

# 潜江凹陷盐湖相页岩矿物组成与稀土元素地球化学特征及地质意义

郑有伟<sup>1</sup>, 付德亮<sup>2</sup>, 田兵<sup>1</sup>, 段志强<sup>3</sup>, 张波<sup>3</sup>, 罗建宇<sup>3</sup>, 王自翔<sup>4</sup>

1 内蒙古科技大学; 2 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室;

3 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院; 4 长江大学

**摘要** 以王场背斜古近系潜江组三段4亚段第10韵律层( $E_{q3}^4$ -10韵律)和潜江组四段0亚段第5韵律层( $E_{q4}^{0\oplus}$ -5韵律)钻井岩心为主要研究对象,通过全岩X射线衍射(XRD)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)实验分析,对潜江凹陷不同韵律层的物源属性与沉积环境开展研究。研究表明,这两套韵律层的矿物组成特征、稀土元素含量及配分特征具有明显的差异: $E_{q3}^4$ -10韵律的硅酸盐矿物主要以黏土矿物和石英为主, $E_{q4}^{0\oplus}$ -5韵律的硅酸盐矿物主要以斜长石、黏土矿物和石英为主;两者的稀土元素含量与硅酸盐矿物含量均呈正相关, $E_{q3}^4$ -10韵律的碎屑岩类稀土元素分馏程度大于碳酸盐岩类,而 $E_{q4}^{0\oplus}$ -5韵律的碎屑岩类稀土元素分馏程度与碳酸盐岩类相似,指示这两套地层的母源物质存在差异,或者 $E_{q3}^4$ -10韵律沉积时期气候相对更为温暖湿润、风蚀作用更强;这两套地层的沉积水体均为还原环境,而 $E_{q3}^4$ -10韵律沉积时期湖泊水体可能更深,更有利于有机质的堆积与保存,由此推断 $E_{q3}^4$ -10韵律更具有勘探潜力。

**关键词** 盐间页岩; 矿物组成; 稀土元素; 沉积环境; 潜江组; 潜江凹陷

**中图分类号**: TE122.2\*3 **文献标识码**: A

## 0 前言

北美页岩油气革命极大地启发了我国页岩油气的勘探与开发。我国南方下古生界海相页岩气已经取得突破性进展,实现了商业开发,陆相页岩油领域的勘探和研究方兴未艾。与北美海相页岩油不同,我国海相地层成熟度普遍较高,因此页岩油攻关多集中在东部成熟度相对较低的中生界—新生界陆相页岩。江汉盆地、东濮凹陷、柴达木盆地等古近纪咸化含油气盆地中,主力烃源岩往往与膏盐岩层存在较好的共生关系<sup>[1-2]</sup>。随着非常规油气理论的发展,江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组内的193个盐韵律被重新认识为富含页岩油的重要地质单元<sup>[3-5]</sup>。潜江组由盐韵律和砂泥岩段频繁交互而成,部分层段广泛发育富有机质泥页岩,其生成的原油受上下盐岩层的封堵而难以排出,形成自生自储的独特的页岩油藏,因此,盐湖相页岩具有较大的页岩油勘探开发潜力。

前人对潜江凹陷潜江组开展了储层特征、构造

和沉积相等方面的研究<sup>[6-10]</sup>,也有部分学者开展了页岩脆性评价、测井识别及生物标志化合物等方面的研究<sup>[11-13]</sup>,这些与页岩有关的研究主要是针对 $E_{q3}^4$ -10韵律层盐间页岩的优质烃源岩特征,而对于 $E_{q4}^{0\oplus}$ -5韵律层的研究却鲜有报道。潜江凹陷作为一种独特的页岩油系统单元,对其潜江组盐间页岩不同韵律层的物源属性与沉积环境差异的研究目前尚未开展。本文试图通过对潜江组两套不同韵律层盐间页岩的矿物组成、稀土元素特征及其之间关系的分析,研究两套盐间韵律层的物源区性质,探讨古气候与沉积环境的差异,以期为进一步的勘探部署奠定基础。

## 1 地质背景

潜江凹陷为江汉盆地中部一个较大的二级构造单元<sup>[10,14]</sup>,王场构造是潜江凹陷内的一个背斜<sup>[15]</sup>,是重要的三级控油构造单元,西侧与北侧被蚌湖向斜和张港单斜夹持(图1a),南段被周矶断裂、车场断裂切割,整体表现为断背斜形态。

收稿日期:2019-10-27; 改回日期:2021-01-06; 网络出版日期:2021-06-11

本文受内蒙古自然科学基金“大兴安岭中南段二叠纪砂岩地球化学和岩石学特征及其构造地质意义”(编号:2018LH04001)资助

**第一作者**: 郑有伟,博士,从事地质构造与地球化学研究。通信地址:014010 内蒙古包头市昆都仑区阿尔丁大街7号; E-mail: ywzheng1988@163.com

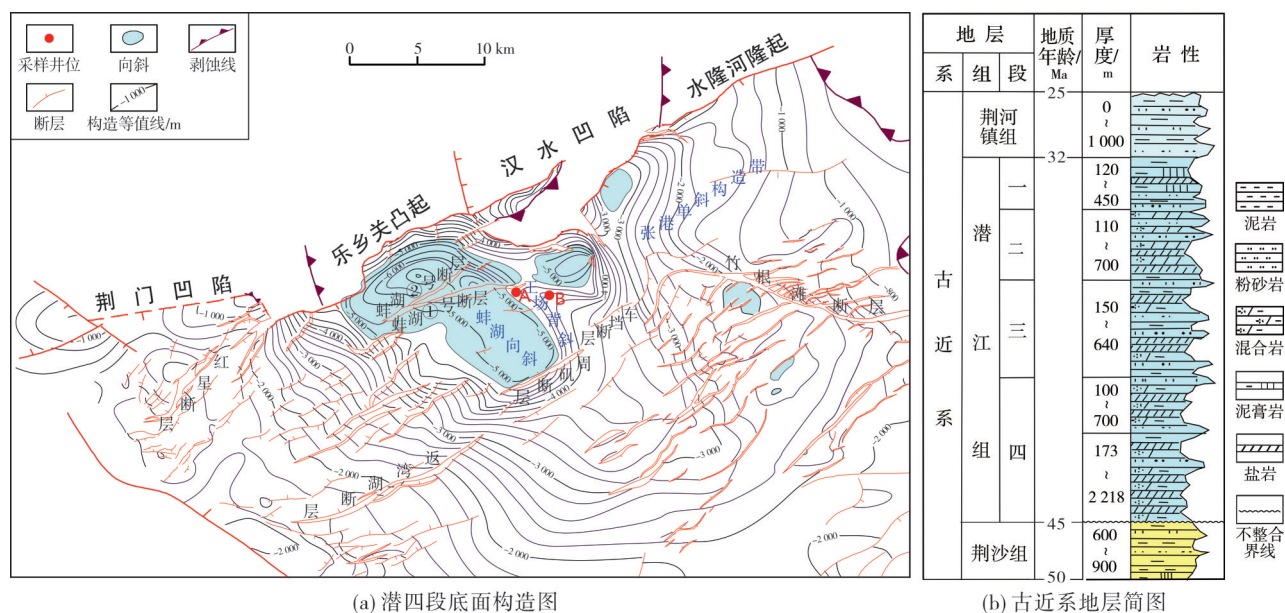


图1 研究区构造位置与地层柱状图(据文献[10]修改)

