

稀土元素指标 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 对沉积相的指示研究*

张文翔^① 张虎才^{①②} 雷国良^② 杨伦庆^②
类延斌^② 常凤琴^② 蒲阳^② 庞有智^②

(^①兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室,兰州 730000;

^②中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点室,南京 210008)

摘要 通过对内蒙古额济纳盆地小狐山剖面沉积物中酸溶组分稀土元素含量及其相关指标、分布模式的分析,讨论了剖面中稀土元素指标 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 与沉积相、沉积环境之间的关系。分析结果表明剖面沉积物酸溶组分中稀土元素丰度均值为 $7.24\mu\text{g/g}$ (不包括 Y),其中 LREE 含量占稀土总量的 88.67%;且各层的稀土分布模式均为轻稀土适度富集缓右倾斜型, Eu 呈负异常模式,但各相位地层的 LREE 富集程度与分配模式存在差异。由于小狐山剖面中沉积地层的自身岩性、沉积粒径、矿物结构组成以及气候环境变化等因素均可能会引起 REE 分异。因此,通过 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 图并结合三次回归曲线,可以很好地将不同沉积相物质有效的区分开来。小狐山剖面除极少数的几个样品(水下沉积砂)之外,其余的均落在三次多项式回归曲线上部;而风成砂层则几乎全部落在回归曲线之下;此外,对于风沙-河流作用下的混合样品也有较好识别,河流过渡相的样品则分布在曲线上或与之相邻近。此研究结果得到了柴达木贝壳堤沉积物的 REE 数据的验证,运用此方法可以为直观的判别剖面中的不同沉积相,并为量化划分地层提供依据。

关键词 稀土元素 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 图 沉积相

中图分类号 O614.33 **文献标识码** A

稀土元素作为一组特殊的元素虽然在不同的地质或表生地球化学过程中具有相近的地球化学行为,但不同的稀土元素之间由于元素之间化学特性的差异,会发生一定程度的分异,致使它们的分布状况和配分模式有着不同的特征。因此,稀土元素配分模式特征常用来判别一些地质过程^[1-4],如地质体形成过程中元素的迁移、富集和环境变化的信息特别是用于讨论沉积物的物质来源^[5-12]另外,稀土元素的变化也常被用来探讨古气候的演变过程^[13-15]。在湖泊沉积物的研究中,稀土元素不仅可以反映不同类型沉积物之间的差异^[12],也可以揭示湖泊水体的地球化学特征和演化过程、沉积物的来源等^[16-18]。

本文从稀土元素地球化学的角度出发,通过对内蒙古额济纳旗盆地小狐山剖面沉积物酸溶组分中稀土元素及其相关参数的系统分析,讨论剖面中稀土元素中 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 与沉积相之间的关系。在此基础上,结合三次回归曲线,通过 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 图对

沉积剖面中的不同沉积相进行划分并探讨其机理,希望为定量判别和划分地层提供依据。

1 研究区域概况

内蒙古自治区西部的额济纳盆地位于内蒙古西部阿拉善盟,西面是北山构造带、东面为阴山山脉及贺兰山,南面被龙首山所阻。额济纳盆地表面为砾石覆盖,形成广大的戈壁滩,而其东部与巴丹吉林沙漠相接,形成十分特征的盆地—高大沙丘地貌单元。额济纳盆地在第四纪期间广泛发育洪积和河湖相的沉积,间有干旱环境下的风沙沉积,地质记录丰富。额济纳盆地面积约为 $3 \times 10^4 \text{km}^2$,是我国内陆干旱区代表性的盆地之一。盆地内降雨稀少,蒸发强烈,温差大,风大沙多,日照时间长,气候极端干旱,为一典型的大陆性气候环境。

大量野外调查结果表明在盆地北部中蒙边境地区不仅存在广泛的干河谷和侵蚀地貌、湖岸堆积,同时在这些湖岸堆积中存在丰富的生物(瓣鳃类)化

第一作者简介:张文翔 男 28岁 博士研究生 自然地理学专业

* 中国科学院“百人计划”项目和国家自然科学基金项目(批准号:40371117)资助

2009-03-27 收稿,2009-05-18 收修改稿

通讯作者:张虎才 E-mail:zhanghc@niglas.ac.cn



图 1 小狐山剖面

Fig. 1 The studied Xiaohushan profile

石,是盆地内地质历史最近一次大范围高湖面存在的地质证据^[19,20]。关于额济纳盆地和巴丹吉林沙漠高大沙丘及湖泊的形成是国际、国内研究热点之一^[21]。

2 样品与分析

2.1 剖面岩性与采样

小狐山位于内蒙古阿拉善盟额济纳旗西北部,地理坐标为 $42^{\circ}19'47''N$, $100^{\circ}19'37''E$; 海拔 908m。由于后期季节性流水的强烈侵蚀作用而形成雅丹地貌,出露良好的,存在厚度达数百米的湖相沉积,可进行大范围追溯与对比古湖相沉积地层研究。小狐山剖面天然露头,上部为原始露头经人工清理的新鲜沉积,下部则是人工新开挖剖面(图1),经野外仔细观察、描述并采样的剖面总厚度为 1049cm,根据野外沉积特征,如颜色、粒度、沉积结构等可将剖面分为 4 段 8 层(其中第八层未被分段),其详细的岩性特征描述及形成年代讨论已有资料发表,主要为粉砂、粘土质粉砂的湖相沉积和风成砂沉积,年代为大于 $38.15^{14}C$ kaB. P. 以来^[22]。

