

# 四川木洛稀土矿床碳酸岩地球化学

朱志敏<sup>1,2</sup> 郑荣才<sup>1</sup> 周家云<sup>2</sup> 陈家彪<sup>2</sup> 沈冰<sup>2</sup>

(1.成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室,四川成都 610059;  
2.中国地质科学院矿产综合利用研究所,四川成都 610041)

**摘要:** 木洛稀土矿床成因上与碳酸岩-碱性杂岩密切相关。碳酸岩主要由方解石组成,  $\text{CaO}/(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MnO})$  比值在 95.7%~99.6%, 为方解石碳酸岩。碳酸岩相对富集大离子亲石元素 Ba、Sr、LREE, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、Zr、P, 高 Zr/Hf 和 La/Nb 值, 低 Sm/Nd 和 Rb/Sr 值, 暗示岩石来自富集地幔 EMI。地质、地球化学研究表明, 木洛碳酸岩是在峨眉山地幔柱地幔遗存物经喜马拉雅造山运动再次活化的产物, 但碳酸岩熔浆在上侵过程中受到地壳物质混染。碳酸岩-碱性岩熔浆带来大量稀土元素, 并在喜马拉雅造山期造山运动派生的局部引张部位成矿。

**关键词:** 碳酸岩; 地球化学; 木洛; 稀土矿床

**中图分类号:** P618.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2008)04-0754-08

碳酸岩(carbonatite)是一种浅灰或灰白色富含碳酸盐矿物(方解石、白云石、铁白云石等占 50%以上)的火成岩<sup>[1]</sup>。这类岩石在地表上出露较少, 易与沉积的碳酸盐岩及其变质岩——大理岩相混淆, 很久以来被人们忽视。20 世纪 60 年代, Dawson 在考察坦桑尼亚的 Oldoinyo Lengai 活火山时发现正在喷发的碳酸盐熔岩, 此后又在乌干达、安哥拉等地相继发现了碳酸盐熔岩, 由此确认了自然界碳酸盐岩浆的存在, 并认为其来源于地幔<sup>[2]</sup>。最近几十年来, 碳酸岩熔体因其来源深<sup>[3]</sup>、粘度和密度低<sup>[4,5]</sup>、富含不相容元素<sup>[6]</sup>、主要产于大陆张性环境<sup>[7]</sup>, 而被认为是探索大陆地幔化学成分演变的重要指示岩石。此外, 碳酸岩常与稀土、铌、磷、铁、萤石等矿产有关<sup>[8,9]</sup>, 有的碳酸岩体本身就是可被利用的矿产资源<sup>[10,11]</sup>, 因此, 碳酸岩成为近年来火成岩研究的热点课题之一。

木洛稀土矿床是攀西地区新近发现的又一中型稀土矿床<sup>[12]</sup>, 远景有望达大型, 且伴生铅和萤石可供综合利用。矿区位于四川省冕宁县南河乡, 它和冕宁牦牛坪稀土矿床、里庄羊房沟稀土矿、德昌大陆槽稀土矿等大中型稀土矿床, 以及其他一些矿化点构成了

南北向展布的攀西稀土成矿带。该稀土成矿带被认为与碳酸岩-碱性杂岩体有关<sup>[13-16]</sup>, 前人<sup>[14-16]</sup>已在牦牛坪、里庄、德昌等地发现碳酸岩。目前木洛矿区仅进行了基本的矿床地质特征<sup>[12]</sup>、矿石稳定同位素<sup>[17]</sup>及与成矿有关的碱性花岗岩研究<sup>[18,19]</sup>, 工作程度总体比较薄弱。本次野外考察, 笔者在木洛矿区发现碳酸岩出露, 并初步分析了样品的主要元素、稀土元素和微量元素, 总结了碳酸岩的元素地球化学特征, 并试图探讨其成因、构造成矿背景。

## 1 地质背景

木洛稀土矿床位于冕宁县大桥至泸沽一线以西的冕西稀土成矿带(图 1)。研究区位于锦屏山前缘基底隆起带东翼, 海拔 2100~3000 m, 主构造线方向近南北, 主要区域性断裂为棉纱湾断裂, 该断裂经历了多次活动, 与次级控矿断裂呈“入”字型相交, 为矿化流体的运动和储藏提供了通道和空间。矿区出露地层仅有二叠系下统阳新组和新近系洪、坡积物, 岩浆岩主要有峨眉山玄武岩、海西期变辉绿岩、喜马拉雅期碳酸岩-碱性杂岩(包括英碱正长岩和少量二

