

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 03. 016

## 下刚果盆地 M 区块 Madingo 组烃源岩的 岩相特征与有机质富集机制

季少聪<sup>1,2</sup>, 杨香华<sup>1,2</sup>, 朱红涛<sup>1,2</sup>, 邓运华<sup>3</sup>, 康洪全<sup>3</sup>, 王波<sup>1,2</sup>, 魏小松<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074; 3. 中国海洋石油研究总院, 北京 100027)

**摘要:**以下刚果盆地 M 区块 Madingo 组烃源岩为研究对象, 通过 X-射线衍射、薄片鉴定、背散射、能谱分析、主量元素及有机地化测试等技术手段, 分析了烃源岩的矿物组成、古生物与岩相特征, 并讨论了烃源岩有机质富集机制。结果表明: Madingo 组烃源岩矿物组成以黏土矿物和硅质矿物为主, 方解石和长石次之, 含有少量的白云石和黄铁矿; 有孔虫、放射虫等微古生物发育; 根据矿物组成、古生物特征和磷酸盐含量, 并结合显微岩石构造, 共识别出富有孔虫细粒岩、富放射虫细粒岩、磷质细粒岩、黏土质细粒岩、长英质细粒岩和灰质细粒岩 6 种岩相类型。研究区 Madingo 组烃源岩的发育受海平面升降、上升流、古地理和古气候的控制; Madingo 组共识别出 3 期海侵/海退旋回, 海平面升降通过控制水体深度、氧化还原条件和沉积物类型, 进而控制岩相和烃源岩的发育; 富放射虫细粒岩、磷质细粒岩和富有孔虫细粒岩有机质含量较高, 推测为两期不同规模的上升流沉积; Madingo 组沉积时期, 研究区发育与盐底辟活动相关的陆架内部洼陷, 相对封闭的水体环境有利于有机质的保存; 古气候经历了干旱气候、相对湿润气候和湿润气候 3 个阶段, 通过控制海洋中陆源有机质输入在一定程度上影响烃源岩有机质丰度和有机质类型。

**关键词:** 烃源岩; 岩相; 海平面升降; 上升流; 古气候; 下刚果盆地

**中图分类号:** P744.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0256-1492(2017)03-0157-12

细粒沉积物是指黏土级和粉砂级的沉积物, 主要包括黏土矿物、石英、长石、碳酸盐以及有机质等<sup>[1,2]</sup>。近年来, 随着北美地区和我国四川盆地页岩气勘探开发取得重大进展, 国内外学者对细粒沉积岩的矿物组成、古生物特征、岩相、层序地层划分及沉积环境等方面进行了大量的研究, 取得了一系列的成果, 但目前还没有专门针对细粒岩相划分的标准<sup>[3-10]</sup>。页岩油气勘探表明<sup>[11]</sup>, 海相暗色细粒岩(烃源岩)有机质分布的非均质性较大, 为了降低油气勘探风险, 提高勘探效率, 必须提高烃源岩评价和预测的精度。细粒岩沉积学研究不仅有着重要的理论意义, 同时有助于更好地理解细粒沉积物中有机质的差异富集机理, 精确评价和预测优质烃源岩的特征和分布, 更精细地指导油气勘探。

海相烃源岩发育的控制因素一直是沉积学和石油地质学研究的难点和热点之一, 国内外学者对此曾有“生产力模式”和“保存模式”之争<sup>[12,13]</sup>, 但越来越多的研究实例表明烃源岩的发育受原始生产力和保存条件共同控制, 单纯强调其中一种都不能客观地反映烃源岩有机质富集机理<sup>[14,15]</sup>, 而有机质生产力和保存条件最终又受海平面升降、上升流、古地理和古气候的影响。海平面升降引起的水体深度和底水氧化还原条件变化进而控制有机质的保存条件; 原始海洋生产力和上升流存在与否密切相关, 上升流将海底富营养盐水体带至表层, 从而促进表层生物勃发, 极大地提高了生产力<sup>[14-16]</sup>; 不同的古气候条件下海洋中陆源高等植物输入差异明显, 在一定程度上影响原始有机质生产力的 高低和生源构成<sup>[17]</sup>。

勘探实践表明, 下刚果盆地深水区油气主要来自上白垩统海相烃源岩的贡献, 但其研究程度整体较低, 仅局限于零散烃源岩样品的地球化学评价方面, 关于烃源岩矿物组成、古生物特征及岩相划分等沉积特征方面的研究较为匮乏, 对海相烃源岩有机质分布的非均质性认识不清<sup>[18,19]</sup>。Madingo 组发育厚层富有机质细粒岩, 是盐上海相烃源岩的主力

**基金项目:** 国家重大科技专项“西非和南美海域重点区油气地质评价及关键技术研究”(2017ZX05032-001)

**作者简介:** 季少聪(1994—), 男, 硕士, 主要从事沉积学、层序地层学与石油地质学研究工作, E-mail: jishaocong00@163.com

**通讯作者:** 杨香华(1964—), 男, 教授, 主要从事沉积学、层序地层学与石油地质学教学与科研工作, E-mail: xhyang111@vip.sina.com

**收稿日期:** 2016-08-27; **改回日期:** 2017-02-08. 蔡秋蓉编辑

层位,岩矿、古生物与地球化学分析资料丰富,满足细粒沉积岩岩相分析与烃源岩精细评价的需求。笔者以下刚果盆地 M 区块 Madingo 组烃源岩为研究对象,在典型矿物组成、古生物组合与岩相分析的基础上,明确有机质沉积过程中古水深、古洋流和古气候的演变规律,探讨烃源岩发育的控制因素,为海相烃源岩的评价与预测提供沉积学思路。

### 1 区域地质概况

下刚果盆地位于南大西洋非洲西海岸,北部以马永巴高原与加蓬盆地相邻,南部以安布里什高原与宽扎盆地相邻,东部以前寒武系基底露头 and 变质沉积物为界,西部边界以洋壳的出现为标志。盆地总面积为 68 698 km<sup>2</sup>,其中海上面积为 43 528 km<sup>2</sup>,陆上面积为 25 171 km<sup>2</sup>,是西非被动大陆边缘系列含盐盆地之一<sup>[20]</sup>。晚侏罗世,随着冈瓦纳大陆的裂解,非洲和南美洲大陆开始分离。受南大西洋裂谷作用和持续漂移的控制,盆地经历了晚侏罗世—早白垩世 Aptian 期裂谷阶段、早白垩世 Aptian 期过渡阶段和早白垩世 Aptian 期以后的漂移拗陷阶段 3 个阶段。裂谷阶段主要发育湖相沉积,漂移拗陷阶段主要发育海相沉积。Aptian 期,受持续的海侵

及干旱气候的影响,形成了广泛分布的盐岩层,该盐岩层分隔了盐下湖相含油气系统和盐上海相含油气系统。受漂移拗陷阶段南大西洋不断扩张的影响, Madingo 组沉积时期,下刚果盆地过渡到半封闭的海洋环境,在陆架背景发育高有机质丰度的海相烃源岩<sup>[21,22]</sup>(图 1)。

