

天然气勘探

基于 SVD 法三维地震属性优化技术 在苏里格气田含气性预测中的应用

畅永刚, 史松群, 赵玉华, 王大兴

(中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018)

摘要:在进行地震储层预测时,经常先对地震属性依据地表环境、采集客观因素、处理不当等原因引起属性异常进行客观分析,充分理解地震各个属性所携带的各种非储层信息;然后再综合分析地质资料,诸如沉积环境、构造特征、岩性变化、物性变化等;最后才是储层含气性在地震属性上的表现特征,再结合非地质因素和非含气性因素进行含气性预测,尤其注意预测方法的适用条件,即在同等级别的地质因素、储层因素的前提下预测含气性。按照上述流程对苏里格气田东区三维地震区进行详细研究,针对三维地震资料属性分析中对于储层预测多解性问题,采用了奇异值分解(SVD)的方法对地震属性展开降维,分类优化,在一定程度上降低了三维地震预测储层的多解性,降低了气田开发井位部署风险,在气田滚动评价与整体开发中起到很好的应用效果。

关键词:SVD(奇异值分解);属性优化;致密砂岩储层;鄂尔多斯盆地;苏里格气田

中图分类号:TE132.1

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2012)03-0596-06

引用格式:Chang Yonggang, Shi Songqun, Zhao Yuhua, *et al.* Application of optimization technology of SVD-based 3D seismic attribution in gas bearing prediction of Sulige gas field[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3): 596-601. [畅永刚, 史松群, 赵玉华, 等. 基于 SVD 法三维地震属性优化技术在苏里格气田含气性预测中的应用[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3): 596-601.]

0 引言

鄂尔多斯盆地苏里格气田是典型的低渗透气藏,该区发育缓坡型三角洲沉积体系,主要目的层砂体纵向相互叠置,横向复合连片,有效储层相对较薄^[1]。面对复杂的地震地表条件,通过二维地震属性分析及 AVO 分析技术的应用,有效储层的预测符合率达到 70% 以上。但是随着苏里格气田大规模开发,快节奏生产要求部署开发井位也是成批量的优化部署,因此,在鄂尔多斯盆地苏里格气田开发中大量应用三维地震资料也是大势所趋,特别是近 3 年三维地震在苏里格气田开发中被广泛应用,如 2009 年苏 14 井区三维地震的应用,2010 年

召 30 区块三维地震的应用,2011 年苏 156 井区三维地震的应用等起到了很好的效果。2011—2012 年苏里格气田有近 600 km² 的范围内应用了三维地震,所以开展三维地震属性优化分析,降低多解性迫在眉睫。地震属性携带的各种信息包含了地表噪音、采集因素、处理痕迹等,更重要的是携带了地质储层特征信息,如构造特征、沉积环境、岩性、物性及含流体信息等,在众多庞杂的地震属性数据中,首先按照资料采集因素、地表客观影响、处理痕迹对资料做详细分析,然后按照储层不同级别影响因素展开分类分析,最终优化可以预测储层含气性的有用地震属性。本文在综合分析地质、钻井、测井及录井资料的前提下,利用 SVD 方法对地震属性进行优化,

收稿日期:2011-12-30;修回日期:2012-03-12.

基金项目:国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地大型岩性地层油气藏勘探开发示范工程”(编号:2011ZX05044)资助.

作者简介:畅永刚(1978-),男,甘肃庆阳人,工程师,硕士,主要从事地震储层预测与属性优化方面的研究.

E-mail:changyg_cq@petrochina.com.cn.

