

辫状河储层构型表征研究进展

乔雨朋^{1,2}, 邱隆伟^{1,2*}, 邵先杰³, 王 军⁴, 宋 璠^{1,2}, 王晔磊^{1,2}, 汤丽莉^{1,2}, 张以根⁴

(1.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2.青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 3.燕山大学石油工程系, 河北 秦皇岛 066004; 4.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 储层构型表征是开发后期挖潜剩余油的重要手段, 辫状河砂体是重要的油气储层, 但由于辫状河沉积机制复杂, 砂体叠置关系多样, 致使其内部构型模式复杂。针对辫状河储层构型的研究, 在野外地质解剖、测井曲线识别、探地雷达分析以及室内模拟实验等多方面均已取得了诸多研究成果。依据储层构型层次界面分析法, 辫状河储层构型共划分出6级储层构型单元; 其中主要的储层构型研究对象为3级和4级储层构型单元, 研究内容为辫状河沉积体系中单砂体的沉积模式、构型参数表征, 心滩内部增生体与夹层的发育模式及构型参数特征。辫状河储层构型主要受构造运动、河水能量、气候条件以及沉积基准面变化4个方面的影响。

关键词: 辫状河 储层构型 构型参数 表征方法 研究进展

中图分类号: TE112.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)06-0034-09

Research progress on characterization of braided river reservoir architecture

Qiao Yupeng^{1,2}, Qiu Longwei^{1,2}, Shao Xianjie³, Wang Jun⁴, Song Fan^{1,2}, Wang Yelei^{1,2}, Tang Lili^{1,2}, Zhang Yigen⁴

(1.School of Geosciences, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2.Evaluation and Detection Technology Laboratory of Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao City, Shandong Province, 266071, China; 3.Department of Petroleum Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao City, Hebei Province, 066004, China; 4.Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: The reservoir architecture characterization is an important means to exploit the residual oil in the later stage of development. The braided river sand body is an important oil and gas reservoir. However, due to the complex mechanism of the braided river sedimentation and multiple superimposition patterns of sandbodies, the mode of the inner reservoir architecture is complex and variable. In view of the study of reservoir architecture of braided river, many achievements have been made in geologic outcrop analysis, logging curve interpretation, characterization and analysis using ground penetrating radar and laboratory experiments. According to the analytical hierarchy process (AHP) of reservoir architecture, the main structure of the braided river reservoir was graded into 6 levels of architecture units, among which the 3rd level unit and the 4th level unit were the main objects to be studied focusing on their sedimentary model of single sandbodies, characterization of architecture parameters and development model of inner accretion sandbody of braided river bar and interbed and their architecture parameters. The braided river reservoir architecture are mainly affected by four aspects including tectonic movement, river water energy, climatic conditions and sedimentary datum change.

Key words: braided river; reservoir architecture; architecture parameters; characterization method; research progress

收稿日期: 2017-07-11。

作者简介: 乔雨朋(1990—), 男, 吉林榆树人, 在读博士研究生, 从事沉积学与油藏描述研究。联系电话: 13153245695, E-mail: qiaoyupeng@126.com。

*通讯作者: 邱隆伟(1967—), 男, 江西赣州人, 教授, 博导。联系电话: 18561332099, E-mail: qiulwsd@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“特高含水后期整装油田延长经济寿命期开发技术”(2016ZX05011-001)。

储层构型研究主要依据地质学家 Maill 针对河流相储层提出的构型理论^[1-2]。自该理论提出以来,中外诸多地质学家针对不同类型的沉积体系进行储层构型分析,对于河流相储层,地质学家们对曲流河储层构型的研究程度较高,例如在储层构型划分、点坝构型解剖、储层构型参数地质知识库建立以及储层构型建模等方面均取得了诸多进展^[3-5]。辫状河砂体主要是冲刷充填以及垂向加积作用控制的粗碎屑沉积体,由于储层内部不同期次河道的冲刷叠置,加之心滩落淤层及憩水期沉积的泥岩,使得辫状河储层内部构型变得十分复杂^[6]。由于辫状河砂体一般较厚,是很好的储层,加强对其内部构型的研究对于开发后期油田辫状河储层的挖潜具有十分重要的意义。

近年来对辫状河储层构型的研究越来越多,在辫状河储层描述、野外地质解剖、测井曲线识别、室内模拟实验、探地雷达分析以及储层构型参数地质知识库建立等诸多方面已取得了一定的进展^[4-5]。

但辫状河储层纵向上多期叠置,构型单元复杂,其组合关系的研究仍存在一些问題。目前针对辫状河储层构型的研究日益成熟,已逐渐从定性描述发展为定量表征,从单一技术手段逐渐发展为多种技术手段联合表征。为此,笔者调研辫状河储层构型表征研究进展,指出辫状河储层构型表征研究存在的问题以及未来的发展趋势,以期为油田开发后期辫状河储层构型研究及剩余油挖潜提供帮助。

1 辫状河储层构型单元划分

储层构型的本质即为储层内部的层次结构性,其不仅注重沉积单元的级次,而且强调各级单元之间的界面,即层次界面^[7]。辫状河储层构型划分是依据 Maill 构型划分方案,采用储层构型层次界面分析法对辫状河储层进行构型单元的划分以及构型界面的识别^[1,7-9](图1)。其中,6级储层构型单元为复合辫状河道带,其构型界面为复合辫状河道带与

