

基于水平井资料的三维地质建模方法

柳琳*

中国石油长城钻探工程有限公司地质研究院, 盘锦 124010

* 通信作者, liulin8812@163.com

收稿日期: 2019-10-14

中国石油天然气集团公司工程技术科技统筹项目“自营区块增产综合技术与试验”(2017T-004-001)资助

摘要 以苏里格气田某水平井密集分布区为例, 分析水平井资料在三维地质建模中的优势和应用误区。水平井资料具有信息集中且量大的特点, 对于提高井间预测的准确性和表征地质体的规律性方面具有优势; 但由于水平井资料具有较强的方向性和选择性钻遇砂体的特点, 形成了丛聚效应, 导致在建模过程中变差函数分析结果与地质认识不符。本文在充分利用水平井数据优势的前提下, 提出了两种水平井资料在三维地质建模中的应用方法: 一是变程椭圆计算法, 该方法是根据变程椭球空间分布特征, 利用直井信息求取垂向变程大小, 利用两个不同方向的水平井组分别求取两个不同方向的变程大小, 进而通过计算求取变差函数, 计算结果具有高精度的特点, 此方法适用于至少存在两个方向的水平井组的区域; 二是水平段数据抽稀法, 该方法是有规律的多次均匀抽稀水平段数据, 消除丛聚效应, 求取多个变差函数, 通过统计求取研究区的变差函数, 与变程椭圆计算法相比, 此方法精度略低, 可应用于只存在单一方向的水平井组的区域。

关键词 水平井; 变差函数; 地质建模; 苏里格气田

3D geological modeling based on horizontal well data

LIU Lin

Geology Research Institute, Great Wall Drilling Company, PetroChina, Panjin 124010, China

Abstract Taking the dense distribution area of horizontal wells in the Sulige Gas Field as an example, the superiority and paradox of horizontal well data in 3D geological modeling are analyzed in this paper. For the characteristics of centralized information and large quantity of information, the horizontal wells data have advantage in improving the accuracy of inter-well prediction and characterizing the regularity of geological bodies. However, a clustering effect occurs because of the strong directional and selective drilling of sand bodies in horizontal well data. As a result, the variogram based on the horizontal well data is not consistent with the geological knowledge. In this paper we present two practical approaches of horizontal well data application in 3D geological modeling. Based on the spatial distribution characteristics of the variable range ellipsoid, the range ellipse calculation method is presented. In this method, two different ranges of the horizontal variogram are obtained by horizontal well data in two different directions individually while the vertical range of variogram is obtained by vertical well data. So we can get the variogram with high precision by calculation. However, the application of this method is limited to areas with more than two directions of horizontal wells. The other is the horizontal well data rarefying method. To eliminate the clustering effect, the horizontal well data are rarefied regularly and uniformly multiple times. And then we can get multiple variograms by rarefying the horizontal well data to calculate the variogram of the study area by statistics. Compared to the range

引用格式: 柳琳, 基于水平井资料的三维地质建模方法. 石油科学通报, 2020, 01: 17-25

LIU Lin. 3D geological modeling based on horizontal well data. Petroleum Science Bulletin, 2020, 01: 17-25. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.01.002

ellipse calculation method, the horizontal well data rarefying method has a lower precision and can be applied to the area with single direction of horizontal wells.

Keywords horizontal wells; variogram; geological modeling; Sulige Gas Field

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.01.002

0 引言

近些年来,随着钻井工艺的发展,水平井在提高油气田产能方面发挥着越来越重要的作用,尤其是在一些低渗透油气田出现了以水平井开发为主的井网^[1-4]。与直井资料不同,水平井受研究区地应力影响,水平段一般具有统一方向性,且水平段数据信息具有高集中度、高精确性的特点。由于水平井资料的特殊性,如何充分利用水平井资料建立合理的高精度的储层地质模型一直是学者研究的热点^[5-10]。在地质建模过程中,由于水平段信息的分布特点而形成的丛聚效应会造成变差函数分析误区,从而不能获取反映地质特征的变差函数,难以建立符合地质认识的地质模型^[8-9]。但如果放弃使用水平井资料,又会提高井间砂体预测的误差,从而降低地质模型精度。为了解决这一矛盾,有学者提出了在相控和地震约束下利用水平井和直井信息综合求取变差函数建立地质模型思路^[9],但这一方法对于地震品质差,直井信息少的地区应用难度较大。本文以苏里格气田某区块为例,针对地震品质差、直井少且水平井分布密集的特点,提出了变程椭圆计算法和水平段数据抽稀法两种求取变差函数的方法,从而建立表征储层真实分布规律的地质

质模型。这两种方法既能充分利用水平井提供的丰富地质信息,又能有效的避免水平井数据的丛聚效应,对国内外相似油田的研究具有一定的指导意义。

1 研究区概况

研究区位于苏里格气田的西北部,主力含气层位为下二叠统下石盒子组盒8段和山西组山1段,是河流相沉积的低孔低渗储层^[11-13]。研究表明,研究区物源方向为北北东向。研究区采用水平井方式整体开发,平均井间距为600 m,单井水平段长度在800 m左右,受研究区地应力和储层压裂条件限制,水平井组分为两个方向,一组为北偏西13°方向的水平井147口,另一组为北偏东13°方向的水平井24口,研究区另有直井26口(图1)。

2 水平井数据优势与建模误区

水平井具有横向延伸距离远、方向性强、提供的地质信息集中且量大的特点^[9]。在刻画小规模地质体的发育规律及地质形态方面能够提供大量的有效信息,与直井相比,充分利用水平井数据能够提高井间预测