### 2 样品与实验

本次研究所需样品采自下刚果盆地 M 区块 A 井 Madingo 组,共 50 个烃源岩岩屑样品。将 50 个样品全部制作成薄片,进行显微岩石构造、矿物组成及古生物分析,并对其中 15 个典型样品进行氩离子剖光处理并通过背散射及能谱等技术方法进行分析。31 个样品进行了全岩和黏土矿物 X-衍射分析,其中全岩矿物 X 射线衍射分析执行《沉积岩中黏土矿物总量和常见非黏土矿物 X 射线衍射定量分析方法》(SY/T 6210-1996<sup>[23]</sup>)标准,黏土矿物相对含量 X 射线衍射分析执行《沉积岩黏土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163-1995<sup>[24]</sup>)标准,采用荷兰 X'pert MPD ProX 射线衍射仪,测试温度 20 °C,测试湿度 65%,由中国地质大学(武汉)地质过程和矿产资源国家重点实验室完成。14 个样品

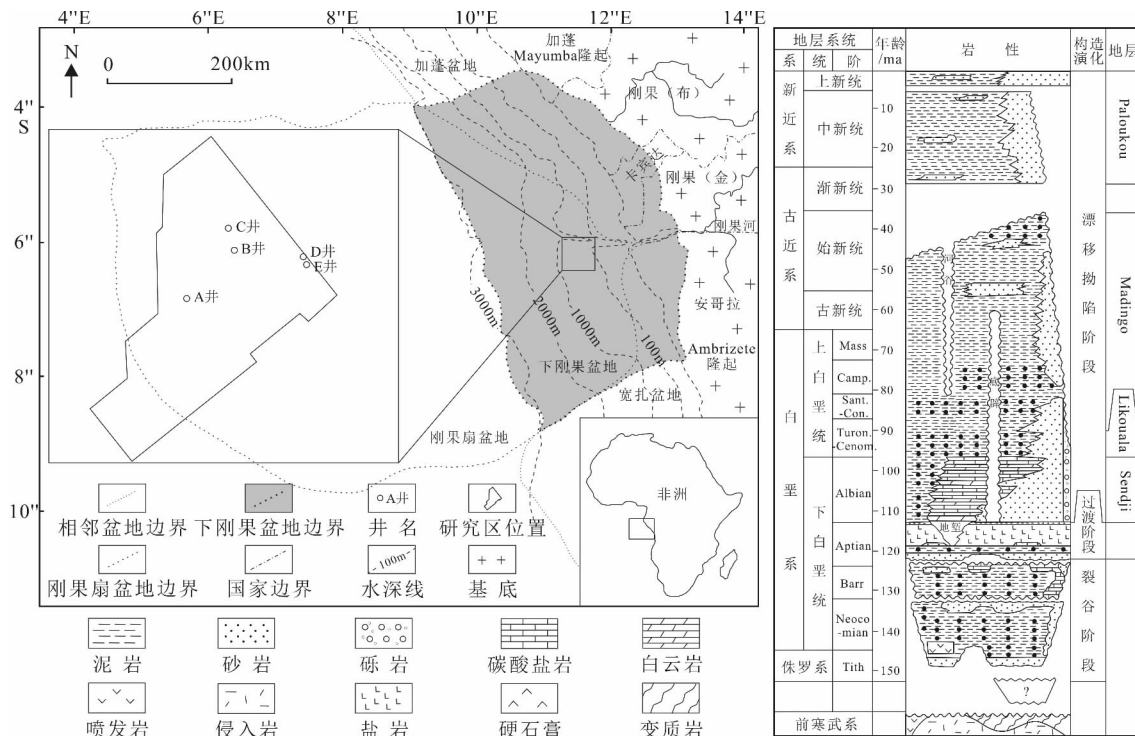


图 1 下刚果盆地地理位置及地层柱状图(据文献[21]修改)

Fig. 1 Location of the study area and stratigraphic column ( modified from reference[21] )

进行主量元素分析,首先将样品在烘箱中 105 °C 下烘干 2h,再以 45Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> + 10LiBO<sub>2</sub> + 5LiF 为混合熔剂、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 和 LiBr 为分析纯试剂,将烘干的样品在高频熔融炉 1 000 °C 下熔融制片,最后采用 XRF-1800 波长扫描 X 射线荧光光谱仪进行样品测定,测试功率 2 500 W,仪器恒温 35 °C,由中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成。7 个样品进行了 TOC 含量分析,采用 Leco CS-230 碳硫测定仪进行样品测试,执行标准为《GB/T 19145-2003 沉积岩中总有机碳的测定》<sup>[25]</sup>,由中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成。

### 3 烃源岩的岩相特征

#### 3.1 岩矿与古生物特征

##### 3.1.1 矿物组成

Madingo 组烃源岩矿物成分以黏土矿物和石英为主,方解石和长石次之(图 2),含有少量的黄铁矿、白云石等(表 1)。黏土矿物含量介于 20%~75%之间,平均含量为 41.0%;石英含量介于 12%~34%之间,平均含量为 23.7%;方解石平均含量为 15.8%,长石平均含量为 10.6%。黏土矿物以伊利石和绿泥石为主,高岭石相对含量变化较大,介于 0~40%之间。

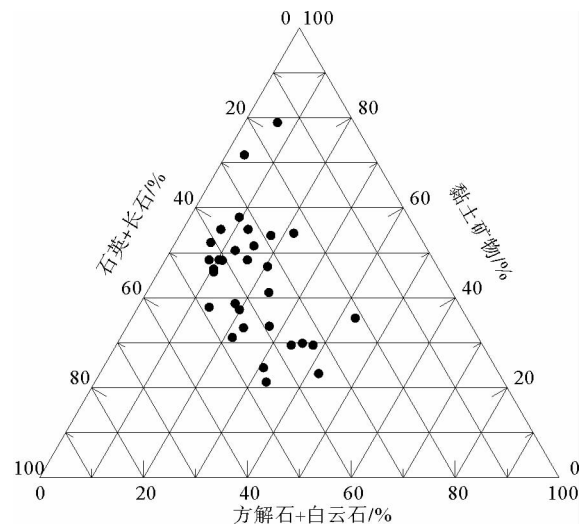
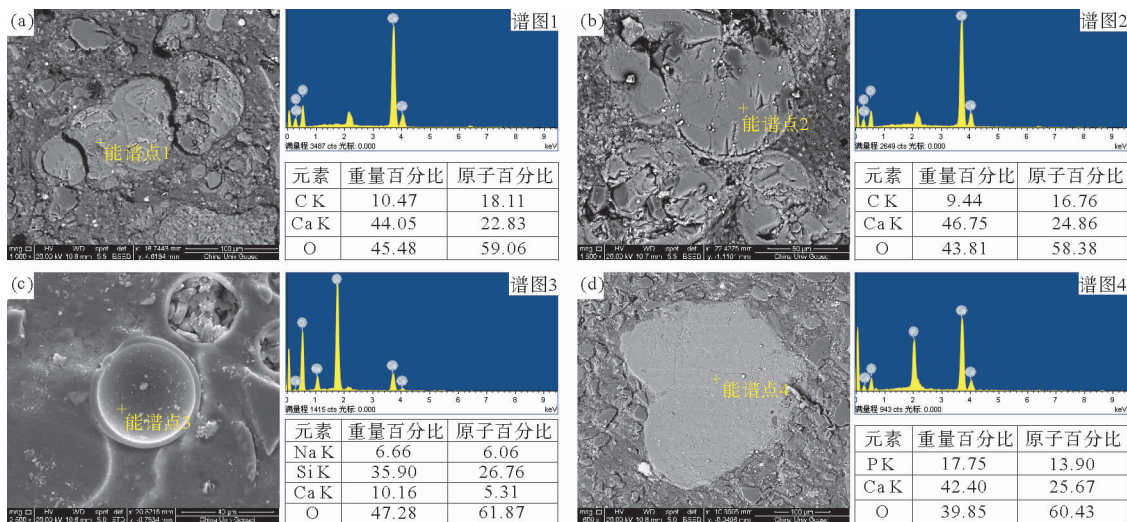


