

# 攀枝花铁矿床稀土元素特征\*

## Characteristics of Rare Earth Elements of Panzhihua Iron Deposit

温春齐<sup>1</sup> 曹志敏<sup>2</sup> 罗小军<sup>1</sup> 霍艳<sup>1</sup>

(1 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2 青岛海洋大学, 山东 青岛 266003)

Wen Chunqi<sup>1</sup>, Cao Zhimin<sup>2</sup>, Luo Xiaojun<sup>1</sup> and Huo Yan<sup>1</sup>

(1 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003, Shandong, China)

**摘要** 通过对攀枝花铁矿床母岩辉长岩岩石、铁矿石及钛磁铁矿和黄铁矿矿物的稀土元素中子活化测试分析及计算的有关参数统计表明, 从围岩→赋矿岩石→铁矿石→钛磁铁矿→黄铁矿, 其稀土元素总量 ( $\Sigma$  REE)、轻重稀土比值 (LREE/HREE)、含量比值 (La/Yb、Ce/Yb、Eu/Sm 等)、标准化比值 ( $La_{cn}/Yb_{cn}$ 、 $Ce_{cn}/Yb_{cn}$ ) 及异常系数  $\delta Eu$ 、 $\delta Ce$  平均值均具逐渐降低的趋势, 而中稀土、重稀土百分量却具有逐渐增高的特征, 显示其成岩、成矿过程是一个轻稀土元素逐渐亏损, 而中稀土、重稀土元素相对富集的过程。

**关键词** 稀土元素 稀土参数 铁矿床 攀枝花

攀枝花铁位于著名的攀枝花—西昌成矿带上。该成矿带内存在一套古老变质岩系, 发育着一系列历史悠久、规模巨大的南北向或近于南北向断裂或断裂带。沿着南北向断裂或断裂带发育有不同时期、不同类型的岩浆岩, 形成一个规模宏伟的岩浆杂岩带。区内出露岩浆岩主要有辉长岩、正长岩、花岗岩、混合岩及伟晶岩脉、花岗岩脉。与矿化有关的岩浆岩为辉长岩体<sup>①</sup>。到目前为止, 在区内发现含矿岩体 25 个, 其中攀枝花、白马、太和、红格四个岩体赋存大型钒钛磁铁矿矿床 (《中国矿床》编委会, 1994)。

### 1 矿床一般特征

攀枝花钒钛磁铁矿赋存于北东-南西向展布的辉长岩体中, 矿体亦呈北东-南西向展布。矿床自北东向南西由朱家包包、尖山、兰家火山和营盘山四个矿段组成。其中以朱家包包铁矿床规模最大。

矿体赋存于辉长岩体中下部, 呈层状、似层状产出, 产状与岩层产状一致。根据岩石韵律结构特征, 自下而上分为 IX、VIII、VII、VI、V、IV、III、II、I 等 9 个矿层, 其中 VIII、VI 矿层较大。

矿石中矿石矿物主要为钛磁铁矿、钛铁矿及少量硫化物, 脉石矿物主要为硅酸盐矿物 (如斜长石、辉石为主, 含少量角闪石、橄榄石) 及少量磷酸盐 (如氟磷灰石)、碳酸盐矿物等; 矿石中伴生有益成分除铁、钛、钒外, 还有钴、镍、铜、铬、锰、镓、铈等, 有害成分有硫、磷等。矿石的构造主要有浸染状、条带状、块状、流层状、斑杂状构造等; 矿石的结构主要有粒状镶嵌结构、嵌晶、海绵陨铁结构、反应边、交代结构、压碎结构、自形、半自形和他形粒状结构。

根据矿体形态、产状和矿石结构、组分及地球化学特征研究, 我们认为矿床的形成至少经历了 3 个矿化期, 即岩浆期、热液期和表生期, 其中主要成矿期为岩浆期<sup>②</sup>。

\* 本文得到国家自然科学基金 (NSFC 40072037) 和国家重点基础研究发展规划项目 (973-G1999043200) 资助

第一作者简介 温春齐, 男, 1945 年生, 博士, 教授, 从事矿床学教学与科研。

① 地质矿产部四川地质矿产勘查开发局攀枝花地质队. 1998. 四川省攀枝花市攀枝花钒钛磁铁矿朱家包包矿区生产勘探地质报告.

