

文章编号: 1000-0550(2008)06-0994-11

# 苏丹 Muglad 盆地 Fula 坳陷白垩系 Abu Gabra 组 层序地层及沉积体系

杨俊生<sup>1</sup> 朱筱敏<sup>2</sup>

(1 中国石油大学(华东) 山东东营 257061; 2 中国石油大学(北京) 北京昌平 102249)

**摘要** Fula 坳陷白垩系 Abu Gabra 组是 Muglad 盆地第一裂谷旋回中形成的同裂谷期地层, 它可以分为 3 个二级层序, 自下而上是  $K_1SSI$ 、 $K_1SSII$  和  $K_1SSIII$ , 它们分别与断陷期早期地层、断陷期中期地层和断陷期晚期地层相对应。其中二级层序  $K_1SSI$  和  $K_1SSIII$  各分为 2 个三级层序,  $K_1SSII$  则可进一步划分为 3 个三级层序。综合应用地震和钻/测井资料, 以三级层序为单元, 完成了 Abu Gabra 组沉积相分布与沉积体系预测工作。研究认为, 阿加组的主要沉积类型包括: 河流相、三角洲相、扇三角洲相、辫状河三角洲相、近岸水下扇相、滨浅湖亚相、半深湖—深湖亚相。各沉积相带在 Fula 坳陷内的演化形成了 5 个主要沉积体系, 分别是东北部的扇三角洲体系, 西北部的三角洲体系、西部近岸水下扇体系、东南部辫状河三角洲体系以及早期的河流沉积体系。沉积体系的分布与演化受构造活动强度变化的控制, 也受古地形和古地貌的影响。

**关键词** Muglad 盆地 层序地层学 裂谷盆地 沉积体系 Abu Gabra 组

**第一作者简介** 杨俊生 男 1972 年出生 博士 沉积学与储层地质学 E-mail: sydxjys@126.com

**中图分类号** P539.2 P512.2 文献标识码 A

## 0 前言

Muglad 盆地位于苏丹国西南部, 是该国最大的沉积盆地(图 1)。根据目前的研究成果, Muglad 盆地是在稳定的前寒武系基底上发育起来的中、新生界裂谷盆地<sup>[1~3]</sup>。盆地的裂陷始于晚侏罗世—早白垩世, 一直持续到渐新世末期。裂陷分为三期, 并形成了三个沉积旋回, 分别是晚侏罗世—早白垩世、晚白垩世和古近纪<sup>[4~6]</sup>。Fula 坳陷位于 Muglad 盆地东北部, 它是由东、西边界断层挟持而成的地堑, 走向北北西向, 总面积约 4 500 km<sup>2</sup>。该坳陷可以进一步划分为东北部断阶带、中央断裂带、西南部断阶带、北部次凹、南部次凹共 5 个次级构造单元(图 1)。该坳陷主要沉积第一裂谷旋回地层, 占地层总厚度的 70%<sup>[7]</sup>。本文研究的层段 Abu Gabra 组相当于第一裂谷旋回中的同裂谷期地层, 其上的 Bentu 组为第一裂谷旋回的后裂谷期地层, 二者共同构成了第一裂谷旋回<sup>[5,8]</sup>。在油气田勘探中, 中国石油油气勘探公司(CNODC)将 Abu Gabra 组划分为上、中、下三段。

Fula 坳陷的勘探始于上世纪 70 年代, 先后有 Chevron 公司、中石化和中石油等多家石油公司在本区进行过油气勘探<sup>[9]</sup>, 并在白垩系的 Bentu 组和

Darfur 群发现了亿吨级稠油储量, 在 Abu Gabra 组也获得高产稀油和天然气流。为解决稠油运输的困难, 保障稠油资源的顺利投产, 进一步加快投资回收步伐, 针对 Abu Gabra 组稀油油藏的勘探显得日益重要。正是基于这一原因, CNODC 立项研究 Abu Gabra 组的沉积特征, 预测有利的储层发育区, 为稀油资源的进一步勘探提供沉积学的基础。本文依据地震反射终止关系、钻/测井剖面上的岩性组合关系和准层序组的叠加样式、VSP 或合成地震记录资料将 Fula 坳陷 Abu Gabra 组划分为 7 个层序, 并在钻井剖面上建立起体系域级别的层序地层格架。以层序为研究单元, 完成了各层序地层厚度图、地震相分布图, 依据钻井沉积相与地震相之间的对应关系, 将地震相转换为沉积相, 完成了 7 个层序的沉积体系分布图, 并结合构造演化分析了各沉积体系发育的控制因素。

## 1 层序地层格架

在地震剖面和钻井剖面上识别层序界面和湖泛面, 进而划分层序和体系域是层序格架建立的基础。在地震剖面上, 层序界面之下多出现削截、顶超等现象, 层序界面之上则多为上超。钻井剖面上识别层序界面要找到“相”缺失的证据, 即一种近端相直接超

