

多点地质统计学在点坝内部构型三维建模中的应用

刘可可^{1,2},侯加根¹,刘钰铭¹,史燕青¹,柳琳^{1,3},唐力^{1,4},高兴军⁵,周新茂⁵

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 2. 中国石油 长城钻探工程有限公司 测井公司,辽宁 盘锦 124011;
3. 中国石油 长城钻探工程有限公司 地质研究院,辽宁 盘锦 124010; 4. 中国石油 华北油田公司 勘探开发研究院,
河北 任丘 062552; 5. 中国石油 勘探开发研究院,北京 100083]

摘要:首次将多点地质统计学应用于点坝内部三维建模。基于60 m超小井距资料,统计点坝内部夹层发育特征,利用统计结果人机交互绘制训练图像,定量表征了夹层的厚度、倾角、频率、密度、水平间距等信息。选取典型点坝,将单井解释夹层沿着夹层面垂直投影至点坝顶面,结合点坝沉积样式,获取建模过程中旋转数据体,以此来表征夹层走向信息。利用多点地质统计学Snesim算法进行点坝内部侧积层三维建模,与序贯指示模拟方法在同一点坝和旋转数据体基础上建立的点坝内部三维构型模型进行对比分析。研究表明,序贯指示模拟方法建立的点坝内部三维构型模型,虽然能够在一定程度上表征点坝内部夹层特征,但在表征夹层的连续性方面效果不佳,并且由于缺少训练图像的约束,只能定性展示夹层发育情况,无法达到定量刻画的程度。而利用多点地质统计学方法建立的模型,点坝内部夹层受控于训练图像及旋转数据体的双重约束,能够定量再现夹层的发育规模和产状,精确表征点坝内部夹层的几何形态与空间结构。结合水淹信息表明,此多点方法建立的点坝内部三维构型模型对于剩余油分布研究有指导意义。

关键词:训练图像;旋转数据体;密井网;多点地质统计学;点坝;剩余油分布

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Application of multiple-point geostatistics in 3D internal architecture modeling of point bar

Liu Keke^{1,2}, Hou Jiagen¹, Liu Yuming¹, Shi Yanqing¹, Liu Lin^{1,3}, Tang Li^{1,4}, Gao Xingjun⁵, Zhou Xinmao⁵

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. Wireline Logging Company of Great Wall Drilling Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124011, China;

3. Geology Research Institute of Great Wall Drilling Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China;

4. Exploration and Development Research Institute of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei, 062552, China;

5. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China]

Abstract: For the first time, an application of Multiple-point geostatistics in 3D internal architecture modeling of point bar is proposed in this paper. Data from dense well patterns (well spacing of 60 m) offer us the statistical distribution characteristics of interbeds within the point bar. Training images are produced by interactive processing of the statistical results for quantitative characterization of the interbeds, such as their thickness, dip, frequency, density and horizontal spacing. A typical point bar is first choosed for vertically projecting the interbeds interpreted from single well data to its top surface along the surfaces of interbeds, and then a 3D spinning cube is calculated in combination with the depositional patterns of the point bar for strike characterization of the interbeds. The Snesim algorithm is used for 3D architectural modeling of lateral accretion, and the results are compared with those from sequential indicator simulation (SIS). It is concluded that SIS may represent the characteristics of interbeds, but it is inadequate to characterize their continuity. Besides, a lack of constraints from training images forbids satisfactory quantitative characterization. In contrast, the model based on Snesim is under the dual control of training images and 3D spinning cube, thus it can quantitatively characterize the distribution, geometry and spatial structure of the interbeds. The data of watered-out reservoirs reveal that the architecture model built with multiple-point geostatistics method can guide the mapping of remaining oil.

Key words: training image, 3D spinning cube, dense well-pattern, multiple-point geostatistics, point bar, remaining oil residual

收稿日期:2015-03-04;修订日期:2016-06-20。

第一作者简介:刘可可(1988—),男,硕士研究生,油气田开发地质学。E-mail:liukk.cup.edu@163.com。

通讯作者简介:侯加根(1963—),男,教授,油气田开发地质。E-mail:hougj63@yahoo.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41202106);国家科技重大专项(2011ZX05010);中国石油大学(北京)基金项目(KYJJ2012-01-19)。

