

复合砂体构型理论及其生产应用

胡光义,范廷恩,陈飞,井涌泉,宋来明,梁旭,肖大坤

(中海油研究总院有限责任公司,北京 100028)

摘要:近年来中海油提出并形成了复合砂体构型理论,在这一理论指导下取得了一系列重大发现。系统介绍了复合砂体构型理论提出的背景、基本概念、主要内容、表征方法和实践应用,探讨了复合砂体构型理论的意义。运用探地雷达证实了常见的构型单元往往是点坝复合体,当达到地震可分辨尺度时,一般对应于单一河道带或复合河道带,相当于小层或砂层组级别,这个级次的砂体定义为“复合砂体”,在油田开发中作为一个独立开发单元。复合砂体是由于河谷盆地构造变化而造成可容空间和物源供给之间突变而引起的,地貌学上的阶地地貌证明了沉积作用和复合砂体构型样式之间的关系。论述了复合砂体构型界面、构型单元、构型模式、规模特征以及控制因素,明确了构型界面的现代沉积地貌标志。如何进行精细复合砂体构型表征关系到能否正确描述剩余油分布和量化开发指标,进而完善注采井网、提高加密调整井的成功率。

关键词:河流阶地;构型级次;表征方法;复合砂体构型;剩余油分布

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Theory of composite sand body architecture and its application to oilfield development

Hu Guangyi, Fan Ting'en, Chen Fei, Jing Yongquan, Song Laiming, Liang Xu, Xiao Dakun

(CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: In recent years, the theory of composite sandbody architecture proposed by CNOOC has contributed to several major oil and gas discoveries. This paper systematically introduces the context for proposing this theory, its fundamental concept, main content and characterization method as well as practical application, and discusses the significances of this theory. Ground penetrating radar reveals that the common architecture element of modern and ancient meandering river deposits is point bar composite instead of a single point bar. When their scales being larger than seismic resolution, they commonly correspond to a single channel belt or composite channel belts and represent a sub-layer or sand group. A sand body of this kind is defined as a composite sand body and is treated as a separate development unit. The composite sand body is originated from abrupt change in accommodation and source supply caused by tectonic uplift or subsidence of basin valley. The relationship between depositional process and composite sand body architecture pattern is revealed by river terrace geomorphology. This paper illustrates architecture unit, architecture bounding surfaces, architecture model, scale characteristics and their controlling factors, and defines modern sedimentary geomorphic markers of architecture bounding surfaces. Fine characterization of composite sand body architecture is the key to precisely describing remaining oil distribution and quantifying development index, and further optimizing injection-production pattern and increasing success rate of infilling drilling.

Key words: river terrace, architecture hierarchy, characterization method, composite sandbody architecture, remaining oil distribution

近十年,海上油田大胆创新高效开发理念,强化技术攻关,探索地质新思路和新方法,提出并形成了

适合海上油田开发尺度的复合砂体构型理论,奠定了海上大井距油田高效开发的坚实技术基础^[1-9]。

收稿日期:2017-02-14;修订日期:2018-01-03。

第一作者简介:胡光义(1961—),男,博士、教授级高级工程师,油气田勘探开发地质研究与生产管理。E-mail: huggy@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05024-001)。

经过探地雷达分析、野外露头 and 探槽解剖的研究,证实了完整的单期点坝出现概率极低,往往以点坝复合体的形态出现,海上油田构型研究难以达到基于密井网条件的陆上油田点坝构型认识程度。“复合砂体构型”的概念是从油气藏开发生产实际操作和地震属性研究的需求出发而提出,是储层非均质性的直观量化,据此完善注采井网、提高加密调整井的成功率。在这一理论指导下中国海油在海上取得了一系列重大发现^[1-3,10-11],渤海湾河流相油田新投产油田有30多个,设计方案动用原油地质储量 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$,天然气地质储量 $797 \times 10^8 \text{ m}^3$,设计开发井数1308口,产能 $1790 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[11]。

1 复合砂体构型理论背景

海上油田具有井距大、井网稀、资料相对较少,这对油田的认识造成了很大的局限性^[1-3,5]。油田最直接资料是钻井资料,陆相河流单砂体侧向规模一般小于100 m,随着加密调整陆上油田井距一般能够控制这些储层单元^[12],而对于海上油田即使在开发中后期的井距也是350~400 m,这种大井距超出了单个点坝的范围,这给油田地质研究带来了很大的困难。仅由单井资料出发,依靠传统的“井-震结合”描述储层是不够的。

海上油田地质研究条件苛刻。河流三角洲沉积的砂体储层非均质性强、内部结构复杂、相变快。陆上油田关于河流三角洲复杂储层构型研究,往往是针对基于50 m小井距的开发实验区块^[13-14]。同时,受开发周期和完井费用的限制,生产过程中对于钻井资料的再收集和再研究的程度有限,导致海上油田整体研究程度相对陆上油田较低^[3,15-16]。

但是,海上油田往往能够采集到更高品质的地震资料,充分挖掘地震资料信息,通过地质与地震的结合^[5-7,17-18],发展井震结合的油藏精细描述方法是海上油田开发亟需解决的难题。地震信息通常只能识别大尺度的构型单元(复合砂体),对于小尺度构型单元(单砂体)的识别存在一定难度。目前海上高品质地震主频范围约在20~40 Hz,理论可分辨10~20 m^[18],即使高分辨率地震最多能达到3~5 m分辨率。在面向开发尺度的河流相储层研究中,地震资料分辨率之下的沉积单元和沉积界面的穿时性和多解性是急需解决的重要问题,而这也正是海上油田构型研究的一个重要难题。

2 复合砂体构型的内涵

2.1 关键概念

复合砂体指地震资料空间可识别的、成因相联系的、不同期次、不同微相、多期单砂体的组合体。理论上说它对应于一个单一的复合地震反射相位,由河流的迁移摆动形成,受可容空间与沉积物供给控制,空间上呈堆叠型、侧叠型和孤立型等,对应于现代沉积的活动河道带,是三级阶地所限范围,相当于砂层组-小层级别。在海上大井距条件下,以构型要素分析方法为指导,以地震信息为主井震联合,研究复合砂体内部不同构型单元的级次、形态、规模、方向、物性及其空间叠置关系(图1)。构型单元在开发中作为一个独立开发单元,对油田高效开发具有重要意义。

