

深水局部限制型水道复合体沉积特征及其对储层性质的影响 ——以东非鲁武马盆地始新统为例

孙辉, 范国章, 邵大力, 左国平, 刘少治, 王红平, 马宏霞, 许小勇, 鲁银涛, 闫春

(中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州310023)

摘要:东非鲁武马盆地始新统水道砂岩储层为深水沉积环境下的重力流沉积, 水道复合体具有单侧迁移、多级别侵蚀充填的特征。应用岩心观察、测井分析和三维地震属性分析等方法和技术研究水道复合体, 厘清了水道复合体的沉积相与级别之间的关系, 将始新统局部限制型水道复合体细分为3个亚相、3个级别和4个沉积期次, 描述了4期复合水道的演化过程, 分析了水道复合体的沉积单元类型、沉积期次以及距水道口距离对储集层性质的影响。鲁武马盆地始新统水道复合体由复合底层、主要限制水道充填和溢岸楔3种沉积亚相组成。水道充填沉积可以细分为水道复合体、复合水道以及水道3个级别。受底流作用影响, 复合水道内部以及由早到晚演化的不同期次的复合水道间均呈现由北向南侧向迁移的特征, 储集层类型以连片发育的叠置水道为主。始新统局限型水道复合体的储层性质与沉积期次、沉积单元类型和距水道口距离密切相关。砂岩储层主要发育于叠置水道和弯曲水道沉积内, 叠置水道是最有利的储层类型。水道沉积越早、单砂层越厚, 沉积越晚、物性越好, 距水道口越近、储层厚度越大、孔隙度越低。泥质含量及渗透率随延伸距离变化关系比较复杂。研究成果不仅可以深化深水水道复合体沉积储层研究, 而且适用于开发前期地质模型构建。

关键词:复合水道; 水道复合体; 深水沉积; 储层特征; 始新统; 鲁武马盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Depositional characteristics of locally restricted channel complex in deep water and its influence on reservoir properties: A case study of the Eocene series, Rovuma Basin

Sun Hui, Fan Guozhang, Shao Dali, Zuo Guoping, Liu Shaozhi, Wang Hongping, Ma Hongxia, Xu Xiaoyong, Lu Yintao, Yan Chun

(Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: The Eocene channel sandstone reservoirs in the Rovuma Basin, East Africa, are of deep sea gravity flow deposits. The Eocene channel complex is characterized by unilateral migration and multi-level erosion and filling. Research methods and technologies including core observation, well logging analysis, and 3D seismic attribute analysis, etc., are applied to study the channel complex. The relationship between the sedimentary facies of channel complex and its grade is clarified. The Eocene channel complex of locally restricted type can be divided into 3 subfacies, 3 grades and 4 sedimentary periods; moreover, the evolutionary process of the 4 periods is described, and the impact of sedimentary unit type, sedimentary period of the channel complex and the distance from the channel mouth on the reservoir properties is analyzed. The Eocene channel complex in the Rovuma Basin is composed of 3 sedimentary subfacies, i. e. complex substrate, main deposits of confined filling and overflow wedge. Channel filling deposition includes 3 grades of channel complex, composite channel and channel. Under the influence of bottom current, a north-to-south migration occurs within a single composite channel and between composite channels of different stages from old to young; and thereby the reservoir is mainly of the superimposing channel facies in laterally continuous distribution. On

收稿日期:2021-04-16;修订日期:2021-10-10。

第一作者简介:孙辉(1969—),女,高级工程师,地震深水沉积及储层。E-mail:sunh_hz@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(2019D-4309)。

the other hand, the reservoir properties of the Eocene channel complex of local restriction type are closely associated with the sedimentary period, the type of sedimentary units and the distance from the channel mouth. Sandstone reservoirs are mainly developed in superimposing and meandering channels, and the superimposing channel facies is the most favorable to reservoir development. The earlier the channel deposition occurs, the thicker a single sandstone layer will be; however, the later the channel deposition begins, the better the physical properties of a reservoir will be, and the closer to the channel mouth, the greater the reservoir thickness and the lower the porosity will be. The variation of shale content and permeability with extension distance is complicated. In a nutshell, the research results serve for deepening the study of sedimentary reservoir of deep-water channel complex facies, as well as are of practical value to establishing geological models in the early stage of oil/gas field development.

Key words: composite channel, channel complex, deep-water deposits, reservoir characteristics, Eocene, Rovuma Basin

近40年的国内、外深水油气勘探结果显示,深水区具有广阔的油气勘探前景。与此同时,深水沉积研究取得了大量成果,深水沉积学理论和认识也得以快速发展。大量的深水油气勘探资料(露头、地下钻井和高品质地震资料)及海洋调查结果揭示出深水区发育多种深水沉积类型^[1-3]。结合水槽实验和数值模拟,建立了不同深水沉积类型的沉积模式^[4-6],水道复合体就是诸多深水沉积类型中非常重要的组成部分。由于深水重力流沉积的复杂性^[7-8],深水水道形成过程受海平面变化、地貌特征和底流等多种控制因素影响^[9-10],水道平面迁移变化多样,多级别频繁侵蚀充填沉积导致其储层性质复杂^[11-12],深水优质储层的识别成为世界深水研究的前沿及深水油气勘探的关键^[13]。

多数深水区缺少钻井资料,许多研究仅依据侧扫声纳和地震等资料开展,而缺少钻井资料的直接证据,研究结果存在一定的预测性和不确定性,仅限于定性的预测。鲁武马盆地是东非被动大陆边缘的主要含油气盆地之一,截至目前,在鲁武马盆地已经发现了19个气田,其中有14个为深水环境^[14]。目前已经针对鲁武马盆地开展了多项研究,包括区域构造特征^[15-16]、沉积层序^[17-18]、含油气系统^[19-20]等,针对沉积结构单元演化及对储层性质控制作用的研究很少。始新统水道复合体沉积的砂岩厚度巨大、泥质含量低、物性较好,属超“干净”砂岩,沉积特征及沉积形态明显异于墨西哥湾、西非等深水沉积^[3,7,21]。这种复杂而巨厚的沉积是如何构成和演化的,它对储层的性质和分布具有哪些影响,这些问题成为了开发前期地质模型精准建立需要解决的问题。鲁武马盆地始新统水道复合体上完钻5口井,其中1口井取心,岩心观察、测井分析、三维地震属性分析等研究方法和应用于该水道复合体的研究,有效识别了水道复合体的剖面几何形态及平面展布特征,并将水道复合体划分为4个期次的复合水道,进而分析复合水道沉积对储层性质的影响。尽管研究区相

对于整个盆地范围较小,但所研究水道复合体的资料丰富,沉积区构造简单,沉积界面易于识别,局部限制特征明显,基本可以代表鲁武马盆地始新统水道复合体的沉积规律。通过本研究,不仅可以探索沉积对储层性质的影响方式,同时也可以深化深水水道复合体研究的地质理论,具有重要的理论和实际意义。

