

文章编号: 1009-3850(2011)04-0104-07

滇东南中三叠统法郎组含锰岩系稀土元素和 铀、钍元素的特征及意义

杨伟^{1,2}, 伊海生¹, 杜秋定³, 夏国清¹, 达雪娟¹

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 四川省核工业地质局二八二大队, 四川 德阳 618000; 3. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

摘要: 对滇东南中三叠统法郎组含锰岩系进行了系统采样, 用 ICP-MS 法分析了 17 件锰矿样品和两件含锰灰岩样品中的稀土元素组成。研究表明, 所有样品 REE 配分模式皆为富 LREE 型, 锰矿样品表现较弱的 Ce (δCe 值 0.79 ~ 1.29) 异常和 Eu (δEu 值 0.84 ~ 1.20) 异常; 而含锰灰岩则显示出强烈的负 Ce 异常和较弱的负 Eu 异常。并通过 $\log\text{Th}-\log\text{U}$ 图解分析, 得出滇东南中三叠统法郎组含锰岩系普遍经受了多期次的热液的作用。

关键词: 滇东南; 法郎组; 锰矿; 稀土元素; 铀; 钍

中图分类号: P595

文献标识码: A

稀土元素的地球化学特征分析, 已经成为研究矿物成因和物质来源等的重要手段。在锰矿的成因、沉积环境和矿物质来源等研究中, 稀土元素地球化学方法的运用也相当广泛, 研究手段也趋于成熟。刘仁福等(1988)和于苏俊等(2000)采用稀土元素地球化学方法, 研究了云南省境内锰矿的控矿因素、物质来源和沉积构造环境^[1-2]。刘仁福等(1988)将滇东南法郎组锰矿作为一个整体探讨其沉积环境特征。滇东南法郎组锰矿含矿层达 10 余层, 但总体上可分为 2 个主要含矿层, 即 T_2f_4 下含矿层和 T_2f_5 上含矿层, 且上下含矿层几乎都产出在不同矿点或矿段^[3]。本文以含锰地层 REE 地球化学特征为基础, 结合微量元素 Th 和 U 的特征分析, 分别讨论滇东南法郎组锰矿上、下含矿层和不同矿点、矿段的锰矿沉积环境。

1 采样位置

本次实验分析样品分别采自蒙自岩子脚、开远老乌、砚山斗南矿点(图 1), 精心挑选样品 19 件, 样

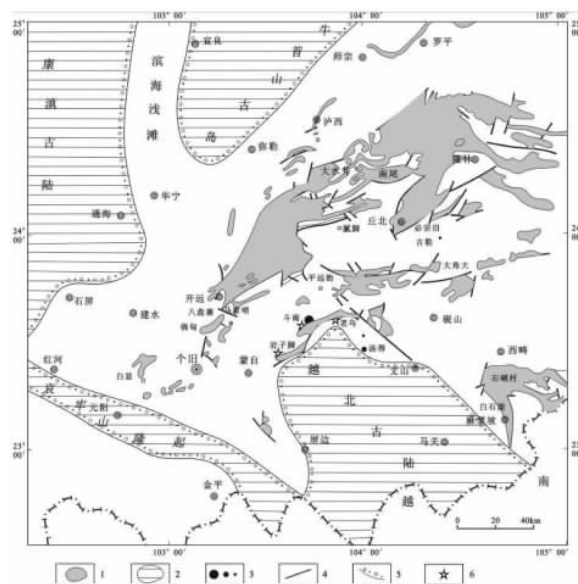


图 1 采样位置图

1. 法郎组; 2. 古陆; 3. 大中小型矿床; 4. 断层; 5. 古陆边界; 6. 采样点

Fig. 1 Sampling sites

1 = Falang Formation; 2 = old land; 3 = large-, medium- and small-sized ore deposits; 4 = fault; 5 = old land boundary; 6 = sampling site

收稿日期: 2010-11-04; 改回日期: 2011-02-08

作者简介: 杨伟(1984-), 男, 2009年毕业于成都理工大学沉积学专业, 获硕士学位, 主要从事地质矿产勘查工作
资助项目: “十一五”国家科技支撑项目(编号: 2006BAB01A12-5) 资助

品所在的含矿层、矿点和矿段等见表 1。

2 实验分析方法

制样方法: 所有样品经粉碎后 ,磨至 200 目以下; 然后冲洗、加热 ,用 6N 的 HNO₃ 浸泡; 再次冲洗加热烘干 封存待用。然后去除样品中的 CO₂ ,再经微波消解后 加入 HClO₄加热烘干; 再滴入 HNO₃ 和 H₂O₂ 微波消解后 ,加热烘干; 最后加入 HNO₃ 和