针对储层厚度低于地震分辨率的先天不足,对成因相联系的多期点坝所构成的复合砂体在地震可识别尺度上进行分类,通过探地雷达的精细解剖,识别精细的构型界面,建立复合砂体三维构型定量模式,依据点坝的沉积结构构造、几何形态和增生迁移方式,对不同类型的复合砂体构型样式与叠合结构进行精细解剖。因此,将地质与地震有机结合,形成海上开发尺度的“复合砂体构型”的研究方法,有助于适应海上大井距条件下的储层构型研究。

2.2 构型界面

2.2.1 构型界面特征

沉积环境具有旋回性,沉积速率具有期次性,这必将导致沉积体的期次结构性^[19-22]。通过对不同级别构型进行分析,将其划分为具有成因联系的不同级别沉积单元,明确复合砂体之间几何形态、叠置关系以及连通性(表1;图2)。

5级是复合河道带级别,界面为古河谷群的边界,河道带摆动的最大范围受控于米兰科维奇旋回的影响^[22]。5级层序与短期基准面旋回或者砂层组大体相当。相当于一个河谷或多期河流沉积的垂向叠置体,厚度可达几米到几十米;横向上,沉积单元间具有较好的可对比性和等时性,分布几个平方千米。整个研究区地层为一个5级层序。

6级是单一河道带级别,界面为河道带的界面,河道摆动的最大范围,可形成河流阶地,时间约为0.001~0.002 Ma^[23],受控于米兰科维奇旋回的影响。6级层序与单层大体相当。侧向为几期河流沉积的横向摆

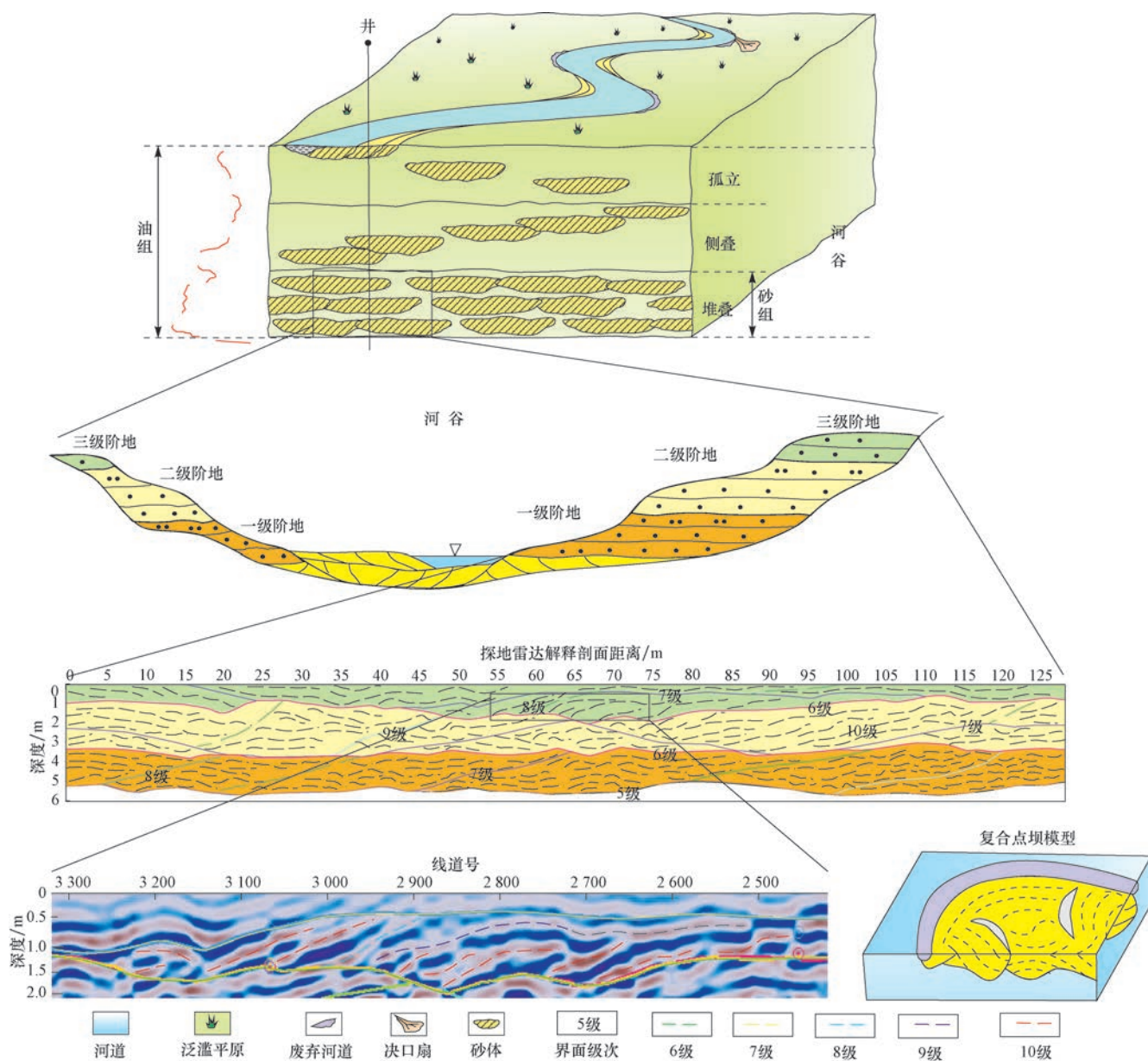


图1 复合砂体构型分级示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hierarchies of composite sandbody architectural units

动叠置体组成河道带,具有单层河道砂体侧向叠置特征,垂向厚度可达数米,横向分布范围不足一个平方米。在海拉尔现代曲流河钻孔时在1.3 m左右出现卡钻现象,卡钻部分以泥岩为主,砂体以深灰色、灰色粉砂岩为主,表明了河道群规模相对较小,侵蚀能力较弱。下部界线在钻井位置大约2.9 m,整体以发育浅灰色、灰色中、细砂岩为主,探地雷达反射能量下部相对较强,河道清晰可见,表明河道具有一定规模(图2)。