根据地层野外特征和变化特点,以 2~3cm 间距连续采样,共获得 446 个样品,所有样品均取自新鲜断面,装入封口塑料袋密封保存待实验分析。在实验室通过大量平行实验分析,在确保实验数据可重复性和精确性的基础上,测定了每个样品的碳酸盐含量及粒度、色度和磁化率,并参考其变化将剖面以 3~8cm 不等间隔选取了具有代表性的 162 个样

品进行稀土元素含量的测试分析。

2.2 稀土元素测定

实验采用醋酸溶解法分离法,分离出酸溶组分和残留组分,然后再对酸溶组分中各样品的稀土元素含量进行测量。具体实验过程为:称取研磨至 200 目以上样品 500mg,用 1mol/L HAc 5ml 溶解样品,经超声振荡并静止 12 小时后离心抽取出酸溶组分。用 2.5ml HAc 淋洗两遍,将提取出的清液合并蒸干,最后用 10ml 2% HNO_3 溶解,取出 5ml 溶液用加入含 500ppb Rh 的 2% HNO_3 溶液定容至 50ml,进行酸溶组分中 REE 元素含量的测量^[23]。在测量中每 10 个样品做一平行样以验证数据的准确性。

样品测试在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室利用 ELEMENT II 等离子质谱仪(ICP-MS)完成,仪器测量精度为 1×10^{-9} , RSD $\leq 3\%$ 。

3 结果与讨论

3.1 稀土元素含量和分布

分析结果显示(图2),小狐山剖面沉积物酸溶组分中的稀土元素总量(ΣREE , 不含元素 Y)相对较低,变化范围在 2.18~14.48 $\mu g/g$,且平均值为 7.24 $\mu g/g$,其中轻稀土元素(LREE)富集(均值为 6.42 $\mu g/g$),占稀土元素总量的 88.67%;而重稀土元素(HREE)丰度较低(均值为 0.83 $\mu g/g$),仅占 11.33%,因此,酸溶组分中轻稀土元素含量的变化决定了沉积物稀土总量的变化特征。组分中的

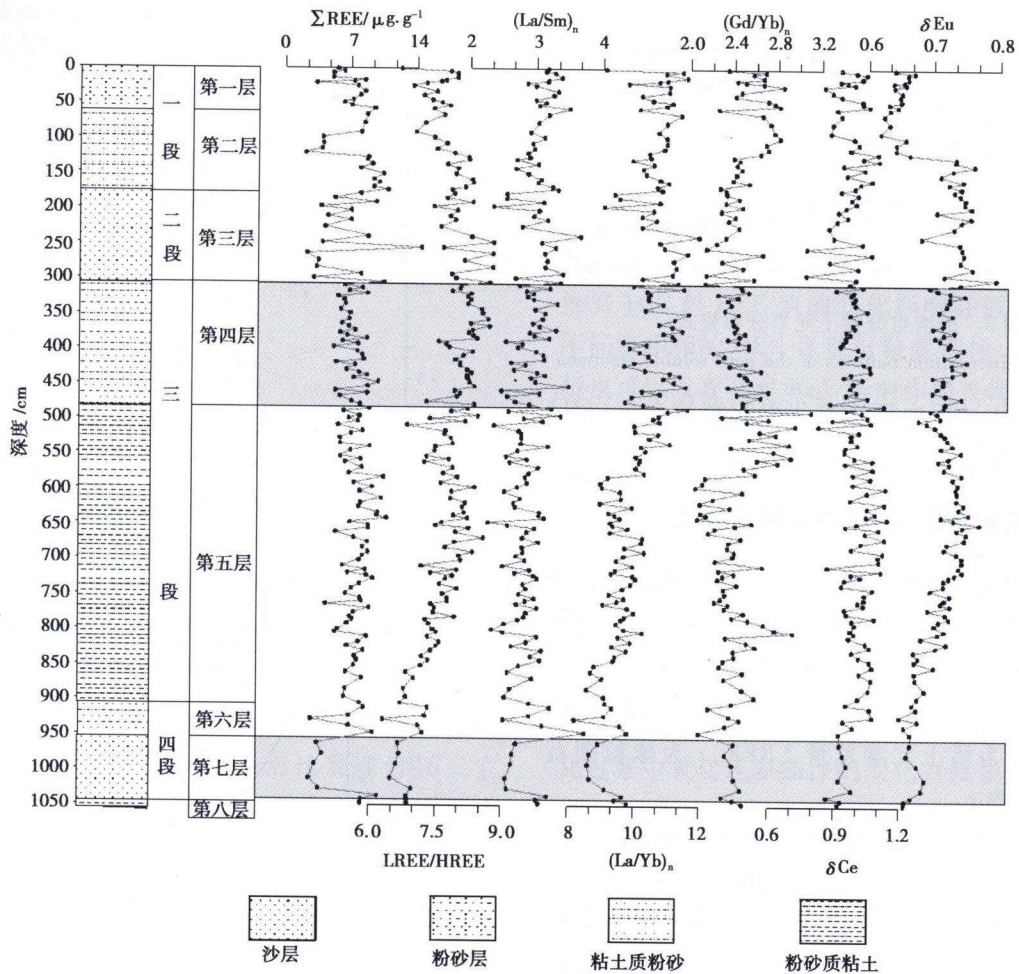


图2 小狐山剖面酸溶组分稀土及 δCe 和 δEu 变化

Fig. 2 REEs, δCe and δEu Variations in the acid soluble fractions of the Xiaohushan section