图 2 Madingo 组烃源岩矿物组成

Fig. 2 Mineral composition distribution of source rock in Madingo Formation

##### 3.1.2 古生物特征

Madingo 组烃源岩微古生物发育,包括有孔虫和放射虫等。有孔虫壳体呈球形、椭球形、花生状等多种形态,大小不一,直径介于 50~150 μm,能谱分析可知其主要成分为钙质(图 3a-b)。有孔虫按其生活习性又可分为浮游有孔虫和底栖有孔虫两种类型<sup>[26]</sup>。放射虫壳体形态较为单一,以球形为主,大小不一,直径介于 20~50 μm,能谱分析可知其主要成分为硅质(图 3c)。



a. 底栖有孔虫, A 井, 3 740 m; b. 浮游有孔虫, A 井, 3 728 m; c. 放射虫, A 井, 3 899 m; d. 磷酸盐颗粒, A 井, 3 911 m

图 3 Madingo 组烃源岩古生物及磷酸盐特征

Fig. 3 Paleontology and phosphate deposits of the source rock in Madingo Formation

表1 Madingo组烃源岩X衍射分析数据  
Table 1 X-ray diffraction data of source rock in Madingo Formation

深度/m	岩相	全岩矿物含量/%							黏土矿物相对含量/%			
		石英	长石	黄铁矿	黏土矿物	方解石	白云石	其他	绿泥石	伊利石	高岭石	伊蒙混层
3 580	磷质细粒岩	18	3	7	61	3	0	8	10	25	40	25
3 611	磷质细粒岩	22	14	4	46	2	4	8	10	30	35	25
3 623	磷质细粒岩	23	16	4	34	15	3	5	10	30	35	25
3 629	磷质细粒岩	20	6	3	49	13	3	6	5	40	35	20
3 638	磷质细粒岩	24	6	4	35	18	2	11	20	30	35	15
3 650	灰质细粒岩	24	6	4	26	28	3	9	20	20	40	20
3 677	磷质细粒岩	18	4	3	50	15	5	5	20	25	30	25
3 689	灰质细粒岩	17	3	3	33	37	3	4	20	30	30	20
3 716	富有孔虫细粒岩	26	11	4	32	20	6	1	10	30	30	30
3 728	富有孔虫细粒岩	25	6	1	53	8	4	3	25	25	20	30
3 740	富有孔虫细粒岩	30	10	3	47	8	2	0	25	30	25	20
3 749	富有孔虫细粒岩	23	13	2	53	6	1	2	25	35	15	25
3 764	黏土质细粒岩	25	7	3	50	12	3	0	25	35	15	25
3 791	长英质细粒岩	26	15	2	43	8	2	4	30	45	5	20
3 806	长英质细粒岩	27	19	3	36	11	2	2	30	45	0	25
3 818	黏土质细粒岩	34	7	2	46	5	3	3	30	45	0	25
3 830	黏土质细粒岩	25	6	2	55	8	1	3	35	45	0	20
3 839	长英质细粒岩	32	10	1	45	8	2	2	25	45	15	15
3 845	黏土质细粒岩	31	5	0	49	11	1	3	25	50	0	25
3 860	黏土质细粒岩	28	6	2	46	12	3	3	35	45	0	20
3 875	富放射虫细粒岩	23	17	3	36	12	5	4	25	45	15	15
3 881	富放射虫细粒岩	28	16	2	29	17	3	5	15	40	25	20
3 893	富放射虫细粒岩	32	11	2	20	28	3	4	20	50	20	10
3 899	富放射虫细粒岩	29	13	3	23	26	3	3	25	55	10	10
3 911	富放射虫细粒岩	12	2	5	75	6	0	0	20	15	35	30
3 920	富放射虫细粒岩	20	12	2	46	18	2	0	25	10	30	35
3 941	灰质细粒岩	16	19	2	28	31	1	3	10	70	10	10
3 968	灰质细粒岩	17	14	2	28	35	1	3	35	55	0	10
3 980	灰质细粒岩	15	18	2	22	39	1	3	30	60	0	10
3 998	长英质细粒岩	19	22	3	31	20	1	4	35	40	5	20
4 020	长英质细粒岩	26	11	4	44	10	0	5	40	45	0	15

### 3.1.3 磷酸盐

Madingo组烃源岩中可见大量分布的磷酸盐颗粒,多为不规则形状,直径介于100~200  $\mu\text{m}$ ,能谱分析可知其主要成分为磷和钙(图3d)。

## 3.2 岩相类型及特征

岩相是沉积环境和水动力条件分析的基础。对于细粒岩岩相的划分,不同学者有着不同的划分依

据和分类方案,主要包括以下几种:(1)根据细粒岩矿物成分及含量进行划分<sup>[4,27]</sup>; (2)注重细粒岩结构构造,并结合矿物组成进行划分<sup>[5,28,29]</sup>; (3)综合细粒岩有机质含量、矿物组成和沉积构造进行划分<sup>[1,3]</sup>; (4)根据细粒岩有机质成分及分布形式进行划分,如含有孔虫和钙质超微化石泥岩、含植物碎屑泥岩<sup>[30]</sup>。

参考前人研究成果,并结合研究区地质背景,本

文根据典型矿物组成、古生物特征及显微岩石构造进行细粒岩岩相划分。首先将富含孔虫、放射虫或磷酸盐颗粒的细粒岩细分为富有孔虫细粒岩、富放射虫细粒岩和磷质细粒岩。对于不含有孔虫、放射虫或磷酸盐颗粒的细粒岩则根据矿物组成和显微岩石构造进行细分,若长英质矿物占主导,镜下可见较多碎屑颗粒,则为长英质细粒岩;若黏土矿物占主导,长英质矿物含量较低,镜下碎屑颗粒罕见,则为黏土质细粒岩;若碳酸盐矿物占主导,镜下可见大量泥晶方解石,则为灰质细粒岩。

### 3.2.1 富有孔虫细粒岩

富有孔虫细粒岩主要发育在 Madingo 组中上部,以富含孔虫化石为主要特征。黏土矿物平均含量为 46.3%,长英质平均含量为 36%,碳酸盐平均含量为 13.8%(表 1)。镜下可见大量的有孔虫密集分布,个体大小不一,内部被方解石(茜素红染色)充填(图 4a),另有少量石英颗粒零星分布。

### 3.2.2 富放射虫细粒岩

富放射虫细粒岩主要发育在 Madingo 组中下部,以富含放射虫化石为主要特征。黏土矿物平均含量为 38.2%,长英质平均含量为 35.8%,碳酸盐平均含量为 20.5%(表 1)。镜下可见放射虫大量存在,大小混杂,均匀分布(图 4b)。推测富放射虫细粒岩的硅质主要为生物成因,并且生物硅来自于放射虫<sup>[27]</sup>。

### 3.2.3 磷质细粒岩

磷质细粒岩主要发育在 Madingo 组顶部,以富含磷酸盐颗粒为主要特征。黏土矿物平均含量为 45.8%,长英质平均含量为 29%,碳酸盐平均含量为 13.8%(表 1)。背散射下可见磷酸盐颗粒,形状不规则(图 4c)。推测磷酸盐颗粒的形成与上升流有关<sup>[31]</sup>。

