

厚油层内部隔夹层预测建模 ——以 Velasquez 油田为例

张国一, 侯加根, 吴小斌

中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘要 开发后期,厚油层内部隔夹层是造成剩余油分布的主要因素之一。Velasquez 油田 G 组厚油层内部发育泥质隔夹层和物性隔夹层,本文建立了这两种隔夹层的电性、物性识别模式,利用该模式开展全区隔夹层的识别及横向对比。结果表明,该区隔夹层可分为稳定型、次稳定型和随机型 3 种。在分析 3 种隔夹层分布规律的基础上,分别用确定性建模、物性下限值控制、条件模拟等方法预测了隔夹层的井间分布,建立研究区隔夹层三维展布模型,为油藏后期措施调整和水平井的部署提供了地质依据。

关键词 隔夹层;识别模式;条件模拟;三维模型;Velasquez 油田

中图分类号 TE122.2

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)23-0056-04

Modeling of Inner Interlayer Prediction in Thick Oil Layer ——with Velasquez Oilfield as an Example

ZHANG Guoyi, HOU Jiagen, WU Xiaobin

College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The inner interlayers are the main causes for forming multi-layer reservoirs with strong heterogeneity, which control the remaining oil distribution. Velasquez oilfield is located in the central part of Magdalena basin in Columbia, and the paleogene group G sandstone reservoirs are of braided channel deposition. Muddy interlayer and interlayer of physical property are developed in the G reservoirs in Velasquez oilfield. Muddy interlayer consists mainly of flood argillaceous sediments, with the porosity less than 5%, and the permeability less than $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. The porosity of physical interlayer is less than 11.3%, and the permeability is less than $23.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Two models for interlayers are built in order to identify interlayers in the whole area and to carry out lateral correlation. According to their planar distributions, the interlayers in the study area are divided into the steady, sub-steady and stochastic types, and then their interwell distributions are predicted by using the methods of interwell correlation, lower limit of physical property control and conditional simulation, respectively, in order to build the interlayer 3D distribution model and provide foundations for predicting remaining oil distribution. The method enjoys the necessary accuracy for the high water-cut reservoir interlining.

Keywords interlayers; identification models; conditional simulation; 3D modeling; Velasquez oilfield

0 引言

厚油层储层隔夹层是影响流体在储层内流动的关键因素,同时也在一定程度上控制着剩余油分布^[1-7]。在油藏的开发中后期,识别判断隔夹层类型、定量描述其发育规模和三维分布是研究的重点与难点,对于精细表征储层、预测剩余

油分布具有重要意义^[2-8]。2000年,赵汉卿等^[2]通过河流相、三角洲相的油藏精细描述,从岩性和物性特征上将隔夹层分为泥质夹层、钙质夹层和物性夹层 3 类。2003—2006年,陈程^[5]、郭长春等^[6]在充分利用密闭取心资料的基础上,对河流相厚油层内部夹层的分布模式做了细致工作,认为夹层分布与

收稿日期:2010-07-09;修回日期:2010-11-07

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05010)

作者简介:张国一,博士研究生,研究方向为油藏地质及油藏描述,电子信箱:gyg88198@163.com;侯加根(通信作者),教授,研究方向为油藏地质与油藏描述,电子信箱:houljg63@cup.edu.cn

3—4 级层序界面相关,存在随机性、过渡性和连续性 3 种模式。2006—2008 年,周国文^[9]、窦松江等^[7]利用测井资料,建立了厚油层内部隔夹层识别方法和标准,为隔夹层的定量识别做出了积极探索。2008 年,严耀祖等^[4]应用随机建模方法建立了隔夹层分布模型,提出井间隔夹层预测新方法。2007—2009 年,岳大力等^[9]、渠芳^[10]、刘钰铭等^[11]通过河流相储层构型的研究,定量计算了夹层的倾角,为隔夹层的研究提供了新的思路。对于隔夹层的单井识别、成因及其对生产开发的影响,前人已经做了大量工作。利用多种资料,采用确定性建模、物性下限值控制、条件模拟等综合方法,对隔夹层的井间预测及三维分布进行研究的报道相对较少。

