

基于三维构造恢复技术的特殊岩性体裂缝预测方法

——以惠民凹陷商541井区为例

韩波, 贾红义, 李国栋, 孙金磊

(中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257022)

摘要: 裂缝预测方法大多基于现今的构造属性特征, 而通过三维构造恢复预测裂缝的方法则考虑了多期构造运动对裂缝发育的影响, 特别是断层形态对上盘地层变形的影响。应用3DMove的三维面模型构造恢复方法, 对惠民凹陷商541井区沙三段中亚段侵入岩进行了构造恢复, 计算了侵入岩的现今累加应变量, 并进行了裂缝预测; 利用曲率属性提取方法对研究区的裂缝进行了预测, 对2种方法的预测结果进行了对比。构造恢复方法预测结果表明, 研究区商541、商548井区均具有较高的累加应变量, 构造裂缝发育; 曲率属性提取预测方法结果表明, 商548井区曲率值低, 裂缝不发育。参照商541和商548井的孔隙度、渗透率等参数, 将2种裂缝预测方法进行了对比, 基于三维构造恢复技术的裂缝预测方法预测效果较好。

关键词: 裂缝预测 三维构造恢复 侵入岩 曲率属性 商541井区

中图分类号: TE112.222

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)06-0051-03

目前, 裂缝型油气藏预测及评价研究仍处于探索阶段, 针对该类油气藏的储层预测方法很多, 具体可分为基于钻井取心观测、测井识别的地质统计方法, 基于地震、测井数据的属性分析、优化方法, 基于地质成因的曲率、数值模拟方法以及基于数学函数运算的理论分析方法等^[1-4]。这些方法大多依据现今的构造属性特征, 未考虑多期构造运动对裂缝发育的影响, 特别是断层几何形态在构造运动中对上盘地层的影响。随着基于断层褶皱三维描述、恢复理论的不完善^[5-8]及二维空间几何学平衡恢复向基于岩石物理性质的三维构造恢复的转变, 使得三维域内模拟特殊岩性体的构造变形过程、定量计算应力应变及预测裂缝成为可能。

笔者以惠民凹陷商541井区沙三段中亚段侵入岩为例, 研究了在伸展变形环境下断层对上盘地层形态的改造作用。通过三维建模、构造恢复, 计算现今累加应变量, 对侵入岩的构造裂缝进行了预测, 并与常规的曲率预测方法进行了对比分析。

1 三维构造恢复技术原理

随着三维构造恢复理论的完善和计算机性能的提高, 用于三维数值模拟的 Geosec3D 和 3DMove

等商业软件不断涌现, 其预测裂缝的基本思路均是在遵循平衡约束条件和岩石变形机制的原则下计算应力应变, 以应力或应变为主控因素结合地层厚度等影响裂缝发育的因素进行预测。三维构造恢复的依据是二维平衡剖面断层相关褶皱理论^[9], 其可分为面模型恢复和体模型恢复^[10], 面模型恢复是将三维空间坐标系转换到二维空间坐标系, 计算过程遵循最小应变原则, 保证了构造恢复的合理性; 体模型恢复基于地层力学结构, 通过设置密度、拉梅系数和剪切模量等参数使模型更接近真实的目标地质体。

利用面模型对伸展变形环境下地质体的构造恢复过程为: 将地震解释得到的地层和断层数据通过曲面重建算法, 在三维坐标系内建立具有一定拓扑关系的网格曲面模型, 在遵循岩石变形机制的前提下, 应用斜剪切、去褶皱算法, 经过去压实校正及均衡补偿, 将断层上盘地层恢复至未变形前的状态, 同时计算出上盘地层的累加应变量^[11]。由于在构造变形过程中上盘地层经过断层转折后发生褶皱变形, 经过断层转折次数越多, 累加应变越大, 裂缝越发育, 如褶皱的前翼、背斜轴面等部位^[5]。因此, 可依据地质体的累加应变量进行构造裂缝的预测, 其预测流程如图1所示。

收稿日期: 2013-09-17。

作者简介: 韩波, 男, 工程师, 从事石油地质综合研究。联系电话: (0546)8791631, E-mail: hanbo131.slyt@sinopec.com。

