

四川盆地元坝长兴组礁滩相气藏概率体约束地质建模

胡向阳,郑文波,游瑜春,刘国萍

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:四川盆地元坝长兴组气藏礁滩相储层岩相类型多样,生物礁和生屑呈离散分布,储层及物性参数非均质性强,储层构型特殊,气水关系复杂,现有建模方法难以精细表征礁滩相内部储层非均质性,不能满足气藏开发生产需求。通过对礁滩相气藏地质、物探、测井及生产动态等多学科资料研究,提出以地质模式为指导,采用礁滩相储层构型、地质及地震概率体等多信息协同约束的建模思路,分级相控-序贯指示随机模拟方法建立生物礁、生屑滩储层相模型;采用相控-序贯高斯随机模拟方法建立属性参数模型。该方法建立的模型,精细表征了礁滩相储层内部结构及属性参数非均质性特征,刻画了生物礁、生屑滩储层及属性参数的三维空间分布,为气藏的高效开发奠定了坚实地质基础。

关键词:储层构型;概率体约束;地质建模;礁滩相;长兴组;元坝气田;四川盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Probability body-constrained geomodeling of reef-shoal reservoir in Changxing Formation, Yuanba area, Sichuan Basin

Hu Xiangyang, Zheng Wenbo, You Yuchun, Liu Guoping

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The reef-shoal reservoir of the Changxing Formation in Yuanba area, Sichuan Basin, is rich in lithofacies types. Organic reef and shoal bodies are distributed discretely, and the reservoir and physical parameters are highly heterogeneous. The reservoir architecture is quite bizarre, and the distribution of water cut is complicated. Given these features, the existing modeling methods can hardly characterize the heterogeneity within the reef-shoal reservoir in a high resolution manner, and cannot meet the demand of gas reservoir development and production. Based on the researches on gas reservoirs of reef-shoal facies in terms of geology, geophysical prospecting, well logging and production performance, the study put forward the idea of geological model constrained modelling, integrating multiple information, including reservoir architecture, geology and seismic probability body. The geological model of the reservoir of organic reef and bioclast shoal facies was established by hierarchical facies control and sequential indication simulation, and the attribute model by facies control and sequential Gaussian random simulation. The models constructed through the method can finely characterize the inner architecture of the reef-shoal reservoir, the heterogeneity characteristics of its physical parameters, and the 3-D distribution of the reservoir of organic reef and bioclast shoal facies and attribute parameters, laying a solid foundation for the efficient development of gas reservoirs.

Key words: reservoir architecture, probability body-constrained, geomodeling, reef-shoal facies, Changxing Formation, Yuanba gas field, Sichuan Basin

由碳酸盐岩储集层构成的油气田储量大、产量高,容易形成大型油气田。全球碳酸盐岩油气田储层类型主要有生物礁、颗粒滩、白云岩和古岩溶4种类型,其中生物礁储层类型占的数量相对最多^[1-6]。中国塔里

木盆地、鄂尔多斯盆地、华北盆地和四川盆地等地区都存在生物礁,近年来发现一批高产油气田,如四川盆地东北部元坝长兴组生物礁滩相气藏^[7-10]。

目前针对礁滩相储层三维地质建模研究较少,前

收稿日期:2019-07-25;修订日期:2019-11-09。

第一作者简介:胡向阳(1964—),男,博士、教授级高级工程师,油气田开发。E-mail:huxy.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05017-005);中科院先导项目(XDA14010204);中石化科技部十条龙项目(P18062-1)。

人多以地质模式、现代沉积及地球物理等为基础和手段对礁滩相储层进行建模和表征^[9-17]。文献中有关礁滩相储层地质建模研究主要集中在礁滩相储层属性参数模型建模方法方面,几乎不涉及礁滩相沉积相模型,尚无能够精细刻画礁滩相储集体内部非均质性和储层构型的地质建模方法和技术,礁滩相建模方法和技术仍处于探索和完善阶段^[14-19]。利用上述方法建立的礁滩相储层地质模型未能实现对礁滩相储集体内部结构和边界的精细刻画,无法精细表征储层的非均质性,模型与地质实际存在较大差异,不能满足气藏的开发生产需求。本文拟通过多学科资料综合分析,结合沉积学、储层地质学及地质统计学原理,对礁滩相气藏三维地质建模方法进行研究。