1 区域地质特征

鲁武马盆地(Rovuma Basin)地处东非被动大陆边缘盆地群内,是中生代以来随着东冈瓦纳大陆裂解、印度洋形成而产生的系列盆地之一^[14]。盆地东部为凯端巴斯盆地(Kerimbass Basin),西部为莫桑比克褶皱带,北部以鲁武马转换带为界,与坦桑尼亚的曼达瓦次盆(Mandawa Sub-Basin)分隔(图1a)^[22],晚侏罗世—早白垩世晚期,东非大陆南部边缘形成右行剪切型的大陆边缘,鲁武马盆地显示出“窄陆架、陡陆坡”的特征^[23],沉积地貌一直延续至今^[24]。盆地内以中—新生代沉积为主,深水区主要沉积了中侏罗世—新生代地层^[25]。地震资料显示,盆地内深水沉积现象丰富。从古新世至今的各个时期的地层内,深水水道尤为发育。深水沉积物源自研究区以西数十千米以外的陆架边缘^[24],经峡谷/水道体系在下陆坡及盆底形成富砂的重力流沉积,在深水区形成了粗粒、巨厚的深水沉积体。底流对鲁武马盆地深水沉积方式具有重要影响^[9,10,26],水道复合体侧翼堤通常堆积于水道的一侧,对水道内浊流的运动产生单侧限制作用,因此始新统内的水道复合体属于局部限制型水道复合体。钻井取心证实,深水沉积储层具有良好的储层物性,为富砂的重力流沉积。研究区面积约1 000 km²,发育近500 km²多期充填的水道复合体,沉积总厚度可达600 m(图1b),位于始新统上部三级层序内(图1c)。区内水深约1 500~3 000 m,3D地震资料全覆盖,研究工作以叠前时间偏移和叠前

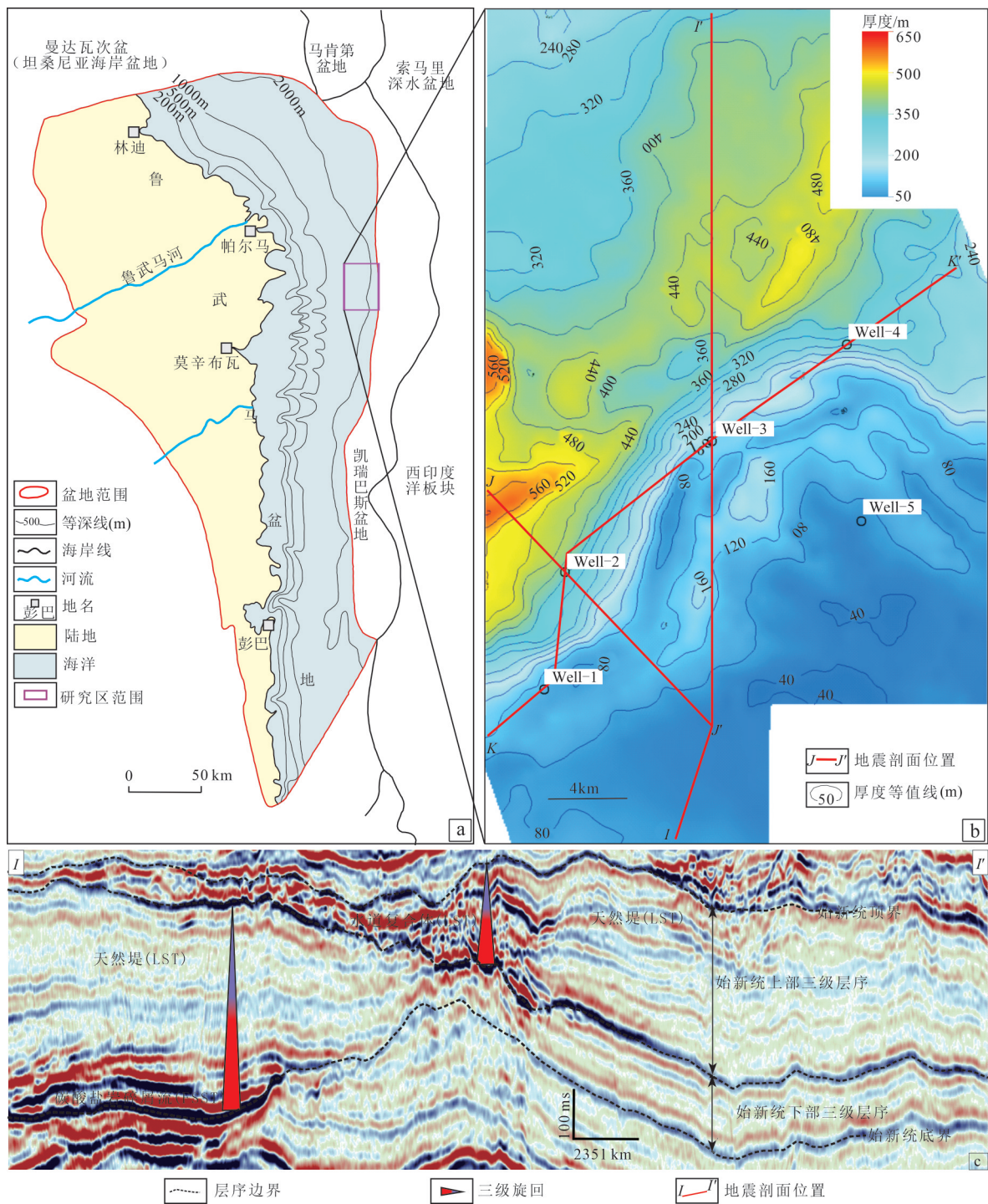


图1 东非鲁武马盆地位置及水道复合体基本信息(据 IHS, 2009 修改^[15])

Fig. 1 Location map of Rovuma Basin, East Africa and general description of the Eocene channel complex(modified from IHS, 2009^[15])
a. 鲁武马盆地地区构造位置;b. 水道复合体等厚图及过井地震剖面位置;c. 过井地震剖面

深度偏移的3D地震资料分析应用为主。1口取心井资料和5口井测井资料应用于研究中。

2 研究思路和方法

鲁武马盆地始新统水道复合体规模大,地震剖面

上的水道充填沉积可以划分出不同级别。根据本区水道的充填规模及特征、界面接触关系、沉积位置、垂向及横向演化特征,采用Sprague等(2002)的分类命名方式^[27],确定始新统水道充填属水道复合体。在单井及地震剖面上将水道充填沉积分为3个级别:水道复合体(channel complex)、复合水道(composite channel)以

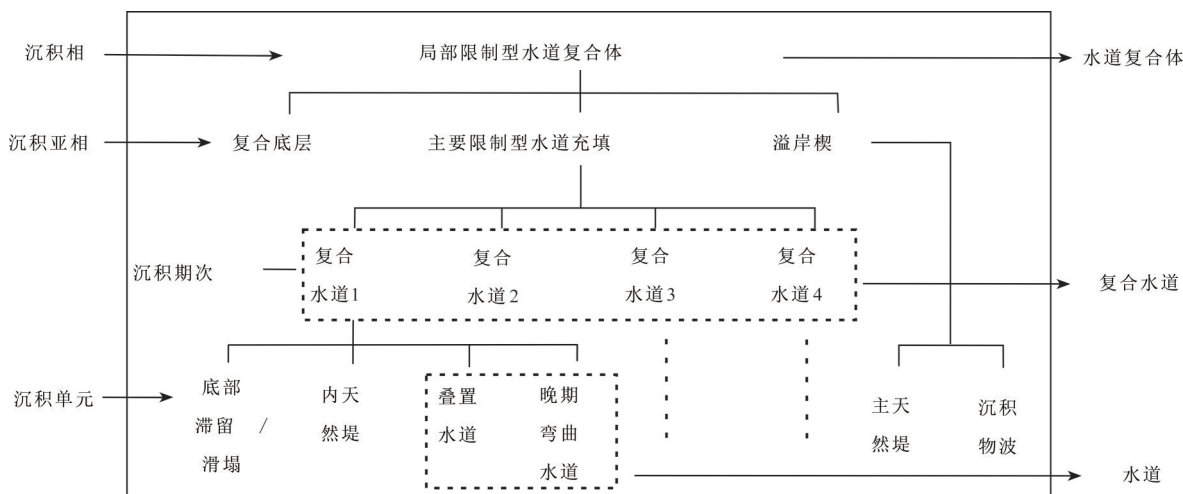


图2 局部限制型水道复合体沉积亚相、沉积单元以及级别的关系

Fig. 2 Relationship between sedimentary subfacies, sedimentary units and grades of locally restricted channel complex