5~6级界面在井间可以对比,7级以下井间对比困难。

7级是复合点坝规模,为河道与溢岸沉积复合体的边界,以局部冲刷充填和底部滞留泥砾为特征,相当

于当前活动河道及溢岸沉积体,受米兰科维奇旋回影响,是油田开发的基本地层单元。河道内部可以识别出多期点坝,界面向下微凹或者相对平坦,侧向上与泥质泛滥平原或废弃河道相连。在垂向上为几期河流沉积,侧向上由河道及溢岸沉积构成(图2)。

8级代表了点坝或者心滩的界面,相当于Maill的4级界面^[19-20]。这种底形是较长时间形成的微地貌沉积成因单元^[24],相当于成型淤积体^[25],沉积时间跨度为一百年至数千年^[20]。在河流体系内,8级构型相当于单一微相,例如点坝、天然堤、决口扇、决口水道沉积等。在雷达剖面上常常呈现为雷达反射的终止或同相轴产状的改变,一般为复合点坝间或河道间的界限(图2)。

表 1 河流相复合砂体构型分级
Table 1 Hierarchies of fluvial composite sandbody architecture

级别	构型单元	时间 规模/a	典型 厚度/m	沉积相	界面特征/ 构造标志	沉积过程	地貌 特征	与油组 对比	Vail 层序 地层分级	Miall 界 面分级
1	叠合盆地充填复合体	$10^8 \sim 10^9$			全球板块运动 不整全面	板内沉积旋回		巨层序		
2	盆地充填复合体	$10^7 \sim 10^8$			区域不整合间断面	区域性沉积			超层序	9
3	盆地充填体	$10^6 \sim 10^7$			不整合面和与 其相应的整合面	盆地内沉积		含油层系	层序	8
4	体系域	$10^5 \sim 10^6$		河流相沉积体系	沉积相间	岩性组旋回米 兰科维奇旋回		油层组	准层序组	7
5	复合河道带	$10^4 \sim 10^5$	>5	叠置河流沉积体	沉积亚相间/ 三级阶地	岩性旋回米 兰科维奇旋回	河谷	砂层组	准层序	6
6	单一河道带	$10^3 \sim 10^4$	0.5 ~ 3	河道复合体	河道间界面/ 二级阶地	河道叠置米 兰科维奇旋回	活动河 道带	单砂层/ 小层	层组	5
7	复合点坝	$10^3 \sim 10^4$	0.5 ~ 2	多期河道点坝复合体	砂层组界面/ 一级阶地	河道改道	现存 河道			
8	点坝	$10^2 \sim 10^3$	0.5 ~ 2	河道充填,顶部为泥 披,底部为侵蚀面, 发育泥砾,正韵律	办面平缓至向上凹 的,底部见滞留 沉积砾石	百年洪水 河道及坝体 迁移	河床		层	4
9	侧积体	1 ~ 10	0.3 ~ 1	顶部为侵蚀面, 发育泥砾	界面不平, 呈低角度, 为侧向增生界面	十年洪水 季节事件				3
10	层理	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	0.1 ~ 0.2	同种相	层理界面	脉动水流			纹层	0 ~ 2

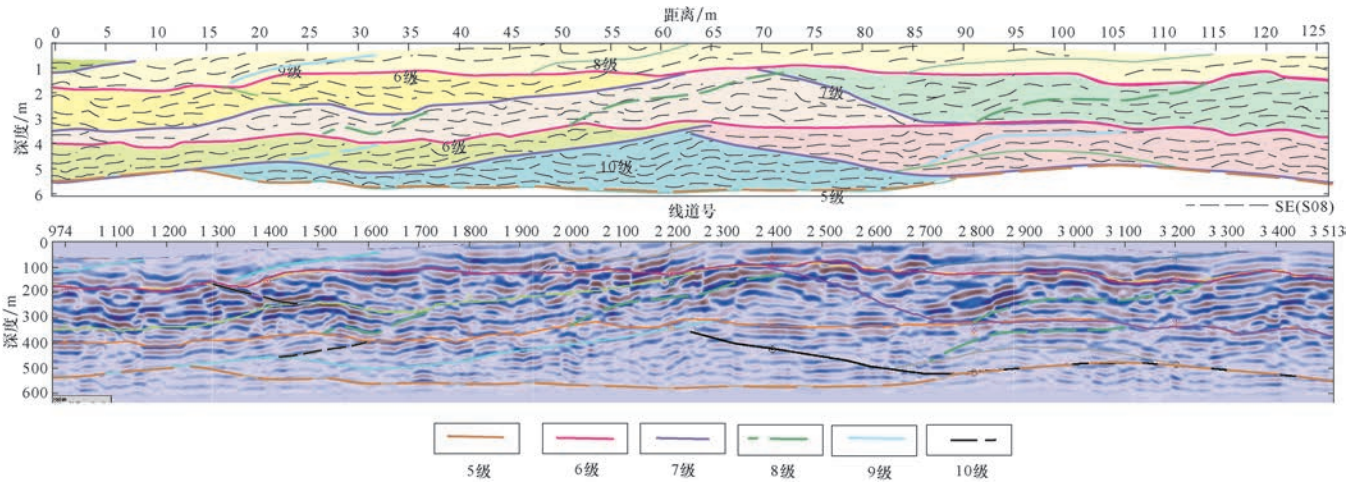


图 2 河流相复合砂体构型界面级次划分(探地雷达剖面)
Fig. 2 Hierarchies of fluvial composite sandbody architectural bounding surfaces

2.2.2 构型界面的现代沉积意义

河流阶地的形成是气候变化、构造运动与基准面变化的综合结果,侵蚀基准面下降,河道侵蚀侧向迁移,横向摆动,导致河流阶地形成^[26-27]。阶地形态与复合砂体规模分布存在一定相关性。通过对海拉尔河进行测量发现,河谷宽度 3 ~ 5 km,整个河谷发育有三级河流阶地,河谷形态、阶地分布及沉积物厚度等各不相同,河谷呈宽阔的 U 型,阶地沿河道两侧不对称分布。阶地平台代表河谷盆地短暂稳定期,对应于薄泥

岩层界面,泥岩厚度(本区 < 0.3 m)取决于稳定周期长短。阶地高度 1 ~ 3 m 恰好对应于砂层组的厚度。一级阶地面距离河面 0.5 ~ 1.1 m,为堆积阶地,沉积物为粉砂岩、细砂岩;二级阶地面距离河面 2.2 ~ 3.8 m,为堆积阶地,沉积物为中细砂岩、粉砂岩;三级阶地面距离河面 4.8 ~ 6.2 m,为堆积阶地,沉积物为中细砂岩(图 3)。研究表明,5 级构型单元是复合河道带级次,受三级阶地沉积控制,砂体分布于河谷范围。6 级构型单元是单一河道带,分布于活动河道带范围,受二级阶地沉积控制。7 级构型单元是复合点坝,受控于一



