

文章编号: 0258-7106 (2005) 06-0647-09

四川冕宁木落寨稀土矿床稳定同位素研究及其意义^{*}田世洪^{1,2}, 张桂兰³, 侯增谦^{1,2}, 丁悌平^{1,2}, 谢玉玲⁴, 袁忠信¹, 白 鸽¹, 邹天人¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 国土资源部同位素地质重点实验室, 北京 100037;

3 内蒙古自治区国土资源信息院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 4 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要 木落寨稀土矿床在构造上位于西南新生代陆内造山带的锦屏山北缘。文章通过对木落寨 2 个坑道的矿石样品的 C、H、O、S 同位素组成的系统研究, 探讨了木落寨稀土矿床成矿流体的来源及其与深部过程的关系。研究表明, 石英和萤石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-2.5\% \sim -9.0\%$, 方解石、石英、萤石和氟碳铈矿的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-63\% \sim -87\%$, 萤石和石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为 $10.0\% \sim 15.5\%$, 重晶石和方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值分别为 $0.1\% \sim 2.2\%$ 和 $-8.6\% \sim -9.3\%$, 方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 分别为 $-6.6\% \sim -6.8\%$ 和 $8.4\% \sim 9.1\%$ 。所有这些数据均显示木落寨稀土矿床在成矿过程中有大量地幔流体的参与, 表明其成矿作用与深部过程有关。

关键词 地球化学; 稀土矿床; 稳定同位素; 幔源; 木落寨; 四川冕宁

中图分类号: P618.7; P597+.2

文献标识码: A

攀枝花—西昌地区是著名的攀西裂谷所在地, 是中国重要的稀土成矿区之一, 被称为“攀西稀土成矿带”。它北起冕宁牦牛坪以北, 向南经里庄直至大陆乡以南, 呈 NNE 向展布, 纵贯冕宁、西昌、德昌 3 县市, 长 150 km 以上, 宽约 10 km (施泽民等, 1996), 东、西分别以甘落—小江断裂带和箐河—程海断裂带为界 (图 1)。前人在矿床地质、矿物学、地球化学和成矿作用等方面对牦牛坪和大陆槽等稀土矿床做了大量的研究工作 (阳正熙等, 2000; 2001; 蒲广平, 1988; 1993; 1995; 2001; 牛贺才等, 1994; 1995a; 1995b; 1996a; 1996b; 1997; 2002; 许成等, 2001; 2002a; 2002b; 2003; 2004; 王登红等, 2002a; 2002b; 袁忠信等, 1993; 1995; 2001; 叶幼兰, 1992; 蒋明全, 1992; 李小渝, 2005; Wang et al., 2001; Yuan et al., 2000; 田世洪等, 2003; 万德芳等, 2004), 取得了丰硕的研究成果。一些研究者 (蒲广平, 2001; 牛贺才等, 1995a; 1995b; 1997; 2002; 许成等, 2001; 2002a; 2002b; 2003; 2004; 王登红等, 2002a; 2002b; 田世洪等, 2003) 认为牦牛坪和大陆槽等稀土矿床的形成与深部流体有关。由于木落寨稀土矿床位于海

拔 4 000 m 左右的山中, 山脉走向近于 NS 向, 山高谷深, 沟谷切割强烈, 形成陡坡绝崖, 坡度在 40° 以上, 未通公路, 当地居民和矿山工作人员均以骑马为工具, 因此自 1961 年四川省地质局西昌地质队发现该稀土矿床以来, 还没有人对它进行过研究。木落寨稀土矿床作为攀西稀土成矿带的重要组成部分, 对它进行研究对于认识整个攀西稀土成矿带的成矿规律有帮助, 对于寻找类似的稀土矿床也具有重要意义。此外, 该稀土矿床位于青藏高原的东部, 研究它对研究印度-亚洲大陆碰撞也具有一定的辅助作用。本文从稳定同位素组成的角度来探讨木落寨稀土矿床成矿流体的来源及其与深部过程的关系。

1 地质背景

四川冕宁木落寨稀土矿床 (东经 $101^\circ 50'$, 北纬 $28^\circ 22'$) 位于攀西裂谷中段, 距冕宁县西南约 60 km (图 1)。本区出露的地层仅有晚古生代二叠纪地层, 包括峨眉山组 and 阳新组。因受区域动力变质的影响, 晚二叠世峨眉山玄武岩已变成绿片岩, 晚二叠世

^{*} 本文得到国家重点基础研究发展规划项目 (编号: 2002CG412610 和 G1999043211)、国家杰出青年基金 (编号: 40425014) 和中国地质科学院重点开放实验室专项资金 (编号: KL05-9) 联合资助

第一作者简介 田世洪, 男, 1973 年生, 助理研究员, 主要从事矿床学和同位素地球化学研究工作。E-mail: gyl821207@sohu.com。

收稿日期 2005-03-11; 改回日期 2005-06-27。张绮玲编辑。

① 杨光明, 常 诚, 左大华, 等. 1998. 四川省德昌县 DL 稀土矿床成矿条件研究. 1~89.