收稿日期: 2007-12-04 收修改稿日期: 2008-04-02

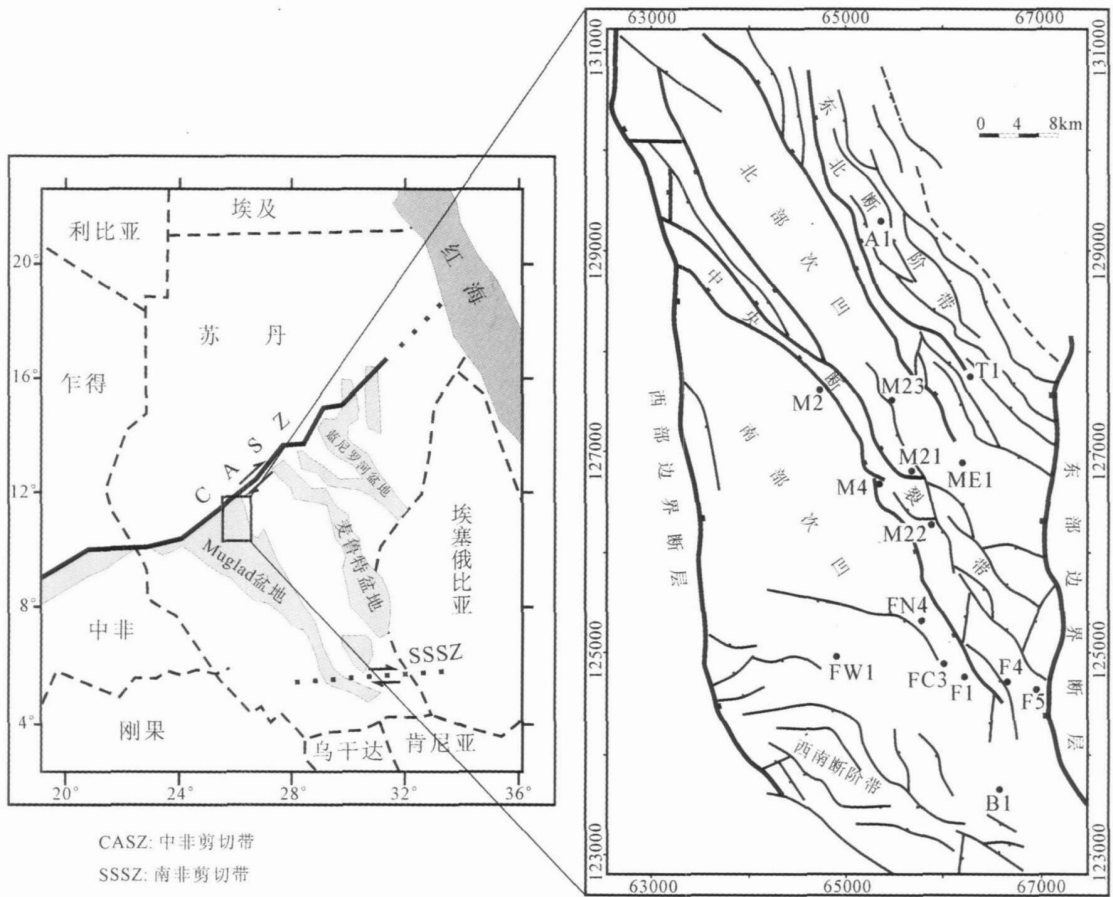


图 1 苏丹 Muglad盆地 Fula坳陷地理位置与构造单元区划图

Fig 1 The location and geological settings of Fula depression Muglad Basin Sudan

覆在远端相之上, 没有保留其间的过渡相。在测井曲线组合上, 层序界面一般常表现为由进积向退积的向上突变。湖泛面在地震剖面上一般为下超面, 在钻井剖面上位于进积式准层序组向退积式准层序组转换的界面上。本次工作在 Fula坳陷 Abu Gabra组识别出 8 个层序界面, 自下而上命名为 KSB1、KSB2... KSB8。它们将 Abu Gabra组划分为 3 个二级层序和 2 个三级层序, 各层序自下而上命名为  $K_1S \dots K_1SVII$

### 1.1 层序界面的识别

Abu Gabra组与 Bentiu组的分界, 即 Abu Gabra组顶界面在坳陷的大部分钻井上特征明显, 在界面之下, Abu Gabra组顶部沉积了厚约 50 m 的泥岩, 间夹薄层粉、细砂岩, Abu Gabra组顶界就定在该段泥岩的顶部。从目前的钻井揭示情况来看, 该段泥岩在坳陷中部的中央构造带上的各井中分布最为稳定; 在位于南部凹陷的 FW-1井上, 该段泥岩变厚, 增至约 80 m; 在靠近盆地边缘的斜坡区可能略变薄或砂岩夹层变厚, 但仍可以划分出这段泥岩。该段泥岩的测井响

应特征则更为明显, 由于受泥岩上部 Bentiu组底部厚层砂岩的影响, 在自然伽马 (GR) 和电阻率 (RD、RS) 曲线上均表现为漏斗形 (图 2)。

图 2 所示联井剖面的上部是 Abu Gabra组顶部泥岩段。由图可见, 从 Adoma-1 井向 FW-1 井方向 Abu Gabra组顶部泥岩单层厚度和总厚度变大, 砂岩夹层厚度变小, 砂岩粒度变细。在该段泥岩底部, 电阻率曲线表现为明显的高值尖峰, 各井特征一致; 自然伽马曲线和声波时差曲线也存在一高峰值, 向上值变小, 该段曲线略呈漏斗形。按照这一特征在钻井上划分的 Abu Gabra组顶界面是容易识别的, 本文将这一界面命名为 KSB1。用同样的办法对比了 Abu Gabra组上中段的界面, 该界面在钻井剖面上也较易识别, 它同样是以一较稳定的泥岩段顶部为界。通过反复对比, 本次工作应用井—震结合的方法将部分钻井的上中段的分层数据进行了调整, 使得钻井分层界面在横向上更具有可对比性, 并将这两个界面分别命名为 KSB3 和 KSB6。

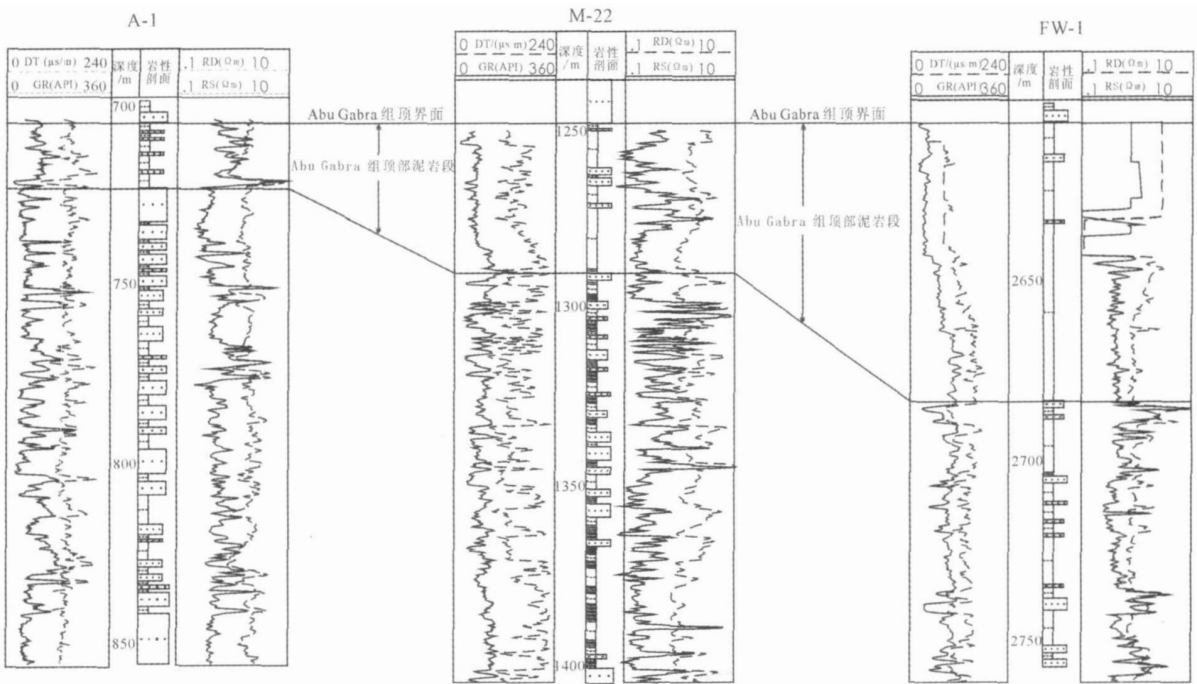


图 2 Fula 坳陷 Abu Gabra 组顶部泥岩特征的钻 / 测井特征  
 Fig 2 The well log character of mudstone at the top of Abu Gabra Formation in Fula depression

在钻井剖面上识别层序界面的特征这主要依据准层序组的叠加样式、岩性与电性的突变、以及相的缺失等特征。以 FC-3 井为例可以说明钻 / 测井剖面上层序界面的识别特征 (图 3)。从图 3 中可以看到, 首先 KSB6 处是一个明显的岩性、电性突变面, 变化幅度较大, 且侧向上分布较广; 其次, 在该界面之下为进积准层序组界面之上则为退积准层序组; 另外, 层序界面 KSB6 之上的辫状河三角洲前缘亚相直接超覆在其下的半深湖—深湖亚相沉积之上, 显示存在明显的相突变。以上证据表明, 在钻 / 测井剖面上将 KSB6 定在此处是有较好的依据的。在 Fula 地区的各井此界面有相似的特征, 与 Abu Gabra 组上 / 中段的界线基本一致, 较易识别。