及水道(channel)(图2)。由于在水道复合体沉积时,并非只沉积了水道充填沉积物,在水道的负地貌区域以外也同期沉积了溢岸的楔状沉积物,因此从相的角度将水道复合体沉积划分为相应的沉积亚相以及沉积单元。图2显示了始新统局部限制型水道复合体的亚相、沉积单元以及与充填级别的关系,储层主要分布于多期复合水道内的叠置水道及弯曲水道沉积单元中。

研究中首先以深水沉积学理论为指导,针对鲁武马盆地始新统水道复合体开展精细解释及沉积、储层特征分析。由于全区仅有1口取心井,取心段位于主要限制型水道充填沉积的局部,工作时分级别研究。①在有取心资料的亚相上,开展岩心-测井-地震的全过程分析,识别沉积单元;②在无岩心资料的亚相上,以测井标定地震,开展沉积相分析,解释沉积亚相。其次,通过综合分析过水道复合体的钻井取心观察和测井解释结果,以及与沉积单元分析相关的地震相特征,结合前人针对水道研究中总结的水道沉积剖面演化序列^[28],针对鲁武马盆地始新统水道复合体开展深水沉积相、亚相及沉积单元的识别,同时解释复合水道的沉积期次。最终通过对深水沉积的详细划分,分析叠置水道与弯曲水道储层性质的差别,以及不同期次的复合水道之间储层性质关系。

3 始新统水道复合体沉积亚相及沉积演化

3.1 沉积亚相及沉积单元

井-震标定结果显示,始新统水道复合体的顶、底界均对应强振幅反射同相轴(图3)。水道复合体底部

发育一套稳定分布的复合底层,一些复合水道底部可能也发育一些过路沉积(无钻井位置根据前人沉积模式^[28]推断),各期复合水道不断侵蚀、迁移、叠置,致使水道砂连片发育,水道复合体的北部发育较厚层的细粒溢岸楔。

3.1.1 复合底层

水道复合体底部通常发育一套由过路相组合而成复合底层,覆盖于水道复合体侵蚀面的上部,在水道复合体底部较发育^[29]。露头观察^[30-32]显示,复合底层主要由一些泥岩和杂砂岩地层构成,由浊流经过后的泥质或保留下来的杂砂岩沉积组成,在水道充填主要阶段之前沉积,与大规模侵蚀和沉积改造密切相关,如粗粒滞留沉积、互层砂岩和泥砾岩等^[33]。加拿大不列颠哥伦比亚省的 Isaac 地层露头显示,过路披覆沉积相当厚,接近 25 m,由多种岩相组成^[29]。鲁武马盆地始新统水道复合体底部的复合底层,GR 曲线呈中等伽马值的锯齿状或指状特征(图 4),解释为一套较致密的薄互层沉积(图 3)。多口井均钻遇到该套复合底层,为厚度不等的砂、泥岩薄互层沉积,单砂层厚度在 0.5 ~ 2.0 m。复合底层在地震上对应水道复合体底部的强振幅波峰反射,难以进一步精细识别薄层。

3.1.2 主要限制水道充填

主要限制水道充填内沉积了大量的低位域粗粒沉积物,在油气勘探中具有重要的经济价值。主要限制水道充填一般由多期复合水道组成,每一期的复合水道由底部滞留/滑塌沉积、内天然堤、叠置水道以及晚期弯曲水道组成(图2)。Well-1井在4 000 m以下近

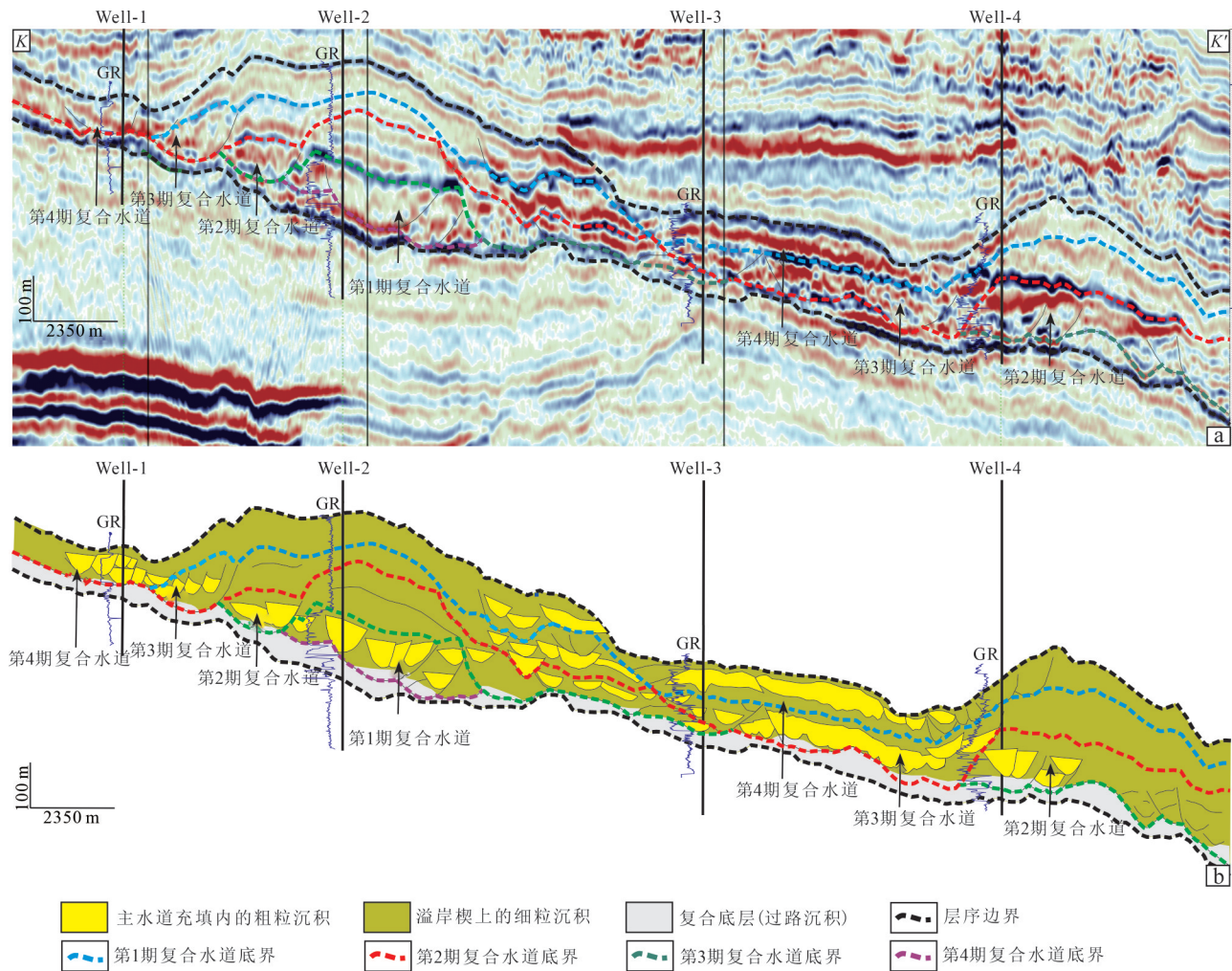


图3 沿水道延伸方向水道复合体分布特征 (剖面位置见图1b)