得到第一主分量——反映的是辫状河—三角洲沉积环境、第二主分量——反映的是储层物性特征、第三主分量——反映的是储层含气性、第四主分量及以后分量——反映的是背景噪音。

1 SVD 降维方法研究进展^[2]

关于 SVD 算法的研究最早可以追溯到 1873 年 Beltrami 所做的工作,这期间在理论方面进行了大量的工作,直到 1965 年 Golub 和 Kahan 才在 SVD 的数值计算领域取得突破性进展,并且于 1969 年给出了比较稳定的算法(以下简称传统 QR 迭代算法),这也是后来在 LINPACK 中所采用的方法。其中心思想是用正交变换将原矩阵化为双对角线矩阵,然后再对双对角线矩阵迭代进行 QR 分解。在 20 世纪 60 年代一份内部技术报告中,Kahan 证明了双对角线矩阵的奇异值可以精确地计算,具有和原矩阵元素相当的相对精度;进一步于 1990 年,Demmel 和 Kahan 给出了一种零位移的 QR 算法(Zero-shift QR Algorithm),这种算法计算双对角线矩阵的奇异值具有很高的相对精度,并且由此得到的奇异向量也具有很高的精度。Fernando 和 Parlett 在 1994 年将 QD 算法应用到奇异值的计算上,从而得到了一种全新的比 Zero-shift QR Algorithm 更加精确和快速的计算奇异值的算法,而 Demmel 和 Veselic 在文献中则说明了用 Jacobi 方法与其他方法相比计算所得到的奇异值和奇异向量具有更高的精度,可惜 Jacobi 算法比 DK 算法速度要慢得多;再对 Jacobi 算法进行改进,使得其在速度上几乎和 DK 算法相当。SVD 作为一种有效使用的数据处理数学方法,在图像分析、图像边缘检测、模式识别、决策方案分析等方面被广泛应用,取得了很好的效果。

2 SVD 降维基本原理^[3]

2.1 实对称矩阵的正交分解

若 G 为 $M \times M$ 阶实对称非奇异矩阵,则存在正交矩阵 U ,使

$$U^T G U = \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M) \quad (1)$$

式(1)中: λ_i 是矩阵 G 的第 i 个特征值; Λ 是由 G 的 M 个特征值组成的对角线矩阵,而 U 是 G 的 M 个特征向量矩阵。它是一个正交向量,即: $G = U \Lambda U^T$,这是一个实对称矩阵的正交分解。

2.2 非奇异且非对称矩阵分解

若 G 是非奇异、非对称矩阵,则正交分解不成

立。可证明,存在 2 个正交矩阵 U 和 V ,且

$$U^T G V = \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M) \quad (2)$$

式(2)中: Λ 为由 GG^T 或 $G^T G$ 的 M 个特征值之正根组成对角线矩阵, $\lambda_i > 0$; U 和 V 分别为对称矩阵 GG^T 和 $G^T G$ 的特征向量组成的特征向量矩阵,即: $G = U \Lambda V^T$,这是一个非奇异且非对称矩阵分解。

2.3 奇异矩阵的奇异值分解

若 G 是 $M \times N$ 阶奇异矩阵,此时也可以进行分解,即:

$$G = U_r \Lambda_r V_r^T \quad (3)$$

式(3)为奇异矩阵 G 的奇异值分解。式中: Λ_r 由 $G^T G$ 或 GG^T 的 r 个非零特征值之正根组成对角线矩阵。这样可以把 $(M-r)$ 个或者 $(N-r)$ 个相关的行或列降低到 r 行或者列。在地震属性优化过程中,有些地震属性之间,可能有某种线性的相关性,通过 SVD 降维优化,去除了这些线性相关属性的干扰而造成储层预测的误判。

3 致密砂岩储层 SVD 三维地震属性优化应用

苏里格气田致密砂岩储层主要表现为孔隙度小于 10% 的低渗透率的大面积砂体储层特征^[4],在仔细分析地表、采集、处理手段等客观因素造成地震属性异常的情况下,储层的沉积背景、岩性及含气性等地质条件下地震属性异常在三维地震沿层属性上是有所反映的。基于奇异值(SVD)法的属性优化技术在该地区是适应的,由于 SVD 法是基于数据携带各级信息的一种统计学分析技术,地震属性在该区所携带的最一般的地质信息就是大套砂岩的沉积背景,其次是储层孔隙所含流体的指示。