### 3.2.4 黏土质细粒岩

黏土质细粒岩主要分布在 Madingo 组中下部。黏土矿物占主导,平均含量为 49.2%,黏土矿物类型以伊利石和绿泥石为主,平均含量分别为 44%和 30%,伊蒙混层含量较少,平均含量为 23%,高岭石含量最低,平均含量仅为 3%。长英质含量较低,平均含量为 34.8%,碳酸盐含量很低,平均含量仅为 11.8%(表 1)。镜下可见黏土广泛存在,未见生物化石和磷酸盐颗粒,碎屑石英、碎屑长石颗粒零星分布,颗粒粒径以黏土级或粉砂级为主(图 4d)。黏土质细粒岩矿物成分较纯,以黏土矿物为主,缺乏大的

碎屑颗粒和生物扰动构造,沉积作用方式以静水条件下悬浮沉降为主<sup>[28]</sup>。

### 3.2.5 长英质细粒岩

长英质细粒岩在 Madingo 组中部和底部均有发育,但厚度较小。长英质矿物占主导,平均含量为 41.4%,主要为陆源石英、长石粉砂。碳酸盐平均含量为 12.8%,黏土矿物平均含量为 39.8%(表 1)。镜下可见大量的粉砂级的石英、长石颗粒均匀分布,呈漂浮状产出,分选中等,磨圆次棱角-次圆状(图 4e),为陆源碎屑成因。长英质细粒岩碎屑石英、长石颗粒含量较高,表明其形成于相对高能的环境。

### 3.2.6 灰质细粒岩

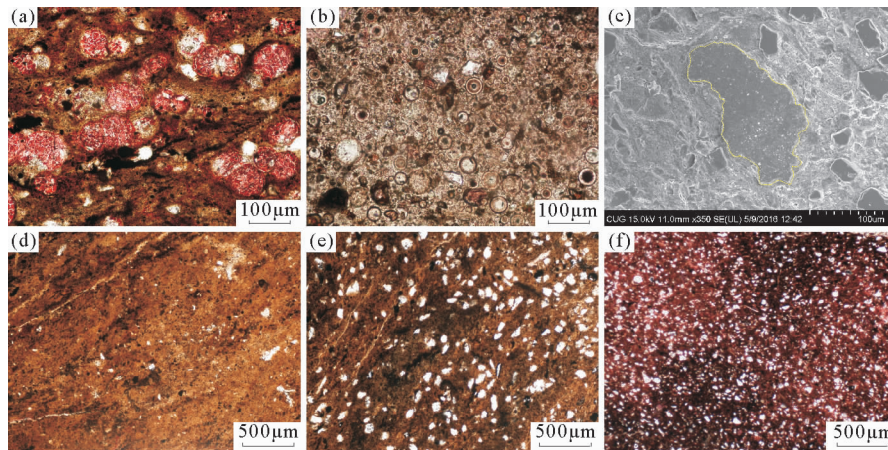
灰质细粒岩主要发育在 Madingo 组中上部和底部。碳酸盐矿物占主导,主要为方解石,平均含量为 34%,白云石含量相对较少,平均含量仅为 1.8%。长英质含量为 29.8%,黏土矿物含量为 27.4%(表 1)。镜下可见广泛发育的泥晶方解石(茜素红染色),另夹杂有少量的黏土级或粉砂级的石英颗粒(图 4f)。与黏土质细粒岩和长英质细粒岩相比,灰质细粒岩碳酸盐含量相对较高,表明其形成于相对浅水环境<sup>[29]</sup>。

## 4 有机质富集机制

### 4.1 海平面升降

#### 4.1.1 GRP 原理

国外学者基于 GR 曲线特征和岩相叠加样式进行细粒沉积岩层序划分和地层对比,识别出 3 种岩相叠加样式,由于其特定的 GR 曲线响应特征而定义为 GRP(gamma-ray patterns),即向上减小型 GRP、向上增大型 GRP 和相对稳定型 GRP<sup>[6,7]</sup>。向上减小型 GRP 对应颗粒粒径增大,黏土矿物含量减少,碳酸盐含量增加(图 5a),岩相由黏土质细粒岩向长英质细粒岩和灰质细粒岩转化;向上增大型 GRP 对应颗粒粒径减小,黏土矿物含量增加,碳酸盐含量减少(图 5b),岩相由长英质细粒岩和灰质细粒岩向黏土质细粒岩转化;相对稳定型 GRP 对应矿物含量相对稳定,岩相变化较小(图 5c)。垂向岩相叠加样式解释为两种连续的海平面升降过程,即海侵(浅水高能、高碳酸盐含量岩相被深水低能、高黏土矿物岩相代替)和海退(深水低能、高黏土矿物岩相被浅水高能、高碳酸盐含量岩相代替)。



- a. 富有孔虫细粒岩,有孔虫呈椭圆形、花生状等,大小不一,内部被方解石充填(茜素红染色),直径介于 $50\sim 150\ \mu\text{m}$ ,A井,3 740 m;  
 b. 富放射虫细粒岩,放射虫以球形为主,大小不一,直径介于 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ ,A井,3 899 m; c. 磷质细粒岩背散射照片,黄色虚线为磷酸盐颗粒,形状不规则,A井,3 629 m; d. 黏土质细粒岩,黏土含量高,黏土级或粉砂级的石英颗粒零星分布,A井,3 764 m;  
 e. 长英质细粒岩,石英颗粒呈漂浮状,分选中等,磨圆次棱角-次圆状,A井,3 806 m; f. 灰质细粒岩,泥晶方解石(茜素红染色)大量存在,夹杂有少量的石英颗粒,A井,3 968 m

图4 Madingo组烃源岩岩相类型及特征

Fig. 4 Lithofacies and characteristics of source rock in Madingo Formation

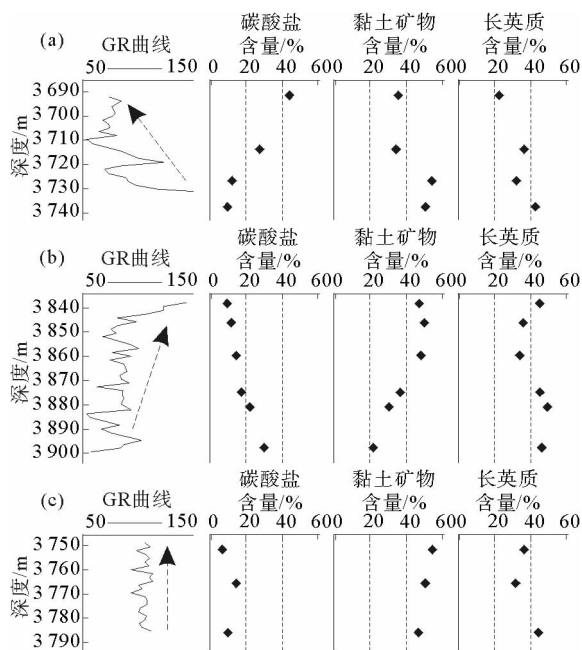


图5 Madingo组3种GR曲线类型及矿物含量变化

Fig. 5 Three types of GR curves and variation in mineral composition in Madingo Formation