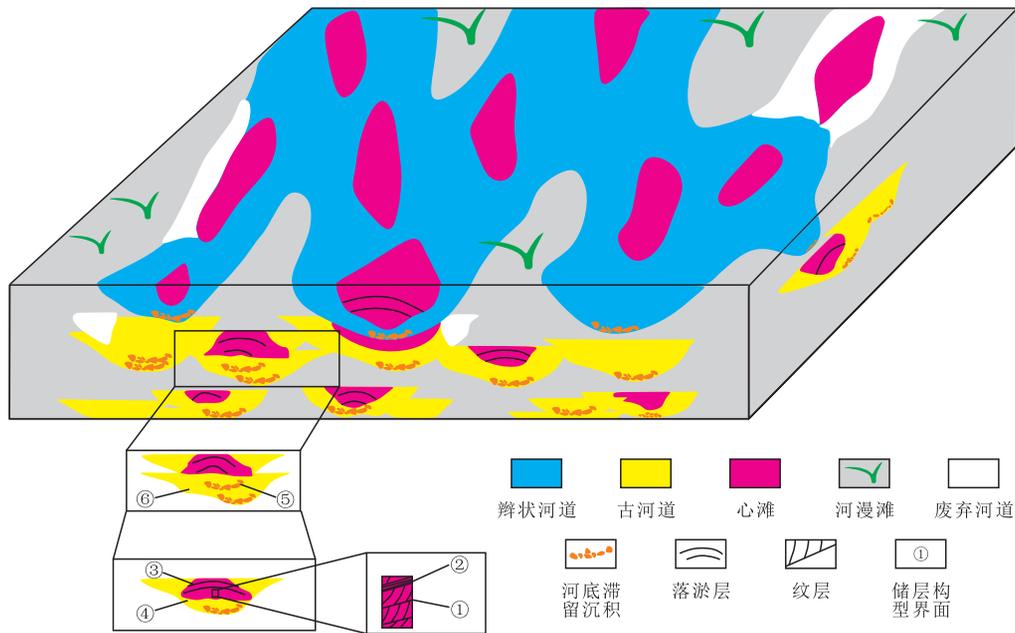


图1 辫状河储层构型划分示意

Fig.1 Schematic diagram showing division of braided river reservoir architecture

围岩的底面;5级储层构型单元为单一辫状河道,对应的构型界面为单一辫状河道与围岩的界面;4级储层构型单元为辫状河道、心滩、河底滞留沉积和河漫滩等单砂体,对应的构型界面为辫状河道、心滩、河底滞留沉积、河漫滩等单砂体之间的界面;3级储层构型单元为增生体,对应的构型界面为增生体之间的界面;2级储层构型单元为纹层组,对应的构型界面为纹层组之间的界面;1级储层构型单元为纹层,对应的构型界面为纹层之间的界面。辫状

河储层构型研究主要针对4级和3级储层构型单元,即辫状河道、心滩、河底滞留沉积和河漫滩等单砂体,以及心滩内增生体及增生体之间夹层的展布情况。

2 辫状河储层构型表征方法

2.1 野外地质解剖

于兴河等对大同中侏罗统辫状河(野外)露头

剖面进行解剖,系统描述了辫状河储层的沉积学特征、露头特征、露头储层岩相组合、层次界面、沉积模式以及地质模型,为中国较详细系统的辫状河储层构型解剖资料^[8]。廖保方等对比研究永定河高坡降辫状河和低坡降辫状河,认为二者的沉积作用机制和砂体沉积模式是近似的,辫状河沉积模式可概括为由垂向加积作用控制的粗粒岩性(砂、砾)为主体,少有细粒粉砂质泥质夹层,层理构造发育,横向相变较大、垂向层序向上变细、空间广泛展布的正旋回叠覆泛砂体^[10]。金振奎等根据阜康、柳林和延安地区辫状河(野外)露头特征,将河道砂体构型分为叠拼式、侧拼式和孤立式,其中叠拼式可进一步分为完全叠拼式、不完全叠拼式和交错叠拼式,侧拼式可进一步划分为侧切式和似侧切式^[11]。

2.2 测井曲线识别

辫状河储层构型的单井划分主要根据岩心和测井资料。其中,6级储层构型界面易于识别,不同期次复合辫状河道砂体之间均夹有相当厚度的泥岩,在测井曲线上表现为箱形、齿化箱形突变(图2);5级储层构型界面可通过岩心与连井剖面的测井资料联合进行识别;4级储层构型界面以泥质沉积为主,自然伽马曲线回返幅度超过2/3;3级储层构型界面主要为心滩内部增生体之间的界面,其夹层类型主要包括钙质夹层、落淤夹层和泥砾夹层3类,且根据夹层厚度的不同,自然伽马曲线回返程度也不同,主要表现为基线式回返、半幅式回返以及阶梯式回返3类^[5]。

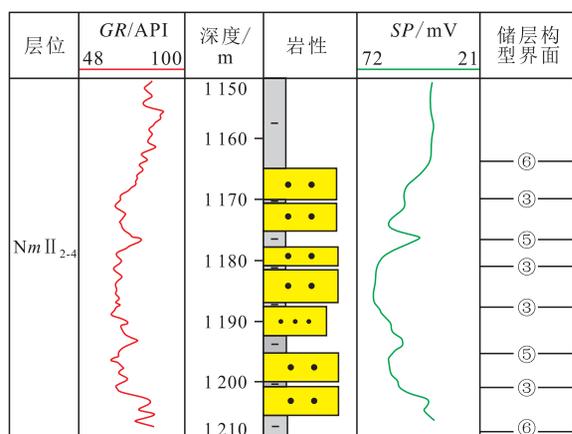


图2 辫状河储层构型界面测井曲线特征

Fig.2 Logging curves characteristic of architecture interface of braided river reservoir

利用辫状河储层构型单元的划分标准及构型界面的识别方法,可以根据测井、岩心等资料对辫状河储层进行构型界面的单井及连井识别。在研究过程中主要识别3—6级储层构型界面,且在连井对比分析时,需考虑辫状河沉积模式。