Fig. 1 Structural location and stratigraphic column of study area (cited from reference[10], modified)

潜江凹陷潜江组自上而下依次分为潜一段、潜二段、潜三段和潜四段(图1b)。从潜四段沉积中晚期开始古地貌表现为北深南浅、地形相对平缓的特点,在高盐度、强蒸发、封闭的潮湿气候与干旱气候交替环境下沉积了盐系地层,纵向上由盐岩层和砂泥岩段频繁互层<sup>[16]</sup>。每个段分为若干亚段,每个亚段由若干盐韵律层组成,一个盐韵律层由底部盐岩层和上部盐间层组成。为了便于讨论,通常称盐间层为一个韵律层或者盐间页岩。受西北部单向物源的影响,平面上自西北向东南方向依次发育三角洲沉积区—半咸水湖过渡区—盐湖沉积区<sup>[3]</sup>。根据钻井岩心观察、岩心样品分析:在三角洲沉积区,纵向上岩性组合为砂岩、泥岩频繁互层;在半咸水湖过渡区,纵向上岩性组合为泥页岩夹碳酸盐岩或薄层砂岩;在盐湖沉积区,由一百多个盐韵律组成<sup>[3,5]</sup>。

$Eq_3^{4-10}$  韵律盐间页岩有机碳含量(TOC)在0.60%~6.38%之间,平均值为3.39%, $S_1+S_2$ 在4.44~43.39 mg/g之间,平均值为22.24 mg/g,反映有机质丰度达到了优质烃源岩的标准<sup>[15]</sup>。有机质类型为I型和II型,镜质组反射率( $R_o$ )分布范围为0.4%~0.8%。

$Eq_4^{0+5}$  韵律盐间页岩 TOC 在 0.20%~1.57% 之间,平均值为 0.72%,有机质类型主要为 II 型。 $Eq_4^{0+5}$  韵律埋深较大, $R_o$ 最大可达 1% 以上,成熟度较大。 $S_1+S_2$ 分布范围在 0.37~10.87 mg/g 之间,平

均值为 4.58 mg/g,显示页岩储层具有中等水平的含油量,较  $Eq_3^{4-10}$  韵律盐间页岩含油量偏低,为中等富油储层<sup>[17]</sup>。

## 2 矿物组成与地球化学特征

本次研究系统采集了潜江凹陷盐湖沉积区王场背斜上 A 井  $Eq_4^{0+5}$  韵律(57 块)和 B 井  $Eq_3^{4-10}$  韵律(65 块)盐间层岩心样品(钻井位置见图 1),样品干燥后研磨至 200 目,随后分别进行全岩 X 射线衍射(XRD)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)实验。XRD 实验在江汉油田勘探开发研究院测试中心完成,ICP-MS 实验在中国科学院油气资源研究重点实验室完成。

### 2.1 矿物组成特征

全岩 XRD 分析表明,样品中均含较高的  $Al_2O_3$ 、CaO 和 MgO 组分,说明与淡水环境的泥页岩、泥岩相比,咸化环境形成的烃源岩钙质和膏盐成分较高。两套盐间页岩主要由硅酸盐矿物(黏土矿物、石英、钾长石、斜长石)、碳酸盐矿物(方解石、白云石)、硫酸盐矿物(钙芒硝、石膏、硬石膏)、石盐和黄铁矿组成,为典型的混积岩<sup>[18]</sup>。其中,硫酸盐矿物主要顺层集中发育和在裂缝中充填,仅有少量以基质形式存在。受采样位置的影响,部分样品硫酸盐矿物含量较高,不宜参与平均统计。剔除

高含硫酸盐矿物的样品后,  $Eq_3^4$ -10 韵律硅酸盐矿物平均含量为 46.58%, 碳酸盐矿物平均含量为 43.56%, 硫酸盐矿物平均含量为 4.92%, 硫酸盐矿物基本为钙芒硝(图 2a);  $Eq_4^{0+}$ -5 韵律硅酸盐矿物平

均含量为 38.91%, 碳酸盐矿物平均含量为 49.56%, 硫酸盐矿物平均含量为 7.44%(图 2b), 与  $Eq_3^4$ -10 韵律不同,  $Eq_4^{0+}$ -5 韵律硫酸盐矿物主要为硬石膏。

两套韵律层的硅酸盐矿物与碳酸盐矿物之和

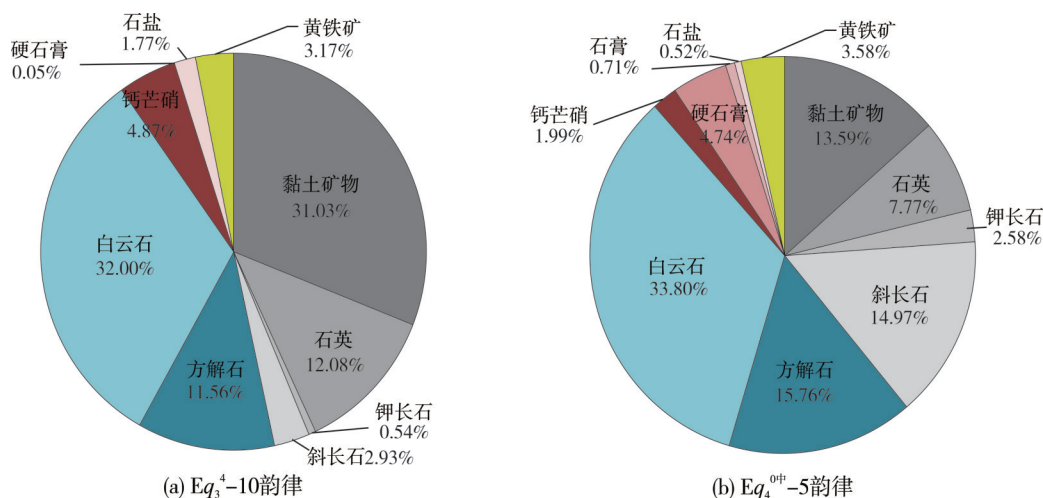


图2 潜江凹陷潜江组盐间页岩的矿物组成

Fig. 2 Mineral composition of inter-salt shale of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression

约占 90%, 硫酸盐矿物、石盐和黄铁矿等约占 10%。 $Eq_3^4$ -10 韵律的硅酸盐矿物与碳酸盐矿物含量相当, 各占 45% 左右;  $Eq_4^{0+}$ -5 韵律的硅酸盐矿物含量约占 38.91%, 低于碳酸盐矿物含量 (49.56%)。另外, 两套韵律层在硅酸盐矿物构成上存在较大差异:  $Eq_3^4$ -10 韵律的硅酸盐矿物主要以黏土矿物和石英为主, 含少量斜长石和钾长石;  $Eq_4^{0+}$ -5 韵律的硅酸盐矿物主要以斜长石、黏土矿物和石英为主, 含少量钾长石。矿物组成与硅酸盐矿物构成的差异可能暗示着物源与沉积环境的差异。

由于矿物组成的特殊性, 普通岩石命名规则不适用于该类混积岩的定名。为了便于讨论, 本文暂且以硅酸盐矿物、碳酸盐矿物、膏盐矿物作为 3 个端元, 按各类矿物的含量多少将样品分为碎屑岩类、碳酸盐岩类和膏盐岩类 3 种岩石类型 (图 3)。

## 2.2 稀土元素特征

$Eq_3^4$ -10 韵律的碎屑岩类、碳酸盐岩类和膏盐岩类的稀土元素总量  $\Sigma REE$  平均值分别为 124.03  $\mu g/g$ 、88.34  $\mu g/g$  和 53.04  $\mu g/g$  (表 1);  $Eq_4^{0+}$ -5 韵律的分别为 139.82  $\mu g/g$ 、112.15  $\mu g/g$  和 73.38  $\mu g/g$ 。两套盐间页岩稀土元素含量均明显低于澳大利亚后太古宙页岩 (PAAS)<sup>[19]</sup>、北美页岩 (NASC)<sup>[20]</sup> 和中国东部泥岩

(ECA)<sup>[21]</sup>, 介于中国东部碎屑岩与碳酸盐岩之间 (表 1), 体现出潜江凹陷潜江组盐间页岩为陆源碎屑岩机械沉积与盐类矿物化学沉积的混合沉积的特征。

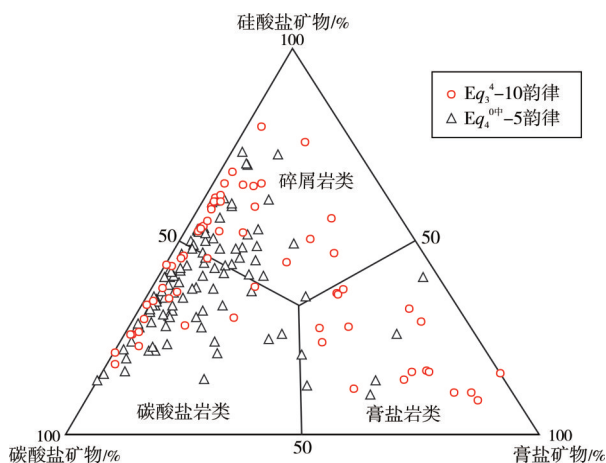


图3 潜江凹陷潜江组盐间页岩的矿物组成分类

Fig. 3 Classification of mineral composition of inter-salt shale in Qianjiang Formation in Qianjiang Depression

已有研究表明, 受成岩作用的影响, 岩石中往往会出现  $\delta Ce$  与  $\delta Eu$ 、 $(Dy/Sm)_N$ 、 $\Sigma REE$  等参数都存在较好相关性<sup>[22-23]</sup>。本次研究样品的  $\delta Ce$  与  $\delta Eu$ 、 $(Dy/Sm)_N$  均显示无相关性 (图 4), 表明成岩作用对  $Eq_3^4$ -10 韵律和  $Eq_4^{0+}$ -5 韵律稀土元素的影响不明显。



表1 潜江凹陷和其他地区不同类型岩石稀土元素参数统计表

Table 1 Statistis of REE paramaters of different types of rocks in Qianjiang Depression and other areas

层位/地区		岩石类型	样品数	$\Sigma\text{REE}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Sigma\text{LREE}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Sigma\text{HREE}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$
潜江凹陷	$\text{Eq}_3^{4-10}$	碎屑岩类	26	$\frac{87.68\sim149.47}{124.03}$	$\frac{77.36\sim137.32}{112.31}$	$\frac{7.86\sim13.93}{11.72}$	$\frac{8.59\sim11.30}{9.63}$	$\frac{9.46\sim12.90}{10.85}$	$\frac{3.84\sim4.48}{4.16}$	$\frac{1.58\sim1.83}{1.69}$
		碳酸盐岩类	20	$\frac{47.88\sim149.27}{88.34}$	$\frac{42.37\sim136.12}{79.49}$	$\frac{5.84\sim13.15}{8.85}$	$\frac{7.65\sim10.35}{8.87}$	$\frac{8.47\sim11.99}{9.89}$	$\frac{3.63\sim4.35}{4.01}$	$\frac{1.48\sim1.85}{1.66}$
		膏盐岩类	17	$\frac{13.38\sim100.87}{53.04}$	$\frac{12.13\sim92.89}{47.88}$	$\frac{1.25\sim9.61}{5.16}$	$\frac{6.77\sim11.64}{9.13}$	$\frac{7.24\sim13.07}{10.16}$	$\frac{3.64\sim4.33}{4.05}$	$\frac{1.52\sim1.82}{1.66}$
	$\text{Eq}_4^{0\text{中}}-5$	碎屑岩类	20	$\frac{58.92\sim192.89}{139.82}$	$\frac{53.17\sim173.64}{125.30}$	$\frac{5.75\sim19.25}{14.52}$	$\frac{7.62\sim9.57}{8.66}$	$\frac{7.28\sim10.33}{8.92}$	$\frac{3.18\sim4.14}{3.72}$	$\frac{1.47\sim1.72}{1.60}$
		碳酸盐岩类	32	$\frac{53.89\sim137.78}{112.15}$	$\frac{48.62\sim134.70}{100.77}$	$\frac{5.27\sim16.05}{11.38}$	$\frac{7.94\sim10.15}{8.86}$	$\frac{7.93\sim11.73}{9.73}$	$\frac{3.56\sim4.66}{3.96}$	$\frac{1.44\sim1.84}{1.66}$
		膏盐岩类	5	$\frac{47.88\sim105.18}{73.38}$	$\frac{42.97\sim94.98}{66.06}$	$\frac{4.81\sim10.25}{7.32}$	$\frac{8.74\sim9.26}{8.98}$	$\frac{9.39\sim10.54}{9.87}$	$\frac{3.93\sim4.17}{4.04}$	$\frac{1.51\sim1.79}{1.64}$
中国东部 <sup>[21]</sup>		碎屑岩	137.95	152.82	14.87	9.28	10.92	4.28	1.73	
		泥质岩	275.60	296.96	21.36	12.90	11.24	4.37	1.67	
		碳酸盐岩	22.76	25.58	2.82	8.07	8.83	3.64	1.69	
PAAS <sup>[19]</sup>		页岩	167.16	184.77	17.61	9.49	9.13	4.33	1.33	
NASC <sup>[20]</sup>		页岩	173.21	152.84	20.37	7.50	6.96	3.53	1.35	
ECA <sup>[21]</sup>		页岩	217.76	196.40	21.36	9.19	11.24	4.37	1.67	