#### 4.1.2 岩相、烃源岩与海平面升降关系

根据A井GR曲线特征和岩相叠加样式以及B、C、D和E井(该4口井没有进行矿物含量测试,岩性剖面来自录井资料。)GR曲线特征,将Madingo组划分为3期海平面升降旋回,并且该划分结果

能够与同期全球海平面变化较好对应<sup>[32]</sup>(图6)。

**第一期海平面升降:**海侵阶段,底部受陆源供给影响较大,主要发育长英质细粒岩和薄层的黏土质细粒岩,向上过渡为厚层的灰质细粒岩。再向上由于海平面迅速上升,发育富放射虫细粒岩。海退阶段,由厚层的富放射虫细粒岩、黏土质细粒岩夹薄层灰质细粒岩过渡为长英质细粒岩。

**第二期海平面升降:**海侵阶段,岩相主要为厚层黏土质细粒岩,代表相对稳定的深水沉积环境。向上GR曲线快速增大,由富有孔虫细粒岩组成密集段。海退阶段岩相过渡为灰质细粒岩,对应向上减小型GRP。

**第三期海平面升降:**海侵阶段,对应向上增大型GRP,底部岩相为灰质细粒岩与磷质细粒岩互层,向上过渡为厚层的磷质细粒岩。海退阶段,对应向上减小型GRP,发育厚层的磷质细粒岩(图6)。

岩相和烃源岩的发育与海平面升降密切相关,低海平面时期,水体较浅而水动力条件较强,发育灰质细粒岩、长英质细粒岩,水体含氧而不利于有机质保存;高海平面时期,在相对深水低能环境下岩相以黏土质细粒岩为主,水体分层广泛存在,底层水缺氧而有利于有机质的保存。从图7可以看出,高海平面时期发育的深水岩相有机质含量较高,烃源岩的质量较好,而低海平面时期发育的浅水灰质细粒岩、长英质细粒岩有机质含量相对较低。但A井Madingo组烃源岩海侵/海退旋回和有机质丰度对比

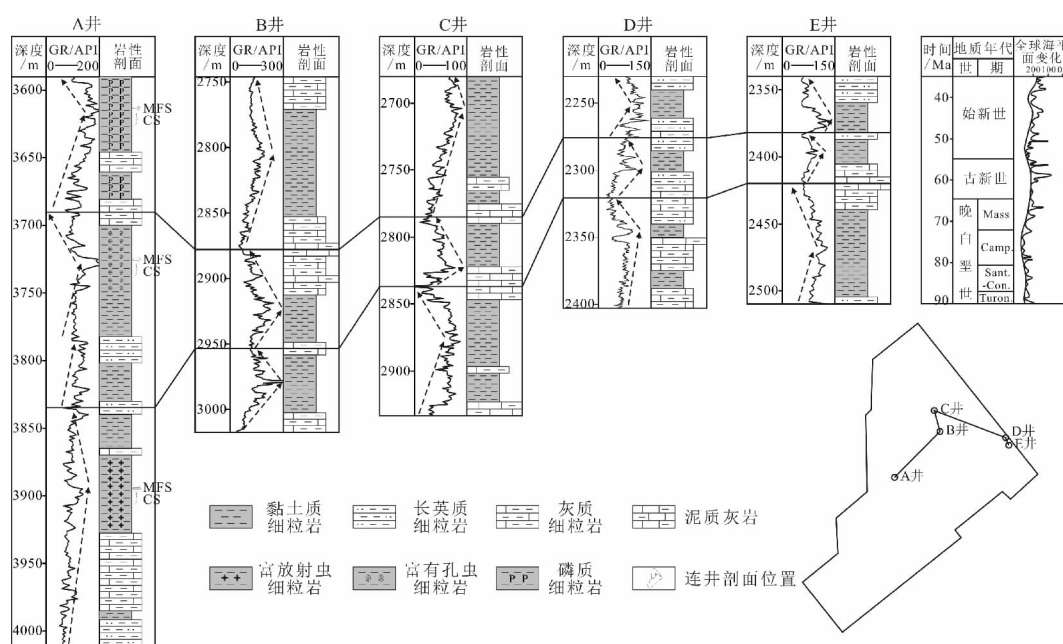


图 6 Madingo 组连井剖面 GR 旋回特征及全球海平面变化

Fig. 6 GR cycle characteristics of connecting-well profile in Madingo Formation and global sea-level changes

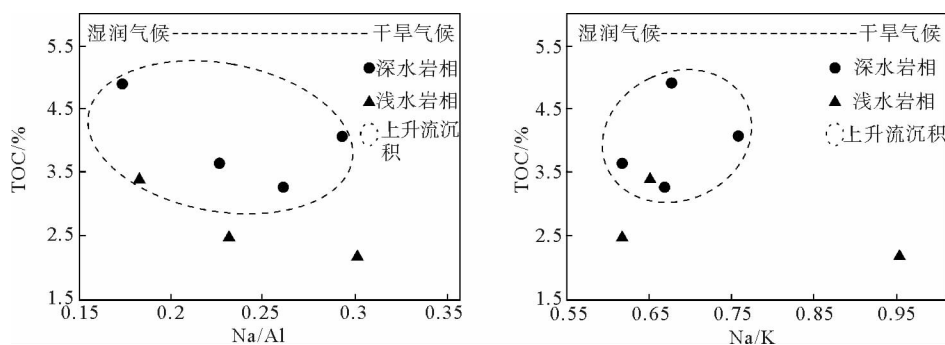


图 7 Madingo 组烃源岩 TOC 与 Na/Al、Na/K 比值交汇图

Fig. 7 Intersection of the TOC and Na/Al, Na/K ratio of source rock in Madingo Formation

表明,磷质细粒岩有机质丰度普遍较高,与海平面变化和水体深浅无明显相关性(图 8),可见海平面升降不是烃源岩有机质富集的唯一控制因素。

#### 4.2 上升流

研究区上升流沉积的岩性与古生物标志包括:(1)典型的碳-硅细粒岩组合<sup>[15]</sup>(富放射虫细粒岩,富有机碳,放射虫为硅质生物);(2)碳-磷细粒岩组合<sup>[15]</sup>(磷质细粒岩,富有机碳和磷酸盐颗粒);(3)底栖生物和浮游生物混生<sup>[15]</sup>(富有孔虫细粒岩中底栖有孔虫和浮游有孔虫混生)。在 A 井 Madingo 烃源岩可识别出 2 期上升流沉积:第一期为 Madingo 组中下部富有机质富放射虫细粒岩沉积(图 8),镜下可观察到大量的放射虫(硅质生物)存在,为典型的

碳-硅细粒岩组合。富放射虫细粒岩厚度较小,推测该期上升流活动时间较短,规模较小;第二期为 Madingo 组顶部富有机质磷质细粒岩和富有孔虫细粒岩沉积,以高有机质含量和磷酸盐含量为典型特征(图 8),为典型的碳-磷细粒岩组合,富有孔虫细粒岩中底栖有孔虫和浮游有孔虫混生。磷质细粒岩和富有孔虫细粒岩厚度较大,推测该期上升流活动时间较长,规模较大。因此,富放射虫细粒岩、富有孔虫细粒岩和磷质细粒岩均为上升流沉积产物。

上升流对烃源岩的发育具有重要的影响,现已证实多个地区海相烃源岩的发育与上升流有关<sup>[31,33,34]</sup>。从图 7 可以看出,上升流活动形成的烃源岩有机质丰度明显高于非上升流活动形成的烃源岩。高有机质生产力是上升流活动区的典型特征,

