

“源-汇”体系主导下的断陷湖盆陡坡带扇三角洲发育模式探讨：以苏丹Muglad盆地Fula凹陷为例

吴冬^{1,2}, 朱筱敏^{1,2*}, 刘常妮^{1,2}, 李雨彤^{1,2}

1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249

摘要: 断陷湖盆陡坡带粗粒三角洲地质研究对于油气勘探至关重要。通过岩心、测井和地震资料综合分析,在苏丹Muglad盆地Fula凹陷陡坡带识别出两类扇三角洲,分别为Jake区锥状扇三角洲和Keyi区片状扇三角洲。Jake区物源供给充足,早白垩世持续供源,形成的锥状扇三角洲岩石颗粒较粗,分选-磨圆差,砂体厚度较厚,分布范围较广;Keyi区物源供给不足,形成的片状扇三角洲岩石颗粒较细,分选-磨圆更好,砂体厚度较薄,分布范围有限。文章将“源-汇”体系理论引入到陡坡带粗粒三角洲研究中,通过对母岩剥蚀供源、搬运以及汇聚条件分析,对两类扇三角洲进行成因解释,并建立相应模式,同时指出,“源-汇”体系只有作为一个整体研究,才能较好地预测断陷湖盆陡坡带扇三角洲分布。

关键词: “源-汇”体系;断陷湖盆;陡坡带;扇三角洲;Fula凹陷

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2015) 04-0653-11

Discussion On Depositional Models of Fan Deltas in Steep Slope Belt of the Rift Basin under the Guidance of Source-to-Sink System Theory: A Case Study from the Fula Sub-basin, Muglad Basin, Sudan

WU Dong^{1,2}, ZHU Xiaomin^{1,2*}, LIU Changni^{1,2}, LI Yutong^{1,2}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: The coarse-grained delta, developed in steep slope belt of a rift basin, usually plays an important role in oil and gas exploration. Based on the analysis of core, logging and seismic data, two types of fan deltas are recognized in steep slope belt in the Fula Sub-basin, Muglad Basin, Sudan. The taper-shaped fan delta in Jake Area is composed of relatively coarse-grained sandstone and conglomerate with more thickness and wide distribution. The sorting and grounding are poor in this type of fan delta deposition. On the contrary, the grain is much finer in the platy fan delta in Keyi Area while the sorting and grounding are relatively good. The sand body is thin and limited spread. The source is sufficient in Jake Area but insufficient in Keyi Area during the Early Cretaceous. This paper brings the theory of source-to-sink system into the fan delta research. Through the study about clastic supplying, transporting and accumulating, the explanation of these two types of fan deltas are given, and the depositional models are built. Only be regarded as a whole, the source-to-sink system study can be utilized to predict the fan delta deposition in steep slope belt of the rift basin.

Key words: source to sink system; rift basin; steep slope belt; fan delta; Fula Sub-basin

Corresponding author: ZHU Xiaomin, Professor; E-mail: xmzhu@cup.edu.cn

收稿日期: 2015-03-18; 修回日期: 2015-08-26

基金项目: 国家油气重大专项“岩性地层油气藏沉积体系、储层形成机理与分布研究”(2011ZX05001-002-005)

作者简介: 吴冬,男,1987年生,博士研究生, E-mail: lisandpw@163.com

*通讯作者: 朱筱敏,1960年生,教授,从事沉积储层方面的教学与科研工作; E-mail: xmzhu@cup.edu.cn

断陷湖盆陡坡带向来以其复杂的地质条件为石油学家所关注 (Marr et al., 2000; 鄢继华等, 2005; 杨波等, 2011)。前人围绕断陷湖盆陡坡带粗粒三角洲沉积特征、储层评价以及内部结构开展了一系列研究 (鄢继华等, 2005; 朱筱敏等, 2013; 陈欢庆等, 2014), 但对扇三角洲的类型, 以及其发育条件认识尚浅。另一方面, “源-渠-汇”体系研究已经成为当下全球沉积学的研究热点 (Allen, 2008; Matenco et al., 2013; Sømme and Jackson, 2013; Sømme et al., 2013); 目前在油气勘探领域“源-渠-汇”的研究十分薄弱, 专家学者主要借鉴其研究思路对“渠”开展研究, 通过对水道沟谷、构造转换带以及坡折带的刻画预测砂体分布。然而随着勘探深入, “源”的地位逐渐凸显出来, 赖维成等 (2010) 发现“沟-扇”理论需要同物源研究结合才能更好地预测砂体。在 Muglad 盆地早期勘探过程中, 由于资料非常有限, “源”的认识不足, 在 Fula 凹陷西南部陡坡带预测相对大规模的近岸水下扇, 钻井证实并不存在。笔者认为, 断陷湖盆陡坡带粗粒三角洲因其物源区距离盆地较近, “源”的影响尤其需要重视。苏丹 Muglad 盆地 Fula 凹陷西部陡坡带南段和北段各自发育粗粒三角洲, 两个扇体无论从形态上或是岩相组合上均存在较大差异, 油气勘探潜

力亦十分悬殊, 本文通过对两个扇体定相、刻画, 分析其形成和发育条件, 进而讨论陆相湖盆陡坡带扇三角洲体系类型、形成机制, 以及油气勘探潜力, 同时为“源-汇”系统在油气勘探领域的应用提供一定的思路。

1 研究区地质概况

Muglad 盆地 Fula 凹陷总体呈近南北向长条状分布。凹陷主体为“两断两凹两斜坡”结构, 两断分别指凹陷西部的控凹断裂和东部断裂, 两凹分别为北部次凹和南部次凹, 两斜坡分别为东北部断阶缓坡和东部半地堑缓坡 (图1)。研究区西部控凹断裂从平面分布来看大致可以分为南、北两段, 北段近邻 Jake 井区, 南段近邻 Keyi-Bara 井区, 为 2 个三维地震区所覆盖, 共 24 口井钻遇 Abu Gabra 组。

Fula 凹陷 Abu Gabra 组沉积于早白垩世初始强烈断陷阶段, 地层厚度大, 发育厚层湖相烃源岩 (童晓光等, 2004; 于潮等, 2007; 杨俊生和朱筱敏, 2008; 张志伟等, 2009), 其内部粗粒三角洲具有得天独厚的油气成藏条件, 对此前人开展了一系列研究 (吴因业和邵文斌, 2000; 杨俊生和朱筱敏, 2008; 关欣, 2012), 由于研究资料精度有限, 认识存在较大差异, 例如在陡坡带北段,