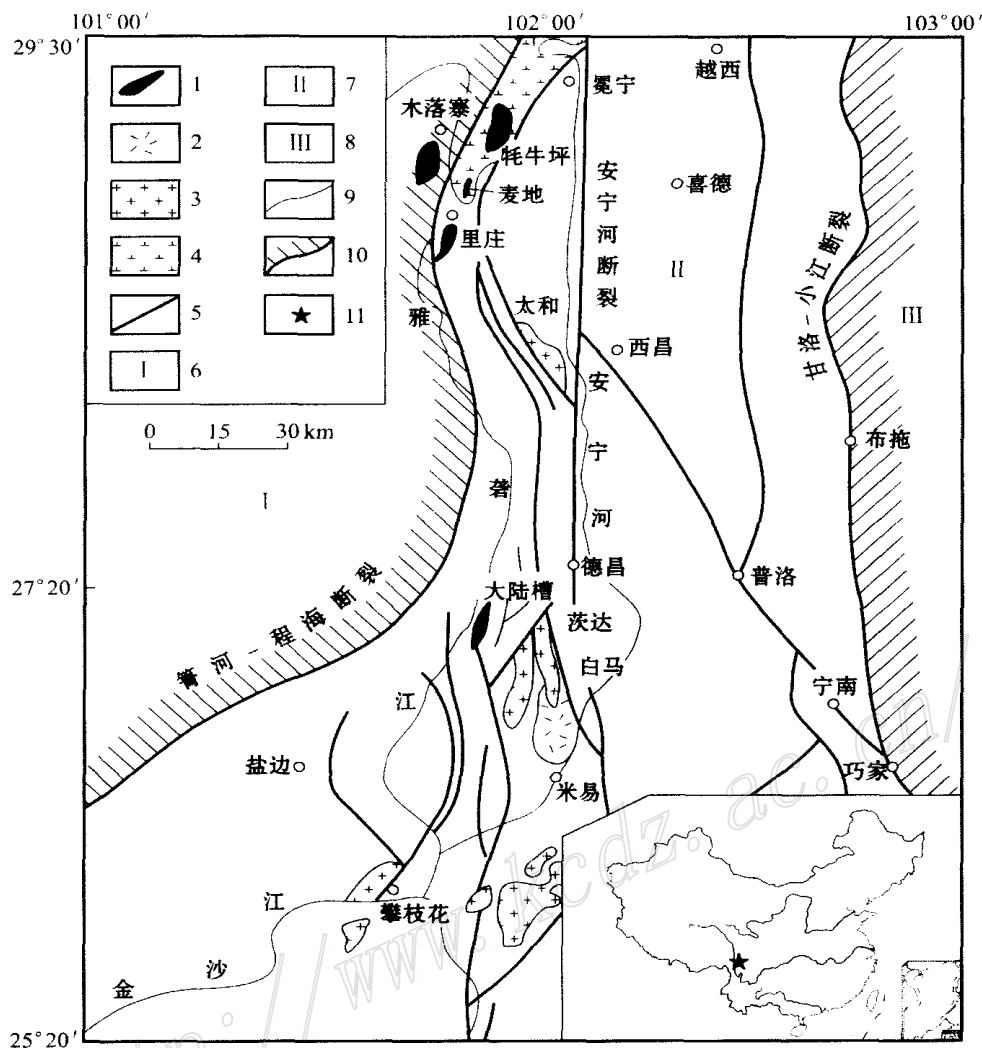


图 1 攀西裂谷稀土矿带地质构造位置略图(据 Wang et al., 2001 修改)

1—喜马拉雅期富稀土碱性杂岩;2—印支期正长岩;3—印支期碱性花岗岩;4—燕山期碱性花岗岩;5—基底断裂;6—陆缘海相中生界分布区;7—前震旦系古陆分布区;8—古生界及陆相中生界分布区;9—河流;10—构造单元分界线;11—研究区

Fig. 1 Geological and structural sketch map of the REE ore belt in Panxi rift (modified after Wang et al., 2001)

1—Himalayan REE-rich alkaline complex; 2—Indosinian syenite; 3—Indosinian alkaline granite; 4—Yanshanian alkaline granite; 5—Base ment fracture; 6—Area of Mesozoic pericontinental marine facies; 7—Area of Presinian old land; 8—Area of Palaeozoic strata and Mesozoic continental strata; 9—River; 10—Boundary of tectonic units; 11—Working area

阳新组灰岩多变质成大理岩。本区主要构造方向与大地构造方向一致,近于 NS 向,位于锦屏山前缘基底隆起带东翼。由于受雅砻江深断裂的应力影响,在其上盘形成了很多次一级的同向排列的正断层,以 NNE-SSW 走向的正断层为主,倾角 $60 \sim 70^\circ$ 左右,为成矿的主要构造。本区出露的火成岩有 2 种:一为燕山期花岗岩,二为海西期辉绿岩。四川省地

质局西昌地质队提交的普查报告认为,木落寨稀土矿床的形成与燕山期黑云母花岗岩有密切关系^①。另据四川省地质局 1:20 万金矿幅区域地质调查报告,木落寨萤石稀土矿床在成因上与木落寨黑云母花岗岩有关^②。笔者研究认为,与木落寨稀土矿床有关的岩石是英碱正长岩,而不是前人认为的黑云母花岗岩(田世洪等,2005)。矿体产于英碱正长岩与

① 四川省地质局西昌地质队. 1961. 冕宁木落寨稀土矿区地质普查报告. 1~81.

② 四川省地质局. 1974. 1:20 万金矿幅区域地质调查报告. 90~105.

变质辉绿岩的接触带中或英碱正长岩边缘的构造裂隙中。矿石矿物主要为氟碳铈矿,脉石矿物以萤石、重晶石、方解石、长石、石英、云母和霓辉石为主。根据野外产状和矿石的结构构造,矿床的矿石类型主要分为3种:①致密块状萤石-氟碳铈矿型,主要由萤石和氟碳铈矿组成,萤石品位在75%以上,氟碳铈矿呈板状或细脉状与方解石穿插于萤石的解理中,此种类型大多产于英碱正长岩与变质辉绿岩的接触破碎带中;②浸染状,主要产于变质辉绿岩内破碎带的矿脉中,其次产于大理岩与变质岩的接触带中,主要为氟碳铈矿,萤石少许;③条带状,主要产于大理岩内断裂带的矿脉中,主要矿物为氟碳铈矿、萤石、方解石和斜长石,它们定向排列组成条带状。矿脉结构以他形不等粒状、板柱状镶嵌结构为主,少部分为半自形粒状。矿脉构造以致密块状、条带状等构造为主。围岩蚀变主要为接触蚀变和热液蚀变,后者主要有绢云母化、黄铁矿化、重晶石化、碳酸盐化等。