1 地质概况

四川盆地东北地区二叠系-三叠系发育大量生物礁气田,上二叠统长兴组主要为碳酸盐岩台地沉积,发育有开阔台地、台地边缘礁滩、缓坡和盆地等沉积环境,生物礁主要发育于碳酸盐岩台地边缘。元坝气田长兴组气藏发现于2007年11月(图1),气藏埋藏深度7 000 m左右,储层为碳酸盐岩台地生物礁滩相储层,礁滩体个数多规模小,平面分散,具有储层薄、物性差且与非储层形成多层复杂叠置特征^[1-9]。

元坝气田长兴组生物礁发育在台地边缘外侧呈条带状分布,形成4条礁带,由多个礁群组成,各礁带间并不完全相连。随生屑加积及礁屑不断向礁后充填,在生物礁后发育台内点滩及点礁沉积^[3-6](图2)。碳酸盐岩台地体系内储层发育主要受控于沉积相分布,长兴组礁滩相储层为典型的相控储层。取心资料表明,台地边缘生物礁及生屑滩相是最有利储集相带,台内滩相次之,且礁相优于滩相^[3-6],台地、斜坡、潟湖和半深海为非储层相带。礁体构型金字塔状特征,礁体垂向发育礁基-礁核-礁盖的相序特征,礁相内各微相储层差别较大,礁盖-礁核-礁基内储层发育比例依次降低,储层主要发育于礁核礁盖微相,横向位于礁体中部,礁体内部存在礁体侧向迁移,垂向多期礁体叠置特征。滩相沉积内自下而上发育低能滩、高能滩微相相序,滩相内各微相储层发育,高能滩相储层优于低能滩相储层(图3)。

2 碳酸盐岩礁滩相气藏三维地质建模方法

元坝气田长兴组礁滩相气藏储层发育受沉积和成岩作用双重控制,生物礁及生屑滩沉积在平面上和垂向上相带变化迅速,不同相带礁滩储层结构及物性参数具有很强的非均质性。目前文献报道关于礁滩相储

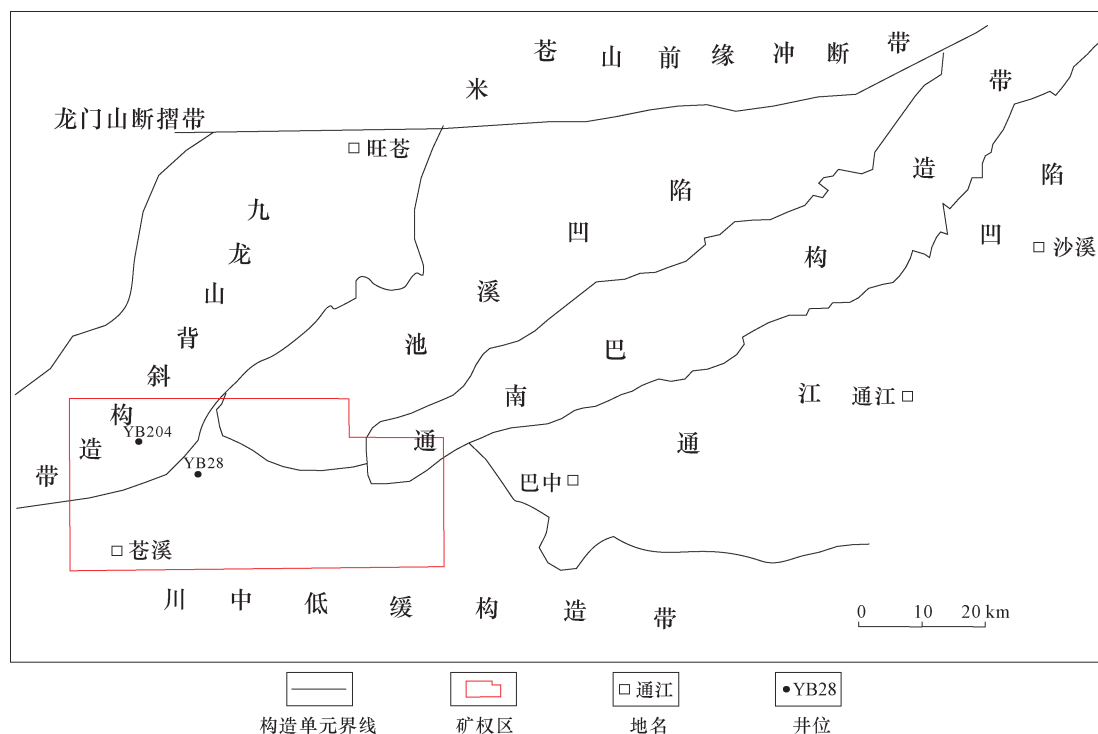


图1 四川盆地元坝长兴组礁滩相气田位置

Fig. 1 The location of gas field of reef-shoal facies in the Changxing Formation, Yuanba area, Sichuan Basin

