

# REE Geochemical Characteristics of Sedimentary Facies

Rongge Xiao<sup>1</sup>, Jingdang Liu<sup>2</sup>, Hongcai Fei<sup>3</sup>, Fengjun Bai<sup>4</sup>, Qing Zhao<sup>1</sup>, Fan Yang<sup>1</sup>, Meng Cui<sup>1</sup>, Hui Meng<sup>1</sup>, Tengfei Zhang<sup>1</sup>, Yuqi Jiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience (Beijing), Beijing

<sup>2</sup>Liaoning Chemical Geology Exploration Institute, Jinzhou Liaoning

<sup>3</sup>Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing

<sup>4</sup>Henan Provincial Non-ferrous Metals Geological and Mineral Resources Bureau, Zhengzhou Henan

Email: [rgxiao@163.com](mailto:rgxiao@163.com)

Received: Jun. 9<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2015; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

Sedimentary facies study is a base of research on sedimentary deposits. In this paper, a systematic study is carried out on REE geochemical characteristics of different sedimentary facies, followed by the exploration about evolution of REE in supergene environment. Based on the analysis of the REE distribution patterns about Chile trench sediments, Mesozoic continental sedimentary rocks in Mayang and tidal-flat phosphorite, a regular pattern is summarized that REE distribution features vary among different sedimentary facies. More specifically, the correlations of LRE/HRE-ΣREE and δEu-LRE/HRE are significantly different among the rocks of different sedimentary source and sedimentary facies. Marine sea sediments show a positive correlation in LRE/HRE-ΣREE diagram and a negative correlation in δEu-LRE/HRE diagram, while for the terrigenous continental sediments, the conditions are just the opposite. Furthermore, marine mixed-source sediments display a curvilinear correlation in LRE/HRE-REE and δEu-LRE/HRE diagrams. As Zr/Y ratios have some influence on the correlations of LRE/HRE-REE and δEu-LRE/HRE, the correlations and REE patterns can be used to distinguish different sedimentary facies.

## Keywords

Sedimentary Facies, Trench Sediments, Continental Sediments, Tidal-Flat Phosphorite

## 沉积相稀土地球化学标志

肖荣阁<sup>1</sup>, 刘敬党<sup>2</sup>, 费红彩<sup>3</sup>, 白凤军<sup>4</sup>, 赵青<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 崔蒙<sup>1</sup>, 孟辉<sup>1</sup>, 张腾飞<sup>1</sup>, 姜雨奇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京

<sup>2</sup>辽宁省化工地质勘查院, 辽宁 锦州

<sup>3</sup>中国地质科学院, 北京

<sup>4</sup>河南省有色金属地质矿产局, 河南 郑州

Email: [rgxiao@163.com](mailto:rgxiao@163.com)

收稿日期: 2015年6月9日; 录用日期: 2015年6月23日; 发布日期: 2015年6月29日

## 摘要

沉积相研究是沉积矿床研究的基础, 本文系统研究了各种沉积相的稀土元素地球化学特征, 探讨了表生环境下稀土元素演化规律。根据大洋铁锰结核与大石桥菱镁矿碳酸盐岩、智利与冲绳海沟沉积物、麻阳中生代陆相沉积岩及潮坪相磷块岩等沉积相稀土元素分配特征分析, 发现不同沉积相稀土分配特征不同, 尤其是不同沉积物源及沉积相岩石的 $LRE/HRE-\Sigma REE$ 、 $\delta Eu-LRE/HRE$ 相关性不同。本文第一次把沉积相物质来源和沉积环境结合进行分类, 分为海源海相、陆源陆相、陆源海相及海陆过渡相四种沉积相。海源海相沉积物以大洋铁锰结核与大石桥菱镁质碳酸盐岩为代表, 铁锰结核的 $LRE/HRE-\Sigma REE$ 、 $\delta Ce-LRE/HRE$ 正相关,  $\delta Eu-LRE/HRE$ 负相关, 而菱镁质碳酸盐岩的 $LRE/HRE-\Sigma REE$ 、 $\delta Ce-LRE/HRE$ 、 $\delta Eu-LRE/HRE$ 均为正相关, 两者的差异反映了氧化还原条件的差异。陆源陆相沉积物以麻阳中生代沉积岩为代表,  $LRE/HRE-\Sigma REE$ 负相关,  $\delta Eu-LRE/HRE$ 正相关。陆源海相沉积物以海沟碎屑沉积物为特征, 碎屑物以陆缘为主, 海源物质形成胶结物,  $LRE/HRE-\Sigma REE$ 、 $\delta Eu-LRE/HRE$ 都呈曲线相关型式。海陆过渡相以磷块岩为代表具有海陆物质混合的特点, 钙磷质属于海源物质, 而碎屑物属于陆源物质,  $LRE/HRE-\Sigma REE$ 、 $\delta Eu-LRE/HRE$ 都表现为曲线相关型式。岩石中 $Zr/Y$ 比值影响 $LRE/HRE-\Sigma REE$ 、 $\delta Eu-LRE/HRE$ 的相关性, 因此 $LRE/HRE-\Sigma REE$ 、 $\delta Eu-LRE/HRE$ 的相关演化特征及其稀土配分模式可以作为判别沉积相的重要标志。

## 关键词

沉积相, 海源海相, 陆源陆相, 潮坪相磷块岩

## 1. 引言

地表沉积环境可以分为陆相沉积、海相沉积及海陆过渡相沉积不同的沉积环境, 人们探讨了很多判别沉积环境的地球化学方法, 根据元素地球化学性质的不同, 探讨不同沉积环境元素的富集规律, 从而分析其指相意义, 作为分析判断沉积相的标志。作者根据多年来对沉积矿床及沉积环境的研究经验, 及积累的沉积地球化学资料, 结合国内外近几年对不同沉积环境的地球化学研究资料, 系统分析总结了各种沉积环境稀土元素的分配特征, 发现不同沉积环境的稀土配分模式是不同的, 其配分特征可以作为沉积环境的判别标志。

根据稀土地球化学特征反映, 可以对沉积物成因进行划分, 分为海源海相、陆源陆相、陆源海相及海陆过渡相四种沉积相。海源海相是指大洋底部化学沉积铁锰结核及碳酸盐岩, 沉积物质来自海水的化学结晶沉淀; 陆源海相是海相碎屑沉积物, 以海沟沉积为特征, 具有浊流沉积性质, 来自大陆碎屑物在大洋环境形成的沉积物; 陆源陆相是指沉积物质来源陆壳风化物, 并且在大陆盆地环境形成的沉积物; 海陆过渡相是指在滨浅海环境沉积物质来源相对复杂, 可以具有海源物质, 也有陆源物质混杂一起, 在海相环境共同沉积。

本文以大洋结核、大石桥菱镁质碳酸盐岩、湖南麻阳盆地中生代陆相沉积岩、智利和冲绳海沟现代沉积物发表的稀土测试数据及对我国一些典型海陆过渡相磷块岩实际测试的稀土结果, 进行稀土地球化学

特征对比研究, 总结不同沉积相环境沉积物的稀土配分模式。

本文所采用数据有关磷矿床稀土地球化学系中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所测试, 测试质量达到国际质量认证标准。其它有关数据系引用有关文献近 20 年来公开发表的文章, 数据都是由达到国家质量认证的实验室测试。

## 2. 稀土元素地球化学特征

14 个稀土元素中(不包括 Pm 和 Y), La-Eu 6 个元素称为轻稀土, 具有较大的离子半径(La 115 pm)和较高的电荷, 其性质类似 Th、U, 是不相容元素; Gd-Lu 8 个元素称为重稀土, 具有较小的离子半径(Lu 93 pm)和较低的电荷, 与某些矿物是相容的, 如在石榴石中可以替代  $Al^{3+}$  进入矿物晶格。在还原条件下, Eu 以  $Eu^{2+}$  存在时, 可以进入斜长石晶格替代  $Ca^{2+}$ , 因此斜长石中出现正铈异常, 而与斜长石平衡的其它相则出现铈亏损形成负铈异常。在海水及海相沉积物中, Ce 以  $Ce^{4+}$  存在, 经常与其它稀土元素分离, 出现负铈异常。

不同地质环境岩石的稀土地球化学特征显示, 大洋中脊幔源岩浆岩基本没有稀土分异, 稀土总量高于球粒陨石, 稀土配分曲线显示平缓直线, 而地壳尤其是上地壳岩石具有明显轻重稀土分异, 并出现负铈异常(图 1)。理论上分析, 由幔源岩到壳源岩, 稀土总量、轻重稀土比值逐渐增加, 铈异常与轻重稀土分异应该是同步的。但是根据世界各种岩浆岩的稀土元素特征值与  $SiO_2$  的相关性统计分析显示,  $\Sigma REE$ 、LRE/HRE 与  $SiO_2$  二次回归相关曲线在  $SiO_2$  在 45%~65% 之间为正相关, 65% 以后为负相关(图 2)。由于稀土总量与轻稀土 La 呈明显的直线正相关关系(图 3), 与重稀土 Lu 相关性不明显(图 4), 因此 LRE/HRE 的变化实际上主要受重稀土含量的影响。

与 LRE/HRE- $SiO_2$  关系图类似,  $\delta Eu-SiO_2$  的关系也显示在  $SiO_2 < 65\%$  时比较平缓, 在  $>65\%$  以后呈负相关(图 5)。这表明在基性岩到中性岩段稀土总量、轻重稀土分异及负铈异常是同步演化的, 而从中性岩到酸性岩段, 负铈异常与轻重稀土分异是不同步的。

南天山哈拉军山石炭系火山岩稀土分布特点比较符合这种规律(表 1), 玄武岩到安山岩段稀土总量升高, 轻重稀土分异与负铈异常同步出现, 玄武岩基本反映幔源岩浆特点, 总量低、轻重稀土分异不明显、没有铈异常, 安山岩表现为轻重稀土比值大、有负铈异常; 而花岗闪长岩和流纹岩稀土元素配分曲线图则显示斜率大的花岗闪长岩负铈异常弱, 斜率小的流纹岩负铈异常强(图 6)。LRE/HRE- $\Sigma REE$  表现为上凸曲线相关型式(图 7),  $\delta Eu-LRE/HRE$  表现下凹曲线相关型式(图 8)。这种特征表明, 基性岩到中性岩的稀土演化与中性岩到酸性岩的稀土演化是不同原因造成的。

对于沉积岩的稀土地球化学特征一般认为接近于上地壳岩浆岩特征, 用以判别沉积环境的就是认为滨海相潮汐带氧化环境沉积物会导致铈亏损出现负铈异常。但是从上面分析可能产生疑问, 地表沉积物稀土地球化学特征是接近基性岩到中性岩的演化系列, 还是接近中酸性岩到酸性岩的演化系列, 这是本文要探讨的重点。

## 3. 海源海相沉积物稀土地球化学

海源海相沉积物是指沉积物质来自海水溶解物在海洋环境经化学沉积作用形成的物质, 本文介绍深海相铁锰结核与浅海相碳酸盐岩的稀土地球化学特征, 海源海相沉积物的重要特征是具有正铈异常, 并且与轻重稀土比值呈正相关关系。

### 3.1. 东太平洋铁锰结核稀土地球化学

大洋铁锰结核是海底化学沉积物, 因此属于海源海相沉积物质。铁锰结核多呈嵌入式生长在沉积物的表层, 主要组成矿物主要是粉末状铁锰氧化物。

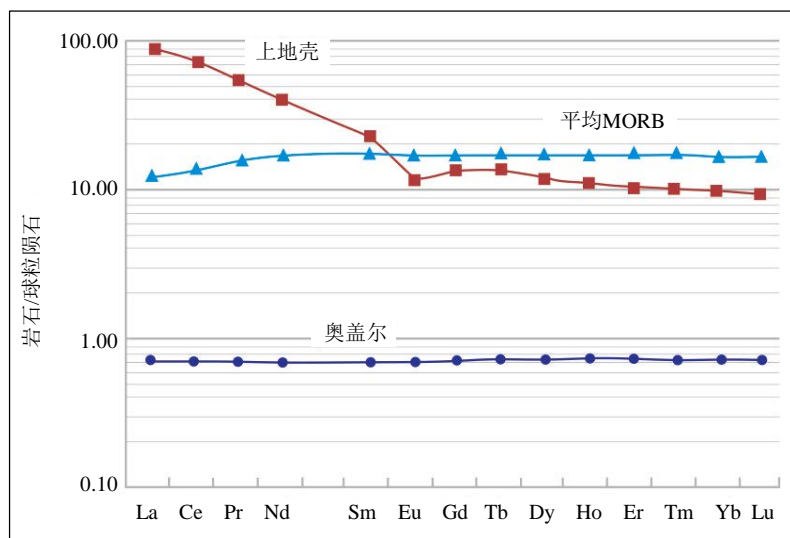


Figure 1. Chondrite-normalized REE distribution patterns for Upper crust, average MORB, and Orgueil meteorite [3]

图 1. 上地壳、大洋玄武岩及奥盖尔陨石稀土配分曲线图[3]

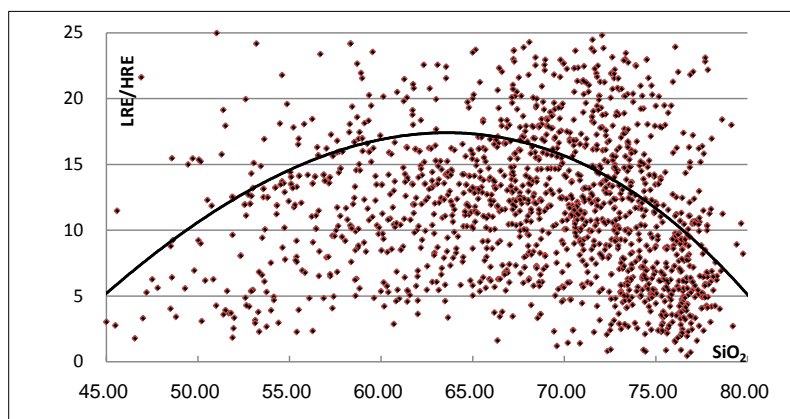


Figure 2. LRE/HRE versus  $\text{SiO}_2$  contents graph for the global magmatic rocks

图 2. 世界岩浆岩 LRE/HRE- $\text{SiO}_2$  相关性图解

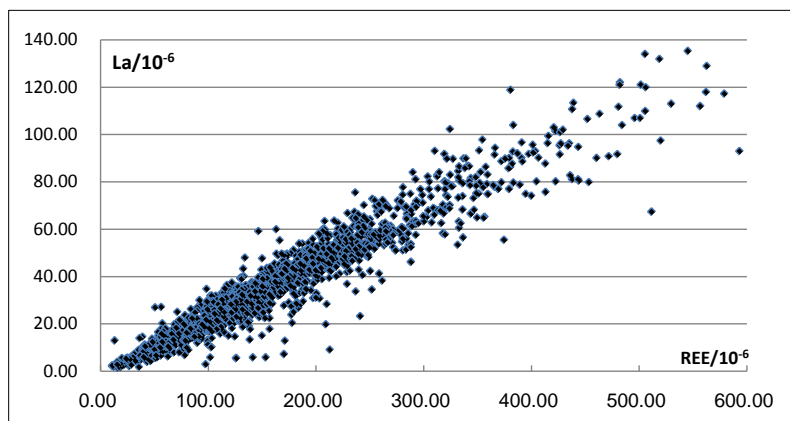


Figure 3. La versus  $\Sigma\text{REE}$  (ppm) contents graph for the global magmatic rocks

图 3. 世界岩浆岩 La- $\Sigma\text{REE}$  相关性图解

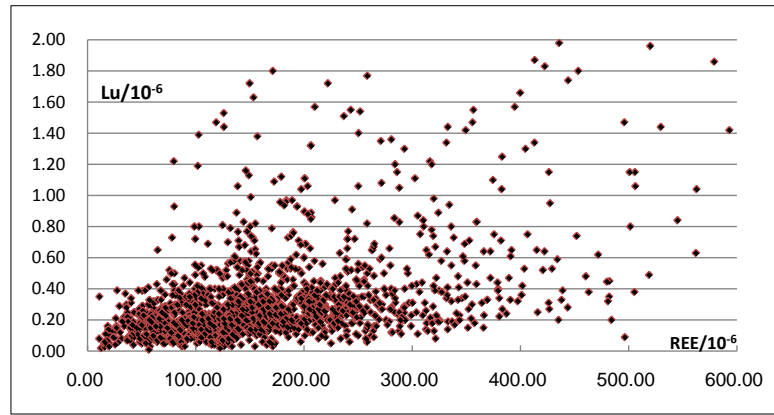


Figure 4. Lu versus  $\Sigma$ REE (ppm) graph for the global magmatic rocks  
 图 4. 世界岩浆岩 Lu- $\Sigma$ REE 相关性图解

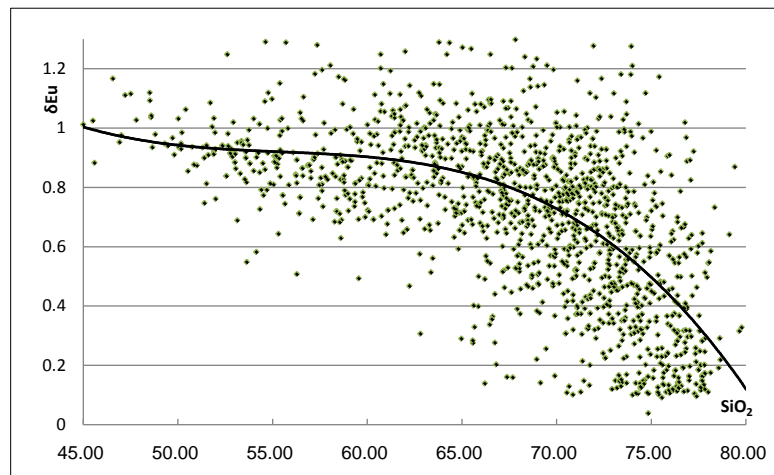


Figure 5.  $\delta$ Eu versus  $\text{SiO}_2$  graph for the global magmatic rocks  
 图 5. 世界岩浆岩  $\delta$ Eu- $\text{SiO}_2$  相关性图解

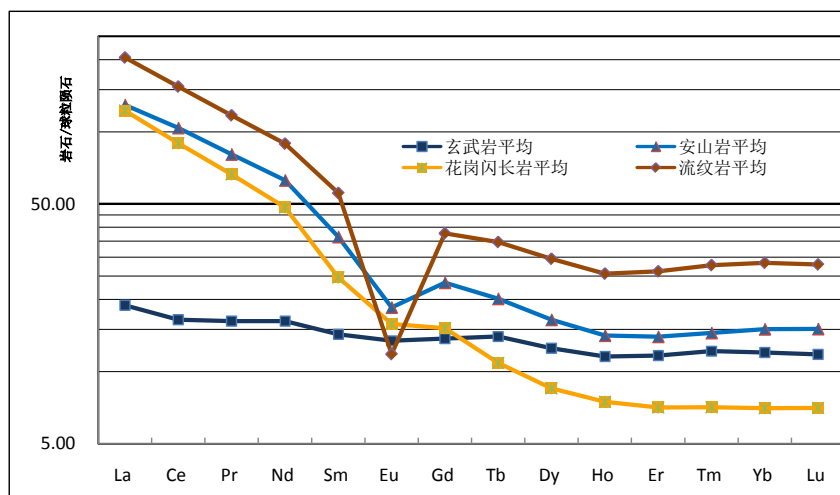
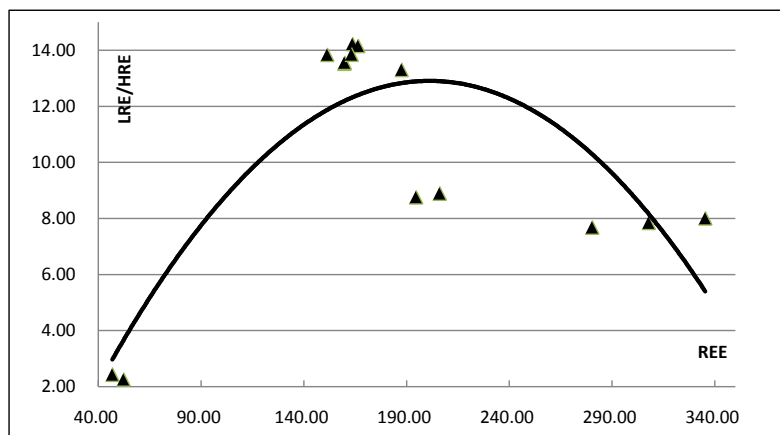
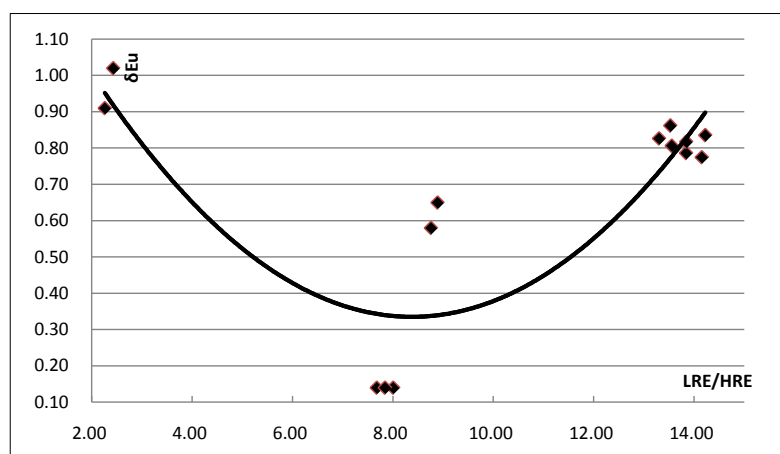


Figure 6. Chondrite-normalized REE distribution patterns for Carboniferous magmatic rocks from Halajunshan in South Tianshan Mountains  
 图 6. 南天山哈拉军山石炭系岩浆岩稀土配分曲线图



**Figure 7.** LRE/HRE versus REE (ppm) contents graph for Carboniferous magmatic rocks from Halajunshan in South Tianshan Mountains  
**图 7.** 南天山哈拉军山石炭系岩浆岩 LRE/HRE-REE 相关性图解



**Figure 8.**  $\delta$ Eu versus LRE/HRE graph for Carboniferous magmatic rocks from Halajunshan in South Tianshan Mountains  
**图 8.** 南天山哈拉军山石炭系岩浆岩  $\delta$ Eu-LRE/HRE 相关性图解