2 样品分析方法

本次工作分析了木落寨矿区矿6和矿9两坑道中代表性样品的C、H、O和S同位素组成,矿石类型为致密块状萤石-氟碳铈矿型。所有同位素分析均在国土资源部同位素地质重点实验室MAT-251EM型质谱计上完成。硫酸盐矿物先经艾氏卡试剂熔样提纯为纯净的BaSO₄,再用V₂O₅氧化剂制备SO₂,而硫化物样品直接以Cu₂O作氧化剂制备SO₂,分析精度均为±0.2‰,相对标准为V-CDT。碳酸盐样品采用McCrea(1950)描述过的正磷酸方法,将不同的碳酸盐矿物与100%的H₃PO₄在不同的温度下反应产生H₂O和CO₂气体,并通过恒温震荡使之达到氧同位素平衡,收集CO₂气体,分析精度均为±0.2‰,C和O相对标准分别为V-PDB和V-SMOW。选取40~60目的纯净石英、方解石、萤石和氟碳铈矿样品,在150℃温度下真空去气4h以上,以彻底除去表面吸附水和次生包裹体水,然后在400℃高温下爆裂提取水,并与金属锌反应生成H₂,分析精度为±2‰,相对标准为V-SMOW。对硅酸盐样品的氧同位素分析则采用传统的BrF₅分析方法(Clayton et al., 1963),用BrF₅与含氧矿物在真空和500℃高温条件下反应提取矿物氧,并与灼热电阻——石墨棒燃烧转化成CO₂气体,分析精度为±

0.2‰,相对标准为V-SMOW。而对于萤石流体包裹体中的H₂O,首先需要爆裂提取水,同H同位素取水方法一样,然后采用常规的BrF₅分析方法(Clayton et al., 1963),用BrF₅与H₂O在真空和300℃高温条件下反应提取氧,并与灼热石墨棒反应转化成CO₂气体,分析精度为±0.2‰,相对标准为V-SMOW。对于石英、萤石流体包裹体中的CO₂,是在热爆法取水分析H同位素的同时分离、提取的,分析精度为±0.2‰,相对标准为V-PDB。

3 分析结果

3.1 碳、氢、氧同位素

木落寨稀土矿床矿石矿物和脉石矿物中的流体包裹体的碳和氢同位素测试结果列于表1中,其中包括7件碳同位素分析,17件氢同位素分析。2件石英的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为-2.5‰~-3.6‰,5件萤石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为-5.5‰~-9.0‰,平均为-7.1‰。5件方解石的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为-70‰~-82‰,平均为-76‰,2件石英的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为-69‰~-76‰,5件萤石的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为-73‰~-87‰,平均为-81‰,5件氟碳铈矿的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为-63‰~-

表1 四川木落寨稀土矿床矿石矿物和脉石矿物中的流体包裹体的碳和氢同位素组成

Table 1 Carbon and hydrogen isotope compositions of fluid inclusions in ore minerals and gangue minerals from the Muluozhai REE deposit, Sichuan Province

样号	矿物名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$
ML-002	氟碳铈矿		-86
ML-006	氟碳铈矿		-64
ML-008	氟碳铈矿		-63
ML-009	氟碳铈矿		-73
ML-010	氟碳铈矿		-71
ML-014	石英	-2.5	-69
MLZ-5	石英	-3.6	-76
ML-002	萤石	-7.8	-86
ML-003	萤石	-5.5	-76
ML-005	萤石	-5.9	-87
ML-006-1	萤石	-7.4	-84
ML-006-2	萤石	-9.0	-73
MLZ-6	方解石		-76
ML-005	方解石		-70
ML-008	方解石		-74
ML-009	方解石		-82
ML-010	方解石		-78

- 86 ‰,平均为 - 71 ‰。

氧同位素测试结果如表 2,3 件萤石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 11.1 ‰~15.5 ‰,平均为 13.4 ‰,2 件石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 10.8 ‰~11.0 ‰。以 $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (由课题组成员谢玉玲提供,未发表) 计算,石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 10.1 ‰~10.3 ‰。将 δD (表 1) 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (表 2) 的数据表示在图 2 中,可以看出成矿过程中有岩浆水的参与。

木落寨稀土矿床矿石中的方解石的碳、氧同位素组成分析见表 3。其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 - 6.6 ‰~ - 6.8 ‰,平均为 - 6.7 ‰,与 Faure(1986) 界定的地幔来源碳同位素值(- 7.0 ‰) 相当接近。而且其 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 8.4 ‰~9.1 ‰,平均为 8.7 ‰,落在“初始火成碳酸岩”的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ (6 ‰~10 ‰) (Keller et al., 1995) 范围内。

3.2 硫同位素

木落寨稀土矿床的硫同位素组成分析结果见表 4。从表 4 可以看出,重晶石的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 0.1 ‰~2.2 ‰,平均为 0.8 ‰, $\delta^{34}\text{S}$ 组成变化小,接近陨石 $\delta^{34}\text{S}$ 组成(约 0.5 ‰),反映出地幔硫同位素组成特点

表 2 四川木落寨稀土矿床石英和萤石的氧同位素组成
Table 2 Oxygen isotope compositions of quartz and fluorite from the Muluozhai REE deposit, Sichuan Province

样号	矿物名称	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$t/^{\circ}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-V-SMOW}}/\text{‰}$
ML-014	石英	10.8	700	10.1
MLZ-5	石英	11.0	700	10.3
ML-002	萤石			15.5*
ML-003	萤石			13.5*
ML-005	萤石			11.1*

* 为萤石中包裹体氧同位素组成;计算所采用的分馏方程为:
 $1000\ln\alpha_{\text{石英-水}} = 2.51 \times 10^6 T^{-2} - 1.95$ (Clayton et al., 1972)。

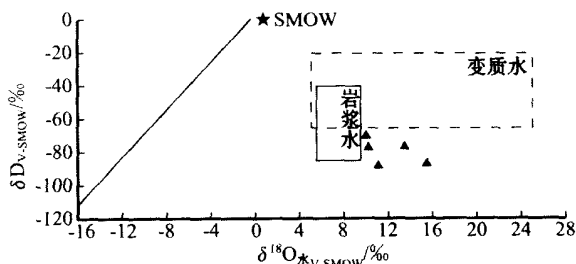


图 2 四川木落寨稀土矿床 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 图解
Fig. 2 δD versus $\delta^{18}\text{O}$ diagram of the Muluozhai REE deposit, Sichuan Province

