

Facies-Controlled Reservoirs Classification and Comprehensive Evaluation in Sparse Well Areas Combined with Well-Seismic

—Taking the Pearl River Formation of the WC-A Oilfield in the Pearl River Mouth Basin as an Example

Feng Wei¹, Guoqing Xue¹, Cong Xiong², Chengsheng Zhao²

¹Zhanjiang Branch of CNOOC (China) Co. Ltd., Zhanjiang Guangdong

²Wuhan Times GeoSmart Science and Technology Co. Ltd., Wuhan Hubei

Email: weifeng@cnooc.com.cn

Received: Mar. 4th, 2020; accepted: Apr. 7th, 2020; published: Jun. 15th, 2020

Abstract

Reservoir classification and comprehensive evaluation is an important research content in the middle and late stage of oil and gas field development, especially for offshore oil and gas fields, the well pattern is sparse and the risk of well location deployment is high. Through reservoir classification and comprehensive evaluation, the development risk can be effectively reduced, which has an important guiding significance for the realization of fine adjustment and potential tapping of oil and gas fields. This paper takes the ZJ1-4 oilgroup of the Neogene in the WC-A oilfield in the Pearl River Mouth Basin as an example, and establishes three major categories and five subcategories through the optimization of sensitive geological parameters and the classification of facies-controlled logging reservoirs. In addition, the reservoir prediction thinking using analytic hierarchy has carved out the lithological and physical properties of the reservoir, and comprehensively evaluated the plane distribution of different types of reservoirs. Using this research result, multiple adjustment wells were subsequently implemented, and the initial average production capacity reached 20 m³/d, which has achieved good development results, and provides a new research idea for the classification and development of sparse well pattern oil and gas field reservoirs.

Keywords

Grey System Theory, Reservoir Classification Controlled with Facies Controlled, Reservoir Prediction, Reservoir Comprehensive Evaluation

井震结合的稀疏井区相控储层分类与综合评价

——以珠江口盆地 WC-A 油田珠江组为例

魏峰¹, 薛国庆¹, 熊聪², 赵澄圣²

¹中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江

²武汉时代地智科技股份有限公司, 湖北 武汉

Email: weifeng@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020年3月4日; 录用日期: 2020年4月7日; 发布日期: 2020年6月15日

摘要

储层分类与综合评价是油气田开发中后期的重要研究内容, 尤其是对于海上油气田, 井网稀疏、井位部署风险较高, 通过储层分类与综合评价, 可以有效降低开发风险, 对于实现油气田的精细调整挖潜有着重要的指导意义。本文以珠江口盆地 WC-A 油田新近系 ZJ1-4 油组为例, 通过敏感地质参数优选、相控测井储层分类建立了三大类五小类的储层分类标准, 并采用层次分析的储层预测思路雕刻了储层的岩性和物性空间分布, 综合评价了不同类型储层的平面展布。运用该研究成果后续实施了多口调整井, 初期平均产能达到了 20 m³/d, 取得了良好的开发效果, 为稀疏井网油气田储层的分级分类开发提供了一条新的研究思路。

关键词

灰色系统理论, 相控储层分类, 储层预测, 储层综合评价

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

储层分类与综合评价是油气田开发中后期的重要研究内容, 是油田综合调整挖潜和井位部署的重要地质依据。国内外储层综合评价方法较多, 主要包括定性和定量评价两大类[1]。定性评价方法一般根据测井和岩心等资料, 从储层的孔隙度、渗透率相对高低出发, 将储层分为好、中、差等几个级别, 同时结合岩石的结构成熟度、成岩作用、微观孔喉等参数来评价储层的储集性能。这种定性评价受人为因素影响较大, 具有不同工作经验的研究人员对同一个目标进行评价时, 结果可能会存在较大的差异[2]。

储层定量评价方法则主要是通过各种相对复杂的数学算法来进行定量综合评价, 应用较为广泛且适用性较好的主要有灰色系统理论法、主成分分析法、聚类分析法、层次分析法、神经网络法、分形理论法等方法[3]。这些定量评价方法以较复杂的数学理论为基础, 通过多参数降维运算, 有效建立了测井的储层分类标准。但在实际生产中, 难以与地震预测、地质建模和油藏工程等三维储层模型有效衔接起来, 储层分类的标准及计算过程也没有比较明确的地质含义, 且对于海上油气田, 井网稀疏统计样本空间较