注：表中分式为  $\frac{\text{最小值}\sim\text{最大值}}{\text{平均值}}$ ；下角标 N 表示球粒陨石标准化值；PAAS 为澳大利亚后太古宙平均页岩；NASC 为北美页岩；ECA 为中国东部泥岩。

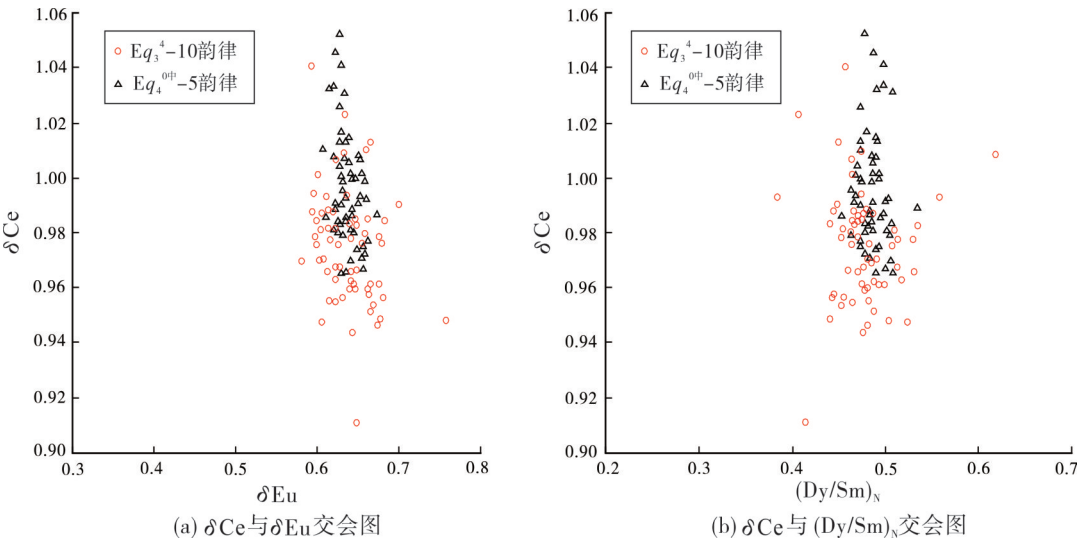


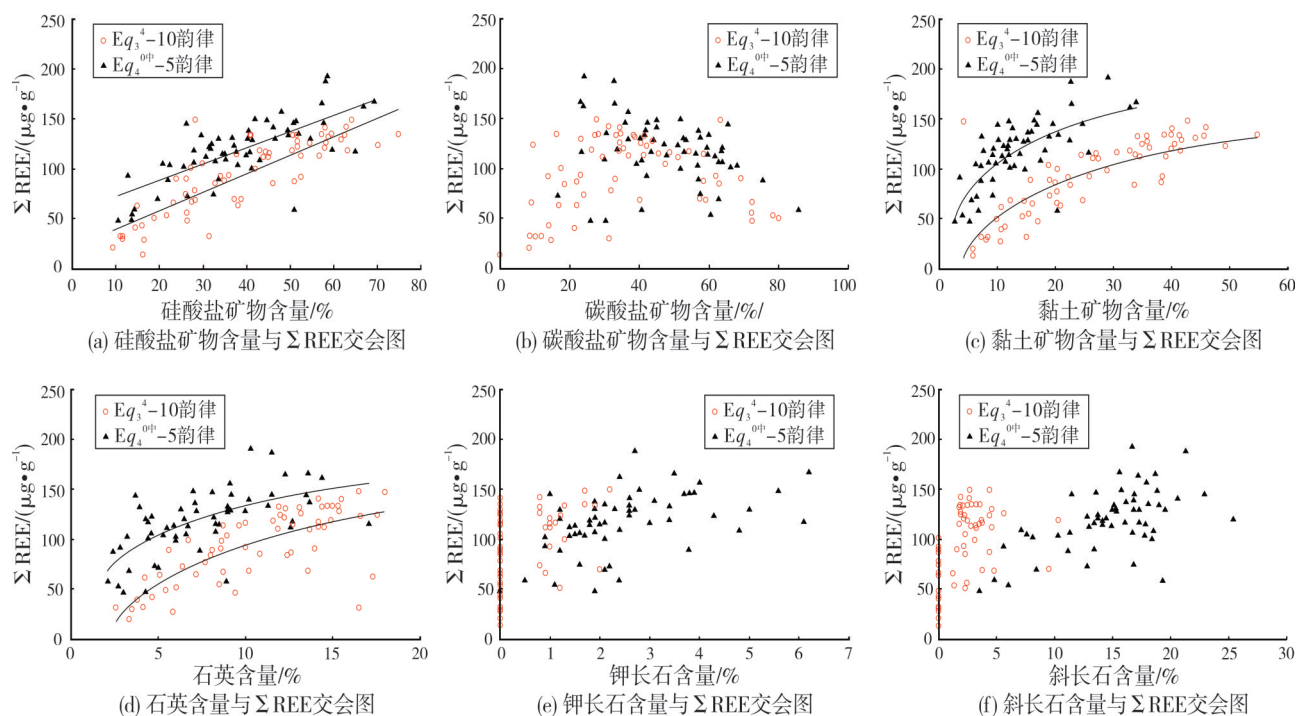
图4 潜江凹陷潜江组盐间页岩  $\delta\text{Ce}$  与  $\delta\text{Eu}$ 、 $(\text{Dy}/\text{Sm})_{\text{N}}$  关系图

Fig. 4 Relationship between  $\delta\text{Ce}$  and  $\delta\text{Eu}$ ,  $(\text{Dy}/\text{Sm})_{\text{N}}$  of inter-salt shale of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression

2.3 稀土元素与矿物组成的关系

同一套韵律层内的不同类型岩石的稀土元素含量存在明显差异(表1),即碎屑岩类的 $\Sigma\text{REE}>$ 碳酸盐岩类的 $\Sigma\text{REE}>$ 膏盐岩类的 $\Sigma\text{REE}$ 。显然,盐间页岩的稀土元素含量与矿物组成密切相关。图

5a 显示两套韵律层的稀土元素总量与硅酸盐矿物含量之间呈明显正相关性,体现了稀土元素的继承性特征<sup>[24]</sup>。斜长石是沉积岩继承母岩稀土元素的重要载体之一, $\text{Eq}_4^{0\text{中}}-5$ 韵律的稀土元素含量高于 $\text{Eq}_3^4-10$ 韵律,这可能与 $\text{Eq}_4^{0\text{中}}-5$ 韵律中具有较高含量的斜长石有关。

图5 潜江凹陷潜江组盐间页岩的矿物含量与 $\Sigma\text{REE}$ 关系Fig. 5 Relationship between mineral content and  $\Sigma\text{REE}$  of inter-salt shale of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression

在不考虑高含硫酸盐矿物样品时,碳酸盐矿物含量与稀土元素含量之间呈负相关性(图5b),这主要是因为碳酸盐矿物含量与硅酸盐矿物含量之间呈此消彼长的关系:碳酸盐矿物含量高时,硅酸盐矿物含量就低。

稀土元素总量 $\Sigma\text{REE}$ 与黏土矿物、石英含量之间并不是呈现简单的线性关系,而是呈对数关系(图5c,5d);钾长石由于含量很低,其与 $\Sigma\text{REE}$ 之间并无明显相关性(图5e)。Eq<sub>3</sub><sup>4</sup>-10韵律中的斜长石含量较低,其与 $\Sigma\text{REE}$ 也无明显相关性,但Eq<sub>4</sub><sup>0+</sup>-5韵律的斜长石含量相对较高,变化范围较大,与 $\Sigma\text{REE}$ 之间呈明显正相关性(图5f)。综合来看,盐间页岩硅酸盐矿物的含量控制着稀土元素的丰度。

### 3 讨论

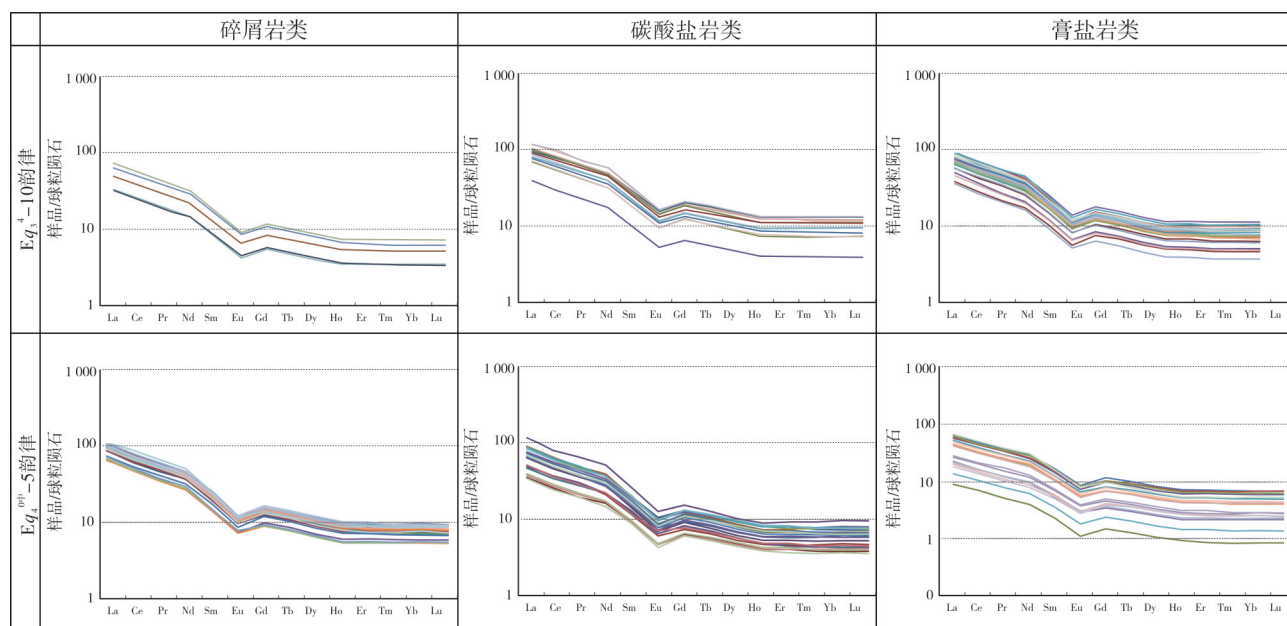
#### 3.1 物源指示意义

稀土元素的化学性质极其相似,在水介质中的停留时间短、含量低,能够快速地在细粒沉积物中而不易发生分异作用,同时,由于受成岩作用和蚀变作用影响较小,使得沉积物能够较好地保存物源区的地球化学信息。因此,稀土元素常被用作

物源指示剂,其特征参数 $\delta\text{Eu}$ 、 $\delta\text{Ce}$ 以及轻、重稀土元素质量分数比值( $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ )等主要反映了物源特征<sup>[25-26]</sup>。

以球粒陨石为标准,对研究样品的REE进行标准化,结果如图6。两套韵律层的3类岩石均表现出相似的配分模式:LREE相对富集,HREE相对亏损,曲线呈右倾斜型,La—Eu曲线较陡,Gd—Lu曲线较为平缓。 $\delta\text{Eu}$ 值为0.58~0.75,平均值为0.64,具较为明显的亏损; $\delta\text{Ce}$ 值为0.91~1.05,平均值为0.98,无明显Ce异常。相似的配分模式说明两套韵律层的母源物质具有相同的稀土元素配分模式,可能来源于同一母源。

$\Sigma\text{REE}$ —La/Yb图版常被用来判断岩石母源。由于该图版使用了稀土元素绝对含量作为参数之一,因此,可以用来判断沉积岩直接来源的硅酸盐矿物的母源。在计算稀土元素含量时应将碳酸盐等化学沉积矿物所占比重扣除,而不应该将硅酸盐矿物稀土元素含量与碳酸盐等化学沉积类矿物的稀土元素含量混为一谈。Cullers等<sup>[27]</sup>在关于沉积分选作用对REE浓度的影响效应研究中发现,含黏土的岩石比其他沉积岩具有更高的REE含量,石英和碳酸盐矿物的存在对REE起了稀释作用,