基金项目: 中国石化重点科技攻关项目“济阳坳陷第三系储层预测技术优化集成研究”(P07029)。

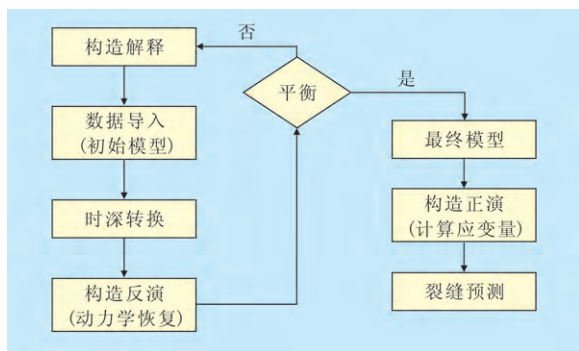


图1 三维构造恢复面模型裂缝预测流程

2 裂缝预测

侵入岩的储集空间主要包括裂缝、溶蚀孔洞和气孔,构造活动所形成的构造裂缝不仅可连通原生孔缝提高储层的孔渗性,其本身也可作为有利的油气储集空间^[12-13],含油性主要取决于构造裂缝的发育程度。笔者以惠民凹陷商541井区沙三段中亚段侵入岩为例,通过建立该区三维地质模型,在明确侵入岩侵入时期的基础上,通过面模型方法对侵入岩侵入之后沉积的地层进行构造恢复,还原侵入岩侵入的初始状态,计算侵入岩累加应变变量,以应变量为主要参数预测构造裂缝发育情况,并将裂缝发育区与侵入岩的含油性进行对比分析,以验证预测结果的合理性。

2.1 构造解释及建模

断点的位置以及断面的产状直接影响构造恢复的过程及裂缝预测的准确性,首先应用Geoframe软件的3D Canvas模块对研究区沙三段中亚段侵入岩顶面及其上覆馆陶组底面(T₁)、沙一段上亚段底面(T₂)、沙二段底面(T₃)、沙三段上亚段底面(T₄)进行了三维追踪解释,厘定了研究区8条主干断层的交切关系;然后将地震解释得到的地层和断层面数据导入3DMove,在三维坐标系下生成三角剖分网格曲面,建立具有空间拓扑关系的时间曲面模型。同时,应用该区时深转换经验公式将其由时间域转换至深度域,构建出侵入岩的三维深度模型(图2)。

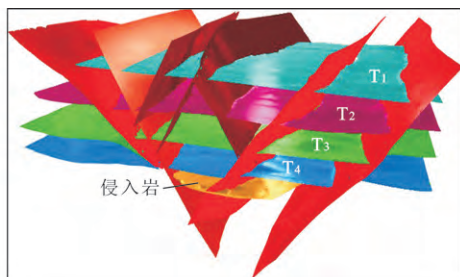


图2 惠民凹陷商541井区三维深度模型

2.2 构造恢复

构造恢复的关键是明确侵入岩侵入的地质时期及其经历的构造运动期次。早期研究表明,在沙三段沉积早期和中期惠民凹陷构造活动强度相对较弱,继承性发育了深湖—半深湖相沉积,形成了一套厚层暗色泥岩,无明显火山活动;沙三段中亚段沉积晚期随着临邑断裂强烈活动,深部岩浆沿着断层上涌,侵入到沙三段沉积中期所形成的暗色油泥岩层段^[14]。由于临邑各分支断层自沙三段沉积时期至馆陶组沉积时期持续性强烈活动,使早期形成的侵入岩受到较强的构造应力作用改造,发育了丰富的构造剪切缝^[15]。应用3DMove软件中的斜剪切、去褶皱算法,将侵入岩上覆的沉积地层逐层恢复至沙三段上亚段沉积前,并进行去压实校正及均衡补偿以还原侵入岩侵入时的初始形态(图3)。

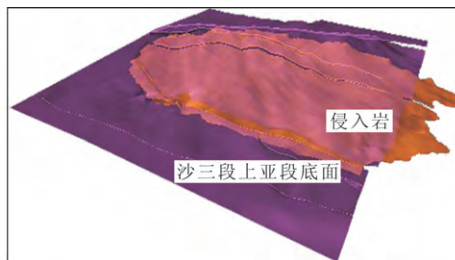


图3 惠民凹陷商541井区沙三段上亚段沉积前三维模型

2.3 应变分析及裂缝预测

将构造恢复得到侵入岩的初始形态再逐次正演到现今形态,可得到侵入岩现今的累加应变变量。由惠民凹陷商541井区裂缝预测结果(图4)可以看出,累加应变变量高值区主要分布在主干断层附近及断层交汇处,而侵入岩内部的次级断层对累加应变变量的影响较小,说明累加应变变量主要受北部临邑分支断层多期活动的影响,远离断层的累加应变变量高值区推测是由于在伸展变形过程中侵入岩受断层面形态影响引起多次转折造成的。因此,累加应变变量高值区是受断层持续活动和断层面形态双重因