LREE/HREE, $(La/Sm)_n$, $(La/Yb)_n$ 和 $(Gd/Yb)_n$ 四者在不同的地层中呈同步变化(图2)。在酸溶组分中LREE/HREE, $(La/Sm)_n$, $(La/Yb)_n$ 和 $(Gd/Yb)_n$ 四者呈同步变化。从剖面 1039 ~ 949cm 段, LREE/HREE, $(La/Sm)_n$ 和 $(La/Yb)_n$ 值较低, 处于整个剖面的低值段, 且变化范围较小; 在 949 ~ 903cm 中 LREE/HREE, $(La/Sm)_n$, $(La/Yb)_n$ 和 $(Gd/Yb)_n$ 均出现剧烈波动、幅度较大; 从 903 ~ 304cm, 虽 LREE/HREE, $(La/Sm)_n$, $(La/Yb)_n$ 和 $(Gd/Yb)_n$ 有所波动, 但其值整体呈现出增大的趋势, 处在整个剖面的高值段; 从 304 ~ 178cm 稀土元素各相关数值出现巨幅波动; 此后, 从 178cm 至研究剖面顶部的 LREE/HREE, $(La/Sm)_n$, $(La/Yb)_n$ 和 $(Gd/Yb)_n$ 在均值附近波动。由于 LREE/HREE, $(La/Sm)_n$, $(La/Yb)_n$ 和 $(Gd/Yb)_n$ 值的变化反映了 REE, LREE 和 HREE 之间的分异程度^[24,25], 因此, 在研究剖面中第三段的 ΣREE 和 LREE 富集程度较

高, HREE 亏损则相对较大, 并较其他地层分段波动相对稳定; 而在剖面 1039 ~ 949cm 段 REE 和 LREE 富集程度减小, HREE 亏损度降低。这表明尽管各个地层中均表现为 LREE 相对 HREE 富集, 但富集程度有所不同。经球粒陨石标准化后的 Ce 异常值 δCe 显示, 其在 0.83 ~ 1.14 内波动, 说明无显著的 Ce 异常; 而 Eu 异常值 δEu 在沉积物酸溶组分中的变化范围在 0.62 ~ 0.79 之间, 平均为 0.70, 呈现出中等程度的负 Eu 异常。而在 1 ~ 2 层以及第七层中 REE 相关参数的异常变化, 可能与其相对应的沉积环境有关。

进一步对小狐山剖面的稀土分布模式分析可以发现(图3), 经球粒陨石标准化后的各地层的稀土元素配分模式均为轻稀土适度富集缓右倾斜型、Eu 呈负异常分布模式, 但是之间存在分异。尤其明显的是在剖面 178 ~ 304cm 和 949 ~ 1046cm 段 LREE 贫缺, 而 Eu 相对富集。这可能与各沉积地层的岩

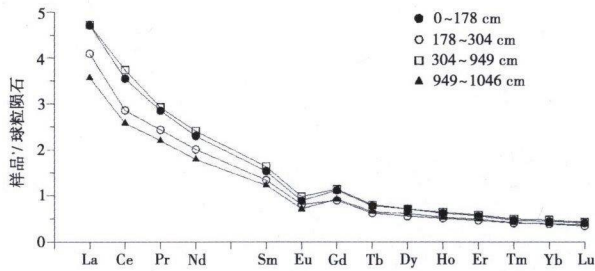


图3 酸溶组分稀土元素分布模式

Fig. 3 REE distribution patterns of the acid soluble fractions

性及湖泊演化过程中环境变化引起湖泊介质(pH)条件改变而导致元素发生分异相关联。

3.2 剖面沉积地层与 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 对比

首先我们建立 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 分布图,根据全部测量的162个样品值得出一个以正交多项式回归分析所计算出的三次回归曲线,其曲线方程(1)为:

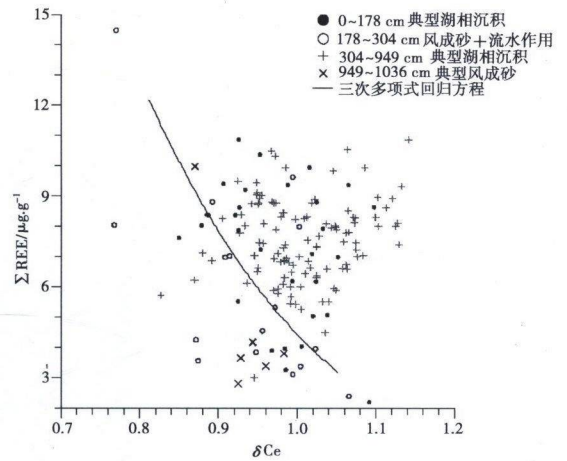
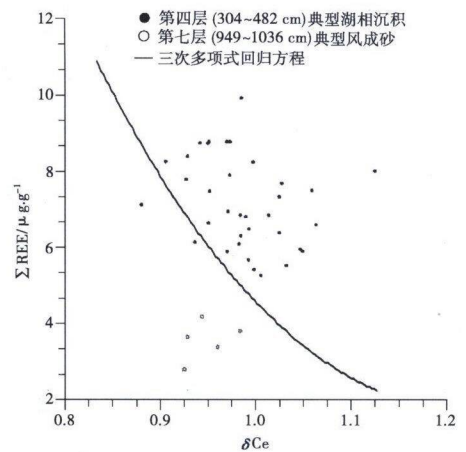
$$y = 34.52 \times (-x^3 + 4.92x^2 - 7.6x + 3.82) \quad (1)$$

其中, y 为稀土元素总量 ΣREE , x 为球粒陨石标准化后的 δCe 。

然后将小狐山剖面所有样品的 δCe 值(x_n)带入公式(1)计算出与之对应的 ΣREE 值(y_n),当 $\Delta y > 0$ 时,说明此样品在 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 分布图上应位于回归曲线的上方;而当 $\Delta y < 0$ 时,说明样品在 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 分布图上应位于回归曲线的下方。根据此计算方法,我们将实验测量的162个样品进行了分类,并将全部样品划分在两个区域之内(图4a)。根据研究剖面样品 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 分布区域与已知地层岩性描述可以看出,湖泊沉积相中的样品除极少数的几个样品之外,均在三次多项式回归曲线的上部;而风成砂层则几乎全部落在回归曲线之下;河流过渡相的样品则分布在曲线上或与之相邻近。

由于剖面中第三层沉积物是在风成砂与河流共同作用下形成的,为了更加清晰的区分出典型沉积相,在此特将典型的湖相沉积层(第四层)与典型的风成砂层(第七层)单独进行对比研究(图4b)。虽然也存在于实际地层不匹配的样品,如典型的湖相沉积层中有两个样品,落在了回归曲线的下方,这可能是在湖泊发育中由于环境发生突变或是由于水体中的生物作用及实验误差有关。

此外,由于贝壳堤剖面样品全部形成于高湖面时期,属典型的湖相沉积^[26-33],因此,可利用柴达木贝壳堤剖面的样品 REE 数据来检验此方法的可靠

图4a 小狐山剖面酸溶组分稀土元素 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 分布图Fig. 4a $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ plot of the acid fractions from Xiaohushan section图4b 剖面中典型湖相地层与风成砂的 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 分布对比Fig. 4b The contradistinction between the lacustrine deposit and the eolian sand in the $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ plot

性,通过将贝壳堤剖面稀土相关数据投在 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 图中发现,贝壳堤剖面的全部样品均落在了典型湖相沉积区(图5),即 $\Delta y > 0$,且 Δy 值的大小与重建的湖泊水位高低相关联。

总体上来说, $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 分布图结合三次回归曲线,基本上可以很好的将湖相沉积地层与风成砂地层有效的区分开来,且对于河流相的过渡地层也有较好辨别。利用此方法并结合稀土元素分配模式,可以有效用以区分沉积剖面中的不同沉积相,为地层的划分提供定量判别,并为研究气候环境演变提供较好的参考依据。

3.3 机理研究

不同沉积相的沉积物,由于其组成颗粒、矿物成

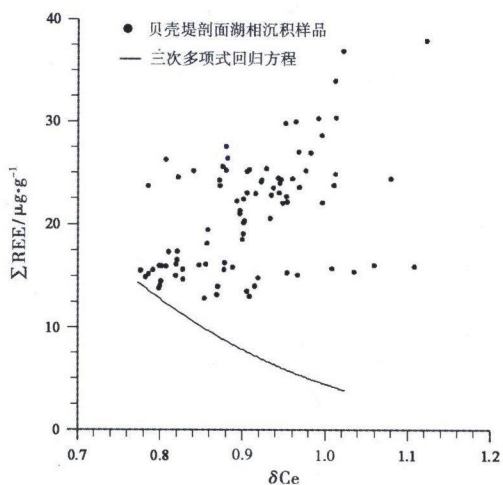


图 5 柴达木剖面酸溶组分稀土元素 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ 分布图
Fig. 5 $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ plot of the acid fractions from the Shell bar section

分存在差异,所以不同沉积物所含的元素丰度也会有差别。而这些造成 REE 分异的因素均与气候环境变化有着紧密的联系^[34]。通过酸溶组分中 ΣREE 与 Rb/Sr 和元素 Mn 含量对比发现(图6),它们之间存在着一定的联系,这说明小狐山剖面中