Velasquez 油田(简称 V 油田)位于哥伦比亚 Magdalena 盆地中部,主力油层古近系 G 组砂岩为辫状河沉积。油层厚度大,最厚可达 61m,储层物性好,平均孔隙度 21.3%,平均渗透率 $749.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。该油田于 1946 年投入开发,目前综合含水率高达 91%,采出程度为 22%,属高含水期油藏。V 油田整体研究程度低,对于隔夹层的识别、分布及剩余油分布认识不清,导致近年来采取措施效果不理想,新井高含水现象较多。因此,急需准确识别隔夹层,分析其分布规律,并对其空间分布做出预测。本文以 V 油田 G 组储层为例,通过砂岩储层岩性、物性及电性特征,建立隔夹层的识别标准;采用动态资料和密井网对子井、更新井信息,定量计算了夹层厚度和夹层延伸范围;针对 3 类不同类型隔夹层,提出对应的预测建模方法,利用确定性建模与条件模拟方法,建立高含水期厚油层内部隔夹层预测模型。

1 隔夹层识别

1.1 岩性和电性特征

对取心井岩心观察和描述表明,该区发育泥质隔夹层和物性隔夹层两种。由于岩性、沉积、成岩作用不同,两种隔夹层具有不同的测井响应特征。

泥质隔夹层在研究区内较为常见,主要为辫状河沉积过程中河漫滩沉积物在垂向或侧向形成的隔挡层^[2-8,11]。岩性上,泥质隔夹层主要为泥岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩。测井响应为:自然电位曲线接近泥岩基线,深浅电阻率呈低值且幅度差很小或为 0,密度增大,声波时差呈高值,井径明显扩大。

物性隔夹层岩性主要为粉砂和细砂,泥质含量高,物性差,没有达到储层下限值,成为物性隔挡层。此类隔夹层是由于辫状河沉积过程中水动力减弱、沉积物颗粒变细、泥质含量增加形成的。发育位置一般在单期河道顶部,如单一心滩坝顶部的细粒沉积;有的则在单一河道水动力弱的河道边部,如天然微坝相等。测井响应为:自然电位曲线稍有回返,自然伽马呈中幅齿状凸起,深浅电阻率幅度差变小,声波时差和密度孔隙度变小。

1.2 物性特征

该区泥质隔夹层孔隙度小于 5%,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。物性隔夹层有一定的渗透性,但上下围岩均为高渗透层,这

种渗流差别严重影响了流体的流动。为了研究 G 组物性隔夹层的物性标准,对垂直渗透率与孔隙度进行了相关性分析。渗透率与孔隙度正相关(图 1),随着孔隙度的增加,渗透率变化分 3 个阶段:1) 孔隙度 0~11.3%,渗透率变化很小;2) 孔隙度 11.3%~18.2%,渗透率急剧增加,变化明显;3) 孔隙度大于 18.2%,很小的孔隙度增量导致渗透率剧烈增大。据此,将第一阶段和第二阶段的分界值 11.3%定义为有效储层的孔隙度下限值^[3-8,11-12],则对应的渗透率为 $23.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

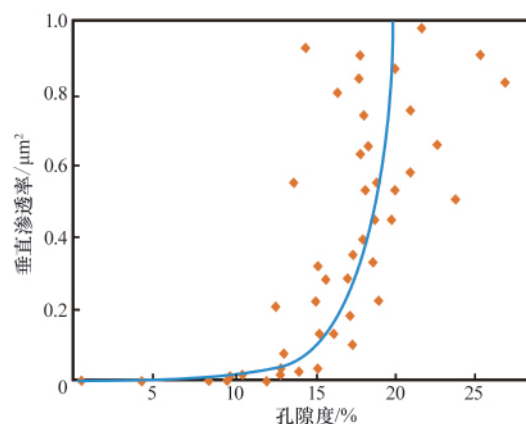


图 1 孔隙度与垂直渗透率关系图

Fig. 1 Relationship between porosity and vertical permeability

2 隔夹层类型和预测建模

依据隔夹层电性和物性的识别标准,从单井上识别出研究区单井隔夹层,进行横向对比,得到每个单层的隔夹层平面分布,并将隔夹层分为稳定型、次稳定型和随机型 3 类。G_I 组隔夹层的剖面图和 G_{III} 组平面图直观地揭示了研究区隔夹层的分布规律(图 2、图 3)。

