

构型要素分析法的储层细分对比意义

陈清华, 李 敏

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘 要:储层细分对比存在的问题主要表现为两个方面:一是储层细分对比的结果往往是岩性单元,多不具等时性;二是储层细分对比的结果仍不够精细,不能满足高含水阶段剩余油挖潜的需要。其根本原因是对层、地层结构认识的局限性。储层细分对比以传统地层学理论为指导,认为层、地层结构符合“层状”模式,即地层是全区分布、近于水平、相互平行的,并且层与层水平叠置。然而,层序地层学等突破了传统地层学对层、地层结构的认识,认为地层不一定全区分布、不一定水平、不一定相互平行;层的空间位置变化大,相互间可呈超覆、退覆等叠置特点。构型要素分析法更细致地揭示了储层结构特征,认为原来划分的层是复合体,需进一步细分。通过层次界面划分,复合体可以被细分成一系列形态各异、分布复杂的构型单元。从问题根源入手提出相应对策,解决储层细分对比存在的问题需要以沉积学、层序地层学、地震地层学等理论为指导,运用构型要素分析法进行层次界面划分。

关键词:储层;细分对比;地层结构;构型要素分析法;层次界面;等时性;精度;东辛油田

中图分类号:P618.130.2⁺1;TE122.2 **文献标志码:**A

Significance of Architectural-element Analysis to Fine Division and Correlation of Reservoir

CHEN Qing-hua, LI Min

(School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: Problems in the reservoir subdivision and correlation mainly display in two aspects: one is that the comparison results are usually lithologic units, which are often not isochronous; another one is that the accuracy of comparison result is not enough, which can not meet the needs of tapping the remaining oil in high water cut stage. The basic reasons are the limitation of the understanding of layer, stratum and the reservoir structures. Based on the traditional stratigraphic theories, the reservoir subdivision and correlation show that the layer and stratum structures accord with the “layer” mode, the layer distributes over the whole area, closing to the level and paralleling to each other, and the layers are stacked horizontally. However, the sequence stratigraphy, which breaks through the understanding of traditional stratigraphy, believes that the layer does not distribute over the whole area necessarily, not close to the level necessarily and not parallel to each other necessarily. The spatial position of layer varies greatly, and the superimposed relationships between layers can be overlap or offlap. Architectural-element analysis is more detailed to reveal the structural characteristics of the reservoir. The layer divided originally is a complex, which should be further divided hierarchically. Based on hierarchical

收稿日期:2016-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41504068)

作者简介:陈清华(1958-),男,山东单县人,教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail:chenqhua@upc.edu.cn。

interface division, the complex can be subdivided into a series of architecture units with different shapes and complex distribution. Beginning with the basic reason of problems, the corresponding countermeasure is proposed that taking the theories of sedimentology, sequence stratigraphy and seismic stratigraphy as guidance, the hierarchical interfaces are divided by the means of architectural-element analysis.

Key words: reservoir; subdivision and correlation; stratum structure; architectural-element analysis; hierarchical interface; isochronism; accuracy; Dongxin oilfield

0 引言

作为油气田开发中一项重要的基础地质工作,储层细分对比一直是研究热点。近 20 年来,储层细分对比工作取得了丰富的成果。孔祥宇等针对复杂断块老油田提出了“地震测井结合、分块分级对比”的小层对比方法^[1];对于河流相等缺少全区标志的储层,乐大发等提出可以充分利用局部性标志进行储层细分和对比^[2];邓媛等采用“标准层辅助、旋回对比、分级控制”的方法对姬塬油田长 6 油层组进行精细划分和对比^[3]。然而随着中国各大油田相继进入开发中后期阶段,剩余油分布不均、水淹严重、油气采收率低等问题日益突出^[4-6],储层细分对比存在的问题逐渐暴露出来,根据其结果已经不能有效指导油气开采工作。因此,找出储层细分对比存在的问题并予以解决成为当务之急。

在综合前人研究成果的基础上,本文系统阐述储层细分对比的主要内容,深入剖析总结储层细分对比存在的主要问题及其原因;从问题根源入手,讨论层序地层学等相关理论和构型要素分析法在解决储层细分对比存在问题方面的有效性,进而提出对策;最后以渤海湾盆地济阳坳陷东辛油田辛 1 断块沙二下亚段第 9 砂层组三角洲前缘亚相储层为例,详细说明储层细分对比存在的问题以及如何利用构型要素分析法给予解决。

1 储层细分对比现状

传统储层细分对比一般总结为“以等时性为前提,先找区域标志层,再找辅助标志层,先对大段,再对小段,旋回控制,不同相带区别对待,参考厚度,多井对比,全区闭合”^[7-9]。其中,标志层、沉积旋回等为储层细分对比的主要划分依据,等时性、分级控制为主要对比原则。储层细分对比所涉及的不同级别单元可以很好地反映储层分级对比问题。

1.1 划分依据

储层细分对比强调标志层、沉积旋回和岩性组

合等是储层细分对比直接有效的依据。

1.1.1 标志层

标志层是指在地层剖面上特征突出、厚度不大、分布广泛且在同一时间内形成的岩层,常常是单一岩性层。由于标志层的等时性、特征性和稳定性,其可以作为划分依据对储层细分对比起到良好的控制作用。李家华等在丘陵—鄯善交界处的三间房组储层细分对比过程中,根据三间房组顶部发育的一套区域性薄层灰绿色泥岩标志层确定其顶界面位置并控制油层组的划分,而又利用砂层组内部发育的标志层作为划分砂层组和小层的参考标准^[10]。舒曼等以牛居油田牛 12 块东营组油层为研究对象进行小层划分对比,共划分出 4 个油层组、13 个砂岩组和 35 个小层,其中利用标志层对个别储层单元的划分实现了较好地控制^[4]。将油层顶部发育的一套厚 8~10 m、钻遇率超过 90% 的灰绿色泥岩作为标志层控制油层顶界面的划分,将油层中部发育的一套厚 8~10 m、钻遇率接近 90% 的浅灰色泥岩辅助标志层作为 I、II 油层组的划分界限,又根据 I 油层组内部发育的泥岩辅助标志层控制 I₁、I₂ 砂层组的边界划分。

