

## 泥质烃源岩密度分组及有机质赋存类型初探

樊 馥<sup>1,2</sup>, 蔡进功<sup>1</sup>, 宋明水<sup>3</sup>, 包于进<sup>2</sup>

(1. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 中石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东 东营 257000)

**摘要:** 选取济阳拗陷沙河街组深湖相暗色泥岩为研究对象, 通过不同密度  $ZnBr_2$  重液浮选, 将样品分离成多个密度组分, 对各组分检测透射光、荧光、X光衍射等, 揭示不同组分有机质赋存类型的差异性. 分析结果表明, ①组分(密度  $\rho < 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )以颗粒有机质为主, 有机质与矿物无明显紧密结合关系; ②, ③组分( $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} < \rho < 2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho > 2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )多见无定形有机质分散于细粒矿物相中, 呈橙黄-亮黄色荧光, 反映有机质与矿物颗粒紧密共生的赋存特征. 进一步对不同密度组分有机质分配的研究表明, ①组分结合了烃源岩总有机质质量不到1%; ②, ③组分结合了烃源岩中90%以上质量的有机质. 这反映了有机质和矿物颗粒共生的赋存形式在有机质保存中不可忽视的重要地位.

**关键词:** 烃源岩; 密度分组; 有机质赋存

**中图分类号:** P 618.13

**文献标识码:** A

results indicate in the fraction ①( $\rho < 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), the free organic particles are dominant and the minerals do not combine with the organic particles closely. In the fractions of ② and ③( $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} < \rho < 2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho > 2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), the organic amorphous distributes in the fine mineral phase and shows orange and light yellow fluorescence. It indicates the organic matter combines with mineral closely. Further analysis on the organic matter distribution indicates that the fraction ① combines with less than 1% organic matter in the source rock; the fraction ② and ③ combine more than 90% organic matter of the source rock. It reflects the organic matter combining with the mineral is very important way of the organic matter preservation.

**Key words:** source rock; density fractionation; organic matter preservation

### An Exploratory Study on Density Fractionation and Organic Matter Preservation of Muddy Source Rock

FAN Fu<sup>1,2</sup>, CAI Jingong<sup>1</sup>, SONG Mingshui<sup>3</sup>, BAO Yujin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Geology Science Research Institute, Branch Company of Shengli Oil Field, China Petroleum & Chemical Group, Dongying 257000, China)

**Abstract:** The black muddy rock samples were selected from the deep lake facies of the Shahejie formation, tertiary, in Jiyang depression. By floating with different densities  $ZnBr_2$  heavy solution, the samples were divided into many density fractions. A series of detections, including transmission light, florescence, XRD and so on, revealed the difference of organic matter preservation in the different fractions. The analysis

烃源岩中的有机质是油气生成的物质基础, 有机质的赋存特征一直是人们关注的焦点. 长期以来, 干酪根被认为是有机质主要的赋存形式. 伴随着未熟-低熟油的大量发现和开采, 可溶有机质对油气生成的贡献被逐渐认识<sup>[1-2]</sup>. 但是, 目前对于有机质赋存的研究, 不论是干酪根还是可溶有机质, 都是将有机质从岩石和矿物中剥离出来, 忽略了矿物成分对有机质保存和演化的影响. 已有研究表明, 自然界中多数有机质都是通过与无机矿物共生而得以保存. 对烃源岩的研究发现, 全岩光片下观察到的矿物沥青基质是无机矿物和超细有机质甚至分子级有机质的混合体<sup>[3]</sup>, 提纯的干酪根中也发现了伊利石和干酪根复合的红外光谱特征<sup>[4]</sup>. 可见, 在烃源岩中, 有机质都是与矿物紧密共生的. 进一步提取烃源岩中的黏土矿物分析, 发现黏土矿物层间及表面都结合一定数量的有机质, 形

收稿日期: 2010-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(40872089, 41072089); 国家油气重大专项基金(2008ZX05006-003); 中国石油化工有限公司科技局基金(P08039)

第一作者: 樊馥(1982—), 女, 博士生, 主要研究方向为油气地球化学. E-mail: fanfu2005612033@sina.com

通讯作者: 蔡进功(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为海洋沉积与石油地质学. E-mail: jgcai@tongji.edu.cn

成有机黏土复合体<sup>[5-6]</sup>,说明矿物与有机质关系密切.因此,迫切需要探索新的分析方法,在不破坏有机质与矿物结合关系的前提下,探讨矿物成分在有机质保存中的作用,揭示烃源岩有机质的原始赋存特征,为进一步探讨不同赋存形式有机质的生烃特征和对油气生成的贡献奠定基础.

