矿物岩石地球化学通报
Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry
Vol 28 No. 2, Apr. 2009

四川会理拉拉铜矿辉长岩群地球化学与 Sm-Nd 同位素定年

周家云[1,2], 郑荣才[2], 朱志敏[1,2], 陈家彪[1], 沈　冰[1], 李潇雨[1], 罗丽萍[1]

1. 中国地质科学院 矿产综合利用研究所, 成都 610041;
2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059

摘　要: 四川会理拉拉铜矿床辉长岩群与矿床在时空分布上紧密相关, 表明辉长岩群岩石成因与构造背景对重新认识矿床成因有重要意义。本文分析了辉长岩群的主量元素、微量元素、稀土元素和 Sm-Nd 同位素, 探讨了辉长岩的成因。结果表明, 拉拉地区辉长岩群形成于 850 Ma 板内裂谷环境, 为碱性玄武岩, 具有较平坦的 REE 分布型式和"驼峰"状微量元素原始地幔标准化分配型式, 较低的原始地幔标准化 Th/Nb 值, 以及较高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(0.8~4.1), HFSE 比值成分点均落入洋岛玄武岩(OIB)范围, 与本区同期地幔柱成因的大陆玄武岩特征相似, 说明辉长岩的形成可能是扬子地台西缘 Rodinia 超大陆裂解的岩浆事件, 与矿床之间很可能有紧密的热动力学联系。

关　键　词: 拉拉铜矿; 辉长岩; 岩石成因; 地球化学; Sm-Nd 同位素

中图分类号: P588.14　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1007-2802(2009)02-0111-12

Geochemistry and Sm-Nd Dating of the Gabbro in the Lala Copper Ore District, Sichuan Province, China

ZHOU Jia-yun[1,2], ZHENG Rong-cai[2], ZHU Zhi-min[1,2], CHEN Jia-biao[1], SHEN Bing[1], LI Xiao-yu[1], LUO Li-ping[1]

1. *Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 610041, China;* 2. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir and Ecploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059, China*

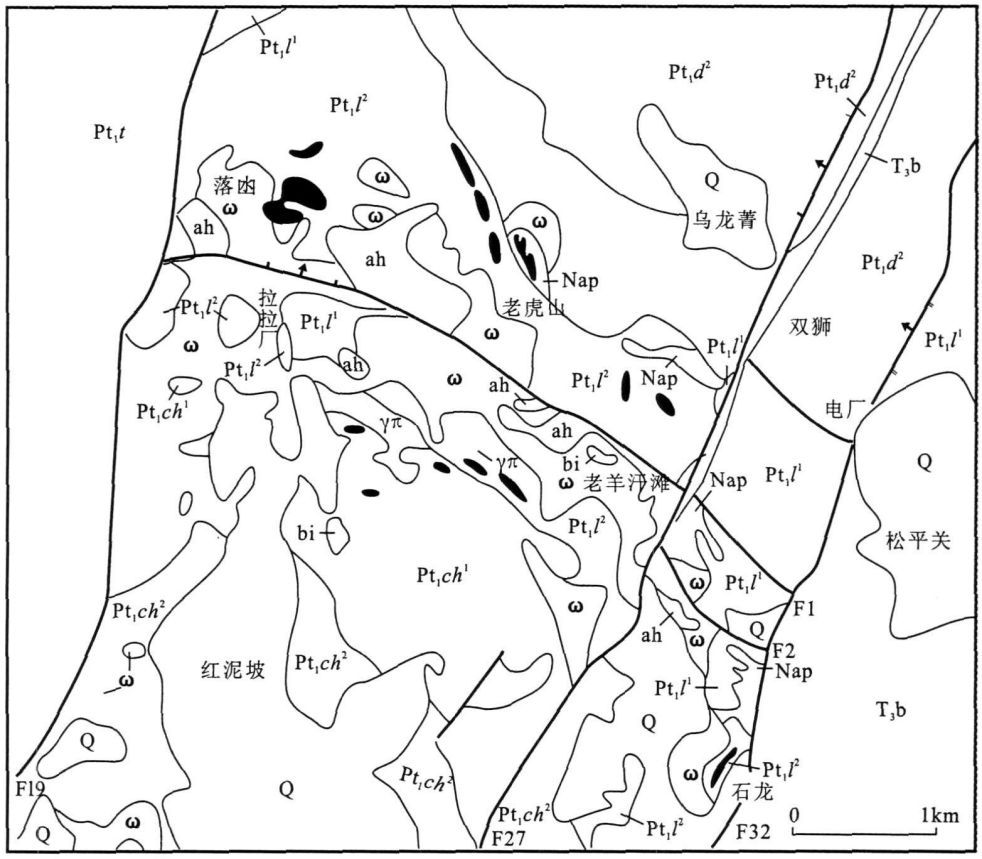
Abstract: The spatial and temporal distributions of copper deposit and gabbros in the Lala copper deposit area (Huili, Sichuan) are closely related indicates the petrogenesis and tectonic setting of the gabbros are of great significance in understanding the genesis of the deposit. This study analyzed the contents of major elements, trace elements and rare earth elements as well as Sm-Nd isotopic constitute of the gabbros and investigated the genesis of the gabbros. The results showed that the gabbros is alkaline basalt and was formed in the Rift Valley about 850Ma ago, the gabbros has a relatively flat REE distribution pattern, a "hump" shape primitive mantle-normalized pattern of trace elements, a low primitive mantle-normalized ratio of Th/Nb and a high $\varepsilon_{Nd}(t)$ ratio (0.8–4.1), in terms of discriminating evaluation system of the high field strength elements (HFSE), the values of all gabbros samples fall into the range of oceanic island basalt (OIB), and are similar with those of continental basalt, which were formed by mantle plume of the same period. It may suggest that the gabbros were formed by Neoproterozoic magmatic event in the western margin of the Yangtze craton, and that there may have closely thermodynamical connections between the gabbros and the deposit.

Key words: Lala copper deposit; gabbros; petrogenesis; geochemistry; Sm-Nd isotope

收稿日期: 2008-06-30 收到, 2008-09-09 改回
基金项目: 科技部国际科技合作项目(2005DFA20063)
第一作者简介: 周家云(1973—), 工程师, 博士, 研究方向: 岩石化学。E-mail: zjy200202020@yahoo.com.cn.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

四川会理拉拉铜矿位于康滇地轴中部,是元古代大型富铜矿床,因巨大的规模和独特的地质特征,引起众多学者的兴趣[1~5];但是有关矿床成因众说纷纭,未有统一的认识。前人在讨论辉长岩群与矿床的关系时,普遍认为辉长岩晚于矿床,对矿床没有成因意义,所以未对辉长岩群作深入研究。首先,前人取得的年龄均为K-Ar法数据,变化大,争议大,得到的结论值得怀疑;其次,矿床在空间分布上与辉长岩群密切共生,如落凼、老虎山、老羊汗滩矿段周围都有大量辉长岩出露,两者常常相伴而生,都受到东西走向断层控制而分布其两侧(图1),说明矿床可能与辉长岩侵入有关;第三,基性岩群是大陆伸展背景下,主要来自陆下软流圈或地幔岩石圈的岩浆侵入体,对古板块伸展-裂解有至关重要的作用,对基性岩浆事件的研究既可恢复岩墙侵位时古板块的性质和古板块裂解的动力学行为过程,又可为同一构造域构造-岩浆事件对比研究提供参照体系[6]。



1. 辉长岩; 2. 石英钠长岩; 3. 角闪钠长岩; 4. 花岗斑岩; 5. 侵入角砾岩; 6. 上三叠统白果湾煤组; 7. 铜矿体; 8. 大云山组; 9. 落凼组; 10. 长冲组; 11. 第四纪