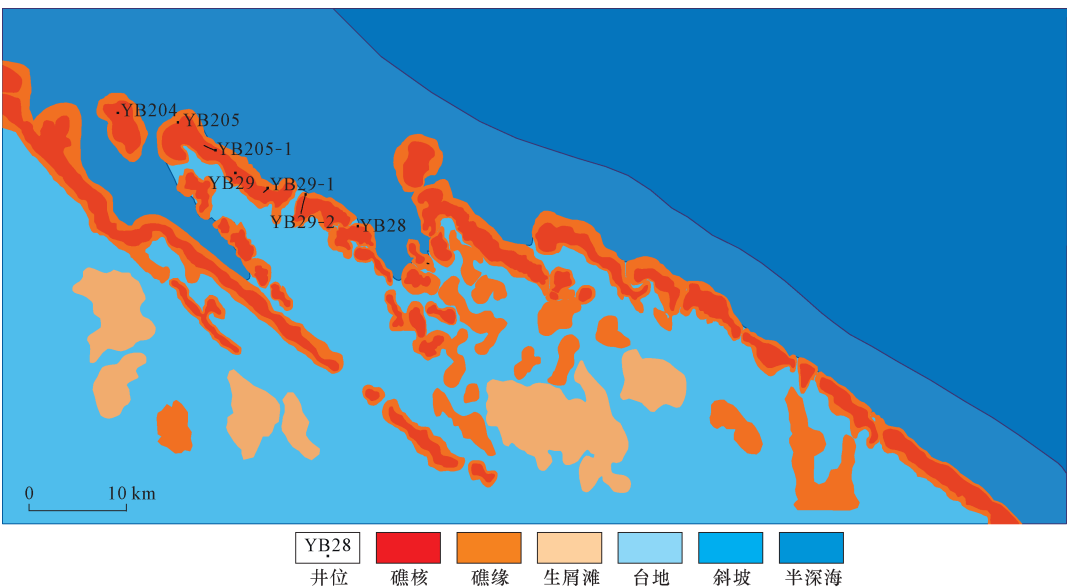


图 2 四川盆地元坝长兴组气藏礁滩相分布

Fig. 2 Distribution of reef-shoal sedimentary facies in the Changxing gas field, Yuanba area, Sichuan Basin

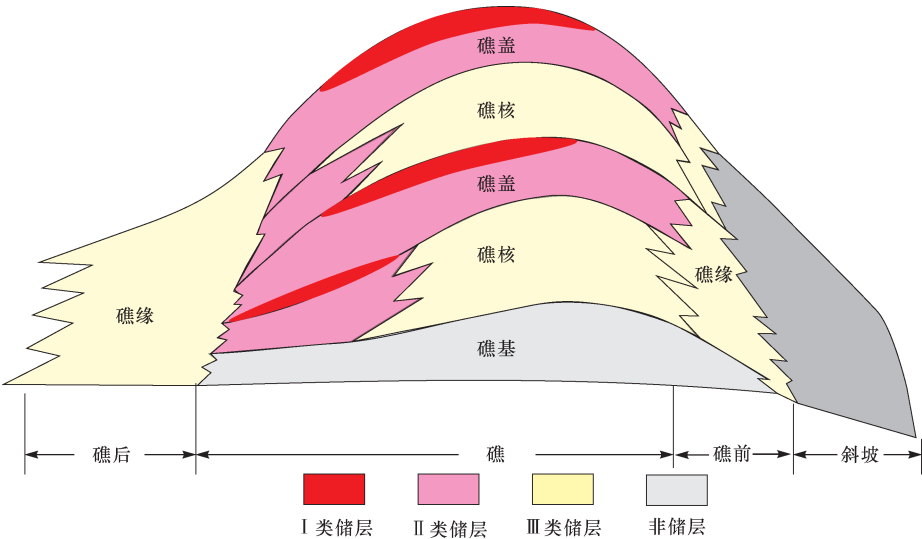


图 3 四川盆地元坝长兴组礁相结构及储层发育模式^[4]

Fig. 3 The diagram showing the reservoir architecture and evolution model of reef-shoal facies in the Changxing Formation, Yuanba area, Sichuan Basin^[4]

