

文章编号: 1000-6524(2003)01-0055-06

# 敦煌方山口大型钒磷铀矿床的稀土元素地球化学研究

赵省民<sup>1</sup>, 聂凤军<sup>1</sup>, 江思宏<sup>1</sup>, 白大明<sup>1</sup>, 王新亮<sup>2</sup>, 苏新旭<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 内蒙古地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 采用等离子光谱法对敦煌方山口钒磷铀矿床围岩及矿石的稀土元素含量进行了测定, 结果显示本区稀土元素多为 LREE 富集型, 各样品间稀土元素的含量、组成和 Ce、Eu 亏损程度等差异, 主要是沉积环境变化的反映。通过相关性分析得知,  $\Sigma$ REE 与粘土、有机质、 $V_2O_5$  等呈负相关, 与 CaO、MgO、 $P_2O_5$  和 U 呈正相关, 并认为  $\Sigma$ REE 与有机质的负相关性为成岩后生改造的结果, 与其他化学成分之间的关系均是沉积条件与沉积过程复合作用的结果。

**关键词:** 钒磷铀矿床; 稀土元素; 地球化学; 敦煌方山口

中图分类号: P595; P619.14; P618.61; P619.21

文献标识码: A

## REE geochemistry of the Fangshankou large size V-P-U deposit in Dunhuang City, Gansu Province

ZHAO Xing\_min<sup>1</sup>, NIE Feng\_jun<sup>1</sup>, JIANG Si\_hong<sup>1</sup>, BAI Da\_ming<sup>1</sup>, WANG Xin\_liang<sup>2</sup> and SU Xin\_xu<sup>2</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037, China; 2. Inner Mongolia Geological Survey, Hohhot, 010020, China)

**Abstract:** The ICP-AES method was applied to measure the abundances of rare earth elements in wallrock and ore samples from the Fangshankou V-P-U deposit in Dunhuang City, Gansu Province. The results show that REE of the deposit is usually of the LREE-enriched type, and that the differences of contents, compositions and negative anomalies of Ce and Eu between samples from the deposits reflect changes in sedimentary environments. Correlation analyses of the samples indicate that  $\Sigma$ REE, which is negatively related to abundances of clay, organic carbon and  $V_2O_5$ , is positively correlated to contents of CaO, MgO,  $P_2O_5$  and U, and the negative correlation of  $\Sigma$ REE to organic carbon results from diagenesis, and that its relations to other chemical components are caused by sedimentary conditions combined with depositional process.

**Key words:** V-P-U deposits; rare earth elements; geochemistry; Fangshankou of Dunhuang

敦煌方山口大型钒磷铀矿床位于甘肃省西北部, 是一个以钒为主, 兼含磷、铀的复合型矿床。经勘查, 该复合矿床的地质储量为: 磷矿  $2.305 \times 10^7$  t,  $P_2O_5$  含量 6%~11%; 钒矿  $1.296 \times 10^6$  t, 含  $V_2O_5$  0.40%~0.85%, 为中型磷矿床、大型钒矿床和小型铀矿床, 是我国西北地区规模最大的钒矿床之一<sup>①</sup>。20世纪50~80年代, 地矿部门曾先后对该矿床进行过多次地质勘探, 取得了不少成果, 也提出了一些有益的认识, 但从未对之开展过系统的理论研究, 只是在进行学术研究时, 仅将其作为一磷矿点简单地提了一下(陈从云, 1983)。笔者欲从该矿床的稀土元素地球化学研究入手, 为探究矿床成因

提供帮助。

## 1 矿床地质概述

敦煌方山口大型钒磷铀矿床地处塔里木板块、西伯利亚板块和哈萨克斯坦-北山板块的交接部位, 位于构造变形程度较为强烈的天山-北山海槽的东端(中国地质科学院地质研究所, 1985)。由于经历了以海西期为主的构造运动的影响, 该矿及附近区域的岩层发生强烈变形, 形成一系列紧闭褶曲和大量逆冲断层, 同时伴有许多岩体侵入。区内出露地层

收稿日期: 2001-12-25; 修订日期: 2002-09-10

基金项目: 国家地质大调查资助项目(K1.3.32)