上升流将海底富营养盐水体带至表层,从而促进了表层水体生物的大量发育,提高了原始海洋生产力。高海平面时期,水体分层广泛存在,表层水中发育的生物降落至缺氧的底层水中得以保存;低海平面时期,没有水体分层,但由于生物过量发育而消耗掉水中大量的氧气,缺氧的环境有利于有机质的保存而形成优质的烃源岩<sup>[14,16]</sup>。因此,受上升流活动的影响,低海平面时期形成的磷质细粒岩有机质丰度较高。

### 4.3 古地理与古气候

板块构造重建表明,晚白垩世研究区位于一个喇叭型海湾的东侧陆架上<sup>[35-37]</sup>。Albian期由于洋中脊扩张与洋壳生成,海湾两侧陆架受到挤压抬升,Aptian期盐层发生不均匀底辟作用,在陆架内部形成大小不等的洼陷,相对封闭的水体环境为细粒沉积物的堆积与有机质的保存创造了良好的条件。中

东地区中生界优质烃源岩,以及新生界高有机质含量的富放射虫细粒岩都发育在陆架内部的洼陷或受台地分割的浅海环境中<sup>[38,39]</sup>。

Na/Al、Na/K等值经常被作为判别古气候和化学风化强弱的指标,在化学风化过程中,钠元素由于化学活性较强而容易发生迁移、淋失,钾、铝等元素由于化学活性较弱则多聚集在风化形成的黏土中。湿润气候条件下化学风化强,Na/Al、Na/K比值低;干旱气候条件下化学风化弱,Na/Al、Na/K比值高<sup>[40]</sup>。主量元素分析可知,A井Madingo组底部Na/Al、Na/K比值较高,其中,Na/Al平均值为0.32,Na/K平均值为1.0,该沉积时期气候条件为干旱气候;中下部Na/Al、Na/K比值变化较快,其中Na/Al介于0.17~0.3,平均值为0.23,Na/K介于0.58~0.99,平均值为0.77,气候条件从干旱气候向相对湿润气候转变;中上部Na/Al、Na/K比值较低,其中Na/Al平均值为0.19,Na/K平均值为0.6,该沉积时期气候条件为湿润气候(图8)。

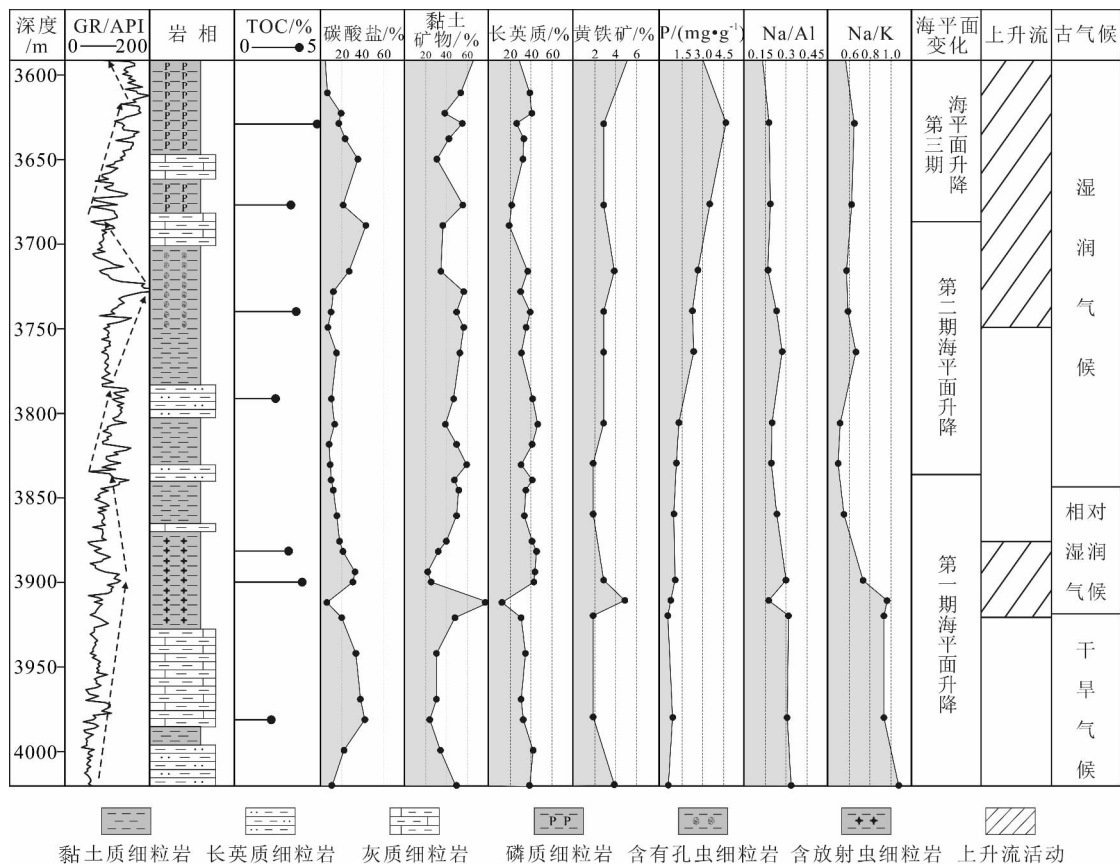


图8 A井Madingo组烃源岩GR旋回、矿物组成与主量元素分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of GR cycle, mineral composition and major element of source rock in Madingo Formation of Well A



古气候对烃源岩有机质富集的影响体现在原始有机质生产力和生源构成 2 个方面,通过影响陆源高等植物输入在一定程度上影响海相烃源岩的有机质丰度和有机质类型。干旱气候时期,降雨较少,流域内高等植物不发育,海洋中陆源有机质供给较少,因此,原始有机质生产力较低,生物构成以海洋水生生物为主;湿润气候时期,降雨充沛,流域内高等植物发育,有较多的陆源有机质输入到海洋中,因此,原始有机质生产力较高,生物构成包含海洋水生生物和陆源高等植物 2 种<sup>[17]</sup>。但古气候对上升流形成的烃源岩和非上升流形成的烃源岩的影响存在差异。

上升流活动时期,海洋水生生物大量发育,原始有机质生产力整体较高,不同古气候条件下陆源有机质输入对生产力差异影响不明显,如图 7 所示,上升流沉积有机质丰度较高,而且 TOC 含量与 Na/Al、Na/K 比值(古气候条件)没有明显关系。同时,生源构成以海洋水生生物为主,随着古气候条件由干旱逐渐变为湿润,陆源高等植物输入逐渐增多,烃源岩有机质类型由 I 型向 II<sub>1</sub> 型过渡。曹军等<sup>[18]</sup>在研究下刚果盆地海相烃源岩地球化学特征时表明, Madingo 组海相烃源岩有机质类型以 II<sub>1</sub> 和 II<sub>2</sub> 型为主, I 型烃源岩较少(图 9)。

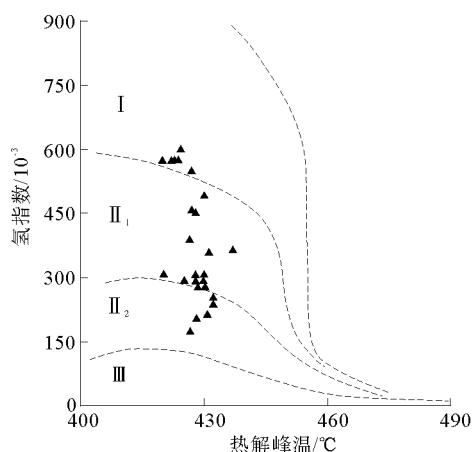


图 9 Madingo 组烃源岩有机质类型(据文献<sup>[18]</sup>)