层建模方法主要包括:①模式方法,以地质模式为指导,考虑相分类、相序和相组合,采用相趋势约束方法;②类比方法,以现代沉积和露头为指导,考虑平面形态、分布和内部结构特征,采用训练图像的多点地质统计学方法;③透视方法,以地球物理为基础,考虑平面边界特征,以阻抗体为约束方法^[8-17]。上述建模方法主要适合于受沉积作用控制的碎屑岩储层及孔隙型碳酸盐岩储层,针对同时受沉积作用和成岩作用改造形成的原生孔隙和次生孔隙为主要储集空间类型的礁滩相储层地质建模方法,目前尚处于探索阶段^[10-19]。

目前礁滩相储层地质建模存在难点主要有两个方面:①礁滩相储层受控于沉积和成岩双重影响,不同岩

相的物性差别巨大,储层非均质性极强,难以建立精确的储层岩相模型;②礁滩相储层构型呈金字塔状几何结构,呈孤立状或条带状展布,不同于河道形态,常规碎屑岩建模方法无法表征礁滩相内部的储层构型和物性分布特征^[11-19]。

本文提出以地质模式为指导,充分应用地质、物探、测井及生产动态等多学科资料,采用礁滩相储层构型、地质及地震概率体等多信息协同约束的建模思路,采用分级控制序贯指示随机模拟方法建立生物礁、生屑滩储层沉积相模型;在相模型基础上,采用相控序贯高斯模拟方法建立属性参数模型,精细表征礁滩相储层内部结构及属性参数非均质性,刻画生物礁、生屑滩

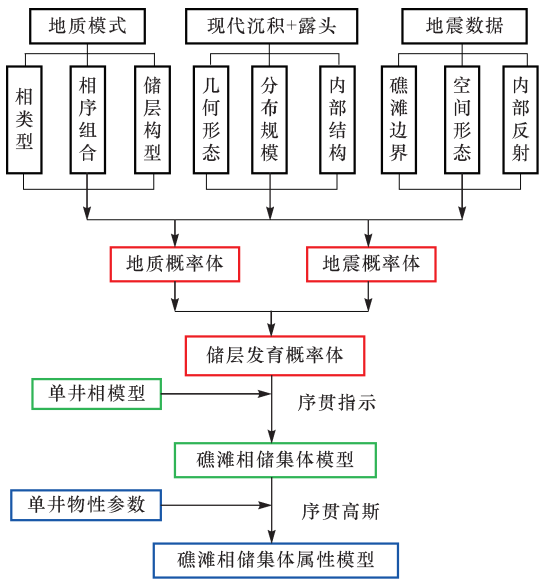


图 4 四川盆地元坝礁滩相气藏三维地质建模技术路线图
Fig. 4 The technology workflow showing the 3 - D geological modeling for the gas reservoir of reef-shoal facies in Yuanba area, Sichuan Basin

储层及属性参数的三维空间分布,为气田高效开发奠定坚实地质基础(图 4)。

3 元坝礁滩相气藏三维地质建模

3.1 礁滩相储层三维相建模

3.1.1 礁滩相储层构型

元坝长兴组储层以台缘生物礁、生屑滩相为主。

根据该地区沉积特征结合前人对生物礁、滩微相的划分,对生物礁、滩沉积微相进行了细化,将生物礁纵向上进一步细化为 3 种微相类型,生屑滩细化为 4 种微相类型。长兴组生物礁平面上总体呈 4 条分隔的带状分布(图 2),纵向上礁体多期次叠加,厚度较大,礁体内部白云岩化及溶蚀程度的差异造成岩性及储层物性不同;生屑滩相平面呈椭圆形,纵向上多期次侧向叠加。以礁滩体精细刻画成果,结合野外露头,建立 4 种礁滩体构型模式(图 5),即垂向叠置型、垂向叠置-侧向拼接型、侧向拼接型及层状叠置型。综合现代沉积、礁滩体识别成果,统计礁滩体构型参数,建立礁滩体构型地质参数库(图 5),用以指导礁滩相气藏三维地质建模。

3.1.2 地质概率体及地震概率体

地质概率体:以单井测井解释成果为硬数据,以储层发育模式为指导,以储层构型参数、储层厚度百分比图和储层垂向概率分布为约束,建立储层发育地质概率体。

地震概率体:通过单井相与地震波阻抗数据体相关性分析,确定不同礁滩相储层波阻抗体截断值,利用储层-波阻抗相关性,建立储层发育地震概率体(图 6)。

3.1.3 礁滩相储层三维相建模

总体建模思路是以地质模式为指导,充分应用地质、物探、测井及生产动态等多学科资料,采用礁滩相储层构型、地质及地震概率体等多信息协同约束的建模思路,采用分级控制序贯指示随机模拟方法建立生