Fig. 3 Diagram showing the channel complex distribution pattern along channel extension (see Fig. 1b for the section location)

a. 连井地震剖面;b. 连井相解释剖面

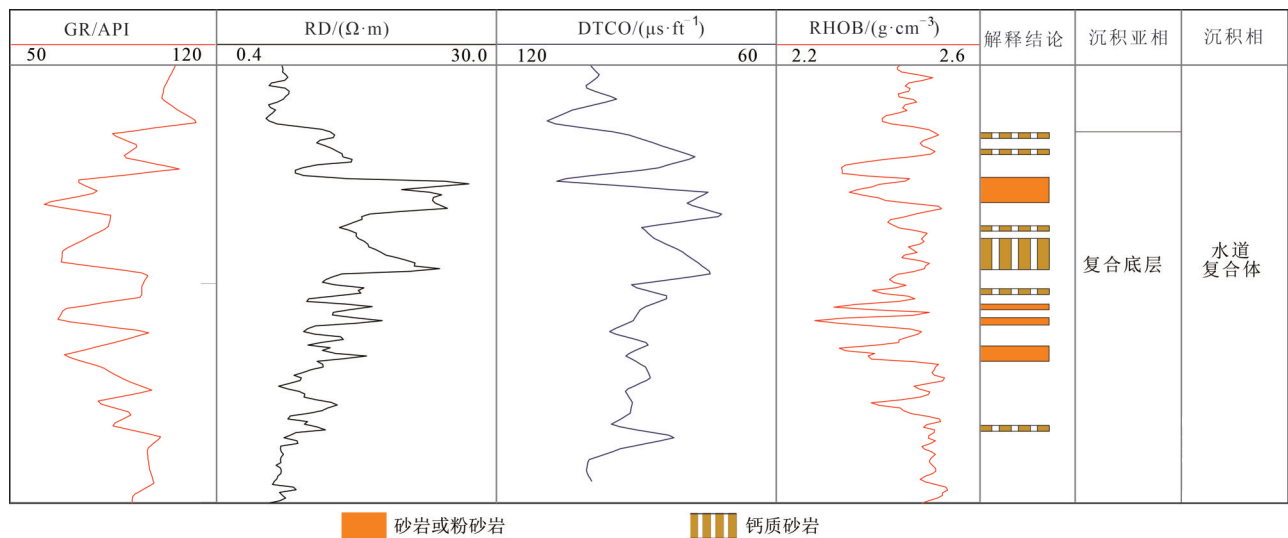


图4 鲁武马盆地 Well-1 复合底层典型测井响应及沉积解释结果

Fig. 4 Typical log responses and sedimentary interpretation of complex substrate in Well-1, Rovuma Basin

27 m的取心段内,位于复合水道下部的砂岩主要以正粒序为主,存在少量逆-正粒序,具有高密度浊流^[34]的岩相特征。不同位置的多种沉积现象,如急剧变化的事件层底界面(图5a),大块泥屑(图5b),砂岩沉积中具有生物扰动的块状粉砂质泥岩(图5c),代表了浊积相中具有侵蚀能力并快速沉积的高密度浊流(图5)。3套叠置的巨厚事件层(单层厚可达10 m)底部存在侵蚀界面,各事件层分选差-中等,由弱固结含砾砂岩(图5d)组成,每个事件层基本上无构造(图5e)、无流体逃逸或内部层理,可能是高密度浊流整体快速凝固形成,亦或是浊流颗粒粒度差异明显,沉积后细粒沉积受生物扰动和液化搬走,以及纹层部分埋藏之后快速受到侵蚀所致^[35]。取心段底部存在由微小滑塌和蠕动产生的具有变形内部纹层的深灰色粉砂质泥岩(图5f),薄层砂/粉砂岩层显示较强的钙质胶结,不具储集性能,为水道底部滞留/滑塌沉积。

叠置水道的巨厚事件层具有箱形的低伽马值、高纵波速度、高电阻率和低密度特征(表1;图6),在事件层之间存在相对高密度段,已证实与第二期事件层下部沉积

层内泥屑发育有关。巨厚事件层顶部中伽马值、中电阻率、中密度的薄层为晚期弯曲水道沉积。测井响应上具有中等伽马值、较低纵波速度、较低电阻率及高密度的致密层,解释为复合水道底部的底部滞留/滑塌沉积。内天然堤的电性响应上显示出更高的伽马值,测井上未解释为砂层,可能是一些薄层的粉砂岩沉积(图6)。

水道砂顶界通常具有强振幅、低频反射特征,但当某些部位水道砂沉积厚度很大,地震剖面上一些厚层块状砂体内会显示明显的弱振幅、低频特征;一些相对较薄的砂、泥岩互层则表现出强振幅、较高频率的地震响应。有时晚期的弯曲水道由于砂岩厚度较薄,地震上难以识别,位置与叠置水道顶部的地震反射同相轴基本重合(图7)。内天然堤在地震剖面上一般可识别,其频率较高,反射能量明显低于水道砂。由于底部滞留沉积以泥岩为主,且厚度较薄,该沉积单元在地震剖面上通常难以识别。

3.1.3 溢岸楔

溢岸楔内由两种沉积单元组成:一种为主天然堤,

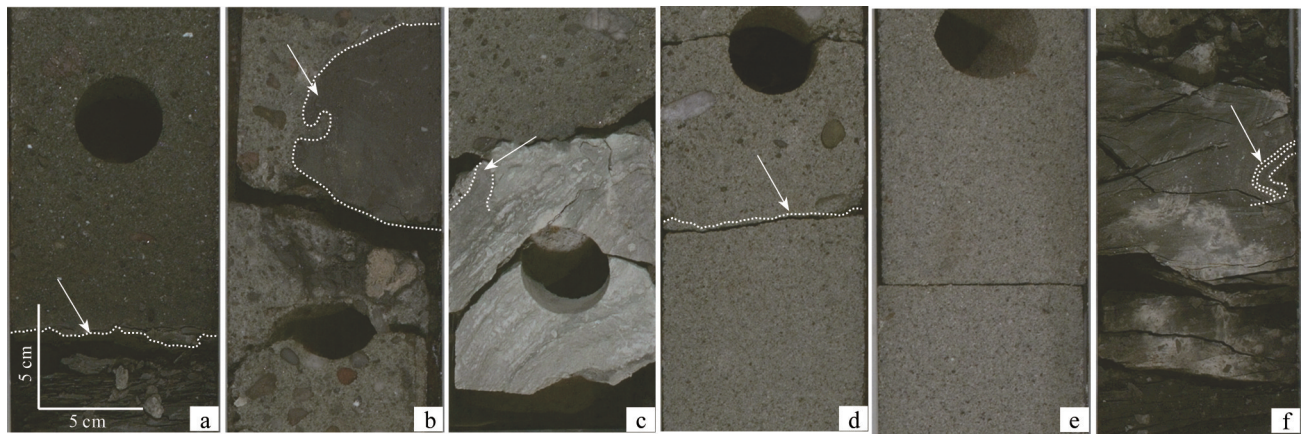


图5 鲁武马盆地 Well-1 井始新统水道复合体内典型砂岩、泥岩特征及接触关系

Fig. 5 Pictures showing typical characteristics sandstone and mudstone and their contact styles in the Eocene channel complex in Well-1, Rovuma Basin

a. 急剧变化的事件层底界面(埋深:2 531.05 ~ 2 531.25 m); b. 大块泥屑(埋深:2 522.0 ~ 2 522.28 m); c. 生物扰动的粉砂质泥岩(埋深:2 520.80 ~ 2 521.00 m); d. 不同事件层的转化(埋深:2 512.10 ~ 2 512.30 m); e. 无构造块状砂岩(埋深:2 513.07 ~ 2 513.27 m); f. 变形构造(埋深:2 532.52 ~ 2 532.72 m)

