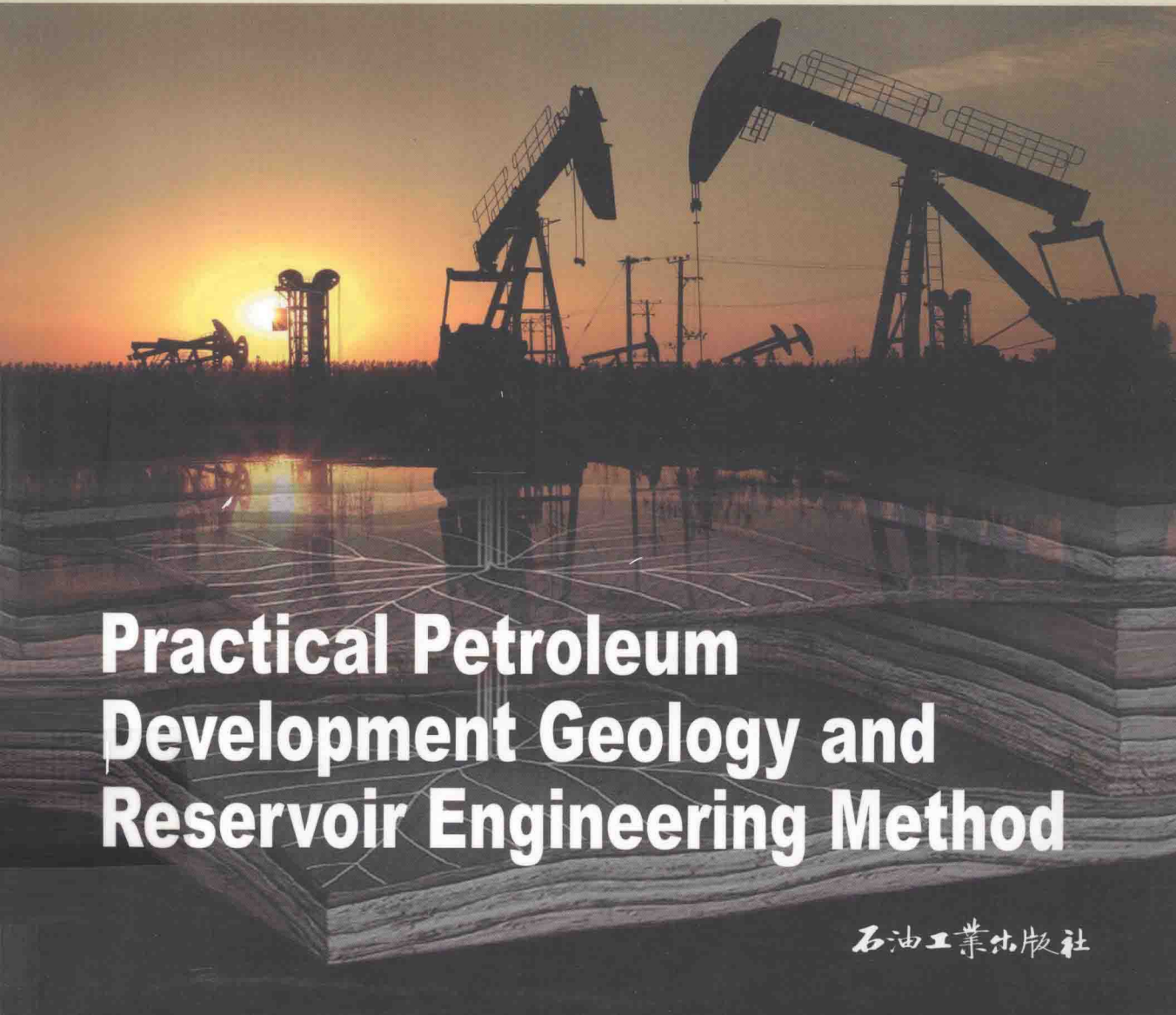


实用油气田开发地质 与油藏工程方法

彭仕宓 陈元千 著

The background of the lower half of the cover is a photograph showing several oil pumpjacks (jackalopes) in silhouette against a bright, low sun on the horizon. The scene is reflected in a body of water in the foreground. The overall color palette is warm, with oranges, yellows, and dark silhouettes.

**Practical Petroleum
Development Geology and
Reservoir Engineering Method**

石油工业出版社

实用油气田开发地质与 油藏工程方法

Practical Petroleum Development Geology
and Reservoir Engineering Method

彭仕宓 陈元千 著
Peng Shimi Chen Yuanqian

石油工业出版社

内 容 提 要

本文集由两部分组成。第一部分为实用油气田开发地质,重点内容有:陆相等时地层格架建立方法新探;砾岩储层沉积微相研究新方法;储层流动单元划分标准的探讨;流动单元的井间预测;油田开发高含水期水淹层的定量识别;窜流通道定量描述方法;分阶段油藏数值模拟研究及剩余油分布等内容。第二部分为油藏工程方法,重点内容有:对我国石油供需关系的中期预测;对我国《石油天然气资源/储量分类》标准的评论与建议;线性流的启动压力梯度不能用于平面径向流;打加密井和注聚合物提高采收率幅度的评价方法;预测产量、可采储量、储采比的方法;对谢尔卡切夫(Щелкачев)公式的推导与拓展;确定气井高速湍流系数的方法;油气藏工程常用公式的单位变换等内容。

本文集可供石油院校、相关科研院所和矿场生产单位的有关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

实用油气田开发地质与油藏工程方法/彭仕宓,陈元千著.
北京:石油工业出版社,2013.4
ISBN 978-7-5021-9331-7

I. 实…

II. ①彭…②陈…

III. ①油气田开发-石油天然气地质
②油藏工程

IV. ①P618.130.2 ②TE34

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第256858号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523536 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013年5月第1版 2013年5月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:31.5