自然界中,矿物密度为  $2.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  左右,而纯有机质颗粒的密度为  $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,二者结合的比例不同导致沉积物密度的差异<sup>[7]</sup>.基于该原理,在土壤和海洋沉积物中,常采用不同密度重液对沉积物密度分组<sup>[8]</sup>,讨论不同密度组分中有机质与矿物特点、二者结合关系特征,获得有机质赋存的信息.关平最早利用该方法对泥质烃源岩进行有机质赋存态的讨论<sup>[9]</sup>.叶文青等也将密度分组方法在泥质烃源岩中的应用做了大量的可行性分析,认为密度分组在烃源岩有机质研究中具有重要的应用前景<sup>[10]</sup>.为此,笔者试图通过密度分组的方法,分离烃源岩中不同密度组分,并通过有机碳分析、衍射分析、透射光、荧光以及扫描电镜等检测手段,探讨不同密度组分中有机质赋存方式的差异性.

## 1 样品和实验分析方法

### 1.1 样品来源

选取来自济阳坳陷下第三系、沙河街组三段的3块暗色泥岩作为本次研究对象,按照从浅到深分别编号为1,2,3.样品埋藏深度为1 503~3 020 m.样品选取层段暗色泥岩发育,且厚度很大,表现为深湖相沉积环境特征.

### 1.2 密度分组实验

对3块样品进行密度分组,具体流程如下:

(1) 3个样品经过机械粉碎后,经瓷研钵研磨到200目.称取200 g,加入  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的盐酸直至无气泡产生,去除次生碳酸盐的胶结作用,增加泥质烃源岩样品的分散程度<sup>[10]</sup>,之后用去离子水离心清洗除去残留盐酸.

(2) 将样品分别放入200 mL离心管中,加入  $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的  $\text{ZnBr}_2$ <sup>[11]</sup>重液,用玻璃棒搅拌至样品全部悬浮,于59 kHz超声分散15 min之后以  $2\ 500 \sim 3\ 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的转速离心15~20 min.上部悬浮液中即为密度  $\rho < 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  组分.向离心管残余样品中加入密度为  $2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的重液,充分搅拌使样品悬浮,继续以相同转速离心15~20 min,

获得悬浮液中  $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} < \rho < 2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的组分,离心管底部剩余沉淀为  $\rho > 2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  组分.每步离心分离重复3~4次,使各密度组分分离完全.

(3) 将各密度组分样品用酒精和去离子水离心清洗3~4次除去残留重液,而后将样品置于  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下低温烘干<sup>[12]</sup>.

将各密度组分编号:  $\rho < 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 为①;  $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} < \rho < 2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 为②;  $\rho > 2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 为③.

### 1.3 样品分析检测

对全岩及各密度组分样品进行相应的测试分析.分析仪器型号如下:

质量称量:HANGPING JA1003 电子天平;精度:0.001 g.

有机碳(TOC)分析:LECO CS-444 型碳硫分析仪;测试条件:氧气为0.17 MPa,燃烧时0.055 MPa.

XRD分析:Panalytical Xpert-MPD 衍射仪;测试条件:铜靶,管压30 kV,管流40 mA,扫描  $2^\circ(2\theta) \cdot \text{min}^{-1}$ ,获得样品关于矿物组成和相对含量的信息.另加入与样品等质量的刚玉  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体粉末作为内标,得到各组分矿物相对于无定形组分的含量值.

透射光和荧光观察仪器:Axiophot 型透光-荧光高级生物显微镜.按李建国和 Batten 制定的有机质分类标准进行镜下鉴定和描述<sup>[13]</sup>.

扫描电镜(ESEM):FEI Quanta200 环境扫描电镜,高真空模式,电压20 kV.EDAX Genesis 2 000X-射线能量分散谱仪(EDS).

## 2 实验数据

### 2.1 全岩特征

全岩样品的有机碳的质量分数  $c_{\text{TOC}}$  为1.73%~2.91%.矿物成分质量分数为:黏土矿物28%~44%,石英7%~32%,长石3%~17%,碳酸盐13%~40%,黄铁矿0~4%(表1).