侧积层是曲流河储层中点坝内部砂体主要的渗流屏障,因此建立精确的点坝内部构型三维模型,对曲流河储层内部剩余油预测及挖潜具有重要实用价值^[1-4]。由于点坝内部侧积层三维空间展布形态相对复杂,传统的地质统计学方法难以表征其复杂的空间结构和再现其几何形态^[5-6]。相对于传统的地质统计学,多点地质统计学利用训练图像代替变差函数,能够克服传统的地质统计学的不足。目前限制多点地质统计学应用的两个主要因素是训练图像的获取和其平稳性问题^[7-8]。鉴于此,国内外诸多学者提出了几何变换的方法,主要是通过方位角旋转、比例压缩以及分区建模等手段来弥补多点地质统计学的不足^[7-14],但只能用于带有明显趋势的建模,在趋势变化不明显的目标体内还没有得到很好的应用^[7],并且在解决目标体三维空间中各项异性方面的应用较少,未见有关于表征点坝内部侧列式夹层的展布的应用。Hu^[15]改进了多点地质统计算法,将非平稳训练图像应用于多点地质统计学建模,大大提高了多点地质统计学建模方法应用的广泛性,但是该方法需要一个与研究区相同大小的先验模型来匹配井点数据,这在一定程度上限制了该方法的应用;而在训练图像的获取上主要依赖于露头沉积及密井网资料^[16],并且局限于二维训练图像^[7],三维定量训练图像的获取具有相当大的难度^[17]。受三维定量训练图像的获取及其平稳性问题的制约,多点地质统计学在三维点坝建模中的应用一直未能取得理想效果。本文以超小井距资料为基础,结合大量对子井资料,在统计的基础上对点坝内部夹层进行定量描述,从而获得量化的三维平稳训练图像,利用超小井距对夹层控制程度的绝对优势,获取量化的三维旋转数据体,利用多点地质统计学方法建立点坝内部构型三维模型。该方法是通过方位角旋转解决目标体三维空间各项异性的应用。

1 研究区概况

大庆萨尔图油田中区西部平均井网密度 250 口/ km^2 ,以河流和三角洲沉积为主要储层。目前,开发进入高含水期阶段,剩余油挖潜难度大,需要进行精细的构型研究为剩余油挖潜提供理论依据^[18-20]。研究区面积为 8.2 km^2 ,共有 2 266 口井,其中包含 6 口取心井,研究区平均井距 60 m,并有大量井距小于 30 m 的对子井。取心井及测井资料研究表明,葡 I₂ 小层发育典型的高弯度曲流河沉积,河道砂体发育广,呈连片分布,是良好的储层。因此,以葡 I₂ 小层经典点坝为例,利用多点地质统计学进行建模研究。

2 多点地质统计学在点坝内部构型建模的优势

目前对于点坝内部构型建模多采用序贯指示模拟与人机结合再处理的方法^[21-22]。此外,有学者提出了二次网格加密法^[23]、基于沉积过程的模拟法^[24]、基于沉积界面的模拟法^[25]、基于空间矢量的模拟法^[26]、层次约束下的随机抽样法^[27-28]等建模方法,但各种方法仍处于探索阶段。而多点地质统计学是利用训练图像代替变差函数来表征空间多点的相关性^[7-10,29-30],它综合了基于目标和基于象元两种算法的优点,使模型在忠实于井数据和地震数据的前提下,可以反映目标体的空间几何形态及其相互之间的接触关系。点坝内部夹层呈叠瓦状斜列式展布,可以通过夹层的产状及发育程度来描述其空间三维展布。利用量化的训练图像表征夹层倾角及发育程度,如夹层所占比例、夹层厚度、夹层倾角、夹层频率、夹层密度、夹层水平间距等信息,结合夹层的走向信息,选择合适的模拟参数,建立点坝内部构型模型,模拟结果在忠实于井点数据的前提下,既定性的再现了夹层的空间展布形态,又定量表征了夹层发育程度。

多点地质统计学算法分为迭代与非迭代两类。迭代算法主要受到迭代收敛的局限,因而其应用也受到了限制。目前应用较为广泛的是由 Strebelle 和 Journel^[31]在 Guardiano 和 Srivastava^[32]发展的非迭代算法上改进的算法——Snesim 算法。该算法应用一种动态数据结构“搜索树”一次性存储训练图像的条件概率分布,并保证在模拟过程中快速提取条件概率分布函数。本文利用 Snesim 算法建立点坝内部构型三维模型。

3 训练图像的建立

训练图像的准确性是多点地质统计学建模成功的关键^[8],利用研究区超小井距的优势,结合大量对子井定量统计点坝内部夹层的产状及发育程度。由于训练图像不必忠实于井数据,只需反应储层变化的空间结构性,因此,可以利用统计结果,人机交互绘制训练图像。考虑训练图像平稳性问题,绘制的训练图像只反映夹层的厚度、倾角、频率、密度和水平间距等信息,不反映夹层的弯曲程度。

为了减少点坝规模对夹层发育程度的影响,提高训练图像的精度,在研究区已解剖的单一点坝中,去除相对规模很大和很小的两类,选取 28 个点坝,472 口井进行统计。统计结果表明,单井识别夹层个数 0~2

个,大多只能识别一个夹层(图 1a),夹层厚度主要集中在 0.3 m 附近(图 1b),夹层密度主要集中在 0~0.5 (图 1c),平均密度为 0.125 (图 1d),夹层频率 0.19 层/m。

选取井距小于 30 m 且垂直于夹层走向的对子井 24 对,对夹层倾角进行统计,研究表明夹层倾角在 3.3°~10.3°,平均倾角为 7°(表 1),计算可知夹层水平间距 41 m。

综合点坝内夹层展布样式,在上述夹层统计信息的约束下,人机交互绘制训练图像(图 2),为了便于获取下文介绍的夹层旋转角度,将训练图像夹层走向设置为南北走向,倾向向东。训练图像包含了以下信息:夹层厚度 0.2 m 和 0.4 m 各占 50%左右,夹层倾角 7°,夹层频率 0.19 层/m,密度 0.125,夹层水平间距 41 m。