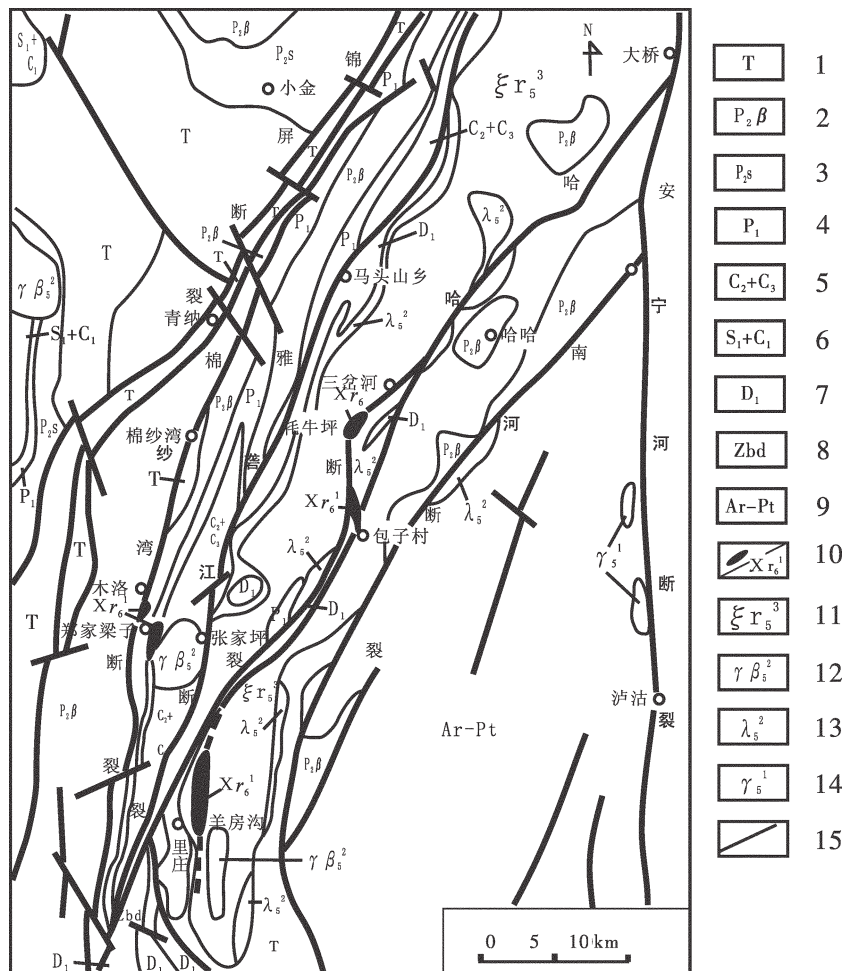


图 1 冕西地区地质略图(据参考文献[12])

1—三叠系;2—峨眉山玄武岩;3—二叠系上统萨彦沟组;4—二叠系下统;5—石炭系中上统;  
6—志留系下统与下石炭统;7—泥盆系下统;8—灯影组;9—康定群;10—霓石碱性花岗岩;  
11—钾长花岗岩;12—黑云母花岗岩;13—流纹岩;14—普通花岗岩;15—断层

Fig.1 Geological sketch map of the western Mianning area (after reference [12])

1-Triassic;2-Emeishan basalt;3-Upper Permian Sayangou Formation;4-Lower Permian;  
5- Middle Carboniferous;6-Lower Silurian and Lower Carboniferous;7-Lower Devonian;  
8- Dengying Formation;9-Kangding Group;10- Aegirine alkali granite;11-Potash-feldspar granite;  
12-Biotite granite;13-Rhyolite;14- Normal granite;15-Fault

长花岗岩)。近年来研究表明峨眉山玄武岩是地幔柱活动的产物<sup>[20,21]</sup>。木洛稀土矿床由北至南分为碉楼山矿段、方家堡矿段和郑家梁子矿段。

碳酸岩在碉楼山矿段呈细脉产出,脉宽仅 10~30 cm;在郑家梁子矿段主脉宽约 50 m,旁侧有 30 cm 左右宽支脉;在方家堡矿段目前尚未发现。碳酸岩的主要矿物为方解石(>90%),次要矿物为黑云母、正长石、霓石、钠铁闪石等,副矿物有磷灰石和磁铁矿等。岩脉边缘发育霓长岩化、钠铁闪石化。田世洪等<sup>[22]</sup>获得与碳酸岩共生的英碱正长岩中微斜长石 Ar-Ar 坪年龄为

31.2 Ma、矿体黑云母 Ar-Ar 法坪年龄为 35.5 Ma<sup>[27]</sup>,表明木洛碳酸岩侵位于喜马拉雅期。

## 2 样品及分析

样品 ML-6 采自碉楼山坑道,ML-Y3 和 ML-Y6 采自郑家梁子地表露头,ML-8 和 PD-4 采自郑家梁子坑道。除样品 ML-Y6 轻微风化蚀变,其他样品表面较新鲜,无风化蚀变特征。每个样品精心挑选 500 g 小碎块,用蒸馏水清洗干净,用烘箱在 100 °C 条件下烘干。将样品碎块置于玛瑙球磨内粉碎至 200 目

以下,进行主要元素、稀土元素和微量元素分析。主要元素采用 XRF 分析; 稀土元素和微量元素采用 ICP-MS 分析,均由中国地质科学院矿产综合利用研究所黄进工程师完成,分析方法及流程见文献<sup>[2]</sup>;主要元素分析误差 $<2\%$ , 稀土元素和微量元素分析误差 $<10\%$ ;稀土元素、微量元素配分图利用路远发<sup>[23]</sup>提供的 GeoKit 程序完成。

### 3 结果

#### 3.1 主要元素

木洛矿区碳酸岩全岩主要元素含量见(表 1),  $\text{SiO}_2$  含量为  $0.15\% \sim 1.09\%$ ,  $\text{TiO}_2$  含量为  $0.0016\% \sim$