Fig. 9 Organic matter type of source rock in Madingo Formation (from reference<sup>[18]</sup>)

非上升流活动时期,不同古气候条件下陆源有机质输入对生产力差异影响较为明显,如图 7 所示,非上升流沉积有机质丰度虽然较低,但随着 Na/Al、Na/K 比值降低,即古气候条件由干旱变为湿润,TOC 含量增加。同时,由于海洋水生生物不发育,陆源高等植物在生源构成上占有更大比例,随着海

洋中陆源高等植物输入逐渐增多,烃源岩有机质类型由 I 型向 II<sub>1</sub> 型和 II<sub>2</sub> 型过渡。

## 5 结论

(1) 研究区 Madingo 组烃源岩矿物组成复杂,以黏土矿物和石英为主,方解石和白云石次之,另有少量的长石和黄铁矿,有孔虫和放射虫等微古生物发育,局部可见大量存在的磷酸盐颗粒。根据烃源岩矿物组成、古生物特征和磷酸盐含量,并结合显微岩石构造,共识别出富有孔虫细粒岩、富放射虫细粒岩、磷质细粒岩、黏土质细粒岩、长英质细粒岩和灰质细粒岩 6 种岩相。

(2) 研究区 Madingo 组烃源岩发育受海平面升降、上升流和古气候控制。Madingo 组共划分为 3 期海平面升降旋回,高海平面时期发育的深水岩相有机质含量较高,而低海平面时期发育的浅水岩相有机质含量相对较低。但磷质细粒岩有机质含量普遍较高,与海平面升降无明显相关性,因此,海平面升降不是烃源岩有机质富集的唯一控制因素。

(3) Madingo 组发育的富放射虫细粒岩、磷质细粒岩和富有孔虫细粒岩推测为 2 期不同规模的上升流沉积。上升流提高了表层水体有机质生产力,高海平面时期,水体分层广泛存在,表层生物降落至缺氧的底层水中得以保存;低海平面时期,没有水体分层,但由于生物过量发育而形成的缺氧环境有利于有机质的保存。因此,上升流活动是引起浅水磷质细粒岩高有机质丰度的原因。

(4) Madingo 组沉积时期,由于盐底辟作用在大陆架内部形成一系列洼陷,其相对封闭的水体环境有利于有机质的保存。快速的海平面上升与浮游生物勃发也有利于海底形成缺氧环境。古气候经历了干旱气候、相对湿润气候和湿润气候 3 个阶段,通过控制海洋中陆源有机质输入在一定程度上影响烃源岩有机质丰度和有机质类型。

## 参考文献 (References)

- [1] 姜在兴,梁超,吴靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039. [JIANG Zaixing, LIANG Chao, WU Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.]
- [2] Aplin A C, Macquaker J H S. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.

- [3] 吴靖. 东营凹陷古近系沙四上亚段细粒岩沉积特征与层序地层研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2015. [WU Jing. The study on sedimentary characteristics and sequence stratigraphy of fine-grained rocks of the upper fourth member of Paleogene Shahejie formation, Dongying Depression[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2015.]
- [4] 梁超, 姜在兴, 杨懿婷, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 691-698. [LIANG Chao, JIANG Zaixing, YANG Yiting, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 691-698.]
- [5] 张顺, 陈世悦, 谭明友, 等. 东营凹陷西部沙河街组三段下亚段泥页岩沉积微相[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 633-645. [ZHANG Shun, CHEN Shiyue, TAN Mingyou, et al. Characterization of sedimentary microfacies of shale in the lower third sub-member of Shahejie Formation, western Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 633-645.]
- [6] Singh P. Lithofacies and sequence-stratigraphic framework of the Barnett Shale, northeast Texas[D]. Doctor Dissertation of University of Oklahoma, 2008.
- [7] Abouelresh M O, Slatt R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.
- [8] Slatt R M, Rodriguez N D. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: Commonality or coincidence? [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012, 8: 68-84.
- [9] 吴靖, 姜在兴, 童金环, 等. 东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段细粒沉积岩沉积环境及控制因素[J]. 石油学报, 2016, 37(4): 464-473. [WU Jing, JIANG Zaixing, TONG Jinhuan, et al. Sedimentary environment and control factors of fine-grained sedimentary rocks in the upper fourth Member of Paleogene Shahejie Formation, Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4): 464-473.]
- [10] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- [11] 黄文彪, 邓守伟, 卢双舫, 等. 泥页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用——以松辽盆地南部青山口组为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 704-711. [HUANG Wenbiao, DENG Shouwei, LU Shuangfang, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation—a case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 704-711.]
- [12] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(8): 1179-1209.
- [13] Pedersen T F, Calvert S E. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(4): 454-466.
- [14] 张宝民, 张水昌, 边立曾, 等. 浅析中国新元古—下古生界海相烃源岩发育模式[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊): 58-69. [ZHANG Baomin, ZHANG Shuichang, BIAN Lizeng, et al. Developmental modes of the Neoproterozoic-Lower Paleozoic marine hydrocarbon source rocks in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 77-91.]
- [15] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 39-48. [ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, BIAN Lizeng, et al. Development constraints of marine source rocks in China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 39-48.]
- [16] 刘峰, 蔡进功, 吕炳全, 等. 下扬子五峰组上升流相烃源岩沉积特征[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(3): 440-444. [LIU Feng, CAI Jingong, LV Bingquan, et al. Sedimentary characters of Wufeng Formation upwelling facies source rock in lower Yangtze area[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(3): 440-444.]
- [17] 林俊峰, 郝芳, 胡海燕, 等. 廊固凹陷沙河街组烃源岩沉积环境与控制因素[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 163-173. [LIN Junfeng, HAO Fang, HU Haiyan, et al. Depositional environment and controlling factors of source rock in the Shahejie Formation of Langgu sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 163-173.]
- [18] 曹军, 钟宁宁, 邓运华, 等. 下刚果盆地海相烃源岩地球化学特征、成因及其发育的控制因素[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(4): 87-98. [CAO Jun, ZHONG Ningning, DENG Yunhua, et al. Geochemical characteristics, origin and factors controlling formation of marine source rock in lower Congo Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(4): 87-98.]
- [19] Cole G A, Requejo A G, Ormerod D, et al. Petroleum geochemical assessment of the lower Congo Basin[M]//Mello M R, Katz B J. Petroleum Systems of South Atlantic Margins. Tulsa: AAPG, 2000, 73: 325-339.
- [20] 朱伟林, 陈书平, 王春修, 等. 非洲含油气盆地[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 205-229. [ZHU Weilin, CHEN Shuping, WANG Chunxiu, et al. African Petroliferous Basins[M]. Beijing: Science Press, 2013: 205-229.]
- [21] 刘琼, 陶维祥, 于水, 等. 西非下刚果—刚果扇盆地圈闭类型和分布特征[J]. 地质科技情报, 2013, 32(3): 107-112, 117. [LIU Qiong, TAO Weixiang, YU Shui, et al. Trap types and distribution of Lower Congo-Congo Fan Basin in west Africa[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(3): 107-112, 117.]
- [22] 郑应钊. 西非海岸盆地带油气地质特征与勘探潜力分析[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2012. [ZHENG Yingzhao. Petroleum geology features and exploration potential analysis in the coastal basins of west Africa[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2012.]
- [23] 石油地质勘探专业标准化委员会. SY/T 6210-1996 沉积岩