表 3 四川木落寨稀土矿床方解石碳、氧同位素组成

Table 3 Carbon and oxygen isotope compositions of calcite from the Muluozhai REE deposit, Sichuan Province

样号	矿物名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}^*/\text{‰}$
ML-005	方解石	-6.6	-21.8	8.4
ML-008	方解石	-6.8	-21.4	8.8
ML-009	方解石	-6.8	-21.7	8.5
ML-010	方解石	-6.7	-21.5	8.7
MLZ-6	方解石	-6.7	-21.2	9.1

* $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 1.03086 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} + 30.86$ (Friedman et al., 1977)。

表 4 四川木落寨稀土矿床重晶石和方铅矿的硫同位素组成

Table 4 S isotope compositions of barite and galena from the Muluozhai REE deposit, Sichuan Province

样号	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
ML-006	重晶石	2.2
ML-008	重晶石	0.1
ML-010	重晶石	0.1
ML-015	方铅矿	-9.3
MLZ-10	方铅矿	-8.6

(卢长武,1986),这与该矿床中重晶石为早期形成的地质特征相吻合。而方铅矿在矿床中形成较晚,其 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 - 8.6 ‰~ - 9.3 ‰,说明矿石中的硫化物亏损 ^{34}S ,但 ^{34}S 组成相当稳定,硫化物中的 S 可能来源于地壳中 ^{32}S 的沉积物或大气降水下渗循环的地下热水。但由于本区矿石中的硫化物多呈浸染状和斑杂状交代早期的方解石和重晶石,因此矿石中重晶石风化过程中被淋滤的 ^{32}S 也可能是硫化物的重要来源之一,即该区矿化晚期含硫流体中的 S 也可能主要来源于地幔。

4 讨论和结论

根据前人的研究成果(蒲广平,2001),攀西裂谷是在早古生代地台基础上发展起来的陆内或陆缘裂谷,裂谷作用开始于早古生代末,发育于晚古生代—中生代,到新生代随着喜马拉雅造山运动的进行而封闭。牦牛坪稀土矿床位于攀西裂谷北缘哈哈断裂的中部,其成岩成矿的时代变化于距今 40.3~12.2 Ma,属于新生代成矿(袁忠信等,1995)。因此,牦牛坪稀土矿床的形成与攀西裂谷没有实质性的关系。木落寨矿床在成矿岩石组成、结构构造、矿体产状和组成及矿床地球化学特征等方面与牦牛坪稀土矿床

很相似,可以认为木落寨稀土矿床也属于新生代成矿(黑云母 Ar-Ar 法坪年龄为 35.5 Ma,另文发表)。因此,木落寨稀土矿床的形成也与攀西裂谷没有实质性的关系。

骆耀南等(1998)认为龙门山—锦屏山造山带呈南北向纵贯四川省中部,在构造上位于扬子地台西缘,在地理地貌上组成青藏高原的东部边界。它是由“陆块对接”机制所引起的,即自 66 Ma 以来,由于印度板块与亚洲板块边界发生局部碰撞和持续自南而北楔入,使碰撞边界以北的陆块发生破裂,并依次向东南方向挤出,其前缘受阻于扬子陆块,导致两陆块边缘部位相对挤压,成为应力集中带,从而引起强烈的新生代陆内造山作用。研究区位于攀西裂谷与龙门山—锦屏山造山带的转折部位,该陡倾带倾向 NWW,坡度达 6°左右,是显著的构造变异带。根据骆耀南等(2001)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,扬子地块呈楔形体插入龙门山地壳之中,造成其上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,产生正长岩碱性杂岩体。另据张云湘等(1988)研究发现,攀西地区地幔顶部遗存裂谷期“异常地幔”透镜体,指出“如遇到合适的板块活动条件,推测将会又一次出现构造岩浆活化”,而喜马拉雅期印度-欧亚板块碰撞缝合提供了这一契机,使之局部熔融,成为区内喜马拉雅期岩浆活动和稀土成矿的可能策源地。

本次研究显示,石英和萤石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值均与地幔来源碳同位素值(正常值为 $-2\text{‰} \sim -10\text{‰}$,集中分布在 -5‰ 附近;储雪蕾,1996;王先彬等,2000;张铭杰等,2000;Nadeau et al., 1990;Pineau et al., 1990)相当接近,甚至重合。方解石、石英、萤石和氟碳铈矿的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值均与金伯利岩中的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值($-60\text{‰} \sim -80\text{‰}$, Kuroda, 1975;池际尚,1988)相当。

成矿热液中的碳主要有 3 种可能来源(图 3):①地幔射气或岩浆来源。地幔射气和岩浆来源的碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围分别为 $-5\text{‰} \sim -2\text{‰}$ 和 $-9\text{‰} \sim -3\text{‰}$ (Taylor, 1986);②沉积岩中碳酸盐岩的脱气或含盐卤水与泥质岩相互作用。这种来源的

碳同位素组成具有重碳同位素特征,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围为 $-2\text{‰} \sim +3\text{‰}$,海相碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 大多稳定在 0‰ 左右 (Veizer et al., 1980);③各种岩石中的有机碳。有机碳一般富集 ^{12}C ,因而碳同位素组成很低,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围为 $-30\text{‰} \sim -15\text{‰}$,平均为 -22‰ (Ohmoto, 1972)。据 Ray 等(1999; 2000)的资料,全球原生碳酸岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值区域远大于以往所预计的,达到如图 3 中五边形所示的范围。如表 3 和图 3 所示,木落寨稀土矿床中方解石的碳、氧同位素组成较为稳定,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 分别为 $-6.6\text{‰} \sim -6.8\text{‰}$ 和 $8.4\text{‰} \sim 9.1\text{‰}$,与原生碳酸岩的碳、氧同位素组成相同。