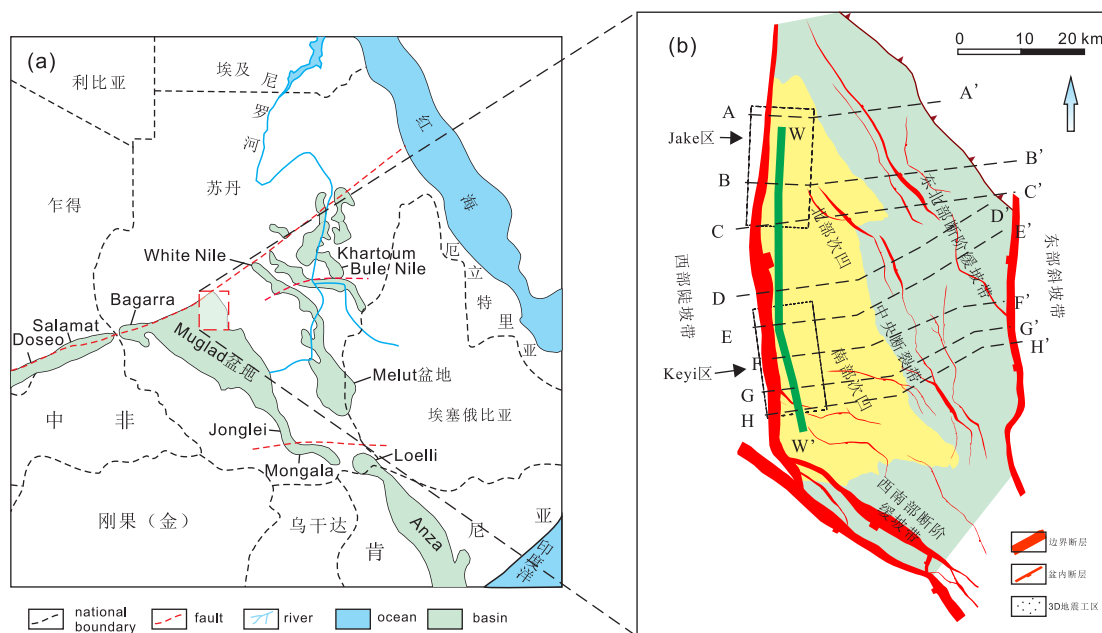


图1 Fula凹陷地理位置(a, 据 Genik, 1993)和构造单元(b)

Fig. 1 Location (a) and tectonic subdivision (b) of the Fula Sub-basin

杨俊生和朱筱敏(2008)认为发育正常三角洲, 关欣(2012)则认为发育近岸水下扇。与此同时中石油在 Fula 凹陷西部陡坡带进行勘探, 并取得了重要的商业发现(张志伟等, 2009)。因此, 在西部陡坡带落实沉积体系类型、刻画沉积体系分布特征, 将为 Fula 凹陷西部陡坡带岩性-地层油气藏勘探奠定坚实的基础。

2 陡坡带粗粒三角洲为扇三角洲

Fula 凹陷 Abu Gabra 组西南厚, 东北薄。将西部陡坡带大致分为南、北两段, 沉降中心位于西部陡坡带南段, 继承性发育, 自下而上可以划分出 5 个三级层序, 分别为 SQ1~SQ5。对西部边界断裂位移量的分析表明, 北段在 SQ5 和 SQ4 沉积期活动强度相对较低, 南段相对较高, 约为同期北段的 2 倍(图 2)。Fula 凹陷西部陡坡带在 Abu Gabra 组沉积扇三角洲(吴冬等, 2015), 主要发育前缘亚相, 垂向上具有明显的进积旋回特征, 每个旋回从下至上发育滨浅湖、扇三角洲前缘和扇三角洲平原, 相应的, 沉积物粒度由细变粗。

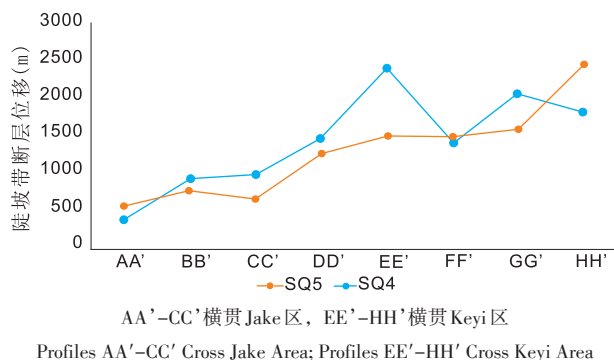


图2 苏丹 Fula 凹陷西部边界断层在不同构造期内的位移曲线

Fig. 2 Displacement curves of western boundary fault of the Fula Sub-basin in different tectonic stages

2.1 扇三角洲平原

扇三角洲平原系扇三角洲水上部分, 其岩石类型、结构和构造特征类似于冲积扇沉积, 重力流成分较多, 主要分布在 Fula 凹陷西部陡坡带北段, 湖平面相对下降时期。在 Jake 区主要通过岩心识别扇三角洲前缘和平原, 扇三角洲平原砂岩含量大于扇三角洲前缘, 电阻率和声波曲线多呈齿化箱形, 揭示了水道沉积, 而下伏的扇三角洲前缘电阻率和声波曲线多为指形, 反映了湖相砂

泥岩间互沉积。

2.2 扇三角洲前缘

扇三角洲前缘系冲积扇入湖之后的水下沉积部分, 为扇三角洲的主体部分, 主要发育水下分支河道、水下分支河道间和河口坝等微相。由于在陡坡带地形陡, 相带较窄, 扇三角洲水道改道频繁, 河口坝微相分布有限。研究区扇三角洲前缘岩石类型以砂砾岩、中粗砂岩、中细砂岩为主, 夹粉砂质泥岩、灰绿色或灰色泥岩, 相对于扇三角洲平原, 扇三角洲前缘重力流成分减少, 牵引流成分增加。

总体上 Fula 凹陷西部陡坡带粗粒三角洲富含牵引流成分, 且未见扇体与深湖相泥岩伴生, 测井响应多为反韵律, 指示扇体多期进积, 这与重力流成分为主, 测井响应多正韵律的近岸水下扇沉积完全不同; 同时断陷湖盆经典沉积模式陡坡带基本不发育正常三角洲或辫状河三角洲, 因此推断 Fula 凹陷西部陡坡带粗粒三角洲为扇三角洲。

2.3 扇三角洲发育规律

断陷湖盆陡坡带砂砾岩体多具有“横向分带、纵向分期”特征。横向分带: Fula 凹陷 Abu Gabra 组西部陡坡带扇三角洲平面上可以划分两个区域: 北部扇三角洲物源自西往东, 携带大量粗碎屑物质注入北部次凹, 形成较大规模的 Jake 扇三角洲, 南部扇三角洲物源同样自西往东, 携带少量中-粗碎屑物质注入南部次凹, 形成较小规模的 Keyi 扇三角洲。纵向分期: 纵向上 Abu Gabra 组自下而上分为 5 个三级层序, 分别对应 5 个构造阶段: 初始断陷阶段、初次沉降阶段、短暂抬升阶段、剧烈沉降阶段和短暂回返阶段(吴冬等, 2015), 西部陡坡带 Jake 和 Keyi 扇三角洲各自继承性发育, 随着这 5 个演化阶段发生进积-退积过程。初始断陷阶段形成底部 SQ1, 该时期北部 Jake 区和南部 Keyi 区主要发育冲积平原和扇三角洲, 在北部次凹和南部次凹发育孤立的湖泊; 初次沉降阶段形成 SQ2, 该时期湖平面初次上升, 淹没凹陷大部分地区, 西部陡坡带扇三角洲位于水下; 短暂抬升阶段形成 SQ3, A/S 值的降低致使 Jake 区扇三角洲发生进积, 由于物源供给不足, Keyi 区 A/S 值较高, 扇三角洲规模较小; SQ4 剧烈沉降阶段, 湖平面快速上升, 在西部陡坡带 Jake 扇三角洲退积, 前端深湖区发育重力流沉积体, Keyi 区