小, 根据井点建立的评价标准对于全研究区可能存在偏态的风险。

针对海上稀疏井网油气田储层分类评价遇到的主要问题, 本文以为珠江口盆地 WC-A 油田新近系珠江组 ZJ1-4 油组为例, 以灰色系统理论为基础, 通过多轮迭代优化, 总结了一套适用于稀疏井网油气田的相控储层分类与综合评价方法, 该方法通过敏感地质参数的优选、相控测井储层分类、层次分析的高分辨率储层预测建立了储层的分类标准并综合评价了其空间展布特征, 运用该研究成果对于部分低渗储层成功实施的多口调整井, 产能超出了设计预期, 取得了良好的开发效果。

2. 研究区概况

WC-A 油田位于南海西部海域, 构造上位于珠江口盆地珠三坳陷琼海地凸起中部, 是在基底隆起上发育的低幅波覆背斜构造。WC-A 油田新近系珠江组为一个持续海进的沉积层序, 以潮坪相、滨浅海相沉积为主, 其中珠江组一段四油组(ZJ1-4 油组)为滨浅海相沉积, 为本区最重要的含油层系之一。ZJ1-4 油组纵向上分为 4U、4M 和 4L 三个(亚)油组, 其中 ZJ1-4L 油组基本为水层, ZJ1-4U (共两个小层)、ZJ1-4M (共三个小层)油组主要发育临滨砂坝和临滨沙滩砂体, 但受到海平面频繁升降的影响, 层内泥质和物性隔夹层较为发育, 储层非均质性较强。

经过多年的水驱开发, 目前油田已进入开发中后期, 受到储层非均质性较强等因素的影响, 主力 ZJ1-4U/4M 油组表现出高含水、层间干扰严重, 潜力不明确, 剩余油挖潜难度大等特点(见图 1)。如 A4H2 水平井(开发层系 ZJ1-4M-1 小层), 水平段测井解释渗透率约为 $16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属低阻低渗油藏, 投产初期不含水, 产能较低, 开发效果较差, 采出程度低, 严重制约了本油田的调整挖潜。因此, 如何合理的开展储层分类和综合评价工作, 以及进一步明确低渗小层的潜力, 成为了 WC-A 油田 ZJ1-4 油组后续调整挖潜的关键所在。

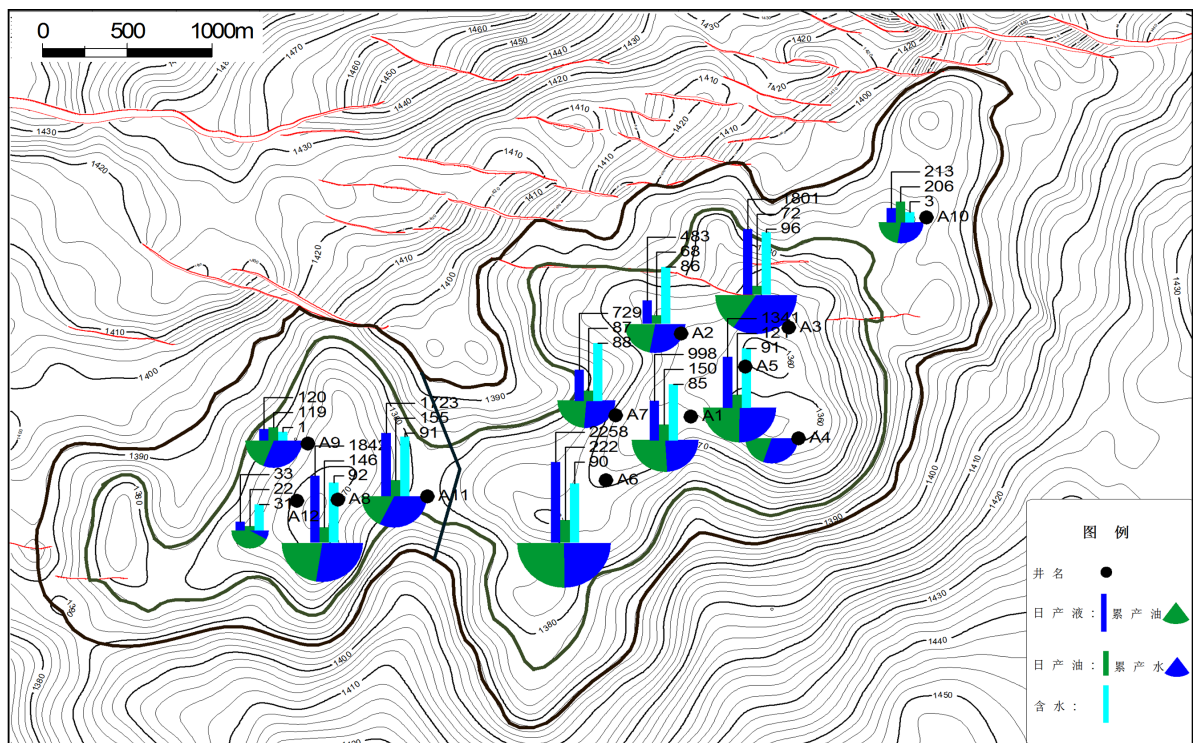


Figure 1. Production status diagram of ZJ1-4 oil group in WC-A oilfield

图 1. WC-A 油田 ZJ1-4 油组开采现状图

3. 相控测井储层分类与综合评价思路

相控测井储层分类与综合评价方法(见图 2)的提出,主要是针对传统定量评价方法地质参数选取过程指向性不强、计算过程地质含义不明确,难以与地震预测、地质建模、油藏数值模拟成果相耦合、以及计算方法较复杂,地质人员难以熟悉掌握的研究现状。