3.1 苏里格东区致密砂岩储层地震地质特征

苏里格气田上古生界盒 8 段主力气层是致密砂岩储层,是沼泽背景下的辫状河沉积,有效砂体多呈孤立状分布,规模小、连续性差;以次生孔隙为主,具有低孔、特低渗致密砂岩储层特点^[4]。波阻抗差异小,成为地震储层预测难点;因此在提取多种地震属性后需结合大量地质资料做地震属性优化工作^[5-6]。

3.2 苏东三维区石盒子组盒 8 段沿层属性提取^[7]

提取地震属性除了对于地震数据处理高保真要求外,在属性优化的时候,要重视分析由于采集因素、地表客观条件、处理痕迹等资料本身难以克服的客观因素引起的地震属性异常。另外,地震沿层属性提取更加要求地震层位解释的准确性,本文在对

苏里格气田东区三维地震资料做精细处理的基础上,分析野外采集因素、处理环节对研究区资料的影响,做到属性分析优化有针对性、有限度、有分类、有级别。最后做到客观预测储层含气性分布,为气田开发做好可靠的技术支撑。

首先提取了各种地震属性,初步结合地质、钻井、录井等资料综合分析,把采集因素、处理痕迹等引起的属性异常认识清楚,再按照沉积环境、岩性、物性、含气性等不同储层特征级别展开分析,图 1 所示为盒 8 段沿层吸收衰减属性,暖色区为强吸收衰减区域,在其他储层特征相对均一的情况下,强吸收衰减可指示储层含气性,在大量砂岩区应用效果良好。图 2 所示盒 8 段沿层最大波峰振幅属性,暖色调为高值,反映砂泥岩界面明显区域,可明显看出河道砂体沉积细微变化。结合井点弹性曲线、储层物性、含气性曲线交会分析,岩石声波参数试验表明有效储层对地震波吸收衰减明显。纵波 Q 值变化比横波 Q 值变化明显,孔隙度越高,物性越好,纵波 Q 值越小,吸收越大。纵横波速度比、泊松比 2 个参数在含气储层表现为低值。图 3 所示是苏里格气田东区三维地震盒 8 段沿层吸收衰减属性,暖色部分为吸收强的区域,分析认为该区域孔隙度较大,砂岩储层发育,在含气性上也可指示为含气有利区域。