图3 现代沉积地貌与构型界面关系

Fig. 3 Relationship between modern sedimentary geomorphology and architectural bounding surfaces

级阶地,空间上呈一定角度叠瓦状分布,单个点坝间存在泥质薄夹层,复合点坝间被废弃河道所分割,是现代沉积的河道所限范围。8级构型单元是点坝级别,相当于现代沉积的河床位置。

2.3 构型单元

河流相复合砂体划分为3种类型7种构型样式,分别为堆叠型、侧叠型和孤立型3种砂体构型,形成紧密接触侧叠型、疏散接触侧叠型、离散接触侧叠型、下切侵蚀河道孤立型、决口扇孤立型、孤立河道和堆叠构型7类样式。

不同构型样式在岩心上是由单期河道垂向和侧向叠置而成,单期河道垂向上具有粒度向上变细、沉积构造规模向上变小的典型正韵律特征,厚度一般大于2 m。横向上河道砂体迁移,侧向上河道叠置内部发育不同

冲刷界面,河道呈堆叠或侧叠样式。底部为冲刷面,冲刷面之上见泥砾沉积,向上由细砂岩变为粉砂岩至纯泥岩组成,表现为明显的二元结构;下部具槽状和板状交错层理、平行层理、爬升层理、波纹层理,顶部为具水平层理的泥岩(图4)。自然电位测井曲线以钟型为主,也有箱型、钟型箱型组合型,自然伽马曲线低值,深浅双侧向曲线幅度差大。

2.3.1 堆叠型特征

多个河道砂体在侧向和垂向上的彼此切割和叠置,呈现“多层楼”形态。整体呈河道复合体,河道砂体以中粗砂岩为主,内部发育槽状交错层理、楔状交错层理和平行层理。不同期次、不同级次砂体相互叠置,内部发育各种形式的冲蚀-充填界面,局部夹有泥质夹层。河道频繁迁移摆动,砂体垂向厚度较大,延伸相

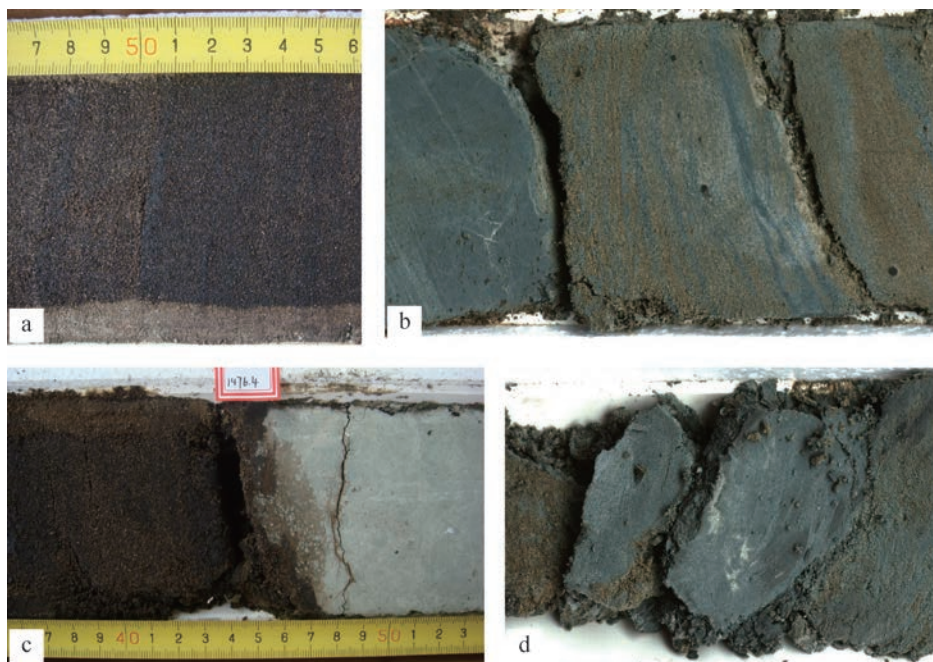


图4 渤海油田复合砂体构型单元岩心特征

Fig. 4 Characteristics of composite sandbody architecture in cores from Bohai oilfield

- a. 堆叠砂体, NmIV-1, 中砂岩, 埋深1 476.4 m, Q油田; b. 堆叠砂体, 中-细砂岩, NIII, 埋深1 690.5 m, B油田;
c. 侧叠砂体, 砂、泥岩, NmIV-1, 埋深1 475.5 m, Q油田; d. 孤立河道砂体, 粉-细河道砂体, 粉-细砂岩, NmIV, 埋深1 703.28 m, B油田

对较远。测井曲线为箱形、箱-钟形,地震上呈现强振幅,连续性较好,波形表现为拉伸和变形。

2.3.2 侧叠型特征

河道规模变大、弯曲度增大,河道呈大规模冲刷充填结构,砂体呈透镜状、板状,以侧向迁移增生为主,底界面为河道侵蚀界面。河道横向环流能力变大,横向迁移摆动能力相对较强,砂体横向延伸较大,形成连片状河道砂体,剖面上呈侧向叠置横向分布。地震剖面上反射同相轴相连,但是波形有所变化,测井上可以看出有明显上下分布特征,形成钟状尖峰型高阻。

依据侧向迁移的分布状态和连通关系又分为以下3种类型。

1) 紧密接触型侧叠砂体:此时可容纳空间相比其它亚类小,河道规模相对变化较小,砂体侧向连通性较好,河道砂体依次相互切割。砂体呈侧向切叠式,表明了相对小的可容纳空间下砂体强烈侧向迁移。

2) 疏散接触型侧叠砂体:可容纳空间相对增加,河道横向环流能力变小,河道坡度变小,更加接近下游,侧向迁移能力变弱,砂体与砂体之间有泥质隔夹层存在。河道砂体平面上呈宽条带状分布,侧向连通性变差。