字数:800千字

定价:98.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前言

本书是由两部分内容组成的论文集。第一部分为实用油气田开发地质,由彭仕宓完成;第二部分为油藏工程方法,由陈元千完成。

在第一部分中,实用油气田开发地质方面的重点内容有:陆相等时地层格架建立方法新探;砾岩储层沉积微相研究新方法;基于测井曲线元的沉积微相定量识别;储层成岩储集相及储集空间演化;测井储层参数定量研究;低阻气层的识别方法;应用多属性体分类技术进行储层预测;基于地质统计学的薄砂层预测方法;裂缝性储层的定量识别方法及隔层裂缝研究;储层流动单元划分标准的探讨;流动单元的井间预测;洪积扇砾岩储层精细相控随机建模;建立储层四维地质模型的方法探讨;储层综合评价的数学地质方法;复杂介质中渗流描述的广义方法;油田开发高含水期水淹层的定量识别;窜流通道定量描述方法;分阶段油藏数值模拟研究及剩余油分布等内容。

在第二部分中,油藏工程方法方面的重点内容有:对我国石油供需关系的中期预测;对我国《石油天然气资源/储量分类》标准的评论与建议;预测油气资源帕雷托(Porato)模型的建立修正与应用;线性流启动压力梯度不能用于平面径向流方程;打加密井和注聚合物提高采收率幅度的评价方法;在均质和非均质条件下水平井产量公式的推导;确定水平井与垂直井的产能比、流动阻力比、驱动面积比和表皮因子的方法;预测气锥和水锥水平井和垂直井临界产量的方法;定容地下储气库方案的设计方法;新型产量递减模型的建立;产量递减阶段储采比的变化规律;预测产量、可采储量、储采比的方法;对谢尔卡切夫(Щелкачев)公式的推导与拓展;确定气井高速湍流系数的方法;气井垂直管流的计算公式推导;确定已开发油田采油井和注水井地层压力的简易方法;两种单位制的对比与变换;油气藏工程常用公式的单位变换等内容。

在本书的重点内容中,应该说有不少独到和创新之处,且具有明显的理论联系实际的特点,实用性较强,而且部分文章的内容有一定的理论价值。当然,文中也会存在有若干不够完善,甚至不够正确的地方,恳请读者予以批评指正。

在我们完成本书的有关文章的过程中,得到了我们的学生和一些青年朋友的热情帮助和通力合作,在此,对他们表示诚挚的感谢,并祝他们家庭幸福、事业有成、身体健康,为祖国石油工业的发展做出应有的贡献。

作者

2010.9.25

目 录

第一部分 实用油气田开发地质

陆相等时地层格架建立方法新探——以冀东高尚堡深层 $E_{s_3}^{3+2}$ 油藏为例	(3)
对基准面旋回定义进行修改的建议	(13)
砾岩储层沉积微相研究新方法	(19)
测井曲线元数学特性及沉积微相定量识别	(26)
基于流动单元的辫状河储层沉积微相研究——以王官屯油田官 142 断块侏罗系储层为例	(32)
新立油田下白垩统泉头组成岩储集相及储集空间演化	(38)
利用多属性体分类技术预测扇三角洲砂体	(48)
独特角度交会技术在振幅随偏移距变化属性解释中的应用	(55)
地质统计学反演方法及其在薄层砂体预测中的应用	(60)
井间砂体定量预测的泛克里格法	(66)
第四系天然气藏储层物性参数测井解释模型	(71)
太古宇变质岩潜山测井综合评价技术研究	(77)
苏里格气田低阻气层分布特征及识别方法研究	(81)
用正交偶极阵列声波测井研究地层地应力场	(85)
裂缝性油气储层定量综合评价——以辽河油田齐家古潜山基岩储层为例	(91)
应用分形技术预测井间裂缝	(97)
东部深层油藏隔层裂缝及其地质意义	(102)
柴达木盆地第四系生物气藏泥岩盖层封闭机理	(108)
油气储层流动单元划分标准的探讨	(115)
分流动单元精确求取储层渗透率的方法	(121)
流动单元的井间预测及剩余油分布规律研究	(127)
分阶段流动单元模型的建立及剩余油预测——以别古庄油田京 11 断块为例	(133)
洪积扇砾岩储层精细相控随机建模	(142)
建立储层四维地质模型的新尝试——以冀东高尚堡沙三段储层模型的建立为例	(149)
双重介质模拟模型中的零平衡失效研究	(155)
一种复杂介质中渗流描述的广义方法	(160)
低速非达西渗流的全隐式模拟模型	(166)
高含水期水淹层的定量识别	(173)
油田高含水期窜流通道定量描述方法	(181)

高含水期油藏精细数值模拟研究	(188)
储层综合评价的主成分分析方法	(193)