1.1.2 沉积旋回

沉积旋回为若干相似岩性在地层剖面上有规律地周期性重复,或指一套自下而上粒度由粗变细再由细变粗的岩石组合。沉积旋回表现为不同规模和尺度,可以划分成不同的级次。油田地质工作者习惯使用四级旋回划分方案,一级旋回反映古水深、生物组合及沉积体系的变化,二级旋回反映同一类沉积体系内部沉积相的多次重复,三级旋回为同一岩相段内不同微相的有序组合,四级旋回为至少包含一个相对粗岩性层的粒序组合^[11]。根据不同级别的沉积旋回均可以对储层进行级次划分,一至四级旋回大致分别对应于含油层系、油层组、砂层组和小层。

根据沉积旋回进行储层细分对比时,首先确定高级别沉积旋回的范围,并以此为依据划分出高级

别的储层对比单元;然后在高级别旋回边界的控制下进一步识别出低级别沉积旋回,进而控制低级别储层对比单元的划分。以垦西油田 K71 断块东营组为例,东二段为三角洲前缘—三角洲平原沉积,其上部三角洲平原沉积表现为向上变细的正旋回,下部三角洲前缘沉积表现为向上变粗的负旋回。这两个沉积旋回均为三级旋回,据此可将东二段划分成 I、II 砂层组;I 砂层组纵向上又可细分为多个向上变细的四级旋回,II 砂层组纵向上又可细分为多个向上变粗的四级旋回,据此可将 I、II 砂层组进一步细分成若干小层^[12]。

1.1.3 岩性组合

岩性组合指地层剖面上不同类型岩石的垂向组合关系。通常情况下,同一沉积环境中形成的岩石类型相同或相近,具有基本一致的岩性特征,当沉积环境发生变化时,岩石类型也相应发生改变。因此,岩性组合特征在储层细分对比中可以作为对比标志。一般情况下,岩性组合与标志层或沉积旋回配合使用。以南美 E 油田白垩系河流相储层细分对比为例,考虑到该地区河流多、河道同期发育的特点,根据横向上岩性组合变化规律并结合沉积韵律对小层进行细分,如 6-4 小层横向上为河道砂和决口扇细砂岩的组合,3-5 小层横向上由河道砂渐变为河道间泥岩^[13]。当标志层缺少及沉积旋回不明显时,岩性组合在储层细分对比中发挥了重要的控制作用。朱小燕等对镇北油田延长组长 3 油层组进行细分对比时,根据标志层和沉积旋回特征将其划分成 3 个小层,各小层内部没有成层稳定分布的标志层,也没有明显的旋回特征,但依据岩性特征可在各小层中进一步划分出 9 个细小层(表 1)^[14]。

表 1 镇北油田延长组长 3 油层组细小层岩性特征
Tab. 1 Lithologic Characteristics of Fine Layers of Chang-3 Reservoir of Yanchang Formation in Zhenbei Oilfield

小层	细小层	岩性特征
长 3 ₁	长 3 ₁ ¹	分流间湾沉积,深灰色、灰色泥岩
	长 3 ₁ ²	分流间湾沉积,深灰色、灰色泥岩
	长 3 ₁ ³	分流河道和分流间湾沉积,深灰色泥岩、粉砂质泥岩夹薄层粉砂岩
长 3 ₂	长 3 ₂ ¹	分流间湾沉积,泥岩、粉砂质泥岩
	长 3 ₂ ²	分流河道和分流间湾沉积,灰色细砂岩、深灰色泥岩、粉砂质泥岩
	长 3 ₂ ³	分流间湾沉积,深灰色泥岩、灰色泥岩
长 3 ₃	长 3 ₃ ¹	分流河道和分流间湾沉积,灰色细砂岩、灰色泥岩
	长 3 ₃ ²	分流间湾沉积,泥岩、粉砂质泥岩夹薄层粉砂岩
	长 3 ₃ ³	分流间湾沉积,泥岩、粉砂质泥岩夹薄层粉砂岩

1.2 对比原则

在进行储层细分对比时,需要遵循等时性原则和分级控制原则。

1.2.1 等时性原则

等时性原则指储层细分对比单元是同一时期形成的^[11,15]。该原则是储层细分对比时最基础也是最重要的一条原则。储层细分对比是否等时,直接关系到对比结果的有效性。一方面,通过等时细分对比将储层划分成不同级次的等时地层单元,建立全区等时地层格架,这样才能准确揭示地层的沉积序列,反映储层空间结构特征,有效指导油气田开发工作。另一方面,等时的储层细分对比单元为一个相对均质体,岩性、孔隙度、渗透率等特征相对一致,其内部一般不存在大规模的渗流屏障,因此,以等时储层细分对比单元为对象进行油气开采效果较好,可以提高油气采收率,减少水淹等现象的发生。

储层细分对比选择的对比依据(如标志层、沉积旋回等)在一定程度上反映了等时性原则,然而受资料精度、对比观念等因素的综合影响,储层细分对比并没有完全实现对比结果的等时性,这正是储层细分对比所存在的重要问题之一。

1.2.2 分级控制原则

分级控制原则指在储层对比过程中遵循由大到小逐级对比细分单元的思路^[11,16]。不同规模或不同级别的储层细分对比单元所反映的储层特征是不同的,储层细分对比单元规模越小,其所提供的地质信息就越详细,对储层特征的反映就越逼近地质事实。此外,在高级别储层单元的控制下进行低级别储层单元的划分对比,很大程度上避免了对比串层问题的出现,有利于逐级控制储层单元的等时对比。

1.3 对比结果

储层细分对比是以地层单元的划分对比为基础的。地层单元有多种划分标准:依据岩石体形成时间划分出年代地层单元,包括宇、界、系、统、阶、时间带等 6 个级别;根据古生物化石可以划分出组合带、延限带、间隔带、富集带等生物地层单元;而依据岩性特征可以划分出岩石地层单元,包括群、组、段、层等 4 个级别^[17]。为适应油田生产开发,石油地质工作者提出了油层对比单元的概念,即根据地层(储层)岩性和储油物性划分出地层(储层)单元,这正是储层细分对比所达到的结果。

目前广泛使用的油层对比单元划分方案(表 2)^[18]为含油层系、油层组、砂层组、小层、单层。当然,这种划分方案的使用不能一概而论,针对具体

研究区域可能需要进行适当调整。例如,大庆油田生产单位针对长垣上的油田使用的油层对比单元划分方案是含油层系、油层组、砂层组、小层、沉积单元和细分沉积单元,其中沉积单元与细分沉积单元是在小层内部进一步划分出来的。

表 2 油层对比单元命名方案

Tab. 2 Naming Schemes of Reservoir Units

级别	石油行业标准		大庆油田	文献[11]
	SY/T 6166—1995 标准	SY/T 5363—1998 标准		
第一级	油层组	含油气层系	含油层系	含油层系
第二级	砂岩组	含油气层组	油层组	油层组
第三级	小层	含油气层段	砂层组	砂层组
第四级		含油气层	小层	小层
第五级			沉积单元	单层
第六级			沉积时间单元	