H₂O 溶样 ,精确定容 ,再次微波消解后 ,配置标准溶液。

实验分析在成都理工大学核技术与自动化工程学院 ICP-MS 实验室完成 ,实验仪器为 PE 公司生产 型号为 ELAN DRC-e 高分辨电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS) 。分析了 19 件样品 REE 组成和 Th、U 等微量元素含量。REE、Th、U 的检出限和测试结果见表 2。

表 1 样品采集层位的建造类型及岩性

Table 1 Ore horizons , formation type and lithology of manganese deposits

矿点/矿段	含锰建造类型	地层	含矿层	岩性	样品
岩子脚锰矿	碳酸岩 含锰建造	T ₂ f ₄	下含矿层	含锰灰岩	ym3、ym6
				条带状锰矿石	ym4
				块状锰矿石	ym5、ym5 平行样
老乌锰矿	粉砂质泥岩 含锰建造	T ₂ f ₅	上含矿层	鲕状锰矿石	lm1
				条带状锰矿石	lm2、lm3
斗南锰矿米里克矿段		T ₂ f ₄	下含矿层	条带状锰矿石	yd14b1、yd14b2、dm3
斗南锰矿白姑矿段		T ₂ f ₅	上含矿层	鲕状锰矿石	bm1、bm3、bm3 平行样、bm5、bm6、bm7、bm8、 bm8 平行样

表 2 锰矿石样品中 Th、U 和 REE 含量(ng/ml)

Table 2 Th , U and REE contents in the manganese ore samples (ng/ml)

样品 编号	bm1	bm3	bm3 平行样	bm5	bm6	bm7	bm8	bm8 平行样	lm1	lm2	lm3	yd14 b1	yd14 b2	dm3	ym3	ym4	ym5	ym5 平行样	ym6	检出限
La	7.94	18.43	18.60	8.95	6.71	4.83	14.00	14.39	10.55	43.41	17.50	16.43	12.37	24.76	5.00	15.22	13.67	14.25	9.57	0.0003
Ce	14.55	39.80	39.68	15.34	10.16	7.41	24.98	25.68	15.92	86.65	27.10	27.71	20.53	42.36	1.98	27.61	31.57	33.58	5.26	0.0018
Pr	1.86	4.34	4.36	1.93	1.46	0.93	2.75	2.80	2.04	8.93	3.57	3.55	2.80	5.28	1.16	2.99	2.68	2.83	2.22	0.0003
Nd	7.34	17.06	17.24	7.10	5.41	3.57	10.21	10.76	6.94	24.83	12.91	13.04	9.95	19.72	4.81	11.38	10.51	10.98	9.73	0.0022
Sm	2.10	4.27	4.29	1.77	1.40	0.83	2.31	2.35	1.53	5.68	2.87	2.76	2.29	4.19	1.00	2.57	2.87	3.07	2.37	0.0008
Eu	0.50	1.03	0.98	0.48	0.40	0.22	0.50	0.51	0.40	1.20	0.75	0.65	0.61	1.04	0.20	0.55	0.84	0.88	0.50	0.0006
Gd	2.46	5.03	5.01	2.12	1.64	1.16	2.78	2.73	1.99	6.20	3.23	3.28	2.67	5.18	1.24	3.06	3.13	3.32	2.92	0.0006
Tb	0.35	0.67	0.68	0.27	0.22	0.15	0.35	0.35	0.26	0.71	0.44	0.44	0.36	0.66	0.13	0.40	0.42	0.44	0.35	0.0002