则不发育扇三角洲; SQ5短暂回返阶段, Jake扇三角洲进积, 主体为平原亚相, Keyi扇三角洲再次发育, 厚度薄, 分布范围窄。

3 南北段扇三角洲沉积特征对比

作为西部陡坡带最重要的沉积相类型, 北部Jake扇三角洲前缘和南部Keyi扇三角洲前缘在岩性成分、沉积构造以及发育规模均存在较大差别。

3.1 岩性分析

对6段取心样本分析发现, Jake区扇三角洲岩性较粗, 富含砂砾岩、中砂岩和角砾岩, Keyi区扇三角洲岩性较细, 富含粉砂岩、极细砂岩和中砂岩。岩石类型均以石英砂岩为主, 石英含量普遍大于65%。Jake区石英含量55%~80%, 长石含量18%~28%, 岩屑含量5%~20%, Keyi区石英含量65%~83%, 长石含量15%~25%, 岩屑含量2%~12%, Jake区石英含量略低于Keyi区, 长石和岩屑含量则略高(图3)。

3.2 沉积构造

岩心观察发现, 在北部Jake区, SQ4扇三角洲岩性主要以砂泥岩为主, 夹砾岩, 不同亚段岩性组合不同, 上段以粗砂岩和砾岩为主, 砂砾岩分

选、磨圆中等-好, 具多个冲刷面, 表现为叠加正韵律岩性序列, 揭示了牵引流沉积特征。中段砾石含量增加, 且砾石体积较上覆两个亚段更大, 分选中等, 磨圆中-好, 多处砾石直立分布, 且观察到上层砾石较大, 下层砾石较小的现象, 这体现了重力流成分的增加(图4)。扇三角洲刚形成时, 重力流成分较多, 随着扇体往前推进, 牵引流成分越来越大, 据此认为上段为扇三角洲前缘沉积, 中段为扇三角洲平原-前缘沉积, 总体来看Jake区扇三角洲岩性较粗, 砂砾混杂。Keyi扇三角洲前缘主要发育中-细砂岩, 砾石含量较少, 砾石以细砾为主。砂岩发育楔状交错层理, 冲刷下伏深灰色泥质粉砂岩, 冲刷面上可见泥砾, 泥砾磨圆中等, 最大的直径约2.5 cm(图4), 砂岩中滑塌变形构造和生物扰动常见, 液化脉则指示了重力流成因机制。

3.3 发育规模

就扇体规模来看, 陡坡带南段Keyi扇三角洲在Abu Gabra组厚度较小, 主要沉积于AG1段, 其内部单砂层呈现正韵律、反韵律和复合韵律特征, 韵律厚度6~8 m, 累计厚度约50~60 m(图5), 平面延伸有限, 分布面积约50 km², AG2段扇体展布范围几乎为零。Abu Gabra组沉积时陡坡带

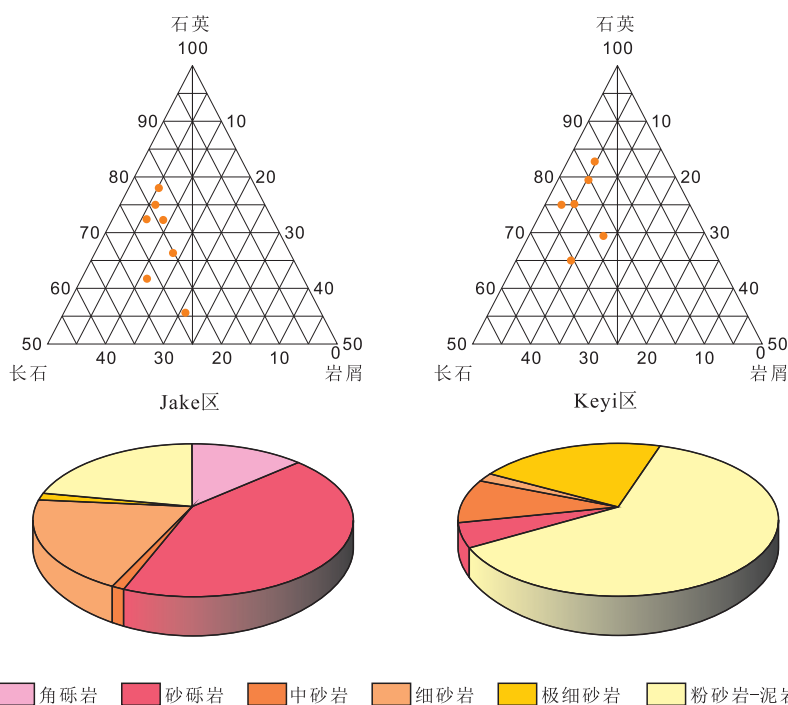


图3 Fula凹陷西部陡坡带扇三角洲岩石学特征

Fig. 3 Lithological characteristics of fan deltas in steep slope belt of the Fula Sub-basin

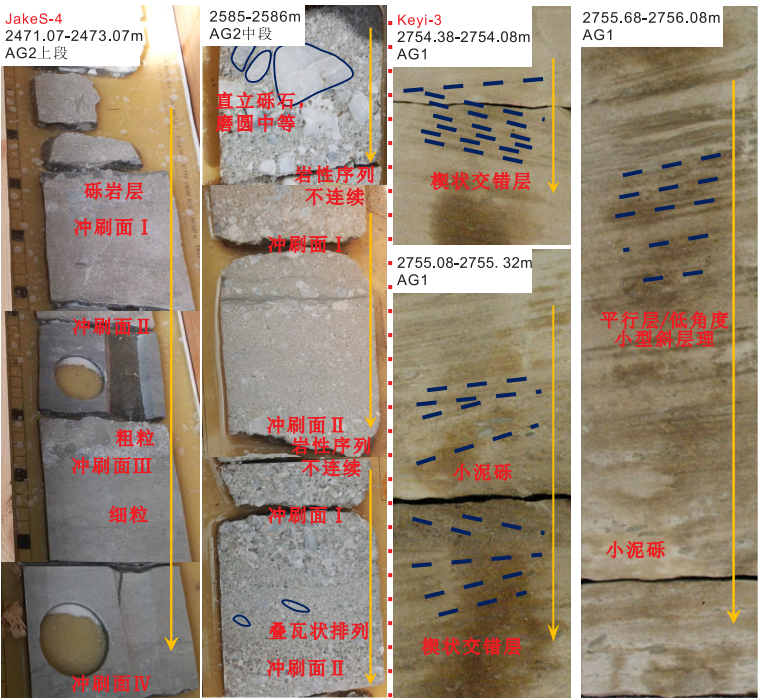


图4 Fula凹陷Jake和Keyi扇三角洲岩心特征

Fig. 4 Core characteristics of the fan deltas in the Jake and Keyi Area in the Fula Sub-basin