**Table 1.** Whole-rock composition of Carboniferous magmatic rocks of Halajunshan in South Tianshan Mountains  
**表 1.** 南天山哈拉军山石炭系岩浆岩化学成分表

	玄武岩			安山岩			花岗闪长岩			流纹岩		
	玄 1	玄 2	平均	安 1	安 2	平均	花 1	花 2	平均	流 1	流 2	平均
SiO <sub>2</sub>	42.59	47.32	44.96	59.55	61.38	60.47	63.53	61.69	62.87	74.55	77.54	76.05
TiO <sub>2</sub>	1.10	1.07	1.09	0.70	0.73	0.72	0.56	0.62	0.60	0.15	0.14	0.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.97	13.29	12.63	14.62	15.13	14.88	14.92	15.17	15.00	15.15	13.19	14.17
TFeO	22.47	18.03	20.25	8.95	10.67	9.81	3.56	4.19	3.88	2.73	2.25	2.49
MnO	0.19	0.19	0.19	0.11	0.06	0.09	0.07	0.07	0.08	0.06	0.05	0.06
MgO	8.11	6.89	7.50	4.34	3.33	3.84	1.39	1.73	1.62	0.41	0.27	0.34
CaO	10.08	9.75	9.92	3.08	1.64	2.36	2.83	3.43	3.09	2.28	1.14	1.71
Na <sub>2</sub> O	2.22	2.19	2.21	3.78	3.31	3.55	5.35	5.29	5.08	0.21	0.29	0.25
K <sub>2</sub> O	0.42	0.64	0.53	3.30	2.73	3.02	6.35	5.89	6.03	5.45	5.05	5.25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.08	0.09	0.17	0.15	0.16	0.37	0.43	0.40	0.02	0.02	0.02

## Continued

灼失量							0.68	1.02	0.89			
总量	100.63	100.55	100.59	99.24	99.88	99.56	99.61	99.53	99.53	100.27	100.15	100.71
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	2.64	2.83	2.74	7.08	6.04	6.56	11.70	11.18	11.11	5.66	5.34	5.50
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.19	0.29	0.24	0.87	0.82	0.85	1.19	1.11	1.19	25.95	17.41	21.68
A/CNK	0.90	1.01	0.96	1.16	1.53	1.35	0.72	0.71	0.73	1.82	1.89	1.86
A/NK	2.91	3.09	3.00	1.49	1.80	1.65	0.95	1.01	1.01	2.42	2.21	2.32
Rb	14.90	25.70	20.30	126.60	129.20	127.90	145.43	115.60	122.83	283.00	267.70	275.35
Sr	137.30	175.10	156.20	519.40	173.00	346.20	1489.55	1751.58	1441.49	40.20	29.50	34.85
Ba	104.50	149.50	127.00	901.70	557.20	729.45	1737.66	1884.08	1528.76	272.30	371.80	322.05
Zr	66.60	65.30	65.95	200.30	209.80	205.05	273.53	219.56	275.11	239.40	207.10	223.25
Th	0.84	1.43	1.14	16.69	18.12	17.41	16.12	10.53	15.41	43.05	34.09	38.57
U	0.40	0.44	0.42	4.33	4.41	4.37	3.41	2.39	3.01	4.93	4.26	4.60
Y	19.64	23.09	21.37	28.07	26.71	27.39	14.24	14.04	14.31	53.68	46.73	50.21
Nb	4.68	5.20	4.94	14.11	15.27	14.69	24.42	17.24	22.43	24.26	21.51	22.89
Ta	0.35	0.36	0.36	1.10	1.15	1.13	1.96	1.15	1.62	2.01	1.88	1.95
Cr	207.90	203.50	205.70	68.40	71.00	69.70	12.48	11.49	14.82	2.50	2.50	2.50
Ni	102.70	95.98	99.34	20.20	24.29	22.25	4.85	6.18	6.57	2.57	2.83	2.70
Co	56.90	48.59	52.75	23.85	24.41	24.13	9.83	11.26	10.63	1.41	1.36	1.39
Rb/Sr	0.11	0.15	0.13	0.24	0.75	0.37	0.10	0.07	0.09	7.04	9.07	8.06
Sr/Ba	1.31	1.17	1.23	0.58	0.31	0.47	0.86	0.93	0.95	0.15	0.08	0.11
Th/U	2.10	3.25	2.70	3.85	4.11	3.98	4.73	4.41	5.09	8.73	8.00	8.37
Zr/Y	3.39	2.83	3.09	7.14	7.85	7.49	19.21	15.64	19.11	4.46	4.43	4.45
La	5.58	6.13	5.86	41.16	39.01	40.09	38.43	36.47	37.91	71.86	59.80	65.83
Ce	12.73	13.88	13.31	86.17	81.58	83.88	72.35	70.27	72.35	142.05	117.12	129.59
Pr	1.90	2.06	1.98	10.14	9.51	9.83	7.76	8.13	8.10	15.53	12.90	14.22
Nd	9.35	10.12	9.74	38.93	36.46	37.70	28.66	27.67	29.04	56.87	48.11	52.49
Sm	2.58	3.00	2.79	7.35	6.86	7.11	4.57	4.88	4.82	11.24	9.67	10.46
Eu	0.98	1.00	0.99	1.48	1.24	1.36	1.14	1.25	1.16	0.50	0.44	0.47
Gd	3.35	3.76	3.56	6.32	5.84	6.08	3.81	4.03	3.93	9.99	8.63	9.31
Tb	0.60	0.73	0.67	0.99	0.92	0.96	0.51	0.52	0.52	1.72	1.46	1.59
Dy	3.69	4.37	4.03	5.40	5.20	5.30	2.67	2.70	2.74	10.01	8.57	9.29
Ho	0.75	0.91	0.83	1.04	0.99	1.02	0.50	0.52	0.54	1.93	1.68	1.81
Er	2.24	2.66	2.45	3.03	2.85	2.94	1.41	1.42	1.49	5.70	5.01	5.36
Tm	0.35	0.44	0.40	0.46	0.48	0.47	0.23	0.21	0.23	0.92	0.82	0.87
Yb	2.31	2.71	2.51	3.12	3.16	3.14	1.40	1.38	1.47	6.06	5.34	5.70
Lu	0.35	0.41	0.38	0.48	0.49	0.49	0.22	0.21	0.23	0.89	0.80	0.85
∑REE	46.77	52.18	49.48	206.08	194.60	200.34	163.66	159.66	164.52	335.29	280.34	307.82
LRE/HRE	2.43	2.26	2.35	8.89	8.76	8.83	14.22	13.53	13.78	8.01	7.68	7.85
δCe	0.95	0.95	0.95	1.00	1.01	1.01	1.01	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99
δEu	1.02	0.91	0.97	0.65	0.58	0.62	0.84	0.86	0.82	0.14	0.14	0.14

注: 根据文献[4] [5] [8]-[10] [17]的数据计算。

### 3.1.1. 铁锰结核层纹化学成分变化

根据中国“大洋一号”2003年东太平洋深海平原取得的ET0303样品(8°35'01"N, 154°03'06"W)分析, 从多层结核内核向外层, 样品号依次分为ET031、ET032、ET033和ET034四层分别分析其化学成分(表2), 化学成分没有明显递变规律。结核MnO平均含量40.99%, FeO平均含量5.36%, MnO/FeO比值平均9.13, 富含Cu、Ni等金属元素[6]。

铁锰结核稀土元素含量较高, 平均 $578.46 \times 10^{-6}$ , 远高于一般的沉积物稀土含量。稀土元素一般为吸附状态存在, 稀土总量与MnO/FeO比值呈现负相关性(图9), 表明FeO是稀土的主要吸附剂。氧化铁也导致铈富集,  $\delta\text{Ce}$ 值与MnO/FeO比值呈负相关性(图10), 高氧化铁形成铈正异常的稀土配分曲线[1]。铁锰结核一个重要的稀土地球化学特征是具有明显的正铈异常, 并且 $\delta\text{Ce}$ 值与LRE/HRE呈正相关性(图11), 表现在稀土配分曲线上显示斜率大的曲线正铈异常强, 而斜率小的曲线铈异常弱, 都具有负铈异常(图12)。

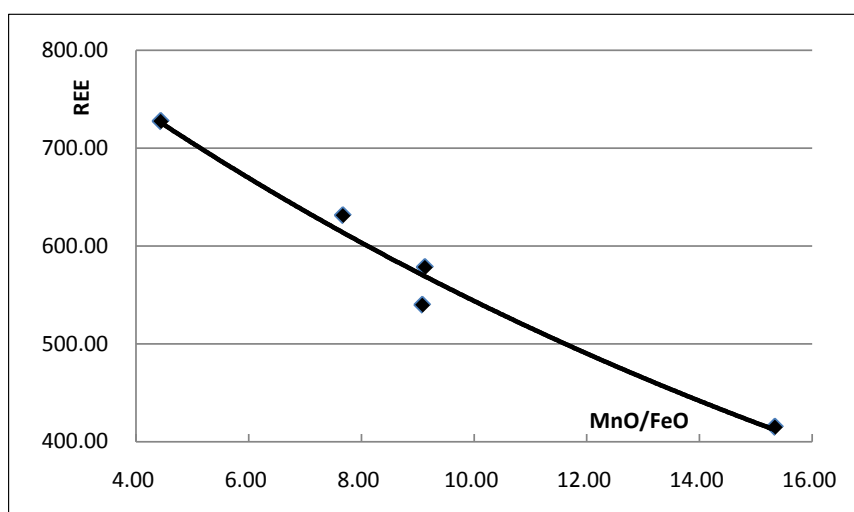


Figure 9. REE (ppm) versus MnO/FeO graph of Fe-Mn nodules

图9. 铁锰结核 REE-MnO/FeO 相关曲线

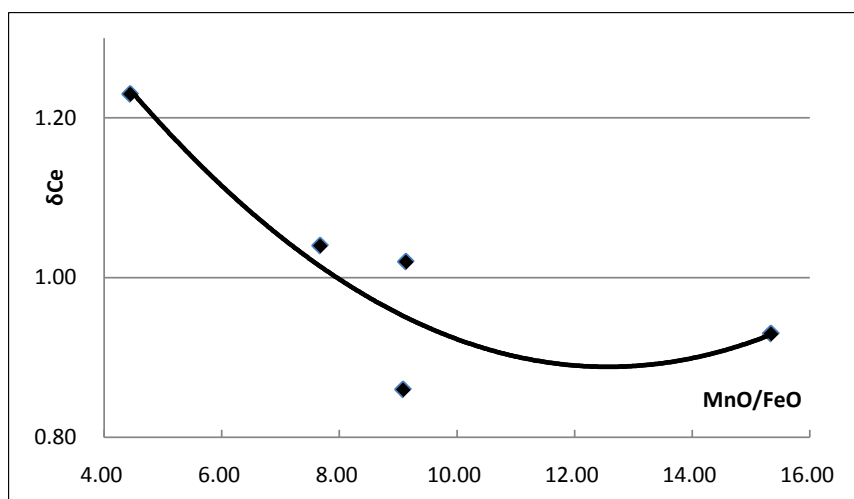


Figure 10.  $\delta\text{Ce}$  versus MnO/FeO graph of Fe-Mn nodules

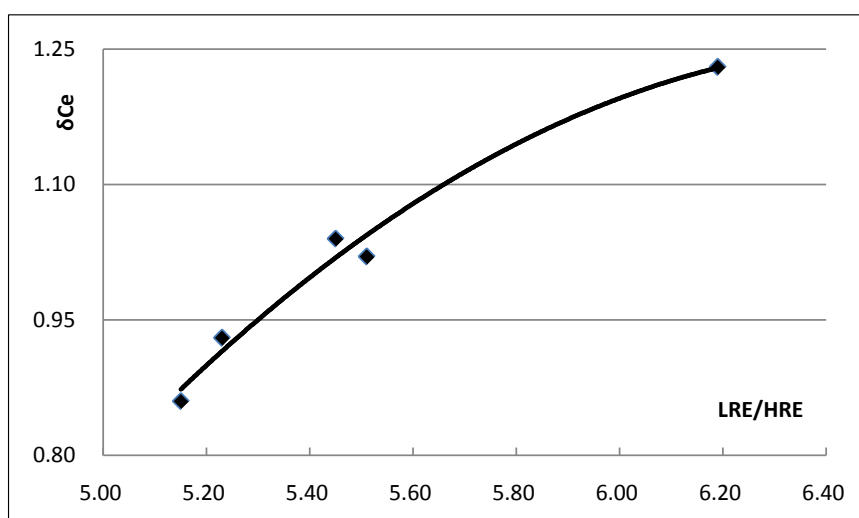
图10. 铁锰结核  $\delta\text{Ce}$ -MnO/FeO 相关曲线



**Table 2.** The chemical compositions of Fe-Mn nodules in eastern Pacific  
**表 2.** 东太平洋铁锰结核化学成分表\*

样品	岩石化学/%					样品	稀土元素/ $10^{-6}$					海水
	ET031	ET032	ET033	ET034	平均		ET031	ET032	ET033	ET034	平均	
MnO	41.84	41.53	42.06	38.53	40.99	La	102.70	92.74	65.24	110.90	92.90	4.26
FeO	5.45	4.57	2.74	8.68	5.36	Ce	234.30	178.90	142.30	306.30	215.45	1.46
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.35	0.27	0.71	0.47	Pr	28.84	26.77	20.63	32.46	27.18	0.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.73	4.75	3.85	4.17	4.38	Nd	128.10	116.80	91.01	133.90	117.45	2.64
MgO	4.88	4.51	3.87	3.06	4.08	Sm	32.36	30.13	23.95	34.86	30.33	0.49
CaO	2.07	1.88	1.93	2.39	2.07	Eu	7.21	6.78	5.29	7.84	6.78	0.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.32	0.3	0.28	0.36	0.32	Gd	30.90	27.60	21.50	32.70	28.18	0.80
Ni	1.78	1.4	1.31	1.4	1.47	Tb	4.75	4.38	3.37	5.20	4.43	0.13
Cu	2.01	1.62	1.35	1.05	1.51	Dy	26.43	24.00	18.17	27.13	23.93	1.04
Co	0.33	0.15	0.13	0.19	0.20	Ho	5.28	4.73	3.58	5.39	4.75	0.31
Zn	0.15	0.15	0.22	0.16	0.17	Er	13.90	12.20	9.11	14.10	12.33	1.08
Sr	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	Tm	2.00	1.78	1.28	1.99	1.76	0.17
Ba	0.32	0.35	0.16	0.15	0.25	Yb	12.80	11.40	8.43	12.80	11.36	1.17
MnO/FeO	7.67	9.08	15.34	4.44	9.13	Lu	1.89	1.65	1.20	1.88	1.66	0.22
						REE	631.46	539.86	415.06	727.45	578.46	14.49
						LRE/HRE	5.45	5.15	5.23	6.19	5.51	1.95
						$\delta$ Ce	1.04	0.86	0.93	1.23	1.02	0.22
						$\delta$ Eu	0.697	0.719	0.713	0.71	0.710	0.684

\*根据文献[6]的数据计算。



**Figure 11.**  $\delta$ Ce versus LRE/HRE graph of Fe-Mn nodules

**图 11.** 铁锰结核  $\delta$ Ce-LRE/HRE 相关曲线

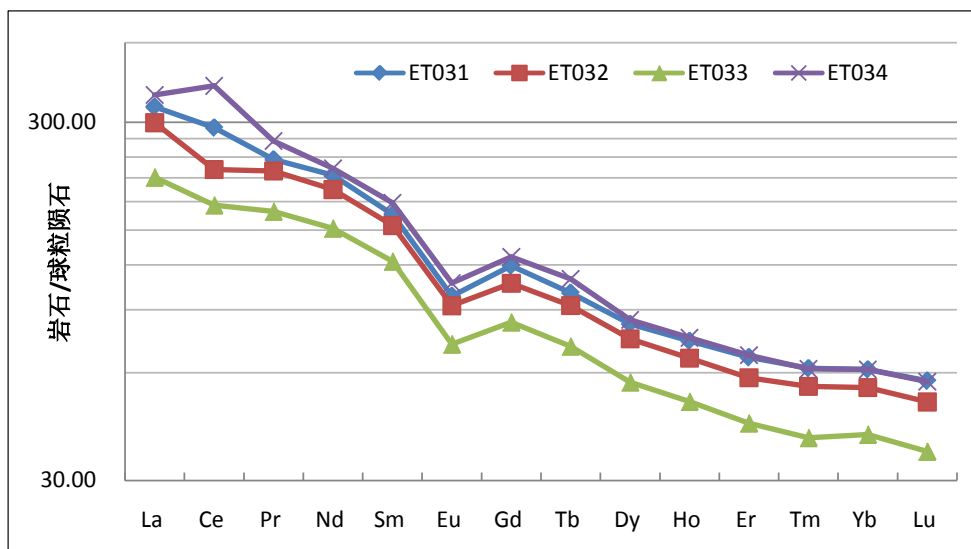


Figure 12. Chondrite-normalized REE distribution patterns of Fe-Mn nodules  
图 12. 铁锰结核稀土配分曲线

### 3.1.2. 铁锰结核稀土地球化学

据“海洋四号”船于DY105-13 (2002年)和DY105-15 (2003年)航次在夏威夷岛南太平洋调查区样品测试结果[7], 稀土含量普遍高于一般沉积岩, 平均 $1025.01 \times 10^{-6}$ , LRE/HRE平均6.6,  $\delta\text{Ce}$ 平均1.36,  $\delta\text{Eu}$ 平均0.72, 其主要特征就是 $\delta\text{Ce}$ 大于1 (表3)。

其稀土特征值LRE/HRE-REE呈正相关(图13), 随着稀土总量升高, 轻重稀土分异增强;  $\delta\text{Eu}$ -LRE/HRE呈负相关(图14), 随着LRE/HRE比值增大,  $\delta\text{Eu}$ 减小。稀土配分曲线表现为斜率大的曲线负铈异常强, 斜率小的曲线负铈异常弱(图15, 图16), 不同斜率曲线互相交织。稀土配分曲线具有明显的正铈异常, 并且 $\delta\text{Ce}$ -LRE/HRE呈正相关性(图17), 稀土配分曲线显示结核内核正铈异常最强, 间层最弱, 外层介于两者之间(图18), 不具有顺序变化规律, 因此应该主要与外部环境影响的成分变化有关。

大洋结核属于大洋水化学沉积物, 稀土地球化学特征显示为稀土总量、轻重稀土比值与负铈异常是同步演化关系, 这与普通陆相沉积物明显不同, 而接近于传统的稀土地球化学理论, 与幔源岩浆岩稀土演化特征是一致的。

### 3.2. 大石桥镁质碳酸盐岩稀土地球化学

大石桥菱镁矿矿床产于辽东元古界裂谷盆地大石桥组镁质碳酸盐岩系, 基底为二云母片岩、含石榴二云石英片岩、黑云片岩、千枚岩及白云质大理岩, 盖层为矽线二云片岩夹云母变粒岩、十字二云片岩夹石英岩及千枚岩夹变质粉砂岩。

镁质碳酸盐岩系自下而上分三个岩性段: 下段为方解石大理岩和白云石大理岩, 夹透闪大理岩、透闪岩; 中段下部为石榴十字云母石英片岩、钙质黑云变粒岩, 中部为条带状大理岩, 上部为石榴十字云母石英片岩、黑云变粒岩、夹白云质大理岩; 上段主要为厚层菱镁矿岩和白云质大理岩, 夹薄层千枚岩、板岩, 其中厚层菱镁矿岩是菱镁矿层, 顶底板均为白云质大理岩。

分析菱镁矿矿石样品来自菱镁矿层(LM1-LM4)、白云岩样品来自顶板(LH1)和底板(LC1-LC6)。菱镁矿矿石具有重结晶现象, 呈细粒结构, 白云岩为粉晶结构, 顶板白云岩(LH1)具有滑石化蚀变[19]。