REE 的形成不仅与化学风化和气候环境有关,同时受到湖泊水化学性质和氧化-还原等因素的综合影响。在酸溶组分中,REE 与元素 Mn 含量之间存在较高的相关性($R^2 = 0.581$),说明 Fe-Mn 氧化物对于 REE 有一定的影响,而 Fe-Mn 氧化物的形成与介质 pH-Eh 紧密相关。另外,由于小狐山沉积中的总有机碳(TOC)含量仅为 0.11% ~ 0.23%^[22],可以推测 TOC 对 REE 值的变化影响甚微。此外,对于不同沉积相的 REE 含量与粒度指标(图7)对比分析也可以发现其对 REE 影响作用表现的并不明显。

从以上讨论可以得出,流域内的风化作用、介质 pH-Eh 是影响酸溶组分中 REE 的主要因素,而流域风化作用和介质性质受气候环境的制约,故酸溶组分中 REE 记录了湖泊与流域的环境变化信息。而正是环境气候对于酸溶组分中各个剖面样品的影响,从而使得不同沉积相、甚至是同一沉积相的样品在稀土参数上都会有所差别。

稀土元素中的变价元素 Ce 的活动性主要受风化过程中氧化还原条件的变化直接影响^[1,35,36]。元素 Ce 一般在两种情况下出现异常,一种是在弱酸

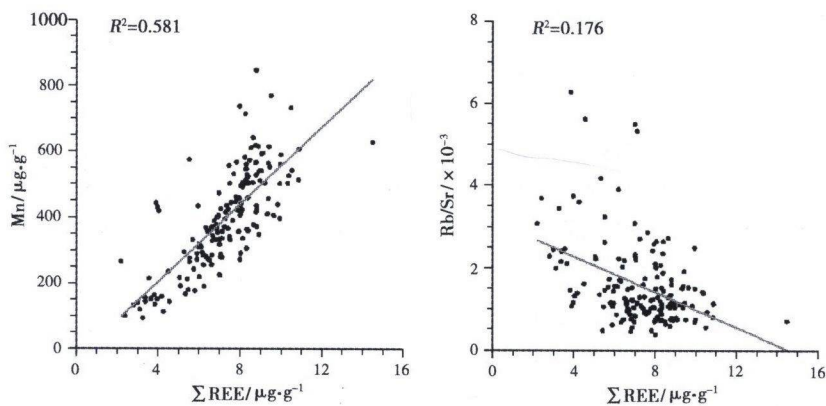


图 6 酸溶组分 ΣREE 与 Mn 含量、Rb/Sr 的相关性
Fig. 6 Correlations between ΣREE and Mn, Rb/Sr in AS fraction

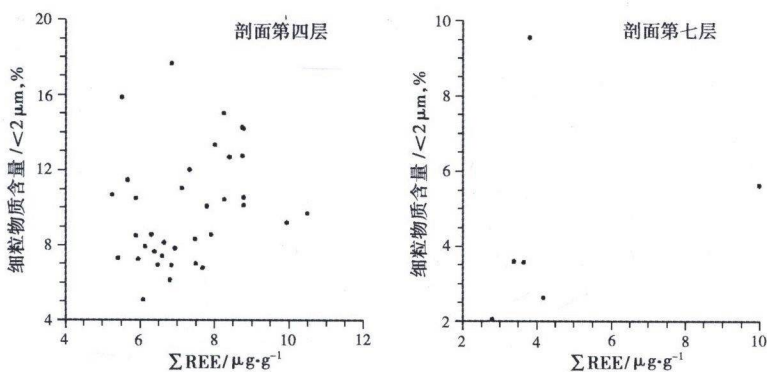


图 7 酸溶组分 ΣREE 与不同段样品粒度的相关性
Fig. 7 Correlations between ΣREE and fine grain-size of different parts of the section in AS fraction

性条件下的岩石风化过程中,由于 Ce^{4+} 极易水解而形成沉淀,使淋出液贫 Ce,产生 Ce 异常^[1,35]; 另一种出现在海洋沉积过程中^[37,38],因此, δCe 被认为是研究沉积区氧化 - 还原环境较为有效的示踪剂^[39,40],在表生沉积环境下, Ce 可以很好的记录气候信息。

就此研究剖面而言,表现出以风成砂、河流相沉积、湖泊沉积旋回与气候环境同步变化的特征。剖面中的风成砂在组成上主要以石英颗粒为主,粘土含量相对较低^[41],致使其稀土元素含量不高,加之样品中的 Ce 处于相对于早寒冷的时期,使得氧化程度受一定限制,表现出 δCe 分异程度不显著; 与之相对的是湖相沉积物,其所含的粘土较风成砂高,由于当时气候环境较为暖湿,氧化程度增大,使 δCe 值的分布相对于风成砂离散。但是,单从 δCe 或者 ΣREE 的变化来看,很难区分不同地层的沉积相。因此,需要稀土元素中多指标相互结合,综合考虑和判别。

4 结论

(1) 小孤山剖面各沉积相的稀土元素配分模式均为轻稀土适度富集缓右倾斜型、Eu 呈负异常分布模式,但是之间存在差异。在有风成砂的地层之中, LREE 相对贫缺,而 Eu 相对富集。其可能与各沉积地层的岩性及湖泊演化过程中环境变化引起湖泊介质 (pH) 条件改变而导致元素发生分异相关联。

(2) 由于 REE 分布模式和特征参数与湖泊及其流域环境和风化作用密切相关,因此湖泊沉积物中酸溶组分 REE 记录了湖泊与流域的环境变化信息, REE 变化及其各项参数是用来研究湖泊系统区域气候环境变化的良好代用指标。