3) 离散接触型侧叠砂体:随着相对湖平面继续上升,可容纳空间变大, A/S 接近 1 (A 为可容纳空间; S 为沉积物供给量),河流由加积逐渐转变为退积。河道流量变小,更加趋于下游分布,河道砂体彼此相对孤立,连通性变差,形成迷宫状砂体结构。

2.3.3 孤立型特征

随着基准面的不断上升, A/S 比值增大,河道趋于下游,坡度变得更加平缓。河道规模变小,砂体规模变小,泛滥平原泥岩沉积增加,河道砂体呈孤立式分布。砂体彼此孤立,地层表现为弱退积-加积特征,测井曲线以钟形为特点,地震剖面上出现以弱反射为背景的不连续强振幅反射。

依据沉积特征又分为以下2种类型。

1) 下切侵蚀型:河道下切侵蚀能力变强,河道流量变大。剖面上切河谷充填的砂体具有冲刷充填结构。这种河道充填砂体在下切侵蚀河谷内频繁摆动迁移,填充粗粒物质,形成孤立河道砂体结构类型,构成各类储集砂体和岩性圈闭。渤海海域秦皇岛 S 油田新近系明化镇组在 1 340 m 的下切河谷内至少有 3 期河道填充,最厚处达到 36 m 左右,宽度达到 3 500 m 左右。

2) 孤立河道和决口扇:可容纳空间达到较大范围,河流流量相对变小,河道弯曲度增大,宽/深比较大,河道呈孤立状,厚度变薄延展变小。河道砂体粒度向上变细,分选性变好。形成分布广泛的孤立河道砂体,有时还伴有决口扇出现。

2.4 规模特征

通过探地雷达对海拉尔现代曲流河的研究,统计了河道带各期点坝及其侧积层产状及规模参数,结果表明,该期河道带侧积体沿走向长度约 72 ~ 173 m,宽度约 28 ~ 58 m,最大厚度可达 2.65 m,最大倾角 3.19° (图 5;表 2)。

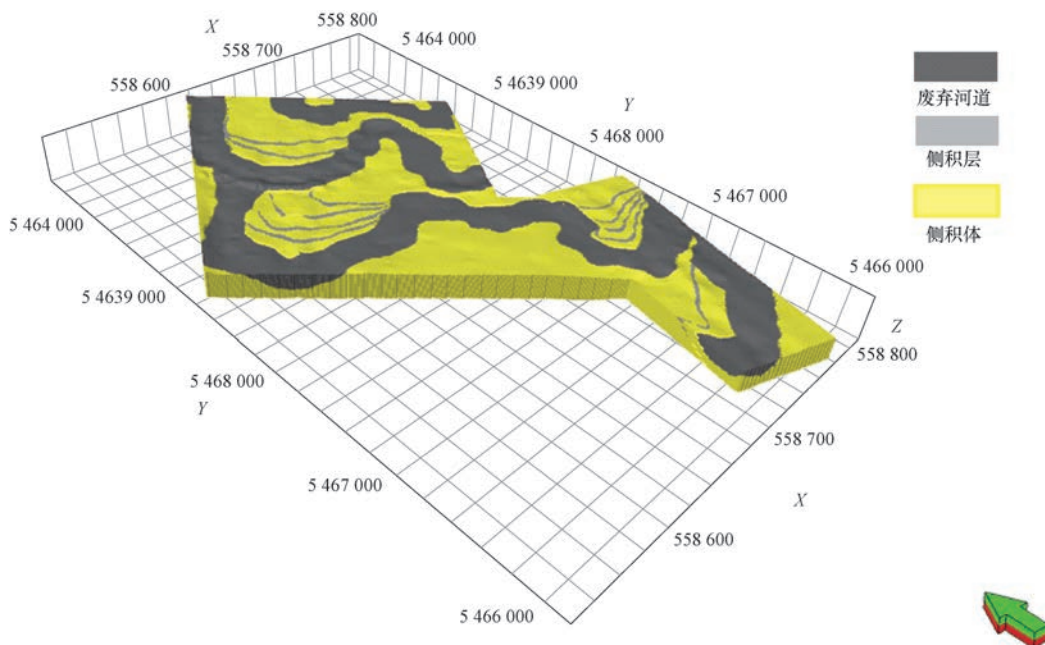


图5 海拉尔曲流河现代沉积基于探地雷达的三维原型模型

Fig.5 3-D prototype architecture model built based on GRP of modern Halaer meandering river deposits

表 2 河道带点坝产状规模参数

Table 2 Occurrence and parameters of point bar in channel belt

期次	点坝	侧积体	长度/m	宽度/m	最大厚度/m	最大倾角/(°)	备注
SQ1	No. 1	LA1	102	48	1.05	1.25	
		LA2	92	28	1.56	3.19	
		LA3	66	24	1.61	3.84	未全覆盖
		LA4	78	32	2.15	3.84	未全覆盖
	No. 2	LA1	173	58	2.65	2.62	
		LA2	115	45	2.00	2.54	
		LA3	118	40	2.04	2.92	
		LA4	72	42	1.68	2.29	
	No. 3	LA1	86	56	1.65	1.69	
		LA2	96	66	1.73	1.50	未全覆盖
	No. 4	LA1	67	51	1.84	2.07	未全覆盖
		LA2	66	40	1.54	2.20	未全覆盖

在点坝研究基础上得出复合点坝规模,堆叠型砂体厚度一般 3~10 m,平均 8 m,宽度一般 300~1 200 m,平均 600 m,砂/地比大于 40%。侧叠型砂体厚度一般 3~8 m,平均 6.4 m,宽度一般 300~900 m,平均 560 m,砂/地比约为 40%~30%。孤立型砂体砂体厚度一般 1~4 m,平均 3 m,宽度一般 200~600 m,平均 400 m,砂/地比小于 30%。

2.5 控制因素

河流相复合砂体空间结构、叠置样式和规模形态具有一定的规律性,复合砂体结构形态受控于相对可容纳空间与沉积物供给^[6,19,24,28-34]。随着 A/S 比值增大,砂体类型依次发育堆叠型、侧叠型和孤立型,砂体的加积程度减小,分割程度变大(图 6)。