### 2.2 分组样品特征

#### 2.2.1 质量和有机碳(TOC)含量

泥质烃源岩密度  $\rho$  分组后的质量  $m$  的总回收率  $f$  为60%~92%.各组分有机碳的质量分数  $c_{\text{TOC}}$  及有机质质量分数  $c_y$  见表2.

#### 2.2.2 X衍射(XRD)分析

XRD 分析结果表明,各组分矿物成分(质量分

表1 分析样品矿物成分质量分数及质量分数特征  
Tab.1 The relative content and component of mineral from the samples %

样品编号	石英	钾长石	斜长石	碳酸盐	黄铁矿	黏土矿物
1	28	5	12	13		44
2	23		5	40	4	28
3	29		3	30		38

数)有较大的变化(表3). ①组分总量低(18%~44%);②组分矿物明显增加(55%~79%),且以黏土矿物为主(达29%~52%);③组分更高(72%~97%),石英和长石的增加最为显著.

### 2.2.3 透射光及荧光分析

不同密度组分样品的显微镜分析表明:①组分主要为颗粒态有机质,可见具生物结构的孢型和结构有机质,如葡萄藻类、孢子、黑色或棕红色棱角状

表2 各密度组分样品质量及有机碳  
Tab.2 The mass and TOC in different density fractions

样品编号	<i>h</i> /m	$\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	<i>m</i> /g	<i>c</i> /%	<i>f</i> /%	<i>c</i> <sub>TOC</sub> /%	<i>c</i> <sub>y</sub> /%
1-①		<1.6	0.086	0.04		19.38	0.42
1-②	1 503	1.6~2.2	70.064	35.03	92.16	2.84	50.69
1-③		>2.2	114.247	57.12		1.68	48.89
2-①		<1.6	0.104	0.05		11.64	0.15
2-②	2 089	1.6~2.2	78.518	39.26	59.76	8.37	83.75
2-③		>2.2	41.007	20.50		3.08	16.10
3-①		<1.6	0.270	0.14		18.08	1.78
3-②	3 020	1.6~2.2	26.776	13.39	77.80	2.62	25.54
3-③		>2.2	128.820	64.41		1.55	72.69

注:*h*表示深度;*c*表示质量分数, $c = m \div 200 \text{ g} \times 100\%$ ; *c*<sub>y</sub>(各组分中有机质的总量占全岩有机质总量的百分比) = (某组分样品的 *c*<sub>TOC</sub> × 该组分质量) ÷ ∑(各组分样品的 *c*<sub>TOC</sub> × 质量) × 100%.

表3 样品各密度组分的矿物成分及质量分数  
Tab.3 The mineral component and content in different density fractions

样品编号	<i>h</i> /m	$\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	各组分及矿物成分的质量分数/%					
			石英	钾长石	斜长石	方解石	黏土矿物	矿物
1-①		<1.6	4		6		22	32
1-②	1 503	1.6~2.2	8	6	8	5	52	79
1-③		>2.2	19	11	16	6	45	97
2-①		<1.6	3		4		11	18
2-②	2 089	1.6~2.2	13		9	4	29	55
2-③		>2.2	18	7	17	4	26	72
3-①		<1.6			6		38	44
3-②	3 020	1.6~2.2	12	6	11	4	44	77
3-③		>2.2	20	6	17	5	44	92

的木质等(图1a,b,c),以及少量的海绵状有机质团块(图1d). 矿物颗粒极少,且相对有机质颗粒基本呈游离状态. ②组分以无定形有机质为主,具生物结构的有机质数量锐减;矿物成分上,黏土为主,散布于其中的有机质发橙黄-亮黄色迷雾状荧光(图1e). ③组分中,呈透明状的石英和长石颗粒明显增加,但无明显荧光,而黏土矿物中呈现出微弱的亮黄色荧光(图1f),表明其中散布部分有机质.

### 2.2.4 扫描电镜分析

扫描电镜分析结果显示;在1组分中,包括两种颗粒类型:第一种是生物有机质颗粒(图2a),具生物结构的颗粒和碎片,呈圆状或棱角状,与矿物颗粒相互分离,

无密切关系;第二种是有机质与黏土粘结形成的集合体颗粒(图2b),粒径多大于100 μm,放大后见粒径为10 μm左右的有机颗粒相互堆积粘结,这种集合体颗粒形式可能与透射光下海绵有机质团块相对应.