结构单元	叠置型	拼接型	连片拼接型	层状型
地震相	YB29	YB204	YB27	YB12 YB124
宽度/km	1.3~1.5	1.2~1.8	2.2~3.5	1.5~8.2
长度/km	1.9~2.5	3.6~6.2	8.5~15.2	1.8~9.5
长宽比(R)	$R < 1.5$	$1.5 < R < 3$	$R > 3$	$R < 1.5$
厚度/m	25~38	18~32	15~24	9~15
叠加样式	垂向叠置型	垂向叠置-侧向拼接型	侧向拼接型	层状叠置型
叠加形态				
平面形态	圆形-椭圆形	椭圆形	椭圆形-条形	圆形-椭圆形

图 5 四川盆地元坝长兴组生物礁滩构型模式及参数统计
Fig. 5 The architecture model and parameter statistics of organic reef-shoal reservoir in the Changxing Formaiton, Yuanba area, Sichuan Basin

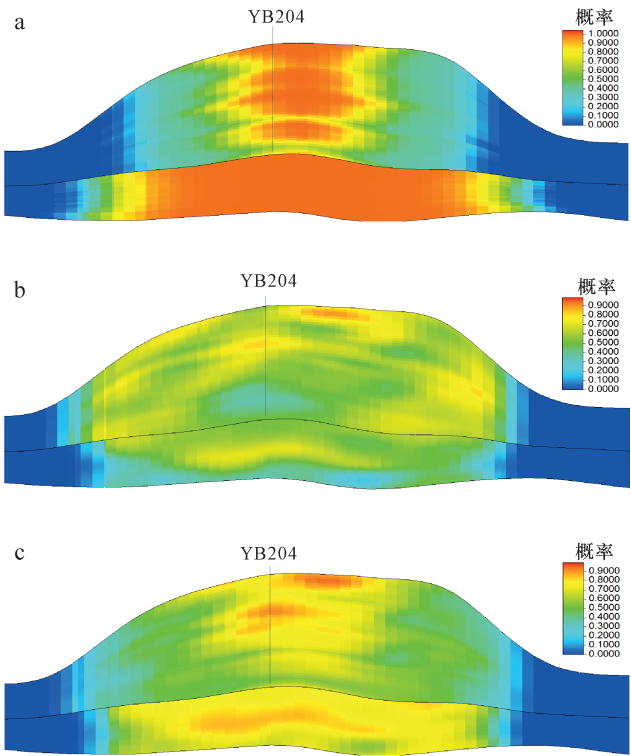


图 6 四川盆地元坝气田过 YB204 井概率体
Fig.6 The section showing the probability body through Well YB204, Yuanba gas field, Sichuan Basin
a. 地质概率体; b. 地震概率体; c. 综合概率体

物礁、生屑滩储层三维相模型,精细表征礁滩相储层内部结构特征及在三维空间分布。

在相建模过程中,以单井相和各沉积微相概率统计为基础,综合礁滩体储层构型、地质概率体及地震概率体作为井间约束,采用分级相控和序贯指示模拟的方法建立元坝长兴组气藏三维沉积微相模型(图 7),定量刻画储层沉积微相三维空间展布。

相模型是一组等概率的多个模型实现,为得到最优相模型,需对多个微相模型进行等概率多实现优势相大多数计算和筛选,降低多解性,得到最优微相模型。在此基础上,根据地质分析的井间储层的连通情况、利用抽稀井验证、多实现对比、地质模式与地震资料检验等方法进行模型验证。通过以上方法建立的长兴组礁滩相储层沉积微相模型,实现与井点资料吻合,避免礁滩体边界“一刀切”现象,刻画礁滩体金字塔状构型特征,确保礁基-礁核-礁盖的垂向相序特征(图 7)。

3.2 礁滩相储层三维属性参数建模

在沉积相三维模型基础上,以单井孔隙度和渗透率等属性参数测井解释成果为基础,采用相控-序贯高斯模拟方法分别建立礁滩相气藏三维属性参数模型,精细地刻画储层及属性参数的非均质性。