成矿流体体系的总硫值($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$),可以通过矿石中的矿物共生组合比较法来判断。根据 Ohmoto (1972)的理论计算,在高氧逸度条件下,可能的矿物组合为重晶石+方解石,此时有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{重晶石}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$;在中等氧逸度条件下,当硫化物与硫酸盐共存时,有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{重晶石}} > \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$,而 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} < \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$;如果氧逸度再低些,硫酸盐不能存在,可能的矿物组合为黄铁矿+磁黄铁矿+方解石,并有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 。据此可判断本区矿床中的成矿流体的硫同位素组成应介于硫酸盐和硫化物之间。根据矿石中的硫酸盐矿物较硫化物多的特点,可判断成矿体系中的硫同位素组成, $2.2\text{‰} > \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} > 0$,可能与典型幔源硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值($0 \pm 3\text{‰}$)相近(卢长武,1986),总体上显示出成矿流体中硫可能来源于地幔。

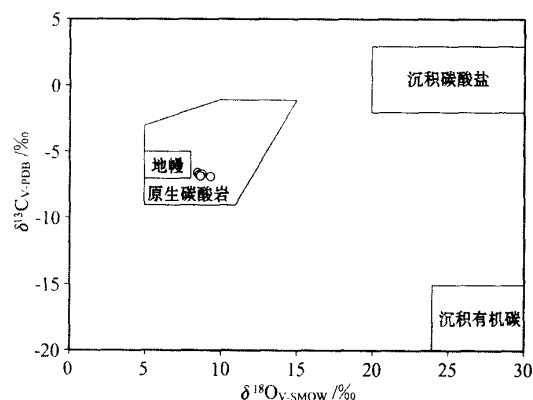


图 3 四川木落寨稀土矿床方解石碳、氧同位素组成图解(原图据刘建明等修改,2003)

Fig. 3 $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ diagram of calcite from the Muluozhai REE deposit, Sichuan Province (modified from Liu et al., 2003)

综上所述,木落寨稀土矿床成矿流体的 C、H、O、S 同位素特征反映出成矿作用与地幔流体活动的内在联系。这一结论可以较好地与成矿地球化学及其他同位素资料相印证。笔者最近在对木落寨稀土矿床进行包裹体显微测温 and 单个包裹体激光拉曼光谱研究时发现,包裹体以高度富 CO₂ 为特征,也证明地幔流体参与了成矿(Groves et al., 1988)。矿石中方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 0.706581 ~ 0.706601、0.512297 ~ 0.512356、18.2894 ~ 18.3457、15.6172 ~ 15.6682 和 38.6077 ~ 38.7865, 在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图上位于 EM I 附近,说明矿床成矿物质来自富集地幔,具深源甚至幔源特征(田世洪等, 2005)。总之, C、H、O、S 同位素资料清楚地表明木落寨稀土矿床的成矿流体主要来自地幔,而且与地壳物质交换的程度不十分强烈。

致谢 野外工作得到骆耀南、蒲广平、余波、李小渝等同志的大力支持和帮助;室内测试工作得到国土资源部同位素地质重点实验室万德芳研究员、白瑞梅高级工程师、罗续荣工程师、王成玉副研究员、李金诚高级工程师等的帮助。在此一并表示衷心感谢!

References

- Chi J S. 1988. A study on Cenozoic basalt and upper mantle in the eastern China [M]. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences. 1 ~ 268 (in Chinese).
- Chu X L. 1996. Carbon isotopes in mantle [J]. Advance in Earth Sciences, 11(5): 446 ~ 451 (in Chinese with English abstract).
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. Geophys. Res., 7: 3055 ~ 3067.
- Clayton R N and Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 27: 43 ~ 52.
- Faure G. 1986. Principles of isotope geology [M]. 2nd edition. New York: Wiley & Sons. 497 ~ 507.
- Friedman I and O'Neil J R. 1977. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest [A]. In: Fleischer M, ed. Data of geochemistry [M]. 6th edition. Geology Survey Professional Paper. 117.
- Groves D I, Golding S D, Rock N M S, et al. 1988. Archaean carbon reservoirs and their significance to the fluids source for gold deposits [J]. Nature, 331: 254 ~ 257.
- Jiang M Q. 1992. Structure feature of the Maoniuping REE deposit and its significance [J]. Mineral Deposits, 11(4): 351 ~ 358 (in Chinese with English abstract).
- Keller J and Hoefs J. 1995. Stable isotope characteristics of recent natrocarbonatites from Oldoinyo Lengai [A]. In: Bell K, ed. Carbonatites volcanism: Oldoinyo Lengai and petrogenesis of natrocarbonatites [M]. LAVCEI Proceeding in Volcanology. 113 ~ 123.
- Kuroda Y. 1975. D/H ratios of the coexisting phlogopite and richterite from mica nodules and a peridotite in South Africa kimberlites [J]. Contrib. Mineral Petrol., 52: 315 ~ 318.
- Li X Y. 2005. Geological characteristics of Dalucao REE deposit in Dechang county, Sichuan Province [J]. Mineral Deposits, 24(2): 151 ~ 160 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Zhang H F, Sun J G, et al. 2003. Geochemical research on C-O and Sr-Nd isotopes of mantle-derived rocks from Shangdong Province, China [J]. Science in China (Series D), 33(10): 921 ~ 930 (in Chinese).
- Lu C W. 1986. Stable Isotopic geochemistry [M]. Chengdu: Publishing House of Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Luo Y N and Yu R L. 2001. Major features and dynamic model of the Himalayan tectonic-magmatism in the intracontinental orogenic belt in Longmenshan-Jingpingshan, Sichuan Province [A]. In: Chen Y C, Wang D H, ed. Study on Himalayan endogenic mineralization [C]. Beijing: Seismological Press. 88 ~ 96 (in Chinese with English abstract).
- Luo Y N, Yu R L, Hou L W, et al. 1998. Longmenshan-Jingpingshan intracontinental orogenic belt [M]. Chengdu: Sichuan Sci. & Techn. Press. 1 ~ 171 (in Chinese with English abstract).
- McCrea J M. 1950. On the isotope chemistry of carbonates and a paleotemperature scale [J]. J. Chem. Phys., 18: 849 ~ 857.
- Nadeau S, Pineau F, et al. 1990. Carbon concentrations and isotopic ratios in fluid-inclusion-bearing upper-mantle xenoliths among the northwestern margin of North America [J]. Chemical Geology, 81: 271 ~ 297.
- Niu H C and Lin C X. 1994. The genesis of the Mianning REE deposit, Sichuan Province [J]. Mineral Deposits, 13(4): 345 ~ 353 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C and Lin C X. 1995a. Study on the fluid-melt inclusions in fluorite [J]. Geological Review, 41(1): 28 ~ 33 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C and Lin C X. 1995b. Geochemical characteristics of trace elements in major minerals of Mianning REE deposit, Sichuan Province [J]. Geochimica, 24(3): 287 ~ 293 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C, Chen F R and Lin M Q. 1996a. REE geochemistry of magmatogenic barite and fluorite [J]. Acta Mineralogica Sinica, 16(4): 382 ~ 388 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C, Shan Q and Lin M Q. 1996b. A study on inclusions in minerals from Mianning REE deposit in Sichuan Province [J]. Geochimica, 25(6): 559 ~ 567 (in Chinese with English abstract).
- Niu H C, Shan Q and Chen P R. 1997. Natures of fluids in magmatic-