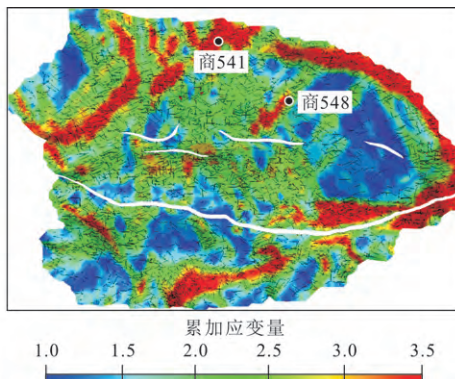


图4 惠民凹陷商541井区裂缝预测结果

素控制的,其中断层的活动性是影响其上盘地层累加应变量的主要因素。以累加应变量为主控因素,利用3DMove的裂缝预测模块进行了裂缝预测,从裂缝分布特征上看,裂缝发育部位与累加应变量大高值区相吻合,表明对于侵入岩这种能干性强的岩体,累加应变量为与构造裂缝发育程度呈正相关关系,累加应变量大部位裂缝较发育。

3 应用效果对比分析

对侵入岩储集性能起关键作用的是构造运动产生的、开启的、未被充填的高角度裂缝^[16-17],在裂缝不发育段孔渗性差,试油结果一般为干层。研究区商541井沙三段中亚段钻遇侵入岩62 m,商548井钻遇侵入岩33 m,对商541井沙三段中亚段3 736~3 749 m井段试油,产水量为6.15 m³/d,表明该井段裂缝较发育,无油气显示的原因可能是临近北部顺向断层断距大、活动性强,导致对油气封堵性差。而商548井沙三段中亚段侵入岩录井有2 m荧光显示,综合解释为油水同层2 m/2层,测井孔隙度为1.676%~10.256%,裂缝较发育。

以往认为岩层曲率值大的部位裂缝发育,故曲率属性常用于断层和构造裂缝的识别^[18],为明确曲率属性是否适用于侵入岩裂缝预测,笔者提取了研究区侵入岩顶面的极大曲率属性(图5)。从图5可看出,商541井处曲率值相对较大,为裂缝发育区,商548井处曲率值低,裂缝不发育,这与实际裂缝发育情况不符,表明曲率属性并不能准确反映侵入岩裂缝发育程度。而三维构造恢复技术预测结果显示,商541、商548井均具有较高的累加应变,受断层活动的影响大,构造裂缝发育,由于次生构造裂缝连通了侵入岩的原生缝洞,使地层孔隙度、渗透率有所提高,这与钻井实测数据相吻合。

对比分析认为,曲率属性不能有效预测侵入岩裂缝发育程度的原因是研究对象超出了该方法的适用范围,即利用曲率预测裂缝的前提是地层必须是因受力而弯曲的^[7],而侵入岩往往沿地层分界面、断层面等“薄弱面”顺层或穿层侵入,顺层侵入的形态受到顶、底围岩控制,而切穿围岩层理和片理的穿层侵入岩一般是沿着斜交层理或片理的裂缝和断裂贯入形成的不整合侵入体。如济阳拗陷在古近系一新近系孔店组、沙河街组和东营组钻遇的侵入岩多以斜穿沉积岩为主,局部为顺层侵入^[19]。因此,这些“薄弱面”的产状势必对侵入岩的形态有所影响,即侵入岩岩层的弯曲并非完全是受力而变形

的,有可能是“先天”而非“后天”形成的,岩层的曲率高值区裂缝可能不发育,而曲率值较低的区域有可能受多期构造运动的影响,而具有较高的累加应变,成为裂缝发育有利区。由于基于三维构造恢复技术的裂缝预测方法不依赖于地质体现今的构造特征,因此,对于岩层曲面形态不完全由构造变形形成的特殊岩性体,如侵入岩,则具有更好的适用性。