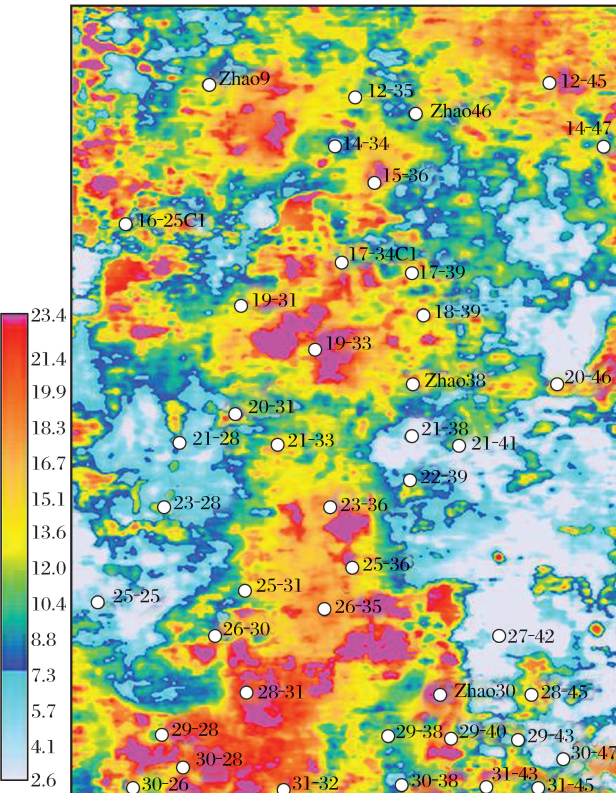


图 1 盒 8 段沿层吸收衰减属性

图 4 为泊松比属性,依据岩石物理分析认为暖色部分为流体指示含气有利区。

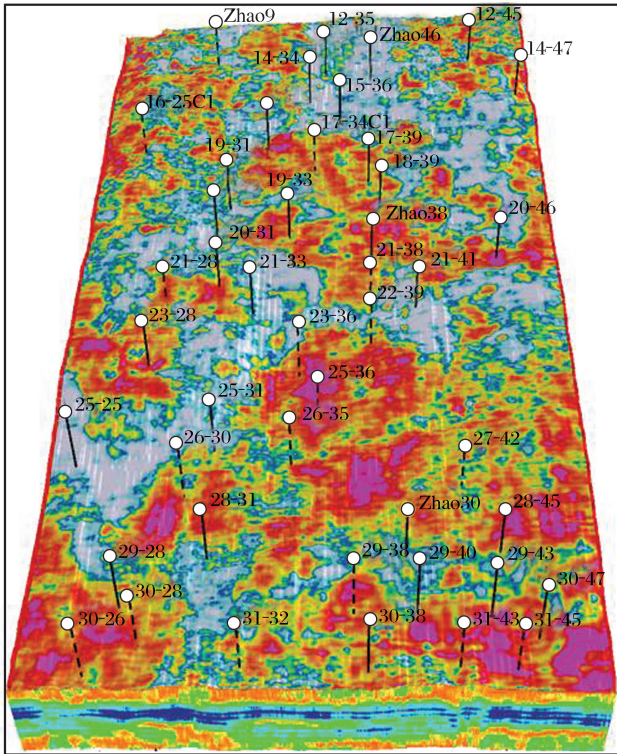


图 2 盒 8 段沿层最大波峰振幅属性

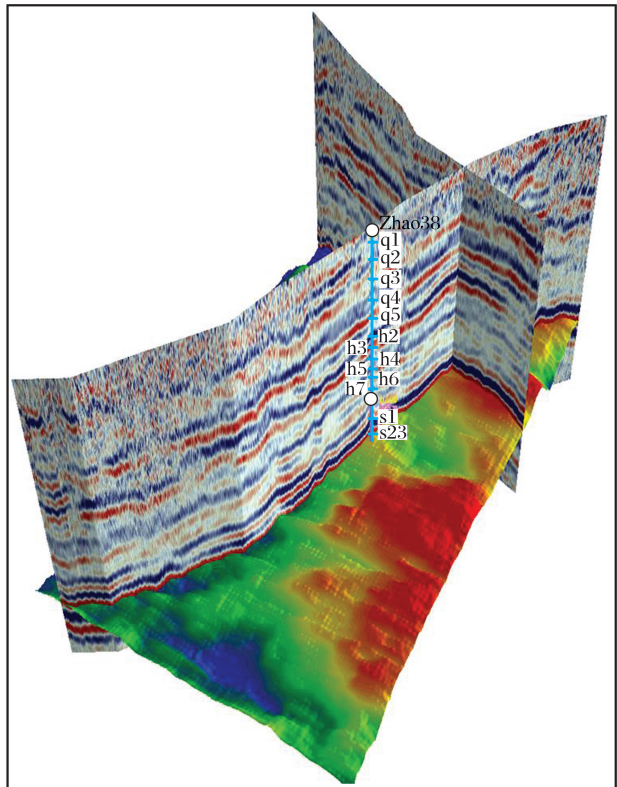


图 3 盒 8 段沿层吸收系数属性与丝带剖面

这些都是单一属性反映,而且各个属性表达的地震信息与储层真实情况存在差距,这样就要求我们在这些众多属性中做取舍优化,降低地震属性储层预测的多解性。

笔者采用了 SVD(奇异值分解)的办法来去除那些本来线性相关的属性后,再融合优化后的属性,综合分析地震属性所反映不同级别的地质因素,如:沉积背景、储层物性及含气性等。