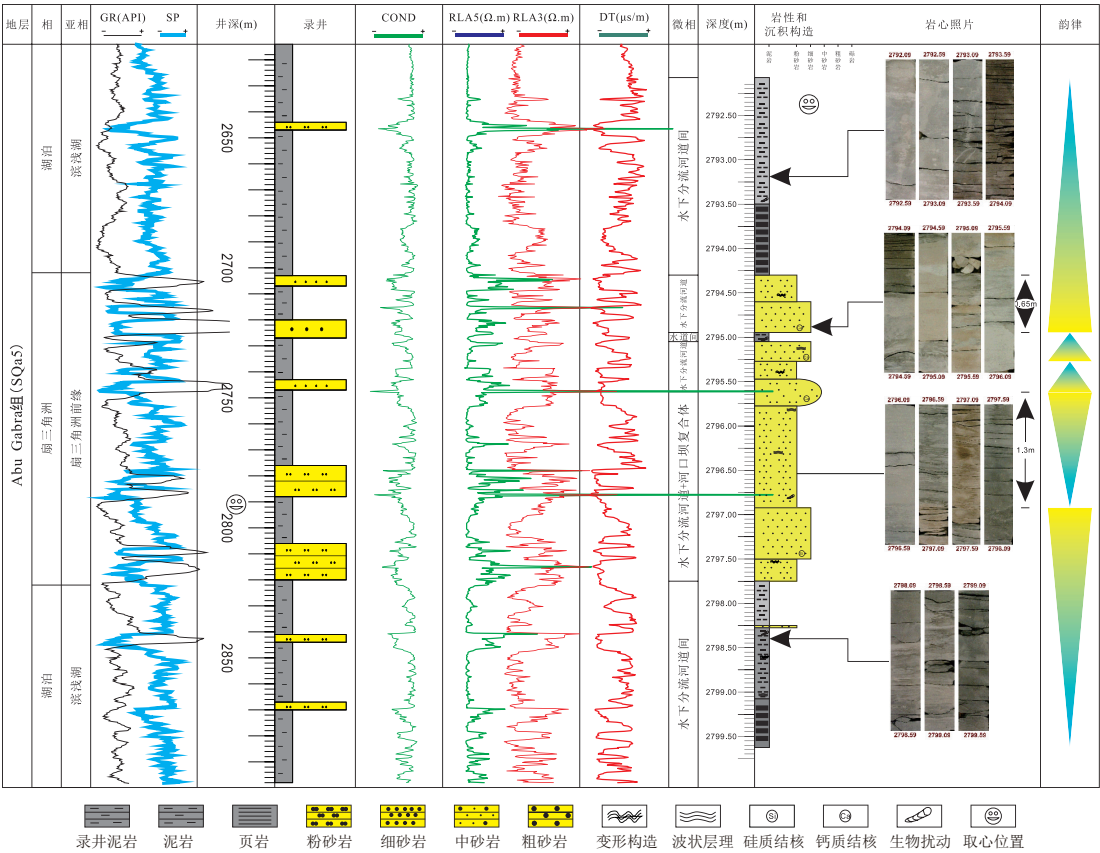


图5 Fula凹陷Keyi扇三角洲纵向发育特征与岩相组合

Fig. 5 Vertical development and lithofacies characteristics of the fan delta in the Keyi Area

北段Jake扇三角洲随湖平面升降经历了多次进积-退积过程,其砂体横切断裂伸向北部次凹呈扇朵状分布,砂体呈现正韵律多期叠置特征,根据测井解释结果大致推断Jake区AG1单砂层厚度10~30 m,累计砂岩厚度100~150 m,扇体展布范围约70 km²,AG2单砂层厚度6~15 m,累计砂岩厚度50~150 m(图6),扇体展布范围约35 km²。

前期研究经验发现陡坡带粗粒三角洲发育规模和粒度都与边界大断裂的活动性密切相关,活动性强的,断层位移较大,形成的扇三角洲或近岸水下扇厚度越大,反之则越小。然而综上可知Fula凹陷陡坡带发育的扇三角洲其厚度和平面分布范围与紧邻的边界断层错断幅度不成正比,断层活动更强烈的地区同生的扇三角洲规模反而更小,断层活动相对弱的地区发育的扇三角洲规模更大。

3.4 地震响应

地震剖面上陡坡带北段Jake扇三角洲响应明显,靠近西部陡坡带多为杂乱反射,往湖盆方向过渡为前积反射(图7e),南段Keyi扇三角洲发育

层段在地震剖面上响应不明显,主要为强振幅、高连续、平行席状反射(图7f)。

4 “源-汇”体系决定扇三角洲类型和分布

4.1 扇三角洲类型

前人对断陷湖盆陡坡带扇三角洲进行分类(吴胜和等,1994;陈景山等,2007),总体认为陡坡带扇三角洲粒度粗、分选差、物性差,而缓坡带三角洲粒度细、分选好、物性好。研究表明在Fula凹陷陡坡带这两类扇三角洲均可能发育,北段Jake扇三角洲物源自西往东,自白垩纪以来继承性发育,岩心和井上观察发现其砂砾含量大,累计厚度较粗,反映进入白垩纪以后西部陡坡带北段物源供给充足、强烈,A/S值虽然发生变化,但总体较小。相反南段Keyi扇三角洲在Abu Gabra组沉积期时而发育时而消失,岩石颗粒较细,细砂岩含量很高,累计厚度较薄,反映了物