- hydrothermal transitional stage-exemplified by Mianning deposit, Sichuan, China [J]. *Journal of Nanjing University*, 33 : 21 ~ 27 (in Chinese with English abstract) .
- Niu H C, Shan Q, Chen X M, et al. 2002. Relationship between light rare earth deposits and mantle processes in Panxi rift, China [J]. *Science in China (Series D)*, 32 (Supp.) : 33 ~ 40 (in Chinese) .
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits [J]. *Econ. Geol.*, 67 : 551 ~ 578 .
- Pineau F and Methez E A. 1990. Carbon isotopes in xenoliths from the Hualalai volcano, Hawaii, and the generation of isotopic variability [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54 : 2117 ~ 2127 .
- Pu G P. 1988. Discovery of an alkalic pegmatite-carbonatite complex zone in Maoniuping, southwestern Sichuan Province [J]. *Geological Review*, 34(1) : 88 ~ 92 (in Chinese with English abstract) .
- Pu G P. 1993. Ore-model and exploration method in Maoniuping REE deposit [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 13(1) : 46 ~ 57 (in Chinese with English abstract) .
- Pu G P. 1995. Metallogenic conditions in metallogenic belt of REE in west Mianning region [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 15(1) : 60 ~ 65 (in Chinese with English abstract) .
- Pu G P. 2001. The evolution history of rare earth elements mineralization and major features of Himalayan REE deposits in the Panzhihua-Xichang area, Sichuan [A]. In: Chen Y C, Wang D H, ed. *Study on Himalayan endogenic mineralization* [C]. Beijing: Seismological Press. 104 ~ 116 (in Chinese with English abstract) .
- Ray J S, Ramesh R and Pande K. 1999. Carbon isotopes in Kerguelen plume-derived carbonatites: Evidence for recycled inorganic carbon [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 170 : 205 ~ 214 .
- Ray J S, Ramesh R, Pande K, et al. 2000. Isotope and rare earth element chemistry of carbonatite-alkaline complexes of Deccan volcanic province: Implications to magmatic and alteration processes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18 : 177 ~ 194 .
- Shi Z M and Li X Y. 1996. Geologic features and ore-forming conditions of alkali complex-hosted ore deposits of REE in Himalayan epoch in Panzhihua-Xichang region [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 16(1) : 54 ~ 59 (in Chinese with English abstract) .
- Taylor B E. 1986. Magmatic volatiles: Isotope variation of C, H and S. reviews in mineralogy [A]. In: *Stable isotopes in high temperature geological process* [M]. Mineralogical Society of America. 16 : 185 ~ 226 .
- Tian S H, Ding T P and Mao J W. 2003. Mantle fluids involved in the ore-forming process of the Maoniuping REE deposit, Sichuan: Evidence of C, H, O and S isotopes [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24 (6) : 543 ~ 547 (in Chinese with English abstract) .
- Tian S H, Yuan Z X, Zhang G L, et al. 2006. Discussion on ore-forming-related granite in the Muluozhai REE Deposit, Sichuan Province and their significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* (in press) .
- Veizer J, Holser W T and Wilgus C K. 1980. Correlation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ secular variation [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44 : 579 ~ 588 .
- Wan D F and Tian S H. Stable isotope evidence of deep source ore-forming fluid in the Dalucao REE deposit of the Panxi rift [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25 (2) : 161 ~ 164 (in Chinese with English abstract) .
- Wang D H, Yang J M, Yan S H, et al. 2001. A special orogenic-type rare earth element deposit in Maoniuping, Sichuan, China: Geology and Geochemistry [J]. *Resource Geology*, 15(3) : 177 ~ 188 .
- Wang D H, Yu J J, Yang J M, et al. 2002a. Inert gas isotopic studies and dynamic background of Cenozoic ore-forming process in China [J]. *Mineral Deposits*, 21(2) : 179 ~ 186 (in Chinese with English abstract) .
- Wang D H, Yang J M, Yan S H, et al. 2002b. Dynamics of the REE mineralization in Maoniuping area, Sichuan Province: Isotopic geochemistry of carbonatites [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(5) : 539 ~ 544 (in Chinese with English abstract) .
- Wang X B, Wu M B and Zhang M J. 2000. Stable isotope geochemistry of mantle fluids [J]. *Geology-Geochemistry*, 28 (3) : 69 ~ 74 (in Chinese with English abstract) .
- Xu C, Huang Z L, Qi L, et al. 2001. Source and evolution of ore-forming fluids of Maoniuping rare-earth deposit—evidence from REE geochemistry of fluorites [J]. *Geology and Prospecting*, 37 (5) : 24 ~ 28 (in Chinese with English abstract) .
- Xu C, Huang Z L, Qi L, et al. 2002a. REE and isotopic geochemistry of fluorites in the Maoniuping rare-earth deposit, Sichuan Province [J]. *Geochimica*, 31 (2) : 180 ~ 190 (in Chinese with English abstract) .
- Xu C, Huang Z L, Liu C Q, et al. 2002b. Geochemistry of carbonatites in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China [J]. *Science in China (Series D)*, 32(8) : 635 ~ 643 (in Chinese) .
- Xu C, Huang Z L, Liu C Q, et al. 2003. Indicator of fluorite Sr and Nd isotope to mantle-derived ore-forming fluids in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China [J]. *Earth Science*, 28(1) : 41 ~ 46 (in Chinese with English abstract) .
- Xu C, Huang Z L, Liu C Q, et al. 2004. Pb isotopic geochemistry of carbonatites in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3) : 495 ~ 500 (in Chinese) .
- Yang Z X, Anthony E W J and Pu G P. 2000. Geological features of Maoniuping REE deposit, Sichuan, China [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 20(2) : 28 ~ 34 (in Chinese with English abstract) .
- Yang Z X, Anthony E W J and Pu G P. 2001. A fluid inclusion study of Maoniuping REE deposit, Sichuan, China [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 21(2) : 26 ~ 33 (in Chinese with English abstract) .
- Ye Y L. 1992. The geochemical characteristic of rare earth elements in Maoniuping alkali complex massif and discussion on its genesis [J]. *Exploration of Geosciences*, 7 : 120 ~ 127 (in Chinese with English abstract) .
- Yuan Z X, Bai G, Ding X S, et al. 1993. U-Pb isotopic age of zircon from the Maoniuping alkali granite, Sichuan Province and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 12(2) : 189 ~ 192, 147 (in Chinese with English abstract) .
- Yuan Z X, Shi Z M, Bai G and Li L W. 1995. The Maoniuping rare