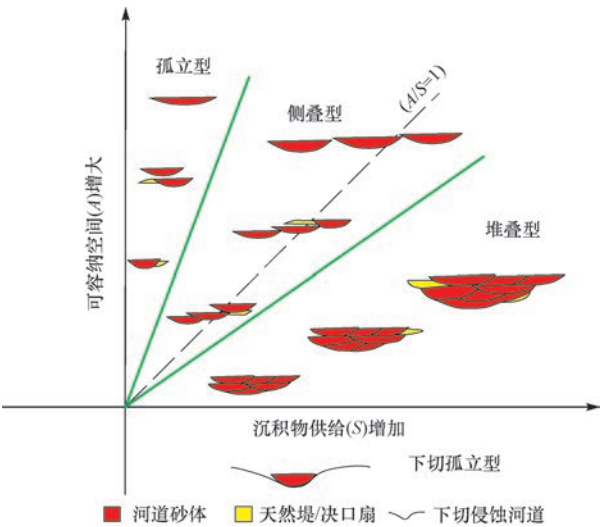


图 6 复合砂体构型控制因素分析

Fig. 6 Diagram illustrating controlling factors on composite sandbody architecture

在层序界面附近,湖平面上升早期,由于可容纳空间较低,河流通过侵蚀下切增加可容纳空间,从而形成下切侵蚀河道(河谷)。河流规模相对较大,河道迁移摆动能力相对较强,单套砂体规模较大,河道呈大规模冲刷充填。

随着湖平面缓慢上升,河流水体能量变大,沉积物负载量大,河道规模变大。发育相互切割、彼此叠置的河道砂岩,砂体内部发育各种形式的冲刷充填界面。当湖平面达到快速上升阶段时,河道表现为退积叠加样式,形成堆叠型复合河道砂体。

湖平面达到最高时期,河道弯曲度增大,沉积物供给相对减小,形成彼此孤立、横向上受限的河道。整体上呈现多期河道相互叠加,河道间发育明显的隔夹层,形成侧叠型河道砂体。河道砂内部结构疏散,连通性变差。

湖平面下降时期,可容纳空间减小,沉积物供给相对不足,河道作用相对较弱,侧积作用不甚发育,河道规模变小,侧向连通性差,呈窄小的条带状孤立分散于泛滥平原中。

3 复合砂体的表征技术

1) 地质信息约束的井-震联合表征技术

复合砂体构型理论基于构型单元厚度低于地震分辨能力的储层表征,实现薄层人工智能地震解释新途径。将地震可分辨尺度的“复合砂体构型”,进行正演、反演和地震属性敏感性分析。分析表明,复合砂体构型的地质属性与其地震属性密切相关,从而建立了基于复合砂体构型样式的地震响应特征模板,实现低于地震分辨能力的储层表征(图 7)。平面在任何一点

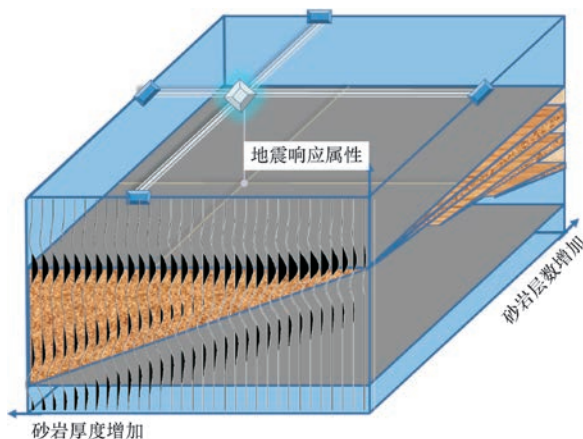


图7 地质信息约束的井-震联合表征技术思路

Fig. 7 Procedures of well-to-seismic characterization of sand body architecture under geological constraints

则代表一种构型类型,任何一种构型样式都对应一种地震响应模式。

综合复合砂体构型样式及其测井曲线特征、单井相识别、地质知识库等方面的研究成果,建立相应的地球物理参数模型,在地质信息约束的条件下进行单井地质相-地震相的转换分析,从而明确了地震响应正演模拟和地质模型的对应关系。在精细的储层井震标定基础上,选择有监督的波形分类算法,确定典型的构型地震相,目前技术可以识别单层、两层叠置、三层叠置和多层叠置等4类构型地震相。进而,通过各类不同构型地震响应模板转成地质模型。

2) 地震驱动确定性建模技术

既然地震信息空间变化特征是可以确定的,复合砂体构型实际把是空间某个位置的储层构型属性看作一种信息,那么另一位置的储层特征可以通过地震信息的空间变化特征估算得到^[34-36]。该空间变化可以基于复合砂体构型的地震信息计算得到,有依据地赋予地震属性以鲜活的沉积学意义,使得储层构型与地震属性相实现了一一对应,该建模方法不仅能通过构型地震相“相控”模型的属性,而且还能控制储层的内部构型。沉积相分析虽然能够划分不同相带,但同一沉积微相内往往被视为均质;与之相比,基于复合砂体构型的地震驱动建模方法能够得到砂体的构型样式,且充分考虑所在位置的地震属性信息,因此能够更加精确的刻画砂体的非均质性。

4 应用成效及意义

4.1 小层的细分和对比

依照河道砂体演化规律,河道砂体的每个周期性

的沉积演化过程,一般会经历下切孤立型、堆叠型、侧叠型和孤立型河道的过程。其底部为下切侵蚀河道,顶部为湖泛期构成的相对稳定的隔层,内部具有成因上有联系、相对完整的一套岩性组合,因而,这个过程的地层单元是属于一个油层组。在油组内随着A/S的演化,又形成堆叠型、侧叠型和孤立型3种构型类型,这3种类型可以被细化为次级的砂层组。每一种构型类型受可容纳空间与沉积物供给的变化影响,又分成几种构型样式,每一种构型样式分属于不同单砂层,所以完全可以采用构型样式作为储层细分的依据和对比的标志。

4.2 储层精细解剖

河流相砂岩储层砂体横向迁移摆动频繁,不同级次叠置普遍,形成各种类型级次复杂的复合砂体。砂体规模变化较大,砂体间的接触关系复杂,受砂体分布影响,油水关系往往被复杂化。这其中最关键的就是有效划分和识别各级构型单元的界限,正是这些界限阻断了流线,从而影响开发效果。依据复合砂体构型理论对河流相储层的储量单元内部储层进行了分级解剖刻画。按照不同构型级次,能够清晰的识别出储量单元油水关系、界面类型、注采关系和剩余油分布规律。