作者简介: 赵省民(1964-), 男, 博士, 副研究员, 从事矿床地质与地球化学研究。

① 甘肃省地质四队, 1982. 甘肃省敦煌县方山口钒磷铀矿区地质勘探报告。

主要有震旦系、寒武系及奥陶系,其中,早寒武世双鹰山组为该复合型矿床的容矿围岩,岩性主要为(含炭)硅质板岩和大理岩。方山口钒磷铀矿床赋存于以中震旦统为核心的近东西向复式背斜上。背斜长16 km,宽约2~3 km,两翼地层由寒武系和奥陶系组成,北翼较陡,南翼较缓,向四周倾伏于第四

系(少量为第三系)之下(图1)。磷矿体通常呈薄层状产出,长400~800 m,厚0.5~1.0 m,主要由钙质磷块岩、氧化钙质磷块岩和硅质磷块岩组成;钒矿体呈层状、似层状和扁豆状,长一般400~600 m,厚0.7~4.0 m,主要由含钒磷块岩和含钒炭质板岩组成;铀很少单独成矿,常与磷、钒矿体共生。

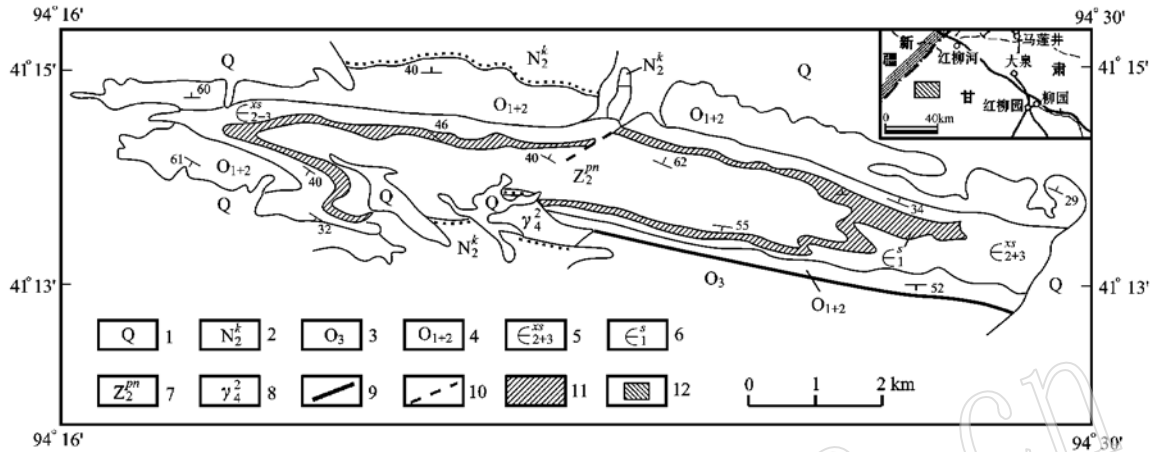


图1 敦煌方山口大型钒磷铀矿床区域地质图

Fig. 1 The regional geological map of the Fangshankou large size V-P-U deposit, Dunhuang

1—第四纪砂砾岩;2—上新世苦泉组粉砂岩;3—晚奥陶世云母石英片岩;4—早中奥陶世硅质板岩及石英岩;5—中晚寒武世西双鹰山群硅质板岩;6—早寒武世双鹰山组硅质板岩和大理岩(含磷建造);7—晚元古代大理岩;8—海西中期花岗岩;9—断层;10—推测断层;11—矿体赋存层位;12—研究区位置

1—Quaternary sandy conglomerate; 2—Pliocene siltstone of Kuquan Formation; 3—Late Ordovician micaceous quartz schist; 4—Early-Middle Ordovician siliceous slate and quartzite; 5—Middle-Late Cambrian siliceous slate of Xishuangyingshan Group; 6—Early Cambrian siliceous slate and marble of Shuangyingshan Formation; 7—Neoproterozoic marble; 8—Middle Hercynian granite; 9—fault; 10—inferred fault; 11—location of deposits; 12—location of studied area

## 2 矿床稀土元素特征

### 2.1 样品分析方法和结果

分析样品多采自矿体,少量采自围岩。样品经过粉碎至200目并缩分后,由国家地质实验测试中心用等离子光谱(ICP-AES)对其中的稀土元素进行了系统分析,分析误差小于3%。主量元素由国家地质实验测试中心采用X荧光光谱仪分析,误差小于3%,分析结果见表1。