第二部分 油藏工程方法

对中国石油消费量和自供量的预测	(203)
对中国《石油天然气资源/储量分类》标准的评论与建议	(208)
预测油气资源帕雷托(Pareto)模型的建立、修正与应用——兼评我国现行的油田储量 规模排序法	(216)
确定饱和型煤层气藏地质储量、可采储量和采收率方法的推导及应用	(225)
线性流的启动压力梯度不能用于平面径向流方程	(233)
加密井提高注水开发油田采收率的评价方法	(241)
注聚合物提高采收率幅度的评价方法及应用	(249)
水平井产量公式的推导与对比	(255)
对 Joshi 各向异性水平井产量公式的质疑、推导与对比	(262)
考虑各向异性和偏心距影响水平井产量公式推导与对比	(268)
确定水平井产能比、流动阻力比、驱动面积比和表皮因子的新方法	(276)
确定水平井有效井底半径、表皮系数和产能比的新方法	(283)
预测水锥和气锥水平井临界产量的新方法	(287)
预测气锥和水锥垂直井临界产量方法的推导与应用	(296)
对谢尔卡切夫(Щелкачев)公式的推导及拓展	(310)
定容地下储气库方案指标的计算方法	(316)
新型递减模型的建立与应用	(326)
产量递减阶段储采比变化规律的研究	(332)
预测油气田剩余可采储量、剩余可采程度和剩余储采比的方法和应用	(339)
水驱曲线法在油田开发评价中的应用	(347)
预测海外合作开发油田可采储量、产量和储采比的方法	(354)
预测水驱油田体积波及系数和可采储量的方法	(362)
确定经济极限含水率和经济可采储量的方法	(367)
确定油井经济极限产量和极限井控面积的简易方法	(376)
半球形流气井产量公式的推导与应用	(379)
压降曲线和压力恢复曲线测试资料的应用与对比	(386)
双产量流动测试资料的扩展应用	(391)
气井一点测试解释法的集成应用	(398)
确定气井高速湍流系数方法的应用与对比	(406)
利用气井测试资料建立确定湍流系数的新公式	(412)
确定非达西流动常数的方法及应用	(422)
气井垂直管流计算方法的推导与应用	(430)

确定已开发油田采油井和注水井地层压力的简易方法 (439)

现代试井解释的技术基础 (448)

两种单位制的对比、变换与应用 (463)

油气藏工程常用公式的单位变换 (468)

附录 1 (488)

附录 2 (490)

附录 3 (492)

附录 4 (493)

第一部分 实用油气田开发地质

陆相等时地层格架建立方法新探

——以冀东高尚堡深层 Es_3^{2+3} 油藏为例

迥异于海相地层,陆相地层对物源、构造、气候以及湖平面变化的响应更加敏感,因而决定了其研究更具复杂性,尤其是等时地层格架的建立更是一个亟待攻关的课题。

Sloss、Krumbein 和 Dapples 于 1948 年提出层序的概念以来,层序地层学经过了半个多世纪的发展。通过最大限度地综合岩心、钻井、露头、测井、地震以及生产测试等资料,尤其是对层序成因进行深入探讨,层序地层学者最大可能地应用了包括沉积、构造、气候、天文乃至数学、物理、化学等多种学科理论,并因其理论的系统性、先进性、预测性和特有的易操作性、高效率性,已经成为地质研究必不可少的手段,尤其是在石油领域,从资源评价(鲁洪波等,1997)、古地貌分析(Farrell,2001;赵俊兴等,2003;Cantalamesa 等,2004)、等时地层格架建立(Cross,2000;Plint 等,2001;顾家裕等,2005;林春明等,2005)、砂体预测(黄啸年等,2001;肖玉茹等,2003;张本琪等,2004;Houston,2004)、流动单元研究(张尚锋等,2002)、油藏数值模拟(许广明等,1999)、剩余油分布预测(尹太举等,2001)等角度做了大量工作。在将层序地层学应用于陆相地层的研究领域方面,国内学者甚至超过了国外同行(徐强等,2003),取得了令人瞩目的成就。

然而,正因为层序地层学理论的飞速发展,以及在油田、煤矿等矿产领域的广泛应用,其自身的缺陷逐渐显现。层序地层学从海相地层发展而来,至今已经发展了多个派别,主要有 Exxon 公司 Vail 为代表的经典层序地层学派、以 Johnson 为代表的 T-R 旋回地层学派、以 Frazier、Galloway 为代表的成因层序地层学派以及由美国科罗拉多矿业学院的 Cross 教授所领导的成因地层研究组发展起来的高分辨率层序地层学派等。各个学派为了研究方便,在层序的成因、层序界面的界定乃至层序方案的划分(二分方案、三分方案、四分方案和五分方案)等方面仍存在重大分歧。不可否认的是,各个学派有其优势所在,已有学者对传统地层学与层序地层学间的统一性和继承性上也开始了一些研究(赖维成等,2004)。但是,多种层序地层学继承性与统一性的研究,仍然很少展开。在各种层序地层理论应用于陆相沉积研究时,单一学派的深入研究,反而带来了对同一问题相互排斥甚至大相径庭的结论,导致研究效率大幅降低。本文试图从理论层次上,统一概念、融合多学派层序地层观点、扬长避短,以期解决油田勘探开发实际问题,并总结一套适合于陆相层序地层研究的技术方法。

1 经典层序地层学与高分辨率层序地层学理论浅析

前已述及,层序地层学理论起源于被动大陆边缘,现在已经发展为多个流派。不同流派层序地层学者对层序成因理解不同,对层序边界的界定也有各自的看法。Exxon 公司 Vail 为代表的经典层序地层学者认为,不整合或与之相对应的整合面为层序的边界;以 Johnson 为代表的层序地层学者认为,以海侵面为层序边界,海进-海退旋回为一个层序;而以 Frazier、Galloway

为代表的成因层序地层学者认为,层序边界为最大洪泛面(图1)。以 Cross 教授为代表的高分辨率层序地层学派则认为层序的边界应该具有更广泛的表现形式,层序的边界并不一定必须是不整合面/整合面,还可以是沉积作用间断面、沉积作用转换面。