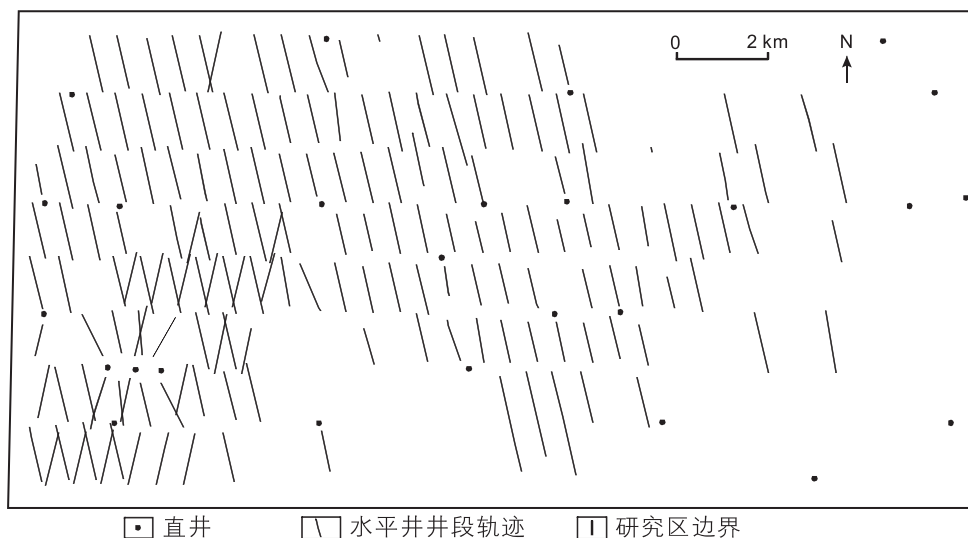


图1 研究区井位分布图

Fig. 1 Location map of wells in the study area

的准确性,表征地质体的规律性。

然而在实际建模过程中,水平井采样点在某一方向上大量数据的聚集会造成不符合地质认识的地质学统计,从而形成地质建模的误区,主要表现在两个方面,一是丛聚效应造成的变差函数求取的误区,二是水平井选择性钻遇砂体造成的砂泥比统计误区。

为了研究丛聚效应对变差函数求取的影响,分别对研究区直井和水平井的河道砂体进行变差函数分析。通过直井数据求取的河道砂体变差函数(图2)主变程方向为 13° ,与物源方向一致,主变程大小1916.3 m,次变程大小1783.3 m,块金值为0。由于直井井数太少,井距过大,因此得到的变差函数结果正确性有待商榷。通过水平井数据的河道砂体变差函数(图3)可以看出:由于水平井段大量数据的集中分布,变差函数点对个数增加了30多倍,主变程方向变为 -13° ,与水平井井轨迹方向一致,主变程大小852.3 m,次变程大小483.6 m,变差函数块金值为0.38,此结果是由于水平井数据在 -13° 的井轨迹方向大量密集分布而造

成的分析误区,块金值的增大是由于沿井轨迹方向密集分布的水平段数据突变造成的分析误区,比如长井段的河道砂体中夹杂的薄泥岩夹层。

钻井过程中,水平井在地质导向的调整下避开泥岩,选择性的钻遇砂岩储层。因此,水平井更多的反映砂岩信息,在砂泥比例统计分析时得到的砂泥比远大于地下真实的砂泥比,从而造成砂泥比明显变高的假象。即使综合水平井和直井信息共同分析,也会由于水平井信息量远远大于直井从而造成砂泥比变高的误差现象(图4)。

3 变差函数求取方法

3.1 变程椭圆算法

地质统计学研究表明,以变差函数为基础的传统地质建模方法的关键是求取三维变程椭球体^[14]。在地质建模过程中,储层受沉积作用影响,无论是岩性、沉积相还是储层物性,垂向变化要比横向变化更快。