- earth ore deposit, Mianning County, Sichuan Province [M]. Beijing: Seismological Press. 1 ~ 150 (in Chinese).
- Yuan Z X, Bai G and Zhang Z Q. 2000. Trachytic rock and associated fenitization in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China: Evidence for magmatic-hydrothermal mineralization related to a carbonatitic complex [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 74 (2): 148 ~ 153.
- Yuan Z X and Bai G. 2001. Temporal and spatial distribution of endogenic rare and rare earth mineral deposits of China [J]. *Mineral Deposits*, 20(4): 347 ~ 354 (in Chinese with English abstract).
- Zhang M J, Wang X B and Li L W. 2000. Composition of mantle fluid [J]. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 401 ~ 412 (in Chinese).
- Zhang Y X, Luo Y N and Yang C X. 1988. The Panxi rift [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 224 ~ 270 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 池际尚. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1 ~ 268.
- 储雪蕾. 1996. 地幔的碳同位素[J]. *地球科学进展*, 11(5): 446 ~ 451.
- 蒋明全. 1992. 牦牛坪轻稀土矿床构造特征及其控矿意义[J]. *矿床地质*, 11(4): 351 ~ 358.
- 李小渝. 2005. 四川德昌大陆槽稀土矿床地质特征[J]. *矿床地质*, 24(2): 151 ~ 160.
- 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 2003. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和铈-钕同位素地球化学研究[J]. *中国科学(D辑)*, 33(10): 921 ~ 930.
- 卢长武. 1986. 稳定同位素地球化学[M]. 成都: 成都地质学院出版社.
- 骆耀南, 俞如龙, 侯立玮, 等. 1998. 龙门山—锦屏山陆内造山带[M]. 成都: 四川科学技术出版社. 1 ~ 171.
- 骆耀南, 俞如龙. 2001. 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[A]. 见: 陈毓川, 王登红, 主编. 喜马拉雅期内生矿作用研究[M]. 北京: 地震出版社. 88 ~ 96.
- 牛贺才, 林传仙. 1994. 论四川冕宁稀土矿床的成因[J]. *矿床地质*, 13(4): 345 ~ 353.
- 牛贺才, 林传仙. 1995a. 萤石中流体-熔融包裹体的研究[J]. *地质论评*, 41(1): 28 ~ 33.
- 牛贺才, 林传仙. 1995b. 四川冕宁稀土矿床脉石矿物的微量及稀土元素地球化学特征[J]. *地球化学*, 24(3): 287 ~ 293.
- 牛贺才, 陈繁荣, 林茂青. 1996a. 岩浆成因重晶石、萤石的稀土元素地球化学特征[J]. *矿物学报*, 16(4): 382 ~ 388.
- 牛贺才, 单强, 林茂青. 1996b. 四川冕宁稀土矿床包裹体研究[J]. *地球化学*, 25(6): 559 ~ 567.
- 牛贺才, 单强, 陈培荣. 1997. 岩浆-热液过渡阶段流体性质的研究——以四川冕宁矿床为例[J]. *南京大学学报*, 33: 21 ~ 27.
- 牛贺才, 单强, 陈小明, 等. 2002. 攀西裂谷带轻稀土矿床与地幔过程的关系[J]. *中国科学(D辑)*, 32(增刊): 33 ~ 40.
- 蒲广平. 1988. 四川西南牦牛坪碱性伟晶岩-火成碳酸盐杂岩体的发现[J]. *地质论评*, 34(1): 88 ~ 92.
- 蒲广平. 1993. 牦牛坪轻稀土矿床成矿模式及找矿方向探讨[J]. *四川地质学报*, 13(1): 46 ~ 57.
- 蒲广平. 1995. 冕西稀土成矿带成矿条件探讨[J]. *四川地质学报*, 15(1): 60 ~ 65.
- 蒲广平. 2001. 攀西地区稀土成矿历史演化与喜马拉雅期成矿基本特征[A]. 见: 陈毓川, 王登红, 主编. 喜马拉雅期内生矿作用研究[M]. 北京: 地震出版社. 104 ~ 116.
- 施泽民, 李小渝. 1996. 攀西地区喜马拉雅期碱性杂岩的稀土成矿条件及资源特点[J]. *四川地质学报*, 16(1): 54 ~ 59.
- 田世洪, 丁梯平, 毛景文. 2003. 四川牦牛坪轻稀土矿床地幔流体成矿的碳、氢、氧、硫同位素证据[J]. *地球学报*, 24(6): 543 ~ 547.
- 田世洪, 袁忠信, 张桂兰, 等. 2006. 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* (出版中).
- 万德芳, 田世洪. 2004. 攀西大陆槽稀土矿床深源成矿流体的稳定同位素证据[J]. *地球学报*, 25(2): 161 ~ 164.
- 王登红, 余金杰, 杨建民, 等. 2002a. 中国新生代成矿作用的惰性气体同位素研究与动力学背景[J]. *矿床地质*, 21(2): 179 ~ 186.
- 王登红, 杨建民, 闫升好, 等. 2002b. 四川牦牛坪碳酸岩的同位素地球化学及其成矿动力学[J]. *成都理工学院学报*, 29(5): 539 ~ 544.
- 王先彬, 吴茂炳, 张铭杰. 2000. 地幔流体的稳定同位素地球化学综述[J]. *地质地球化学*, 28(3): 69 ~ 74.
- 许成, 黄智龙, 漆亮, 等. 2001. 四川牦牛坪轻稀土矿床成矿流体来源与演化初探——萤石稀土地球化学的证据[J]. *地质与勘探*, 37(5): 24 ~ 28.
- 许成, 黄智龙, 漆亮, 等. 2002a. 四川牦牛坪轻稀土矿床萤石稀土元素、同位素地球化学[J]. *地球化学*, 31(2): 180 ~ 190.
- 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 2002b. 四川牦牛坪轻稀土矿床碳酸岩地球化学[J]. *中国科学(D辑)*, 32(8): 635 ~ 643.
- 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 2003. 四川牦牛坪轻稀土矿床萤石 Sr、Nd 同位素对地幔成矿流体的指示意义[J]. *地球科学*, 28(1): 41 ~ 46.
- 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 2004. 牦牛坪轻稀土矿床碳酸岩 Pb 同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 20(3): 495 ~ 500.
- 阳正熙, Anthony E Williams-Jones, 蒲广平. 2000. 四川冕宁牦牛坪轻稀土矿床地质特征[J]. *矿物岩石*, 20(2): 28 ~ 34.
- 阳正熙, Anthony E Williams-Jones, 蒲广平. 2001. 四川牦牛坪轻稀土矿床矿物流体包裹体研究[J]. *矿物岩石*, 21(2): 26 ~ 33.
- 叶幼兰. 1992. 牦牛坪碱性杂岩体 REE 地球化学特征及成因探讨[J]. *地质探索*, 7: 120 ~ 127.
- 袁忠信, 白鸽, 丁孝石, 等. 1993. 四川冕宁牦牛坪碱性花岗岩锆石-铀-铅同位素年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 12(2): 189 ~ 192, 147.
- 袁忠信, 施泽民, 白鸽, 等. 1995. 四川冕宁牦牛坪轻稀土矿床[M]. 北京: 地震出版社. 1 ~ 150.
- 袁忠信, 白鸽. 2001. 中国内生稀有稀土矿床的时空分布[J]. *矿床地质*, 20(4): 347 ~ 354.
- 张铭杰, 王先彬, 李立武. 2000. 地幔流体组成[J]. *地学前缘*, 7(2): 401 ~ 412.
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. 攀西裂谷[M]. 北京: 地质出版社. 224 ~ 270.