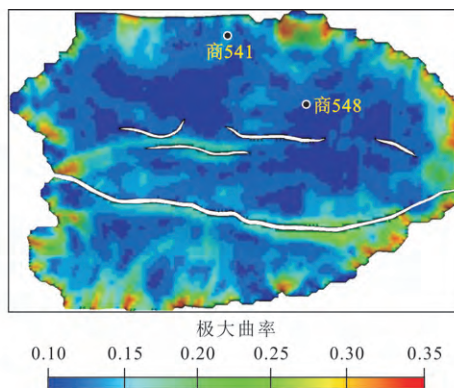


图5 惠民凹陷商541井区侵入岩顶面极大曲率

4 结束语

通过三维构造恢复技术对侵入岩进行构造恢复预测裂缝的结果与实际相吻合,表明在伸展应变环境下对于侵入岩这种能干性强的岩体,累加应变量大部位构造裂缝发育,裂缝发育受断层活动性和断层面形态双重因素控制。曲率属性预测构造裂缝的前提是曲面形态变化受构造引起的,因此,利用现今曲面的曲率属性预测侵入岩等特殊岩性体的构造裂缝可能导致错误的结论,而三维构造恢复方法则具有较好的适用性。

目前限制三维构造恢复广泛应用的因素,一是恢复过程对层位解释及构造建模要求严格、恢复过程操作繁琐;二是构造变形史难确定,即难以明确构造活动的位移方向及特殊岩性体的形成时代。然而,在实际的勘探生产中,应用三维构造恢复研究断层对局部应力场的扰动作用具有重要的意义,应加强三维空间地质体的几何学及运动学研究。

参考文献:

- [1] 王永刚,耿斌,张豆娟.济阳拗陷埕北地区变质岩储层特征与测井解释[J].油气地质与采收率,2013,20(1):48-51.
- [2] 肖阳,江同文,冯积累,等.缝洞型碳酸盐岩油藏开发动态分析方法研究[J].油气地质与采收率,2012,19(5):97-99.

井产能预测方程和油井流入动态方程,经现场数据验证,拟合程度较高。

储层物性对低渗透油藏水平井产能的敏感性分析结果表明:产液量随启动压力梯度的增加而减小,水平井流入动态规律基本不受启动压力梯度的影响;产液量与渗透率变化系数、流体粘度变化系数成反比;渗透率变化系数、流体粘度变化系数对水平井流入动态影响随井底流压的降低逐渐增大,贾敏效应对流入动态影响很大,因此保持地层压力是提高低渗透油藏水平井开发效果的关键。水平井产液量对表皮系数敏感度较高;油井增产作业等使储层压力重新分布,储层及流体物性参数均对压力敏感;以水平井段长度以400 m为界,小于400 m时,极限产液量随水平段长度增加呈线性增加,大于400 m时,极限产液量增幅变缓并最终趋于稳定;水平井极限产液量与井径基本成正比。

利用层次分析法对滨348块平1井的举升方式进行优选分析,得到最优举升方式为螺杆泵举升,其次为电潜泵举升方式,而使用等级加权法优选该井举升方式时排除了螺杆泵举升,因此,滨348块平1井的最优举升方式为电潜泵举升。

参考文献:

[1] 闫存章.低渗透油田开发技术文集[M].北京:石油工业出版社,2008.

- [2] 杜殿发,侯加根,李冬冬,等.低渗透油藏直井水平井联合井网产能公式[J].油气地质与采收率,2012,19(2):64-66,71.
- [3] 安永生,吕亿明,鲁玲,等.特低渗透油藏压裂水平井流入动态研究[J].特种油气藏,2012,19(2):90-92.
- [4] 孙娜.低渗气藏水平井产能影响因素敏感性分析[J].特种油气藏,2011,18(5):96-99.
- [5] 郝明强,胡永乐,李凡华.特低渗透油藏压裂水平井产液量递减规律[J].石油学报,2012,33(2):269-273.
- [6] Borisov.Oil production using horizontal and multiple deviation wells[M].Oklahoma:The R&D Library Translation,1984.
- [7] 何逸凡,廖新维,徐梦雅,等.低渗透气藏压裂水平井产能预测模型及其应用[J].油气地质与采收率,2012,19(4):93-96.
- [8] Joshi.Augmentation of well production using slant and horizontal wells[R].SPE 15375,1986.
- [9] Giger.Horizontal wells production techniques in herogenous reservoir[R].SPE 13710,1985.
- [10] 邴绍献.油田单井可采储量定量预测模型[J].油气地质与采收率,2013,20(1):85-88.
- [11] 王瑞和,张玉哲,步玉环,等.射孔水平井产能分段数值计算[J].石油勘探与开发,2006,33(5):630-633.
- [12] Joshi.A review of horizontal well and drainhole technology [R].SPE 16868,1988.
- [13] 任荣权,于博生,赵众,等.失效严重度模糊综合评判[J].石油学报,1997,18(2):138-142.
- [14] 廉冬.水平井采油工艺及配套技术研究与应[D].东营:中国石油大学(华东),2007.
- [15] 蒋官澄,吴雄军,王晓军,等.确定储层损害预测评价指标权值的层次分析法[J].石油学报,2011,32(6):1 037-1 041.