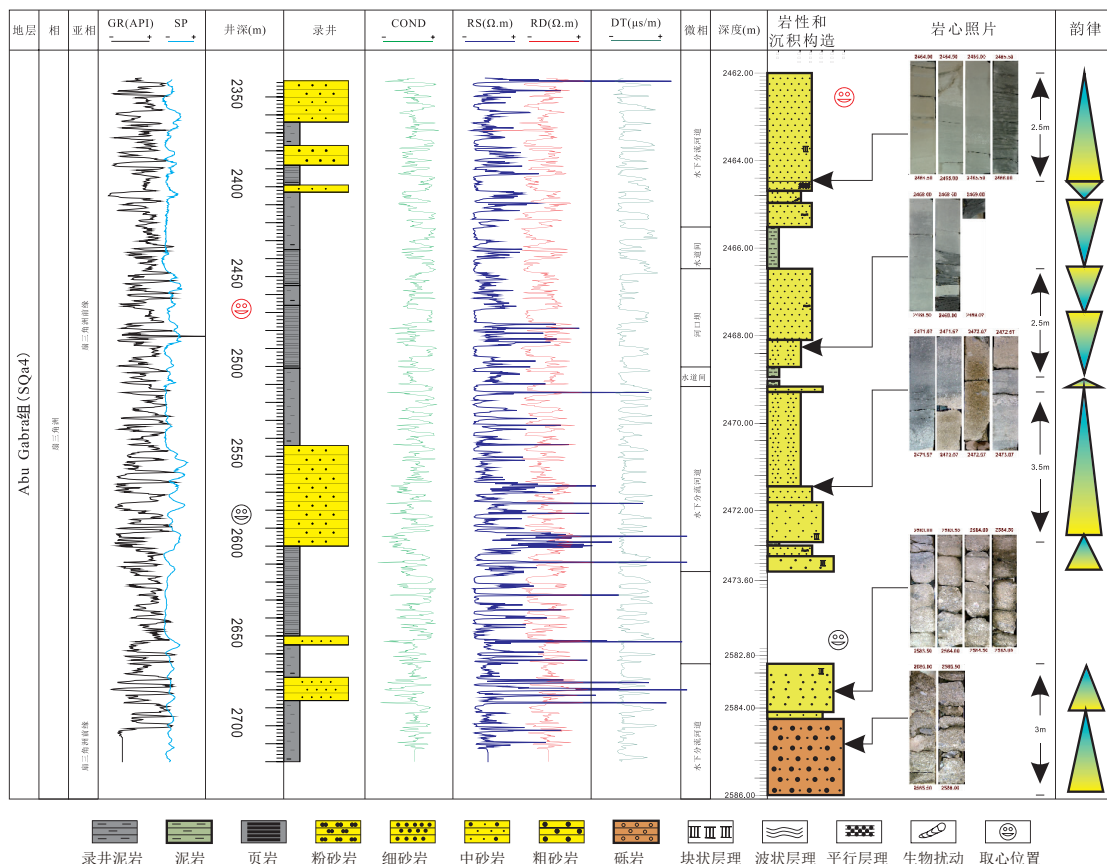
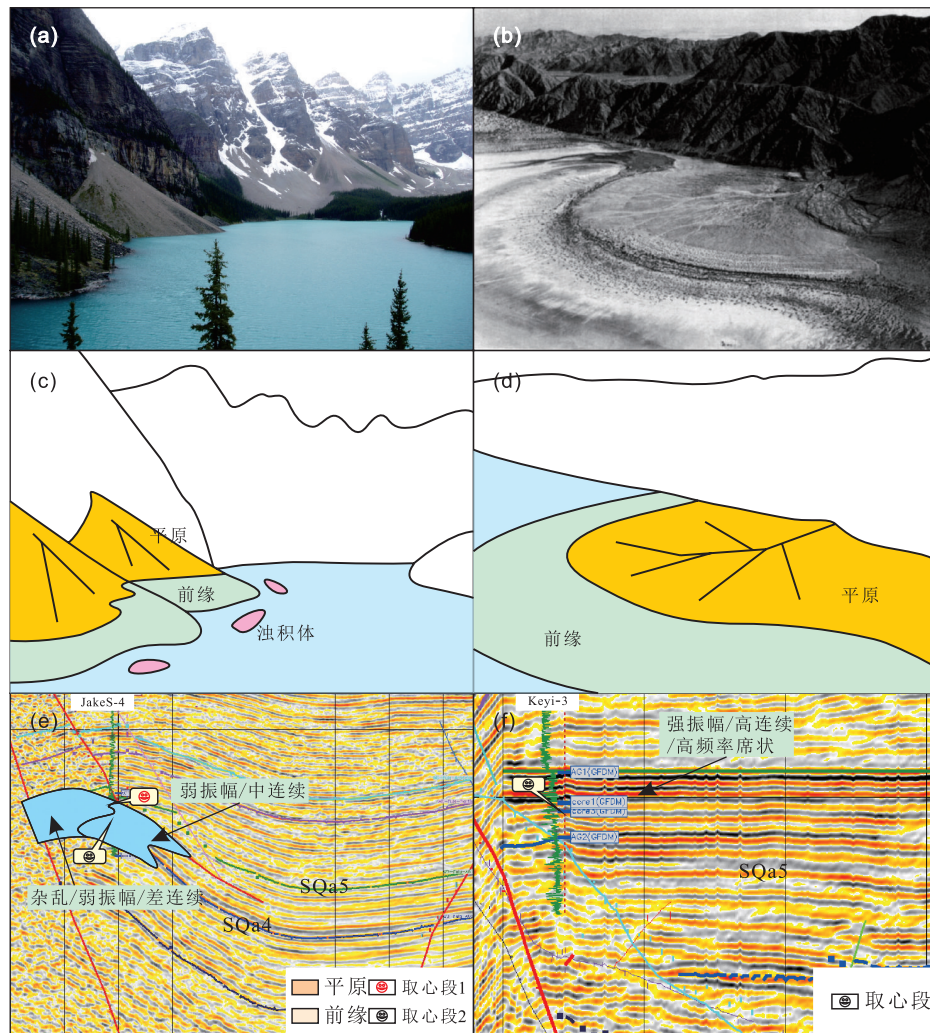


图6 Fula凹陷Jake扇三角洲纵向发育特征与岩相组合

Fig. 6 Vertical development and lithofacies characteristics of the fan delta in the Jake Area



(a) “锥状”扇三角洲 (加拿大班夫国家公园, 照片授权: 朱筱敏, 2015); (b) “片状”扇三角洲 (墨西哥下加利福尼亚半岛, 据 Peter Kresan, 1978, 转引自 McPherson et al., 1987); (c) “锥状”扇三角洲沉积模式; (d) “片状”扇三角洲沉积模式; (e) Jake “锥状”扇三角洲反射特征 (Jake 三维区测线); (f) Keyi “片状”扇三角洲反射特征 (Keyi 三维区测线)

(a) Taper-shaped fan delta (Banff National Park, Canada); (b) Platy fan delta (Baja California, Mexico After Peter Kresan, 1978); (c) Depositional model of a taper-shaped fan delta; (d) Depositional model of a platy fan delta; (e) Seismic reflection character of a taper-shaped fan delta in Jake Area (in Jake 3D Area); (f) Seismic reflection character of a platy fan delta in Keyi Area (in Keyi 3D Area)

图7 “锥状”扇三角洲和“片状”扇三角洲模式

Fig. 7 Models for the taper-shaped fan delta and the platy fan delta

源供给的阶段性和微弱性,从西部陡坡带下盘而来注入南部次凹的物源较少,A/S值主体较大。结合现代沉积考察,对比岩心观察、测井和地震响应特征,认为区内扇三角洲大致可以分为两类:“锥状”扇三角洲和“片状”扇三角洲,Jake扇三角洲应属于前者,Keyi扇三角洲应属于后者。所谓“锥状”扇三角洲外形呈锥形,纵向厚度较大,平面分布相对较窄,在地震剖面上,扇根多呈现杂乱、弱振幅、差连续反射特征,扇端多呈现弱振幅、中连续前积特征,横截面为丘状或透

镜状;“片状”扇三角洲厚度较薄,平面分布范围较大,呈层堆积,地震反射上难以看出三角洲前积特征(S型前积、斜交前积或者楔状前积等,图7),单从沉积特征来看“片状”扇三角洲与辫状河三角洲并无明显差异,传统的沉积学概念里面陡坡带不发育辫状河三角洲,为不引起概念混淆,依然称之为扇三角洲(扇状三角洲)。