在含油气盆地中,油层对比单元与年代地层单元和岩石地层单元的关系见表 3。油层对比单元中的含油层系的顶、底界一般与岩石地层单元中的“组”、“段”或“亚段”的顶、底界相对应,而岩石地层单元中的“组”通常是在年代地层单元“统”的基础上划分的。

表 3 不同类型地层单元的对应关系

Tab. 3 Corresponding Relationship Among Different Types of Stratigraphic Units

年代地层单元	岩石地层单元	油层对比单元	层序地层单元	基准面旋回级次	储层构型单元
宇					
界					
系	群			巨旋回	
统					
阶	组	含油层系	层序	超长旋回	
	段				
		油层组	准层序组	长期旋回	
		砂层组	准层序	中期旋回	河道群或古河谷群
		单油层/小层	层组	短期旋回	大型砂席(如河道充填复合体)
		单层	亚层组	超短期旋回	巨型底型(如单一点坝、心滩)
					沉积韵律(如点坝侧积体)
					交错层系组
					交错层系

2 储层细分对比存在的问题

储层细分对比存在的问题主要表现为两个方面:一是储层细分对比的结果往往是岩性地层单元,多不具等时性;二是储层细分对比的结果不够精细,不能满足高含水阶段剩余油挖潜的需要。而导致这些问题的根本原因是对层、地层结构认识的局限性。

2.1 储层对比结果的等时性

等时性原则是指导储层细分对比工作的一项最重要原则。建立等时地层格架是储层细分对比的最终目标之一。然而,目前储层细分对比并没有完全实现等时性。储层细分对比主要依据地层剖面的岩性特征及其测井曲线响应特征划分对比地层,强调地层间的岩性对应关系,其划分的对比单元往往是岩性地层单元。

岩性地层单元是沉积环境的产物。若同一时期沉积的地层横向上沉积环境发生改变,则其岩性也随之改变;若不同时期沉积的地层沉积环境相同或相似,也可以发育相同的岩性(图 1)。由此看来,岩性地层单元具有很强的不等时性。

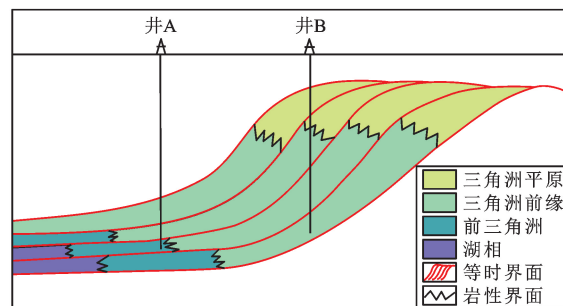


图 1 岩性地层单元穿时示意图

Fig. 1 Sketch Map of Diachronism of Lithologic Stratigraphic Units

2.2 储层对比结果的精度

目前,储层细分对比多以小层为基本单元,少数能达到单层级别^[19]。然而研究表明,小层结构仍较复杂:由多种沉积微相构成,砂体叠置组合关系仍较复杂^[20-21];微构造发育^[22-23];层内非均质性强^[24];剩余油分布不均^[25-26]。将小层作为基本开发单元已经不能满足高含水阶段剩余油挖潜的需要。为充分认识小层内部油水分布规律,准确预测剩余油分布以及提高油气采收率,进一步细分小层及提高储层细分对比精度是十分必要的。

事实上,小层内部发育很多小规模对比标志,但因其产状各异且分布多不规则而没有得到合理利用,使小层进一步细分对比受到限制。

2.3 问题根源

导致储层细分对比出现上述问题的根本原因是对层、地层结构认识的局限性。早在17世纪六七十年代,丹麦地质学家斯坦诺在意大利托斯卡纳观察地质构造时发现了地质体成层产出的现象,并首次提出地层层序律,奠定了传统地层学的理论基础,并深刻影响了后代学者对地层结构特征的认识。储层细分对比以传统地层学理论为指导,认为层、地层结构符合“层状”模式,即地层是全区分布、近于水平、相互平行的,并且层与层水平叠置。

在“层状”模式指导下,储层细分对比忽略了对沉积规律的反映,造成对比结果不能真实反映地层结构或储层结构特征,并进一步导致对比结果的不等时性。根据地层成层分布的结构特点,储层细分对比多以标志层为基准,按照沉积旋回或岩性组合等特征将储层划分为各个级次的对比单元。这些对比单元形态较规则,近于全区水平分布,成层叠置,且为岩性地层单元,在多数情况下是不等时的。

以“层状”模式为指导,一些客观存在的、良好的小规模对比标志失去了使用意义,造成储层细分对比的结果不够精细。储层细分对比倾向于选择横向连续稳定、分布广泛的特殊岩性层作为对比标志,例如标志层。规模较大的对比标志因横向连续、产状稳定、成层性好,很容易根据“层状”模式进行识别并加以利用;而规模较小的对比标志横向连续性差、分布不规律、产状多变,不符合“层状”模式,因而很难被利用。但是,若摆脱“层状”模式的束缚,以储层沉积规律为指导,这些看似分布不规律的小规模对比标志可以充分得以利用,实现小层的进一步细分和对比。

“层状”模式本身没有错误,是传统地层学对层、地层结构的一种简单认识,不过这一认识有局限性。虽然确实存在符合“层状”模式的地层,但也是在非常理想化的情况下才出现的。总之,“层状”模式是有适用范围的,不能无条件套用该模式。然而,储层细分对比深受“层状”模式的影响,导致其对比结果不能真实反映层的分布特点和地层结构的特点。

3 对策

从储层细分对比存在问题的根源入手提出对策,即以沉积学、层序地层学和地震地层学等学科理论为指导,运用构型要素分析法进行层次界面划分。

3.1 层序地层学等相关理论

地震勘探技术水平的提高促进了地震地层学的建立,提供了一种新的地层解释手段——地震剖面。不同于野外露头、岩芯和测井曲线资料,地震剖面视域宽广,能横向追踪地层,可以反映三维地质体结构特征,展现地层分布面貌。前人基于地震地层学建立了层序地层学^[27]。

层序地层学将全球海平面升降旋回与地层旋回联系起来,从成因上分析地层的演化过程,揭示地层的空间分布格局,并建立年代地层框架。对应于不同级别的海平面升降旋回级次,将地层划分成一系列层序地层单元,由高到低依次为层序、准层序组、层序组、层组和亚层组^[27]。这些地层单元因具有成因意义所以是等时的。