编辑 常迎梅

(上接第53页)

- [3] 高斌,王伟锋,卫平生,等.三种典型火山岩储层的特征和综合预测研究[J].石油实验地质,2013,35(2):207-212.
- [4] 聂永生,田景春,魏生祥,等.裂缝三维地质建模的难点与对策[J].油气地质与采收率,2013,20(2):39-41.
- [5] 何登发,John Suppe,贾承造.断层相关褶皱理论与应用研究新进展[J].地学前缘,2005,12(4):353-361.
- [6] Delphine Rouby, Xiao Hongbin, John Suppe.3-D restoration of complexly folded and faulted surfaces using multiple unfolding mechanisms[J].AAPG Bulletin,2000,84(6):805-828.
- [7] Isabelle Moretti.Working in complex areas: New restoration workflow based on quality control, 2D and 3D restorations [J].Marine and Petroleum Geology,2008,25(3):205-218.
- [8] Paul Griffiths, Serena Jones, Neil Salter, et al.A new technique for 3-D flexural-slip restoration [J].Journal of Structural Geology,2002,24(1):773-782.
- [9] 贾东,李一泉,王毛毛,等.断层相关褶皱的三维构造几何学分析:以川西三维地震工区为例[J].岩石学报,2011,27(3):732-739.
- [10] 管树巍, Andreas Plesch, 李本亮,等.基于地层力学结构的三维构造恢复及其地质意义[J].地学前缘,2010,17(4):141-142.
- [11] Midland Valley.3DMove V5 tutorial [R].Beijing: Midland Vally Training Center,2008:270-326.
- [12] 刘魁元,康仁华,武恒志,等.罗151井区侵入岩油藏储集层分布及成藏特征[J].石油地球物理勘探,2000,27(6):16-18.
- [13] 刘惠民,肖焕钦,韩荣花.临邑洼陷商741火成岩油藏岩相及储集层研究[J].地质评论,2000,46(4):425-430.
- [14] 岳志鹏.惠民凹陷沙三段侵入岩油气层的识别技术[J].大庆石油地质与开发,2007,26(3):27-31.
- [15] 操应长,姜在兴,邱隆伟,等.渤海湾盆地第三系火成岩油气藏成藏条件探讨[J].石油大学学报:自然科学版,2002,26(2):6-10.
- [16] 王志萍,秦启荣,王保全,等.川西DY构造须家河组致密砂岩储层裂缝分布控制因素[J].断块油气田,2011,18(1):22-25.
- [17] 王永刚,郑淑媛,刘彝,等.南堡油田深层火成岩天然气藏压裂技术[J].石油钻采工艺,2010,32(3):119-121.
- [18] 曾锦光,罗元华,陈太源.应用构造面主曲率研究油气藏裂缝问题[J].力学学报,1982,2(2):202-206.
- [19] 曹忠祥.济阳凹陷第三纪侵入岩成藏研究[J].油气地质与采收率,2004,11(2):15-17.

编辑 武云云

cient material source, ancient valleys and slope breaks in fault sags are influenced mutually and have a significant effect on the formation and distribution of sandbodies jointly.