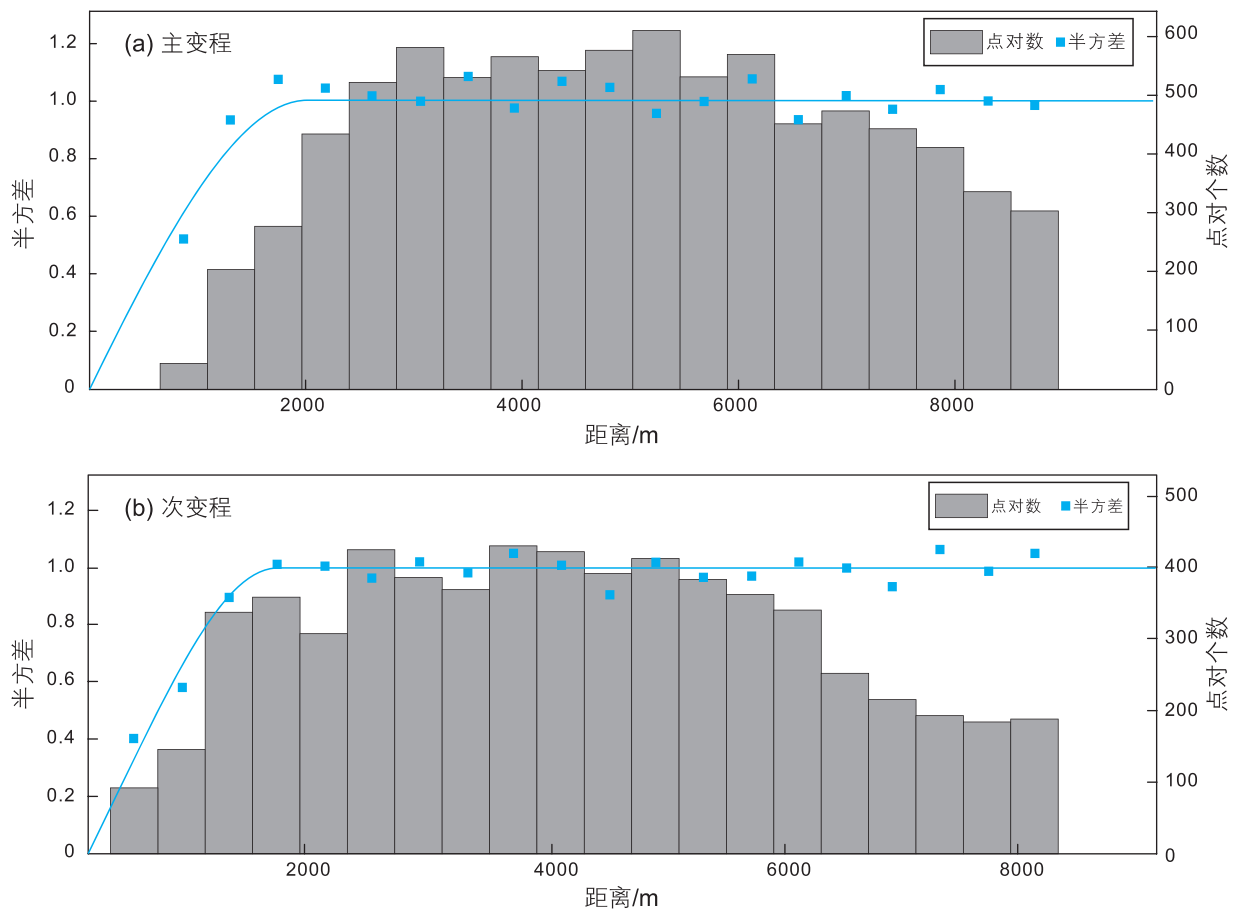


图2 直井数据河道砂体变差函数(主变程方向 13°)

Fig. 2 Variogram of fluvial sand bodies based on vertical well data (major direction is 13°)

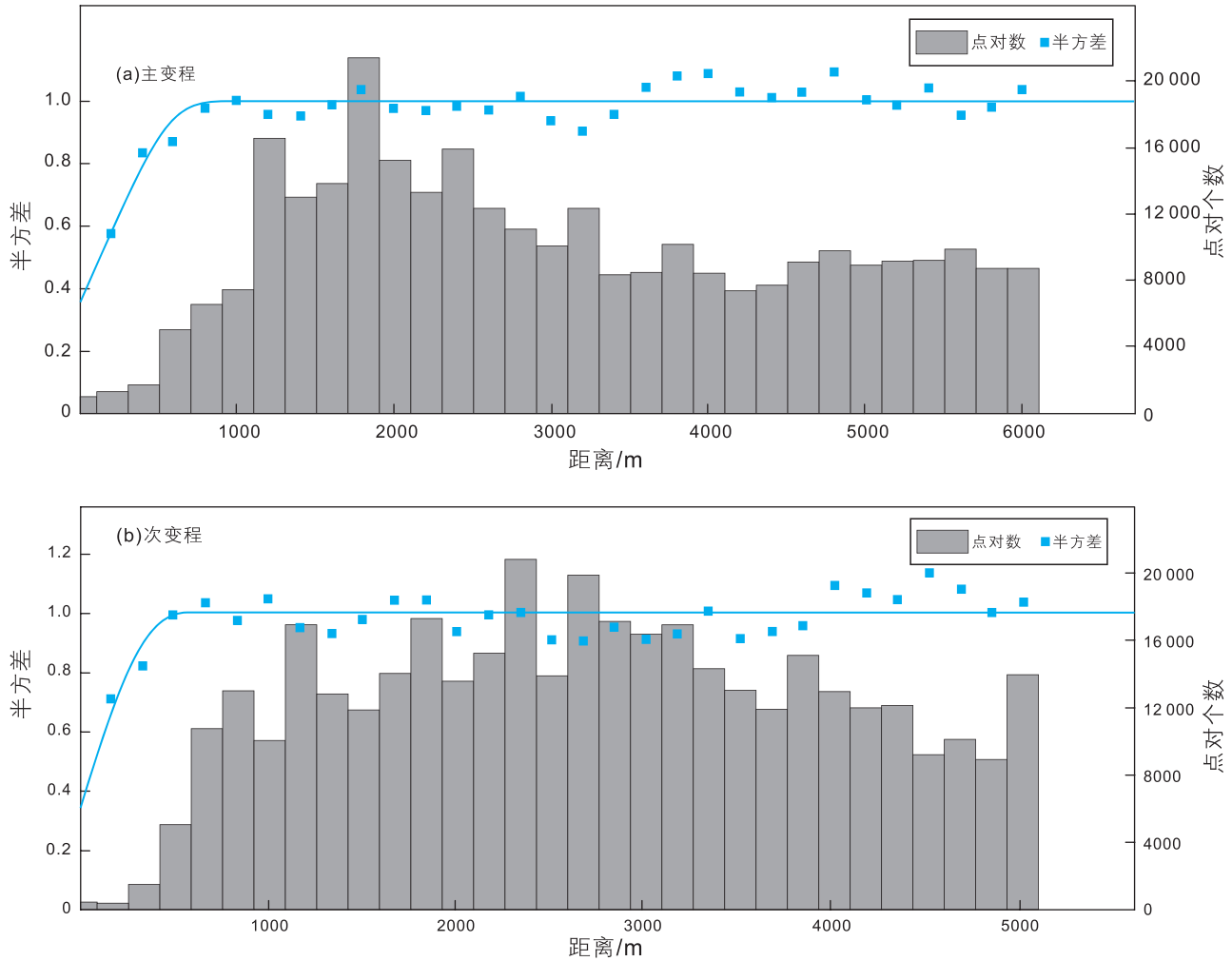


图3 水平井数据河道砂体变差函数(主变程方向 -13°)