在地震剖面上识别不整合及与其可以对比的整合要比在钻井剖面上容易, 尤其是在坳陷边缘的地震剖面上, 反映不整合的削截、上超等特征一般较为明显。研究区内 Abu Gabra 组的顶、底界面是较大的不整合面, 两个界面分别对应于同裂谷期不整合与后裂谷期不整合<sup>[3]</sup>。在过坳陷边缘的地震剖面上, Abu Gabra 组顶界面的不整合特征明显, 界面附近的削截和上超现象常见。在坳陷中心的地震剖面上, 这种上超和下超现象不是很明显, 但是可以见到界面上下地震相特征的差异。如在 SD84-234 剖面上, 在坳陷中

心附近, KSB8 表现为一连续性好的强轴, 界面之下为中振幅—好连续—平行—席状反射, 界面之上则为弱振幅中—差连续亚平行席状反射 (图 4-a)。其沉积学意义很可能是代表了层序界面之上的 Bentiu 组河流相地层直接覆盖在 Abu Gabra 组浅湖—半深湖地层之上。

除了根据地震反射界面的反射终止关系识别层序界面外, 地震相变化也可以做为划分层序的一个依据。尤其是在坳陷的各次凹内, 下部两个层序 K<sub>1</sub>SI 和 K<sub>1</sub>SII 埋藏较深, 层序界面横向追踪存在困难, 但是可以大致识别出 2 个不同的地震相单元, 下部单元以中—弱振幅中—差连续为特征, 上部单元则表现为强振幅好连续性 (图 4-b)。虽然图中 2 个地震相单元各自的特征在横向上可能会发生变化, 但二者之间始终存在差异, 正是根据这种差异实现了 Fula 坳陷南部次凹内下部 2 个层序的划分与对比。

除了层序界面之外, 层序内部的初始湖泛面和最大湖泛面也是层序地层分析中的关键界面<sup>[10]</sup>。前者将低位体系域与湖侵体系域分隔开, 后者则是划分湖侵体系域与高位体系域的界线。鉴于地震资料的品质较差, 并未在地震剖面上划分体系域, 湖泛面的识别和体系域的划分主要是在钻 / 测井剖面上进行的。

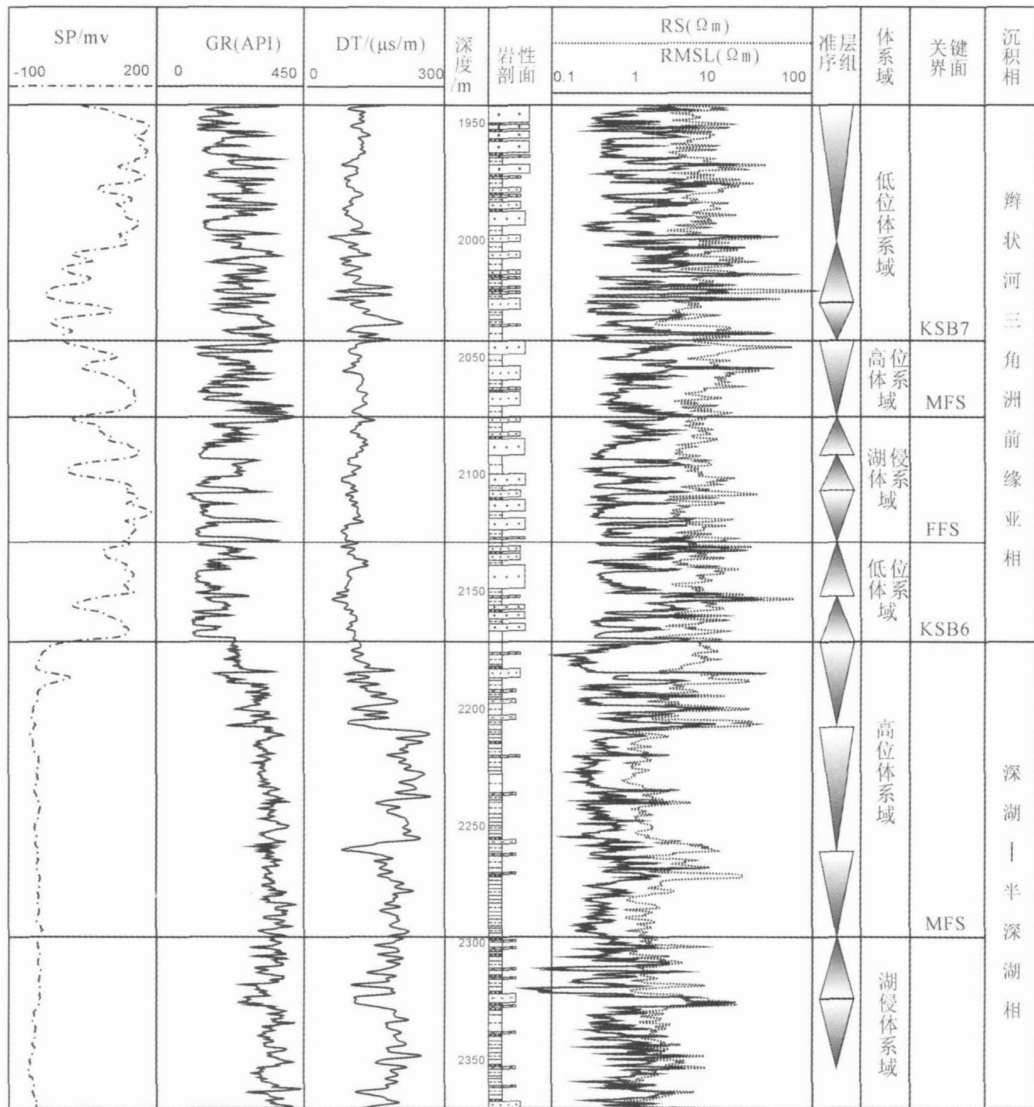


图 3 Muglad 盆地 Fula 坳陷 FC-3 井关键层序地层界面的识别

Fig. 3 The identification of key sequence surfaces in Well FC-3 of Fula depression, Muglad Basin

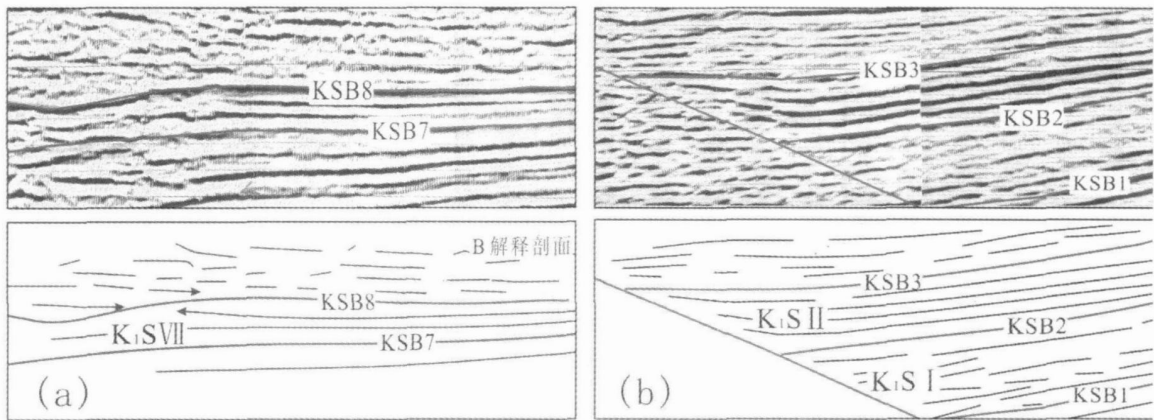


图 4 Muglad 盆地 Fula 坳陷层序界面在地震剖面上的识别特征

Fig. 4 The seismic character of sequence boundaries of Fula depression, Muglad Basin