- 中黏土矿物总量和常见非黏土矿物 X 射线衍射定量分析方法[S]. 北京:石油工业出版社,1996. [Petroleum Geological Exploration Professional Standardization Committee. SY/T 6210-1996 Quantitative analysis method of clay mineral total quantity and common non-clay mineral in sedimentary rock by X-ray diffraction[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.]
- [24] 石油地勘探专业标准化委员会. SY/T 5163-1995 沉积岩粘土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法[S]. 北京:石油工业出版社,1996. [Petroleum Geological Exploration Professional Standardization Committee. SY/T 5163-1995 Analysis method of clay mineral relative content in sedimentary rock by X-ray diffraction[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.]
- [25] 徐冠军,高瑛,董淑红,等. GB/T 19145-2003 沉积岩中总有机碳的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2003. [XU Guan-jun, GAO Ying, DONG Shuhong, et al. GB/T 19145-2003 Determination of total organic carbon in sedimentary rock[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.]
- [26] 周洋,陈芳,孙桂华,等. 台湾海峡西北部表层沉积物中有孔虫分布对沿岸上升流存在的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质,2015,35(1):111-119. [ZHOU Yang, CHEN Fang, SUN Guihua, et al. Foraminiferal distribution in surface sediments of the northwestern Taiwan strait and its response to the coastal upwelling current[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2015, 35(1): 111-119.]
- [27] 吴蓝宇,胡东风,陆永潮,等. 四川盆地涪陵气田五峰组—龙马溪组页岩优势岩相[J]. 石油勘探与开发,2016,43(2):189-197. [WU Lanyu, HU Dongfeng, LU Yongchao, et al. Advantageous shale lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling gas field of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 189-197.]
- [28] 赵建华,金之钧,金振奎,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境[J]. 石油学报,2016,37(5):572-586. [ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(5): 572-586.]
- [29] 王志峰,张元福,梁雪莉,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组不同水动力成因页岩岩相特征[J]. 石油学报,2014,35(4):623-632. [WANG Zhifeng, ZHANG Yuanfu, LIANG Xueli, et al. Characteristics of shale lithofacies formed under different hydrodynamic conditions in the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 623-632.]
- [30] 刘传联. 琼东南盆地渐新统烃源岩微观沉积特征与沉积环境[J]. 石油学报,2010,31(4):573-578. [LIU Chuanlian. Sedimentary environment and micro-sediment characteristics of Oligocene source rocks in Qiongdongnan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 573-578.]
- [31] 吕炳全,王红罡,胡望水,等. 扬子地块东南古生代上升流沉积相及其与烃源岩的关系[J]. 海洋地质与第四纪地质,2004,24(4):29-35. [LV Bingquan, WANG Honggang, HU Wangshui, et al. Relationship between Paleozoic upwelling facies and hydrocarbon in southeastern marginal Yangtze block[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(4): 29-35.]
- [32] Broucke O, Temple F, Rouby D, et al. The role of deformation processes on the geometry of mud-dominated turbiditic systems, Oligocene and Lower-Middle Miocene of the Lower Congo basin (West African Margin)[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(3): 327-348.
- [33] 吕炳全,胡望水,王红罡,等. 华北地块中—上元古界上升流沉积相及其与油气的关系[J]. 海洋地质与第四纪地质,2005,25(3):83-88. [LV Bingquan, HU Wangshui, WANG Honggang, et al. Neoproterozoic-Mesoproterozoic upwelling facies and its relationship with hydrocarbon in north China[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005, 25(3): 83-88.]
- [34] Piper D Z, Link P K. An upwelling model for the Phosphoria sea: A Permian, ocean-margin sea in the northwest United States[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(7): 1217-1235.
- [35] Valle P J, Gjelberg J G, Helland-Hansen W, et al. Tectonostratigraphic development in the eastern Lower Congo Basin, offshore Angola, West Africa[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(8): 909-927.
- [36] Wagner T. Late Cretaceous to early Quaternary organic sedimentation in the eastern Equatorial Atlantic[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 179(1-2): 113-147.
- [37] Jaillard E, Dumont T, Ouali J, et al. The Albian Tectonic "crisis" in Central Tunisia: Nature and chronology of the deformations[J]. Journal of African Earth Sciences, 2013, 85: 75-86.
- [38] De Wever P, Dumitrica P, Caulet J P, et al. Radiolarians in the Sedimentary Record [M]. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2001: 69-72.
- [39] Alsharhan A S, Nairn A E M. Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1997: 297-392.
- [40] 杨群慧,张富元,林振宏,等. 南海东北部晚更新世以来沉积环境演变的矿物-地球化学记录[J]. 海洋学报,2004,26(2):72-80. [YANG Qunhui, ZHANG Fuyuan, LIN Zhenhong, et al. On mineralogical and geochemical records of paleosedimentary environmental variation in the northeastern South China Sea since the late Pleistocene[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(2): 72-80.]

## LITHOFACIES AND ORGANIC MATTER ENRICHMENT IN MADINGO FORMATION OF BLOCK M, LOWER CONGO BASIN

JI Shaocong<sup>1,2</sup>, YANG Xianghua<sup>1,2</sup>, ZHU Hongtao<sup>1,2</sup>, DENG Yunhua<sup>3</sup>, KANG Hongquan<sup>3</sup>,  
WANG Bo<sup>1,2</sup>, WEI Xiaosong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

3. CNOOC Research Institute, Beijing 100027)

**Abstract:** The source rock of the Madingo Formation in the Block M of the Lower Congo Basin is selected as the research object of this paper. Mineralogy, paleontology and lithofacies of the source rock were analyzed using X-ray diffraction, thin sections, backscatter and energy spectrum. Special attention is paid to major elements and organic matters, and the enrichment mechanism of organic matters discussed. The results show that the source rock is mainly composed of clay and silica minerals, followed by calcite, feldspar, dolomite and pyrite. Micro fossils and nanofossiles, such as foraminifera and radiolarian, are rather popular. Based on mineralogy, paleontology, phosphate content and microstructure, six types of lithofacies are identified, i. e. : foraminifera-bearing fine deposits, radiolarian-bearing fine deposits, phosphatic fine deposits, argillaceous fine deposits, silty fine deposits and calcareous fine deposits. The deposition of the source rock in Madingo Formation was under the joint control of sea level eustacy, upwelling current, paleo-climate and paleogeography. Several cycles of transgression and regression events are identified in the Formation. Sea level eustacy constrained the deposition of lithofacies through changes in water depth, redox conditions and sediments types. Foraminifera-bearing fine deposits, phosphatic fine deposits and radiolarian-bearing fine deposits with high organic content are formed in two cycles of upwelling. Depressions in the inner shelf were filled with evaporate deposits during the period while the Madingo Formation was deposited. The relatively closed environment benefited the preservation of organic matters. The paleo-climate experienced three stages of change from dry to relatively humid and to humid climate during the period of Madingo Formation. The abundance and types of organic matter were dependent upon to some extent the input of terrigenous organic matter.

**Key words:** lower Congo Basin; source rock; lithofacies; sea level eustacy; upwelling; ancient climate