2.3 探地雷达分析

探地雷达是用于确定浅层地下介质分布的广谱电磁技术,其利用一个天线发射高频宽频带电磁波,另一个天线接收来自地下介质界面的反射波^[3]。研究表明,探地雷达能够识别出辫状河心滩与河道之间的构型界面,也可以识别出心滩内部增生体之间的界面。在国外探地雷达早已应用于辫状河露头或辫状河现代沉积体的解剖。Ruc-sandra等应用探地雷达技术与岩心、露头研究相结合对河流相砂体进行解剖,并应用雷达剖面进行储层构型单元划分^[12]。Best等通过对孟加拉Jamuna河废弃心滩坝进行探地雷达解剖,发现该心滩坝呈整体平缓前积叠置向下游方向迁移的沉积模式^[13]。Skelly等利用探地雷达对美国内布拉斯加州东北部的奈厄布拉勒河进行心滩与河道的储层构型界面识别^[14]。Lunt等在解剖美国阿拉斯加州北部的大型辫状河Sagavanirktok河时,利用探地雷达发现砂坝的侧向迁移模式^[15]。Smith等应用探地雷达对加拿大南萨斯喀彻温砂质辫状河进行解剖时,识别出4类雷达相,进而确定砂坝、复合砂坝与周围沉积体之间的构型界面^[16-17]。

2.4 室内模拟实验

为详细分析辫状河储层发育及构型特征,中外地质学家在室内进行了一系列模拟实验。Moreton等利用室内物理实验结果指导地质建模,所建模型中河道与围岩界面的发育特征与室内物理实验结果具有较高的吻合度^[18]。Bertoldi等利用实验室物理模型进行了相关的14个实验,在统一物源,改变排量以及不同坡度条件下,探讨辫流带宽度、河道分支与节点的数量、形态与流量和坡度的关系^[19]。何宇航等通过6个轮次的室内模拟实验,建立不同沉积微相砂体构型参数的相关关系以及物性参数模型^[20]。

3 辫状河储层构型表征研究进展

辫状河储层构型研究的主要对象为4级和3级储层构型单元,主要包括4级储层构型单元(沉积微相级别储层构型单元)的横、纵向叠置关系,以及河道与心滩的构型参数,3级储层构型单元的心滩内部增生体的叠置关系、夹层的发育模式以及定量规模的确定等。

3.1 4级储层构型单元表征

3.1.1 沉积模式

陈彬滔等认为,同一沉积时期,砂质辫状河沉

积体系存在4种基本储层构型单元沉积模式,分别为河道-漫溢-边滩-河道/废弃河道、河道-心滩-河道、河道-边滩-漫溢^[21]。王越等在解剖扒楼沟二叠系辫状河剖面时,识别出河道-心滩-河道储层构型单元沉积模式^[22]。孙天建等在野外露头及地下储层描述时,认为辫状河道存在砂质充填、泥质充填以及砂泥质充填3类^[23-25]。

3.1.2 储层构型参数

心滩储层构型参数 心滩储层规模的确定有利于对砂体的精确表征,可以为地质建模提供重要依据(表1)。Kelly利用22个现代辫状河(或水槽实验数据)和34个古代露头数据建立砂质辫状河心滩长度与宽度之间的关系^[26]。何宇航等以大庆油区葡12₃单元辫状河砂体沉积背景为基础,设计物理模拟实验,通过6个轮次的实验,识别出多种沉积微相类型,建立不同沉积微相砂体构型参数的关系^[20]。李海明等应用Google earth软件对现代辫状河沉积的心滩的宽度、长度以及辫流带宽度进行测量,分析其相关性,建立不同沉积环境下近源砾质辫状河与远源砂质辫状河的心滩宽度、长度以及辫流带宽度之间类似的函数关系^[27]。邢宝荣以大庆长垣油田喇萨区块葡一组储层为例,利用岩心、沉积、测井和密井网等资料,结合卫星照片,研究心滩的识别方法、河道砂体的储层构型要素及几何特征,构建辫状河储层地质知识库^[28]。孙玉波应用Google earth软件对北美洲阿拉斯加地区和非洲刚果地区的辫状河沉积进行数据调查,建立辫状河储层构型

表1 辫状河心滩储层构型参数地质知识库
Table1 Geological knowledge database for reservoir architecture parameters of braided river bar

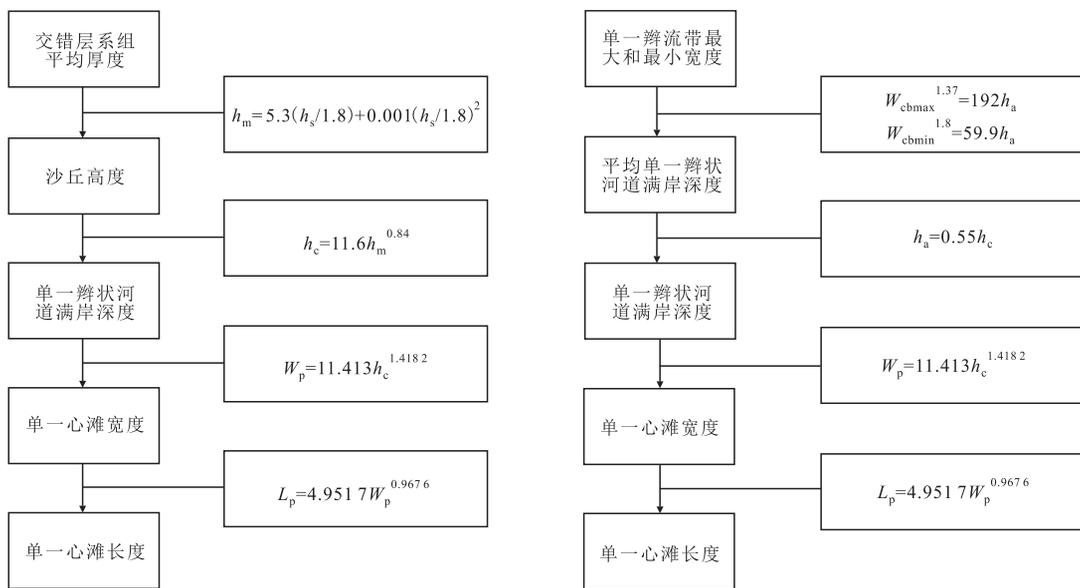
预测公式	数据来源	作者
$L_p = 4.9517W_p^{0.9676}$	现代辫状河、水槽实验以及古代露头	Kelly
$W_p = 0.304L_p + 26.11$ $h = 0.0166W_p - 0.3793$	室内模拟实验	何宇航等
$L_p = 2.4671W_p + 93.655$ $W_p = 0.2458W_n - 46.196$	现代近源砾质辫状河	李海明等
$L_p = 2.64W_p + 705$ $W_p = 0.228W_n + 799$	现代远源砂质辫状河	
$L_p = 1.1677W_p + 279.27$	地下储层	邢宝荣
$L_p = 3.7802W_p$	现代砂质辫状河	孙玉波
$L_p = 4.1487W_p^{0.9574}$	现代砂质辫状河	孙天建等