② 温春齐等. 2002. 攀枝花钒钛磁铁矿床地质特征.

## 2 岩石、矿石稀土元素特征

根据攀枝花铁矿床特征,本次对矿体围岩——辉长岩(2件)、钛磁铁矿矿石(4件)进行了中子活化稀土元素分析,其结果及部分计算参数见表1;经C1球粒陨石(Anders E and Grevesse N,1989)标准化后所作的稀土元素分布型式如图1所示。

表1 攀枝花铁矿床稀土元素及部分参数值

序号	样号	名称	$w_B$ 实测值/ $10^{-6}$									计算参数值								备注		
			La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	$\Sigma$ REE	L/H	La/Sm	Sm/Nd	Eu/Sm	La/Yb	Ce/Yb	$La_{cn}/Yb_{cn}$	$Ce_{cn}/Yb_{cn}$		$\delta$ Eu	$\delta$ Ce
1	P-2	辉长岩	44.1	106	80.8	17.9	4.98	3.06	3.93	0.46	325.53	5.52	2.46	0.22	0.28	11.21	26.95	7.76	7.26	0.858	0.809	围岩岩石
2	P8-2	辉长岩	6.73	9.63	7.68	2.35	0.81	0.44	1.25	0.12	37.92	3.37	2.86	0.31	0.34	5.384	7.70	3.73	2.075	1.042	0.618	矿层中的脉石
3	P8-3	铁矿石	0.31	0.66	0.78	0.15	0.03	0.05	0.18	0.02	3.24	1.85	2.07	0.19	0.2	1.72	3.67	1.19	0.99	0.456	0.673	VIII矿层下部
4	P8-5	铁矿石	2.1	4.22	3.39	1.01	0.43	0.29	0.12	0.01	15.72	3.27	2.08	0.30	0.43	17.5	35.17	12.12	9.47	1.25	0.742	VIII矿层中部
5	P8-7	铁矿石	8.84	6.05	9.32	2.06	0.72	0.29	0.74	0.05	35.53	4.87	4.29	0.22	0.35	11.95	8.18	8.27	2.20	1.053	0.306	VIII矿层上部
6	P4-2	铁矿石	5.48	4.82	6.23	1.18	0.26	0.29	0.65	0.05	24.65	3.90	4.64	0.19	0.22	8.43	7.41	5.84	2.00	0.652	0.381	IV矿层
7	P9-1	钛磁铁矿	5.05	2.3	5.12	1.69	0.33	0.62	1.96	0.11	26.84	1.44	2.99	0.33	0.19	2.58	1.17	1.78	0.32	0.585	0.208	IX矿层
8	9S-1	钛磁铁矿	1.09	2.51	5.06	0.55	0.18	0.14	0.13	0.01	12.83	5.12	1.982	0.11	0.33	8.385	19.31	5.80	5.20	0.922	0.424	IX矿层
9	P8-4	钛磁铁矿	1.48	1.85	2.71	0.88	0.26	0.31	1.48	0.19	14.72	1.15	1.68	0.32	0.29	1.0	1.25	0.69	0.34	0.861	0.434	VIII矿层
10	P8-1	钛磁铁矿	5.05	8.04	5.45	0.96	0.23	0.36	0.70	0.06	26.67	3.85	5.26	0.181	0.24	7.21	11.49	4.99	3.09	0.702	0.707	VIII矿层
11	P6-1	钛磁铁矿	5.76	5.83	10.2	1.47	0.24	0.48	1.25	0.14	34.44	3.21	3.92	0.14	0.16	4.61	4.66	3.19	1.26	0.487	0.350	VI矿层
12	P5-2	钛磁铁矿	3.41	5.68	3.77	1.03	0.14	0.18	0.2	0.02	18.04	4.97	3.311	0.27	0.14	17.05	28.4	11.80	7.65	0.399	0.736	V矿层
13	P4-2b	钛磁铁矿	5.83	2.23	8.22	1.45	0.29	0.43	0.89	0.06	27.13	2.92	4.021	0.18	0.2	6.55	2.506	4.53	0.67	0.596	0.149	IV矿层
14	B02-1	黄铁矿	0.32	0.3	0.77	0.22	0.06	0.07	0.11	0.01	3.03	1.54	1.45	0.29	0.273	2.91	2.73	2.014	0.735	0.678	0.306	VI矿层大脉
15	6SS-2	黄铁矿	0.28	0.36	0.72	0.18	0.03	0.06	0.2	0.02	3.01	1.34	1.56	0.25	0.167	1.40	1.80	0.969	0.485	0.397	0.406	VI矿层细脉