### 2.2 稀土元素的地球化学特征

(1)  $\Sigma\text{REE}$  从所采集样品的  $\Sigma\text{REE}$  看,围岩与矿石相差不多,前者稍高(平均  $205.24 \times 10^{-6}$ ),与我国南方早寒武世黑色岩系的  $(144.73 \sim 226.70) \times 10^{-6}$  (中国科学院矿床地球化学开放研究实验室,1997)和北美页岩的  $200 \times 10^{-6}$  (Haskin *et al.*, 1968)相近;矿石的  $\Sigma\text{REE}$  平均  $173.42 \times 10^{-6}$ ,分别低于北美页岩和南方早寒武世磷块岩的  $(209.72 \sim 476.75) \times 10^{-6}$  (中国科学院矿床地球化学开放研究实验室,1997),但高于鄂西黑色岩系中的银钒矿石  $(84.51 \sim 152.23) \times 10^{-6}$  (张乾等,1995)。从稀土元素的分馏程度看,围岩的LREE较高,其平均值为  $144.39 \times 10^{-6}$ ,而矿石的LREE平均  $115.59 \times$

$10^{-6}$ 。稀土元素的含量和组成都反映了矿石形成的沉积环境比围岩相对远离陆源区。因为当稀土元素被搬运到沉积盆地以后,LREE和中稀土元素易于为吸附性特强的粘土质吸附(王中刚等,1989),在盆地近岸先期沉积,使近岸沉积物相对富集LREE。随着水体向盆地中心迁移,其中轻、中稀土元素含量日益减少,HREE相对富集,导致近盆地中心的沉积物相对富集HREE且 $\Sigma\text{REE}$ 降低。

(2) LREE/HREE 本区围岩的LREE/HREE平均为2.52,矿石平均为2.43。围岩LREE的富集程度较为接近,而矿石LREE的富集程度差异较大,说明矿石形成时古地理环境变化较明显。这是因为盆地近岸沉积物相对富集LREE和中稀土元素,而远离岸处沉积物相对富集HREE(王中刚等,1989),在大地构造背景相对稳定的条件下,同一位置沉积物中稀土元素组成的这种差异,应是海平面升降引起古地理环境变迁的结果。另外,本区样品的LREE/HREE值显著高于浙江黑色岩系中含稀土元素磷块岩和金属硫化物层的 $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 值(1.30~1.96)(张爱云等,1987),指示本区含矿层段LREE的富集程度高于后者,显示研究区当时距陆源区较近。

(3)  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值 本区的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值大体为1,其中,

表 1 方山口钒磷铀矿床的主要化学成分 ( $w_B/\%$ ) 和稀土元素 ( $w_B/10^{-6}$ ) 分析结果Table 1 Chemical components ( $w_B/\%$ ) and REE ( $w_B/10^{-6}$ ) of Fangshankou large\_size V\_P\_U deposit, Dunhuang

样品编号	FSK- H2*	FSK- H4*	FSKK- H1	FSKK- H2	FSKK- H3	FSKK- H4	FSKK- H5
岩 性	含磷硅质板岩	含钒磷绢云母 千枚岩	含钒碳硅质 板岩	含钒磷硅质 板岩	含钒碳硅质 板岩	钙质磷质岩	含钒磷碳质 板岩
SiO <sub>2</sub>	79.56	78.53	70.37	70.20	71.15	36.37	62.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.07	10.07	9.80	10.81	9.32	5.34	12.38
K <sub>2</sub> O	2.55	3.37	3.30	3.94	3.44	1.30	3.97
Na <sub>2</sub> O	0.85	0.69	0.25	0.28	0.25	0.47	0.14
CaO	0.28	0.35	0.44	0.25	0.40	22.32	1.04
MgO	0.58	0.93	1.00	1.13	0.85	4.96	1.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.40	0.32	0.05	0.80	0.21	6.29	0.95
FeO	0.09	0.47	0.90	0.88	1.06	0.09	0.13
TiO <sub>2</sub>	0.71	0.90	0.84	0.89	0.88	0.34	0.93
MnO	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.08	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	0.56	0.40	0.19	0.32	15.16	0.57
La	30.90	55.47	36.68	20.28	22.92	41.47	52.48
Ce	42.78	71.22	45.63	26.66	30.02	40.67	83.08
Pr	5.08	8.63	5.98	3.04	4.17	6.10	8.43
Nd	22.99	38.10	26.85	13.69	20.92	29.42	31.88
Sm	4.46	6.86	4.34	2.69	3.60	5.99	5.30
Eu	0.91	1.37	1.35	0.72	0.75	1.85	0.98
Gd	4.71	7.07	4.47	3.29	3.51	7.63	4.86
Tb	0.78	1.24	0.78	0.64	0.54	1.31	0.72
Dy	3.42	7.45	4.68	4.04	3.08	8.05	3.32
Ho	0.69	1.66	0.94	0.91	0.70	1.75	0.69
Er	1.62	4.02	2.55	2.29	1.94	4.83	1.81
Tm	0.24	0.63	0.41	0.35	0.30	0.69	0.27
Yb	1.84	4.39	3.13	2.78	2.51	5.50	2.16
Lu	0.30	0.70	0.50	0.40	0.40	0.90	0.30
Y	23.67	57.27	40.05	34.78	26.51	78.73	19.22
ΣREE	144.37	266.1	178.32	116.56	121.85	234.86	215.52
LREE	107.12	181.65	120.83	67.08	82.38	125.50	182.15
HREE	37.25	84.45	57.49	49.48	39.47	109.36	33.37
LREE/HREE	2.88	2.15	2.1	1.36	2.09	1.15	5.49
(La/Yb) <sub>N</sub>	1.63	1.22	1.14	0.71	0.88	0.73	2.35
δCe	0.73	0.69	0.74	0.72	0.66	0.54	0.84
δEu	0.87	0.81	1.34	1.15	0.93	1.18	0.85