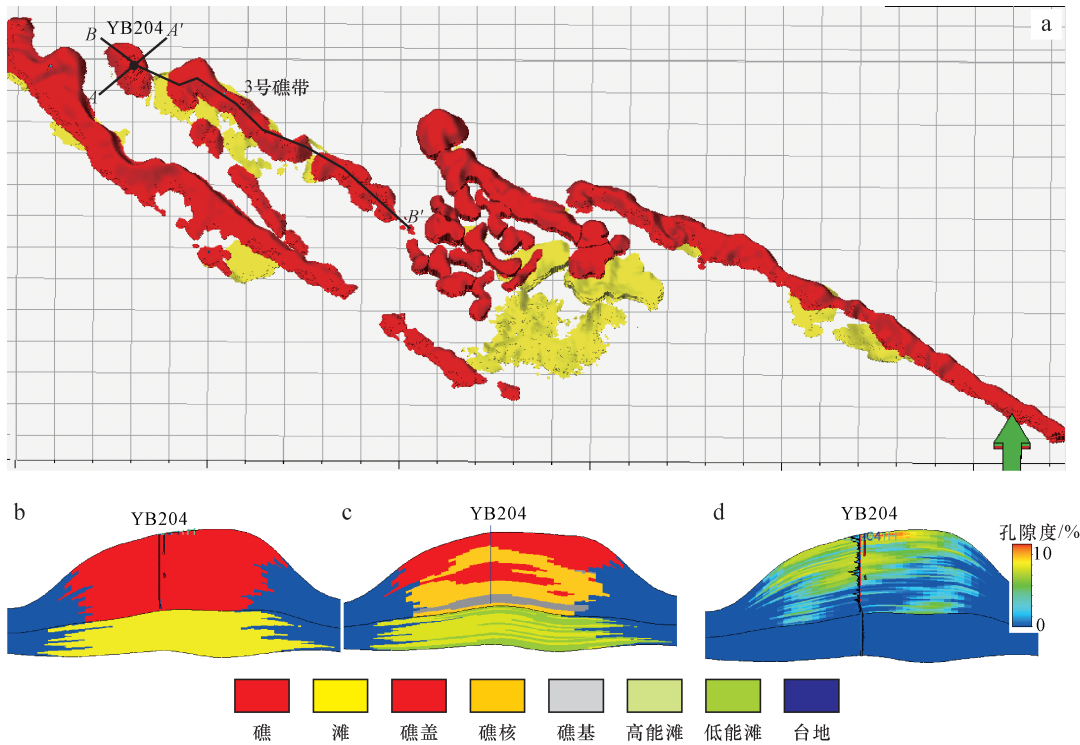


图 7 四川盆地元坝长兴组气藏地质模型
Fig.7 The geological model of Changxing gas reservoir in Yuanba area, Sichuan Basin
a. 元坝气田储层相模型; b. 过 YB204 井沉积相模型; c. 过 YB204 井沉积微相模型; d. 过 YB204 井孔隙度模型(剖面位置见 a 图内 A—A')

在属性参数建模过程中,需要分层段、分岩相统计孔隙度、渗透率及含气饱和度等参数的概率密度函数。充分利用地震资料横向高分辨优势,优选能够较好反映各种参数分布的地震数据体,为参数建模提供井间约束,提高所建模型精度。元坝长兴组储层的地震波阻抗反演数据与储层孔隙度具有很好的相关性,可将波阻抗数据体做为软数据进行井间约束;根据测井解释及岩心分析资料可知,元坝长兴组储层中渗透率与孔隙度具有较好的相关性,以孔隙度模型为约束,建立礁滩体三维渗透率模型;对于流体分布模型,除优选出含气饱和度反演地震体作为井间约束、分析统计气体饱和度密度函数外,同时要综合气水界面认识,采用多信息约束的序贯高斯模拟方法,表征气藏流体在三维空间分布特征(图7,图8)。

3.3 礁滩相气藏地质模型评价

礁滩相气藏三维地质模型精细表征了礁滩相储层及孔、渗和饱等参数非均质性特征;礁体内部孔隙度分布符合地质规律,礁盖>礁核>礁基,礁后>礁前(图7);储层非均质性与气水分布特征符合礁滩体内部结构和储层发育特征(图8)。

长兴组礁滩相气藏新井及测试资料证实气藏气水关系复杂,各礁带不连通的礁滩体存在不同的气水系统,呈独立气藏特征;已钻遇水层发现连通的礁滩体内具有统一气水界面。针对以上特征,将不同礁滩体含气饱和度模型进行气水界面分割计算,

可直观准确的表征气藏内部气水分布特征。3号礁带构造高部位(YB204井至YB29-1井)为无水气藏,构造低部位(YB29-2, YB28)为两个独立的底水气藏(图8)。

4 结论

1)针对礁滩相气藏储层构型特殊、岩性复杂和储层非均质性强等特点,本文提出了一种礁滩相气藏三维地质建模新方法:以地质模式为指导,充分应用地质、物探、测井及生产动态等多学科信息,采用礁滩相储层构型、地质及地震概率体等多信息协同约束的建模思路,分级控制-序贯指示随机模拟方法建立生物礁、生屑滩储层三维沉积相模型;在三维相模型基础上,采用相控-序贯高斯模拟方法建立属性参数三维模型。所建模型精细表征了礁滩相储层及属性参数三维空间分布,刻画了储层及物性参数的非均质性特征,为气田高效开发奠定了基础。