表1 鲁武马盆地始新统叠置水道岩心-测井-地震特征对应关系

Table 1 Sedimentary features of the Eocene superimposing channel obtained from core observation, logging and seismic interpretation, Rovuma Basin

完整事件层	岩心厚度/ m	岩心分析		测井				备注	地震描述
		孔隙度/ %	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	GR/ API	RT/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	DT/ ($\mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$)	RHOB/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		
上事件层	10.3	19.92	1127.0	54.0	140.0	89.6	2.28	事件层之间具有较高伽马值、 高密度特征,异于上、下层	较强振幅,低频, 上、下层无反射界面
下事件层	8.7	21.10	1251.5	55.0	145.0	90.0	2.24		
平均值	9.5	20.51	1189.0	54.5	142.5	89.8	2.26		

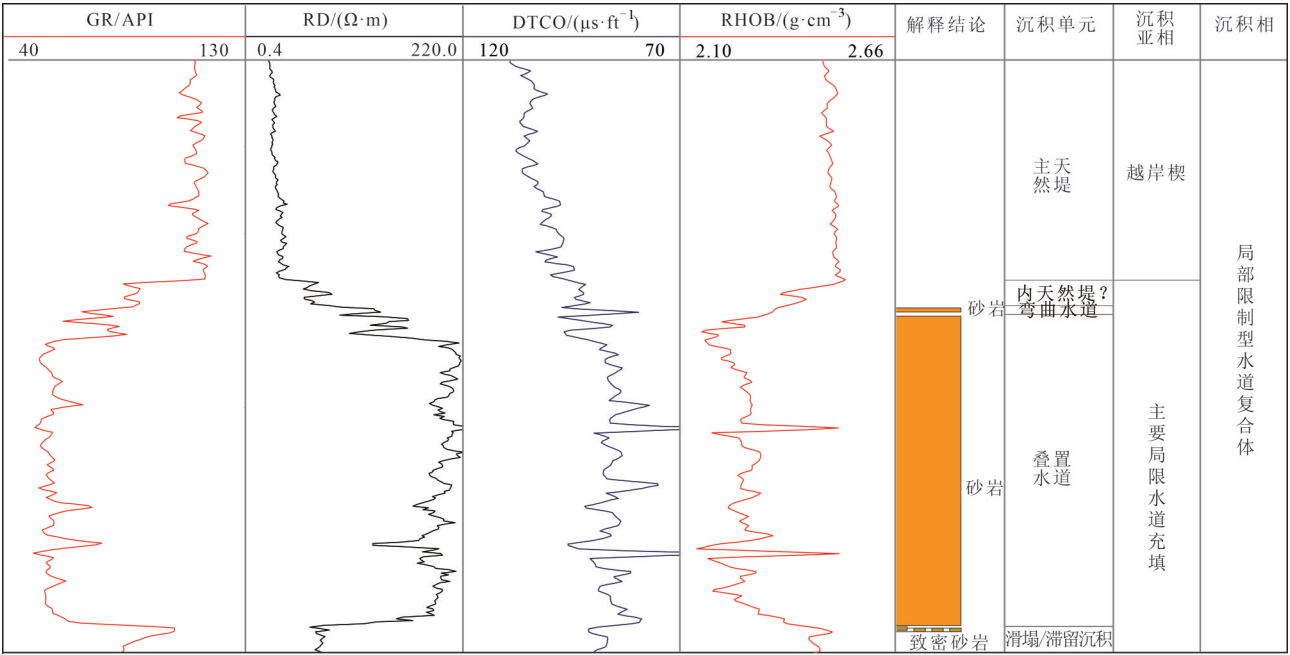


图6 鲁武马盆地 Well-2 复合水道典型测井响应及沉积解释结果

Fig. 6 Typical log responses and sedimentary interpretation of the composite channel in Well-2, Rovuma Basin

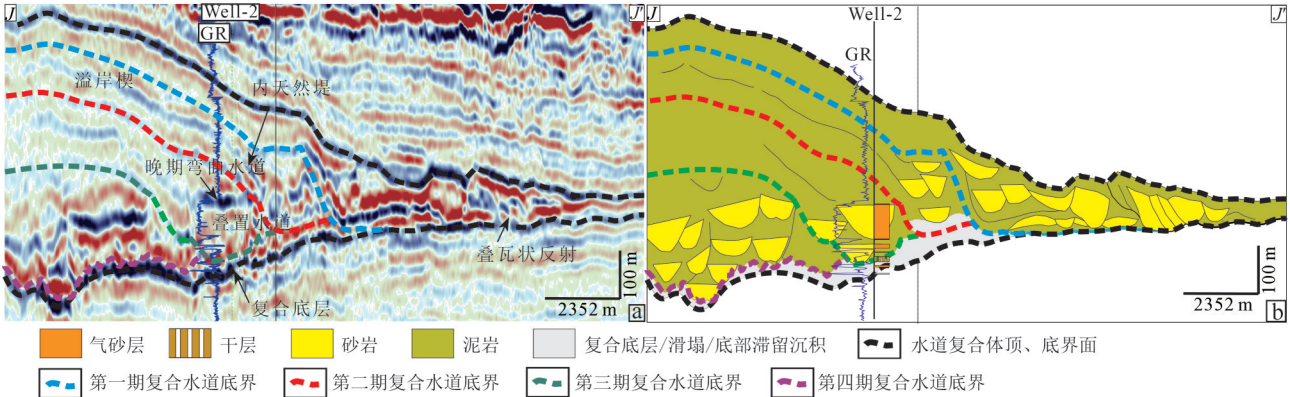


图7 鲁武马盆地始新统水道复合体沉积结构(剖面位置见图1b)

Fig. 7 Sedimentary architecture of the Eocene channel complex, Rovuma Basin (see Fig. 1b for the section location)

a. 过 Well-2 的地震剖面; b. 对应于过井剖面的沉积简图

在各期复合水道的北侧发育。测井曲线具有很稳定的高伽马值特征,反映沉积特征的细粒沉积岩性均一(图3,图6,图7);另一种沉积单元为沉积物波,地震剖面上显示为同相轴连续性好、强振幅断续分布、具有微弱的波状反射特征。单一波列的沉积物波延伸长度较小,波长及波高值低,振幅属性图上强振幅波形分布区延伸长度约2.0~3.5 km。类比南海南部的多种类型沉积物波的地震反射特征,认为该部位的沉积物波可能是低幅软弱层,岩性均一且含砂率低^[36]。

3.2 沉积演化特征

受海平面变化、地形坡度以及底流作用等的综合

影响,鲁武马盆地始新统深水水道复合体的分布特征、规模及演化方式呈现复杂的多级充填。底流作用改变了早期地貌,水道延伸方向不断改变,在每一期复合水道沉积的晚期,受海平面高频旋回上升期的控制形成弯曲水道。先期复合水道沉积末期的地貌形态直接影响后期复合水道的发育位置。早期复合水道较顺直呈南西-北东走向,之后方向不断改变,在远端逐渐向南摆动。根据单井相、连井相分析,不同期次复合水道沉积厚度图以及可以反映各期次粗粒沉积分布的地震总能量(total energy)属性分布图,结合地震剖面反射特征的分析,共识别出4期复合水道沉积,由早至晚分别命名为第1期到第4期复合水道(图8)。第1期较顺直