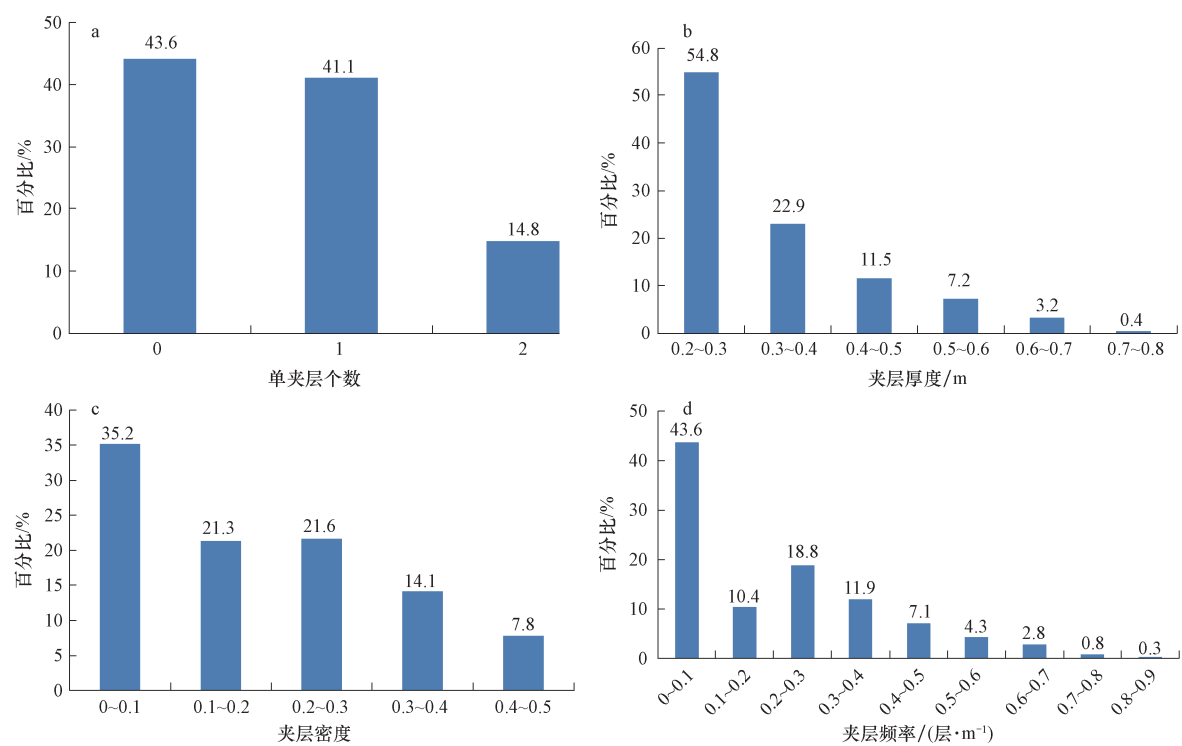


图 1 夹层发育程度统计柱状图

Fig. 1 Histogram of the developmental degree of interbeds

a. 单井夹层个数统计;b. 夹层厚度统计;c. 夹层密度统计;d. 夹层频率统计

表 1 对子井统计夹层倾角数据

Table 1 Statistical dip angle of interbeds from twin wells

井名	井距/m	倾角/(°)	井名	井距/m	倾角/(°)
G123-262/Z412-S303	5.2	8.8	ZD241-SE53/ZD241-SE54	4.2	9.7
Z412-S303/G123-26	12.1	6.1	Z511-310/G227-S315	25.0	6.7
Z342-5/G123-S285	3.5	8.1	G224-S315/ZD42-E50	25.0	5.7
Z422-304/ZD42-P9	12.0	6.8	ZD61-E56/G132-335	17.0	6.7
Z347-6/ZD251-SE43	6.8	3.4	Z44-JP204/Z345-5	28.0	9.1
Z345-3/G423-S27	17.2	9.8	Z4-5/Z4-F5	28.0	3.3
ZD241-SE61/G223-285	14.8	3.5	Z4-J7/Z4-FJ7	29.0	5.0
Z344-6/G323-S29	16.0	10.3	Z4-J7/Z4-7	25.0	7.1
Z24-SE41/G225-S275	14.0	10.1	ZD5-J7/ZD5-307	26.0	4.8
Z43-4/Z4-SE50	14.0	8.1	Z341-J7/G421-S29	28.0	8.9
Z7-10/G138-X34	30.0	5.3	Z63-4/ZD71-SE56	13.0	6.6
Z62-S5/ZD71-SE56	20.0	7.4	Z62-S5/Z63-4	11.0	5.8