菱镁矿岩化学成分以MgO为主, 平均含量43.96%, CaO平均3.23%, 而顶底板白云岩MgO平均含

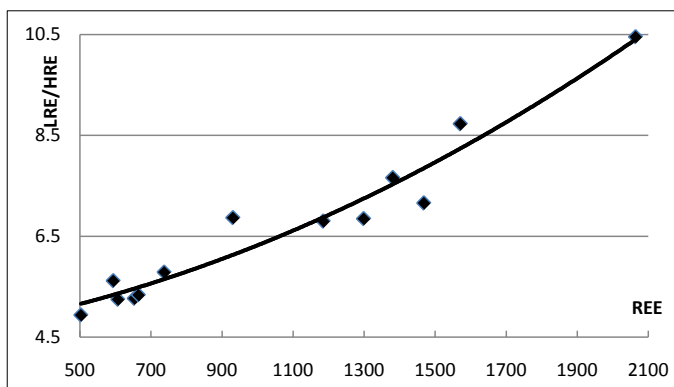


Figure 13. LRE/HRE versus REE (ppm) graph of Fe-Mn nodules

图 13. 铁锰结核 LRE/HRE-REE 相关图解

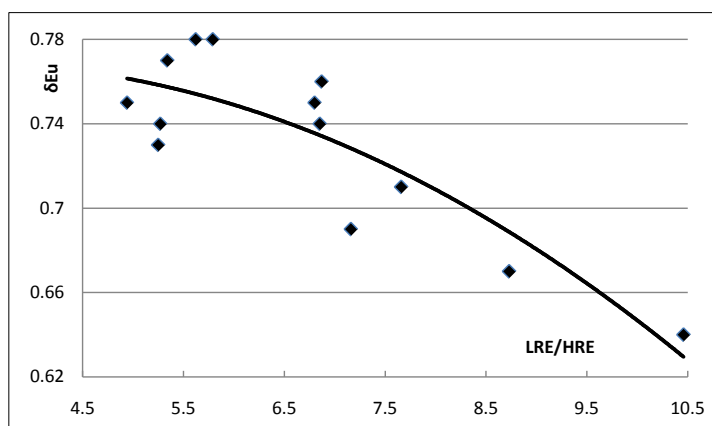


Figure 14.  $\delta\text{Eu}$  versus LRE/HRE graph of Fe-Mn nodules

图 14. 铁锰结核  $\delta\text{Eu}$ -LRE/HRE 相关图解

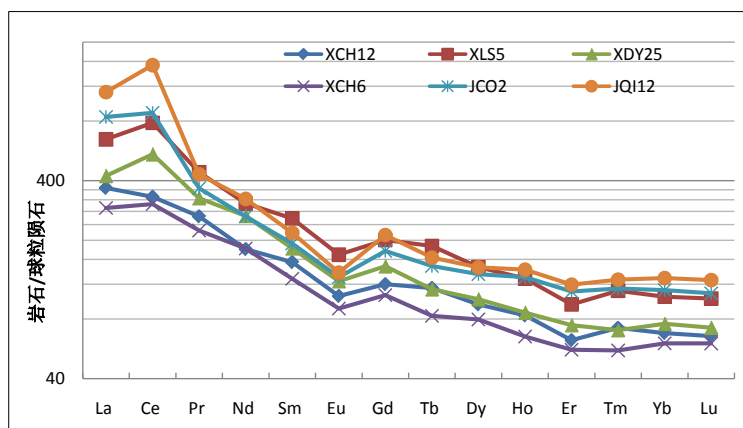


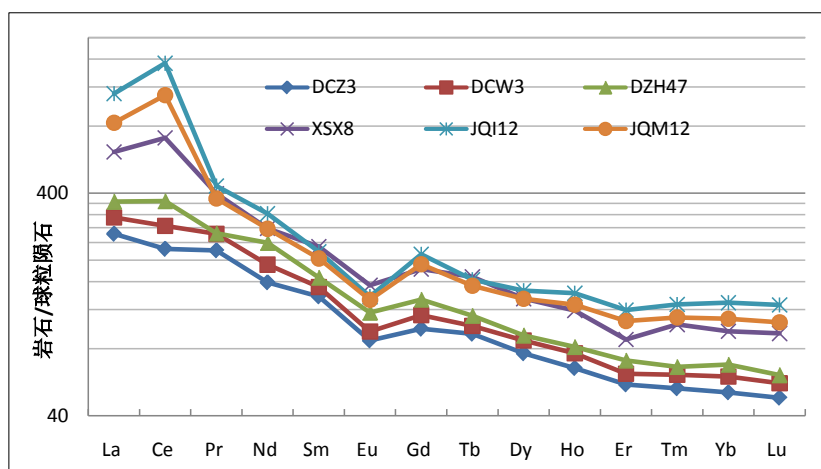
Figure 15. Chondrite-normalized REE distribution patterns. Curves JCO2 and JQI12 which have relatively higher slopes show stronger negative Eu and positive Ce anomalies. Curves XCH12 and XCH6 which have lower slopes show weaker negative Eu and positive Ce anomalies. Curves XLS5 and XDY25 are among them

图 15. 稀土配分曲线图，斜率大的曲线 JCO2、JQI12，负铕异常最强，正铈异常最强；斜率最小的曲线 XCH12、XCH6 负铕异常和正铈异常最弱；XLS5、XDY25 曲线介于之间

**Table 3.** REE compositions of Fe-Mn nodules from the eastern Pacific ( $10^{-6}$ )  
**表 3.** 东太平洋海底铁锰结核稀土元素含量表\* ( $10^{-6}$ )

	结核	内层	中间层	外层	DY957	结核	碎屑状	连生体	DY959	结核	钴结核	内层	中间层	外层	平均
	DCH15	DCN4	DCZ3	DCW3	DZH47	XCH12	XSX8	XLS5	XDY25	XCH6	JCO2	JQI12	JQM12	JQW13	
La	107.81	105.18	81.31	96.41	113.50	113.91	189.71	200.42	130.91	90.28	260.05	347.2	256.53	278.28	169.39
Ce	248.43	274.70	181.20	230.20	297.94	267.95	572.21	632.94	438.68	246.1	710.85	1237.6	891.0	717.15	496.21
Pr	33.19	34.21	26.97	31.98	32.15	32.23	48.51	53.79	39.77	27.32	44.74	52.55	46.19	51.38	39.64
Nd	118.32	124.83	95.24	114.53	143.64	108.22	166.67	183.86	159.2	109.13	158.4	193.89	165.92	186.23	144.86
Sm	32.94	42.02	26.78	29.52	32.59	30.22	44.89	50.26	35.50	24.95	37.57	42.54	39.67	43.81	36.66
Eu	7.86	7.61	6.40	7.03	8.54	7.69	11.34	12.42	9.12	6.65	9.58	10.08	9.76	10.88	8.93
Gd	31.93	32.04	25.45	29.32	34.45	31.06	47.21	51.88	38.24	27.36	45.72	55.03	49.67	53.79	39.51
Tb	5.27	5.19	4.42	4.80	5.34	5.43	7.97	8.86	5.36	3.94	7.03	7.74	7.28	8.12	6.20
Dy	29.44	30.33	24.54	28.07	29.54	30.52	43.22	47.08	32.41	25.62	43.42	46.92	43.21	49.26	35.97
Ho	5.76	5.84	4.70	5.48	5.85	5.99	8.53	9.21	6.18	4.69	9.34	10.19	9.06	10.26	7.22
Er	14.51	14.01	11.60	12.97	14.89	13.15	18.5	19.9	15.64	11.75	23.16	25.08	22.37	24.69	17.30
Tm	2.17	2.16	1.72	1.98	2.15	2.34	3.33	3.60	2.28	1.80	3.70	4.10	3.58	4.09	2.79
Yb	13.09	13.20	10.64	12.54	14.21	14.21	20.02	21.67	15.80	12.60	23.43	26.9	22.80	25.80	17.64
Lu	1.97	2.00	1.60	1.86	2.02	2.18	3.11	3.37	2.40	2.00	3.58	4.18	3.49	3.91	2.69
REE	653	693	503	607	737	665	1185	1299	931	594	1381	2064	1571	1468	1025.01
LRE/ HRE	5.27	5.62	4.94	5.25	5.79	5.34	6.80	6.85	6.87	5.62	7.66	10.46	8.73	7.16	6.60
$\delta$ Ce	1.00	1.10	0.93	1.00	1.19	1.06	1.44	1.47	1.46	1.19	1.59	2.21	1.97	1.44	1.36
$\delta$ Eu	0.74	0.63	0.75	0.73	0.78	0.77	0.75	0.74	0.76	0.78	0.71	0.64	0.67	0.69	0.72

\*根据文献[7]的等数据计算。



**Figure 16.** Chondrite-normalized REE distribution patterns. Curves JQM12 and JQI12 which have relatively higher slopes show stronger negative Eu and positive Ce anomalies. Curves DCZ3 and DCW3 which have lower slopes show weaker negative Eu and positive Ce anomalies. Curves DZH47 and XSX8 are among them  
**图 16.** 稀土配分曲线图，斜率大的曲线 JQM12、JQI12，负铕异常最强，正铈异常最强；斜率最小的曲线 DCZ3、DCW3 负铕异常和正铈异常最弱；DZH47、XSX8 曲线介于之间

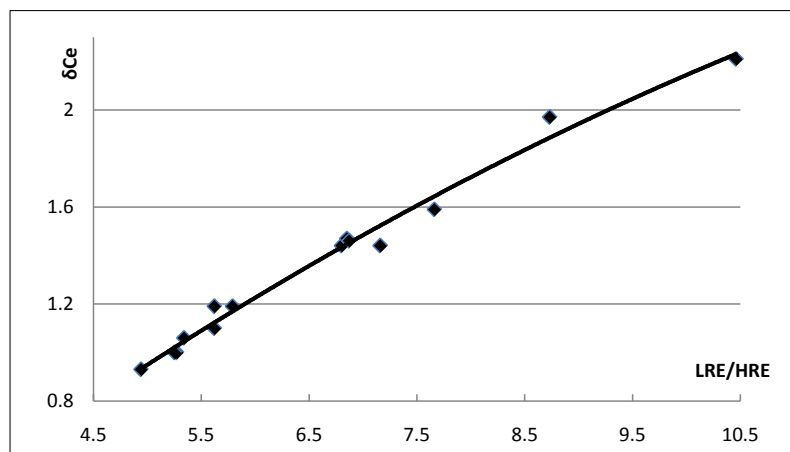


Figure 17.  $\delta\text{Ce}$  versus LRE/HRE graph of Fe-Mn nodules

图 17. 铁锰结核  $\delta\text{Ce}$ -LRE/HRE 相关图解

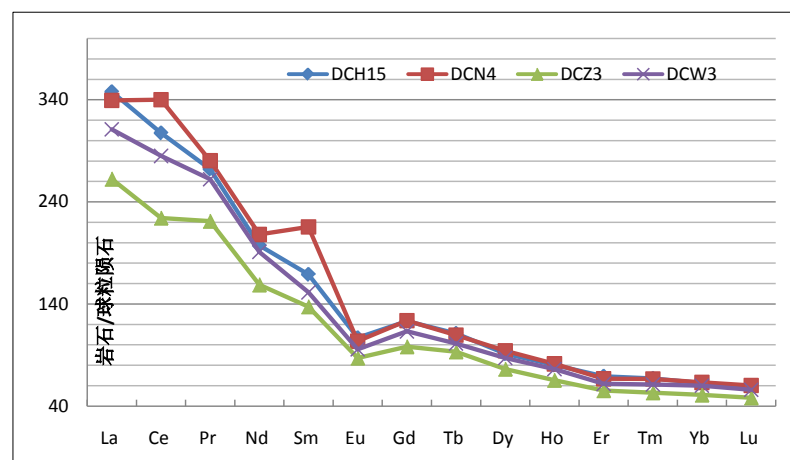


Figure 18. Chondrite-normalized REE distribution patterns of Fe-Mn nodules. The curve DCN4 which represents the inner layer of nodules has higher slope and shows obviously negative Eu and positive Ce anomaly. The curve DCZ3 which represents the interlayer of nodules has lower slope and shows weaker negative Eu and positive Ce anomaly

图 18. 铁锰结核稀土配分曲线图, 结核内层曲线斜率大, 负铕异常和正铈异常最强, 中间层斜率最小, 负铕异常和正铈异常最弱

量 22.24%, CaO 平均 27.89%。其他成分含有少量  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ , 其次有微量  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  (表 4)。

微量元素中只有 Sr/Ba 比值比较高, 显示海相沉积的特征, 其他 Rb/Sr、Th/U、V/Cr、Zr/Y、Nb/Ta 都比较低, 由于微量元素一般以胶体或者粘土吸附状态存在, 而本区碳酸盐岩中杂质含量较低, 因此微量元素含量很低。 $\text{Sr}^{2+}$ 离子性质接近  $\text{Ca}^{2+}$ 离子, 可以替代  $\text{Ca}^{2+}$ 离子进入矿物晶格, 因此白云岩中 Sr/Ba 比值明显大于菱镁矿岩(表 4)。

镁质碳酸盐岩中稀土含量普遍低于铁锰结核的稀土含量, 稀土总量普遍低于  $10 \times 10^{-6}$ , 除了顶板滑石化白云岩稀土总量略高, 菱镁矿岩稀土总量一般高于白云岩稀土总量(表 4)。

镁质碳酸盐岩各种化学组分聚类分析显示, La-Y 与  $\text{TFe}_2\text{O}_3$ -MnO-Rb-Ba-Co-V 构成一个群组, 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$ -CaO- $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{P}_2\text{O}_5$ -Th-Nb-Ni-Zr-Sr-U 群组正相关, 与 MgO-Ta-Cr 及  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  负相关(图 19)。化

**Table 4.** The geochemical composition of carbonate rock in Liaoning Dashiqiao magnesite deposit  
**表 4.** 辽宁大石桥菱镁矿碳酸盐岩石化学成分表

	菱镁岩					白云岩						
	LM1	LM2	LM3	LM4	平均	LH1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	平均
SiO <sub>2</sub>	1.13	3.98	2.06	1.01	2.05	3.20	1.74	2.60	1.61	1.97	2.88	2.33
TiO <sub>2</sub>	0.004	0.002	0.002	0.001	0.002	0.030	0.002	0.007	0.001	0.001	0.001	0.007
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.38	0.32	0.37	0.38	0.36	1.43	0.47	0.76	0.39	0.39	0.38	0.64
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.01	1.02	0.61	0.72	0.84	1.02	0.00	0.12	0.03	0.03	0.08	0.21
MnO	0.10	0.09	0.08	0.04	0.08	0.07	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
MgO	42.42	46.65	46.63	40.14	43.96	21.95	22.88	21.47	22.62	22.37	22.12	22.24
CaO	4.53	0.45	0.33	7.61	3.23	26.98	27.77	28.31	27.93	28.14	28.21	27.89
Na <sub>2</sub> O	0.26	0.25	0.24	0.27	0.26	0.31	0.29	0.33	0.30	0.31	0.31	0.31
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.02	0.05	0.02	0.03	0.04	0.06	0.03	0.02	0.05	0.02	0.04
烧失	50.12	47.20	49.61	49.80	49.18	44.92	46.76	46.36	47.06	46.71	45.95	46.29
总量	99.99	99.99	99.99	100.00	99.99	99.97	99.99	100.01	99.98	99.99	99.98	99.99
Rb	0.56	0.39	0.80	0.18	0.48	0.87	0.08	0.08	0.12	0.21	0.15	0.25
Sr	30.42	3.88	4.63	10.59	12.38	72.72	37.31	32.54	37.12	20.27	24.06	37.34
Ba	9.86	2.56	6.02	3.50	5.49	28.81	3.19	1.99	2.10	2.73	5.45	7.38
Zr	2.87	1.01	1.10	2.80	1.95	12.53	11.44	9.30	0.81	1.22	2.58	6.31
Hf	0.05	0.02	0.03	0.07	0.04	0.30	0.26	0.21	0.02	0.03	0.07	0.15
Th	0.05	0.03	0.08	0.03	0.05	0.58	0.08	0.18	0.02	0.03	0.02	0.15
U	0.62	0.44	0.33	0.10	0.37	0.49	1.07	1.08	0.62	0.99	0.51	0.79
Y	2.28	0.87	0.88	1.48	1.37	1.88	1.05	1.30	0.55	1.61	0.84	1.20
Nb	0.07	0.05	0.10	0.07	0.07	0.62	0.09	0.40	0.03	0.04	0.05	0.20
Ta	0.03	0.03	0.04	0.12	0.06	0.08	0.03	0.05	0.02	0.03	0.03	0.04
Cr	12.03	11.93	15.70	26.66	16.58	12.82	26.80	23.21	11.68	8.37	12.06	15.82
Ni	6.02	6.47	8.66	13.29	8.61	18.80	8.85	16.58	4.95	5.57	5.30	10.01
Co	2.61	0.99	1.45	0.80	1.46	5.62	0.38	0.76	0.32	0.35	0.41	1.31
V	4.38	2.59	3.68	1.39	3.01	6.53	2.21	3.78	1.01	3.55	1.86	3.16
Rb/Sr	0.018	0.101	0.174	0.017	0.08	0.012	0.002	0.002	0.003	0.010	0.006	0.01
Sr/Ba	3.08	1.52	0.77	3.03	2.10	2.52	11.71	16.39	17.67	7.43	4.41	10.02
Th/U	0.08	0.07	0.24	0.30	0.17	1.19	0.08	0.16	0.03	0.03	0.05	0.26
V/Cr	0.36	0.22	0.23	0.05	0.22	0.51	0.08	0.16	0.09	0.42	0.15	0.24
Zr/Y	1.26	1.17	1.25	1.90	1.39	6.68	10.94	7.13	1.47	0.76	3.06	5.01
Nb/Ta	2.10	1.45	2.69	0.60	1.71	7.90	2.82	7.60	1.33	1.30	1.74	3.78
La	0.927	0.461	0.330	0.577	0.574	1.922	0.333	0.494	0.181	0.341	0.271	0.590
Ce	2.758	1.416	0.947	1.443	1.641	5.142	0.815	1.153	0.403	0.827	0.608	1.491

Continued

Pr	0.323	0.173	0.114	0.154	0.191	0.482	0.082	0.115	0.039	0.093	0.064	0.146
Nd	1.294	0.687	0.457	0.598	0.759	1.719	0.282	0.405	0.154	0.341	0.287	0.531
Sm	0.276	0.128	0.097	0.124	0.156	0.288	0.056	0.082	0.033	0.083	0.058	0.100
Eu	0.082	0.045	0.029	0.036	0.048	0.111	0.019	0.026	0.011	0.025	0.018	0.035
Gd	0.303	0.155	0.101	0.154	0.178	0.320	0.094	0.121	0.047	0.114	0.089	0.131
Tb	0.038	0.015	0.016	0.021	0.023	0.041	0.011	0.014	0.005	0.017	0.012	0.017
Dy	0.232	0.092	0.099	0.143	0.142	0.280	0.086	0.101	0.038	0.124	0.076	0.118
Ho	0.054	0.020	0.025	0.039	0.035	0.060	0.026	0.031	0.011	0.034	0.022	0.031
Er	0.153	0.061	0.063	0.106	0.096	0.183	0.073	0.095	0.037	0.119	0.058	0.094
Tm	0.019	0.007	0.009	0.014	0.012	0.025	0.011	0.012	0.003	0.016	0.008	0.013
Yb	0.108	0.040	0.041	0.065	0.064	0.160	0.062	0.084	0.025	0.074	0.049	0.076
Lu	0.013	0.006	0.006	0.009	0.009	0.026	0.008	0.011	0.002	0.013	0.006	0.011
∑REE	6.58	3.31	2.33	3.48	3.93	10.76	1.96	2.74	0.99	2.22	1.63	3.38
LRE/HRE	6.15	7.35	5.48	5.32	6.08	8.83	4.28	4.85	4.89	3.35	4.08	5.04
δCe	1.21	1.21	1.18	1.17	1.19	1.29	1.19	1.16	1.15	1.12	1.11	1.17
δEu	0.87	0.98	0.90	0.80	0.88	1.12	0.80	0.80	0.85	0.79	0.77	0.85

注：根据文献[19]的数据计算。

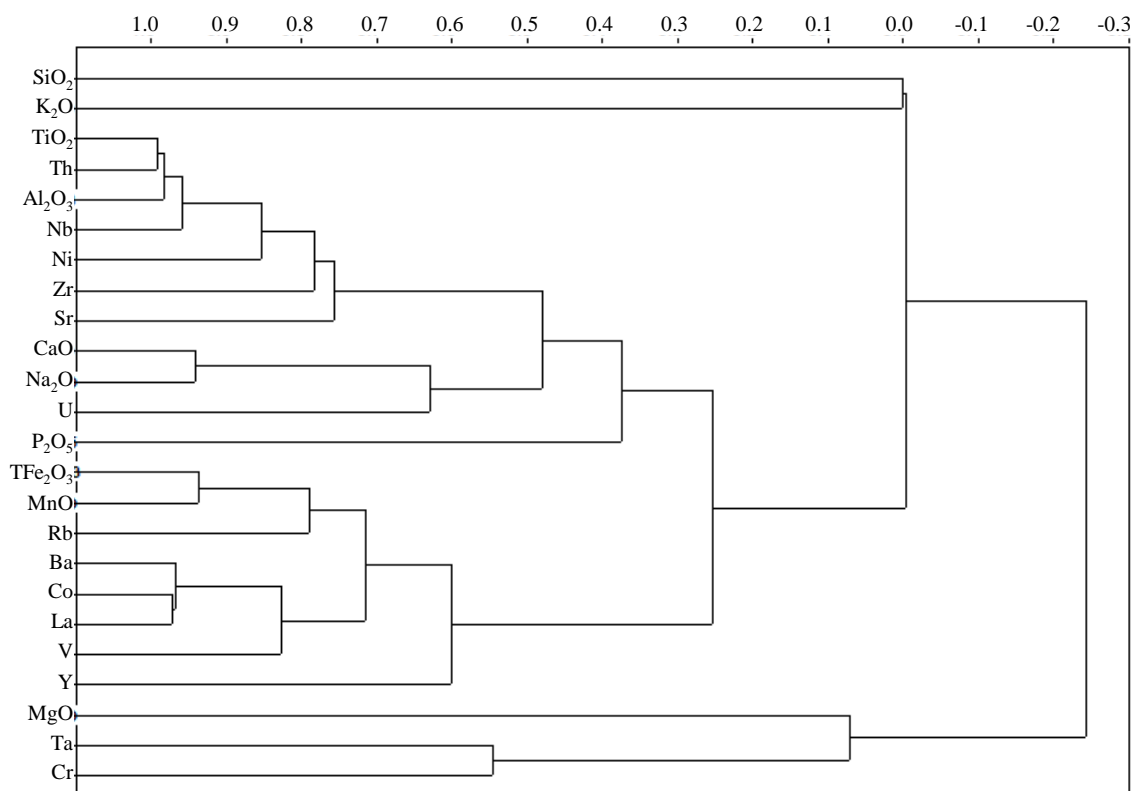


Figure 19. R-type cluster analysis of the geochemical compositions in magnesian carbonate rock

图 19. 镁质碳酸盐岩石化学组分 R 型聚类图谱

学组分特征值聚类分析显示 La-REE-LRE/HRE- $\delta$ Ce- $\delta$ Eu 显著相关, 与  $\text{TiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Th/U- $\text{TFe}_2\text{O}_3$ -MnO-V/Cr- $\text{SiO}_2$ -MgO-Rb/Sr 构成一个群组, 与  $\text{CaO}$ - $\text{Na}_2\text{O}$ -Sr/Ba-Zr/Y-Nb-Ta- $\text{P}_2\text{O}_5$ - $\text{K}_2\text{O}$  群组负相关(图 20)。

聚类分析表明, 稀土元素是  $\text{TFe}_2\text{O}_3$ -MnO 相关性密切, 主要是以铁锰氧化物吸附状态存在的。

LRE/HRE-REE (图 21)、 $\delta$ Eu-LRE/HRE (图 22)、 $\delta$ Ce-LRE/HRE (图 23)均呈正相关,  $\delta$ Eu-LRE/HRE (图 22)正相关特征不同于深海铁锰结核稀土分配模式, 而 LRE/HRE-REE (图 21)、 $\delta$ Ce-LRE/HRE (图 23)正相关与铁锰结核稀土分配模式是一致的, 是镁质碳酸盐岩稀土地球化学的基本特征。表现在配分曲线上, 斜率大的配分曲线具有正铈异常和正铕异常或者弱负铕异常, 斜率小的配分曲线弱铈异常和稍强的负铕异常(图 24)。