该方法主要是在测井相分析的基础上(见图 2(a)),通过初期产能等生产数据优选了区域的敏感地质参数(见图 2(b)),根据灰色系统理论求取了各敏感地质参数的权重(见图 2(c)),从而多参数构建了具有明确地质含义的综合评价指数及分类标准(见图 2(d)),并结合层次分析的高分辨率叠前地质统计学反演雕刻了储层的岩性和物性空间展布,计算得到了表征储层品质的储层品质因子三维数据体,最后再根据井点储层分类标准,对不同类型储层的平面展布进行综合分析(见图 2(e))。其关键技术点如下:

1) 敏感地质参数选取(见图 2(b))。敏感地质参数的选取主要是从储层储集性能和储层渗流性能两方面出发,根据初期产能来进行相关分析,优选敏感的地质参数;

2) 相控测井储层分类(见图 2(d))。相控测井储层分类主要是在测井相解释的基础上,统计不同微相单元的特征地质参数值,分析单参数在不同微相单位变化速度(求取变异系数,判断该参数的敏感性),基于灰色理论降维运算构建多参数的储层综合指数(储层品质因子)计算方法,同时结合油田开发规划和经济评价指标,建立多参数的相控测井储层分类标准;

3) 层次分析高分辨率地震岩性物性预测(见图 2(e))。针对传统的地质统计学反演方法不确定性较大的现状,采用层次分析的研究思路,先定相再定砂,先半定量分析再定量预测,指导叠前地质统计学反演的预测过程,精细雕刻储层的岩性和物性空间展布;

4) 储层空间综合评价(见图 2(e))。根据测井储层综合评价的计算公式,对地球物理预测的物性和物性成果进行综合运算,得到反映储层品质的储层品质因子三维数据体,用于平面和空间的储层综合评价与评价。

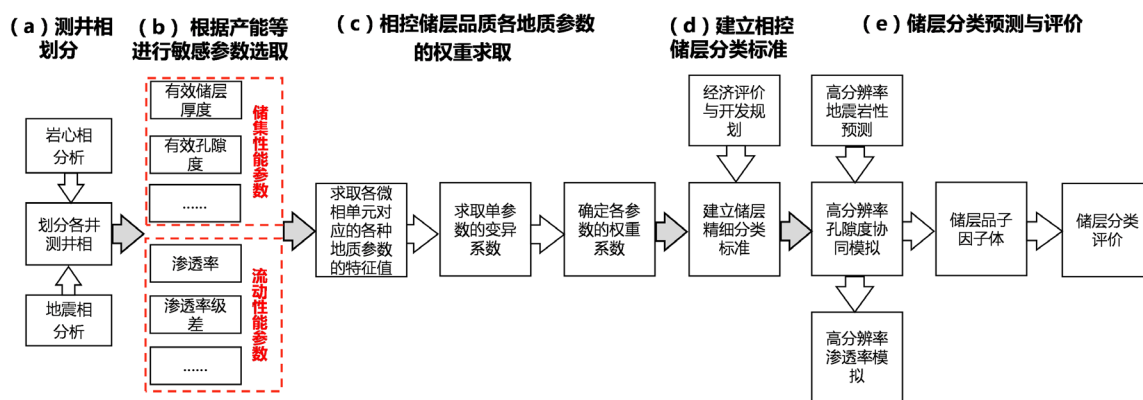


Figure 2. Flowchart of reservoir classification and spatial evaluation of ZJ1-4 oil group phased logging in WC-A oilfield
图 2. WC-A 油田 ZJ1-4 油组相控测井储层分类与空间评价流程图

4. 关键技术环节

4.1. 敏感地质参数选取

敏感地质参数的选取是测井储层分类与综合评价的基础和关键,在测井储层分类方法中,一般都是在油田前提研究成果的基础上,选取渗透率和有效储层厚度等指标来构建综合评价指数[4],选取地质参数的过程并没有非常明确的指向和地质油藏含义。