图1 拉拉铜矿床地质略图

Fig. 1 Schematic map of geology of Lala area

本文根据矿区辉长岩群的主量元素、微量元素、稀土元素和Sm-Nd同位素定年探讨其成因,为辉长岩群产出的构造属性及其与矿床的关系提供有效的岩石地球化学和同位素年龄制约。

1 地质概况

拉拉铜矿区在大地构造上位于南北向延伸的川滇被动陆缘裂谷系中部,东西向会理-东川坳拉槽的西端[7,8]。坳拉槽南界宝台山-九龙深大断裂控制了古元古代河口群含Cu-Fe细碧角斑岩系和新元古代辉长岩群的分布,应是古元古代细碧角斑岩溢流到地表和新元古代辉长岩侵入地表的通道。区内出露地层主要有下元古界河口群、三叠系白果湾组煤系岩层和第四系,河口群为一套火山-沉积变质岩

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系,由各类片岩、大理岩及变质火山岩组成,是区内主要含矿建造,分为三个不同的火山喷发-沉积旋回,每个旋回以正常沉积开始,至火山喷发沉积结束而告终,从老至新分别为大云山组、落凼组和长冲组。矿区构造以断裂为主,其方向与区域构造线方向一致,分为北西西向和北北东向两组,前者形成较早,与成矿关系密切。矿区有多次岩浆活动,与成矿有关的岩浆活动主要为会理期和晋宁期的岩浆活动。会理期火山岩是赋矿层位,同时构成河口群地层的主体部分[5]。晋宁期岩浆活动以基性岩浆侵入为主,区域上广泛分布于拉拉、黎溪和通安地区,侵入于河口群。拉拉铜矿区辉长岩群正是这一时期的产物,属落凼-石龙岩体群。该岩体群东西长 5 km,南北宽 1 km,面积约 4~ 5 km^2,明显受构造断裂控制,主要沿矿区 F1 断层以及 F1 断层与 F13 断层交汇处侵入,出露于落凼—老虎山—老羊汗滩—石龙一带(图 1),以十几个大小不等岩墙和岩床产出。岩石呈暗绿色,具辉长结构、辉绿结构,块状构造。主要矿物成分为斜长石、碱性长石和普通辉石,次要矿物为角闪石和黑云母,副矿物为磁铁矿、榍石和磷灰石等。斜长石为 An= 55 的拉长石,呈板状。

2 样品及测试

本文分析了拉拉铜矿区落凼岩体辉长岩样品的主量元素、稀土元素、微量元素和 Sm-Nd 同位素。样品经洗净晾干,挑选新鲜部位,用玛瑙研钵手工研磨至 200 目以下备用。主量元素在中国地质科学院矿产综合利用研究所用 X 荧光光谱法(XRF)测定,详细分析方法见文献[9],分析精度优于 2%。稀土元素和微量元素在中国科学院同位素年代学和地球化学重点实验室(广州)等离子质谱仪(ICP-MS)完成,详细分析方法见文献[10],分析精度优于 1%~ 3%。Sm-Nd 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,在中国科学院同位素地球化学实验室(广州)的超净实验室完成。Sm-Nd 同位素组成在中国科学院同位素地球化学实验室(广州)的 Micromass Isoprobe 型 MC-ICPMS 进行,Nd 的分馏校正因子$^{146}Nd/^{144}Nd$= 0.7219。Nd 同位素分析的全流程本底< 100 pg,该 MC-ICPMS 对日本的 Nd 同位素标准 Shin Etsu的$^{143}Nd/^{144}Nd$ 测定值为 0.512115 ±10(2σ),^{147}Sm的衰变常数 λ= $6.54\times10^{-12}/a$。测试误差为 2σ。数据处理用路远发提供的 Geokit 软件进行。

3 结 果

3.1 元素地球化学

辉长岩主量元素、稀土元素和微量元素分析结果见表 1。SiO_2 含量为 40.7%~ 49.43%,平均 47.12%;Na_2O+K_2O 为 4.23%~ 7.48%,平均为 6.13%;TiO_2 为 0.9%~ 3.79%,平均为 1.69%;Al_2O_3 含量较高,为 10.65%~ 20.28%,平均为 17.13%,CaO 为 2.24%~ 5.72%,平均为 3.21%,MgO 为 0.57%~ 5.58%,平均 1.83%。与中国辉长岩化学成分平均值相比,本区辉长岩明显硅、钛饱和,且富碱、铝,贫钙,与扬子地台西缘新元古代地幔柱成因的康定冷碛辉长岩[11][$\omega(Na_2O+K_2O)$= 2.9%~ 5.1%,$\omega(CaO)$= 6.59%~ 10.42%,$\omega(MgO)$= 6.54%~ 7.37%]相比,拉拉矿区辉长岩除 Na_2O+K_2O 较高,CaO 和 MgO 含量较低外,其他成分相近。总体上矿区辉长岩接近于弱碱性玄武岩的主量元素特征[$\omega(Na_2O+K_2O)>5\%$],明显不同于岛弧玄武岩[$\omega(Na_2O+K_2O)<5\%$]。

岩石稀土元素总量较高,最高为 591.5×10^{-6},最低为 255.82×10^{-6},平均为 309.69×10^{-6}。岩石的轻稀土元素含量高于重稀土元素,LREE/HREE 值一般,REE 配分模式呈较缓的右倾曲线,属 LREE 中等富集的分配型式(图 2),无明显的 Ce 亏损现象(Ce/Ce^* 为 0.84~ 0.93)。8 个样品中 δEu 为正异常的有 6 个,变化范围为 0.66~ 1.64,平均为 1.17,表明岩体在岩浆结晶过程中存在明显的斜长石堆晶作用。

岩石中多数大离子亲石元素和高场强元素的含量普遍较高,部分大离子亲石元素和高场强元素 $\omega(B)/10^{-6}$变化范围较宽,如 Sr 9.836~ 563.4,Ba 89.04~ 2529.3,Y 8.122~ 89.71,Yb 0.423~ 7.947;有些元素的含量相对稳定,如 Ta 3.02~ 7.805,Nb 44.03~ 79.13。部分不相容元素比值不太稳定(如 Ba/Nb, Rb/Nb),有一些比值相对稳定(如 Zr/Nb, La/Nb),总体上多数微量元素比值和 EMⅠ型富集地幔端员相似(如 Zr/Nb、Ba/Nb、Th/Yb、Th/La 和 Zr/Y)(表 2)。非常高的原始地幔标准化 Th/Nb 值(≫1)和低 Nb/La 值(< 1)是地壳混染作用的两个可靠的微量元素指标[12,13]。矿区岩石样品具低-较低的Th_N/Nb_N 值,为0.5~ 1.57。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 辉长岩的主量元素含量及稀土、微量元素丰度

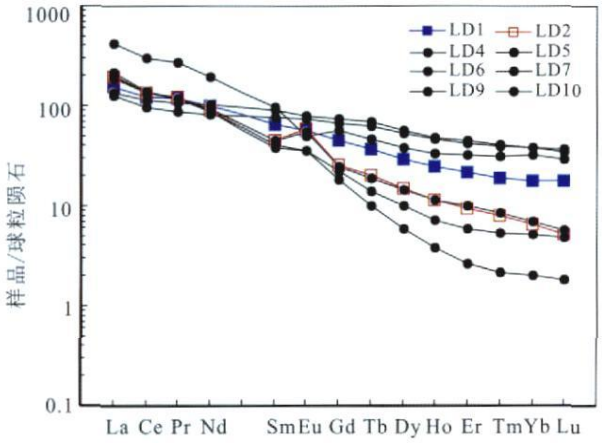
Table 1 Major element, REE & trace element contents of the gabbro