(3) 经过球粒陨石标准化后的 $\delta Ce - \Sigma REE$ 图中,不同沉积相的沉积物分布在不同的区域。通过与地层对比证明利用 $\delta Ce - \Sigma REE$ 图并结合稀土分配模式可以有效用以判别不同沉积相,为定量划分地层,进一步深入、系统的对比分析研究提供有益的支持。

致谢 在分析研究过程中,得到了南京大学杨兢红博士、濮巍、裘丽雯及林雨萍等老师的指导与帮助,在此特致谢意。

参考文献 (References)

1 Nesbitt H W. Mobility and fractionation of rare earth elements

during weathering of a granodiorite. *Nature*, 1979, **279**: 206 ~ 210

- 2 刘英俊,曹励明. 元素地球化学导论. 北京:地质出版社,1987. 57 ~ 81
Liu Yingjun, Cao Liming. An Introduction to Elemental Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 1987. 57 ~ 81
- 3 Daux V, Crovisier J L, Hemond C *et al.* Geochemical evolution of basalt rocks subjected to weathering: Fate of the major elements, rare earth elements and thorium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, **58**: 4941 ~ 4954
- 4 张虎才. 元素表生地球化学特征及其理论基础. 兰州:兰州大学出版社,1997. 136 ~ 142
Zhang Hucai. The Superficial Elemental Geochemistry and Theoretical Principles. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1997. 136 ~ 142
- 5 McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin B R, McKay G A eds. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Reviews in Mineralogy*, 1989, **21**: 169 ~ 200
- 6 Murray R W, Buchholz ten Brink M R, Jones D L *et al.* Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale. *Geology*, 1990, **18**(3): 268 ~ 271
- 7 张虎才. 武都黄土剖面稀土元素研究. 地球化学, 1996, **25**(6): 545 ~ 551
Zhang Hucai. A study on REE of Wudu loess. *Geochimica*, 1996, **25**(6): 545 ~ 551
- 8 张虎才. 腾格里沙漠南缘武威黄土稀土元素及黄土沉积模式. 兰州大学学报(自然科学版), 1998, **34**(4): 157 ~ 164
Zhang Hucai. The REE of Wuwei loess at south vicinity of Tengger Desert and a model for loess accumulation. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 1998, **34**(4): 157 ~ 164
- 9 蓝先洪,王红霞,张志珣等. 南黄海表层沉积物稀土元素分布与物源关系. 中国稀土学报, 2006, **24**(6): 745 ~ 749
Lan Xianhong, Wang Hongxia, Zhang Zhixun *et al.* Distributions of rare earth elements and provenance relations in the surface sediments of the South Yellow Sea. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2006, **24**(6): 745 ~ 749
- 10 Yang Shouye, Li Congxian, Lee C B *et al.* REE geochemistry of suspended sediments from the rivers around the Yellow Sea and provenance indicators. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(11): 1135 ~ 1139
- 11 杨守业,韦刚健,夏小平等. 长江口晚新生代沉积物的物源研究: REE 和 Nd 同位素制约. 第四纪研究, 2007, **27**(3): 339 ~ 346
Yang Shouye, Wei Gangjian, Xia Xiaoping *et al.* Provenance study of the Late Cenozoic sediments in the Changjiang Delta: REE and Nd isotopic constraints. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(3): 339 ~ 346
- 12 蒋富清,周晓静,李安春等. $\delta Eu_N - \Sigma REEs$ 图解定量区分长江和黄河沉积物. 中国科学(D辑), 2008, **38**(11): 1460 ~ 1468
Jiang Fuqing, Zhou Xiaojing, Li Anchun *et al.* Quantitatively distinguishing sediments from the Yangtze River and the Yellow River using $\delta Eu_N - \Sigma REEs$ plot. *Science in China (Series D)*, 2009, **52**(2): 155 ~ 165