Dy	2.10	3.70	3.83	1.41	1.16	0.77	1.97	1.91	1.37	3.45	2.24	2.22	1.84	3.42	0.62	2.25	2.42	2.52	1.78	0.0007
Ho	0.41	0.68	0.70	0.29	0.24	0.17	0.37	0.37	0.29	0.71	0.48	0.48	0.39	0.70	0.10	0.44	0.45	0.47	0.32	0.0002
Er	1.36	2.19	2.29	0.92	0.77	0.51	1.17	1.19	0.92	2.39	1.56	1.55	1.22	2.18	0.30	1.42	1.43	1.48	0.94	0.0006
Tm	0.20	0.30	0.29	0.11	0.10	0.06	0.16	0.16	0.11	0.32	0.20	0.20	0.16	0.28	0.03	0.19	0.18	0.19	0.10	0.0002
Yb	1.20	1.74	1.77	0.75	0.65	0.43	0.99	1.00	0.75	2.34	1.41	1.39	1.08	1.92	0.17	1.17	1.10	1.13	0.59	0.0005
Lu	0.19	0.28	0.28	0.12	0.10	0.07	0.15	0.15	0.12	0.36	0.22	0.22	0.17	0.31	0.03	0.18	0.16	0.16	0.09	0.0002
Y	11.75	19.86	19.7	7.96	7.66	5.34	10.52	10.57	11.05	20.93	15.05	14.81	12.96	22.49	4.36	11.91	11.46	12.17	14.84	0.0012
U	1.41	2.48	2.43	1.03	0.82	1.03	2.26	2.32	1.16	4.12	1.89	1.58	1.25	4.01	0.47	2.36	1.51	1.61	0.32	0.004
Th	6.85	7.12	7.11	2.82	1.97	1.14	4.54	4.71	2.66	18.57	6.81	6.44	4.97	9.20	0.33	6.03	2.67	3.01	0.92	0.0016
ΣREE	54.33	119.4	119.7	49.51	38.09	26.44	73.21	74.92	54.24	208.1	89.55	88.73	69.40	134.5	21.14	81.33	82.89	87.48	51.58	
ΣLREE / ΣHREE	4.14	5.81	5.73	5.94	5.23	5.38	6.91	7.19	6.44	10.36	6.61	6.56	6.17	6.65	5.39	6.63	6.70	6.76	4.17	
δEu	0.93	0.94	0.90	1.04	1.11	0.91	0.84	0.86	0.95	0.86	1.05	0.91	1.04	0.94	0.76	0.84	1.20	1.18	0.80	
δCe	0.93	1.09	1.08	0.90	0.79	0.85	0.98	0.99	0.84	1.07	0.84	0.89	0.85	0.91	0.20	1.00	1.27	1.29	0.28	
(La/Sm) N	0.69	0.79	0.79	0.93	0.87	1.06	1.11	1.12	1.26	1.40	1.12	1.09	0.99	1.08	0.92	1.09	0.87	0.85	0.74	
(Gd/Yb) N	1.14	1.61	1.57	1.58	1.40	1.51	1.57	1.52	1.47	1.47	1.28	1.31	1.38	1.50	4.09	1.46	1.58	1.63	2.75	
Th/U	4.86	2.87	2.93	2.74	2.39	1.11	2.01	2.03	2.29	4.51	3.61	4.06	3.98	2.29	0.70	2.56	1.77	1.87	2.86	