在②组分中,黏土粒级矿物充满整个视域.能谱点分析显示,具有极多的Si,Al,Mg等代表黏土矿物成分的元素,也检测到C和微量Fe(图2c),反映黏土矿物与有机物质具有共生关系,但无法观察到有机质的具体形态. ③组分矿物颗粒的粒度增大,视域中分布一定量的细粒黏土矿物.能谱检测到石英、钾长石及黄铁矿等矿物颗粒的元素组成(图2d).对一些细粒黏土矿物所在区域分析能谱点,检测到C.

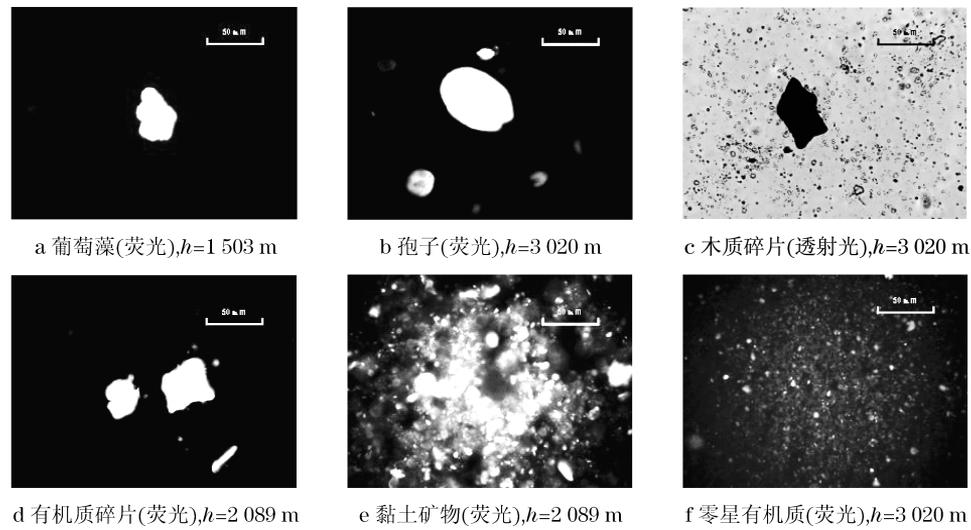


图 1 各组分透射光及荧光特征

Fig. 1 The character of different density fractions under the transmission light and fluorescence light