结合 WC-A 油田的地质油藏特点以及生产开发现状, 相控测井储层分类与综合评价方法主要从储层储集性能和储层渗流性能两个方面出发, 参考已开发井的初期产能数据, 同时考虑到参数的可定量描述性、参数之间的相对独立性和参数的易获取性等方面因素, 通过多种地质参数与直井米采油指数进行相关性分析。

通过反复对比和相关性分析, 结合宏观生产、微观分析化验结果分析表明, 有效储层厚度、有效孔隙度、渗透率和渗透率级差四项关键地质参数对储层品质有较明显的控制作用。其中, 影响储集性能的地质参数主要是有效储层厚度和有效孔隙度的大小, 二者共同决定了有效孔隙砂岩的体积; 而影响储层渗流性能的地质参数主要是渗透率和渗透率级差, 前者反应了平均渗流速度, 后者影响了渗流的变化和表征了储层的非均质性。

4.2. 相控测井储层分类

相控储层分类和综合评价方法是在灰色系统理论的基础上, 针对珠江口盆地 WC-A 油田低渗储层调整挖潜而进行的一次综合尝试, 其关键在于通过沉积相分析来明确影响储层品质的主控因素, 并运用灰色理论来求取各敏感地质参数的权重, 其中相控测井储层分类的主要实现步骤如下:

1) 分析不同微相单元的参数变化规律。不同的微相单位储层品质往往存在较大的差异, 其主控地质参数也不尽相同。以 ZJ1-4M-3 小层为例, 受到海平面变化和沉积物补给通量的影响, 在该沉积时期, 主要发育箱状临滨砂坝主体, 有效储层厚度和有效孔隙度较高, 有足够的储集空间, 影响该小层储层品质的因素主要为渗透率级差; 而在 ZJ1-4U-1 小层沉积时期, 海平面相对较高, 主要发育临滨沙滩等砂体, 砂体分选较好, 但储集空间相对不足, 使得储层有效厚度成为了影响该小层储层品质的主控因素;

2) 计算各种地质参数的权重。运用灰色系统理论, 根据不同微相单位地质参数的典型特征值并对其归一化, 采用变异系数法分别求取每种地质参数的变异系数, 确定不同地质参数的权重系数, 权重系数值等于该地质参数的变异系数除以所有地质参数的变异系数之和(见表 1);

Table 1. Weight table of sensitive geological parameters for reservoir classification and evaluation of ZJ1-4 oil group in WC-A oilfield

表 1. WC-A 油田 ZJ1-4 油组储层分类评价敏感地质参数权重表

沉积微相	评价参数		储集性能评价参数		渗流性能评价参数	
	有效厚度	有效孔隙度	渗透率	渗透率级差		
凹槽沟槽	1.62	16.90	3.21	85.88		
临滨浅滩	3.72	19.25	11.80	76.96		
临滨砂坝侧缘	4.01	21.67	101.26	29.88		
临滨砂坝主体	7.48	24.75	818.59	142.68		
变异系数	0.58	0.16	1.67	0.86		
权重系数	0.19	0.06	0.57	0.18		

3) 建立储层综合评价指数(储层品质因子)计算公式。根据各参数求取的变异系数, 得到了综合评价指数的计算公式:

计算公式为 $\delta = \sum_{k=1}^n G^k Q^k$, 其中: δ 为地质参数的综合评价指数, G^k 为地质参数典型特征值的归一化值, Q^k 为地质参数的权重系数。

根据测井储层综合指数构建成果, 同时结合研究区的开发现状, 以及珠江口盆地 WC 油田群的经济

开发标准和邻区的储层分类标准,将 ZJ1-4 油组储层分为了由好到差分为了三大类储层,分别为 I 类、II 类和 III 类。为进一步寻找在低渗储层中的优势储层,将 III 类储层进一步细分为 III-1、III-2 和 III-3 类三小类(见表 2)。

Table 2. Reservoir quality factor parameters of ZJ1-4 oil group in WC-A oilfield

表 2. WC-A 油田 ZJ1-4 油组储层分类评价储层品质因子参数表

沉积微相	储层类型	I 类储层	II 类储层	III 类储层			非储层
				III-1 类储层	III-2 类储层	III-3 类储层	
储层品质因子		>0.55	0.55~0.35	0.35~0.25	0.25~0.15	0.05~0.15	<0.05
优势相带		临滨砂坝主体	临滨砂坝侧缘	临滨浅滩		凹槽	裂流沟槽 滨浅湖泥