注:① 样品由成都理工大学核技术学院中子活化分析室周蓉生分析;② 计算稀土总量( $\Sigma$ REE)及轻重稀土比值(LREE/HREE)时Pr,Gd,Dy, Ho,Er,Tm的估计值采用内插外推法(陈德潜等,1990)求得;③ 球粒陨石标准据Anders et al.(1989);异常系数 $\delta$ Eu= $2 \times Eu_{cn}/(Sm_{cn}+Gd_{cn})$ ;  $\delta$ Ce= $2 \times Ce_{cn}/(La_{cn}+Pr_{cn})$

### 2.1 辉长岩的稀土元素

从表1统计的有关参数可见,攀枝花铁矿围岩稀土元素总量 $\Sigma$ REE变化较大(变异系数为58.5%),仅就2件样品而言,其变化范围从 $37.9 \times 10^{-6} \sim 325.5 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $181.7 \times 10^{-6}$ ;但LREE/HREE比值变化较小,变化范围从3.37~5.52,平均值为4.45,显示轻稀土富集的特点;在稀土元素分布型式图(Bou M,1991)(图1)上总体呈右倾型。稀土元素含量比值La/Sm变化(2.86和3.20)相近,平均值为2.66;Eu/Sm比值(0.28和0.34,平均值为0.31)、Sm/Nd比值(0.22和0.31,平均值为0.26)变化亦不大;La/Yb比值(5.38和11.21,平均值为8.30)、Ce/Yb比值(7.70和26.95,平均值为17.32)变化较大。标准化 $La_{cn}/Yb_{cn}$ 值分别为3.73和7.76,平均值为5.74; $Ce_{cn}/Yb_{cn}$ 值分别为2.08和7.26,平均值为4.67。异常系数 $\delta$ Eu为0.86和1.04,平均值为0.95; $\delta$ Ce为0.62和0.81(平均0.71);显示岩石中Eu为弱不亏损到低正偏异常,而Ce稍有亏损的特征。

据外围渡口务本、红格岩体和白马岩体6件辉长岩岩石稀土元素(杨瑞瑛等,1985)资料统计,辉长岩稀土元素总量 $\Sigma$ REE变化亦大(从 $24.0 \times 10^{-6} \sim 261.3 \times 10^{-6}$ ),平均值为 $177.0 \times 10^{-6}$ ,与攀枝花成矿岩体辉长岩的稀土元素总量( $181.7 \times 10^{-6}$ )基本一致;LREE/HREE比值变化较小,变化范围4.00~9.22,平均值为7.82,轻、重稀土比值明显高于攀枝花成矿岩体(4.45);与攀枝花成矿岩体一样为轻稀土富集型。