$0.002\%$ ,  $\text{CaO}$  含量为  $53.20\% \sim 55.89\%$ ,  $\text{CO}_2$  含量为  $40.01\% \sim 42.77\%$ ,  $\text{CaO} + \text{CO}_2$  含量达到  $93.31\% \sim 98.66\%$ ,  $\text{MgO}$  含量为  $0.16\% \sim 0.41\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$  为  $0.149\% \sim 1.65\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量极低,分别为  $0.011\% \sim 0.51\%$  和  $0.0067\% \sim 0.026\%$ , 可能为碳酸岩上侵上部地壳的过程中与围岩发生了碱质交代作用而使  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  强烈亏损有关,这与观察到的岩脉边缘发育霓长岩化、钠铁闪石化现象一致。碳酸岩的  $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})$  比值在  $95.7\% \sim 99.6\%$ , 按照 Samoilov<sup>[24]</sup>统计的碳酸岩主要元素范围,为方解石碳酸岩。与世界钙质碳酸岩平均值<sup>[23]</sup>相比,木洛碳酸岩贫  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,

表 1 碳酸岩及英碱正长岩主要元素、稀土元素和微量元素  
Table 1 Major element, REE and trace element analyses of carbonatite and nordmarkite

样品	碳酸岩						英碱正长岩				
	ML-6	PD-4	ML-Y3	ML-Y6	ML-8	平均*	DL1	DL2	DL3	M1001	M1011
$\text{SiO}_2/10^{-2}$	0.15	1.10	0.31	0.29	1.09	2.72	73.03	69.56	66.92	67.07	66.82
$\text{TiO}_2$	0.0020	0.0025	0.0025	0.0016	0.0022	0.15	0.074	0.18	0.21	0.27	0.53
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.17	2.65	0.42	0.033	2.60	1.06	13.18	14.20	13.73	14.30	14.29
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.11	0.80	0.16	0.024	0.87	2.25	1.26	2.34	1.87	2.22	2.27
$\text{FeO}$	0.085	0.68	0.13	0.0068	0.78	1.01	0.39	0.3	0.00	1.06	1.13
$\text{MnO}$	0.064	0.32	0.15	0.0065	0.32	0.52	0.076	0.10	0.11	0.08	0.12
$\text{MgO}$	0.41	0.41	0.24	0.16	0.43	1.80	0.056	0.022	0.48	1.32	0.85
$\text{CaO}$	55.09	53.55	54.85	55.89	53.20	49.12	0.50	0.12	1.20	1.69	2.18
$\text{Na}_2\text{O}$	0.023	0.150	0.030	0.011	0.51	0.29	4.72	4.64	5.96	4.48	5.21
$\text{K}_2\text{O}$	0.014	0.010	0.026	0.0067	0.0068	0.26	3.72	4.48	7.48	6.12	4.84
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.012	0.014	0.032	0.013	0.010	2.1	0.096	0.020	0.13	0.35	0.21
$\text{H}_2\text{O}^-$	0.074	0.019	0.038	0.019	0.019						
$\text{H}_2\text{O}^+$	0.07	0.05	0.07	0.08	0.05		2.01	3.26	1.76	0.42	0.52
$\text{CO}_2$	42.36	40.41	42.11	42.77	40.01						
Total	98.634	100.16	98.569	99.312	99.898	99.69	99.01	99.22	99.85	99.38	98.97
$\text{Sr}/10^{-6}$	1749	2841	3279	511	2898		660	1300	1100		
Rb	5.0	6.4	7.6	5.2	4.7	14	411.9	383.4	508.9		
Ba	114	204	75	93	93		8900	11100	11200		
Th	1.1	5.1	1.0	0.4	4.9	52	35.0	126.6	82.8		
Ta	1.13	0.51	0.17	0.78	0.19	5	1.10	0.80	0.90		
Nb	0.95	0.14	0.37	0.32	0.14	1204	0.86	0.90	0.65		
Zr	1.1	0.6	0.3	0.7	0.9	189	14.5	45.6	6.0		
Hf	0.51	1.79	0.05	0.08	2.26						
Y	2.1	150	36	7	175	119	25.0	54.6	18.1		
Sc	0.6	6.0	1.4	0.2	6.3	7					
La	152.5	125.8	342.0	36.2	122.0	608	220.3	795.0	309.3	191	307
Ce	424	438	739	239	382	1 687	267.9	1320.4	385.8	397	586
Pr	27.1	37.0	54.0	7.8	34.6	219	28.7	145.2	57.3	47.8	65.1
Nd	109.1	150.7	210.2	40.6	143.8	883	149.0	530.4	173.4	181	225
Sm	17.87	44.89	33.44	5.36	43.47	130	28.3	75.6	26.6	30.1	34.7
Eu	3.9	11.9	6.8	1.3	12.5	39	6.0	17.6	6.6	7.34	7.64
Gd	9.1	30.4	14.1	1.8	30.4	105	18.2	47.8	14.4	20.0	19.4
Tb	1.5	5.0	2.5	0.7	5.4	9	2.0	5.4	2.1	2.35	2.36
Dy	4.4	21.1	6.7	1.2	24.1	34	8.4	19.8	8.3	10.3	10.3
Ho	1.00	4.95	1.45	0.23	5.33	6	1.0	2.6	1.0	1.60	1.58
Er	2.3	10.2	2.9	0.5	11.5	4	2.0	4.4	1.4	3.77	4.02
Tm	0.33	1.44	0.44	0.06	1.47	1	1.0	2.1	1.0	0.43	0.44
Yb	1.4	6.6	2.0	0.3	6.8	5	1.8	3.4	1.4	2.32	2.72
Lu	0.24	0.97	0.31	0.04	0.88	0.7	1.0	1.2	1.0	0.32	0.36