注: 图中不同颜色曲线代表不同样品。

图6 潜江凹陷潜江组盐间页岩的REE配分模式

Fig. 6 REE distribution model of inter-salt shale of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression

物源区的REE含量完全可以由沉积岩中的黏土矿物来代表。由上述矿物含量与稀土元素含量关系(图5)可知,稀土元素主要赋存在硅酸盐矿物之中,通过图5a中硅酸盐矿物与REE的线性关系,可以简单换算出硅酸盐矿物为100%时的稀土元素,这一含量反映的是真实物源区的稀土元素含量。将研究区样品投点到 $\Sigma\text{REE}-\text{La}/\text{Yb}$ 图版(图7),绝大部分样品落入花岗岩区,部分落入花岗岩与碱性玄武岩重叠区,少量落入沉积岩与花岗岩重叠区,体现了潜江组盐间页岩具有多物源属性,更多的可能来源于花岗岩区和碱性玄武岩区。

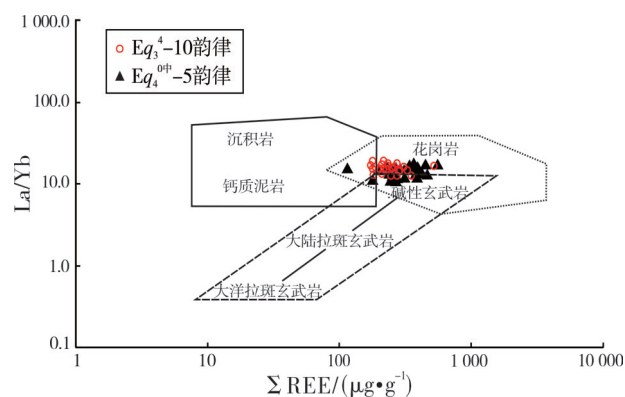


图7 潜江凹陷潜江组盐间页岩 $\Sigma\text{REE}-\text{La}/\text{Yb}$ 图版

Fig. 7  $\Sigma\text{REE}-\text{La}/\text{Yb}$  chart for provenance discrimination of inter-salt shale of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression

### 3.2 古气候与沉积环境

Sr和Ba具有相似的化学性质,Sr丰度和Sr/Ba值与古盐度值存在较好的相关性,通常随着水体盐度的逐渐加大,Ba离子先与碳酸盐、硫酸盐中的阴离子结合发生沉淀,之后Sr离子再发生沉淀,因此Sr/Ba值可用来作为沉积时期古盐度分析的一个指标。研究区 $\text{Eq}_3^4-10$ 韵律中Sr含量的范围为411~24 839  $\mu\text{g/g}$ , $\text{Eq}_4^{0+5}$ 韵律中Sr含量的范围为265.8~24 924  $\mu\text{g/g}$ ,两套韵律层均表现出Sr含量变化快的特征,说明潜江组的古盐度变化很快。古盐度的变化对古气候变化有一定的指示意义,一般认为:Sr/Ba值小于0.6代表陆相淡水沉积,Sr/Ba值在0.6~1.0范围代表半咸水的海陆过渡相沉积,Sr/Ba值大于1.0代表海相(咸化湖泊)咸水沉积<sup>[28]</sup>。研究区 $\text{Eq}_3^4-10$ 韵律的Sr/Ba值的范围为1.25~20.63,平均值为5.01,而 $\text{Eq}_4^{0+5}$ 韵律的Sr/Ba值的范围为0.87~16.09,平均值为4.19,说明当时的沉积环境均为咸湖沉积,该时期古盐度较大,该环境下发育石膏和盐晶体。上述分析表明,Sr的丰度和Sr/Ba值都显示了此沉积期处于湖盆咸化期,而且 $\text{Eq}_3^4-10$ 韵律页岩比 $\text{Eq}_4^{0+5}$ 韵律页岩处于更咸化的湖盆环境。咸湖沉积有利于有机质的堆积与保存<sup>[29]</sup>,有利于烃源岩的发育。



古气候、沉积环境的变化可以引起沉积物中矿物组成的变化,而这种变化也可能被稀土元素记录下来,并体现在稀土元素的配分特征上。

通常用 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 等比值来反映稀土元素的分馏程度: $(La/Yb)_N$ 反映了稀土元素球粒陨石标准化图解中配分曲线的倾斜程度,即轻、重稀土元素的分馏程度; $(La/Sm)_N$ 反映了轻稀土元素之间的分馏程度; $(Gd/Yb)_N$ 反映了重稀土元素之间的分馏程度。研究区 $Eq_3^4$ -10韵律的碎屑岩类 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 的平均值分别为10.85、4.16和1.69,碳酸盐岩类 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 的平均值分别为9.89、4.01和1.66,均低于碎屑岩类,表明 $Eq_3^4$ -10韵律碎屑岩类稀土元素分馏程度高于碳酸盐岩类。与此相反, $Eq_4^{0+}$ -5韵律的碎屑岩类 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 的平均值分别为8.92、3.72和1.60,碳酸盐岩类 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 的平均值分别为9.73、3.96和1.66,均高于碎屑岩类,表明 $Eq_4^{0+}$ -5韵律的碎屑岩类稀土元素分馏程度低于碳酸盐岩类。另一方面,从 $(La/Yb)_N$ 与硅酸盐矿物含量关系图(图8)也可发现, $Eq_3^4$ -10韵律的硅酸盐矿物含量与稀土元素分馏程度呈良好的正相关性,而 $Eq_4^{0+}$ -5韵律的硅酸盐矿物含量与稀土元素分馏程度具负相关性。显然,稀土元素在硅酸盐矿物和碳酸盐矿物中具有不同的分馏特征。

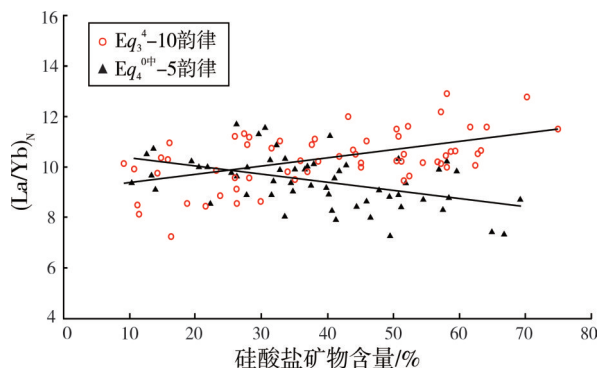


图8 潜江凹陷潜江组盐间页岩硅酸盐矿物含量与 $(La/Yb)_N$ 关系

Fig. 8 Relationship between silicate minerals content and  $(La/Yb)_N$  of inter-salt shale of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression

研究表明,页岩标准化后的海水中的稀土元素常表现出重稀土元素相对富集, $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 值较小,这是由于海水中稀土元素的离子常与碳酸根离子形成络合物,重稀土络合物比较稳定<sup>[30-31]</sup>,轻

稀土元素的离子半径较小,其与黏土矿物的吸附而作用更强,因此碳酸盐沉积环境下 $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 值较小,碎屑岩沉积环境下 $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 值较大。鄢明才等<sup>[21]</sup>对中国东部不同类型岩石稀土元素特征的统计发现,稀土元素分馏程度由小到大依次为碳酸盐岩、碎屑岩、泥质岩(表1)。 $Eq_3^4$ -10韵律表现出正常的岩石类型与分馏程度关系的特征。

与中国东部碳酸盐岩<sup>[21]</sup>相比,潜江组两套韵律层的碳酸盐岩类稀土元素分馏程度相似,都略高于中国东部碳酸盐岩(表1),这与研究样品中含有部分硅酸盐矿物有关。研究区 $Eq_3^4$ -10韵律碎屑岩类稀土元素分馏程度与中国东部碎屑岩相近,而 $Eq_4^{0+}$ -5韵律碎屑岩类稀土元素分馏程度则明显低于 $Eq_3^4$ -10韵律碎屑岩类和中国东部碎屑岩。分析认为有两种原因造成以上现象:其一,潜江组两套韵律层的母源物质本身有所差异;其二,两套韵律层具有同一物源,但在 $Eq_4^{0+}$ -5韵律沉积时期的沉积物在风化—搬运—沉积—成岩这一过程中稀土元素的分馏作用弱于 $Eq_3^4$ -10韵律和中国东部碎屑岩。结合两套韵律层的硅酸盐矿物组成来看,相较于 $Eq_3^4$ -10韵律而言, $Eq_4^{0+}$ -5韵律较高含量的长石类矿物说明其物源母质并未遭受强烈的风蚀作用,在母岩风化后便快速搬运、沉积下来,其稀土元素配分特征仍然保持着与母岩更为相似的相对较弱的稀土元素分馏程度特征。

气候变化是控制沉积物稀土元素配分的重要原因之一,高的 $(La/Yb)_N$ 值通常指示着相对温暖湿润的气候<sup>[19]</sup>。相同类型的岩石,研究区 $Eq_3^4$ -10韵律 $(La/Yb)_N$ 值高于 $Eq_4^{0+}$ -5韵律,表明 $Eq_3^4$ -10韵律沉积时期气候相对更为温暖湿润,这种气候更有利于生物的生长,这可能是 $Eq_3^4$ -10韵律有机质丰度相对较高的原因之一。

稀土元素在湖泊中以溶解态和悬浮态的形式存在,重稀土元素较易沉淀,分异不明显,而轻稀土元素停留在深水环境的时间长,沉降缓慢,与水溶液交换时间长,促进了轻稀土元素间的分异<sup>[32]</sup>。因此,较高的 $(La/Sm)_N$ 值可能指示了相对较深的水体。相同类型的岩石, $Eq_3^4$ -10韵律 $(La/Sm)_N$ 值大于 $Eq_4^{0+}$ -5韵律,表明 $Eq_3^4$ -10韵律沉积时期湖泊水体可能更深。

Elderfield等<sup>[33]</sup>提出了Ce异常值的计算公式为

$Ce_{anom} = \lg(3Ce_N / (2La_N + Nd_N))$ , 以北美页岩为标准值。当  $Ce_{anom}$  值  $> -0.1$  时, 为缺氧还原条件; 当  $Ce_{anom}$  值  $< -0.1$  时, 为氧化环境。研究区  $Eq_3^4$ -10 韵律的  $Ce_{anom}$  值为  $-0.08 \sim -0.02$ , 平均值为  $-0.05$ ,  $Eq_4^{0+}$ -5 韵律的  $Ce_{anom}$  值为  $-0.05 \sim -0.01$ , 平均值为  $-0.04$ , 均大于  $-0.1$ , 表明这两套韵律层的沉积水体均为缺氧的还原环境, 有利于有机质的保存。

## 4 结 论

(1) 潜江凹陷古近系潜江组盐间页岩主要由硅酸盐矿物、碳酸盐矿物和少量膏盐矿物组成, 由于古气候和沉积环境的变化, 不同韵律层之间矿物组成有一定的差异。 $Eq_3^4$ -10 韵律的硅酸盐矿物主要以黏土矿物和石英为主;  $Eq_4^{0+}$ -5 韵律的硅酸盐矿物主要以斜长石、黏土矿物和石英为主。

(2) 研究区盐间页岩稀土元素含量与硅酸盐矿物含量呈正相关。 $Eq_3^4$ -10 韵律的碎屑岩类稀土元素分馏程度大于碳酸盐岩类,  $Eq_4^{0+}$ -5 韵律的碎屑岩类稀土元素分馏程度与碳酸盐岩类相似, 可能指示两套地层的母源物质存在差异, 或  $Eq_3^4$ -10 韵律沉积时期气候相对更为温暖湿润、风蚀作用更强。两套地层沉积水体均为还原环境, 而  $Eq_3^4$ -10 韵律沉积时期的湖泊水体可能更深。

(3) 对古气候与沉积环境对比研究表明, 研究区  $Eq_3^4$ -10 韵律页岩比  $Eq_4^{0+}$ -5 韵律页岩处于更咸化的湖盆环境, 咸湖沉积有利于有机质的堆存, 有利于烃源岩的发育, 因而具有更好的勘探潜力。