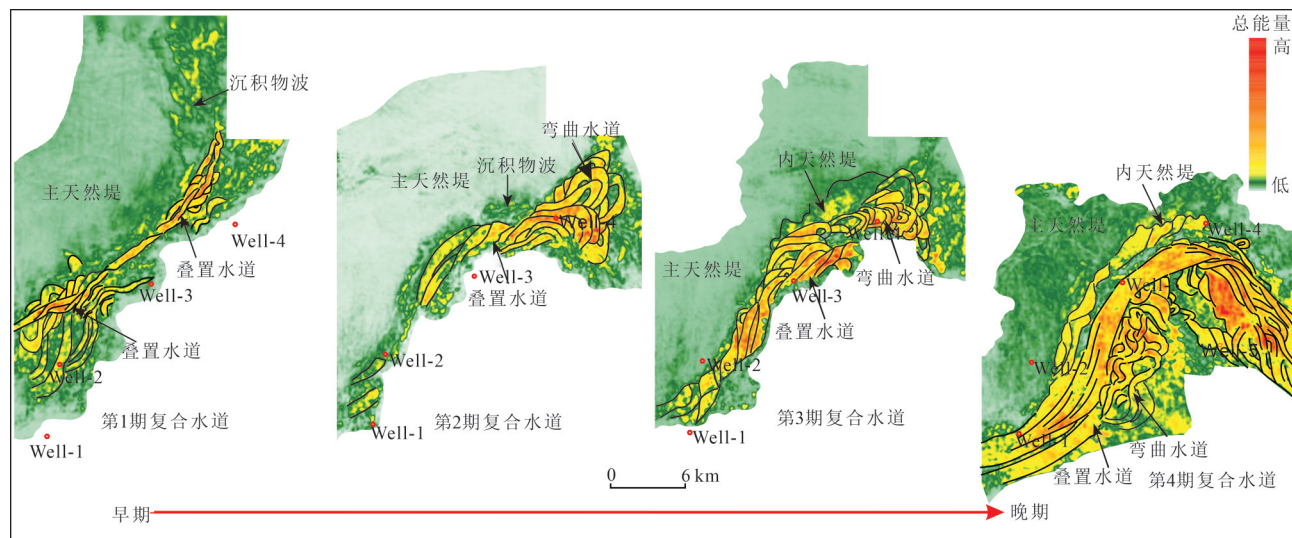


图8 鲁武马盆地始新统水道复合体内4期复合水道总能量变化及沉积分析

Fig. 8 Total energy variation of the Eocene 4-stage channel complex evolution and corresponding sedimentary analysis, Rovuma Basin

复合水道的北东方向受晚期复合水道的侵蚀,水道宽度明显收窄。在水道的北部发育一些沉积物波,呈短而弯曲的条带状较强振幅,含砂率可能较低。第2期近陆端水道保持早期的延伸方向,远陆端复合水道向南发生偏转,较顺直的叠置水道外部存在部分早期的弯曲水道。由于水道的迁移、摆动及被后期水道侵蚀,水道内粗粒沉积物平面分布形态不规则。第3期复合水道沉积范围与第2期相似,在东北方向的叠置水道的外侧分布一些弯曲水道。受复合水道向南迁移的影响,弯曲水道通常只保留了复合水道北岸的部分,而南侧通常被后一期的复合水道侵蚀。第4期,即最晚一期复合水道沉积的形态保留完整。

4 沉积作用对储层性质的影响

鲁武马盆地勘探实践表明,深水区储集层以深水重力流成因储层为主。由于原始沉积作用是储层物性差异形成的基础^[37],参考其他地区沉积储层表征方法^[38-39],利用岩心、测井资料分析井点处不同沉积类型、沉积期次以及不同位置储层性质的差异性,以及3种主要沉积因素对4种储层宏观性质(即砂岩厚度、泥质含量、有效孔隙度和渗透率)的影响。

4.1 沉积类型对储层性质的影响

鉴于录井信息缺乏,以测井解释结果开展储层性质分析。5口完钻井中均钻遇始新统水道复合体,解释73个小层,根据单砂层厚度、储层的物性相似性以及沉积单元的差异将这些解释层分为3类:叠置水道、

弯曲水道、复合底层及底部滞留沉积。其中复合底层及底部滞留沉积层数最多,占总层数的43%;其次是叠置水道,占比为33%;弯曲水道层数占比为24%,居于第3。尽管复合底层及底部滞留沉积的层数最多,但其超过一半的解释层厚度处于0.5~1.0 m,多数层厚度较薄,仅极少数的层厚处于10~20 m;而弯曲水道厚度普遍较薄,所有单层厚度均处于0.5~10.0 m,且小于1 m的薄层占比达总层数的一半;叠置水道单层厚度普遍较厚,为1~20 m,其中超过一半的单层厚为2~10 m,小于2 m和大于10 m的解释层数量相对较少。

单砂层厚度小于30 m时,砂岩的有效孔隙度/渗透率与单砂层厚度呈现出较好的正相关性(图9)。当单砂层厚度大于30 m时,有效孔隙度/渗透率有下降趋势,但无明显规律。单砂层厚度大于30 m的砂岩均为叠置水道沉积,因此并非越厚的叠置水道,储层物性越好。这主要因为厚层砂岩由多期的事件层叠置而成,在不同的事件层接触面处的有效孔隙度与渗透率均显著降低,从而导致叠置砂岩的单层砂岩的平均有效孔隙度与渗透率降低。

储层性质与沉积环境具有一定的相关性(图10)。不同沉积单元的储层参数显示,叠置水道储层最好,其次是弯曲水道,复合底层最差。叠置水道与弯曲水道相比,其有效孔隙度与渗透率值接近,厚度比弯曲水道大得多,而泥质含量上前者较后者低得多。在复合水道的一个典型沉积周期内^[27-28],薄层的滞留沉积位于复合水道底部,之上是泥质碎屑,再向上沉积的是较顺直的叠置水道,最上部是弯曲水道。这种沉积周期可

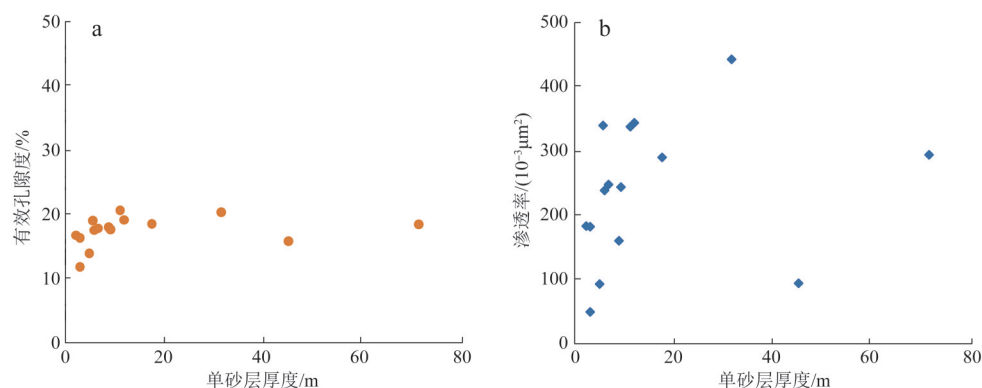


图9 鲁武马盆地始新统水道复合体叠置水道和弯曲水道物性随单砂层厚度变化

Fig. 9 Scattered plots of porosity and permeability variation of superimposing and meandering channels with thickness of single sandstone layer in the Eocene channel complex, Rovuma Basin