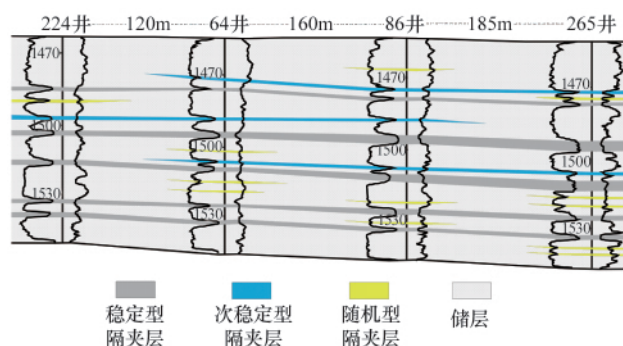


图 2 G_I 隔夹层对比剖面

Fig. 2 G_I interbeds comparison profile

2.1 稳定型隔夹层预测建模

稳定性隔夹层多为泥质隔夹层,平均厚度可达 6m 以上,分布面积为研究区面积的 65%(图 3(a)),具有剖面上连续性好、平面上呈席状分布的特征。可采用井间对比方法预测稳定型隔夹层井间分布。

井间对比方法以现代沉积学和构型理论为指导,利用测

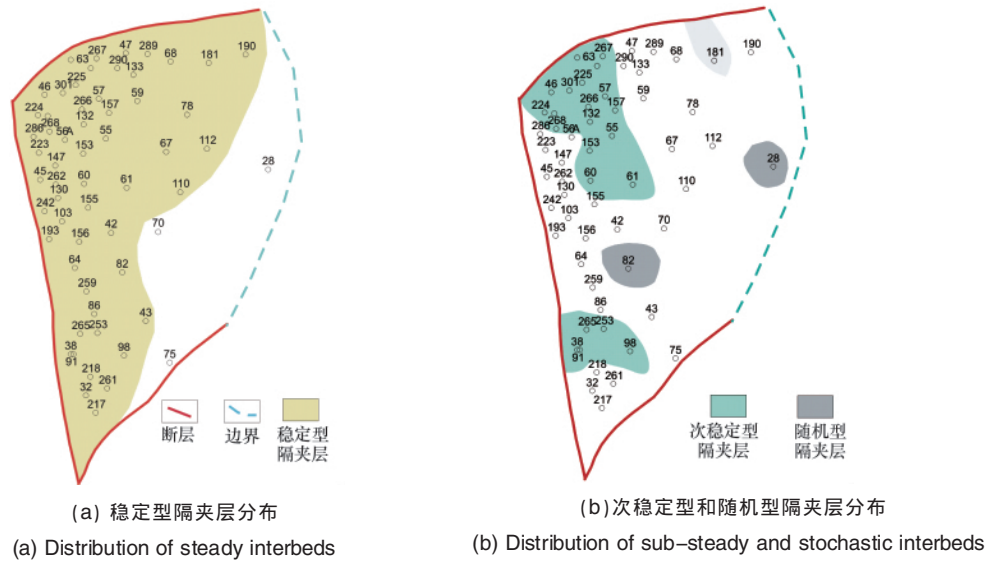


图 3 G_{III} 隔夹层分布图
Fig. 3 Interbeds distribution of layer G_{III}

井曲线形态特征识别沉积单元和隔夹层^[9-10,13-14]。首先分析单井沉积微相,其次分析目标砂体的沉积界面,最后根据砂体的形成机制,分析稳定型隔夹层的空间组合方式,达到井间对比识别的目的。稳定型隔夹层属于洪泛期的泥质沉积,与砂体层面平行,且厚度大,测井曲线显示厚层泥岩特征,对比特征清楚。

利用井间对比的结果得到的单井稳定型隔夹层厚度数据,可以绘制其厚度等值线图。根据隔夹层的厚度等值线图,用确定性建模的方法建立稳定型隔夹层三维模型。

2.2 次稳定型隔夹层预测建模

次稳定型隔夹层包括泥质隔夹和物性隔夹层,厚度为 1~3m,连续性较差,呈片状分布,面积为研究区的 10%~35%,平面分布范围在 5 口井以上(图 3(b))。此类隔夹层在全井间对比性差,井间对比方法难以预测该类夹层的分布范围。

本文提出采用控制储层三维孔隙度、渗透率模型下限值的方法预测次稳定型隔夹层的三维展布的方法。在储层构造模型的基础上,首先建立相控的储层孔隙度和渗透率三维模型,然后根据储层的物性下限值对储层物性三维模型进行物性截断,即物性小于储层下限值的为隔夹层,物性大于储层物性下限值的为储层,从而得到隔夹层三维空间的分布模型。该方法在预测次稳定型隔夹层的三维展布上取得了良好的效果,提高了隔夹层预测精度。

