秀山凉桥板溪群红子溪组凝灰岩 SHRIMP 锆石测年及其意义 [J]. *中国地质*, 2009, 36 (4): 761–768.
Wang Zhengjiang, Wang Jian, Xie Yuan, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating for crystal tuff from Hongzixi Formation of Banxi Group in Xiushan area, Chongqing, and its significance [J]. *Geology in China*, 2009, 36(4): 761–768(in Chinese with English abstract).
- [18] Li Zhengxiang, Zhang Linghua, Powell C. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia–East Antarctica and Laurentia? [J]. *Geology*, 1995, 23: 407–410.
- [19] Li Zhengxiang, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break–up history of Rodinia: A synthesis [J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 67–76.
- [20] Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy A K, et al. 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.*, 2002, 196: 51–67.
- [21] Zhou Meifu, Kennedy A K, Sun Min, et al. Neoproterozoic arc–related mafic intrusions along the northern margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia [J]. *J. Geol.*, 2002, 110: 611–618.
- [22] Zhou Meifu, Ma Yuxiao, Yan Danping, et al. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block [J]. *Precambrian Research*, 2006, 144: 19–38.
- [23] Zhou Meifu, Yan Danping, Wang Changliang et al. 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*, 2006, 248: 286–300.
- [24] Chen Yuelong, Luo Zhaohua, Zhao Junxiang, et al. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province [J]. *Science in China (Ser.D)*, 2005, 48(5): 622–634.
- [25] Zhao Junhong, Zhou Meifu. 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*, 2007, 152: 27–47.
- [26] Zhao Junhong, Zhou Meifu. Neoproterozoic adakitic plutons and arc magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Journal of Geology*, 2007, 115: 675–689.
- [27] Sun Weihua, Zhou Meifu, Zhao Junhong. Geochemistry and tectonic significance of basaltic lavas in the Neoproterozoic Yanbian Group, southern Sichuan Province, southwest China [J]. *Int. Geol. Rev.*, 2007, 49: 554–571.
- [28] Sun Weihua, Zhou Meifu, Yan Danping, et al. Provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic Yanbian Group, western Yangtze Block (SW China) [J]. *Precambrian Research*, 2008, 167: 213–236.
- [29] Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, et al. 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*, 2008, 257(1/2): 1–15.
- [30] 沈渭洲, 凌洪飞, 徐士进, 等. 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*, 2000, 46 (5): 512–519.
Shen Weizhou, Ling Hongfei, Xu Shijin, et al. Geochemical characteristics and genesis of some Neoproterozoic granitoids in the Northern part of the Western margin of the Yangtze Block [J]. *Geological Review*, 2000, 46(5): 512–519(in Chinese with English abstract).
- [31] 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 等. 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*, 2002, 8 (4): 380–389.
Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, et al. Geochemical characteristics and genesis of the Qiaotou basic complex, Luding county, Western Yangtze block [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(4): 380–389(in Chinese with English abstract).
- [32] 颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, 等. 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*, 2002, 9(4): 249–256.
Yan Danping, Zhou Meifu, Song Honglin, et al. Where was South China located in the reconstruction of Rodinia [J]. *Earth Science*

- Frontiers, 2002, 9(4): 249–256 (in Chinese with English abstract).
- [33] 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等. 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, 2006, 25 (4): 273–281.
Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, et al. The stipulation of Neoproterozoic TTG in western Yangtze block and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25(4): 273–281(in Chinese with English abstract).
- [34] 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等. 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, 2007, 81 (11): 1562–1577.
Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, et al. New understanding on Kangding group on western margin of Yangtze Block: Evidence from geochemistry and chronology [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81 (11): 1562–1577 (in Chinese with English abstract).
- [35] 李志红, 罗照华, 陈岳龙, 等. 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, 2008, 22(2): 181–189.
Li Zhihong, Luo Zhaohua, Chen Yuelong, et al. Geology and Geochemistry of the Kangding–Luding Metamorphosed intrusions and implication for Tectonic Setting [J]. Geoscience, 2008, 22(2): 181–189.
- [36] Zheng Yongfei, Zhang Shaobin, Zhao Zifu, et al. 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, 2007, 96: 127–150.
- [37] Zheng Yongfei, Wu Rongxin, Wu Yuanbao, et al. Rift melting of juvenile arc –derived crust: Geochemical evidenee from Neoprotemzoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan orogen, South China[J]. Precambrian Research, 2008, 163(3–4): 351–383.
- [38] 孟庆秀, 张健, 耿建珍, 等. 湘中地区冷家溪群和板溪群锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素特征及对华南新元古代构造演化的意义[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 191–216.
Meng Qingxiu, Zhang Jian, Geng Jianzhen, et al. Zircon U–Pb age and Hf isotope compositions of Lengjiaxi and Baxi Groups in middle Hunan Province: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution in South China [J]. Geology in China, 2013, 40 (1): 191–216(in Chinese with English abstract).
- [39] Windley B F. The Evolving Continents [M]. 3rd ed. New York: John Wiley, 1995: 1–526.
- [40] Hall H C. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic process [J]. Geosciences Canada, 1982, 9: 145–154.
- [41] Weaver B L, Tarney J. The Scourie dyke suite: Petrogenesis and geochemical nature of the Proterozoic sub–continental mantle [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1981, 78: 175–188.
- [42] Vernon R H, Etheridge M A, Wall V J. Sharp and microstruture of microgranitoid enclaves: Indicators of magma mingling and flow [J]. Lithos, 1988, 22: 1–11.
- [43] Goto A, Tatsumi Y. Quantitative analysis of rock samples by an X–ray fluorescence spectrometer (I)[J]. The Rigaku Journal, 1994, 11: 40–59.
- [44] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 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, 1996, 25(6): 552–558.
Liu Ying, Liu Haicheng, Li Xianhua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP–MS [J]. Geochimica, 1996, 25 (6): 552–558 (in Chinese with English abstract).
- [45] 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 等. 利用 MC–ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 91–96.
Liang Xirong, Wei Gangjian, Li Xianhua, et al. 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, 2003, 32 (1): 91–96 (in Chinese with English abstract).
- [46] Tanaka T, Togashi S, Kamioka H, et al. JNdi–1: A neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium [J]. Chemical Geology, 2000, 168: 279–281.
- [47] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed igneous rocks [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 28: 459–469.
- [48] Miyashiro A. Volcanic rock series in island arc and active continental margins[J]. Am. J. Sci., 1974, 274: 321–355.
- [49] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [C] // Saunders A D, Norry M J (eds.). Implications for Mantle Composition and Processes, Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications 42, 1989: 313–345.
- [50] Tatsumi Y, Eggins S M. Subduction Zone Magmatism [M]. Cambridge, Boston: Black Well Science, 1995: 1–211.
- [51] Ernst R E, Buchan K L, Campbell I H. Frontiers in large igneous province research[J]. Lithos, 2005, 79: 271–297.
- [52] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 77–89.
Xia Linqi, Xia Zhuchun, Xu Xueyi, et al. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26 (1): 77–89(in Chinese with English abstract).
- [53] Rudnick R L, Gao Shan. Composition of the Continental Crust [C] // Rudnick R L, The Crust: Vol.3. Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier–Pergamon, 2003: 1–64.
- [54] 张旗, 钱青, 王焰. 造山带火成岩地球化学研究 [J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 113–120.
Zhang Qi, Qian Qing, Wang Yan. Geochemical study on igneous rocks of orogenic belts[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 113–120(in Chinese with English abstract).
- [55] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1979, 69: 33–47.