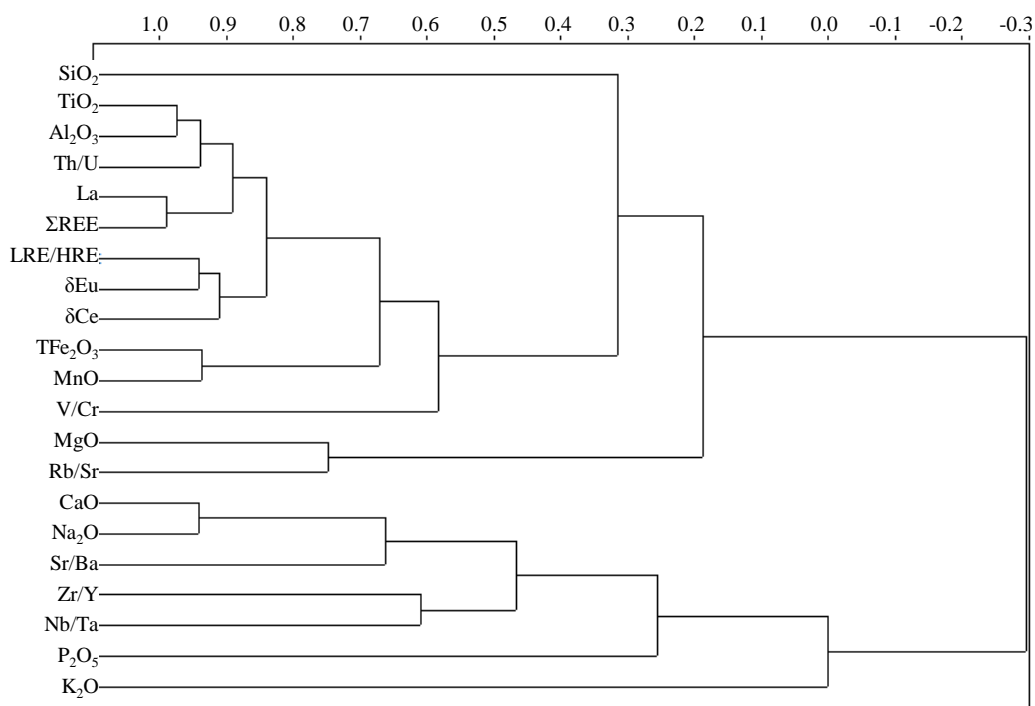


Figure 20. R-type cluster analysis of the geochemical parameters in magnesian carbonate rock  
图 20. 镁质碳酸盐岩岩石化学特征值 R 型聚类图谱

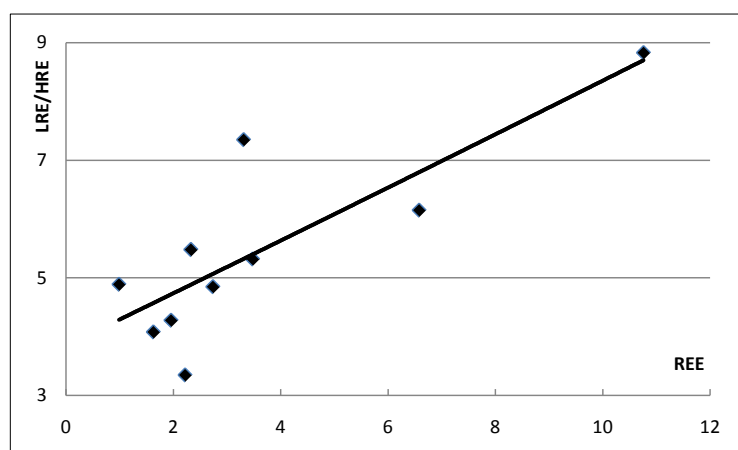


Figure 21. LRE/HRE versus REE (ppm) graph of magnesian carbonate rock  
图 21. 镁质碳酸盐岩 LRE/HRE-REE 相关曲线图



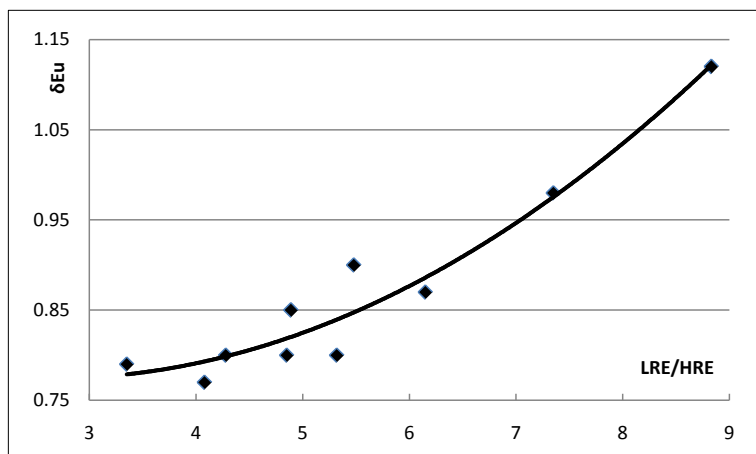


Figure 22.  $\delta\text{Eu}$  versus LRE/HRE graph of magnesian carbonate rock  
 图 22. 镁质碳酸盐岩  $\delta\text{Eu}$ -LRE/HRE 相关曲线图

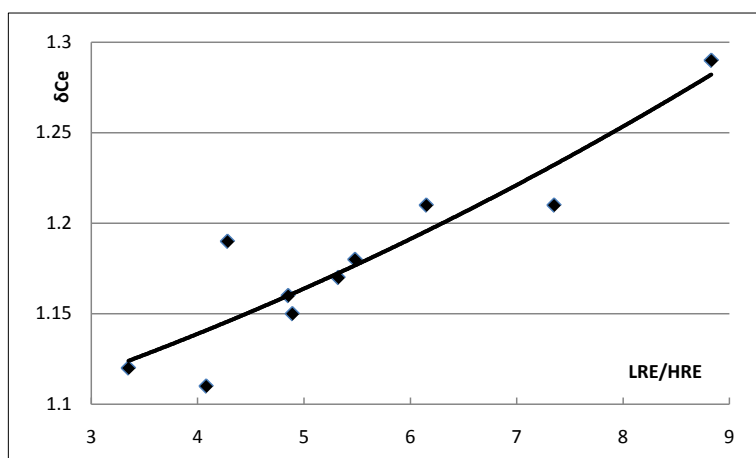


Figure 23.  $\delta\text{Ce}$  versus LRE/HRE graph of magnesian carbonate rock  
 图 23. 镁质碳酸盐岩  $\delta\text{Ce}$ -LRE/HRE 相关曲线图

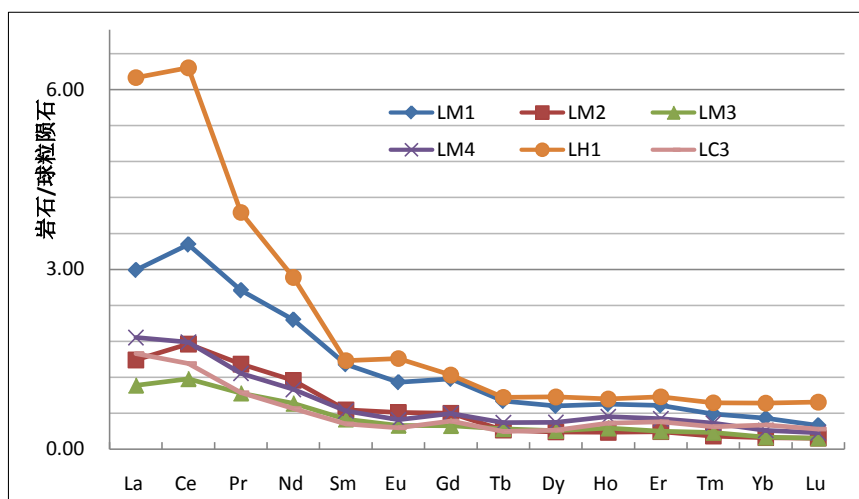


Figure 24. Chondrite-normalized REE distribution patterns of magnesian carbonate rock  
 图 24. 镁质碳酸盐岩稀土配分曲线图

## 4. 陆源海相沉积物稀土地球化学模式

陆源海相沉积物,是指碎屑物以陆源为主,而胶结物来自海水的化学充填胶结。海沟是大陆架边缘深海环境,其碎屑物质主要来自大陆架的浊积物沉积物质及火山碎屑物,而其化学胶结物可以来自海水中溶解的物质,海底拉斑玄武岩的海解物质及海底热泉等。本文讨论海沟相沉积物的稀土地球化学特征。

### 4.1. 智利海沟沉积物稀土地球化学

智利海沟远离南美大陆 100 多公里,其以接受深海沉积为主,但其沉积碎屑物则具有陆源碎屑物特征。其沉积物化学组成  $K_2O/Na_2O$  比值为 0.41~0.58,平均 0.47;  $MgO/CaO > 0.5$ ,平均 0.64;  $^{87}Sr/^{86}Sr < 0.706$ ,主要反映海相沉积特征。在  $K_2O/Na_2O-SiO_2$  图解和  $TiO_2-(FeO + MgO)$  图解分析,相当于海洋岛弧环境沉积。 $Sr/Ba$  比值是区分海相与陆相沉积物的很重要标志,智利海沟沉积物  $Sr/Ba$  平均 0.82,而其他陆相沉积物的  $Sr/Ba$  均小于 0.60。海沟沉积物的  $Rb/Sr$  与  $Th/U$  比值分别是 0.14 和 2.42,低于陆相沉积物; $V/Cr$  和  $Zr/Y$  比值分别是 2.37 和 6.79,高于陆相沉积物。

海沟沉积物稀土特征表现为,稀土总量比较低,平均  $85.77 \times 10^{-6}$ ,  $LRE/HRE$  较低,平均 5.35,  $\delta Eu$  值小于 1,弱负铕异常,  $\delta Ce$  在 1 左右,略显正铈异常(表 5)。 $LRE/HRE-\Sigma REE$  下凹型曲线型式(图 25),显然与幔源物质演化特征是不一致的,而代表海陆物质混合的特征; $\delta Eu-LRE/HRE$  表现为略上凸弧形负相关型式(图 26),与壳幔混合源物质演化特征比较一致,代表了海相碎屑沉积物的特点。稀土配分曲线斜率较小,  $(La/Lu)_N$  平均 4.94,轻稀土段斜率大于重稀土段,显示斜率大的曲线铕异常明显,斜率小的曲线铕异常弱(图 27, 图 28)。

### 4.2. 冲绳海沟沉积物稀土地球化学

冲绳海槽是处于扩张作用早期的弧后盆地,其沉积物成分和物源比较复杂,以火山喷发物、生物碎屑和陆源物质共存为典型特征,热液物质加入使海槽中部沉积物成分进一步复杂化。其稀土地球化学特征不同于海源海相沉积铁锰结核(表 6),  $LRE/HRE-REE$  与  $\delta Eu-LRE/HRE$  都是负相关(图 29, 图 30)。 $LRE/HRE-REE$  负相关与陆源碎屑物质特征相同,而  $\delta Eu-LRE/HRE$  负相关反映的是海相沉积环境,海底热液还原作用导致 Eu 缺失,随着  $LRE/HRE$  升高,  $\delta Eu$  值降低。稀土配分均具有负铕异常,略显负铈异常,并且显示为斜率大的曲线负铕异常强,而斜率小的负铕异常弱(图 31~34)。

海沟沉积物稀土配分曲线一个非常重要的特征是轻稀土含量相近,配分曲线基本重合,而重稀土含量不同,配分曲线呈现分散状态,因此  $LRE/HRE$  比值变化不取决于轻稀土,而是与重稀土变化有关。在岩浆岩中铁镁矿物和锆石等副矿物是富重稀土矿物,钙长石是含铕矿物,因此重稀土含量高低与海沟沉积物中火山物质多少有关,含火山物质多富重稀土,负铕异常弱,含火山物质少重稀土含量低,负铕异常强。

## 5. 陆源陆相沉积岩稀土地球化学型式

陆源陆相是指沉积物质来源陆壳风化物,并且在大陆盆地环境形成的沉积物,陆源陆相沉积物比较复杂,成熟地壳风化堆积物以沉积岩及变质岩风化物来源为主,而欠成熟地壳风化堆积物具有大量岩浆岩风化物来源,不同陆源物质其稀土地球化学特征显然是不同的。

湖南麻阳盆地是成熟地壳基础上形成的中生代内陆沉积盆地,位于雪峰山脉与武陵山脉之间,雪峰山-武陵山隆起带前寒武系浅变质岩提供了沉积碎屑物具有较高的成熟度[12]。中生代沉积碎屑岩  $K_2O/Na_2O$  比值为 1.13~3.06,平均 1.39,  $MgO/CaO$  为 0.11~0.62,平均 0.27。在  $K_2O/Na_2O-SiO_2$  图解和  $TiO_2-(FeO + MgO)$  图解分析,相当于被动陆缘环境沉积。沉积岩  $Rb/Sr$  和  $Th/U$  平均比值分别为 0.40, 4.16,

**Table 5.** REE and trace elements compositions of trench sediment in Chile (36°~40°S)  
**表 5.** 智利(36°~40°S)海沟沉积物稀土元素及微量元素含量表

	QZL2	QZL3	QZL6	QZL10	QZL12	QZL16	QZL19	平均	最大	最小
La	13.5	12.3	14.2	17.7	13.5	16.6	12.5	14.38	17.7	12.3
Ce	29.7	26.6	31.8	38.5	29.6	36.5	27.7	31.94	38.5	26.6
Pr	3.71	3.29	4.08	4.8	3.76	4.57	3.64	4.04	4.8	3.29
Nd	15.6	14	17.3	20	16	19	15.9	16.99	20	13.9
Sm	3.54	3.05	4.06	4.52	3.8	4.2	3.69	3.87	4.52	3.05
Eu	0.98	0.88	1.12	1.2	1.05	1.12	1.13	1.06	1.21	0.88
Gd	3.14	2.91	3.99	4.39	3.77	3.99	3.73	3.75	4.39	2.91
Tb	0.54	0.45	0.66	0.68	0.59	0.62	0.56	0.58	0.68	0.45
Dy	3.31	2.79	4	4.13	3.65	3.75	3.29	3.59	4.18	2.79
Ho	0.67	0.58	0.82	0.81	0.72	0.78	0.66	0.73	0.84	0.58
Er	1.93	1.67	2.39	2.54	2.23	2.23	1.97	2.16	2.54	1.67
Tm	0.28	0.24	0.36	0.34	0.3	0.32	0.27	0.31	0.37	0.24
Yb	1.91	1.57	2.33	2.28	2.05	2.13	1.92	2.06	2.38	1.57
Lu	0.29	0.25	0.35	0.34	0.32	0.31	0.28	0.31	0.36	0.25
REE	79.1	70.58	87.46	102.23	81.34	96.12	77.24	85.77	102.23	70.58
LRE/HRE	5.55	5.75	4.87	5.59	4.97	5.8	5.09	5.35	5.8	4.87
(La/Lu) <sub>N</sub>	4.99	5.27	4.35	5.58	4.52	5.73	4.78	4.94	5.73	4.35
(La/Sm) <sub>N</sub>	2.40	2.54	2.20	2.46	2.23	2.49	2.13	2.34	2.54	2.13
(Gd/Lu) <sub>N</sub>	1.39	1.49	1.46	1.66	1.51	1.65	1.71	1.54	1.71	1.39
δCe	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.01	0.99	1.01	1.04	0.99
δEu	0.90	0.90	0.85	0.82	0.85	0.84	0.93	0.85	0.93	0.81
Rb	34.00	30.00	34.00	50.00	54.00	52.00	30.00	43.62	59.00	30.00
Sr	272.00	382.00	337.00	335.00	333.00	335.00	462.00	330.95	462.00	256.00
Ba	294.00	296.00	452.00	454.00	376.00	512.00	307.00	432.48	653.00	294.00
Zr	147.00	127.00	132.00	124.00	122.00	122.00	102.00	127.00	147.00	102.00
Th	4.22	4.16	3.95	5.52	3.49	5.61	3.22	4.50	5.75	3.22
U	1.06	1.81	1.62	1.80	1.05	2.22	1.05	2.09	3.48	0.82
Y	16.30	14.80	21.50	21.80	19.40	20.60	18.20	19.01	22.30	14.80
Cr	44.00	69.00	61.00	66.00	57.00	65.00	82.00	68.86	94.00	44.00
V	130.00	162.00	188.00	163.00	169.00	146.00	173.00	158.38	188.00	130.00
Rb/Sr	0.125	0.079	0.101	0.149	0.162	0.155	0.065	0.138	0.209	0.065
V/Cr	2.955	2.348	3.082	2.470	2.965	2.246	2.110	2.367	3.232	1.714
Sr/Ba	0.925	1.291	0.746	0.738	0.886	0.654	1.505	0.821	1.505	0.422
Th/U	3.981	2.298	2.438	3.067	3.324	2.527	3.067	2.423	4.329	1.150
Zr/Y	9.018	8.581	6.140	5.688	6.289	5.922	5.604	6.792	9.018	5.604

注：根据文献[2]的数据计算。

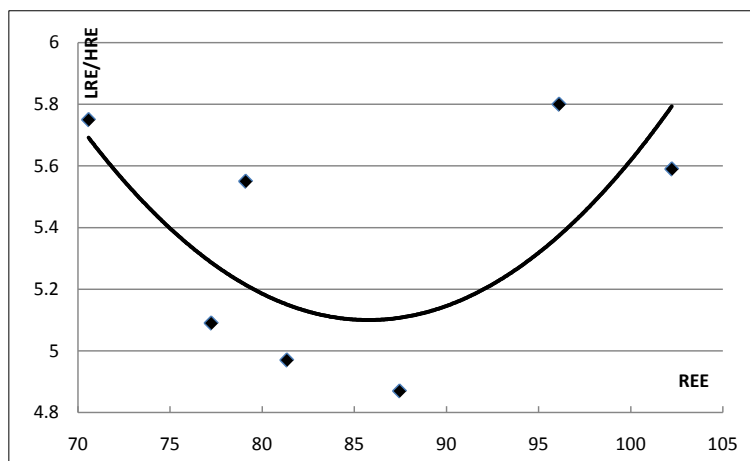


Figure 25. LRE/HRE versus  $\Sigma$ REE (ppm) contents graph for trench sediments from Chile

图 25. 智利海沟沉积物 LRE/HRE- $\Sigma$ REE 相关性图解

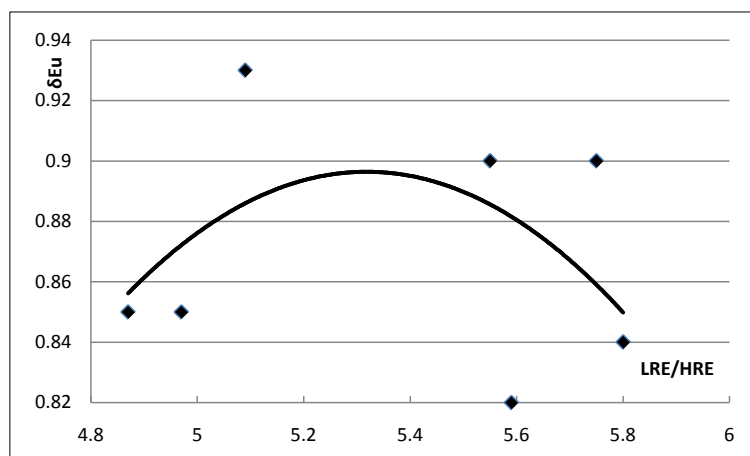


Figure 26.  $\delta$ Eu versus LRE/HRE graph for trench sediments from Chile

图 26. 智利海沟沉积物  $\delta$ Eu-LRE/HRE 相关性图解

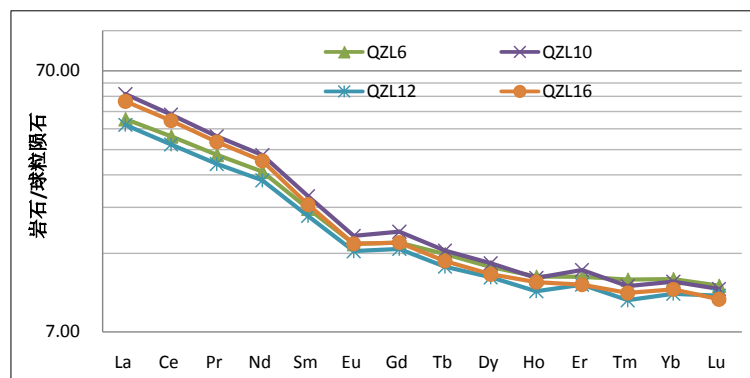
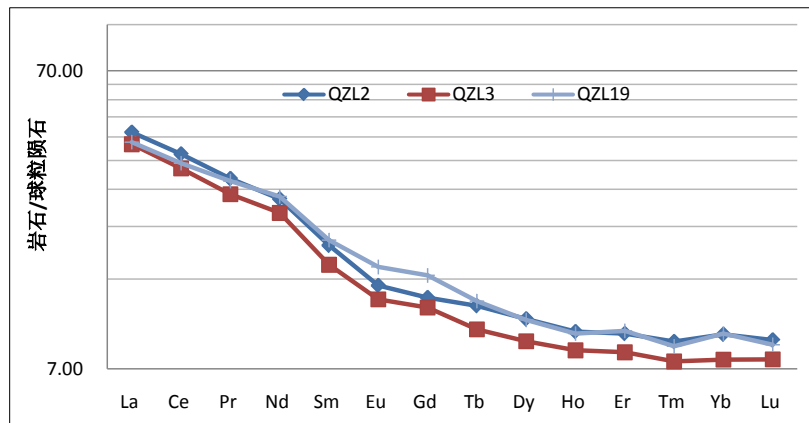
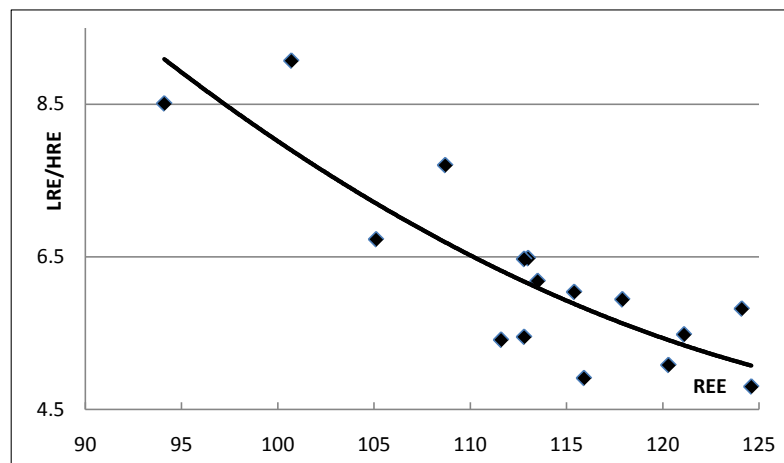