注: \* 为世界钙质碳酸岩平均值<sup>[23]</sup>, 英碱正长岩据参考文献<sup>[18-19]</sup>, 其余为本文数据, 空格为未报道。

富 CaO, MnO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 大致相当。

### 3.2 稀土元素

矿区碳酸岩稀土元素含量变化范围较宽 (表 1),  $\sum REE$  为  $335.09 \times 10^{-6} \sim 1415.84 \times 10^{-6}$ , 平均  $843.89 \times 10^{-6}$ ; LREE 为  $330.26 \times 10^{-6} \sim 1385.44 \times 10^{-6}$ , 平均  $799.49 \times 10^{-6}$ ; HREE 为  $4.83 \times 10^{-6} \sim 85.88 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 在 8.60~68.39, Sm/Nd 值为 0.13~0.30。REE 配分模式为 LREE 富集型, 与英碱正长岩配分模式相似 (图 2), 其 (La/Yb)<sub>n</sub> 为 12.12~115.55, 有弱的 Eu 负异常 ( $\delta Eu$  为 0.82~1.00, ML-Y6 为 1.03), Ce 有弱的正异常 ( $\delta Ce$  为 1.16~1.49, ML-Y6 为 3.21)。矿区碳酸岩的  $\sum REE$  和 LREE 低于共生的英碱正长岩 ( $\sum REE$  为  $735.6 \times 10^{-6} \sim 2970.9 \times 10^{-6}$ , 平均  $1371 \times 10^{-6}$ ), 也低于世界钙质碳酸岩平均值 ( $\sum REE$  为  $3732.70 \times 10^{-6}$ )。ML-Y6 可能是蚀变导致与其他样品配分差异较大, 但总体趋势一致。

### 3.3 微量元素

矿区碳酸岩中 Th ( $0.4 \times 10^{-6} \sim 5.1 \times 10^{-6}$ ) 和 Hf ( $0.05 \times 10^{-6} \sim 2.26 \times 10^{-6}$ ) 含量变化较大, 其他微量元素含量相对稳定 (表 1), Zr/Hf 和 La/Nb 比值较高 (平均值分别为 3.528 和 593.58), Rb/Sr, Sm/Nd 比值较低 (分别为 0.0016~0.0102 和 0.13~0.30)。与世界方解石碳酸岩平均值相比, 其 Nb、Ta、Th 和 Zr 含量较低。从微量元素蛛网图 (图 3) 可以看出, 本区碳酸岩

相对富集 LILE (大离子亲石元素) Sr、Ba、LREE, 亏损 HFSE (高场强元素) Nb、Ta、Ti、Zr、P 及放射性元素 Th。另外, 本区碳酸岩强烈亏损大离子亲石元素 K, 轻微亏损 Rb, 不同于原生碳酸岩的富碱 (K, Na) 特征<sup>[26]</sup>, 可能是木洛碳酸岩岩浆在上侵过程中与围岩发生碱交代导致 K 的亏损, 而 Rb 的亏损是碳酸岩浆分异演化序列晚期阶段出现稀土、重晶石和萤石的成矿作用过程与同时 Rb 富集作用导致<sup>[1]</sup>。

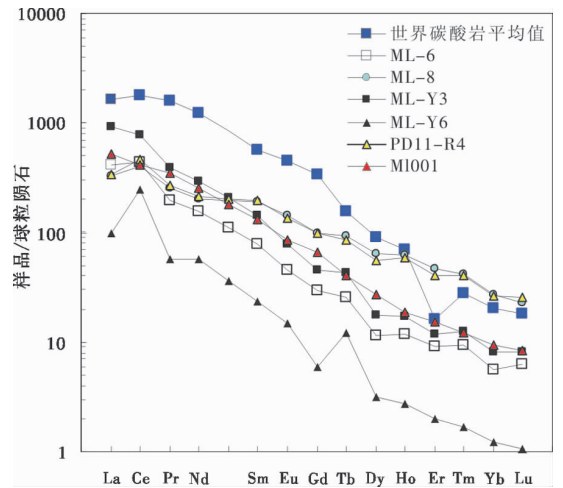


图 2 碳酸岩及英碱正长岩稀土元素配分 (球粒陨石标准化数据据参考文献[26], M1001 据参考文献[18])  
Fig.2 Chondrite-normalized REE distribution patterns for carbonatite and nordmarkite (chondrite-normalized data from reference [26], the data of M1001 from reference [18])