样 号	LD1	LD2	LD4	LD5	LD6	LD7	LD9	LD10
岩 性	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩
SiO_2	42.61	48.91	40.7	49.43	49.27	49.37	48.08	48.65
TiO_2	3.79	1.05	0.90	2.29	1.15	1.01	2.39	1.00
Al_2O_3	15.38	19.71	10.65	15.63	19.68	20.28	15.58	20.12
Fe_2O_3	14.34	10.74	21.87	19.07	10.77	10.19	19.09	9.78
FeO	8.51	8.20	14.16	3.83	6.82	7.10	4.41	6.80
MnO	0.22	0.09	0.23	0.03	0.12	0.07	0.03	0.14
MgO	5.58	1.75	1.18	0.57	1.59	1.65	0.66	1.65
CaO	4.69	2.27	5.72	2.27	2.89	2.34	2.24	3.24
Na_2O	4.04	6.07	1.15	2.88	3.54	5.63	2.41	3.51
K_2O	0.82	0.89	3.08	2.96	3.53	0.93	3.59	3.97
P_2O_5	0.25	0.32	0.33	0.58	0.39	0.40	0.54	0.46
烧失量	0.72	0.90	0.74	0.32	0.75	1.66	0.48	1.32
总量	100.96	100.90	100.71	99.85	100.5	100.63	99.50	100.62
La	47.37	60.23	129.90	42.02	63.05	58.99	38.86	66.44
Ce	98.23	109.10	243.90	90.91	108.50	109.70	77.21	113.50
Pr	14.30	14.81	33.21	13.01	14.19	14.51	10.52	14.62
Nd	60.93	54.85	115.70	61.31	52.79	55.22	48.49	52.70
Sm	12.65	8.82	18.59	17.37	7.95	8.67	15.14	7.30
Eu	4.184	4.26	3.67	5.87	2.63	4.05	5.46	2.58
Gd	11.45	6.63	14.46	19.30	5.70	6.47	17.44	4.69
Tb	1.76	0.95	2.17	3.26	0.67	0.90	3.00	0.47
Dy	9.31	4.74	12.28	18.27	3.20	4.69	17.29	1.86
Ho	1.74	0.83	2.38	3.47	0.52	0.82	3.31	0.27
Er	4.47	1.97	6.67	9.32	1.25	2.07	8.89	0.55
Tm	0.61	0.26	1.00	1.30	0.17	0.27	1.26	0.07
Yb	3.74	1.35	6.61	7.95	1.06	1.47	7.81	0.42
Lu	0.58	0.17	0.98	1.21	0.16	0.19	1.15	0.06
ΣREE	271.31	268.96	591.51	294.55	261.84	268.02	255.82	265.54
L/H	7.06	14.92	11.71	3.60	19.56	14.89	3.25	30.63
Eu/Eu^*	1.04	1.64	0.66	0.98	1.14	1.59	1.02	1.26
Ce/Ce^*	0.90	0.86	0.87	0.93	0.84	0.88	0.90	0.84
Sc	30.30	2.30	3.31	30.41	5.09	2.42	33.83	2.52
Ti	23318.30	7070.00	1310.90	14398.80	8016.50	7382.30	15962.00	7590.70
Cr	30.31	3.50	4.99	4.13	4.32	2.63	7.40	2.93
Ga	22.76	23.54	23.05	30.74	22.26	24.44	33.77	21.03
Rb	28.11	26.06	27.69	105.50	86.14	33.78	123.70	83.23
Sr	46.07	251.90	9.84	24.60	524.30	293.40	25.27	563.40
Y	46.65	23.10	56.75	89.71	14.48	20.97	86.95	8.12
Zr	312.00	228.50	584.30	532.10	263.20	240.20	591.80	233.20
Nb	52.49	44.68	59.98	69.52	46.96	46.24	79.13	44.03
Cs	0.97	0.77	1.03	0.32	0.73	0.96	0.38	0.74
Ba	256.40	265.30	89.04	265.80	2300.30	306.90	366.00	2529.30
Hf	9.01	6.09	20.23	14.74	6.93	6.13	15.61	5.95
Ta	4.03	3.17	7.81	4.97	3.34	3.08	5.41	3.02
Th	4.27	8.44	5.52	7.29	7.18	7.63	4.75	7.20
U	1.14	2.81	5.04	4.03	1.98	2.73	6.62	1.76

分析者: 主量元素由中国地质科学院矿产综合利用研究所分析测试黄进完成; 稀土元素和微量元素由中国科学院同位素地球化学重点实验室刘颖, 涂湘林测试; 主量元素为%, 稀土元素和微量元素为$\times 10^{-6}$

样品LD1、LD5、LD9的Nb/La值大于1(为1.1~2), 在Nb/La-Th_N/Nb_N图解中(图3A), 落入未受地壳混染范围, 在La/Ba-La/Nb图解中(图3B), LD1、LD2、LD4、LD5、LD7和LD9也落在原始地幔范围, 显示岩石基本未受地壳物质混染。而样品LD2、LD4、LD6、LD7和LD10的Nb/La值小于1

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



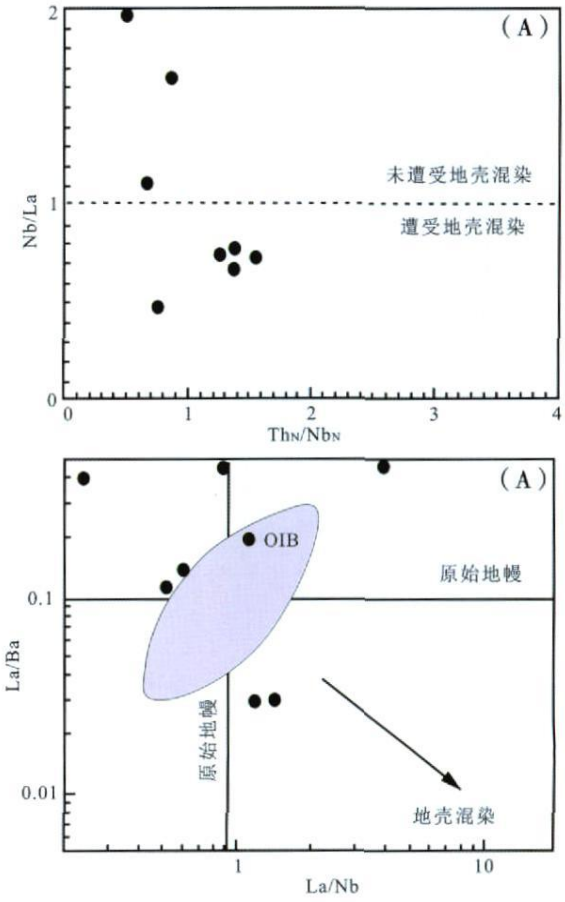
球粒陨石据 Boynton, 1984

图 2 辉长岩稀土配分图解

Fig. 2 REE distribution patterns of the gabbro

(为 0.45~ 0.79), 在 Nb/La-Th/Nb 图解中落入受地壳混染范围(图 3A), LD6、LD10 在 La/Ba-La/Nb 图解中(图 3B) 投到地壳混染范围, 反映岩石可能受到过地壳物质的混染。同时, 因为 La 的活动性相对较强, 在岩石蚀变过程中易活化迁移, 使其浓度发生改变[12, 14, 15], 所以 Th/Nb 值可能较准确地反映了岩石源区的基本特征。

岩石不相容元素原始地幔标准化图解呈驼峰状(图 4), 无明显的 Nb、Ta 负异常, 这种形态的图解正是未遭受到地壳物质混染的大陆裂谷玄武岩微量元素组合的典型特征[16], 而大陆裂谷玄武岩类似于 EM Ⅰ 型洋岛屿玄武岩(OIB), 在成因上可能与古老



图解据文献[12]