4.3. 基于层次分析的叠前地质统计学反演

WC-A 油田 ZJ1-4 油组为基底隆起上发育的低幅披覆背斜构造,断层较为发育,地震品质较差,主要表现为目的层主频较低(30 HZ)、局部有采集脚印、受断层破碎带影响局部地震成像较差,加之海上油气田井网较为稀疏,传统地震方法难以完全满足精细薄储层预测(单砂体厚度 < 5 m)的需求。针对研究区储层预测的主要难点以及传统地质统计学反演方法不确定性较高的特点,在前期研究成果的基础上,结合岩石物理分析成果,采用层次分析的思路,先定相到再定砂,先半定量属性分析再地质模式指导叠前统计学定量预测的思路,从而充分利用了地震的高横向分辨率和测井的高纵向分辨率,分层次逐级解剖,有效提高了高分辨率预测成果的相对可靠性,得到了统计意义上储层空间展布的全局最优解(见图 3)。相对于传统的地质统计学反演方法[5] [6],其优点主要体现在以下几个方面:

1) 基于高频层序的初始模型。统计学预测的关键之一为初始模型,受到构造格架约束的影响,初始模型很大程度上决定了预测成果砂体空间展布和横向分布趋势。海上油气田往往采用砂体对比模式进行开发,然而等时沉积界面、砂体界面和地震反射界面往往并不是完全吻合,在斜坡带和陡坡带沉积体系中,三者甚至存在一定的夹角[7],为了准确表征砂体和砂体的接触关系,在本研究区初始模型建立过程中,主要采用与层序格架控制下的高频层序来指导初始模型的建立;

2) 敏感地震属性与地质知识库指导变差函数的选取。传统的变差函数选取主要根据井点数据来进行统计分析,对于海上稀疏井网油气田,受到井网密度和统计样本空间的影响,选取的成果就存在极大的不确定性,针对以上难点,本研究区根据优势地震属性分析成果[8]结合辫状河三角洲的地质知识库[9],更为准确的拾取了目标砂体的变差函数等信息;

3) 相控思路下的砂泥比选取。砂泥比表征了该套地层的含砂量,但受到主观开发的影响,井位总是部署在研究人员认为的相对优势相带,使得井点统计的砂泥比信息往往实际地层存在较大的差异,进而会引起统计学预测成果出现较为明显的井点打圈现象。通过多轮流程优化试验表明,在测井统计的基础上,综合沉积亚相和微相组合关系,并结合地震属性来综合分析砂泥比,可以有效降低井网稀疏带入的测井统计偏差。

4) 多实现压制随机性。每一个统计学反演实现(成果)都是基于 MCMC 循环算法从满足井震后验概率分布中采样得到的一个可能的解,这使得每个预测成果存在一定的随机性,通过单实现误差分析与筛选,将满足地质油藏综合认识的多个解进行算数平均,不仅可以有效降低预测成果的随机性,还可以得到相对稳健的接近实际地下情况的概率分布(见图 3),以及用于风险评估的 P10、P50 和 P90 的预测成果。

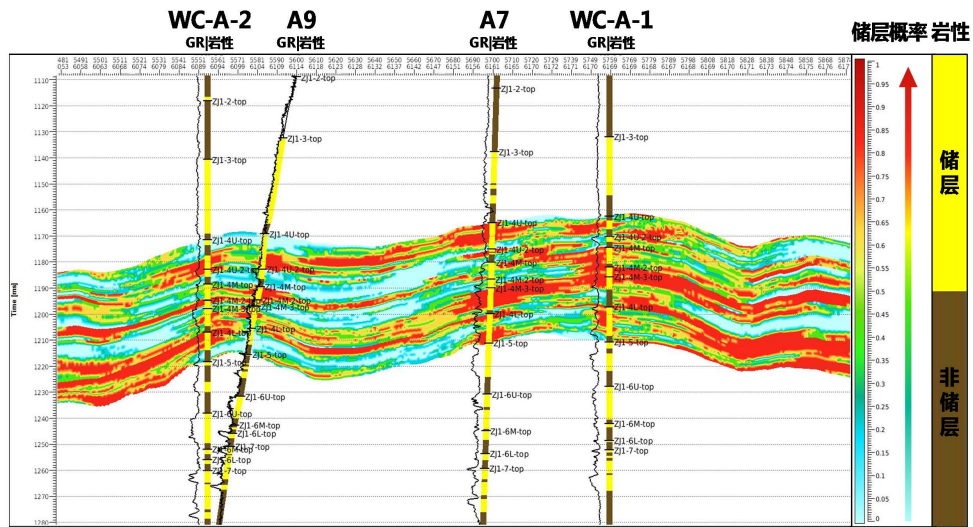


Figure 3. Pre-stack geostatistical inversion of probability profile of ZJ1-4 oil formation in WC-A oilfield
图 3. WC-A 油田 ZJ1-4 油组叠前地质统计学反演储层概率剖面图