Figure 27. Chondrite-normalized REE distribution patterns for trench sediments of Chile. Curves QZL10 and QZL16 which have relatively higher slopes show stronger negative Eu anomalies

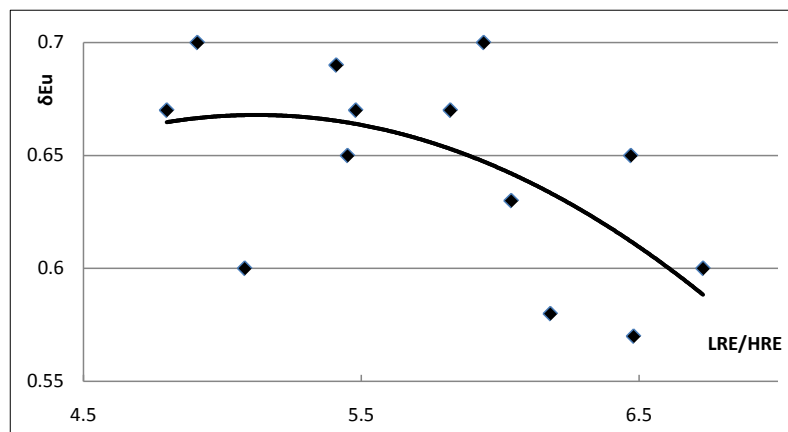
图 27. 智利海沟沉积物稀土配分曲线图, 斜率大的曲线 QZL10 和 QZL16 负钕异常明显



**Figure 28.** Chondrite-normalized REE distribution patterns for trench sediments of Chile. Curve QZL19 whose slope is lower shows a weaker negative Eu anomaly  
**图 28.** 智利海沟沉积物稀土配分曲线图，斜率小的曲线 QZL19 负钷异常较弱



**Figure 29.** LRE/HRE versus REE (ppm) graph of the sediments in Okinawa Trough (150 - 330 cm)  
**图 29.** 冲绳海沟海底 150~330 cm 沉积物 LRE/HRE-REE 相关曲线图



**Figure 30.**  $\delta\text{Eu}$  versus LRE/HRE graph of the sediments in Okinawa Trough (150 - 330 cm)  
**图 30.** 冲绳海沟海底 150~330 cm 沉积物  $\delta\text{Eu}$ -LRE/HRE 相关曲线图

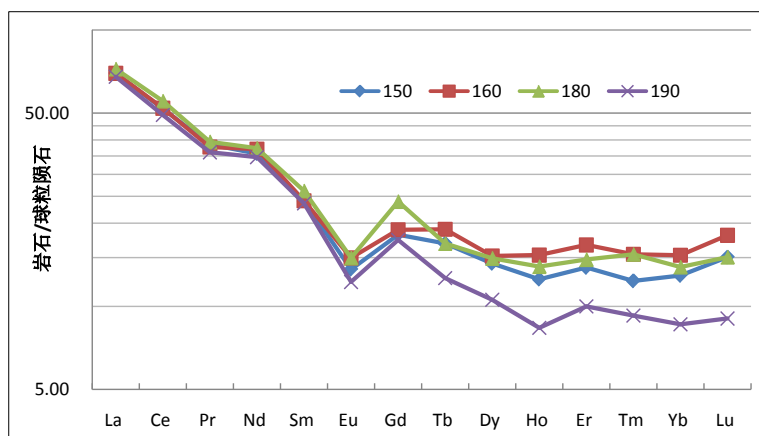


Figure 31. Chondrite-normalized REE distribution patterns for sediments in Okinawa Trough (150 - 190 cm)

图 31. 冲绳海沟海底 150~190 cm 沉积物稀土配分曲线

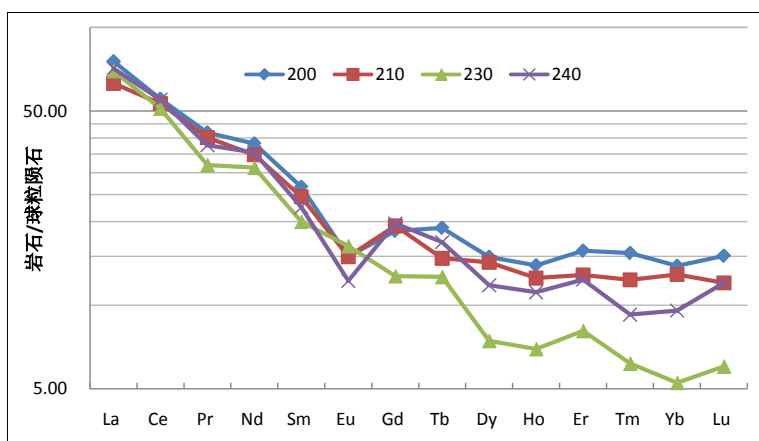


Figure 32. Chondrite-normalized REE distribution patterns for sediments in Okinawa Trough (200 - 240 cm)

图 32. 海底 200~240 cm 沉积物稀土配分曲线

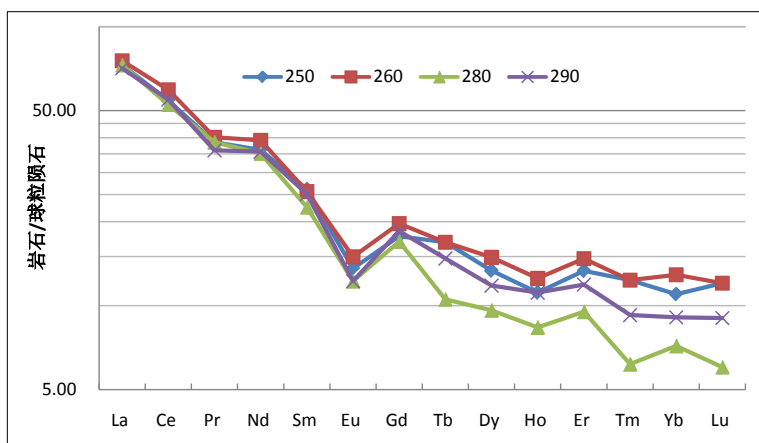


Figure 33. Chondrite-normalized REE distribution patterns for sediments in Okinawa Trough (250 - 290 cm)

图 33. 海底 250~290 cm 沉积物稀土配分曲线

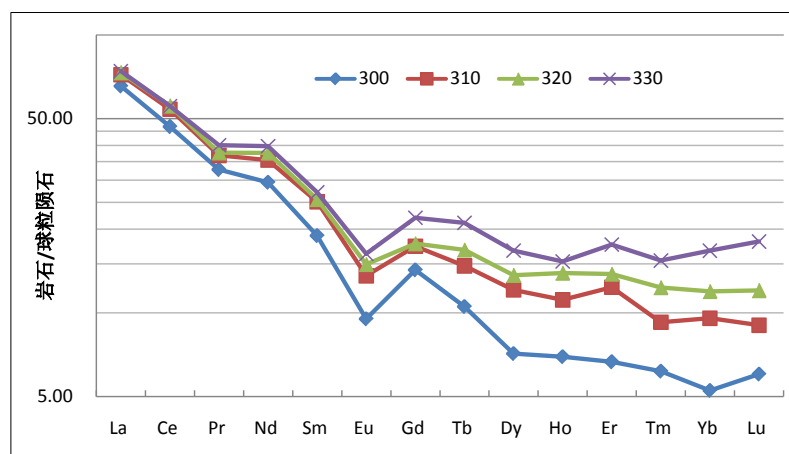


Figure 34. Chondrite-normalized REE distribution patterns for sediments in Okinawa Trough (300 - 330 cm)

图 34. 海底 300~330 cm 沉积物稀土配分曲线

Table 6. REE compositions of the core sediments in Okinawa Trough (150 - 330 cm)

表 6. 冲绳海沟海底 150~330 cm 岩心沉积物稀土元素含量表\*

样品号	150	160	180	190	200	210	230	240	250	260	280	290	300	310	320	330
La	21.6	21.6	22.4	21.0	23.4	19.5	21.6	22.1	22.6	23.4	22.6	22.0	20.3	22.3	22.7	23.0
Ce	41.9	42.1	44.7	39.8	44.7	43.0	41.3	44.4	43.9	48.0	42.5	44.3	37.8	43.7	44.9	44.8
Pr	4.7	4.6	4.8	4.4	5.1	4.9	3.9	4.6	4.7	4.9	4.7	4.4	4.0	4.5	4.6	4.9
Nd	21.4	22.2	22.4	20.8	22.9	20.9	18.8	21.3	21.7	23.5	21.1	21.4	17.7	21.3	22.6	23.9
Sm	4.7	4.7	5.1	4.6	5.2	4.8	3.9	4.4	5.1	5.0	4.4	4.9	3.7	4.9	5.0	5.3
Eu	1.0	1.1	1.1	0.9	1.1	1.1	1.2	0.9	1.0	1.1	0.9	0.9	0.7	1.0	1.1	1.2
Gd	4.7	4.9	6.2	4.5	4.8	5.0	3.3	5.1	4.6	5.1	4.4	4.8	3.7	4.5	4.6	5.7
Tb	0.8	0.9	0.8	0.6	0.9	0.7	0.6	0.8	0.8	0.8	0.5	0.7	0.5	0.7	0.8	1.0
Dy	4.6	4.9	4.8	3.4	4.8	4.6	2.4	3.8	4.3	4.8	3.1	3.8	2.3	3.9	4.4	5.4
Ho	0.9	1.1	1.0	0.6	1.0	0.9	0.5	0.8	0.8	0.9	0.6	0.8	0.5	0.8	1.0	1.1
Er	2.9	3.5	3.1	2.1	3.3	2.7	1.7	2.6	2.8	3.1	2.0	2.5	1.4	2.6	2.9	3.7
Tm	0.4	0.5	0.5	0.3	0.5	0.4	0.2	0.3	0.4	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5
Yb	2.7	3.2	2.9	1.8	2.9	2.7	1.1	2.0	2.3	2.7	1.5	1.9	1.1	2.0	2.5	3.5
Lu	0.5	0.6	0.5	0.3	0.5	0.4	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.6
REE	112.8	115.9	120.3	105.1	121.1	111.6	100.7	113.5	115.4	124.1	108.7	113.0	94.1	112.8	117.9	124.6
LRE/HRE	5.45	4.91	5.08	6.73	5.48	5.41	9.07	6.18	6.04	5.82	7.70	6.48	8.51	6.47	5.94	4.80
$\delta_{Ce}$	1.00	1.02	1.04	1.00	0.98	1.06	1.08	1.06	1.03	1.08	0.99	1.08	1.01	1.05	1.06	1.02
$\delta_{Eu}$	0.65	0.70	0.60	0.60	0.67	0.69	1.02	0.58	0.63	0.67	0.63	0.57	0.58	0.65	0.70	0.67

\*注：根据文献[18]的数据计算。

均高于智利海沟沉积物；V/Cr 和 Sr/Ba 平均比值分别为 0.98, 0.41, 低于智利海沟沉积物；Zr/Y 平均比值 6.28 略低于智利海沟沉积物。

沉积岩稀土特征表现为，稀土总量比较高，平均  $106.93 \times 10^{-6}$ ，LRE/HRE 大，平均 8.71，正负铈异

常均有,无铈异常(表 7)。LRE/HRE- $\Sigma$ REE 负相关曲线型式(图 35),与幔源及海象物质演化特征明显不同; $\delta$ Eu-LRE/HRE 表现为正相关型式(图 36),与幔源物质演化特征相反,代表了陆源陆相沉积特点。稀土配分曲线斜率较大,平均 10.84,轻稀土段斜率大于重稀土段,显示,斜率小的曲线铈异常强(图 37),斜率大的曲线显正铈异常(图 38)。

**Table 7.** REE and trace elements compositions of Mesozoic sedimentary clastic rocks in Mayang basin  
**表 7.** 湖南麻阳中生代盆地沉积碎屑岩稀土元素及微量元素含量表

	MSY1	MSY5	MRT7	MRT8	MRT9	MRT12	MHT19	平均	最大	最小
La	28.42	34.72	14.88	12.34	25.83	16.92	20.76	22.79	36.78	12.34
Ce	55.88	70.95	27.95	22.46	48.52	31.37	39.7	44.53	75.36	22.46
Pr	6.51	7.9	3.21	2.51	5.54	3.64	4.75	5.07	8.47	2.51
Nd	24.76	29.58	11.97	8.97	20.19	13.54	17.82	18.87	32.17	8.97
Sm	4.72	5.9	2.27	1.58	3.85	2.67	3.55	3.62	6.14	1.58
Eu	1.02	1.25	0.98	0.96	0.89	0.79	0.81	0.95	1.29	0.75
Gd	4.55	5.65	2.37	1.67	3.79	2.48	3.47	3.44	5.93	1.67
Tb	0.65	0.81	0.3	0.21	0.53	0.34	0.5	0.48	0.85	0.21
Dy	3.97	4.97	1.83	1.38	3.31	2.08	3.01	2.92	5.14	1.38
Ho	0.77	0.98	0.35	0.27	0.64	0.39	0.6	0.57	0.98	0.27
Er	2.21	2.8	1	0.82	1.84	1.16	1.71	1.64	2.86	0.77
Tm	0.32	0.39	0.15	0.12	0.26	0.17	0.25	0.24	0.4	0.11
Yb	2.15	2.71	0.92	0.8	1.77	1.13	1.64	1.57	2.72	0.77
Lu	0.31	0.4	0.14	0.12	0.26	0.16	0.24	0.23	0.4	0.11
$\Sigma$ REE	136.24	169.01	68.32	54.21	117.22	76.84	98.81	106.93	175.56	54.21
LRE/HRE	8.13	8.03	8.68	9.06	8.45	8.71	7.65	8.71	10.12	7.65
(La/Lu) <sub>N</sub>	9.82	9.30	11.38	11.01	10.64	11.33	9.26	10.84	12.37	9.26
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.79	3.70	4.12	4.91	4.22	3.99	3.68	4.08	4.91	3.52
(Gd/Lu) <sub>N</sub>	1.88	1.81	2.17	1.78	1.87	1.99	1.85	1.93	2.21	1.55
$\delta$ Ce	0.99	1.03	0.97	0.97	0.98	0.96	0.96	0.99	1.05	0.96
$\delta$ Eu	0.67	0.66	1.29	1.81	0.71	0.94	0.71	0.93	1.81	0.65
Rb	89.98	161.81	63.07	62.11	98.16	77.37	81.60	92.75	161.81	62.11
Sr	174.35	151.54			549.78	180.62	247.28	672.13	2737.00	146.10
Ba	393.00	376.00	4495.00	5368.00	977.00	1071.00	726.00	1617.16	5368.00	376.00
Zr	164.23	163.39	54.82	51.92	115.35	65.65	98.96	100.42	164.23	46.22
Hf	4.11	4.13	1.53	1.48	2.91	1.82	2.65	2.65	4.13	1.28
Th	12.23	13.02	5.61	5.19	10.19	6.89	8.35	8.93	13.42	4.44
U	2.57	3.45	1.72	1.37	2.03	1.33	1.99	2.42	6.33	1.33
Y	21.54	27.17	10.16	7.66	18.56	11.37	17.15	16.03	27.24	7.66
Cr	90.07	96.84	33.40	32.52	60.92	55.51	62.13	61.61	105.47	32.52
V	70.07	122.30	35.46	35.93	71.65	38.15	59.73	59.33	122.30	33.40
Rb/Sr	0.52	1.07			0.18	0.43	0.33	0.40	1.07	0.03
V/Cr	0.78	1.26	1.06	1.10	1.18	0.69	0.96	0.98	1.31	0.38
Sr/Ba	0.44	0.40			0.56	0.17	0.34	0.41	0.98	0.12
Th/U	4.76	3.77	3.26	3.79	5.02	5.18	4.20	4.16	7.29	1.05
Zr/Y	7.62	6.01	5.40	6.78	6.21	5.77	5.77	6.28	9.57	4.89



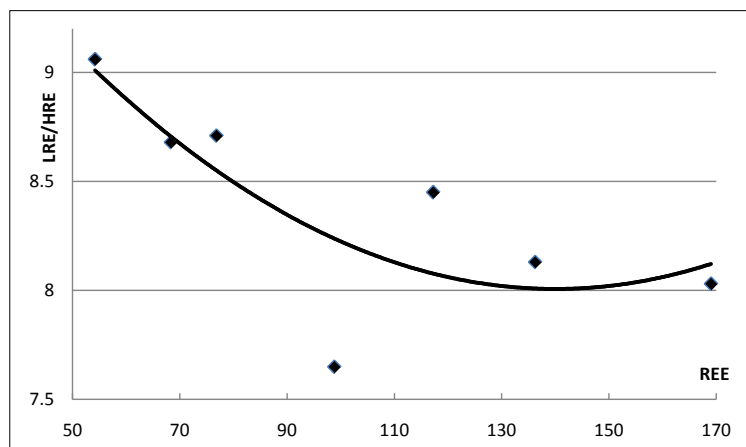


Figure 35. LRE/HRE versus  $\Sigma$ REE (ppm) contents graph of sediments in Mayang basin

图 35. 麻阳盆地沉积物 LRE/HRE- $\Sigma$ REE 相关性图解

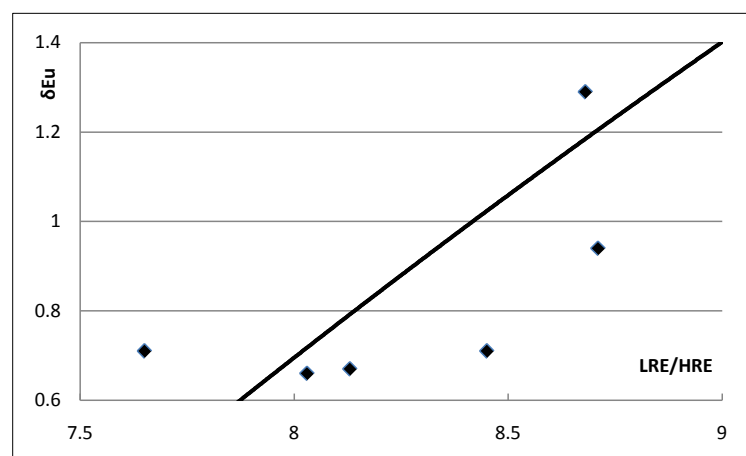


Figure 36.  $\delta$ Eu versus LRE/HRE graph of sediments in Mayang basin

图 36. 麻阳盆地沉积物  $\delta$ Eu-LRE/HRE 相关性图解

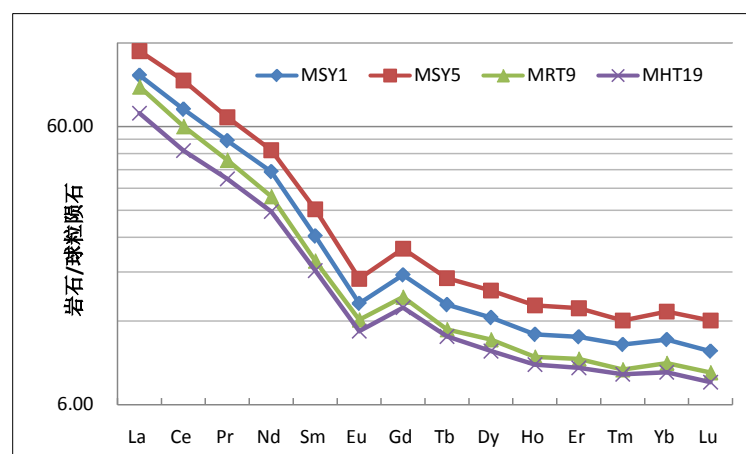


Figure 37. Chondrite-normalized REE distribution patterns for sediments in Mayang basin

图 37. 麻阳盆地沉积物稀土配分曲线图

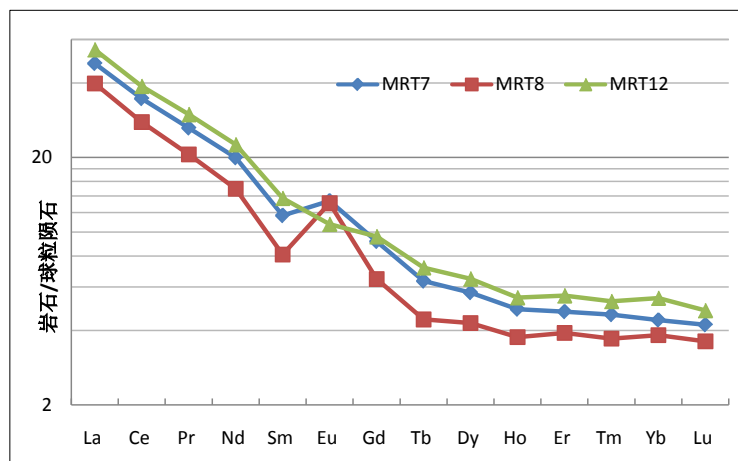


Figure 38. Chondrite-normalized REE distribution patterns for sediments in Mayang basin

图 38. 麻阳盆地沉积物稀土配分曲线图

## 6. 滨海潮坪相稀土地球化学模式

滨海潮坪相沉积比较复杂，可以有陆源海相沉积和海陆混合来源的沉积。陆源海相是沉积物质来自大陆，而在海洋环境形成的沉积物，这种沉积环境一般在滨海潮汐带或者浅海环境，一般为碎屑沉积为主。而对于化学沉积或者胶体化学沉积物，经常陆源物质为碎屑物质，而海源提供化学物质的混合物，因此稀土地球化学模型比较复杂。我国磷块岩矿床主要是潮坪相胶体沉积矿床，下面以磷块岩矿床介绍潮坪相稀土地球化学特征。