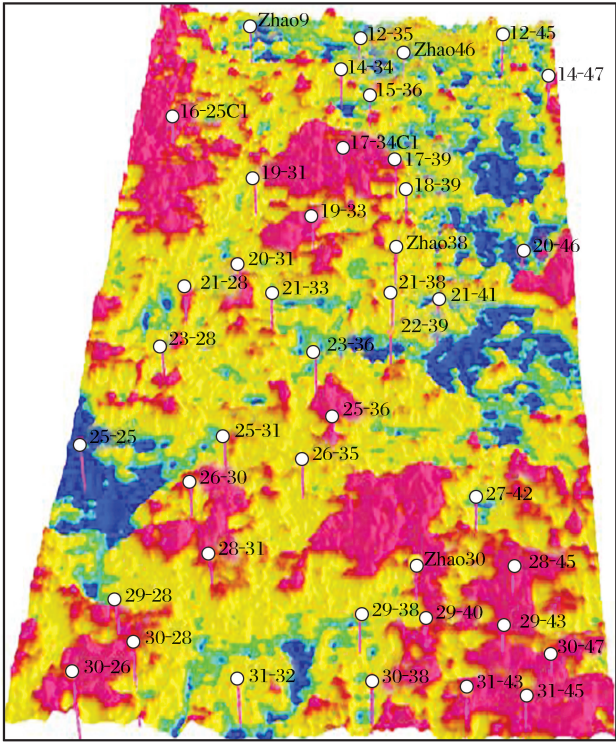


图 4 盒 8 段沿层泊松比属性

3.3 基于 SVD 法三维地震属性优化技术应用

通过提取苏东三维地震数据盒 8 段沿层多地震属性,把各种地震属性输入 SVD 优化分析系统,结合地质资料、钻井资料等综合分析认为:奇异值分解第一主分量反映的是该地区的大沉积背景,即图 5 所示的河流相沉积特征。反映了物源方向,依据 SVD 第一主分量反映的是目的层位最一般的储层信息,图 5 所示的西北方向在众多的单地震属性都表现出来特征异常,通过勘探井岩性分析,沉积相分析也是这样的结果。图 6 所示奇异值分解的第二主分量反映的是砂岩分布情况;第二主分量是除了第一主分量外的次一级储层特征信息,在苏里格地区也是比较符合地质规律的。图 7 所示奇异值分解的第三主分量反映的是储层的含气性分布情况,储层含气性检测是储层流体检测的一部分,由于地震属性中包含了众多可以识别孔隙流体的地震属性,例如:叠前弹性参数、横波信息、AVO 属性等,这些都

可以只是流体的地震属性经过 SVD 法分析降低了单属性的预测多解性。该结论已得到开发井完钻情况的证实^[8-10]。如图 8 所示的第四主分量表现为噪音。地震属性中的噪音成分是永远存在的,因此, SVD 法降维分析也可以把地震属性中的一般随机