注:室内模拟实验获得预测公式中的参数单位为cm。

单元几何关系知识库,并用于指导建模^[29]。孙天建等应用前人的经验公式(图3),通过岩心观察的纹层或辫流带的整体规模,确定心滩的规模^[23,26,30-33]。

笔者利用Google earth软件对玉门西部冲积扇扇根、扇中及扇缘亚相发育的辫状河(近源、季节流水型)和印度布拉马普特拉河(远源、常年流水型)进行储层构型参数的统计,其中心滩储层构型参数与孙天建等建立的预测公式拟合度较高(图4)。

河道储层构型参数 诸多学者针对河道储层构型参数进行了研究(表2)。邢宝荣对9条现代河流进行构型参数统计,回归分析辫状河河道与心滩



a—由纹层确定心滩储层构型参数

b—由辫流带确定心滩储层构型参数

图3 2种辫状河心滩储层构型参数计算方法

Fig.3 Two kinds of calculation method of reservoir architecture parameters of braided river bar

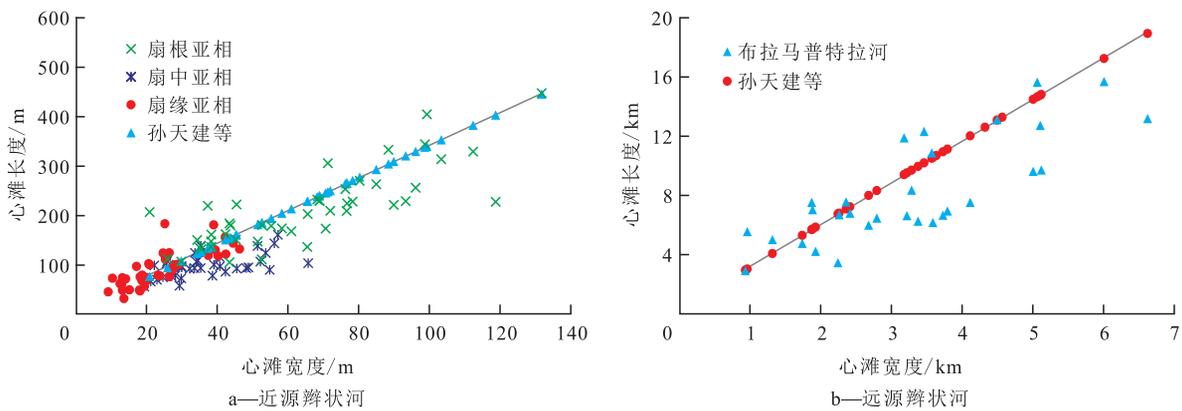


图4 辫状河心滩长度与宽度的关系

Fig.4 Relationship between the length and width of braided river bar

表2 辫状河河道储层构型参数地质知识库
Table2 Geological knowledge database for reservoir architecture parameters of braided river channel

预测公式	数据来源	作者
$W_c = 0.275 \cdot 8W_p - 4.610 \cdot 6$	现代辫状河	邢宝荣
$W_c = 0.299 \cdot 4W_p^{1.0125}$	现代辫状河	孙天建等

的参数关系^[28]。孙天建等利用 Google earth 软件进行数据回归,建立辫状河河道宽度与心滩宽度的关系^[30]。笔者对辫状河心滩长度与宽度之间关系的统计结果与孙天建等拟合公式的计算结果具有较高的吻合度;对辫状河心滩宽度与河道宽度的关系也进行了分析,并与孙天建等建立的预测公式进行验证,亦具有较好的吻合度(图5)。

3.2 3级储层构型单元表征

3级储层构型单元是砂质辫状河储层构型研究的重点。对于辫状河心滩内部储层构型的研究主要针对增生体的发育模式以及心滩内部夹层的类型、规模等。

3.2.1 增生体发育特征

增生体发育模式 辫状河心滩在空间上可以划分为头部、尾部以及两翼共4个部分,由于辫状河

水体能量一般较强,其头部往往受到冲刷,内部夹层不发育,而尾部受到保护,夹层较为发育^[34]。Best等利用探地雷达技术解剖心滩内部结构,发现心滩内部增生体呈整体平缓前积叠置向下游方向迁移的沉积模式^[13]。马世忠认为心滩内部的增生体为陡角前积叠置模式,存在反“S”型顺流加积沉积,且倾角存在较缓或较陡2种可能性^[4]。钟思瑛等提出在静水期辫状河心滩两侧发育侧向加积模式^[35]。牛博等基于野外露头及探地雷达分析结果,建立辫状河心滩沉积模式,即心滩内部增生体在横截水流方向上发育垂向加积和侧向加积等多种沉积模式,顺水流方向上具有整体平缓前积、内部陡角前积的沉积特征;心滩中心部位增生体顶界面总体近似水平,头部稍陡,尾部平缓,具有明显的顺流加积沉积特征^[36]。