4.2 扇三角洲分布特征与控制因素

分析认为,层序地层学和“源-汇”体系研究具有内在紧密关联性。断陷湖盆陡坡带扇三角洲

的分布特征与 A/S 值密切相关, 扇三角洲规模大, 砂体持续加积或进积, 可能的原因只有3条: 其一是可容空间或新增可容空间 (A) 小, 其二是物源供给充足, “S” 较大, 或者上述两点同时发生。“A” 实际上就对应着盆地的“汇”, “S” 对应着盆地的“源”。可以认为“源-汇”体系直接控制着沉积扇体的类型和特征。

就物源供给 (“源”) 来说, 其是沉积物供给之源, 是储集砂体存在的物质基础, 无源则无储层可言, 沉积物源供给对陆相盆地砂体的分布具有极其重要的影响 (徐长贵, 2013)。由于本区资料有限, 很难完成精确的物源分析工作, 本次研究主要通过现象分析和描述反推沉积过程, 给予沉积特征合理的成因解释。“源”是“汇”的起因, “汇”是“源”的记录, 扇体反映物源特征主要体现在两个方面: ①砂体规模指示了供源强度, ②成熟度指示了搬运距离。就现存扇体特征来看, Jake 扇三角洲沉积物粒度粗, 分选-磨圆差, 泥质含量高, 长石和岩屑含量高, 指示了近源快速堆积, Keyi 扇三角洲沉积物粒度细, 分选-磨圆好, 石英含量高, 说明碎屑物质经历了一定距离的搬运才最终堆积下来。虽然现今巴巴努萨凸起区几乎剥蚀夷平, 但两个地区扇三角洲发育的差异性从侧面证实了早白垩纪时巴巴努萨凸起并非“铁板一块”, 均匀剥蚀, 而是存在高低起伏, 远离沉积基准面的高部位剥蚀量较大, 岩石风化剥蚀程度较强, 为盆地提供的碎屑物质较多, 扇体发育的厚度较大, 距离沉积基准面越低, 岩石风化剥蚀程度越弱, 为盆地提供的碎屑物质越少,

扇体发育的厚度越薄。综上不难看出, Jake 扇三角洲距离物源较近, 其母岩区剥蚀强烈, Keyi 扇三角洲距离物源较远, 其母岩区剥蚀较弱 (图8)。

就可容空间 (“汇”) 来说, 目前对于 Fula 凹陷形成和演化的构造背景认识较少, 肯定的是其形成与北部的中非剪切带右旋活动有着直接关系。受中非剪切带影响, Muglad 盆地整体上呈西北宽、东南窄的楔形 (史忠生等, 2014), 代表着北部较强的地应力往南逐渐消减。相比较而言 Fula 凹陷南北两端宽度相近, 因此笔者认为在 Fula 凹陷形成过程中, 北部可能存在一定的挤压, 挤压应力来源于其西部的巴巴努萨凸起, 该论断主要基于以下2个方面的考虑: ①Fula 凹陷南北近等宽, 而北部紧邻中非剪切带, 构造应力强于南部, 伸展幅度应大于南部; ②地层北薄南厚, 沉降中心远离北部中非剪切带, 单个三级层序厚度往北均减薄, 内部逐渐往北超覆的上超点指示了同沉积的基底抬升 (图9)。受该挤压应力的影响, 早白垩纪 Abu Gabra 组沉积期, 凹陷南北犹如“跷跷板”一般, 北部抬升致沉积下来的地层较薄, 且往东北部甚至出现尖灭现象, 由于西部断裂持续发育, 在临近陡坡带北段还是保留了一部分可容空间 (北部次凹) 供砂砾岩体堆积; 南部持续沉降致使可容空间不断增大, 发育巨厚地层, 以湖相泥页岩最为发育, 至 AG1 沉积期, Fula 凹陷断陷幅度减弱, 地层变薄, 南北部可容空间增长差异缩小, 南部 Keyi 区亦开始沉积扇三角洲。

就物源供给和可容空间配置关系 (“A/S” 或

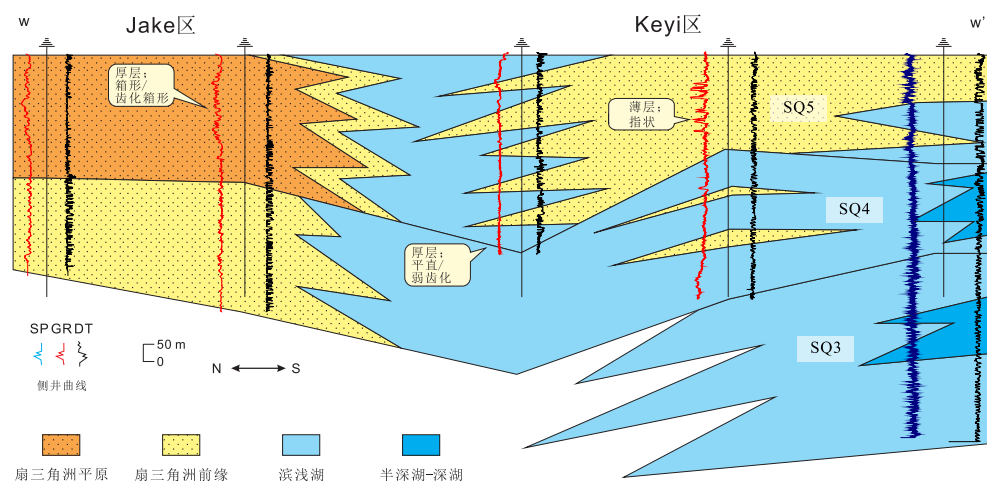


图8 Jake 和 Keyi 区扇三角洲规模对比 (位置见图 1b)

Fig. 8 Contrast in scale between Jake and Keyi fan deltas (See Fig. 1b for the location)

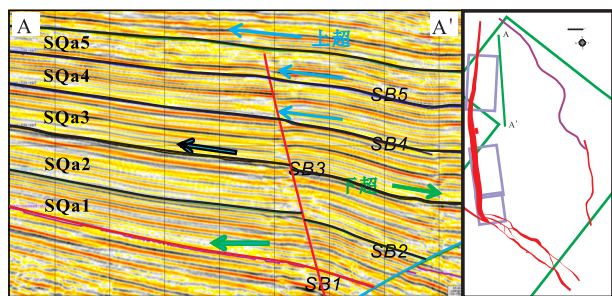


图9 Fula凹陷北部界面反射特征

Fig. 9 Interface characteristics in the north of the Fula Sub-basin

“源-汇”）来说，Jake 区物源供给十分充足，相对的，可容空间增长速率较为缓慢，A/S 值较小，砂地比值高，砂砾岩分布广泛；Keyi 区物源供给不足，同时沉降速率较大，可容空间增长明显，A/S 值较大，砂地比值低，砂砾岩分布极为有限。岩心、录井和测井岩性反演均证实了这一点。