### 6.1. 潮间带磷块岩

纵贯滇东北、会泽 - 寻甸、滇池 - 抚仙湖和滇东南区域的下寒武统含磷岩系，主要由潮坪相潮间带沉积环境胶体沉积磷块岩、白云岩、泥灰岩组成，其中昆阳磷矿是最大磷块岩矿床。磷矿层厚度 31~67 m，分为上、下两个磷块岩矿层，之间夹层由含磷粘土岩相变为含磷白云岩，工业矿层主要由条带状白云质砂屑磷块岩组成。含磷岩系顶部为黑色泥质粉砂岩，与磷块岩接触带为一薄层结核状含海绿石粘土质磷块岩层。磷块岩主矿层为灰白色条纹状磷块岩，主要由隐晶氟磷灰石称为胶磷矿组成，含有陆源细碎屑物，显隐晶泥晶结构、泥质砾屑、砂屑、鲕粒结构(照片 1)，条纹潮汐层理发育(照片 2)，层面发育干裂纹构造(照片 3)。磷岩系底板是自紫色层至硅质条带白云岩。含磷岩系形成于海进序列，属于潮间带沉积环境沉积磷矿，向上渐变为浅海相黑色页岩沉积[13] [16]。

昆阳磷块岩矿石 Rb/Sr、Th/U、Zr/Y 均较陆源低，V/Cr 较海源低、而 Sr/Ba 较陆源高，因此既有海源特征，也有陆源特征。

磷矿层内不同岩石稀土元素总量有规律变化(表 8)，细晶白云岩最低，在  $5.97\sim 6.8 \times 10^{-6}$ ；含磷白云岩和白云质磷块岩稍高，为  $46.64\sim 138.3 \times 10^{-6}$ ；致密磷块岩稀土总量最高，为  $128.15\sim 222.1 \times 10^{-6}$ ，平均  $189.43 \times 10^{-6}$ 。

总体轻重稀土比值在 3.1~5.26，以黑色页岩最高，为 8.87，但是磷块岩轻重稀土比值与白云岩相近，高于含磷白云岩。LRE/HRE-ΣREE 呈上凸曲线相关性(图 39)， $\delta\text{Eu-LRE/HRE}$  呈现半凸起弧形曲线负相关(图 40)。稀土配分曲线右倾斜，以磷块岩和黑色页岩斜率最大，白云岩和含磷白云岩斜率较小，轻稀土段斜率大于重稀土段斜率。含磷白云岩及磷块岩均表现为极其明显的负铈异常和负钕异常(图 41，图 42)，是潮坪相氧化环境沉积的特征。

**Table 8.** REE and Trace elements compositions of phosphoric rock series in Kunyang phosphate deposit  
**表 8.** 昆阳磷矿含磷岩系稀土及微量元素含量表

样号	白云岩		含磷白云岩				磷块岩					黑页岩	
	BYP	HP1	HP2	HP3	HP4	平均	PK2	PK6	PK9	PK10	Km6	平均	Km9
La	4.14	19.94	10.54	29.22	22.51	20.55	74.53	36.96	33.62	51.51	44.95	46.69	38.58
Ce	6.48	19.32	9.17	40.82	48.62	29.48	55.21	31.35	63.3	45.28	28.84	46.70	56.2
Pr	1.04	3.94	2.3	6.81	5.7	4.69	18.18	7.51	8.51	12.31	7.65	10.22	7.14
Nd	4.23	14.15	9.96	28.45	22.27	18.71	72.67	24.51	38.85	53.8	33.99	41.52	25.29
Sm	1.15	3.95	3.11	5.37	4.48	4.23	13.24	4.8	8.13	10.02	6.14	7.76	4.25
Eu	0.25	0.25	0.18	1.04	0.21	0.42	2.93	0.43	0.23	1.43	1.55	1.23	0.8
Gd	1.20	4.93	3.65	9.16	6.17	5.98	20.82	7.11	11.23	17.24	8.6	11.53	4.16
Tb	0.16	0.68	0.52	1.15	0.98	0.83	3	1.01	1.69	2.34	1.47	1.70	0.67
Dy	0.88	3.64	2.69	6.62	5.96	4.73	17	5.6	8.38	12.3	9.77	9.48	3.8
Ho	0.21	0.89	0.75	1.64	1.37	1.16	3.89	1.5	1.65	2.84	2.37	2.18	0.81
Er	0.49	2.39	2.04	4.41	4.51	3.34	9.9	4.1	3.6	7.44	6.72	5.69	2.38
Tm	0.08	0.3	0.28	0.61	0.77	0.49	1.27	0.53	0.48	0.96	1.03	0.78	0.41
Yb	0.39	1.33	1.28	2.67	4.42	2.43	5.09	2.41	1.75	4.11	5.05	3.46	2.32
Lu	0.05	0.17	0.17	0.33	0.79	0.37	0.78	0.33	0.23	0.52	0.84	0.51	0.36
REE	20.73	75.88	46.64	138.3	128.76	97.40	298.51	128.15	181.65	222.1	158.97	189.43	147.17
LRE/HRE	4.99	4.30	3.10	4.20	4.16	3.94	3.83	4.67	5.26	3.65	3.43	4.95	8.87
$\delta\text{Ce}$	0.94	0.52	0.45	0.70	1.03	0.72	0.36	0.45	0.90	0.43	0.37	0.56	0.81
$\delta\text{Eu}$	0.65	0.17	0.16	0.45	0.12	0.26	0.54	0.23	0.07	0.33	0.65	0.40	0.58
(La/Lu) <sub>N</sub>	6.99	12.56	6.64	9.48	3.05	6.03	10.23	11.99	15.65	10.61	5.73	10.95	11.48
(La/Sm) <sub>N</sub>	2.27	3.18	2.13	3.42	3.16	3.06	3.54	4.84	2.60	3.23	4.61	4.09	5.71
(Gd/Lu) <sub>N</sub>	2.69	3.72	2.75	3.56	1.00	2.10	3.42	2.76	6.26	4.25	1.31	3.25	1.48
Rb						13.26					7.37	5.20	90.96
Sr						72.52					426.7	697.27	70.18
Ba						45.15					113.8	189.48	397.1
Zr						0.86					0.74	0.83	3.33
Th						1.49					1.24	1.01	8.15
U						3.34					11.07	13.64	7.12
Y						9.9					131.3	101.74	28.88
Cr						18.36					39.37	34.83	76.44
V						13.88					26.84	19.09	131.75
Rb/Sr						0.183					0.017	0.009	1.296
Sr/Ba						1.606					3.75	3.737	0.177
Th/U						0.446					0.112	0.079	1.144
V/Cr						0.756					0.682	0.502	1.724
Zr/Y						0.087					0.006	0.009	0.115

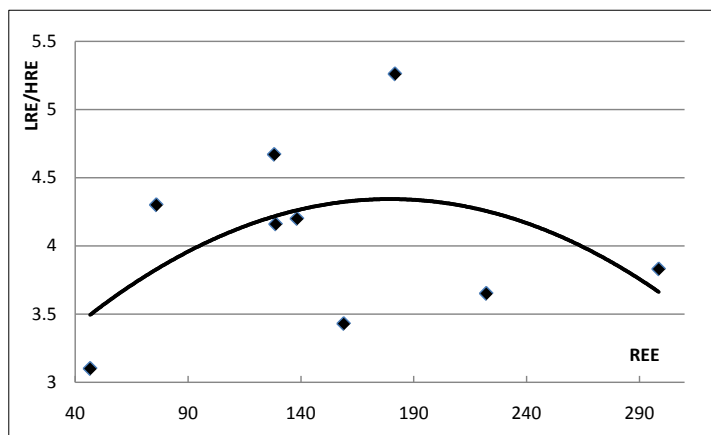


Figure 39. LRE/HRE versus  $\Sigma$ REE (ppm) contents graph for Kuyang phosphate deposit  
图 39. 昆阳磷矿磷块岩 LRE/HRE- $\Sigma$ REE 相关性图解

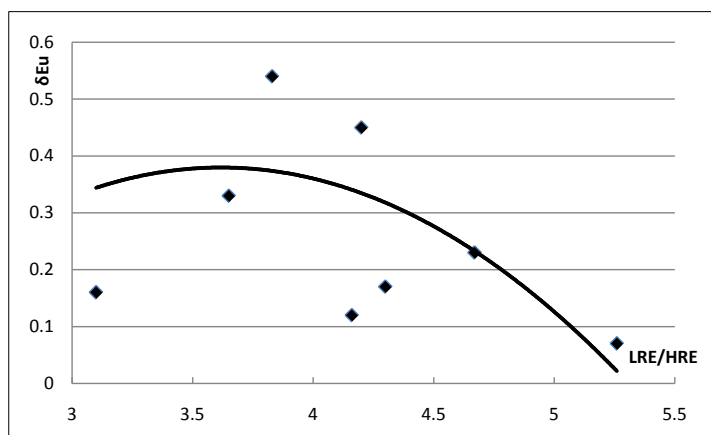


Figure 40.  $\delta$ Eu versus LRE/HRE graph for Kuyang phosphate deposit  
图 40. 昆阳磷矿磷块岩  $\delta$ Eu-LRE/HRE 相关性图解

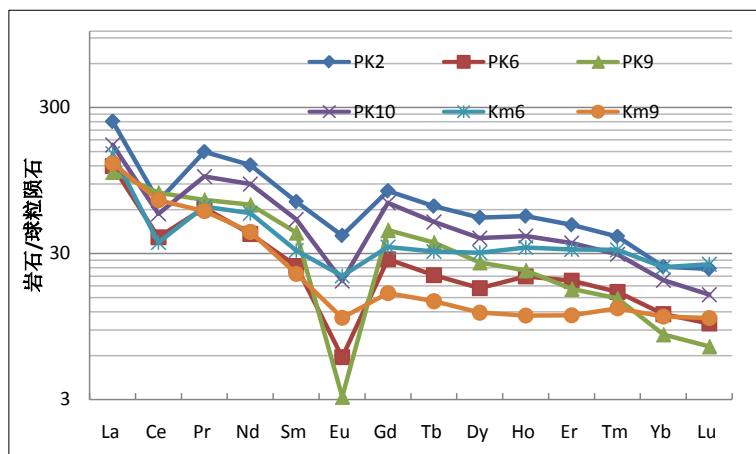
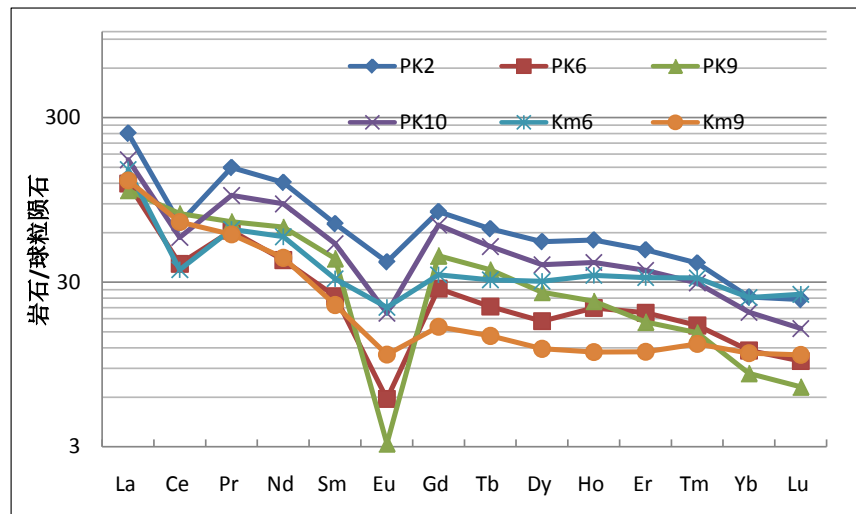


Figure 41. Chondrite-normalized REE distribution patterns for phosphorite samples from Kuyang phosphate deposit. Curves (PK6, PK9, Pk10) with higher slopes and stronger negative Eu anomalies cut curves (PK2, Km9, Km6) with lower slopes and weaker negative Eu anomalies, which shows the samples are marine

图 41. 昆阳磷矿磷块岩矿石稀土配分曲线图, 斜率大铕异常强的 PK6、PK9、PK10 曲线, 切割斜率小而铕异常弱的 PK2、Km9 和 Km6 曲线, 海源物质特征



**Figure 42.** Chondrite-normalized REE distribution patterns for phosphoric dolomite samples from Kunyang phosphate deposit. Curves (HP1, HP3) with higher slopes and weaker negative Eu anomalies cut curves (HP2, HP4) with lower slopes and stronger negative Eu anomalies, which shows the samples are terrigenous

**图 42.** 昆阳磷矿含磷白云岩稀土配分曲线图，斜率大铕异常弱的 HP1、HP3 曲线，切割斜率小而铕异常强的 HP2、HP4 曲线，陆源物质特征

稀土总量高的磷块岩矿石稀土配分曲线图显示斜率大的曲线负铕异常强，切割斜率小而负铕异常弱的曲线，这是显示的海源物质特征(图 41)；稀土总量低的含磷白云岩稀土配分曲线图显示斜率大的曲线铕异常弱，切割斜率小而负铕异常强曲线，这是陆源物质特征(图 42)。

上述稀土地球化学模型显示昆阳磷矿属于海陆混合源海相沉积特点，其中碎屑物来自陆源，磷化学物质主要来自海源，两种来源都影响稀土的分配，但是磷块岩中稀土较高，说明海源稀土是主要来源。

## 6.2. 潮坪泻湖磷块岩

川西中泥盆统什邡组底部什邡期含磷岩系中形成一种特殊的磷锶铝石型磷矿类型，国内外均为罕见 [11] [15]，主要由砾屑磷块岩、磷锶铝石岩、含磷高岭石粘土岩和含磷炭质水云母粘土岩组成。

扬子古陆西缘近东西向断裂带中发育的喀斯特岩溶地貌形成一系列近于平行的深度不等的岩溶洼地，控制了滨海泻湖展布，促进磷质富集成矿。磷块岩建造及厚度的变化明显地受古构造和古地形的控制，角砾状磷块岩大都沉积在低洼处，致密状磷块岩大都沉积在较隆起的地方。磷块岩有致密状、角砾状、团粒状构造和条带状构造(照片 4)，尤其是团粒状磷块岩(照片 5)和角砾状磷块岩分布广泛(照片 6)。

含磷岩系岩性、沉积构造显示浅水动荡泻湖相沉积特点，砾屑磷块岩是由致密状磷块岩经破碎，并被大风暴带到离岸较近的古喀斯特地区(或后滨地带)快速沉积而成的。随后海平面继续上升，海水淹没了这些隆起区(或后滨区)，并在砾屑磷块岩之上沉积了致密状磷块岩。因而这些磷块岩是在海进的海岸环境高能相形成的，而磷锶铝石岩、粘土岩和炭质页岩，是在局限的、水流活动弱的海湾或泻湖相形成的[14]。

磷块岩矿石 Rb/Sr、Th/U、Zr/Y 均较陆源低，V/Cr 较海源低、Sr/Ba 异常高，均显示的海源特征。

磷块岩矿石稀土总量较高，平均  $235.76 \times 10^{-6}$  (表 9)，轻重稀土比值平均 4.15， $\delta\text{Ce}$ 、 $\delta\text{Eu}$  均较低，稀土配分曲线斜率轻稀土段斜率大于重稀土段斜率(表 8)。

LRE/HRE- $\Sigma\text{REE}$  呈负相关曲线(图 43)， $\delta\text{Eu}$ -LRE/HRE 呈正相关曲线(图 44)。稀土配分曲线右倾斜，均表现为极其明显的负铈异常和负铕异常(图 45，图 46)，是潮坪相氧化环境沉积的特征。稀土总量高的三条配分曲线，斜率大的曲线铕异常弱，斜率小的曲线铕异常强(图 45)，稀土总量低的两条曲线，斜率

**Table 9.** REE and trace elements compositions of phosphoric rock series in Shifang phosphate deposit  
**表 9.** 什邡磷矿含磷岩系稀土及微量元素含量表

	SF1	SF2	SF4	SF6	SF7	平均
La	9.22	31.08	90.63	70.79	70.16	54.37
Ce	17.92	23.44	74.14	87.82	61.14	52.89
Pr	2.01	5.93	17.42	18.73	13.14	11.44
Nd	8.25	25.48	75.68	87.72	52.78	49.98
Sm	1.44	5.21	14.93	21.54	10.12	10.65
Eu	0.37	1.29	3.48	4.84	2.34	2.46
Gd	1.58	6.47	18.57	25.12	11.33	12.61
Tb	0.27	1.13	3.28	4.58	1.95	2.24
Dy	1.45	7.75	21.7	30.1	12.83	14.77
Ho	0.29	1.77	4.91	6.72	2.96	3.33
Er	0.9	5.24	14.77	19.26	8.17	9.67
Tm	0.15	0.82	2.36	2.92	1.25	1.5
Yb	0.87	4.75	12.76	16.55	7.3	8.44
Lu	0.13	0.78	2.17	2.68	1.2	1.39
∑REE	44.84	121.13	356.79	399.36	256.68	235.76
LRE/HRE	6.96	3.22	3.43	2.7	4.46	4.15
(La/Lu) <sub>N</sub>	7.67	4.27	4.45	2.81	6.23	5.09
(La/Sm) <sub>N</sub>	4.02	3.75	3.82	2.07	4.36	3.60
(Gd/Lu) <sub>N</sub>	1.57	1.06	1.09	1.19	1.20	1.23
δCe	1	0.42	0.45	0.58	0.48	0.59
δEu	0.73	0.68	0.63	0.63	0.66	0.67
Rb	32.99	2.51	22.59	1.48	14.98	14.91
Sr	121.9	827.05	3347	88705	1484	18897
Ba	437.05	608.9	436.8	2072	402.4	791.43
Zr	1.02	0.91	6.45	6.62	3.1	3.62
Th	4.16	2.48	3.56	31.93	1.3	8.68
U	2.09	16.71	29.43	57.26	23.14	25.72
Y	9.29	84.53	222.4	276.55	125.9	143.73
Cr	22.15	60.79	230.5	364.2	226.3	180.79
V	21.12	142.7	183.2	194.6	232.35	154.79
Rb/Sr	0.271	0.003	0.007	0	0.01	0.058
Sr/Ba	0.279	1.358	7.663	42.811	3.688	11.16
Th/U	1.989	0.148	0.121	0.558	0.056	0.574
V/Cr	0.953	2.347	0.795	0.534	1.027	1.131
Zr/Y	0.11	0.011	0.029	0.024	0.025	0.04

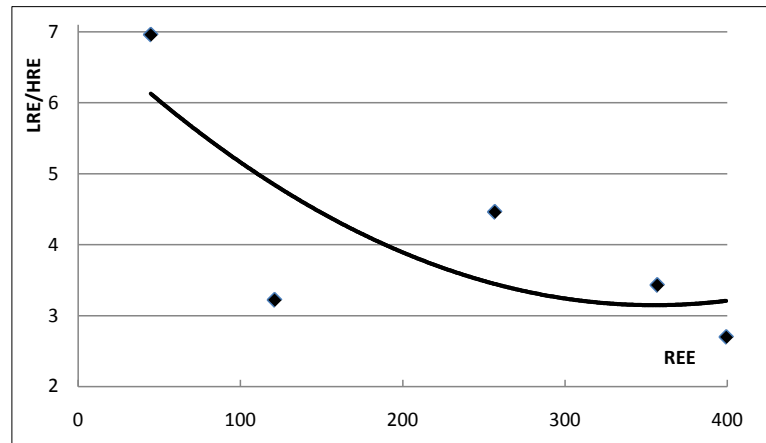


Figure 43. LRE/HRE versus REE (ppm) contents graph of Shifang phosphate deposit  
图 43. 什邡磷矿磷块岩 LRE/HRE-REE 相关性图解

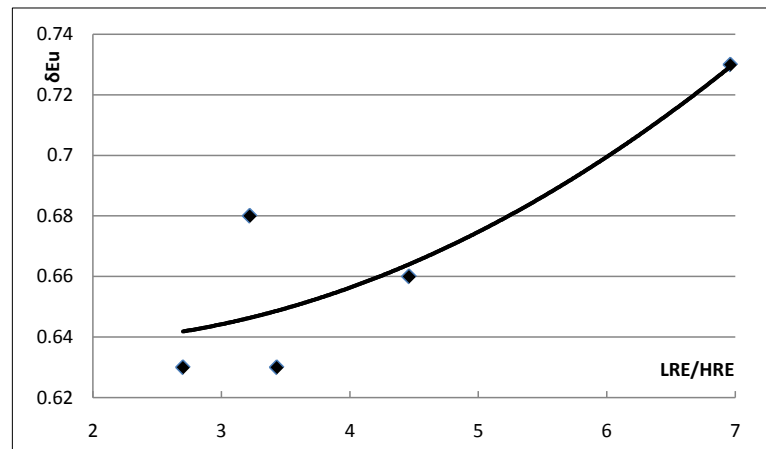


Figure 44.  $\delta\text{Eu}$  versus LRE/HRE graph of Shifang phosphate deposit  
图 44. 什邡磷矿磷块岩  $\delta\text{Eu}$ -LRE/HRE 相关性图解

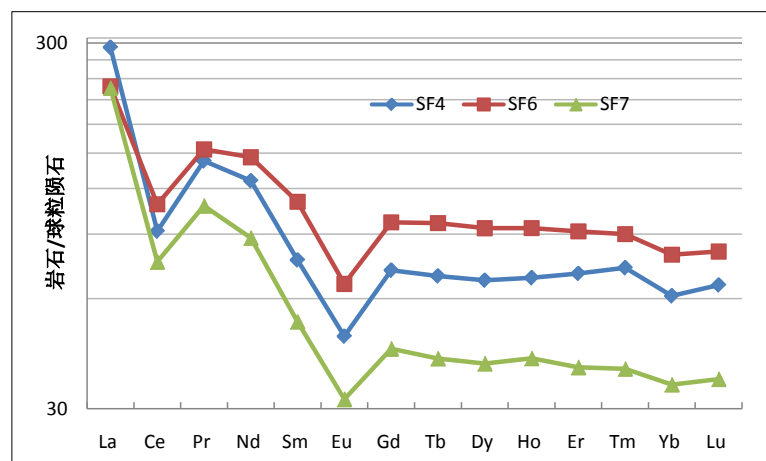


Figure 45. Chondrite-normalized REE distribution patterns for Shifang phosphate deposit. Curves disperse to the right, with curve SF7 showing a higher slope and a weaker negative Eu anomaly and Curves SF4 and SF6 showing just the opposite  
图 45. 什邡磷矿磷块岩稀土分配曲线，斜率大铕异常弱的 SF7 与斜率小铕异常强的 SF4、SF6 呈向右散开