2)本文提出的碳酸盐岩礁滩相气藏三维地质建模方法,充分考虑了礁滩相储层发育模式和储层构型对储层空间展布的控制作用,强化了地质模式和地质规律对建模过程的约束,提高了碳酸盐岩礁滩相气藏地质模型的精度,有效地表征礁滩相储层及属性参数在三维空间上的分布特征,更加客观地逼近气藏地质实际,对于该类气藏评价和高效开发管理具有重要的实际意义。

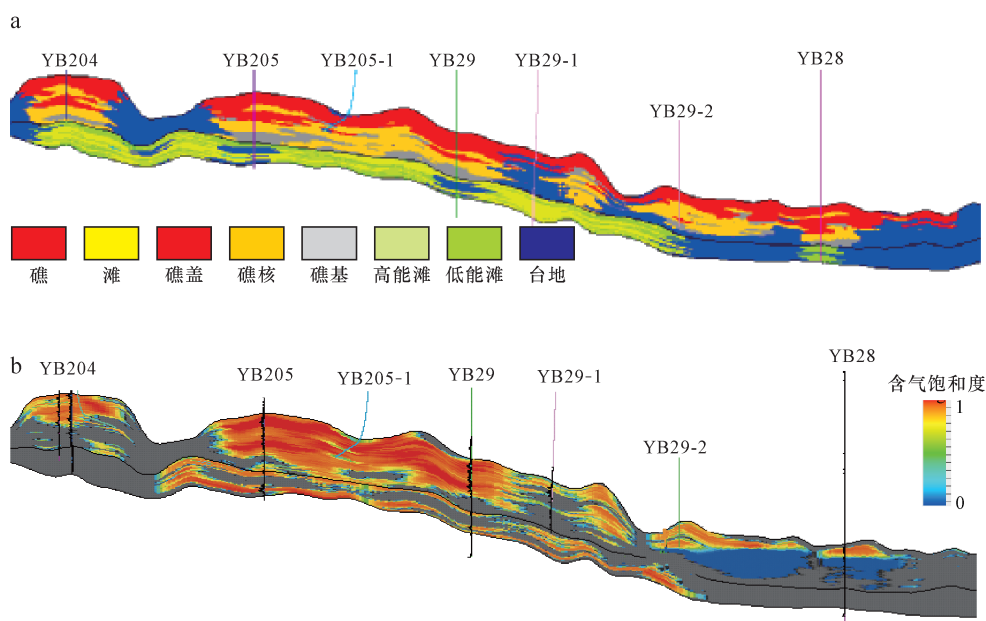


图8 四川盆地元坝长兴组气藏3号礁带剖面模型

Fig.8 The model profile of reef zone 3 in the Changxing gas reservoir, Yuanba area, Sichuan Basin

a. 沉积微相;b. 含气饱和度模型(剖面位置见图7a内B-B')