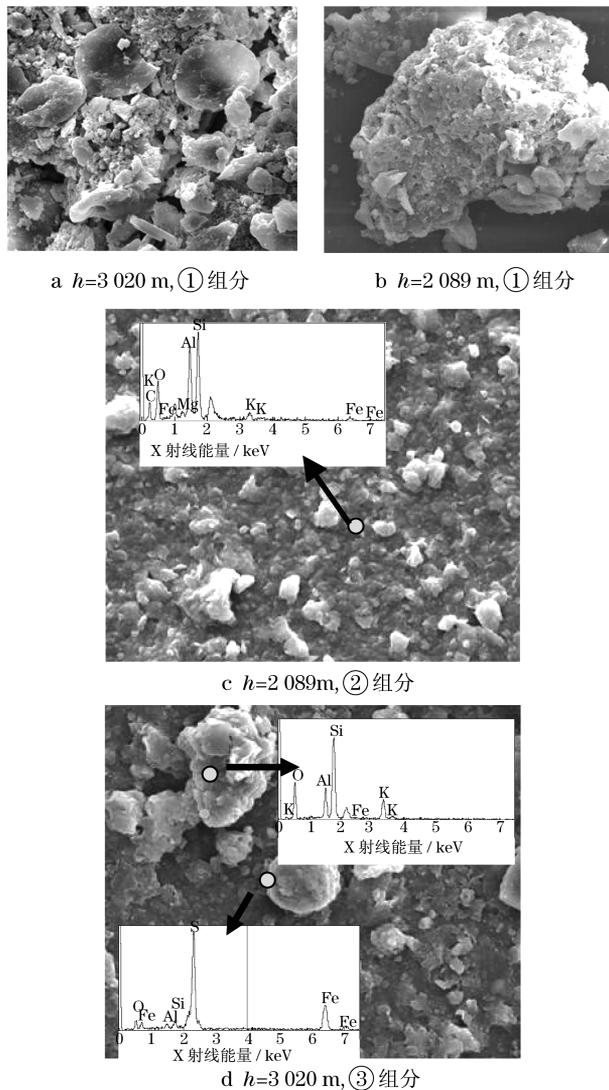


图 2 各组分扫描电镜及能谱特征

Fig. 2 The SEM and EDS characters in different density fractions

### 3 分析与讨论

#### 3.1 密度分组后的质量回归

样品分组后,3个密度组分回收的总质量分别为全岩样品质量的 92.16%,59.76%,77.80%(表 2),加上样品中被溶解的碳酸盐(1,2,3号样品碳酸盐质量分数分别为 13%,40%,30%)(表 1),样品质量回收率分别为 105.16%,99.76%,107.80%。可以看出,一系列样品处理并未导致成分大量损失,说明分离具有可信性,分组后总质量比原始岩石样品略高,推测可能是部分样品重液残留导致。

#### 3.2 各密度组分有机质赋存差异性

对各密度组分的光学显微镜、扫描电镜观察、有机碳及 XRD 分析显示,①组分具有以颗粒有机质为主(图 1a,b,c,d)、 $C_{TOC}$ 高(11.64%~19.38%)、矿物质量分数低(18%~44%)的特点。说明该组分有机质较为富集。显微和扫描电镜分析结果反映矿物与有机质颗粒之间结合关系不明显(图 2a),①组分整体呈现出以游离颗粒有机质为主的赋存态特征。这些有机颗粒在分散及分组过程中多次破碎(图 1d),但内部生物结构清晰,未溶解破坏,有机质十分稳定。对于这些有机质的稳定及保存机制,以往研究认为主要是选择性保存的结果<sup>[14]</sup>。同时出现少量的海绵无定形有机质,推测有机质的降解-缩聚以及早期成岩过程中的硫化还原反应可能是其重要的保存机制<sup>[15]</sup>。总之,有机质通过多种途径形成自身稳定的形式,是不同类型的颗粒有机质得以保存的重要

原因.另外,由于矿物与该组分有机质结合关系不明显,推测矿物在这种保存过程中的意义不大.

3个样品中,②组分矿物的质量分数都明显升高,黏土为矿物成分主体(52%~66%), $c_{\text{TOC}}$ 相比于①组分明显降低(2.62%~8.37%),有机质与矿物含量的特征显示,二者共居主体.③组分的石英、长石、黄铁矿等碎屑矿物的质量分数上升至矿物总量的50%以上,黏土的质量分数降低, $c_{\text{TOC}}$ 数值相比于②组分也明显降低(1.55%~3.08%).②,③组分在显微荧光下表现为矿物基质呈橙黄-亮黄色迷雾状荧光(图1f),能谱分析检测到黏土粒级矿物中包含C,O等有机元素,但扫描电镜下无法区分出矿物成分与有机质的颗粒形态(图1e),反映了有机质与矿物紧密共生.另外,②,③组分镜下的荧光特点与全岩光片下矿物沥青基质的荧光特点相近<sup>[16]</sup>,说明研磨、超声等一系列样品分散过程对矿物与有机质的紧密结合状态并无影响.与①组分对比,这2个组分中有机质与矿物之间具有更密切的关系.对土壤和海相沉积的研究表明,矿物成分中的细粒黏土物质对有机质有明显的富集作用<sup>[17]</sup>.对烃源岩中黏土矿物分析,也反映出蒙脱石黏土矿物层之间及表面结合了一定量的有机质<sup>[5-6]</sup>.这说明,有机质与黏土结合,可能是②,③组分有机质得以保存的主要机制.

可以看出,密度分组后各组分特征差异性明显,表现为有机质、矿物以及二者之间相互关系都存在差别.密度分组在土壤中已经有较为成熟的应用,土壤在密度分组后,各组分特征表现为低密度组分富集大量未分解的生物残体,有机碳含量高,矿物含量低.中间密度组分主要为有机质与黏土结合成团聚体,黏土含量高,有机碳含量中等;而高密度组分有机质很少,有机碳含量最低,包含大量长石、石英类矿物颗粒<sup>[18]</sup>.这与本次泥质烃源岩密度分组后规律是基本一致的,说明密度分组在泥质烃源岩中可以获得很好的应用效果.