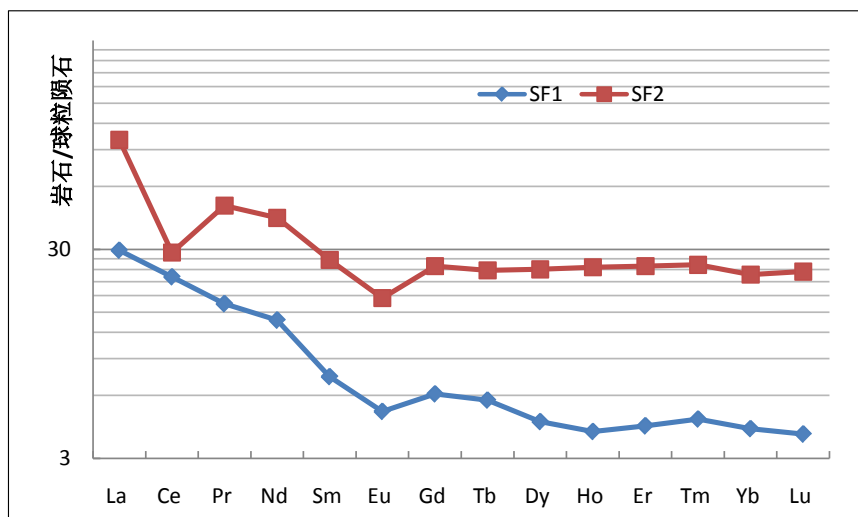


Figure 46. Chondrite-normalized REE distribution patterns for Shifang phosphate deposit. Curve SF1, having a higher slope, shows a stronger negative Eu anomaly than Curve SF2 which has a lower slope

图 46. 什邡磷矿磷块岩稀土配分曲线，斜率大 SF1 曲线铕异常比斜率小的 SF2 曲线铕异常弱

大的曲线铕异常比斜率小的曲线铕异常弱(图 46)。

上述稀土地球化学模型显示什邡磷矿属于海陆混合源海相泻湖沉积特点，其中碎屑物来自陆源，磷化学物质主要来自海源，但是磷块岩中稀土较高，说明海源稀土是主要来源。

### 6.3. 潮下浅海相磷块岩

开阳磷矿是鄂湘黔晚元古界陡山沱组磷矿带上重要的磷块岩矿床，磷矿石品位高，有害元素含量低，是优质碳酸盐岩型磷块岩矿床。矿区位于继承洋水古隆起的背斜两翼，核部地层为前震旦纪变质岩，翼部依次为下震旦统南沱组冰碛砾岩-紫红色砂页岩、陡山沱组含磷地层、灯影组藻白云岩及下寒武统黑色页岩。

磷块岩矿石主要矿物组分是碳氟磷灰石、白云石和粘土矿物，也有石英、长石，海绿石、硬锰矿、软锰矿、褐铁矿等。磷矿石砂砾屑、球粒状、层纹石构造(照片 7)，灰紫色磷块岩薄层与白云质泥灰岩薄层组成的互层状构造(照片 8)及厚层块状构造(照片 9)。

矿层矿物粒度一般都是下粗上细形成向上渐细的正韵律结构，其间多个次级小韵律构成，这些小韵律有些表现为正韵律，但有些可表现为反韵律，即下细上粗的结构特征。岩相学研究显示开阳磷块属于潮下浅海环境沉积磷块岩矿床。

磷块岩矿石 Rb/Sr、Th/U、Zr/Y 均较陆源低，V/Cr、Sr/Ba 均较高，显示海源为主的特征。磷块岩矿石稀土总量最高在  $300 \times 10^{-6}$  以上(表 10)，低者不足  $50 \times 10^{-6}$ ，平均  $180.93 \times 10^{-6}$ ，轻重稀土比值平均 3.69， $\delta\text{Eu}$  平均 0.77， $\delta\text{Ce}$  平均 0.93，稀土配分曲线斜率轻稀土段斜率  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  大于重稀土段斜率  $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$ ，稀土总量与 Zr/Y 比值具有正相关性。磷矿层中白云质泥灰岩夹层稀土总量明显低于磷块岩矿石，为  $9.26\text{--}71.3 \times 10^{-6}$ ，轻重稀土比值高于磷块岩。

磷块岩 LRE/HRE-REE 呈上凸曲线相关型式(图 47)， $\delta\text{Eu}$ -LRE/HRE 呈负相关曲线(图 48)。稀土配分曲线右倾斜，表现为弱负铈异常和负铕异常(图 49，图 50)，显示弱还原环境沉积的特征。稀土总量高的配分曲线，斜率大的曲线铕异常强，斜率小的曲线铕异常弱(图 49)，稀土总量低的曲线，也显示类似型式，斜率大的曲线铕异常比斜率小的曲线铕异常强(图 50)。



**Table 10.** REE and trace elements compositions of phosphoric rock series in Kaiyang phosphate deposit  
**表 10.** 开阳磷矿含磷岩系稀土及微量元素含量表

	白云岩						磷块岩						平均
	GZ1	SJW09	GZ2	GZ4	GZ8	GZ9	GZ11	GZ13	SJW15	SJW16	SJW17		
La	8.98	1.98	9.86	6.79	23.53	25.43	29.83	21.07	66.20	50.30	37.60	30.07	
Ce	22.74	3.07	22.53	14.28	42.56	52.91	71.30	53.45	103.00	83.80	70.30	57.13	
Pr	3.22	0.43	2.71	1.84	5.57	6.58	10.07	7.70	15.80	11.40	9.79	7.94	
Nd	14.69	1.89	12.89	8.32	24.99	29.58	48.44	37.81	73.60	51.80	46.10	37.06	
Sm	5.14	0.37	2.74	1.78	4.99	6.31	11.19	8.68	15.50	11.10	9.99	8.03	
Eu	1.18	0.11	0.82	0.63	1.32	1.55	3.46	2.18	3.63	2.63	2.45	2.07	
Gd	5.54	0.37	3.66	2.20	5.63	7.00	13.18	10.01	16.70	11.60	10.60	8.95	
Tb	0.79	0.07	0.54	0.37	1.00	1.22	2.34	1.77	3.12	2.21	2.07	1.63	
Dy	4.18	0.41	3.35	2.79	6.37	7.99	14.48	11.61	20.80	15.10	14.20	10.74	
Ho	0.73	0.08	0.77	0.65	1.43	1.72	3.16	2.57	4.77	3.39	3.17	2.40	
Er	1.80	0.23	2.35	2.12	4.38	5.27	9.29	7.44	13.40	9.77	9.09	7.01	
Tm	0.27	0.03	0.36	0.34	0.72	0.89	1.54	1.21	1.89	1.41	1.31	1.07	
Yb	1.49	0.19	1.95	1.81	4.03	4.89	8.27	6.67	10.20	7.83	7.28	5.88	
Lu	0.28	0.03	0.32	0.30	0.63	0.82	1.32	1.06	1.60	1.23	1.14	0.94	
ΣREE	71.03	9.26	64.85	44.22	127.2	152.16	227.87	173.23	350.21	263.57	225.09	180.93	
LRE/HRE	3.71	5.57	3.88	3.18	4.26	4.11	3.25	3.09	3.83	4.02	3.61	3.69	
δCe	1.02	0.80	1.05	0.97	0.89	0.98	0.99	1.01	0.77	0.84	0.88	0.93	
δEu	0.68	0.91	0.79	0.97	0.76	0.71	0.87	0.72	0.69	0.71	0.73	0.77	
(La/Lu) <sub>N</sub>	3.43	7.07	3.30	2.42	4.00	3.32	2.42	2.13	4.43	4.38	3.53	3.33	
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.10	3.37	2.26	2.40	2.97	2.54	1.68	1.53	2.69	2.85	2.37	2.36	
(Gd/Lu) <sub>N</sub>	2.54	1.58	1.47	0.94	1.15	1.09	1.28	1.21	1.34	1.21	1.19	1.21	
Rb	21.21	2.87	6.56	4.32	17.58	19.97	12.33	6.26	7.11	5.91	4.83	9.43	
Sr	268.1	69.0	897.20	787.90	973.4	1029.5	1139.5	1279.5	757.0	858.0	764.0	942.88	
Ba	260.15	63.40	1979.0	5532.5	895.1	2316.5	5452.5	9167.5	1599.0	574.0	1876.0	3265.78	
Zr	1.53	14.70	0.77	0.66	1.48	1.42	1.46	2.05	37.90	33.50	34.20	12.60	
Hf	3.04	0.24	0.72	0.69	1.05	1.66	1.74	0.52	1.50	2.44	1.10	1.27	
Th	2.20	0.52	1.17	0.69	2.39	2.39	5.27	3.40	3.33	2.75	2.36	2.64	
U	2.88	1.70	18.70	11.30	17.65	9.23	9.22	8.46	30.70	24.70	25.40	17.26	
Y	22.47	3.50	32.64	29.44	56.00	67.24	115.00	95.22	192.00	134.00	124.00	93.95	
Nb	2.67	1.19	1.05	1.19	1.41	1.84	2.62	1.50	3.37	2.88	2.51	2.04	
Ta	0.17	0.04	0.04	0.04	0.08	0.11	0.10	0.05	0.18	0.12	0.11	0.09	
Cr	21.17	14.00	23.62	22.77	27.82	22.80	21.94	21.16	13.30	27.40	11.70	21.39	
Ni	14.21	32.00	22.14	24.43	24.87	26.71	22.56	22.04	44.50	47.40	42.90	30.84	
Co	13.83	3.73	9.15	7.48	14.53	18.76	9.97	3.56	5.95	4.98	3.68	8.67	
V	34.36	3.29	11.26	14.39	43.16	13.06	16.96	7.28	26.00	28.20	25.10	20.60	
Rb/Sr	0.08	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	
Sr/Ba	1.03	1.09	0.45	0.14	1.09	0.44	0.21	0.14	0.47	1.49	0.41	0.54	
Th/U	0.76	0.31	0.06	0.06	0.14	0.26	0.57	0.40	0.11	0.11	0.09	0.20	
V/Cr	1.62	0.24	0.48	0.63	1.55	0.57	0.77	0.34	1.95	1.03	2.15	1.05	
Zr/Y	0.07	4.20	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.20	0.25	0.28	0.09	

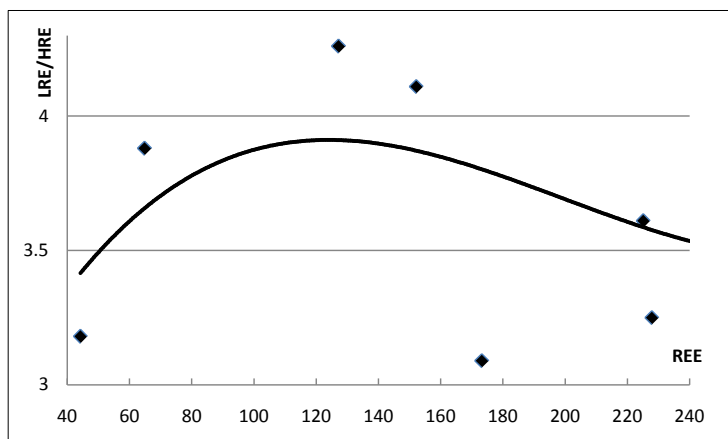


Figure 47. LRE/HRE versus REE (ppm) contents graph of Kaiyang phosphate deposit  
图 47. 开阳磷矿磷块岩 LRE/HRE-REE 相关曲线图

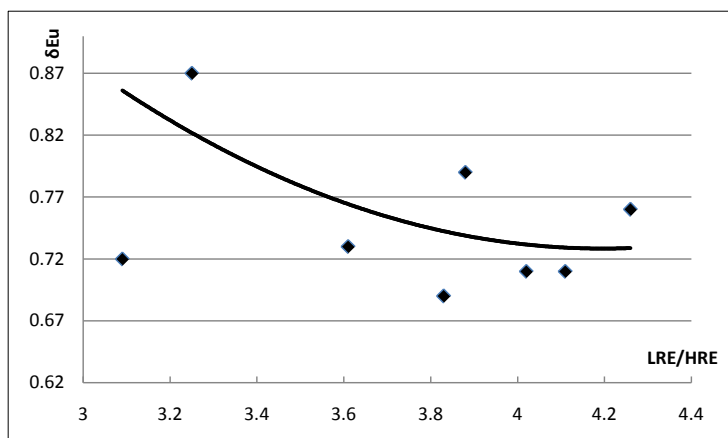


Figure 48.  $\delta\text{Eu}$  versus LRE/HRE graph of Kaiyang phosphate deposit  
图 48. 开阳磷矿磷块岩  $\delta\text{Eu}$ -LRE/HRE 相关曲线图

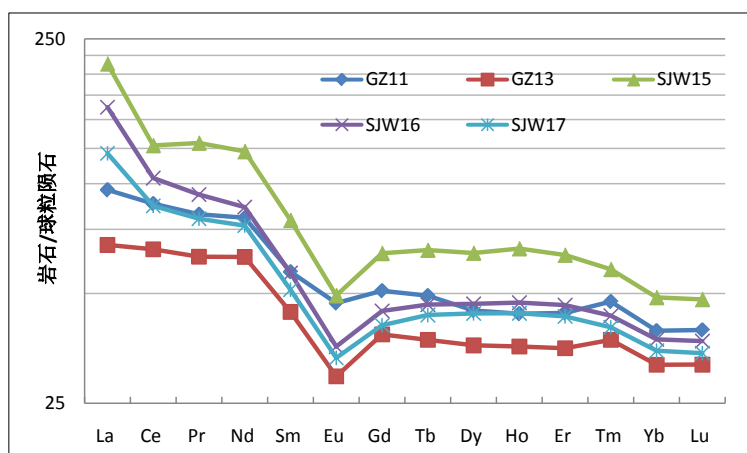


Figure 49. Chondrite-normalized REE distribution patterns for samples with  $\Sigma\text{REE}$  contents higher than the average. Curves SJW15, SJW16 and SJW17 are cut by the curves GZ11 and GZ13 which show lower slopes and weaker negative Eu anomalies

图 49. 开阳磷矿磷块岩高稀土总量稀土配分曲线图，斜率大的 SJW15、SJW16、SJW17 曲线负钷异常强，被斜率小负钷异常弱的 GZ11、GZ13 曲线切割

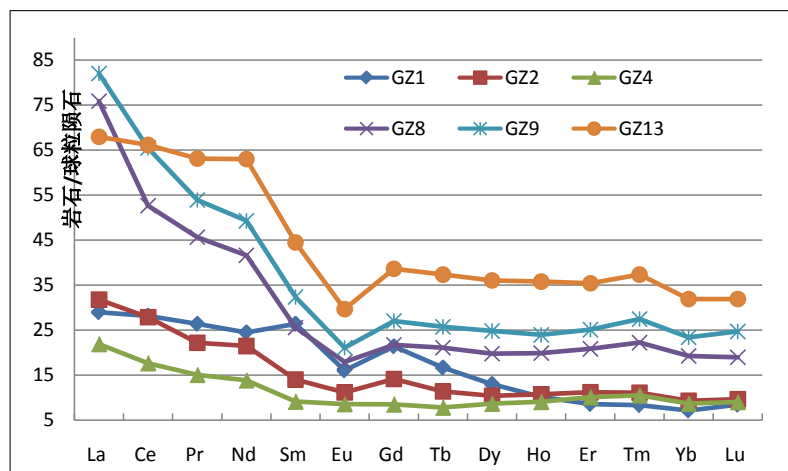


Figure 50. Chondrite-normalized REE distribution patterns for samples with  $\Sigma$ REE contents lower than the average. Curves GZ1, GZ8 and GZ9, with higher slopes, show stronger negative Eu anomalies than curves GZ2 and GZ4

图 50. 开阳磷矿磷块岩低稀土总量稀土配分曲线, 斜率大的 GZ1、GZ8、GZ9 负铕异常强, 斜率小的 GZ2、GZ4 曲线负铕异常弱

## 7. 稀土地球化学演化分析

稀土(主要是轻稀土)是不相容元素, 只有少量稀土进入矿物晶格, 沉积岩中大部分呈吸附状态存在, 这样导致富含有机质及粘土矿物多的岩石中稀土含量较高, 一些富含有机质碎屑岩型磷块岩中稀土含量接近工业品位。

沉积岩中自生矿物磷灰石及碎屑锆石等矿物也是属于富稀土矿物, 并且以富含重稀土为特征。根据阿尔金山花岗岩及东秦岭花岗岩中锆石稀土含量及花岗岩中稀土含量比较分配系数, 锆石稀土分配系数明显大于 1, 并且重稀土分配系数大于轻稀土, 随着原子序数增加, 富集系数逐渐增大, Lu 最大达到 135~765。哈萨克斯坦花岗岩中磷灰石中的稀土分配系数也明显大于 1, 并且重稀土分配系数大于轻稀土。

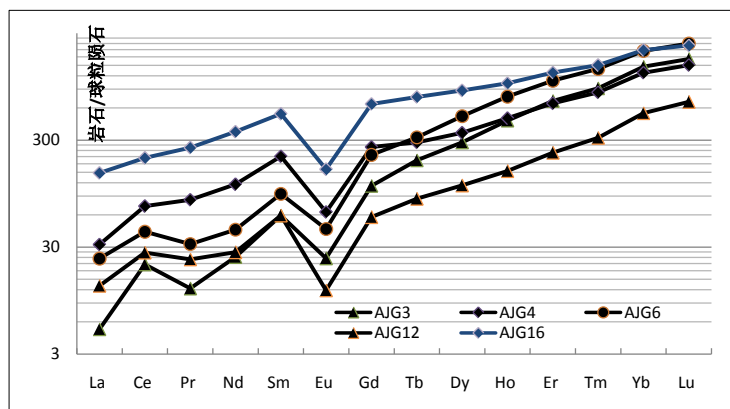
锆石的稀土配分曲线明显不同于一般岩石, 呈现轻稀土亏损, 重稀土富集的特征曲线, 一些锆石稀土配分曲线出现明显正铕异常(图 51)。锆石 LRE/HRE 比值均小于 1, 表现为左倾斜线,  $\delta\text{Eu-LRE/HRE}$  正相关(图 52), 因此负铕异常明显的曲线左倾斜率较大, 而弱负铕异常曲线左倾斜率较小。

磷灰石的稀土配分曲线类似于花岗岩, 呈现轻稀土富集, 重稀土亏损的特征曲线, 配分曲线均显示负铕异常(图 53)。 $\delta\text{Eu-LRE/HRE}$  略具有正相关(图 54), 因此负铕异常强的曲线斜率稍小, 而弱负铕异常曲线斜率较大。

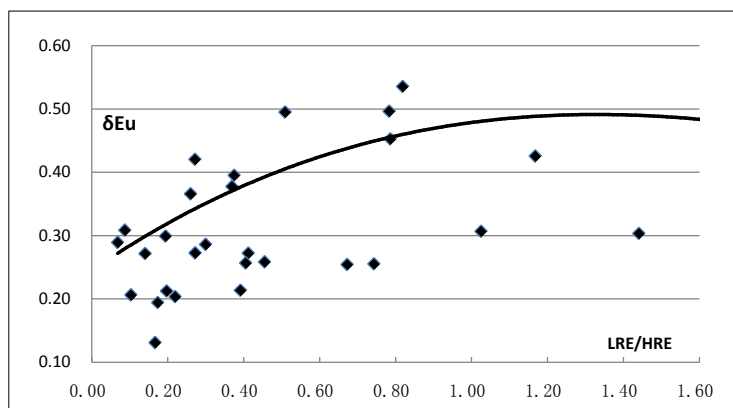
陆相岩浆岩的 LRE/HRE-Zr/Y,  $\delta\text{Eu-Zr/Y}$  都呈正相关, 这是由于岩浆岩中锆石是结晶矿物, 富含重稀土的锆石含量高导致岩浆岩中轻重稀土分异与铕异常不一致, 从而导致  $\delta\text{Eu-LRE/HRE}$  正相关。

而在沉积物中锆石是碎屑矿物, 粘土、有机质及胶体吸附是导致稀土富集的重要因素, 因此  $\Sigma\text{REE-Zr/Y}$ 、LRE/HRE-Zr/Y 的相关性不同于岩浆岩, 如智利海沟沉积物  $\Sigma\text{REE-Zr/Y}$  呈负相关(图 55), LRE/HRE-Zr/Y 呈现正相关(图 56); 麻阳盆地中生代沉积岩  $\Sigma\text{REE-Zr}$ 、LRE/HRE-Zr/Y 主要呈现正相关型式(图 57, 图 58), 这显然是受碎屑锆石稀土的影响。中国磷块岩的  $\Sigma\text{REE-Zr/Y}$ 、LRE/HRE-Zr/Y 与智利海沟沉积物类似,  $\Sigma\text{REE-Zr/Y}$  呈负相关(图 59), LRE/HRE-Zr/Y 呈现正相关(图 60), 磷块岩主要由胶体化学沉积的氟磷灰石组成, 含有少量陆缘碎屑物, 因此碎屑锆石较少, 其稀土特征反映的是海相沉积特征。

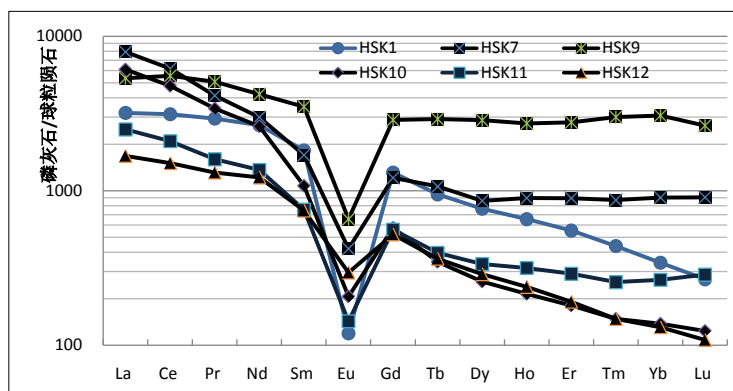
沉积过程中物质来源有海源和陆源, 沉积环境有海相和陆相, 均可以表现出不同的稀土分配型式, 海源物质以化学物质为主, 陆源物质以碎屑物质为主。在陆相沉积环境下, 物源是单一的陆源, 而在海