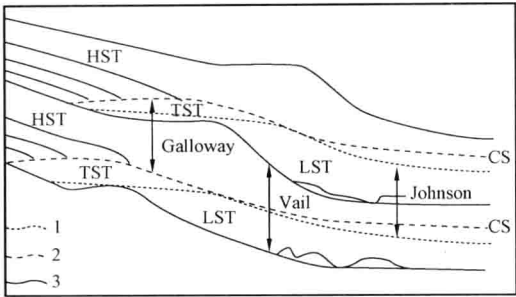


图1 不同层序地层流派层序边界定义
(据 Armentrout, 1993 修改)

1—海侵面;2—最大海泛面;3—不整合及相应的整合面;
CS—凝缩段;HST—高位体系域;TST—水进体系域;
LST—低位体系域

诸多层序地层流派中,以经典层序地层学和高分辨率层序地层学理论应用最广泛。

经典层序地层学的概念和理论是由 Vail 为代表的 Exxon 公司的研究人员根据被动大陆边缘沉积特征提出的。他们认为,层序是一套以不整合面或与之可对比的整合面为界的、成因上相关的、相对整合的连续地层序列。层序本身不包含规模甚至时间的意义,但层序内所有的岩层都是沉积在以层序边界年代所限定的地质时间间隔内。该层序地层学理论基本假设条件为:水体深度旋回变化是以快速水进、缓慢水退为特征的,地层的最基本单元是准层序。每一个准层序都是自下而上水深逐渐变浅的过程,其底界是水深最大时沉积的一套泥岩。其理论基础有二:其一为海平面升降变化具有全球周期性,从而控制了层序的形成与发育,并确定了层序内部与层序之间的成因联系;其二认为构造沉降、全球海平面升降、沉积物供给速率和气候变化是控制层序形成的4个主要因素,这些因素同时使层序表现出不同的级别、规模和时间间隔。

而以 Cross 教授领导的科罗拉多矿业学院成因地层研究组为代表的高分辨率层序地层学是在层序地层学理论基础上发展起来的,主要以岩心、三维露头、测井和高分辨率地震资料为基础,运用精细层序划分和对比技术,建立区域、油田乃至油藏级别的成因地层对比格架(邓宏文等,2001)。

高分辨率层序地层学的理论基础主要包括4个方面,即地层基准面原理、体积划分原理、相分异原理和旋回等时对比法则,共在诸多文章和著作中均有论述,在此不再赘述,但需强调几点。

高分辨率层序地层学的理论基础主要包括4个方面,即地层基准面原理、体积划分原理、相分异原理和旋回等时对比法则,共在诸多文章和著作中均有论述,在此不再赘述,但需强调几点。

(1) 基准面是一个势能面,它反映了地球表面与力求其平衡的地表过程间的不平衡程度。在一个基准面旋回变化过程中(可理解为时间域)保存下来的岩石为一个成因地层单元,即成因层序(邓宏文,1995)。高分辨率层序地层对比是同时代地层与界面的对比,不是旋回幅度和岩石类型的对比。以基准面转换点为界面的高分辨率层序地层对比是等时对比,每一个旋回内部的地层是在相同的时间单元内形成的,即一个基准面旋回也是等时的。

(2) 从基准面和可容纳空间的动力学观点出发,相同沉积体系域或相域的体积划分、沉积物的保存程度、地层堆积样式、相序特征及相类型是其在基准面旋回中所处的位置和可容纳空间的函数,即时间和空间的函数。

(3) 高分辨率层序地层学是对地层记录中反映基准面变化旋回的时间地层单元的二元划分,因而该理论与技术应用的关键,是如何在地层记录中识别代表不同级次基准面旋回的地层旋回,并进行高分辨率的等时地层对比。

因而,基准面原理决定了高分辨率层序地层学理论的工作手段和分析思路。

高分辨率层序地层学是将层序地层学和沉积学理论、方法紧密结合起来,以相互标定的岩

心、测井与高分辨地震资料为基础,依据可容纳空间和 A/S 值的变化趋势识别基准面旋回界面,因而理论上各级次、不同性质的基准面旋回均可识别,可以在以不整合面为界的三级层序内部进行高精度地层单元划分与对比,在深化层序内部结构特征的研究上具有独到之处,其精度更能满足油藏开发的需要。因此在陆相层序地层的研究中更具有实用性,目前已得到许多学者的支持并应用于勘探开发实践中(Cross,2000;肖玉茹等,2003)。

综上所述,经典层序地层学理论以其易于识别的层序边界特征,在界定数十万至数百万年级别(相当于3~4级层序)以上级别层序具有突出作用,而对以岩心、测井资料为主精确至沉积相、岩石相乃至流动单元研究中则力有未逮,尤其是陆相地层,冲刷面频繁发育,经典层序地层学理论中层序边界定义使得层序界面级次确定难上加难,而以二分方案为特征的高分辨率层序地层学理论则对此有独到论述。

2 主流层序地层学流派可结合性探讨

经典层序地层学理论与高分辨率层序地层学理论虽然在理论上、对层序成因的认识上、层序的划分乃至层序边界的界定、层序级次上的观点均大有不同,那么能否将经典层序地层学理论与高分辨率层序地层学理论结合起来,互相取长补短,在陆相地层研究加以运用呢?