1.2 湖泛面的识别

初始湖泛面代表了盆地第一次大规模的湖平面上升,多发生在低水位期进积作用达到最大位置之后,因此该界面常与最大进积面一致<sup>[11]</sup>。但是在水体相对较深的浅湖—半深湖位置,或由于物源供给的变化,低位域可能由几个退积准层序组构成,初始湖泛面则可能位于退积准层序组向进积准层序组转换的位置(图 3)。另外,湖侵过程会造成湖盆的扩张,使湖泊范围较低位期扩大,由此,侧向上湖侵体系域沉积物可能直接覆盖在低水位期的剥蚀区或沉积物过路区之上,其结果是由盆地内部向盆地边缘初始湖泛面与层序界面重合。

最大湖泛面在钻 测井剖面上主要是根据准层序

组的叠加样式来识别,一般将其置于退积准层序组叠加样式向进积准层序组叠加样式转换的位置(图 5)。由图 5 可见, M-21 井 K<sub>1</sub>SVI 层序的湖侵体系域由 5 个退积准层序组叠加而成,高位体系域由 3 个进积准层序组叠加而成,最大湖泛面位于退积准层序组向进积准层序组转换的位置处。在该界面上下沉积物的岩电特征也存在较为明显的变化:如界面之下的湖侵体系域沉积物以深灰色、灰色泥页岩为主,夹中—细砂岩,与其上部的高位体系域相比,砂层个数少,但单砂层厚度较大;相应地,湖侵体系域砂体的测井曲线为齿化箱形,而高位域则主要为锯齿状(图 5)。在 Fula 坳陷的钻井剖面上多数最大湖泛面具有上述的特征。

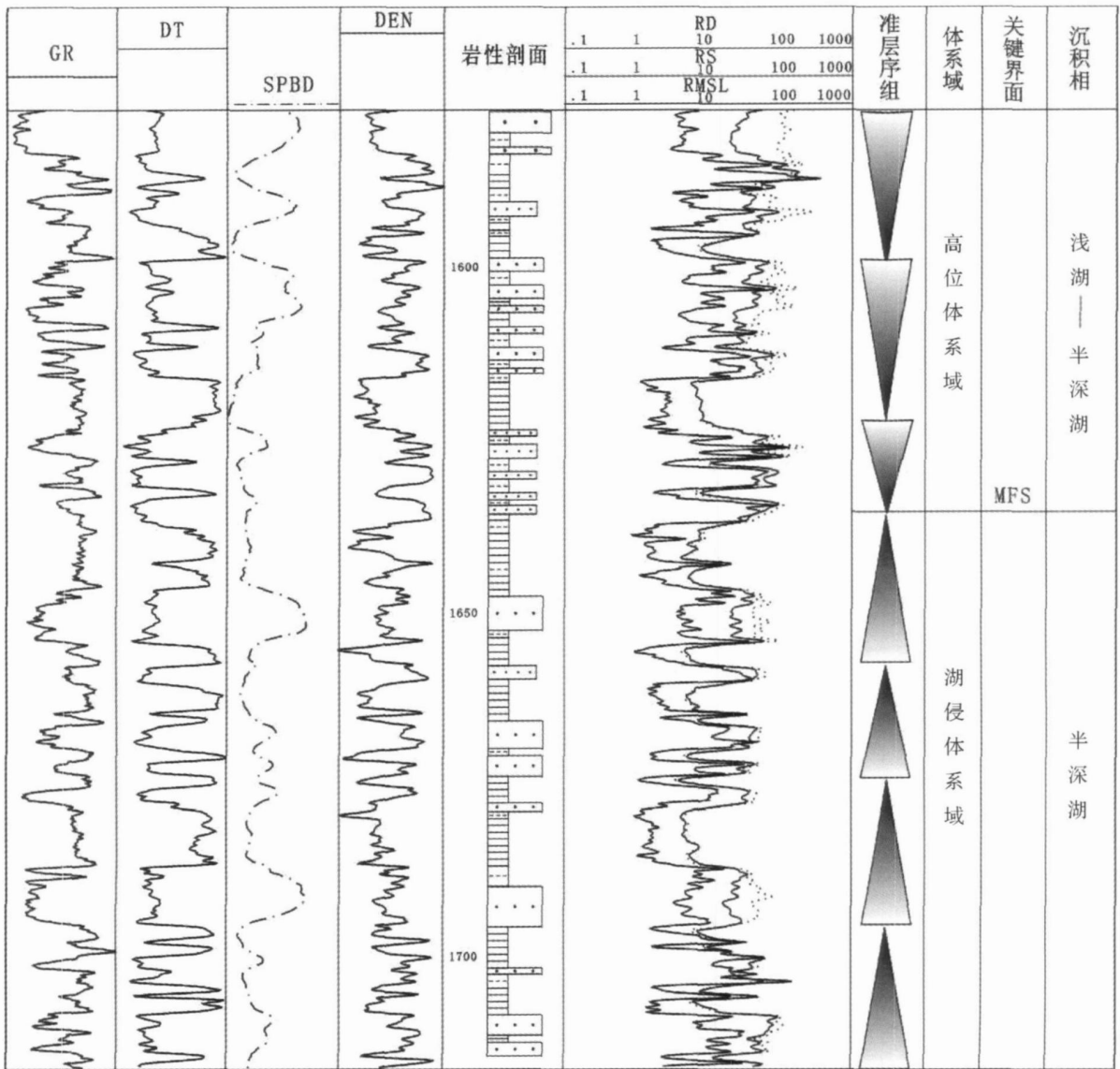


图 5 Muglad 盆地 Fula 坳陷 M-21 井 K<sub>1</sub>SVI 层序最大湖泛面特征

Fig 5 The maximum flooding surface of Well M-21 in Fula depression, Muglad Basin

表 1 Muglad 盆地 Fula 坳陷地震—钻井层序地层划分方案

Table 1 Well log and seismic sequence stratigraphic scheme of Fula depression, Muglad Basin

钻井分层				地震波组	层序方案		湖平面变化 降 ← 升 →	裂谷作用																									
					樊太亮	本文																											
第三系	白垩系	Zeraf	Cycle-3	T4	SH	层序	超层序	↓																									
		Adok																															
		Tendi																															
		Nayil																															
		Amal																															
	白垩系	上统	Darfur	Cycle-2	T4 <sup>1</sup>	SG	层序	超层序	↓																								
		下统	Bentiu								Cycle-1	T5	SF	层序	超层序	↓																	
			上段															A Gabra	T6	SE	K <sub>1</sub> S <sub>VI</sub>	K <sub>1</sub> SS <sub>III</sub>	↓	晚期	第一裂谷旋回裂谷期								
																										中段	T6 <sup>1</sup>	SD	K <sub>1</sub> S <sub>V</sub>	K <sub>1</sub> SS <sub>II</sub>	↓	中期	
下统	下段	Tg	SA+SB	K <sub>1</sub> S <sub>II</sub>	K <sub>1</sub> SS <sub>I</sub>	↓																											
侏罗系	?								Tg	SA+SB	K <sub>1</sub> S <sub>I</sub>	K <sub>1</sub> SS <sub>I</sub>	↓																				