注: 带“\*”号的为围岩样品, 其余为矿石样品; HREE 中包括 Y 的含量。

围岩为 1.22~ 1.63, 平均 1.43; 矿石为 0.71~ 2.35, 平均 1.16。围岩 LREE 的富集程度较为接近, 而矿石 LREE 的富集程度差异较大, 进一步说明矿石形成时的古地理变化较为明显。

(4) δCe 值 围岩的 δCe 值约 0.69~ 0.73, 平均 0.71, 矿石的 δCe 值变化范围较大, 在 0.54~ 0.84 之间, 平均 0.70, 均呈明显的 Ce 负异常。亏损 Ce 是多数海相沉积物的普遍特征 (王中刚等, 1989), 所以, 本区 δCe 的分布指示该矿区的围岩和矿石均是海洋环境的产物。而且由盆地边缘到中心, 沉积物中 Ce 的亏损程度增加 (王中刚等, 1989), 因此, 矿石 δCe 值的较大差异, 是矿石形成的古地理环境显著变化的又一反映。同时, 本区的 δCe 值是北美页岩标准化的结果, 因此, 其普遍

的负异常特征是本区当时水体深度大于北美页岩形成水深的表现。另外, 样品 δCe 值的特征可能与其中含有胶磷矿、磷灰石等海相磷酸盐有关, 因为海相磷酸盐岩是海洋环境中的生物化学沉积 (Sharp *et al.*, 2000), 而多数海洋生物与海水一样, 具有富集 HREE 和 Ce 明显亏损的稀土元素地球化学特征 (王中刚等, 1989), 生物化学过程形成的沉积物自然也就继承了海洋生物与海水的稀土元素特征。研究区的 δCe 值稍大于湘西黑色岩系 (0.60) (吴朝东等, 1999) 则是含矿岩系沉积期本区水体较浅、距滨岸较近的结果。

(5) δEu 值 与 δCe 值不同, δEu 值变化较大, 其中围岩 δEu 值为 0.81~ 0.87, 平均 0.84, 显示 Eu 负异常 (王中刚等, 1989); 矿石的 δEu 为 0.85~ 1.34, 平均 1.09, 微显 Eu 正异

常。由于从盆地的边缘到中心, Eu 亏损程度降低, 所以本区围岩和矿石的 Eu 异常特征是前者近岸、后者靠盆的古地理环境之反映。

### 2.3 稀土元素配分型式

稀土元素标准化采用 Haskin 等(1968)的40个北美页岩组合样的平均值(王中刚, 1989)。从图2a可以看出, 围岩的稀土元素组成、含量与北美页岩基本相似, 其分布曲线大致呈略有起伏的水平状, 无轻、重稀土元素相对富集。此种稀土元素分布特点, 是围岩形成环境与北美页岩相似, 但水体深度和介质性质又有所变化的结果。另外, 在 Ce、Eu 处各有一微弱