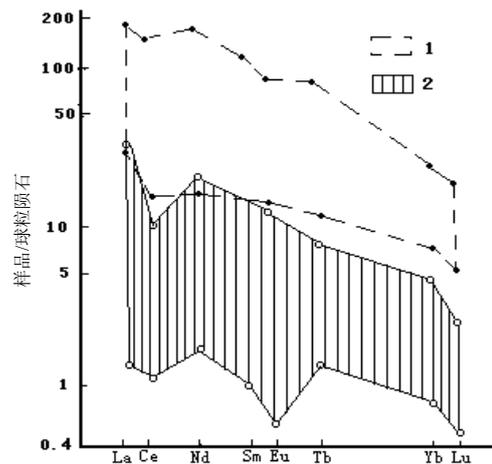


图1 岩石矿石的稀土元素分布型式图  
1—辉长岩岩石稀土元素变化范围;2—铁矿石稀土元素变化范围

## 2.2 矿石的稀土元素

4件铁矿石的稀土元素总量 $\Sigma\text{REE}$ 变化大,从 $3.24 \times 10^{-6} \sim 35.53 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $(19.78 \pm 13.68) \times 10^{-6}$ ,明显低于辉长岩的稀土元素总量( $181.7 \times 10^{-6}$ );铁矿石的LREE/HREE比值变化较大(变异系数为69.2%),从1.85~4.88,平均值为 $3.47 \pm 1.27$ ,显示轻稀土富集特点;铁矿石稀土元素含量La/Sm比值为2.07~4.64,平均值为 $3.27 \pm 1.39$ ;Eu/Sm比值为0.2~0.426,平均值为 $0.30 \pm 0.11$ ;显示轻重稀土富集的La/Yb比值为1.7~17.5,平均值为 $9.90 \pm 6.61$ ;Ce/Yb比值为3.67~35.17,平均值为 $13.61 \pm 12.56$ 。球粒陨石标准化值 $\text{La}_{\text{cn}}/\text{Yb}_{\text{cn}}$ 变化较大,为1.19~12.12,平均值为 $6.85 \pm 4.58$ ;  $\text{Ce}_{\text{cn}}/\text{Yb}_{\text{cn}}$ 值为0.99~9.47,平均值为 $3.67 \pm 3.91$ ,表明铁矿石具有轻稀土富集的特点。异常系数 $\delta\text{Eu}$ 变化为0.46~1.25,平均值为 $0.85 \pm 0.36$ ;  $\delta\text{Ce}$ 变化为0.31~0.74,平均值为 $0.53 \pm 0.21$ ,显示铁矿石具Eu负异常和弱正异常及明显的Ce负异常特点。在稀土元素分布型式图(图1)上,铁矿石稀土元素的上限近于辉长岩稀土元素的下限。

## 3 矿物的稀土元素特征

本次对攀枝花铁矿床中的钛磁铁矿矿物(7件)和黄铁矿矿物(2件)进行了中子活化稀土元素分析,其结果如表1所示;经C1球粒陨石标准化后所作的矿物的稀土元素分布型式如图2所示。

### 3.1 钛磁铁矿稀土元素特征

矿石中的钛磁铁矿测试统计分析表明,稀土元素总量 $\Sigma\text{REE}$ 变化不是太大(变异系数为34.3%),从 $12.83 \times 10^{-6} \sim 34.44 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $(22.95 \pm 7.88) \times 10^{-6}$ ,明显低于辉长岩的稀土元素总量为 $181.7 \times 10^{-6}$ ,而与矿石的稀土元素总量 $(19.78 \pm 13.68) \times 10^{-6}$ 相近,显示钛磁铁矿与矿石的亲缘关系;钛磁铁矿的LREE/HREE比值变化不大(变异系数为48.2%),从1.15~5.128,平均值为 $3.24 \pm 1.56$ ,显示轻稀土略有富集特点;钛磁铁矿稀土元素含量La/Sm比值为1.68~5.26,平均值为 $3.31 \pm 1.24$ ;Eu/Sm比值为0.14~0.33,平均值为 $0.22 \pm 0.07$ ;显示轻重稀土富集的La/Yb比值为1.00~17.05,平均值为 $6.77 \pm 5.23$ ;Ce/Yb比值为1.17~19.31,平均值为 $9.83 \pm 10.54$ 。稀土元素球粒陨石 $\text{La}_{\text{cn}}/\text{Yb}_{\text{cn}}$ 标准化值变化较大,为0.69~11.81,平均值为 $4.69 \pm 3.62$ ;  $\text{Ce}_{\text{cn}}/\text{Yb}_{\text{cn}}$ 值为0.34~7.65,平均值为 $2.65 \pm 2.84$ ,表明钛磁铁矿也略具轻稀土富集的特点。异常系数 $\delta\text{Eu}$ 变化从0.49~0.92,平均值为 $0.65 \pm 0.19$ ,变异系数为29.3%;  $\delta\text{Ce}$ 变化从0.15~0.43,平均值为 $0.43 \pm 0.30$ ,变异系数为52.5%;

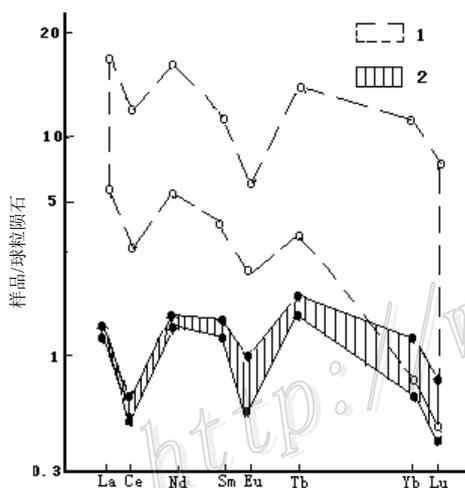


图2 矿物的稀土元素分布型式图

1—钛磁铁矿的稀土元素变化范围; 2—黄铁矿稀土元素变化范围

在稀土元素分布型式图(图2)上,亦表明钛磁铁矿明显具负Eu异常和负Ce异常的特点,但明显不同于沉积变质型和接触交代型的钛磁铁矿稀土元素的特点(温春齐,1989);与大洋中脊玄武岩中钛磁铁矿(Schock H H,1979)相比有相似之处,但稀土参数平均值均偏低。