Fig. 3 Variogram of fluvial sand bodies based on horizontal well data (major direction is -13°)

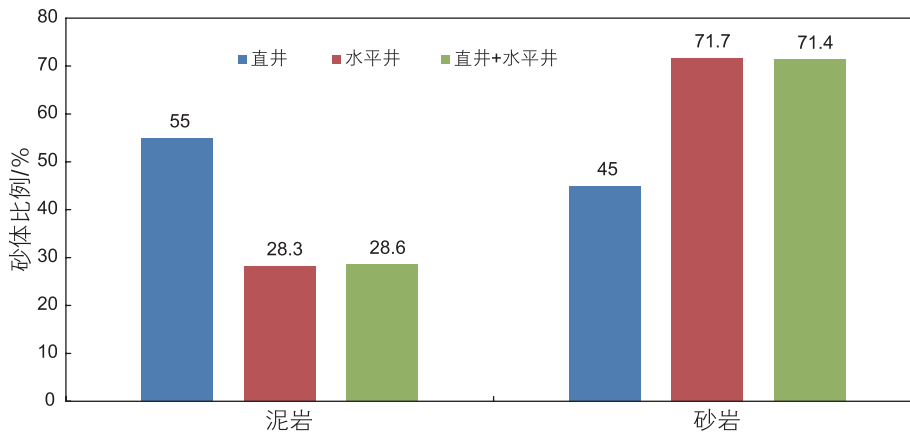


图4 直井与水平井钻遇砂体比例对比图

Fig. 4 Comparison histogram of drilling sand bodies in vertical wells and horizontal wells

因此, 变程椭球体的短轴一般为垂直方向, 与直井轨迹方向基本一致, 故变程椭球体可进一步简化为平面变程椭圆与垂向变程两个参数。垂向变程利用直井分

析即可得到, 而平面变程椭圆的求取则成为水平井建模的关键。

平面变程椭圆的长轴方向, 即主变程方向一般与

物源方向一致。当物源方向已知的情况下，平面变程椭圆可以表达为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

式中， x, y 为自变量； a 为长轴大小，即主变程大小； b 为短轴大小，即次变程大小；主变程方向与 x 轴方向一致。由式 1 可以看出，只需得到不平行于 x 轴和 y 轴的两点，即可求取 a, b 值。

上文已论述，水平井数据的丛聚效应会造成变差函数分析的误区。从另一个角度说明了，同一方向的

水平井数据分析得到的主变程大小可以看做是在变程椭圆上沿着这个方向的变程大小。而在垂直水平井轨迹方向上的次变程大小则非变程椭圆上的值，这是由于在垂直于水平井轨迹的方向上，不同点对距离对应的点对个数分布非常不均匀(图 5)，在与水平井间距成整数倍数的地方，点对个数非常多，而其它距离的点对个数很少，结果可信度不高。因此，只需找到两个不同方向的水平井组，分别分析这两个方向的变程大小(图 6)，带入式 1，得到式 2。

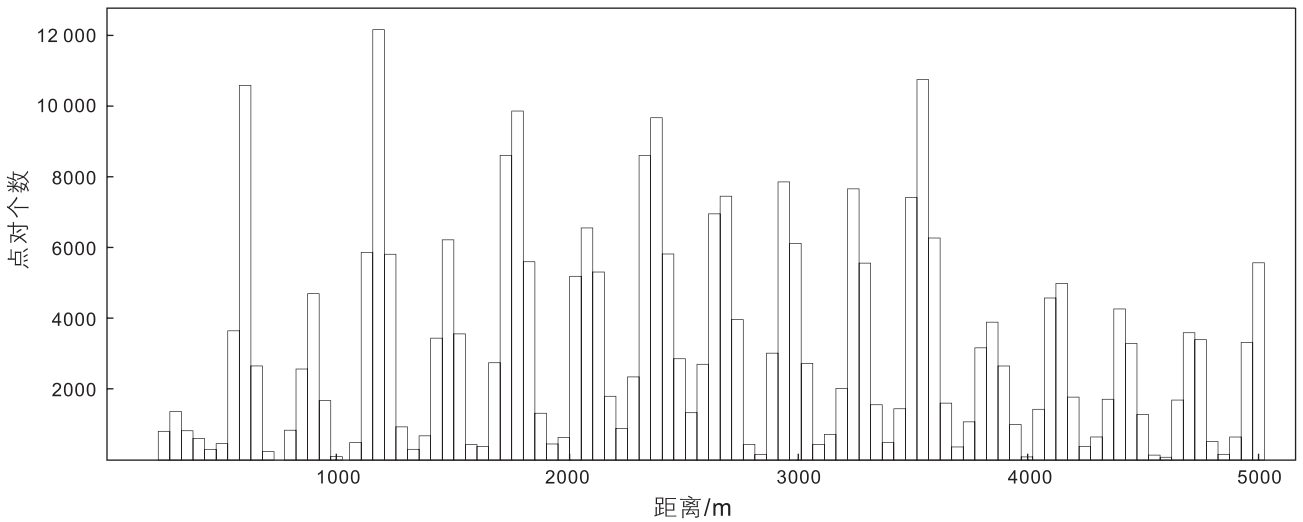


图 5 垂直于水平井轨迹方向上的点对个数分布图

Fig. 5 Histogram of the number of pairs vertical to the direction of horizontal wells

$$\begin{aligned} \frac{(m \cos \alpha)^2}{a^2} + \frac{(m \sin \alpha)^2}{b^2} &= 1 \\ \frac{(n \cos \beta)^2}{a^2} + \frac{(n \sin \beta)^2}{b^2} &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