Stable isotope data from Muluozhai REE deposit in Mianning County , Sichuan Province , and their geological implications

TIAN Shi-hong^{1, 2} , ZHANG Gui-lan³ , HOU Zeng-qian^{1, 2} , DING Ti-ping^{1, 2} , XIE Yu-ling³ ,
YUAN Zhong-xin¹ , BAI Ge¹ and ZOU Tian-ren¹

(1 Institute of Mineral Resources , Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100037 , China ; 2 Key Laboratory on
Isotope Geology , Ministry of Land and Resources , Beijing 100037 , China ; 3 Academy of Information of Land and
Resources of Inner Mongolia , Hohhot 010020 , Inner Mongolia , China ; 4 Civil & Environmental Engineering
School , Beijing University of Science and Technology , Beijing 100083 , China)

Abstract

The Muluozhai REE deposit , located about 60 km south west of Mianning County , Sichuan Province , is the third large LREE deposit in Sichuan . The Muluozhai REE deposit is tectonically located on the northern margin of the Jinpingshan Mountain in the Cenozoic intracontinental orogenic belt of southwestern China . Based on field work , the authors analyzed the essential ores from two tunnels for their carbon , hydrogen , oxygen , and sulfur isotopic components so as to investigate sources of metallogenic fluids in the Muluozhai REE deposit and the relation between the metallogenic fluids and the deep process . The $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ values of fluids from fluid inclusions in quartz and fluorite vary from -2.5 to -9.0 per mil , showing characteristics of mantle-derived carbon . The $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ values of fluids from fluid inclusions in calcite , quartz , fluorite and bastnaesite range from -63 to -87 per mil , suggesting characteristics of mantle-derived hydrogen . The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values of barite and galena vary in narrow ranges of + 0.1 ~ + 2.2 per mil and -8.6 ~ -9.3 per mil , respectively , indicating isotopic characteristics of mantle-derived sulfur . The $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ values and the $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ values of calcite range from -6.6 to -6.8 per mil and from + 8.4 to + 9.1 per mil , respectively , which are fallen into the range of the "primary carbonates" , implying that carbon and oxygen in ores of Muluozhai ore veins were mainly derived from the depth . The stable isotopic data suggest a mantle source for the REE mineralization and a deep process involving mantle materials and tectonics .

Key words : geochemistry , rare earth element deposit , stable isotope , mantle source , Muluozhai , Mianning County in Sichuan Province