### 3.2 黄铁矿稀土元素特征

2件黄铁矿中子活化分析(表1)测试统计分析表明,稀土元素总量变化很小(变异系数为4.7%),从 $3.03 \times 10^{-6} \sim 3.01 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $(3.02 \pm 0.01) \times 10^{-6}$ ,明显低于辉长岩、矿石及钛磁铁矿的稀土元素总量;黄铁矿的LREE/HREE比值变化不大(变异系数为9.6%)且为低值(平均值为 $1.44 \pm 0.14$ );稀土元素含量比值La/Sm为1.46~1.56,平均值为 $1.51 \pm 0.07$ ;Eu/Sm比值为0.17~0.27,平均值为 $0.22 \pm 0.07$ ;显示轻重稀土富集的La/Yb比值为1.4~2.91,平均值为 $2.15 \pm 1.07$ ;Ce/Yb比值为1.80~2.72,平均值为 $2.26 \pm 0.65$ 。稀土元素球粒陨石(La/Yb)<sub>cn</sub>标准化值变化较大,为0.97~2.01,平均值为 $1.49 \pm 0.74$ ;  $\text{Ce}_{\text{cn}}/\text{Yb}_{\text{cn}}$ 值为0.48~0.73,平均值为 $0.61 \pm 0.18$ ,表明黄铁矿不具明显轻稀土富集的特点。异常系数 $\delta\text{Eu}$ 变化较大(变异系数为37.0%),从0.40~0.68,平均值为 $0.54 \pm 0.20$ ;  $\delta\text{Ce}$ 变化从0.30~0.41,平均值为 $0.36 \pm 0.07$

(变异系数为 20.1%); 表明黄铁矿更具负Eu异常和明显负Ce异常的特点。

## 4 讨论与结论

对攀枝花铁矿床各类样品稀土元素参数平均值如表 2。通过分析研究认为:

表 2 攀枝花钒钛磁铁矿各类样品稀土元素参数平均值

类型	样数	LREE	HREE	ΣREE	L/H	LR%	MR%	HR%	La/Yb	Ce/Yb	La/Sm	Eu/Sm	La <sub>n</sub> /Yb <sub>n</sub>	Ce <sub>n</sub> /Yb <sub>n</sub>	δEu	δCe
外围	6	158.21	18.81	177.02	7.82	84.73	12.18	3.09	23.1	47.57	3.198	0.65	15.99	12.81	1.981	0.732
岩石	4	152.42	29.30	181.72	4.45	79.06	14.50	6.43	8.30	17.33	2.66	0.31	5.74	4.67	0.950	0.713
铁矿石	4	15.81	3.97	19.78	3.47	74.34	17.34	8.32	9.90	13.61	3.27	0.30	6.85	3.66	0.853	0.525
钛磁铁矿	7	16.73	6.23	22.95	3.24	71.69	16.88	11.44	6.77	9.83	3.31	0.22	4.69	2.65	0.650	0.430
黄铁矿	2	1.78	1.24	3.02	1.44	57.49	26.92	15.58	2.16	2.26	1.50	0.22	1.49	0.61	0.538	0.355

注: (1) 矿区外围辉长岩体岩石据杨瑞瑛等 (1985) 资料统计; (2) L/H 为轻重稀土比值, LR% 为轻稀土百分量, MR% 为中稀土百分量, HR% 为重稀土百分量。

(1) 该矿床稀土元素总量 ( $\Sigma\text{REE}/10^{-6}$ ) 变化较大 (3.01~325.53)。各类样品中, 其平均值以辉长岩最高(为 181.72)与外围辉长岩  $\Sigma\text{REE}$  平均值 (177.02) 相近; 次为铁矿石 (19.78) 和钛磁铁矿 (22.98), 两者平均值相近; 而黄铁矿平均值 (3.02) 最低。由此显示本区成岩成矿过程是一个稀土元素总量降低的过程。