层序地层学突破了传统地层学对层和地层结构特征的认识:地层不一定是全区分布、不一定水平、不一定相互平行;各层的发育位置变化大,层与层之间不一定水平叠置,也可以以超覆或退覆等形式叠置。图2为一个完整的层序单元,由低水位体系域、海进体系域和高水位体系域组成,而每一个体系域又包含若干准层序组,而准层序组又由层序组成。从各级层序地层单元的分布特点来看,其分布也具有成层叠置的特征,但又不完全符合“层状”模式:仅有个别层序地层单元是全区分布的,大多数层序地层单元是局部分布的;有的层序地层单元产状稳定、近于水平,有的层序地层单元产状倾斜;个别层序地层单元水平叠置,大多数层序地层单元的叠置关系相对复杂。由于层序地层学侧重于对宏观地层结构特征的研究,其多适用于盆地或区域规模的地层划分对比^[28],而很少应用到油田范围内的储层细分对比。

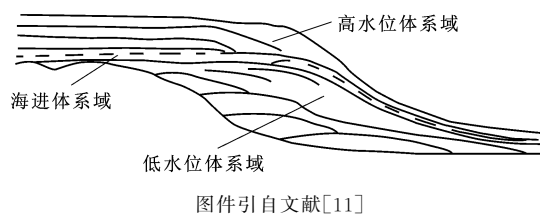


图2 陆架坡折盆地层序模式

Fig. 2 Sequence Pattern of Basin with Continental Shelf Slope-break

基于层序地层学,高分辨率层序地层学作为一门分支学科逐渐发展起来,其中以Cross为代表的分辨率层序地层学得到广泛应用。与层序地层学有所不同,高分辨率层序地层学认为基准面旋回是形成地层旋回的直接原因,而基准面旋回进一步受

海平面升降、构造沉降和沉积物供应等因素的控制。在一个基准面旋回中沉积的地层具有成因意义,为时间地层单元。对应于不同级别的基准面旋回,高分辨率层序地层学一般将地层划分为超长期基准面旋回、长期基准面旋回、中期基准面旋回、短期基准面旋回和超短期基准面旋回,其与油层对比单元的对对应关系见表 3。

高分辨率层序地层学为储层细分对比问题的解决提供了思路。高分辨率层序地层学是依据基准面旋回、可容纳空间变化导致岩石记录的地层学和沉积学特征的过程-响应原理划分地层层序的^[28]。利用高分辨率层序地层学进行储层细分对比不是简单的旋回幅度与岩石类型的对比,而是具有等时意义的岩石与界面之间、岩石之间或界面之间的对比。较之层序地层学,高分辨率层序地层学可进一步实现小尺度层序地层单元的划分。郑荣才等基于高分辨率层序分析对河流相砂体进行划分对比,以中期层序界面和洪泛面为年代地层框架,以短期层序为等时地层对比单元,并通过分析沉积物供给量与可容空间的关系判断短期层序的结构类型和叠加样式,并对其分布模式进行了总结^[29]。袁新涛等提出了解决高分辨率层序地层对比时难以利用井信息识别短期基准面这一问题的方法,即在较长期高级别基准面旋回控制下,综合利用近距离自旋回沉积对比、各类关键面约束对比、河流切割充填对比和储层流体性质对比等多种手段进行小层等时对比^[30]。龙国清等在河流相储层中识别短期基准面旋回时,为排除自旋回因素的干扰,提出了在较长期等时地层格架约束下根据河型和砂体叠置样式、相序和相组合等特征识别短期基准面旋回的方法^[31]。

然而,高分辨率层序地层学依旧未能解决储层细分对比的精度问题。长期基准面旋回层序界面多为大型冲刷间断面或区域性侵蚀暴露面,在地震剖面上常表现为区域性超覆、削截等地震反射终止现象;而长期旋回中最大湖泛面位置往往发育稳定的泥岩,可作为良好的标志层,故结合地震和测井资料很容易划分对比长期基准面旋回层序。中期基准面旋回层序界面常表现为区域可比的冲刷面、间歇暴露面等,利用地震资料难于识别,但因其具有良好的测井响应特征,可以利用测井资料进行识别。而短期基准面旋回层序界面常表现为冲刷面以及其上的滞留沉积物和内碎屑、非沉积作用间断面等,但因短期基准面旋回层序常被侵蚀冲刷或不发育,缺乏区域对比标志,并且极易受其他因素影响,导致识别困

难。因此,引入高分辨率层序地层学进行储层划分对比能够较好地解决相当于砂层组及以上级别大尺度地层单元的等时划分对比,而对于小尺度地层单元(如小层、单层)的对比及其进一步细分对比仍存在困难。

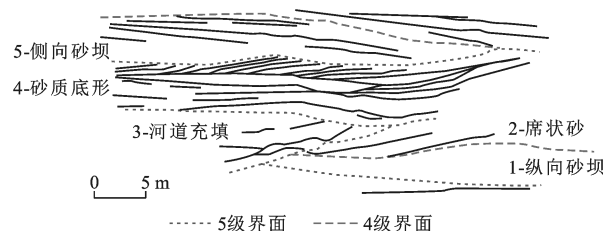
综上所述,层序地层学等相关理论虽然不能有效解决储层细分对比存在的问题,但其对于层和地层结构特点的突破性认识为储层细分对比存在问题的真正解决奠定了基础,具有重要指导意义。

3.2 构型要素分析法

构型要素分析法最早由 Miall 提出,是从沉积成因角度在三维空间上详细解剖沉积体或储层,划分出不同层次的等时构型单元,并研究它们的形态、规模、方向和空间叠置关系^[32-34]。构型要素分析法涉及的内容很多,但应用于储层细分对比时,主要研究储层内部层次界面和构型单元的划分。以 Miall 的河流相储层层次划分方案为例,构型要素分析法可将储层砂体由小到大划分成交错层系、层系组、沉积韵律、巨型底形、河道充填复合砂体和古河谷等 6 个层次^[32],各层次构型单元与其他类型地层单元的对对应关系见表 3。显然,构型要素分析法的研究范围更小,研究程度更加精细,侧重于分析低级别储层单元(诸如砂层组、小层或单层内部)的沉积序列和结构特征。