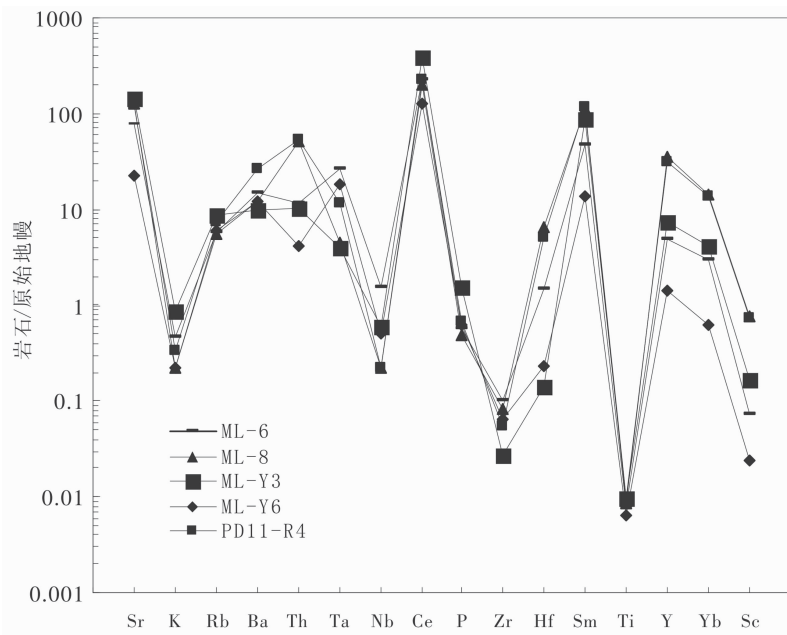


图 3 碳酸岩微量元素原始地幔蛛网图<sup>[27]</sup>  
Fig.3 Primitive mantle-normalized trace element spidergram for carbonatite<sup>[27]</sup>

## 4 讨论与结论

### 4.1 源区特征

木洛矿区碳酸岩中方解石的 C、O、H 稳定同位素值 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  和  $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$  分别为  $-6.6\text{‰}$ ~ $-6.8\text{‰}$ 、 $8.4\text{‰}$ ~ $9.1\text{‰}$  和  $-70\text{‰}$ ~ $-82\text{‰}$ ) 清楚表明<sup>[7]</sup>, 碳酸岩岩浆来自地幔。碳酸岩富集 Ba、Sr、LREE 等大离子亲石元素, 高 Zr/Hf 和 La/Nb 值, 低 Sm/Nd 和 Rb/Sr 值, 暗示岩石来自于俯冲进入地幔的地壳物质与地幔混合作用形成的富集地幔 EMI, 但详细的地幔源区讨论还需要同位素证据的支持。碳酸岩中高场强元素 Nb、Ta、Ti、Zr、P 亏损 (表 1), 可能与伴随扬子板块俯冲地壳下插温度升高和脱水变质, 形成富水条件下的部分熔融, 富含于锆石、磷灰石、金红石等难熔 (溶) 副矿物中的 HFSE 更多地留在源区的残余固相而未能更多地进入碳酸岩岩浆有关。图 3 中碳酸岩和英碱正长岩不相容元素 “TNT” (Ta-Nb-Ti) 负异常, 也证明碳酸岩形成于俯冲环境<sup>[29]</sup>。另外, 矿区内与碳酸岩共生的英碱正长岩在构造环境判别图解中落在同碰撞与造山晚期花岗岩区域<sup>[19]</sup>, 表明碳酸岩-碱性岩岩浆的形成与碰撞有关。主量元素 ( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ ) 和 REE 含量变化较大 (表 1), 表明原始岩浆在上升过程中受到地壳物质混染, 这得到碱交代作用导致的碳酸岩  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量降低现象的支持。可以初步认为, 木洛矿区碳酸岩来源于俯冲进入地幔的地壳物质与地幔混合作用形成的富集地幔 EMI, 但是在上升过程中受到地壳物质混染。

### 4.2 构造背景

攀西地区的地震层析成像揭示该区下地壳底部-上地幔顶部存在源于幔源物质侵入的附加层 (透镜体), 其速度值为  $7.1\sim 7.5\text{ km/s}$ , 厚度约  $20\text{ km}$ <sup>[30]</sup>, 并被认为是峨眉山地幔柱导致的地幔侵入物质 (遗存物)。喜马拉雅期印度-欧亚板块俯冲过程中, 扬子地块呈楔形体插入龙门山地壳之中, 造成其上的岩片和中下部地壳同向前陆方向分别逆冲和俯冲。在深部, 受挤压的中下部地壳及上地幔顶部向前陆深处发生俯冲, 并使莫霍面发生错断, 地幔物质沿深大断裂上涌。随着深部过程的进行, 上涌地幔引起中下部地壳局部熔融, 后随熔融深度延入地幔深处, 导致幔源碱性岩浆作用, 产生的碳酸岩-碱性岩熔浆体沿先存断裂等构造薄弱部位可迅速上升至地表形成

碳酸岩-碱性杂岩。以上深部过程与骆耀南等<sup>[31]</sup>提出的龙门山-锦屏山陆内造山带喜马拉雅期的“上冲下楔”模式相一致, 即俯冲诱发地幔上涌且导致峨眉山地幔柱地幔遗存物 (异常透镜体) 再次复活。碳酸岩主要产于地幔柱派生的大陆裂谷环境, 与碱性岩共生<sup>[7]</sup>; 也可以产于碰撞造山过程中派生的引张大陆岩石圈断裂带, 例如巴基斯坦的 Loe Shilman<sup>[32]</sup>, 但巴基斯坦的 Loe Shilman 碳酸岩不与碱性杂岩共生。笔者认为木洛碳酸岩产于喜马拉雅期印度-欧亚板块碰撞造山派生的局部拉张环境, 且与碱性岩共生, 主要受以下几个因素影响: (1) 该区峨眉山地幔柱的地幔遗存物对后期碳酸岩-碱性岩岩浆产生影响; (2) 该区存在区域性岩石圈深大断裂——安宁河断裂和雅砻江断裂, 具备局部岩石圈拉张环境<sup>[33]</sup>; (3) 所以碳酸岩-碱性杂岩的母岩浆是多源的——峨眉山地幔柱地幔遗存物、喜马拉雅俯冲地壳, 既继承了地幔柱的特征, 又具有后期俯冲造山运动的新特征, 以上结论得到牦牛坪碳酸岩-碱性杂岩体研究的支持<sup>[14, 15]</sup>。