a. 有效孔隙度; b. 渗透率

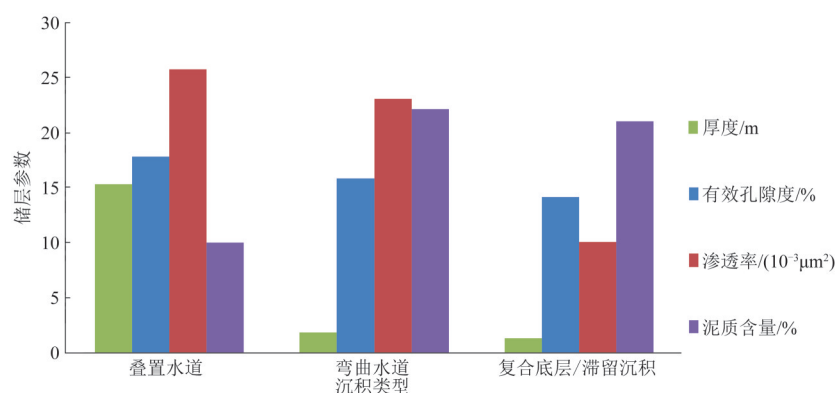


图10 鲁武马盆地始新统水道复合体不同类型储层参数分布直方图

Fig. 10 Histogram of reservoir parameter distribution of different types in the Eocene channel complex, Rovuma Basin

能与海平面变化相关。低水位时期,河流体系下切,粗粒沉积物越过陆架进入深海区域。水道充填于海平面上升初期,陆架的加积减少了沉积物向深盆地的供给,进而形成有堤水道沉积。因此,在复合水道内由下至上的水道沉积过程中,随着叠置水道向弯曲水道演化,泥质含量逐渐增高。弯曲水道的沉积厚度普遍较薄,可能水道砂仅由单一事件层构成,同时由于其沉积于复合水道沉积的晚期,浊流搬运沉积物的能量已经明显降低,水道砂的粒度相对均一,分选较好。复合底层单砂层厚度低,泥质含量高,渗透率比前两者低得多,物性相对较差。

4.2 沉积期次对储层性质的影响

叠置水道储层性质最佳,各井均钻遇叠置水道,统计样点较多,因此本文以叠置水道为例,分析沉积期次对储层性质的影响。平均厚度上,单砂层厚度与沉积期次关系密切,沉积越早,单砂层越厚;沉积越晚,单砂层越薄。最大厚度也具有相似的规律,仅第2期沉积

显示出异常的相对薄层。有效孔隙度和渗透率与沉积期次相关性不大,无论平均值还是最大值,前两期之间有效孔隙度和渗透率值接近,第4期(最晚期)显示出异常好的渗透性,即最晚期沉积的叠置水道物性最好。泥质含量与沉积期次无明显关系。

4.3 沉积距离与储层性质关系

水道复合体内的不同储层参数随距源区的距离增加而发生变化。以叠置水道为例,各井点处的平均储层参数分布与最大储层参数分布趋势相似,反映了最大储层参数对平均结果具有较大的影响。无论平均砂岩厚度还是最大砂岩厚度,总体表现随距离的增加而下降,在 Well-2 处厚度的突然增加可能与沉积期次有关,该井的叠置砂岩位于第1期沉积内,而第1期的砂岩厚度在所有期次中是最厚的。叠置水道的泥质含量在 6% ~ 13%,随距离增加波动变化,无明显变化趋势。有效孔隙度随距离增加呈现微小的近线性增加趋势,渗透率的最大值与平均值随距离增加无明显变化。

由于参加统计的井数较少,规律性认识受限制。

5 结论

1)鲁武马盆地始新统局部限制型水道复合体由复合底层、主要限制水道充填及溢岸楔3个亚相组成,可以细分为水道复合体、复合水道及水道3个级别。复合水道由4个沉积期次组成。

2)始新统局限型水道复合体内主要包含叠置水道、弯曲水道、复合底层及沉积物波4种粗粒沉积。叠置水道由多期叠置的事件层组成,具有箱形的低伽马值、高纵波速度、高电阻率和低密度特征;弯曲水道无取心资料,电性表现为中伽马值、中电阻率、中密度的薄层沉积特征;复合底层伽马曲线呈中等伽马值的锯齿状或指状特征,可能由一些泥岩和杂砂岩地层构成,测井解释为较致密的薄互层沉积;沉积物波主要由地震资料识别,类比其他地区沉积物波的地震反射特征,推测研究区的沉积物波可能是低幅软弱层,或为岩性均一且含砂率低的沉积。

3)储层性质与沉积期次、沉积单元类型以及距水道口距离密切相关。复合底层物性差,沉积物波的含砂率可能较低,均难以成为有利储层。叠置水道具有单砂层厚度大、储层物性好、泥质含量低的特征,是最有利的储层类型;水道沉积越早,单砂层越厚。距水道口越近,储层厚度越大,孔隙度越低。泥质含量及渗透率随延伸距离变化比较复杂。

4)水道复合体的研究应重点针对有利储层赋存其中的亚相类型开展沉积期次的划分,分析已取得的资料可以识别的最小级别与储层性质的相关性,得出水道复合体储层性质的影响因素。

参 考 文 献

- [1] Gervais A, Savoye B, Mulder T, et al. Sandy modern turbidite lobes: A new insight from high resolution seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(4): 485-502.
- [2] 吴时国,秦蕴珊. 南海北部陆坡深水沉积体系研究[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 922-930.
Wu Shiguo, Qin Yunshan. The research of deepwater depositional system in the northern South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 922-930.
- [3] 孙辉,范国章,吕福亮,等. 孟加拉湾缅甸若开盆地上新统斜坡水道复合体沉积特征[J]. *沉积学报*, 2011, 21(9): 695-703.
Sun Hui, Fang Guozhang, Lyu Fuliang, et al. Sedimentary characteristics of Pliocene slope channel complexes in the Rakhine basin, offshore Myanmar[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 21(9): 695-703.
- [4] Cronin B T, Gürbüz K, Hurst A, et al. Vertical and lateral organization of a carbonate deep-water slope marginal to a submarine fan system, Miocene, southern Turkey[J]. *Sedimentology*, 2000, 47(4): 801-824.
- [5] 李胜利,于兴河,刘玉梅,等. 水道加朵体型深水扇形成机制与模式:以白云凹陷荔湾3-1地区珠江组为例[J]. *地质前缘*, 2012, 19(2): 32-40.
Li Shengli, Yu Xinghe, Liu Yumei, et al. Formation mechanism and pattern of deep-water fan with channel and lobe: A case study of the Zhajiang Formation in Liwan3-1 area, Baiyun Depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 32-40.
- [6] 刘曾勤,王英民,吕睿,等. 孟加拉扇上扇某区块深水沉积体的物征及演化模式[J]. *沉积学报*, 2012, 30(1): 84-91.
Liu Zengqin, Wang Yingmin, Lyu Rui, et al. The architecture and evolution of deepwater sedimentary elements in one study area within Upper Bengal Fan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(1): 84-91.
- [7] Deptuck M E, Sylvester Z, Pirmez C, et al. Migration-aggradation history and 3-D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6-9): 406-433.
- [8] McHargue T, Pyrcz M J, Sullivan M D, et al. Architecture of turbidite channel systems on the continental slope: Patterns and predictions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(3): 728-743.
- [9] 孙辉,吕福亮,范国章,等. 三级层序内受底流影响的富砂深水沉积演化规律——以东非鲁武马盆地中中新统为例[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(1): 106-115.
Sun Hui, Lyu Fuliang, Fan Guozhang, et al. Evolution of deep-water sand-rich sediments affected by bottom currents in the 3rd order sequences: A case study of Middle Miocene in the Ruvuma Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(1): 106-115.
- [10] 孙辉,刘少治,范国章,等. 深水复合水道体系沉积特征及时空演化规律——以东非鲁武马盆地中中新统为例[J]. *海洋学报*, 2019, 41(1): 87-97.
Sun Hui, Liu Shaozhi, Fan Guozhang, et al. Depositional characteristics and temporal and spatial evolution of deepwater channel complex systems: A case study of Middle Miocene in the Rovuma Basin, East Africa[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(1): 87-97.
- [11] Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, et al. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6-8): 649-676.
- [12] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs—Key elements in facies prediction and effective development[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(8): 821-841.
- [13] 陈亮,庞雄,刘军,等. 珠江口盆地白云凹陷深水重力流优质砂岩储集层特征及识别方法[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(4): 463-471.
Chen Liang, Pang Xiong, Liu Jun, et al. Characteristics and identification of high quality deep-water gravity flow sandstone reservoirs in Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Petroleum exploration and development*, 2015, 42(4): 463-471.
- [14] HIS Energy. Basin monitors: Ruvuma basin[DB/CD]. Houston: IHS Inc, 2019.