图 3 辉长岩 Nb/La-Th_N/Nb_N 和 La/Ba-La/Nb 图解

Fig. 3 Nb/La-Th_N/Nb_N (A) and La/Ba-La/Nb (B) plots of the gabbro

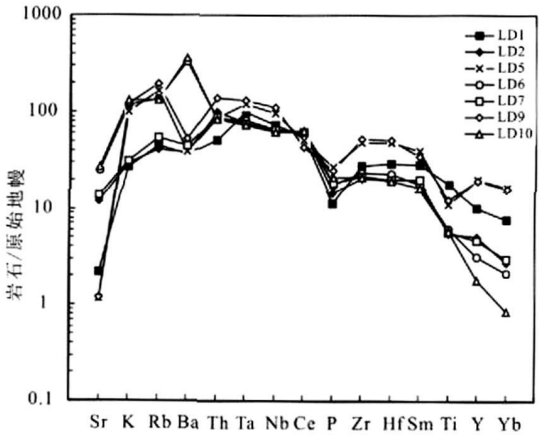
表 2 辉长岩中不相容元素比值

Table 2 Incompatible element ratios of the gabbro

	Zr/Nb	La/Nb	Ba/Nb	Th/Yb	Rb/Nb	Th/Nb	Th/La	Zr/Y
LD1	5.94	0.90	4.88	1.14	0.54	0.08	0.09	6.69
LD2	5.11	1.34	5.94	6.23	0.58	0.19	0.14	9.89
LD4	9.74	2.16	1.51	3.85	0.46	0.43	0.19	10.29
LD5	7.65	0.60	3.82	0.92	1.52	0.11	0.17	5.93
LD6	5.60	1.34	48.98	6.74	1.83	0.15	0.11	18.16
LD7	5.19	1.27	6.64	5.16	0.73	0.16	0.12	11.45
LD9	7.48	0.50	4.63	0.61	1.56	0.06	0.12	6.81
LD10	5.30	1.50	57.44	1.70	1.89	0.16	0.11	28.71
最小	5.11	0.50	1.51	0.61	0.46	0.06	0.09	5.93
最大	9.74	2.16	57.44	6.74	1.89	0.43	0.19	28.71
平均	6.50	1.20	16.73	3.29	1.14	0.17	0.13	12.24
原始地幔	14.8	0.94	9.0		0.91	0.117	0.125	
N-MORB	30	1.07	1.7~ 8.0	0.25	0.26	0.0025~ 0071	0.067	2.64
E-MORB			4.9~ 8.5	0.04		0.06~ 0.08		3.32
大陆地壳	16.2	2.2	54		4.7	0.44	0.204	
HIMU-OIB	3.2~ 5.0	0.66~ 0.77	4.9~ 6.9		0.35~ 0.38	0.078~ 0.101	0.107~ 0.133	
EMⅠ-OIB	4.2~ 11.5	0.86~ 1.19	11.4~ 17.8	1.85	0.88~ 1.17	0.105~ 0.122	0.107~ 0.128	9.66
EMⅡ-OIB	4.5~ 7.3	0.89~ 1.09	7.3~ 13.3		0.59~ 0.85	0.111~ 0.157	0.122~ 0.163	

注: HIMU、EMⅠ、EMⅡ和 DMM 的数据据文献[46~ 50]

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



原始地幔据 Sun & McDonough, 1989

图 4 辉长岩微量元素原始地幔标准化图解

Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace element patterns of the gabbro

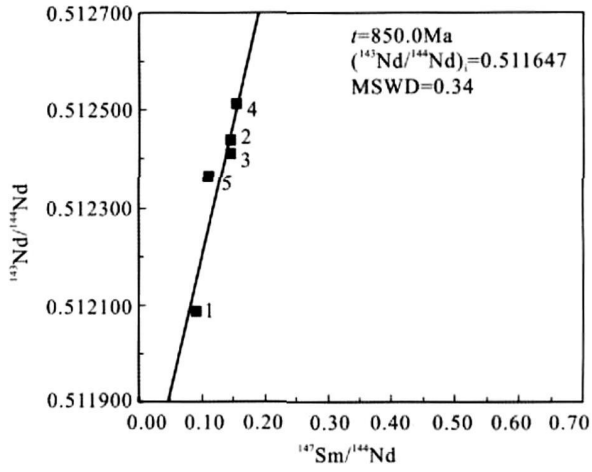


图 5 辉长岩 ω(143Nd)/ω(144Nd)-ω(147Sm)/ω(144Nd) 等时线

Fig. 5 Sm-Nd isochrone of the gabbro

表 3 辉长岩 Nd 同位素分析结果

Table 3 Nd isotopic compositions of the gabbro

样号	LD1	LD2	LD3	LD5	LD6
$^{147}Sm/^{144}Nd$	0.0900	0.1449	0.1435	0.1531	0.1100
$^{143}Nd/^{144}Nd$	0.512086±0.000004	0.512439±0.000008	0.512409±0.000007	0.512514±0.000006	0.512364±0.000003
I_{Nd}	0.511584	0.511631	0.511609	0.511661	0.511751
$\varepsilon_{Nd}(t)$	0.8	1.8	1.3	2.3	4.1

测试单位: 中国科学院同位素和地球化学实验室, 测试人: 梁细荣

大陆下岩石圈的再循环有关[15], 是富集不相容元素的地幔部分熔融的结果[12]。

3.2 岩体形成时代

本文选择能克服岩石侵蚀、变质甚至地壳重熔作用的 Sm-Nd 同位素对 5 个蚀变较弱的辉长岩样品进行了定年研究, 所测 Sm 和 Nd 含量及 Nd 同位素比值列于表 3。辉长岩全岩样品的 Sm 同位素比值$^{147}Sm/^{144}Nd$ 变化范围大(0.0900~ 0.1531), Nd 同位素比值变化小($^{143}Nd/^{144}Nd$= 0.512086~ 0.512514), 构成了一条相关性很好的等时线(图 5)。利用 Geokit 软件求得岩石的等时线年龄 T= 850.0±10 Ma, 相关系数 R= 0.9196, 初始$^{143}Nd/^{144}Nd$值为0.511647, MSWD 为 0.34。由 t= 850 Ma 计算获得样品 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为 0.8~ 4.1。其中 2 件样品 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值高(2.3~ 4.1), 表明岩浆有亏损地幔组分加入; 另外 3 件样品 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 较低(0.8~ 1.3), 接近于 CHUR 的值。这种岩石可能直接来自分异小的下地幔[17], 也可能是亏损地幔的岩浆受到地壳物质的混染所致[18]。然而, 总体上来说, 所有样品 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 都大于 0, 具较低的原始地幔标准化 Th/Nb 值, 特别是微量元素分配型式无 Nb、Ta 负异常, 说明样品并没有显著的大陆地壳物质的混染。

4 讨 论

4.1 岩石成因

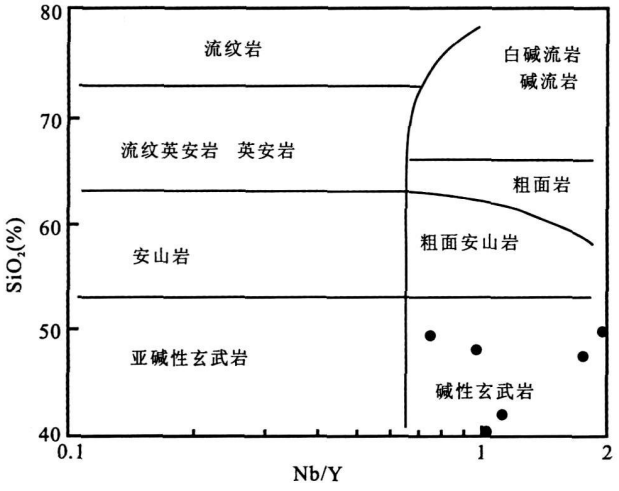
年龄是确定矿区辉长岩原岩性质和构造属性的关键, 但目前尚没有令人信服的结果和解释。前人对矿区辉长岩年龄作过一些研究, 辉长岩同位素年龄数据均用 K-Ar 法测定, 为 324~ 1620 Ma, 变化较大, 可信度较低。本文的 Sm-Nd 同位素定年能克服岩石侵蚀、变质甚至地壳重熔作用的影响, 而且 Sm 同位素比值$^{147}Sm/^{144}Nd$ 变化范围大, 初始比值 I_{Nd}、$\varepsilon_{Nd}(t)$ 彼此相差很小, 表明本文等时线是有效和合理的, 获得的 850.0±10 Ma 的 Sm-Nd 等时线年龄能代表矿区辉长岩的年龄, 属于扬子地台西缘新元古代 Rodinia 超大陆裂解期。