1.3 层序划分方案

由于在钻井层序划分中考虑了地震资料, 而在地震层序界面的识别中又结合了钻井资料, 所以地震层序方案是与钻井层序划分是一致的。所不同的是在钻井剖面上各层序均识别出了低位、湖侵和高位体系域, 而在地震剖面上, 由于受地震反射分辨率的限制, 并没有对三级层序的内部构成做进一步的分析。两种资料是通过合成地震记录和测井曲线的深度—时间转换结合在一起的。工作中对 Fula 坳陷的十几口井进行了合成地震记录标定, 对所有揭示 Abu Gabra 组的钻井的测井曲线进行了深—时转换, 通过这种标定, 可以对 Abu Gabra 组中、上段的各种层序地层界面对比与识别, 实现了钻井、地震层序划分的统一 (表 1)。

2 沉积相类型

根据钻 测井资料分析及地震资料的预测, 研究

区内 Abu Gabra 组的沉积相类型包括河流相、扇三角洲相、三角洲相、近岸水下扇相及湖相。

2.1 河流相

河流相主要分布在 Abu Gabra 组下段的两个层序内 (K<sub>1</sub>S<sub>I</sub>、K<sub>1</sub>S<sub>II</sub>) 是盆地发育早期充填的产物。从 K<sub>1</sub>S<sub>III</sub> 层序开始, 整个 Fula 坳陷为湖泊所占据, 河流相沉积退出研究区之外。钻井没有揭示到河流相沉积, 相的判别与相分布的范围都是根据地震资料来实现的。一般是将下部两个层序中的杂乱相反射地震相或亚平行反射地震相解释为河流相 (图 6)。

2.2 扇三角洲相

扇三角洲相仅发育在东北部断阶缓坡带上, 沉积相的确定主要是依据 A-1 井的钻 测井资料及该区的的海震资料, 并辅助以 Fula 坳陷的古地理、古构造格局 (图 1)。

由图 7a 可见, A-1 井 K<sub>1</sub>S<sub>III</sub> 层序高位域厚近 100 m 由 6 个准层序组构成, 其中进积准层序组 5 个, 退

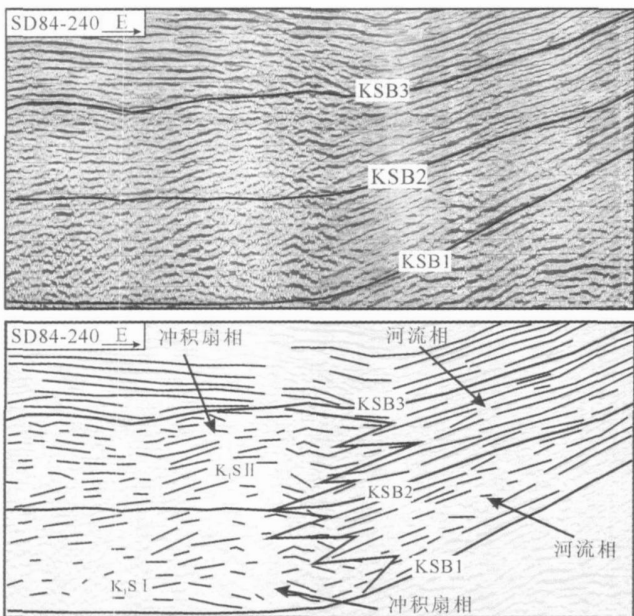


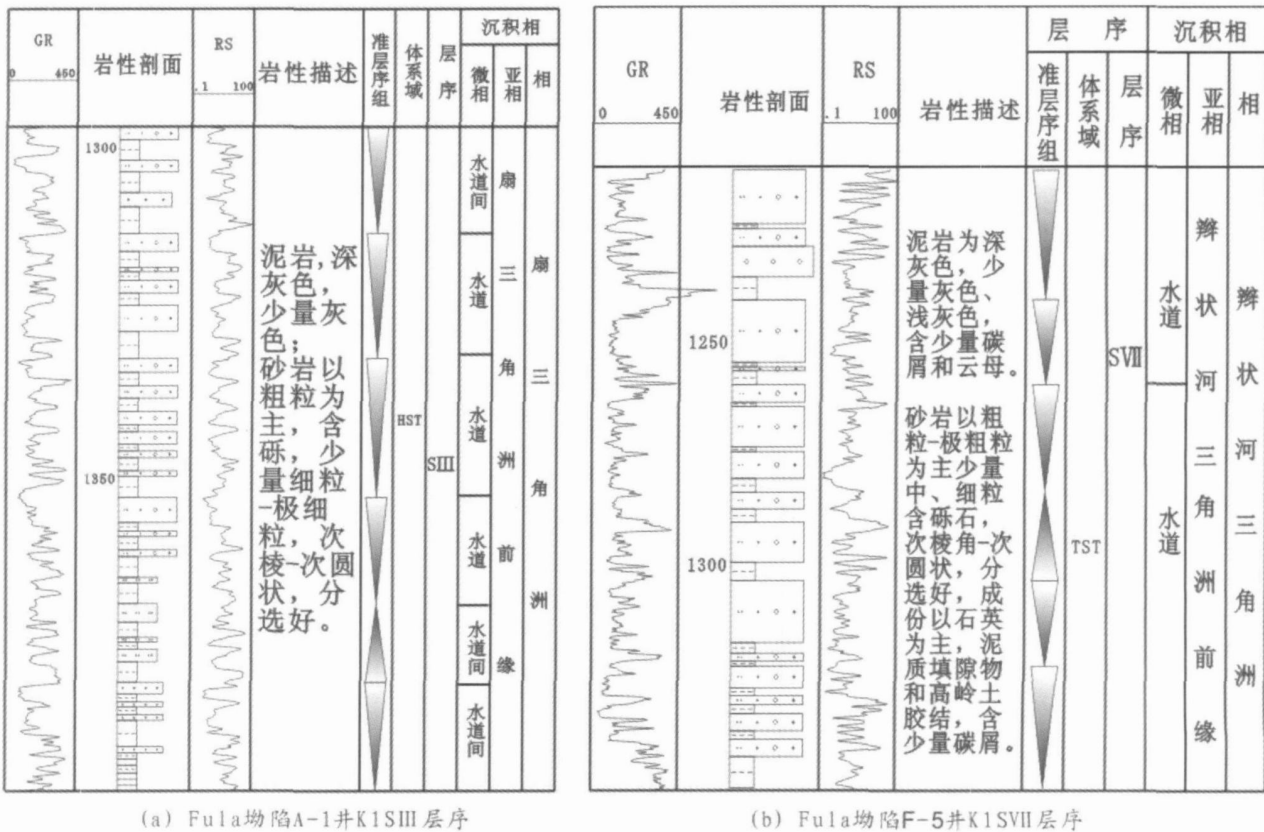
图 6 Muglad盆地 Fula坳陷 SD84-240剖面上河流相的地震反射特征

Fig 6 The seismic reflection character of alluvial-fluvial facies on profile SD84-240 in Fula depression Muglad Basin

积准层序组 1 个。从泥岩颜色以暗色为主的特征来看,它是处于水下的沉积体,从岩性组合特征来看基本上是砂、泥岩不等厚互层的特征,但砂岩的分选和磨圆显示沉积物经历了较长距离的搬运。从各条曲线特征来看,该段沉积的旋回性不是很明显,但曲线特征与岩性变化特征吻合较好,基本上反映了砂、泥岩剖面的变化特征。综合考虑该井所处的古地理特征,将它定为扇三角洲相,为扇三角洲前缘沉积,下部 2 个准层序组砂岩粒度较细,百分含量较低,以扇三角洲前缘分流河道间微相为主,其上的 3 个进积准层序组以含砾砂岩沉积为主,为扇三角洲前缘分流水道沉积,最上部的 1 个准层序组则为分流河道间沉积。