* 分析测试于 2008 年 9 月在成都理工大学核技术与自动化工程学院 ICP-MS 实验室完成 测试人彭秀红

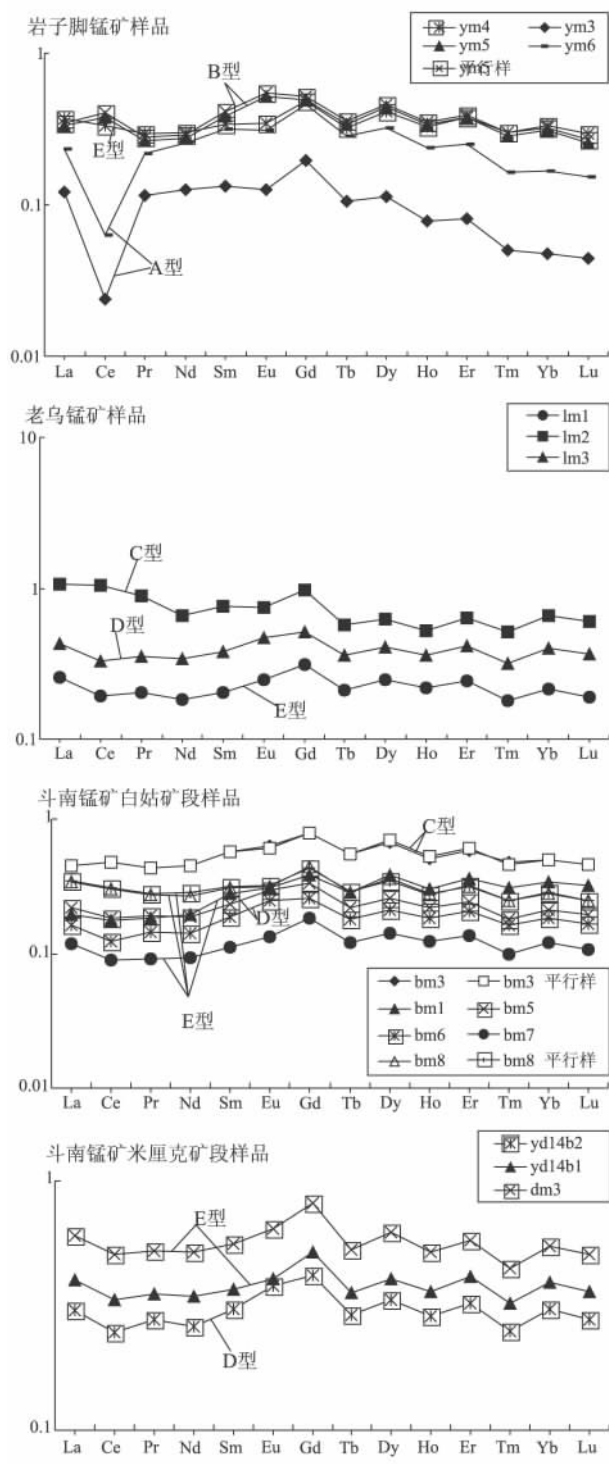


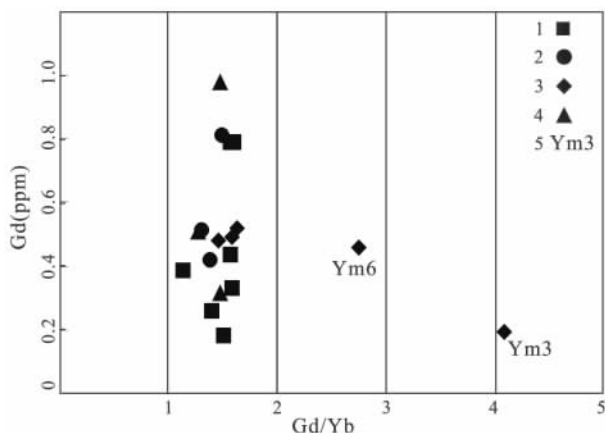
图2 NASC 标准化的 REE 配分模式类型

Fig. 2 NASC-normalized REE distribution patterns for the manganese ore samples from the study area

3 REE, Th 和 U 分析结果

3.1 REE 丰度特征

由表 2 可知,所有样品的稀土总量(Σ REE)在 21.14 ~ 208.10 ng/ml 之间。上矿层:开远老乌锰矿

图3 锰矿样品($(Gd/Yb)_N$ -Gd 关系图

1. 斗南锰矿白姑矿段样品; 2. 斗南锰矿米厘克矿段样品; 3. 岩子脚锰矿样品; 4. 老乌锰矿样品; 5. 样品编号(下同)

Fig. 3 $(Gd/Yb)_N$ vs. Gd diagram for the manganese ore samples

Sampling sites: 1. Baigu ore block of the Dounan manganese deposit; 2. Milike ore block of the Dounan manganese deposit; 3. Yanjiaozhi manganese deposit; 4. Laowu manganese deposit; 5. sample number

中 Σ REE 在 54.24 ~ 208.10 ng/ml 之间,平均值 117.29 ng/ml; 砚山斗南锰矿(白姑矿段)中 Σ REE 在 26.44 ~ 119.70 ng/ml 之间,平均值 69.45 ng/ml,两者平均值相比,老乌锰矿的 Σ REE 较高。下矿层:蒙自岩子脚锰矿中 Σ REE 在 21.14 ~ 87.48 ng/ml 之间,其中 ym3 和 ym6 为含锰灰岩,其 Σ REE 值分别为 21.14 ng/ml 和 51.58 ng/ml,平均值 36.36 ng/ml,与同层位含锰灰岩平均值 114.10 ng/ml^[1]相比,稀土总量甚低。锰矿石 Σ REE 值为 81.33 ~ 87.84 ng/ml,平均值 83.90 ng/ml; 砚山斗南锰矿(米厘克矿段)的 Σ REE 在 64.90 ~ 134.50 ng/ml 之间,平均值 97.54 ng/ml。所有锰矿中 Σ REE 的平均值(除去 ym3、ym6)为 85.40 ng/ml,与同层位原生锰矿平均值 73.00 ng/ml^[1]相比, Σ REE 较高;锰矿中 Σ REE 较大陆地壳 Σ REE 为低。

3.2 REE 分馏特征与配分模式分类

1. REE 分馏特征

为了直观表达 REE 的含量、分馏特征和 Eu、Ce 元素的异常,采用样品 REE 的测量值与页岩或球粒陨石标准样品中对应元素比值,通过数值法(如 La/Lu 比, LREE/HREE 比)和图解来反映稀土元素的富集与亏损和 Eu、Ce 元素的异常^[4]。球粒陨石的稀土元素丰度代表地球原始组成的 REE 含量,多用于火成岩的研究,而页岩稀土元素含量(如北美页岩