### 3.3 有机质分配的差异性

通过密度分组分析发现,烃源岩中有机质有多种赋存方式,如①组分的颗粒态和②,③组分的有机质与矿物紧密共生态,对于烃源岩油气生成的贡献,与每种赋存态结合的有机质数量密切相关.下面利用烃源岩样品3个不同密度组分的有机碳和各组分质量求得各组分有机质含量,探讨有机质在不同赋存态中分配的差异性.在①组分中, $c_{\text{TOC}}$ 最高,为11.64%~19.38%,但占样品总质量分数极低,仅为0.04%~0.14%;在②组分中, $c_{\text{TOC}}$ 为2.62%~

8.37%,占样品总质量的13.39%~39.26%;③组分 $c_{\text{TOC}}$ 为1.55%~3.08%,占样品总质量的20.50%~64.14%.将3个组分有机碳按总量分配发现,①组分有机质含量低于1%;②组分25.54%~83.75%,平均53.33%;③组分16.10%~72.69%,平均45.89%(表2).这些特征表明,烃源岩中颗粒有机质含量极低,大部分是与无机矿物共生.

比较烃源岩与土壤和表层沉积物,①组分泥质烃源岩的质量分数结合了全岩不足1%的有机质,土壤中为1.4%~2.3%<sup>[19]</sup>,深海陆坡沉积物的质量分数为1%~4%<sup>[20]</sup>,各样品的①组分均结合极少量的有机质,但泥质烃源岩最少;对于松散未固结沉积样品,包括地表浅层沉积、土壤以及海相沉积物,②组分的质量分数结合了全样25%~80%的有机质<sup>[19,21]</sup>,泥质烃源岩为25.54%~83.75%,不同样品差异不大,泥质烃源岩略多.对于③组分,目前仅获得土壤研究数据,表明结合了全土中不足5%质量分数的有机质<sup>[21]</sup>,远低于泥质烃源岩的16.10%~72.69%.从有机质分布情况可见,在类型样品中,中、高密度的②,③组分结合了大量有机质,反映有机质与矿物共生可能为有机质的主要赋存形式.对比松散沉积物分析结果,泥岩型的①组分有机质含量略低,而②,③组分含量略高.反映了随着沉积成岩作用的进行,有机质倾向于向高密度组分转移,即具有更多的通过与矿物结合而获得保存的趋势.

表4 烃源岩与松散沉积物密度分组结果对比

Tab.4 The contrast with the density fractionation result of the source rock and the unconsolidated

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$c_y/\%$	土质类型	资料来源
<1.6	1.4~2.3	土壤	文献[19]
	<1(平均)	泥质烃源岩	本研究
1.6< $\rho$ <2.2	25~45	浅层沉积物	文献[20]
	80	土壤和海相沉积	文献[18,21]
>2.2	53.33(平均)	泥质烃源岩	本研究
	<5	土壤	文献[19]
	45.89(平均)	泥质烃源岩	本研究

## 4 结论

(1) 各密度组分有机质特征、矿物成分以及有机质和矿物关系方面都有明显差异性:①组分( $\rho < 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )以颗粒态有机质为主,有机质与矿物颗粒无紧密结合关系;②,③组分( $\rho > 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )有机质与矿物颗粒紧密共生.各组分差异性说明泥质烃源岩中存在多种有机质赋存态,表明密度分组

在分离有机质赋存态方面具有很好的应用效果。

(2) 颗粒态有机质组分保存的有机质数量极少,有机质与矿物颗粒共生形式保存了烃源岩中90%(质量分数)以上有机质,反映有机质与矿物共生的赋存态在有机质保存中具有重要地位。

(3) 与土壤和表层沉积物相比,泥质烃源岩样品中,低密度①组分有机质含量偏低,而中、高密度的②,③组分结合的有机质含量偏高。反映随着成岩作用的进行,有机质倾向于向高密度组分转移,具有通过与矿物结合而获得保存的趋势。