### 2.3 辫状河三角洲相

辫状河三角洲相主要分布在研究区的东南部,不同层序分布范围有所不同,纵向上主要分布在  $K_1SIII \sim K_1SVII$  层序。F-5井是较为典型的辫状河三角洲沉积。由图 7b 可见, F-5井  $K_1SVII$  层序主要由砾岩、砂岩、泥岩组成。其中砂、砾岩厚度较大,占 62%,泥岩较薄,占 38%。砂岩以粗粒、极粗粒为主,含砾,成份



(a) Fula坳陷A-1井K1SIII层序

(b) Fula坳陷F-5井K1SVII层序

图 7 Muglad盆地 Fula坳陷扇三角洲、辫状河三角洲钻/测井特征

Fig 7 The well logs character of fan delta and braided delta in Fula depression Muglad Basin

以石英为主,磨圆为次棱角一次圆状,分选好。泥岩颜色为深灰色,少量灰色、浅灰色。砂泥岩中均含碳屑。相应地,自然伽马曲线是以尺化箱形为主。从上述岩性—电性资料来看,该段为粗粒的水下碎屑流沉积。与图 7 中 A-1 井的扇三角洲沉积特征相比, F-5 井的沉积旋回性较好,在泥岩段, GR 曲线出现明显的高值尖峰,这些高 GR 值段在其它测井曲线上也有相应的响应(图 7)。在层序分析中,准层序组的界线一般与这些高值点相吻合。从各准层序组的岩性组成来看,各准层序组,尤其是进积准层序组主要由砂、砾岩组成,泥岩含量较少。这种特征与辫状河三角洲前缘水下分流河道的特点很接近。按上述钻 测井特征,参考区域地质背景资料,将该段定为辫状河三角洲前缘沉积。

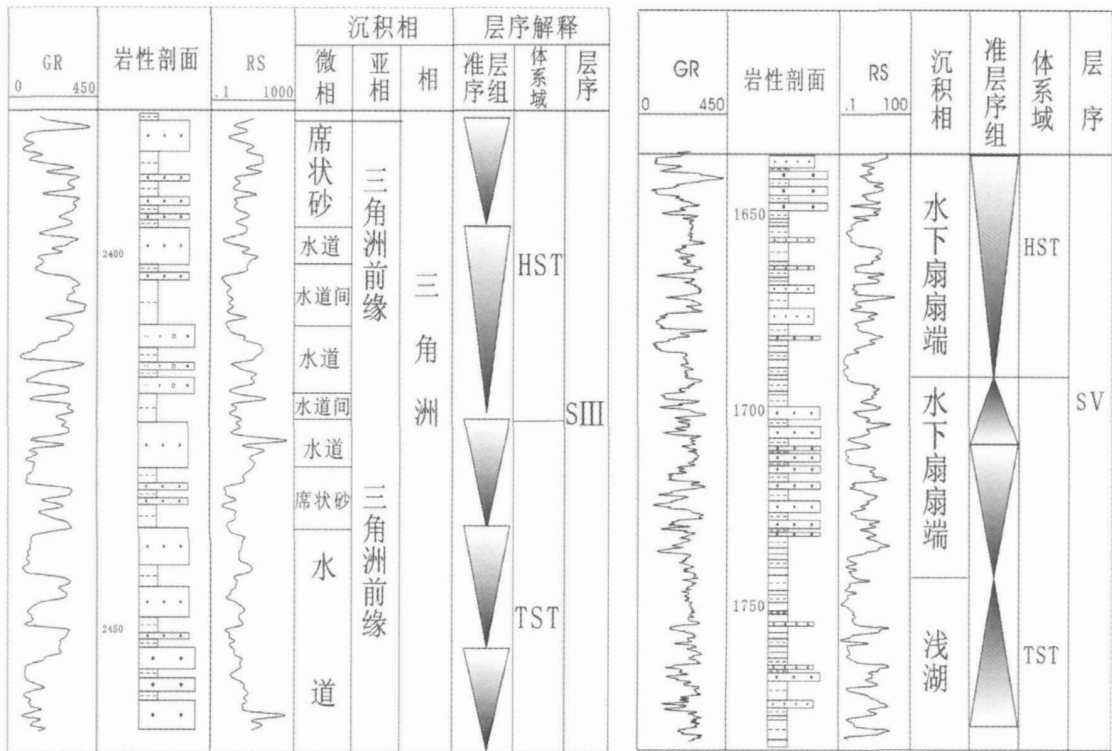
### 2.4 三角洲相

除了东北部的扇三角洲相和东南部的辫状河三角洲相之外,在坳陷的西北部还发育有三角洲相,由于该三角洲很少有钻井揭示(仅 M-23 井钻遇),其存在及分布范围主要是在地震资料上识别出来的。根据其延伸较远的特点,也根据 M-23 井揭示的岩—电特征,我们认为它可能与西北部的扇三角洲和东南部

的辫状河三角洲存在不同,认为它可能更接近于正常的三角洲沉积(图 8a)。M-23 井的三角洲沉积可能就受此物源的影响。由图 8a 可见, M-23 井 K<sub>1</sub> SIII 层序的湖侵体系域和高水位体系域在岩性与电性特征上与 F-5 井 K<sub>1</sub> SV 层序的辫状河三角洲存在差异。从岩性特征上来看,该井的三角洲前缘沉积中砂岩的粒度、砂层的厚度和砂岩的百分含量要比 F-5 井的小,纵向上,砂、泥岩是互层状而不是象 F-5 井显示的泥岩以薄夹层的形式产出。电性特征上,该井的自然伽马曲线中有钟形、漏斗形、锯齿形和箱形,而 Fula-5 井则以尺化的箱形为主。

### 2.5 近岸水下扇相

近岸水下扇主要分布在边界断层下降盘的陡坡带,它们在 Fula 坳陷的大规模湖侵期沉积的 K<sub>1</sub> SIII、K<sub>1</sub> SIV、K<sub>1</sub> SV 层序内发育广泛。由于西界断层活动强、断距大,古地形坡度陡,因此,该类沉积相主要发育在西界断层下降盘。另外在东界断层断距较大的部位也发育有近岸水下扇相, FE-4 井就揭示了近岸水下扇扇端沉积(图 8b)。如图 8b 所示,在 FE-4 井 K<sub>1</sub> SV 层序湖侵体系域的上部和高位体系域的下部,各发育一套相对较厚的砂岩,它们的岩性是中、细砂



(a) Fula 坳陷 M-23 井

(b) Fula 坳陷 FE-4 井

图 8 Muglad 盆地 Fula 坳陷三角洲、近岸水下扇钻 测沉积特征

Fig 8 The well log character of delta facies and nearshore subaqueous fan facies of Fula depression Muglad Basin



岩和粗砂岩,这两套粒度较粗的砂岩夹有深灰色泥、页岩隔层,它们的顶部和底部也有厚层状泥岩、页岩将它位分隔开,根据这种地层组合关系,结合平面上地震相组合特征,我们可以将它们确定为近岸水下扇的远端沉积。