2.3 随机型隔夹层预测建模

随机型隔夹层厚度小(一般厚度小于 1m),井间连续性非常差或者不连续,甚至只有单井发育,平面上呈土豆状分布(图 3(b))。随机型隔夹层厚度小、数量多,其形态和空间分布非常复杂,研究过程中需采用条件模拟方法对其进行预测。解剖研究区内密井网区随机型隔夹层空间分布,得到其发育的表征数据,将表征数据作为约束条件,建立此类隔夹层三维分布模型,实现定量预测。

V 油田 64 井组井网密度大,平均井距 50m 左右, G_1 为主力产油层,生产、射孔、注水、示踪剂、压力测试等资料丰富,测井解释结论可靠,因此以其为解剖原型,分析该区隔夹层分布特征。A、B、C 井为 64 井组内东西向的 3 口井,A 井距 B 井 33.7m,B 井距 C 井 65.3m。

首先,根据砂体厚度分布,分析随机型隔夹层的分布方向。该区 G_1 沉积时期物源方向为南北向, G_1 小层砂体厚度分布具有由东向西逐渐增厚的特征,说明 G_1 沉积时期,辫状河道由东向西迁移。那么心滩坝的沉积方式除了向水流下游方向的垂向加积,还由东向西侧向加积。 G_1 小层随机型隔夹层的空间展布方向为北西向。

进而,根据示踪剂、注水、压力测试等动态资料分析此类隔夹层的空间组合关系,揭示砂体的连通性。连通的砂体具有相同的压力系统,可见示踪剂,注水有明显效果,反之砂体不连通。图 4 为 64 井组 G_1 隔夹层分布图,C 井 2 砂体注水,B 井 1 砂体见效,两砂体连通;压力测试资料表明,A 井 1 砂体与 B 井 2 砂体为同一压力系统,两砂体连通。对于缺乏动态资料的层位,测井曲线的形态、砂体发育的模式是预测的主要手段。

最后,根据测井解释的油水系统对预测结果进行检验,

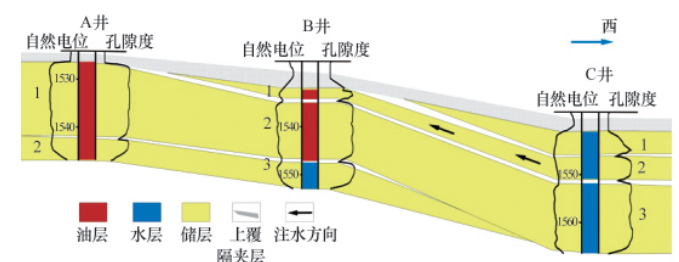


图 4 64 井组 G_1 隔夹层分布
Fig. 4 G_1 small layer and interlayer distribution of 64 well group

得到密井网区的随机型隔夹层分布(图4)。

逐一解剖V油田多处密井网井区,同时利用成对井、更新井信息,分析该区随机性隔夹层分布规律,统计每口井此类隔夹层在空间的分布数据,即夹层厚度和夹层延伸范围,得到宽厚比为237.8,隔夹层倾角为 $8.1^{\circ}\sim 9.5^{\circ}$,隔夹层展布方位角为 340° 。以上述条件为约束,以井点隔夹层数据为硬数据,用指示模拟方法预测随机型隔夹层展布模型(图5)。

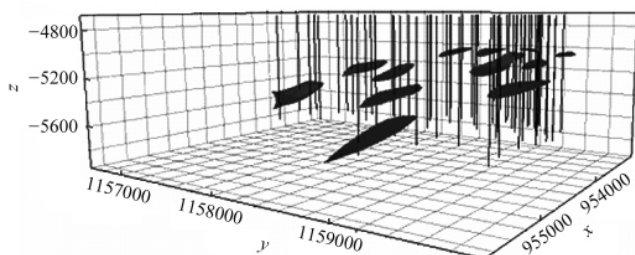


图5 G_1 层随机性隔夹层预测三维模型

Fig. 5 Three-dimensional prediction model of stochastic interlayers of G_1 formation