岩组合样 NASC、后太古宙页岩 PAAS) 则反映上地壳的 REE 平均丰度,故常采用 NASC 或 PAAS 标准讨论沉积物或沉积岩的 REE 配分型式^[5]。本文采用 NASC 标准讨论滇东南锰矿和含锰灰岩的 REE 配分模式和分馏特征。

$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值表明所有样品具有轻稀土富集、重稀土亏损的分馏特征, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值集中分布在 4.14 ~ 7.19 之间。老乌锰矿样品(lm2) $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 偏高,为 10.36,且其 ΣREE 为 208.10,是所有样品中稀土总含量最高的。

样品中 LREE 和 HREE 的分馏程度用 REE 含量经北美页岩组合样标准化后的值计算,其中 LREE 分馏程度用 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 计算,锰矿和含锰灰岩值都在 0.69 ~ 1.40 之间,表明 LREE 分馏程度较低;HREE 的分馏程度用 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 计算,其中锰矿值在 1.14 ~ 1.65 之间,岩子脚含锰灰岩样品(ym3、ym6) 为 4.09 和 2.75。由此可见,滇东南锰矿中 LREE 和 HREE 的分馏特征相似,岩子脚含锰灰岩 HREE 的分馏程度要高于锰矿样品。

2. 配分模式

REE 含量经北美页岩组合样标准化后,以 La 到 Lu 的原子序数为横坐标,以所测样品 REE 含量标准化比值为纵坐标(对数坐标)进行投影,得出 REE 的分布模式图。由于锰矿样品中 REE 分馏特征相似,LREE 和 HREE 的分馏特征也相近,本文将同一矿床(段)样品的 REE 配分模式进行比较,且根据 Ce 异常与 Eu 异常的微小差别,将锰矿中 REE 配分模式分为 5 种类型(图 2):

A 型:该 REE 配分模式以强负 Ce 异常为特点, δCe 值为 0.2 ~ 0.28,平均值 0.24,是所有样品中表负 Ce 异常明显;负 Eu 异常则表现较弱, δEu 值为 0.76 ~ 0.80,平均值 0.78。其 ΣREE 为 21.14 ~ 51.58ng/ml,平均值 36.36ng/ml。代表样品有 ym3 和 ym6。

B 型:该 REE 配分模式中 Ce 和 Eu 均表现为弱正异常, δCe 值为 1.27 ~ 1.29,平均值 1.28; δEu 值为 1.18 ~ 1.20,平均值为 1.19。其 ΣREE 为 82.89 ~ 87.48ng/ml,平均值 85.19ng/ml。代表样品有 ym5 及 ym5。

C 型:REE 配分模式中 Ce 和 Eu 的异常表现都比较弱。其中 Ce 表现为弱正异常, δCe 值为 1.07 ~ 1.09,平均值 1.08;Eu 则表现为弱负异常, δEu 值为 0.86 ~ 0.94,平均值 0.90。 ΣREE 值较高,为

119.40 ~ 208.10ng/ml,平均值 149.07ng/ml。代表样品有 bm3、bm3 平行样和 lm2。

D 型:该 REE 配分模式中 Ce 和 Eu 的异常同样表现较弱。样品 REE 表现出弱负 Ce 异常, δCe 值为 0.79 ~ 0.90,平均值 0.85;Eu 则表现为弱正异常, δEu 值为 1.04 ~ 1.11,平均值 1.06。 ΣREE 值为 38.10 ~ 89.55ng/ml,平均值 61.64ng/ml。代表样品有 bm5、bm6、lm3 和 yd14b2。

E 型:该 REE 配分模式以 Ce 和 Eu 同时出现弱负异常或无异常为特点, δCe 值为 0.84 ~ 0.997,平均值 0.92; δEu 值为 0.84 ~ 0.95,平均值 0.90。 ΣREE 值为 26.40 ~ 134.50ng/ml,平均值 73.46ng/ml。代表样品有 bm1、bm7、bm8、bm8 平行样、lm1、yd14b1、dm3 和 ym4。