## 2.6 湖相

除  $K_1S_I$ 、 $K_1S_{II}$  层序广泛发育河流相沉积外,上述三角洲相、扇三角洲相、辫状河三角洲相、近岸水下扇相都是在湖泊和湖泊边缘的产物,湖泊相在 Fula 拗陷的中段和上段各层序中发育广泛。包括滨—浅湖相、半深湖—深湖相,当然,它们按拗陷的形态呈条带状和环状分布,滨浅湖在边缘,半深湖—深湖相则位于中央。

## 3 沉积体系

通过研究区测井相、地震相综合分析,并结合其它区域地质资料,可以确定 Abu Gabra 组 7 个层序的沉积相及其展布特征<sup>[12]</sup>。从各层序的沉积相图上可以发现,不同层序的沉积相与沉积体之间既有很强的继承性,也有着显著的变化。由于控凹断层活动的差异性,同一时期不同次凹间的沉积相和沉积体系发育条件也存在差异。受不同构造单元的控制,研究区主要发育东北部扇三角洲沉积体系、西北部三角洲沉积体系、东南部三角洲沉积体系、西部近岸水下扇沉积体系、冲积—河流沉积体系、Kaikang 东坡三角洲—湖泊沉积体系。下面按不同构造单元上发育的不同沉积体为主线来说研究区沉积体系的展布(图 9)。

### 3.1 东北部扇三角洲沉积体系

Fula 拗陷东北部断阶带上发育的扇三角洲沉积体系在钻井剖面和地震剖面上都得到了确认(图 7)。该扇三角洲体系自裂谷期早期的  $K_1S_I$  层序沉积时期就开始发育,直至裂谷期晚期的  $K_1S$  层序沉积时它一直存在。平面分布受断层的分布与走向控制,沉积体基本上呈北西向条带状分布,与东北部断阶带断层走向一致,西南边界一般不超过断阶带的西南端。

### 3.2 东南部辫状河沉积体系

东南部辫状河三角洲沉积体系是 Fula 拗陷的又一重要的沉积类型,它的发育始于  $K_1S_V$  层序,并不断扩张,它的存在及发育已在单井、联井剖面上得到了证实(图 7b)。由于该辫状河三角洲是发育在二级层序的湖侵期,湖泊范围不断扩张,所以,在研究区内均为辫状河三角洲前缘沉积。值得注意的一点是它的发育规模与前述西北部的三角洲有彼此消长关系。

前已述及,西北部三角洲自  $K_1S_{III}$  沉积到  $K_1S_{IV}$  层序至  $K_1S_{VII}$  层序沉积,是不断退缩的沉积过程,而后者东南部辫状河三角洲则是自  $K_1S_V$  层序开始至  $K_1S_{VII}$  层序不断扩张的过程。上述变化特点反映的是不同区域在不同阶段构造活动的差异性。在裂谷作用的早、中期,西北构造升降和断层活动较强,东南部较弱,而在裂谷作用的晚期则恰好相反,它们的分界时间大致在  $K_1S_V$ 、 $K_1S_{VII}$  层序沉积时的某一时段。

### 3.3 西北部三角洲沉积体系

西北部的三角洲沉积体系在以前就曾被注意过,但当时认为它是一个小型的扇三角洲<sup>[3]</sup>。本次工作我们根据最新的钻井和地震资料认为它是一个自  $K_1S_{III}$  沉积时期就开始发育的大型三角洲沉积体系,它的展布受中央断裂带北段断槽的控制,呈 NW—SE 向的条带状。实际上,早在  $K_1S_I$ 、 $K_1S_{II}$  层序沉积时期这一物源就开始发育,只不过是当时的沉积类型是冲积—河流体系。随着湖泊的扩张,冲积—河流相退出研究区之外,并开始发育三角洲相沉积。

在  $K_1S_{III}$ — $K_1S_{IV}$  层序沉积时期该物源体系的进积作用最强,三角洲的展布也最大,其影响范围可能达到 Moga-23 井或 Moga-21 井区(图 8a)。随后,由于湖泊的进一步扩张及作为其物源的巴巴努萨隆起的不断剥蚀,该三角洲体系不断向后退缩,到  $K_1S_{VII}$  层序沉积时期,三角洲平原沉积在研究区消失。上述三角洲的条带状分布,体现出中央断裂带断层对该物源体系的发育有控制作用;它在纵向上早期由河流转变为三角洲,中晚期由大规模的三角洲转变为规模较小的三角洲,这种物源体系不断退缩的过程体现了区域构造作用和西界断层活动不断变弱及其对沉积的控制作用。

### 3.4 西部近岸水下扇沉积体系

自  $K_1S_{II}$  层序沉积以来,北部次凹开始发育较广泛的湖泊后就在西界断层的下降盘一侧发育一系列近岸水下扇。它们呈条带状或朵叶状沿断层展布,因无钻井揭示,其主要识别根据是地震反射内部结构河外部形态。从地震相和沉积相分布图来看(图 9), $K_1S_{II}$ 、 $K_1S_{III}$ 、 $K_1S_{IV}$  层序的近岸水下扇规模较大,它分布遍及西界断层的北断、中段、和南段,并由早期的 1 个扇体演变为 3 个扇体。 $K_1S_V$  层序开始,各扇体的规模不断变小,出现的位置也不断南移。这种变化规律是与前述三角洲的演化是一致的。这种一致性实际上是必然的,因为拗陷内所有沉积体系分布是受相同构造背景和断裂构造活动控制的。

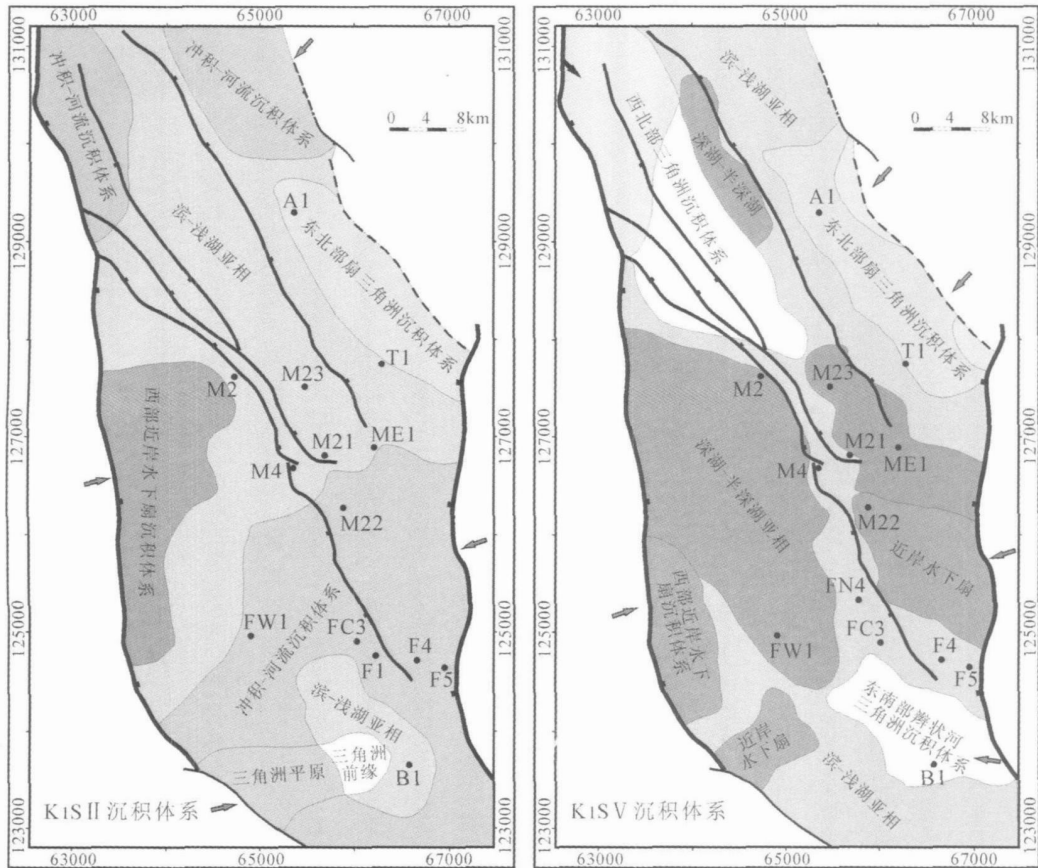


图 9 Muglad 盆地 Fula 坳陷 Abu Gabra 组沉积体系分布图

Fig 9 The depositional systems of Abu Gabra Formation in Fula depression Muglad Basin