参 考 文 献

- [1] 蔡希源. 川东北元坝地区长兴组大型生物礁滩体岩性气藏储层精细刻画技术及勘探实效分析[J]. 中国工程科学, 2011, 13(10): 28-33.
Cai Xiyuan. The subtly method of reservoir and exploration effects on the organic reef-beach body of Changxing Formation, Yuanba Area, Northeastern Sichuan[J]. Engineering Sciences, 2011, 13(10): 28-33.
- [2] 胡伟光, 蒲勇, 赵卓男, 等. 川东北元坝地区长兴组生物礁的识别[J]. 石油物探, 2010, 49(1): 46-53.
Hu Weiguang, Pu Yong, Zhao Zhuonan, et al. Identification of reef reservoir of Changxing formation in Yuanba area of Northeastern Sichuan Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(1): 46-53.
- [3] 武恒志, 吴亚军, 柯光明. 川东北元坝地区长兴组生物礁发育模式与储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 645-657.
Wu Hengzhi, Wu Yajun, Ke Guangming. Bioherm development model and reservoir prediction of Changxing Formation in Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 645-657.
- [4] 李宏涛, 肖开华, 龙胜祥, 等. 四川盆地元坝地区长兴组生物礁储层形成控制因素与发育模式[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 744-755.
Li Hongtao, Xiao Kaihua, Long Shengxiang, et al. Controlling factors and development models of biohermal reservoirs of the Changxing Formation in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 744-755.
- [5] 徐守成, 李国蓉, 张小青, 等. 川东北元坝地区长兴组生物礁白云岩成因机理[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 729-740.
Xu Shoucheng, Li Guorong, Zhang Xiaoqing, et al. Genetic mechanism of reefal dolostones of the Changxing Formation in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 729-740.
- [6] 刘国萍, 游瑜春, 冯琼, 等. 元坝长兴组生物礁储层精细雕刻技术[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(3): 583-590.
Liu Guoping, You Yuchun, Feng Qiong, et al. Fine depict of reef reservoir in Changxing Formation, Yuanba area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(3): 583-590.
- [7] 肖秋红, 李雷涛, 屈大鹏, 等. YB地区长兴组礁滩地震相精细刻画[J]. 石油物探, 2012, 51(1): 98-103.
Xiao QiuHong, Li Leitao, Qu Dapeng, et al. Fine description on the seismic facies of reef-beach reservoir in Changxing Formation, YB area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(1): 98-103.
- [8] 郭旭升, 郭彤楼, 黄仁春, 等. 普光-元坝大型气田储层发育特征与预测技术[J]. 中国工程科学, 2010, 12(10): 82-90.
Guo Xusheng, Guo Tonglou, Huang Renchun, et al. Reservoir development characteristics and predication technologies of large Puguang-Yuanba Gas Field[J]. Engineering Sciences, 2010, 12(10): 82-90.
- [9] 赵钊, 王身建, 张延充, 等. 川东地区长兴组生物礁有利相带预测技术研究[J]. 海洋石油, 2014, 34(1): 41-45.
Zhao Zhao, Wang Shenjian, Zhang Yanchong, et al. Study on the technology for prediction of the favorable reef facies belt in Changxing Formation in the east of Sichuan[J]. Offshore Oil, 2014, 34(1): 41-45.
- [10] Tebo J M, Hart B S. Use of volume-based 3-D seismic attribute analysis to characterize physical property distribution; A case study to delineate sedimentologic heterogeneity at the Appleton field, southwestern Alabama, USA. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75: 723-735.
- [11] Ma Y Z, Seto A, Gomez E. Depositional facies analysis and modeling of the Judy Creek reef complex of the Upper Devonian Swan Hills, Alberta, Canada[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1235-1256.
- [12] Deng Y, Li Y L, Li Z R, et al. Seismic prediction of carbonate reef or oolitic reservoir in central Sichuan Basin[J]. SPE, 2010: 131220.
- [13] Jung A, Aigner T, Palermo D, et al. A new workflow for carbonate reservoir modelling based on MPS; Shoal bodies in outcrop analogues (Triassic, SW Germany) [J]. Geological Society, 2012, 370(S1): 277-293.
- [14] Wen L, Yang Y, Zhang Q, et al. The distribution controlling factors of reef and shoal, and their favorable plays analysis: Changxing (Permian)-Feixianguan (Triassic), Sichuan Basin[J]. IPTC, 2013: 16892.
- [15] 胡光义, 古莉, 王福利. 礁灰岩特征和块状体储层建模方法探讨[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(2): 90-96.
Hu Guangyi, Gu Li, Wang Fuli. Reef limestone features and modeling approach of massive reservoir[J]. Lithologic Reservoir, 2007, 19(2): 90-96.
- [16] 胡光义, 古莉, 孙立春, 等. 一体化地质建模在新近系礁灰岩储层定量表征中的应用[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 957-962.
Hu Guangyi, Gu Li, Sun Lichun, et al. Application of integrated geological modeling to the characterization of Neocene reef reservoir[J]. Geoscience, 2009, 23(5): 957-962.
- [17] 徐维胜, 吴键, 秦关. 地震属性在普光气田储层地质建模中的应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(11): 59-63.
Xu Weisheng, Wu Jian, Qing Guan. Application of seismic attribute in geologic modeling of Puguang gasfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(11): 59-63.
- [18] 胡勇, 陈恭洋, 周艳丽. 地震反演资料在相控储层建模中的应用[J]. 油气地球物理, 2011, 9(2): 41-43.
Hu Yong, Chen Gongxiang, Zhou Yanli. The application of seismic inversion data in the facies constrained reservoir model building[J]. Petroleum Geophysics, 2011, 9(2): 41-43.
- [19] 胡向阳, 李阳, 权连顺, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法-以塔河油田四区奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 383-387.
Hu, Xiangyang, Li Yang, Quan Lianshun, et al. Three-dimensional geological modeling of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case from the Ordovician reservoirs in Tahe-IV block, Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 383-387.