3.3 稀土元素异常分析

1. Ce 异常

δCe 是以数值的形式来表示 Ce 异常的程度,据公式 $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_N / \text{Ce}^* = \text{Ce}_N / [1/2(\text{La}_N + \text{Pr}_N)]$ 求出。Ce 异常一般在两种情况下产生,一种产生在弱酸性条件下的岩石风化过程中,由于 Ce^{4+} 极易水解而形成沉淀,使淋出液贫 Ce,产生 Ce 异常^[6];另一种产生在海洋沉积过程中,在海水中由于 Ce 元素的滞留时间较其它稀土元素短得多,而且在海水的 pH-Eh 条件下, Ce^{3+} 被氧化成 Ce^{4+} ,以 CeO_2 形式沉淀,由此造成海水中 Ce 强烈亏损,而沉积物中却表现为 Ce 的正异常^[7]。Ce 异常被作为古海洋氧化—还原状态的指标^[8-9],且在沉积环境的演变过程中, δCe 值的增加可以解释为古海洋底层水由还原条件逐渐变化为氧化环境^[10]。

2. Eu 异常

δEu 是以数值的形式来表示 Eu 异常的程度,是 REE 值经北美页岩组合样标准化后,根据公式 $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / \text{Eu}^* = \text{Eu}_N / [1/2(\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)]$ 求出。样品的 δEu 值在 0.76 ~ 1.20 之间。因 Eu 属于变价元素,在一般情况下呈 Eu^{3+} 出现,这时它与 REE^{3+} 的性质相似,共同迁移,但在还原条件下,部分 Eu^{3+} 可还原成 Eu^{2+} ,因其碱性度与 REE^{3+} 差别较大而发生分离,因此出现了 Eu 异常。

3. $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值与 Gd 之间的关系

$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 用来表示 HREE 的分馏程度,其值越高,表明 HREE 的分馏程度越强。典型的上地壳岩石中的 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值在 1 ~ 2 之间。重矿物独居石具有很高的 REE 含量和陡倾的 REE 配分模式,

显示出独居石很高的 HREE 分馏程度。上地壳岩石中 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值的增加 (>2 时) 可能是独居石在上地壳岩石中的富集^[11]。如(图 3)所示,两个岩子脚含锰灰岩样品(ym3、ym6) $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值分别为 4.09 和 2.75,但是它们 REE 的总含量分别仅为 21.14 ng/ml 和 51.58 ng/ml,由此可以推测,含锰灰岩中不存在独居石的富集。

3.4 U 和 Th 分析结果与讨论

Th/U-Th 图(图 4)可以用来评价滇东南中三叠统法郎组含锰岩系风化程度和铁镁质富集程度。上地壳岩石的 Th/U 值通常分布在 3.5~4 之间。如果 Th/U 值过高,则代表了岩石在氧化条件下遭受了侵蚀风化,同时也是风化过程中 U 损耗的标志^[11]。在滇东南锰矿样品中,bm1、lm2 的 Th/U 值分别为 4.86 和 4.51,其余均小于 4,表明大部分含矿岩系仍为原生沉积,未经风化,而部分含矿岩系已经风化。

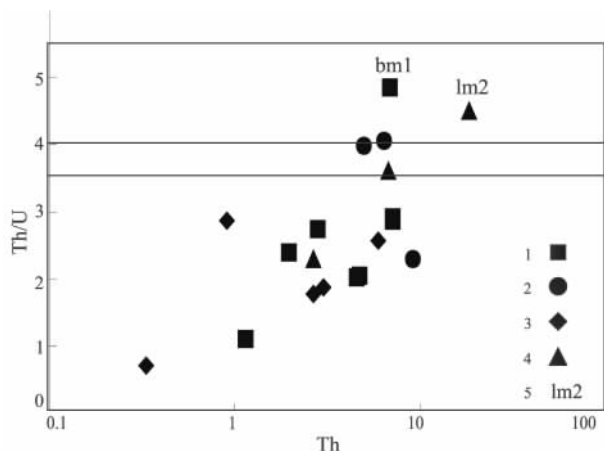


图 4 Th/U-Th 相关关系图

Fig. 4 Th/U vs. Th diagram (symbols as in Fig. 3)

据 Bostrom (1983) 研究,不同沉积区 logU 与 logTh 特征差异明显,logU-logTh 图解是用以划分不同沉积区的有效手段^[12]。以样品中 U 和 Th 的含量(表 2)为真数,以 10 为底求出 $\log_{10} U$ 和 $\log_{10} Th$ 的值,以 $\log_{10} Th$ 为横坐标值, $\log_{10} U$ 为纵坐标值,得出研究样品的 logU-logTh 三角图(图 5)。从图 5 中可直观地观察到,除下含矿层斗南锰矿样品(yd14b2)落点于普通远洋沉积区(OS)边缘外,其余样品均投影在 OS 区和石化的热水铁锰沉积区(FH)内。其中取自下含矿层的 5 个蒙自岩子脚样品(除 ym4)均落在 FH 区;取自下含矿层斗南米厘克矿段的样品投点于在 OS 区内或边缘;而上含矿层斗南白姑矿段锰矿和开远老乌锰矿样品散落于 OS 区和 FH 区内。