亏损, 且前者亏损程度高于后者。从图2b可以看出, 矿石的稀土元素含量大体都低于北美页岩, 其中多数样品呈左倾状, 显示 HREE 相对富集。Ce 多有不同程度的亏损, 但 Eu 有时具正异常, 有时显负异常。矿石的这种稀土元素分布差异, 也是矿层形成期间沉积古地理和水体介质变化的稀土元素地球化学响应的结果。稀土元素呈左倾状分布的矿石, 其 HREE 富集程度随离子半径增大而增强, 这种特别的分布样式, 与新西兰寒武纪罗宾沙德(Rubby Saddle)组近正态分布模式(Wombacher and Munker, 2000)和鄂西黑色页岩的下突弓形分布模式(张乾等, 1995)均形成了鲜明对比。

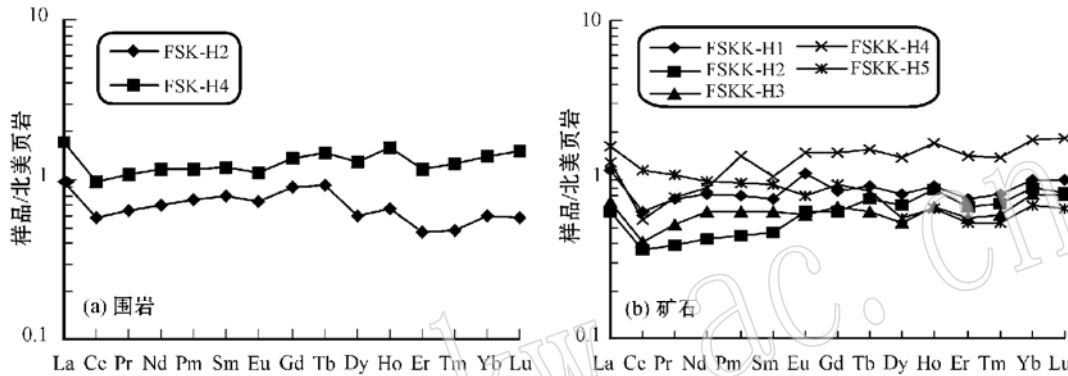


图2 方山口钒磷铀矿床稀土元素分布模式

Fig. 2 REE patterns of the Fangshankou large\_size V\_P\_U deposit, Dunhuang

## 3 稀土元素与主要化学组成之间的关系

### 3.1 与矿石矿物化学组成的关系

如果用粘土主要化学组成( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )的质量分数代表其在矿石中的含量来考察  $\Sigma\text{REE}$  与粘土含量的关系, 可以看出, 样品中的  $\Sigma\text{REE}$  与粘土含量呈负相关(图3a), 二者相关系数为  $-0.32$ , 而 HREE 与粘土含量的负相关性更为明显, 其相关系数达  $-0.66$ (表2)。此外, 无论 HREE 还是 LREE, 其含量都与  $\text{SiO}_2$  呈负相关, 相关系数分别为  $-0.61$  和  $-0.06$ 。 $\Sigma\text{REE}$  与样品中的有机质也呈负相关(图3b), 相关系数为  $-0.60$ 。而  $\Sigma\text{REE}$  与  $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$  之间均表现为正相关(图3c、3d), 同样, HREE 含量与它们的正相关性更为显著(表2), 相关系数均在  $0.80$  左右。

### 3.2 与成矿元素之间的关系

从表2可以看出, 样品的  $\Sigma\text{REE}$  与  $\text{P}_2\text{O}_5$  和 U 均为正相关, 尤其与后者的正相关性表现得更为明显。HREE 与  $\text{P}_2\text{O}_5$  和 U 的正相关性更为明显, 相关系数达  $0.80$  和  $0.72$ 。 $\Sigma\text{REE}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  之间的相关性与云南早寒武世磷块岩中得出的结论相吻合。此外, 样品的  $\Sigma\text{REE}$  与  $\text{V}_2\text{O}_5$  之间具有一定程度的负相关(相关系数达  $-0.35$ ), 与其他成矿元素相比, LREE 与  $\text{V}_2\text{O}_5$  的负相关性更强, 相关系数达  $-0.34$ (表2)。

表2 矿石稀土参数与主要化学成分的相关性

Table 2 The correlation between REE parameters and chemical components of the ores