根据沉积相和地震属性指导的叠前统计学反演成果分析来看，在垂物源方向，受到波浪作用影响，主力 ZJ-4M 油组砂体横向连续性较好，呈较明显沿岸线分布，其优势相带主要为临滨砂坝和临滨沙滩，局部受到回流的切割作用，形成裂流沟槽。在顺物源物源方向，砂体砂坝与砂坝之间局部发育凹槽，砂体连续性稍差。

同时根据测井物性解释成果，建立分岩性的弹性属性(纵波速度、横波速度、密度等)与有效孔隙度的概率变换关系，利用弹性属性体(纵波速度体、横波速度体、密度体等)协同模拟得到了有效孔隙度的空间分布，进而通过测井分流动单位的孔渗关系，计算得到了渗透率(见图 4)和渗透率级差的空间分布。

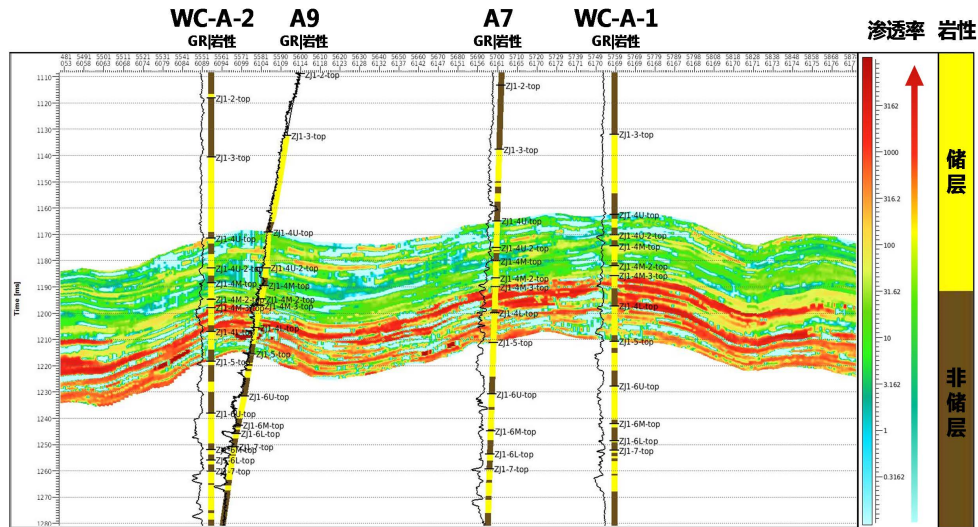


Figure 4. Pre-stack geostatistical inversion of permeability profile of ZJ1-4 oil formation in WC-A oilfield
图 4. WC-A 油田 ZJ1-4 油组叠前统计学反演模拟渗透率剖面图

4.4. 储层分类评价

根据上述测井储层综合指数的计算公式，以及高分辨率地震预测的有效储层、孔隙度、渗透率和渗

透率级差预测成果, 计算得到了储层品质因子体(储层综合指数体)(见图 5), 并前期划定的储层分类标准提取得了各小层的储层品质平面图(见图 6、图 7)。

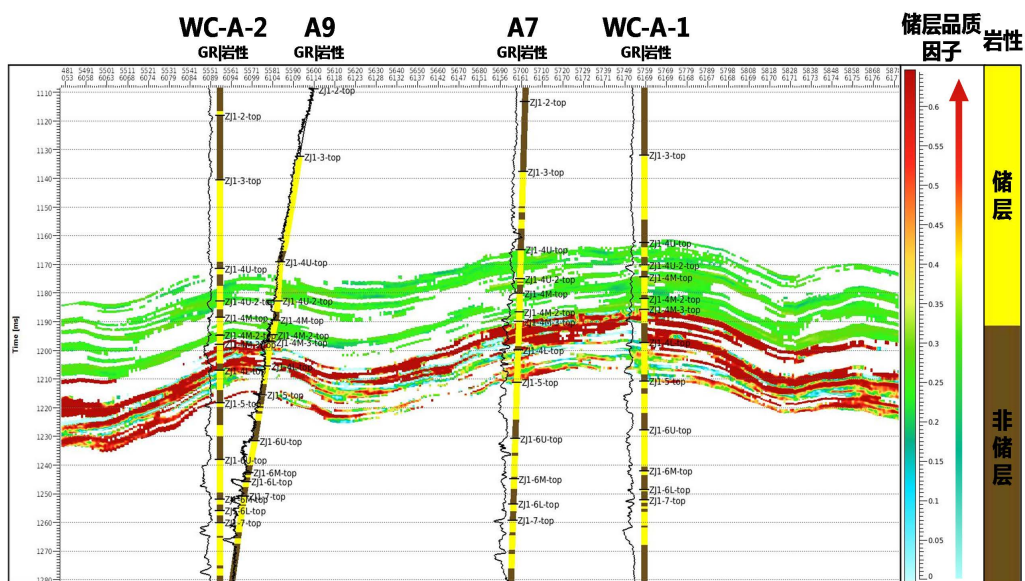


Figure 5. Reservoir quality factor profile of ZJ1-4 oil formation in WC-A oilfield
图 5. WC-A 油田 ZJ1-4 油组储层品质因子剖面图