平均倾角:7°

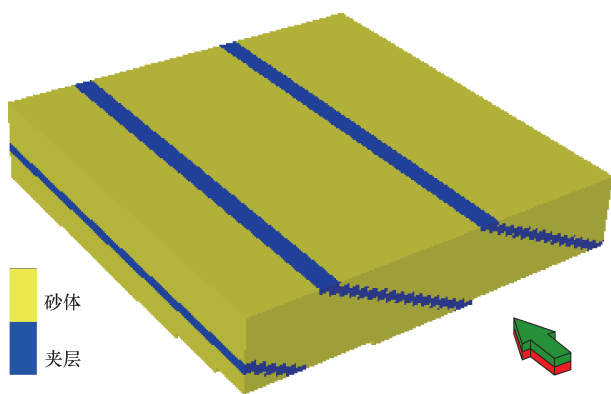


图2 点坝训练图像

Fig. 2 Training image of point bar

4 旋转数据体的获取

为了表征夹层在空间中的弯曲形态这一特征,采用旋转数据体来刻画。定义旋转数据体为模拟过程中夹层产状与训练图像中夹层产状的夹角,为了方便,将南北走向,正东倾向的夹层设置为 0° ,即不需旋转,南北走向,正西倾向则需旋转 180° 。因此,只需确定一个 $0 \sim 360^\circ$ 的三维旋转数据体,结合定量训练图像,即可刻画夹层空间展布。

基于超小井距对夹层的控制程度及上文统计结果,首先获取点坝顶面二维夹层旋转数据。为了充分

利用测井解释夹层数据,将单井解释夹层投影至点坝顶面,投影原理:沿着夹层面,在垂直于夹层走向方向投影至平面。鉴于夹层展布未知,而废弃河道已知,由于废弃河道泥坡展布形态与夹层类似,故上述原理可简化为在垂直于废弃河道走向方向上,单井解释的夹层以上文统计的夹层倾角大小在三维空间进行延伸,与顶面的交点即为该夹层在点坝顶面的投影(图3)。对投影的夹层进行平行加密,提取夹层与正北方向夹角,插值做面,即可获得二维旋转数据面。针对同一点坝不同深度,重复此方法,可以获取不同深度的二维旋转数据面,图4为研究区一实例,可以看出,不同深度二维旋转数据面值基本一致,因此可以近似将顶面数据面直接赋值拓展到三维,得到夹层三维旋转数据体。

5 多点地质统计学实例模拟

综合平稳训练图像和旋转数据体进行多点地质统计学模拟(图5),即以平稳训练图像为依托,单井解释夹层数据作为硬数据,旋转数据体作为约束条件,应用Snesim算法,选取研究区典型点坝在相控基础上进行随机建模,包括数据准备、扫描训练图像以构建搜索树、选择随机路径、序贯求取各个模拟点的条件概率分布函数并通过抽样获得模拟实现。

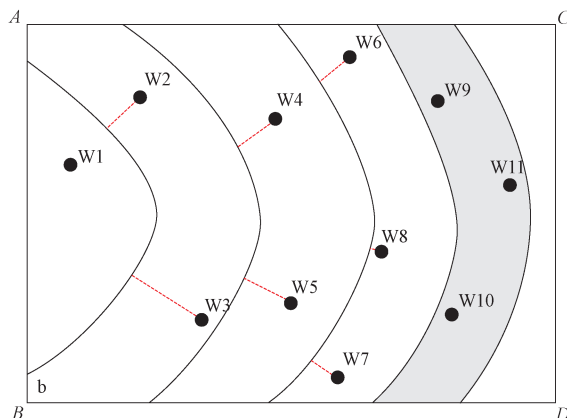
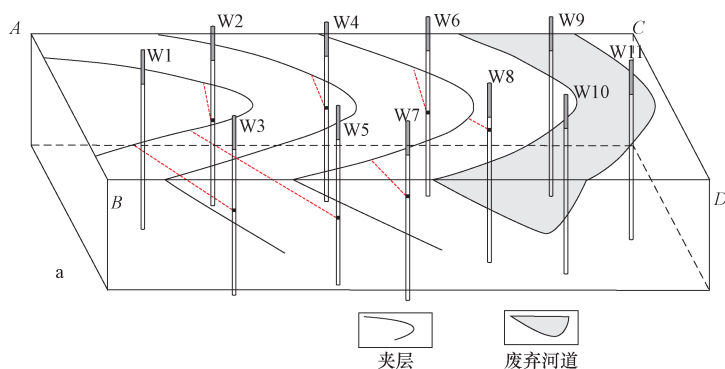