4.3 地震沉积学意义

通过对河流相复合砂体构型分析,结合每一类构型的地震响应特征,将构型类型在地震响应属性上表现出来,避免了砂体预测时存在的多解性和不确定性,提高了小于 $1/4\lambda$ 厚度的薄储层构型的描述精度。由于地震属性与储层参数之间的对应关系复杂,单地震属性预测储层时存在多解性,将优选的敏感地震属性进行聚类分析,获得各地震属性组合后的变化规律,对储层进行解释,降低解释过程中的不确定性,提高储层解释的精度和准确度。地震属性随储层厚度叠置部位的不同发生有规律的变化,不同地震属性组合特征可以区分砂泥岩,在此基础上,建立地震属性组合多维网状图,实现了薄层砂体的预测。另一方面,将探地雷达的解释方法运用到地震解释中,精细刻画目标油田储层,推动地震信息的精细解读。

5 结论

1) 针对储层厚度低于地震分辨率的先天不足,创立并发展适合海上油田开发尺度的“复合砂体构

型理论”。

2) 论述复合砂体构型的涵义,识别出了4个级次的构型界面,初次识别出复合点坝,建立复合砂体三维构型定量模式,总结了复合砂体构型受控于可容纳空间与沉积物供给的影响。

3) 针对海上大井距油田,在复合砂体构型理论的指导下,形成了地质信息约束的井震联合表征技术和地震驱动确定性建模技术。

4) 复合砂体构型理论不仅适用于海上油田,而且也适用陆上油田,丰富了陆相层序地层学、储层地质学和地震沉积学的理论。

参 考 文 献

- [1] 胡光义,孙福街,范廷恩,等. 海上油气田勘探开发一体化理念、基本思路 and 对策[J]. 中国海上油气,2013,25(6):61-64.
Hu Guangyi, Sun Fujie, Fan Ting'en, et al. A conception of exploration-development integration and the relative working principles and procedure in offshore oil and gas fields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(6): 61-64.
- [2] 周守为. 海上油田高效开发技术探索与实践[J]. 中国工程科学, 2009, 11(10): 55-60.
Zhou Shouwei. Exploration and practice of offshore oilfield effective development[J]. Technology Engineering Science, 2009, 11(10): 55-60.
- [3] 胡光义,陈飞,孙立春,等. 高分辨率层序地层学在河流相油田开发中的应用[J]. 沉积学报,2013,31(4):600-607.
Hu Guangyi, Chen Fei, Sun Lichun, et al. Application of high-resolution sequence stratigraphy of fluvial facies in development of oilfield[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 600-607.
- [4] 孙立春,蒋百召,何娟,等. 基于参数增量的地质储量增量近似劈分方法[J]. 中国海上油气,2015,27(2):48-52.
Sun Lichun, Jiang Baizhao, He Juan, et al. An approximate method to breakdown the OOIP based on the OOIP-estimate parameter increments[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(2): 48-52.
- [5] 陈飞,胡光义,范廷恩,等. 渤海海域W油田新近系明化镇组河流相砂体结构特征[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 207-213.
Chen Fei, Hu Guangyi, Fan Ting'en, et al. Sandbody architecture and sequence stratigraphy of fluvial facies, Neogene Minghuazhen Formation, W Oil field, Bohai Bay[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(2): 207-213.
- [6] 胡光义,陈飞,范廷恩,等. 渤海海域S油田新近系明化镇组河流相复合砂体叠置样式分析[J]. 沉积学报,2014,32(3):586-592.
Hu Guangyi, Chen Fei, Fan Ting'en, et al. Analysis of fluvial facies compound sandbody architecture of the Neogene Minghuazhen Formation of S oilfield in the Bohai bay[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(3): 586-592.
- [7] 范廷恩,胡光义,余连勇,等. 切片演绎地震相分析方法及其应用[J]. 石油物探,2012,51(4):371-376.
Fan Ting'en, Hu Guangyi, Yu Liangyong, et al. Isochronous slice method for seismic facies analysis and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(4): 371-376.
- [8] 王晖,胡光义,范洪军,等. 边际油田河流相储集层表征关键技术[J]. 石油勘探与开发,2012,39(5):626-633.
Wang Hui, Hu Guangyi, Fan Hongjun, et al. Key technologies for the fluvial reservoir characterization of marginal oilfields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 626-633.
- [9] 孙立春,汪洪强,何娟,等. 尼日利亚海上区块近海底深水水道体系地震响应特征与沉积模式[J]. 沉积学报,2014,32(6):1140-1152.
Sun Lichun, Wang Hongqiang, He Juan, et al. Seismic characteristics and depositional model of near-seabed submarine leveed-channel complexes in Nigeria Offshore Block, West Africa[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(6): 1140-1152.
- [10] 夏庆龙,周心怀,王昕,等. 渤海蓬莱9-1大型复合油田地质特征与发现意义[J]. 石油学报(增刊2), 2013, 34:15-23.
Xia Qinglong, Zhou Xinhui, Wang Xin, et al. Geological characteristics and discovery significance of large-scale and compound oilfield of Penglai9-1 in Bohai[J]. Acta Petrolei Sinica (2), 2013, 34: 15-23.
- [11] 陈伟,孙福街,朱国金,等. 海上油气田开发前期研究地质油藏方案设计策略和技术[J]. 中国海上油气, 2013, 25(6):48-54.
Chen Wei, Sun Fujie, Zhu Guojin, et al. Some strategies and techniques for designing geological reservoir engineering plans in the preceding research of offshore oil and gas field development[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(6): 48-54.
- [12] 吴胜和,翟瑞,李宇鹏. 地下储层构型表征:现状与展望[J]. 地学前缘, 2012, 19(2):15-23.
Wu Shenghe, Zhai Rui, Li Yupeng. Subsurface reservoir architecture characterization: Current status and prospect[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 15-23.
- [13] 李阳,郭长春. 地下侧积砂坝建筑结构研究及储层评价—以孤东油田七区西Ng52+3砂体为例[J]. 沉积学报,2007,25(6):942-945.
Li Yang, Guo Changcun. The architecture and reservoir evaluation of underground lateral accretion bar: a case study on the Ng52+3 sandbody in 7th block west of the Gudong oilfield[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 942-945.
- [14] 封从军,鲍志东,代春明,等. 三角洲前缘水下分河道单砂体叠置机理及对剩余油的控制—以扶余油田J19区块泉头组四段为例[J]. 石油与天然气地质,2015,36(1):128-135.
Feng Congjun, Bao Zhidong, Dai Chunming, et al. Super imposition patterns of under water distributary channel sands in deltaic front and its control on remaining oil distribution: a case study from K₁q⁴ in J₁₉ block, Fuyu oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 128-135.
- [15] 韩雪芳,颜冠山,刘宗宾,等. 基于单成因砂体的三角洲前缘油水运动规律—以渤海湾盆地Z油田东营组二段下亚段为例[J]. 石油天然气地质,2017,38(2):241-246.
Han Xuefang, Yan Guanshan, Liu Zhongbin, et al. Oil water movement pattern based on research of delta front monogenetic sand: a case study from the E₃d^{2(下)} of oilfield Z in the Bohai bay basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 241-246.