- 13 余素华, 郑洪汉, 陈肖柏等. 南极长城站区燕窝湖岩芯中稀土元素特征. 极地研究, 1993, **5**(3): 48 ~ 54
Yu Suhua, Zheng Honghan, Chen Xiaobo *et al.* Characteristics of the REE in Yanwo lake core at Grate wall station, Antarctica. *Antarctic Research*, 1993, **5**(3): 48 ~ 54
- 14 谢周清, 孙立广, 刘晓东等. 近 2000 年来南极菲尔德斯半岛西湖沉积物中稀土元素 $1/\delta\text{Eu}$ 特征与气候演变. 沉积学报, 2002, **20**(2): 303 ~ 306
Xie Zhouqing, Sun Liguang, Liu Xiaodong *et al.* The characteristic of $1/\delta\text{Eu}$ in the sediments of west lake with respect to climate change during the past 2000 years, Fildes Peninsula, Antarctica. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, **20**(2): 303 ~ 306
- 15 Tanaka K, Akagawa F, Yamamoto K *et al.* Rare earth element geochemistry of Lake Baikal sediment: Its implication for geochemical response to climate change during the Last Glacial/Interglacial transition. *Quaternary Science Review*, 2007, **26**: 1362 ~ 1368
- 16 余素华, 郑洪汉. 宁夏中卫长流水剖面沉积物中稀土元素及其环境意义. 沉积学报, 1999, **17**(1): 149 ~ 155
Yu Suhua, Zheng Honghan. REE of sediments of the Changliushui section at Zhongwei County of Ningxia Province and the environmental significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, **17**(1): 149 ~ 155
- 17 Johannesson K H, Lyons W B, Bird D A. Rare earth element concentrations and speciation in alkaline lakes from the western U. S. A. *Geophysical Research Letters*, 1994, **21**(9): 773 ~ 776
- 18 史基安, 郭雪莲, 王琪等. 青海湖 QH1 晚全新世沉积物稀土元素地球化学与气候环境关系探讨. 湖泊科学, 2003, **15**(1): 28 ~ 34
Shi Ji'an, Guo Xuelian, Wang Qi *et al.* Geochemistry of REE in QH1 sediments of Qinghai Lake since Late Holocene and its paleoclimatic significance. *Journal of Lake Science*, 2003, **15**(1): 28 ~ 34
- 19 Pachur H J, Wünnemann B, Zhang Hucai. Lake evolution in the Tengger Desert, North Western China during the last 40,000 years. *Quaternary Research*, 1995, **44**: 171 ~ 180
- 20 Wünnemann B, Pachur H J, Zhang Hucai. Climatic and environmental changes in the deserts of Inner Mongolia, China, since the Late Pleistocene. In: Alsharhan A S, Glennie K W, Whittle G L eds. *Quaternary Deserts and Climatic Change*. Rotterdam: Balkema, 1998. 381 ~ 394
- 21 张虎才, 明庆忠. 中国西北极端干旱区水文与湖泊演化及其巴丹吉林沙漠大型沙丘的形成. 地球科学进展, 2006, **21**(5): 532 ~ 538
Zhang Hucai, Ming Qingzhong. Hydrology and lake evolution in hyperarid Northwestern China and the mystery of megadune formation in Badain Jaran Desert. *Advance in Earth Science*, 2006, **21**(5): 532 ~ 538
- 22 杨伦庆, 张虎才, 类延斌等. 内蒙古西部额济纳古湖小孤山剖面有机质与碳酸盐组成及其古环境意义. 第四纪研究, 2009, **29**(2): 356 ~ 367
Yang Lunqing, Zhang Hucai, Lei Yanbin *et al.* Compositions of the organic matter and carbonate in Xiaohushan Section from Ejina Basin, Western Inner Mongolia, China and their paleoenvironmental significance. *Quaternary Sciences*, 2009, **29**(2): 356 ~ 367
- 23 Jiang Shaoyong, Zhao Haixiang, Chen Yongquan *et al.* Trace and rare earth element geochemistry of phosphate nodules from the lower Cambrian black shale sequence in the Mufu Mountain of Nanjing, Jiangsu Province, China. *Chemical Geology*, 2007, **244**: 584 ~ 604
- 24 Ross G R, Guevara S R, Arribère M A. Rare earth geochemistry in sediments of the Upper Manso River Basin, Rio Negro, Argentina. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, **133**: 47 ~ 57
- 25 Roy P D, Smykatz-Kloss W. REE geochemistry of the recent playa sediments from the Thar Desert, India: An implication to playa sediment provenance. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2007, **67**: 55 ~ 68
- 26 Zhang Hucai, Chang Fengqin, Li Bin *et al.* Branched aliphatic alkanes of Shell bar section in Qarhan Lake, Qaidam Basin and their paleoclimate significance. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(9): 1248 ~ 1256
- 27 常凤琴, 张虎才, 陈玥等. 柴达木盆地察尔汗古湖贝壳堤剖面碳酸盐和瓣鳃化石碳氧稳定同位素. 第四纪研究, 2007, **27**(3): 427 ~ 436
Chang Fengqin, Zhang Hucai, Chen Yue *et al.* Stable isotopes of carbonate and fossil shells from the Shell Bar section of the paleolake, Qarhan, Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(3): 427 ~ 436
- 28 牛洁, 张虎才, 常凤琴等. 柴达木察尔汗贝壳堤剖面 Sr 同位素及其环境意义. 高校地质学报, 2007, **13**(1): 14 ~ 22
Niu Jie, Zhang Hucai, Chang Fengqin *et al.* The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of Shell Bar section at Charhan Lake, Qaidam Basin and its paleo-environmental significance. *Geological Journal of China Universities*, 2007, **13**(1): 14 ~ 22
- 29 雷国良, 张虎才, 张文翔等. 柴达木盆地察尔汗古湖贝壳堤剖面粒度特征及其沉积环境. 沉积学报, 2007, **25**(2): 274 ~ 282
Lei Guoliang, Zhang Hucai, Zhang Wenxiang *et al.* Characteristics of grain-size and sedimentation of Shell Bar section in salt lake, Qaidam Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, **25**(2): 274 ~ 282
- 30 Chang Fengqin, Zhang Hucai, Chen Yue *et al.* Sedimentary geochemistry and environmental changes of paleolake Qarhan during the Late Pleistocene in Qaidam Basin, China. *Journal of China of Geosciences*, 2007, **18**(2): 135 ~ 141
- 31 张虎才, 王强, 彭金兰等. 柴达木察尔汗盐湖贝壳堤剖面介形类组合及其环境意义. 第四纪研究, 2008, **28**(1): 103 ~ 111
Zhang Hucai, Wang Qiang, Peng Jinlan *et al.* Ostracod assemblages and their paleoenvironmental significance from Shell Bar section of paleolake Qarhan, Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(1): 103 ~ 111
- 32 万和文, 唐领余, 张虎才等. 柴达木盆地东部 36 ~ 18kaB. P. 期间的孢粉记录及其气候环境. 第四纪研究, 2008, **28**(1): 112 ~ 121
Wan Hewen, Tang Lingyu, Zhang Hucai *et al.* Pollen record reflects climate changes in Eastern Qaidam Basin during 36 ~ 18kaB. P. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(1): 112 ~ 121
- 33 张文翔, 张虎才, 雷国良等. 柴达木贝壳堤剖面元素地球化学与环境演变. 第四纪研究, 2008, **28**(5): 917 ~ 928