构型要素分析法更细致地揭示了层的特点和储层结构特征。构型要素分析法提出根据传统地层学和层序地层学等所划分的层都是复合体,需进一步细分。通过层次界面划分,复合体被细分成一系列形态各异、分布复杂的构型单元。各层次构型界面产状不一,有水平的也有倾斜的,有平直的也有波状起伏的,有全区分布的也有局部分布的;各层次构型单元形态各异,既有垂向切割叠置又有侧向迁移和拼接(图 3)。

以层序地层学等理论为指导,应用构型要素分



图件引自文献[33]

图 3 河流相砂体内部构型单元和层次界面分布剖面

Fig. 3 Profile of Distribution of Architecture Units and Hierarchical Interfaces in Fluvial Sandstones

析法进行层次界面划分,可以有效解决储层细分对比存在的问题。

首先,构型要素分析法解决了储层细分对比结果不等时的问题。从构型要素分析法的定义可以看出,该方法是从沉积成因的角度对地层进行解剖,各个层次的构型界面和构型单元均具有沉积成因意义,因而是等时的。因此,利用构型要素分析法理论上可以实现储层的等时划分和对比。

此外,构型要素分析法解决了储层细分对比结果不够精细的问题,可以实现小层或单层的进一步细分对比。构型要素分析法重视野外露头的精细描述,为储层细分对比提供精细信息,大大提高了储层细分对比的精度。在构型要素分析法应用之前,储层细分对比工作主要依据岩芯、测井曲线和地震剖面等资料,很少利用野外露头,主要是因为储层单元(如油层组、砂层组等)级别较高,规模较大,其对比标志在测井曲线和地震剖面上特征明显,易于识别,而野外剖面出露有限且不连续,不能较好地反映这些储层单元的分布特征,故不作为主要资料使用。相反地,利用构型要素分析法进一步分析小层、单层等低级别储层单元内部的结构特征,划分构型单元时,测井、地震等资料因分辨率较低已经无法精确提供小层或单层内部的结构特征信息,而野外露头虽然规模小,但直观且可测,能提供很多精细的储层结构信息,如小层内部隔层和夹层的分布、砂体形态、规模和空间叠置关系等。通过将野外特征与岩芯、测井资料建立一定的联系,对小层或单层内部的小规模对比标志进行合理利用,实现小层或单层的精细划分。

构型要素分析法对小层、单层等低级别储层单元进一步等时精细划分具有良好的应用效果,这也是构型要素分析法对储层细分对比的突出贡献。陈清华等对东营凹陷史南地区 Es_1^3 砂层组进行储层细分对比时,首先根据常规对比方法划分出小层单元,然后采用构型要素分析法对 Es_1^3 1 小层进一步细分,共划分出 6 期沉积单元,并发现各期沉积单元呈退积式叠加的现象^[35]。渠芳等采用构型要素分析法精细解剖河流相储层砂体,垂向上实现单砂层的划分,平面上细分至单一成因砂体^[36]。牛博等应用构型要素分析法对大庆油田萨中密井网区 P1-3 小层辫状河砂体进行精细解剖,划分出辫状河道和心滩坝以及心滩坝内部的增生体等构型单元^[37]。王冠民等针对胜利油田永 8 断块沙二段辫状河三角洲前缘砂层组级别的储层进行构型要素分析,划分出相

当于砂层组和小层级别的多期三角洲前缘叠置体和单期三角洲前缘复合沉积体,并在小层内部进一步划分出一系列空间上逐层进积的单一三角洲前缘沉积体^[38]。贾珍臻等以大庆升平油田葡萄花油层葡一油组浅水三角洲储层为研究对象,在储层内部划分出 6 级构型界面,其中 VI 级、V 级界面分别对应小层和单层界面,并重点研究了 IV 级构型单元单一流河道的空间组合特征^[39]。当然,构型要素分析法所能划分对比的构型单元精度也是有限的。层系组、交错层系和纹层级别的构型单元因规模太小且分布复杂而难以识别划分,但这并不是储层细分对比所关心的层次单元,可以不予考虑。总的来说,构型要素分析法为储层精细划分对比提供了一种新的思路,利用构型要素分析法进行储层细分对比成为必然趋势。

4 实 例

现以渤海湾盆地济阳坳陷东辛油田辛 1 断块沙二下亚段第 9 砂层组为例,详细说明储层细分对比存在的问题以及如何利用构型要素分析法给予解决。

辛 1 断块位于东辛油田东端、辛镇长轴背斜北翼,平面上受两条 EW 向南倾的 III 级断层控制。该断块区含油层位主要为沙一段和沙二下亚段第 9 砂层组(Es_2^9)。其中, Es_2^9 砂层组为三角洲前缘亚相沉积,物源大致位于研究区东部。研究区建立的地层对比骨架剖面见图 4。

原储层划分方案是将 Es_2^9 砂层组划分成 2 个小层。该砂层组的中上部发育一套厚 2~5 m 的灰绿色泥岩标志层,底部发育一套厚度为 5~10 m 的富含碳屑和鱼鳞化石的暗灰色泥岩标志层。以这两套标志层为标准,并结合沉积旋回特征,将 Es_2^9 砂层组划分成 2 个小层(图 5)。然而,原储层细分对比结果明显反映出“层状”模式,各小层全区分布,近于水平,相互平行,不符合三角洲前缘前积的地层结构特点。

应用构型要素分析法可以解决 Es_2^9 砂层组细分对比存在的主要问题。具体步骤如下:①确定对比基线;②层次界面划分;③全区闭合。 Es_2^9 砂层组中上部存在一套岩电特征明显、区域广泛稳定分布的厚层泥岩标志层,将该标志层的顶面“拉平”作为对比基线。层次界面划分包括层次界面识别和层次界面组合两个方面的内容,根据测井响应特征可以较容易地确定单井层次界面的发育位置,在此基础上