	$\Sigma\text{REE}$	LREE	HREE
$\text{Al}_2\text{O}_3$	-0.07	0.26	-0.56
$\text{SiO}_2$	-0.34	-0.06	-0.61
$\text{K}_2\text{O}$	-0.30	0.04	-0.69
$\text{Na}_2\text{O}$	0.22	0.11	0.27
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	-0.32	-0.01	-0.66
$\text{CaO}$	0.41	0.04	0.78
$\text{MgO}$	0.41	0.03	0.80
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.24	-0.04	0.56
$\text{FeO}$	-0.55	-0.55	-0.25
Corg	-0.60	-0.41	-0.58
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.42	0.04	0.80
$\text{V}_2\text{O}_5$	-0.35	-0.34	-0.1
U	0.67	0.42	0.72
Y	0.62	0.17	0.997

## 4 讨论

本区钒磷铀含矿岩系与我国南方寒武系底部的磷矿床和

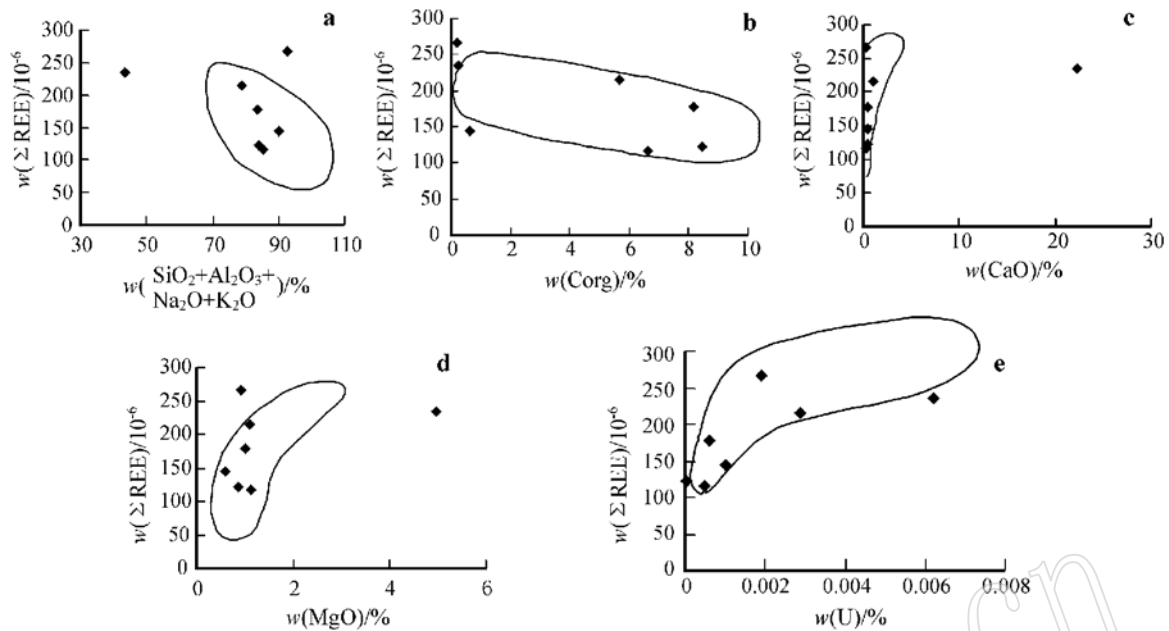


图 3 方山口钒磷铀矿床稀土元素与主要化学成分及成矿元素 U 之间的关系  
 Fig. 3 Relations between REE and chemical components and ore forming element U of the Fangshankou large size V-P-U deposit, Dunhuang

黑色岩系应属同期沉积,均为全球地质历史上首次聚磷期(刘宝,1980)的产物。其中磷矿床为浅海环境下的沉积,含钒的黑色岩系为局限海湾内的产物。尽管它们的主要成分和特征有许多相似之处,但其 REE 组成仍存在一定差异。据此推断,本区当时的沉积古地理必有一些特别之处:①具相对较多的物源区,因为不同物源区的岩性差异必然会反映到其沉积物的 REE 丰度和分配曲线上;②古沉积古地理变化较剧烈,因为较为一致的岩石组成说明本区当时处于一个较为稳定的大地构造背景,岩石中 REE 组成的差异不可能是剧烈构造运动引起物源区的巨大变化造成的,而极可能是海平面震荡性升降引起古地理环境变迁的结果。当海平面上升时,本区相对靠近盆地中心,沉积物中 REE 含量较低,HREE 相对富集,Ce 亏损相对显著;海平面下降时,本区相对靠近盆地边缘,岩石内的 REE 含量较高,LREE 相对富集,Eu 相对亏损。