增生体发育规模 针对增生体发育规模的研究方法有野外露头法、密井网井间精细对比法和经验公式法^[23,30]。Kelly建立心滩内部增生体规模计算公式^[26],在已知单一增生体厚度的条件下,可根据经验公式计算单一增生体宽度,单一增生体长度与宽度的关系可参考心滩宽度与长度关系的经验公式确定。

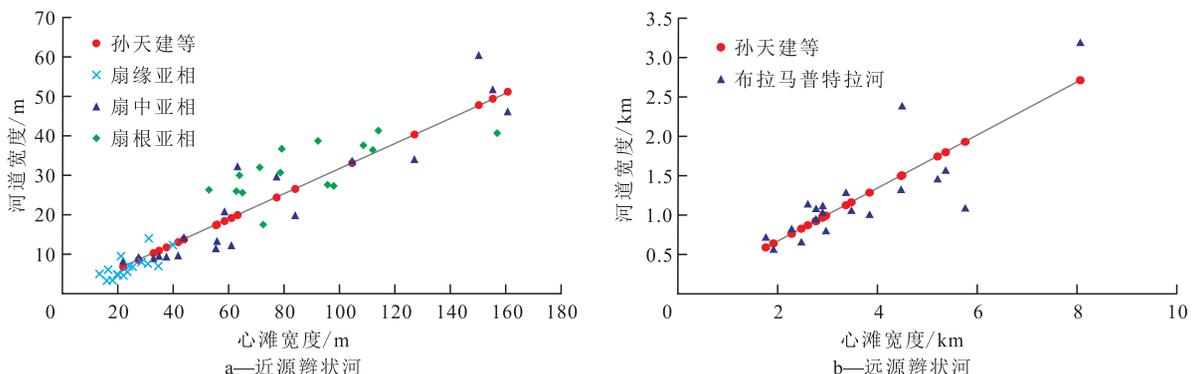


图5 辫状河心滩宽度与河道宽度的关系

Fig.5 Relationship between width of braided river bar and channel

3.2.2 夹层发育特征

夹层发育类型 针对辫状河心滩内部夹层的研究对开发后期辫状河储层内部剩余油的挖潜具有重要意义,也是心滩内部储层构型解剖的关键。心滩内部发育的夹层类型主要有泥质落淤层、钙质夹层以及物性夹层3类^[30,37]。刘钰铭等根据沉积成因将心滩内部夹层划分为落淤层、坝间泥岩以及串沟泥质充填3类^[24]。

夹层发育倾角 野外露头观察及现代心滩剖

析结果表明,辫状河心滩内部落淤层在中心部位的倾角较小,近似水平;在长轴方向上,迎水面倾角稍陡,背水面较平缓且呈前积特征,短轴方向上则向两翼倾斜^[12-15,34]。针对夹层倾角的研究多采用井间对比方法,将底部标志层拉平,利用三角函数求取^[30]。从辫状河心滩内部长轴方向的连井剖面(图6)可以看出,根据井间距离与落淤层垂向高度差可以求取落淤层倾角,且心滩头部、尾部及两翼落淤层倾角的计算方法是相同的。

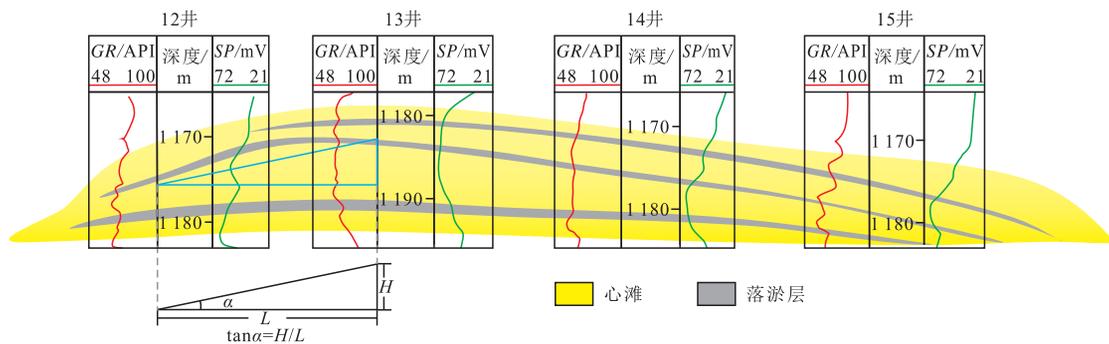


图6 辫状河心滩内部长轴方向落淤层倾角计算

Fig.6 Dip calculation of silt in long-axis direction of braided river bar

夹层发育规模 针对心滩内部夹层发育规模的研究方法主要有经验公式法和密井网井间精细对比法^[20,36]。在应用经验公式法时,可以参照增生体发育规模的研究方法,夹层可以认为是增生体上面的披覆体,二者的发育规模一致,同为利用井间对比进行约束,以定量表征夹层发育规模。