### 4.3 成因

关于碳酸岩的成因很难用单一的机制解释<sup>[34]</sup>, 基于野外地质、地球化学和岩石学研究, Wyllie<sup>[35]</sup>总结了 3 种假说: (1) 原生的、非常富碱的碳酸岩浆, 直接来自碳酸盐交代地幔所产生的、分离的原生碳酸岩和硅酸盐岩岩浆; (2) 富  $\text{CO}_2$  的碱性硅酸盐岩浆液态不混溶产物; (3) 碳酸盐碱性拉斑玄武质母岩浆在低温、低压条件下的结晶分异作用产生的残留岩浆。稀土配分模式和高场强元素 Nb、Ta 比值可以用来探讨岩浆成因<sup>[36, 37]</sup>。木洛碳酸岩与英碱正长岩空间上密切共生, 两者的稀土配分型式相似 (图 2), Nb/Ta 比值比较接近 (平均分别 0.99 和 0.88), 表明二者来源于共同的母岩浆。邓晋福等<sup>[38]</sup>指出, 正长岩类岩浆是在加厚陆壳底部形成的, 依斜长石的多少仅有弱的 Eu 负异常。木洛碳酸岩与英碱正长岩均表现出弱的 Eu 负异常, 那么该碳酸岩-英碱正长岩熔浆必定是在后期造山运动陆壳加厚条件下, 而不是峨眉山地幔柱活动期岩石圈伸展减薄条件下产生。需要注意的是, 该区碳酸岩 Ba、LREE 含量低于英碱正长岩 (表 1), 与牦牛坪碳酸岩截然不同 (牦牛坪碳酸岩被认为是富  $\text{CO}_2$  的碱性硅酸盐岩浆液态不混溶产物<sup>[15]</sup>)。笔者认为木洛碳酸岩最初经历了与牦牛坪碳酸岩相同形成过程——峨眉山地幔柱晚期地幔遗存

物(透镜体)→板块俯冲脱水诱发的地幔软流圈(包括地幔柱遗存物)低程度部分熔融形成碳酸岩-碱性正长岩混合熔浆→上升减压过程碳酸岩-碱性正长岩混合熔浆发生液态不混溶,但是木洛碳酸岩熔浆在上侵地壳过程中受到地壳物质混染(或者说受到的混染比牦牛坪大得多),发生了第三个过程——低温低压条件岩浆期后再平衡,最终形成分离的碳酸岩和碱性正长岩,并导致该区碳酸岩 Ba、LREE 较低,理由如下:(1)木洛矿区断裂系统更加复杂,且断裂规模小于牦牛坪,仅允许小规模碳酸岩岩体侵入;(2)木洛矿区碳酸岩岩体规模小,所以熔浆上升速度较慢,与围岩接触时间长、接触面积大,受到混染程度也更大;(3)木洛矿区碳酸岩附近霓长岩化、钠铁闪石化更加明显,碱交代作用更加强烈,导致碳酸岩中 Na、K 含量远远低于牦牛坪矿区,也说明木洛矿区碳酸岩受到的地壳混染远大于牦牛坪。

基于以上证据,推断木洛碳酸岩来源于俯冲进入地幔的地壳物质与地幔混合作用形成的富集地幔 EMI,是在峨眉山地幔柱地幔遗存物基础上经喜马拉雅造山运动再次活化的产物,但碳酸岩熔浆在上升过程中受到地壳物质混染发生岩浆再平衡而表现出特殊而复杂的地球化学特征。碳酸岩-碱性岩熔浆带来了该区稀土矿床的成矿物质,并最终在构造薄弱位置富集成矿。