- Zhang Wenxiang, Zhang Hucai, Lei Guoliang *et al.* Elemental geochemistry and paleoenvironment evolution of Shell Bar section at Qarhan in the Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 2008, **28** (5): 917 ~ 928
- 34 黄成敏, 王成善. 风化成土过程中稀土元素地球化学特征. 稀土, 2002, **23**(5): 46 ~ 49
Huang Chengmin, Wang Chengshan. Geochemical features of rare earth elements in process of rock weathering and soil formation. *Chinese Rare Earths*, 2002, **23**(5): 46 ~ 49
- 35 Braun J J, Pagel M, Muller J P *et al.* Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, **54**: 781 ~ 795
- 36 张虎才, 李吉均, 马玉贞等. 腾格里沙漠南缘武威黄土沉积元素地球化学特征. 沉积学报, 1997, **15**(4): 153 ~ 158
Zhang Hucai, Li Jijun, Ma Yuzhen *et al.* A study on elemental geochemical characters of the Wuwei loess section in the south vicinity of Tengger Desert. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, **15** (4): 153 ~ 158
- 37 Martin J M, Høgdahl O, Philippot J C. Rare earth elements supply to the ocean. *Journal Geophysical Research*, 1976, **81** (C18): 3119 ~ 3124
- 38 Fleet A J. A queous and sedimentary geochemistry of the rare earth elements. In: Henderson P ed. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984. 343 ~ 373
- 39 Wright J, Seymour R S, Shaw H F. REE and Nd isotopes in conodont apatite: Variations with geological age and depositional environment. *Geological Society of America Special Paper*, 1984, **196**: 325 ~ 340
- 40 Murray R W, Buchholtzen B M R, Brumsack H J *et al.* Rare earth elements in Japan Sea sediments and diagenetic behavior of Ce/Ce*: Results from ODP Leg 127. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, **55**(9): 2453 ~ 2466
- 41 张虎才, 张文翔, 常凤琴等. 稀土元素在湖相沉积中的地球化学分异——以柴达木盆地贝壳堤剖面为例. 中国科学(D辑), 2009(出版中)
Zhang Hucai, Zhang Wenxiang, Chang Fengqin *et al.* Geochemical fractionation of Rare Earth Elements in lacustrine deposits: A case study on the Shell Bar section from Qaidam Basin. *Science in China (Series D)*, 2009 (in Press)

THE $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ INSTRUCTION ON THE SEDIMENTARY FACIES

Zhang Wenxiang^① Zhang Hucai^{①②} Lei Guoliang^② Yang Lunqing^②
Lei Yanbin^② Chang Fengqin^② Pu Yang^② Pang Youzhi^②

(^①Key Laboratory of Western China's Environments System, Ministry of Education, College of Earth and Environments Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000; ^②State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract

Based on the concentration, ratios and distribution pattern analysis of the rare earth elements (REEs) in the acid fractions at the Xiaohushan section in Ejina Basin, Western Inner Mongolia, We have studied the relationship between $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ plot and the sedimentary facies for the study section. Our results show that the REE average concentration in AS is 7.24 $\mu\text{g/g}$ (except element Y) and that LREEs are strongly enriched (about 88.67%). Although each sedimentary facies of the section have similar REE distribution patterns, which are slightly rich in light earth rare elements (LREEs), with slightly right-tilting and negative Eu anomaly, they have fractionation in distribution patterns. Because the fractionation of REE in each sedimentary facies caused by their lithology, grain-size, mineral composition and the fractionation of REE during the environmental changes of lake, the $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ plot and regression equation can clearly distinguish sediments from lacustrine deposits and the eolian sand. The boundary can be described as an orthogonal polynomial equation by the ordinary linear regression with sediments from the lacustrine deposits located above the curve and the sediments from the eolian sand located below the curve. And the plot also can better identify samples formed in a combined effect of wind and water. This method can be used to distinguish the sediments from different sedimentary facies visually and quantitatively, which is verified by the data of the Shell bar section in the Qaidam Basin.

Key words REE, $\delta\text{Ce} - \Sigma\text{REE}$ plot, sedimentary facies