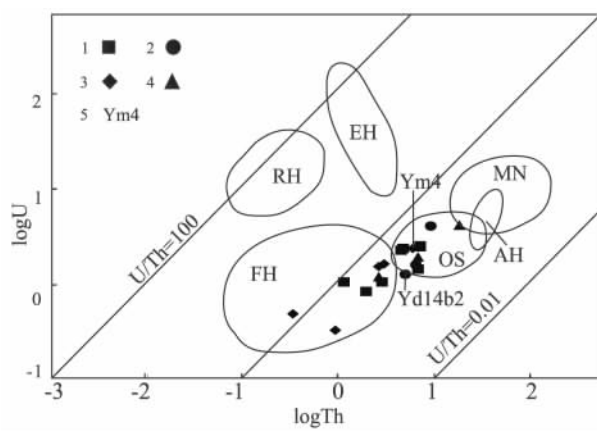


图 5 滇东南锰矿样品 logU-logTh 三角图(Bostrom, 1983)

RH: 红海热卤水沉积区; EH: 东太平洋热水沉积区; FH: 石化的热水铁锰沉积区; OS: 普通远洋沉积区; MN: 锰结核沉积区; AH: 铝土矿区

Fig. 5 LogU vs. logTh triangular diagram (modified from Bostrom, 1983)

RH = Red Sea hot brine sedimentary area; EH = Eastern Pacific hydrothermal sedimentary area; FH = hydrothermal Fe-Mn sedimentary area; OS = pelagic sedimentary area; MN = manganese concretion sedimentary area; AH = bauxite sedimentary area

4 讨论

(1) 根据 logTh-logU 的关系图(图 5),滇东南法郎组锰矿下含矿层蒙自岩子脚样品中除样品 ym4 外,均投点在石化的热水铁锰沉积区(FH),明显受热液作用控制。结合 REE 配分模式曲线 A 型和 B 型(图 2)可以发现,锰矿的正 Eu 异常与和 Ce 异常与含锰灰岩的负 Eu 异常和较强的负 Ce 异常为互补关系。含锰灰岩 δCe 值在 0.20~0.28 之间。典型海水的 δCe 在 0.1~0.4 范围内波动^[13],海相灰岩的稀土元素分布反映海水的特点,通常都出现强烈的负 Ce 异常,如侏罗纪礁灰岩 δCe 低至 0.14^[14],白垩纪海相灰岩约为 0.45^[15]。因此,研究区含锰灰岩可以代表当时水环境的 REE 特征,这就正好解释了在当时的强氧化条件下,海水中的 Ce^{3+} 被氧化成 Ce^{4+} 形成 CeO_2 沉淀于锰矿层中,形成了含锰灰岩中较强的 Ce 的负异常和锰矿样品中的正 Ce 异常。据 Michard 等报导^[16],东太平洋洋底热液喷口群中的热水就具有明显的正 Eu 异常, Galapagos 裂谷和红海热卤水池中金属沉积物亦具有类似的特征^[16-17]。由此表明,岩子脚锰矿样品中显示正 Eu 异常也是热液沉积的标志。

(2) 斗南米厘克矿段为下含矿层锰矿样品均投影于 OS 区中或者在 OS 区边缘,为普通远洋沉积环

境。其 REE 配分模式为 D 型、E 型(图 2),以 Ce 的弱负异常为共同特征。而典型海水均为负 Ce 弱负异常,说明锰矿中的 Ce 异常是来源于海水的。

(3) 砚山斗南白姑矿段和开远老乌同属于滇东南法郎组锰矿上含矿层。 $\log Th-\log U$ 关系图解、 $Th/U-U$ 相关关系和 REE 配分模式曲线反映,即使是同一含矿层或同一矿段的锰矿,其氧化还原环境、Ce 和 Eu 的异常特征存在差异。上含矿层锰矿形成的环境可能为热水沉积(图 4)。