图3 单井解释夹层在点坝顶面投影示意图

Fig. 3 Projection diagram of interpreted interbeds from single wells on the top surface of point bar

a. 夹层三维投影示意图; b. 夹层投影平面图

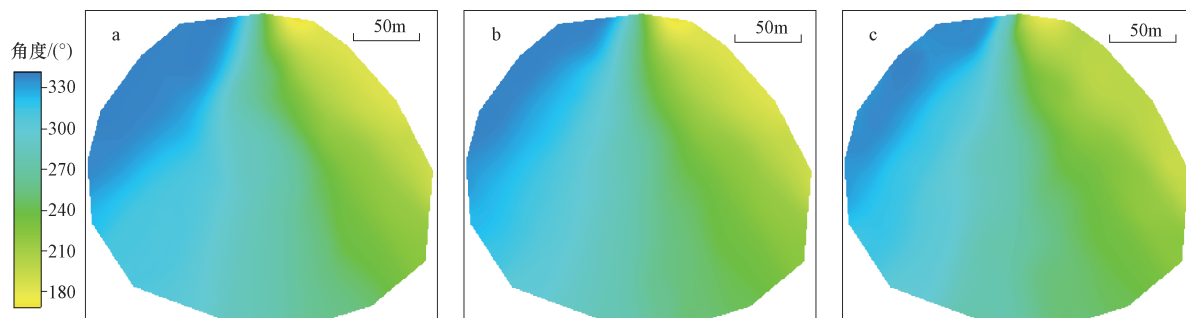


图4 不同深度夹层二维旋转数据面

Fig. 4 Surface of 2D spinning cube of interbeds with different depth

a. 距点坝顶面0 m数据面; b. 距点坝顶面1 m数据面; c. 距点坝顶面2 m数据面

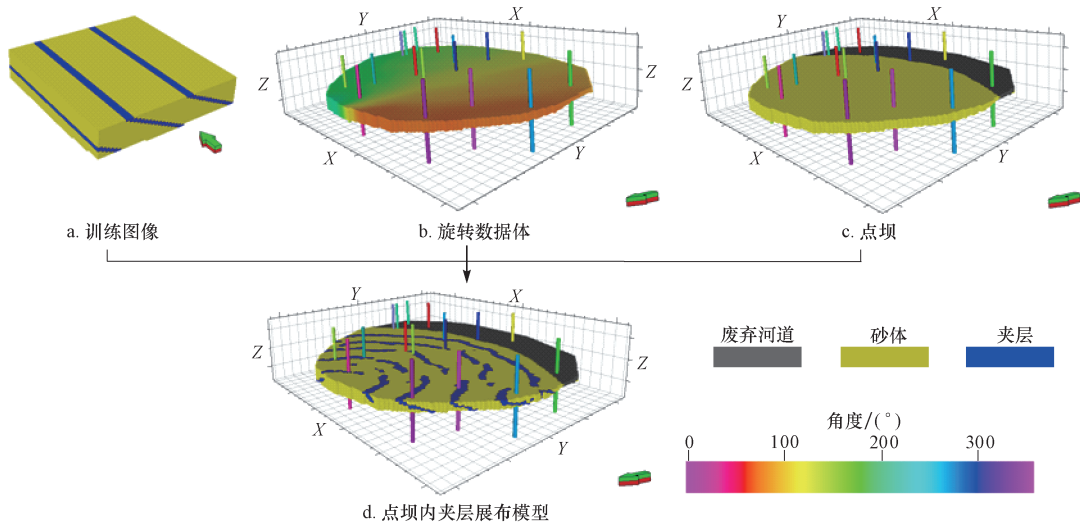


图5 应用平稳训练图像和趋势体的多点地质统计学模拟

Fig. 5 Multiple-point geostatistical simulation with stationary training and 3D spinning cube