近年来, 有学者将扬子地块和华夏地块新元古代碰撞与新元古代 Rodinia 超大陆的重建联系在一起[19, 21]。在 Rodinia 超大陆形成的聚合时间上已基本取得共识, 赣东北[22]、皖南[23] 和桂北蛇绿岩[24](约 1.0 Ga) 被认为是扬子地块和华夏地块碰撞缝合带的标志, 时代上与全球 Grenvillian 造山带也基本一致, 代表华南 Rodinia 超大陆形成的时间。但对 Rodinia 超大陆裂解期间形成的岩浆岩的成因和

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

构造背景还有争议,目前大多数学者认为扬子地块西缘新元古代 860~ 740 Ma 的基性岩浆活动多与板内裂谷活动有关,很可能是 Rodinia 超大陆下 860~ 740 Ma 超级地幔柱所引起[19,25~33],但也有相当一部分学者主张这些岩浆岩系岛弧成因[34~39]。

由于矿区辉长岩群已遭受不同程度的变质和蚀变,导致某些性质活泼元素的活化迁移,使其浓度发生改变。因此,我们将地球化学数据的重点放在不活泼元素上,如高场强元素(HFSE)、稳定主成分(P_2O_5、TiO_2)、Th、Y、Ti、Cr、Ni 和 $\varepsilon(t)$ 值。此外,目前认为稀土元素在变质作用中也较为稳定,因而能反映原岩的特征[17],所以我们也讨论了稀土元素。在 Winchester 等人提出的 SiO_2-Nb/Y 分类图上,辉长岩样品均具高的 Nb/Y(0.78~ 5.42),均落入碱性玄武系列范围(图 6),属大陆裂谷岩浆岩。一般地说,这种分布于大陆裂谷边缘或深大裂谷带的碱性玄武质岩浆是裂谷期的产物[9]。



图解据文献[40];转引自文献[15]

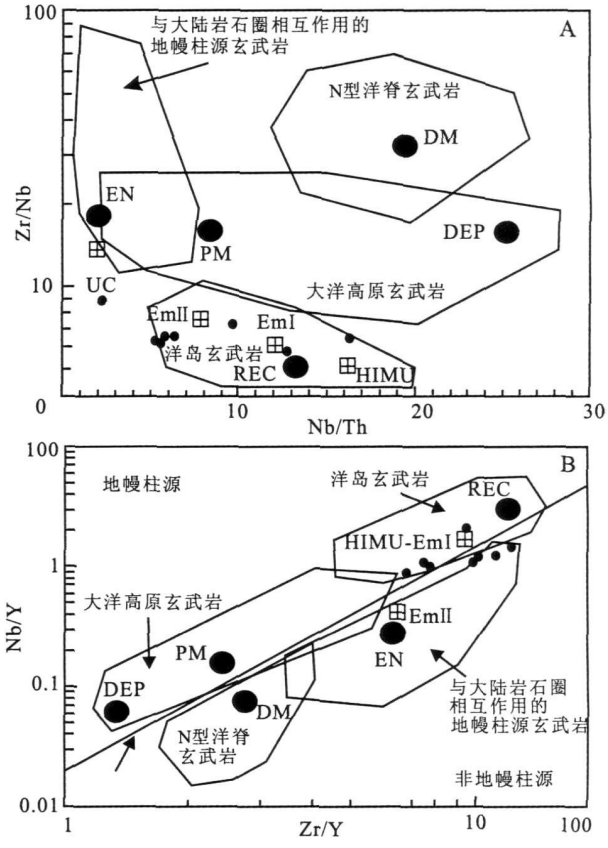
图 6 辉长岩 SiO_2-Nb/Y 图解

Fig. 6 SiO_2-Nb/Y diagram of the gabbro

运用 Condie[41] 建立的高场强元素(HFSE)比值(Nb/Th、Zr/Nb、Nb/Y 和 Zr/Y)评价体系来约束辉长岩的幔源性质,发现在辉长岩的 Nb/Th-Zr/Nb 图上(图 7A),HFSE 值成分点几乎全投在 EM Ⅰ(富集地幔)和 EM Ⅱ(富集地幔)之间,落入源于地幔柱的洋岛玄武岩(OIB)范围。在辉长岩的 Nb/Y-Zr/Y 图上(图 7B),部分样品(LD1、LD5、LD9)投点接近于 EM Ⅰ 富集地幔,落入地幔柱源洋岛玄武岩(OIB)范围,反映了岩浆岩的真实源区性质;部分样品(LD6、LD10 等)投点接近于 EM Ⅱ富集地幔,落入与大陆岩石圈相互作用的地幔柱源玄武岩,说明辉长岩主要源于 EM Ⅰ 富集地幔,但可能受到岩石圈地幔的混染,部分样品源区性质从 EM Ⅰ 向 EM Ⅱ偏移。

微量元素也是好的示踪剂。样品稳定元素比值一般相对较为稳定,如 Zr/Nb 为 5.11~ 9.74,Th/Yb 为 0.61~ 6.74,Th/La 为 0.09~ 0.19,Zr/Y 为 5.93~ 28.71。这些比值与 EM Ⅰ 型和 EM Ⅱ洋岛玄武岩都比较相近(表 2),表明岩石起源于富集型地幔源,这正是地幔柱岩浆的重要地球化学标志。而部分大离子亲石元素比值不太稳定(如 Ba/Nb、Rb/Nb),这可能是岩石遭受蚀变,大离子亲石元素发生迁移所致。

研究表明,没有受到地壳混染的由地幔柱产生的玄武质岩石,通常具平坦的 REE 分配型式或 LREE 富集的分配型式,并以缺乏 Nb、Ta 和 Ti 的负异常为特征[12]。矿区辉长岩 REE 配分模式呈较缓的右倾曲线(图 2),微量元素呈非常醒目的"驼峰"状原始地幔标准化分配型式(图 4),并显示了富



UC:上部陆壳;PM:原始地幔;DM:浅部亏损地幔;HIMU:高 U/Pb 源;EM Ⅰ 和 EM Ⅱ:富集地幔源;DEP:深部亏损地幔;EN:富集组分;REC:再循环组分;据文献[41]