式中， α, β 分别为两个不同方向的水平井组与主变程方向的夹角； m, n 分别为两个不同方向的水平井组沿其井轨迹方向的变程大小； a 为长轴大小，即主变程大小； b 为短轴大小，即次变程大小。解方程组即可求得平面变程椭圆。

研究区大部分水平井井轨迹方向为北偏西 13° ，但受地质、工程条件等因素的影响，有 24 口井井轨迹方向为北偏东 13° 左右，并且集中在研究区西南部(图 1)。因此，在已知研究区物源为北偏东 13° 的情况下，可以分别利用研究区两个方向的水平井求取其井轨迹方向的变程大小，带入式 2 即可求取研究区平面变程椭圆，即变差函数。结果表明，方向为北偏西 13° 的水平井主变程大小为 1255.7 m，方向为北偏东

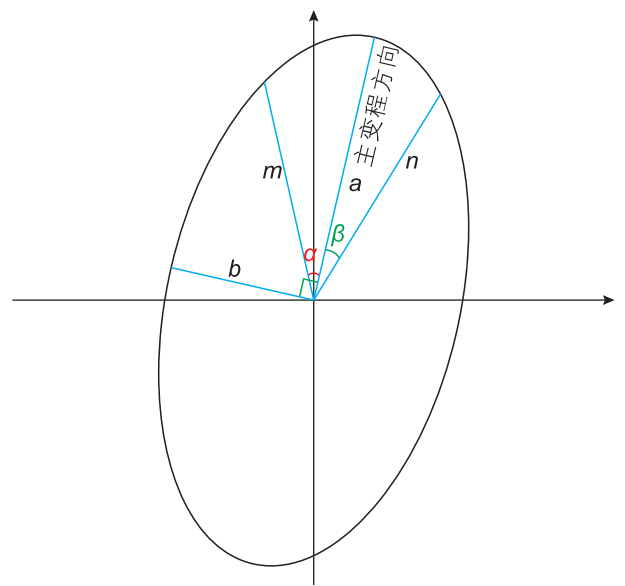


图 6 利用两个不同方向水平井组求取变差函数示意图

Fig. 6 Diagram of using horizontal well data in two different directions to obtain variogram

13°的水平井主变程大小为 1376.6 m，带入式 2 计算可知，变差函数主变程大小为 1376.6 m，次变程大小为 978.4 m。研究区解剖的砂体延伸范围在 2700 m 左右，长宽比在 1.4 左右，对比计算结果可以看出变差函数是可信的。

该方法从经典的地质统计学基本原理出发，利用变程椭球体的几何特征求取变差函数，能够充分利用所有水平井数据，具有高精度度的特点，适用于至少有两个不同方向的水平井组的研究区。

3.2 水平段数据抽稀法

由于水平井信息的特殊性，难以提供连续有效的垂向信息，一般利用同一区域的直井信息求取垂向变程。而利用水平井数据求取的平面变差函数的误差主要来源于水平段数据的丛聚效应，解决了丛聚效应也就解决了变差函数求取的问题。对水平井水平段数据进行抽稀，保留部分水平段数据，从而消除丛聚效应，求取符合地质认识的合理的变差函数。水平段密集的数据点能够为我们对于地下非均质性的认识带来更多的信息，为了保证在消除丛聚效应的前提下充分挖掘和利用水平井信息，减少抽稀后数据不足造成非均质性认识缺陷的影响，数据抽稀需遵循以下原则：一是尽可能的使抽稀后的数据均匀分布，二是在数据均匀分布的前提下尽可能的保留更多的水平井信息来保证变差函数的准确性，三是规律性重复抽稀，保证从第一次至最后一次所有的抽稀点数据无重复，且数

据点组合后是所有水平段数据点，最终将多次抽稀后求取的变差函数取平均值最为研究区最终的变差函数。考虑到多次抽稀用的水平井数据点是无重复等概率的，所以每次抽稀后的变差函数结果权重应当相同，变差函数结果取平均的方法用的是算术平均值法。

研究区水平井间距 600 m，水平段呈近南北向分布。为了保证抽稀后数据的均匀分布，抽稀方法如图 7 所示。使抽稀线平行于工区边界，与水平段并轨迹呈近似直交，抽稀线间距为 600 m，交点即为抽稀后的数据点，综合直井数据信息，求取变差函数。研究区建模过程中平面网格步长为 50 m，则 600 m 间距共有 12 个平面网格分布，因此，在重复抽稀过程中，只需抽稀 12 次即可覆盖研究区所有水平井数据信息。最终 12 组变差函数(表 1)平均可知研究区变差函数主变程方向为 13°，主变程大小 1360.9 m，次变程大小 1027.2 m，块金值 0。综合直井求取的垂向变程大小 8.4 m，可以求取研究区的变差函数。

从求取过程可以看出，该方法得到的变差函数的主变程和次变程是多组平均的结果，与变程椭圆法相比，水平井数据不是同时参与变差函数求取，结果准确性略有降低，适用于只存在单一方向的水平井组的研究区。