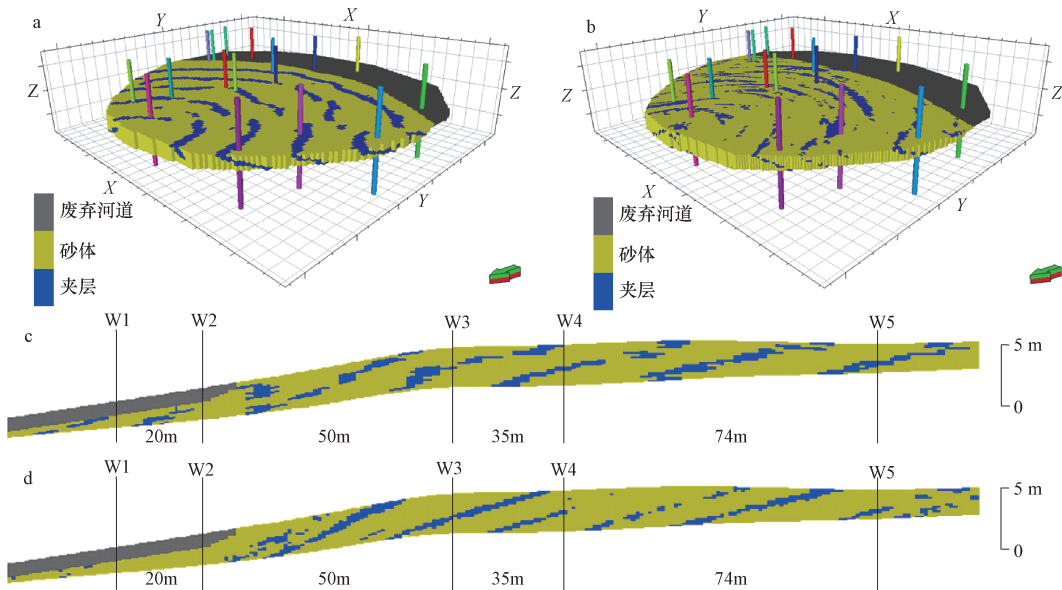


图6 点坝内夹层展布模型对比

Fig. 6 Comparison diagram of interbed distribution models in point bar

a. 多点地质统计学模拟实现; b. 序贯指示模拟实现; c. 多点地质统计学模拟实现的连井剖面; d. 序贯指示模拟实现的连井剖面

图6a,c分别为研究区点坝的一个模拟实现及其剖面。图6b,d分别为在同一旋转数据体约束下,用基于变差函数的序贯指示进行模拟并去噪后的一个实现及其剖面。对比可以看出,两种方法虽然都能忠实于井点数据,但多点地质统计学建立的模型能够反应定量训练图像的结构性,同时再现夹层的三维空间展布,与实际点坝内部模型和统计结果更为接近。而序贯指示模拟建立的模型,在夹层平面连续性差、夹层延伸连续性以及长度以及夹层间距等方面不能有效控制,模型只能一定程度上反应点坝内部夹层展布,不能定量再现夹层的三维空间展布。由此可知,多点地质统计学随机模拟比传统两点地质统计学模拟方法具有明显优越性。

6 点坝构型模型对剩余油研究的意义

侧积层是点坝内部砂体内的主要渗流屏障,控制着注水开发过程中点坝内部的油水流动,进而影响剩余油的形成与分布,因此建立点坝内部三维构型模型对剩余油的分析及开采有重要实用价值^[3,21,33-35]。

如图7所示,早在1986年完钻的注水井ZD5-14井已经到达中强水淹程度,而经过近20年的开采,在2005年完钻的采油井ZD252-SE63井虽然与其最近的注水井ZD5-14只有38m的距离,但是该井砂体顶部仍然未水淹,而且出现顶部未水淹段与下部中水淹段相邻的情况,在构型分析及点坝内部三维模建立之

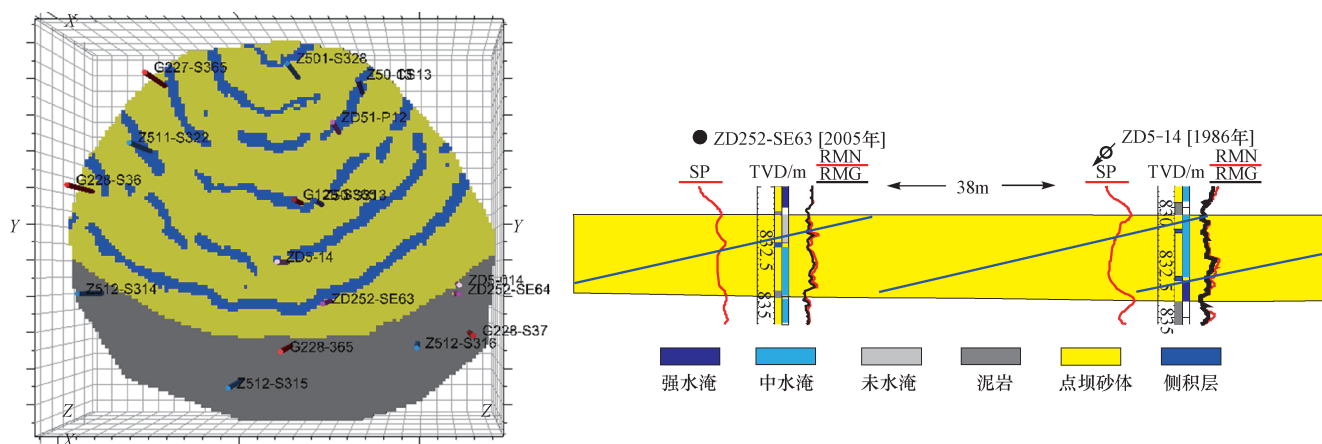


图7 基于点坝内部构型模型的水淹状况分析

Fig. 7 Watered-out reservoir mapping of point bar based on architecture modeling

a. 点坝内部构型模型俯视图; b. 邻井水淹状况分析

前,对 ZD252-SE63 井水淹程度很难给出合理解释,而建立点坝内部构型三维模型之后,可知由于两口井之间稳定的侧积层的遮挡作用,从而导致注水井 ZD5-14 到采油井 ZD252-SE63 驱油效果不佳,造成 ZD252-SE63 井顶部水淹程度低,形成剩余油。在油田调整方面,可以针对剩余油在点坝砂体顶部的分布规律采用水平井进行挖潜,提高采收率。综上,点坝内部构型三维模型的建立对于下一步剩余油分析及挖潜,提高采收率有重要指导意义。

7 结语

1) 利用超小井距资料,统计点坝内夹层产状及发育程度,建立定量训练图像,并获取旋转数据体作为多点地质统计学随机建模过程中约束条件,利用 Sneseim 算法建模,模型包含夹层的厚度、密度、倾角、频率、夹层间距以及夹层弯曲程度等信息,能够定量再现点坝内夹层三维几何形态和展布情况。