4 辫状河储层构型控制因素

辫状河储层构型表征方法及研究进展的调研结果表明,辫状河储层构型具有多种类型,其控制因素与河型转化的控制因素一致,包括构造运动、河水流量、气候条件以及沉积基准面变化^[6,38-39]。受这些因素影响,近源辫状河与远源辫状河互相转化,在上游带(近源辫状河),河道冲刷作用强,水体能量高,河道不稳定,多为高频叠置型、替代型河道;在中游带,地形坡度变缓,水体能量相对变低,河道分叉数量变少,河道之间多为侧向拼接型;在下游带,地形坡度最缓,水体能量低,河道较为稳定,河道之间多为孤立型^[11]。

4.1 构造运动

构造作用是河型转化最重要的控制因素^[40-41],在河型转化过程中会影响其内部的储层构型。在构造运动活跃期,如果山体发生相对抬升,则地形坡度变大,河道多为高频叠置型和替代型。在构造

运动稳定期,随着沉积作用的进行,地形坡度减小,水体能量变低,辫状河道带整体退缩,可由上游带沉积依次变为中游带、下游带沉积,辫状河道拼接模式也会依次由高频叠置型变为侧向拼接型和孤立型。

4.2 河水流量

河水流量是控制河流稳定程度的主要因素。水体能量高,冲刷作用强,其储层构型相对较为复杂;水体能量低,冲刷作用弱,其储层构型相对较为稳定。如果河水流量高,水体漫过心滩,则心滩为多期增生体叠合组成;如果河水流量低,水体低于心滩,则在心滩两侧形成侧积体^[16]。

4.3 气候条件

气候条件是一个相对宏观的概念,气候条件往往控制着降雨量及河岸的植被发育情况。如果气候湿润,降雨量强,则河水流量变大,进而影响河流内部的储层构型模式。特别是在洪水期,河水一般会漫过心滩,形成垂向加积;而在枯水期,心滩则会出露水面。

4.4 沉积基准面变化

沉积基准面升降对储层构型也具有一定的影响。当沉积基准面上升时,有效可容空间变大,接受砂泥沉积,河道冲刷作用相对较弱;而沉积基准面下降时,有效可容空间变小,河道冲刷作用变强,后期辫状河道对前期河道的改造较为明显。

5 存在问题及展望

目前针对辫状河沉积体系的研究仍处于定性、定量的探索阶段。虽然很多学者针对野外露头、现代沉积、室内模拟实验以及地下储层描述开展了大量工作,但仍需进一步研究。目前存在的问题有:①在进行储层构型表征时,针对辫状河心滩在平面上的发育位置具有较强的推测性,心滩内部落淤层、增生体规模预测等仍存在问题。②辫状河储层构型研究多针对地下储层进行表征,而对野外露头的解剖、现代辫状河沉积的剖析以及室内水槽实验的研究则相对落后,特别在中国缺少基于岩心、露头、测井以及探地雷达等多项技术相结合的辫状河储层构型解剖,而国外在这方面的研究则相对较多。③在从物源方向游荡过程中,辫状河的水体能量逐渐减弱。李海明等统计发现,在不同沉积环境下现代辫状河道和心滩的沉积规模也各不相同^[27],且笔者对比前人经验公式发现,构型参数的关系公式存在很大的差异性。因此,在未明确辫状河发育类型时,直接应用前人的经验公式是不适用的。此外,由于辫状河极不稳定,易被改造,应用现代辫状河储层构型参数指导地下辫状河储层的描述及建模是否适用也是值得思考的。④辫状河储层构型建模技术尚处于起步阶段,由于辫状河储层的复杂性与不确定性,因此仍难以建立可以精确表征辫状河储层构型的模型,特别是辫状河砂体之间除了存在一些夹层,也发育一些逻辑储层构型界面,在建模过程中如何准确表征仍需进一步探索。

辫状河储层构型表征方法日渐成熟,但仍存在一些不足。辫状河沉积具有多样性及不确定性,针对不同类型辫状河沉积的研究以及综合利用多尺度技术手段对辫状河沉积进行解剖是未来辫状河储层构型表征的趋势。今后仍需在以下几个方面进一步深化研究:①加强不同类型现代辫状河储层构型的野外地质解剖,例如近源辫状河及远源辫状河储层构型剖析,终年流水型及季节性流水型辫状河的对比剖析,研究不同沉积环境下储层构型的拼接模式、三维沉积模式以及构型参数地质知识库。②加强室内水槽实验,研究沉积微相发育类型、心滩发育位置、储层构型单元拼接模式以及定量评价构型参数的关系。③采用地球物理测井、探地雷达(地震)与野外露头、岩心分析等多种方法相结合,建立古辫状河储层构型模式以及构型参数地质知识库。④在储层构型建模时,建模专家在曲流河储

层构型建模过程中提出基于沉积界面约束、分级套合等多种方法^[42-43],这些方法可以延伸发展至辫状河储层构型研究中。

6 结论

开展辫状河储层构型研究对提高开发后期老油田的采收率及剩余油挖潜均具有重要意义。基于野外露头、岩心、测井以及探地雷达(地震)等多尺度的储层构型表征是未来构型表征的趋势。通过对储层构型单元的识别、构型参数地质知识库的建立,对辫状河储层构型的研究已逐渐发展为定量化表征。由于辫状河储层构型模式较复杂,控制因素较多,因此仍需进一步深化研究辫状河储层构型的表征方法,开展针对近源、远源辫状河,干旱、湿润辫状河以及古辫状河露头与现代沉积的研究,以进一步丰富辫状河储层构型地质知识库。

符号解释:

L_p ——心滩长度, m; W_p ——心滩宽度, m; W_R ——辫流带宽度, m; h ——心滩厚度, m; h_c ——交错层系组平均厚度, m; h_m ——沙丘高度, m; h_e ——单一辫状河道满岸深度, m; $W_{cb,max}$ ——辫流带最大宽度, m; $W_{cb,min}$ ——辫流带最小宽度, m; h_a ——平均单一辫状河道满岸深度, m; W_e ——辫状河河道宽度, m; α ——落淤层倾角, ($^\circ$); H ——落淤层垂向高度差, m; L ——井间距离, m。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Miall A D. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: Lessons from outcrop studies [J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72(6): 682-697.
- [3] 周银邦, 吴胜和, 计秉玉, 等. 曲流河储层构型表征研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 695-702.
Zhou Yinbang, Wu Shenghe, Ji Bingyu, et al. Research progress on the characterization of fluvial reservoir architecture [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 695-702.
- [4] 蒋平, 赵应成, 李顺明, 等. 不同沉积体系储层构型研究与展望 [J]. *新疆石油地质*, 2013, 34(1): 111-115.
Jiang Ping, Zhao Yingcheng, Li Shunming, et al. Reservoir configuration research and prospect of different deposit systems [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 34(1): 111-115.
- [5] 吴胜和, 岳大力, 刘建民, 等. 地下古河道储层构型的层次建模研究 [J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2008, 38(增刊1): 111-121.
Wu Shenghe, Yue Dali, Liu Jianmin, et al. Research on hierarchical modeling of reservoir architecture of underground paleochannel [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2008, 38(Sup-

- plement): 111-121.
- [6] 乔雨朋, 邵先杰, 接敬涛, 等. 远源砂质辫状河储层构型及控制因素——以秦皇岛32-6油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(1): 46-52.
Qiao Yupeng, Shao Xianjie, Jie Jingtao, et al. Architecture analysis and controlling factor on far source sandy braided river reservoir: A case study of Qinhuangdao32-6 oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 46-52.
- [7] 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.
- [8] 于兴河, 马兴祥, 穆龙新, 等. 辫状河储层地质模式及层次界面分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
Yu Xinghe, Ma Xingxiang, Mu Longxin, et al. Reservoir geology model and hierarchy surface analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [9] 刘卫, 路智勇, 牛栓文, 等. 东辛油田营13断块辫状河储层构型模式[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4): 33-37.
Liu Wei, Lu Zhiyong, Niu Shuanwen, et al. An architecture model of braided river reservoir in Ying-13 fault block of Dongxin oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4): 33-37.
- [10] 廖保方, 张为民, 李列, 等. 辫状河现代沉积研究与相模式——中国永定河剖析[J]. 沉积学报, 1998, 16(1): 34-39, 50.
Liao Baofang, Zhang Weimin, Li Lie, et al. Study on modern deposit of a braided stream and facies model—taking the Yongding River as an example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(1): 34-39, 50.
- [11] 金振奎, 杨有星, 尚建林, 等. 辫状河砂体构型及定量参数研究——以阜康、柳林和延安地区辫状河露头为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 311-317.
Jin Zhenkui, Yang Youxing, Shang Jianlin, et al. Sandbody architecture and quantitative parameters of single channel sandbodies of braided river: Cases from outcrops of braided river in Fukang, Liulin and Yanan areas[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(3): 311-317.
- [12] Ruesandra M C, Kristian S, Robert B S, et al. Detailed internal architecture of a fluvial channel sandstone determined from outcrop, cores, and 3-D ground-penetrating radar: Example from the middle Cretaceous Ferron Sandstone, east-central Utah[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(9): 1 583-1 608.
- [13] Best J L, Ashworth P J, Bristow C S, et al. Three-dimensional sedimentary architecture of a large, mid-channel sand braid bar, Jamuna River, Bangladesh[J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(4): 516-530.
- [14] Skelly R L, Bristow C S, Ethridge F G, et al. Architecture of channel-belt deposits in an aggrading shallow sandbed braided river: the lower Niobrara River, northeast Nebraska[J]. Sedimentary Geology, 2003, 158(3/4): 249-270.
- [15] Lunt I A, Bridge J S, Tye R S, et al. A quantitative, three-dimensional depositional model of gravelly braided rivers[J]. Sedimentology, 2004, 51(3): 377-414.
- [16] Smith G H, Ashworth P J, Best J L, et al. The sedimentology and alluvial architecture of the sandy braided South Saskatchewan River, Canada[J]. Sedimentology, 2006, 53(2): 413-434.
- [17] Smith G H, Ashworth P J, Best J L, et al. The sedimentology and alluvial architecture of a large braid bar, Rio Parana, Argentina[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(8): 629-642.
- [18] Moreton D J, Ashworth P J, Best J L, et al. The physical scale modelling of braided alluvial architecture and estimation of subsurface permeability[J]. Basin Research, 2002, 14(3): 265-285.
- [19] Bertoldi W, Zanoni L, Tubino M, et al. Planform dynamics of braided streams[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(4): 547-557.
- [20] 何宇航, 宋保全, 张春生. 大庆长垣辫状河砂体物理模拟实验研究与认识[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 41-48.
He Yuhang, Song Baoquan, Zhang Chunsheng. A study of braided river sand deposit in Changyuan, Daqing through physical simulation experiments[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 41-48.
- [21] 陈彬滔, 于兴河, 王天奇, 等. 砂质辫状河岩相与构型特征——以山西大同盆地中侏罗统云冈组露头为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 111-117.
Chen Bintao, Yu Xinghe, Wang Tianqi, et al. Lithofacies and architectural characteristics of sandy braided river deposits: a case from outcrops of the Middle Jurassic Yungang Formation in the Datong Basin, Shanxi province[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 111-117.
- [22] 王越, 陈世悦, 李天宝, 等. 扒楼沟剖面二叠系辫状河砂体构型与非均质性特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2016, 40(6): 1-8.
Wang Yue, Chen Shiyue, Li Tianbao, et al. Braided river sand body architecture and heterogeneity of Permian in Palougou outcrop[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2016, 40(6): 1-8.
- [23] 孙天建, 穆龙新, 吴向红, 等. 砂质辫状河储层构型表征方法——以苏丹穆格莱特盆地 Hegli 油田为例[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 715-724.
Sun Tianjian, Mu Longxin, Wu Xianghong, et al. A quantitative method for architectural characterization of sandy braided-river reservoirs: taking Hegli oilfield of Muglad Basin in Sudan as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 715-724.
- [24] 刘钰铭, 侯加根, 宋保全, 等. 辫状河厚砂层内部夹层表征——以大庆喇嘛甸油田为例[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 836-841.
Liu Yuming, Hou Jiagen, Song Baoquan, et al. Characterization of interlayers within braided-river thick sandstones: A case study on the Lamadian Oilfield in Daqing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 836-841.
- [25] 张善严, 白振强. 长垣油田辫状河砂体储层内部构型研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2012, 31(4): 57-63.
Zhang Shanyan, Bai Zhenqiang. Studies on the internal configurations of braided river sandbody reservoirs of placanticline oilfields[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2012, 31(4): 57-63.