(2) 轻重稀土元素 (LREE/HREE) 比值平均值, 从外围辉长岩, 到矿区辉长岩、铁矿石, 再到钛磁铁矿、黄铁矿, 随着成岩、成矿过程的继续, LREE/HREE 具有逐渐降低的趋势; 经统计稀土元素三分量, 随着成岩成矿过程的继续, LREE 百分比具有逐渐降低的趋势, 而中稀土、重稀土却具有逐渐增大的趋势。显示本区成岩成矿过程是一个轻稀土元素逐渐亏损, 而中稀土、重稀土却逐渐相对富集的演化过程 (表 2)。

(3) 元素含量比值如 La/Yb、Ce/Yb、La/Sm 在成矿过程中亦具有逐渐降低的趋势, 但岩石、铁矿石及钛磁铁矿其相应比值都相近, 表明可能属同一成矿期产物; 而黄铁矿的同类比值显然较低, 暗示其属另一成矿期产物。稀土元素标准化比值如  $\text{La}_{cn}/\text{Yb}_{cn}$ 、 $\text{Ce}_{cn}/\text{Yb}_{cn}$  亦具有相似特点。

(4) 异常系数, 从外围辉长岩、矿区辉长岩、铁矿石、钛磁铁矿到黄铁矿, 其异常系数  $\delta\text{Eu}$ 、 $\delta\text{Ce}$  平均值具有规律性降低的趋势。

综上所述, 通过对攀枝花铁矿各类稀土元素测试分析研究认为, 攀枝花铁矿床形成过程中, 稀土元素具有明显的规律性变化: 从岩石、铁矿石、钛磁铁矿、黄铁矿, 其  $\Sigma\text{REE}$ 、LREE/HREE、La/Yb、Ce/Yb、La/Sm、 $\text{La}_{cn}/\text{Yb}_{cn}$ 、 $\text{Ce}_{cn}/\text{Yb}_{cn}$  及  $\delta\text{Eu}$ 、 $\delta\text{Ce}$  等计算参数平均值均具有逐渐降低, 而中稀土、重稀土却具有增高的趋势, 显示其成岩-成矿过程是一个统一的系统。按稀土元素特征, 可将其成岩-成矿过程分为 3 个期次: 即成岩期 (形成辉长岩体)、主成矿期 (岩浆期形成铁矿) 和次成矿期 (热液期形成硫化物矿)。主成矿期形成的铁矿石和钛磁铁矿, 其稀土元素的各种计算参数及其平均值十分相近, 在稀土元素分布型式图上其分布范围也相近, 显示其为同一成矿期的产物。与外围辉长岩岩石的同类值相比, 除中稀土、重稀土百分量平均值高于岩石外, 其余均明显低于岩石, 但矿层中的辉长岩 (P8-2) 却与铁矿石、钛磁铁矿的稀土元素参数值相似, 显示矿层中的岩石、铁矿石和钛磁铁矿是同期产物。热液期形成的黄铁矿与主成矿期相比, 显示其为次成矿期产物。

野外期间得到攀枝花矿业公司及朱家包包铁矿胡国辉科长、杜永平高工的大力支持, 室内研究得到徐新煌教授的热心帮助, 在此深表谢意。

## 参 考 文 献

- 陈德潜, 陈 刚. 1990. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社.
- 温春齐. 1989. 铜官山铁铜矿床中显微球粒磁铁矿的发现及其成因意义[J]. 矿床地质, 8 (4): 61~65.
- 杨瑞瑛, 黄忠祥, 李继亮. 1985. 攀西裂谷火成岩组合的微量元素地球化学[J]. 中国科学, B 辑, 9: 844~854.
- 《中国矿床》编委会. 1994. 中国矿床[M]. 北京: 地质出版社. 401~407.
- Anders E. and Grevesse N. 1989. Abundances of the elements meteoritic and solar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53 (1): 197~214.
- Schock, H. H. 1979. Distribution of rare-earth and other trace elements in magnetites[J]. *Chemical Geology*, 26 (1/2): 119~133.
- Bou M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium[J]. *Chemical Geology*, 93 (3/4): 219~230.