#### 参考文献:

- [1] 黄第藩,李晋超.陆相沉积中的低熟石油及其意义[J].石油学报,1987,8(1):1.  
HUANG Difan, LI Jinchao. Low mature oil in the terrestrial sediments[J]. Acta Petrol Sinica, 1987, 8(1): 1.
- [2] 李素梅,庞雄奇,金之钧,等.未熟-低熟油研究现状与存在的问题[J].地质论评,2003,49(3):298.  
LI Sumei, PANG Xiongqi, JIN Zhijun, et al. Present studies and problems of immature oils [J]. Geological Review, 2003, 49(3): 298.
- [3] 王飞宇,傅家谟.煤和烃源岩镜质体中超微细类脂体检出及意义[J].科学通报,1995,38:151.  
WANG Feiyu, FU Jiemo. Detection and meaning of super lipid-like in vitrinite from coal and source rock [J]. Chin Sci Bull, 1995, 38: 151.
- [4] 周炎如.应用显微 FT-IR 光谱技术“原位”研究沉积岩中生油母质:干酪根[J].沉积学报,1994,12:22.  
ZHOU Yanru. Situ-study on generative kerogen in sedimentary rock by FT-IR micro-spectrum technique [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12: 22.
- [5] 蔡进功,包于进,杨守业,等.泥质沉积物和泥岩中有机质的赋存形式与富集机制[J].中国科学:D辑,2007,37:234.  
CAI Jingong, BAO Yujin, YANG Shouye, et al. Preservation ways and accumulated mechanism in muddy sediment and muddy rock [J]. Science in China; D, 2007, 37, 234.
- [6] 张永刚,蔡进功,许卫平,等.泥质烃源岩中有机质富集机制[M].北京:石油工业出版社,2007.  
ZHANG Yonggang, CAI Jingong, XU Weiping, et al. Accumulation mechanism of organic matter in muddy source rock [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [7] 熊毅.土壤胶体——土壤胶体研究法[M].北京:科学出版社,1985.  
XIONG Yi. Soil colloid—the study methods of soil colloid [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [8] Curry J K, Bennett H R, Mayer M L, et al. Direct visualization of clay microfabric signatures driving organic matter preservation in fine-grained sediment [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71: 1709.
- [9] 关平,徐水昌,刘文汇.烃源岩有机质的不同赋存状态及定量估算[J].科学通报,1998,43:1556.  
GUAN Ping, XU Shuichang, LIU Wenhui. Quality on different preservation ways of organic matter in source rock [J]. Chin Sci Bull, 1998, 43: 1556.
- [10] 叶文青,蔡进功,樊馥,等.泥质烃源岩密度分级分离与有机碳分配[J].高校地质学报,2009,15(4):547.  
YE Wenqing, CAI Jingong, FAN Fu, et al. Argillaceous hydrocarbon source rock density separation and distribution of organic carbon [J]. Geological Journal of China University, 2009, 15(4): 547.
- [11] Ting G, Novak J M, Amarasiriwardena D, et al. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 421.
- [12] 傅积平.土壤结合态腐殖质分组测定[J].土壤通报,1983,14:36.  
FU Jiping. Fractionation and measurement on combined humus in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 1983, 14: 36.
- [13] 李建国, David J Batten.孢粉相:原理及方法[J].古生物学报,2005,44:138.  
LI Jianguo, David J Batten. Palynofacies: theory and method [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2005, 44: 138.
- [14] Pichevin L, Bertrand P, Boussafir M, et al. Organic matter accumulation and preservation controls in a deep sea modern environment: an example from Namibian slope sediments [J]. Org Geochem, 2004, 35: 543.
- [15] Salmon V, Derenne S, Lallier-Verges E, et al. Protection of organic matter by mineral matrix in a Cenomanian black shale [J]. Org Geochem, 2000, 31: 463.
- [16] 唐跃刚,姜鹏,侯慧敏,等.沥青质体和矿物沥青基质与沉积有机基质关系[J].中国矿业大学学报,1999,28(1):33.  
TANG Yuegang, JIANG Peng, HOU Huimin, et al. Correlation of bituminite and mineral-bituminous groundmass with sedimentary organic groundmass [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(1): 33.
- [17] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils [J]. Plant Soil, 2002, 241: 155.
- [18] Chenu C, Plante A F. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: revisiting the concept of the “primary organo-mineral complex” [J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57: 596.
- [19] Derenne S, Largeau C, Hetenyi M, et al. Chemical structure of the organic matter in a pliocene maar-type shale: implicated Botryococcus race strains and formation pathways [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61: 1879.
- [20] Bock M J, Mayer L M. Mesodensity organo-clay associations in a near-shore sediment [J]. Marine Geology, 2000, 163: 65.
- [21] Arnarson S T, Keil G R. Organic-mineral interactions in marine sediments studied using density fraction and X-ray photoelectron spectroscopy [J]. Org Geochem, 2001, 32: 1401.