隔夹层是控制高含水期油藏剩余油分布的关键因素。通过V油田隔夹层三维模型的建立,精细表征了储层的特征,基于该模型开展油藏数值模拟工作,结果表明,剩余油富集在 G_1 层顶部隔夹层遮挡区,为油藏后期措施调整及水平井的部署提供了地质依据。为挖掘 G_1 层顶部剩余油,目前V油田部署7口水平井,已投产3口,与周围及同期投产直井相比,水平井投产初期单井日产油是直井的1.5~3倍,含水比直井低30%~50%,含水上升速度比直井慢1.3%/月,累计产油量是直井的3倍,开发效果较好。

3 结论

1) 通过砂岩储层岩性、物性及电性特征,建立了隔夹层的识别标准。泥质隔夹层主要为河漫滩泥质沉积物在垂向或侧向形成的隔挡层,其孔隙度小于5%,渗透率小于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。 G 组储层平均渗透率 $749.3\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,具有高渗的特点,物性夹层孔隙度小于11.3%,渗透率小于 $23.3\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

2) 依据井间对比识别结果及隔夹层平面分布特征,将研究区隔夹层划分为稳定型、次稳定型和随机型3种类型,针对3类不同类型隔夹层提出了相应的预测建模方法。按照二维分布特征用井间对比方法,采用确定性方法模拟稳定型隔夹层;采用储层物性下限的方法模拟次稳定型隔夹层;以通过密井网解剖得到的定量数据为条件,模拟随机型隔夹层。

3) 采用动态资料和密井网对子井、更新井信息,分析计算了夹层厚度和夹层延伸范围,研究认为隔夹层倾角为 $8.1^{\circ}\sim 9.5^{\circ}$,隔夹层展布方位角为 340° ,其宽厚比约为237.8。

4) 利用确定性建模与条件模拟方法,建立了高含水期厚油层内部隔夹层预测建模,该方法能够满足高含水油藏隔夹层研究的精度要求。

参考文献 (References)

- [1] 李阳. 我国油藏开发地质研究进展[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 75-79.
Li Yang. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(3): 75-79.
- [2] 赵翰卿, 付志国, 吕晓光, 等. 大型河流—三角洲沉积储层精细描述方法[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 109-113.
Zhao Hanqing, Fu Zhiguo, Lu Xiaoguang, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(4): 109-113.
- [3] 周国文, 谭成仟, 郑小武, 等. H油田隔夹层测井识别方法研究[J]. 石油物探, 2006, 45(5): 542-545.
Zhou Guowen, Tan Chengqian, Zhang Xiaowu, et al. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2006, 45(5): 542-545.
- [4] 严耀祖, 段天向. 厚油层中隔夹层识别及井间预测技术[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(2): 127-131.
Yan Yaozu, Duan Tianxiang. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(2): 127-131.
- [5] 陈程, 孙义梅. 厚油层内部夹层分布模式及对开发效果的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(2): 24-27.
Chen Cheng, Sun Yimei. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2003, 22(2): 24-27.
- [6] 郭长春, 李阳. 河流相储层中夹层的发育规律及预测[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(4): 200-203.
Guo Changchun, Li Yang. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2006, 28(4): 200-203.
- [7] 窦松江, 季领, 王海波, 等. 王官屯油田中生界厚油层内隔夹层研究[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(1): 48-51.
Dou Songjiang, Ji Ling, Wang Haibo, et al. *Petroleum Geology and Engineering*, 2008, 22(1): 48-51.
- [8] 王改云, 杨少春, 廖飞燕, 等. 辫状河储层中隔夹层的层次结构分析[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 378-383.
Wang Gaiyun, Yang Shaochun, Liao Feiyan, et al. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(3): 378-383.
- [9] 岳大力, 吴胜和, 刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 99-103.
Yue Dali, Wu Shenghe, Liu Jianmin. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 99-103.
- [10] 渠芳, 陈清华, 连承波. 河流相储层构型及其对油水分布的控制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 14-18.
Qu Fang, Chen Qinghua, Lian Chengbo. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2008, 32(3): 14-18.
- [11] 刘钰铭, 侯加根, 王连敏, 等. 辫状河储层构型分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(1): 7-11.
Liu Yuming, Hou Jiagen, Wang Lianmin, et al. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2009, 33(1): 7-11.
- [12] 郭睿. 储集层物性下限值确定方法及其补充[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 140-144.
Guo Rui. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(5): 140-144.
- [13] 朱东亚, 胡文. 临南油田隔层类型划分及其分布规律研究[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2004, 29(2): 211-223.
Zhu Dongya, Hu Wen. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(2): 211-223.
- [14] 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. *Braided pattern and level of reservoir interface analysis* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.

(责任编辑 刘志远)