### 3.5 早期冲积—河流沉积体系

冲积—河流体系主要发育在裂谷作用早期阶段沉积的 K<sub>1</sub>SI、K<sub>1</sub>SII 层序内。K<sub>1</sub>SI 层序沉积时, 仅在北部次凹内发育一小型湖泊, 其北部为扇三角洲沉积体系, 另外在南部次凹内也可能发育有规模更小的湖泊, 其余地区则为冲积—河流沉积体系。同样因无钻井证实, 主要是据地震相分析成果来识别该体系的展布及演化规律。在北部 Fula 坳陷内, 物源来自东、西边界断层下盘的剥蚀区, 在南部的 Kaikang 东斜坡上物源则仅来自东部。在地震剖面上, 冲积—河流沉积主要表现为杂乱相、杂乱充填相、或楔状充填地震相。与其它沉积体系类似, 冲积—河流体系的平面演化也有由北向南移的特点, 这与湖泊体系首先在北部次凹内发育相适应。由于湖泊的不断扩张, K<sub>1</sub>SII 层序河流相的面积要较 K<sub>1</sub>SI 层序小得多。

## 4 主要结论

根据 Fula 坳陷的钻测井资料和地震资料, 结合前人的研究成果, 将白垩系 Abu Gabra 组划分为 3 个

二级层序和 7 个三级层序。钻井揭示的沉积相类型主要有滨浅湖亚相、半深湖亚相、深湖亚相、三角洲相、辫状河三角洲相、扇三角洲相和近岸水下扇相。以层序为单元划分地震相, 根据地震相类型, 构造背景以及地震相与钻井相的对比, 可以解释出各地震相代表的沉积相意义, 进而编制了 7 个层序的沉积相分布图。上述沉积相在不同层序的发育共形成了 5 个沉积体系, 东北部扇三角洲沉积体系、西北部三角洲沉积体系、东南部辫状河三角洲沉积体系、西部近岸水下扇沉积体系和早期冲积—河流沉积体系。

### 参考文献 (References)

- 1 Ahmed Y.M. Organic matter characterization and environmental control on organic facies and lithofacies of early Cretaceous Lake Asalan NW Muglad Basin Sudan [D]. Tokyo: University of Tokyo 1996 110
- 2 窦立荣. 苏丹被动裂谷盆地的油气成藏机理和成藏模式 [D]. 中国石油大学, 2003: 13-23 [ Dou Liang The reservoir forming mechanism and model of inactive rift basins in Sudan [D]. University of Petroleum 2003 13-23]
- 3 樊太亮, 刘慧峰, 赵中平. 苏丹六区福拉凹陷层序地层分析与砂

- 体预测 [R]. 科研报告, 2002: 66-68 [ Fan Taibang, Liu Hui Feng, Zhao Zhongping. The sequence stratigraphy and sand-body prediction in Fula subbasin, Sudan [R]. Scientific Report, 2002: 66-68]
- 4 Schull T J. Rift basins of interior Sudan: Petroleum exploration and discovery [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72: 1128-1142
  - 5 Abdalla Y Mohamed, Ashcroft W A, Whiteman A J. Structural development and crustal stretching in the Muglad Basin, southern Sudan [J]. Journal of African Earth Sciences, 2001, 32(2): 179-191
  - 6 Gian Battista Vai. Development of the palaeogeography of Pangaea from Late Carboniferous to Early Permian [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 196(2003): 125-155
  - 7 Pletsch T, Erbacher J, Holbourn A E L. Cretaceous separation of Africa and south America: the view from the West Africa margin (ODP Leg 159) [J]. Journal of South America Earth Sciences, 2001, 14(2001): 147-174
  - 8 Abdalla Y Mohamed, Michael J Pearson, William A Ashcroft. Petroleum maturation modelling, Abu Gabra Sharaf area, Muglad Basin, Sudan [J]. Journal of African Earth Sciences, 2002, 35: 331-344
  - 9 Atalay Ayele. Active compressional tectonics in central Africa and implications for plate tectonic models: evidence from fault mechanism studies of the 1998 earthquakes in the Congo Basin [J]. Journal of African Earth Sciences, 2002, 35: 45-50
  - 10 朱筱敏, 康安, 王贵文. 陆相拗陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨 [J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 283-287 [ Zhu Xiaomin, Kang An, Wang Zhongping. Sequence stratigraphic models of depression and faulted-down lake basins [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 283-287]
  - 11 Bosence D W J. Stratigraphic and sedimentological models of rift basins [C] // Sedimentation and Tectonics in Rift Basins, 1998: 9-25
  - 12 Henni Ali, Sayed Mohamed Ibrahim. Sedimentology and Reservoir Geology of the Middle-Upper Cretaceous Strata in Unity and Heglig Fields in SE Muglad Rift Basin, Sudan [D]. Khartoum: Sudan University of Khartoum, 2003

## Lower Cretaceous Sequence Stratigraphy of Fula Depression Muglad Basin, Sudan

YANG Jun-sheng<sup>1</sup> ZHU Xiao-min<sup>2</sup>

(1 University of Petroleum, Dongying Shandong 257061; 2 University of Petroleum, Beijing 102249)

**Abstract** Abu Gabra Formation of Cretaceous Fula depression, which is formed during the first rifting cycle, can be divided into three second-order sequences, namely, sequence K<sub>1</sub>SSI, sequence K<sub>1</sub>SSII and sequence K<sub>1</sub>SSIII. They can correspond separately to the strata deposited in the early, middle and late rift period. Of the three second-order sequences, the sequence K<sub>1</sub>SSI and sequence K<sub>1</sub>SSIII can be subdivided into two third-order sequences, the sequence K<sub>1</sub>SSII into three third-order sequences. Based on the integrated analysis of seismic data, core and well logging, the distribution of sedimentary facies and the prediction of sedimentary system are achieved. Through investigation, 7 types of sedimentary facies are recognized, namely, fluvial deposit, delta fan, delta, braided delta, proximal sub-lacustrine fan, lacustrine facies. Due to the evolution of their sedimentary facies, five chief depositional systems are established in the Fula depression. They are fan delta system in the NE, delta system in the NW, proximal sub-lacustrine fan in the west, braided delta system in the ES and fluvial system produced in the early period. The distribution and evolution of the depositional systems is controlled by tectonics, probably influenced by paleotopography and paleogeography.

**Key words** Muglad Basin, sequence stratigraphy, rift basin, depositional system