2) 采用同样的硬数据及软数据,利用序贯指示模拟建立点坝模型,对比发现,多点地质统计学建立的模型无论是在夹层侧积形态、夹层延伸长度还是夹层平面连续性都更加符合实际情况,具有明显优越性。

3) 由于夹层遮挡作用而形成的剩余油是油气田开发后期挖潜的重要对象,建立点坝内部三维构型模型,对油气田的地质认识更为细致,对合理改善采油措施,提高采收率有一定的指导作用。

4) 实际的侧积层是顶底缓、中间陡的模式,该方法未能体现该模式,有待于后期研究进一步完善。

参考文献

[1] 邹拓,左毅,孟立新,等.地质建模技术在复杂断块老油田二次开发中的应用[J].石油与天然气地质,2014,35(1):143-147.
Zou Tuo, Zuo Yi, Meng Lixin, et al. Application of geological model-

ing technology in secondary development of old and complex fault block oilfields [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 143-147.

[2] Miall A D. The geology of fluvial deposits [M]// The Geology of Fluvial Deposits. Heidelberg: Springer Berlin, 1996: 582.

[3] 王夕宾,钟建华,薛照杰,等.孤岛油田馆(1+2)砂层组沉积模式及其对剩余油分布的控制[J].中国石油大学学报:自然科学版, 2004, 28(6): 16-20.
Wang Xibin, Zhong Jianhua, Xue Zhaojie, et al. Sedimentary model of Guan (1+2) sand sets and its control over distribution of remaining oil in Gudao Oilfield [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2004, 28(6): 16-20.

[4] 闵小刚,陈开远,范廷恩.井-震结合进行河流相储层非均质性表征——以渤海湾盆地黄河口凹陷渤中 263 油田为例[J].石油与天然气地质, 2011, 32(3): 375-381.
Min Xiaogang, Chen Kaiyuan, Fan Ting'en. Heterogeneity characterization of fluvial facies reservoirs through integration of seismic and logging data [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 375-381.

[5] 范峥,吴胜和,岳大力,等.曲流河点坝内部构型的嵌入式建模方法研究[J].中国石油大学学报:自然科学版, 2012, 36(3): 1-6.
Fan Zheng, Wu Shenghe, Yue Dali, et al. Embedding modeling method for internal architecture of point bar sand body in meandering river reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(3): 1-6.

[6] Strebelle S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics [J]. Mathematical Geology, 2002, 34(1): 1-21.

[7] 吴胜和,李文克.多点地质统计学——理论、应用与展望[J].古地理学报, 2005, 7(1): 137-144.
Wu Shenghe, Li Wenke. Multiple-point geostatistics: theory, application and perspective [J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 137-144.

[8] 尹艳树,张昌民,李玖勇,等.多点地质统计学研究进展与展望[J].古地理学报, 2011, 13(2): 245-252.
Yin Yanshu, Zhang Changmin, Li Jiuyong, et al. Progress and prospect of multiple-point geostatistics [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(2): 245-252.

[9] Strebelle S, Zhang T. Non-stationary multiple-point geostatistical models [M]// Geostatistics Banff 2004. Netherlands: Springer, 2005: 235-244.

[10] Wu J, Zhang T, Boucher A. Non-stationary multiple-point geostatistical simulations with region concept [C]// Proceedings of the 20th