4 建模实例

近些年来，国内学者在建立苏里格气田低孔低渗透层地质模型方面取得了很大进展^[15-18]，但关于如何

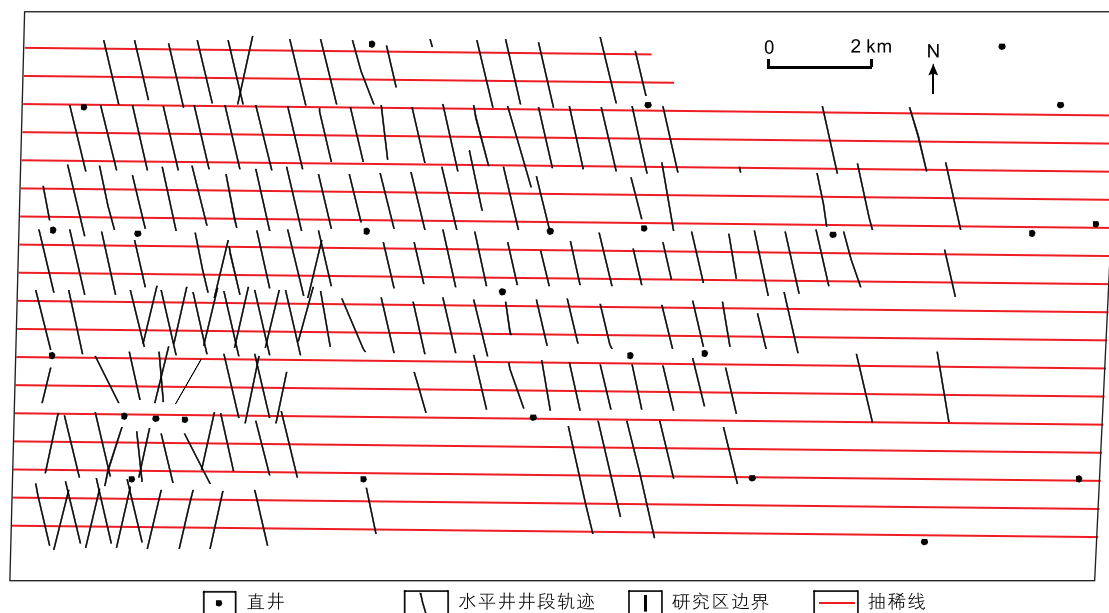


图 7 水平井水平段数据抽稀图

Fig. 7 Rarefying map of horizontal well data in horizontal section

充分利用水平井资料建立三维地质模型的研究却很少。本文分别利用变程椭圆计算法和水平段数据抽稀法得到的变差函数建立研究区地质岩相模型，在建模过程

中，为了避免水平井选择性钻遇砂体造成的砂泥比统计误区(图 4)，采用直井分析得到的砂泥比约束建模。为了验证模型的准确性，利用同样的数据和砂泥比约束，分别采用直井分析得到的变差函数和水平井加直井分析得到的变差函数建模，将建立的模型进行对比。从模型(图 8)中可以看出，利用直井求取的变差函数建立的模型砂体分布范围广，连续性最好；利用水平井加直井求取的变差函数建立的模型砂体高度分散，连续性最差；利用椭圆计算法和水平段数据抽稀法得到的变差函数建立的模型砂体连续性中等。研究区砂体延伸范围在 2700 m 左右，长宽比在 1.4 左右，对比可以看出，椭圆计算法和水平段数据抽稀法求取的变差函数建立的模型更加符合地下真实的地质情况。

为了进一步验证椭圆计算法和水平段数据抽稀法求取的变差函数建立的模型的可靠性，对模型进行了抽稀井验证。如图 9 所示，将 S40H 井从建模数据中抽

表 1 变差函数统计表

Table 1 Statistics of variogram

序号	主变程/m	次变程/m	主变程方向/°	块金值
1	1281.5	933.6	13	0
2	1320.3	1126.5	13	0
3	1406.4	1105.3	13	0
4	1399.3	979.5	13	0
5	1457.5	1056.3	13	0
6	1379.1	1089.4	13	0
7	1398.6	907.2	13	0
8	1331.2	1078.4	13	0
9	1256.3	1075.6	13	0
10	1297.3	879.4	13	0
11	1386.3	969.4	13	0
12	1416.8	1125.8	13	0