总体来看, 本研究区 ZJ1-4 油组滨浅海沉积的砂体主要受控于物源和海平面的相对变化, 在 ZJ1-4M-3、ZJ1-4M-2 和 ZJ1-4U-2 小层相对低水位沉积期, 主要发育临滨砂坝主体和临滨砂坝侧缘, 砂体厚度较厚、储层物性好、储层品质因子主要在 0.4 至 0.6 之间变化; 而随着海平面逐级上升, ZJ1-4M-1 和 ZJ1-4U-1 小层整体含砂量明显降低, 主要发育滨砂坝侧缘和临滨浅滩沉积, 储层品质因子较低, 主要在 0.2 至 0.4 之间变化。根据储层品质因子体, 提取得了各小层的品质系数平面图, 其主要特征如下:

1) ZJ1-4U 油组。ZJ1-4U-1 小层(见图 6(a))主要为滨砂坝侧缘和临滨浅滩沉积, 发育 III-1 和 III-2 类储层, 平面上分为三块; 而 ZJ1-4U-2 小层(见图 6(b))储层品质稍好, 主要为 II 类和 III-1 类储层, 储层为典型的北西 - 南东的沿岸砂坝分布特征, 受到河流、波浪和潮汐等多种水动力环境的综合影响, 砂体较为破碎, 非均质性较强。

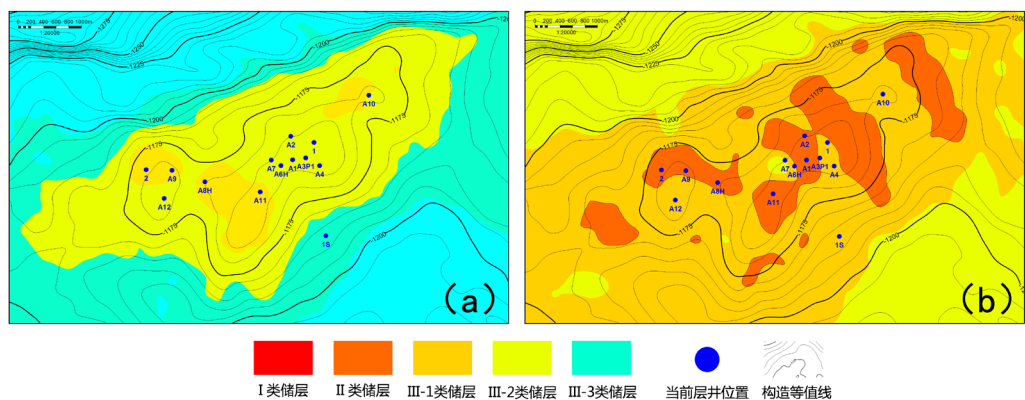


Figure 6. Classification plans of ZJ1-4U-1 small layer (a) and ZJ1-4U-2 small layer (b) in WC-A oilfield
图 6. WC-A 油田 ZJ1-4U-1 小层(a)、ZJ1-4U-2 小层(b)储层分类平面图

2) ZJ1-4M 油组。ZJ1-4M-1 小层(见图 7(a))主要发育 III-1、III-2、III-3 类储层; ZJ1-4M-2 小层(见图 7(b))整体表现为 II 类和 III-1 类储层, 平面分为三块, 在构造鞍部有两条典型的凹槽低渗储层条带, 局部高渗条带为后续调整挖潜的主要方向; 而在 ZJ1-4M-3 小层(见图 7(c)), 整体为高孔高渗储层, 储层品质主要为 I 类和 II 类储层, 在沉积相上对应为临滨砂坝主体和临滨砂坝侧缘相, 平面趋势上表现为近北西-南东向的连片临滨砂坝。