- SCRF meeting. Stanford;2007.
- [11] Journel A G. Combining knowledge from diverse sources: an alternative to traditional data independence hypotheses[J]. *Mathematical Geology*,2002,34(5): 573-596.
- [12] Zhang T. Rotation and affinity invariance in multiple-point geostatistics[C]//SCRF Annual Meeting Report. Stanford;2002.
- [13] Caers J,Zhang T. Multiple-point geostatistics: A quantitative vehicle for integrating geologic analogs into multiple reservoir models[J]. *AAPG Memoir*,2004,80(80):383-394.
- [14] Liu Y. Using the Snesim program for multiple-point statistical simulation[J]. *Computers & Geosciences*,2006,32(10): 1544-1563.
- [15] Hu L Y,Liu Y,Scheepens C,et al. Multiple-point simulation with an existing reservoir model as training image[J]. *Mathematical Geosciences*,2014,46(2):227-240.
- [16] Strebelle S. Sequential simulation drawing structures from training images[D]. Stanford;Stanford University,2000.
- [17] 张文彪,段太忠,郑磊,等. 基于浅层地震的三维训练图像获取及应用[J]. *石油与天然气地质*,2015,36(6):1030-1037.
Zhang Wenbiao,Duan Taizhong,Zheng Lei,et al. Generation and application of three-dimensional MPS training images based on shallow seismic data [J]. *Oil & Gas Geology*,2015,36(6): 1030-1037.
- [18] 岳大力,吴胜和,程会明,等. 基于三维储层构型模型的油藏数值模拟及剩余油分布模式[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*,2008,32(2):21-27.
Yue Dali,Wu Shenghe,Cheng Huiming,et al. Numerical reservoir simulation and remaining oil distribution patterns based on 3D reservoir architecture model[J]. *Journal of China University of Petroleum*,2008,32(2): 21-27.
- [19] 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(S1): 111-121.
Wu Shenghe,Yue Dali,Liu Jianmin,et al. Hierarchy modeling of subsurface palaeochannel reservoir architecture[J]. *Science in China: Series D*,2008,(Supplement1):111-121.
- [20] 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. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river[J]. *Acta Petrolei Sinica*,2007,28(4): 99-103.
- [21] 王凤兰,白振强,朱伟. 曲流河砂体内部构型及不同开发阶段剩余油分布研究[J]. *沉积学报*,2011,29(3):512-519.
Wang Fenglan,Bai Zhenqiang,Zhu Wei. Study on geological 3D reservoir architecture modeling and distribution of remaining oil of different development stage in meandering reservoir[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2011,29(3): 512-519.
- [22] 白振强,王清华,杜庆龙,等. 曲流河砂体三维构型地质建模及数值模拟研究[J]. *石油学报*,2009,30(6):898-902.
Bai Zhenqiang,Wang Qinghua,Du Qinglong,et al. Study on 3D architecture geology modeling and digital simulation in meandering reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*,2009,30(6): 898-902.
- [23] 岳大力,陈德坡,徐樟有,等. 济阳坳陷孤东油田曲流河河道储集层构型三维建模[J]. *古地理学报*,2009,11(2):233-240.
Yue Dali,Chen Depo,Xu Zhangyou,et al. Channel reservoir architecture 3D modeling of meandering fluvial reservoir in Gudong Oilfield, Jiyang Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*,2009,11(2): 233-240.
- [24] 李少华,卢文涛. 基于沉积过程的储集层随机建模方法——以河流相储集层为例[J]. *古地理学报*,2011,13(3):325-333.
Li Shaohua,Lu Wentao. Depositional process-based reservoir stochastic modeling ——A case of fluvial reservoir modeling[J]. *Journal of Palaeogeography*,2011,13(3): 325-333.
- [25] 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.
- [26] 李宇鹏,吴胜和,耿丽慧,等. 基于空间矢量的点坝砂体储层构型建模[J]. *石油学报*,2013,34(1):133-139.
Li Yupeng,Wu Shenghe,Geng Lihui,et al. Spatial-vector-based reservoir architecture modeling of point bar sand [J]. *Acta Petrolei Sinica*,2013,34(1): 133-139.
- [27] 尹艳树,张昌民,李少华,等. 一种新的曲流河点坝侧积层建模方法[J]. *石油学报*,2011,32(2):315-319.
Yin Yanshu,Zhang Changmin,Li Shaohua,et al. A new stochastic modeling method for 3-D forecasting lateral accretion beddings of point bars in meandering rivers [J]. *Acta Petrolei Sinica*,2011,32(2): 315-319.
- [28] Yin Y. A new stochastic modeling of 3-D mud drapes inside point bar sands in meandering river deposits [J]. *Natural resources research*,2013,22(4): 311-320.
- [29] 贾爱林. 中国储层地质模型 20 年[J]. *石油学报*,2011,32(1): 181-188.
Jia Ailin. Research achievements on reservoir geological modeling of China in the past two decades [J]. *Acta Petrolei Sinica*,2011,32(1): 181-188.
- [30] 段冬平,侯加根,刘钰铭,等. 多点地质统计学方法在三角洲前缘微相模拟中的应用[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*,2012,36(2):22-26.
Duan Dongping,Hou Jiagen,Liu Yuming,et al. Application of multiple-point geostatistics in delta front microfacies simulation[J]. *Journal of China University of Petroleum*,2012,36(2): 22-26.
- [31] Strebelle S,Journel A. Reservoir modeling using multiple-point statistics[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans;Society of Petroleum Engineers,2001.
- [32] Guardiano F B,Srivastava R M. Multivariate geostatistics: beyond bivariate moments[M]//Geostatistics Troia '92. Netherlands:Springer,1993: 133-144.
- [33] 王鸣川,朱维耀,董卫宏,等. 曲流河点坝厚油层内部构型及其对剩余油分布的影响[J]. *油气地质与采收率*,2013,20(3):14-17.
Wang Mingchuan,Zhu Weiyao,Dong Weihong et al. Study on distribution and influence factors of remaining oil in point bar of meandering river [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*,2013,20(3):14-17.
- [34] 周伟东,刘振坤,岳大力,等. 济阳坳陷孤东油田七区中单元新近系馆陶组点坝构型[J]. *石油与天然气地质*,2010,31(1):126-134.
Zhou Weidong,Liu Zhenkun,Yue Dali,et al. An analysis of point bar configuration of the Neogene Guantao Formation in the middle unit of Block 7 in Gudong oilfield, the Jiyang Depression [J]. *Oil & Gas Geology*,2010,31(1): 126-134.
- [35] 李军,宋新民,薛培华,等. 扶余油田杨大城子组曲流河相油藏单砂体层次细分及成因[J]. *石油与天然气地质*,2010,31(1): 119-125.
Lijun,Song Xinmin,Xue Peihua,et al. Hierarchical subdivision and origin of single sandbody in the reservoirs of meandering river facies in the Yangdachengzi formation of Fuyu oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*,2010,31(1):119-125.