- [16] 安桂荣, 许家峰, 周文胜, 等. 海上复杂河流相水驱稠油油田井网优化: 以 B-2 油田为例[J]. 中国海上油气, 2013, 25(3): 28-31.
An Guirong, Xu Jiafeng, Zhou Wensheng, et al. Well pattern optimization in offshore water driver heavy oilfields with complicated fluvial facies[J]. China Offshore oil and Gas 2013, 25(3): 28-31.
- [17] 胡光义, 范廷恩, 陈飞, 等. 从储层构型到“地震构型相”——一种河流相高精度概念模型的表征方法[J]. 地质学报, 2017, 91(2): 465-478.
Hu Guangyi, Fan Ting'en, Chen Fei, et al. Form Reservoir architecture to seismic architecture facies—the characteristics method of a high resolution the conceptual model[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(2): 465-478.
- [18] 井涌泉, 范洪军, 陈飞, 等. 基于波形分类技术预测河流相砂体叠置模式[J]. 地球物理学进展, 2014, 19(3): 1163-1167.
Jing Yongquan, Fan Hongjun, Chen Fei, et al. Application of wave-form classification in the prediction of fluvial facies interbedded sandstone reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2014, 19(3): 1163-1167.
- [19] Miall A D. The geology of fluvial deposits-sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology[M]. Springer, 1996: 75-310.
- [20] Miall A D. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. Earth Science Reviews, 1985, 22: 261-308.
- [21] 纪友亮, 周勇, 吴胜和, 等. 河流相地层高精度地层构型界面形成机制及识别方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 8-15.
Ji Youliang, Zhou Yong, Wu Shenghe, et al. Formation mechanism and recognizing method of high resolution strata architecture boundary in fluvial strata[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(2): 8-15.
- [22] 吴胜和, 纪友亮, 岳大力, 等. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 12-22.
Wu Shenghe, Ji Youliang, Yue Dali, et al. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 12-22.
- [23] Vail P R, Mitchum R M J, Todd R G, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 4: Global cycles of relative changes of sea level [A] // Payton C E. Seismic Stratigraphy applications to hydrocarbon exploration [J]. AAPG Memoir, 1977, 26: 49-212.
- [24] Allen J R L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar complexes and sandstone sheets (lower-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders [J]. Sedimentary Geology, 1983, 33(4): 237-293.
- [25] Reesink J H, Bridge J S. Evidence of bedform superimposition and flow unsteadiness in unit-bar deposits, South Saskatchewan river, Canada[J]. Journal of Sedimentary Research, 2011, 81, 814-840.
- [26] Bridgland D R. River terraces system in north-west Europe: An archive of environmental change uplift and early human occupation [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19: 1293-1303.
- [27] 许刘兵, 周尚哲. 河流阶地形成过程及其驱动机制再研究[J]. 地理科学, 2007, 27(5): 672-677.
Xu Liubing, Zhou Shangzhe. Formation process and driving mechanism of fluvial terrace [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(5): 672-677.
- [28] Reesink J H, Bridge J S. Evidence of bedform superimposition and flow unsteadiness in unit-bar deposits, South Saskatchewan river, Canada[J]. Journal of Sedimentary Research, 2011, 81, 814-840.
- [29] Mark D B, Edward S A, Nole T. Stratigraphic architecture of fluvial-deltaic sandstones from the Ferron sandstone outcrop, east-central Utah [M] // Analog for fluvial-deltaic reservoir modeling: Ferron sandstone of Utah. Special Publication AAPG, 2004, 50: 193-210.
- [30] 陈飞, 胡光义, 范廷恩, 等. 秦皇岛 H 油田陆相下切侵蚀河谷充填特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(5): 33-39.
Chen Fei, Hu Guangyi, Fan Ting'en, et al. The continental incised valley filling architecture of the Qinhuangdao H Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University (science & technology edition), 2015, 37(5): 33-39.
- [31] 胡光明, 王军, 纪友亮, 等. 河流相层序地层模式与地层等时对比[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 745-751.
Hu Guangming, Wang Jun, Ji Youliang, et al. Fluvial sequence stratigraphy mode and isochronous strata correlation[J]. Acta Sedimentaria Sinica, 2010, 28(4): 745-751.
- [32] 孙春燕, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 高分辨率层序格架内储层砂体发育特征——以松辽北部州 311 地区泉三、泉四段为例[J]. 石油天然气地质, 2017, 38(6): 1019-1031.
Sun Chunyan, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Characteristics of reservoir sand bodies within high-resolution sequence framework: A case from the 3rd and 4th members of Quantou Formation in Zhou 311 area, northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1019-1031.
- [33] Marinus E D, Irina O. Connectivity of fluvial point-bar deposits: An example from the Miocene Huesca fluvial fan, Ebro Basin, Spain[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(9): 1109-1129.
- [34] 李绪宣, 胡光义, 范廷恩, 等. 基于地震驱动的海上油气田储层地质建模方法[J]. 中国海上油气, 2011, 23(3): 143-147.
Li Xuxuan, Hu Guangyi, Fan Ting'en, et al. A method of geological reservoir modeling based on seismic drive for offshore fields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(3): 143-147.
- [35] Daniel P H, James S S, John A Q. Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data[J]. Geophysics, 2002, 66(1): 220-236.
- [36] 宋海渤. 井-震联合描述储层性质空间变化的方法研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2008: 26-28.
Song Haibo. Study on describing reservoir spatial properties variation by integration of well and seismic data[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2008: 26-28.