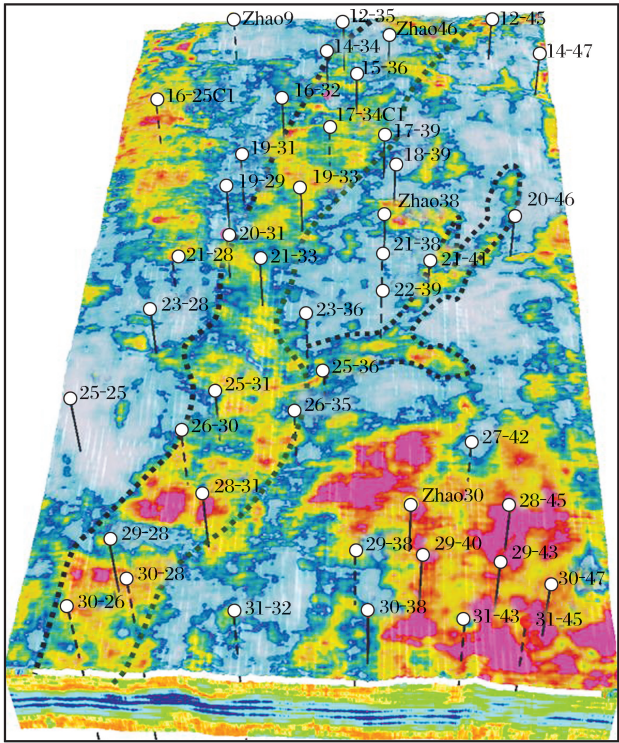


图 5 奇异值分解第一主分量

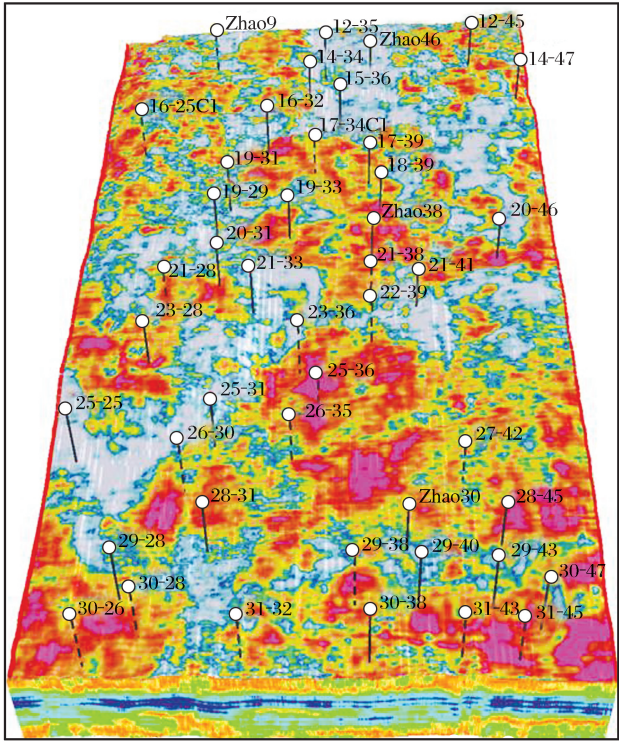


图 6 奇异值分解第二主分量

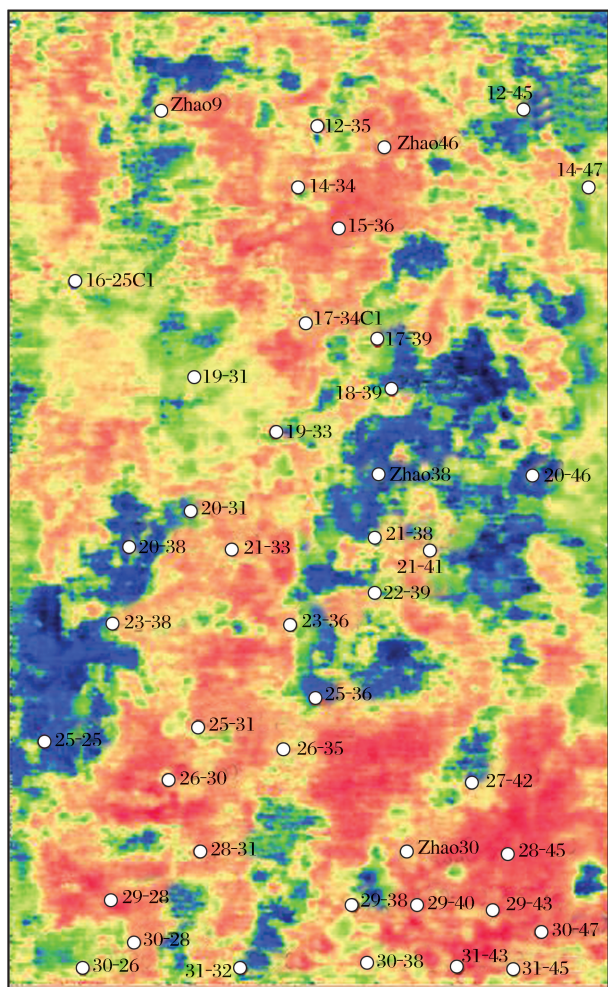


图7 奇异值分解第三主分量

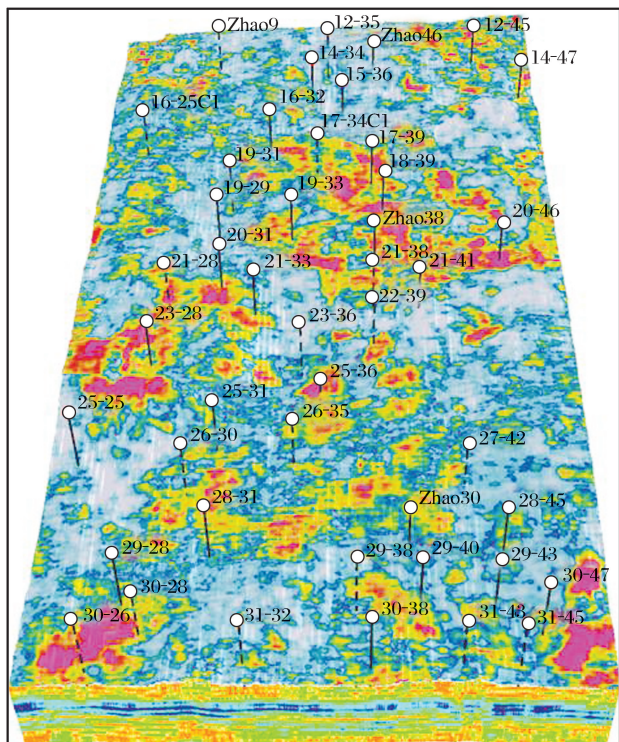


图8 奇异值分解第四主分量

噪音信号分解为一种噪音信号分量。这是SVD法作为数学统计学分析的一种本质特征。大面积砂岩分布、大面积含气,而砂岩的致密性和不连续性导致了单井产量小。SVD属性优化方法在苏里格地区的应用提高了气田开发的经济效率。因此在第五主分量以后信号被噪音淹没。

3.4 苏东盒8段沿层地震属性SVD优化效果

苏里格气田开发过程中,以往大量二维地震逐渐转向全三维数字地震,应用好三维地震属性分析,是部署开发井位的关键。在对资料精细处理、客观综合分析的基础上,以苏东三维地震盒8段为研究重点做奇异值分解属性优化,并部署了开发井,使Ⅰ+Ⅱ类优质储层预测成功率达到了80%以上。

4 结论

(1)SVD法是一种基于求解奇异矩阵特征值的数学统计学方法,被广泛应用到各个领域。且应用到地震属性数据降维优化分析中是可行的,这种分析数据的思路符合地质统计规律。

(2)做好地震属性分类优化的关键在于:首先,对资料从采集因素、地表客观条件、处理痕迹方面做客观分析,深刻认识资料本身非地质储层原因的地震异常响应;其次,对地质储层因素从影响级别的大小分类做属性分析(沉积环境、岩性、物性及含气性等);最后,从地震属性的物理意义上分类,把识别地层非弹性性质的属性、反映不同流体性质的属性及这些属性对各影响因素敏感性等方面进行分析,这样才能应用各种优化算法(奇异值分解)对属性降维。

(3)SVD法在苏里格气田开发地震解释工作中应用效果良好,在苏里格气田东区三维地震区的应用使得Ⅰ+Ⅱ类优质储层预测成功率达到了80%以上。

参考文献(References):

- [1] Ma Chunsheng, Xu Huazheng, Gong Changhong, *et al.* Paleo oil reservoir and Jingbian natural gas field of Ordovician weathering crust in Ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2): 280-286. [马春生, 许化政, 宫长红, 等. 鄂尔多斯盆地中央隆起带奥陶系风化壳古油藏与靖边大气田关系[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2): 280-286.]
- [2] Yu Huili. Singularvalue decomposition(SVD)and its applications in time series analysis; Algorithm sand problems study