前面已经探讨了经典层序地层学理论和高分辨率层序地层学理论的主要优缺点,下面对这两种理论主要不同点进行讨论。

2.1 理论出发点

经典层序地层学理论认为,最基本的层序单元为准层序。海平面变化是层序形成的一个重要控制因素,而海进海退的过程假设使得经典层序地层理论中的“准层序”典型特征为反旋回(潮坪沉积除外),其海平面变化曲线如图2。而高分辨率层序地层学理论则强调的是基准面的升降变化,认为基准面旋回的升降变化产生了基准面旋回,即相应级别的层序。其最基本的层序单元——短期基准面旋回基准面变化曲线见图3。

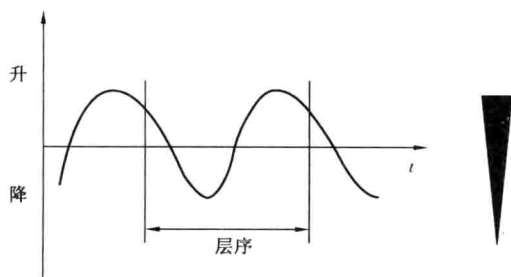


图2 经典层序地层学水平面变化

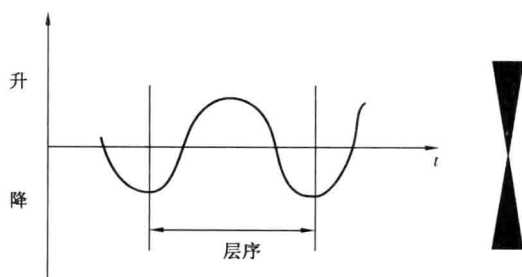


图3 高分辨率层序地层学基准面变化

无论是认为“准层序是水进与水退(即相对水平面变化)的周期性变化产生的旋回性沉积”的经典层序地层学,还是以“基准面变化”为基本出发点的高分辨率层序地层学理论,都可以简化为一点:某一控制因素(水平面或基准面)规律性变化导致了地层的旋回性沉积,进而产生了层序。地层的旋回性是层序地层学理论得以发展的基本支柱。不同的是控制层序形成的要素有不同的理解,进而产生了发展于不同控制因素基础之上的各种观点,这些观点进一步

发展,经系统化,最终出现了对地层成因持不同观点的多家层序地层学流派。因而两种层序地层学理论具有统一的核心思想。

2.2 层序级次讨论

对于层序级次,国内外学者提出众多观点。Vail(1991)根据层序成因的规模,提出将层序分为6个级别。顾家裕等(2001)根据层序边界的性质将陆相地层层序划分为6个级别,即超级层序、一级层序、二级层序、三级层序、准层序组和准层序,其中三级层序边界的不整合面规模为盆地内的较大部分,准层序组的边界位于较大湖泛面位置,而准层序的边界则位于较小湖泛面处。而高分辨率层序地层学学者对于层序的时间规模没有具体的统一观点,只是笼统提出长期、中期、短期基准面旋回的观点,这样就导致了不同地区甚至同一地区不同学者划分的长期、中期、短期基准面旋回时间规模相差很大、无法对比的问题。郑荣才等(2001)将不同构造性质的湖盆在盆地构造—沉积演化序列中的控制因素进行分类,根据界面成因特征提出了“巨旋回、超长周期旋回、长周期旋回、中期旋回、短期旋回、超短期旋回”的划分方案,提出赋予长期、中期、短期基准面旋回以时间规模的概念。

综合上述分析,笔者以为,经典层序地层学理论与高分辨率层序地层学理论在层序级次划分上虽然有较大不同,但如果认为经典层序地层学理论的三级层序(即层序)与高分辨率层序地层学理论的长期基准面旋回在时间上基本相当,而准层序组、准层序分别与中期、短期基准面旋回相对应,那么经典层序地层学与高分辨率层序地层学的层序规模在理论上就可以统一起来,从而能够进行对比。这样做,同时也解决了高分辨率层序地层学理论中层序时间规模的问题。

2.3 层序界面的辩证统一关系

层序地层学研究中,层序界面的界定至关重要,而层序界面的识别尤为关键(蒙启安等,2005)。那么,经典层序地层学理论与高分辨率层序地层学理论层序界面的界定是否有关联呢?

典型的三分方案为代表的经典层序地层学者认为,一个完整的地层沉积层序包括3个部分,即低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)(图4)。

而在海侵末期、高水位初期因沉积作用缓慢,在远端易形成凝缩层(CS)。而高分辨率层序地层学理论则认为,凝缩层(最大湖泛面)是基准面旋回的旋回转换面,也是其二分结构单元的界线。如此,可以借助湖泛面把两种层序地层界面联系起来(图4)。

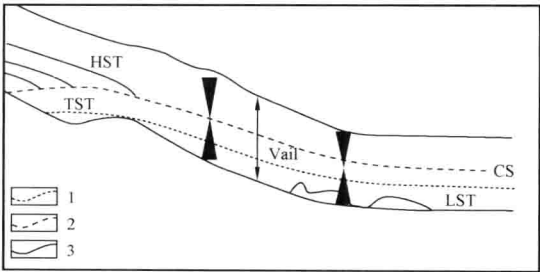


图4 基准面旋回与经典层序地层层序界面的统一性
1—海侵面;2—最大海泛面;3—不整合及相应的整合面

3 实例

高尚堡油田地理位置地跨唐海、滦南两县,构造上,高尚堡油田位于南堡凹陷北部。古近系沙河街组三段为高尚堡油田的重要产油层段,可分为5个亚段($Es_3^1—Es_3^5$),其中 Es_3^{2+3} 段属于近源陡岸扇三角洲沉积体,地层厚度大约为1000m,是典型的湖盆沉积。近几年,三维地震二次采集和处理成果使得工区无论对断裂系统,还是古地貌特征均取得了突破性认识:断裂系