图 7 辉长岩(A)Nb/Th-Zr/Nb 和(B)Zr/Y-Nb/Y 图解中的分布

Fig. 7 Distribution of the gabbro on (A) Nb/Th-Zr/Nb, and (B) Zr/Y-Nb/Y diagrams

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

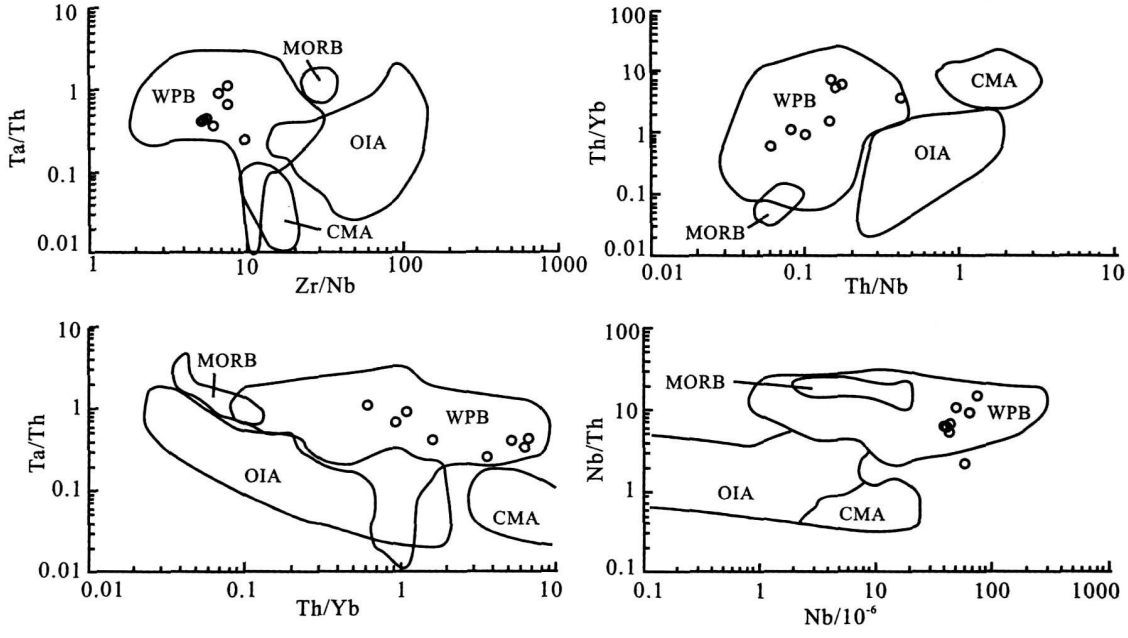
集强不相容元素,缺乏Nb、Ta负异常的特征,与典型的地幔柱成因的玄武岩非常接近。同时,正异常δEu除了表明岩体在岩浆结晶过程中有明显的斜长石堆晶作用外,也暗示岩石虽然遭受蚀变,但强度微弱,稀土元素特征能作为原岩性质判断的制约。因为在岩石蚀变过程中,导致岩石微量元素活动的机制有两种可能:一是离子交换,即在流体与矿物之间发生离子交换;二是富含微量元素的矿物发生分解[42]。在前一种情况下,矿物在流体中保持稳定,微量元素离子主要通过扩散方式实现矿物与流体间的离子交换,交换速率完全取决于离子在矿物中的扩散速率,这种扩散速度非常缓慢[43]。因此,富含微量元素的矿物发生分解是岩石体系中微量元素活动的主要机制[42]。辉长岩最常见的蚀变是钠黝帘石化(钠长石、黝帘石和绿帘石等矿物集合体)交代斜长石。但斜长石同时又是Eu的主要寄主矿物,所以,岩石如果蚀变强烈,Eu应首先随斜长石的分解而迁移,造成Eu负异常。而实际情况恰恰相反,说明岩石蚀变较为微弱,与岩相学观察到的现象相符。

研究表明,没有受到地壳混染的由地幔柱产生的大陆玄武岩在同位素成分上,常具高的$\varepsilon_{Nd}(t)$值(>+2)特征[44],这是由于母岩浆在上升过程中有亏损地幔物质的加入所致[19],如康定冷碛辉长岩[$\varepsilon_{Nd}(t)=+3.4$][19]。矿区辉长岩部分高$\varepsilon_{Nd}(t)$值(4.1),与世界上及扬子地台西缘同时代的一些具地幔柱成因的大陆玄武岩相似,是岩浆上升过程中亏损地幔组分加入导致$\varepsilon_{Nd}(t)$值升高。

综上可见,拉拉地区辉长岩群保存了鲜明的地幔柱信号,它们是源于大陆岩石圈之下的地幔柱,主要来源于EMⅠ富集地幔,并在上升过程中局部与岩石圈地幔发生作用,使部分样品显示出EMⅡ富集地幔特征。

4.2 构造环境

在辉长岩的Ta/Th-Zr/Nb、Th/Yb-Th/Nb、Ta/Th-Th/Yb和Nb/Th-Nb构造环境判别图解上(图8),辉长岩样品几乎都落入板内玄武岩(WPB)区内,稍微表现出亲大陆边缘弧(CMA)趋势,说明矿区辉长岩形成于板内裂谷构造环境。扬子块体西缘在新元古代860~750 Ma发育一个南北向展布的康滇裂谷系,它类似于现代与地幔柱活动有关的高火山活动型裂谷。在这期间,扬子地台西缘大规模的岩浆活动正与Rodinia超级大陆下的一个超级地幔柱活动有关[11]。拉拉矿区辉长岩群年龄(850 Ma)与扬子地台西缘新元古代地幔柱源铁镁质岩年龄(860~750 Ma)一致。它们的元素地球化学、同位素特征也和李献华等[11]研究的冷碛辉长岩相似,均为碱性玄武岩、中等富集LREE、较平缓的REE



底图转引自文献[51]

WPB 板内玄武岩;CMA 大陆边缘弧;MORB 洋中脊玄武岩;OIA 大洋弧

图8 拉拉矿区辉长岩的构造判别图

Fig. 8 Identification diagrams of tectonic formations of the gabbro

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分布型式和富集 HFSE, 只是冷碛辉长岩受到下地壳物质的混染, 显示 Nb-Ta 亏损, 说明拉拉地区辉长岩群和其他新元古代铁镁质岩体一样产于大陆裂谷环境下的地幔柱成因。

4.3 矿床成因的限定

研究表明拉拉铜矿具多期成矿的特点, 成矿年龄集中于 928~ 1005 Ma[3] 和 833~ 887 Ma 两个年龄段[4, 5]。矿区辉长岩年龄为 850 Ma, 与矿床晚期成矿年龄一致, 充分说明了矿区辉长岩与矿床在时空分布上的一致性。然而, 矿区辉长岩中成矿元素含量普遍很低[45], 辉长岩和矿石间微量元素特征差异较大, 矿床成矿流体主要为变质水而非岩浆水[4, 5], 又说明辉长岩和矿床间并不存在物质联系和流体联系, 而可能是热动力联系。由此可见, 拉拉铜矿的多期成矿的特点, 包括晚期成矿过程中, 代表新元古代深部构造过程的地幔柱辉长岩岩浆热事件对该区金属元素巨量堆积起到极其重要的成矿"引擎"作用, 所携带的巨大热量与含矿地层发生"引潮共振", 为成矿元素的重新活化、迁移、富集提供了强大的热动力, 因而形成拉拉地区巨量金属元素的富集。

5 结 论

扬子地台西缘新元古代岩浆活动非常强烈[19]。对华南新元古代(850~ 750 Ma)岩浆岩的成因目前主要有两种解释。根据桂北基性岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与澳大利亚地幔柱成因的 Gairdner 岩墙群年龄一致, 指出约 825 Ma 前华南有一地幔柱, 它引发了新元古代大陆裂谷和岩浆活动[26]; 与这一观点相反, 有人根据新元古代康定花岗质杂岩的岛弧地球化学特征, 认为扬子块体在 865~ 760 Ma 期间被西- 西北缘和东南缘两个活动岛弧环绕, 是一个被海洋岩石圈俯冲带包围的孤立陆块[34]。本文认为, 拉拉地区辉长岩群形成于约 850 Ma, 其岩性和地球化学特征与地幔柱成因的大陆玄武岩十分吻合, 说明它的形成是扬子地台西缘 Rodinia 超大陆裂解的岩浆事件, 这一事件与地幔柱活动有关。

此外, 虽然前人认为矿区辉长岩含矿性较差, 与矿床的形成并无物质联系, 但是辉长岩群和矿床群在时间、空间分布上的紧密联系, 暗示着矿床和地幔柱源辉长岩之间很可能存在着紧密的热动力联系。本区地幔柱源辉长岩虽然没有为矿床的形成直接提供物质来源, 但是地幔柱在上升过程中, 其蕴涵的大量热量促使区域变质作用的发生, 促成了河口群(矿源层)内成矿元素的进一步活化、富集, 形成变质热液, 在有利部位形成矿体, 这是地幔柱成矿作用的重要型式之一。

致 谢: 同位素测试得到中国科学院同位素地球化学重点实验室梁细荣老师的帮助, 稀土元素和微量元素测试得到中国科学院同位素地球化学实验室刘颖和涂湘林老师的帮助, 主量元素测试得到中国地质科学院矿产综合利用研究所黄进工程师的帮助, 在此表示感谢!