- [26] Kelly S. Scaling and hierarchy in braided rivers and their deposits: Examples and implications for reservoir modeling [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2006: 75-106.
- [27] 李海明, 王志章, 乔辉, 等. 现代辫状河沉积体系的定量关系[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(29): 21-26, 60.
Li Haiming, Wang Zhizhang, Qiao Hui, et al. Quantitative relation of sedimentary system of modern braided river [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(29): 21-26, 60.
- [28] 邢宝荣. 辫状河储层地质知识库构建方法——以大庆长垣油田喇萨区块葡一组储层为例[J]. 东北石油大学学报, 2014, 38(6): 46-53.
Xing Baorong. Establishment of the braided river reservoir geology bank and its application: Daqing Changyuan oilfield La-Sa piece of Pu I as an example [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(6): 46-53.
- [29] 孙玉波. 河流相砂体地质建模方法[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
Sun Yubo. The geological modeling of fluvial facies sand body [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [30] 孙天建, 穆龙新, 赵国良. 砂质辫状河储集层隔夹层类型及其表征方法——以苏丹穆格莱特盆地 Hegli 油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 112-120.
Sun Tianjian, Mu Longxin, Zhao Guoliang. Classification and characterization of barrier-intercalation in sandy braided river reservoirs: Taking Hegli Oilfield of Muglad Basin in Sudan as an example [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 112-120.
- [31] Bridge J S. Fluvial facies models: Recent developments [J]. Society for Sedimentary Geology, 2006, 84(1): 85-170.
- [32] Bridge J S, Tye R S. Interpreting the dimensions of ancient fluvial channel bars, channels, and channel belts from wireline-logs and cores [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(8): 1 205-1 228.
- [33] Fielding C R, Crane R C. An application of statistical modelling to the prediction of hydrocarbon recovery factors in fluvial reservoir sequences [J]. Recent Development in Fluvial Sedimentology, 1987, 39: 321-327.
- [34] 余成林, 李志鹏, 熊运斌, 等. 心滩储层内部构型分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(3): 19-23.
Yu Chenglin, Li Zhipeng, Xiong Yunbin, et al. Analysis on internal architecture of batture bar reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(3): 19-23.
- [35] 钟思瑛, 刘金华, 乔力, 等. 真武油田辫状河心滩微相储层构型研究[J]. 特种油气藏, 2014, 21(2): 32-36.
Zhong Siying, Liu Jinhua, Qiao Li, et al. Study on the texture of braided bar microfacies reservoirs in the Zhenwu oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(2): 32-36.
- [36] 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, 2015, 36(1): 89-100.
Niu Bo, Gao Xingjun, Zhao Yingcheng, 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, 2015, 36(1): 89-100.
- [37] 杨少春, 赵晓东, 钟思瑛, 等. 辫状河心滩内部非均质性及对剩余油分布的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(3): 1 066-1 074.
Yang Shaochun, Zhao Xiaodong, Zhong Siying, et al. Inner heterogeneity within braided bar of braided river reservoir and its influence on remaining oil distribution [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(3): 1 066-1 074.
- [38] 唐武, 王英民, 赵志刚, 等. 河型转化研究进展综述[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 138-151.
Tang Wu, Wang Yingmin, Zhao Zhigang, et al. A review of fluvial pattern transformation [J]. Geological Review, 2016, 62(1): 138-151.
- [39] 谭程鹏, 于兴河, 李胜利, 等. 辫状河一曲流河转换模式探讨——以准噶尔盆地南缘头屯河组露头为例[J]. 沉积学报, 2014, 32(3): 450-458.
Tan Chengpeng, Yu Xinghe, Li Shengli, et al. Discussion on the model of braided river transform to meandering river: As an example of Toutunhe Formation in southern Junggar Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(3): 450-458.
- [40] Catuneanu O, Elango H N. Tectonic control on fluvial styles: the Balfour Formation of the Karoo Basin, South Africa [J]. Sedimentary Geology, 2001, 140(3): 291-313.
- [41] Bordy E M, Hancox P J, Rubidge B S. Fluvial style variations in the Late Triassic-Early Jurassic Elliot formation, main Karoo Basin, South Africa [J]. Journal of African Earth Sciences, 2004, 38(4): 383-400.
- [42] 李宇鹏, 吴胜和. 储集层构型分级套合模拟方法[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 630-635.
Li Yupeng, Wu Shenghe. Hierarchical nested simulation approach in reservoir architecture modeling [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 630-635.
- [43] 黄继新, 穆龙新, 陈和平, 等. 基于沉积界面的储集层建模方法初探[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 591-594.
Huang Jixin, Mu Longxin, Chen Heping, et al. Preliminary study on a depositional interface-based reservoir modeling method [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 591-594.

编辑 邹淑滢