陡坡带不同的断裂组合形成的多级别的构造转换带经常扮演着“渠”的角色，对于扇三角洲砂砾岩入湖具有重要意义，Fula 凹陷陡坡带发育 3 类构造转换带：北部的外凸转换带，中部的内凹转换带和南部的平直转换带。就构造转换带分布来看，Jake 区和 Keyi 区条件相当，均存在较好的碎屑物质疏导通道，但实际发育的扇体特征却是大相径庭。因而，Fula 凹陷陡坡带的事实证明，构造转换带为碎屑物质汇聚、入湖提供了条件，但其作为碎屑物质运移的通道本身与砂砾岩发育没有必然联系，很多情况下也不能控制砂砾岩的岩相特征、岩性序列、沉积类型或发育规模，没有充足的物源，没有合适的汇水空间，构造转换带（“渠”）的作用便不能体现出来，这是日常科研或工作中常常被忽视的地方，一味地强调构造转换带控砂往往会造成储层预测的失利。

5 陡坡带扇三角洲模式和预测

结合上述地质分析推断白垩纪 Jake 区西部邻近地区应发育地形较高的大山，地形较高遭受的风化作用强烈，大量的碎屑物质从山坡滚下，就近填充山脚下的次级凹陷，砾石颗粒大小不一，有棱有角，在扇体前端还可能发育重力流沉积物，而 Keyi 区西部剥蚀区地形相对平坦，临近湖平面，物源区离 Keyi 区亦有一段距离，母岩区剥蚀量较小，沉积物搬运距离较大，岩石颗粒分选-磨圆较好，在扇

体前端不易发育重力流砂泥岩。考虑到巴巴努萨凸起面积有限，Fula 凹陷南部 Keyi 扇三角洲物源很可能来自于巴巴努萨凸起北部，和凹陷北部 Jake 扇三角洲同源（有待补充相关资料证实），巴巴努萨凸起随着时间的推移逐渐剥蚀、夷平，其不同部位的剥蚀时间和程度已经不好推算，但作为剥蚀-沉积记录的三角洲不断掩埋，得到了很好的保存。尽管 Fula 凹陷西部陡坡带北段和南段在 Abu Gabra 组沉积期均发生错断和位移，但断盘的旋转使得陡坡带下盘在北部基本处于沉积基准面（湖平面）之上，以风化剥蚀为主，在南部基本处于沉积基准面之下，剥蚀强度较小，陡坡带上盘在北部临近沉积基准面，可容空间较小，在南部远离沉积基准面，可容空间较大。在此构造活动基础上，Fula 凹陷陡坡带形成了独特的“源-汇”系统，发育了独特的沉积面貌（图 10）。

值得一提的是，在 Jake 区以南和 Keyi 区以北的陡坡带中部地区，由于缺少井震资料控制，沉积相研究难以开展。该区较 Keyi 区更为靠近北部中非剪切带，也更为靠近 Jake 扇三角洲母岩区，具有良好的供“源”条件，同时该区处于 Fula 凹陷陡坡带北段和南段交会处东侧，边界断层在此构成了构造转换带，又为砂体搬运提供了优势疏导“渠”道，同样位于陡坡带上盘，断块持续下降给该区创造了充足的可容空间，为沉积物“汇”集提供可能。虽然缺少实际资料支撑，通过上述“源-汇”体系分析，笔者认为该区域应发育扇三角洲，且规模比 Jake 区扇三角洲规模略小，同时大于 Keyi 区扇三角洲规模。

6 结论与启示

断陷湖盆陡坡带勘探开发最重要的一点就是对沉积砂砾岩体的认识，这其中包括：砂砾岩体岩石学特征、岩相组合特征、所属的相带（相/亚相/微相）、规模大小、发育的场所、与物源和盆地的耦合关系等。通过对上述多个因素分析，首先开展“定相”工作，认为苏丹 Muglad 盆地 Fula 凹陷西部陡坡带发育两种类型的扇三角洲，陡坡带北部 Jake 区发育锥状扇三角洲，砂砾岩体普遍较粗，分选-磨圆较差，储层物性欠佳但规模大，而南部 Keyi 区发育片状扇三角洲，发育的岩石粒度偏细，分选-磨圆较好，储层物性较好但规模小（图 11）。

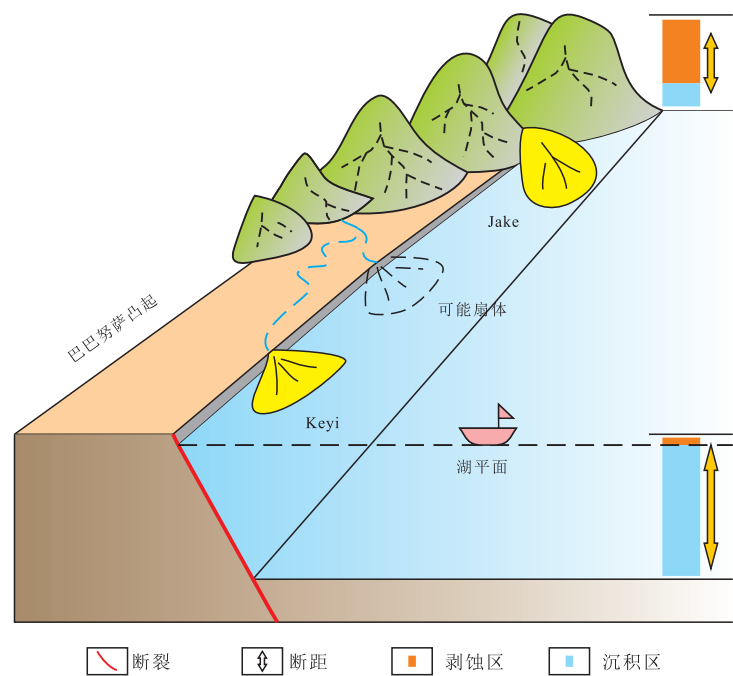


图 10 Fula 凹陷陡坡带扇三角洲发育模式

Fig. 10 A model for fan delta deposition in steep slope belt of the Fula Sub-basin

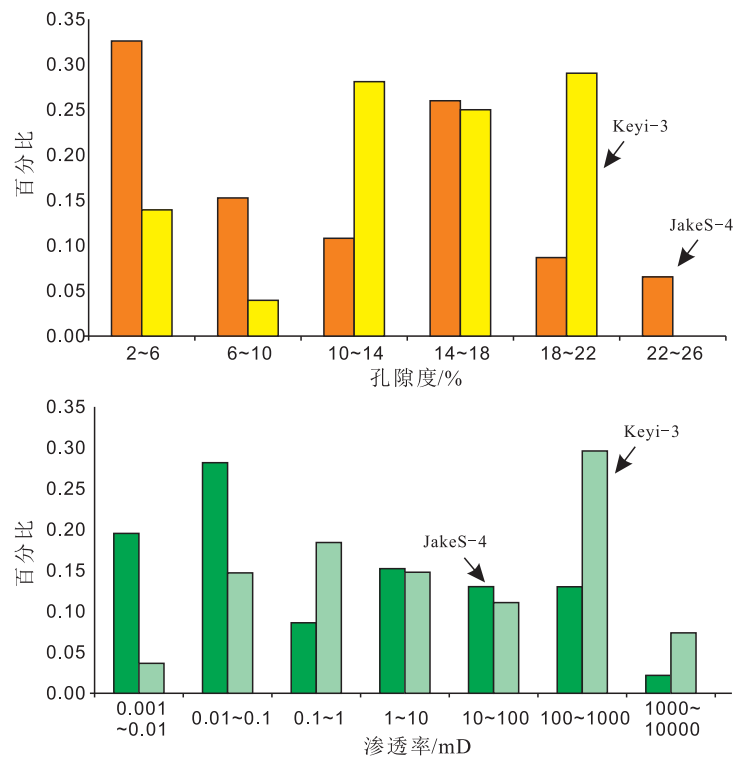


图 11 Fula 凹陷 Jake 和 Keyi 扇三角洲储层物性特征

Fig. 11 Characteristics of reservoir porosity and permeability of fan deltas in Jake and Keyi Area in the Fula Sub-basin