参考文献 (References):

[1] 陈根文, 夏斌. 四川拉拉铜矿床成因研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(1): 42- 44.
Chen Genwen, Xia Bin. Study on the genesis of Lala copper deposit, Sichuan province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemisty, 2001, 20(1): 42- 44. (in Chinese with English abstract)

[2] 申屠保涌. 钠长岩类地质地球化学特征及变质变形与铜矿的形成——以四川会理拉拉铜矿床为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20(3): 77- 91.
Shentu Baoyong. Geology-geochemistry, metamorphism and deformation of albitites and their bearings on copper minrralization: an example from the Lala copper deposit in Huili, Sichuan[J]. Sedimentary geology and tethyan geology, 2000, 20(3): 77- 91. (in Chinese with English abstract)

[3] 李泽琴, 王奖臻, 刘家军, 李朝阳, 杜安道, 刘玉平, 叶琳. 拉拉铁氧化物-铜-金-钼-稀土矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质找矿论丛, 2003, 18(1): 39- 42.
Li Zeqin, Wang Jiangzhen, Liu Jiajun, Li Chaoyang, Du Andao, Liu Yuping, Ye Lin. Re-Os dating of molybdenite from lala Fe-Oxide-Cu-Au-Mo-REE deposit, south west china: Implications for ore genesis[J]. Geology and Mineral Rosources Research, 2003, 18(1): 39- 42. (in Chinese with English abstract)

[4] 陈好寿, 冉崇英. 康滇地轴铜矿床同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 20- 74.
Chen Haoshou, Ran Chongying. Isotope geochemistry of copper deposits in kangdian axis[M]. Beijing: Geological publishing house, 1992: 20- 74. (in Chinese)

[5] 孙燕, 舒晓兰, 肖渊甫. 四川省拉拉铜矿床同位素地球化学特征及成矿意义[J]. 地球化学, 2006, 35(5): 553- 559.
Sun Yan, Shu Xiaolan, Xiao Yuanfu. Isotopic geochemistry of the Lala copper deposit, Sichuan province, China and its metallogenetic significance[J]. Geochimica, 2006, 35(5): 553- 559. (in Chinese with English abstract)

[6] 李才, 和钟铧, 李惠民. 青藏高原南羌塘基性岩墙群 U-Pb 和 Sm-Nd 同位素定年及构造意义[J]. 中国地质, 2004, 31(4): 384- 389.
Li Cai, He Zhonghua, Li Huimin. U-Pb and Sm-Nd dating of mafic dike swarms in southern Qiangtang, Qinghai-Tibet pleatau and its tectonic significance[J]. Geology in China,

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2004, 31(4): 384-389. (in Chinese with English abstract)

[7] 刘肇昌, 李凡友, 钟康惠. 扬子地台西缘构造演化与成矿[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1996, 7: 40-90.
Liu Zhaochang, Li Fanyou, Zhong Kanghui. Tectonic evolution and metallogenesis on the western margin of the Yangtze platform[M]. Chengdu: China Electronic Science University Press, 1996, 7: 40-90. (in Chinese)

[8] 吴根耀. 会理-东川裂堑的发育及形成机制[M]. 北京: 北京科技出版社, 1983: 30-62.
Wu Gengyao. The formation and development-mechanism of Huili-Dongchuan Rifting[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House, 1983: 30-62. (in Chinese)

[9] Lee C Y, Tsai J H, Ho H H, *et al*. Quantative analysis in rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer, (Ⅰ) major elements[J]. An Meet. Geol. Soc. China, 1997: 418-420.

[10] 刘亚轩, 张勤, 黄珍玉, 吴健玲. ICP-MS法测定地球化学样品中As、Cr、Ge、V等18种微量痕量元素的研究[J]. 化学世界, 2006(1): 16-20.
Liu Yaxuan, Zhang Qin, Huang Zhenyu, Wu Jianling. Study on determination of 18 trace elements including As, Cr, Ge, Vin geochemical samples by ICP-MS[J]. Chemical World, 2006, (1): 16-20. (in Chinese with English abstract)

[11] 李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和Sm-Nd同位素制约及其大地构造意义[J]. 地质科学, 2002, 37(3): 264-276.
Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, Liu Ying. Petrogenesis of neoproterozoic bimodal volcanics in west Sichuan and its tectonic implications: Geochemical and Sm-Nd isotopic constraints[J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(3): 264-276. (in Chinese with English abstract)

[12] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 碧口群火山岩岩石成因研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 84-101.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. Study of petrogenesis of Bikou group volcanic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3): 84-101. (in Chinese with English abstract)

[13] Kieffer B, Arndt N, Lapierre H, *et al*. Flood and shield basalts from Ethiopia[J] Geol Soc Spec. Pub, 1992, 68: 41-60.

[14] 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 任留东, 周喜文, 石玉若, 杨铸生. 扬子地台西缘盐边群玄武质岩石地球化学特征及SHRMP锆石U-Pb年龄[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 805-813.
Du Lilin, Geng yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Ren Liudong, Zhou Xiwen, Shi Yuruo, Yang Zhusheng. Geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon chronology of basalts from the yanbian group in the western Yangtze block[J]. Aeta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 805-813. (in Chinese with English abstract)

[15] 李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖, Kinny P. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩的锆石U-Pb年龄和岩石化学特征[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 315-322.
Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, Liu Ying, Kinny P. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristics of the neoproterozoic bimodal volcanics from western Yangtze block[J]. Geochimica, 2001, 30(4): 315-322. (in Chinese with English abstract)

[16] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 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): 77-87.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. Acta Petrologica et Mineralogical, 2007, 26(1): 77-87. (in Chinese with English abstract)

[17] 陈骏, 王鹤年. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 150-155.
Chen Jun, Wang Henian. Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2004: 150-155. (in Chinese)

[18] 张本仁, 傅家谟. 地球化学进展[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 200-240.
Zhang Benren, Fu Jiamo. Advances in geocheminstry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 200-240. (in Chinese)

[19] 李献华, 李正祥, 周汉文, 刘颖, 梁细荣. 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, 10, 9(4): 329-338.
Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, Liu Ying, Liang Xirong. U-Pb zircon geochronological, geochemical and Nd istopic study of neoproterozoic basaltic magmatism in western Sichuan: petrogenesis and geodynamic implications[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 10, 9(4): 329-338. (in Chinese with English abstract)

[20] Li Z X, Zhang L, Powell C M. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? [J]. Geology, 1995, 23: 407-410.

[21] Li Z X, Zhang L, Powell C M. Positions of the East Asian cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia[J]. Aust. J. Earth Sci., 1996, 43: 593-604.

[22] Zhou G Q, Zhao J X. Sm-Nd Isotopic systematics of the NE Jiangxi ophiolite(NEJXO), SE margin of the Yangtze Craton, south China[J]. Chin. Sci. Bull., 1999, 36: 1374-1379.