**致谢:**沈苏研究员、张仕鲁高级工程师、刘飞燕工程师参加了项目的部分野外工作,审稿人和编辑提供宝贵的修改意见,在此表示感谢。

## 参考文献(references):

- [1] Le Bas. Carbonatite magmas [J]. Mineralogical Magazine, 1981, 44: 133-140.
- [2] Dawson J B. Sodium carbonatite lavas from Oldoinyo Lengai, Tanganyika [J]. Nature, 1962, 195(4846):1075-1076.
- [3] Wyllie P J, Baker M B, White B S. Experimental boundaries for the origin and evolution of carbonatites [J]. Lithos, 1990, 26:3-19.
- [4] Dobson D P, Jones A P. In-situ measurement of viscosity and density of carbonate melts at high pressure [J]. Earth Planet Sci Lett., 1996, 143: 207-215.
- [5] Triman A H, Schedl A. Properties of carbonatite magma and processes in carbonatite magma chambers [J]. Journal of Petrology, 1983, 91:437-447.
- [6] Bell K. Carbonatites—into the twenty-first century [J]. Journal of petrology, 1989, 39:1839-1845.
- [7] 杨学明, 杨小勇, 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):457-464.
- Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Le Bas. Geological and geochemical characteristics of carbonatites and their implication for tectonic settings [J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13 (5):457-464(in Chinese with English abstract).
- [8] 秦朝建, 裘愉卓. 岩浆(型)碳酸岩研究进展 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(4):500-507.
- Qin Chaojian, Qiu Yuzhuo. Recent progress in carbonatite research [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16 (4):500-507 (in Chinese with English abstract).
- [9] Willams J A, Samson I M, Olivo G R. The genesis of hydrothermal fluorite-REE deposits in the Gallinas Mountains, New Mexico [J]. Economic Geology, 2000, 95:327-342.
- [10] Smith M P, Henderson P, Campbell L. S. Fractionation of the REE during hydrothermal processes: constraints from the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, Inner Mongolia, China [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(18):3141-3160.
- [11] 范宏瑞, 谢奕汉, 王凯怡, 等. 碳酸岩流体及其稀土成矿作用 [J]. 地学前缘, 2001, 8(4):289-295.
- Fan Hongrui, Xie Yihan, Wang Kaiyi, et al. Carbonatitic fluids and REE mineralization [J]. Earth Sciences Frontier, 2001, 8 (4):289-295(in Chinese with English abstract).
- [12] 周家云, 沈冰, 朱志敏, 等. 四川冕宁木洛稀土矿床地质特征 [J]. 稀有金属, 2006, 30(4):494-499.
- Zhou Jiayun, Shen Bing, Zhu Zhimin, et al. Geological features of Muluo REE deposit in Mianning, Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30 (4):494-499 (in Chinese with English abstract).
- [13] Niu Hecai, Shan Qiang, Chen Xiaoming, et al. Relationship between light rare earth deposits and mantle processes in Panxi rift, China [J]. Science in China(Series D), 2003, 46(z1):41-49.
- [14] 王登红, 杨建民, 闫升好, 等. 四川牦牛坪碳酸岩的同位素地球化学及其成矿动力学 [J]. 成都理工大学学报, 2002, 29(5):539-544.
- Wang Denghong, Yang Jianmin, Yan Shenghao, et al. Dynamics of the REE mineralization in Maoniuping area, Sichuan Province: isotopic geochemistry of carbonatites [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002, 29(5):539-544(in Chinese with English abstract).
- [15] 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 四川牦牛坪稀土矿床碳酸岩地球化学 [J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(8):635-646.
- Xu Cheng, Huang Zhilong, Liu Congqiang, et al. Geochemistry of carbonatites in Maoniuping REE deposit, Sichuan province, China [J]. Science in China (Series D), 2002, 32(8):635-646(in Chinese).
- [16] 谢玉玲, 尹淑萍, 徐九华, 等. 冕宁-德昌稀土成矿带碳酸岩流体研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1):66-74.
- Xie Yuling, Yin Shuping, Xu Jiuhua, et al. A study on the fluids in carbonatite of the Mianning-Dechang REE metallogenic belt [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24 (6): 647-655(in Chinese with English abstract).