- [15] Janssen M E, Stephenson R A, Cloetingh S. Temporal and spatial correlation between changes in plate motion and the evolution of rifted basins in Africa[J]. *GSA Bulletin*, 1995, 107(11): 1317-1332.
- [16] Mahanjane E S, Franke D. The Rovuma Delta deep-water fold-and-thrust belt, offshore Mozambique [J]. *Tectonophysics*, 2014, 614(3): 91-99.
- [17] Hancox P J, Brandt D, Edwards H. Sequence stratigraphic analysis of the Early Cretaceous Maconde Formation (Rovuma basin), northern Mozambique [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2002, 34(3-4): 291-297.
- [18] 孙辉,刘少治,吕福亮,等. 东非鲁武马盆地渐新统深水沉积层序地层格架组成和时空分布[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(1): 170-181.
Sun Hui, Liu Shaozhi, Lyu Fuliang, et al. Stratigraphic framework and temporal-spatial distribution of Oligocene deepwater sedimentary sequence in Ruvuma Basin, East Africa[J]. *Oil and gas geology*, 2019, 40(1): 170-181.
- [19] Salazar M U, Baker D, Francis M, et al. Frontier exploration offshore the Zambezi delta, Mozambique[J]. *EAGE*, 2013, 31(1): 135-144.
- [20] 周总瑛,陶冶,李淑筠,等. 非洲东海岸重点盆地油气资源潜力[J], *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 543-551.
Zhou Zongying, Tao Ye, Li Shujun, et al. Hydrocarbon potential in the key basins in the East Coast of Africa[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 543-551.
- [21] Crane W H, Lowe D R. Architecture and evolution of the Paine channel complex, Cerro Toro Formation (Upper Cretaceous), Silla Syncline, Magallanes Basin, Chile [J]. *Sedimentology*, 2008, 55(4): 979-1009.
- [22] HIS Energy. Basin monitors: Ruvuma basin[DB/CD]. Houston: IHS Inc, 2009.
- [23] Bosellini A. East Africa continental margins[J]. *Geology*, 1986, 14(1): 76-78.
- [24] 温志新,王兆明,宋成鹏,等. 东非被动大陆边缘盆地结构构造差异与油气勘探[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 671-680.
Wen Zhixin, Wang Zhao ming, Song Chengpeng, et al. Structural architecture difference and petroleum exploration of passive continental margin basins in east Africa[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 671-680.
- [25] Salman G, Abdula I. Development of the Mozambique and Ruvuma sedimentary basins, offshore Mozambique[J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 96(1-2): 7-41.
- [26] Fannesu M, Palermo D, Galbiati M, et al. A new world-class deep-water play-type, deposited by the syndepositional interaction of turbidity flows and bottom currents: The giant Eocene Coral Field in northern Mozambique [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 111: 179-201.
- [27] Sprague A R G, Sullivan M D, Campion K M, et al. The physical stratigraphy of deep-water strata: A hierarchical approach to the analysis of genetically related stratigraphic elements for improved reservoir prediction[C]. AAPG Annual Meeting. Houston, TX: AAPG, 2002, 10-13.
- [28] Mayall M, Stewart I. The architecture of turbidite slope channels. In Weimer P, Slatt R M, Coleman J L, Rosen N, Nelson C H, Bouma A H, Styzen M, Lawrence D T, eds. [C], Deep-water Reservoirs of the World: Gulf Coast Section SEPM Foundation 20th Annual Bob F Perkins Research Conference. Tulsa, OK, 2000, 578-586.
- [29] Alpak F O, Barton M D, Naruk S J. The impact of fine-scale turbidite channel architecture on deep-water reservoir performance [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(2): 251-284.
- [30] Pyles D R, Jennette D C, Tomasso M, et al. Concepts learned from a 3-D outcrop of a sinuous slope-channel complex: Beacon Channel complex, Brushy Canyon Formation, West Texas, U. S. A [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(1): 67-96.
- [31] Rossen C, Beaubouef R T. Slope-channel complexes at Guadalupe Canyon, upper Brushy Canyon Formation, Texas, U. S. A [M]. In Nilsen T H, Shew R D, Steffens G S, Studlick J R J, eds. *Atlas of deep-water outcrops: AAPG Studies in Geology*, 2007, 56: 429-431.
- [32] Chapin M, Keller F. Channel-fill sandstones at San Clemente State Beach, California, U. S. A [M]. In Nilsen T H, Shew R D, Steffens G S, Studlick J R J, eds. *Atlas of deep-water outcrops: AAPG Studies in Geology*, 2007, 56, 401-405.
- [33] Barton M, Byrne C O, Pirmez C, et al. Turbidite channel architecture: Recognizing and quantifying the distribution of channel-base drapes using core and dipmeter data [M]. In Poppelreiter M, García-Carballido C, Kraaijveld M A, eds. *Dipmeter and borehole image-log technology: AAPG Memoir*, 2010, 92: 195-211.
- [34] Lowe D R. Sediment-gravity flows, II: Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1982, 52(1): 279-297.
- [35] Baas J H. Conditions for formation of massive turbiditic sandstones by primary depositional processes [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 166(3-4): 293-310.
- [36] 王龙樟,姚永坚,林卫兵,等. 南海南部沉积物波: 软变形及其触发机制[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3462-3470.
Wang Longzhang, Yao Yongjian, Lin Weibing, et al. Sediment-waves in the south of South China Sea: Soft sediment deformation and its triggering mechanism [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3462-3470.
- [37] 杨勤林,张静,郝涛,等. 滨里海盆地盐下碳酸盐岩储层地震逐级预测方法[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(8): 1261-1266.
Yang Qinlin, Zhang Jing, Hao Tao, et al. Seismic stepped prediction methods of sub-salt carbonate reservoirs in Pre-Caspian Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(8): 1261-1266.
- [38] 陈波,郝媛媛,石海信,等. 冷东地区下干柴沟组上段沉积储层特征研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2018, 8(3): 1-6.
Chen Bo, Hao Yuanyuan, Shi Haixing, et al. Sedimentary facies and reservoir characteristics of upper reservoir of lower Gangchaigou formation in eastern Lenghu region [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2018, 8(3): 1-6.
- [39] 张毅,孙东升,薛丹. 曲流河道砂体三维构型建模[J]. *断块油气田*, 2019, 26(04): 470-474.
Zhang Yi, Sun Dongsheng, Xue Dan. 3D architecture modeling of meandering river sand body [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2019, 26(04): 470-474.