在某种程度上,REE 与岩石主要化学成分的关系是沉积条件变化的直接反映。前述的  $\Sigma$ REE 与粘土呈负相关的事实表明,本区样品中的 REE 不是以粘土吸附方式搬运而来的,而主要是以溶液的形式搬运并沉积而成的。因为以粘土吸附搬运来的稀土元素,其含量必与粘土的含量成正比;另一方面,HREE 与粘土负相关性更强(相关系数为-0.66)的事实,证明了 HREE 较 LREE 易于形成可溶性络合物而不利于粘土矿物对其的吸附(王中刚等,1989); $\Sigma$ REE、LREE 和 HREE 均与  $\text{SiO}_2$  呈负相关则与  $\text{SiO}_2$  对样品中的 REE 具有稀释作用(王中刚等,1989)的认识相吻合。REE(尤其是 HREE)与  $\text{P}_2\text{O}_5$ 、CaO 的正相关性(相关系数达 0.8 左右)可能与该钒磷铀矿床中的磷矿(Ca 是磷灰石的主要组成元素)有关。因为

磷矿岩沉积物的 REE 含量在海洋沉积物中是比较高的(王中刚等,1989),因此,本区矿石和围岩中的 REE 含量可能受磷矿岩含量的影响较大。至于样品中的 REE 与有机质也呈负相关,则可能与次生改造有关。因为本区矿石和围岩均遭受一定程度的变质,在成岩和变质过程中,有机质的存在使碱性的灰质、磷质地层中形成了弱碱-弱酸性的还原环境,导致富含  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  地下水对地层中 REE 的解吸淋滤,引起了 REE 的流失,这样,地层中的有机质含量越高,产生的酸性还原溶液就越多,造成 REE 的流失也就愈多。这与世界各地煤层中 REE 含量普遍偏低(陈如冰等,1985;王云泉等,1999;邵靖邦等,1997;黄文辉等,1999;赵志根等,2000;Seredin,1996;Finkelman,1993)的原因(黄文辉等,1999)极为相似。REE 与  $\text{V}_2\text{O}_5$  为负相关,可能与 V 主要以钒云母形式存在有关,因为后者与粘土矿物具有相同的沉积水动力条件而经常同时沉积。

## 5 结 论

(1) 在相对稳定的构造条件下,沉积地层中的稀土元素含量与组成是沉积古地理环境变化的结果。本区围岩的平均 REE 与北美页岩相近,矿石的平均 REE 低于北美页岩,但高于鄂西黑色岩系中的银钒矿石。无论是稀土元素的含量,还是其组成,均反映围岩形成于近岸的海洋环境,矿石沉积于相对近海的环境。

(2) 本区围岩的稀土元素分布曲线大致呈略有起伏的水平状产出,无明显的轻、重稀土元素相对富集,Ce、Eu 处各有

一微弱亏损。矿石有的微呈右倾,有的呈左倾,Ce多具不同程度的亏损,但Eu有时显正异常,有时具负异常。围岩、矿石的稀土元素分布差异,正是沉积古地理和水体介质变化的稀土地球化学响应。

(3) 钒磷铀矿床中的 $\Sigma$ REE与粘土和有机质为负相关,与CaO和MgO呈正相关。除了与有机质的负相关性成岩后生改造有关外,REE与其他化学成分之间的关系均是沉积条件与沉积过程的复合作用结果。