- [17] 田世洪, 张桂兰, 侯增谦, 等. 四川冕宁木落寨稀土矿床稳定同位素研究及其意义[J]. 矿床地质, 2005, 24 (6):647-655.  
Tian Shihong, Zhang Guilun, Hou Zengqian, et al. Stable isotope data from Muluozhai REE deposit in Mianning County, Sichuan Province, and their geological implications [J]. Mineral Deposits, 2005, 24 (6): 647-655(in Chinese with English abstract).
- [18] 田世洪, 袁忠信, 张桂兰, 等. 四川木落寨稀土矿床与成矿有关的花岗岩问题及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(2):110-118.  
Tian Shihong, Yuan Zhongxin, Zhang Guilun, et al. Discussion on ore-forming related granite in the Muluozhai REE deposit, Sichuan Province and their significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25(2):110-118(in Chinese with English abstract).
- [19] 周家云, 郑荣才, 沈冰, 等. 四川冕宁木洛稀土矿床含矿岩体地球化学特征及其构造意义[J]. 矿物岩石, 2007, 27(1):83-89.  
Zhou Jiayun, Zheng Rongcai, Shen Bing, et al. Geochemical characteristics of the host intrusion of Muluo REE deposit in Mianning, Sichuan Province, and their tectonic significance [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2007, 27 (1):83-89 (in Chinese with English abstract).
- [20] Xu Y G, He B, Chung S L, et al. The geologic, geochemical and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood basalt province[J]. Geology, 2004, 30(10):917-920.
- [21] 钟宏, 朱维光, 漆亮, 等. 攀西地区峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征[J]. 科学通报, 2006, 51(11):1297-1304.  
Zhong Hong, Zhu Weiguang, Qi Liang, et al. Platinum-group element (PGE) geochemistry of the Emeishan basalts in the Pan-Xi area, SW China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(11):1297-1304(in Chinese).
- [22] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Talanta, 2000, 51:507-513.
- [23] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5):459-464.  
Lu Yuanfa. Geokit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. Geochimica, 2004, 33 (5):459-464 (in Chinese with English abstract).
- [24] Samoilov V S. The main geochemical features of carbonatites [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1991, 40:251-262.
- [25] Woolley A R, Kempe D R C. Carbonatite: nomenclature, average chemical compositions, and element distribution [C]//Bell K (ed.). Carbonatites -Genesis and Evolution. London:Unwin Hyman, 1989:1-14.
- [26] Boynton W V, Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[J]. Dev Geochem, 1984, 2:63-114.
- [27] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes [C]//Saunders A D (ed.). Magmatism in the Oceanic Basins. Geological Society, London:Special Publication, 1989:313-345.
- [28] Dawson J B, Pinkerton H. June 1993 eruption of Oldoinyo Lengai, Tanzania: exceptionally viscous and large carbonatite lava flows and evidence for coexisting silicate and carbonatite magmas[J]. Geology, 1994, 22:709-802.
- [29] 裴先治, 李佐臣, 丁仁平, 等. 西秦岭天水地区岛弧型基性岩杂岩的地球化学特征及形成时代 [J]. 中国地质, 2005, 32(4):529-540.  
Pei Xianzhi, Li Zuochen, Ding Saping, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb ages of island-arc basic igneous complexes in the Tianshui area, West Qinling [J]. Geology in China, 2005, 32(4):529-540(in Chinese with English abstract).
- [30] Liu Jianhua, Liu Futian, He Jiankun, et al. Study of seismic tomography in Panxi paleorift area of southwestern China - Structural features of crust and mantle and their evolution [J]. Science in China (Series D), 2001, 44(3):277-288.
- [31] 骆耀南, 俞如龙. 龙门山-锦屏山陆内造山带喜马拉雅期构造-岩浆作用主要特征及其动力学模式 [C]//见陈毓川, 王登红. 喜马拉雅期内生矿作用研究. 北京:地质出版社, 2001:88-96.  
Luo Yaonan, Yu Rulong. Major features and dynamic model of the Himalayan tectonic-magmatism in the intracontinental orogenic belt in Longmenshan-Jinpingshan, Sichuan Province[C]// (Chen Y C, Wang D H) (eds.). Study on Himalayan Endogenic Mineralization. Beijing: Geological Publishing House, 2001, 88-96 (in Chinese)
- [32] Mian I, Le Bas M J. Sodic amphiboles in fenites from the Loe Shilman carbonatite complex, NW Pakistan [J]. Mineral Magazine, 1986, 50:187-197.
- [33] 张岳桥, 杨农, 孟晖, 等. 四川攀西地区晚新生代构造变形历史与隆升过程初步研究[J]. 中国地质, 2004, 31(1):23-33.  
Zhang Yueqiao, Yang Nong, Meng Hui, et al. Late Cenozoic tectonic deformation history and uplift process of the Panxi region, western Sichuan [J]. Geology in China, 2004, 31 (1):23-33 (in Chinese with English abstract).
- [34] Lee W J, Wyllie P J. Petrogenesis of carbonatite magmas from mantle to crust, constrained by the system  $\text{CaO}-(\text{MgO}+\text{FeO})-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)-\text{CO}_2$  [J]. Journal of Petrology, 1998, 39: 495-517.
- [35] Wyllie P J. Discussion of recent papers on carbonated peridotite, bearing on mantle metasomatism and magmatism [J]. Earth Planet Sci Lett, 1987, 82:91-397.
- [36] 邵济安, 张永北, 张履桥, 等. 大同地区早中生代煌斑岩-碳酸岩岩墙群[J]. 岩石学报, 2003, 19(1):93-104.  
Shao Ji'an, Zhang Yongbei, Zhang Lvqiao, et al. Early Mesozoic dike swarms of carbonatites and lamprophyres in Datong area [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19 (1):93-104 (in Chinese with English abstract).
- [37] 喻学惠, 赵志丹, 莫宣学. 甘肃西秦岭新生代钾霞黄长岩和碳酸岩的微量、稀土和 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学: 地幔柱-岩石圈交换的证据[J]. 岩石学报, 2004, 20 (3):483-494.  
Yu Xueyu, Zhao Zhidan, Mo Xuanxue. Cenozoic kamafugite volcanism and tectonic meaning in west Qinling area, Gansu province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20 (3):483-494(in

Chinese with English abstract).

[38] 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等. 岩石成因、构造环境与成矿作用 [M]. 北京:地质出版社, 2004:1-381.

Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, et al. Petrogenesis, Tectonic Settings and Mineralization [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2004:1-381(in Chinese).

## Geochemistry of carbonatite in the Muluo REE deposit, Sichuan

ZHU Zhi-min<sup>1,2</sup>, ZHENG Rong-cai<sup>1</sup>, ZHOU Jia-yun<sup>2</sup>, CHEN Jia-biao<sup>2</sup>, SHEN Bing<sup>2</sup>

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

**Abstract:** The Muluo REE deposits is genetically closely related to carbonatite-alkaline complexes. Carbonatite is mainly composed of calcite (>90%) with a CaO/(CaO+MgO+FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MnO) ratio of 95.7-99.6%, so it is calcite carbonatite. The carbonatite is characterized by relative enrichment in the LILE Ba, Sr and LREE, relative depletion in the HFSE Nb, Ta, Ti, Zr and P, higher ratios of Zr/Hf and La/Nb and lower ratios of Sm/Nd and Rb/Sr, implying that the rock was derived from the enriched mantle (EMI). Geochemical study shows that the Muluo carbonatite is the product of reactivation of the mantle remnants of the Emeishan mantle plume caused by the Himalayan orogenic movement; however, the carbonatitic molten magma was contaminated with crustal material during its ascent. The molten magma of carbonatite-alkaline rocks brought substantial REE to extensional sites resulting from orogeny in the Himalayan orogenic phase and formed REE deposits.

**Key words:** carbonatite; geochemistry; Muluo, REE deposit

---

**About the first author:** ZHU Zhi-min, male, born in 1978, engineer and Ph.D candidate, engages in the study of mineralogy, petrology and mineral deposit geology; E-mail: weah0500@163.com.