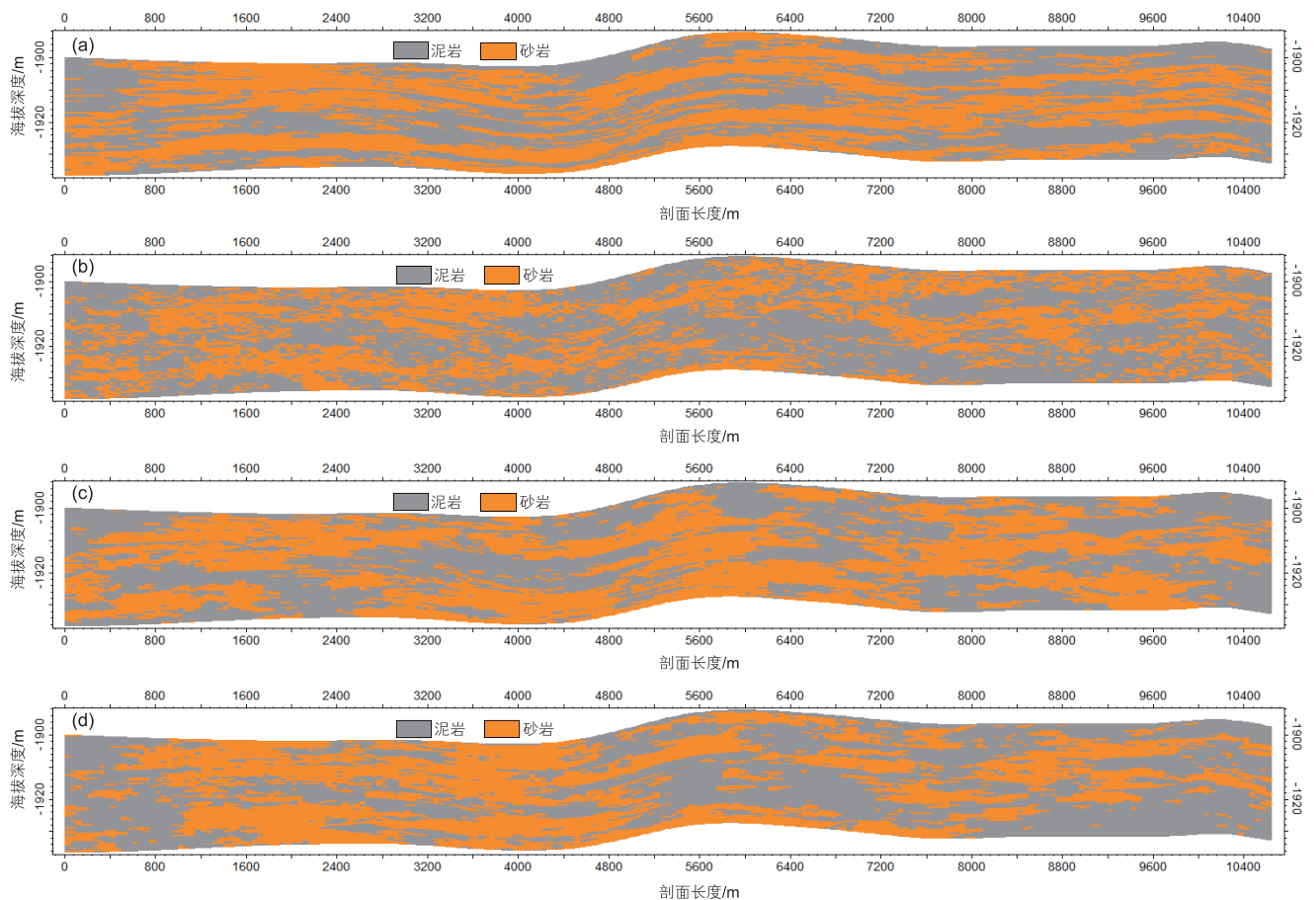


图 8 建模结果对比图 (a)直井变差函数建立的模型剖面；(b)直井加水平井变差函数建立的模型剖面；(c)变程椭圆计算法变差函数建立的模型剖面；(d)水平井段数据抽稀法变差函数建立的模型剖面

Fig. 8 Comparison diagram of geological models (a) model section based on vertical well data variogram; (b) model section based on vertical well data and horizontal well data variogram; (c) model section based on range ellipse calculation method; (d) model section based on horizontal well data rarefying method

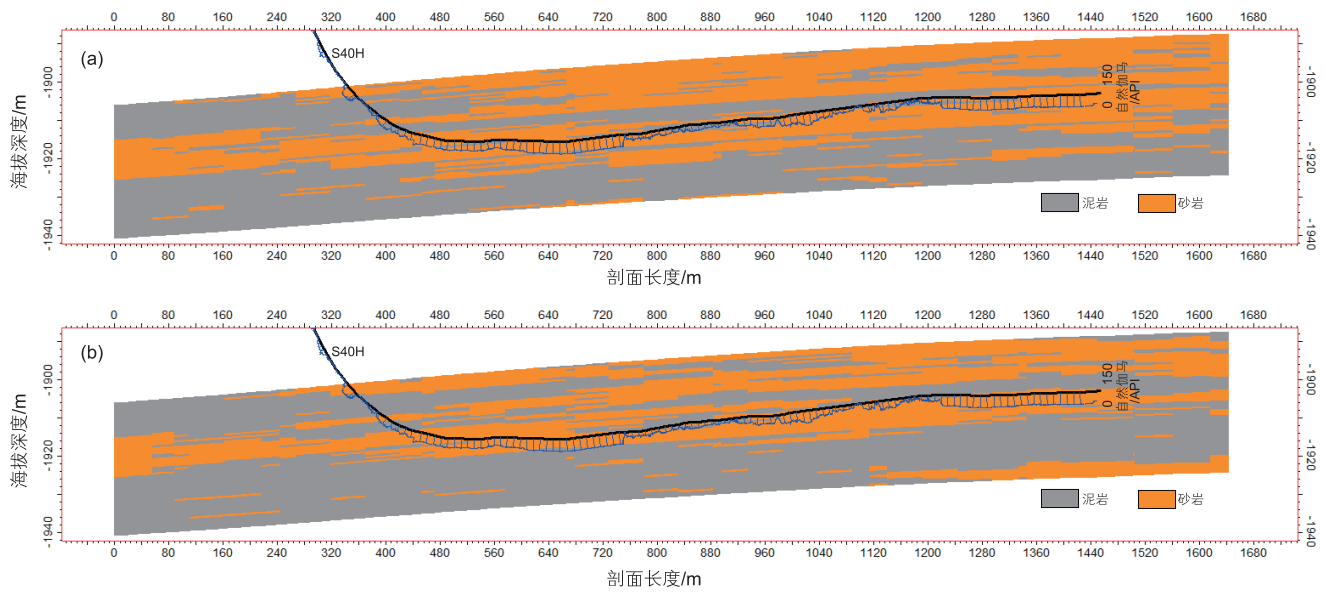


图9 抽稀井模型验证 (a) 变程椭圆算法变差函数建立的模型剖面图; (b) 水平井段数据抽稀法变差函数建立的模型剖面图
 Fig. 9 Models checking by rarefying well (a) model section based on range ellipse calculation method; (b) model section based on horizontal well data rarefying method

出, 不参与模型的建立, 通过对比模型结果与该井的解释结果可以看出, 这两种方法建立的模型与S40H井的解释结果吻合度高, 说明模型是可靠的。

5 结论

1) 由于水平井数据沿井轨迹集中分布, 形成了丛聚效应, 从而造成了地质建模过程中变差函数分析的误区, 并且由于水平井选择性钻遇砂体造成的砂泥比统计误区, 共同形成了水平井建模的误区。只利用直