## 参 考 文 献

- [1] 孙镇城, 杨藩, 张枝焕, 等. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1-338.
- [2] QUAN Cheng, LIU Zhonghui, UTESCHER T, et al. Revisiting the Paleogene climate pattern of East Asia: a synthetic review [J]. *Earth-science reviews*, 2014, 139: 213-230.
- [3] 吴世强, 唐小山, 杜小娟, 等. 江汉盆地潜江凹陷陆相页岩油地质特征[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(3): 282-286.
- [4] 熊智勇, 吴世强, 王洋, 等. 江汉盐湖盆地盐间泥质白云岩油藏地质特征与实践[J]. 地质科技情报, 2015, 34(2): 181-187.
- [5] HOU Yuguang, WANG Furong, HE Sheng, et al. Properties and shale oil potential of saline lacustrine shales in the Qianjiang Depression, Jiangnan Basin, China [J]. *Marine and petroleum geology*, 2017, 86: 1173-1190.
- [6] 王必金, 林畅松, 陈莹, 等. 江汉盆地幕式构造运动及其演化特征[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(2): 226-230.
- [7] 张永生, 杨玉卿, 漆智先, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境[J]. 古地理学报, 2003, 5(1): 29-35.
- [8] 刘安林. 江汉盐湖盆地第三系潜江组沉积环境及其与油气的关系[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(3): 10-19.
- [9] 李乐, 王自翔, 郑有恒, 等. 江汉盆地潜江凹陷潜三段盐韵律层页岩油富集机理[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 1012-1023.
- [10] 李乐, 刘爱武, 漆智先, 等. 潜江凹陷王场背斜潜四下段盐韵律层页岩储层孔隙结构特征[J]. 地球科学, 2020, 45(2): 602-616.
- [11] 王芙蓉, 何生, 郑有恒, 等. 江汉盆地潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层矿物组成与脆性特征研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(2): 211-218.
- [12] 王庆胜, 汤达祯, 彭美霞, 等. 江汉盆地盐间非砂岩储层测井响应特征与识别[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(2): 73-77.
- [13] WANG Zixiang, ZHENG Youheng, CHEN Fengling, et al. Biomarker geochemistry of  $Eq_3^4$ -10 cyclothems shale in Qianjiang Depression of the Jiangnan salt lake facies Basin [J]. *Petroleum science and technology*, 2018, 36(2), 148-153.
- [14] 方志雄. 潜江凹陷隐蔽油藏主控因素及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 804-812.
- [15] 陶国亮, 刘鹏, 钱门辉, 等. 潜江凹陷潜江组盐间页岩含油性及其勘探意义[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1256-1265.
- [16] 江继纲, 彭平安, 傅家谟, 等. 盐湖油气的形成、演化 and 运移聚集[M]. 广州: 广东科技出版社, 2004: 1-364.
- [17] 肖枫. 潜江凹陷潜江组盐间页岩储层特征研究: 以潜 3<sup>4</sup>10 韵律和潜 4<sup>0+</sup>5 韵律为例[D]. 荆州: 长江大学, 2018.
- [18] LI Maowen, CHEN Zhuoheng, CAO Tingting, et al. Expelled oils and their impacts on Rock-Eval data interpretation, Eocene Qianjiang Formation in Jiangnan Basin, China [J]. *International journal of coal geology*, 2018, 191: 37-48.
- [19] 王任. 北黄海盆地东部地区下白垩统红色泥岩段沉积及其与岩浆活动的耦合关系[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [20] 柳蓉, 刘招君, 郭巍, 等. 巴格毛德油页岩中稀土元素特征研究及其地质意义[J]. 地球化学, 2010, 39(4): 364-370.
- [21] 鄢明才, 迟清华, 顾铁新, 等. 中国东部地壳元素丰度与岩石平均化学组成研究[J]. 物探与化探, 1997, 21(6): 451-459.
- [22] SHIELDS G, STILLE P. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: an isotopic and REE study of Cambrian phosphorites [J]. *Chemical geology*, 2001, 175(1/2): 29-48.
- [23] 刘士林, 刘蕴华, 林舸, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2006, 20(3): 449-456.
- [24] 谢尚克, 杜佰伟, 王剑. 伦坡拉盆地丁青湖组油页岩稀土元素特征及其地质意义[J]. 地质科技情报, 2015, 34(2): 57-62.



- [25] BHATIA M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary geology*, 1985,45(1/2):97-113.
- [26] 陈衍景, 杨忠芳, 赵太平, 等. 沉积物微量元素示踪物源区和地壳成分的方法和现状[J]. *地质地球化学*, 1996 (3): 7-11.
- [27] CULLERS R L, BARRETT T, CARLSON R, et al. Rare-earth element and mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment: a case study in the Wet Mountains, Colorado, U.S.A[J]. *Chemical geology*, 1987, 63(3/4):275-297.
- [28] 张妮, 林春明, 周健, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组一段元素地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2012, 86 (2):269-279.
- [29] 金强, 朱光有. 中国中新生代咸化湖盆烃源岩沉积的问题及相关进展[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4):483-492.
- [30] CANTRELL K J, BYME R H. Rare earth element complexation by carbonate and oxalate ions[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1987, 51(3):597-605.
- [31] TURNER D R, WHITFIELD M, DICKSON A G. The equilibrium speciation of dissolved components in freshwater and sea water at 25°C and 1 atm pressure[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1981, 45(6):855-881.
- [32] 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[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2009, 39(8):1160-1168.
- [33] ELDERFIELD H, PAGETT R. REE in ichthyoliths: variation with redox conditions and depositional environment[J]. *Science of the total environment*, 1986, 49(86):175-197.

编辑: 黄革萍

## The mineral composition and geochemical characteristics of rare earth elements of salt lake shale in Qianjiang Depression and its geological significance

ZHENG Youwei, FU Deliang, TIAN Bing, DUAN Zhiqiang,  
ZHANG Bo, LUO Jianning, WANG Zixiang

**Abstract:** Taking the drilling cores of the 10th rhythmite of  $Eq_3^4$  Submember( $Eq_3^4$ -10 rhythmite) and 5th rhythmite of middle  $Eq_4^0$  Submember( $Eq_4^0$ -5 rhythmite) of Qianjiang Formation in Wangchang anticline as main research object, the provenance properties and sedimentary environment of different rhythmite in Qianjiang Depression were studied through the analysing of XRD and ICP-MS. The results show that there are obvious differences in mineral composition, REE content and distribution between the two rhythmites. Clay minerals and quartz are the main silicate minerals in  $Eq_3^4$ -10 rhythms, while plagioclase, clay minerals and quartz are the main silicate minerals in  $Eq_4^0$ -5 rhythmite. The contents of REE and silicate minerals of the two sets were positively correlated. The REE fractionation degree of clastic rock in  $Eq_3^4$ -10 rhythmite is higher than that of carbonate rocks, while that of clastic rock in  $Eq_4^0$ -5 rhythmite is similar to that of carbonate rocks. It is indicated that the provenance of these two rhythmites is different, or the climate is relatively warmer, humid and wind erosion is stronger in the depositional period of  $Eq_3^4$ -10 rhythmite. The sedimentary water of these two sets of strata are in reductive environment, and the lake water may be deeper during the deposition period of  $Eq_3^4$ -10 rhythmite, which is more conducive to the accumulation and preservation of organic matter. Therefore, it is inferred that  $Eq_3^4$ -10 rhythmite has more exploration potential.

**Key words:** inter-salt shale; mineral composition; rare earth elements; sedimentary environment; Qianjiang Formation; Qianjiang Depression

**ZHENG Youwei**, First author: PhD, Lecturer, engaged in the research of geological structure and geochemistry. Add: No. 7 Aarding Street, Kundulun District, Baotou, Inner Mongolia 014010, China