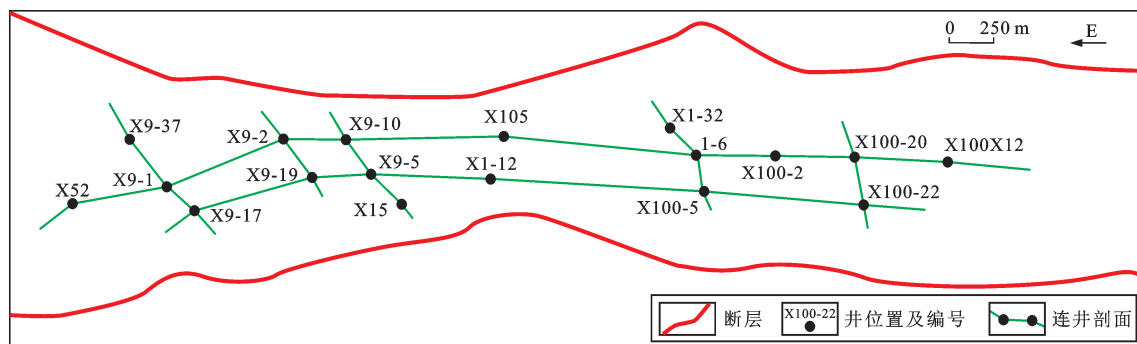
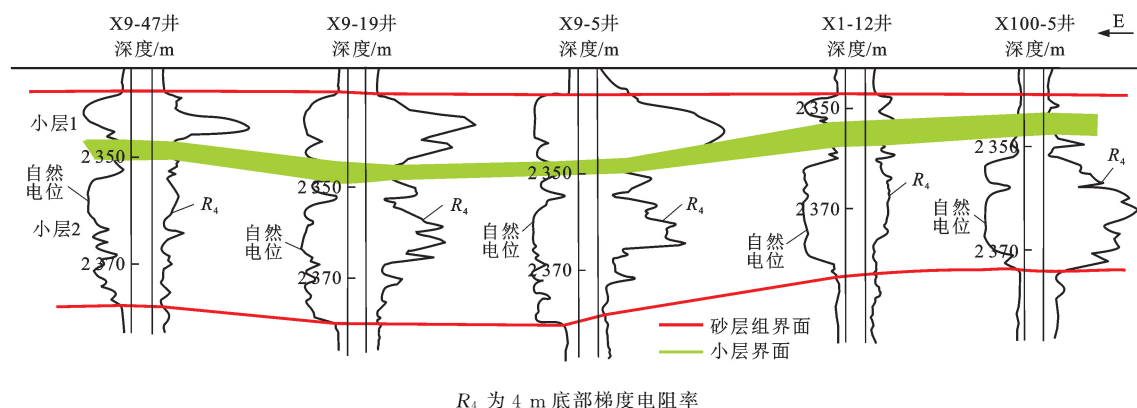


图4 辛1断块地层对比骨架剖面

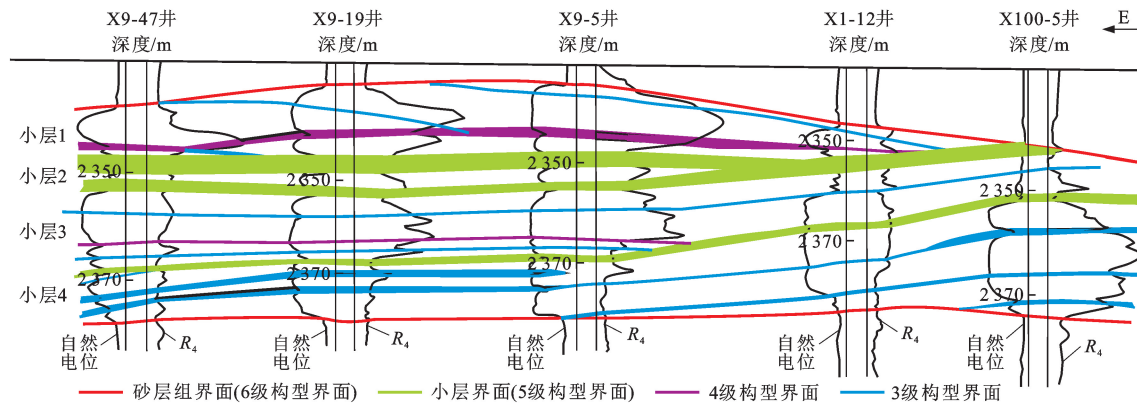
Fig. 4 Stratigraphic Correlation Skeleton Section of Xin1 Fault Block

图5 辛1断块 Es_2^9 砂层组细分对比剖面Fig. 5 Subdivision Contrast Profile of Es_2^9 Sand Group of Xin1 Fault Block

对各井中的层次界面进行组合。在层次界面组合时,需要注意:①以三角洲前缘沉积规律为指导;②以等时界面(点)作控制;③遵循同级次构型界面产状接近的原则。该砂层组顶部和底部为全区稳定分布的泥岩,其界面级别最高,相当于 Miall 构型界面分级方案中的 6 级构型界面;在砂层组内部发育有基本全区分布的泥岩,其顶、底界面相当于 5 级构型界面;而砂层组内局部不稳定分布的泥岩,其顶、底界面对应 4 级或 3 级构型界面(图 6)。最后,将

东西和南北两个方向的连井剖面的层次界面划分对比结果进行交叉验证,实现全区闭合。

应用构型要素分析法进行储层细分对比,精细刻画储层的结构特征。 Es_2^9 砂层组共划分出 4 个小层,小层 1 近于全区分布,小层 2 局部分布,小层 3 和小层 4 全区分布,各小层界面产状稳定,呈一定角度向西倾斜(图 6)。小层内部进一步划分出 4 级和 3 级构型单元,其界面分别对应 4 级、3 级构型界面;各构型界面的分布均反映出三角洲前缘前积的特

图6 辛1断块 Es_2^9 砂层组层次界面划分剖面Fig. 6 Profile of Hierarchical Interface Division of Es_2^9 Sand Group of Xin1 Fault Block

点。由3级构型界面的分布特点进一步得到小层4—小层3具进积叠置的结构特点,而小层1呈现退积叠置的结构特点。

5 结 语

(1)储层细分对比遵循等时性、分级控制的原则;其对比标志主要为标志层、沉积旋回和岩性组合。储层细分对比可以实现含油层系、油层组、砂层组、小层和单层等多个级别油层对比单元的划分,并通常以小层作为基本对比单元。

(2)储层细分对比存在的问题表现为两个方面:一是储层细分对比的结果往往是岩性单元,多不具等时性;二是储层细分对比的结果仍不够精细,不能满足高含水阶段剩余油挖潜的需要。

(3)储层细分对比所划分的是岩性地层单元,导致这种结果的根本原因是对层、地层结构和储层结构认识的局限性。

(4)解决储层细分对比存在问题的对策为以沉积学、层序地层学、地震地层学等理论为指导,运用构型要素分析法进行层次界面划分。层次界面划分有两个突出特点:一是以等时界面(点)为基本划分依据;二是其所划分出的构型单元为等时单元。

参考文献:

References:

- [1] 孔祥宇,于继崇,李树峰.复杂断块老油田精细地层对比综合方法的提出与应用[J].岩性油气藏,2009,21(1):120-124.
KONG Xiang-yu, YU Ji-chong, LI Shu-feng. Fine Stratigraphic Correlation Method and Its Application in Complicated Fault-block Oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(1): 120-124.
- [2] 乐大发,陈清华,张福利.孤岛油田南区馆1+2砂层组细分对比标志特征[J].地球科学与环境学报,2011,33(1):84-88.
LE Da-fa, CHEN Qing-hua, ZHANG Fu-li. Characteristic of Markers for the Stratigraphic Correlation and Subdivision of Guan 1+2 Sand Member in the South Block of Gudao Oilfield[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 84-88.
- [3] 邓媛,王海军,洪荆晶,等.姬塬油田铁边城区延长组长2油层组地层精细划分与对比[J].中国西部科技,2011,10(5):10-11,47.
DENG Yuan, WANG Hai-jun, HONG Jing-jing, et al. Fine Stratigraphic Classification and Correlation of Chang-2 Reservoir of Yanchang Formation in Tiebian-

cheng Area in Jiyuan Oilfield[J]. Science and Technology of West China, 2011, 10(5): 10-11, 47.

- [4] 舒曼,许晓宏,牛居油田牛12块东营组小层对比研究[J].长江大学学报:自然科学版,2013,10(26):17-18.
SHU Man, XU Xiao-hong. Comparative Study on Sub Layers of Dongying Formation in Block Niu12 of Niuju Oilfield[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2013, 10(26): 17-18.
- [5] 余成林,国殿斌,熊运斌,等.厚油层内部夹层特征及在剩余油挖潜中的应用[J].地球科学与环境学报,2012,34(1):35-39.
YU Cheng-lin, GUO Dian-bin, XIONG Yun-bin, et al. Characteristics of Interbeds in Thick Reservoir and Application in Potential Tapping of Residual Oil[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 35-39.
- [6] 朱强,毕彩芹.陆相地层精细对比方法及应注意的问题[J].油气地质与采收率,2002,9(3):27-30.
ZHU Qiang, BI Cai-qin. Methods of Fine Correlation and Its Matters Needing Attention in Terrestrial Formation[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(3): 27-30.
- [7] 赵虹,党彝,靳文奇,等.安塞油田长6油层组精细地层划分与对比[J].西北大学学报:自然科学版,2004,34(4):461-463.
ZHAO Hong, DANG Ben, JIN Wen-qi, et al. Fine Strata Classification and Correlation of Chang-6 Oil-bearing Formation of Yanchang Formation in Ansai Oilfield[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2004, 34(4): 461-463.
- [8] 张彬,单敬福,吴东胜,等.辽河油田欢喜岭沙河街组沙四段精细地层划分与对比[J].地质找矿论丛,2015,30(4):548-553.
ZHANG Bin, SHAN Jing-fu, WU Dong-sheng, et al. Fine Stratigraphic Classification and Correlation of the Fourth Member of Shahejie Formation in Huanxiling Oilfield[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2015, 30(4): 548-553.
- [9] 李康,康胜松,尚婷,等.姬塬油田X区长8油层组地层精细划分与对比[J].石油地质与工程,2013,27(4):48-50.
LI Kang, KANG Sheng-song, SHANG Ting, et al. Fine Stratigraphic Classification and Correlation of Chang-8 Reservoir of Yanchang Formation in X Area in Jiyuan Oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(4): 48-50.
- [10] 李家华,陈文武,公学成,等.丘陵—鄯善交界区域三间房组地层划分及砂体展布特征研究[J].石油天然

- 气学报, 2010, 32(2): 186-190.
- LI Jia-hua, CHEN Wen-wu, GONG Xue-cheng, et al. Stratigraphic Division and Distributing Features of Sandbody of Sanjianfang Formation in the Junction Region Between Qiuling and Shanshan Depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(2): 186-190.
- [11] 吴胜和, 蔡正旗, 施尚明. 油矿地质学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- WU Sheng-he, CAI Zheng-qi, SHI Shang-ming. Industrial Geology of Petroleum[M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [12] 郭秀蓉, 程守田, 刘 星. 油藏描述中的小层划分与对比: 以垦西油田 K71 断块东营组为例[J]. 地质科技情报, 2001, 20(2): 55-58.
- GUO Xiu-rong, CHENG Shou-tian, LIU Xing. Division and Correlation of Substrata in Reservoir Description: The Substrata of Dongying Formation in Kenxi Oilfield as an Example[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(2): 55-58.
- [13] 徐 睿. 旋回对比技术在河流相地层细分对比中的认识: 以南美 E 油田白垩系储层为例[J]. 地质科技情报, 2015, 34(2): 36-41.
- XU Rui. Application of Cycle Correlation on Fluvial Stratum Division and Correlation in Cretaceous Reservoir, E Oilfield, South America[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(2): 36-41.
- [14] 朱小燕, 李爱琴, 段晓晨, 等. 镇北油田延长组长 3 油层组精细地层划分与对比[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 82-86.
- ZHU Xiao-yan, LI Ai-qin, DUAN Xiao-chen, et al. Fine Stratigraphic Classification and Correlation of Chang-3 Reservoir of Yanchang Formation in Zhenbei Oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 82-86.
- [15] 梁正中. 济阳坳陷临盘油区储层精细划分与对比[J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29(4): 42-46.
- LIANG Zheng-zhong. Division and Correlation of Sandstone Reservoirs in the Linpan Oil Field Jiyang Depression, Shandong [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2009, 29(4): 42-46.
- [16] 陈清华, 王 晶, 石艳红, 等. 济阳坳陷沾化凹陷桩南断裂带储层精细划分对比方法研究[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(2): 75-79.
- CHEN Qing-hua, WANG Jing, SHI Yan-hong, et al. Study on the Method of Stratigraphic Accurate Correlation and Subdivision in Zhuangnan Fault Zone of Zhanhua Sag, Jiyang Depression[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(2): 75-79.
- [17] 温献德. 地史学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 1998.
- WEN Xian-de. Historical Geology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1998.
- [18] 陈秉麟. 再议我国含油气地层的命名[J]. 石油知识, 1998(3): 27-28.
- CHEN Bing-lin. Re-discussion on China's Petroliferous Strata Named[J]. Petroleum Knowledge, 1998(3): 27-28.
- [19] 崔卫东. 新滩油田曲流河薄层砂体对比方法研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(4): 33-38.
- CUI Wei-dong. The Comparison Methods of Thin Sandbody of Meandering Facies in Xintan Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2011, 33(4): 33-38.
- [20] 陈 伟, 刘大锰, 彭承文, 等. 大庆油田肇 35 区块葡萄花油层沉积微相分布演化规律及有利相带预测[J]. 现代地质, 2010, 24(6): 1072-1078.
- CHEN Wei, LIU Da-meng, PENG Cheng-wen, et al. Distribution and Evolution of Sedimentary Microfacies and Prediction for Favorable Facies Zones of Putao-hua Reservoir in Block Zhao35, Daqing Oilfield[J]. Geoscience, 2010, 24(6): 1072-1078.
- [21] 孙晓玮, 姜在兴, 宋 珊. 河流相储层精细对比及沉积特征探讨[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(4): 47-52.
- SUN Xiao-wei, JIANG Zai-xing, SONG Shan. Study on Detailed Contrast and Sedimentary Characteristics of Fluvial Reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(4): 47-52.
- [22] 郭 新. 复杂岩性油藏储层微型构造研究[J]. 特种油气藏, 2006, 13(3): 29-31.
- GUO Xin. Study on Microstructure of Complex Lithologic Reservoir [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2006, 13(3): 29-31.
- [23] 代金友, 李建霆, 王宝刚, 等. 里 151 油藏延安组延 8—延 10 油层微构造研究[J]. 特种油气藏, 2012, 19(6): 22-27.
- DAI Jin-you, LI Jian-ting, WANG Bao-gang, et al. Study on the Micro-tectonics of Layers Yan8-Yan10 of Yan'an Formation of No. 151 Li Oilfield[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(6): 22-27.
- [24] 胡望水, 曹 春, 何海泉, 等. 新立地区嫩三段储层非均质性及其影响因素分析[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(6): 20-26.
- HU Wang-shui, CAO Chun, HE Hai-quan, et al. Reservoir Heterogeneity and Influencing Factors of Nen 3 Member in Xinli Area [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(6): 20-26.