统由“棋盘式”变为一组近东西走向断裂系统;构造高点由现在的主体块移向西北高5区块。工区地层格架因而必然发生巨大变化,如何在工区开展地层研究是油田所面临的亟待解决的问题。如果仍按照传统的地层学研究方法,势必会重蹈覆辙;以经典层序地层学理论为指导,可以建立工区较大层序格架,但无法建立复杂陆相湖盆沉积精细地层格架,这对于开发后期油田,意义不大;而一开始就以高分辨率层序地层学理论为指导,则难免会陷入细枝末节之中,并且陆相地层沉积的复杂性使地层的等时性很难保证。为此,采用经典层序地层学和高分辨率层序地层学理论相结合的办法重新建立了工区等时地层格架。

3.1 层序界面的统一性分析

对于陆相断陷湖盆而言,依据湖盆结构特征,经典层序地层学理论向有三分、二分两种层序划分方案(朱筱敏,2000)。据研究,高尚堡深层属于坡折带不明显的断陷湖盆,对于此类湖盆,可以将其层序二分为湖退体系域(RST)和湖进体系域(TST)。从而使经典层序地层学理论和高分辨率层序地层学理论的层序划分具有统一性——都采用二分方案。

工区层序界面分析如下:

图5中,地层B+C为研究区目的层段。目的层顶底在高5区块为不整合面,而到了主体区块,则变成最大湖泛面,远端为凝缩层,形成一套整合界面。不整合面和与之对应的整合面就构成了目的层顶底的层序界面,即目的层段用经典层序地层学理论来解释,构成了一个完整三级层序。从湖盆的结构特征出发,可以将工区二分为湖退体系域和湖进体系域。湖进体系域和湖退体系域的分界面就是地层B和C之间的界面,而地层C相当于湖退体系域,地层B相当于湖进体系域。陆相湖盆沉积研究表明,地层B和C之间的界面是一套区域性岩性转换面,可以作为长期基准面旋回的层序界限。目的层顶底为最大湖泛面,沉积于湖盆大面积扩张时期,又可以作为长期基准面旋回的转换面。也就是说,工区用经典层序地层学理论解释,可以作为一个完整的层序,而用高分辨率层序地层学分析,则跨两个长期基准面旋回,即两个三级层序(包括长期基准面旋回AB的基准面上升半旋回和长期基准面旋回CD的下降半旋回)。因此,经典和高分辨率层序地层学理论的层序界面在该区可以相互借鉴,具有可结合性。

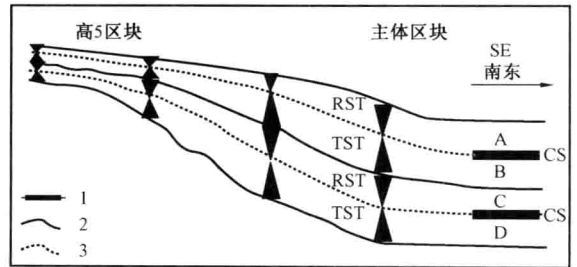


图5 工区地层结构示意图

1—凝缩层;2—不整合及相应的整合面;3—最大海泛面

间的界面,而地层C相当于湖退体系域,地层B相当于湖进体系域。陆相湖盆沉积研究表明,地层B和C之间的界面是一套区域性岩性转换面,可以作为长期基准面旋回的层序界限。目的层顶底为最大湖泛面,沉积于湖盆大面积扩张时期,又可以作为长期基准面旋回的转换面。也就是说,工区用经典层序地层学理论解释,可以作为一个完整的层序,而用高分辨率层序地层学分析,则跨两个长期基准面旋回,即两个三级层序(包括长期基准面旋回AB的基准面上升半旋回和长期基准面旋回CD的下降半旋回)。因此,经典和高分辨率层序地层学理论的层序界面在该区可以相互借鉴,具有可结合性。

3.2 层序划分方案

以经典层序地层和高分辨率层序地层学理论为指导,确立了工区层序地层划分方案(图6)。以该方案为基础,进一步建立了工区三至五级层序地层以及长期(2)、中期(10)、短期(24)、超短期(63)基准面旋回地层格架,并将二者融合,建立了工区高精度等时层序地层格架。其中,长期基准面旋回与四级层序(体系域)规模相当,中、短期基准面旋回分别略小于准层序组、准层序规模,而超短期基准面旋回则与韵律性砂体规模相当。中期、短期、超短期基准面旋回的划分是在三、四级层序地层格架的约束下进行的,并结合动态生产资料,对三、四级层序地层格架进行了调整。