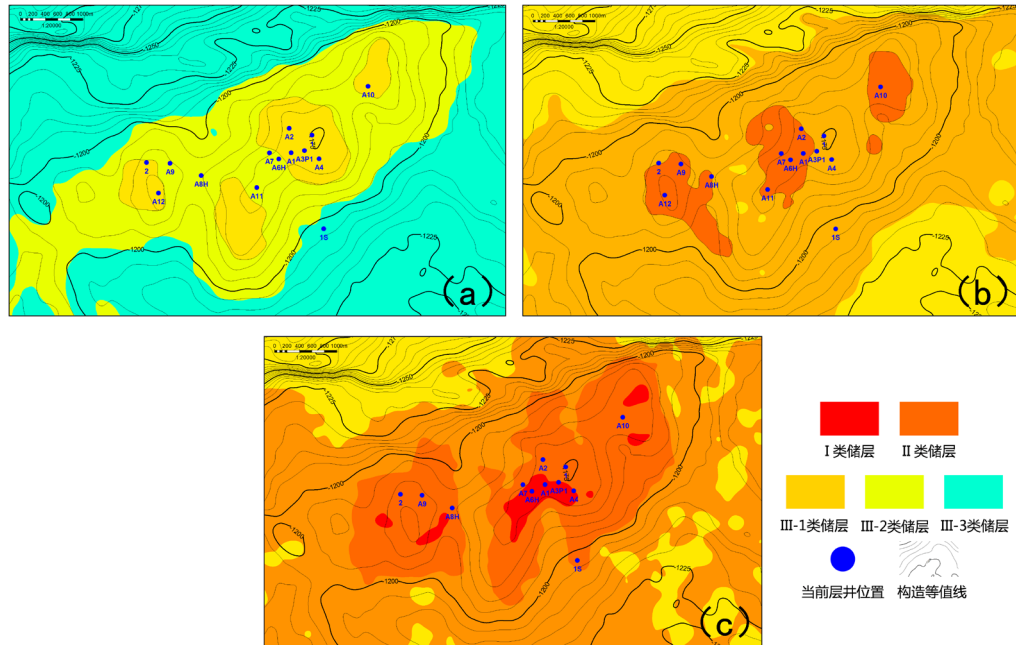


Figure 7. Classification plans of ZJ1-4M-1 (a), ZJ1-4M-2 (b) and ZJ1-4M-3 (c) reservoirs in WC-A oilfield
图 7. WC-A 油田 ZJ1-4M-1 小层 (a)、ZJ1-4M-2 小层 (b)、ZJ1-4M-3 小层 (c) 储层分类平面图

5. 结论

储层分类与综合评价是油气田开发后期的重要研究内容, 针对传统测井储层分类方法的主要问题, 本文以珠江口盆地 WC-A 油田新近系珠江组 ZJ1-4 油组为例, 通过与初期产能等相关性分析优选了敏感地质参数、相控多参数建立了测井分类评价、并基于层次分析的高分辨率地震预测岩性物性空间分布等关键技术手段, 从测井到地震, 到半定量分析到定量空间预测综合划定了研究区不同类型储层的识别标准并预测了其空间展布。

通过该方法有效实现了测井分类标准在地震三维预测端的应用, 敏感地质参数的选取和测井分类的标准具备更为明确的指向性和地质含义, 基于层次分析和多学科信息指导的地叠前地质统计学反演, 其预测成果相比于传统地质统计学反演方法不确定性更小, 成果适用性更佳。根据 ZJ1-4U-1、ZJ1-4U-2 和 ZJ1-4M-1 低渗小层的储层分类评价成果, 采用储层分级分类开发的思路, 在构造南部和构造东部井控区之外针对 II 类和 III-1 类储层, 实施了 A、B 两口调整井(水平井), 初期平均产能达到了 $20 \text{ m}^3/\text{d}$, 远超前期 $8 \text{ m}^3/\text{d}$ 的平均产能指标, 取得了良好的经济效益和调整挖潜效果, 为高含水开发期油气田, 尤其是海上稀疏井网油气田低渗储层的精细评价和开发, 提供了一条新的技术解决思路。

参考文献

- [1] 杨宇. 开发早期岩性气藏动态描述[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2004.

- [2] 赵新智. 鄂尔多斯盆地陇东地区低渗透储层特征及分级评价[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [3] 涂乙, 邹海燕, 孟海平, 夏志远, 李楠. 页岩气评价标准与储层分类[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 153-158.
- [4] 孙玉平. 低渗透储层综合评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院, 2008.
- [5] 孙月成, 周家雄, 马光克, 等. 叠前随机反演方法及其在薄层预测中的应用[J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 29-32.
- [6] 王香文, 刘红, 滕彬彬, 等. 地质统计学反演技术在薄储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 10(5): 730-735.
- [7] 杨培杰, 刘书会, 隋凤贵. 地震反射同相轴等时与穿时问题探讨[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 2969-2976.
- [8] 陈刚, 全海燕, 马敬滨, 等. 利用地震多属性分析和波阻抗技术提高叠后反演分辨率[J]. 中国矿业, 2012, 21(8): 611-612.
- [9] 王海峰, 范廷恩, 胡光义, 何明薇, 张显文, 高玉飞. 海上油田开发中后期砂岩储层构型剖析与表征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 12(2): 1-12.