- [25] 郭松,谭丽娟,林承焰,等. 储层非均质性对油气成藏的影响:以博兴油田沙四上亚段滩坝相砂岩为例[J]. 石油实验地质, 2013, 35(5): 534-538.
GUO Song, TAN Li-juan, LIN Cheng-yan, et al. Influence of Reservoir Bed Heterogeneity on Hydrocarbon Accumulation: Taking Beach-bar Sandstone of Upper Fourth Member[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(5): 534-538.
- [26] 田建锋,刘池洋,梁晓伟. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长2油层组石油富集规律及其差异性[J]. 现代地质, 2011, 25(5): 902-908.
TIAN Jian-feng, LIU Chi-yang, LIANG Xiao-wei. Oil Enrichment Laws and Differentia of Chang-2 Formation in Jiyuan Area, Ordos Basin[J]. Geoscience, 2011, 25(5): 902-908.
- [27] 张世奇,纪友亮. 油气田地下地质学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006.
ZHANG Shi-qi, JI You-liang. Underground Geology in Oil-gas Field[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006.
- [28] 孟万斌. 从层序地层学到高分辨率层序地层学[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(4): 380-385.
MENG Wan-bin. From Sequence Stratigraphy to High Resolution Sequence Stratigraphy[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002, 29(4): 380-385.
- [29] 郑荣才,柯光明,文华国,等. 高分辨率层序分析在河流相砂体等时对比中的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2004, 31(6): 641-647.
ZHENG Rong-cai, KE Guang-ming, WEN Hua-guo, et al. Isochronic Correlation of Fluvial Sandbodies by High-resolution Sequence Technique[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2004, 31(6): 641-647.
- [30] 袁新涛,沈平平. 高分辨率层序框架内小层综合对比方法[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 87-91.
YUAN Xin-tao, SHEN Ping-ping. Continental Strata Correlation of High-resolution Sequence in Reservoir Development Phase[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 87-91.
- [31] 龙国清,韩大匡,田昌炳,等. 油藏开发阶段河流相基准面旋回划分与储层细分对比方法探讨[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 963-967.
LONG Guo-qing, HAN Da-kuang, TIAN Chang-bing, et al. The Base Level Cycle Subdivision and Correlation of Fluvial Facies in the Phase of Reservoir Development[J]. Geoscience, 2009, 23(5): 963-967.
- [32] MIALl A D. Architectural-element Analysis: A New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits[J]. Earth-science Reviews, 1985, 22(4): 261-308.
- [33] MIALl A D. Architectural Elements and Bounding Surfaces in Fluvial Deposits: Anatomy of the Kayenta Formation(Lower Jurassic), Southwest Colorado[J]. Sedimentary Geology, 1988, 55(3/4): 233-262.
- [34] MIALl A D. Reconstructing the Architecture and Sequence Stratigraphy of the Preserved Fluvial Record as a Tool for Reservoir Development: A Reality Check[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(7): 989-1002.
- [35] 陈清华,王亚玲,金大伟. 碳酸盐岩滩坝相储层精细划分对比的新方法[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(3): 1-4.
CHEN Qing-hua, WANG Ya-ling, JIN Da-wei. New Method of Reservoir Hierarchy Division and Correlation in Carbonate Bank-dam Facies[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(3): 1-4.
- [36] 渠芳,陈清华,连承波. 河流相储层细分对比方法探讨[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(1): 17-21.
QU Fang, CHEN Qing-hua, LIAN Cheng-bo. Discussion on the Method for the Subdivision and Comparison of Fluvial Reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(1): 17-21.
- [37] 牛博,高兴军,赵应成,等. 古辫状河心滩坝内部构型表征与建模:以大庆油田萨中密井网区为例[J]. 石油学报, 2014, 36(1): 89-100.
NIU Bo, GAO Xing-jun, ZHAO Ying-cheng, et al. Architecture Characterization and Modeling of Channel Bar in Paleo-braided River: A Case Study of Dense Well Pattern Area of Sazhong in Daqing Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 36(1): 89-100.
- [38] 王冠民,李明鹏. 胜利油田永8断块沙二段辫状河三角洲前缘储层构型特征[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(6): 10-21.
WANG Guan-min, LI Ming-peng. Reservoir Architecture Characteristics of Braided River Delta Front in the Second Member of Shahejie Formation, Yong8 Fault Block, Shengli Oilfield[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(6): 10-21.
- [39] 贾臻臻,林承焰,董春梅,等. 大庆升平油田葡萄花油层葡一油组浅水三角洲储层构型研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(6): 9-17.
JIA Zhen-zhen, LIN Cheng-yan, DONG Chun-mei, et al. Shallow Delta Reservoir Architecture Analysis on Putaohua Oil Formation in Shengping Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2014, 38(6): 9-17.