- [56] Shervais J W. Ti–V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1982, 31: 457–484.
- [57] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid–ocean basalts and continental tholeiites with the Nb–Zr–Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56: 207–218.
- [58] Wood D A. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crust contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1980, 50: 11–30.
- [59] Xu Yigang, Chung Sunlin, Jahn B, et al. Petrologic and geochemical constrains on the petrogenesis of Permian Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [J]. *Lithos*, 2001, 58: 145–168.
- [60] Lassiter J C, DePaolo D J. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints [C]//Mahoney J J, Coffin M F (eds.). *Large Igneous Province: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*. American Geophysical Union Geophysical Monography, 1997, 100: 335–355.
- [61] McKenzie D P, Bickle M J. The volume and composition of melt generated by extension of whole lithosphere[J]. *J. Petrol.*, 1988, 29: 625–679.
- [62] 资锋, 林广春, 李杰. 四川木里地区二叠纪苦橄岩和玄武岩成因及源区性质[J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1168–1178.
Z i Feng, Lin Guangchun, Li Jie. Petrogenesis and source characteristics of Permian picrites and basalts in Muli area, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1168–1178(in Chinese with English abstract).
- [63] Condie K C. High field strength element ratios in Archean basalts: A window to evolving sources of mantle plumes? [J]. *Lithos*, 2005, 79(3/4): 491–504.
- [64] Wang Xuance, Li Xianhua, Li Wuxian, et al. The Bikou basalts in northwestern Yangtze Block, South China: Remains of 820–810 Ma continental flood basalts?[J]. *GSA Bull.*, 2008, 120: 1478–1492.
- [65] Wang Xuance, Li Zhengxiang, Li Xianhua, et al. Geochemical and Hf–Nd isotope data of Nanhua rift sedimentary and volcanoclastic rocks indicate a Neoproterozoic continental flood basalt provenance [J]. *Lithos*, 2011, 127: 427–440.
- [66] Wang Xuance, Li Xianhua, Li Zhengxiang, et al. The Willouran basic province of South Australia: Its relation to the Guibe large igneous province in South China and the breakup of Rodinia[J]. *Lithos*, 2010, 119: 569–584.

Petrogenesis and source characteristics of Neoproterozoic mafic dykes in Kangding–Danba area, western Sichuan

LIN Guang–chun^{1,2}, DONG Jun–chao³

(1. *College of Earth Science and Resources, Chang’an University, Xi’an 710054, Shaanxi, China*; 2. *Key Laboratory of Western China’s Mineral Resources and Geological Engineer, Ministry of Education, Xi’an 710054, Shaanxi, China*; 3. *Shaanxi China Nuclear Resources Company Limited, Xi’an 710054, Shaanxi, China*)

Abstract: Neoproterozoic magmatic rocks are widespread on the western margin of the Yangtze block, and their genesis and tectonic setting have long been problems of hot debate. Petrological, geochemical and Sm–Nd isotopic data are reported for Neoproterozoic Kangding–Danba mafic dykes in the Kangdian rift on the western margin of the Yangtze block. This paper deals with petrogenesis and magma source characteristics of these rocks. The rock samples are of tholeiite series, and their geochemical and Nd isotopic characteristics suggest that they were generated in an intraplate setting with variable degrees of contamination of young island arc crust during magma ascending. The magma was generated by partial melting of DM mantle source region within the spinel stability field, and was probably related to Neoproterozoic plume event related to the breakup of Rodinia supercontinent.

Key words: mafic dykes; Kangdian rift; Neoproterozoic; Rodinia supercontinent

About the first author: LIN Guang–chun, male, born in 1974, doctor, engages in the study of geochemistry; E–mail: lgchunxa@126.com.