Key words: stratigraphic–lithologic reservoir; sedimentary sandbody distribution; controlling factors; fault sag; Erlian basin

Wang Quan, Exploration & Development Research Institute, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu City, Hebei Province, 062552, China

Li Ye, Zheng Deshun, Tang Jie. Integrated geophysics research on distribution of turbidite sand body in E_{2s3}, Binnan oilfield. *PGRE*, 2013, 20(6): 46–50

Abstract: The E_{2s3} formation of Binnan oilfield is developed in basin rift epoch. Because of the adequate sediments, many kinds of turbidite sediment reservoirs are developed. However, due to the restriction of seismic data's quality and facies change, great progress has not been made in the exploration of turbidite reservoirs in Binnan oilfield. This paper aims at practical problems of turbidite reservoirs identification and introduces a workflow: establishing sequence framework–analyzing seismic response characteristics (amplitude, continuity etc.)–attribute analysis with strata slice–spectral decomposition–log–constrained seismic inversion, and the issues above are perfectly solved. According to the seismic response, log and drilling characteristics, this paper divides the E_{2s3} formation into three sequences, and the turbite reservoirs is mainly developed in mid E_{2s3} & lower E_{2s3}; the favorable turbidite reservoirs development sites are anticipated by using 90° phase rotation, strata slice and instantaneous amplitude technology, the result shows that the turbidite reservoirs is mainly developed in southeast and the neighboring areas of Binxian prominence; by application of S–Transformation, the initial seismic data is decomposed into 25, 30, 35, 40 and 45 Hz single–frequency data–bodies, among which, the 40 Hz single–frequency data–body shows a better resolving ability of turbidite reservoirs; and then, in combination with the log–constrained seismic inversion and 40 Hz single–frequency data–body, the vertical overlap features of turbidite sandbodies are clear, and favorable development sites of turbidite reservoirs are proposed.

Key words: turbidites; reservoir prediction; phase transformation; strata slice; optimal attribute analysis; spectral decomposition; logging constrained inversion

Li Ye, Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo City, Henan Province, 454000, China

Han Bo, Jia Hongyi, Li Guodong et al. Application of 3D restoration to predicting fractures in special lithologic body–case study of Shang541 region, Huimin sag. *PGRE*, 2013, 20(6): 51–53

Abstract: Most of the fracture prediction methods are based on the present geological structure characteristics, without considering the effect of multi–stage tectonic movements, especially the effects of the fault shape on strata in hanging wall. Using the Plane Model in 3D Move software, the method based on 3D restoration is applied to calculate the present accumulative strain and predict fractures, in the middle E_{2s3} intrusive rocks of Shang541 region, Huimin sag. The principal curvature of the top of intrusive rocks is also calculated. With reference to the porosity and permeability data of two wells, the fracture prediction result by 3D restoration is contrasted with that by curvature method. It shows that the 3D restoration method is highly applicable to the fracture prediction in special lithologic body, such as intrusive rocks, of which the curved surface is not formed totally by tectonic deformation.

Key words: fracture prediction; 3D structural restoration; intrusive rocks; curvature attribute; Shang541 region

Han Bo, Geophysical Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257022, China

Qu Zhanqing, He Limin, Dou Xiaokang et al. Inflow performance analysis and optimization of artificial lifting for horizontal wells in low permeability reservoir. *PGRE*, 2013, 20(6): 54–60

Abstracts: Inflow performance and optimization of artificial lifting way for horizontal wells in low permeability reservoir is the key to develop the horizontal wells for low permeability reservoir. Based on the classic Giger capacity formula, and adopting the hydropower similar principle and conformal mapping method to derive the productivity model and inflow performance equation of the hypotonic non–Darcy horizontal wells, the model has a higher accuracy after the field application verification, and the capacity influencing factors sensitivity of horizontal wells in low permeability reservoir is then analyzed. The analysis indicates that the horizontal well inflow performance variation is basically not affected by starting pressure gradient; and keeping pressure is the key to improve the efficiency of low permeability horizontal wells, the starting pressure gradient, permeability and coefficient of variation of the viscosity of the fluid are inversely proportional to liquid production, and the lower the pressure, the more obvious the effect; for the horizontal section length within 400 m, the ultimate production increases linearly with the horizontal length, the production drops and finally stabilized beyond 400 m; we use the equivalent weighting method and analytic hierarchy process to establish the lifting way preferred model, and the best lifting way of field wells is the electric submersible pump lifting.

Key words: low permeability reservoir; horizontal wells; inflow status; lifting way; analytic hierarchy

Qu Zhanqing, School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China