**Figure 51.** Chondrite-normalized REE distribution patterns for zircons of granite in Altun Mountains. The curves with higher left-leaning slopes have stronger negative Eu anomalies than those having lower left-leaning slopes  
**图 51.** 阿尔金山花岗岩锆石稀土配分模式图，左倾斜率大曲线负异常强于左倾斜率小的曲线



**Figure 52.**  $\delta\text{Eu}$  versus LRE/HRE graph of zircons of the granite in Altun Mountains  
**图 52.** 阿尔金山花岗岩锆石  $\delta\text{Eu}$ -LRE/HRE 散点图



**Figure 53.** Chondrite-normalized REE distribution patterns for apatites of granite in Kazakhstan. The curves, with higher slopes, have weaker negative Eu anomalies than those having lower slopes  
**图 53.** 哈萨克斯坦花岗岩磷灰石稀土配分模式图，斜率大曲线负异常弱于倾斜率小的曲线

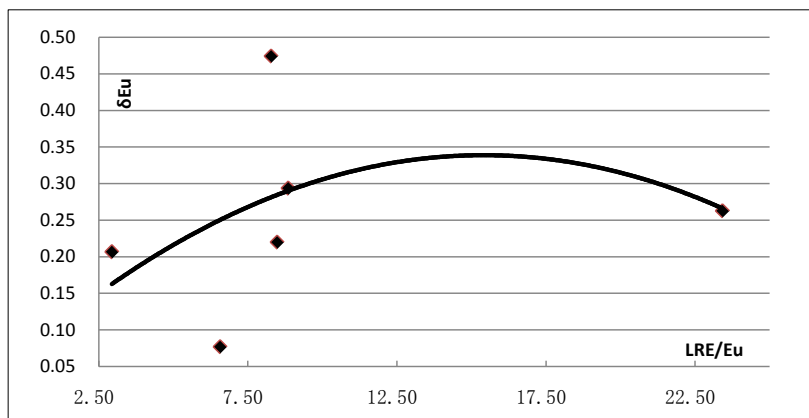


Figure 54.  $\delta\text{Eu}$  versus LRE/HRE of apatites of granite in Kazakhstan

图 54. 哈萨克斯坦花岗岩磷灰石  $\delta\text{Eu}$ -LRE/HRE 散点图

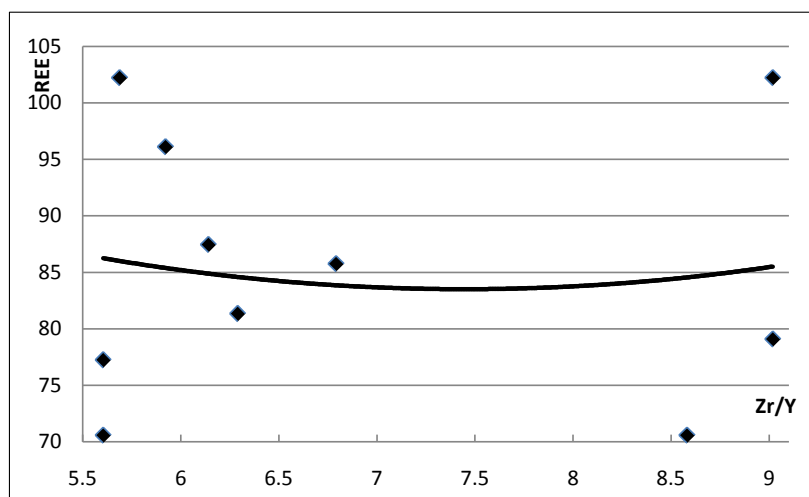


Figure 55.  $\Sigma\text{REE}$  versus Zr/Y graph of recent sediments in Chile trench

图 55. 智利海沟现代沉积物  $\Sigma\text{REE}$ -Zr/Y 散点图

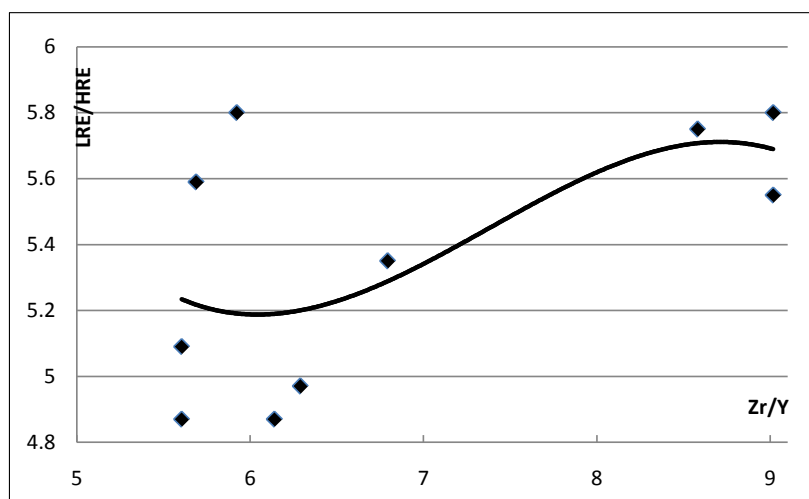


Figure 56. LRE/HRE versus Zr/Y graph of recent sediments in Chile trench

图 56. 智利海沟现代沉积物 LRE/HRE-Zr/Y 散点图

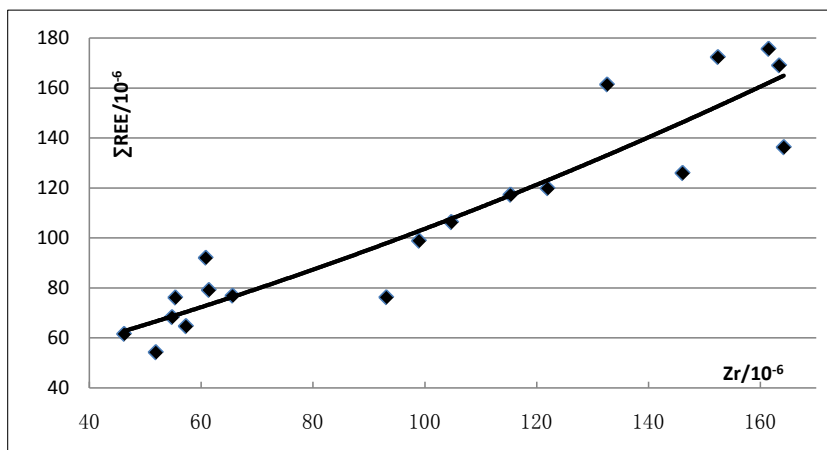


Figure 57.  $\Sigma$ REE versus Zr/Y graph of Mesozoic Sedimentary Rocks in Mayang basin

图 57. 麻阳盆地中生代沉积岩  $\Sigma$ REE-Zr 散点图

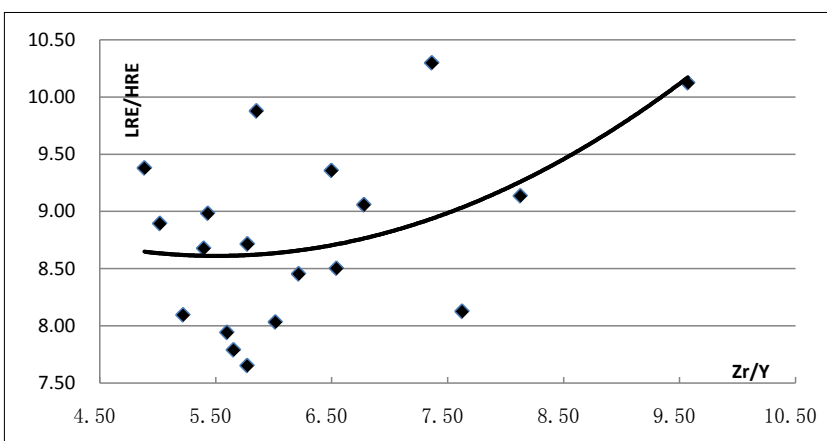


Figure 58. LRE/HRE versus Zr/Y graph of Mesozoic Sedimentary Rocks in Mayang basin

图 58. 麻阳盆地中生代沉积岩 LRE/HRE-Zr/Y 散点图

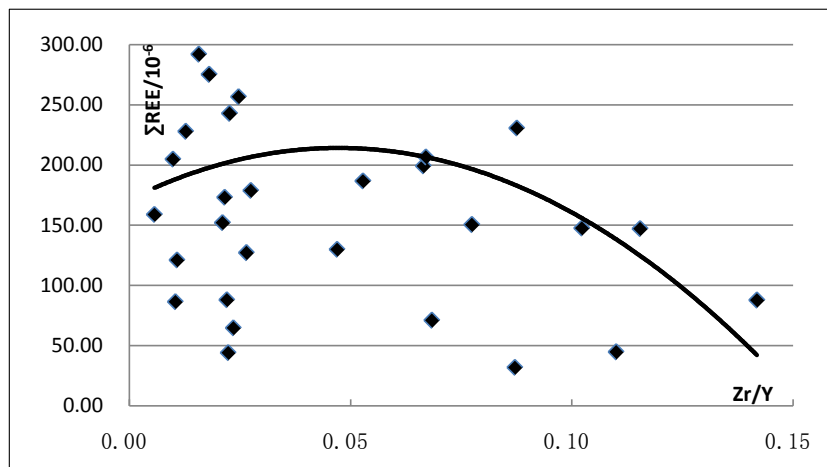


Figure 59.  $\Sigma$ REE versus Zr/Y graph of Phosphorite in China

图 59. 中国磷块岩  $\Sigma$ REE-Zr/Y 散点图

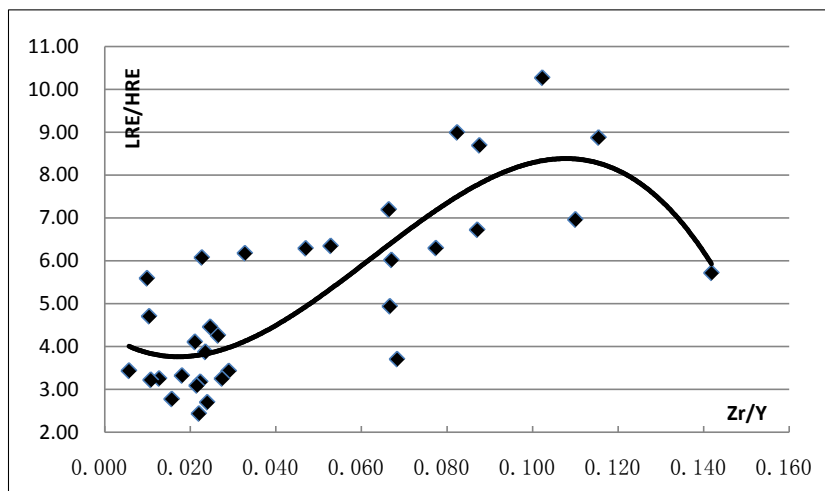


Figure 60. LRE/HRE versus Zr/Y graph of Phosphorite in China

图 60. 中国磷块岩 LRE/HRE-Zr/Y 散点图

相沉积环境中，物质来源比较复杂。海相碎屑沉积物物源以陆源为主，而化学沉积物则以海源为主，因此海相沉积物经常海陆混合来源。

海陆混合沉积物的 LRE/HRE- $\Sigma$ REE 和  $\delta$ Eu-LRE/HRE 相关曲线表现为两种型式，上凸和下凹曲线型式，分别代表了两种混合模式。

以海源化学物质为主的化学与胶体化学沉积物混合陆源碎屑物的 LRE/HRE- $\Sigma$ REE 一般表现为上凸型曲线， $\delta$ Eu-LRE/HRE 表现为下凹型曲线，如开阳磷块岩的稀土曲线型式。以陆源碎屑物质为主化学物质胶结沉积物的 LRE/HRE- $\Sigma$ REE 一般表现为下凹型曲线， $\delta$ Eu-LRE/HRE 表现为上凸型曲线，如智利海沟沉积物是碎屑物质为主的沉积物。

## 8. 结论

1) 世界各种岩浆岩的稀土元素特征值  $\Sigma$ REE-SiO<sub>2</sub>、LRE/HRE-SiO<sub>2</sub> 的相关性分析表明在基性岩到中性岩段稀土总量、轻重稀土分异及负铈异常是同步演化的，而从中性岩到酸性岩段，负铈异常与轻重稀土分异是不同步的。南天山哈拉军山石炭系火山岩稀土分布特点 LRE/HRE- $\Sigma$ REE 的下凹曲线相关型式和  $\delta$ Eu-LRE/HRE 表现上凸曲线相关型式，说明基性岩到中性岩的稀土演化与中酸性岩到酸性岩的稀土演化是不同原因造成的，岩石稀土演化不是单一的稀土总量、轻重稀土分异及负铈异常是同步演化的。

2) 大洋结核稀土总量高，在  $500 \times 10^{-6}$  以上，主要与氧化铁吸附有关。稀土配分曲线具有负铈异常和正铈异常，LRE/HRE- $\Sigma$ REE 正相关， $\delta$ Eu-LRE/HRE 负相关， $\delta$ Ce-LRE/HRE 正相关，并且相关系数较高。这种稀土地球化学特征代表了海源海相沉积物特征，与幔源岩浆岩稀土演化特征类似。

3) 大石桥镁质碳酸盐岩稀土总量低，其 LRE/HRE- $\Sigma$ REE、 $\delta$ Ce-LRE/HRE、 $\delta$ Eu-LRE/HRE 均为正相关，与大洋结核稀土特征的差异是  $\delta$ Eu-LRE/HRE 相关性差异，反映了氧化还原条件的差异， $\delta$ Ce-LRE/HRE 都是正相关，反映了铁锰氧化物吸附稀土的状态。

4) 海沟沉积物稀土特征表现为，稀土总量比较低，平均  $85.77 \times 10^{-6}$ ，LRE/HRE 较低，平均 5.35，弱负铈异常。智利海沟沉积物 LRE/HRE- $\Sigma$ REE 下凹型曲线型式和  $\delta$ Eu-LRE/HRE 略上凸弧形负相关型式代表了海相碎屑沉积物的特点；冲绳海沟沉积物 LRE/HRE-REE 与  $\delta$ Eu-LRE/HRE 都是负相关，其重要特征是稀土配分曲线重稀土段呈现撒开形态，与火山混入物的多少有关。

5) 湖南麻阳中生代陆相盆地碎屑岩稀土特征表现为，稀土总量比较高、LRE/HRE 大、具有正负铈

异常、无铈异常。 $LRE/HRE-\Sigma REE$  负相关曲线型式和  $\delta Eu-LRE/HRE$  正相关曲线型式代表了陆源陆相沉积特点。

6) 滨海潮汐带沉积磷块岩分为潮间带、潮坪泻湖及潮下带, 都具有海陆过渡相沉积特点, 但是其稀土地球化学特征略有不同。重要特征是具有负铈异常, 潮间带和潮坪泻湖沉积磷块岩负铈异常强, 潮下带磷块岩负铈异常弱。潮间带和潮下带磷块岩  $LRE/HRE-\Sigma REE$  显上凸曲线型式,  $\delta Eu-LRE/HRE$  略显下凹或者上凸的负相关曲线型式, 代表了海源化学物源为主混入少量陆源碎屑的海相沉积特征。潮坪泻湖沉积磷块岩  $LRE/HRE-\Sigma REE$  负相关,  $\delta Eu-LRE/HRE$  正相关的曲线型式与麻阳陆源陆相盆地沉积物特点类似, 代表了陆相改造作用。

7) 智利海沟沉积物与中国磷块岩的  $\Sigma REE-Zr/Y$  呈负相关,  $LRE/HRE-Zr/Y$  呈现正相关代表了海相沉积共同特征。麻阳盆地中生代沉积岩  $\Sigma REE-Zr/Y$ 、 $LRE/HRE-Zr/Y$  主要呈现正相关型式代表了陆源碎屑沉积特征。

## 致 谢

本文引用了大量文献期刊近 20 年来发表的有关作者的文献数据, 是他们的先期认真的工作提供了有用的数据, 使我们这篇文章得以有充分的数据支持, 进行全面总结获得有益的成果认识, 所以这篇文章的成果首先归功于提供原始数据资料的作者, 在此真诚的感谢。

## 基金项目

中国地质科学院矿产资源研究所委托项目 2013(077), 《中国主要品种煤炭工序趋势研究》。

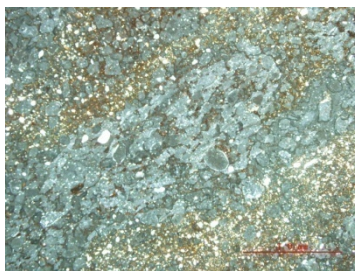
## 参考文献 (References)

- [1] Bau, M., Koschinsky, A., Dulski, P., et al. (1996) Comparison of the partitioning behaviors of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**, 1709-1725.
- [2] Lucassen, F., Wiedicke, M. and Franz, G. (2010) Complete recycling of a magmatic arc: Evidence from chemical and isotopic composition of Quaternary trench sediments in Chile (36° - 40°S). *International Journal of Earth Sciences*, **99**, 687-701.
- [3] Cao, M.J., Li, G.M., Qin, K.Z., Seitmuratova, E.Y. and Liu, Y.S. (2011) Major and trace element characteristics of apatites in granitoids from central Kazakhstan: Implications for petrogenesis and mineralization. *Resource Geology*, **62**, 63-83.
- [4] 曹玉亭, 刘良, 王超, 等 (2010) 阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成. *岩石学报*, **11**, 3259-3271.
- [5] 郭波, 朱赖民, 李犇, 等 (2009) 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景. *岩石学报*, **2**, 265-281.
- [6] 姜学钧, 文丽, 林学辉, 姚德 (2009) 稀土元素在成岩型海洋铁锰结核中的富集特征及机制. *海洋地质*, **12**, 114-121.
- [7] 何高文, 孙晓明, 杨胜雄, 朱克超, 等 (2011) 太平洋多金属结核和富钴结壳稀土元素地球化学对比及其地质意义. *中国地质*, **2**, 462-472.
- [8] 李继磊, 钱青, 高俊, 等 (2010) 西天山昭苏东南部阿登套地区大哈拉军山组火山岩及花岗岩侵入体的地球化学特征、时代和构造环境. *岩石学报*, **10**, 2913-2924.
- [9] 李注苍, 李永军, 李景宏, 栾新东, 郭文杰 (2006) 西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造环境分析. *新疆地质*, **2**, 120-124.
- [10] 孙林华, 彭头平, 王岳军 (2007) 新疆特克斯东南大哈拉军山组玄武安山岩地球化学特征: 岩石成因和构造背景探讨. *大地构造与成矿学*, **3**, 372-379.
- [11] 孙枢, 陈其英, 陈开会 (1973) 川西磷酸岩. *地质科学*, **1-4**, 196-217.



- [12] 王大鹏, 张乾, 祝朝辉, 蒋寿平, 陈龙兵 (2007) 湖南麻阳铜矿自然铜形态特征及其成因意义. *矿物学报*, **3**, 384-387.
- [13] 汪寿松, 陈其英 (1985) 昆阳磷矿磷块岩的矿物组成. *地质科学*, **1**, 78-85.
- [14] 王士涛, 李学仁 (1988) 论四川龙门山什邡式磷矿的时代及其沉积环境. *地层古生物论文集*, **4**, 1-8.
- [15] 王素纮 (1989) 四川金河磷矿马槽滩矿区磷酸盐矿物研究. *化工矿产地质*, **2**, 69.
- [16] 杨帆, 肖荣阁, 夏学惠 (2011) 昆阳磷矿沉积环境与矿床地球化学. *地质与勘探*, **2**, 294-303.
- [17] 张学奎, 李注苍 (2008) 西天山大哈拉军山组火山岩地球化学特征及地质意义. *甘肃科技*, **3**, 32-35.
- [18] 于增慧, 杜同军, 翟世奎 (2010) 冲绳海槽中部热液活动区岩芯沉积物稀土元素地球化学特征. *海洋与湖沼*, **5**, 676-682.
- [19] 汤好书, 陈衍景, 武广, 杨涛 (2009) 辽东辽河群大石桥组碳酸盐岩稀土元素地球化学及其对 Lomagundi 事件的指示. *岩石学报*, **11**, 3075-3093.

## 照片



1.昆阳磷矿条纹状磷块岩，正交偏光，粗粒胶磷矿条带中杂质较少，细粒胶磷矿条带中含有较多泥质胶结物



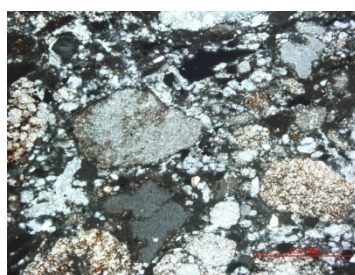
2.昆阳磷矿磷块岩中薄层和透镜状潮汐层理，显示潮间带沉积特征



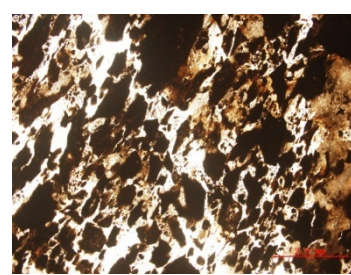
3.昆阳磷矿磷块岩层面干裂构造，干裂纹大小与韵律层厚度有关，厚层沉积层表面干裂纹面积大



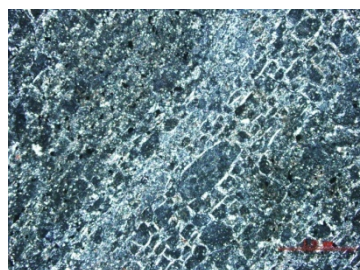
4.什邡磷矿角砾状磷锶铝石矿石，同生沉积碎裂构造，角砾有磨圆和塑性变形。



5.什邡磷矿团粒状矿石显微照片，正交偏光，大小不等的硫磷铝锶矿团粒均显示一级灰白色干涉色



6.什邡磷矿角砾状矿石显微照片，正交偏光，红褐色不规则菱角状胶磷矿泥屑被方解石胶结



7.开阳磷矿条纹状磷块岩，正交偏光，粗细不同的氟磷灰石鲕粒分别集中成纹层，鲕粒具有定向压扁现象，细粒纹层中含杂质多。



8.开阳磷矿中厚层状磷块岩，灰紫色磷块岩薄层条带中夹灰白色泥灰岩条带



9.开阳磷矿厚层块状磷块岩，灰紫色磷块岩与下部灰白色泥灰岩整合接触。