(4) 该钒磷铀矿床的REE与其成矿元素的关系也很密切,它们之间的相关性则与沉积环境和其他化学成分的影响有关。

## References

- Chen Congyun. 1983. Geological characteristics on the phosphorite of Sinian-Cambrian periods, North China[J]. Mineral Deposits, 2(4): 78~ 88 (in Chinese with English abstract).
- Chen Rubing, Qian Qinfang and Yang Yinan. 1985. Microelements concentration distribution of 107 coal mines in China[J]. Chinese Science Bulletin, 30(1): 27~ 29 (in Chinese).
- Finkelman R B. 1993. Trace and minor elements in coal [A]. Engel M H, Meko S A. Organic Geochemistry [C]. New York Plenum, NY, 593~ 607.
- Geochemistry Open Laboratory, CAGS. 1997. Deposits Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Haskin L A, Frey F A, Schmitt R A. et al. 1996. Meteoritic, solar and terrestrial rare earth distribution[A]. Seredin V V. Rare Earth Element-bearing Coals from the Russian Far East Deposits[C]. Int. J. Coal Geology, 30(1~ 2): 101~ 129.
- Huang Wenhui, Yang Qi and Tang Dazhen, et al. 1999. REE geochemical characteristics of late Paleozoic coals, North China [J]. Acta Geologica Sinica, 73(4): 360~ 369(in Chinese with English abstract).
- Institute of Geology, CAGS and Wuhan College of Geology. 1985. Paleogeographic Atlas of China [M]. Beijing: Map Publishing House (in Chinese).
- Liu Baojun. 1980. Petrology of Sedimentary Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Shao Jingbang, Zeng fangui, Wang Yulin, et al. 1997. REE Geochemical Characteristics of Pingzhuang Coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 25(4): 13~ 15(in Chinese).
- Sharp Z D, Atudorei. Vand Furrer H. 2000. The effect of diagenesis on oxygen isotope ratios of biogenic phosphates[J]. American Journal of Science, 300: 222~ 237.
- Wang Yunquan, Mo Jieyun and Ren Deyi. 1999. Microelements distribution of thermometamorphic coals[J]. Geochemica, 28(3): 289~ 296 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhonggang, Yu xueyuan, Zhao Zhenhua, et al. 1989. Geochemistry of Rare Earth Elements [M]. Beijing: Scientific Publishing House (in Chinese).
- Wombacher F, Munker C. 2000. Pb, Nd, and Sr isotope and REE systematics of Cambrian sediments from New Zealand: Implications for the reconstruction of the Early Paleozoic Gondwana margin along Australian and Antarctica [J]. Journal of Geology, 108: 663~ 686.
- Wu Chaodong, Yang Chengyun and Chen Qiyang. 1999. Geochemical characteristics and origin of black rock series, west Hunan Province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 18(1): 26~ 39 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Aiyun, Wu Damao, Guo Lina, et al. 1987. Geochemistry and Mineralization of Marine Black Shale[M]. Beijing: Scientific Publishing House (in Chinese).
- Zhang Qian, Dong Zhensheng and Zhan Xinzhi. 1995. Geochemical Characteristics of black rock series type V<sub>Ag</sub> deposits in west Hubei Province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 15(2): 185~ 191 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhigen, Tang Xiuyi and Li Baofang. 2000. REE geochemistry of Huaibei coalfield [J]. Geochemica, 29(6): 578~ 583 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈从云. 1983. 中国北方震旦-寒武纪磷块岩的地质特征[J]. 矿床地质, 2(4): 78~ 88.
- 陈如冰, 钱琴芳, 杨亦男. 1985. 我国107个煤矿样中微量元素的浓度分布[J]. 科学通报, 30(1): 27~ 29.
- 黄文辉, 杨起, 汤达祯, 等. 1999. 华北晚古生代煤的稀土元素地球化学特征[J]. 地质学报, 73(4): 360~ 369.
- 刘宝. 1980. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社.
- 邵靖邦, 曾凡桂, 王宇林, 等. 1997. 平庄煤田煤中稀土元素地球化学特征[J]. 煤田地质与勘探, 25(4): 13~ 15.
- 王云泉, 莫洁云, 任德贻. 1999. 梅田矿区岩浆热变煤中微量元素分布特征[J]. 地球化学, 28(3): 289~ 296.
- 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 吴朝东, 杨承运, 陈其英. 1999. 湘西黑色岩系地球化学特征和成因意义[J]. 岩石矿物学杂志, 18(1): 26~ 39.
- 张爱云, 伍大茂, 郭丽娜, 等. 1987. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义[M]. 北京: 科学出版社.
- 张乾, 董振生, 战新志. 1995. 鄂西白果园黑色页岩型银钒矿床地球化学特征[J]. 矿物学报, 15(2): 185~ 191.
- 赵志根, 汤修义, 李宝芳. 2000. 淮北煤田煤的稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 29(6): 578~ 583.
- 中国地质科学院地球化学开放研究实验室. 1997. 矿床地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 中国地质科学院地质研究所, 武汉地质学院. 1985. 中国古地理图集[M]. 北京: 地图出版社.