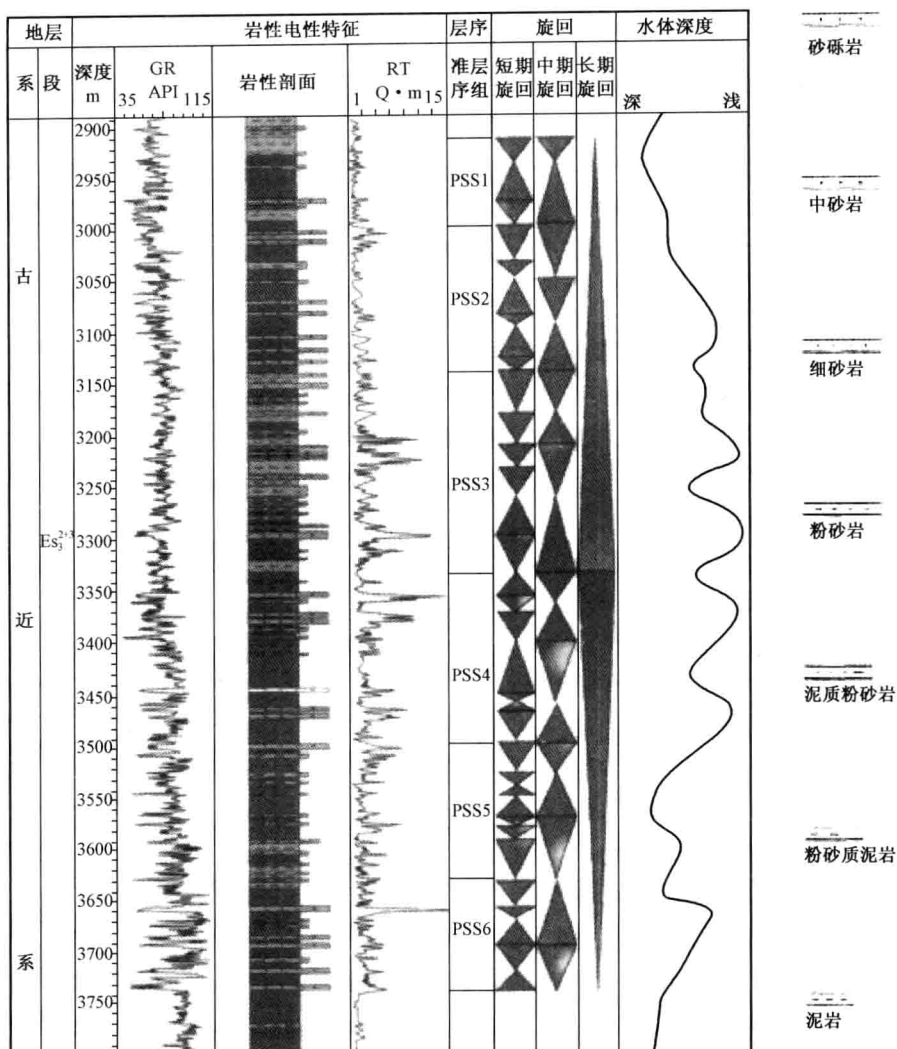


图 6 冀东高尚堡深层 Es_3^{2+3} 亚段层序地层划分方案

3.3 高尚堡深层油藏沉积特征分析

结合工区复杂的地质情况,以高精度等时地层格架研究为基础,以沉积时间单元(相当于超短期基准面旋回,即旋回性单砂体规模)为基本单位,以取心标定测井,将测井相定性分析与砂岩含量、砂岩厚度的定量分析结合起来,对该油藏沉积特征进行了分析。

纵向上,长期基准面旋回的转换位置附近,基准面处于下降末期到上升初期,可容纳空间最小, A/S 值也最小,导致河口坝相对发育。而远沙坝砂体多发育于基准面位置相对较高时期,即一般位于长期基准面下降半旋回的较老地层和长期基准面上升半旋回的较新地层(图 7、图 8)。

该等时格架控制下,砂体的进退积特征突出(图 7、图 8)。长期基准面旋回转换面之下,即长期基准面下降半旋回沉积期,随着水体变浅,可容纳空间降低,砂体向湖盆进积;界面附近,即长期基准面旋回转换位置附近(如中期基准面旋回 $MSC5$ 、 $MSC6$),砂体相对来说最发育;界面之上为长期基准面上升半旋回沉积期,砂体逐渐向物源方向退积,因主体区块主要位