[23] 周新民, 邹海波, 杨杰东, 王银喜. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的Sm-Nd等时线年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 1989, 34(16): 1243-1245.
Zhou Xinmin, Zou Haibo, Yang Jiedong, Wang Yinxi. Sm-Nd isochronous age of Fuchuan ophiolite suite in Shexian county, Anhui Province, and its geological significance[J]. Chin. Sci. Bull., 1989, 34, (16): 1243-1245. (in Chinese with English abstract)

[24] 甘晓华, 李献华, 赵风清, 王海波. 广西龙胜丹洲群细碧岩U-Pb及Sm-Nd等时线年龄[J]. 地球化学, 1996, 25(3): 270-276.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Gan Xiaohua, Li Xianhua, Zhao Fengqing, Wang Haibo. U-Pb zircon and Sm-Nd isotopic ages of spilites from Danzhou group, Longsheng, Guangxi[J]. Geochimica, 1996, 25(3): 270- 276. (in Chinese with English abstract)

[25] 朱维光, 刘秉光, 邓海琳, 钟宏, 李朝阳, 皮道会, 李志德, 覃喻. 扬子地块西缘新元古代镁铁-超镁铁质岩研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(3): 254- 260.
Zhu Weiguang, Liu Bingguang, Deng Hailin, Zhong Hong, Li Chaoyang, Pi Daohui, Li Zhide, Qin Yu. Advance in the study of Neoproterozoic mafie-ultramafic rocks in the western margin of the Yangtze craton[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23(3): 254- 260. (in Chinese with English abstract)

[26] Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1999, 173: 171- 181.

[27] Li Z X, Li X H, Zhou H, Kinny P D. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia[J]. Geology, 2002, 30: 163- 166.

[28] Li X H, Li Z X, Zhou H, Liu Y, Kinny P D. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangding Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia [J]. Precamb Res., 2002, 113: 135- 1551.

[29] Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J, Zhang S, Zhou H. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a superplume that broke up Rodinia [J]. Precam. Res., 2003, 122: 85- 109.

[30] Li X H, Li Z X, Ge W, Zhou H, Li W X, Liu Y, Wingate M T D. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825Ma? [J]. Precam. Res., 2003, 122: 45- 83.

[31] Ling W, Gao S, Zhang B R, Li H M, Liu Y. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze Craton, South China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia supercontinent[J]. Precam. Res., 2003, 122: 111 - 140.

[32] 凌文黎, 王敖华, 程建萍. 扬子北缘晋宁期望江山基性岩体的地球化学特征及其构造背景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20: 218- 221.
Ling Wenli, Wang Xinhua, Cheng Jianping. Geochemical features and its tectonic implication of the Jinningian Wangjiangsha grabbros in the north margin of Yangtze Block [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, 20: 111- 140. (in Chinese with English abstract)

[33] 林广春, 李献华, 李武显. 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), 2006, 36(7): 630- 645.
Lin Guanchun, 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), 2006, 36 (7): 630- 645. (in Chinese)

[34] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, Li Y Q, Ding J. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic are-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2002, 196: 51- 67.

[35] Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, Malpas J, Lesher C M. Neoproterozoic are-related mafic intrusions along the Northern margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia[J]. J. Geol., 2002, 110: 611- 618.

[36] 颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, Malpas J. 华南在 Rodinia 古陆中的位置的讨论——扬子地块西缘变质-岩浆杂岩的证据及其与 Seychelles 地块的对比[J]. 地学前缘, 2002, 9(4): 49- 50.
Yan Danping, Zhou Meifu, Song Honglin, Malpas J. Where was South China located in the reconstruction of Rodinia? [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(4): 49- 50. (in Chinese with English abstract)

[37] 沈渭洲, 高剑峰, 徐士进, 周国庆. 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, Zhou Guoqing. Geochemical characteristics and genesis of the Qiaotou basic complex, Luding county, western Yangtze Block[J]. Geol. J. China Universities, 2002, 8(4): 380- 389. (in Chinese with English abstract)

[38] 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 谭国全, 杨铸生, 杨七文. 四川盐边冷水箐岩体的形成时代和地球化学特征[J]. 岩石学报, 2003, 19(1): 27- 37.
Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, Tan Guoquan, Yang Zhusheng, Yang Qiwen. Format on age and geochemical charateristics of the Lengshuiqing body, Yanbian, Sichuan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(1): 27 - 37. (in Chinese with English abstract)

[39] 周金城, 王孝磊, 邱检生, 高剑峰. 桂北中-新元古代镁铁质-超镁铁质岩的岩石地球化学[J]. 岩石学报, 2003, 19(1): 9 - 18.
Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng, Gao Jianfeng. Lithogeochemistry of Meso- and Neoproterozoic mafie ultramafic rocks from northern Guangxi[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(1): 9- 18. (in Chinese with English abstract)

[40] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chem. Geol., 1977, 20: 325- 343.

[41] Condie K C. High field strength element ratios in Archean basalts: A window to evolving sources of mantle plumes[J]. Lithos, 2005, 70: 491- 504.

[42] 凌其聪, 刘丛强. 低级变质岩在热液蚀变过程中的微量元素地球化学行为——以赣东北银山地区双桥山群为例[J]. 岩石学报, 2002, 18(1): 100- 108.
Ling Qicong, Liu Congqiang. Geochemical behavior of trace

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

element hydrothermal alterationin low-metamorphic rock: a case study for shuangqiaoshan group in yinshan area, northwestern Jiangxi province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(1): 100-108. (in Chinese with English abstract)

[43] Campbell I H, Lesher C M, Coad P, Franklin J M, Gorton M P and Thurston P C. Rare earth element mobility in alteration pipes below massive Cu-Zn sulfide deposits[J]. Chem. Geol., 1984, 45: 184-202.

[44] Saunders A D, Storey M, Kent R W, *et al*. Consequences of plume-lithosphere interaction[A]. Storey B C, Alabaster T and Pankhurst R J. Magmatism and the causes of continental Break-up[C]. Geol. Soc. Spec. Pub., London, 1992, 68: 41-60.

[45] 攀西地质大队. 四川省会理县拉拉铜矿床详细勘探地质报告[R]. 成都: 四川省地质矿产局, 1984: 12-128.
Panxi Geological Survey. The geological report for detailed prospecting of Lala copper deposit, Huili county, Sichuan province[R]. Chengdu: Bureau of Geological and Mineral Resources of Sichuan Province, 1984: 12-128. (in Chinese)

[46] Saunders A D, Norry M J, Tarney J. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: Trace element constraints[J]. Journal of Petrology, 1998, 29(special lithosphere issue): 425-445.

[47] Fittion J G, James D, Kempton P D, *et al*. The role of the lithospheric mantle in the generation of cate cenozoic basic magmas in the western United States[J]. Journal of Petrology, 1998, 29(special lithosphere issue): 331-349

[48] Weaver B L. The origin of ocean island end-member composition: trace element and isotopic constrants[J], Earth Planet. Sci. Lett., 1991, 104(2-4): 381-397.

[49] 杨学明, 杨晓勇, M J Le Bas. 碳酸岩的地质地球化学特征及其大地构造意义[J]. 地球科学进展, 1998, 13(5): 458-466.
Yang Xueming, Yang Xiaoyong, M J Le Bas. Geological and geochemical characteristics of carbonatites and their implication for tectonic settings[J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13(5): 458-466. (in Chinese with English abstract)

[50] 沈渭洲, 高剑峰, 徐士进, 李惠民, 周国庆, 杨铸生, 杨七文. 四川石棉蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质论评, 2003, 49(1): 17-27.
Shen Wenzhou, Gao Jianfeng, Xu Shijin, Li Huimin, Zhou Guoqing, Yang Zhusheng, Yang Qiwen. Geochemical characteristics of the shimian ophiolite, shichuan province and its tectonic significance[J]. Geological Review, 2003, 49(1): 17-27. (in Chinese with English abstract)

[51] 张鸿翔, 刘丛强, 徐志方, 黄智龙. 扬子板块西缘早元古代俯冲体系的地球化学证据——有关变基性岩的微量元素地球化学研究[J]. 矿物学报, 2001, 21(2): 231-238.
Zhang Hongxiang, Liu Congqiang, Xu Zhifang, Huang Zhilong. Geochemical evidence of the lower proterozoic subduction system at the western margin of the Yangtze plate[J]. Acta Mineralogical Sinica, 2001, 21(2): 231-238. (in Chinese with English abstract)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net