- [J]. Information and Control, 1990, (2): 30-31. [余辉里. 奇异值分解(SVD)及其在时间序列分析中的应用——算法与问题研究[J]. 信息与控制, 1990, (2): 30-31.]
- [3] Wang Jiaying. Inverse Theory in Geophysics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. [王家映. 地球物理反演理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.]
- [4] Fan Aiping, Zhao Juan, Yang Renchao, *et al.* Pore structure of reservoir rocks in Shan1 and He 8 Members, the east block of Sulige gas field[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 482-487. [樊爱萍, 赵娟, 杨仁超, 等. 苏里格气田东二区山1段、盒8段储层孔隙结构特征[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 482-487.]
- [5] Chang Yonggang, Gui Zhixian, Zhang Zonghe, *et al.* Application of multi-parameter seismic attribute analysis in reservoir prediction[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(1): 244-246. [畅永刚, 桂志先, 张宗和, 等. 多参数地震属性分析技术在储层预测中的应用——以 NP 地区为例[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(1): 244-246.]
- [6] Chang Yonggang, Zhang Zonghe, Wang Zhimei, *et al.* Application effects of elastic impedance seismic trace inversion in igneous strata[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3): 422-525. [畅永刚, 张宗和, 王志美, 等. 弹性阻抗反演在火山岩发育区应用效果分析——以 NP 构造为例[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 422-525.]
- [7] Tian Xin, Wang Xuben, Zhang Ming, *et al.* Application of seismic attributes identifying thin sand body: A example of M Formation in Gemah oilfield of Sumatrina basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 533-538. [田鑫, 王绪本, 张铭, 等. 地震属性方法在油田开发阶段薄砂体识别中的应用——以印尼苏门答腊盆地 Gemah 油田 M 油层为例[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 533-538.]
- [8] Gu Lijing, Xu Shouyu, Su Jin, *et al.* Muddy hydrocarbon source rock prediction and evaluation with seismic data[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 554-558. [顾礼敬, 徐守余, 苏劲, 等. 利用地震资料预测和评价烃源岩[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 554-558.]
- [9] Wang Xiaoyang, Gui Zhixian, Gao Gang, *et al.* Seismic attribute optimization and its application in reservoir prediction by using K-L transform[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(3): 96-98. [王晓阳, 桂志先, 高刚, 等. K-L 变换地震属性优化及其在储层预测中的应用[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(3): 96-98.]
- [10] Du Lijun, Wu Zhiqiang. Application of neural network technology optimized by multiple seismic attributes to predict high-impedance sandstone reservoirs in Ordos basin[J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(10): 45-49. [杜丽筠, 吴志强, 多地震属性优化的神经网络技术在鄂尔多斯盆地高阻抗砂岩储层预测中的应用[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(10): 45-49.]

Application of Optimization Technology of SVD-based 3D Seismic Attribution in Gas Bearing Prediction of Sulige Gas Field

CHANG Yong-gang, SHI Song-qun, ZHAO Yu-hua, WANG Da-xing

(Research Institute of Exploration and Development of Geophysical Computing Center, Changing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: In seismic reservoir prediction, we firstly deal with the abnormality of seismic attribute due to surface or seismic acquisition, misleading data processing and understand the seismic attribute with a variety of reservoir information; then we illustrate comprehensively the geological data, such as, sedimentary environment, tectonic features, lithology, physical property; finally the performance characteristics of the gas bearing property of reservoirs in the seismic attribute is determined in combination with geologic factors, no gas bearing prediction factors. Here, we must pay special attention to the conditions of the prediction method like as the prediction of gas bearing in one level of geological and reservoir factors. In this paper we use the singular direct decomposition method to reduce dimensionality of seismic attributes and optimize the deployment in the eastern Sulige gas field 3D seismic, since there is the ambiguity of reservoir prediction in the 3D seismic data attribute analysis. To a certain extent, this method reduces the ambiguity of the seismic reservoir and decrease the risk of well deployment in the gas development, getting the good effect on rolling evaluation and overall development.

Key words: Single value decomposition(SVD); Attribute optimization; Compacted sandstone reservoir; Ordos basin; Sulige gas field.