5 结论

(1) 下含矿层蒙自岩子脚锰矿形成于热液作用下的强氧化环境;同含矿层的斗南米厘克矿段锰矿为典型的普通远洋沉积环境。

(2) 而作为上含矿层的砚山斗南白姑矿段和开远老乌锰矿沉积环境不稳定,部分锰矿受热液作用影响明显,推测上含矿层锰矿形成于热液-普通远洋的过渡环境;

(3) 锰矿的沉积环境受海侵的影响,由下含矿层-上含矿层,沉积环境由热液作用下的强氧化环境逐渐转变为普通远洋沉积环境。

参考文献:

- [1] 刘仁福,田宝坤,时子祯等. 滇东南地区中三叠世法郎组含锰建造的地球化学特征[J]. 地质找矿论丛,1988,3(4):1-19.
- [2] 于苏俊,杨立中,刘丹. 云南鹤庆锰矿控矿因素初步分析[J]. 矿物岩石,2000,20(1):30-37.
- [3] 郑荣才,张锦泉. 滇东南斗南锰矿重力流沉积及其聚锰环境[J]. 成都地质学院学报,1991,18(4):65-75.
- [4] 韩吟文,马振东. 地球化学[M]. 北京:地质出版社,2003.
- [5] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985. 321.
- [6] NESBITT H W. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite [J]. Nature, 1979, 279: 206-210.
- [7] 亨德森. 稀土元素地球化学[M]. 北京:地质出版社,1989. 201-203.
- [8] HOLSER W T. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleo-oceanography [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeo-ecology, 1997, 132: 309-323.
- [9] GERMAN C R, ELDERFIELD H. Application of the Ce anomaly as a paleo-redox indicator: the ground rules [J]. Paleooceanography, 1990, 5: 823-833.
- [10] 伊海生,彭军,夏文杰. 扬子东南大陆边缘晚前寒武纪古海洋演化的稀土元素记录[J]. 沉积学报,1995,13(4):131-137.
- [11] CARMALA N, GARZION E, MATT J, IKARI, BASU A R. Source of Oligocene to Pliocene sedimentary rocks in the Linxia basin in northeastern Tibet from Nd isotopes: Implications for tectonic forcing of climate [J]. Geological Society of America Bulletin, 2005, 117(9-10): 1156-1166.
- [12] BOSTROM K et al. Hydrothermal processes at seafloor spreading centers [M]. New York: Plenum Press, 1983. 535-555.
- [13] PIEPGRAS D J, JACOBSEN S B. The behavior of rare earth elements in seawater: precise determination of variations in the North Pacific water column [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(5): 1851-1862.
- [14] OLIVAREZ A M, OWEN R M. The europium anomaly of seawater: implications for fluvial versus hydrothermal REE inputs to the oceans [J]. Chemical Geology, 1991, 92(4): 317-328.
- [15] BELLANCA A, MASETT D, NERI R. Rare earth elements in limestone/marlstone couplets from the Albian-Cenomanian Cismon section (Venetian region, northern Italy): assessing REE sensitivity to environmental changes [J]. Chemical Geology, 1997, 141: 141-152.
- [16] MICHARD A et al. Rare earth elements and uranium in high-temperature solutions from East Pacific Rise hydrothermal vent field(13N) [J]. Nature, 1983(303): 795-797.
- [17] FRYER B J. Rare earth elements evidence in iron-formations for changing Precambrian oxidation states [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1977, 41: 361-367.

REE and trace elements U and Th from the manganese-bearing rock series in the Middle Triassic Falang Formation in southeastern Yunnan

YANG Wei^{1,2}, YI Hai-sheng¹, DU Qiu-ding³, XIA Guo-qing¹, DA Xue-juan¹

(1. *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;*

2. *No. 282 Geological Party, Sichuan Bureau of Geology for Nuclear Industry, Deyang 618000, Sichuan, China;*

3. *Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)*

Abstract: The REE compositions are explored by using ICP-MS method for 17 pieces of manganese ore samples and 2 pieces of manganese-bearing limestone samples from the manganese-bearing rock series in the Middle Triassic Falang Formation in southeastern Yunnan. The REE distribution patterns for all these samples display the patterns for the enrichment in LREE. The manganese ore samples are characterized by slight Ce (δCe values ranging from 0.79 to 1.29) and Eu (δEu values ranging from 0.84 to 1.20) anomalies. The manganese-bearing limestone samples are characterized by highly negative Ce anomalies and slightly negative Eu anomalies. It is concluded that the manganese-bearing rock series in the Middle Triassic Falang Formation in southeastern Yunnan are commonly subjected to hydrothermal processes and resulted from polyphase processes.

Key words: southeastern Yunnan; Falang Formation; manganese deposit; REE; U; Th