“源-汇”体系宏大，简单点可以分为沉积基准面之上和之下两部分。之上物质多剥蚀，进一步又应考虑剥蚀区距离基准面的纵向高低或剥蚀区的横向面积，之下多应该考虑汇水盆地的可容空间，以及可容空间增长速率和物质供给的匹配关系，甚至还应考虑汇水盆地的空间结构和基底

形态。盆地内部临近的不同位置可能由于母岩区剥蚀强度不同供源能力天差地别,而即便物源供给充足,可容空间发育,又可能由于坡度陡峭无法沉积。

“源-汇”体系对断陷湖盆油气勘探与开发的影响在 Fula 凹陷得到了良好的印证。前期研究由于资料匮乏、沉积学理论发展不足等原因,专家学者更多依靠断陷湖盆陡坡带沉积充填和层序充填模式来预测有利砂体分布,而忽视了“源-汇”体系的研究,得出沉降幅度大的 Keyi 区发育扇体规模更大的结论,钻井结果则显示相反的情况。结合上述断陷湖盆陡坡带“源-汇”分析和扇体沉积模式,实际上是可以预测 Keyi 区扇三角洲特征的。希望 Fula 凹陷西部陡坡带粗粒三角洲的研究实例能够给予今后的油气勘探开发工作启发,即应该从盆地的构造背景出发,立足于对不同类型物源的分析,精细刻画多种沉积物搬运通道,将沉积物与潜在的可容空间匹配起来,整体把握,进而预测有利储集体分布,缺乏“源”、“渠”、“汇”任何一环的分析,储集体预测证据便不够充足,结果便可能偏差。

致谢:在研究过程中得到了中国石油勘探开发研究院万仑坤、张光亚、肖坤叶、刘计国等领导的关怀和指导,以及南征兵、史艳丽等专家的热忱帮助,在此表示感谢。

参考文献 (References):

- 陈欢庆, 赵应成, 李树庆, 等. 2014. 岩性分析对砾岩储层构型研究的意义——以准噶尔盆地西北缘六区克下组冲积扇储层为例[J]. 天然气地球科学, 25(5): 721-731.
- 陈景山, 唐青松, 代宗仰, 等. 2007. 特征不同的两种扇三角洲相识别与对比[J]. 西南石油大学学报, 29(4): 1-6.
- 关欣. 2012. 苏丹被动裂谷盆地与渤海湾主动裂谷盆地沉积体系对比研究[D]. 武汉: 长江大学: 1-123.
- 赖维成, 宋章强, 周心怀, 等. 2010. “动态物源”控砂模式[J]. 石油勘探与开发, 37(6): 763-768.
- 史忠生, 方乐华, 王天琦, 等. 2014. 苏丹-南苏丹 Muglad 盆地构造对油气成藏控制作用研究[J]. 地质论评, 60(2): 389-396.
- 童晓光, 窦立荣, 田作基, 等. 2004. 苏丹穆格莱特盆地的地质模式和成藏模式[J]. 石油学报, 25(1): 19-24.
- 吴冬, 朱筱敏, 李志, 等. 2015. 苏丹 Muglad 盆地 Fula 凹陷白垩纪断陷期沉积模式[J]. 石油勘探与开发, 42(3): 319-327.
- 吴胜和, 熊琦华, 龚姚进, 等. 1994. 陡坡型和缓坡型扇三角洲及其油气储层意义[J]. 石油学报, 15 (增刊): 52-59.
- 吴因业, 邵文斌. 2000. 含油气盆地层序解释技术与应用[M]. 北京: 石油工业出版社: 1-326.
- 徐长贵. 2013. 陆相断陷盆地源-汇时空耦合控砂原理: 基本思想、概念体系及控砂模式[J]. 中国海上油气, 25(4): 1-21.
- 鄢继华, 陈世悦, 姜在兴. 2005. 东营凹陷北部陡坡带近岸水下扇沉积特征[J]. 石油大学学报 (自然科学版), 29(1): 12-21.
- 杨波, 徐长贵, 牛成民. 2011. 墙角型陡坡带岩性圈闭油气成藏条件研究——以渤海湾盆地石南陡坡带中段 BZ3 区古近系东营组为例[J]. 古地理学报, 13(4): 434-442.
- 杨俊生, 朱筱敏. 2008. 苏丹 Muglad 盆地 Fula 坳陷白垩系 AbuGabra 组层序地层及沉积体系[J]. 沉积学报, 26(6): 994-1004.
- 于潮, 白洋, 于中洋, 等. 2007. 苏丹 Fula 油田成藏规律与油气分布[J]. 石油勘探与开发, 34(5): 633-639.
- 张志伟, 潘校华, 汪望泉, 等. 2009. 苏丹福拉凹陷陡坡带构造地质特征及勘探[J]. 石油勘探与开发, 36(4): 480-486.
- 朱筱敏, 张守鹏, 韩雪芳, 等. 2013. 济阳坳陷陡坡带沙河街组砂砾岩体储层质量差异性研究[J]. 沉积学报, 31(6): 1094-1104.
- Allen P A. 2008. From landscape into geological history [J]. Nature, 451: 274-276.
- Genik G J. 1993. Petroleum geology of Cretaceous-Tertiary rift basins in Niger, Chad, and Central African Republic [J]. AAPG Bulletin, 8: 1405-1434.
- Marr J G, Swenson J B, Paola C, et al. 2000. A two-diffusion model of fluvial stratigraphy in closed depositional basins [J]. Basin Research, 12: 381-398.
- Matenco L and Andriessen P. 2013. The Source sink network, quantifying the mass transfer from mountain ranges to deposition in sedimentary basins: Source to sink studies in the Danube Basin-Black Sea system [J]. Global and Planetary Change, 103: 1-18.
- McPherson J G, Shanmugam G and Moiola R J. 1987. Fan-deltas and braid deltas: varieties of coarse-grained deltas [J]. Geol. Soc. Am. Bull., 331-340.
- Sømme T O, Jackson C A-L and Vaksdal M. 2013. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Møre-Trøndelag area of southern Norway: Part1-depositional setting and fan evolution [J]. Basin Research, 25: 489-511.
- Sømme T O and Jackson C A-L. 2013. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Møre-Trøndelag area of southern Norway: Part 2-sediment dispersal and forcing mechanisms [J]. Basin Research, 25: 512-531.