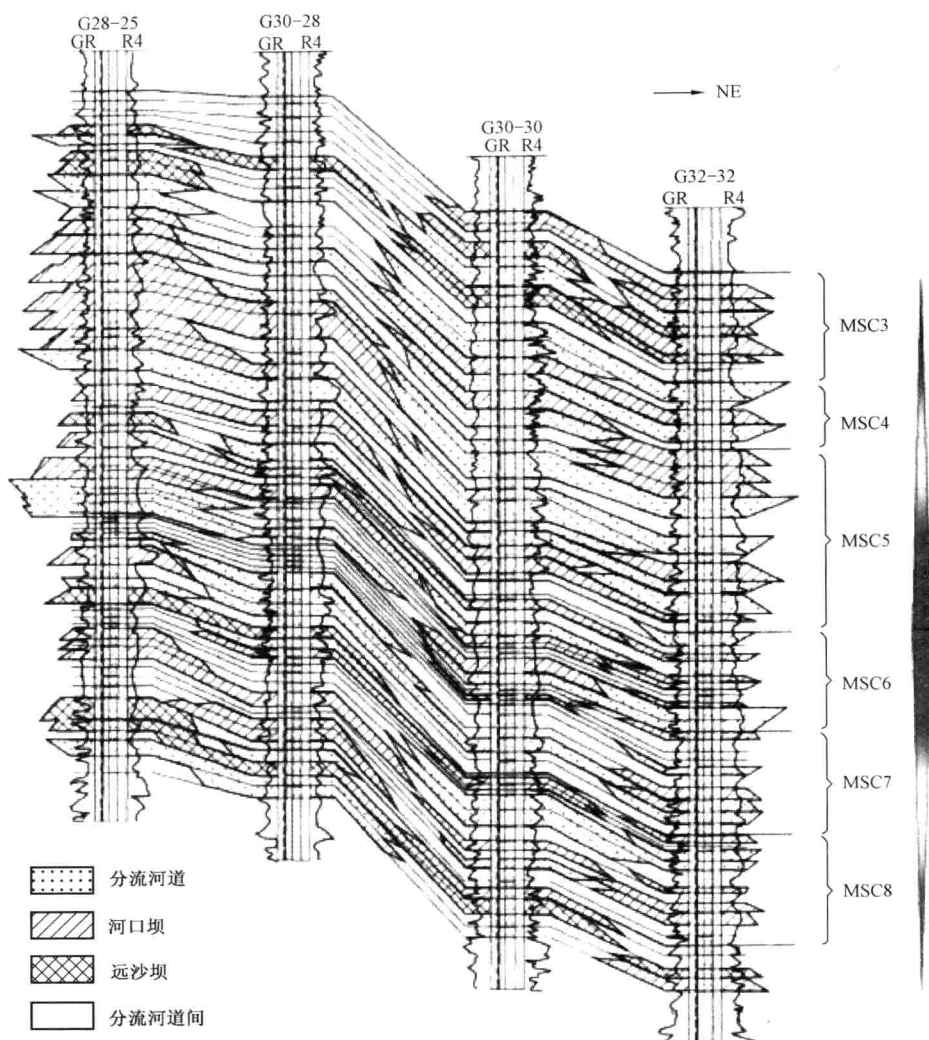


图7 高5区块垂直于主物源方向沉积微相剖面图

置接近湖盆中心,其退积特征最为典型(图8)。到最大湖泛时期, A/S 值最大,砂体发育程度差,以泥岩层厚度和层数增加为主要沉积特征。

一般认为,顺主物源方向,砂体连通性要较垂直于主物源方向好得多。但是,生产情况表明,高5区块垂直于物源方向展布的砂体连通性却反而比主体区块顺物源方向砂体好得多,而且砂体也远较主体区块发育。分析认为,由于高5区块地处古地貌较高处,可容纳空间较主体区块低, A/S 值一般较低,导致河口坝、分流河道等微相比较发育,而远沙坝发育程度则次之,砂体切割、叠置现象突出。而主体区块砂体类型、规模乃至砂体的相互切割叠置性较高5区块都要差些。剖面微相特征也说明了这点(图7、图8)。

已有研究表明,高5区块受北西向物源控制、受北东方向物源影响,而主体区块则只受北东方向的物源控制。在平面上,整体处于扇三角洲前缘亚相,两个扇体形态还是比较清楚的(图9),对其平面分布特征的认识符合该区地质背景及规律。

以精细地层格架约束的沉积特征分析表明,无论是纵向上、还是平面上,工区沉积规律都

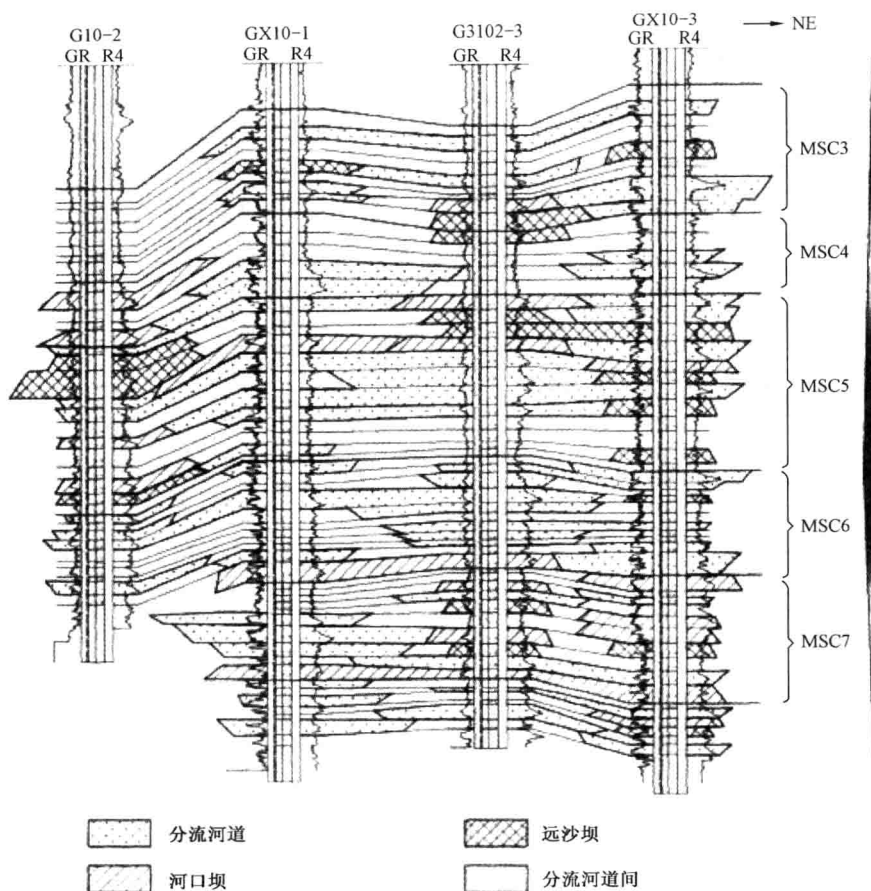


图8 主体区块顺主物源方向沉积微相剖面图

是比较清楚的,从而进一步验证了工区地层格架具有较大合理性。也就是说,将经典层序地层学和高分辨率层序地层学理论相结合,在复杂的陆相地层研究中是大有作为的。

4 结论

建立高精度等时层序地层格架是油气藏后续地质研究、乃至油藏研究的基础。以高尚堡深层油藏为实例,讨论了经典层序地层学与高分辨率层序地层学在陆相地层研究中的可结合性以及具体操作办法。研究表明,以高分辨率层序地层学和经典层序地层学理论相结合的方法,在工区的地层研究中具有突出的效率。油田现场应用反馈结果表明,所建立的地层格架在油田开发调整、井网完善乃至水平井钻井中均起到了重大作用。这说明,经典层序地层学与高分辨率层序地层学相结合的研究方法,在陆相地层研究中具有一定的实际意义。在假设三级层序和长期基准面旋回规模一致的前提下,本文认为两种层序地层学理论的结合是有理论基础的。这样,既克服了高分辨率层序地层学层序规模不确定性、层序界面较难大规模追踪和不易保证较大规模层序的等时性等一系列问题,也在一定程度上弥补了经典层序地层学在深化层序内部特征研究方面的不足。