井或直井加水平井数据难以求取准确的变差函数从而建立可靠的地质模型。

2) 采用利用变程椭圆算法或水平段数据抽稀法来求取变差函数, 既能充分利用水平井数据信息的优势, 又能有效避免丛聚效应, 从而求取符合区域地质认识的变差函数, 在直井数据分析得到的砂泥比约束下建立反应真实地质特征的地质模型。变程椭圆算法适用于至少有两个不同方向的水平井组的研究区, 精度高; 水平段数据抽稀法适用于只存在单一方向的水平井组的研究区, 精度略有降低。

参考文献

- [1] 赵继勇, 樊建明, 何永宏, 等. 超低渗—致密油藏水平井开发注采参数优化实践——以鄂尔多斯盆地长庆油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 68–75. [ZHAO J Y, FAN J M, HE Y H, et al. Optimization of horizontal well injection-production parameters for ultra-low permeable-tight oil production: A case from Changqing Oilfield, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 68–75.]
- [2] 何东博, 贾爱林, 冀光, 等. 苏里格大型致密砂岩气田开发井型井网技术[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 79–89. [HE D B, JIA A L, JI G, et al. Well type and pattern optimization technology for large scale tight sand gas, Sulige Gas Field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 79–89.]
- [3] 卢涛, 张吉, 李跃刚, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏水平井开发技术及展望[J]. 天然气工业, 2013, 33(8): 38–43. [LU T, ZHANG J, LI Y G, et al. Horizontal well development technology for tight sandstone gas reservoirs in the Sulige Gas Field, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 38–43.]
- [4] 费世祥, 王东旭, 林刚, 等. 致密砂岩气藏水平井整体开发关键地质技术——以苏里格气田苏东南区为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1620–1629. [FEI S X, WANG D X, LIN G, et al. The key geological technology for horizontal wells overall development in tight sandstone gas reservoirs: Take the Sudongnan area of Sulige Gas Field for an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1620–1629.]

- [5] 张瑞, 廖新武, 刘宗宾, 等. 基于水平井信息的单一河口坝内部增生体识别[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 81-89. [ZHANG R, LIAO X W, LIU Z B, et al. Recognition of accretion of sand bodies in single mouth bar based on horizontal well data[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(6): 81-89.]
- [6] 吴胜和, 武军昌, 李恕军, 等. 安塞油田坪桥水平井区沉积微相三维建模研究[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 266-271. [WU S H, WU J C, LI S J, et al. 3D microfacies modeling of Pingqiao horizontal well region of Ansai Oilfield[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 266-271.]
- [7] 郝建明, 吴健, 张宏伟. 应用水平井资料开展精细油藏建模及剩余油分布研究[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 730-736. [HAO J M, WU J, ZHANG H W. Study on fine reservoir modeling and distribution of remaining oil with data of horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 730-736.]
- [8] 陈文浩. 扶余油田水平井平台区改进油藏地质模型精度的方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [CHEN W H. Study on the methods to improve the reservoir geological modeling accuracy of horizontal well platform area in Fuyu oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2016.]
- [9] 黄文松, 王家华, 陈和平, 等. 基于水平井资料进行地质建模的大数据误区分析与应对策略[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 939-947. [HUANG W S, WANG J H, CHEN H P, et al. Big data paradox and modeling strategies in geological modeling based on horizontal wells data[J]. Beijing: Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 939-947.]
- [10] LIU Y, ZHANG B, DONG Y, et al. The determination of variogram in the presence of horizontal wells-An application to a conglomerate reservoir modeling, East China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 173: 512-524.
- [11] 何顺利, 兰朝利, 门成全. 苏里格气田储层的新型辫状河沉积模式[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 25-29. [HE S L, LAN C L, MEN C Q. New braided river model in Sulige Gas Field of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 25-29.]
- [12] 李海燕, 彭仕宓. 苏里格气田低渗透储层成岩储集相特征[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 100-104. [LI H Y, PENG S M. Characteristics of diagenetic reservoir facies of low-permeability reservoir in Sulige Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 100-104.]
- [13] 何东博, 贾爱林, 田昌炳, 等. 苏里格气田储集层成岩作用及有效储集层成因[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 69-71. [HE D B, JIA A L, TIAN C B, et al. Diagenesis and genesis of effective sandstone reservoirs in the Sulige Gas Field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 69-71.]
- [14] DEUTSCH C V. Geostatistical reservoir modeling[M]. London: Oxford University Press, 2014: 85-89.
- [15] 贾爱林, 唐俊伟, 何东博, 等. 苏里格气田强非均质致密砂岩储层的地质建模[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(1): 12-16. [JIA A L, TANG J W, HE D B, et al. Geological modeling for sandstone reservoirs with low permeability and strong heterogeneity in Sulige Gas Field[J]. China Petroleum Exploration, 2007, 12(1): 12-16.]
- [16] 郭智, 孙龙德, 贾爱林, 等. 辫状河相致密砂岩气藏三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 76-83. [GUO Z, SUN L D, JIA A L, et al. 3D geological modeling for tight sand gas reservoir of braided river facies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 76-83.]
- [17] 田冷, 何顺利, 顾岱鸿. 苏里格气田储层三维地质建模技术研究[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 593-596. [TIAN L, HE S L, GU D H. The use of 3D reservoir geological modeling in Sulige Gas Field[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6): 593-596.]
- [18] 李进步, 付斌, 赵忠军, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏储层表征技术及其发展展望[J]. 天然气工业, 2015, 35(12): 35-41. [LI J B, FU B, ZHAO Z J, et al. Characterization technology for tight sandstone gas reservoirs in the Sulige Gas Field, Ordos Basin, and its development prospect[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(12): 35-41.]

(编辑 付娟娟)